

基于生态系统服务的黄河三角洲生态风险评估研究

郭 贺¹, 樊彦国¹, 管青春¹, 樊博文², 王 勇³

(1. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 烟台市地理信息中心, 山东 烟台 264000)

摘要: 生态安全与人类福祉密切相关, 因此量化区域生态风险能够有效地对高风险地区进行防范, 同时更利于区域可持续发展。本文通过 InVEST 模型测算黄河三角洲区域 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年生态系统碳存储、生境质量和土壤保持 3 种生态系统服务的物理量, 根据测算结果构建生态风险评估模型, 在此基础上对黄河三角洲生态风险进行时空格局演变特征分析。结果表明: 1) 黄河三角洲区域生态系统服务整体弱化, 在建设用地、水域等区域最为明显。2) 1990—2020 年黄河三角洲区域碳存储整体呈现内陆高沿海低的空间格局, 生境质量空间波动范围增大, 土壤保持能力降低。3) 黄河三角洲区域生态风险有上升趋势。沿海水域及建设用地区域受风险概率较大, 而林草地等植被覆盖区域生态风险低。研究结果可为黄河流域生态保护和高质量发展提供决策支持与参考。

关键词: 黄河三角洲; 生态系统服务; 生态风险; 时空格局

中图分类号: X171.1, S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2023)5-0015-12

DOI: 10.11759/hyxx20220429003

近 40 年来, 我国在经济、科技等方面都取得了瞩目成就, 但长期的资源开发和人口压力使我国生态系统和生态系统服务严重退化, 生态安全面临严峻挑战。其中, 人类为满足自身利益, 过度汲取自然资源用于人工建筑、石油开采等活动, 致使水土流失、土地荒漠化等现象频繁发生^[1], 经济发展与环境保护之间出现矛盾。如何在满足人类需求的同时进一步保护生态系统, 降低区域生态风险成为目前亟待解决的问题。

生态风险评估是指生态系统中的一种或多种威胁因素可能导致该生态环境面临风险的一种评价方法^[2]。经过学者对风险理论及评价框架的不断完善, 至今已取得众多成果。针对生态风险评估的国内外研究主要集中在两个方面: 1) 从风险源、生境和风险受体的角度出发, 通过影响因子构建风险模型^[3-6]; 2) 基于景观生态学的生态过程与土地类型变化的耦合关联, 通过景观格局指数进行建模^[7-10]。随着黄河流域的生态保护与高质量发展的国家战略被提出, 黄河三角洲区域生态风险评估也逐渐由重金属、烃类有机物等物质对环境污染的研究扩展到对区域生态系统的风险研究。目前, 对黄河三角洲生态风险的研究包含多个方面: 1) 研究黄河三角洲土壤层中镉、铜等重金属物质对土壤的污染, 通过重金属含量分析该

区域潜在生态风险程度^[11-12]; 2) 依据黄河三角洲湿地生态系统特征和结构量化生态系统服务价值, 通过货币的形式进行分析生态系统健康状况^[13-14]; 3) 从土壤盐渍化角度出发, 通过测算土壤中的盐分含量进而分析土壤盐渍化对生态安全的威胁^[15-16]; 4) 根据黄河三角洲区域存在的风险源和受体定量评估区域生态风险^[17-18]; 5) 从景观格局角度通过景观扰动指数以及景观脆弱指数构建风险指数模型^[19-20]。黄河三角洲区域风险评估方法的多样化为生态安全提供有利保障, 但目前主要从重金属、服务价值、土壤盐碱度等角度进行生态风险评估, 风险评估指标过于单一, 缺少生态系统整体进行综合性评估。人类和自然的双重因素会改变土地利用类型, 土地利用类型发生改变打破了生态系统原有的平衡, 从而增加生态系统患风险的概率, 与此同时, 土地利用类型改变对

收稿日期: 2022-4-29; 修回日期: 2022-6-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42106215); 山东省自然科学基金(ZR202103030691)

[Foundation: National Natural Science Youth Foundation of China, No. 42106215; Natural Science Youth Foundation of Shandong, No. ZR202103030691]

作者简介: 郭贺(1998—), 女, 河北沧州人, 硕士生, 主要从事生态风险评估研究, E-mail: g_he1998@163.com; 管青春(1988—), 通信作者, 山东青岛人, 研究方向为生态系统综合评估与生态安全, E-mail: qingchun68628@126.com

生态系统的碳储量、生物多样性以及土壤保持能力均有作用,进而影响生态系统服务质量,因此本研究从生态系统服务的视角对区域生态系统进行生态风险评估。

黄河三角洲是我国暖温带地区最完整、最广阔、最年轻的新生湿地生态系统^[21]。近年来,黄河三角洲不仅受集约化围海、滩涂开垦等活动破坏,同时又受到海水侵蚀等自然因素影响,致使该区域生态稳定性减弱。生态系统受损不仅会减缓经济发展的脚步,也为人类生存埋下隐患。鉴于此,本文以黄河三角洲为研究区,基于生态系统服务构建生态风险评估模型,以期为黄河三角洲生态安全管理提供科学依据,从而为黄河流域生态保护和高质量发展提供技术保障。

1 研究区概况与数据方法

1.1 研究区

黄河三角洲由河流入海时的泥沙沉积形成,是我国目前最大的三角洲^[22]。近代黄河三角洲以垦利宁海为顶点,套儿河口及支脉沟口为两端构成的扇形区域,北毗邻渤海湾,东接莱州湾^[23],是一个具有较高价值的陆海交错带^[24]。该区域主要位于山东省东营市,包含河口区、利津县及垦利区,地理位置为东经 118°06'~119°20',北纬 37°20'~38°10',如图 1 所示该区域属于暖温带半湿润大陆季风气候,不仅光照充足,而且冬寒夏热,四季分明^[25],此外,该区域年平均降水量为 530~630 mm。

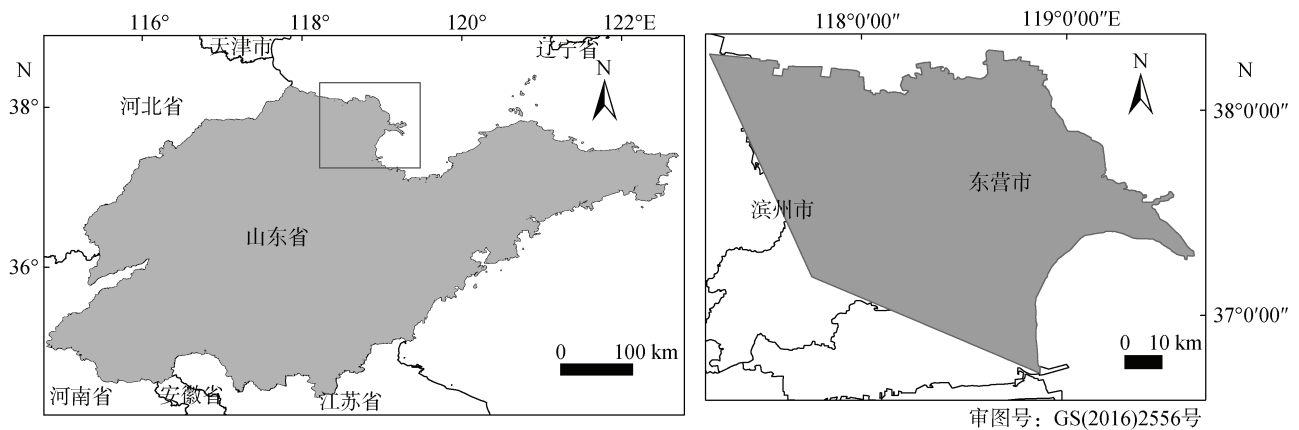


图 1 研究区位置
Fig. 1 Study area

1.2 数据来源与处理

选取 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年同季度且分辨率为 30 m 的 Landsat 影像作为数据源。GEE 平台可根据研究需求直接加载影像信息并完成影像处理工作,而随机森林方法以不同地物特征作为树的节点进行分类,分类精度较高且不易发生过拟合现象,因此该研究在 GEE 平台上通过随机森林方法完成解译。依据国家标准《土地利用现状分类》并结合黄河三角洲区域土地现状,最终将研究区域分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地六大类(图 2),分类总体精度均高于 92%,Kappa 系数均高于 0.85,满足精度要求。其他实验数据来源如表 1 所示。

1.3 研究方法

InVEST 模型是美国斯坦福大学联合其他部门

研发的一个能够量化和评估生态系统服务的模型^[26],该模型根据土地利用类型和气象等数据来模拟生态系统服务功能的动态变化,从而帮助政府科学合理分配资源。本研究选取 InVEST 模型中的碳存储、生境质量以及土壤保持 3 个模块对黄河三角洲生态系统服务进行评估。

1.3.1 生态系统碳储量估算

陆地生态系统中的碳储量与全球碳循环和大气中 CO₂ 浓度密切相关^[27],其主要来源包括地上碳库、地下碳库、土壤有机碳库和枯落物有机碳库。碳存储计算公式如下:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}, \quad (1)$$

$$C_{total} = (C_{abovei} + C_{belowi} + C_{soili} + C_{dead_i}) \times A_i, \quad (2)$$

式中, C_{total} 主要指生态系统的碳储量(t), C_{above} 主要指土壤层以上植物中的碳储量(t), C_{below} 包括地下生物量活根系的碳储量(t), C_{soil} 指土壤有机碳库中的碳储

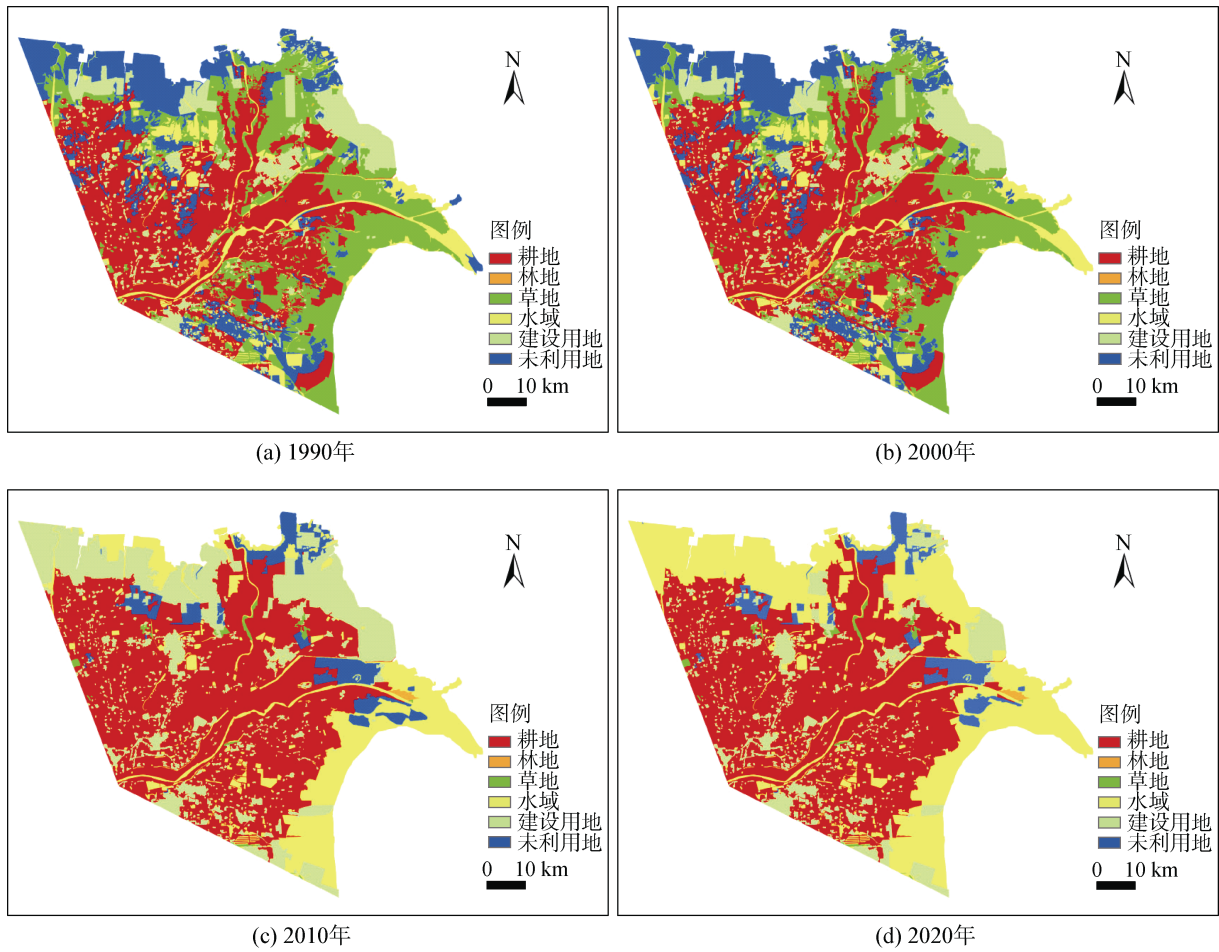


图 2 黄河三角洲土地利用类型分类图

Fig. 2 Classification of land use types in the Yellow River Delta

表 1 实验数据来源

Tab. 1 Experimental data sources

数据类型	数据源
土地利用数据	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
气象数据	国家气象信息中心(http://www.nmic.cn/)
DEM 数据	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
土壤数据	世界土壤数据库(HWSD)

量(t), C_{dead} 主要指枯木及垃圾等的碳储量(t), C_{abovei} 、 C_{belowi} 、 C_{soili} 、 C_{deadi} 为对应的碳密度(t/hm^2), A_i 为 i 类土地面积(hm^2)。

1.3.2 生态系统生境质量估算

生境质量指环境为生物生存发展提供适宜条件的能力^[28], 也间接反映出该系统的生物多样性。测算时需充分考虑土地类型和威胁因子之间的关系, 通过测算结果来评估人类活动对生态环境的干预程度^[29]。生境质量计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z + k^Z} \right) \right], \quad (3)$$

式中, Q_{xj} 为生态系统生境质量, H_j 取值范围 0~1; D_{xj} 为生境退化度指数; k 常数为半饱和系数, 一般取值为生境退化度的一半; Z 为归一化常量, 一般取值为 2.5。

1.3.3 生态系统土壤保持估算

土壤保持指通过植被自身结构减少水土流失的功能, 在维持生态系统服务和功能中扮演着重要角色^[30]。测算时根据研究区域地形、降雨等因素^[31], 分别计算潜在土壤侵蚀量和产沙量与真实侵蚀量和产沙量, 并将两者测算的差值作为土壤保持量化值。土壤保持计算公式如下:

$$Q_{srx} = Q_{se_px} - Q_{se_ax}, \quad (4)$$

$$Q_{se_px} = R_x \times K_x \times L_x \times S_x, \quad (5)$$

$$Q_{se_ax} = R_x \times K_x \times L_x \times S_x \times C_x \times P_x, \quad (6)$$

式中, Q_{srx} 为土壤保持量($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$); Q_{se_px} 为潜在水土

流失量($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$); Q_{se_ax} 为实际水土流失量($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$); R_x 为降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$); K_x 为土壤可蚀性因子($t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$); L_x 为坡长因子, S_x 为坡度因子, C_x 为植被覆盖因子, P_x 为表示水土保持措施因子。

1.3.4 生态风险评价模型

生态系统中碳存储在大气碳循环中扮演重要角色,而生态系统碳储量的减少表明该区域参与碳循环的植被在减少,植被覆盖率降低,生态系统抵抗风险的能力减弱。生境质量反映了生物多样性,生境质量的下降表明该生态系统稳定性变弱,生存环境受到破坏,因而对生态安全产生威胁。土壤保持能够表征生态系统水土流失情况,黄河流经区域的沿海土壤常年受到海水侵蚀导致水库泥沙淤积,从而降低水库的蓄水能力,水生环境的退化增加该区域受风险的可能。上述的三种生态系统服务对生态系统稳定和安全均有影响,因此本研究选取碳存储、生境质量、土壤保持构建生态风险评估模型,如公式(7)所示。变量 η 代表当前生态

系统现状,结合生态系统服务测算结果确定。

$$ERI_i = \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{S} \cdot \eta_i, \quad (7)$$

式中, ERI_i 为生态风险; K 为土地利用类型; S_k 为土地利用类型 K 的面积(hm^2); S 为研究区土地总面积(hm^2); η_i 为引入的生态系统服务综合指数。

η_i 确定时需要考虑当前生态系统服务现状,由于三种生态服务量化结果取值范围不同,首先需要对结果进行归一化处理,其次通过主成分分析降低各服务功能之间的相关性并进行取反处理,进而得到代表变量 η 的栅格图,最终根据模型测算研究区域生态风险空间分布。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务时空变化

2.1.1 黄河三角洲碳存储时空分布

黄河三角洲区域碳存储的空间分布如图3所示。从时间角度看,1990—2020年该区域储碳量整体呈

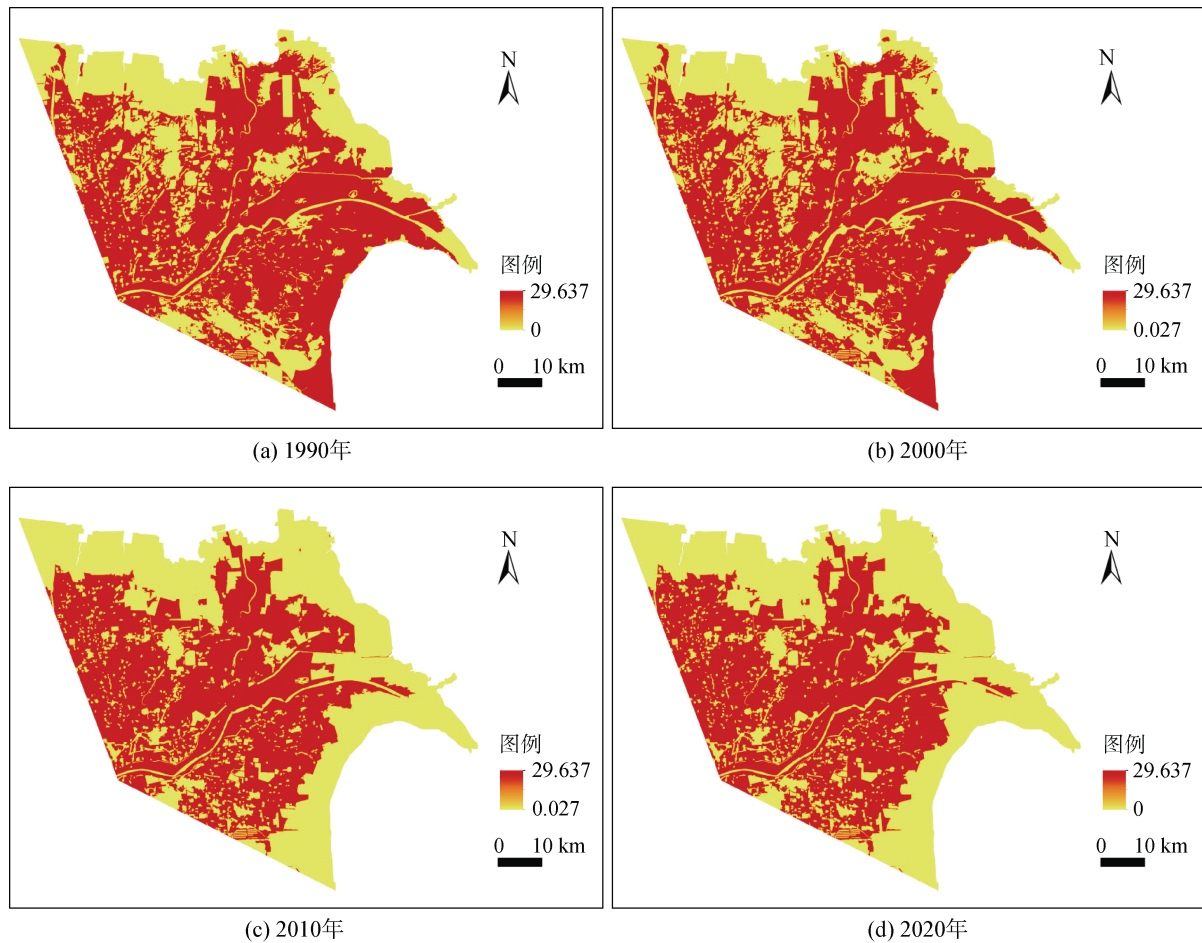


图3 黄河三角洲碳储量空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of carbon storage in the Yellow River Delta

现下降的趋势,1990年、2000年、2010年和2020年平均碳密度分别为 12.87 t/hm^2 、 12.76 t/hm^2 、 10.86 t/hm^2 和 10.26 t/hm^2 。其中,1990—2000年碳储量分布变化较小,平均碳密度变化幅度仅为 0.11 t/hm^2 。2000—2010年碳储量变化显著,平均碳密度降低了 1.9 t/hm^2 。2010—2020年碳储量仍处于减少状态,与2010年相比减少了 0.6 t/hm^2 。从空间角度看,该区域整体呈现内陆高沿海低的空间格局,高值区主要分布在研究区域内部,低值区主要分布在沿海部分地区,其中低值区域有向内扩张的趋势。2010年和2020年沿海区域含碳量明显下降,研究区域东南区域变化最为明显,而中部变化程度较小。整体来看,黄河三角洲区域内部碳分布较稳定,但沿海部分改变明显,碳储量降低不利于生态系统中碳循环和气候调节,从而降低该区域抵抗风险的能力。

2.1.2 黄河三角洲生境质量时空分布

黄河三角洲区域生境质量空间分布如图4所示。

从时间角度看,1990—2020年该区域的低质量生境逐渐扩大,整体呈下降趋势,1990年、2000年、2010年和2020年生境质量平均值分别为0.520、0.521、0.336和0.445。其中,1990—2000年黄河三角洲生态状况保持稳定,生境质量平均值变化最小,变化值仅为0.001。2000—2010年该区域生境质量空间波动范围增大,生境质量差异扩大,生境质量平均值降低0.185。2010—2020年该区域整体生境质量上升趋势,平均值增加0.109。从空间角度看,生境质量内部变化较小,沿海区域变化明显。高值区主要分布在东南方向以及沿海区域,低值区主要分布在北部区域,其中低值区域有向内扩张的趋势。2010年生境质量变化最显著,其中高品质生境主要分布在东南沿海区域,研究区域中部处于中间值,而东南区域以及人类活动频繁地区生境质量相对较低。随着生态治理问题被重视,2020年黄河三角洲区域生境质量得到改善,但该区域生境质量整体呈下降趋势,

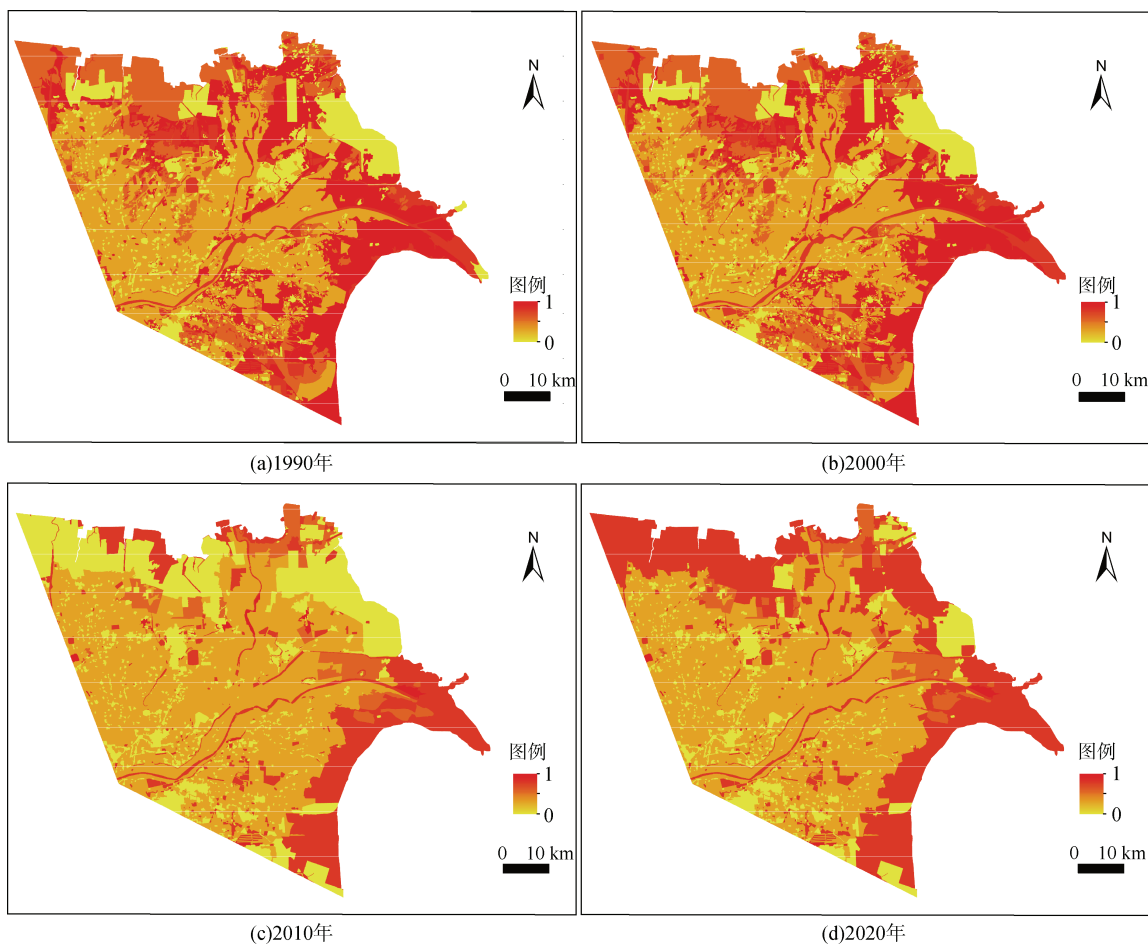


图4 黄河三角洲生境质量空间分布图
Fig. 4 Spatial distribution of habitat quality in the Yellow River Delta

而生境质量的降低严重影响生物的栖息环境,导致生态系统稳定性随生物多样性的缩减而变弱。

2.1.3 黄河三角洲土壤保持时空分布

黄河三角洲土壤保持空间分布如图 5 所示。从时间角度看,1990—2020 年该区域土壤保持能力变弱,1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年土壤保持最高值分别是 $9\,232\,410\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $3\,621\,500\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $6\,345\,680\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $5\,796\,530\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,对应平均值为 $8\,067.1\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $3\,088.6\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $5\,321.8\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $5\,691.28\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中,1990—2000 年研究区域土

壤保持能力直线下降,土壤保持能力在 2000 年达到最低,且变化幅度达到 $4\,978.5\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2000—2010 年,该区域土壤保持能力得到增强,平均土壤保持量增加 $2\,233.2\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2010—2020 年,平均值虽有所增加,但土壤保持最高值降低 $549\,150\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。从空间角度看,研究区近 30 年土壤保持在空间分布格局上基本一致,中部地区相较于沿海地区土壤保持能力更好,建设用地及水域区域能力最弱。由于土壤保持的强弱与水土流失密切相关,因此黄河三角洲区域整体土壤保持能力的下降不利于该区域的生态安全。

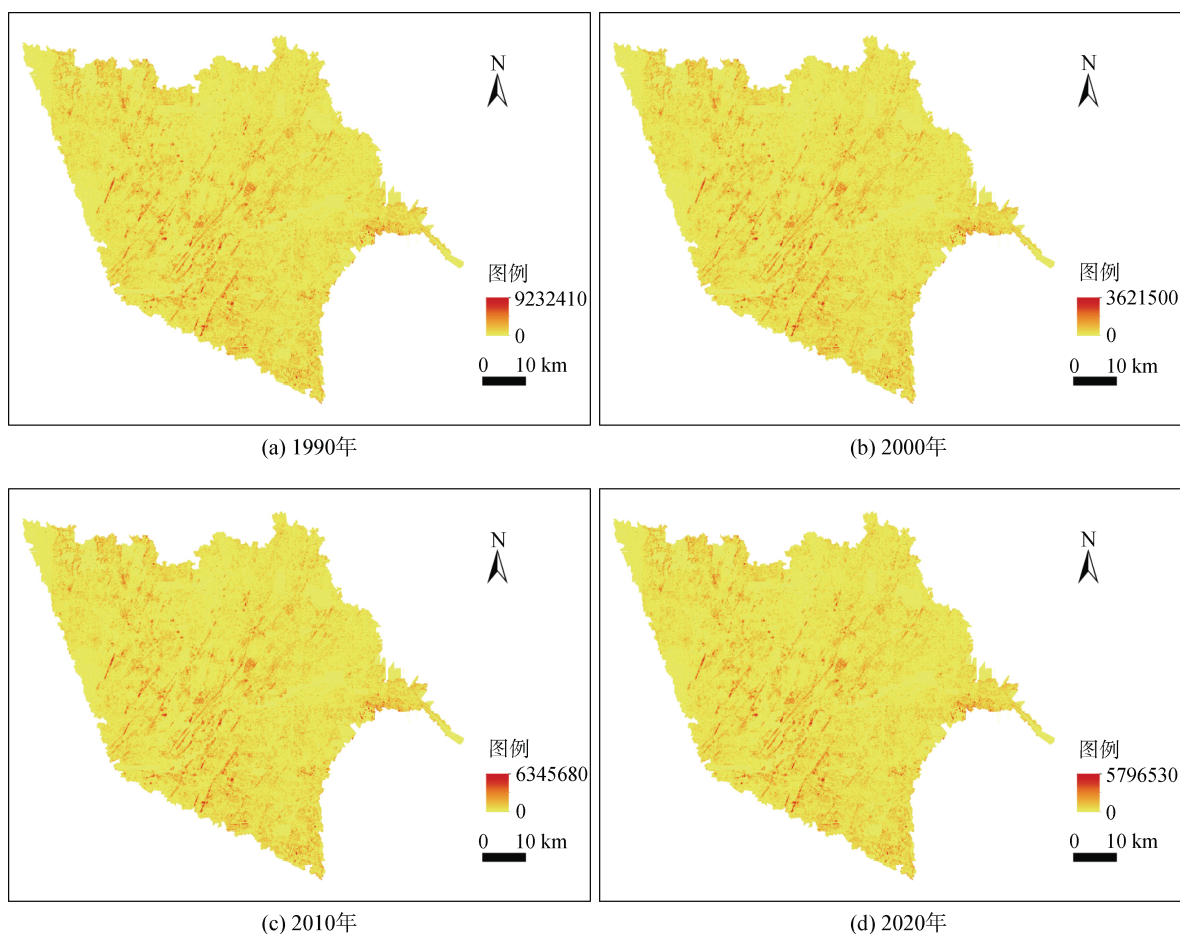


图 5 黄河三角洲土壤保持空间分布图
Fig. 5 Spatial distribution of soil conservation in the Yellow River Delta

2.2 生态风险空间分布

黄河三角洲区域生态风险空间分布,如图 6 所示。从时间角度看,1990—2020 年该区域生态风险呈现上升趋势,1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年平均风险值分别为 0.327、0.329、0.4612、0.508。其中,1990—2000 年该区域生态风险变化最小,平均生态风险值仅增加 0.002。2000—2010 年该区域风险变化最明显,平均风

险值增加了 0.132 2。2010—2020 年风险值增加 0.046 8,并在 2020 年达到最高。从空间角度看,1990 年该区域东南部分属于较低风险地区,高风险区域分布零散,其中该区域中部大部分属于较高风险区。2000 年该区域较低生态风险区主要分布在研究区东南部沿海区域,较高生态风险区域主要分布北部地区,而东北沿海地区为高风险区。2010 年该区域风险等级发生改变,其

中中部地区风险等级较低，北部沿海及内部部分地区属于中等风险地区，而东南沿海地区受风险概率达到最大。2020 年相比于 2010 年高风险区域范围扩大，其中北部沿海地区升为高风险区域，沿海区域风险等级均相对较高，而内部区域仍属于低风险区。

整体看，黄河三角洲受损害概率极高的地区主要分布在建筑用地以及沿海水域部分。低风险区主要在研究区域内部，包含有森林、草地以及耕地，其中林草地风险指数相对较低，间接表明林草地生态系统受损害可能性较小。

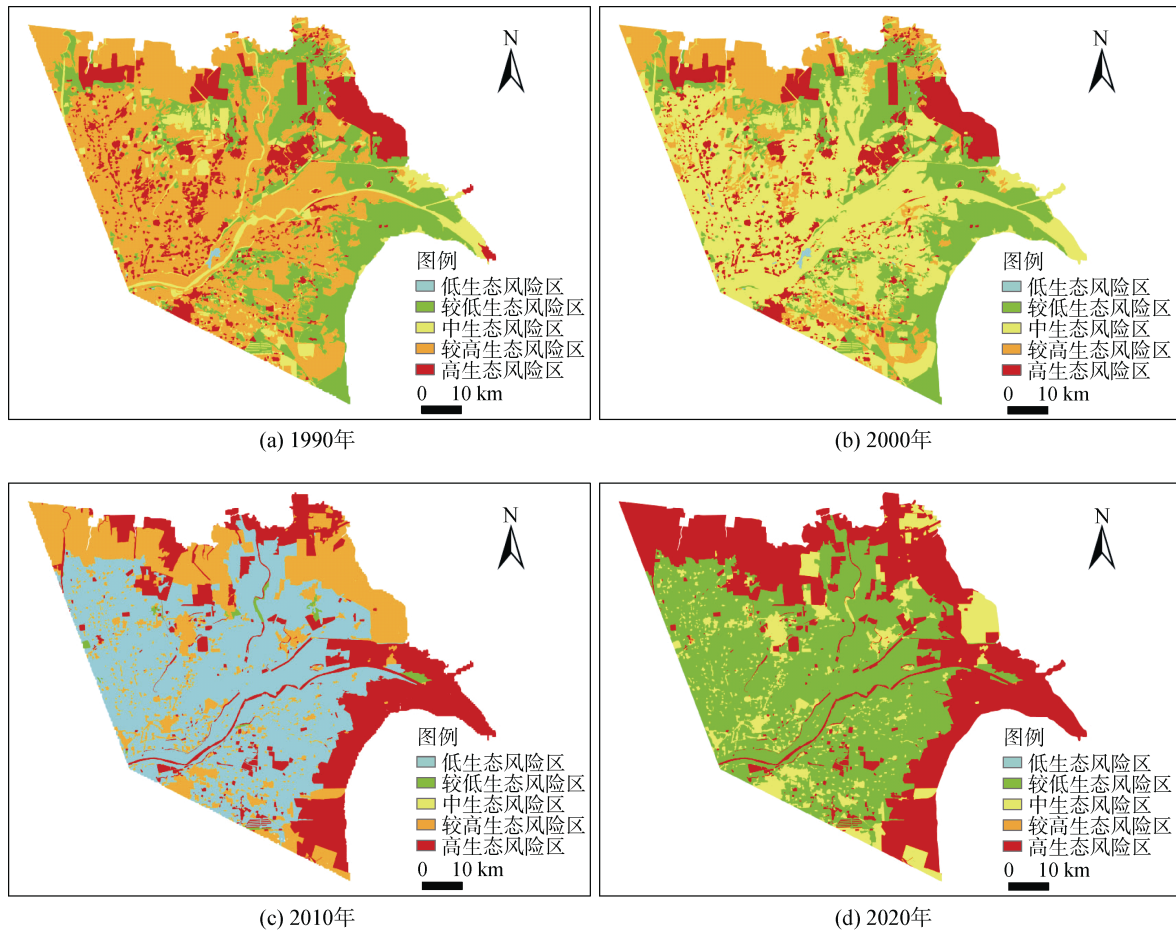


图 6 黄河三角洲生态风险分布图

Fig. 6 Distribution of ecological risks in the Yellow River Delta

结合黄河三角洲土地利用分布与生态风险分布图可知，四个时期风险等级变化最明显的是耕地，因此将耕地作为风险高低评判的相对参照。黄河三角洲区域生态系统服务归一化均值及生态风险分级面积比分别如图 7、图 8 所示。

总体看，该区域 1990 年生态系统服务归一化后的碳存储和生境质量处于四个时期中最高，土壤保持虽然稍弱，但生态系统服务整体状态较好。在风险分级比中，虽然该区域较高生态风险占比达 50% 以上，但较高生态风险区域中耕地面积占比较大，说明 1990 年黄河三角洲生态系统处于相对稳定状态，整体表明 1990 年黄河三角洲区域生态系统安全程度

较高。到 2000 年，该区域生态系统服务土壤保持和碳存储均有所降低，且耕地风险等级也降为中生态风险区，同时风险等级占比中低生态风险下降了 0.6%，整体表明该区域生态稳定性变弱。2010 年该区域除土壤保持外生态系统服务均有下滑趋势，耕地风险等级降低为低生态风险区，而高生态风险区占比达到 23.5%，整体表明该区域生态安全受破坏概率在持续增大。到 2020 年该区域生境质量有所缓和，但碳储量减少明显。在此阶段耕地升为较低生态风险区，但高生态风险区随建设用地和水域面积的增加占比达到 37.4%，达到四年中的最高，由此可见该区域生态安全受到更大威胁。

3 讨论与结论

3.1 讨论

常用风险评估模型以景观格局与生态过程相互作用产生的不利结果作为影响因子，如景观分维、景观破碎度、景观分离度等。其中景观损失度指数通过景观干扰度和脆弱度确定，确定过程需结合专家打分赋予不同指数权重，最终结合土地利用面积比和景观损失度进行风险量化。为提高风险模型的合理性和可操作性，本研究分别从碳存储、生物多样性、水土保持能力三个方面通过量化生态系统服务对生态系统现状的评估，从生态系统整体的大视角，通过储碳量、水土保持能力的强弱以及生物多样、环境的变化情况来构建风险模型。

本文分析基于生态系统服务构建风险模型，从研究区域上看，量化生态风险对该区域发展和资源分配

有警示和参考作用。从研究方法上看，生态风险评估结果与生态系统服务密切相关，研究过程充分结合该区域不同层面的服务变化来综合评估生态风险现状。

土地类型转变打破黄河三角洲生态系统的平衡状态和调节能力，同时也增加了区域受风险的概率。为使黄河三角洲生态系统服务功能最大限度地给人类提供可持续生存生活保证，当地政府应抓住环黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略。根据风险分级结果，重点关注高风险地区存在的问题，通过生态海岸带修复、绿化造林等工程，在增加植被分布面积的同时增强生态系统水土保持能力；针对建设用地和未利用地区，应降低人类开发强度，合理开发土地资源；针对低风险区域，应注重对生物的保护，节约利用自然资源。通过不同区域不同措施，有针对性地强化黄河三角洲生态治理，进而提高人类应对自然环境变化的能力^[32]。

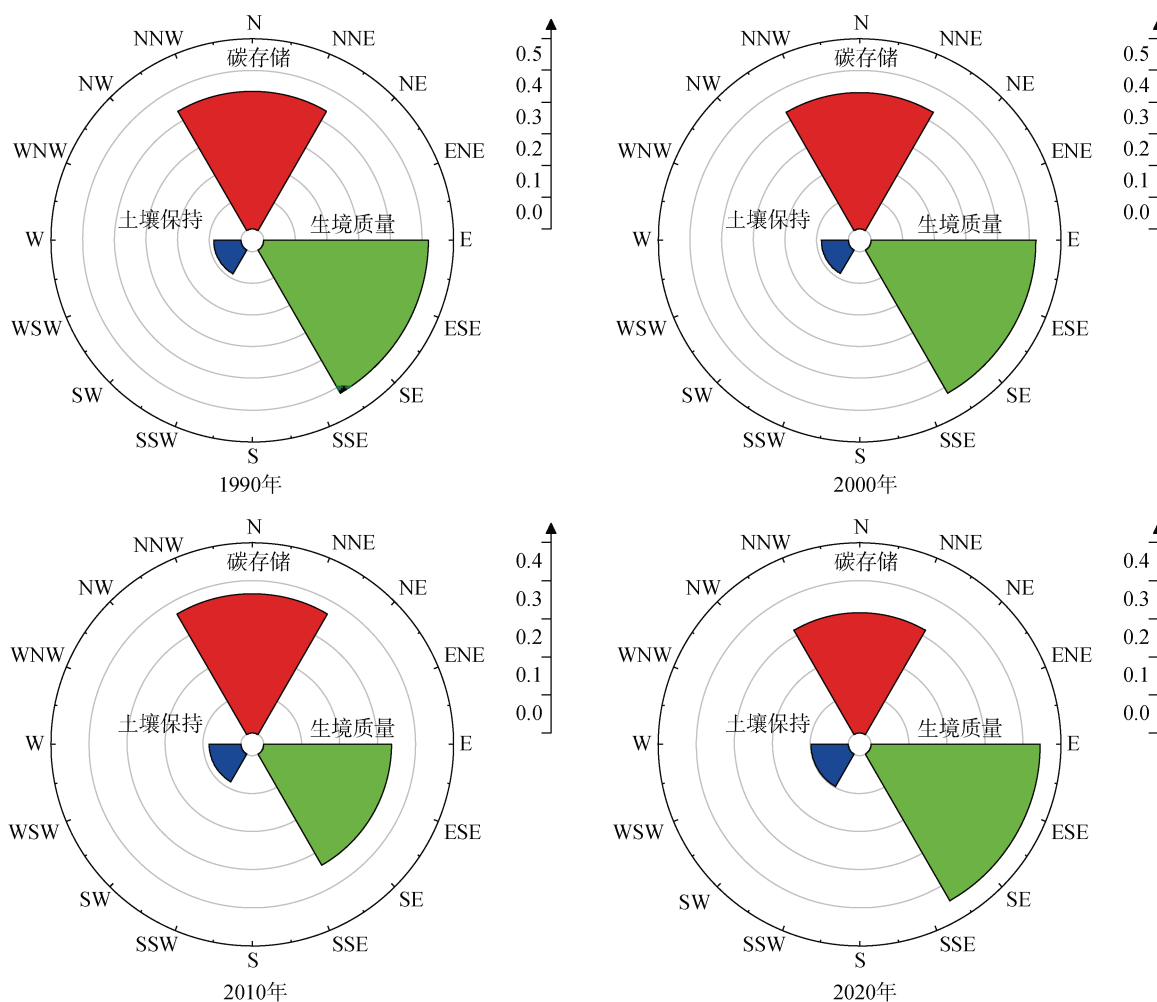


图 7 生态系统服务归一化均值
Fig. 7 Normalized values of ecosystem services

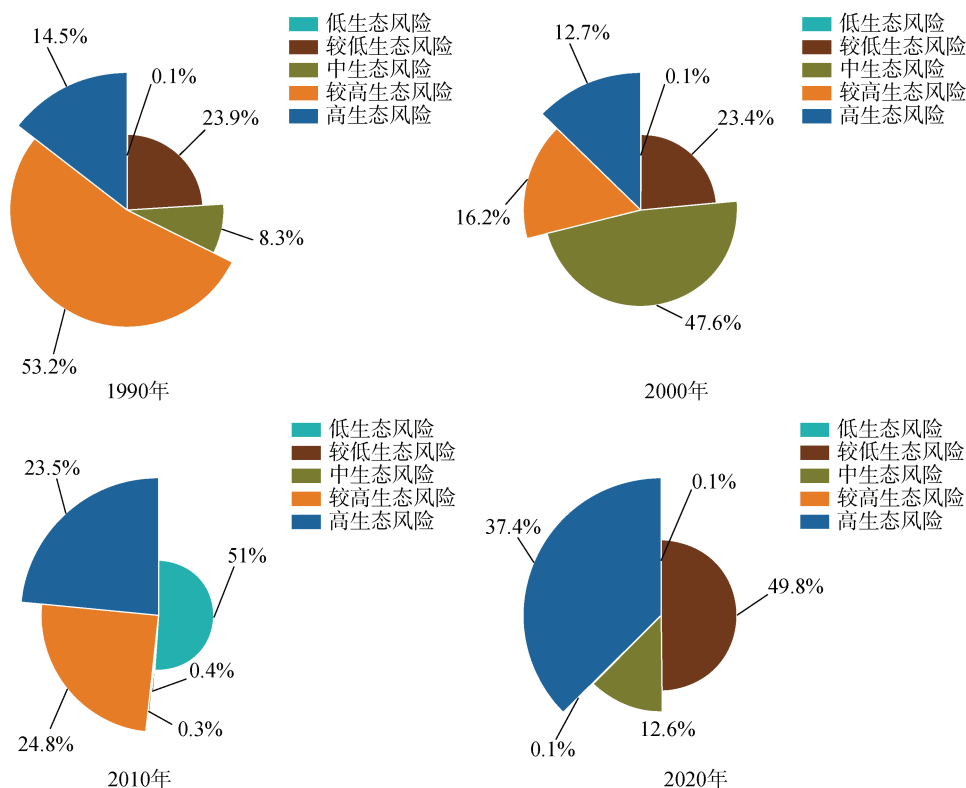


图8 黄河三角洲生态风险分级比

Fig. 8 Ecological risk classification ratio of the Yellow River Delta

3.2 结论

本研究以黄河三角洲为研究区, 研究 1990—2020 年该区域生态系统功能变化, 并基于生态系统服务构建生态风险模型, 进而分析该区域生态风险时空格局演变特征。主要结论如下:

1)黄河三角洲土地利用类型的改变使该区域生态系统服务功能整体弱化。生态系统服务在建设用、水域等人为活动剧烈的区域弱化现象明显, 而在林地草地等植被覆盖区域状态最佳。由此可见, 林地草地对生态系统服务的维持起促进作用。

2)1990—2020 年黄河三角洲区域碳储量降低, 呈现内陆高沿海低的空间分布; 生境质量空间波动范围增大, 总体呈下降趋势; 土壤保持空间格局变化虽然不显著, 但受降雨、土壤等因素影响, 该区域土壤保持能力减弱。

3)土地类型转变打破黄河三角洲生态系统原有的平衡状态和调节能力, 使黄河三角洲区域生态风险整体呈上升趋势。根据生态风险等级划分可知, 该区域生态风险由低到高依次为: 林地<草地<耕地<未利用地<建设用地<水域。其中, 中、高生态风险地区主要分布在

沿海区域以及建设用地等人类活动频繁、开发力度大的区域, 并随着面积的扩大风险值升高, 而林地草地等植被覆盖区域生态风险低, 更利于该区域的生态安全。

参考文献:

- [1] 赵越, 罗志军, 李雅婷, 等. 赣江上游流域景观生态风险的时空分异——从生产-生活-生态空间的视角[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4676-4686.
ZHAO Yue, LUO Zhijun, LI Yating, et al. Study of spatial-temporal variation of landscape ecological risk in the upper reaches of the Ganjiang River Basin based on the “production-living-ecological space”[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4676-4686.
- [2] 孙丽蓉, 马静, 周冬梅, 等. 石羊河流域景观生态风险时空分布特征[J]. 生态科学, 2022, 41(2): 194-203.
SUN Lirong, MA Jing, ZHOU Dongmei, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of landscape ecological risk in the Shiyang River basin[J]. Ecological Science, 2022, 41(2): 194-203.
- [3] 张天华, 王彤, 黄琼中, 等. 青藏高原拉萨河流域生态风险评估[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 9012-9020.
ZHANG Tianhua, WANG Tong, HUANG Qiongzong, et al. Ecological risk assessment in the Lhasa River Basin on the Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,

- 2018, 38(24): 9012-9020.
- [4] TANG L N, WANG L, LI Q Y, et al. A framework designation for the assessment of urban ecological risk[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2018, 25(5): 387-395.
- [5] WANG H. Regional assessment of human-caused ecological risk in the Poyang Lake Eco-economic Zone using production–living–ecology analysis[J]. *PloS One*, 2021, 16(2): e0246749.
- [6] 王昌博, 李爱农, 张晓荣, 等. 基于遥感和 GIS 的中巴经济走廊多发展情景生态风险综合评价[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(1): 65-78.
WANG Changbo, LI Ainong, ZHANG Xiaorong, et al. Comprehensive assessment of ecological risk in multi-scenarios of China-Pakistan Economic Corridor based on RS and GIS[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(1): 65-78.
- [7] WEI S M, PAN J H, LIU X. Landscape ecological safety assessment and landscape pattern optimization in arid inland river basin: Take Ganzhou District as an example[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2020, 26(3): 782-806.
- [8] ZHANG X M, DU H M, WANG Y, et al. Watershed landscape ecological risk assessment and landscape pattern optimization: Take Fujiang River Basin as an example[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2021, 27(9/10): 2254-2276.
- [9] 张雪茂, 董廷旭, 杜华明, 等. 基于景观生态风险评价的涪江流域景观格局优化[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 3940-3951.
ZHANG Xuemao, DONG Tingxu, DU Huaming, et al. Optimization of Landscape pattern in Fujiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 3940-3951.
- [10] 于航, 刘学录, 赵天明, 等. 基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J]. *生态科学*, 2022, 41(02): 99-107.
YU Hang, LIU Xuelu, ZHAO Tianming, et al. Landscape ecological risk assessment of Qilian Mountains National Park based on landscape pattern[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(02): 99-107.
- [11] 王颜昊, 刘增辉, 柳新伟, 等. 黄河三角洲表层土壤重金属空间分布与潜在生态风险评价[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 305-311.
WANG Yanhao, LIU Zenghui, LIU Xinwei, et al. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in the topsoil of the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 305-311.
- [12] GE M, LIU G J, LIU H Q, et al. The distributions, contamination status, and health risk assessments of mercury and arsenic in the soils from the Yellow River Delta of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(34): 35094-35106.
- [13] 王娜娜, 刘宏元, 李英, 等. 黄河三角洲湿地生态系统服务价值评估[J]. *山东农业科学*, 2022, 54(2): 153-158.
WANG Nana, LIU Hongyuan, LI Ying, et al. Value evaluation of wetland ecosystems in the Yellow River Delta wetland[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(2): 153-158.
- [14] ZHANG X Q, HE S Y, YANG Y. Evaluation of wetland ecosystem services value of the yellow river delta[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(6): 1-11.
- [15] CHEN H Y, ZHAO G X, LI Y H, et al. Monitoring the seasonal dynamics of soil salinization in the Yellow River delta of China using Landsat data[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(7): 1499-1508.
- [16] GUO B, YANG F, FAN Y W, et al. Dynamic monitoring of soil salinization in Yellow River Delta utilizing MSAVI–SI feature space models with Landsat images[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(10): 308.
- [17] JIN Q, JIANG Q N, WU F, et al. Ecological risk assessment of benzo[a]pyrene in Yellow River Delta[J]. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 2013, 41(4): 370-376.
- [18] QU Y B, ZONG H N, SU D S, et al. Land use change and its impact on landscape ecological risk in typical areas of the Yellow River Basin in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(21): 11301.
- [19] 宋雨桐, 张子璇, 牛蓓蓓, 等. 2005—2018 年黄河三角洲景观格局脆弱性的时空变化规律[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 258-266.
SONG Yutong, ZHANG Zixuan, NIU Beibei, et al. Temporal and spatial variations of landscape pattern vulnerability in Yellow River Delta during 2005-2018[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 258-266.
- [20] ZHANG X J, WANG G Q, XUE B L, et al. Dynamic landscapes and the driving forces in the Yellow River Delta wetland region in the past four decades[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 787: 147644.
- [21] 张磊, 宫兆宁, 王启为, 等. Sentinel-2 影像多特征优选的黄河三角洲湿地信息提取[J]. *遥感学报*, 2019, 23(2): 313-326.
ZHANG Lei, GONG Zhaoning, WANG Qiwei, et al. Wetland mapping of Yellow River Delta wetlands based on multi-feature optimization of Sentinel-2 Images[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2019, 23(2): 313-326.
- [22] FAN X M, PEDROLI B, LIU G H, et al. Soil salinity development in the Yellow River Delta in relation to

- groundwater dynamics[J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(2): 175-189.
- [23] KONG D X, MIAO C Y, BORTHWICK A G L, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 157-167.
- [24] SUN Q H, MIAO C Y, DUAN Q Y, et al. Would the “real” observed dataset stand up? A critical examination of eight observed gridded climate datasets for China[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(1): 015001.
- [25] CHI Y, SHI H H, ZHENG W, et al. Spatiotemporal characteristics and ecological effects of the human interference index of the Yellow River Delta in the last 30 years[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 880-892.
- [26] 柳嘉佳, 王普昶, 王志伟, 等. 基于 InVEST 模型的贵州喀斯特生态系统服务功能评估研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(20): 25-27.
LIU Jiajia, WANG Puchang, WANG Zhiwei, et al. Research progress of on Guizhou Karst ecosystem service function evaluatin based on InVEST model[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(20): 25-27.
- [27] ZHAO M M, HE Z B, DU J, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 29-38.
- [28] DING Q L, CHEN Y, BU L T, et al. Multi-scenario analysis of habitat quality in the Yellow River delta by coupling FLUS with InVEST model[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(5): 2389.
- [29] OUYANG X, TANG L S, WEI X, et al. Spatial interaction between urbanization and ecosystem services in Chinese urban agglomerations[J]. *Land Use Policy*, 2021, 109: 105587.
- [30] WANG X M, LIU X C, LONG Y X, et al. Analysis of soil retention service function in the north area of Guangdong based on the InVEST model[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Proceedings of the Fourth International Workshop on Renewable Energy and Development, Sanya, China, 24–26 April 2020; IOP: Bristol, UK, 2020, 510: 032011.
- [31] XIAO Q, HU D, XIAO Y. Assessing changes in soil conservation ecosystem services and causal factors in the Three Gorges Reservoir region of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163(Sup.): S172-S180.
- [32] ZHOU R B, LIN M Z, GONG J Z, et al. Spatiotemporal heterogeneity and influencing mechanism of ecosystem services in the Pearl River Delta from the perspective of LUCC[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29: 831-845.

Ecological risk assessment of the Yellow River Delta based on ecosystem services

GUO He¹, FAN Yan-guo¹, GUAN Qing-chun¹, FAN Bo-wen², WANG Yong³

(1. College of Oceanography and Space Information, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Yantai Geographic Information Center, Yantai 264000, China)

Received: Apr. 29, 2022

Key words: Yellow River Delta; ecosystem services; ecological risk; spatiotemporal pattern

Abstract: Ecological security is closely related to human well-being; thus, quantifying regional ecological risks can effectively prevent high-risk areas and benefit regional sustainable development. In this study, the InVEST model was used to calculate the physical quantities of ecosystem carbon storage, habitat quality, and soil conservation in the Yellow River Delta region in 1990, 2000, 2010, and 2020. On the basis of the measurement results, an ecological risk assessment model was constructed. This study analyzed the evolution characteristics of the temporal and spatial patterns of ecological risks in the Yellow River Delta. The results showed that 1) the overall weakening of ecosystem services in the Yellow River Delta region was the most obvious in areas such as construction sites and wetlands. 2) From 1990 to 2020, the overall carbon storage in the Yellow River Delta region showed a spatial pattern of high inland and low coastal areas, the spatial fluctuation range of habitat quality increased, and the soil retention capacity decreased. 3) The ecological risk in the Yellow River Delta region increased. The ecological risk was high in coastal waters and construction sites and low in areas covered by vegetation, such as forests and grasslands. The research results can provide support and reference for decisions on ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin.

(本文编辑: 赵卫红)