

基于夜间灯光影像的能源消费与 $PM_{2.5}$ 时空关系研究*

裴川乐¹⁾ 连炎清^{2)†}

(1)北京师范大学地球科学前沿交叉研究中心, 100875, 北京; (2)中国科学院地球环境研究所, 710061, 陕西西安)

摘要 利用能源消费统计数据与夜间灯光影像对陕西省能源消费进行空间化处理, 结合 $PM_{2.5}$ 遥感数据, 基于双变量空间相关性分析等方法, 研究了陕西省能源消费与 $PM_{2.5}$ 的时空关系, 并利用随机森林回归模型探讨了影响 $\rho(PM_{2.5})$ 变化的能源消费因素. 结果表明: 1) 2001—2013 年陕西省 $\rho(PM_{2.5})$ 先增大后减小, 最高值达到 $28.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 省内 $PM_{2.5}$ 分布的空间异质性较强, 其中关中地区的 $\rho(PM_{2.5})$ 最高; 2) 陕西省能源消费量逐年上升, 在空间上的分布与 $\rho(PM_{2.5})$ 类似, 关中地区的能源消费量最多; 3) 陕西省能源消费量与 $\rho(PM_{2.5})$ 的 Moran's I 达到了 0.289, 表明二者之间有着明显的空间正相关性, 即高能源消费的区域有着高质量浓度的 $PM_{2.5}$ 分布; 4) 人口密度、路网密度与能源消费总量是陕西省 $\rho(PM_{2.5})$ 变化的重要驱动因素.

关键词 $PM_{2.5}$; 能源消费; 时空关系; 空间相关性; 随机森林

中图分类号 X87

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020241

0 引言

清洁的空气环境是当代人类生活的基本条件. 伴随着城市化的快速发展, 中国的大气污染变得日益严重. $PM_{2.5}$ 指的是大气中空气动力学直径 $<2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 是目前中国面临的最重要的大气污染物之一^[1], 它不仅能使大气能见度降低, 且参与大气化学反应生成其他污染物, 对人类身心健康带来极大危害^[2-4]. 作为世界上最大的能源消费国之一, 中国的能源消费量长期居高不下. 随着经济的快速发展, 能源消费量始终保持着—个快速增长的趋势, 由此带来的空气污染等环境问题也日益恶化^[5-6]. 国内外学者对能源消费与空气质量间的关系进行了大量研究: 宋敏等^[7] 基于灰色关联分析法研究了陕西能源消费和环境质量之间的关系, 结果表明二者之间具有显著的关联关系; 欧阳等^[8] 检测了北京西三环主干道附近典型区域的 $\rho(PM_{2.5})$, 发现道路两旁 $\rho(PM_{2.5})$ 在水平和垂直方向上的分布存在一定规律, 车流量的大小是影响道路两旁 $\rho(PM_{2.5})$ 高低的重要因素; 杨晓叶等^[9] 梳理了空气污染与中国城镇化率的关系, 构建计量经济学模型, 指出二者间具有双向的格兰杰因果关系.

现有研究成果为深入研究 $PM_{2.5}$ 的时空特征和影响因素提供了理论依据, 但多是利用数理统计方法研究影响因素与 $\rho(PM_{2.5})$ 的时间序列相关关系, 缺乏对二者空间关系的探讨. 且已有研究主要关注中国东

部沿海地区^[10] 及京津冀^[11-12] 等发达地区, 对西部地区的关注相对较少. 陕西省地处我国西北内陆, 是“一带一路”建设的重要节点省份. 随着省内经济的迅速发展, 能源消费需求持续增加, 大气污染也变得日益严重. 陕西省地形势南北高中部低, 且自西向东倾斜, 较差的地形条件不利于大气污染物的扩散^[13]. 关中地区受工业废气、机动车尾气、沙尘气溶胶等多方面因素的影响, 长期以来是我国大气污染最严重的区域之一^[14-16], 西安^[17-18]、渭南^[19]、榆林^[20]、汉中^[21] 等城市都存在着程度不同的 $PM_{2.5}$ 污染. 如何在防治 $PM_{2.5}$ 污染的前提下, 对当地能源消费进行合理布局, 已成为影响当地社会经济可持续发展的关键问题. 鉴于此, 本文利用夜间灯光影像对能源消费进行空间化处理, 结合 $PM_{2.5}$ 遥感数据, 探索 $PM_{2.5}$ 与能源消费的时空关系. 由于随机森林方法便于建立自变量与因变量的非线性关系, 且能够评估自变量的重要性, 利用随机森林回归方法探究驱动 $\rho(PM_{2.5})$ 变化的能源消费影响因素, 为陕西省减少灰霾污染、实现“绿色一带一路”发展提供科学参考.

1 研究区与数据

1.1 研究区概况 陕西省位于我国西北内陆, 介于 $105^{\circ}29' \sim 111^{\circ}15' \text{E}$ 、 $31^{\circ}42' \sim 39^{\circ}35' \text{N}$, 总面积 20.56 万 km^2 , 包括高原、山地、平原、盆地等多种地形, 分

* 中国科学院先导性科技专项(B类)资助项目(XDB40020100)

† 通信作者: 连炎清(1962—), 男, 博士, 研究员. 研究方向: 水文与水环境模拟. E-mail: lianyq@ieecas.cn

收稿日期: 2020-06-17

为陕北、关中、陕南3个区域,秦岭山脉是我国南北方的气候分界线。陕西省区位优势明显,是连接西北地区与华北、华中地区的重要枢纽,是我国西部大开发的前沿阵地,是国家“一带一路”倡议的重要节点,省会城市西安是“陆上丝绸之路”的起点^[22]。

1.2 数据来源及处理 DMSP/OLS夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)网站(<https://www.ngdc.noaa.gov>),借鉴曹子阳等^[23]提出的影像校正方法对DMSP/OLS夜间灯光数据进行校正。能源消费数据来自于《中国能源统计年鉴》《陕西统计年鉴》及各地市统计年鉴。PM_{2.5}数据来源于大气成分分析组织(ACAG)发布的全球地面 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 遥感反演数据(http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140),已在我国相关研究中广泛应用^[24-26]。为验证该数据集在研究区的数据质量,从全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>)获取了2014—2016年研究区范围内全部监测站点的PM_{2.5}实时监测数据。研究区内站点共计52个,均匀分布于陕西省各地市,在空间上有着较好的代表性。计算对应年份各站点的年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$,将计算结果与对应位置的遥感数据进行相关分析。结果表明,二者之间的相关系数高达0.8186,具有显著的相关性,说明该数据能够满足研究要求。为了保证数据的可靠性与平稳性,所用数据取原始数据每3年的平均值,以中间年份作为研究数据。土地覆盖类型数据来源于美国国家航空航天局(NASA)所提供的MODIS三级土地覆盖类型数据产品(<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod12.php>)。计算影响因子的基础统计数据,主要来源于相应年份的《陕西统计年鉴》《中国城市统计年鉴》和《中国县域统计年鉴》等,部分缺失数据结合相应地市级统计局公布的统计数据补充。行政边界矢量数据等辅助数据来自于国家地理信息公共服务平台(<https://service.tianditu.gov.cn>)。

2 研究方法

2.1 能源消费空间化 第一产业能源消费空间化:已有文献指出,农业生产过程中会释放一定量的污染性气体,对区域空气质量会产生一定的影响^[27-28],因而本文在研究能源消费与PM_{2.5}关系时将第一产业考虑进去。由于GDP中的第一产业与土地利用数据之间存在显著相关性^[29],本文结合MODIS土地分类数据,根据统计年鉴中农业、林业、牧业、渔业的GDP所占权重对第一产业能源消费数据进行各行业的分配。将MODIS土地分类数据中与第一产业活动相关的土地利用类型重分类为农田、林地、草地和水体4类,

分别对应农业、林业、牧业、渔业的能源消费情况,重分类结果如表1所示。利用ArcGIS的分区统计工具计算得到各土地利用类型的像元数,用农、林、牧、渔业的能源消费值分别除以对应土地类型的像元数,得到各土地利用类型的平均生产总值,再将其赋值于对应类型像元,从而得到第一产业能源消费的空间化栅格数据。

表1 MODIS数据重分类结果

重分类结果	原始编码	原始分类
1 耕地	12	农用地
	14	农用地/自然植被拼接
2 林地	1	常绿针叶林
	2	常绿阔叶林
	3	落叶针叶林
	4	落叶阔叶林
	5	混交林
	6	稠密灌丛
	7	稀疏灌丛
3 草地	16	稀疏植被
	8	木本热带稀树草原
	9	热带稀树草原
	10	草地
4 水体	11	永久湿地

二三产业能源消费空间化:大量研究表明,二三产业的能源消费与夜间灯光相关性较强^[30-32],因而利用夜间灯光数据对二三产业能源消费进行空间化处理。提取MODIS土地利用分类数据中的城市和建筑区类型作为掩膜,利用该掩膜裁剪DMSP/OLS夜间灯光影像得到二三产业夜间灯光总值,并与二三产业能源消费统计值进行回归分析,构建能源消费反演模型。最后利用模型反演夜间灯光影像得到二三产业能源消费量。

2.2 双变量空间相关性分析 为研究变量间的空间相关性,一般采用莫兰指数(Moran's *I*)和局部空间自相关指数(local indicator of spatial association, LISA)来对全局空间自相关和局部空间自相关进行描述。为了刻画多个变量之间的空间相关性,Anselin等^[33-34]在Moran's *I*的基础上进一步拓展得到双变量全局自相关和局部自相关,为揭示不同要素空间分布的相关性提供了可行方法^[35]。本文首先利用ArcGIS软件的“栅格转点”工具,将栅格影像转换为矢量点数据;再将点数据输入GeoDa软件,建立能源消费与PM_{2.5}的空间权重矩阵,计算双变量Moran's *I*

(Bivariate Moran's I); 通过对 Moran's I 的分析进一步研究能源消费与 $PM_{2.5}$ 的时空关系演变. 双变量局部 Moran's I 的定义为

$$I_M = z_l^p \sum_{q=1}^n W_{pq} z_m^q,$$

式中 W_{pq} 为空间单元 p 、 q 间的空间权重矩阵. 能源消费与 $PM_{2.5}$ 间的影响会随距离增大而减弱, 基于此构建反距离空间权重矩阵, 根据不同矢量点距离的倒数来确定权重, 2 点之间距离越近权重越大, 距离越远权重越小^[36]. $z_l^p = \frac{x_l^p - \bar{x}_l}{\sigma_l}$, $z_m^q = \frac{x_m^q - \bar{x}_m}{\sigma_m}$, 其中 x_l^p 是空间单元 p 的属性 l 的值, x_m^q 是空间单元 q 的属性 m 的值, \bar{x}_l 、 \bar{x}_m 是属性 l 、 m 的平均值, σ_l 、 σ_m 是属性 l 、 m 的方差. I_M 的取值 $[-1, 1]$. 若属性 l 与属性 m 在空间上呈正相关关系, 则 $I_M > 0$, 正值越大, 正相关性越强; 在空间上呈负相关关系则, $I_M < 0$, 负值越小, 负相关性越强; $I=0$ 时两属性空间无关.

2.3 随机森林回归 随机森林(random forest)模型是一种基于分类树的机器学习算法, 由 Breiman 在 2001 年所提出, 模型利用 bootstrap 重抽样方法从原始样本中抽取多个样本, 对每个样本进行决策树建模, 然后组合多棵决策树的结果, 通过投票得出最终预测结果^[37-38]. 随机森林模型在解决回归、分类等问题上有着明显的优势, 同时还可以对变量的重要性进行评估. 本文在 R 语言平台上进行随机森林回归, 利用 random

forest 包构建随机森林回归模型, 对影响因素与 $\rho(PM_{2.5})$ 进行回归分析, 探究不同影响因素的驱动力大小. 训练随机森林回归模型时有 2 个重要参数: 决策树数量 $n(\text{tree})$, 决策树分裂时的候选变量个数 $m(\text{try})$. 本文利用 OOB 无偏估计方法对不同参数设置下模型精度进行估计. 综合考虑模型精度及计算机运行性能, 最后确定参数 $n(\text{tree})$ 取值为 2000, $m(\text{try})$ 取值为 10. 模型返回值中的 IncMSE 为 Increase in MSE 的缩写, 其含义为对每一个自变量随机赋值, 若该自变量重要, 预测的误差会增大, 可用来反映影响因素的驱动力大小, IncMSE 值越大, 变量的驱动力越大^[39]. 本文利用 IncMSE 来表示各影响因素的驱动力大小.

3 结果与分析

3.1 能源消费空间化拟合精度检验 叠加第一产业与二三产业的能源消费总量(均以标准煤计算)空间化结果, 即得到总体能源消费空间化结果. 依据顾羊羊等^[40]提出的验证方法, 将空间化拟合数据与由统计数据计算得到的 13 年陕西省能源消费量进行对比, 对第一产业、二三产业以及总体能源消费拟合结果进行验证, 结果如图 1 所示. 计算模拟值与统计值的均方根误差(RMSE)与平均相对误差(MRE), 计算结果如表 2 所示. 由图 1 和表 2 可知, 模型的拟合优度 R^2 较高, 且均方根误差 RMSE 与平均相对误差 MRE 较小, 说明模型拟合精度较高, 可用于后期能源消费与 $PM_{2.5}$ 时空关系分析.

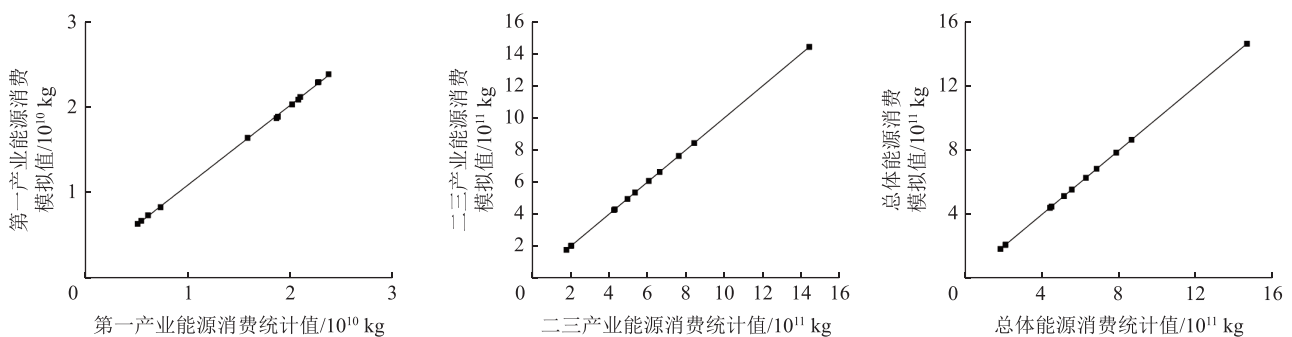


图 1 2001—2013 年陕西省能源消费统计值与模拟值(以标准煤计算)

3.2 $PM_{2.5}$ 与能源消费时空特征

3.2.1 $PM_{2.5}$ 与能源消费的时序变化 对陕西省 2001—2013 年的 $\rho(PM_{2.5})$ 年均值计算可知, 13 年中陕西省年均 $\rho(PM_{2.5})$ 先升后降(图 2). 其中: 2001—2006 年为波动上升阶段, 峰值达到 $28.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 2007—2013 年为波动下降阶段, 降至 $24.73 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 为进一步探究 $PM_{2.5}$ 随时间变化的规律, 参考国家空气质量标准, 以年均一级质量浓度限值 $15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、年均二级质量

浓度限值 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为分界线, 将年均 $\rho(PM_{2.5})$ 划分为 3 个区间, 分析各区间内栅格占比的变化情况(图 3). 由图 3 可知: 2001—2013 年年均 $\rho(PM_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的栅格比例先降后升再降, 从 2001 年的 5.83% 增至 2006 年的 14.22%, 又降至 2009 年的 6.52%, 再增至 2013 年的 11.26%; 而年均 $\rho(PM_{2.5}) \leq 15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的栅格比例变化大致与之相反, 由 2001 年的 2.5% 降至 2006 年的 0.05%, 后又增至 2009 年的 18.42%, 再降至

表 2 陕西省能源消费空间化模型拟合精度评价结果

能源消费拟合	MRE	RMSE/10 ⁸
第一产业能源消费拟合	6.84	4.96
第二三产业能源消费拟合	0.04	2.25
总体能源消费拟合	0.18	10.70

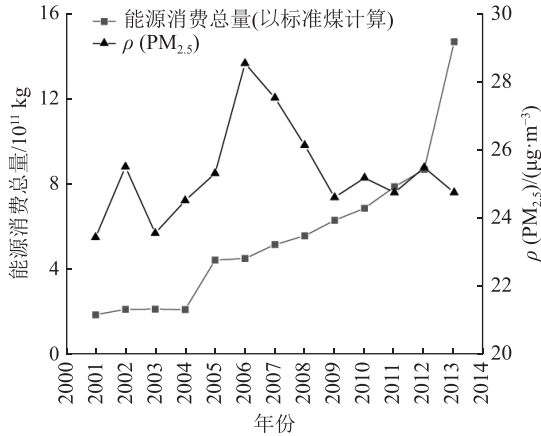


图 2 2001—2013 年陕西省 ρ(PM_{2.5}) 变化

2013 年的 11.26%。究其原因可能是国家生态文明建设相关政策的实施具有一定成效, 2006 年之后的大气污染受到一定程度上的治理, 但影响空气质量的相关因素仍未得到根本性治理。相比于 2001 年, 2013 年超过二级标准的栅格又新增了 5.43%, 是 2001 年的 2 倍, 其中年均质量浓度在 40~50 μg·m⁻³ 的栅格由 1.45% 增至 7.75%, 增加幅度超过 4 倍, 表明高污染区域呈快速扩张趋势。

陕西省 2001—2013 年能源消费总量不断上升(图 2), 由于 2005 年统计数据口径发生改变, 导致 2005 年数



图 3 2001—2013 年陕西省 ρ(PM_{2.5}) 变化趋势

据产生突变^[41], 但整体仍保持快速增长趋势。其中, 2013 年的能源消费总量达到 1.46×10¹² kg, 约是 2001 年能源消费量的 7.8 倍。陕西省经济发展对化石能源具有高度依赖性, 且该地区第二产业所占比重较大, 因而在经济快速发展、城镇化加速进行的情况下, 消耗了大量的能源物质, 带来大量的大气污染物排放。

3.2.2 PM_{2.5} 与能源消费的空间格局 陕西省的 PM_{2.5} 高质量浓度地区主要分布在关中地区, 陕南次之, 陕北最小(图 4)。计算 2001—2013 年的 ρ(PM_{2.5}) 多年均值可知, 各城市中 ρ(PM_{2.5}) 多年均值最高的渭南市达到了 39.76 μg·m⁻³, 而最低的榆林市仅有 19.84 μg·m⁻³, 说明陕西省内部 PM_{2.5} 的空间异质性较高。其中, 关中地区的渭南、咸阳、西安 ρ(PM_{2.5}) 多年均值大于国家空气质量二级标准, 分别为 39.76、36.48 与 35.63 μg·m⁻³, 且超过二级标准的地区面积随时间不断扩大。

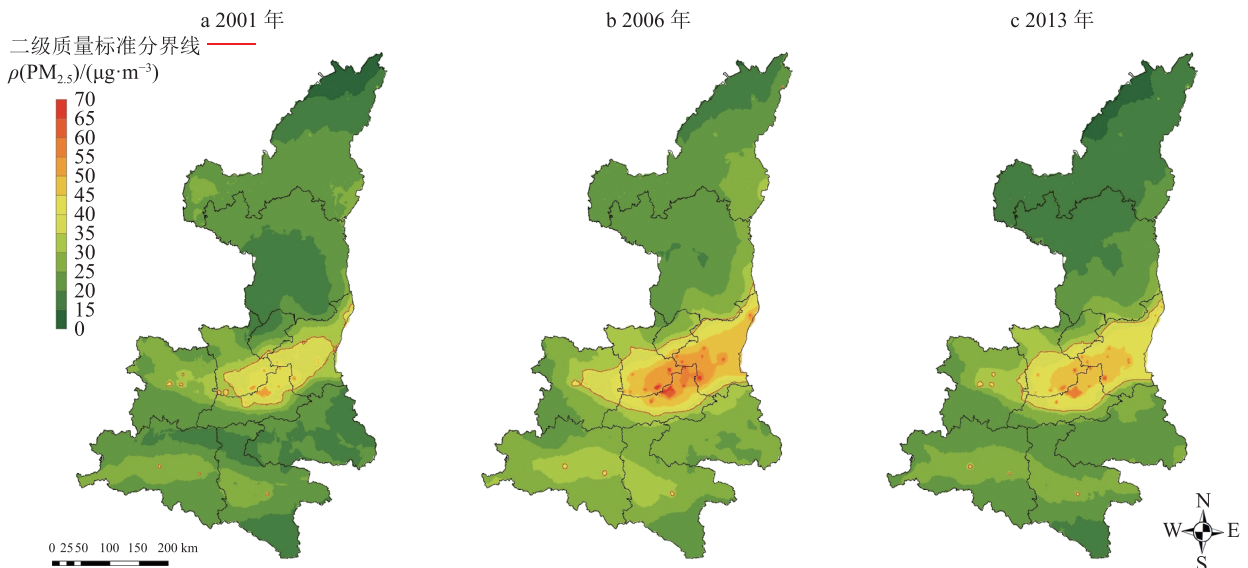


图 4 2001—2013 年陕西省 PM_{2.5} 空间格局演变特征

第一产业能源消费情况如图 5 所示. 关中地区、汉中、商洛附近分布大量农田, 能源消费较高的同时, 也分布有较高质量浓度的 $\text{PM}_{2.5}$, 表明第一产业的生产活动所消耗的能源对 $\text{PM}_{2.5}$ 有一定的贡献. 图 6 为总体能源消费空间化结果. 随时间推移, 陕西省能源消费总量在不断增高, 其中西安的能源消费量是全省最高的, 多年均值达到 2.29×10^{11} kg. 分区域分析可知, 陕南、陕北的差异不大, 多年均值分别为 4.66×10^{10} 与 3.84×10^{10} kg, 但关中地区的能源消费量最大, 多年均值达到 4.70×10^{11} kg, 说明省内能源消费的空间异质性较大.

对比图 4 与图 6, 发现在能源消费量较大的区域也有着高质量浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 分布. 在空间维度上计算

不同年份内陕西省各区域能源消费量与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的相关系数, 并对其进行相关性检验, 计算结果如图 7 所示. 表中各年份相关系数均 > 0.6 , 且 $P < 0.05$. 综合能源消费与 $\text{PM}_{2.5}$ 地图及相关性分析结果, 说明能源消费与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 有着显著的空间正相关性, 即能源消费高的区域, 其 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 也较高. 这一结果表明, 陕西省内不同的地区, 由于能源消费量的不同, 带来了 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的差异性分布, 说明能源消费与 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间相关性较强, 能源消费是导致 $\text{PM}_{2.5}$ 空间异质性的影响因素.

3.3 能源消费与 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间相关性分析 应用 GeoDa 软件生成双变量 Moran's I 散点图(图 8)与双变量局部空间自相关 LISA 聚类地图(图 9), 对能源

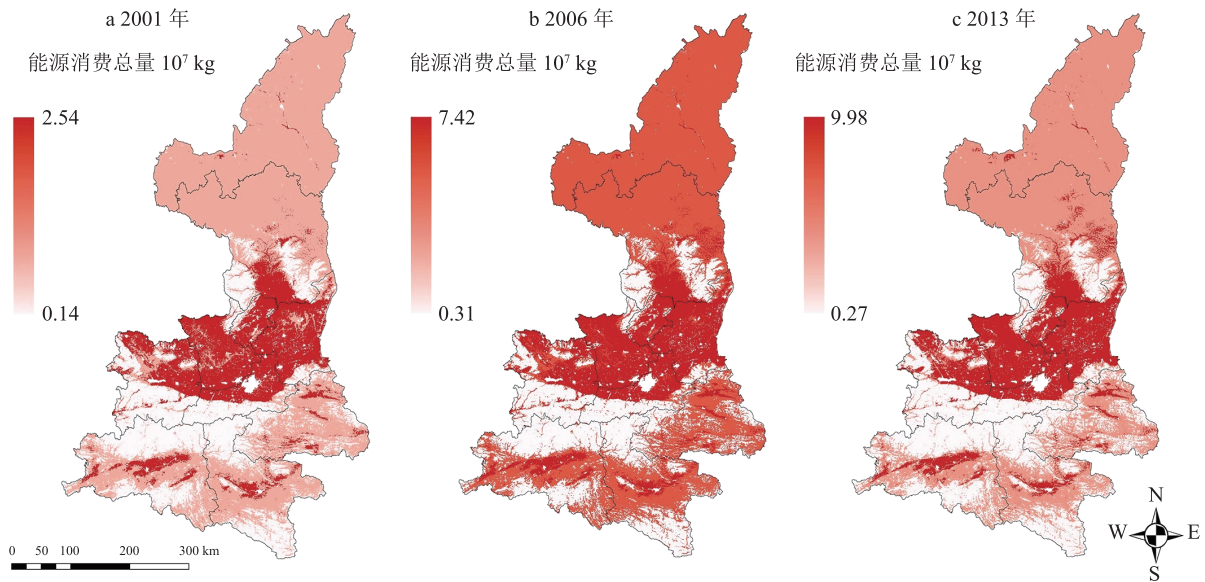


图 5 2001—2013 年陕西省第一产业能源消费空间格局演变特征

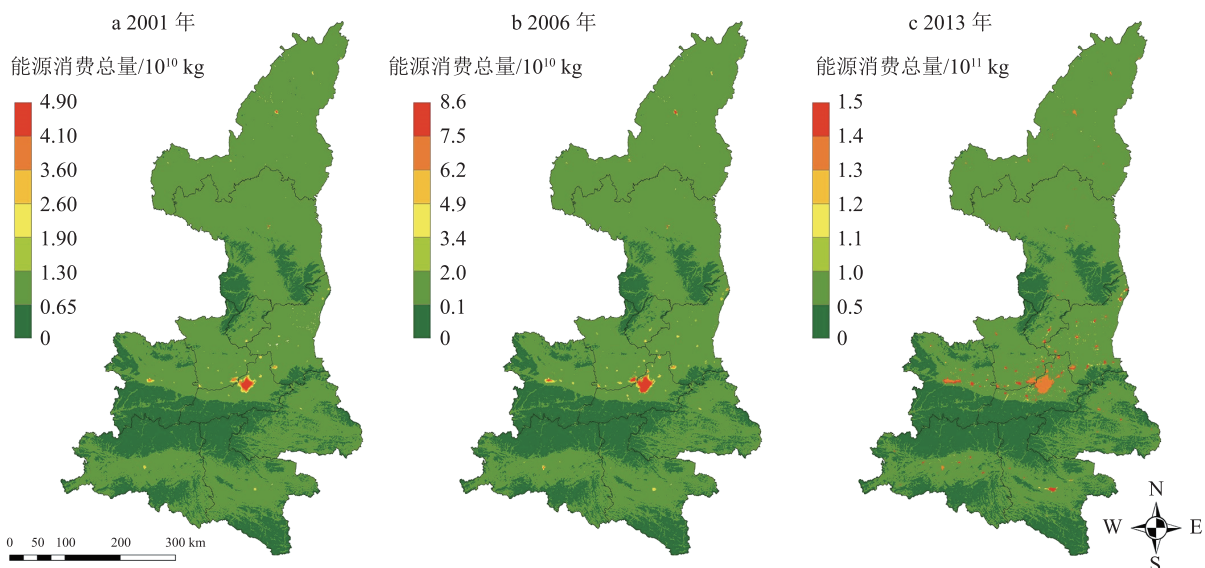


图 6 2001—2013 年陕西省能源消费空间格局演变特征

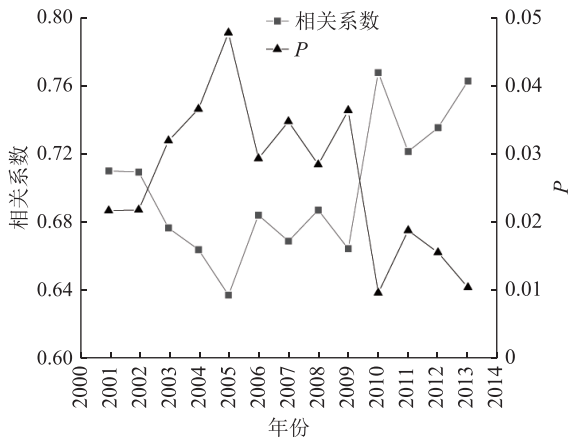


图 7 2001—2013 年陕西省能源消费与 PM_{2.5} 质量浓度相关系数

消费与 PM_{2.5} 的空间相关性进行研究. 图 8 中, 横纵轴分别表示多年平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与能源消费总量 (简称 EC). 不同的象限表示某一位置能源消费总量与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的不同空间关系: 第一象限为“高-高”分布, 表示该位置能源消费量大且 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高; 第二象限为“低-高”分布, 表示该位置能源消费量高但 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低; 第三象限为“低-低”分布, 表示该位置能源消费量低同时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低; 第四象限为“高-低”分布, 表示该位置能源消费量低但 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高. 从 Moran's *I* 散点图中点的分布可知, 大部分点分布于第一象限, 同时 Moran's *I* 达到了 0.289, 进一步表明了能源消费量与 PM_{2.5} 的空间关系显著, 高能源消费的区域同样有着高质量浓度的 PM_{2.5} 分布, 说明二者之间存在着显著的空间正相关性.

图 9 表示能源消费量与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 双变量局部空间自相关 LISA 聚类地图, 其中不同颜色的点表示不同的空间关系. 红色和蓝色分别表示“高-高”、“低-低”聚集的空间正相关关系. 由图 9 可知: “高-高”聚集关系的点主要分布在关中地区的西安、宝鸡、渭南、咸

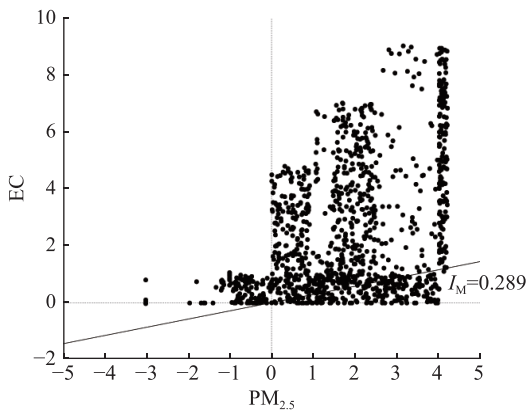


图 8 PM_{2.5} 与能源消费 (EC) 双变量局部空间 Moran's *I* 散点

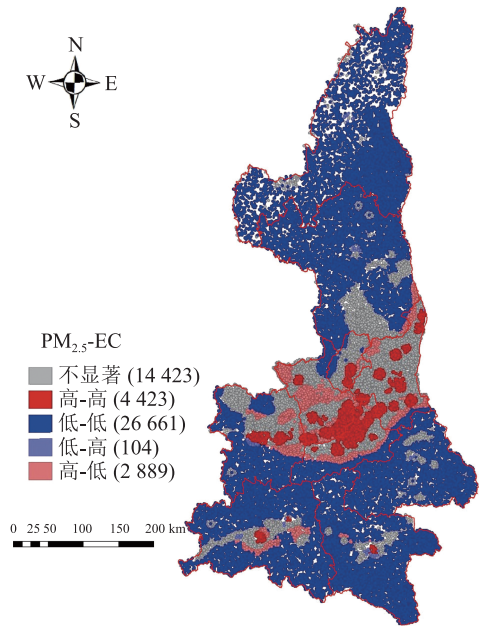


图 9 陕西省 PM_{2.5} 与能源消费的双变量 LISA 聚类

阳、铜川及陕南的汉中、安康等城市, 这些城市的经济水平较高, 人口密度大, 交通活动频繁, 对能源有着大量的消费, 产生大量 PM_{2.5} 的前体物质. “低-低”聚集关系的点在陕西省内大量分布, 对应的地区属于农耕地或山区林地, 生长有大量的绿色植被. 植被的存在既能够降低空气流速、改变空气流动路径延缓 PM_{2.5} 传播, 又可以通过覆盖裸露的地表以减少 PM_{2.5} 来源, 降低该区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ [42-43]. 而“高-低”聚集关系的点则分布于“高-高”聚集点的周围, 这些地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高但能源消费量低, 位于城市边缘地带, 人类活动较少. 其大气中存在较高质量浓度的 PM_{2.5}, 可能是由于空气流动导致高质量浓度 PM_{2.5} 地区的大气污染传播过来所致 [44]. 图 9 中大量存在着“高-高”“低-低”聚集关系的点, 进一步验证二者之间存在显著的空间正相关性.

关中地区由西安、宝鸡、渭南、咸阳、铜川 5 市组成, 人口密集, 经济水平发达. 由上述研究可知, 该地区能源消费与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较全省其他地区空间关系更强, 因而对其进行深入探讨. 图 10-a~c 为关中地区 2001、2006、2013 年能源消费与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 聚类地图, 对应的 I_M 分别为 0.213、0.256、0.314, 表明二者有着显著的空间相关性, 且随时间进展空间关系逐渐增强, 表明能源消费对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响逐渐增大. “高-高”聚集关系的区域面积在不断扩大, 2013 年的面积大约是 2001 年的 2 倍, 其中西安市与渭南市的变化较为明显, 但二者的发展模式较不同. 西安市存在“高-高”聚集关系的点的集聚性较强, 大部分位于市中心区域, 而渭南市“高-高”聚集关系的点则分布较为分

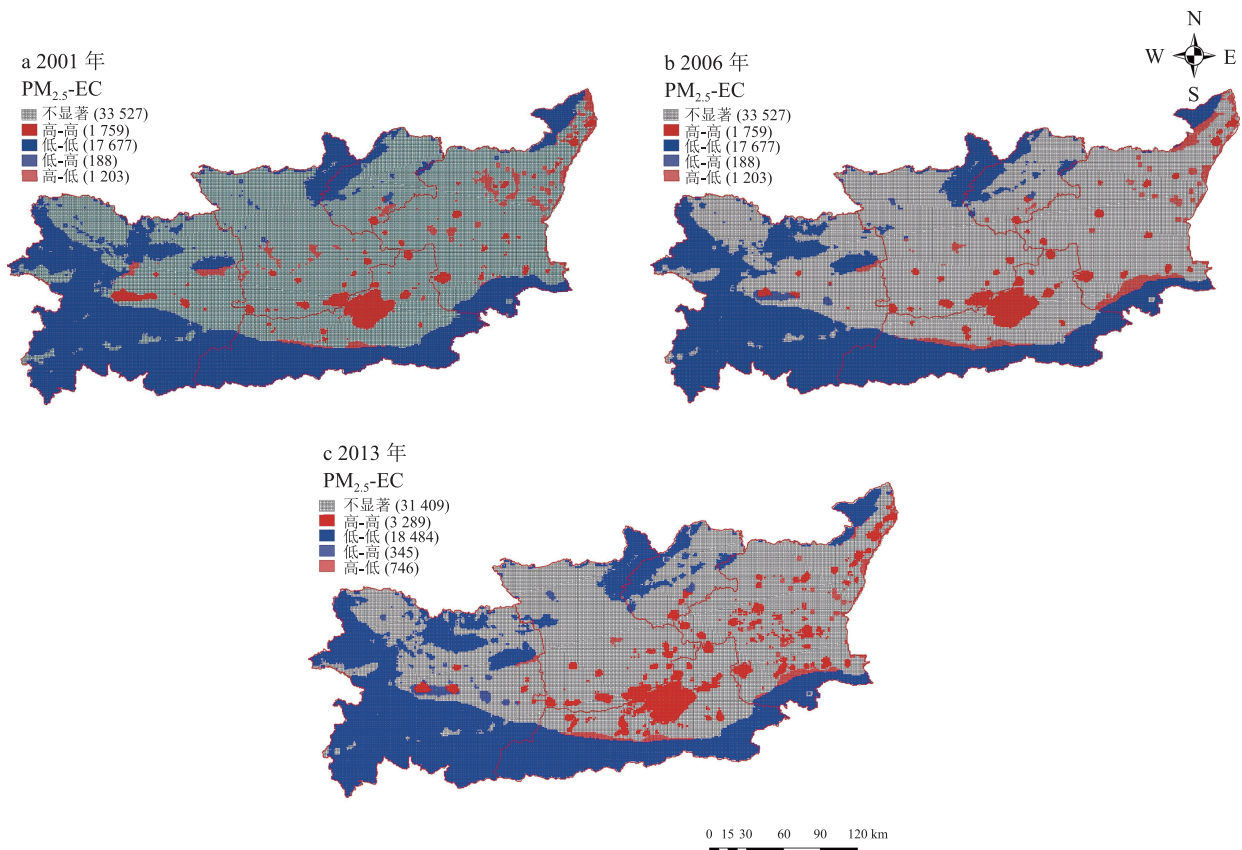


图 10 关中地区 $PM_{2.5}$ 与能源消费的双变量 LISA 聚类图

散,大致均匀分布于下属各县市.对比能源消费地图可知,这些区域均是高能耗地区,且位于建成区,大量的能源消费带来大量的大气污染物排放,而城市楼房的存在又限制了空气的流通,前体物质的大量聚集与不利的环境条件,二者共同作用,使得这些区域的 $\rho(PM_{2.5})$ 日益增高.

3.4 $PM_{2.5}$ 能源消费驱动因子分析 由前述分析可知,陕西省 $\rho(PM_{2.5})$ 与能源消费关系有着显著的空间正相关性,为进一步分析影响 $PM_{2.5}$ 的能源消费因素,本文选取 2001、2006、2013 年的相关统计数据,利用随机森林回归模型揭示 $PM_{2.5}$ 的能源消费驱动因子,选取人口密度、单位 GDP 能耗等 12 个指标作为影响 $PM_{2.5}$ 时空分布的影响因子,计算其对 $PM_{2.5}$ 的贡献程度(表 3).

人类活动对大气 $PM_{2.5}$ 污染有着深刻的影响,能源消费是其重要表现.对随机森林回归模型返回的 IncMSE 进行分析可知,在全部的能源消费影响因素中,人口密度、路网密度与能源消费总量对 $\rho(PM_{2.5})$ 的影响力远大于其余变量,多年均值均 >15 ,其余变量按由大到小的顺序依次为单位 GDP 能耗、人均能耗、工业化水平、规模以上工业企业数、第二产业增加值、GDP、年末总人口、规模以上工业总产值、总

车辆数.相比于 2001 年,2013 年的 IncMSE 增大较多的是规模以上工业总产值、工业化水平、人口密度、单位 GDP 能耗,说明工业对 $\rho(PM_{2.5})$ 变化的影响力在逐渐增大.根据能源消费在人类活动中的功能对各驱动因子进行划分,可分为城市化能源消费驱动、工业过程能源消费驱动与交通能源消费驱动.

3.4.1 城市化能源消费驱动 计算影响 $\rho(PM_{2.5})$ 的城市化能源消费驱动因素的 IncMSE 可知:在 2001、2006、2013 年 3 个时间点上,人口密度、人均能耗、GDP 等因子随时间呈“U”形分布,在 2006 年达到最低,单位 GDP 能耗大致不变,年末总人口呈倒“U”形分布,2006 年最大.计算各因子 IncMSE 的多年均值可发现,人口密度远大于其他变量,说明人口城镇化对 $\rho(PM_{2.5})$ 的变化有着极大的影响.大量人口涌入城市,带来大量能源物质的需求与消费,而城市化进程的快速推进又需要大量的能源供应,且城市化带来的经济水平的快速提升也消耗大量的化石燃料,导致大气颗粒污染物的大量排放,使得城市内部 $\rho(PM_{2.5})$ 增大.而城市化进程降低了城市及其周边的绿化面积,能够吸滞、沉降 $PM_{2.5}$ 的绿色植被减少,又从另一方面促进了 $\rho(PM_{2.5})$ 的提高^[45-47].

3.4.2 工业过程能源消费驱动 对工业过程能源消

表3 PM_{2.5}影响因子重要性指数分析

影响因子	2001	2006	2013	多年均值	
	IncMSE	IncMSE	IncMSE		
城市化能源消费	人口密度	30.43	29.29	30.87	30.20
	单位GDP能耗	12.03	12.03	12.13	12.06
	人均能耗	12.42	10.43	11.66	11.50
	GDP	6.83	5.47	7.01	6.44
	年末总人口	5.59	6.37	4.97	5.64
工业过程能源消费	能源消费	16.78	15.56	14.39	15.58
	工业化水平	9.54	10.01	10.09	9.88
	规模以上工业企业数	7.99	9.88	7.79	8.55
	第二产业增加值	6.81	6.32	6.58	6.57
	规模以上工业总产值	3.34	5.52	6.14	5.00
交通能源消费	路网密度	21.06	20.53	19.92	20.50
	总车辆数	4.73	4.34	3.84	4.30

费驱动因子 IncMSE 多年均值进行计算, 从大到小依次为能源消费量、工业化水平、规模以上工业企业数、第二产业增加值、规模以上工业总产值, 其中能源消费量的影响力远大于其他因素, 说明各行业对能源的消费对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 有着重要的影响, 但影响力逐渐减小. 而工业化水平与规模以上工业总产值的影响力逐渐增大, 究其原因在于, 陕西省在发展过程中对产业组成进行调整, 促进能耗低、排放小的第三产业发展, 推动各行业向清洁型、环境友好型转型, 使得陕西省在整体能源消费量逐年增大的背景下, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 有所降低. 但由于陕西省仍存在着大量的高能耗、高污染、高排放的工业企业, 其在消费能源的同时排出大量的污染气体, 是大气污染的重要来源, 从而对 $\text{PM}_{2.5}$ 产生了越来越强的影响力.

3.4.3 交通能源消费驱动 随机森林模型对驱动 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的交通能源消费驱动因素分析表明, 路网密度 IncMSE 的多年均值大于总车辆数, 二者随时间均呈现降低的趋势. 陕西省车辆的大量增加带来了巨大的能源消费, 汽车行驶排出的大量尾气是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要来源. 而近年来由于中国城市建设快速进展, 城市内部道路数量大幅提升, 使得路网密度成为影响 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的重要因素. 与之相比, 总车辆数虽大幅增高但影响力却不如路网密度高. 分析其原因, 可能是城市快速建设使得路网密度增大, 既占据了可沉降 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒的绿地空间, 又降低了空气流通性, 加剧了 $\text{PM}_{2.5}$ 在大气中的积累. 而总车辆数虽大幅提高, 但限号等措施的实施降低了车辆的使用率, 且公共交通快速发展, 车辆使用率进一步降低, 从而导致对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的驱动力不如路网密度大.

4 结论

1) 2001—2013 年陕西省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 先增大后减小, 于 2006 年达到峰值, 省内 $\text{PM}_{2.5}$ 分布的空间异质性较强, 关中地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高, 陕南陕北地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均较低. 陕西省能源消费量逐年上升, 空间分布与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 类似, 关中地区能源消费量最大, 其中西安市消费量大, 占全省总量的 40% 以上.

2) 陕西省能源消费量与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ Moran's I 达到 0.289, 说明二者有着明显的空间正相关性, 即高能源消费的区域有着高质量浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 分布, 其中关中地区二者空间正相关性更强, 且随时间逐渐增强. 这种分布情况受当地的植被、人口、经济水平等多种因素的影响.

3) 分析影响陕西省 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布的能源消费因素发现, 城市化能源消费、工业过程能源消费与交通能源消费等因素都有着较大的影响力, 其中人口密度、路网密度与能源消费总量是陕西省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的重要驱动因素.

5 参考文献

- [1] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000—2011 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2079
- [2] DOCKERY D W, POPE C A, XU X P, et al. An association between air pollution and mortality in six US cities[J]. New England Journal of Medicine, 1993, 329(24): 1753
- [3] FRANKLIN M, KOUTRAKIS P, SCHWARTZ P. The role of particle composition on the association between $\text{PM}_{2.5}$ and mortality[J]. Epidemiology (Cambridge, Mass), 2008,

- 19(5): 680
- [4] POPE C A III. Review: epidemiological basis for particulate air pollution health standards[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000, 32(1): 4
- [5] 田时中, 赵鹏大. 西北六省工业污染动态综合评价及影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(7): 1
- [6] 肖周燕, 沈左次. 人口集聚、产业集聚与环境污染的时空演化及关联性分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(2): 1
- [7] 宋敏, 郭清卉. 基于低碳视角的陕西能源消费与环境污染的灰色关联度研究[J]. *科技管理研究*, 2015, 35(16): 243
- [8] 欧阳, 赵文吉, 郑晓霞, 等. 机动车排放对PM_{2.5}空间分布的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 2009
- [9] 杨晓叶, 许东海. 空气污染程度对中国城镇化率的影响研究: 基于VAR模型的分析[J]. *生态经济*, 2018, 34(10): 162
- [10] 赵佳楠. 基于随机森林的长江三角洲PM_{2.5}浓度空间模拟及暴露风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2018
- [11] 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
- [12] 王桂林, 杨昆, 杨扬. 京津冀地区不透水表面扩张对PM_{2.5}污染的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(7): 2470
- [13] 龙艳侠, 谭志海, 孙斌, 等. 陕西省大气污染现状及其成因[J]. *西安工程大学学报*, 2016, 30(1): 43
- [14] 杨昆, 杨玉莲, 朱彦辉, 等. 中国PM_{2.5}污染与社会经济的空间关系及成因[J]. *地理研究*, 2016, 35(6): 1051
- [15] 王振波, 梁龙武, 王旭静. 中国城市群地区PM_{2.5}时空演变格局及其影响因素[J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2614
- [16] 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 关中地区冬季PM_{2.5}中碳气溶胶的污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 427
- [17] 魏国茹, 史兴民. 西安市PM_{2.5}健康损害价值评估[J]. *环境科学*, 2018, 39(7): 3014
- [18] 钱婧, 韩婧, 阮幸. 西安市冬季重污染天PM_{2.5}高分辨率及其中碳气溶胶污染特征分析[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 464
- [19] 吉庆, 武麦凤, 何林, 等. 渭南市2015—2017年典型霾天气过程气象特征分析[J]. *陕西气象*, 2019(6): 12
- [20] 郭瑞英, 沈振兴, 任文祥, 等. 陕西省榆林市冬季PM₁₀和PM_{2.5}的污染特征[J]. *中国粉体技术*, 2015, 21(3): 84
- [21] 张勇, 刘随心, 曹军骥, 等. 汉中市秋季PM_{2.5}昼夜变化特征[J]. *地球环境学报*, 2019, 10(1): 79
- [22] 李琪, 朱楠. “一带一路”战略下西安开放开发新高地规划建设策略[J]. *规划师*, 2016, 32(2): 31
- [23] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(9): 1092
- [24] 张亮林, 潘竟虎. 中国PM_{2.5}人口暴露风险时空格局[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 1
- [25] 吴浪, 周廷刚, 温莉, 等. 基于遥感数据的PM_{2.5}与城市化的时空关系研究: 以成渝城市群为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(9): 2142
- [26] HAN L J, ZHOU W Q, LI W F, et al. Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 194: 163
- [27] 李瑞敏. 东北地区农业源PM₁₀排放清单研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015
- [28] ANEJA V P, SCHLESINGER W H, ERISMAN J W. Effects of agriculture upon the air quality and climate: research, policy, and regulations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(12): 4234
- [29] 卢秀, 李佳, 段平, 等. 基于夜间灯光和土地利用数据的云南沿边地区GDP空间差异性分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(3): 455
- [30] 张怡哲, 杨续超, 胡可嘉, 等. 基于多源遥感信息和土地利用数据的中国海岸带GDP空间化模拟[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(2): 235
- [31] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的1995—2009年中国地级市能源消费动态[J]. *地理研究*, 2014, 33(4): 625
- [32] 韩向娣, 周艺, 王世新, 等. 基于夜间灯光和土地利用数据的GDP空间化[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(3): 396
- [33] ANSELIN L, SYABRI I, SMIRNOV O. Visualizing multivariate spatial correlation with dynamically linked windows[C]//Proceedings, CSISS Workshop on New Tools for Spatial Data Analysis, Santa Barbara, CA, 2002
- [34] ANSELIN L. Local indicators of spatial association-LISA[J]. *Geographical Analysis*, 2010, 27(2): 93
- [35] 陆汝成, 黄贤金. 基于省级和市级层次的违法占用耕地与经济空间计量分析[J]. *中国土地科学*, 2012, 26(7): 60
- [36] 刘帅, 董会忠, 刘明睿, 等. 城市规模对能源消耗的空间溢出效应[J]. *资源开发与市场*, 2018, 34(12): 1701
- [37] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5
- [38] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述[J]. *统计与信息论坛*, 2011, 26(3): 32
- [39] 王超, 阚媛珂, 曾业隆, 等. 基于随机森林模型的西藏人口分布格局及影响因素[J]. *地理学报*, 2019, 74(4): 664
- [40] 顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新, 等. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化[J]. *测绘科学*, 2017, 42(2): 140
- [41] 王亚青, 尚梅. 陕西省能源消费的影响因素研究[J]. *生态经济(学术版)*, 2012(1): 28
- [42] 贺勇, 李磊, 李俊毅, 等. 北方30种景观树种净化空气效益分析[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(5): 37

- [43] NOWAK D J, CRANE D E, STEVENS J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3/4): 115
- [44] 赵卉伊, 周卫健, 牛振川, 等. 西安市2013—2017年大气PM_{2.5}的时空变化特征及影响因素分析[J]. *地球环境学报*, 2019, 10(3): 248
- [45] 李三, 郭金禄, 郑煜. 森林覆被率等因子与PM_{2.5}的时间滞后效应的研究[J]. *植物研究*, 2020, 40(5): 659
- [46] DE MATSUDA K, FUJIMURA Y, HAYASHI K, et al. Deposition velocity of PM_{2.5} sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(36): 4582
- [47] FREER-SMITH P H, HOLLOWAY S, GOODMAN A. The uptake of particulates by an urban woodland: Site description and particulate composition[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 95(1): 27

Spatio-temporal correlation between energy consumption and PM_{2.5} concentration based on nighttime light images

PEI Chuanle¹⁾ LIAN Yanqing^{2)†}

(1) Interdisciplinary Research Center of Earth Science Frontier, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 710061, Xi'an, Shaanxi, China)

Abstract PM_{2.5} is the primary pollutant in urban air in China, causing serious harm to human physical and mental health, arousing widespread concern. Study on the spatial and temporal relationship between PM_{2.5} and energy consumption will provide some theoretical basis to formulate effective atmospheric environmental protection policies and to promote urbanization. Energy consumption statistical data and nighttime light images were used to define spatial patterns in energy consumption in Shaanxi Province. Time-space relationship between energy consumption and PM_{2.5} concentration with PM_{2.5} remote sensing data were studied by spatial correlation analysis. Random forest regression was used to dissect energy consumption factors affecting changes in PM_{2.5} concentration. It was found that from 2001 to 2013, PM_{2.5} concentrations in Shaanxi Province initially increased and then declined, with the highest value at 28.5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. The spatial heterogeneity in PM_{2.5} distribution in the province was marked, with the Guanzhong region showing the highest PM_{2.5} concentration. Energy consumption in Shaanxi Province was found to increase year by year, with a spatial distribution similar to that of PM_{2.5} concentration. Energy consumption in the Guanzhong region was the largest. The Moran's index of energy consumption and PM_{2.5} concentration in Shaanxi Province reached 0.289, indicating an obvious positive spatial correlation—areas with high energy consumption had high concentrations of PM_{2.5}. Population density, road network density and total energy consumption were found to be important driving factors for changes in PM_{2.5} concentration in Shaanxi Province.

Keywords PM_{2.5}; energy consumption; spatio-temporal relationship; spatial correlation; random forest

【责任编辑: 刘先勤】