

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.002 CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.002

张洪珊,李书,王彦丹,等.人类活动加剧三峡库区湿地景观破碎化[J].水土保持学报,2025,39(6):139-151.

ZHANG Hongshan, LI Shu, WANG Yandan, et al. Human activities intensify wetland landscape fragmentation in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):139-151.

## 人类活动加剧三峡库区湿地景观破碎化

张洪珊<sup>1</sup>, 李书<sup>2</sup>, 王彦丹<sup>3</sup>, 王云琦<sup>1</sup>, 张建聪<sup>1</sup>, 李俊杰<sup>1</sup>, 程士宝<sup>4</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083; 2.水利部长江勘测技术研究所,武汉 430011; 3.重庆市林业投资开发有限责任公司,重庆 401120; 4.重庆市地质矿产测试中心,重庆 400042)

**摘要:** [目的] 当前针对三峡库区湿地景观格局动态变化及其多维驱动因子的耦合研究仍较为欠缺,通过定量解析三峡库区湿地景观的时空异变规律及其驱动机制,以此突破传统研究在动态追踪与交互效应量化方面的局限。[方法] 基于库区1980—2020年多源遥感影像,结合转移矩阵、标准差椭圆和景观指数等方法揭示演变特征,并采用地理探测器模型定量探测自然-人为因素对湿地变化的驱动贡献度及其交互效应。[结果] 1) 1980—2020年三峡库区湿地面积减少154.59 km<sup>2</sup>,其中人工湿地中水田减少7.82%,水库坑塘增加73.85%;自然湿地中河流增加53.62%,滩涂减少80.09%,新增沼泽湿地9.00 km<sup>2</sup>。期间库区水田湿地大规模转为建设用地,而湿地空间分布呈扩展趋势、方向性增强及重心呈锯齿形移动特征。2) 景观特征显示湿地破碎化加剧、斑块形状复杂化和异质性增加。河流湿地连通性强,主导作用显著,水田湿地连通性下降。而湿地景观破碎化会加剧生态功能退化,虽景观异质性提升但连通性降低凸显系统脆弱性。3) 地理探测器模型识别出夜间灯光指数、人口密度、国内生产总值等人为因子的解释力均超过10%,人为因素的总贡献度要高于自然因素的总贡献度;其次X6(植被指数)∩X8(国内生产总值)对湿地变化的解释力最强( $q=0.249$ ),并表现出非线性加强或双因子协同加强效应;总体上,双因子交互对湿地变化的解释力高于单一因子。研究结果为三峡库区湿地生态环境保护政策提供重要的理论依据和数据支撑。[结论] 三峡库区湿地系统生态功能出现衰退现象,而人为因素作用为三峡库区湿地景观格局演变的关键驱动因素,研究结果为库区大流域湿地生态治理提供空间决策支持。

**关键词:** 三峡库区; 湿地景观格局; 时空分布; 驱动因素

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0139-13

## Human Activities Intensify Wetland Landscape Fragmentation in Three Gorges Reservoir Area

ZHANG Hongshan<sup>1</sup>, LI Shu<sup>2</sup>, WANG Yandan<sup>3</sup>, WANG Yunqi<sup>1</sup>, ZHANG Jiancong<sup>1</sup>, LI Junjie<sup>1</sup>, CHENG Shibao<sup>4</sup>

(1. Jingyun Mountain Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Changjiang Survey Technology Research Institute, Ministry of Water Resources, Wuhan 430011, China; 3. Chongqing Forestry Investment Development Co., Ltd., Chongqing 401120, China; 4. Chongqing Testing Center of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China)

**Abstract:** [Objective] Current research on the dynamic changes of wetland landscape patterns and their coupling effects with multidimensional driving factors in the Three Gorges Reservoir area remains relatively insufficient. This study aims to quantitatively analyze the spatiotemporal variation patterns of wetland landscape and their driving mechanisms in the Three Gorges Reservoir area, thereby overcoming the limitations of traditional research

收稿日期: 2025-02-15 修回日期: 2025-04-12 录用日期: 2025-04-30 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-08-15

资助项目: 水利部重大科技项目(SKS-2022082); 国家重点研发计划项目(2023YFF1305201)

第一作者: 张洪珊(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事湿地生态系统服务研究。E-mail: 1050536492@qq.com

通信作者: 王云琦(1979—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

in dynamic tracking and interaction effect quantification. [Methods] Based on multi-source remote sensing images from 1980 to 2020 in the reservoir area, transition matrices, standard deviational ellipses, and landscape indices were combined to reveal the evolutionary characteristics of wetlands. A geodetector model was used to quantitatively assess the driving contributions of natural and anthropogenic factors to wetland changes and their interaction effects. [Results] 1) From 1980 to 2020, wetland areas in the Three Gorges Reservoir area decreased by 154.59 km<sup>2</sup>. Among artificial wetlands, paddy fields decreased by 7.82%, while reservoirs and ponds increased by 73.85%. Among natural wetlands, river areas increased by 53.62%, mudflats decreased by 80.09%, and 9.00 km<sup>2</sup> of new marsh wetlands emerged. During this period, a large proportion of paddy fields were converted to construction lands in the reservoir area, while wetlands expanded, coupled with directional enhancements and a zigzag pattern of centroid movement. 2) Landscape characteristics indicated that wetland fragmentation intensified, patch shapes became more complex, and heterogeneity increased. River wetlands exhibited strong connectivity and played a dominant role, while the connectivity of paddy fields declined. Wetland landscape fragmentation further exacerbated ecological function degradation. Although landscape heterogeneity increased, the decline in connectivity highlighted the system's vulnerability. 3) The geodetector model identified that anthropogenic factors such as night light index, population density, and gross domestic product each had explanatory power exceeding 10%, and the total contribution of anthropogenic factors was greater than that of natural factors. Furthermore, the interaction effect between X6 (vegetation index) and X8 (gross domestic product) had the strongest explanatory power for wetland changes ( $q=0.249$ ), demonstrating nonlinear enhancement or synergistic strengthening effects. Overall, the explanatory power of two-factor interactions on wetland changes was higher than that of a single factor. The research results provide important theoretical foundations and data support for formulating wetland ecological conservation policies in the Three Gorges Reservoir area. [Conclusion] The ecological functions of the wetland system in the Three Gorges Reservoir area have shown signs of degradation, and anthropogenic factors are the key driving forces behind the evolution of wetland landscape patterns. The research results provide spatial decision support for wetland ecological governance in the reservoir's large watershed.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir area; wetland landscape pattern; spatiotemporal distribution; driving factors

**Received:** 2025-02-15

**Revised:** 2025-04-12

**Accepted:** 2025-04-30

**Online**(www.cnki.net): 2025-08-15

湿地是由水域与陆地相互作用而形成的,地表长期存在或仅在特定季节出现积水的自然综合体<sup>[1]</sup>,在维持生物多样性、调节气候、净化水质和碳储量等方面发挥着关键作用<sup>[2]</sup>,湿地景观格局反映了多种生态过程与湿地生态系统在不同空间尺度上的相互作用结果<sup>[4]</sup>,其变化对物质迁移转化及能量的流动等生态过程有重要影响<sup>[5]</sup>。然而,受社会经济的快速发展、农业开垦、水利设施建设和气候变化等多重因素影响<sup>[6]</sup>,据统计<sup>[7]</sup>,到2020年中国湿地总面积净减少 $6.09 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,且相对损失率为12%,丧失速度远超其他类型的生态系统,湿地面临着面积显著减少、景观破碎化加剧以及景观异质性发生转变等问题<sup>[8]</sup>。

基于3S技术的多源遥感数据与景观生态学方法深度融合,结合转移矩阵和景观指数等多种方法结

合使用可以全面反映湿地景观破碎化的动态变化,有效克服了单一方法在破碎化动态监测中的局限性,已推动湿地景观研究取得显著进展,现有成果多聚焦于国家宏观尺度或典型城市尺度,在驱动机制方面,普遍认为自然与社会经济因素的复合影响是湿地演变的核心驱动力<sup>[9]</sup>,其中,大型水利工程(如三峡工程引发的洞庭湖水文改变<sup>[10]</sup>、重庆市湿地退化<sup>[11]</sup>)、城市扩张经济增长(上海<sup>[12]</sup>、江苏<sup>[13]</sup>、珠江三角洲<sup>[14]</sup>等地城镇化)、农业生产方式(武汉市<sup>[15]</sup>、黄河三角洲<sup>[16]</sup>养殖、围垦)被证实为关键驱动因素。目前区域尺度湿地景观格局的时空动态及影响因素的研究案例较少。尤其在三峡库区这一特殊地理单元,已有研究时段多集中于2000年,缺乏蓄水工程实施前(1980s)的基线数据,以及传统回归模型难以量化多因子交互效应。

作为长江中上游关键生态节点,三峡库区凭借其特有的水库生态系统特征,在维系长江中下游流域水环境安全方面发挥着不可替代的生态防护功能。由于三峡工程的分阶段蓄水、大量土地淹没、原居民移居、城镇化建设等使库区土地利用结构发生了显著转变<sup>[17-18]</sup>,水土流失、生物多样性减少等生态问题随之增加,其中湿地生态环境格局发生显著变化<sup>[11]</sup>,可持续发展面临严峻挑战。基于此,本研究要解决的核心问题是回答库区湿地景观格局时空动态变化特征及其驱动因素是什么。通过库区 1980—2020 年时序遥感影像数据,结合转移矩阵、标准差椭圆和景观指数等方法,分析湿地景观格局的时空演变趋势,并通过地理探测器模型解析因子间非线性交互关系,定量研究驱动三峡库区湿地景观格局演变的因素。以期为三峡库区实现湿地资源的系统保护及景观格局优化提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

三峡库区(28°30'20"~31°44'43"N,105°48'25"~111°40'14"E)是指受三峡工程影响水位升高而受淹没的地区(图 1),三峡工程于 1994 年开工建设,2006 年竣工,面积为 5.7×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,175 m 正常蓄水位时水域面积为 1 084 km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>,最大入库洪峰流量 7.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/s,为长江中下游累计补水 164 d。三峡库区地处四川盆地东缘与江汉平原西部的过渡地带,横跨大巴山南麓和鄂西武陵山北麓,呈现东高西低的地貌特征,以山地地形为主。从气候特征来看,作为亚热带季风气候向温带过渡的典型区域,年平均气温 17~19℃,年平均降水量 1 100~1 200 mm。三峡工程建设带来的移民安置、基础设施建设和农林产业结构调整,使其人口和经济结构发生了巨大变化<sup>[20]</sup>。

表 1 三峡库区湿地分类

Table 1 Wetland classification in Three Gorges Reservoir area

湿地类型	湿地名称	划分标准
自然湿地	河流	指天然形成或人工开挖的河流及主干常年水位以下的土地
	湖泊	指天然形成的积水区常年水位以下的土地
	滩地	指河、湖水域平水期水位与洪水期水位之间的土地
	沼泽	指地势平坦低洼,排水不畅,长期潮湿,季节性积水或常年积水,表层生长湿生植物的土地
人工湿地	水田	指有水源保证和灌溉设施,在一般年景能正常灌溉,用以种植水稻,莲藕等水生农作物的耕地,包括实行水稻和旱地作物轮种的耕地
	水库坑塘	指人工修建的蓄水区常年水位以下的土地

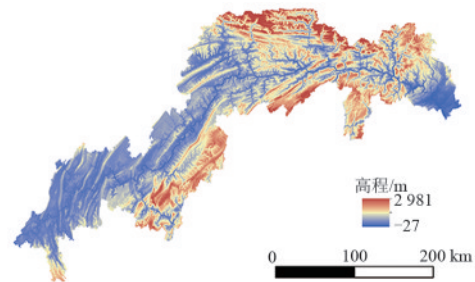


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

### 1.2 数据来源与处理

本文数据来源于中国地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn/>)8期分辨率为 30 m 的土地利用数据。中国地理科学与资源研究所已将这些数据与 Landsat 8 OLI 和 GF2 遥感卫星数据进行了判读,分类结果通过无人机图像和实地调查进行抽样验证,二级土地利用的分类准确率超过 91.2%,故直接使用该土地利用数据进行研究。并基于《湿地公约》<sup>[21]</sup>《第三次全国国土调查技术规程》<sup>[22]</sup>以及《湿地分类》(GB/T 24708-2009)<sup>[23]</sup>,并参考三峡库区湿地的具体特征,将湿地分为自然湿地(含河流、湖泊、滩涂和沼泽地)和人工湿地(含水库坑塘和水田)。具体划分标准详见表 1。本研究从地理关联性、数据可获性、库区特殊性 3 个维度,选取气候因子(X1~X2):库区东西部 500 mm 降水差及 0.8℃/(10 a)增温直接调控湿地水文平衡;地形因子(X3~X4):地形差显著影响湿地分布;生态因子(X5~X6):紫色土持水量较黄壤低,NDVI 与生物量之间具有较好的正相关关系。人文因子(X7~X9):经济增长和人口增加是湿地变化的主要社会经济驱动因素;空间胁迫(X10~X12):距离居民点和道路越近,湿地破碎化程度越高;而距离水体越近,湿地的连通性和生态功能越强,结合库区实际情况及参考相关研究<sup>[24]</sup>选取 12 个自然因素和人为因素进行驱动分析(表 2),所有数据采用 WGS-1984 地理坐标系,进行统一的空间配准。

表 2 三峡库区湿地驱动因子数据来源  
Table 2 Data sources of driving factors for wetlands in Three Gorges Reservoir area

数据类型	驱动因子	数据来源
自然因素	降雨量(X1)	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
	气温(X2)	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
	海拔(X3)	NASA 地球科学数据网站(https://nasadaacs.eos.nasa.gov/)
	坡度(X4)	/
	土壤类型(X5)	世界土壤数据库(HWSD, Harmonized World Soil Database)
	植被指数(X6)	https://search.earthdata.nasa.gov/search
人为因素	人口密度(X7)	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	国内生产总值(X8)	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	夜间照明指数(X9)	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	距城区距离(X10)	Open street map(https://www.openhistoricalmap.org/)
	距道路距离(X11)	Open street map(https://www.openhistoricalmap.org/)
	距水体距离(X12)	Open street map(https://www.openhistoricalmap.org/)

### 1.3 研究方法

1.3.1 转移矩阵 动态变化转移矩阵能够直观反映一定时间段内土地利用类型的起始与结束结构,同时揭示各土地利用类型在该时间段内的来源和组成<sup>[25]</sup>。基于此研究,利用 ArcGIS 软件提取三峡库区 1980—2020 年不同土地利用类型的土地利用转移图,计算转移矩阵,公式为:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $P_{ij}$ 为土地利用类型*i*转换为土地利用类型*j*的面积,km<sup>2</sup>;n为转移前后的土地利用类型数;*i*和*j*分别为转移前和转移后的土地利用类型。

1.3.2 标准差椭圆方法 标准差椭圆方法是一种用来分析湿地空间分布特征的常用手段,能够直观反映研究时段内研究区湿地类型的空间演变过程<sup>[26]</sup>。本研究该方法以湿地景观的空间质心为基准,分别计算其在X轴和Y轴方向上的标准差椭圆参数。其中,X轴方向(长轴)表明湿地空间分布的主导延伸趋势,Y轴方向(短轴)则反映湿地空间格局在该方向上的离散特征。计算公式为:

$$\begin{cases} \text{SDE}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \\ \text{SDE}_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \end{cases} \quad (2)$$

标准差椭圆的中心代表一种动态变化的状态,能够反映区域发展差异的变化轨迹。其中心位置的计算公式为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \cos \theta - \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{n}} \\ \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \sin \theta - \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{n}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_i$ 和 $y_i$ 为不同类型湿地中心的经纬度坐标; $\tilde{x}_i$ 和 $\tilde{y}_i$ 为平均值各湿地中心的中心;n为湿地类型的总数; $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ 分别为沿着X轴和Y轴的标准偏差; $\theta$ 为椭圆的方位角,为正北方向顺时针旋转至椭圆长轴所形成的角度,(°)。

1.3.3 景观指数 景观指数作为景观格局特征的高度集成化表征指标,能够有效反映研究区域景观系统的结构特征与空间配置关系,为准确解析三峡库区湿地景观格局的时空演变规律提供量化依据。本文从三峡库区湿地的异质性、形状等方面考虑,根据湿地景观的稳定性并参考相关研究<sup>[11,15]</sup>,综合选取8个景观指数(表3),利用Fragstats 4.2软件对景观指数进行系统性量化分析。

1.3.4 地理探测器 地理探测器是从空间分异的角度探究因变量与自变量之间的空间分布关系<sup>[27]</sup>,本文从自然因素、人为因素2个维度选取相关指标作为研究区三峡库区湿地变化率(Y)<sup>[28]</sup>的探测因子。

1)单因子探测利用地理探测器计算解释力*q*统计值,用于量化驱动湿地景观变化的因素的解释能力,*q*统计值的取值为[0,1],*q*值越大表示自变量X对因变量Y的解释能力越强,反之则弱,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (5)$$

$$SST = N\sigma^2 \quad (6)$$

式中:  $h = 1, 2, \dots; L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的层, 也称为类别或分区;  $N_h$  和  $N$  分别为  $h$  层和整个研究区域的单位数量;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为  $h$  层层和整个区域  $Y$  值的方

差;  $SSW$  和  $SST$  分别为内部平方和和总平方和。

2) 双因子交互探测评估因变量  $Y$  在 2 个因素共同影响时的解释力。评估方法包括首先计算与  $Y$  相关的每个因素的  $q(X1)$  和  $q(X2)$ 。随后, 计算它们相互作用的  $q(X1 \cap X2)$ , 对比以判断它们对湿地景观变化空间分异的解释力是增强还是减弱(表 4)。

表 3 景观格局指数表

Table 3 Landscape pattern indices

尺度	景观指数	缩写	生态学意义
类型水平	斑块密度	PD	描述景观的空间异质性
	最大斑块指数	LPI	描述景观的优势度
	周长-面积分维数	PAFRAC	反映各类型斑块形状的复杂性
	聚集度指数	AI	描述景观空间集聚性程度
景观水平	斑块数量	NP	描述景观的破碎化程度
	景观形状指数	LSI	描述斑块边界复杂程度
	香农多样性指数	SHDI	描述斑块多样性情况
	蔓延度指数	CONTAG	描述不同斑块类型的团聚程度

表 4 相互作用检测器的可能性类型

Table 4 Possible types of interaction detectors

序号	互动关系	交互作用
1	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强
2	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
3	$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), q(X2)]$	线性增强
4	$\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
5	$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱

## 2 结果与分析

### 2.1 三峡库区湿地时空特征

2.1.1 三峡库区湿地面积变化趋势 由图 2 可知, 通过分析库区湿地分布, 发现河流湿地是湿地景观的核心骨架, 展现出较高的连通性和空间稳定性;

水田主要分布在河谷平原及地势较低的区域, 呈现出密集分布的特点; 水库坑塘分布零散, 2000 年后, 逐渐扩展到周边地区; 滩涂较为分散, 多位于河流及湖泊附近, 表现出小规模分布; 2020 年新增沼泽地类。

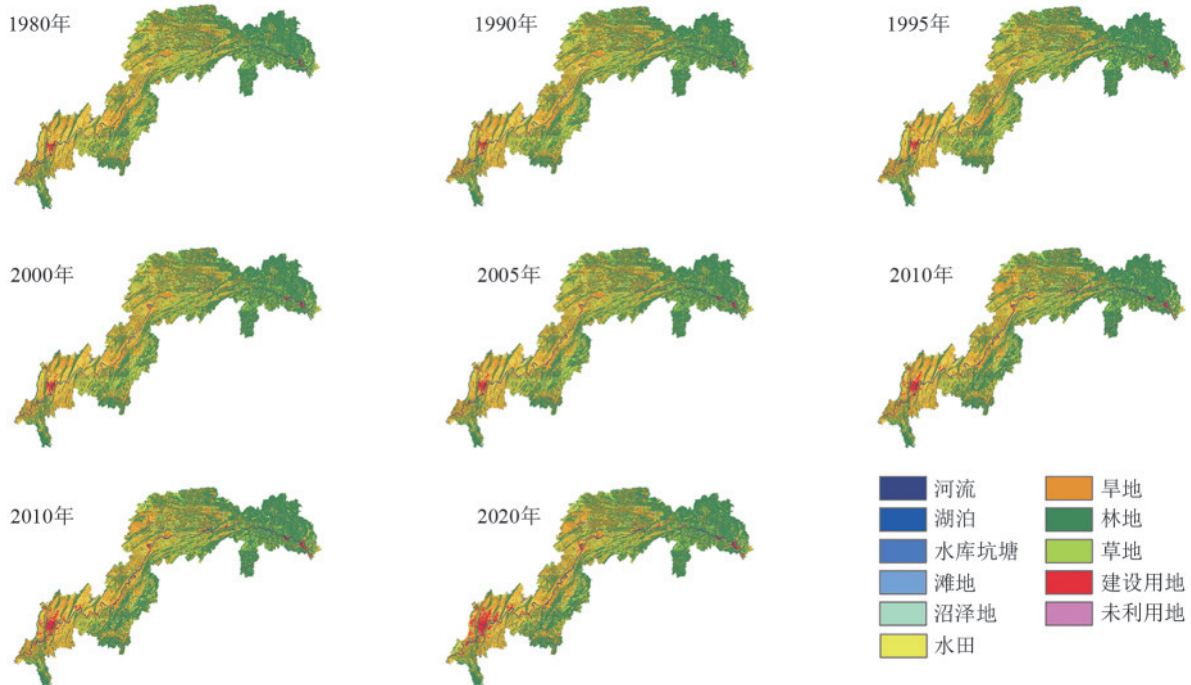


图 2 1980—2020 年三峡库区湿地景观与其他地类分布

Fig. 2 Distribution of wetland landscape and other land types in Three Gorges Reservoir area (1980—2020)

1980—2020年,三峡库区湿地总面积经历下降-上升-下降,截至2020年三峡库区湿地面积为7 099.82 km<sup>2</sup>,40 a减少154.59 km<sup>2</sup>,2010—2020年湿地总面积损失速度最大(图3a)。三峡库区湿地构成以人工湿地为主,占湿地总面积的80%以上,人工湿地面积呈现下降趋势,在人工湿地中水田面积占比最大,1980—2020年(图3b),水田面积缩减7.82%,相反水库坑塘增幅达73.85%,是人工湿地中年际间变化最大的类型;自然湿地面积呈现小幅度上升趋势。自然湿地以河流湿地为主,其面积在年际间呈现增加趋势,为53.62%,滩涂面积显著减少80.09%,湖泊面积年际间基本持平,变化较小。

互转化见图4。从各时间段来看,1980—1990年湿地各地类比较稳定,湿地主要转移为旱地、建设用地和林地,但转移比例较低;到2000年湿地面积下降70.47 km<sup>2</sup>,水田是湿地面积下降的主要贡献者,转移面积达192.58 km<sup>2</sup>,建设用地占水田转移面积的31.93%;2010年湿地面积相较2000年增加342.35 km<sup>2</sup>,旱地、林地、草地大量转移为水田,对湿地面积增长的贡献率达到76.55%;2020年湿地面积相较2010年显著减少216.52 km<sup>2</sup>,下降速度进一步加快。主要原因是水田大规模转化为建设用地,转化面积达408.17 km<sup>2</sup>,占湿地总减少面积的188.51%。水田的转移对非湿地面积增长的贡献率达到88.76%,是非湿地扩张的主要来源之一,2020年出现沼泽地类,主要由水田及河流转移而来。

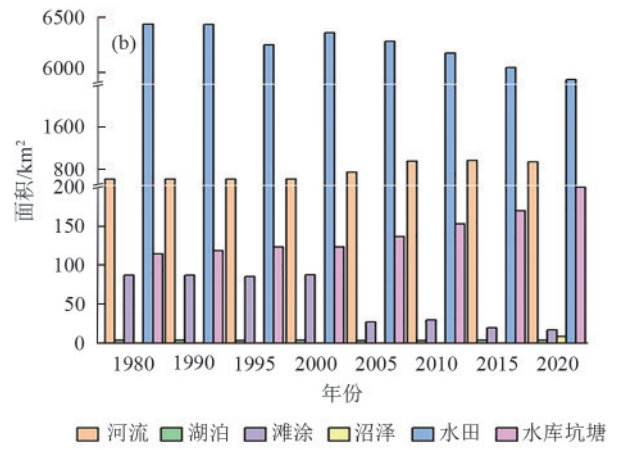
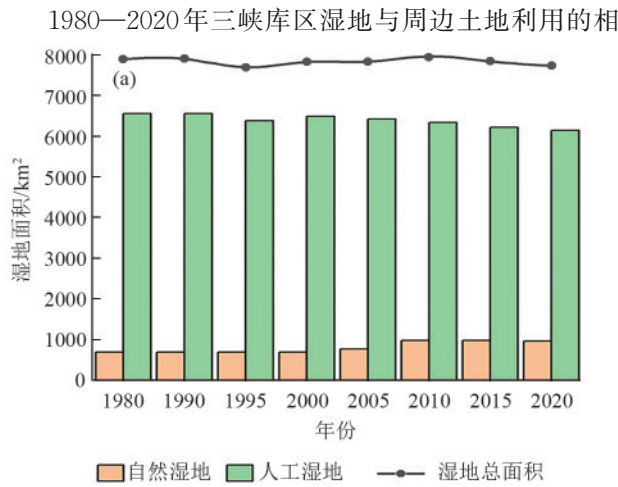


图3 1980—2020年三峡库区湿地面积的年际变化

Fig. 3 Interannual variations of wetland areas in Three Gorges Reservoir area (1980—2020)

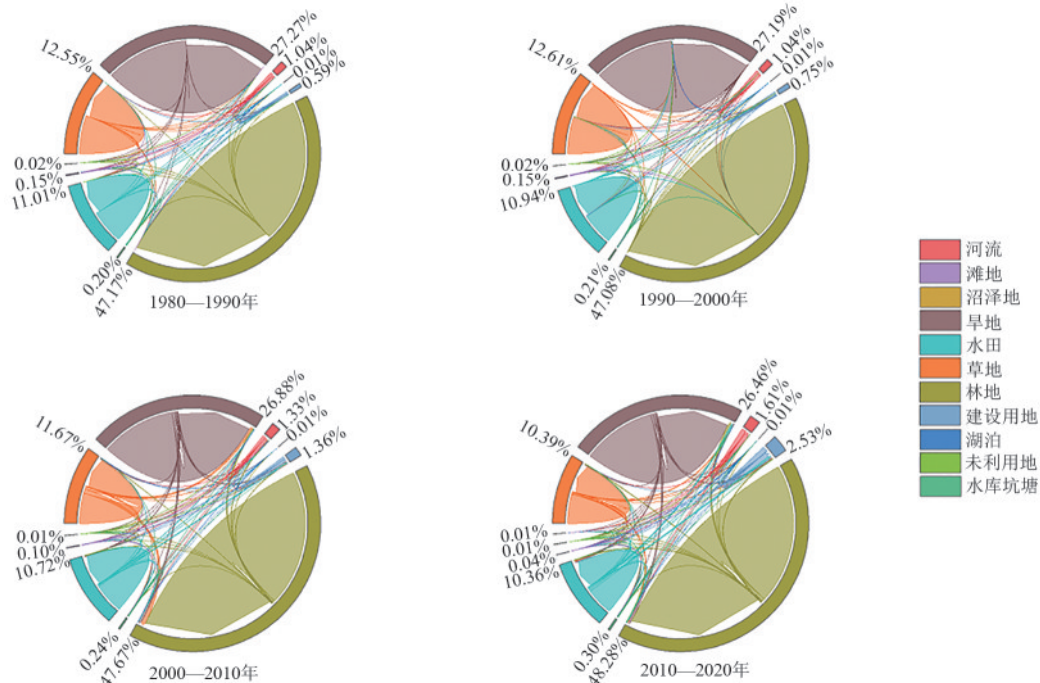
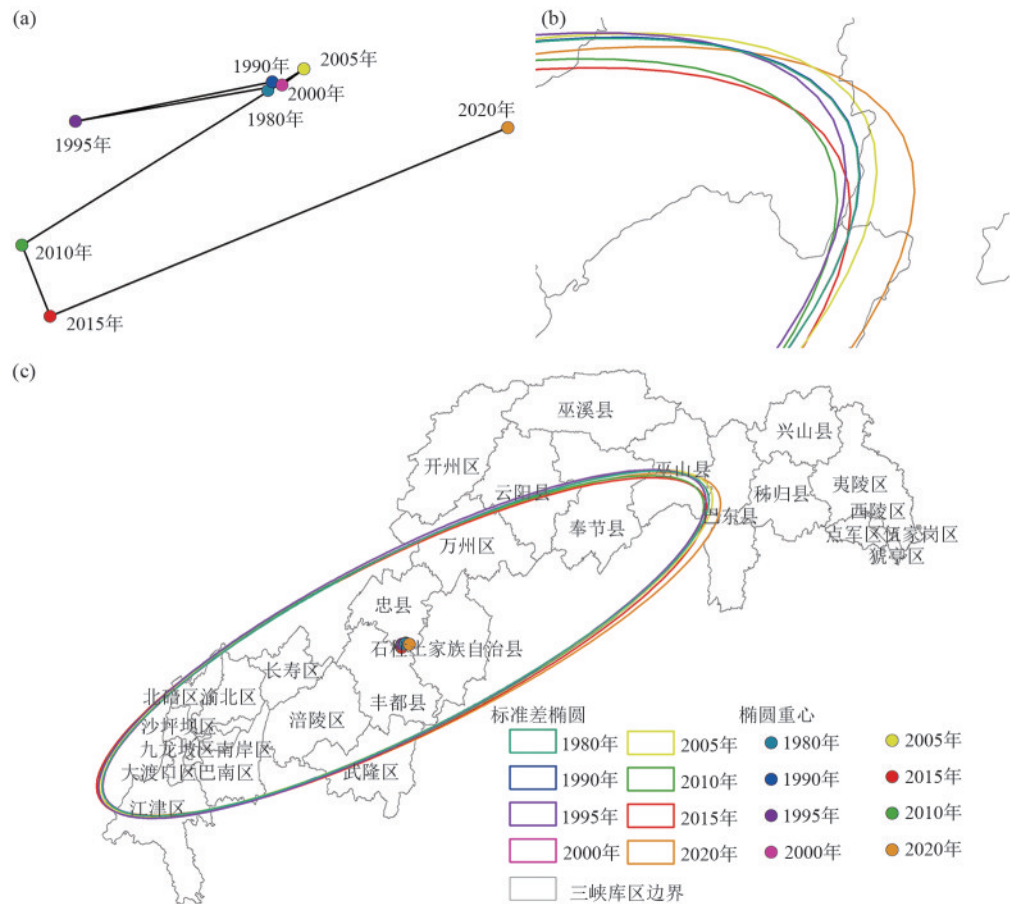


图4 1980—2020年三峡库区湿地与其他土地利用转移弦图

Fig. 4 Chord diagrams of land-use conversions between wetlands and other land types in Three Gorges Reservoir area (1980—2020)

2.1.2 三峡库区湿地空间变化特征 1980—2020年三峡库区湿地景观的变化趋势和空间分布特征见图5。湿地景观的重心在1980—2020年呈锯齿形移动,总体上向东偏南方向迁移。重心阶段性变化:1980—1995年重心从西向东偏西移动2.70 km;1995—2005年重心再次向东偏北方向移动3.18 km;2005—2010年重心向东南方向移动4.38 km,显示出湿地景观的显著动态变化;2010—2015年重心略微向南偏东方向移动0.93 km;2015—2020年重心大幅向东北方向移动6.61 km(图5a)。标准差椭圆的范围主要涵盖重庆市境内(图5c),其重心均位于忠县,

反映了该区域在湿地景观分布中的核心作用。椭圆呈西南至东北方向分布,且旋转角度在62.69°~63.79°波动,显示出湿地景观的分布方向性增强。长半轴从1980年的229.36 km增长到2020年的233.45 km,表明湿地景观在主方向上逐渐扩展;短半轴在1980年的58.84 km到2020年的60.17 km,增幅较小(表5),表明湿地在次方向上的扩展相对有限。总的来说随着时间推移,湿地景观的分布格局逐渐趋于扩展,方向性更为明显,且重心的移动显示出景观的动态变化特性,湿地景观的空间分布格局在此期间经历了明显的扩展与重新调整。



注:图a为标准差椭圆重心变化趋势;图b为标准差椭圆随时间变化的空间分布;图c为三峡库区各年份标准差椭圆分布及重心图。

图5 1980—2020年三峡库区湿地景观的变化趋势和空间分布

Fig. 5 Variation trends and spatial distribution of wetland landscape in Three Gorges Reservoir area (1980—2020)

表5 三峡库区湿地空间分布格局的标准差圆参数

Table 5 Standard deviational ellipse parameters of wetland spatial distribution in Three Gorges Reservoir area

年份	重心地理坐标		重心移动距离/km	长半轴/km	短半轴/km	旋转角度/(°)
1980	30°05'59"N	107°58'14"E	/	229.36	58.84	62.84
1990	30°06'03"N	110°50'22"E	0.12	229.39	58.89	62.83
1995	30°05'50"N	107°56'49"E	2.70	229.87	60.17	62.69
2000	30°06'01"N	107°58'20"E	2.82	229.21	58.98	62.81
2005	30°06'07"N	107°58'30"E	0.36	231.54	58.88	62.98
2010	30°05'03"N	107°56'24"E	4.38	228.22	59.64	63.20
2015	30°04'35"N	107°56'35"E	0.93	229.43	59.74	63.53
2020	30°05'42"N	107°59'58"E	6.61	233.45	59.98	63.79

## 2.2 三峡库区湿地景观指数变化特征

2.2.1 景观斑块指数演变分析 河流和水田的 PD 相对较高(图 6a),表明这 2 种景观类型的斑块密度在湿地景观中占主导地位,水库坑塘和湖泊的 PD 较低,说明这些景观类型的分布较为稀疏;整体来看,PD 相对平稳,显示湿地景观的斑块数量在时间维度上没有发生显著变化。河流的 LPI 显著高于其他类型(图 6b),且呈现逐渐上升趋势,表明河流湿地在景观中具有重要的核心作用,规模不断扩大,水田的 LPI 在 2000 年后明显下降,这与城镇化发展和土地利用变化导致的水田减少有关,其他湿地类型的 LPI 基本稳定,表明其主导地位没有发生明显变化。湖

泊和水库坑塘湿地的 PAFRAC 波动较大(图 6c),反映出其形状复杂度受环境和人为干扰的影响显著,水田湿地的 PAFRAC 相对稳定,说明其形状较为规则,变化幅度不大,河流的 PAFRAC 呈现一定下降趋势,表明其形状趋于简单化;河流的 AI 最高且保持稳定(图 6d),表明其连通性较好,景观聚合程度较高,水田的 AI 逐渐下降,说明其景观斑块的连通性在减弱,这可能与土地利用转换有关,其他类型湿地的 AI 变化幅度较小,显示其连通性相对稳定。从整体格局来看,三峡库区湿地景观的连通性和异质性呈现一定变化,其中河流和水田湿地的格局差异尤为显著。

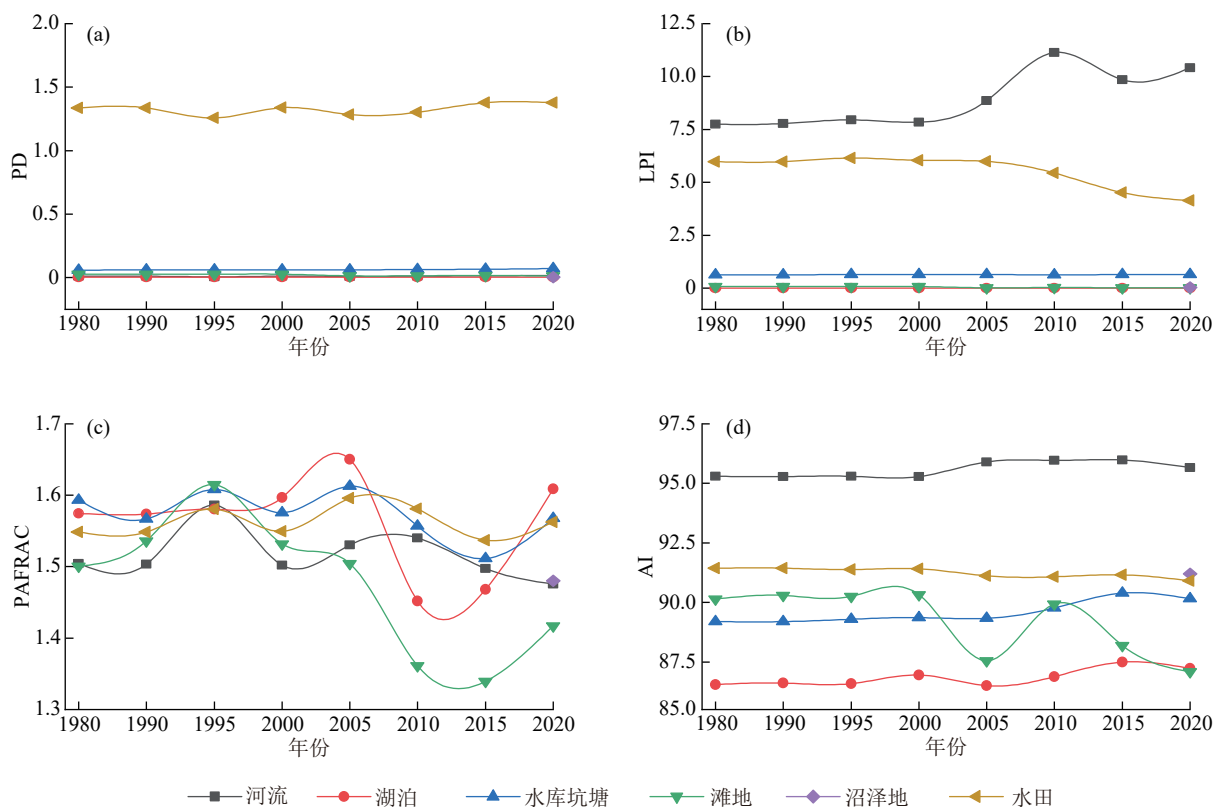


图 6 1980—2020 年三峡库区湿地景观斑块指数

Fig. 6 Patch indices of wetland landscape in Three Gorges Reservoir area (1980—2020)

2.2.2 景观水平指数演变分析 NP 指数整体呈波动变化(图 7a),先增加后减少,在 1990 年达到峰值后,经历 1995 年的显著下降,再次回升至 2005 年后逐渐减少,表明湿地景观的破碎化程度随着时间变化而波动,在 2015 年达到最大值;在整个时间段中,LSI 指数逐渐增加,说明湿地斑块的边界形状趋于复杂。特别是 2000 年至 2010 年间的快速上升,表明这一时期湿地受到较大干扰或人为活动的影响,在 2015 年后降到最低 230.69 后景观形状指数开始又上升。CONTAG 指数整体呈下降趋势(图 7b),从 1980 年的 86.5 下降到 2020 年的 83.0 以下,反映了湿地景观中不同斑块类型的连通性降低,景观破碎化程度增

加。SHDI 指数逐年上升,从 1980 年的 0.43 增加到 2015 年的 0.54,特别是在 2005 年之后显著增加。这表明湿地景观的多样性和异质性在增强,不同斑块类型的分布更加均匀。1980—2020 年,三峡库区湿地景观格局总体呈现出破碎化增强,斑块形状复杂化,异质性增加的变化趋势,湿地景观破碎化加剧导致生态功能退化,景观异质性提升但连通性降低凸显系统脆弱性。

## 2.3 三峡库区湿地景观变化驱动因素分析

2.3.1 各环境因子对湿地变化的贡献度 采用因子探测法计算出各因子对湿地变化率的贡献度。由表 6 可知,12 种环境因子均通过显著性检验

( $p < 0.05$ )。各指标因子对三峡库区湿地演变的贡献度(%)从高到低依次排列为夜间灯光指数(13.76) > 人口密度(12.06) > 国内生产总值(11.56) > 植被指数(7.61) > 距城区距离(7.66) > 降雨量(3.05) > 距水体距离(1.17) > 土壤类型(1.21) > 气温(0.78) > 坡度(0.63) > 海拔(0.37), 其中夜间照明指数、人口密度、国内生产总值的贡献度均高于10%, 为主要的驱动因子, 在自然因素

中, 植被指数、土壤类型、降雨量对三峡库区湿地景观变化率的解释力最强, 因子贡献度分别为7.61%、3.05%、1.21%。在人为因素中, 夜间照明指数、人口密度、国内生产总值对三峡库区湿地景观变化率的解释力最强, 因子贡献度分别为13.76%、12.06%、11.56%。人为因素的总贡献度显著高于自然因素的总贡献度, 由此可见, 人为因素是影响三峡库区湿地变化的主要原因。

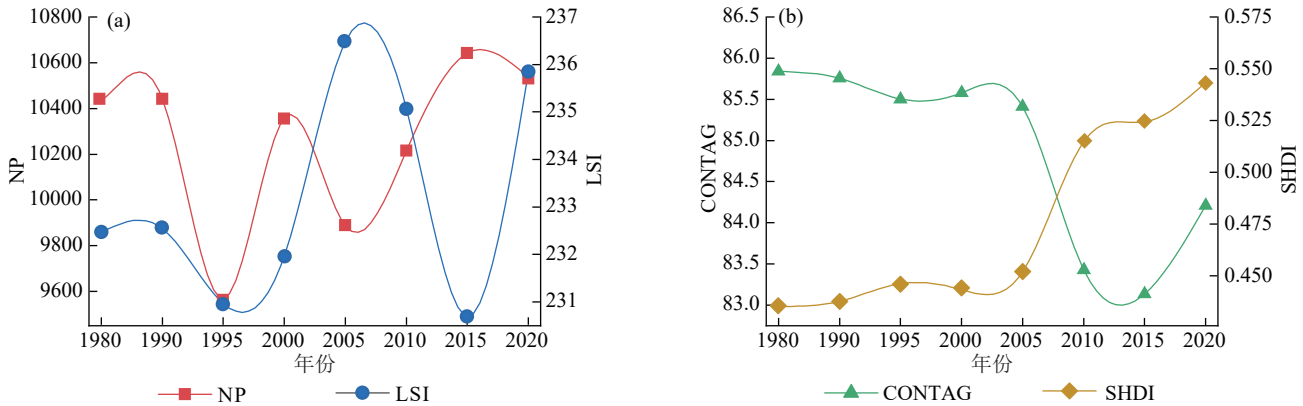


图 7 1980—2020年三峡库区湿地景观格局水平指数

Fig. 7 Landscape level indices of wetlands in Three Gorges Reservoir area (1980—2020)

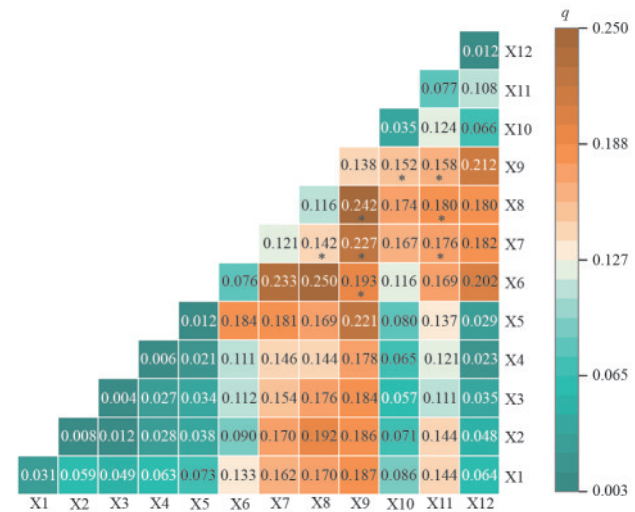
表 6 地理探测器单因子探测

Table 6 Single-factor detection using geodetector

因子指标	贡献度/%	$p$
降雨量(X1)	3.05	0
气温(X2)	0.78	0
海拔(X3)	0.37	0.004
坡度(X4)	0.63	0
土壤类型(X5)	1.21	0
植被指数(X6)	7.61	0
人口密度(X7)	12.06	0
国内生产总值(X8)	11.56	0
夜间灯光指数(X9)	13.76	0
距城区距离(X10)	3.51	0
距道路距离(X11)	7.66	0
距水体距离(X12)	1.17	0

2.3.2 各环境因子交互作用探测 12个影响因素两两交互作用对湿地变化的解释力都比单因素的解释力强(图8), 而且以双因素增强为主, 这表明三峡库区湿地变化是多种因素交互作用的结果。其中X6(植被指数)和X9(夜间灯光指数); X7(人口密度)和X8(国内生产总值)、X9(夜间灯光指数)、X11(距道路距离); X8(国内生产总值)和X9(夜间灯光指数)、X11(距道路距离); X9(夜间灯光指数)和X10(距城区距离)、X11(距道路距离)为线性增强, 其余交互作用类别为双因素增强类别。X6(植被指数)∩X8(国内生产总值)对湿地变

化的解释力最强, 为0.249, X6(植被指数)∩X7(人口密度), X9(夜间灯光指数)∩X12(距水体距离)次之, 为0.232, 0.212, 这表明人为因素对综合湿地变化的驱动占主导地位。



注: \*表示两因子的交互作用为线性增强, 其余未标注的都表示作用类型为非线性增强双因子。

图 8 三峡库区各环境因子交互探测解释力

Fig. 8 Explanatory power of environmental factor interactions in Three Gorges Reservoir area

### 3 讨论

#### 3.1 三峡库区湿地景观格局时空变化

从时间序列来看, 三峡库区湿地总面积经历了“下降-上升-下降”的变化趋势, 水库的建设影响湿地

的分布<sup>[29]</sup>,1980—1995年初期下降,三峡工程前期规划及建设(1994年正式动工)导致部分滩涂因早期水利工程和农业开垦被侵占;水田因三峡工程前期征地、移民搬迁大量减少;1995—2010年短暂回升,三峡蓄水(2003年)后,河流面积因水位上升暴涨,成为自然湿地增长核心。水库坑塘随工程配套建设稳步增加,有研究表明土地利用/覆盖类型的改变易受到项目建设影响<sup>[30]</sup>,2009年重庆的多个国家级湿地公园及其配套项目,如汉丰湖、涪江(潼南地区)、丰都县龙河和九龙坡区彩云湖等,对三峡库区湿地的保护工作做出了杰出贡献,特别是在2005—2010年湿地面积增长122.78 km<sup>2</sup>。

从空间变化来看,重心经历5次显著迁移,受早期三峡工程规划及库区移民安置的影响,人类活动(如农业开垦、居民点扩张)导致西部湿地减少,而东部因地形限制或未大规模开发,湿地景观相对稳定,重心向东部偏移;三峡工程于1994年正式动工,2003年初期蓄水,库区水位上升导致低海拔湿地被淹没,同时上游来水在库区北部形成新的河岸湿地。此外,重庆市城市化进程加快,南部区域开发压力增大,湿地重心向受干扰较小的东北方向迁移;2008年三峡工程完成持续蓄水至175 m高程,库区中段形成大面积消落带,季节性水位变化促进了东南部湿地(如沼泽、河滩)的扩张;2010—2015年,生态修复工程集中于南部区域,减缓了重心迁移速度;库区后续工程(如支流整治、防洪设施建设)及周边城市扩张(如重庆主城区向北发展)导致南部湿地进一步缩减,而东北部因地形复杂、开发较晚,成为湿地景观的新集中区。2016年重庆市政府印发《重庆市环境保护和生态建设“十三五”规划》<sup>[31]</sup>,指出要注重湿地保护和修复,伴随着国家保护政策的落实,2015年后,湿地空间向东北部移动了6.61 km,湿地空间移动较为显著。

从三峡库区湿地景观格局指数来看,城市扩张和基础设施建设直接侵占湿地,减少了水田面积,导致其连通性和主导地位下降<sup>[32]</sup>。河流湿地因水库的调控作用得以维持较高连通性,但形状复杂化(LSI上升)与人为干扰密切相关。长江中下游湿地景观也面临城镇化压力,但相比三峡库区,农业活动对水田湿地的影响更显著。长江中下游地区湿地多样性(SHDI)增长幅度较小,而连通性(CONTAG)下降幅度更大,反映了更高的生态干扰程度。涪公河三角洲湿地受农业活动、基础设施建设和气候变化的显著影响,湿地景观破碎化趋势明显(NP下降、CONTAG下降)<sup>[33]</sup>,与三峡库区类

似,该地区的河流湿地规模较大,连通性保持较高水平。但由于土地利用变化,水田湿地的连通性和多样性均有所下降(SHDI上升幅度有限)。城市扩张和基础设施建设导致湿地景观破碎化和连通性下降,湿地景观格局指数受到农业活动和生态干扰的显著影响,表明三峡库区湿地生态系统景观格局的破碎化直接导致栖息地连通性降低、物种迁移受阻、生态系统服务功能衰退等后果,未来需要加大对湿地保护的投入,推动湿地修复工程,提升湿地生态系统的连通性和稳定性,确保湿地资源的可持续利用。此外建议库区湿地生态修复需强化系统性与科学性,并注重跨工程协同联动,建立长期维护机制以巩固自我恢复功能,同时加强监测评估,为湿地保护提供科学支撑,推动生态保护向可持续发展方向。

### 3.2 三峡库区湿地景观变化的响应机制

本研究采用地理探测器模型量化各种因素对湿地面积变化率的多维驱动力,其中人为因素的贡献度显著高于自然因素,表明城市化进程和社会经济发展是湿地变化的核心驱动力,上海市湿地<sup>[12]</sup>、长江上游湿地<sup>[22]</sup>的研究结果进一步揭示,城市扩张、经济增长和人口增长是湿地面积减少的关键原因,城市化导致湿地向建设用地的转换。这些研究结果验证了本文的观点。

其次夜间灯光指数作为人类活动强度的表征指标跃居首位,凸显了城乡建设扩张对湿地空间挤压的突出影响,这与“经济优先型”湿地演变模式<sup>[16]</sup>形成呼应。同时夜间灯光指数(night light index, NLI)是通过卫星遥感和数据分析技术,提取到的人类夜间生活及生产的灯光影像数据,能够直观地展示一个区域的繁荣程度和发展水平,当NLI值较高时,往往对应城市或工业区等人类活动高度密集的区域,此类区域的湿地更易因开发、填埋或向其他用途转变而减少面积,并发生景观格局重塑<sup>[34]</sup>。本研究中单因子探测结果显示夜间灯光指数、人口密度、GDP是驱动湿地空间格局变化的重要因素。相关研究<sup>[35]</sup>也提出了NLI与GDP和人口在不同空间尺度上均呈显著正相关,也有研究<sup>[36]</sup>指出,高等级道路中心地所在网格通常风险等级较高,道路密度与风险源等级之间具有较好的拟合度,而夜间灯光指数可较好表征行政区域内多等级中心地的分布,进一步说明NLI指数较高的区域往往面临更高的生态风险。而植被指数(7.61%)处于中间贡献水平,揭示了生态响应与空间约束的交互作用机制,为制定湿地保护策略提

供了量化依据。

2020年三峡库区地区生产总值达9 691.5亿元,人口规模约1 561万人,远超全国平均水平<sup>[19]</sup>,快速增长的人口进一步加大了土地和粮食的需求,“与水争地”“向湖要粮”等问题依旧突出。在1990—2020年,三峡库区农业用地面积减少3 819.62 km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>,已有研究<sup>[12]</sup>显示,水田面积与农作物播种总面积之间的关联度高达0.71,随着城镇化的推进,大量水田被转为工业用地、居住用地,显著改变了湿地的空间格局<sup>[32]</sup>。在高GDP地区,大规模基础设施建设和城市扩张对湿地造成了更大的占用与破坏压力,进而影响湿地的生态功能和空间分布,使得湿地景观格局的演变不可避免地受到社会经济因素的深刻影响,土地利用变更速度持续加快,湿地利用类型与转换形式更加多样,导致湿地的破碎化程度不断提高<sup>[12]</sup>。高GDP通常伴随着人口集聚(高人口密度)和城市化水平提升(高NLI),三者叠加加剧了湿地的丧失与破碎化。这些相互作用的社会经济因素共同推动了湿地景观格局的演化,且对区域生态系统的完整性和稳定性构成潜在威胁。本研究中植被指数(7.61%)是自然因素中贡献度最高的因子,表明植被覆盖状况对湿地变化具有较强的调节作用。植被覆盖减少可能导致土壤侵蚀加剧、水文循环改变,从而影响湿地生态系统的稳定性<sup>[37-38]</sup>。交互作用探测结果显示,植被指数与国内生产总值、植被指数与人口密度、夜间照明指数和距水体距离均大于20%,这表明三峡库区湿地生态系统的变化与区域经济发展、人口分布、人类活动强度以及水文条件紧密相关。

在湿地景观演变驱动机制研究中,由于研究时段选取、驱动因子识别以及分析方法体系存在差异,研究结论呈现显著的空间异质性和时间变异性特征。尤其是在大尺度和多样化的地理区域内,影响湿地变化的因素具有较强的空间异质性和时间动态性,这增加了研究的复杂性。未来的研究应加强区域间的比较分析,探索不同区域湿地变化驱动因子的异同及其形成机制。

## 4 结论

1) 1980—2020年,三峡库区湿地总面积减少154.59 km<sup>2</sup>,土地利用方式改变是大面积水田转变为建设用地。空间分布格局呈现出显著的动态变化,表现为整体扩展、方向性增强和重心的锯齿形移动。

2) 1980—2020年,河流和水田湿地的斑块密度较高,河流湿地规模不断扩大,保持较高连通性并

在景观中发挥核心作用,而水田湿地的连通性和主导地位有所下降。三峡库区湿地景观格局总体呈现出破碎化增强(NP下降、CONTAG下降),斑块形状复杂化(LSI上升),异质性增加(SHDI上升)的变化趋势,三峡库区湿地系统生态功能显现衰退现象,未来需要加大力度推动湿地修复工程,提升湿地生态系统的连通性和稳定性,确保湿地资源的可持续利用。

3) 夜间照明指数、人口密度和国内生产总值是影响湿地面积变化率的前3个主要因素,特别是夜间照明指数的解释力最高(12.06%);植被指数与夜间照明指数、人口密度与国内生产总值、人口密度与夜间照明指数以及人口密度与距道路距离之间表现出非线性加强或双因子协同加强效应。

### 参考文献:

- [1] MURRAY N J, WORTHINGTON T A, BUNTING P, et al. High-resolution mapping of losses and gains of Earth's tidal wetlands [J]. *Science*, 2022, 376 (6594): 744-749.
- [2] MITSCH W J, GOSELINK J G. *Wetlands*[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2015.
- [3] BRASWELL A E, HEFFERNAN J B. Coastal wetland distributions: Delineating domains of macroscale drivers and local feedbacks [J]. *Ecosystems*, 2019, 22 (6): 1256-1270.
- [4] 宋小梅,常晓丽,丁辰.近30年根河流域湿地景观格局变化及驱动因素分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 294-303.  
SONG X M, SATO H, DING C, et al. Analysis of the changes in wetland landscape pattern and driving factors in the genhe basin over the past 30 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 294-303.
- [5] BYUN E, SATO H, COWLING S A, et al. Extensive wetland development in mid-latitude North America during the Bølling-allerød [J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14: 30-35.
- [6] MAO D H, YANG H, WANG Z M, et al. Reverse the hidden loss of China's wetlands [J]. *Science*, 2022, 376 (6597): e1061.
- [7] AN X X, JIN W P, ZHANG H Q, et al. Analysis of long-term wetland variations in China using land use/land cover dataset derived from Landsat images [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 145: e109689.
- [8] Mao D, Wang M, Wang Y, et al. The trajectory of wetland change in China between 1980 and 2020: hidden losses and restoration effects [J]. *Science Bulletin*, 2025, 70(4): 587-596.

- [9] 周婷, 马姣娇, 徐颂军. 2003—2013年中国湿地变化的空间格局与关联性[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2496-2504. ZHOU T, MA J J, XU S J. Spatial patterns and spatial autocorrelations of wetland changes in China during 2003—2013[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2496-2504.
- [10] 杨利, 谢炳庚, 秦建新, 等. 三峡建坝前后洞庭湖区湿地景观格局变化[J]. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2068-2080. YANG L, XIE B G, QIN J X, et al. Changes in Dongting Lake wetland landscape pattern related to pre- and post-construction of the Three Gorges Dam[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(12): 2068-2080.
- [11] 张艳军, 龚巧灵, 官冬杰. 重庆市湿地生态系统时空变化特征[J]. 环境生态学, 2019, 1(7): 79-86. ZHANG Y J, GONG Q L, GUAN D J. Study on temporal-spatial characteristics of wetland ecosystem in Chongqing City[J]. Environmental Ecology, 2019, 1(7): 79-86.
- [12] 易阿岚, 王钧. 上海市湿地景观格局时空演变与驱动机制的量化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2622-2631. YI A L, WANG J. Quantitative study on spatio-temporal evolution and mechanisms of wetland landscape patterns in Shanghai [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2622-2631.
- [13] 王雯, 王静, 祁元, 等. 基于空间回归分析的滨海湿地演变驱动机制研究: 以江苏省滨海三市为例[J]. 中国土地科学, 2017, 31(10): 32-41. WANG W, WANG J, QI Y, et al. Driving mechanism of coastal wetlands evolution based on spatial regression analysis: Taking Jiangsu coastal region as an example[J]. China Land Science, 2017, 31(10): 32-41.
- [14] 胡盼盼, 李锋, 胡聃, 等. 珠三角城市群湿地景观格局变化及其驱动因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 418-427. HU P P, LI F, HU D, et al. Change of wetland landscape patterns and its driving factors in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 418-427.
- [15] 梁芳源, 李鹏, 程维金, 等. 武汉城市湿地景观格局及生态系统服务功能演变轨迹与驱动机制[J]. 环境工程, 2023, 41(1): 105-111. LIANG F Y, LI P, CHENG W J, et al. Driving mechanism of wetland landscape pattern and ecosystem services in Wuhan[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(1): 105-111.
- [16] 智烈慧, 马田田, 高原, 等. 围垦开发下滨海湿地格局演变的自然-人为复合驱动过程[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9626-9635. ZHI L H, MA T T, GAO Y, et al. Human-natural coupling driving processes for spatiotemporal dynamics of coastal wetlands under reclamation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9626-9635.
- [17] 吴及. 三峡工程对库区土地利用变化的影响研究: 基于1990—2010年库区遥感影像[J]. 海河水利, 2020(1): 30-36. WU J. Research of the impact of Three Gorges Project on land use change in reservoir area: Based on 1990-2010 remote sensing image of reservoir area [J]. Haihe Water Resources, 2020(1): 30-36.
- [18] 毛海涛, 王正成, 林荣, 等. 三峡水库蓄水后上下游河段水沙特性变化及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 161-169. MAO H T, WANG Z C, LIN R, et al. Analysis of water-sediment characteristics and influence factors of upper and lower river reaches before and after impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 161-169.
- [19] WANG Z, WANG Y Q, DING X K, et al. Evaluation of net anthropogenic nitrogen inputs in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Ecological Indicators, 2022, 139: e108922.
- [20] YAN Z Y, WANG Y Q, WANG Z, et al. Spatiotemporal analysis of landscape ecological risk and driving factors: A case study in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Remote Sensing, 2023, 15(19): e4884.
- [21] Convention on wetlands. Convention on wetlands of international importance especially as waterfowl habitat [S]. Ramsar, Iran: 1971.
- [22] 中华人民共和国自然资源部. 《第三次全国国土调查技术规程》TD/T 1055—2019第三次全国国土调查技术规程[S]. 北京: 地质出版社, 2019. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Technical specifications for the third national land survey (TD/T 1055—2019) [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 《湿地分类》GB/T 24708—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Wetland classification (GB/T 24708—2009) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [24] 刘小欢, 张文, 郑和松, 等. 1980—2020年长江中游阳新县湖群湿地景观格局演变及影响因素[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(3): 239-247. LIU X H, ZHANG W, ZHENG H S, et al. Driving force analysis of wetland landscape pattern changes of the lakes in Yangxin in the middle reaches of Yangtze River from

- 1980 to 2020[J].Journal of Northwest Forestry University,2024,39(3):239-247.
- [25] 谢贤健,苟千陶,吴汉.重庆市土地利用变化特征及生态敏感性评价[J].水土保持学报,2024,38(6):178-194.  
XIE X J, GOU Q T, WU H, Characteristics of land use change and evaluation of ecological sensitivity in Chongqing[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):178-194.
- [26] LEFEVER D W.Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse [J].American Journal of Sociology,1926,32(1):88-94.
- [27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.  
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1) : 116-134.
- [28] 董斯齐,袁军,吴春生,等.1980年以来太湖流域湿地变化及其影响因素分析[J].湿地科学,2023,21(2):176-185.  
DONG S Q, YUAN J, WU C S, et al. Changes of wetlands in Taihu Lake basin since 1980 and their influencing factors[J].Wetland Science, 2023, 21(2) : 176-185.
- [29] CHEN L W, WU Y F, XU Y J, et al. Alteration of flood pulses by damming the Nenjiang River, China - Implication for the need to identify a hydrograph-based inundation threshold for protecting floodplain wetlands [J].Ecological Indicators, 2021, 124:e107406.
- [30] ZHANG Y Z, CHEN R S, WANG Y. Tendency of land reclamation in coastal areas of Shanghai from 1998 to 2015[J].Land Use Policy, 2020,91:e104370.
- [31] 重庆市人民政府.《重庆市环境保护和生态建设“十三五”规划》[Z].重庆:重庆市人民政府,2016.  
Chongqing Municipal People's Government. Chongqing environmental protection and ecological conservation "13th Five-Year Plan" [Z]. Chongqing: Chongqing Municipal People's Government, 2016.
- [32] 贾艳艳,唐晓岚,唐芳林,等.1995—2015年长江中下游流域景观格局时空演变[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(3):185-194.  
JIA Y Y, TANG X L, TANG F L, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin from 1995 to 2015[J].Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(3):185-194.
- [33] ABUODHA P A O, WOODROFFE C D. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: A case study from southeast Australia[J].Journal of Coastal Conservation, 2010, 14(3):189-205.
- [34] 文婧,徐颂军,邱彭华,等.城镇化背景下海口湿地近30年变化分析[J].华南师范大学学报(自然科学版), 2023,55(3):74-86.  
WEN Q, XU S J, QIU P H, et al. Analysis on the change of Haikou wetland in the context of urbanization in the last 30 years [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition) , 2023, 55 (3) : 74-86.
- [35] 方学儒,盛永财,罗益寿,等.武威市夜间灯光数据与植被覆盖变化的空间自相关分析[J].中南农业科技,2024(11):48-54.  
FANG X R, SHENG Y C, LUO Y S, et al. Spatial autocorrelation analysis of night lighting data and vegetation cover change in Wuwei city[J].South-Central Agricultural Science and Technology, 2024(11):48-54.
- [36] 万慧琳,王赛鸽,陈彬,等.三江平原湿地生态风险评价及空间阈值分析[J].生态学报,2022,42(16):6595-6606.  
WAN H L, WANG S G, CHEN B, et al. Ecological risk assessment and spatial threshold analysis of wetlands in the Sanjiang Plain [J].Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (16):6595-6606.
- [37] 杨凯祥,刘强,李秀红,等.三峡库区土壤侵蚀和植被覆盖变化分析[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2021,57(5):631-638.  
YANG K X, LIU Q, LI X H, et al. Analysis of soil erosion and fractional vegetation cover change in the Three Gorges Reservoir Area[J].Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(5):631-638.
- [38] 于泉洲,董杰,刘恩峰,等.基于MODIS的南四湖植被覆盖变化的时空特征研究[J].林业资源管理, 2017(1): 144-152.  
YU Q Z, DONG J, LIU E F, et al. Analysis on vegetation spatio-temporal variation of nansi lake based on MODIS[J]. Forest Resources Management, 2017(1):144-152.