

DOI: 10.5846/stxb202204211087

李佳雨, 钱雨果, 周伟奇, 郑重, 靖传宝, 易绍庭, 叶匡旻. 社会-生态综合视角下海岸带生态监管框架与应用——以深圳为例. 生态学报, 2023, 43(10): 4212-4225.

Li J Y, Qian Y G, Zhou W Q, Zheng Z, Jing C B, Yi S T, Ye K M. A framework for coastal zone ecosystem monitoring and management from an integrated social-ecological perspective and its application in Shenzhen, China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4212-4225.

社会-生态综合视角下海岸带生态监管框架与应用 ——以深圳为例

李佳雨^{1,2}, 钱雨果¹, 周伟奇^{1,2,3,4,*}, 郑 重^{1,3}, 靖传宝^{1,2}, 易绍庭⁵, 叶匡旻⁵

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京京津冀区域生态环境变化与综合治理野外科学观测研究站, 北京 100085

4 雄安创新研究院, 雄安新区 071000

5 深圳市环境科学研究院, 深圳 518022

摘要: 海岸带作为海洋与陆地两大生态系统的连接与桥梁, 既是国民经济、社会发展的重要区域与战略中心, 也是生态环境破坏和污染的热点区域。以往针对海岸带区域开展的城市化对生态环境的影响研究, 主要利用 30 m 空间分辨率的 Landsat 数据分析城市扩张对自然生态系统的侵占, 如自然用地减少、景观异质性降低、填海造陆速度变快等, 而针对污染产业、人类活动等引起的河口水质污染、水温异常、自然岸线退化等复杂生态环境问题关注不足, 难以满足陆海统筹管理、综合防治的需求。因此, 研究围绕海岸带面临的主要问题, 面向海岸带生态环境综合管制, 构建了“问题识别-格局量化-地面调查-生态监管”的综合框架, 通过明确生态环境问题, 量化社会-生态格局, 开展实地调查, 制定生态监管目标和策略。通过融合高分影像、兴趣点、道路等多源异构数据并结合地面调查, 准确识别影响生态环境的社会-生态格局因子, 实现空间显性的生态监管。进一步以深圳为典型案例, 探讨该概念框架的应用, 将深圳市海岸带划分为四类共 980 个生态监管单元, 其中包括 153 个优先保护单元, 主要为分布在海岸带东部的林地, 7 个生态风险较大的核心管控单元, 597 个几乎分布在海岸带西部的重点管控单元和 223 个涉及人类日常活动的一般管控单元, 并分别提出了相应的生态监管策略, 以期为陆海统筹的海岸带综合管理提供科学支撑。

关键词: 海岸带; 社会-生态系统; 遥感; 生态监管; 陆海统筹; 深圳市

A framework for coastal zone ecosystem monitoring and management from an integrated social-ecological perspective and its application in Shenzhen, China

LI Jiayu^{1,2}, QIAN Yuguo¹, ZHOU Weiqi^{1,2,3,4,*}, ZHENG Zhong^{1,3}, JING Chuanbao^{1,2}, YI Shaoting⁵, YE Kuangmin⁵

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing-Tianjin-Hebei Urban Megaregion National Observation and Research Station for Eco-Environmental Change, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Xiong'an Institute of Innovation, Xiong'an New Area, Xiong'an New Area 071000, China

5 Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518022, China

Abstract: As the connection between marine and terrestrial ecosystems, the coastal zone is not only an important regional

基金项目: 深圳市海岸带生态环境现状遥感调查 (SZDL2020335466); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA230301)

收稿日期: 2022-04-21; **采用日期:** 2022-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@rcees.ac.cn

and strategic center of national economic and social development, but also a hotspot of ecological environment destruction and pollution. For the impact of urbanization on ecological environment in coastal zone, most studies used 30 m spatial resolution Landsat data to analyze the encroachment of urban expansion on natural ecosystem, which ignored the complex ecological environment problems caused by industries or human activities such as estuary water pollution, abnormal seawater temperature, and natural coastline degradation. As a result, it is difficult to meet the needs of the coordinated land and marine management and comprehensive prevention and control. In this study, therefore, we constructed a comprehensive framework of “problem identification-pattern quantification-ground survey-ecosystem supervision” based on the coastal zone problems, then we formulated ecosystem supervision objectives and strategies by defining ecological and environmental problems, quantifying social-ecological patterns, and carrying out ground surveys. By integrating multi-source heterogeneous data such as high-resolution images, points of interest and roads, and combined with ground surveys, the social-ecological patterns that affected the ecological environment were accurately identified to realize spatially explicit ecosystem monitoring and management. Taking Shenzhen as a case, this study applied this research framework to divide Shenzhen’s coastal zone into four types of ecosystem supervision units, including 153 priority protection units, most of them were woodlands distributed in the northeastern coastal zone, 7 core control units with large ecological risks, 597 key control units almost all distributed in the western coastal zone, and 223 general control units related to human daily activities. Finally, we proposed corresponding ecosystem supervision strategies respectively, in order to provide scientific support for the integrated management of coastal zone with coordinated land and marine.

Key Words: coastal zone; social-ecological system; remote sensing; ecosystem monitoring and management; coordinated land and marine; Shenzhen

海岸带是海洋与陆地两大生态系统的连接与桥梁,是海岸动力与沿岸陆地相互作用、具有海陆过渡特点的独立环境体系^[1-2]。该区域是地表最为活跃与敏感的区域^[3-4],集中了全球 60%的人口和 1/3 人口在一百万以上的大城市^[5]。我国拥有 1.8 万多公里的大陆岸线与 1.4 万多公里的岛屿岸线,仅占陆地国土面积 13% 的大陆 11 个沿海省、直辖市和自治区集中了 50% 以上的大城市、42% 的人口和 60% 以上的国内生产总值^[6]。随着人类社会经济发展,海岸带正出现围填海无序增长、红树林与珊瑚礁生态系统功能受损^[7-8]、近海水域富营养化^[9-10]等生态环境问题,此外,气候变化带来的海平面上升^[11]、沿海洪涝^[12]、风暴潮^[13]等一系列沿海灾害也严重危害了沿海居民的生命财产安全^[14-15]。因此,国家在《关于加快推进生态文明建设的意见》与“十四五”规划中多次做出了陆海统筹的战略部署,即根据海陆一体化的战略,统筹沿海陆地区域和海洋区域的国土开发规划,坚持区域经济协调发展^[16]。陆海统筹已成为深入我国政策、方针与制度的政治需求。

随着研究者可以通过遥感技术更加高效地监测并获取土地利用现状和时空动态变化信息^[17-18],海岸带的土地利用时空变化及驱动因素、对人类活动强度的响应状态及生态风险评价成为全球研究的重要内容^[19-22]。已有研究多在国家或城市等大空间尺度分析十年以上长时间序列海岸带景观类型的空间分布规律、动态特征变化以及背后的驱动因素,研究结果揭示了城市化等人类社会活动致使海岸带的自然用地减少、景观异质性降低、填海造陆速度变快等^[23-30]。

然而对于复杂的海岸带生态环境问题,包括农业面源污染、工业工厂水质与水温污染以及围填海等陆地对海洋的环境影响,以及海平面上升、沿海洪涝、风暴潮等海洋对陆地的生态风险,已有的研究缺乏深入的探究和科学认知,难以为其防治与管控提供足够的科技支撑。这是因为:(1)已有研究的分类体系主要关注建设用地对滨海农田、湿地、森林的侵占,缺乏对建设用地内部的社会功能的表征,如工业区、住宅区、游憩区等。因此,难以定量解析海岸带的生活污水、工业废水、核电站排水等对海洋的影响^[31];(2)用于分类的遥感影像数据分辨率不足,常用于分类的 30 m 空间分辨率 Landsat 影像难以准确量化海岸带精细的景观格局和演变特征^[32],使得分析结果不准确,难以支撑海岸带科学的生态管控^[33];(3)缺乏反映人类活动的社会经济数据,忽

略了社会系统与生态系统的交互作用,使研究结果不具有目标靶向性,无法识别污染排放、围填海等人类社会活动带来的海岸带生态环境问题;(4)研究结果大多落脚在海岸带生态风险的评价上^[34-36],未给出具有针对性的管控建议,使得海岸带生态环境问题与风险管控脱节,不利于后续管控措施的具体落实与陆海统筹战略的制定。

针对复杂的海岸带生态环境问题,本研究构建了“问题识别-格局量化-地面调查-生态监管”的综合框架,通过明确生态环境问题,量化社会-生态格局,开展实地调查,为海岸带的生态监管制定目标和策略。该框架通过融合高分影像、兴趣点、道路等多源异构遥感数据与地面调查数据,准确识别影响生态环境的社会-生态格局因子,实现精细的、空间显性的生态监管,在城市化进程加快、全球气候变暖的大背景下为海岸带区域的综合管理提供科学支撑^[37]。

1 海岸带生态监管框架的构建

本研究基于陆海统筹的典型问题,从目标需求的角度出发构建海岸带“问题识别-格局量化-地面调查-生态监管”的综合研究框架。该框架包括四大部分:(1)明确陆海交互的问题;(2)构建海岸带分类体系并开展分类;(3)开展针对性的地面调查;(4)制定海岸带生态监管策略。其中,海岸带的典型问题决定了遥感分类需要刻画表征的要素,比如河口污染需要刻画海陆交互的排污口、自然岸线保有率低需要量化不同类型海岸线,红树林丧失需要刻画自然生态系统中的红树林斑块,围填海无序增长等带来的面源污染需要刻画城市不同的下垫面斑块;遥感分类结果明确了需要地面调查的区域,如遥感难以观测的区域、排放的污废水特征等;分类结果和地面调查结果共同决定了海岸带点线面状不同类型地物的管控目标与策略。通过生态管控,可反馈典型问题的动态变化,进而调整和优化监测与管理的方案(图1)。相比以往从土地覆盖的角度分析海岸带的景观格局和动态变化,该框架更加具有问题的针对性和管理的导向性。

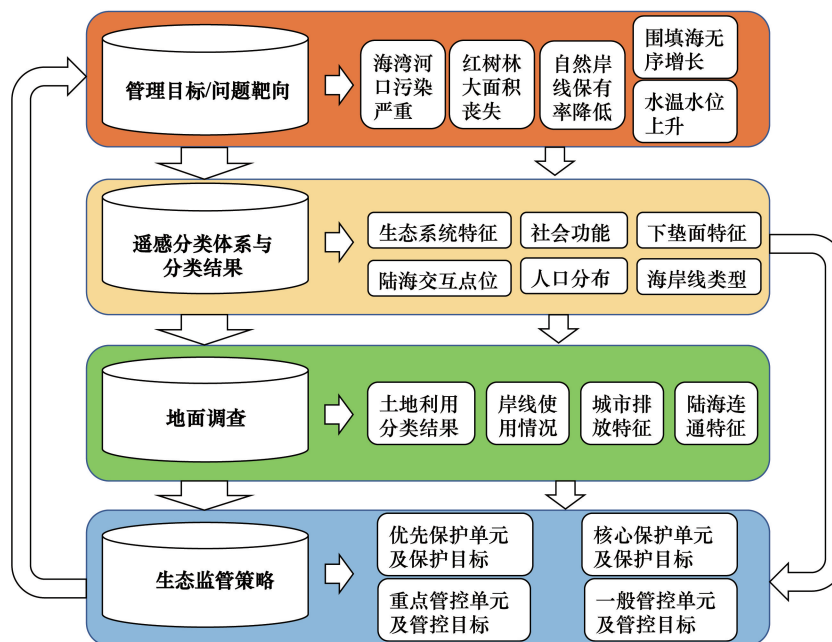


图1 海岸带生态监管框架思路图

Fig.1 Framework of coastal zone ecosystem supervision

分类体系决定了需要量化表征的要素,是整个框架中最核心的纽带,一方面它衔接了海岸带需要改善的生态环境问题,另一方面也指向了生态监管的目标和策略。因此,除了常规的土地覆盖,还需要定量表征社会-生态系统中与海岸带问题相关的如重点企业的空间位置、污染排放等特征。本研究基于社会-生态特征的

多等级分类框架来构建海岸带监管的三级分类体系^[38],第一级利用长时间序列的 Landsat 数据将海岸带划分为城市生态系统和自然生态系统,该级在管理上对应了城市发展和生态保护的权衡策略;第二级在第一级的基础上进一步结合兴趣点 (Point of Interest, POI) 数据,道路和建筑矢量数据,将城市生态系统划分为不同类型的功能区,将自然划分为不同类型的生态系统,该级对应了分级分类的防治与管控;第三级利用高分影像量化了城市的精细下垫面特征,用于城市精细的调控与管理(图 2)。

地面调查一方面可以提升遥感分类的精度,另一方面也可以补充遥感难以准确识别的关键区域,如排污口、河口、岸线使用情况等。生态监管不仅需要考土地斑块的分类结果,也需要充分考虑地面调查的关键点、线要素特征。为了综合点、线、面状的社会-生态格局信息,并建立多部门通用的管理单元,本研究借鉴多等级网格的研究框架^[39],通过结合行政管理边界(包括辖区尺度、街道尺度)和多等级分类边界划分三个等级生态监管网格(辖区、街道、地块),综合点、线、面要素的多维属性开展评价,进而制定海岸带全域监管单元的监管目标和策略(图 2)。

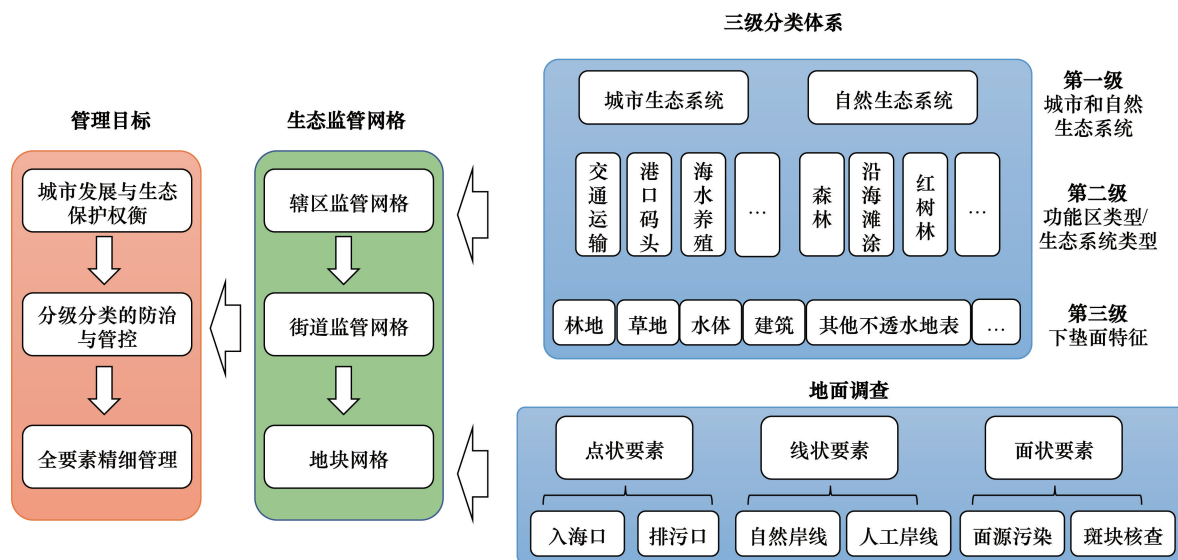


图 2 海岸带生态监管流程图

Fig.2 Flow chart of coastal zone monitoring and ecological management

2 案例分析

2.1 研究区介绍

本研究以广东省深圳市作为典型案例,开展实证研究。深圳地处中国华南地区、广东南部、珠江口东岸,东临大亚湾和大鹏湾,西濒珠江口和伶仃洋,南隔深圳河与中国香港相连,其作为国家十四五编制试点与先行示范区,是粤港澳大湾区的龙头城市,在国家发展大局中有着重要的战略地位。紧扣国家新一轮国土空间一体规划改革思路,其探索和实践经验也为国家加强对“山水林田湖草”等自然资源的统一管理和保护提供了深圳示范样本^[40]。

本次研究范围以《深圳市海岸带综合保护与利用规划(2018—2035)》中界定的海岸带陆域范围为基准,划定依据结合了沙滩、珊瑚礁等自然环境因素及海岸带用地等的社会经济因素,最终规划海岸线长度 261.2 km,海岸带陆域 315 km²(图 3)。

2.2 海岸带主要生态环境问题与分类体系

深圳海岸带面临着诸多生态环境问题与风险,如红树林大面积丧失^[41]、珊瑚礁覆盖度降低^[42]、自然岸线保有率降低^[43]、核电站温排水导致的海洋热污染^[44]、油港油库与工矿仓储用地的溢油风险^[45]、围填海无序



图 3 深圳市海岸带研究区示意图
Fig.3 The spatial distribution of Shenzhen coastal zone

建设^[46]、滩涂湿地被大面积侵占^[47]、海滨浴场水质超标^[48]、入海排污口的点源污染^[49]、农业与交通的面源污染^[50]等。针对上述问题,本研究基于多等级分类框架构建了海岸带三级分类体系来表征其社会-生态特征(表 1)。

表 1 海岸带三级分类体系
Table 1 Three-level classification system for coastal zone

等级 Levels	分类体系 Classification system	
一级 The first level	城市景观	自然景观
二级 The second level	住宅用地	森林 草地 沿海滩涂 红树林地
	工矿仓储用地	
	公共管理与公共服务用地	
	商服用地	
	交通运输用地	
	港口与码头	
	水域及水利设施用地	
	海水养殖区	
	海洋渔业区	
	沙滩	
	其他土地	
	特殊用地	
园地		
耕地		
三级 The third level	建筑、道路、其他不透水地表、水体、林地、草地、裸地、耕地	

本研究利用空间分辨率为 30 m 的 Landsat、0.8 m 的高分 2 号遥感影像,结合 POI、道路和建筑等矢量数据开展了深圳三个等级的社会-生态格局分类,其中 POI 数据来源于百度地图,道路和建筑矢量数据来源于深圳市规划和自然资源局。本研究采用了自上而下的方法开展三个等级的社会-生态格局分类,按照景观类型、社会功能区/生态系统类型、以及土地覆盖的顺序进行分类,其中上一等级的分类结果是下一等级的分类基础。利用面向对象的图像分析技术来实现自上而下的多级分类,首先对 Landsat 遥感影像进行分割,生成第一级的大尺度斑块对象,然后使用阈值分类和目视解释开展斑块对象分类,得到第一级分类结果。在此基础上,叠加

道路矢量层来分割第二层,并利用建筑物属性和 POI 类别对第二级斑块对象进行决策树分类。在第二级分类结果的基础上,利用高分 2 号影像开展分割,形成第三级小尺度斑块对象,并利用支持向量机对第三级斑块对象开展土地覆盖的监督分类^[38]。

第一级分类区分了城市景观与自然景观,主要针对宏观问题,比如开发建设对生态空间的侵占,围填海建设时空演变等。第二级分类一方面区分了对不同人类活动的影响,如与工业排放相关的工业区,与农业排放相关的种植养殖区,与交通排放相关的交通区,以及与一般生活排放相关的混合区等;另一方面细化了不同类型的自然景观,以对应相应的管控策略。第三级区分了精细的土地覆盖特征,主要针对不同下垫面可能导致的面源污染风险。

深圳市海岸带区域总面积为 315 km²,一级分类中城市景观面积 193 km²,占比 61.3%,多分布在海岸带西部;自然景观面积 122 km²,占比 38.7%,多分布在海岸带东部(图 4)。

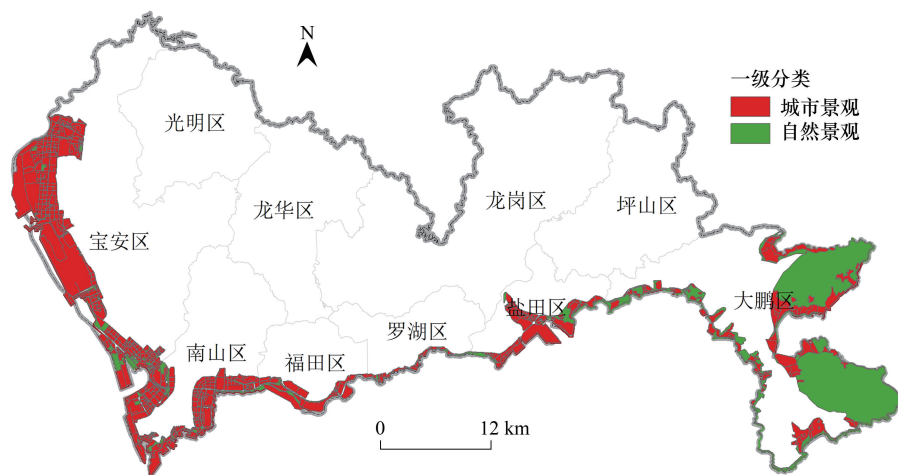


图 4 深圳市海岸带一级分类结果图

Fig.4 First-level classification results of Shenzhen coastal zone

二级分类里城市景观中对海洋影响较大的工矿仓储用地、园地、养殖用地、耕地的面积分别为 39.5 km²、6.4 km²、3.8 km²、3 km²,其中工矿仓储用地占陆域总面积比例高达 12.5%,此外交通运输用地 15.8 km²,占比 5%,港口和码头用地 11.8 km²,占比 3.7%;而二级分类的自然景观中林地面积最大,为 105.2 km²,占陆域总面积的 33.4%,剩下的自然斑块种类中面积由大到小依次为沿海滩涂 5.1 km²、草地 4.2 km²、红树林 0.8 km²(图 5)。

第三等级的土地覆盖主要类型分布情况如图 6 所示,其中林地占比最高,达 52.36%,但空间分布集中在东部大鹏区的大鹏街道与南澳街道,以大片连续的天然林地为主;人工土地覆盖类型(包括建筑、道路、其他不透水地表)以及裸地占比总共超过 40%,其中其他不透水地表占比 20.02%,建筑占比 11.98%,上述土地覆盖类型在深圳市中、西部分布更为集中。各类型中,草地占比比较低(1.73%),仅在西部地区有零星分布,耕地面积占比最少,仅为 0.32%。

2.3 地面调查方案:海陆交互点与海岸线

在刻画了人类社会活动程度和生态本底的类型、面积等特征后,需要明确应重点保护和管控的区域,因此在上述分类基础上对易发生生态环境问题的海陆交互点进行分类,形成面向陆海统筹的交互点分类体系(表 2),进一步识别可能带来污染的海陆交互的重要节点,基于该分类体系的分类结果将是监督管理的重点区域(图 7)。海陆交互点的一级分类中根据其交互的性质将交互点区分为自然与人工两类,以区别管控程度的不同;二级分类则根据排入海的污水性质进一步细化,分为了河流入海口、排水口及排污口、重点工业用地三类,便于制定具体的管控目标与方式。

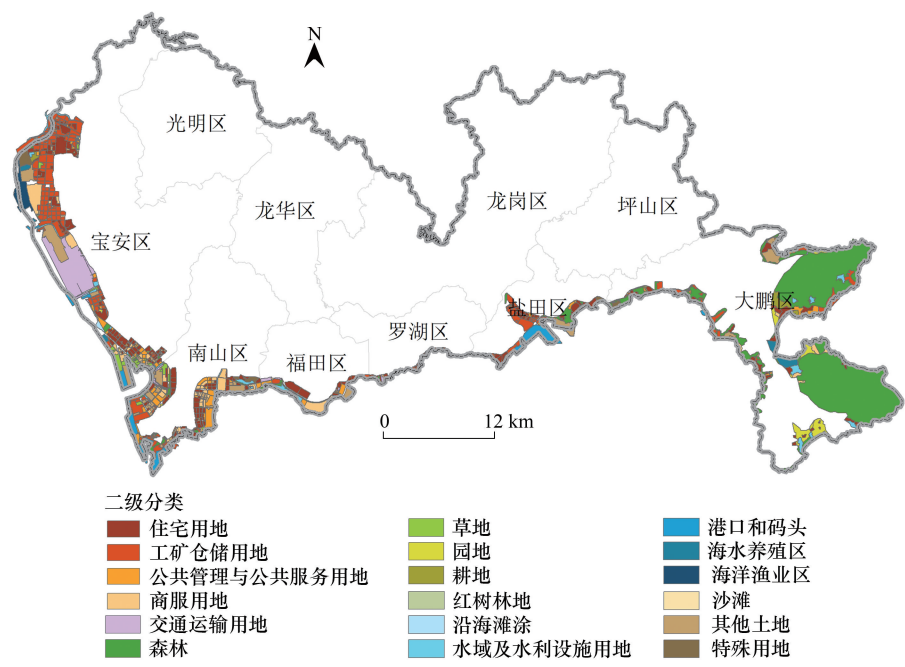


图 5 深圳市海岸带二级分类结果图
Fig.5 Second-level classification results of Shenzhen coastal zone

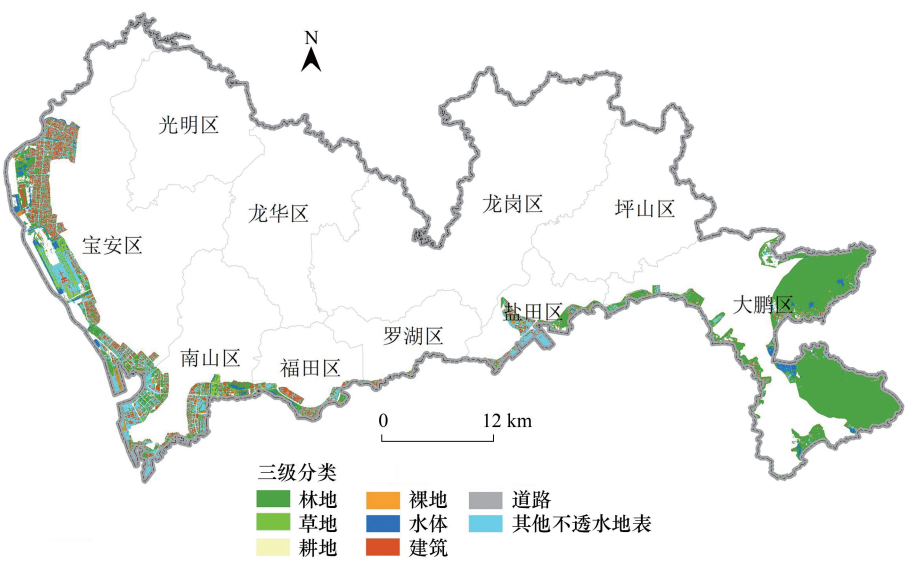


图 6 深圳市海岸带三级分类结果图
Fig.6 Third-level classification results of Shenzhen coastal zone

表 2 交互点分类体系

Table 2 Interactive points classification system

一级 The first level	二级 The second level	备注 Note
自然交互点 Natural interaction points	河流入海口	汇集河道周围雨水、生活与工业污水入海
人工交互点 Artificial interaction points	排水口及排污口	是海岸带附近地表降水、生活污水与工业废水主要入海渠道
	重点工业用地	核电站、气站、油气库、其他工矿仓储用地等



图 7 海陆交互点遥感与地面调查示意图

Fig.7 Schematic diagram of remote sensing and ground survey of sea-land interaction points

在对海岸带进行点与面维度的刻画后,还需从线维度出发构建海岸线分类体系,以通过不同类型岸线长度和类型反映其开发和利用的特征。首先根据岸线自然状态下的形态与属性是否发生变化分为第一级的自然岸线与人工岸线^[51],接着在国家海洋局 2005 年提出的分类体系基础上,进一步细化和优化了二级分类,其中自然岸线按照自然特征划分为基岩、平原、生物岸线,人工岸线按照人为用途划分为建设围堤、农业围垦、游憩岸线(表 3)。

表 3 海岸线分类体系

Table 3 Classification system for coastline

一级 The first level	二级 The second level	备注 Note
自然岸线 Natural coastlines	基岩岸线	自然的岩石岸线
	平原岸线	包括砂砾岸线、淤泥岸线等
	生物岸线	包括红树林岸线、珊瑚礁岸线等
人工岸线 Artificial coastlines	建设围堤岸线	住宅、工厂、市政等
	农业围垦岸线	养殖、盐田、池塘等
	游憩岸线	供人娱乐活动的海滩,形态与平原岸线相似,但周围有较多酒店、住宅的海岸线

陆海交互点分类结果显示,深圳市共有河流入海口 123 个,包括 15 个疑似河流入海口,汇集河道周围雨水、生活与工业污水入海;排水口及排污口 389 个,包括 9 个疑似排水口及排污口,是海岸带附近地表降水、生活污水与工业废水主要的入海渠道;重点工业用地 7 处与一般工业用地 195 处,主要分布在深圳西部,与入海河流相邻(图 8)。在进行交互点分类时应辅以地面调查工作,调查内容应包括疑似排水口及排污口情况、排水口及排污口使用状况(使用或废弃)、排入方式(明渠、暗渠)、污废水特征(颜色、浑浊度、水温)等。

海岸线分类结果显示,深圳市海岸线总长度约为 261.2 km,一级分类中自然岸线的长度为 79.7 km,占比

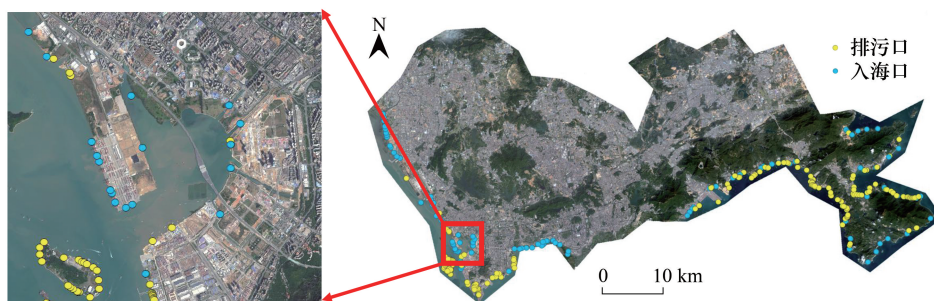


图8 入海口及排污口分布示意图

Fig.8 Distribution of estuaries and sewage outfalls

为 30.5%, 主要分布在东部的大鹏区和深圳湾公园一带, 大鹏区的自然岸线还表现出破碎化的趋势; 而人工岸线长度为 181.5 km, 占比 69.5%, 主要分布在西部的宝安区和南山区, 以及盐田和大鹏北部, 这部分区域抵御各类自然灾害如台风、海平面上升的能力严重不足。二级分类里基岩是自然岸线中最主要的岸线类型, 长 70 km, 占比高达 87.8%, 其生态系统服务功能较低, 主要分布在大鹏区; 具有较好生态系统服务功能的平原岸线和生物岸线的占比次之, 长度均为 4.8 km, 分别占自然岸线的 6%, 其中, 生物岸线为主要分布在深圳湾公园的红树林。而人工岸线中建设围堤岸线为主要岸线类型, 长为 149.3 km, 占比高达 82.3%, 岸线形态规则, 大多分布在海岸带西部宝安区、南山区, 还有部分位于东部的盐田区与大鹏区; 游憩岸线长 25.6 km, 占比 14.1%, 多分布在盐田区大鹏区, 较为破碎; 农业围垦岸线最少, 长 6.5 km, 只占人工岸线的 3.6% (图 9)。



图9 深圳市海岸线分类结果图

Fig.9 Coastline classification results of Shenzhen

2.4 管控单元划分与生态风险管控

在上述点线面三个维度的分类结果基础上, 叠加道路矢量、建筑属性等多源异构数据在斑块尺度进行管控单元划分, 并归纳不同单元的生态环境风险对其进行分级, 本研究将深圳海岸带划分为了 4 类管控单元, 分别为优先保护单元、核心管控单元、重点管控单元、一般管控单元。其中, 优先保护单元的管控目标是生态保护, 包括海岸带的生态斑块和自然岸线; 其他三类单元的管控目标是控制生态风险, 保障生态安全, 根据风险程度的高低分为了核心、重点和一般管控单元。对于每类管控单元, 首先对应了需要重点关注的生态环境问题; 然后, 根据问题对应到需要重点监测的分析对象, 包括多个等级土地覆盖类别, 以及地面调查中的点、线要

素;最后,提出了不同问题需要开展的管控策略(表4)。

表4 管控策略清单
Table 4 Control strategies checklist

管控目标 Control targets	生态问题 Ecological problems	分析对象 Analysis objects	管控策略 Control strategies
优先保护单元 Priority protection units	红树林等生态空间大面积丧失	红树林(二级)、森林(二级)	面积不减、功能不降、性质不变
	珊瑚礁覆盖度降低	沿海滩涂(二级)	面积不减、位置不变、质量不降
	自然岸线保有率降低	生物岸线(调查岸线)、基岩岸线(调查岸线)、平原岸线(调查岸线)	长度不减、位置不变
核心管控单元 Core control units	核电站温排水导致的海洋热污染	核电站(调查点)	水温监测,空间升温度数和范围
	油港油库与工矿仓储用地的溢油风险	油气库等(调查点)	水质的遥感监测,及时发现污染事件
	危险化学品导致的水体污染	重点工业用地(二级)、工矿仓储用地(二级)、港口和码头(二级)	高频遥感监测与实地调查,处理违规排放
重点管控单元 Key control units	围填海风险及其违规开发建设	城市景观(一级)多年变化	围填海区域的地面沉降监测,以及开发建设监管
	滩涂湿地被大面积侵占	水体(三级)与其他三级土地覆盖的转换特征	高频遥感监测与实地调查,处理违规用地侵占
	水体富营养化、赤潮等水体污染现象	农业围垦岸线(调查岸线)、海水养殖区(二级)、海洋渔业区(二级)	水体污染的遥感监测与污染排放的实地调查
	海平面上升风险	建设围堤岸线(调查岸线)相邻的住宅用地(二级)和重点工业用地(二级)	制定海平面上升的应急预案
	有毒有害污染物排放	排污口(调查点)、排水口(调查点)、河流入海口(调查点)	水体污染的定点监测与污染排放的实地调查
	海漂垃圾	沙滩(二级)和游憩岸线(调查岸线)的人为活动特征	对海漂垃圾开展无人机监测,整治污染源头
		住宅用地(二级)、商服用地(二级)、公共管理与公共服务用地(二级)、特殊用地(二级)	
一般管控单元 General control units	生活面源污染		监测生活面源污染
	交通面源污染	交通运输用地(二级)	监测交通面源污染
	农业面源污染	耕地、园地、草地(三级)	监测农业面源污染
	生态空间被侵占	公园(二级)、林地(三级)	稳定生态空间面积和比例

分级结果显示,深圳市共有 980 个管控单元,其中包括 153 个优先保护单元,因含有林地,平均斑块面积较大,多在海岸带东部,主要保护其面积与质量不减;核心管控单元数量最少,为 7 个重点工业用地斑块,生态风险大;重点管控单元数量最多,有 597 个,基本分布在海岸带西部,这些单元中的人类活动可能对生态环境带来较大的负面影响;有 223 个一般管控单元,涉及人类日常生活,分布零散但数量不少,管控重点应放在面源污染的监测上(图 10)。

在划分四个管控类别的基础上,可在管控单元的尺度进一步细化管理单元,开展具有针对性、差异化的监管。每个管控单元都整合了多个等级分类结果、地面调查等社会-生态信息(图 11),形成了 980 个海岸带管控斑块的社会-生态属性表,以及每个斑块的主要管控策略。在为每个单元制定管控策略时,可进一步聚焦到斑块的各类属性特征,并结合区域的规划目标和管理现状,设置多部门协同的、业务化的策略,以实现精细化的生态监管。

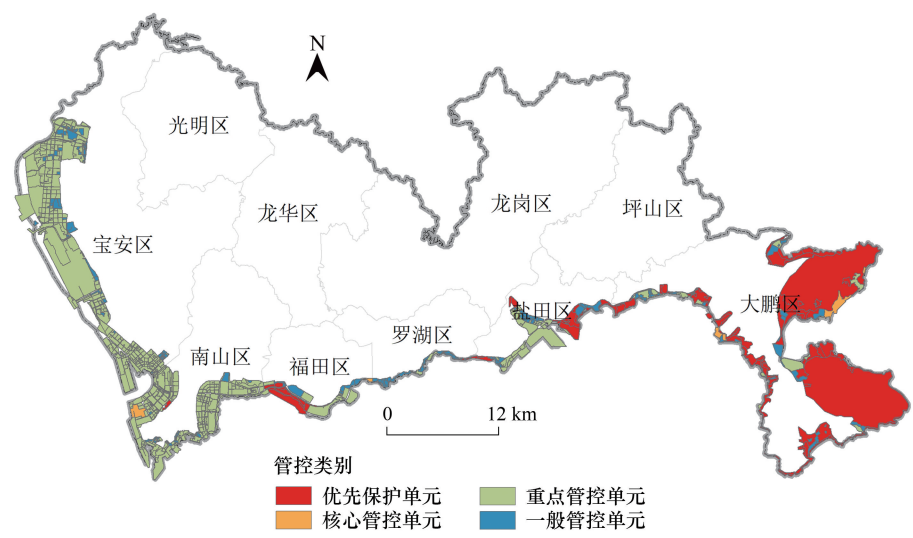


图 10 深圳市海岸带管控单元分布图
Fig.10 Distribution of Shenzhen coastal zone management units

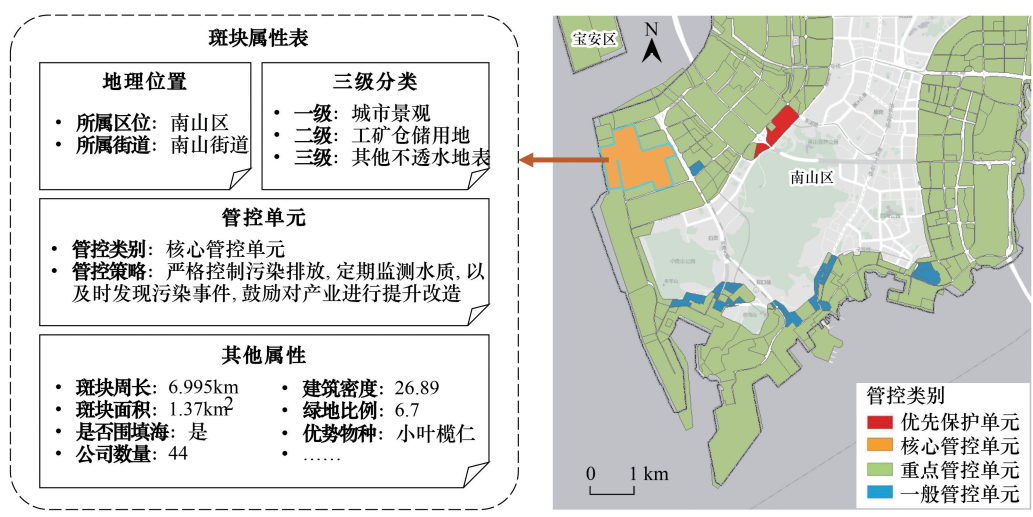


图 11 管控单元属性表示例图
Fig.11 An example of management units attribute table

3 讨论与结论

面向海岸带复杂的生态环境风险和陆海统筹战略的国家需求,本研究从问题出发,构建了“问题识别-格局量化-地面调查-生态监管”的综合框架,并以深圳为试点,利用该研究框架划分为四类生态监管单元,提出了相应的生态风险监管策略。针对以往研究中遥感数据源空间分辨率不足、人类活动表征不精细的现状,本研究通过构建多级社会-生态分类体系,融合高分影像、兴趣点、道路等多源异构遥感数据与地面调查,来准确识别影响生态环境的土地覆盖斑块、社会功能单元以及陆海交互位点,以实现精细化的、空间显性的生态监管。

在社会-生态格局量化以及地面调查的基础上,本研究框架可以进一步关联和深化研究海岸带的具体的生态环境问题。比如,通过海水温度的反演,可以研究海岸带人为活动特征,如排污口、重点工业等对海水的

热污染。通过卫星遥感反演深圳海岸带地区近海海域海水温度分布(图 11),发现部分工业活动对水温有较大影响,如大鹏液化天然气码头和大亚湾核电站、南海油脂工业和南天油粕工业附近海域水温比周边海域均高出 1°C 。海洋热污染会改变近海海域水生态环境,影响海洋生物的分布,如日本高滨核电站的排水使得海水升温,引来热带鱼在周边海域定居,给生态系统带来了潜在风险。类似的,通过叠加分析海岸带高程和沿海居住区,能够预测气候变化引发的海平面上升对海岸带居民的影响。

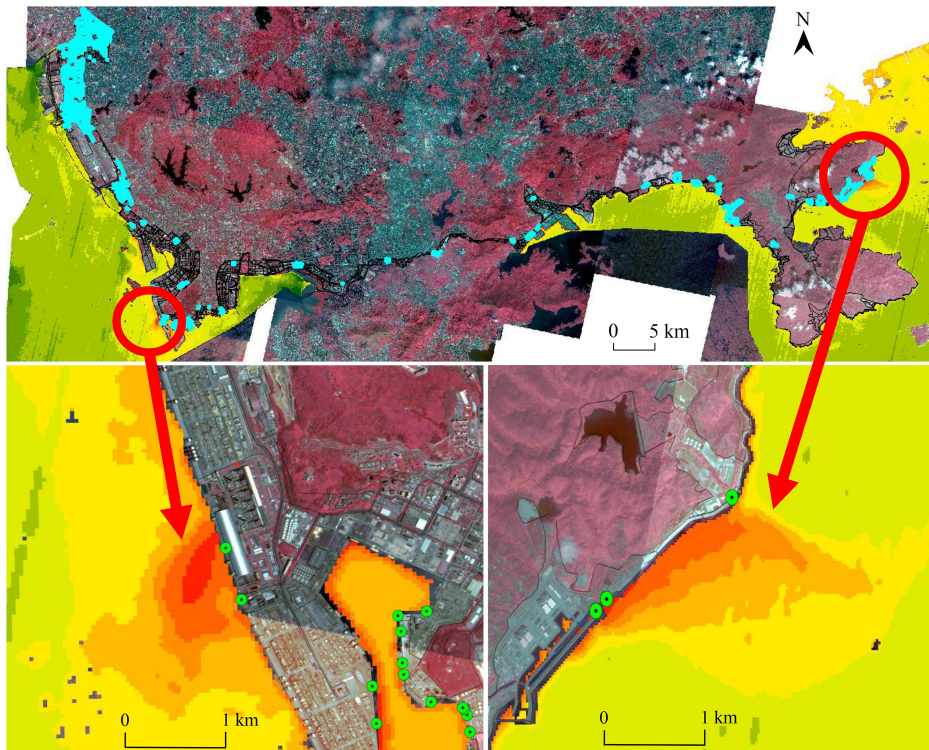


图 12 深圳市海岸带水温反演结果

Fig.12 Water temperature derived from remotely sensed data in Shenzhen coastal zone

陆海交互产生的生态环境问题十分复杂,传统的地面调查尽管能够反映土地覆盖和人为活动特征,但是还缺乏对生态环境问题产生过程的刻画与表征。因此,地面调查的内容、方法还需要根据生态环境问题进一步完善。比如针对红树林,需要调查其中的人类活动特征、外来入侵物种分布等;针对珊瑚礁,需调查其生长情况、是否存在珊瑚白化等;针对面源污染,需要调查生活区的废气排放、农田与果园的农药农肥排放、裸土及建设用地的扬尘、港口码头的废气废水排放、海水养殖区的废水与有机废物排放等;针对入海口、排污口等,需要调查入海河流流量、泥沙入海情况、排放水体的颜色、温度、浑浊度等。这些调查内容涉及的指标多、难度大,调查方法缺少规范,具有较大的挑战。在陆海统筹的后续研究中,还需要不断实践和探索,使该框架更好地支撑海岸带生态监管实践。

参考文献(References):

- [1] 范学忠,袁琳,戴晓燕,张利权. 海岸带综合管理及其研究进展. 生态学报, 2010, 30(10): 2756-2765.
- [2] 彭建,王仰麟,刘松,吴健生,李卫锋. 海岸带土地持续利用景观生态评价. 地理学报, 2003, 58(3): 363-371.
- [3] Mattheus C R, Rodriguez A B, McKee B A, Currin C A. Impact of land-use change and hard structures on the evolution of fringing marsh shorelines. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 88(3): 365-376.
- [4] 李克煌,钟兆站. 论中国生态环境脆弱带. 河南大学学报:自然科学版, 1995, 25(4): 57-64.
- [5] 李猷,王仰麟,彭建,刘珍环,吴健生. 海平面上升的生态损失评估——以深圳市蛇口半岛为例. 地理科学进展, 2009, 28(3): 417-423.

- [6] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1133-1142.
- [7] Kuenzer C, Bluemel A, Gebhardt S, Quoc T V, Dech S. Remote sensing of mangrove ecosystems: a review. *Remote Sensing*, 2011, 3(5): 878-928.
- [8] Bellwood D R, Hoey A S, Hughes T P. Human activity selectively impacts the ecosystem roles of parrotfishes on coral reefs. *Proceedings Biological Sciences*, 2012, 279(1733): 1621-1629.
- [9] 赵蒙蒙, 寇杰锋, 杨静, 赵文静. 粤港澳大湾区海岸带生态安全问题与保护建议. *环境保护*, 2019, 47(23): 29-34.
- [10] Xu H L, Zhang Y, Zhu X Z, Zheng M F. Effects of rainfall-runoff pollution on eutrophication in coastal zone: a case study in Shenzhen Bay, Southern China. *Hydrology Research*, 2019, 50(4): 1062-1075.
- [11] Arkema K K, Guannel G, Verutes G, Wood S A, Guerry A, Ruckelshaus M, Kareiva P, Lacayo M, Silver J M. Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 913-918.
- [12] Voudoukas M I, Mentaschi L, Voukouvalas E, Bianchi A, Dottori F, Feyen L. Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe. *Nature Climate Change*, 2018, 8(9): 776-780.
- [13] 赵庆良, 许世远, 王军, 胡蓓蓓, 叶明武, 刘耀龙. 沿海城市风暴潮灾害风险评估研究进展. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 32-40.
- [14] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 802-806.
- [15] 杨桂山, 施雅风. 中国海岸地带面临的重大环境变化与灾害及其防御对策. *自然灾害学报*, 1999, 8(2): 13-20.
- [16] 杨荫凯. 陆海统筹发展的理论、实践与对策. *区域经济评论*, 2013(5): 31-34.
- [17] 周可法, 吴世新. 基于 RS 和 GIS 技术下城镇空间变化分析及应用研究. *干旱区地理*, 2002, 25(1): 61-64.
- [18] Sandwell D T. Physical principles of remote sensing: third edition. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(3): 2050.
- [19] 易琳, 陈劲松, 朱方, 王月如, 张彦南. 海滨城市海岸带区域生态环境时空变化特征研究——以深圳市为例. *海洋环境科学*, 2017, 36(2): 229-236.
- [20] 陈阳, 岳文泽, 马仁锋. 中国海岸带土地研究回顾与展望. *浙江大学学报: 理学版*, 2017, 44(4): 385-396, 428.
- [21] 许妍, 曹可, 李冕, 许自舟. 海岸带生态风险评价研究进展. *地球科学进展*, 2016, 31(2): 137-146.
- [22] 郑洋, 于格, 钟萍丽, 王友霄. 基于土地利用变化和生态系统服务的海岸带生态安全综合评价——以胶州湾为例. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4097-4105.
- [23] 柏叶辉, 李向新, 钟舒怡. 深圳市 1988—2018 年海岸线时空演变分析. *软件*, 2018, 39(10): 133-138.
- [24] 高梅, 曾辉. 深圳市 1986—2020 年间海岸线动态变化特征及成因分析. *热带地理*, 2012, 32(3): 274-279.
- [25] 李猷, 王仰麟, 彭建, 吴健生, 吕晓芳. 深圳市 1978 年至 2005 年海岸线的动态演变分析. *资源科学*, 2009, 31(5): 875-883.
- [26] 涂晔昕, 沈玉莲, 卢艺, 邬国锋, 费腾. 使用多源遥感影像监测深圳市海岸线变迁. *海洋开发与管理*, 2016, 33(10): 83-88.
- [27] 赵玉灵. 珠江口地区近 30 年海岸线与红树林湿地遥感动态监测. *国土资源遥感*, 2010, 22(S1): 178-184.
- [28] 陈保瑜, 宋悦, 咎启杰, 谭凤仪, 李喻春, 岳钊, 田莉, 余世孝. 深圳湾近 30 年主要景观类型之演变. *中山大学学报: 自然科学版*, 2012, 51(5): 86-92.
- [29] 高义, 苏奋振, 孙晓宇, 杨晓梅, 薛振山, 张丹丹. 近 20a 广东省海岛海岸带土地利用变化及驱动力分析. *海洋学报*, 2011, 33(4): 95-103.
- [30] 左丽君, 徐进勇, 张增祥, 温庆可, 刘斌, 赵晓丽, 易玲. 渤海海岸带地区土地利用时空演变及景观格局响应. *遥感学报*, 2011, 15(3): 604-620.
- [31] 王金华, 黄华梅, 贾后磊, 郑淑娴, 赵明利, 陈绵润, 张晓浩, 庄铎. 粤港澳大湾区海岸带生态系统保护和修复策略. *生态学报*, 2020, 40(23): 8430-8439.
- [32] Qian Y G, Zhou W Q, Yu W J, Pickett S T A. Quantifying spatiotemporal pattern of urban greenspace: new insights from high resolution data. *Landscape Ecology*, 2015, 30(7): 1165-1173.
- [33] 李锋, 王如松. 城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究——以扬州市为例. *生态学报*, 2003, 23(9): 1929-1936.
- [34] 周汝佳, 张永战, 何华春. 基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价. *地理研究*, 2016, 35(6): 1017-1028.
- [35] Li J L, Pu R L, Gong H B, Luo X, Ye M Y, Feng B X. Evolution characteristics of landscape ecological risk patterns in coastal zones in Zhejiang Province, China. *Sustainability*, 2017, 9(4): 584.
- [36] Liu Y C, Liu Y X, Li J L, Lu W Y, Wei X L, Sun C. Evolution of landscape ecological risk at the optimal scale: a case study of the open coastal wetlands in Jiangsu, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1691.
- [37] Rosenzweig C, Solecki W, Hammer S A, Mehrotra S. Cities lead the way in climate-change action. *Nature*, 2010, 467(7318): 909-911.
- [38] Qian Y G, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Xiong D P, Wang W M, Jing C B. Integrating structure and function: mapping the hierarchical spatial heterogeneity of urban landscapes. *Ecological Processes*, 2020, 9(1): 1-11.
- [39] 钱雨果, 周伟奇, 王佳, 胡潇方, 韩立建, 虞文娟, 王伟民. 面向生态监管的多等级生态功能网格概念与框架. *生态学报*, 2021, 41(11):

4259-4270.

- [40] 李孝娟, 傅文辰, 繆迪优, 苏广明. 陆海统筹指导下的深圳海岸带规划探索. 规划师, 2019, 35(7): 18-24.
- [41] Barbier E B, Hacker S D, Kennedy C, Koch E W, Stier A C, Silliman B R. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 2011, 81(2): 169-193.
- [42] 赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能. 生态学报, 2006, 26(1): 186-194.
- [43] Slott J M, Murray A B, Ashton A D. Large-scale responses of complex-shaped coastlines to local shoreline stabilization and climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115(F3): F03033.
- [44] 翟水晶. 电厂温排水对湿地生态系统的影响研究——以江苏射阳港电厂为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- [45] 刘胜. 沿海石油储运溢油风险评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [46] Meng W Q, Hu B B, He M X, Liu B Q, Mo X Q, Li H Y, Wang Z L, Zhang Y. Temporal-spatial variations and driving factors analysis of coastal reclamation in China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 191: 39-49.
- [47] Dar I A, Dar M A. Prediction of shoreline recession using geospatial technology: a case study of Chennai coast, Tamil Nadu, India. *Journal of Coastal Research*, 2009, 256: 1276-1286.
- [48] 戴红, 杨毕铖, 颜露露, 张瑜, 袁春伟. 厦门海域海漂垃圾现状及治理建议. 海洋开发与管理, 2018, 35(11): 67-71.
- [49] 付青, 吴险峰. 我国陆源污染物入海量及污染防治策略. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2006, 15(3): 213-217.
- [50] Fang H Y, Lu Q S, Gao Z Q, Shi R H, Gao W. Analysis of non-point and point source pollution in China: case study in Shima Watershed in Guangdong Province. *SPIE Optical Engineering+Applications. Proc SPIE 8869, Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability X*, San Diego, California, USA. 2013, 8869: 267-273.
- [51] Steers J A, Bird E C F. Coastline changes: a global review. *The Geographical Journal*, 1986, 152(1): 108.