

DOI: 10.20103/j.stxb.202301280140

杨立言, 陈万旭, 曾杰, 王官政, 原晋涛. 长江流域城镇化对生境质量的影响梯度差异研究. 生态学报, 2024, 44(10): 4038-4050.

Yang L Y, Chen W X, Zeng J, Wang G Z, Yuan J T. Gradient differences of the impact of urbanization on habitat quality in the Yangtze River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4038-4050.

# 长江流域城镇化对生境质量的影响梯度差异研究

杨立言, 陈万旭\*, 曾杰, 王官政, 原晋涛

中国地质大学(武汉)区域生态过程与环境演变湖北省重点实验室, 武汉 430074

**摘要:** 作为我国最大的流域, 长江流域城镇化对生境质量的影响呈现出明显的沿江梯度差异。揭示城镇化对生境质量影响的梯度差异对长江大保护以及生境修复差异化管控措施的制定具有重要意义。然而, 城镇化对生境质量影响的沿江梯度差异规律仍然不清楚。基于此, 沿长江建立了三个缓冲梯度, 并基于多源数据, 借助一系列动态分布和空间回归分析方法分析了 2000 年、2010 年和 2020 年城镇化对生境质量影响的梯度差异规律。结果表明: (1) 长江流域的生境质量沿缓冲梯度先减少后增加, 且在不同梯度区间内均随时间发生恶化, 而城镇化水平沿缓冲梯度不断降低, 但在不同梯度区间随时间发生了剧烈增长; (2) 不同梯度区间生境质量的区域内差异以及区域间差异均不断增加, 超变密度是区域差异的主要来源, 且不同梯度区间生境质量的转移趋势也具有较大差异; (3) 城镇化水平与生境质量以负相关为主, 且城镇化对生境质量的负向影响沿着缓冲梯度不断增强, 但随时间均有所减弱。针对长江流域地区的生境治理, 应当充分考虑生境质量及其影响因素的梯度差异, 以支持差异化生境保护政策与措施的制定与实施。

**关键词:** 生境质量; 城镇化; 梯度差异; 空间分析; 动态分布; 长江流域

## Gradient differences of the impact of urbanization on habitat quality in the Yangtze River Basin

YANG Liyan, CHEN Wanxu\*, ZENG Jie, WANG Guanzheng, YUAN Jintao

Hubei Key Laboratory of Regional Ecology and Environmental Change, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** As the biggest basin in China, the impact of urbanization on habitat quality in the Yangtze River Basin show obvious gradient differences. Revealing the gradient differences of the impact of urbanization on habitat quality is crucial for the Yangtze River protection and the development of differentiated control measures for habitat restoration. However, few previous studies still reveal gradient differences in the impacts of urbanization on habitat quality in basin regions, which has brought about some knowledge gaps and limited the development and improvement of related policies. To this end, this study established 100km and 300km buffer zones along the main stream of the Yangtze River, and set buffer zones within 100km as the inner basin, buffer zones between 100 and 300km as the outer basin, and the rest of the area as the border basin as sub-regional divisions. Then, this study introduced the Dagum Gini coefficient, kernel density estimation, and spatial statistics to analyze the regional differences in urbanization level and habitat quality among different sub-regions, respectively, and introduced a set of spatial regression models to analyze the impact of urbanization on habitat quality in different sub-regions to reveal the gradient differences in the impact of urbanization on habitat quality. The results showed that: (1) the habitat quality in the Yangtze River Basin decreased and then increased along the buffer gradient and deteriorated over time in different gradient intervals, while the urbanization level continued to decrease along the buffer

基金项目: 国家自然科学基金(42371258, 42001231); 中国博士后科学基金(2023M733466)

收稿日期: 2023-01-28; 网络出版日期: 2024-02-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cugcwx@sina.com

gradient but increased dramatically over time in different gradient intervals. (2) Intra-regional and inter-regional differences in habitat quality between different gradient intervals have been increasing, with the intensity of transvariation being the main source of regional differences, and trends in habitat quality shifts between different gradient intervals were also highly variable. (3) The urbanization level was mainly negatively correlated with habitat quality, and the negative impact of urbanization on habitat quality increased along the buffer gradient but weakened over time. Based on the results of the study, we propose that the process of biodiversity conservation in the Yangtze River Basin should be tailored to the specific natural conditions of the different gradient intervals, as well as the mode and level of urbanization and socioeconomic development goals. The implementation of reasonable habitat management and restoration measures can better alleviate the resource and environmental pressures brought about by urbanization. Meanwhile, this study may also provide a case study for researching gradient differences in the resource and environmental effects of urbanization in other basin areas.

**Key Words:** habitat quality; urbanization; gradient differences; spatial analysis; distribution dynamic; Yangtze River basin

当前,城镇化导致的生境退化已经成为了我国实现绿色高质量发展进程中亟待解决的现实问题,尤其是在流域地区,生境退化愈发明显<sup>[1-2]</sup>。长江流域是我国重要的生态屏障,也是我国经济最为发达、城镇化水平最高的区域之一,其城镇化与生境保护之间的矛盾日益凸显<sup>[3]</sup>。同时,在长江不同的梯度区间下,其生态要素与城镇化水平也具有较高差异,加之流域地区生境的不可分割性和生态要素的多元关联性<sup>[4]</sup>,在流域地区的生境治理中必须要坚持协同治理的思想<sup>[5]</sup>。这也对准确评估流域地区生境质量及其所受城镇化的干扰程度的梯度差异提出了要求,以支持相关政策的形成与实施。然而,长江流域地区城镇化对生境质量影响的梯度差异特征仍鲜有揭示<sup>[3, 5]</sup>。这限制了流域生物多样性保护与城镇化绿色发展相关政策的制定。因此,有必要对长江流域的生境质量进行定量评估,并揭示城镇化对其影响的梯度差异特征,这对于实现长江大保护以及流域生境综合修复具有重要意义。

生境质量是指区域生态系统为人类及其他物种提供适宜性生存空间的能力,是维持生物多样性的重要基石<sup>[1, 6-7]</sup>。生境的不断退化则会严重影响人类福祉,并威胁区域生物多样性的保育,从而引发区域生态系统的失衡<sup>[8]</sup>。有关生境质量的评估方法多种多样,早期的研究或基于测度生境的各种属性来分析区域的生境质量<sup>[9]</sup>,或基于野外调查数据,使用物种丰度进而计算生境质量<sup>[10-11]</sup>。然而,这些方法有一些局限性,包括耗时耗力、无法进行长时间序列下的评估、难以复制且无法在大的地理尺度下进行评估<sup>[9, 12]</sup>。近些年来,一系列生境评估模型的出现以及长时间序列土地利用遥感监测数据的生产为评估大尺度、长时间序列的生境质量变化提供了可能性<sup>[9]</sup>。其中,InVEST模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)由于其高效率、低数据要求以及高精度度相比于其他模型被更为广泛的接受<sup>[9, 13-14]</sup>。现有的研究在全国尺度、城市群尺度、省域尺度以及区域尺度着重分析了生境质量的时空分异以及影响因素等<sup>[7, 9, 12-15]</sup>。然而,却鲜有研究在大流域尺度下分析生境质量的梯度差异特征。在大流域尺度下对生境质量梯度差异的分析对流域生境协同治理以及生物多样性差异化管控具有借鉴意义。

城镇化导致的生境退化受到了学界的广泛的关注,城镇化已被证实为是推动生境变化的重要因素<sup>[15-17]</sup>。经济的增长以及农村人口向城市转移所带来的生活方式的转变不可避免地增加了资源消耗,造成环境污染并影响区域生境<sup>[15]</sup>。城镇人口规模的不断扩大以及经济增长的需要带来了城镇建设用地需求的增加<sup>[18]</sup>。然而,建设用地的增长往往会侵占周边耕地与生态用地,破坏景观连通性,引发区域生境恶化并威胁生物多样性<sup>[19]</sup>。以往的研究对城镇化与生境质量的空间关系做出了大量的探讨<sup>[17, 19]</sup>,但仍存在一些不足。城镇化的不同发展阶段可能对生境质量的影响具有较大差异<sup>[20-21]</sup>,不同区域尤其是流域的不同梯度区间内城镇化对生境质量的驱动机理同样存在显著的差异性<sup>[5]</sup>。科学揭示城镇化对生境质量影响的梯度差异对于探索流域城镇化绿色可持续发展以及差异化的生境管理体系具有实践意义。

长江流域占地面积广阔,生态资源丰富,产业种类齐全,经济发展水平高。因此,长江流域在我国社会经济发展与生态安全方面具有重要的地位<sup>[3]</sup>。作为我国重要的经济带,同时也是我国重要的生态安全屏障,长江流域城镇化与生境保护之间关系日益凸显<sup>[3]</sup>。评估城镇化对生境质量影响的梯度差异可为流域生态系统制定有效的差异化生境修复措施以及城镇化发展路径提供科学参考。本研究基于 2000 年、2010 年以及 2020 年的多源数据,以 10km 的正方形格网为基本研究单元,采用一系列空间分析以及动态分布的方法,着重开展了以下两方面内容:(1)测度了长江流域 20 年来生境质量以及城镇化水平的时空格局以及梯度差异;以及(2)探究了城镇化水平对生境质量影响的梯度差异。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

长江流域是我国最大的流域地区(面积大约 180 万 km<sup>2</sup>),经纬跨度十分广阔(24°27'—35°54'N, 90°13'—122°19'E),区域差异十分显著。作为我国重要的生态屏障,长江流域在高质量发展的进程中起着举足轻重的作用<sup>[3]</sup>。此外,长江流域在地理位置上与长江经济带具有极大的重合,因此而导致了经济发展与环境保护之间的显著矛盾。当前,长江经济带快速的城镇化不可避免地带来了生境恶化,严重威胁到了长江流域生物多样性的保护以及流域综合治理的进程。因此,迫切需要评估长江流域城镇化水平与生境质量的空间相关性,以支持长江流域生境保护措施的实施。由于长江流域主要的大城市均是沿长江干流分布,因此本研究使用梯度分析的方法<sup>[22]</sup>,以长江干流作为核心分别建立 100km、300km 的缓冲区,并分析长江流域城镇化与生境质量的空间相关及其在不同缓冲地带的梯度特征(图 1)。其中,将 100km 内的缓冲区设定为内流域,100—300km 内的缓冲区设定为外流域,其他地区设定为边流域。分析不同缓冲梯度地带下的生境差异,可以为长江流域生态环境协同治理提供差异化的决策支持。

### 1.2 数据来源

研究涉及 2000 年、2010 年和 2020 年 1km 分辨率的土地利用遥感监测数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)<sup>[23]</sup>。该数据包括了六个一级地类和 25 个二级地类,是目前中国精度最高的土地利用数据。2000 年、2010 年和 2020 年三年的 1km 精度的人口空间分布公里网格来源于 WorldPop 数据网(<https://www.worldpop.org>),单位为人/km<sup>2</sup>。相同年份与精度的 GDP 空间分布公里网格数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),单位为万元/km<sup>2</sup>。由于 2020 年 GDP 空间分布公里网格数据缺失,本研究使用 2019 年的数据代替。

### 1.3 生境质量测度

基于 InVEST 模型生境质量模块的量化途径可以考虑到区域生态系统结构的特殊性,通过分析威胁源的影响距离、权重以及地区本身的生态适宜性和受威胁源的影响程度来计算生境质量,用以表征区域生境质量的优劣<sup>[7, 24]</sup>。InVEST 模型的参数的设定参考 Chen 等人的研究进行赋值<sup>[25]</sup>。计算公式如下:

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

$$D_{xj} = \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^{Y_t} \left( W_t / \sum_{t=1}^T W_t \right) t_y i_{txy} \beta_x S_{jt} \quad (2)$$

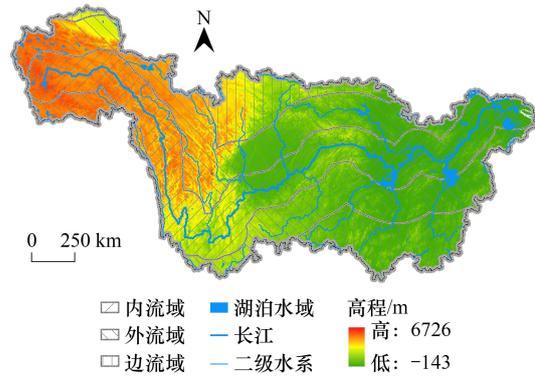


图 1 长江流域区位图及不同梯度区间划分

Fig.1 Study area and division of different sub-regions

式中,  $HQ_{xy}$  表示在  $j$  地类上第  $x$  个斑块的生境质量;  $k$  为半饱和常数;  $D_{xy}$  为生境退化程度; 模型规定  $z$  为 2.5;  $H_j$  表示生境适宜性指数,  $R_{xy}$  为 0;  $T$  表示威胁因子的种类;  $W_i$  表示生态威胁因子的权重,  $Y_i$  表示威胁因子的个数;  $t_j$  表示地类图层中每个栅格上威胁因子的数量;  $\beta_x$  表示可达性水平;  $S_{ji}$  为敏感度大小;  $i_{txy}$  代表各威胁因子的威胁度。

#### 1.4 城镇化水平测度

城镇化是一个复杂的过程, 其中涉及了经济发展(经济城镇化), 土地扩张(土地城镇化), 人口增长(人口城镇化) 以及社会进步(社会城镇化), 四者存在交互耦合的关系<sup>[26]</sup>。由于在格网尺度下的社会城镇化难以量化, 因此在本研究中不予以考虑<sup>[26]</sup>。参考前人的研究, 本研究选取人口密度, GDP 密度以及城镇建设用地占比分别衡量人口城镇化, 经济城镇化以及土地城镇化<sup>[26-28]</sup>。人口密度与 GDP 密度分别使用格网内每  $\text{km}^2$  所拥有的平均人口数量与平均 GDP 来计算, 单位分别为人/ $\text{km}^2$  和万元/ $\text{km}^2$ 。城镇建设用地占比使用格网内城镇建设用地面积占格网总面积的百分比表示, 单位为%。计算公式如下:

$$UL_i = (PD_i + GD_i + CL_i) / 3 \quad (3)$$

式中,  $UL_i$  代表第  $i$  个格网的城镇化水平;  $PD_i$ 、 $GD_i$  和  $CL_i$  分别代表第  $i$  个格网标准化后的人口密度, GDP 密度以及城镇建设用地占比。

#### 1.5 Dagum 基尼系数及其分解方法

传统的基尼系数无法测度不同子区域间的差异大小与差异来源。针对传统基尼系数的不足, Dagum 提出了基尼系数按照子群分解的方法, 并将总体差距按照子区域分解为地区内差距  $G_w$ , 地区间差距  $G_{nb}$  以及超变密度  $G_t$ , 且满足  $G = G_w + G_{nb} + G_t$ <sup>[29]</sup>。该方法可以更好地揭示区域差距的大小以差距的来源<sup>[5, 30]</sup>。本研究引入 Dagum 基尼系数来测度长江流域不同梯度区间内生境质量的区域差异。其计算公式如下:

$$G = \sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |HQ_{ji} - HQ_{hr}| / 2 n^2 hq \quad (4)$$

式中,  $j$  和  $h$  代表内流域、外流域和边流域中的不同区域;  $k$  为子区域的个数,  $n$  为样本内格网的数量;  $n_j$  和  $n_h$  分别代表  $j$  区域和  $h$  区域内格网的个数;  $HQ_{ji}$  和  $HQ_{hr}$  分别代表  $j$  地区的第  $i$  个格网和  $h$  地区第  $r$  个格网的生境质量指数;  $hq$  代表整个流域生境质量的均值。

根据 Dagum 基尼系数分解方法, 可以将基尼系数分解为区域内差距的贡献  $G_w$ , 区域间差异的贡献  $G_{nb}$  和超变密度的贡献  $G_t$ , 并且满足  $G = G_w + G_{nb} + G_t$ 。由于篇幅原因, 具体计算公式在本研究中不予展示, 详细计算公式间 Dagum 等的研究<sup>[29]</sup>。

#### 1.6 Kernel 核密度估计

Kernel 核密度估计是非参数估计方法的一种, 通过连续的密度曲线对随机变量的概率分布进行描述, 具有稳健性和对模型依赖性不强等优点<sup>[30-31]</sup>。本研究引入 Kernel 核密度估计, 用于分析不同梯度区间下生境质量指数动态演进。其计算公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (5)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (6)$$

式中,  $K(x)$  为高斯核函数;  $N$  为观测值的个数,  $X_i$  为第  $i$  个观测对象的值,  $x$  为所有观测值的均值;  $h$  为带宽, 带宽越大, 曲线越光滑, 估计精度越低, 反之则亦然。

#### 1.7 双变量空间自相关

使用双变量空间自相关模型来研究长江流域生境质量与城镇化水平的空间相关性。包括在全局尺度下使用莫兰散点图分析生境质量与城镇化水平的相关性关系以及在局部尺度下使用 LISA 聚类图分析其在空间上的集聚类型<sup>[28]</sup>。具体计算公式如下:

$$\text{Moran's } I_{\text{global}} = m \sum_{i=1}^m \sum_{j \neq i}^m W_{ij} s_i^H s_j^U / (m-1) \sum_{i=1}^m \sum_{i \neq j}^m W_{ij} \quad (7)$$

$$\text{Moran's } I_{\text{local}} = s_i^H \sum_{j=1}^n W_{ij} s_j^U \quad (8)$$

式中,  $m$  代表格网单元的个数;  $W_{ij}$  代表  $n \times n$  的空间权重矩阵, 在本研究中采用的是二阶 Queen 邻接矩阵;  $s_i^H$  和  $s_j^U$  分别代表第  $i$  个和第  $j$  个格网单元标准化之后的生境质量指数和城镇化水平。

### 1.8 空间回归模型

以往的研究显示, 城镇化与生境质量均存在空间效应, 所以应当使用空间回归模型解决<sup>[32-33]</sup>, 以达到更好的解释力度<sup>[26, 28]</sup>。因此, 本研究引入了空间滞后模型(SLM), 空间误差模型(SEM)以及加入了空间滞后项的空间误差模型(SEMLD)分析城镇化对生境质量影响的梯度差异特征<sup>[28]</sup>。SEMLD是SLM和SEM的一般形式, 包含了空间滞后项以及空间误差项<sup>[32]</sup>。SEMLD的计算公式如下:

$$Y = aX + \rho WY + \varepsilon, \varepsilon = \lambda W\varepsilon + \xi \quad (9)$$

式中,  $Y$  代表被解释变量;  $X$  代表解释变量;  $a$  代表解释变量的回归系数;  $W$  代表空间权重矩阵, 与双变量空间自相关所使用的空间权重矩阵相同;  $\rho$  代表空间滞后参数,  $\lambda$  代表空间误差参数;  $\varepsilon$  代表随机误差的向量。如果  $\rho=0$ , 则 SEMLD 退化为 SEM, 如果  $\lambda=0$ , 则 SEMLD 退化为 SLM。

## 2 结果与分析

### 2.1 2000—2020 年长江流域生境质量与城镇化水平时空格局特征

研究发现在 2000 年、2010 年以及 2020 年, 长江流域的生境质量分别为 0.736、0.735 和 0.733, 总体下降了 0.408%。具体来说, 2000—2010 年间共有 84.132 万  $\text{km}^2$  的地区发生了生境退化, 2010—2020 年间共有 114.965 万  $\text{km}^2$  的地区发生了生境退化, 发生生境退化的区域面积不断增加。从生境质量指数的空间分布来看(图 2), 大型城市群地区(长三角城市群, 长江中游城市群, 成渝城市群)以及长江源地区是生境较差的地区。而西南山区、巫山、武夷山等山地丘陵地区是生境较好的地区。城市群地区多处于平原或盆地, 较高的土地开发强度以及庞大的人口、经济规模使这些地区的生境质量总体处于较差的区间。长江源地区由于海拔较高, 冻土分布广, 冻融侵蚀较为严重使得植被难以生长, 因此同样生境质量较差。而山地丘陵地区由于土地难

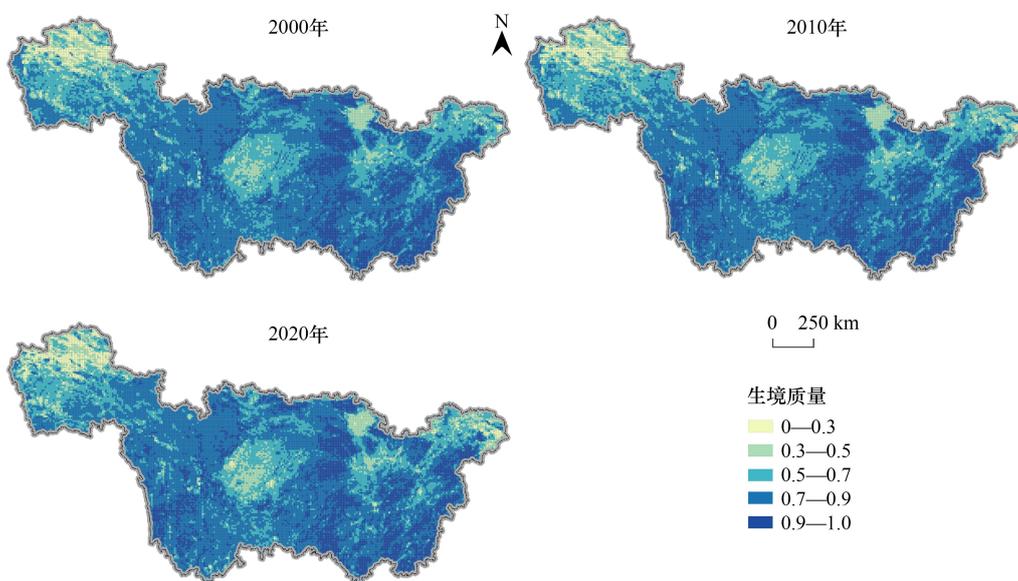


图 2 2000—2020 年 10km 格网尺度下长江流域生境质量的空间分布格局

Fig.2 Spatial patterns of habitat quality in the Yangtze River basin during 2000—2020 at the 10km grid scale

以规模性开发,生态用地受破坏较少等原因使其生境质量相比于城市群地区更好。

研究期间,长江流域的城镇化水平发生飞速增长,二十年间增幅为 143.450%。城镇化水平的空间分布格局如图 3 所示。发生城镇化水平增长的格网单元在 2000—2010 年间占比为 75.229%,在 2010—2020 年间占比为 91.485%。具体来看,研究期间长江流域的人口密度、GDP 密度与建设用地占比分别增长了 6.336%、879.896%与 236.194%,经济的快速发展与建设用地的快速扩张的是导致城镇化水平发生巨幅增加的重要原因。从城镇化水平的空间方面来看,大型城市群地区依然是高城镇化水平聚集的主要区域,尤其是长三角城市群,城镇化水平一直处在高位。城市发展往往具有空间依赖性,形成规模效应并进一步促使其周边地区城镇化水平的增加。平原地区尤其是长江下游的冲击平原地区,水资源丰富,地势平坦,为城市土地的快速扩张提供了良好的立地条件。此外,由于大城市的虹吸效应显著,城市群地区往往可以吸引大量的人口流入以及投资建设,并在空间上形成一定程度的马太效应。

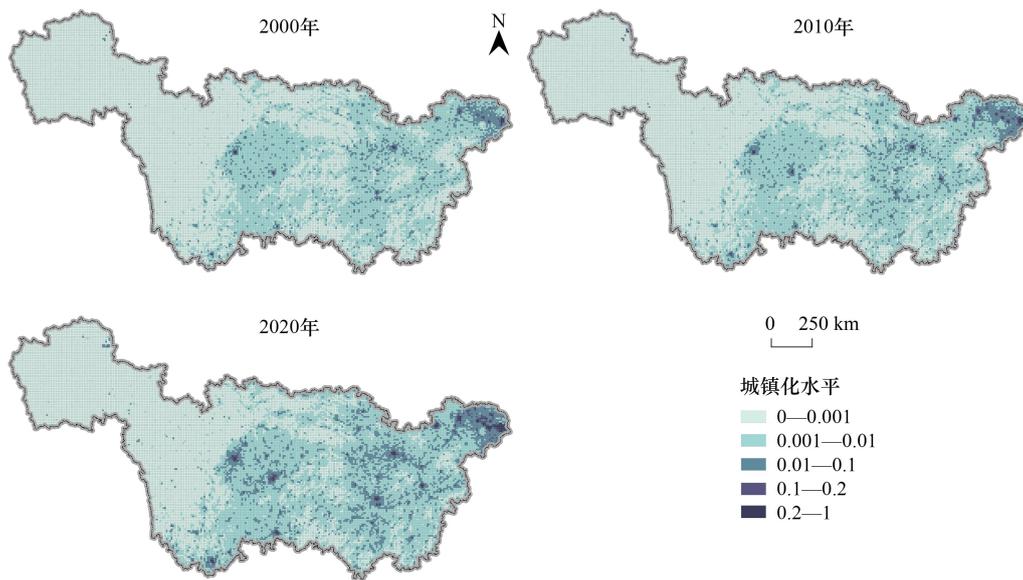


图 3 2000—2020 年 10km 格网尺度下长江流域城镇化水平的空间分布格局

Fig.3 Spatial patterns of urbanization level in the Yangtze River basin during 2000—2020 at the 10km grid scale

研究期间长江流域生境质量与城镇化水平的变化格局如图 4 所示。根据 2000 年至 2020 年生境质量的时空差异结果来看(图 4),城市群地区以及长江源部分地区发生了较为严重的生境质量恶化。然而,长江源地区是流域重要的水源涵养地,而城市群地区则是人类生产与生活的聚集地,二者均具有十分重要的生态战略意义。此外,长江源地区的生态环境恶化也将影响到下游地区,城市群地区的生境恶化也会通过溢出效应影响周边生境。因此此类现象应当引起相关部门的足够重视。2000 年至 2020 年城镇化水平的时空差异十分显著(图 4),大部分地区均发生了增长,但主要增长区域集中于长三角城市群、长江中游城市群以及成渝城市群等城市群地区。这也在一定程度上说明了城市群地区越来越成为城镇化的主要载体。

长江流域不同梯度区间内的生境质量具有较大差异,其生境质量表现为边流域优于内流域优于外流域(图 5)。研究期间,不同区间的生境质量均发生了不同程度的下降,其中内流域、外流域和边流域分别下降了 0.553%、0.281%和 0.122%。沿长江梯度向外恶化程度不断降低。城镇化水平的梯度差异同样十分显著(图 5),表现为内流域大于外流域大于边流域。研究期间,内流域、外流域以及边流域的城镇化水平分别上升了 145.593%、148.457%以及 113.428%。大型城市往往沿长江分布,都处在内流域与外流域区间。城镇化的快速推进往往会牺牲周边地区生态用地,并造成相应程度的生态恶化。相比于生境质量,城镇化水平的频率分布往往更集中,表现为其箱体更窄。这也一定程度上说明了高城镇化水平往往集中于小部分地区,具有较

强的空间异质性。

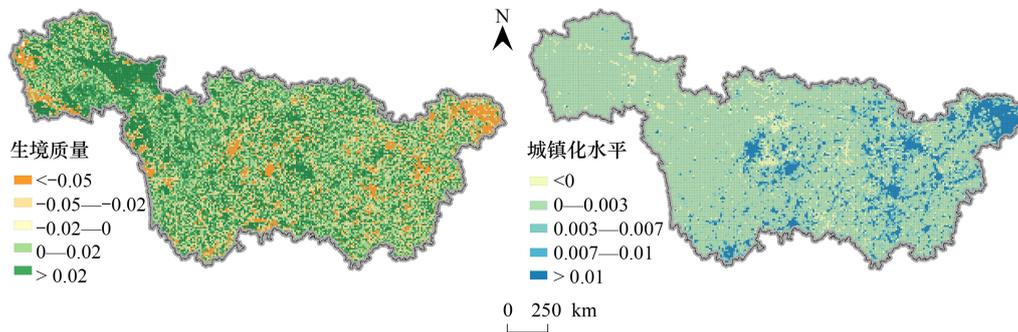


图 4 2000—2020 年长江流域生境质量与城镇化水平的变化格局

Fig.4 Changing patterns of habitat quality and urbanization level in the Yangtze River Basin during 2000—2020

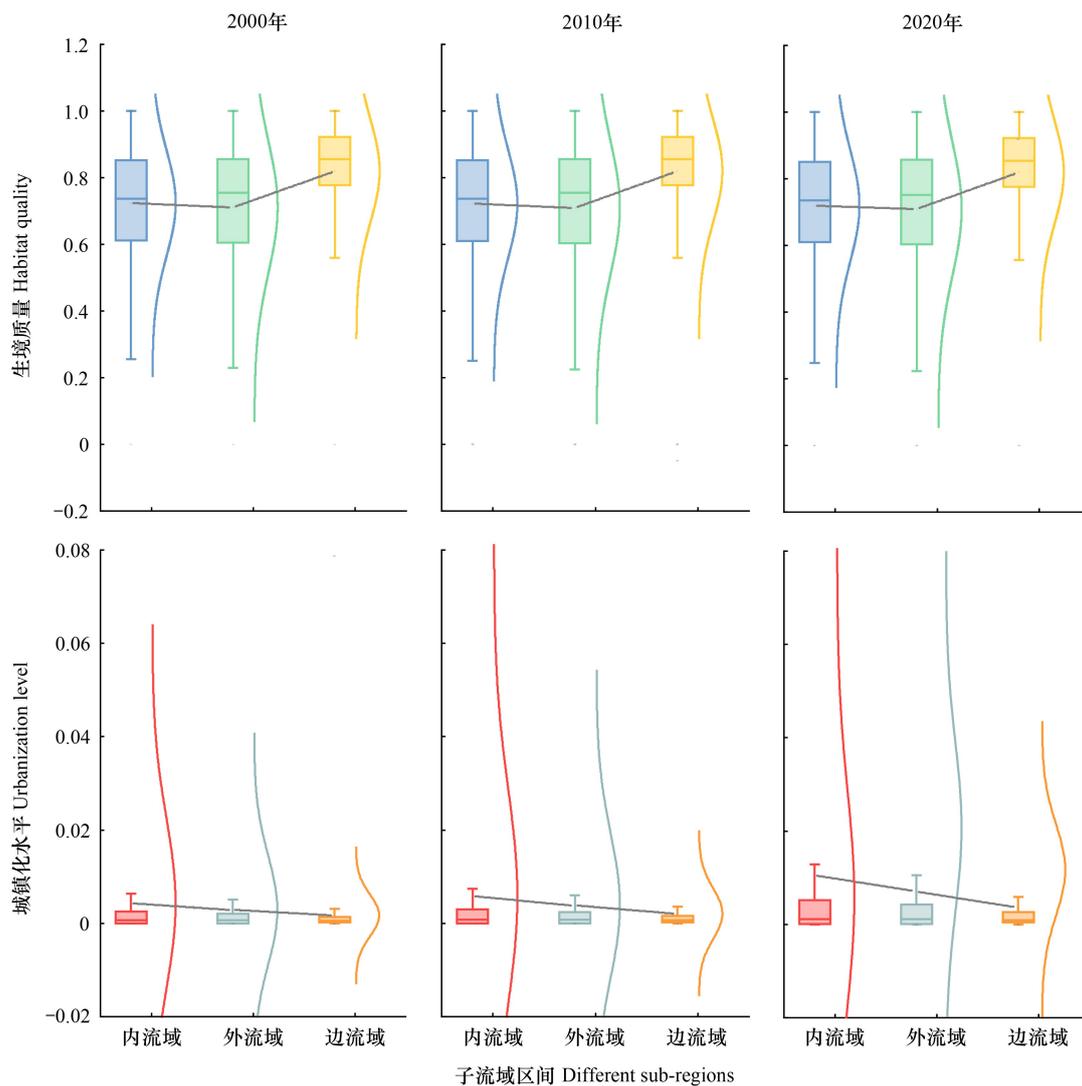


图 5 2000—2020 年不同梯度区间生境质量与城镇化水平的箱线图

Fig.5 Box plot of habitat quality and urbanization levels in different sub-regions during 2000—2020

箱体表示值域分布在 20%—80% 内的格网点, 曲线代表格网点的正态分布曲线, 不同流域间的连线代表平均值的变化情况, 箱体内的横线代表中位数的值

## 2.2 2000—2020 年长江流域生境质量的梯度差异

Dagum 基尼系数及其分解结果如表 1 所示。具体来看,不论是区域内的基尼系数还是区域间的基尼系数均具有相同的变化趋势,呈现出一定的上升趋势,表明了不同区域内的生境质量的空间不均衡性的不断上升。具体来说,整体长江流域、内流域、外流域以及边流域的基尼系数分别上升了 0.004、0.006、0.003 和 0.001,涨幅分别为 3.008%、4.834%、2.000% 和 1.087%。沿着缓冲梯度的延伸,区域内差异的涨幅也不断增加。从区域间的差异来看,内流域与外流域生境质量的差异最大,而内流域与边流域生境质量的差异最小。且研究期间,内外(内流域与外流域)、内边(内流域与边流域)以及外边(外流与与边流域)的基尼系数分别增加了 0.004、0.003 和 0.002,增幅分别为 2.899%、2.439% 和 1.504%。从区域差异的贡献率来看,超变密度的贡献率最大,区域内差异其次,而区域间的差异贡献率最小。超变密度的贡献率超过了 45%,表明了不同梯度区间之间生境质量离群值的跨群交叉程度较高,不同梯度区间内离群值交叉项的存在也是导致区域总体差异的重要原因。

表 1 2000—2020 年长江流域生境质量的 Dagum 基尼系数及其分解结果

Table 1 Dagum Gini coefficient and its decomposition results of habitat quality in the Yangtze River basin during 2000—2020

年份 Year	区域内基尼系数 Regional Gini coefficient				区域间基尼系数 Interregional Gini coefficient			贡献率/% Contribution rate		
	整体	内流域	外流域	边流域	内外	内边	外边	区域 内差异	区域 间差异	超变 密度
2000	0.133	0.124	0.150	0.092	0.138	0.123	0.133	36.183	18.072	45.745
2010	0.135	0.127	0.152	0.092	0.140	0.124	0.134	36.215	18.098	45.687
2020	0.137	0.130	0.153	0.093	0.142	0.126	0.135	36.273	17.689	46.038

时间跨度为 10 年的核密度结果所揭示出的不同梯度区间下生境治理的演化特征如图 6 所示。结果发现所有梯度区间下生境质量的动态演进趋势有所不同。具体来说,内流域生境质量指数在 0.2 附近的区域具有不稳定性,既有向高值转移的趋势也有向低值转移的趋势,而生境质量指数在 0.7 附近的区域,生境质量指数具有向低值转移的趋势。外流域的生境质量指数的流动性较差,生境质量在 0.8 左右的区域具有一定的生境退化趋势。针对边流域来看,具有较低生境质量指数(大约 0.1 至 0.4 之间)的区域具有向高值转移的趋势,而生境质量指数在 0.7 左右的极少部分区域,其生境质量有发生极大恶化趋势。这可能是由于一系列生态保护工程的实施,其目标往往是针对于生境质量极差的区域,并导致了其生境质量发生了一定程度的恢复。而在城市外围的一系列生境质量较好的区域,可能会受到城市化的负面影响,甚至有些生态用地直接被城市用地侵占,导致了这些地区的生境质量发生了显著的下降。

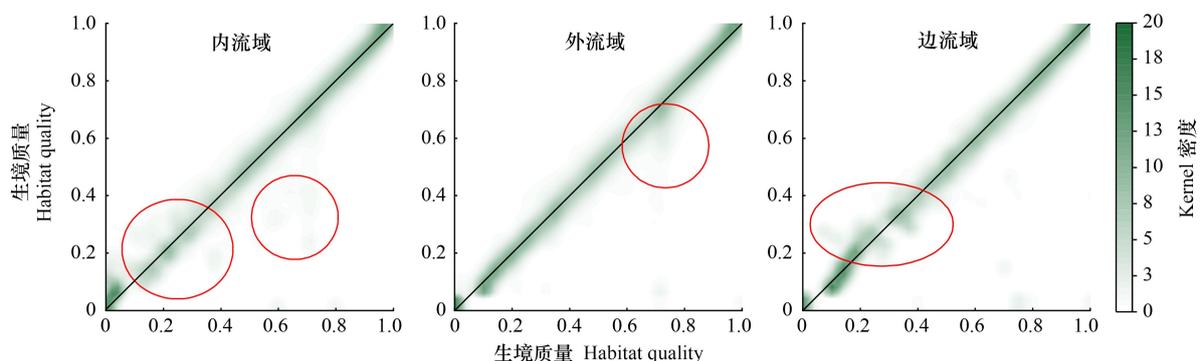


图 6 2000—2020 年内流域、外流域和边流域生境质量的核密度估计等高线图

Fig.6 Contour maps of kernel density of habitat quality in different sub-regions during 2000—2020

图中红色圆圈代表发生较为明显变化的生境质量区间

### 2.3 城镇化与生境质量的空间相关性

全局空间自相关的结果显示(图7),生境质量与城镇化水平在长江流域整体具有负的空间相关性,其中2000年、2010年和2020年的 Moran's  $I$  分别为-0.093、-0.125 和-0.176,且均在 0.001 水平下显著。全局空间自相关的结果在一定程度上显示生境质量与城镇化水平具有显著的空间相关性,且其负相关性随时间不断增强。

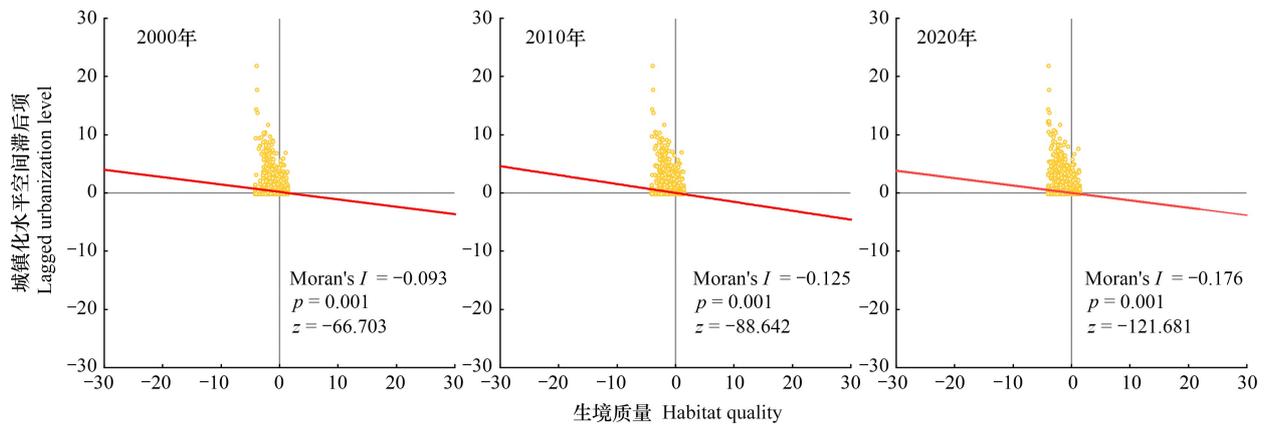


图7 2000—2020年长江流域生境质量与城镇化水平的莫兰散点图

Fig.7 Moran scatter plots between habitat quality and urbanization level in the Yangtze River Basin during 2000—2020

图中的红色曲线代表生境质量指数与城镇化水平空间滞后项的拟合曲线

双变量自相关的 LISA 聚类图如图 8 所示。高-低聚类(高生境质量和低城镇化水平)是长江流域主要的聚类类型。研究期间,高-高聚类、低-低聚类、低-高聚类、以及高-低聚类的占比分别变化了-0.008%、-0.255%、0.099%和 2.436%。长江上游地区的主要聚类为低-低聚类。上游地区由于自然生境相比于其他地区较差,生境质量总体处在较低的位置。同时,作为长江源地区,其生境保护显得尤为重要,上游地区立地条

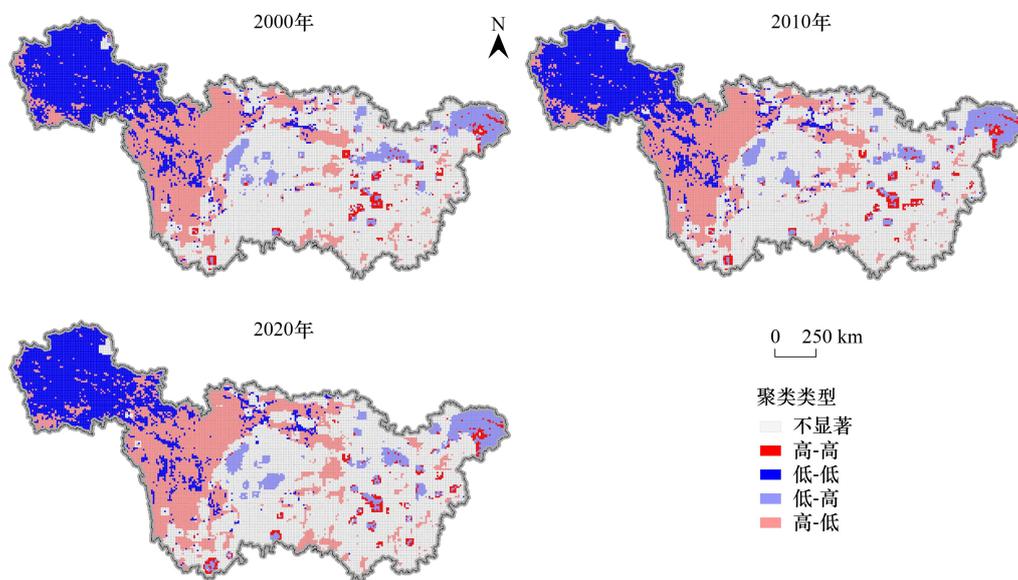


图8 2000—2020年长江流域生境质量与城镇化水平的双变量 LISA 聚类图

Fig.8 Bivariate LISA cluster maps between habitat quality and urbanization level during 2000—2020

LISA: 空间联系的局部指标;高高类型代表高生境质量与高城镇化水平的聚类类型;低低类型代表低生境质量与低城镇化水平的聚类类型;低高聚类代表低生境质量与高城镇化水平的聚类类型;高低聚类代表高生境质量与低城镇化水平的聚类类型

件差,加之政策管控,其城镇化水平也处在较低位置。高-低聚类是横断山脉至都江堰连线的主要集聚类型。这些地区地势崎岖,有着丰富的森林资源且无法支撑大规模的城镇化,因此其生态环境受城镇化的干扰较弱。反观城市群地区,尤其是大型城市周边地区(如成都,重庆,武汉,南昌以及长三角城市群),高度的城镇化水平加之较差的生境质量导致这些地区是低-高聚类的主要地区。然而,在大型城市的边缘地区,出现了高-高聚类,这可能是由于城市群周边地区部分公园绿地等生态保护用地的建立使其生境质量相比于城市建成区更好。

#### 2.4 城镇化对生境质量影响的梯度差异特征

普通最小二乘法(OLS)模型的诊断结果显示(表2),模型的残差项中存在显著的空间自相关效应,考虑构建空间回归模型,因此引入SLM、SEM和SEMLD来分析城镇化水平对生境质量影响的梯度差异。对比OLS模型,所有空间模型均显著增强了原模型的性能(表3)。所有回归模型的诊断结果显示,SEMLD模型是本研究所有梯度区间内的最佳模型,具有最高的解释力度,因此后续的分析均以SEMLD模型为准。此外,本研究所选用的所有模型均通过了Robust LM检验,表明模型均具有可用性。

SEMLD模型的回归结果如表4所示,在不同梯度区间内城镇化水平对生境质量的影响呈现出巨大的差异。具体来说,距离长江越远的梯度区间其城镇化水平对生境质量的负向影响越大,且所有梯度区间内城镇化水平对生境质量的影响均呈现出随时间减弱的趋势。这可能是因为城镇化与生境质量之间存在U型曲线的关系,这也在以往的研究中被大量证实。城镇化水平随着缓冲梯度的增加呈现出下降的趋势,这构成了城镇化水平对生境质量影响的样带,并侧面证实了城镇化水平的增加可能带来生境恢复。空间滞后项在所有梯度区间均十分显著,且回归系数均大于1,这表明了生境质量具有显著的空间溢出效应。空间误差项的回归系数也在1%水平下显著,这表明生境质量不仅仅受到城镇化水平的影响,还受到其他因素的作用,且相邻地区的误差项会对本地区的误差项造成影响。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本研究沿长江建立三个缓冲区间,并基于2000年、2010年和2020年三年的多源数据,采用一系列空间分析和动态分布的方法在10km格网尺度下着重探讨了长江流域生境质量与城镇化水平的时空格局,以及它们之间的空间相互关系的梯度差异。本研究的主要结论如下:

(1)研究期间,长江流域及其不同梯度区间的生境质量均发生了不同程度的下降,沿缓冲梯度区间其下降程度不断降低。外流域的生境质量指数最低,边流域的生境质量指数最高。主要城市群地区是生境较差的地区,而西南山区等山地丘陵地区是生境较好的地区。城镇化水平在研究期间发生了飞速增长,毗邻长江的梯度区间增长最快,而边流域增长最慢。

(2)长江流域及其不同梯度区间生境质量的区域内差异以及不同梯度区间生境质量的区域间差异在研究期间均发生了不同程度的上升,表明了长江流域生境质量的空间不均衡性不断上升。此外,不同梯度区间内其生境质量的转移趋势具有较大差异,低生境质量地区具有生境恢复的趋势,而高生境质量地区具有生境退化的趋势。

(3)生境质量与城镇化水平在长江流域具有显著的空间效应,不同梯度区间内城镇化对生境质量的负向影响均随时间下降。同时,沿缓冲梯度城镇化对生境质量的影响大小也不断降低,即内流域的回归系数最大,边流域的回归系数最小。此外,生境质量具有显著的空间溢出效应,这表明了周边地区的生境质量会影响本地区的生境质量。

#### 3.2 讨论

在长江大保护与流域综合治理的背景下,确定城镇化对生境质量影响的梯度差异对决策者制定宏观与微观的生态修复政策具有重要的参考价值<sup>[3]</sup>。研究发现城镇化对生境质量的负面影响程度随着时间不断减

表 2 最小二乘法(OLS)模型的诊断结果  
Table 2 Diagnostic item of ordinary least-squares (OLS) method

诊断项目	内流域 Inner basin			外流域 Outer basin			边流域 Border basin		
	2000	2010	2020	2000	2010	2020	2000	2010	2020
Diagnostic item									
Moran's 指数(残差项) Moran's $I$ (error)	160.410***	159.028***	154.840***	188.671***	188.553***	184.967***	86.676***	86.576***	85.835***
Lagrange 乘子检验(滞后项) LM (lag)	23500.291***	22089.021***	18711.805***	338.566***	34229.312***	31285.214***	5295.124***	5227.305***	4799.901***
稳健性 Lagrange 乘子检验(滞后项) Robust LM (lag)	159.019***	199.565***	170.764***	0.399	2.835	0.025	66.848***	59.898***	22.398***
Lagrange 乘子检验(误差项) LM (error)	25663.1903***	25218.916***	23904.450***	35528.239***	35479.146***	34137.415***	7480.497***	7462.949***	7335.026***
稳健性 Lagrange 乘子检验(误差项) Robust LM (error)	232.918***	3329.460***	5363.408***	1530.071***	1252.669***	2852.226***	2252.221***	2295.543***	2557.523***
Lagrange 乘子检验(滞后项与误差项) LM (lag and error)	25822.209***	25418.481***	24075.213***	35528.637***	35481.981***	34137.440***	7547.345***	7522.848***	73577.424**
对数似然值 Log likelihood	4225.270	4227.31	4362.340	2225.340	2191.910	2212.550	2168.090	2175.820	2195.590
Akaike 信息量准则 AIC	-8446.540	-8450.630	-8720.680	-4446.680	-4379.820	-4421.100	-4332.190	-4347.640	-4387.180
Schwartz's Bayesian 信息准则 SC	-8432.250	-8436.340	-8706.390	-4432.180	-4365.320	-4406.600	-4319.340	-4334.790	-4374.320
拟合优度 $R^2$	0.070	0.106	0.177	0.015	0.025	0.051	0.049	0.050	0.069

\*\*\*  $P \leq 0.001$ ; \*\*  $P \leq 0.01$ ; \*  $P \leq 0.05$ ; LM: 拉格朗日乘子法 Lagrange multiplier; AIC: 赤池信息量准则 Akaike information criterion; SC: 斯瓦兹贝叶斯信息准则 Schwartz's Bayesian information criterion

表 3 SLM、SEM 和 SEMLD 的模型参数  
Table 3 Model parameter of the SLM, SEM, and SEMLD

模型参数	SLM			SEM			SEMLD		
	2000	2010	2020	2000	2010	2020	2000	2010	2020
Model parameter									
内流域 Inner basin									
对数似然值 Log likelihood	8218.780	8168.870	7987.470	8299.447	8251.923	8170.247	9280.130	9120.039	8834.010
Akaike 信息量准则 AIC	-16431.600	-16331.700	-15968.900	-16594.900	-16499.800	-16336.500	-18554.300	-18234.100	-17662.000
Schwartz's Bayesian 信息准则 SC	-16410.100	-16310.300	-15947.500	-16580.600	-16485.600	-16322.200	-18532.800	-18212.700	-17640.600
拟合优度 $R^2$	0.633	0.643	0.646	0.641	0.652	0.664	0.705	0.706	0.703
外流域 Outer basin									
对数似然值 Log likelihood	808.890	8064.020	7680.810	8178.408	8134.138	7852.889	9414.433	9298.645	8854.469
Akaike 信息量准则 AIC	-16155.800	-16122.000	-15355.600	-16352.800	-16264.300	-15701.800	-18822.900	-18591.300	-17702.900
Schwartz's Bayesian 信息准则 SC	-16134.000	-16100.300	-15333.900	-16338.300	-16249.800	-15687.300	-18801.100	-18569.500	-17681.200
拟合优度 $R^2$	0.708	0.713	0.696	0.715	0.717	0.707	0.768	0.766	0.752
边流域 Border basin									
对数似然值 Log likelihood	3513.330	3514.030	3429.700	3563.814	3567.929	3561.692	4231.630	4226.150	4121.577
Akaike 信息量准则 AIC	-7020.660	-7022.060	-6853.400	-7123.630	-7131.860	-7119.380	-8457.260	-8446.300	-8237.150
Schwartz's Bayesian 信息准则 SC	-7001.380	-7002.780	-6834.120	-7110.780	-7119.010	-7109.530	-8437.990	-8427.030	-8217.890
拟合优度 $R^2$	0.505	0.504	0.489	0.526	0.526	0.528	0.632	0.630	0.621

SLM: 空间滞后模型 Spatial lag model; SEM: 空间误差模型 Spatial error model with lagged dependence

表 4 不同梯度区间 SEMLD 的回归结果

Table 4 Regression results of SEMLD in different sub-region

变量 Variables	内流域 Inner basin			外流域 Outer basin			边流域 Border basin		
	2000	2010	2020	2000	2010	2020	2000	2010	2020
城镇化水平 Urbanization level	-0.531 *** (0.038)	-0.472 *** (0.029)	-0.331 *** (0.017)	-1.160 *** (0.067)	-0.917 *** (0.048)	-0.678 *** (0.029)	-5.051 *** (0.265)	-4.298 *** (0.217)	-2.763 *** (0.122)
常数项 Constant	-0.019 *** (0.003)	-0.014 *** (0.003)	-0.004 (0.003)	-0.016 *** (0.002)	-0.015 *** (0.002)	-0.011 *** (0.002)	-0.040 *** (0.006)	-0.042 *** (0.006)	-0.045 *** (0.006)
空间滞后项 Spatial lag term	1.029 *** (0.004)	1.022 *** (0.004)	1.009 *** (0.004)	1.027 *** (0.003)	1.025 *** (0.003)	1.021 *** (0.003)	1.057 *** (0.007)	1.060 *** (0.007)	1.065 *** (0.007)
空间误差项 Spatial error term	-0.979 *** (0.024)	-0.962 *** (0.024)	-0.950 *** (0.025)	-0.926 *** (0.022)	-0.918 *** (0.022)	-0.930 *** (0.022)	-0.915 *** (0.025)	-0.909 *** (0.026)	-0.898 *** (0.027)

括号内的值为标准差

弱。以往的研究表明,城镇化的不同发展阶段存在不同的资源环境胁迫效应,因此城镇化与生境质量之间或许存在 U 型曲线的关系<sup>[1, 26, 28]</sup>。城镇化初期,粗放的城镇化发展模式会不可避免地侵占周边生态用地,破坏景观连通性并造成生境恶化<sup>[9, 34]</sup>。然而,随着经济社会的发展与技术革新,以及对于环境保护的不断重视,城镇化也可以为生境修复提供技术与资金支持<sup>[35]</sup>。因此,城镇化对生境质量的影响往往不断减弱。此外,本文的结果也显示城镇化对生境质量的影响呈现出明显的沿江梯度差异,主要表现为沿着缓冲梯度的增加,城镇化对生境质量的负面影响不断加剧。造成这种现象的原因可能与不同梯度区间下城镇化的发展阶段有关。在内流域,城镇化的发展水平较高且一直是人口与经济的聚集地。正如上文所述的那样,内流域的城镇化对生境质量的影响可能会低于外流域与边流域。比如,城市群地区城镇化与生态系统服务之间被发现了 U 型曲线的关系<sup>[1]</sup>,而城市群多集中于内流域。

流域生态要素的多关联性以及长江流域梯度区间内城镇化影响差异的显著性决定了其生境保护措施必须采取宏观治理与微观调控相结合<sup>[5]</sup>。根据不同梯度区间的具体自然情况以及城镇化发展模式、水平以及社会经济发展目标因地制宜实施合理的生境管理与修复措施可以更好地缓解城镇化所带来的资源环境压力。例如,在内流域,城镇化水平较高,实行集约化的城市发展模式与进一步推进城市群转型发展可以实现生境保护与城镇化发展的双赢局面。而在边流域,城镇化发展水平低,且生境质量对城镇化的敏感性高,及时实现生境修复措施是当下的重要任务。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Chen W X, Chi G Q. Urbanization and ecosystem services: the multi-scale spatial spillover effects and spatial variations. *Land Use Policy*, 2022, 114: 105964.
- [ 2 ] Tang F, Wang L, Guo Y Q, Fu M C, Huang N, Duan W S, Luo M, Zhang J J, Li W, Song W. Spatio-temporal variation and coupling coordination relationship between urbanisation and habitat quality in the Grand Canal, China. *Land Use Policy*, 2022, 117: 106119.
- [ 3 ] Pan Z Z, Gao G Y, Fu B J. Spatiotemporal changes and driving forces of ecosystem vulnerability in the Yangtze River Basin, China: Quantification using habitat-structure-function framework. *Science of the Total Environment*, 2022, 835: 155494.
- [ 4 ] Heino J, Koljonen S. A roadmap for sustaining biodiversity and ecosystem services through joint conservation and restoration of northern drainage basins. *Ecological Solutions and Evidence*, 2022, 3(2): e12142.
- [ 5 ] Yang L Y, Chen W X, Zeng J, Pan S P, Zhong Y Y, Gu T C. Regional differences and driving forces of ecosystem health in Yangtze River Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(27): 70985-71000.
- [ 6 ] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, Mandle L, Ziv G, Acuña V. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 63-70.
- [ 7 ] 周婷, 陈万旭, 李江风, 梁加乐. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系. *生态学报*, 2021, 41(15): 6134-6145.
- [ 8 ] 夏盈, 张莹莹, 厉恩华, 蔡晓斌, 杨超, 杨娇. 江汉平原四湖流域生境质量时空演化及预测. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(7): 1616-1626.
- [ 9 ] Hu J Y, Zhang J X, Li Y Q. Exploring the spatial and temporal driving mechanisms of landscape patterns on habitat quality in a city undergoing

- rapid urbanization based on GTWR and MGWR; the case of Nanjing, China. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109333.
- [10] Van Horne B. Density as a misleading indicator of habitat quality. *The Journal of Wildlife Management*, 1983, 47(4): 893.
- [11] Kempton R A. The structure of species abundance and measurement of diversity. *Biometrics*, 1979, 35(1): 307.
- [12] Tang F, Fu M C, Wang L, Zhang P T. Land-use change in Changli County, China: predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106719.
- [13] 邓越, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 陈坤. 城市扩张导致京津冀区域生境质量下降. *生态学报*, 2018, 38(12): 4516-4525.
- [14] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
- [15] Zhu C M, Zhang X L, Zhou M M, He S, Gan M Y, Yang L X, Wang K. Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106654.
- [16] McDonald R I, Güneralp B, Huan C W, Seto K C, You M D. Conservation priorities to protect vertebrate endemics from global urban expansion. *Biological Conservation*, 2018, 224: 290-299.
- [17] Song S X, Liu Z F, He C Y, Lu W L. Evaluating the effects of urban expansion on natural habitat quality by coupling localized shared socioeconomic pathways and the land use scenario dynamics-urban model. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106071.
- [18] Qu Y B, Zhan L Y, Jiang G H, Ma W Q, Dong X Z. How to address "Population Decline and Land Expansion (PDLE)" of rural residential areas in the process of urbanization: a comparative regional analysis of human-land interaction in Shandong Province. *Habitat International*, 2021, 117: 102441.
- [19] Bai L M, Xiu C L, Feng X H, Liu D Q. Influence of urbanization on regional habitat quality: a case study of Changchun City. *Habitat International*, 2019, 93: 102042.
- [20] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Li W F. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 824-833.
- [21] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: a case study in Shenzhen City, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 56-68.
- [22] Chen W X, Zeng J, Chu Y M, Liang J L. Impacts of landscape patterns on ecosystem services value: a multiscale buffer gradient analysis approach. *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2551.
- [23] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树远, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.
- [24] Yang L Y, Pan S P, Chen W X, Zeng J, Xu H, Gu T C. Spatially non-stationary response of habitat quality to land use activities in World's protected areas over 20 years. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138245.
- [25] Chen W X, Wang G Z, Zeng J. Impact of urbanization on ecosystem health in Chinese urban agglomerations. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 98: 106964.
- [26] 陈万旭, 刘志玲, 李江风, 冉端, 曾杰. 长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究. *生态学报*, 2020, 40(15): 5137-5150.
- [27] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 706-714.
- [28] Chen W X, Gu T C, 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: 115565.
- [29] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio. *Empirical Economics*, 1997, 22(4): 515-531.
- [30] 沈丽, 张好圆, 李文君. 中国普惠金融的区域差异及分布动态演进. *数量经济技术经济研究*, 2019, 36(7): 62-80.
- [31] Quah D T. Empirics for growth and distribution: stratification, polarization, and convergence clubs. *Journal of Economic Growth*, 1997, 2(1): 27-59.
- [32] Yang L Y, Chen W X, Pan S P, Zeng J, Yuan Y S, Gu T C. Spatial relationship between land urbanization and ecosystem health in the Yangtze River Basin, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(8): 957.
- [33] Zheng L, Wang Y, Li J F. Quantifying the spatial impact of landscape fragmentation on habitat quality: a multi-temporal dimensional comparison between the Yangtze River Economic Belt and Yellow River Basin of China. *Land Use Policy*, 2023, 125: 106463.
- [34] Chen L L, Zhao H S, Song G, Liu Y. Optimization of cultivated land pattern for achieving cultivated land system security: a case study in Heilongjiang Province, China. *Land Use Policy*, 2021, 108: 105589.
- [35] Li W J, Wang Y, Xie S Y, Cheng X. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing municipality, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148311.