

密级： _____

河北地质大学硕士学位论文

金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程
综合效果评估

论文作者： 郝阳

学生类别： 全日制

专业学位类别： 资源与环境

领域名称： 环境工程

指导教师： 温学友

职 称： 副教授

企业指导教师： 张甲波

职 称： 教授级高工

Dissertation Submitted to

Hebei GEO University

for

The Master Degree of
Resources and environment

Comprehensive effect evaluation of Jinshawan and Dapu River Es-
tuary coastal zone protection and restoration project

by

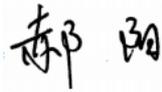
HaoYang

Supervisor: Prof. Wen Xueyou

December, 2022

原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文不包含任何他人或集体已经发表的作品内容，也不包含本人为获得其他学位而使用过的材料。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律責任由本人承担。



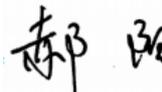
学位论文作者签名：

日期：2022.12.04

关于学位论文版权使用授权的说明

本人完全了解河北地质大学关于收集、保存、使用学位论文的以下规定：学校有权采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供本学位论文全文或者部分内容的阅览服务；学校有权将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流；学校有权向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版。

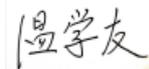
（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）



学位论文作者签名：

日期：2022.12.04

导师签名：



日期：2022.12.04

摘要

北戴河新区位于河北省秦皇岛市西部，是众多游客心中理想的海滨避暑胜地。但近些年，受沿海区域经济快速发展和风暴潮侵袭等人为和自然因素的影响，位于北戴河新区的金沙湾及大蒲河河口海岸带，受到不同程度的破坏，逐渐显现出防灾减灾能力下降、海洋生态环境受损和生态系统退化等问题。为了保护海岸带生态环境和提高防灾减灾能力，秦皇岛市海洋与渔业局建设了金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程项目。

本文以金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程区域及邻近海域为评估工作区域，依据《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第8部分：砂质海岸》（T/CAOE 20.8-2020）中的相关规定，在对海岸带修复工程2020年（施工前）和2021年（施工后）的防灾减灾效益和生态环境效益两方面现状进行分析的基础上，构建了海岸带保护修复工程综合效果评估的指标体系；基于层次分析法，采用现场调查、数值模拟和ArcGIS空间数据分析等方法，构建了金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估体系，从而实现海岸带保护修复工程综合效果的空间差异化评价。本项目主要研究结果如下：

（1）构建了海岸带保护修复工程评估体系。体系有4个层次，以海岸带保护修复工程综合效果评估为目标层；以该工程的防灾减灾效益和生态环境效益2个指标为准则层；防灾减灾效益包括抵御海浪、风暴潮能力和海岸侵蚀强度，生态环境效益包括海滩资源禀赋、环境要素、海洋生物多样性和后滨植被，共6个指标为因素层；19个评价指标构成指标层。

（2）海岸带保护修复工程建设后，大蒲河口和金沙湾工作区具有相同的变化规律，砂质岬头改变了水动力方向，水下沙坝使得高程增加，波高衰减率均提高了63%，减缓海水对沙滩的冲刷和侵蚀，提高了海岸带的防灾减灾能力；干滩宽度增加了24.08~25.77 m；后滨植被总面积和盖度变化率增加了33%~65%；符合第一类海水水质标准的监测站数量占比从93%提高到100%；但是海洋生物多样性因工程建设对其生存环境的影响略有下降，沉积物质量等级和分选度没有明显变化，总体来说生态环境效益变好。

（3）运用层次分析法对综合效果进行评价。大蒲河口工作区综合效果评价得分范围从2020年的46.74~49.04提高到2021年的57.46~66.46，施工后增加了评价等级为良的区域；金沙湾工作区综合效果评价得分范围从2020年的39.80~41.96提高到2021年的57.46~66.46，施工前评价等级较差的区域施工后变为一般。保护修复工程

对该区域防灾减灾能力和生态环境效益的提高有一定成效。

(4) 对修复工程进行综合效果评估, 不仅能全面的量化评价保护修复工程近岸海域和全面掌握近岸修复工程海域的环境质量情况, 还能为近岸海域的修复工程建设提供科学依据和指导性建议, 进一步提升了海洋精准化管理水平, 具有很好的现实意义。

关键字: 海岸带; 防灾减灾; 生态环境; 层次分析法; 综合效果评估

ABSTRACT

Beidaihe New Area, located in the west of Qinhuangdao City, Hebei Province, is an ideal seaside summer resort for many tourists. However, in recent years, influenced by human and natural factors such as rapid economic development in coastal areas and storm surge invasion, Jinshawan and Dapu River estuary and coastal zones located in Beidaihe New Area have been damaged to varying degrees, gradually showing problems such as reduced disaster prevention and mitigation ability, damaged Marine ecological environment and ecosystem degradation. In order to protect the ecological environment of the coastal zone and improve the ability of disaster prevention and reduction, Qinhuangdao Ocean and Fishery Bureau has established the coastal zone protection and restoration project of Jinshawan and Dapu River estuary.

In this paper, Jinshawan and Dapu River estuary coastal zone protection and restoration project areas and adjacent sea areas are taken as the assessment work areas. According to the Technical Guidelines for the Investigation and Assessment of Coastal Ecosystem Status, Part 8: According to the relevant provisions of Sandy Coast (T/CAOE 20.8-2020), an index system for the evaluation of the comprehensive effect of the project is constructed based on the analysis of the current situation of disaster prevention and reduction and ecological environment of the coastal zone restoration project in 2020 (before construction) and 2021 (after construction). Based on analytic hierarchy process (AHP), field investigation, numerical simulation and ArcGIS spatial data analysis, the comprehensive effect evaluation system of Jinshawan and Dapu River estuary and coastal zone protection and restoration project was constructed. The main results of this project are as follows:

(1) An evaluation system for coastal zone protection and restoration projects has been established. The system consists of four levels, with the comprehensive effect assessment of coastal zone protection and restoration projects as the target level. The two indexes of disaster prevention and reduction benefit and ecological environment benefit are taken as the criterion layer. The benefits of disaster prevention and mitigation include the ability to withstand waves and storm surges and the intensity of coastal erosion. The ecological and environmental benefits include the beach resource endowment, environmental factors, Marine biodiversity and backshore vegetation, with a total of six indicators as factor layers. Nineteen evaluation indicators constitute the index layer.

(2) After the construction of the coastal zone protection and restoration project, the work area of Dapuhekou and Jinshawan has the same change law. The sandy headland changes the hydrodynamic direction, the underwater bar increases the elevation, and the wave height attenuation rate increases by 63%, which slows down the erosion and erosion of seawater on the beach and improves the disaster prevention and mitigation ability of the coastal zone. The width of dry beach increased by 24.08~25.77 m; The change rate of backshore vegetation area and coverage increased by 33%-65%. The number of monitoring stations that meet Class I seawater quality standards increased from 93% to 100%; However, the Marine biodiversity decreased slightly due to the impact of engineering construction on its living environment, and the sediment quality grade and sorting degree did not change significantly. Overall, the ecological and environmental benefits became better.

(3) Use analytic hierarchy process to evaluate the comprehensive effect. The comprehensive effect evaluation range of Dapuhekou work area increased from 46.74~49.04 in 2020 to 57.46~66.46 in 2021. After construction, more areas with good evaluation grade were added. The comprehensive effect evaluation range of Jinshawan work area increased from 39.80~41.96 in 2020 to 57.46~66.46 in 2021, and the areas with poor evaluation grade before construction became average after construction. The protection and restoration project has some effect on the improvement of disaster prevention and reduction ability and eco-environmental benefit in this region.

(4) The comprehensive effect assessment of the restoration project can not only comprehensively and quantitatively evaluate the offshore waters of the protection and restoration project and comprehensively grasp the environmental quality of the offshore waters of the restoration project, but also provide scientific basis and guiding suggestions for the construction of the offshore restoration project, further improve the level of accurate Marine management and have good practical significance.

Key words: coastal zone; Disaster prevention and mitigation; Ecological environment; Analytic hierarchy process; Comprehensive effect evaluation

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.2.1 海岸带保护修复工程技术方法研究进展.....	2
1.2.2 海岸带保护修复工程效果评价研究进展.....	5
1.2.3 海岸带保护修复工程效果评估研究存在的主要问题.....	8
1.3 研究内容和技术路线.....	8
1.3.1 研究内容.....	8
1.3.2 技术路线.....	9
第二章 金沙湾及大蒲河河口海岸带和工程项目概况.....	11
2.1 金沙湾及大蒲河河口海岸带概况.....	11
2.2 金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程概况.....	11
第三章 金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估指标体系.....	15
3.1 评估指标选择标准.....	15
3.2 评估指标的确定.....	15
3.3 评估指标量化方法.....	17
3.3.1 防灾减灾效益.....	17
3.3.2 生态环境效益.....	20
3.3.3 综合效果评估.....	25
3.4 指标数据分析方法.....	25
第四章 金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估方法.....	27
4.1 层次分析法.....	27
4.2 层次分析法指标权重的确定.....	29
第五章 金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估指标监测与分析.....	33
5.1 监测站点的布设.....	33
5.2 监测项目.....	35

5.3 监测方法.....	36
5.4 大蒲河口工作区评估指标分析.....	37
5.4.1 防灾减灾效益.....	37
5.4.2 生态环境效益.....	38
5.5 金沙湾工作区评估指标分析.....	48
5.5.1 防灾减灾效益.....	48
5.5.2 生态环境效益.....	49
5.6 本章小结.....	60
第六章 金沙湾及大蒲河口工作区保护修复工程综合效果评估结果.....	63
6.1 大蒲河口工作区保护修复工程综合效果评估结果.....	63
6.1.1 防灾减灾效益结果.....	63
6.1.2 生态环境效益结果.....	64
6.1.3 大蒲河口工作区综合评估结果与影响因素分析.....	66
6.2 金沙湾工作区保护修复工程综合效果评估结果.....	69
6.2.1 防灾减灾效益结果.....	69
6.2.2 生态环境效益结果.....	70
6.2.3 金沙湾工作区综合评估结果与影响因素分析.....	72
6.3 本章小结.....	75
第七章 结论与展望.....	77
7.1 结论.....	77
7.2 展望.....	78
参考文献.....	81
作者简介.....	87
攻读硕士学位期间发表的论文和科研成果.....	87
致 谢.....	89

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

北戴河位于河北省秦皇岛市西部，砂质海滩岸线蜿蜒、沙滩柔软、潮汐平缓、海水清澈，是著名的海滨度假胜地^[1]。但近些年，随着沿海地区工业化和城市化进程的加快，水体富营养化和风暴潮等海洋生态灾害的频繁发生导致秦皇岛近岸海域环境质量和防灾减灾能力逐年下降，严重影响到人民群众的生产活动、旅游产业发展，以及秦皇岛市沿海社会经济的可持续发展。

为了防止海岸带生态系统继续退化，加强生态文明建设，根据党中央、国务院相关工作部署，财政部、自然资源部支持开展海岸带保护修复工程的相关通知与要求，2020年12月秦皇岛市启动了金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程，通过覆植沙丘、滩肩补沙、水下沙坝和砂质岬头等修复措施，来提升海岸带的防灾减灾能力和生态环境效益。

随着海岸带修复工程的实施，2021年5月18日自然资源部办公厅、水利部办公厅、发展改革委办公厅、财政部办公厅、国家林业和草原局办公室下发了《海岸带保护修复工程评估方案》（自然资办函[2021]840号）的通知，要求全面评估2019-2021年海岸带保护修复工程的实施情况，评估工程成效，总结提炼好的经验做法，为不断提升抵御台风、风暴潮等海洋灾害能力，构建生态减灾协同增效、更具韧性的海岸带综合防护体系奠定坚实基础。

在此背景下，从修复工程的防灾减灾效益和生态环境效益两个方面进行综合分析，建立一套完善的海岸带修复保护工程的综合效果评估指标体系，对金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果进行评估。

1.1.2 研究意义

本文立足于人类和社会对海岸带综合服务功能的需要，对海岸带生态恢复的工程技术进行了研究，并对已有的海岸带保护修复工程效果的评价指标体系以及评估方法的研究成果进行了总结，在这些研究成果的基础上结合金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程的实际情况，研究构建一套从防灾减灾能力和生态环境效益两方面出发的

海岸带保护修复工程的综合效果评价体系,包括确定评价指标、选择评价方法和构建评价体系等。分析修复工程在后续养护方面需要着重注意的问题,提出针对性的后续养护措施,不仅能对修复保护工程近岸海域进行全面的量化评价和全面掌握近岸修复工程海域的环境质量情况,还能对其他砂质海岸带整治与修复项目的成效评估工作提供技术支持与参考^[2],提升海洋精准化管理水平,有利于沿海地区社会经济的可持续发展。

1.2 国内外研究进展

海洋与陆地交接,发生相互作用形成了海岸带,海岸带拥有着可供人类进步的活力和经济发展的宝贵资源^[3]。海岸带不仅可以为社会的发展提供天然材料、食品、海洋矿产资源、生物水产资源、海洋可再生能源等丰富的自然资源;还可以为人类提供生态系统服务的价值,松软平坦的沙滩可以供人休闲娱乐,沙丘上的后滨植被以及浅水域的浮游植物通过光合作用调节着水质净化着空气,同时还能海洋生物提供食物和繁衍的环境^[4]。

沿海经济的蓬勃发展使得越来越多的人向海岸带地区聚集,越来越多的产业在这里开发兴起,在人们享受着海岸带所带来的优质自然资源的同时,海岸带变成受到自然灾害影响和人类活动损害严重的区域之一,港口码头建设、围塘养殖、海砂开采等人类活动^[2,5],使得海岸带的海洋生物多样性锐减,后滨植被总面积降低,潮间带宽度变小等。因此,海岸带的保护修复工作刻不容缓^[6]。

海岸带保护修复工程及其效果评价是近年来国际上较为活跃的一个新课题^[7],国内外研究主要集中在几个方面,一是对海岸带保护修复工程技术方法的探索;二是研究海岸带保护修复工程的评估指标体系;三是研究海岸带保护修复工程效果评估的方法。

1.2.1 海岸带保护修复工程技术方法研究进展

全球范围内的砂质海岸正面临严重的侵蚀退化,如何有效解决生境退化问题、提升海岸带韧性、实现生态环境改善和自然灾害治理的复合功能是诸多地区密切关注的重要议题。海岸带保护修复工程技术主要是根据人类对生态环境效益的要求和防灾减灾功能的需要,通过营造生态长廊和覆植沙丘等措施来修复生态环境;修建砂质岬头、防波堤和水下沙坝等措施来提高海岸带抵御侵蚀和风暴潮的能力^[8]。

早在二十世纪初期欧洲和美国等发达国家就兴起了海岸带修复工程的技术研究与应用^[9]。国外最早的案例是对美国纽约的康尼岛公共海滩的改善工程,选择用人工

填沙的方式建造公共海滩，并且为了保护新建的公共海滩，在海滩后加设一个隔板起到保护作用^[10]。而我国起步较晚，上世纪八十年代末的香港浅水湾沙滩养护修复工程是国内最早的一项海滩修复工程，其采取的措施包括抽沙上岸、重铺沙粒及修建防沙堤^[11-12]。直到二十一世纪初，海滩养护修复技术在我国逐渐得到重视。2009年至2010年，国家海洋局颁布了有关海洋生态保护和海岸带整治的意见和政策^[13]，随着国家建设海洋强国的必然要求和对海洋生态文明建设的持续推进，各地方政府在国家政策的引导下和中央财政基金的支持下，开始对被侵蚀以及生态系统遭受破坏的海岸带进行拯救工作。2016年以来，国家投入了将近二十五亿元的资金用于开展18个试点城市的“蓝湾整治行动”，其中青岛西海岸新区以及温州洞头率先成为完成沙滩及受损海岸线恢复的“蓝湾整治行动”试点城市^[14-15]。2019年陆续新增了10个城市地区开展“蓝湾整治行动”。

按照结构性措施和非结构性措施。可将海岸带保护措施分为“硬”结构和“软”结构^[16]。“硬”结构措施包括：海堤、岸堤、防波堤、滩肩补沙和水下沙坝等，对于改善海岸的脆弱性有较为明显和快速的优点。于2007年完工的厦门东海岸的沙滩修复工程，对水动力、沉积物类型和水质条件进行分析后，采用干滩补沙的方法修复该区域海滩1.5 km^[17-18]。近年来，秦皇岛陆续开展海岸带的海滩养护工作，2010年西海滩开始治理工作，工程项目包括人工海滩和沙坝的吹填，潜堤和潜礁的建设等，完成了修复3.5 km岸线的任务；2012年对老虎石及周围海岸进行了滩肩补沙及剖石岬头等建设，使2.6 km以上的岸线得到修复；2021年金梦海湾海岸带开展以滩肩补沙为主，近岸补沙为辅的海岸线修复工程^[19]。

但是传统的海岸带保护修复工程在带来高成本，高维护费用的同时，也会对海岸带生态系统带来负面的影响，一定程度破坏海洋生物的生存环境，破坏生态系统的完整性^[16]。而“软”结构工程寻求与自然合作，对于海岸带的保护能达到一个良好的长期有效的效果，而不是用刚性的工程结构来对抗这种能量^[20]。

从十八世纪起，人们开始建造沿海结构，用海堤、防波堤、木制或碎石制的护岸等硬防护工程来加强当地的海岸线^[20]。然而，在过去的几个世纪里，这些海岸带依然遭受着结构性侵蚀，海岸带的衰退持续存在，显然硬防护措施并没有被证明是一个可持续的解决方案。从二十世纪中旬开始发达国家中，“软”工程（如海滩补给、人工鱼礁和种植红树林）方法已越来越多地被用于设计海岸防御系统，以解决与传统“硬”防护（如建造护岸海堤和 underwater 沙坝）解决方案相关的建造成本高和后续维护费用高的问题，同时减少对海洋生物多样性和其他海洋生态系统资源的不利影响^[21]。荷兰沿海地区与许多其他脆弱的低地海岸相似，低洼沿海地区可能面临巨大的洪水威胁。在20世纪50年代，荷兰采用了一种大胆创新的干预方法，名为“沙地引擎”。这种“软”

防护手段在为临近的海滩提供泥沙自然补给的同时稳定海岸线位置,结合新的空间价值提高防洪安全性能^[22]。

越来越多的人要求考虑沿海自然生态系统在沿海防御中的作用。红树林在一些珊瑚礁和盐沼等沿海生态系统中具有明显的优势,被认为是抵御海岸灾害的优秀生物屏障^[23]。英国剑桥大学海岸研究室有关红树林减少风浪的作用报告重点关注了红树林及其在减少风浪和涌浪方面可以发挥的作用,研究了红树林对风浪的减弱能力,得出了红树林可以在相对较短的距离内降低风浪和涌浪的高度:在每一百米的红树林中,波高可以降低 13%到 66%。研究结果表明对红树林地区进行适当的管理可以提高海浪的衰减程度^[24]。霍斯特曼等人展示了在 2012 年泰国南部董里府安达曼海岸沿岸红树林进行的为期 6 个月实地考察的结果,得出红树林充当着一道自然保护线,帮助保护海岸线免受海浪和近岸水流的影响,并且具有促进沉积物的积累的作用^[25]。Rasmeemasuang 等人具体描述了红树林中波浪衰减的机制,以及当它们在红树林中传播时,波浪的高度如何降低约 20%~90%^[26]。海滩营养、沙丘恢复和植树造林等“软”工程,为解决沿海地区海平面上升提供了有效的替代方案。

使用“软”工程作为海岸保护的策略时,具有成本低,可长期保持自然的海岸线栖息地及其原有生态系统的优点,但是也具有一些主要缺点包括:它们的成功与许多外部因素(环境、气象、水文和地貌条件)有关,并不普适于不同的海岸带类型及风暴灾害类型。从二十世纪初开始,部分发达国家开始致力于探索基于海岸资源可持续管理的自然解决方案(NBS)。即遵循自然规律,模仿自然设计,以自然生态系统为基础,将工程防护与生物保护手段相结合,来代替传统的海岸带保护修复措施^[27]。

通过保护、修复自然或改良的生态系统,使生态与减灾协同增效,成功的起到防御灾害的作用。英国 Medmerry 海岸带项目作为欧洲最大的开放海岸重建项目,是由人工修复并且借助自然之力完成的,该项目将海岸线向内陆移动,形成新的潮间带,由于水域向内陆发展,为海洋生物提供了更多的生存空间,是 NBS 理念应用的成功案例^[27]。冯哲在海口西海岸 4 段砂质海岸工程中运用 NBS 策略进行了应用创新,建造了将潜礁岬头和人工沙丘等“软”结构防护和硬质护岸相结合的综合防护体系,提出周期性补沙的同时应用循环补沙的沙滩管理模式,是仿自然修复策略的一次重要尝试^[28]。

仅对受损的海岸带生态系统完成保护和恢复工作是不够的,不能满足当代社会和经济发展的需要,还需要对保护修复工程的效果进行评价。为此,国内的研究学者对此进行了多方面的研究^[29]。研究主要有两类:一类集中在研究海岸带生态修复的评估指标体系,另一类集中在研究修复工程效果评估的方法。

1.2.2 海岸带保护修复工程效果评价研究进展

海岸带生态修复工程建设后,构建一个适合该生态修复项目的效果评估体系是生态治理工作的重点和难点,构建评估体系的首要任务是选取合适的评估指标来进行定性、定量分析。

(1) 评估指标

国外较早的研究是1996年 Simmetal 对于英国沙滩维护项目效益评价选择了海滩使用寿命、抵御洪灾和环境影响因子等指标,该评估主要关注成本收益比、实际有效使用寿命、抵御洪涝能力及生态环境等指标^[30]。Sadeghi 建立了由环境、技术、经济、社会和人口等七个指标组成的评估体系来评估伊朗马赞达西部沿海地区洪水风险的指数模型,并应用于2012年的诺沙赫尔洪水案例中得出不同区域的洪水风险情况^[31]。

我国对于海岸带保护修复工程效果的评价指标体系的研究起步较晚。2010年包敏等人在北戴河沙滩修复效果的评估中选取了沉积物平均粒径和分选度等指标进行评价,结果显示该海滩养护后沉积物逐渐与海洋动力环境相适应,粒径整体变粗并且分选度变好,潜堤等“硬”工程设施对养护海滩的稳定具有积极作用^[32]。2013年王伟伟等人从海洋环境质量现状和灾害状况等三个方面选取了海水水质质量、污水排放、海岸侵蚀等29个指标对辽宁省海岸带开发活动的综合效果进行评价^[33]。2015年董月娥等人建立了三个层次的指标体系,从人工建设特征方面选取了海岸稳定性指数和破坏性指数等五个指标;从环境生态方面选取了水质质量改善指数和生态环境敏感层级等五个指标;改善措施水平方面选取了公众满意度和生态指数等五个指标来评价该海岸带人工生态建设后的效果^[34]。

2001年全球范围内第一个综合的评价生态系统——千年生态系统评估计划(The Millennium Ecosystem Assessment, MA)提出^[35-36],有学者开始在评价指标中引入以生态系统服务为基础的指标,以达到评估更加全面的目的^[37]。生态系统服务评价包括单一评价和综合评价两大类,其中单一评价侧重于保护生物栖息环境、调节气候和改善水质等方面的作用。综合性评价则涵盖人文、科教、经济和文化服务等多维度的评价,目前还没有统一的评价标准和评价方法^[38]。2005年 Ortiz-Lozano 等人从渔业及水产养殖、农业工业、旅游及娱乐、港口城市发展、垃圾存放地、生境破坏和废水排放七个方面来对墨西哥海岸带环境影响进行评价,得出石油和相关的石化工业以及大型旅游胜地的建立是墨西哥沿海地区自然生态系统退化的最大影响因素^[39]。2006年 CREST 项目组制定墨西哥湾北部海岸生态环境恢复的评价方案里选择沿海生境、沿海资源、渔业发展和沿海社区作为评估指标^[40]。2010年 Kim Jones 等人选择了景观层面、岩土参数、环境和生态指标、以及社会和经济因素五个指标,建立了一个多层次评估体系,

来评估在德克萨斯州巴芬湾的洛约拉海滩一个利用生态工程方法缓解海岸侵蚀的海岸线恢复的项目效果,由此建立的综合评估系统,对沿海地区的治理与恢复项目的评估具有较好的参考价值^[41]。2020年吴威等人按照MA模型归纳的四个方面选取评价指标,在供给方面选取植物供给一个指标;在调节方面选取水质和气候等四个指标;在支持方面选取生物多样性一个指标;在文化服务方面选取休闲娱乐和科研教育两个指标。对鸚鵡洲生态湿地生态系统服务价值进行评估,直观显示了鸚鵡洲的修复成效^[42]。同年林雪萍等人为了客观评价蓝色海湾整治行动的修复效果,选取了水清指标、滩净指标和人和指标等8个要素,8个要素下包括了16个指标建立了三层指标体系^[43]。

可见,国内外大多学者基于MA的框架下从不同的角度来评估海岸的生态修复效果,例如:基于生态系统服务角度、效益、景观功能和支持服务角度等。而对于海岸带防灾减灾能力的评估内容相对较少。

(2) 评估方法

当前,海岸带生态环境评价工作的重点一方面在于选取具有标志性能真实反应实际情况且易于获得指标数据,用该指标构建评价体系,另一方面在于选取一套科学、合理、易于实施的评估方法。目前,国内外许多学者对生态恢复的效果评估理论做了大量研究,对生态恢复的效果评估方法做了很多应用,例如:指标直接评价法、综合效益评估法、模糊分析法和层次分析法等。

指标直接评价法:根据生态修复区域的评价目的,选取相应的指标后用定性描述结合定量的方法对施工前后的指标情况进行对比分析,或是对于选取的指标进行连续监测其变化情况进行比较分析,得出变化趋势^[37]。2005年王玉广等人从影响辽东湾西侧砂质海岸的岸坡不稳定因素中选取水动力和岸线变化等四个直接影响因素进行分析,并结合当地的环境特点和灾害状况,对该区域的海岸侵蚀灾害的风险进行了评价^[44]。2006年Woolsey等人提出了一个河流恢复成功的策略,他们认为对河流生态修复成功的评估基于评估指标在修复前后的变化,考虑到评估周期越长,指标数据对于评估的价值就越大,于是挑选出审美景观价值和河床地貌的多样性等17个方面的指标进行修复前的情况与修复后三年左右的数据进行直接对比来判断^[45]。2010年彭艳红等人将生态修复前的湖滨湿地生态系统的辛普森多样性指数、香农-维纳指数和表示均匀度的Pielou指数与经生态修复后的结果进行了直接对比,得出修复后的地区植物空间分布更加均匀,群落的优势度也更好^[46]。2013年张悦等人分别建立了长期与短期两套评价指标体系,将由植物生长发育状况和面积修比率等五个指标构成的评价体系应用于黄河口的滨海芦苇湿地恢复效果的案例研究中,通过对五个指标修复前的数据与修复两年后的数据进行直接对比,得出该区域整体恢复状态较好但是面积修比

率指标等级是较差^[47]。指标直接评价方法的思路相对简单明了,易于使用,但存在着评价结果受指标选择的科学性影响较大的弊端。

综合效益估法是对各个环境要素的属性及其随时间、空间或者要素与要素之间的变化规律进行分析,对标相关国家行业标准进行定性描述或者定量赋予从高到低的相应得分,再根据同一层次的要素对于生态恢复的重要性不同赋予相应的权重,最后将每个要素的评估得分与权重进行层层计算得到生态恢复综合评价的分值^[48]。该方法可以根据不同时期的环境要素数据,得到不用时期生态环境恢复的情况。综合效益评价包括模糊综合评价法和层次分析法等^[49],其中被广泛应用的是模糊评价法和层次分析法。

模糊综合评价法以模糊数学中的隶属度理论为基础,增加评价结果的客观性、合理性和科学性,降低人为主观因素的影响^[50]。2015年童爱华的研究团队在对舟山南部海域的水质进行综合评价时选取DO和COD等五个重要水质影响指标,采用模糊综合评价法对该区域四个月的监测数据进行评价,科学客观的反应出该海域的生态恢复情况,得出与当年该省环境公报上一致的结论^[51]。2016年钟舜丹等人运用模糊综合评价法,选取压力指标和调控指标下的7个指标建立评价模型对2003年到2013年以来南海近海海域生态环境状况进行评估,得出该区域生态环境脆弱性的变化规律,总结影响南海生态环境脆弱性的主要因素^[52]。2019年Li等人选取主要指标,通过综合运用熵权法、模糊综合评价法和灰色关联分析法等,建立了水资源安全评价体系对东北三省水环境安全进行评价,结果表明该地区水环境安全总体上先改善后恶化,在水环境安全水平上吉林省排名第一,其次是黑龙江省和辽宁省^[53]。

层次分析法包括指标细分和权重设计两方面,运用定量与定性结合分析的方法,通过建立不同层次的逻辑体系,解决多目标多层次的复杂问题,步骤简单计算方便。2010年程建华基于生态系统服务功能,运用层次分析法构建指标体系,对厦门五缘湾海岸带生态修复施工前两个时期和施工后一个时期的数据进行对比评估^[38]。2015年刘大海等人结合层次分析法和熵权法两种方法对黄河三角洲海岸带脆弱性进行评价,通过将两种方法得到的权重值相互比较,相互修正,避免了两种方法各自的弊端,既保留了人为经验又保证了指标权重的客观性和真实性的体现^[54]。2016年陈玮彤等人,在“压力-状态-响应(PSR)”模型的框架下筛选出了16个分别代表促进和影响海岸带资源利用的指标,运用层次分析法得到目前江苏南通围填海域的开发强度和发展潜力^[55]。

还有一部分学者是将层次分析法和模糊评价法综合起来应用。2007年韩吉武等人利用“PSR”模型,从陆地压力、海域压力、环境质量和资源数量等6个方面选取了35个指标建立了海岸带可持续发展水平的指标体系,采用层次分析法结合专家打分得出

指标权重,运用综合评价法对天津和深圳等七个城市进行评价,得出了不同城市的资源环境 and 经济情况^[56]。2012年 Wu 等研究学者构建生态质量评价指标体系时,分别选用了6个生物元素方面的指标和5个物理化学元素方面的指标,运用层次分析法得到指标权重,最后结合模糊综合评价实现海岸带封闭水域的生态质量评价^[57]。2020年张明慧等人构建了砂质海岸整治修复效果综合评价指标体系,分别应用到营口和大连两个海岸带的修复工程中,通过层次分析法确定权重,模糊综合评价法对定性和定量指标分析赋值,分别得出两个海岸带的整治修复效果^[7]。

总的来说层次分析法在海岸带生态修复中已经得到广泛应用。该方法很好地解决了海岸带生态化建设效果评价指标体系多目标和多层次的决策问题。以综合效益为基础对生态恢复成效进行评估是发展的必然趋势,根据研究区域的实际情况构建评价指标体系成为研究重点。

1.2.3 海岸带保护修复工程效果评估研究存在的主要问题

(1) 从单一方面进行评价指标的选取。大多数的研究都是根据生态恢复的某一方面来选择相应的指标进行评价,从而导致对生态恢复的实际情况没办法客观、全面和准确的描述,缺少综合性评价的指标体系。大多数的评价指标都是通过简单的监测与对比分析来判断项目的恢复效果,得出的评价结果不能全面地反映项目的实际恢复情况。

(2) 评价理论体系不完善,创新性不足。虽然一些国内外的科学家讨论了评估生态环境恢复效果的理论,但有关生态恢复效果评价理论体系领域的书籍几乎没有。目前,学者对生态环境恢复评估的研究多集中于方法和指标体系选择的研究上,缺少一个统一的理论标准,评估体系也不完备。

(3) 评价结果对于项目的后续运维和调整参考性不大。目前还没有关于评价结果在环境恢复后工作中的具有指导作用的研究。大多数研究仅限局限于评估其效果本身,而忽略了评估结果随着时间推移和经济社会发展需求产生的变化,缺乏观察和改进现有恢复模式的意识,没办法实现“反馈到调整”的机制。

1.3 研究内容和技术路线

1.3.1 研究内容

在综合国内外海岸带生态保护修复工程效果评估研究的基础上^[38],分析了金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程项目的现状,并基于层次分析法对海岸带保护修复

效果评估模型进行研究,评价其综合效果,为海岸保护修复工程的改进提供技术支持。主要研究内容如下:

(1) 文献对比,问题总结。对国内外海岸带保护修复工程的效果评估进行对比和总结,包括评估指标、评估方法、评估成果和现有未解决的问题。

(2) 选取评估指标,建立指标体系。通过查阅文献、向有关部门收集资料和实地调研等方式,掌握金沙湾及大蒲河河口海岸带及邻近海域相关资料。根据国内外海岸带生态修复及效果评价的研究动态,结合金沙湾及大蒲河河口海岸带的生态环境特点,分别从防灾减灾能力和生态环境效益两个方面筛选出代表性评估指标,确定评估指标的量化方法,构建海岸带保护修复工程综合效果评估体系。

(3) 对金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程的效果进行综合评价。通过对金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程的评估指标数据进行监测统计和分析量化。综合运用数值模拟、ArcGIS 空间数据分析和层次分析法等对金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程的效果进行综合评价,最后提出金沙湾及大蒲河河口海岸带生态修复调控对策措施。

1.3.2 技术路线

本文的研究框架包括研究准备、理论研究和效果评价三部分。首先,研究准备部分通过收集文献资料,对国内外海岸带保护修复工程技术、效果评价指标和评价方法三方面研究成果进行总结,对研究区域和工程项目进行介绍。其次,理论研究部分是对金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估体系的构建,包括选择评估指标和评估方法两部分。从防灾减灾效益和生态环境效益两部分选取 19 个评估指标,用层次分析法结合专家咨询法得出各层指标权重。最后,效果评估部分运用构建的评估体系对金沙湾和大蒲河口两个工作区进行综合效果的评估。本论文的技术路线如图 1.1 所示。

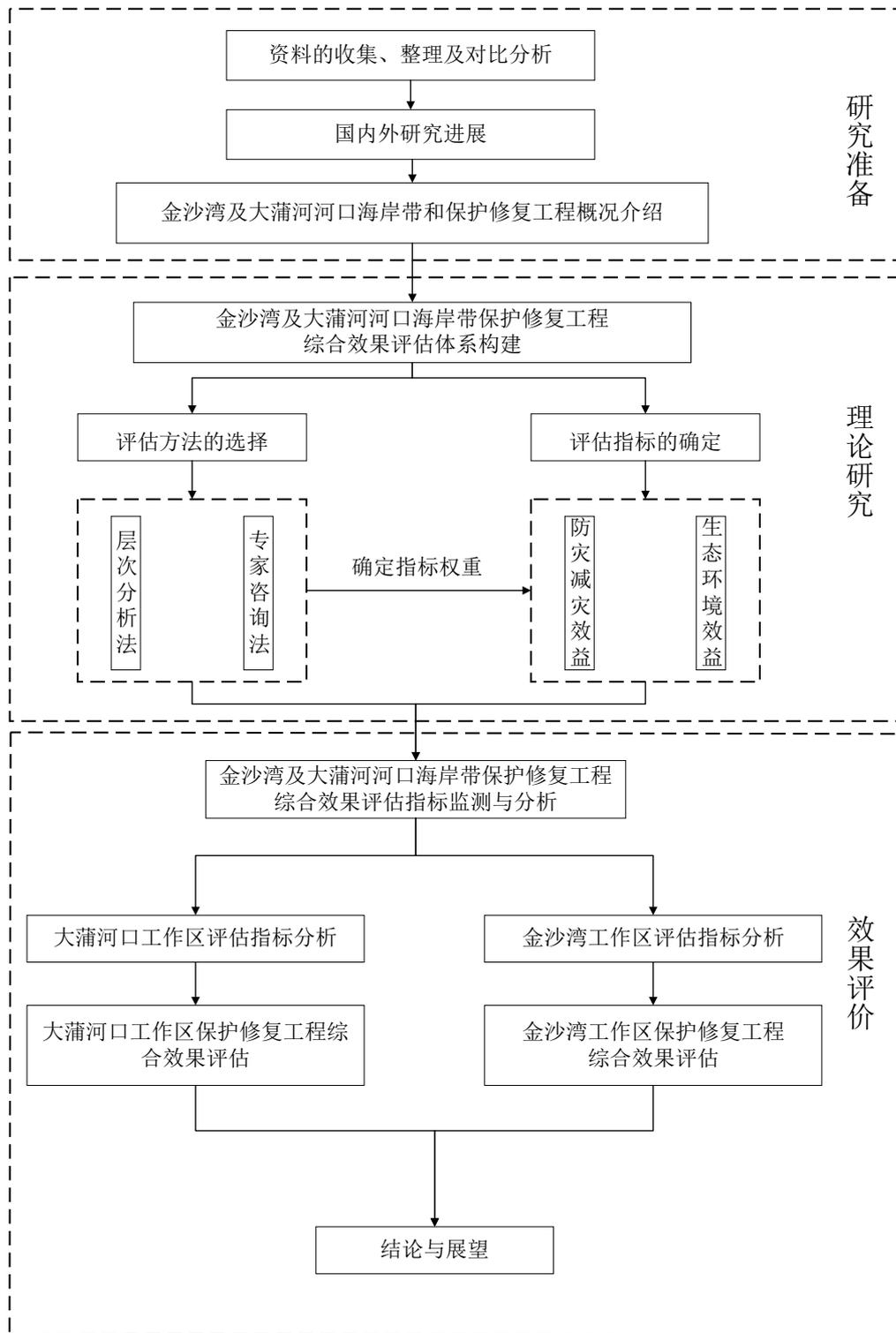


图 1.1 技术路线

第二章 金沙湾及大蒲河河口海岸带和工程项目概况

2.1 金沙湾及大蒲河河口海岸带概况

北戴河新区隶属于河北省秦皇岛市，被誉为著名的海滨度假胜地，金沙湾及大蒲河河口海岸带位于秦皇岛北戴河新区大蒲河口和新开口之间的岸段，该海岸带位于中纬暖温带，属暖温带半湿润大陆性季风气候，由于受海洋的影响这里光照充足，干湿相宜，四季分明，在净化周围环境和当地气候方面发挥着重要作用^[58-59]。

近几年，随着沿海地区工业化和城市化进程的加快，秦皇岛及近岸海域环境质量和生态功能退化等问题日益显现，尤其是海岸侵蚀等问题日益严峻，防灾减灾能力逐年低下。勘察岸段长约 5.2 km，海岸形态为平直型砂质海岸，地势平坦，属滨海相沉积地貌。向陆为平缓的冲积平原，岸线走向东北-西南向。金沙湾和大蒲河河口岸段为平直型海岸，没有岬头遮蔽，在大蒲河、东沙河河口淤塞严重，在没有泥沙供给的条件下，海滩侵蚀严重。近年来，由于风暴潮、台风等极端灾害天气的影响，海滩蚀退速度加剧，海滩滩肩已基本消失，多处干滩宽度不足 15 m，部分区域已无干滩，侵蚀陡坎达 2 m，沙丘迎水面受蚀严重，已无植被生长，甚至有坍塌的情况发生，滩面下蚀严重。海岸带生态系统急剧退化，防灾减灾能力极大降低，已给沿岸人民的生产和生活带来严重影响。

2.2 金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程概况

2020 年 12 月秦皇岛市启动了金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程（一期），于 2021 年 6 月在北戴河新区的大蒲河河口南侧岸段、金沙湾岸段的修复工程主体工程已完工如图 2.1 所示。

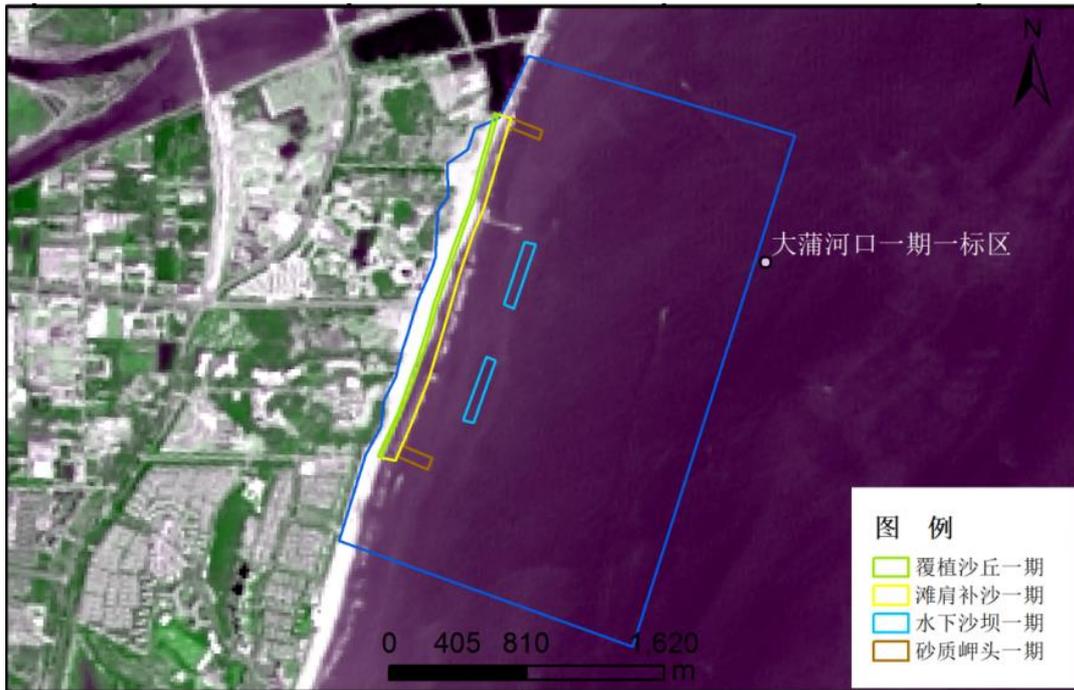


图 2.1 大蒲河口工作区海岸带生态修复工程平面布置图

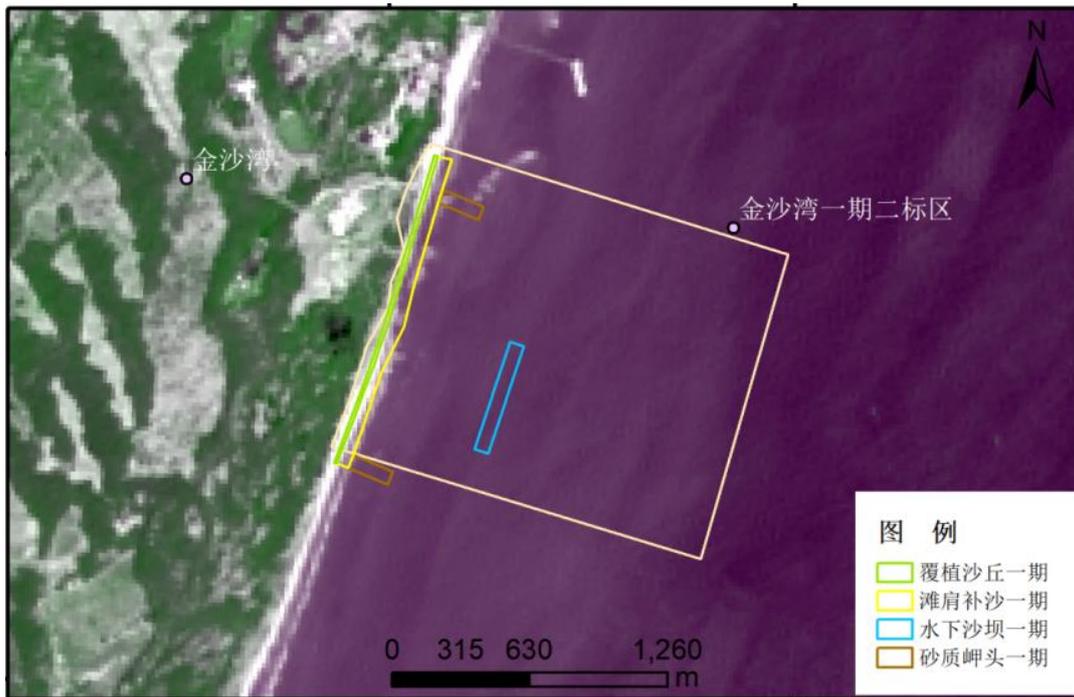


图 2.2 金沙湾工作区海岸带生态修复工程平面布置图

秦皇岛市金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程包括砂质海岸减灾防灾工程建设、生态环境修复和退养还海。修复区域为大蒲河河口南侧约 740 m 处至阿那亚北侧约 1.55 km 岸段和金沙湾岸段自北端点向南延伸 1 km 岸段共 2.55 km 海岸，重建覆植沙丘 2.55 km，滩肩补沙 2.55 km 如图 2.1 和 2.2 所示，营造水下沙坝 3 座，总长度

1 km, 吹填砂质岬头 4 座, 总长度 0.7 km, 砂质海岸修复长度 2.55 km, 退养还海规模 2935.23 公顷。通过项目的实施, 对受损严重的金沙湾岸段、大蒲河河口岸段的海岸带进行整治修复, 提高生态功能, 提升海岸带防护能力, 完善防灾减灾体系, 促进海岸带生态保护和防灾减灾协同增效。

第三章 金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估指标体系

3.1 评估指标选择标准

为了构建科学合理的海岸带保护修复工程综合评估指标体系,通过分析砂质海岸带相关的评价指标体系及砂质海岸带生态系统特征,确定了砂质海岸带的保护修复工程效果的综合评估涉及到防灾减灾和生态环境两个方面。从理论层面来看,评价指标越多越详细,反映出来的评价结果就会越准确全面,但一定程度上增加了工作量;选择的评价指标过少则会减低评价的精确度,评价指标体系的构建是实现科学评价的关键。应当遵循以下基本原则:

(1) 客观性和可操作性

在评价指标的选择上我们首先要站在一个客观公正的立场上,为使评价能够顺利进行,要求评价指标能够通过查阅文献、走访调查或遥感反演等途径获取,即具有可操作性。

(2) 全面性和独立性

在指标的选择上既要从整体角度来全面地考察项目实施带来的各种影响,同时也要确保指标间是相互独立不交叉的,减少指标间的相关性,防止重复计算。

(3) 定量与定性结合

评价指标可以遵循定量指标与非定量指标相结合的原则,定量指标应是可测量的,并应有清晰明确的赋值等级标准。非定量指标需要加强定性分析,以弥补关联性分析中的不足。

(4) 探索性和反馈性

即在客观真实数据的基础上,能够发现工程中存在的问题并预测趋势,分析影响工程效益发挥的主要因素,反馈到决策部门为后续工程的维护提出切实可行的改进建议。

3.2 评估指标的确定

金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估指标体系在前期考察了当地海岸带的资源环境,围绕该海岸带保护修复工程的建设目标,通过文献资料对比、现场调研与专家探讨等方式,对主要评价指标进行筛选,最终确定围绕海岸带保护修

复工程的防灾减灾效益和生态环境效益两个方面展开，提出一套科学、合理和适用的海岸带保护修复工程综合效果评估指标体系，以促进海岸带保护修复工程综合效果评估工作的规范化和程序化。

（1）防灾减灾效益评估

海岸带保护修复工程竣工后，保护修复区域的海滩资源发生变化，区域的波浪、潮汐和人为扰动等条件与养护海滩外来沉积物相互作用，经历一定时间的岸线调整，会达到一个准平衡状态，受到保护修复工程的影响，抵御海浪、风暴潮的能力发生变化；某些区域岸线可能向海淤进，某些区域岸线向陆蚀退，海岸侵蚀强度发生变化。抵御海浪、风暴潮能力和海岸侵蚀强度评估的主要内容包括：波高衰减率、岸线长度、向海开阔度、岸线位置变化速率和岸滩蚀淤速率。

（2）生态环境效益评估

生态环境效益评估主要是保护修复工程完工后对区域生态环境所产生的影响进行的评估。通过将工程施工后监测数据与施工前的情况进行比较，说明工程实施对评估区域的生态环境产生的环境影响，其中生态环境效益的监测内容包括干滩宽度、潮间带宽度、潮间带坡度、沉积物类型、沉积物分选度、海滩地貌特征、近海海水水质等级、近海沉积物质量等级、海洋生物物种多样性（底栖生物、浮游动物、浮游植物、潮间带生物等物种多样性）以及后滨植被（植被总面积变化率和盖度变化率）。

首先，根据海岸带保护修复工程效果综合评价内涵和综合评价指标筛选的基本原则，初步构建海岸带保护修复工程效果综合评价指标体系框架。根据海岸带及保护修复工程的特点，确定综合效果评估指标体系如图 3.1 所示。该体系分为 4 个层次，即目标层（A）、准则层（B）、因素层（C）和指标层（D），从防灾减灾效益（B1）、生态环境效益（B2）2 个准则层指标（一级指标）出发，最终筛选出 6 个要素层指标（二级指标）和 19 个指标层指标（三级指标）。

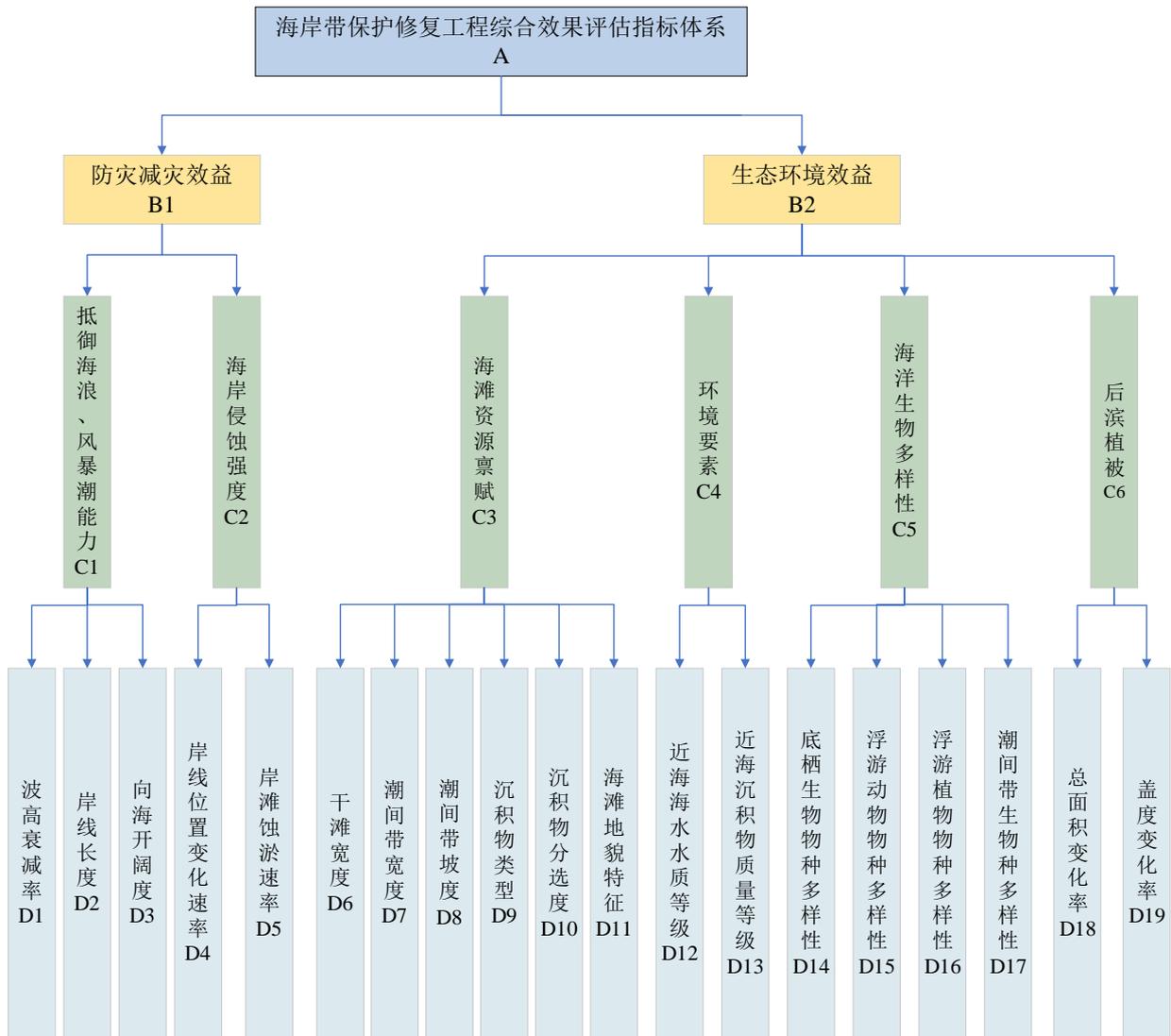


图 3.1 海岸带保护修复工程综合效果评估指标体系

3.3 评估指标量化方法

3.3.1 防灾减灾效益

(1) 抵御海浪、抵御风暴潮能力 (C1)

①波高衰减率 (D1) 是指波浪向海岸运动时, 经过一定距离的海滩时, 波高下降的百分率。本项目采用数值模拟方法来评估波高衰减率, 应采用真实尺度进行模拟计算, 并将模拟得到的待评估海滩前后的波高和 H_1 和 H_2 代入式 (3.1), 即可计算得到砂质海岸的波高衰减率 R_{wL} 。

$$R_{wL} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (3.1)$$

式中： R_{wL} ——波高衰减率；

H_1 ——破波带外侧的波高，单位为米（m）；

H_2 ——破波带内侧的波高，单位为米（m）。

根据《海岸带生态减灾修复技术导则第7部分：砂质海岸》（T/CAOE 21.7-2020）规定，评估结果可根据波高衰减率将减灾能力分为优、良、中和差四个等级。当波高衰减率较大时，海滩防灾减灾作用较好。

②岸线长度（D2）：可以反应出砂质海岸的规模。

③向海开阔度（D3）：是指自海向陆观察海岸的开阔程度，其计算公式为：

$$C = \frac{S}{L} \quad (3.2)$$

式中： C ——向海开阔度；

S ——岸线长度，单位为千米（km）；

L ——岸线起始点直线距离，单位为千米（km）。

岸线长度和向海开阔度是表征海岸减灾能力的两个指标，岸线长度越长，向海开阔度越大，海岸减灾能力越大。该项指标的评价标准以及等级划分和赋值标准如表 3.1 所示，抵御海浪、抵御风暴潮能力的评价标准以及等级划分和赋值标准如表 3.2 所示。

表 3.1 海岸带承载能力评价标准

序号	指标	I	II	III	IV	V
1	岸线长度（km）	>3.0	(2.0, 3.0]	(1.0, 2.0]	(0.5, 1.0]	≤0.5
2	向海开阔度	≥1.5	/	[1.3, 1.5)	/	[1, 1.3)
	赋值	100	75	50	25	12.5

表 3.2 砂质海岸减灾能力等级划分及赋值标准

指标	等级划分			
抵御海浪、风暴潮能力	优（I）	良（II）	中（III）	差（IV）
赋值（分）	100	60	4	20

（2）海岸侵蚀强度（C2）

在有历史数据的调查区域，以海岸侵蚀强度来评估海滩稳定性。利用单因子法对海岸侵蚀强度进行评价，当具备监测岸线位置变化速率与岸滩蚀淤速率两个指标时，以两个指标之间较高等级的为准。

①岸线位置变化速率（D4）：采用端点速率法，其数学表达式为：

$$R_{wl} = \frac{D_1 - D_2}{T_1 - T_2} \quad (3.3)$$

式中： D_1 ——时间 T_1 时的岸线位置；

D_2 ——时间 T_2 时的岸线位置。

岸线位置变化速率指标是通过输入施工前岸线高程值 Z 从剖面数据上提取高程值作为基准线，再通过输入施工后高程 Z 值从剖面数据上提取施工后岸线等高线，两个等高线合成封闭的不规则多边形区域，将该区域分割为 1 米*1 米的像元格子，提取每个格子中心点坐标，逐点计算格子中心点到基准线的距离作为宽度，再除以时间差，然后根据评分标准转化为分数，最终生成栅格图。

②岸滩蚀淤速率 (D_5)：岸滩蚀淤速率指标是通过输入施工前岸线高程值 Z 从剖面数据上提取高程值作为基准线，再通过输入施工后高程 Z 值从剖面数据上提取施工后岸线等高线，得出施工后海岸线每个点到基准线的高程差，再除以时间差，根据评分标准转化为分数，最终生成栅格图。

根据《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则第 8 部分：砂质海岸》(T/CAOE 20.8-2020) 规定，岸线位置变化率和岸滩蚀淤速率的评价标准和等级赋值标准表 3.3 和表 3.4 所示。

表 3.3 海岸稳定性评价标准

指标	分级					
	淤积	稳定	微侵蚀	侵蚀	强侵蚀	严重侵蚀
岸线位置变化率 ($m.a^{-1}$)	$r \geq +0.5$	$-0.5 \leq r < +0.5$	$-1 \leq r < -0.5$	$-2 \leq r < -1$	$-3 \leq r < -2$	$r < -3$
岸滩蚀淤速率 ($cm.a^{-1}$)	$s \geq +5$	$-5 \leq s < +5$	$-10 \leq s < -5$	$-30 \leq s < -10$	$-50 \leq s < -30$	$s < -50$

注：“+”代表淤涨；“-”代表侵蚀。

表 3.4 海岸侵蚀强度等级赋值标准

海岸侵蚀强度 (海岸稳定性)	淤积/稳定 (I)	微侵蚀 (II)	侵蚀 (III)	强侵蚀 (IV)	严重侵蚀 (V)
赋值 (分)	100~80	80~60	60~40	40~20	20~0

(3) 防灾减灾效益结果

防灾减灾效益根据其评价得分，可以划分为优、良、一般、较差和差 5 个综合评价等级，其划分标准如表 3.5 所示。

表 3.5 海岸带保护修复工程防灾减灾效益评估等级划分

综合效果等级	优	良	一般	较差	差
得分	80~100	60~80	40~60	20~40	<20

3.3.2 生态环境效益

(1) 海滩资源禀赋 (C3)

砂质海岸上的海滩资源既是海岸地貌形态之一,又能为观光游憩者在滨海休息放松和戏水娱乐提供宜人场所,是滨海景观和休闲娱乐的重要资源。对海岸带的海滩资源禀赋的评估,一方面可以客观评估海滩资源禀赋的实际影响,另一方面也是海岸带保护修复工程效果评价的重要组成部分^[7]。因此,金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程对海滩资源效果评价时,主要选取指标有干滩宽度(D6)、潮间带宽度(D7)、潮间带坡度(D8)、沉积物类型(D9)、沉积物分选度(D10)和海滩地貌特征(D11)等。

①干滩宽度 (D6)

干滩宽度是指滩肩前缘至后滨沙丘或海堤之间的水平距离。干滩宽度越大,沙滩空间规模越大。干滩宽度是从横向角度评价沙滩规模的主要指标。

②潮间带宽度 (D7) 和潮间带坡度 (D8)

潮间带是陆地与海洋生态系统相互作用较强烈的地带,主要是由于波浪的强烈冲击所致,同时也十分容易受到人类活动的影响和干扰,是海洋中最敏感的生态系统^[60-61]。潮间带宽度是指平均高潮线到平均低潮线之间的水平距离,潮间带宽度越大以及坡度越小,砂质海滩空间规模越大。潮间带坡度是指平均高潮线到平均低潮线之间的坡度,其数学表达式为:

$$I = \frac{H}{L} \times 100\% \quad (3.4)$$

式中: H——高程差,单位为米(m);

L——水平距离,单位为米(m);

I——坡度。

③沉积物类型 (D9) 和分选度 (D10)

海滩表层沉积物主要是粒径大小不一的砂,粒径较小的砂可以增加沙滩景观和娱乐休闲功能的效益,粒径较大的砂可以一定程度上提高对风暴潮和海浪对海滩侵蚀的能力^[7,62]。因此海滩表层沉积物粒径是砂质海岸带保护修复工程实施效果关注的主要指标之一。一般选取沉积物粒度类型和沉积物分选度等参数作为海滩资源的评估指标。海滩表层沉积物粒级划分标准,按GB/T 12763.8-2007中附录A的规定执行,海滩

沉积物粒度命名根据等比制（ ϕ 标准）粒级，分为砾质、粗砂、中砂、中细砂、细砂、粉砂和粘土。沉积物分选度，按GB/T 12763.8-2007中6.3.3的规定执行，根据《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则第8部分：砂质海岸》（T/CAOE 20.8-2020）规定，海滩资源禀赋指标及赋值标准见表3.6。

④海滩地貌特征（D11）

海滩地貌特征（D11）：表征滩肩、侵蚀陡坎、水下沙坝等海滩地貌类型发育特点。海滩地貌特征的不同，会影响海滩资源禀赋。

表 3.6 海滩特征评估指标及赋值标准

序号	指标	I	II	III	IV	V
1	干滩宽度（m）	≥ 70	[40, 70)	[20, 40)	[10, 20)	<10
2	潮间带宽度（m）	≥ 150	[100, 150)	[50, 100)	[30, 50)	<30
3	潮间带坡度	$\leq 1/80$	(1/80, 1/50]	(1/50, 1/30]	(1/30, 1/20]	>1/20
4	沉积物类型	细砂	中细砂	中砂	粗砂	砾质
5	沉积物分选度	极好	好	中等	差	极差
6	海滩地貌特征	发育滩肩与水下沙坝，无侵蚀陡坎	-	发育滩肩，无水下沙坝	-	不发育滩肩与水下沙坝，有侵蚀陡坎
	赋值	100	75	50	25	12.50

（2）环境要素（C4）

①近海水质等级（D12）

海水水环境质量是海洋生态环境方面一个重要的指标，国外很多研究者从生物和物化等方面做了大量有关海水水环境质量和评价指标方面的研究，国内也先后两次对海水水质等级标准进行了修订^[7]。为了体现砂质海岸带保护修复工程对近岸海域水环境质量的保护修复效果，本文采用单站单因子标准指数法对海水水质等级进行评价^[63]，评价方法如下：

a. 与浓度成正相关的评价因子^[64]，其污染指数按下式计算：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (3.5)$$

式中： P_i ——评价因子 i 的污染指数；

C_i ——评价因子 i 的实测值，单位为毫克每升（mg/L）；

S_i ——评价因子 i 的标准值，单位为毫克每升（mg/L）。

b. 对具有最低和最高允许限值的评价因子（pH），其污染指数按下式计算：

$$P_{pH_j} = (pH_j - 7.0) / (pH_{su} - 7.0) \quad pH_j > 7.0 \quad (3.6)$$

$$P_{pH_j} = (7.0 - pH_j) / (7.0 - pH_{sd}) \quad pH_j \leq 7.0 \quad (3.7)$$

式中： $P_{pH, j}$ ——pH 值的指数，大于 1 表示该水质因子超标；

pH_j ——第 j 取样点的实测值；

pH_{su} ——海水 pH 评价标准上限值；

pH_{sd} ——海水 pH 评价标准下限值。

海水水质指标根据《海水水质标准》（GB 3097-1997），得出水环境质量的因子标准指数值，如果大于 1 说明该站点评价因子 i 已超出该类评价因子的标准。将每一个监测站的水质因子污染指数根据污染指数的污染程度划分。见表 3.7 得出污染程度，将每一个监测站中水质各因子的实测浓度与海水水质标准中相应标准值比较，选取污染最重的因子的水质类别作为该站点的水质类别，然后赋值如表 3.8 所示。

表 3.7 污染因子的污染程度

P_i	<0.5	$0.5 \leq P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 1.5$	$1.5 < P_i \leq 2$	$2 < P_i$
污染程度	清洁	微污染	轻污染	中污染	重污染

表 3.8 近海水质等级赋值标准

等级	I	II	III	IV
赋值（分）	100	60	60	20

②近海沉积物质量等级（D13）

海洋中沉积物的重金属的状况是评价海洋环境质量的基础指标，与人类活动有着紧密的关联，其含量与人类活动的强度有着良好的相关性，是海洋环境可持续发展的基础^[65]。沉积物质量评价采用单站单因子标准指数法，其评价模式为：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (3.8)$$

式中： P_i ——i 种评价因子的污染指数；

C_i ——i 种评价因子的实测结果，单位为毫克每升（mg/L）；

S_i ——i 种评价因子的标准值，单位为毫克每升（mg/L）。

当一个监测站位中任意一种监测要素超过某一标准等级，则该站位海洋沉积物质量劣于该等级，根据 GB/T 12763.8-2007 中 6.3.3 的规定得出的沉积物等级（D11）给予赋值，如表 3.9 所示。

表 3.9 近海沉积物质量等级赋值标准

等级	I	II	III
赋值(分)	100	60	20

(3) 海洋生物多样性 (C5)

在海洋生态服务功能价值中,生物多样性占有重要地位。海洋生物的数量、密度和种类等影响着生物多样性^[66]。而本项目根据中华人民共和国海洋行业标准《近岸海域海洋生物多样性评价技术指南》(HYT 215-2017)对海洋生物多样性进行评价,海洋生物多样性评价指标包括底栖生物多样性(D14)、浮游动物多样性(D15)、浮游植物多样性(D16)和潮间带生物多样性(D17)等。

通过对不同站点的浮游生物、底栖生物和潮间带生物的监测,对其多样性指数、丰度、均匀度等指标进行了统计分析。计算公式为:

①种类多样性指数(H') 香农-韦弗(Shannon - Weaver)指数

端点法仅用 2 个历史位置数据来计算岸线位置变化率 EPR,其数学表达式为:

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (3.9)$$

式中: H'——多样性指数;

P_i ——第 i 种的个体数占该调查站位总个体的比值;

②种类丰度(Margalef 计算式)

$$d = \frac{S-1}{\ln N} \quad (3.10)$$

式中: d——丰度指数;

S——调查站位所有的物种数目;

N——调查站位的所有体总数。

③均匀度指数

$$J' = \frac{H'}{\ln S} \quad (3.11)$$

式中: J'——均匀度指数;

H'——种类多样性指数。

海洋生物多样性二级指标评价指标分为 5 个等级见表 3.10,海洋生物多样性综合指数等级及相应的分值如表 3.11 所示。

表 3.10 海洋生物多样性二级指标的赋值标准

等级	I	II	III	IV	V
分值	100	[75, 100)	[50, 75)	[25, 50)	(0, 25)

海洋生物多样性综合指数 (MBI) 计算, 数值范围为 0~100。

$$MBI = \sum_{i=1}^s W_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} W_{ij} \quad (3.12)$$

式中: MBI——海洋生物多样性综合指数;

W_i ——第 i 个一级指标的权重;

Y_{ij} ——第 i 个一级指标中的第 j 个二级指标的赋值得分;

W_{ij} ——第 i 个一级指标中的第 j 个二级指标的权重。

评价指标采用等权重, 并且各层级指标权重之和均等于 1。

表 3.11 海洋生物多样性现状分级

等级	I (高)	II (中)	III (一般)	IV (低)
分值	[75, 100)	[50, 75)	[25, 50)	(0, 25)

(4) 后滨植被 (C6)

本文通过遥感反演方法获得后滨植被总面积变化率 (D18) 和植被盖度变化率 (D19)。根据表 3.12 对这两个指标的变化率进行赋值。

表 3.12 后滨植被分级赋值标准

序号	指标	I	II	III	IV	V
1	植被总面积变化率	$\geq 10\%$	[5%, 10%)	[0, 5%)	[-10%, 0)	< -10%
2	植被覆盖度变化率	$\geq 10\%$	[5%, 10%)	[0, 5%)	[-10%, 0)	< -10%
	赋值	100	80	60	40	20

(5) 生态环境效益结果

生态环境效益根据其评价得分, 可以划分为优、良、一般、较差和差 5 个综合评价等级, 其划分标准如表 3.13 所示。

表 3.13 海岸带保护修复工程生态环境效益评估等级划分

综合效果等级	优	良	一般	较差	差
得分	80~100	60~80	40~60	20~40	<20

3.3.3 综合效果评估

海岸带保护修复工程综合效果根据其评价得分，可以划分为优、良、一般、较差和差 5 个综合评价等级，其划分标准如表 3.14 所示。

表 3.14 海岸带保护修复工程综合效果评估等级划分

综合效果等级	优	良	一般	较差	差
得分	80~100	60~80	40~60	20~40	<20

3.4 指标数据分析方法

首先将地形和剖面数据导入 ArcGIS，再对海洋生态的原始数据表（主要有沉积物粒度、水环境质量、沉积物质量、海洋生物数据）进行统一规范，对每个评价指标进行建立空间矢量化数据，然后将矢量数据转化为栅格数据，运用层次分析法对指标赋予权重，进行空间叠加计算，得到该区域各评价层的指标和分数。

以目视解译和人工交互解译法为主，采用遥感技术提取海岸带岸线位置及其空间分布特征，利用 GIS 技术实现空间综合分析。人工交互解译法对海岸线位置变化进行修改和补充^[67]，海滩资源禀赋 ArcGIS10.2 软件处理，得到高程图。

后滨植被数据的处理是通过图斑分割采用遥感解译软件进行切割，利用多比例尺分割技术将遥感图像按特定的尺度划分均匀层次网格影像^[68]，最终得到后滨植被数据。

第四章 金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估方法

4.1 层次分析法

层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 是美国运筹学家 Saaty 于 70 年代提出的一种用于解决多目标多层次且具有递进结构的复杂问题的指标权重测度方法^[69]。特别是在多指标综合定量评价研究工作中应用广泛, 具有将定量处理和定性分析结合起来的特点, 通过分层、判断和分析的步骤来把较为复杂、模糊和综合性的问题, 运用易于理解的操作步骤和简便灵活的计算方法做出条理清晰的决策。层次分析法的具体计算过程如下:

(1) 建立多层次结构模型

第一, 围绕评价对象确定评价范围; 第二, 将复杂的问题按照一定的逻辑关系可以划分为目标层、准测层、方案层和指标层等具有递进归属关系的层次结构。本项目的评估结构采用四个层次, 分别是目标层、准则层、因素层和指标层; 第三, 进行各层次影响因素和评价因素的筛选划分, 根据各层次之间的逻辑关系和分类范围, 自上而下确定各评价因素之间的层次隶属关系。

(2) 建立判断矩阵

运用相对尺度的 1-9 标度法如表 4.1 来对同一层次或者同一组的指标之间进行两两比较得出相对重要性, 从而得到判断矩阵, 该矩阵是层次分析法的核心, 矩阵中的数字表示指标的重要程度, 得出哪个指标相对更重要。

表 4.1 指标相对重要程度分级表

标度	定义
1	两个要素相比一样重要
3	前者比后者稍微重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者特别重要
9	前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若要素 i 与要素 j 相比为 a_{ij} , 则要素 j 与要素 i 相比为 $1/a_{ij}$

例如 A 层为目标层, 将准则层 B 层中包含的 B_1, B_2, \dots, B_n 元素进行两两比较,

B_i 元素和 B_j 元素进行比较后得出能代表相对重要程度的判断值 b_{ij} ^[73]。便可构造出 A-B 之间的判断矩阵，如表 4.2 所示。

表 4.2 A-B 判断矩阵

A	B_1	B_2	...	B_n
B_1	1.00	b_{12}	...	b_{1n}
B_2	b_{21}	1.00	...	b_{2n}
...	1.00	...
B_n	b_{n1}	b_{n2}	...	1.00

(3) 计算单一准则下元素的相对权重^[71]

采用“和积法”计算权重值，其计算步骤为：

①对判断矩阵 A 每一列的因素归一化：

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4.1)$$

②再按行相加得和向量：

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4.2)$$

③将得到的 \bar{w}_i 归一化即得权重向量：

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4.3)$$

④计算判断矩阵 A 的最大特征根：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw_i)_i}{nw_i} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4.4)$$

(4) 进行单个判断矩阵的一致性检验：计算判断矩阵的一般性一致性指标 CI

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4.5)$$

最后计算矩阵一致性比率 CR：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.6)$$

其中 RI 为平均随机一致性指标。

当 $CR < 0.10$ 时，即认为判断矩阵具一致性，得到的权重结果是合理的；否则说明判断矩阵构建不合理，需要重新调整判断矩阵的取值直到出现合理的结果。其中 RI 为平均随机一致性指标。部分常用值如表 4.3 所示。

表 4.3 判断矩阵的 RI 值

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

4.2 层次分析法指标权重的确定

本文以金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果作为主要研究对象，准则层包含防灾减灾效益和生态环境效益两个方面，再由准则层两个主体重新分配组合 19 个评价因子建立一个多层次性的综合评价指标系统。

邀请熟悉海岸带保护修复工程的十名专家，对于每一个相对重要性程度判断矩阵，采用 Saaty T. L. 的 1-9 标度法进行重要性程度等级定量赋值；统计专家得出的权重结果，在得出指标权重后，进行了一致性检验，并对符合要求的结果取权重均值，最终形成各层次指标的权重。

本小节将专家的调查结果和参考规范进行展示（由于展示结果只保留了三位小数，所以可能导致权重相加不等于 1 的情况出现）。

(1) 一级指标权重计算及一致性检验如表 4.4 所示

表 4.4 一级指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	防灾减灾效益	生态环境效益	权重 ω
防灾减灾效益	1	2	0.667
生态环境效益	1/2	1	0.333

根据前文公式，计算得出该判断矩阵的 $\lambda_{\max}=4.097$ ， $CI=0.032$ ， $RI=0.9$ ， $CR=0.036 < 0.10$ ，因此专家 M_1 的一级指标判断矩阵通过一致性检验，权重结果可信。

(2) 防灾减灾效益二级指标权重计算及一致性检验如表 4.5 所示

表 4.5 抵御海浪、风暴潮能力指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	波高衰减率	岸线长度	向海开阔度	权重 ω
波高衰减率	1	2	2	0.500

表 4.5 (续)

指标 i \ 指标 j	波高衰减率	岸线长度	向海开阔度	权重 ω
岸线长度	1/2	1	1	0.250
向海开阔度	1/2	1	1	0.250

根据前文公式, 计算得出该判断矩阵的 $\lambda_{\max}=3.000$, $CI=0.000$, $RI=0.580$, $CR=0.000<0.10$, 因此专家 M_1 的社会效益方面指标判断矩阵通过一致性检验, 权重结果可信。

(3) 生态环境效益二级指标权重及一致性检验如表 4.6 所示

表 4.6 生态环境效益纬度的指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	海滩资源禀赋	环境要素	海洋生物多样性	后滨植被	权重 ω
海滩资源禀赋	1	2	3	1/2	0.308
环境要素	1/2	1	2	1	0.234
海洋生物多样性	1/3	1/3	1	1/2	0.126
后滨植被	2	1	2	1	0.331

根据前文公式, 计算得出该判断矩阵的 $\lambda_{\max}=4.205$, $CI=0.068$, $RI=0.900$, $CR=0.076<0.10$, 因此专家 M_1 的生态环境效益方面指标判断矩阵通过一致性检验, 权重结果可信。

(4) 抵御海浪、风暴潮能力三级指标权重及一致性检验如表 4.7 所示

表 4.7 抵御海浪、风暴潮能力指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	波高衰减率	权重 ω
波高衰减率	1	1.0000

(5) 海岸侵蚀强度三级指标权重及一致性检验如表 4.8 所示

表 4.8 海岸侵蚀强度指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	岸线位置变化率	岸滩蚀淤速率	权重 ω
岸线位置变化率	1	2	0.667
岸滩蚀淤速率	1/2	1	0.333

根据前文公式, 计算得出该判断矩阵的 $\lambda_{\max}=2.000$, $CI=0.0$, $RI=0.0$, $CR=0.0<0.10$, 因此专家 M_1 的海岸侵蚀强度方面指标判断矩阵通过一致性检验, 权重结果可信。

(6) 海滩资源禀赋三级指标权重及一致性检验如表 4.9 所示

表 4.9 海滩资源禀赋指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	干滩宽度	潮间带 宽度	潮间带 坡度	沉积物类 型	沉积物分选 度	海滩地貌 特征	权重 ω
干滩宽度	1	1	1	2	2	1	0.203
潮间带宽度	1	1	3	2	2	1	0.243
潮间带坡度	1	1/3	1	1/2	1/2	1	0.106
沉积物类型	1/2	1/2	1/2	1	1	1	0.143
沉积物分选度	1/2	2	2	1/2	1	1	0.143
海滩地貌特征	1	1	1	1	1	1	0.161

根据前文公式，计算得出该判断矩阵的 $\lambda_{\max}=6.041$ ， $CI=0.000$ ， $RI=0.000$ ， $CR=0.000<0.10$ ，因此专家 M_1 的滩资源禀赋方面指标判断矩阵通过一致性检验，权重结果可信。

(7) 水环境质量三级指标权重及一致性检验如表 4.10 所示

表 4.10 海滩资源禀赋指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	近海海水水质等级	权重 ω
近海海水水质等级	1	1.000

(8) 海洋沉积物质量三级指标权重及一致性检验如表 4.11 所示

表 4.11 海滩资源禀赋指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	近海沉积物等级	权重 ω
近海沉积物等级	1	1.000

(9) 海洋生物多样性三级指标权重及一致性检验如表 4.12 所示

表 4.12 海滩资源禀赋指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	底栖生物物种多样性	浮游动物物种多样性	浮游植物物种多样性	权重 ω
底栖生物物种多样性	1	1	2	0.400
浮游动物物种多样性	1	1	2	0.400
浮游植物物种多样性	1/2	1/2	1	0.200

根据前文公式，计算得出该判断矩阵的 $\lambda_{\max}=3.000$ ， $CI=0.000$ ， $RI=0.580$ ， $CR=0.000<0.10$ ，因此专家 M_1 的海洋生物多样性方面指标判断矩阵通过一致性检验，权重结果可信。

(10) 后滨植被三级指标权重及一致性检验如表 4.13 所示

表 4.13 后滨植被指标权重分配表

指标 i \ 指标 j	总面积变化率	盖度变化率	权重 ω
总面积变化率	1	1/3	0.250
盖度变化率	3	1	0.750

根据前文公式，计算得出该判断矩阵的 $\lambda_{\max}=6.263$ ， $CI=0.053$ ， $RI=1.24$ ， $CR=0.043<0.10$ ，因此专家 M_1 的海洋生物多样性方面指标判断矩阵通过一致性检验，权重结果可信。

(11) 综合评价指标权重层次单排序表权重及一致性检验

根据判断矩阵通过一致性检验，满足要求。通过计算各专家的符合要求权重的平均值，得出综合评价指标体系层次单排序表如表 4.14 所示。

表 4.14 海岸带保护修复工程综合效果评估指标体系权重层次单排序表

目标层	准则层	权重	因素层	权重	指标层	权重
海岸带保护 修复工程综 合效果评估 指标体系 A	防灾减灾效益 B1	0.667	抵御海浪抵御、风暴 潮能力 C1	0.667	波高衰减率 D1	0.500
					岸线长度 D2	0.250
			海岸侵蚀强度 C2	0.333	向海开阔度 D3	0.250
					岸线位置变化速率 D4	0.500
					岸滩蚀淤速率 D5	0.500
			海滩资源禀赋 C3	0.250	0.250	干滩宽度 D6
	潮间带宽度 D7	0.167				
	潮间带坡度 D8	0.167				
	沉积物类型 D9	0.167				
	沉积物分选度 D10	0.167				
	海滩地貌特征 D11	0.167				
	近海海水水质等级 D12	0.500				
	生态环境效益 B2	0.333	环境要素 C4	0.250	近海沉积物质量等 D13	0.500
					底栖生物物种多样性 D14	0.167
					浮泳动物物种多样性 D15	0.167
					浮游植物物种多样性 D16	0.167
					潮间带生物物种多样性 D17	0.500
	海洋生物多样性 C5	0.250	0.250	总面积变化率 D18	0.500	
				盖度变化率 D19	0.500	
			后滨植被 C6	0.250		

第五章 金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估指标监测与分析

金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程项目综合效果评估的评估区域为大蒲河口一期一标区和金沙湾一期二标工作区，为了分析得出该保护修复工程项目的综合效果，掌握该区域的生态环境及防灾减灾能力的变化趋势，开展了不同连续年份的监测工作。下文内容中涉及到金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程项目各指标的监测数据来自于河北省地矿局第八地质大队相关研究报告，并已征得同意。

5.1 监测站点的布设

本项目评估在工程施工前 2020 年 11 月完成了一期沉积动力剖面、地形地貌、表层沉积物、海洋水质、海洋生物和后滨植被等的调查；施工后 2021 年 6 月至 10 月进行剖面、地形地貌、表层沉积物、海洋水质、海洋生物和后滨植被等的调查。

2020 年 11 月，秦皇岛市金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程项目开展了前期勘查，共布设 25 条断面，断面垂直于海岸线，设置表层沉积物粒度监测 114 站位，潮流监测站 2 个，海水水质、沉积物质量和海洋生物监测均为 30 站次，全面调查项目区沉积动力、地形地貌和海洋生态环境特征，为海滩生态修复工程提供基础环境资料。前期勘查工作布置图如图 5.1 所示。

秦皇岛市金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程于 2021 年 6 月完工。2021 年 6 月至 10 月，海岸带保护修复工程主体完成后进行一期监测，包括剖面监测 25 条断面，海洋沉积物粒度监测 40 站次，海水水质和沉积物质量为 12 站次，海洋生物监测均为 10 站次，提供保护修复工程施工后综合效果评估的一期数据。施工后勘查工作布置图如图 5.2 所示。

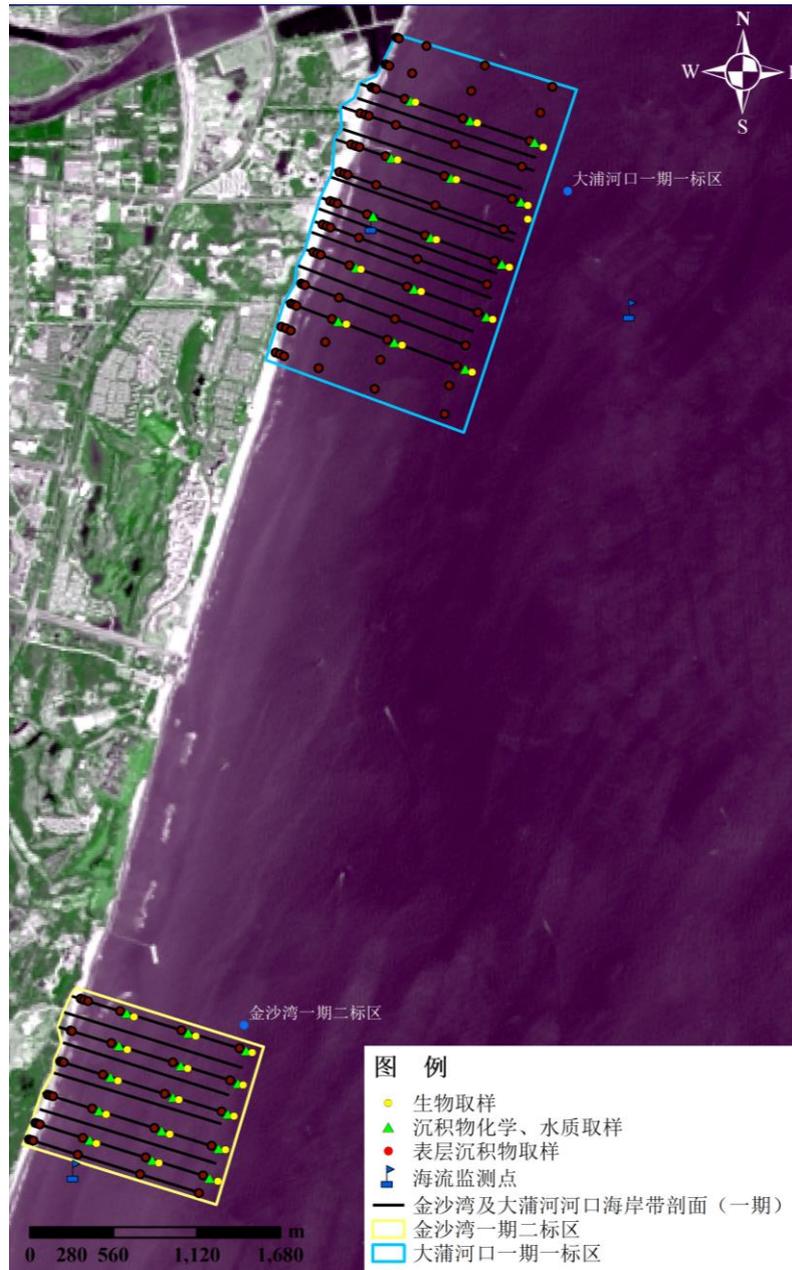


图 5.1 前期勘查工作布置图

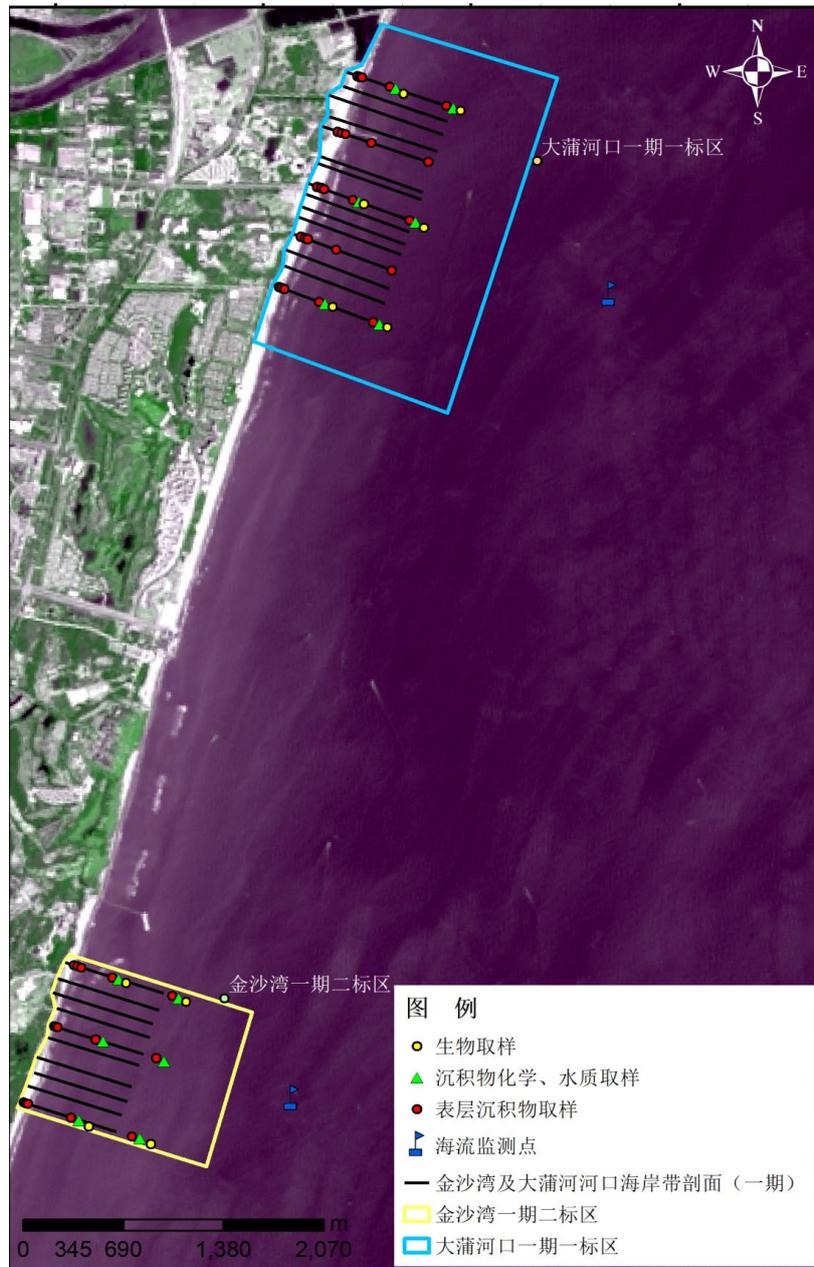


图 5.2 施工后监测剖面布置图

5.2 监测项目

(1) 海水水质特征：水质分析选取 pH 值、COD、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、活性磷酸盐、挥发性酚、油类及重金属（As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cd）等监测项目^[72]。

(2) 海洋生物多样性：研究区域浮游动植物、底栖生物和潮间带生物的总种类、总细胞数、多样性指数、丰度和均匀度等^[73]。

(3) 沉积物环境：沉积物质量分析选取总有机碳、硫化物、油类和重金属（铜、

锌、铅、镉、汞、砷、铬)。沉积物特征包括沉积物粒度和分选度^[74]。

(4) 后滨植被: 研究区域内植被总面积和盖度。

(5) 地形地貌: 获取地形剖面数据、岸滩和波高。

5.3 监测方法

(1) 地形地貌监测

对岸滩进行沉积动力地貌监测, 采用 RTK 剖面监测剖面起点位于沙滩后缘, 每条剖面长约 1 km。分析水动力条件改变后沙滩的稳定状态, 并分析其剖面的动态演化过程。由海岸至 1.5 m 水深采用 RTK 测量, 1.5 m 水深以外采用测深仪与 RTK 配合测量, 测量点距不大于 5 m。剖面基点固定、方向固定。

(2) 波浪监测

为分析工程施工后周边海域的水动力变化, 在水下沙坝两侧分别布设 4 个波浪监测站位, 每次监测时长为一个月, 通过对近岸海洋水动力环境调查, 获得区内海域高精度的波浪相关实测数据, 工程竣工后监测一次, 1 月/站, 共计 4 站。

(3) 海洋水质等级监测

在本次调查海域内, 分别在施工前后布设 30 个监测站, 施工后共布设 12 个监测站, 分施工前后两期各监测一次, 具体站位的平面分布如图 5.1 和 5.2 所示。选取 pH 值、DO、COD、无机氮、活性磷酸盐、石油类及重金属 (As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cd) 等监测项目, 各项监测因子的采集与分析均按照《海洋调查规范》(GB12763.2-2007) 与《海洋监测规范》(GB17378-2007) 进行。

(4) 海洋生物监测

在本次调查海域内, 分别在施工前后布设 30 个监测站, 施工后共布设 10 个监测站, 分施工前后两期各监测一次。对该研究区内的浮游动植物、底栖生物和潮间带生物的总种类、总细胞数、多样性指数、丰度和均匀度等采用现场采样分析法进行统计分析监测。

(5) 沉积物监测

在岸滩监测剖面的基础上, 在沙滩的滩肩、滩面、水下岸坡及相应海域进行沉积物监测, 在本次调查海域内, 分别在施工前后布设 30 个监测站, 施工后共布设 12 个监测站, 分施工前后两期各监测一次。沉积物质量分析项目主要包括: 总有机碳、硫化物、油类、Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As、Cr, 各项监测因子的采集与分析均按照《海洋调查规范》(GB12763.2-2007) 与《海洋监测规范》(GB17378-2007) 进行^[74]。

沉积物粒径分析, 室内试验先在干燥机上进行干燥, 试样中直径大于 0.063 mm 的样品按 1/4 Φ 间距筛, 直径小于 0.063 mm 的样品按 1 Φ 间距进行沉淀, 并通过电

子称重，计算出各个颗粒直径的样品的百分数^[78]。沉积物分类与命名按 GB/T 12763.8-2007 中附录 A 的规定执行，海滩沉积物粒度命名根据等比制（ ϕ 标准）粒级命名，如表 5.1 所示，粒度参数计算采用福克和沃德公式计算。

表 5.1 沉积物名称分类

粒度命名	粘土	粉砂	细砂	中细砂	中砂	粗砂	砾质
赋分	100 分	100 分	100 分	75 分	50 分	25 分	12.5 分

(6) 后滨植被

后滨植被调查采用遥感反演法，2020 年 11 月施工前共收集到工作区 2018 年-2020 年间 2 景，轨道号为 121033 陆地资源卫星遥感数据如表 5.2 所示，作为修复工程施工前的遥感数据，通过反演得到修复工程施工前工作区地表植被覆盖度；2021 年 6 月施工后收集到工作区 2021 年 1 景，轨道号为 121033 陆地资源卫星遥感数据如表 5.2 所示，作为修复工程施工后刚竣工的遥感数据，通过反演得到修复工程施工后工作区地表植被覆盖度。

表 5.2 遥感数据源与成像时间表

序号	卫星名称	成像时间
1	Land Sat 8	2018 年 7 月 31 日
2	Land Sat 8	2020 年 6 月 2 日
3	Land Sat 8	2021 年 6 月 5 日

5.4 大蒲河口工作区评估指标分析

5.4.1 防灾减灾效益

(1) 抵御海浪、风暴潮能力

①波高衰减率

2020 年（施工前）大蒲河口工作区的波高衰减率为 2%，2021 年（施工后）大蒲河口工作区波高衰减率为 65%。水下沙坝高程从 2020 年 11 月 -2.45 m 到 2021 年 6 月 -2.29 m，该阶段表现为水下沙坝从无到有，波高衰减率从 2% 提高到 65%，表明水下沙坝修建后，可减小的波浪强度及频度，进一步减轻海岸侵蚀强度。

②岸线长度和③向海开阔度

2020 年（施工前）大蒲河口工作区岸线长度为 3.190 千米，向海开阔度为 1.032；2021 年（施工后）大蒲河口工作区岸线长度为 3.194 千米，向海开阔度为 1.033。总体来看，工程建设对岸线长度和向海开阔度影响较小，施工前后基本稳定。

(2) 海岸侵蚀强度

①岸线位置变化速率和②岸滩蚀淤速率

2020年（施工前）大蒲河口工作区的岸线位置平均变化速率为-3 m/a，岸滩蚀淤平均速率为-20 cm/a，根据表 3.3 得出该区域海岸稳定性属于强侵蚀状态；2021年（施工后）大蒲河口工作区的岸线位置平均变化率为 42.9 m/a，岸滩蚀淤平均速率为 63 cm/a，根据表 3.3 得出该区域海岸稳定性属于淤积状态。

5.4.2 生态环境效益

(1) 海滩资源禀赋

①干滩宽度

2020年11月（施工前）大蒲河口工作区的干滩宽度范围为 27.30~245.93 m，工作区的干滩区域中间区域较宽，呈现出向南北两端逐渐变窄的趋势，如图 5.3 所示，计算出整个工作区的干滩平均宽度为 133.08 m；2021年6月（施工后），大蒲河口工作区干滩的宽度范围为 42.44~258.04 m 如图 5.3 所示，平均宽度为 157.16 m，较施工前的干滩宽度增加了 24.08 m，整体达到了实施方案要求的沙滩增宽 20~40 m 的补滩效果。

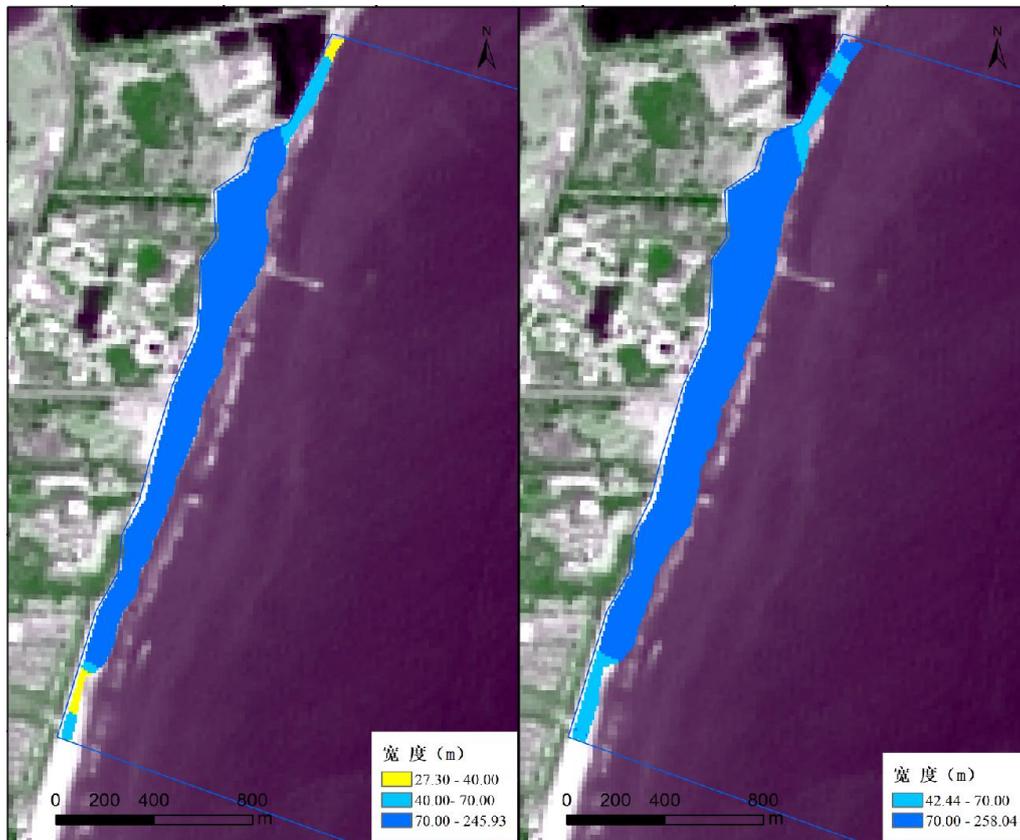


图 5.3 大蒲河口工作区干滩宽度空间差异分布图：2020 年（左）和 2021 年（右）

②潮间带宽度

2020年11月(施工前)大蒲河口工作区的潮间带宽度范围为28.64~189.73 m,工作区岸段南侧的潮间带较宽,岸段北侧潮间带宽度较窄,整个工作区的潮间带平均宽度为80.29 m如图5.4所示;2021年6月(施工后)大蒲河口工作区的潮间带宽度范围为28.29~97.90 m如图5.4所示,整个工作区的潮间带平均宽度为53.30 m。总体来看由于滩肩补沙建设的原因,潮间带区域分布情况均比施工前更加平整均匀且有向海移动趋势。

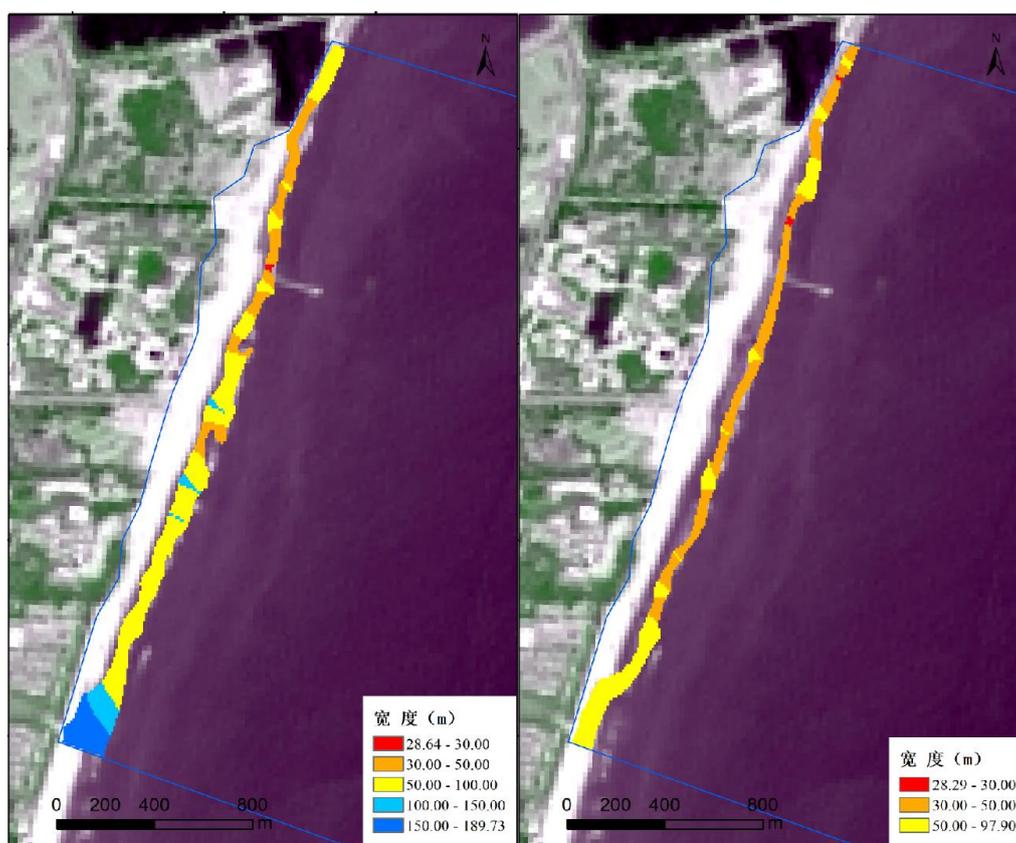


图 5.4 大蒲河口工作区潮间带宽度空间差异分布图: 2020 年(左)和 2021 年(右)

③潮间带坡度

2020年11月(施工前)大蒲河口工作区施工前的潮间带坡度范围为 $0.01\sim 17.93^\circ$;中高坡度区域沿岸线位置向内陆方向分布,低坡度区域沿靠近海域一侧分布,极少部分高坡度区域呈零星散落状分布。整个工作区潮间带的平均坡度为 2.28° 如图5.5所示;2021年6月(施工后)大蒲河口工作区潮间带坡度范围为 $0.05\sim 14.25^\circ$,其空间差异分布如图5.5所示,整个区域的平均坡度为 2.67° 。大蒲河口工作区施工前、后潮间带坡度均主要集中在 $0\sim 4.5^\circ$ 低坡度范围内,沿岸线方向相对分布均匀,有极少部分区域属于 $11.50\sim 17.93^\circ$,高坡度区域呈零星无规则散落状分布,施工后低坡度区域面积占比变大,高坡度区域面积占比变小,整体坡度有变小趋势。

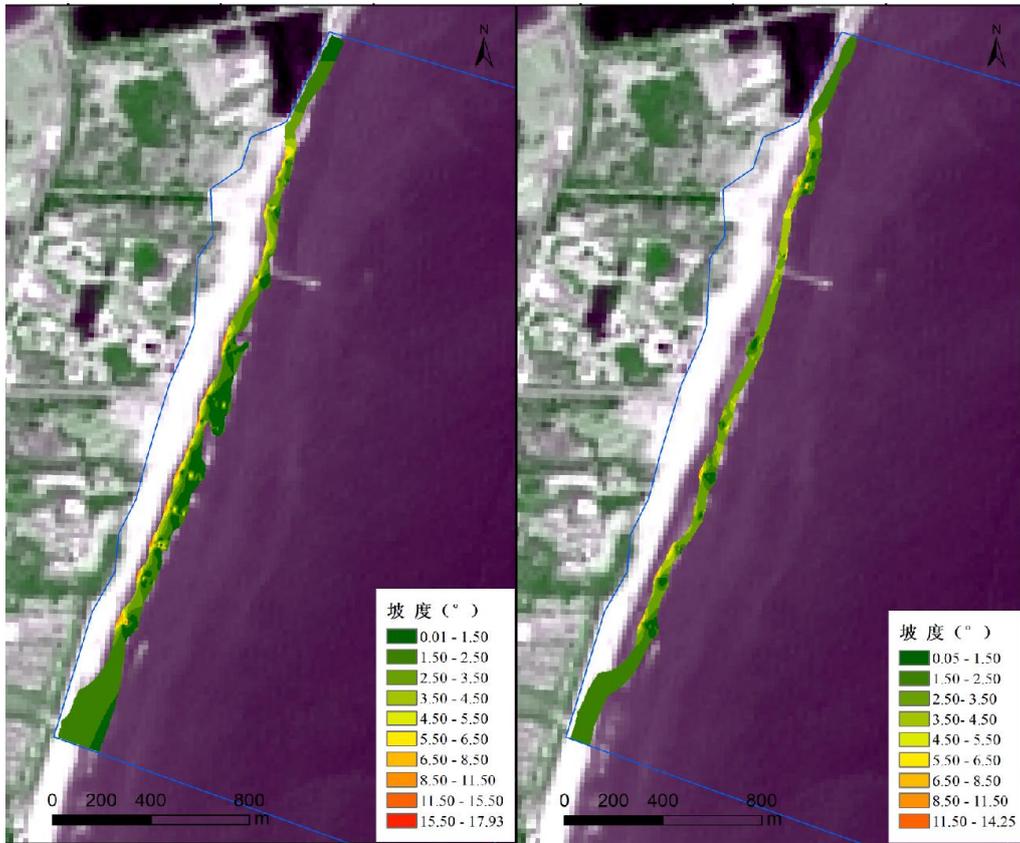


图 5.5 大蒲河口工作区潮间带坡度空间差异分布图：2020 年（左）和 2021 年（右）

④沉积物类型

2020 年 11 月（施工前）大蒲河口工作区沉积物类型主要以中砂为主，在工作区东南海域有细砂分布，整个工作区沉积物类型分布如图 5.6 所示；2021 年 6 月（施工后）大蒲河口工作区沉积物类型存在中砂、中细砂和细砂，沿滩肩补沙区域以中细砂和细砂为主，整个工作区中砂分布区域面积约占 50%，中细砂和细砂区域面积一共约占 50%，其空间差异分布如图 5.7 所示；总体来说，施工前以中砂为主，施工后出现了细砂和中细砂，沉积物粒径总体上变小。

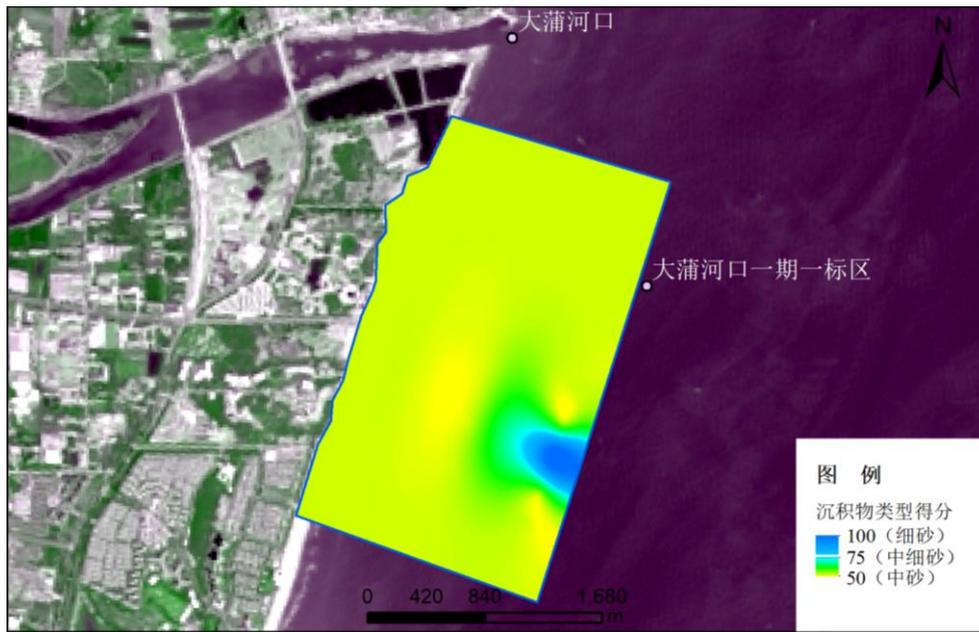


图 5.6 2020 年大蒲河口工作区沉积物类型空间差异分布图

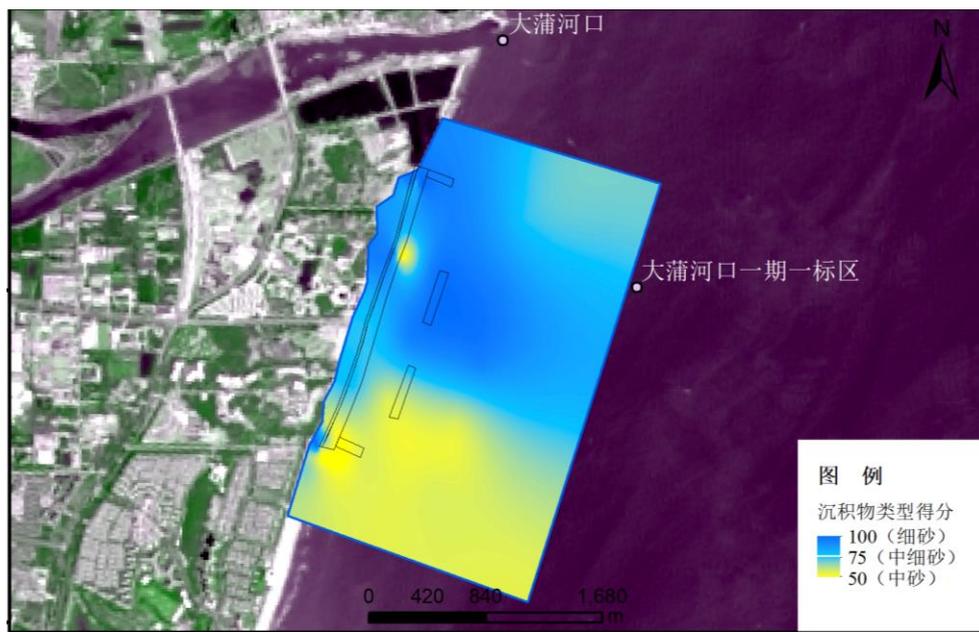


图 5.7 2021 年大蒲河口工作区沉积物类型空间差异分布图

⑤ 沉积物分选度

2020 年 11 月（施工前）和 2021 年 6 月（施工后）大蒲河口工作区的沉积物分选系数变化范围在 0.02~1.2，均达到沉积物分选度极好的标准。对比施工前后的数据来看该工作区的沉积物颗粒大小均匀程度很好，海岸带保护修复工程对表层沉积物分选度的影响很小。

⑥ 海滩地貌特征

2020年11月（施工前）大蒲河口工作区无发育滩肩和水下沙坝，存在岸滩侵蚀陡坎情况；2021年6月（施工后）该工作区有发育滩肩与水下沙坝且无侵蚀陡坎情况。

（2）环境要素

①近海海水水质等级

监测分析结果表明，2020年11月（施工前）监测海域中，大蒲河口工作区共14个监测站，其中达到第一类海水水质标准的监测站个数占总数的93%，符合第二类海水水质标准的监测站个数占总数的7%，如图5.8所示。由表5.3可知，该工作区Cu标准指数最大值为1，根据单因子标准指数法，按照表3.7的判断标准可知大蒲河口工作区的Cu达到微污染的程度。

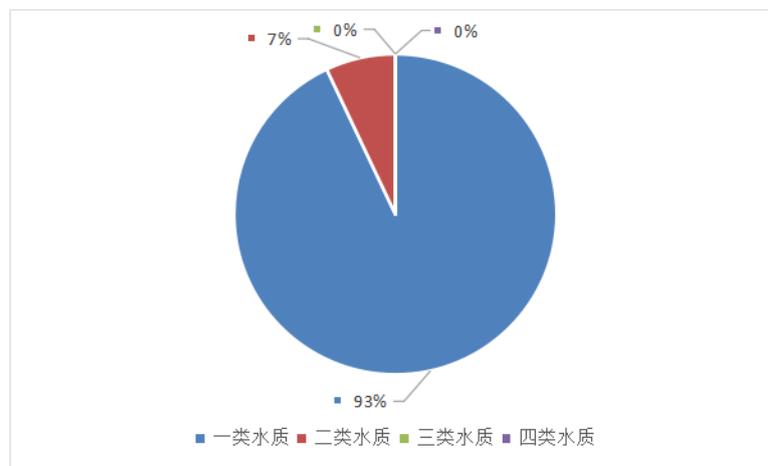


图 5.8 2020 年大蒲河口工作区海水水质等级监测站占比图

表 5.3 大蒲河口工作区海水水质标准指数计算结果

时间	标准指数	pH	化学需氧量					砷 ($\mu\text{g/L}$)	活性磷 酸盐 (以 P 计) (mg/L)	挥发性 酚 (以苯 酚计) (mg/L)
			(COD Mn) (mg/L)	镉 ($\mu\text{g/L}$)	铅 ($\mu\text{g/L}$)	铜 ($\mu\text{g/L}$)	锌 ($\mu\text{g/L}$)			
2020 年 11 月	最大值	0.27	0.78	0.27	0.61	1.00	0.58	1.10	-	0.60
	最小值	0.19	0.51	0.11	0.13	0.27	0.21	0.60	-	0.20
	平均值	0.23	0.63	0.18	0.24	0.44	0.30	0.69	-	0.47
2021 年 6 月	最大值	0.43	0.71	0.39	0.56	0.84	0.39	0.05	0.53	0.60
	最小值	0.31	0.63	0.31	0.52	0.78	0.35	0.05	0.33	0.20
	平均值	0.36	0.66	0.36	0.55	0.82	0.38	0.05	0.42	0.43

Cu 浓度超标区域与第二类水质出现的区域相同如图 5.9 和图 5.10 所示，因此 Cu 是影响施工前大蒲河口工作区水质的主要因素。2021 年 6 月（施工后）大蒲河口工作区共 6 个监测站位，其海水水质均符合第一类海水水质标准。

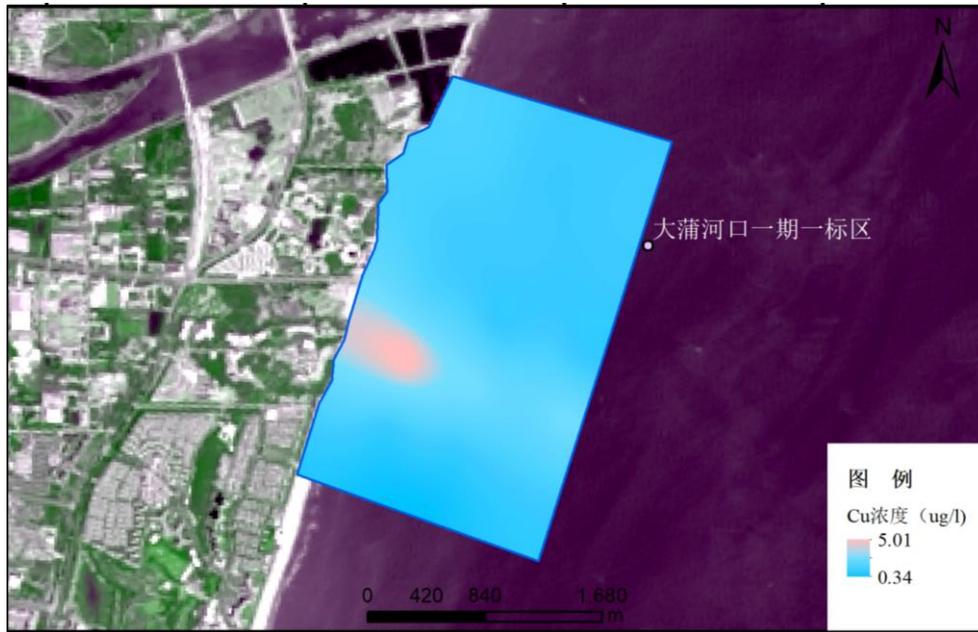


图 5.9 2020 年大蒲河口工作区 Cu 含量分布图

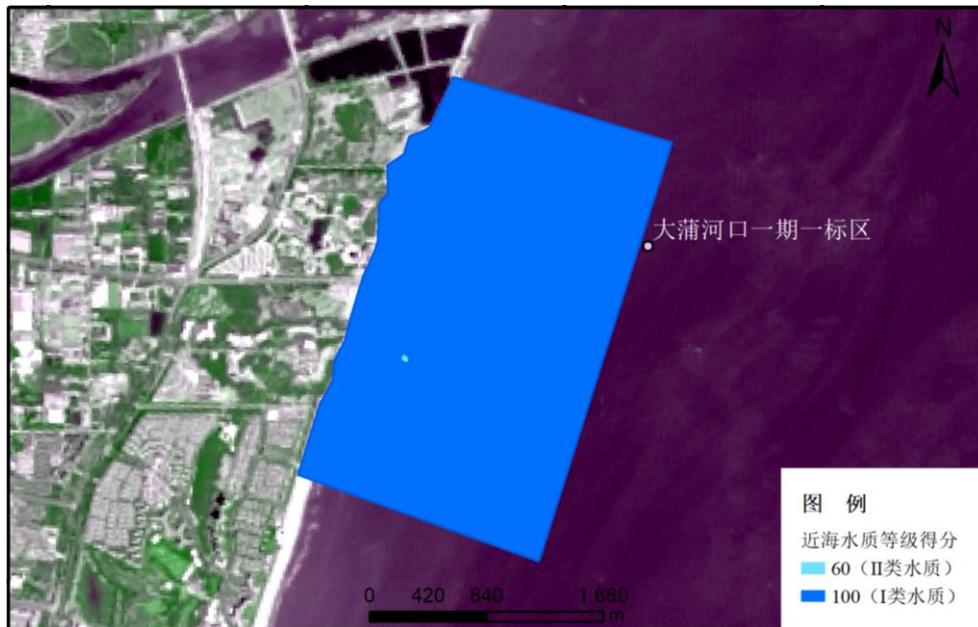


图 5.10 2020 年大蒲河口工作区海水水质等级分布图

②近海沉积物质量等级

2020 年 11 月（施工前）大蒲河口工作区海洋沉积物质量等级均为第一类；2021 年 6 月（施工后）大蒲河口工作区海洋沉积物质量等级均为第一类。

(3) 海洋生物多样性

①底栖生物物种多样性

2020年11月（施工前）大蒲河口工作区底栖动物多样性指数范围为14.4~41.9，其空间差异分布如图5.11所示，该工作区靠岸区域底栖生物物种多样性比近海区域丰富，物种分布较均匀，物种多样性较高；2021年6月（施工后），大蒲河口工作区底栖动物多样性指数范围为17.7~40.6，其空间差异分布如图5.12所示，该工作区西南角靠海岸线区域底栖生物物种多样性较低，工程建设区域物种多样性升高，由于修建的水下沙坝降低水动力对底栖生物生存环境的破坏，使其生存环境更稳定。

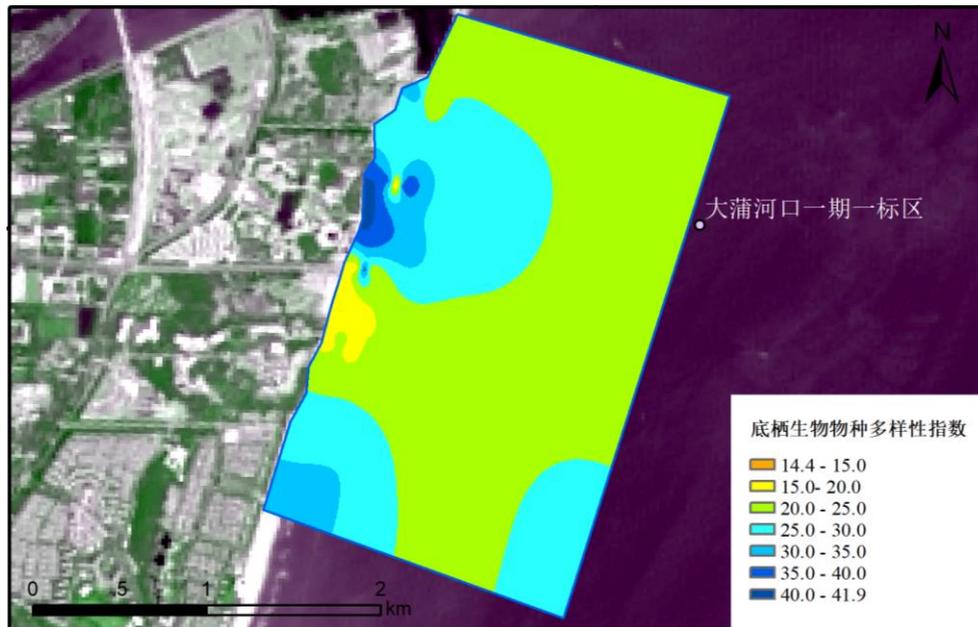


图 5.11 2020 年大蒲河口工作区底栖生物物种多样性空间差异分布图

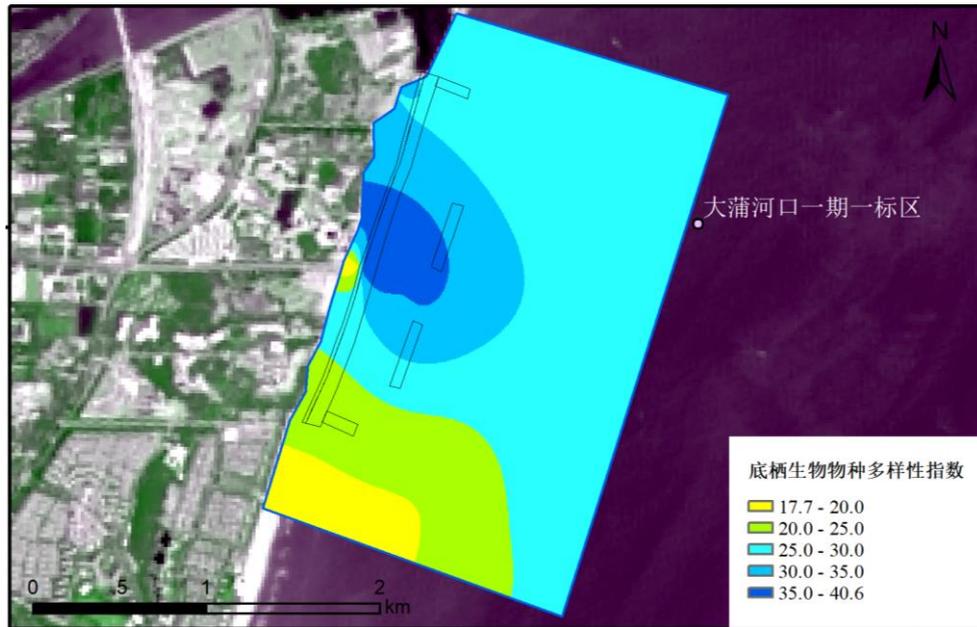


图 5.12 2021 年大蒲河口工作区底栖生物物种多样性空间差异分布图

②浮游植物物种多样性

2020 年 11 月（施工前），大蒲河口工作区浮游植物多样性指数为 11.2~46.2 如图 5.13 所示，该工作区物种多样性指数成对称分布，靠岸的西南角和西北角多样性指数较低。2021 年 6 月（施工后），大蒲河口工作区浮游植物物种多样性指数为 5.3~24.2，整个工作区浮游植物物种分布不太均匀，物种多样性很低，其空间差异分布如图 5.14 所示。总体来看浮游植物施工后比施工前物种多样性降低，一方面原因是由于水下沙坝的抵挡作用，使得沿岸浮游植物分布发生了变化，坝的位置向岸的方向正好是原来水流和营养物质聚集的区域，修筑水下沙坝后，阻挡了水流，岸边的营养物质减少，导致了浮游植物的减少；另一方面原因是由于工程建设过程中挖掘、扬沙等操作，使得水体中泥沙含量升高变得更加浑浊，水体透明度降低，严重抑制了浮游植物的光合作用^[79]，使得浮游植物无法存活，物种多样性降低^[77]。

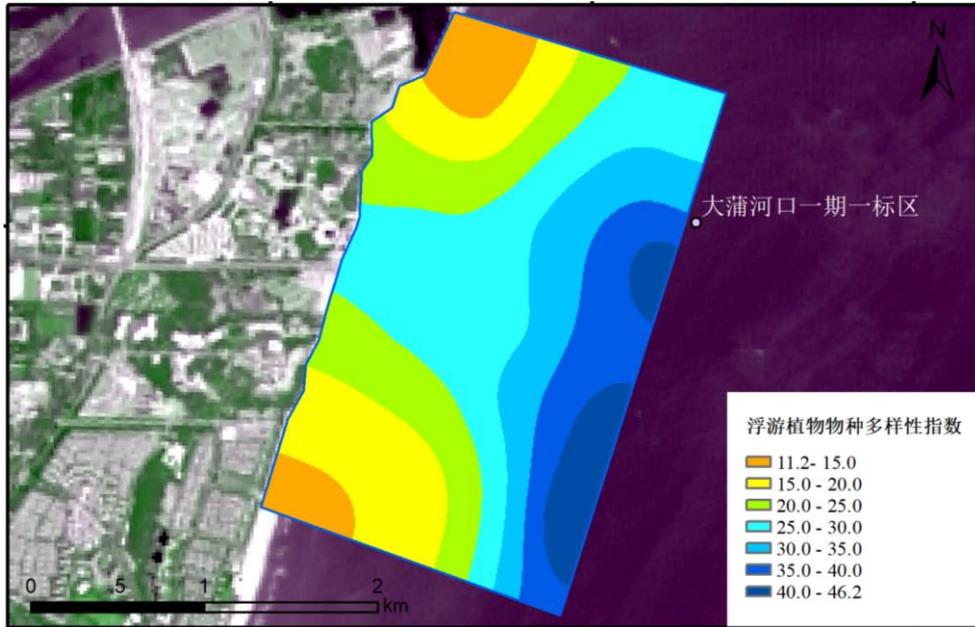


图 5.13 2020 年大蒲河口工作区浮游植物物种多样性空间差异分布图

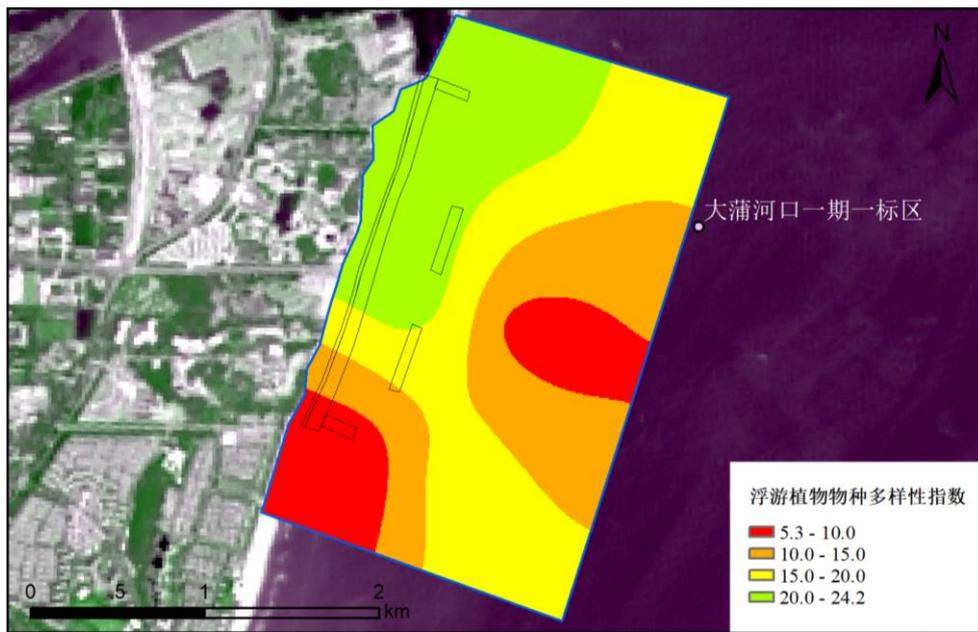


图 5.14 2021 年大蒲河口工作区浮游植物物种多样性空间差异分布图

③浮游动物物种多样性

2020 年 11 月（施工前），大蒲河口工作区浮游动物物种多样性指数为 25.9~35.4 如图 5.15 所示，该工作区物种分布较均匀，该工作区的西南角物种多样性指数较低；2021 年 6 月（施工后），大蒲河口工作区浮游动物物种多样性指数为 5.3~28.1，整个工作区浮游动物物种分布不太均匀，物种多样性很低，其空间差异分布如图 5.16 所示。总体来看施工后比施工前浮游动物物种多样性下降，2021 年 6 月水下沙坝修建后，对

海洋环境产生扰动，侵占了浮游动物的栖息地，对浮游动物生存环境影响较大，在施工过程中直接导致部分浮游动物受到掩埋等损害^[78]，部分工程措施导致海水中泥沙含量升高，悬浮物增多，使得水体更加浑浊，使得具有昼夜活动规律的浮游生物受到捕食、生长发育等方面的影响，降低其生物多样性^[77]。

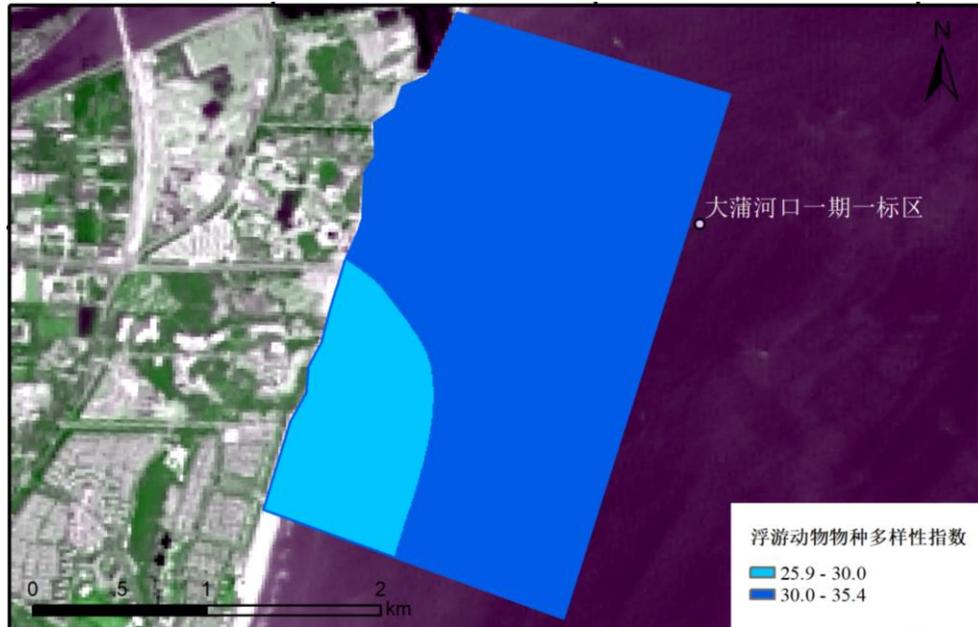


图 5.15 2020 年大蒲河口工作区浮游动物物种多样性空间差异分布图

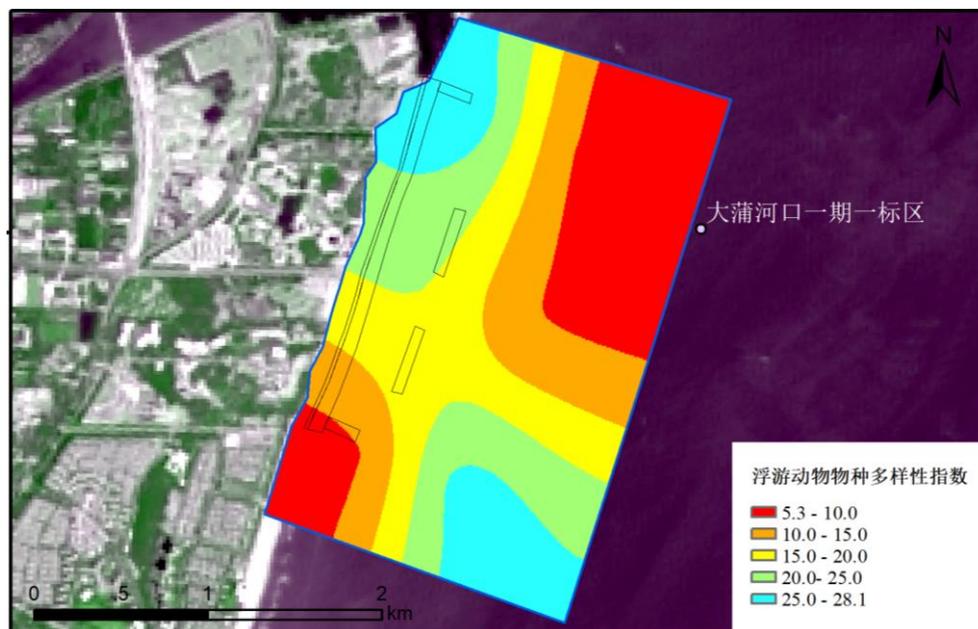


图 5.16 2021 年大蒲河口工作区浮游动物物种多样性空间差异分布图

④潮间带生物物种多样性

2020 年 11 月（施工前），大蒲河口工作区潮间带生物物种多样性指数范围为 0~20

如图 5.17，大蒲河口工作区物种分布不均匀，该区域北半部潮间带生物物种多样性高于南半部。2021 年 6 月（施工后）由于潮间带区域实施的工程建设，导致潮间带生境受损，影响潮间带生物物种多样性，所以该年数据不做参考。

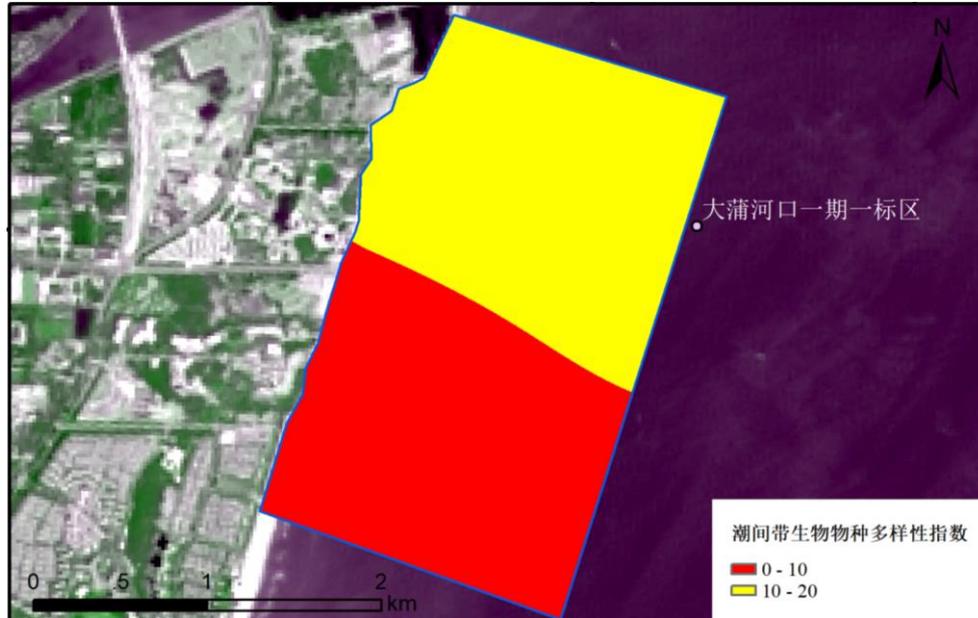


图 5.17 2020 年大蒲河口工作区潮间带生物物种多样性空间差异分布图

(4) 后滨植被

①植被总面积变化率和②植被总面积变化率

通过遥感技术提取 2018 年和 2020 年大蒲河口工作区后滨植被的面积，通过计算得出 2020 年植被总面积变化率和盖度变化率均为 0%，说明 2018 年和 2020 年 6 月施工前后，覆植沙丘工程刚刚完成，植被尚小，还未绿化。2021 年 6 月 5 日，通过遥感技术提取大蒲河口工作区域后滨植被面积，通过计算得出植被总面积变化率和盖度变化率为 65% 和 33%。

5.5 金沙湾工作区评估指标分析

5.5.1 防灾减灾效益

(1) 抵御海浪、风暴潮能力

①波高衰减率

2020 年（施工前）金沙湾工作区的波高衰减为 2%，2021 年（施工后）金沙湾工作区的波高衰减率为 65%。水下沙坝高程从 2020 年 11 月 -4.41 m 到 2021 年 6 月 -4.37 m，该阶段表现为水下沙坝从无到有，波高衰减率从 2% 变为 65%，表明水下沙坝修建后，可减小的波浪强度及频度，进一步减轻海岸侵蚀强度。

②岸线长度和③向海开阔度

2020年（施工前）金沙湾工作区岸线长度为1.528千米，向海开阔度为1.051；2021年（施工后）金沙湾工作区岸线长度为1.492千米，向海开阔度为1.026。总体来看，工程建设对岸线长度和向海开阔度影响较小，施工前后基本稳定。

（2）海岸侵蚀强度

①岸线位置变化速率和②岸滩蚀淤速率

2020年（施工前）金沙湾工作区的岸线位置平均变化率为-2.5 m/a，岸滩蚀淤平均速率约为-20 cm/a，根据表3.3得出该区域海岸稳定性属于强侵蚀状态。2021年（施工后）金沙湾工作区岸线位置变化率为-102~100.90 m/a，岸线位置平均变化率为38.6 m/a，岸滩蚀淤速率变化范围为-0.39~10.58 cm/a，岸滩蚀淤平均速率为80 cm/a，根据表3.3得出该区域海岸稳定性属于淤积状态。

5.5.2 生态环境效益

（1）海滩资源禀赋

①干滩宽度

2020年11月（施工前）金沙湾工作区的干滩宽度范围为28.81~146.69 m，工作区的干滩区域中间区域较窄，呈现出向南北两端增宽的趋势，如图5.18所示，整个工作区干滩的平均宽度为88.02 m。2021年6月（施工后），金沙湾工作区干滩宽度范围为82.95~160.12 m如图5.18所示，整个工作区干滩平均宽度为113.79 m，较施工前的干滩宽度增加了25.77 m，整体达到沙滩增宽20~40 m的补滩效果，从整体干滩区域形状来看，施工后比施工前更加均匀平缓。

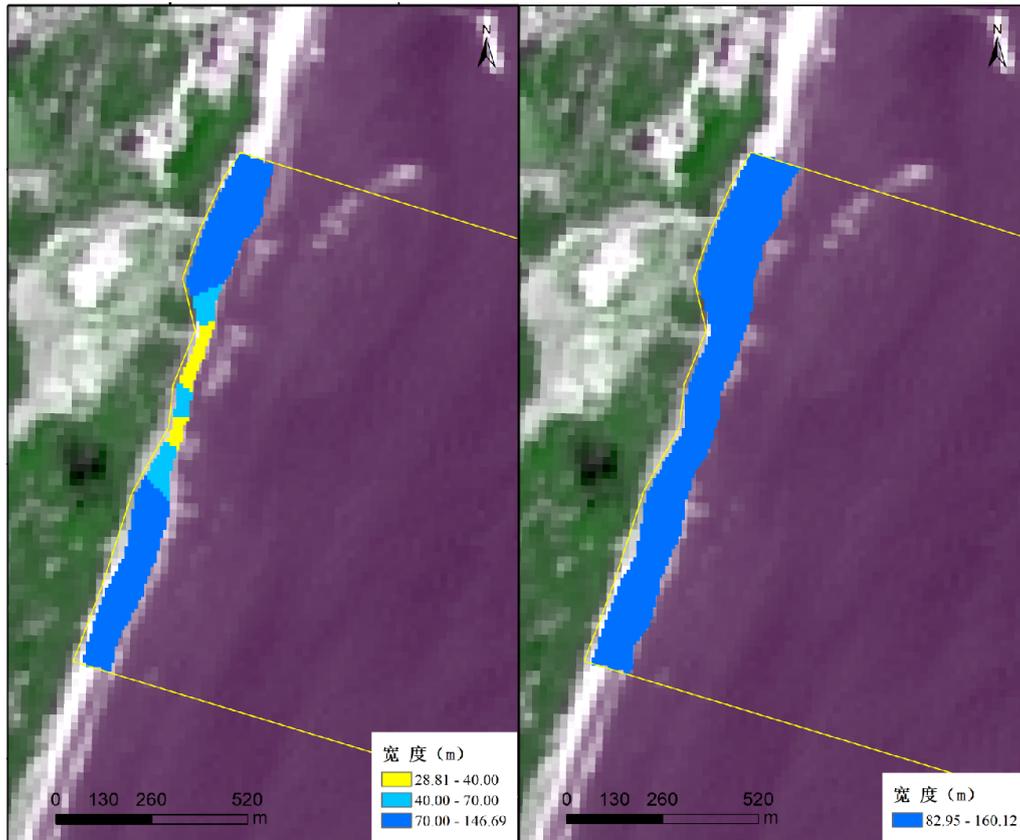


图 5.18 金沙湾工作区干滩宽度空间差异分布图：2020 年（左）和 2021 年（右）

②潮间带宽度

2020 年 11 月（施工前）金沙湾工作区的潮间带宽度范围为 14.15~79.96 m，工作区岸段北段的潮间带较宽，整体宽窄分布不均匀，整个工作区的潮间带宽度平均值为 39.72 m 如图 5.19。2021 年 6 月（施工后）金沙湾工作区的潮间带宽度范围为 27.95~97.58 m，整个工作区的平均值为 56.41 m 如图 5.19，施工后潮间带区域比施工前整体变宽，形状更加平缓均匀，有向海方向移动的趋势。

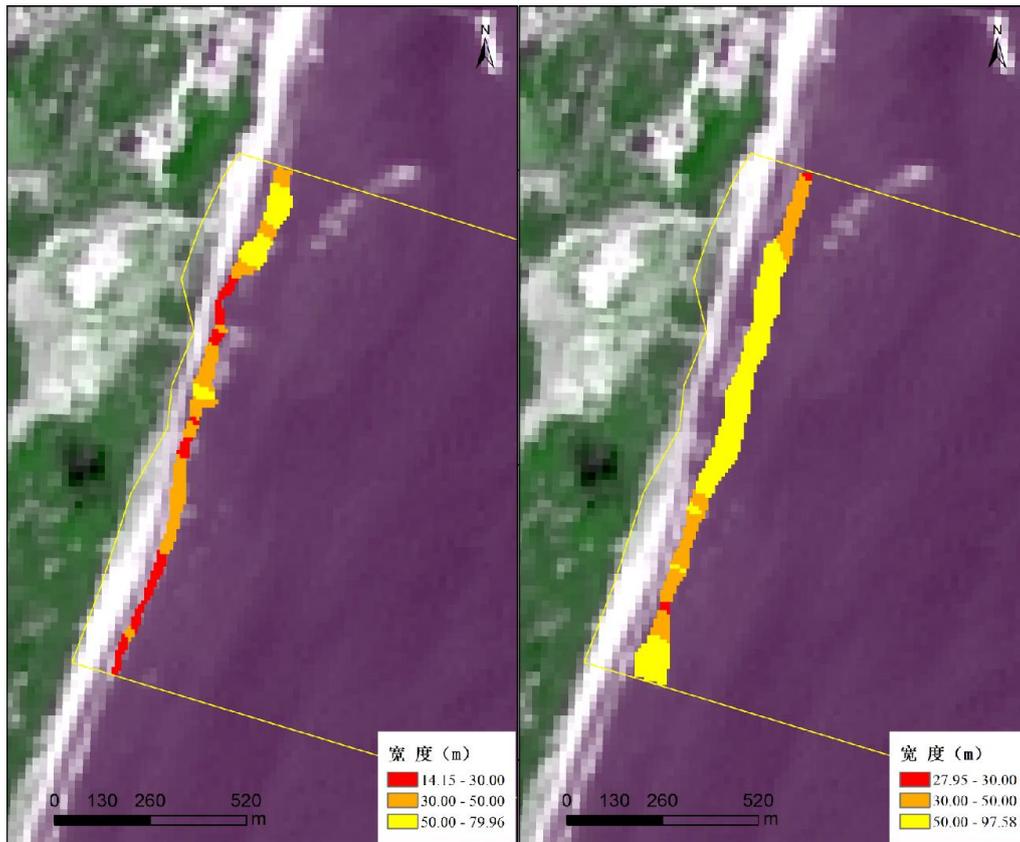


图 5.19 金沙湾工作区潮间带宽度空间差异分布图：2020 年（左）和 2021 年（右）

③潮间带坡度

2020 年 11 月（施工前）金沙湾区潮间带坡度在 $0.13\sim 15.59^\circ$ 范围内如图 5.20 所示，高坡度区域自南向北分沿岸线分布，自岸向海坡度降低，得出工作区潮间带的平均坡度为 3.96° ；2021 年 6 月（施工后）金沙湾工作区潮间带坡度范围为 $0.10\sim 9.91^\circ$ ，低坡度区域面积比施工前有所增加，以 $0\sim 4.5^\circ$ 范围内的低坡度区域为主，整个区域的平均坡度为 2.64° 如图 5.20 所示。

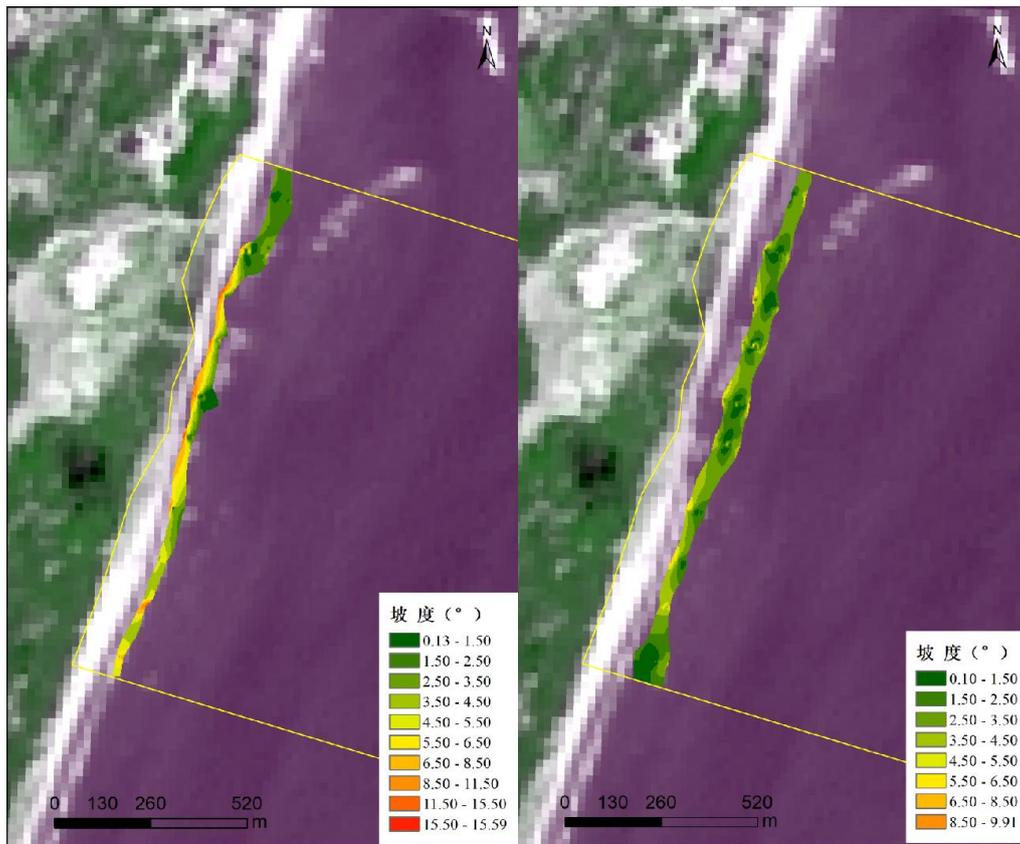


图 5.20 金沙湾工作区潮间带坡度空间差异分布图：2020 年（左）和 2021 年（右）

④沉积物类型

2020 年 11 月（施工前）金沙湾工作区表层沉积物类型以中砂为主，在工作区中间区出现少量粗砂如图 5.21 所示。2021 年 6 月（施工后）金沙湾工作区表层沉积物类型全部为中砂如图 5.22 所示。从整体上来看，施工后沉积物粒径变小。

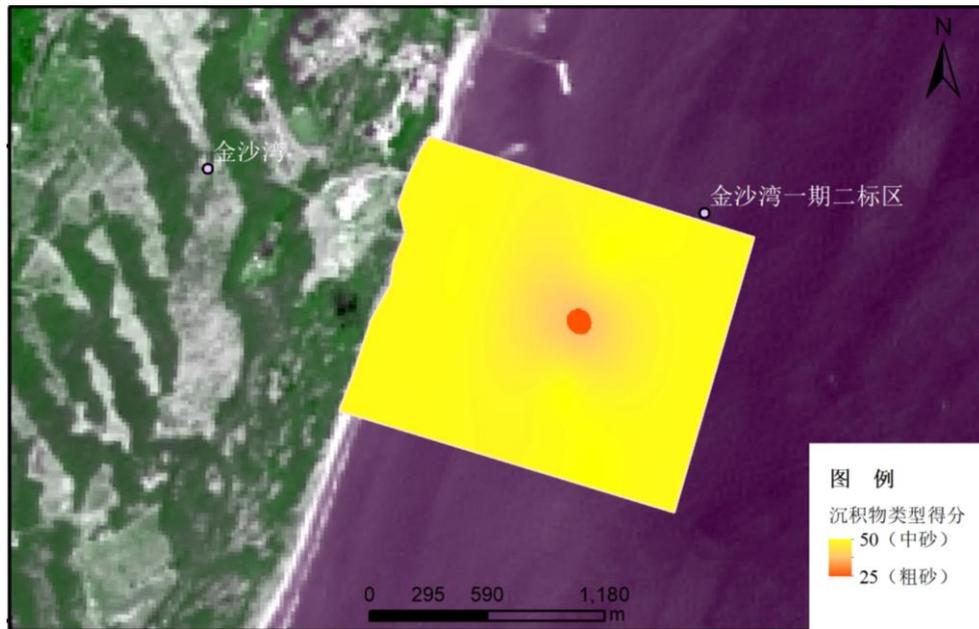


图 5.21 2020 年金沙湾工作区沉积物类型空间差异分布图

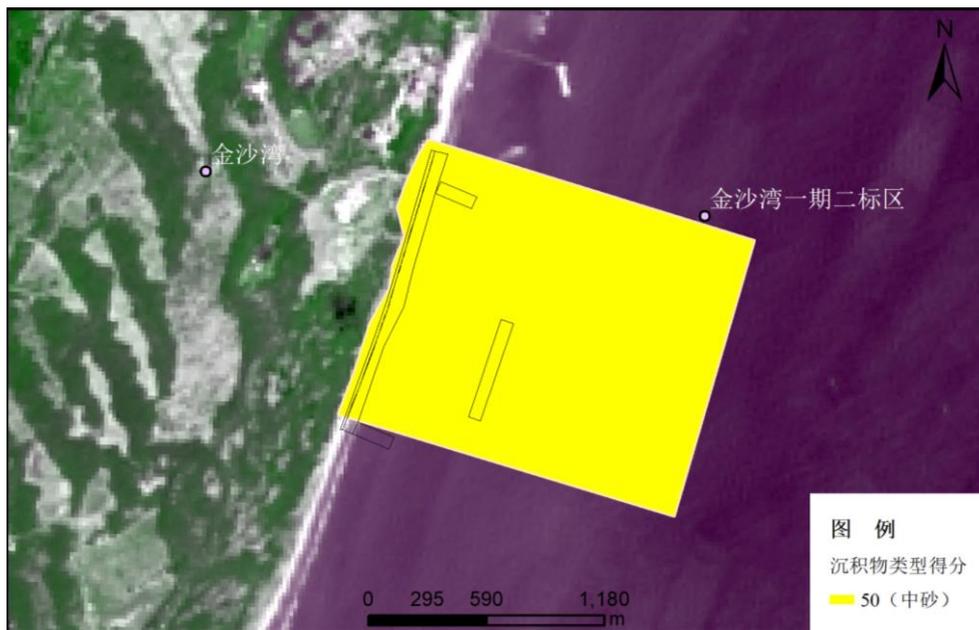


图 5.22 2020 年金沙湾工作区沉积物类型空间差异分布图

⑤沉积物分选度

2020 年 11 月（施工前）金沙湾工作区的沉积物分选度为极好，分选系数 $<0.35\phi$ ；
2021 年 6 月（施工后）金沙湾工作区的沉积物分选度为极好，分选系数 $<0.35\phi$ 。

⑥海滩地貌特征

2020 年 11 月（施工前）金沙湾工作区海滩地貌特征无发育滩肩和 underwater 沙坝，存在岸滩侵蚀陡坎情况；2021 年 6 月（施工后）金沙湾工作区具有发育滩肩与 underwater 沙坝

且无侵蚀陡坎情况。

(2) 环境要素

① 近海海水水质等级

监测分析结果表明,2020年11月(施工前)监测海域中,金沙湾工作区14个监测站中。符合第一类海水水质标准的监测站占总监测站总数的93%,存在1个监测站符合第二类海水水质标准,占监测站总数的7%如图5.23所示。由表5.4可知,金沙湾工作区的Cu单因子标准指数最大值为1.01,根据单因子标准指数,按照表3.7的判断标准可知金沙湾区域的Cu达到轻污染程度。

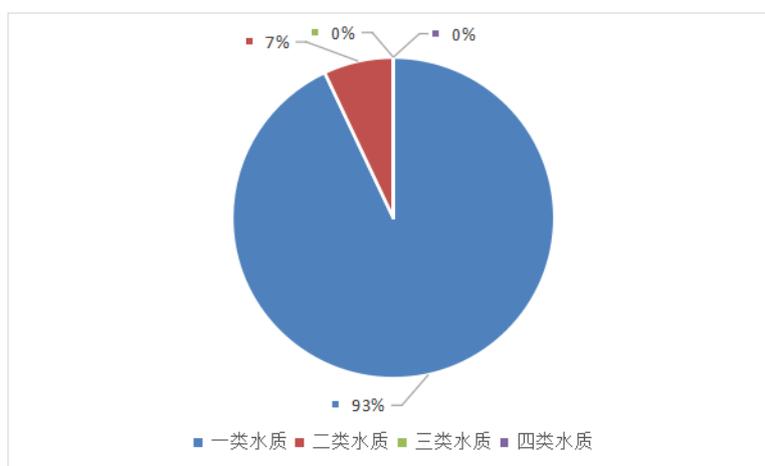


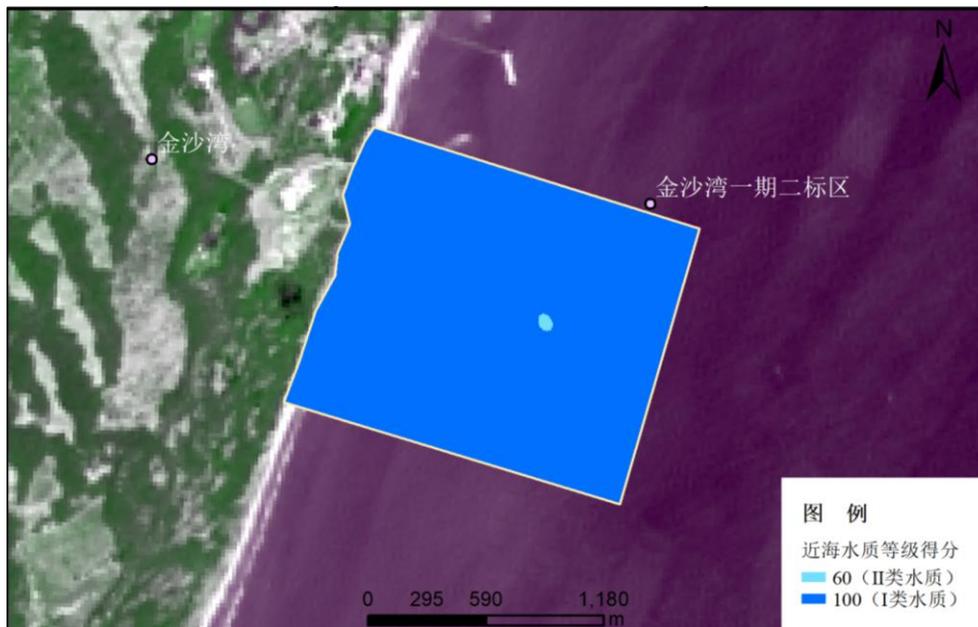
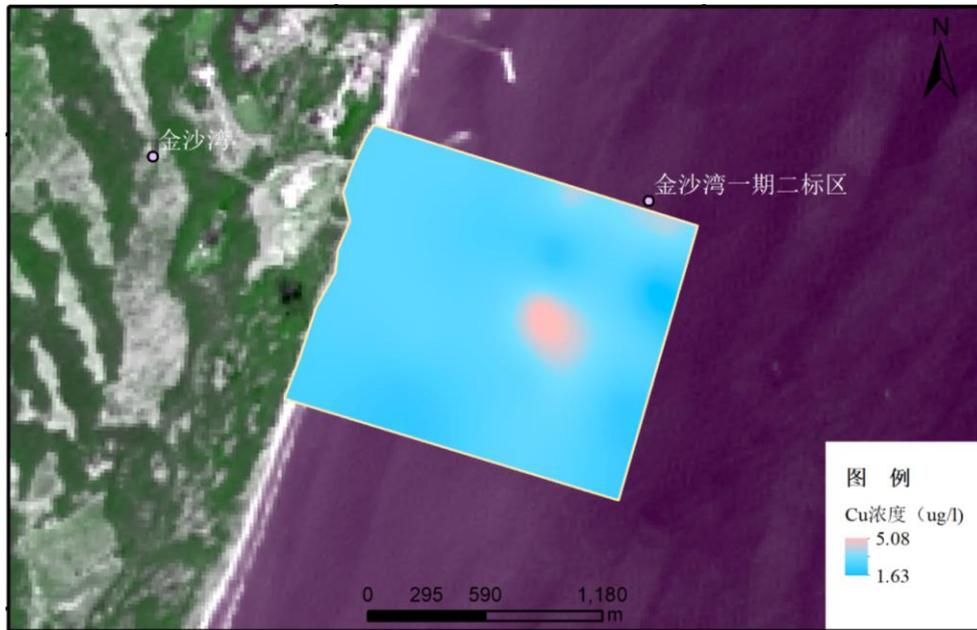
图 5.23 2020 年金沙湾工作区海水水质等级监测站占比图

表 5.4 金沙湾工作区海水水质标准指数计算结果

时间	标准指数	pH	化学需氧量						活性磷 (以 P 计) (mg/L)	挥发性 酚 (以苯 酚计) (mg/L)
			(COD Mn) (mg/L)	镉 ($\mu\text{g/L}$)	铅 ($\mu\text{g/L}$)	铜 ($\mu\text{g/L}$)	锌 ($\mu\text{g/L}$)	砷 ($\mu\text{g/L}$)		
2020 年 11 月	最大值	0.26	0.80	0.31	0.55	1.01	0.64	0.04	-	0.80
	最小值	0.04	0.47	0.14	0.15	0.34	0.26	0.03	-	0.20
	平均值	0.20	0.63	0.19	0.23	0.65	0.38	0.03	-	0.43
2021 年 6 月	最大值	0.33	0.73	0.39	0.59	0.86	0.41	0.05	0.53	0.60
	最小值	0.26	0.63	0.08	0.24	0.14	0.25	0.05	0.33	0.20
	平均值	0.29	0.65	0.28	0.52	0.64	0.36	0.05	0.44	0.50

Cu 浓度超标区域与第二类水质出现的区域相同如图 5.24 和图 5.25 所示,因此 Cu 是影响施工前金沙湾工作区水质的主要因素。2021 年 6 月(施工后)金沙湾工作区共

6 个监测站位，其海水水质均质均达到一类海水水质标准。



②近海沉积物质量等级

2020 年 11 月（施工前）金沙湾工作区海洋沉积物质量等级为第一类；2021 年 6 月（施工后）金沙湾工作区海洋沉积物质量等级为第一类。可得出工程建设对沉积物质量等级影响不大。

（3）海洋生物多样性

①底栖生物物种多样性

2020年11月（施工前），金沙湾工作区底栖动物物种多样性指数为16.2~39.3如图5.26所示，该工作区物种多样性成对称分布，北部和南部底栖生物物种多样性指数较低。2021年6月（施工后），金沙湾工作区底栖生物物种多样性指数为35.1~43.2如图5.27所示，整个工作区底栖生物物种分布均匀，工程建设区域物种多样性指数较高。总体来看施工后底栖生物物种多样性增加。

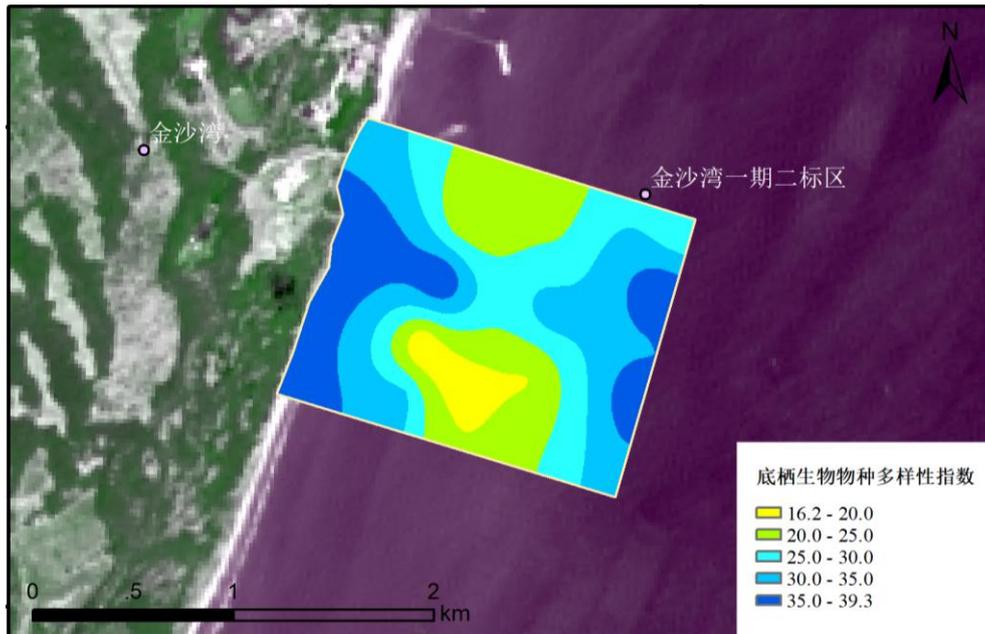


图 5.26 2020 年金沙湾工作区底栖生物物种多样性空间差异分布图

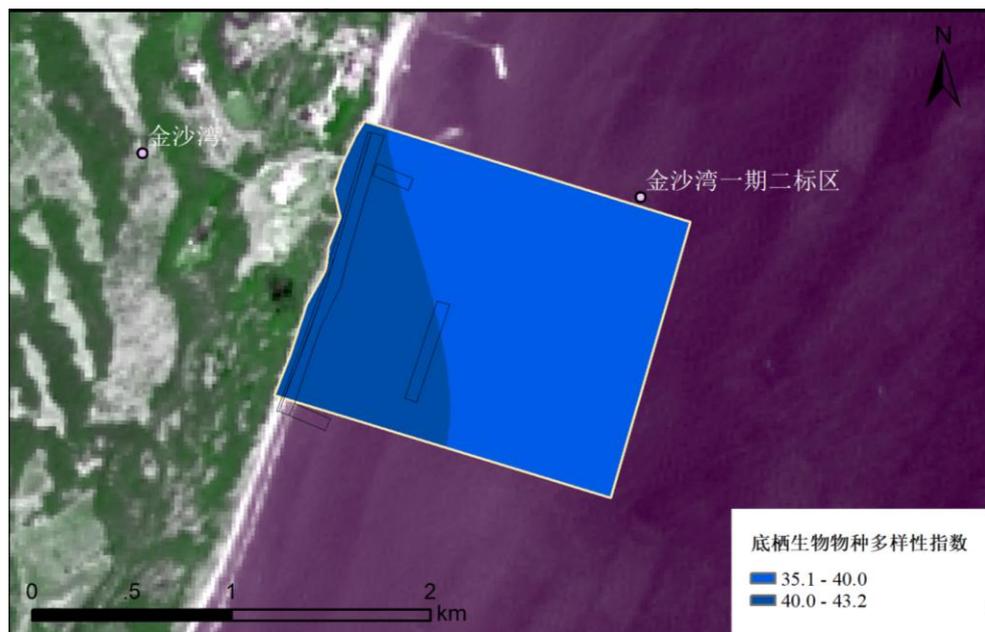


图 5.27 2021 年金沙湾工作区底栖生物物种多样性空间差异分布图

②浮游植物物种多样性

2020年11月（施工前），金沙湾工作区浮游植物多样性指数为26.9~55.2如图5.28所示，该工作区物种分布不均匀，物种多样性较为丰富；2021年6月（施工后），金沙湾工作区浮游植物物种多样性指数为5.6~7.9，整个工作区浮游植物物种分布均匀，物种多样性很低如图5.29所示。施工后该区域浮游植物物种多样性下降的原因是由于工程建设对该工作区浮游植物的生境造成了影响，施工中挖掘、扬沙等操作，使得水体中泥沙含量升高，水质透明度下降，严重抑制了浮游植物的光合作用，导致施工后浮游植物生物多样性锐减^[77]。

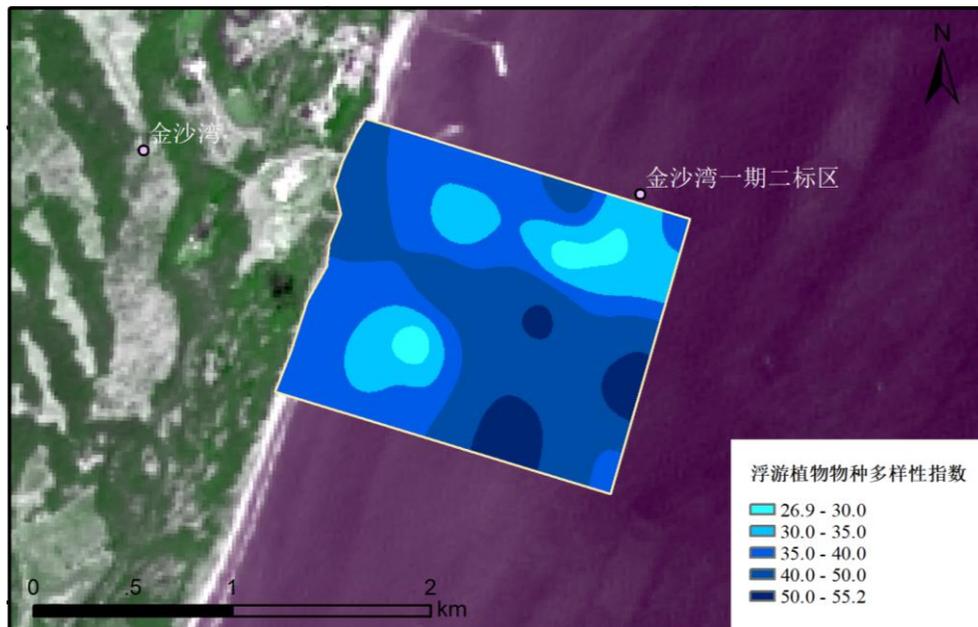


图 5.28 2020 年金沙湾工作区浮游植物物种多样性空间差异分布图

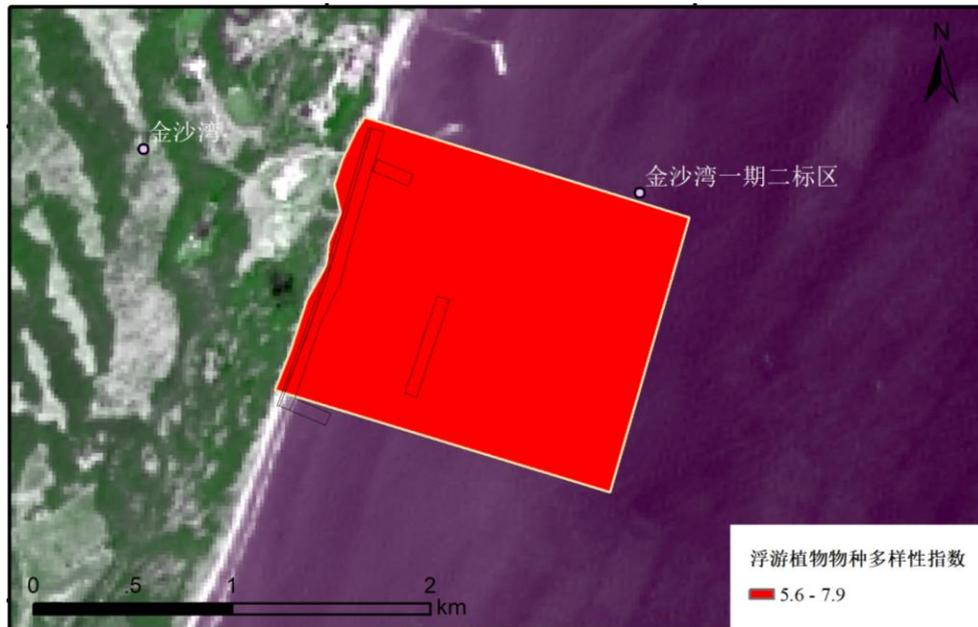


图 5.29 2021 年金沙湾工作区浮游植物物种多样性空间差异分布图

③浮游动物物种多样性

2020 年 11 月（施工前）金沙湾工作区浮游动物多样性指数为 18~50.5 如图 5.30 所示，分布较均匀，靠岸的东南角多样性指数较低，其余大部分区域物种多样性较为丰富；2021 年 6 月（施工后）金沙湾工作区浮游动物多样性指数为 17.0~30.7 如图 5.31 所示，分布规律呈现从海岸向海域阶梯式降低，总体来看施工后比施工前浮游动物物种多样性降低，2021 年 6 月水下沙坝和滩肩补沙修建后，侵占了部分浮游动物的繁衍捕食的栖息地，对海洋环境产生扰动，对浮游动物生存环境影响较大^[79]；在施工过程中直接导致部分浮游动物受到掩埋等损害^[78]；部分工程措施导致海水中泥沙含量升高，悬浮物增多，使得水体更加浑浊，部分具有昼夜活动规律的浮游生物受到影响，影响其捕食、生长发育等方面，降低其生物多样性^[77]。

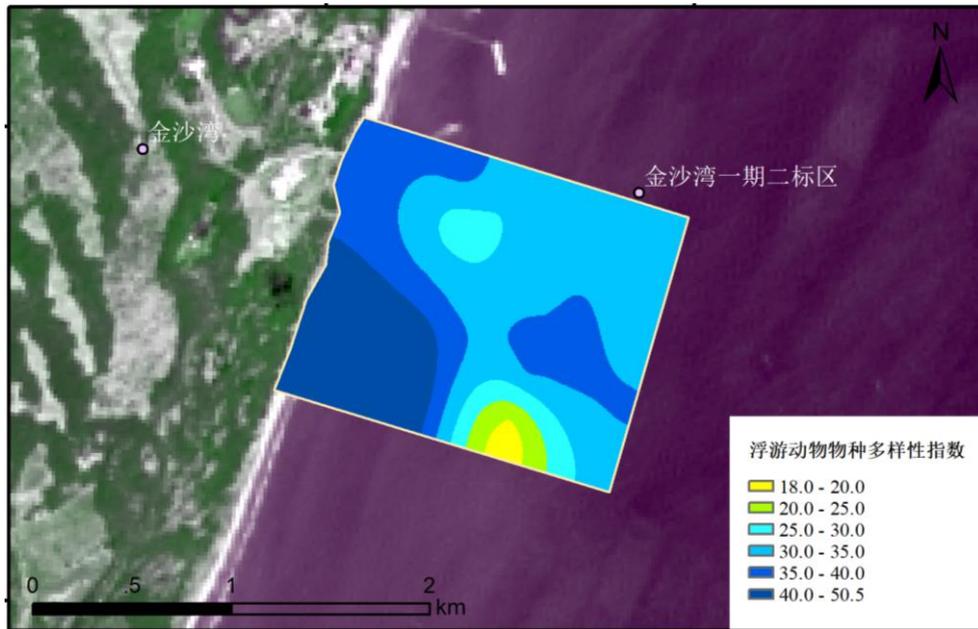


图 5.30 2020 年金沙湾工作区浮游动物物种多样性空间差异分布图

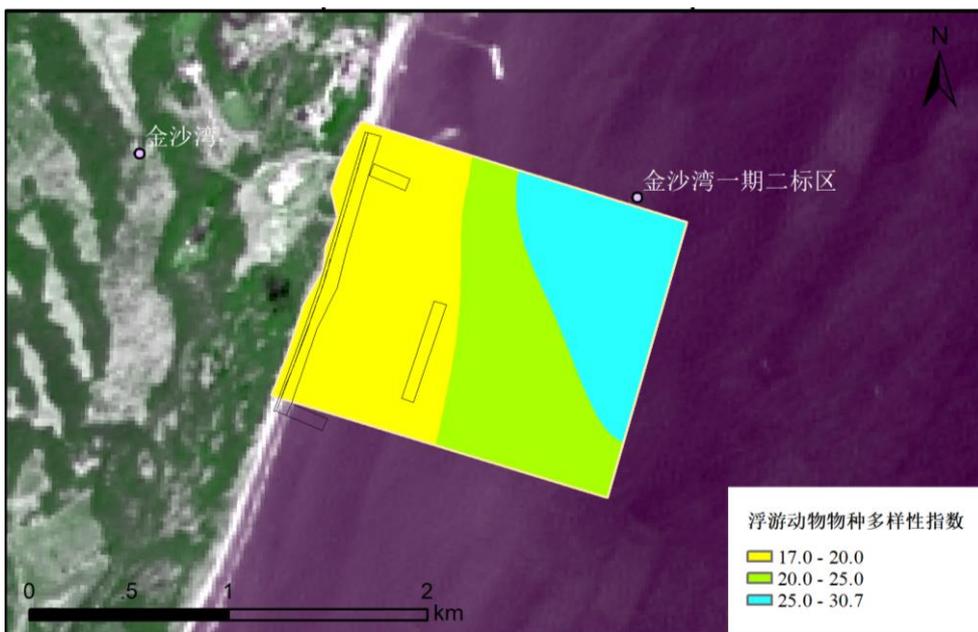


图 5.31 2021 年金沙湾工作区浮游动物物种多样性空间差异分布图

④潮间带生物多样性

2020 年 11 月（施工前），金沙湾工作区潮间带生物物种多样性指数为 0~19.5 如图 5.32 所示，金沙湾工作区潮间带生物在西南角区域的物种多样性指数较高。2021 年 6 月由于工程建设位于潮间带区域，使得大量潮间带生物在工程施工中被掩埋伤害，并且潮间带生境受损被破坏，影响潮间带生物多样性，所以该年数据不做参考^[77]。

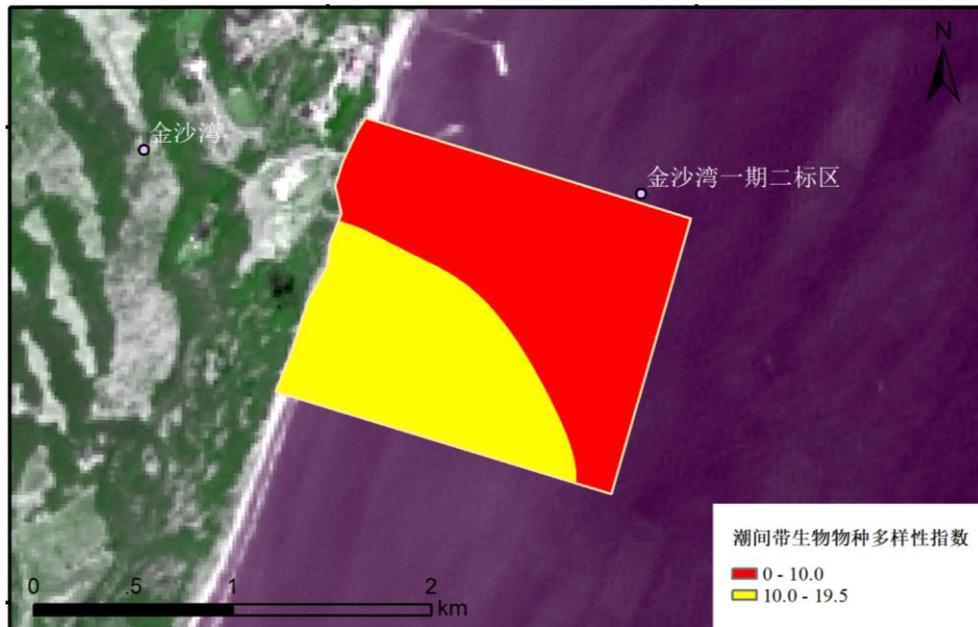


图 5.32 2020 年金沙湾工作区潮间带生物多样性空间差异分布图

①植被总面积变化率和②植被总面积变化率

通过遥感技术提取 2018 年和 2020 年金沙湾工作区后滨植被的面积，通过计算得出 2020 年植被总面积变化率和盖度变化均为 0%，说明 2018 年和 2020 年 6 月施工前后，覆植沙丘工程刚刚完成，植被尚小，还未绿化。2021 年 6 月 5 日，通过遥感技术提取金沙湾工作区域后滨植被面积，通过计算得出植被总面积变化率和盖度变化率为 65% 和 33%。

5.6 本章小结

本章基于 ArcGIS 对指标数据的空间分析，分别对大蒲河口工作区和金沙湾工作区在 2020 年（施工前）和 2021 年（施工后）的评价指标数据情况进行对比分析，得出以下主要结论：

（1）防灾减灾效益方面

总体来说工程建设后两个工作区在防灾减灾效益方面具有相同的变化规律，波高衰减率提高了 63%，岸滩蚀淤平均速率增加了 83~100 cm/a，岸线位置平均变化率增加了 38.6~45.9 m/a，海岸稳定性从施工前的侵蚀状态变为施工后的淤积状态。向海开阔度和岸线长度施工前后没有明显变化。工程建设改变了水动力方向，减缓了海浪对岸滩的冲刷和侵蚀强度，一定程度提高了海岸带的防灾减灾能力。

（2）生态环境效益方面

总体来说工程建设后两个工作区在生态环境效益方面具有相同的变化规律，干滩

宽度的平均值增加了 24.08~25.77 m，潮间带区域变得更加平整均匀，整体有向海移动趋势，潮间带坡度施工后低整体坡度区域面积增加，近海海水水质达到第一类海水水质等级标准的监测站占比从 93%提高到 100%，海洋生物多样性因工程建设对其生存环境的影响略有下降，后滨植被总面积变化率和盖度变化率均提高了 33%~65%，沉积物质量等级和分选度没有明显变化，沉积物粒径整体上有变小趋势。生态环境效益有所提高。

第六章 金沙湾及大蒲河口工作区保护修复工程综合效果评估结果

果评估结果

6.1 大蒲河口工作区保护修复工程综合效果评估结果

6.1.1 防灾减灾效益结果

如图 6.1 所示, 施工前大蒲河口工作区防灾减灾效益评估结果得分为 42.08, 全区评价等级为一般; 如图 6.2 所示, 施工后大蒲河口工作区防灾减灾效益评估结果得分范围为 58.70~72.07, 评价等级升级为一般和良好, 其中评价等级为一般区域面积占评价区面积的 0.08%, 评价等级为良好区的面积占评价区面的 99.92% 如图 6.3 所示。表明施工后大蒲河口工作区防灾减灾等级基本从一般变良好。

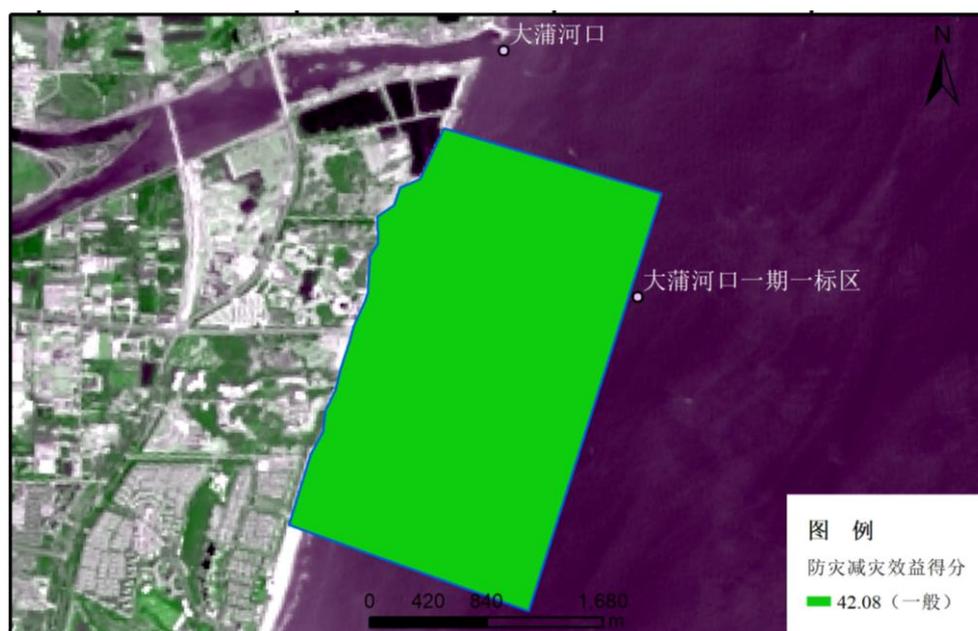


图 6.1 2020 年大蒲河口工作区防灾减灾效益图

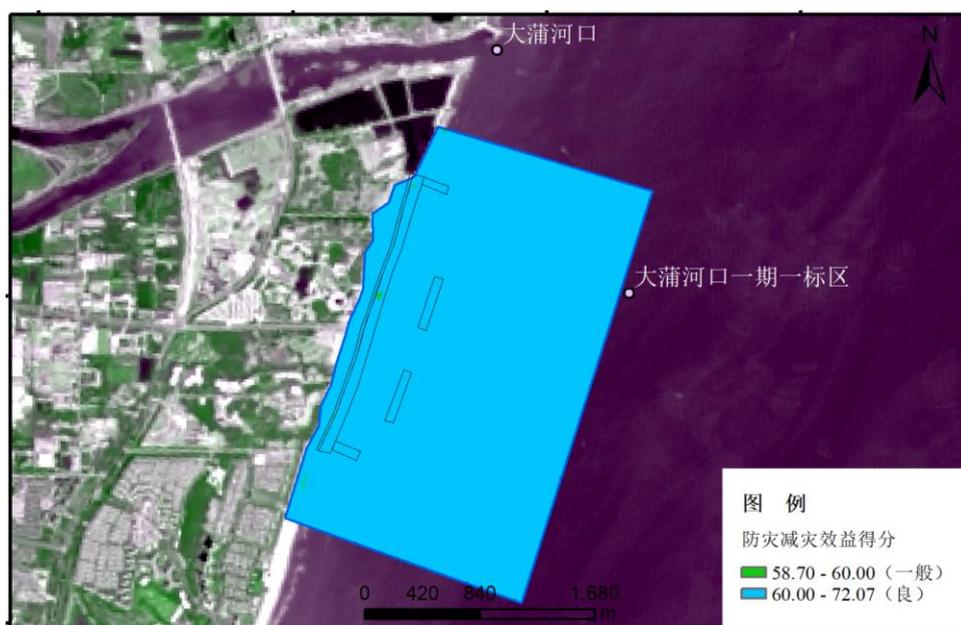


图 6.2 2021 年大蒲河口工作区防灾减灾效益图

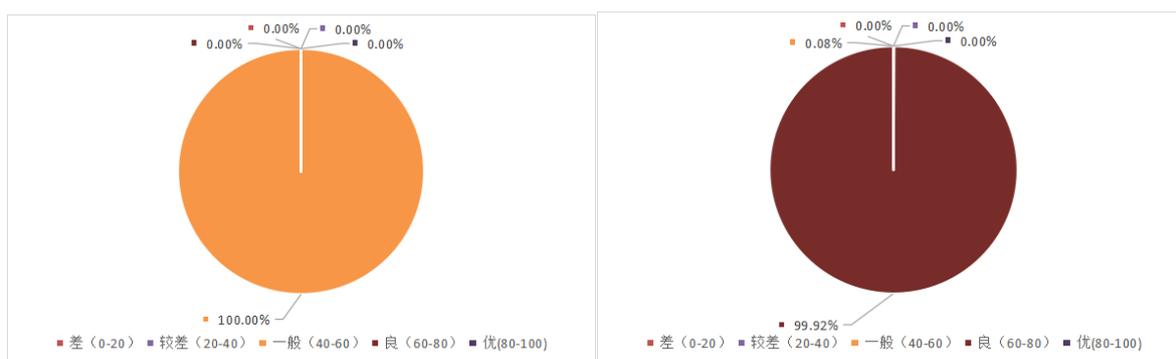


图 6.3 大蒲河口工作区防灾减灾效益等级面积占比图：2020 年（左）和 2021 年（右）

6.1.2 生态环境效益结果

如图 6.4 所示，施工前大蒲河口工作区生态环境效益结果评价等级为一般，评分范围为 47.94~56.84；如图 6.5 所示，施工后大蒲河口工作区生态环境效益评价结果升级为一般和良好，评分范围为 47.86~62.17，面积占比分别为 99.98%和 0.02%，如图 6.6 所示，相比施工前效果等级为良的区域增加了。因此，施工后大蒲河口工作区的生态环境效益比施工前显著增加，海岸带保护修复工程对工作区一年内的生态环境效益有显著提高，能保护和维持近海的生态环境。

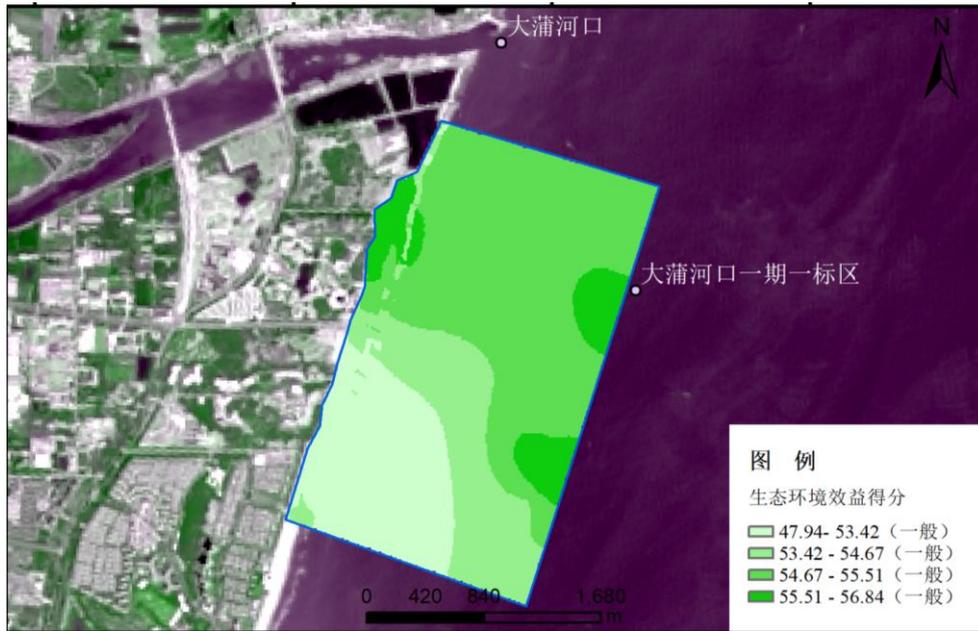


图 6.4 2020 年大蒲河口工作区生态环境效益图

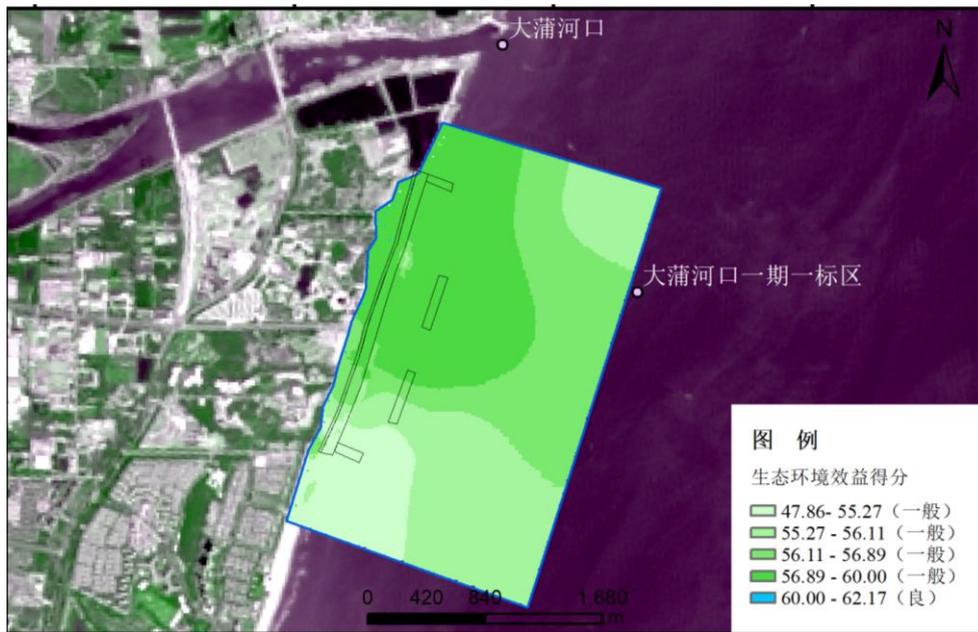


图 6.5 2021 年大蒲河口工作区生态环境效益图



图 6.6 大蒲河口工作区生态环境效益等级占比图：2020 年（左）和 2021 年（右）

6.1.3 大蒲河口工作区综合评估结果与影响因素分析

(1) 大蒲河口工程综合评价结果分析

大蒲河口工作区施工前（2020 年）综合效果评价得分范围为 46.74~49.04 如图 6.7 所示；施工后（2021 年）综合效果评价得分范围为 57.46~66.64 如图 6.8 所示。总体来看保护修复工程对大蒲河口工作区的防灾减灾能力和生态环境效益有一定程度的提高。

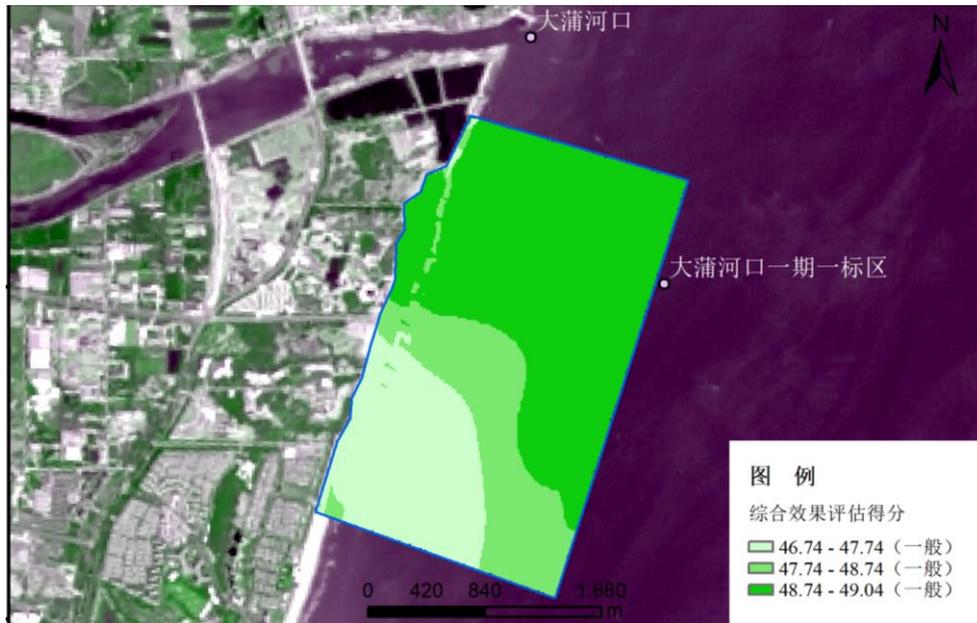


图 6.7 2020 年大蒲河口工作区综合评价效果等级图

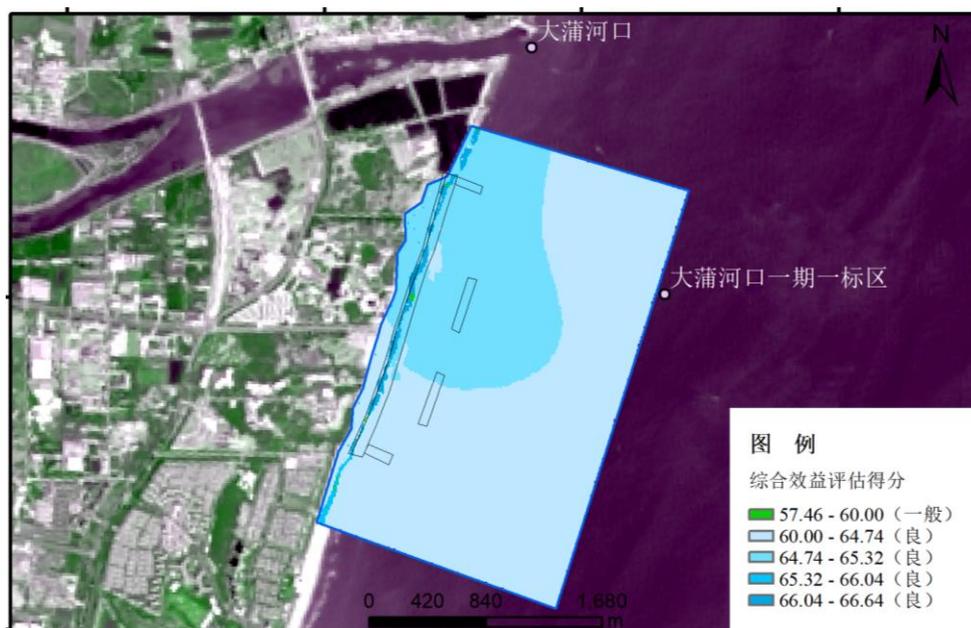


图 6.8 2021 年大蒲河口工作区综合评价效果等级图

大蒲河口工作区施工前全区域评价等级为一般，评价区域该等级的面积为 2.8667 km² 如表 6.1 所示，占该评价区面积的 100% 如图 6.9 所示；施工后全区域的评价等级分为一般和良好，各评价等级的面积分别为 0.0022 km² 和 2.8761 km² 如表 6.1 所示，分别占该评价区面积的 0.08% 和 99.92% 如图 6.9 所示，施工后大蒲河口工作区相比施工前综合评估分数变高，并且增加了等级为良的区域面积，表明工程建设对该区域的防灾减灾效益和生态环境效益的提高起到了促进作用。

表 6.1 大蒲河口工作区综合评价等级统计表

级别	施工前（2020 年）		施工后（2021 年）		施工后面积增 长的百分比 （%）
	面积（km ² ）	比例（%）	面积（km ² ）	比例（%）	
差	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00
较差	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00
一般	2.8667	100	0.0022	0.08	-99.92
良	0.0000	0.00	2.8761	99.92	99.92
优	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00

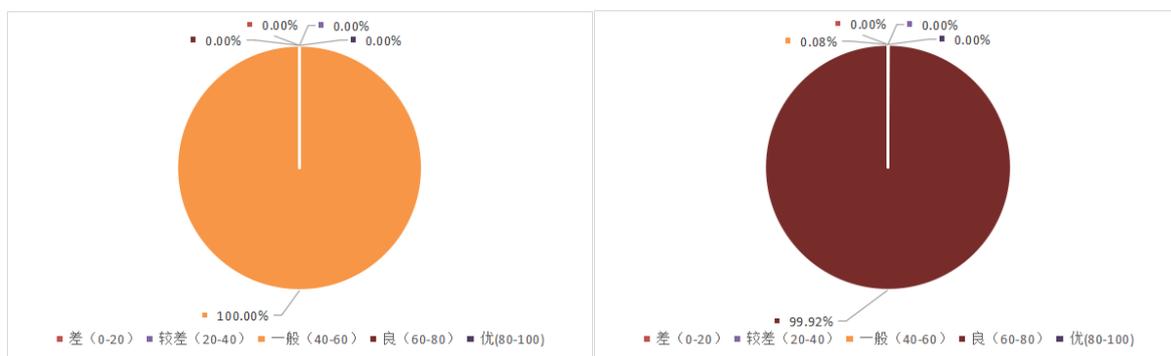


图 6.9 大蒲河口工作区综合效果评价等级占比图：2020 年（左）和 2021 年（右）

(2) 大蒲河口工作区工程综合评价结果影响因素分析

将施工后的大蒲河工作区综合评价结果与施工前的综合评价结果作差如图 6.10 所示，施工后综合效果明显变好的区域主要在位于后滨、沙滩以及修复工程区域，从岸线向海方向修复效果呈现出阶梯状下降的趋势，可以得出工程建设主要对海岸带的修复保护效果明显，对海域环境产生的影响相对较小。

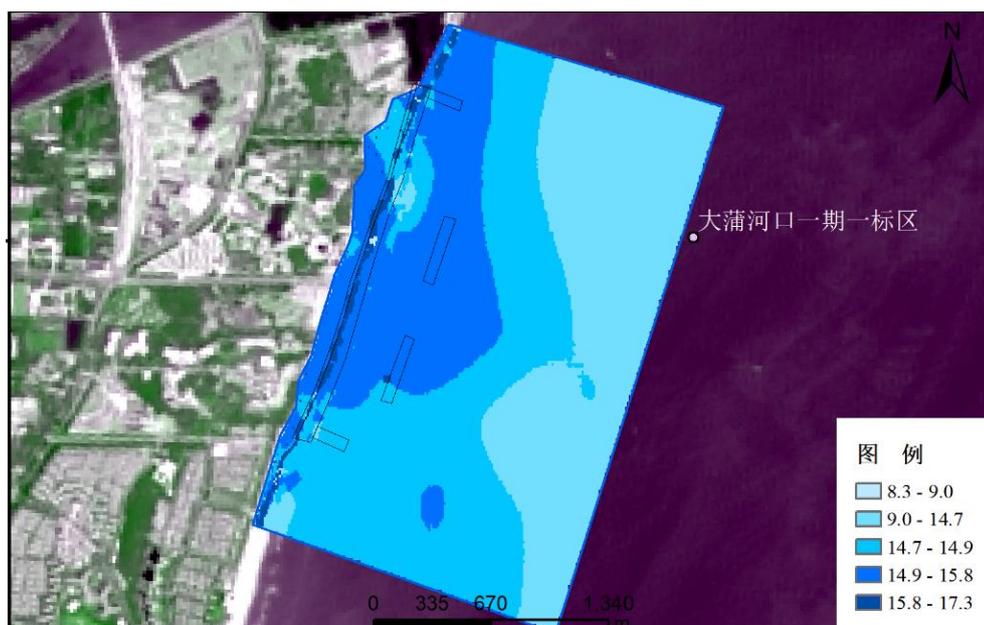


图 6.10 大蒲河口工作区综合效益施工前后分数差值图

①施工后大蒲河口工作区的综合评价评价结果的变好与该区域的波高衰减率、岸线位置变化速率、沉积物类型、海滩地貌特征、近海海水水质等级和后滨植被指标有关。水下沙坝工程的修建使水下沙坝高程从 2020 年 11 月-2.45 m 到 2021 年 6 月-2.29 m，使海水流速到达该处后减缓，提高波高衰减率，降低海水对海岸的侵蚀影响；覆植沙丘修复措施使后滨植被的面积和盖度有所增加，可抵挡一定海浪的侵蚀，保护海滩不被破坏，提高海岸带的防灾减灾能力。同时由于水下沙坝向岸侧的水动力变小，而水动力是搬运沉积物的主要作用力，使得施工后该区域的沉积物类型细砂和中细砂

占比增大。近海海水水质等级由施工前小部分区域存在由于 Cu 超标导致的二类水质，施工后水质等级全部为一类水质，生态环境效益提高。

②施工后评估结果下降的指标是海洋生物多样性。2021 年 6 月水下沙坝和砂质岬头修建后，使工程周围的水动力不稳对海洋环境产生扰动，以及施工过程中对生物的伤害等原因，使得浮游植物和浮游动物多样性下降，该时期浮游植物生物多样性得分从 30.08 降低至 16.78，浮游动物多样性得分从 33.45 降低至 17.66，对底栖生物影响较小。

③沉积物分选度和沉积物质量等级评价指标在施工前后评价结果相同，工程建设对该指标没有影响，不影响评价结果。

6.2 金沙湾工作区保护修复工程综合效果评估结果

6.2.1 防灾减灾效益结果

如图 6.11 所示，施工前金沙湾工作区防灾减灾效益评价结果得分为 31.65，全区评价等级为较差；如图 6.12 所示，施工后金沙湾工作区防灾减灾效益评价结果评分范围为 48.33~61.65，评价等级升级分为一般、良好，其中评价等级为一般区域面积占工作区面积 0.04%，良好区域面积占工作区面积的 99.6%，如图 6.13 所示。表明施工后金沙湾工作区海岸的防灾减灾能力基本上由一般变为良好，防灾减灾效益得到明显提高。

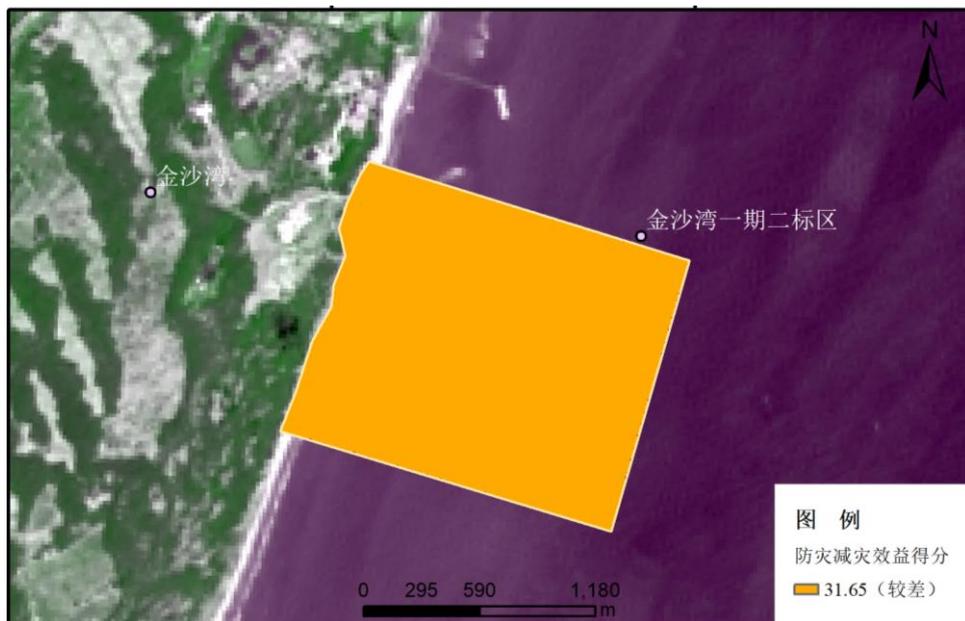


图 6.11 2020 年金沙湾工作区防灾减灾效益图

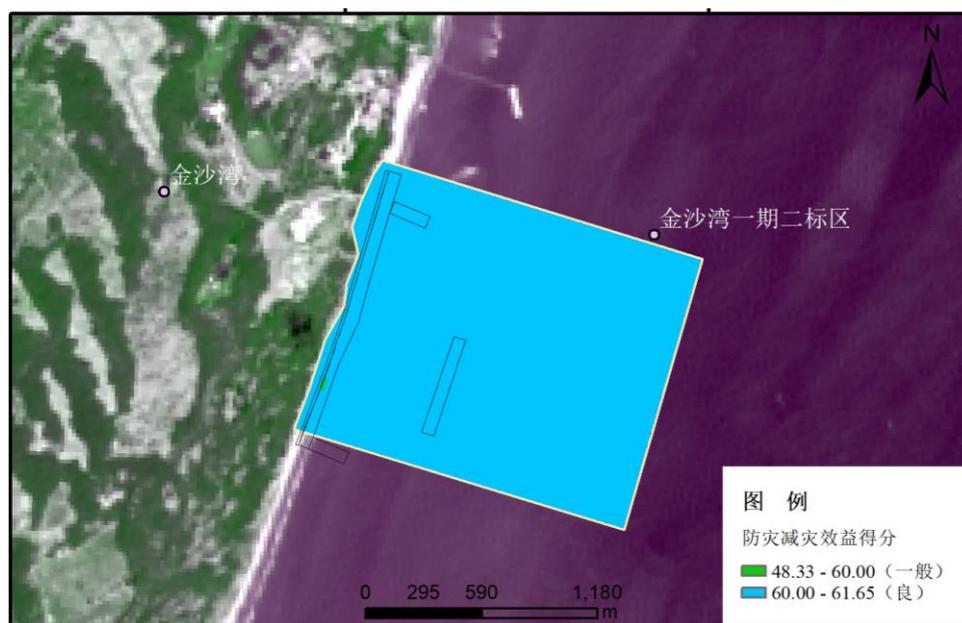


图 6.12 2021 年金沙湾工作区防灾减灾效益图

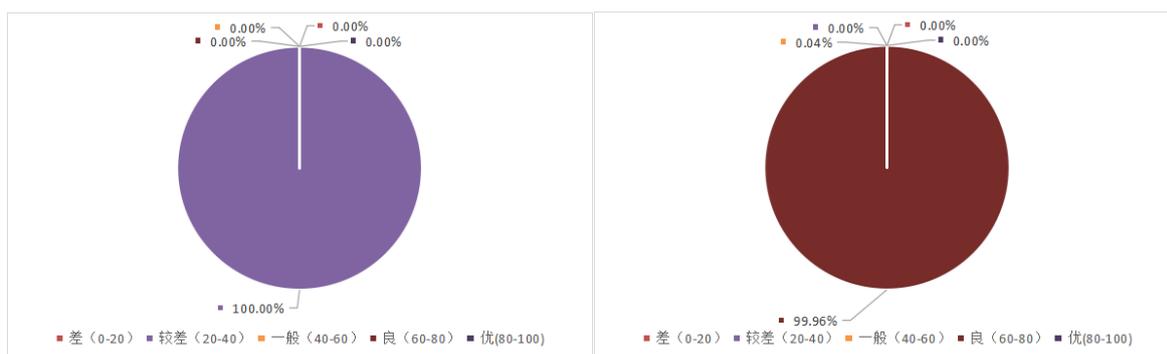


图 6.13 金沙湾工作区防灾减灾效益等级占比图：2020 年（左）和 2021 年（右）

6.2.2 生态环境效益结果

如图 6.14 所示，施工前金沙湾工作区海洋生态效益评分 46.69~55.10，全区评价等级为一般；施工后金沙湾工作区海洋生态效益评分范围为 48.03~49.73，全区评价结果为一般如图 6.15 所示。施工前后该区域等级为一般的面积占比均为 100%如图 6.16 所示，因此施工后金沙湾工作区的生态环境效益与施工前基本相同。

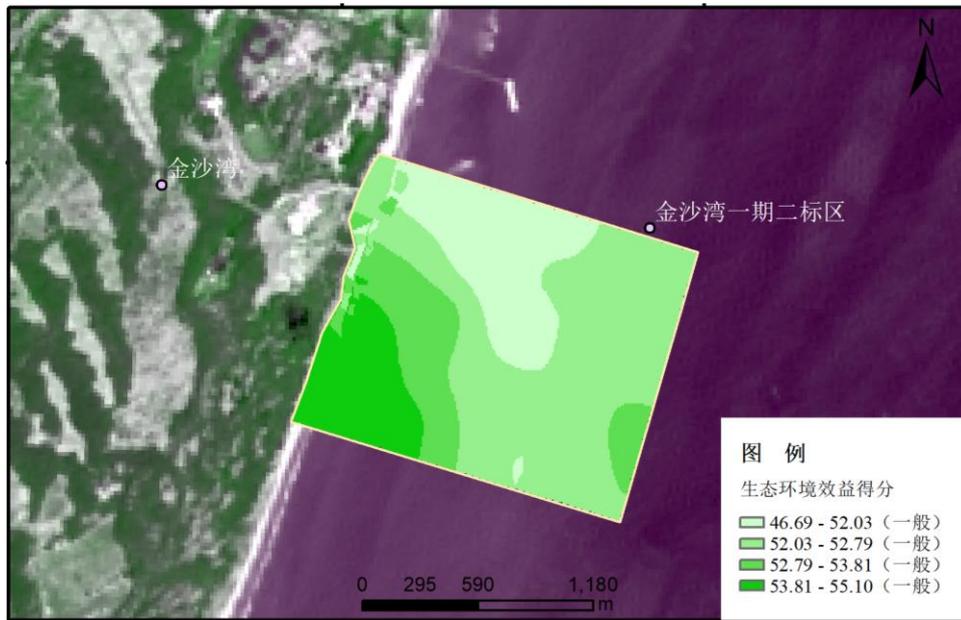


图 6.14 2020 年金沙湾工作区生态环境效益图

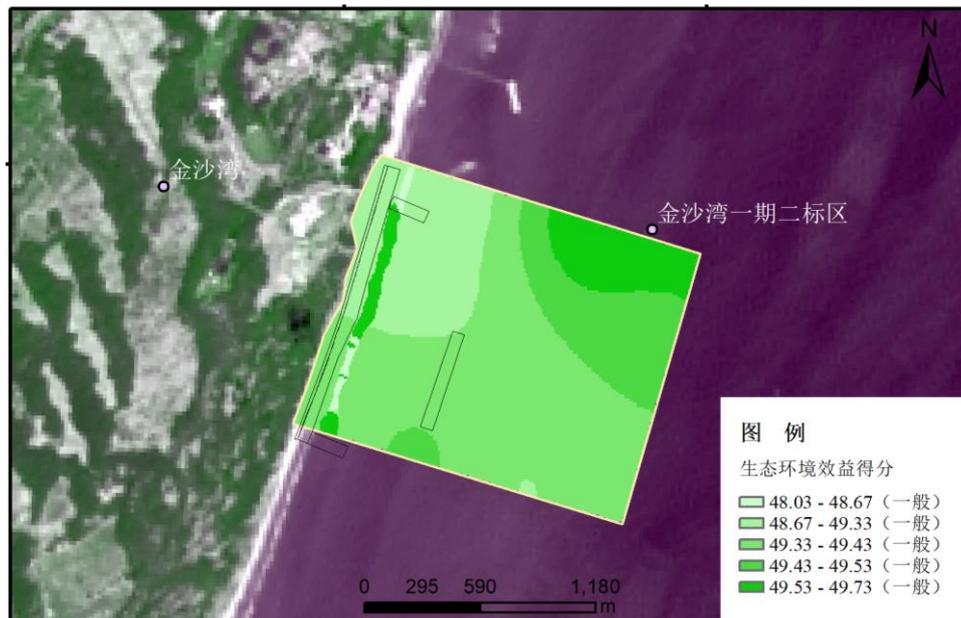


图 6.15 2021 年金沙湾工作区生态环境效益图

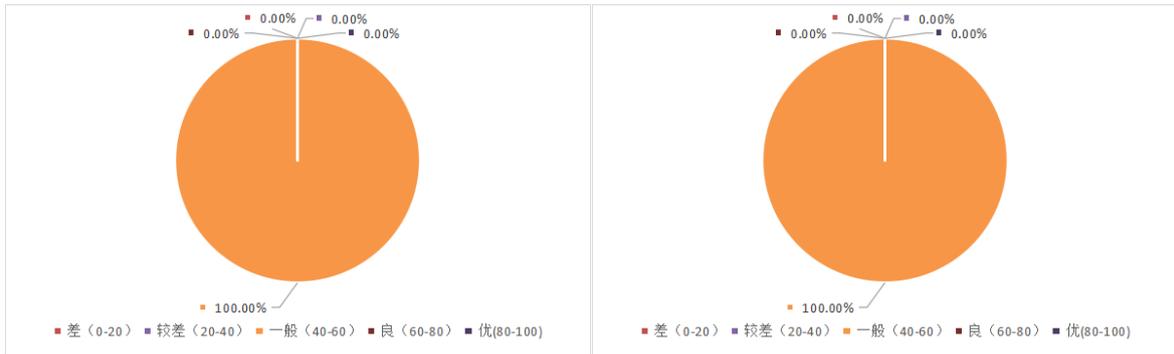


图 6.16 金沙湾工作区海洋生态效益等级占比图：2020 年（左）和 2021 年（右）

6.2.3 金沙湾工作区综合评估结果与影响因素分析

(1) 金沙湾工程综合评价结果分析

金沙湾工作区施工前（2020 年）综合效果评价得分范围为 39.80~41.96 如图 6.17 所示；施工后（2021 年）综合效果评价得分范围为 52.25~57.14 如图 6.18 所示。总体来看保护修复工程对金沙湾工作区的防灾减灾能力和生态环境效益有一定程度的提高。

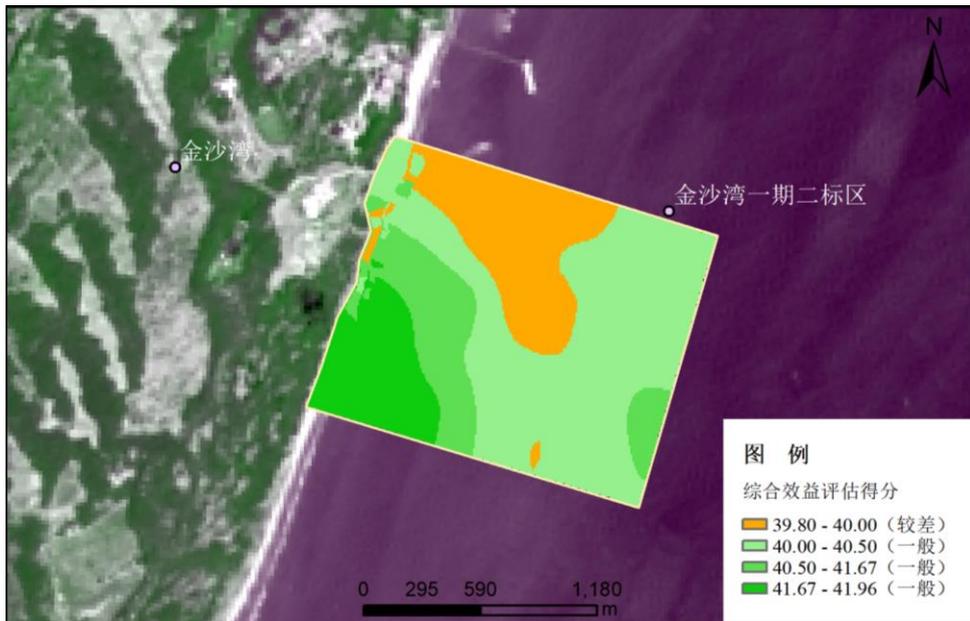


图 6.17 2020 年金沙湾工作区综合评价效果等级图

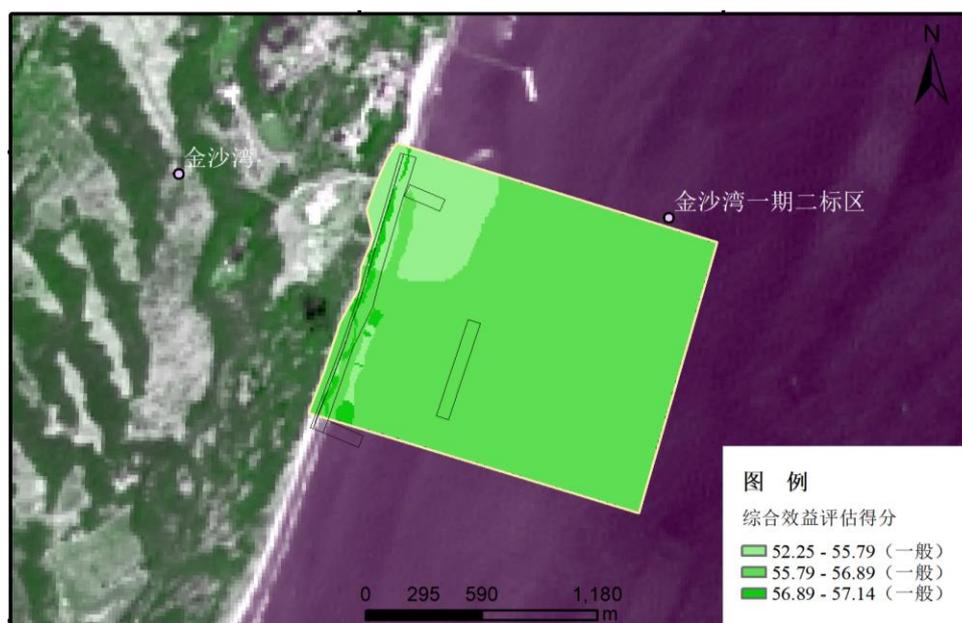


图 6.18 2021 年金沙湾工作区综合评价效果等级图

金沙湾工作区施工前全区域评价等级分为较差和一般，较差等级区域面积为 0.4524 km^2 如表 6.2 所示，占该工作区面积的 23.2% 如图 6.19 所示，一般等级区域面积为 1.4961 km^2 如表 6.2 所示，占该工作区面积的 76.8% 如图 6.19 所示；施工后全区综合评价等级为一般，一般等级区域面积为 1.95 km^2 如表 6.2 所示。海岸带修复工程建设后金沙湾工作区相比施工前综合评估分数有所提高，施工前评价结果为较差的区域变成一般，说明此修复工程也改善了金沙湾工作区的防灾减灾、海洋生态环境等综合效益。

表 6.2 金沙湾工作区综合评价等级统计表

级别	施工前（2020 年）评估工作区		施工后（2021 年）		施工后面积增 长的百分比 (%)
	面积 (km^2)	比例(%)	面积 (km^2)	比例(%)	
差	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00
较差	0.4524	23.2	0.0000	0.00	0.00
一般	1.4961	76.8	1.9508	100	0.00
良	0.0000	0.00	0.0000	0.00	100
优	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00

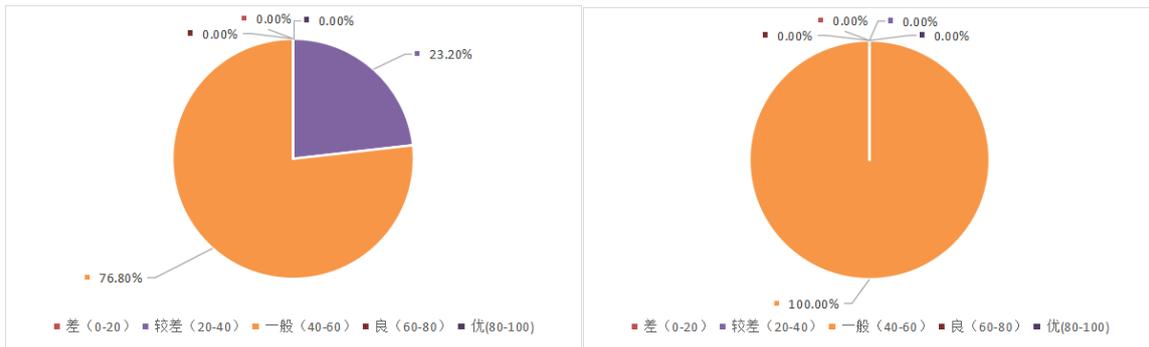


图 6.19 金沙湾工作区综合效果评价等级占比图：2020 年（左）和 2021 年（右）

(2) 金沙湾工作区工程综合评价结果影响因素分析

将施工后的金沙湾工作区综合评价结果与施工前的综合评价结果作差如图 6.20 所示，金沙湾工作区的东偏北区域施工后综合效果明显提升，与近海海水水质等级施工前二类水质区域位置相同，说明工程建设后该区域水质变好，提高了生态环境效益。从海岸北侧砂质岬角海域，向南方向修复效果变弱，从岸线向海方向修复效果越来越弱，这是由于海浪受到砂质岬角的阻隔，波浪经过该区域后强度减弱，水动力变小影响了近海岸生态环境，使得该区域海洋生物多样性下降，其中浮游植物和潮间带生物多样性明显降低。

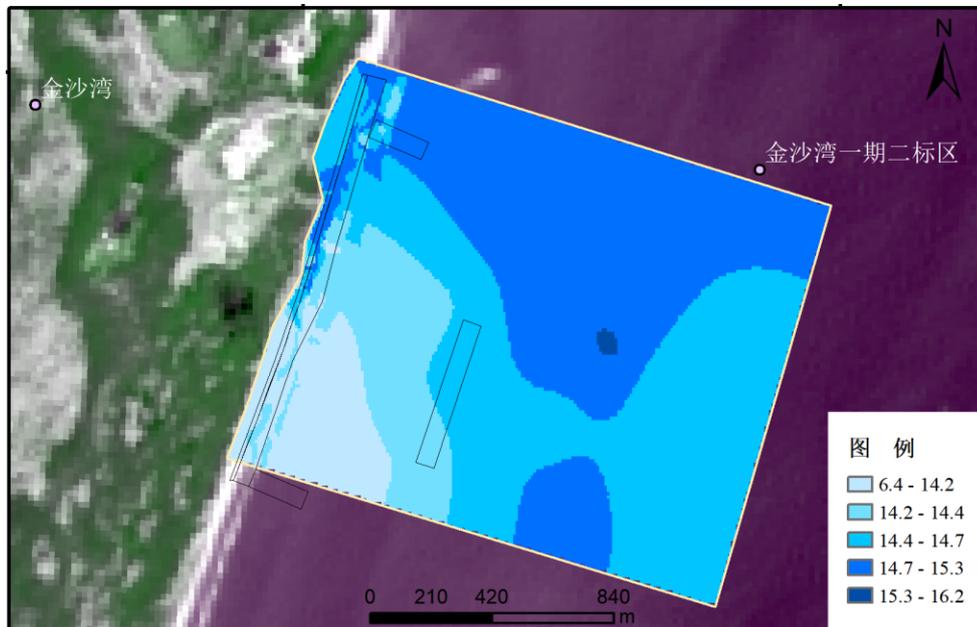


图 6.20 金沙湾工作区综合效益施工前后分数差值图

①施工后金沙湾工作区的综合评价结果的变好与该区域的波高衰减率、岸线位置变化速率、干滩宽度、潮间带宽度、海滩地貌特征和近海海水水质等级评价指标有关。水下沙坝工程的修建使水下沙坝高程从 2020 年 11 月-4.41m 到 2021 年 6 月

-4.37m,使海水流速到达该处后减缓,提高波高衰减率,降低海水对海岸的侵蚀影响;近海海水水质等级由施工前小部分区域存在由于 Cu 超标导致的二类水质,施工后水质等级全部为一类水质,生态环境效益提高。

②施工后评估结果下降的指标是海洋生物多样性。2021年6月水下沙坝和砂质岬头修建后,使工程周围的水动力不稳对海洋环境产生扰动,以及施工过程中对生物的危害等原因,对浮游植物和浮游动物的生存环境影响较大,该时期浮游植物多样性得分从55.2降低至7.9,浮游动物多样性得分从50.5降低至30.7,对底栖生物影响较小。

③沉积物分选度和沉积物质量等级评价指标在施工前后评价结果相同,表面工程建设对该指标没有影响,不影响评价结果。

6.3 本章小结

本章运用 ArcGIS 对各层评价指标结合指标权重进行分区域的空间叠加,得出大蒲河工作区的防灾减灾效益评价结果、生态环境效益结果和综合评价结果;得出金沙湾工作区的防灾减灾效益评价结果、生态环境效益结果和综合评价结果。通过对2020年(施工前)和2021年(施工后)评价结果进行对比,得到如下结论:

(1) 大蒲河口工作区施工前、后变化情况

大蒲河口工作区防灾减灾效益和生态环境效益施工前的评价等级均为一般,施工后防灾减灾效益方面评价等级为良好的区域面积占工作区总面积的99.92%;生态环境效益评价等级为良好的区域面积占工作区面积的0.02%。总体来说防灾减灾效益和生态环境效益施工后均有提高,但防灾减灾效益受工程建设的影响较大,提升明显。

从综合评价结果来看大蒲河口工作区综合评价得分范围从2020年的46.74~49.04提高到2021年的57.46~66.46,施工前工作区评价等级为一般,该等级面积占比100%,施工后增加了评价等级为良的区域,该等级面积占比99.92%。施工后比施工前的大蒲河口工作区综合评价效果有所提高。

(2) 金沙湾工作区施工前、后变化情况

金沙湾工作区防灾减灾效益结果评价等级施工前为较差,施工后防灾减灾效益评价等级升级为一般和良好,其中评价等级为良好的区域面积占工作区总面积的99.96%;生态环境效益全区域的评价等级施工前的和施工后均为一般。总体来说防灾减灾效益施工后有明显的提高,生态环境效益施工后变化不明显。

金沙湾工作区综合评价得分范围从2020年的39.80~41.96提高到2021年的57.46~66.46,施工前存在综合评价等级为较差的区域,该等级区域面积占比为23.2%,施工后全工作区综合评价等级提升为一般。施工后比施工前的金沙湾工作区综合评价效果有所提高。

第七章 结论与展望

7.1 结论

(1) 防灾减灾能力有所提高

本项目中实施了水下沙坝、滩肩补沙、覆植沙丘和砂质岬头等保护措施,工程区的近岸流态将会发生一定的变化,从而在工程区沙坝和岬头处产生一定的冲刷和淤积影响,金沙湾工作区沙坝周围呈冲刷状态,但除北侧沙坝外,其余沙坝内靠岸线侧均基本维持动态平衡,有利于岸线保护;大蒲河河口工作区北侧岬头周围略微冲刷,由于突堤限制横向输沙的作用,南侧出现淤积区域,除以上所述,近海岸线区域基本呈动态平衡状态。

总的来说,金沙湾和大蒲河口工作区施工前后在防灾减灾效益方面具有相似的变化规律。水下沙坝工程的修建使水下沙坝高程变高,海水流速到达该处后减缓,波高衰减率提高了 63%;砂质岬头能改变海洋水动力方向,从而减轻海水对沙滩的冲刷,增强了海岸的稳定性。滩肩补沙使干滩宽度增加了 24.08~25.77 m,潮间带区域向海延伸,有利于增强海滩的抗冲刷能力,也可以对海岸起到保护作用。覆植沙丘修复措施使后滨植被的面积和盖度增加了 33%~65%,维持岸滩景观格局的同时可抵挡一定海浪的侵蚀,保护海滩不被破坏,提高海岸带的防灾减灾能力。

(2) 生态环境效益有所好转

①近海海水水质明显好转

海水水质中的金属元素污染物主要是受到人类活动的影响,例如工业污染和农村偷排粪污等,随着该区域保护修复工程建设的同时,当地政府加强了工业污水排放的监管力度,强化了农村污水的深度治理工作,加强从末端治理专项污染源的管控。政策措施的实施配合着保护修复工程的完工,施工后大蒲河口和金沙湾工作区的水质情况,从施工前各有一个监测站为第二类海水水质等级变为施工后各监测站均符合第一类海水水质等级,近海海水水质得到了明显好转。

②沉积物粒径总体变小

大蒲河口工作区沉积物类型施工前以中砂为主,施工后主要为细砂和中细砂;金沙湾工作区沉积物类型施工前以中砂为主,存在少量粗砂,施工后沉积物类型全部为中砂。施工后沉积物粒径总体上变小,对沙滩来说是变得更好。

③沉积物质量等级和分选度没有明显变化

从 2020 年 11 月至 2021 年 6 月,工作区沉积物采样点分选度分析结果均为极好,尽管同时期水下沙坝高程发生变化,但沉积物分选度等级没有发生变化,即水下沙坝

修建前后,工作区沉积物分选度等级没有发生变化,表明水下沙坝修建前后对沉积物分选度等级没有影响。

④海洋生物多样性略有下降

一方面由于沙坝、岬头等海岸带保护修复工程的施工引起岸线与海岸带地形地貌的剧烈变化,从而改变了水动力和海床沙质底泥的环境,对局部海域的生态环境造成影响,使得海洋生物的栖息、捕食和繁衍环境遭到破坏,导致施工后海洋生物多样性下降;另一方面在施工过程中挖掘、抛沙、填沙等基础操作直接导致部分浮游动物受到掩埋等伤害^[80],导致海水中泥沙含量升高,使得水体更加浑浊,部分具有昼夜活动规律的浮游动物的捕食和生长发育受到影响,浮游植物的光合作用下降,降低其生物多样性^[79]。

(3) 综合评价结果变好

从综合评价结果来看大蒲河口工作区综合评价得分范围从 2020 年的 46.74~49.04 提高到 2021 年的 57.46~66.46,施工前工作区全区域评价等级为一般,施工后增加了评价等级为良的区域,该等级面积占比 99.92%。施工后比施工前的大蒲河口工作区综合评价效果有所提高。

金沙湾工作区综合评价得分范围从 2020 年的 39.80~41.96 提高到 2021 年的 57.46~66.46,施工前存在综合评价等级为较差的区域,该等级面积占比 23.2%,施工后全工作区综合评价等级提升为一般。施工后比施工前的金沙湾工作区综合评价效果有所提高。

总体来说金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程对该区域防灾减灾能力和生态环境效益的提高是有一定成效的。

7.2 展望

(1) 减少工程实施过程中的对海洋生态的影响

工程施工结束时,海洋生物多样性综合指数有明显降低,海洋生物多样性等级较低,由于受施工影响,水下沙坝及沙质岬头建设时施工机器运行影响了周边海域生物的分布。因此,在工程施工时,要减少工程引起的负面影响。保护修复工程的实施,将会对水产养殖业的生态环境产生一定的影响,不会对所在海域的主要功能造成较大的影响。因此工程实施过程中可以采取对渔业资源的保护,如增殖放流、生态修复和水生生物资源养护等,减少工程建设对渔业生态资源的破坏^[79]。达到区域经济发展、生态环境保护和渔业资源的可持续发展兼顾的目的。

(2) 加强保护修复工程措施的维护和修复,建立定量模型,进行长效管理机制。

本项目中实施了水下沙坝、滩肩补沙、覆植沙丘和砂质岬头等保护修复措施,水

下沙坝和砂质岬头能改变海洋水动力方向，提高波高衰减率，从而减轻海岸侵蚀；滩肩补沙、覆植沙丘使干滩宽度和潮间带宽度增加，增加海岸带的抵抗能力。根据水下沙坝与波高衰减率和海洋生物多样性的关系，应适时增加水下沙坝的高程。在今后的工作中，可建立定量模型，量化水下沙坝的维护，进行长期的评估工作。

（3）调整修复工程评估的监测指标

适当调整修复工程评估体系中评价指标的监测，可降低人力物力的浪费，提高工作效率。

（4）搭建海岸带保护修复工程综合效果评估平台

建立包括潮位在线监测系统、应急检验检测系统和岸滩视频监控系统等模块的海岸带保护修复工程评估平台，将来修复工程的设计和 implement 提供理论和数据支撑。

（5）对海岸带保护修复工程综合效果进行后续监测

金湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程综合效果评估工作还需深入。由于目前只有两期监测数据，只能对工程效果进行短期内的效果评估。后续对该工程综合效果评价指标的数据保持动态连续监测，对多期数据进行整合和评估分析进行深层次的成因机制研究，为秦皇岛市甚至我省海岸带保护工程提出针对性改善意见，更好地保护海岸带环境，利国利民。

本次工作完成了对金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程防灾减灾和生态环境等综合效果的评估，为秦皇岛市甚至我省海岸带保护修复工程提供了科学依据。对于海岸带保护修复工程的长期效果有待深入研究，这样更好地得出海岸带保护修复工程效果。

参考文献

- [1] 邹亚荣. 近 20 年北戴河岸线变化监测与对策研究[C]// 一带一路战略与海洋科技创新——中国海洋学会 2015 年学术年会. 0.
- [2] 张明慧, 孙昭晨, 梁书秀, 等. 砂质海岸整治修复效果模糊综合评价研究——以营口月亮湾为例[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 9.
- [3] 李红柳, 侯晓珉, 孙贻超, 等. 海岸带生态恢复技术研究现状及存在问题综述[C]// 建设资源节约型, 环境友好型社会国际研讨会暨中国环境科学学会学术年会. 2006.
- [4] 高宇, 黄海萍, 吴侃侃, 等. 厦门海洋垃圾防治与管理实践及启示[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(11): 6.
- [5] 王文渊, 徐长坤, 孙家文. 人工海岸生态化改造及修复效果评价指标体系研究[J]. 海岸工程, 2020, 39(01): 70-76.
- [6] 钟超, 石洪源, 隋意, 等. 我国海岸侵蚀的成因和防护措施研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(6): 4.
- [7] 张明慧. 砂质海岸带整治修复工程效果评价方法研究[D]. 大连理工大学, 2020.
- [8] C Feng, XS A, J Liub, et al Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention[J]. Progress in Natural Science, 2009.
- [9] 蒋成竹, 吴林强, 徐晶晶, 等. 美国海岸带自然资源与生态损害评估及修复工作对中国的启示 [J]. 地质通报, 2019, 38(11): 1912-1919.
- [10] Dornhelm R B . The Coney Island Public Beach and Boardwalk Improvement of 1923[C]// Urban Beaches. ASCE, 2014.
- [11] 何杏枫. 刘以鬯主编《香港时报·浅水湾》(1960.2.15-1962.6.30)时期研究资料[M]. 邓依韵, 2004.
- [12] Leatherman S P. Shoreline stabilization approaches in response to sea level rise: U.S. experience and implications for Pacific Island and Asian nations[J]. Water Air & Soil Pollution, 1996, 92(1-2): 149-157.
- [13] 于小芹, 余静. 我国海岸带生态修复的政策发展, 现状问题及建议措施[J]. 中国渔业经济, 2020, 38(5): 9.
- [14] 杨同玉文/摄影. 青岛:蓝湾整治"绣出"亮丽海岸线[J]. 海洋世界, 2019(4): 2.
- [15] 佚名. 打造蓝湾行动样板 助力海上花园建设——记温州市蓝色海湾整治[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(1): 8.
- [16] 蔡锋, 苏贤泽, 建辉, 等. 全球气候变化背景下我国海岸侵蚀问题及防范对策[J]. 自然科学进

- 展, 2008, 18(10): 11.
- [17] 宫立新. 山东半岛东部海滩侵蚀现状与保护研究[D]. 中国海洋大学, 2015
- [18] 王广禄, 蔡锋, 曹惠美, 等. 厦门香山至长尾礁沙滩修复实践及理论探讨[J]. 海洋工程, 2009, 27(3):10.
- [19] 杨燕雄, 张甲波, 刘松涛. 秦皇岛海滩养护工程的实践与方法[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(3): 15.
- [20] Grenell P. Coastal Zone Management (1) — U.S. Perspective[M]. 2015.
- [21] Leatherman S P. Shoreline stabilization approaches in response to sea level rise: U.S. experience and implications for Pacific Island and Asian nations[J]. Water Air & Soil Pollution, 1996, 92(1-2): 149-157.
- [22] Stive, JF M, D Schipper. A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: The sand engine.
- [23] Bkva B, Rdwc D, Ntkd E, et al. The use of bioshields for coastal protection in Vietnam: Current status and potential[J]. Regional Studies in Marine Science, 2021.
- [24] Mcivor A L, Miller I, Spencer T, et al. Reduction of wind and swell waves by mangroves. Natural coastal protection series: report 1. Cambridge Coastal Research Unit working paper 40. 2012.
- [25] Horstman E M , Dohmen-Janssen C M, Hulscher S. Flow routing in mangrove forests: A field study in Trang province, Thailand[J]. Continental Shelf Research, 2013, 71: 52-67.
- [26] Rasmeemasuang T, Sasaki J. Chapter 24 - Wave Reduction in Mangrove Forests: General Information and Case Study in Thailand[M]. Elsevier Inc. 2015.
- [27] 康瀨月, 李妹洋, 李洪远. NbS 在海岸带蓝碳生态系统修复中的案例研究[J]. 景观设计, 2021(000-004).
- [28] 冯哲, 邵铁政, 李元青, 等. 基于自然的解决方案(NBS)在海口西海岸修复工程中的应用创新[J]. 水运工程, 2022(S01): 9
- [29] 徐长坤. 基于 FCE 的海岸生态化建设效果评价方法[D]. 大连理工大学, 2021.
- [30] Simm J D, Brampton A H, Beech N W, et al. Beach management manual[M]. London:ConstructionIndustry Research and Information Association(CIRIA), 1996.
- [31] Sadeghi-Pouya A, Nouri J, Mansouri N, et al. Developing an index model for flood risk assessment in the western coastal region of Mazandaran, Iran[J]. Vodohospodársky časopis, 2017.
- [32] 包敏, 王永红, 杨燕雄, 等. 北戴河西海滩人工养护前后沉积物粒度变化特征[J]. 海洋地质动态, 2010(9): 25-34.
- [33] 王伟伟, 李方, 蔡悦荫. 辽宁省海岸带开发活动的综合环境效应评价[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(004): 610-613.
- [34] 董月娥, 张静怡, 滕欣, 等. 人工海岸的生态化建设效果评价方法初探[J]. 海洋开发与管理, 82

- 2015, 32(011): 28-32.
- [35] 韩爽, 张华兵. 盐城市沿海滩涂湿地生态服务价值研究[J]. 特区经济, 2010(11): 2.
- [36] 叶丽丽. 城市内湖生态系统服务价值变化及驱动力研究[D]. 中南财经政法大学, 2019.
- [37] 仝磊. 七里海湿地保护区生态修复工程效果评估[D]. 天津理工大学, 2021.
- [38] 程健华. 基于生态系统服务的城市海岸带生态修复效果评估研究. 国家海洋局第三海洋研究所.2010
- [39] Ortiz-Lozano L, Granados-Barba A, Solis-Weiss V, et al. Environmental evaluation and development problems of the Mexican Coastal Zone[J]. Ocean & Coastal Management, 2005, 48(2):161-176.
- [40] Chapman P, Reed D. Advances in coastal habitat restoration in the northern Gulf of Mexico[J]. Ecological Engineering, 2006, 26(1): 1-5.
- [41] Jones K , Pan X , Garza A , et al. Multi-level assessment of ecological coastal restoration in South Texas[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4):435-440.
- [42] 吴威, 李彩霞, 陈雪初. 基于生态系统服务的海岸带生态修复工程成效评估——以鸚鵡洲湿地为例[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020, 000(003): 98-108.
- [43] 林雪萍, 李昌达, 姜德刚, 等. 蓝色海湾评估体系构建及初步应用研究 ——以温州市洞头区为例[J]. 海洋开发与管理, 2020, 037(005): 46-51.
- [44] 王玉广, 李淑媛, 苗丽娟. 辽东湾两侧砂质海岸侵蚀灾害与防治[J]. 海岸工程, 2005, 24(1): 10.
- [45] Weber C, Woolsey S, Peter A. A strategy to assess river restoration success[J]. Archives Des Sciences Journal, 2006, 59(2): 251-256.
- [46] 彭艳红, 靖玉明, 刘道行, 等. 南四湖新薛河湖滨带湿地修复效果评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2010(1): 4.
- [47] 张悦, 刘长安, 宋永刚, 等. 滨海湿地植物修复效果监测与评价方法研究[J]. 海洋环境科学, 2013(04): 544-546.
- [48] 张嘉强. 农户沼气使用及生态环境效益评价: 来自恩施州的证据[D]. 华中农业大学, 2008.
- [49] 孙晓萌, 彭本荣. 中国生态修复成效评估方法研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(07): 153-157.
- [50] 杨端阳. 基于灰色关联和 GA-DBN 的长江二元堤防管涌险情预测分析[D]. 郑州大学, 2021.
- [51] 童爱华. 舟山南部典型海域海水水质综合评价[J]. 中国水运: 下半月, 2015, 000(010): 189-190.
- [52] 钟舜丹, 刘炎, 钟顺洋, 等. 南海近海海域生态环境脆弱性评估[J]. 福建农林大学学报: 哲学社会科学版, 2016, 19(2): 4.
- [53] Li, Sun, Yuan, et al. Evaluation Methods of Water Environment Safety and Their Application to the Three Northeast Provinces of China[J]. Sustainability, 2019, 11(18): 5135.

- [54] 刘大海, 宫伟, 邢文秀, 等. 基于 AHP-熵权法的海岛海岸带脆弱性评价指标权重综合确定方法[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 6.
- [55] 陈玮彤, 张东, 韩飞, 等. 江苏南通沿岸围填海强度与潜力定量评价研究[J]. 海洋通报, 2015(4): 443-449.
- [56] 韩吉武, 吴伟, 李健. 海岸带可持续发展评价研究——以中国沿海七城市为例[J]. 环境保护科学, 2007(05): 58-60.
- [57] Wu H Y, Chen K L, Chen Z H, et al. Evaluation for the ecological quality status of coastal waters in East China Sea using fuzzy integrated assessment method[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(3): 546-555.
- [58] 赵金莹. 北戴河新城防洪排涝水系规划探讨[J]. 河北水利, 2018(5): 1.
- [59] 崔志刚. 滨海地区土地线性景观生态设计与效果评价[D]. 河北农业大学, 2014.
- [60] 庄军莲, 许铭本, 王一兵, 等. 钦州湾潮间带生物群落对环境变化的响应分析[J]. 广西科学, 2014, 21(04): 381-388.
- [61] 覃胡林. 苍南县沿浦湾大型底栖动物群落结构及多样性研究[D]. 浙江海洋大学.
- [62] 黎家财, 邓友国, 孙娟娟, 等. 北海冠头岭沙滩表层沉积物粒度变化再研究[J]. 地质论评, 2015, 61(S1): 77-78.
- [63] 于洪波, 宋松伟, 李丹, 等. 营口近岸海域海水及沉积物中重金属污染现状及评价[J]. 河北渔业, 2019(6): 4.
- [64] 刘会欣, 张甲波, 王刚. 大蒲河口表层沉积物中重金属污染特征[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2017, 27(06): 78-82.
- [65] 王应飞, 高建华, 石勇, 等. 鸭绿江河口西岸潮间带柱状沉积物中重金属的分布特征及其对流域变化的响应[J]. 地球化学, 2014, 43(1):13.
- [66] 李东, 侯西勇, 张华. 曹妃甸围填海工程对近海环境的影响综述[J]. 海洋科学, 2019, 43(2): 9.
- [67] 徐军. 从 Landsat 图像提取湿地遥感信息的方法[C]// 中国测绘学会全国会员代表大会. 2009.
- [68] 胡慧萍. 面向对象分类技术的景观信息获取[D]. 中南大学, 2007.
- [69] 周海明. 基于层次分析法的物流技术装备选型研究[J]. 物流工程与管理, 2019, 41(6):2.
- [70] 高盛韬. 矿产项目境外投资风险分析[D]. 天津大学, 2013.
- [71] 周昶. 对电力企业同业对标综合评价方法的分析[J]. 大科技: 科技天地, 2011(20):2.
- [72] 任敏, 叶仙森, 项有堂. 中街山列岛附近海域环境质量现状评价与分析[J]. 海洋开发与管理, 2006, 23(3): 4.
- [73] 解雪峰. 乐清湾海湾生态系统健康评价[D]. 浙江师范大学.
- [74] 宫立新, 杨燕雄, 张甲波, 等. 海滩原位监测技术及应用[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(3):9.
- [75] 李娜, 刘建涛, 任旭光, 等. 秦皇岛近海沉积物特征研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2017, 027(004): 57-61.

- [76] 董静瑞, 胡成业, 水玉跃, 等. 温州南部沿岸海域鱼类群落特征及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2017, 24(02): 209-219.
- [77] 曹伟, 李涛. 水运工程对海洋生态系统的影响[J]. 中国资源综合利用, 2009, 27(11): 26-30.
- [78] 屠腾, 郑智倩, 郑一帆, 等. 围海造地工程对海洋生物的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(16): 249-250+316.
- [79] 李明. SH 原油码头扩建项目环境经济分析与评价[D]. 大连海事大学, 2017.

作者简介

郝阳，女，1997年4月，河北邢台人。

工作学习经历：

2016年9月-2020年6月就读于河北科技大学环境科学与工程学院环境科学专业；

2020年9月-2023年1月就读于河北地质大学水资源与环境学院资源与环境专业。

硕士阶段学习情况：

在攻读硕士学位期间，共完成6门学位课程和7门非学位课程的学习以及本专业培养方案要求的必修环节的学习，已获得的总学分为32分，达到了本专业培养方案要求的总学分30分。

攻读硕士学位期间发表的论文和科研成果

一、论文发表情况：

[1] 第二作者. 生物脱氮新途径在人工湿地中的应用前景展望 [J]. 河北工业科技, 2021, 38(06): 476-485.

二、科研项目情况：

[1] 2021 河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心开放基金项目：改性陶粒与硫铁矿在人工湿地中去除污染物的机理研究。排名，第四。

[2] 2022 年度河北省自然科学基金：华北地区不同轮作制度下秸秆还田土壤有机碳物理保护和微生物调控机制。排名，第四。

[3] 2021 秦皇岛市海洋和渔业局横向项目：金沙湾及大蒲河河口海岸带保护修复工程项目综合效果评估项目。参与。

致 谢

行文至此，百感交集，总以为来日方长，却不知时光匆匆，诚实的说现在的我也没有很大的出息，努力的成为芸芸众生中平凡的大多数，也依然迷茫。但总有幸运点缀着我平凡的生活，他们的出现让我觉得我是那个最幸运的人，在生命中这样一段时光里，拥有着很多感恩。

春晖寸草，山高海深，父母爱子，永记于心。感谢父母二十余载的养育，保我衣食无忧，是我最坚固的避风港，让我得以站在他们的肩膀上见过外面世界的繁华。在我求学十余载的时光里，在每个抉择的人生路口，他们总是义无反顾的支持着我的决定，感谢他们对我的信任，这是我人生道路上最大的底气，给予力量让我勇敢前进。

饮水思源，莫忘师恩。在此特别感谢我的指导老师温学友老师，感谢他在我整个研究生期间给予我的一贯支持和帮助，从学术上认真严谨的解答疑惑到生活中的关心，亦师亦友，感谢他在我撰写论文方面给我提供了很好的机会和建议，从论文的选题到最终成文，感谢他陪我字斟句酌，倾尽所能的点播和指导我。在跟着他做项目的过程是我研究生期间成长最快的时期，在此过程中遇到难疑或是项目进行不下去的时候，温老师总能凭借其渊博的学识和专业知识出谋划策，使我们的项目得以圆满结束。感谢我的校外导师张甲波老师，给了我锻炼自己，运用专业知识到实践中去的实践学习机会。感谢项目组里吕凤军老师对我在 ArcGIS 上的指导与帮助，不仅教会我软件的使用，更多的是教会我自学的方法与思考问题的方式。感谢项目组里韩亚老师，和她一起撰写项目书的日子即充实又快乐，她的温柔和蔼，平易近人的性格像一缕清风化解我的焦虑和担忧。最后感谢学院里我聆听过教诲的每一位老师，在以后的人生道路上，我一定勤于思考，不负老师们的授业解惑之恩。

感谢相遇，莫负青春。我也要感谢我的舍友，大家来自天南海北，有缘相聚在一起，相伴度过两年多的时光。我们四个性格各不相同，却能相处的非常和谐，可以一起讨论学术研究，也可以谈论娱乐八卦，她们的陪伴为我的研究生时光增添了许多色彩。

遇见美好，落笔是你。感谢我的男孩儿宿培元这三年来对我包容和关怀，无时无刻给我最大的鼓励与支持，我们自高中相识，一路见证彼此的收获与成长，愿我们继续在彼此今后的岁月里熠熠生辉。

最后我要感谢那些焦虑的白天和失眠的夜晚，感谢挑灯夜战日子和伴着日出赶路的清晨，虽然我的论文止笔于第七章，但我的人生还要继续，保持初心，方得始终，但行好事，莫问前程。