

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.025

洪泽湖流域污染负荷削减对生境质量的影响

王 俊¹, 刘 超^{2,3}, 王智源^{3,4}, 陈求稳^{3,4}, 黄 玉³, 胡晓东¹, 刘东升³, 吴苏舒¹, 闫丹丹³

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074;
3. 南京水利科学研究院生态环境研究所, 江苏 南京 210029; 4. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:运用 InVEST 生境质量模型分析了 1980—2020 年洪泽湖流域生境质量时空变化特征, 通过 Johnes 输出系数模型计算不同情景下污染负荷输出量, 利用回归模型建立污染负荷与生境质量关系, 预测流域污染负荷削减措施对生境质量的改善效果。结果表明: 洪泽湖流域生境质量逐年恶化, 空间上呈“南优北差、东优西差”分布格局; 流域污染负荷输出呈逐年上升趋势, 且污染负荷在差生境质量区域有明显集聚效应, 污染负荷与生境质量呈显著负相关; 在自然发展(污染负荷无削减)情景下, 2030 年流域生境质量平均值与 2020 年相比较将降低 1.0%~2.4%; 根据流域污染负荷削减目标, 在污染负荷削减率为 8% 情景下, 流域生境质量平均值较自然发展情景提升 0.9%~2.2%, 在污染负荷削减率为 18% 情景下, 流域生境质量平均值较自然发展情景提升 1.3%~2.7%, 流域污染负荷削减对于提高生境质量具有显著效果。

关键词: 生境质量; 污染负荷; InVEST 生境质量模型; Johnes 输出系数模型; 洪泽湖流域
中国分类号: X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)01-0190-10

Effects of pollution load reduction on habitat quality in Hongze Lake Basin // WANG Jun¹, LIU Chao^{2,3}, WANG Zhiyuan^{3,4}, CHEN Qiwen^{3,4}, HUANG Yu³, HU Xiaodong¹, LIU Dongsheng³, WU Sushu¹, YAN Dandan³ (1. Jiangsu Province Water Conservancy Science Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Eco-Environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the InVEST habitat quality model used to analyze the spatio-temporal variation characteristics of habitat quality in the Hongze Lake Basin from 1980 to 2020, the Johnes classical output coefficient model used to calculate pollution load output under different scenarios, and the regression model used to establish the relationship between pollution load and habitat quality, the effect of pollution load reduction measures on habitat quality was predicted. The results showed that the habitat quality deteriorated year by year in the Hongze Lake Basin, presenting a spatial pattern of south superior to north and east superior to west; the output of pollution load increased year by year, the pollution load had an obvious agglomeration effect in bad habitat quality areas, and there was a significant negative correlation between pollution load and habitat quality; under the condition of natural development (without reduction of pollution load), the average habitat quality in 2030 would further reduce by 1.0% to 2.4%, as compared with that in 2020; according to the watershed pollution load reduction target, the average habitat quality of the Hongze Lake Basin would increase by 0.9% to 2.2% in the scenario with the pollution load reduction rate of 8%, and the value would increase by 1.3% to 2.7% in the scenario with the pollution load reduction of 18%, as compared with the natural development scenario, demonstrating that pollution load reduction has significant effect on improving habitat quality.

Key words: habitat quality; pollution load; InVEST habitat quality model; Johnes output coefficient model; Hongze Lake Basin

基金项目: 国家自然科学基金(52121006, 52070132, U2040209); 江苏省自然科学基金优秀青年项目(BK20200053); 江苏省水利科技项目(2019004)

作者简介: 王俊(1971—), 男, 研究员, 博士, 主要从事水资源保护研究。E-mail: wjnau@aliyun.com

通信作者: 王智源(1988—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事流域水生态健康研究。E-mail: zywang@nhri.cn

流域水生态健康是生态文明建设的重要基础^[1],保障流域水生态健康是国家水环境安全的重要组成部分^[2-3]。流域生境质量对水生态健康有着重要的表征指示作用,近年来人类活动增强引起的土地利用变化降低了土地景观连通性,改变了污染负荷的产出和运移,破坏了斑块之间的物质和能量循环,导致生境的结构和组成遭到破坏,这是生境质量降低的主要原因^[4-5]。

生境的定义在 20 世纪 90 年代被提出, Hall 等^[6]定义生境为“存在于一个地区的资源和条件,为给定生命体提供生存和繁殖的栖息用地环境”,生境质量指生态系统基于生存资源可获得性,为生物的生存繁殖提供适合个体和种群生存条件的能力,是在 0~1 之间的连续变量,具有明显的地域特性^[7]。高生境质量数值趋近于 1,量化数值越小,生境质量越差。生境质量的量化数值主要取决于土地利用覆被和土地利用威胁因子对生物多样性的威胁距离和威胁权重及各个生境类型的生境适宜度指数和对威胁的相对敏感性^[8-9]。

国内外对生境质量开展了大量研究,并在生境质量的服务功能、价值、内在机理以及驱动影响因素等方面取得了一系列成果^[10-12]。周婷等^[13]应用双变量空间自相关和地理加权回归对神农架林区生境质量与人类活动进行了定性的分析;田义超等^[14]以流域尺度模拟预测了北部湾南流江生物多样性生境质量与生境退化程度;杨洁等^[15]评估了黄河流域生境质量,并探究了生境质量的空间分布特征及其内在驱动因素;李子等^[16]基于土地利用研究了渭河流域生态服务功能与生态之间的平衡关系。气候变化、地理特征、人类活动等要素是生境质量变化的驱动因素^[17-18],城镇化和经济发展不可逆趋势增加了环境压力,环境压力增大最直接的特征表现为污染负荷产出增加^[19],地区污染负荷的产出总量以及单位产出量都能在不同层面反映区域城镇化和经济发展水平以及人类活动强度^[20]。研究生境质量与污染负荷之间的关联特征,对于寻求城镇化、经济发展与生境质量的平衡区间具有重要意义,可为当前实施的一系列环境治理措施对生境质量的改善效果提供一种评价方法,也有助于预测实施污染负荷削减措施对生境质量的改善效果,在土地资源的优化配置以及精细化管理方面具有重要参考价值。但目前关于流域生境质量与污染负荷之间的定量响应关系尚不明晰。

本研究以 1980—2020 年土地利用数据为基础,运用 InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) 生境质量模型评价了洪泽湖流域生境质量的演变,基于 Johnes 输出系数模型计

算了基于土地利用程度的流域污染负荷产出,探讨流域污染负荷与生境质量之间的回归关系,预测了不同污染负荷削减情景对流域生境质量的改善效果。

1 研究区概况

洪泽湖是我国第四大淡水湖泊,在防洪、生物多样性保护等方面起着极其重要的作用。近年来,经济社会快速发展和人类活动加剧加快了流域内生态失衡,生境质量逐年下降,严重影响了洪泽湖生态环境和周边地区社会经济的可持续发展。洪泽湖流域作为农业化向城镇化过渡的代表流域,其研究成果具有普适性。

洪泽湖流域包含江苏省淮安市和宿迁市的 2 区 4 县(图 1),流域内产业多元、经济发展迅猛,农作物主要以水稻、三麦、玉米、大豆等为主;经济作物主要以花生、棉花、油菜等为主;渔业和旅游业也为当地带来了不菲的经济收益;工业经济近年发展迅速,主要有盐、硝矿业以及化工工业。2020 年《宿迁市统计年鉴》和《淮安市统计年鉴》显示,流域总人口近 498.9 万人,地区生产总值 6 970 亿元,总面积 9 826 km²,耕地 42.64 万 hm²,人均耕地 0.09 hm²。面源污染是洪泽湖流域污染的一个主要污染源。洪泽湖流域农业比较发达,农田污染物质(农药、化肥等)以及陆域分散的污染物质蓄积于土地中,会随着降雨径流等发生迁移转换进入湖中;点源污染是

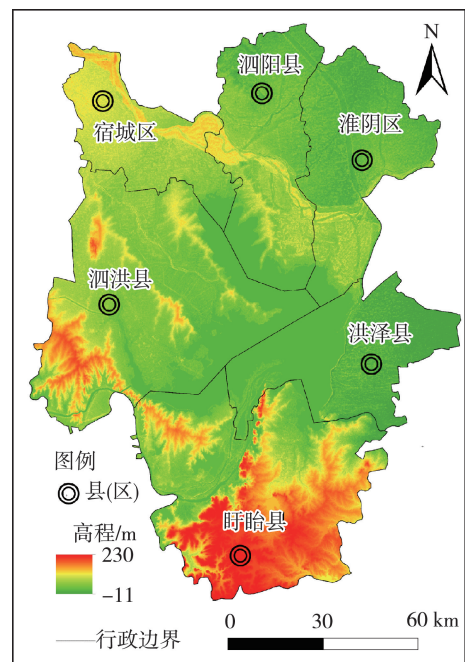


图 1 洪泽湖流域行政边界和高程

Fig. 1 Administrative boundary and elevation of Hongze Lake Basin

洪泽湖流域另一个污染源,城区工业尾水排放,村镇和渔民生活污水排放,增加了流域内污染负荷的产出。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

1980年、1990年、2000年、2010年和2020年Landsat系列遥感影像数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),数据源空间分辨率为30 m,且云量覆盖度小于2%。基于多光谱信息源,通过监督分类和人工解译相结合的方式,将遥感影像数据解译、划分为6个一级土地利用类型和26个二级土地利用类型,将解译结果和历史高分辨率影像进行精度验证,验证结果表明整体精度达到90%,保证了分类精度的可靠性。根据本研究内容的需要,在ArcGIS 10.6中将土地利用重分类为水田、旱地、林地、草地、水域、城镇用地以及农村居民点7种土地利用类型。

2.2 研究思路

分别选用InVEST生境质量模型和Johnes输出系数模型模拟生境质量和计算污染负荷。InVEST生境质量模型相比于其他模型具有数据易于获取、能模拟现状和预测未来、评价准确度高、空间可视化效果强等特点^[21];Johnes输出系数模型具有使用简单、基础数据资料要求低、参数需求少、精度高等优势特点^[22]。

基于高分辨率土地利用覆被数据,筛选土地利用威胁因子,运用InVEST生境质量模型计算分析洪泽湖流域1980—2020年生境质量变化情况。运用Johnes输出系数模型计算不同土地利用类型非点源总氮(TN)和总磷(TP)的污染负荷量。在ArcGIS 10.6平台进行正交网格单元分析,提取网格质点生境质量表示网格区域生境质量的平均水平,并计算网格单元非点源污染负荷,通过回归模型构建污染负荷与生境质量之间的回归关系,研究思路流程见图2。2018年江苏省人民政府办公厅出台了《江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案》,于2019年完成了规划目标,明确了生态环境治理与修复的远景目标,其中,“三线一单”指生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单。本研究对规划目标下生境质量改善效果进行评价,基于远景目标,对未来生境质量变化进行预测。

2.3 土地利用生境质量评价

参考前人研究成果^[23-24],根据本研究区域特点将生境质量按值域区间划分为差(0~0.25)、中

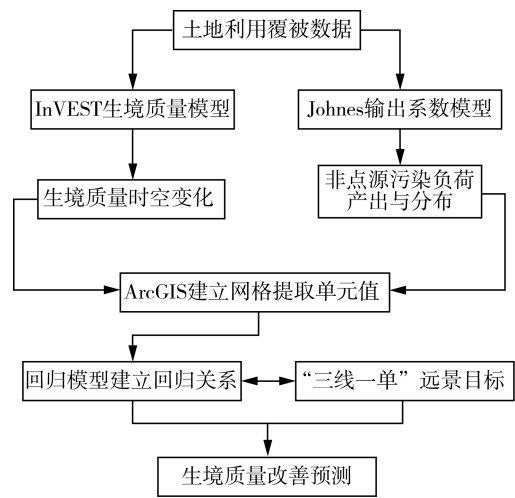


图2 研究思路流程图

Fig. 2 Flowchart of research ideas

($>0.25 \sim 0.50$)、良($>0.50 \sim 0.75$)和优($>0.75 \sim 1$)4个级别。为量化局部区域生境质量平均水平,以合理性与可操作性为原则,采用 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 正交网格单元对生境质量进行提取,以网格单元质心点的生境质量作为该网格单元生境质量,以所有单元数值的平均值代表区域生境质量整体水平。

InVEST生境质量模型计算生境质量主要受到4个因素的影响,分别为威胁因子的相对影响距离,生境类型对各个威胁因子的相对敏感性,栅格单元生境与威胁因子之间的距离,栅格单元受到合法保护的^[25]。威胁因子对生境的威胁水平通常随距离的增加而降低,影响程度有线性衰减和指数衰减2种方式,计算公式^[26-27]分别为

$$I_{rxy} = 1 - \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \quad (1)$$

$$I_{rxy} = \exp\left(-\frac{2.99}{d_{rmax}}d_{xy}\right) \quad (2)$$

式中: I_{rxy} 为栅格 y 的威胁因子 r 对栅格 x 的威胁水平; d_{xy} 为栅格 x 与 y 之间的直线距离; d_{rmax} 是威胁因子 r 对生境的最大影响距离。

每一种生境类型对每一种威胁因子的敏感性具有显著差异性,敏感性越高,其值越接近1。计算公式为

$$D_{sj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (w_r / \sum_{r=1}^R w_r) r_y I_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (3)$$

式中: D_{sj} 为生境类型 j 在栅格 x 的退化度; R 为威胁因子数量; Y_r 为威胁因子 r 的栅格数; w_r 为威胁因子 r 的权重; r_y 为栅格 y 对应的威胁因子个数; β_x 是威胁因子对栅格 x 的可接近性; S_{jr} 为生境类型 j 对威胁因子 r 的敏感度。

生境质量计算公式为

$$Q_{sj} = H_j \left(1 - \frac{D_{sj}^z}{D_{sj}^z + K^z} \right) \quad (4)$$

式中: Q_{xy} 为生境类型 j 的生境质量; H_j 为生境类型 j 的生境适宜度; z 为归一化指数; K 为半饱和和常数。

威胁因子属性值以及不同生境类型对其敏感性具有地域差异性,参考前人研究的基础成果^[28-29],结合洪泽湖流域特征对其进行确定。因洪泽湖流域农业化程度高,城镇化进程加快,故选择水田、旱地、城镇用地、农村居民点、工业用地作为生境威胁因子。威胁因子的最大影响距离和权重以及生境对威胁因子的敏感性如表 1 和表 2 所示。

表 1 威胁因子最大影响距离和权重

Table 1 Maximum influence distance and weight of threat factors

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减函数类型	来源文献
水田	2	0.7	线性衰减	刘世梁等 ^[11]
旱地	1	0.5	线性衰减	常玉昀等 ^[12,14]
城镇用地	5	1	指数衰减	景晓玮等 ^[23]
农村居民点	4	0.8	指数衰减	Li 等 ^[27]
工业用地	8	1	线性衰减	包玉斌等 ^[28]

表 2 不同土地利用类型生境适宜度及其对威胁因子的敏感度

Table 2 Habitat suitability and its sensitivity to threat factors of different land use types

土地利用类型	生境适宜度	对威胁因子的敏感度				
		水田	旱地	城镇用地	农村居民点	工业用地
水田	0.4	0	0.1	0.5	0.6	0.5
旱地	0.2	0.3	0	0.6	0.7	0.4
林地	1	0.7	0.6	0.9	0.8	0.6
草地	1	0.7	0.6	0.5	0.7	0.3
河渠	0.8	0.8	0.5	1	1	0.7
湖泊	0.8	0.7	0.5	0.9	0.9	0.7
水库坑塘	0.7	0.8	0.6	0.8	0.9	0.8
滩地	0.6	0.7	0.5	0.5	0.6	0.3
城镇用地	0	0.1	0.1	0	0.1	0.2
农村居民点	0	0.2	0.1	0.1	0	0.2
工业用地	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0

2.4 土地利用程度综合指数计算

为探讨生境质量时间和空间差异性原因,对流域各县(区)土地利用程度综合指数进行计算^[30-32]:

$$L = 100 \sum_{i=1}^n (a_i C_i) \quad (5)$$

式中: L 为土地利用程度综合指数; a_i 为 i 级土地利用类型对应的分级指数; C_i 为 i 级土地利用类型面积占比。土地利用类型对应的分级指数如下:未利用土地为 1,草地、林地、水域为 2,水田、旱地为 3,城镇用地、农村居民点为 4。

2.5 基于土地利用的流域污染负荷估算

采用 Johnes 输出系数模型对 1980 年、1990 年、

2000 年、2010 年和 2020 年土地利用产生的非点源 TN 和 TP 污染负荷进行计算。采用 5 km × 5 km 正交网格单元作为污染负荷输出的基础计算单元,总污染负荷以各网格为输出单元进行累计求和,模型计算公式为

$$W = \sum_{i=1}^n (E_i A_i) \quad (6)$$

式中: W 为输出污染负荷; E_i 为 i 类土地利用类型输出系数; A_i 为营养物输入的 i 类土地利用类型面积。

Johnes 输出系数模型的核心在于输出系数的确定,本研究中土地利用类型的输出系数主要参考胡晴等^[33]研究成果,结合洪泽湖流域的特点进行调整得到 TN 和 TP 的输出系数,结果如表 3 所示。

表 3 土地利用非点源污染负荷输出系数

Table 3 Non-point source pollution load output coefficient of different land use types

土地利用类型	TN 输出系数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	TP 输出系数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)
水田	2.51	0.16
旱地	2.05	0.15
林地	0.25	0.02
草地	0.6	0.15
水域	1.1	0.02
城镇用地	1.5	0.05
农村居民点	2.5	0.22

3 结果与分析

3.1 生境质量与人口密度时空变化特征

不同时期洪泽湖流域生境质量空间分布如图 3 所示。从空间尺度看,洪泽湖流域生境质量整体呈“南优北差、东优西差”,东南方区域向西北方区域生境质量有恶化趋势,差等级生境质量区具有明显聚合特征。宿城区差等级生境质量区分布趋于边缘化,2020 年平均生境质量为 0.634 6;泗洪县差等级生境质量区主要集中在中心,呈四周优的环状分布特征,2020 年平均生境质量为 0.638 7;盱眙县 2020 年平均生境质量为 0.664 1,在洪泽湖流域的 6 个分区中最高,优等级生境质量区主要集中在正南方,由东向西也有零散分布,优等级生境质量面积占比大于差等级生境质量面积占比;洪泽县生境质量具有“近湖差、远湖优”的分布特征,2020 年平均生境质量为 0.675 4;淮阴区生境质量呈现“四周差、中间优”的分布格局,2020 年平均生境质量为 0.657 9;泗阳县差等级生境质量区域集聚成“倒三角”形状、生境质量呈南北向中间恶化的分布特征,2020 年平均生境质量为 0.661 8。

在时间上,1980—2020 年洪泽湖流域生境质量

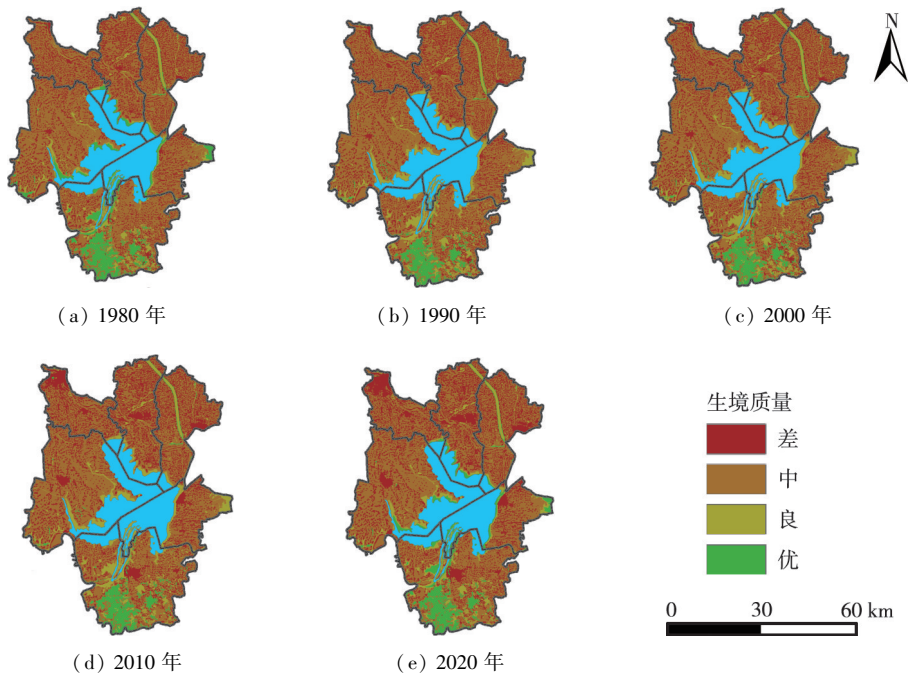


图3 洪泽湖流域1980—2020年生境质量时空变化特征

Fig.3 Temporal and spatial characteristics of habitat quality in Hongze Lake Basin from 1980 to 2020

整体呈现出衰退趋势。1980—2000年主要在宿城区北部、泗阳县中部、淮阴区东部以及盱眙县中部等局部小面积呈现出衰退特征,2000—2020年生境质量衰减趋势更显著,差等级生境质量面积在各县(区)向四周扩张。图4为1980—2020年各生境质量等级面积变化情况,从图4可以看出,1980—2020年洪泽湖流域生境质量的动态转移主要发生在差与中等级之间,优和良等级面积在2000年之后有小幅降低。1980年差等级生境质量面积比例为15.1%,2020年上升到27.5%;中等级生境质量面积变化趋势与差等级生境质量相反,面积占比由1980年57.4%降低到2020年的47%;优等级和良等级生境质量面积变化较小,1980—2020年面积比例分别降低了0.3%和1.8%。

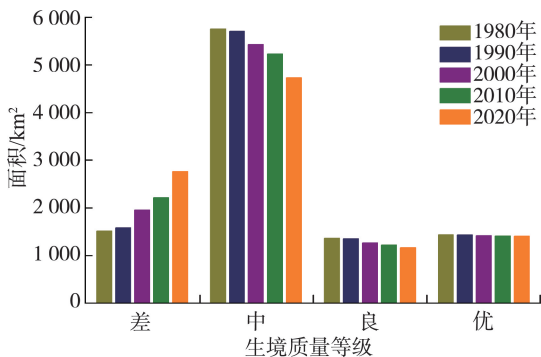


图4 1980—2020年洪泽湖流域各生境质量等级面积变化

Fig.4 Area changes of different habitat quality grades in Hongze Lake Basin from 1980 to 2020

洪泽湖流域人口密度分布如图5所示,由高到

低各等级人口密度分别为 ≤ 270 人/ km^2 、 $271 \sim 550$ 人/ km^2 、 $551 \sim 825$ 人/ km^2 、 > 825 人/ km^2 。由图5可见,2000—2020年低人口密度区域不断向高一等级人口密度区域转移,2000年低、较低、较高和高人口密度区域面积分别占总面积的40.3%、39.3%、16.0%和9.9%,到2020年,不同人口密度区域面积占比分别变化为31.0%、41.4%、22.2%和5.4%。

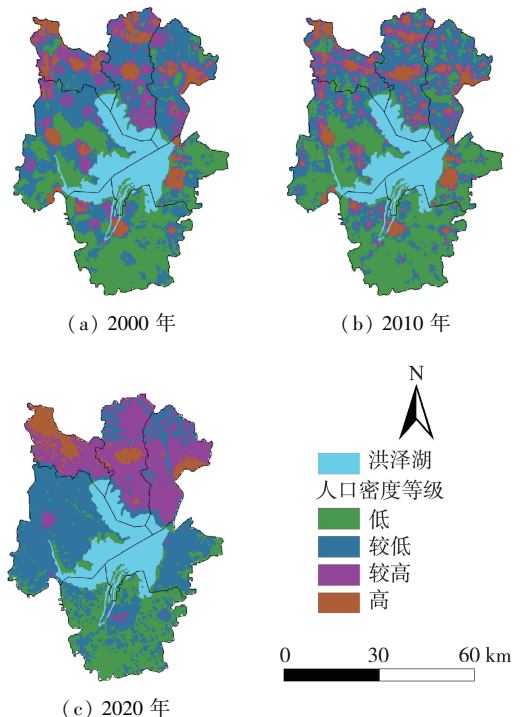


图5 2000—2020年洪泽湖流域人口密度空间分布特征
Fig.5 Spatial distribution characteristics of population density in Hongze Lake Basin from 2000 to 2020

3.2 土地利用程度与生境质量相关性

洪泽湖流域 1980—2020 年土地利用程度综合指数计算结果如表 4 所示,可以看到所有土地利用类型的综合指数之和在 1980—1990 年出现略微降低,在 1990—2020 年逐步上升。从类型上看,1980—2020 年水田、旱地和城镇用地综合指数的变化最为剧烈,水田和城镇用地综合指数分别增加了 27.59 和 15.75,旱地则降低了 44.20。

表 4 洪泽湖流域 1980—2020 年土地利用程度综合指数

Table 4 Comprehensive index of land use degree in Hongze Lake Basin from 1980 to 2020

土地利用类型	土地利用程度综合指数				
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
水田	56.97	56.87	55.72	87.10	84.56
旱地	114.46	115.54	114.30	72.47	70.26
林地	5.88	6.02	6.02	5.56	5.47
草地	1.82	1.79	1.80	1.78	1.79
水域	43.31	43.33	43.49	44.02	44.51
城镇用地	5.90	6.20	6.78	18.83	21.65
农村居民点	63.20	61.62	63.89	65.69	68.37
合计	291.54	291.37	292.00	295.44	296.62

基于土地利用程度指数与生境质量数据进行正态分布检验,显著性均大于 0.05,满足了相关性分析的统计条件。土地利用程度与生境质量相关性分析结果如图 6 所示,其中,宿城区土地利用程度最高,洪泽县利用程度最低。6 县(区)土地利用程度均与生境质量呈显著负相关关系,根据 Pearson 相关

系数 r 排序,两者的相关性由高到底的顺序为盱眙县、泗洪县、洪泽县、泗阳县、宿城区和淮阴区。

3.3 污染负荷与生境质量回归关系

表 5 为输出系数模型的污染负荷计算结果。1980—2020 年各县(区)污染负荷产出整体呈增加趋势。洪泽县 TN 负荷产出增长率(35.9%)最大,泗阳县增长率(1.3%)最小,其余县(区)增长率由大到小分别为泗洪县(24.7%)、盱眙县(3.3%)、宿城区(3.1%)、淮阴区(2.1%)。TP 负荷产出增长率最大为洪泽县(47.3%),最小为泗阳县(0.9%),其余县(区)增长率由大到小分别为泗洪县(26.3%)、宿城区(7.4%)、盱眙县(2.3%)、淮阴区(2.1%)。

污染负荷与生境质量之间的定量回归关系如图 7 所示。TN 和 TP 负荷与生境质量回归关系具有显著负效应($p < 0.01$)。当 TN 负荷等于 3500 t 时,生境质量均值在 95% 置信区间为 0.6896 ~ 0.7004;当 TP 负荷为 230 t 时,生境质量在 95% 置信区间为 0.6931 ~ 0.7054。

3.4 污染负荷削减情景下生境质量变化预测

洪泽湖流域自然发展和污染负荷削减情景下生境质量变化预测如表 6 所示。在自然发展(污染负荷不削减)情景下,与 2020 年相比,2030 年 6 县(区)平均生境质量皆下降,盱眙县、宿城区、泗阳县、泗洪县、淮阴区和洪泽县生境质量分别下降了 0.07% ~

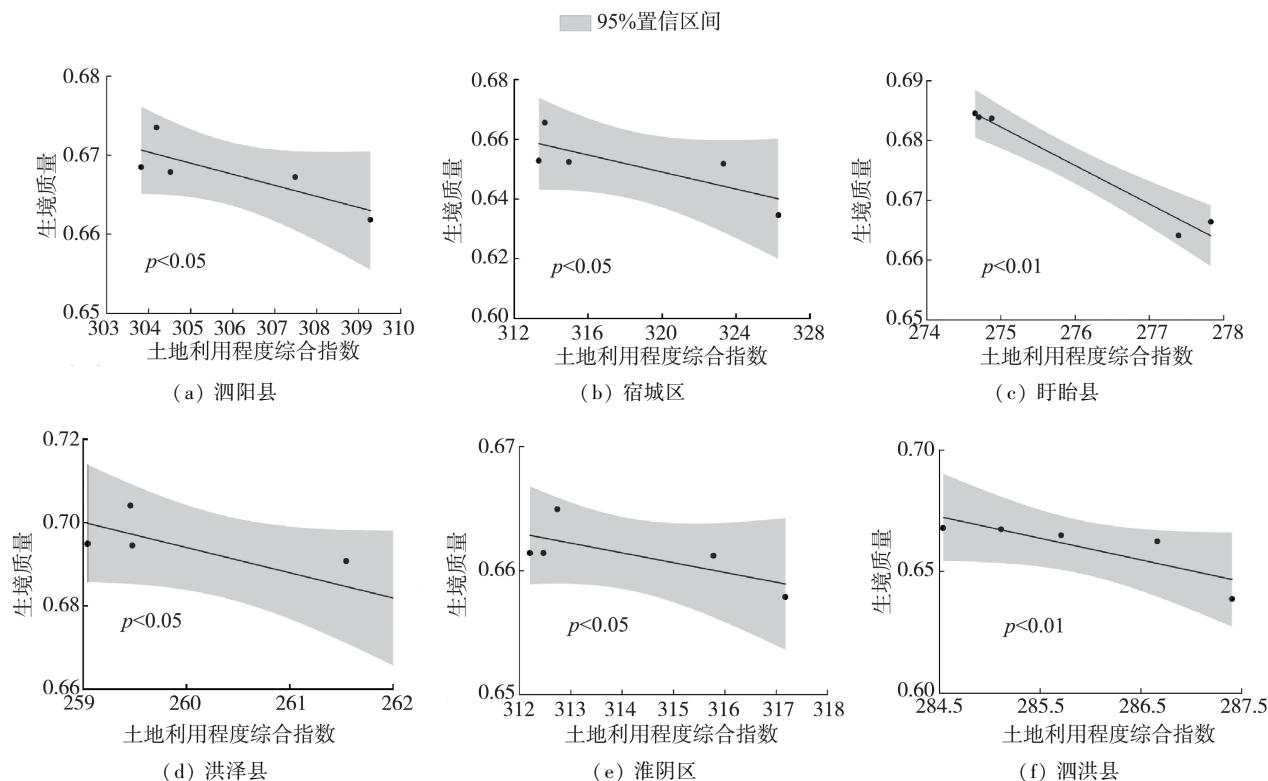


图 6 土地利用程度与生境质量相关性

Fig. 6 Correlation between land use degree and habitat quality

表5 1980—2020年洪泽湖流域TN和TP污染负荷

Table 5 TN and TP pollution loads in Hongze Lake Basin from 1980 to 2020

年份	TN 污染负荷/t						TP 污染负荷/t					
	泗阳县	宿城区	盱眙县	洪泽县	淮阴区	泗洪县	泗阳县	宿城区	盱眙县	洪泽县	淮阴区	泗洪县
1980年	2305.5	1672.8	4096.9	1666.9	2108.9	4271.0	151.8	107.4	268.1	80.5	146.3	254.4
1990年	2308.9	1678.5	4099.3	1667.8	2110.9	4282.3	151.9	108.3	268.4	80.8	146.6	255.6
2000年	2312.7	1720.5	4105.8	1673.5	2117.4	4290.1	152.5	114.7	269.1	81.5	147.3	256.2
2010年	2320.0	1722.5	4213.6	2256.6	2133.9	5301.2	152.8	115.2	271.8	118.1	147.4	319.6
2020年	2336.0	1724.7	4231.8	2264.7	2152.7	5324.3	153.1	115.3	274.3	118.6	149.3	321.2

表6 2030年不同污染负荷削减情景下洪泽湖流域生境质量变化预测

Table 6 Prediction of habitat quality change under different pollution load reduction scenarios in 2030 in Hongze Lake Basin

污染负荷 削减情况	生境质量变化					
	洪泽县	淮阴区	泗阳县	宿城区	泗洪县	盱眙县
未削减	-0.000 5 ~ -0.013 3	-0.002 1 ~ -0.010 1	-0.001 5 ~ -0.009 6	-0.033 1 ~ -0.042 4	-0.000 6 ~ -0.008 7	-0.001 9 ~ -0.010 6
削减率8%	0.004 7 ~ 0.013 3	0.007 6 ~ 0.015 4	0.004 4 ~ 0.013 1	0.009 4 ~ 0.017 7	0.004 8 ~ 0.013 3	0.002 8 ~ 0.012 3
削减率18%	0.006 9 ~ 0.016 7	0.011 0 ~ 0.019 4	0.006 8 ~ 0.016 7	0.014 0 ~ 0.021 9	0.007 2 ~ 0.016 9	0.004 4 ~ 0.015 2

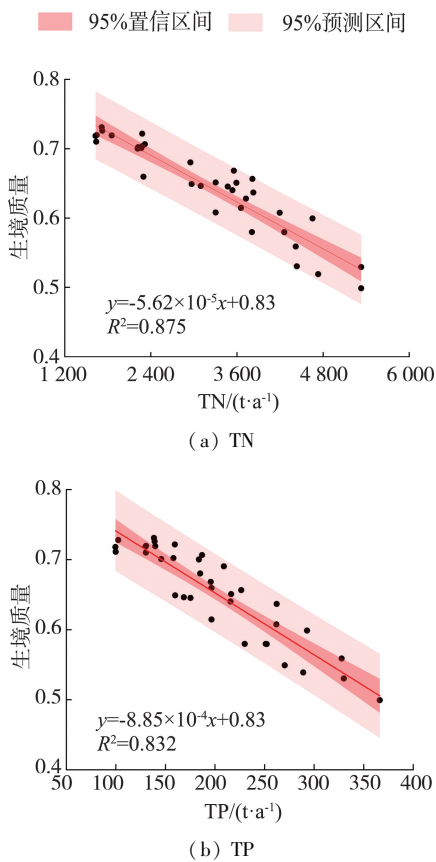


图7 洪泽湖流域污染负荷与生境质量回归关系

Fig.7 Regression relationship between pollution load and habitat quality in Hongze Lake Basin

2.0%、0.3% ~ 1.6%、0.2% ~ 1.5%、5.2% ~ 6.6%、0.1% ~ 1.3%和0.3% ~ 1.6%。以8%削减率对污染负荷进行控制时,较未削减情景下2030年6县(区)生境质量均有不同程度的提升,宿城区平均生境质量提升幅度最大,盱眙县提升幅度最小,提升区间分别为0.009 4 ~ 0.017 7和0.002 8 ~ 0.012 3,提升效率分别为11.8% ~ 22.1%和3.5%

~15.4%。以18%削减率对污染负荷进行控制时,生境质量整体提升效果更好,但相比于8%削减比例,宿城区和盱眙县生境质量提升效率有所降低,分别为7.8% ~ 12.2%和2.5% ~ 8.4%。

4 讨论

1980—2020年洪泽湖流域生境质量逐渐恶化,呈“南优北差,东优西差”空间分布特征,这与土地利用程度增强有密切联系。生境适宜度对生境质量的优劣有决定性作用^[34-35],土地利用程度的提高破坏了区域生境适宜度的平衡,大量人为开发耕地和建设用地降低了地区生境适宜度^[36-37]。在城镇化大背景下,洪泽湖流域土地利用程度逐年增强,1980—2000年土地利用程度增长幅度较小,综合指数仅增加0.46,流域内整体以农业占据主导地位^[38];同时流域内人为活动程度相对较低,城镇化水平不高,城镇用地与农村居民点等主要生境质量威胁因子面积变化较为缓慢,城镇用地面积增加17.93 km²,增长率为14.3%,农村居民点面积增加18.19 km²,增长率为1.3%,造成洪泽湖流域在1980—2000年生境质量呈现局部小面积恶化。2000—2020年,洪泽湖流域土地利用程度急剧增强,水田、城镇用地和农村居民点土地利用程度综合指数分别由55.72、6.78和63.89增长到84.56、21.65和68.37,导致洪泽湖流域在2000年之后生境质量出现大面积恶化。空间上,洪泽湖流域各县(区)土地利用程度综合指数范围为259 ~ 327,由高到低的排列顺序为宿城区、淮阴区、泗阳县、泗洪县、盱眙县、洪泽县,这与生境质量在空间上的分布特征一致,即土地利用程度空间差异性造成生境质量空间差异的主要原因。国内外一些学者在其他研究

区域也得出和本文一致的结果,如 Ma 等^[39]在疏勒河流域、Brumm 等^[40]在密歇根湖支流的研究结果,验证了本文关于土地利用程度增强会促进生境质量降低结论的可靠性。

从人口密度和生境质量的时空分布特征可以看出,人口密度在时间上的转移变化特征与生境质量在时间上的变化特征相吻合,本研究认为人类聚集对生境质量具有负效应,人类活动增强直接带来各类建设用地和耕地面积增加,导致地区景观破碎化、连通性降低,使地区生境受到威胁^[41-42],造成地区生境质量逐年下降。空间上,高和较高人口密度区域主要聚集在淮阴区、泗阳县和宿城区;泗洪县、盱眙县和洪泽县人口密度等级主要为低和较低,较高密度区域零星分布在边缘和中间。城镇化程度不统一和区域经济发展不平衡导致人类活动强弱存在空间差异是生境质量空间差异的重要原因,这合理解释了空间上宿城区平均生境质量最低,洪泽县平均生境质量最高的分布特征。已有学者在甘肃省、泛长三角地区的研究中得出相似结论^[43-44],说明本文关于人类活动强度影响生境质量的结论具有普适性。

5 结 论

a. 1980—2020 年洪泽湖流域整体生境质量逐年恶化,空间上呈“南优北差,东优西差”分布格局,40 年间差等级生境质量面积占总面积比例提升 12.4%,中、良、优等级生境质量面积比例分别降低 10.4%、1.8% 和 0.3%。污染负荷与生境质量呈显著负相关关系。

b. 洪泽湖流域土地利用程度综合指数在 1980—1990 年有略微降低,在 1990—2020 年呈逐年增长的趋势,40 年间综合指数变化最大的土地利用类型依次为旱地、水田和城镇用地。

c. 自然发展情景下,2030 年流域生境质量平均值与 2020 年相比下降 1.0%~2.4%;在 8% 和 18% 污染负荷削减率情景下,流域平均生境质量相比自然发展情景改善率分别为 0.9%~2.2% 和 1.3%~2.7%。

参考文献:

[1] 金菊良,汤睿,周戎星,等. 基于联系数的城市水生态文明评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(4):1-6. (JIN Juliang, TANG Rui, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):1-6. (in Chinese))

[2] 徐红玲,潘继征,徐力刚,等. 太湖流域湖荡湿地生态系统健康评价[J]. 湖泊科学,2019,31(5):1279-1288. (XU Hongling, PAN Jizheng, XU Ligang, et al. Ecological system health evaluation of lacustrine wetland in Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences,2019,31(5):1279-1288. (in Chinese))

[3] 金菊良,李蔓,周戎星,等. 减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用[J]. 水资源保护,2022,38(1):198-204. (JIN Juliang, LI Man, ZHOU Rongxing, et al. Application of subtraction set pair potential method in river ecological health evaluation and diagnosis [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):198-204. (in Chinese))

[4] JANUS J,BOZEK P. Land abandonment in Poland after the collapse of socialism; over a quarter of a century of increasing tree cover on agricultural land[J]. Ecological Engineering,2019,138:106-117.

[5] LIU Yan, HUANG Xianjin, YANG Hong, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in southwest China Karst area: a case study of Guiyang[J]. Habitat International,2014,44:339-348.

[6] HALL L S, KRAUSMAN P R, MORRISON M L. The habitat concept and a plea for standard terminology[J]. Wildlife Society Bulletin,1997,25(1):173-182.

[7] NELSON E, POLASKY S, LEWIS D J, et al. Efficiency of incentives to jointly increase carbon sequestration and species conservation on a landscape [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2008,105(28):9471-9476.

[8] ELLIS E C, GOLDEWIJK K K, SIEBERT S, et al. Anthropogenic transformation of the biomes,1700 to 2000 [J]. Global Ecology and Biogeography,2010,19(5):589-606.

[9] 姚斯洋,李昕禹,刘成林,等. 不同水位下拟建鄱阳湖水利枢纽对食块茎鸟类栖息地适宜性的影响研究[J]. 生态学报,2021,41(10):3998-4009. (YAO Siyang, LI Xinyu, LIU Chenglin, et al. The proposed construction of Poyang Lake Hydraulic Project on the habitat suitability for tuber-eating birds at different water levels [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (10): 3998-4009. (in Chinese))

[10] BILLIONNET A. Mathematical optimization ideas for biodiversity conservation [J]. European Journal of Operational Research,2013,231(3):514-534.

[11] 刘世梁,尹艺洁,杨珏婕,等. 漫湾库区景观破碎化对区域生境质量的影响[J]. 生态学报,2017,37(2):619-627. (LIU Shiliang, YIN Yijie, YANG Jujie, et al. Assessment of the influences of landscape fragmentation on regional habitat quality in the Manwan Basin [J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):619-627. (in Chinese))

- [12] 常玉畅,高阳,谢臻,等.京津冀地区生境质量与景观格局演变及关联性[J].中国环境科学,2021,41(2):848-859. (CHANG Yuyang, GAO Yang, XIE Zhen, et al. Spatiotemporal evolution and spatial correlation of habitat quality and landscape pattern over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 848-859. (in Chinese))
- [13] 周婷,陈万旭,李江风,等.1995—2015年神农架林区人类活动与生境质量的空间关系研究[J].生态学报,2021(15):1-12. (ZHOU Ting, CHEN Wanxu, LI Jiangfeng, et al. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia forest region from 1995 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021(15): 1-12. (in Chinese))
- [14] 田义超,黄远林,张强,等.北部湾南流江流域土地覆盖及生物多样性模拟[J].中国环境科学,2020,40(3):1320-1334. (TIAN Yichao, HUANG Yuanlin, ZHANG Qiang, et al. Simulation of land cover and biodiversity in Nanliu River Basin in Beibu Gulf [J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1320-1334. (in Chinese))
- [15] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J].中国沙漠,2021,41(4):12-22. (YANG Jie, XIE Baopeng, ZHANG Degang. Spatial-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in the Yellow River Basin based on InVEST model and GeoDetector[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 12-22. (in Chinese))
- [16] 李子,张艳芳.基于InVEST模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J].水土保持学报,2021,35(4):178-185. (LI Zi, ZHANG Yanfang. Spatiotemporal evolution of ecosystem services in the main and tributaries of Weihe River Basin based on InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 178-185. (in Chinese))
- [17] LI Shicheng, WU Jianshuang, GONG Jian, et al. Human footprint in Tibet: assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 18-29.
- [18] RIEDLER B, LANG S. A spatially explicit patch model of habitat quality, integrating spatio-structural indicators[J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 128-141.
- [19] 任玮,代超,郭怀成.基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J].中国环境科学,2015,35(8):2400-2408. (REN Wei, DAI Chao, GUO Huaicheng. Estimation of pollution load from non-point source in Baoxianghe watershed, Yunnan Province based on improved export coefficient model [J]. China Environmental Science, 2015, 35(8): 2400-2408. (in Chinese))
- [20] 张婷,高雅,李建柱,等.流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 42-49. (in Chinese))
- [21] 姜凯斯,刘正佳,李裕瑞,等.黄土丘陵沟壑区典型村落土地利用变化及对区域乡村转型发展的启示[J].地理科学进展,2019,38(9):1305-1315. (JIANG Kaisi, LIU Zhengjia, LI Yurui, et al. Land use change of typical villages in the loess hilly and gully region and implications for regional rural transformation and development [J]. Progress in Geography, 2019, 38(9): 1305-1315. (in Chinese))
- [22] ZHANG Liguo, WANG Zhangqi, CHAI Ji, et al. Temporal and spatial changes of non-point source N and P and its decoupling from agricultural development in water source area of middle route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Sustainability, 2019, 11(3): 895.
- [23] 景晓玮,赵庆建.基于InVEST模型的贵州省生境质量时空变化研究[J].国土与自然资源研究,2021(5):1-5. (JING Xiaowei, ZHAO Qingjian. Research on temporal and spatial changes of habitat quality in Guizhou province based on InVEST model [J]. Territory & Natural Resources Study, 2021(5): 1-5. (in Chinese))
- [24] 宋磊,陈笑扬,宋丹,等.基于InVEST模型的生境质量变化评价:以2009—2012年长沙市望城区为例[J].国土资源导刊,2018,15(4):23-30. (SONG Lei, CHEN Xiaoyang, SONG Dan, et al. InVEST model based evaluation of habitat quality changing: a case study from 2009 to 2012 in Wangcheng district of Changsha City [J]. Land & Resources Herald, 2018, 15(4): 23-30. (in Chinese))
- [25] 钟莉娜,王军.基于InVEST模型评估土地整治对生境质量的影响[J].农业工程学报,2017,33(1):250-255. (ZHONG Lina, WANG Jun. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 250-255. (in Chinese))
- [26] 税燕萍,卢慧婷,王慧芳,等.基于土地覆盖和NDVI变化的拉萨河流域生境质量评估[J].生态学报,2018,38(24):8946-8954. (SHUI Yanping, LU Huiting, WANG Huifang, et al. Assessment of habitat quality on the basis of land cover and NDVI changes in Lhasa River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8946-8954. (in Chinese))
- [27] LI Haiping, QI Yanan, QU Yunying. Use a spatial analysis model to assess habitat quality in Lashihai Watershed [J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(6): 622-632.
- [28] 包玉斌,刘康,李婷,等.基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响:以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J].干旱区研究,2015,32(3):622-629. (BAO Yubin, LIU Kang, LI Ting, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model: taking Yellow River wetland nature reserve in Shaanxi Province as an example

- [J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32 (3): 622-629. (in Chinese))
- [29] 江伟康,吴隽宇. 基于地区 GDP 和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究[J]. *生态学报*, 2021, 41 (5): 1747-1757. (JIANG Weikang, WU Junyu. Spatio-temporal evolution of habitat quality in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on regional GDP and population spatial distribution [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (5): 1747-1757. (in Chinese))
- [30] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183 (3/4): 323-349.
- [31] 詹立坤,郭先华,符坤,等. 两种指数法表征重庆市忠县土地利用/覆盖变化的对比研究[J]. *生态科学*, 2021, 40(4): 102-112. (ZHAN Likun, GUO Xianhua, FU Kun, et al. Comparative study of two index methods for characterizing of landuse/cover change in Zhong County, Chongqing [J]. *Ecological Science*, 2021, 40 (4): 102-112. (in Chinese))
- [32] 何丹,周璟,蔡建明,等. 中国高铁沿线区域土地利用景观格局变化分析[J]. *生态科学*, 2021, 40(4): 184-194. (HE Dan, ZHOU Jing, CAI Jianming, et al. Analysis of land use and landscape pattern changes on the areas along the high-speed railway in China [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(4): 184-194. (in Chinese))
- [33] 胡晴,郭怀成,王雨琪,等. 基于改进输出系数模型的农业源污染物负荷核算[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(4): 739-748. (HU Qing, GUO Huaicheng, WANG Yuqi, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution loads based on improved export coefficient model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(4): 739-748. (in Chinese))
- [34] 王惠,许月卿,刘超,等. 基于地理加权回归的生境质量对土地利用变化的响应: 以河北省张家口市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(3): 509-518. (WANG Hui, XU Yueqing, LIU Chao, et al. Response of habitat quality to land use change based on geographical weighted regression: a case study of Zhangjiakou City, Hebei Province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55 (3): 509-518. (in Chinese))
- [35] 马永强,石云,郝姗姗,等. 黄土丘陵区土地覆盖和生物多样性功能演化及预测[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2806-2815. (MA Yongqiang, SHI Yun, HAO Shanshan, et al. Evolution and prediction of land cover and biodiversity function in loess hilly region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2806-2815 (in Chinese))
- [36] 王军,严有龙,王金满,等. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J]. *生态学报*, 2021, 41 (14): 5837-5848. (WANG Jun, YAN Youlong, WANG Jinman, et al. Temporal-spatial variation characteristics and prediction of habitat quality in Min River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5837-5848. (in Chinese))
- [37] 周晓艳,何依依,黄欣,等. 三峡库区生境质量的地形梯度效应及对土地利用变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (11): 259-267. (ZHOU Xiaoyan, HE Yiyi, HUANG Xin, et al. Topographic gradient effects of habitat quality and its response to land use change in Hubei section of the Three Gorges Reservoir [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (11): 259-267. (in Chinese))
- [38] 刘超,王智源,张建华,等. 景观类型与景观格局演变对洪泽湖水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(8): 3302-3311. (LIU Chao, WANG Zhiyuan, ZHANG Jianhua, et al. Effects of landscape types and landscape pattern evolution on water quality of Hongze Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41 (8): 3302-3311. (in Chinese))
- [39] MA Libang, BO Jie, LI Xiaoyang, et al. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: the middle and lower reaches of Shule River Basin as an example [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 424-438.
- [40] BRUMM K J, JONAS J L, PRICHARD C G, et al. Land cover influences on juvenile Rainbow Trout diet composition and condition in Lake Michigan tributaries [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2019, 28(1): 11-19.
- [41] RIJAL S, RIMAL B, ACHARYA R P, et al. Land use/land cover change and ecosystem services in the Bagmati River Basin, Nepal [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(10): 651.
- [42] HU Baoan, KANG Fengfeng, HAN Hairong, et al. Exploring drivers of ecosystem services variation from a geospatial perspective: insights from China's Shanxi Province [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108188.
- [43] 赵晓同,王建,苏军德,等. 基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (18): 301-308. (ZHAO Xiaojiong, WANG Jian, SU Junde, et al. Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36 (18): 301-308. (in Chinese))
- [44] 张学儒,周杰,李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178. (ZHANG Xueru, ZHOU Jie, LI Mengmei. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 160-178. (in Chinese))

(收稿日期:2021-11-23 编辑:施业)