

河南省 PM_{2.5} 时空分布特征及其与植被覆盖度的关系

杜彦彦, 黄青*

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

摘要: 随着中国城市化和工业化的不断推进, 大气污染治理形势严峻, PM_{2.5} 作为首要的大气污染物, 已经引起了公众和学术界的普遍关注。研究 PM_{2.5} 的时空分布特征及其质量浓度同植被覆盖度之间的关系, 为区域大气污染联防联控提供数据支撑和理论依据。以大气污染严重的河南省为研究对象, 利用 2017 年 1 月—2019 年 2 月期间 75 个国家空气质量监测站的逐日 PM_{2.5} 质量浓度数据, 通过空间插值技术, 分析了 PM_{2.5} 质量浓度的时间和空间分布特征。基于 MODIS NDVI 遥感卫星数据, 采用像元二分模型反演获取植被覆盖度数据, 再计算其与 PM_{2.5} 质量浓度的秩相关系数。研究发现, (1) 总体上, 河南省 PM_{2.5} 年均质量浓度逐年降低, 由 2015 年的 79 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 2018 年的 63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均降幅达 7.2%, 但是依然超过国家二级标准 (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 污染防治形势仍然严峻。(2) 从时间分布看, PM_{2.5} 季节差异明显, 月均质量浓度曲线大致呈“U”形, 冬季质量浓度最高 (113 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 夏季最低 (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 春秋两季居中。(3) 从空间分布来看, PM_{2.5} 质量浓度在河南省内由南至北污染程度递减, 形成了以污染最严重的郑州市、安阳市为中心的 PM_{2.5} 辐射圈。(4) 植被覆盖度和 PM_{2.5} 质量浓度相关性弱, 秩相关系数为-0.55。从污染治理来看, 提高植被覆盖度, 增加植被面积对 PM_{2.5} 沉降有积极作用, 但作用有限。

关键词: PM_{2.5}; 植被覆盖度; 时空分布; 秩相关分析; 河南省

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.11.015

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2019) 11-2257-09

引用格式: 杜彦彦, 黄青, 2019. 河南省 PM_{2.5} 时空分布特征及其与植被覆盖度的关系[J]. 生态环境学报, 28(11): 2257-2265.

DU Yanyan, HUANG Qing, 2019. Spatial and temporal variation characteristics of PM_{2.5} and its relationship with vegetation fraction in Henan Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 28(11): 2257-2265.

近年来, “雾霾天”席卷中国大江南北, PM_{2.5} 等大气污染物的危害成为全社会关注的焦点。PM_{2.5} 也称细颗粒物, 是空气动力学当量直径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物, 是中国主要的大气污染物 (李小飞等, 2012), 悬浮时间长、直径小、比表面积大且散射性强, 不仅会降低大气能见度, 影响气候变化, 还会对人体呼吸系统造成损害 (杨新兴等, 2012), 其质量浓度是评价空气质量的重要指标 (中华人民共和国环境保护部, 2012; 2013)。

植被与 PM_{2.5} 的相互影响已成为研究热点, 植被对 PM_{2.5} 的削减作用引起了学术界的广泛关注 (赵晨曦等, 2013; 吴海龙等, 2012)。植被可通过覆盖地表切断 PM_{2.5} 来源 (Fan et al., 2019); 植物叶片、枝条表面、茎干可直接捕获 PM_{2.5} (Liang et al., 2016; Beckett et al., 1998); 植被能够营造稳定的微气候环境, 促进 PM_{2.5} 沉降 (Zhang et al., 2017; Fan et al., 2019); 林带可以通过改变风场阻拦颗粒物进入局部区域 (郭伟等, 2010)。许多研究者设计了对比实验, 分别在森林或者绿化带和周边的道

路设置观测点, 发现植被覆盖区域 PM_{2.5} 质量浓度显著低于其他土地利用类型区域 (刘萌萌, 2014; 王轶浩等, 2016; 阮氏清草, 2014), 但也有研究表明当林带处于低风速高湿度的状态时, 森林对 PM_{2.5} 有聚集作用 (刘旭辉等, 2014)。

河南省作为人口大省、农业大省、中部发展中省份, 工业化和城市化正在加速推进, 面临高速发展和生态环境保护的双重挑战。《2018 中国生态环境状况公报》显示, 河南省安阳市、焦作市、新乡市以及郑州市 4 座城市, 位于全国空气质量相对较差的 20 个城市之列。2016—2018 连续 3 年, 河南省大气首要污染物为 PM_{2.5} (河南省生态环境厅, 2017; 2018), 2018 年全省 18 个省辖市 PM_{2.5} 年均质量浓度皆超过了二级标准 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。但是目前关于 PM_{2.5} 研究, 多集中于单一的时空分布研究, 综合分析其与植被覆盖度的关系研究较少, 也鲜有关于整个河南省区域的研究报告, 研究主要集中在个别城市 (朱文德等, 2018; 陈强等, 2015), 且采样点较少, 观测时间跨度短。本研究基于 2017 年 1

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871353)

作者简介: 杜彦彦 (1995 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事农业环境遥感研究。E-mail: duyanyan3@163.com

*通信作者, 黄青, E-mail: huangqing@caas.cn

收稿日期: 2019-09-02

月—2019 年 2 月期间 75 个国控空气质量监测站 $PM_{2.5}$ 数据和遥感卫星数据, 在分析 $PM_{2.5}$ 时空分布特征的基础上, 进一步研究二者的关系, 为 $PM_{2.5}$ 时空分布特征和植被覆盖度的关系研究提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南界于 31.4° — 36.4° N 和 110.4° — 116.7° E 之间, 东邻山东、安徽, 西连陕西, 北与河北、山西相临, 南接湖北, 总面积为 $1.67 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其中耕地面积接近 50%。地势西高东低, 中部和东部为黄淮海冲积平原, 西南部为南阳盆地。属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候, 年平均降水量为 477.8—1 167.3 mm, 降雨主要集中在 6—8 月。河南省是中国能源消费大省, 以煤炭为主要能源; 由于连接南北的区位优势, 河南是中国交通物流枢纽, 汽车污染物排放严重; 农业体量大, 种植业和养殖业也是重要污染来源, 大气环境质量面临极大的挑战。

1.2 数据来源

1.2.1 $PM_{2.5}$ 质量浓度

河南省 2017 年 1 月—2019 年 2 月 $PM_{2.5}$ 质量浓度日均值数据, 来自环保部环境监测总站空气质量实时发布系统, 根据原始数据建立 $PM_{2.5}$ 质量浓度空间数据库。如图 1 所示, 河南省内共有 75 个国控空气质量监测站, 主要分布在城区。原始数据 58 651 条, 剔除无监测数据和有明显规律的异常值

的条目之后, 用于研究的有效数据有 56 001 条。

1.2.2 被覆盖度

植被覆盖信息由美国国家航空航天局提供的 MODIS NDVI 产品数据集 MOD13Q1 反演而来。该数据集经过水汽、云和气溶胶等部分数据噪声处理, 数据质量较好, 被广泛用于植被相关研究。影像行列号为 h27v05, 收集了 2017 年 1 月—2018 年 12 月 46 景影像, 产品周期为 16 d, 空间分辨率 250 m, 原始数据采用 Sinusoidal 投影, 将原始的 hdf 文件批量转换为 tiff 影像, 投影转换至以 WGS84 为基准的地理坐标系, 重采样方法选用最近邻法, 再根据河南省界矢量边界进行影像裁剪。

植被覆盖度是指植被地上部分 (包括叶、茎、枝) 在地面的垂直投影面积占总面积的百分比, 植被覆盖度是衡量地表植被覆盖最重要的指标。本研究利用 MODIS NDVI 数据, 采用像元二分模型来估算植被覆盖度 (李苗苗等, 2004)。

像元二分模型假设影像中每个像元只有两个成分, 由植被覆盖的部分和无植被覆盖的裸土组成, 该像元的信号是由这两部分线性组合而成, 植被部分的权重系数即为植被覆盖度。

根据像元二分模型, 遥感传感器的观测到的信号为 S , S_v 和 S_s 分别表示植被和土壤的贡献, 即:

$$S = S_v + S_s \quad (1)$$

假设某一像元植被覆盖度为 VF , 植被全覆盖的纯像元的遥感传感器接收的信号为 S_{veg} , 则该像

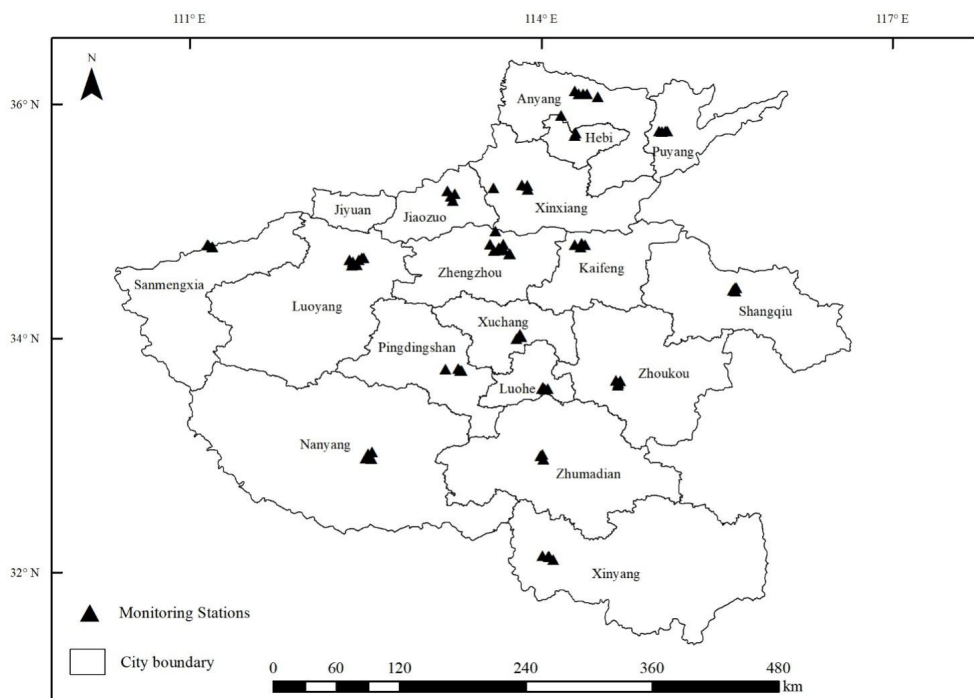


图 1 河南省空气质量监测站分布图

Fig. 1 Distribution map of air quality monitoring stations in Henan

元植被部分贡献的信号为:

$$S_v = VF \times S_{veg} \quad (2)$$

同理, 若无植被覆盖的纯像元的遥感传感器接收的信号为 S_{soil} , 则像元的裸土部分贡献的信号为:

$$S_s = (1 - VF) \times S_{soil} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)带入式(1)得:

$$S = VC \times S_{veg} + (1 - VF) \times S_{soil} \quad (4)$$

由式(4)可解得植被覆盖度 VF 为:

$$VF = (S - S_{soil}) / (S_{veg} - S_{soil}) \quad (5)$$

因此, 只要得到参数 S_{veg} 和 S_{soil} 即可计算植被覆盖度。NDVI 是遥感传感器接收到地物近红外和红光波段反射率的非线性组合, 是定量反映植被状况的敏感指标。某个像元的 NDVI 值可以表达为由绿色植被部分所贡献的信息 $NDVI_{veg}$, 与由裸土部分所贡献的信息 $NDVI_{soil}$ 这两部分组成, 因此可以将 NDVI 代入式(4), 经变换后得植被覆盖度 VF 为:

$$VF = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (6)$$

其中, $NDVI_{soil}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值, 理论上接近于 0, 一般在 0.1—0.2 之间变化; $NDVI_{veg}$ 则代表完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值, 即纯植被像元的 NDVI 值, 在没有实地测量数据的情况下, 分别可以取 $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 来代替。在本研究中, 取各景影像 NDVI 累计频率为 95% 的值为 $NDVI_{max}$, 累计频率为 5% 的值 $NDVI_{min}$, 带入下式即可计算得到植被覆盖度, 从而得到河南省 16 d 植被覆盖度数据集。

$$VF = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (7)$$

1.3 秩相关分析

秩相关系数, 又称等级相关系数, 或顺序相关系数。是描述两个因素之间相关程度的一种统计指标, 由 Spearman 在 1904 年提出, 用来度量两个变量之间联系的强弱, 与常用的 Pearson 相关系数计算方法不同, 它是位次分析方法的数量化, 非参数性的秩统计参数, 与样本的分布无关(徐建华, 2014)。

由于 MOD13Q1 为 16 d 合成产品, 本研究为使反演得到的植被覆盖度与 PM_{2.5} 时间序列一致, 将 PM_{2.5} 日均值数据以 16 d 平均值合成, 得到了 2017—2018 年 46 组数据, 进行秩相关分析。

秩相关系数的具体计算过程如下:

设两个要素 x 和 y 有 n 对样本, 令 R_1 代表要素

x 的位次, R_2 代表要素 y 的位次, $d_i^2 = (R_{1i} - R_{2i})^2$ 代表要素 x 和 y 的同一组样本位次差的平方, 那么要素 x 与 y 之间的秩相关系数被定义为:

$$r'_{xy} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (8)$$

其中 x 代表 16 d PM_{2.5} 平均质量浓度; y 为对应的植被覆盖度; n 表示样本数目; r'_{xy} 的绝对值越接近与 1 表明两要素相关性越强, 通过查阅秩相关系数检验的临界值表进行显著性检验(徐建华, 2014)⁸⁹⁻⁹¹。

1.4 空间插值

克吕金插值是建立在地理学第一定律和变异函数的理论上, 对区域化变量进行无偏最优估计的一系列空间局部估计方法。根据不同的变异函数模型, 有普通克吕金、泛克吕金、协同克吕金、析克吕金和指示克吕金 5 种插值方法(徐建华, 2014)¹⁷⁷⁻¹⁸¹。已有研究表明, 普通克吕金在估算 PM_{2.5} 质量浓度时制图效果较好(李杰等, 2016), 本研究采用该方法, 根据研究区域已知采样点的 PM_{2.5} 质量浓度和空间位置, 考虑采样点与待估计点的相互空间位置关系, 建立插值函数计算估计值。插值公式为:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (i=1, 2, 3, \dots, 75) \quad (9)$$

其中, λ_i 为权重系数, 表示采样点 x_i 处 PM_{2.5} 质量浓度 $Z(x_i)$ 对 x 处估计值 $Z^*(x)$ 的贡献程度, 计算公式为:

$$\lambda = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (10)$$

其中, h 为分离距离; N_h 是在 $(x_i, x_i + h)$ 之间样本点的个数。

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5} 质量浓度的时间分布特征

基于各站点 PM_{2.5} 质量浓度日均值数据, 计算所有站点各个季节的算数平均值即为河南省该季节的 PM_{2.5} 平均质量浓度。根据河南省的气候特点, 河南省每年 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12 至翌年 2 月为冬季。从图 2 可看出, 河南省 PM_{2.5} 质量浓度季节性差异显著。河南省冬季 PM_{2.5} 质量浓度最高, 远高于其他季节, 2018 年冬季质量浓度 ($113 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 是同年夏季 ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

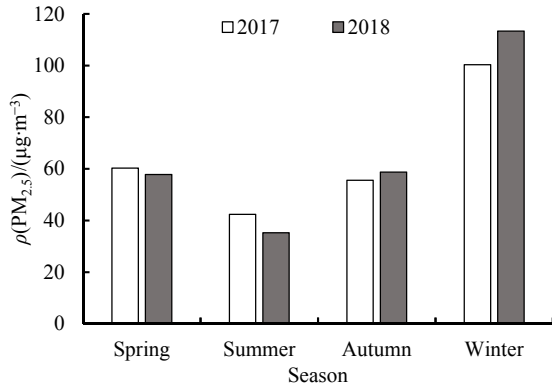


图 2 2017 年和 2018 年河南省四季 PM_{2.5} 平均质量浓度
Fig. 2 Quarterly average of PM_{2.5} mass concentrations in Henan in 2017 and 2018

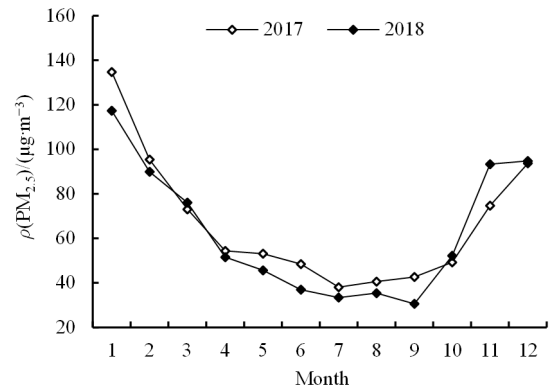


图 3 2017 年和 2018 年河南省 PM_{2.5} 月平均质量浓度
Fig. 3 Monthly variation of PM_{2.5} mass concentrations in Henan in 2017 and 2018

的 3.2 倍。春季和秋季 PM_{2.5} 质量浓度水平相当，在 56—60 μg·m⁻³ 之间，略高于夏季，远低于冬季。2017 年与 2018 年 PM_{2.5} 质量浓度月变化趋势基本一致 (图 3)，月均值折线图呈“U”形。月均 PM_{2.5} 质量浓度最高值出现在 1 月，2018 年 1 月河南省 PM_{2.5} 均值为 117 μg·m⁻³，2017 年 1 月为 137 μg·m⁻³，从 1—7 月，PM_{2.5} 质量浓度一直呈现降低态势，2017 年 7 月是 PM_{2.5} 质量浓度水平最低的月份，7 月之后 PM_{2.5} 质量浓度开始逐渐升高，进入 10 月 PM_{2.5} 质量

浓度急剧上升，一直持续到翌年 1 月。
2.2 PM_{2.5} 质量浓度的空间分布特征
运用普通克吕金插值法，将各个离散测站得到的 PM_{2.5} 质量浓度值模拟为整个河南省空间连续的数据。如图 4 所示，总体上河南省 PM_{2.5} 质量浓度呈现南低北高，质量浓度高的区域有聚集效应，且季节差异显著。春季和秋季 PM_{2.5} 质量浓度水平相当，但是春季高值区主要分布在河南中部，以郑州为中心向周围呈辐射状扩散趋势，秋季 PM_{2.5} 质量

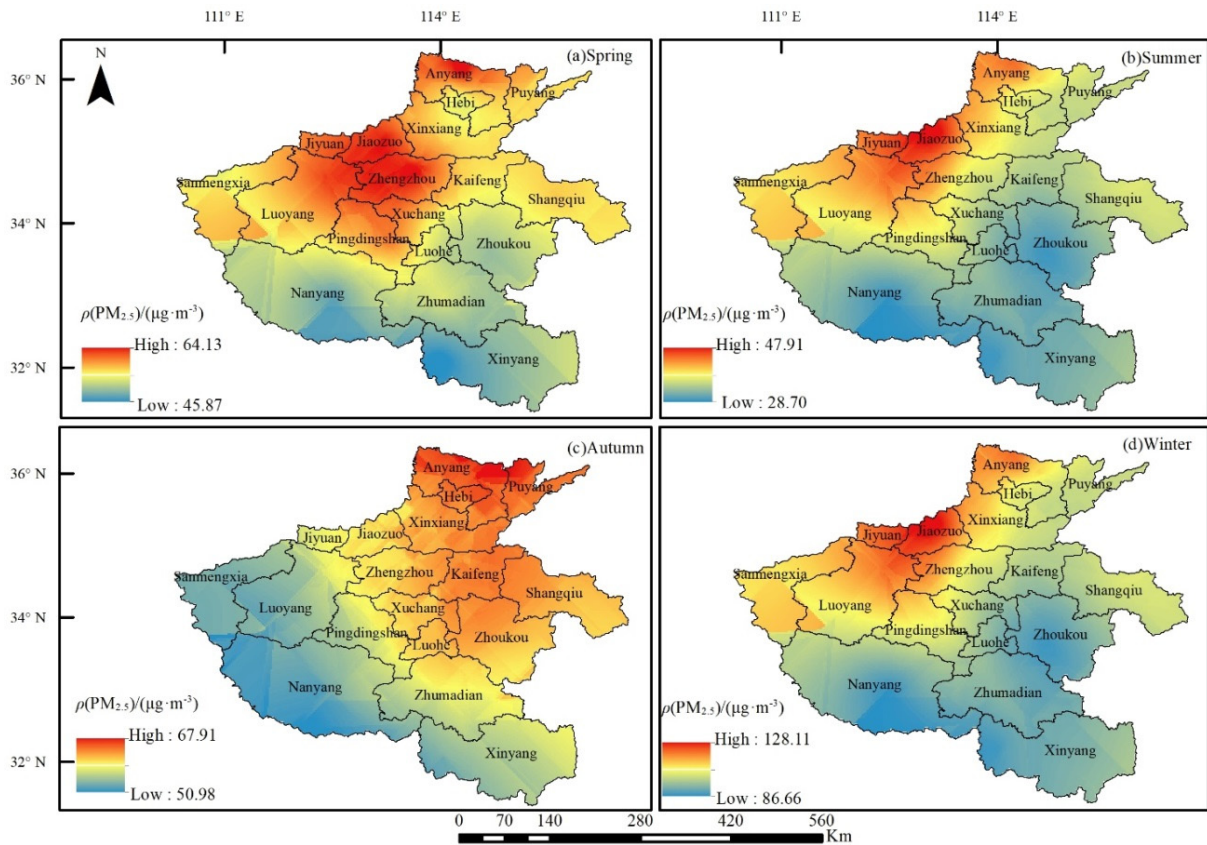


图 4 河南省 2018 年 PM_{2.5} 质量浓度四季空间分布示意图
Fig. 4 Quarterly spatial distribution of PM_{2.5} mass concentrations in Henan in 2018

浓度污染强点主要位于东北部。北部形成了以安阳市为污染中心的辐射圈，在关于河南省 PM_{2.5} 来源解析的研究中发现（王媛林等，2016），河南北部受到河北省的 PM_{2.5} 传输影响。西部和南部边界多山地，工业化和城镇化水平普遍低于北部城市，本地排放量小，且距离主要污染源郑州市和安阳市较远，不会受到区域传输的影响，因此 PM_{2.5} 污染程度低于中部和北部。

2.3 植被覆盖度和 PM_{2.5} 质量浓度的关系

2018 全省 PM_{2.5} 年均质量浓度为 63 μg·m⁻³（图 5），较 2015 年降幅达 20.2%，3 年平均降幅为 7.2%，尽管其质量浓度持续下降，但速度缓慢，以 2015 为基准，按照目前的年均降幅，到 2023 年河南省年均质量浓度才能达到国家二级标准 35 μg·m⁻³。

2.3.1 河南省植被覆盖特征

如图 6 所示，河南省 16 d 平均植被覆盖度呈波浪形分布。3 月植被开始生长，林地和农田生物量开始增长，在 4 月初植被覆盖度达到第一个峰值，5 月底至 6 月初正处于冬小麦收割黄金期，植被覆盖度迅速降低，7 月中下旬夏玉米正处穗期，植被覆盖度全年最高，9 月底玉米开始收获，10 月后树木叶绿素含量降低，植被覆盖度逐渐降低。

根据河南省植被覆盖度空间分布图（图 7），高植被覆盖区主要位于豫南山地，豫西山地和北部省界沿线的太行山脉。中等植被覆盖区主要分布在豫

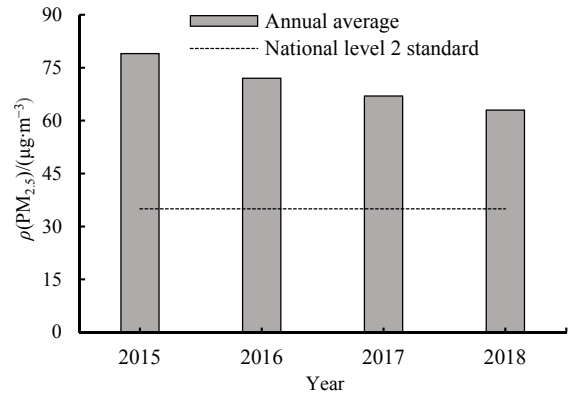


图 5 2015—2018 年 PM_{2.5} 年均质量浓度
Fig. 5 Annual average concentration of PM_{2.5} from 2015 to 2018

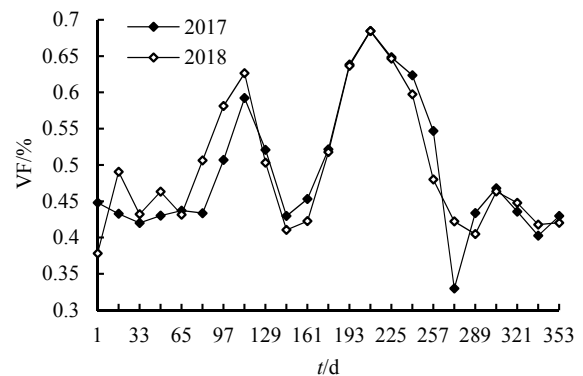


图 6 2017 和 2018 年植被覆盖度(VF)变化趋势
Fig. 6 The variation of vegetation fraction (VF) in 2017 and 2018

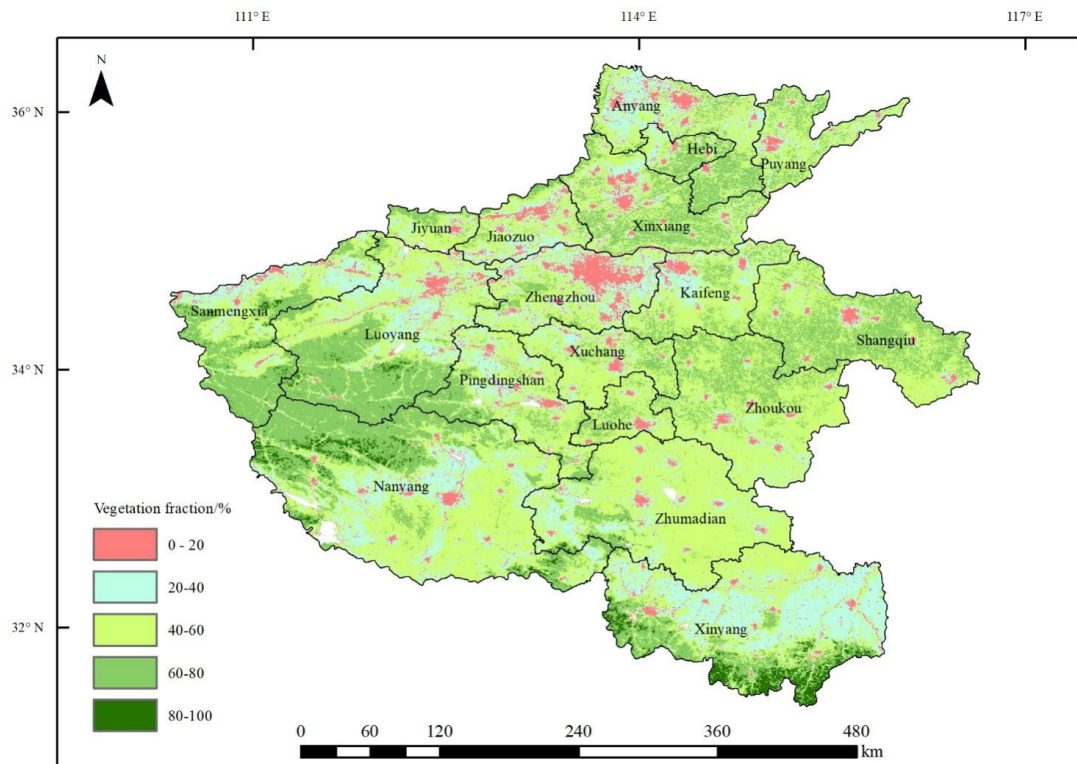


图 7 2018 年河南省植被覆盖度空间分布图
Fig. 7 Spatial distribution map of vegetation fraction in Henan in 2018

东平原和南阳盆地, 该区域土地利用类型是耕地, 作物生长期较树木短, 且存在撂荒和休耕现象; 低盖度区域零星分散在各个区域, 主要是城市、河流和湖泊。

2.3.2 植被覆盖度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的相关性分析

本研究为使植被覆盖度与 $PM_{2.5}$ 时间序列一致, 将 $PM_{2.5}$ 日均值数据合成为 16 d 平均值合成, 得到了 2017—2018 年 46 组数据, 两组数据 Spearman 秩相关系数为 -0.55, 在 0.01 的置信度水平下显著负相关, 说明 $PM_{2.5}$ 质量浓度和植被覆盖度有着此消彼长的关系。从图 8 可明显看出植被对 $PM_{2.5}$ 的清除作用, 植被覆盖度随时间变化的趋势与 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化刚好相反, 夏季和冬季响应最为强烈, 在植被覆盖高的时期, 对应的 $PM_{2.5}$ 质量浓度水平较低。

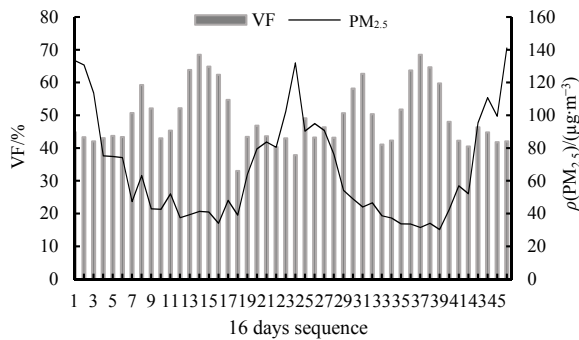


图 8 16 d 序列植被覆盖度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度

Fig. 8 16 days sequence vegetation fraction and $PM_{2.5}$ mass concentration

如表 1 统计结果所示, 2018 年较 2017 年高植被覆盖度 ($VF > 80\%$) 增加了 $1\,662.4\text{ km}^2$, 是 2017 年的 1.7 倍, 植被覆盖度小于 20% 的面积减少了 12.3%, 2018 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度较 2017 年下降了 $4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。如表 2 所示, 信阳、许昌和焦作三市二氧化硫、氮氧化物、烟(粉)尘排放总量接近, 而 $PM_{2.5}$ 质量浓度依次为 54、64、75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对应的植被覆盖度分别为 50%、48% 和 38%, 排放量接近的条件下, 植被覆盖度高的信阳市 $PM_{2.5}$ 质量浓度分别比许昌和焦作低 $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $21\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

表 1 不同等级植被覆盖度面积

Table 1 Area with different levels of vegetation fraction

VF/%	Area/ km^2		Increased area/ km^2
	2017	2018	
<20	10 113.7	8 860.4	-1 253.3
20-40	33 372.9	34 274.6	901.6
40-60	69 813.0	72 683.7	2 870.7
60-80	39 885.5	36 518.0	-3 367.5
>80	935.0	2 597.4	1 662.4

表 2 2017 年河南省和废气排放量与 $PM_{2.5}$

Table 2 Exhaust emissions and $PM_{2.5}$ mass concentration in Henan in 2017

City	VF/%	Exhaust emissions/t	$\rho(PM_{2.5})/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$
Kaifeng	43	5 393.02	68
Zhoukou	54	7 880.47	61
Puyang	46	8 233.97	70
Shangqiu	55	9 538.85	62
Luohe	52	13 343.41	63
Hebi	52	21 816.22	65
Sanmengxia	46	28 280.59	60
Zhumadian	50	31 961.45	60
Xinxiang	51	36 356.27	67
Xinyang	50	39 997.02	54
Jiaozuo	38	40 258.79	75
Xuchang	48	41 755.44	64
Nanyang	52	48 998.30	58
Luoyang	45	52 545.46	74
Pingdingshan	46	57 104.73	68
Zhengzhou	32	76 492.01	71
Anyang	45	110 521.95	81

3 讨论

3.1 关于河南省 $PM_{2.5}$ 时空分布

河南省 $PM_{2.5}$ 季节分布特征与我国北方其他区域研究结果相似 (顾芳婷等, 2016; 王振波等, 2014), 冬季污染程度最高, 夏季最低, 春秋两季居中, 地形、气候特征和污染源是主要驱动因素。冬季细颗粒物污染严重的主要原因是采暖期消耗化石燃料, 向大气中排放了大量的废气和颗粒物, 冬季大面积的地表无植被覆盖, 地面扬尘也是细颗粒物一大重要来源, 又因为冬季地表温度较低, 气流非常稳定, 大气垂直扩散条件较差, 容易形成逆温效应, 不利于 $PM_{2.5}$ 扩散和降解 (李梦, 2017; 杨龙等, 2005)。河南省夏季降雨频繁, 雨水对大气中的颗粒物存在一定的冲刷效应 (李芳等, 2013), 再加上植被的吸滞作用, 空气较为清洁。

春季空气湿度高, 大气结构较为稳定, 使得颗粒物难以扩散 (顾芳婷等, 2016)。秋季是河南省主要农作物玉米 (*Zea mays*)、水稻 (*Oryza sativa*)、棉花 (*Gossypium spp.*)、花生 (*Arachis hypogaea*)、大豆 (*Glycine max*) 和甘薯 (*Dioscorea esculenta*) 的收获期, 大范围的作物收割, 土壤扰动严重, 同时由于秸秆燃烧, 向大气中排放了大量的颗粒物 (李瑞敏等, 2015)。以郑州市、安阳市为代表的豫中和豫北是 $PM_{2.5}$ 重污染区。郑州市人口密集, 煤炭为主要能源, 且由于北部太行山脉阻隔, 逆温天气频繁, 不利于大气污染物的沉降和扩散, 容易形成重污染天气 (田贺忠等, 2011)。安阳市是中部重要的工业城市, 除了本地排放较大, 还由于与河

北省南部接壤, 易受到其污染传输的影响(王媛林等, 2016)。

3.2 关于 PM_{2.5} 质量浓度与植被覆盖度的关系

本研究采用秩相关分析的方法发现 PM_{2.5} 质量浓度与植被覆盖度呈显著的负相关关系, 植被面积的增加有助于降低 PM_{2.5} 的含量。从地区的统计数据来看, 植被覆盖度高的地区 PM_{2.5} 质量浓度相应较低, 植被发挥了一定作用, 然而高植被覆盖的地区工业化城市化进程缓慢, 本地排放量较小。三门峡和濮阳植被覆盖程度相同, 均为 46%, 且濮阳少排放了两万余吨废气, 但是 PM_{2.5} 质量浓度却超过三门峡 10 μg·m⁻³, 主要原因是濮阳毗邻排放量最高的安阳, 又与河北南部相接, 受区域传输影响严重。说明植被的吸滞作用有限, 污染源和气象条件才是主要的驱动因素。农田对 PM_{2.5} 而言是一种特殊的土地利用类型, 一方面农田扬尘、秸秆燃烧以及化肥的大量施用, 都会提高颗粒物的浓度; 另一方面, 在作物的生长季, 作物叶片又能吸附、沉降大气中的颗粒物。植被对 PM_{2.5} 的吸滞作用还取决于森林结构、景观格局和植被的生理活动, 精确量化植被的吸滞作用还需深入研究。

目前河南省空气质量监测站分布不均且数量有限, 同时长时间序列的观测数据不足, 本研究结果是否与其他年份一致, 还需更多的数据来验证。利用卫星遥感监测技术的发展可克服地面监测的局限, 精确描述 PM_{2.5} 空间分布, 为未来的研究提供数据支撑。本文旨在研究植被覆盖度与 PM_{2.5} 质量浓度的关系, 并未考虑如降雨量、风速和湿度等气象因素的影响, 还需在以后的研究中进行综合研究。

4 结论

(1) 2015—2018 年期间, 河南省 PM_{2.5} 年均质量浓度由 79 μg·m⁻³ 持续降至 63 μg·m⁻³, 年均降幅达 7.2%, 但是仍然超过国家二级标准(35 μg·m⁻³), 大气污染治理的任务艰巨。

(2) 河南省 PM_{2.5} 时间变化规律明显, 冬季 PM_{2.5} 质量浓度最高, 夏季最低, 春秋两季接近。从月尺度来看, PM_{2.5} 月均质量浓度大致呈“U”形分布, 1 月最高, 9 月最低。

(3) 河南省 PM_{2.5} 空间分布差异显著, 呈北高南低, 形成了以污染最严重的郑州市、安阳市为核心的 PM_{2.5} 辐射圈, 离核心越近的地区 PM_{2.5} 质量浓度越高。冬季是各区域 PM_{2.5} 浓度最高、污染范围最广的季节。

(4) 整体而言, 植被覆盖度和 PM_{2.5} 浓度有显著负相关关系, 植被面积的增加能够降低空气中的 PM_{2.5} 含量, 但是在受污染源和地形气象因素主导的地区, 植被只能起到一定的辅助作用。

参考文献:

- BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G, 1998. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution [J]. *Environmental Pollution*, 99(3): 347-360.
- FAN S X, LI X P, DONG L, 2019. Field assessment of the effects of land-cover type and pattern on PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in a microscale environment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3): 2314-2327.
- LIANG D, MA C, WANG Y Q, et al., 2016. Quantifying PM_{2.5} capture capability of greening trees based on leaf factors analyzing [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(21): 21176-21186.
- QIU L, LIU F, ZHANG X, et al., 2018. The reducing effect of green spaces with different vegetation structure on atmospheric particulate matter concentration in Baoji city, China [J]. *Atmosphere*, 9(9): 332.
- ZHANG X D, DU J, HUANG T, et al., 2017. Atmospheric removal of PM_{2.5} by man-made Three Northern Regions Shelter Forest in Northern China estimated using satellite retrieved PM_{2.5} concentration [J]. *Science of the Total Environment*, 593-594: 713-721.
- 陈强, 梅琨, 朱慧敏, 等, 2015. 郑州市 PM_{2.5} 浓度时空分布特征及预测模型研究[J]. *中国环境监测*, 31(3): 105-112.
- CHEN Q, MEI K, ZHU H M, et al., 2015. Study on spatiotemporal variability of PM_{2.5} concentrations and prediction model over Zhengzhou city [J]. *Environmental Monitoring in China*, 31(3): 105-112.
- 陈卫卫, 2015. 农业土壤耕作大气颗粒物排放研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 34(7): 1225-1232.
- CHEN W W, 2015. Research progress in atmospheric particulate matter emissions from agricultural tillage [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 34(7): 1225-1232.
- 顾芳婷, 胡敏, 王渝, 等, 2016. 北京 2009—2010 年冬、春季 PM_{2.5} 污染特征[J]. *中国环境科学*, 36(9): 2578-2584.
- GU F T, HU M, WANG Y, et al., 2016. Characteristics of PM_{2.5} pollution in winter and spring of Beijing during 2009—2010 [J]. *China Environmental Science*, 36(9): 2578-2584.
- 郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 等, 2010. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展[J]. *生态环境学报*, 19(6): 1465-1470.
- GUO W, SHENTU Y J, ZHENG S Q, et al., 2010. Research advances on mechanisms and rules of dust retention of the urban green areas [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 19(6): 1465-1470.
- 河南省生态环境厅, 2017. 2017 年河南省生态环境状况公报. [R/OL] (2019-06-13) [2019-07-05]. <http://www.hnep.gov.cn/cn/rootimages/2018/06/13/20180613094134818.pdf>.
- Department of Ecology and Environment of Henan Province, 2017. Bulletin on the state of ecological environment of Henan province in 2017. [R/OL] (2019-06-13) [2019-07-05]. <http://www.hnep.gov.cn/cn/rootimages/2018/06/13/20180613094134818.pdf>.
- 河南省生态环境厅, 2018. 2018 年河南省生态环境状况公报. [R/OL] (2019-06-04) [2019-07-05]. <http://www.hnep.gov.cn/cn/rootimages/2019/06/04/20190604110815897.pdf>.
- Department of Ecology and Environment of Henan Province, 2018. Bulletin on the state of ecological environment of Henan province in

2018. [R/OL] (2019-06-04) [2019-07-05]. <http://www.hnep.gov.cn/rootimages/2019/06/04/20190604110815897.pdf>.
- 李芳, 张承中, 2013. 西安市大气颗粒物 PM_{2.5} 与降水关系的探讨[J]. 中国环境监测, 29(6): 22-28.
- LI F, ZHANG C Z, 2013. Analysis on the relationship between PM_{2.5} and the precipitation in Xi'an [J]. Environmental Monitoring in China, 29(6): 22-28.
- 李梦, 2017. 河南省雾霾污染时空特征及影响因素分析[D]. 重庆: 重庆大学: 20-20
- LI M, 2017. Temporal-spatial characteristics and factors of the haze pollution in Henan province [D]. Chongqing: Chongqing University: 20-20.
- 李杰, 翟亮, 桑会勇, 等, 2016. PM_{2.5} 浓度插值中不同空间插值方法对比[J]. 测绘科学, 41(4): 50-54.
- LI J, ZHAI L, SANG H Y, et al., 2016. Comparison of different spatial interpolation methods for PM_{2.5} [J]. Science of Surveying and Mapping, 41(4): 50-54.
- 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等, 2004. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 26(4): 153-159.
- LI M M, WU B F, YAN C Z, et al., 2004. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing [J]. Resources Science, 26(4): 153-159.
- 李瑞敏, 张世春, 王毅勇, 等, 2015. 三江平原作物收获期大气颗粒物浓度特征[J]. 中国环境科学, 35(3): 676-68.
- LI R M, ZHANG S C, WANG Y Y, et al., 2015. Mass concentration of atmospheric fine particulates in crop harvesting period in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. China Environmental Science, 35(3): 676-682.
- 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等, 2012. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 33(6): 1936-1943.
- LI X F, ZHANG M J, WANG S J, et al., 2012. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China [J]. Environmental Science, 33(6): 1936-1943.
- 刘萌萌, 2014. 林带对阻滞吸附 PM_{2.5} 等颗粒物的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学: 14-16.
- LIU M M, 2014. Studies on influence of the forest belt to intercept and adsorb particulate matter [D]. Beijing: Beijing Forestry University: 14-16.
- 刘旭辉, 余新晓, 张振明, 等, 2014. 林带内 PM_{2.5}、PM₁₀ 污染特征及其与气象条件的关系[J]. 生态学杂志, 33(7): 1715-1721.
- LIU X H, YU X X, ZHANG Z M, et al., 2014. Pollution characteristics of atmospheric particulates in forest belts and their relationship with meteorological conditions [J]. Chinese Journal of Ecology, 33(7): 1715-1721.
- 阮氏清草, 2014. 城市森林植被类型与等颗粒物浓度的关系分析[D]. 北京: 北京林业大学: 33-35.
- NGUYEN THI THANH THAO, 2014. Analysis and evaluation of the relationship between different types of urban forest plant species and vegetation in reducing airborne particulate matter in urban environment [D]. Beijing: Beijing Forestry University: 33-35.
- 田贺忠, 王艳, 赵丹, 等, 2011. 中国太行山东麓 NO_x 重污染成因分析[J]. 科学通报, 56(18): 58-63.
- TIAN H Z, WANG Y, ZHAO D, et al., 2011. Analysis of the causes of NO_x heavy pollution in the Taihang Mountains of China [J]. Chinese Science Bulletin, 56(18): 58-63.
- 王轶浩, 凯旋, 薛兰兰, 等, 2016. 重庆城郊森林植被调控大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的时空效应[J]. 生态环境学报, 25(10): 1678-1683.
- WANG Z H, KAI X, XUE L L, et al., 2016. Temporal and spatial effect of atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ regulated by forest vegetation in the suburban park of Chongqing [J]. Ecology and Environment Sciences, 25(10): 1678-1683.
- 王媛林, 李杰, 李昂, 等, 2016. 2013—2014 年河南省 PM_{2.5} 浓度及其来源模拟研究[J]. 环境科学学报, 36(10): 3543-3553.
- WANG Y L, LI J, LI A, et al., 2016. Modeling study of surface PM_{2.5} and its source apportionment over Henan in 2013—2014 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(10): 3543-3553.
- 王振波, 方创琳, 许光, 等, 2015. 2014 年中国城市 PM_{2.5} 浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 70(11): 1720-1734.
- WANG Z B, FANG C L, XU G, et al., 2015. Spatial-temporal characteristics of the PM_{2.5} in China in 2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 70(11): 1720-1734.
- 吴海龙, 余新晓, 师忱, 等, 2012. PM_{2.5} 特征及森林植被对其调控研究进展[J]. 中国水土保持科学, 10(6): 116-122.
- WU H L, YU X X, SHI C, et al., 2012. Advances in the study of PM_{2.5} characteristic and the regulation of forests to PM_{2.5} [J]. Science of Soil and Water Conservation, 10(6): 116-122.
- 徐建华, 2014. 计量地理学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社.
- XU J H, 2014. Quantitative geography [M]. 2nd Edition. Beijing: Higher education press.
- 杨龙, 贺克斌, 张强, 等, 2005. 北京秋冬季近地层 PM_{2.5} 质量浓度垂直分布特征[J]. 环境科学研究, 18(2): 23-28.
- YANG L, HE K B, ZHANG Q, et al., 2005. Vertical distributive characters of PM_{2.5} at the ground layer in autumn and winter in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 18(2): 23-28.
- 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏, 2012. 大气颗粒物 PM_{2.5} 及其危害[J]. 前沿科学(1): 22-31.
- YANG X X, FENG L H, WEI P, 2012. Air particulate matter PM_{2.5} in Beijing and its harm [J]. Frontier Science (1): 22-31.
- 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等, 2013. 细颗粒物 (PM_{2.5}) 与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志, 32(8): 2203-2210.
- ZHAO C X, WANG Y J, WANG Y Q, et al., 2013. Interactions between fine particulate matter PM_{2.5} and vegetation: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 32(8): 2203-2210.
- 中华人民共和国环境保护部, 2012. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行): HJ 633—2012[S]. 北京: 8-8.
- Ministry of Environmental Protection of PRC, 2012. Technical regulation on ambient air quality index (on trial) HJ 633—2012 [S]. Beijing: 8-8.
- 中华人民共和国环境保护部, 2013. 环境空气质量评价技术规范(试行)HJ 663—2013[S]. 北京: 2-5.

- Ministry of Environmental Protection of PRC, 2013. Technical regulation for ambient air quality assessment (on trial) HJ 633-2012 [S]. Beijing: 2-5.
- 朱文德, 徐澍, 郑逢斌, 等, 2018. 基于 MODIS 数据的郑州地区 PM_{2.5} 时空分布特征分析 [J]. 河南大学学报: 自然科学版, 48(2): 172-178.
- ZHU W D, XU S, ZHENG F B, et al., 2018. Analysis of the spatial-temporal PM_{2.5} distribution over zhengzhou area using modis data [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 48(2): 172-178.

Spatial and Temporal Variation Characteristics of PM_{2.5} and Its Relationship with Vegetation Fraction in Henan Province

DU Yanyan, HUANG Qing*

Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: With the continuous advancement of urbanization and industrialization in China, the situation of air pollution control is grim. As the primary air pollutant, PM_{2.5} has attracted widespread attention from the public and academic circumstance. Studying the spatial and temporal distribution characteristics of PM_{2.5}, and the relationship between its mass concentration and vegetation fraction can provide data support and theoretical basis for regional air pollution joint prevention and control. This paper took Henan Province with severe air pollution as the research area, and used the daily PM_{2.5} mass concentration data from 75 state-controlled air quality-monitoring stations of nationally controlled from January 2017 to February 2019, combined with spatial interpolation technology to analyze its temporal and spatial distribution characteristics of mass concentration. Retrieved vegetation fraction by the dimidiate pixel model based on the MODIS NDVI remote sensing satellite dataset, and then calculate its rank correlation coefficient with PM_{2.5} mass concentration. The study found that, (1) Overall, the average annual mass concentration of PM_{2.5} dropped from 79 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ to 63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ with an average annual decline of 7.2% from 2015 to 2018. However, it was still more than twice the national level-2 standard (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), the situation of prevention and control was still rigorous. (2) From the temporal distribution perspective, PM_{2.5} showed significant seasonal variations, the monthly average mass concentration curve of PM_{2.5} was roughly “U” shape, with the highest concentration in winter (113 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) and the lowest in summer (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), and the middle of spring and autumn. (3) From the spatial distribution perspective, the PM_{2.5} mass concentration decreased from south to north in Henan Province, forming the PM_{2.5} radiation circle centered on Zhengzhou and Anyang, which were seriously polluted. And (4) from the perspective of pollution control, the rank correlation coefficient of vegetation fraction and PM_{2.5} mass concentration was as high as -0.55. Increasing vegetation fraction and vegetation area have a positive effect on reducing PM_{2.5} mass concentration, but the role of vegetation is limited.

Key words: PM_{2.5}; vegetation fraction; spatial and temporal distribution; rank correlation analysis; Henan Province