

# 我国主要粮产区PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>时空分布特征及影响因素 ——以河南省为例

臧振峰<sup>1,2</sup>, 张凤英<sup>3</sup>, 李永华<sup>1</sup>, 邢 昱<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国环境监测总站, 北京 100012; 4. 河南省生态环境监测中心, 郑州 450004)

**摘要:** 利用2018年河南省PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>监测数据, 结合统计学方法及克里格插值技术, 分析河南省PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的时空分布特征及影响因素, 结果表明: (1) PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>日均、月均浓度均呈现出“U”型变化特征, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>月均值呈现出“W”型变化特征, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>季均浓度及其比值均呈现出冬季>秋季>春季>夏季的规律; (2) PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月均浓度的空间分布差异较大, 而年均浓度则呈现出相似的空间分布规律, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>季均值呈现出不同的空间分布规律, 总体上东部及东南部较高, 中西部区域较低; (3) PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>与NDVI、年降水量呈显著负相关, 与人口密度、第二产业占比呈显著正相关。研究结论可为粮产区大气污染防治及粮食安全生产提供重要的科学依据。

**关键词:** 时空分布; PM<sub>2.5</sub>; PM<sub>10</sub>; 河南省

随着我国工业化、城镇化进程的加快, 大气污染形势日益严峻, 特别是以颗粒物(PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>)为特征污染物的区域性大气污染问题较为突出, 对人群健康以及生态环境都造成了一定程度的影响<sup>[1,2]</sup>。大气颗粒物可引发心血管、呼吸、免疫以及神经等系统的疾病, 其携带的有毒物质可能引发癌症, 对人体健康产生危害<sup>[1,3-7]</sup>。大气颗粒物也可能对农业生产产生不利影响, 如影响作物正常生长、造成作物产量和品质下降<sup>[8-11]</sup>。潘月鹏等<sup>[8]</sup>研究发现, 我国农业生产区PM<sub>2.5</sub>浓度值相对较高。因此, 研究PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的时空变化特征, 对于人群健康以及农业生产都具有重要的意义, 已成为目前研究的热点之一。

河南省是我国粮食重要生产区, 随着社会经济快速发展, 大气污染问题不断凸显, 给社会经济发展、生态环境保护以及农业生产都带来了严重挑战<sup>[12,13]</sup>。根据河南省2015—2018年连续四年环境质量年报, 大气污染主要是PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>污染。2018年3月, 河南省发布《河南省大气污染防治条例》, 重污染时采取“史上最严”环保措施, 如限产、停产等。

目前, 国内外关于大气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>)的成分、源解析、空间分布特征及影响因素等方面的研究较多, 国内相关研究主要集中在京津冀及南方经济相对发达区域<sup>[14-21]</sup>。而对以农业为主的河南省PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的时空分布、来源及影响因素的研究则相对较少<sup>[13,22,23]</sup>。研究使用数据多是基于少量站点的观测数据, 且大多数监测站点位于市级行政区建成区内, 不能较好地反映整个粮食生产区的大气污染状况。本文利用2018年河南省108个县(区)级监测站点的PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>日均浓度数据, 分析了PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>时空分布

收稿日期: 2020-05-06; 修订日期: 2020-10-14

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040303)

作者简介: 臧振峰(1986-), 男, 河南睢县人, 博士研究生, 研究方向为环境与健康。E-mail: zangfengaa@163.com

通讯作者: 李永华(1971-), 男, 湖南衡南人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为环境与健康。

E-mail: yhli@igsnnr.ac.cn

特征,并探究了其时空分布的影响因素,可为了解粮产区河南省的大气污染状况、大气污染防治、粮食安全生产以及生产生活空间的合理规划与布局提供数据支撑和理论依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

河南省位于 $31^{\circ}23'\sim 36^{\circ}22'N$ 和 $110^{\circ}21'\sim 116^{\circ}39'E$ 之间,是我国重要的粮食生产区,其小麦产量占全国的1/4以上。属于大陆性季风气候,年均温为 $12.7\sim 16.2^{\circ}C$ ,年均降水量为 $477.8\sim 1167.3\text{ mm}$ ,降水相对集中于6-8月。全省面积 $16.7\text{ 万 km}^2$ ,其中耕地面积 $8.1\text{ 万 km}^2$ 。地势西高东低,山脉沿北、西、南三面省界分布,中东部为平原区,西南部为盆地。

### 1.2 数据来源与处理

2018年河南省 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 浓度数据来源于河南省生态环境监测中心和中国环境监测总站,共108个县(区)级监测站的监测数据,监测站分布见图1。

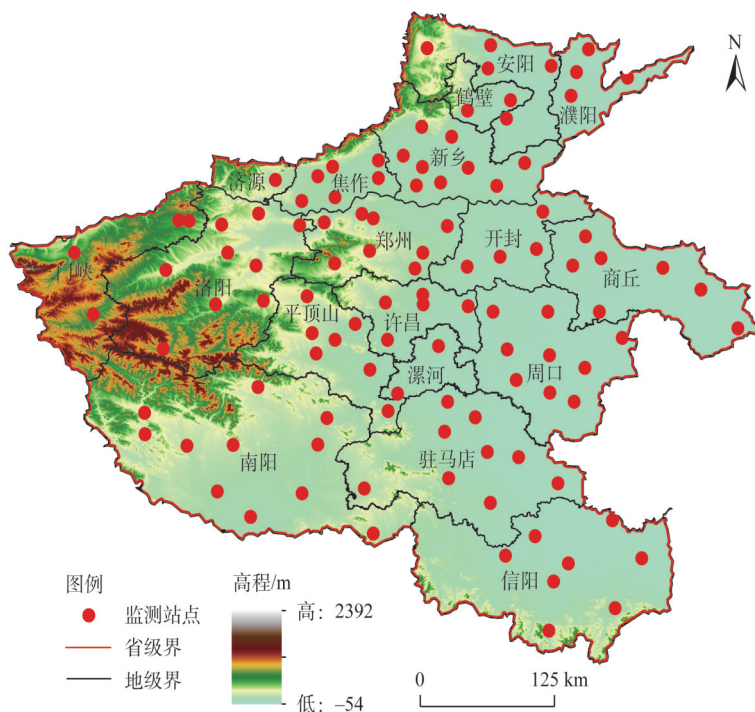


图1 研究区监测站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of monitoring stations in Henan province

社会经济数据来自统计年鉴<sup>[24]</sup>,高程及NDVI数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),气温、降水量数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site>)。高程数据是基于SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据经整理拼接生成,NDVI数据是基于MODIS卫星遥感数据,采用最大值合成法生成<sup>[25]</sup>。

$PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 浓度数据均按照《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中的规定进行质量控制,剔除无数据或异常值,并分别计算月均、季均以及年均浓度。分别采用Ex-

cel、Origin Pro 2016 以及 SPSS 对原始数据进行数据整理分析、图形绘制及相关性分析; 采用 ArcGIS 10.3 中的克里格插值法绘制空间分布图。由于本文中 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 是站点数据, 为了与自然及社会经济指标进行匹配分析, 利用 ArcGIS 10.3 将 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 年均值空间分布栅格数据进行按照县级行政区划边界的矢量转化, 并利用区域统计分析, 得到各监测站点所在行政区的栅格平均值, 即为该区域对应的 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 年均值。各县级行政区对应的自然因素 (NDVI、年降水量、气温及高程) 均值也采用此方法进行计算得出。

Spearman 相关系数可用来衡量变量之间的线性相关关系, 以度量变量之间关联的强弱, 其采用非参数检验, 对变量分布不做要求, 适用范围较广<sup>[26-29]</sup>。本文采用该方法来探讨 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 与自然以及社会经济因素之间的相关关系。

## 2 结果分析

### 2.1 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度的时间变化规律

基于各监测点位 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 日均浓度数据, 计算得出 2018 年河南省 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 年均浓度分别为 57.62 μg/m<sup>3</sup>、105.29 μg/m<sup>3</sup>, 均高于环境空气质量标准 (GB3095-2012) 中其对应二级标准限值 (35 μg/m<sup>3</sup>、70 μg/m<sup>3</sup>)。按照市级行政区对各行行政区的 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 年均浓度进行计算, 对于 PM<sub>2.5</sub> 而言, 各地级市年均浓度均高于其二级标准限值, 其中新乡市最高, 焦作市次之, 分别为 71.64 μg/m<sup>3</sup>、69.44 μg/m<sup>3</sup>, 信阳市最低, 为 44.82 μg/m<sup>3</sup>。PM<sub>10</sub> 年均浓度表现出相同的变化趋势, 各地级市均高于其二级标准限值, 其中新乡市最高, 信阳市最低, 分别为 128.93 μg/m<sup>3</sup>、78.15 μg/m<sup>3</sup>。为进一步研究 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的时间变化规律, 分别分析其日均、月均及季均浓度的变化规律。

#### 2.1.1 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 日均浓度变化规律

PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 日均浓度变化趋势见图 2。由图 2 可知, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 日均浓度均呈现出“U”型变化特征。

河南省主要粮食作物是小麦和玉米, 小麦收获期为 5 月下旬至 6 月上旬, 而玉米收获期为 9 月中下旬至 10 月上旬。由图 2 可知, PM<sub>2.5</sub> 在小麦收获前时段呈现出不均匀变化规律, 但在收获时段, 整体上呈现出增加的趋势, 收获后时段浓度开始降低。PM<sub>10</sub> 在收获前时段, 浓度不断降低, 收获时段呈现出明显的增加趋势, 且最高值达到 165.59 μg/m<sup>3</sup>, 在收获结束后, PM<sub>10</sub> 浓度开始下降。而 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 在玉米收获时段总体上也呈现出较收获前后时段增加的趋势, 但增加相对不明显。在小麦及玉米收获时段, PM<sub>10</sub> 浓度变化均较 PM<sub>2.5</sub> 显著, 这与陈卫卫<sup>[30]</sup>、李瑞敏等<sup>[31,32]</sup>的研究结果一致, 即农业生产, 特别是作物收割过程是悬浮颗粒物的重要来源, 且收割过程中颗粒物以 PM<sub>10</sub> 为主, PM<sub>2.5</sub> 占比相对较低。

#### 2.1.2 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 月均及季均浓度变化规律

由月均浓度变化趋势可知 (图 3a), PM<sub>2.5</sub> 月均浓度呈现出“U”型变化特征。其中 1 月浓度最高, 为 99.28 μg/m<sup>3</sup>; 从 1 月开始, 浓度不断降低, 最低值出现在 7 月为 30.65 μg/m<sup>3</sup>, 7 月、8 月、9 月的浓度相对全年来说, 处于 U 型分布的底部区域, 相对较低; 从 10 月开始浓度不断增加。PM<sub>10</sub> 月均浓度也呈现出与 PM<sub>2.5</sub> 相似的变化趋势, 其中 12 月浓度最高, 为 159.93 μg/m<sup>3</sup>, 是月均值最低月份 7 月的 2.94 倍。由 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 月均浓度的变化趋势可知, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度高值月份与冬小麦生长期 (9 月、10 月至次

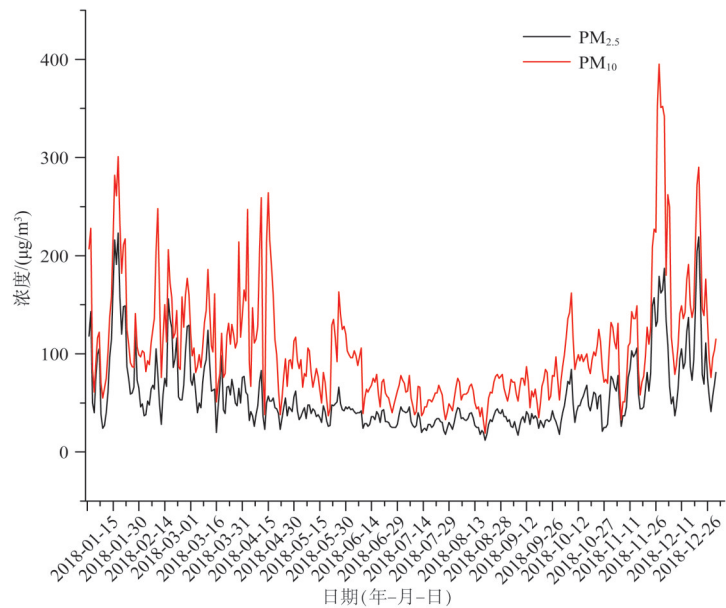


图2 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>日均浓度变化趋势

Fig. 2 The variation trend of daily average concentration of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>

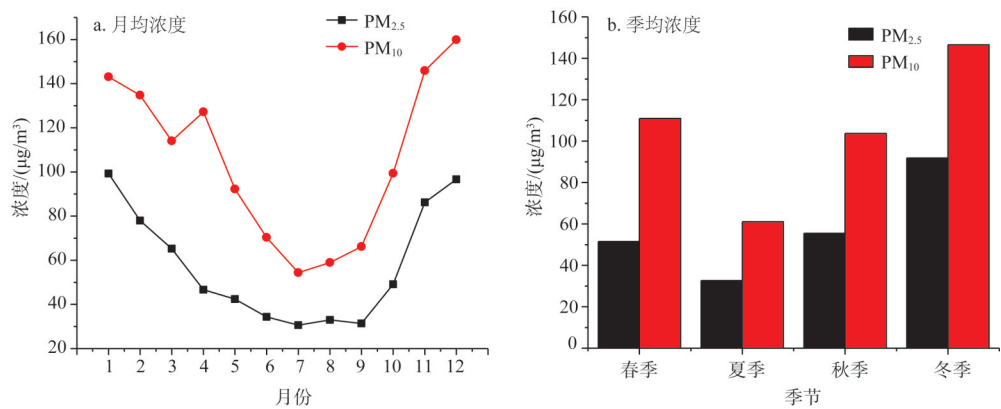


图3 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月均及季均浓度

Fig. 3 Monthly average and quarterly average concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>

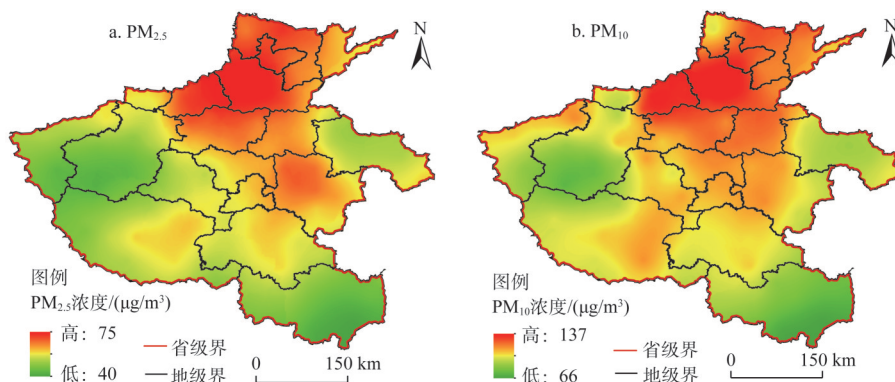
年5月、6月)存在重合,这可能会在一定程度上影响冬小麦的正常生长。

由季均浓度变化趋势可知(图3b),PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>均呈现出明显的季节变化规律,总体上为冬季>秋季>春季>夏季。春季PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>季均浓度与秋季差别较小,冬夏季差别较大,PM<sub>2.5</sub>冬季季均浓度为91.87 μg/m<sup>3</sup>,是夏季季均浓度的2.81倍;PM<sub>10</sub>冬季季均浓度为146.52 μg/m<sup>3</sup>,远高于夏季季均浓度(61.12 μg/m<sup>3</sup>)。这与河南省其他年份以及北京、南京等区域的研究结果相似<sup>[13,16,17,22]</sup>。

2.2 空间分布规律

根据计算得到的各站点PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>年均浓度、月均浓度,采用ArcGIS中克里格插值,分别绘制其空间分布图(图4~图6)。



图4 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>年均浓度空间分布Fig. 4 Spatial distribution of annual average concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>

### 2.2.1 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>年均浓度空间分布特征

由PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>年均浓度空间分布可知(图4),PM<sub>2.5</sub>的高浓度区主要分布在河南省的中北部区域,如焦作市、新乡市、郑州市、鹤壁市以及安阳市,低值区主要分布在西部区域。PM<sub>10</sub>年均浓度呈现出与PM<sub>2.5</sub>相似的分布规律,即高值区主要分布在中北部区域,低值区主要分布在西部及南部区域。

### 2.2.2 PM<sub>2.5</sub>月均浓度空间分布特征

由PM<sub>2.5</sub>月均浓度空间分布可知(图5),冬季(1月、2月、12月)PM<sub>2.5</sub>在空间分布上呈现出不同的分布特征,1月、2月高值区主要分布在中北部区域,即郑州市、焦作市、新乡市、鹤壁市及安阳市;而12月高值区主要集中在周口市、许昌市及漯河市等中部区域。春季(3-5月)PM<sub>2.5</sub>在区域分布上,呈现出随着时间变化浓度不断降低的趋势,高值区主要分布在中北部区域。夏季(6-8月)PM<sub>2.5</sub>在整个区域均较低,月份之间浓度差异较小,但整体上中北部区域高于其他区域。秋季(9-11月)PM<sub>2.5</sub>随着时间变化呈现出浓度不断增加的趋势,高值分布区域也存在一定差异,特别是到了11月份,高值区浓度相对较高,主要分布在郑州市、焦作市、新乡市、鹤壁市、安阳市、濮阳市以及周口市。

### 2.2.3 PM<sub>10</sub>月均浓度空间分布特征

由PM<sub>10</sub>月均浓度空间分布可知(图6),冬季(1月、2月、12月)PM<sub>10</sub>在空间分布上呈现出不同的分布特征,1-2月高值区由中北部区域向东部区域扩散,12月较年初浓度有所增加,且高值分布区域主要位于中东部及西南区域。春季(3-5月)PM<sub>10</sub>在区域分布上,呈现出随着月份变化浓度不断降低的趋势,总体上中北部区域高于其他区域。夏季(6-8月)PM<sub>10</sub>在整个区域分布上浓度均较低,但整体上中北部区域高于其他区域。秋季(9-11月)PM<sub>10</sub>随着月份变化呈现出高值不断增加的趋势,特别是到了11月份,高值区浓度显著升高,其空间分布呈现出与PM<sub>2.5</sub>相似的分布规律,即高值区主要位于中北部以及中东部区域。

## 2.3 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>影响因素分析

相关研究表明,自然因素如NDVI、年降水量、气温与高程等能影响PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的浓度<sup>[14,17-19,26,33]</sup>;社会经济指标如人口密度、城镇化率、第二产业占比和人均生产总值一定

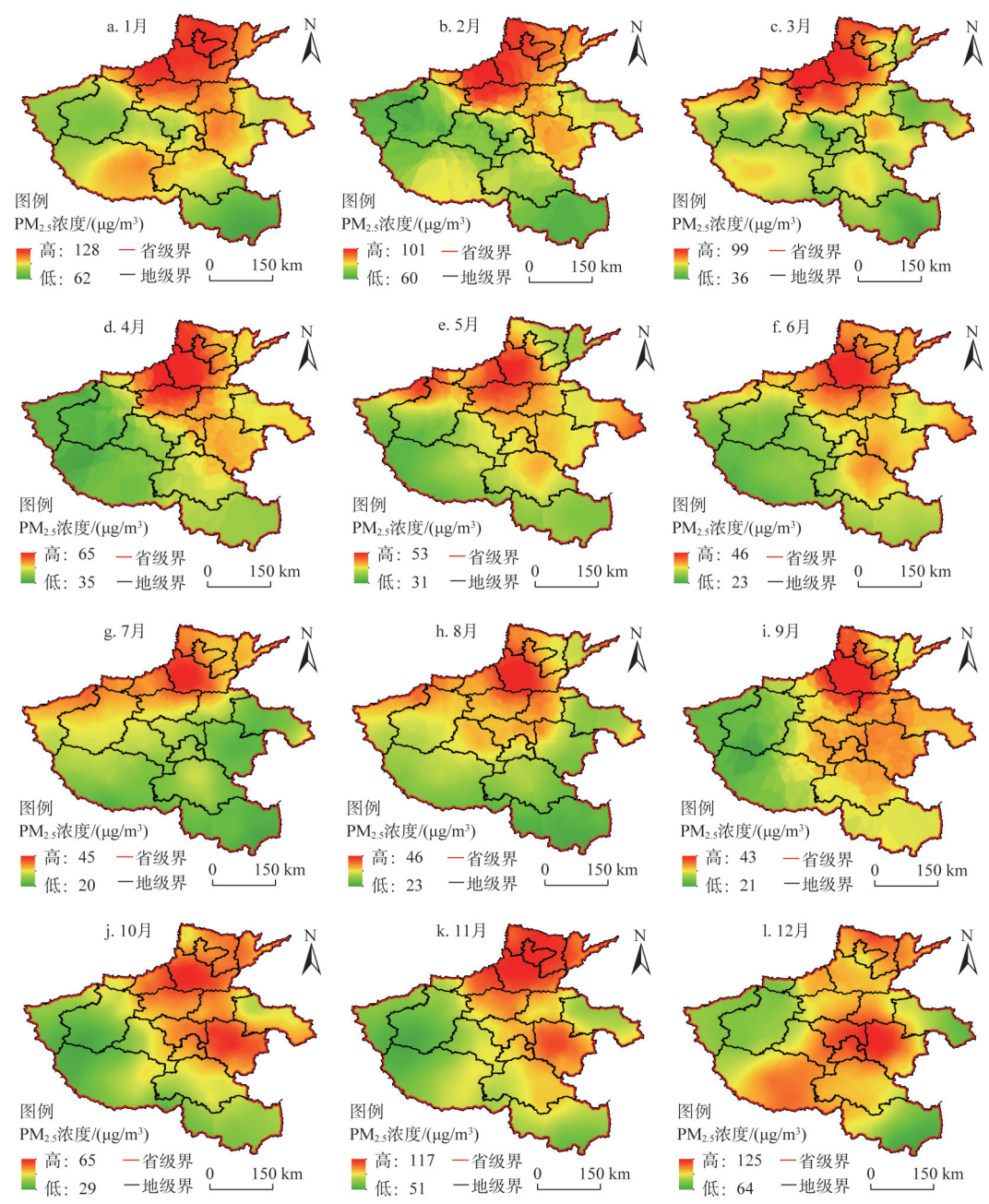
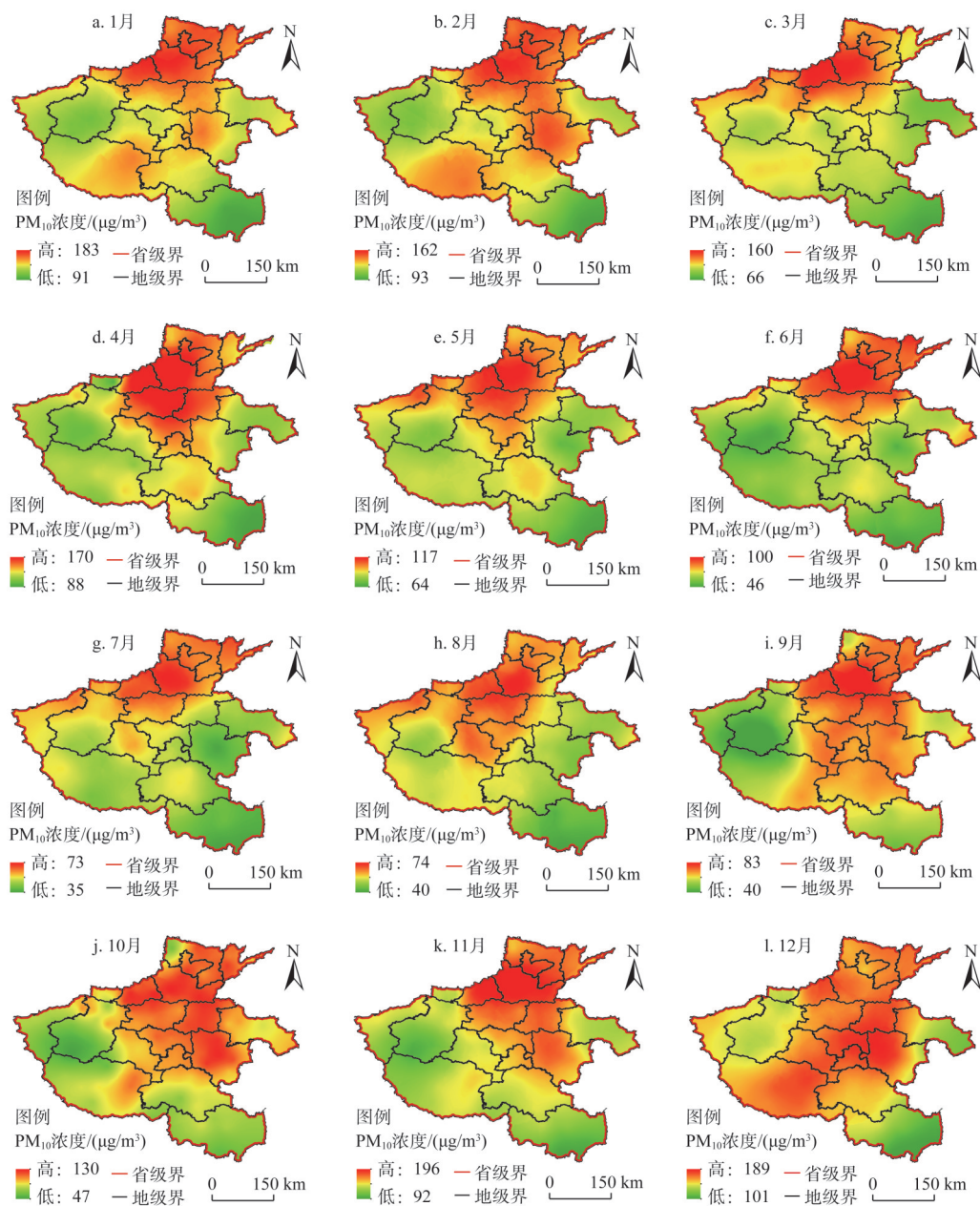


图5  $PM_{2.5}$ 月均浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of monthly average concentration of  $PM_{2.5}$

程度上能反映一个区域的人类活动强度及工业发展水平，从而对 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 浓度产生一定的影响<sup>[14,16]</sup>。为探讨 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 与自然及社会经济指标之间的关系，本文利用各行政区 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 年均值分别与其所在区域自然（NDVI、年降水量、气温、高程）以及社会经济（人口密度、城镇化率、第二产业占比、人均生产总值）等指标进行相关性分析。分析结果见表1。

图6 PM<sub>10</sub>月均浓度空间分布Fig. 6 Spatial distribution of monthly average concentration of PM<sub>10</sub>

由表1可知, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>与NDVI、年降水量呈显著负相关, 反映出降雨及植被覆盖(NDVI)能起到降低PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的作用<sup>[18,23,26,33]</sup>, 这与PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的季节分布相一致。夏季降雨多、NDVI高, 大气颗粒物浓度低, 冬季降水相对较少, 且NDVI低, 大气颗粒物浓度高。PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>与人口密度、第二产业占比呈现显著正相关, 表明人口密度和第二产业占比等对于PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的浓度增加有促进作用, 即人口密度越大、人类日常生活以及工业生产活动越强, 越可能造成PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>浓度的增加<sup>[13,22]</sup>。



表1  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 与自然及社会经济因素 Spearman 分析结果

Table 1 Results of Spearman analysis of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  and natural and socioeconomic factors

	NDVI	年降水量	气温	高程	人口密度	城镇化率	第二产业占比	人均生产总值
$PM_{2.5}$	-0.322**	-0.596**	-0.050	-0.145	0.383**	0.125	0.364**	0.078
$PM_{10}$	-0.413**	-0.708**	-0.167	-0.033	0.375**	0.135	0.423**	0.178

注：\*在0.05水平显著，\*\*在0.01水平显著。

2.4  $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化分析

$PM_{2.5}$ 是 $PM_{10}$ 的一部分，但是两者的来源存在差异性。根据对两者源解析及元素分析的结果表明，对 $PM_{2.5}$ 贡献较大的为二次颗粒物，而对 $PM_{10}$ 贡献较大的主要是扬尘、燃煤尘等一次污染物<sup>[34,35]</sup>。因此， $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 比值代表细颗粒物占可吸入颗粒物的比例，比值越大说明细颗粒物在可吸入颗粒物中的占比越高，一定程度上可以反映二次污染的程度<sup>[17,36]</sup>。

根据 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 月均值变化曲线可知（图7a）， $PM_{2.5}/PM_{10}$ 月均值呈现出“W”型变化特征，1月最高为0.69，然后开始降低，4月最低为0.37，随后开始增加，7月达到0.57，9月达到一个低值0.47，随后就开始增加，到12月达到0.61。从季度变化来看， $PM_{2.5}/PM_{10}$ 表现为冬季>秋季>夏季>春季，冬季最高为0.61，春季最低为0.47，夏季、秋季相当，分别为0.53、0.54。

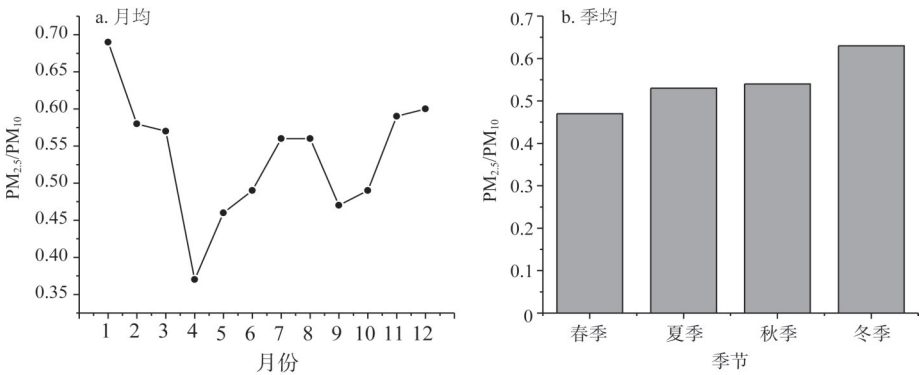


图7  $PM_{2.5}/PM_{10}$ 月均及季均值

Fig. 7 Monthly average and quarterly average values of  $PM_{2.5}/PM_{10}$

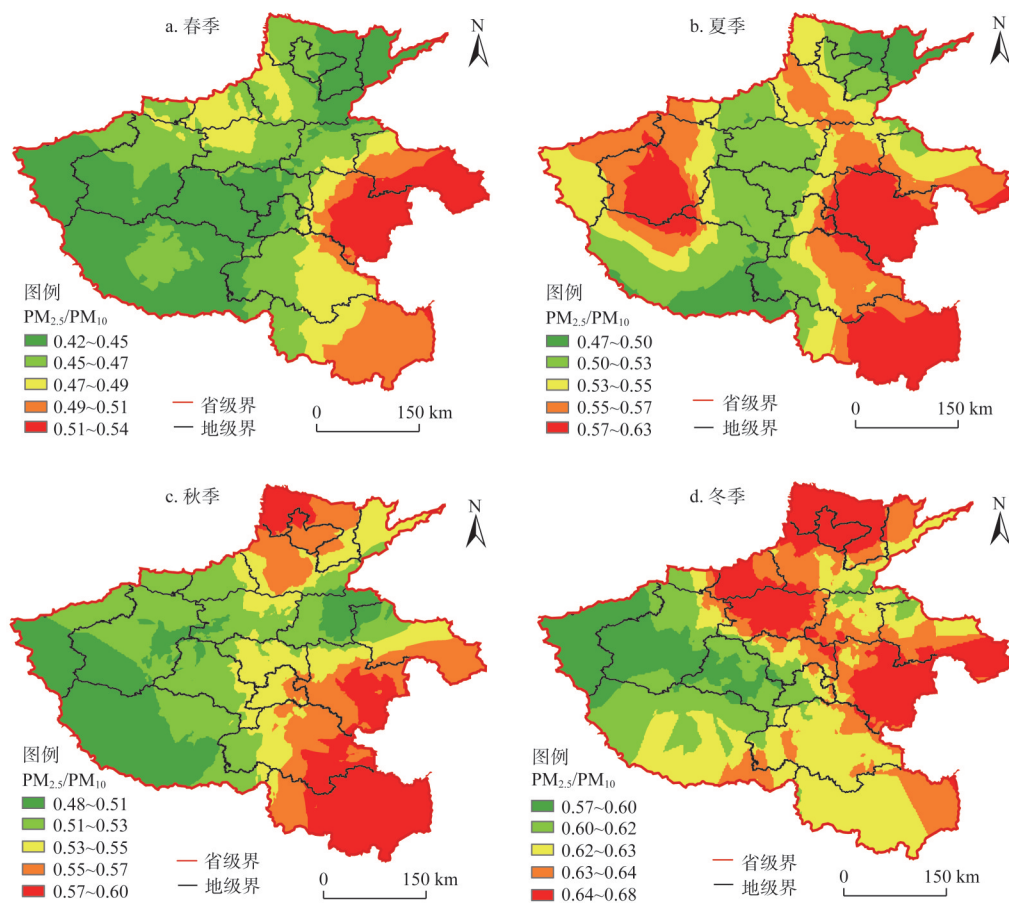
由 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 季均值空间分布可知（图8），春季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 高值区主要分布在东部及东南部区域，尤以周口市、商丘市东部较高，其他区域则相对较低。夏季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 高值区主要分布在东部、东南部及西部区域，其中周口市、信阳市以及洛阳市相对较高，低值区主要分布在北部及中南部。秋季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 高值区主要分布在东南部及北部区域，低值区主要分布在中西部。冬季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 高值区主要分布在中北部及东部，低值区主要分布在中西部。 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 季均值各季节呈现出不同的空间分布规律，总体上呈现出东部及东南部较高、中西部区域较低的规律。

3 结论与讨论

3.1 结论

（1）河南省 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 年均浓度分别为 $57.62\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $105.29\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，均高于其对应



图8 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>季均值空间分布Fig. 8 Spatial distribution of quarterly average of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>

二级标准限值 ( $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。就市级行政区来分, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>年均浓度均超过其二级标准限值, 其中新乡市最高, 信阳市最低。

(2) PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>日均浓度均呈现出“U”型变化规律, 农业生产特别是小麦收割会对颗粒物浓度产生一定的影响。PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月均浓度也均呈现出“U”型变化特征。PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>季均浓度均呈现出冬季>秋季>春季>夏季的变化规律。春季PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>季均浓度与秋季差别较小, 冬夏季节差别较大。PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>月均值呈现出“W”型变化特征, 季均值呈现出冬季>秋季>夏季>春季规律。

(3) 从空间分布上, PM<sub>2.5</sub>年均浓度的高值区主要分布在河南省的中北部区域, 低值区主要分布在西部区域。PM<sub>10</sub>年均浓度在空间分布上呈现出与PM<sub>2.5</sub>相似的分布规律, 高值区主要分布在中北部区域, 低值区主要分布在西部及南部区域。PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>月均浓度空间分布均呈现出不同的分布规律, 月均分布变化较大。PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>季均值呈现出不同的空间分布规律, 总体上东部及东南部较高, 中西部区域较低。

(4) 相关分析表明, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>与NDVI、年降水量呈显著负相关, 与人口密度、第二产业占比呈显著正相关, 表明植被及降雨的增加可能会对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>浓度的降低起到一定的促进作用, 而人类社会经济活动则对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的浓度增加起到一定的促进作用。

### 3.2 讨论

本文分析了 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的时空分布特征,并探究了自然及社会经济因素对 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的影响。 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 日均浓度呈现出“U”型变化特征,在作物收获季节表现出增加的趋势,尤其是小麦收获期,这个与相关分析结果“ $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 与NDVI、年降水量呈显著负相关”的总体规律是一致的。主要是由于小麦收获时期的浓度增加只是相对于该时期前后时段来对比分析的,其相对于全年来说该时期浓度还是处于低值水平。小麦收割会导致NDVI降低,但是由于6月处于植物生长旺季,小麦收割后,玉米开始生长,因此该时段NDVI降低相对较少;6月降水量较多,但该时段颗粒物浓度较前后时段增加,主要是单一来源的收割活动造成的,降雨虽然会导致颗粒物浓度降低,但在整个时段内降水对颗粒物的去除率是一致的,因此即使考虑降水因素影响,收获时段也会较收获前后时段浓度增加。

从空间分布上看, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 月均及年均浓度的高值区主要集中于中北部区域,中北部区域的城市基本属于“2+26”京津冀大气污染传输通道城市。结合相关分析结果,人口密度及第二产业占比与 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 呈显著正相关,表明该区域浓度一方面受京津冀地区的污染传输影响<sup>[13]</sup>,另一方面是由于这些城市人口密度高、第二产业占比相对较高,人为排放量较多造成的。 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的空间分布差异主要是由于东部及东南部区域是传统农业区,农业生产活动造成 $PM_{10}$ 的变化幅度较大,而对 $PM_{2.5}$ 影响相对较弱,并且大颗粒物相对较易被清除,而 $PM_{2.5}$ 则较难被清除,这就造成 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 相对其他区域较高。

而 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 浓度在不同月份及季节也存在较大差异,结合相关分析结果,表明这种季节差异主要与污染源排放、植被覆盖以及降水量等密切相关。对于粮产区来说,其植被覆盖度受作物种植的影响相对较大,根据河南省粮食种植方式及树木生长规律,夏季植被覆盖度最高,春秋次之,冬季最差,加上研究区降雨主要集中于夏季,冬季属于供暖季,污染物排放增加等因素叠加影响造成了 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的月份及季节差异<sup>[22,37]</sup>。而 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 冬季最高,其原因主要是冬季属于供暖期,且气象条件较差(静风、逆温较多),更有利于细颗粒物的形成。春季最低,尤其是4月份,可能与4月份河南省还处于初春,地表植被覆盖度相对较低、大风天气较多,地表扬尘较多有关<sup>[19,22]</sup>。

### 参考文献(References):

- [1] HU D, JIANG J Y.  $PM_{2.5}$  pollution and risk for lung cancer: A rising issue in China. *Journal of Environmental Protection*, 2014, 5(8): 731-738.
- [2] 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 等. 北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评估. *环境科学*, 2018, 39(3): 997-1003. [ZHANG X, ZHAO X M, MENG X J, et al. Particle size distribution and human health risk assessment of heavy metals in atmospheric particles from Beijing and Xinxiang during summer. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 997-1003.]
- [3] 孙兆彬, 陶燕, 崔莹莹, 等. 北京地区奥运会期间 $PM_{2.5}$ 对心脑血管疾病的影响. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3481-3488. [SUN Z B, TAO Y, CUI M M, et al. The effect of  $PM_{2.5}$  on cardiovascular and cerebrovascular diseases in Beijing areas during the Olympic Games. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3481-3488.]
- [4] 咸平, 闫梦瑶, 李耀妍, 等.  $PM_{10}$ 长期暴露与中国北方城市居民慢性支气管炎发病风险的回顾性队列研究. *环境与职业医学*, 2020, 37(2): 95-102. [XIAN P, YAN M F, LI Y Y, et al. Long-term exposure to  $PM_{10}$  and risk of chronic bronchitis of residents in Northern China: A retrospective cohort study. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2020, 37(2): 95-102.]
- [5] WEI T T, TANG M. Biological effects of airborne fine particulate matter ( $PM_{2.5}$ ) exposure on pulmonary immune sys-

- tem. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2018, 60: 195-201.
- [6] 陈晓雨, 李纪桡, 张芳, 等. 大气颗粒物的神经毒性效应. *环境与职业医学*, 2019, 36(6): 602-608. [CHEN X Y, LI J R, ZHANG F, et al. Neurotoxic effects of airborne inhaled particulate matters. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2019, 36(6): 602-608.]
- [7] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市PM<sub>2.5</sub>中有毒重金属污染特征及健康风险评价. *中国环境科学*, 2015, 35(7): 2225-2232. [LI Y P, LIU H F, ZHOU H, et al. Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in Chengdu. *China Environmental Science*, 2015, 35(7): 2225-2232.]
- [8] 潘月鹏, 贾琳, 田世丽, 等. 大气霾污染对农业生产的可能影响. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2279-2280. [PAN Y P, JIA L, TIAN S L, et al. Potential effects of haze pollution on agriculture in China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2279-2280.]
- [9] HASSAN Z, AARTS M G M. Opportunities and feasibilities for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 72(1): 53-63.
- [10] MANIOS T, STENTIFORD E I, MILLNER P A. The effect of heavy metals accumulation on the chlorophyll concentration of *Typha latifolia* plants, growing in a substrate containing sewage sludge compost and watered with metaliferous water. *Ecological Engineering*, 2003, 20(1): 65-74.
- [11] 翟薇, 赵艳霞, 王春乙, 等. 大气气溶胶变化对农业影响的研究进展. *气象科技*, 2006, 34(6): 705-710. [ZHAI W, ZHAO Y X, WANG C Y, et al. Advances in effect study of atmospheric aerosol changes on agriculture. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(6): 705-710.]
- [12] 史聆聆, 李小敏, 刘静, 等. 河南省大气污染现状及其控制对策分析. *环境工程*, 2015, 33(5): 104-108. [SHI L L, LI X M, LIU J, et al. Air pollution situation of Henan province and its controlling measures. *Environmental Engineering*, 2015, 33(5): 104-108.]
- [13] 王媛林, 李杰, 李昂, 等. 2013—2014年河南省PM<sub>2.5</sub>浓度及其来源模拟研究. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3543-3553. [WANG Y L, LI J, LI A, et al. Modeling study of surface PM<sub>2.5</sub> and its source apportionment over Henan in 2013-2014. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(10): 3543-3553.]
- [14] 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. *地理学报*, 2018, 73(1): 177-191. [LIU H M, FANG C L, HUANG J J, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 177-191.]
- [15] YAN D, LEI Y L, SHI Y K, et al. Evolution of the spatiotemporal pattern of PM<sub>2.5</sub> concentrations in China: A case study from the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Atmospheric Environment*, 2018, 183: 225-233.
- [16] 杨文涛, 姚诗琪, 邓敏, 等. 北京市PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其与PM<sub>10</sub>关系的时空变异特征. *环境科学*, 2018, 39(2): 684-690. [YANG W T, YAO S Q, DENG M, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and spatio-temporal variation characteristics of the relationship between PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Beijing. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 684-690.]
- [17] 王涛, 何浩奇, 夏忠欢, 等. 2015年南京市PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>的污染特征. *环境工程学报*, 2017, 11(11): 5978-5985. [WANG T, HE H Q, XIA Z H, et al. Pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in 2015 in Nanjing, China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(11): 5978-5985.]
- [18] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 等. 2013—2014年北京地区PM<sub>2.5</sub>时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 103-111. [WANG Y R, ZHANG X X, ZHAO J Y, et al. Temporal and spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> and its relationship with vegetation coverage in Beijing during the period of 2013-2014. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 103-111.]
- [19] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>污染水平时空分布及其与气象条件的关系. *环境科学*, 2014, 35(2): 418-427. [ZHAO C X, WANG Y Q, WANG Y J, et al. Temporal and spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 418-427.]
- [20] KOZAKOVA J, POKORNA P, VODICKA P, et al. The influence of local emissions and regional air pollution transport on a European air pollution hot spot. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(2): 1675-1692.
- [21] MURARI V, SINGH N, RANJAN R, et al. Source apportionment and health risk assessment of airborne particulates

- over Central Indo-Gangetic Plain. *Chemosphere*, 2020, 257: 1-11.
- [22] 曹景丽, 王明仕, 韩文生, 等. 河南省PM<sub>2.5</sub>时空分布特征研究. 大气与环境光学学报, 2018, 13(1): 42-51. [CAO J L, WANG M S, HAN W S, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Henan province. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(1): 42-51.]
- [23] 杜彦彦, 黄青. 河南省PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其与植被覆盖度的关系. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2257-2265. [DU Y Y, HUANG Q. Spatial and temporal variation characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its relationship with vegetation fraction in Henan province. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(11): 2257-2265.]
- [24] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 河南统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019: 729-775. [Henan Province Bureau of Statistics, Henan Investigation Team of National Bureau of Statistics. *Henan Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2019: 729-775.]
- [25] 徐新良. 中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, <http://www.resdc.cn>, 2018. [XU X L. Spatial distribution data set of annual vegetation index (NDVI) in China. Data Registration and Publishing System of Resource and Environmental Science Data Center of Chinese Academy of Sciences, <http://www.resdc.cn>, 2018.]
- [26] 薛海, 张帆. 降水量与城市大气环境关系: 以113个环保重点城市为例. 自然资源学报, 2020, 35(4): 937-949. [XUE H, ZHANG F. Study on the relationship between precipitation and urban atmospheric environment: Cases of 113 key environmental protection cities. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(4): 937-949.]
- [27] 王亚慧, 戴尔阜, 马良, 等. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究. 自然资源学报, 2020, 35(2): 371-386. [WANG Y H, DAI E F, MA L, et al. Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain Region. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 371-386.]
- [28] 汪左, 王芳, 张运. 基于CWSI的安徽省干旱时空特征及影响因素分析. 自然资源学报, 2018, 33(5): 853-866. [WANG Z, WANG F, ZHANG Y. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing factors of drought in Anhui province based on CWSI. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(5): 853-866.]
- [29] DE WINTER J C F, GOSLING S D, POTTER J. Comparing the pearson and spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data. *Psychological Methods*, 2016, 21(3): 273-290.
- [30] 陈卫卫. 农业土壤耕作大气颗粒物排放研究进展. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1225-1232. [CHEN W W. Research progress in atmospheric particulate matter emissions from agricultural tillage. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1225-1232.]
- [31] 李瑞敏, 张世春, 王毅勇, 等. 三江平原作物收获期大气颗粒物浓度特征. 中国环境科学, 2015, 35(3): 676-682. [LI R M, ZHANG S C, WANG Y Y, et al. Mass concentration of atmospheric fine particulates in crop harvesting period in Sanjiang Plain, Northeast China. *China Environmental Science*, 2015, 35(3): 676-682.]
- [32] 李瑞敏, 童金松, 陈卫卫, 等. 东北地区农业源一次颗粒物排放清单研究. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1601-1609. [LI R M, TONG J S, CHEN W W, et al. Primary particulate matter (PM) emission inventory from agricultural activities in Northeastern China. *China Environmental Science*, 2016, 36(6): 1601-1609.]
- [33] 曹杨, 刘炜桦, 王晨曦, 等. 成都市降水对大气污染物的清除效果分析. 环境科学研究, 2020, 33(2): 305-311. [CAO Y, LIU W H, WANG C X, et al. Scavenging effect of precipitation on removal of atmospheric pollutants in Chengdu city. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(2): 305-311.]
- [34] 刘浩, 张家泉, 张勇, 等. 黄石市夏季昼间大气PM<sub>10</sub>与PM<sub>2.5</sub>中有机碳、元素碳污染特征. 环境科学学报, 2014, 34(1): 36-42. [LIU H, ZHANG J Q, ZHANG Y, et al. Pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric particles during the summer day in Huangshi city. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(1): 36-42.]
- [35] HUANG R J, ZHANG Y L, BOZZETTI C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- [36] 付宏臣, 孙艳玲, 陈莉, 等. 基于AOD数据与GWR模型的2016年新疆地区PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>时空分布特征. 环境科学学报, 2020, 40(1): 27-35. [FU H C, SUN Y L, CHEN L, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Xinjiang region in 2016 based on AOD data and GWR model. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(1): 27-35.]



- [37] 郑瑶, 邢梦林, 李明, 等. 郑州市 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 质量浓度变化特征分析. 干旱环境监测, 2014, 28(3): 104-108. [ZHENG Y, XING M L, LI M, et al. Analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> mass concentration variation characteristics in Zhengzhou. Arid Environmental Monitoring, 2014, 28(3): 104-108.]

## **Spatio-temporal distribution and affecting factors of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in major grain producing areas in China: A case study of Henan province**

ZANG Zhen-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Feng-ying<sup>3</sup>, LI Yong-hua<sup>1</sup>, XING Yu<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China; 4. Henan Ecological Environmental Monitoring Center, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** This research analyzed the spatio-temporal distribution characteristics and the affecting factors of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> based on the daily monitoring data in Henan province in 2018, and using statistical methods and Kriging interpolation. The results showed that: (1) The daily and monthly average concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> showed a U-shaped pattern, and the monthly average of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> showed a W-shaped pattern. The seasonal average concentrations and ratio of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> showed the same pattern of winter>autumn> spring>summer. (2) The monthly average concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> showed different spatial distribution characteristics, and the spatial distribution varied greatly. However, the spatial distribution of annual average concentration of PM<sub>10</sub> was similar to that of PM<sub>2.5</sub>. The seasonal average of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> showed different spatial distribution characteristics, which was generally higher in the east and southeast, and lower in the central and western regions. (3) The correlation analysis showed that PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> were significantly negatively correlated with NDVI and annual precipitation, and significantly positively correlated with population density and the proportion of secondary industry. The conclusions can provide an important scientific basis for air pollution control and food safety production in grain producing areas.

**Keywords:** spatio-temporal distribution; PM<sub>2.5</sub>; PM<sub>10</sub>; Henan province