

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.02.2016092602

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.

SUN Xiaodan, LI Haimei, LIU Xia, et al. Subduction ability of different green space structure on atmospheric particulate matter[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 289-295.

## 不同绿地结构消减大气颗粒物的能力\*

孙晓丹<sup>1</sup> 李海梅<sup>1\*\*</sup> 刘霞<sup>2</sup> 徐萌<sup>1</sup>

(1. 青岛农业大学园林与林学院, 青岛, 266109; 2. 山东绿城市政园林工程有限公司, 聊城, 252000)

**摘要** 随着城市化和工业化的发展, 空气环境问题日益突出, 大气颗粒物污染受到人们越来越多的关注. 为了研究城市道路中不同绿地结构对大气不同粒径颗粒物的消减作用, 本文选择青岛市城阳区主干道——长城路的4种不同绿地结构(“乔-灌-草”、“乔-草”、“乔-灌”、“灌-草”), 测定其对不同粒径颗粒物( $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_1$ )的消减率. 结果表明: (1) 不同粒径颗粒物的浓度日变化曲线呈现出“早晚高, 中午低”的变化趋势, 其中8:00—10:00的颗粒物浓度最高; 颗粒物浓度日变化与空气湿度变化相一致, 与温度变化相反; (2) 4种绿地结构对 $PM_{10}$ 的消减率表现为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“灌-草”>“乔-草”, 对 $PM_{2.5}$ 和 $PM_1$ 的消减率表现为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“乔-草”>“灌-草”; 且各绿地结构对 $PM_{2.5}$ 的消减能力最强, 其次为 $PM_1$ 和 $PM_{10}$ ; (3) 同一种绿地结构, 植物种类越丰富, 其消减大气颗粒物的能力越强.

**关键词** 绿地结构, 不同粒径, 颗粒物, 消减能力.

## Subduction ability of different green space structure on atmospheric particulate matter

SUN Xiaodan<sup>1</sup> LI Haimei<sup>1\*\*</sup> LIU Xia<sup>2</sup> XU Meng<sup>1</sup>

(1. College of Landscape Architecture and Forestry, Qingdao Agriculture University, Qingdao, 266109, China;

2. Shandong Greentown Municipal Garden Engineering Co., LTD, Liaocheng, 252000, China)

**Abstract:** With the development of urbanization and industrialization, air pollution is becoming increasing serious, and the air particulate matter pollution has received increased attention. In order to investigate the subduction effect of different green space structures on atmospheric particulate matter, four types of green space structures (“arbor-shrub-grass”, “arbor-shrub”, “arbor-grass”, “shrub-grass”) on Changcheng road, the main road in Chengyang District of Qingdao City was chosen to measure the different diameter particulate matter ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and  $PM_1$ ) subduction rates. The results showed that the diurnal variation of particulate matter concentration displayed a pattern of “high at night and in the morning and low at moon”, and the highest concentration of particulate matter occurred between 8:00—10:00 am. Daily variation of particulate matter concentration was consistent with the change of the air humidity and correlated inversely with temperature. The subduction rates of the four types of green space structures for  $PM_{10}$  were “arbor-shrub-grass” > “arbor-shrub” > “shrub-grass” > “arbor-grass”, and were “arbor-shrub-grass” > “arbor-shrub” > “arbor-grass” > “shrub-grass” for both  $PM_{2.5}$  and  $PM_1$ . The subduction ability of each green space structure on  $PM_{2.5}$  was the strongest, followed by  $PM_1$  and  $PM_{10}$ . For a particular

2016年9月26日收稿(Received: September 26, 2016).

\* 山东省青年基金(BS2012NY005), 研究生创新立项(760-1215024)和青岛市科技局项目(13-1-4-165-jch)资助.

**Supported by** Youth Fund of Shandong Province(BS2012NY005), Postgraduate technology innovation project(760-1215024) and Qingdao Technology Bureau Project(13-1-4-165-jch).

\*\* 通讯联系人, Tel: 13553079024, E-mail: lihaimei75@163.com

**Corresponding author**, Tel: 13553079024, E-mail: lihaimei75@163.com

type of green space structure, the more plant species it has, the stronger subduction ability it will have.

**Keywords:** green space structure, different diameter, particulate matter, subduction ability.

目前,我国正处于城市化和工业化高速发展时期,煤炭的大量燃烧、工厂生产排放的废气和汽车尾气等产生了大量的有害颗粒物,造成严重的雾霾天气,空气质量不断下降,环境问题亟待改善.而园林植物在滞留粉尘、消减大气颗粒物、提升空气质量方面具有重要作用,目前利用园林植物消减大气颗粒物是改善空气污染的有效手段.

近些年,学者们对颗粒物的污染特征、单一植物消减大气颗粒物的能力及影响因素等方面的研究较多,研究内容也不断深入,而对不同园林绿地结构消减不同粒径颗粒物的研究还处于探索阶段,主要集中在空气颗粒物浓度的日变化特征(一般认为呈现“双峰单谷”型或“双峰双谷”型趋势)<sup>[1-3]</sup>、影响因素(如温度、湿度、风速、光强、绿带宽度等)<sup>[4-8]</sup>以及不同绿地群落结构对颗粒物的消减能力等方面.如郑少文、董明坤等<sup>[9-10]</sup>对山西校园及北京道路中的不同绿地类型研究表明,“乔-灌-草”型绿地对颗粒物的消减作用较好.而王国玉等<sup>[11]</sup>提出了在道路绿带中,“(乔+灌+草)-乔”的配置结构有利于遮荫,对 $PM_{2.5}$ 的消减效果明显优于“乔-灌-草”型的渐次配置.相比植物个体滞尘能力研究,探索绿地结构整体对空气颗粒物的消减作用具有更重要的实际应用价值.

在以往的研究中,对于青岛市园林绿地结构消减不同粒径颗粒物(特别是 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ )的研究尚未见报道,由于各区域污染来源及气候条件不同,空气中颗粒物污染特征不同,影响因素较多,加之各地区的植物配置存在差异,其利用植物进行颗粒物治理的效果也不同.因此,本文主要对青岛市城阳区主要道路中不同绿地结构消减不同粒径颗粒物能力进行研究,旨在筛选出消减不同粒径颗粒物能力较强的群落结构,为今后园林道路绿化中植物的选择和配置提供科学依据.

## 1 实验部分(Experimental section)

### 1.1 研究区概况

研究区位于青岛市城阳区( $120^{\circ}12' E, 36^{\circ}20' N$ ),该区两面平原,一面环山(崂山),一面临海,属于暖温带大陆性季风气候,并具有独特的小气候区,年平均降水量 700 mm 左右,适宜南北方多种植物的生长.选择城阳区具有代表性的主干道——长城路作为试验地点,长城路是城阳区一条车流量较大、各种交通设施和活动场所比较完善、人口相对密集的三板四带式道路,该道路主要的绿地结构类型有“乔-灌-草”、“乔-草”、“乔-灌”、“灌-草”等 4 种.

### 1.2 研究方法

在长城路街旁绿地中选择 20 处植物长势较好的地点作为试验样地,即 4 种绿地结构(“乔-灌-草”、“乔-草”、“乔-灌”、“灌-草”)各选择 5 个典型的群落,编号 1—20,如图 1 所示,各样地的规格为 15 m(垂直于道路) $\times$ 20 m(平行于道路),各群落的监测点设置在样地的几何中心(m),距离道路 10 m 左右,同时在绿地外的硬质地面上设置对照点(s),取样点 m 与 s 之差为该绿地在这一时段内对大气颗粒物的消减值.

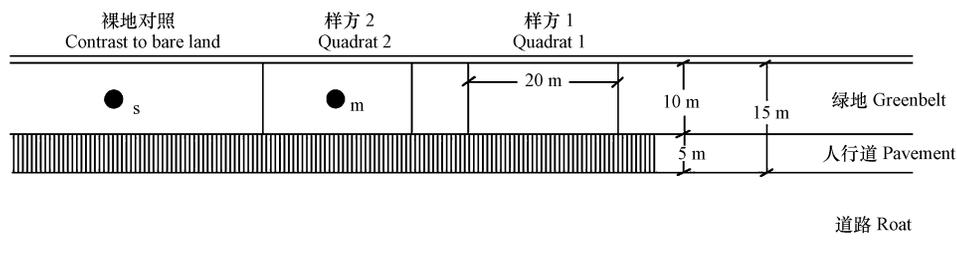


图 1 样方测量点平面示意图

Fig.1 Sketch of samples measuring position

于 2016 年 4 月下旬到 5 月上旬选择晴朗无风(风速 < 2 级)天气,对多个监测点进行不同粒径颗粒物的监测,每个群落监测设 3 次重复.采用 DustTrak II 8532 Handheld 便携式空气微粒检测仪每隔 2 h (即 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00)测定不同粒径颗粒物( $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_1$ )的浓度,设置仪器每 2 s 自动记录 1 次数据,每次监测 2 min,监测的高度为距离地面 1.2 m 处(与人体的平均呼吸高度保持一致).同时采用 Kestrel 4500 手持式风速风向气象仪实时监测记录空气湿度和温度.

### 1.3 数据处理

不同绿地结构对不同粒径颗粒物的消减能力(消减率)计算公式<sup>[1]</sup>如下:

$$p = \frac{C_s - C_m}{C_s} \times 100\%$$

其中, $C_s$ 为对照裸地 s 点的颗粒物浓度, $C_m$ 为绿地内部 m 点的颗粒物浓度.

试验数据分析采用 Excel、SPSS21.0 等软件进行统计处理.

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

### 2.1 大气颗粒物浓度的日变化

空白对照监测点的颗粒物浓度日变化曲线如图 2 所示,本文对不同粒径颗粒物( $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_1$ )的浓度日变化均进行了测定和比较,其日变化曲线具有一致性,基本呈现“早晚高,中午低”的变化趋势,且早上的空气颗粒物浓度高于晚上.监测时间段内上午 8:00 的颗粒物浓度最高, $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_1$ 的浓度分别为  $0.1951 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1630 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.1285 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ .推测可能是由于这个时间段为上班高峰期,车流量较大,汽车尾气排放较多,增加了大气颗粒物的浓度.10:00 后浓度开始下降,在中午 12:00 至 16:00 期间颗粒浓度较低,其中, $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 和  $PM_1$ 浓度在 16:00 时最低,分别为  $0.1109 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.0937 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和  $0.0737 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ .18:00 为下班高峰期,颗粒物浓度又有所回升.

试验测定期间最高温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最低温度为  $20.23 \text{ }^\circ\text{C}$ ,平均温度为  $23.18 \text{ }^\circ\text{C}$ ;大气湿度为  $29.14\%$ — $51.13\%$ ,平均湿度为  $36.69\%$ ;由图 2 可以看出,不同粒径颗粒物浓度的日变化特征与空气湿度变化相对一致,与温度变化相反,这可能是由于空气湿度较大时,空气中的水分含量增加,使颗粒物变潮湿,形成凝聚状态,降低了其扩散程度.在上午 8:00—10:00 期间温度较低,湿度较高,颗粒物浓度较高;10:00 之后随着温度的升高,湿度开始不断下降,颗粒物浓度也逐渐下降,其中在 14:00 温度达到一天中的最大值,湿度达到一天中的最小值,之后变化不大,到 18:00 时温度稍下降,湿度增加,颗粒物浓度又有所回升.另外在试验的监测过程中发现,风速增大时,仪器显示的瞬时值会减小,车辆通过时,仪器显示的瞬时值会增大,说明大气颗粒物浓度受风速和车流量的影响较大,与其他学者的研究结果一致<sup>[12-15]</sup>.

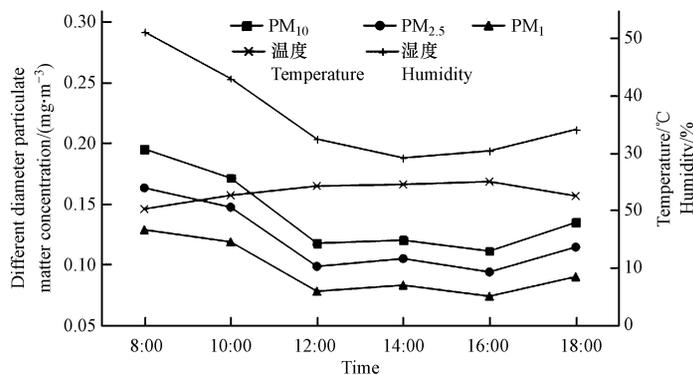


图 2 不同粒径颗粒物浓度的日变化

Fig.2 Diurnal variation of particulate matter concentration with different diameters

### 2.2 绿地结构消减大气颗粒物比较

#### 2.2.1 绿地结构消减大气颗粒物日变化

4 种绿地结构消减大气颗粒物的日变化规律如图 3 所示,不同绿地结构在一天中的不同时间段对

不同颗粒物的消减能力存在差异。“乔-灌-草”、“乔-草”对不同颗粒物的消减率日变化基本呈现出先下降后逐渐上升的趋势,“乔-灌”、“灌-草”则基本表现为上升趋势,同时4种绿地结构的消减率基本在18:00达到最大值。

“乔-灌-草”对 $PM_{10}$ 和 $PM_1$ 的消减率呈起伏状变化,且二者变化相反,对 $PM_{2.5}$ 的消减率先降低,在10:00达到最低值后逐渐上升,“乔-灌-草”对 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_1$ 的消减率均在18:00达到峰值,分别为9.01%、11.42%、9.31%。“乔-草”对 $PM_{2.5}$ 和 $PM_1$ 的消减率在10:00达到最低值,分别为2.80%和3.11%,对 $PM_{10}$ 的消减率在12:00达到最低值,仅为3.21%,之后“乔-草”对3种颗粒物的消减率逐渐上升,而对 $PM_{10}$ 的消减在16:00达到最大值(4.20%)后呈下降趋势,由图3可以看出,“乔-草”对 $PM_{10}$ 的消减率较其他2种颗粒物低。

“乔-灌”和“灌-草”对3种颗粒物的消减率总体呈起伏状上升趋势,“乔-灌”对 $PM_{2.5}$ 的消减能力较其他2种颗粒物强,“灌-草”对 $PM_{2.5}$ 的消减率在10:00后呈现持续下降趋势,在14:00达到最低值(2.72%)后逐渐上升,在18:00达到最大值(7.21%)。

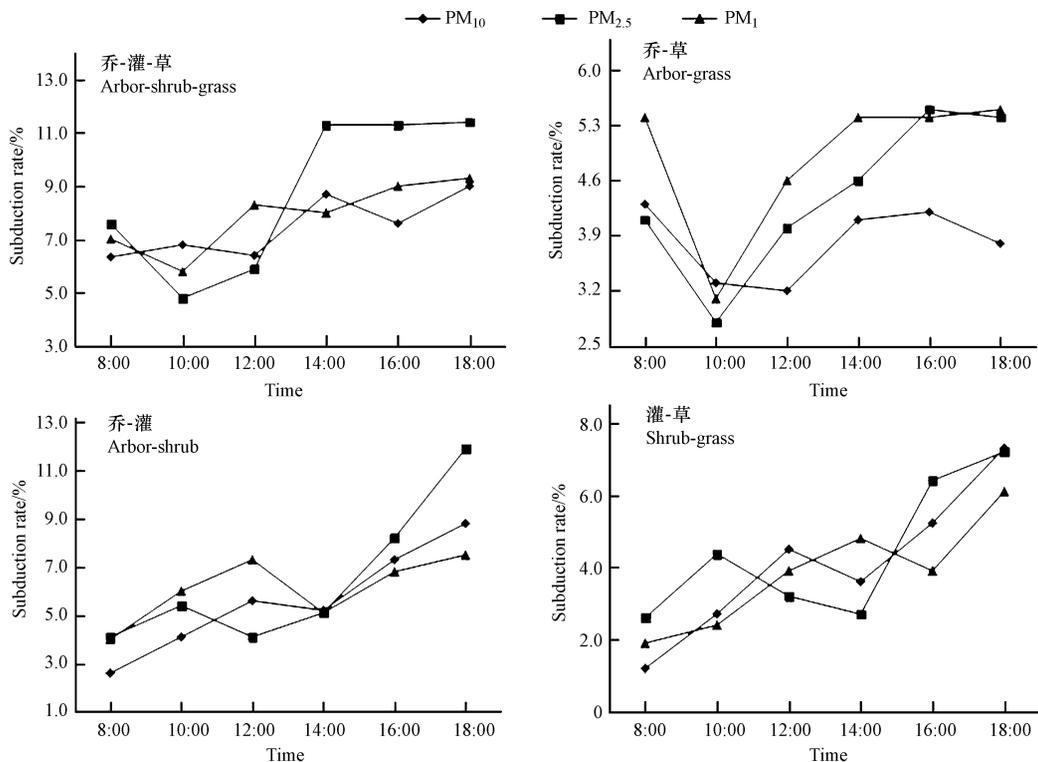


图3 不同绿地结构对不同粒径颗粒物的消减率

Fig.3 Subduction rates of different green space structures on the particulate matters with different diameters

### 2.2.2 不同绿地结构消减大气颗粒物比较

不同绿地结构对不同粒径颗粒物的平均消减率如表1所示,“乔-灌-草”对 $PM_{10}$ 的消减率最高,达到7.60%,与其他3种绿地结构均存在显著性差异( $P < 0.05$ ),其次是“乔-灌”,而“乔-草”、“灌-草”对 $PM_{10}$ 的消减率较低,二者差异不显著;4种绿地结构对 $PM_{2.5}$ 的消减率为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“乔-草”>“灌-草”,其中“乔-灌-草”的消减率达到8.73%,而“乔-草”、“灌-草”对 $PM_{2.5}$ 的消减率差异不显著;“乔-灌-草”、“乔-灌”对 $PM_1$ 的消减率均较高,分别为7.92%和6.11%,且二者差异不显著,其次为“乔-草”,“灌-草”对 $PM_1$ 的消减最低,仅为3.82%。因此,4种群落对 $PM_{10}$ 的消减率表现为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“灌-草”>“乔-草”,对 $PM_{2.5}$ 和 $PM_1$ 的消减率表现为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“乔-草”>“灌-草”。同时,表1也可以明显看出,绿地对 $PM_{2.5}$ 的消减能力最强,其次为 $PM_1$ 和 $PM_{10}$ 。综合来看,4种绿地结构对不同颗粒物的平均消减率为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“乔-草”>“灌-草”,其中“乔-灌-草”、“乔-灌”与其他2种绿地结构之间差异显著( $P < 0.05$ ),“乔-草”、“灌-草”之间差异不大。

表 1 不同绿地结构对颗粒物的消减率

Table 1 Subduction rates of different green space structures on the particulate matters

	乔-灌-草 Brbor-shrub-grass	乔-草 Arbor-grass	乔-灌 Arbor-shrub	灌-草 Shrub-grass
PM <sub>10</sub>	7.60%±0.0141a	3.89%±0.0058c	5.59%±0.0092b	4.10%±0.0048c
PM <sub>2.5</sub>	8.73%±0.0322a	4.51%±0.0075c	6.45%±0.0119b	4.45%±0.0085c
PM <sub>1</sub>	7.92%±0.0121a	4.93%±0.0136b	6.11%±0.0105a	3.82%±0.0026b
平均	8.08%±0.0029a	4.44%±0.0016c	6.05%±0.0054b	4.12%±0.0031c

注:小写字母表示不同绿地结构对颗粒物的消减率差异显著( $P < 0.05$ ). Note: Lowercase letters indicated significant difference the subduction rate of different greenbelt structure on particulate matter at 0.05 level.

试验表明,“乔-灌-草”结构对不同粒径颗粒物的消减能力均较强,其次是“乔-灌”,这可能是因为乔木的体积比较大,能够有效地降低风速,阻滞空气中的扬尘,灌木和草本能够有效阻滞空气中的降尘<sup>[16]</sup>,且该结构美观性更强.因此在城市绿化中,可优先采用“乔-灌-草”结构以提高城市的绿量,更大限度地发挥其生态功能.

### 2.3 同一绿地结构消减颗粒物能力比较

如表 2 所示,试验区域内选择的 4 种绿地结构中有乔灌木 16 种(乔木 6 种,灌木 11 种),隶属于 8 个科,15 个属,其中圆柏既有乔木形式,也有灌木形式.草坪为 3 种禾本科的草坪草(黑麦草、高羊茅、草地早熟禾)混播.

表 2 不同群落结构主要应用的植物

Table 2 The main applied plant in different community structure

植物名称 Plant name	拉丁学名 Latin name	科 Family	属 Genus	生活型 Life from
雪松	<i>Cedrus deodara</i>	松科	雪松属	乔木
洋白蜡	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	木犀科	白蜡树属	乔木
紫叶李	<i>Prunus cerasifera</i>	蔷薇科	李属	乔木
贴梗海棠	<i>Chaenomeles speciosa</i>	蔷薇科	木瓜属	乔木
侧柏	<i>Platyclusus orientalis</i>	柏科	侧柏属	乔木
圆柏	<i>Sabina chinensis</i>	柏科	圆柏属	乔木/灌木
连翘	<i>Forsythia suspensa</i>	木犀科	连翘属	灌木
红瑞木	<i>Swida alba</i>	山茱萸科	株木属	灌木
大叶黄杨	<i>Euonymus japonicus</i>	黄杨科	黄杨属	灌木
小叶黄杨	<i>Buxus sinica</i>	黄杨科	黄杨属	灌木
紫叶小檗	<i>Berberis thunbergii</i>	小檗科	小檗属	灌木
金叶女贞	<i>Ligustrum vicaryi</i>	木犀科	女贞属	灌木
火棘	<i>Pyracantha fortuneana</i>	蔷薇科	火棘属	灌木
石楠	<i>Photinia serrulata</i>	蔷薇科	石楠属	灌木
多花蔷薇	<i>Rosa multiflora</i>	蔷薇科	蔷薇属	灌木
刚竹	<i>Phyllostachys viridis</i>	禾本科	刚竹属	灌木
草坪草	—	禾本科	—	草本

如表 3 所示,同一种绿地类型对颗粒物的消减能力也有所不同.在“乔-灌-草”结构中,样方 1、2 的植物种类较样方 4、5 丰富,其对不同粒径颗粒物的平均消减率也明显高于样方 4 和 5,分别达到 9.49% 和 9.08%;在“乔-灌”结构中,样方 6 和 7(均由 4 种植物组成)对颗粒物的平均消减率较高,分别为 6.68% 和 6.19%,而样方 10(仅有 2 种植物组成)的平均消减率最低,仅为 3.38%;在“乔-草”结构中,样方 11 因具有 4 种植物而消减率较高,在“灌-草”结构中,样方 19、20 的植物种类较少,对不同粒径颗粒物的消减较低,仅为 2.79% 和 2.58%.虽然总体上“乔-灌-草”消减颗粒物的能力较强,但样方 5 因其植物种类较少,其消减率与“乔-灌”、“乔-草”、“灌-草”结构中的各群落相比均较低.因此,植物丰富度也是影响绿地结构消减不同粒径颗粒物的的重要因素之一,植物种类相对丰富的绿地结构其消减大气颗粒物的能力较高.在园林绿化时,可通过增加植物种类来达到提高植物滞尘能力、改善空气环境质量的目的.

表 3 各绿地群落对颗粒物的消减率

Table 3 Subduction rates of each greenland community on the particulate matter

绿地群落 Greenbelt community	样方编号 Quadrat number	群落配置模式 Community configuration pattern	平均消减率 Average subduction rate/%
“乔-灌-草”	1	雪松-火棘+红瑞木+多花蔷薇-草坪草	9.49
	2	雪松+圆柏-金叶女贞+刚竹-草坪草	9.08
	3	雪松+侧柏-圆柏+紫叶小檗-草坪草	7.78
	4	雪松+侧柏-珍珠梅-草坪草	3.39
	5	雪松-小叶黄杨-草坪草	2.59
“乔-灌”	6	雪松+圆柏-贴梗海棠+小叶黄杨	6.68
	7	雪松+紫叶李-圆柏+金叶女贞	6.19
	8	雪松-圆柏+金叶女贞	5.37
	9	紫叶李-大叶黄杨+紫叶小檗	4.79
	10	雪松-连翘	3.38
“乔-草”	11	雪松+紫叶李+圆柏-草坪草	6.49
	12	洋白蜡+紫叶李-草坪草	3.90
	13	雪松+侧柏-草坪草	3.79
	14	雪松-草坪草	3.18
	15	紫叶李-草坪草	3.18
“灌-草”	16	石楠+大叶黄杨+小叶黄杨-草坪草	3.79
	17	石楠+大叶黄杨+小叶黄杨-草坪草	3.38
	18	石楠+大叶黄杨+小叶黄杨-草坪草	3.10
	19	大叶黄杨+小叶黄杨-草坪草	2.79
	20	大叶黄杨+小叶黄杨-草坪草	2.58

### 3 结论 (Conclusion)

(1) 不同粒径颗粒物( $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_1$ )的日变化曲线具有一致性,基本呈现“早晚高,中午低”的变化趋势,且早上 8:00—10:00 的空气颗粒物浓度最高.不同粒径颗粒物浓度的日变化特征与空气湿度变化相一致,与温度变化相反.

(2) 不同绿地结构消减不同粒径颗粒物的能力存在差异,4 种绿地结构对不同颗粒物的平均消减率表现为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“乔-草”>“灌-草”,其消减率基本在 18:00 达到最大值,其中对  $PM_{10}$  的消减率表现为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“灌-草”>“乔-草”,对  $PM_{2.5}$  和  $PM_1$  的消减率表现为“乔-灌-草”>“乔-灌”>“乔-草”>“灌-草”;且各绿地结构对  $PM_{2.5}$  的消减能力最强,其次为  $PM_1$  和  $PM_{10}$ .

(3) 同一种绿地结构、不同植物配置对颗粒物的消减能力不同,植物种类越丰富,其消减大气颗粒物的能力越强.因此在城市绿化建设中,考虑绿地结构的同时还应尽量增加植物的丰富度,以达到最佳的滞尘效果,改善空气污染.

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 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.  
LI X Y, ZHAO S T, LI Y M, et al. Subduction effect of urban arteries green space on atmospheric concentration of  $PM_{2.5}$  in Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences,2014,23(4):615-621 (in Chinese).
- [ 2 ] 傅伟聪,董嘉莹,王茜,等.福州市冬季若干典型游憩地大气颗粒物浓度日变化规律研究[J].热带作物学报,2014,35(2):348-354.  
FU W C, DONG J Y, WANG Q, et al. Daily changes of atmospheric particulates in several typical recreation sites in Fuzhou City[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2014,35(2):348-354 (in Chinese).
- [ 3 ] 郭二果,王成,郟光发,等.北京西山典型游憩林空气颗粒物不同季节的日变化[J].生态学报,2009,29(6):3253-3263.

- GUO E G, WANG CH, QIE G F, et al. Diurnal variations of airborne particulate matters in different seasons in typical recreation forests in West Mountain of Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3253-3263 (in Chinese).
- [ 4 ] CHEN B, LU S W, LI S N, et al. Impact of fine particulate fluctuation and other variables on Beijing's air quality index[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2015, 22(7): 5139-5152.
- [ 5 ] 刘萌萌. 林带对阻滞吸附 PM<sub>2.5</sub>等颗粒物的影响研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.  
LIU M M. Studies on influence of the forest belt to intercept and adsorb particulate matter[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014 (in Chinese).
- [ 6 ] 陈上杰,牛健植,韩旖旎,等. 道路绿化带内大气 PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 100-105.  
CHEN S J, NIU J Z, HAN Y N, et al. Characteristics of mass concentration variations of PM<sub>2.5</sub> in the road greenbelts[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 100-105 (in Chinese).
- [ 7 ] 李素莉,杨军,马履一,等. 北京市交通干道防护林带内 PM<sub>2.5</sub>浓度变化特征[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(3): 245-252.  
LI S L, YANG J, MA L Y, et al. Variations of PM<sub>2.5</sub> concentrations inside the greenbelts along two urban traffic arteries in Beijing[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(3): 245-252 (in Chinese).
- [ 8 ] 刘宇,黄旭,偶春,等. 夏季不同结构绿地空气 PM<sub>2.5</sub>浓度与气候因子关系[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(5): 241-245.  
LI Y, HUANG X, OU C, et al. Relationships between PM<sub>2.5</sub> concentrations in different greenbelts and climate factors in summer[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(5): 241-245 (in Chinese).
- [ 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.  
ZHENG S W, XING G M, LI J, et al. Comparison of dust catching capacity of different greenbelt types[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2008, 36(5): 70-72 (in Chinese).
- [ 10 ] 董明坤,王吉喜,田美荣,等. 北京市道路绿地消减 PM<sub>2.5</sub>总量及其健康效益评估[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2861-2867.  
TONG M K, WANG J X, TIAN M R, et al. Subduction of PM<sub>2.5</sub> by road green space in Beijing and its health benefit evaluation[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(9): 2861-2867 (in Chinese).
- [ 11 ] 王国玉,白伟岚,李新宇,等. 北京地区消减 PM<sub>2.5</sub>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 G Y, BAI W L, LI X Y, et al. Research of greenbelt design technology on PM<sub>2.5</sub> pollution reduction in Beijing[J]. *Chinese Garden*, 2014, 30(7): 70-76 (in Chinese).
- [ 12 ] 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.  
CHEN B, WANG X P, LIU J L, et al. Mass concentration variations of airborne particulate matters inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7): 1171-1181 (in Chinese).
- [ 13 ] 陈波,鲁绍伟,李少宁. 北京城市森林不同天气状况下 PM<sub>2.5</sub>浓度变化[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1391-1399.  
CHEN B, LU SH W, LI S N. Dynamic analysis of PM<sub>2.5</sub> concentrations in urban forests in Beijing for various weather conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(5): 1391-1399 (in Chinese).
- [ 14 ] 罗娜娜,赵文吉,晏星,等. 交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(10): 3741-3748.  
LUO N N, ZHAO W J, YAN X, et al. Study on influence of traffic and meteorological factors on inhalable particle matters of different size [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10): 3741-3748 (in Chinese).
- [ 15 ] 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 X L, WANG C, GU L, et al. Concentration variations of atmospheric particulate matters in street greenbelts under typical weather conditions in spring[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 2889-2896 (in Chinese).
- [ 16 ] 廖莉团,苏欣,李小龙,等. 城市绿化植物滞尘效益及滞尘影响因素研究概述[J]. *森林工程*, 2014, 30(2): 21-24.  
LIAO L T, SU X, LI X L, et al. Review on the purification effects of urban landscape plants and factors affecting detaining dust[J]. *Forest Engineering*, 2014, 30(2): 21-24 (in Chinese).