

高密度城区绿地景观格局对 $PM_{2.5}/O_3$ 的多尺度影响

马西娜, 李金铭, 王梦瑶, 安琦

(长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 为探究高密度城区绿地景观格局对于 $PM_{2.5}$ 浓度与 O_3 浓度的尺度效应, 分析西安市高密度城区范围, 选取边界密度(ED)、景观形状指数(LSI)、面积加权形状指数(SHAPE_AM)和平均形状指数(SHAPE_MN)共 4 个景观格局指数衡量绿地景观格局, 爬取 2020—2021 年国家空气质量监测站点的大气监测数据, 运用皮尔逊相关性分析和线性回归分析方法, 探究多尺度下高密度城区绿地景观格局对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的时空分布特征、绿地景观格局特征和 $PM_{2.5}$ 浓度、 O_3 浓度与景观格局指数的多尺度影响关系。结果表明, 景观格局在夏季对于 $PM_{2.5}$ 浓度、在春季对于 O_3 浓度的影响更为显著; 在高密度城区内较小尺度的绿地上优化景观格局对 $PM_{2.5}$ 与 O_3 浓度影响更有效。由此提出的绿地优化策略可为城市高密度城区多尺度绿地规划设计提供参考依据。

关键词: 城市高密度城区; 多尺度效应; 绿地景观格局; $PM_{2.5}$; O_3

中图分类号: TU985; X51

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0120-11

Multi-scale effects of high-density urban green space landscape pattern on $PM_{2.5}$ and O_3

MA Xina, LI Jinming, WANG Mengyao, AN Qi

(College of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to investigate the scale effect of green space landscape pattern on $PM_{2.5}$ and O_3 concentrations in high-density urban areas, four landscape pattern indices, namely edge density (ED), landscape shape index (LSI), area-weighted shape index (SHAPE_AM) and mean shape index (SHAPE_MN), were selected to measure the landscape pattern of green space in Xi'an city. Based on the atmospheric monitoring data of national air quality monitoring stations from 2020 to 2021, Pearson correlation analysis and linear regression analysis were used to investigate the spatial and temporal distribution characteristics of green space landscape pattern on $PM_{2.5}$ and O_3 , the characteristics of green space landscape pattern and the relationship between $PM_{2.5}$ concentration, O_3 concentration and landscape pattern index at multiple scales in high-density urban areas. The results show that the landscape pattern has a more significant effect on $PM_{2.5}$ concentrations in summer and O_3 concentrations in spring, and optimizing the landscape pattern on smaller scale green spaces in high-density urban areas is more effective in influencing $PM_{2.5}$ and O_3 concentrations. The proposed green space optimization strategy can provide a reference for the planning and design of multi-scale green space in high-density urban areas.

Key words: urban high-density areas; multi-scale effects; green space landscape patterns; $PM_{2.5}$; O_3

随着城市化进程加快, 工业发展、乡村人口向城市迁移、城市快速扩张导致城市发展中出现环境污染、资源短缺等各种生态问题, 其中大气污染已经成为我国城市的主要环境问题。 $PM_{2.5}$ 一直是造成城市雾霾污染、危害空气质量的主要大气污染物之一^[1], 近年来 O_3 浓度总体呈上升趋势已成为继 $PM_{2.5}$ 后影响城市空气质量改善的另一主

要大气污染物^[2]。 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的协同控制是“十四五”时期我国持续改善大气环境质量的核心内容^[3], 在《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》中明确提出汾渭平原持续开展秋冬季大气污染综合治理专项行动, 要开展 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同防控科技攻关, 聚焦秋冬细颗粒物污染, 实现细颗粒物和臭氧协同控制^[4]。近年来, 许多学者从化

收稿日期: 2023-02-16

修回日期: 2023-02-01

基金项目: 陕西省社会科学基金项目(2018S18); 国家自然科学基金项目(51908039); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102411201)

第一作者: 马西娜(1986—), 女, 博士, 副教授, 硕导, 主要研究方向为城市生态环境及城市设计。E-mail: maxina861005@126.com

学成分^[5]、污染来源^[6-7]、生态影响^[8-9]、时空分布特征^[10-11]、地域差异^[12]等方面对大气污染进行研究。由于东部地区经济发展较快, 国内对于东部地区的大气污染数据和治理较为关注, 对于经济相对落后的西北地区研究较少。2014—2018 年间, 关中地区 5 个城市 6 种污染物年平均浓度均未达到国家空气质量二级标准^[13], 空气质量问题愈发突出。西安是关中平原城市群的核心城市、西北地区龙头城市, 在北方城市中具有一定典型性^[14]。针对西安市的大气污染情况, 西安市生态环境系统联合政府部门确定了 20 条集中攻坚措施, 对大气污染物进行科学治理^[15]。

综上所述, 本研究选取西安市为主要研究区域, 基于国家空气质量监测站点提供的大气监测数据, 分析多尺度下高密度城区的绿地景观格局对 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 的时空分布特征, 寻找不同尺度下影响 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度分布的显著景观格局指标, 在城市规划设计方面提出改善高密度城区污染物扩散的建议策略, 为探究西北高密度城区的热污染耦合分布(影响)打下理论基础, 为城市绿地系统多尺度规划设计提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

西安市位于渭河盆地中心地区, 位于中国西北部($107^{\circ}40'E \sim 109^{\circ}49'E$, $33^{\circ}42'N \sim 34^{\circ}45'N$)。西安是暖温带半湿润大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥夏季炎热多雨, 盛行东北风向。由于西安市的东部海拔较低呈开口状, 西部海拔较高呈束口状, 从东部进入盆地内部的污染物传输至西安上空后无法快速扩散, 在对流层停留, 加之静稳、高湿的气象条件导致大气污染物更容易积累、二次转化和吸湿增长, 逐步推高了西安区域的污染物浓度。根据陕西省生态环境厅发布的报告, 2020—2021 年西安市优良天数比例 68.3%, 污染天数为 116 d。

城市环境中 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要排放源是化石燃料燃烧和人群聚集区域的人为排放^[16], O_3 浓度与建成区面积、能源消耗量等因素呈现显著正相关关系^[17]。因此高密度城区的大气污染物浓度区别于乡镇区域。在 Arc GIS 中通过建筑面积与路网划分地块面积的比值计算建筑密度(图 1)反映出建筑密集程度。通过初步筛选, 西安市的高密度区域集中在雁塔区、碑林区、莲湖区、新城区、未央区东部和灞桥区西部, 共 6 个主要城区。其中未央区

和灞桥区的建筑密度低于 10% 的地块出现频次较高, 分别为 641 次和 364 次, 整个行政区内建筑密度较低, 加之在用地类型中未央区绿地占比较高, 有利于污染物扩散, 灞桥区水体占比较高, 是缓解 O_3 扩散、缓解城市热岛效应的关键因素, 两个城区均存在对于污染物尺度影响效应研究结果的干扰因素。因此研究区选取西安市新城区、莲湖区、雁塔区、碑林区 4 个城区作为研究对象, 在 ENVI 中以遥感卫星影像为底图对 4 个城区的土地利用情况进行目译解析, 将其中的环境空气质量国控监测站点污染物数据进行尺度效应分析, 从而探究多尺度污染物分布规律。

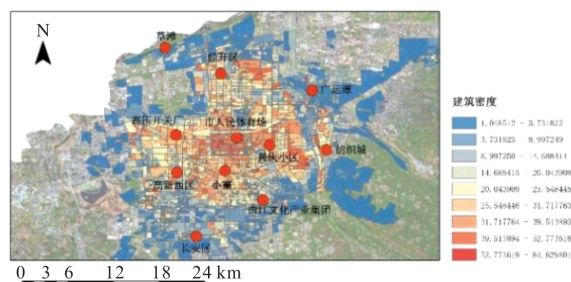


图 1 西安市高密度城区建设强度图

Fig. 1 Xi'an high density urban area construction intensity map

1.2 数据来源与处理

1.2.1 影像数据

本研究使用的卫星遥感影像为西安市 2020 年 8 月 13 日的高分一号 WFV 图像, 影像下载于地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/sources/>), 所选影像下载时研究区域的上空云量少于 5%, 分辨率为 20 m。影像通过 ENVI 软件进行辐射定标、大气校正等预处理。

1.2.2 污染物数据

本研究中所使用的 $\text{PM}_{2.5}$ 数据、 O_3 数据来源于陕西省生态环境厅政府门户 (<http://sthjt.shaanxi.gov.cn/service/>)、中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>)、中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/sssj/>), 在其中选择高压开关厂、兴庆小区、小寨、市人民体育场、高新西区、曲江文化产业集团六个国家空气质量监测站点的 2020 年 3 月—2021 年 2 月每天逐小时监测数据, 再计算 6 个站点大气污染物浓度的月均值、季节均值的颗粒物数据。研究时间段划分参考以往研究中的季节划分^[18], 划分 3、4、5 月为春季, 6、7、8 月为夏季, 9、10、11 月为秋季, 1、2、12 月为冬季。

1.3 研究方法

1.3.1 景观格局指标计算

景观格局指数现主要用于分析土地利用类型和景观生态功能分析,分为形状景观指数和斑块镶嵌景观指数两类。本研究在Fragstats中先从景观、类型、斑块三种尺度下的景观格局指标进行初步筛选,通过前人研究以及对于样本地块尺度分析,计算多个指标的相关性分析结果。

通过计算景观格局指数并将其与 $PM_{2.5}$ 各季节浓度进行相关性分析可知,在1 km尺度时的春季 $PM_{2.5}$ 浓度与 $ED(-.879^*)$ 、 $LSI(-.882^*)$ 、 $SHAPE_AM(-.870^*)$ 呈现显著负相关性;2 km时春季、秋季、冬季的 ED 和 LSI 均呈现显著负相关,夏季和秋季的 $SHAPE_MN$ 呈现显著负相关性;3 km、5 km夏季和1 km春季的 $PM_{2.5}$ 浓度均与 ED 和 LSI 呈现显著负相关性,尤其5 km夏季 $PM_{2.5}$ 浓度与 $ED(-.966^{**})$ 和 $LSI(-.971^{**})$ 的负相关性最为显著。

在 O_3 浓度与景观格局指标计算中,0.5 km春季 O_3 浓度与 $SHAPE_AM(-.892^*)$ 呈现显著负相关性;在1 km四季、3 km冬季、4 km秋季、5 km春季均与 $SHAPE_MN$ 呈现显著负相关性,尤其是5 km春季 O_3 浓度的相关性最为明显 $(-.970^{**})$;而在1 km春、秋季、5 km春、夏季的 O_3 浓度与 ED 和 LSI 呈现显著负相关。

由此可最终筛选出4个与 $PM_{2.5}$ 浓度、 O_3 浓度具有强相关关系的指标。边界密度(ED)用于表示景观或类型被边界分割的程度,是景观破碎化程度的直接反映;景观形状指标(LSI)反应景观尺度和类型尺度下斑块形状的复杂程度;面积加权形状指数($SHAPE_AM$)表示某一类型斑块形状的不规则程度,其值越接近于1,斑块形状越接近正方形;平均形状指数($SHAPE_MN$)表示某种土地利用类型矢量斑块的复杂程度,其值越大说明土地利用类型越不规则。分析不同尺度各季节下绿地景观格局指数与 $PM_{2.5}$ 浓度、 O_3 浓度的关系。

1.3.2 空间尺度划定

本研究从行政区划上通过站点缓冲区尺度上探究城市土地利用景观格局对于 $PM_{2.5}$ 浓度、 O_3 浓度的影响。通过计算建设强度、建筑密度对比后选取西安市高密度城区的国家空气质量监测站点。碑林区内没有国家空气质量监测站点但在选择其它行政区站点缓冲区时均覆盖碑林区,因此

包含碑林区。在确定缓冲区尺度时,根据《环境空气质量自动监测技术规范》中的说明,空气质量监测站点所能代表的范围为 $0.5\sim 4\text{ km}^{[19]}$,本研究参照了已有研究中城区尺度的缓冲半径 $^{[20]}$,确定了以国家空气质量监测站点为中心,划定边长为0.5、1、2、3、4与5 km,共计6个缓冲区,探索各个指标对 $PM_{2.5}$ 浓度、 O_3 浓度影响的尺度效应。

1.3.3 数据分析方法

本研究基于皮尔逊相关性分析将景观格局指数中存在显著相关关系的指标分别与 $PM_{2.5}$ 与 O_3 浓度进行线性回归分析,再通过最小二乘法求出二者的直线方程表达式,考虑其线性关系。最后通过所有缓冲区的尺度影响效应对比,分析不同尺度下景观格局指数与 $PM_{2.5}$ 浓度、 O_3 浓度的相关性。

2 研究内容与结果

2.1 西安市高密度城区 $PM_{2.5}$ 浓度与 O_3 的时空分布特征

2020年西安市的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值为 $51\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,同比下降10.5%; O_3 浓度的日最大8小时平均值为 $145\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,环境空气质量在全国168个重点城市排名倒数第19位,在陕西省的环境空气质量排名中位列倒数第三,是空气质量较差的城市。 $PM_{2.5}$ 浓度在冬季最高是由于冬季火力发电和集中供热采暖是刚需,加之冬季降水较少,空气流动性差,容易出现污染物堆积现象;夏季最低,夏季的频繁降水有效减缓 $PM_{2.5}$ 扩散趋势。 O_3 浓度在夏季最高,原因是在光照足、气温高的天气下,形成 O_3 的光化学反应速度加剧,导致 O_3 浓度超标。

如图2所示,在2020—2021年间,高密度城区范围的 $PM_{2.5}$ 浓度呈现北高南低的趋势,莲湖区、新城区 $PM_{2.5}$ 浓度最高并向碑林区扩散,雁塔区最低; O_3 浓度则在莲湖区的西北角和新城区东北角向碑林区和雁塔区扩散,雁塔区东南角 O_3 浓度较低,原因是莲湖区、新城区、碑林区属于西安最早建设区域,人口密度大、商业和老旧建筑较密集,城区格局出现混乱、无序的现象;大量高层建筑物会与过境的大风形成阻碍和摩擦,使区域风速明显降低,导致污染物聚集难以扩散,因此高压开关厂站点、兴庆小区站点附近的污染物浓度整体较高。雁塔区相较其它3个城区而言绿

地面积大、数量较多且布局分散, 建筑密度较低, 有利于污染物扩散。

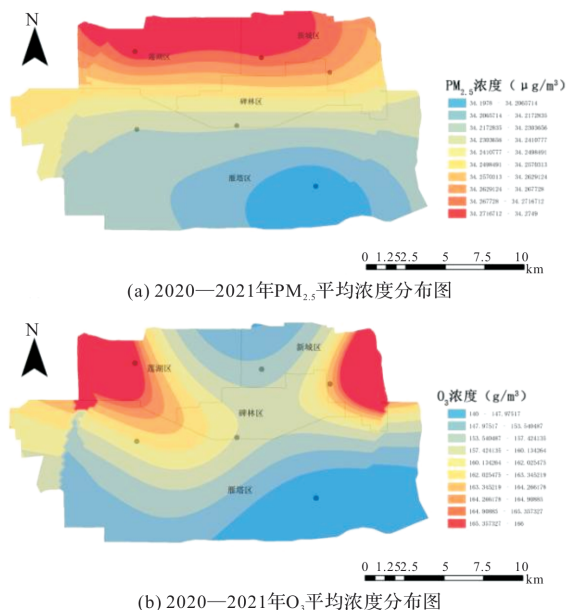


图 2 2020—2021 年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 O_3 浓度分布图
Fig. 2 Average $\text{PM}_{2.5}$ concentration and O_3 concentration distribution in 2020—2021

2.2 西安市高密度城区绿地景观格局特征与尺度规律

经济发展和人口活动是导致污染物加剧的最主要原因, 因此研究不同土地利用占比对于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 O_3 浓度的分布是必要的, 同时土地利用占比也是计算景观格局指数的必要条件。从图 3 可知, 西北地区水源匮乏, 水体在西安市的分布较少, 水体在土地利用中的占比均小于 1%。从高密度城区土地利用角度分析, 由于研究区域综合考虑土地开发程度较高, 人口密度大, 得到建设用地所占比重最高, 在 58%~72% 之间; 绿地所占比重相对较小, 均不超过 30%; 未利用地所占比重较小, 占比在 6%~15% 之间浮动。高密度城区中水体占比、绿地占比、未利用地占比最多的为雁塔区, 分别为 0.6%、26.6%、14.1%; 建设用地占比最多的为莲湖区(72.8%)。

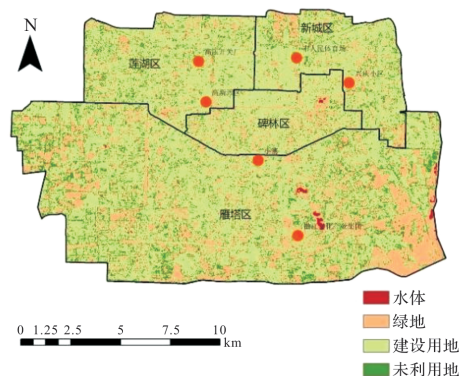
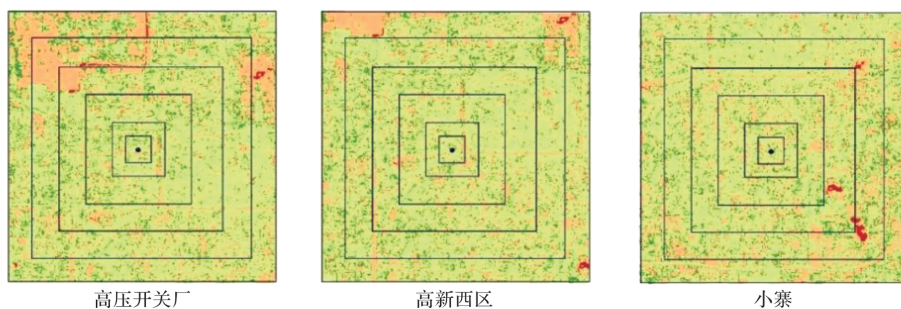


图 3 高密度城区土地利用图

Fig. 3 Land use in high-density urban areas

通过分析不同站点土地利用分类图(图 4)以及计算不同站点缓冲区的绿地景观格局指标指数(表 1)的综合结果表明, 雁塔区的绿地景观格局指标大部分优于其它站点, 并且雁塔区内整体绿地数量较多, 分布呈现破碎化状, 未利用地比例较高, 因此小寨站点和曲江文化产业集团站点的 LSI 较高, 曲江文化产业集团站点 SHAPE_AM 为所有站点中最大值, 表明曲江文化产业集团站点缓冲区内绿地数量最多、形状不规则程度最高; 同属于雁塔区的高新西区站点的 ED、LSI 低于其他站点, 原因是高新西区站点缓冲区建设用地比例较高, 商业区分布密集且高层建筑较多, 绿地多、水体面积较少且分布在 5 km 尺度, 因此整体景观格局指数较低。莲湖区建设用地数量最大, 因此高压开关厂站点的绿地景观格局指数低于其他站点, 由于绿地区域较为集中多分布在 4~5 km 尺度北部、形状规则程度较其它站点较高, 导致 ED、SHAPE_AM 与 SHAPE_MN 为所有站点景观格局指数最低。新城区内的市人民体育场站点绿地分布较集中, 为大面积组团形式, 同时建设用地大面积集中在缓冲区南部, 因此 ED 较低; 新城区兴庆小区站点绿地数量较市人民体育场站点较多, 缓冲区东部绿地破碎程度较高、绿地不规则程度较高, 因此整体景观格局指数优于市人民体育场站点。



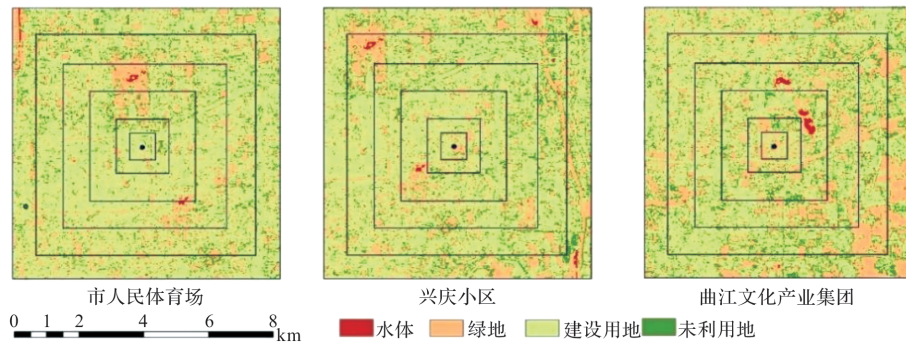


图4 国控站点土地利用分类图

Fig. 4 National control site land use classification map

表1 密度城区国控站点不同缓冲区景观格局指数

Tab. 1 Landscape pattern index for different buffer zones of high-density urban national control site

尺度	站点名称	ED	LSI	SHAPE	
				_MN	_AM
0.5 km	高新西区	176.93	5.46	1.22	4.54
	高压开关厂	198.63	6.01	1.18	4.87
	曲江文化产业集团	249.85	7.29	1.31	6.15
	市人民体育场	156.27	4.94	1.19	4.18
	小寨	187.80	5.72	1.24	4.59
	兴庆小区	214.80	6.41	1.27	4.92
1 km	高新西区	187.60	10.38	1.18	8.40
	高压开关厂	185.81	10.29	1.18	8.10
	曲江文化产业集团	248.34	13.40	1.28	8.91
	市人民体育场	164.27	9.21	1.20	7.20
	小寨	210.73	11.53	1.22	9.11
	兴庆小区	206.91	11.34	1.21	8.79
2 km	高新西区	188.97	19.90	1.18	15.79
	高压开关厂	187.56	19.76	1.18	15.40
	曲江文化产业集团	237.74	24.78	1.25	15.63
	市人民体育场	173.35	18.34	1.18	13.73
	小寨	210.26	22.03	1.21	17.22
	兴庆小区	197.48	20.76	1.19	15.80
3 km	高新西区	186.58	29.00	1.18	23.05
	高压开关厂	186.52	28.99	1.18	21.84
	曲江文化产业集团	233.68	36.06	1.25	22.32
	市人民体育场	178.87	27.84	1.18	20.13
	小寨	206.67	32.01	1.20	24.59
	兴庆小区	198.05	30.72	1.19	22.58
4 km	高新西区	190.90	39.16	1.18	30.48
	高压开关厂	187.59	38.49	1.19	26.26
	曲江文化产业集团	219.95	44.96	1.24	28.21
	市人民体育场	191.90	39.35	1.18	29.12
	小寨	207.34	42.44	1.20	31.46
	兴庆小区	193.11	39.59	1.20	27.48
5 km	高新西区	194.82	49.70	1.19	36.66
	高压开关厂	190.52	48.63	1.19	30.81
	曲江文化产业集团	211.60	53.89	1.23	32.02
	市人民体育场	193.74	49.43	1.19	35.90
	小寨	211.08	53.76	1.20	38.96
	兴庆小区	199.69	50.92	1.21	33.80

2.3 西安市高密度城区 PM_{2.5} 浓度与绿地景观格局指数的尺度影响关系

通过相关性分析高密度城区 PM_{2.5} 浓度与绿地景观格局指数, 得出结果如下: PM_{2.5} 浓度整体上随着边界密度(ED)的增加而下降, 呈负相关关系(图5). 春季 ED 对于 PM_{2.5} 浓度的影响呈现显著负相关作用, 在 2 km 时在 0.05 级别为显著负相关, 相关系数为 -0.914 *, 随着尺度增加变化越明显. ED 与 PM_{2.5} 浓度在夏季呈现显著的负相关关系, 在 5 km 时在 0.01 级别为显著负相关, 相关系数为 -0.966 **, R² 为 0.93, 变化趋势在 0.5~3 km 时较为平缓, 4~5 km 变化较为明显. 秋季 ED 与 PM_{2.5} 浓度没有显著相关性, 除 2 km 尺度时随着 ED 增加 PM_{2.5} 浓度有所降低, 其它尺度变化不明显. 冬季除 1 km 尺度外, 其它尺度的 PM_{2.5} 浓度均随 ED 的增加而降低.

景观形状指标(LSI)对 PM_{2.5} 浓度呈负相关关系, 且尺度越大相关性越高(图6). 春季 LSI 与 PM_{2.5} 浓度在 1 km 和 5 km 尺度呈现显著负相关关系, 在 4 km 和 5 km 时随 LSI 增加 PM_{2.5} 浓度下降的趋势较为明显. 夏季所有尺度 LSI 与 PM_{2.5} 浓度均呈现显著负相关关系, 5 km 尺度时为 0.01 级别显著负相关. 秋季 LSI 与 PM_{2.5} 浓度没有显著相关性, 除 2 km 尺度时随着 ED 增加 PM_{2.5} 浓度有所降低, 其它尺度变化较为平缓. 冬季除 1 km 尺度外, 其它尺度的 PM_{2.5} 浓度均随 LSI 的增加而降低.

面积加权形状指数(SHAPE_AM)与 PM_{2.5} 浓度在春、夏季呈现显著负相关性(图7). 在春季 1 km 尺度时 SHAPE_AM 与 PM_{2.5} 浓度呈现显著负相关关系, 相关系数为 -0.870 *, 在 5 km 尺度时变化趋势较为明显, 其它尺度较为平缓. 夏季 1 km 尺度时 SHAPE_AM 与 PM_{2.5} 浓度呈现显著负

相关关系, 所有尺度变化趋势都较为平缓. 秋季 SHAPE_AM 与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性不明显, 但二者的变化趋势在 4 km 尺度时由负相关变为正相

关. 冬季 SHAPE_AM 与 $PM_{2.5}$ 浓度没有显著相关性, 变化趋势在 1 km、2 km、4 km、5 km 尺度时随 SHAPE_AM 的增加 $PM_{2.5}$ 浓度减少.

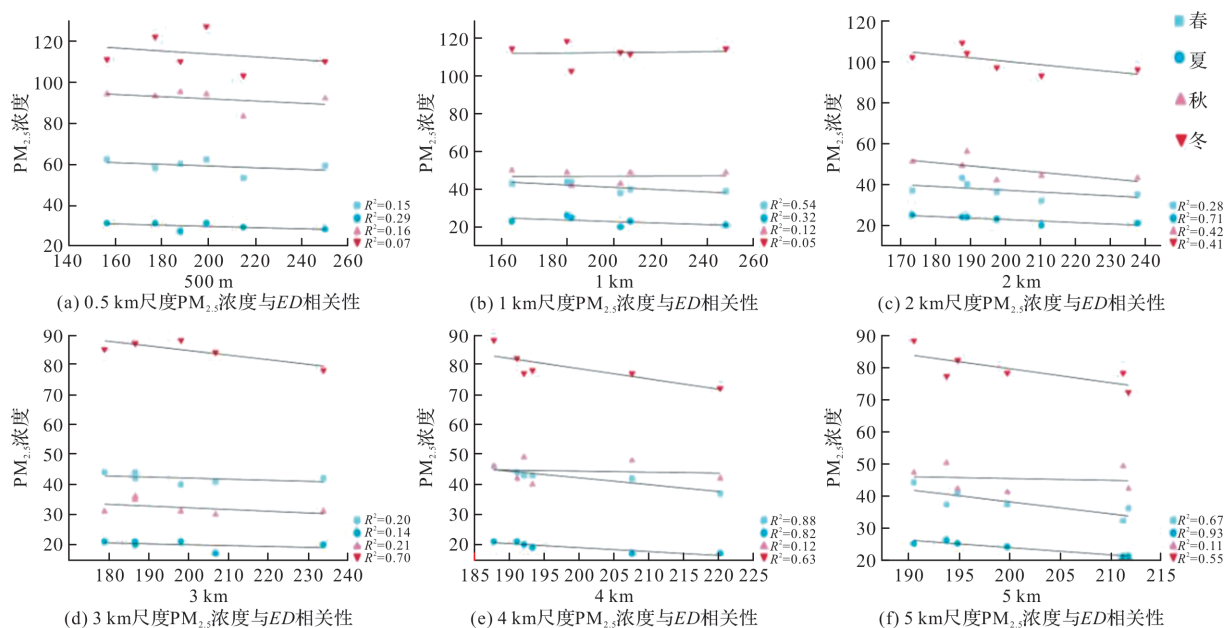


图 5 $PM_{2.5}$ 浓度与 ED 相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between $PM_{2.5}$ concentration and ED

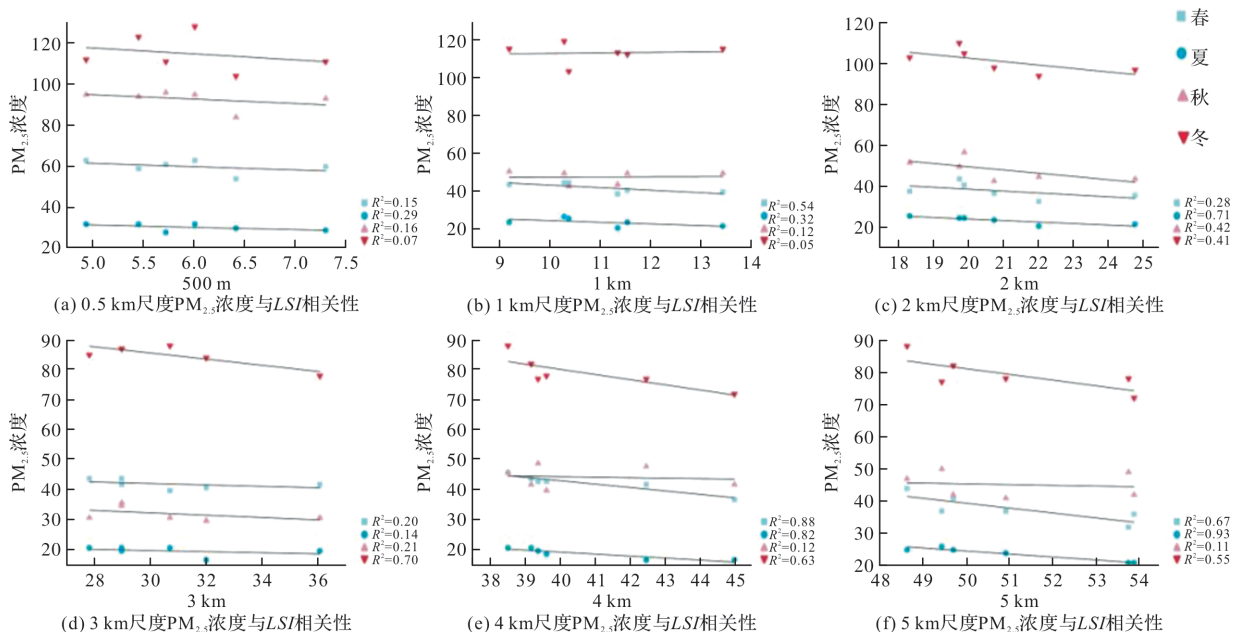
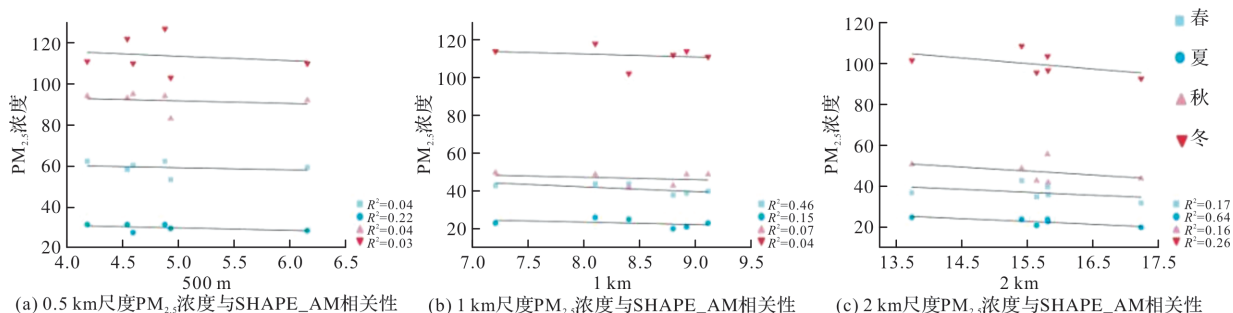
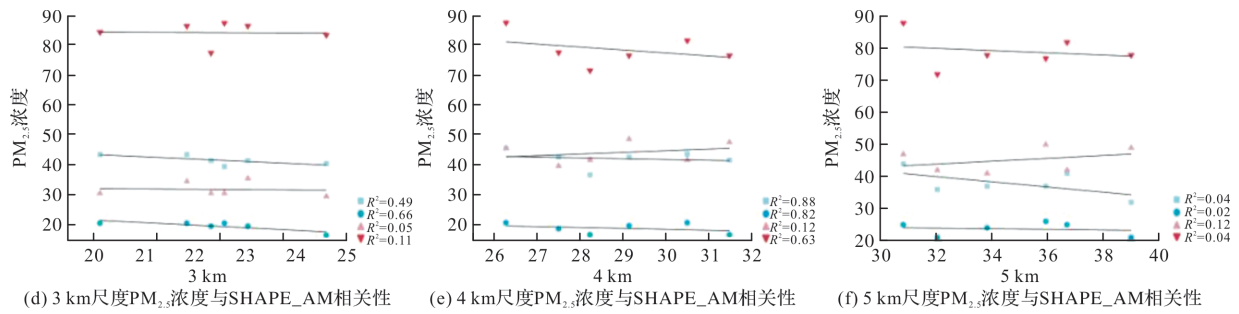


图 6 $PM_{2.5}$ 浓度与 LSI 相关性分析

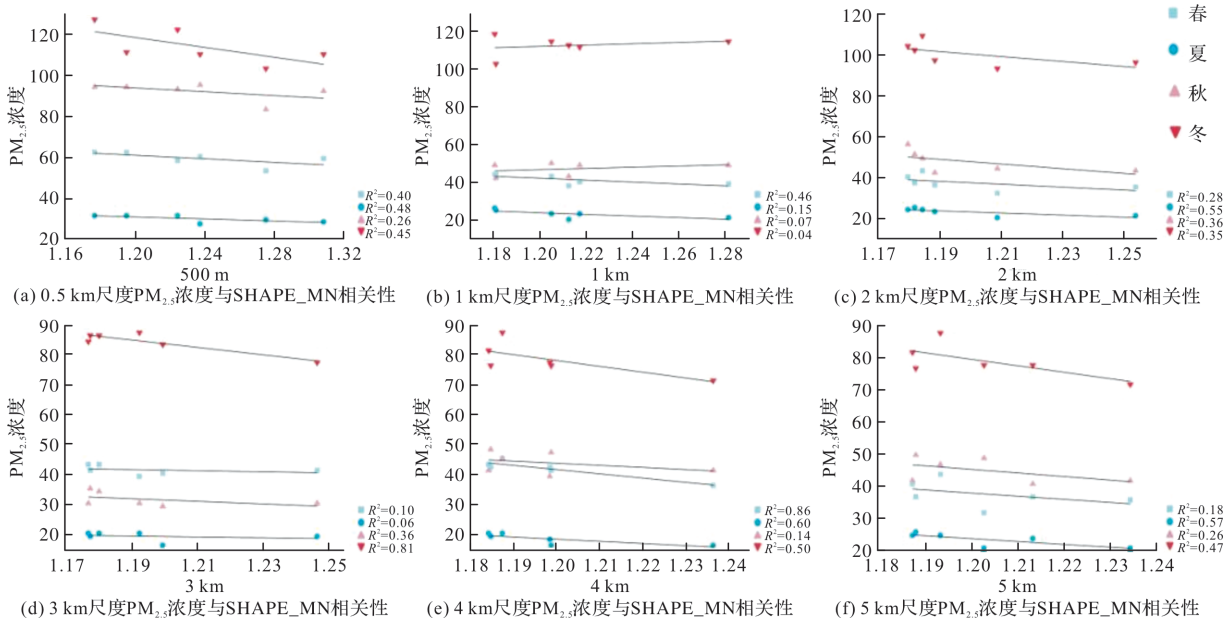
Fig. 6 Correlation analysis between $PM_{2.5}$ concentration and LSI



图7 $PM_{2.5}$ 浓度与 SHAPE_AM 相关性分析Fig. 7 Correlation analysis between $PM_{2.5}$ concentration and SHAPE_AM

平均形状指数(SHAPE_MN)的增加会导致 $PM_{2.5}$ 浓度呈现降低趋势(图8). 春季 SHAPE_MN 与 $PM_{2.5}$ 浓度没有显著相关性, 夏季在 2 km 尺度时 SHAPE_MN 与 $PM_{2.5}$ 浓度呈现 0.05 级别显著负相关, 相关系数为 -0.824^* , 在 4、5 km 时变化趋势较为明显. 秋季 SHAPE_MN 与 $PM_{2.5}$

浓度没有显著相关性, 变化趋势除 1 km 尺度为正相关关系外其它尺度均为负相关关系. 冬季 SHAPE_MN 与 $PM_{2.5}$ 浓度没有显著相关性, 二者的变化趋势除 1 km 尺度正相关关系外其它尺度均为负相关关系, 在 3 km 尺度时 R^2 最高为 0.81.

图8 $PM_{2.5}$ 浓度与 SHAPE_MN 相关性分析Fig. 8 Correlation analysis between $PM_{2.5}$ concentration and SHAPE_MN

2.4 西安市高密度城区 O_3 浓度与绿地景观格局指数的尺度影响关系

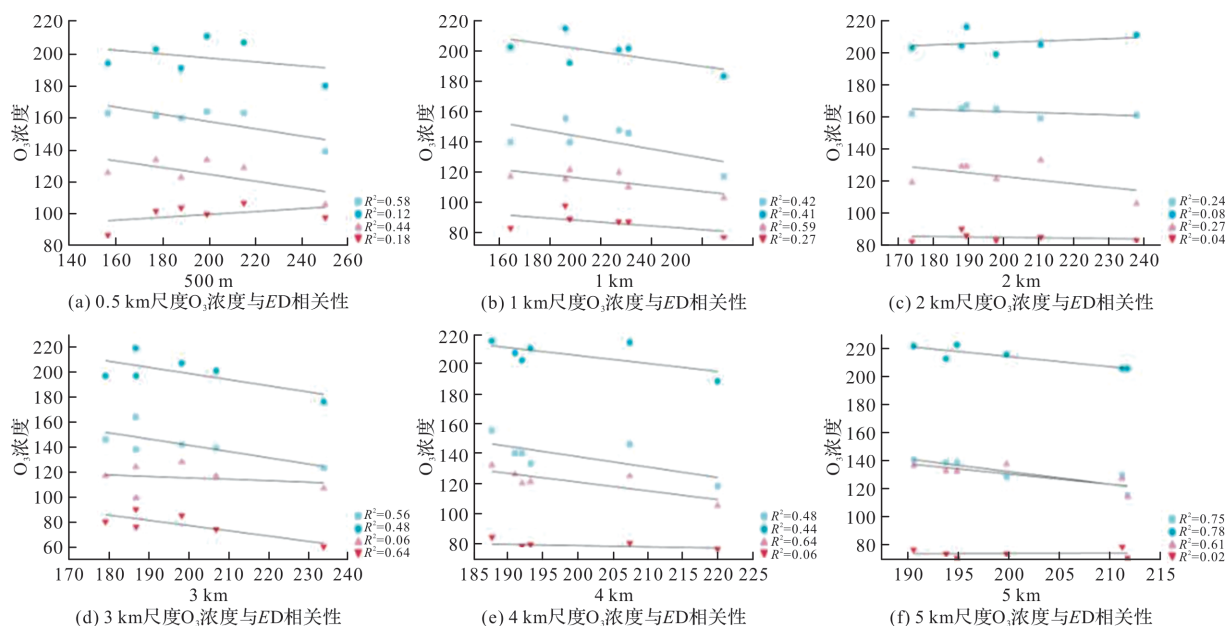
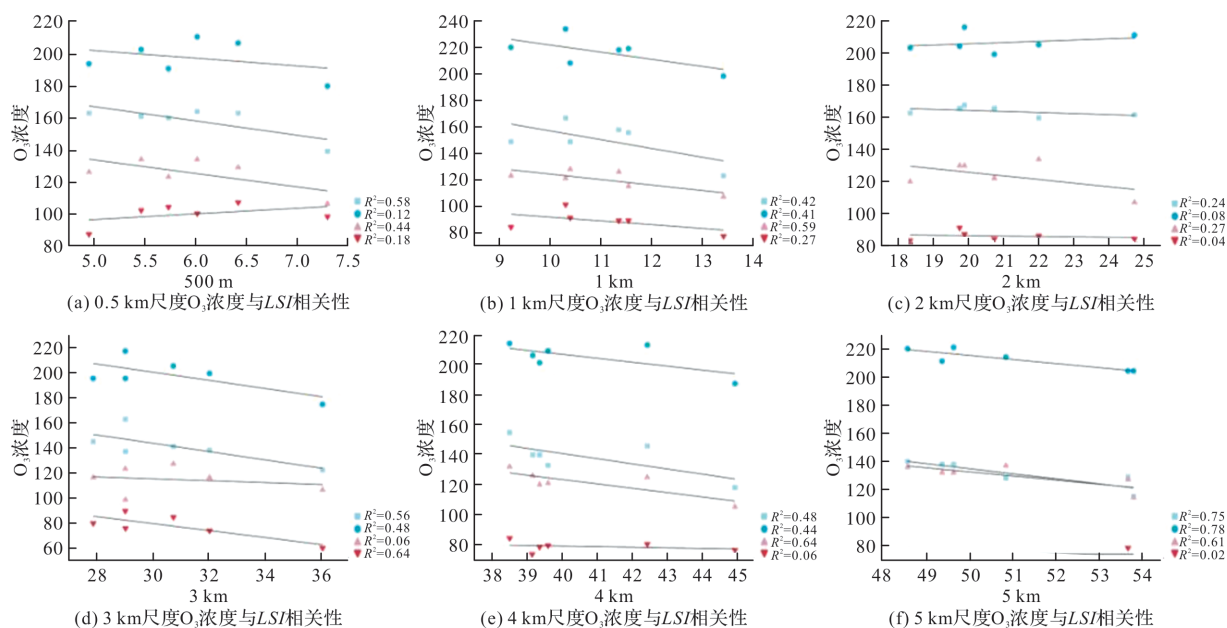
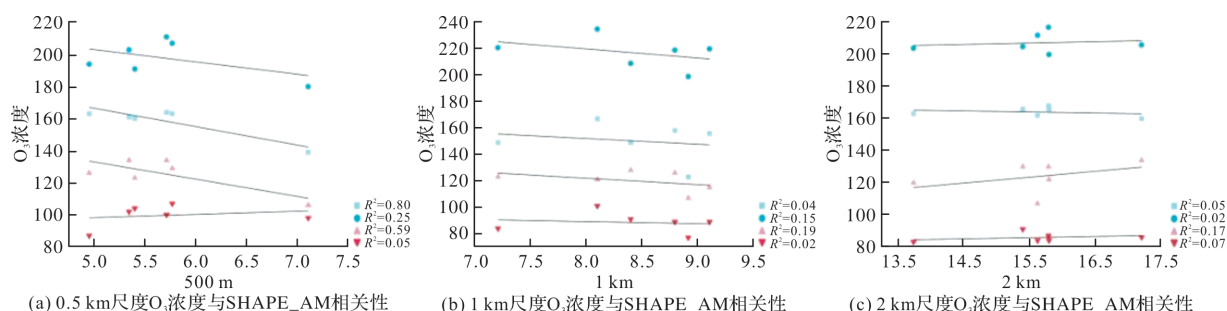
通过相关性分析高密度城区 O_3 浓度与绿地景观格局指数, 得出结果如下: 边界密度(ED)对 O_3 浓度的影响受尺度和季节的干扰(图9). 除冬季外, 春、夏、秋三季 O_3 的浓度整体随 ED 的增加而降低, 且随尺度递增相关性作用越小. 春、秋两季 ED 与 O_3 浓度呈现负相关, 并在 5 km 尺度时相关系数在达到最大, 分别为 -0.867^* 和 -0.883^* . 夏季除 2 km 尺度外其它尺度均与 O_3 浓度为负相关关系, 变化趋势逐渐平缓. 冬季除 3 km 尺度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关性, 其它尺度的 O_3 浓度与 ED

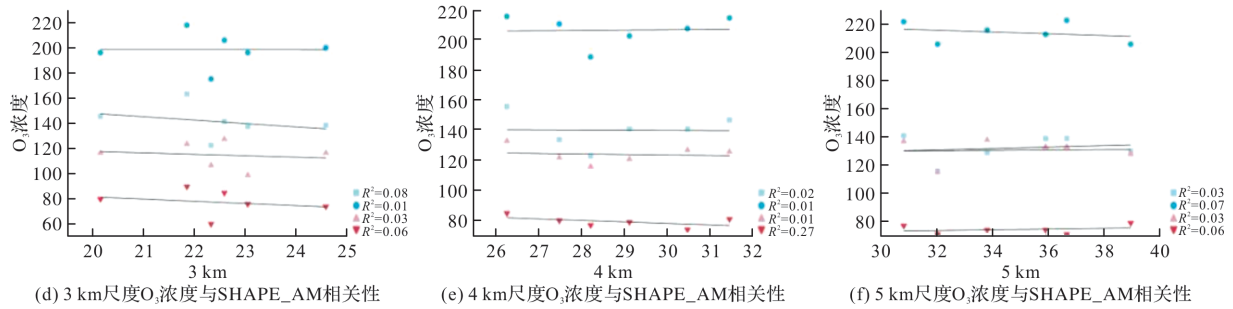
的相关性较弱.

O_3 浓度随景观形状指标(LSI)的增加呈下降趋势(图10). 在春季相关性最为显著, 在尺度变化中的相关作用呈先下降后上升的趋势, 在 5 km 尺度时相关系数在达到最大. 夏季除 2 km 尺度外其它尺度均与 O_3 浓度为负相关关系, 变化趋势随尺度增加趋于平缓. 秋季 LSI 与 O_3 浓度整体呈现负相关关系, 在 4~5 km 时相关系数高于其它尺度. 冬季 O_3 浓度与 LSI 无显著相关性.

面积加权形状指数(SHAPE_AM)与 O_3 浓度的相关性随尺度的递增而减弱(图11). 春季 SHAPE_AM 与 O_3 浓度呈现显著负相关性, 在

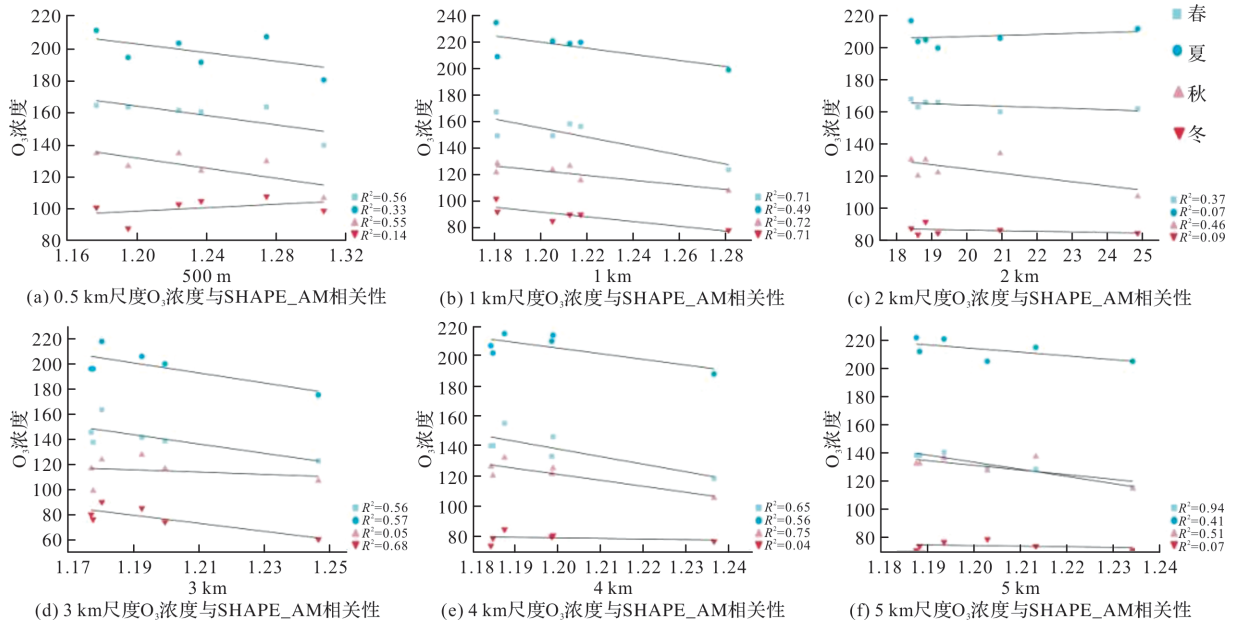
0.5 km 尺度相关系数最大, 为 -0.892^* . 夏季、秋季的负相关关系在 0.5 km、1 km 尺度时较为明显, 后随尺度增加而降低. 冬季 O_3 浓度与 SHAPE_AM 在各个尺度无显著相关性.

图 9 O_3 浓度与 ED 相关性分析Fig. 9 Correlation analysis between O_3 concentration and ED图 10 O_3 浓度与 LSI 相关性分析Fig. 10 Correlation analysis between O_3 concentration and LSI

图 11 O₃ 浓度与 SHAPE_AM 相关性分析Fig. 11 Correlation analysis between O₃ concentration and SHAPE_AM

平均形状指数(SHAPE_MN)的增加会导致O₃浓度呈现降低趋势(图12)。春季SHAPE_MN与O₃浓度的负相关关系尤为显著,相关系数随尺度增加而增加,在5 km尺度时呈现双尾负相关关系,相关系数为 -0.970^{**} 。夏季在1 km、5 km

尺度上呈现显著负相关,但相关系数随尺度增加而降低。秋季O₃浓度与SHAPE_MN的负相关性在1 km和4 km尺度时较为显著,其它尺度不明显。冬季仅在1 km和3 km尺度为明显的负相关关系,且SHAPE_MN越大O₃浓度越小。

图 12 O₃ 浓度与 SHAPE_MN 相关性分析Fig. 12 Correlation analysis between O₃ concentration and SHAPE_MN

3 结论

本研究以国控站点提供的PM_{2.5}和O₃污染物浓度数据为基础,分析高密度城区内站点污染物浓度与景观格局指标相关性,通过皮尔逊相关性分析和线性回归,使用土地利用数据计算不同景观格局指标对于PM_{2.5}、O₃浓度的尺度效应,所得结论如下:

(1)高密度城区景观格局指标与PM_{2.5}浓度、O₃浓度的季节变化特征明显。PM_{2.5}浓度受绿地景观格局影响排序为的季节排序为夏季>春季>冬

季>秋季,ED、LSI与PM_{2.5}浓度的相关性在夏季最为显著,其原因是夏季空气质量更优,主要由于西安市夏季热带气旋活动频繁以及植被茂盛有利于PM_{2.5}扩散;而冬季煤炭供暖,燃煤量增加导致污染物排放,加之冬季夜间辐射降温明显、空气对流困难导致污染物积聚;

(2)O₃浓度季节受绿地景观格局影响排序为春季>夏季>秋季=冬季,边界密度(ED)、景观形状指标(LSI)与O₃浓度在春、夏季有明显负相关作用,其原因为夏季高温且太阳辐射强且光照强烈,大气氧化性强,造成光化学烟雾和二次臭氧

的形成, O₃ 峰值出现^[22];

(3)城市高密度建设区绿地景观格局对于PM_{2.5}浓度的尺度效应, 随尺度发生变化, PM_{2.5}浓度与绿地景观格局指数的相关性存在显著尺度差异. ED与PM_{2.5}浓度在春季1 km、5 km尺度下呈现显著负相关, ED、LSI与PM_{2.5}浓度在夏季0.5~5 km尺度均存在显著相关性, ED的提高能够使不同绿地斑块类型的相互作用更加紧密; LSI表明增加绿地形状复杂程度对于PM_{2.5}浓度的影响较为显著, 且尺度越小影响作用越低;

(4)城市高密度建设区绿地景观格局对于O₃浓度存在尺度效应. 在1 km春季、5 km春季和夏季O₃浓度均与ED、LSI存在显著负相关关系, 表明景观破碎化程度和地表面积异质程度在夏季时对于O₃浓度的影响更为显著; SHAPE_AM与O₃浓度仅在春季0.5 km尺度下呈现负相关性, 表明在小于1 km尺度时形状越不规则, O₃浓度越低; SHAPE_MN在1 km时与O₃浓度关系最为明显, 四个季节均为负相关关系, 在3 km冬季、4 km秋季、5 km春季时SHAPE_MN与O₃浓度均存在负相关性, 绿地斑块形状越复杂, 导致O₃浓度降低.

由于高密度城区的景观格局已建成, 不宜大面积改动, 因此小幅度优化设计是最合适的方式. 基于本研究的结论在城市绿地优化层面提出以下建议: 一是在保证现有绿地面积的基础上尽可能增加城区小面积绿化, 如口袋公园、街边绿地等, 在植物设计搭配时尤其考虑春季、夏季绿化效果, 在最大程度上缓解城区污染物; 二是在城市绿地设计时由于交通、建筑等限制城市绿地通常以规则式设计, 在未来发展中设计小尺度绿地时绿地边界应尽量弯曲和突起, 增大边界与城市景观基质的接触面, 从而达到缓解区域PM_{2.5}浓度; 三是在小尺度绿地设计时尽量增加绿地形状复杂性, 提高城区内绿地与建设用地的接触形状与来降低区域内的O₃浓度.

参考文献 References

[1] 谢志祥, 秦耀辰, 李亚男, 等. 基于PM_{2.5}的中国雾霾灾害风险评价[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4503-4510.
XIE Zhixiang, QIN Yaochen, LI Yanan, et al. Haze disaster risk evaluation in China based on PM_{2.5}[J]. Journal of Environmental Science, 2017, 37(12): 4503-4510.

[2] 陈思璇, 何永梅, 姚进文, 等. 2018—2020年天水市大气污染对急性上呼吸道感染住院患者的影响[J]. 中国预防医学杂志, 2023, 24(9): 964-970.
CHEN Sixuan, HE Yongmei, YAO Jinwen, et al. Effects of air pollution on hospitalized patients with acute upper respiratory tract infections in Tianshui City, China, 2018-2020[J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2023, 24(9): 964-970.

[3] 胡建林, 张远航. 加强O₃和PM_{2.5}协同控制, 持续改善我国环境空气质量[J]. 科学通报, 2022, 67(18): 1975-1977.
HU Jianlin, ZHANG Yuanhang. Strengthening the synergistic control of O₃ and PM_{2.5} for continuous improvement of China's ambient air quality[J]. Science Bulletin, 2022, 67(18): 1975-1977.

[4] 中华人民共和国生态环境部网站. 【生态环境部】关于开展细颗粒物和臭氧污染协同防控“一市一策”驻点跟踪研究工作的通知[EB/OL]. (2021-4-28) [2021-4-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk04/202104/t20210428_831139.html
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the "One City, One Policy" residence tracking research on the coordinated prevention and control of fine particulate matter and ozone pollution[EB/OL]. (2021-4-28) [2021-4-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk04/202104/t20210428_831139.html

[5] 王红磊, 沈利娟, 唐倩, 等. 嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3594-3604.
WANG Honglei, SHEN Lijuan, TANG Qian, et al. Distribution characteristics of atmospheric pollutants and aerosol chemical components under different weather conditions in Jiaxing City[J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3594-3604.

[6] 王芳龙, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 2015—2017年天水市大气污染物变化特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4592-4604.
WANG Fanglong, LI Zhongqin, YOU Xiaoni, et al. Characterization of air pollutant changes and source analysis in Tianshui city from 2015 to 2017[J]. Journal of Environmental Science, 2018, 38(12): 4592-4604.

[7] CHEN S, ZHOU G, ZHU B, et al. A method for fast quantification of air pollutant sources[J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2017, 37(7): 2474-2481.

[8] 高庆先, 师华定, 张时煌, 等. 空气污染对气候变化的影响与反馈研究[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1384-1391.
GAO Qingxian, SHI Huading, ZHANG Shihuang, et

- al. Impacts and feedbacks of air pollution on climate change [J]. Resource Science, 2012, 34 (8): 1384-1391.
- [9] 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀 PM_{2.5} 的主要影响因素及内在关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(4): 102-109.
- ZHOU Shudong, OUYANG Weiqing, GE Jihong. Research on the main influencing factors and intrinsic relationship of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. China Population-Resources and Environment, 2017, 27(4): 102-109.
- [10] 侯素霞, 张鉴达, 李静. 上海市大气污染物时空分布及其相关性因子分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1220-1228.
- HOU Suxia, ZHANG Jianda, LI Jing. Spatial and temporal distribution of air pollutants and their correlation factors in Shanghai [J]. Journal of Ecology and Environment, 2021, 30(6): 1220-1228.
- [11] 刘永林, 钟明洋, 孙启民, 等. 重庆市都市功能核心区秋季大气污染物时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2016, 36(7): 2344-2354.
- LIU Yonglin, ZHONG Mingyang, SUN Qimin, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of air pollutants in the fall in the urban functional core area of Chongqing [J]. Journal of Environmental Science, 2016, 36(7): 2344-2354.
- [12] 孙旭映, 尉元明, 庞朝云, 等. 兰州城区大气污染物分布特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004(6): 15-18.
- SUN Xuying, YU Yuanming, PANG Chaoyun, et al. Characterization of air pollutant distribution in Lanzhou [J]. Arid Zone Resources and Environment, 2004(6): 15-18.
- [13] 魏俊涛, 杨晓春, 杜萌萌, 等. 关中地区大气污染特征分析[J]. 陕西气象, 2022(1): 53-58.
- WEI Juntao, YANG Xiaochun, DU Mengmeng, et al. Characterization of air pollution in Guanzhong region [J]. Shaanxi Meteorology, 2022(1): 53-58.
- [14] 李琪, 周文林. 新时代背景下西安城市高质量发展的策略探索[J]. 规划师, 2020, 36(24): 5-11.
- LI Qi, ZHOU Wenlin. Exploration of strategies for high-quality development of Xi'an city in the context of the new era [J]. Planner, 2020, 36(24): 5-11.
- [15] 西安市人民政府门户网站. 20 条措施集中攻坚 西安推进秋冬季大气污染防治 [EB/OL]. (2022-10-15) [2022-10-15]. <https://www.xa.gov.cn/xw/zwzx/bmdt/634a7d49f8fd1c4c21201c83.html>
- Xi'an Municipal People's Government Portal. 20 Measures to Concentrate on Xi'an's Prevention and Control of Air Pollution in Autumn and Winter [EB/OL]. (2022-10-15) [2022-10-15]. <https://www.xa.gov.cn/xw/zwzx/bmdt/634a7d49f8fd1c4c21201c83.html>
- [16] 庞杨, 韩志伟, 朱彬, 等. 利用 WRF-Chem 模拟研究京津冀地区夏季大气污染物的分布和演变[J]. 大气科学学报, 2013, 36(6): 674-682.
- PANG Yang, HAN Zhiwei, ZHU Bin, et al. Distribution and evolution of atmospheric pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei region in summer using WRF-Chem simulation [J]. Journal of Atmospheric Science, 2013, 36(6): 674-682.
- [17] 王明仕, 何向东, 曹景丽, 等. 区域城市化程度与大气污染的相关性研究——以河南省为例[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(2): 71-76.
- WANG Mingshi, HE Xiangdong, CAO Jingli, et al. A study on the correlation between the degree of regional urbanization and air pollution—taking Henan Province as an example [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 38(2): 71-76.
- [18] 关舒婧. 深圳市 PM_{2.5} 时空分布及与土地利用关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- GUAN Shujing. Research on the spatial and temporal distribution of PM_{2.5} and its relationship with land use in Shenzhen [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [19] 国家环境保护总局. 环境空气质量自动监测技术规范: HJ/T 193-2005 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- State Bureau of Environment Protection. Technical specifications for automatic monitoring of ambient air quality: HJ/T 193-2005 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [20] REN W, ZHAO J, MA X, et al. Analysis of the spatial differentiation and scale effects of the three-dimensional architectural landscape in Xi'an, China [J]. PloS one, 2021, 16(12): e0261846
- [21] 李林耀, 李雨娟, 王晓琦, 等. 银川城区夏季臭氧污染成因分析[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S2): 50-54.
- LI Linyao, LI Yujuan, WANG Xiaoqi, et al. Analysis of the causes of summer ozone pollution in Yinchuan city [J]. Environmental Science and Technology, 2021, 44(S2): 50-54.

(编辑 郑晓龙 沈 波)