

# 2016—2024 年湖北省生态质量时空变化特征及影响因素分析

张媛<sup>1</sup>,熊晶<sup>1</sup>,於少平<sup>2</sup>,杨晨<sup>3</sup>,刘真贞<sup>1\*</sup>,许可<sup>1</sup>,刘海<sup>3</sup>

(1. 湖北省生态环境监测中心站,武汉 430060; 2. 宁波珈图科技有限公司,浙江宁波 315502;

3. 湖北大学资源环境学院,武汉 430062)

**摘要:**本研究依据生态环境部《区域生态质量评价办法(试行)》所构建的指标体系,对湖北省 2016—2024 年生态质量进行动态评价,通过实证研究分析了该方法在湖北省域范围内的适宜性.结合地理探测器与变差分解等方法,解析了近 8 年来湖北省生态质量演变的关键驱动因素.结果表明:1) 湖北省生态质量总体优良(一类),91.97% 的国土面积优于或等于二类,空间上呈现四大生态屏障区优、江汉平原良、主城区较差的格局,验证了该评价办法在省域层面的良好适用性.2) 生态质量指数(EQI)空间分异主要受生态格局指标与生态功能指标主导,陆域开发干扰指数、生态用地面积比指数与生境质量指数是影响 EQI 空间分异的主要三级指标.3) 湖北省内 EQI 时序上总体呈波动上升趋势,主要受生态功能指标与生物多样性指标改善影响,其中植被覆盖指数与水土保持指数是影响 EQI 年际间变化的关键三级指标.4) EQI 的负向变化主要归因于生态胁迫和生态格局部分指标的恶化,而其正向变化则主要归功于生态宜居和生物多样性系列指标的改善.降水等气候因素主导的生态功能指标变化则是导致部分县域植被覆盖指数与水土保持指数年际波动的主要原因.

**关键词:**湖北省;生态质量指数;时空变化;影响因素

中图分类号:X826

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



良好的生态环境是支撑人类社会生存与发展的基础.受全球气候变化强度攀升、人为快速扩张等多重驱动因素交织叠加影响,环境污染加剧、生物多样性衰退及极端气象灾害高发等问题已成为全球生态环境面临的严峻挑战<sup>[1-4]</sup>.在此背景下,我国高度重视生态环境保护,从党的十八大将生态文明建设纳入“五位一体”总体布局,到党的二十大明确提出要提升生态系统多样性、稳定性和持续性,逐步形成了系统性的生态保护战略导向<sup>[5-6]</sup>.科学评估生态质量,并制定针对性的保护措施则是推动该战略落实的关键.因此,客观评价生态质量及其变化趋势、精准识别影响其变化的关键因素,既是响应全球生态治理需求、落实国家生态保护战略的重要举措,也是科学开展生态保护监管与治理工作的必要基础,具有重要的现实意义.

为统一生态质量评价的标准并推动其业务化应用,原国家环境保护总局于 2006 年发布《生态环

境状况评价技术规范(试行)》(HJ/T 192—2006)<sup>[7]</sup>,并于 2015 年进行修订后发布正式版本(HJ 192—2015)<sup>[8]</sup>.该规范采用生态环境状况指数(ecological index, EI)作为评价结果,已在国家及区域层面得到广泛应用<sup>[4-6, 9-12]</sup>.然而, EI 值主要依赖土地利用类型与水资源量、污染物排放量等部门统计数据,对生态系统功能与生物多样性的表征尚显不足.为推进生态保护与修复,强化生态建设与生物多样性保护,生态环境部于 2021 年印发《区域生态质量评价办法(试行)》<sup>[13]</sup>(以下简称《评价办法》).《评价办法》首次将生物多样性纳入综合评价体系,并从生态系统格局、服务功能、生物多样性和胁迫状况四个维度构建评价框架<sup>[14]</sup>,并将其量化为生态质量指数(ecological quality index, EQI)来评价区域整体的生态质量.该方法融合遥感与地面生物监测数据,更全面地反映了区域生态质量状况.马广文等<sup>[15]</sup>基于 EQI 评估了全国 2020—2023 年

收稿日期:2025-11-10.

基金项目:国防科工局高分辨率对地观测系统重大专项政府综合治理应用与规模化产业化示范项目(81-Y50G20-9001-22/23);国家自然科学基金重点项目(42271318);国家自然科学基金项目(42571370).

\* 通信联系人. E-mail: yuan\_zy1988@163.com.

生态质量变化;代雨婷等<sup>[6]</sup>分析了湖北省2016—2020年的生态质量演变;钱贞兵等<sup>[16]</sup>评价了安徽省大别山区2021年与2023年的生态质量差异;许伟伟等<sup>[17]</sup>探讨了江苏省2022年EQI及其影响因素;朱希希等<sup>[18]</sup>则聚焦泰州市城市“生态功能”指标,探索EQI提升路径。尽管上述研究在生态质量现状评估、时空变化及影响因素分析方面取得了积极进展,但多数仍侧重于现状描述或空间格局分析,对生态质量时空变化的驱动机制尚缺乏系统性、多尺度、多维度的综合解析。

湖北省地处华中腹地、长江中游,既是三峡大坝所在地和南水北调中线工程核心水源区的一部分,也是长江干流流经里程最长的省份,在维系国家生态安全中具有不可替代的战略地位。近年来,湖北省以“生态强省”建设为目标,持续推进污染防治攻坚战,生态环境质量显著改善,但全省EQI评价结果仍存在阶段性波动,其内在变化规律与驱动因素尚未明确。基于此,本研究以湖北省为研究区,依据EQI评价办法,重点分析2016年以来湖北省生态质量的时空变化特征及关键影响因素,旨在为湖北省生态保护监管决策、生态文明可持续发展提供科学支撑,为提升区域生态系统的多样性、稳定性和持续性提供理论与实践参考。

## 1 研究区域与数据处理分析方法

### 1.1 研究区域

湖北省位于中国中部(108°21′~116°7′E, 29°1′~33°6′N),地处长江中游,兼具衔接东西、贯通南北的区位特点,交通条件优越。全省地势整体呈现西、北、东三面环山,中、南部为平原的基本格局,在地形梯度与水文网络的共同作用下,形成了“五分林地、三分耕地、一分城乡建设用地与一分水域”的土地利用结构<sup>[19]</sup>。省内地貌类型多样,涵盖平原、丘陵与山地,长江、汉江、清江构成其主要的水系脉络。秦巴山、武陵山、大别山与幕阜山等重要山脉共同构筑区域生态安全屏障,常被简称为湖北省的“四大生态屏障”,其对省内的水源涵养、生物多样性维护具有关键作用,其中多个县区被列为国家和湖北省重要生态功能区。2020年全省森林覆盖率达42%,显著高于全国均值,神农架林区等代表性区域保存有完好的北半球中纬度森林生态系统,生态功能突出<sup>[20]</sup>。行政区划上,湖北省下辖13个地级单位及103个县级单位<sup>[21]</sup>,其中仙桃市、潜江市、天门市与神农架林区属省直管行政单

元<sup>[4]</sup>,研究中也同步作为市级参与分析。

### 1.2 评价体系

根据EQI评价办法,整个评价指标体系包含4项一级指标(生态格局、生态功能、生物多样性和生态胁迫),并细分为11项二级指标和18项三级指标。湖北省属于内陆省域,不涉及海岸自然岸线保有指数和海域开发强度指数等两项三级指标;没有防风固沙类型的县域,不涉及防风固沙指数;受数据来源限制,原生功能群种占比指数和自然灾害受灾指数不参与评价。因此,本研究中湖北省生态质量评价共包括4个一级指标、9个二级指标和13个三级指标(详见表1)。

生态功能一级指标针对特定县域不同的生态功能定位建立了差异化的二级指标体系。具体将湖北省103个县区分为4类开展评价:13个水土保持生态功能县域开展水土保持功能评价,主要分布在三峡库区水土保持生态功能区和黄冈市大别山区水土保持生态功能区;11个水源涵养生态功能县域开展水源涵养功能评价,包括十堰市全域、神农架林区以及咸宁市的通山县和通城县;30个地级及以上城市建成区开展生态宜居功能评价,涵盖武汉市大部分县区,以及襄阳市、荆门市、荆州市、宜昌市和鄂州市主城区,简称生态宜居县域;其余49个县域开展生态活力功能评价,主要包括江汉平原以及恩施州区域,简称生态活力县域。具体的分区情况见图1。

区县生态质量评价的三级指标通过《评价办法》中对应计算公式得出,一级、二级指标及EQI则由各三级指标按照权重计算获得。EQI评价以县域为基本评价单元,省、市一级EQI由其行政区域内所有县域的EQI按面积加权求和得出,计算公式如下:

$$I_{\text{区域}} = \frac{\sum I_{\text{县}} \times S_{\text{县}}}{\sum S_{\text{县}}}, \quad (1)$$

式中, $S_{\text{县}}$ 为县域面积, $I_{\text{县}}$ 为县域EQI, $I_{\text{区域}}$ 为区域EQI。

### 1.3 数据来源

生态质量评价的主要数据来源包括遥感分析数据、生态调查数据和气象统计数据。遥感分析数据具体包含解译的生态系统类型分布数据、植被覆盖指数、水土保持指数等。其中通过高分系列卫星影像解译获得的分年度全省生态系统类型分布数据是计算生态用地面积比指数、生境质量指数、重要生态空间连通度指数、水源涵养指数、水网密度指数以及陆域开发干扰指数这6个三级指标的基

表 1 湖北省区县生态质量评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of ecological quality of districts and counties in Hubei Province

一级指标 (权重)	二级指标 (权重)	三级指标/英文简称(权重)	数据来源	备注
生态格局 (0.36)	生态组分(0.32)	生态用地面积比指数/ Ecological land area ratio index, EL(1)	遥感解译	
		生态保护红线面积比指数/ Ecological conservation redline area ratio index, ECRR(0.1)	国务院批复的 生态保护红线边界	
	生态结构(0.68)	生境质量指数/ Habitat quality index, HQI(0.8)	遥感解译	
		重要生态空间连通度指数/ Probability of connectivity index, PC(0.1)	遥感解译	
生态功能 (0.35)	水土保持(1)	水土保持指数/ Net primary productivity index, NPP(1)	MODIS 植被净初级 生产力产品	水土保持国家重点生态功 能区县域(13个)
	水源涵养(1)	水源涵养指数/ Water retention capacity index, WRC(1)	遥感解译	水源涵养国家重点生态功 能区县域(11个)
	生态宜居(1)	建成区绿地率指数/ Urban green space ratio, URG(0.54)	遥感解译	地级及以上城市建成区(30 个),简称生态宜居县域
		建成区公园绿地可达指数/ Urban park accessibility index, UPR(0.46)	遥感解译	其他县域(49个),简称生态 活力县域
生物多样性 (0.19)	生态活力(1)	植被覆盖指数/ Normalized difference vegetation index, NDVI(0.6)	MODIS 植被指数合 成产品	
		水网密度指数/ Denseness index of water network, DW(0.4)	遥感解译	
	生物保护(0.3)	重点保护生物指数/Key species, KS(1)	各部委相关调查数据	
	重要生物功能群 (0.7)	指示生物类群生命力指数/ Qt(0.62)	生态环境部生物多样 性调查数据	
生态胁迫 (0.1)	人为胁迫(1)	陆域开发干扰指数/ Landscape development intensity, LDI(1)	遥感解译	

础。解译过程中所用到的全色与多光谱融合影像空间分辨率为 2 m, 该数据为 Albers 双标准纬线等积圆锥投影(投影参数 25°、47°、110°、12°), 采用专家目视判读方法进行解译, 并结合野外核查数据开展精度验证与修正工作, 一级分类精度高于 90%。分类体系为中科院土地利用/覆盖分类体系<sup>[22]</sup>。

植被覆盖指数和水土保持指数分别由美国国家航空航天局(NASA)网站发布的归一化植被指数合成产品(MOD13Q1 与 MYD13Q1)和植被净初级生产力产品(MOD17A3H)计算。归一化植被指数合成产品空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 8 d; 植被净初级生产力产品空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 1 年。在指数计算过程中, 将每年植被生长期(5月至9月)归一化植被指数的月最大值进行平均, 所得结果即确定为该年度的植被覆盖指数值。水土保持指数通过归一化处理后的 MOD13Q1 与 MOD17A3H 各占 50% 权重加权计算, 再取评价区像元平均值得到。生态宜居指数也

用到了遥感监测数据, 其中建成区面积、建成区绿地面积及建成区公园绿地面积以天地图、World Imagery 等在线遥感影像为底图, 结合高分辨率遥感影像提取。

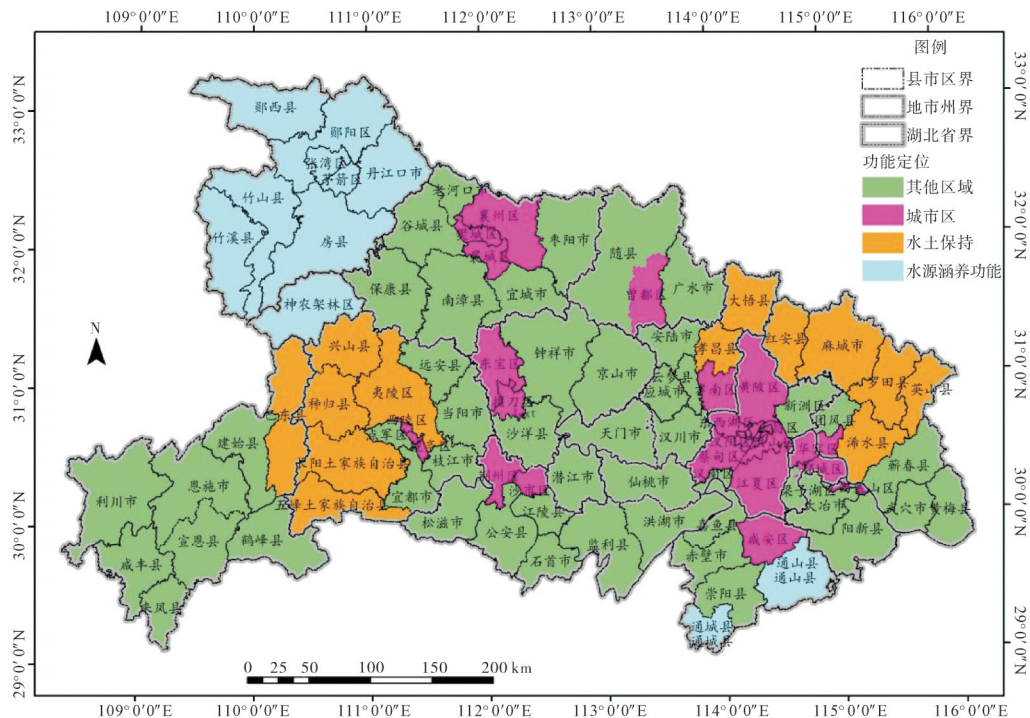
生物多样性数据以生态环境部生物多样性调查数据为主, 辅以其他部委公开数据及相关文献资料, 用于计算重点保护生物指数和指示生物类群生命力指数。降水量和气温数据则来自湖北省气象局国控气象站点监测数据, 用于解析气象因素对生态质量的影响。

#### 1.4 数据分析方法

1.4.1 线性回归方法 为量化 EQI 及各分指标的年际变化趋势, 研究采用一元线性回归模型对其进行拟合, 公式为:

$$y = ax + b. \quad (2)$$

该模型的斜率( $a$ )即代表指数的年变化率, 而截距( $b$ )则为拟合常数。基于此拟合结果, 进一步计算决定系数( $R^2$ )与显著性水平( $p$ 值), 以评估时



注: 底图下载自国家基础地理信息中心“天地图”(https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/dataSource), 审图号为GS(2020)4619号。

图1 研究区生态功能分区

Fig. 1 Ecological Function Zoning of the Study Area

序变化趋势的强度及其统计显著性。

1.4.2 地理探测器 地理探测器是一种能够有效识别空间异质性、定量刻画驱动因素作用强度的空间统计工具,在各类地理现象的驱动力识别、影响因素解析及多因子交互作用评估中应用广泛<sup>[23-24]</sup>。该方法主要由因子探测、交互探测、风险探测及生态探测四个核心模块构成<sup>[25]</sup>。研究中选取因子探测与交互探测两个模块,用于揭示不同分指标对EQI空间分布格局的影响。

1.4.3 变差分解 变差分解方法以线性回归原理为基础,具体实施过程如下:通过Python语言的sklearn库构建多元线性回归模型,利用itertools生成特征组合空间;采用逐步回归法计算各阶特征组合的边际贡献,并借助numpy完成矩阵运算与标准化处理;以决定系数( $R^2$ )对解释方差进行量化,同时通过pyvenn库绘制维恩图,以此呈现特征的相关效应。上述过程均通过Python代码实现。

## 2 结果与分析

### 2.1 湖北省生态质量空间格局分析

2.1.1 分指数空间格局分析 生态格局指标主要反映自然生态用地类型占比及空间分布合理性。评价结果显示,2024年湖北省生态格局指数为

63.09,该指数水平主要源于其较高的自然生态系统覆盖度,表明区域生态结构的完整性良好。从空间分异特征分析,生态格局指数高值区域的核心集聚地为鄂西地区,该区域凭借优越的自然本底条件,维持了较高的林地覆盖率。另一方面,当地经济发展相对滞后,人为干扰程度较低。除核心高值区外,鄂西与江汉平原的过渡地带,以及鄂东北、鄂东南的山地丘陵地带,亦表现为中高值分布区。与之相对,生态格局指数低值区主要零散分布于中东部平原地带的大中城市,该类区域经济活跃,伴随城市化进程的快速推进,高强度开发建设活动直接导致土地利用类型发生剧烈转换,且植被覆盖面积持续缩减<sup>[4,26-27]</sup>,这两大因素共同构成了该区域生态格局指数较低的主导驱动机制。

生态功能指标集中体现了生态系统的服务价值,其内涵包括系统内在的稳定性与外部的环境调节能力。评价结果显示,2024年湖北省生态功能指数为75.90,整体处于完善水平。从区域功能定位看,水源涵养、水土保持和生态活力功能均较为完善,指数分别为82.77、74.80和79.81。生态宜居功能指数为50.72,处于基本完善水平。具体而言,生态宜居指数中武汉市江夏区(因汤逊湖全划入建成区致城市绿地占比偏低)和鄂州市华容区(因老城区纳入建成区、住房密度高致绿地占比不足)相对

较低;生态活力指数中恩施州及襄阳市保康县、远安县最低,主要是由于这些区域以山地为主,森林覆盖率高但水域面积占比低,较高的植被覆盖指数与较低的水网密度指数综合作用导致该结果。

生物多样性指标通过重点保护生物指数与指示生物类群生命力指数综合评价得出。评价结果显示,2024年湖北省生物多样性指数为72.55,生物多样性丰富,其中重点保护生物指数为46.43,指示生物类群生命力指数为83.74。需说明的是,因县级数据掌握不全,本研究中各县均采用省级生物多样性指数,故未能体现其空间差异。

生态胁迫指标由人为胁迫与自然灾害综合评价得出,因自然灾害受灾指数未纳入评价,本研究中“生态胁迫”指标评价主要针对人为胁迫,采用陆域开发干扰指数表征,该指数将评价区域开发建设用地的面积占比作为关键参考依据,以此反映人类活动对生态系统产生的胁迫效应大小。评价结果显示,2024年湖北省生态胁迫指数为26.41,生态质量遭受了一定程度的胁迫。空间分布上,武汉市、黄石市、宜昌市及襄阳市的主城区胁迫程度最

严重,主要因这些区域以城市开发为主,建筑用地占比较大;其次为武汉周边城市及江汉平原区域;鄂西区域胁迫程度最轻,这与湖北省生态系统类型空间分布格局基本一致。

2.1.2 EQI空间变化特征 EQI是基于生态格局、生态功能、生物多样性与生态胁迫4个维度的指标,通过加权求和计算得出的。根据评价结果,2024年湖北省EQI为70.42,等级为一类。17个重点城市中,神农架林区、十堰市等7个地区生态质量等级为一类(占全省国土面积的51.7%,以下简称占比);荆门市、黄冈市等8个地区生态质量等级为二类(占比42.8%);鄂州市和武汉市生态质量等级为三类(占比5.5%)。103个县市区中,生态质量等级优于或等于二类的县域共有76个(占比91.97%),其中40个一类县域主要分布于湖北省四大生态屏障区,与当地较高的生态格局、生态功能及较低的生态胁迫指标相关,36个二类县域主要分布于江汉平原;其余县域生态质量等级以三类为主,主要分布在武汉市、襄阳市和宜昌市等主要城市的主城区(图2)。

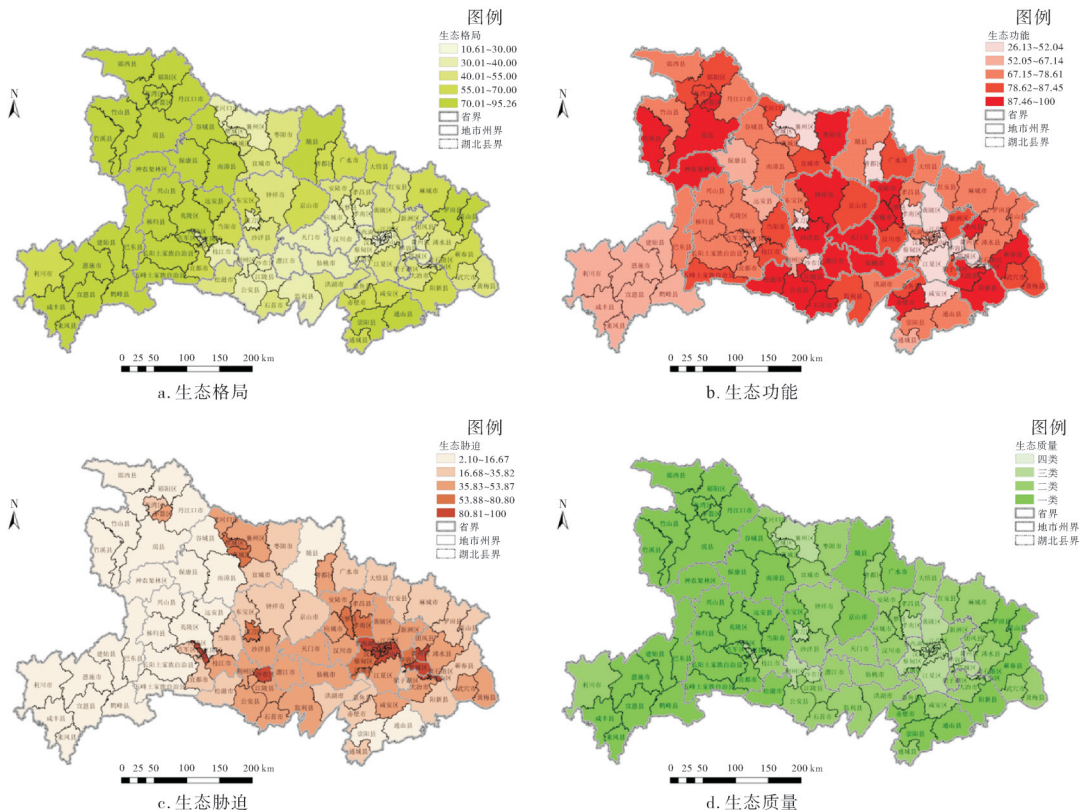


图2 2024年湖北省EQI及各分指数空间变化

Fig. 2 Spatial distribution of EQI and each sub-index at 2024

从功能分区看,水源涵养功能区EQI最高(81.30),水土保持功能区次之(73.88),生态活力

区域EQI为70.12,三者等级均为一类;生态宜居区EQI值为50.21,等级为三类。11个水源涵养功

能区县域 EQI 介于 65.00~92.87, 仅咸宁市通城县因林地、湿地等自然生态用地占比略低于其他县域而未达一类, 神农架林区以 92.87 居首. 13 个水土保持生态功能区 EQI 在 60.11~82.64, 黄冈市、孝感市以二类为主, 宜昌市以一类为主. 49 个生态活力功能县 EQI 在 51.32~77.16, 鄂西区县以一类为主, 江汉平原区县以二类为主. 30 个生态宜居功能区县 EQI 在 39.21~71.46, 以三类为主, 主要是由于各区县生态功能(生态宜居)指数普遍较低(平均为 52.63), 显著低于其他三个类型区县(平均为 79.73).

2.1.3 EQI 空间分布格局的形成归因分析 为揭示影响湖北省 EQI 空间分布格局的主要因素, 本文采用地理探测器开展分析. 以 EQI 为因变量, 由于缺乏县域的生物多样性数据, 且不同县域“生态功能”指标体系不同, 最终选取除“生物多样性”指标外的 11 个三级指标以及生态功能指数(ecological function index, EFI)这个二级指标, 共 12 个因子作为自变量. 首先以湖北省 103 个县区为研究单元,

每个县区设置 1 个采样点, 基于采样点提取 EQI 及 13 个因子的数据; 对因子进行重分类, 通过 SPSS 软件采用 K 均值分类法将其划分为 6 类, 最终在 Excel 中通过宏功能完成因子检测与交互检测.

根据因子探测结果, 生态保护红线面积比指数(ECRR)、水土保持指数(NPP)、水源涵养指数(WRC)和水网密度指数(DW)这 4 个探测因子的  $p$  值均高于 0.05, 未通过显著性检验. 生态用地面积比指数(EL)、生境质量指数(HQI)、重要生态空间连通度指数(PC)、建成区绿地率指数(URG)、建成区公园绿地可达指数(UPR)、植被覆盖指数(NDVI)、陆域开发干扰指数(LDI)、生态功能指数(EFI)共 8 个因子  $p$  值均小于 0.01, 通过了显著性检验, 可作为解释 EQI 空间分布格局的影响因子进行进一步分析. 其中, LDI、EL、HQI 的解释力最强,  $q$  值均超 0.7, 与许伟伟等<sup>[19]</sup>的研究结果一致; PC 和 EFI 的  $q$  值亦高于 0.5, 解释力较强(见图 3a). 这一结果与各指标在 EQI 评价中的权重及自身数值特征相关.

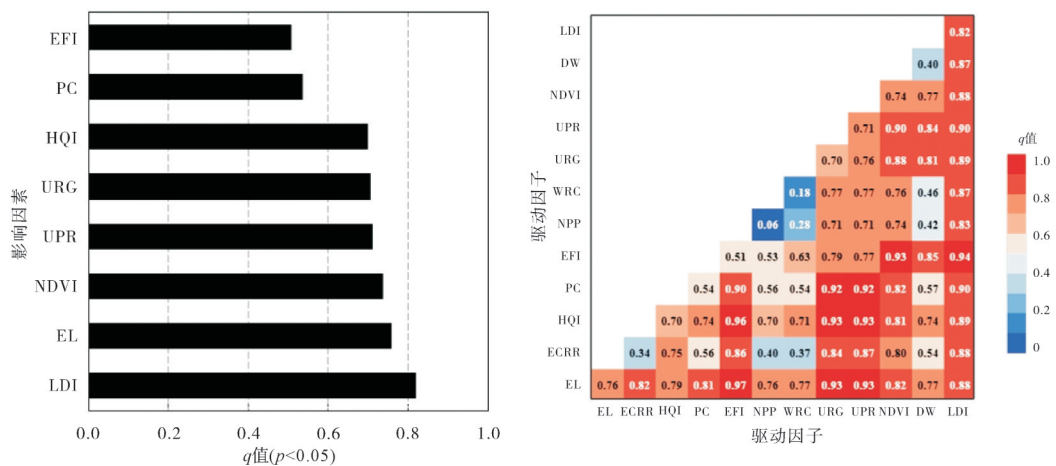


图 3 2024 年湖北省生态因子解释力探测结果

Fig. 3 Explanatory power detection results for ecological factors of Hubei Province in 2024

对 12 个因子进行交互探测, 结果表明: EFI 与其他因子交互时, 对 EQI 空间分布的解释率均超 90%, 其中与 EL、HQI 交互的解释率高达 97% (见图 3b). 值得注意的是, EL、HQI、PC、LDI 均来自遥感解译的生态系统类型分布数据, 彼此相关性较高, EL 与 HQI 相关系数为 0.92、与 PC 相关系数为 0.82, HQI 与 PC 相关系数更是达 0.93, 近乎完全正相关. 可见, 生态系统类型空间分布格局及生态功能高低, 是决定 EQI 大小的关键. 而不同功能区“生态功能”指标的评价方法虽然不同, 但是均与自然生态用地占比和植被覆盖度息息相关. 因此, 提升自然生态用地占比和植被覆盖度、加强重点生态空间人为活动监管、控制城市开发强度、加强生态

空间连通性建设等, 均是提升 EQI 的关键.

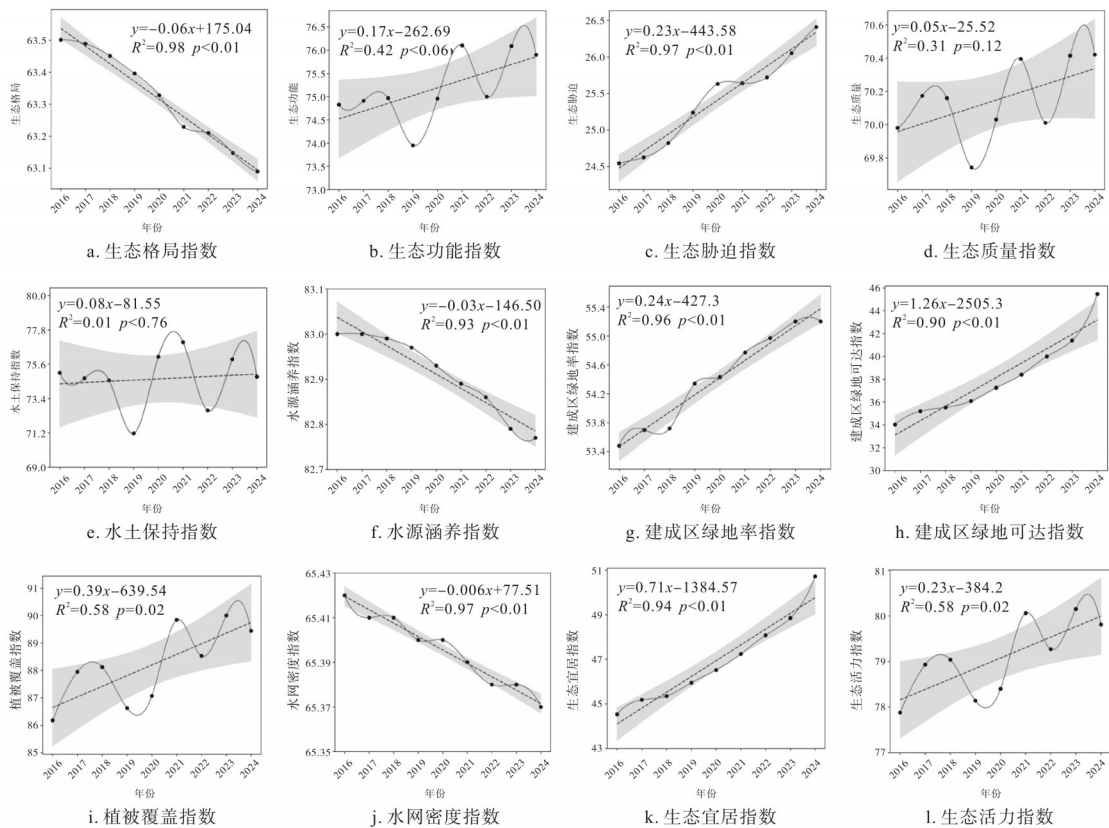
## 2.2 湖北省生态质量时序变化特征

2.2.1 各分指数时序变化特征 湖北省生态格局指数自 2016 年以来呈显著持续下降趋势 ( $p < 0.01$ ), 年平均递减约 0.06, 如图 4a 所示, 下降幅度无明显波动, 整体态势稳定. 这一变化主要源于社会经济发展背景下, 城市开发建设对自然生态空间的挤占. 其中 2021 年下降幅度最大, 推测与 2020 年疫情后经济和生产生活活动快速恢复导致的生态空间压力骤增相关.

湖北省生态功能指数在 2016—2024 年呈波动上升的趋势(图 4b), 但变化趋势不显著 ( $p = 0.06$ ). 该指数在 2019 年出现异常下降, 随后逐步回升,

2021年达到峰值后小幅回落. 从不同生态功能类型来看:水源涵养指数与水网密度指数均呈显著逐年下降趋势( $p < 0.01$ ), 年均分别下降 0.03 和 0.006. 结合《评价办法》中二者基于生态系统类型空间分布的计算逻辑, 进一步印证了城市开发导致自然生态用地减少, 是驱动这两个指数下降的核心原因. 生态宜居指数呈极显著上升趋势( $p < 0.01$ ), 年均上升 0.71, 这与建成区绿地率指数( $p < 0.01$ )、建成区公园绿地可达指数( $p < 0.01$ )的极显著提升直接相关, 反映出湖北省主要城市在发展过程中对

绿化与人居环境改善的重视. 生态活力指数呈显著上升的趋势( $p < 0.05$ ), 年均上升 0.23, 其变化趋势与植被覆盖指数完全一致, 二者相关性接近 1 ( $p < 0.01$ ), 说明区域内植被覆盖度增加可能是生态活力指数提升的主要原因. 水土保持指数呈现明显波动特征, 最大波动幅度达 7.16, 无显著变化趋势( $p = 0.76$ ). 2016—2024 年其与降水量呈显著正相关(相关系数 0.69,  $p < 0.01$ ). 因 2019 年、2022 年为近 9 年降水量低值, 故这两年水土保持指数显著低于其他年份(图 5).



注: 灰色部分为 95% 置信区间

图 4 EQI 及各分指标的时序变化

Fig. 4 Time-series variation of EQI and each sub-index

湖北省生物多样性指数 9 年来上升了 1.18, 对 EQI 的正向贡献为 0.22, 这主要得益于重点保护物种种类数增加 26 种. 生态胁迫指数自 2016 年以来呈显著持续上升趋势( $p < 0.01$ ), 表明人为胁迫程度逐年加剧. 该指数从 2016 年的 24.55 增至 2024 年的 26.41, 累计上升 1.86 (增幅 7.60%), 年均上升 0.23, 且上升速度逐年加快, 2022 年后增幅尤为明显. 该变化主要受建筑用地面积持续扩张驱动, 2016 年以来, 湖北省建筑用地面积累计增加了约 1 413  $\text{km}^2$ , 导致 EQI 下降 0.19.

2.2.2 EQI 时序变化特征 2016—2024 年, 湖北省 EQI 值在波动中呈缓慢上升趋势: 从 2016 年的 69.98 增至 2024 年的 70.42, 上升趋势不显著( $p = 0.12$ ). 期间 2019 年出现低谷 (69.74), 2020 年后稳步回升, 2024 年达研究期最高值(图 4d). 这一变化是各分指标综合作用的结果: 生态格局指数(年均下降 0.06)和生态胁迫指数(负向指标, 年均上升 0.23)共同导致 EQI 年均降低 0.1, 其中生态胁迫指数的快速上升是主要负面驱动因素; 而生态功能指数(年均上升 0.17)和生物多样性指数(年均上升

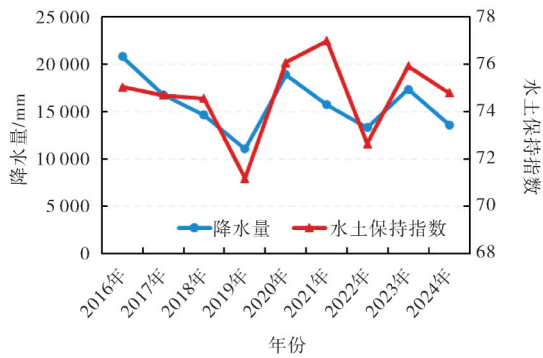


图5 水土保持功能区水土保持指数与降水量变化趋势图  
Fig. 5 Trend chart of soil and water conservation index and precipitation variations in soil and water conservation functional areas

0.13)则对EQI形成正向支撑,尤其生态功能指标的提升显著抵消了生态格局指标下降的影响.总体而言,EQI最终实现增长,表明湖北省生态系统在多重压力下仍保持一定韧性,2019年多个指标均出现异常波动,或为关键转折点.

从不同功能区看,生态宜居区县( $p < 0.01$ )和生态活力区县( $p = 0.05$ )的EQI均呈显著上升趋势,前者主要得益于城市建设中对绿化的重视及生物多样性提升,后者除生物多样性指数上升的影响外,还与植被覆盖指数的提升密切相关;而水源涵养区和水土保持生态功能区EQI则无明显变化趋势(图6).

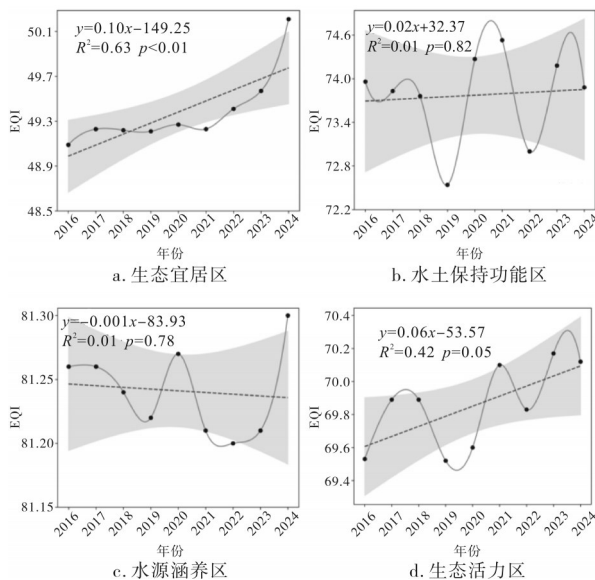


图6 不同功能区EQI时序变化  
Fig. 6 Time-series variation of EQI in different functional areas

2.2.3 EQI时序变化影响因素分析 相关性分析结果显示,近9年来湖北省EQI与生态功能指数呈显著正相关,相关系数达0.96.三级指标中,EQI

与植被覆盖指数相关系数最高(0.88),其次是水土保持指数(0.73),表明这两个指数是影响湖北省EQI时序波动的决定性因素.变差分解结果表明,生态功能指标单独解释了湖北省39.01%的EQI变化(图7a),与生态格局、生态胁迫指标的交互作用分别共同解释了19.92%和15.24%的EQI的变化,进一步印证了生态功能指标是EQI变化的主要驱动因素.从三级指标看,植被覆盖指数和水土保持指数分别单独解释了15.40%和12.04%的EQI变化(图7b),二者协同解释了22.66%的变化,是影响EQI变化的核心三级指标.且受生态功能定位的差异性影响,植被覆盖指数对生态活力区EQI变化的单独解释效应达47.55%(图7f),是该区域EQI变化的决定性因素.而水土保持指数对水土保持功能区EQI变化的单独解释力高达57.84%(图7d),主导了对应区域EQI的变化.

进一步分析发现,湖北省植被覆盖指数与降水量、气温均无显著相关性.49个生态活力区县中植被覆盖波动较大的江陵县、老河口市、梁子湖区和天门市受区域性气候异常影响及人为干扰影响显著.其中老河口市植被覆盖指数波动较为剧烈(标准差=4.40),其中2022年数值(63.29)明显低于2021年(77.60)和2023年(77.71),导致全省植被覆盖指数较2021年下降0.15(贡献率11%),并对当地EQI产生较大影响.相关性分析显示,其植被覆盖指数与年降水量呈显著正相关( $r = 0.89, p < 0.01$ ),而与5—9月最高气温均值呈显著负相关( $r = -0.72, p < 0.05$ ),2022年该市植被生长期降水量和气温分别为近九年最低和最高,二者协同作用可能是当年植被覆盖指数骤降的主要原因.江陵县植被覆盖指数波动最大(标准差=4.45),且与植被生长季最高气温均值呈显著正相关( $p < 0.05$ ),表明气温可能也是影响江陵区植被覆盖指数波动的重要因素.梁子湖区的植被覆盖波动与气温和降水则均无显著相关关系,但与生境质量指数显著相关( $r = 0.72, p < 0.05$ ),暗示其植被变化主要受人为开发活动影响.总体而言,湖北省部分区县EQI的时序变化受气候条件影响较大,但总体人为活动的影响仍非常明显.

### 3 讨论

基于2016—2024年湖北省EQI及其分项指标的多尺度系统评估,验证了现行EQI评价体系在区域生态质量状况与动态趋势的识别上有较好的适

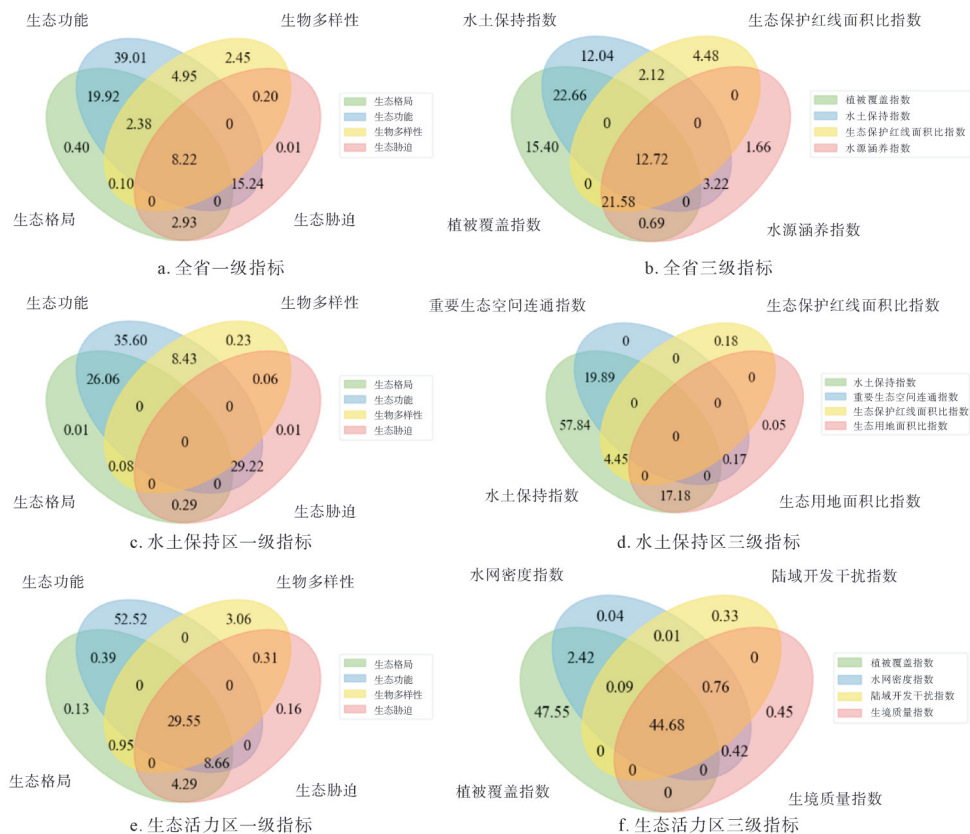


图 7 EQI 及主要分指标特征变差贡献韦恩图(单位: %)

Fig. 7 Venn chart of the contribution of variation of EQI and major sub-indicators (unit: %)

用性,可为区域生态质量监测与评估提供支撑.然而,结合生态保护修复监管与成效考核的实际需求,该体系在部分指标的适用性、数据来源及评价精度方面仍存在进一步优化的空间.

1) 气候波动对指标稳定性的干扰. 植被覆盖指数与水土保持指数等核心指标对降水与温度的年际异常波动较为敏感,部分年份的自然气候波动可能对特定区县 EQI 的变化起到主导作用. 这种干扰可能削弱考核结果对实际治理成效的客观表征. 研究初步识别了气候因素对 EQI 的影响机制,后续研究将引入时间序列分解与多元回归等方法,量化气候因子的贡献比例,构建剔除气候干扰的“修正指数”,以更准确地反映人为治理与生态系统自身恢复的贡献.

2) 遥感数据依赖与工程成效体现不足. 当前水源涵养指数主要基于县域生态系统类型进行整体估算,未能有效纳入局部水源涵养工程(如梯田建设、植被恢复等)的实际修复成效. 由于县域尺度上生态系统破坏的影响往往在短期内高于修复成效,导致该指数整体呈下降趋势,难以准确反映局部治理效果. 水土保持指数则单纯依赖 MODIS 遥感产品,缺乏与水利部门实际治理工作的衔接,

难以反映地方治理成效. 因此,亟需整合水利部门的地面监测数据(如径流深度、土壤侵蚀模数),构建“遥感+地面”协同的反演与校验机制,提升相关指标的可量化、可溯源及精准化水平.

3) 功能定位与评价体系的适配性问题. EQI 评价体系虽针对不同功能定位的区县采用差异化指标组合,如生物多样性维护功能区侧重植被覆盖与水网密度,但在实际应用中,部分区域的评价结果仍与其生态优势存在偏差. 以恩施土家族苗族自治州为例,作为湖北省重要生态屏障与“鄂西林海”,其森林资源丰富,生态功能突出,但生态功能指数在全省排名相对靠后(指数值为 65.65). 分析表明,该类区域森林覆盖率高但水域面积比例较低,导致水网密度指数贡献度不足,进而影响综合评价结果. 将来还需针对山区型生物多样性功能区特点,探索构建更契合其生态特征的指标结构与权重设置.

4) 评价单元与指数设置的优化路径. 当前将区县作为评价的基本单元,虽便于行政考核,但在进行地理探测器等因子分析时,因区县内部生态条件可能异质性较高,难以精细反映其内部的空间差异性特征. 后续研究将推进栅格尺度的生态质量评价,以更精细地揭示生态质量空间分异规律及驱

动机制。此外,现行生物多样性指数在全省采用统一赋值,无法体现区域本底差异。后期拟结合县域生物多样性本底调查与生态质量监测网络数据,建立更具区域区分度的生物多样性监测数据库,以体现该指标的贡献。

## 4 结论

本文以长江流域重要省份湖北省为研究区,综合卫星遥感与地面监测手段,基于EQI评价办法,系统分析2016—2024年湖北省EQI及各分指数的时空变化特征,并通过回归分析、地理探测器、变差分解等方法,探究了其空间分布与时序变化的驱动机制,主要结论如下。

1) 湖北省生态质量整体优良,空间分异显著。全省生态质量等级为一类,有76个县域生态质量等级优于或等于二类(面积占比达91.97%),其中40个一类县域集中分布于四大生态屏障区,36个二类县域主要分布于江汉平原;其余县域以三类为主,多分布于武汉市、襄阳市和宜昌市等主要城市的主城区。不同生态功能类型区县中,水源涵养功能区EQI最高(81.30),水土保持功能区次之(73.88),生态活力区域EQI为70.12,三者等级均为一类;生态宜居区EQI为50.21,等级为三类。

2) 生态系统类型格局是EQI空间分布结构的基础。地理探测器结果显示,生态系统类型空间分布及生态功能指标是决定EQI高低的关键因素,其中陆域开发干扰指数、生态用地面积比指数和生境质量指数对湖北省EQI空间分布的解释力最强。尽管不同功能区的评价方法存在差异,但自然生态用地占比为其共性因子。因此,提升自然生态用地占比与植被覆盖度,加强重点生态空间人为活动监管,控制城市开发强度,优化生态空间连通性,是提升EQI的重要途径。

3) 2016—2024年湖北省EQI在波动中呈缓慢上升趋势,其主要受生态功能指数和生物多样性指数上升的正向驱动,其中生态功能指数是最为重要的影响因素,植被覆盖指数、水土保持指数则是影响EQI变化最核心的三级指标。

4) EQI变化受气候变化与人类活动因素双重影响。无序的国土开发导致生态格局指数下降、生态胁迫指数上升,对EQI呈负向驱动;而城市绿化带来的生态宜居指数上升则表现为正向驱动。气候条件在部分区域特定年份会主导其生态功能变化,尤其会影响水土保持指数和植被覆盖指数的变

化。降水量是水土保持指数变化的主要诱因,植被覆盖指数虽与降水、气温无显著整体相关性,但局部区域受二者影响明显,导致部分年际波动显著。

## 参考文献:

- [1] EL-SAYED A, KAMEL M. Climatic changes and their role in emergence and re-emergence of diseases [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(18): 22336-22352.
- [2] MANISALIDIS I, STAVROPOULOU E, STAVROPOULOS A, et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review[J/OL]. *Frontiers in Public Health*, 2020, 8[2026-01-05]. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.
- [3] COOK J, ORESKES N, DORAN P T, et al. Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming [J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(4)[2026-01-05]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/4/048002>.
- [4] 张媛, 昌维, 熊晶, 等. 1998—2022年湖北省生态环境状况时空变化特征及影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2025, 41(1): 34-41.  
ZHANG Y, CHANG W, XIONG J, et al. Spatio-temporal changes characteristics and influencing factors of ecological quality status in Hubei Province from 1998 to 2022 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2025, 41(1): 34-41. (Ch).
- [5] 董贵华, 王业耀, 于洋, 等. “十三五”以来我国生态质量状况时空变化分析[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(1): 1-9.  
DONG G H, WANG Y Y, YU Y, et al. Analysis on spatio-temporal changes of ecological quality status in China since the 13th Five-year Plan period [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(1): 1-9. (Ch).
- [6] 代雨婷, 刘海, 张媛. 基于生态质量指数的湖北省县级尺度生态质量时空动态变化研究[J]. *环境生态学*, 2024, 6(1): 53-65.  
DAI Y T, LIU H, ZHANG Y. Study on spatio-temporal dynamic changes of ecological quality at county scale in Hubei Province based on ecological quality index [J]. *Environmental Ecology*, 2024, 6(1): 53-65. (Ch).
- [7] 国家环境保护总局. 生态环境状况评价技术规范(试行): HJ/T 192—2006[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.  
State Environmental Protection Administration. Technical criterion for eco-environmental status evaluation: HJ/T 192—2006[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006. (Ch).
- [8] 中华人民共和国环境保护部. 生态环境状况评价技术规范: HJ 192—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical Criterion for Ecosystem Status Evaluation: HJ 192—2015 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015. (Ch).

- [9] 张媛, 望志方, 陈楠, 等. 湖北省生态环境状况时空变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S2): 300-305.  
ZHANG Y, WANG Z F, CHEN N, et al. Spatiotemporal variation characteristics and related affecting factors of Hubei Province eco-environmental status [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S2): 300-305. (Ch).
- [10] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于MODIS的2006—2016年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1438-1449.  
WU Y J, ZHAO X S, XI Y, et al. Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006-2016 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74 (7) : 1438-1449. (Ch).
- [11] 欧阳玲, 马会瑶, 王宗明, 等. 基于遥感与地理信息数据的科尔沁沙地生态环境状况动态评价[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5906-5921.  
OUYANG L, MA H Y, WANG Z M, et al. Dynamic evaluation of ecological environment in Horqin sandy land based on remote sensing and geographic information data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5906-5921. (Ch).
- [12] 郑敏, 乔占明, 赖锋, 等. 地理国情支撑下的祁连山生态状况精细化评价[J]. 测绘科学, 2022, 47(10): 213-220.  
ZHENG M, QIAO Z M, LAI F, et al. Fine evaluation of ecological status in the Qilian Mountains based on national geographic conditions data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(10): 213-220. (Ch).
- [13] 生态环境部. 关于印发《区域生态质量评价办法(试行)》的通知[Z], 2021.  
Ministry of Ecology Environment. Notice on issuing the *Regional Ecological Quality Assessment Measures (Trial)*[Z], 2021. (Ch).
- [14] 郗建荣. 生物多样性首次纳入生态综评体系[N]. 法治日报, 2021-06-21(8).  
QIE J R. Biodiversity was included in the ecological comprehensive assessment system for the first time [N]. Legal Daily, 2021-06-21(8). (Ch).
- [15] 马广文, 张凤英, 牛丽楠, 等. 中国生态环境质量现状及2016—2023年动态变化分析[J]. 中国环境监测, 2024, 40(3): 1-11.  
MA G W, ZHANG F Y, NIU L N, et al. Analysis on current situation of the eco-environment quality and its dynamic changes from 2016 to 2023 in China [J]. Environmental Monitoring in China, 2024, 40(3): 1-11. (Ch).
- [16] 钱贞兵, 潘成荣, 徐升, 等. 安徽大别山区生态质量评价与监管格局构建[J]. 中国环境监测, 2024, 40(S1): 30-39.  
QIAN Z B, PAN C R, XU S, et al. Ecological quality evaluation and suggestions on the construction of regulatory structure in the Dabie Mountain area of Anhui Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2024, 40(S1): 30-39. (Ch).
- [17] 许伟伟, 臧协超, 金洋, 等. 基于EQI和地理探测器的江苏省区县生态质量评价与驱动力分析[J]. 环境科学, 2025, 46(6): 3760-3771.  
XU W W, ZANG X C, JIN Y, et al. Assessment and driving force analysis of ecological quality in Jiangsu Province's counties based on EQI and geographic detectors [J]. Environmental Science, 2025, 46 (6) : 3760-3771. (Ch).
- [18] 朱希希, 侯玉婧, 张宗祥, 等. 基于Landsat 8数据的植被覆盖度动态变化监测及生态质量指数提升对策分析——以泰州市海陵区为例[J]. 中国环境监测, 2024, 40(4): 272-280.  
ZHU X X, HOU Y J, ZHANG Z X, et al. Dynamic change monitoring of vegetation coverage based on landsat 8 remote sensing image and the analysis on countermeasures for improving the ecological quality index: a case study of Hailing District, Taizhou City [J]. Environmental Monitoring in China, 2024, 40(4): 272-280. (Ch).
- [19] 荣维康, 徐天乐, 葛小东, 等. 2000—2020年湖北省土地利用变化对植被覆盖度的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 238-246;283.  
RONG W K, XU T L, GE X D, et al. Impacts of land use changes on fractional vegetation coverage of Hubei Province from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 238-246;283. (Ch).
- [20] 湖北省人民政府. 省人民政府关于印发《湖北省国土空间规划(2021—2035年)》的通知[EB/OL]. (2025-02-21) [2026-01-05]. [https://www.hubei.gov.cn/zfwj/ezf/202502/t20250221\\_5550263.shtml](https://www.hubei.gov.cn/zfwj/ezf/202502/t20250221_5550263.shtml)  
Hubei Provincial People's Government. Notice on issuing the *Hubei Province Territorial Spatial Planning (2021-2035)* [EB/OL]. (2025-02-21) [2026-01-05]. [https://www.hubei.gov.cn/zfwj/ezf/202502/t20250221\\_5550263.shtml](https://www.hubei.gov.cn/zfwj/ezf/202502/t20250221_5550263.shtml). (Ch).
- [21] 湖北省人民政府. 人口区划[EB/OL]. (2024-04-16) [2026-01-05]. [http://www.hubei.gov.cn/jmct/hbgk/202404/t20240416\\_5159910.shtml](http://www.hubei.gov.cn/jmct/hbgk/202404/t20240416_5159910.shtml)  
Hubei Provincial People's Government. Administrative divisions of Hubei Province [EB/OL]. (2024-04-16) [2026-01-05]. [http://www.hubei.gov.cn/jmct/hbgk/202404/t20240416\\_5159910.shtml](http://www.hubei.gov.cn/jmct/hbgk/202404/t20240416_5159910.shtml). (Ch).
- [22] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.  
LIU J Y. Macro-scale survey and dynamic study of natural resources and environment of China by remote sensing [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996. (Ch).
- [23] 田云, 刘俊艳, 白爽, 等. 近20年黄河流域甘肃段植被覆盖度变化与驱动因素分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 365-372;404.  
TIAN Y, LIU J Y, BAI S, et al. Fractional vegetation cover change and driving factors in Gansu section of Yellow River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 365-372;404. (Ch).
- [24] ZHU L J, MENG J J, ZHU L K. Applying Geodetector to

- disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2020, 117[2026-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106545>.
- [25] 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. (Ch).
- [26] ZHONG J, LIU J F, JIAO L M, et al. Assessing the comprehensive impacts of different urbanization process on vegetation net primary productivity in Wuhan, China, from 1990 to 2020[J/OL]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75[2026-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103295>.
- [27] 王海军, 王惠霞, 邓羽, 等. 武汉城市圈城镇用地扩展的时空格局与规模等级模式分异研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(2): 272-285.
- WANG H J, WANG H X, DENG Y, et al. Study on the spatio-temporal pattern and differentiation of rank-size distribution of urban land expansion in Wuhan urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(2): 272-285. (Ch).

## Assessing spatio-temporal changes and influential factors of ecological quality in Hubei Province from 2016 to 2024

ZHANG Yuan<sup>1</sup>, XIONG Jiong<sup>1</sup>, YU Shaoping<sup>2</sup>, YANG Chen<sup>3</sup>,  
LIU Zhenzhen<sup>1</sup>, XU Ke<sup>1</sup>, LIU Hai<sup>3</sup>

(1. Ecology Environment Monitoring Center of Hubei Province, Wuhan 430060, China;

2. Ningbo Jiayu Technology Co., LTD, Ningbo 315503, Zhejiang, China;

3. Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** This study conducted a dynamic assessment of ecological quality in Hubei Province from 2016 to 2024, based on the indicator system outlined in the Ministry of Ecology and Environment's Trial Measures for the Evaluation of Regional Ecological Quality. Through empirical analysis, the applicability of this framework at the provincial scale was evaluated. By integrating geodetector analysis and variance decomposition, key driving factors underlying the evolution of ecological quality over the past eight years were systematically identified. The results are shown as follow. 1) The overall ecological quality of Hubei Province is classified as excellent (Class I), with 91.97% of the land area meeting or exceeding Class II standards. Spatially, ecological quality exhibits a distinct pattern characterized by high-quality four major ecological barrier zones, moderate conditions in the Jiangnan Plain, and relatively lower levels in urban core areas—demonstrating the method's strong suitability for provincial-scale applications. 2) Spatial differentiation of the Ecological Quality Index (EQI) is primarily governed by the ecological pattern and ecological function dimensions, with the land development disturbance index, ecological land area ratio, and habitat quality index emerging as the dominant third-level indicators. 3) Temporally, EQI has exhibited an overall fluctuating upward trend, driven largely by improvements in ecological function and biodiversity indicators. Notably, the vegetation coverage index and soil and water conservation index are the most influential third-level metrics shaping interannual variations in EQI. 4) Declines in EQI are mainly attributable to the deterioration of certain indicators within the ecological stress and ecological pattern categories, whereas improvements are primarily linked to gains in ecological livability and biodiversity-related indicators. Furthermore, climatic factors—particularly precipitation—play a dominant role in modulating ecological function indicators, which in turn drive interannual fluctuations in vegetation coverage and soil and water conservation at the county level.

**Key words:** Hubei Province; ecological quality index; spatio-temporal changes; influencing factors