

基于Arcgis呼包鄂地区生境质量的空间自相关分析

于启辉

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年12月23日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月10日

摘要

研究结果表明, 呼包鄂地区生境质量在空间上呈现出显著的非随机分布特征。全局Moran's I指数分析显示, 生境质量存在显著的正向空间自相关, 即生境质量高的区域倾向于与高的区域相邻, 低的区域倾向于与低的区域相邻, 且这种聚集性在研究期内呈现出动态变化。LISA聚类分析进一步揭示了空间异质性, 清晰地划分出以“高-高”聚集为主的生态核心保护区(如鄂尔多斯杭锦旗等山区)和以“低-低”聚集为主的城市化与工业活动密集区(如呼和浩特、包头、鄂尔多斯市区周边)。高高聚集这些区域受人类活动干扰较小, 生态系统相对完整。而低低聚集区域则集中在城市建成区、工矿用地以及部分过度开垦的农田区域, 这些区域土地利用强度大, 生态功能退化明显。应针对性地实施退耕还林还草、矿山复绿、城市绿地系统建设等工程, 以改善局部生态环境。本研究为呼包鄂地区乃至其他类似快速城市化地区的国土空间规划、生态保护修复和可持续发展提供了科学、精细化的决策支持。

关键词

生境质量, Invest模型, 空间自相关, 可持续发展

Spatial Autocorrelation Analysis of Habitat Quality in Hubei and Ezhou Based on Arcgis

Qihui Yu

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: December 23, 2025; accepted: January 28, 2026; published: February 10, 2026

Abstract

The results show that the habitat quality in the Hohhot-Baotou-Erdos region exhibits a significant

non-random pattern in space. The global Moran's I index analysis revealed a significant positive spatial autocorrelation in habitat quality, where high-quality habitat areas tend to be adjacent to high-quality areas, and low-quality areas tend to be adjacent to other low-quality areas, with this clustering pattern showing dynamic changes during the study period. LISA cluster further revealed spatial heterogeneity, clearly dividing the regions into ecological core protected areas (such as the Daxinganling Mountains, Majian Mountain, etc.), which are characterized by "high-high" clusters, and urbanized and industrially active areas (such as the suburbs of Hohhot, Baotou, and Erdos) which are mainly characterized by "low-low" clusters. These regions are less disturbed by human activities and have relatively intact ecosystems. Cold spot areas, on the other hand, are in urban built-up areas, mining land, and some over-cultivated farmland areas, where land use intensity is high and ecological functions have significantly degraded. Target engineering measures such as returning farmland to forests and grasslands, mine greening, and urban green space system construction should be implemented to improve the local ecological environment. This study provides and refined decision support for land space planning, ecological protection and restoration, and sustainable development in the Hohhot-Baotou-Erdos region and other similar rapidly urban areas.

Keywords

Habitat Quality, Invest Model, Spatial Self-Correlation, Sustainable Development

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

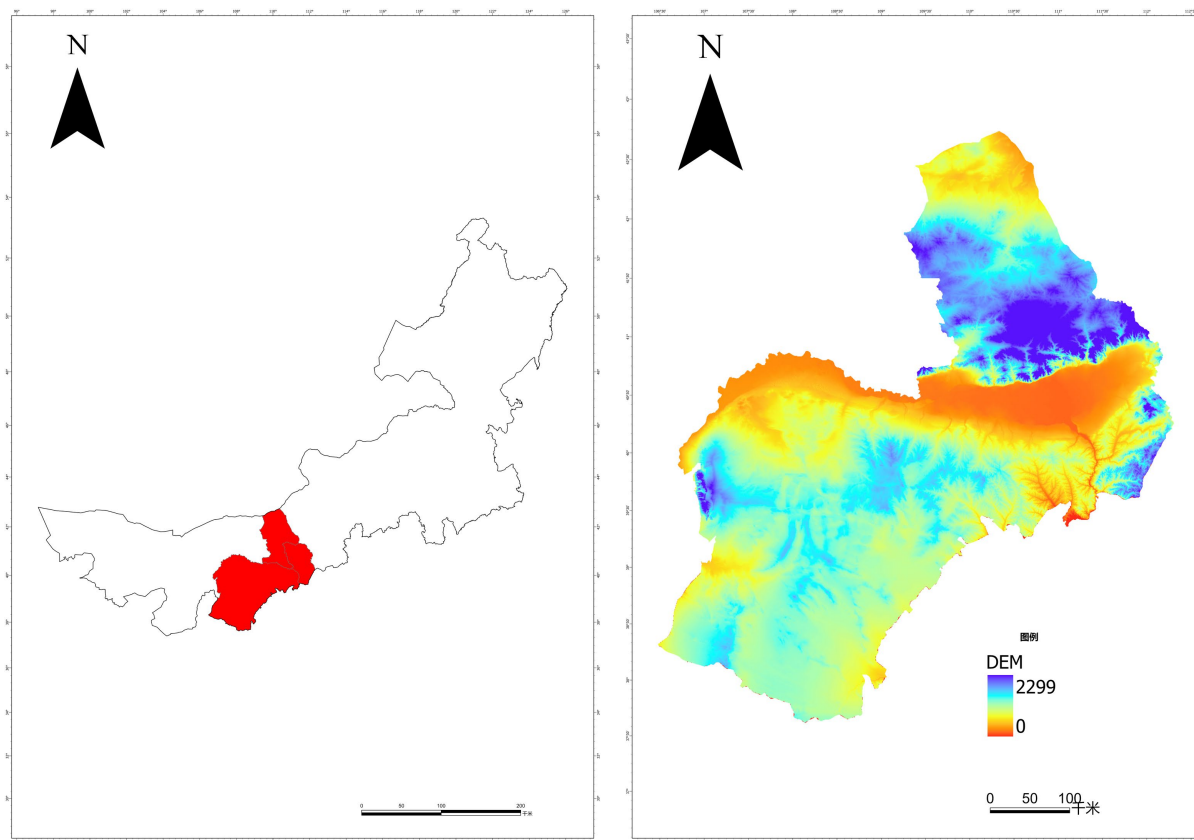
1. 引言

呼包鄂地区作为中国北方重要的能源与重工业基地,正经历快速的城市化与工业化进程,其独特的生态环境面临前所未有的压力。生境质量作为衡量区域生态系统健康与生物多样性的核心指标,其空间分布格局及演变趋势对于区域可持续发展至关重要。该区域不仅是国家重要的能源、化工、冶金和稀土工业基地,也是内蒙古经济发展的核心引擎[1]。然而,这种以资源消耗和重工业为主导的经济发展模式,叠加快速的城市化进程,使得该区域面临着严峻的生态环境挑战。呼包鄂地区地处干旱、半干旱过渡带,属于典型的温带大陆性气候,降水稀少且时空分布不均,生态系统本身具有天然的脆弱性[2]。因此,在保障区域经济的同时,如何维护和提升其生态环境质量,特别是作为生物多样性基础的生境质量,已成为一个紧迫而关键的科学问题。生境质量(Habitat Quality)是衡量生态系统为物种提供生存、繁衍和迁徙所需资源与环境条件能力的综合性指标,是生物多样性的直接体现[3]。因此,本研究旨在通过 Arcgis 空间分析,为呼包鄂地区构建科学合理的生态安全格局、优化国土空间布局,实现“山水林田湖草沙”系统治理提供直接的科学支撑。

2. 研究区数据与方法

2.1. 研究区概况

本研究的研究区为呼和浩特-包头-鄂尔多斯(简称“呼包鄂”)地区,位于中国北方内蒙古自治区的中西部,是黄河流域的重要组成部分。该区域地处东经 109°至 112°,北纬 39°至 41°之间,总面积约为 13.16 万平方公里[4]。如图 1 所示,研究区北部与阴山山脉相接,南部为鄂尔多斯高原,东部与乌兰察布市相邻,西部与巴彦淖尔市和乌海市接壤。黄河自西向东流经该区域,形成了重要的沿黄平原,是区域主要的农业区和人口聚居区。



注：基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1823 号标准地图制作，底图边界无修改。下同。

Figure 1. General map of the study area

图 1. 研究区概况图

2.2. 数据来源

土地利用数据来源于中国科学院数据共享平台下载(<http://www.resdc.cn/>), 分辨率为 30 m, 大致拟 5 个节点, 2000 年、2005 年、2010 年、2015 以及 2020 的土地利用数据。基础地理信息数据来源于国家基础地理信息中心(<http://ngcc.sbsm.gov.cn>), 包括呼包鄂地区的行政边界、行政中心、道路和河流等。

2.3. 生态系统服务供给核算

采用 InVEST 模型当中的生境质量模块对呼包鄂城市群的生境质量进行计算[5]。

公式如下：

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xi}^z}{D_{xi}^z + K^2} \right) \quad (1)$$

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

式中, Q_{xj} 表示土地利用类型 j 中的栅格单元 x 的生境质量, H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜度, D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格单元 x 的生境胁迫程度, K 为半饱和系数, Z 为归一化常数。 R 表示胁迫因子, Y_r 表示胁迫因子 r 占有的栅格数, W_r 表示胁迫因子 r 的权重。生境质量威胁因子表如表 1 所示。

Table 1. Habitat quality threat factor
表 1. 生境质量威胁因子

土地利用类型/威胁因子	名称	生境适宜度	耕地	未利用地	建设用地
1	耕地	0.3	0	0.5	0.6
2	森林	0.9	0.8	0.4	0.7
3	灌木	0.9	0.8	0.4	0.7
4	草原	0.7	0.6	0.3	0.6
5	水域	0.75	0.5	0.1	0.6
6	冰雪	0.75	0.5	0.1	0.6
7	未利用地	0	0	0	0
8	建设用地	0	0	0.1	0.2
9	湿地	0	0	0.1	0.2

2.4. 空间自相关分析：ArcGIS 空间统计工具

2.4.1. 全局空间自相关分析

全局空间自相关分析旨在从整体上判断一个空间变量(如本研究中的生境质量)在整个研究区域内是否存在空间聚集或分散的模式[6]。为对区域空间关联性进行综合测度，本研究采用莫兰指数(Moran’s I)作为量化工具。该指数能够有效判别呼包鄂地区生境质量在空间分布上所呈现的整体格局特征，即明确其属于随机型、集聚型抑或离散型分布。此种整体性分析可为后续展开的局部分析奠定必要的宏观认知基础。

2.4.2. LISA 空间自相关

进一步采用局部空间自相关分析(Local Indicators of Spatial Association, LISA)作为核心的空间统计工具。该工具旨在精准识别生境质量在空间上呈现的聚类分布模式，即局部高值聚集(HH)、局部低值聚集(LL)、以及高低异常值(HL)与低高异常值(LH)区域。局部空间自相关分析是在全局空间关联性分析基础上的深化与拓展[7]，它着重探究空间数据在局部尺度上的具体关联结构。与仅能提供一个概括整个区域空间关联性强弱的单一统计量(如全局莫兰指数)不同，LISA 分析能够为每一个独立的空间单元计算其专属的局部统计量。

3. 结果与分析

3.1. 生境质量服务供给时空变化

根据 Invest 模型计算[8]，得出对应栅格数据，经过归一化，从 2000 年至 2005 年，生境质量供给量由归一化值由 0.4251 增长到 0.4302，增长幅度为 1.19%。从 2005 年到 2010 年，生境质量供给量增长到 0.4377，增长幅度为 1.74%，到 2015 年生境质量供给量降低为 0.4359，2010 年至 2015 年的下降幅度为 0.4%。到 2020 年，呼包鄂地区生境质量服务供给量达到 0.4396，2015 年至 2020 年的增长幅度为 0.8%。因此，在 2000 年至 2005 年间，2005 年间至 2010 年，2015 年至 2020 年生境质量供给在持续增长。在 2010 年至 2015 年，生境质量供给量在下降，2005 年至 2010 年生境质量供给服务增长水平增长最快。时空变化图如图 2 所示。

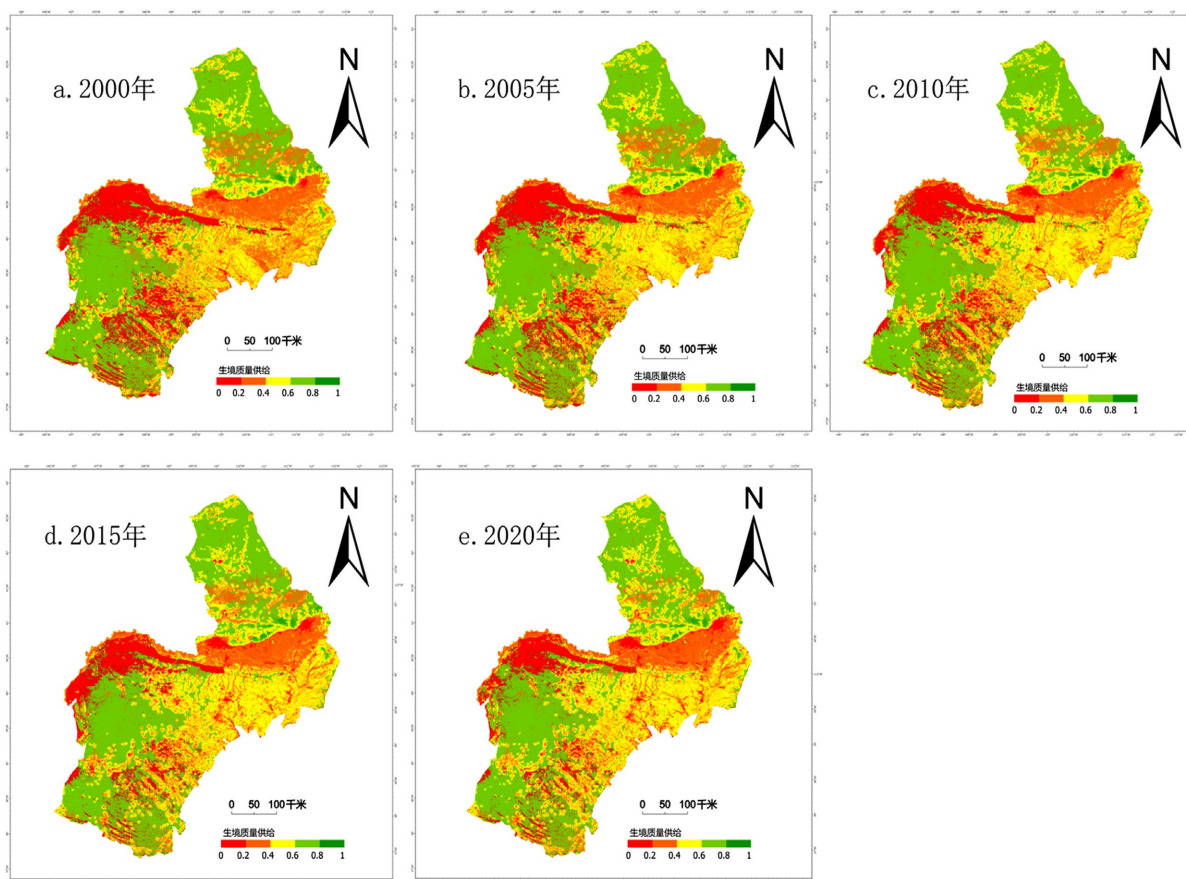


Figure 2. Spatiotemporal variation of habitat quality service supply

图 2. 生境质量服务供给时空变化

生境质量的空间分布格局呈现出显著的非均质性,并表现出明显的“中心-外围”特征。具体而言,生境质量较高的区域主要分布在研究区的边缘地带,特别是北部的阴山山脉(如大青山、乌拉山)和南部的鄂尔多斯高原部分未被开发的草地和林地。这些区域由于地形起伏较大,人类活动难以到达,生态系统保持了相对的完整性和原生性。相反,生境质量较低的区域则集中在三大城市的中心城区及其周边地区,以及沿黄河的农业灌溉区和部分工矿开发区。这些区域土地利用强度高,人类活动频繁,生态系统受到的干扰和破坏最为严重,生境破碎化程度高,生态服务功能显著退化。

3.2. 生境质量全局空间自相关分析结果

全局 Moran's I 指数的计算结果将揭示呼包鄂地区生境质量整体空间关联性的强度及其随时间的变化[9]。如表 2,研究区内的全局 Moran's I 指数在整个研究时段内预计将持续保持显著的正值。这表明生境质量在空间上始终存在显著的正向自相关性,其空间分布呈现明确的聚集特征,即高值与高值区域相邻、低值与低值区域相邻,而非随机散布的格局。从时序变化趋势分析,伴随着快速的城市化进程,土地利用格局预计将发生剧烈转变,这一过程可能引致区域空间异质性的增强。相应地, Moran's I 指数预测将呈现先下降、后逐渐趋于稳定或进入小幅波动的演变轨迹。这一趋势意味着,在城市化初期阶段,生境质量的空间聚集程度可能减弱,其空间分布格局趋于复杂化与分散化。然而,随着城市发展格局逐步定型并进入相对稳定阶段,生境质量的空间关联模式亦可能随之固化,形成新的稳态聚集结构。如下图 3~7 所示:

Table 2. Global Moran’s I map
表 2. 全局莫兰指数

时间	莫兰指数	显著性	Z 值
2000 年	0.475698	0.000011	4.394810
2005 年	0.469324	0.000015	4.329165
2010 年	0.490286	0.000008	4.473214
2015 年	0.496198	0.000007	4.501441
2020 年	0.514929	0.000003	4.664800

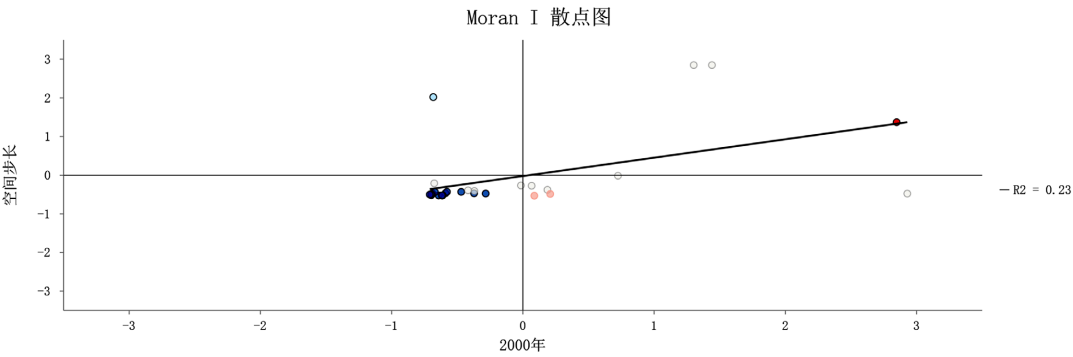


Figure 3. 2000 Moran scatter plot
图 3. 2000 年莫兰散点图

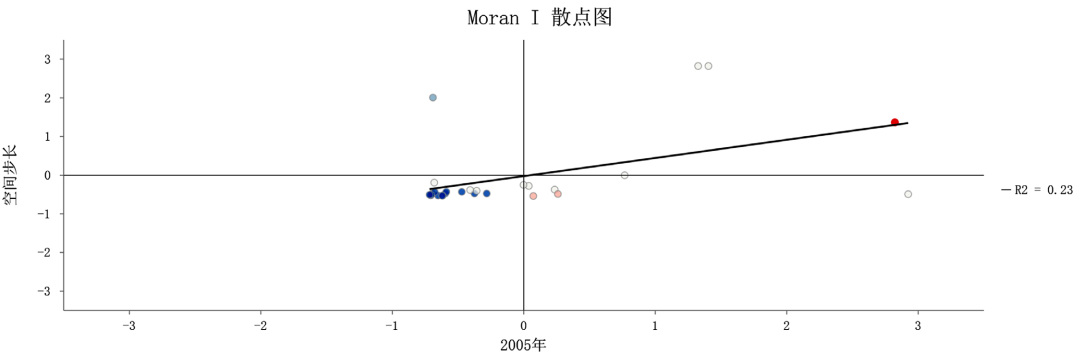


Figure 4. 2005 Moran scatter plot
图 4. 2005 年莫兰散点图

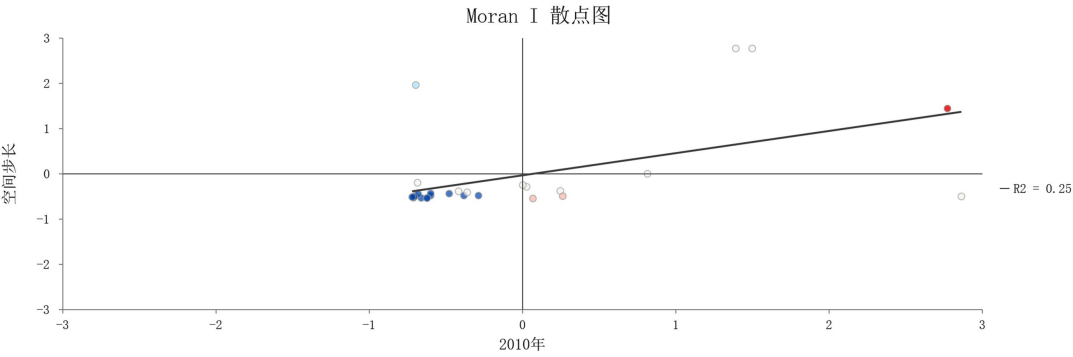


Figure 5. 2010 Moran scatter plot
图 5. 2010 年莫兰散点图

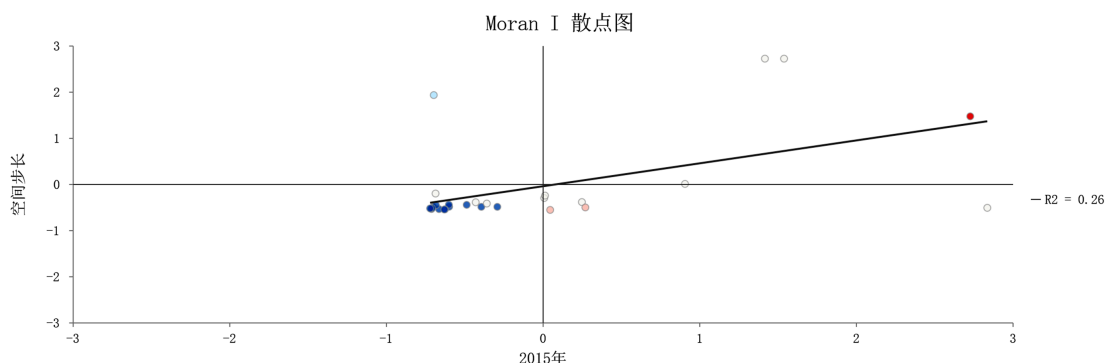


Figure 6. 2015 Moran scatter plot

图 6. 2015 年莫兰散点图

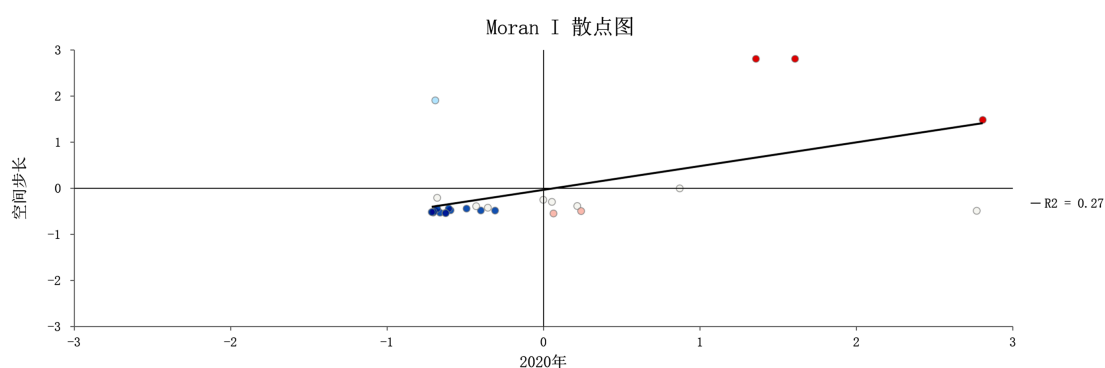


Figure 7. 2020 Moran scatter plot

图 7. 2020 年莫兰散点图

对全局 Moran's I 指数的 Z 得分和 P 值进行分析, 可以验证其统计显著性。预计在研究的所有年份中, Z 得分都将远大于 1.96 的临界值, 而 P 值则远小于 0.05。这一结果将强有力地拒绝空间随机分布的零假设, 从而证实呼包鄂地区生境质量的空间聚集模式是真实存在且具有统计学意义的。

3.3. 生境质量局部空间自相关分析结果

LISA 聚类图: 识别“高-高”、“低-低”聚集区

基于局部空间自相关(LISA)分析生成的聚类图, 将可视化呈现出生境质量在局部尺度上的空间关联模式[10]。呼包鄂地区生境质量空间自相关图如图 8。

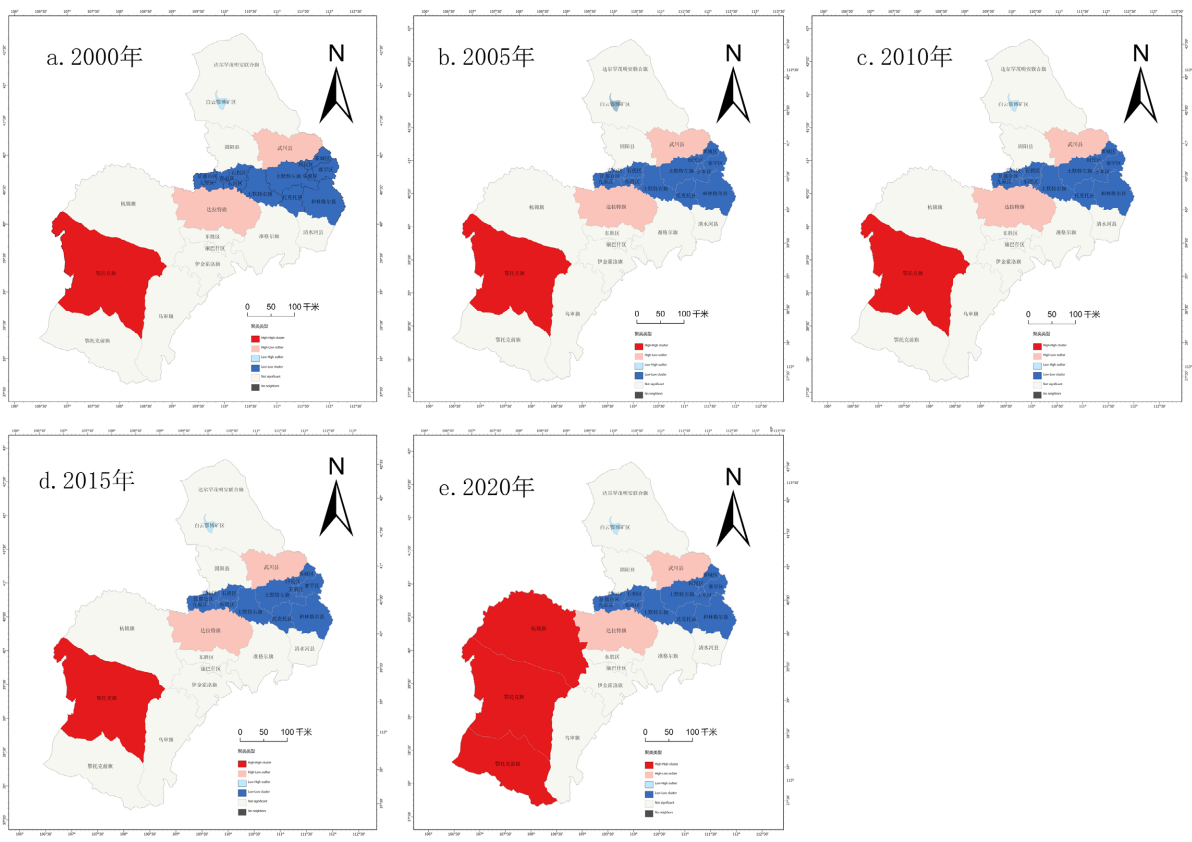
鄂尔多斯市境内受人类活动干扰较小的草原和林地呈现“高-高”(HH)聚集区。这些区域生态系统结构相对完整, 植被覆盖度高, 是区域生物多样性的核心保护区和重要的生态屏障。

在呼和浩特、包头、鄂尔多斯三大城市的中心城区及其周边快速扩展的城镇带、沿黄河的农业灌溉区以及部分工矿开发区。属于“低-低”(LL)聚集区这些区域土地利用强度大, 生境破碎化严重, 生态系统服务功能退化明显, 是生态修复和治理的重点区域。

除上述主要聚集类型外, LISA 分析亦能有效识别出具有指示意义的空间异常值, 这对理解生态系统的复杂性与脆弱性格局至关重要。

“高-低”(HL)异常值: 这些区域代表在普遍低质量生境背景下的高质量区域。它们可能是城市公园、受保护的小片林地或具有特殊生境条件的区域。这些“孤岛”对于维持局部生物多样性和提供生态服务具有重要作用, 但其孤立性也使其面临较高的生态风险, 需要加强保护和廊道建设。

“低-高”(LH)异常值: 这些区域代表在普遍高质量生境背景下的低质量区域。它们可能是局部的人为干扰点, 如小型采矿点、污染源或过度放牧的草场。这些区域是生态系统的脆弱环节, 需要重点调查和治理, 以防止其负面影响向周边高质量生境扩散。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1823 号标准地图制作, 底图边界无修改。

Figure 8. Habitat quality LISA map
图 8. 生境质量 LISA 图

4. 讨论

本研究基于 2000~2020 年呼包鄂地区各县级区域的生境质量数据, 来构建生境质量空间自相关分析, 本文研究的结论如下:

- (1) 生境质量存在显著的正向空间自相关。全局 Moran's I 指数分析表明, 呼包鄂地区生境质量并非随机分布, 而是呈现出显著的空间聚集性, 即高质量生境与高质量生境相邻, 低质量生境与低质量生境聚集。
- (2) 呼包鄂地区空间聚集模式呈现出典型的“核心-边缘”结构特征。基于局部空间自相关(LISA)的分析结果, 可以得到跟土地利用相似的区域分析, “高-高”聚集的地区主要分布于研究区外侧, 空间上对应于受人类活动干扰较少的山地与草地生态系统; 以“低-低”聚集为主导的区域, 该类区域高度集中于研究区的核心地带, 具体表现为三大城市的中心建成区及其外围扩展区域。
- (3) 生境质量空间聚集模式的成因探讨, 自然因素: 呼包鄂地区生境质量的空间聚集模式首先受到区域自然地理背景的深刻影响。地形是决定生境质量空间分异的基础性因素。北部的阴山山脉, 由于海拔较高、坡度较陡, 限制了人类活动的强度, 使得该区域得以保留大面积的林地和草地, 形成了生境质量

的热点聚集区。相反,中部的土默川平原地势平坦,土壤肥沃,适宜农业开发和城市建设,因此成为生境质量的冷点区域。气候条件,特别是降水的空间分布,也起到了重要作用。降水相对丰沛的东南部地区,植被生长条件较好,生态系统更为稳定,而生境质量也相对较高。人为因素:在脆弱的生态本底之上,人为因素是驱动生境质量空间聚集模式演变的最主要力量。快速的城市化进程是导致生境质量冷点区域形成和扩张的最直接原因。城市用地的“摊大饼”式扩张,大量侵占了周边的耕地和草地,导致生境的完全丧失和高度破碎化,在城市周边形成了显著的生境质量低值聚集区。土地利用方式的转变,特别是农业的集约化开发和矿产资源的粗放式开采,也对生境质量造成了严重破坏。高强度的农业活动导致土壤退化和面源污染,而工矿开发则直接摧毁地表植被,造成不可逆的生态破坏。这些活动主要集中在平原和资源丰富地区,进一步强化了生境质量的“中心-外围”分布格局。人类活动强度(HAI)的空间差异直接决定了生境质量的高低,高强度人类活动区与低生境质量区在空间上高度耦合。

本研究主要在县域尺度上进行,未来的研究可以进一步下沉到更精细的尺度,如乡镇尺度,甚至利用更高分辨率(如 10 米或更高)的遥感数据,来探索生境质量在微观尺度上的空间异质性。

参考文献

- [1] 刘玘玘,刘书芳. 黄河流域城市群生态韧性时空演化及提升路径研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(7): 1534-1545.
- [2] 庄元,薛东前,匡文慧,等. 中国半干旱区呼包鄂城市群地表覆盖等级结构时空特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 197-206.
- [3] 张继,杨世琦,赵磊,冯介玲,陈艳英. 基于 InVEST 模型的重庆市“一带三屏”生境质量时空演变特征分析[J]. 生态环境学报, 2025, 34(2): 167-180.
- [4] 孙泽祥,刘志锋,何春阳,等. 中国北方干燥地城市扩展过程对生态系统服务的影响——以呼和浩特-包头-鄂尔多斯城市群地区为例[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1691-1704.
- [5] 游文川,吴文坤. 基于 InVEST 模型与地理探测器的粤东地区碳储存服务时空变化及驱动因素分析[J]. 现代园艺, 2026, 49(1): 26-29.
- [6] 梁彦庆,黄志英,代汝磊,等. 中国土地生态系统服务价值的时空分异特征及溢出效应——以 284 个地级及以上城市为例[J/OL]. 湖南师范大学自然科学学报: 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/43.1542.N.20251217.1611.002>, 2025-12-23.
- [7] 董光龙,刘德玲,雷彤,等. 基于多源遥感数据的中国县域土地利用碳排放时空演变与影响因素分析[J/OL]. 环境科学: 1-24. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202507092>, 2025-12-23.
- [8] 赖玉莹,童锦文,陈志平,等. 基于 PLUS-InVEST 模型的江西省萍乡市碳储量时空演变与多情景模拟[J/OL]. 水土保持通报: 1-11. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20251216.001>, 2025-12-23.
- [9] 张鹏杨,杨怡,乔花飞,等. 我国“一带一路”沿线重点省份旅游经济高质量发展水平及区域差异研究[J]. 旅游论坛, 2025, 18(11): 16-32.
- [10] 刘苗,张佳翌,李振海,等. 基于地形差异的乡村聚落时空演变及驱动因素分析[J/OL]. 智慧农业(中英文): 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/10.1681.S.20251222.1250.002>, 2025-12-23.