

城市公园秋冬季典型天气和不同绿地对 PM_{2.5} 浓度的影响

于 慧¹, 袁楚阳¹, 莫 莉², 黄 芳¹, 张天然¹, 李晓璐¹, 邵 锋¹

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 生态环境部 土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012)

摘要:以杭州市临安区狮山公园中草坪、乔木和乔灌木 3 种不同植物配植类型样地为研究对象,在 2019 年秋、冬两季选择“连续晴天”“连续阴天”和“雨后晴天”3 种典型天气,对公园内不同植物配植类型绿地的 PM_{2.5} 浓度及气象因子(温度、相对湿度和风速)进行监测,探究天气条件和绿地对城市公园环境中 PM_{2.5} 浓度的影响。结果表明,PM_{2.5} 浓度有明显的季节差异,冬季的 PM_{2.5} 浓度高于秋季的;天气条件对 PM_{2.5} 浓度变化作用明显,“连续阴天”的 PM_{2.5} 日平均浓度显著高于其他 2 种天气的;在 3 种天气条件下,PM_{2.5} 浓度与温度之间呈极显著负相关、与相对湿度之间呈极显著正相关、与风速之间呈极显著负相关(除“连续阴天”以外),相对湿度是影响 PM_{2.5} 浓度最主要的气象因子;公园内 3 种不同植物配植类型绿地的 PM_{2.5} 浓度表现为草坪>乔木>乔灌木。

关键词:城市公园;PM_{2.5};典型天气;气象因子;植物配植类型;杭州

中图分类号:X171 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3776(2020)06-0031-09

Effect of Weather and Green Space on PM_{2.5} Concentrations in Urban Park in Autumn and Winter

YU Hui¹, YUAN Chu-yang¹, MO Li², HUANG Fang¹, ZHANG Tian-ran¹, LI Xiao-lu¹, SHAO Feng¹

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China;

2. Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

Abstract: Determinations were implemented during September 2019 and January 2020 on PM_{2.5} concentration, air temperature, relative humidity and wind speed in different plant distribution sample plots under different weather conditions in Shishan Park of Lin'an, Zhejiang province. The results showed that the PM_{2.5} concentrations in winter were higher than that in autumn. The daily average PM_{2.5} concentration in continuous cloudy days was remarkably higher than that of the left. Under different weather conditions, there was extremely significant negative correlation between PM_{2.5} concentration with temperature and wind speed (except in continuous cloudy days), but significant positive one with relative humidity. The relative humidity was the main factor to influence PM_{2.5} concentration. The experiment demonstrated that concentration of PM_{2.5} in different green spaces was ordered by lawn > trees and grasses > trees, shrubs and lawn.

Key words: urban park; PM_{2.5}; typical weather; meteorological factor; plants arrangement types; Hangzhou

随着我国经济社会的快速发展,以大气颗粒物为主要污染特征的雾霾事件日益增多,长三角、珠三角和京津冀地区空气污染问题尤为突出^[1-5]。大气颗粒物中的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 对大气能见度、空气质量及人体健康产生了严重的负面影响,其中,PM_{2.5} 极易富集空气中的有毒重金属、酸性氧化物等有害物质,其粒径小,可直接通过呼吸进入人体,增加呼吸系统病发的风险,因此,对 PM_{2.5} 的研究已成为全球范围内一个重要的领域^[6-9]。目前,

收稿日期:2020-06-14;修回日期:2020-09-28

作者简介:于慧,硕士,从事园林植物应用与园林生态研究;E-mail: 591922465@qq.com。通信作者:邵锋,副教授,博士,从事园林植物应用与园林生态研究;E-mail: shaofeng@zafu.edu.cn。

诸多学者从 $\text{PM}_{2.5}$ 来源^[10]、成分解析^[11]、污染特征^[12]和健康损害评估^[13]等方面开展了系统研究。此外,有学者从宏观视角来研究绿地对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减规律,如肖玉等^[14]利用 NDVI 数据模拟城市绿地叶面积指数,并计算绿地对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消除效果,得出了绿地能有效降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的结论。王蕾等^[15]则专注于园林植物叶表面微观形态结构的研究,分析不同植物的滞尘能力差异,为绿地规划设计中的植物选择提供理论基础。天气条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化会产生重要影响。陈博等^[16]以北京大兴区的景观生态林为例,研究了不同天气条件下 TSP(总悬浮颗粒物)、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 三种粒径大气颗粒物的质量浓度变化特征。李瑞芃等^[17]利用在青岛观测到的大气颗粒物浓度数据及气象图资料、后向轨迹分析资料等,研究了气团来源对大气颗粒物浓度谱分布的影响。以上研究大多集中在中国北方地区,而长三角地区有关天气条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响的研究较少。本文以杭州市临安区狮山公园为研究对象,研究典型天气条件和不同植物配植类型绿地对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响,分析 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象因子的相关关系,以期为游人选择合适的户外休闲时间和场所及城市公园植物景观设计提供科学依据。

1 研究区概况

杭州市临安区位于浙江省西北部,地理坐标为 $29^{\circ}56' \sim 30^{\circ}23'N$, $118^{\circ}51' \sim 119^{\circ}52'E$,东临杭州主城区,西接黄山市,境内地势西北高、东南低,南、西、北三面环山。属季风型气候,四季分明、温暖湿润、光照充足、雨量充沛。年平均气温为 16.4°C ,年均日照时数为 $1\,837.9\text{ h}$,年均降水量为 $1\,613.9\text{ mm}$,年降水日为 158 d ^[18-19]。

狮山公园是坐落于临安青山湖科技城研发核心区块的一座城市生态公园,占地面积约 72.3 hm^2 ,绿化覆盖率达 88% ,共有 500 余种园林植物。狮山公园凭借“四季有花、三季有果”的植物景观特色,被誉为花果飘香的硅谷绿芯,深受市民喜爱。公园周边无大型工矿企业等污染源,公园西、南两侧毗邻城市道路,但目前车流量小。公园内以人行为主,禁止机动车通行,少有自行车骑行。

景观对微气候的影响范围有限,最小距离为 10 m ^[20-21]。因此,本试验研究区域为公园内测量点周围半径 10 m 的范围。选择 3 种植物配植类型绿地作为样地,分别是以樟 *Cinnamomum camphora*,黄杨 *Buxus sinica* 为主体的开敞型草坪样地(以下简称草坪);以马尾松 *Pinus massoniana*,杜鹃 *Rhododendron simsii* 为主体的半开敞型乔草样地(以下简称乔草);以无患子 *Sapindus mukorossi*,羽毛槭 *Acer palmatum* var. *dissectum* 等 6 种乔木,红花檵木 *Loropetalum chinense* var. *rubrum*,南天竹 *Nandina domestica* 等 12 种灌木及芭蕉 *Musa basjoo*,大吴风草 *Farfugium japonicum* 等 6 种草本植物组成的密闭型乔灌草样地(以下简称乔灌草)(图 1)。

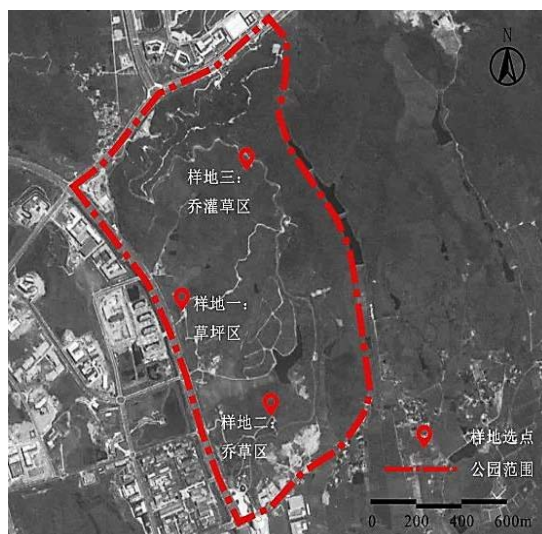


图 1 样地分布图

Figure 1 Distribution of sample plots

2 研究方法

2.1 典型天气选择

通过对比和分析杭州地区近年来的气象数据资料,结合相关的研究成果,总结出杭州地区秋、冬季节出现频率较高且对大气颗粒物的集聚、传输、扩散和消除等作用明显的 3 种天气类型,分别为“连续晴天”“连续阴天”和“雨后晴天”。其中,“连续晴天”要求试验日前 2 天为晴天,试验当日同为晴天;“连续阴天”是指试验日前 2 天为阴天,试验当日也为阴天;而“雨后晴天”则要求试验日前 2 天为连续降雨,试验当日为晴天。为了减小误差,确保试验的可比性、一致性和可重复性,每种天气条件下重复开展 3 次试验。

2.2 指标测定

采用 3 台微电脑激光粉尘仪[LD-5C (B)]监测公园内的草坪、乔草和乔灌草样地内的 PM_{2.5} 浓度。监测数据采集频率为 1 次·min⁻¹, 仪器架设高度为距离地面 1.5 m 处(与成人呼吸高度基本相同)。利用风速仪(MS6252B)同步监测并记录试验当天的温度、相对湿度和风速等气象数据, 仪器与粉尘仪的水平距离为 0.5 m, 架设高度与粉尘仪一致。于 2019 年 9 月 11 日至 2020 年 1 月 12 日, 分别选取 3 种典型天气开展试验, 每次进行 8.5 h (8:30 – 17:00) 的连续监测。因白天的气温变化较大, 人为活动多, 各项生产生活活动大都发生在白天, 相较于晚上, 变化较大, 且便于监测, 因此, 本文仅观测了 8:30 – 17:00 的变化情况。

2.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 整理数据, 利用 Origin 2017 绘制 PM_{2.5} 浓度变化图及 PM_{2.5} 浓度与气象因子的拟合方程图, 应用 SPSS 22.0 对 PM_{2.5} 浓度进行方差分析及与各气象因子的 Spearman 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 秋、冬季节典型天气条件下 PM_{2.5} 的浓度变化

秋、冬季不同天气条件对公园内 PM_{2.5} 浓度均有不同程度的影响。由表 1 可知, 秋季“连续晴天”“连续阴天”和“雨后晴天”的 PM_{2.5} 平均浓度分别为 42.00±23.57 μg·m⁻³, 65.52±34.14 μg·m⁻³ 和 60.35±16.89 μg·m⁻³, 其 PM_{2.5} 空气质量指数 (AQI) 均为良好等级。在显著性水平为 0.05 的情况下, 秋季“连续晴天”和“连续阴天”之间的 PM_{2.5} 浓度差异显著, 并且两者与“雨后晴天”的 PM_{2.5} 浓度均存在一定的差异。由表 2 可知, 冬季“连续晴天”“连续阴天”和“雨后晴天”的 PM_{2.5} 平均浓度分别为 99.28±25.93 μg·m⁻³, 165.31±62.97 μg·m⁻³ 和 63.83±16.97 μg·m⁻³, 其 AQI 分别为轻度污染、中度污染和良好。冬季不同天气条件下 PM_{2.5} 浓度的差异较秋季的更为显著, 空气质量也明显低于秋季的。在显著性水平为 0.05 时, 冬季“连续阴天”的 PM_{2.5} 浓度与“连续晴天”“雨后晴天”之间差异显著。

表 1 秋季典型天气条件下不同植物配植类型绿地的 PM_{2.5} 日平均浓度及方差分析
Table 1 Diurnal mean concentration of PM_{2.5} in different green spaces under three weather conditions in autumn and ANOVA on it

天气类型	PM _{2.5} 日平均浓度/(μg·m ⁻³)				显著性水平 (0.05)	F 值
	草坪	乔草	乔灌草	平均值		
连续晴天	50.77±26.35	40.47±18.15	34.77±22.63	42.00±23.57	b	5.33
连续阴天	79.02±40.90	61.70±28.78	55.83±26.57	65.52±34.14	a	
雨后晴天	67.96±15.69	58.29±16.48	54.79±15.67	60.35±16.89	ab	

注: 同一列不同字母表示经 LSD 检验差异显著, 下同。

表 2 冬季典型天气条件下不同植物配植类型绿地的 PM_{2.5} 日平均浓度及方差分析
Table 2 Diurnal mean concentration of PM_{2.5} in different green spaces under three weather conditions in winter and ANOVA on it

天气类型	PM _{2.5} 日平均浓度/(μg·m ⁻³)				显著性水平 (0.05)	F 值
	草坪	乔草	乔灌草	平均值		
连续晴天	112.51±28.15	99.99±20.28	85.35±21.05	99.28±25.93	b	20.01
连续阴天	200.14±66.22	163.88±57.19	139.03±48.53	167.69±62.98	a	
雨后晴天	73.99±16.01	65.60±14.10	51.92±12.67	63.83±16.97	b	

由图 2 可知, 在秋季 3 种天气条件下, PM_{2.5} 浓度的日变化较明显。“连续晴天”的 PM_{2.5} 浓度日变化呈现“单峰型”, 在 9:00 左右达到最高值 (99 μg·m⁻³), 之后 PM_{2.5} 浓度持续下降, 最低值 (4 μg·m⁻³) 出现在 15:30。“连续阴天”的 PM_{2.5} 浓度日变化趋势与“连续晴天”较为一致, 最高值为 181 μg·m⁻³, 出现在 10:00 左右, 随后呈现持续大幅下降趋势, 12:00 之后 PM_{2.5} 浓度变化趋于平缓, 数值稳定在 50 μg·m⁻³ 左右, 在 16:00 出现最低值 (24 μg·m⁻³)。以上 2 种天气的 PM_{2.5} 浓度最低值均出现在 15:30 – 16:00, 原因是此时段太阳辐射强、气温较高, 这些气象条件有利于 PM_{2.5} 的扩散, 使之浓度降低。“雨后晴天”的 PM_{2.5} 浓度日变化趋势则与前 2 种天气不同, 其最高值 (125 μg·m⁻³) 出现在试验开始时, 随后浓度开始呈现大幅下降趋势, 在 10:30 左右出现最低值 (33 μg·m⁻³) 后趋于稳定, 直至 12:30 左右开始浓度逐渐升高, 15:30 达到第 2 个峰值 (84 μg·m⁻³), 之后浓度再次下降到 70 μg·m⁻³ 左右。

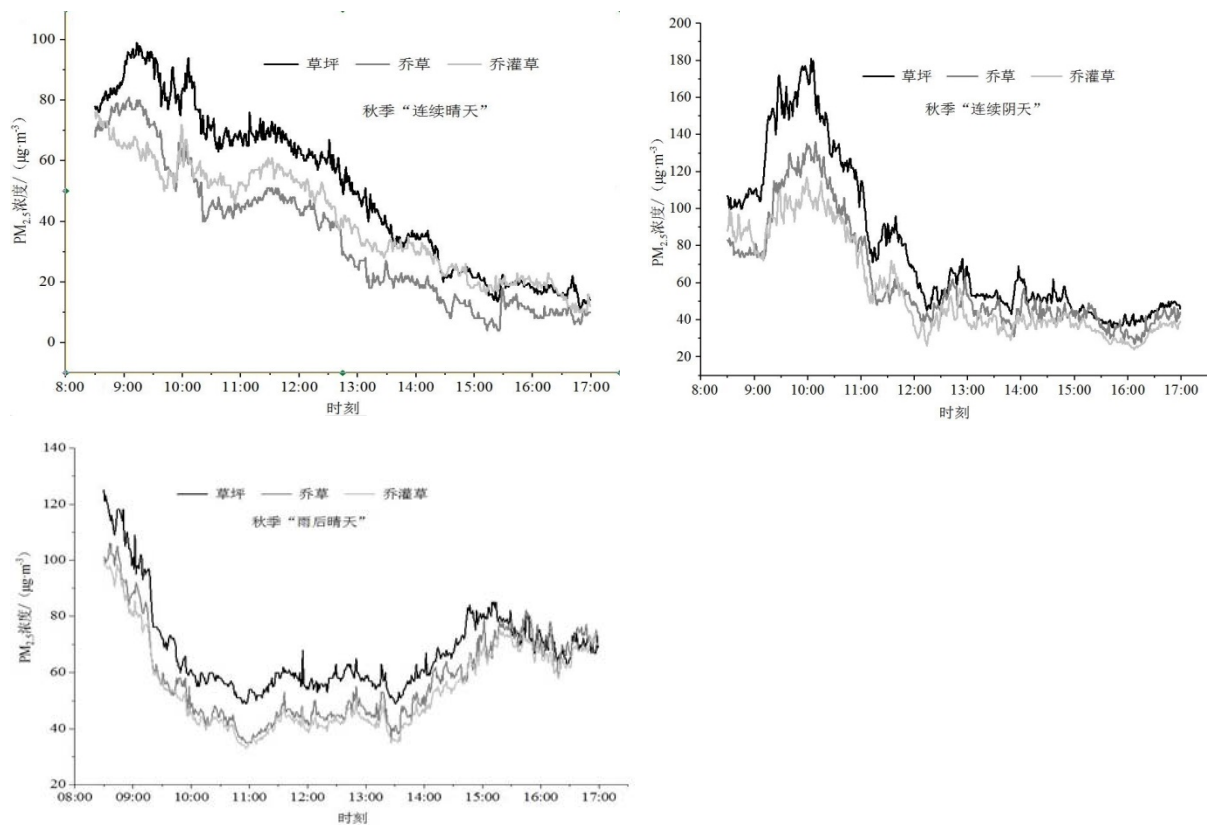


图2 秋季“连续晴天”“连续阴天”和“雨后晴天”的PM_{2.5}浓度日变化曲线

Figure 2 Daily changes of PM_{2.5} under different weather conditions in Autumn

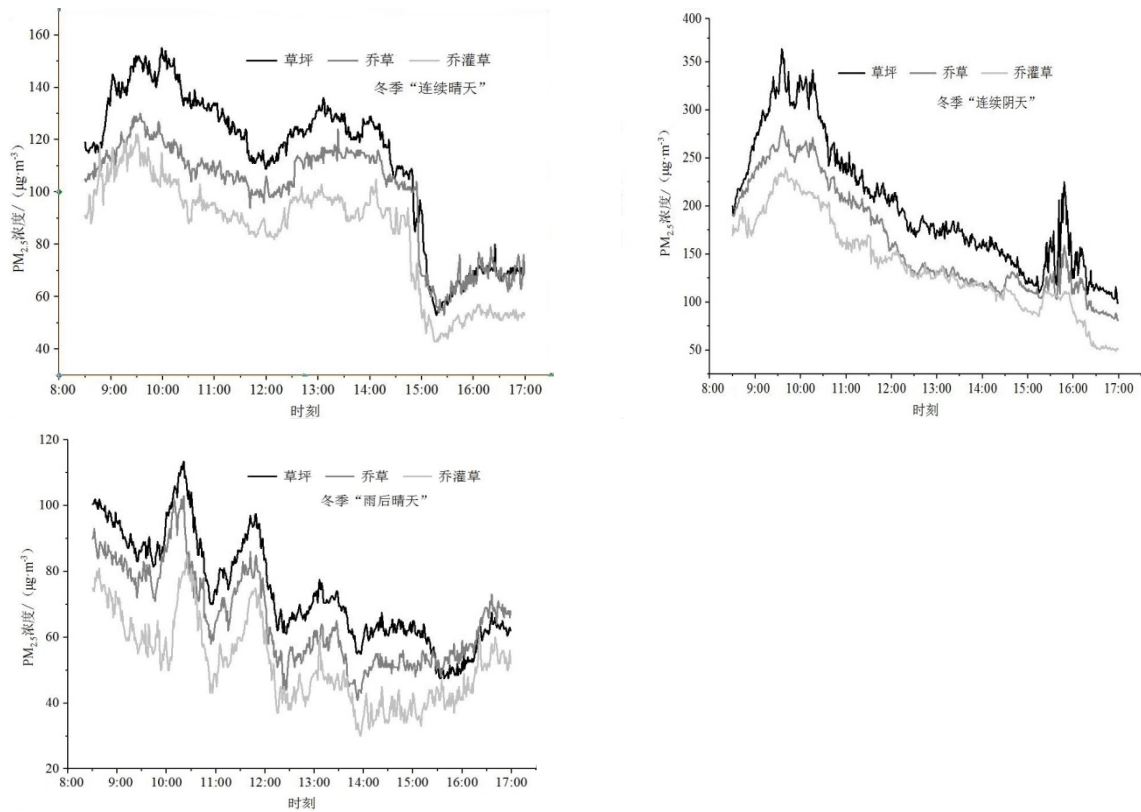


图3 冬季“连续晴天”“连续阴天”和“雨后晴天”的PM_{2.5}浓度日变化曲线

Figure 3 Daily changes of PM_{2.5} under different weather conditions in winter

由图 3 可知, 冬季 PM_{2.5} 浓度的日变化在 3 种天气条件下均呈“双峰型”, 其中, “连续阴天”的 PM_{2.5} 浓度明显高于其他 2 种天气, 9:30—10:30 为第 1 个峰值区间, PM_{2.5} 浓度最高达到 364 μg·m⁻³, 10:30 后呈持续下降趋势, 在 15:30 达到第 2 个峰值 (215 μg·m⁻³), 但该峰值远低于第 1 个峰值, 16:00 后开始再次小幅下降, 并于 0.5 h 后趋于稳定。“连续晴天”的 PM_{2.5} 浓度第 1 个峰值 (155 μg·m⁻³) 出现在 9:30, 之后浓度有所下降, 在 13:00 出现第 2 个峰值 (136 μg·m⁻³), 2 个峰值相差较小, 15:00 后浓度骤降, 数十分钟后浓度略有上升并保持稳定。“雨后晴天”的 PM_{2.5} 浓度在 3 种天气中为最低, 其第 1 个峰值出现在 10:00—10:30, PM_{2.5} 浓度最高为 114 μg·m⁻³, 在 11:30 出现第 2 个峰值 (98 μg·m⁻³), 在 12:00 后 PM_{2.5} 浓度处于较为稳定的状态, 于 50 μg·m⁻³ 上下波动, 无明显峰值出现。

3.2 气象因子对 PM_{2.5} 浓度的影响

由于气象因子的多变性和不可控性, 一定程度上会导致 PM_{2.5} 浓度变化的复杂性。本文采用 Spearman 秩相关分析可提供 2 个随机变量在线性相关或非线性相关下的共变趋势程度^[22], 利用这一特性, 能更加客观地反映气象因子与 PM_{2.5} 浓度之间的相关关系, 研究结果见表 3。由表 3 表明, 温度、相对湿度和风速均与 PM_{2.5} 浓度变化有着不同程度的相关性, 其中, PM_{2.5} 浓度与温度和风速之间均呈负相关关系, 与相对湿度间呈极显著正相关关系。在不同天气条件下, 气象因子与 PM_{2.5} 浓度之间表现出相关性差异, 其相关系数从大到小依次为“连续阴天” > “连续晴天” > “雨后晴天”。

表 3 秋、冬季不同天气条件下 PM_{2.5} 浓度与气象因子的相关性
Table 3 Correlation between PM_{2.5} concentration and meteorological factors under different weather conditions in autumn and winter

天气类型	温度		相对湿度		风速	
	秋季	冬季	秋季	冬季	秋季	冬季
连续晴天	-0.747**	-0.407**	0.799**	0.637**	-0.397**	-0.182**
连续阴天	-0.826**	-0.736**	0.840**	0.722**	-0.098*	-0.015
雨后晴天	-0.262**	-0.434**	0.458**	0.669**	-0.319**	-0.329**

注: *表示显著相关, **表示极显著相关。

3.2.1 温度对 PM_{2.5} 浓度的影响

由表 3 可知, PM_{2.5} 浓度与温度间呈极显著负相关, 其相关系数在 -0.826 ~ -0.262。根据两者相关性分析结果建立趋势线性拟合模型, 得出秋、冬季 PM_{2.5} 浓度与温度的拟合方程分别为: $y = 180.1984 - 6.66737x$ ($R^2 = 0.8436$) 和 $y = 288.19578 - 15.84207x$ ($R^2 = 0.54862$), 见图 4。由图 4 可知, 秋季的 PM_{2.5} 浓度与温度的相关性略高于冬季的。2 个季节均以“连续阴天”的 PM_{2.5} 浓度与温度相关系数为最高, “雨后晴天”的为最低, 所有天气条件下的 PM_{2.5} 浓度与温度的相关性均达到了极显著相关的水平。

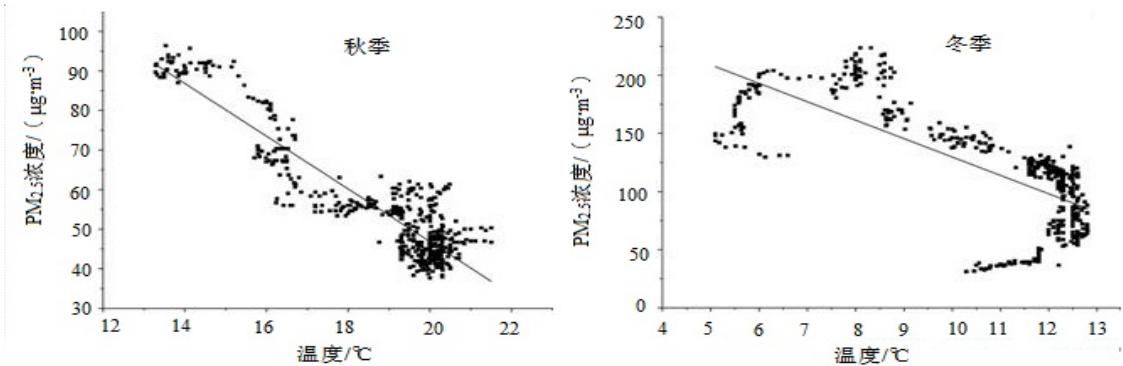


图 4 秋、冬季 PM_{2.5} 浓度与温度拟合方程图

Figure 4 Fitting equation of PM_{2.5} concentration and temperature in autumn and winter

3.2.2 相对湿度对 PM_{2.5} 浓度的影响

由表 3 可知, PM_{2.5} 浓度与相对湿度间呈极显著正相关, 将 PM_{2.5} 浓度与相对湿度进行趋势拟合分别得到秋、

冬季的线性方程: $y = 139.359\ 9x - 10.954\ 29$ ($R^2 = 0.898\ 08$) 和 $y = 460.923\ 23x - 109.589\ 93$ ($R^2 = 0.533\ 51$), 见图 5。由图 5 可知, 空气的相对湿度越大, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越高。

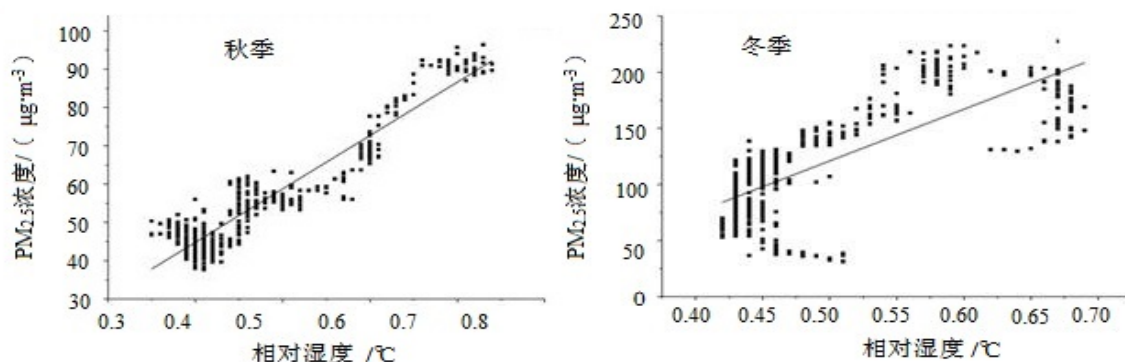


图 5 秋、冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与相对湿度的拟合方程图

Figure 5 Fitting equation of $\text{PM}_{2.5}$ concentration and relative humidity in autumn and winter

3.2.3 风速对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

风是大气边界层内影响颗粒污染物稀释扩散的重要气象因子之一。由表 3 可知, 在秋、冬季“连续晴天”和“雨后晴天”条件下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速之间均呈极显著的负相关关系; 在秋季“连续阴天”的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速间呈显著负相关, 而在冬季, 两者之间的相关性并不明显。将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和风速进行趋势拟合得到秋、冬季的线性方程: $y = 51.759\ 76 - 5.050\ 81x$ ($R^2 = 0.082\ 1$) 和 $y = 100.630\ 6 - 2.217\ 19x$ ($R^2 = 0.009\ 01$), 见图 6。在一定程度上, 风速越大局地空气对流效果越好, 越有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散。“连续晴天”和“雨后晴天”的日平均风速较高, 分别为 $1.64\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.82\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风速成为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的重要因素之一。“连续阴天”的风速较小, 在长时间的静风或微风条件下不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升。

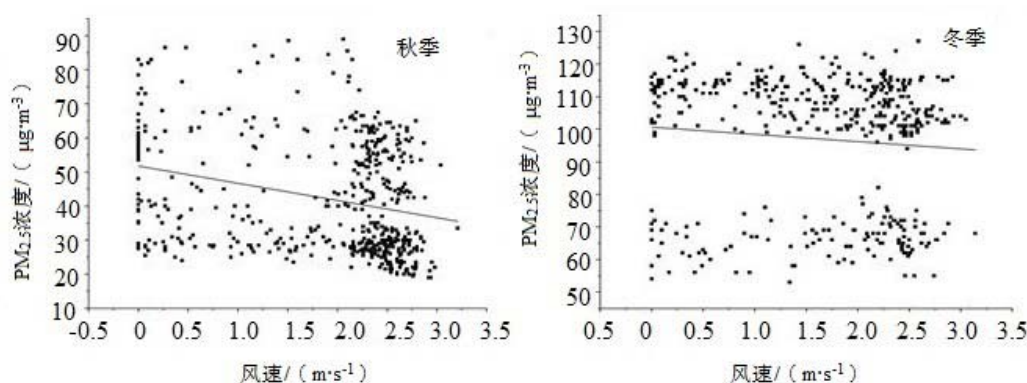


图 6 秋、冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速拟合方程图

Figure 6 Fitting equation of $\text{PM}_{2.5}$ concentration and wind speed in autumn and winter

3.3 不同植物配植类型绿地对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化除受到人为活动、天气条件影响之外, 还与植物有着密切的关系, 不同植物配植类型会直接或间接影响 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度变化。对本研究中 3 种不同植物配植类型绿地的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行统计分析, 结果见表 4。由表 4 可知, 在时间上, 3 个绿地的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大小表现为冬季 > 秋季、上午 > 下午的变化趋势; 在空间上, 同一时间段内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的大小排序为草坪 > 乔草 > 乔灌木。乔灌木区共有 22 种植物, 其中, 乔木和灌木有 16 种, 绿地内植物郁闭度高, 形成了密闭的复层景观空间, 能有效降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。

表 4 秋、冬季不同植物配植类型绿地的 PM_{2.5} 时平均浓度
Table 4 Mean hourly concentration of PM_{2.5} in different green spaces in autumn and winter

季节	时刻	PM _{2.5} 时平均浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)								
		草坪			乔草			乔灌木		
		连续晴天	连续阴天	雨后晴天	连续晴天	连续阴天	雨后晴天	连续晴天	连续阴天	雨后晴天
秋季	9:00	81.63±2.97	104.53±3.48	113.27±6.54	69.87±3.80	77.30±2.87	96.97±6.26	74.13±3.12	88.47±4.67	92.12±5.93
	10:00	89.40±6.77	148.27±21.93	78.23±14.26	60.47±5.29	106.22±19.45	65.08±13.68	69.22±9.15	95.10±12.25	61.64±12.23
	11:00	73.22±7.90	138.25±19.48	55.87±3.43	54.88±4.82	107.58±17.17	42.82±3.95	48.18±6.89	95.18±10.61	40.34±3.95
	12:00	67.83±2.88	83.80±10.80	56.58±3.48	56.03±2.56	58.52±10.15	42.67±3.94	47.48±2.05	57.17±8.55	40.63±3.51
	13:00	58.10±4.62	58.17±7.05	58.03±2.66	45.40±5.43	48.73±6.88	46.07±2.87	37.58±6.46	40.73±7.47	43.05±2.39
	14:00	39.55±5.50	53.42±5.07	55.73±3.52	31.90±1.86	43.55±4.90	45.60±4.20	21.82±1.86	37.50±3.55	41.67±3.59
	15:00	27.25±5.34	52.45±4.04	70.33±7.06	25.42±3.89	44.92±4.07	60.30±4.95	14.83±3.56	39.38±2.45	56.32±5.53
	16:00	18.98±2.25	41.03±3.16	77.05±4.38	19.43±1.61	38.75±5.30	73.93±4.10	10.08±3.54	32.55±4.10	69.83±2.92
冬季	17:00	16.37±2.14	44.03±1.18	69.23±3.10	15.57±3.85	37.52±5.91	70.52±4.14	9.28±1.48	32.73±5.12	66.22±3.81
	9:00	120.77±6.45	228.17±21.13	98.23±2.46	109.27±3.32	212.88±13.56	86.40±2.56	100.40±7.27	178.97±7.77	74.07±3.49
	10:00	144.87±4.83	311.80±22.00	87.83±3.46	121.82±4.62	256.53±10.97	79.45±3.78	111.90±5.02	216.08±16.19	60.08±4.08
	11:00	138.93±7.04	285.07±33.77	93.92±13.22	112.55±4.16	237.71±20.59	81.67±13.72	98.25±5.01	195.10±19.32	64.72±12.36
	12:00	121.13±7.11	221.20±12.40	85.78±6.76	103.93±3.86	190.70±14.40	74.67±5.97	89.00±3.17	154.28±9.75	60.88±8.10
	13:00	120.13±5.77	185.05±12.58	68.10±4.79	106.18±6.03	139.86±10.18	55.30±4.90	92.18±6.22	134.67±8.75	44.90±5.63
	14:00	126.72±4.32	169.97±7.90	67.46±6.56	114.93±1.81	126.23±5.96	54.52±7.28	94.95±3.72	122.48±5.94	44.40±6.56
	15:00	110.93±11.55	146.80±12.64	62.61±1.71	103.45±9.26	118.56±6.46	51.65±1.82	86.52±11.73	106.63±7.92	37.57±3.01
	16:00	63.60±7.56	146.43±31.08	54.30±5.74	62.88±4.96	119.92±14.24	52.82±2.09	48.90±3.40	101.12±8.80	40.47±2.97
	17:00	69.67±1.94	120.82±15.53	59.78±4.70	69.50±3.83	97.08±13.32	64.30±5.26	53.58±1.43	61.90±13.00	51.27±4.86

表 5 秋、冬季不同植物配植类型绿地的 PM_{2.5} 时平均浓度方差分析
Table 5 ANOVA on PM_{2.5} mean hourly concentration in different green spaces in autumn and winter

时刻	秋季			冬季		
	草坪	乔草	乔灌木	草坪	乔草	乔灌木
9:00	a	ab	a	a	a	a
10:00	a	a	b	a	a	a
11:00	ab	a	d	a	a	a
12:00	ab	bc	d	a	a	a
13:00	bc	c	cd	a	a	a
14:00	cd	c	cd	a	a	a
15:00	d	c	bc	a	a	a
16:00	d	c	b	a	a	a
17:00	d	c	b	a	a	a
F 值	19.08	14.27	16.39	0.72	0.74	0.80

注: 同一列不同字母表示经 LSD 检验差异显著。

对不同植物配植类型绿地的 PM_{2.5} 时平均浓度进行方差分析, 结果见表 5。由表 5 表明, 在显著性水平为 0.05 时, 秋季各时刻不同植物配植类型绿地对 PM_{2.5} 的浓度变化均有不同程度的显著影响, 而冬季的均不显著。以草坪作为对照组计算乔草和乔灌木型绿地对 PM_{2.5} 浓度的消减率, 结果见表 6。由表 6 可知, 秋季乔灌木和乔草对 PM_{2.5} 浓度的消减率分别为 27.73%和 18.81%, 冬季乔灌木和乔草对 PM_{2.5} 浓度的消减率则分别为 28.17%和 13.53%。

表 6 秋、冬季典型天气条件下乔草和乔灌木型绿地对 PM_{2.5} 浓度的消减率

天气类型	秋季/%		冬季/%	
	乔草	乔灌木	乔草	乔灌木
连续晴天	20.29	31.51	11.13	24.14
连续阴天	21.92	29.35	18.12	30.53
雨后晴天	14.23	22.32	11.34	29.83

4 结语

4.1 讨论

不同的天气条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响较大。秋季“连续晴天”的 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度最低,而“连续阴天”的 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度均显著高于其他 2 种天气的,其原因可能是秋季“连续晴天”的温度略高于其他 2 种天气,同时,相对湿度较小、风速较大,这种天气条件有利于大气颗粒物的扩散。秋季“雨后晴天”的 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度较“连续晴天”的有所上升,这是由于雨水对大气颗粒物的清除主要通过惯性碰撞,而 $\text{PM}_{2.5}$ 主要分布在积聚模态,降雨对积聚模态的清除效果并不明显,因此,秋季降雨对 $\text{PM}_{2.5}$ 直接碰撞清除的作用很弱。3 种天气中以“连续阴天”的 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度最高,其原因可能是由于连续阴天常伴随着轻雾,此时大气能见度较低、逆温层变厚,与此同时,空气相对湿度较大、风速较小,这些都不利于大气中颗粒物的扩散,所以,其 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高。冬季“雨后晴天”的 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度最低,“连续阴天”的最高,并且冬季无论哪种天气条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度均保持较高数值,其原因可能是冬季大气层结构相对稳定,易形成逆温层,促进 $\text{PM}_{2.5}$ 的聚集,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较秋季的上升明显。相较于秋季,冬季降雨对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除作用明显,主要原因是试验日前 2 天为连续降雨,且降雨量等级为中雨,中雨及以上强度降雨对大气颗粒物的清除作用更显著。栾天等^[23]在不同降水强度对 $\text{PM}_{2.5}$ 清除作用及影响因素的研究中发现,中雨和大雨对 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均清除率分别达 38.5%和 50.6%。

气象因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有着不同程度的影响。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与温度之间呈极显著负相关关系,表明在其他影响因素一致的情况下,温度越高, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越低。BARMADIMOS 等^[24]的研究也证实,在较低温度条件下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与温度之间呈负相关性。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与空气相对湿度之间呈极显著正相关。相对湿度越大,在凝聚作用下细颗粒物吸湿后更易形成大颗粒物,颗粒物质量的增加会使之加快沉降,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升。TIWARI 等^[25]对印度德里市的 $\text{PM}_{2.5}$ 及其他大气污染物进行连续监测过程中也得到同样结论。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速之间呈正相关。在一定程度上,较大风速能产生较强的局地空气对流效果,有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散和转移,具有良好的清除作用^[26]。

不同植物配植类型会影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化,在同一时间段内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大小的排序为草坪 > 乔草 > 乔灌木。合理且丰富的植物配植可以营造复层密闭的空间,形成巨大的叶片面积,为大气颗粒物的滞留提供有利条件,从而降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,发挥植物在净化空气方面的重要作用^[27]。 $\text{PM}_{2.5}$ 粒径小,不以自身重力沉降为主,植物叶片的表面特征与湿润性对颗粒物有良好的吸附作用。不同植物单位叶面积和单片的滞尘量差异很大^[28],有时可达数十倍以上^[29],这与植物叶表面绒毛特征^[29]、叶量、枝叶密度^[30]和叶表面微观结构^[31]等因素的差异有关。孙晓丹等^[32]对不同绿地结构对 $\text{PM}_{2.5}$ 消减能力的研究表明,4 种不同绿地结构对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减率表现为乔灌木 > 乔草 > 灌木 > 乔草 > 灌木;同一种绿地结构,植物种类越丰富,其消减能力越强。闫珊珊等^[33]在研究公园绿地不同景观空间 $\text{PM}_{2.5}$ 的分布特征时发现,草坪地被和硬质铺装等要素构成的开敞空间中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高,而处于由乔灌木和硬质铺装等要素构成的半开敞空间中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与水体、建筑和硬质铺装等无明显相关性,但与绿量间呈显著负相关。

影响城市公园内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的因素较多,除了受天气条件等自然因素和游人活动等人为因素的影响之外,还与公园的整体布局、建筑容积率、水体等密切相关。本研究由于试验监测时间、仪器等局限,研究过程中还存在许多不足之处,对公园内样地分布、游客量、地表高程等对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响还需进一步研究。

4.2 结论

以上对秋、冬季典型天气影响城市公园内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的研究结果表明, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度表现出明显的季节差异,冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度要高于秋季的。天气条件对公园内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有显著影响,在不同的天气条件下, $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度变化差异明显,秋季表现为“连续阴天” > “雨后晴天” > “连续晴天”,冬季则表现为“连续阴天” > “连续晴天” > “雨后晴天”,2 个季节“连续阴天”的 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度均显著高于其他 2 种天气的。仅从不同天气条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染程度看,“连续晴天”和“雨后晴天”的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较轻,更适宜游人开展户外游憩活动,而若选择在“连续阴天”外出则应关注 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况,以免影响身体健康。通过对狮山公园内 $\text{PM}_{2.5}$

浓度的监测结果发现, PM_{2.5} 浓度日变化波动较大, 峰值均出现于上午, 谷值出现于下午, 整体上 PM_{2.5} 浓度表现为上午 > 下午, 因此游人可选择错峰出游的游憩方式, 以呼吸更为清新的空气。气象因子对 PM_{2.5} 浓度的影响较为复杂。研究表明, 温度、相对湿度和风速均与 PM_{2.5} 浓度变化有着不同程度的相关性, PM_{2.5} 浓度与温度和风速之间呈负相关关系、与相对湿度之间呈极显著正相关。不同植物配植类型会直接或间接影响 PM_{2.5} 浓度的变化, 公园内 3 种不同植物配植类型绿地的 PM_{2.5} 浓度表现为草坪 > 乔草 > 乔灌木。

参考文献:

- [1] ZHANG R H, LI Q, ZHANG R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Sci Chin (Earth Sci)*, 2014, 57 (1): 26–35.
- [2] 徐建辉, 江洪. 长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征[J]. *环境科学*, 2015, 36 (9): 3119–3127.
- [3] CHAN C K, YAO X H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmosph Environ*, 2008, 42: 1–42.
- [4] CAO J J, LEE S C, CHOW J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: D22S11.
- [5] ZHANG Y L, CAO F. Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level [J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 14884.
- [6] 刘熔熔. 1994–2017 年杭州能见度特征及其与 PM_{2.5} 关系[J]. *浙江气象*, 2018, 39 (3): 17–21, 48.
- [7] KIM Y J, KIM K W, KIM S D, *et al.* Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon [J]. *Atmosph Environ*, 2006, 40: 593–605.
- [8] 杨晔, 王银. 长江经济带 PM_{2.5} 时空特征及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27 (1): 91–100.
- [9] 谢鹏, 刘晓云, 刘兆荣, 等. 我国人群大气颗粒物污染暴露—反应关系的研究[J]. *中国环境科学*, 2009, 29 (10): 1034–1040.
- [10] 杨新兴, 尉鹏, 冯丽华. 大气颗粒物 PM_{2.5} 及其源解析[J]. *前沿科学*, 2013, 7 (2): 12–19.
- [11] 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 等. 南京江北新区冬季 PM_{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2020, 41 (2): 529–536.
- [12] 毛敏娟, 孟燕军, 齐冰, 等. 浙江省城市大气污染特性研究[J]. *南京大学学报: 自然科学*, 2015, 51 (3): 499–507.
- [13] 刘帅, 宋国君. 城市 PM_{2.5} 健康损害评估研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36 (4): 1468–1476.
- [14] 肖玉, 王硕, 李娜, 等. 北京城市绿地对大气 PM_{2.5} 的消减作用[J]. *资源科学*, 2015, 37 (6): 1149–1155.
- [15] 王蕾, 高尚玉, 刘连友, 等. 北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (4): 597–601.
- [16] 陈博, 王小平, 刘晶岚, 等. 不同天气下景观生态林内外大气颗粒物质量浓度变化特征[J]. *生态环境学报*, 2015, 24 (7): 1171–1181.
- [17] 李瑞芃, 石金辉, 张代洲. 天气条件及气团来源对青岛春季大气颗粒物数浓度谱分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32 (8): 1392–1399.
- [18] 王涛, 陈云蔚, 孙小平, 等. 临安近 50 年器物变化特征分析[J]. *浙江气象*, 2009, 30 (1): 31–34.
- [19] 叶小猛, 洪冉. 临安近 50 年日照变化特征及影响因素分析[J]. *广东气象*, 2011, 33 (6): 34–37.
- [20] SUN C Y. A street thermal environment study in summer by the mobile transects technique [J]. *Theor App Climatol*, 2011, 106: 433–442.
- [21] YOKOBORI T, OHTA S. Effect of land cover on air temperatures involved in the development of an intra-urban heat island[J]. *Clim Res*, 2009, 39: 61–73.
- [22] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2014, 35 (2): 418–427.
- [23] 栾天, 郭学良, 张天航, 等. 不同降水强度对 PM_{2.5} 的清除作用及影响因素[J]. *应用气象学报*, 2019, 30 (3): 279–291.
- [24] BARMADIMOS I, KELLER J, ODERBOLZ D, *et al.* One decade of parallel fine (PM_{2.5}) and coarse (PM₁₀–PM_{2.5}) particulate matter measurements in Europe: trends and variability[J]. *Atmosph Chem Phys*, 2012, 12: 3189–3203.
- [25] TIWARI S, BISHT D S, SRIVASTAVA A K, *et al.* Variability in atmospheric particulates and meteorological effects on their mass concentrations over Delhi, India [J]. *Atmosph Res*, 2014, 145–146: 45–56.
- [26] 吴海堂, 孙丰宾, 晏海, 等. 城市公园大气颗粒物浓度的节假日特征[J]. *风景园林*, 2019, 26 (3): 87–92.
- [27] 王晓磊, 王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34 (8): 1910–1921.
- [28] LI G, WANG L H, SUN F B, *et al.* Capacity of landscaping plants to accumulate airborne particulate matter in Hangzhou, China[J]. *Pol J EnvironStud*, 2020, 29 (1): 153–161.
- [29] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (12): 3077–3082.
- [30] 郑少文, 邢国明, 李军, 等. 北方常见绿化树种的滞尘效应[J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2008, 28 (4): 383–387.
- [31] SHAO F, WANG L H, SUN F B, *et al.* Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China [J]. *Sci Tot Environ*, 2019, 652: 939–951.
- [32] 孙晓丹, 李海梅, 刘霞, 等. 不同绿地结构消减大气颗粒物的能力[J]. *环境化学*, 2017, 36 (2): 289–295.
- [33] 闫珊珊, 洪波. 公园绿地不同景观空间 PM_{2.5} 分布特征及其影响因素研究[J]. *风景园林*, 2019, 26 (7): 101–106.