

长江中游地区不同林地覆盖率下 PM_{2.5} 的综合影响因素及比较研究

苗欣然^{1, 2} 曾晨³ 程轶皎⁴ 吕天宇³¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

3. 华中农业大学公共管理学院, 湖北 武汉 430070;

4. 西安交通大学公共政策与管理学院, 陕西 西安 710049)

【摘要】: 空气质量与人类健康和社会经济可持续发展密切相关, 探究不同用地形态下大气污染物浓度变化的影响因素具有重要理论和实证意义。以长江中游地区为例, 采用空间回归模型, 以林地覆盖率作为划分研究区域的基准因子, 以林地景观格局作为挖掘 PM_{2.5} 变化驱动的关键因子, 综合考虑区域社会经济和自然条件状况, 从 PM_{2.5} 的来源、扩散和清除 3 个方面选取影响因子, 探索不同林地覆盖率下 PM_{2.5} 的综合影响因素并对其进行比较分析。研究结果表明: (1) 不同林地覆盖率下的影响因素对于 PM_{2.5} 在影响模式上类似, 但在作用方式和作用强度上有所不同; (2) PM_{2.5} 的空间异质性明显, 随着林地覆盖率的提高, PM_{2.5} 浓度明显减低; (3) 降低林地斑块分离度有利于降低 PM_{2.5} 浓度; (4) DEM 是影响 PM_{2.5} 的主要因素, 其对 PM_{2.5} 的削弱作用随着林地覆盖率的增加而增加。基于以上研究结果, 建议根据不同等级林地覆盖区的特点, 加强长江中游地区大气污染的精细化治理, 结合 PM_{2.5} 的空间外溢性特征, 强化地区之间的联防联控。

【关键词】: 林地覆盖率 PM_{2.5} 影响因素 长江中游地区

【中图分类号】: X513 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)06-1302-10

长江流域是社会经济活动较为密集的区域, 国土空间开发强度日益增大, 空气污染问题日益凸显。PM_{2.5} 是大气污染物的重要组成部分, 高浓度 PM_{2.5} 对人体健康, 生态环境和气候变化的影响已成为全球关注的重要环境问题^[1, 2]。同时, 工业化、城镇化的持续、快速推进带来了流域土地利用和地表覆盖的巨大变化, 面对基本农田的严格保护和城镇空间扩展的必然趋势, 林地保护面临挑战, 区域空气治理受到威胁。因此, 不同用地形态下 PM_{2.5} 变化的影响因素对于科学合理优化国土空间布局、改善空气质量

作者简介: 苗欣然(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为自然资源。E-mail:miaoxr06@163.com; 曾晨 E-mail:zengchen@igsnrr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771563)

至关重要。

近年来,国内外学者围绕不同用地类型及其空间布局与大气污染的关系展开了一系列的理论和实证研究,建设用地作为人类生产生活的主要聚集地,是 $PM_{2.5}$ 浓度提高的主要源头之一,而林地、草地等生态用地对于大气污染物浓度具有一定的缓解作用^[3,4]。其中,林地作为重要的“汇”景观,其规模、形态和格局等对于控制和降低 $PM_{2.5}$ 浓度效果显著,成为探究 $PM_{2.5}$ 的影响因素时重点关注的土地利用类型之一^[5,6]。林地虽无法抑制 $PM_{2.5}$ 的排放,但可削减污染物浓度并创造适宜其沉降的环境,从而有效降低大气中 $PM_{2.5}$ 的浓度^[7],学者们在城市和区域的实证研究中也发现林地面积与 $PM_{2.5}$ 具有显著负相关关系^[6,8]。另外,吴志萍等^[9]和李琪等^[10]等通过野外调查观测、遥感地理信息数据等,探究了不同树种、不同林地类型等对于 $PM_{2.5}$ 的影响。

除此之外,国内外学者从自然因素、社会经济等方面已对 $PM_{2.5}$ 的影响因子进行了系统梳理和分析^[11,12]。从 $PM_{2.5}$ 变化的影响机理来看,学者们对于 $PM_{2.5}$ 影响因子的选取可大致归纳为来源、扩散和清除 3 个方面,其中社会经济因素主要影响 $PM_{2.5}$ 的来源^[13,14];因 $PM_{2.5}$ 在空气中传播的特性,气象因素中的风向、风速等及研究区的地形地貌 (DEM) 主要作用于 $PM_{2.5}$ 的输送和扩散^[15,16,17];气象因素中的降水、降雪和植被则主要作用于 $PM_{2.5}$ 的消减和清除^[15,18,19,20]。

事实上,大气污染是一个受到自然环境和社会经济活动综合影响的过程,过去关注城区建设用地上所承载的社会经济活动对 $PM_{2.5}$ 影响的研究相对较多,在流域尺度上系统分析土地利用及其景观格局对于 $PM_{2.5}$ 的影响方面的理论和实证研究则有待进一步挖掘^[21,22]。鉴于此,本文以长江中游地区为例,重点探索土地利用格局对 $PM_{2.5}$ 的影响,以林地覆盖率作为划分区域的基准,将林地景观格局纳入影响因素,利用遥感地理信息数据量化影响因子,开展相关性分析及空间回归分析,挖掘不同林地覆盖率下 $PM_{2.5}$ 的影响因素并分析其差异性,为科学合理进行林地空间布局,提高流域空气质量提供理论参考。

1 研究区概况

长江中游地区是长江经济带的重要组成部分,对于长江经济带流域的可持续发展至关重要。其以武汉城市圈、长株潭城市群和环鄱阳湖城市群为主体部分,主要涉及到湖北、湖南、江西三个省份,面积约为 32.54 万 Km^2 ,林地占比近 50%,分布空间差异明显(图 1)。其中,大巴山、大别山、武陵山等重要山脉林地覆盖率高,江汉平原、洞庭湖平原、鄱阳湖平原等地势较低的平原地区作为人类活动的主要聚集地,林地覆盖率相对较低。

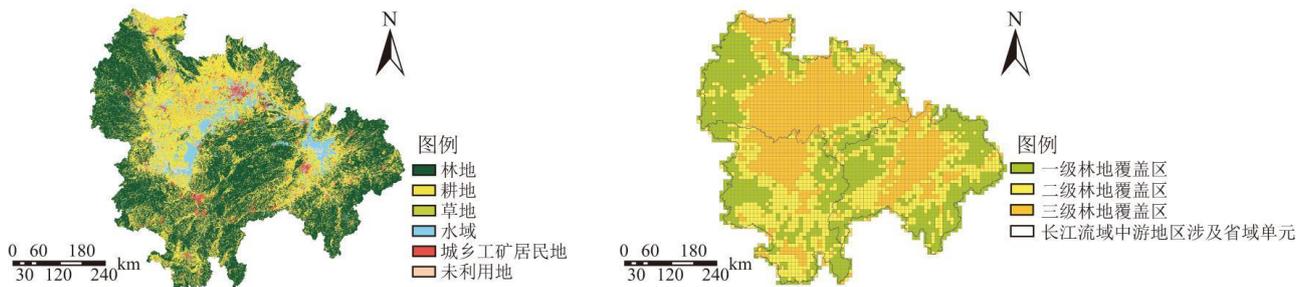


图 1 研究区基本情况及林地覆盖率等级划分示意图

近年来,长江中游地区处于快速发展阶段,区域经济发展与生态环境保护的矛盾相对较为突出,带来的空气污染问题不容小觑。研究表明长江中游部分地区的雾霾天数已经达到 100 天/年以上^[23], $PM_{2.5}$ 年均浓度值长时间低于《环境空气质量标准》(GB3095-2012)规定的二类区浓度限值。在长江中游地区 3 个城市群中,武汉城市圈和长株潭城市群污染较重,空气质量一般呈中度污染状态,污染严重天气集中在秋冬,持续时间较长,导致全年污染平均水平高于全国。如何在森林资源较为丰富的高水平工业化、城镇化地区改善空气质量、保护生态环境值得进一步思考与探索,因此选择长江中游地区作为本文的研究区域具有一定的价值。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

本研究涉及到的数据主要包括 PM_{2.5} 浓度、土地利用、降雨量、DEM、夜间灯光遥感影像和行政区划等地理信息数据。PM_{2.5} 浓度数据来源于加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组 (ACAG), 该数据集利用 NASA 卫星、地面监测站数据及地理加权回归模型综合估测而成, 已在系列研究中得到广泛应用^[24,25]。土地利用数据、降雨量数据、DEM 数据和行政区划数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心, 土地利用数据依据 CNLUCC 分类标准将地类重分类为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民地、未利用地六类^[26]。夜间灯光遥感数据来源于中科院中国遥感卫星地面站, 是由陈甫团队利用美国 Suomi-NPP 卫星 2012~2017 长时间观测的地球夜光数据, 通过进一步处理合成研制的地球夜光产品数据集 (<http://satsee.radi.ac.cn/cfimage/nightlight/>)。数据的具体参数所示, 时间节点大部分为 2017 年, 降雨量和行政区划数据因考虑到短期内无明显变化, 采用了 2015 年的数据。

本文前期的数据处理工作主要包括研究区的网格化以及林地覆盖率的分级。PM_{2.5} 可在大气中输送传播, 在网格尺度进行研究可消除区域内部行政边界的影响, 有利于实现流域范围内空气治理的联防联控。同时本研究选取的数据大部分是栅格类型的, 需要进行尺度的统一, 结合前人的研究及实际操作情况^[22,24], 本文将研究区域划分为 10km×10km 的网格, 共计得到 3000 余个网格单元。长江中游地区林地与 PM_{2.5} 的分布均具有较强的空间差异性, 且从空间分布来看两者之间有一定的联系, 同时已有实证研究证实了林地对于大气污染具有不同程度的改善作用^[6,7,8], 因此以林地覆盖率作为区域的划分因子具有一定的可行性。综上, 本研究中计算了每个网格单元的林地覆盖率, 在保证网格单元个数大致相同的前提下, 选择林地覆盖率较为规整的分界数, 将研究区划分为 3 个区域, 林地覆盖率大于等于 70% 的区域为一级林地覆盖区; 林地覆盖率为 35%~70% (包含 35%) 的区域为二级林地覆盖区; 林地覆盖率小于 35% 的区域为三级林地覆盖区, 同时 3 个区域的划分与高程起伏、自然保护区的空间分布等具有一定的一致性 (图 1)。

2.2 研究方法

本文根据林地覆盖率划分研究区域, 综合考虑社会经济、自然地理、空间格局 3 方面对于 PM_{2.5} 的影响, 在验证空间相关特性的基础上, 采用空间回归模型探索不同林地覆盖率下 PM_{2.5} 的影响因素及其作用强度的差异。

2.2.1 基于多元地理空间数据的影响因素选择和量化

结合 PM_{2.5} 从形成到清除的整个过程中各因素对 PM_{2.5} 的影响机理, 在前人研究的基础上综合考虑影响因素选取的全面性和数据的可获取性, 本文从社会经济、自然条件、空间格局 3 个方面选取 7 个影响因素 (表 1)。其中, 夜间灯光遥感数据表征社会经济发展情况, 主要影响 PM_{2.5} 的来源; DEM 通过地形的起伏影响 PM_{2.5} 的扩散; 降雨量则通过雨滴对于污染物颗粒的冲刷沉降作用于 PM_{2.5} 的清除; LPI、SHAPE_AM、DIVISION、AI 表征林地的空间格局, 影响林地对于 PM_{2.5} 的清除作用。

2.2.2 林地及其景观格局对 PM_{2.5} 的影响分析

森林被称为“地球之肺”, 有净化环境、提升空气质量的作用。研究区林地占比将近 50%, 但空间分布差异较大, 同时市区的林地面积因其社会经济的主导功能必然受限, 在此背景下考虑林地空间格局对 PM_{2.5} 的影响十分必要。景观格局是不同尺寸和形状的斑块在空间上的各种排列组合, 景观异质性在此得以体现^[29], 同时也能在一定程度上反映人类社会经济发展和自然条件改变对景观单元的影响。随着自然更替和人为的干预调节等, 景观格局可以在一定程度上得到改变, 影响景观的功能特性。林地为“汇”景观, 本身对于 PM_{2.5} 具有消减作用, 斑块的面积、形状、排列等对于其作用发挥有一定的影响。因此本文将林地及其空间格局作为研究重点, 试图通过优化生态用地的空间格局充分发挥林地景观“汇”的作用, 进而改善空气质量。

表 1 影响因素及其影响机理

	影响因素	影响机理	对 PM _{2.5} 的影响阶段
社会经济	夜间灯光遥感	社会经济发展过程中的人为排放是 PM _{2.5} 的主要来源 ^[11,13]	来源
自然条件	DEM	在山地分布的区域,受风等因素的影响,PM _{2.5} 更易扩散;研究区的平原大部分被山体包围,PM _{2.5} 主要扩散的气象条件—风难以对此区域的气流产生明显影响,形成的PM _{2.5} 较难扩散 ^[17]	扩散
	降雨量	降水可通过雨滴降落时的冲刷有效降低颗粒物浓度,在雨滴降落过程中通过惯性碰并过程和布朗扩散作用,捕获气溶胶粒子,使之从大气中清除 ^[15]	清除
空间格局	LPI	通过面积、形状、聚散度三方面表征林地的空间分布,进而影响林地对于PM _{2.5} 的清除 ^[27,28]	清除
	SHAPE_AM		
	DIVISION		
	AI		

本文依据已有研究成果和研究区的实际情况,从面积、形状、聚散度 3 个方面选取了 4 个景观格局指数表征林地的空间格局^[27,28],分别为表征面积的最大斑块指数 LPI、表征形状的面积加权平均斑块形状指数 SHAPE_AM、表征聚散度的景观分割指数 DIVISION 和景观聚集度指数 AI。其中 LPI 表示最大斑块面积占整个景观面积的比例,反映人类活动强度;SHAPE_AM 通过斑块的周长和面积计算,表示林地空间格局的复杂性,值越小,斑块形状越规则,空间格局越简单;DIVISION 的公式为:

$$\left[1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right] \quad (1)$$

a_{ij} 为斑块 ij 的面积, A 为景观总面积,表示林地斑块的分离度,值越大,景观空间格局越分散;AI 为相似临界斑块数量 g_{ij} 表示的林地斑块聚合程度,其公式如下,值越大,景观聚合度越高。

$$\left[\frac{g_{ij}}{\max \rightarrow g_{ij}} \right] (100) \quad (2)$$

2.2.3 不同林地覆盖率下 PM_{2.5} 的影响因素分析

PM_{2.5} 本身具有扩散的特性,其浓度变化是一个具有明显空间相关性的过程,传统的回归方法需要观测点彼此独立且随机,因此本研究在相关检验的基础上,尝试采用空间回归模型来进一步挖掘不同林地覆盖率下 PM_{2.5} 的影响因素。空间回归模型是在传统回归模型的基础上进行的扩展,常见的空间回归模型有空间滞后模型 (SLM, Spatial Lag Model) 和空间误差模型 (SEM, Spatial Error Model)。空间滞后模型考虑了被解释变量之间的空间相关性,空间误差模型则考虑了误差项的空间相关性。Anselin^[30]提

出了模型的一般式:

$$y = \rho W_1 y + X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon = \lambda W_2 \varepsilon + \mu \quad (4)$$

$$\mu \sim N(0, \sigma^2 I_n) \quad (5)$$

在本文中, y 为被解释变量 $PM_{2.5}$; W_1 、 W_2 为空间权重矩阵; ρ 为 W_1 的参数; X 为解释变量; β 为解释变量的回归系数; ε 为随机误差向量; λ 为空间自相关系数; μ 为随机误差项。当 $\rho=0$ 、 $\lambda=0$ 时, 一般式为线性回归模型 (OLS); 当 $\lambda=0$ 时, 一般式为空间滞后模型 (SLM); 当 $\rho=0$ 时, 一般式为空间误差模型 (SEM)。

空间回归模型的选择和模型形式需要通过一系列检验来确定。根据 Moran^[31]、Burridge^[32] 和 Anselin^[30] 提出的方法, 本文计算 Moran' sI、LM(error)、LM(lag), 通过统计值的显著性水平进行模型的优选。即若 Moran' sI 存在明显的空间依赖效应则证明传统回归分析并不适用, 需要进一步进行空间回归分析; 若 LM(error) 或 LM(lag) 显著则证明所选择的解释变量对于 $PM_{2.5}$ 浓度存在空间误差或空间滞后影响, 需要使用空间误差模型或空间滞后模型进行分析; 若二者均显著, 则需要通过稳健性检验进行进一步分析。

3 结果分析

3.1 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布

图 2 为 2017 年 $PM_{2.5}$ 的空间分布图, 根据 $PM_{2.5}$ 的浓度数值在自然断点法的基础上将其划分为五类, 其中 15 和 $30 \mu g/m^3$ 分别为《环境空气质量标准》中规定的一类区和二类区浓度限值, 从图中来看长江中游地区大部分区域未达到二类区浓度限值。2017 年, 长江中游地区 $PM_{2.5}$ 年平均浓度值为 $40.23 \mu g/m^3$, 超过了《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 规定的二类区浓度限值 $30 \mu g/m^3$, 研究区的空气污染处于较严重水平。另外, 研究区 $PM_{2.5}$ 空间异质性明显, 整个区域边缘部分和区域内部局部地区 $PM_{2.5}$ 浓度较低, 西北部 $PM_{2.5}$ 浓度较高且集中, 涉及到的 3 个省份从湖北到湖南再到江西 $PM_{2.5}$ 浓度依次递减, 这与地区的发展水平和林地分布有一定关联。

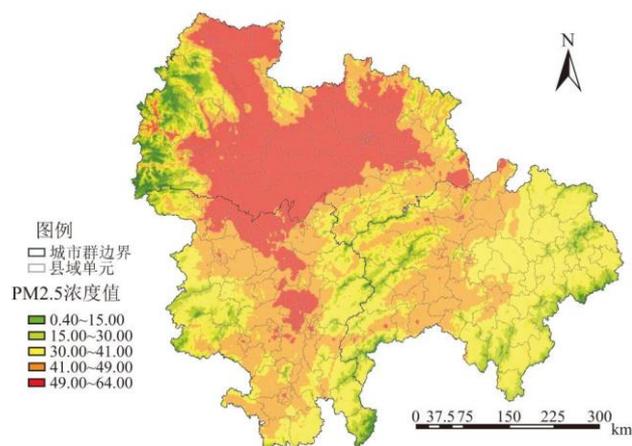


图 2 长江中游地区 $PM_{2.5}$ 空间分布图

3 个区域 $PM_{2.5}$ 浓度统计值如下表所示 (表 2), 无论是最小值、最大值还是均值都随着林地覆盖率的增加而减少, 证明了林地

对于 PM_{2.5} 的清除效应。三级林地覆盖区的 PM_{2.5} 浓度最小值明显大于其他两个区域，究其原因大致有三点，一是三级林地覆盖区工业化、城市化水平高，工厂排放、汽车尾气等造成 PM_{2.5} 来源增加；二是该区域地势低平、周围有山体分布，使得 PM_{2.5} 在此区域聚集，难以扩散；三是该区域主要为建设用地，具有 PM_{2.5} 清除能力的林地占比少，故 PM_{2.5} 浓度较高。

表 2 不同等级林地覆盖率区域 PM_{2.5} 浓度统计值 (μg/m³)

区域	最小值	最大值	均值
一级林地覆盖区	3.2937	54.5253	31.4173
二级林地覆盖区	3.7286	57.4606	41.6551
三级林地覆盖区	28.7667	61.0381	49.1920

3.2 PM_{2.5} 浓度变化与影响因素的相关性分析

在将研究区划分为 3 个等级林地覆盖区的基础上，运用 Person 相关性分析方法，挖掘不同等级林地覆盖率区域 PM_{2.5} 的主要相关因子。

从整体来看林地面积和各影响因素与 PM_{2.5} 相关性显著，这说明影响因素的变化与 PM_{2.5} 浓度的变化具有一致性，所选择的影响因素与 PM_{2.5} 空间分布联系紧密。林地面积占比是划分研究区等级的基准，从表中结果来看，3 个区域的林地面积占比均与 PM_{2.5} 浓度呈显著负相关，这与前人研究结果一致^[5,6]，也进一步证明以林地覆盖率划分研究区域的可行性。

从 3 个区域来看，随着林地覆盖率的增加，影响因素中夜间灯光、LPI、DIVISION、AI 和 DEM 与 PM_{2.5} 浓度相关系数绝对值增加，表明随着林地面积的增加，上述因素与 PM_{2.5} 的联系更加密切；SHAPE_AM 和降雨量与 PM_{2.5} 浓度相关系数绝对值减小，表明随着林地面积的增加，二者之间的相关性逐渐减小，相关系数的增减与林地及各因素对于 PM_{2.5} 的影响机理有一定的关系。在一级林地覆盖区，DEM 与 PM_{2.5} 的相关系数最大，表明一级林地覆盖区的地形起伏与 PM_{2.5} 空间分布一致性最高；在三级林地覆盖区，AI 与 PM_{2.5} 的相关系数最小且无显著相关性，表明三级林地覆盖区的林地聚集度与 PM_{2.5} 分布无明显联系，这也是 3 个区域的各影响因素中唯一一个未通过显著性检验的因素。

从各影响因素来看，通过纵向比较，各因素在 3 个区域与 PM_{2.5} 浓度的相关性方向基本一致。其中夜间灯光、DIVISION 与 PM_{2.5} 浓度显著正相关，这与二者的影响机理和常规认知相符。LPI、AI、降雨量、DEM 与 PM_{2.5} 浓度显著负相关，表明人类活动强度越小、林地空间格局越聚集、降雨量越大、DEM 越大，PM_{2.5} 浓度越低，即林地的滞尘作用，降雨的冲刷作用和 DEM 的扩散作用与 PM_{2.5} 的浓度降低有一定的联系。SHAPE_AM 对于 PM_{2.5} 浓度的相关性方向在各区域不一致。在林地覆盖率小于 70% 的二级林地覆盖区和三级林地覆盖区 SHAPE_AM 越大，表示林地斑块形状越复杂，林地斑块与周围景观的交换物质和能量的能力增强，使得林地能够吸收更多的不同来源的颗粒物，PM_{2.5} 浓度降低^[27]。在林地覆盖率大于 70% 的一级林地覆盖区 SHAPE_AM 越大，PM_{2.5} 浓度越大。事实上，“汇”景观格局中的形状和结构等对于 PM_{2.5} 的削弱作用是存在临界效应和季节差异的^[21,27]。“霾岛”与“城市热岛”现象也存在类似机理，景观形状对于 PM_{2.5} 浓度的变化有着双向影响，即斑块形状简单或复杂都有可能使得 PM_{2.5} 浓度增加^[5]。

3.3 不同林地覆盖率下的影响因素分析

在相关性分析的基础上，本文针对 3 个林地覆盖区分别建立回归方程，因主要比较不同研究区影响因素的系数差异，故需要将 3 个研究区纳入回归方程的影响因素相统一并将影响因素分别进行归一化处理。根据相关性分析的结果，考虑影响因素的解

释能力和多重共线性, 最终选择降雨量、DEM、夜间灯光和 DIVISION 这 4 个因子进行影响因素的探索, 经检验, 3 个回归方程的 VIF 值均可接受。

另外, 本研究采用了 F-statistics、Moran' sI、拉格朗日检验(LM)、稳健性检验(RobustLM)等来验证回归模型的有效性。OLS 结果表明, 3 个等级林地覆盖区的 F 统计量均通过显著性检验, R^2 均大于 0.75, 表明所选择的影响因子在整体上对 $PM_{2.5}$ 的影响显著, 且模型拟合程度良好。3 个回归方程的残差项 Moran' sI 统计量分别为 0.7290、0.7633 和 0.7993, 且均通过 1% 显著性检验, 残差项存在空间依赖性。由此可见, 传统回归分析的假设并不成立, 本研究更适合采用空间回归模型。3 个等级林地覆盖区 $PM_{2.5}$ 的 Moran' sI 均在 1% 的水平下显著, 表明 3 个等级林地覆盖区的 $PM_{2.5}$ 均具有显著空间正相关关系。LM(lag) 和 LM(error) 均通过 1% 的显著性检验, 但在稳健性检验中二级林地覆盖区的 RobustLM(lag) 并未通过显著性检验, 且从统计量数值来看, LM(error) 和 RobustLM(error) 均明显优于 LM(lag) 和 RobustLM(lag), 故可以判断空间误差模型(SEM)在本研究中优于空间滞后模型(SLM)。

从回归结果来看, 3 个等级林地覆盖区空间误差相关系数 γ 和空间效应系数 ρ 均通过显著性检验。这说明除了所选择的影响因素之外, 3 个等级林地覆盖区误差项的空间交互作用和相邻单元的 $PM_{2.5}$ 浓度均对于长江中游地区的 $PM_{2.5}$ 产生一定的影响。根据相关系数的统计值, 空间误差项对于长江中游地区 $PM_{2.5}$ 的影响程度更大, 未被纳入回归方程的影响因素如能源消费量、风速、相对湿度等的空间交互效应作用于研究区的 $PM_{2.5}$, 使得其产生空间聚集。相邻单元 $PM_{2.5}$ 的扩散也是致使 $PM_{2.5}$ 空间聚集的因素之一, 但其影响程度没有前者大。3 个等级林地覆盖区空间误差模型的 R^2 均大于 0.95, 表明实际值和预测值的相关性在 95% 以上, 模型具有良好的拟合效果。

从解释变量的回归系数来看, 影响因素的影响模式在不同林地覆盖率等级和不同回归模型中均一致。4 个影响因素中, DEM 对于 $PM_{2.5}$ 的影响最大, 且为负向作用, 表明 DEM 的增加对于 $PM_{2.5}$ 浓度降低有显著促进作用, 这与盆地地形不利于 $PM_{2.5}$ 扩散的影响机理相符, 也与学者们的研究一致^[17, 33]。根据空间回归的结果, 随着林地覆盖率减少, DEM 对于 $PM_{2.5}$ 的作用逐渐下降, 这一结果是长江中游地区的地形特征导致的。因 DEM 主要作用于 $PM_{2.5}$ 的扩散, 其变化趋势与 $PM_{2.5}$ 的空间分布最吻合, 在高程较高无遮挡的一级林地覆盖区 $PM_{2.5}$ 更易扩散; 而随着 DEM 的降低, 二级林地覆盖区和三级林地覆盖区四周的遮挡物相对增多, $PM_{2.5}$ 难以扩散, 使得 DEM 的作用逐渐下降。

降雨量对于 $PM_{2.5}$ 的作用强度次于 DEM, 降雨量的增加有助于 $PM_{2.5}$ 浓度的降低。根据空间回归结果, 降雨量在三级林地覆盖区的作用最大、二级林地覆盖区次之、一级林地覆盖区最小。这是由于在林地覆盖率较低的区域, 社会经济的发展和地形特点使得 $PM_{2.5}$ 来源增加的同时扩散的路径受阻, 而林地在此区域分布零散, 不能充分发挥作用, 故此区域降雨的清除效应相对更加明显。因此, 对于降雨量较低的区域可在空气污染严重时选择地进行人工降雨, 发挥雨滴对于污染物的沉降作用。

夜间灯光亮度值在一定程度上可表征社会经济发展水平^[4, 34, 35], 对于 $PM_{2.5}$ 的作用相对较小, 从回归结果来看, 夜间灯光越强的地方 $PM_{2.5}$ 浓度越大, 这与相关性分析结果和夜间灯光的影响机理相符。随着林地覆盖率的增加, 夜间灯光对于 $PM_{2.5}$ 的作用效果大致呈下降趋势, 即在林地覆盖率大于 70% 的地区, 社会经济的作用反而最大, 这是因为在这一区域人类活动相对较少而林地的阻滞吸收作用强致使 $PM_{2.5}$ 的值较小, 夜间灯光与 $PM_{2.5}$ 的变化趋势在 3 个区域中最接近。此外, 一级林地覆盖区与自然保护区、生态敏感区的分布大致相同, 具有一定的脆弱性, 与二级林地覆盖区和三级林地覆盖区相比, 人类活动本身就对其产生较大影响。

相较于其他 3 个影响因素, DIVISION 对于 $PM_{2.5}$ 的作用强度在空间回归方程中最小, 从系数的符号来看, DIVISION 对于 $PM_{2.5}$ 是正向作用, 这表明林地的空间格局越分散, $PM_{2.5}$ 的浓度越大, 这一结果从数据上验证了林地对于 $PM_{2.5}$ 的清除作用。从系数本身来看, 随着林地覆盖率的增加, DIVISION 对于 $PM_{2.5}$ 的作用强度先下降再上升, 且在二级林地覆盖区的作用效果明显小于一级林地覆盖区和三级林地覆盖区。这是由于一级林地覆盖区本身林地的占比就超过 70%, 林地的清除作用相对较强, 同时区域的脆弱性也较强, 故在自然或人为因素导致林地斑块分离时, 对于 $PM_{2.5}$ 的影响较大。三级林地覆盖区大部分以建设用地主导, 在具有

较大 $PM_{2.5}$ 浓度的基数时, 迫切需要林地发挥其清除作用, 故 DIVISION 对于这一区域的作用也较大。而二级林地覆盖区, 主要分布在山脚, 且大多以耕地、林地或水域主导, 区域中的土地利用类型也较为复杂, 耕地、水域在不同的研究中对于 $PM_{2.5}$ 均有一定的影响^[21,36], 故林地斑块分离度在此区域的作用效果相对不突出。

4 结论与建议

4.1 结论

本研究以长江中游地区为例, 系统分析林地及其空间格局对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响, 将林地覆盖率作为区域划分因子, 将林地的景观格局变化作为 $PM_{2.5}$ 浓度变化的重要影响因子, 结合自然地理和社会经济因素, 挖掘长江中游地区 $PM_{2.5}$ 变化的影响机理和空间溢出效应, 研究结果能够为流域尺度的国土空间优化和大气污染防治提供参考依据。研究结论主要包括以下 4 个方面:

(1) 不同林地覆盖率下影响因素对于 $PM_{2.5}$ 的影响模式虽然具有一定的相似性, 但社会经济因素、自然因素及林地空间格局对于 $PM_{2.5}$ 的作用方式和作用强度存在一定的差异。

(2) 在高林地覆盖率区域, 林地对于 $PM_{2.5}$ 的阻滞吸收作用更好, $PM_{2.5}$ 浓度明显降低。长江中游地区的 $PM_{2.5}$ 浓度空间异质性明显, 总体上呈现西北高、东南低的特征。

(3) 林地的景观破碎化会在一定程度上影响林地对于 $PM_{2.5}$ 的“汇”景观功能发挥。当林地斑块分离度增加时, 林地截留吸收颗粒物的能力就会减弱, 不利于大气中 $PM_{2.5}$ 浓度的降低。

(4) DEM 是影响 $PM_{2.5}$ 的主要因素, 因 $PM_{2.5}$ 在大气中输送传播的特性, 地势高无遮挡的区域更利于 $PM_{2.5}$ 的扩散, DEM 对于 $PM_{2.5}$ 的削弱作用随着林地覆盖率的增加而增加。

本研究在研究时点、影响因素的选择等方面仍存在不足之处, 如未考虑季节因素和时间变化, 对于不同林地种类如何影响 $PM_{2.5}$ 未作出进一步阐释等, 在未来有待讨论与完善。

4.2 建议

近年来, 长江中游地区是空气质量相对较差的区域, 亦是社会经济发展和国土空间开发较为迅速的区域, 亟待系统治理和统筹协调。基于以上研究结果, 本文建议根据不同等级林地覆盖区的特点, 加强长江中游地区大气污染的精细化治理, 结合 $PM_{2.5}$ 的空间外溢性特征, 强化地区之间的联防联控。具体来说, 针对性对策建议包括:

(1) 影响因素对于 3 个等级林地覆盖区 $PM_{2.5}$ 浓度的影响模式表现出一定的相似性, 可结合《长江中游城市群发展规划》开展区域联动的大气污染治理, 实现地区之间的联防联控, 如加强城市间对工业废气排放、城市扬尘等的协同控制; 共同推进生态屏障的建设等。

(2) 一级林地覆盖区以林地为主要地类, 主要分布在大巴山、武陵山等重要山脉处, 亦是全国重要生态敏感区和保护区的所在地, 建议结合长江重点生态区的生态保护修复工程, 加强重要山脉的林地建设, 积极进行森林抚育及退化林的修复, 充分发挥林地对于 $PM_{2.5}$ 的削弱作用, 同时加大对生态敏感区的保护和监管力度, 减少人类活动对于自然的破坏。

(3) 二级林地覆盖区中土地利用类型多样, 多以耕地或林地为主, 主要分布在农村和城郊地区, 建议根据主导用地功能来选择合适的 $PM_{2.5}$ 治理方式。如在耕地面积相对较大的区域, 从来源入手, 如严格控制秋季秸秆焚烧等; 在林地为主导的区域, 在符

合条件的前提下做好退耕还林的工作, 增加林地斑块之间的连通性, 同时做好居民的收入保障工作。

(4) 三级林地覆盖区是人类活动聚集的区域, 除了人类活动的影响以外, 重要“汇”景观的空间破碎程度亦对 $PM_{2.5}$ 产生一定作用。建议一方面从 $PM_{2.5}$ 的来源入手进行空气治理, 如推进清洁能源的研发与使用等, 另一方面在条件允许的情况下改善林地的空间格局, 如建设生态廊道、有选择性地在城市屋顶建设绿地, 增加可有效阻滞吸收 $PM_{2.5}$ 的林地面积等。

参考文献:

- [1] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2018, 73(1):177-191.
- [2] CUHEN A J, BRAUER M, BURNETT R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015[J]. Lancet, 2017.
- [3] 唐昀凯, 刘胜华. 城市土地利用类型与 $PM_{2.5}$ 浓度相关性研究——以武汉市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9):1458-1463.
- [4] 欧维新, 张振, 陶宇. 长三角城市土地利用格局与 $PM_{2.5}$ 浓度的多尺度关联分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7):11-18.
- [5] 杨婉莹, 刘艳芳, 刘耀林, 等. 基于 LUR 模型探究城市景观格局对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响——以长株潭城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9):2251-2261.
- [6] 赵文斐, 于占江, 王让会, 等. 石家庄市 $PM_{2.5}$ 时空特征及其对土地利用变化的响应[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12):2404-2413.
- [7] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 细颗粒物($PM_{2.5}$)与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8):2203-2210.
- [8] 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红. 基于 LUR 模型的中国 $PM_{2.5}$ 时空变化分析[J]. 环境科学, 2018, 39(12):5296-5307.
- [9] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 等. 6 种城市绿地空气 $PM_{2.5}$ 浓度变化规律的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008(4):494-498.
- [10] 李琪, 陈文波, 郑蕉, 等. 南昌市中心城区绿地景观对 $PM_{2.5}$ 的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11):3855-3862.
- [11] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, 39(5):2498-2504.
- [12] ONUORAH C U, LETON T G, MOMOH Y. Influence of meteorological parameters on particle pollution ($PM_{2.5}$ and PM_{10}) in the tropical climate of Port Harcourt, Nigeria[J]. Archives of Current Research International, 2019:1-12.
- [13] 曹宁, 黄学敏, 祝颖, 等. 西安冬季重污染过程 $PM_{2.5}$ 理化特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1):32-39.
- [14] AHMAD M, YU Q, CHEN JING, et al. Chemical characteristics, oxidative potential, and sources of $PM_{2.5}$ in wintertime in Lahore and Peshawar, Pakistan[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 102:148-158.

-
- [15]蒲维维, 赵秀娟, 张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6):716-723.
- [16]姚青, 蔡子颖, 刘敬乐, 等. 气象条件对 2009-2018 年天津地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1):65-75.
- [17]黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因素及空间溢出效应[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8):3539-3548.
- [18]潘本锋, 赵熠琳, 李健军, 等. 气象因素对大气中 $PM_{2.5}$ 的去除效应分析[J]. 环境科技, 2012, 25(6):41-44.
- [19]NOWAK D J, HIRABAYASHI S, BODINE A, et al. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States[J]. Environmental Pollution, 2014, 193(oct.):119-129.
- [20]VARSHA G, SATOSHI H, GUY Z, et al. Air quality and human health impacts of grasslands and shrublands in the United States[J]. Atmospheric Environment, 2018, 182:193-199.
- [21]谢舞丹, 吴健生. 土地利用与景观格局对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响——以深圳市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(1):160-170.
- [22]杨伟, 姜晓丽. 华北地区大气细颗粒物($PM_{2.5}$)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应[J]. 环境科学, 2020, 41(7):2995-3003.
- [23]柏玲, 姜磊, 陈忠升. 长江中游城市群 $PM_{2.5}$ 时空特征及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5):960-968.
- [24]杨文涛, 譙鹏, 刘贤赵, 等. 2011~2017 年中国 $PM_{2.5}$ 多尺度时空分异特征分析[J]. 环境科学, 2020, 41(12):5236-5244.
- [25]黄小刚, 赵景波, 辛未冬. 基于网格的长三角 $PM_{2.5}$ 分布影响因素及交互效应[J]. 环境科学, 2021, 42(7):3107-3117.
- [26]徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). 中国科学院地理科学与资源研究所数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI:10.12078/2018070201).
- [27]雷雅凯, 段彦博, 马格, 等. 城市绿地景观格局对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 分布的影响及尺度效应[J]. 中国园林, 2018, 34(7):98-103.
- [28]赵育恒, 曾晨. 武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(4):1426-1440.
- [29]周志翔, 主编. 景观生态学基础[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [30]ANSELIN L. Lagrange multiplier test diagnostics for spatial dependence and spatial heterogeneity[J]. Geographical Analysis, 1988, 20(1):1-17.
- [31]MORAN, AP P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. Biometrika, 1950, 37(1/2):17-23
- [32]BURRIDGE P. On the cliff-ord test for spatial correlation[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1980, 42(1):107-108.

[33]江笑薇,任志远,孙艺杰.基于LUR和GIS的西安市 $PM_{2.5}$ 的空间分布模拟及影响因素[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2017,45(3):80-87,106.

[34]徐康宁,陈丰龙,刘修岩.中国经济增长的真实性的检验[J].经济研究,2015,50(9):17-29,57.

[35]孙阳,刘新,苏亚聪,等.基于夜间灯光数据估算安徽省县级尺度城镇化水平[J].地球信息科学学报,2020,22(9):1837-1847.

[36]曾元梓,陈奕汝,郭慧娟,等.城市湖泊湿地建成环境对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度影响因子分析——以武汉市为例[J].中国园林,2018,34(7):104-109.