

基于多尺度地理加权回归模型探求生态用地景观格局与季节性PM_{2.5}之间的联系

——以长江经济带下游地区为例

张 瑞^{1,2}, 李 婷^{1,2,*}, 苗培培^{1*}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2025年7月29日; 录用日期: 2025年10月9日; 发布日期: 2025年10月20日

摘 要

近年来, 随着城市化进程的加快, 长江经济带下游地区面临着严重的PM_{2.5}污染问题。PM_{2.5}作为主要的空气污染物, 对公众健康构成了巨大威胁。因此, 探讨生态用地景观格局对PM_{2.5}浓度的影响, 寻找有效的污染防治策略, 具有重要的现实意义。本研究以长江经济带下游地区为研究区域, 旨在通过多尺度地理加权回归(MGWR)模型, 分析2021年不同季节生态空间格局与PM_{2.5}浓度之间的关系。研究区域涵盖江苏、浙江、安徽和上海, 面积约35.03万平方公里, 具有显著的季节性气候特征和复杂的景观格局。研究利用遥感数据和地理信息系统(GIS)技术, 表征该地区不同季节的PM_{2.5}浓度空间分布及生态景观格局特征。通过MGWR模型, 探讨生态景观格局对PM_{2.5}污染的多尺度和季节性影响。研究结果显示, 生态用地景观格局与PM_{2.5}浓度之间存在显著相关性, 且这种相关性在不同季节表现出明显的差异。春季和秋季, 生态用地面积和斑块边界复杂度对PM_{2.5}浓度的削减作用较强; 夏季, 生态用地空间的破碎化程度对PM_{2.5}浓度的影响更为显著; 冬季, 生态用地的聚集度和连接性对PM_{2.5}浓度的削减作用较为明显。此外, 研究还发现生态景观的多样性和连通性在减少PM_{2.5}污染方面具有重要作用。本研究深化了对生态景观格局与PM_{2.5}污染关系的理解, 揭示了不同季节生态景观特征对PM_{2.5}浓度的不同影响机制。研究结果为长江经济带下游地区的城市规划和环境治理提供了科学依据, 有助于制定更有效的生态用地管理策略, 改善空气质量, 保障公众健康。

关键词

长江经济带下游, 生态用地, 景观格局, MGWR

*通讯作者。

A Study to Explore the Association between Ecological Land Landscape Pattern and Seasonal PM_{2.5} Based on Multi-Scale Geographically Weighted Regression Models

—Taking the Lower Reaches of the Yangtze River Economic Belt as an Example

Rui Zhang^{1,2}, Ting Li^{1,2*}, Peipei Miao^{1*}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²GIS Technology Research Center of Resource and Environment Western China of Ministry of Education, Kunming Yunnan

Received: July 29, 2025; accepted: October 9, 2025; published: October 20, 2025

Abstract

In recent years, with the acceleration of urbanization, the lower reaches of the Yangtze River Economic Belt are facing serious pollution problems from PM_{2.5}. As a major air pollutant, PM_{2.5} poses a great threat to public health. Therefore, it is of great practical significance to explore the influence of ecological land landscape pattern on PM_{2.5} concentration and to find effective pollution prevention strategies. Taking the lower reaches of the Yangtze River Economic Belt as the study area, this study aims to analyse the relationship between ecological spatial patterns and PM_{2.5} concentrations in different seasons in 2021 through a multi-scale geographically weighted regression (MGWR) model. The study area covers Jiangsu, Zhejiang, Anhui and Shanghai, with an area of about 350,300 km², with significant seasonal climatic characteristics and complex landscape patterns. Remote sensing data and geographic information system (GIS) technology were used to characterize the spatial distribution of PM_{2.5} concentration and the ecological landscape pattern in different seasons in the region. Through the MGWR model, the multi-scale and seasonal effects of ecological landscape pattern on PM_{2.5} pollution were explored. The results show that there is a significant correlation between ecological land landscape pattern and PM_{2.5} concentration, and this correlation shows significant differences in different seasons. In spring and autumn, the area of ecological landscapes and the complexity of patch boundaries had a stronger effect on the reduction of PM_{2.5} concentrations; in summer, the degree of spatial fragmentation of ecological landscapes had a more significant effect on PM_{2.5} concentrations; and in winter, the degree of aggregation and connectivity of ecological landscapes had a more significant effect on the reduction of PM_{2.5} concentrations. In addition, the study found that the diversity and connectivity of ecological landscapes play an important role in reducing PM_{2.5} pollution. This study deepens the understanding of the relationship between ecological landscape patterns and PM_{2.5} pollution, and reveals the different mechanisms by which ecological landscape features affect PM_{2.5} concentrations in different seasons. The results of the study provide a scientific basis for urban planning and environmental management in the lower reaches of the Yangtze River Economic Belt, and help to develop more effective ecological land management

strategies to improve air quality and protect public health.

Keywords

Lower Yangtze River Economic Belt, Ecological Land Use, Landscape Pattern, MGWR

Copyright © 2025 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

长期以来,随着城市化进程的加快,污染气体的大量排放,人口的扩张以及不透地表的增加,给城市带来了严重的空气污染问题。其中 $PM_{2.5}$ (大气中直径小于或等于 $2.5\ \mu m$ 的颗粒物)是主要的空气污染物之一[1],对公众的生命健康构成了巨大威胁。 $PM_{2.5}$ 会诱发哮喘和呼吸道炎症[2],损害肺功能[3],甚至导致癌症的产生[4]。据统计,在中国因 $PM_{2.5}$ 污染而死亡的人数从 2000 年的 71 万人增加到 2017 年的 97 万人[5]。为防治 $PM_{2.5}$ 污染,中国生态环境部首次于 2012 年修订了国家标准 GB3095-2012《环境空气质量标准》,并将 $PM_{2.5}$ 污染纳入空气质量评价。与此同时,中共中央国务院于 2013 年启动了《大气污染防治行动计划》[6]。作为有史以来规模最大的大气污染防治行动,该计划旨在到 2017 年将地级及以上城市的 $PM_{2.5}$ 浓度降低 10%~25% [7]。但是,截至 2020 年,全国 337 个地级及其以上的城市中仍有 40.1% 的城市面临着空气污染的问题[8]。因此, $PM_{2.5}$ 污染仍然是中国的一个主要环境问题,也是公众长期关注的问题。准确识别 $PM_{2.5}$ 污染的影响因素,采取有效措施减轻我国城市 $PM_{2.5}$ 污染已成为当前亟待解决的问题。

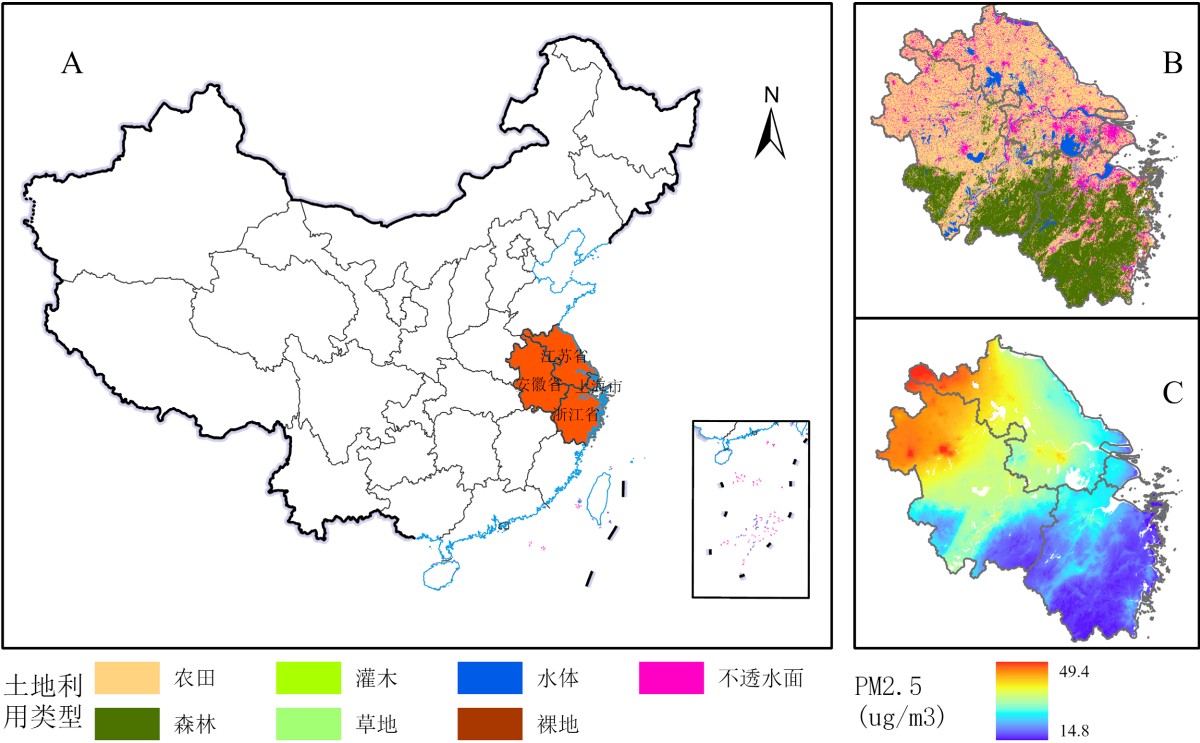
长期研究表明,植被因其特殊的结构特征能够很好吸收大气中空气质量较高的颗粒物,并起到减尘、滞尘、吸尘、降尘和阻尘并实现净化空气的作用[9]。林地、草地以及湿地构成的生态用地在空气污染的防治中起到主导作用。为此,生态用地景观格局的构建被认为是可以有效地维持城乡区域环境的生态平衡,显著降低空气中颗粒物的浓度的有效办法。近些年来,城镇化进程的持续加快导致大量城市植被转变为建设用地,造成其生态用地的面积的不断缩减[10]。通过深入地探究生态用地景观格局对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因子,尽可能在面积有限的情况下最大限度发挥生态用地对于 $PM_{2.5}$ 浓度的削减作用,是当前研究的重点主题。目前,从事相关领域研究的学者一般通过采用 Pearson correlation 分析、Spearman correlation 相关性分析或土地利用回归模型等来研究生态用地格局与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性[11]。苟爱萍等人通过研究波兰空气站点周边区域绿色空间景观格局对 $PM_{2.5}$ 的影响,得出绿色空间面积越大、边界形状越复杂,其对 $PM_{2.5}$ 浓度的消减作用越强[12];马博伦等通过多元线性回归分析得出景观优势度越高、斑块连接性越强,其越能够降低 $PM_{2.5}$ 浓度[13];邱义山等人运用土地利用回归模型研究绿色空间景观格局对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响,得出在绿色空间面积比例不变的情况下,绿色空间破碎化程度越高、绿色空间形状越复杂、离散程度越低,其越有利于降低 $PM_{2.5}$ 浓度[12]。但谭璐等利用 Pearson correlation 分析对绿色空间数量指标、景观格局指数与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性进行研究,发现绿色空间聚集度和蔓延度越低, $PM_{2.5}$ 浓度越低,这可能是由于忽视了立体绿化的影响[14]。王梦迪等通过 Pearson correlation 分析得出西安市绿色空间的斑块面积越大、斑块越聚集、边缘密度越大,其越有助于降低 $PM_{2.5}$ 浓度。宋海啸等人发现绿色空间分离度与 $PM_{2.5}$ 浓度成显著正相关关系,绿色空间景观格局对 $PM_{2.5}$ 浓度的作用存在季节上和尺度

上的差异。同时,相关研究表明,空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在空间上的分布具有差异性。

基于上述研究中的问题,本研究旨在探求中国综合实力最强的长江经济带下游地区的生态用地景观格局对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响。自 2000 年以来,由于城市化进程的加快,该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染越来越严重[15]。同时,该城市群景观格局复杂,空间异质性强,因此,它是研究 $\text{PM}_{2.5}$ 污染与生态用地景观的理想区域。本研究旨在利用 MGWR 模型研究了长江经济带下游地区 2021 年生态空间格局与不同季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的关系。其具体目标是:(1) 表征长江经济带 2021 年不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间格局和生态景观格局;(2) 探讨长江经济带不同季节生态景观格局与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系;(3) 分析生态景观格局对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的季节性和多尺度影响。这项研究有望改善生态景观格局模式与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染之间的关系,并为长江经济带快速城市化地区缓解 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的城市规划提供有价值的信息。

2. 研究区域

长江经济带下游地区位于北纬 $24^{\circ}30' \sim 35^{\circ}45'$, 东经 $90^{\circ}33' \sim 112^{\circ}25'$, 涵盖江苏、浙江安徽和上海这三省一市,总占地面积约 35.03 万平方公里,约占整个长江经济带的 17.1%,如图 1 所示。其具有独特的地理和气候特征,属亚热带季风气候,四季分明。平均气温随季节变化较大:春季:气温范围为 10°C 至 22°C ;夏季:平均气温为 25°C 至 32°C ,部分地区最高气温超过 35°C ;秋季:气温范围为 15°C 至 25°C ;冬季:气温范围为 0°C 至 10°C ,北部偶尔降雪。该地区城市化发展水平及质量较高,以城市、工业、农业和自然景观的多样性为特征,是研究生态用地景观模式与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间关系的关键地区。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作, 底图边界无修改。

Figure 1. On the left is the location of the lower reaches of the Yangtze River Economic Belt in China (A) and the administrative divisions of the Yangtze River Economic Belt (B). On the right is the spatial distribution of the lower reaches of the Yangtze River Economic Belt (C), and the red dots indicate provincial administrative centres

图 1. 左边是长江经济带下游在中国的位置(A)和长江经济带的行政区划(B)。右边是长江经济带下游地区的空间分布(C), 红点表示省级行政中心

3. 材料和方法

3.1. 数据收集和处理

本研究使用的 PM_{2.5} 数据来自中国高空气污染物(CHAP)数据集[16]。该数据集基于时空 Extra Trees 模型生成的, 用于建立 PM_{2.5} 浓度与气溶胶光学深度之间的关系, 时间范围为 2000~2020 年, 空间分辨率为 1 km × 1 km, 时间分辨率为逐日。该数据集很好地展现了中国 PM_{2.5} 浓度的空间异质性, 具有较高的预测精度(CV-R² 在 0.86 和 0.90 之间)和较强的预测能力(R² 在 0.80 和 0.82 之间), 被逐渐广泛应用于公共卫生、生态质量、空气污染等的研究[17]。

2021 年覆盖长江中下游地区的土地利用数据来源于由武汉大学黄听团队公布, 基于 Google Earth Engine 上 335,709 景 Landsat 数据, 制作中国年度土地覆盖数据集(annual China Land Cover Dataset, CLCD)。该数据集具有连续 30 年土地利用分类结果。与其他土地利用产品数据相比, 时间分辨率更高[18]。

道路数据来源于 OSM 道路数据, 通过裁剪和清洗得到主要的道路以便于后面的研究和分析。具体数据来源与介绍如表 1 所示。

Table 1. Source of data
表 1. 数据来源

数据名称	数据缩写	时间	来源	处理方式
中国高分辨率空气污染物数据集	CHAP	2000~2022	国家地球系统科学数据中心	ArcGIS 10.8 中的掩模提取、坐标系转换和重采样
土地利用类型	LUCC	1985~2022	中国科学院资源环境科学与数据中心	ArcGIS 10.8 中的掩模提取、坐标系转换和重采样
距道路距离	Road	2021	国家地球系统科学数据中心	ArcGIS 10.8 中的欧式距离, 并坐标系转换和裁剪

3.2. 数据预处理

3.2.1. PM_{2.5} 数据

本研究所使用的 PM_{2.5} 数据来源于中国高空气污染物(CHAP)数据集中的月均值站点数据。通过应用经验贝叶斯克里金法对这些数据进行了插值处理, 以获取其季节均值的 PM_{2.5} 数据。研究时间段的划分参考了以往研究中的季节划分方法, 其中 3、4、5 月为春季, 6、7、8 月为夏季, 9、10、11 月为秋季, 1、2、12 月为冬季[19]。

3.2.2. 生态用地景观指标计算

基于土地利用数据和之前研究对生态用地景观格局指数的选取方法, 研究从类型尺度选取面积指数(TA)、最大斑块指数(LPI)、聚合度指数(AI), 面积加权形状指数(SHAPE_AM)、斑块密度指数(PD)以及斑块连接度指数(COHESION), 6 个景观指数反映不同季节使其绿色空间景观格局特征。并将获取的生态用地的数据通过 Fragstats4.2 软件进行景观格局指数的计算。本研究在 ArcGIS Pro 中采用渔网工具生成 5 km × 5 km 的渔网, 合计 12,901 个网格单元, 之后在每个网格单元中计算长江经济带下游地区生态用地空间的景观格局指标。

3.2.3. 道路数据

基于 OSM 道路数据和研究区边界, 提取得到研究区的道路数据, 并按照道路等级提取出每一种类型道路。并对每种类型单独计算其道路长度、道路密度以及距离网格的道路距离, 最终使用熵值法确定出

最终总道路的道路长度、道路密度以及距离网格中心的距离来作为影响因子研究。

3.3. 研究方法

3.3.1. 全局空间自相关分析

全局空间自相关分析是用于衡量整个区域内各空间单元与相邻单元之间的集聚性。全局莫兰指数(Global Moran's I, IG)表达式为:

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

式中: n 为网格的单元总数量, S^2 为所有网格单元中 $PM_{2.5}$ 浓度的方差; x_i 和 x_j 分别表示第 i 个网格单元和第 j 个网格单元的 $PM_{2.5}$ 浓度; $\bar{x}$ 为研究所有格网属性的平均值; w_{ij} 为空间权重。本研究以网格单元为空间单元, 通过全局莫兰指数来判断 $PM_{2.5}$ 浓度是否具有空间自相关性。全局莫兰指数的取值范围为 $[-1, 1]$, 其值大于 0 表示区域间的 $PM_{2.5}$ 浓度及其影响因素存在空间正相关关系, 小于 0 表示区域间存在空间负相关关系, 等于 0 表示区域间不存在空间自相关关系。

3.3.2. 局部空间自相关分析

局部空间自相关分析用以探究局部区域中变量分布的空间相关性, 局部莫兰指数(Local Moran's I, IL)表达式为:

$$I_L = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (4)$$

式中: W 为通过 K 邻接关系法建立的空间权重矩阵, 本文以网格为空间单元, 采用局部莫兰指数来研究 $PM_{2.5}$ 浓度在重庆市的空间集聚情况。

3.3.3. 地理加权回归分析(GWR)

我们使用 MGWR 模型来探索 2021 年长江经济带下游地区生态用地的景观指数与季节性 $PM_{2.5}$ 浓度之间的空间关系。为了验证 MGWR 模型的有效性, 首先采用了 GWR 模型来探求其空间回归关系, 并与 MGWR 模型的结果进行了比较。GWR 模型是专门为分析空间数据而开发的, 通过将解释变量与地理位置相关联可以使回归系数局部变化[20]。GWR 模型公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (5)$$

3.3.4. 多尺度地理加权回归分析(MGWR)

与 GWR 相比, MGWR 模型考虑了影响因素的空间异质性, 从而减少了参数估计中的共线和偏差。MGWR 模型可以很好地捕捉解释变量的局部、区域和全局效应[21], 其公式如下:

$$y_i = \sum_{k=1}^8 \beta_{bwk}(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (6)$$

4. 结果分析

4.1. PM_{2.5} 浓度的季节性空间分布格局

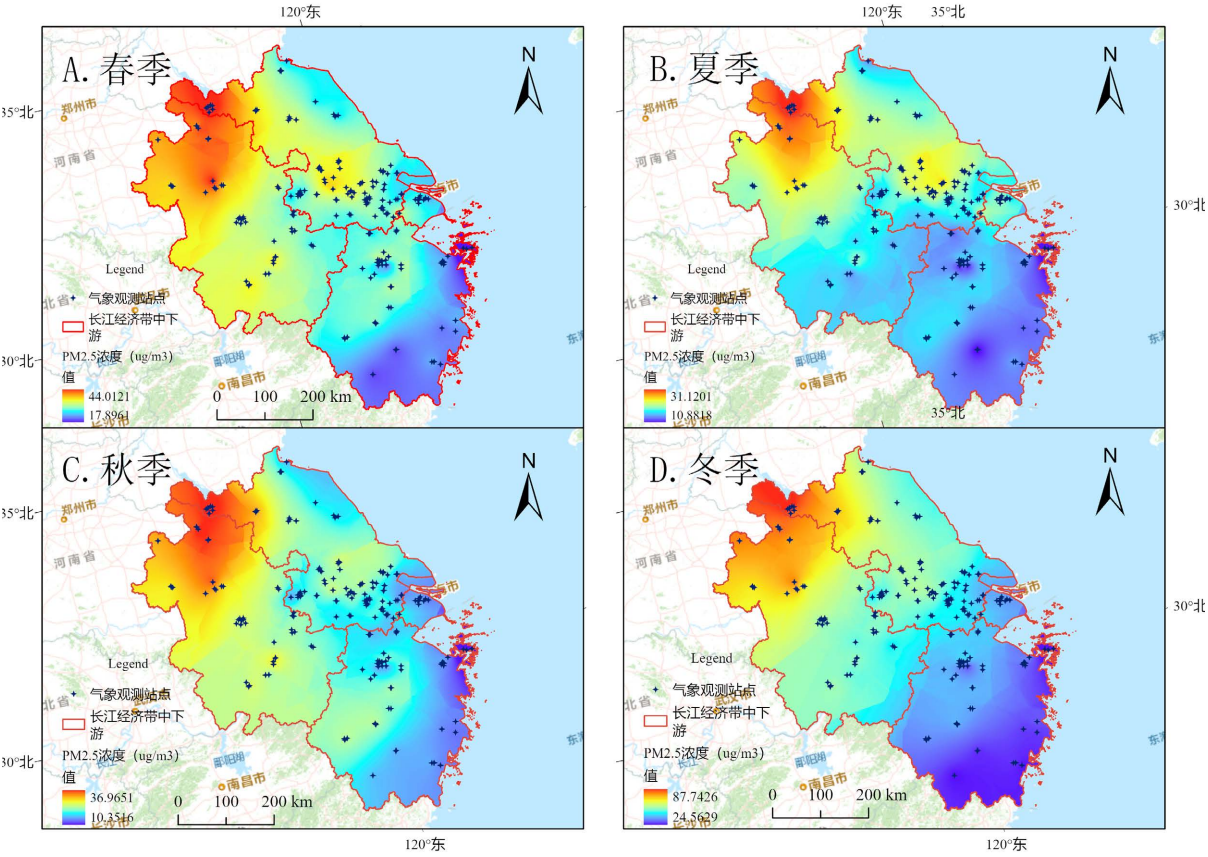
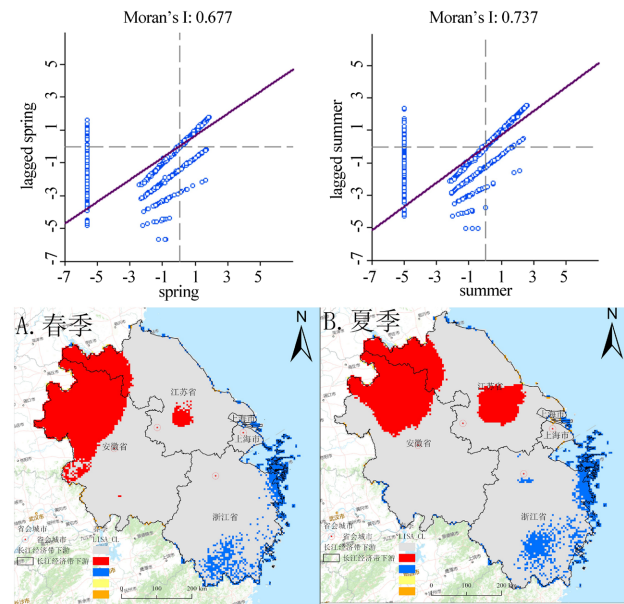


Figure 2. Seasonal distribution of PM_{2.5} in the lower part of the Yangtze River Economic Belt
图 2. 长江经济带下游地区 PM_{2.5} 季节性分布



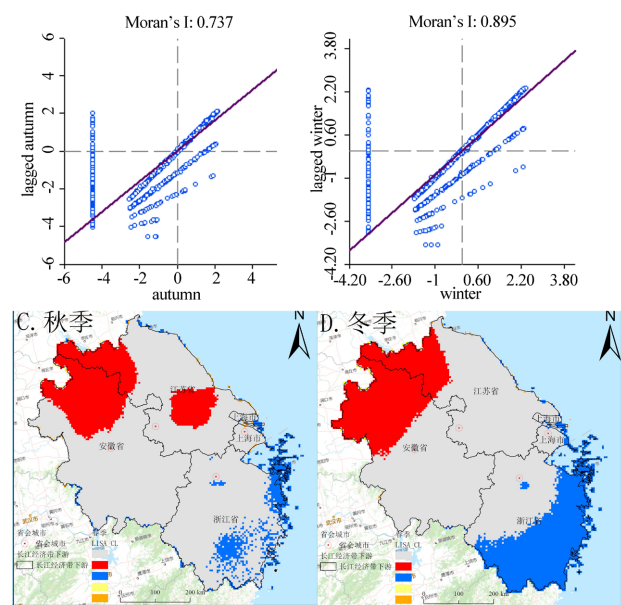


Figure 3. Relationship between PM_{2.5} and ecological land landscape patterns and road indexes
图 3. PM_{2.5} 与生态用地景观格局和道路指数之间的关系

在进行空间回归分析之前,我们先研究了长江经济带下游地区各季节平均 PM_{2.5} 浓度的空间格局。分析结果如图 2 所示,可以看出,城市核心区各季节 PM_{2.5} 浓度最低,西北部地区浓度最高。总体上,下游地区 PM_{2.5} 浓度北部高,南部低,且呈现由西向东递减的趋势。春季(A): PM_{2.5} 浓度范围为 36 至 44 μg/m³,夏季(B): 全年 PM_{2.5} 浓度最低,≤31 μg/m³。秋季(C): 与春季相似, PM_{2.5} 浓度一般在 36 至 44 μg/m³ 之间。冬季(D): PM_{2.5} 浓度最高,平均为 87 μg/m³。按照《中国环境空气质量标准》,2021 年长江经济带下游地区空气质量为良好。

由图 3 可知在 p = 0.001 置信水平下的全局 Moran's I 值介于 0.677 和 0.885 之间,空间自相关系数均显示为正,说明了相邻单元的 PM_{2.5} 残差分布的自相关性很强。夏季和秋季的空间聚集模式相似,春季、夏季以及 w 秋季聚集分布较为分散,冬季聚集分布较为集中。沿海、沿江城市核心区 PM_{2.5} 浓度为低 - 低聚集,安徽省北部、江苏省城市核心区及其附近为高 - 高聚集。说明 PM_{2.5} 浓度受季节性影响较为显著,并主要集中在城市的核心地区。

4.2. 生态用地空间景观格局与 PM_{2.5} 浓度相关性分析

4.2.1. 回归变量的选择

基于之前的研究选取了景观格局指数和道路两种指标,共 9 个研究变量,来探索道路密度、距离道路的距离、道路长度以及生态用地景观格局指数对其 PM_{2.5} 的关系指标选择如表 2 所示。

Table 2. Selection of regression variables for the correlation analysis between spatial landscape pattern of ecological land and PM_{2.5} concentration

表 2. 生态用地空间景观格局与 PM_{2.5} 浓度相关性分析回归变量的选择

变量	符号	单位	变量
中国高分辨率空气污染物数据集	CHAP	2000~2022	国家地球系统科学数据中心
道路总长度	Length	km	道路总长度
道路总道路密度	Density	km/km ²	道路总道路密度

续表

道路总欧式距离	Length	m	道路总欧式距离
面积指数	CA	---	面积指数
斑块密度指数	PD	---	斑块密度指数
最大斑块指数	LPI	---	最大斑块指数
面积加权形状指数	SHAPE_AM	---	面积加权形状指数
斑块连接度指数	COHESION	---	斑块连接度指数

4.2.2. 生态用地空间景观格局与 PM_{2.5} 浓度相关性检验

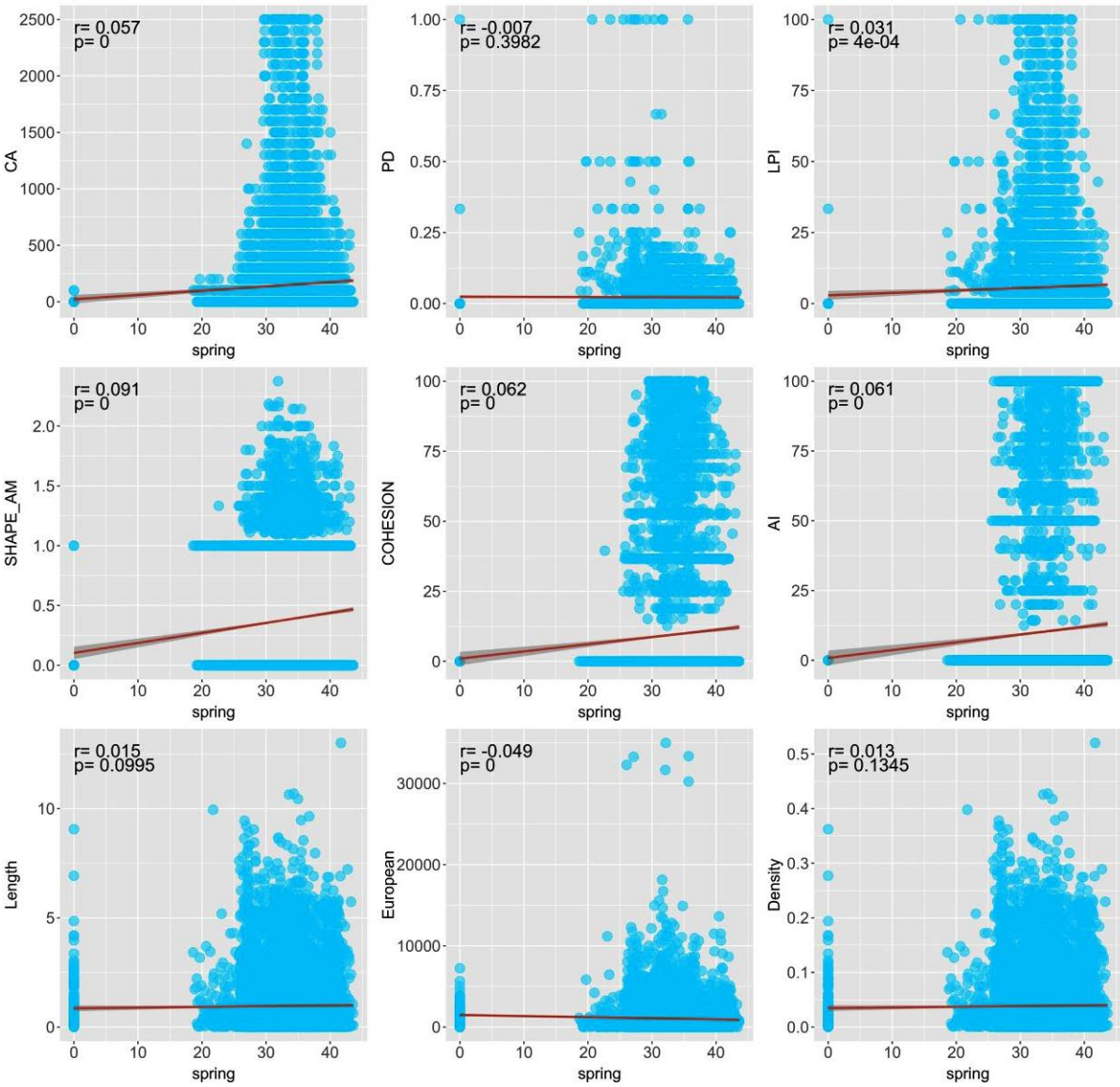


Figure 4. Correlation test between spatial landscape pattern of ecological land and PM_{2.5} concentration

图 4. 生态用地空间景观格局与 PM_{2.5} 浓度相关性检验

计算其每一个季节 PM_{2.5} 与变量之间的联系，根据回归变量以 PM_{2.5} 之间的显著性水平不高于 0.05

来,选择通过检验的变量用于回归模型。最终确定最大斑块指数(LPI)、聚合度指数(AI),面积加权形状指数(SHAPE_AM)、斑块连接度指数(COHESION)以及距离道路的距离(European)用于 GWR 和 MGWR 模型的回归,如上图 4 所示。

4.3. 生态空间景观尺度的空间格局

利用 Fragstats4.2 软件对长江经济带中下游流域的生态用地景观格局指数进行计算,整体景观和类型水平景观的指数结果分别如图 5 所示。LPI 代表了最大斑块占据整个景观面积的比例,体现了景观的破碎性。PD 反映了景观的空间异质性,斑块密度越大,景观孔隙度越高,其破碎度也就越大。SHAPE_AM 即表示斑块形状不规则程度,COHESION 反映景观中不同斑块类型的聚集程度或延展趋势,其值小说明土地利用类型越复杂多样,破碎化程度越高;相反,蔓延度值高则说明景观中的某种优势斑块类型形成了良好的连接性。AI 主要反映了斑块在景观中的聚集和分散程度。

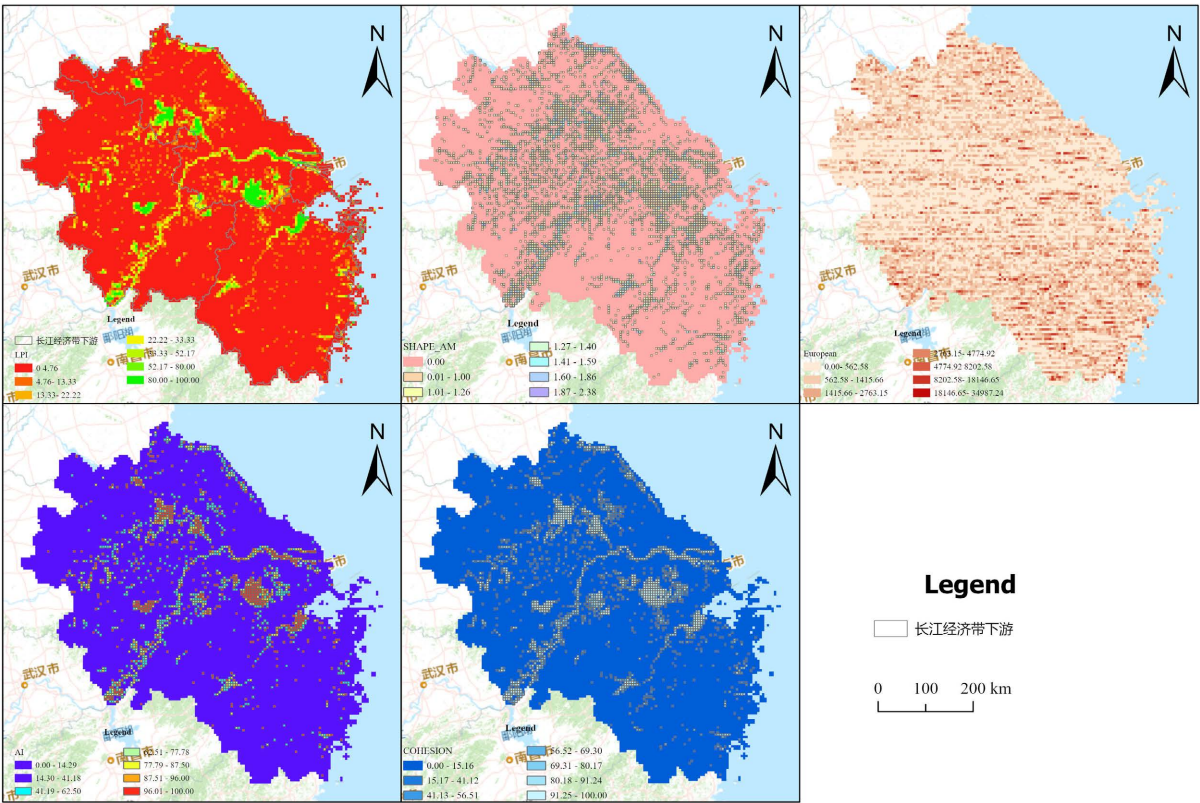


Figure 5. Index distribution of the overall landscape level pattern in the lower Yangtze River in all seasons in 2021
图 5. 2021 年长江下游地区四季整体景观水平格局指数分布

4.4. PM_{2.5} 浓度的季节性空间分布格局

深入了解生态土地利用模式与 PM_{2.5} 浓度之间的关系对于制定有效的环境政策至关重要。由于 PM_{2.5} 浓度和生态用地的景观模式显示出显著的空间异质性,我们选择局部回归模型(即 GWR 和 MGWR),而不是全局回归模型来研究它们之间的关系。与传统的地理加权回归(GWR)模型相比,多尺度地理加权回归(MGWR)更适合处理不同空间尺度变量之间的复杂相互作用。这对于生态用地和 PM_{2.5} 研究尤其重要,因为城市化、植被覆盖和气象因素之间的相互作用起着关键作用。通过对比 GWR 和 MGWR 在不同季节的结果。结果表明, MGWR 的表现优于 GWR,在所有季节都具有较高的 R² 和较低的 AIC,相比之下,

MGWR 模型在冬季的性能最好($R^2 = 0.98$ 和 $AIC = 866.46$), 而夏季最差($R^2 = 0.88$ 和 $AIC = 11288.11$)。在此, 利用 MGWR 模型探讨了生态用地的景观模式景观格局与 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度之间的空间关系。如图 6 所示 MGWR 模型的 Local R^2 在春季和冬季具有较高的值和空间变异性(0.98 和 0.97)高于夏、秋季节(平均 0.88 和 0.89)。此外, 夏季和秋季的 Local R^2 的空间变异性表现出相似的模式。

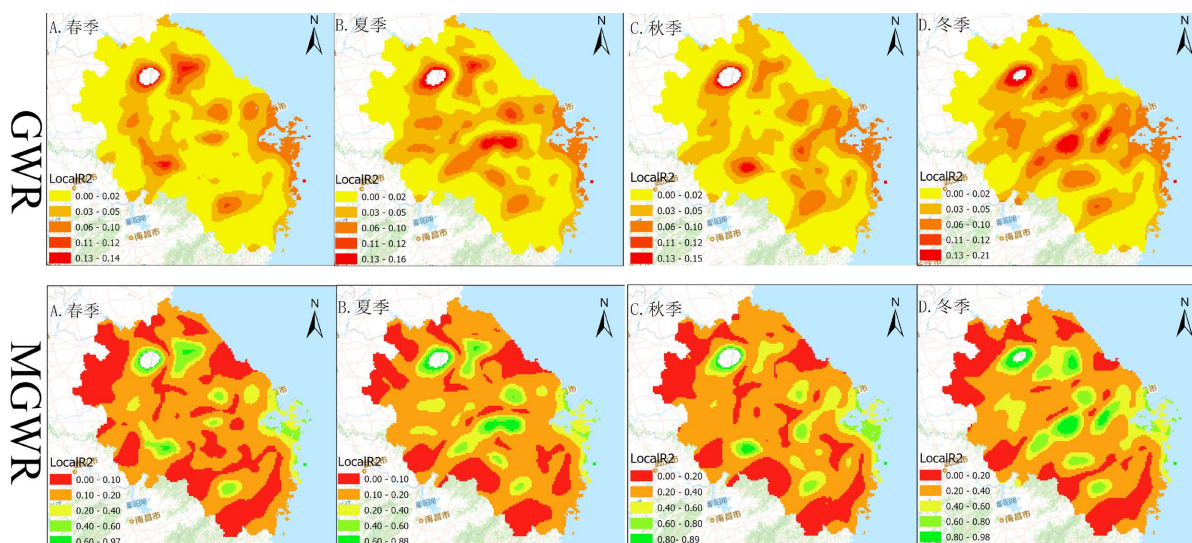


Figure 6. 2021 regression coefficient distribution of GWR and MGWR in the lower reaches of the Yangtze River

图 6. 2021 年长江下游地区 GWR 和 MGWR 的回归系数分布

5. 结论

本文通过结合 Pearson 相关性分析和多尺度地理加权回归模型(MGWR), 系统探讨了长江经济带下游地区生态用地景观格局与季节性 $PM_{2.5}$ 浓度之间的耦合关系。研究结果揭示了不同景观指数对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响, 并提出了基于土地利用类型的生态用地景观格局优化策略, 以期为区域大气污染防治提供科学依据。主要结论如下:

首先, 通过 Pearson 相关性分析发现, 无论是整体景观还是类型水平上的景观格局指标, 大部分均与 $PM_{2.5}$ 浓度存在显著相关关系。生态用地类型的景观格局确实对区域内 $PM_{2.5}$ 浓度产生了显著影响。特别是生态用地中的林地和草地景观指数与 $PM_{2.5}$ 含量呈显著负相关关系, 表明绿地景观格局在缓解 $PM_{2.5}$ 污染方面具有重要作用。

其次, 从 MGWR 模型回归分析结果来看, 生态用地对 $PM_{2.5}$ 产生影响的因子包括草地 SHAPE_AM、林地 COHESION、林地 LPI、林地 PD、林地 AI 和林地 SHAPE_AM 等。其中, 生态用地中草地 SHAPE_AM 是对 $PM_{2.5}$ 浓度影响最显著的因子。研究进一步表明, 在城市中, 增加绿地的面积和数量, 提高其所占的绿地空间比例, 是有效削减 $PM_{2.5}$ 浓度的重要措施。同时, 增加城市绿色斑块形态复杂度, 强化灰绿空间之间的物质与能量交换过程, 能够显著提升绿地的环境功能。保护和发展优势斑块, 增强全局水平绿地空间集群效应, 也是优化城市景观格局、减少 $PM_{2.5}$ 浓度的重要策略。此外, 增加城市绿地和城市用地的多样性, 提高各类斑块间的相互作用效率, 有助于实现更为有效的 $PM_{2.5}$ 浓度控制。

结合前文对长江经济带地区 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化特征和景观格局的分析结果, 本研究在生态用地结构分布和景观布局上提出了以下的优化策略: 在有限的城市空间内, 合理配置绿地空间, 增加绿地面积和斑块数量, 提升绿地景观的复杂度和多样性; 通过保护和发展优势绿地斑块, 增强其在景观中的主导地位, 发挥其对 $PM_{2.5}$ 的控制作用; 通过科学规划, 优化灰绿空间的配置, 提高其对 $PM_{2.5}$ 浓度的削减效

率。未来的研究可以进一步结合更多的环境变量,探索更为综合的景观优化策略,以期实现更为有效的大气污染防治目标。

参考文献

- [1] 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物 PM_{2.5} 及其危害[J]. 前沿科学, 2012, 6(1): 22-31.
- [2] 张瑜, 肖纯凌. PM_{2.5} 对呼吸系统的影响以及呼吸道益生菌的发展前沿[J]. 中国医药导报, 2018, 15(8): 28-31.
- [3] 柯益鑫, 王子林, 李卓远, 等. 卷丹多糖的结构表征及其对 PM_{2.5} 暴露致小鼠急性肺损伤的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(8): 1385-1392.
- [4] 袁小雪, 周定友, 李杰, 等. ICP-MS 在 PM_{2.5} 元素分析中的应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(8): 2373-2381.
- [5] 巫燕园, 刘逸凡, 汤蓉, 等. 中国特大城市群 PM_{2.5} 污染及健康负担的时空演变特征[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2024, 60(1): 158-167.
- [6] 柴发合. 我国大气污染治理历程回顾与展望[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(3): 5-15.
- [7] Chen, Y., Ebenstein, A., Greenstone, M., et al. (2013) Evidence on the Impact of Sustained Exposure to Air Pollution on Life Expectancy from China's Huai River Policy. *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, **110**, 12936-12941. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300018110>
- [8] 汪克亮, 姜伟. 科技金融政策能否降低环境污染?——基于“促进科技与金融结合试点”的准自然实验[J]. 技术经济, 2022, 41(10): 109-121.
- [9] 王占永, 陈昕, 胡喜生, 等. 植物屏障影响路边大气颗粒物分布机理及研究方法的进展[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 1047-1058.
- [10] 余洲, 李明玉, 钱雨扬, 等. 基于 CA_Markov 模型多情景模拟的三峡库区土地利用变化及其生态环境效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 363-372.
- [11] 叶深, 王鹏, 黄玮, 等. 长三角城市群城市空间形态对 PM_{2.5} 与 O₃ 污染空间异质性特征的影响研究[J]. 生态环境学报, 2023, 32(10): 1771-1784.
- [12] 苟爱萍, 李皖新, 王江波. 重庆市绿色空间景观格局与 PM_{2.5} 浓度时空相关性[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(1): 25-37.
- [13] 马博伦, 王雷, 滑永春. 北京市细颗粒污染物与土地覆被景观格局关联分析[J]. 林业资源管理, 2021(4): 94-103.
- [14] 赵强, 谭璐, 方潜生, 等. 基于卫星资料的合肥市热岛效应时空演变及其影响因子分析[J]. 大气与环境光学学报, 2023, 18(2): 153-167.
- [15] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 长江经济带 PM_{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1190-1200.
- [16] 刘励坤, 刘婷婷, 许瑞君, 等. 大气污染物短期暴露对自杀死亡风险的影响[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(12): 862-869.
- [17] 刘威, 蔡苗, 龙政, 等. 大气一氧化碳短期暴露与哮喘死亡关系的时间分层病例交叉研究[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(4): 243-249.
- [18] Yan, G.J. and Huang, X. (2021) 30 m Annual Land Cover and Its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data Discussions*, **13**, 1-29.
- [19] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区 PM_{2.5} 的成分特征及来源分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 645-654.
- [20] Wheeler, D.C. (2021) Geographically Weighted Regression. In: *Handbook of Regional Science*, Springer, 1895-1921. https://doi.org/10.1007/978-3-662-60723-7_77
- [21] Wu, R., Li, Z. and Wang, S. (2021) The Varying Driving Forces of Urban Land Expansion in China: Insights from a Spatial-Temporal Analysis. *Science of the Total Environment*, **766**, Article 142591. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142591>