

不同结构绿地细颗粒物变化及其与气象因子的关系

徐 宁¹, 刘艳秋², 李佰林², 苏 欣¹, 周蕴薇¹

(1. 东北林业大学 园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 江西环境工程职业学院, 江西 赣州 341000)

摘要:2016年7月,选取黑龙江省森林植物园内4种不同结构绿地计6个样地,采用TSIAM510粉尘仪观测PM_{1.0}, PM_{2.5}质量浓度变化,并使用KESTREL4500小型气象站实时记录森林植物园内主要气象因子变化,分析不同结构绿地2种细颗粒物变化规律以及其与气象因子的关系。结果表明,8:00–18:00,各样地中2种细颗粒物质量浓度变化规律为上午高,下午低,高峰值集中在8:00–10:00,低谷值出现在14:00–16:00;植物群落对2种细颗粒物均具有削减作用,不同绿地中2种细颗粒物浓度均值大小为:乔-灌-草绿地>乔-草绿地>草地>灌-草绿地;在乔-草结构绿地中,以落叶松 *Larix gmelinii* 为主的针叶林削减2种细颗粒物的能力强于以白桦 *Betula platyphylla* 为主的阔叶林;2种细颗粒物质量浓度与温度、风速呈负相关,与相对湿度、大气压呈正相关。

关键词: 绿地结构; 细颗粒物; PM_{1.0}; PM_{2.5}; 群落; 气象因子

中图分类号: S731.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-3776(2018)01-0011-09

Change of Fine Particles and its Relationship with Meteorological Factors in Different Structures of Green Space

XU Ning¹, LIU Yan-qi², LI Bai-lin², SU Xin¹, ZHOU Yun-wei¹

(1. College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Heilongjiang 150040, China;

2. Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Jiangxi, 341000, China)

Abstract: This research investigated two kinds of fine particles (PM_{1.0}, PM_{2.5}) in the atmosphere and meteorological factors (air temperature, relative humidity, wind speed, light intensity and atmospheric pressure) by using the SIDEPAKAM510 and the handheld weather instrument named Kestrel 4500 at Heilongjiang Forest Botanical Garden. The typical weather was chosen to analyze the relationship between the fine particles mass concentration and main meteorological factors in four different structures of green space. The results indicated that: In the 8:00–18:00 observation period, the concentration of two kinds of fine particles in the green land was high in the morning and low in the afternoon. High peak concentration in 8:00–10:00, trough value appears in 14:00–16:00. The different structure of green space has obvious effect on the reduction of fine particles, the mean concentration of fine particles in each community structure is: arbor- shrub -grass compound land > arbor-grass land > grassland > shrub -grassland. the ability of reducing fine particulate matter in the coniferous forest dominated by *Larix gmelinii* was stronger than that in the broad-leaved forest dominated by *Betula platyphylla*. Among the meteorological factors, there was a negative correlation between temperature and wind velocity and the concentration of fine particles in the air. The relative humidity and atmospheric pressure were positively correlated with the concentration of fine particles in the atmosphere.

Key words: structure of green space; fine particles; PM_{1.0}; PM_{2.5}; community; meteorological factors

收稿日期: 2017-08-27; 修回日期: 2017-10-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(2572017BA09); 林业公益性行业科研专项: 东北黑土区林业生态工程构建技术集成与示范(201404202)

作者简介: 徐宁, 硕士在读, 从事园林植物应用与生态研究工作; E-mail: 350469358@qq.com。通信作者: 周蕴薇, 博士, 教授, 从事园林植物应用研究; E-mail: dlzhyw@126.com。

近年来,受城市化和工业发展的影响,城市颗粒物排放源增多,大气颗粒物污染已经成为影响城市居民健康、生活的重大问题^[1]。在大气颗粒物中,细颗粒物 $PM_{1.0}$ 和 $PM_{2.5}$ 粒径小、比表面积较大,吸附能力强,易富集重金属、细菌和病毒等多种有毒有害物质危害人类健康^[2]。城市绿地在美化、改善城市环境等方面发挥着重要的作用,因此合理应用植物绿化城市,近年来成为国内外学者的研究热点^[3-4]。

目前,国内外有关植物滞留大气细颗粒物的研究多集中于机理分析、植物选择以及动态变化等方面^[5-7],而对细颗粒物受绿地空间结构和气象因子的影响等相关研究较少。选取黑龙江省森林植物园内 6 块样地,分析研究不同结构绿地 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ 2 种细颗粒物变化规律以及与气象因子的关系,以期为黑龙江省森林植物园的群落配置和绿地结构改造提供理论依据,为游人选择合适的时间开展森林游憩活动提供参考。

1 实验方法及内容

1.1 研究区概况

黑龙江省哈尔滨市为中温带大陆性季风气候,年平均气温 5.6°C ,最高月平均气温 23.6°C ,最低月平均气温 -15.8°C ,年降水量 423 mm。春、秋季短,为过渡季节,夏季温热多雨,冬季严寒干燥。是我国北方的高能耗、高污染的重工业城市,空气污染具有典型的冬、春季高,夏、秋季低的季节变化特征。黑龙江省森林植物园位于哈尔滨市香坊区, $45^{\circ}45' \text{N}$, $126^{\circ}16' \text{E}$,占地面积 136 hm^2 ,是中国地处市区的国家级森林公园之一。

1.2 样点设置

通过现场勘查,在黑龙江省森林植物园内选取植物生长状况良好、面积相似但植物群落结构差异性较大的乔-灌-草、乔-草、灌-草、草地 4 类结构 6 块样地(表 1)。在各样地内部距离样地边缘 50 m 以上设置 3 个 1.5 m 高的观测点,各观测点之间相距 10 m。同时,将位于园内的硬质铺装广场作为对照(CK)样地。

表 1 不同样地的基本特征
Table 1 Information of sample plots

样地	面积/ m^2	结构类型	植物构成	叶面积指数	郁闭度/%
CK	3 380	广场	—	—	—
1	3 481	乔-灌-草	落叶松 <i>Larix gmelinii</i> , 水曲柳 <i>Fraxinus mandschurica</i> , 黄檗 <i>Phellodendron amurense</i> , 接骨木 <i>Sambucus williamsii</i> , 金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i> , 白屈菜 <i>Chelidonium majus</i>	4.776	0.95
2	3 470	乔-灌-草	白桦 <i>Betula platyphylla</i> , 接骨木, 白屈菜, 牛蒡 <i>Arctium lappa</i> , 早熟禾 <i>Poa annua</i>	2.245	0.89
3	3 280	乔-草	落叶松, 玉簪 <i>Hosta plantaginea</i>	1.933	0.85
4	3 329	乔-草	白桦, 玉簪, 活血丹 <i>Glechoma longituba</i> , 委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	2.570	0.90
5	3 257	灌-草	紫丁香 <i>Syringa oblata</i> , 委陵菜	3.784	0.95
6	3 400	草地	早熟禾, 车轴草 <i>Galium odoratum</i>	—	—

1.3 实验方法

1.3.1 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ 浓度测定 在 2016 年 7 月,避开降雨、大雾、大风、霾等特殊天气,选择 5 个晴天进行实验。观测时间为 8:00—18:00,每隔 2 h 进行同步监测。以每个样地的 3 个观测点作为重复,使用 TSI-AM510 (SIDEPAKTM 公司)测定各观测点 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ 质量浓度^[8]。本文中所描述的 2 种细颗粒物指代 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ 。

1.3.2 绿地空间冠层结构表征因子的测定 本研究参照秦仲等^[9]实验方法,以样地内乔灌木的郁闭度和叶面积指数作为各植物群落冠层结构状况的表征因子。乔灌木的叶面积指数参照张明丽等^[10]实验方法,采用 LAI-2000 植物冠层仪(LI-COR 公司)测定。郁闭度参照殷杉等^[11]实验方法,以样地的两对角线上树冠覆盖的总长度与两对角线的总长之比计算所得。

1.3.3 气象因子的测定 参照郭建超等^[12]实验方法,采用 KESTREL-4500 小型气象站(NIELSEN-KELLERMAN 公司)同步监测各样地内空气温度、相对湿度、风速以及大气压等主要气象因子变化。为了科学比较和评价城市森林公园对 $PM_{2.5}$ 的净化效果,在分析过程中采用《环境空气质量标准》(GB3059—2012)为依据,并与哈尔滨市 7 月 $PM_{2.5}$ 浓度背景值相比较。

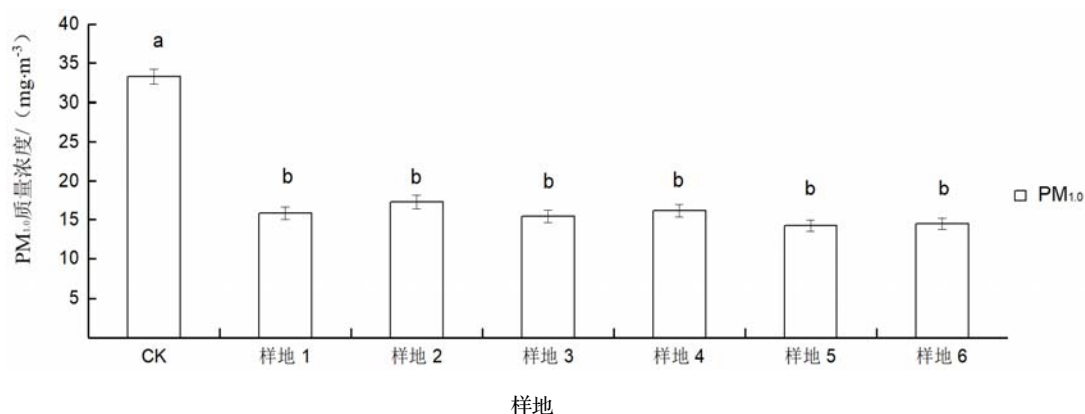
1.4 数据分析

运用 Excel 2003 和 SPSS 20.0 对样本数据进行整理和处理。

2 结果与分析

2.1 不同结构绿地 2 种细颗粒物质量浓度日均值比较

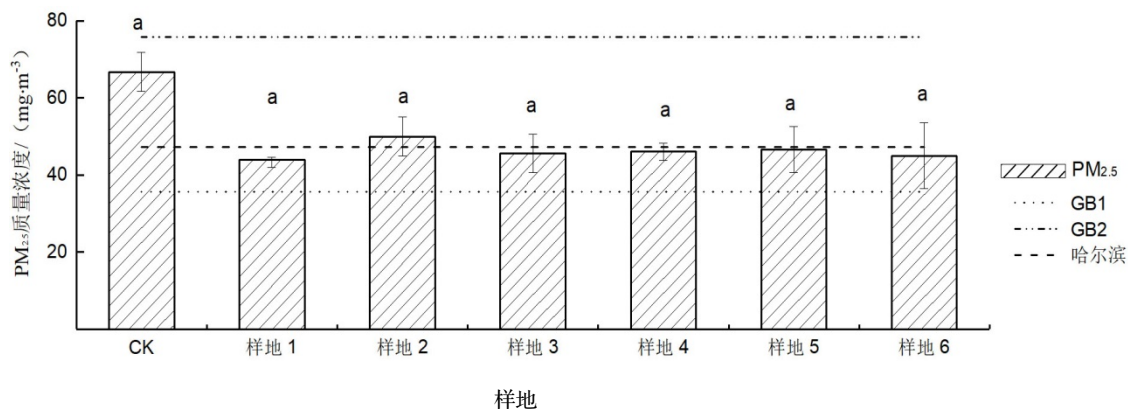
图 1 所示, 各绿地日平均 $PM_{1.0}$ 质量浓度都显著低于对照, 且与对照相比差异显著 ($P < 0.05$)。其中, 以样地 5 的 $PM_{1.0}$ 质量浓度日均值最低, 与对照相比降低了 57.6%。样地 2 相比于其它结构绿地削减空气中 $PM_{1.0}$ 能力最差, 与对照相比仅降低了 48.5%。其它样地内 $PM_{1.0}$ 质量浓度日均值大小为样地 4 > 样地 1 > 样地 3 > 样地 6, 与对照样地相比分别降低了 51.7%, 53.4%, 53.8%, 57.1%, 即使各绿地对降低 $PM_{1.0}$ 浓度具有较强效果, 但各绿地间并未形成差异显著性 ($P > 0.05$)。



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 各样地 $PM_{1.0}$ 质量浓度日均值

Figure 1 Daily mean mass concentration of $PM_{1.0}$ in each plot (mean \pm SD)



GB1 – 我国环境空气一类地区 $PM_{2.5}$ 浓度标准; GB2 – 我国环境空气二类地区 $PM_{2.5}$ 浓度标准; 哈尔滨 – 7 月份哈尔滨 $PM_{2.5}$ 日均浓度值。下同。

图 2 各样地 $PM_{2.5}$ 质量浓度日均值

Figure 2 Daily mean mass concentration of $PM_{2.5}$ in each plot (mean \pm SD)

图 2 显示, 各样地日均 $PM_{2.5}$ 质量浓度虽低于我国环境空气二类地区浓度标准, 但高于我国自然保护区、风景名胜等一类地区的浓度标准。这主要是因为植物群落虽对微气候环境具有改善功能, 但局部环境也受哈尔滨整个城市的污染影响。与对照样地相比, 各结构绿地对 $PM_{2.5}$ 降低值均在 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 改善效果较为明显, 但各结构绿地与对照样地间并未表现出差异显著性 ($P > 0.05$)。在各绿地中, 样地 1 日均 $PM_{2.5}$ 质量浓度最低, 样地 2 最高。其它绿地内日均 $PM_{2.5}$ 质量浓度大小为样地 5 > 样地 4 > 样地 3 > 样地 6, 与对照相比浓度分别降低 29.7%,

30.5%，31.8%，32.6%，通过多重比较分析可知，各结构绿地之间差异并不显著（ $P>0.05$ ）。

为进一步明确样地内部细颗粒物质量浓度与绿地空间结构各要素之间的关联性及其关联程度，采用统计分析方法对其进行相关性分析。通过相关性分析表（表 2）可知，各样地内部 $PM_{1.0}$ 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度均与叶面积指数和郁闭度呈负相关关系，但相关性并不显著。

表 2 绿地结构特征与 $PM_{1.0}$ 和 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度之间的相关系数
Table 2 Correlation coefficient between stand structure and average daily mass concentration of $PM_{1.0}$ and $PM_{2.5}$

项目	$PM_{1.0}$ 日均质量浓度	$PM_{2.5}$ 日均质量浓度	叶面积指数	郁闭度
$PM_{1.0}$ 日均质量浓度	1	0.540	-0.544	-0.264
$PM_{2.5}$ 日均质量浓度		1	-0.467	-0.455
叶面积指数			1	0.920*
郁闭度				1

注：* $P<0.05$ 。

2.2 不同结构绿地 2 种细颗粒物质量浓度日变化规律

由图 3 和图 4 可知，8:00–18:00 观测时段内，各样地内 2 种细颗粒物质量浓度日变化规律整体相似，峰值集中出现在 8:00–10:00，谷值出现在 14:00–16:00。

由图 4 所示，参照我国居住区、工业区和农村地区等二类地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度标准，8:00 对照和样地 3 内 $PM_{2.5}$ 质量浓度均不达标，超标率分别为 15.2%，4.1%。随着 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降，12:00 后各样地 $PM_{2.5}$ 基本能够达到二类地区标准，但观测时段内大部分时间不能达到自然保护区等一类地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度限值标准。

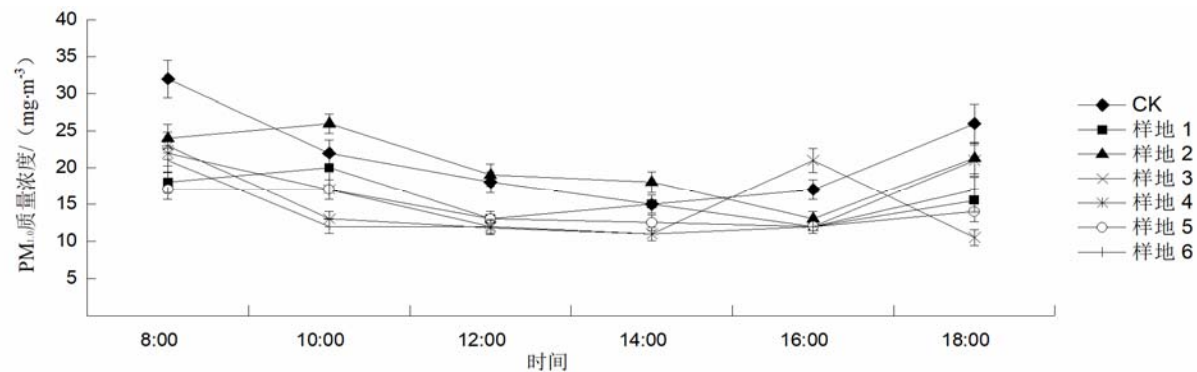


图 3 各样地 $PM_{1.0}$ 质量浓度日变化

Figure 3 Diurnal change of mass concentration of $PM_{1.0}$ in different plots (mean \pm SD)

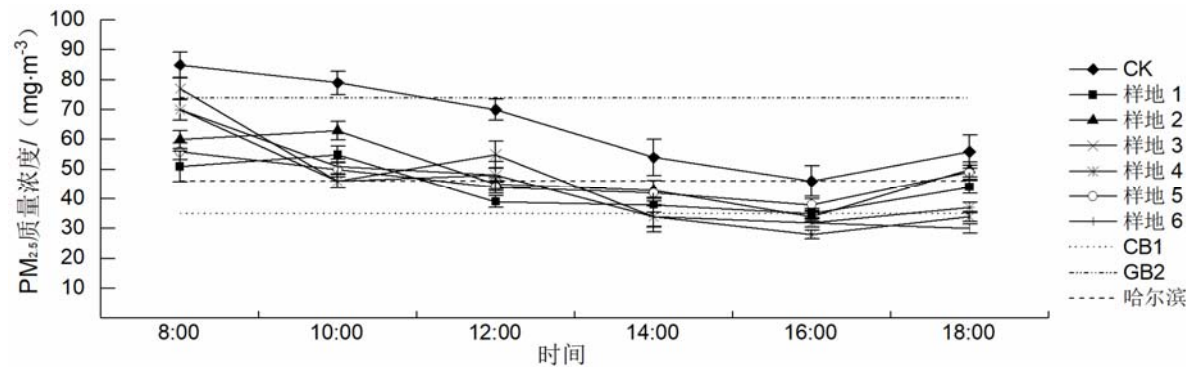


图 4 各样地 $PM_{2.5}$ 质量浓度日变化

Figure 4 Diurnal change of mass concentration of $PM_{2.5}$ in different plots (mean \pm SD)

2.3 主要气象因子与 2 种细颗粒物质量浓度的相关关系

2.3.1 相对湿度与 2 种细颗粒物质量浓度的相关关系 图 5 和图 6 所示,当空气湿度小于 75%时,各样地中 PM_{1.0} 与 PM_{2.5} 质量浓度整体随着空气湿度的增大而升高。表 3 所示,除样地 1 外,其余样地 2 种细颗粒物质量浓度与相对湿度均呈显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 正相关。

表 3 不同粒径颗粒物浓度与气象因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of mass concentration of PM_{1.0} and PM_{2.5} and meteorological factors

项目	细颗粒物	平均风速	平均温度	相对湿度	气压
对照	PM _{1.0}	0.038	-0.580*	0.548*	-0.425
	PM _{2.5}	-0.336	-0.036	0.598**	-0.654**
样地 1	PM _{1.0}	0.014	-0.554*	0.565*	0.007
	PM _{2.5}	-0.178	-0.218	-0.067	-0.333
样地 2	PM _{1.0}	-0.678**	-0.644**	0.717**	0.294
	PM _{2.5}	-0.626**	-0.632**	0.668**	0.489*
样地 3	PM _{1.0}	-0.029	-0.057	0.542*	0.634**
	PM _{2.5}	0.147	-0.281	0.797**	0.722**
样地 4	PM _{1.0}	0.051	-0.460	0.792**	0.599**
	PM _{2.5}	-0.001	-0.375	0.814**	0.826**
样地 5	PM _{1.0}	0.180	-0.711**	0.565*	-0.196
	PM _{2.5}	-0.022	-0.671**	0.684**	0.035
样地 6	PM _{1.0}	-0.325	-0.277	0.677**	0.577*
	PM _{2.5}	-0.002	-0.068	0.662**	0.864**

注: ** $P<0.01$; * $P<0.05$ 。

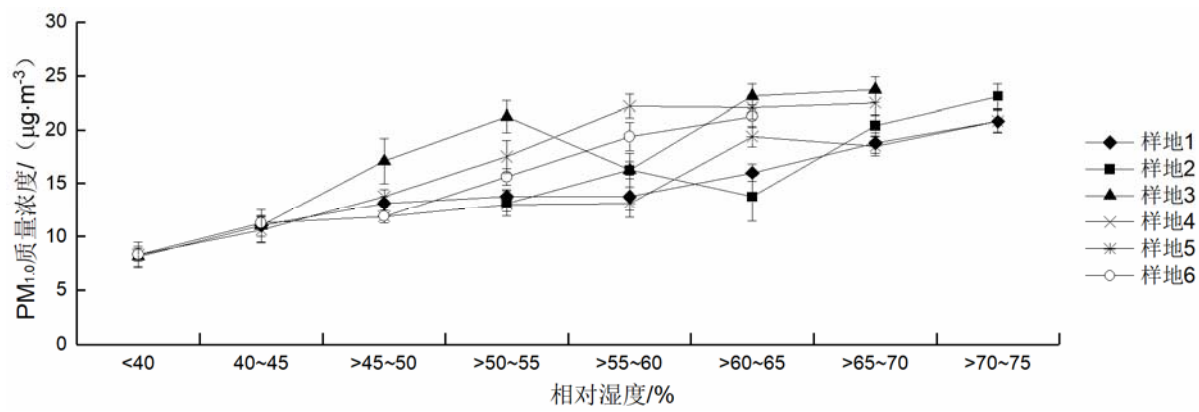


图 5 不同湿度范围内 PM_{1.0} 浓度变化

Figure 5 The change of PM_{1.0} at different range of relative humidity

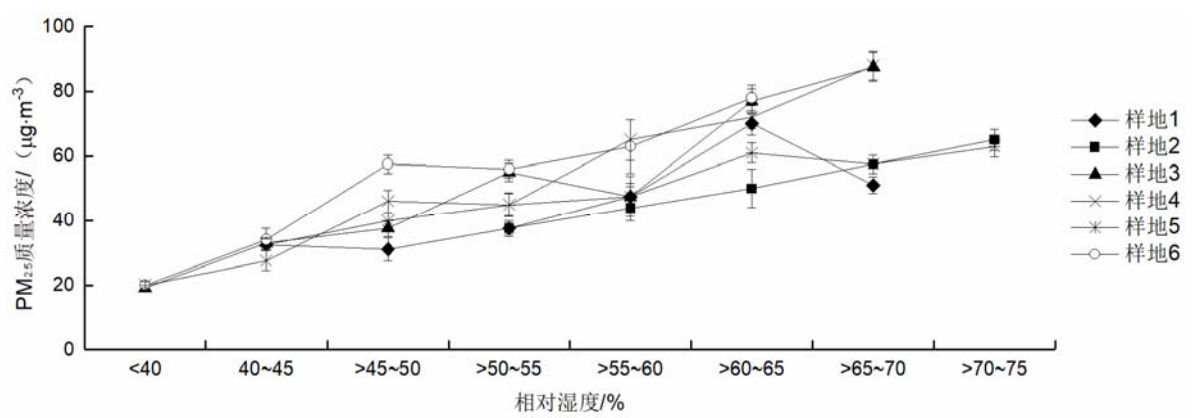


图 6 不同湿度范围内 PM_{2.5} 浓度变化

Figure 6 The change of PM_{2.5} at different range of relative humidity

2.3.2 气温与 2 种细颗粒物质量浓度的相关关系 图 7 和图 8 所示,当气温在 23 ~ 29℃时,各样地中 PM_{1.0} 与

PM_{2.5}质量浓度与气温并无统一变化趋势。除样地4、样地3和样地6外,其余样地2种细颗粒物质量浓度均随着气温的升高而降低。在29~33℃时,各样地中PM_{1.0}与PM_{2.5}质量浓度整体均随着气温的升高而降低。由表3可知,各样地内2种细颗粒物质量浓度均与气温呈负相关关系。其中样地1 PM_{1.0}与日平均气温呈显著负相关($P<0.05$),样地2和样地5的2种细颗粒物质量浓度均与气温呈极显著负相关($P<0.01$)。

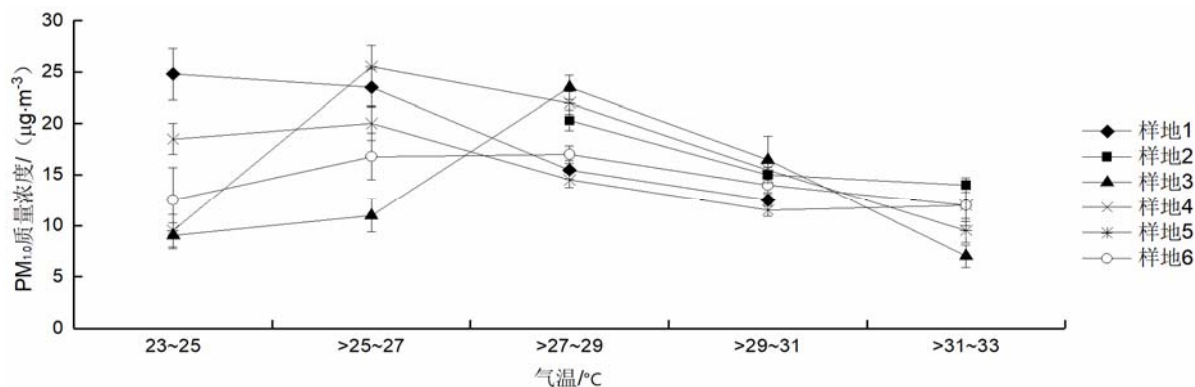


图7 不同气温范围内 PM_{1.0} 浓度变化

Figure 7 The change of PM_{1.0} at different range of temperature

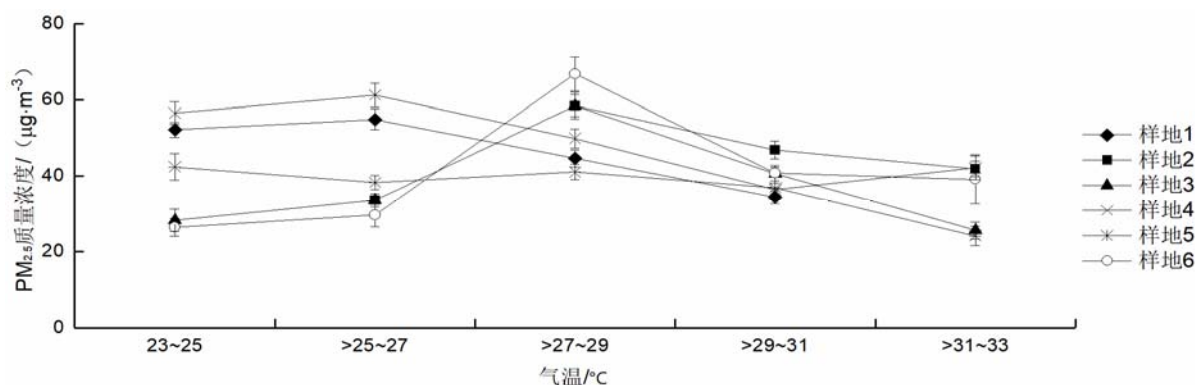


图8 不同气温范围内 PM_{2.5} 浓度变化

Figure 8 The change of PM_{2.5} at different range of temperature

2.3.3 风速与2种细颗粒物质量浓度的相关关系 图9和图10所示,当风速小于1.1 m·s⁻¹时,大部分样地中2种细颗粒物质量浓度整体随着风速的增大而降低。但当风速上升至1.1 m·s⁻¹之后,部分样地的2种细颗粒物质量浓度随风速的增大而增大。由表3可知,除样地3外其余样地中PM_{2.5}质量浓度与风速呈负相关关系,其中样地2内2种细颗粒物质量浓度与日平均风速度呈极显著负相关($P<0.05$)。

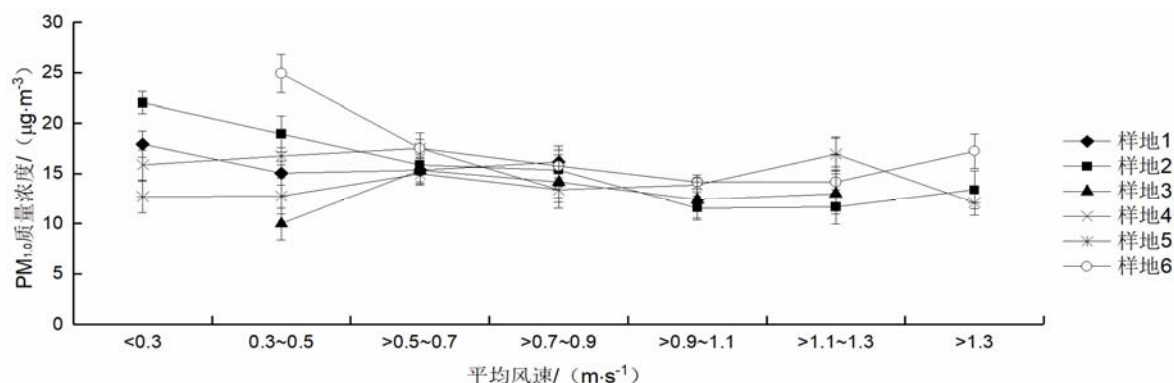
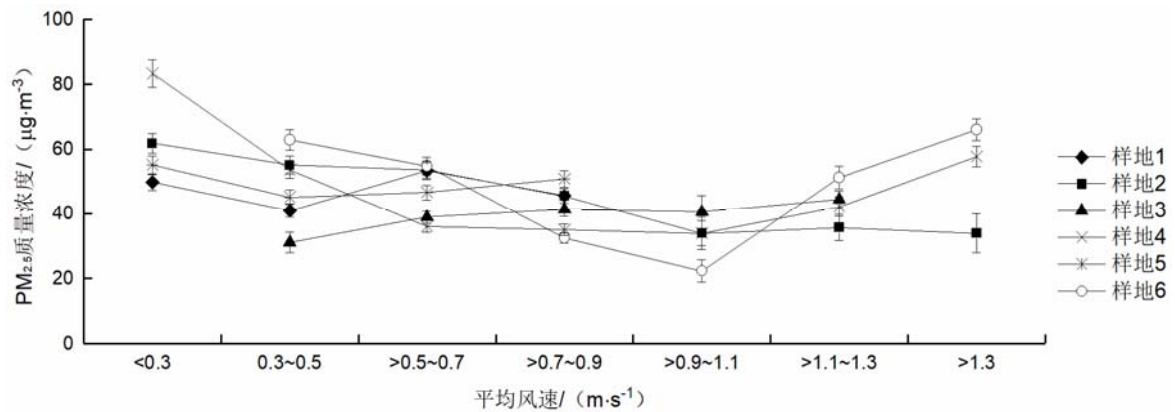
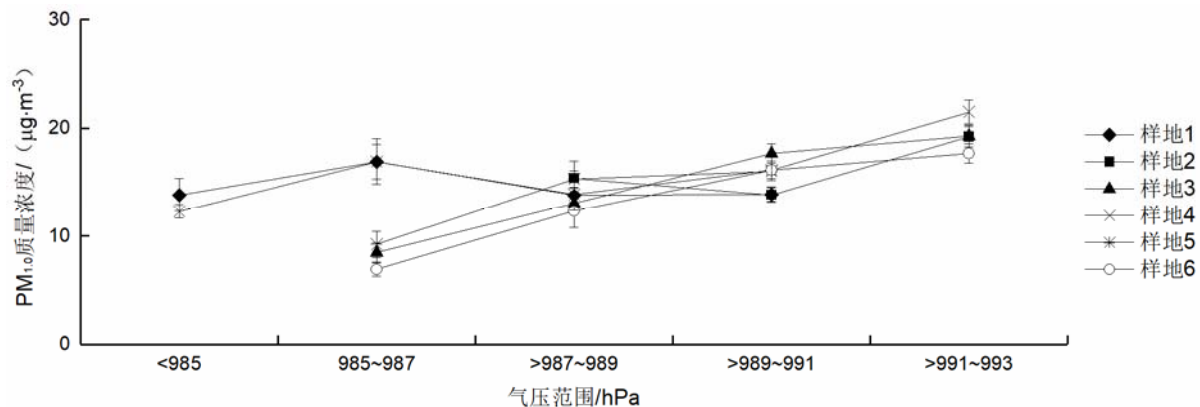
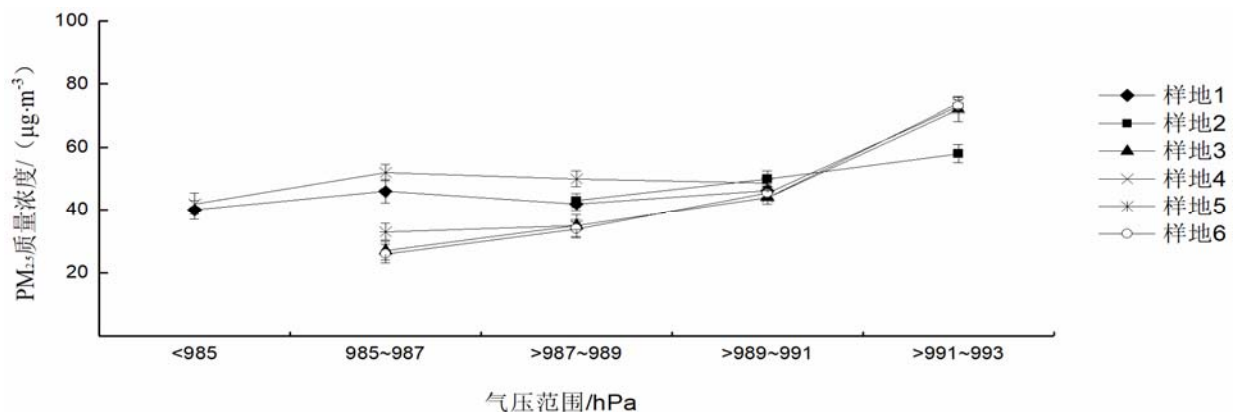


图9 不同风速范围内 PM_{1.0} 浓度变化

Figure 9 The change of PM_{1.0} at different range of wind speed

图 10 不同风速范围内 $PM_{2.5}$ 浓度变化Figure 10 The change of $PM_{2.5}$ at different range of wind speed

2.3.4 气压与 2 种细颗粒物质量浓度的相关关系 图 11 和图 12 所示, 当大气压小于 993 hPa 时, 各样地中 2 种细颗粒物质量浓度随大气压变化趋势大体一致, 即随着气压的增大而升高。当气压升至 989 hPa 后, 部分样地中 2 种细颗粒物质量浓度随温度的变化速率改变较为明显。由表 3 可知, 除对照样地、样地 1 和样地 5 外, 其余样地内 2 种细颗粒物质量浓度均与气压整体呈正相关关系。其中样地 3、样地 4 和样地 6 的日平均大气压与 2 种细颗粒物质量浓度呈显著 ($P<0.05$) 或极显著正相关 ($P<0.01$)。

图 11 不同气压范围内 $PM_{1.0}$ 浓度变化Figure 11 The change of $PM_{1.0}$ at different range of air pressure图 12 不同气压范围内 $PM_{2.5}$ 浓度变化Figure 12 The change of $PM_{2.5}$ at different range of air pressure

3 结论与讨论

公园绿地对空气细颗粒物具有一定的滞留作用^[13], 研究发现植物群落的滞尘作用与其叶面积指数和郁闭度等结构因子呈正相关关系, 与李新宇等研究结果相似^[14]。这是因为植物群落的生态效益主要是依靠叶片来完成, 因此单位绿地叶面积指数及郁闭度作为影响绿地冠层结构的基本要素通常用于衡量园林绿地生态功能的大小^[15]。但不同结构绿地与 2 种细颗粒物质量浓度相关性并不显著, 各群落结构细颗粒物浓度均值大小为乔-灌-草绿地>乔-草绿地>草地>灌-草绿地。这与汪结明等^[16,17]对不同植物群落内部细颗粒物质量浓度测定发现乔-灌-草结构绿地对细颗粒物削减最为明显的结果存在差异。造成这一差异的原因可能是, 哈尔滨市 7 月份空气湿度较高, 同时乔-灌-草复合群落垂直结构植物层次最丰富, 空气流通性较差, 绿地内细颗粒物易聚集且难以扩散。因此, 群落结构相对单一, 空气通透性较好的灌-草和草地削减细颗粒物的能力较强^[18]。在乔-草结构绿地中, 虽然以白桦为主的阔叶林(样地 4)叶面积指数及郁闭度均大于以落叶松为主的针叶林(样地 3), 但样地 3 削减细颗粒物的能力强于样地 4。其原因可能是落叶松能分泌植物油脂等物质, 有利于吸附空气中的细颗粒物^[19], 而白桦叶表纹饰细密且较浅, 吸附细颗粒物的能力较差^[20]。

植物群落的滞尘效应不仅与植物种类及群落结构有关, 还受温度、相对湿度、风速、大气压等小气象因子的影响^[21]。研究发现 2 种细颗粒物质量浓度与温度、风速呈负相关, 与相对湿度、大气压呈正相关。本研究所选样地中温度、风速、气压与 2 种细颗粒物质量浓度关系表现为: 当气温在 25~29℃之间时, 部分样地中 2 种细颗粒物质量浓度随温度的变化速率改变较为明显; 当风速升至 1.1 m·s⁻¹之后, 部分样地中 2 种细颗粒物质量浓度改变为随风速的增大而增大; 当气压升至 989 hPa 后, 部分样地中的 2 种细颗粒物质量浓度随温度的变化速率改变较为明显。这些结果表明气象因子与细颗粒物质量浓度的关系存在一定的阈值, 与古琳等^[22]对夏季空气颗粒物随小气候变化规律的研究结果相似。

城市绿地生态效应在小尺度时间上存在差异^[23], 研究表明黑龙江省森林植物园不同样地中 2 种细颗粒物质量浓度整体表现为上午高、下午低的特点。高峰值集中在 8:00–10:00, 低谷值出现在 14:00–16:00, 这与王成、吴志评等人研究结果类似^[7,24]。因此, 从大气细颗粒物污染情况来选择游园时间, 避免 8:00–10:00 游憩或者运动。此外, 公园可根据各气象因子与空气细颗粒物浓度的相关关系, 选择合适的气象因素作为预报园内大气细颗粒物质量浓度的依据, 以指导游人进行游园活动。本文群落结构最丰富的乔-灌-草绿地削减细颗粒物的能力较差, 一方面由于乔-灌-草复合绿地群落空气流通相对较弱, 细颗粒物扩散较慢; 另一方面与复合绿地群落内湿度较大有关。因此通过适时疏伐改善相关群落内部的通风情况, 提高绿地的滞尘能力。在植物选配时, 适度增加滞留细颗粒物能力较强的树种比例, 如落叶松等针叶树种分泌植物油脂, 对空气中细颗粒物具有较强吸附力。此外, 王会霞等^[25]研究发现植物叶片微形态结构越密集、深浅差别越大、叶表面绒毛数量越多, 越有利于滞留大气颗粒物。因此在北方公园绿地尽量搭配水曲柳、榆叶梅 *Amygdalus triloba*、东北连翘 *Forsythia mandschurica* 等叶片粗糙、具绒毛或沟壑密集的植物^[26]。同时, 设计公园植物群落时, 还应注意调整群落结构, 选择分枝点高、适应性强、疏透性好的乔木。城市绿地滞尘效应不仅在大尺度时间(季节)上存在差异, 同时也受环境空气质量条件的制约^[27,28]。本研究夏季城市森林公园内不同结构绿地细颗粒物变化特征, 且分析了气象因子与细颗粒物的关系, 其它季节、空间的大气细颗粒物动态变化以及空气细颗粒物与其它污染物和气象因素的交互作用将成为今后的研究重点^[29]。

参考文献:

- [1] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 我国 113 个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30(3): 410–415.
- [2] BECHTEL D G, WALDNER C L, WICKSTROM M. Associations between immune function in yearling beef cattle and airborne polycyclic aromatic hydrocarbons and PM₁₀ near oil and natural gas field facilities[J]. Arch Environ Occup Health, 2009, 64(1): 47–58.
- [3] 周旭丹, 安佰仪, 王薇, 等. 北方城市不同植物滞尘效应季节变化[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 489–493.
- [4] JAYASOORIYA V M, Ng A W M, MUTHUKUMARAN S, et al. Green infrastructure practices for improvement of urban air quality[J]. Urban

For Urban Green, 2017, 21: 34–47.

- [5] 刘莹莹, 肖湘东, 过显辰, 等. 五种常见群落小乔木对降温增湿效应和 $PM_{2.5}$ 削减效应的研究[J]. 北方园艺, 2016, 2: 74–77.
- [6] OTTELÉ M, BOHEMEN H D, FRAAIJ A L A. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls[J]. Ecol Engin, 2010, 36 (2): 154–162.
- [7] 王成, 郭二果, 鄯光发. 北京西山典型城市森林内 $PM_{2.5}$ 动态变化规律[J]. 生态学报, 2014, 34 (19): 5650–5658.
- [8] 赵金镯, 李丽, 钱春燕, 等. 上海市居民区大气细颗粒物污染水平及时空分布特征研究[J]. 卫生研究, 2012, 41 (1): 35–39.
- [9] 秦仲, 李湛东, 成仿云, 等. 北京园林绿地 5 种植物群落夏季降温增湿作用[J]. 林业科学, 2016, 52 (1): 37–47.
- [10] 张明丽, 秦俊, 胡永红. 上海市植物群落降温增湿效果的研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30 (2): 39–43.
- [11] 殷杉, 蔡静萍, 陈丽萍, 等. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益[J]. 生态学报, 2007, 27 (11): 4590–4594.
- [12] 郭建超, 齐实, 申云康, 等. 2 种城市林地 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化及其与气象因子的关系[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (6): 88–100.
- [13] 赵松婷, 李新宇, 李延明, 等. 公园绿地及周边环境 $PM_{2.5}$ 浓度特征及其影响因素[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2017, 41 (2): 187–1992.
- [14] 李新宇, 赵松婷, 郭佳, 等. 公园绿地植物配置对大气 $PM_{2.5}$ 浓度的消减作用及影响因子[J]. 中国园林, 2016, 8: 10–13.
- [15] 王美仙, 杨帆, 徐艳, 等. 深圳医疗花园植物群落的生态效益研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31 (4): 312–318.
- [16] 汪结明, 王良桂, 朱柯铎杰, 等. 不同园林绿地类型内空气 $PM_{2.5}$ 浓度的动态变化及其滞尘效应分析[J]. 环境工程, 2016, 7: 120–124.
- [17] 刘宇, 董蓉, 王晓立, 等. 不同群落结构绿地空气负离子浓度与颗粒物的关系[J]. 江苏农业科学, 2015, 43 (11): 465–467.
- [18] 陈波, 鲁绍伟, 李少宁. 北京城市森林不同天气状况下 $PM_{2.5}$ 浓度变化[J]. 生态学报, 2016, 36 (5): 1391–1399.
- [19] BRANFORD D, FOWLER D, MOGHADDAM M V. Study of aerosol deposition at a wind exposed forest edge using ^{210}Pb and ^{137}Cs soil invention[J]. Water Air Soil Pollut, 2004, 157 (1): 107–116.
- [20] 李新宇, 赵松婷, 郭佳, 等. 基于扫描电镜定量评价植物滞留大气颗粒物能力[J]. 西北林学院学报, 2016, 31 (1): 286–291.
- [21] 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.
- [22] 古琳, 王成, 王艳英, 等. 夏季持续高温天气下无锡惠山游憩林内空气颗粒物变化特征[J]. 林业科学, 2013, 49 (10): 66–73.
- [23] 郭含文, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 城市不同绿地 $PM_{2.5}$ 质量浓度日变化规律[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11 (4): 99–103.
- [24] 吴志评, 王成, 侯晓静, 等. 6 种城市绿地空气 $PM_{2.5}$ 浓度变化规律的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35 (4): 494–498.
- [25] 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.
- [26] 赵松婷, 李新宇, 李延明. 园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律[J]. 生态环境学报, 2014, 23 (2): 271–276.
- [27] 王铁浩, 凯旋, 薛兰兰, 等. 重庆城郊森林植被调控大气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的时空效应[J]. 生态环境学报, 2016, 25 (10): 1678–1683.
- [28] 翟广宇, 王式功, 董继元, 等. 兰州市不同粒径大气颗粒物污染特征及气象因子的影响分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24 (1): 70–75.
- [29] 刘金培, 汪官镇, 陈华友, 等. 基于 VAR 模型的 $PM_{2.5}$ 与其影响因素动态关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30 (5): 78–84.