

中国典型湖泊流域生态安全-城镇化水平的交互胁迫关系及演化特征——以太湖、巢湖、鄱阳湖、抚仙湖和呼伦湖为例*

郭辉^{1,2,3}, 王森^{1,2,3,4}, 孙伟^{1,2,3**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 211135)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 211135)

(3: 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

(4: 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 流域内生态安全-城镇化水平的交互胁迫关系本质上是人地关系的相互作用, 在城镇化加速推进、资源环境承载力趋于紧张的背景下, 湖泊流域难以为区域的可持续发展提供稳定的物质支撑与生态保障。本文在人地关系地域系统理论的框架下, 对不同湖泊流域的生态安全状况和城镇化水平开展定量分析, 并对二者的交互胁迫关系的空间异质性进行探究。研究表明: ①在生态治理和区域发展的共同作用下, 不同湖泊流域的生态安全和城镇化水平均得到不同程度的提升, 其时空演变特征表现出显著的空间异质性。②不同流域在生态环境和城镇化的互动过程中所承受的胁迫强度各异, 表现出差异化的耦合协调演化模式, 发达流域协调程度高, 生态基础好的区域城镇化发展普遍滞后, 不同流域在生态安全-城镇化水平互动中所承受和施加的胁迫强度不同, 反映出自然条件与发展阶段共同塑造的区域差异性。③生态安全-城镇化水平间存在复杂的交互胁迫关系, 受自然禀赋和发展阶段等因素的影响, 不同流域呈现出差异化的作用机制和演化特征, 发达流域生态约束逐步减弱, 生态优良且发展滞后流域生态对城镇化形成强约束, 生态脆弱且发展滞后流域则呈现双向胁迫格局。因地制宜的推进各流域生态治理和城镇化进程, 探索适配性强、协同性高的发展路径, 是湖泊流域高质量发展的关键支撑。

关键词: 湖泊流域; 生态安全; 城镇化水平; 时空演化; 交互胁迫关系

Interactive Stress and Evolution Between Ecological Security and Urbanization in Typical Lake Basins of China

Guo Hui^{1,2,3}, Wang Sen^{1,2,3,4}, Sun Wei^{1,2,3**}

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Watershed Geography, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(4: School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

Abstract: The interactive stress relationship between ecological security and urbanization within lake basins fundamentally manifests the interactive dynamics between humans and the environment. Against the backdrop of accelerating urbanization and mounting pressure on natural resource and environmental carrying capacity, lake basins face growing challenges in providing

* 2025-07-01 收稿;2025-08-25 收修改稿。

中国科学院南京地理与湖泊研究所自主部署项目 (NIGLAS2022GS06) 资助。

** 通信作者;E-mail: wsun@niglas.ac.cn。

stable material support and ecological guarantees for regional sustainable development. Within the theoretical framework of the human-land relationship in regional systems, this study quantitatively analyzes ecological security and urbanization levels across various lake basins and explores the spatial heterogeneity of their interactive stress relationship. The results indicate that: (1) Under the combined influence of ecological governance and regional development, ecological security and urbanization levels in different lake basins have improved to varying degrees, with their spatiotemporal evolution exhibiting significant spatial heterogeneity. (2) The stress experienced in the interaction between ecological environment and urbanization varies across basins, showing distinct patterns of coupling and coordinated evolution. Developed basins tend to achieve a higher level of coordination, whereas regions with a strong ecological foundation often experience lagging urbanization. The differing degrees of stress exerted and endured in the ecological security-urbanization interaction across basins reflect regional disparities shaped by the combined effects of natural conditions and developmental stages. (3) A complex interactive stress relationship exists between ecological security and urbanization, influenced by factors such as natural endowments and developmental stages. Ecological constraints in developed basins have progressively weakened; in ecologically sound but underdeveloped basins, ecological factors strongly constrain urbanization; in ecologically fragile and underdeveloped basins, a bidirectional stress pattern is observed. Promoting ecological governance and urbanization processes in a context-sensitive manner and exploring development pathways characterized by high adaptability and synergy are key to achieving high-quality development in lake basins. This study aims to systematically delineate the interactive stress relationship and evolutionary characteristics between ecological security and urbanization, thereby providing scientific reference and practical insights for sustainable urbanization and ecological civilization construction in lake basins.

Keywords: lake basin; ecological security; urbanization; spatiotemporal evolution; interactive stress

湖泊既是陆地生态系统中关键的组成单元，也是人类文明演替的核心区域，对环境变迁和人类活动具有高度敏感性^[1-2]。湖泊及其流域通过水系这一自然纽带，将多样的地理单元整合为一个兼具自然和人文属性的有机整体^[3]。淡水湖泊流域作为支撑人类生存发展的重要淡水资源库和生态空间，承载着生产、生活和生态多种功能，流域内部自然资源要素与人文经济要素彼此响应和反馈，共同构成了湖泊流域人地关系地域系统^[4-5]。湖泊流域当前已全面进入“人类世”阶段^[6-7]，人类日益增长的生产与生活需求不断加剧对生态环境的侵占，生态空间被不断压缩，“山水林田湖草沙”等生态要素间的空间关联被割裂^[8]，不仅致使湖泊流域生态环境恶化，也对城镇化发展形成阻碍。因此，分析各湖泊流域生态安全与城镇化的交互作用，因地制宜的探索二者协同发展路径，对缓解湖泊流域人地关系地域系统矛盾，推进区域城镇化可持续发展具有重要意义。

生态安全反映了生态系统在特定时空尺度下抵御自然环境变化和人类活动压力，维持自身结构与功能稳定的能力^[9]，是国家安全的重要组成部分^[10]。生态安全状况影响着人类的生存和社会经济的发展，对区域生态安全的科学评价可以为社会经济的可持续发展和生态环境的良性管理提供科学依据与指导^[11]。生态安全评价常采用“压力-状态-响应 (PSR)”框架作为基本分析工具^[12-13]，在此基础上，学者们先后引入区域发展基底、驱动力、环境影响和生态系统服务等要素，发展出“基础-压力-状态-响应 (BPSR)”^[14]、“驱动-压力-状态-响应 (DPSR)”^[15]、“驱动力-压力-状态-影响-响应 (DPSIR)”等模型^[16]，实现了从单一压力识别向复杂因果链分析的演进，但忽视了生态系统的整体性与系统性，未能围绕生态系统状态及其对人类的服务功能开展合理分析^[17]。一般认为，区域生态安全的核心在于生态系统具备良好的完整性、自我调节能力及生态系统服务功能，避免生态退化对人类福祉及经济社会发展的威胁^[17-18]。因此，如何在“风险-健康-服务”框架下评价湖泊流域的生态安全状况是本研究需要解决的关键问题，也是当前学界研究的主要趋势^[14,19]。

基于耗散结构理论和生态系统需求规律，城市化与生态环境可视为具有非线性互动和自组织特征的开放、非平衡动态互动胁迫系统^[20-21]，城镇化的推进依赖于区域生态环境提供的物质基础，同时也通过空间扩张和资源开发重塑着生态环境^[22-23]，二者之间相互作用、相互制约，既可推动系统走向协调共生，也可导致环境失衡与发展受限^[21]。既有研究分别探究了生态系统服务^[24]、生态系统健康^[25]及生态脆弱性^[26]与城镇

化之间的耦合协调关系及时空演变特征,还重点关注了生态环境对城镇化的空间响应、二者耦合协调关系、影响因素等研究^[27]。总体来看,关于生态环境与城镇化耦合关系的研究日趋丰富,且研究普遍认为城镇化与生态环境间存在着复杂的非线性交互作用。但现有研究多集中于社会经济维度的行政区与经济区,或围绕大江大河流域展开,对湖泊流域这一相对封闭的水文单元的研究较为不足。行政区和经济区往往割裂了生态系统的完整性,江河流域研究更多关注城镇化通过纵向物质输送对上下游生态环境的影响^[28],相比之下,湖泊流域以横向汇集过程为主,城镇化压力直接作用于湖泊水体和环湖带空间,在污染累积和空间集聚等方面展现出显著的独特性,在生态安全-城镇化水平的交互胁迫关系上更具复杂性和敏感性,但相关研究相对匮乏,且鲜有关注不同湖泊流域差异性的系统研究。

综上所述,湖泊流域是支撑人类生存发展的重要资源与功能载体,城镇化的快速推进和资源环境承载力趋紧加剧了区域发展与生态环境间的冲突。中国湖泊分布广泛,不同湖泊流域因所处地域的自然环境基底和人类活动强度差异,其生态安全状况与城镇化水平亦存在空间差异。为此,本文选择太湖、鄱阳湖、巢湖、抚仙湖和呼伦湖等5个生态环境特征各异、城镇化发展阶段不同的湖泊流域作为研究对象,开展湖泊流域的生态安全和城镇化水平评价,并在此基础上探究二者的交互胁迫关系及演化特征,以为湖泊流域可持续城镇化和生态文明建设提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究从全国范围内选取对区域生态环境具有重要意义,且代表不同城镇化阶段的典型湖泊流域作为研究区(图1)。太湖是典型的大型浅水湖泊,人口密集、产业集聚,是中国经济最发达的地区之一,2022年,太湖流域城镇化率超80%,区域生态-经济矛盾突出,是高度城镇化阶段的典型代表区域。巢湖流域是重要的水环境保护区和重点开发区,2022年,流域城镇化率较2000年提升了近50%,是快速城镇化导致生态压力加剧的典型地区。鄱阳湖是中国最大的淡水湖泊,承担着调蓄洪水和生物多样性维护等多种生态功能,2022年流域城镇化率为62.24%,低于全国平均水平,是生态优良、城镇化相对滞后的典型区域。抚仙湖是典型的高原深水湖泊,是重要的淡水资源储备库,生态价值较高,其流域城镇化率长期低于全国平均水平,是生态本底优良而城镇化滞后的典型区域。呼伦湖是中国草原地区最大的淡水湖泊,其流域生态系统较好地保留了原始特征,生态价值高于经济价值,2022年城镇化率为86.80%,处于极高水平,是生态脆弱而城镇化水平高的典型区域。

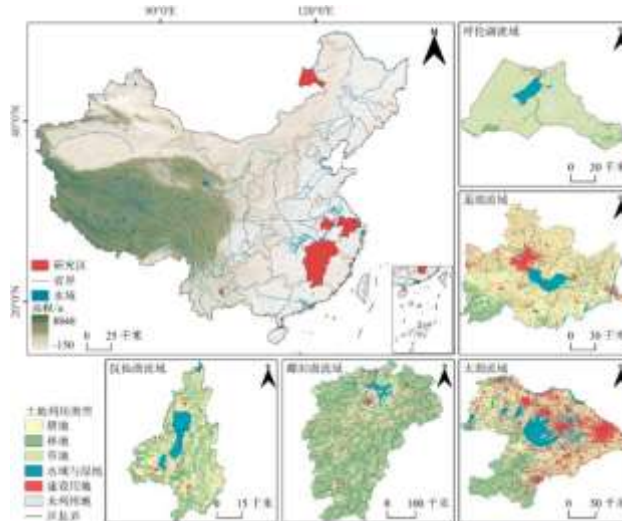


图1 研究区范围

Fig. 1 Scope of the study area

注:此图基于自然资源部地图技术审查中心的标准地图(审图号:GS(2024)0650)绘制,底图边界无修改。

1.2 数据来源

本研究采用的行政区划数据来源为中国国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn/>)。土地利用数据和数字高程数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。气候数据和夜间灯光数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)。归一化植被指数 (NDVI)、归一化差值悬浮泥沙指数 (NDSSI)、归一化干度指数 (NDBSI)、地表温度指数(LST)基于 Google Earth Engine 平台计算获得。以上栅格数据的空间分辨率存在差异,均借助 Python 重采样为 500m。社会经济相关数据来源于各省市县的统计年鉴和统计公报。

1.3 研究方法

1.3.1 生态安全评估框架及核算 结构完整和功能稳定的生态系统是区域生态安全的基础保障,生态安全评价指标体系的建立需要综合考量生态系统的抗风险能力、服务供给能力和健康状态。故本研究基于“风险-健康-服务”框架,借鉴已有研究的指标体系和湖泊流域的环境特征,从生态健康、生态风险和生态系统服务功能三个维度构建生态安全综合评价体系^[29-30]。生态安全评价的计算步骤如下,相关数据均采用极值法进行标准化处理:

(1) 生态安全评估

生态安全指数的计算公式如下^[30]:

$$LESI = \sqrt[3]{EHI \times (1 - ERI) \times ESI} \quad (1)$$

式中, $LESI$ 表示生态安全指数; EHI 表示生态健康指数; ERI 表示生态风险指数; ESI 表示生态系统服务功能指数。

(2) 生态健康指数计算

“活力-组织力-恢复力 (VOR)”模型综合考量了生态系统的结构、功能和抗干扰能力,可以较好的反映区域生态健康水平。本研究在该模型基础上,构建了生态健康评估体系,计算公式如下^[31]:

$$EHI = \sqrt[3]{EV \times EO \times ER} \quad (2)$$

式中, EV 为生态系统活力; EO 为生态系统组织力; ER 为生态系统恢复力; 相应指标的计算方法如表 1 所示。

表 1 生态健康评估指标体系及计算方法

指标	计算方式	公式解释
活力	$EV = NDVI + NDSSI$	$NDVI$ 和 $NDSSI$ 分别表征陆域和水域生态系统活力 ^[32] ,二者经标准化处理后可共同反映研究区整体生态系统活力水平。
组织力	$EO = 0.25 \times SHDI + 0.1 \times AWMPFD + 0.25 \times LFI_1 + 0.1 \times LFI_2 + 0.1 \times LFI_3 + 0.1 \times CTI + 0.05 \times PCI_1 + 0.05 \times PCI_2$	$SHDI$ 为景观多样性指数; $AWMPFD$ 为面积加权平均斑块分形维数; LFI_1 、 LFI_2 、 LFI_3 分别为景观破碎度指数、林地破碎度指数、水域破碎度指数; CTI 为景观蔓延度指数; PCI_1 、 PCI_2 分别为林地和水域的斑块凝聚度指数; 上述指标均借助 Fragstats 软件计算获得 ^[33] 。
恢复力	$ER = 0.6 \times \sum_{i=1} A_i \times RSL_i + 0.4 \times \sum_{i=1} A_i \times RST_i$	A_i 为 i 类景观类型的面积; RSL_i 为 i 类景观类型的恢复力系数; RST_i 为 i 类景观类型的抵抗力系数; 相关系数见表 2 ^[31] 。

表 2 不同景观类型的恢复力系数和抵抗力系数

景观类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
恢复力系数	0.3	0.6	0.8	0.7	0.2	0.4
抵抗力系数	0.5	1.0	0.6	0.8	0.3	0.6

(3) 生态风险指数计算

生态风险是指生态系统在受到外部扰动或潜在威胁时,其结构与功能遭受破坏的可能性。本研究选取景观格局风险、地质灾害风险、洪涝灾害风险、城市扩张、热岛效应、人类活动强度等指标开展生态风险评估(城市扩张采用归一化干度指数表征,热岛效应采用地表温度指数表征,人类活动强度采用夜间灯光

指数表征，其它风险指数计算方式见表 3)。考虑到区域生态风险强度往往由少数几个高暴露度的主导风险因子所驱动，本研究采用主成分分析法提取累积贡献率>90%的前 k 个主成分，通过加权求和构建生态风险指数，计算公式如下：

$$ERI = \sum_{i=1}^k w_i \times Z_i \quad (3)$$

式中， w_i 为根据特征值归一化后得到的第 i 个主成分的权重； Z_i 表示第 i 个主成分得分。

表 3 部分生态风险指标的计算方法

Tab. 3 Resilience and resistance coefficients for different landscape types

指标	计算方式	公式解释
景观格局风险	$LPR = \sum_{i=1}^n \frac{UA_i}{UA_n} \sqrt{LDI_i \times LVI_i}$	LPR 为景观格局风险； UA_i 为第 n 个评价单元中 i 类景观类型的面积； UA_n 为第 n 个评价单元的总面积； LDI_i 为第 i 类景观类型的景观干扰度； LVI_i 为第 i 类景观类型的景观脆弱度（各景观类型的脆弱度赋值如下：建设用地为 1、林地 2、草地 3、耕地 4、水域 5、未利用地为 6，脆弱度指数为上述赋值归一化后的结果） ^[30] 。
地质灾害风险	$TRI = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_c)^2}$	TRI 为地形起伏度指数，用以表征地质灾害风险； Z_c 为中心像元的高程； Z_i 为中心像元周边 8 个像元的高程。
洪涝灾害风险	$FRI = aSN + bSL + cSV$	FRI 为洪涝灾害风险指数； SN 为多年平均暴雨次数； SL 为多年平均暴雨等级； SV 为多年平均暴雨量； a 、 b 、 c 为采用熵值法获得的相应指标权重 ^[34] 。

(4) 生态系统服务功能指数计算

生态系统服务能力的强弱直接体现了生态系统运行状态与安全水平。生态系统服务功能指数的计算公式如下：

$$EFI = aC + bM + cW + dQ \quad (4)$$

式中， C 、 M 、 W 、 Q 分别表示碳储量、土壤保持、水源涵养、生境质量，均利用 Invest 模型获得； a 、 b 、 c 、 d 为利用熵值法确定的四类功能的权重，均为 0.25。

1.3.2 城镇化水平评估框架及核算 城镇化是一个涉及多维度的复杂演化过程，单一指标往往难以切实反映区域城镇化的真实水平，故参照已有研究^[35-36]，构建涵盖人口、经济、空间、社会等维度的城镇化水平评价体系。各指标均利用极值法进行标准化处理，考虑时间尺度上的可比性，采用基于专家打分的层次分析法（AHP）和加入时间变量改进熵值法（CRITIC）^[37]对指标进行主客观赋权，以二者的综合权重作为指标权重，指标选择和权重计算结果见表 4。城镇化水平指数的计算公式如下：

$$ULI = \sum_{i=1}^n U_i \times W_{ij} \quad (5)$$

式中， ULI 为城镇化水平指数； U_i 表示第 i 个指标的值， W_{ij} 该指标对应的综合权重值。

表 4 城镇化水平评估指标体系及权重

Tab. 4 System of indicators and weights for assessing the level of urbanization

准则层	指标	主观权重	客观权重	综合权重
经济城镇化	二三产业占比	0.114	0.008	0.061
	社会零售品	0.158	0.101	0.130
	人均 GDP	0.121	0.089	0.105
人口城镇化	城镇人口占比	0.112	0.031	0.071
	二三产业从业占比	0.025	0.026	0.026
	建成区人口密度	0.031	0.182	0.106
空间城镇化	建成区面积占比	0.165	0.131	0.148
	地均 GDP	0.060	0.169	0.114
	夜间灯光总值/建成区面积	0.127	0.121	0.124
社会城镇化	城镇人均可支配收入	0.043	0.069	0.056
	万人卫生机构床位数	0.023	0.066	0.045
	中小学教育阶段师生比	0.020	0.007	0.013

1.3.3 生态安全-城镇化水平的交互胁迫分析 区域生态安全与城镇化发展之间呈现复杂的交互胁迫机制。

一方面，生态安全为城镇化提供资源保障；另一方面，城镇化是生态安全的主要威胁源。本研究以县域为研究单元，提取各县域生态安全指数的均值，结合县域城镇化指数开展交互胁迫关系分析。为进一步探讨变量的空间特征，通过空间自相关分析检验变量是否存在空间异质性，以此判断开展地理加权回归分析的必要性。在此基础上，利用地理探测器定量识别驱动因子对空间格局的整体解释力，并通过 MGWR 揭示不同因子在不同区域的空间作用差异，二者结合既能识别主要驱动因子，又能展现其空间差异性，从而更全面地解析研究区的空间异质性。具体方法如下：

(1) 耦合协调度模型可以反映生态安全与城镇化水平的发展协调性，进而揭示二者的交互胁迫关系。协调度等级的划分如表 5 所示，耦合协调度计算公式如下：

$$C = \frac{2\sqrt{U_c \times U_e}}{U_c + U_e}, T = \alpha U_c + \beta U_e \quad (6)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (7)$$

式中， C 为耦合度； U_c 、 U_e 分别为城镇化水平指数和生态安全指数； T 表示两个指标的综合协调指数； α 、 β 分别为两个指标的权重，因二者同等重要，故取值均为 0.5； D 表示耦合协调度。

表 5 耦合协调度类型

Tab. 5 Type of coupling coordination degree

耦合协调度 (D)	生态安全与城镇化水平的差值 (C)	耦合协调类型
0 ≤ D ≤ 0.2	C > 0.1	严重失调-城镇化滞后
	-0.1 ≤ C ≤ 0.1	严重失调-同步发展
	C < -0.1	严重失调-生态滞后
0.2 < D ≤ 0.4	C > 0.1	中度失调-城镇化滞后
	-0.1 ≤ C ≤ 0.1	中度失调-同步发展
	C < -0.1	中度失调-生态滞后
0.4 < D ≤ 0.6	C > 0.1	勉强协调-城镇化滞后
	-0.1 ≤ C ≤ 0.1	勉强协调-同步发展
	C < -0.1	勉强协调-生态滞后
0.6 < D ≤ 0.8	C > 0.1	中度协调-城镇化滞后
	-0.1 ≤ C ≤ 0.1	中度协调-同步发展
	C < -0.1	中度协调-生态滞后
0.8 < D ≤ 1	C > 0.1	高度协调-城镇化滞后
	-0.1 ≤ C ≤ 0.1	高度协调-同步发展
	C < -0.1	高度协调-生态滞后

注：C=生态安全指数-城镇化水平指数

(2) 双变量空间自相关可以反映区域内两个变量间的交互作用关系，双变量 Moran's $I > 0$ ，表示空间正相关，反之则为负相关，Moran's I 绝对值越高表示空间自相关越强。

(3) 地理探测器是一种考虑空间异质性的统计学方法，主要用来分析不同自变量对因变量的作用强度，解释因变量空间分异的成因^[38]。

(4) 多尺度地理加权回归模型 (MGWR)^[39] 能够将数据的地理位置信息通过权重嵌入到回归参数中，实现数据的局部空间变化估计，能够刻画多尺度空间效应。相比地理加权回归 (GWR) 可以更加精准地分析生态安全-城镇化水平的交互作用，更准确地揭示空间异质性，具备更高的模型解释力。

2 结果与分析

2.1 湖泊流域生态安全的时空演变特征

湖泊流域是人类生产生活活动的重要空间载体，其生态安全状态与人类活动密切相关。受地理区位与人类活动强度差异的影响，各湖泊流域的生态安全状况上表现出显著差异。如图 2 所示，研究期内，各湖泊流域的生态安全状况演变存在显著的空间异质性，随着生态文明建设的推进，2010 年后，各流域生态安全指数均呈现上升态势。作为长三角地区人口密集、产业发展基础优良的典型区域，太湖流域与巢湖流域生态安全水平低值区分布较广，整体呈现先恶化、后好转的演变特征，其中太湖流域经济高度发达，是研

究区中生态安全指数最低的区域，除西南部丘陵地带相对较好外，其余地区普遍处于较低水平；巢湖流域生态安全指数的高值区主要分布在合肥城区，低值区集中于六安西南部的部分山区。鄱阳湖流域生态安全状况显著好转，生态安全指数低值区主要分布在鄱阳湖平原和流域内的河谷平原，呈现以南昌市为核心向外辐射的空间格局，高值区则主要分布在流域外围的山地丘陵地区。呼伦湖作为草原湖泊，地广人稀，整体生态安全状况相对较好，但受人口集聚和气候变化影响，呼伦湖及其周边生态安全水平相对偏低。抚仙湖作为高原湖泊，其流域生态环境较为脆弱，经过多年治理，生态安全状况虽有好转，但湖区及周边地区生态安全状况仍然较差。

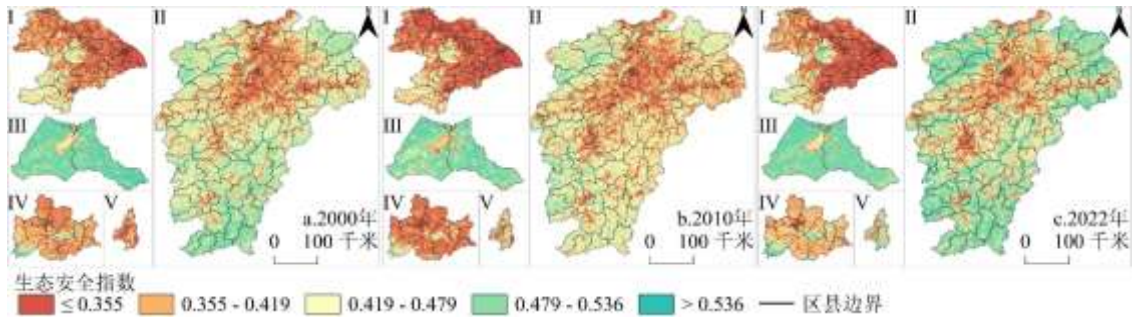


图2 各湖泊流域的生态安全指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecological security indices by lake basins

2.2 湖泊流域城镇化水平的时空演变特征

城镇化是人类活动最为显著的外在表征之一。由于自然环境和发展阶段的差异，不同湖泊流域的城镇化水平呈现出显著的空间差异。如图3所示，2000-2022年，各湖泊流域的城镇化水平整体呈上升趋势，呈现以流域内主要城市为核心向外扩展的空间演变特征。太湖流域城镇化水平显著高于其它流域，城镇化水平高值区由主要集中在核心城市的城区向成带连片转变，低值区范围则持续缩减。鄱阳湖流域整体城镇化水平较低，城镇化水平高值区主要分布在各地市的城区，呈现以南昌市为核心沿平原向外拓展的空间特征，流域东、西、南三面山地的城镇化水平则相对较低。呼伦湖流域地广人稀，人口高度集聚分布在呼伦湖北部的满洲里市和扎赉诺尔区，其它地区城镇化水平相对较低，整体城镇化水平变化平稳。巢湖流域近年来城镇化进程加快，流域内各区县的城镇化水平均得到了显著提升，高值区主要分布在合肥城区和芜湖鸠江区。抚仙湖流域由于地理环境限制，不利于城市扩张和产业集聚，城镇化率常年处于较低水平。

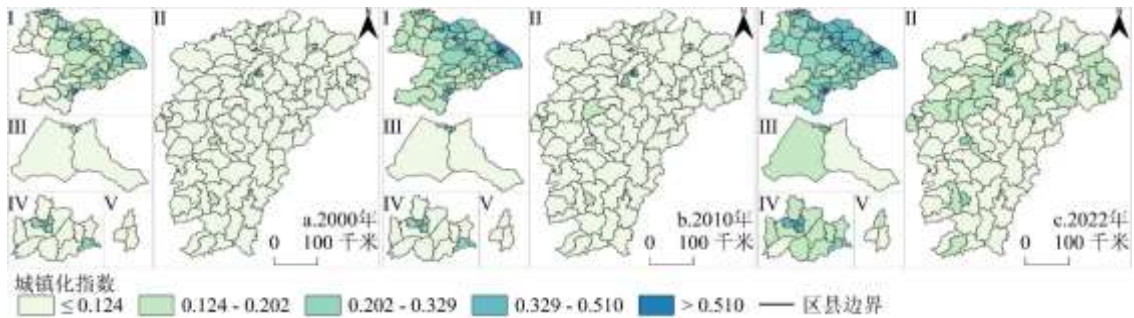


图3 各湖泊流域的城镇化指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of urbanization indices by lake basins

2.3 生态安全-城镇化水平交互胁迫关系

2.3.1 生态安全-城镇化水平耦合协调的时空演变分析 湖泊流域生态安全-城镇化水平耦合协调度

分析表明，流域间和流域内部存在较大的空间异质性（图4），具体如下：

太湖流域生态安全-城镇化水平中度协调区域呈先增后减的时序特征，呈现以上海、苏州、无锡、杭州等核心城市的生态良好城区为中心向外扩展空间演化特征，其中城镇化滞后区域数量稳定并呈西移趋势，生态滞后区域基本消失，同步发展区域增多且主要分布在苏南和浙北部分经济较发达的区县。勉强协调区域分布最广，生态安全滞后区域和同步发展区域集中在以上海为中心的流域东部，城镇化滞后区域集中分布于流域西部。中度失调和严重失调区域均为生态滞后性，主要分布于上海市中心城区。由于城镇化扩张速度与生态系统承载力存在错配，再叠加产业结构、空间外溢效应及治理能力差异，导致部分区域短期内生态安全水平难以与城镇化保持同步，耦合协调水平出现阶段性下滑。

鄱阳湖流域生态环境基底较优越，但流域内各区县城镇化水平相对滞后，二者发展存在一定脱节，该流域除南昌市部分中心城区为同步发展和生态滞后型外，其余区域普遍为城镇化水平滞后型。研究期内，该流域生态安全-城镇化水平耦合协调度由以勉强协调-城镇化滞后、中度失调-城镇化滞后两种类型均等分布转为以勉强协调-城镇化滞后为主，失调类型区域逐步消失，中度协调-城镇化滞后类型的区县数量逐步增加，表明该流域城镇化的推进，在一定程度上缩小了与生态系统适应能力间的差距。

巢湖流域是中部地区重要的增长级，研究期内，流域内基础设施和公共服务水平均得到快速提升，产业规模持续扩大，特别是安徽纳入长三角一体化发展战略后，流域城镇化进程显著加快。同时，为适应生态文明建设需要，巢湖流域生态治理投入持续加大，生态环境明显好转。受此影响，该流域生态安全-城镇化水平的耦合协调度提升显著，中度失调区域均逐步转换为勉强协调或中度协调类型，但城镇化滞后类型仍为主导类型，表明该流域在生态环境质量持续改善的基础上，仍需强化生态约束下的城镇化路径探索。

与其它流域相比，呼伦湖和抚仙湖流域在生态系统类型与城镇化发展路径方面具有显著的特殊性。呼伦湖流域的生态系统以草原和湿地为主，生态环境脆弱，流域内人类活动强度小且高度集聚于城镇和牧业聚落，近年来人口外流现象突出，使得该流域的生态安全-城镇化水平的耦合协调度总体上保持相对稳定，仅新巴尔虎左旗转为严重失调-城镇化滞后类型。抚仙湖流域是典型的高原湖泊生态系统，生态环境承载力有限且极易受到污染物累积效应影响，随着新型城镇化建设和旅游业的发展，流域内各区县的城镇化水平得到了不同程度的提升，但仍均为城镇化滞后类型。

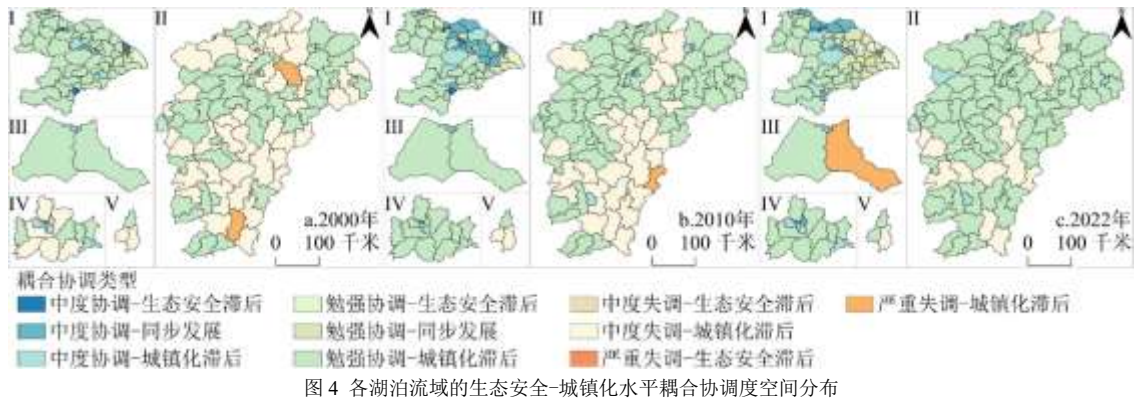


Fig. 4 Spatial distribution of the coupled ecological security-urbanization level coordination degree in each lake basin

2.3.2 生态安全与城镇化水平双变量空间自相关分析 为深入探讨生态安全与城镇化水平之间的交互胁迫关系，借助 GeoDa 进行双变量全局自相关分析。结果如表 6 所示，研究期内，生态安全与城镇化水平均有较强的空间异质性，且二者呈现愈发强烈的负相关关系，表明区域城镇化水平的提升往往伴随着生态安全水平的下降，反之，较低的生态安全水平也会对城镇化可持续发展形成制约。这一结果表明生态安全-城镇化水平间存在交互胁迫、双向反馈的作用机制，与既有认知及前人研究结论基本一致^[40,41]，也突显出在区域发展过程中统筹生态保护与城市扩张的必要性。

表 6 生态安全与城镇化水平双变量空间自相关分析结果

Tab. 6 Results of bivariate spatial autocorrelation analysis of ecological security and urbanization level

年份	Moran's <i>I</i>	<i>P</i>	Z-score
2000 年	-0.647	0.001	-15.220
2010 年	-0.722	0.001	-16.429
2022 年	-0.731	0.001	-16.438

2.3.3 生态安全与城镇化水平的交互影响分析 为明晰各流域内部生态安全-城镇化水平交互影响的空间差异,本研究分别以生态安全和城镇化水平为因变量,引入其对应的子系统作为自变量,开展双向影响分析。利用 SPSS 软件对选择的影响因子进行共线性检验,结果显示所有影响因子的方差膨胀因子(VIF)均小于 10(表 7)。首先借助 R 语言中的 GeoDetector 算法包^[42],利用地理探测器分析上述因子对城镇化水平的作用程度。结果显示(表 7):生态安全子系统对城镇化水平的影响方面,生态健康(E_1)和生态系统服务功能(E_3)始终对城镇化水平的空间分异具有强解释力,生态风险(E_2)的解释力在 2022 年大幅下降,可能的原因为生态治理成效显著,区域间生态风险趋于收敛。城镇化水平子系统对生态安全的影响方面,各因素对生态安全空间分异的解释力整体呈上升趋势,空间城镇化(U_3)始终是最主要的驱动力,人口城镇化(U_1)和社会城镇化(U_4)的影响力持续增强,反映人口迁移和公共服务等非物质性城镇化过程成为影响生态安全变化的重要因素,经济城镇化(U_2)虽依然重要,但影响力渐趋平稳,原因在于随着快速城镇化向高质量城镇化的转变,影响生态安全空间分异的主导机制也从空间开发逐步转向人口、社会与空间等多因素共同驱动。引入 MGWR 模型探究上述三个自变量的作用方向和作用强度的空间差异,如表 8 所示, MGWR 模型的 AICc 小于 GWR 模型,调整后 R^2 高于 GWR 模型,可判定 MGWR 模型的拟合效果优于 GWR 模型。不同子系统对生态安全、城镇化水平的影响分析如下:

表 7 生态安全-城镇化水平交互作用的地理探测结果

Tab. 7 Geodetection results of the ecological security-urbanization level interaction

影响类型	Indicators	<i>q</i> -value			VIF		
		2000	2010	2022	2000	2010	2022
生态安全子系统对城镇化水平的影响	生态健康(E_1)	0.731***	0.751***	0.792***	5.588	5.870	7.956
	生态风险(E_2)	0.365***	0.381***	0.144**	1.768	2.303	1.230
	生态系统服务功能(E_3)	0.706***	0.802***	0.788***	7.133	8.620	8.383
城镇化水平子系统对生态安全的影响	人口城镇化(U_1)	0.513***	0.613***	0.670***	4.061	5.686	8.374
	经济城镇化(U_2)	0.432***	0.585***	0.576**	1.871	3.056	3.223
	空间城镇化(U_3)	0.741***	0.794***	0.800***	4.023	7.646	9.470
	社会城镇化(U_4)	0.336***	0.583***	0.693***	1.363	3.867	4.592

表 8 MGWR 拟合结果

Tab. 8 MGWR fitting results

影响类型	年份	模型	残差平方和	AICc	R^2	调整后的 R^2	带宽
生态安全子系统对城镇化水平的影响	2000	GWR	46.628	296.327	0.748	0.732	120
		MGWR	33.016	254.941	0.822	0.799	43-184
	2010	GWR	19.202	182.402	0.896	0.876	49
		MGWR	18.135	158.158	0.902	0.886	43-67
	2022	GWR	22.216	207.207	0.880	0.857	49
		MGWR	22.280	198.458	0.880	0.859	43-71
城镇化水平子系统对生态安全的影响	2000	GWR	13.970	152.476	0.924	0.904	51
		MGWR	11.516	89.624	0.938	0.925	43-184
	2010	GWR	8.934	73.911	0.952	0.938	51
		MGWR	8.801	40.628	0.952	0.943	43-1848
	2022	GWR	10.723	110.177	0.942	0.925	51
		MGWR	9.783	50.478	0.947	0.938	43-184

(1) 生态安全子系统对城镇化水平的影响分析

生态健康指数(E_1)整体对各流域区县城镇化水平为负向影响,呈现出一定的空间排斥效应;对太湖、呼伦湖和巢湖等流域的负向影响逐年减弱,主要在于上述流域城镇化水平逐步提升至较高水平,城镇扩张趋向稳定,生态约束效应逐步减弱;对鄱阳湖和抚仙湖等流域负向影响逐年加强,表明在生态敏感区,城

城镇化是生态压力的重要来源。生态风险(E_2)对各流域区县城镇化水平的影响以正向为主,表明城镇扩张与生态破坏长期共存;对太湖流域、巢湖流域和鄱阳湖流域的环鄱阳湖地区的作用力逐步减弱,在部分生态治理成效显著的区域转为负向影响;对呼伦湖和抚仙湖流域的正向作用逐渐增强,原因在于上述流域的生态脆弱,易受人类活动干扰;鄱阳湖流域除北部环鄱阳湖区县外,生态风险的作用力呈先增强后减弱的趋势,反映了生态治理成效的阶段性与城镇扩张之间的动态博弈。生态系统服务功能(E_3)对各流域区县城镇化水平的影响以负向为主,除太湖流域北部和东部、巢湖流域东部部分区县负向作用较稳定外,其它区域均呈减弱趋势,且鄱阳湖流域大部分地区逐步转为正向影响,反映出生态系统服务与城镇化水平逐步从冲突转向协同。

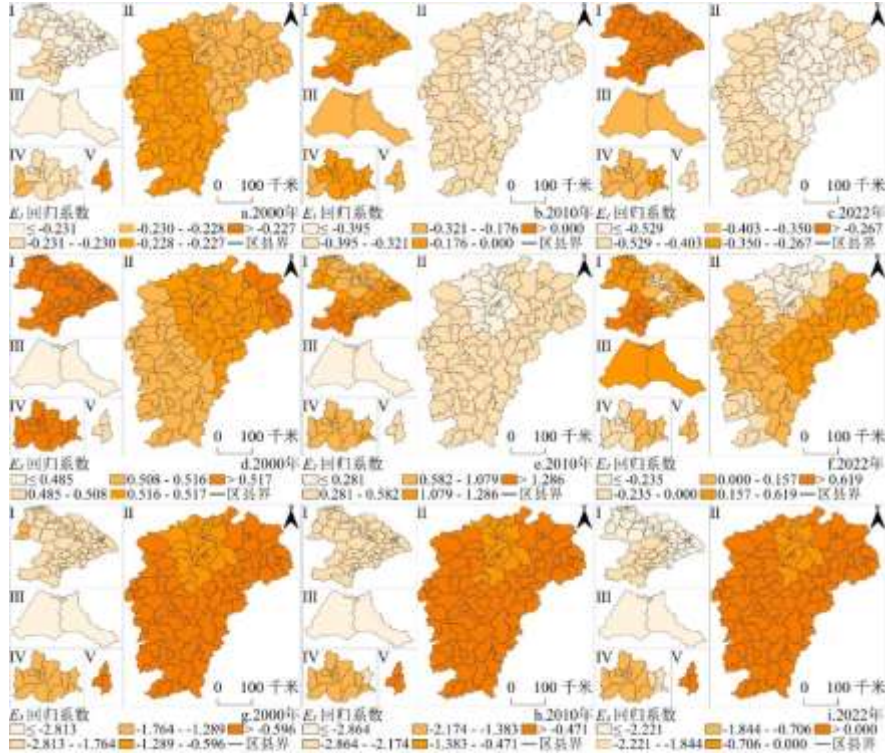


图5 各湖泊流域生态安全子系统对城镇化水平影响的空间分异

Fig. 5 Spatial differentiation of the impact of urbanization level on the ecological security subsystems in lake basins

(2) 城镇化水平子系统对生态安全的影响分析

人口城镇化(U_1)对各流域生态安全均为负向影响,呈先增强后减弱的趋势,且不同流域不同区县间差距较小,受其影响较小的区域主要集中在太湖流域、巢湖流域和呼伦湖流域等部分城镇化率较高的区域,受该因素影响较大的区域主要集中在抚仙湖流域和鄱阳湖流域南部生态环境优良的区域。

经济城镇化(U_2)对各流域生态安全影响以负向影响为主,呈先增强后减弱的趋势,空间格局从显著的空间异质性向空间均质化演变。对太湖、巢湖、呼伦湖和鄱阳湖流域东北部等快速城镇化地区的影响由正向趋于中性,原因在于随着城镇化的推进和对生态治理的重视,区域发展经历了从产业集聚正向效应弱化、生态扰动加剧,向经济城镇化对生态安全的正负作用相抵消转变。鄱阳湖流域的大部分地区和抚仙湖流域则由于生态环境治理成效显著,生态与经济发展趋向平衡。

空间城镇化(U_3)对各流域生态安全的负向影响同样呈现先增后降的趋势,这与早期城镇扩张和近年来国土空间管控密切相关。太湖流域、巢湖流域和鄱阳湖流域的环湖地区等城镇化水平较高的区域因城镇化起步早、开发基底好,城镇扩张的生态扰动有限,负向影响较弱。鄱阳湖流域其余地区和抚仙湖流域由于城镇化的快速推进,城镇空间扩张对生态安全的负向影响加剧。呼伦湖流域生态脆弱,城镇空间扩张对

生态安全的负向影响最为显著，近年来，由于流域人口外流和国土空间管控，空间城镇化的负向影响显著减弱。

社会城镇化 (U_4) 对各流域生态安全的影响整体呈正负效应交织、空间分异显著的特征。太湖流域早期因人口集聚超出了公共服务的承载力，生态压力加剧，表现为负向影响，随着公共服务体系逐步完善，居民环保意识和地方治理能力显著提升，社会城镇化的影响转为正向。巢湖流域与太湖流域类似，但演化进程略滞后，西部区县多以负向影响为主。鄱阳湖、呼伦湖和抚仙湖流域由于人口集聚和社会功能的扩张，区域生态承载力超负荷，社会城镇化的影响由正转负。

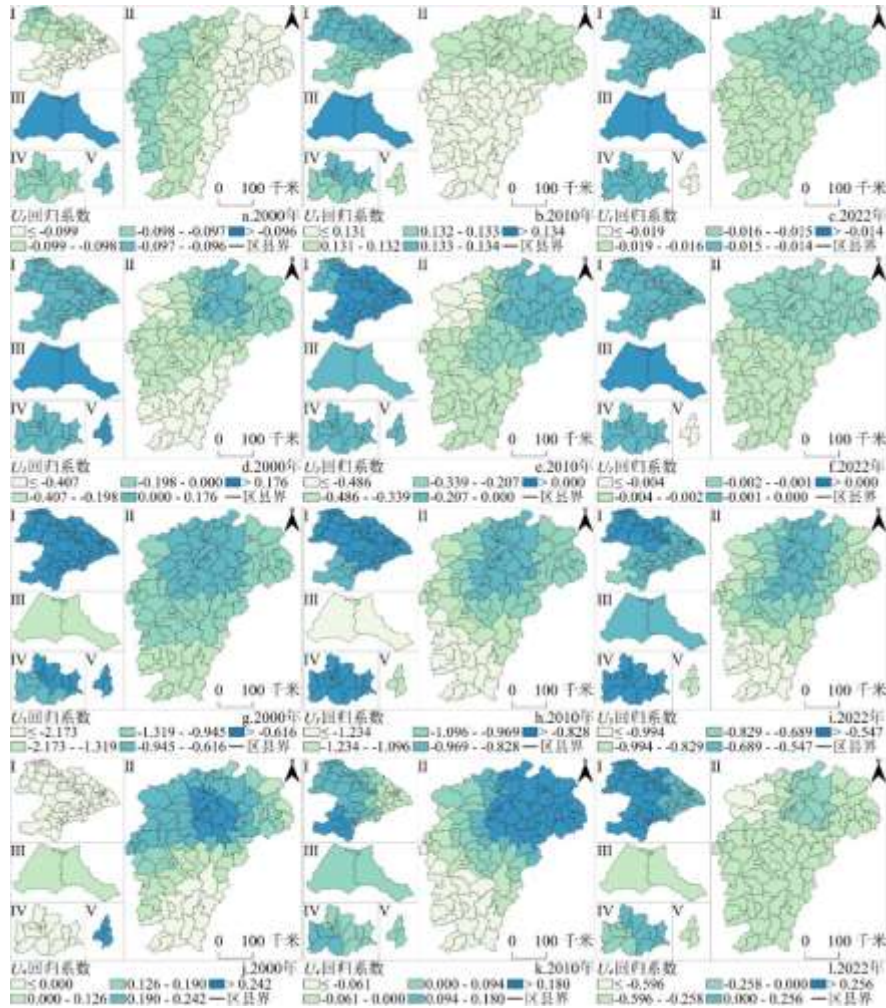


图6 各湖泊流域城镇化水平子系统对生态安全影响的空间分异

Fig. 6 Spatial differentiation of the impact of urbanisation level subsystems on ecological security across lake basins

(3) 生态安全与城镇化水平交互影响概述

不同流域生态安全与城镇化水平的交互影响呈差异化的演化特征，是生态基础条件、城镇化发展阶段及治理措施共同作用的结果。在较发达的流域，随着城镇扩张趋于稳定及生态治理成效显现，生态系统对城镇化的约束逐步减弱，呈现出生态与城镇化相对协同发展的态势；而生态优良且城镇化滞后的流域，由于生态承载力较强，生态系统对城镇化形成制约，城镇扩张受生态约束效应主导；生态脆弱且城镇化水平低的流域，则表现为城镇化压力与生态脆弱性叠加的双向胁迫格局。在这一过程中，生态治理与空间管控措施对缓解生态压力、调节城镇化扩张起到关键作用，体现出区域发展与生态安全之间的动态博弈关系。

3 讨论与结论

3.1 结论

(1) 各湖泊流域在生态安全和城镇化水平上呈现出明显的空间异质性。生态安全方面,研究期内,各流域生态安全状况均得到不同程度好转。太湖和巢湖流域生态安全状况相对欠佳;鄱阳湖流域外围的丘陵山地区域生态安全提升显著;呼伦湖和抚仙湖流域整体生态状况较好,但湖区及周边人口密集的区域较脆弱,需持续治理。城镇化方面,各流域普遍以核心城市为中心向外扩展。太湖流域城镇化水平最高,呈由点状集聚向连片发展的特征;巢湖流域的发展模式与太湖前期相似,正处于快速发展阶段;鄱阳湖流域城镇化高值区集中分布于鄱阳湖区周围的平原河谷及各地级市城区;呼伦湖和抚仙湖流域则受自然地理条件制约,整体水平较低,发展相对平稳。

(2) 不同流域在生态环境和城镇化的互动过程中所承受的胁迫强度各异,呈现出差异化的耦合协调演化模式。太湖流域城镇化水平高、发展快,对生态系统形成强胁迫,生态响应滞后使部分地区协调水平下滑;鄱阳湖流域生态基础较好,但城镇化进程相对滞后,城镇扩张对生态系统的胁迫较弱,协调关系逐步改善;巢湖流域在快速城镇化背景下同步推进生态治理,协调度提升明显,但仍以城镇化滞后型为主;呼伦湖和抚仙湖流域因生态脆弱、城镇化指数较低,城镇发展对生态胁迫相对较小,耦合协调关系整体稳定,但面临生态承载力有限与发展需求增长的双重挑战。不同流域在生态安全-城镇化水平互动中所承受和施加的胁迫强度不同,反映出自然条件与发展阶段共同塑造的区域差异性。

(3) 不同流域因自然禀赋、发展阶段与治理能力等因素的差异,生态安全-城镇化水平呈现出差异化的交互胁迫作用和演化特征。太湖和巢湖流域等城镇化水平较高的区域,随着生态治理投入的增加,生态安全对城镇化的负向作用逐渐减弱,空间开发管控与社会治理能力日益成为提升生态安全的关键因素,二者表现出高开发-高协调的演化特征。鄱阳湖和抚仙湖流域作为城镇化的后发地区,生态安全对城镇化具有一定的制约作用,呈现出强生态-弱城镇的胁迫格局。呼伦湖流域生态脆弱,生态条件限制了城镇扩张,城镇化发展又加剧了生态安全压力,表现出高脆弱-低密度的协调发展特征。

3.2 讨论

(1) 不同湖泊流域生态安全-城镇化水平的交互胁迫过程既有共性也有差异性。一方面,生态安全对城镇化具有制约作用,城镇化推进造成的环境破坏同样制约生态安全,这一双向负效应与以城市群或行政单元为研究区的相关研究结论一致^[23-25],在各湖泊流域中也普遍存在。另一方面,不同湖泊流域因发展阶段与生态基底差异,生态安全-城镇化的交互胁迫程度、作用路径呈现差异化特征,较发达区域和生态脆弱区域的突出矛盾在于城镇化对生态系统的负向冲击^[20, 37],而欠发达地区及生态条件较好的区域则更多面临如何在保持生态本底优势的同时稳步推进城镇化的发展挑战^[2, 23],这在一定程度上验证了以往研究的结论,但不同之处在于,湖泊流域作为以湖泊为中心的高度完整且连通的自然单元,其生态安全与城镇化的交互关系呈现更为突出的中心压力集中、外围承载能力相对充裕的空间分异特征。

(2) 湖泊流域间差异化的生态安全-城镇化水平交互胁迫关系使得湖泊流域在推进二者协调发展过程中要注重因地制宜。既有研究表明,不同江河流域的生态安全-城镇化间的交互作用存在空间异质性^[28, 44],本研究的对比分析进一步证明湖泊流域同样呈现类似特征,生态安全与城镇化的协调发展必须立足区域特征,实施差异化管控与治理。太湖流域城镇化水平高、产业密集,尽管通过生态治理和产业转型改善了流域生态环境,但仍难以与城镇化实现协调发展,未来要依托国土空间规划,强化空间管控,推进跨行政区的流域系统治理,健全生态价值转化机制^[43],率先探索现代化人民城市建设路径。巢湖流域自纳入长三角一体化后,城镇化进程加快,生态环境压力加大,未来要注重空间分区管控,着力避免生态脆弱区过度城镇化。鄱阳湖流域生态基底好、生态价值高,流域城镇化的推进要紧扣生态与经济和谐共进准则,探索生态价值转化路径,实现城镇扩张与生态保护的共赢。呼伦湖流域应高度重视草原生态系统保护,在尊重自然本底基础上,推进城镇化有序发展。抚仙湖流域需持续关注面源污染,提示治理水平,防范产业扩张对生态系统带来的潜在冲击,探索构建人与自然和谐共生的城湖融合发展新路径。

(3) 生态安全-城镇化水平交互胁迫关系的定量分析仍处于初级阶段,现有方法虽可反映不同流域二

者交互作用的空间分异及基本作用机制,但受数据可获得性限制,本文选取的指标仍具有较强普适性,难以充分揭示湖泊流域生态安全-城镇化水平交互胁迫的内在逻辑与深层驱动机制。下一步研究亟需融入湖泊监测数据和经济社会大数据,突出湖泊特征,结合机器学习、系统动力学等先进模型方法,提高研究精度和解释力。

4 参考文献

- [1] Zhang GL, Gu XH, Zhao T, *et al.* Ecological and Environmental Changes and Protection Measures of Lakes in China. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(3), 358-364. [张甘霖, 谷孝鸿, 赵涛, 等. 中国湖泊生态环境变化与保护对策. 中国科学院院刊, 2023, **38**(03): 358-64.]
- [2] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW, *et al.* Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(30), 3503-3519. [张运林, 秦伯强, 朱广伟, 等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题. 科学通报, 2022, **67**(30): 3503-19.]
- [3] Jin XC, Wang SR, Xi HY. Lake Ecological Security and Assessment Methodology Framework. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(4), 357-362. [金相灿, 王圣瑞, 席海燕. 湖泊生态安全及其评估方法框架. 环境科学研究, 2012, **25**(04): 357-62.]
- [4] Luo J, Xia J, Hao FH, *et al.* Theoretical thinking and practical development on coordination and high-quality governance of human activity space in river basins in China. *Journal of Natural Resources*, 2024, **39**(11), 2505-2524. [罗静, 夏军, 郝芳华, 等. 中国流域人类活动空间协同与高水平治理的理论思考与实践发展. 自然资源学报, 2024, **39**(11): 2505-24.]
- [5] Wang F, Wang SY, Prominski M. Water-related urbanization and locality: Protection and utilization of water environment as well as planning and design of water space in a sustainable perspective. *Geographical Research*, 2018, **37**(12), 2576-2584. [汪芳, 王舜奕, Martin P. 城镇化与地方性中的水资源: 可持续视角的水环境保护利用与水空间规划设计. 地理研究, 2018, **37**(12): 2576-84.]
- [6] Tao SL, Fang JY, Ma SH, *et al.* Changes in China's lakes: climate and human impacts. *National Science Review*, 2020, **7**(1): 132-40. DOI:10.1093/nsr/nwz103.
- [7] Wang R, Zhang K, Liu JB, *et al.* The importance of lake ecosystem evolution for anthropocene research. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(2), 333-338. DOI:10.18307/2024.0200. [王荣, 张科, 刘建宝, 等. 湖泊流域生态系统演化对人类世研究的重要意义. 湖泊科学, 2024, **36**(02), 333-338.]
- [8] Wang ZX. Legal System Response to Natural Ecological Space Use Control. *China Land Science*, 2020, **34**(3), 9-15. [王志鑫. 自然生态空间用途管制的法律制度应对. 中国土地科学, 2020, **34**(03): 9-15.]
- [9] Liu CL, Li WL, Xu J, *et al.* Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis. *Ecological Indicators*, 2022, **137**. DOI:10.1016/j.ecolind.2022.108734.
- [10] Zhang T, Huang XY, Li P, *et al.* Basic theories and construction layout of eco-economic pivotal zones in northwest China based on "ThreeWater Lines" strategy. *Acta Geographica Sinica*, 2022, **77**(9), 2154-2173. [张甜, 黄晓燕, 李鹏, 等. 西北“水三线”地区生态经济枢纽区基本理论与建设布局. 地理学报, 2022, **77**(09): 2154-73.]
- [11] Zhang JY, Qiao XN, Yang YJ, *et al.* Ecological security driving mechanisms and optimization of zoning in Chinese urban agglomerations: A case study of the central plains urban agglomeration. *Ecological Indicators*, 2025, **171**. DOI:10.1016/j.ecolind.2025.113190.
- [12] Tang YS, Zhao XY, Jiao JL. Ecological security assessment of Chaohu Lake Basin of China in the context of River Chief System reform. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(3): 2773-85. DOI:10.1007/s11356-019-07241-0.
- [13] Wang WQ, Zhou LZ, Chen W, *et al.* Evaluation of conservation effectiveness of Lake Shengjin, lower reaches of the Yangtze River, 1989-2019. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(3), 905-921. DOI:10.18307/2021.0324. [王维晴, 周立志, 陈薇, 等. 长江下游升金湖湿地保护有效性评价(1989-2019年). 湖泊科学, 2021, **33**(03), 905-921.]
- [14] Liu CL, Li WL, Xu J, *et al.* Temporal and spatial variations of ecological security on the northeastern Tibetan Plateau integrating ecosystem health-risk-services framework. *Ecological Indicators*, 2024, **158**. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.111365.

- [15] Wu SG, Tian CH, Li BL, et al. Ecological environment health assessment of lake water ecosystem system based on simulated annealing-projection pursuit: A case study of plateau lake. *Sustainable Cities and Society*, 2022, **86**. DOI:10.1016/j.scs.2022.104131.
- [16] Sun K, He WB, Shen YF, et al. Ecological security evaluation and early warning in the water source area of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project. *Science of the Total Environment*, 2023, **868**. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.161561.
- [17] Ying LX, Kong LQ, Xiao Y, et al. The research progress and prospect of ecological security and its assessing approaches. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(5), 1679-1692. [应凌霄, 孔令桥, 肖焱, 等. 生态安全及其评价方法研究进展. 生态学报, 2022, **42**(05): 1679-92.]
- [18] Wilkins DA. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*, 1999, **14**(2): 69-69. DOI:10.1016/s0169-5347(98)01526-2.
- [19] Zhu Q, Cai YL. Assessment framework and simulation prediction for ecological security based on "risk-health-services": A case study of the Huaihe River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2024, **39**(11), 2676-2690. [朱青, 蔡永立. 基于“风险—健康—服务”的生态安全评价框架构建及模拟预测——以淮河流域为例. 自然资源学报, 2024, **39**(11): 2676-90.]
- [20] Fang CL. Dissipative structure theory and geography system. *Arid Land Geography*, 1989, **12**(3): 51-56. [方创琳. 耗散结构理论与地理系统论. 干旱区地理, 1989, **12**(3): 51-56.]
- [21] Fang CL, Wang J. A Theoretical Analysis of Interactive Coercing Effects Between Urbanization and Eco-environment. *Chinese Geographical Science*, 2013, **23**(2), 147-162. DOI:10.1007/s11769-013-0602-2.
- [22] Wang SJ, Cui ZT, Lin JJ, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(4), 973-991. [王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. 地理学报, 2021, **76**(04): 973-91.]
- [23] Fang CL, Zhou CH, Gu CL, et al. Theoretical analysis of interactive coupled effects between urbanization and eco-environment in mega-urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(4), 531-550. [方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. 地理学报, 2016, **71**(04): 531-50.]
- [24] Du FY, Chen SL, Pu JH. Spatiotemporal Coupling Analysis of Urbanization and Ecosystem Services in Southeastern Fujian. *Environmental Science*, 2024, **45**(7), 4152-4163. DOI:10.13227/j.hjlx.202308118. [杜峯屹, 陈松林, 蒲佳豪. 闽东南地区城镇化与生态系统服务的时空耦合分析. 环境科学, 2024, **45**(07): 4152-63.]
- [25] Li C, Wu YM, Gao BP, et al. Local and tele-coupling coordination of urbanization and ecosystem health in the central yunnan urban agglomeration. *Economic Geography*, 2025, **45**(04), 157-167. [李琛, 吴映梅, 高彬斌, 等. 滇中城市群城镇化水平与生态系统健康的近远程耦合协调. 经济地理, 2025, **45**(04): 157-167.]
- [26] Tang L, Hu XJ, Luo ZW, et al. Spatiotemporal coupling of ecological vulnerability and urbanization level and their interactive influencing factors:a case study of Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(11), 4662-4677. [汤良, 胡希军, 罗紫薇, 等. 生态脆弱性与城镇化水平时空耦合及其交互影响因素——以湖南省为例. 生态学报, 2024, **44**(11): 4662-77.]
- [27] Liu SK, Qin XH, Lu RC, et al. Dynamic Interactive Responses of Urbanization and Ecosystem Health in Land Border Areas in China. *China Land Science*, 2024, **38**(9), 122-134. [刘少坤, 覃雪华, 陆汝成, 等. 中国陆地边境地区城镇化与生态系统健康的动态交互响应. 中国土地科学, 2024, **38**(09): 122-34.]
- [28] Liu HL, Wang GY, Zhang PH, et al. Spatio-temporal evolution and coordination influence of coupling coordination between new urbanization and ecological resilience in Fenhe River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2024, **39**(3), 640-667. [刘海龙, 王改艳, 张鹏航, 等. 汾河流域新型城镇化与生态韧性耦合协调时空演变及协调影响力研究. 自然资源学报, 2024, **39**(03): 640-667.]
- [29] Zhu Q, Cai YL. Integrating ecological risk, ecosystem health, and ecosystem services for assessing regional ecological security and its driving factors: Insights from a large river basin in China. *Ecological Indicators*, 2023, **155**. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.110954.
- [30] Li WJ, Kang JW, Wang Y. Spatiotemporal changes and driving forces of ecological security in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration, China: Quantification using health-services-risk framework. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **389**.

DOI:10.1016/j.jclepro.2023.136135.

- [31] Xie X, Fang B, Xu HZY, *et al.* Study on the coordinated relationship between Urban Land use efficiency and ecosystem health in China. *Land Use Policy*, 2021, **102**: 105235. DOI:10.1016/j.landusepol.2020.105235.
- [32] Sankaran R, AL-Khayat JA, Aravinth J, *et al.* Retrieval of suspended sediment concentration (SSC) in the Arabian Gulf water of arid region by Sentinel-2 data. *Science of the Total Environment*, 2023, **904**. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.166875.
- [33] Chen WX, Gu TC, Zeng J. Urbanisation and ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River urban agglomerations, China: A U-curve relationship. *Journal of Environmental Management*, 2022, **318**. DOI:10.1016/j.jenvman.2022.115565.
- [34] Li Y, Gong SY, Zhang ZR, *et al.* Vulnerability evaluation of rainstorm disaster based on ESA conceptual framework: A case study of Liaoning province, China. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **64**. DOI:10.1016/j.scs.2020.102540.
- [35] Zhou C, Zheng X, Yang Q. Coevolution of new urbanization and rural revitalization and its citizenization effect. *Geographical Research*, 2024, **43**(12), 3265-3288. [周闯, 郑旭刚, 杨苒菲. 新型城镇化与乡村振兴的共同演化及其市民化效应. 地理研究, 2024, **43**(12): 3265-88.]
- [36] Bian X, Chen HY, Cao GZ. Patterns of regional urbanization and its implications: An empirical study of the Yangtze River Delta region. *Geographical Research*, 2013, **32**(12), 2281-2291. [边雪, 陈昊宇, 曹广忠. 基于人口、产业和用地结构关系的城镇化模式类型及演进特征——以长三角地区为例. 地理研究, 2013, **32**(12): 2281-91.]
- [37] Yang L, Sun ZC. The development of western new-type urbanization level evaluation based on entropy method. *Economic Problems*, 2015, (03): 115-119. DOI:10.16011/j.cnki.jjw.2015.03.023. [杨丽, 孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评. 经济问题, 2015, (03): 115-9.]
- [38] Wang JF, Xu CD. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1), 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望. 地理学报, 2017, **72**(01): 116-34.]
- [39] Fotheringham AS, Yang WB, Kang W. Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR). *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, **107**(6): 1247-65. DOI:10.1080/24694452.2017.1352480
- [40] Zheng HL, Zheng HF. Spatiotemporal coupling of ecological vulnerability and urbanization level and their interactive influencing factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Environmental Science*: 1-23. DOI: 10.13227/j.hjxx.202410113. [郑慧玲, 郑辉峰. 粤港澳大湾区生态脆弱性与城镇化水平时空耦合及其交互影响因素. 环境科学: 1-23.]
- [41] Luo JQ, Zhang ZN, Zhang PL, *et al.* Coupling of urbanization and eco-environmental quality in the evolution of human-environment relationships in China's metropolitan regions. *Resources Science*, **47**(2), 281-293. [骆军强, 张子宁, 张培蕾, 等. 中国都市圈人地关系演变中的城镇化与生态环境质量耦合. 资源科学, 2025, **47**(02): 281-93.]
- [42] Song YZ, Wang JF, Ge Y, *et al.* An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *Giscience & Remote Sensing*, 2020, **57**(5): 593-610. DOI:10.1080/15481603.2020.1760434
- [43] Chen W, Liu W, Sun W. Taihu Lake and integrated development of Yangtze River Delta region: Status, challenges and countermeasures. *Journal of Lake Sciences*. 2021, **33**(02): 327-335. DOI: 10.18307/2021.0201. [陈雯, 刘伟, 孙伟. 太湖与长三角区域一体化发展: 地位、挑战与对策. 湖泊科学. 2021, **33**(02): 327-335.]
- [44] Zhao JJ, Liu Y, Zhu YK, *et al.* Spatiotemporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin. *Resources Science*, 2020, **42**(1): 159-171. DOI: 10.18402/resci.2020.01.16. [赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素. 资源科学, 2020, **42**(1): 159-171.]