西北林学院学报 2021,36(4):249-256
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2021.04.36

西安市 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的时空特征及其与土地利用的关系

王梦迪,吉文丽*,李凯媛

(西北农林科技大学 风景园林艺术学院,陕西 杨陵 712100)

摘　要:基于西安市 9 个空气质量监测站的颗粒物浓度数据与土地利用景观格局指数,探索大气污染的时空差异及其与土地利用指数的深层量化关系,为城市规划提供参考。结果表明:1)大气污染浓度呈现冬、春、秋、夏递减的季节特征;大气污染站点浓度表现出高值、低值相聚、北高南低的空间自相关性;不同站点的 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度在城市平均水平 6.7%～9.7%、6.4%～6.8%浮动。2) PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度与 G-PLAND、R-PLAND 相关性显著,与 B-PLAND 不相关,与 G-LPI、G-DIVISION、G-ED、G-AI 分别呈负相关、正相关、负相关、负相关。表明绿地斑块越大、优势度越高、分离程度越低、边缘密度越高、聚集度越高、道路斑块越小越有利于颗粒物的减少。与 B-AI 的正相关关系表明,建设用地的聚集度越大,PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度越高。3)当 G-PLAND 每增加 10%,PM_{10}、$PM_{2.5}$ 分别消减 11.29%、8.6%;当 R-PLAND 每增加 10%,PM_{10}、$PM_{2.5}$ 分别增加 5.39%、6.03%,表明绿地对 PM_{10} 的沉积作用强于 $PM_{2.5}$,道路与 $PM_{2.5}$ 的关系更加密切。

关键词:PM_{10};$PM_{2.5}$;景观格局;土地利用;城市建成区

中图分类号:S731.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2021)04-0249-08

Spatial and Temporal Distributions of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Xi'an and Their Relationships with Land Use Pattern

WANG Meng-di, JI Wen-li*, LI Kai-yuan

(*College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*)

Abstract: Based on the particulate matter concentration data and land use landscape pattern index of 9 air quality monitoring stations in Xi'an, spatial and temporal distribution differences of air pollution and their in-depth quantitative relationships with land use indexes were explored to provide reference for urban planning. The results indicated that 1) the concentration of particulate matter was in the order of winter > spring > autumn > summer; spatial autocorrelationships were found in monitoring sites: both high values and low values were converged, the particulate matter concentration was high in the north of the city and low in the south; the concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ at different sites fluctuated between about 6.7%－9.7% and 6.4%－6.8% of the urban average. 2) The concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ were significantly correlated with G-PLAND and R-PLAND, but not with B-PLAND; the concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ were negatively, positively, negatively, and negatively correlated with G-LPI, G-DIVISION, G-ED, and G-AI, respectively. The results of correlation analysis indicated that the larger the green patch, the higher the degree of dominance, the lower the degree of separation, the higher the degree of aggregation, and the smaller the road patch, the better the reduction of the concentrations of particulate matter. The positive correlation with B-AI indicated that the greater the concentration of construction land, the higher the concentration of PM_{10} and $PM_{2.5}$. 3) When G-PLAND increased by 10%, PM_{10} and $PM_{2.5}$ decreased by 5.67% and

收稿日期:2020-07-10　**修回日期**:2020-09-29
基金项目:陕西省林业科学研究重大项目"森林质量精准提升关键技术研究"(SHLY-2018-02)。
作者简介:王梦迪。研究方向:城市绿地与大气颗粒物。E-mail:WMDLFY@163.com
* **通信作者**:吉文丽,教授,博士。研究方向:园林植物与规划设计。E-mail:jiwenli@nwsuaf.edu.cn

4.87%, respectively; when R-PLAND increased by 10%, PM_{10} and $PM_{2.5}$ increased by 9.18% and 11.4%, respectively, showing that the sedimentation effect of green land on PM_{10} was stronger than $PM_{2.5}$, and the relationship between road and $PM_{2.5}$ was closer.

Key words: PM_{10}; $PM_{2.5}$; landscape pattern; land use; urban built-up area

近几十年,随着我国社会经济水平不断提高,城市变得拥挤,污染问题加剧[1],以 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 为首要的颗粒物污染问题,已经成为中国城市面临的严峻挑战,也对人们的健康造成了巨大威胁[2]。现有研究证实,高浓度的 $PM_{2.5}$ 会导致心血管和呼吸系统疾病的增加[3],也会导致癌症和过早死亡[4]。因此,如何降低 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度,改善城市居民生活,已成为研究的热点问题。气象条件对颗粒物浓度分布具有重要的影响[5],但即使在同一气象条件下,颗粒物的分布也存在差异,这表明城市下垫面对颗粒物的分布有影响[6]。

目前,较多学者从 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的化学组成和来源、时空差异、污染过程、测量与模拟、健康评估以及气象因素与颗粒物之间的关系进行研究,逐步开始探究地表景观类型、组分、格局及时空变换对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的影响[7]。大多数研究关注的是城市规划空间以及森林植被,如武晓红等[8]研究林带对 $PM_{2.5}$ 的净化效率时发现林带宽度在 20~60 m 净化效率逐渐提高,并且在 12:30-17:00 净化效率高。少量研究以城市街区为对象,其中苏维[9]等发现在以监测点为圆心的 500 m 和 1 000 m 的缓冲区内,大气颗粒物浓度与绿地面积呈显著负相关,与建筑面积呈显著正相关,并且在景观尺度上探讨土地利用 LPI 与 MPS 的关系,但是未在更精细的模型尺度上探讨城市下垫面的贡献。Cheng Ming 等[10]探究绿地(树、灌木、草)的不同形式在减少颗粒物污染中所做的贡献,发现植被组合在一起是减少 PM 的理想方法。以及在城市街区尺度上减少 $PM_{2.5}$ 浓度的最佳规划空间尺度并建立了模型,表明在 400~800 m 时,$PM_{2.5}$ 的缓解能力达到峰值。研究多从城市单一的绿地进行探索,缺乏对城市土地利用进行综合的研究。而城市社区尺度的下垫面土地利用类型更易通过规划设计手段得到改善,具有更大的实操性。因此,本研究通过分析空气污染的时空特征、城市建成区社区尺度下土地利用与颗粒物的关系并构建模型,对于城市规划设计、建成区的更新改造具有参考意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

西安位于我国的西北部属于大陆性温带季风气候。西安市国家空气质量监测站共有 13 个,对监测站进行筛选,排除位于大型城市公园以及污染源附近的站点,这些站点不属于城市建成区环境。筛选后得到 9 个监测点。这些站点呈现了典型的城市风貌,包括建筑物、道路、绿地和其他地面物体,在城市建成区中的分布相对平均(表 1)。

西安的空气污染在 2019 年全国 168 个重点城市阶段排名中,位于第 136 位,排名较后。根据西安市环保局发布的《西安市环境质量公报》显示,2017 年 3 月-2020 年 2 月,西安市优良天气数为 635 d,良的天数占优良总天数的 82.99%,轻度污染 289 d、中度污染 89 d、重度污染 65 d、严重污染 13 d。

1.2 数据来源与方法

1.2.1 *遥感影像* 通过 Google Earth 高清卫星,获取 2019 年的 9 个站点附近街区 1 km^2 范围的遥感影像,以往的研究发现居民舒适步行距离(500 m)内的空气环境对人们的日常生活质量起着重要作用[11]。因此,以监测站为中心的 1 km^2 的方形面积为试验的样本。利用 eCognition Developer8.9 软件处理遥感影像,软件采用面向对象的分类技术,能够避免人工目视解读的繁琐以及误差,更有利于提取光谱分辨率不高,而空间分辨率高的图像,所以通常被用来提取土地利用特征[12]。参考相关研究通过多尺度分割影像、对分割对象选取样本、配置最近邻特征、再进行样本分类的步骤,将土地利用类型分为水体、裸地、绿地、建设用地、道路等 5 类[13]。本研究使用的遥感影像有 RGB 3 个波段,选取标准差异化植被指数(VDVI)用于样本的识别[14-15],计算公式为:

$$VDVI=\frac{2G-R-B}{2G+R+B} \quad (1)$$

式中,G 为绿波段像素值;R 为红波段像素值;B 为蓝波段像素值。

本研究主要针对绿地、道路以及建设用地的相关指数展开研究,用 G-PLAND、G-LPI(Green)等表示绿地斑块特征,用 B-PLAND、B-LPI(Building)等表示建设用地斑块特征,道路没有其余斑块特征,用 R-PLAND(Road)表示道路面积率。绿地和建设用地的景观格局指数利用 Fragstats 软件[16-17]进行计算(表 2)。

1.2.2 *颗粒物浓度数据* 通过中国城市质量实时监测平台,得到各个站点 2017 年 3 月 1 日-2020

年 2 月 29 日的大气污染小时数据,剔除缺失数据和明显有误的数据。按照四季划分(3－5 月是春季、6－8 月为夏季、9－11 月为秋季、12 月－次年 2 月为冬季[18]),计算季度平均值。这样即可以假定在气象条件相对一致的情况下突出城市土地利用对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的影响。

表 1　西安市环境空气质量监测点详情

Table 1　Details information of monitoring point in Xi'an

名称	地点	经度	纬度	区域类型
XA1	草滩	108.9724	34.3995	居民区、商业区、农业、工业区
XA2	经开区	108.9355	34.3663	居住区、商业区、工业区
XA3	高压开关厂	108.9119	34.2735	工业区
XA4	高新西区	108.9164	34.2552	居民区、工业科技园区
XA5	市人民体育场	108.9654	34.2760	居民区、商业区、城市中心区
XA6	小寨	108.9455	34.2291	商业区、工业区、交通区
XA7	兴庆小区	108.9943	34.2651	居民区
XA8	临潼区	109.2207	34.3729	居民区、工业区
XA9	曲江文化产业集团	108.968	34.1953	居民区、旅游区

表 2　景观格局指数类型

Table 2　Landscape pattern index types

指标名称	数学公式	生态学意义
斑块类型覆盖率(PLAND)	$PLAND=\frac{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}}{A}\times 100$	反映某一斑块类型的总面积占整个景观面积的百分比
景观形状指数(LSI)	$LSI=\frac{0.25E}{A}\times 100$	表征景观内所有斑块的形状复杂程度
聚合度指数(AI)	$AI=\left[\frac{e_i}{\max\rightarrow e_i}\right](100)$	AI 基于同类型斑块像元间公共边界长度计算,描述景观不同斑块的聚合程度
最大斑块指数(LPI)	$LPI=\frac{\max a_i}{A}\times 100$	确定优势景观的类型
边缘密度指数(ED)	$ED=(\sum_{k=1}^{m} a_{ij}/A)(100)$	反映景观的边缘效应
景观分割指数(DIVISION)	$DIVISION=\left[1-\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{a_{ij}}{A}\right)^2\right]$	度量同一类型斑块的分离程度

注:a_{ij} =某类型斑块总面积;A 为景观总面积;N 为景观斑块类型中斑块总数;E 表示景观斑块总周长;a_i 为景观中最大斑块的面积;e_i 相应景观类型的相似邻接斑块数量。

1.3　数据处理

对 2017 年 3 月－2020 年 2 月的 3 a PM_{10}、$PM_{2.5}$ 均值分析,再对不同站点的颗粒物浓度数据整理,比较季节差异;利用系统聚类分析(欧式平方距离)计算站点空间差异。研究大气污染与土地利用景观格局指数的 Pearson 双变量相关。以 3 a 平均 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度、G-PLAND 及 R-PLAND 进行一元线性回归分析,量化 G-PLAND 及 R-PLAND 对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的消减和增加作用。

2　结果与分析

2.1　PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度的时空差异

2.1.1　不同年份分析　由表 3 可知,从 2017 年 3 月－2020 年 2 月,西安市 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度逐年降低,2019 年的下降最为明显。2019 年下降最多可能是由于 2020 年 2 月的疫情国家采取限制措施,以至于人口流动减弱,交通运输减少,导致大气污染的数值急剧下降。以西安市城市 3 a 平均 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度为参考发现 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的浓度限值均超过国家《环境空气质量标准》(GB3095-2012)的要求(70、35 $\mu g/m^3$),超过率分别为 71.84%、71.31%、37.6%、86.94%、77%、54.31%。

表 3　景观格局指数类型

Table 3　Landscape pattern index types

质量浓度/($\mu g \cdot m^{-3}$)	2017	2018	2019
PM_{10}	120.29±41.76	119.79±50.13	96.32±36.32
$PM_{2.5}$	65.43±34.86	61.95±37.65	54.01±34.89

注:表中数据为均值±标准差,t 检验同行数据间的显著性水平的 P 值(Sig.(双侧))为 0.00。

2.1.2　季节分析　3 a PM_{10}、$PM_{2.5}$ 数据逐月均值统计分析,监测点月均空气质量差异性极显著($P<0.01$),PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的月份变化趋势较一致,曲线均大致呈现先降后升再降的“小 U 形”模式(图 1)。

PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度最高的月份分别为 12 月(185.60 $\mu g/m^3$)和 1 月(144.13 $\mu g/m^3$),最低的月份都是 7 月(52.91、23.78 $\mu g/m^3$)按照当地气候条件,西安市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度表现出冬季>春季>秋季>夏季的季节差异(图 2)。可能与冬季取暖,夏季降雨、植被较多有关。

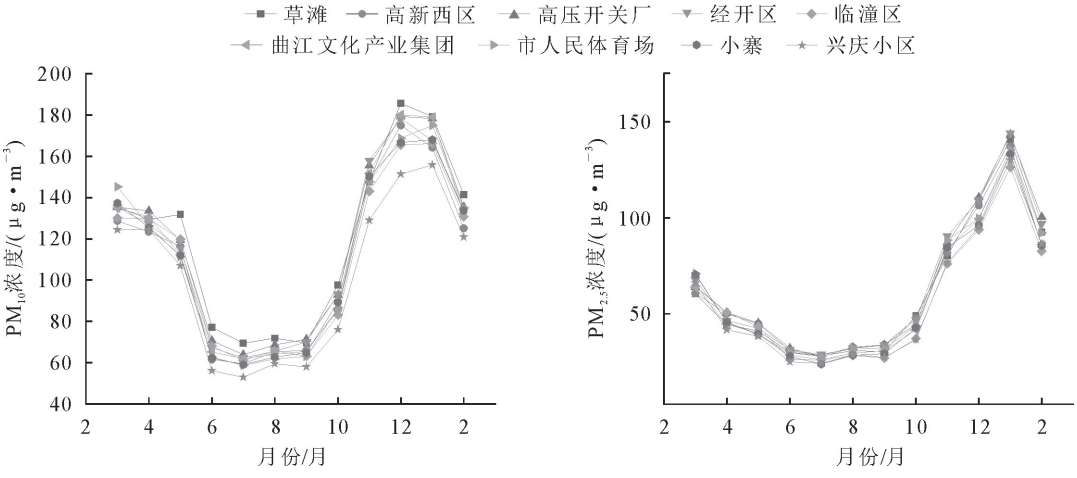


图 1 西安市 9 个站点空气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的月变化

Fig. 1 Monthly changes of air PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations at 9 monitoring sites in Xi'an

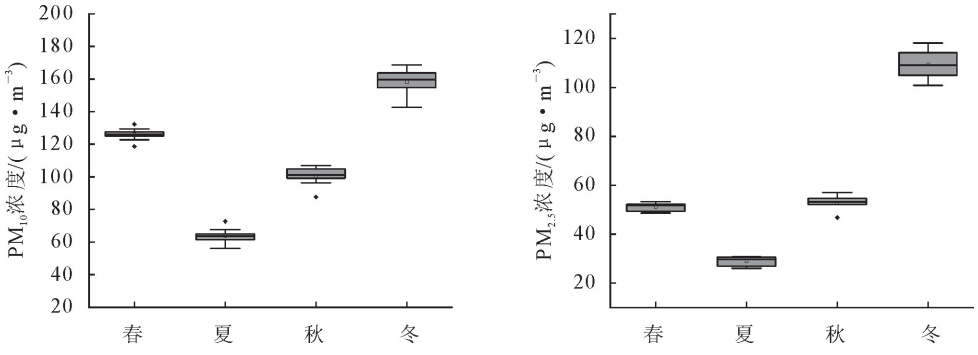


图 2 西安市 9 个站点空气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of air PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations at 9 sites in Xi'an

2.1.3 空间分析 以 2017 年 3 月—2020 年 2 月 3 a 9 个站点的年均值比较,由表 4 可知,得出站点的 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度在城市平均水平约 6.7%~9.7%、6.4%~6.8% 浮动。PM_{10} 浓度最高在 XA1,最低在 XA7,$PM_{2.5}$ 浓度最高在 XA3,最低在 XA7。

表 4 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 各个站点 3 a 均值

Table 4 3-year averages of PM_{10} and $PM_{2.5}$ at each site

质量浓度/($\mu g \cdot m^{-3}$)	XA1	XA4	XA3	XA2	XA8	XA9	XA5	XA6	XA7	城市平均
PM_{10}	119.68	109.85	117.02	114.41	110.52	113.64	111.86	110.97	101.26	112.13
$PM_{2.5}$	61.44	61.64	64.35	64.20	56.86	58.98	61.41	58.94	56.36	60.46

对 9 个监测点的 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度的 3 年均值进行标准化处理,采用系统聚类法分析,将 9 个监测点分为 3 类(图 3):XA1、XA2、XA3 为一类;XA4、XA5、XA6、XA8、XA9 为一类;XA7 为一类。采用单因素 ANOVA 对上述分类结果进行验证($P<0.05$),说明分类结果准确。结合分析发现 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度存在较强的空间自相关性,且呈高值相聚、低值相聚、西北高东南低的分布特点。可能与每个监测点所在区域的工业活动、生产模式、城市下垫面等因素有关。

2.2 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度与土地利用景观指数的相关性与回归分析

2.2.1 相关性分析 由表 5 可知,G-PLAND 对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的影响受到季节的干扰,与 PM_{10} 的相关性强于 $PM_{2.5}$。在年均、春、夏、秋、冬季 PM_{10} 与 G-PLAND 的相关系数依次为 −0.839、−0.839、−0.864、−0.820、−0.785,都呈显著负相关关系。$PM_{2.5}$ 浓度与 G-PLAND 仅在年均、夏、冬季呈负相关关系($P<0.05$)。PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度都与 G-LPI 呈负相关关系,但 PM_{10} 相关性显著,$PM_{2.5}$ 相关性

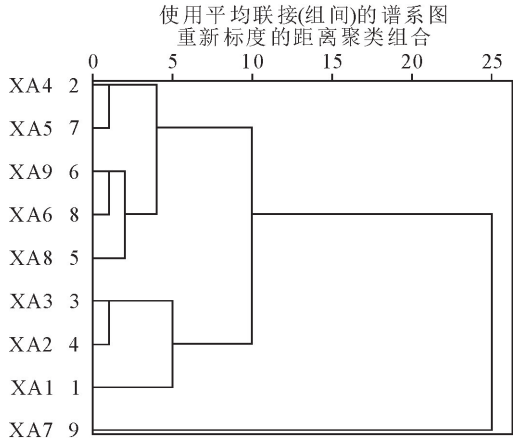


图 3　西安站点聚类分析

Fig. 3　Cluster analysis of monitoring sites in Xi'an

不显著。说明绿地斑块的面积越大优势越强、相互的耦合关系越好，对颗粒物的消减作用越明显。

年均春、夏、秋、冬季的 PM_{10} 浓度与 G-DIVISION 均呈显著正相关关系，与 G-ED 仅在冬季呈显著负相关关系，$PM_{2.5}$ 浓度与 G-DIVISION、G-ED 分别呈正相关、负相关，但相关性不显著。PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度与 G-LSI 均基本无相关性，表明绿地斑块分离度越高越不连通、景观异质性越低越容易导致 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度增加。PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度与 G-AI 均呈负相关关系，表明斑块越聚合越高，颗粒物浓度越低。

PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度与 B-PLAND、B-LPI、B-DIVISION、B-ED、B-LSI 均无相关性，相关系数在 0.004～0.6。PM_{10} 浓度与 B-AI 仅在冬季呈显著相关，相关系数为 0.667，$PM_{2.5}$ 浓度与 B-AI 仅在春季呈显著相关，相关系数为 0.669。说明建设用地斑块越聚集，颗粒物浓度越高。

PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度与 R-PLAND 的相关性均呈显著正相关，说明大气污染颗粒物浓度与 R-PLAND 的关系密切。道路面积增加，颗粒物污染加剧。

2.2.2　一元回归分析　PLAND 表征了斑块分类在整个景观中所占的百分比，在城市建成区，不同监测点附近地表覆盖面积率(PLAND)的差异显著(图 4)。建成区的绿地覆盖率 G-PLAND 普遍在 20%～30%，最高的是 XA7，最低的是 XA1。建设用地面积率 B-PLAND 在 50%～70%，最高的为 XA8、最低的为 XA7。道路面积率 R-PLAND 的最高值和最低值分别是 XA3(21.49%)、XA7(10.51%)。

由表 6 可知，3 年平均 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度(112.13 $\mu g/m^3$、60.46 $\mu g/m^3$)所对应的 G-PLAND、R-PLAND 分别约为 22.58%、13.88%，当 G-PLAND 每增加 10%，PM_{10} 就消减 11.29%；当 R-PLAND 每增加 10%，PM_{10} 就增加 5.39%。同理，对 $PM_{2.5}$ 浓度的消减和增加作用分别为 8.6%和 6.03%。

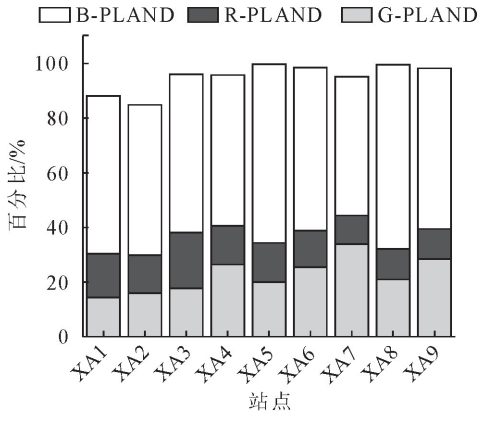


图 4　土地覆盖类型差异

Fig. 4　Land cover type differences

3　结论与讨论

3.1　颗粒物浓度的时间规律

PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度逐年递减，说明西安市蓝天保卫战的举措成效显著，并且 2019 年的颗粒物浓度减少幅度最大，这与 Bao Rui [19] 的对疫情封闭期间大气污染物减少的研究结果一致，表明限制人口流动，工厂停工等限制措施有利于颗粒物的减少。PM_{10} 浓度与 $PM_{2.5}$ 浓度的年变化趋势较一致，呈现“小 U 形”模式，季节特征呈现为冬＞春＞秋＞夏。这与 Huang Ping[20] 对西安(2013－2014 年)的季节研究结果一致。站点间的差异明显，不同站点的 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度在城市平均水平约 6.7%～9.7%、6.4%～6.8%浮动，并呈现高值相聚、低值相聚、北高南低的空间自相关性。

西安市属于温带大陆性季风气候，夏季炎热多雨，较多雷雨大风天气，使得大气沉降功能提高，同时大风也有利于 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的迅速扩散，因此西安市夏季 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度明显比其他季度低，而秋季气温下降，凉爽，静风、逆温等气候条件使得污染物不易扩散和迁移，导致 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 污染加重。北方颗粒物污染在冬季加剧，主要是因为冬季供暖燃煤，加上冬季气象条件不利于颗粒物的扩散，同时由于空间供暖和大气逆温频率的上升，使得北方城市冬季更容易出现持续性污染事件。

3.2　颗粒物浓度的空间规律

颗粒物污染的空间自相关性，表明 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度的空间区域分布变化规律与其所在的地理位置无直接联系，XA2 站点的颗粒物浓度较大，其中 15%为裸地，说明裸露土地的二次扬尘造成污染大于城市其余站点。并且通过站点分类结果可以发现，高值相聚主要出现在工业集中、人流量较大、交

通密集处;低值相聚主要出现于城市居住区,公园旅游景点较多,绿化良好,工业等产业较少的地区(表7)。并且XA5的颗粒物浓度相对较高,因为城市中心区高楼降低了风速,形成了热岛更不利于颗粒物的扩散。有研究表明,风速越大,颗粒物浓度越低。城市中心区相较于周边较近的站点污染浓度稍高,但是没有出现明显的"城市-郊区"梯度分布,与苏维[9]的试验不同,可能是西安市选取的9个站点的距离分布较近,都属于城市建成区环境,没有处于城市郊区的站点。

表5 不同街区土地利用斑块指标与 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的相关性

Table 5 Correlationship between PM_{10}, $PM_{2.5}$ and different land-use neighborhoods and plaque index

	季节	类型	PLAND	LPI	DIVISION	ED	AI	LSI
PM_{10}	年均	绿地	−0.839**	−0.902**	0.856**	−0.581	−0.501	−0.003
		建设用地	0.223	0.090	0.071	−0.357	0.503	−0.107
		道路	0.670*					
	春	绿地	−0.839**	−0.902**	0.856**	−0.581	−0.501	−0.003
		建设用地	0.223	0.091	0.071	−0.357	0.503	−0.107
		道路	0.670*					
	夏	绿地	−0.864**	−0.864**	0.804**	−0.475	−0.665	0.177
		建设用地	0.330	0.283	−0.115	−0.432	0.423	−0.281
		道路	0.637					
	秋	绿地	−0.820**	−0.842**	0.737*	−0.521	−0.581	−0.078
		建设用地	0.143	0.146	−0.004	−0.323	0.384	−0.127
		道路	0.592					
	冬	绿地	−0.785*	−0.828**	0.836**	−0.724*	−0.211	0.285
		建设用地	0.216	0.147	−0.319	−0.298	0.667*	0.109
		道路	0.694*					
$PM_{2.5}$	年均	绿地	−0.697*	−0.562	0.571	−0.553	−0.206	−0.189
		建设用地	0.040	0.309	−0.429	0.022	−0.528	0.319
		道路	0.811**					
	春	绿地	−0.383	−0.407	0.500	−0.535	−0.295	−0.490
		建设用地	0.477	0.117	−0.086	−0.595	−0.669*	−0.174
		道路	0.415					
	夏	绿地	−0.673*	−0.597	0.599	−0.402	−0.340	−0.004
		建设用地	0.039	0.230	−0.329	0.102	−0.390	0.272
		道路	0.729*					
	秋	绿地	−0.567	−0.498	0.570	−0.448	−0.159	−0.154
		建设用地	0.069	0.359	−0.445	0.125	−0.461	0.361
		道路	0.646					
	冬	绿地	−0.680*	−0.477	0.421	−0.512	−0.287	−0.123
		建设用地	0.128	0.344	−0.431	0.116	−0.416	0.367
		道路	0.824**					

注:*、**分别表示在0.05、0.01水平显著相关。

表6 一元回归分析

Table 6 Unary regression analysis

	模型	非标准化系数		Sig	R^2	Durbin-Watson	ANOVA	
		B	标准误差				F	Sig
PM_{10}	G-PLAND	−67.551	16.586	0.005	0.703	2.610	16.588	0.005
	常量	127.383	3.878	0.000				
	R-PLAND	112.848	47.217	0.048	0.449	1.411	5.712	0.048
	常量	96.463	6.698	0.000				
$PM_{2.5}$	G-PLAND	−31.219	12.1	0.037	0.486	2.043	6.629	0.037
	常量	67.508	2.835	0.000				
	R-PLAND	75.880	20.681	0.008	0.658	2.888	13.462	0.008
	常量	49.924	2.933	0.000				

表 7　西安市各区域工业活动特点

Table 7　Characteristics of industrial activities in various regions of Xi'an

分类	区域	主要区域特征及工业活动类型
1	高压开关厂、经开区、草滩	居住小区,城市中心区,路网密布,陕西省政府、大型商城酒店集中区,工业区,包括草滩生态园区,以机械电子、轻工产品、生物医药、新材料为支柱和以高新技术产品为主导的产业等
2	高新西区小寨、曲江文化产业集团、临潼区、市人民体育场	居住小区密集,大唐芙蓉园、曲江池等公园及旅游景点,城市中心商业区,赛格国际购物中心等大型商城
3	兴庆小区	居住区,兴庆公园、科技园区,国家自主创新示范区,电子信息产业,以新能源汽车、生物医药等为核心的现代制造业,以及现代金融、文化创意为核心的现代服务业三大主导产业

3.3　颗粒物浓度与土地利用的关系

G-PLAND、R-PLAND 是影响 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度变化的主要因素,B-PLAND 与 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 不相关。这与戴菲等[21]的研究结果一致,但是与苏维等[9]对南昌市城市大气污染与景观格局的研究结果不一致,可能是由于本研究和戴菲的研究均将城市交通用地从城市建设用地中提取出来,而苏维的分类建设用地包含交通用地。PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度与 G-LPI、G-DIVISION、G-ED、G-AI 分别呈负相关、正相关、负相关、负相关,表明绿地斑块面积越大、优势度越强、景观内部的物种丰富度及抗干扰能力提升,分离化程度越低、聚集度越高会导致 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度的降低。这与 Bagheri 等[22]对大面积绿地斑块面积的减少促进了空气污染的研究结果较一致。说明城市中大片的茂盛树林更有利于大气污染物的消减,例如,纽约中央公园、北京奥林匹克森林公园等。基于景观生态学理论中斑块-廊道-基质理论,打造城市大面积的绿色斑块之后,如果可以打通斑块之间的廊道,建立斑块之间的交流频率,将更有利于生态环境的稳定。PM_{10} 浓度与 G-ED 仅在冬季呈相关系,可能是北方冬季燃烧暖气,且气象条件的影响,使得植被的作用弱化,并且试验站点较少造成实验差异。增强绿地边缘的树种抗性,也对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度的降低有一定的影响。PM_{10}、$PM_{2.5}$ 与 B-AI 的正相关关系表明,建设用地的聚集度增大会增加 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的浓度。当 G-PLAND 每增加 10%,PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度分别消减 11.29%、8.6%;当 R-PLAND 每增加 10%,PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度分别增加了 5.39%、6.03%。表明绿地对 PM_{10} 的沉积作用强于 $PM_{2.5}$,这与赵松婷等[23]通过试验对植物叶片滞留 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的质量研究结果相符。且道路与 $PM_{2.5}$ 的关系更加密切。与陆平等[24]对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 来源贡献率结果较一致。

城市建成区土地利用类型丰富,造成了不同的景观格局,也间接反映了人类活动对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度的影响。汽车排放以及工业生产是颗粒物的主要来源,植被作为汇景观通过干、湿沉降作用,可吸收 PM_{10}、$PM_{2.5}$,是天然的颗粒物净化器,这就是"源-汇"景观理论[21]。

在城市建成区应采取见缝插绿的措施[25],可以增加绿地面积率 G-PLAND,但是更应使绿地面积更加聚集,这样更有利于斑块分割指数 G-DIVISION 以及绿地聚集度 AI 的提高;现有绿地提质增量,增加绿地斑块优势度 G-LPI,增加生物多样性;在绿地的边缘增加抗性强的树种,增加绿地的边缘密度指数 G-ED;减少大面积的城市建设用地,可以在建筑周围增加绿篱的围挡,使建设用地 AI 指数减小更趋向于破碎化;其次是在条件允许的情况下降低道路面积率等都有利于颗粒物的减少。

城市大气污染不是单一的土地利用就可以揭示其规律的,今后的研究应在城市三维空间,结合建筑物的高度以及密度、建筑布局、气象、水体等因素多角度认识空气颗粒物浓度受多种影响的动态机制[26]。

参考文献:

[1] BLANCO H, ALBERTI M, FORSYTH A, *et al*. Hot, congested, crowded and diverse: emerging research agendas in planning [J]. Progress in Planning, 2009, 71(4): 153-205.

[2] FONTES T, LI P L, BARROS N, *et al*. Trends of $PM_{2.5}$ concentrations in China: a long term approach [J]. Environmental Sciences, 2017, 196: 719-732.

[3] 万好,王琴. 武汉市典型道旁绿地消减空气细微颗粒物的作用研究[J]. 西北林学院学报,2020,35(3):237-242.
WAN H, WANG Q. Effect of typical roadside green space on the reduction of air fine particles in Wuhan [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 237-242. (in Chinese)

[4] POPE C A, BURNETT R T, KREWSKI D, *et al*. Cardiovascular mortality and exposure to airborne fine particulate matter and cigarette smoke: shape of the exposure-response relationship [J]. Circulation, 2009, 120(11): 941-948.

[5] REID C E, JERRETT M, PETERSEN M L, *et al*. Spatiotemporal prediction of fine particulate matter during the 2008 Northern California wildfires using machine learning [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(6): 3887-3896.

[6] 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.

LI Q, CHEN W B, ZHENG J, *et al*. Influence of greenspace landscape pattern on $PM_{2.5}$ in the center urban area of Nanchang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3855-3862. (in Chinese)

[7] 娄彩荣，刘红玉，李玉玲，等. 大气颗粒物($PM_{2.5}$、PM_{10})对地表景观结构的响应研究进展[J]. 生态学报，2016，36(21)：6719-6729.
LOU C R, LIU H Y, LI Y L, *et al*. Research on the response of air particles($PM_{2.5}$、PM_{10})to landscape structure: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): 6719-6729. (in Chinese)

[8] 武晓红，张先平，李晓迪，等. 太原市森林公园林带对空气 $PM_{2.5}$ 的净化效率[J]. 西北林学院学报，2020，35(2)：260-265.
WU X H, ZHANG X P, LI X D, *et al*. Characterists of the variation of $PM_{2.5}$ concentration in forest belt of Taiyuan forest park[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 260-265. (in Chinese)

[9] 苏维，赖新云，赖胜男，等. 南昌市城市空气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时空变异特征及其与景观格局的关系[J]. 环境科学学报，2017，37(7)：2431-2439.
SU W, LAI X Y, LAI S N, *et al*. Spatiotemporal variations of atmospheric $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Nanchang and its correlation with landscape pattern [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7): 2431-2439. (in Chinese)

[10] CHEN M, DAI F, YANG B, *et al*. Effects of neighborhood green space on $PM_{2.5}$ mitigation: evidence from five megacities in China [J]. Building and Environment, 2019, 156: 33-45.

[11] LEI Y K, DUAN Y B, HE D, *et al*. Effects of urban greenspace patterns on particulate matter pollution in metropolitan Zhengzhou in Henan, China [J]. Atmosphere, 2018, 9(5): 199-208.

[12] 申广荣，钱振华，徐敬敬，等. 基于 eCognition 的城镇绿地信息动态监测研究[J]. 上海交通大学学报：农业科学版，2009，27(1)：1-6.
SHEN G R, QIAN Z H, XU J J, *et al*. Research on dynamic monitoring of urban green space information based on eCognition[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science Edition, 2009, 27(1): 1-6. (in Chinese)

[13] 孙敏，陈健，林鑫涛，等. 城市景观格局对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J]. 浙江农林大学学报，2018，35(1)：135-144.
SUN M, CHEN J, LIN X T, *et al*. Urban landscape patterns and $PM_{2.5}$ pollution[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(1): 135-144. (in Chinese)

[14] WANG X Q, WANG M M, WANG S Q, *et a*1. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 152-159.

[15] 钟佳龙. 城市绿地与人类活动的空间相关性分析[D]. 成都：成都理工大学，2018.

[16] 苟睿坤，赵选，卜元坤，等. 杭州市城区热岛效应与景观格局的动态研究[J]. 水土保持研究，2019，26(1)：316-322.
GOU R K, ZHAO X, BU Y K, *et al*. Dynamic study on the heat island effect and landscape pattern in urban area of Hangzhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 316-322. (in Chinese)

[17] 罗紫薇，胡希军. GIS 支持下的上杭县城市景观格局分析[J]. 西北林学院学报，2019，34(3)：225-230.
LUO Z W, HU X J. On urban landscape pattern in Shanghang country supported by GIS[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 225-230. (in Chinese)

[18] WU J S, XIE W D, LI W F, *et al*. Effects of urban landscape pattern on $PM_{2.5}$ pollution—a Beijing case study[J]. PLoS ONE. 2015, 10(11): e0142449.

[19] BAO R, ZHANG A. Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in Northern China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: 1-12.

[20] HUANG P, ZHANG J Y, TANG Y X, *et al*. Spatial and temporal distribution of $PM_{2.5}$ pollution in Xi'an city, China [J]. Public Health, 2015, 12: 6608-6625.

[21] 戴菲，陈明，王敏，等. 城市街区形态对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的影响研究——以武汉为例[J]. 中国园林，2020，36(3)：109-114.
DAI F, CHEN M, WANG M, *et al*. Effect of urban block form on reducing particulate matter: a case study of Wuhan [J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(3): 109-114. (in Chinese)

[22] BAGHERI Z, NADOUSHAN MA, ABARI MF. Evaluation the effect of green space on air pollution dispersion using satellite images and landscape metrics: a case study of Isfahan city [J]. Fresenius Environment Bulletin, 2017, 26(12A): 520-530.

[23] 赵松婷，李新宇，李延明. 园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律[J]. 生态环境学报，2014，23(2)：271-276.
ZHAO S T, LI X Y, LI Y M. The characteristics of deposition of airborne particulate matters with different size on certain plants [J]. 2014, 23(2): 271-276. (in Chinese)

[24] 陆平，赵雪艳，殷宝辉. 临沂市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素分布特征及来源解析[J]. 环境科学，2020，41(5)：2036-2043.
LU P, ZHAO X Y, YIN B H. Distribution characteristics and Source apportionment of elements bonded with $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Linyi[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2036-2043. (in Chinese)

[25] 贾堃，赵群. 基于 RS 和 GIS 的北京城市副中心绿地系统分析[J]. 北京农学院学报，2020，35(2)：105-108.
JIA K, ZHAO Q. Green space system of Beijing city sub-center based on RS and GIS [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2020, 35(2): 105-108. (in Chinese)

[26] 王誉洁，黄天丽，孙丰宾，等. 冬季居住区不同功能绿地 $PM_{2.5}$ 浓度变化及其与气象因子的关系[J]. 西北林学院学报，2019，34(4)：239-245.
WANG Y J, HUANG T L, SUN F B, *et al*. Winter $PM_{2.5}$ concentration changes of different functional green spaces in the residential area and their correlations with meteorological factors [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 239-245. (in Chinese)