

公园绿地和广场空气颗粒物浓度对比及影响因素研究

Comparative Study on Air Particulate Matter Concentration Differences and Factors Between Urban Park and Urban Square

王 森 李恩正 薛登高 邱 玲* 高 天*
WANG Sen LI Enzheng XUE Denggao QIU Lin* GAO Tian*

(西北农林科技大学风景园林艺术学院, 杨凌 712100)
(College Of Landscape Architecture And Art, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China, 712100)

文章编号: 1000-0283(2022)12-0129-06
DOI: 10. 12193 /j. laing. 2022. 12. 0129. 017
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-02-24
修回日期: 2022-11-08

摘 要
大气污染是中国城市环境面临的严峻问题之一, 场地尺度的污染防治面临巨大压力。一些研究认为城市绿地对改善空气质量具有重要作用, 然而也有部分研究提出了质疑, 认为绿地植被加剧了空气污染。鉴于结论的不一致性, 选择西安地区公园绿地丹枫园和紧邻的开敞广场作为研究对象, 开展对比分析, 采用更高的时间分辨率, 对距道路不同水平距离的颗粒物浓度和气象因子进行为期一周的连续监测, 分析其时空变化规律和影响因素。结果表明: (1) 温度、气压、湿度和风速对PM_{2.5}和PM₁₀浓度均有显著影响, 湿度和风速对颗粒物的影响存在阈值, 湿度阈值为70%, 风速阈值为1.8 m·s⁻¹, 颗粒物浓度随着湿度和风速的增大而升高, 湿度和风速超过阈值时, 颗粒物浓度逐渐降低, 但广场风速超过阈值时, 广场PM₁₀浓度继续升高。(2) 颗粒物浓度日变化呈“峰谷型”, 6点至8点, 19点至24点颗粒物浓度较高, 样地内颗粒物浓度随水平距离增加而升高, 绿地内颗粒物浓度低于广场。10点至18点颗粒物浓度较低, 颗粒物浓度随距离增加而降低, 绿地内颗粒物浓度高于广场。(3) 对比硬质广场, 绿地能有效削弱颗粒物浓度峰值和PM₁₀浓度。结果表明绿地主要通过影响绿地风速和湿度等气象因子, 调控颗粒物的扩散和沉降, 可以有效阻滞和清除颗粒物, 特别是粗颗粒物。研究结果能为以改善空气质量为目标的公园绿地设计提供理论依据。

关键词
公园绿地; 颗粒物; 时间变化; 空间分布; 气象因子

Abstract
Air pollution is one of the serious problems facing urban environments worldwide, and pollution prevention and control under the background of site scale is facing tremendous pressure. Some studies believe that urban green space is essential in improving air quality. However, some studies have questioned that, and they think green space vegetation exacerbates air pollution because of the inconsistency of the conclusions. An urban green space with closed and semi-open structures and the adjacent urban square in Xi'an, China, was selected as the research sample plots. With high temporal resolution, the particle matter concentrations and meteorological factors at different horizontal distances from the road between the spaces were continuously monitored for one week. When relative humidity and the wind speed increased above certain thresholds, the particle concentration began to decrease gradually, except in the urban square where PM₁₀ concentration increased when wind speed exceeded its threshold. The diurnal variation in particulate matter concentration was double peaks and double valleys. From 6:00 to 8:00 and 19:00 to 24:00, the concentration of particulate matter was highest, the concentration of particulate matter increased with increasing distance from the road, the concentration of particulate matter in the green space was lower than that in the square, while the concentration of particulate matter was lower from 10:00 to 18:00, the concentration of particulate matter decreased with increasing distance, the concentration of particulate matter in the green space was higher than in the square. Compared with closed green space, semi-open green space, and square, green space can effectively weaken the peak concentration of particulate matter and PM₁₀ concentration. The results show that green space can effectively block and remove particles, especially coarse particles, by regulating the diffusion and settlement of particles mainly by affecting meteorological factors such as wind speed and humidity. This information could be used for better air pollution mitigation strategies, especially when incorporating green spaces in future urban design.

Keywords
urban green space; particulate matter; temporal change; spatial distribution; meteorology

王 森
1994年生/男/四川青川人/在读硕士研究生/研究方向为大地景观规划与生态修复

邱 玲
1981年生/女/陕西西安人/博士/副教授/研究方向为城乡生物多样性保护与规划、城市绿色基础设施规划等

高 天
1982年生/男/陕西西安人/博士/副院长, 教授/研究方向为不同空间尺度下植被滞尘设计、生物多样性定向的风景园林规划设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: qiu.ling@nwsuaf.edu.cn; tian.gao@nwsuaf.edu.cn

基金项目:
国家自然科学基金面上项目“基于实践应用目的的城市绿地景观削减空气颗粒物浓度研究”(编号: 31971722); 陕西省林业科学技术创新计划项目“基于生境制图的秦岭生物多样性保护体系构建”(编号: SXLK2021-0216); 咸阳市重点研发计划“基于实践应用目的的咸阳市绿地削减空气颗粒物浓度研究”(编号: 2021ZDYF-SF-0022); 咸阳林业局科研合作协议项目“关中地区强碳汇能力典型地被群落营建关键技术与示范”(编号: 20211221000007)

频发的雾霾事件，使人们对空气污染的
关注与认识不断提高。空气污染对人体产生危
害，主要在于影响心脑血管系统、呼吸系统、
神经系统而增加死亡率，污染的空气严重影响
人们的生活和健康^[1]。2021年3月全国两会
表决通过的“十四五”规划也再次强调“持续
改善环境质量，深入开展污染防治行动，坚持
源头防治、综合施策”^[2]。目前防治污染相
关研究主要有两方面：(1) 来源解析，控制排
放源，减少颗粒物的产生^[3]；现有研究表明城
市空气污染的主要来源是道路交通^[4]；(2) 寻
找可以通过吸收、滞留、控制传播等机制降
低大气颗粒物浓度的路径^[5-7]。公园绿地作为
城市生态系统的重要组成部分，不仅发挥缓
解热岛效应、保护生物多样性、心理减压等
作用^[8]，也被认为是消减大气颗粒物，改善空
气质量的有效路径。

目前公园绿地滞尘的研究主要围绕不同
植物群落的滞尘能力和影响因素。有些学者
认为乔灌木复合型绿地滞尘能力强，绿地内
颗粒物浓度低于无植被覆盖的对照点^[9]，也
有部分学者的研究结果相反，路琛等^[10]基
于融入植被结构因子的生态单元制图分类系
统，从绿地横向结构、树种组成，竖向结构
三个维度对绿地进行分类，发现所有植被
结构类型的绿地颗粒物浓度均高于硬质铺
装。上述研究结果的不一致，主要原因是将
研究样地视为污染物均匀分布的环境进行对
比，忽视了植物群落与对照点相对污染源
的空间位置差异。此外，绿地削减颗粒物
的能力还与时间气象因素显著相关^[11]。气
象条件的周期变化是影响颗粒物浓度周期
变化非常重要的因素^[12]。现有结果较多
的分析气象等因素与颗粒物浓度的相关性，
缺少气象因子具体取值大小对颗粒物浓度
影响作用的定量研究。现有研究采样时间
通常为白天^[13]，采

样时间不连续，时间分辨率不足以观察空
气颗粒物和气象因子更细的时间变化规律
和空间特征。

因此，本研究选择西安地区丹枫园和紧
邻的硬质广场作为研究对象，开展对比研
究，采用更高的时间分辨率进行为期一周
的连续实地监测，监测样地距道路不同水
平距离处的颗粒物空间分布特征和时间变
化规律。同时依据群落结构特征将样地绿
地细分为闭合绿地和半开敞绿地两种典
型植物群落，探究群落结构对调控颗粒物
的影响，以期改善空气质量为目标的公园
绿地规划设计提供参考与借鉴。

1 研究区概况

陕西省西安市位于东经107° 24′ —
109° 29′ 和北纬33° 25′ —34° 27′ 之
间，北临渭河和黄土高原，南邻秦岭，属
暖温带半湿润大陆性季风气候，受大陆性
季风气候影响，冷暖干湿四季分明，年平
均气温13 ~ 13.7℃，年降水量522.4 ~
719.5 mm。研究选择样地丹枫园和硬质广
场（会展中心广场），丹枫园面积242 hm²，
广场面积1.83 hm²，广场紧邻绿地，绿地
和广场面积大小相近，与污染源空间位置
相对一致，并且周围无工厂、建筑工地等
其他污染源。广场空间为硬质铺装，无其
他遮挡，绿地树种丰富，对比差异显著，
具有典型性和代表性。春季主导风向为东
南风，样地南侧神果路为双向四车道，神
果路交通排放和扬尘为主要污染源，丹枫
园和广场中间是南北向会展路，会展路为
内部小路，很少有机动车辆通过，因此沿
着垂直神果路方向设置6条70 m监测样带，
为消除会展路产生的微弱影响，样带1、2、
3与样带4、5、6距会展路保持一致间距，
每条样带共15个监测点，每个

监测点之间间隔5 m（图1）。样带1、2、
3布置在空旷硬质广场，样带4、5、6布置
在绿地，绿地主要树种为雪松（*Cedrus deo
dara*）、国槐（*Styphnolobium japonicum*）、
枇杷（*Eriobotrya japonica*）、紫叶李
（*Prunus cerasifera f. atropurpurea*）。
绿地依据郁闭度大小进行细分，样带4和
样带5平均郁闭度为0.872，为闭合绿地，
样带6平均郁闭度为0.202，为半开敞绿地。

2 研究方法 with 数据处理

2.1 实地监测

研究使用手持式粉尘测量仪（Metone831，
美国）和便携式自动气象站（Kestrel5500，
美国）对样地PM_{2.5}和PM₁₀浓度及气象因
子（温度、相对湿度、气压、风速）进行
同步监测，监测前对仪器进行调零校准。
Metone 831粉尘测量仪采用激光原理对空
气中不同粒径的颗粒物进行准确区分和计
数，标准取样持续时间为1 min，6 s进行
一次采样，标准模式下每分钟采样10次，
最后结果为10次的平均值，量程为0 ~
1 000 ug · m⁻³，分辨率为0.1 ug · m⁻³。
Kestrel5500手持气象仪温度的测量范围
为-29 ~ 70℃，分辨率为0.1℃，相对湿
度的测量范围为0 ~ 100%，分辨率为0.1，
气压的测量范围为300 ~ 1 100 hpa，分
辨率为0.1 hpa，风速的测量范围为0 ~
60 m · s⁻¹，分辨率为0.1 m · s⁻¹。采样
于2021年3月13-17日进行，采样期间无
降雨天气，24小时连续监测，每1 h采集
一次数据，每天共采集24次，每次采样6
名测试组员同时对6条样带进行同步监
测，每台设备在同一样带监测点1到监测
点15循环使用，每条样带采样时间不超
过20 min。测定高度为人的呼吸高度（距
地面1.5 m）。

2.2 数据处理

利用Microsoft Office Excel 2007进行
数据录入

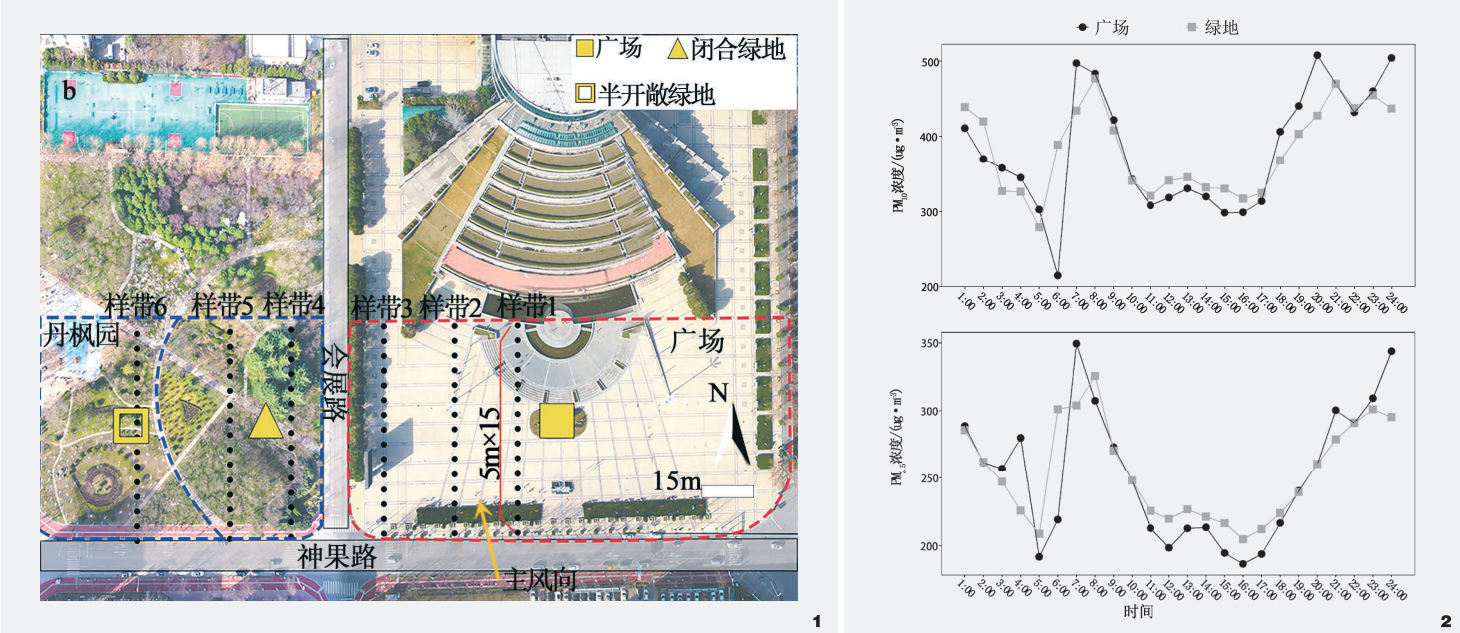


图1 监测点布置
Fig. 1 Distribution of monitoring points

图2 绿地与广场中PM_{2.5}和PM₁₀浓度的日变化
Fig. 2 Diurnal variation of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration in green space and square

与整理，基于SPSS Statistics 26采用方差分析模型检验样地类型和距离、气象因子和时间对颗粒物浓度的影响，由此得到颗粒物浓度变化的影响因素，并进一步分析颗粒物浓度与样地类型、距离、时间气象因子的关系。计算监测期内三种样地类型PM_{2.5}和PM₁₀浓度的平均值和标准差；在分析空气颗粒物浓度与气象因子的关系时，采用局部加权回归(Loess)拟合方法对污染物浓度和气象因子进行拟合。用R、Origin将结果制作为可视化图。

3 结果与分析

绿地和广场空间监测期内，PM_{2.5}的变化范围为142 ~ 448 ug·m⁻³，PM₁₀的变化范围为164 ~ 722 ug·m⁻³，温度的变化范围为6.9 ~ 25.2℃，湿度的变化范围为40.6% ~ 100%，气压的变化范围为954.3 ~ 970.6 hpa，风速的变化范围为0 ~ 3.9 m·s⁻¹。方差分析结果显示样地类型、距离、日期、时间和气象因子均对PM_{2.5}和PM₁₀浓度有显著影响(表1)。

3.1 绿地和广场的PM_{2.5}和PM₁₀浓度日变化对比

两种颗粒物浓度在绿地和硬质广场的日变化规律一致，呈现早晚高中午低“峰谷型”特点，夜间颗粒物浓度持续降低，5点颗粒物浓度最低(图2)。颗粒物浓度出现早晚峰值主要原因有通勤时间段内，交通排放增加导致环境污染物浓度升高；晚间高污染物浓度持续时间较长，很可能是因为晚间大气边界层下降，气流不活跃，不利于交通排放扩

表1 两种颗粒物浓度影响因素方差分析结果
Tab.1 ANOVA results for the effect on PM_{2.5} and PM₁₀ concentration

		样地类型 Sample Plot	距离/m Distance	时间/h Time	温度/℃ Temperature	湿度/% Humidity	气压/hpa Air pressure	风速/(m·s ⁻¹) Wind speed
PM _{2.5}	F	6.36	25.87	610.58	45.11	31.31	312.01	14.27
	P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PM ₁₀	F	14.038	25.98	771.61	55.96	8.78	378.1	69.7
	P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000

注：P<0.05表示影响显著，P<0.01表示极显著。

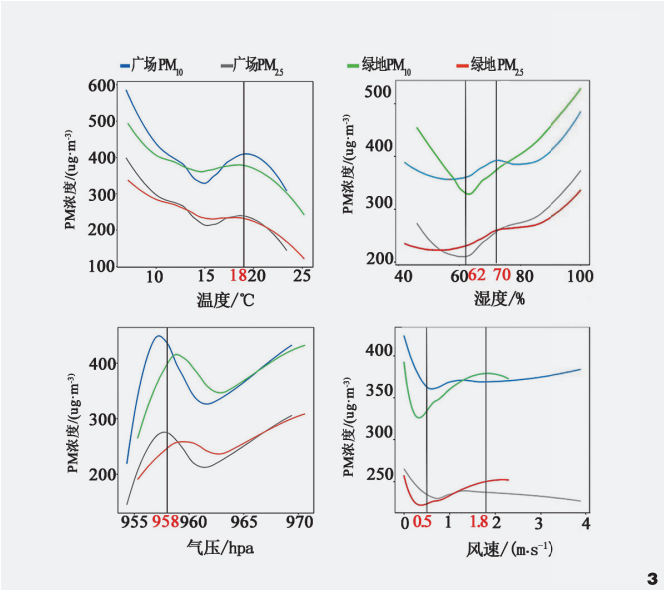


图3 气象因子对PM_{2.5}和PM₁₀的影响
Fig. 3 Relationship between meteorological factors and particulate matter

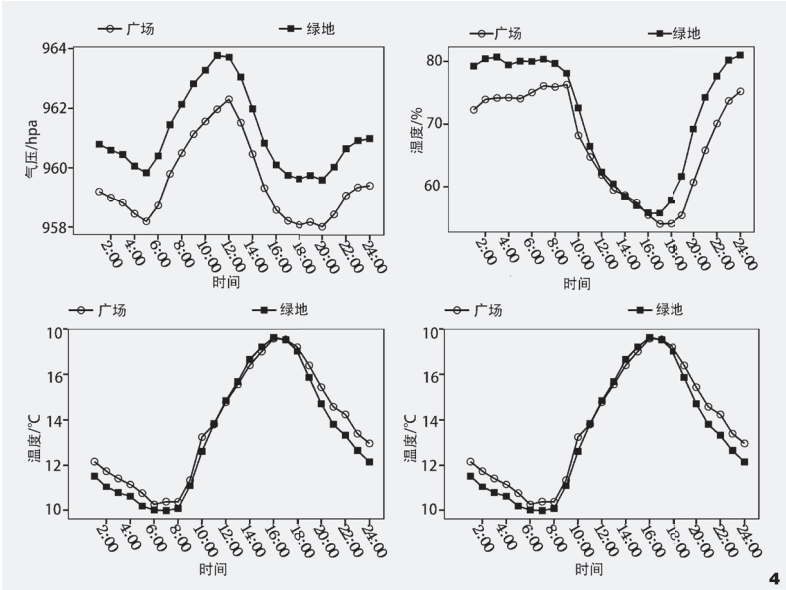


图4 气象因子日变化规律
Fig. 4 Diurnal variation of meteorological factors

散，污染物形成累积^[14]。对比硬质广场，不同时间段内绿地削减颗粒物的能力有明显差异，白天10点至17点时间段内，颗粒物浓度总体较低，绿地内颗粒物浓度高于广场，6点至8点、18点至次日凌晨4点，颗粒物浓度总体较高，绿地内颗粒物浓度低于广场。

3.2 气象因子对绿地和广场PM_{2.5}和PM₁₀浓度的影响

风速、气压、温度对PM_{2.5}和PM₁₀均有极显著影响 ($P<0.01$)，湿度对PM_{2.5}也有极显著影响 ($P<0.01$)，对PM₁₀具有显著影响 ($P<0.05$)。拟合结果如图3所示：(1) 当温度取值大小为18℃，气压取值大小为958 hPa，湿度小于62%，风速小于0.5 m·s⁻¹ 接近于0点 (黑色竖向参考线)，拟合曲线出现拐点，颗粒物浓度较高或呈降低趋势，根据气象因子日变化 (图4) 可知，以上气象因子取值大小对应时间为18点、19点前后，晚高峰造成颗

粒物浓度较高，需要排除此因素对拟合曲线出现拐点的干扰。(2) 当风速取值大小超过1.8 m·s⁻¹ (紫色竖向参考线)，广场PM_{2.5}、绿地PM₁₀、绿地PM_{2.5}浓度随着风速增大而减小，但PM₁₀浓度随着风速增大而升高。(3) 当湿度取值大小为70%附近，广场PM₁₀浓度随湿度增加呈显著下降趋势，其他颗粒物浓度与湿度拟合曲线斜率减小。

3.3 样地类型对PM_{2.5}和PM₁₀浓度的影响

PM₁₀浓度在三种样地具有显著差异 (图5)，三种样地PM₁₀浓度大小排序为：半开敞绿地>广场>闭合绿地。PM_{2.5}浓度在半开敞绿地与闭合绿地和广场具有显著差异，闭合绿地和广场不具有显著差异，三种样地PM_{2.5}浓度大小排序为：半开敞绿地>闭合绿地>广场。对比三种空间颗粒物浓度标准差，广场PM₁₀、PM_{2.5}标准差最大，表明广场颗粒物浓度的峰值最大，闭合绿地颗粒物浓度峰值最小。

3.4 不同水平距离PM_{2.5}和PM₁₀浓度

不同水平距离处PM_{2.5}和PM₁₀浓度具有显著差异 ($P<0.05$)，样地内PM_{2.5}和PM₁₀浓度随距离变化升高或降低的趋势一致 (图6)。闭合绿地内颗粒物浓度不同水平距离分布变化趋势显著，1点至9点时间段内，PM_{2.5}和PM₁₀浓度随着距离增加而升高；10点至18点时间段内，PM_{2.5}和PM₁₀浓度在0~70 m内均随着距离增加而降低；19点至24点时间段内，PM_{2.5}浓度随距离增加而升高，PM₁₀浓度无明显升高或降低趋势。

4 讨论与结论

4.1 颗粒物浓度日变化和气象因子的影响

不同时间段内绿地削减颗粒物的能力有明显差异，在6点至8点、18点至次日4点，此时段为交通排放活跃之后的时段，外源性颗粒物浓度较高，绿地内颗粒物浓度明显低于广场，绿地的存在阻滞或减缓了颗粒物向

绿地内部的扩散。但在10点至17点时间段内,此时段内交通排放较少,气温逐渐升高,气流活动活跃,有利于颗粒物扩散,因此此时段颗粒物浓度维持一天中较低水平,绿地植被导致绿地内气流活动强度低于广场,吸滞叶片表面的颗粒物也容易产生再悬浮,从而使绿地内颗粒物浓度高于广场^[15]。PM_{2.5}和PM₁₀浓度随着湿度升高而逐渐升高,湿度的升高促进颗粒物的凝聚和成核,导致颗粒物浓度升高,但当相对湿度达到阈值(阈值为70%),夜间(22点至次日8点)湿度均高于70%,湿沉降量增加,夜间颗粒物浓度持续降低^[16]。当广场风速达到1.8 m·s⁻¹,增加了地面扬尘,已沉降的PM₁₀颗粒被风吹起发生再悬浮,导致广场PM₁₀浓度逐渐升高。气压的变化主要反映大气边界层的高低,从而影响颗粒物的浓度,随着温度的升高,地表大气活动活跃,样地内湍流活动增强,有利于颗粒物的扩散^[17]。包红光等^[18]研究表明,颗粒物浓度与气象因子显著相关,且颗粒物粒径越小,相关性越显著,但相关性存在一定阈值,阈值大小学者们还在界定和研究。拟合结果产生的阈值充分说明采用更高的时间分辨率进行连续监测,对观察颗粒物更细的变化以及与气象因素的关系非常重要。白天绿地调控颗粒物的主导气象因子是风,绿地植被具有阻滞颗粒物进入绿地内部或阻滞颗粒物向外部扩散双重作用,夜间绿地调控颗粒物浓度的主导气象因子是湿度,绿地内具有较高的湿度和清除颗粒物的效率。

4.2 不同水平距离和植被结构对颗粒物的影响

在10点至18点时段内,温度升高,湍流活动增强,风速也逐渐升高,有利于颗粒物的扩散,此时段内交通排放量小,环境污染浓度处在较低水平,绿地和广场空间

内部具有较强的扩散能力,交通排放对空间内部影响小,对靠近道路边界影响较大,因此时段内颗粒物浓度内部低于靠近道路边界。这与李新宇等^[21]研究结果一致。在6点至8点,18点至20点时段内,由于早晚高峰交通排放迅速增大,气温低风速小,植被生长活动不活跃,不利于颗粒物的扩散和吸收,颗粒物在样地内部均逐渐形成累积,因此此时段离道路距离越远,颗粒物浓度越高,但闭合绿地内颗粒物浓度总体显著低于半开敞绿地和广场,闭合绿地对颗粒物的阻滞作用明显。邵建明等^[22]研究也发现绿地内颗粒物浓度在离林缘50 m处开始逐渐上升。包红光等^[23]研究夏季海淀公园不同水平距离颗粒物浓度变化,在上午9点,0~160 m范围内,样地内颗粒物浓度均有升高,11点至13点绿地对颗粒物削减作用显著;闭合绿地植被空隙较小,形成比广场更为稳定的局部环境,可以有效阻滞外源性颗粒物快速扩散至绿地内部,同时闭合绿地叶面积总量大,不同层次的枝叶更容易再次截获悬浮的颗粒物^[9],吸滞的粉尘更多。半开敞绿地阻滞外源性颗粒物进入的能力弱于闭合绿地,同时对比广场,颗粒物扩散稀释能力弱于广场,因此半开敞绿地内颗粒物浓度均较高。闭合绿地削减PM₁₀浓度的强于PM_{2.5}浓度,PM₁₀具有较大的粒径,更容易被植物枝叶吸附和发生沉降,沉降到土壤中也不易发生再悬浮^[19]。杨貌等^[20]也发现植物削减PM₁₀作用强于PM_{2.5}。综上所述,绿地内部削减颗粒物的正负效应与污染源排放强度和气象因子有关,早晚高峰时段,绿地内部颗粒物浓度高于外部;其他时段,绿地内部低于外部,闭合绿地内颗粒物浓度显著低于半开敞绿地和广场,闭合绿地对外源性颗粒物具有较好的削减作用。

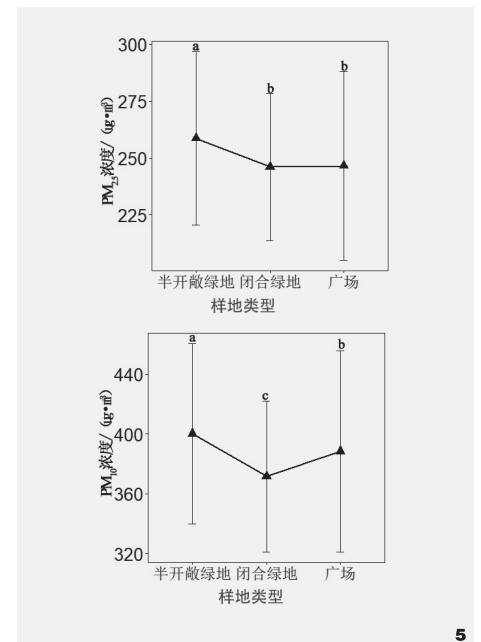


图5 样地类型对PM_{2.5}和PM₁₀的影响
Fig. 5 Differences particulate matter concentration with different plot

4.3 结论

(1) 颗粒物浓度日变化受到气象因子日变化和污染源的综合影响,10点至18点时段内,风速是影响颗粒物浓度的主导气象因子,绿地阻滞了颗粒物的扩散,导致绿地内颗粒物浓度高于广场,风速超过1.8 m·s⁻¹,颗粒物浓度降低;凌晨1点至5点,湿度是影响颗粒物浓度的主导气象因子,湿度超出阈值70%,可以有效清除颗粒物,颗粒物浓度持续降低。(2) 对比硬质广场,绿地内颗粒物浓度值的变化幅度更小,绿地对交通排放具有较强的缓冲效应。(3) 交通排放活跃的时段内,颗粒物浓度随距离增加而升高,在绿地内部形成累积;交通排放较低的时段内,颗粒物浓度随距离增加而降低。

综上所述,绿地植被通过改变局部的气象因子,风速、湿度、温度和气压等条件,可以有效对颗粒物的浓度进行调控,依据上述研究结果,实践中可以积极探索通过增加

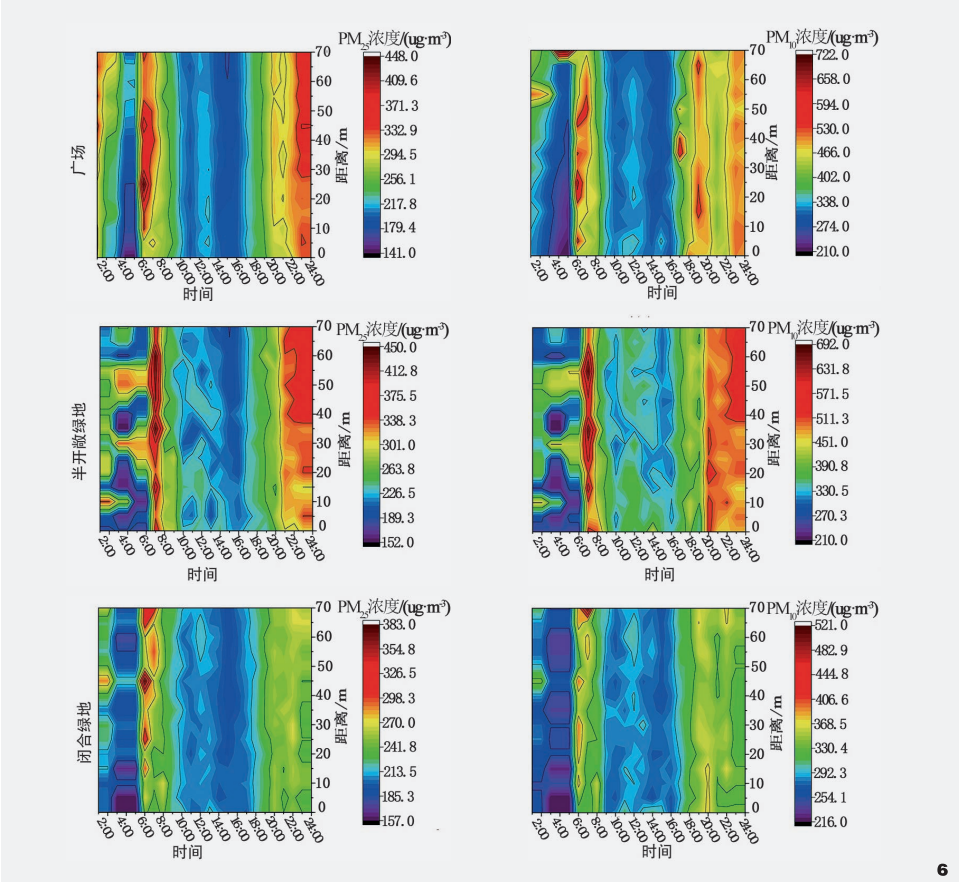


图6 不同水平距离PM_{2.5}和PM₁₀浓度变化
Fig. 6 Particulate matter concentration gradient distribution of different distance levels

环境空气湿度，建立智慧增湿设施，在交通排放较强的时段内增加绿地内湿度，改善空气质量。在公园绿地靠近道路一侧建立郁闭度较高的密林防护，阻滞颗粒物向绿地内部扩散。在绿地内部建立疏林空间或者开敞草坪，有利于内部颗粒物向外扩散，且靠近道路交通一侧不宜设计休闲步道或者建立运动场所。

参考文献

[1] BOLUND P, HUNHAMMAR S. Ecosystem Services in Urban Areas[J]. Ecological Economics, 1999, 29(2): 293-301.

[2] 中华人民共和国第十三届全国人民代表大会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2021-3-13] (2021-3-13). http://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c_1127205564.htm.

[3] LATHA K M, HIGHWOOD E J. Studies on Particulate Matter (PM10) and Its Precursors over Urban Environment of Reading, UK[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2006, 101(2): 367-379.

[4] ROSSINI OLIVA S, Fernandez Espinosa A J. Monitoring of Heavy Metals in Topsoils, Atmospheric Particles and Plant Leaves to Identify Possible Contamination Sources[J]. Microchemical Journal, 2007, 86(1): 131-139.

[5] KWAK M J, Lee J, Kim H, et al. The Removal Efficiencies of Several Temperate Tree Species at Adsorbing Airborne Particulate Matter in Urban Forests and Roadsides[J]. Forests, 2019, 10(11): 960.

[6] ZHAI J, CONG L, YAN G, et al. Dry Deposition of Particulate Matter and Ions in Forest at Different Heights[J]. International journal of environmental research, 2019, 13(1): 117-130.

[7] WANG Y, CHEN B. Dust Capturing Capacity of Woody Plants in Clean Air Zones Throughout Taiwan[J]. Atmosphere, 2016, 12(6): 696.

[8] 杨畅, 王锐, 王月容. 公园绿地生态保健功能研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34(05): 32-37.

[9] 郑少文, 邢国明, 李军, 等. 不同绿地类型的滞尘效应比较[J]. 山西农业科学, 2008, 36(5): 70-72.

[10] 路琛, 张祥, 邱玲, 等. 不同植被结构校园绿地对空气颗粒物浓度影响研究[J]. 中国园林, 2020, 36(08): 113-118.

[11] 赵秀娟, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京城区和郊区PM_{2.5}浓度季节与日变化特征[C]//中国气象学会2008年年会城市气象与城市可持续发展分会场, 中国: 北京, 2008: 419-429.

[12] 陈博. 北京地区典型公园绿地对PM_{2.5}等颗粒物浓度及化学组成影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[13] 邵锋, 钱思思, 孙丰宾, 等. 杭州市区春季绿地对PM_{2.5}消减作用的研究[J]. 风景园林, 2017(05): 79-86.

[14] 刘宇, 王晓立, 董蓉, 等. 采暖季4种结构的公园绿地对PM_{2.5}和PM₁₀的调控作用[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2134-2139.

[15] 郭二果, 王成, 郝光发, 等. 北方地区典型天气对城市森林内大气颗粒物的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(07): 1185-1198.

[16] 刘旭辉, 余新晓, 张振明, 等. 林带内PM₁₀、PM_{2.5}污染特征及其与气象条件的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(07): 1715-1721.

[17] 郎凤玲, 闫伟奇, 张泉, 等. 北京大气颗粒物数浓度粒径分布特征及与气象条件的相关性[J]. 中国环境科学, 2013, 33(07): 1153-1159.

[18] 包红光, 王成, 杜万光. 城市林木滞尘效应研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021(12): 1514-1523.

[19] 李新宇, 赵松婷, 郭佳, 等. 公园绿地植物配置对大气PM_{2.5}浓度的消减作用及影响因子[J]. 中国园林, 2016, 32(08): 10-13.

[20] 杨貌, 张志强, 陈立欣, 等. 春季城区道路不同绿地配置模式对大气颗粒物的削减作用[J]. 生态学报, 2016, 36(07): 2076-2083.

[21] 李新宇, 赵松婷, 李延明, 等. 北京市不同主干道绿地群落对大气PM_{2.5}浓度消减作用的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(04): 615-621.

[22] 邵建明, 刘斌, 鲁绍伟, 等. 城市森林植被对空气PM_{2.5}质量浓度的影响[J]. 北方园艺, 2016(13): 182-186.

[23] 包红光, 王成, 郝光发, 等. 夏季海淀公园内PM_{2.5}浓度水平梯度分布规律[J]. 环境工程学报, 2017, 11(06): 3678-3684.