

DOI: 10.5846/stxb202203080551

崔丽娟, 李伟, 窦志国, 张曼胤, 邬国锋, 胡忠文, 高 崑, 雷茵茹. 近 30 年中国滨海滩涂湿地变化及其驱动力. 生态学报, 2022, 42(18): 7297-7307.

Cui L J, Li W, Dou Z G, Zhang M Y, Wu G F, Hu Z W, Gao Y, Li J, Lei Y R. Changes and driving forces of the tidal flat wetlands in coastal China during the past 30 years. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7297-7307.

近 30 年中国滨海滩涂湿地变化及其驱动力

崔丽娟^{1,*}, 李 伟¹, 窦志国¹, 张曼胤¹, 邬国锋², 胡忠文², 高 崑^{1,3}, 李 晶¹,
雷茵茹¹

1 中国林业科学研究院湿地研究所, 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091

2 深圳大学建筑与城市规划学院, 自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 深圳 518060

3 国家基础地理信息中心, 北京 100830

摘要:随着人类活动影响的不断加剧, 滨海湿地正面临着退化的威胁。尤其是近三十年来, 中国东部沿海地区经济发展迅速, 中国滨海湿地在时空格局等方面发生了巨大改变。以 Google Earth Pro (GEP) 的遥感影像为数据源, 基于 Google Earth Engine (GEE) 平台和随机森林分类方法, 解译了 1990—2020 年中国滨海地区的遥感影像, 提取不同年份滩涂湿地面积, 分析了过去 30 年间滨海滩涂湿地空间分布变化, 从自然原因和政策变化两个方面探讨了中国滨海滩涂湿地时空格局变化的驱动机制。研究表明, 中国滨海滩涂湿地呈现总体减少的趋势, 总面积减少了 42.98%, 其中光滩面积减少了 46.30%, 盐沼面积增加了 4.95%。不同省份滩涂湿地面积变化总体趋势与全国一致, 与国家政策紧密联系; 但不同年份各省份因发展需求和压力不同, 滩涂湿地的变化的进程有一定差异。泥沙沉积和水动力条件的变化是滩涂湿地变化的主要自然因素, 方针政策的贯彻执行是滩涂湿地变化的重要人为因素, 通过出台严格合理管控政策可以促进中国滨海滩涂湿地可持续发展。

关键词:滨海滩涂湿地; 时空格局; 人类活动; 面积动态变化; 驱动力

Changes and driving forces of the tidal flat wetlands in coastal China during the past 30 years

CUI Lijuan^{1,*}, LI Wei¹, DOU Zhiguo¹, ZHANG Manyin¹, WU Guofeng², HU Zhongwen², GAO Yin^{1,3}, LI Jing¹,
LEI Yinru¹

1 Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Beijing 100091, China

2 College of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Ministry of Natural Resources Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area, Shenzhen 518060, China

3 National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

Abstract: The coastal tidal flat wetlands are facing the threat of degradation due to increasing human activities. During the past 30 years, the rapid economic development in the urbanized areas of eastern China led to great changes in the temporal and spatial pattern of coastal wetlands. Employing the high-resolution remote sensing images provided by Google Earth Pro (GEP) and Google Earth engine (GEE) platform, the wetland remote sensing images of China from 1990 to 2020 were interpreted and the spatial distribution map of coastal wetlands in the past 30 years was obtained. Combined with the relevant policies, this paper further studied the temporal and spatial patterns and mechanism of China coastal tidal flat wetlands in the past three decades. The results indicated that the total area of the coastal tidal flat wetlands in China had a decreasing trend in the past three decades, reducing by 42.98%. The area of the bare tidal flat reduced by 46.30%, while

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0506200)

收稿日期: 2022-03-08; 采用日期: 2022-06-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lkyclj@126.com

that of the vegetation area increased by 4.95%. The overall change in different provinces was in consistent with the national trend, which was affected by the national policy. However, due to different development needs and pressures in each province, the progresses of change varied in their tidal flat wetlands. The sediment deposition and hydrodynamic environment were the main natural factors that drove the changes of China's tidal flat wetland, while policies and guidelines were important human factors. The introduction of strict and reasonable control policies can promote the sustainable development of coastal tidal flat wetland in China.

Key Words: coastal tidal flat wetlands; temporal and spatial pattern; human activity; dynamic change of area; driving forces

滨海滩涂湿地是指大潮高潮位与低潮位之间的潮浸地带,包括潮间带泥滩、沙滩和咸水沼泽等,是滨海湿地的重要组成部分。滨海滩涂湿地资源丰富,是全球最有价值的生态系统之一,在食物生产、水源涵养、水质净化、气候调节、保持土壤、营养循环、生物多样性维持、支撑区域经济社会发展等方面发挥着不可替代的作用^[1-3]。但由于中国沿海地区人口众多,对滩涂湿地的掠夺性开发利用,导致滩涂湿地面积减少和功能退化,在一定程度上影响了区域可持续发展^[4-6]。滨海滩涂湿地形成、发育和演变以及分布格局,受到海陆相互作用以及人为影响的共同塑造,尤其国家关于滨海湿地保护管理政策是滨海湿地面积变化趋势的重要驱动。定量分析滨海滩涂湿地的格局演变过程,有助于为滨海滩涂的资源评估、合理利用和保护管理提供科学依据^[4,7-11]。

近年来,利用遥感卫星影像进行专题地图制作已经较为成熟,利用遥感技术可以实现滨海滩涂湿地变化研究^[12-16]。通过基于对象的影像分析来进行滨海湿地分类研究较为广泛,Google Earth Engine(GEE)、云计算和大功率计算经常用于量化滨海地区土地利用/覆盖变化的时间序列研究^[17-19]。然而,大多数研究时间间隔较大,分类不够细致,未明确区分光滩和盐沼面积动态变化^[20-21],导致滨海湿地保护管理措施政策与滨海湿地变化难以做到实时对应,难以满足对滨海湿地高质量管理的需求。本研究以 30 年长时间序列下的中国滨海滩涂湿地空间分布特征为核心,结合“陆域—滩涂—海域”之间的相互作用机制以及快速城市化背景,从自然因素和人为因素等方面对典型区域的滨海滩涂时空演变进行驱动力分析,为中国滨海滩涂湿地保护与合理利用提供支持。

1 研究区概况

中国滨海滩涂湿地北至鸭绿江口,南达广西北仑河口,涉及辽宁省、河北省、天津市、山东省、江苏省、上海市、浙江省、福建省、广东省、广西壮族自治区、海南省和台湾省的海岸潮间带^[3]。综合考虑滨海滩涂地区的地形地貌和海岸类型,以从全球高分辨率地理数据集(GSHHG)中获取的海岸线为基准,向陆延伸 10 km,向海延伸 40 km 的区域作为本研究滨海滩涂湿地信息提取的范围。

2 研究方法

2.1 数据获取

本研究采用的遥感数据源为 Landsat 卫星影像。使用了 1990—2020 年逐年覆盖研究区域所有可用的 LIT 正射校正 Landsat 图像,传感器类型包括搭载于 Landsat 5 卫星的专题制图仪 TM(Thematic Mapper)、Landsat 7 卫星的增强型专题制图仪 ETM+(Enhanced Thematic Mapper plus)和 Landsat 8 卫星的陆地成像仪 OLI(Operational Land Imager),信息如表 1 所示。Landsat 卫星影像来源于美国地质调查局(USGS),在 Google Earth Engine 平台可通过在线代码编辑器编写代码调用经大气校正的地表反射率(Surface Reflectance)影像。辅助数据则包括来源于全球行政区域划分数据集(GADM,<https://gadm.org/>)的行政区域划分数据、全球高分辨率地理数据集(GSHHG)的海岸线数据。此外,还有研究区域的地面高程及水深数据,数据来源于全球地形水深数据(ETOPO1)。

表 1 TM、ETM+、OLI 传感器信息
Table 1 TM、ETM+、OLI Sensor information

传感器 Sensor	波段名称 Band name	波长/ μm Wavelength	传感器 Sensor	波段名称 Band name	波长/ μm Wavelength
Thematic Mapper (TM)	Blue(蓝波段)	0.45—0.52	Operational Land Imager (OLI)	SWIR1(短波红外波段 1)	1.55—1.75
	Green(绿波段)	0.52—0.60		SWIR2(短波红外波段 2)	2.08—2.35
	Red(红波段)	0.63—0.69		Coastal(海蓝波段)	0.43—0.45
	NIR(近红外波段)	0.77—0.90		Blue(蓝波段)	0.45—0.51
	SWIR1(短波红外波段 1)	1.55—1.75		Green(绿波段)	0.53—0.59
	SWIR2(短波红外波段 2)	2.08—2.35		Red(红波段)	0.64—0.67
Enhanced Thematic Mapper plus(ETM+)	Blue(蓝波段)	0.45—0.52		NIR(近红外波段)	0.85—0.88
	Green(绿波段)	0.52—0.60		SWIR1(短波红外波段 1)	1.57—1.65
	Red(红波段)	0.63—0.69		SWIR2(短波红外波段 2)	2.11—2.29
	NIR(近红外波段)	0.77—0.90		Cirrus(卷云波段)	1.36—1.38

2.2 数据分析

参照全国第二次湿地资源调查分类标准,结合滨海湿地的实际情况,研究将滨海滩涂湿地分类为光滩和盐沼(含红树林滩涂等)。所有 Landsat 图像预处理任务均在 GEE 平台上进行,利用 Landsat 时间序列影像选取地面参考样本,利用 Google Earth Pro 软件识别已利用地、水体、光滩和盐沼等四种地物类型,将样本点范围以 *.kml 格式从 Google Earth Pro 中导出,在 ArcMap 10.7 中转化为 shp 格式,导入 GEE API 中进行调用^[22—23]。将获取的 Landsat 地表反射率影像集使用 CFMask 算法对云、云阴影进行识别,并利用 QA 波段进行去除,在 GEE API 中调用随机森林分类器,以土地利用类型为目标变量,将 Landsat 影像的原有光学波段、光谱指数和 ETOPO 1 数据作为随机森林分类器的特征变量,决策树的数量设置为 100,其他参数保持默认设置,实行大范围滨海滩涂湿地空间分布信息提取^[24—26]。研究假定 5a 内训练样本保持 5% 的变化,在目标年的高分辨率影像上选取 700 个随机点(滩涂类别 200 个,滨海植被类别 100 个,其他类别 400 个),并以此为 5a 的逐年随机森林分类算法的训练样本点,利用谷歌地球高分辨率影像,通过分层随机采样的方法对验证数据集和训练数据集进行精度验证,利用 ArcGIS 10.7 软件对 1990—2020 年制图产品,每年选取随机点导入 Google Earth Pro 软件,进行目视判读,验证并生成研究中滨海滩涂湿地分类结果。

3 结果与分析

3.1 中国滨海滩涂湿地空间分布现状

中国滨海滩涂湿地面积分布特征自东向西总体呈先下降后增长的趋势,自南向北面积分布趋势变化较大(图 1)。其中,光滩主要集中在中国沿海东部地区(118°E—123°E),在地势低的海岸线与泥沙流速高的地区^[27—28],如黄河三角洲、辽河三角洲、江苏沿海岸段等。大范围盐沼主要集中在三个经度区间:21—23°N,珠江三角洲所在地;30—34°N,长江三角洲以及江苏盐城滩涂湿地所在地;37—41°N,辽河及黄河三角洲所在地。盐沼多与光滩连接,是在光滩的基础上演替而来,所以其分布与光滩的区域较为一致。长江三角洲、黄河三角洲、江苏盐城等沿海地段,这些地区的盐沼面积共计约占中国的 45.4%。

根据滩涂湿地空间分布数据(表 2)可知,江苏省滩涂湿地面积最大,2020 年江苏滩涂湿地总面积为 $24.47 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其次为浙江省 $14.94 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、山东省 $10.55 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。光滩面积较大的省份为江苏省、浙江省、山东省,面积及占比分别为 $21.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (31.07%)、 $13.98 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (19.74%)、 $9.37 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (13.24%)。盐沼面积较大的省份则为江苏省、上海市、山东省、浙江省,面积及占比分别为 $2.48 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (25.77%)、 $2.42 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (25.16%)、 $1.17 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (12.21%)、 $0.96 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (10.01%)。

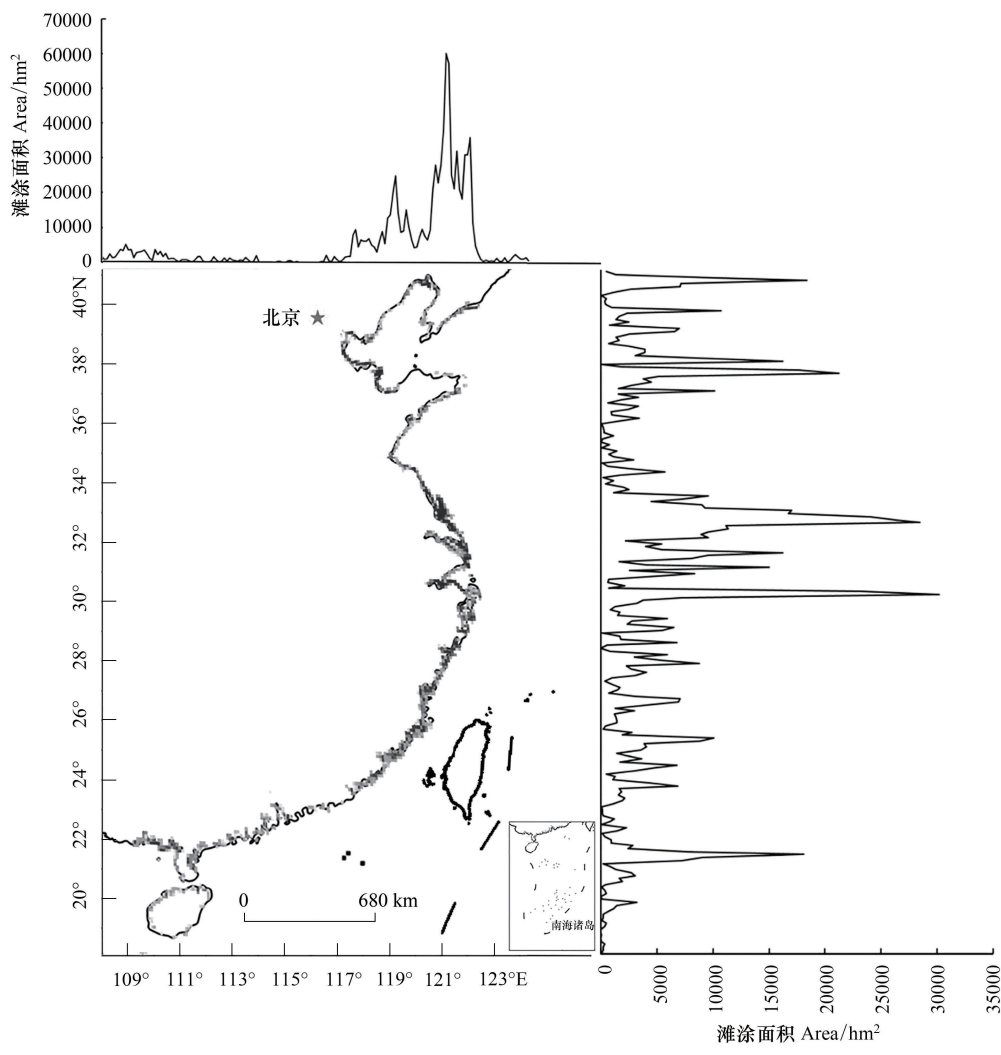


图 1 中国滨海滩涂湿地地图(以 km²/0.1°网格单元)

Fig.1 Map of China's coastal tidal flat wetlands (in square kilometers per 0.1 degree grid unit)

表 2 2020 年沿海各省份滩涂湿地面积及占比情况

Table 2 Area and proportion of coastal tidal flat wetlands for coastal provinces in 2020

省份 Provinces	光滩面积 Bare tidal flat area/hm ²	光滩占比 Bare tidal flat area ratio/%	盐沼面积 Salt marsh area/hm ²	盐沼占比 Salt marsh ratio/%	总面积 Total area/hm ²	总占比 Total ratio/%
辽宁	6.39×10 ⁴	9.02	0.22×10 ⁴	2.33	6.61×10 ⁴	8.22
河北	2.14×10 ⁴	3.02	0.03×10 ⁴	0.27	2.16×10 ⁴	2.69
天津	0.76×10 ⁴	1.07	0.01×10 ⁴	0.11	0.77×10 ⁴	0.95
山东	9.37×10 ⁴	13.24	1.17×10 ⁴	12.21	10.55×10 ⁴	13.12
江苏	21.99×10 ⁴	31.07	2.48×10 ⁴	25.77	24.47×10 ⁴	30.44
上海	3.07×10 ⁴	4.33	2.42×10 ⁴	25.16	5.48×10 ⁴	6.82
浙江	13.98×10 ⁴	19.74	0.96×10 ⁴	10.01	14.94×10 ⁴	18.58
福建	6.01×10 ⁴	8.49	0.45×10 ⁴	4.71	6.46×10 ⁴	8.04
广东	3.08×10 ⁴	4.35	0.80×10 ⁴	8.31	3.88×10 ⁴	4.82
广西	2.01×10 ⁴	2.85	0.78×10 ⁴	8.17	2.80×10 ⁴	3.48
海南	0.50×10 ⁴	0.71	0.26×10 ⁴	2.71	0.76×10 ⁴	0.95
台湾	1.49×10 ⁴	2.11	0.02×10 ⁴	0.26	1.52×10 ⁴	1.88
合计 Sum	70.79×10 ⁴	100.00	9.61×10 ⁴	100.00	80.39×10 ⁴	100.00

3.2 中国滨海滩涂湿地时空分布特征

从近 30 年沿海滩涂湿地面积年份变化情况(图 2)上来看,1990 年至 2020 年,中国滩涂湿地面积变化趋势为明显减少,总面积由 1990 年 $140.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 减少到 2020 年的 $80.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$,减少了 42.98%。其中光滩面积减少显著,减少 $61.05 \times 10^4 \text{ hm}^2$,减少了 46.30%;盐沼面积变化总体较为平稳并略有增加,增加了 $0.45 \times 10^4 \text{ hm}^2$,增加了 4.95%。以 10 年为时间段分析变化趋势显示,1990 年至 2000 年,滩涂湿地面积呈现持续减少趋势,减少了 $20.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (14.58%);2000 年至 2010 年,滩涂湿地面积呈现先动态平稳后减少趋势,减少了 $15.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (13.02%);2010 年至 2020 年,滩涂湿地面积呈现先持续减少后保持平稳的趋势,减少了 $24.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (23.25%)。

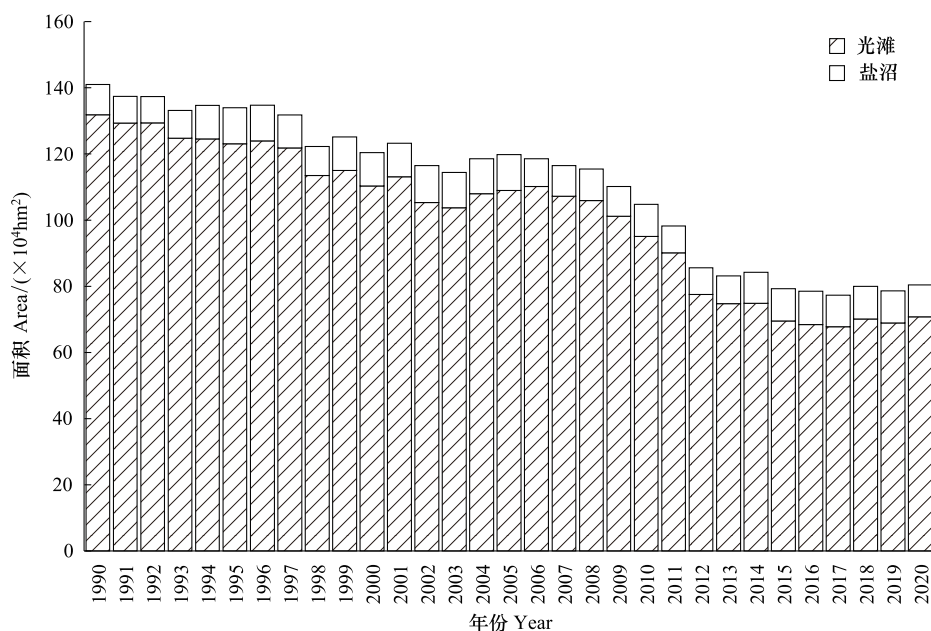


图 2 近 30 年沿海滩涂湿地面积年份变化情况

Fig.2 Annual change of coastal tidal flat wetland area in the past 30 years

中国沿海各省份滩涂湿地(光滩、盐沼)面积年份变化差异明显(见图 3)。江苏省滩涂湿地总面积在沿海省份中保持最大,但损失高达 $16.85 \times 10^4 \text{ hm}^2$,减少了 40.79%。其他滩涂湿地总面积减少较大的省份有山东省、辽宁省,与 1990 年相比分别减少了 $16.25 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (60.65%)、 $9.28 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (58.39%)。此外还有河北省和天津市,与 1990 年相比减少了 $5.05 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (70.02%)和 $1.43 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (65.09%)。2020 年光滩主要集中分布在江苏省、浙江省、山东省、辽宁省、福建省等沿海地区。近 30 年来,江苏省光滩面积损失 $15.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (42.09%)、浙江省为 $2.71 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (16.26%)、山东省为 $16.32 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (63.51%)、辽宁省 $8.70 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (57.65%)、福建省 $4.98 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (45.31%)。此外减少比例较大的省份还有河北省和天津市,与 1990 年相比减少了 $4.96 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (69.91%)和 $1.43 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (65.39%)。沿海各省份 2020 年盐沼面积较 1990 年变化差异明显。面积减少的省份有江苏省、广东省、辽宁省、河北省、天津市,减少面积及占比分别为 $0.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (25.97%)、 $0.61 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (43.34%)、 $0.58 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (72.2%)、 $0.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (77.43%)、 $0.01 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (9.18%)。其余沿海省份盐沼面积均增加,其中广西增幅最大,达到 687.99% ($0.68 \times 10^4 \text{ hm}^2$)。增幅较为明显的省份还有台湾 556.31% ($0.02 \times 10^4 \text{ hm}^2$)、福建 365.79% ($0.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$)、浙江 159.62% ($0.59 \times 10^4 \text{ hm}^2$)。山东、江苏、福建、广东、广西、海南分阶段滩涂湿地面积变化趋势与中国滩涂面积变化趋势呈现高度的一致性,即先减少后动态平稳之后再减少最后动态平稳;辽宁、天津在最初 1990 年至 2000 年先出现面积增加后与中国变化一致;河北则为持续性减少;上海 2000 年至 2010 年滩涂面积为增加趋势;浙江滩涂面积在 2016—2020 年持续增加;台

湾滩涂面积的变化趋势则为先减少后动态平稳再增加最后减少。

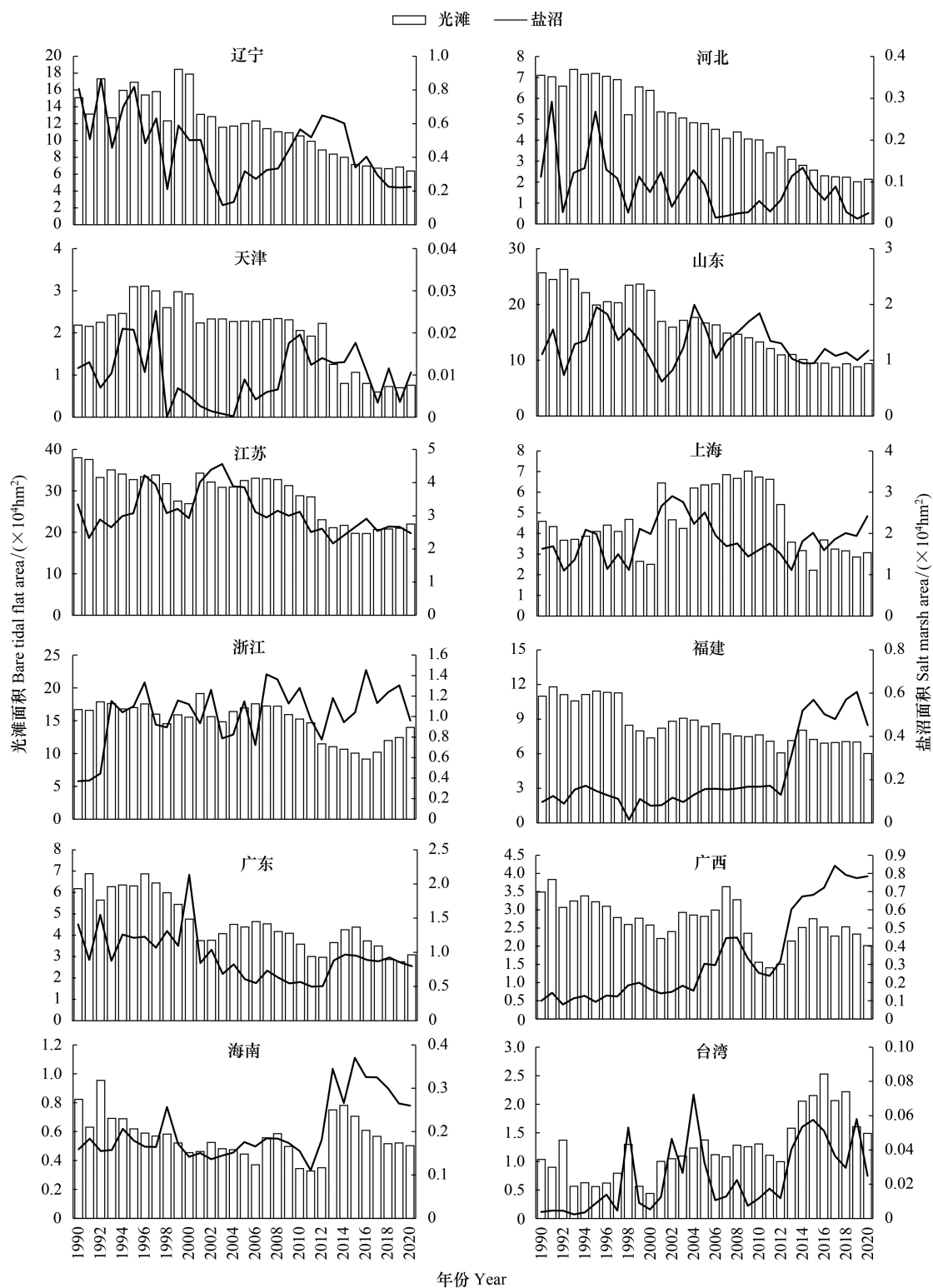


图3 中国沿海各省份光滩、盐沼面积年份变化情况

Fig.3 Annual change of coastal tidal flat wetland area in coastal provinces of China

3.3 典型区域滩涂湿地变化

3.3.1 盐城滩涂湿地变化

江苏盐城分布有中国最典型的滩涂湿地,占江苏省滩涂总面积近 70%,是由古黄河三角洲和长江三角洲的泥沙在黄海和东海潮汐作用下形成的淤泥质滩涂^[29-30]。1990 年至 2020 年,盐城滨海滩涂湿地面积变化趋势明显减少,总面积由 1990 年的 $24.55 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 减少到 2020 年的 $16.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中滩涂面积减少了 $8.23 \times 10^4 \text{ hm}^2$,盐沼面积减少了 $0.08 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。盐城滩涂湿地面积变化趋势与中国滩涂面积变化趋势一致,近 30 年内以 2010 年为时间节点的前后两个阶段均呈现先减少后动态平稳的规律。该时段盐城滩涂湿地中的光滩面积呈下降趋势,盐沼面积基本保持稳定状态,其变化趋势如图 4 所示。

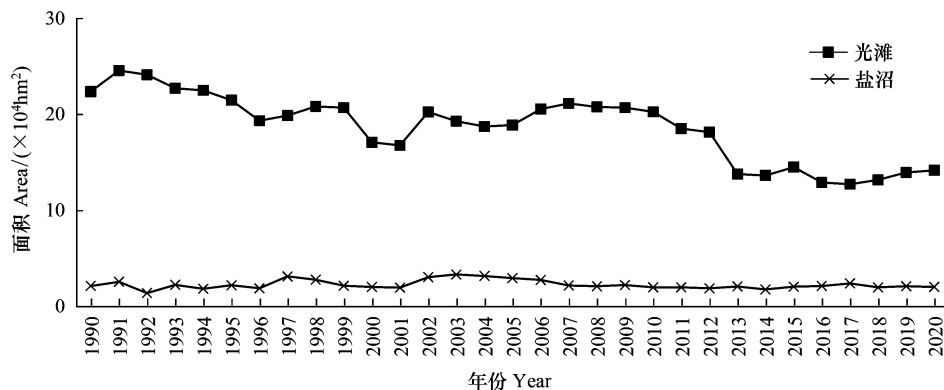


图 4 盐城滩涂湿地面积变化趋势图

Fig.4 Change trend of coastal tidal flat wetland area in Yancheng

3.3.2 三角洲滩涂湿地变化

中国滨海地区共分布有 4 大三角洲类型的滩涂湿地,包括长江三角洲、黄河三角洲、辽河三角洲和珠江三角洲湿地^[31-33]。1990 年至 2020 年的四大三角洲滩涂湿地面积整体呈下降趋势,光滩和盐沼面积均随时间明显减少,如图 5 所示。长江、黄河、辽河、珠江三角洲 2020 年对比 1990 年光滩面积分别减少了 $3.82 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (46.42%)、 $14.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (66.78%)、 $3.03 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (49.50%)、 $2.15 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (66.33%)。长江、黄河、辽河、珠江三角洲 2020 年对比 1990 年盐沼面积分别减少了 $0.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (52.53%)、 $0.02 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (2.17%)、 $0.53 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (77.29%)、 $0.61 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (68.52%)。

3.4 中国滨海滩涂湿地变化驱动力分析

3.4.1 自然驱动力分析

滨海滩涂湿地是泥沙在入海口或海岸淤积而成,其变化受到泥沙沉积和和水动力环境的影响。大面积滩涂湿地一般位于沿海地段、地势低平、排水不畅、泥流速度快的区域,例如黄河三角洲、长江三角洲等。河流水沙及其造陆运动为三角洲滩涂湿地发展提供了源动力,河口冲淤是三角洲滩涂湿地面积不断增长的重要原因。但是,受气候变化影响流域降水发生变化,以及黄土高原森林覆盖率的增加,黄河入海泥沙量呈阶梯状减少^[34],2020 年利津水文站年输沙量为 $3.14 \times 10^8 \text{ t}$ ^[35],为多年均值的 49%;同时黄河故道处海岸侵蚀加快,新黄河河口处冲淤能力减弱,导致黄河三角洲 2020 年对比 1990 年滩涂湿地面积减少了 $14.75 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (63.76%)。此外,黄河三角洲近几年互花米草面积增加,也是光滩面积减少和盐沼面积增加的重要原因^[36-37]。长江三角洲地形演变受流域来水来沙影响较大,2020 年对比 1990 年滩涂湿地面积减少了 $4.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (47.45%),2000 年以后,大通水文站的年输沙量出现了断崖式下降,2020 年大通水文站年输沙量为 $1.64 \times 10^8 \text{ t}$ ^[38],为多年均值的 47%,长江口来沙量锐减,发生由淤积主导向侵蚀主导的转变^[39-41],长江三角洲滩涂湿地面积减少。

3.4.2 人为驱动力分析

国家政策是主导滨海滩涂湿地面积变化的主要原因。在 2000 年至 2010 年,《中华人民共和国海域使用

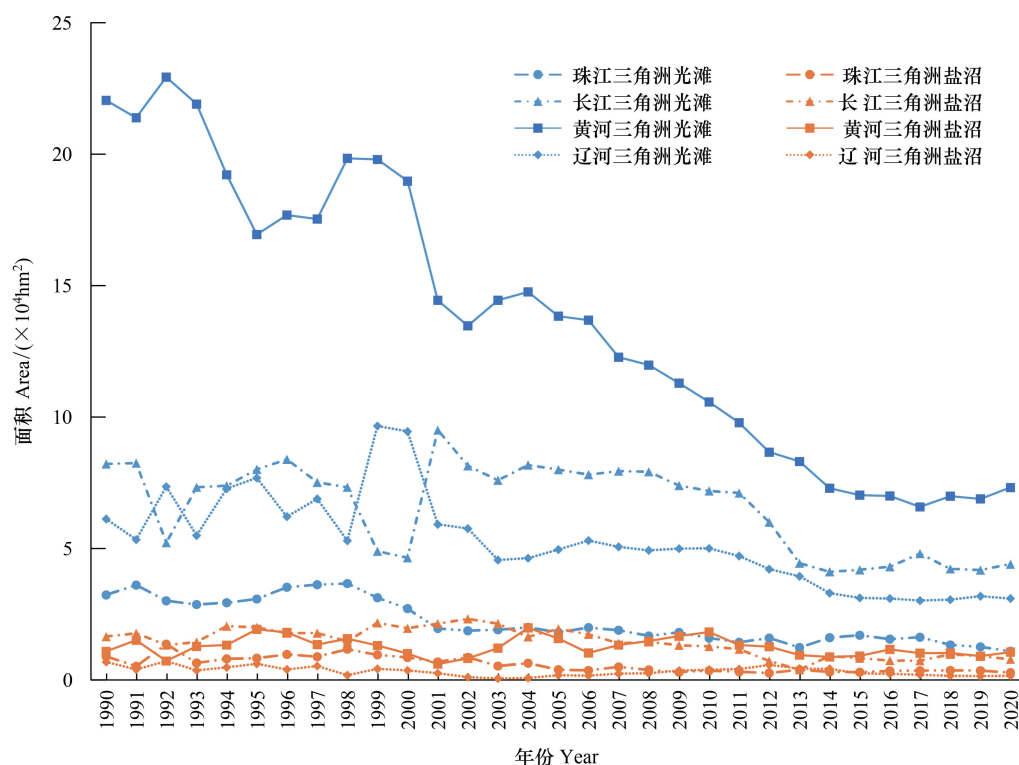


图5 四大三角洲滩涂湿地面积变化趋势图

Fig.5 Change trend of coastal tidal flat wetland area in Yancheng

管理法》(2001年)、《国务院进一步加强海洋管理工作若干问题的通知》(2004年)、《国务院办公厅关于加强湿地保护管理的通知》(2004年)先后出台,提出了海域的合理开发、可持续利用以及严控制围填海,中国滩涂湿地面积快速减少的趋势得到短期遏制,但仍然持续减少,总计减少 $15.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (13.02%)。2010年至2020年,滩涂湿地总面积呈现先持续减少后保持平稳的趋势,总计减少了 $24.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (23.25%)。在此期间,《国务院关于印发全国主体功能区规划的通知》(2010年)和《全国海洋经济发展“十二五”规划》(2012年)发布,提出在中国优先发展沿海区域的战略背景下,沿海基础设施建设以及滨海产业的发展导致沿海省份用地紧张,沿海城市通过“围填海”方式缓解区域发展的用地需求,因此,2010年至2015年期间滩涂湿地面积急剧减少。在此之后,《全国海洋主体功能区规划》(2015年)、《湿地保护修复制度方案》(2016年)和《国务院关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知》(2018年)等一系列有利于滨海滩涂湿地保护的政策出台,进一步加强滨海湿地保护,严格管控围填海活动,尤其是在2019年,“全面禁止围填海”写进十九届四中全会公报,对违法违规项目进行生态修复,对严重破坏海洋生态环境的坚决予以拆除,中国滩涂湿地面积再次归于平稳趋势,2015年—2020年间,除个别省份略有减少外,到2020年中国滩涂湿地面积已略有增加,国务院有关文件精神得到有效落实,《中华人民共和国湿地保护法》于2022年6月起实施,为滨海湿地保护提供了法律保障。

基建占用、渔业发展、滩涂围垦、油田开发等因素是造成滨海滩涂湿地减少的直接原因^[9, 42]。围垦养殖、基建占用和油田开发等直接引起滨海湿地面积减少的热点区域主要分布在江苏盐城、辽河三角洲、黄河三角洲、长江三角洲和珠江三角洲等地区。盐城是国家实施沿海开发战略的重要节点,“开发沿海滩涂、建设海上盐城”战略促使大面积的滩涂围垦在相当长一段时间内持续进行,除用于种植业、水产养殖业外,还被用于工业开发和港口扩建^[29]。辽河三角洲、黄河三角洲地区石油资源丰富,油田开发是导致其滩涂湿地面积减少的主要原因^[33, 43]。长江三角洲地区作为中国经济发展最活跃、人口最密集的地区之一,其城镇化和经济快速发

展造成用地需求的不断增长,其变化驱动力由围垦后进行农业生产转为城市扩张,成为滩涂面积减少的最主要原因^[27]。珠江三角洲地区是我国第二大经济区,存在大量的浅海养殖活动,此外,为实现产业结构转型,在深圳、广州和珠海等城市的滨海滩涂区域,通过围海造地建立产业园区。

此外,在滩涂围垦热点区主要分布在渤海湾、江苏省和杭州湾^[44],滩涂湿地广泛受到人类活动干扰^[45]。对近 10 年围垦热点区域的分析,滩涂湿地空间变化分布情况见图 6。河北省人工围填海面积达 $2.80 \times 10^4 \text{ hm}^2$,转化为人工湿地 $0.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$,转化为滩涂湿地 $0.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$;天津市人工围填海面积达 $1.51 \times 10^4 \text{ hm}^2$,转化为人工湿地 $0.01 \times 10^2 \text{ hm}^2$,转化为滩涂湿地 $0.25 \times 10^2 \text{ hm}^2$,这两个省份对滩涂的人工开垦主要用于工业发展,此外,天津滨海新区建设是天津地区围海造地,滩涂面积损失的重要原因。江苏省人工围填海面积达 $4.63 \times 10^4 \text{ hm}^2$,转化为人工湿地 $3.94 \times 10^4 \text{ hm}^2$,转化为滩涂湿地 $2.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$,江苏省滩涂湿地大部分转换为养殖鱼塘和农业用地及港口、道路等基础建设,人工开垦面积较大、利用方式较为均衡。上海市人工围填海面积达 $0.70 \times 10^4 \text{ hm}^2$,转化为人工湿地 $3.57 \times 10^4 \text{ hm}^2$,转化为滩涂湿地 $0.01 \times 10^4 \text{ hm}^2$,滩涂围垦主要转化为养殖塘等人

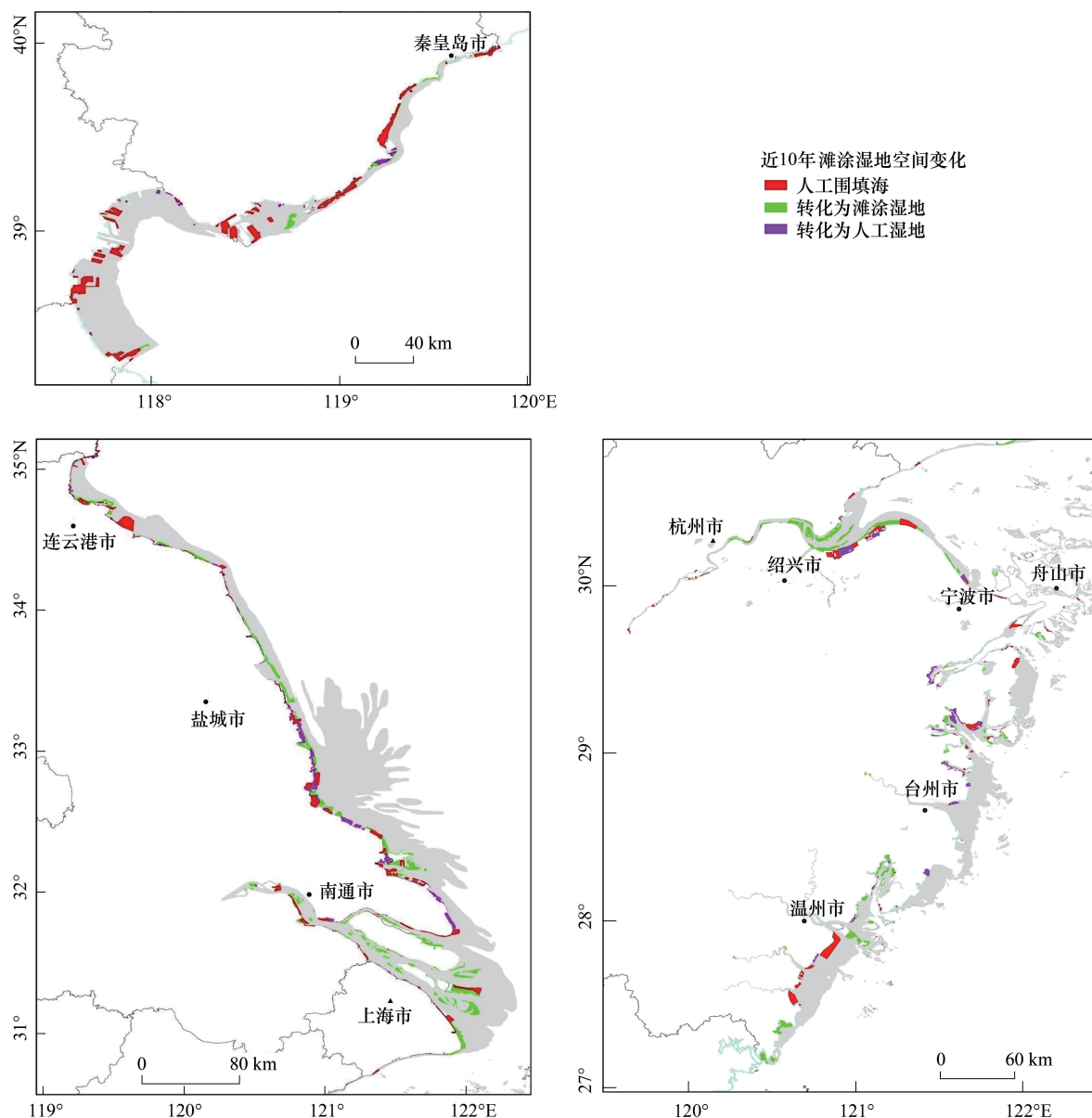


图 6 围垦热点区滩涂湿地空间变化分布图

Fig.6 The spatial distribution and comparison of changes in tidal flat wetlands in hot reclamation areas

工湿地。浙江省人工围填海面积达 $3.41 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 转化为人工湿地 $11.84 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 转化为滩涂湿地 $3.90 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其对滩涂的人工开垦相较于工业发展更多的是转化为农业(水稻田)、渔业(养殖塘)发展。

4 结论

近 30 年来, 中国滨海滩涂湿地面积不断减少, 从 1990 年的 $140.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 减少到 2020 年的 $80.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中光滩面积损失 46.30%、盐沼面积增加 4.95%。中国滩涂湿地时空变化主要受自然条件和人为因素两方面影响, 自然因素在大时间尺度上控制着滩涂湿地演化, 人为因素在短期内影响滩涂湿地的动态变化。不同省份滩涂湿地面积变化总体趋势与全国一致, 国家关于土地利用、经济发展、环境保护的一系列相关政策是影响滩涂围垦的重要因素, 各省份因发展需求和压力不同, 滩涂湿地面积减小的变化程度有一定差异。随着人们湿地保护意识的增强, 在全面禁止围填海的前提下, 通过严守生态保护红线、加强滨海滩涂湿地保护恢复、合理利用滨海滩涂湿地资源、明确各方责任职责等一系列政策措施, 将有效促进中国滨海滩涂湿地的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 张晓龙, 李培英, 李萍, 徐兴永. 中国滨海湿地研究现状与展望. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 87-95.
- [2] 李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 张曼胤, 马牧源, 康晓明, 王义飞. 中国滨海湿地及其生态系统服务功能研究概述. 林业调查规划, 2014, 39(4): 24-30.
- [3] 崔丽娟, 康晓明, 张曼胤, 李伟. 中国滨海湿地生态系统功能及服务评价. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [4] 雷光春, 张正旺, 于秀波, 张明祥. 中国滨海湿地保护管理战略研究. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [5] 李晶, 雷茵茹, 崔丽娟, 潘旭, 张骁栋, 张曼胤, 李伟. 我国滨海滩涂湿地现状及研究进展. 林业资源管理, 2018, (2): 24-28, 137-137.
- [6] 徐彩瑶, 濮励杰, 朱明. 沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展. 生态学报, 2018, 38(3): 1148-1162.
- [7] 宫鹏, 牛振国, 程晓, 赵魁义, 周德民, 魏建宏, 梁璐, 王晓风, 李丹丹, 黄华兵, 王毅, 王坤, 李文宁, 王显威, 应清, 杨镇钟, 叶玉芳, 李展, 庄大方, 迟耀斌, 周会珍, 闫军. 中国 1990 和 2000 基准年湿地变化遥感. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(6): 768-775.
- [8] 牛振国, 张海英, 王显威, 姚文博, 周德民, 赵魁义, 赵惠, 李娜娜, 黄华兵, 李丛丛, 杨军, 柳彩霞, 刘爽, 王琳, 李展, 杨镇钟, 乔飞, 郑姚闽, 陈炎磊, 盛永伟, 高小红, 朱卫红, 王文卿, 王红, 翁永玲, 庄大方, 刘纪远, 罗志才, 程晓, 郭子琪, 宫鹏. 1978—2008 年中国湿地类型变化. 科学通报, 2012, 57(16): 1400-1411.
- [9] 宫宁, 牛振国, 齐伟, 张海英. 中国湿地变化的驱动力分析. 遥感学报, 2016, 20(2): 172-183.
- [10] Bian H L, Li W, Li Y Z, Ren B, Niu Y D, Zeng Z Q. Driving forces of changes in China's wetland area from the first (1999-2001) to second (2009-2011) national inventory of wetland resources. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00867.
- [11] Tian Y X, Li J W, Wang S L, Ai B, Cai H L, Wen Z. Spatio-Temporal Changes and Driving Force Analysis of Wetlands in Jiaozhou Bay. Journal of Coastal Research, 2022, 38(2): 328-344.
- [12] 蒋卫国, 李京, 王文杰, 谢志仁, 宫辉力. 基于遥感与 GIS 的辽河三角洲湿地资源变化及驱动力分析. 国土资源遥感, 2005, (3): 62-65.
- [13] 廖华军, 李国胜, 王少华, 崔林林, 欧阳宁雷. 近 30 年苏北滨海滩涂湿地演变特征与空间格局. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1209-1217.
- [14] 洪佳, 卢晓宁, 王玲玲. 1973—2013 年黄河三角洲湿地景观演变驱动力. 生态学报, 2016, 36(4): 924-935.
- [15] 王俊杰, 刘珏, 石铁柱, 郭国锋. 1990—2015 年广西廉州湾红树林遥感动态监测. 森林与环境学报, 2016, 36(4): 455-460.
- [16] 刘会增, 刘珏, 石铁柱, 王俊杰, 郭国锋. 红树林景观格局遥感提取的尺度效应. 遥感信息, 2017, 32(5): 44-51.
- [17] DeLancey E R, Kariyeva J, Bried J T, Hird J N. Large-scale probabilistic identification of boreal peatlands using Google Earth Engine, open-access satellite data, and machine learning. PLoS One, 2019, 14(6): e0218165.
- [18] Long X R, Li X Y, Lin H, Zhang M. Mapping the vegetation distribution and dynamics of a wetland using adaptive-stacking and Google Earth Engine based on multi-source remote sensing data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102453.
- [19] Fu B L, Lan F W, Xie S Y, Liu M, He H C, Li Y, Liu L L, Huang L K, Fan D L, Gao E T, Chen Z L. Spatio-temporal coupling coordination analysis between marsh vegetation and hydrology change from 1985 to 2019 using LandTrendr algorithm and Google Earth Engine. Ecological Indicators, 2022, 137: 108763.
- [20] Zhang L G, Hu Q, Tang Z H. Assessing the contemporary status of Nebraska's eastern saline wetlands by using a machine learning algorithm on the Google Earth Engine cloud computing platform. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(3): 193.

- [21] Yin H Y, Hu Y M, Liu M, Li C L, Chang Y. Evolutions of 30-year spatio-temporal distribution and influencing factors of *Suaeda salsa* in Bohai Bay, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 138.
- [22] Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, Chen B Q, Ma J, Dong J W, Doughty R B, Zhong Q Y, Qin Y W, Dai S Q, Li X P, Zhao B, Li B. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986—2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 238: 110987.
- [23] Dervisoglu A. Analysis of the temporal changes of inland Ramsar sites in turkey using Google earth engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(8): 521.
- [24] Zhang K Y, Dong X Y, Liu Z G, Gao W X, Hu Z W, Wu G F. Mapping tidal flats with Landsat 8 images and Google earth engine: a case study of the China's eastern coastal zone circa 2015. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 924.
- [25] Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, Hou L Y, Qin Y W, Dong J W, Doughty R B, Chen B Q, Zhang X, Chen Y, Ma J, Zhao B, Li B. Mapping coastal wetlands of China using time series Landsat images in 2018 and Google earth engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 163: 312-326.
- [26] Jia M M, Wang Z M, Mao D H, Ren C Y, Wang C, Wang Y Q. Rapid, robust, and automated mapping of tidal flats in China using time series Sentinel-2 images and Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 255: 112285.
- [27] Gao Y, Cui L J, Liu J J, Li W, Lei Y R. China's coastal-wetland change analysis based on high-resolution remote sensing. *Marine and Freshwater Research*, 2020, 71(9): 1161-1181.
- [28] Wang X X, Xiao X M, Xu X, Zou Z H, Chen B Q, Qin Y W, Zhang X, Dong J W, Liu D Y, Pan L H, Li B. Rebound in China's coastal wetlands following conservation and restoration. *Nature Sustainability*, 2021, 4(12): 1076-1083.
- [29] 左平, 李云, 赵书河, 周鑫, 滕厚锋, 陈浩. 1976 年以来江苏盐城滨海湿地景观变化及驱动力分析. *海洋学报*, 2012, 34(1): 101-108.
- [30] 崔红星, 汪驰升, 杨红, 胡忠文, 王春峰. 近 40 年苏北海岸线时空动态变迁分析. *海洋环境科学*, 2020, 39(5): 694-702, 708-708.
- [31] Chu Z X, Sun X G, Zhai S K, Xu K H. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: based on remote sensing images. *Marine Geology*, 2006, 227(1/2): 13-30.
- [32] Wu M X, Li C W, Du J, He P M, Zhong S C, Wu P L, Lu H D, Fang S B. Quantifying the dynamics and driving forces of the coastal wetland landscape of the Yangtze River Estuary since the 1960s. *Regional Studies in Marine Science*, 2019, 32: 100854.
- [33] 闫晓露, 钟敬秋, 韩增林, 孙才志, 刘森. 近 40 年辽东湾北部围垦区内外滨海湿地景观演替特征及驱动力分析. *地理科学*, 2019, 39(7): 1155-1165.
- [34] Wang H J, Yang Z S, Li Y H, Guo Z G, Sun X X, Wang Y. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe (Yellow River) mouth. *Continental Shelf Research*, 2006, 27(6): 854-871.
- [35] 水利部黄河水利委员会. 黄河泥沙公报 2020. [2022-02-20]. <http://www.yrcc.gov.cn/nishagonggao/2020/2020hnhsgb.pdf>
- [36] 任广波, 周莉, 梁建, 路峰, 王安东, 王建步, 李晓敏, 马毅. “高分五号”高光谱互花米草遥感识别与制图研究. *海洋科学进展*, 2021, 39(2): 312-326.
- [37] Wang Z P, Ke Y H, Chen M M, Zhou D M, Zhu L, Bai J H. Mapping coastal wetlands in the Yellow River Delta, China during 2008-2019: impacts of valid observations, harmonic regression, and critical months. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(20): 7880-7906.
- [38] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2020. 武汉: 长江出版社, 2021.
- [39] Yang S L, Milliman J D, Li P, Xu K. 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1/2): 14-20.
- [40] 黎兵, 严学新, 何中发, 陈勇, 张金华. 长江口水下地形演变对三峡水库蓄水的响应. *科学通报*, 2015, 60(18): 1735-1744.
- [41] 李溢汶, 张诗媛. 新形势下长江口横沙浅滩演变分析及趋势预测. *人民长江*, 2020, 51(S2): 16-19, 62-62.
- [42] 吴文挺, 田波, 周云轩, 舒敏彦, 戚纤云, 胥为. 中国海岸带围垦遥感分析. *生态学报*, 2016, 36(16): 5007-5016.
- [43] 魏帆, 韩广轩, 张金萍, 栗云召, 赵建民. 1985—2015 年围填海活动影响下的环渤海滨海湿地演变特征. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1527-1537.
- [44] 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.
- [45] Cui B S, He Q, Gu B H, Bai J H, Liu X H. China's coastal wetlands: understanding environmental changes and human impacts for management and conservation. *Wetlands*, 2016, 36(S1): 1-9.