

江汉平原四湖流域生境质量时空演化及预测

夏盈^{1, 2} 张莹莹³ 厉恩华¹ 蔡晓斌¹ 杨超¹ 杨娇^{1, 21}

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 环境与灾害监测评估湖北省重

点实验室, 湖北 武汉 430077; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 郑州师范学院 地理与旅游学院, 河南 郑州 450044)

【摘要】: 评价生境质量对区域生物多样性保护和生态环境的可持续发展具有重要意义, 通过 InVEST 模型和空间自相关分析、热点分析方法探索 2000~2020 年间江汉平原四湖流域生境质量的时空变化, 综合 CA-Markov 和 InVEST 模型模拟不同情景模式下的 2030 年四湖流域生境质量情况。研究发现: (1) 四湖流域生境质量空间分布呈现西北、东南高, 中部低的特点, 生境质量呈持续下降趋势, 生境质量平均值由 2000 年的 0.4977 下降至 2020 年的 0.4842, 生境退化强度增强, 近 20 年间的生境退化指数最大值由 0.1555 上升至 0.1593, 空间上扩散趋势明显; (2) 生境质量与生境退化具有显著的空间集聚性, 皆具有明显的冷热点; (3) 相较于自然变化情景下的生境质量和退化程度结果, 生态保护情景的退化强度较弱, 生境质量得以改善, 表明在实施生态保护措施的影响下有利于区域的生物多样性保护和提高生态系统服务功能。

【关键词】: InVEST 模型 生境质量 空间自相关 热点分析 CA-Markov 模型

【中图分类号】: X821 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)07-1616-11

生境指的是生物生活繁衍的场所, 由生物与非生物环境构成^[1]。生境的破碎、退化与丧失会直接导致生物多样性的减少。作为生物多样性及生态环境的重要指标, 生境质量是指环境为生物提供的适宜的持续生存的能力, 范围从低到中到高, 分别具有生存、繁殖到持续生存的 3 个等级的资源^[2], 对生态安全及可持续发展具有重要意义。土地利用/覆被变化 (LUCC) 是地球环境变化的主要原因与重要组成部分之一, 二者彼此相互作用, 紧密相关, 能够影响区域生态环境质量, 将会引起生态系统功能与结构的改变, 使得生态系统服务产生相应变化^[3, 4, 5, 6, 7]。因此, 深入研究区域生境质量的时空演变及预测, 分析生境质量与景观格局的对应关系, 对区域构建安全土地资源结构、生物多样性保护以及区域的可持续发展具有重要意义。

对于生境质量的评价方法, 生态系统服务评估与权衡模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradesoff, InVEST) 以运行参数相对较少、评估结果定量化和空间可视化等优势而被国内外广泛应用于生境质量研究中^[8]。刘汉仪等^[9]利用 InVEST 模型和“3S”技术定量估算和分析土地利用变化下的粤港澳大湾区生境质量时空演变特征。Moreira 等^[10]以葡萄牙皮科岛为研究区, 利用 InVEST 模型评估生境质量和退化程度, 在岛屿系统景观水平上分析土地利用和管理对特定植被生境的影响。现有研究多侧重于历史时期生境质量与土地利用变化的关系, 缺乏对生境质量的模拟和空间集聚模式的研究。土地利用预测模

作者简介: 夏盈 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态学。E-mail: Xiayyying@163.com; 厉恩华 E-mail: lieh@whigg.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671512)

型与 InVEST 模型相结合将为预测区域生境质量的变化提供新的研究思路。土地利用模拟及预测的主要方法有元胞自动机模型^[11]、马尔科夫链模型^[12]、CLUE-S 模型^[13]和人工神经网络模型^[14]等。CA-Markov 模型结合了 CA 模型模拟复杂系统的空间变化能力和 Markov 的长期预测优势，因此被广泛应用于多地类土地利用模拟及预测中^[15]。

长江中游地区面临着较大的生态和环境威胁，任意地采砂、围湖造田和江湖阻隔、滥捕及大规模养殖、基础设施建设等一系列人类活动，导致生物多样性景观破碎、湿地退化。四湖流域作为长江中游流域重要组成部分，具有涵养水源等重要的生态意义。本文以江汉平原四湖流域为研究区，基于 InVEST 模型和 CA-Markov 模型，综合运用热点分析、空间自相关分析探究在土地利用覆盖类型变化下的生境质量的响应，旨在探究四湖流域生境质量时空格局变化，以期为该区域生物多样性、生态环境保护与空间格局优化、可持续发展乃至长江保护工作提供理论支撑和科学依据。

1 研究区概况

四湖流域(111° 57' E~114° 5' E, 29° 26' N~31° 2' N)属于长江一级支流内荆河水系，地处江汉平原腹地(图 1)，因区内长湖、三湖、白露湖及洪湖四大湖而得名，现今只余长湖和洪湖两个湖泊。四湖流域属亚热带季风气候区，年平均气温及降水量分别在 15.7℃~16.6℃和 1100~1300mm 之间。流域内高程总体上小于 100m，绝大部分低于 40m，河网密布、湖泊众多，由一系列河间洼地组成，是江汉平原地势最低洼的地区^[16]，四湖流域总面积达 1.15×10⁴km²，主要分布在荆州、潜江、荆门 3 个地级市。该流域作为典型的农业流域，是湖北省重要的农业生产基地，也是长江沿江经济带的重要组成部分，但同时旱涝灾害也是制约区域农业生产的主要因素^[17]，使其成为典型的生态脆弱区。随着经济的快速发展、人为干扰强度增加，城镇化效应、农业集约化生产经营以及工业化的迅速发展使得流域内生物资源衰退、生态环境劣变，对生态系统产生巨大压力。

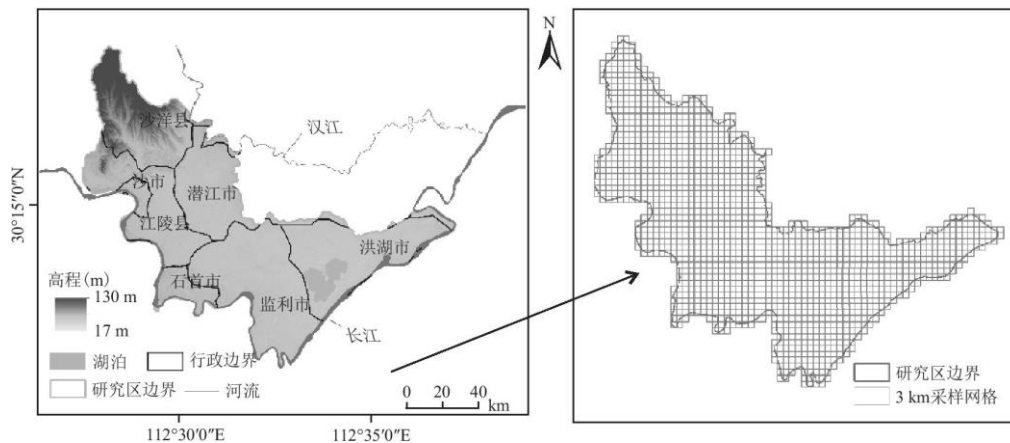


图 1 研究区地理区位及空间采样网格

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究选取 2000、2010、2020 年共 3 期 6~10 月云量覆盖度低的 LandsatTM/OLI 系列遥感影像数据(行列号: 123/39、124/39、123/40)，影像数据来源于美国地质勘探局数据库(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)。DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)的 ASTERGDEM 数据，分辨率为 30m，平面精度为 30m，高程精度为 20m^[18]。坡度数据由 ArcGIS10.2 软件中 slope 工具计算而来。道路数据来源于 OSM 道路地图(<https://www.openstreetmap.org/>)，该数据集 Node 点数量达到 40 多亿^[19]，行政矢量边界由中国科学院资源环境科学与数据中心网站(<http://www.resdc.cn/>)下载获取。

结合研究区内实际情况，参考国家土地利用/土地覆盖遥感监测数据分类系统，将土地利用类型分为6个一级分类，12个二级分类，分别是水田、旱地、林地、草地、河流、湖泊、水库坑塘、滩地、城镇居民用地、农村居民点、其他建设用地、草本沼泽。采用人机互译方式，利用 eCognition9.0 软件采用面向对象随机森林分类算法分类，通过实地考察样点、GoogleEarth 高清影像对面向对象分类结果进行目视校正，获得研究区内 2000、2010、2020 年的土地利用分类结果。经检验，二级土地利用分类的总体精度达到 0.85 以上，满足研究要求。

2.2 生境质量评估

本研究评估的生境质量优劣主要基于 InVEST 模型中的生境质量模块 (Habitat Quality) 计算研究区内生境质量指数，生境质量指数范围从 0 到 1，数值越高，生境质量越好，计算公式如下^[2]：

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

式中： Q_{xj} 为土地利用与景观类型 j 中栅格 x 的生境质量指数； H_j 为土地利用景观类型 j 的生境适宜度； D_{xj} 为景观类型 j 中栅格 x 的生境退化度； z 为模型默认参数； k 值为半饱和常数一般取 0.5。

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{\gamma_r} \left(\omega_r / \sum_{r=1}^R \omega_r \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (2)$$

式中： D_{xj} 为生境退化度； R 为生境的威胁因子的个数； γ_r 为威胁层在地类图层上的栅格个数； ω_r 为威胁因子 r 的权重； r_y 为栅格 y 的威胁强度； i_{rxy} 为 r_y 对生境栅格 x 的威胁水平； β_x 为栅格 x 的可达性； S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性。

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \text{ if linear} \quad (3)$$

$$i_{rxy} = \exp\left(-\left(\frac{2.99}{d_{rmax}}\right) d_{xy}\right) \text{ if exponential} \quad (4)$$

式中： d_{xy} 为栅格 x 与 y 间的线性距离； d_{rmax} 为威胁因子 r 的最大作用距离。

本研究参考相关文献[20, 21, 22, 23, 24]和专家打分系统，将城镇用地、农村居民点、其他建设用地、旱地和水田作为威胁因子，并且根据实际背景设定不同威胁因子的影响距离及权重(表 1)，以及生境类型的生境适宜度和不同生境类型对威胁因子的敏感度(表 2)。为了便于比较生境质量时空变化，将 2000~2020 期间 3 个时期研究区的生境质量指数值利用自然间断点分级法划分为 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8 和 0.8~1 共 5 个区间，并据此分为低、较低、中等、较高、高共 5 个等级。

表 1 威胁因子的影响距离及权重

威胁因子	最大影响距离(km)	权重	距离衰减函数
水田	0.5	0.5	指数

旱地	0.3	0.5	指数
城镇用地	10	1	指数
农村居民点	3	0.7	指数
其他建设用地	5	0.6	线性

表 2 各生境类型及其对威胁因子的敏感度

生境类型	生境适宜度	水田	旱地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地
水田	0.5	0	1	0.7	0.8	0.6
旱地	0.3	1	0	0.7	0.8	0.6
林地	1	0.8	0.5	0.5	0.2	0.8
草地	1	0.8	0.8	0.5	0.7	0.4
河渠	0.9	0.8	0.2	0.6	0.5	0.5
湖泊	1	0.9	0.2	0.8	0.7	0.5
水库坑塘	0.6	0.7	0.2	0.3	0.5	0.1
滩地	0.7	0.5	0.2	0.7	0.6	0.1
城镇用地	0	0	0	0	0	0.2
农村居民点	0	0	0	0	0	0.7
其他建设用地	0	0	0	0.7	0.6	0
草本沼泽	1	0.5	0.2	0.8	0.5	0.6

2.3 网格法空间采样

根据 Rangel 等^[25]的研究, 网格宜采用平均斑块面积的 2~5 倍, 利用 ArcGIS10.2 网格化采样方法对研究区进行 3km×3km 的区域划分, 形成评价单元共 1507 个, 提取对应评价单元的生境质量指数和退化指数, 并基于 3km 幅度对生境质量以及退化程度的空间集聚与分布特征变化进行空间统计分析。

2.4 空间自相关与热点分析

为探索研究区内生境质量的空间依赖联系, 本研究选取一种通用的空间自相关测量方法, 即全局莫兰指数 (Global Moran's I Index) 来研究各网格样本单元的生境质量及退化程度的空间相关关系, 其值域范围为 [-1, 1], 以数值的正负和大小来反映自相关的性质与程度。

全局莫兰指数只能监测具有相似值的要素是否发生聚类，不能判断是否具有统计学意义上的冷热点^[26]。本研究采用热点分析的 Getis-OrdGi*参数用以区分研究区内生境质量在局部空间分布上聚类状况。

本研究通过 ArcGIS10.2 环境完成空间自相关和热点分析的空间可视化。

2.5 CA-Markov 模型

CA-Markov 模型将 CA 与马尔科夫链模型结合起来，利用一个转移概率矩阵模拟土地利用随时间的变化^[27]。本研究使用 IDRISI17.0 软件运行 CA-Markov 模型，预测不同情境下的 2030 年四湖流域土地利用景观覆盖类型，具体进行以下操作：

(1) 分别将 2010 和 2020 年的土地利用格局作为 Markov 模块输入的初始年份和最终年份，分别计算转移概率矩阵和转移面积。

(2) 利用多标准评价(MCE)模块建立土地利用适宜性规则图集，得到各景观地类的空间概率分布图。依次设置两种情景：在社会经济发展的影响作用下，按照生态环境保护政策要求建立生态保护情景，即对林地、草地以及水域转出为其他景观地类的概率设置为 0，以 DEM、坡度、到铁路及道路的距离作为驱动因素，权重值分别为 0.0969、0.1820、0.2863 和 0.4348，经检验 Consistency ratio 为 0.02，符合要求。基于经济社会发展背景，未严格实施生态环境保护政策，建立自然变化情景，即不限制林地、草地及水域转出为其他景观类型的概率，并假定 2020~2030 年影响土地利用景观类型的因素没有发生大的改变，根据 2010~2020 年转移概率预测 2030 年景观覆被类型，并以 DEM、坡度、到铁路及道路的距离作为驱动因素，权重值分别为 0.0929、0.1814、0.3859 和 0.3397，经检验 Consistency ratio 为 0.01，符合要求。

(3) 用 Collectioneditor 模块将所有概率图集成在一个图集中，选择 5×5 邻接滤波器作为邻域定义，单元格大小设置为 30m×30m，得到适宜性规则图集。

(4) 以 2010 年作为预测起始时刻，设定 CA 的迭代次数为 10，模拟研究区 2020 年的土地利用空间分布。为确保模拟结果的可靠性，需要对其进行检验。采用 Kappa 系数对模拟的土地利用变化的精度进行检验，公式如下：

$$Kappa = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (5)$$

式中：P_o表示模拟正确的比例；P_c表示模型随机情况下模拟正确的比例；P_p表示理想分类情况下正确模拟的比例。

(5) 使用通过验证后的 CA-Markov 模型规则进行 2030 年土地利用预测。以 2020 年为预测起始时刻，选择适宜性图集，设置迭代次数为 10 预测得出 2030 年的景观类型覆盖图。

3 结果与分析

3.1 生境变化特征分析

3.1.1 生境质量分析

通过评估四湖流域生境质量时空变化(图 2)，结果表明：从空间尺度上看，空间分布特征明显，并与土地利用分布具有密切联系。研究区西北部丘陵、湖库区以及南部河流湿地区主要为生境质量高等级区，中部多旱地、农村居民点及城镇建设用地分

布，人类活动利用强度大，因此主要为生境质量低等级区，东部为生境质量混合等级区。

从不同时期生境质量等级变化空间统计可知，从时间尺度上看，生境质量指数的平均值在 2000、2010 和 2020 年分别为 0.4977、0.4965 和 0.4842，表明生境质量在逐渐下降；但生境质量指数的标准差由 2000 年的 0.2342 增加到 2020 年的 0.2511，表明生境质量的差异加剧。比较不同时期生境质量等级所占比例可知，近 20 年来生境质量中等等级占比最高，占比均过半，变化趋势呈现先增加后减小的特征，由 2000 年的 58.96% 逐渐上升到 61.79% 后减小到 2020 年的 53.99%，但总体来看中等生境质量占比减小。生境质量低等级所占比例逐渐增加，由 2000 年的 6.97% 增加到 2020 年的 9.83%。生境质量等级中较低等级、较高级和高等级所占比例呈现先减小后增加的趋势，变化幅度不大，其中较高级和高等级占比变化幅度均小于 1%。

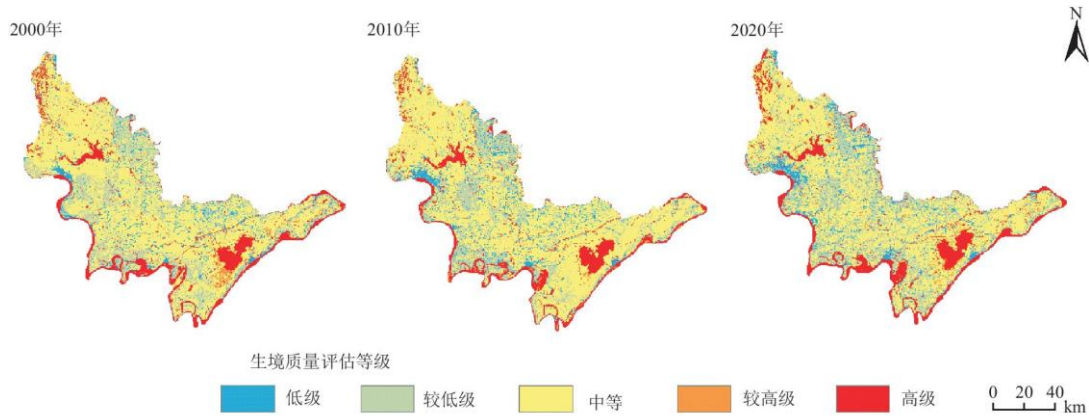


图 2 四湖流域生境质量等级空间分布

为进一步了解研究区内生境质量等级时空变化，对不同时期的生境质量等级相互转化情况进行统计，得到生境质量等级转化图(图 3)。

2000~2010 年四湖流域约 33.73% 的生境质量等级变化，其中 16.03% 的生境质量等级升高，主要由较低级向中等转变，占比为 8.76%，主要分布于东部湖区坑塘和南部靠近长江的河流湿地区域；17.7% 的生境质量等级降低，其中以中等向较低级和较低级向低级转换为主，分别占比 7.14% 和 2.36%，分布于城镇乡村集中区。

2010~2020 年四湖流域中 60.48% 的生境质量等级不变，21.17% 的栅格生境质量等级下降，等级下降变换的主要趋势与前一个时期相一致；18.35% 的栅格生境质量等级上升，以中等向高级、低级向中等转化为主，分布于西北部丘陵区、南部长江沿岸及大型天然湖泊附近，主要得益于近年来流域内植树造林、长江大保护、自然保护区的建立以及退垸还湿工程的政策影响。

2000~2020 年四湖流域 39.5% 的生境质量等级区域存在转变，其中 22.17% 的生境质量等级降低，以中等向较低级、较低级向低级转变为主，17.34% 的生境质量等级区域提高，主要表现为较低级向中等级转化。

总体而言，三段时期四湖流域生境质量等级转移中，生境质量呈退化趋势，生境质量等级下降的比例均高于生境质量升高的比例，等级降低的主要趋势为中等向较低级转换，由于城镇化及工业化的发展，等级降级的分布特征呈现以城市、乡镇为核心的辐射型扩散。

3.1.2 生境退化分析

通过计算四湖流域生境退化指数,得到四湖流域生境退化指数空间分布图(图4)。由图4可知,生境退化度较高值分布区主要集中在中部地区,具体为潜江市北部和江陵县、石首市北部以及监利县的东北部和南部区域。生境退化指数较低值分布区主要分布在西北丘陵山区和湖库区、东南部天然湖泊自然保护区。

生境退化的相关参数统计结果(表3)显示,四湖流域生境质量退化指数的最大值和平均值呈逐渐上升的趋势,分别由2000年的0.1555和0.0346增加到2020年的0.1593和0.0366,表明生境退化的强度增加,研究区内生境退化趋势愈加明显。生境退化的标准差总体上呈减小的趋势表明空间上栅格单元间生境退化差异在缩小,生境退化呈蔓延趋势。

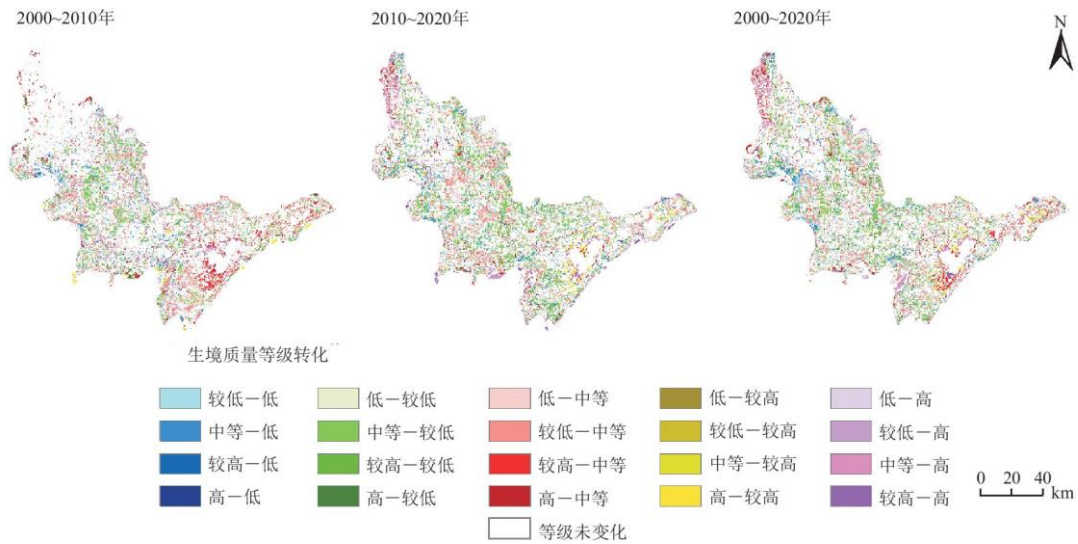


图3 2000~2020年四湖流域生境质量等级转移格局

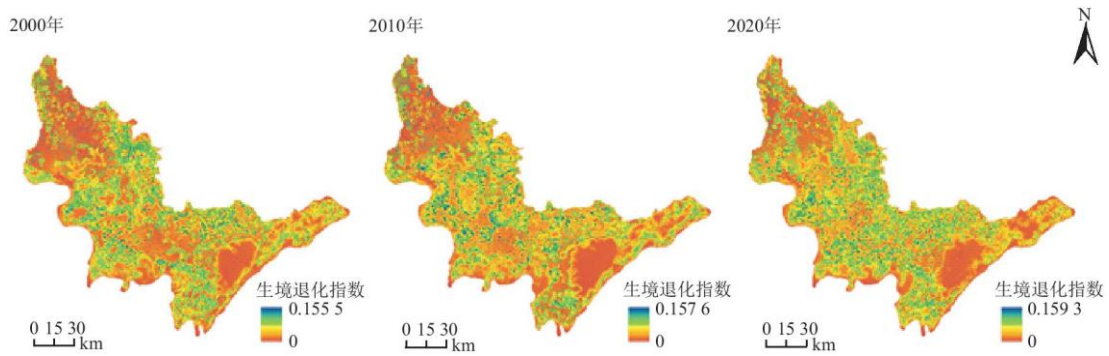


图4 四湖流域生境退化指数空间分布

表3 生境退化程度统计

年份	生境退化程度统计参数			
	最小值	最大值	平均值	标准差
2000	0	0.1555	0.0346	0.0305

2010	0	0.1576	0.0351	0.0282
2020	0	0.1593	0.0366	0.0296

3.2 生境变化空间分布特征分析

3.2.1 生境质量和生境退化空间自相关分析

为进一步反映研究区生境变化的空间相关性和空间差异性，本研究对网格化生境质量和退化程度空间分布进行全局空间自相关分析。根据全局自相关分析结果(表 4)显示：2000、2010、2020 年四湖流域生境质量全局 Moran' sI 分别为 0.2217、0.2380、0.2841, 全局 Moran' sI 逐步上升, Z 值远大于阈值 1.96, P 值均为 0, 表明研究区生境质量在空间上呈正相关性, 表现出显著的空间集聚分布特征, 生境质量的空间集聚有进一步集中的趋势。2000~2020 年, 生境退化程度全局 Moran' sI 均大于 0, P 值均为 0, 呈现空间集聚特征, 但 Moran' sI 的变化趋势呈现为先下降后上升的趋势, 表明在 2000~2010 年期间生境退化集聚有分散的趋势, 而近十年来, 随着城镇化和经济社会的发展, 生境退化的空间集聚有进一步集中的趋势, 从 2000 年到 2020 年生境退化程度的空间集聚特征总体上集聚的强度增大。

表 4 空间数据探索统计

年份	生境质量空间自相关			生境退化程度空间自相关		
	Moran' sI	Z-score	P-value	Moran' sI	Z-score	P-value
2000	0.2217	11.9067	0.0000	0.2138	11.3553	0.0000
2010	0.2380	12.7798	0.0000	0.1724	9.2679	0.0000
2020	0.2841	15.2440	0.0000	0.2436	13.0779	0.0000

3.2.2 生境质量和生境退化热点分析

根据热点分析结果(图 5)显示, 生境质量和生境退化程度均存在较明显的冷热点, 四湖流域生境质量指数空间集聚情况表现为“四周热、中部冷”的特点。近 20 年来, 四湖流域生境质量热点区域(99%置信水平)主要分布在长湖、洪湖等湖泊和自然保护区以及长江和汉江沿岸湿地滩涂区, 周边地区则成为次级热点区(95%或 90%置信水平), 西北部区域为低山丘陵, 土地利用覆盖类型为多为林地、草地, 森林覆盖率高, 人口较少, 为次级热点区。生境质量冷点区域(99%置信水平)主要分布在四湖流域中部和中北部等人类活动干扰大的区域, 生境质量冷点区域与次级冷点区域(95%或 90%置信水平)的分布有向南和西北方向扩散的趋势。从 2010~2020 年期间, 流域内城市规划中大力发展中等城市, 推进县级市扩容提质, 推动城乡一体化, 其中位于四湖流域的上游区沙洋县与潜江市着眼于引江济汉工程带来的机遇, 加强航道、港口建设和城区基础设施建设, 随着工业化和城镇化的效应, 生境质量冷点区域有向西北方向扩散的趋势。

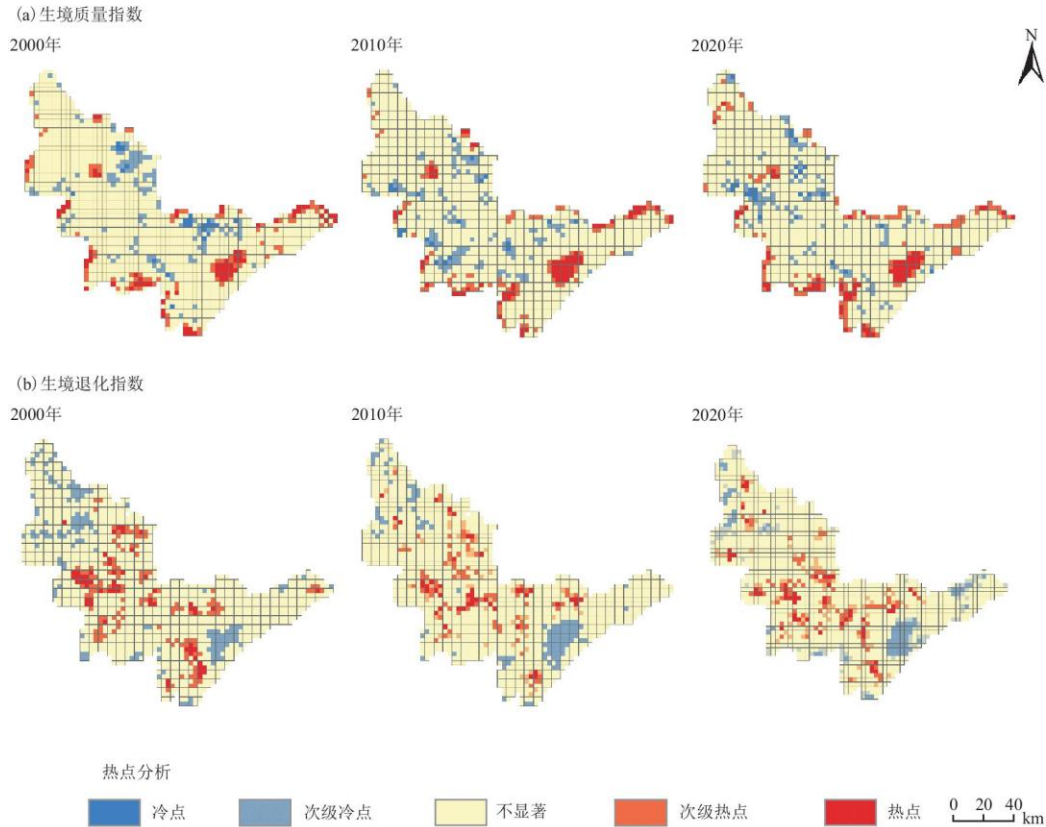


图5 2000~2020年生境质量和生境退化程度冷热点分布图

生境退化程度空间集聚性呈现“东西冷、中部热”的特点。2000~2020年四湖流域生境退化只存在次级冷点区域，且分布面积比例逐渐增大，集中分布于西北丘陵林地、湖库区和东南部洪湖湿地自然保护区；主要原因在于随着国家及省级自然保护区的相继建立，保护区内实施严格的生态保护措施，人为干扰活动少，景观破碎相对减弱，生境得以改善。表明生境质量退化的低值集聚趋势明显，在局部空间范围内生境质量的改善。研究区生境退化热点与次级热点区域分布在中部平原等土地利用强度高的区域，较为集中。

3.3 生境质量预测与模拟

据检验，两种情景模式下的 kappa 系数的值均大于 0.83，满足 CA-Markov 模型运行精度。

利用 InVEST 模型分别预测模拟自然变化情景和生态保护情景下 2030 年四湖流域的生境质量，得到不同情景的生境质量等级分布图(图 6)和生境退化指数分布图(图 7)。两种不同情景下，四湖流域 2020~2030 年生境质量的变化趋势与 2010~2020 年相一致，整体生境质量小幅下降。生境质量等级的分布特征也与前 20 年间的总体分布相似，呈现“中部低、西北和东南高”的特点。

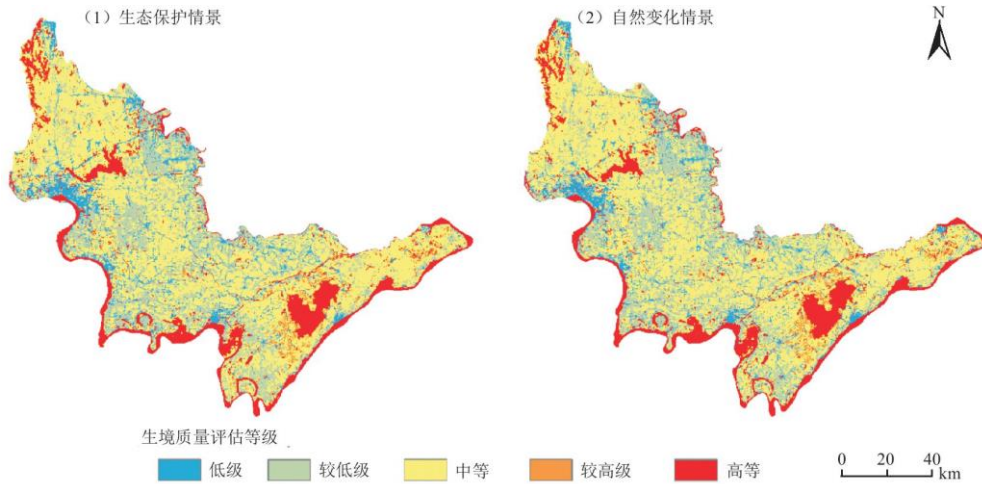


图 6 不同情景下 2030 年四湖流域生境质量等级分布图

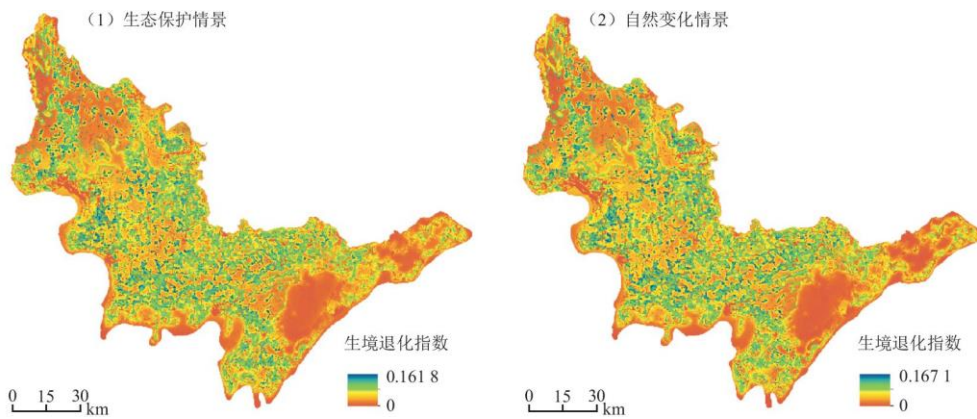


图 7 不同情景下 2030 年四湖流域生境退化指数分布图

根据生境质量等级相关参数统计,自然变化情景下,四湖流域生境质量指数的平均值为 0.4741;生态保护情境下,四湖流域生境质量指数的平均值为 0.4750,表明:相比于在社会经济影响的自然变化情景下的生境质量,在社会经济作用下实施生态保护措施条件下生境质量得到相应改善,其中较高及以上的生境质量等级所占的比值较大,高出 0.16%,较低与低等级的生境质量区域占比较小,局部区域生态系统服务功能得到恢复。由于生态保护情景设置的条件也考虑了到道路和铁路等社会经济因素的驱动影响,四湖流域以耕地、湖泊、坑塘等景观类型占主导,而 InVEST 模型对于水生生境的模拟效果较差^[20]以及只考虑各威胁因子对生境的累计胁迫等局限性^[24],导致两种情景下的结果相差不大,但总体而言,生态保护情景对于局域与总体生境质量的改善具有积极效应。生态保护情景下生境质量指数的平均值相较于 2020 年生境质量指数平均值的减幅小于自然变化情景,一方面是由于一部分生境质量等级向较高与高等级转换,另一方面由于对林地、草地、湖库等地类转换成较差的生境类型的控制,可见实施生态保护措施有利于维护区域的生物多样性,提高生态系统服务功能。

根据生境退化指数的空间分布图(图 7),统计相关参数可知,自然变化情景下的生境退化指数最大值为 0.1671,略高于生态保护情景下的生境退化指数最大值,表明在未实施生态保护措施的情况下生境退化强度更高,对研究区生境威胁更大。自然变化情景下社会经济的发展,城镇化进程加速,建设用地的增加导致生境破碎化、连通性差,表明实施生态保护措施能缓解流域内总体生境退化趋势。

4 结论

基于 InVEST 模型和 CA-Markov 模型分析并模拟了四湖流域生境质量和生境退化的时空变化,运用空间自相关和热点分析法探究了生境变化的空间关联,结论如下:

(1)四湖流域生境质量表现为西北、东南高,中部低的特点。近 20 年间流域内中等生境质量面积所占比例均过半,生境质量呈持续下降趋势,其中生境质量等级下降的主要转移趋势为中等级向较低级和低级转换。2000~2020 年间生境退化蔓延趋势明显,生境退化强度增加。

(2)研究区生境质量与生境退化具有显著的空间集聚性,生境质量的空间集聚性进一步集中,生境退化的空间集聚则呈分散后集中的变化特征。根据局域空间自相关和热点分析,生境质量和生境退化具有明显的冷热点,生境质量的热点区域集中于西北丘陵林地和湖库区、东南湖泊自然保护区,生境质量的冷点区域集中于中部平原耕地和城镇乡村集中区,并有向西北扩散的趋势;生境退化的冷热点分布特征与生境质量冷热点分布相反。

(3)生态保护情景和自然变化情景下生境质量等级的组成和生境退化程度具有差异,相比于自然变化情景结果,生态保护情景的高等级生境质量占比较高,生境退化强度较弱,生境质量得到改善,有利于区域生物多样性以及生态系统服务功能的恢复。

参考文献:

- [1]欧阳志云,刘建国,肖寒,等.卧龙自然保护区大熊猫生境评价[J].生态学报,2001,21(11):1969-1874.
- [2]SHARP R,TALLIS H T,RICKETTS T,et al.InVEST 3.2.0 User's Guide The Natural Capital Project,Stanford University,University of Minnesota,The Natural Conservancy,and World Wildlife Fund.2014.
- [3]李志,刘文兆,杨勤科,等.黄土高原沟壑区小流域土地利用变化及其生态效应分析 [J].应用生态学报,2007,18(6):1299-1304.
- [4]莫宏伟,任志远,李振国.陕北榆林市土地生态价值及生态风险动态分析[J].水土保持通报,2009,29(6):189-192,197.
- [5]WILCOVE D S,ROTHSTEIN D,DUBOW J,et al.Quantifying threats to imperiled species in the United States [J].BioScience,1998,48(8):607-615.
- [6]VITOUSEK P M,MOONEY H A,LUBCHENCO J,et al.Human domination of earth's ecosystems [J].Science,1997,277(5325):494-499.
- [7]NÜSSER,M.Change and persistence:Contemporary landscape transformation in the Nanga Parbat Region,Northern Pakistan [J].International Mountain Society,2000,20(4):348-355.
- [8]韩艳莉,陈克龙,于德永.土地利用变化对青海湖流域生境质量的影响 [J].生态环境学报,2019,28(10):2035-2044.
- [9]刘汉仪,林媚珍,周汝波,等.基于 InVEST 模型的粤港澳大湾区生境质量时空演变分析 [J].生态科学,2021,40(3):82-91.

-
- [10] MOREIRA M, FONSECA C, VERGÍLIO M, et al. Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian island based on the InVEST model: A case study of Pico Island (Azores, Portugal) [J]. *Land Use Policy*, 2018, 78: 637-649.
- [11] 杨俊, 李雪铭, 解鹏, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例[J]. *地理学报*, 2015, 70(3): 461-475.
- [12] 何成刚. 马尔科夫模型预测方法的研究及其应用 [D]. 安徽大学, 2011.
- [13] 张永民, 赵士洞. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(3): 310-318.
- [14] 刘斌寅, 卢宏亮. 基于 ANN_CA 模型的安徽省淮北市土地利用变化模拟 [J]. *黑龙江工程学院学报*, 2019, 33(3): 35-39, 45.
- [15] 许小娟, 刘会玉, 林振山, 等. 基于 CA-MARKOV 模型的江苏沿海土地利用变化情景分析 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 213-218, 225.
- [16] 吴启侠, 朱建强, 耿显波. 江汉平原四湖流域降水特征分析 [J]. *中国农业气象*, 2008, 29(2): 146-150.
- [17] 王学雷, 王慧亮, 王巧铭. 江汉平原四湖流域土地利用变化及其水文响应探讨 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 48(1): 101-115.
- [18] SUWANDANA E, KAWAMURA K, SAKUNO Y, et al. Thematic information content assessment of the ASTER GDEM: A case study of watershed delineation in West Java, Indonesia [J]. *Remote Sensing Letters*, 2011, 3(5): 423-432.
- [19] 王艳东, 殷寒露, 吴胜, 等. OpenStreetMap 路网数据的几何精度评价 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(2): 1-3, 7.
- [20] 张大智, 孙小银, 袁兴中, 等. 南四湖流域 1980-2015 年土地利用变化及其对流域生境质量的影响 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 349-357.
- [21] 张文静, 孙小银, 单瑞峰. 基于 InVEST 模型研究山东半岛沿海地区土地利用变化及其对生境质量的影响 [J]. *环境生态学*, 2019, 1(5): 15-23.
- [22] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析 [J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 2895-2906.
- [23] 陈一萌, 于竹筱, 许尔琪. 1965 年以来 6 个时期广东潼湖湿地的景观格局和生境质量 [J]. *湿地科学*, 2018, 16(4): 486-492.
- [24] 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.
- [25] RANGEL-BUITRAGO N, NEAL W J, JONGE V. Risk assessment as tool for coastal erosion management [J]. *Ocean*

Coastal Management, 2020, DOI:10.1016/j.ocecoaman.2020.105099.

[26] 姚可桢, 岳书平. 网络大数据下的中国现代食甜习惯空间分布特征及其影响因素研究 [J]. 地球信息科学, 2020, 22(6): 1202-1215.

[27] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1018-1029.