招标编号：ZB20250134

正本

湿地生态调查与湿地资源趋势模拟项目

（预算编号：0025-00009786）

投标文件

投标人：河南思泰电子科技有限公司

法定代表人或授权代理人（签字或盖章）：

日　期：2025 年 05 月 13 日

目 录

商 务 部 分

一、投标函

致：上海市野生动植物和自然保护地研究中心（采购人名称）

根据贵方 湿地生态调查与湿地资源趋势模拟、ZB20250134（项目名称、招标编号）采购的招标公告，史本超、部门经理（姓名和职务）被正式授权代表投标人 河南思泰电子科技有限公司、河南自贸试验区郑州片区（郑东）普惠路68号1单元7层702号（投标人名称、地址），向贵方在网上投标系统中提交投标文件1份 。

据此函，投标人兹宣布同意如下：

1.按采购文件规定，我方的投标总价为 壹佰贰拾叁万陆仟叁佰元整（大写）人民币。

2.我方已详细研究了全部采购文件，包括采购文件的澄清和修改文件（如果有的话）、参考资料及有关附件，我们已完全理解并接受采购文件的各项规定和要求，对采购文件的合理性、合法性不再有异议。

3.投标有效期为自开标之日起 90 日。

4.如我方中标，投标文件将作为本项目合同的组成部分，直至合同履行完毕止均保持有效，我方将按采购文件及政府采购法律、法规的规定，承担完成合同的全部责任和义务。

5.如果我方有采购文件规定的不予退还投标保证金的任何行为，我方的投标保证金可被贵方没收。

6.我方同意向贵方提供贵方可能进一步要求的与本投标有关的一切证据或资料。

7.我方完全理解贵方不一定要接受最低报价的投标或其他任何投标。

8.我方已充分考虑到投标期间网上投标会发生的故障和风险，并对可能发生任何故障和风险造成的投标内容不一致、利益受损或投标失败，承担全部责任。

9.我方同意网上投标内容均以网上投标系统开标时的开标记录表内容为准。我方授权代表将对开标记录进行校核及勘误，授权代表不进行校核及勘误的，由我方承担全部责任。

10.为便于贵方公正、择优地确定中标人，我方就本次投标有关事项郑重声明如下：

（1）我方向贵方提交的所有投标文件、资料都是准确的和真实的。

（2）我方不是采购人的附属机构。

（3）我方最近三年内因违法行为被通报或者被处罚的情况：

无

（4）以上事项如有虚假或隐瞒，我方愿意承担一切后果，并不再寻求任何旨在减轻或免除法律责任的辩解。

地址： 河南自贸试验区郑州片区(郑东)普惠路68号1单元7层702号

电话、传真： 13903712374

邮政编码： 450000

开户银行： 中原银行郑州分行营业部

银行账号： 4101 0101 0180 0612 03

投标人授权代表签名：

投标人名称（公章）：河南思泰电子科技有限公司

日期： 2025 年 05 月 13 日

二、开标一览表

项目名称：湿地生态调查与湿地资源趋势模拟

招标编号：ZB20250134

项目负责人	项目负责人职称/职业资格证书	最终报价（元）
宋亚伟	项目负责人	1236300.00

说明：

（1）“金额（元）”指每一包件投标报价，所有价格均系用人民币表示，单位为元，精确到个数位。

（2）投标人应按照《项目概况及招标需求》和《投标人须知》的要求报价。

（3）开标一览表内容与投标文件其它部分内容不一致时以开标一览表内容为准。

投标人授权代表签字：史本超

投标人（公章）：河南思泰电子科技有限公司

日期：2025 年 05 月 13 日

三、报价分类明细表

序号	项目	含税总价（万元）	备注
1	湿地植被监测	19.8	含人工费、材料费、车费、租船费、鉴定费、研究费、管理费、税费等。
2	底栖动物监测	25.13	
3	水动力泥沙现场数据采集	46.5	
4	横沙湿地资源趋势模拟	32.2	
合计	**人民币大写：壹佰贰拾叁万陆仟叁佰元整　　小写：1236300.00 元**		

投标人授权代表签字：史庆超

投标人（公章）：河南思泰电子科技有限公司

日期：2025 年 05 月 13 日

四、法定代表人资格证明书

投 标 人：河南思泰电子科技有限公司

单位性质：有限责任公司(自然人独资)

地　　址：河南自贸试验区郑州片区(郑东)普惠路 68 号 1 单元 7 层 702 号

成立时间：2017 年 09 月 12 日

经营期限：长期

姓　　名：王艳　　性别：女　年龄：54　　职务：总经理

系河南思泰电子科技有限公司的法定代表人。

特此证明。

投标人：河南思泰电子科技有限公司（单位公章）

日期：2025 年 05 月 13 日

五、法定代表人授权书

致：上海市野生动植物和自然保护地研究中心、上海翔波工程咨询有限公司（采购人、采购代理机构）

我王艳系河南思泰电子科技有限公司的法定代表人，现授权委托本单位在职职工 史本超，部门经理 以我方的名义参加贵司湿地生态调查与湿地资源趋势模拟项目的投标活动，并代表我方全权办理针对上述项目的投标、开标、投标文件澄清、签约等一切具体事务和签署相关文件。

我方对被授权人的签名事项负全部责任。

在贵司收到我方撤销授权的书面通知以前，本授权书一直有效。被授权人在授权书有效期内签署的所有文件不因授权的撤销而失效。除我方书面撤销授权外，本授权书自投标截止之日起直至我方的投标有效期结束前始终有效。

被授权人无转委托权，特此委托。

委托人（签字或盖章）：王艳印

委托人身份证号码：22012319711210246X

日期：2025 年 05 月 13 日

投标人（公章）：河南思泰电子科技有限公司

受托人（签字或盖章）：史本超

受托人身份证号码：412327198310057573

六、资格证明文件

6.1 投标人基本情况简介格式

（一）基本情况：

1、单位名称：河南思泰电子科技有限公司

2、地址：河南自贸试验区郑州片区(郑东)普惠路 68 号 1 单元 7 层 702 号

3：邮编：450000

4、电话/传真：13903712374

5、成立日期或注册日期：2017 年 9 月 12 日

6、行业类型：软件服务业

（二）基本经济指标（到上年度 12 月 31 日止）：

1、实收资本：0 元

2、资产总额：5486426.82 元

3、负债总额：6101080.26 元

4、营业收入：1882039.41 元

5、净利润：430219.5 元

6、上交税收:26256.34 元

7、在册人数：9 人

（三）其他情况：

1、专业人员分类及人数：4

2、企业资质证书情况：营业执照、商标注册证。

3、近三年内因违法违规受到行业及相关机构通报批评以上处理的情况：无

4、其他需要说明的情况：无

我方承诺上述情况是真实、准确的，我方同意根据招标人进一步要求出示有关资料予以证实。

投标人授权代表签字：史本超

投标人（公章）：河南思泰电子科技有限公司

日期：2025 年 05 月 13 日

全程电子化

统一社会信用代码
91410100MA44D16J5X

营业执照

(副 本) (1-1)

扫描二维码登录"国家企业信用信息公示系统"了解更多登记、备案、许可、监管信息。

名　　称　河南思泰电子科技有限公司

类　　型　有限责任公司（自然人独资）

法定代表人　王艳

经营范围　一般项目：技术服务、技术开发、技术咨询、技术交流、技术转让、技术推广；信息技术咨询服务；计算机系统服务；集成电路设计；计算机及办公设备维修；专用设备修理；仪器仪表修理；企业管理咨询；电子、机械设备维护（不含特种设备）；日用品批发；服装服饰批发；体育用品及器材批发；日用电器修理；会议及展览服务；市场营销策划；组织文化艺术交流活动；信息咨询服务（不含许可类信息咨询服务）；信息系统运行维护服务；生态资源监测；自然生态系统保护管理；生态恢复及生态保护服务；环境保护监测；土壤污染治理与修复服务；土壤环境污染防治服务；互联网销售（除销售需要许可的商品）；互联网安全服务；计算机软硬件及辅助设备零售；电子产品销售；集成电路销售；安防设备销售；通讯设备销售；办公用品销售；家具销售；机械设备销售；第一类医疗器械销售；工艺美术品及礼仪用品销售（象牙及其制品除外）；食用农产品零售；礼品花卉销售；食品销售（仅销售预包装食品）；家用电器销售；化妆品零售；卫生洁具销售；塑料制品销售；劳动保护用品销售；珠宝首饰零售；金属结构销售；货物进出口；技术进出口；广告设计、代理；广告制作；广告发布（除依法须经批准的项目外，凭营业执照依法自主开展经营活动）许可项目：第二类增值电信业务、食品销售；广播电视节目制作经营（依法须经批准的项目，经相关部门批准后方可开展经营活动，具体经营项目以相关部门批准文件或许可证件为准）

注册资本　壹仟万圆整

成立日期　2017年09月12日

住　　所　河南自贸试验区郑州片区（郑东）普惠路68号1单元7层702号

登记机关

2025 年 04 月 27 日

国家企业信用信息公示系统网址：http://www.gsxt.gov.cn

市场主体应当于每年1月1日 至 6月30日通过国家企业信用信息公示系统报送公示年度报告

国家市场监督管理总局监制

6.1.1 营业执照复印件

6.1.2 商标注册证

TMZC54770347D01T211118

第 54770347 号

商标注册证

一毛找

核定使用商品/服务项目（国际分类：38）

第38类：通过互联网播放节目；卫星电视广播；在全球通信网络、互联网和无线网络上同步播放电视；播放电视购物节目；无线电广播；信息传送；计算机终端通信；电信信息；提供在线论坛；无线电传送和接收（截止）

注 册 人 河南思泰电子科技有限公司

注册人地址 河南省河南自贸试验区郑州片区（郑东）普惠路68号1单元7层702号

注册日期 2021年10月28日 **有效期至** 2031年10月27日

局 长 申长雨

发证机关 国家知识产权局

TMZC48247861D01T210330

第 48247861 号

商标注册证

四带二

核定使用商品/服务项目（国际分类：42）

第42类：替他人创建主页；提供互联网搜索引擎；云计算；数据安全咨询；创建互联网网站；为他人提供计算机软件设计；计算机软件的设计和开发；计算机软件安装、维护和修理；人工智能领域的研究；手机应用软件的设计和开发（截止）

注 册 人 河南思泰电子科技有限公司

注册人地址 河南省郑州市河南自贸试验区郑州片区（郑东）普惠路68号1单元7层702号

注册日期 2021年03月07日 **有效期至** 2031年03月06日

局 长

发证机关

TMZC61117792D01T220611

第 61117792 号

商标注册证

码上神州

核定使用商品/服务项目（国际分类：42）

第42类：提供互联网搜索引擎；云计算；数据安全咨询；创建互联网网站；为他人提供计算机软件设计；计算机软件的设计和开发；计算机软件安装、维护和修理；人工智能领域的研究；手机应用软件的设计和开发；替他人创建主页（截止）

注 册 人 河南思泰电子科技有限公司

注册人地址 河南省郑州市河南自贸试验区郑州片区（郑东）普惠路68号1单元7层702号

注册日期 2022年05月21日 **有效期至** 2032年05月20日

局 长 申长雨

发证机关 国家知识产权局

6.2 参加政府采购活动前 3 年内在经营活动中没有重大违法记录的书面声明

致：上海市野生动植物和自然保护地研究中心（采购人）

我公司承诺在参加本项目政府采购活动前三年内，在经营活动中没有重大违法记录，遵守国家其他有关的法律、法规和管理办法。

特此声明。

（注：重大违法记录是指供应商因违法经营受到刑事处罚或者责令停产停业、吊销许可证或者执照、较大数额罚款等行政处罚。其中较大数额罚款标准以财库【2022】3 号文规定为准（即 200 万元以上罚款）。

供应商在参加政府采购活动前 3 年内因违法经营被禁止在一定期限内参加政府采购活动，期限届满的，可以参加政府采购活动。）

投标人名称：河南思泰电子科技有限公司（公章）

法定代表人或其授权委托人：（签字或盖章）

日期： 2025 年 05 月 13 日

6.2.1 信用中国-失信被执行人名单

2025/5/12 13:17 全国法院失信被执行人名单信息公布与查询

中国执行信息公开网

(http://zxgk.court.gov.cn/)

失信被执行人将在政府采购、招标投标、行政审批、政府扶持、融资信贷、市场准入、资质认定等方面受到信用惩戒！

失信被执行人(自然人)公布

姓名/名称	证件号码
管金胜	1326231964****2015
李红林	4209821978****1448
林建勇	5111241977****2617
蒋丙满	3326261966****0017
韦霞宁	4527011961****1325
安德正	3326251976****211X

(restraining

失信被执行人(法人或其他组织)公布

姓名/名称	证件号码
北京远翰国际教育咨询有限责任公司	55140080-1
北京远翰国际教育咨询有限责任公司	55140080-1
北京豫安辛伏建筑劳务有限公司	59963962-7
星河互联集团有限公司	69167076-6
北京溢思得瑞智能科技研究院有限公司	MA005UR8-3

查询条件

被执行人姓名/名称:

河南思泰电子科技有限公司

身份证号码/组织机构代码:

91410100MA44D16J5X

省份:

----------全部----------

验证码:

Rxk3

Rxk3

验证码正确!

查询

查询结果

https://zxgk.court.gov.cn/shixin/ 1/2

在全国范围内没有找到 91410100MA44D16J5X 河南思泰电子科技有限公司相关的结果.

全国法院失信被执行人名单信息公布与查询平台首页

声明

为推进社会信用体系建设，对失信被执行人进行信用惩戒，促使其自动履行生效法律文书确定的义务，根据《中华人民共和国民事诉讼法》相关规定，最高人民法院制定了《关于公布失信被执行人名单信息的若干规定》，自今日起向社会开通“全国法院失信被执行人名单信息公布与查询”平台，社会各界通过该平台查询全国法院（不包括军事法院）失信被执行人名单信息。现就有关事项作出如下声明：

一、被执行人未履行生效法律文书确定的义务，并具有《最高人民法院关于公布失信被执行人名单信息的若干规定》第一条规定的情形之一的，执行法院将根据申请执行人的申请或依职权决定将该被执行人纳入失信被执行人名单，并通过本网站予以公布。

二、各级人民法院将向政府相关部门、金融监管机构、金融机构、承担行政职能的事业单位及行业协会等通报失信被执行人名单信息，供相关单位依照法律、法规和有关规定，在政府采购、招标投标、行政审批、政府扶持、融资信贷、市场准入、资质认定等方面，对失信被执行人予以信用惩戒；将向征信机构通报失信被执行人名单信息，并由征信机构在其征信系统中记录。

国家工作人员、人大代表、政协委员等被纳入失信被执行人名单的，失信情况将通报其所在单位和相关部门；国家机关、事业单位、国有企业等被纳入失信被执行人名单的，失信情况将通报其上级单位、主管部门或者履行出资人职责的机构。

三、纳入失信被执行人名单的被执行人，执行法院将依照《最高人民法院关于限制被执行人高消费及有关消费的若干规定》第一条的规定，对被执行人采取限制消费措施。

被执行人为自然人的，被采取限制消费措施后，不得有以下高消费及非生活和工作必需的消费行为：（一）乘坐交通工具时，选择飞机、列车软卧、轮船二等以上舱位；（二）在星级以上宾馆、酒店、夜总会、高尔夫球场等场所进行高消费；（三）购买不动产或者新建、扩建、高档装修房屋；（四）租赁高档写字楼、宾馆、公寓等场所办公；（五）购买非经营必需车辆；（六）旅游、度假；（七）子女就读高收费私立学校；（八）支付高额保费购买保险理财产品；（九）乘坐G字头动车组列车全部座位、其他动车组列车一等以上座位等其他非生活和工作必需的消费行为。被执行人为单位的，被采取限制消费措施后，被执行人及其法定代表人、主要负责人、影响债务履行的直接责任人员、实际控制人不得实施前述行为。因私消费以个人财产实施前述行为的，可以向执行法院提出申请。

四、被纳入失信被执行人名单的公民、法人或其他组织认为有《最高人民法院关于失信被执行人名单信息的若干规定》第十一条规定情形之一的，可以向执行法院申请纠正。

五、本网站提供的信息仅供查询人参考。如有争议，以执行法院有关法律文书为准。因使用本网站信息而造成不良后果的，人民法院不承担任何责任。

六、查询人必须依法使用查询信息，不得用于非法目的和不正当用途。非法使用本网站信息给他人造成损害的，由使用人自行承担相应责任。

七、本网站信息查询免费，严禁任何单位和个人利用本网站信息牟取非法利益。

八、本网站属于政府网站，未经许可，任何商业性网站不得建立与本网站及其内容的链接，不得建立本网站的镜像（包括全部和局部镜像），不得拷贝、复制或传播本网站信息。

九、如对该查询内容有异议，请与执行法院联系。

最高人民法院

2013年10月8日

地址：北京市东城区东交民巷27号 邮编：100745

总机：010-67550114

6.2.2 信用中国-重大税收违法案件当事人名单

2025/5/7 16:04 重大税收违法失信主体_信息公示_信用中国

欢迎来到信用中国

信用信息 统一社会信用代码 站内文章

请输入主体名称或者统一社会信用代码

首页 信用动态 政策法规 信息公示 信用服务 信用研究

信用承诺 信易+ 联合奖惩 个人信用 行业信用 城市信用

您所在的位置：首页 > 信用服务 > 重大税收违法失信主体

重大税收违法失信主体

河南思泰电子科技有限公司 查 询

查询结果

很抱歉，没有找到您搜索的数据

https://www.creditchina.gov.cn/xinyongfuwu/zhongdashuishouweifaanjian/ 1/1

6.2.3 政府采购-严重违法失信行为记录名单

2025/5/7 16:10 政府采购严重违法失信行为记录名单_中国政府采购网

财政部唯一指定政府采购信息网络发布媒体 国家级政府采购专业网站 服务热线：400-810-1996

首页 政采法规 购买服务 监督检查 信息公告 国际专栏

当前位置：首页 » 政府采购严重违法失信行为记录名单 »

企业名称： 河南思泰电子科技有限公司

执法单位： 处罚日期： 至 查询前，请至少输入一个查询条件 查找 重置

序号	企业名称	统一社会信用代码（或组织机构代码）	企业地址	严重违法失信行为的具体情形	处罚结果	处罚依据	处罚日期	公布日期	执法单位

没有该企业的相关记录

本次查询的企业：河南思泰电子科技有限公司

本次查询的时间：2025年05月07日 16时10分

提示：本平台信息依据《关于报送政府采购严重违法失信行为信息记录的通知》（财办库[2014]526号）发布。如有疑问请联系具体执法单位。

政府网站找错

主办单位：中华人民共和国财政部国库司

网站标识码：bm14000002 | 京ICP备19054529号-1 | 京公网安备11010602060068号

https://www.ccgp.gov.cn/search/cr/ 1/1

6.3 中小企业声明函

本公司（联合体）郑重声明，根据《政府采购促进中小企业发展暂行办法》（财库[2020]46号）的规定，本公司（联合体）参加上海市野生动植物和自然保护地研究中心的湿地生态调查与湿地资源趋势模拟采购活动，工程的施工单位全部为符合政策要求的中小企业（或者：服务全部由符合政策要求的中小企业承接）。相关企业（含联合体中的中小企业、签订分包意向协议的中小企业）的具体情况如下：

1. 湿地生态调查与湿地资源趋势模拟，属于其他未列明行业；承建（承接）企业为河南思泰电子科技有限公司，从业人员 9 人，营业收入为 188 万元，资产总额为 548 万元，属于微型企业；

以上企业，不属于大企业的分支机构，不存在控股股东为大企业的情形，也不存在与大企业的负责人为同一人的情形。

本企业对上述声明内容的真实性负责。如有虚假，将依法承担相应责任。

企业名称（盖章）：河南思泰电子科技有限公司

日　　期：2025 年 05 月 13 日

注：1、本声明函适用于所有在中国境内依法设立的各类所有制和各种组织形式的企业。事业单位、团体组织等非企业性质的政府采购供应商，不属于中小企业划型标准确定的中小企业，不得按《关于印发中小企业划型标准规定的通知》规定声明为中小微企业，也不适用《政府采购促进中小企业发展管理办法》财库(2020)46号。与大企业的负责人为同一人，或者与大企业存在直接控股、管理关系的不属于中小企业划型标准确定的中小企业。

2、供应商填写的所属行业应与采购文件中明确的所属行业保持一致，否则按无效响应处理。

3、从业人员、营业收入、资产总额填报上一年度数据，无上一年度数据的新成立企业可不填报。

4、声明函内容应填写完整，若有缺漏按无效响应处理。（第3条情况除外）

5、如为联合体，此附件联合体各方均应提供。

6、成交供应商为中小企业的，成交公告将公告其《中小企业声明函》。

中小企业划型标准规定（工信部联企业[2011]300号）

行业	中小微型企业（或）			中型企业（且）			小型企业（且）			微型企业（或）		
	从业人员	营业收入	资产总额	从业人员	营业收入	资产总额	从业人员	营业收入	资产总额	从业人员	营业收入	资产总额
农、林、牧、渔业		20000万元以下			500万元及以上			50万元及以上			50万元以下	
工业（包括采矿业，制造业，电力、热力、燃气及水生产和供应业）	1000人以下	40000万元以下		300人及以上	2000万元及以上		20人及以上	300万元及以上		20人以下	300万元以下	
建筑业		80000万元以下	80000万元以下		6000万元及以上	5000万元及以上		300万元及以上	300万元及以上		300万元以下	300万元以下
批发业	200人以下	40000万元以下		20人及以上	5000万元及以上		5人及以上	1000万元及以上		5人以下	1000万元以下	
零售业	300人以下	20000万元以下		50人及以上	500万元及以上		10人及以上	100万元及以上		10人以下	100万元以下	
交通运输业（不含铁路运输业）	1000人以下	30000万元以下		300人及以上	3000万元及以上		20人及以上	200万元及以上		20人以下	200万元以下	
仓储业	200人以下	30000万元以下		100人及以上	1000万元及以上		20人及以上	100万元及以上		20人以下	100万元以下	
邮政业	1000人以下	30000万元以下		300人及以上	2000万元及以上		20人及以上	100万元及以上		20人以下	100万元以下	
住宿业	300人以下	10000万元以下		100人及以上	2000万元及以上		10人及以上	100万元及以上		10人以下	100万元以下	
餐饮业	300人以下	10000万元以下		100人及以上	2000万元及以上		10人及以上	100万元及以上		10人以下	100万元以下	
信息传输业（包括电信、互联网和相关服务）	2000人以下	100000万元以下		100人及以上	1000万元及以上		10人及以上	100万元及以上		10人以下	100万元以下	
软件和信息技术服务业	300人以下	10000万元以下		100人及以上	1000万元及以上		10人及以上	50万元及以上		10人以下	50万元以下	
房地产开发经营		200000万元以下	10000万元以下		1000万元及以上	5000万元及以上		100万元及以上	2000万元及以上		100万元以下	2000万元以下
物业管理	1000人以下	5000万元以下		300人及以上	1000万元及以上		100人及以上	500万元及以上		100人以下	500万元以下	
租赁和商务服务业	300人以下		120000万元以下	100人及以上		8000万元及以上	10人及以上		100万元及以上	10人以下		100万元以下
其他未列明行业（包括科学研究和技术服务业，水利、环境和公共设施管理业，居民服务、修理和其他服务业，社会工作，文化、体育和娱乐业等）	300人以下			100人及以上			10人及以上			10人以下		

本规定适用于在中华人民共和国境内依法设立的各类所有制和各种组织形式的企业。个体工商户和本规定以外的行业，参照本规定进行划型。

本规定的中型企业标准上限即为大型企业标准的下限，国家统计部门据此制定大中小微型企业的统计分类。国务院有关部门据此进行相关数据分析，不得制定与本规定不一致的企业划型标准。

6.4 残疾人福利性单位声明函（如有）

本单位郑重声明，根据《财政部民政部中国残疾人联合会关于促进残疾人就业政府采购政策的通知》（财库[2017]141 号）的规定，本单位为符合条件的残疾人福利性单位，且本单位参加_____单位的_____项目采购活动提供本单位制造的货物（由本单位承担工程/提供服务），或者提供其他残疾人福利性单位制造的货物（不包括使用非残疾人福利性单位注册商标的货物）。

本单位对上述声明的真实性负责。如有虚假，将依法承担相应责任。

单位名称（盖章）：河南思泰电子科技有限公司

日　　期：2025 年 05 月 13 日

6.5 供应商控股情况

致 上海市野生动植物和自然保护地研究中心 ：

1. 与我方的法定代表人（单位负责人）为同一人的企业如下：

北京心叶体育文化有限公司、东信数智(北京)科技有限公司

2. 我方的控股股东如下：

王艳

3. 我方直接控股的企业如下：

无

4. 与我方存在管理、被管理关系的单位名称如下：

无

投标人名称：河南思泰电子科技有限公司（公章）

日　　期：2025 年　05 月 13 日

6.6 财务状况及税收、社会保障资金缴纳情况声明函

我方河南思泰电子科技有限公司符合《中华人民共和国政府采购法》第二十二条第一款第（二）项、第（四）项规定条件，具体包括：

1. 具有健全的财务会计制度；

2. 有依法缴纳税收和社会保障资金的良好记录。

特此声明。

我方对上述声明的真实性负责。如有虚假，将依法承担相应责任。

供应商名称：河南思泰电子科技有限公司（公章）

日　　期：2025 年 05 月 13 日

6.6.1 财务状况报表

资产负债表

会小企01表

纳税人识别号：91410100MA44D16J5X　　税款所属期起止：2024-01-01至2024-12-31

编制单位：河南思泰电子科技有限公司　　报送日期：2025-04-29　　单位：元

资　　产	行次	期末余额	年初余额	负债和所有者权益	行次	期末余额	年初余额
流动资产：				流动负债：			
货币资金	1	708,445.50	721,908.71	短期借款	31	0.00	0.00
短期投资	2	0.00	0.00	应付票据	32	0.00	0.00
应收票据	3	0.00	0.00	应付账款	33	3,688,000.00	3,395,000.00
应收账款	4	819,868.66	385,109.65	预收账款	34	27,505.29	27,505.29
预付账款	5	1,607,881.82	1,555,302.72	应付职工薪酬	35	57,675.99	62,693.03
应收股利	6	0.00	0.00	应交税费	36	224.31	5,739.60
应收利息	7	0.00	0.00	应付利息	37	0.00	0.00
其他应收款	8	2,350,230.84	2,365,483.48	应付利润	38	0.00	0.00
存货	9	0.00	0.00	其他应付款	39	2,327,674.67	2,581,739.58
其中：原材料	10	0.00	0.00	其他流动负债	40	0.00	0.00
在产品	11	0.00	0.00	流动负债合计	41	6,101,080.26	6,072,677.50
库存商品	12	0.00	0.00	非流动负债：			
周转材料	13	0.00	0.00	长期借款	42	0.00	0.00
其他流动资产	14	0.00	0.00	长期应付款	43	0.00	0.00
流动资产合计	15	5,486,426.82	5,027,804.56	递延收益	44	0.00	0.00
非流动资产：				其他非流动负债	45	0.00	0.00
长期债券投资	16	0.00	0.00	非流动负债合计	46	0.00	0.00
长期股权投资	17	0.00	0.00	负债合计	47	6,101,080.26	6,072,677.50
固定资产原价	18	0.00	0.00				
减：累计折旧	19	0.00	0.00				
固定资产账面价值	20	0.00	0.00				
在建工程	21	0.00	0.00				
工程物资	22	0.00	0.00				
固定资产清理	23	0.00	0.00				
生产性生物资产	24	0.00	0.00	所有者权益（或股东权益）：			
无形资产	25	0.00	0.00	实收资本（或股本）	48	0.00	0.00
开发支出	26	0.00	0.00	资本公积	49	0.00	0.00
长期待摊费用	27	0.00	0.00	盈余公积	50	0.00	0.00
其他非流动资产	28	0.00	0.00	未分配利润	51	-614,653.44	-1,044,872.94
非流动资产合计	29	0.00	0.00	所有者权益（或股东权益）合计	52	-614,653.44	-1,044,872.94
资产合计	30	5,486,426.82	5,027,804.56	负债和所有者权益（或股东权益）总计	53	5,486,426.82	5,027,804.56

会小企02表

利 润 表

税款所属期起止：2024-01-01 至 2024-12-31

纳税人识别号：91410100MA44D16J5X

纳税人名称：河南思泰电子科技有限公司

报送日期：2025-04-29

单位：元

项目	行次	本年累计金额	上年金额
一、营业收入	1	1,882,039.41	2,120,428.36
减：营业成本	2	136,000.00	935,926.83
税金及附加	3	2,051.43	1,354.29
其中：消费税	4	0.00	0.00
营业税	5	0.00	0.00
城市维护建设税	6	0.00	0.00
资源税	7	0.00	0.00
土地增值税	8	0.00	0.00
城镇土地使用税、房产税、车船税、印花税	9	0.00	0.00
教育费附加、矿产资源补偿费、排污费	10	0.00	0.00
销售费用	11	0.00	0.00
其中：商品维修费	12	0.00	0.00
广告费和业务宣传费	13	0.00	0.00
管理费用	14	1,318,335.24	1,447,317.39
其中：开办费	15	0.00	0.00
业务招待费	16	298.00	32,640.00
研究费用	17	519,705.01	584,967.67
财务费用	18	1,113.68	999.15
其中：利息费用（收入以“-”号填列）	19	-128.82	-257.85
加：投资收益（损失以“-”号填列）	20	0.00	0.00
二、营业利润（亏损以“-”号填列）	21	424,539.06	-265,169.30
加：营业外收入	22	5,702.51	1,580.72
其中：政府补助	23	2,659.88	247.52
减：营业外支出	24	22.07	0.00
其中：坏账损失	25	0.00	0.00
无法收回的长期债券投资损失	26	0.00	0.00
无法收回的长期股权投资损失	27	0.00	0.00
自然灾害等不可抗力因素造成的损失	28	0.00	0.00
税收滞纳金	29	22.07	0.00
三、利润总额（亏损总额以“-”号填列）	30	430,219.50	-263,588.58
减：所得税费用	31	0.00	0.00
四、净利润（净亏损以“-”号填列）	32	430,219.50	-263,588.58

现金流量表

会小企03表

纳税人识别号：91410100MA44D16J5X　　税款所属期起止：2024-01-01至2024-12-31

编制单位：河南思泰电子科技有限公司　　报送日期：2025-04-29　　单位：元

项目	行次	本年累计金额	上年金额
一、经营活动产生的现金流量：			
销售产成品、商品、提供劳务收到的现金	1	1,553,299.90	2,725,319.32
收到其他与经营活动有关的现金	2	230,255.67	837,951.87
购买原材料、商品、接受劳务支付的现金	3	263,000.00	755,818.67
支付的职工薪酬	4	959,645.52	1,043,096.63
支付的税费	5	24,830.13	15,958.44
支付其他与经营活动有关的现金	6	631,543.13	1,227,131.36
经营活动产生的现金流量净额	7	-95,463.21	521,266.09
二、投资活动产生的现金流量：			
收回短期投资、长期债券投资和长期股权投资收到的现金	8	0.00	0.00
取得投资收益收到的现金	9	0.00	0.00
处置固定资产、无形资产和其他非流动资产收回的现金净额	10	0.00	0.00
短期投资、长期债券投资和长期股权投资支付的现金	11	0.00	0.00
购建固定资产、无形资产和其他非流动资产支付的现金	12	0.00	0.00
投资活动产生的现金流量净额	13	0.00	0.00
三、筹资活动产生的现金流量：			
取得借款收到的现金	14	1,390,000.00	1,161,139.58
吸收投资者投资收到的现金	15	0.00	0.00
偿还借款本金支付的现金	16	1,308,000.00	1,643,100.00
偿还借款利息支付的现金	17	0.00	0.00
分配利润支付的现金	18	0.00	0.00
筹资活动产生的现金流量净额	19	82,000.00	-481,960.42
四、现金净增加额	20	-13,463.21	39,305.67
加：期初现金余额	21	721,908.71	682,603.04
五、期末现金余额	22	708,445.50	721,908.71

6.6.2 税收、社会保障资金缴纳证明

中华人民共和国
税收完税证明

No. 341915241000043606

填发日期：2024年 10月 17日　　税务机关：国家税务总局郑州市郑东新区税务局

纳税人识别号	91410100MA44D16J5X		纳税人名称	河南思泰电子科技有限公司	
原凭证号	税种	品目名称	税款所属时期	入(退)库日期	实缴(退)金额
341916241000057397	地方教育附加	增值税地方教育附加	2024-07-01 至 2024-09-30	2024-10-17	129.73
341916241000057397	教育费附加	增值税教育费附加	2024-07-01 至 2024-09-30	2024-10-17	194.59
341916241000057397	城市维护建设税	市区	2024-07-01 至 2024-09-30	2024-10-17	454.05
341916241000057397	增值税	研发和技术服务	2024-07-01 至 2024-09-30	2024-10-17	12,973.01
金额合计	（大写）人民币壹万叁仟柒佰伍拾壹元叁角捌分				¥13751.38
税务机关（盖章）	填票人 电子税务局	备注：一般申报 正税自行申报，主管税务所（科、分局）：国家税务总局郑州市郑东新区税务局商都路税务分局			

收据联 交纳税人作完税证明

国家税务总局郑州市郑东新区税务局 征税专用章

妥善保管

中华人民共和国
税收完税证明

No.441005241000358274

填发日期：2024年 10月 17日　　税务机关：国家税务总局郑州市郑东新区税务局商都路税务分局

纳税人识别号	91410100MA44D16J5X		纳税人名称	河南思泰电子科技有限公司	
原凭证号	税种	品目名称	税款所属时期	入(退)库日期	实缴(退)金额
441916241000002915	基本医疗保险费	职工基本医疗保险(单位缴纳)	2024-10-01至2024-10-31	2024-10-17	2,254.77
441916241000002915	基本医疗保险费	职工基本医疗保险(个人缴纳)	2024-10-01至2024-10-31	2024-10-17	644.22
441916241000002915	生育保险费	生育保险	2024-10-01至2024-10-31	2024-10-17	322.11
金额合计	(大写) 人民币叁仟贰佰贰拾壹元壹角				¥3,221.10
税务机关（盖章）	填票人 电子税务局	备注：一般申报 正税自行申报，主管税务所（科、分局）：国家税务总局郑州市郑东新区税务局商都路税务分局，社保编码：410199983056社保经办机构：郑州市市本级医疗保障局			

收据联 交纳税人作完税证明

国家税务总局郑州市郑东新区税务局 征税专用章

第2次打印　　妥善保管

中华人民共和国
税收完税证明

No.441005241000358273

国家税务总局郑州市郑东新区税务局商都路税务分局

填发日期：2024年 10月 17日　　税务机关：

纳税人识别号	91410100MA44D16J5X	纳税人名称	河南恩泰电子科技有限公司

原凭证号	税种	品目名称	税款所属时期	入(退)库日期	实缴(退)金额
441916241000002914	企业职工基本养老保险费	职工基本养老保险(个人缴纳)	2024-10-01至2024-10-31	2024-10-17	2,576.88
441916241000002914	失业保险费	失业保险(单位缴纳)	2024-10-01至2024-10-31	2024-10-17	225.45
441916241000002914	失业保险费	失业保险(个人缴纳)	2024-10-01至2024-10-31	2024-10-17	96.66
441916241000002914	工伤保险费	工伤保险	2024-10-01至2024-10-31	2024-10-17	32.22
441916241000002914	企业职工基本养老保险费	职工基本养老保险(单位缴纳)	2024-10-01至2024-10-31	2024-10-17	5,153.76
金额合计	(大写) 人民币捌仟零捌拾肆元玖角柒分				¥8,084.97

税务机关（盖章）社税专用章

填票人　电子税务局

备注：一般申报 正税自行申报，主管税务所（科、分局）：国家税务总局郑州市郑东新区税务局商都路税务分局，社保编码：410199916511社保经办机构：郑州市社会保险局

第2次打印　　妥善保管

收据联 交纳税人作完税证明

七、拟投入本项目的人员配备表

项目组成员姓名	性别	年龄	在项目组中的角色	资格及证书号	工作区域
宋亚伟	男	36	项目负责人		郑州
陈朝	男	35	质量负责人		郑州
张盼	男	36	技术人员		郑州
陈晶晶	女	30	安全负责人		郑州
周在杨	男	43	技术人员		上海
葛建忠	男	44	技术负责人		上海

注：

1、在填写时，如本表格不适合投标人的实际情况，可根据本表格格式自行制表。

2、我方承诺以上人员均为本单位职工，按时交纳四金，提供相关执业资格证书、职称证书等证明材料复印件。

3、此表作为中标后服务承诺书的组成部分，项目人员应保持稳定。

投标人：河南思泰电子科技有限公司（公章）

法定代表人或授权代理人（签字或盖章）：史长超

日期：2025 年 05 月 13 日

参保证明

表单验证号码ade65252f8db42fbbcf51502e7ee0f1f

河南省郑州市本级企业基本养老保险参保证明

单位名称：河南思泰电子科技有限公司　　单位编号：410199916511

序号	姓名	个人编号	公民身份号码	工作时间	参保时间	缴费基数
1	吕胤璋	41019990944129	220182199508251751	2019-11-01	2020-04-01	3579.00
2	陈朝	41019993990826	410183199002133813	2018-09-07	2020-10-01	3579.00
3	张盼	41019993752223	410323198906121516	2011-10-01	2021-01-01	3579.00
4	陈晶晶	41019920042854	410482199502105923	2019-12-02	2019-12-02	3579.00
5	王文晓	41019993225832	410526199603139 06X	2018-07-01	2018-07-01	3579.00
6	刘诗哲	41200010698251	411424199911070036	2022-08-01	2024-03-01	3579.00
7	宋亚伟	41029990132977	412721198907035477	2018-07-01	2022-03-01	3579.00
8	张曼	41019920067470	413026199506035889	2020-03-01	2020-11-01	3579.00

打印时间：2025年05月09日

八、主要项目团队人员的详细情况表

姓名	葛建忠	出生年月	1981年7月	文化程度	博士	毕业时间	2011 年 7 月 1 日
毕业院校和专业	华东师范大学 学校自然地理学专业		从事相关工作年限	13		联系方式	15800683250
执业资格			技术职称	研究员		聘任时间	2022 年 2 月

主要工作经历：（包括起止年限、单位名称、从事的工作内容、职务、证明人、证明人联系电话）

美国麻州大学达特茅斯分校 访问学者（2007-2009）

华东师范大学 助理研究员(2011-2015)

美国麻州大学达特茅斯分校 访问学者（2015-2016）

华东师范大学 副研究员（2016-2020）

华东师范大学 研究员 （2021- ）

河南思泰电子科技有限公司 技术顾问（2022- ）

近五年与本项目相匹配的情况

序号	项目名称	参与时间	委托单位名称	项目投资金额（万元）	参与项目的角色
1	闽江下游咸潮治理专题研究	2022年3月1日	武汉大学	30	主要负责人
2	鄱阳湖水利枢纽工程长江口咸潮入侵影响评价修编	2023年12月22日	中国水利水电科学研究院	35	主要负责人
3	半开敞海域疏浚土造滩施工关键技术研究	20024年5月15日	中交上海航道勘查设计研究院有限公司	135	主要负责人
合计				200	

注：团队主要成员指项目负责人、技术负责人、质量负责人、安全负责人等。

项目负责人

姓名	宋亚伟	出生年月	1989年7月	文化程度	本科	毕业时间	2012 年 7 月 1 日
毕业院校和专业	郑州轻工业学院 过程装备与控制工程		从事相关工作年限	3		联系方式	17737148713
执业资格			技术职称			聘任时间	2018 年 4 月

主要工作经历：（包括起止年限、单位名称、从事的工作内容、职务、证明人、证明人联系电话）

开封空分集团有限公司 201207-201510 技术人员

郑州创恒实业有限公司 201508-201804 高级技术人员

河南思泰电子科技有限公司 201804 至今 项目负责人 陈晶晶 13838537469

近五年与本项目相匹配的情况

序号	项目名称	参与时间	委托单位名称	项目投资金额（万元）	参与项目的角色
1	崇明岛典型岸段水动力泥沙监测项目	2022 年	天津元数科技有限公司	23.6	项目负责人
2	2023 年长江口典型湿地底栖动物监测项目	2023 年	北京市燕飞宇教育科技有限责任公司	35	项目负责人
合计				58.6	

注：团队主要成员指项目负责人、技术负责人、质量负责人、安全负责人等。

质量负责人

姓名	陈朝	出生年月	1990 年 2 月	文化程度	本科	毕业时间	2013 年 6 月
毕业院校和专业	重庆理工大学 数学与应用数学专业		从事相关工作年限	3		联系方式	18503866372
执业资格			技术职称			聘任时间	2020 年 9 月 21 日

主要工作经历：（包括起止年限、单位名称、从事的工作内容、职务、证明人、证明人联系电话）

重庆首亨软件有限公司　　技术人员　（2014-2017）

重庆浩普科技有限公司　　技术人员（2017-2018）　陈显强　13320375465

河南中审科技有限公司　　高级技术人员　（2018-2020）　杨帆　13523491155

河南思泰电子科技有限公司　　高级技术人员、质量监测　（2020-）　宋亚伟　17737148713

近五年与本项目相匹配的情况

序号	项目名称	参与时间	委托单位名称	项目投资金额（万元）	参与项目的角色
1	崇明岛典型岸段水动力泥沙监测项目	2022 年	天津元数科技有限公司	23.6	质量负责人
2	2023 年长江口典型湿地底栖动物监测项目	2023 年	北京市燕飞宇教育科技有限责任公司	35	质量负责人
合计				58.6	

注：团队主要成员指项目负责人、技术负责人、质量负责人、安全负责人等。

安全负责人

姓名	陈晶晶	出生年月	1995年2月	文化程度	本科	毕业时间	2018 年 7 月 1 日
毕业院校和专业	河南理工大学万方科技学院 财务管理专业		从事相关工作年限	3		联系方式	13838537469
执业资格			技术职称			聘任时间	2019 年 9 月

主要工作经历：（包括起止年限、单位名称、从事的工作内容、职务、证明人、证明人联系电话）

河南思泰电子科技有限公司　2019.9-至今　王文晓　15225195273

近五年与本项目相匹配的情况

序号	项目名称	参与时间	委托单位名称	项目投资金额（万元）	参与项目的角色
1	崇明岛典型岸段水动力泥沙监测项目	2022 年	天津元数科技有限公司	23.6	安全负责人
2	2023 年长江口典型湿地底栖动物监测项目	2023 年	北京市燕飞宇教育科技有限责任公司	35	安全负责人
合计				58.6	

注：团队主要成员指项目负责人、技术负责人、质量负责人、安全负责人等。

九、投标人拟投入本项目的施工机械、设备清单

序号	机械/设备名称	型号规格	数量	国别产地	制造年份	使用情况	用途	备注
1	S型一体式风速风向传感器	YGC-FSFX-S	1	中国武汉	2020	良好	测量风速风向	
2	OTS温盐深浊度仪	OTS 200	5	中国上海	2021	良好	测量浊度，温度，盐度，水深	
3	声学多普勒流速仪ADV	Vector	4	挪威	2020	良好	测量流速，湍流	
4	ADCP仪器	1200kHz ADCP	1	美国	2019	良好	测分层流速	
5	Spotter-微型波浪浮标	V3	4	中国深圳	2019	良好	测波浪	

投标人：河南思泰电子科技有限公司（公章）

法定代表人或授权代理人（签字或盖章）：史本超

日期： 2025 年 05 月 13 日

十、投标人近3年以来承接类似项目一览表

序号	年份	项目名称	业主单位名称	项目金额（万元）	目前完成情况
1	2022	崇明岛典型岸段水动力泥沙监测项目	天津元数科技有限公司	23.6	完成
2	2023	2023年长江口典型湿地底栖动物监测项目	北京市燕飞宇教育科技有限责任公司	35	完成
3					
4					
5					

注：近3年是指投标截止日前3年，各投标人应提供与本需求类似项目业绩，其业绩应附上中标通知书或合同原件扫描件或验收报告等证明材料。上述扫描件为关键页即可。

投标人：河南思泰电子科技有限公司（公章）

法定代表人或授权代理人（签字或盖章）：史本超

日期：2025 年 05 月 13 日

合同复印件 1

《技术服务委托合同》

工程名称：崇明岛典型岸段水动力泥沙监测项目

1

定制人（甲方）：天津元数科技有限公司

承揽人（乙方）：河南思泰电子科技有限公司

签订时间：2022 年 10 月 20 日

根据《中华人民共和国民法典》、《中华人民共和国测绘法》和有关的法律法规，经双方协商一致签订本合同。

第一条　调查区域

调查区域位于崇明岛。

第二条　调查内容

调查内容为崇明岛典型岸段水动力泥沙监测，本项目仅限于外业技术服务。

第三条　调查标准和依据

1、《海滨观测规范》(GB14914-2006)；

2、《全球定位系统（GPS）测量规范》（GB/T18314-2001）；

3、《水运工程测量规范》(JTJ 203－2001)；

4、委托方技术要求。

第四条　技术服务费

本项目乙方共出具 6 人提供外业技术服务，协助甲方进行大、中、小潮三个潮次的海水温度观测。经甲乙双方友好协商，本次收费合计为人民币 236000 元整（大写：贰拾叁万陆仟元整），该费用包含人员技术费、仪器使用费、税金等一切费用，由乙方包干使用。

第五条　甲方的义务

1、自合同签订之日起3日内向乙方提交有关资料（包含项目测量技术要求、负责人联系方式等）。

2、应当保证乙方的技术人员顺利进入现场工作，并对乙方进场人员的工作提供必要的条件。

第六条　乙方的义务

1、自收到甲方的有关材料之日起3日内提供人员名单，包含姓名、联系电话等信息。

2、服从甲方的现场安排，确保自身人员安全。

第七条　技术服务费支付日期和方式

本项目技术服务费：价税合计人民币236000元整（大写：贰拾叁万陆仟元整）

支付日期和方式：乙方完成外业技术服务后10个工作日内，甲方向乙方一次性支付全部合同费用，共计人民币236000元整（大写：贰拾叁万陆仟元整）。付款前乙方提供正式发票，由甲方将款项汇至乙方公司账户。

第八条　甲方违约责任

1、甲方未按第七条规定支付乙方技术服务费的，应按逾期天数和当时银行贷款利息，向乙方支付违约金。

第九条　乙方违约责任

1、合同签订后，如乙方擅自中途停止或解除合同，乙方向甲方双倍返还定金。双方没有约定定金的，乙方向甲方赔偿本合同款总额的20%。

第十条　不可抗力

由不可抗力，致使本合同无法履行时，双方应按有关法律规定及时协商处理。

第十一条　争议解决

因本合同发生争议，双方当事人协商解决或由双方主管部门调解，协商或调解不成的，当事人双方同意由甲方所在地有管辖权的人民法院诉讼解决。

第十二条　附则

1、本合同执行过程中的未尽事宜，双方应本着实事求是的、友好协商的态度加以解决。双方协商一致的，签订补充协议。补充协议与本合同具有同等效力。

2、本合同由双方代表签字，加盖双方公章或合同专用章即生效。全部成果交接完毕和技术服务费结算完成后，本合同终止。

3、本合同一式二份，双方各执一份，具有同等效力。

（以下无正文，为签字页）

定制人名称（盖章）：

天津元数科技有限公司

定制人住所： 天津市创业总部基地 C06-419 室

联系人： 张磊

电话： 13838537468

开户银行： 兴业银行总行

银行账号： 441310100100567821

法定代表人或委托代理人（签字）：

承揽人名称（盖章）：

河南思泰电子科技有限公司

揽人住所： 河南省郑州市升龙广场 1-1-1507

邮政编码： 450000

联系人： 陈晶晶

电话： 13903712374

开户银行： 中原银行郑州分行营业部

银行账号： 4101 0101 0180 0612 03

法定代表人或委托代理人（签字）：

签订时间：2022 年 10 月 20 日

1

合同复印件 2

合同登记编号：

技术服务合同

项目名称：2023 年长江口典型湿地底栖动物监测项目

甲方委托人：张杰

甲方单位：北京市燕飞宇教育科技有限责任公司

乙方受托人：王艳

乙方单位：河南思泰电子科技有限公司

签订地点：北京

签订日期：2023 年 8 月 10 日

有效期限：2023 年 8 月 10 日至 2023 年 12 月 31 日

依据《中华人民共和国合同法》的规定，合同双方就 2023年长江口典型湿地底栖动物监测项目的技术服务（该项目属观测服务性计划项目）经协商一致，签订本合同。

一、服务内容、方式和要求

1. 甲方负责提供长江口典型湿地底栖动物监测计划制定；
2. 乙方负责对甲方所提供 10 个断层断面进行水文泥沙生物进行现场观测；
3. 乙方负责提供所有水文泥沙及生物关键参数指标和现场观测照片；
4. 乙方负责提供泥样样品和生物数据分析与处理。

二、工作条件和协作事项

1. 乙方拥有水文泥沙仪器设备、具备水文泥沙观测条件，具有丰富的典型湿地底栖动物监测经验等等；

2. 乙方负责对甲方提出的长江口典型湿地底栖动物监测进行周密计划，并对现场情况进行勘察和评估，尽力观测 10 个断层断面长江口及浙闽沿岸的水文泥沙过程及生物参数。

三、履行期限、地点和方式

本合同自 2023 年 8 月 10 日至 2023 年 12 月 31 日

在上海（地点）履行。

本合同的履行方式：本合同完成后，乙方以观测数据形式提交给甲方。

四、验收标准和方式

由甲方组织专家进行评审；专家评审意见作为乙方提交正式成果的组成部分。

本合同服务项目的保证期为4个月，在保证期内双方权利、义务另行商定。

五、报酬及其支付方式

（一）本项目服务报酬人民币大写 叁拾伍万元整，小写：350000.00 元。

（二）本项目中介方活动经费（大写）零 元，由 乙方支付。

（三）支付方式（采用以下第 ① 种方式）

①一次总付：35万元，时间：2023年10月1日前

②分期支付：/ 元，时间：/

/ 元，时间：/

③其他方式：/

六、违约金或者损失赔偿额的计算方法

违反本合同约定，违约方应当按照《中华人民共和国合同法》有关条款的规定，承担违约责任。

（一）违反本合同第2条约定，乙方应承担以下违约责任，退还5000元给甲方；

（二）违反本合同第1条约定，甲方应承担以下违约责任；若甲方标号错误或不明确，由此导致的测试结果有误，则有甲方负责。

（三）其它：无。

七、合同争议的解决方式

在履行本合同过程中发生的争议，当事人双方可以通过和解或者调解解决。当事人不愿和解、调解或者和解、调解不成的，采用以下第（一）种方式解决。

（一）双方同意由 当地 仲裁委员会仲裁。

（二）向人民法院起诉，约定 ② 人民法院管辖。

①被告住所地 ②合同履行地 ③合同签订地

④原告住所地 ⑤标的物所在地

八、附则

本合同执行过程中的未尽事宜，双方应本着实事求是的、友好协商的态度加以解决。双方协商一致的，签订补充协议。补充协议与本合同具有同等效力。

本合同一式二份，双方各执一份，具有同等效力。

委托人（甲方）	名称(或姓名)	北京市燕飞宇教育科技有限责任公司			技术合同专用章 或 单位公章 2023 年 8 月 10 日
	法定代表人	张杰			
	委托代理人	湛瑞玲			
	联系(经办)人	湛瑞玲			
	住所 (通讯地址)	北京市丰台区五里店北里一区 4 号楼 5017 号	邮政编码	100000	
	电　　话	010-62478772			
	开户银行	中国工商银行股份有限公司北京长辛店支行			
	帐　　号	0200004819200050853			
受托人（乙方）	名称(或姓名)	河南思泰电子科技有限公司			技术合同专用章 或 单位公章 2023 年 8 月 10 日
	法定代表人	王艳			
	委托代理人	陈晶晶			
	联系(经办)人	陈晶晶			
	住所 (通讯地址)	河南自贸试验区郑州片区（郑东）升龙广场 1 号楼 A 座 1507	邮政编码	450000	
	电　　话	13903712374			
	开户银行	中原银行郑州分行营业部			
	帐　　号	4101 0101 0180 0612 03			

十一、《联合投标协议书》格式（如有）

甲方（联合体主办方）：/

法定代表人：

住所：

乙方（联合体成员）：/

法定代表人：

住所：

甲乙双方自愿组成联合体参加　/（以下简称“委托人”）组织实施的　（项目名称）项目的招投标活动，并就联合体各方之间的职责分工订立协议如下：

一、双方一致决定，以　/　为联合体主办方，　/　为联合体成员。

二、联合体主办方和成员签署此协议，就本项目的相关服务向委托人负责，对委托人承担连带责任后，甲乙双方内部按责任比例承担各自法律责任。

三、联合体主办方代表联合体成员接受委托人的任务，并负责在整个项目合同服务期内全部相关事宜。

四、本次联合投标中，甲方承担的合同份额为　/　元，约占合同金额的　%，乙方承担的合同份额为　/　元，约占合同金额的　%。联合体分工原则：

1、甲方承担服务期间_____/_____工作。

2、乙方承担服务期间_____/_____工作。

五、联合体在整个合同服务期的费用根据各自承担的工作量进行分摊，酬金由本项目委托人支付至甲方账户，甲方负责按分摊费用支付至乙方账户。

六、本协议作为合同附件，自签署之日起生效，至完成全部合同约定的工作内容后终止。联合体各方不得以任何形式对上述实质内容进行修改或撤销。

七、本协议一式两份，甲、乙双方各持一份。

甲方（联合体主办方）（盖章）：　/

法定代表人（签字或盖章）：　　日期：____年　月　日

乙方（联合体成员）（公章）：　/

法定代表人（签字或盖章）：　　日期：____年　月　日

十二、《资格条件及实质性要求响应表》

资格条件响应表

项目名称：湿地生态调查与湿地资源趋势模拟

项目内容（实质性要求）	具备的条件说明（要求）	投标检查项（响应内容说明(是/否)）	备注
法定基本条件	1、符合《中华人民共和国政府采购法》第二十二条规定的条件：营业执照（或事业单位、社会团体法人证书）、税务登记证和社保登记证（若为五证合一的仅需提供营业执照，若为三证合一的需提供营业执照和社保登记证）（若为多证合一的，仅需提供营业执照）；财务状况及税收、社会保障资金缴纳情况声明函；参加政府采购活动前三年内在经营活动中没有重大违法记录声明。 2、未被列入“信用中国”网站(www.creditchina.gov.cn)失信被执行人名单、税收违法黑名单和中国政府采购网(www.ccgp.gov.cn)政府采购严重违法失信行为记录名单的供应商。	是	
投标人资格要求	符合招标文件规定的合格投标人资质条件： 1、单位负责人为同一人或者存在直接控股、管理关系的不同供应商，不得参加本项目同一合同项下的政府采购活动。 2、法人的分支机构以法人的名义参与投标时，应提供依法登记的相关证明材料和由法人出具的对该投标活动承担全部直接责任的明确承诺（银行、保险、石油石化、电力、电信等有行业特殊情况的，其分支机构的登记注册由相关部门审批并颁发经营许可，应提供经营许可证，无需再提供法人出具的承诺函）。	是	
企业类型划分	本项目专门面向中小企业采购。	是	
联合投标	不接受联合投标。	是	

符合性响应表

项目名称：湿地生态调查与湿地资源趋势模拟

项目内容(实质性要求)	具备的条件说明（要求）	投标检查项（响应内容说明(是/否)）	备注
递交标书要求	递交标书时，提交有效法定代表人证明或者委托书的。	是	
投标保证金	投标单位按采购文件规定的要求提交投标保证金的（如有）。	是	
供应商名称一致性	供应商名称与报名时不一致且未附有效的情况说明的。	是	
联合体投标	联合体投标的，提交符合要求的联合体协议书(如有)。	是	
投标文件签署要求	投标文件按采购文件要求签署、盖章的。	是	
投标有效期	符合采购文件规定：90 日历天。	是	
投标报价	投标报价未超过该标包最高限价的。	是	
服务期	履约期限满足采购文件要求的。	是	
质量要求	自报质量满足采购文件要求的（如有）。	是	
“★”要求	符合采购文件采购需求书中标有“★”的要求(如有)。	是	
其他要求	投标文件不含有采购人不能接受的附加条件的。	是	
串围标行为	未发现以下串通投标行为的： ①未发现存在不同投标人的投标文件由同一单位或者个人编制的情况； ②未发现存在不同投标人委托同一单位或者个人办理投标事宜的情况； ③未发现存在不同投标人的投标文件载明的项目管理成员为同一人的情况； ④未发现存在不同投标人的投标文件异常一致或者投标报价呈规律性差异的情况； ⑤未发现存在不同投标人的投标文件相互混装的情况； ⑥不存在不同投标人的投标保证金从同一单位或者个人的账户转出。	是	
其他无效情形	无法律、法规和采购文件规定的其他无效情形	是	

12.1 服务期限

自合同签订之起至 2025 年 12 月 15 日。

12.2 服务标准承诺

我公司承诺：

1、我公司提供的服务应符合国家、地方及相关政府管理部门和行业与本项目有关的各项服务标准、规范、规章要求，并满足采购人实际需求，标准、规范等不一致的，以要求高的为准。

2、我公司按照工作要求编制工作计划，按月列出工作任务及阶段性产出，并定期向招标人汇报进展情况。

3、我公司对提供的报告数据的真实性、可靠性负责。

4、完成以下考核指标：

(1) 完成 2025 年横沙新洲潮滩植被分布矢量数据(.shp 格式)；

(2) 完成 2025 年横沙新洲潮滩植被分布监测报告（PDF 格式及印刷版），要求报告至少包括：监测内容、影像数据源、解译方法、质量控制、盐沼植物分布、盐沼植物变化、湿地植被变化趋势研判等内容；

(3) 完成 2025 年横沙新洲和横沙浅滩合计至少 25 个采样点的底栖动物现场采集，并于 2025 年底前完成室内鉴定工作，要求鉴定到种，获得物种名称，密度，生物量及生物多样性等参数；

(4) 完成 2025 年底栖动物监测数据 1 套（excel 格式，文本格式）；

(5) 完成 2025 年底栖动物监测报告 1 份（PDF 格式及印刷版），要求报告至少包括：底栖动物监测方法、结果、分析与评价、底栖动物变化趋势研判等内容；

(6) 完成 1 次横沙浅滩合计 3-5 个固定观测站位、50 个参数的现场水动力泥沙数据采集 1 套（excel 格式，文本格式）；

(7) 完成 2025 年横沙浅滩水动力泥沙数据监测报告 1 份（PDF 格式及印刷版），要求报告内容至少包括：现场观测方法、观测数据处理方法、观测结果、结果研判等内容。

(8) 生物地貌耦合模型。（模型文件及使用说明）

(9) 横沙浅滩短期地貌冲淤趋势预测报告（PDF 格式及印刷版），报告内容包括：横沙浅滩地貌模型架构（包括基础动力学、植被、生物地貌、生物地貌-动力耦合等各模型模块）、检验方法与结果、使用方法等说明、不同工程情景影响下的短期预

测模拟结果，对不同情景下地貌短期冲淤趋势的研判以及湿地占补平衡分析等内容。

5、我公司承诺，对招标单位提供的数据、技术咨询等形成的数据资料和工作成功进行保密，不得私自使用或泄露、提供给其他第三方使用。

投标人：河南思泰电子科技有限公司（公章）

法定代表人或授权代理人（签字或盖章）：

日期：2025 年 05 月 13 日

十三、其他证明文件

13.1 计算机软件著作权登记证书

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号：软著登字第2934172号

软 件 名 称：思泰物联网智慧房屋管理系统 V2.0

著 作 权 人：河南思泰电子科技有限公司

开发完成日期：2018年03月02日

首次发表日期：2018年03月09日

权利取得方式：原始取得

权 利 范 围：全部权利

登 记 号：2018SR605077

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。

中华人民共和国国家版权局 计算机软件著作权登记专用章

2018年08月01日

No. 02864667

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号： 软著登字第8338786号

软 件 名 称： 思泰智慧党建APP V1.0

著 作 权 人： 河南思泰电子科技有限公司

开发完成日期： 2021年04月06日

首次发表日期： 2021年04月28日

权利取得方式： 原始取得

权 利 范 围： 全部权利

登 记 号： 2021SR1616160

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。

No. 09171662

中华人民共和国国家版权局 计算机软件著作权登记专用章

2021年11月02日

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号：软著登字第5770825号

软 件 名 称：物联网进出门管理系统 V1.0

著 作 权 人：河南思泰电子科技有限公司

开发完成日期：2018年12月10日

首次发表日期：2018年12月19日

权利取得方式：原始取得

权 利 范 围：全部权利

登 记 号：2020SR0892129

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。

No. 06187152

中华人民共和国国家版权局 计算机软件著作权登记专用章

2020年08月07日

技术部分

一、 项目名称

湿地生态调查与湿地资源趋势模拟

二、 项目主要内容

（一）湿地植被监测

湿地植被监测主要内容概况：

1.工作目标及内容

2025年度计划结合4次无人机现场调查，解译卫星遥感数据，形成2025年横沙新洲潮滩度植被类型及分布变化数据，为开发横沙浅滩区域湿地地貌冲淤预测模型积累基础数据。

2.工作方法与进度

在横沙新洲开展潮滩植被监测，采用无人机、卫星遥感等手段提取横沙新洲潮滩植被面积及分布。选取空间分辨率优于2m的卫星遥感影像，对遥感图像进行预处理后建立解译标志，并选取低潮时段使用无人机进行正射投影拍摄，获取不同植被分布区域高清影像与视频，遥感解译正判率要求达到90%以上，并于12月15日前形成完成2025年植被分布图集及监测报告编写。

3.预期产出

2025年横沙新洲潮滩植被分布矢量数据(.shp格式)

2025年横沙新洲潮滩植被分布监测报告（PDF格式及印刷版）

详细技术方案：

1.1 服务工作方案

2025年度进行4次无人机现场调查，结合同期的卫星遥感数据，形成2025年横沙新洲潮滩植被类型及分布变化数据，产出2025年横沙新洲潮滩植被分布矢量数据(.shp格式)和2025年横沙新洲潮滩植被分布监测报告（PDF格式及印刷版），报告至少包括：监测内容、影像数据源、解译方法、质量控制、盐沼植被分布、盐沼植被变化、湿地植被变化趋势研判等内容，为开发横沙浅滩区域湿地地貌冲淤预测模型积累基础数据。

1.1.1 监测目标与内容

结合卫星影像数据对横沙地区湿地典型盐沼植被进行遥感解译，建立地物遥感解译

标志集，细化盐沼植被解译标志，并结合野外调查调查数据开展人机交互判读，获取横沙地区典型盐沼植被分布结果，精度不小于 90%。全面调查横沙地区典型盐沼植被的分布范围、分布面积等，获得高精度的盐沼植被分布数据，掌握沿海盐沼植被的基本信息。

数据源

由于天气等原因影响，遥感卫星影像容易受到云层覆盖的干扰，且不同植物光谱物候特征在不同季节的差异不同，因此，以不同季节多期遥感影像作为解译数据源，获取盐沼植物本底分布范围。可能参考的影像包括吉林长广、四维高景、高分系列等，将可用卫星参数列举如下（表 1.1、表 1.2、表 1.3）

吉林一号卫星具有高分辨率、大范围、重访周期短等特点，具备红、绿、蓝、近红外四个多光谱波段和一个全色波段，波段融合后空间分辨率可达到 0.5 m 左右，其卫星参数见表 1.1。

四维高景卫星综合利用高分与宽幅成像手段，大幅宽数据不仅提高了影像间的一致性，而且大幅提升了遥感卫星数据匀色、镶嵌的效率，并且该卫星具备 9 个波段，在常见全色、红、绿、蓝、近红外波段基础上，新增沿海气溶胶、黄、红边和近红外 2 等 4 个波段，在去云去雾、林地分类、植被监测等遥感监测中应用较好，其卫星参数见表 1.2。

高分一号是中国高分系列对地观测卫星的第一颗，拥有 2 米全色/8 米多光谱的成像能力，重访周期达到 4 天一次，被广泛应用于国土资源调查、农业监测、环境保护、城市规划、灾害管理等多个领域。该卫星涵盖蓝、绿、红和近红外 4 个波段，空间分辨率达到 8 m，全色波段分辨率达到 2 m，其卫星参数见表 1.3。

结合多时相的遥感卫星影像，实现对横沙沿岸盐沼植被分布区域的覆盖，且空间分辨率达到亚米级，能够有效对横沙地区盐沼植被进行遥感监督分类。

影像质量

影像要求灰度范围总体呈正态分布，植被特征纹理清晰，调查区内不能有云、雾等遮挡，无明显噪声，像素无缺失。

影像重叠

相邻影像间的重叠范围不应少于整景影像的 10%。

表 1.1 吉林一号卫星参数

序号	波谱范围	空间分辨率	幅宽	重访周期
B1	450-510 nm	2 m	优于 150 km	-
B2	510-580 nm			
B3	630-690 nm			
B4	770-895 nm			
PAN	450-700 nm	0.5 m		

表 1.2 四维高景三号 01 星卫星参数

序号	波谱范围	空间分辨率	幅宽	重访周期
B1	450-520 nm	2.4 m	130 km	0.42-3.31 天
B2	520-590 nm			
B3	630-690 nm			
B4	770-890 nm			
B5	400-450 nm			
B6	585-625 nm			
B7	705-745 nm			
B8	860-1040 nm			
PAN	450-800 nm	0.5 m		

表 1.3 高分一号卫星参数

序号	波谱范围	空间分辨率	幅宽	重访周期
B1	450-520 nm	8 m	60 km	4 天
B2	520-590 nm			
B3	630-690 nm			
B4	770-890 nm			
PAN	450-900 nm	2 m		

遥感影像预处理

为保证遥感数据解译的准确性，必先对遥感图像进行预处理。遥感影像预处理主要包括：辐射校正、几何精校正、图像融合、图像镶嵌、图像增强等。

1.3.1 遥感影像辐射校正

电磁波在大气层中传输和传感器测量中受到遥感传感器本身、地物光照条件（地形影响和太阳高度角影响）以及大气作用等影响，导致的遥感传感器测量值与地物实际的光谱辐射率不一致的现象叫做辐射畸变。对辐射畸变进行校正的过程就叫做辐射校正。

辐射畸变产生的原因具体而言有：传感器本身的因素、大气的因素、太阳的因素。传感器本身的因素包括光学摄像机引起的辐射误差和光电扫描仪引起的辐射误差，后者包括光电转换误差和探测器增益变化产生的误差。校正方法有：1、传感器标定法，即通过分析辐射失真的过程，建立辐射失真模型，利用逆过程校正；2、利用实地测量测量值，进行线性回归计算。

大气的因素包括大气的消光、天空光照射和程辐射。校正方法有：1、野外波谱测试回归分析法；2、波段对比法（如回归分析法，直方图法）；3、辐射传输模型法（如 6s 模型、LOWTRAN 模型、MORTRAN 模型等）。

太阳的因素包括太阳的位置和地表的起伏对辐射传输过程的影响。针对太阳位置校正，方法有：1、公式法；2、波段比值法。针对地形起伏校正，方法有：1、比值法；2、模型法。

对于由传感器引起的辐射误差和由太阳高度引起的辐射误差，购买的 SPOT-7 数据在生产过程中已经过校正，因此需要对 SPOT-7 数据进行下一步大气校正。在 ENVI5.1 中对影像数据进行 FLAASH 大气校正：

首先进行参数的确定：

图像中心点坐标：从影像元数据中得出；

海拔高度：由 DEM 计算得出；

像元大小：根据影像空间分辨率得出；

数据获取时间：从影像元数据中得出；

大气模型：根据成像时间和纬度信息选择；

气溶胶模型：根据影像地理位置选择。

其余参数按照默认设置。

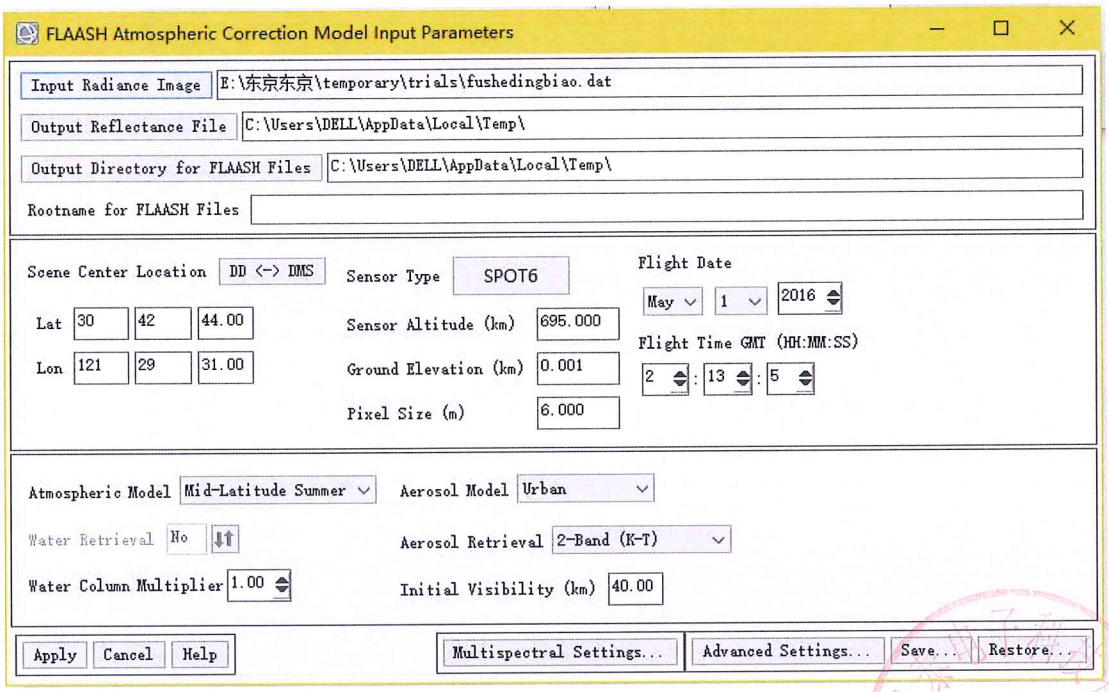


图 1.1 FLAASH 大气校正参数设置

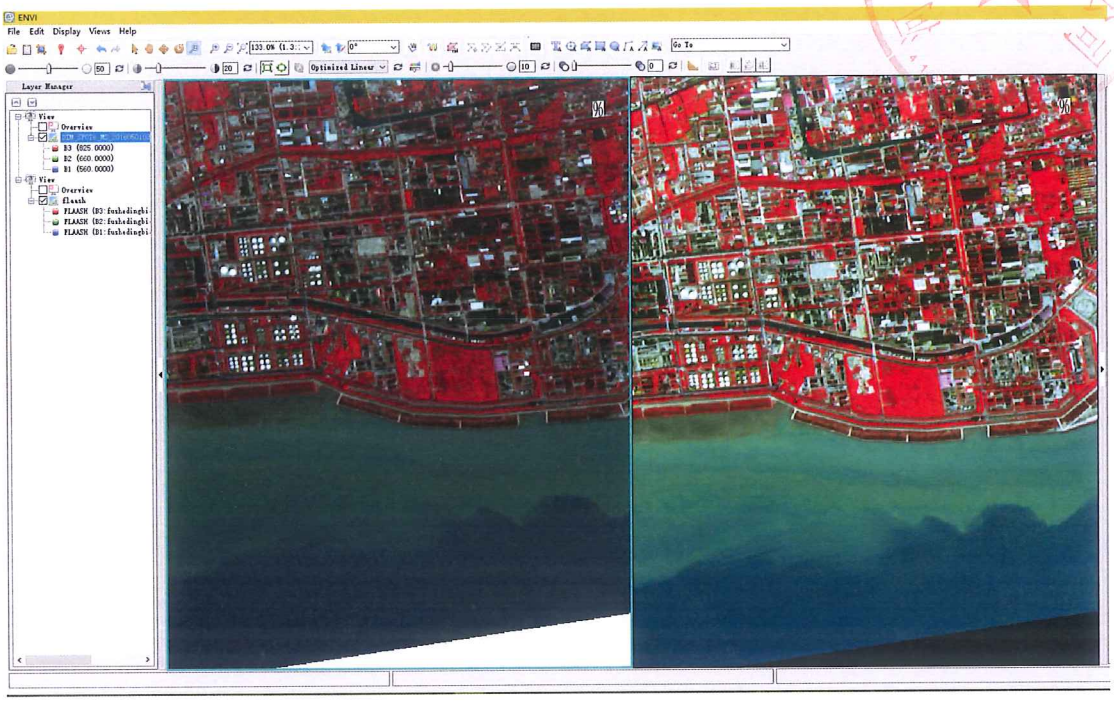


图 1.2 大气校正前后效果对比（左为大气校正前，右为大气校正后）

几何精校正

遥感图像发生几何畸变的原因主要有三类：（1）遥感器的内部畸变：由遥感器结构引起的畸变，如遥感器扫描运动中的非直线性等；（2）遥感平台的运行状态：包括由于平

台的高度变化、速度变化、轨道偏移及姿态变化引起的图像畸变；（3）地球本身对遥感影像的影响：包括地球的自转、高程的变化、地球曲率、大气折射等引起的图像畸变。对几何畸变的校正即为几何校正。

几何校正常用的是几何精校正方法，该方法通过控制点构建多项式纠正方程，以建立原始畸变图像空间与标准图像空间的对应关系，实现不同图像空间中像元位置的变换，并通过重采样的方法计算变换后新像元的亮度值。这种方法适用于在地面平坦，不需考虑高程信息，或地面起伏较大而无高程信息，以及传感器的位置和姿态参数无法获取的情况。

控制点的数目需要按照多项式方程中未知数的多少来确定，K 阶多项式控制点的最小数目为（k+1）(K+2)/2。控制点应该尽可能满幅均匀选取并选取影像上易分辨且较精细的特征点，如道路交叉点、河流弯曲或分叉处、海岸线弯曲处等。特征变化大的地区应多选取控制点，影像边缘部分必须选取控制点，以避免外推。

几何精校正采用统一的地理坐标系统。根据 1:10000 比例尺地形图对每景遥感影像选合适数量的地物控制点，控制点在图像上明显清晰、相对稳定且均匀分布，多幅数据重叠区适当选取多个控制点。对控制点点位进行记录并长期保存，以便下一期调查时使用。现场获取的影像控制点在整景影像上空间分布相对均匀，且在两景影像重叠区影像控制点不少于 2 个，采用几何多项式模型校正（参考《DD 2013-12 多光谱遥感数据处理技术规程》）。影像控制点平面中误差不超过半个像元。

图像融合

图像融合是将多源遥感数据在统一的地理坐标系中，采用一定的算法生成一组新的信息或合成图像的过程。不同的遥感数据具有不同的空间分辨率、波谱分辨率和时相分辨率，如果能将它们各自的优势综合起来，可以弥补单一图像上的信息不足，这样不仅扩大了各自信息的应用范围，而且大大提高了遥感影像分析的精度。

常见的融合方法有 IHS 变换、Brovey 变换、乘积运算、PCA 变换、Gram-schmidt 融合。

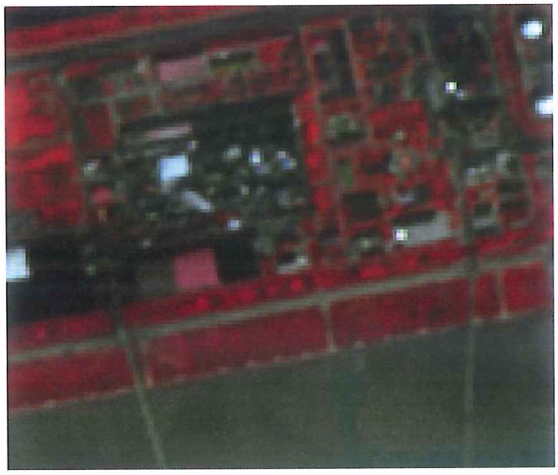
IHS 变换是先将 RGB 彩色图像通过 IHS 空间变换转换到饱和度（saturation，简称 S）、色度（hue，简称 H）和亮度（intensity，简称 I）颜色空间，再用高分辨率的图像代替亮度值波段，并将色度和饱和度重采样到高分辨率像元尺寸上，最后把图像变换回 RGB 颜色空间。此方法能够改善纹理特征，对空间信息保存较好，但是光谱信息损失较大，且受波段限制。

Brovey 变换是对 RGB 图像和高分辨率图像进行数学合成，从而使图像融合，即通过将 RGB 图像中的每一个波段都乘以高分辨率图像与 RGB 图像波段总和的比值，然后将 3 个新的 RGB 波段重采样到高分辨率像元尺寸上。此方法对光谱信息保存较好，但受波段限制。

乘积运算根据高分辨率图像波段的波谱范围，将低分辨率图像的波段划分为各个波谱单元。对于各个波谱单元，将每个低分辨率波段乘以高分辨率波段，再除以波段单位中的输入波段总数，从而完成归一化。此方法对大的地貌类型融合效果好，并可用于多光谱与高光谱影像的融合。

PCA 变换先对多光谱数据进行主成分变换，在高分辨率波段成功匹配到第一主成分波段之后，用高分辨率波段替换第一主成分波段，然后进行主成分反变换得到融合成功的图像。此方法无波段限制，对光谱信息保存较好。但因为第一主成分信息高度集中，所以色调会发生较大变化。

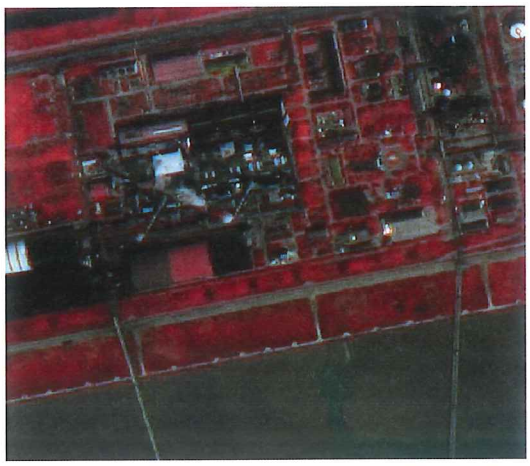
Gram-schmidt 方法先从低分辨率的波段中复制出一个全色波段，再对复制出的全色波段和多波段进行 Gram-Schmidt 变换，其中全色波段被用作第一个波段。接下来用高空间分辨率的全色波段替换 Gram-Schmidt 变换后的第一个波段，最后应用 Gram-Schmidt 反变换得到融合成功的图像。此方法改进了 PCA 变换中信息过分集中的问题，不受波段限制，又能较好地保存空间纹理信息，尤其能高保真保存光谱特征。



原始多光谱图像

HIS 变换

Brovey 变换



乘积运算

PCA 变换

Gram-schmidt 融合

图 1.3 图像融合方法效果比对（RGB=4,3,2）

图像镶嵌

图像镶嵌即对一幅或若干幅图像通过预处理、几何镶嵌、色调调整、去重叠等处理，镶嵌到一起生成一幅大的图像的影像处理方法。要求镶嵌后的影像尽量没有镶嵌缝，图像质量不下降，色彩均衡，无鬼影。图像镶嵌技术作为图像融合技术的一种，一般指同类型间图像融合。需要注意镶嵌的两幅或多幅影像应当选择相同或相近的成像时间，使得图像的色调保持一致。

图像增强

图像增强是指对图像的某些特征，如边缘、轮廓、对比度进行强调或尖锐化，以便于显示、观察或进一步地分析与处理。图像增强不增加图像数据中的相关信息，但它将增加所选择特征的动态范围，从而使这些特征检测或识别更加容易。

图像增强可分为空间域增强、频率域增强。前者是通过改变单个像元及其相邻像元的灰度值来增强图像，后者则通过对图像进行傅立叶变换，然后对变换后的频率域图像进行修改，达到增强的目的。

空间域增强可分为点运算、邻域增强、彩色增强。点运算是指输出图像的每个像素点的灰度值由输入像素点决定，主要方法有图像拉伸、直方图均衡化、直方图规定化以及图像间运算。邻域增强主要通过定义卷积模板对图像进行滤波处理，卷积滤波是通过消除特定的空间频率来增强图像。邻域增强根据目的可分为平滑和锐化。主要方法有均值平滑、中值滤波、拉普拉斯算子锐化、索博尔锐化、罗伯特锐化。彩色增强是指用多波段的黑白遥感图像，通过各种方法和手段进行彩色合成或彩色显示，以突出不同地物之间的差别，提高解译效果。主要方法有伪彩色增强、假彩色增强和彩色变换。

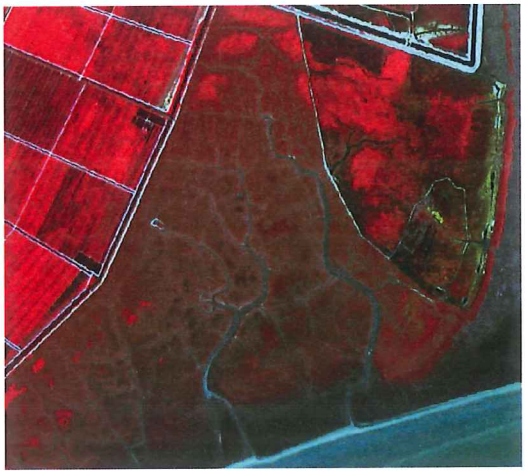
频率域增强可分为低通滤波、高通滤波和同态滤波。在频率域增强技术中，平滑主要是保留图像的低频部分抑制高频部分，锐化则保留图像的高频部分而削弱低频部分。

常用的图像增强方法是图像拉伸。在 ENVI5.1 中分别用线性拉伸、直方图均衡化、高斯拉伸、平方根拉伸、分段线性拉伸对崇明东滩地区进行图像增强，效果见图 3.7。图像拉伸通过拉伸图像的灰度直方图来调整图像显示的对比度，从而突出前景与背景的灰度差别，提高图像目视效果，是最基本的图像处理方法。

原始图像

线性拉伸

直方图均衡化



高斯拉伸

平方根拉伸

分段线性拉伸

图 1.4 图像增强方法效果比对（RGB=4,3,2）

无人机现场验证

无人机数据来源于大疆御 3 行业版无人机，该款飞机配备机械快门、广角相机、56 倍变焦相机及 RTK 模块，测绘精度和效率均可满足本项目要求（图 1.5）。

数据采集时选择秋冬低潮位时间段，飞行高度为 100-120 m，可见光影像地面分辨率（GSD）为 3-4 cm/pixel，为保证影像后期重建精度，拍摄时航向重叠率为 80%，旁向重叠率为 70%。

图 1.5 大疆御 3E 无人机

图 1.5 大疆御 3E 无人机数据采集后使用大疆智图软件进行二维重建（图 1.6），二维重建成果为 TIFF 格式的正射影像（DOM）和相应的数字表面模型（DSM）数据。

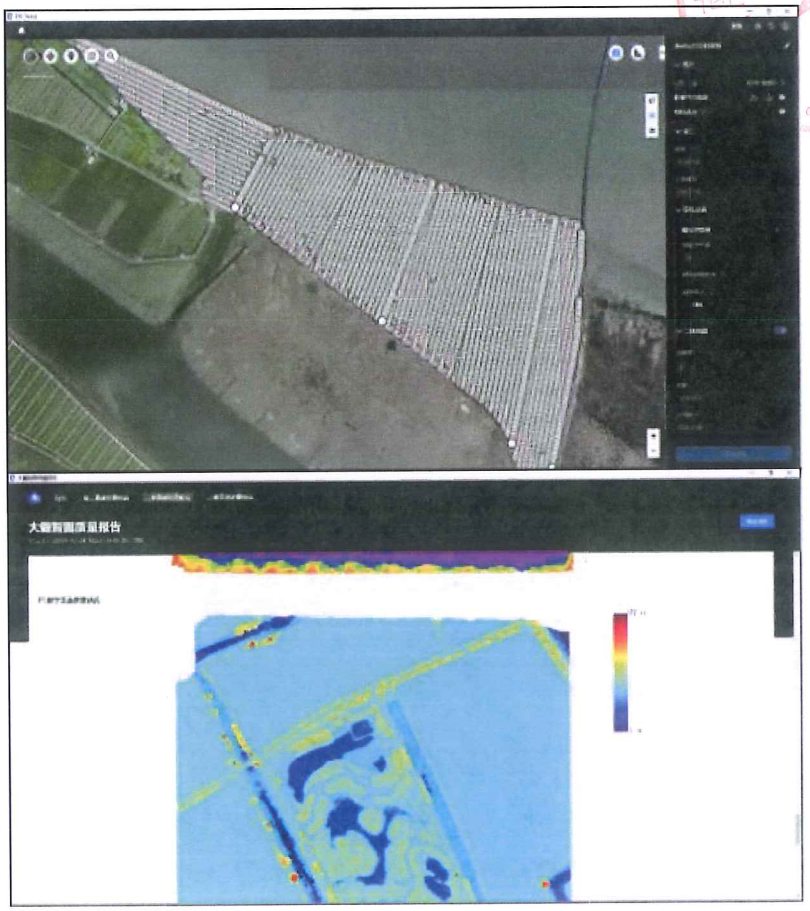


图 1.6 无人机影像重建

在监督分类后，对于目视判读无法进行准确判别或解译标志中的典型互花米草生长

区域，确定其经纬度范围后，使用无人机进行拍摄，获取高清的影像与视频。根据实地调查结果与分辨率较高的无人机影像相结合作为“真值”与互花米草分类结果建立混淆矩阵，确保总体分类精度达到95%以上。若精度未达要求，则重新分析分类结果中的错误，重新修正训练样本，再次进行影像分类。

1.2 遥感影像监督分类

影像解译标志

遥感解译标志是指在遥感图像上能具有反映和判别湿地地物的影响特征。湿地遥感解译标志构建主要根据影像颜色、阴影、大小、形状、纹理、图案、地理位置、空间组合等要素，逐一建立起各种湿地类型影像和相对应地面地物之间的关联特征和关系。以此为基础，对遥感图像进行全面分析、推理与判断，达到识别出各种湿地对象的目的。

室内预建

室内全面观察全市区域遥感影像，参考文献资料，了解区域内地形地貌、湿地类型特征分布情况及交通情况，根据解译任务的需要，在项目判读分类系统下，初步制定所要建立解译标志的类型、数量，并选取相应的调查建标样线。选取的野外踏查样线应满足湿地类型齐全、遥感影像特征全面、有充分代表性。

样线选择

本次调查共选设10条调查线，覆盖调查范围内的各个区县。选设原则为：在遥感假彩色上色彩齐全、对工作区有充分代表性、实况资料好、类型齐、交通方便等。

路线调查

通过对遥感假彩色相片的识别、利用GPS等定位工具，建立起直观影像特征和地面实况的关系。主要步骤有：根据GPS、遥感图、地形图、向导人员现地定位找到调查图斑；植被类型判断、植被现地判读；表格因子逐项填写；现地拍照记录（植被全貌、植被、工作照、周边环境照）。

室内分析

根据野外调查确定的影响和地物间的对应关系，借助有关辅助信息（湿地图、多源遥感影像、高程信息及有关物猴等资料），建立多源遥感影像上反映的色调、形状、图形、纹理、相关分布、地域分布等特征与响应判读类型之间的相关关系。

制定统一解译标准

通过野外调查和室内分析对判读类型的定义、现地景观形成统一认识，并对各类型在遥感信息影响上的反应特征的描述形成统一标准，形成判读标志，填写判读解译标志表。

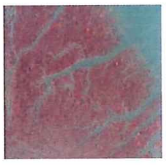
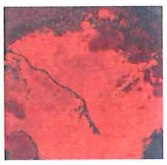
利用影像波段组合和拉伸计算，显示不同盐沼植被的特征，将现场解译照片、不同波段组合或计算得到的遥感影像与分类体系一一对应，建立上海市盐沼植被遥感解译标志集，填写遥感解译标志集信息表（表 1.4）。

通过目视判读和建立后的解译标志表，对不同卫星影像上芦苇、互花米草、海三棱藨草和菰分别选取一定数量的训练样本，用于后续的卫星影像解译。

遥感影像监督分类

对卫星影像采用面向对象方法进行不同盐沼植被的分类与识别，面向对象分类算法最重要的特点就是分类的最小单元不是像元，而是由影像分割得到的同质影像对象，也称为图斑。面向对象分类技术集合临近像元为对象用来识别感兴趣的光谱要素，充分利用高分辨率的全色和多光谱数据的空间，纹理，和光谱信息来分割和分类的特点，以高精度的分类结果或者矢量输出。它主要分成两部分过程：对象构建和对象的分类。

表 1.4 盐沼植被遥感解译标志集信息表

类型	现场照片	吉林一号 影像特征 R：B4 G：B2 B：B1	四维高景 影像特征 R：B4 G：B2 B：B1	高分一号 影像特征 R：B4 G：B2 B：B1	特征描述
互花米草					红色，纹理明显
芦苇					深红色，相对粗糙，斑块状
海三棱藨草					暗红色，无明显的纹理特征
菰		-			亮红色，相对平滑，颜色均匀

面向对象分类方法不仅利用地物本身的光谱信息，而且充分利用地物的空间信息，包括形状、纹理、面积、大小等要素，可以使地物分类结果更接近现实中的形状。运用多尺度分割与光谱差异分割结合，将整幅影像的像素层进行分组，形成分割对象层。

应用 ENVI 5.6 平台，使用“基于样本的特征提取（Example Based Feature Extraction Workflow）”工具对四维高景和吉林长光卫星影像进行面向对象分类。

多尺度分割

选择 Band3 红色波段和 Band4 近红外波段计算归一化植被指数（NDVI），勾选 Color Space 用于 RGB 计算 HIS 空间，对应波段顺序为 321，根据像元的亮度、纹理、光谱等特征对遥感影像进行多尺度分割（图 1.7）。

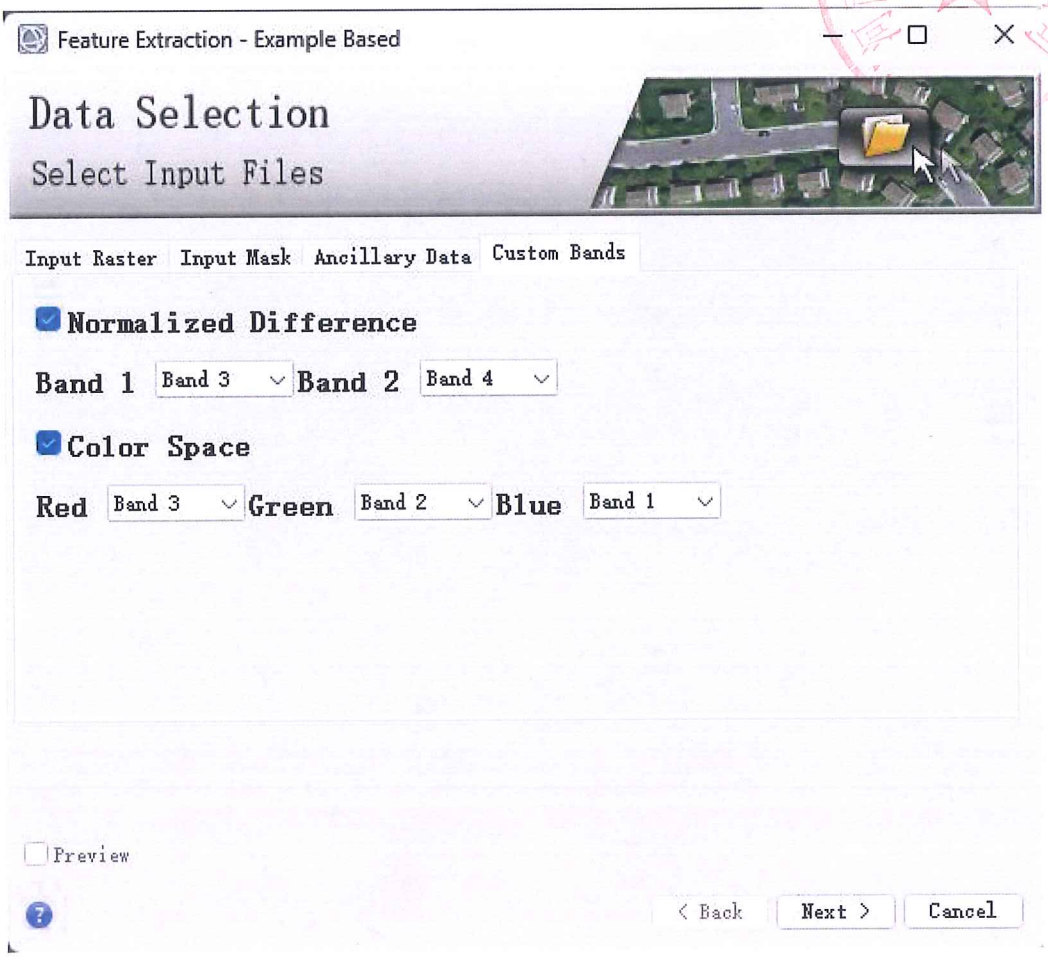


图 1.7 多尺度分割

特征的分割和合并

分割完成后，进入到对象创建的过程中，包括特征的分割合并（图 1.8）。选择高尺度影像分割阈值，将会分出很少的图斑，选择低尺度影像分割阈值将会分割出更多的图斑，

分割效果的好坏一定程度决定了分类效果的精确度。影像分割时，由于阈值过低，一些特征会被错分，一个特征也有可能被分成很多部分，则通过合并来解决这些问题。

本项目使用基于边缘的分割算法，根据临近像素亮度、纹理、颜色等对影像进行分割，同时考虑数据需要兼顾光滩等大范围图斑，以及前沿互花米草新生小图斑，分割阈值和合并阈值分别设置为 30 和 90，分割和合并效果见图 1.9。

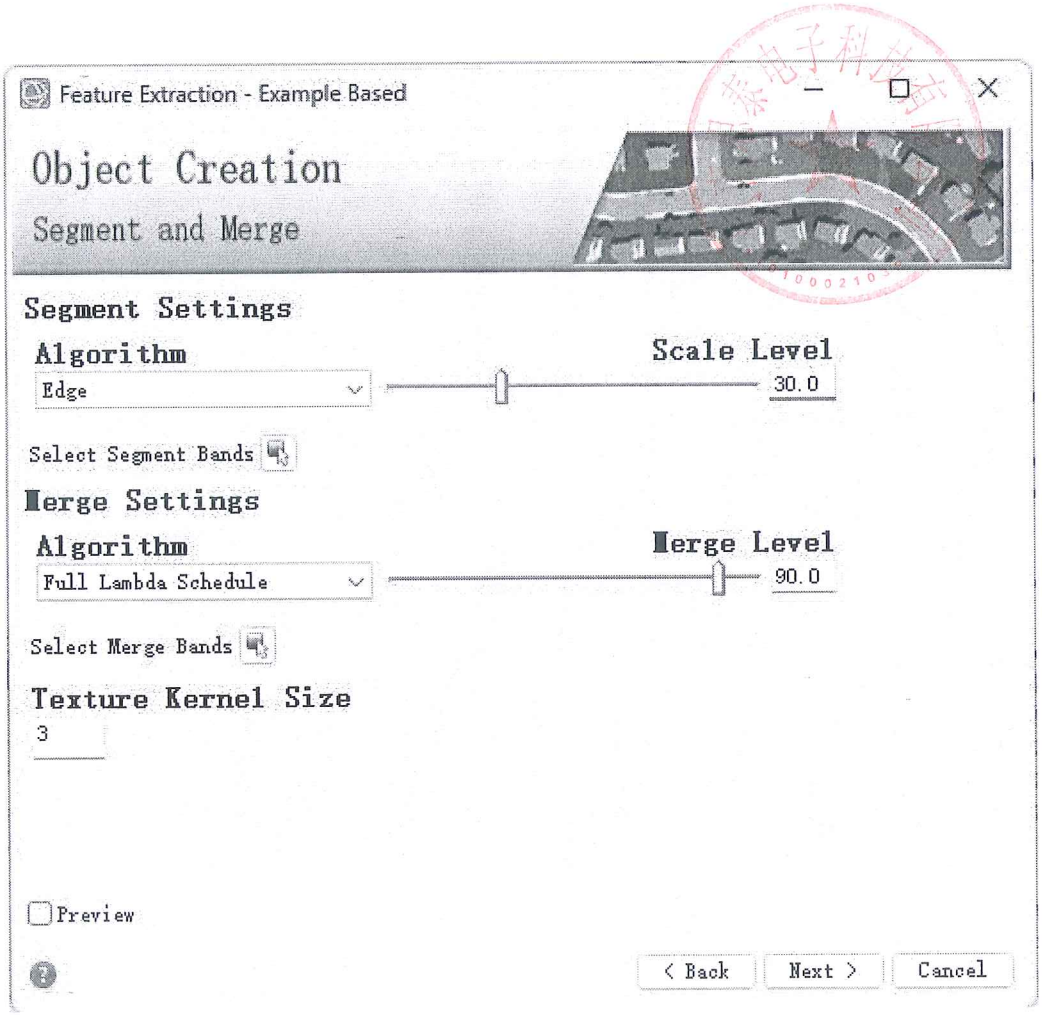


图 1.8 分割、合并阈值设置

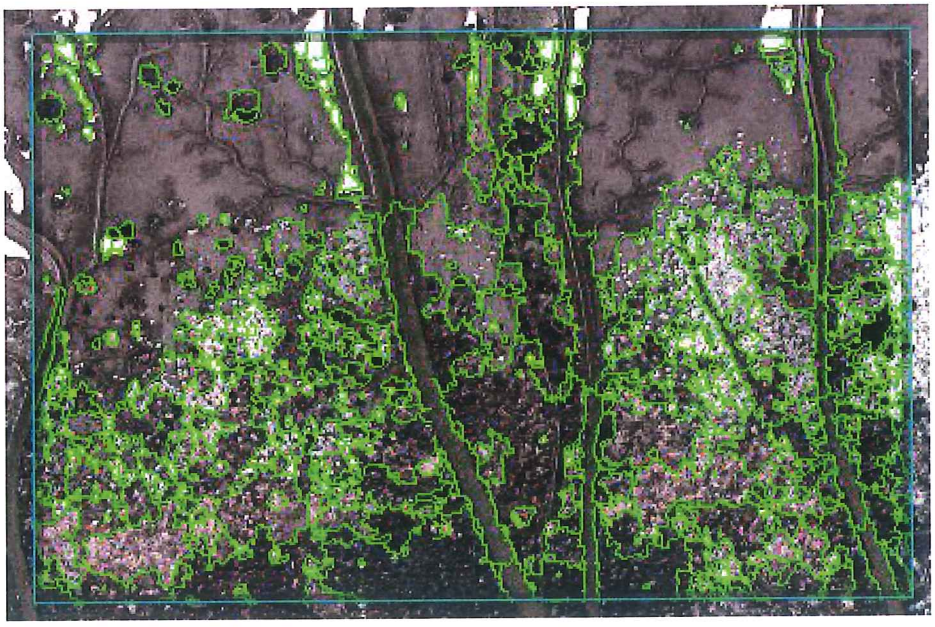


图 1.9 面向对象方法预期分割和合并效果

基于样本的盐沼植被分类

影像分割和合并后，导入构建好的样本数据，选择所有特征属性后，选择支持向量机（SVM）分类算法。支持向量机是一种来源统计学习理论的分类方法，作为一种监督学习模型，对解决二分类问题效果较好，在遥感分类和识别领域有着广泛的应用。经比较，该方法得到的分类结果优于 ENVI 平台提供的 K 邻近法（KNN）和主成分分析法（PCA），确定参数阈值后对数据执行分类即可得到盐沼植被解译结果（图 1.10）。

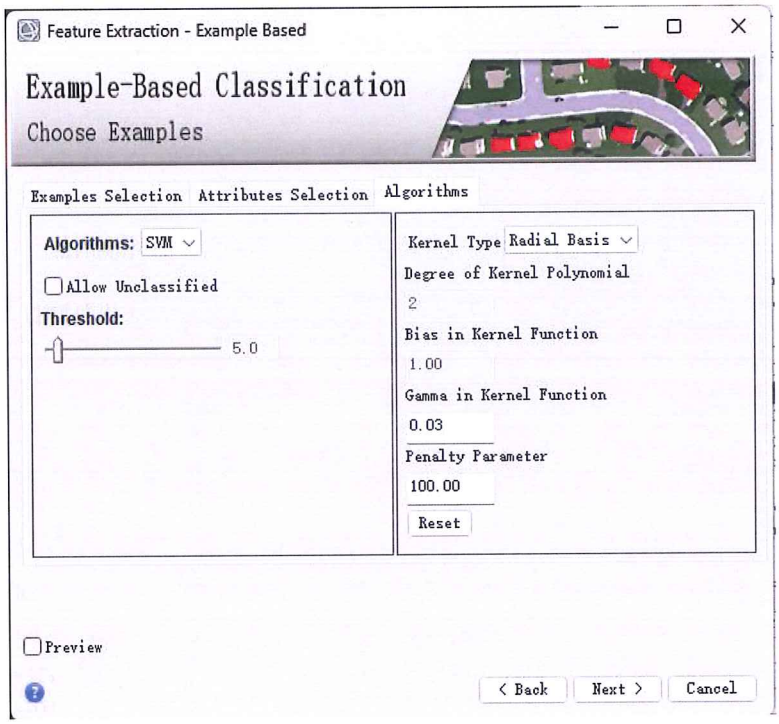


图 1.10 支持向量机分类

1.3 质量控制

在各种遥感影像精度评估的技术中，由图像分类所得的混淆矩阵演化而来的变化检测误差矩阵作为一种定量的评价方法，是目前精度评估的主要方式。混淆矩阵每列数值代表实际类别的样本对象在各个类别下的数量，每行数值则代表模型预测的样本对象在各个类别下的数量。本文采用混淆矩阵计算出的两个关键性指标总体精度（overall accuracy，OA）和Kappa 系数对分类提取结果进行精度评定。

在监督分类后，对于目视判读无法进行准确判别或解译标志中的典型盐沼植被生长区域，确定其经纬度范围后，使用无人机进行拍摄，获取高清的影像与视频。根据实地调查结果与分辨率较高的无人机影像解译结果相结合作为“真值”与盐沼植被分类结果建立混淆矩阵，确保总体分类精度达到 95%以上。若精度未达要求，则重新分析分类结果中的错误，重新修正训练样本，再次进行影像分类。

1.4 横沙地区近岸海域典型植被介绍

上海市北接长江口，东临东海，南濒杭州湾，西靠太湖湖群，是一个在冲击平原上形成的滨海城市，滨海湿地植物是上海市野生植物资源中重要的组成部分。上海滨海湿地类型多样，包括淤泥质海滩、潮间盐水沼泽、潮间森林沼泽等类型，为多种不同生境需求的湿地植物提供了丰富多样的生长空间，因而造就了上海滨海湿地植物区系成分较为复杂，种类丰富多样的特点。

以下介绍一些常见植被的分布区与生境和形态特征。

（1） 芦苇 *Phragmites australis*

芦苇作为上海原生种或栽培种，是长江盐沼湿地高潮滩和河湖浅水处的优势物种之一，滨海湿地、田边荒野、池塘浅水等各种湿地均有分布。芦苇为多年生草本植物，秆直立，具 20 多节，节下被有腊粉。叶片披针状，长 30cm，宽 2cm，深绿色。大型圆锥花序顶生，长 20~40cm；小穗长约 1.2cm，含 4 朵花，下垂，顶端有丝状柔毛。花果期 7-10 月。芦苇与芦竹株型相似，但芦苇较细弱，高 1~4m，且质脆易折断；芦竹更高大，高 3~6m.

（2） 互花米草 *Spartina alterniflora*

互花米草原产于美国东南部海岸，在美国西部和欧洲海岸归化，广泛分布于中国东部沿海盐沼湿地中。互花米草为上海外来入侵物种，据以往调查，广布于崇明东滩、九段沙、金山、奉贤、南汇边滩、横沙东滩等长江口滨海湿地中。互花米草为多年生草本，茎秆坚韧

直立，丛生。叶互生，长披针型，长可达 90cm，宽 1.5~2cm，光滑无毛，具盐腺，叶表面常有白色粉状盐霜出现。花两性，圆锥花序长 20~45cm，具多个穗状花序，小穗侧扁。花果期 7-10 月。互花米草与芦苇生态位相近，分布范围有交叉，易混淆。与芦苇相比，互花米草叶片更细长，易卷曲，颜色嫩绿，顶端无丝状毛。

（3）海三棱藨草/藨草 *Scirpus × mariqueter/ Scirpus triqueter*

海三棱藨草为长江口滨海湿地特有种。作为先锋种，生于潮汐作用下的潮间带湿地前沿，崇明东滩、金山、奉贤、南汇边滩、九段沙、横沙东滩等自然滩涂植被前沿均有分布。海三棱藨草为多年生草本。根状球茎匍匐，秆高 25~40cm，三棱形。叶片 2 枚，短于秆，宽 0.2~0.3cm。苞片 2 枚；小穗单个，假侧生，无柄，广卵形，长 0.8~1.2cm，具多数花。小坚果倒卵状三角形，深褐色。

藨草在我国除广东和海南岛外广泛分布。生长在水沟、水塘或潮间带湿地。据以往调查，崇明东滩、金山、奉贤、南汇边滩、九段沙、横沙东滩、跑台湾湿地等地的前沿偏淡水处均有分布。藨草为多年生草本。根状茎长、匍匐，干时呈红棕色。秆散生，粗壮，圆三棱形。叶片扁平。苞片 1 枚，三棱形；聚伞花序假侧生，有 1~8 根三棱形辐射枝；每根辐射枝顶端有 1~8 个小穗；小穗卵形，密生很多花。花果期 6-9 月。

海三棱藨草与藨草的形态特征十分相似，区别在于：海三棱藨草秆三棱形，棱较尖锐，小穗单个；藨草秆圆三棱形，小穗多个。

（4）菰 *Zizania latifolia*

菰产于华东、华中、华南、西南以及吉林、辽宁、河北、陕西等地。上海原生种或栽培种，水生或沼生。据以往调查，青浦区淀山湖、大莲湖区及其他郊县浅水处有栽培，江亚南沙、南汇边滩、炮台湾湿地等自然滩涂中有分布。菰为多年生草本，秆高大直立，具多数节，基部节生不定根。叶鞘长于其节间，肥厚；叶片扁平宽大，长 50~90cm，宽 1.5~3.5cm。圆锥花序长 30~50cm，分枝多数簇生；小穗单性，有 1 朵小花。花果期 7-9 月。菰与芦苇相比，最大的不同在于菰叶片更宽大，呈条带状，常下垂。

芦苇　　海三棱藨草

菰　　互花米草

图 1.11 各植被图片

1.5 已有研究基础

《近岸海域互花米草现状调查》项目

调查采用分辨率 2m 以上光学、雷达遥感影像，包括 SPOT6/7、航空遥感、高分遥感、Sentinel-1 数据，通过野外调查与室内遥感解译相结合的方式，调查记录上海市自然滩涂中 5 种典型植被类型的在上海近岸海域分布范围，面积大小。内业遥感解译采用影像融合增强、植被指数计算、最大似然法监督分类、面向对象统计、基于专家知识的决策树分类、人机交互验证的方法。外业调查在 2018 年 8-9 月之间分批次进行，共布设样线 65 条，记录样点 639 个，获得照片数据 1239 张，视频 29 段。

除传统光学遥感方法外，雷达微波遥感也可应用于盐沼植物监测，通过特征值的增加提升盐沼植物分类精度。

微波遥感原理

微波遥感（Microwave remote sensing）是以外空间、大气和地球为主要研究对象，通过微波传感器获取来自研究目标的散射、反射或辐射的微波信号，再通过一定的图像处理技术使人们获得感兴趣的目标信息的一门技术（苗俊刚等，2013）。微波的波长范围为 1 mm-1 m（频率介于 300 MHz 到 300 GHz 之间），该特性使得微波遥感可以不受天气的制约而进行全天候、全天时的观测。

在使用雷达卫星上的微波传感器进行对地观测时，卫星发射的微波信号必须穿过位于传感器和目标物之间的大气层，故会与大气层中的微小物质发生复杂的相互作用，从而引起信号的衰减（Signal attenuation）。因为大气中微分子对微波信号的吸收和散射，微波的强度与传输距离成指数级的衰减关系。大气对微波信号的衰减作用的程度，不仅仅取决于大气成分及其相应的物理性质，很大程度上更与电磁波的波长有关。总的来讲，电磁波的波长越长，则大气微粒对电磁波信号的衰减作用越微弱。一般来说，当频率超过 10 GHz 时，电磁波的传输就会受到大气的影响。当传输器的频率很高时，包括云层、雨滴和氧分子对微波的吸收和散射便不可忽略，而审慎选择发射器的频率就可以避免一定程度的衰减。而对于 SAR 卫星而言，因为其波长远大于云层、雨滴和氧分子的粒径，故它们对雷达波的衰减作用可以忽略不计，这也是 SAR 卫星的对地观测不受天气影响的原因。

在有植被的区域，雷达来波与植被和地表同时发生作用。雷达信号的部分能量被消耗吸收，剩余的能量被反射回到传感器。雷达回波的强度，不仅取决于目标物的尺寸（Size）、密度（Density）、形状（Shape）、粗糙度（Roughness）和 复介电常数（Dielectric constant），

同时也和雷达自身的系统参数有关，如入射角（Incidence angle）、极化方式（Polarization）、波长（Wavelength）等（Kiage 等，2005）。举例来说，复介电常数是指一个反射面对雷达信号衰减或传输的能力。植被的叶片在生长期的水分比枯萎期更高，故此时复介电常数更高，这就意味着在生长期的反射回波信号可能要比枯萎期更强。雷达信号对植被冠层的穿透能力也与雷达的系统参数有关，如前所述，L 波段的雷达信号波，其穿透能力要强于 C 波段的雷达波。因此，qw 可以把雷达的后向散射系数看作是一个函数，其中的变量包括诸多因素，当不考虑其他变量时（或者当其他变量的变化范围很小，不足以对后向散射截面的大小造成较大影响），雷达的信号回波能很好的反映植被的种类，可以通过分析回波信息来获取植被空间分布的实际状况。

微波的散射机制

表面散射

在两个均匀介质的分界面，当电磁波从一个介质中射入时，会在分界面上产生散射，这种散射叫表面散射（Surface Scattering）。在地表和海面等面上发生的微波散射就是表面散射。表面散射的强度与介质的复介电常数呈正性相关关系，也就是说，复介电常数越大，则雷达卫星的回波信号越强。表面散射角的特性由散射表面的粗糙度决定。由光滑表面引起的电磁波反射，则叫做镜面散射（Specular scattering）。它在与入射角相反的方向具有较大的散射成分，因为雷达卫星接收回波的方向与入射方向一致，故当镜面散射发生时，雷达卫星接收的回波信号十分微弱，在 SAR 图像上表现为灰暗区域。随机表面散射的程度，取决于采用的微波波长与观测物体的表面粗糙度的特征尺度之间的相对关系。图 1.12 展示了雷达来波与不同粗糙度散射面发生表面散射的示意图。可以看出，在表面散射机制中，散射面的粗糙度是十分重要的。

一般来说，雷达散射截面面积是入射角和散射方向的函数，而在雷达遥感中，所观测到的散射波的方向是来自于入射角方向，因此这个方向上的散射又被称为后向散射（Back scattering）。

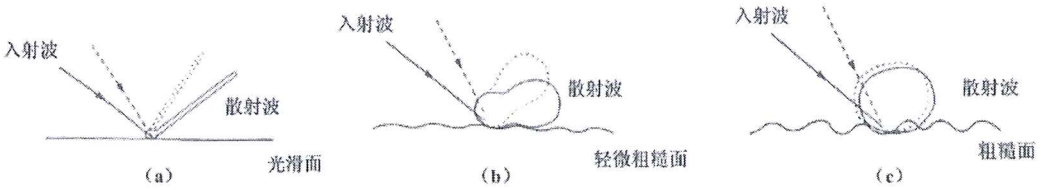


图 1.12 雷达波与不同粗糙度散射面表面散射示意图

体散射

当电磁波通过某一界面，从一种介质进入到另一种介质中时，在介质内部产生的散射叫做体散射（Volume scattering）。研究表明，体散射的散射强度与散射介质密度的不均匀性和体内的不连续性成正性相关关系。它的散射角特性取决于介质内的不连续性、介质表面的粗糙度、介质的复介电常数与波长之间的关系（图 1.13）。

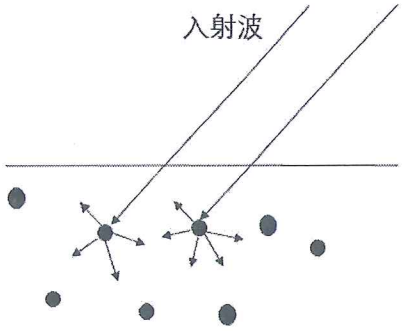


图 1.13 体散射示意图

潮间带盐沼湿地后向散射机制

在有植被的潮间带盐沼地区，SAR 卫星发射的雷达波与地表和植被同时发生作用。雷达回波的大小，不仅取决于目标散射体的尺寸，密度，形状和介电常数等，也与 SAR 卫星本身的系统特征有关，如雷达入射角，极化方式和波长等（Ulaby 等，1989）。雷达波对植被冠层的穿透性与波长有很大关系，波长较长的 L 波段，可以穿透茂密的灌木林和森林，而 C 波段则最有利于识别植被下方有水体的禾本植被 。

在有禾本植被生长的潮滩地区，雷达波发生的散射机制与潮位的高低密切相关。当土壤干燥时，多种散射机制将在植被和地表之间发生，地表能减弱部分雷达来波，散射回雷达卫星传感器的回波将会被减弱。当土壤湿润时，因为湿润的土壤具有更高的复介电常数，湿润的地表将会减弱雷达来波在植被和地表之间的传输，从而加强后向散射的强度。当禾本植被被处于不同程度的浸水状况下时，雷达波的散射机制大致可以分为四大类：面散射（Surface scattering）、体散射（Volume scattering）、镜面散射（Specular scattering）及二次回波散射（Double bounce scattering）。图 1.14 解释了雷达波在不同潮位情况下与不同盖度和高度的草本植被相互作用的机理。当潮滩水位很高、植被几乎被完全淹没时，大部分的雷达波将直接从水面反射出去，而雷达对回波的接收主要来自入射波方向，故此时雷达卫星对回波的接收很少量，造成 SAR 影像该区域的后向散射强度极低（图 1.14 a）；当植被部

分被淹没且植被露出水面的枝秆部分足够大，植被的盖度相对较低使得 C 波段雷达波能较好地穿透植被冠层，并在枝秆和水面之间发生二次回波散射，二次回波散射的雷达波与入射来波方向基本一致，相当大一部分的二次回波能被雷达卫星接收，这时在 SAR 影像上表现为后向散射强度很高的亮白部分（图 1.14 b）；当植被盖度很高且枝秆部分被淹没时，C 波段雷达波能部分穿透植被冠层，但不能抵达水面，这时会同时发生面散射和体散射（图 1.14 c），此时在 SAR 影像上后向散射强度介于二次回波散射与镜面散射之间。

总之，当盐沼禾本植被处于浸水状态下时，植被的盖度、高度以及潮滩水位的高低决定了不同雷达散射机制的发生。一般来说，几种雷达散射机制可能同时发生，占比重最大的称为主导散射机制（Dominant scattering mechanism）。因为雷达散射方式为后向散射（即入射波与反射波方向一致），故当上述散射机制分别占据主导地位时，雷达影像象元的后向散射系数大小关系一般满足：二次回波散射>体散射/面散射>镜面散射。

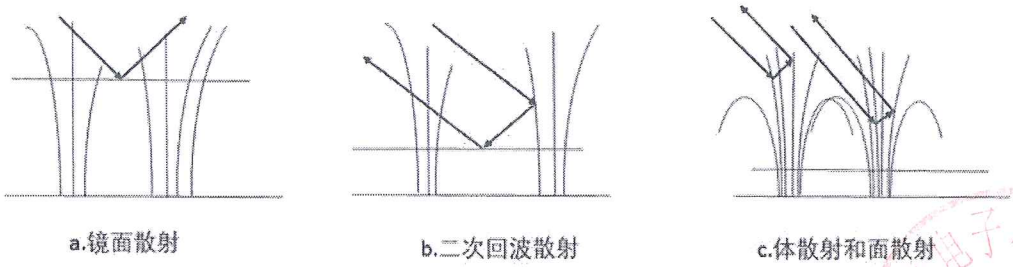


图 1.14 浸水状态下禾本植物的散射机制

Sentinel 卫星产品概述

Sentinel-1A 卫星（Sentinel-1A）于 2014 年 4 月 3 号发射升空，属于欧空局哥白尼计划中的地球观测卫星，是对于 2014 年 4 月 8 号失联的 ENVISAT 卫星的继承。Sentinel-1 雷达卫星采用四种极化方式（VV、VH、HV 和 HH）C 波段工作模式，重访周期（Repeat cycle）为 12 天，2016 年 4 月 Sentinel-1B 卫星发射升空以后，重访周期将缩短至 6 天，具有重访周期短和数据产品发布快的特点（Sentinel-1 Team，2013）。

Sentinel-1 卫星的工作中心频率为 5.405 GHz，入射角范围为 20~45°，一般采取双极化的工作方式，其极化组合包括以下类型：VV+VH，HH+HV，HH，VV。影像象元的精度在 1 dB（3σ）以内。卫星产品包括四种模式，分别是宽刈幅模式（IW）、条带模式（SM）、超宽刈幅（EW）和波模式（WV）。该卫星产品一般分为三个级别：Level-0（Raw data），Level-1（包括单视复数格式（Single-look complex，SLC）和地距格式（Ground range detected，GRDH）），Level-2（海洋产品如风场、流场、海面溢油等）。需要加以说明的是，SLC

格式产品包含了聚焦 SAR 数据，且采用卫星的轨道和高程数据作为地理参照，其影像满足多普勒零点斜距几何，因此 SLC 格式产品是复数格式，保留相位信息。而 GRDH 格式产品是对 SLC 格式产品进行相关处理后得到的产品，利用地球椭球模型进行了地距投影，其象元接近于正方形，且仅具有强度信息。

本文选取 Sentinel-1 卫星的 IW 模式一级产品（Level-1）中的地距格式（GRDH）影像，影像的极化方式均为 VV+VH 双极化。下载的 GRDH 格式影像数据已进行过多视处理，分辨率为 10×10 m。同时需要指出的是，Sentinel-1 雷达卫星在崇明东滩的过境时间均为北京时间下午 5 点 54 分，可以通过翻查潮位表和历史天气资料，获悉影像在过境时刻崇明东滩的潮位和天气信息。

影像预处理

对于 Sentinel-1 地距格式（GRDH）的产品，为了得到符合真实世界地理编码的后向散射强度数据，一般需要经过如下处理流程：

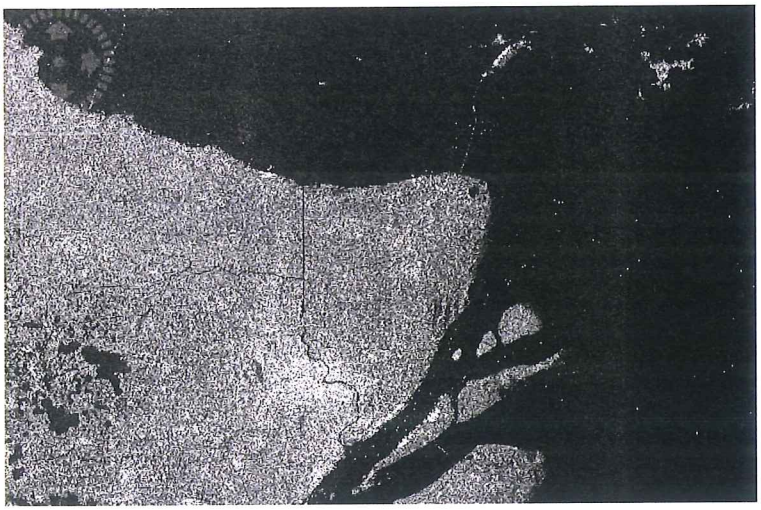
应用轨道数据（Apply orbit correction）。一般在 SAR 影像的元数据中包含了卫星的轨道向量，但其精确度一般不高，需要后续发布的精确轨道数据进行优化处理。对于 Sentinel-1 卫星而言，其精确轨道数据一般会在影像获取时间过后几周内发布，在利用 ESA 为 Sentinel-1 卫星的研发的 SNAP 软件上进行处理时，精确轨道数据可以自动从服务器上下载。

影像拼接（Slice Assembly）。Sentinel-1 影像幅宽较小，无法覆盖上海全境，为获得覆盖整个研究区的雷达影像，使用影像拼接将单景雷达影像进行拼接。

辐射定标（Calibrate）。辐射定标的目的是为了让 SAR 影像的象元值直接反映散射体的后向散射系数。未定标的产品可以直接用定性研究，但辐射定标对于 SAR 数据的定量研究十分必要。

滤波处理（Speckle filter）。SAR 影像因其相干波的本质，不可避免的具有椒盐噪点，这会降低图像的质量，并使得对图像的解译变得困难。空间滤波处理能有效地减少椒盐噪点。

距离向多普勒地形矫正（Range Doppler terrain correction）。因为在影像中实际地形的变化和 SAR 传感器的倾斜，SAR 数据中常常会出现距离变形的现象。地形矫正的目的是为了消除这些变形，让 SAR 影像的几何特征更加吻合真实世界。



处理前

处理后

图 1.15 雷达影像处理前后对比

（二）底栖动物监测

底栖动物监测主要内容概况：

1. 工作目标及内容

2025 年度计划完成底栖动物调查断面样点（图 1）的踏勘确认、现场调查采样材料的采购、制定完成详细周密的现场采样计划，开展两期（夏季、冬季）现场野外采样，并于 2025 年底前完成所有底栖动物物种鉴定工作。

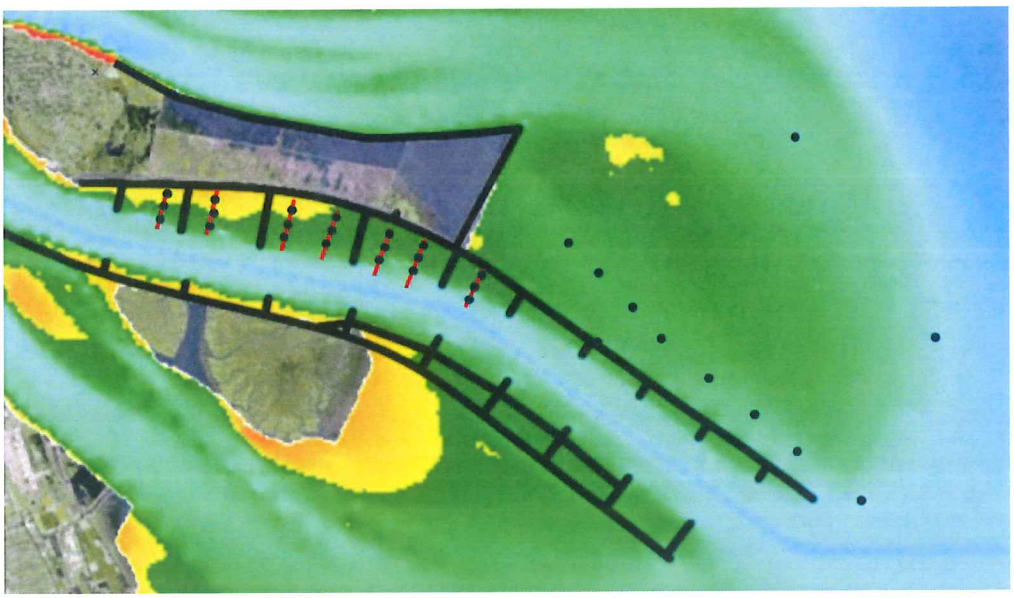


图 1 拟开展底栖动物调查断面样点分布示意图（黑实圆点是底栖动物取样点）

2. 工作方法与进度

在横沙新洲和横沙浅滩选择布置 25 个采样点、75 个平行样（图 1），开展底栖动物种类、密度、生物量调查及室内鉴定工作，每个平行样样本完成至少 5 个底栖动物个体鉴别和生物量测量。2025 年年底完成底栖物种鉴定和测量工作，并完成底栖动物监测报告。

3. 预期产出

完成 2025 年横沙新洲和横沙浅滩合计至少 25 个采样点的底栖动物现场采集，并于 2025 年底前完成室内鉴定工作，完成 2025 年底栖动物监测数据 1 套（excel 格式，文本格式）；

完成 2025 年底栖动物监测报告 1 份（PDF 格式及印刷版）。

详细技术方案：

2.1 服务工作方案

2025 年度在横沙新洲和横沙浅滩开展两期（夏季、冬季）至少 25 个采样点、75 个平行样底栖动物现场野外采样，并于 2025 年底前完成所有底栖动物物种鉴定工作，完成 2025 年横沙新洲和横沙浅滩合计至少 25 个采样点的底栖动物现场采集，并于 2025 年底前完成室内鉴定工作，要求鉴定到种，获得物种名称，密度，生物量及生物多样性等参数和 2025 年底栖动物监测数据 1 套（excel 格式，文本格式）及 2025 年底栖动物监测报告 1 份（PDF 格式及印刷版），报告至少包括：底栖动物监测方法、结果、分析与评价、底栖动物变化趋势研判等内容。

2.1.1 工作目标及内容

横沙地区地处长江口生态协同区，战略区位特点和生态资源优势突出，受长江径流和东海潮流以及深水航道等工程影响，其生态环境状况以及生物多样性类型，结构和功能都在不断发生变化，是目前长江口受人类活动和自然要素影响较为严重的区域，具有非常重要的地理区位代表性、生态系统代表性以及科学研究的代表性。生态系统监测和跟踪研究区域生态系统变化对于分析区域及长江口生态环境演变，明晰河口工程对该区域的潜在威胁等具有非常重要的战略意义。本研究针对横沙地区底栖动物群落进行跟踪监测和数据分析，摸清横沙地区底栖动物种类、密度、生物量等空间分布情况，为区域发展和战略选择等提供数据基础和决策支撑。

工作内容包括：

（1）本年度开展 2 期横沙新洲和横沙浅滩现场底栖动物监测工作；

（2）完成底栖动物室内鉴定、底栖动物数据处理与分析工作；

（3）完成横沙新洲和横沙浅滩底栖动物群落空间分布监测报告。

2.1.2 工作方案

开展横沙新洲和横沙浅滩现场底栖动物监测工作不仅是了解横沙地区水生生物生活与生存的基础工作，而且也是实现横沙地区湿地生态系统全面了解与滩涂的淤涨面积、潜力、分布等趋势模拟的基础。研究团队通过对横沙新洲和横沙浅滩的现场底栖动物取样，获得横沙新洲和横沙浅滩底栖动物物种类、密度、生物量等生态学参数，并分析底栖动物群落的时空分布特征，为生物地貌耦合模型提供生态学参数，服务于横沙地区湿地资源未来演化趋势模拟。

本年度计划在横沙新洲、横沙浅滩开展底栖动物种类、密度、生物量监测 10 个样线（30 个样点），布设的监测点和监测样线如图 2.1 所示，每条样线设置 3 个监测点。

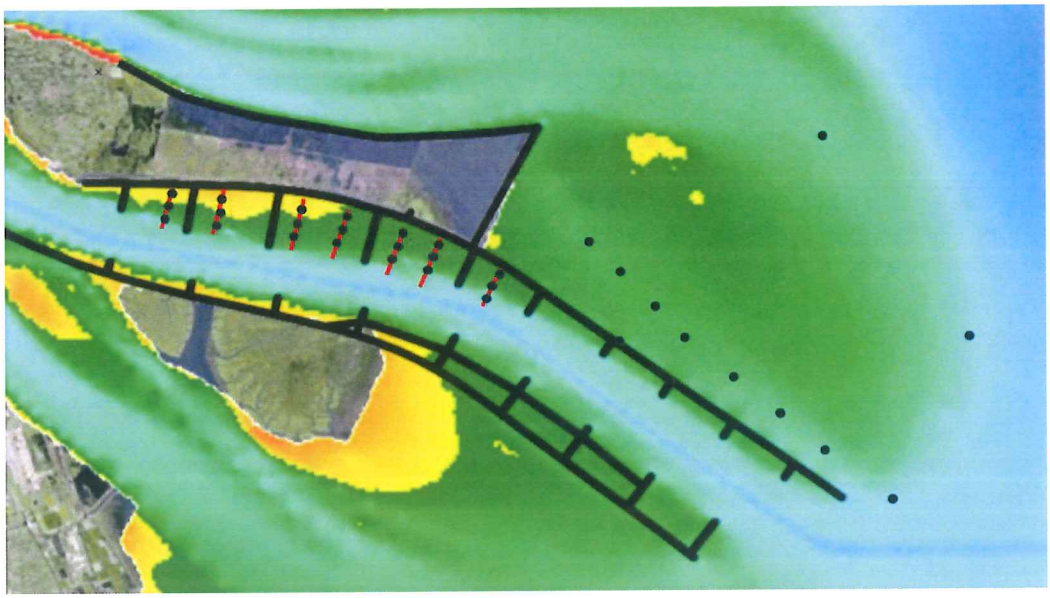


图 2.1 横沙浅滩和横沙新洲大型底栖动物取样点分布图

（黑色实点为底栖动物取样点）

研究团队在国家自然科学基金委项目（风暴影响下潮滩沉积动力过程-底栖动物相互作用与反馈机制，资助号：42076170），国家自然科学基金面上项目：人工养殖影响下的潮滩生物地貌学研究，资助号：41576090），国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项-中国-欧盟科技创新合作项目（近海蓝碳生态系统的碳汇潜力与多功能协同增汇途径，资助号：2023YFE0113100）等国家级项目的资助下，研究团队进行了多个潮滩湿地底栖动物多次现场取样工作，室内鉴定工作和底栖动物群落结构分析。基于研究团队多年潮滩底栖动物取样和室内鉴定经验，研究团队有把握把横沙新洲和横沙浅滩的底栖动物现场取样、室内鉴定、底栖动物群落分析等工作完成。

2.1.3 与底栖动物监测及底栖动物数据分析相关的研究工作

大型底栖动物(文蛤)对潮滩侵蚀淤积过程的影响

潮滩底栖生物活动对沉积动力过程有重要影响。然而，目前这方面的研究仅停留在定性研究，缺乏在现场自然环境下的定量研究。本研究针对养殖区内的文蛤对底床稳定性和侵蚀淤积过程的影响进行了定量化研究。选取了两个点进行对比研究（图2.2; 图2.3）：文蛤养殖区内的测点A (文蛤密度多达137个数每平方米)具有丰富的文蛤存在，而在文蛤养殖区外的测点B (文蛤密度仅仅3.7个数每平方米，距离测点A只有500米)具有很少数目的文蛤。结果表明：测点A和B的底床侵蚀临界剪切应力分别为0.22和0.32 N/m^2，并且测点A侵蚀淤积的幅度明显大于测点B。这些结果揭示了大型底栖动物文蛤降低了底床稳定性，当底部切应力大

于底床临界侵蚀剪切应力时，加速了潮滩侵蚀过程，另一方面当底部切应力小于底床临界侵蚀剪切应力时，加速了潮滩淤积过程（图2.4）。本研究认为这种沉积动力学关键参数的改变(底床侵蚀临界剪切应力)会对潮滩地貌演化预测模型精度产生重要影响。因此，现场沉积动力过程观测和同步大型底栖生物收集，有助于改善浅水环境的水力-沉积和地貌动力学模型的参量化，推动生物地貌学的研究。

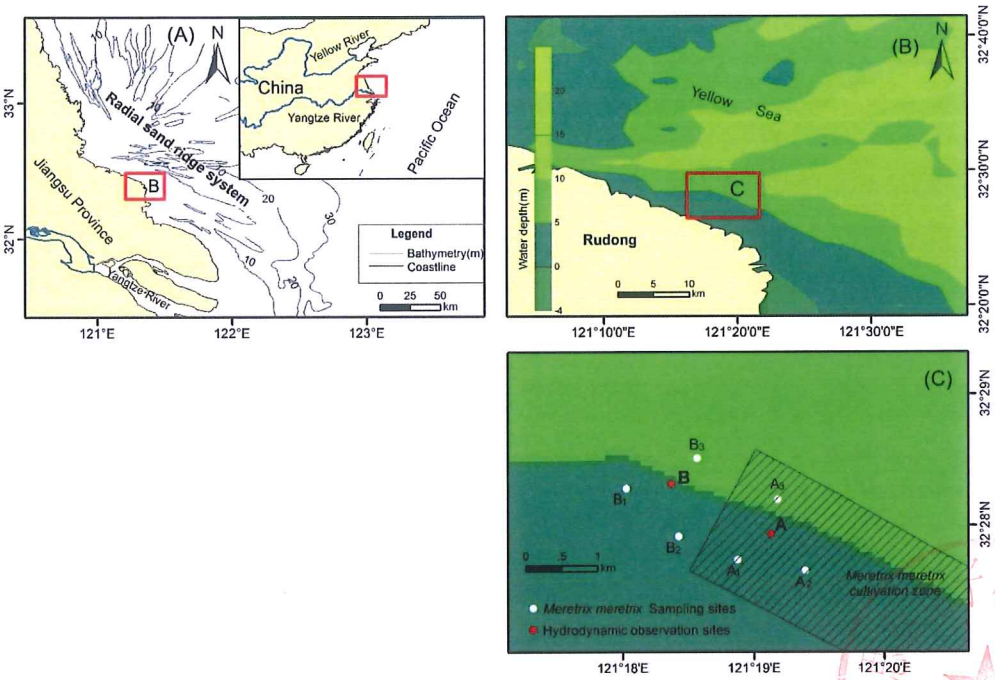


图 2.2 江苏如东潮滩沉积动力过程与底栖动物取样测点空间分布图

图 2.3. 研究区域（如东潮滩）水动力观测和大型底栖动物现场采样

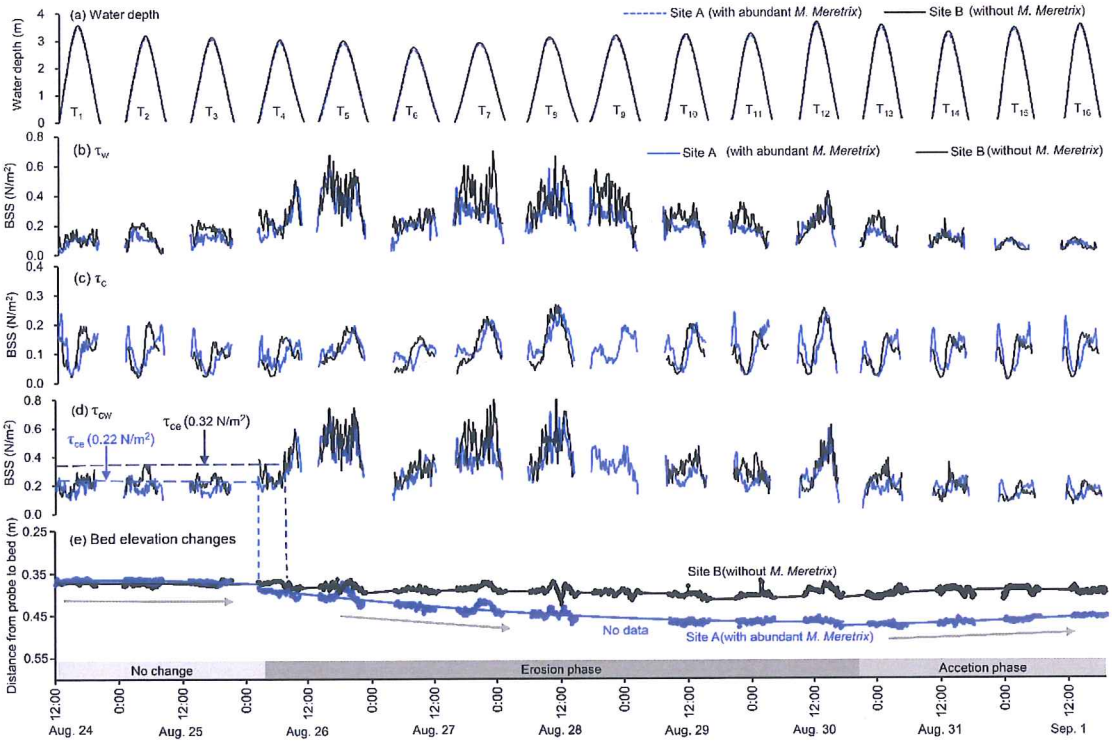


图 2.4 大型底栖动物文蛤影响下沉积动力过程研究

(Shi et al., 2019, Journal of Geophysical Research - Biogeosciences)

远距离台风侵蚀对潮间带大型底栖动物的影响

潮间带大型底栖生物受潮滩物理过程的影响。其实，这些物理过程扰动对潮间带大型底栖生物的影响程度，我们并不完全清楚。因此，严重而且持续的侵蚀事件会不会对大型底栖生物产生很大的影响是值得我们研究的科学问题。我们对江苏如东潮滩水动力、侵蚀-淤积过程和大型底栖生物取样，进行了综合观测，结果发现在1000多公里远的“狮子山”台风影响下，潮滩在2-3天内发生了10厘米左右的持续性侵蚀（图2.5），这个台风过后，大型底栖生物文蛤的密度和生物量减少了近一半（与台风前相比）（图2.6），说明这次极端的侵蚀事件对大型底栖生物产生了致命的影响，即由于远程台风的影响，导致了潮滩发生严重侵蚀，最终导致大型底栖生物生物量减少。这些发现对生态系统的恢复和保护实践具有重要的启示，因为台风事件在未来可能会增加发生的频率和强度，可能导致大型底栖生物对其栖息地产生较大的物理干扰。

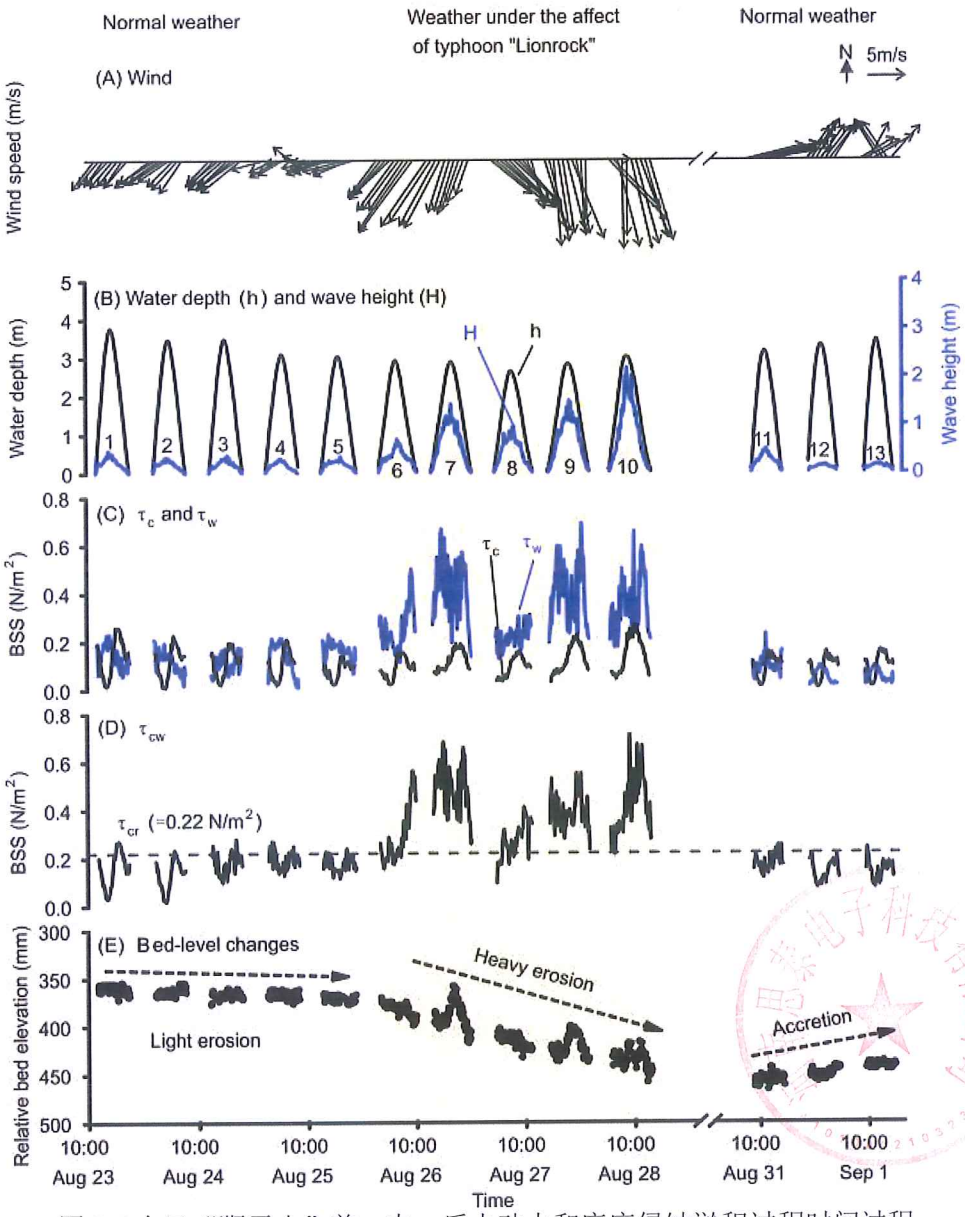


图 2.5 台风“狮子山”前，中，后水动力和底床侵蚀淤积过程时间过程

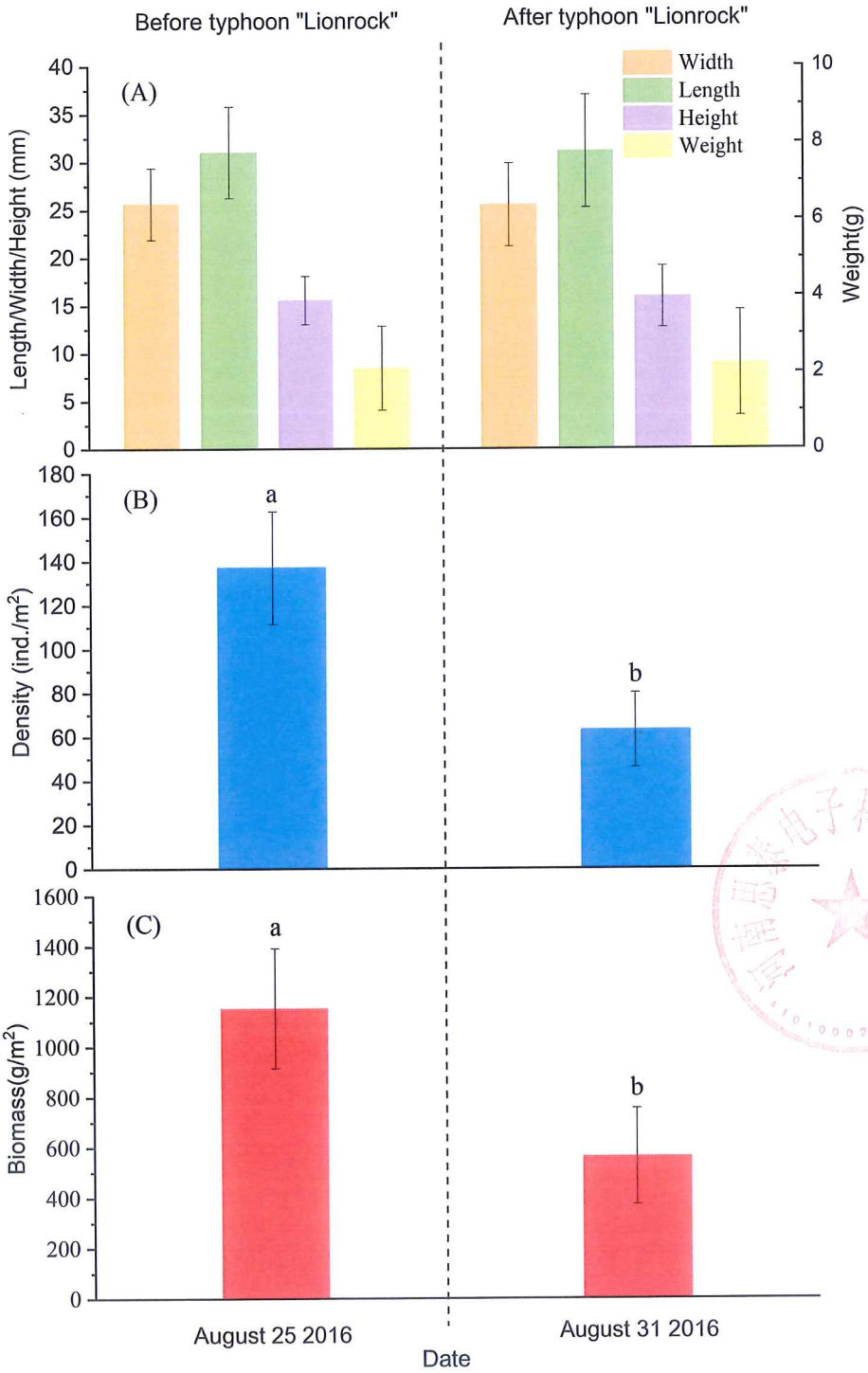


图 2.6 台风“狮子山”前后大型底栖生物密度对比图。

长江口崇明东旺互花米草二次治理对大型底栖动物群落的影响

（1）采样点的布设

根据《海洋调查规范》（GB/T12763.9-2007）调查方法，结合植被疏密、滩面高程设

置 4 个采样点，如图 1 所示，崇明东滩东旺沙 1 号点（密集区高潮带）、东旺沙 2 号点（密集区中潮带）、东旺沙 3 号点（稀疏区高潮带）、东旺沙 4 号点（稀疏区中潮带）。具体采样位置信息如图 2.7 和表 2.1 所示。

图 2.7 崇明东旺互花米草二次治理大型底栖动物采样点位置

表 2.1 崇明东旺互花米草二次治理大型底栖动物采样点经纬度

站位	经度（°）	纬度（°）
东旺沙 1 号点	121.90916106	31.59194
东旺沙 2 号点	121.90992549	31.59217
东旺沙 3 号点	121.90419093	31.59431
东旺沙 4 号点	121.90495938	31.59489

（2）野外采样

治理项目在已对崇明东旺沙互花米草整治区喷洒农药基础上，决定对崇明东旺沙盐沼区域少量残留互花米草斑块进行定点人工喷洒农药的二次治理。2023 年 7 月在二次喷洒农药治理前对互花米草斑块的大型底栖动物行本底采样调查，并在 2023 年 10 月在二次喷洒农药治理后进行大型底栖动物监测调查。每个采样点进行三次采样，采样时使用 25*25*30cm 的样方框进行生物土样采集，并使用 40 目筛网筛洗土样后分拣底栖动物标本。所获取的底栖动物存放于采样瓶并倒入 75%的酒精进行固定，带回实验室后进行物种鉴定、计数、称重等操作，并对所获数据用 R 语言进行统计分析。

图 2.8 野外采样

（3）室内底栖动物鉴定

实验室将物种鉴定至尽可能低的分类单元，部分受损物种鉴定至较低的分类即可。用滤纸吸干样本表面的固定液，置于精度为 0.001 的电子称上称其湿重，之后折算成其单位面积的密度（ind./m^2)和生物量（g/m^2)。采集大型底栖软体动物标本后，根据其独特的形态特征进行物种鉴定。底栖动物实验室鉴定主要依赖于形态学特征分析，通过观察动物的外部形态特征来确定其分类位置，包括颜色、体型、器官机构等方面的观察，器官结构包括螺旋层和体壳层的构型和数量、壳口的形态和定位、唇部的颜色和轮廓、壳表面的纹理和色调、腹足的盖骨属性等。对于双壳类，检查内容包括评估贝壳的顶端、径向肋骨、同心生长轮、韧带、铰链齿或齿槽在内壳表面的形状和位置、铰链齿的组织和数量以及闭壳肌痕和外窦的形态和可见性。

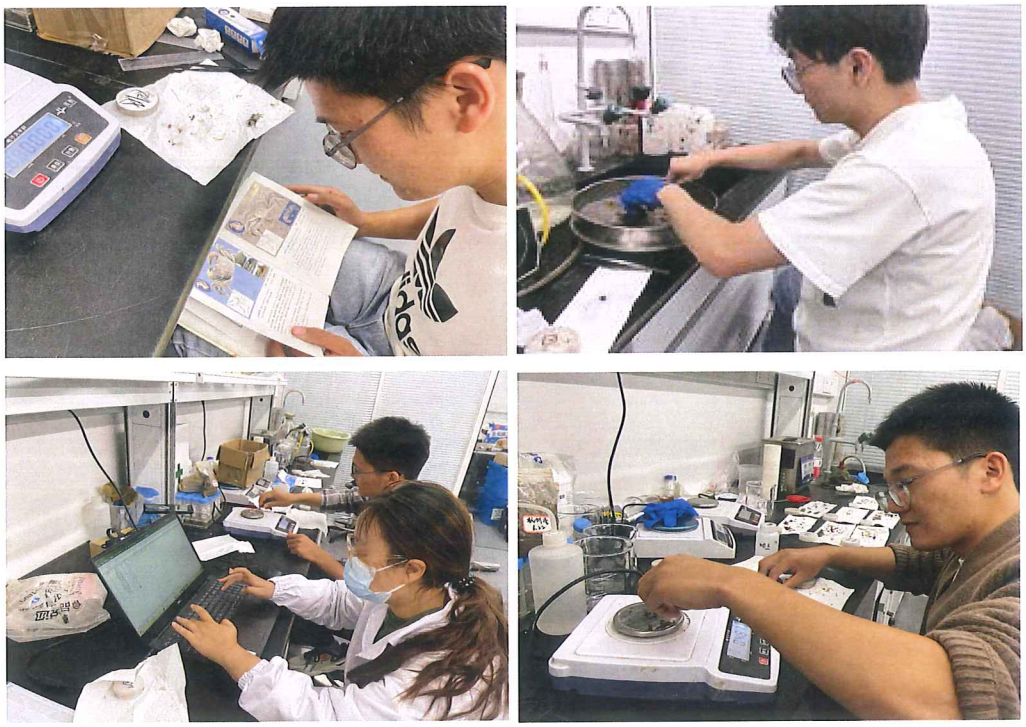


图 2.9 室内鉴定

（4）数据分析

统计分析各样点的底栖动物物种数，物种密度，生物量，功能摄食类群以及优势种情况。通过计算各样点的优势度指数 Y、Shannon-Wiener 物种多样性指数 H'、Pielou 物种均匀度指数 J、Margalef 物种丰富度指数 d、Simpson 多样性指数 $1-\lambda'$等来进行各样点的底栖动物群落多样性评价。多样性指数采用以下公式计算：

Shannon-Wiener 物种多样性指数(H'):$H'=-\sum(ni/N)\log_2(ni/N)$

Pielou 均匀度指数(J):$J=H'/\log_2 S$

Margalef 物种丰富度指数(d):$d=(S-1)/\log_2 N$

辛普森多样性指数(Simpsonindex)$1-\lambda'=D=1-\sum(ni(ni-1))/(N(N-1))$

相对重要性指数（IRI）：$IRI=(N\%+W\%)\cdot F$

优势度 $Y=(ni/N)\times fi$

其中 H'表示 Shannon-Wiener 物种多样性指数；J 表示 Pielou 物种均匀度指数；d 表示 Margalef 物种丰富度指数；$1-\lambda'$表示辛普森多样性指数(Simpson index)；ni 为样品中第 i 种生物的个体数；N 为采泥样品中所有种类的总个体数；S 为采泥样品中的种类总数；fi 为该种 i 出现的频度，$N\%$为该物种数量占样品总数量的百分比;$W\%$为该物种质量占样品总重量的百分比; F 为出现频率。

依据相对重要性指数判别优势种：相对重要性 *IRI*（RelativeImportanceIndex），最先用于表示鱼类食谱中各种饵料的重要性。它是根据饵料的重量百分比（W）、尾数百分比（N）和出现频率（F）计算得出的。将相对重要性指数用于底栖动物研究中，充分考虑了物种的重量在优势种判定中的应用，将 *IR*>1000 定位优势种。

多样性指数采用 Rstudio 软件中的 vegan 包分析得出，聚类分析和非度量多维尺度分析（NMDS 分析）均使用 Rstudio 工具包进行绘制。数据使用 Origin 软件进行计算分析，并绘制柱状图。

（5）结果

- **物种数的变化**

本项目调查共发现底栖动物 13 种，其中软体动物为 7 种，占总物种数的 53.85%，节肢动物 4 种，占总物种数的 30.77%，环节动物有 2 种，占总物种数的 15.38%。

2023 年 7 月，共采集到底栖动物 8 种。其中，采样点 1 有 7 种，包括节肢动物 2 种，占总种数的 28.57%，软体动物 3 种，占总种数的 42.86%，环节动物 2 种占总种数的 28.57%。采样点 2 有 5 种，其中节肢动物和软体动物种数相同，各 2 种，占总种数的 40%，环节动物 1 种，占总种数的 20%。采样点 3 共发现底栖动物 3 种，全部为软体动物，种数占总物种数的 100%，没有发现节肢动物和环节动物。采样点 4 发现底栖动物 4 种，其中节肢动物 1 种，占总种数的 25%，软体动物 3 种，占总种数的 75%，没有发现环节动物。

2023 年 10 月，共采集到底栖动物 10 种。其中，采样点 1 有 7 种，包括节肢动物 2 种，占总种数的 28.57%，软体动物 5 种，占总种数的 71.43%%，没有发现环节动物。采样点 2 有 7 种，全部为软体动物，占总种数的 100%，没有发现环节动物和节肢动物。采样点 3 共发现底栖动物 5 种，其中节肢动物为 2 种，占总种数的 40%，软体动物 3 种，占总种数的 60%。采样点 4 发现底栖动物 5 种，其中节肢动物 1 种，占总种数的 20%，软体动物 4 种，占总种数的 80%，没有发现环节动物。

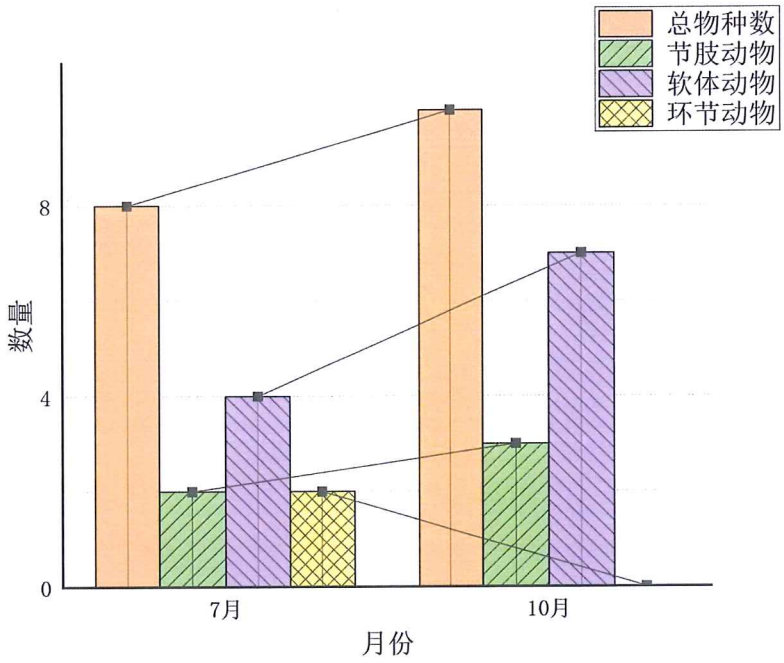


图 2.10 不同月份互花米草整治区域大型底栖动物物种数

- **优势种的变化**

根据相对重要性指数（*IRI*），绯拟沼螺、天津厚蟹和拟沼螺为调查区域 2023 年 7 月份的优势种；绯拟沼螺、拟沼螺和侧足厚蟹为调查区域 10 月份的优势种。

表 2.2 崇明东旺沙不同月份大型底栖生物相对重要性指数

物种名	7 月	10 月
安氏白虾	54	0
背蚓虫	124	0
绯拟沼螺	9932	4482
尖锥拟蟹守螺	801	7471
堇拟沼螺	40	559
拟沼螺	1836	1386
丝异蚓虫	8	0
天津厚蟹	4563	18
侧足厚蟹	0	1356
光滑狭口螺	0	43

谭氏泥蟹	0	11
微小螺	0	278
其他螺	0	491

- **数量（密度）的变化**

2023 年 7 月，整个采样区底栖动物的平均密度为 672.92 ind./m²，其中 D1 的总密度为 1325.00 ind./m²，环节动物为 16.67 ind./m²，软体动物为 1266.67 ind./m²，节肢动物为 47.67 ind./m²。D2 的总密度为 575 ind./m²，环节动物为 58.33 ind./m²，软体动物为 483.33 ind./m²，节肢动物为 33.33 ind./m²。D3 的总密度为 341.67 ind./m²，软体动物为 341.67 ind./m²，无节肢动物和环节动物。D4 的总密度为 450.00 ind./m²，软体动物为 416.67 ind./m²，节肢动物为 33.33 ind./m²，为环节动物。

2023 年 10 月，整个采样区底栖动物的平均密度为 495.83 ind./m²，其中 D1 的总密度为 550.00 ind./m²，软体动物为 500 ind./m²，节肢动物为 50 ind./m²。D2 的总密度为 1166.67 ind./m²，全部为软体动物，为 1166.67 ind./m²，无节肢动物和环节动物。D3 的总密度为 83.33 ind./m²，软体动物为 58.33 ind./m²，节肢动物为 25 ind./m²。D4 的总密度为 183.33 ind./m²，节肢动物为 16.67 ind./m²，环节动物为 166.67 ind./m²。

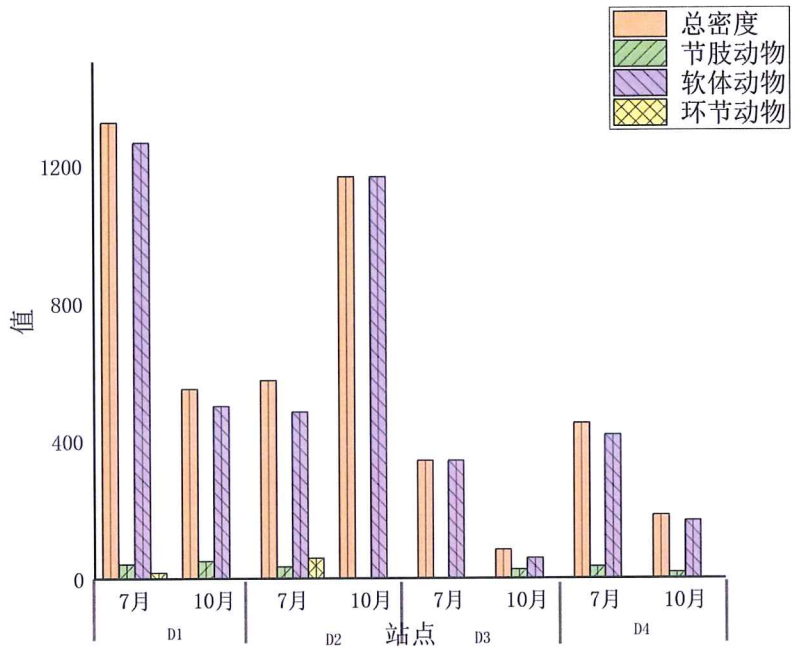


图 2.11 采样点大型底栖生物的生物密度

- **生物量的变化**

2023 年 7 月，整个采样区底栖动物的平均生物量为 61.00g/m²，其中 D1 的总生物量为 62.38g/m²，软体动物为 45.13g/m²，环节动物为 0.03g/m²，节肢动物为 17.23g/m²。D2 的总生物量为 46.15g/m²，节肢动物为 33.71g/m²，软体动物为 12.43g/m²，环节动物为 0.02g/m²。D3 的总生物量为 8.55g/m²，全部为软体动物为 8.55g/m²，无环节动物和节肢动物。D4 的总生物量为 126.93g/m²，软体动物为 36.59g/m²，节肢动物为 90.33g/m²。

2023 年 10 月，整个采样区底栖动物的平均生物量为 265.73g/m²，其中 D1 的总生物量为 86.04g/m²，软体动物为 68.33g/m²，节肢动物为 17.71g/m²。D2 的总生物量为 54.62g/m²，全部为软体动物为 54.62g/m²，无节肢动物和环节动物。D3 的总生物量为 39.78g/m²，软体动物为 26.88g/m²，节肢动物为 12.90g/m²,无环节动物。D4 的总生物量为 85.30g/m²，软体动物为 77.08g/m²，节肢动物为 8.23g/m²。

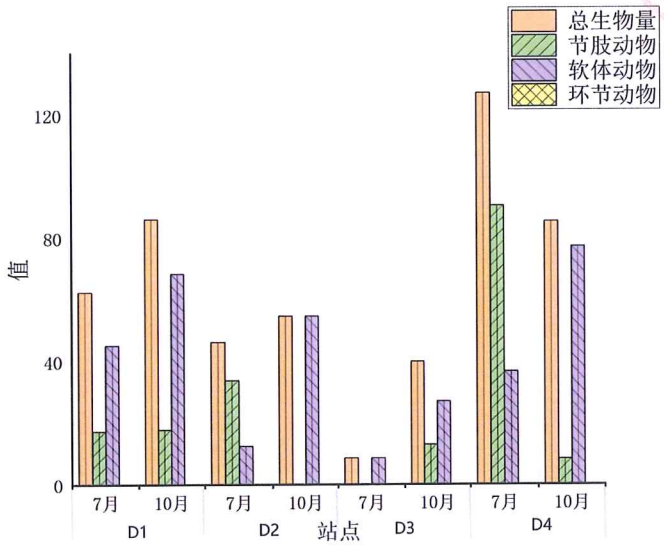


图 2.12 采样点大型底栖生物的生物密度

- **生物多样性的变化**

2023 年 7 月和 10 月，整个采样区底栖动物多样性指数如表所示。

2023 年 7 月，采样点 D1 的香农-威纳指数（*H'*)为 1.76，辛普森指数（*1-λ'*)为 0.78，物种丰富度（SR）为 13.00，Pielou 均匀度指数（*J'*)为 0.69，Margalef 物种丰富度指数（d）为 0.82。采样点 D2 的香农-威纳指数（*H'*)为 1.53，辛普森指数（*1-λ'*)为 0.70，物种丰富度（SR）为 8.00，Pielou 均匀度指数（*J'*)为 0.74，Margalef 物种丰富度指数（d）为 0.65。采样点 D3 的香农-威纳指数（*H'*)为 1.55，辛普森指数（1-λ'）为 0.72，物种丰富度（SR）为 7.00，Pielou 均匀度指数（*J'*)为 0.80，Margalef 物种丰富度指数（d）为 0.37。采样点 D1 的香农-威纳指数（*H'*)为 1.68，辛普森指数（1-λ'）为 0.77，物种丰富度（SR）为 9.00，Pielou 均匀度指数

（J')为 0.77，Margalef 物种丰富度指数（d）为 0.7。

2023 年 10 月，采样点 D1 的香农-威纳指数（H')为 2.30，辛普森指数（1-λ')为 0.88，物种丰富度（SR）为 14.00，Pielou 均匀度指数（J')为 0.87，Margalef 物种丰富度指数（d）为 0.99。采样点 D2 的香农-威纳指数（H')为 2.38，辛普森指数（1-λ')为 0.88，物种丰富度（SR）为 16.00，Pielou 均匀度指数（J')为 0.86，Margalef 物种丰富度指数（d）为 0.84。采样点 D3 的香农-威纳指数（H')为 1.83，辛普森指数（1-λ')为 0.82，物种丰富度（SR）为 7.00，Pielou 均匀度指数（J')为 0.94，Margalef 物种丰富度指数（d）为 1.20。采样点 D1 的香农-威纳指数（H')为 2.02，辛普森指数（1-λ')为 0.85，物种丰富度（SR）为 9.00，Pielou 均匀度指数（J')为 0.92，Margalef 物种丰富度指数（d）为 0.9。

表 2.3 崇明东旺沙不同月份大型底栖生的物生物多样性

	D1		D2		D3		D4	
	7 月	10 月	7 月	10 月	7 月	10 月	7 月	10 月
香农-威纳指数（H')	1.76	2.30	1.53	2.38	1.55	1.83	1.68	2.02
辛普森指数（1-λ')	0.78	0.88	0.70	0.88	0.72	0.82	0.77	0.85
物种丰富度（SR）	13.00	14.00	8.00	16.00	7.00	7.00	9.00	9.00
Pielou 均匀度指数（J')	0.69	0.87	0.74	0.86	0.80	0.94	0.77	0.92
Margalef 物种丰富度指数（d）	0.82	0.99	0.65	0.84	0.37	1.20	0.70	0.90

（6）分析与评价

- **滩涂互花米草整治对底栖动物物种分布的影响**

在 D1 区域，7 月份采样鉴定出 7 种，10 月份采样鉴定出 6 种。7 月份鉴定出的节肢动物有安氏白虾和天津厚蟹，10 月份也检测出了节肢动物，种类有所区别，是侧足厚蟹和谭氏泥蟹；7 月份鉴定出的软体动物有绯拟沼螺、尖锥拟蟹守螺和拟沼螺，10 月份鉴定出绯拟沼螺、尖锥拟蟹守螺、堇拟沼螺和拟沼螺，其中堇拟沼螺在 7 月份采样中未出现；7 月份鉴定出的环节动物有背蚓虫和丝异蚓虫，而在 10 月份中 3 个亚采样点均为出现环节动物。

在 D2 区域，7 月份采样鉴定出 5 种，10 月份采样鉴定出 5 种。7 月份鉴定出的节肢动物有安氏白虾和天津厚蟹，10 月份并未检测出节肢动物；7 月份鉴定出的软体动物有绯拟沼螺和拟沼螺，10 月份鉴定出绯拟沼螺、尖锥拟蟹守螺、堇拟沼螺、光滑狭口螺和拟沼螺，其中堇拟沼螺、尖锥拟蟹守螺和光滑狭口螺在 7 月份采样中未出现；7 月份鉴定出的环节动物有背蚓虫，而在 10 月份中 3 个亚采样点均为出现环节动物。

在 D3 区域，7 月份采样鉴定出 3 种，10 月份采样鉴定出 5 种。7 月份没有鉴定出节肢动物，10 月份检测出的节肢动物有侧足厚蟹和天津厚蟹；7 月份鉴定出的软体动物有绯拟沼螺、堇拟沼螺和拟沼螺，10 月份鉴定出绯拟沼螺、尖锥拟蟹守螺和堇拟沼螺，与 7 月份相比少了拟沼螺，多了尖锥拟蟹守螺；7 月份和 10 月份均为检测出环节动物。

在 D4 区域，7 月份采样鉴定出 4 种，10 月份采样鉴定出 5 种。7 月份鉴定出的节肢动物有天津厚蟹，10 月份也检测出了节肢动物，种类有所区别，是侧足厚蟹；7 月份鉴定出的软体动物有绯拟沼螺、尖锥拟蟹守螺和拟沼螺，10 月份鉴定出绯拟沼螺、尖锥拟蟹守螺、光滑狭口螺和拟沼螺，其中光滑狭口螺在 7 月份采样中未出现；7 月份和 10 月份均为检测出环节动物。

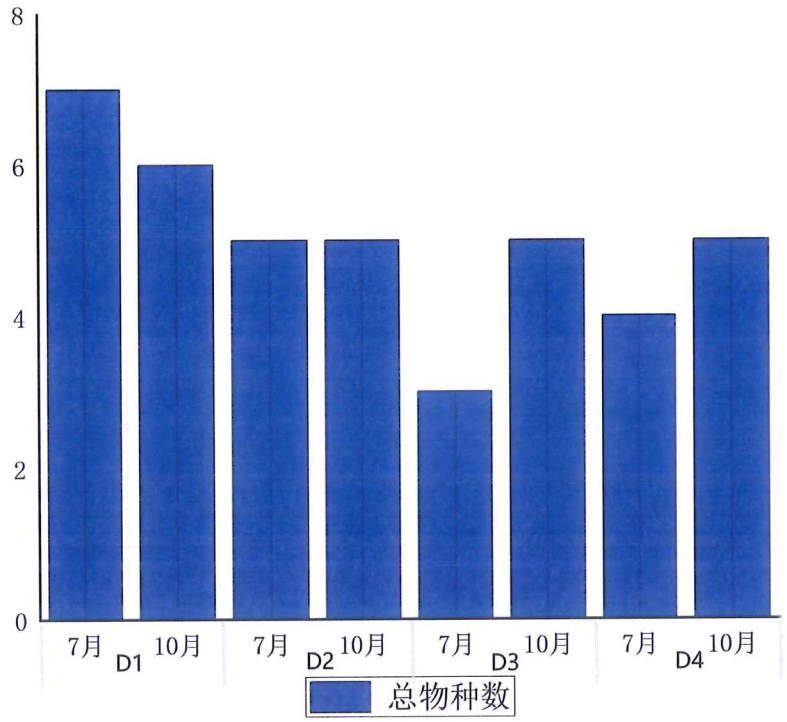


图 2.13 采样点大型底栖动物物种数量变化

- **滩涂互花米草整治对底栖动物优势种的影响**

本项目整个调查样区的底栖动物优势种为 4 种，以软体动物和节肢动物为主，包括绯

拟沼螺、拟沼螺、天津厚蟹、尖锥拟蟹守螺和侧足厚蟹。其中，其中这些软体动物都属于个体偏小型的底栖动物。当环境受到干扰时，优势种会逐步被繁殖更快、周期更短的小型物种占据，也可说明整个调查区域的动物群落结构本身具有一定的脆弱性。四个样区中，7 月份的优势种主要是是绯拟沼螺、拟沼螺和天津厚蟹，而 10 月份优势种为绯拟沼螺、拟沼螺、尖锥拟蟹守螺和侧足厚蟹，优势种的变化可能与温度有关，物种会选择在偏好的温度中大量繁殖。长期以来，丝异蚓虫与背蚓虫是该调查区常见的环节动物优势种。在本次调查中，环节动物仅在 7 月份的采样点中出现，考虑到该区域物种种类较多，尤其是软体动物较多，存在一定的竞争性，加之环境变化如温度和植被稀疏情况，可能不利于背蚓虫、丝异蚓虫这样的机会主义者生存。

- **滩涂互花米草整治对底栖动物分布数量（密度）的影响**

D1 采样点 7 月和 10 月的月平均栖息密度分别为 1325.00 ind./m^2、550 ind./m^2，底栖动物两个月份月平均栖息密度为 937.5 ind/m^2。从 7 月份到 10 月份，底栖动物栖息密度明显下降，主要原因是 7 月份温度更有利于底栖动物尤其是软体动物的生长繁殖，10 月开始温度下降，不利于底栖动物的生长，导致总体数量下降。此外，从 D1 的大生境来看，互花米草在 10 月开始变得枝繁叶茂，这意味着生物的生存空间遭到限制、土壤的板块更加结实，而这些变化都不利于大型底栖动物的生长、繁殖。

D2 采样点 7 月和 10 月的月平均栖息密度分别为 575.00 ind./m^2、1166.67 ind./m^2，底栖动物两个月份月平均栖息密度为 870.83 ind/m^2。10 月份底栖动物的密度将近是 7 月份的两倍，可能是因为 10 月份在采样点发现了大量的死螺和微小螺，这在 7 月份很少出现。

D3 采样点 7 月和 10 月的月平均栖息密度分别为 341.67 ind./m^2、83.33 ind./m^2，底栖动物两个月份月平均栖息密度为 212.5 ind/m^2。7 月份底栖动物的密度将近是 10 月份的 4 倍，D4 采样点 7 月和 10 月的月平均栖息密度分别为 450.00 ind./m^2、183.33 ind./m^2，底栖动物两个月份月平均栖息密度为 316.67 ind/m^2。7 月份底栖动物的密度将近是 10 月份的 2.4 倍，在这段时间，软体动物大量减少，这与软体动物的繁殖期有关，一般每年的 7-8 月份是软体动物的快速繁殖期。在这段时间，软体动物大量减少，这与软体动物的繁殖期有关，一般每年的 7-8 月份是软体动物的快速繁殖期。

四个采样区月栖息密度值变化有较大差异，除 D2 站点外，其他 3 个站点 7 月份的月栖息密度均大于 10 月份，这主要与温度对软体动物的影响有关。软体动物的月栖息密度直接影响了该采样点整体的月栖息密度。

D1 中，7 月密度值最高的物种（采样站位）是软体动物 1166.67 ind./m^2

节肢动物 41.67 ind./m^{2}次之；D2 中，7 月密度值最高的物种（采样站位）是软体动物 483.33 ind./m^{2}环节动物 58.33 ind./m^{2}次之；D3 中，7 月密度值最高的物种且全部（采样站位）

是软体动物 341.67 ind./m²。D4 中，7 月密度值最高的物种（采样站位）是软体动物 416.67 ind./m²。

D1 中，10 月密度值最高的物种（采样站位）是软体动物 500 ind./m²节肢动物 50 ind./m² 次之；D2 中，10 月密度值最高的物种且全部（采样站位）是软体动物 1166.67 ind./m²；D3 中，10 月密度值最高的物种且全部（采样站位）是软体动物 58.33 ind./m²。D4 中，7 月密度值最高的物种（采样站位）是软体动物 166.67 ind./m²。

以上结果可以看出，7 月和 10 月 4 个采样点中占主导优势的软体动物，软体动物成为影响总密度的主导物种。

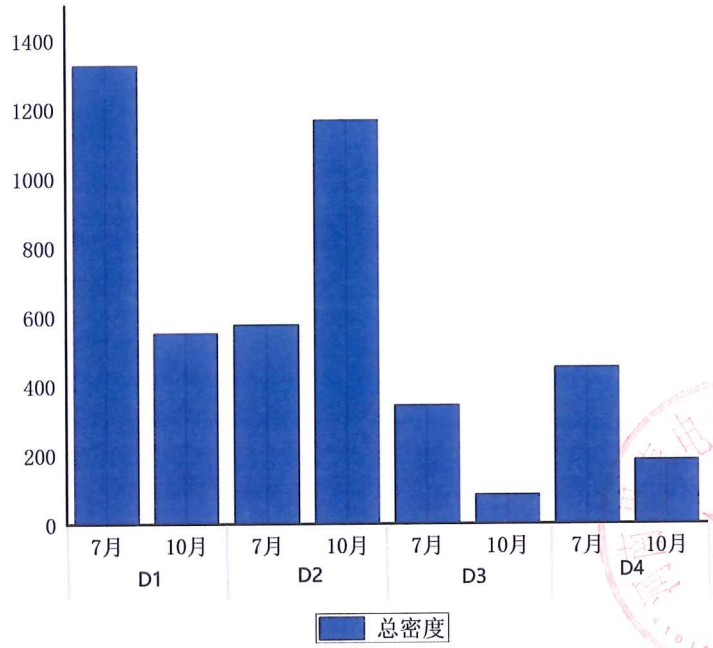


图 2.14 采样点大型底栖动物密度变化

- **滩涂互花米草整治对底栖动物生物量的影响**

底栖动物生物量与其密度密切相关，通常密度高，生物量就大，反之密度低，生物量就小。理论上，底栖动物月平均生物量的变化趋势基本上与对应的月平均栖息密度变化趋势会相同。但是，从本年度的调查结果来看，仅 D4 采样区月平均生物量的变化趋势与月平均栖息密度变化趋势呼应，即 7 月的生物量高于 10 月，而 D1、D2 和 D3 采样区月平均生物量变化特征与理论变化有些许不同。

在 D1 采样区中，7 月和 10 月的总生物量分别为 62.38g/m² 和 86.04g/m²，两个月份平均生物量为 74.21g/m²。变化趋势为增长趋势，也即 7 月不再是生物量峰值，10 月才达到最高值。原因是 7 月虽然背蚓虫、丝异蚓虫密度大，但它们属于个体较小、质量较轻的物种，

在生物量统计上贡献值不大。而 10 月生物量略微提高的主要原因是出现了大体型的侧足厚蟹，它们在总生物量值上的贡献是不容忽视的。

在 D2 采样区中，7 月和 10 月的总生物量分别为 46.15g/m^2 和 54.62g/m^2，两个月份平均生物量为 50.38g/m^2。10 月份的生物量较 7 月份有轻微的增长。原因采集到了体积较大的尖锥拟蟹守螺，10 月份的总密度与 7 月份的增量远大于总生物量的增量，是因为 10 月份虽然采集的物种较多，但是主要是以绯拟沼螺和拟沼螺为主的小型软体动物，质量较小，所以虽然密度有了较大的增长，但是生物量增长不大。

在 D3 采样区中，7 月和 10 月的总生物量分别为 8.55g/m^2 和 39.78g/m^2，两个月份平均生物量为 24.16g/m^2。10 月份的生物量较 7 月份有明显的增长。原因采集到了体积较大的尖锥拟蟹守螺和侧足厚蟹，而 7 月份采集的物种是绯拟沼螺、拟沼螺和堇拟沼螺，体积和质量较小。密度上，7 月份高于 10 月份，生物量上相反，是由于 7 月份虽然采集的数量较多，但是主要是以绯拟沼螺和拟沼螺为主的小型软体动物，质量较小，而 10 月份出现了质量较大的侧足厚蟹和尖锥拟蟹守螺。

在 D4 采样区中，7 月和 10 月的总生物量分别为 126.93g/m^2 和 85.30g/m^2，两个月份平均生物量为 106.11g/m^2。10 月份的生物量较 7 月份有明显的下降。原因一方面是 7 月份的总密度高于 10 月份的总密度，这与生物量的变化趋势与月平均栖息密度变化趋势呼应，另一方面 7 月份采集到了天津厚蟹质量和体积较大，10 月份虽然也有节肢动物侧足厚蟹的出现，但是质量和体积远低于 7 月份采集到了天津厚蟹。

纵观四样区的生物量变化特征来看，最终对平均生物量决定性作用的当属常见底栖动物中个体为大型或中大型的物种。尤其在 D2 采样区的 7 月，生物量贡献最突出的是天津厚蟹，以及 D4 采样区的 7 月中，天津厚蟹的生物量贡献也最突出。天津厚蟹属于个体大体型的节肢动物，而在生物量上密度较大的小体型环节动物未有突出贡献。此外，对比四个采样区的总体月平均生物量值，可再次肯定及时处理入侵植物互花米草对生物的生长有积极的作用。

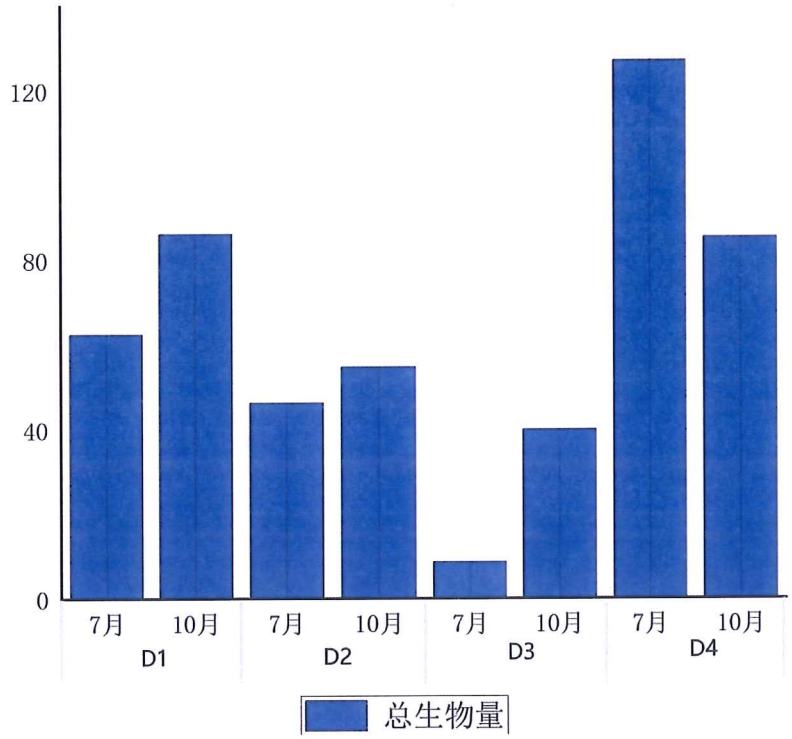


图 2.15 采样点大型底栖动物生物量变化

- **滩涂互花米草整治对底栖动物多样性的影响**

从图可以看出，在物种丰富度上，10 月份采样区域要高于 7 月份，变化趋势较为相似。在 7 月份，D3 采样区的物种丰富度最低，而在 10 月份物种丰富度达到最高，这可能与在 7 月份采样获得的物种种类少有关。在物种均匀度上，整体上 4 个采样区数值差异不大，变化趋势也较为一致，10 月份的物种均匀度都大于 7 月份。而在香农-威纳指数上，整体上各样点各月份数值都处于 1.5-2.5，表明调查样区生态质量状况良好，处于轻度污染状态。其中，10 月份 D1 和 D2 采样区香农-威纳指数值已达到 2.5 左右，表明整体上 10 月份生态质量状况要好于 7 月份，没有受到明显的污染影响。可能由于 7 月温度太高，导致相应的生物多样性略微较差。综上，可以看出，使用适宜浓度治理互花米草的措施对调查区域的生物多样性影响不明显，甚至及时灭除互花米草有助于巩固生物多样性

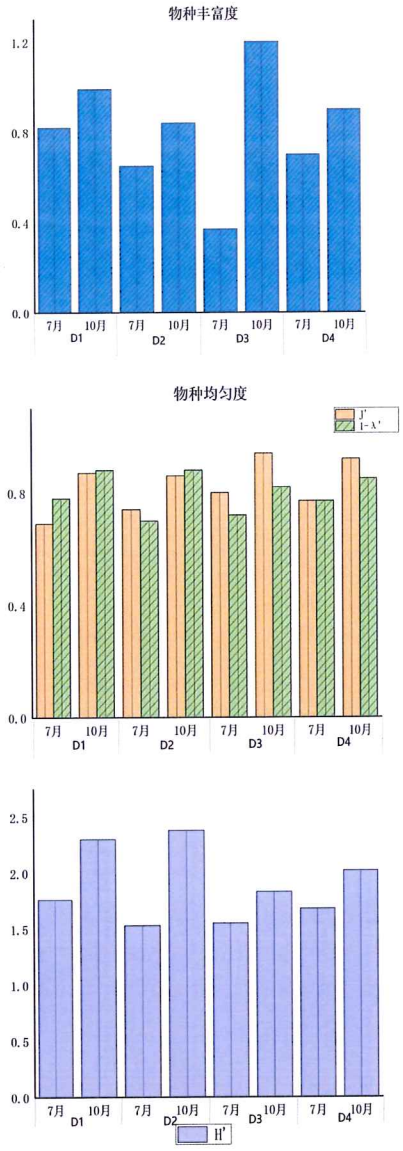


图 2.16 采样点大型底栖动物生物多样性指数变化

- **聚类分析**

聚类分析是分析生物群落相似性的重要方式，能够更为清楚的说明各个样点群落组成的相似性。根据野外采样和室内鉴定获取的数据，使用 Rstudio 软件中的 vegan 包，采用非度量多维尺度分析(NMDS)和层次聚类分析(HCA)方法，分析了 2023 年 7 月和 10 月采样点大型底栖软体动物群落结构的变化。

从聚类图中可以看出，7 月份（d）d1 和 d3 采样点群落结构最为相似，同时 d1、d2、d3 和 d4 也具有一定的相似性，这表明该区域物种组成具有一定的稳定性。在 10 月份（D），D1 和 D2 群落结构较为相似，D3 和 D4 群落结构较为相似。从时间尺度上来看，7 月份该区域的群落结构与 10 月份的 D3 和 D4 采样点有一定的相似性，这表明互花米草环境整治项目对该区域的物种丰度和环境稳定性影响不大。

- **非度量多维尺度分析**

非度量多维尺度分析（Non-metricmultidimensionalscaling,NMDS）是一种将多维空间的研究对象简化到低维空间进行定位，分析和归类，同时又保留对象间原始关系的数据分析方法。一般用组间样本的秩次（数据排名 rankorder）上的差异来定义距离。NMDS 侧重反映距离矩阵中数值的排序关系，弱化数值的绝对差异程度。

检验 NMDS 分析结果的优劣用胁强系数（Stress）来衡量。NMDS 图形通常会给出该模型的 stress 值，用于判断该图形是否能准确反映数据排序的真实分布。通常认为 stress<0.2 时可用 NMDS 的二维点图表示，其图形有一定的解释意义;当 stress<0.1 时，可认为是一个好的排序;当 stress<0.05 时，则具有很好的代表性。运用 Rstudio 软件对 7 月份和 10 月份的样点进行分析，Stress 值为 0.194，表明该图形具有一定的解释意义。NMDS 图形类型为散点图，图形中的点代表样本，不同颜色/形状代表不同的样本分组信息。同组间样本点距离远近说明了样本的重复性强弱。

Non-metricfitR^2=1-$stress^2$。拟合优度图中气泡越大，观测在排序空间的位置与原始位置差距越大。利用 vegan 包和 ggplot2 对 NMDS 图进行处理，7 月份和 10 月份的各样点各自拟合一个椭圆，两个圆相交的范围中所包含的采样点具有一定程度的相似性。

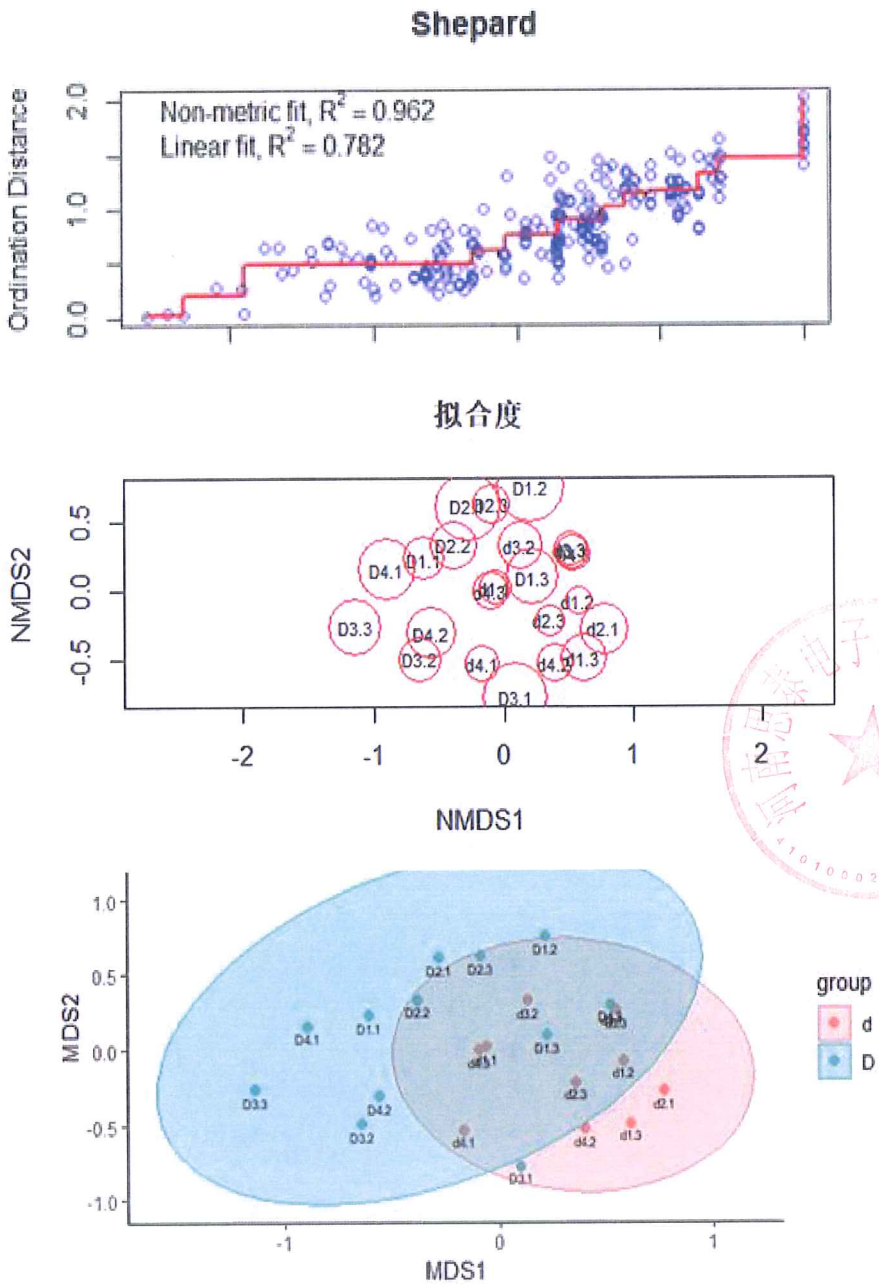


图 2.17 采样点大型底栖动物生物 NMDS 分析

从图可见，7 月份共 12 个采样区域中，仅有 3 个采样点不在相交范围内，另外 9 个采样点都在相交范围内，表明 7 月份该区域环境较为稳定，生态环境良好。10 月份，共 12 个采样区域中，有 6 个采样点不在相交范围内，表明该区域稳定性较 7 月份有所下降。同时，有多个采样点基本完全重合，7 月份的 d4 和 10 月份的 D4 基本重合，表明治理互花米草的措施对该区域影响不大。

（三）水动力泥沙现场数据采集

水动力泥沙现场数据采集主要内容概况：

1.工作目标及内容

2025 年度计划完成船只预约、航海许可的批准和现场观测架的制作等工作， 选择 3-5 个固定观测站位，采集 50 个参数，每个点分别进行水文泥沙连续观测 5 天，并以 50m 间隔沿程采集表层沉积物样品。

2.工作方法与进度

在横沙浅滩开展水动力泥沙现场观测，借助测量水动力泥沙（浪，流和悬沙浓度）的海洋仪器，对横沙浅滩重要部位进行布点（图 2 为参考），开展水动力泥沙观测每个点分别进行水文泥沙连续观测 5 天，并以 50 m 间隔沿程采集表层沉积物样品。于 2025 年底前完成 1 次水动力泥沙数据采集。

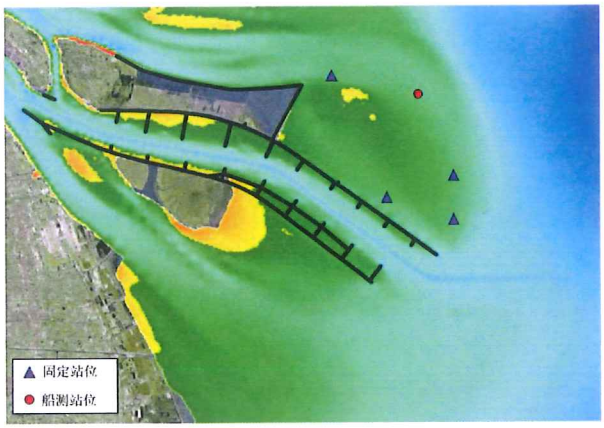


图 2.拟开展的横沙浅滩水动力泥沙数据采集的点位分布图

3.预期产出

完成 1 次横沙浅滩合计 3-5 个固定观测站位、50 个参数的现场水动力泥沙数据采集 1 套（excel 格式，文本格式）；

完成 2025 年横沙浅滩水动力泥沙数据监测报告 1 份（PDF 格式及印刷版）

详细技术方案：

3.1 服务工作方案

2025 年度完成船只、航海许可审批及现场观测架的制作等准备工作， 确定长江口横沙浅滩 3-5 个固定观测站位，确定仪器观测采集参数（至少 50 个），制定每个观测站位进行水文泥沙连续观测 5 天，并以 50m 间隔沿程采集表层沉积物样品。完成横沙浅滩一个航次

3-5 个固定观测站位、50 个参数的现场水动力泥沙数据采集 1 套（excel 格式，文本格式）及完成 2025 年横沙浅滩水动力泥沙数据监测报告 1 份（PDF 格式及印刷版），与甲方协商，定时向甲方汇报工作进展情况，并提交数据和报告。

3.1.1 工作目标及内容

横沙东滩成陆区外围的横沙浅滩水域，直接面对开阔海域，又受到涨落潮水流漫滩及口门强劲风浪作用。近年来，在长江径流输沙锐减、河口大型工程及气候变化影响下，横沙浅滩区域已呈现显著侵蚀现象。鉴于当前横沙浅滩侵蚀情势严峻，横沙浅滩固沙保滩总体工程的实施将面临严峻挑战，沙体过快侵蚀将直接影响长江口整体河势的稳定及长江黄金水道的通畅。开展横沙浅滩水动力泥沙现场观测，可为横沙滩涂的演变趋势预测提供必要的沉积动力学关键参数，进而判断横沙与毗邻地区湿地的生态联动关系，为横沙地区湿地资源保护提供有力支撑。

研究团队长期从事河口海岸地区动力、沉积、地貌观测工作，先后主持了 2 项国家自然科学基金面上项目，积累了丰富的潮滩现场水动力泥沙数据收集经验。本研究首先开展前期的现场勘察工作，选取横沙浅滩典型断面进行现场勘察。根据现场踏勘的情况，制定详细的现场工作计划，包括船只预定、现场可达性、仪器布放及人员的配备等。水动力泥沙现场数据采集：本年度开展 1 次现场水动力及泥沙数据采集。租赁船舶开展横沙浅滩的现场观测，使用流速剖面 HR-profile、紊动流速仪 ADV、悬沙浓度剖面仪 ABS、波潮仪等设备，对典型断面高潮滩、中潮滩和低潮滩布点进行水动力泥沙地貌观测。

测量仪器

（1）观测架：2个架子（包括抱箍、安装扳手等设备）；

（2）水文泥沙波浪仪器：ADCP仪器(1台), ADV （4台），Spotter-微型波浪浮标（4台），OTS温盐深浊度仪 (5台)；

（3）气象仪器：S型一体式风速风向仪器；

（4）采水样瓶、取样袋若干，取样铲、下水裤等经常用的工具等。

横沙水动力泥沙地貌观测利用定点和船测相结合进行。根据观测计划进行横沙水动力泥沙地貌观测（图 3.1），对典型断面高潮滩、中潮滩和低潮滩布点进行水动力泥沙地貌观测。

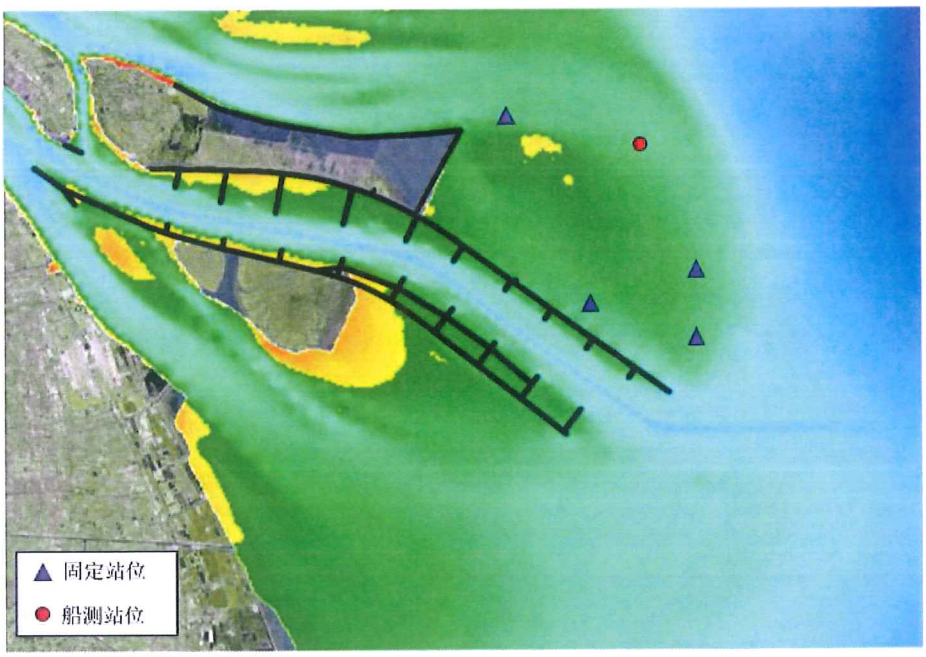


图 3.1 横沙浅滩底质取样和水动力泥沙观测点位分布图

3.1.2 与水动力泥沙观测与数据分析相关的研究工作

河口海岸地区潮滩极浅水沉积环境效应

众所周知，在潮汐作用下，海岸带呈周期性出露和淹没，非常频繁地处于极浅水环境之中。极浅水阶段沉积动力过程常常出现突增现象，因此该阶段地形地貌变化相对剧烈。然而，目前极浅水阶段的现场观测（仪器体积和观测盲区的限制）和数值模拟（边界条件的不确定性）匮乏。因此，开展极浅水阶段沉积动力过程的研究，对于补充河口海岸演化理论体系具有重要的科学意义。课题组在江苏如东潮滩用先进的近底边界层自动观测系统(图 3.2)，对极浅水环境(水深< 0.2 m 时段)沉积动力过程进行了连续观测，提取极浅水环境的水动力和地貌演化信息，在极浅水沉积环境效应研究方面取得新突破：正常天气状况下，水深< 0.2 m 的极浅水阶段产生的侵蚀淤积厚度是水深 > 0.2 m 阶段地貌变化的 3 倍，水深< 0.2 m 的极浅水阶段地貌变化率比水深 > 0.2 m 阶段高一个数量级。尽管这种极浅水阶段持续时间仅占整个潮周期的 10%，但是该时段却发生了快速且强烈的地貌变化。造成这种现象的原因是涨潮期间极浅水阶段水动力大大超过了底床临界侵蚀切应力，导致涨潮极浅水阶段发生剧烈侵蚀，而落潮期间极浅水阶段水动力弱于水深 > 0.2 m 阶段的水动力，因此导致了落潮极浅水阶段发生快速淤积(图 3.3)。这一研究结果表明极浅水沉积地貌效应在整个地貌演化中起着极其重要的

作用（图 3.4）。该研究有助于弥补传统潮滩沉积动力过程研究空白，丰富潮滩沉积-动力-地貌过程的认识，推动海岸地貌动力学及相关学科的发展。

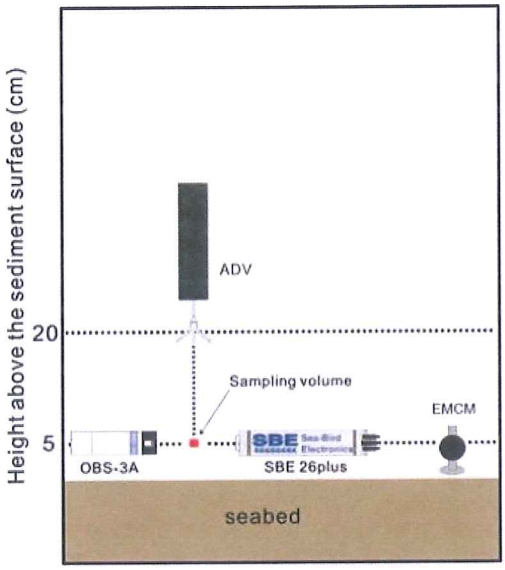


图 3.2 极浅水环境观测仪器设置

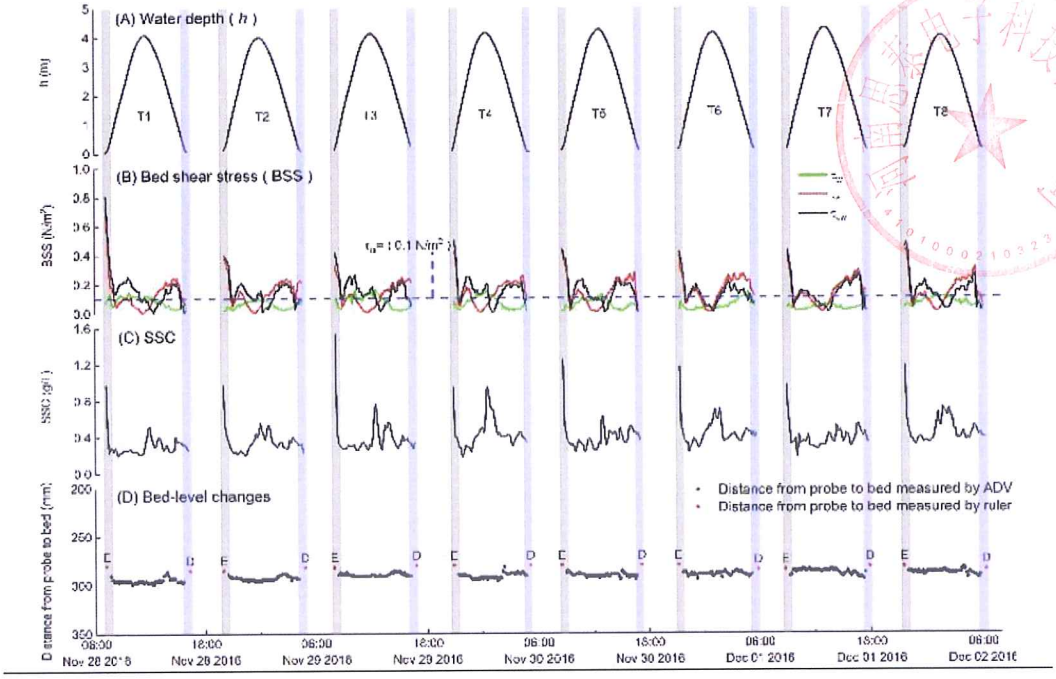


图 3.3 正常天气状况下如东潮滩沉积动力过程连续观测结果(2016.11.26-2016.12.2)。灰色条状代表是涨潮期间极浅水阶段沉积动力过程(水深< 0.2 m)，而浅紫色条状代表是落潮期间极浅水阶段沉积动力过程 (Shi et al., 2019, Journal of hydrology)

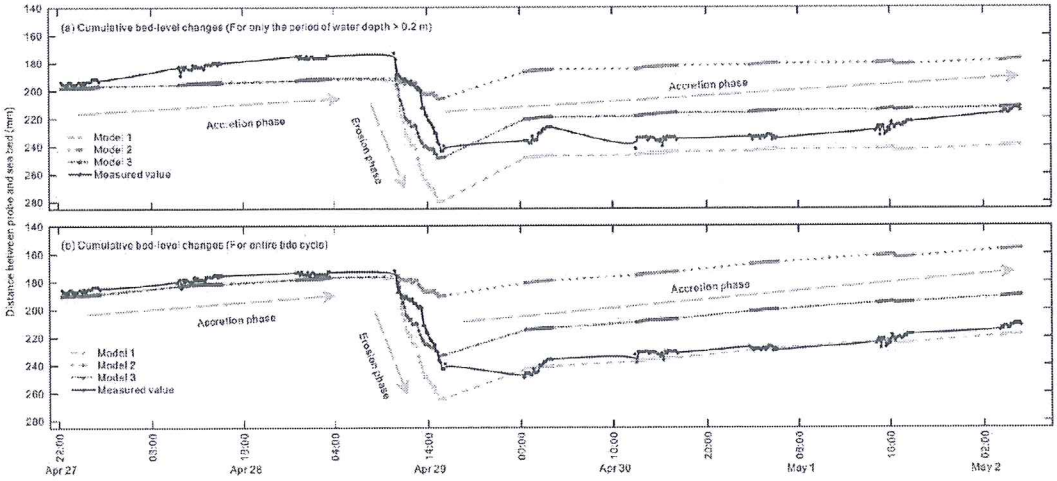


图 3.4 潮周期内底床侵蚀淤积过程实测值和预测值对比时间过程线
（Shi et al., 2017, Journal of Geophysical Research: Oceans）

潮滩侵蚀淤积循环规律方面的新认识

河口海岸、潮汐环境的沉积地貌过程是海岸海洋科学系的传统研究领域。近年来，海岸海洋科学系借助高精度、高时空分辨率的动力-沉积物-地貌观测系统和数值模拟技术（图 3.5），定量研究了河口海岸、潮汐环境中细颗粒物质输运的物理过程和机制，加深了对海岸带侵蚀淤积循环规律的认识。近期在长江口崇明东滩潮间带的研究发现（图 3.6），（1）侵蚀或淤积过程是由风速-风向和大-小潮周期的交互作用所控制的，即为近岸风和潮汐交互影响的结果；（2）无论是在正常天气还是在风暴天气，近岸风均可以显著改变潮滩滩面高程；（3）上述过程可以通过经典的浪-流-沉积物耦合模型来描述和预测。这是对海岸冲淤规律的新认识，有助于进一步发展河口海岸演化的新模式，为建立潮滩和三角洲沉积地貌演化的正演模拟奠定基础，亦可并为海岸带综合管理和生物工程建设提供科学依据。

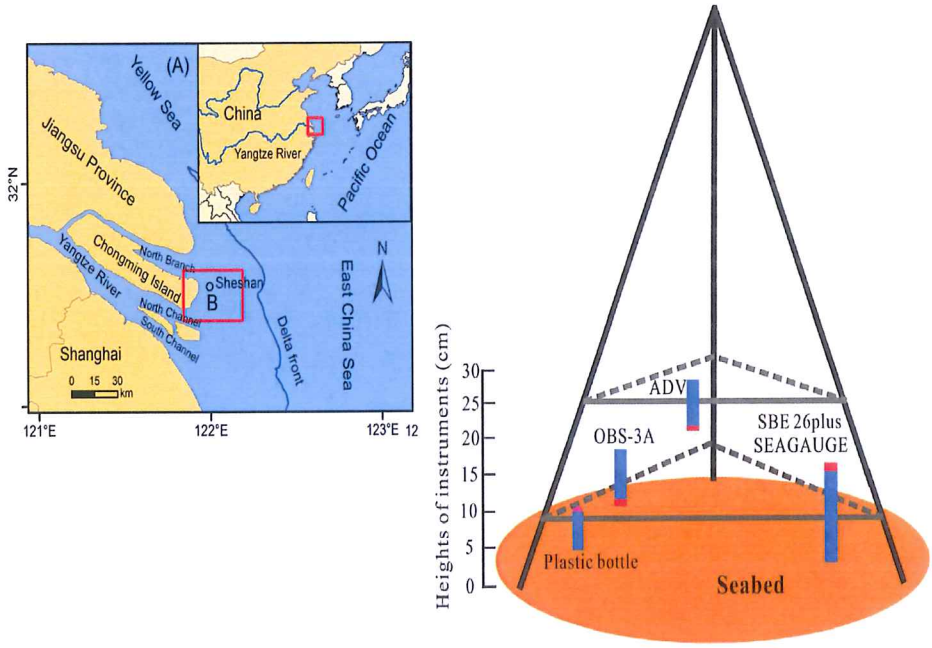


图 3.5 潮滩侵蚀淤积循环观测研究示意图

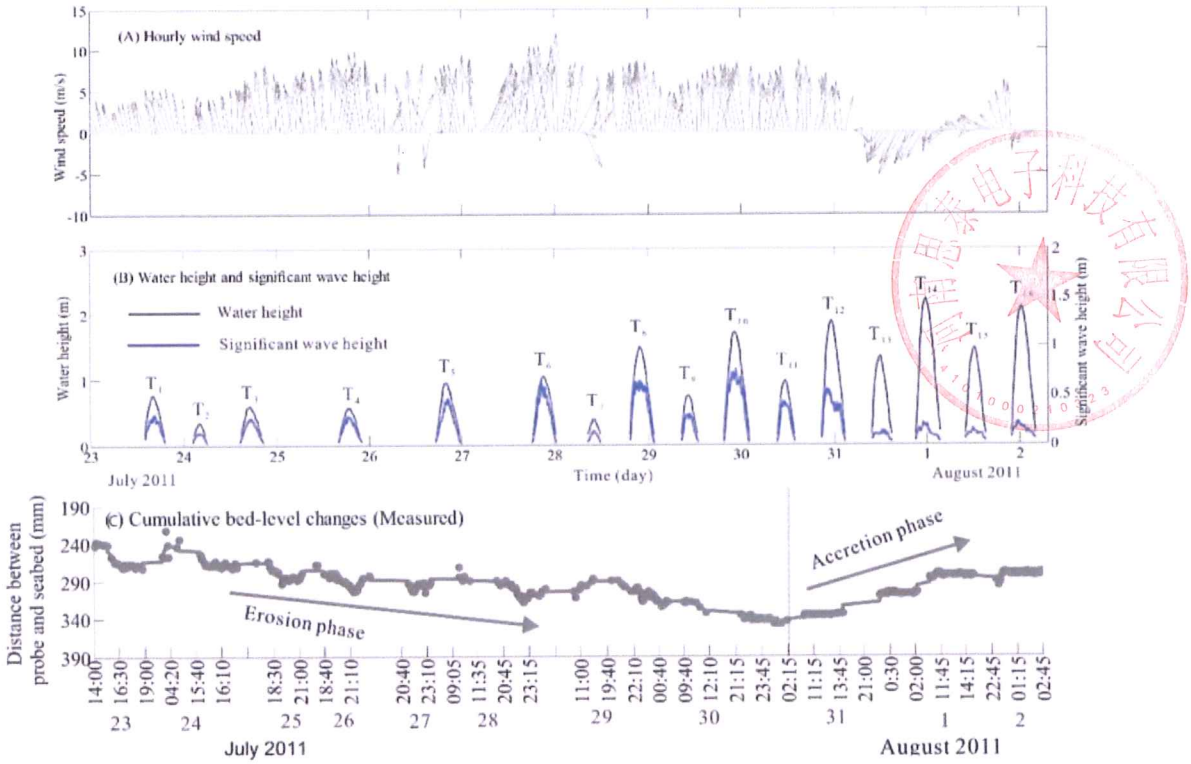


图 3.6 潮滩侵蚀淤积循环与近岸风和大-小潮周期的关系图

（Shi et al., 2017, Journal of Geophysical Research: Oceans）

台风事件对盐沼植被的影响研究进展

选取长江口崇明东滩淤泥质潮间带的盐沼-光滩过渡带为研究对象，借助无人机摄影测量以及实时动态差分定位技术（Real-time kinematic, RTK），对台风“烟花”和台风“梅花”前后进行正射影像获取和高程测量；同时利用动力泥沙仪器于台风“烟花”前、中、后进行水动力泥沙（波浪、潮流、水深、泥沙）的现场连续观测，探讨台风事件对淤泥质盐沼-光滩过渡带冲淤格局和盐沼植被的影响。台风“烟花”影响下，淤泥质盐沼-光滩过渡带呈现光滩区域侵蚀、盐沼区域淤积的状态；光滩区域侵蚀深度的均值和最大值分别为 5.3 cm 和 32 cm；盐沼区域淤积厚度的均值和最大值分别为 9.4 cm 和 49 cm。盐沼-光滩过渡带冲淤格局是由盐沼和光滩区域的植被覆盖、水动力差异所致。在光滩区域，台风影响下水体的波浪、潮流作用均显著增强，波流联合剪切应力也随之增大且远大于底床临界侵蚀剪切应力，滩面侵蚀。台风影响下潮流流速的增强导致水体挟沙能力增强，光滩区域水体将再悬浮的泥沙带至盐沼区域。盐沼区域密集植被消浪缓流，削弱水动力强度；所以水体到达盐沼后挟沙能力变弱，泥沙沉积，因此盐沼区域淤积。台风影响下冲淤格局的侵蚀处盐沼植被生物量减少，因为植被会被连根拔起；弱淤积处盐沼植被新增，可能是因为营养物质的积累为盐沼植被的生长提供了有利条件，同时部分植被的倒伏也会导致无人机航测所得植被面积假性增加；因此，强淤积处（淤积层过厚，泥沙掩埋植被），盐沼植被也出现生物量减少现象。台风“烟花”影响下生物量减少的植被区域为侵蚀区域以及强淤积区域（淤积层过厚，掩埋植被），新增植被区域为弱淤积区域（淤积弱，未掩埋植被）。研究区消亡植被和新增植被面积分别为 2583 m^2 和 5539 m^2，分别占研究区植被总面积的 7.3%和 15.5%。台风“梅花”影响下消亡植被区域为滩面侵蚀区域，新增植被区域为滩面淤积区域；研究区消亡植被和新增植被面积分别为 10323 m^2 和 3497 m^2，分别占研究区植被总面积的 27.1%和 9.2%。

上述研究表明，台风对崇明东滩淤泥质盐沼-光滩过渡带的滩面冲淤格局具有重要影响：台风引起的水动力变化会导致光滩泥沙的再悬浮与输运，泥沙搬离原地（光滩）并异地沉积（盐沼）；不同台风影响下潮况、近岸风向以及滩面盐沼植被分布均会影响滩面冲淤格局的变化。单个台风影响下崇明东滩淤泥质盐沼-光滩过渡带的冲淤格局可使盐沼植被消亡 27.1%，对盐沼植被产生重要影响。

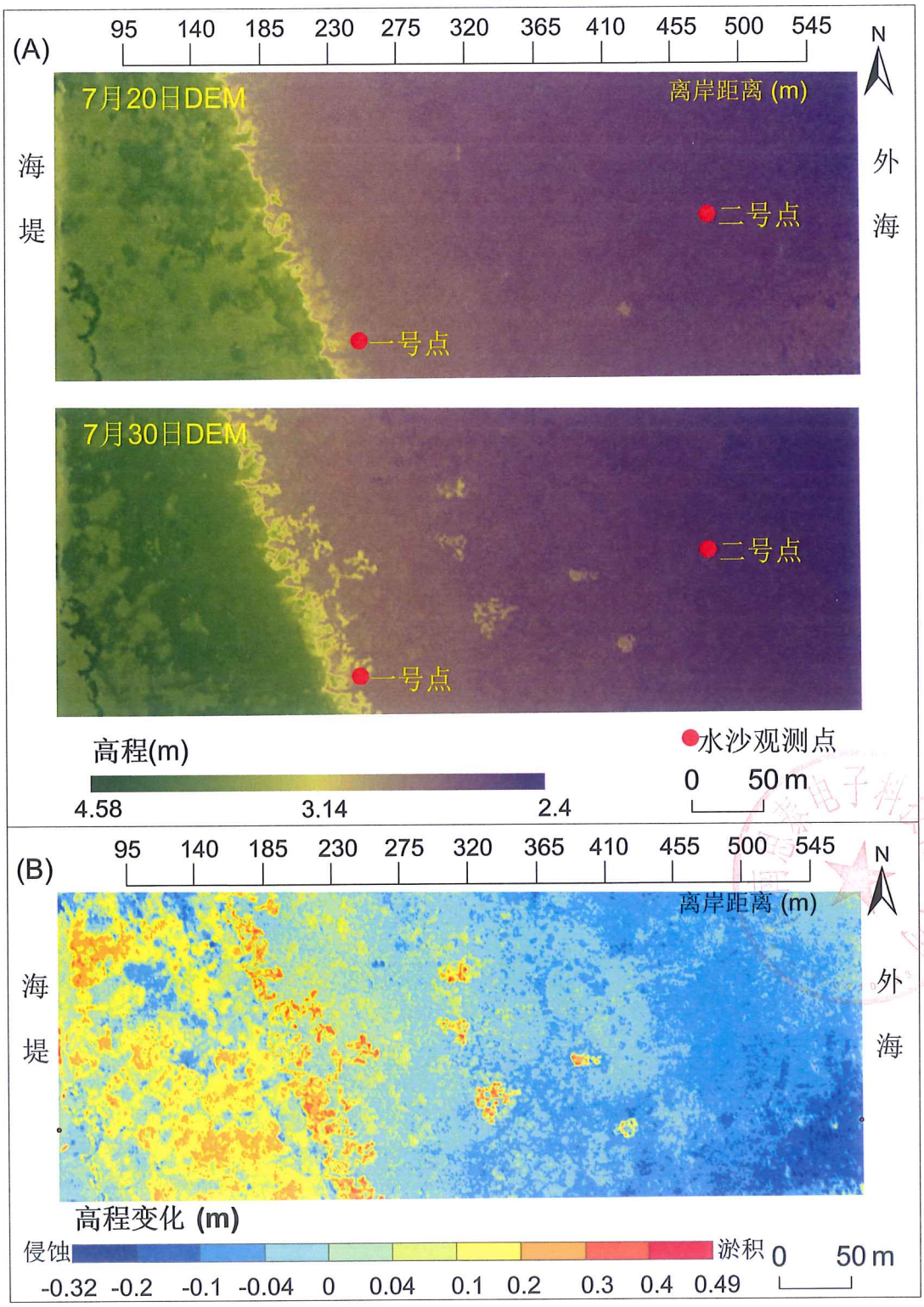


图 3.7 台风“烟花”前后潮滩高程分布图（A）、冲淤变化图（B），数字表示冲淤幅度，负数表示侵蚀，正数表示淤积

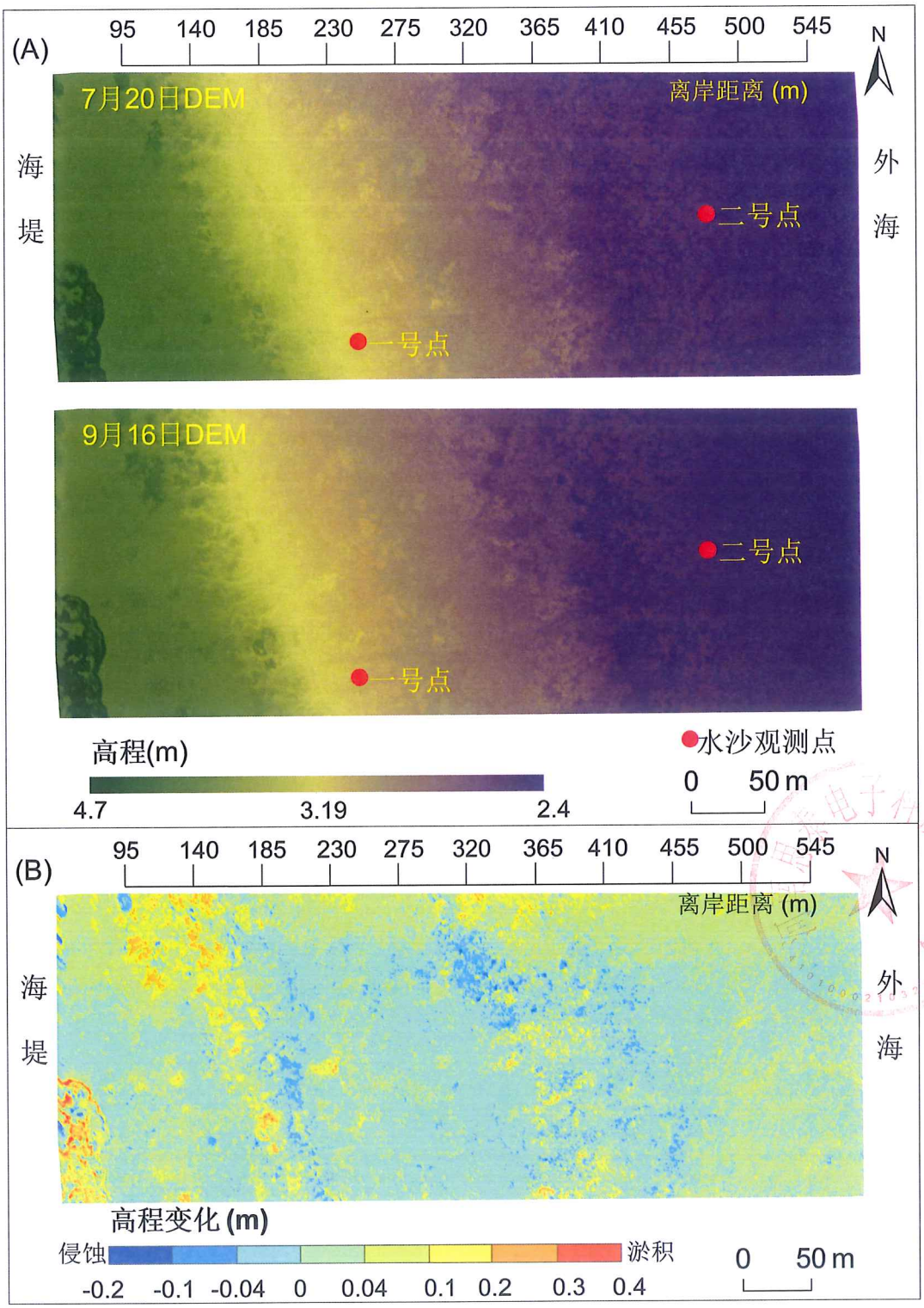


图 3.8 台风“梅花”前后潮滩高程分布图（A）、冲淤变化图（B），数字表冲淤幅度，正值表淤积，负值表侵蚀

图 3.9 台风“梅花”过后光滩区域的侵蚀坑

（四）横沙湿地资源趋势模拟

横沙湿地资源趋势模拟主要内容概况：

1. 工作目标及内容

本年度计划对长江口历史演变过程和特征进行定量分析，提炼冲淤演变的主要因子，预测横沙浅滩区域短、中、长期尺度地貌演化趋势。

2. 工作进度安排

6 月底前完成对以往横沙浅滩水动力泥沙现场采集所获得的断面水动力数据进行全面分析和研究。

7 月完成横沙浅滩动力地貌的历史演化规律分析；

12 月 15 日前完成生物地貌耦合模型研发，并进行调试、验证等工作；完成短、中、长期横沙浅滩地貌演化趋势模拟，预测横沙浅滩淤涨趋势预测与分析，编写横沙浅滩短期地貌冲淤趋势预测报告。

3. 预期产出

1）生物地貌耦合模型。（模型文件及使用说明）

2）横沙浅滩短期地貌冲淤趋势预测报告（PDF 格式及印刷版）。

详细技术方案：

4.1 服务工作方案

2025 年度计划对长江口历史演变过程和特征进行定量分析，提炼冲淤演变的主要因子。分析和研究以往横沙浅滩水动力泥沙现场采集所获得的断面水动力特征，研发生物地貌耦合模型，并完成调试、验证模型等工作，同时模拟短、中、长期横沙浅滩地貌演化趋势，完成预测横沙浅滩淤涨趋势预测与分析和生物地貌耦合模型，并编写横沙浅滩区域短、中、长期尺度地貌演化趋势。

4.1.1 工作目标及内容

横沙浅滩作为重要的湿地生态系统，其动力地貌的演化对区域生态环境、海洋生态系统以及人类活动具有深远影响。理解横沙浅滩的历史演化规律及其主控因子的定量贡献，不仅有助于揭示浅滩地貌变化的内在机制，还能为湿地保护与管理、海岸工程设计及生态恢复提供科学依据。因此，本研究旨在系统分析横沙浅滩动力地貌的历史演化过程，明确主要驱动因素及其作用机制，以支持区域可持续发展与生态环境保护目标的实现。

1.揭示历史演化规律：系统梳理横沙浅滩自过去几十年至今的地貌变化趋势，分析地貌演化的阶段性特征和整体发展方向。

2.识别主控因子：通过多元统计分析和数值模拟，明确影响横沙浅滩动力地貌演化的主要自然与人为因素。

3.定量贡献分析：量化各主控因子对地貌演化的具体影响程度，评估其在不同时间段和空间范围内的作用力。

4.1.2 工作内容及方案

开展横沙浅滩动力地貌的历史演化规律及主控因子的定量贡献研究，旨在系统分析横沙浅滩地貌随时间的变化趋势，并明确影响这些变化的主要自然与人为因素。首先，研究团队将收集和整理大量的潮位数据、历史海图以及水沙水动力等相关资料。这些数据的获取将通过多种途径，包括卫星遥感、无人机航拍以及现场实测，确保数据的全面性和准确性。通过对这些历史和现有数据的深入分析，研究团队将能够重建横沙浅滩在不同时间节点的地

貌分布情况，揭示其演化过程中的关键变化点和发展趋势。

在数据收集和整理的基础上，研究将进一步采用多元统计分析和数值模拟方法，识别并量化影响横沙浅滩动力地貌演化的主要因子。自然因子如潮位变化、海平面上升、气候变化和泥沙供应量等，将通过相关性分析和回归模型进行评估，以确定其对地貌变化的具体影响。同时，人为因子如港口建设、填海造地和航道疏浚等，也将通过因子分析和敏感性分析来量化其对浅滩地貌演化的贡献。通过这些方法，研究团队将能够明确各因子的相对重要性及其在不同时间段和空间范围内的作用力。

为了验证研究结果的可靠性，项目将构建横沙浅滩的水动力-泥沙耦合数值模型，并进行历史过程的检验与分析。模型的建立和调试将基于收集到的潮位数据、历史海图和水沙水动力资料，确保模型能够准确模拟横沙浅滩的地貌演化过程。通过对比模型输出与历史观测数据，研究团队将调整和优化模型参数，提升其预测精度和稳定性。最终，利用优化后的模型，研究将预测横沙浅滩在不同管理措施和环境变化情景下的未来地貌演化趋势，为区域生态环境保护和海洋资源管理提供科学依据和决策支持。

4.1.3 已有动力-泥沙数值模型及研究工作

Delft3D 模型简介

本工作方案使用国际上先进的 Delft3D 模型系统，该系统整合了水动力、物质输运、粒子追踪、水质、生态、波浪和地貌等多个子模块，由荷兰 Deltares 公司负责维护和完善，目前全部子模块已完全开源（http://oss.deltares.nl/web/delft3d）。水动力模块（Delft3D-FLOW）是模型系统的基础，基于静水压力近似差分联解浅水 Navier-Stokes 方程，计算结果为其他子模块提供水动力信息。数值格式采用有限差分 ADI（交替显隐格式）方法对方程进行离散求解，ADI 方法具有稳定性好、精度高的特点。模型在水平方向使用矩形网格或正交曲线网格，交错网格布置变量；垂向上可为水深平均的 2D 模式或垂向σ坐标或者 Z 坐标分层的 3D 模式。模型常被应用于模拟浅海、近岸、河口、泻湖、河流和湖泊等水平尺度远大于垂向深度的水动力现象。模型中能够考虑的物理过程包括天文潮、河流径流、盐淡水混合、风浪和浪流耦合（离线和在线）、泥沙输运（非粘性、粘性及相互作用）和地形时时更新）。前人研究表明使用合理的模型参数和输入条件，Delft3D 模型能够重现长江河口多时间尺度的水动力场、泥沙输运和地形冲淤。许多已发表的研究表明二维模型能够用于河口和近岸冲淤演变过程的模拟和机制分析，因此本文使用二维模式的 Delft3D 来模拟长江河口年代际冲淤演

变。本节下文将对涉及到的四个主要模块，即水动力模块、泥沙输运模块、地形更新模块和波浪模块，进行简单介绍。

（1）水动力模块

水动力模块使用水深平均的二维模式，忽略水体的垂向差异，因此去掉动量守恒方程中的垂向分量即为：

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}+g\frac{\partial \zeta}{\partial x}+c_f\frac{\bar{u}\sqrt{\bar{u}^2+\bar{v}^2}}{h}-\nu_e\left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}\right)-f_{cor}\bar{v}=M_x$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}+\bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}+g\frac{\partial \zeta}{\partial y}+c_f\frac{\bar{v}\sqrt{\bar{u}^2+\bar{v}^2}}{h}-\nu_e\left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2}\right)+f_{cor}\bar{u}=M_y$$

其中：

$$c_f=g\frac{n^2}{\sqrt[3]{h}}$$

垂向平均的连续性方程为：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial\left(h\bar{u}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(h\bar{v}\right)}{\partial y}=q'$$

式中，$\bar{u}$为垂向平均x方向上的流速（m/s）；$\bar{v}$为垂向平均y方向上的流速（m/s）；h为深水（m）；ζ为相对于平均海平面的水位（m）；g为重力加速度（m/s²）；c_f为无量纲化的摩擦系数；n为曼宁系数（s/m³）；ν_e为涡流粘性系数（m²/s）；f_{cor}为科氏力系数（1/s）；M_x为x方向外部动量源汇项（m/s²）；M_y为y方向外部动量源汇项（m/s²）；q'为单位面积内的径流量（m³/s/m²）。通过联解连续性方程和动量守恒方程得到每一个时间步长的水动力场，可用于计算泥沙输运场和地形更新。时间步长Δt通常由CFL数（Courant-Friedrichs-Lewy number）来确定：

$$C_t=2\Delta t\sqrt{gh(\frac{1}{\Delta x^2+\Delta y^2})}<4\sqrt{2}$$

式中，Δx和Δy是x、y方向最小网格尺寸。

（2）泥沙输运模块

泥沙输运模块可以单独或同时考虑考虑非粘性沙（sand）和粘性沙（mud）组分，前者既可以底沙又可以悬沙形式运动，后者则仅以悬沙形式输运。粘性沙和非粘性沙的通过粒径大小来区分，临界粒径为 0.064 mm。在二维模拟中，悬沙输运计算是基于水深平均模式下的平流-扩散方程：

$$\frac{\partial hc_i}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}c_i}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}c_i}{\partial y}-\frac{\partial}{\partial x}\left(h\varepsilon_h\frac{\partial c_i}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(h\varepsilon_h\frac{\partial c_i}{\partial y}\right)=S_i$$

式中，c_i 是第 i 个泥沙组分的浓度（kg/m³）；ε_h 是泥沙水平涡流扩散系数（m²/s）；S_i 是第 i 个泥沙组分的源汇项，代表水体与床面之间的泥沙交换。

非粘性沙泥沙（粒径大于 0.064 mm）的计算基于 Van Rijn (1993)公式，在近底附近定义一个参考高度 a，参考高度以下为底沙输运，反之则为悬沙输运。参考高度 a 的计算公式为：

$$a=\min\left[\max\left\{Fac\cdot k_s,\frac{\Delta r}{2},0.01h\right\},0.20h\right]$$

式中，Fac 为比例因子，默认取 1；k_s 为与水流有关的有效糙率高度，默认取 0.01 m；Δr 为波浪相关的沙波高度，取值 0.025 m。通过在参考高度处指定一个参考泥沙浓度来实现泥沙从床面进入水体，即发生侵蚀；泥沙淤积量则由水体浓度和沉降速度决定。参考浓度计算公式为：

$$c_{a,i}=0.015\rho_{s,i}\frac{D_{50,i}\left(T_{a,i}\right)^{1.5}}{a\left(D_{*,i}\right)^{0.3}}$$

式中，$D_{50,i}$ 为第 i 个非粘性组分的中值粒径（m）；$D_{*,i}$ 为第 i 个非粘性组分无量纲化的粒径大小；$T_{a,i}$ 为第 i 个非粘性组分无量纲化的底部切应力，与波流底部切应力和临界起动应力相对大小有关，临界切应力的计算根据希尔兹曲线，唯一控制因子是 D_{50}。根据 Van Rijn (1993)公式，泥沙的 D_{50} 同样是决定沉降速度的主要因子：

$$w_{s,i}=\begin{cases}\dfrac{(s_i-1)gD_{50,i}}{18\nu} & 65\mu m<D_{50}<100\mu m\\ \dfrac{10\nu}{D_{50,i}}\left(\sqrt{1+\dfrac{0.01(s_i-1)gD_{50,i}^3}{\nu^2}}-1\right), & 100\mu m<D_{50}\le 1000\mu m\\ 1.1\sqrt{(s_i-1)gD_{50,i}} & 1000\mu m<D_{50}\end{cases}$$

式中，$w_{s,i}$ 为第 i 个非粘性组分的沉降速度(m/s)；s_i 为第 i 个非粘性组分的相对密度 ρ_s/ρ_w；ρ_s 和 ρ_w 分别为泥沙和水体的密度；ν 是水的运动黏度系数（m^2/s）。

非粘性沙的底沙输运根据公式计算：

$$\left|S_{b,i}\right|=0.006\omega_{s,i}D_{50,i}\frac{u_{eff}\left(u_{eff}-u_{cr,i}\right)^{1.4}}{\left[\left(s_i-1\right)gD_{50,i}\right]^{1.2}}$$

式中，$\left|S_{b,i}\right|$ 为第 i 个非粘性组分的底沙单宽输运强度（$m^3/m\ s$）；u_{eff} 为垂向平均流速和近底波轨流速的合速度（m/s）；$u_{cr,i}$ 为基于希尔兹曲线得到的第 i 个非粘性组分临界起动速度（m/s）。根据 Bagnold（1966）和 Ikeda（1982）考虑床面坡度对底沙输运的作用。

粘性泥沙（粒径小于 0.064 mm）的侵蚀和淤积量计算采用 Partheniades-Krone 公式（Partheniades, 1965）：

$$E_i=\begin{cases}M_i\left(\dfrac{\tau_{cw}}{\tau_{ce,i}}-1\right), & \tau_{cw}>\tau_{ce,i}\\ 0 & \tau_{cw}\le\tau_{ce,i}\end{cases}$$

$$D_i=w_{s,i}c_{b,i}$$

式中，E_i 和 D_i 分别为第 i 个粘性组分的侵蚀通量和沉降通量（$kg/m^2\ s$）；M_i 为第 i 个粘性组分的侵蚀速率（kg/m^2s）；τ_{cw} 为波流相互作用下的底部切应力（N/m^2）；$\tau_{ce,i}$ 为第 i 个粘性组分的临界侵蚀应力；$w_{s,i}$ 为第 i 个粘性组分的沉降速度（m/s）；$c_{b,i}$ 为第 i 个粘性组分水体悬沙浓度（kg/m^3）。采用 Winterwerp（2007）的建议，认为不存在临界淤积应力，即粘性泥沙组分始终处于沉降状态。

（3）地形更新模块

地形更新计算基于泥沙质量守恒方程，即泥沙输运场的辐散和床面高程变化之间的平

衡公式为：

$$(1-\varepsilon)\frac{\partial z_b}{\partial t}+\frac{\partial S_x}{\partial x}+\frac{\partial S_y}{\partial y}=0$$

式中，ε为床面孔隙率，取默认值 0.4；z_b 为床面高程；S_x 为 x 方向泥沙输运通量；S_y 为 y 方向泥沙输运动量。床面高程在每个水动力时间步长都更新，保证了每一次水动力计算都使用正确的地形。由于水动力变化的时间尺度通常比河床冲淤小 1-2 两个量级，地貌加速因子（*MF*）的引入解决了两者之间的差异。通过将每个水动力时间步长计算得到的床面变化量乘以一个常数得到加速后的地形变化，使水动力时间步长被线性扩展到地形更新时间步长：

$$\Delta t_{mor}=MF\times\Delta t_{hydro}$$

式中，Δt_{hydro} 和 Δt_{mor} 分别为水动力和冲淤演变时间步长。*MF* 方法大大提高了地貌模型的计算效率。

（4）波浪模块

波浪计算采用第三代波浪模型 SWAN（http://www.swan.tudelft.nl），基于矩形或正交曲线网格上计算波浪谱，主要受风场驱动。波浪和水动力模型可以在线或离线耦合。在线耦合为波浪和水动力之间发生信息交换，两者的计算结果互相影响；离线耦合为波浪模块在指定时间间隔时计算得到的波浪参数用于水动力计算，水动力对波浪没有信息反馈。波浪对地形冲淤的影响主要在浅水地区，表现为破波和底部切应力增强。

Delft3D 模型设置

（1）计算区域和网格

模型计算区域（图 4.1）包含了整个长江河口（上边界至潮区界大通）、杭州湾和邻近海域，东西和南北空间跨度分别为 580 km 和 450 km。为了保证尽可能高的分辨率和模型计算效率，网格分辨率从口内的~300 m 到外海边界附近的~3000 m。长江河口滩槽格局的空间尺度在 10 km 量级上，因此该网格的分辨率足以用于冲淤演变模拟。外海开边界位于 50 m 等深线附近，距离口门 10 m 等深线~125 km。因此，模型区域的大小足以忽略边界条件对本文关注的河口区域地貌模拟可能产生的影响。水动力模型采用垂向平均的二维模式，基于 CFL 判据选取时间步长为 2 min。北槽深水航道两侧的双导堤和丁坝群在模型中使用 Current Deflection Wall (CDW)来表示，当水位超过指定高程时水流能越过导堤。

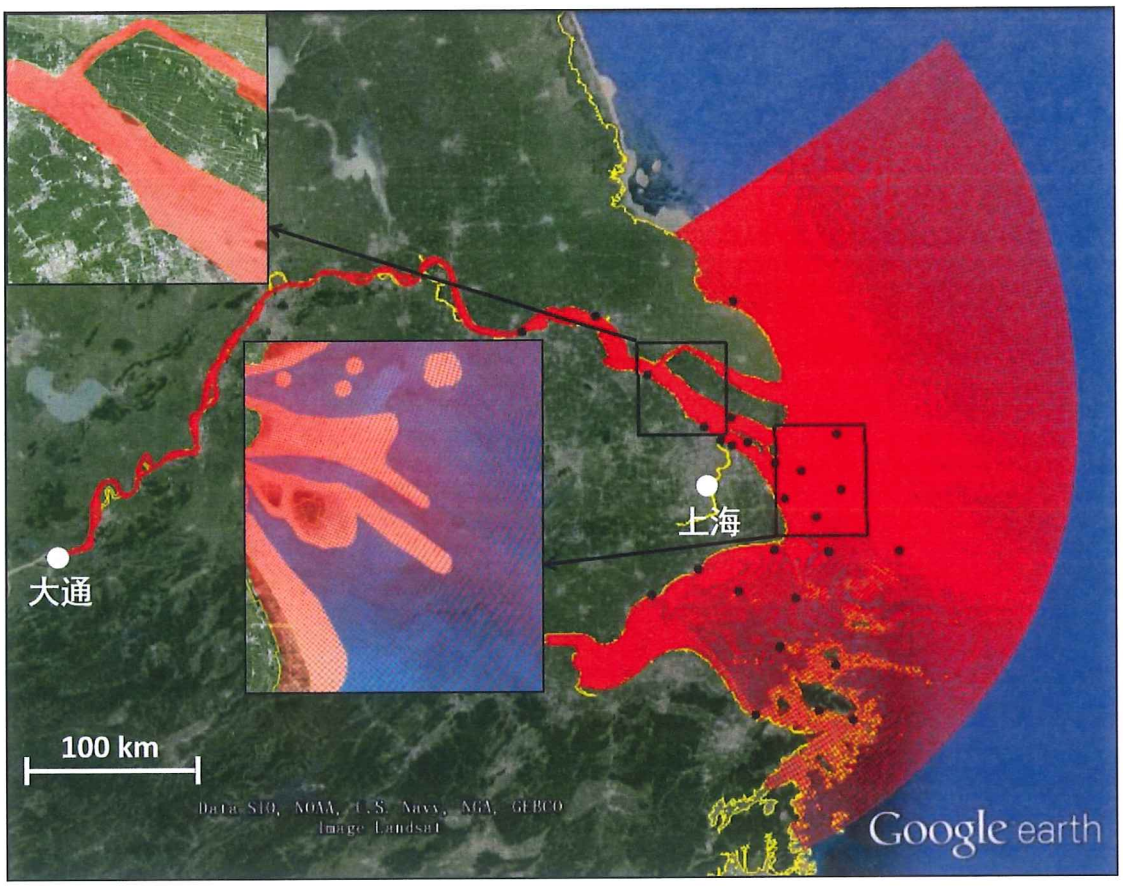


图 4.1 模型计算区域和网格（红线），局部放大区域为南支和拦门沙地区，黑色点代表用于潮汐调和常数验证的验潮站

（2）外海开边界条件

外海开边界由八个主要分潮驱动，分别为 M2、S2、K1、O1、N2、K2、P1 和 Q1，各分潮的调和常数基于一个经充分率定验证的覆盖整个东海陆架的大区模型。强烈的大小潮变化影响长江河口床面冲淤，因此模型开始和终止地形更新计算均设定在小潮期间，从而能最大限度的减小因无法使模拟时间包含完整潮周期而引起的误差。边界条件用于地貌模拟前依然经过了充分的潮汐和水动力验证，验证结果将在第 4.4 节中进行详细描述。外海盐度边界条件使用海洋图集数字化得到的月平均盐度场。而为模式中不存在垂向分层，因此模型中考虑盐度的作用主要用于絮凝模型中发生絮凝沉降的判断条件。由于外海边界距离长江口和杭州湾高含沙区域较远，且观测显示边界附近的水体悬沙浓度较低，因此设置边界上的泥沙浓度为 0，表明外海不向模型区域供给泥沙。模型还指定 Thatcher-Harleman 时间差为 120 min，意味着泥沙会随着涨潮回到模型区域。

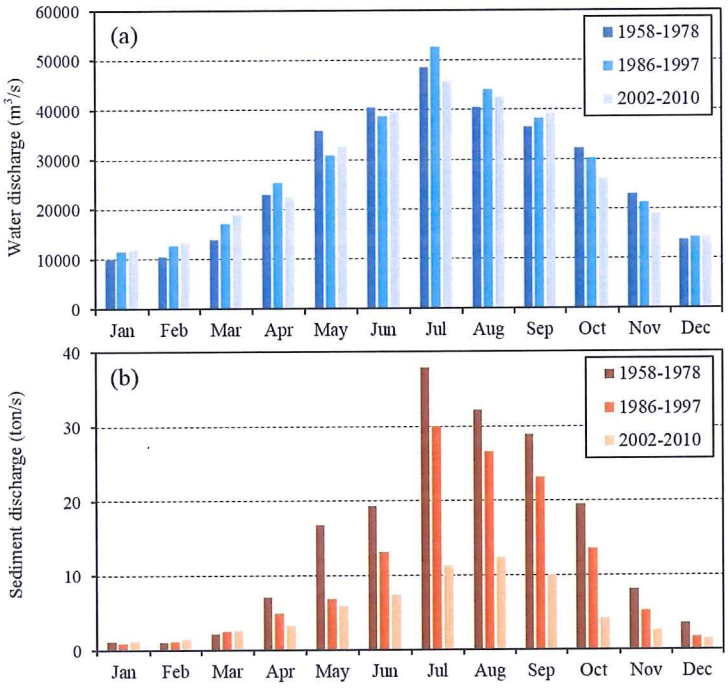


图 4.2 三个后报模拟时期（1958-1978、1986-1997 和 2002-2010）内大通站多年月平均（a）径流量和（b）输沙量

（3）河流开边界条件

河流开边界位于潮区界大通，大通也是长江流域离开口最近的水文站，基本不受潮波影响，因此边界条件指定大通站实测的时间序列径流量和悬沙浓度。大通大水沙通量存在强烈的季节性变化，根据多年月平均值可以看出输沙比径流更集中在洪季（图 4.2）。具体来讲，高径流量仅发生在 7 月，而高来沙量通常在 7-9 月持续发生（图 4.2）。枯季（12、1、2 月）的径流量和输沙量均为一年中最低，且低来沙量会持续到 3 月。其他月份均为中间径流量和输沙量。鉴于以上水沙的年内分布特征，为在模型中考虑水沙季节性变化，我们将多年逐月平均值概化为代表 6 个不同水沙组合的时段，即 P1-P6（表 4.1），用于各历史时期演变的后报模拟。其中，P2 和 P4 分别为 3 月和 7 月的月平均值，其他时段为对应多个月份的平均值。这样概化的优点之一就是能够保证一年内的总径流和输沙量与实测值保持一致，不足之处是洪峰流量有所削弱。分析认为洪峰流量持续时间较短，通常为几天，因此在模型中使用洪季月平均流量对结果不会产生本质影响。模型范围同时还覆盖杭州湾和钱塘江河口，因此河流边界指定恒定径流量（1000 m^3/s）且忽略泥沙输入。

表 4.1 六个时段（P1-P6）河流水沙条件概化结果，对应月份、水动力模拟时间、加速因子（MF）和年总量，以及 2010-2030 预测模拟 MF（年总输沙量单位为 Mt yr^{-1}）

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	年总量
月份		Dec., Jan., Feb.	Mar.	Apr., May, Jun.	Jul.	Aug., Sep.	Oct., Nov.	
水动力模拟时间（月）		1	0.5	1.5	1	1	1	6
1958-1978	径流量 ($m^3 s^{-1}$)	11415	13998	33075	48419	38469	27633	27409
	输沙量 ($ton\ s^{-1}$)	1.890	2.204	14.387	37.911	30.565	13.774	469[a]
	含沙量($kg\ m^{-3}$)	0.166	0.157	0.435	0.783	0.795	0.498	0.543
	MF	60	40	40	20	40	40	40
1986-1997	径流量 ($m^3 s^{-1}$)	12828	17242	31671	52558	41080	25780	28161
	输沙量 ($ton\ s^{-1}$)	1.275	2.503	8.288	29.967	24.882	9.385	343[a]
	含沙量($kg\ m^{-3}$)	0.099	0.145	0.262	0.570	0.606	0.364	0.386
	MF	33	22	22	11	22	22	22
2002-2010	径流量 ($m^3 s^{-1}$)	13290	18975	31630	45754	40886	22568	27265
	输沙量 ($ton\ s^{-1}$)	1.416	2.596	5.554	11.284	11.199	3.403	169[a]
	含沙量($kg\ m^{-3}$)	0.107	0.137	0.176	0.247	0.274	0.151	0.197
	MF	24	16	16	8	16	16	16
2010-2030	*MF*	60	40	40	20	40	40	40

（4）风场和波浪

模型中的风场为气候态月平均风场（1995-2005），来自 NCDC/NOAA Blended Sea Winds。为增加模型计算效率波浪与水动力离线耦合，每 1 小时 SWAN 模型计算得到的波浪参数用于水动力和床面更新计算中。尽管短时间尺度大风浪条件（如风暴潮和寒潮）能够引起长江口剧烈的床面冲淤变化，这种变化通常在正常天气条件时存在一定程度的恢复，对年代际时间尺度冲淤演变的影响较小，因此模型中暂时不考虑。

（5）泥沙参数和初始床面组成

泥沙参数的给定是冲淤演变模拟的关键。为考虑实际泥沙特性，合理选取泥沙参数，课题组于 2015 年 9 月在长江口开展了大面积的表层底质调查，采样范围从徐六泾至外海 122°30′，覆盖了包括所有分汊河道在内的整个河口（图 4.3）。样品通过室内测验得到 D_{50}（图 4.3a）和颗粒组成（图 4.3b、图 4.4）。结果表明长江河口床面泥沙特性具有显著的空间差异性，D_{50} 的变化范围较大，从~5 μm 至~250 μm，口内河段和拦门沙地区分别以细沙和粘土质粉砂为主（图 4.4），与前人研究结果一致。因此，单一粒径的泥沙组分无法代表长江河口的实际情况，模型中有必要考虑多种泥沙组分，同时包括粘性沙和非粘性沙。

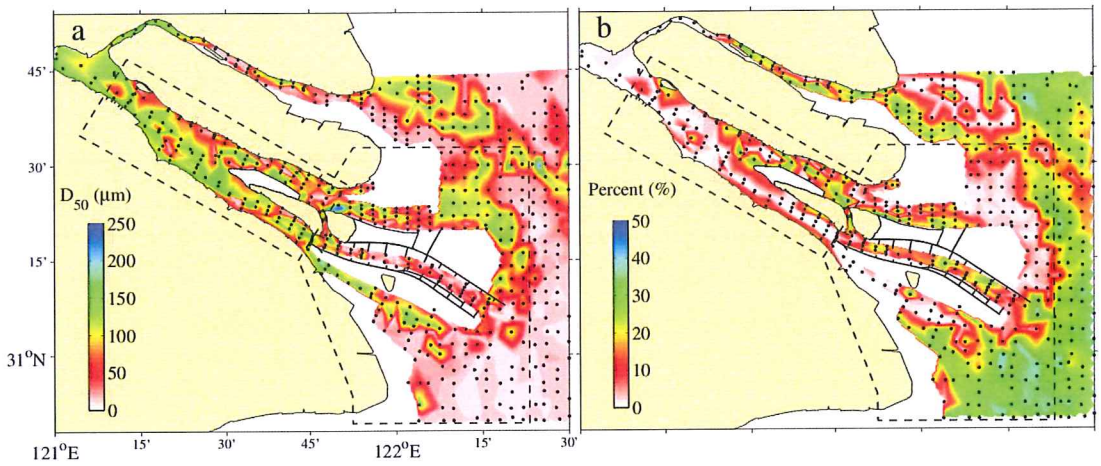


图 4.3（a）中值粒径（D_{50}）分布；（b）粘粒百分含量分布（黑色点代表表层底质采样点，黑色虚线表示定义的口内河段和拦门沙地区的边界）

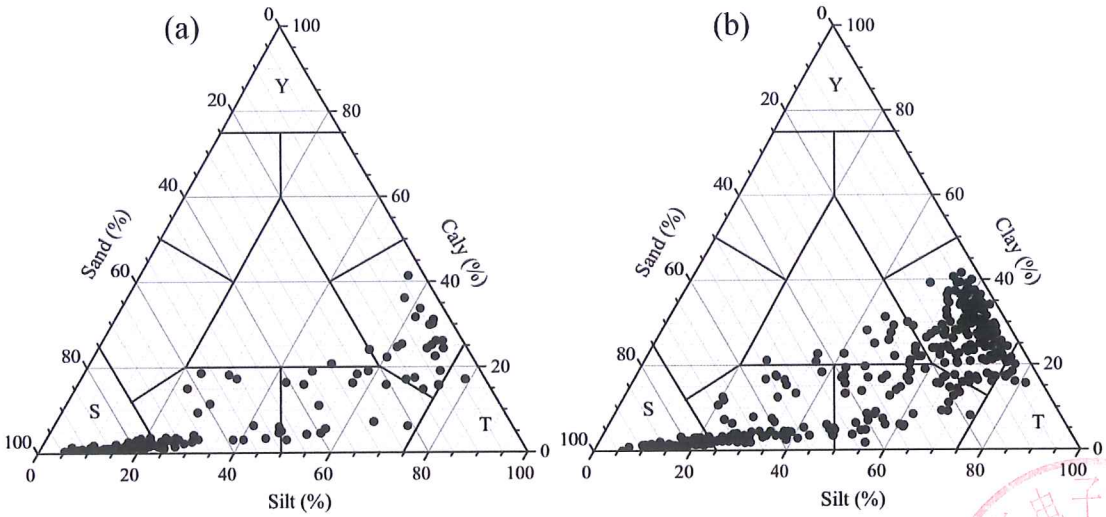


图 4.4（a）口内河段 123 个采样点和（b）拦门沙地区 330 个采样点表层泥沙的组分三角图，采样点位置和区域范围见图 4.3

根据室内测验结果，我们考虑了 2 种非粘性沙组分（sand），分别为占主导的细沙（s1，100 μm）和含量较少的中沙（s2，300 μm）（表 4.2），引入后者的目的是防止出现沿主槽的过渡冲刷，所有非粘性沙的干密度为 1600 kg/m^3。此外，还考虑了 4 种粘性沙组分（mud），m1~m4 粒径依次为 4、7.5、30 和 62.5 μm（表 4.2），覆盖了粘性沙粒径的变化范围，所有粘性沙的干密度为 500 kg/m^3，侵蚀速率为 5.0×10^{-5} kg m^{-2} s^{-1}。六组泥沙组分的颗粒密度均为 2650 kg/m^3。各粘性沙组分的沉降速度与粒径大小有关，通过率定悬沙浓度空间分布确定取值（表 4.2）。

表 4.2 地貌模型中各泥沙组分的参数

		D_{50} (μm)	τ_{ce} (N m^{-2})	w_s (mm s^{-1})	M (kg m^{-2} s^{-1})
Mud	m1	4	空间变化	0.06	5.0×10^{-5}
	m2	7.5		0.14	
	m3	30		0.22	
	m4	62.5		0.26	
Sand	s1	100	-	-	-
	s2	300	-	-	-

模型中还使用了一个简单的絮凝模型，将沉降速度与水体盐度直接相关，当盐度超过 8 psu 时发生絮凝，沉降速度达到最大（5 mm/s）。外海开边界上的所有泥沙组分的浓度均为 0，河流边界上非粘性沙为平衡浓度，四组粘性沙的含沙量相同，总和与概化后的大通站含沙量相同（表 4.1）。

由于口内河段和拦门沙地区底质组成存在巨大差异，因此两个区域内粘性沙组分的临界起动应力使用不同的计算方法。口内河段粘性沙含量较少、底质较粗，泥沙特性与河流泥沙接近，因此使用武水公式并引入一个局地系数计算临界起动应力：

$$u_e=\left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.14}\left(\alpha_1\frac{\rho_s-\rho_w}{\rho_w}D_{50}+\alpha_2\frac{10+h}{D_{50}^{0.72}}\right)^{0.5}$$

$$\tau_{ce}=K_e\rho_w\left[u_e/\left(2.5\ln\left(11h/\Delta\right)\right)\right]^2$$

式中，u_e 和 τ_{ce} 分别为临界起动流速（m/s）和临界起动应力（N/m^2）；α_1 和 α_2 为系数，分别等于 17.6 和 6.05×10^{-7}；Δ 为糙率高度，1 mm；K_e 为局地系数，是反映局部地区底质特性和固结程度的参数最终取值范围为 0.1~0.85，空间上主要体现在浅滩和深槽的差异。拦门沙地区以悬沙输运为主，底质组成多为粘性细颗粒泥沙，床面冲淤主要由沉降和再悬浮引起，因此使用土力学方法计算临界起动应力：

$$\tau_{ce}=\gamma_{cr}PI^{\beta} \tag{4-1}$$

式中，PI 是塑性指数（%）；γ_{cr} 和 β 分别为参数，分别取值 0.161 和 0.45。与粘粒含量呈线性相关，本文参照基于长江口门及外海底质粘粒含量与塑形指数拟合得到的线性关系。合并上述两个计算方法得到的 τ_{ce} 分布，指定给粒径最粗的粘性泥沙组分 m4，其他组分的 τ_{ce} 通过 m4 的 τ_{ce} 分布乘以一个与粒径有关的比例因子（小于 1）得到。

六个泥沙组分的初始床面组成同样基于 2015 年 9 月的底质采样结果。然而由于采样点

的空间分辨率不足以反映出滩槽差异（图 4.3），因此在地貌模拟前使用提出的 Bed Composition Generation（BCG）方法：以实测底质组成为初始条件，基于实际地形和年平均值径流量，不进行床面变化仅更新底质组成，每一个网格单元包括 1 个冲淤层（0.25 m）和 1 个交换层（6 m），模拟直到出现明显的滩槽差异（约 1 个月），得到的各组分的百分含量的空间分布（图 4.5）在整体上与实测结果保持大体一致，可用于冲淤演变模拟。口内河段计算 τ_{ce} 所需的 D_{50} 同样使用了该处理方法。

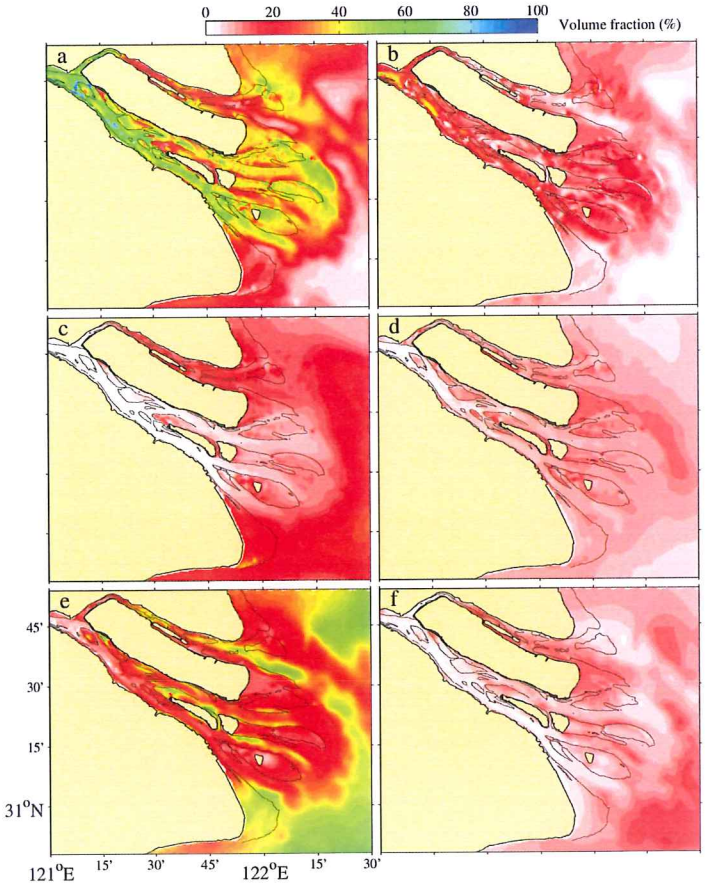


图 4.5 2002-2010 后报模拟中各泥沙组分初始百分含量：（a）s1 组分；（b）s2 组分；（c）m1 组分；（d）m2 组分；（e）m3 组分；（f）m4 组分（黑色细实线为 2002 年 5 m 等深线）

（6）地貌加速因子的选取

根据上文中对河流水沙输入的概化可知，模型中考虑了 3 中径流量水平：高径流（P4）、中等径流（P1、P3、P5 和 P6）和低径流（P1）（表 4.1）。高径流量条件时使用较小的以避免过渡冲刷或淤积，低径流量条件时则可以取更大的 *MF*。为在合理范围内选取最大的 *MF* 以尽可能提高计算效率，首先对 *MF* 进行了敏感性分析。我们将冲刷阶段（1986-1997）作为研究期，原因在于这个时期的演变过程受人类活动的影响较小。设计了四组敏感性实验，

包括 1 个对照组（*MF* 在高径流量、中径流量和低径流量分别为 11、22、33；见表 4.1）和 3 个实验组（*MF* 分别为恒定值 11、恒定值 33 以及对照的 2 倍，依次命名为低值组、高值组和倍值组）。模拟的冲淤体积作为定量评估不同 *MF* 对模型结果影响程度的指标。对照组和低值组模拟得到的口内河段冲刷和淤积体积变化过程十分接近，而高值组和倍值组的模拟结果呈现较大差异（图 4.6a）。四组敏感性实验中，拦门沙地区的体积变化表现出明显的大小潮变化，参照组和低值组的总体积变化结果一致，尽管变化过程因模拟时间差异而存在相位差（图 4.6b），另外两组实验均得到较小的冲刷体积，高值组的淤积体积比参照组稍大，倍值组的淤积体积则远小于参照组。*MF* 越大，模拟结果与参照组的差异越大。因此，认为表 4.1 中给出的参照组的 *MF* 是合理的，能够用于 1986-1997 后报模拟。相应地也确定了年内水沙概化后六个时段（P1-P6）的水动力模拟时间（表 4.1），每个时段持续时间至少为 0.5 个月，能够包含一个完整的大小潮周期。总的来说，6 个月的水动力计算得到的地形变化代表 1986-1997 年共计 11 年的冲淤演变，模型结果即为 6 个不同水沙组合条件下加速后的冲淤演变的总和，而非连续实际时间长度的模拟。另外两个历史时期后报模拟的 *MF* 使用类似的方法确定（表 4.1），如 2002-2010 模拟中，P4 和 P1 的 *MF* 分别为 8 和 24，其余时段为 16。基于以上模型设置，在 3.2 GHz, 3.43 Gb RAM PC 上一个完整的后报模拟用时约 3 天。

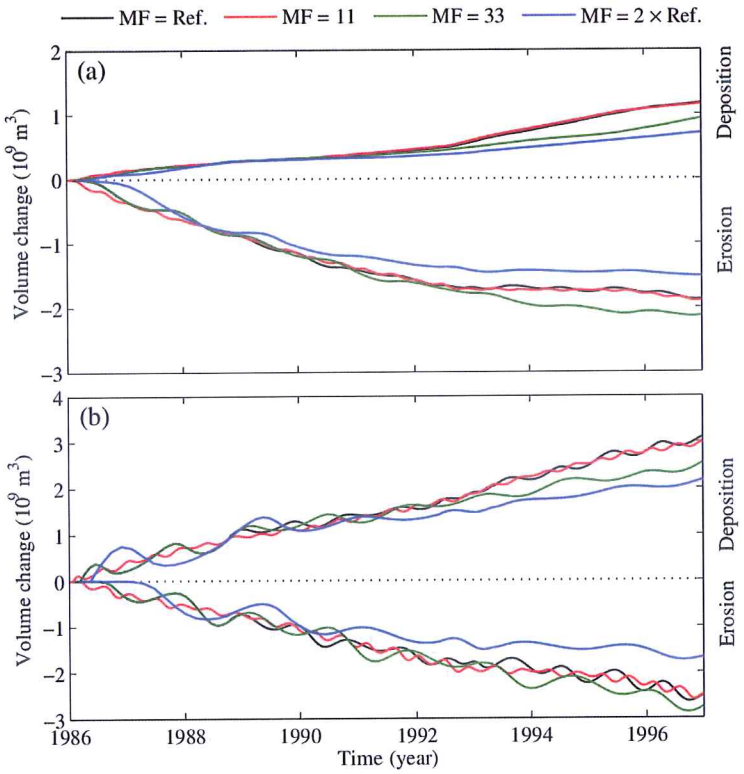


图 4.6 后报模拟 1986-1997 中不同地貌加速因子（*MF*）时（a）口内河段和（b）拦门沙地区的泥沙冲淤体积变化（对照组 *MF* 见表 4.1）

模型水动力验证

（1）潮汐和水位验证

床面冲淤演变数学模型的可靠性依赖于对涨落潮、大小潮和洪枯季等短周期动力过程的准确模拟，这些动力过程的长周期结果引起泥沙净输移和床面变化。长江口是典型的受河流径流和中等强度潮汐共同影响的河口，巨大的径流量携带河流泥沙下泄入海在河口堆积。本文建立的模型考虑了上述物理过程，并成功模拟出长江河口及临近海域的潮波系统以及河口的水动力条件。

首先对整个模拟区域（外海至大通）的潮波系统进行了率定和验证。图 4.7 为模拟的 4 个主要分潮（M2、S2、K1 和 O1）的等振幅线和等相位线，M2 分潮占主导地位，最大振幅（~2 m）位于杭州湾北岸，M2 和 S2 为东海前进潮波，K1 和 O1 为黄海旋转潮波，长江口及临近海域 27 个验潮站（位置见图 4.1）M2 分潮的振幅和相位的模型结果与实测数据对比显示振幅和相位的均方根误差分别为 0.09 m 和 6.48°，相关系数分别为 96.5%和 98.1%（图 4.8），说明模型精度较高。潮波向河流上游传播过程中受径流顶托和底部摩擦的作用振幅逐渐衰减，模型结果反映出这一现象，M2 分潮振幅从河口至大通逐渐减小，验证洪枯季实测振幅结果较好（图 4.9a）；同时还模拟出径流对水位的抬升作用，模型中在洪季 50,000m^3/s 径流量下大通的水位抬升约 12 m，枯季 10,000m^3/s 径流量下仍有抬升（图 4.9b）。

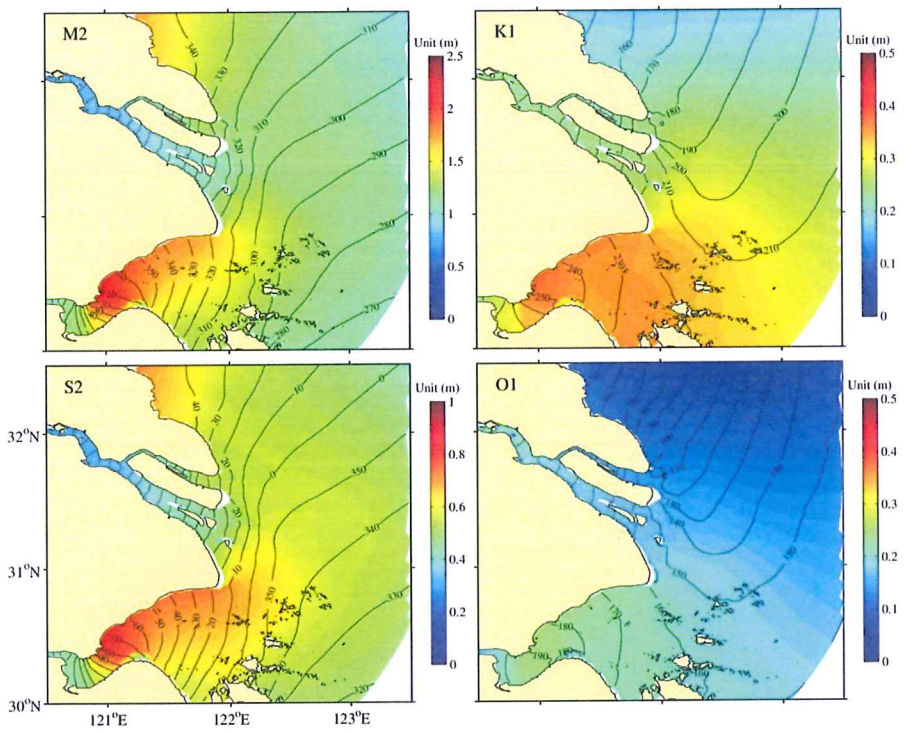


图 4.7 模型得到的四个主要分潮的同潮图（M2、S2、K1 和 O1）

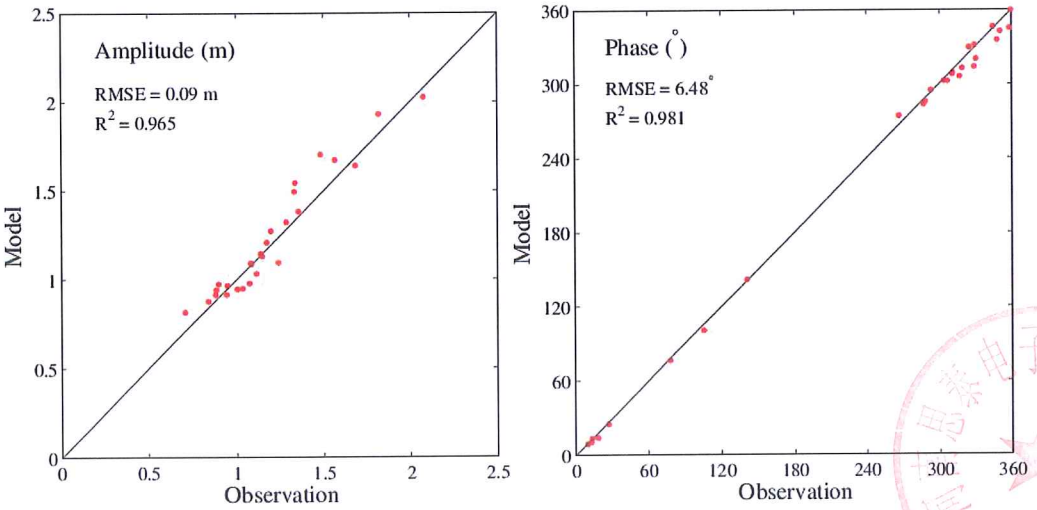


图 4.8 M2 分潮调和常数模型值和实测值对比（27 个潮位站见图 4.1）

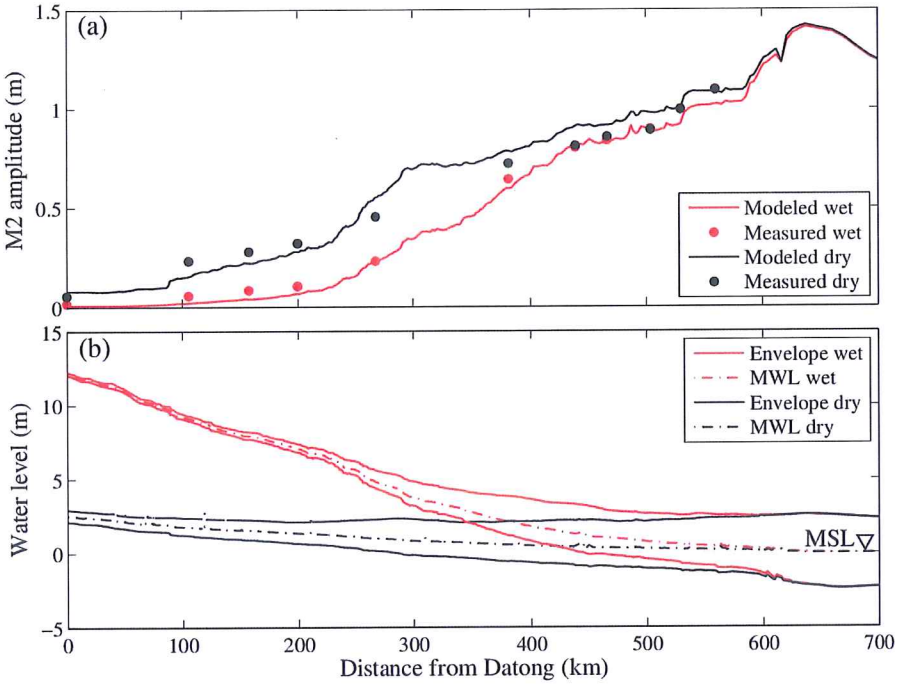


图 4.9 （a）洪枯季 M2 分潮振幅沿河道模拟值和实测值对比；（b）模拟的洪季（50,000 m^3/s，红色线）和枯季（10,000 m^3/s 黑色线）沿河道高水位、中水位和低水位变化，MSL 代表平均海平面

其次模型对长江口 14 个潮位站的水位过程线进行了验证，潮位站分布于徐六泾至鸡骨礁之间（图 4.10），基本覆盖了整个河口地区，包括本文研究区域口内河段和拦门沙地区。长江口受中等强度潮汐影响，为非正规半日潮，存在明显的半日周期变化和半月周期变化，大潮潮差 3-4 m，小潮潮差 1-2 m，潮差从口外向口内不断较小，基于 2012 年 8 月 9-27 日的验证结果显示模型与实测吻合良好（图 4.11）。

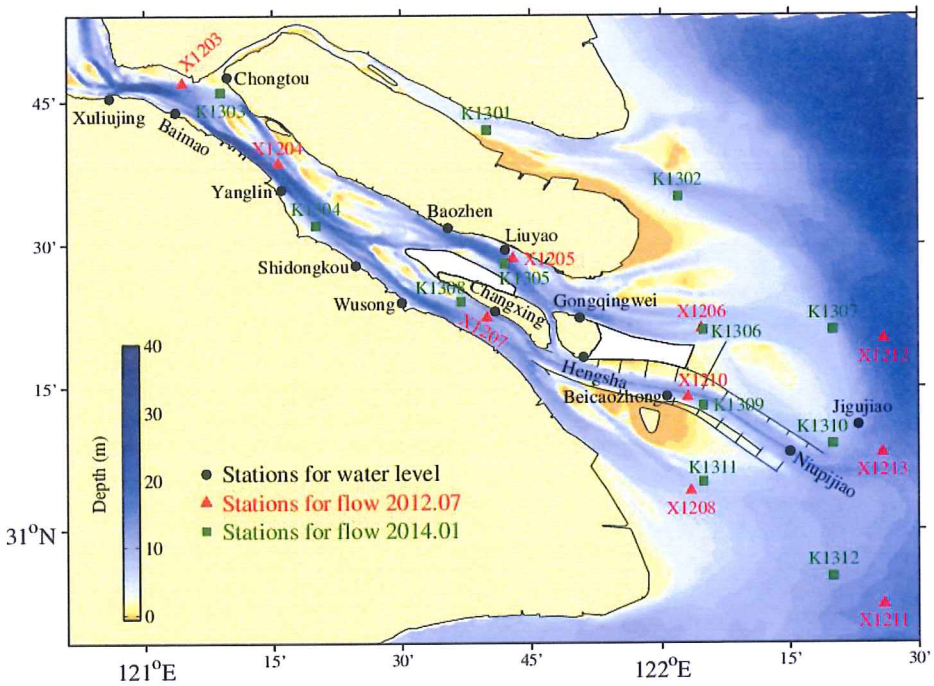


图 4.10 水位和流速验证站位位置

采用均方根误差（RMSE）、相关系数 correlation coefficient（CC）和 skill score（SS）对模型精度进行统计分析，计算公式分别为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{mod} - X_{obs})^2}{N}}$$

$$CC = \frac{\sum (X_{mod} - \overline{X}_{mod})(X_{obs} - \overline{X}_{obs})}{\left[\sum (X_{mod} - \overline{X}_{mod})^2 \sum (X_{obs} - \overline{X}_{obs})^2\right]^{1/2}}$$

$$SS = 1 - \frac{\sum (X_{mod} - X_{obs})^2}{\sum \left(X_{obs} - \overline{X}_{obs}\right)^2}$$

式中，X 为统计分析变量；下标 *mod* 和 *obs* 分别为模型计算值和观测值；上标 $^{-}$ 表示时间平均值。SS=1 表示模型结果完美，SS>0.5 时认为模型很好。统计分析结果（表 4.3）显示 14 个潮位站中最大均方根误差为 0.23 m，平均值 0.19 m，相关系数均超过 95%，平均值达到 98.1%，SS 的平均值也达到 0.944，表明潮位模拟具有很好的精度。

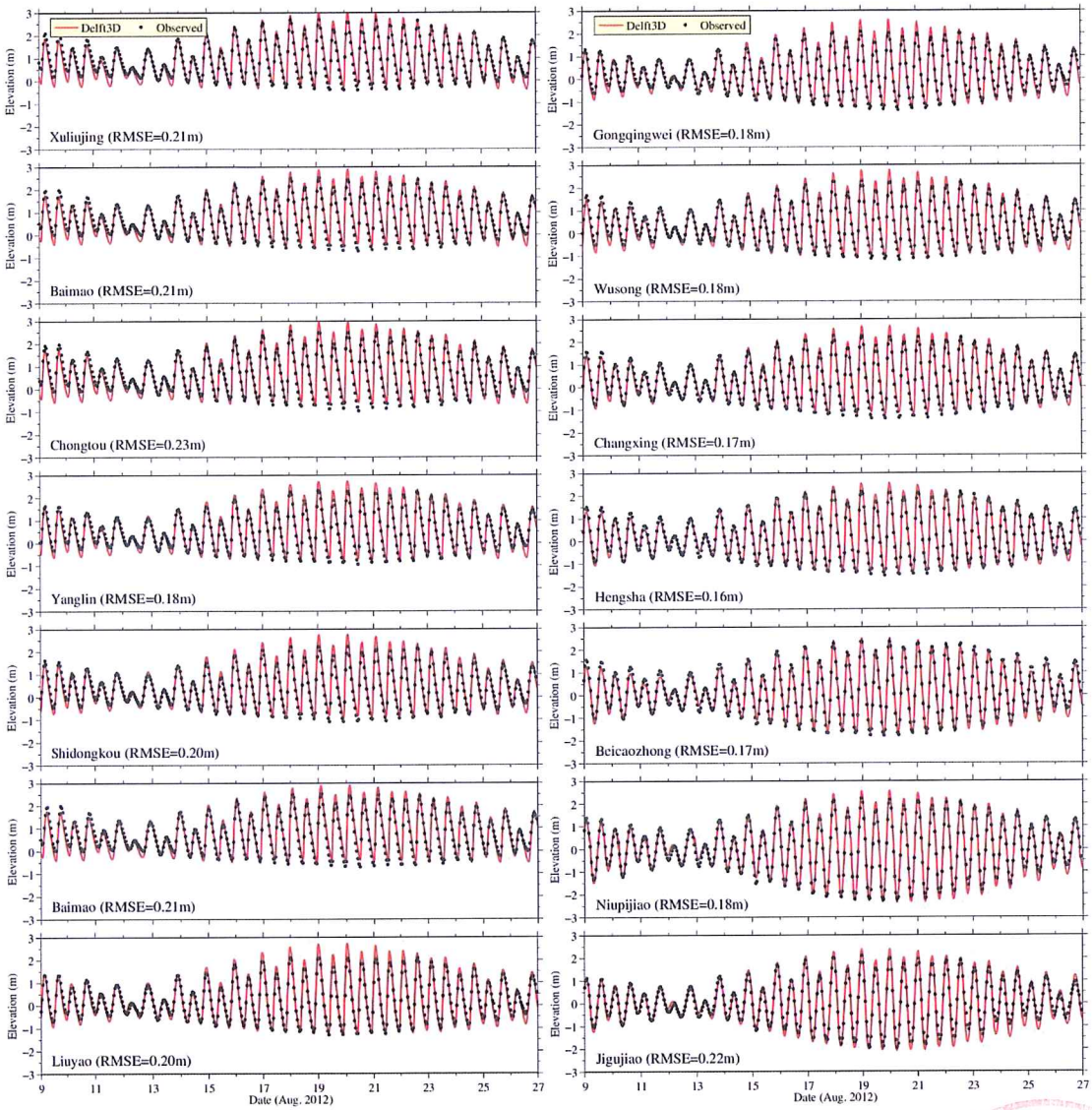


图 4.11 长江口 2012 年 8 月 14 个潮位站的水位过程线模型与实测对比

表 4.3 长江口验潮站 2012 年 8 月水位过程验证统计分析

站位	RMSE (m)	CC	SS
白茆	0.21	0.969	0.930
堡镇	0.19	0.984	0.949
北槽中	0.17	0.987	0.967
长兴	0.17	0.985	0.965
横沙	0.16	0.987	0.973
鸡骨礁	0.22	0.984	0.920
牛皮礁	0.18	0.989	0.972
石洞口	0.20	0.980	0.935
吴淞	0.18	0.984	0.946
徐六泾	0.21	0.970	0.912
杨林	0.18	0.980	0.924

崇头	0.23	0.967	0.924
共青圩	0.18	0.983	0.955
六滚	0.20	0.983	0.942
平均值	**0.19**	**0.981**	**0.949**

（2）流速和流向验证

2012 年 7 月和 2014 年 1 月课题组在长江口开展了大面积多船同步观测，两次分别为 10 个站位和 12 站位，分别代表洪季和额枯季，站点分布覆盖整个河口区（图 4.10），ADCP 测得流速和流向数据取垂向平均值用于模型验证。计算值和实测值对比除个别站位（如 X1205 模拟流速偏小）外均吻合较好（图 4.12），从口内向口外可以明显看出由往复流向旋转流的转变，口内流速大于外海，其中 X1210 由于北槽两侧导堤的束流作用使得落潮流大于其他站位。对计算结果的统计分析（表 4.1）显示流速相关系数超过 85%，流向的相关系数 2012 年 7 月和 2014 年 1 月分别为 82.8%和 93.5%，流速的均方根误差范围为 0.13~0.34 m/s，平均值依次为 0.21 m/s 和 0.16m/s，表明模拟结果较为理想。2012 年 7 月流向的均方根误差平均值依次为 52°，这主要是由于涨落潮转换时很小的相位差也会引起较大的绝对误差，流向的 SS 平均值达到 0.585 说明模型结果较好，流速的 SS 高于流向。以上验证结果说明模型的水动力计算的精度足以用于冲淤演变模拟中。

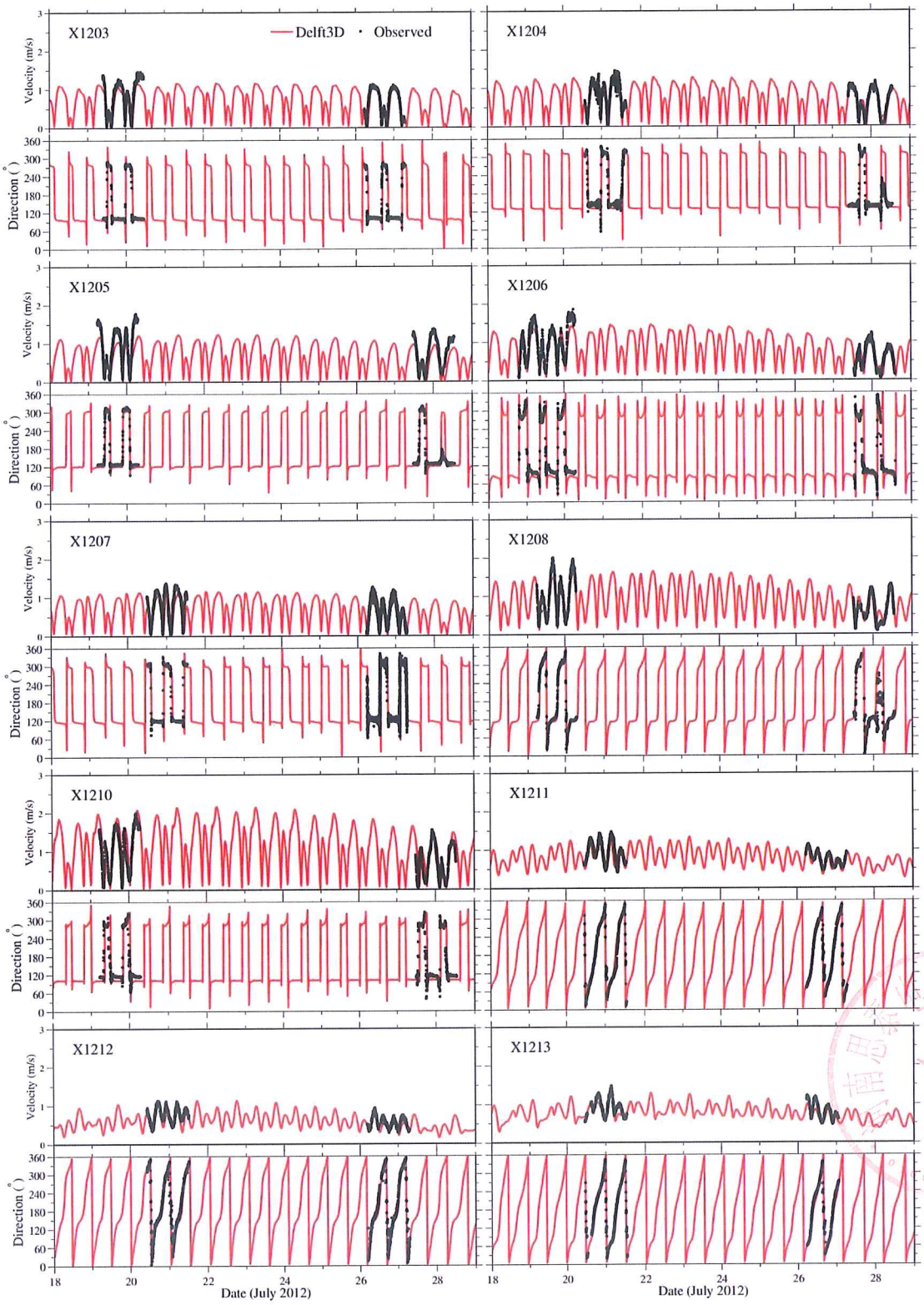


图 4.12 长江口 2012 年 7 月定点船测站位垂向平均流速和流向模型和实测对比

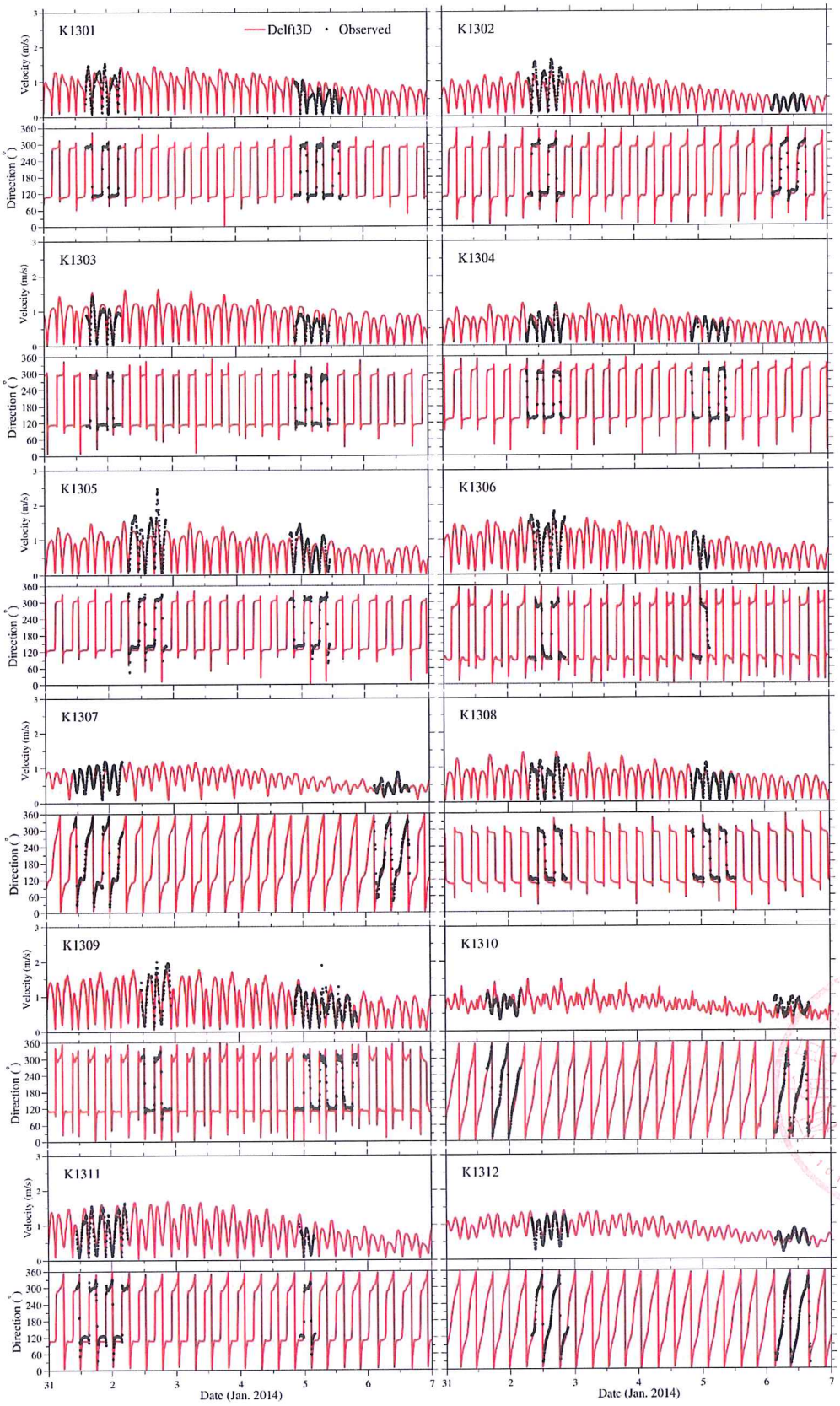


图 4.13 长江口 2014 年 1 月定点船测站位垂向平均流速和流向模型和实测对比

表 4.4 长江口定点船测站位 2012 年 7 月和 2014 年 1 月流速和流向验证统计分析

站位	流速 (m s^{-1})			流向 (°)		
	RMSE	CC	SS	RMSE	CC	SS
X1203	0.21	0.874	0.708	52	0.791	0.510
X1204	0.17	0.889	0.778	53	0.787	0.482
X1205	0.33	0.907	0.475	46	0.831	0.610
X1206	0.21	0.890	0.759	70	0.751	0.363
X1207	0.20	0.800	0.592	57	0.815	0.594
X1208	0.18	0.930	0.852	55	0.839	0.595
X1210	0.34	0.813	0.541	62	0.734	0.363
X1211	0.16	0.828	0.623	42	0.911	0.814
X1212	0.13	0.855	0.562	41	0.933	0.811
X1213	0.14	0.892	0.579	46	0.891	0.711
Average	**0.21**	**0.868**	**0.647**	**52**	**0.828**	**0.585**
K1301	0.25	0.766	0.504	41	0.899	0.789
K1302	0.22	0.897	0.734	22	0.975	0.935
K1303	0.19	0.895	0.510	37	0.906	0.776
K1304	0.13	0.926	0.716	30	0.946	0.858
K1305	0.34	0.779	0.538	63	0.760	0.446
K1306	0.20	0.898	0.802	77	0.703	0.283
K1307	0.13	0.875	0.760	72	0.766	0.453
K1308	0.15	0.879	0.752	45	0.875	0.699
K1309	0.19	0.900	0.800	60	0.828	0.505
K1310	0.21	0.593	-0.290	53	0.846	0.647
K1311	0.22	0.886	0.688	24	0.980	0.930
K1312	0.16	0.855	0.641	37	0.935	0.845
Average	**0.20**	**0.846**	**0.596**	**47**	**0.868**	**0.681**

动力-泥沙耦合数值模型

本次研发工作中，投标团队拟基于国际上知名与认可度较高，在国内外水沙运动模拟、地形冲淤计算等方面有成熟与广泛应用的 FVCOM 数值模型（Finite-Volume Coastal Ocean circulation Model，有限体积算法海洋模型）的基础上进行二次开发，以满足依托工程的应用需求。

FVCOM 数值模型介绍

FVCOM 是无结构三角形网格架构、有限体积、自由表面、三维原始方程海洋数值模型，其原始方程主要包含动量方程、质量连续方程以及温度、盐度和密度方程，在物理和数学上用 Mellor-Yamada 2.5 阶垂向湍流闭合模型及 Smagorinsky 水平湍流闭合模型对方程组进行闭合。在垂向上使用σ坐标系或通用垂向 s 坐标系对不规则底部地形进行拟和，在水平上利用无结构三角形网格对水平计算区域进行空间离散。在数值计算上，利用对水平三角形控制体进行通量有

限体积积分的方式对控制方程进行离散求解。该有限体积积分方法结合了有限元方法的自由几何拟和特性和有限差分方法的离散结构简单及计算高效的特性，从而能综合这两种方法的优点。利用有限体积积分格式，能更好地保证复杂几何结构的河口海湾及海洋计算中的质量、动量、盐度、温度及热量的守恒性。FVCOM的模型显著特点还有所采用的无结构三角形网格对复杂岛屿、岸线及地形具有非常良好的几何拟合能力（图 4..14）。其无结构网格较正交曲线网格对不规则岸线能做到平滑合理过渡，因此对数值处理方法和岸线地形拟和上的优势使其在河口海岸区域得到了广泛应用。

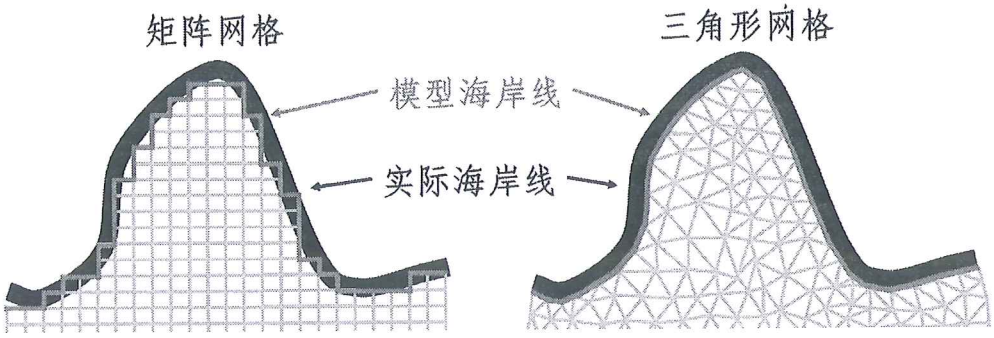


图 4.14 矩阵网格与三角形网格在海岸线拟合上的对比

FVCOM 模式包括单机版本和 MPI 并行计算版本，前者可以通过编译在 Windows 和 Linux 操作系统上运行，后者能在集群上实现并行高效计算。运算输出的结果文件有二进制、ASCII 码和 NetCDF 三种格式，便于结果的处理。

不同于有限差分法和有限元法使用的微分形式，FVCOM 是对基本的控制方程进行离散。在自由尺度三角网格中（与有限元方法相同）用通量计算（与有限差分法相同）可以从数学上解得这些积分方程，有限体积近似可以保证单独控制要素和整体计算范围的质量守恒。从技术角度来看，FVCOM 结合了用于简单离散编码和计算功率的有限差分法以及用于几何灵活性的有限元法的优良特征。

FVCOM 模式在模拟近岸浅海复杂边界以及数值处理方法上的优势，已经在美国多个河口、港湾以及中国渤海、长江口等多处海域的应用上得到验证。投标团队利用 FVCOM 模型模拟深水航道整治工程前后长江口的流场变化，其模拟结果与实测数据的验证表明，FVCOM 能较好的应用于长江口及附近海域。

其原始控制方程组由多个方程组成，其中有，

动量方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}-fv=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial z}(K_m\frac{\partial u}{\partial z})+F_u \tag{4-1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}+fu=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}(K_m\frac{\partial v}{\partial z})+F_v \tag{4-2}$$

静力学平衡方程：

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-\rho g \tag{4-3}$$

不可压缩流体的连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{4-4}$$

热量方程：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}+u\frac{\partial \theta}{\partial x}+v\frac{\partial \theta}{\partial y}+w\frac{\partial \theta}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}(K_h\frac{\partial \theta}{\partial z})+F_\theta \tag{4-5}$$

盐度方程；

$$\frac{\partial S}{\partial t}+u\frac{\partial S}{\partial x}+v\frac{\partial S}{\partial y}+w\frac{\partial S}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}(K_h\frac{\partial s}{\partial z})+F_s \tag{4-6}$$

状态方程：

$$\rho=\rho(\theta,S) \tag{4-7}$$

其中，x，y，和 z 分别为笛卡尔坐标系中东、北和垂直方向的坐标；u，v 和 w 是 x，y，z 三个方向上的速度分量；θ是位温；S 为盐度；ρ 为密度；P 为压力；f 为科氏参数；g 为重力加速度；K_m为垂向涡动黏性系数；K_h为热力垂向涡动摩擦系数。F_u,F_v,F_θ,F_S分别代表水平动量，温度，和盐度扩散项。

在浅海区域，为了更好地拟合底地形，在垂向采用 σ 坐标变换：

$$\sigma=\frac{z-\zeta}{H+\zeta}=\frac{z-\zeta}{D} \tag{4-8}$$

其中 σ 的值从海底的-1 变化到海面的 0。在这个坐标下，方程（1-1）—（1-7）可改写为：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial Du}{\partial x}+\frac{\partial Dv}{\partial y}+\frac{\partial \omega}{\partial \sigma}=0 \tag{4-9}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial uD}{\partial t}+\frac{\partial u^2 D}{\partial x}+\frac{\partial uvD}{\partial y}+\frac{\partial u\omega}{\partial \sigma}-fvD\\&=-gD\frac{\partial \zeta}{\partial x}-\frac{gD}{\rho_0}\left[\frac{\partial}{\partial x}(D\int_{\sigma}^{0}\rho d\sigma')+\sigma\rho\frac{\partial D}{\partial x}\right]+\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_m\frac{\partial u}{\partial \sigma})+DF_x\end{aligned} \tag{4-10}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial vD}{\partial t}+\frac{\partial uvD}{\partial x}+\frac{\partial v^2 D}{\partial y}+\frac{\partial v\omega}{\partial \sigma}+fuD\\&=-gD\frac{\partial \zeta}{\partial y}-\frac{gD}{\rho_0}\left[\frac{\partial}{\partial y}(D\int_{\sigma}^{0}\rho d\sigma')+\sigma\rho\frac{\partial D}{\partial y}\right]+\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_m\frac{\partial v}{\partial \sigma})+DF_y\end{aligned} \tag{4-11}$$

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t}+\frac{\partial \theta uD}{\partial x}+\frac{\partial \theta vD}{\partial y}+\frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma}=\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_h\frac{\partial \theta}{\partial \sigma})+D\hat{H}+DF_\theta \tag{4-12}$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t}+\frac{\partial SuD}{\partial x}+\frac{\partial SvD}{\partial y}+\frac{\partial S\omega}{\partial \sigma}=\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_h\frac{\partial S}{\partial \sigma})+DF_S \tag{4-13}$$

$$\frac{\partial q^2 D}{\partial t}+\frac{\partial q^2 uD}{\partial x}+\frac{\partial q^2 vD}{\partial y}+\frac{\partial q^2 \omega}{\partial \sigma}=2D(P_s+P_b-\varepsilon)+\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_q\frac{\partial q^2}{\partial \sigma})+DE_q \tag{4-14}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial q^2 lD}{\partial t}+\frac{\partial q^2 luD}{\partial x}+\frac{\partial q^2 lvD}{\partial y}+\frac{\omega}{D}\frac{\partial q^2 l\omega}{\partial \sigma}\\&=lE_1D(P_s+P_b-\frac{\tilde{W}}{E_1}\varepsilon)+\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}(K_q\frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma})+DF_l\end{aligned} \tag{4-15}$$

$$\rho=\rho(\theta,S) \tag{4-16}$$

水平扩散项定义为：

$$DF_x\approx\frac{\partial}{\partial x}\left[2A_mH\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[A_mH(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x})\right] \tag{4-17}$$

$$DF_y\approx\frac{\partial}{\partial x}\left[A_mH(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x})\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[2A_mH\frac{\partial v}{\partial y}\right] \tag{4-18}$$

$$D(F_\theta,F_S,F_{q^2},F_{q^2l})\approx\left[\frac{\partial}{\partial x}(A_hH\frac{\partial}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(A_hH\frac{\partial}{\partial y})\right](\theta,S,q^2,q^2l) \tag{4-19}$$

边界条件给出如下：

在海面=0 处，

$$(\frac{\partial u}{\partial \sigma},\frac{\partial v}{\partial \sigma})=\frac{D}{\rho_0 K_m}(\tau_{sx},\tau_{sy}),\omega=0,\frac{\partial \theta}{\partial \sigma}=\frac{D}{\rho c_p K_h}\left[Q_n(x,y,t)-SW(x,y,0,t)\right]$$
$$\frac{\partial S}{\partial \sigma}=-\frac{S(P-E)D}{K_h \rho};q^2 l=0,q^2=B_1^{\frac{2}{3}}u_{\tau s}^2;$$

（4-20）

在海底=-1 处，

$$(\frac{\partial u}{\partial \sigma},\frac{\partial v}{\partial \sigma})=\frac{D}{\rho_0 K_m}(\tau_{bx},\tau_{by}),\omega=0,\frac{\partial \theta}{\partial \sigma}=\frac{\partial S}{\partial \sigma}=0,q^2 l=0,q^2=B_1^{\frac{2}{3}}u_{\tau b}^2 \quad (4\text{-}21)$$

为了节省计算机机时，与 POM 模式一样，也采用了内外模态交替计算的方法。外模态计算水位和垂向平均速度，内模态计算三维速度、温盐和湍动能等物理量。

二维（垂向积分）动量和连续方程给定为：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial(\overline{u}D)}{\partial x}+\frac{\partial(\overline{v}D)}{\partial y}=0 \quad (4\text{-}22)$$

$$\frac{\partial \overline{u}D}{\partial t}+\frac{\partial \overline{u}^2 D}{\partial x}+\frac{\partial \overline{u}\overline{v}D}{\partial y}-f\overline{v}D$$
$$=-gD\frac{\partial \zeta}{\partial x}-\frac{gD}{\rho_0}\left\{\int_{-1}^{0}\frac{\partial}{\partial x}(D\int_{\sigma}^{0}\rho d\sigma')d\sigma+\frac{\partial D}{\partial x}\int_{-1}^{0}\sigma\rho d\sigma\right\}+\frac{\tau_{sx}-\tau_{bx}}{\rho_0}+D\widetilde{F}_x+G_x$$

（4-23）

$$\frac{\partial \overline{v}D}{\partial t}+\frac{\partial \overline{u}\overline{v}D}{\partial x}+\frac{\partial \overline{v}^2 D}{\partial y}+f\overline{u}D$$
$$=-gD\frac{\partial \zeta}{\partial y}-\frac{gD}{\rho_0}\left\{\int_{-1}^{0}\frac{\partial}{\partial y}(D\int_{\sigma}^{0}\rho d\sigma')d\sigma+\frac{\partial D}{\partial y}\int_{-1}^{0}\sigma\rho d\sigma\right\}+\frac{\tau_{sy}-\tau_{by}}{\rho_0}+D\widetilde{F}_y+G_y$$

（4-24）

其中 G_x,G_y 定义为：

$$G_x = \frac{\partial \overline{u}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv} D}{\partial y} - D\widetilde{F}_x - \left[\frac{\partial \overline{u^2} D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv} D}{\partial y} - D\overline{F}_x\right] \tag{4-25}$$

$$G_y = \frac{\partial \overline{uv} D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v}^2 D}{\partial y} - D\widetilde{F}_y - \left[\frac{\partial \overline{uv} D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v^2} D}{\partial y} - D\overline{F}_y\right] \tag{4-26}$$

水平扩散项近似地给出为：

$$D\widetilde{F}_x \approx \frac{\partial}{\partial x}\left[2\overline{A}_m H \frac{\partial \overline{u}}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\overline{A}_m H\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x}\right)\right] \tag{4-27}$$

$$D\widetilde{F}_y \approx \frac{\partial}{\partial x}\left[\overline{A}_m H\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[2\overline{A}_m H \frac{\partial \overline{v}}{\partial y}\right] \tag{4-28}$$

$$D\overline{F}_x \approx \frac{\partial}{\partial x}\overline{2A_m H \frac{\partial u}{\partial x}} + \frac{\partial}{\partial y}\overline{A_m H\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)} \tag{4-29}$$

$$D\overline{F}_y \approx \frac{\partial}{\partial x}\overline{A_m H\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)} + \frac{\partial}{\partial y}\overline{2A_m H \frac{\partial v}{\partial y}} \tag{4-30}$$

上划线的“—”代表垂向平均。例如，对于一个给定的函数ψ，

$$\overline{\psi} = \int_{-1}^{0} \psi d\sigma \tag{4-31}$$

模式水平计算区域被划分为无重合的三角元，变量在三角元中的位置如图.15所示。

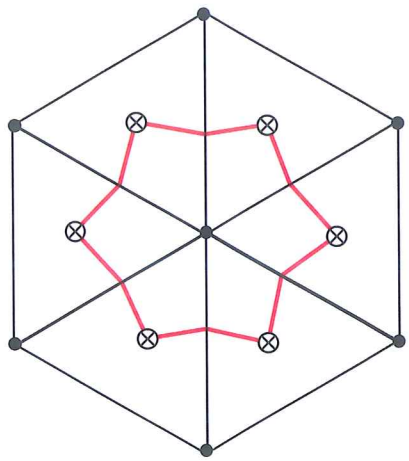


图 4.15 FVCOM 三角网格设计和变量位置

标量(N，ζ，C，H，etc) 位于节点上(•)，矢量(u，v，c_x，c_y) 位于三角元质心（⊗）。

和有限元法相似，计算区域划分成一些不重合的三角形单元。每个三角形网格由三个节点、一个中心和三条边组成。用 N 和 M 来分别表示计算区域内三角形中心和节点的总数目，那么三角形中心的坐标可表示为：

$$[X(i),Y(i)], i=1:N, \tag{4-32}$$

同样，节点的坐标可以表示为：

$$[X_n(j),Y_n(j)], j=1:M. \tag{4-33}$$

由于三角形网格互不重合，因此 N 同时也是三角形网格的数目。在每个三角形网格中，三角形的三个节点可以用整数$N_i(\hat{j})$来表示，其中$\hat{j}$的值按顺时针方向从 1 到 3。具有共用边的相邻的三角形用整数 ${}^{NB}E_i(\hat{j})$ 标号，其中$\hat{j}$按顺时针从 1 到 3 记数。在开边界和海岸固边界处，${}^{NB}E_i(\hat{j})$ 取为 0。在每个节点上，与之其邻的三角形个数计为 $NT(j)$，并用整数 ${}^{N}B_i(m)$ 来标号每个三角形，其中 m 顺时针标号从 1 到 $NT(j)$。

为了给出海表面水位、流速和温度盐度的更精确的计算，数值计算是在特殊设计的三角形网格上进行的，其中 $\zeta,\mathrm{H},\Delta,\omega,\Sigma,\theta,\rho,\theta^2,\theta^2\lambda,\mathrm{K}_\mu,\mathrm{K}_\eta,\mathrm{A}_\mu$ 及 A_η 放在三角形节点上，u,v 放在中心上。节点上的变量的计算通过与该点相连的三角形中心和边的中心的连线的净通量进行，中心上的变量通过该三角形三边的净通量来计算。

模型架构及其组成

由于模型所需的建模系统非常复杂，涉及到海气模型、波浪模型、数据同化等等数学建模技术，因此需要对每个模块处理结果进行组织。因此投标团队需要一系列标准的方法和接口来链接集成这些模型并管理网格、场和数组等数据对象。在过去的十年里，随着科学能力和计算机能力的增长，多组件建模方面已经取得了显著进展。这些工作往往得到包括美国国家海洋和大气管理局（NOAA）、美国宇航局（NASA）、国家科学基金会（NSF）和能源部（DOE）在内的联邦机构的资助。这其中就有地球系统建模框架（Earth System Modeling Framework，ESMF）和模型耦合工具箱（Model Coupling Toolkit，MCT）。以及其他一些通

用基础耦合软件工具包，包括全球组件建构体系（Common Component Architecture）和特定领域的耦合解决方案，例如生态系统建模（Ecosystem Modeling）和空间天气建模框架（Space Weather Modeling Framework）。投标团队选择采用 ESMF 架构，应用编程接口（API）围绕一系列包含模型数据的类组织，如重网格化、数据重新分布和更新操作。这些数据类背后是原生语言数组，ESMF 允许将现有的 Fortran 数组引用到 ESMF 数组或场中，以便可以容易地将 ESMF 数据类引入现有代码中 。

（1）耦合模块 ESMF_FVCOM 的建立

本次技术方案采用 ESMF 框架，其定义了构建复杂的耦合建模系统的体系结构和接口，以便将复杂的应用程序分解为更小的组件。在 ESMF 中，一个组件可以是一个物理域，或者是一个功能，如耦合器或 I/O 系统。该组件为一个足够小的片段，有一个常规的调用接口和行为。组件可以被组装成标准的多重应用程序，并提供所需的功能。ESMF 还包括为构建组件和应用程序提供的工具包，如重组软件、日历管理、日志记录和错误处理等。投标团队已经实现了 ESMF-FVCOM 的集成，在接下来的章节里投标团队将介绍如何利用 ESMF 对 FVCOM 进行单项和双向嵌套。

在 ESMF 中，两个模型或两个域的耦合是通过组件来构成的，其中包括一个父网格组件（parent gridded component），两个子网格组件（child gridded components），以及一个耦合组件（coupler component）。耦合从一个应用程序驱动器（application driver）开始，该驱动器逐步控制从父组件到子组件和耦合组件的模型系统。每个 ESMF 组件包含初始化、运行和结束模块（图.16）。应用程序驱动器调用父组件的初始化模块，然后直接调用所有子组件的初始化模块。同样的，被应用驱动器调用的父组件运行模块和结束模块也直接调用所有子组件的运行模块和结束模块。

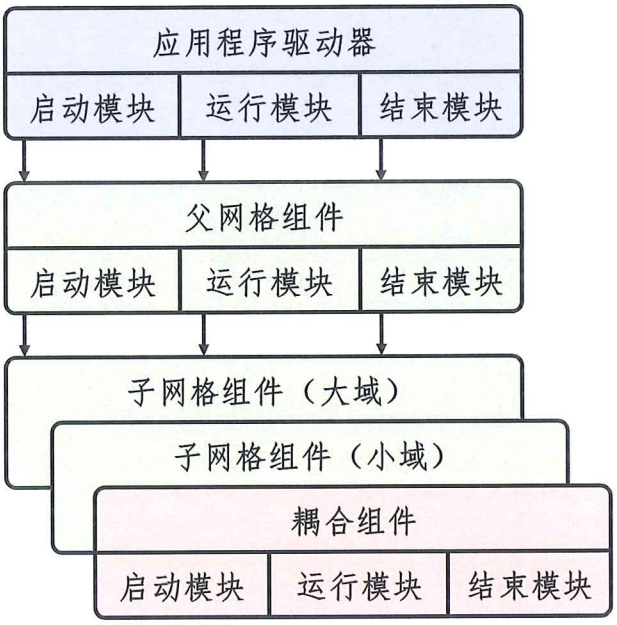


图 4.16 ESMF 组件结构与运行流程

例如在一个双向嵌套应用中，为了实现 FVCOM 到 ESMF 的嵌入，投标团队定义了两个子网格组件，分别名为“大域”（large domain）和“小域”（small domain），以及一个子耦合组件，名为“双向嵌套耦合器”（two-way nesting coupler）（图 14.17）。图中，第一列和第二列建立在 ESMF 架构之上。第三列是一个名为“ESMF_FVCOM”的模块，它基于 ESMF 和 FVCOM 的架构开发，以建立 ESMF 框架和 FVCOM 库之间的连接。第四列包括具有原始 FVCOM 版本 4.0 代码的 FVCOM 库和一个名为“Mod_esmf_nesting”的模块。该模块用于加载大域和小域嵌套边界的节点和单元索引。它也用于生成嵌套边界的子域地图，以便并行化。FVCOM 库是为 FVCOM 更新版本的源代码构建的，其中包括了波浪-流体相互作用。大域和小域都使用相同的 FVCOM 库。大域和小域的模型模拟被分组在不同数量的集群节点上进行。数据交换在大域和小域嵌套边界之间通过 ESMF 分别在不同的处理器上进行。嵌套系统使用的处理器总数来进行整个数据交换。

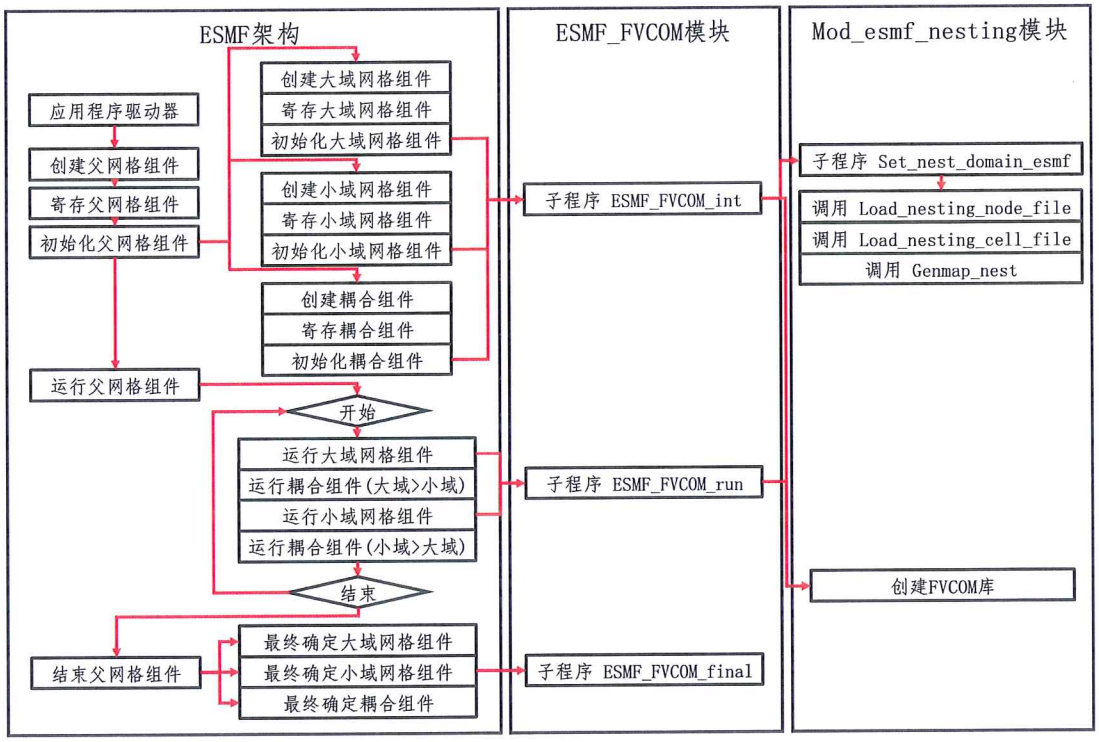


图 14.17 ESMF_FVCOM 嵌套架构的组成与运作逻辑

（2）模型应用情况

（1）投标人针对横沙大道外延基于无结构网格的 FVCOM 模型建立长江口模型（图.18）。模型大范围采用海图数字化水深数据，在长江口内及口门海域采用来自于长江口航道管理局的实测地形资料（2022 年）。以上数据融合后，得到模型所用水深数据如图.19 所示。

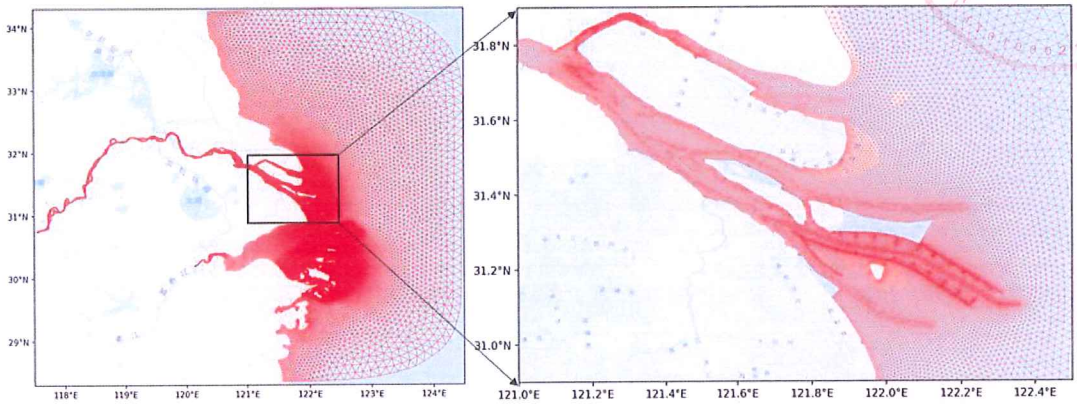


图 4.18 长江口 FVCOM 模型网格图

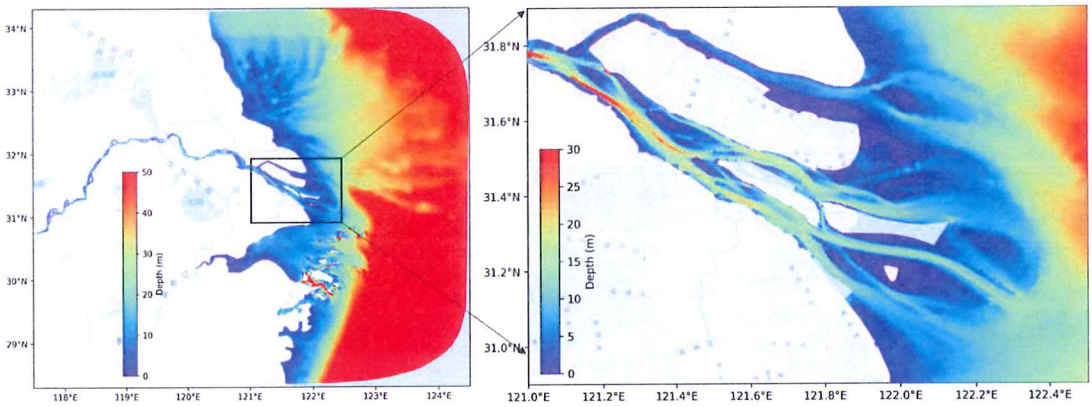


图 4.19 长江口 FVCOM 模型的水深

项目搜集了《中国近海海洋——海洋底质》（石学法主编）中的东中国海底质粒径分布和黄海底质类型分布，并融合华东师范大学河口海岸学国家重点实验室于 2015 年 9 月在长江口进行的大面积表层沉积物调查所得到的中值粒径数据。最终得到模型所用 z_0 的分布如图.20 所示。

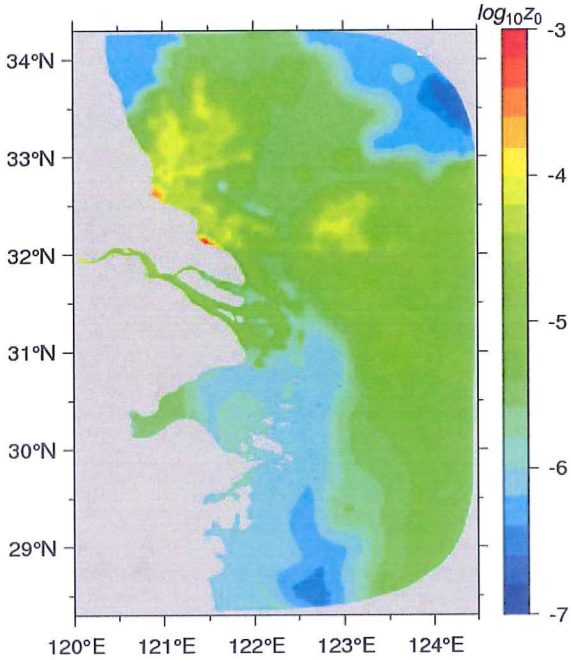


图 4.20 模型所用底部糙率 z_0 的对数值 $\log_{10}$（z_0）分布图

长江口杭州湾地区以粘性细颗粒泥沙为主（D50 = 0.008mm），絮凝现象十分明显。布朗运动，差异沉降，以及流体剪切是迫使泥沙颗粒相互碰撞从而产生絮凝的三个基本因素。模型采用制约沉降的参数化方案，并且设置了泥沙侵蚀速率以及临界侵蚀应力（图.21）。

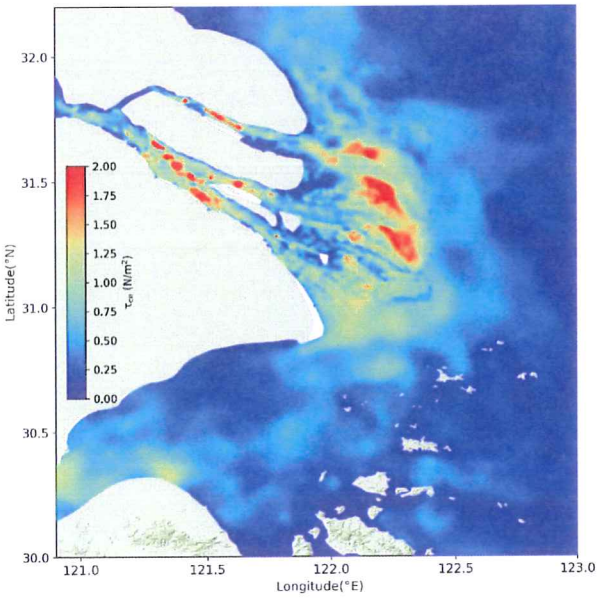


图 4.21 泥沙模型中所采用的底部临界应力分布

模型对横沙大道外延的悬浮物浓度（Suspended Sediment Concentration，SSC）进行了数值模拟，具体分布表现为图.22。

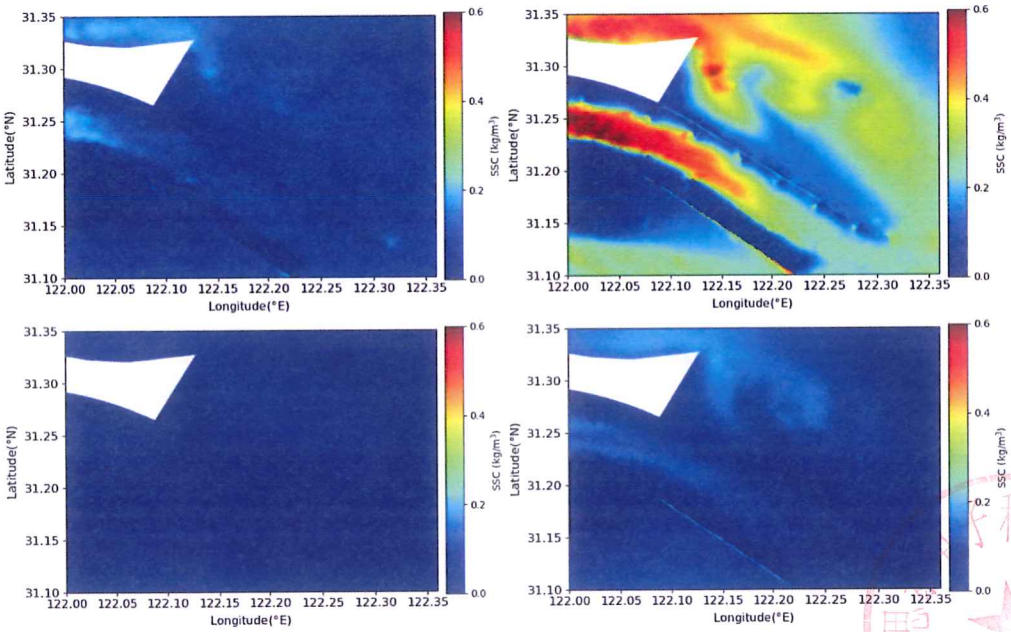
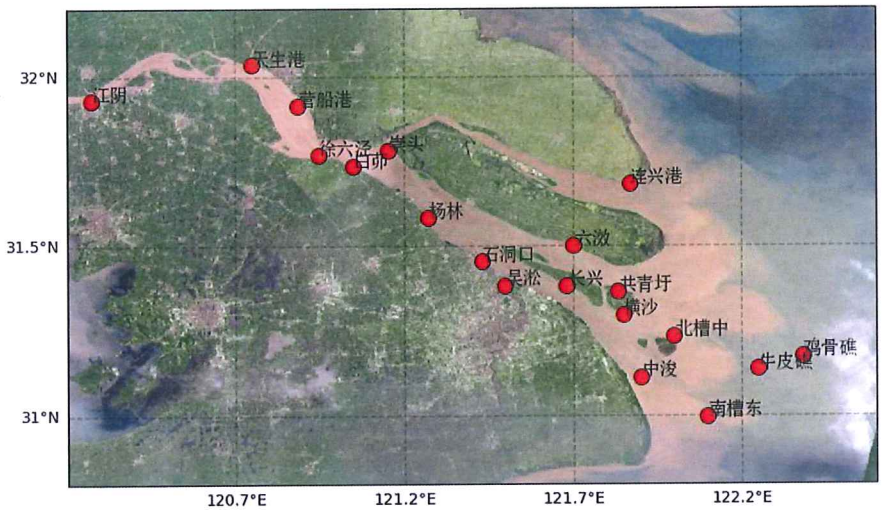


图 4.22 横沙大道外延悬浮物浓度分布。上图分别表示小潮底层 SSC 浓度分布（左上）；大潮底层 SSC 浓度分布（右上）；小潮表层 SSC 浓度分布（左下）；大潮表层 SSC 浓度分布（右下）

项目采用 2022 年 2 月和 8 月的潮位站（图.23）实测数据对模型的可靠性进行定量评估。对于水位、流速大小、盐度和含沙量等标量数据，项目采用以下三

个参数（均方根误差 RMSE、WS 和相对误差 RE）对模型在潮汐潮流、盐水入侵和泥沙输运动力上的表现进行定量评估（表.5、表.6、表.7、表 5.8）。



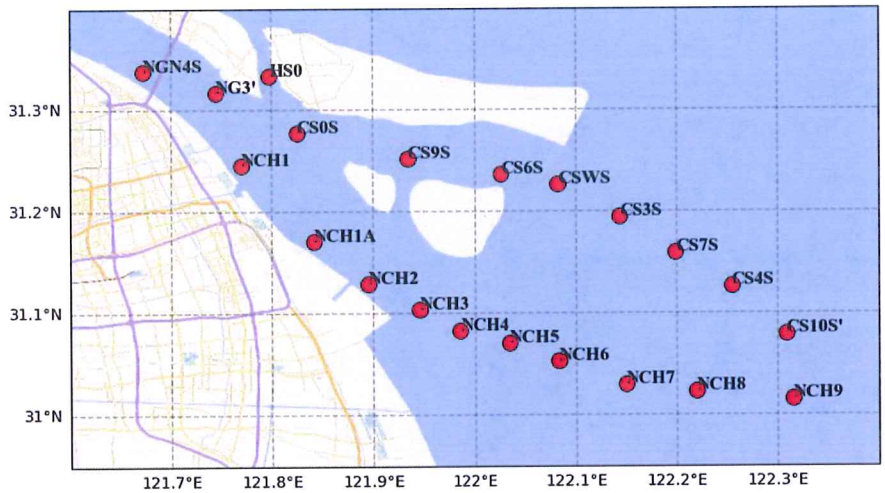


图 4.23 用于潮位验证的长江口潮位站分布图；2022 年 2 月同步水文泥沙观测站位图

表 4.5 2022 年 2 月潮位上的模拟误差统计

站位	RMSE（m）	WS	RE（%）
白茆	0.26	0.97	6.10
北槽中	0.24	0.98	4.74
长兴	0.30	0.97	6.53
崇头	0.30	0.96	6.51
共青圩	0.22	0.98	4.78

横沙	0.24	0.98	5.08
江阴	0.32	0.95	10.42
鸡骨礁	0.27	0.98	5.39
连兴港	0.37	0.96	6.15
六滧	0.24	0.98	5.33
南槽东	0.28	0.98	5.07
牛皮礁	0.27	0.98	5.01
石洞口	0.33	0.95	7.51
天生港	0.20	0.98	4.66
吴淞	0.31	0.96	6.96
徐六泾	0.24	0.97	5.92
杨林	0.29	0.96	6.67
营船港	0.23	0.97	5.52
中浚	0.38	0.96	7.60
平均	**0.28**	**0.97**	**6.10**

表 4.6 2022 年 2 月三维流速上的模拟误差统计

站位	表层			中层			底层		
	RMSE（m/s）	WS	RE（%）	RMSE（m/s）	WS	RE（%）	RMSE（m/s）	WS	RE（%）
HS0	0.45	0.55	38.67	0.40	0.52	41.94	0.26	0.53	37.09
NGN4S	0.27	0.90	14.66	0.23	0.89	15.79	0.11	0.94	10.47
NG3'	0.28	0.89	11.63	0.26	0.84	12.68	0.18	0.84	11.72
CS0S	0.18	0.97	8.06	0.19	0.94	9.80	0.20	0.88	11.06
CS9S	0.23	0.96	8.81	0.18	0.97	7.27	0.13	0.96	7.58
CS6S	0.35	0.94	9.51	0.33	0.92	10.99	0.26	0.90	9.29
CSWS	0.44	0.92	11.68	0.34	0.91	12.04	0.25	0.87	13.33
CS3S	0.41	0.89	14.39	0.31	0.88	11.79	0.25	0.84	13.36
CS7S	0.51	0.90	12.91	0.33	0.86	12.26	0.27	0.77	12.78
CS4S	0.51	0.84	16.30	0.33	0.81	12.33	0.19	0.84	10.15
CS10S'	0.55	0.60	27.74	0.25	0.69	18.79	0.13	0.87	13.07
NCH1	0.31	0.92	12.88	0.18	0.95	8.95	0.14	0.93	9.15
NCH1A	0.56	0.79	28.32	0.37	0.85	21.50	0.19	0.93	12.85
NCH2	0.30	0.84	17.77	0.22	0.85	14.99	0.20	0.69	21.03

NCH3	0.25	0.92	10.28	0.26	0.84	15.40	0.20	0.80	17.04
NCH4	0.29	0.91	12.26	0.27	0.83	14.25	0.19	0.82	13.54
NCH5	0.25	0.92	10.03	0.20	0.91	11.20	0.16	0.88	11.02
NCH6	0.28	0.90	12.81	0.21	0.90	13.33	0.16	0.90	12.66
NCH7	0.43	0.78	17.32	0.25	0.87	14.47	0.18	0.87	14.17
NCH8	0.40	0.82	19.86	0.17	0.92	11.97	0.14	0.89	13.36
NCH9	0.32	0.89	12.00	0.18	0.87	12.76	0.19	0.69	16.84
平均	**0.36**	**0.86**	**15.62**	**0.26**	**0.86**	**14.50**	**0.19**	**0.84**	**13.88**

表 4.7 2022 年 2 月三维盐度的模拟误差统计

站位	表层			中层			底层		
	RMSE（PSU）	RE (%)	WS	RMSE（PSU）	RE (%)	WS	RMSE（PSU）	RE (%)	WS
HS0	0.16			0.15			0.14		
NGN4S	0.06			0.07			0.07		
NG3'	0.08			0.20			0.21		
CS0S	0.19	11.4	0.75	0.47	20.2	0.50	0.63	15.6	0.59
CS9S	0.40	28.7	0.59	0.66	34.1	0.27	0.96	16.6	0.34
CS6S	0.58	31.4	0.45	1.44	9.2	0.74	3.60	22.7	0.33
CSWS	0.66	16.5	0.75	2.16	11.5	0.85	3.37	15.6	0.79
CS3S	1.98	5.9	0.68	2.99	11.5	0.82	2.51	10.3	0.93
CS7S	3.99	11.8	0.54	4.39	15.3	0.74	4.24	13.7	0.79
CS4S	4.29	16.0	0.61	3.03	18.2	0.56	2.94	18.7	0.49
CS10S'	4.43	18.1	0.69	3.68	17.5	0.23	2.33	15.7	0.55
NCH1	0.59			1.39			1.53		
NCH1A	1.95	72.9	-0.15	2.74	39.1	-0.04	2.87	39.9	-0.06
NCH2	2.60	70.7	-0.25	4.00	62.4	-0.43	4.13	60.9	-0.33
NCH3	3.10	37.0	-0.07	4.09	46.6	-0.41	4.29	48.3	-0.59
NCH4	3.66	34.4	-0.14	4.45	42.9	-1.04	4.36	35.7	-0.83
NCH5	3.95	38.6	-0.37	3.92	33.2	-0.98	3.76	29.8	-0.65
NCH6	3.45	40.5	-0.28	2.83	26.0	-0.11	2.72	21.4	0.13
NCH7	3.78	33.5	-0.34	2.88	23.8	0.29	3.88	31.1	0.09
NCH8	3.22	16.5	0.45	1.92	15.7	0.72	2.78	18.1	0.46
NCH9	4.52	17.8	0.60	2.05	17.2	0.50	2.26	23.2	-0.02

北槽	**2.06**	**7.49**	**0.63**	**2.35**	**17.19**	**0.59**	**2.57**	**16.11**	**0.60**
南槽	**3.08**	**40.20**	**-0.06**	**3.03**	**34.09**	**-0.16**	**3.26**	**34.26**	**-0.20**
平均	**2.27**	**29.51**	**0.27**	**2.36**	**26.14**	**0.19**	**2.55**	**25.72**	**0.18**

表 5.8　表、中、底层含沙量的 FVCOM 模拟误差统计

站位	**表层**			**中层**			**底层**		
	RMSE（kg/m3）	**RE (%)**	**WS**	**RMSE（kg/m3）**	**RE (%)**	**WS**	**RMSE（kg/m3）**	**RE (%)**	**WS**
HS0	0.10	28.7	-0.54	0.17	21.0	-0.31	0.19	21.2	0.01
NGN4S	0.06	32.6	0.56	0.19	82.0	-0.45	0.27	82.3	-0.90
NG3'	0.07	34.7	0.35	0.14	24.1	0.10	0.25	45.7	-0.29
CS0S	0.08	23.0	0.53	0.12	22.8	0.48	0.20	27.1	0.27
CS9S	0.11	26.9	0.38	0.15	14.0	0.56	0.25	12.3	0.30
CS6S	0.12	20.7	0.61	0.28	9.8	0.65	0.71	16.0	0.15
CSWS	0.10	14.6	0.74	0.45	8.1	0.52	0.77	11.9	0.43
CS3S	0.16	12.6	0.79	0.28	16.6	0.75	0.64	11.7	0.53
CS7S	0.14	8.7	0.88	0.36	15.9	0.75	0.68	18.8	0.52
CS4S	0.11	26.2	0.34	0.39	46.4	0.34	0.59	56.1	-0.05
CS10S'	0.09	31.2	-0.08	0.25	66.8	0.33	0.45	30.7	-0.42
NCH1	0.09	19.3	0.37	0.12	21.1	0.60	0.18	24.8	0.43
NCH1A	0.14	27.1	0.25	0.16	17.0	0.75	0.14	13.3	0.82
NCH2	0.21	22.9	-0.09	0.27	14.7	0.67	0.51	29.1	0.36
NCH3	0.21	18.9	-0.06	0.26	15.3	0.75	0.33	16.9	0.70
NCH4	0.21	17.5	0.08	0.25	13.2	0.78	0.34	14.2	0.76
NCH5	0.17	20.1	0.28	0.15	9.6	0.88	0.32	11.6	0.73
NCH6	0.24	13.5	0.31	0.35	14.6	0.54	0.41	16.3	0.54
NCH7	0.17	8.8	0.51	0.40	11.3	0.42	0.47	15.4	0.44
NCH8	0.09	10.7	0.54	0.30	9.4	0.55	0.41	13.5	0.46
NCH9	0.11	23.0	0.19	0.31	14.2	0.35	0.79	18.5	-0.19
北槽	**0.11**	**20.5**	**0.52**	**0.29**	**25.1**	**0.55**	**0.53**	**23.1**	**0.22**
南槽	**0.16**	**18.2**	**0.24**	**0.26**	**14.0**	**0.63**	**0.39**	**17.3**	**0.51**
平均	**0.13**	**21.0**	**0.33**	**0.26**	**22.3**	**0.48**	**0.42**	**24.2**	**0.27**

项目组通过比较实测数据与模型预测结果，可以明显看出模型在模拟潮位、流速、盐度和含沙量等关键海洋参数方面具有很高的准确性。具体来说，RMSE、

WS 和 RE 这三个统计参数表明模型的预测值与实测数据高度吻合。模型验证结果显示，所有评估指标都在可接受的误差范围内，标志着模型有很好的预测能力和高度可靠性。

（3）多组分泥沙模块

FVCOM 区分了两种不同类型的沉积物：非粘性沉积物（例如，沙子）和粘性沉积物（例如，泥）。沉积物类别的数量在概念上是无限的，但由于受到计算机物理限制，实际模型的输入和输出都受到限制。每个类别都与某些属性（直径、密度、侵蚀和沉积的临界剪切应力、沉降速度）相关联，这些属性在整个模型计算中作为输入并保持不变。同时，海床属性描述沉积物表面的条件，这些属性以空间维度存储在模型域内。其属性包括代表性值（几何平均值）的沉积物属性，包括粒径、密度、侵蚀的临界剪切应力、沉降速度以及海床表面的属性。并且在如沙脊高度、表面粗糙度和海床坚硬度，投标团队都需要在每个水平位置追踪，且每一层的海床属性数量也被追踪。在模型开始时，送入的海床属性被指定为初始场，并在整个模型运行过程中保持不变；每种沉积物的质量根据每层的平均沉积物密度计算得到，同时也在计算过程中保持不变。

在颗粒尺寸的模拟上，投标团队采用基于尺寸分类的模型，即通过在一定数量的离散颗粒尺寸类别中分配质量来表示颗粒群落，通过半经验公式中分裂和聚合状态来表征每个尺寸类别。基于分类的模型的一个优点是它更简单且更高效，可以为每个类别顺序使用更一致和统一的沉降速度。投标团队用几个（7-20+）类别来描述沉积物和絮凝体分布，每个类别都有固定的特征，包括尺寸、絮凝体密度和沉降速度。

投标团队在 FVCOM 中实施了絮凝体模块（floc mod）来模拟沉降速度和颗粒大小因聚合和解聚作用而产生的变化。这个絮凝体模型是一个零维模型，从计算开始到最后输出结果，它被局部整合在模型的斜压时间步长中，并且在模型的每个单元格中更新。在絮凝体和颗粒被更新之后，沉降、平流和扩散程序在带有海床（侵蚀或沉积）的通量边界条件和表面的零通量条件下于 FVCOM 中运行。在执行絮凝体模块下，模型给出了絮凝体大小和絮凝体密度ρ_f（千克每立方米）之间的关系，这与原始聚合颗粒直径Dp（米）和密度ρ_s（千克每立方米）之间的关系有关，通过一个分形维数n_f来表示，如下：

$$\rho_{\mathrm{f}} = \rho_{\mathrm{w}} + (\rho_{\mathrm{s}} - \rho_{\mathrm{w}}) \left(\frac{D_{\mathrm{f}}}{D_{\mathrm{p}}} \right)^{n_{\mathrm{f}}-3}, \tag{4-1}$$

其中ρ_w（千克每立方米）是絮凝体间隙水的密度。所有粘性沉积物中的颗粒

都带有密度ρ_f=ρ_s。当调用絮凝体模型时，所有粘性沉积物类别都被视为絮凝体，聚合和解聚过程可以在一个类别中的悬浮沉积物质量转移到另一个类别。这个过程被视为拉格朗日过程，它发生在一个斜压模型时间步骤内的模型单元格中，同时保持该单元格中的悬浮质量，类似于生物地球化学模型中的质量守恒传输。絮凝体模型通过模拟絮凝体之间的两个颗粒碰撞和由湍流剪切和/或碰撞引起的解聚来模拟絮凝体的聚合或分离。絮凝体数量浓度 N(k)（每立方米）的变化率由一组 k 个微分方程控制：

$$\frac{\mathrm{d}N(k)}{\mathrm{d}t} = G_{\mathrm{a}}(k) + G_{\mathrm{bs}}(k) + G_{\mathrm{bc}}(k) - L_{\mathrm{a}}(k) - L_{\mathrm{bs}}(k) - L_{\mathrm{bc}}(k), \tag{4-2}$$

其中 G 和 L 项（每立方米每秒）代表增益和损失的质量，分别表示为：a（聚合），bs（由剪切引起的破裂），bc（由碰撞引起的破裂）。方程（4-2）显式地整合到可调节的时间步长中，这些步长可能与斜压模型的时间步长一样长，但当需要确保稳定性和保持正的粒子数量浓度 N(k)（单位：每立方米）时会自动减少。粒子数量浓度 N(k)与悬浮质量浓度C_m(k)（单位：千克每立方米）相关，后者与个体絮凝体的体积和密度有关。通过 FVCOM 中的湍流子模型计算的聚合和解聚项均依赖于局部的湍流剪切率。

投标团队对悬浮物的建模是从海床顶部到水柱底部最低处来计算其侵蚀通量$E_{s,i}$，即：

$$E_{\mathrm{s},i} = E_{0,i}(1-\phi)\left(\tau_{\mathrm{sf}} - \tau_{\mathrm{ce},i}\right)/\tau_{\mathrm{ce},i} \tag{4-3}$$

其中$\tau_{sf} > \tau_{ce}$，E_0是一个床面可蚀性常数，ϕ是顶部床层的孔隙率，τ_{sf}是底部剪切应力的摩擦分量，τ_{ce} 是有效的临界剪切应力，i 是每个沉积物类别的索引。每个时间步长中每个类别侵蚀的质量受限于该沉积物类别在床层顶部的数量。

目前还没有一个普遍接受的基于物理的模型，用于根据床层属性（如粒径、矿物学和孔隙率）确定整体临界剪切应力。投标团队根据整体临界剪切应力剖面趋向于依赖于海床深度的平衡剖面（图.24），预先确定整体临界剪切应力$\tau_{ch\,eq}$，即：

$$\tau_{\mathrm{cb\,eq}} = a\exp\left[\frac{\ln\left(z_{\mathrm{p}}\right) - \mathrm{offset}}{\mathrm{slope}}\right], \tag{4-4}$$

其中，z_p为质量深度，即覆盖在床层给定深度上方沉积物的累积质量。等式（4-4）中，偏移量和斜率的单位是 ln（kg·m^{-2}），而 a=1 Pa·kg^{-1}·m^2 是一个虚设系数，用于产生临界剪切应力的正确单位。每个模型层 k 底部的质量深度计算如下：

$$z_{\mathrm{p}}(k)=\sum_{k}\sum_{i}f_{i,k}\rho_i\Delta z_k, \tag{4-5}$$

其中，求和是对 k 个床层和 i 个沉积物类别进行的，f_i(无量纲)是沉积物类别 i 的分数，ρ_i（单位：kg/m^{-3}）是类别 i 中的颗粒密度，Δz_k（单位：m）是层 k 的厚度。

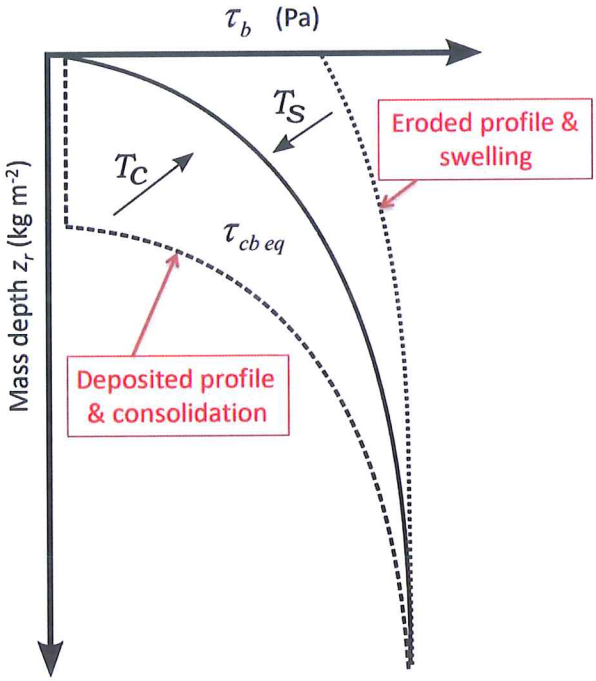


图 4.24 固结和膨胀的概念图

混合沉积物过程在有粘性和非粘性沉积物存在时发生，并且对泥土的比例很敏感。泥土含量极低（<3%）的沉积层表现出非粘性沉积物的特性，并且易蚀性由粒子的临界剪切应力决定，这是每种粒子类的内在特性。非粘性床层可能会因选择性侵蚀而出现风化和硬化。相反，含有更多泥土（3%到 30%）的床层根据整体性质（例如，密度、矿物质、有机含量、埋藏深度等）的不同表现出不同的行为，但在模型中这些特性是由蚀变的临界剪切应力决定的。在模型中，含泥量低到中等的床层具有低到中等的临界剪切应力，并且模型中的临界剪切应力是由粘性和非粘性行为参数Pc确定的，该参数在 0（非粘性）到 1（粘性）之间变化。

当Pc=0 时，不存在粘性行为，粒子的剪切应力τ_c是独立的常数；当Pc=1，粘性沉积物的临界剪切应力是τ_c和层的整体临界剪切应力T_{cb}中的较大者。在这些极限之间，有效的临界剪切应力为：

$$\tau_{ce} = \max\left[P_c \tau_{cb} + (1 - P_c)\,\tau_c, \tau_c\right]. \qquad (4\text{-}6)$$

方程（4-6）允许细颗粒物质（如粘土）在粘性系数P_c较低时容易被悬浮在水中，即使只有少量的泥土存在于其他主要是沙子的床层中。此外，这种方法限制了可以在活动混合层中使用的流量。它也允许在P_c较高时，非粘性的粉砂或细沙在整体侵蚀事件中被重新悬浮。这种方法提供了从一个行为到另一个行为的平滑过渡。活动混合层的厚度是根据粘性和非粘性估计中较厚的那一个来计算的。图.25 演示了混合床层的行为，随着泥土（在这个例子中是粘土大小）的比例f_c增加，对于一个恒定的底部应力 0.12 Pa，混合行为增加。当f_c低时，P_c=0，粘土和粉砂容易被侵蚀（高相对流量率）。

因为这些细颗粒的非粘性行为很低，所以相对流量率是根据每个类别的比例和侵蚀率系数进行标准化的。实际的侵蚀流量在泥土含量低时会很低，因为床层中的泥土含量低。随着f_c的增加，床层变得更加粘性，相对侵蚀流量下降；当f_c超过一个临界值时，床层完全粘性，侵蚀流量由粘性沉积物的整体临界剪切应力T_{cb}决定。

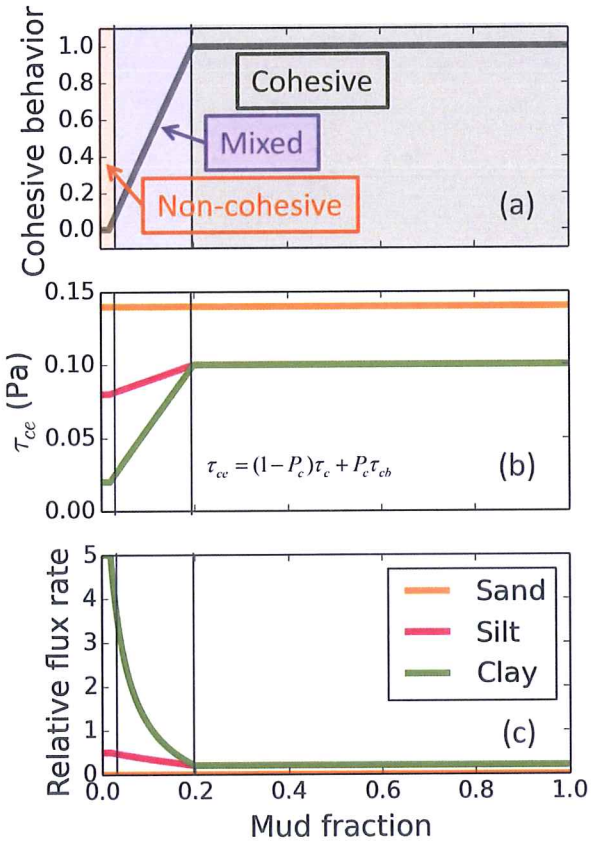


图 4.25 随着泥土比例f_c增加的混合床层行为

沉积物中床层属性的混合可能是由底栖动物或孔隙水循环引起的，这倾向于平滑地层中的梯度并在沉积物中垂直移动物质。模型假设混合是一个一维垂直扩散过程，并忽略了非局域和侧向混合过程，即：

$$\frac{\partial C_{\mathrm{v}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{\mathrm{b}}\frac{\partial C_{\mathrm{v}}}{\partial z}\right), \tag{4-7}$$

其中c_v是守恒性质的体积浓度（例如，沉积物类别的分数浓度或孔隙率），D_b是一个生物扩散系数，可能会随着床层深度而变化，而 z 是床层深度（在沉积物-水界面处为零，向下为正）。

投标团队将以上的粘性和混合沉积物算法添加到了 FVCOM 模型中，补充了现有的非粘性沉积物模块，从而增强了投标团队模拟细粒和混合沉积物环境的能力。该模型可以适合模拟沉积物输运、地层发展和形态变化，其适用于数十到数百平方公里的区域尺度，即，网格单元大小为 10-10000 平方米，并且能够解析从分钟到数十年不等的时间尺度。FLOCMOD 模型模拟了潮汐变化中悬浮颗粒团聚集的实验结果，有效地创建了一个零维模拟。在这个模拟中，唯一活跃的过程是

颗粒团对变化的湍流剪切的响应。粒径类的大小是对数间隔的，从 4 微米到 1500 微米，密度类从方程（4-1）得到。模拟结果很好地匹配了实验结果的颗粒团直径周期变化（图.26），与观测数据相比有 24 微米的均方根差异。同时，投标团队还计算了长达 15 天（360 小时）的强湍流剪切速率周期下颗粒团生长，很好地模拟了第一周期的颗粒团形成。

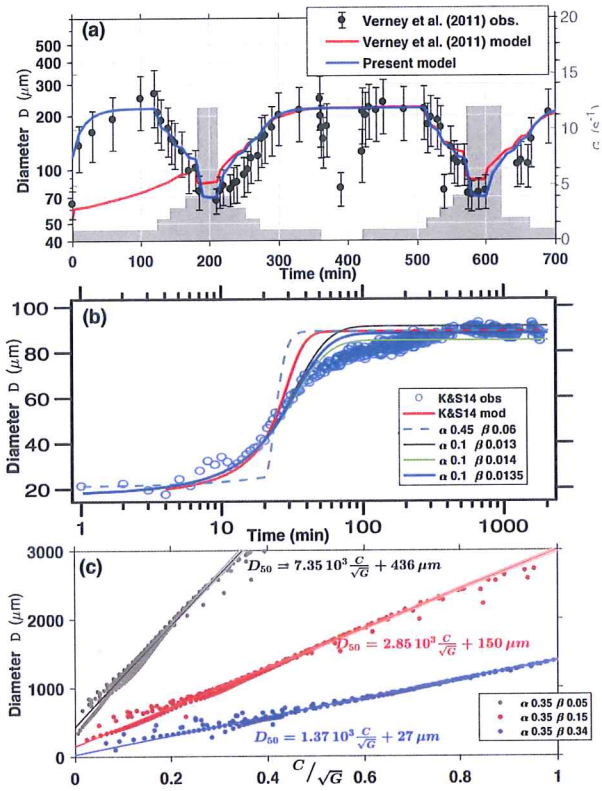


图 4.26 利用 FVCOM 的 FLOCMOD 模块模拟的实验结果与实验室理论结果比较图

另外，投标团队还利用该 FLOCMODE 计算了基于切萨皮克湾的一个支流约克河（the York River）地形网格的凝结沉积物床模型，探讨了该地形下凝结沉积物行为、底栖生态和光衰减之间联系。投标团队对模型沉积物的可侵蚀性和悬浮沉积物浓度进行初始化，其中平衡临界剪切应力剖面为$\tau_{cbeq} = z_P^{0.62}$。膨胀和固结时间尺度分别为 1 小时和 50 天。孔隙度（θ=0.9）和侵蚀率参数（$E_0 = 0.03kg^{-2}s^{-1}P_a^{-1}$）初始值恒定。在开放边界，即约克河遇到切萨皮克湾的地方，设置了一个零悬浮沉积物浓度梯度，分别为六个沉积物类别的侵蚀速率，其粒径从 0.032 到 1 mm 不等。为了初始化海床，这些沉积物在 20 层沉积物床中均匀分布，总厚度为 1 米，其中最顶层是薄的（0.1 mm）。通过这种方式，模型被初始化为一个底层沉积物床>2cm，具有很高的垂直分辨率（~1 m）的沉积物。

在 60 天的模型运行期间，使用了 60 年来中位数的淡水流量 67 立方米/秒和春潮周期，春潮的振幅为 0.2 米，涨潮周期为 0.4 米。原本均匀的沉积物床发生了演变，形成了沉积物易侵蚀性高的区域。一般来说，沉积物从主河道移除，发展出侵蚀性较低的区域（图.27）。在 Gloucester Point 地点，初始床面被认为变得过于粘结，海床的临界剪切应力超出了模型指定的平衡值。相反，在 Clay Bank 地点，条件更为可变。沉积在浅滩区域的沉积物发展出了更高的侵蚀性。在河道内，经常超出临界剪切应力，导致沉积物床严重侵蚀，沉积物表面的临界剪切应力值较大。沉积物分类的潮汐分布，侵蚀区域仅保留了较粗、沉降速度更快的颗粒，而沉积区域则保留了较细、沉降速度更慢的颗粒。这些模式，具有粗糙层和相对浅滩区域河道中侵蚀性减少的沉积物床，与约克河的流动方向一致。

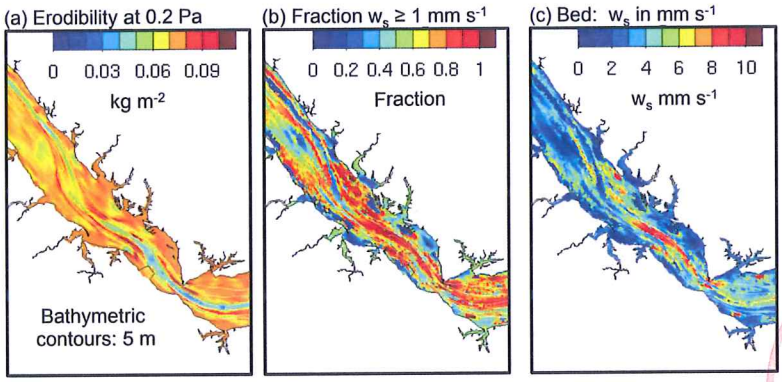


图 4.27 模型在潮汐作用和持续平均淡水排放 2 个月后对海床属性的估算。

（4）植被模块

本团队在已有研究中的植被对平均流、湍流、波生流、波浪、泥沙过程影响的参数化方案基础上，基于 FVCOM 建立了植被作用数值模块，进而构建了流场-波浪-泥沙-植被耦合框架，得到如下结论：本文较为系统地整理了植被参数化方案，开发了较为完善的植被作用模块和耦合框架，与简单地将植被概化为底部粗糙度的传统方法相比更具物理性基础，可更详细地考虑不同高度、不同类型（刚性、柔性）、不同淹水状态下的植被对流场、波浪过程的直接影响以及对泥沙输运过程的间接影响。

潮滩环境中广泛存在的潮沟、植被对水动力、泥沙运动具有显著影响。但目前的潮沟-植被系统动力学数值模型研究中，结构网格对精细地模拟潮滩高复杂度的潮沟和植被存在较大难度，以及对植被这一重要的潮滩动力过程影响因素在数值模型中的合理反映仍有待加强。这些一般性基础问题对深入揭示整个潮滩系统动力过程的数值模拟研究具有重要科学意义和应用价值。

在 FVCOM 中加入植被模块 FVCOM-VEG，考虑植被产生的水平阻力，使用

静力近似控制方程，动量方程表示为：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\vec{v}\cdot\nabla u-fv=-\frac{\partial P_h}{\rho_0\partial x}-\frac{\partial}{\partial s}K_m\frac{\partial u}{\partial z}+D_u+F_u \tag{4-1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\vec{v}\cdot\nabla v+fu=-\frac{\partial P_h}{\rho_0\partial y}-\frac{\partial}{\partial s}K_m\frac{\partial v}{\partial z}+D_v+F_v \tag{4-2}$$

式中，新增的(F_u,F_v)源汇项包括波浪辐射应力项、植被阻力项$F_{d,veg}$以及波生流在植被冠层内引起的平均力项$F_{s,veg}$，其中，波浪辐射应力项已通过波浪-流场耦合模型进行计算，后两项为植被项，将在下文进行详细描述。

每单位面积、单位高度的柔性植被的水平阻力表示为：

$$F_{d,veg}=\frac{1}{2}C_Db_vn_vU^2\cos^2\theta \tag{4-3}$$

因此，高度为l_v的柔性植被，每单位面积的总阻力表示为：

$$F_{d,veg,\ tot}=\int_0^{l_v}\frac{1}{2}C_Db_vn_vU^2\cos^2\theta\cos\theta ds \tag{4-4}$$

式中，C_D代表植物阻力系数；b_v代表单株植物的投影宽度；n_v代表单位面积的植物数量即密度；U（$=\sqrt{u^2+v^2}$）代表水平方向的流速，在数值模型中考虑为对应的不同垂向位置的分层流速；θ是植物相对于 z 方向的弯曲角度；定义有效高度l_{ve}，指高度为l_{ve}的刚性植被，与直立高度为l_v的柔性植被在水流条件下产生了等效的水平阻力，即：

$$F_{d,veg,tot}=\int_0^{l_v}\frac{1}{2}C_Db_vn_vU^2\cos^2\theta\cos\theta ds=\frac{1}{2}C_Db_vn_vU^2l_{ve} \tag{4-5}$$

l_{ve}即为柔性植被的有效高度，表示为：

$$\frac{l_{ve}}{l_v}=\int_0^{l_v}\cos^3\theta d\left(\frac{s}{l_v}\right) \tag{4-6}$$

此时，由于：

$$F_{d,veg,tot}=\frac{1}{2}C_Db_vn_vU^2l_{ve} \tag{4-7}$$

因此，单位体积的刚性植被水平阻力$F_{d,veg}$在动量方程中表示为

$$F_{d,veg,u}=\frac{1}{2}C_Db_vn_vu\sqrt{u^2+v^2} \tag{4-8}$$

$$F_{d,veg,v}=\frac{1}{2}C_Db_vn_vv\sqrt{u^2+v^2} \tag{4-9}$$

为了确定l_{ve}，需通过水槽实验得到的弯曲角θ（$=\cos^{-1}\left(\frac{l_{ve}}{l_v}\right)^{1/3}$）确定$l_{ve}$、$l_v$的关系，基于水槽实验得出的计算$l_{ve}$的经验公式为：

$$\frac{l_{ve}}{l_v} = 1 - \frac{1-0.9Ca^{-1/3}}{1+Ca^{-3/2}\left(8+B^{3/2}\right)} \tag{4-10}$$

其中：

$$Ca = \frac{\frac{1}{2}\rho C_D b_v U^2 {l_v}^3}{EI} \tag{4-11}$$

$$B = \frac{(\rho-\rho_v) g A_C {l_v}^3}{EI} \tag{4-12}$$

式中，Ca为柯西数，代表流动阻力和由于刚度引起的恢复力的相对大小；B为浮力参数，代表由于浮力引起的恢复力与由于刚度引起的恢复力之比；I是植物横截面的惯性矩，E是植物弹性模量，ρ_v是植物组织密度，A_C是植物横截面的面积。

植被冠层内由振荡波引起的沿波传播方向上的平均流，基于植被引起的总波能耗散计算$F_{s,veg}$，表示为：

$$F_{s,veg} = \frac{S_{d,veg,tot}\tilde{k}}{\rho_0 \tilde{\sigma}} \tag{4-13}$$

式中，$\tilde{k}$代表平均波数，$\tilde{\sigma}$代表平均波频，$S_{d,veg,tot}$代表由于植被引起的总波能耗散。

FVCOM 中对垂向涡动粘性系数K_m的参数化，可选用海洋湍流闭合模型 GOTM（General Ocean Turbulence Model）。GOTM 是广泛使用的开放源码模型，由许多湍流模块组成，从简单的理查森到复杂的雷诺应力湍流闭合方程，这些方程包括了经典方案 MY-2.5（$q^2 - q^2 l$，即$k - kl$，$q^2 = k$）和$k - \varepsilon$等，参数化方程使得求解K_m的问题转化成求解q、l或k、ε，其中，q^2即k代表单位质量的湍流动能；l代表湍流长度尺度；ε代表湍流动能耗散率。

边界层近似中，MY-2.5（$q^2 - q^2 l$）湍流闭合方程表示为:

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla q^2 = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z}\right) + 2(P + B - \varepsilon) \tag{4-14}$$

$$\frac{\partial q^2 l}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla q^2 l = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_q \frac{\partial q^2 l}{\partial z}\right) + l(c_1 P + c_1 B - W\varepsilon) \tag{4-15}$$

$k - \varepsilon$湍流闭合方程表示为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right) + P + B - \varepsilon \tag{4-16}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) + \frac{\varepsilon c_{\varepsilon 1}}{k}(P + c_{\varepsilon 3} B) - \frac{\varepsilon^2}{k} c_{\varepsilon 2} \tag{4-17}$$

其中，

$$P = -\overline{u'w'}\frac{\partial u}{\partial z} - -\overline{v'w'}\frac{\partial v}{\partial z} \tag{4-18}$$

$$B = -\frac{g}{\rho_0}\overline{\rho' w'} \tag{4-19}$$

式中，K_q代表湍流动能的垂直涡动扩散系数；P、B分别代表由于湍流动能的剪切产生和浮力产生项；c_1 代表经验常数；W代表近壁函数；v_t与K_q相同；$\widehat{\sigma_k}$为湍流普朗特数；$c_{\varepsilon 1}$、$c_{\varepsilon 2}$、$c_{\varepsilon 3}$代表经验常数。

在 FVCOM 中加入植被模块后，MY-2.5 湍流闭合方程（k-ε同理）表示为：

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + \vec{v}\cdot\nabla q^2 = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_q\frac{\partial q^2}{\partial z}\right) + 2\left(P + P_{veg} + B - \varepsilon\right) \tag{4-20}$$

$$\frac{\partial q^2 l}{\partial t} + \vec{v}\cdot\nabla q^2 l = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_q\frac{\partial q^2 l}{\partial z}\right) + l\left(c_1 P + c_1 B - W\varepsilon - D_{veg}\right) \tag{4-21}$$

式中，新增项P_{veg}代表由于植被引起的湍流动能产生；D_{veg}代表由于植被引起的耗散项。植被引起的湍流动能产生P_{veg}表示为：

$$P_{veg} = \sqrt{\left(F_{d,veg,u}u\right)^2 + \left(F_{d,veg,v}v\right)^2} \tag{4-22}$$

植被引起的耗散项在湍流方程中表示为：

$$D_{veg} = c_2\frac{P_{veg}}{\tau_{eff}} \tag{4-23}$$

其中，

$$\tau_{eff} = \min\left(\tau_{free,}\tau_{veg}\right) \tag{4-24}$$

$$\tau_{free} = \frac{k}{\varepsilon} \tag{4-25}$$

$$\tau_{veg} = \left(\frac{L^2}{c_\mu^2 P_{veg}}\right)^{1/3} \tag{4-26}$$

$$L = c_l\left(\frac{1-A_C n_v}{n_v}\right)^{1/2} \tag{4-27}$$

式中，τ_{free}代表自由湍流的耗散时间尺度；τ_{veg}代表植物之间涡旋的耗散时间尺度；τ_{eff}定义为τ_{free}与τ_{veg}之间的最小值；L代表植物之间的典型长度尺度；c_l代表阶次系数。

SWAN 是第三代海浪模型，物理过程包括：（1）波浪的传播；（2）水深变化和流影响下的折射和相对频率偏移；（3）波浪透过障碍物或被反射；（4）衍射；（5）风的输入；（6）三波或四波相互作用；（7）由于白冠、水深变浅、

底部摩擦引起的破碎；（8）由于水生植被、湍流等引起的耗散。相比 WAM、WAVEWATCH 等的显式计算，SWAN 采用的隐式计算更适用于近岸尺度，这与 FVCOM 的优势相重合，两者均得到了优势的相互辅助。其求解的波浪作用平衡方程表示为：

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial c_x N}{\partial x}+\frac{\partial c_y N}{\partial y}+\frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma}+\frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta}=\frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4\text{-}28)$$

式中，σ代表波浪频率；θ代表波浪传播方向；N代表波作用量密度，定义为在σ和θ上分布的波能密度$E(\sigma,\theta)$除以频率σ，即$N=E(\sigma,\theta)/\sigma$；$c$是传播速度；该方程式中，左边第一项代表波作用量密度在时间上的局地变化；第二项、第三项代表波作用量密度在 x 和 y 方向上的对流变化；第四项代表由于水深和水流变化引起的相对频率偏移；第五项代表水深引起的折射；方程右边代表源/汇项，S_{tot}表示为：

$$S_{d,veg}=-\sqrt{\frac{2}{\pi}}g^2\widetilde{C_D}b_v n_v\left(\frac{\tilde{k}}{\tilde{\sigma}}\right)^3\frac{\sinh^3(\tilde{k}l_v)+3\sinh(\tilde{k}l_v)}{3\tilde{k}\cosh^3(\tilde{k}h)}\sqrt{E_{tot}}E(\sigma,\theta) \quad (4\text{-}29)$$

其中，

$$\tilde{\sigma}=\left(E_{tot}^{-1}\int_0^{2\pi}\int_0^{\infty}\frac{1}{\sigma}E(\sigma,\theta)d\sigma d\theta\right)^{-1} \quad (4\text{-}30)$$

$$\tilde{k}=\left(E_{tot}^{-1}\int_0^{2\pi}\int_0^{\infty}\frac{1}{\sqrt{k}}E(\sigma,\theta)d\sigma d\theta\right)^{-2} \quad (4\text{-}31)$$

$$E_{tot}=\int_0^{2\pi}\int_0^{\infty}E(\sigma,\theta)d\sigma d\theta \quad (4\text{-}32)$$

式中，k代表波数；E_{tot}代表总波能；$\widetilde{C_D}$代表体积阻力系数。

FVCOM-SED 是基于 CSTM 开发的泥沙模型转成的无结构网格、有限体积的泥沙模型。模型考虑了悬移质和推移质泥沙输运过程，和 ROMS 一样应用了基于活动层概念的分层动力学，对每一步计算出的床面泥沙侵蚀量施加限制，保证它在这一步计算初始得到的活动层厚度之内，且不限制沉积物种类和床面层数。

泥沙设置的通量限制解、粘性泥沙侵蚀/沉积算法。其控制方程表示为：

$$\frac{\partial C_i}{\partial t}+\frac{\partial uC_i}{\partial x}+\frac{\partial vC_i}{\partial y}+\frac{\partial (w-w_i)C_i}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(A_h\frac{\partial C_i}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_h\frac{\partial C_i}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial C_i}{\partial z}\right)$$

（4-33）

式中，下标i代表用户指定的第i个泥沙组分，每个泥沙组分需指定以下属性：粒径，密度，沉降速度，侵蚀临界切应力和易蚀性常数；C_i代表第i组分泥沙的浓

度；w_i代表第i组分泥沙的沉降速度；A_h代表水平涡动粘性系数；K_M代表垂向涡动粘性系数。在海表面，无泥沙通量，边界条件表示为：

$$K_m \frac{\partial C_i}{\partial z} = 0, z = \zeta \tag{4-33}$$

在海底，泥沙通量是沉积率D_i和侵蚀率 E_i的差，边界条件表示为：

$$K_m \frac{\partial C_i}{\partial z} = E_i - D_i, z = -h \tag{4-34}$$

侵蚀率E_i的公式表示为：

$$E_i = M\left(\frac{\tau_b}{\tau_{ci}} - 1\right) \tag{4-35}$$

其中，M、τ_{ci}分别为侵蚀经验参数和第i组分泥沙的侵蚀临界切应力，是控制侵蚀的临界参数；τ_b为底部切应力。

投标团队对崇明东滩进行数值模拟研究，而潮沟处的高分辨率网格限制了模型时间步长，为保证模型计算效率，本文采用 FVCOM 模型嵌套技术根据进行崇明东滩南侧的植被区域分布进行模拟研究（图 28），在研究组已经发展非常成熟的长江口大区（图.29）模型中嵌套崇明东滩小区模型。

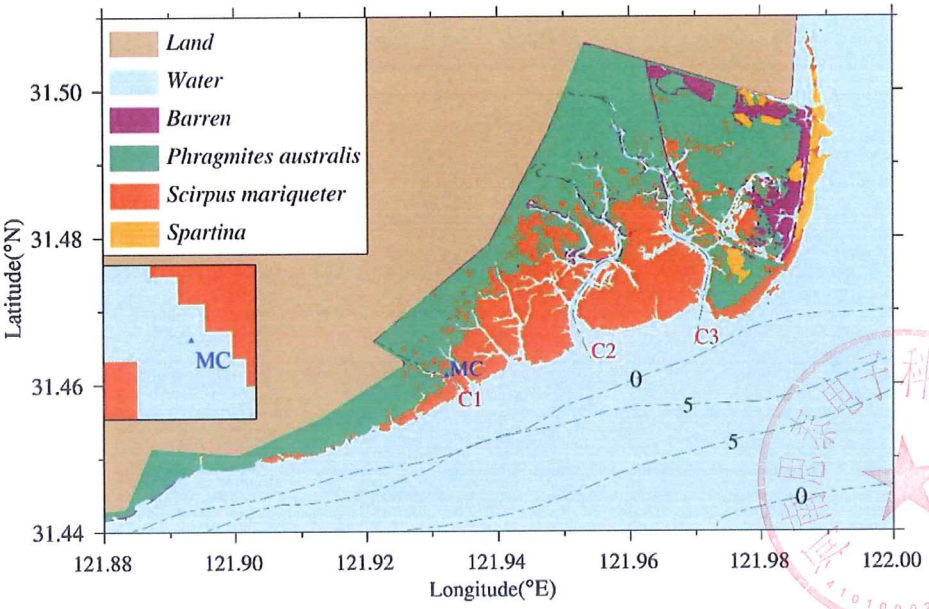


图 4.28 崇明东滩南侧的植被区域分布

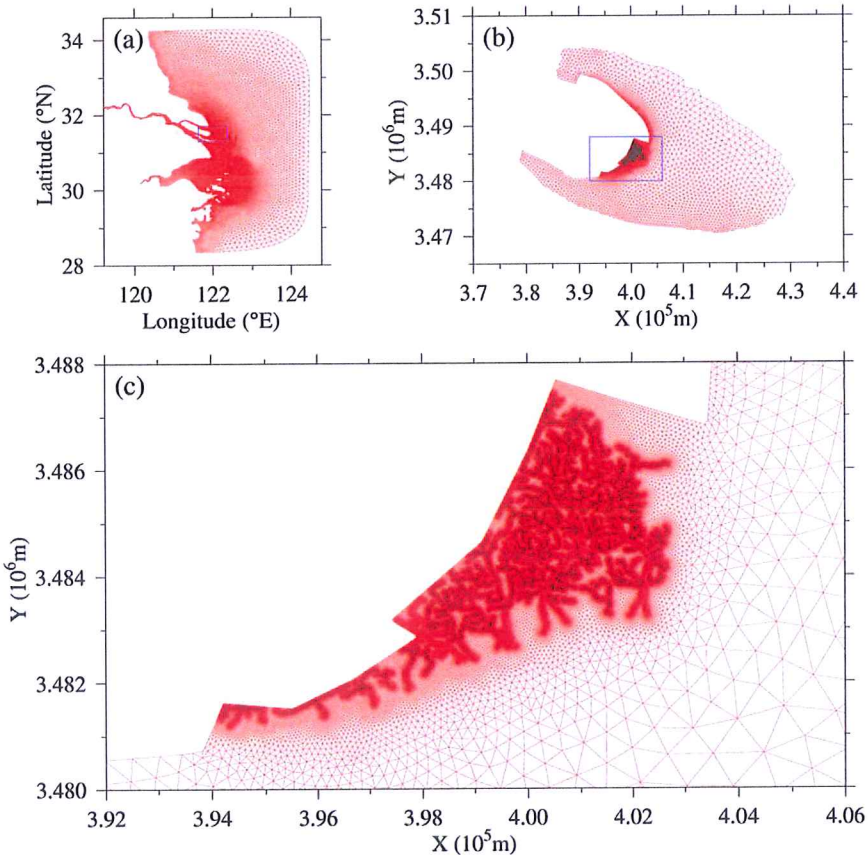


图 4.29 长江口大区，崇明东滩小区模型计算网格与潮沟区域网格

图.30、图.31、图.32 分别为 MC 潮沟站位实测的潮位、流速、流向值与 NV 模型、VB 模型、V 模型在该站位的模拟值随时间变化过程。验证结果显示，对潮位、流向而言，各模型模拟结果间差异不大，与实测数据具有一致性。对流速而言，考虑植被的模型（VB、V）较不考虑植被（NV）更接近实测，而实测与各模型模拟流速的均方根差异：NV>VB>V，也即整个计算时间段内模拟结果接近实测值的情况：V>VB>NV，但各模型间差异并不显著。分析验证结果可知，测站 MC 位于潮沟中部，其流向被潮沟走向所制约，无植被覆盖，因此本次验证中是否考虑植被对流速模拟没有显著影响，即使不考虑植被也能较好地模拟潮沟内水流流速。但仍需要注意的是，没有植被覆盖的潮沟内的流速也依然受到了周边盐沼植被的影响，这应该是植被影响了盐沼潮滩与潮沟之间的水体交换，那么深入植被覆盖的盐沼区域后，植被无疑将发挥更重要的影响，也就更需在模型中合理地反映植被影响。从图中明显可以看出植被作用模型能更好的刻画出涨初和落初时刻，可以认为相对传统改变底部粗糙度的间接考虑植被的方法，形状阻力方法表现更好。

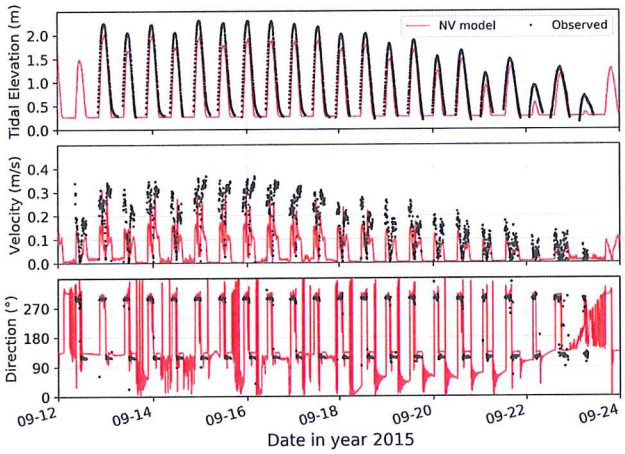


图 4.30 站位实测的潮位流速流向值与 NV 模型在该站位模拟值随时间变化过程

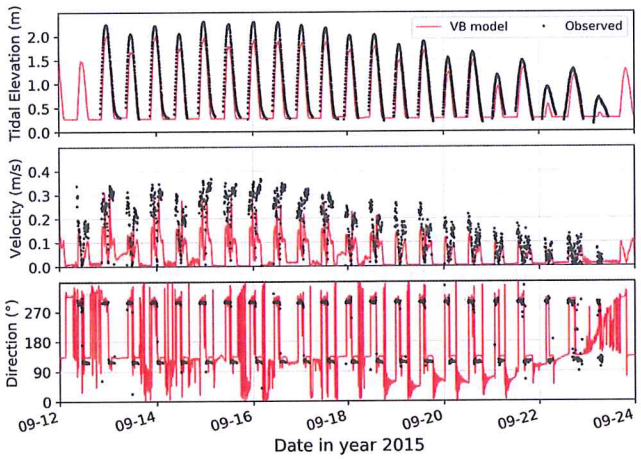


图 4.31 站位实测的潮位流速流向值与 VB 模型在该站位模拟值随时间变化过程

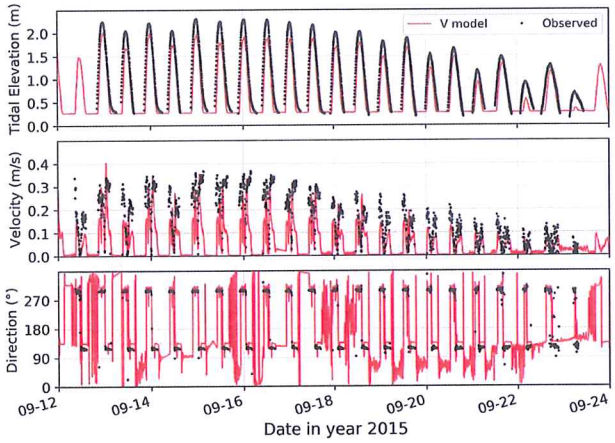


图 4.32 站位实测的潮位流速流向值与 V 模型在该站位模拟值随时间变化过程

图.33、图.34、图.35 和图.36 分别为植被作用下模拟的崇明东滩涨急、涨憩、落急和落憩时刻的流场，选取各个时刻的时间段为 2015 年 9 月 12 日 8 点至 2015 年 9 月 13 日 8 点。

在涨急时刻，潮沟整体为涨潮，潮滩上的大部分的潮沟均被水流汇入，潮沟流速普遍在 0.1~0.5 m/s；水流流向植被区时受到限制，相对于芦苇，海三棱藨草处的水流淹没面积明显更大，即使是水平距离较近也即高程相差不大的两种植被区同样具有此特征，海三棱藨草处的水流个别流速峰值能达 0.15 m/s，但芦苇处的水流流速普遍小于 0.05 m/s。在涨憩时刻，除了部分靠近顶端的部分芦苇区，潮滩区域普遍被淹没；水流仍从靠海侧的主潮沟上溯，但水流已经从靠岸部分的次级支潮沟回落；对于涨落潮流汇聚的潮沟中段，出现了往次级支潮沟以及植被区域的明显流动，流动的方向受到次级支潮沟的边界形态的一定影响，流动面积、流速大小也与对应支潮沟的供给有关；大量水流流经中部和东北部的海三棱藨草植被区，流速 0.05~0.15 m/s，此时，芦苇处的水流流速仍普遍小于 0.05 m/s。在涨急时刻主潮沟的流速普遍达到极值，而涨憩时刻相比涨急时刻，次级支潮沟内和海三棱藨草植被区的流速和流动面积普遍有了增长，这种水流空间变化的时间差说明了水流从主潮沟向支潮沟、次级支潮沟和植被区的有序流入。另外涨憩时刻与涨急时刻，芦苇区的阻流作用始终大于海三棱藨草植被区。

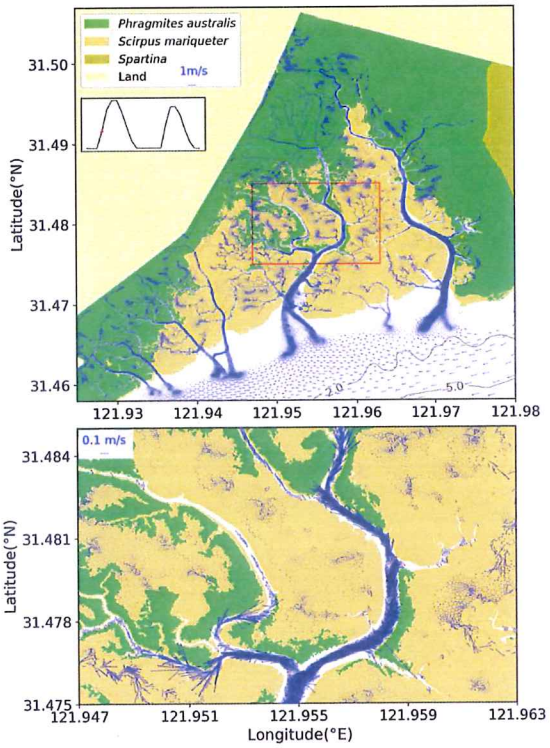


图 4.33 崇明东滩涨急时刻流场

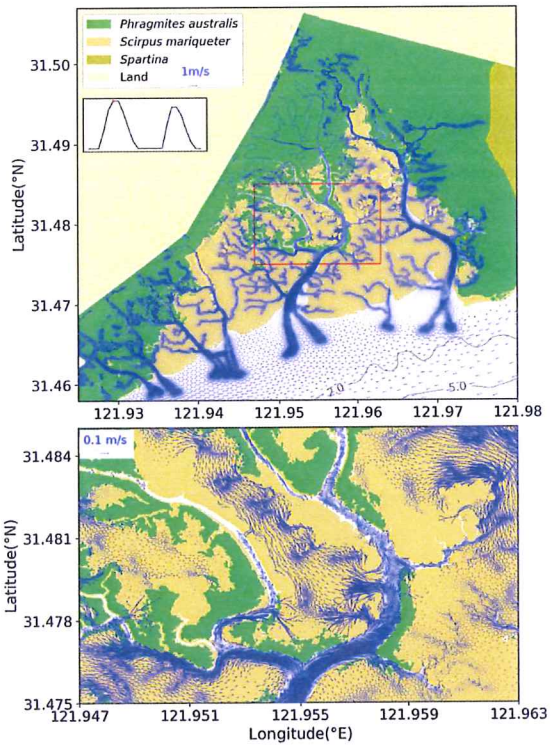


图 4.34 崇明东滩涨憩时刻流场

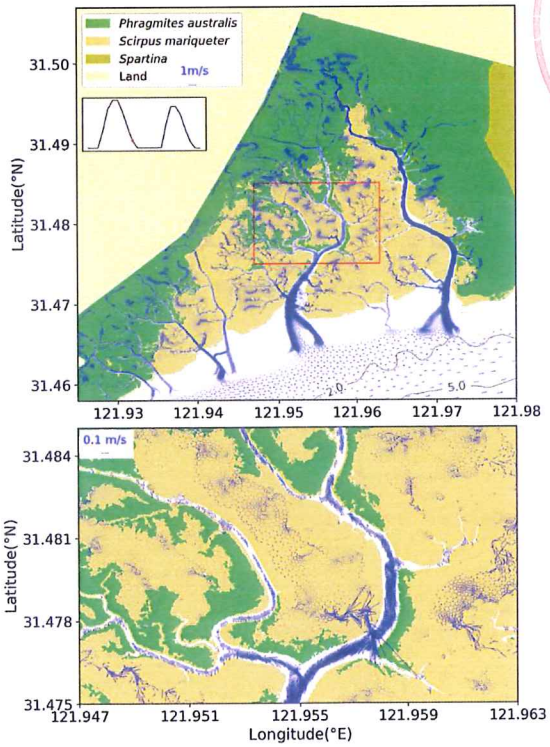


图 4.35 崇明东滩落急时刻流场

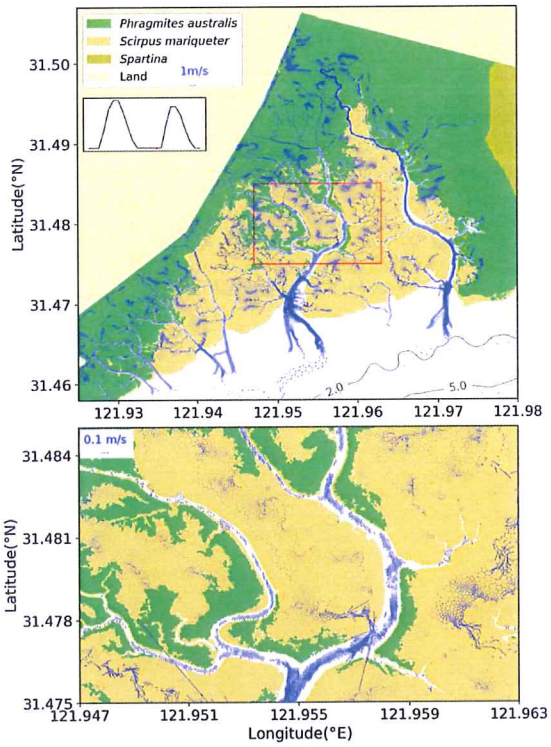


图 4.36 崇明东滩落憩时刻流场

在落急时刻，潮沟和植被区的水流普遍回落，水流方向明显地表现出从植被区回落到次级支潮沟，再往支潮沟、主潮沟回落的特征，同时流速峰值具有从次级支潮沟、支潮沟、主潮沟递减的趋势。在落憩时刻，潮滩区域的淹没面积达到极小值，大量水流回归到支潮沟、主潮沟，通常越长和宽的潮沟具有更广的汇流面积，而流速峰值趋势与落急时刻较为一致。综合各个时刻的流场过程变化分析来看，模型可以较好的刻画出潮沟和植被下的滩面流场过程。

4.1.4 开发方法

在本项目中，投标团队将致力于建立一个综合性的高分辨率无结构网格三维水动力-泥沙-植被数值模型，以全面模拟横沙浅滩区域内自然因素与人类活动对生态环境的影响。首先，团队将开发一个分辨率低于 50 米的高精度三维数值模型，整合水动力、泥沙运动及植被生长等关键要素。该模型采用模块化设计，确保各子模型之间的数据传递高效且准确。此外，模型将动态体现床面水深变化对波浪动力和潮流动力的影响与反馈，确保模拟结果的科学性与可靠性。该模型能够考虑多种植被类型在时间和空间上的变化影响。通过引入植被生长动态函数，

模型将模拟植被的季节性生长与死亡过程，及其对水流速度的减缓和泥沙沉积与侵蚀的影响。这一耦合模块不仅能够动态调整植被参数，还能实时反映植被覆盖变化对整体水动力环境的反馈效应，从而提高模型对复杂生态系统的模拟能力。

在模型研发完成后，投标团队将开展一次夏季水动力与泥沙历史过程的检验与分析，以验证模型的精度和可靠性。此过程将严格按照《水运工程模拟试验技术规范》（JTS/T 231-2021）的要求进行，通过收集和整理横沙浅滩区域的潮位数据、历史海图以及水沙水动力资料，进行全面的数据分析和模型校准。团队将利用实际观测数据对模型输出结果进行对比分析，采用均方根误差（RMSE）和相关系数等统计方法评估模型的预测精度。同时，开发可视化工具以直观展示模型预测结果与实际观测数据的对比，确保模型能够准确反映横沙浅滩的水动力和泥沙动态变化。通过这一验证过程，团队将优化模型参数，提升模型在实际应用中的可靠性和预测能力，确保其能够为横沙浅滩的生态保护与管理提供科学、准确的决策支持。

在开发工程与自然协同的数学模型过程中，投标团队选择设计多模块数据接口，耦合波浪模型、潮流模型、泥沙运动模型及植被生长模型等。在有效简化各子模型间的数据传递与相关处理工作的同时，模型还将体现床面水深变化对波浪动力和潮流动力的影响与反馈，确保模拟过程的高精度和低误差，满足《水运工程模拟试验技术规范》（JTS/T 231-2021）要求。

三、 项目重难点分析

横沙地区的滩涂湿地作为上海目前少有的、仍具有较好发育潜力的湿地，是具有战略意义的湿地资源储备，应当坚持保护优先、严格管理、系统治理、科学修复、合理利用的原则，以发挥其支撑生物多样性、碳汇等多种生态功能。因此要充分发挥横沙地区湿地的自然生态资源禀赋，不仅需要分别关注湿地水土气生各组成要素的状况和变化，更需要以系统化的方法从湿地生态系统完整性及其所承载的生态服务价值的角度开展监测评估和模拟预测。经过前期调研，目前主要存在以下三方面问题：①横沙地区基础湿地生态调查覆盖不全面，难以准确评估该地区湿地资源数量及质量。②缺少对湿地资源变化主要驱动因素的连续观测，难以预测湿地资源演变趋势，难以判断横沙与毗邻地区湿地的生态联动关系。

针对以上存在的问题，本项目旨在从湿地生态系统最关键组成要素的入手，系统采集横沙地区湿地面积、分布、水沙动力变化、地貌特征等并跟踪其变化，本项目的实施意义重大，主要体现在以下四个方面：首次系统评估并预测横沙地区湿地关键生态服务功能状况，填补监测覆盖空白；为科学评价横沙地区湿地资源保护价值提供有力支撑；为实施重大生态综合利用工程提供依据；为推进生态产品价值转化提供助力。

横沙浅滩拥有丰富的滩涂资源，但未来面临长江下泄泥沙持续减少，滩涂自然淤涨能力降低的挑战。在河口重大工程和全球气候变化的背景下，横沙浅滩滩涂将会向何方演化，其淤涨/侵蚀速率有多大，如何维护横沙浅滩滩涂的稳定性，是亟待解决的重要科学问题。通过开展新的长江水沙条件下横沙滩涂的演变趋势研究，因地制宜，实施河口区域海岸综合利用和管理，是破解该问题的关键。

（一）本项目存在的重难点

1.1 横沙浅滩水动力泥沙观测方面

横沙浅滩及其周边区域对于研究长江入海口的沉积过程、生态环境保护以及生物多样性等方面具有重要价值。横沙浅滩的地理位置使得该区域容易受到风浪和涌浪的影响，风浪是由当地风直接作用于水面产生的波动，而涌浪则是由远处的风暴或强风在海面上生成后传播到此地的长周期波。因此这为横沙浅滩水动力泥沙观测带来了难度。因此，在现场水动力泥沙观测期间，要充分考虑风浪和涌浪的情况，特别是在恶劣天气条件下，风浪可能导致严重的安全隐患。

1.2 研究横沙浅滩动力地貌的历史演化规律及主控因子的定量贡献

研究历史演化规律，揭示横沙浅滩近 60 年演化过程，结合流域来沙变化、海平面上升等因素定性分析未来演化趋势；研究河流来沙减少和大型河口工程影响，定量辨识主控因子（河流来沙，河口工程）对地貌演化的贡献。

1.3 生物地貌耦合模型的研发

以主流的开源数值模型 FVCOM 为工具，在线耦合水流（潮汐）、波浪、植被、沉积物输运和地貌演化模块。在波浪模型中开启植被模块，并添加植被茎叶在潮流和波浪作用下弯曲和折断的物理过程，研究植被茎叶弯曲与折断造成的植被高度与密度变化对流场的影响。在地貌演化模型中增加底栖动物对地貌过程的改造作用子模块，研究不同类型的底栖动物对地貌过程的影响与机制及地貌的变化对底栖动物的影响。

1.4 横沙浅滩演化趋势模拟

为预测长江口横沙浅滩在固沙保滩稳定河势工程后，工程附近区域冲淤情况，首先需要收集长江口横沙浅滩区域历史海图和地形资料，借助 GIS 分析手段对历史演变过程和特征进

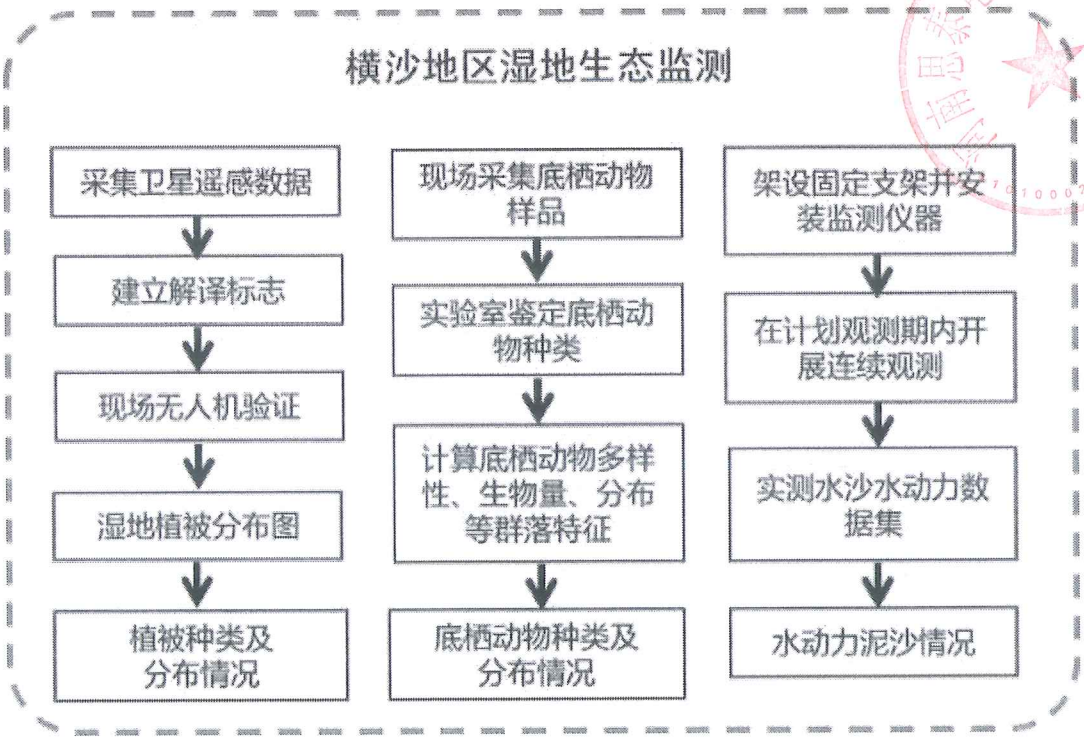
行定量分析，结合研究期内河流水沙条件和河口人类活动影响，总结和提炼控制冲淤演变的主要因子。在充分认识主控因子的基础上，使用 Delft3D 模型系统建立覆盖整个长江河口的年代际地貌模型，模型中合理考虑上述提出的主控因子，模拟实际的水沙过程。对长江口横沙浅滩区域进行野外调查，获得横浅滩水动力地貌数据，以及表层沉积物样品数据，利用此数据对历史时期的演变过程进行后报模拟从而保证模型在横沙浅滩区域冲淤模拟中的精度和可靠

1.5 横沙浅滩生态保滩护岸措施方案

根据历史实测规律、沉积动力过程及数值模拟，研判横沙浅滩短中期的总体冲淤趋势规律，提出横沙浅滩保护治理措施方案，以满足《崇明区湿地保护管理办法（试行）》要求。研究横沙浅滩生态防护工程措施与湿地植被修复协同增效的物理机制。开展多项情景的计算模拟，寻找最优保护治理措施(如生态修复相关的植被种植、生态防护体等)的空间配置。

四、 对所调查监测内容的认知程度

本项目旨在横沙新洲获取高分辨率卫星遥感影响开展潮滩植被调查，掌握横沙新洲潮滩植被面积及分布；在横沙新洲和浅滩开展底栖动物调查，掌握底栖动物种类、密度和生物量；在横沙浅滩开展水动力泥沙现场观测。技术路线如下。



4.1 横沙新洲潮滩植被调查

通过对横沙地区湿地植被生物多样性情况开展连续的实地监测，结合横沙浅滩地区地貌历史演化规律，为开发横沙浅滩区域湿地地貌冲淤预测模型积累基础数据。

4.2 横沙新洲和横沙浅滩底栖动物调查

通过对横沙潮滩底栖动物生物多样性情况开展连续三年的现场监测，结合横沙浅滩地区地貌历史演化规律，为开发横沙浅滩区域湿地地貌冲淤预测模型积累基础数据。

4.3 横沙浅滩水动力泥沙现场数据采集

通过对横沙浅滩水动力及泥沙数据采集，结合植被和底栖动物情况及横沙浅滩地区地貌历史演化规律，开发横沙浅滩区域湿地地貌冲淤预测模型，对横沙地区不同发展战略情景下的湿地面积、生物多样性及生态服务状况做出预测，并提出保护建议。

4.4 横沙湿地资源趋势模拟

横沙东滩被定位为“上海城市长远发展的战略预留空间”。横沙浅滩位于现已成陆的横沙东滩东侧，北邻长江口北港航道，南靠北槽深水航道，是横沙岛唯一的潜在土地资源。近年来，在长江径流输沙锐减、河口大型工程及气候变化影响下，横沙浅滩区域已呈现显著侵蚀现象。根据实测资料，2010～2022 年间横沙浅滩-5 米高程以上滩地面积减少了约 45 平方公里，相当于 6.75 万亩湿地流失，严重威胁横沙这块上海城市发展的“战略预留空间”。科学评估、合理规划利用横沙浅滩，是确保河口河势格局稳定、滩涂资源不减少、生态环境不恶化的必要举措，保障上海未来城市长远发展的重要基础。因此，需重点研究横沙浅滩演化的主控因素和未来演变趋势，最有利用价值的潮滩增长速率和增长潜力，为破解上海土地空间发展瓶颈奠定坚实基础。

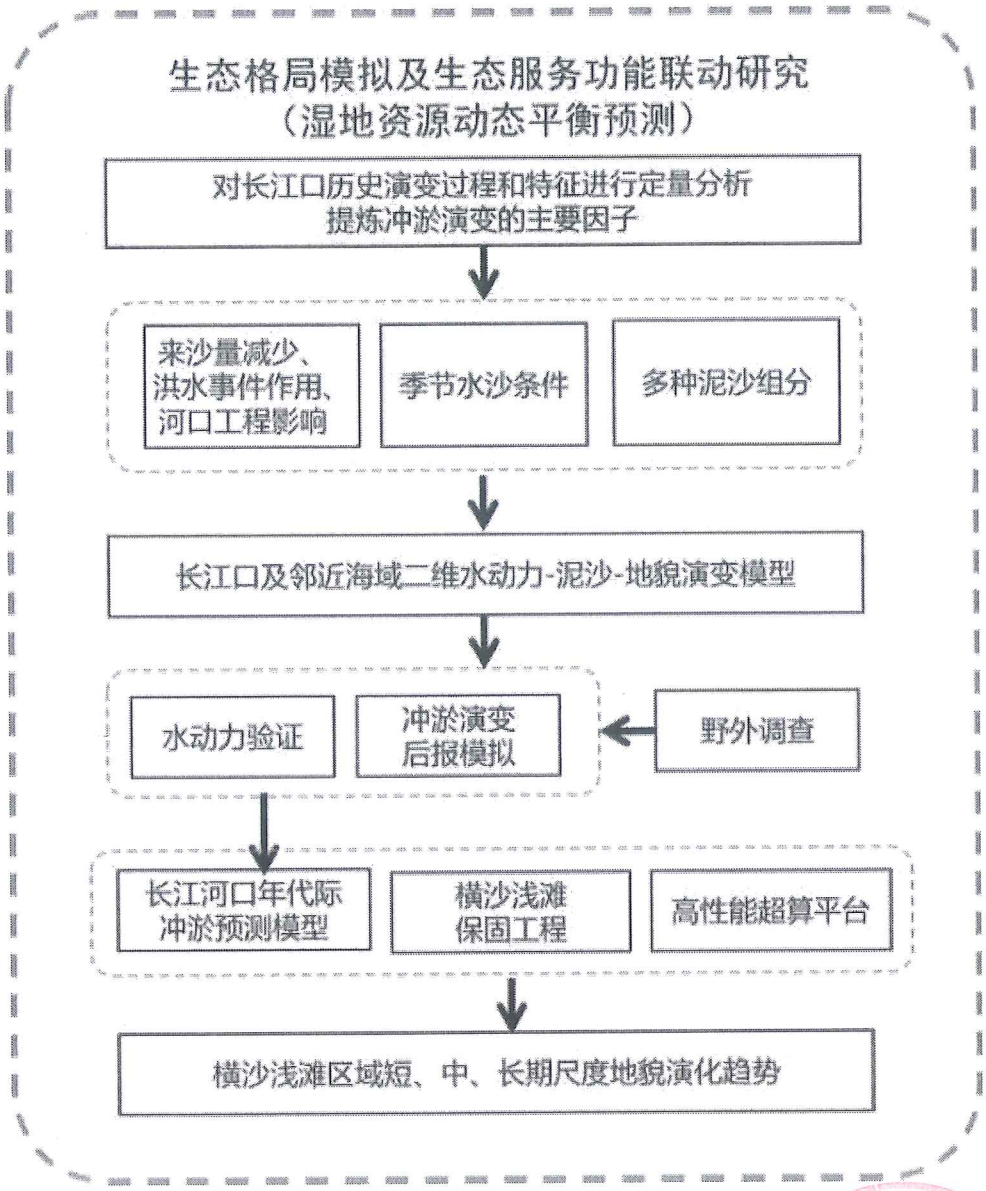
横沙浅滩包括潮间带和水下湿地（水深 6 米），其演变也会影响到长江口深水航道等重大工程和河势格局，从而影响到“一带一路”建设、长江经济带发展、长江三角洲区域一体化发展、长江经济带高质量发展等国家重大战略的顺利实施。《上海市水生态“十四五”规划》要求“持续监测并积极推进横沙八期东北角保沙固滩研究，结合深水航道北导堤先行启动横沙浅滩保滩固沙等工程，为疏浚土综合利用和后续生态基底培育提供基础”。鉴于当前横沙浅滩侵蚀情势严峻，横沙浅滩固沙保滩总体工程的实施将面临严峻挑战，沙体过快侵蚀

将直接影响长江口整体河势的稳定及长江黄金水道的通畅。开展横沙浅滩演化过程与周边重大工程设施之间的正负反馈关系以及未来演变趋势，有利于发挥上海在“一带一路”建设和长江经济带发展中的作用，强化上海对长三角城市群的引领作用及上海大都市圈承载国家战略需求的战略意义。

潮间带滩涂围垦土地利用是上海城市可持续发展的必要手段。横沙浅滩拥有丰富的滩涂资源，但未来面临长江下泄泥沙持续减少，滩涂自然淤涨能力降低的挑战。在河口重大工程和全球气候变化的背景下，横沙浅滩滩涂将会向何方演化，其淤涨/侵蚀速率有多大，如何维护横沙浅滩滩涂的稳定性，是亟待解决的重要科学问题。通过开展新的长江水沙条件下横沙滩涂的演变趋势研究，因地制宜，实施河口区域海岸综合利用和管理，是破解该问题的关键。

横沙保滩护岸建设是河口生态治理的重要举措。目前横沙东滩围垦成陆，成陆区受水源限制，部分区域已出现旱化状况，其生境也出现不同程度的分化或分异，影响鸟类、水生生物以及不同类型植物的生活与生存，成陆区需要进行生态修复，实现生态服务功能最大化。横沙东滩成陆区外围的横沙浅滩水域，直接面对开阔海域，又受到涨落潮水流漫滩及口门强劲风浪作用，需要进行保滩护岸建设。开展横沙浅滩演变预测研究，探究其滩涂的淤涨面积、潜力、分布等，是严守生态优先发展底线的必走之路。

本项目旨在对长江口历史演变过程和特征进行定量分析，提炼冲淤演变的主要因子，预测横沙浅滩区域短、中、长期尺度地貌演化趋势。技术路线如下。



五、 项目质量保证及进度控制措施

5.1 项目质量保证及进度控制的措施和方法

项目质量保证和进度控制是项目管理中的两个关键方面。以下是一些的措施和方法，可以有效地保证项目质量和控制项目进度，确保项目按时高质量完成。

项目组织结构

本项目团队由多个专业工作组组成，各工作组分工明确，紧密协作，共同确保项目的顺利实施与高质量完成。具体工作组及其职责如下：

项目管理组

负责整体项目的规划、协调与监督，确保各项任务按时、按质完成。主要职责包括制定项目计划、分配资源、跟踪项目进度、管理项目风险以及与甲方保持有效沟通，及时汇报项目进展情况。

数据采集组

负责现场数据的获取与管理，包括湿地植被监测、底栖动物监测及水动力泥沙数据的现场采集工作。具体职责涵盖无人机和卫星遥感数据的获取与预处理，底栖动物样点的布置与采样，水动力泥沙观测设备的安装与操作，确保数据采集的科学性和准确性。

数据分析组

负责对采集到的各类数据进行整理、分析与处理。包括植被类型的遥感解译与分类，底栖动物的物种鉴定与生物量测量，水动力泥沙数据的统计分析与初步解读，确保数据的完整性和可靠性，为后续的模型开发提供坚实的数据基础。

模型开发组

专注于横沙地区湿地资源趋势模拟模型的研发与优化。主要职责包括高分辨率无结构网格三维水动力-泥沙-植被数值模型的建立与调试，水动力-植被耦合数值模块的开发，模型参数的校正与验证，确保模型的科学性和预测精度符合《水运工程模拟试验技术规范》(JTS/T 231-2021）要求。

报告编写组

负责各阶段监测与分析结果的汇总与报告编制。包括湿地植被监测报告、底栖动物监测报告、水动力泥沙监测报告及资源趋势模拟报告的撰写与编辑，确保报告内容详实、数据准确、结论科学，为甲方提供全面的项目成果展示。

技术支持与维护组

提供项目期间及项目完成后的技术支持与系统维护服务。包括系统部署、软件更新与升级、故障排除、设备维护与保养，确保项目相关系统的稳定运行和持续优化，及时响应甲方在使用过程中遇到的技术问题，提供 7 天 24 小时的设备和软件维护服务，保障项目的长期效益。

培训与支持组

负责为甲方提供全面的培训与技术支持，确保甲方人员能够熟练使用项目交付的各类工具与系统。包括编制培训材料、组织培训讲座与工作坊、提供在线资源与技术文档，帮助甲

方快速掌握新功能的使用方法，提升项目管理与数据应用能力。

进度控制措施

为实现上述后续服务承诺，投标人将采取以下保证措施：（1）成立一个后续服务工作领导小组，由单位主要领导、技术负责人、技术部门和生产运营部门主管、项目负责人组成，全面负责本项目期间的领导和系统协调工作。（2）在后续服务工作领导小组内部明确各成员的服务职责和内容，确保后续服务工作的有序进行。（3）在整个项目过程中，投标人将始终接受用户对服务工作的监督和检查，并主动配合用户单位的督促和指导，确保服务质量。

通过以上组织结构和保证措施，投标人将确保不仅在项目研究阶段提供高质量的工作成果，同时在项目完成后的后续服务中继续提供专业、有效的支持和服务，满足用户的需求和期待。投标人致力于通过专业的团队和科学的管理，确保项目的每一步都能按时完成，每一项服务都能达到用户的满意。

5.2 项目工作计划

2025 年 6 月份

工作任务：

在长江口横沙新洲利用无人机进行横沙新洲植被监测，搜集 2025 年 6 月（与无人机航拍时间相同时段）卫星遥感影像。

完成横沙新洲和横沙浅滩的底栖动物调查断面样点的踏勘确认工作，制定详细的底栖动物现场调查方案。

计划完成船只预约、航海许可申报的材料准备，水动力泥沙现场观测架的制作等工作；完成对以往横沙浅滩水动力泥沙现场采集所获得的断面水动力数据进行全面分析和研究。

收集长江口历史演变的历史资料工作，包括收集海图和查阅长江口历史演变资料等。

阶段性产出：

产出 2025 年 6 月横沙新洲潮滩植被监测无人机航拍数据和卫星遥感数据。

产出横沙新洲和横沙浅滩的底栖动物调查方案。

产出横沙浅滩水动力泥沙现场观测前期准备计划方案。

产出以往横沙浅滩水动力泥沙现场采集所获得的断面水动力成果图。

产出长江口历史演变系统资料，包括海图和长江口演变文献等。

2025 年 7 月份

工作任务

处理 2025 年 6 月横沙新洲潮滩植被监测无人机航拍数据和卫星遥感影像数据。

完成横沙新洲和横沙浅滩的底栖动物调查材料的采购工作，并为 8 月份底栖动物调查做好一切安排工作。

论证横沙新洲和横沙浅滩水动力泥沙现场观测点位的可行性，确定可行性较高的 3-5 个固定观测站位。

根据 6 月份收集好的长江口历史演变系统资料，提炼冲淤演变的主要因子，并研究和探索长江口横沙浅滩冲淤演变的主要因子。

阶段性产出

产出 2025 年 6 月横沙新洲潮滩植被类型及分布图

完成横沙新洲和横沙浅滩的底栖动物调查前的准备工作。

完成横沙新洲和横沙浅滩水动力泥沙现场观测点位的可行性论证工作。

完成长江口历史演变的主要因子分析工作，进一步完成长江口横沙浅滩冲淤演变的主要因子分析工作。

7 月完成横沙浅滩动力地貌的历史演化规律分析。

2025 年 8 月份

工作任务

在长江口横沙新洲，利用无人机进行横沙新洲植被监测，并搜集 2025 年 8 月（与无人机航拍时间相同时段）卫星遥感影像。

在长江口横沙新洲进行底栖动物现场采样工作。

确定横沙浅滩水动力泥沙观测仪器套数，确定现场水动力泥沙观测参数；

8 月份进行生物地貌耦合模型研发。

阶段性产出

产出 2025 年 8 月份横沙新洲潮滩植被监测无人机航拍数据和卫星遥感数据。

产出横沙新洲 8 月份底栖动物样品。

完成横沙浅滩水动力泥沙观测仪器套数和水动力泥沙观测参数的确定。

产出生物地貌耦合模型。

2025 年 9 月份

工作任务

处理 2025 年 8 月份横沙新洲潮滩植被监测无人机航拍数据和卫星遥感影像数据

室内鉴定横沙新洲 8 月份底栖动物，鉴定到物种，并测量生物量。

进行调试横沙浅滩水动力泥沙观测仪器，确保观测仪器正常工作。

进行调试和验证生物地貌耦合模型等工作。

阶段性产出

产出长江口横沙新洲利用无人机进行横沙新洲植被面积及分布图。

产出横沙新洲 8 月份底栖动物物种鉴定工作的一半。

完成调试横沙浅滩水动力泥沙观测仪器和确保仪器正常工作。

完成生物地貌耦合模型调试、验证等工作。

2025 年 10 月份

工作任务

在长江口横沙新洲，利用无人机进行横沙新洲植被监测，并搜集 2025 年 10 月（与无人机航拍时间相同时段）卫星遥感影像。

室内鉴定横沙新洲 8 月份底栖动物，鉴定到物种，并测量生物量，

确定航海许可证的审批，确定船只，观测架，所有观测期间用到的工具和仪器。

进行长江口横沙浅滩短、中、长期横沙浅滩地貌演化趋势模拟

阶段性产出

产出 2025 年 10 月份横沙新洲潮滩植被监测无人机航拍数据和卫星遥感数据。

完成所有的横沙新洲 8 月份底栖动物物种鉴定工作，并产出横沙新洲夏季底栖动物分布图。

确定航海许可证，船只，观测架等所有观测期间用到的船只，工具和仪器等。

产出长江口横沙浅滩短、中、长期横沙浅滩地貌演化趋势成果。

2025 年 11 月份

工作任务

处理 2025 年 10 月份横沙新洲潮滩植被监测无人机航拍数据和卫星遥感影像数据。

进行横沙浅滩 11 月份底栖动物采样。

按照横沙浅滩观测布点图，开展横沙浅滩水动力泥沙连续 5 天的现场观测，并以 50m 间隔沿程采集表层沉积物样品。

进行横沙浅滩至少 10 个采样点的底栖动物现场采集工作。

预测横沙浅滩淤涨趋势，并进行研究趋势分析。

阶段性产出

产出 2025 年 10 月份长江口横沙新洲利用无人机进行横沙新洲植被面积及分布图。

产出 2025 年 11 月份横沙新洲夏季底栖动物样品。

产出横沙浅滩水动力泥沙现场观测数据。

完成 1 次横沙浅滩合计 3-5 个固定观测站位、50 个参数的现场水动力泥沙数据采集 1 套（excel 格式，文本格式）。

产出横沙浅滩淤涨趋势及趋势分析

2025 年 12 月份

工作任务

在长江口横沙新洲，利用无人机进行横沙新洲植被监测，并搜集 2025 年 12 月（与无人机航拍时间相同时段）卫星遥感影像。

进行 2025 年 12 月份横沙新洲潮滩植被监测无人机航拍数据和卫星遥感影像数据处理工作。

进行横沙浅滩底栖动物的鉴定工作。

处理与分析横沙浅滩水动力泥沙现场观测数据。

编写横沙浅滩短期地貌冲淤趋势预测报告。

阶段性产出

产出 2025 年 12 月份长江口横沙新洲利用无人机进行横沙新洲植被面积及分布图。

产出完成 2025 年横沙新洲潮滩植被分布监测报告（PDF 格式及印刷版）。

产出 2025 年横沙新洲潮滩植被分布矢量数据(.shp 格式）。

产出 2025 年横沙新洲和横沙浅滩合计至少 25 个采样点的底栖动物现场采集，并于 2025 年底前完成室内鉴定工作。

产出 2025 年横沙浅滩底栖动物分布图。

产出 2025 年底栖动物监测报告 1 份（PDF 格式及印刷版）。

产出 2025 年横沙浅滩水动力泥沙数据监测报告 1 份（PDF 格式及印刷版）。

产出横沙浅滩短期地貌冲淤趋势预测报告。

六、 生态保护措施

在横沙新洲底栖动物取样和横沙浅滩水动力泥沙观测及底栖动物取样期间，本项目采取有效的生态保护措施，最大限度地减少对自然环境的干扰和破坏， 具体措施如下：

6.1 减少物理干扰

在安装观测仪器时，尽量减少对底质和植被的破坏。例如在本项目中，尽可能使用可移动的波浪浮标和船载设备，而不是固定在河床或湖底的设备来观测水动力泥沙。

6.2 选择合适的采样方法

在采样过程中尽量轻柔操作，避免对水生生物和栖息地造成不必要的伤害。

6.3 人员培训

对参与观测工作的人员进行环保意识培训，提高他们对生态保护的认识。同时，制定详细的操作规程，确保所有人员按照环保要求进行工作，例如正确处理塑料垃圾和废弃物、避免扰动水生生物等措施。

七、 综合履约能力

本项目在执行过程中，项目组人员能够全面、高效地完成合同或协议中规定的各项任务和目标的能力，包括技术能力、管理能力、资源配置能力、风险控制能力等多个方面。以下是一些关键因素，可以帮助提升项目的综合履约能力。

7.1 技术能力

专业团队：确保项目团队具备所需的技术知识和经验。

先进设备：使用先进的技术设备和工具，提高工作效率和质量。

模拟技术：采用最新的模拟技术和方法解决项目中的关键问题。

7.2 管理能力

项目管理：建立完善的项目管理体系，包括项目计划、进度管理、质量管理等。

沟通协调：确保项目团队内部以及与外部利益相关者的有效沟通和协调。

风险管理：识别项目中的潜在风险，并制定相应的风险应对措施。

7.3 资源配置

人力资源：合理配置观测人员和模型开发人员，确保植被监测，水动力观测，底栖动物取样与鉴定及模型开发都有合适的人选。

资金管理：合理规划和管理项目资金，确保资金的充足和合理使用。

物资供应：确保项目所需的物资和材料能够及时供应，避免因物资短缺影响项目进度。

7.4 合同管理

合同条款：明确合同条款，确保所有参与方都清楚自己的权利和义务。

合同执行：严格按合同要求执行项目，确保每一项任务都按时完成。

变更管理：对合同变更进行有效管理，确保变更过程透明、合规。

7.5 质量控制

质量标准：设定明确的质量标准和验收标准，确保项目成果符合预期和合同规定的内容。

质量检查：定期进行质量检查和评估，及时发现和解决问题。

持续改进：通过质量反馈机制，不断改进项目管理和实施过程。

7.6 环境和社会责任

环境保护：采取必要的环保措施，减少项目对海洋环境的影响。

社会责任：履行企业的社会责任等。

7.7 法律合规

法律法规：确保项目符合当地法律法规的要求，避免法律风险。

合规培训：对项目团队进行合规培训，提高他们的法律意识。

7.8 文档管理

记录保存：详细记录项目过程中的各项活动和决策，便于后续审查和追溯。

信息共享：建立有效的信息共享机制，确保所有相关人员都能及时获取所需信息。

7.9 应急准备

应急预案：制定详细的应急预案，应对可能出现的各种紧急情况。

应急演练：定期进行应急演练，提高项目团队的应急响应能力。

八、 项目管理与实施计划

8.1 项目组织结构

本项目团队由多个专业工作组组成，各工作组分工明确，紧密协作，共同确保项目的顺利实施与高质量完成。具体工作组及其职责如下：

8.1.1 项目管理组

负责整体项目的规划、协调与监督，确保各项任务按时、按质完成。主要职责包括制定项目计划、分配资源、跟踪项目进度、管理项目风险以及与甲方保持有效沟通，及时汇报项目进展情况。

8.1.2 数据采集组

负责现场数据的获取与管理，包括湿地植被监测、底栖动物监测及水动力泥沙数据的现场采集工作。具体职责涵盖无人机和卫星遥感数据的获取与预处理，底栖动物样点的布置与采样，水动力泥沙观测设备的安装与操作，确保数据采集的科学性和准确性。

8.1.3 数据分析组

负责对采集到的各类数据进行整理、分析与处理。包括植被类型的遥感解译与分类，底栖动物的物种鉴定与生物量测量，水动力泥沙数据的统计分析与初步解读，确保数据的完整性和可靠性，为后续的模型开发提供坚实的数据基础。

8.1.4 模型开发组

专注于横沙地区湿地资源趋势模拟模型的研发与优化。主要职责包括高分辨率无结构网格三维水动力-泥沙-植被数值模型的建立与调试，水动力-植被耦合数值模块的开发，模型参数的校正与验证，确保模型的科学性和预测精度符合《水运工程模拟试验技术规范》（JTS/T 231-2021）要求。

8.1.5 报告编写组

负责各阶段监测与分析结果的汇总与报告编制。包括湿地植被监测报告、底栖动物监测

报告、水动力泥沙监测报告及资源趋势模拟报告的撰写与编辑，确保报告内容详实、数据准确、结论科学，为甲方提供全面的项目成果展示。

8.1.6 技术支持与维护组

提供项目期间及项目完成后的技术支持与系统维护服务。包括系统部署、软件更新与升级、故障排除、设备维护与保养，确保项目相关系统的稳定运行和持续优化，及时响应甲方在使用过程中遇到的技术问题，提供 7 天 24 小时的设备和软件维护服务，保障项目的长期效益。

8.1.7 培训与支持组

负责为甲方提供全面的培训与技术支持，确保甲方人员能够熟练使用项目交付的各类工具与系统。包括编制培训材料、组织培训讲座与工作坊、提供在线资源与技术文档，帮助甲方快速掌握新功能的使用方法，提升项目管理与数据应用能力。

8.2 实施计划

8.2.1 项目启动阶段

时间范围：合同签订之日起至 2025 年 12 月 15 日

步骤：

（1） 合同签订与项目启动会议；确认合同条款，召开项目启动会议，明确项目目标、范围及各方职责。

（2） 项目团队组建与培训；组建项目团队，进行项目相关培训，确保所有成员了解项目要求和技术规范。

（3） 制定详细项目计划；编制项目详细计划，包括时间表、资源分配及风险管理方案。

里程碑：完成项目启动会议并明确各方职责；项目详细计划书的完成与批准。

8.2.2. 规划与准备阶段

时间范围：2025 年 06 月 01 日至 2025 年 08 月 31 日

步骤：

（1） 基础资料收集与整理；收集横沙地区的历史数据、生态资料及相关技术文献，整理现有资料。

（2） 确定研究区域与样点布置；根据生态调查需求，确定湿地植被监测和底栖动物监测

的具体区域及采样点位。

（3） 设备与工具准备；确定并采购所需的野外观测设备、无人机、遥感软件及其他技术工具。

制定详细工作计划；为各子项目（湿地植被监测、底栖动物监测、水动力泥沙数据采集、资源趋势模拟）制定具体的工作计划和时间表。

里程碑：完成基础资料的收集与整理；确定并布置所有监测样点；所有设备与工具的准备到位。

8.2.3. 湿地植被监测阶段

时间范围：2025 年 06 月 01 日至 2025 年 12 月 15 日

步骤：

（1） 遥感数据获取与预处理；获取卫星及无人机遥感数据，对遥感影像进行几何校正、辐射校正和大气校正。

（2） 植被类型解译与分类；建立解译标志，利用遥感解译软件进行植被类型及分布的自动分类与人工校正，确保正判率达到 90%以上。

（3） 无人机实地拍摄；在低潮时段使用无人机进行正射投影拍摄，获取高清影像与视频资料。

（4） 植被分布图编制与报告撰写；完成植被分布矢量数据（.shp 格式）的制作，编写横沙新洲潮滩植被分布监测报告。

里程碑：完成四期遥感数据的获取与预处理；植被类型解译正判率达到 90%以上；发布横沙新洲潮滩植被分布监测报告。

8.2.4. 底栖动物监测阶段

时间范围：2025 年 06 月 01 日至 2025 年 12 月 15 日

步骤：

（1） 样点踏勘与确认；对拟开展的底栖动物调查断面样点进行踏勘确认，确保样点的代表性和可操作性。

（2） 采样材料采购与计划制定；采购底栖动物采样所需的材料，制定详细的现场采样计划。

（3） 现场采样与数据收集

（4） 在横沙新洲和横沙浅滩布置 20 个采样点，进行底栖动物种类、密度及生物量的现

场采集。

（5） 室内鉴定与数据整理；完成采集样本的物种鉴定和生物量测量，整理底栖动物监测数据（Excel 格式、文本格式）。

（6） 编写监测报告

里程碑：完成所有底栖动物采样工作；底栖动物监测数据和报告的提交。

8.2.5. 水动力泥沙现场数据采集阶段

时间范围：2025 年 08 月 08 日至 2025 年 11 月 30 日

步骤：

（1） 观测设备与许可准备；确定所需的观测设备，完成船只预约和航海许可的申请，制作现场观测架。

（2） 固定观测站位布置；在横沙浅滩布置 2-3 个固定观测站位，确保覆盖大小潮期间的数据采集需求。

（3） 现场观测与数据采集；使用海洋仪器测量水动力（如浪高、流速）和泥沙参数（如悬沙浓度），进行覆盖大小潮（10-15 天）的数据采集。

（4） 数据整理与初步分析；整理采集到的水动力泥沙数据，进行初步的数据分析。

（5） 编写监测报告

里程碑：完成所有固定观测站位的布置与设备安装；水动力泥沙数据采集的完成与报告提交。

8.2.6. 横沙湿地资源趋势模拟阶段

时间范围：2025 年 08 月 01 日至 2025 年 12 月 15 日

步骤：

（1） 数据收集与整理；收集并整理潮位数据、历史海图、水沙水动力等相关资料，为模型开发提供基础数据。

（2） 模型研发与调试；开发生物地貌耦合模型，进行高分辨率无结构网格三维水动力-泥沙-植被数值模型的构建与调试。

（3） 模块开发与集成；建立水动力-植被耦合数值模块，确保模型能够考虑多种植被的时间、空间变化影响。

（4） 历史过程检验与验证，开展夏季水动力、泥沙历史过程的检验与分析，确保模型精度符合《水运工程模拟试验技术规范》（JTS/T 231-2021）要求；模拟与趋势分析，利用模型进行短、中、长期冲淤趋势的模拟，分析横沙浅滩动力地貌的历史演化规律及主控因子

的定量贡。

（5）编写模拟报告

里程碑：完成高分辨率无结构网格三维水动力-泥沙-植被数值模型的建立；提交水动力、泥沙历史过程检验分析报告；发布横沙湿地资源趋势模拟报告。

8.2.7. 项目收尾与验收阶段

时间范围：2025 年 11 月 01 日至 2025 年 12 月 15 日

步骤：

（1） 综合数据审核与整理；对所有监测数据和模型结果进行全面审核，确保数据的完整性与准确性。

（2） 最终报告编制与提交；汇总所有阶段的工作成果，编制综合性项目报告，提交给甲方进行审核。

（3） 项目验收准备；准备项目验收所需的资料和展示材料，组织内部验收会议。

（4） 项目验收与反馈；召开项目验收会议，展示项目成果，接受甲方的审核与反馈，完成项目的正式验收。

（5） 后续支持与维护安排；确定后续的技术支持与系统维护计划，签订相关服务协议。

里程碑：提交综合性项目最终报告；完成项目正式验收；确定后续技术支持与维护安排。

九、 成果及后续服务计划

9.1 预期提交成果

9.1.1 湿地植被监测

2025 年横沙新洲潮滩植被分布矢量数据(.shp 格式）

2025 年横沙新洲潮滩植被分布监测报告

9.1.2 底栖动物监测

完成 2025 年横沙新洲和横沙浅滩合计至少 20 个采样点的底栖动物现场采集，并于 2025 年底前完成室内鉴定工作，完成 2025 年底栖动物监测数据 1 套（excel 格式，文本格式）；

完成 2025 年底栖动物监测报告 1 份（PDF 格式）。

9.1.3 水动力泥沙现场数据采集

完成 1 次横沙浅滩合计 2-3 个固定观测站位、30-50 个参数的现场水动力泥沙数据采集 1 套（excel 格式，文本格式）；

完成2025年横沙浅滩水动力泥沙数据监测报告1份（PDF格式）

9.1.4 横沙湿地资源趋势模拟

（1）建立综合横沙浅滩区域自然及人类活动的高分辨率无结构网格三维水动力-泥沙-植被数值模型，分辨率<50米；

（2）建立水动力-植被耦合数值模块，能考虑多种植被的时间、空间变化影响。

（3）开展1次（夏季）的水动力、泥沙历史过程检验和分析，精度满足《水运工程模拟试验技术规范》（JTS/T 231-2021）要求。

9.2 后续服务计划

9.2.1 组织结构和人员配置

投标人安排1名项目经理作为项目的总负责人和协调人，负责整项目后续服务的统筹管理和协调工作。此外，还安排了2名项目负责人协助项目经理进行质量和进度控制，确保项目后续服务的顺利进行。由项目总工程师负责后续研究成果的审核工作，确保成果的准确性和科学性。同时，技术骨干将担任专业负责人，并负责后续研究成果的复核工作，进一步保障成果的质量。

9.2.2 后续服务内容

投标人将配合并协助甲方完成各种基础资料的验收工作，确保所有数据和资料的完整性与准确性。在获取新的研究数据和技术进展后，投标人将及时更新模型参数和功能，确保项目模型的科学性和前瞻性。

当新的生态监测数据或技术进展可用时，投标人将根据最新数据及时更新湿地资源趋势模拟模型的参数和功能。提供定期的软件更新和技术支持，确保甲方能够使用最新的分析工具和功能，解决软件运行中的问题。对于关键更新和新功能，投标人将提供详细的培训材料和在线资源，帮助甲方人员快速掌握新功能的使用方法。定期举办培训讲座和在线研讨会，提升甲方团队的技术能力和项目管理水平。提供横沙地区湿地生态监测与趋势模拟系统的全面部署服务，包括软件安装、配置及初始调试。确保系统与甲方现有的数据管理平台和工作流程无缝集成，提升数据处理和分析效率。

投标人将提供7天24小时的设备和软件维护服务，确保系统的稳定运行。在系统出现问题时，甲方可通过电话立即通知投标人团队，投标人将在接到通知后迅速响应，派遣技术人员在48小时内赶赴现场，进行系统检查和故障排除。投标人将实施主动式维护，定期检查系统运行状态，预防潜在问题，提升系统的可用性和可靠性。提供系统性能优化建议，确保系统始终处于最佳工作状态，支持甲方的业务需求。

投标人将与甲方共同建立软件升级审批流程，以书面或邮件形式向甲方及运维团队提出软件升级需求，并提交相关文档及测试报告。在获得甲方批准后，按照计划完成软件升级，确保升级过程的顺利进行。与甲方共同制定详细的软件升级计划，包括需要升级的软件版本、相关设备、操作时间窗口及备份回退方案。确保升级过程对甲方日常工作影响最小，同时保障数据安全和系统稳定。投标人将对软件系统的后期调配进行全面支持，确保系统功能与甲方需求保持一致。提供持续的技术支持，解决甲方在使用过程中遇到的任何技术问题，提升系统的整体效能。

在系统出现问题时，甲方可通过电话或邮件立即通知投标人团队，要求快速响应技术服务。技术人员在接到通知后，将迅速了解问题情况，进行初步判断，并在 48 小时内到达现场，进行系统检查和故障排除。对于系统非宕机的其他故障，投标人的工程师将在接到甲方报修电话并回复后，根据甲方要求和实际情况，迅速到现场提供维护服务。确保所有故障问题在最短时间内得到解决，保障项目的连续性和数据的准确性。提供长期的技术支持服务，确保甲方在项目实施过程中能够获得及时、专业的技术帮助。定期回访，了解甲方使用系统的情况，收集反馈意见，持续改进服务质量。

9.2.3 保证措施

为实现上述后续服务承诺，投标人将采取以下保证措施：（1）成立一个后续服务工作领导小组，由单位主要领导、技术负责人、技术部门和生产运营部门主管、项目负责人组成，全面负责本项目期间的领导和系统协调工作。（2）在后续服务工作领导小组内部明确各成员的服务职责和内容，确保后续服务工作的有序进行。（3）在整个项目过程中，投标人将始终接受用户对服务工作的监督和检查，并主动配合用户单位的督促和指导，确保服务质量。

通过以上组织结构和保证措施，投标人将确保不仅在项目研究阶段提供高质量的工作成果，同时在项目完成后的后续服务中继续提供专业、有效的支持和服务，满足用户的需求和期待。投标人致力于通过专业的团队和科学的管理，确保项目的每一步都能按时完成，每一项服务都能达到用户的满意。