

秋季校园主要园林植物消减可吸入颗粒物能力评价及其与气象因子的关系

屈海燕^{1,2}, 陆秀君², 金含阳¹

(1. 沈阳建筑大学建筑与规划学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳农业大学园艺学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要 目的 研究沈阳市主要校园园林植物对可吸入颗粒物的消减能力及其与湿度、温度、风速等主要气象因子之间的相关性. 方法 以野外连续3个月的监测数据为基础, 采用 SPSS21.0 对沈阳建筑大学12种园林植物进行方差分析和相关性分析. 结果 裸地和林内 PM 质量浓度日变化规律趋向一致, 早晨最高, 随时间成下降趋势, 17:30 左右达到最低; 林内 PM 质量浓度在 9:30 左右达到最高; PM₁₀ 质量浓度的多重比较中, 油松、元宝枫、火炬树、刺槐1和街道对照点差异显著; PM_{2.5} 质量浓度的多重比较中, 油松、元宝枫、火炬树和街道对照点差异显著; 气象因素中, 湿度与 PM 质量浓度呈正相关, 风速和 PM 质量浓度呈负相关, 温度和 PM 质量浓度呈负相关; 时间对于街道对照点、元宝枫无显著影响, 对于油松有一定影响. 结论 植物均具有消减 PM₁₀、PM_{2.5} 的作用, 但绝大多数个体差别不显著. 针叶树(油松)、叶片表面粗糙的阔叶树(元宝枫、火炬树); 绿量大的植物(刺槐1)消减 PM 作用显著.

关键词 PM 质量浓度; 日变化规律; 消减等级; 月份; 气象因素

中图分类号 S73

文献标志码 A

Appraisal of Absorbing Inhalable Particulate Matter to Major Urban Greening Tree Species in the Fall of the Campus and their Correlation with Meteorological Factor

QU Haiyan^{1,2}, LU Xiujun², JIN Hanyang¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang, China, 110161)

Abstract: This study aims to explore the effects of campus landscape plants in reducing inhalable particulate matter (PM) and its relationship with main meteorological factors-humidity, temperature, and wind speed. Based on statistics analysis via SPSS21.0 of the 3 months data by monitoring

收稿日期: 2016-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470031); 住房和城乡建设部科学技术项目(2016-R2-022); 辽宁省教育厅基金项目(LJZ2016021)

作者简介: 屈海燕(1973—), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事园林植物、植物景观与生态修复研究.

12 plants in the campus of Shenyang Jianzhu University, the results showed: 1) The mass concentration of PM inside the forest showed a same trend with the no-plant-cover area. The maximum concentration occurred at 9:30 AM, while the minimum at 5:30 PM, and among this period it declined over time. 2) Results by multiple comparison revealed that the mass concentration of PM₁₀ in the forest of *Pinus Tabulaeformis*, *Acer truncatum* Bunge, *Rhus Typhina* and *Robinia pseudoacacia* 1 is significantly different with no-plant-cover area (control); As for PM_{2.5}, significant differences were found between in the forest of *Pinus Tabulaeformis*, *Acer truncatum* Bunge, *Rhus Typhina* forest and no-plant-cover area. 3) PM mass concentrations were positively related with relative humidity, while negatively correlated with wind velocity and temperature. 4) No significant differences were found between PM mass concentrations in *Acer truncatum* Bunge forest and monitoring time (month), but significant with that in *Pinus Tabulaeformis* forest. It indicated that all plants have effects on reducing mass concentration of PM₁₀ and PM_{2.5}, however, many of them are not significant. Conifer trees (*Pinus Tabulaeformis*), broadleaf tree with rough surface (*Acer truncatum* Bunge, *Rhus Typhina*) and large-greenness plants (*Robinia pseudoacacia* 1) have an obvious effect on reducing PM concentration.

Key words: PM mass concentration; daily variation rule; abate degrees; month; meteorological

随着城市化进程的快速推进、工业化的迅速发展和汽车保有量的持续增加,空气颗粒物(尤其 PM_{2.5})已成为目前国内外许多城市空气的首要污染物,因其不仅本身是污染物,还是其他有毒有害污染物的载体而备受社会各界广泛关注^[1]. 近年来随着大量雾霾天气的增加,人们的保健意识和生态意识的增强,空气质量得到了前所未有的重视. 目前大量研究者集中在来源及成分分析^[2-6]、变化规律及与气象关系^[7-12]、植被吸附与调控等方面. 而植物作为调节生态环境的主要因素,越来越受到重视. 植被吸附与调控主要集中在植物叶片研究^[13-19]、植物单体研究^[20-23,7]、植物群落研究^[24-26]等方面;主要的研究方法则集中在实验室称重法、电镜扫描法、野外监测、软件模拟^[27-28]等. 园林植物消减大气可吸入颗粒物的功能越来越受到认可,但目前城市绿化很少考虑利用树种选择及绿化模式来消减大气污染,特别是北方城市沈阳,由于地带原因,树种选择本身就比较南方城市少,且前身属于重工业城市,污染较为严重,笔者在野外监测的基础上分析了沈阳市校园景观植物消减可吸入颗粒物的能力及其与气象因子的相关性,对于城市大气污染

防治和城市规划及植物景观设计具有指导意义.

1 材料与方法

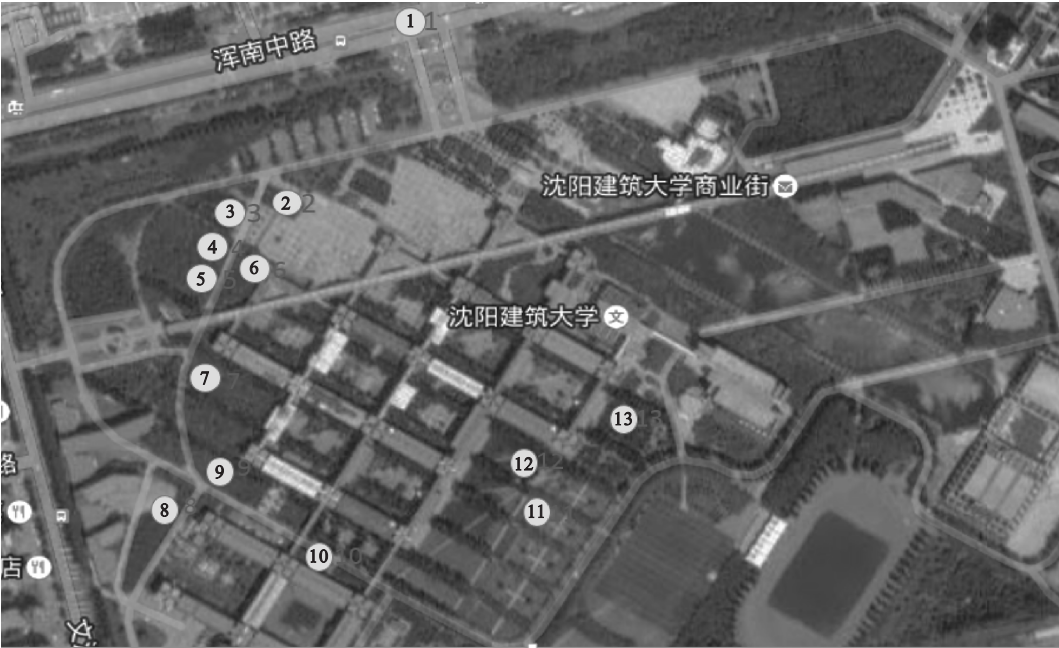
1.1 监测区概况

研究地点选取沈阳建筑大学. 沈阳建筑大学位于沈阳市浑南区,占地面积 80 hm². 校区原址是农业用地,学校于 2002 年经过规划设计后迁入,土壤肥沃,低下水位较高,校园植物大量使用水稻和乡土树种,基本上是成片的纯林,绝大部分为沈阳市城市绿化中的乡土树种. 乔木以油松、火炬树、水曲柳、刺槐、白桦、垂柳以及常见果树为主,灌木以生命力强的紫丁香、连翘、榆叶梅、毛樱桃为主. 经过 13 年的生长,现在已经形成较好的纯林景观,生态系统相对稳定.

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

在校园西部选择 12 块相邻的绿地,其小环境差异不大,并在校园门口城市规划路处选择裸地对照点一个(见图 1). 每一块绿地斑块面积大于 600 m²,植被茂密,生态系统相对稳定(见表 1).



1.对照点;2.水曲柳;3.白桦;4.刺槐;5.火炬树;6.垂柳;7.刺槐2;8.毛樱桃;9.榆叶梅;10.丁香;11.香蒲;12.油松;13.元宝枫。

图1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of the sample points

表1 样地信息表

Table 1 Basic situation for the sample area

树种 编号	监测点	绿地结构	斑块面 积/m ²	规格			植物数 量/株
				胸径 D/cm	树高 H/m	冠幅 W/m	
1	街道对照点	建大校门口街道裸地	—	—	—	—	—
2	水曲柳	水曲柳 + 草坪	1 250	10	6	2	100
3	白桦	白桦 + 野草 + 白桦小苗	900	10	10	2 ~ 3	120
4	刺槐 1	刺槐 + 野草 + 刺槐小苗	780	10 ~ 15	10 ~ 13	3 ~ 8	45
5	火炬树	火炬树 + 野草 + 火炬树小苗	900	5 ~ 15	6 ~ 10	3 ~ 8	70
6	垂柳	垂柳 + 人工草坪	1 500	12 ~ 15	10 ~ 13	5 ~ 10	110
7	刺槐 2	刺槐 + 人工草坪	2 000	10 ~ 20	15 ~ 18	5 ~ 8	109
8	毛樱桃	毛樱桃 + 野草	2 000	—	2 ~ 4	2 ~ 4	600
9	榆叶梅	榆叶梅 + 野草	1 300	—	3 ~ 5	2 ~ 5	190
10	紫丁香	紫丁香 + 人工草坪	650	—	3	2 ~ 4	150
11	香蒲	香蒲	625	—	1.2	—	—
12	油松	油松 + 人工草坪	1 900	10 ~ 20	5 ~ 10	3 ~ 5	110
13	元宝枫	元宝枫 + 人工草坪	3 600	5 ~ 15	5 ~ 10	3 ~ 8	210

1.2.2 监测时间

因不同植被的季相表现不同,且春夏秋冬各季节气象条件和污染源也不尽相同,故先期选择秋季的植被作为研究对象,以8、9、10月份为主.选择12块纯林与1块裸地监测点,分别在此3个月内的上中下旬各

选择一天,在每天的8:00,9:30,12: 00,13:30,16:00,17:30,6个时间点分别同时开展监测,其中油松加测19:00、20:00.

1.2.3 监测方法与数据来源

采用JC—1600粉尘测试仪监测PM_{2.5}及PM₁₀的质量浓度、温度、湿度,并结合手持

式风速仪测试瞬时风速. 在每一块样地选择林内小环境相对稳定的 1~2 处位置, 在同一时间同时读取 3 次数据, 并同时记录风速、温度和湿度. 采样高度距离地面 1.5 m, 即为成人呼吸高度一致.

1.3 数据处理

对于不同植物品种的监测数据进行单因素方差分析, 并用 excell 进行平均值比较; 进行独立 T 检验, 分析时间(月份)上的影响; 进行相关分析, 分析温度、湿度和风的影响. 统计分析采用 SPSS21.0, 差异显著性水平设定为 0.05. 作图分别用 excell2007 和 originPro8.5 软件.

2 结果与分析

2.1 对照点和植被 PM_{2.5}、PM₁₀日变化规律

对研究区内的街道对照点(裸地)和油松林内部进行 3 个月(秋季)的实时空气质量监测. 裸地和油松林的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度日变化总趋势是一致的, 即均随时间推移呈下降趋势, 在 17:30 左右达到最低, 随着夜晚来临, 质量浓度增加(见图 2、图 3). 分析其原因, 应该和绿色植物白天进行光合作用, 晚间进行呼吸作用有很大关系; 也和早晚高峰汽车流量、学校内人流量增加有一定关系.

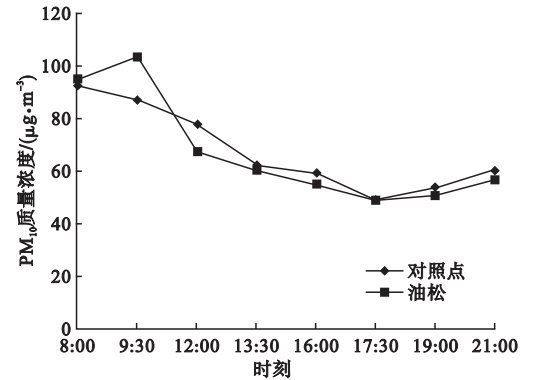


图 2 裸地和油松 PM₁₀ 质量浓度日变化

Fig. 2 Diurnal variations of PM₁₀ concentration of pinus tabulaeformis and control point

早晨 8:00 裸地的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度值最高, 油松林则在 9:30 左右出现一个波峰; 且在 8:00~9:30, 油松林的 PM₁₀ 和

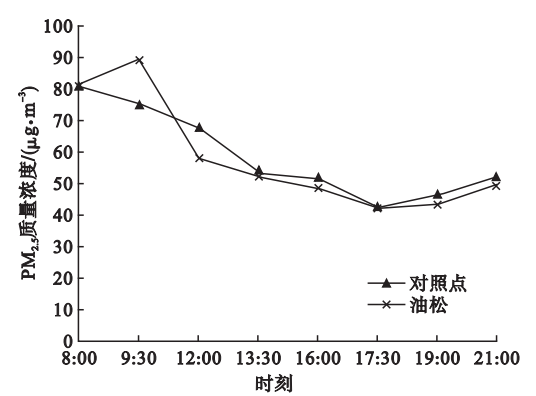


图 3 裸地和油松 PM_{2.5} 质量浓度日变化

Fig. 3 Diurnal variations of PM_{2.5} concentration of pinus tabulaeformis and control point.

PM_{2.5} 质量浓度明显高出裸地(见图 2、图 3). 分析其原因: 油松林下部是土壤和草坪, 日出之后近地面区域很容易出现逆温现象, 且油松林内树种单一, 大气结构稳定不易产生对流运动, 颗粒物积累导致此时间段质量浓度升高; 而裸地地面是柏油路和硬质铺装, 上部空旷, 没有逆温现象且气流运动频繁, 有利于颗粒物扩散, 故油松林此刻出现波峰且比裸地处高. 其后随着时间的推移, 油松进行光合作用, 且叶片具有吸附吸收颗粒物的功能, 而裸地紧邻城市道路, 汽车尾气排放、道路扬尘, 故油松内部 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的质量浓度均低于裸地.

2.2 不同样地内部环境中 PM_{2.5}、PM₁₀ 的差异与变化

对研究区内 12 块样地、1 处街道对照点进行 3 个月的实时空气质量监测, 对 1363 组数据进行 SPSS 分析: 单因素方差分析并进行两两比较, 显著性水平 0.05.

在多重比较中, 对比 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的质量浓度, 街道对照点和大部分植被在 0.05 水平差异不显著, 而在 0.1 水平差异显著(见图 4、图 5). 说明学校内部各类植物对于 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 均起到一定的消减作用. 特别是和同时监测的周围无公园的单一街道对比, 其 PM 质量浓度明显下降, 在 0.05 水平差异性显著. 说明学校的整个植被生态系统共同消减了 PM 质量浓度, 同时影响其相邻

街道(对照点)质量浓度;而周围无公园的单一街道,无大面积的植被生态系统影响,故颗粒物质量浓度明显偏高。

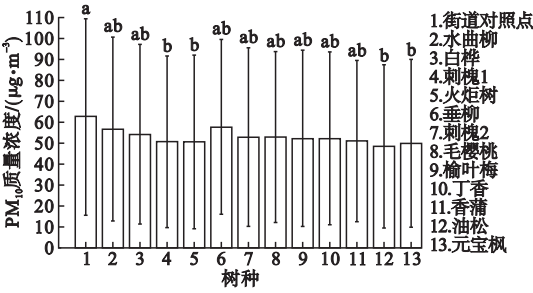


图 4 各监测点 PM₁₀ 质量浓度对比

Fig. 4 Contrast of PM₁₀ mass concentration in each monitoring points.

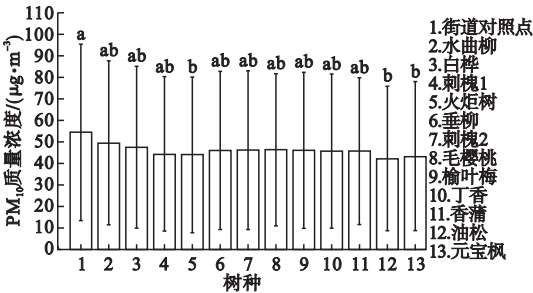


图 5 各监测点 PM_{2.5} 质量浓度对比

Fig. 5 Contrast of PM_{2.5} mass concentration in each monitoring points.

在多重比较中,PM₁₀质量浓度:街道对照点和刺槐 1、火炬树、油松、元宝枫之间在 0.05 水平差异性显著,显著性为 0.049、0.048、0.022、0.038。PM_{2.5}质量浓度:街道对照点和火炬树、油松、元宝枫之间在 0.05 水平差异性显著,显著性为 0.046、0.022、0.037。其他多重比较差异不显著。分析其原因:12 处样地之间没有显著性差异,说明在消减可吸入颗粒物方面,各种植被共同形成的生态大环境起到决定性的作用,而个体植物均有一定的消减作用,但个体之间差异不显著。同时,颗粒物的质量浓度大小受多方面因素影响,如风速、温度、湿度、建筑的朝向、高低及布局等,它们之间是个复杂而动态的过程:学校内部各植被内部消减好,但也受建筑布局及风的影响,导致扩散慢,而街道对照点处相对空旷,扩散快,学校内部植被的消减

和街道对照点处的扩散相互抵消,从而导致街道和大多数植物 PM_{2.5}和 PM₁₀质量浓度差异性不显著。

对比 12 处植被和 1 处街道对照点的 PM₁₀和 PM_{2.5}的质量浓度,PM₁₀质量浓度由高到低: $\rho(\text{对照点}) > \rho(\text{垂柳}) > \rho(\text{水曲柳}) > \rho(\text{白桦}) > \rho(\text{毛樱桃}) > \rho(\text{刺槐 2}) > \rho(\text{紫丁香}) > \rho(\text{榆叶梅}) > \rho(\text{香蒲}) > \rho(\text{刺槐 1}) > \rho(\text{火炬树}) > \rho(\text{元宝枫}) > \rho(\text{油松})$; PM_{2.5}质量浓度由高到低: $\rho(\text{对照点}) > \rho(\text{水曲柳}) > \rho(\text{白桦}) > \rho(\text{毛樱桃}) > \rho(\text{刺槐 2}) > \rho(\text{榆叶梅}) > \rho(\text{垂柳}) > \rho(\text{香蒲}) > \rho(\text{紫丁香}) > \rho(\text{刺槐 1}) > \rho(\text{火炬树}) > \rho(\text{元宝枫}) > \rho(\text{油松})$ (见图 4、图 5)。可以看出,消减 PM₁₀和 PM_{2.5}最好的树种为油松,其次为元宝枫和火炬树。说明针叶树消减可吸入颗粒物效果明显,和大多数研究者结论一致。分析其原因应和其针叶特征有一定关系^[22,29-30],即油松气孔大,叶片油脂高,能够吸附颗粒物。而现场监测的元宝枫和火炬树,从根部就有茂密的树叶,整体绿量明显大于其他树种。刺槐 1 和刺槐 2 为同一种植物,但消减作用不同,分析其原因:刺槐 1 样地从根部自然生长出各个年龄级别的枝条,属于自然式树林,郁闭度大,绿量大;而刺槐 2 则人工味很强,分支点下无树叶,绿量小。由此可见,植物绿量对于消减可吸入颗粒物具有明显作用,绿量越大,消减作用越明显^[31-32]。消减作用最小的为垂柳、水曲柳和白桦,分析原因,此 3 种植物,树冠叶片较少、绿量小、叶片或树干光滑,对于 PM₁₀和 PM_{2.5}的吸附作用较小。除了这类植物外,灌木的消减作用也较小,也和绿量有一定的关系,因监测点在人的呼吸高度,而灌木的主要功能是减少地面扬尘,对于大颗粒物的消减的作用更强,监测高度和消减颗粒物粒径不同也导致监测结果的不同。

2.3 PM_{2.5}、PM₁₀与气象因子的关系

大气可吸入颗粒物的浓度变化受各种因

素影响,通过监测数据分析,其中气象因素具有很大影响. 对研究区内 13 处样地进行 3 个月的早中晚空气质量监测,并对 1363 组数据运用 SPSS 进行相关分析(见表 2). 从表 2 可以看出:相对湿度和 PM 成正相关,温度、风速和 PM 成负相关. 其中,PM₁₀ 质量浓度与湿度、风速在 0.01 水平(双侧)上显著相关;PM_{2.5} 质量浓度与湿度、风速在 0.01 水平(双侧)上显著相关,与温度在 0.05 水平(双侧)上显著相关. 从而可以看出,第一,湿度越大,PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度越大,分析其原因:空气中的水分子容易裹覆细颗粒物,使其聚集于植被群落中,同时质量加大,但又没有达到沉降于地面的程度,故不易扩散,导致质量浓度升高. 这也和随机监测雨中林地内 PM 质量浓度爆表的结论一致^[33]. 第二,风速越大,PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度越低,分析其原因:风对大气污染物的稀释扩散和三维输送起着重要作用^[34]. 第三,温度越高,PM_{2.5} 质量浓度越小,分析其原因:从 3 个月的监测结果看,8:00 的质量浓度明显大于 12:00 和 17:00 的质量浓度,早晨温度最低,中午和晚上温度升高,经过夜晚一夜的呼吸作用,太阳升起,温度升高,光合作用开始,吸收 CO₂ 放出 O₂,且林内不同位置因为光照原因温度也不尽相同,空气产生对流,有利于扩散降低 PM 质量浓度.

表 2 各监测点 PM₁₀、PM_{2.5} 质量浓度与环境因子的相关性

Table 2 Correlation of PM₁₀/PM_{2.5} mass concentration and environmental factor in each monitoring points.

细颗粒物	相关性		
	温度	相对湿度	风速
PM ₁₀	-0.052	0.336**	-0.134**
PM _{2.5}	-0.054*	0.328**	-0.133**

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

2.4 时间对于 PM₁₀、PM_{2.5} 时的影响

以街道对照点、油松(常绿)、元宝枫(落

叶)为例监测秋季 8、9、10 月份共 105 组数据,进行 SPSS 单因素方差分析,显著性水平为 0.05. 分析月份对街道对照点、油松(常绿)、元宝枫(落叶)PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度的影响. 结果显示:月份对街道对照点有显著性差异,显著性 0.036、0.037;月份对油松无显著性差异,显著性 0.087、0.105;月份对元宝枫无显著性差异,显著性 0.342、0.391. 分析其原因:第一,沈阳春秋两季较短,8 月还是夏天,10 月已开始进入冬季,街道对照点作为开敞的空间,剧烈的气象动态变化显著影响空旷地的空气质量浓度. 第二,油松是常绿树,针叶随季节的变化较小,消减可吸入颗粒物的变化也较小. 故月份对常绿树的浓度无显著影响. 而对于元宝枫来说,8、9 月的叶片具有消减大气可吸入颗粒物的功能,但元宝枫绿地郁闭度大,林地内部扩散慢;而到 10 月,元宝枫开始落叶,虽然叶片消减作用减小,但林地郁闭度减小从而导致扩散加速,故落叶树均衡于没落叶之前的叶片消减和落叶后加大通风和扩散,则月份对落叶树的影响不显著.

3 结论与建议

(1) 植物均具有消减 PM₁₀、PM_{2.5} 质量浓度的作用,但绝大多数个体差别不显著. 达到一定面积的多种植被形成的生态大环境对于消减 PM₁₀、PM_{2.5} 质量浓度有很大影响,比如公园、大学校园等,其消减 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的作用远大于街道及其他小型绿地. 所以在城市绿地系统规划时应增加大面积的块状绿地(公园绿地);街道绿地则增加路侧绿地的宽度;而其他附属绿地(学校和居住区)增加林植和片植植物的比例,面积以达到稳定的生态群落为要求.

(2) 消减 PM 作用显著的植物个体为:①针叶树(油松);②叶片表面粗糙的阔叶树(元宝枫、火炬树);③绿量大、叶面积指数大的植物(刺槐 1). 这与其他研究者用不同的

研究方法(实验室称重法、模拟检测法)得出的研究结果相似。所以在实际的种植设计中建议增加针叶树的比例;搭配落叶树时多选择叶片粗糙、具绒毛或沟壑的树种;单株植物选择时尽量选择树冠大、树叶多,也就是整体植物绿量大的植物品种。

(3)气象因子和空气质量浓度有着密切关系,风速对于PM质量浓度起到扩散作用。在实际设计中,除了运用大面积的生态植被群落外,增加风对于PM₁₀及PM_{2.5}的扩散作用,在进行城市绿地系统规划时候考虑通风廊道,缓解城市热岛效应,吹散雾霾。通风廊道可以考虑主要街道、相连的公园绿地、建筑红线后移后的地带及低矮楼宇群等,通风廊道应该沿城市主要风向展开。

(4)因早晨的空气质量在一天中最差,PM质量浓度中午后逐渐下降,黄昏接近最低值,且随着夜晚来临逐渐升高。所以景观设计师应该考虑适合在下午及黄昏时分(空气质量最好)布置适合的运动及休闲场地并通过科学合理的植物配置提高植物群落的滞尘效应。

参考文献

[1] 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.
(WANG Xiaolei, WANG Cheng. Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter[J]. Acta ecologica sinica, 2014, 34(8): 1910-1921.)

[2] 宋少洁,吴烨,蒋靖坤,等.北京市典型道路交通环境细颗粒物元素组成及分布特征[J].环境科学学报,2012,32(1):66-73.
(SONG Shaojie, WU Ye, JIANG Jingkun, et al. Characteristics of elements in size-resolved fine particles in a typical road traffic environment in Beijing[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2012, 32(1): 66-73.)

[3] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等.北京大气PM_{2.5}中微量元素的浓度变化特征与来源[J].环境科学,2003,24(6):33-37.
(YANG Fumo, HE Kebin, MA Yonglang, et al. Characteristics and sources of trace ele-

ments in ambient PM_{2.5} in Beijing[J]. Environmental science, 2003, 24(6): 33-37.)

[4] DZIERZANOWSKI K, POPEK R, GAWROSKA H, et al. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species[J]. International journal of phytoremediation, 2011, 13(10): 1037-1046.

[5] 陶俊,张仁健,段青春,等.北京城区PM_{2.5}中致癌重金属季节变化特征及其来源分析[J].环境科学,2014,35(2):411-416.
(TAO Jun, ZHANG Renjian, DUAN Jingchun, et al. Seasonal variation of carcinogenic heavy metals in PM_{2.5} and source analysis in Beijing[J]. Environmental science, 2014, 35(2): 411-416.)

[6] 谭吉华,段青春.中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J].中国科学院研究生院学报,2013,30(2):145-155.
(TAN Jihua, DUAN Jingchun. Heavy metals in aerosol in China: pollution, sources, and control strategies[J]. Journal of graduate university of Chinese academy of sciences, 2013, 30(2): 145-155.)

[7] 陈俊刚,毕华兴,许华森,等.北京市道路防护林带内外PM_{2.5}质量浓度特征及与气象要素的相关性[J].中国水土保持科学,2014,12(3):1672-1679.
(CHEN Jungang, BI Huaxing, XU Huasen, et al. Correlation analysis between PM_{2.5} mass concentration characteristics and meteorological elements inside and outside the shelterbelts for typical roads in Beijing[J]. Science of soil and water conservation, 2014, 12(3): 1672-1679.)

[8] 赵文慧,宫辉力,赵文吉,等.基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象要素分析[J].环境科学学报,2010,30(11):2154-2163.
(ZHAO Wenhui, GONG Huili, ZHAO Wenji, et al. Spatial and temporal variation of Beijing inhalable particulate matter and its meteorological factors based on geostatistical analysis[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2010, 30(11): 2154-2163.)

[9] 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):418-426.
(ZHAO Chenxi, WANG Yunqi, WANG Yujie, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the corre-

- lation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. Environmental science, 2014, 35(2): 418 - 426.)
- [10] 蒲维维,赵秀娟,张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对PM_{2.5}污染的影响[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 716 - 723.
(PU Weiwei, ZHAO Xiujian, ZHANG Xiaoling. Effect of meteorological factors on PM_{2.5} in late summer and early autumn of Beijing [J]. Journal of applied meteorological science, 2011, 22(6): 716 - 723.)
- [11] 郭利,张艳昆,刘树华,等. 北京地区PM₁₀质量浓度与边界层气象要素相关性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(4): 607 - 612.
(GUO Li, ZHANG Yankun, LIU Shuhua, et al. Correlation analysis between PM₁₀ mass concentration and meteorological elements of atmospheric boundary layer in Beijing area [J]. Acta scientiarum naturalium universitatis pekinensis, 2011, 47(4): 607 - 612.)
- [12] PATERRAKI S, ASIMAKOPOULOS D N, FLOCAS H A, et al. The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}) [J]. Science of the total environment, 2012, 419(1): 124 - 135.
- [13] 王蕾,哈斯,刘连友,等. 北京市六种针叶树叶面附着颗粒物的理化特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 487 - 492.
(WANG Lei, HASI Erdun, LIU Lianyou, et al. Physico-chemical characteristics of ambient particles settling upon leaf surface of six conifers in Beijing [J]. Chinese journal of applied ecology, 2007, 18(3): 487 - 492.)
- [14] 杨佳,王会霞,谢滨泽,等. 北京9个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 284 - 392.
(YANG Jia, WANG Huixia, XIE Binze, et al. Accumulation of particulate matter on leaves of nine urban greening plant species with different micromorphological structures in Beijing [J]. Research of environmental sciences, 2015, 28(3): 384 - 392.)
- [15] 刘璐,管东生,陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2604 - 2614.
(LIU Lu, GUAN Dongsheng, CHEN Yongqin. Morphological structure of leaves and dust-retaining capability of common street trees in Guangzhou municipality [J]. Acta ecologica sinica, 2013, 33(8): 2604 - 2614.)
- [16] 刘玲,方炎明,王顺昌,等. 7种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2361 - 2367.
(LIU Ling, FANG Yanming, WANG Shunchang, et al. Leaf micro-morphology and features in adsorbing air suspended particulate matter and accumulating heavy metals in seven tree species [J]. Environmental science, 2013, 34(6): 2361 - 2367.)
- [17] 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.
(WANG Huixia, SHI Hui, LI Yangyang. Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species [J]. Chinese journal of applied ecology, 2010, 21(12): 3077 - 3082.)
- [18] 张志丹,席本野,曹治国,等. 植物叶片吸滞PM_{2.5}等大气颗粒物定量研究方法初探:以毛白杨为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2238 - 2242.
(ZHANG Zhidan, XI Benye, CAO Zhiguo, et al. Exploration of a quantitative methodology to characterize the retention of PM_{2.5} and other atmospheric particulate matter by plant leaves: taking populus tomentosa as an example [J]. Chinese journal of applied ecology, 2014, 25(8): 2238 - 2242.)
- [19] 唐敏忠,汉瑞英,陈健. 植物叶片吸附大气颗粒物的研究综述[J]. 北方园艺, 2015(11): 187 - 192.
(TANG Minzhong, HAN Ruiying, CHEN Jian. The review of dust-retention of plant's leaf [J]. Northern horticulture, 2015(11): 187 - 192.)
- [20] 吴俊林,齐实,申云康,等. 2种城市林带PM₁质量浓度变化及其与气象因子的关系[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 104 - 109.
(WU Junlin, QI Shi, SHEN Yunkang, et al. PM₁ mass concentration of urban conifer and broadleaf forest and their correlation with meteorological factors [J]. Journal of soil and water conservation, 2015, 29(4): 104 - 109.)
- [21] NOWAK D J, CRANE D E, STEVENS J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States [J]. Urban forestry and urban greening, 2006, 4(3/4): 115 - 123.
- [22] 王兵,张维康,牛香,等. 北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 408 - 414.
(WANG Bing, ZHANG Weikang, NIU Xiang, et al. Particulate matter adsorption capacity of

- 10 evergreen species in Beijing [J]. Environmental science, 2015, 36(2): 408 - 414.)
- [23] SÆBØ A, POPEK R, NAWROT B, et al. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces [J]. Science of the total environment, 2012, 427/428: 347 - 354.
- [24] 王华, 鲁绍伟, 李少宁, 等. 可吸入颗粒物和细颗粒物基本特征、监测方法及森林调控功能 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 869 - 877.
(WANG Hua, LU Shaowei, LI Shaoning, et al. Inhalable particulate matter and fine particulate matter: their basic characteristics, monitoring methods, and forest regulation functions [J]. Chinese journal of applied ecology, 2013, 24(3): 869 - 877.)
- [25] YIN S, SHEN Z, ZHOU P, et al. Quantifying air pollution attenuation with in urban parks: an experimental approach in Shanghai, China [J]. Environmental pollution, 2011, 159 (8/9): 2155 - 2163.
- [26] 王国玉, 白伟岚, 李新宇, 等. 北京地区消减PM_{2.5}等颗粒物污染的绿地设计技术探析 [J]. 中国园林, 2014, 30(7): 70 - 76.
(WANG Guoyu, BAI Weilan, LI Xinyun, et al. Research of greenbelt design technology on PM_{2.5} pollution reduction in Beijing [J]. Chinese landscape architecture, 2014, 30(7): 70 - 76.)
- [27] 李绥, 石铁矛, 杨振, 等. 基于风环境模拟与优化的滨海居住区规划设计 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 173 - 181.
(LI Sui, SHI Tiemao, YANG Zhen, et al. Study on the planning design for coastal community based on simulation and optimization of the wind environment [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2): 173 - 181.)
- [28] 郑茂辉, 金敏, 许建明. 城市建筑群环境有毒有害气体扩散数值模拟 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 48 - 52.
(ZHEN Maohui, JIN Min, XU Jianming. Numerical simulation of hazardous gas dispersion around buildings in urban environment [J]. Journal of tongji university (natural science), 2013, 41(1): 48 - 52.)
- [29] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Urban wood lands: their role in reducing the effects of particulate pollution [J]. Environmental pollution, 1998, 99(3): 347 - 360.
- [30] 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 and urban planning, 2011, 103(2): 129 - 138.
- [31] SU Z F, LIU Y, PENG Q F. Study on dust detention of the different greenland [J]. Arid environment monitoring, 2002, 16(3): 162 - 163.
- [32] ZHENG S W, XING G M, Li J, et al. Effect of dust catching capacity virecence tree species in the north of China [J]. Journal of Shanxi agriculture university (natural science), 2008, 28(4): 383 - 387.
- [33] 王晓磊, 王成, 古琳, 等. 春季典型天气下城市街头绿地内大气颗粒物浓度变化特征 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2889 - 2896.
(WANG Xiaolei, WANG Cheng, GU Lin, et al. Concentration variations of atmospheric particulate matters in street greenbelts under typical weather conditions inspring [J]. Chinese journal of ecology, 2014, 33(11): 2889 - 2896.)
- [34] 刘宇, 王式功, 尚可政, 等. 兰州市低空风时空变化特征及其与空气污染的关系 [J]. 高原气象, 2002, 21(3): 322 - 326.
(LIU Yu, WANG Shigong, SHANG Kezheng, et al. Time-space changing character of low-level wind in lanzhou city and its correlation with air pollution [J]. Plateau meteorology, 2002, 21(3): 322 - 326.)