

武汉园林绿地调控 PM_{2.5} 效果研究

史红文, 刘淑超, 邓永成, 李苗, 孙巧峰 (武汉市园林科学研究院, 湖北武汉 430081)

摘要 [目的]研究城市园林绿地对大气中 PM_{2.5} 的调控效果和作用机理。[方法]选择武汉市 4 块城市园林绿地为监测点,通过对 3 块(蛇山绿地、科普公园、青山公园)绿地内外 PM_{2.5} 瞬时浓度的监测,分析不同时刻、不同季节、不同距离园林绿地消减 PM_{2.5} 的效果。对 2 块城市园林绿地(蛇山绿地、湖北大学)进行群落结构调查、PM_{2.5} 累积浓度测定及成分解析,分析园林绿地群落结构特征与调控 PM_{2.5} 之间的关系、绿地内外 PM_{2.5} 累积浓度特征、武汉城区 PM_{2.5} 的主要成分。[结果]在白天不同时刻,园林绿地对 PM_{2.5} 都具有消减作用,除蛇山绿地,科普公园和青山公园在 11:00 消减调控最强。园林绿地在不同季节对消减 PM_{2.5} 具有显著效果,蛇山绿地和科普公园秋季优于春夏季,青山公园无季节性差异。在不同距离上,园林绿地在 35~45 m 对 PM_{2.5} 调控效果显著。园林绿地面积和群落特征对调控 PM_{2.5} 有较大的影响,群落面积较大、结构完整、郁闭度高的群落对大气中的 PM_{2.5} 调控能力较高。蛇山绿地道路 PM_{2.5} 累积浓度高于绿地内部,湖北大学绿地内外 PM_{2.5} 累积浓度呈随机性,无规律性。蛇山绿地和湖北大学绿地 PM_{2.5} 主要成分为有机碳、无机碳、水溶性离子、金属元素,绿地内外各种成分比例差异较小。[结论]园林绿地对大气 PM_{2.5} 的消减率受到大气 PM_{2.5} 浓度、季节、时段以及距离 PM_{2.5} 源的远近等多种因素的影响。

关键词 园林绿地;调控;PM_{2.5};武汉

中图分类号 S731.2 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)11-0101-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.11.026



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on PM_{2.5} Control Effect of Green Space in Wuhan

SHI Hong-wen, LIU Shu-chao, DENG Yong-cheng et al (Wuhan Institute of Landscape Architecture, Wuhan, Hubei 430081)

Abstract [Objective]To study the control effect and mechanism of urban green space on PM_{2.5} in atmosphere. [Method]We selected four urban green spaces in Wuhan as monitoring points. Through monitoring the instantaneous concentration of PM_{2.5} inside and outside three green spaces (Snake Mountain green space, Kepu Park, Qingshan Park), the effect of reducing PM_{2.5} in different times, seasons and distances was analyzed. The community structure of two urban green spaces (Snake Mountain green space and Hubei University) was investigated, the PM_{2.5} cumulative concentration was measured and the composition was analyzed. The relationship between the community structure characteristics of landscape green space and the regulation of PM_{2.5}, the characteristics of PM_{2.5} cumulative concentration inside and outside the green space, and the main components of PM_{2.5} in Wuhan were analyzed. [Result]The results showed that at different times of the day, green space has a reduction effect on PM_{2.5}, in addition to Snake Mountain green space, Kepu Park and Qingshan Park have the strongest reduction control at 11:00. Green space has a significant reduction effect on PM_{2.5} in different seasons, Snake Mountain Green Space and Kepu Park in autumn excelled in spring-summer, and there is no seasonal difference in Qingshan Park. At different distances, garden green space in 35-45 m on PM_{2.5} control effect was significant. The area and community characteristics of green space have great influence on the control of PM_{2.5}, and the community with large area, complete structure and high canopy density has higher control ability on PM_{2.5} in the atmosphere. The cumulative concentration of PM_{2.5} outside the green space was higher than that inside the Snake Mountain Green Space, and the cumulative concentration of PM_{2.5} inside and outside the green space of Hubei University was random and irregular. The main components of PM_{2.5} in Snake Mountain Green Space and Hubei University green space were organic carbon, inorganic carbon, water-soluble ions and metal elements, there was little difference in the proportion of various components inside and outside the green space. [Conclusion]It can be found from the above that the reduction rate of green space on atmospheric PM_{2.5} was affected by many factors such as atmospheric PM_{2.5} concentration, season, time period and distance from PM_{2.5} source.

Key words Green space;Control;PM_{2.5};Wuhan

近年来,随着城市的快速发展,大气环境问题成为社会关注的热点,尤其以细颗粒物(PM_{2.5})为首要污染物的大气复合污染问题日益凸现^[1]。细颗粒物不仅污染空气环境^[2],还损害人们的身体健康^[3]。根据武汉市生态环境局发布的《2019年武汉市生态环境状况公报》显示,2019年武汉细颗粒物(PM_{2.5})平均浓度为 45 μg/m³,超过国家《环境空气质量标准》二级标准(35 μg/m³)的 128%,因此改善空气质量及缓解大气污染状况尤为紧迫。同时,大量研究表明园林绿地对大气中 PM_{2.5} 有消减作用^[4-7],通常植物通过吸附和吸收作用调控大气 PM_{2.5}^[8-9],因此,园林绿地是有效缓解城市大气污染 PM_{2.5} 问题的重要措施^[10]。通过研究武汉园林绿地调

控 PM_{2.5} 的效果和作用机理,旨在了解不同类型的园林绿地对 PM_{2.5} 的调控效果,以为园林绿地植物群落配置构建和改造提升提供借鉴,为指导城市园林绿地建设提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 武汉市自然气候特征及园林绿化概况 武汉市气候属北亚热带季风性湿润气候,雨量充沛,日照充足,四季分明,年平均气温 15.8~17.5℃,年降水量约 1 100 mm,年无霜期约 240 d,年日照总时数约 2 000 h,地带性植被为常绿落叶阔叶混交林。近年来,武汉市城市园林事业得到快速发展。截至 2020 年,全市建成区绿化覆盖率 42.07%,绿地率 37.05%,人均公园绿地面积 14.04 m²,逐渐形成了布局合理、类型多样、植物丰富的城市园林绿地系统格局。

1.2 PM_{2.5} 瞬时浓度测定方法 2015—2018 年,每个季节选择 3 d 晴天或多云无风的天气对园林科普公园、蛇山绿地(蛇山南坡)、青山公园,用手持式 PC-3A 激光可吸入粉尘连

基金项目 武汉市园林和林业局科技项目“武汉园林绿地调控空气细颗粒物(PM_{2.5})研究”(2015-06)。**作者简介** 史红文(1975—),男,湖北恩施人,高级工程师,硕士,从事园林生态学研究。**收稿日期** 2021-09-03

续测试仪测定空气 $PM_{2.5}$ 瞬时浓度。具体方法:以路边为对照点,选取距离对照点 5、15、25、35 和 45 m 的绿地为监测点;从 09:00 开始,每隔 2 h 同时测定各点空气 $PM_{2.5}$ 瞬时浓度值,每次测定重复 2 次,取平均值,最后以春秋季节对照点监测数据的平均值来表示武汉城区空气 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化,用群落中不同点位的 $PM_{2.5}$ 瞬时浓度值表示园林绿地中 $PM_{2.5}$ 浓度值的日变化。

1.3 绿地对 $PM_{2.5}$ 消减率计算方法 园林绿地 $PM_{2.5}$ 消减率(P)计算方法参考文献[11],具体公式为

$$P = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100\%$$

式中, C_0 为对照点 $PM_{2.5}$ 浓度; C_i 为绿地内某个位置的 $PM_{2.5}$ 浓度。

1.4 $PM_{2.5}$ 累积浓度测定及成分解析方法 选择蛇山绿地和湖北大学校园绿地作为 $PM_{2.5}$ 累积浓度的研究地点。具体方法:在绿地群落内设置空气取样器(天虹牌 TH-150 型大气采样器),对绿地内的空气 $PM_{2.5}$ 进行连续取样,取样器离道路 25.0 m,离地高度 1.5 m,每次取样时间为 7 h,同时在道路边设置对照点,同步取样。

每次采样结束,将滤膜封装好并标记,带回实验室;然后对滤膜上的 $PM_{2.5}$ 进行浓度测定和成分解析。分析的指标有 $PM_{2.5}$ 累积浓度、有机碳(OC)、无机碳(EC)、水溶性离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 和 Na^+)及金属元素(Ca、Fe、Cu、Zn 和 Pb),测定方法参考文献[12]。

1.5 园林绿地群落特征研究方法 为研究园林绿地群落特征对其调控 $PM_{2.5}$ 的作用,选择湖北大学校园内的绿地和蛇山绿地开展群落特征研究。具体方法:在 2 块绿地内分别设置 3~5 个 10 m×10 m 的样方,对高度在 3 m 以上的乔木进行每木检尺,记录树种名并测量树木的高度、胸径以及冠幅面

积等指标,记录灌木和地被植物,并测定其种类、地径、株数及盖度等指标(野草除外),群落郁闭度采用树冠投影法测定,最后计算平均值。选取乔木平均密度(Q_m)、乔木平均高度(Q_h)、乔木平均胸径(Q_d)、灌木平均密度(G_m)、灌木平均高度(G_h)和群落郁闭度(A)指标作为群落结构特征参数。

2 结果与分析

2.1 园林绿地消减 $PM_{2.5}$ 效果 在蛇山、科普公园和青山公园的 240 个监测数据中(包含不同季节、不同距离和不同时刻), P 值为负值的有 41 个,占比 17.08%,为正值的有 172 个,占比 71.67%,为 0 的有 27 个,占比 11.25%,具体分布见表 1~3。 P 值为正值表明园林绿地起到了调控 $PM_{2.5}$ 的作用, P 值为负值表明绿地内的 $PM_{2.5}$ 浓度高于道路,未能发挥消减作用,可能原因是绿地内气流不畅导致 $PM_{2.5}$ 沉淀,难以扩散;另外,靠近林缘的地方也是市民游玩和外部干扰较多的地方,也增加了 $PM_{2.5}$ 的来源。

在白天的不同时刻,总体上,3 块绿地在不同季节和不同位点都具有一定消减 $PM_{2.5}$ 的作用,相对而言 11:00 时,园林绿地具有较强的消减调控 $PM_{2.5}$ 的作用。如青山公园在 11:00 和 13:00 的 P 值为正值的比例均在 90% 及以上,表明青山公园在这 2 个时刻发挥了显著的消减 $PM_{2.5}$ 的生态功能;但科普公园在 13:00 时 P 值为负值的比例(40%)高于正值的比例(35%),表明园林绿地仅具有一定的调控消减 $PM_{2.5}$ 的生态功能,且调控机理较为复杂。

在不同季节,3 个绿地都发挥了较为显著的消减 $PM_{2.5}$ 的生态功能,蛇山绿地和青山公园绿地调控 $PM_{2.5}$ 的实际效果要高于科普公园,在不同季节之间没有明显的差异;从 P 值为正值的比例来看,蛇山绿地和科普公园绿地均是秋季消减 $PM_{2.5}$ 效果最高,春夏季相对较差;青山公园则是 4 个季节较为均衡,以夏季最高。

表 1 不同时刻绿地消减 $PM_{2.5}$ 效果

Table 1 Effect of green space on $PM_{2.5}$ reduction at different times

时间 Time	P 值 P value	蛇山绿地 Snake Mountain		科普公园 Kepu Park		青山公园 Qingshan Park	
		数量	比例	数量	比例	数量	比例
		Quantity//个	Proportion//%	Quantity//个	Proportion//%	Quantity//个	Proportion//%
09:00	正	14	70	12	60	16	80
	负	2	10	6	30	3	15
	零	4	20	2	10	1	5
11:00	正	14	70	14	70	19	95
	负	3	15	4	20	1	5
	零	3	15	2	10	0	0
13:00	正	16	80	7	35	18	90
	负	1	5	8	40	1	5
	零	3	15	5	25	1	5
15:00	正	12	60	12	60	17	85
	负	5	25	6	30	2	10
	零	3	15	2	10	1	5

2.2 园林绿地群落特征 蛇山绿地东西长 3 000 m(大东门至黄鹤楼公园),南北宽 400 m,面积超过 100 000 m^2 。绿地植被为常绿落叶阔叶混交林,乔灌木结构合理,人为干扰较少。群落乔木层平均高度为 15.89 m,平均密度为

0.19 株/ m^2 ,平均胸径为 29.65 cm;灌木层平均高度为 1.22 m,平均密度为 0.07 株/ m^2 ;群落郁闭度为 0.8~0.9 m。植物种类主要有悬铃木(*Platanus acerifolia*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)、杜英(*Elaeocarpus decipi-*

ens)、朴树(*Celtis sinensis*)等。

表 2 不同季节绿地消减 PM_{2.5} 效果

Table 2 Effect of green space on PM_{2.5} reduction in different seasons

季节 Season	P 值 P value	蛇山绿地 Snake Mountain		科普公园 Kepu Park		青山公园 Qingshan Park	
		数量	比例	数量	比例	数量	比例
		Quantity///个	Proportion///%	Quantity///个	Proportion///%	Quantity///个	Proportion///%
春季 Spring	正	12	60	12	60	16	80
	负	2	10	6	30	3	15
	零	6	30	2	10	1	5
夏季 Summer	正	13	75	8	40	19	95
	负	6	30	9	45	0	0
	零	1	5	3	15	1	5
秋季 Autumn	正	16	80	14	70	17	85
	负	2	10	5	25	3	15
	零	2	10	1	5	0	0
冬季 Winter	正	15	75	12	60	17	85
	负	1	5	5	25	2	10
	零	4	20	3	15	1	5

表 3 不同距离绿地消减 PM_{2.5} 效果

Table 3 Effect of green space on PM_{2.5} reduction in different distances

绿地距离 Green space distance//m	P 值 P value	蛇山绿地 Snake Mountain		科普公园 Kepu Park		青山公园 Qingshan Park	
		数量	比例	数量	比例	数量	比例
		Quantity///个	Proportion///%	Quantity///个	Proportion///%	Quantity///个	Proportion///%
5	正	6	38	8	50	12	75
	负	5	31	6	38	3	19
	零	5	31	2	12	1	6
15	正	6	38	3	19	15	94
	负	3	19	9	56	1	6
	零	7	43	4	25	0	0
25	正	12	75	6	38	12	75
	负	3	19	6	38	3	19
	零	1	6	4	25	1	6
35	正	16	100	15	94	16	100
	负	0	0	0	0	0	0
	零	0	0	1	6	0	0
45	正	16	100	13	81	14	88
	负	0	0	2	13	1	6
	零	0	0	1	6	1	6

湖北大学校园绿地为资环学院前的小型块状绿地,面积约 1 000 m²,植被类型为落叶阔叶林。群落乔木层平均高度为 10.20 m,平均密度为 0.16 株/m²,平均胸径为 15.72 cm;灌木层平均高度为 1.10 m,平均密度为

0.02 株/m²;群落郁闭度为 0.6~0.7。主要植物为日本晚樱(*Cerasus serrulata*)、马褂木(*Liriodendron chinense*)、紫叶李(*Prunus ceraifera* cv. *Pissardii*)和白玉兰(*Magnolia denudata*)等;群落结构较为简单(表 4)。

表 4 绿地群落结构特征

Table 4 Structure characteristics of green space community

绿地 Greenland	乔木 Tree			灌木 Shrub		群落郁闭度 A
	平均密度 Q _m 株/m ²	平均高度 Q _h m	平均胸径 Q _d cm	平均密度 G _m 株/m ²	平均高度 G _h m	
蛇山绿地 Snake Mountain	0.19	15.89	29.65	0.07	1.22	0.8~0.9
湖北大学 Hubei University	0.16	10.20	15.72	0.02	1.10	0.6~0.7

2.3 绿地内外 PM_{2.5} 累积浓度特征 由表 5 可知,蛇山绿地道路 PM_{2.5} 累积浓度均高于绿地。2016 年 4、8 月、2017 年 12 月、2018 年 10、12 月 5 次取样中,绿地内外 PM_{2.5} 累积浓度差值分别为 4.95、55.98、1.43、7.35 和 11.88 μg/m³,对应

的减少率分别为 3.51%、52.22%、1.53%、5.52%和 8.59%。

湖北大学校园道路与绿地的 PM_{2.5} 累积浓度呈现高低交替出现的现象,随机性强,没有规律性。2016 年 5—6、8—10 月 5 次取样中,道路与绿地 PM_{2.5} 累积浓度差分别为

-21.87、-26.39、2.70、-3.61 和 15.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;对应的减少率分别为 -30.96%、-38.84%、5.82%、-7.19% 和 29.15% (表5)。

表5 绿地内外 $\text{PM}_{2.5}$ 累积浓度分析

Table 5 Cumulative concentration of $\text{PM}_{2.5}$ inside and outside green space $\mu\text{g}/\text{m}^3$

绿地 Greenland	测定日期 Determination date	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $\text{PM}_{2.5}$ concentration	
		道路 Road	绿地 Greenland
蛇山绿地 Snake Mountain	2016-04	141.06	136.11
蛇山绿地 Snake Mountain	2016-08	107.20	51.22
	2017-12	93.38	91.95
	2018-10	133.11	125.76
	2018-12	138.25	126.37
湖北大学 Hubei University	2016-05	70.64	92.51
湖北大学 Hubei University	2016-06	67.95	94.34
	2016-08	46.36	43.66
	2016-09	50.24	53.85
	2016-10	53.90	38.19

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 成分解析 综合蛇山绿地和湖北大学校园绿地内外(绿地、道路) $\text{PM}_{2.5}$ 成分解析数据,武汉城区 $\text{PM}_{2.5}$ 主要成分包括有机碳、无机碳、水溶性离子、金属元素等,虽然绿地内外 $\text{PM}_{2.5}$ 累积浓度有一定差异,但各种成分的比例差异较小。蛇山绿地内外各成分重量比例排序为水溶性离子>有机碳>其他成分>无机碳>金属元素;湖北大学校园道路和绿地 $\text{PM}_{2.5}$ 主要成分排序为水溶性离子>有机碳>金属元素>无机碳>其他成分(图1、2)。

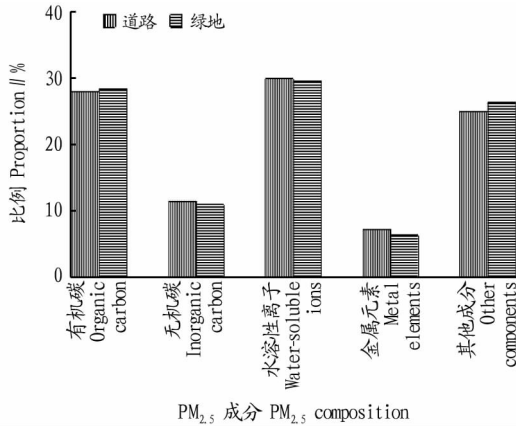


图1 蛇山绿地内外 $\text{PM}_{2.5}$ 成分比例

Fig. 1 Proportion of $\text{PM}_{2.5}$ inside and outside Snake Mountain green space

由表6可知,蛇山绿地道路 $\text{PM}_{2.5}$ 成分中有机碳的比例为 18.77%~35.18%,均值为 27.66%;无机碳的比例为 10.65%~12.11%,均值为 11.34%;水溶性离子的比例为 20.57%~35.09%,均值为 29.48%;金属元素的比例为 5.88%~8.43%,均值为 7.03%;其他成分的比例为 16.95%~33.17%,均值为 24.62%。绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 成分中有机碳的比例为 18.45%~33.96%,均值为 27.98%;无机碳的比例为 9.67%~11.66%,均值为 10.70%;水溶性离子的比例为 17.34%~36.62%,均值为 29.23%;金属元素的比例为

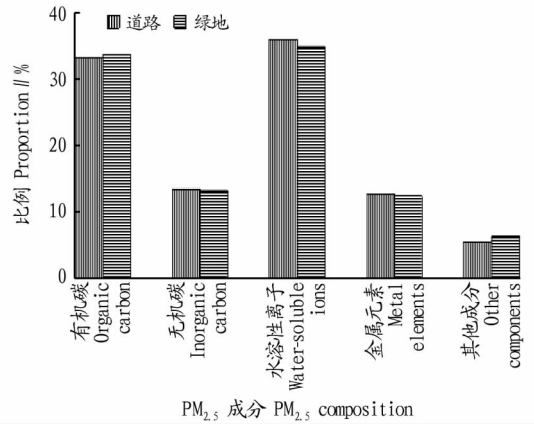


图2 湖北大学校园绿地内外 $\text{PM}_{2.5}$ 成分比例

Fig. 2 Proportion of $\text{PM}_{2.5}$ inside and outside Hubei University green space

5.78%~6.42%,均值为 6.21%;其他成分的比例为 16.46%~35.48%,均值为 25.88%。

湖北大学校园道路 $\text{PM}_{2.5}$ 成分中有机碳的比例为 26.54%~35.85%,均值为 33.05%;无机碳的比例为 11.78%~15.75%,均值为 13.35%;水溶性离子的比例为 30.77%~38.43%,均值为 35.92%;金属元素的比例为 9.25%~19.28%,均值为 12.37%;其他成分的比例为 2.26%~10.65%,均值为 5.43%。绿地内 $\text{PM}_{2.5}$ 成分中有机碳的比例为 28.38%~35.71%,均值为 33.48%;无机碳的比例为 11.83%~15.43%,均值为 13.21%;水溶性离子的比例为 31.61%~38.43%,均值为 34.78%;金属元素的比例为 8.88%~18.28%,均值为 12.28%;其他成分的比例为 3.08%~11.40%,均值为 6.25%。

$\text{PM}_{2.5}$ 各成分在道路和绿地的比例各有高低,但差异并不显著。湖北大学取样点不论是道路还是绿地,有机碳、无机碳、水溶性离子和金属元素的比例均高于蛇山绿地,其他成分低于蛇山绿地,反映了 $\text{PM}_{2.5}$ 成分时空变化的复杂性。

3 结论与讨论

该研究阐述了园林绿地调控 $\text{PM}_{2.5}$ 的实际效果和作用机理,园林绿地对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的调控功能主要通过叶片吸附^[13-14]和林冠的阻滞作用来实现,而绿地面积和群落特征对绿地调控大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的实际效果有较大影响。如蛇山绿地体现出显著的消减调控 $\text{PM}_{2.5}$ 的功能,且规律性强,表明较大的绿地面积、完整的结构以及较高的群落郁闭度有利于提高绿地调控 $\text{PM}_{2.5}$ 功能,这与戴菲等^[15]的研究结论一致。

该研究结果表明,园林绿地对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减率(P)受到大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、季节、时间段以及距离 $\text{PM}_{2.5}$ 源远近等多种因素的影响^[16-17]。在一定条件下,P值为负,但进一步统计分析发现,在夏秋季节每天中午时段以及距离绿地道路大于 35 m 的绿地内,P值总体为正值,表明园林绿地对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 具有消减调控作用,这与王琴等^[10]的研究结论一致。 $\text{PM}_{2.5}$ 监测的时间尺度对研究结论具有较大的影响,如在极小时间尺度上 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(瞬时浓度,1~2 min)具有较大的随机性,一个随机发生的事件(如车辆通过)都会影响其数值

大小,难以反映园林绿地调控 PM_{2.5} 的实际效果。相较而言,在相对长的时间尺度上的 PM_{2.5} 浓度(7 h 累积浓度)反映

PM_{2.5} 的累积效应,能更客观地揭示园林绿地消减 PM_{2.5} 的实际效果。

表 6 绿地内外 PM_{2.5} 成分分析Table 6 Analysis of PM_{2.5} composition inside and outside green space

%

绿地 Greenland	有机碳 OC		无机碳 EC		水溶性离子 Water soluble ion		金属元素 Metallic element		其他成分 Other ingredients		
	道路 Road	绿地 Greenland	道路 Road	绿地 Greenland	道路 Road	绿地 Greenland	道路 Road	绿地 Greenland	道路 Road	绿地 Greenland	
	蛇山绿地	2016-04	18.77	18.45	10.65	9.83	31.53	30.46	5.88	5.78	33.17
Snake	2016-08	30.54	30.84	10.76	9.67	35.09	36.62	7.16	6.41	16.95	16.46
Mountain	2017-12	35.18	33.96	12.11	11.65	20.57	17.34	6.66	6.42	25.48	30.63
	2018-10	26.13	28.65	11.82	11.66	30.74	32.51	8.43	6.22	22.88	20.96
	平均值	27.66	27.98	11.34	10.70	29.48	29.23	7.03	6.21	24.62	25.88
湖北大学	2016-05	26.54	28.38	13.06	12.14	30.77	31.61	19.28	18.28	10.65	9.59
Hubei	2016-06	35.85	34.76	11.78	15.43	36.13	33.22	9.74	13.15	6.50	3.44
University	2016-08	35.05	33.52	12.54	11.83	38.43	34.37	11.72	8.88	2.26	11.40
	2016-09	34.08	35.71	15.75	12.91	36.06	36.29	11.88	12.01	2.54	3.08
	2016-10	33.72	35.01	13.63	13.72	38.22	38.43	9.25	9.10	5.18	3.74
	平均值	33.05	33.48	13.35	13.21	35.92	34.78	12.37	12.28	5.43	6.25

通过对绿地内外 PM_{2.5} 的成分进行解析,发现园林绿地对 PM_{2.5} 的不同成分没有选择性的调控消减作用,园林绿地调控 PM_{2.5} 的主要方式在于林冠阻拦,这与张凯等^[18]的研究结论一致。

由于 PM_{2.5} 具有来源广泛、成分复杂以及时空变化不稳定性高等特征,对研究园林绿地对其调控作用影响较大,但该研究考虑了季节、时刻、时间尺度和绿地结构差异等多种因素,研究结论具有较强的科学意义。

参考文献

- [1] 燕丽,贺晋瑜.我国控制细颗粒物污染的若干行动建议[J].环境与可持续发展,2013,38(5):18-21.
- [2] 张智胜,陶俊,谢绍东,等.成都城区 PM_{2.5} 季节污染特征及来源解析[J].环境科学学报,2013,33(11):2947-2952.
- [3] 李云云,马利刚,苏兵,等.2013—2017年太原市大气细颗粒物污染对儿童呼吸系统疾病门诊量的影响[J].中国药物与临床,2021,21(5):752-754.
- [4] NOWAK D J,HIRABAYASHI S,BODINE A,et al. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U. S. cities and associated health effects[J]. Environmental pollution,2013,178:395-402.
- [5] 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(4):615-621.
- [6] 王晓磊,王成,古琳,等.春季不同天气城市街头绿地内 PM_{2.5} 质量浓度

- 分布特征研究[J].生态环境学报,2014,23(6):972-978.
- [7] 万好,王琴,余刘思,等.武汉市典型道旁绿地消减空气细颗粒物中的作用研究[J].西北林学院学报,2020,35(3):237-242.
- [8] 鲁君悦.武汉市不同树种吸附 PM_{2.5} 能力研究[J].林业调查规划,2016,41(6):68-71.
- [9] 闫生荣,杜中英,张跃群,等.城市绿地调控 PM_{2.5} 研究进展[J].北方园艺,2019(2):168-173.
- [10] 王琴,谢梦婷,沈秋月,等.城市园林绿地消减大气 PM_{2.5} 浓度研究进展[J].世界林业研究,2021,34(3):46-51.
- [11] 郭伟,申屠雅瑾,郑述强,等.城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展[J].生态环境学报,2010,19(6):1465-1470.
- [12] 王大春,陈璞珑,黄图南,等.宜兴市细颗粒物化学特征和来源解析[J].环境监测管理与技术,2018,30(2):11-15.
- [13] 王磊,万欣,江浩,等.植物叶片表面特征对吸附 PM_{2.5} 能力的影响研究[J].江苏林业科技,2018,45(6):39-43.
- [14] 沈剑,李蓓蓓,郑国良,等.城市树木对空气颗粒物的影响综述[J].安徽农业科学,2019,47(21):8-11,16.
- [15] 戴菲,陈明,朱晟伟,等.街区尺度不同绿化覆盖率对 PM₁₀、PM_{2.5} 的消减研究:以武汉主城区为例[J].中国园林,2018,34(3):105-110.
- [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(7):1715-1721.
- [17] 陈羽阳,王婧,赵聆言,等.城市公园绿地对周边环境空气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的影响及效应场特征:以武汉市中山公园为例[J].生态学杂志,2021,40(7):2263-2276.
- [18] 张凯,孟凡,李新宇,等.园林植被对交通排放 PM_{2.5} 浓度影响研究[J].生态环境学报,2017,26(6):1009-1016.

(上接第 100 页)

- [8] BLANCO A,MANGINI G,GIANCASPRO A,et al. Relationships between grain protein content and grain yield components through quantitative trait locus analyses in a recombinant inbred line population derived from two elite durum wheat cultivars[J]. Molecular breeding,2012,30(1):79-92.
- [9] TSILO T J,HARELAND G A,SIMSEK S,et al. Genome mapping of kernel characteristics in hard red spring wheat breeding lines[J]. Theoretical and applied genetics,2010,121(4):717-730.
- [10] 周淼平,姚金保,杨学明,等.小麦纹枯病抗性 QTL 分析[J].麦类作物学报,2020,40(5):554-559.
- [11] RAMYA P,CHAUBAL A,KULKARNI K,et al. QTL mapping of 1000-kernel weight,kernel length,and kernel width in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of applied genetics,2010,51:421-429.
- [12] ZOU J,SEMAGN K,IQBAL M,et al. QTLs associated with agronomic traits in the Attila × CDC Go spring wheat population evaluated under conventional management[J]. PLoS One,2017,12(2):1-20.
- [13] MAPHOSA L,LANGRIDGE P,TAYLOR H,et al. Genetic control of grain yield and grain physical characteristics in a bread wheat population grown

- under a range of environmental conditions[J]. Theoretical & applied genetics,2014,127(7):1607-1624.
- [14] LIU G,JIA L J,LU L H,et al. Mapping QTLs of yield-related traits using RIL population derived from common wheat and Tibetan semi-wild wheat [J]. Theoretical and applied genetics,2014,127(11):2415-2432.
- [15] MIR R R,KUMAR N,JAISWAL V,et al. Genetic dissection of grain weight in bread wheat through quantitative trait locus interval and association mapping[J]. Molecular breeding,2012,29(4):963-972.
- [16] HUANG X Q,CÖSTER H,GANAL M W,et al. Advanced backcross QTL analysis for the identification of quantitative trait loci alleles from wild relatives of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Theoretical and applied genetics,2003,106(8):1379-1389.
- [17] SOMERS D J,ISAAC P,EDWARDS K. A high-density microsatellite consensus map for bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Theoretical and applied genetics,2004,109(6):1105-1114.
- [18] RÖDER M S,HUANG X Q,BÖRNER A. Fine mapping of the region on wheat chromosome 7D controlling grain weight[J]. Functional & integrative genomics,2008,8(1):79-86.