

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.05.012

郑州市数码公园不同植物群落对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的影响研究

王柄权, 赵佳伦, 孙晓燕, 张凌

(河南农业大学 风景园林与艺术学院, 河南 郑州 450000)

摘要:以郑州市数码公园为例,研究不同植物群落对大气颗粒物污染的影响。2020 年 4 月—2021 年 3 月,监测郑州市数码公园内不同植物群落结构(乔灌草、乔草、乔灌、灌草、草坪)在春夏秋冬四季的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度以及温度、湿度和风速等气象因子,分析不同植物群落 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度的变化规律,并研究其与气象因子的相关性。研究表明,不同样地内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度日变化基本一致,呈早高晚低趋势。不同样地内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度均表现为秋冬季高,春夏季低;PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度高低依次为草坪和广场样地>灌草和乔草结构样地>乔灌草和乔灌结构样地;复合群落结构绿地对颗粒物滞尘能力大于单一群落结构。乔灌草、乔灌结构样地对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的阻滞率较高。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度与温度、相对湿度、风速等气象因子间呈不同相关性,PM_{2.5} 浓度与各气象因子的相关性高于 PM₁₀ 浓度。由于数码公园为紧邻城市道路的开放公园,适宜种植郁闭度较高、以常绿树种为主的植物群落类型。

关键词:城市公园;植物群落;PM_{2.5};PM₁₀;大气颗粒物浓度;气象因子;郑州

中图分类号:S718.54;TU834.6;TU986.5 文献标识码:A 文章编号:1671-3168(2023)05-0070-13

引文格式:王柄权,赵佳伦,孙晓燕,等.郑州市数码公园不同植物群落对 PM_{2.5}和PM₁₀浓度的影响研究[J].林业调查规划,2023,48(5):70-82. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.05.012

WANG Bingquan, ZHAO Jialun, SUN Xiaoyan, et al. Influence of Different Plant Communities on PM_{2.5} and PM₁₀ Concentrations in Zhengzhou Digital Park[J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(5): 70-82. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2023.05.012

Influence of Different Plant Communities on PM_{2.5} and PM₁₀ Concentrations in Zhengzhou Digital Park

WANG Bingquan, ZHAO Jialun, SUN Xiaoyan, ZHANG Ling

(College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: This paper investigated the influence of different plant communities on atmospheric particulate matter pollution based on the case of Zhengzhou Digital Park. From April 2020 to March 2021, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations and meteorological factors such as temperature, humidity, and wind speed, were monitored for different plant communities (arbor-shrub-herb, arbor-herb, arbor-shrub, shrub-herb and lawn) in Zhengzhou Digital Park in the four seasons. The variation patterns of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in different plant communities were analyzed, and their correlation with meteorological factors

收稿日期:2022-03-19.

第一作者:王柄权(1998-),男,河南郑州人,硕士研究生.研究方向为风景园林规划设计与植物应用. Email:451002962@qq.com

责任作者:张凌(1978-),女,河南开封人,博士,副教授.研究方向为风景园林规划设计与风景园林历史理论.

Email:yuanlinzhangling@henau.edu.cn

was studied. The research results indicated that the daily changes of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in different areas were basically consistent, showing a trend of high in the morning and low in the evening. The concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in different areas were high in autumn and winter, and low in spring and summer; the concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} were in the order of lawn and square plots > shrub-herb and arbor-herb plots > arbor-shrub-herb and arbor-shrub plots; the ability of composite community green space to retain particulate matter dust was stronger than that of single community. The arbor-shrub-herb and arbor-shrub plots had higher resistance to $PM_{2.5}$ and PM_{10} . The concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} had different correlation with meteorological factors such as temperature, relative humidity, and wind speed. The correlation between $PM_{2.5}$ concentration and meteorological factors was higher than that of PM_{10} concentration. The Digital Park was an open park adjacent to urban roads and suitable for planting plant communities with high canopy density and evergreen tree species.

Key words: urban park; plant community; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; concentration of atmospheric particulate matter; meteorological factor; Zhengzhou

近年来,大气颗粒物仍是世界许多城市大气环境污染的主要污染物^[1-3],根据中国环境监测总站“全国城市空气质量实施发布平台”发布的数据,河南省一直是中国空气污染最严重的地区之一,2019年全国337个地级市及以上城市中,180个城市环境空气污染超标,占比53.4%,郑州市空气质量排在后20名^[4]。根据河南省环境监测中心发布的环境质量报告显示,近年来大气颗粒物仍是郑州市大气环境污染的首要污染物^[5]。

植物可有效阻滞和吸收空气颗粒物,因此可通过合理增加城市绿化达到净化空气效果^[6]。目前,植物对空气颗粒物浓度的影响研究主要集中在植物个体、植物群落、绿地斑块等方面^[7-10],多选择单一季节进行分析^[11-14],缺少一年四季持续的研究数据。本研究从郑州市数码公园选取6个监测样地,监测其 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度及气象因子,分析不同植物群落、环境因子等与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度变化的关系,比较不同植物群落内 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度变化情况及其阻滞颗粒物的能力,筛选有效阻滞颗粒物的植物配置模式,为改善城市环境空气质量提供理论和实践依据。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域数码公园位于郑州市东北部的金水区,金水区东临中牟县,南连管城回族区、二七区,西接中原区,北靠惠济区。地理位置为东经 $113^{\circ}40' \sim 113^{\circ}47'$,北纬 $30^{\circ}50' \sim 34^{\circ}57'$ 。辖区东西最长距离22.9 km,南北最长距离17.2 km,总面积135.3 km^2 。

金水区地处北温带和亚热带气候过渡带,四季分明,日照时间长,自然降水偏少。春旱多风;夏季炎热多雨,水热同期;秋凉清爽,日照充足;冬季干燥,风多雪少。年均温 $14.8^{\circ}C$,降雨量586.1 mm,日照时数2 052.6 h。研究区域范围及监测点位置见图1。



图1 郑州金水区数码公园范围及监测点布设
Fig. 1 Scope and monitoring points layout of Digital Park in Jinshui District

研究区域内共选取6个监测样地,样地调查时采用标准样地法,通过现场调研,在具有典型代表性的植物群落中,选择生长状况良好的植物群落,包括乔灌草结构、乔草结构、乔灌结构、灌草结构、草坪结构、硬质广场(共6个类型,其中硬质广场为对照组),标记方式为数码公园乔灌草样方1标为S1样方,依此类推(表1)。路琛等^[15]选取不同植被结构

校园绿地,进行其与空气颗粒物浓度响研究,选取样地面积在 0.3~2.4 hm²,经研究得出植被面积对空气颗粒物浓度影响不显著。因此本实验在选

取样方时,样方周围是绿地还是道路对实验结果影响不大。本实验选取每个样方为 20 m × 10 m,不同植物群落情况具体见表 1 和图 2。

表 1 监测样地内植物群落情况
Tab. 1 Status of plant communities in sample plots

监测样地群落结构	编号	植物配置模式	郁闭度/%				植物盖度
			春季	夏季	秋季	冬季	
乔灌草	S1	乔木:女贞(<i>Ligustrum lucidum</i>)、楝(<i>Melia azedarach</i>) 灌木:月季(<i>Rosa chinensis</i>)、小叶黄杨(<i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i>)、紫荆(<i>Cercis chinensis</i>)、紫薇(<i>Lagerstroemia indica</i>)、海桐(<i>Pittosporum tobira</i>)、南天竹(<i>Nandina domestica</i>) 草本:沿阶草(<i>Ophiopogon bodinieri</i>)	60	65	60	58	0.7
乔草	S2	乔木:国槐(<i>Styphnolobium japonicum</i>)、桂花(<i>Osmanthus fragrans</i>) 草本:地毯草(<i>Axonopus compressus</i>)	57	60	36	30	0.5
乔灌	S3	乔木:悬铃木(<i>Platanus acerifolia</i>)、龙爪槐(<i>Sophora japonica</i> var. <i>japonica</i> f. <i>pendula</i>)、白皮松(<i>Pinus bungeana</i>) 灌木:小叶黄杨	30	34	31	25	0.8
灌草	S4	灌木:大叶黄杨(<i>Buxus megistophylla</i>)、紫薇、银薇(<i>Lagerstroemia indica</i> f. <i>alba</i>)、南天竹(<i>Nandina domestica</i>)、红叶石楠(<i>Photinia × fraseri</i>) 草本:狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>)	—	—	—	—	0.4
草坪	S5	草本:狗牙根	—	—	—	—	0.5
硬质广场(对照)	S6	—	—	—	—	—	

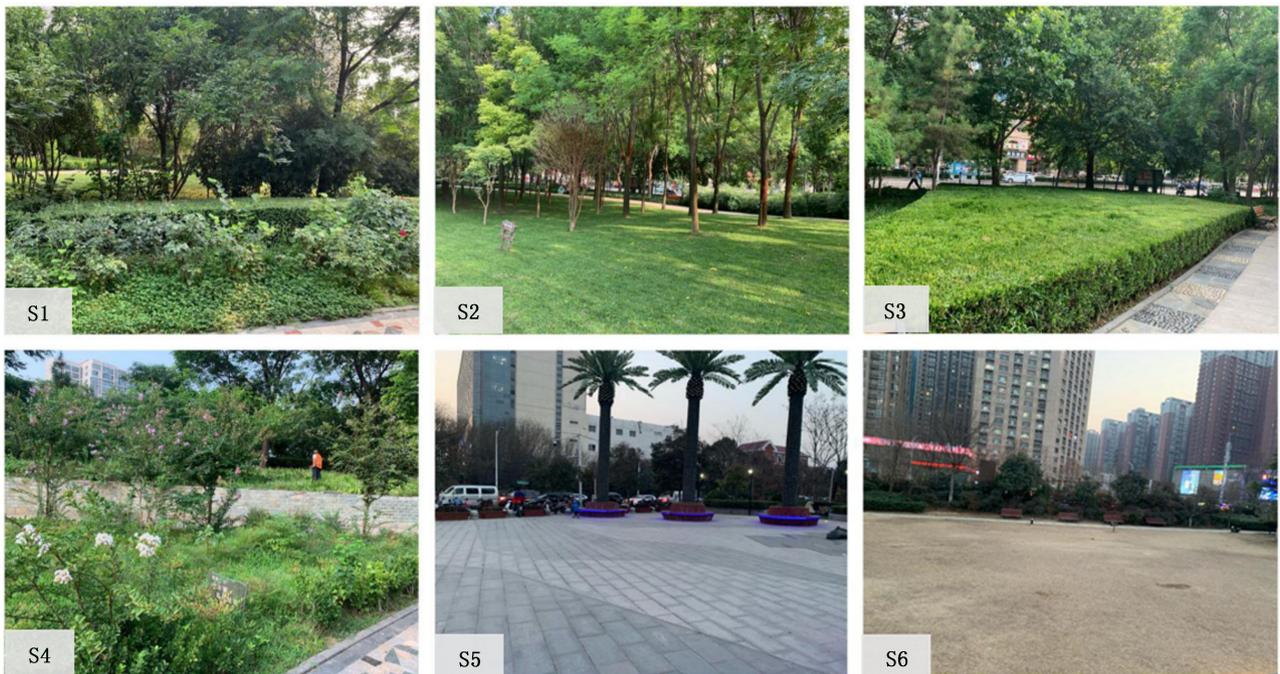


图 2 郑州数码公园不同监测样地植物群落情况

Fig. 2 Monitoring sample plots of plant communities in Digital Park

1.2 研究方法

在天气晴朗微风条件下,2020 年 5 月至 2021 年

3 月,每月 3 d,对数码公园不同监测样地内 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度、气象因子进行监测(8:00—18:00),每

隔2 h监测一次。本研究中3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12—次年2月为冬季。PM_{2.5}、PM₁₀浓度监测采用英国Turnkey仪器公司生产的Dustmate粉尘监测仪,每2 h的整点同步测定各监测样地人体呼吸高度1.5 m处PM₁₀、PM_{2.5}浓度,每个时间点在东西南北4个方向测取4次。阻滞能力用阻滞率 P_n 来表示,其能直接反应各监测样地的颗粒净化效益,计算公式为:

$$P_n = (C_0 - C_n) / C_0 \quad (1)$$

式中: C_0 为对照点处空气颗粒物质量浓度; C_n 为公园内不同监测点空气颗粒物质量浓度。

采用美国产Kestrel 4500手持自动气象仪,测定各监测样地气温、相对湿度、风速等气象因子,每次在整点前后10 min内完成并在东西南北4个方向进行4次重复,测定高度为1.5 m。

实验数据导出后,采用Excel软件进行统计运算并整合数据,计算日、月、季平均PM_{2.5}、PM₁₀浓度;运用ORIGIN绘制PM_{2.5}、PM₁₀浓度日变化及季节变化曲线;运用SPSS进行不同植物群落PM_{2.5}、PM₁₀浓度的多重比较及方差分析,以及气象因子与PM_{2.5}、PM₁₀浓度的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落内PM_{2.5}、PM₁₀浓度日变化

测定不同植物群落内PM_{2.5}、PM₁₀浓度日变化,见图3。

如图3所示,春夏秋冬4个季节数码公园中不同植物群落内PM_{2.5}浓度日变化均呈现早高晚低的特征。春季一般为早晨8:00时PM_{2.5}浓度最高,下午16:00时浓度最低;而PM₁₀则为早晨10:00—12:00时浓度最高,下午16:00时浓度最低;夏季各样地的PM_{2.5}和PM₁₀浓度变化趋势基本相似,均呈L型变化,显示为早高晚低;秋季各样地内PM_{2.5}、PM₁₀浓度最大值为早晨10:00时,最小值为下午16:00—18:00时;冬季各监测各样地PM_{2.5}、PM₁₀浓度日变化情况与春夏秋季变化趋势均不相同,PM_{2.5}、PM₁₀浓度均在早晨8:00或10:00时达最大值,在下午14:00或16:00时最低,且冬季各样地PM₁₀、PM_{2.5}浓度明显高于其他3个季节。不同季节中S5和S6样地PM_{2.5}、PM₁₀浓度明显高于其他4个样地,这是由于S6样地为广场区域,人流量较大,造成颗粒物浓度明显大于其他场地;同样S5为单一草坪结构,颗粒物浓度较高,但春季回暖,

植物复苏,长势良好,草坪也具有一定滞沉能力,因此浓度略低于广场区域。

2.2 不同植物群落内PM_{2.5}、PM₁₀浓度季节变化

测定不同样地内PM_{2.5}、PM₁₀浓度季节变化,见图4。

如图4所示,各样地PM_{2.5}和PM₁₀浓度高低依次为冬季>秋季>春季>夏季,具有明显的差异性,且冬季的标准差较大,说明冬季空气颗粒物浓度不稳定,这与冬季供暖、燃煤量增加以及冬季植物叶片脱落有关。

2.2.1 春季不同植物群落内PM_{2.5}、PM₁₀浓度差异性分析

对数码公园不同样地PM_{2.5}、PM₁₀浓度进行单因素方差分析,得出PM_{2.5}的 F 值为6.419, $P < 0.05$ 。从总的浓度变化来看,春季数码公园不同样地间PM_{2.5}浓度存在显著差异(图5)。

由图5可知,S1、S2、S3、S4样地间无显著差异,与S5、S6样地间存在显著差异。PM₁₀的 F 值为9.286, $P < 0.05$,其差异性与PM_{2.5}方差检验结果相似。

综合以上结果,样地S1为PM_{2.5}浓度最低的样地,该样地植物群落为乔灌草结构,半闭合阔叶多层结构,最下层密被沿阶草,灌木层植物层次丰富,郁闭度也相对较高为60%;S3样地为PM₁₀浓度最低的样地,且PM_{2.5}浓度较S1样地也相差无几,该样地为针阔叶混交林多层结构,郁闭度为32%,下层密被小叶黄杨,林下植物盖度较高,虽郁闭度不高,但针阔叶混交林阻滞颗粒物的能力较强,因此使得颗粒物浓度降低;S5和S6样地颗粒物浓度较高,因为数码公园广场位于公园主入口,紧邻道路,人车流量大,且公园几处高大的模型树无滞尘作用;草坪区域紧邻儿童游乐区,草坪单一且面积过大。

2.2.2 夏季不同植物群落内PM_{2.5}、PM₁₀浓度差异性分析

数码公园不同样地夏季PM_{2.5}浓度经单因素方差分析可知 F 值为4.527, P 值为0.047 < 0.05 ;PM₁₀浓度的 F 值为4.697, P 值为0.043 < 0.05 (图6)。

如图6所示,夏季数码公园不同样地间PM_{2.5}浓度存在显著差异,S1与S5样地差异性最大;不同样地间PM₁₀浓度也存在显著差异。夏季不同样地PM_{2.5}与PM₁₀浓度高低依次为S5>S6>S4>S2>S3>S1。

春季PM_{2.5}浓度最低为S1样地,PM₁₀浓度最低为S3样地,与夏季相似,但夏季S1样地的滞尘能力强于春季,因为夏季植物生长茂盛,叶片滞尘能力增强。

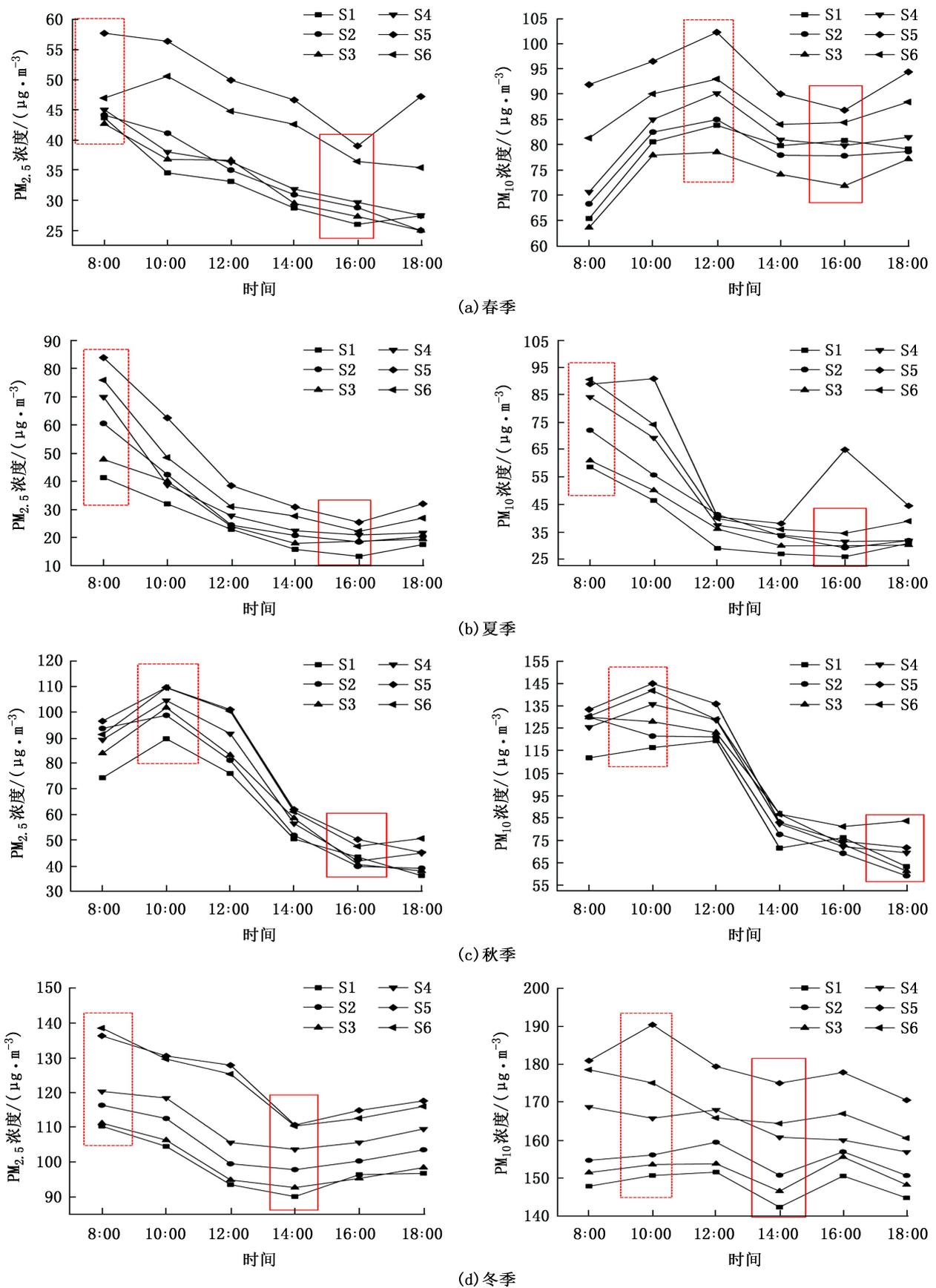


图 3 不同季节不同植物群落内 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度日变化

Fig. 3 Daily variation of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in different plant communities in different seasons

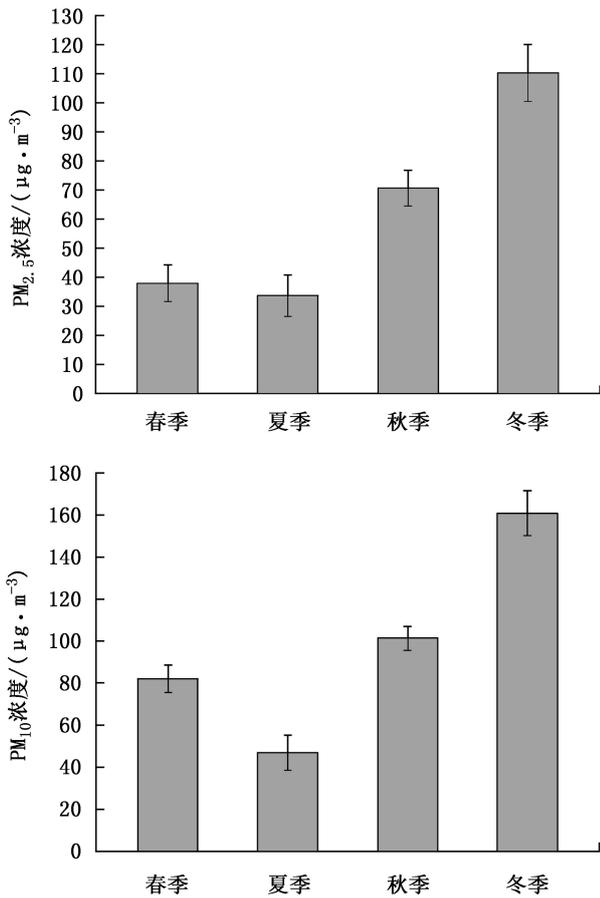
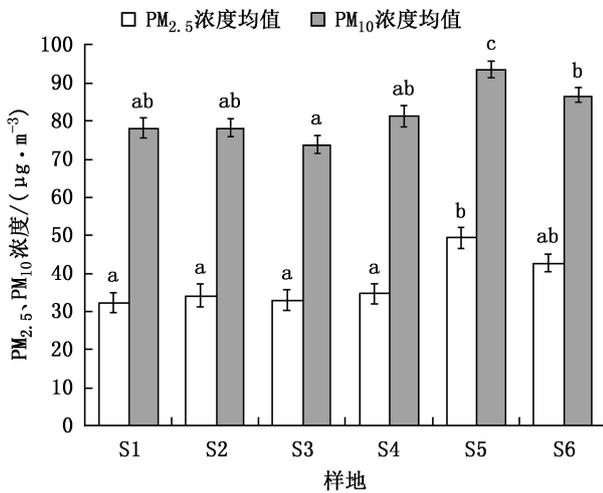


图 4 郑州数码公园不同样地内 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度季节变化
 Fig. 4 Seasonal variation of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in different areas



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 5 郑州数码公园春季不同植物群落内 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度方差分析与多重比较
 Fig. 5 Variance analysis and multiple comparisons of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in different plant communities in spring

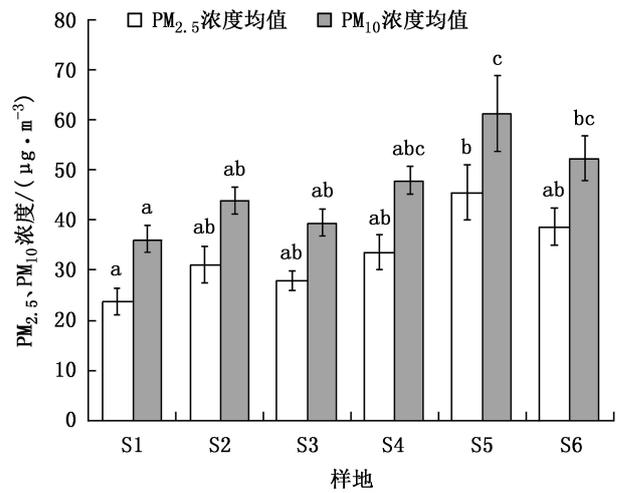


图 6 郑州数码公园夏季不同植物群落内 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度方差分析与多重比较
 Fig. 6 Variance analysis and multiple comparisons of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in different plant communities in summer

2.2.3 秋季不同植物群落内 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度差异性分析

数码公园不同样地秋季 PM_{2.5} 浓度经单因素方差分析可知 F 值为 3.348, P 值为 $0.016 < 0.05$; PM₁₀ 浓度的 F 值为 2.802, P 值为 $0.034 < 0.05$ (图 7)。

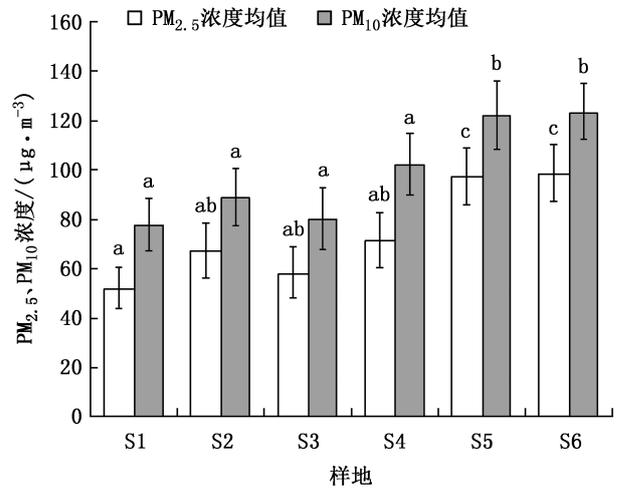


图 7 郑州数码公园秋季不同植物群落内 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度方差分析与多重比较
 Fig. 7 Variance analysis and multiple comparisons of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in different plant communities in autumn

如图 7 所示,秋季依然为 S1 与 S5、S6 样地间差异最大;秋季不同样地 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度高低依次为

S6 > S5 > S4 > S2 > S3 > S1。

结果表明 S1 样地浓度最低,与春夏季基本相同,但春夏季均为 S5 样地的颗粒物浓度最高,而秋季则为 S6 样地,这是由于秋季植物会出现季相变化,该样地草坪在秋季变得干枯,因此滞尘效果减弱。

2.2.4 冬季不同植物群落内 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度差异性分析

数码公园不同样地冬季 PM_{2.5} 浓度经单因素方差分析可知 F 值为 9.383, P 值 < 0.05; PM₁₀ 浓度的 F 值为 32.350, P 值 < 0.05(图 8)。

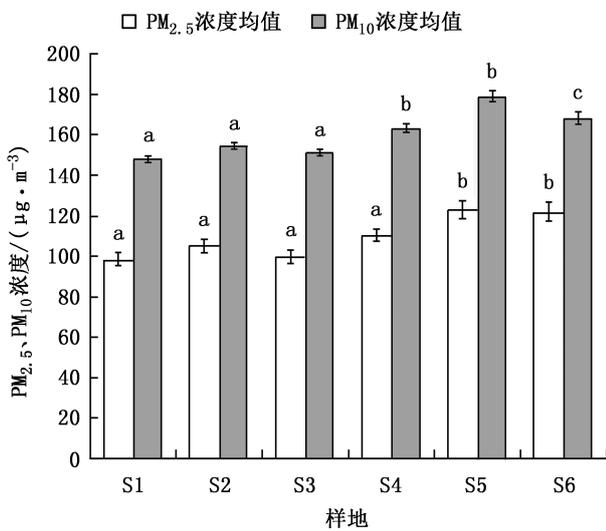


图 8 郑州数码公园冬季不同植物群落内 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度方差分析与多重比较

Fig. 8 Variance analysis and multiple comparisons of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in different plant communities in winter

如图 8 所示,冬季不同样地间 PM_{2.5} 浓度和 PM₁₀ 无显著差异,冬季不同样地 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度高低依次为 S5 > S6 > S4 > S2 > S3 > S1。

从上述结果可得出四季均为 S1 样地 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度最低。但整体上冬季颗粒物浓度明显高于其他季节,这是由于冬季易出现雾霾天气,逆温层也频繁出现,空气颗粒物不易扩散,植物开始进入休眠阶段,导致颗粒物浓度增高。

2.3 不同植物群落阻滞 PM_{2.5}、PM₁₀ 能力分析

2.3.1 不同植物群落阻滞 PM_{2.5} 的能力分析

根据研究方法中阻滞率计算公式得出不同样地对 PM_{2.5} 污染物的阻滞率(图 9)。

如图 9 所示,不同样地中乔灌草结构的阻滞率最高,灌草和草坪结构最低,且乔灌草、乔草、乔灌、

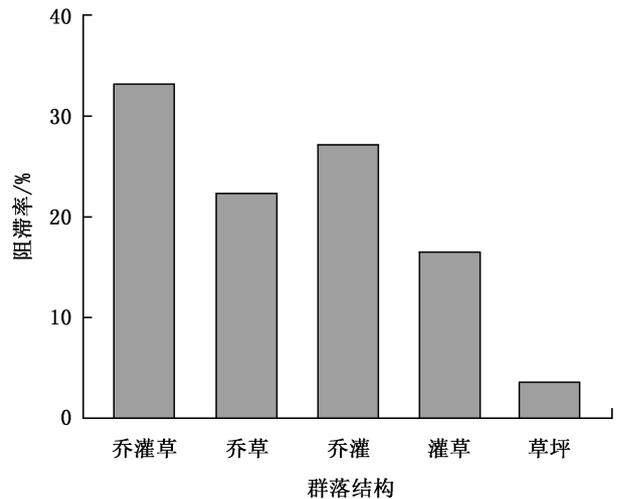


图 9 不同植物群落对 PM_{2.5} 阻滞情况

Fig. 9 Retention of different plant communities to PM_{2.5}

灌草、草坪结构对 PM_{2.5} 的阻滞率分别为 33.13%、22.25%、27.12%、16.47%、3.57%。植物群落的郁闭度和林下覆盖率是影响植物群落阻滞大气颗粒物能力高低的重要因素之一,郁闭度在 80% 左右表现出较好的阻滞作用,增加林下植物数量或盖度能更好地阻滞大气颗粒物^[14]。S1 和 S3 样地郁闭度和植物盖度均较高,因为常绿树种较多,春夏秋季郁闭度均较高且变化不大,因此这两个样地对 PM_{2.5} 阻滞率较高。

2.3.2 不同植物群落阻滞 PM₁₀ 的能力分析

数码公园不同植物群落对 PM₁₀ 的阻滞率具体见图 10。

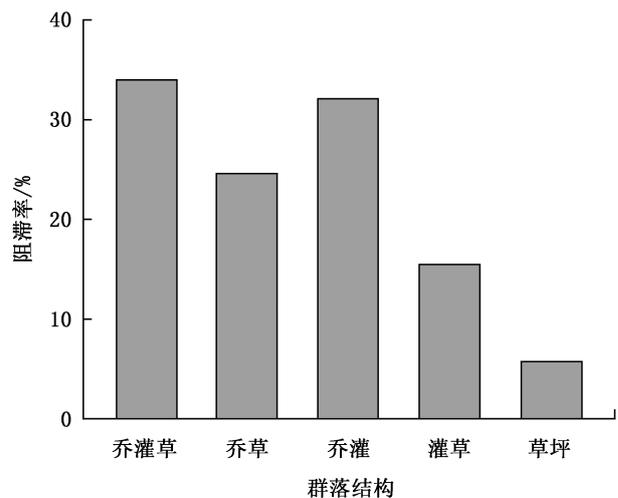


图 10 不同植物群落对 PM₁₀ 阻滞情况

Fig. 10 Retention of different plant communities to PM₁₀

如图 10 所示,不同植物群落对 PM_{10} 的阻滞情况与不同样地对 $PM_{2.5}$ 阻滞情况相同。乔灌木、乔草、乔灌、灌木、草坪结构对 PM_{10} 的阻滞率分别为 33.98%、24.59%、32.10%、15.47%、5.775%。其中乔灌木、乔灌结构的阻滞率较高。

因此根据不同样地对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 阻滞的整体情况,说明复合群落结构的绿地对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 阻滞率大于单一结构群落结构的绿地。

2.4 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与部分气象因子的相关性分析

2.4.1 温度与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的相关性分析

不同季节数码公园不同样地 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度与温度相关关系分析见图 11。

如图 11 所示,春季温度会持续上升至 16:00 时有微弱下降。 $PM_{2.5}$ 浓度则持续下降直到 16:00 时达到最低值后趋于稳定。而 PM_{10} 浓度变化趋势与温度变化无明显相关关系。春季温度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关关系 ($P < 0.01$),线性拟合方程为 $y = 1.7067x + 75.882$,决定系数 (R^2) 为 0.183。

夏季温度较高,且波动较大。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均随温度的升高而降低。夏季温度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关关系 ($P < 0.01$),线性拟合方程为 $y = -4.6448x + 80.4$,决定系数 (R^2) 为 0.121,温度与 PM_{10} 浓度同样呈负相关关系 ($P = 0.008 < 0.01$),线性拟合方程为 $y = -4.9433x + 207$,决定系数 (R^2) 为 0.06,拟合程度较弱。由于夏季处于高温、高湿状态, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度受多种因素影响,导致拟合数据离散程度高。

秋季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度先升高后降低,随后再次微弱上升后趋于稳定。对秋季 $PM_{2.5}$ 浓度与温度数据进行线性回归分析后发现,温度与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度均呈负相关关系 ($P < 0.01$), $PM_{2.5}$ 线性回归方程为 $y = -4.0882x + 144.14$,决定系数 (R^2) 为 0.2436, PM_{10} 线性回归方程式为 $y = -2.8451x + 147.18$,决定系数 (R^2) 为 0.1378。综合来看 $PM_{2.5}$ 浓度与温度的拟合度要高于 PM_{10} 浓度。

冬季温度先升高后降低。 $PM_{2.5}$ 浓度则先降低后升高,对冬季 $PM_{2.5}$ 浓度与温度数据进行线性拟合后发现,温度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关关系 ($P < 0.01$),线性回归方程为 $y = -5.0311x + 126.83$,决定系数 (R^2) 为 0.2164。而 PM_{10} 浓度与温度间无明显相关性 ($P = 0.063 > 0.01$)。此变化可能与冬季供暖、燃煤量增加有关。

综合以上结果可得出,在春夏秋冬四季 $PM_{2.5}$ 浓度与温度均呈负相关,而仅在夏秋季 PM_{10} 浓度与温度呈负相关,春冬季无相关性,且 $PM_{2.5}$ 浓度与温度的相关性要高于 PM_{10} 浓度。

2.4.2 相对湿度与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的相关性分析

不同季节数码公园不同样地 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度与相对湿度相关关系分析见图 12。

如图 12 所示,春季相对湿度会从 87% 下降至约 28%。 $PM_{2.5}$ 浓度一直处于下降状态,最终达 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$;而 PM_{10} 浓度变化无规律。春季 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度与相对湿度的线性回归分析可知, $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度间呈显著正相关 ($P < 0.01$),线性回归方程为 $y = 0.7899x + 14.222$,决定系数 (R^2) 为 0.207; PM_{10} 浓度则与相对湿度间无相关性 ($P = 0.829 > 0.01$)。

夏季相对湿度先降至 58% 后再升至 63.2%。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化趋势与相对湿度变化基本一致,先大幅下降后保持平稳。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与相对湿度间呈显著正相关, $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度的线性回归方程为 $y = 0.6124x - 2.7558$,决定系数 (R^2) 为 0.1211 ($P < 0.01$); PM_{10} 浓度与相对湿度的线性回归方程为 $y = 0.9785x - 8.3975$,决定系数 (R^2) 为 0.1425 ($P < 0.01$)。

秋季相对湿度变化与 $PM_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度“波谷”出现时间大约有 1 h 时间差,并且相对湿度开始上升时, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度开始处于平稳。秋季相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度间呈正相关关系 ($P < 0.01$),线性拟合方程为 $y = 0.8882x + 14.742$,决定系数 (R^2) 为 0.177;与 PM_{10} 间相关性不强 ($P = 0.027 < 0.05$),其线性拟合方程为 $y = 0.362x + 70.939$,决定系数 (R^2) 为 0.0348,拟合度较低。

冬季相对湿度先降低后升高。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化也出现同样趋势。冬季相对湿度与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度间呈正相关关系 ($P < 0.01$), $PM_{2.5}$ 与相对湿度的线性拟合方程为 $y = 2.0431x + 11.59$,决定系数 (R^2) 为 0.4069; PM_{10} 与相对湿度的线性拟合方程为 $y = 1.5192x + 85.963$,决定系数 (R^2) 为 0.165。 $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度的拟合度更高。

综合上述结果,春夏秋冬 4 个季节的 $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度间均呈显著正相关,而仅在夏季和冬季 PM_{10} 浓度与相对湿度间呈显著正相关,在春秋两季两者间无相关性。

2.4.3 风速与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的相关性分析

不同季节数码公园不同样地 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度与风速的相关关系分析见图 13。

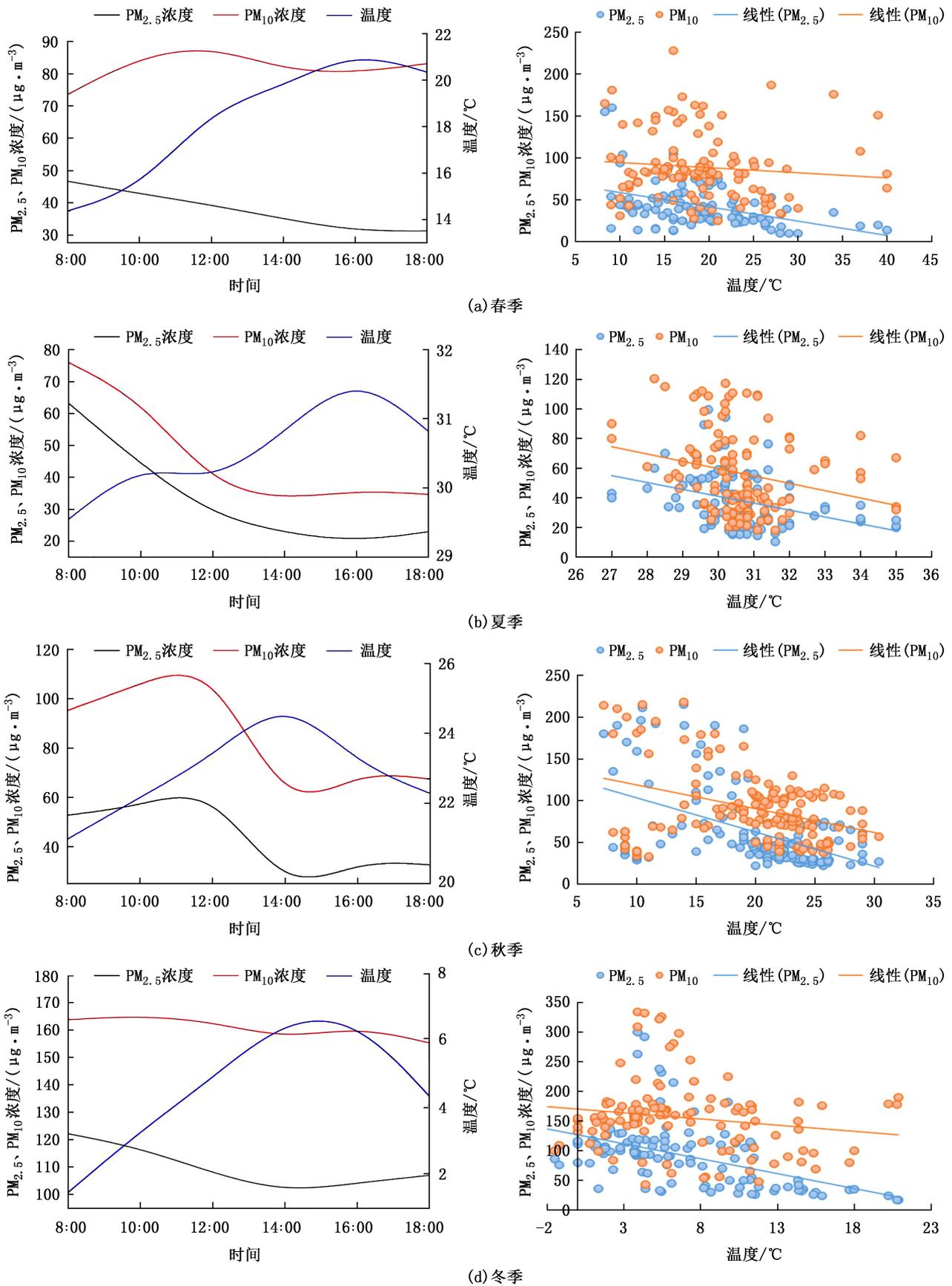


图 11 不同季节数码公园 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度与温度相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations and temperature in different seasons

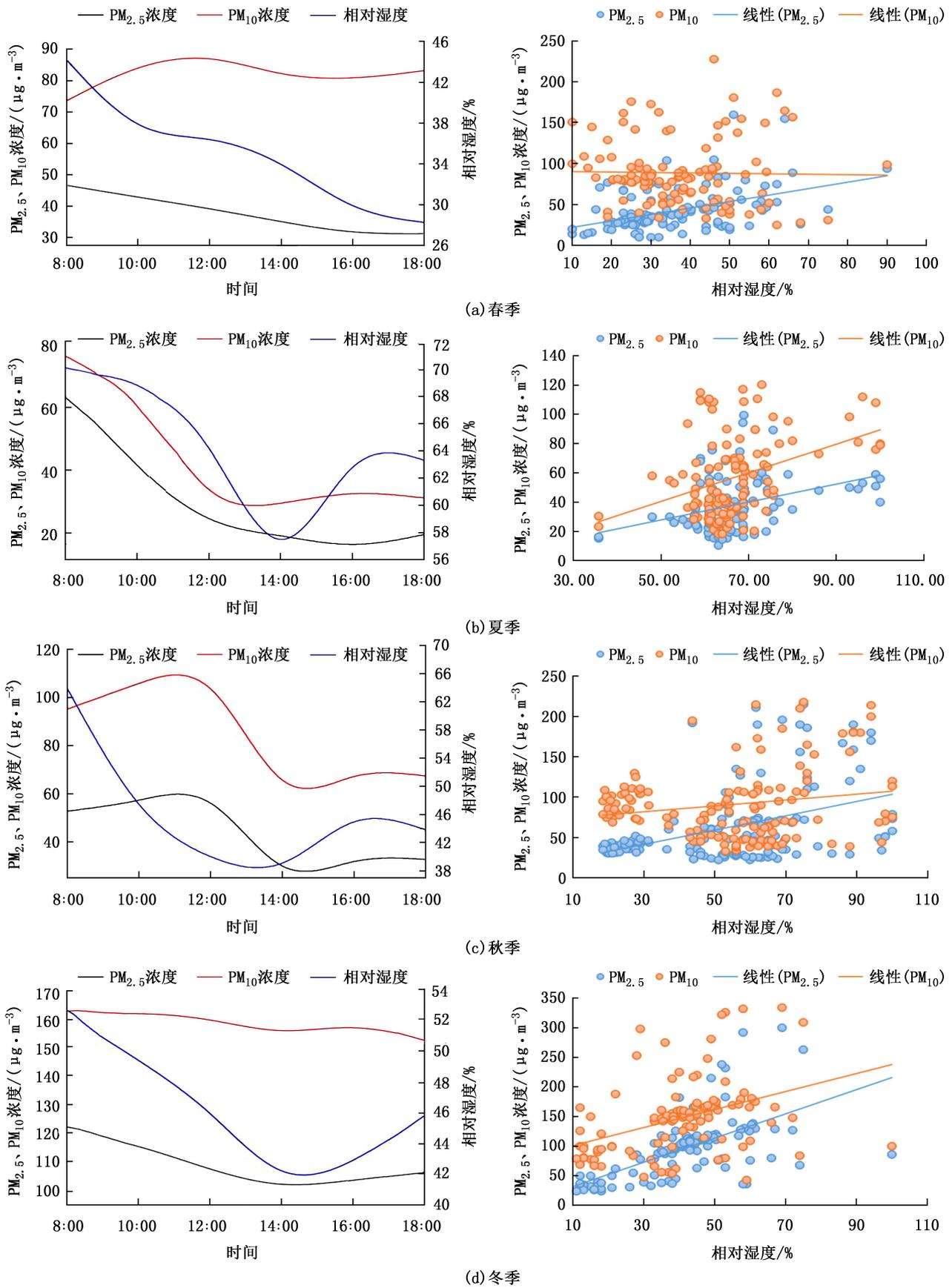


图 12 不同季节数码公园 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度与湿度相关性分析

Fig. 12 Correlation analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations and humidity in different seasons

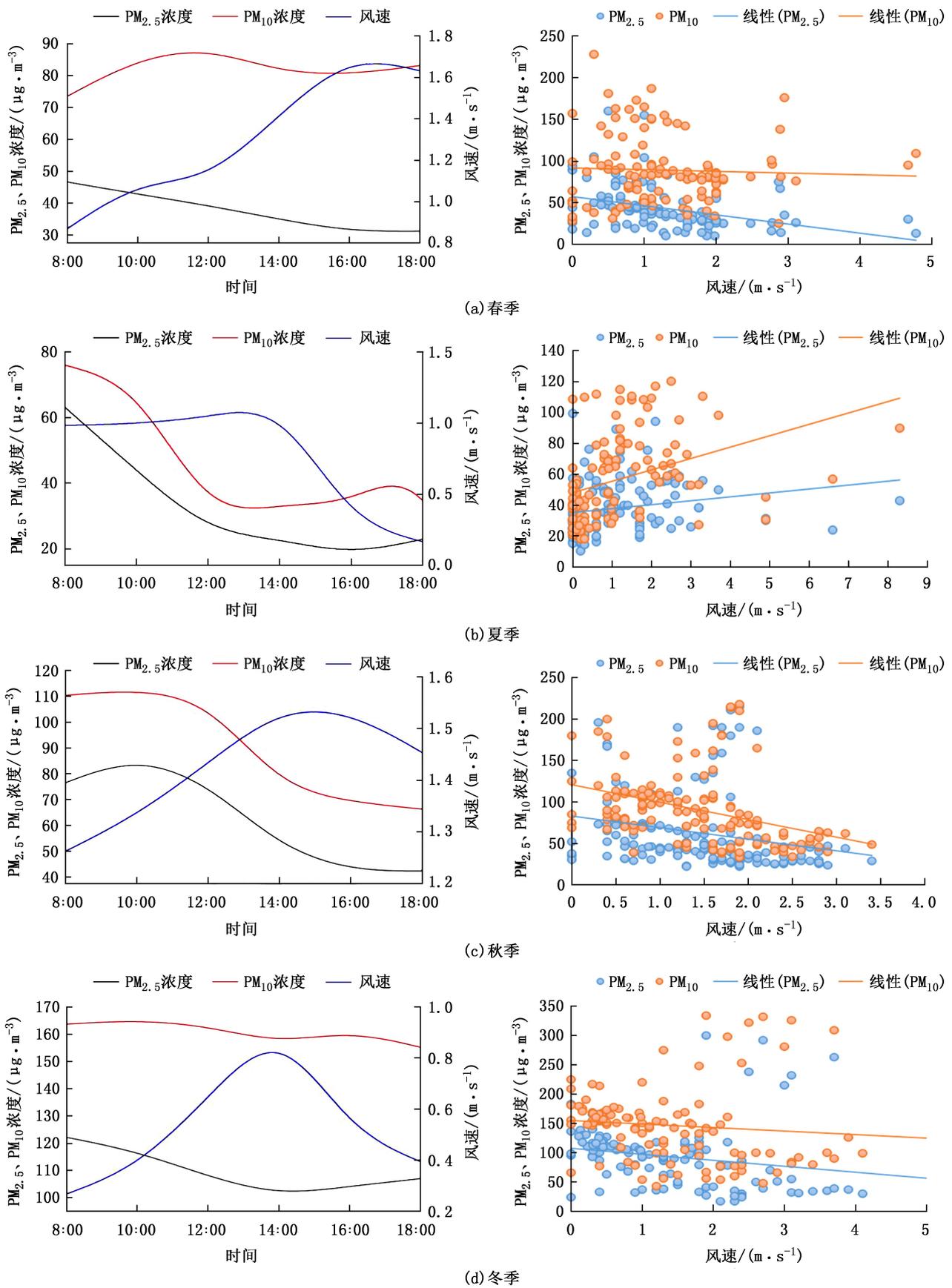


图 13 冬季数码公园 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度与风速相关性分析

Fig. 13 Correlation analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations and wind speed in winter

如图 13 所示,春季风速变化趋势为先增大后减小。期间 $PM_{2.5}$ 浓度下降较快,而 PM_{10} 浓度变化不随风速的变化而变化。 $PM_{2.5}$ 浓度与风速间呈负相关($P < 0.01$), PM_{10} 浓度与风速间无相关性($P = 0.645 > 0.05$); $PM_{2.5}$ 浓度与风速的线性拟合方程为 $y = -10.978x + 57.277$,决定系数(R^2)为 0.129, $PM_{2.5}$ 浓度与风速的线性拟合方程为 $y = -2.0354x + 91.576$,决定系数(R^2)为 0.0019。

夏季风速多处于 0~1 m/s,与春季不同,夏季 $PM_{2.5}$ 浓度与风速间呈正相关($P = 0.041 < 0.05$), PM_{10} 浓度与风速间同样呈正相关($P < 0.05$)。 $PM_{2.5}$ 浓度与风速的拟合方程为 $y = 2.5351x + 35.346$,决定系数(R^2)为 0.0359,拟合程度较弱, PM_{10} 浓度与风速的线性拟合方程为 $y = 7.3729x + 48.204$,决定系数(R^2)为 0.1325。夏季风速较小,持续时间短,且植被茂盛,使得颗粒物难以扩散,导致 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度增大。

秋季风速与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度变化趋势相反。 $PM_{2.5}$ 浓度与风速间呈负相关($P = 0.007 < 0.05$)。 $PM_{2.5}$ 浓度与风速的线性拟合方程为 $y = -13.967x + 82.95$,决定系数(R^2)为 0.0514, PM_{10} 浓度与风速间也呈负相关($P < 0.05$), PM_{10} 浓度与风速的线性拟合方程为 $y = -21.081x + 120.77$,决定系数(R^2)为 0.1367。

冬季风速先增大后减小。 $PM_{2.5}$ 浓度在持续下降后趋于平稳,但相较于秋季变化幅度不大; PM_{10} 浓度在一天中的变化幅度较小,与风速间无相关性。 $PM_{2.5}$ 浓度与风速间呈负相关($P < 0.05$),线性拟合方程为 $y = -10.207x + 107.5$,决定系数(R^2)为 0.052,线性拟合度弱; PM_{10} 与风速间无相关性,线性拟合方程为 $y = -5.9925x + 154.95$,决定系数(R^2)为 0.013,拟合度弱。

综合以上结果, $PM_{2.5}$ 浓度在春秋冬季与风速间呈负相关,在夏季与风速间呈正相关,在夏季 PM_{10} 浓度与风速间呈正相关,在秋季与风速间呈负相关,其他季节无相关性。

3 结论与讨论

3.1 不同植物群落内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的时间变化

本研究得出 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度日变化一般呈现早高晚低的特征,这与多数学者的研究相似^[8,16-18]。造成 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度日变化的主要原因是夜晚低气温易产生逆温层,空气颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 在底层沉淀聚集,导致观测初始的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度较高;太阳升起后,地温逐渐升高,形成暖气团,携带细

颗粒物逐渐上升到高度 1.5 m 以上,因此不同样地 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度变化总体呈下降趋势^[19]。

季节变化中,不同样地 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度均表现为秋冬季高、春夏季低,与一些研究^[5,16-17,20]得出的结果夏秋季低、春冬季高略有不同。造成变化不同的原因可能是 2020 年初疫情较为严重,人车限制流动,1—3 月期间公园人车流动相比平时大幅减少,本研究监测是从 2020 年 4 月开始,4、5 月各功能区人车流动不大,使得在此期间环境中颗粒物浓度受影响程度较小,春季不同样地 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度较低;秋季植物开始落叶,植物的滞尘能力下降,冬季空气对流能力减弱,不利于颗粒物扩散,并且受植物落叶以及生长缓慢的影响,使得植物叶片吸附空气颗粒物的能力下降,所以秋冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度最高^[15]。

不同季节不同植物群落内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度存在显著差异,其中广场样地(S6)的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度与其他样地相比差异最显著。研究表明增加林下植物的数量或盖度可以更好的消减空气颗粒物,增加植物群落的种植密度和郁闭度可以调节其滞尘能力^[7]。

3.2 不同植物群落阻滞 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的能力分析

通过对各功能区植物群落对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度阻滞能力的分析,发现改善空气颗粒物浓度和居民舒适度,要合理设计休憩区域的遮阴空间,合理搭配落叶乔木和常绿乔木的比例,建议在休息区或污染较重的区域多种植乔灌木结构植被,且要有一定数量的常绿乔木,以此来保证秋冬季植物群落的滞尘能力。张琳等^[21]对郑州城市园林植物群落物种多样性进行研究,同样提出要注意丰富植物群落垂直结构层次的建议。在有限的条件内也可选择灌木结构植被,但要注意灌木结构的植物盖度,尽量保证较高的植物盖度;在绿地建设中,多层结构的绿地要优于单层结构的绿地,草坪结构作为最后的选择。不同植物具有不同的阻滞效率,也会影响其对颗粒物的阻滞作用^[22],杜万光^[7]从不同尺度研究了北京公园绿地颗粒物变化特征,得出不同种类植物个体滞尘具有明显差异性,而具有最强颗粒物滞留能力的植物不一定在植物群落阻滞率最高,这是由许多因素引起的,如植物群落的种植密度、群落结构等。因此后期要多从植物群落或绿地斑块等方面综合进行研究。

3.3 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与气象因子的相关性分析

$PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度与气象因子间有显著相关关系,但均存在一定阈值。本研究得出温度与颗粒物浓度间呈负相关,与王誉洁等^[8]研究结果基本一

致,主要原因是受太阳辐射的影响,气温升高,颗粒物随着空气对流向上扩散,进而使得 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度降低。有学者在研究中发现,温度过高时颗粒物浓度与温度呈正相关关系^[23],与本研究结果有所不同,这是由于高温会使植物发生剧烈光化学反应,使 $PM_{2.5}$ 浓度上升。有学者研究得出,降雨天气会使相对湿度升高,能有效去除污染颗粒物^[24]。而本研究是在一些限制条件下进行的,选取晴朗天气进行监测,相对湿度升高会聚集更多污染颗粒物^[25],因此得出颗粒物浓度与相对湿度呈正相关关系。本研究中风速在春秋冬季与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度呈负相关关系,而在夏季呈正相关关系,风速要达到一定阈值且保持一段时间才能有效降低 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度^[8],而夏季风速小,持续时间短,植物群落内颗粒物很难在短时间内被清除,可能使内部颗粒物堆积,导致颗粒物浓度增高。春秋冬季风速较大,尤其秋冬季节风速增大,利于颗粒物扩散。

数码公园内影响 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度监测的因素较多,除受自然因素和人为因素影响外,还与环境内部的布局、水体、建筑的容积率等有密切关系。此外,本研究仅监测人体呼吸高度 1.5 m 处的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度,今后可增加不同高度下各监测点的颗粒物浓度,在测量时间和仪器的限制下,研究还存在一些不足。关于人车流量、微生物等对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] ZANOBBETTI A, SCHWARTZ J. The effect of fine and coarse particulate air pollution on mortality: A national analysis [J]. *Environ Health Perspect*, 2009, 117(6): 898-903.
- [2] TALLIS M, TAYLOR G, SINNETT D, et al. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2011, 103(2): 129-138.
- [3] 包红光. 城市公园绿地内空气颗粒物浓度时空变化规律 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [4] 中国环境监测总站, 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国生态环境状况公报 [R]. 北京: 生态环境部, 2019.
- [5] 王翠连, 张军, 郑瑶, 等. 郑州城区 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征及其对气象因子的响应 [J]. *环境保护科学*, 2019, 45(6): 76-83.
- [6] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 与植被关系的研究综述 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2203-2210.
- [7] 杜万光. 不同尺度下北京公园绿地颗粒物变化特征及影响因子研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [8] 王誉洁. 居住区绿地内空气 $PM_{2.5}$ 浓度的动态变化及影响因素 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [9] 胡泽威. 浙江农林大学校园不同空间绿地植物群落 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [10] 贾雨龙. 北京市四种道路防护林内 $PM_{2.5}$ 浓度变化规律研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [11] 王晓磊, 王成, 古琳, 等. 春季不同天气城市街头绿地内 $PM_{2.5}$ 浓度分布特征研究 [J]. *生态环境学报*, 2014(6): 972-978.
- [12] 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.
- [13] 刘宇, 黄旭, 偶春, 等. 夏季不同结构绿地空气 $PM_{2.5}$ 浓度与气候因子关系 [J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(5): 241-245.
- [14] 杨琰, 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(7): 2076-2083.
- [15] 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(8): 113-118.
- [16] 张羽, 张振明, 杨汀昱, 等. 近地表不同下垫面大气颗粒物浓度变化特征 [C]//《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(下册). 北京: 工业建筑杂志社有限公司, 2019: 5.
- [17] 依再提古丽·外力, 王明力, 杨建军, 等. 2015—2018 年乌鲁木齐市 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 时空分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1749-1757.
- [18] 张建设, 冯万富, 史晓海, 等. 不同绿地结构对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的削减作用 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(21): 302-304.
- [19] 戴菲, 陈明, 朱晟伟, 等. 街区尺度不同绿化覆盖率对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的削减研究——以武汉主城区为例 [J]. *中国园林*, 2018(3): 105-110.
- [20] 马格, 田国行, 李永华, 等. 郑州市气象因子对大气颗粒物浓度的影响研究 [J]. *气象与环境科学*, 2018, 41(3): 29-38.
- [21] 张琳, 孟亚南, 王佩佩, 等. 郑州城市园林植物群落物种多样性研究 [J]. *林业资源管理*, 2017(6): 72-76.
- [22] 鲁敏, 李英杰. 部分园林植物对大气污染物吸收净化能力的研究 [J]. *山东建筑工程学院学报*, 2002(2): 45-49.
- [23] 曾凡. 武汉市光谷局域地区环境空气中颗粒物分布特征研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [24] 吴志萍. 城市不同类型绿地空气颗粒物浓度变化规律的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [25] 古孜扎尔·米吉提. 乌鲁木齐冬季南部大气 $PM_{2.5}$ 化学组成特征及来源分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.

责任编辑: 陈旭