

DOI: 10.5846/stxb202007071757

刘畅, 胡尚春, 唐立娜. 寒地校园植物群落对大气细颗粒物浓度的消减作用. 生态学报, 2021, 41(15): 6227-6233.

Liu C, Hu S C, Tang L N. Reduction effects of plant community on the concentration of atmospheric fine particles in a cold zone campus. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6227-6233.

寒地校园植物群落对大气细颗粒物浓度的消减作用

刘 畅^{1,2}, 胡尚春³, 唐立娜^{1,*}

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 东北林业大学园林学院, 哈尔滨 150040

摘要:近年来随着我国城市的快速发展, 空气污染作为城市生态环境破坏的首要问题日益严重。因此探究城市绿地中的植物群落是否能够消减大气细颗粒物浓度及其变化特征成为公众和学者广泛关注的焦点。选取位于寒地城市哈尔滨的东北林业大学作为研究对象, 通过对校园 $PM_{2.5}$ 浓度进行测定和校园植物群落进行调查, 定量地分析不同植物群落对 $PM_{2.5}$ 浓度的消减作用、 $PM_{2.5}$ 浓度的时间变化规律、 $PM_{2.5}$ 浓度与温度和空气相对湿度之间的关系。结果显示: (1) $PM_{2.5}$ 浓度日变化呈“双峰单谷”型, 早晚偏高; 季节变化是夏季 $PM_{2.5}$ 浓度最低, 秋季 $PM_{2.5}$ 浓度最高。 (2) 不同结构的植物群落对大气细颗粒物的削减效果略有差异, 乔灌木配置型绿地的 $PM_{2.5}$ 消减率为 30.30%, 消减效果最佳; 乔木和灌木的 $PM_{2.5}$ 消减率分别为 14.30% 和 7.77%, 消减效果较差。 (3) $PM_{2.5}$ 浓度与温度呈负相关关系, 与空气相对湿度呈正相关关系。

关键词: $PM_{2.5}$ 浓度; 寒地校园; 植物群落; 温度; 空气相对湿度; 消减效果; 相关性

Reduction effects of plant community on the concentration of atmospheric fine particles in a cold zone campus

LIU Chang^{1,2}, HU Shangchun³, TANG Lina^{1,*}

1 Key laboratory of Urban Environment and health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: In recent years, with the rapid development of cities in China, air pollution has become increasingly serious as the primary problem of urban ecological and environmental damage. Therefore, exploring whether plant communities in urban green spaces can reduce the concentration of atmospheric fine particles and their changing characteristics has become the focus of widespread attention by the public and scholars. This paper selects Northeast Forestry University in the cold city of Harbin as the research object. By measuring the concentration of $PM_{2.5}$ and investigating the plant community on campus, the effects of different plant communities on the reduction of $PM_{2.5}$ concentration, the temporal variation of $PM_{2.5}$ concentration and the relationship between $PM_{2.5}$ concentration and temperature and air relative humidity were analyzed quantitatively. The results show that: (1) the diurnal variation of $PM_{2.5}$ concentration shows a “double peak and single valley” pattern, with higher morning and evening; the seasonal variation presents the lowest $PM_{2.5}$ concentration in summer and the highest $PM_{2.5}$ concentration in autumn. (2) Plant communities with different structures have slightly different effects on the reduction of atmospheric fine particles. The reduction rate of $PM_{2.5}$ in arbor-shrub-grass greenbelt is 30.30%, which is the best reduction effect; the reduction rate of $PM_{2.5}$ of arbor and shrub was 14.30% and 7.77%, and the reduction effect

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0502902); 国家自然科学基金重点项目(71533003)

收稿日期:2020-07-07; **修订日期:**2021-02-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ltang@iue.ac.cn

was poor. (3) $PM_{2.5}$ concentration has a negative correlation with temperature, and a positive correlation with air relative humidity.

Key Words: $PM_{2.5}$ concentration; campus in cold zone; plant community; temperature; relative air humidity; reduction effect; correlation

随着我国城市的发展,人为活动给城市生态环境带来诸多问题,尤其是近年来凸显的城市大气污染问题。在全球范围内,颗粒物一直是大多数城市空气污染的主要指标之一,也是中国大多数城市的首要污染物^[1]。 $PM_{2.5}$ 是指空气中直径 $\leq 2.5 \mu m$ 的细颗粒,也称细颗粒物^[2]。 $PM_{2.5}$ 的浓度值越高,就代表环境的空气质量越差。为此,世界各国及有关国际组织将 $PM_{2.5}$ 的浓度值作为对衡量环境空气质量的标准^[3-4]。因此有效地控制大气细颗粒物污染是改善城市生态环境的必要举措。已有研究结果表明,由于植物能够通过吸附和滞留悬浮在空气中的颗粒物,从而降低空气中的颗粒物浓度^[5-7]。不同植物群落对改善空气中 $PM_{2.5}$ 等颗粒物的能力不同^[8-10]。因此城市绿地是生物降解 $PM_{2.5}$ 的可行途径^[11-12]。

目前国内外学者围绕 $PM_{2.5}$ 的组成来源^[13-16],浓度变化规律^[17-18]已经做了大量的研究,这些研究大多数以“城市”为单元的大尺度空间范围内,而以校园为对象的小空间范围内的 $PM_{2.5}$ 浓度特征研究则较为鲜有。校园绿地空间不同于一般的城市绿地,它的使用者具有特殊性,他们对绿地的使用率较高和使用周期较长,而且他们更关注周围环境的细微变化。因此,了解校园植物群落 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征,可以指导使用者特别是学生的空间活动,同时为决策者制定提升校园生态环境的相关政策提供参考。

1 实验方法及内容

1.1 研究区概述

寒地城市是分布在北半球一个特殊的城市群体,典型代表有哈尔滨、呼和浩特、长春和沈阳。其冬季漫长,1月平均气温在 $-18^{\circ}C$ 以下。在寒地城市可以通过观察植物生长状况和群落结构的变化来感知大自然四季的变化。

哈尔滨属于中温带大陆性季风气候,冬长夏短,四季分明,冬季1月平均气温约为 $-19^{\circ}C$;夏季7月平均气温约为 $23^{\circ}C$ 。全年平均降水量569.1 mm,降水主要集中在6—9月,夏季约占全年降水量60%。

东北林业大学位于哈尔滨市香坊区,东经 $125^{\circ}42'$ — $130^{\circ}10'$ 、北纬 $44^{\circ}4'$ — $46^{\circ}40'$,处于寒地城市,校园内植物种类丰富,群落结构完整,形成具有季节性的植物景观,属于典型的寒地校园植物群落^[19]。

1.2 样点设置

本研究选取东北林业大学校园内具有代表性且周边干扰性较小的五处植物群落作为样地(图1)。样地1以乔草为主,郁闭度较高,样地4以灌草为主,这两个样地植物群落结构比较简单,植物种类也比较单一。样地2和样地3是以乔灌草结合为主,植物种类比较丰富,植物群落也比较完整。样地5是空旷的场地,作为对照组。

1.3 实验方法和仪器

数据采集时间为2017年10月,2018年4月和6月,此时间段植物正处于生长季。按照春夏秋冬季节划分,各选出代表性的3 d(为避免环境变化等因素可能带来的误差,一般选定晴好且无风或微风的连续3 d)对东北林业大学校园内5处样地进行数据测定,以样地5为参照。每天从8:00—18:00在每个样地置测点一处,每次间隔2 h对温度、湿度、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 进行测定。

测定方法为:每个样地东西南北中各选一点在距离地面1.5 m处测试其温度、湿度、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ,记录5次取其平均值作为此时间段内样点数据。数据测定结束后,对数据进行列表记录。

实验仪器采用博世(BOSCH)cube空气质量检测仪,这个仪器可以较为快速精准检测 $PM_{2.5}$,该仪器的测



图1 研究样地

Fig.1 Study plot

量参数是颗粒物测量范围:0.3—1.0 μm ; 1.0—2.5 μm ; 2.5—10 μm 。同时采用华仪 MS6300 多功能环境检测仪来对小气候温度和湿度进行测量。

1.4 数据分析

运用 Excel 2003 和 SPSS 23.0 对样本数据进行整理和处理,得出不同植物群落 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间变化,以及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化与温度和湿度等气候因素的关联程度。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度季节变化规律

不同样地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随季节变化的趋势基本相同, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值夏季<春季<秋季(图2)。秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,可能与寒地秋季开始供暖有关,大量使用燃料会提高空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值,从而严重影响空气质量^[20]。与夏季不同的是,春季和秋季各群落 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值接近,且对照组(样地5)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值并不是最高的,这可能由于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值过高已经超出植物的调节范围,而样地5较开阔,空气流动性较好,有助于颗粒物在空气中扩散^[21]。夏季校园 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低,空气质量较好。

2.2 不同植物群落 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化规律

为避免春秋季节寒地受供暖等人为因素的干扰,选取夏季2018年6月9日—2018年6月11日三天进行监测,探究5种样地的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化差异。不同样地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化的曲线基本以同位相波动(图3),早晚偏高,8:00以后逐渐降低,10:00左右达到最低值,随后又逐渐升高。

样地2和样地3的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化规律相似且浓度值相对其他样地较低,这可能是由于它们的植物群落结构相似有关,群落的植物类型丰富且乔灌草搭配方式合理。样地1和样地4的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值偏高,这可能与它们的植物类型较单一有关。样地5作为对照组, $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度值远高于其他植物群落,说明植物能够一定程度上降低小环境的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,但不同植物群落对小环境的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日变化均有不同程度的影响。

2.3 植物群落对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

植物可以改善环境空气质量,这已成为人们的共识,为了解不同植物群落对降低细颗粒物浓度方面是否有差异,以植物群落较完整的夏季为例,对5处样地进行比较。由图3可以看出,样地为植物群落的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显低于空地,层次为乔灌草3层的植物群落样地2和样地3低于乔草和灌草样地,但其 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降不

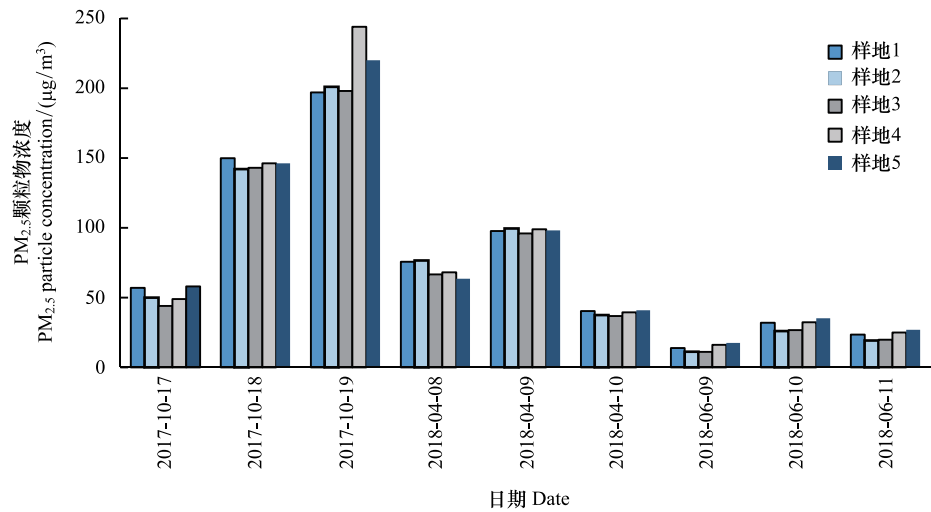


图 2 PM_{2.5} 浓度的季节变化图
Fig.2 Seasonal variation of PM_{2.5} concentration

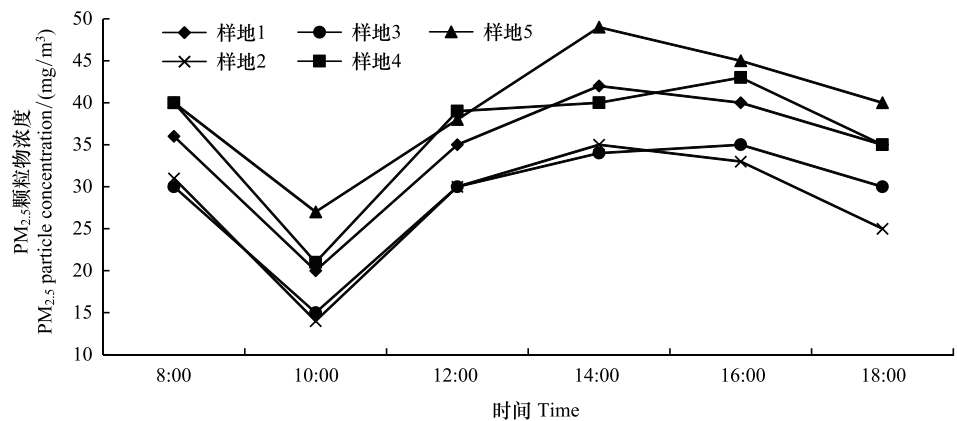


图 3 PM_{2.5} 浓度的日变化图
Fig.3 Diurnal variation of PM_{2.5} concentration

显著。因此对 5 组数据进行单因素方差分析得表 1,由表 1 可知乔草、乔灌木和灌木 3 种群落类型 P 值为 $0.226 > 0.05$,说明 3 种群落类型间 $PM_{2.5}$ 浓度变化差异不显著,表明植物能够降低环境中 $PM_{2.5}$ 浓度,但与植物群落层次关系不显著。

表 1 3 种植物群落类型 $PM_{2.5}$ 浓度的比较

	群落类型 Community type			<i>F</i>	<i>P</i>
	乔草 Arbor-grass	乔灌木 Arbor-shrub-grass	灌木 Shrub-grass		
$PM_{2.5}$ 数值 Number of $PM_{2.5}$	23.11±10.56a	18.78±9.84a	24.50±10.29a	1.531	0.226

数值后相同字母表示在 0.05 水平上差异不显著

2.4 不同植物群落对颗粒物浓度的消减影响

春秋季节容易受到供暖等人为因素的干扰,夏季植物生长旺盛,群落结构比较完整因此选取 2018 年 6 月 9 日—2018 年 6 月 11 日三天监测的数据进行计算。

不同植物群落对颗粒物浓度消减百分率的计算公式如下^[22]：

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

式中, C_s 是对照组(样地 5)的颗粒物浓度, C_m 是不同类型植物群落的颗粒物浓度。

三种植物群落对颗粒物浓度的消减率略有差异(表 2),层次为乔灌木 3 层的植物群落对颗粒物浓度的消减效果最佳,PM_{2.5}消减率为 30.30%,PM₁₀消减率为 26.52%。层次为乔木和灌木的植物群落相对较低,PM_{2.5}消减率分别为 14.30%和 7.77%,PM₁₀消减率分别为 13.60%和 7.72%。由此可以看出,提升植物群落的丰富度有助于提升其消减颗粒物浓度的能力,并且植物群落对 PM_{2.5}的消减效果优于 PM₁₀。

表 2 3 种植物群落类型对颗粒物浓度的消减率/%

Table 2 Reduction rate of particulate matter concentration of three types of plant communities

	群落类型 Community type		
	乔木 Arbor-grass	乔灌木 Arbor-shrub-grass	灌木 Shrub-grass
PM _{2.5} 消减率 Reduction rate of PM _{2.5}	14.30	30.30	7.77
PM ₁₀ 消减率 Reduction rate of PM ₁₀	13.60	26.52	7.72

2.5 环境因子对 PM_{2.5}浓度变化的影响

环境因子对颗粒物在空气中的扩散有较大的影响^[23-24],为了探究环境中环境因子特别是温度和湿度对校园植物群落 PM_{2.5}浓度变化的影响,以样地 2 为例。该样地植物群落较完整,且层次为乔灌木 3 层的植物群落,树木高低错落,景观优美。监测采样的时间为夏季 2018 年 6 月 9—11 日。

2.5.1 温度对 PM_{2.5}浓度变化的影响

温度变化是人们最容易感知到的。将监测到的数据与 PM_{2.5}进行相关性分析(图 4)。PM_{2.5}随温度的升高是降低的趋势,两者之间存在着一定的负相关关系,其中 y 代表 PM_{2.5}颗粒物浓度, x 代表温度, $R^2 = 0.6436$,其相关性较高。样地 2 在 8:00—10:00 时间段温度是最高的,对应的 PM_{2.5}浓度是一天中最低的。因此 PM_{2.5}与温度基本上为负相关关系,原因可能是温度较高时,空气对流和乱流旺盛,有助于颗粒物在空气中的扩散,最终导致 PM_{2.5}浓度会相应降低。

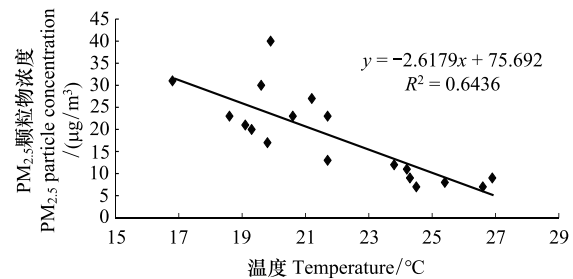


图 4 PM_{2.5}颗粒物浓度与温度的变化关系

Fig.4 Relationship between PM_{2.5} particle concentration and temperature

2.5.2 空气相对湿度对 PM_{2.5}浓度变化的影响

哈尔滨的降雨主要集中在夏季,夏季空气相对湿度较大。湿度是影响空气中 PM_{2.5}浓度的一个重要指标^[25]。PM_{2.5}与空气相对湿度存在一定的正相关关系(图 5),PM_{2.5}浓度随着空气湿度的增大而增加,其中 y 代表 PM_{2.5}颗粒物浓度, x 代表空气相对湿度, $R^2 = 0.6344$,其相关性较高。其原因可能是因为空气相对湿度较大,会使空气中的水蒸气含量增加。漂浮在空气中的细颗粒物会与水蒸气凝结形成雾,这会增加颗粒物的重量,从而颗粒物聚集在大气层中阻碍空气流通,最终导致空气中 PM_{2.5}浓度增加。

2.5.3 环境因子对 PM_{2.5}浓度变化的综合影响

考虑到空气中的 PM_{2.5}浓度的影响因素是复合多样的,因此采用回归分析的方法探究环境因子(温度和相对湿度)对 PM_{2.5}浓度变化的综合影响。温度和相对湿度与 PM_{2.5}浓度的相关性较强,温度与 PM_{2.5}浓度存在一定负相关关系,相对湿度与 PM_{2.5}浓度存在一定正相关关系。因此得到模型:

$$y = -1.683 \times Ta + 1.426 \times RH + 6.589 \quad R^2 = 0.814 \quad P < 0.01$$

Ta 代表空气温度(°C), RH 代表相对湿度(%), y 代表 PM_{2.5}浓度(μg/m³)

3 结论与讨论

研究发现受寒地供暖等人为因素的影响东北林业大学校园 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度春秋季节偏高,夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低,空气质量较好。校园中 $\text{PM}_{2.5}$ 日变化呈“双峰单谷”的分布状态,即“早晚高,白天低”这与王开燕等人的研究结果相似^[26]。由于早晚校园 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,因此建议师生可以在 10:00 左右进行户外活动^[4]。

吴志萍等^[27]在对清华大学 6 种类型绿地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化规律的研究中指出,层次合理和植被丰富的植物群落能够起到净化空气的作用。本研究中乔灌木搭配良好的样地 2 和样地 3 相对于植被较单一的样地 1 和样地 4 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值较低,但是差异不显著。空地中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度要明显高于植物群落。但是当 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度过高时,由于空地开阔,空气流动性较好,相对于层次丰富郁闭度较高的植物群落,其 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低^[21]。因此校园在提升植物丰富度的同时,应营造合理的植物层,充分考虑植被的体量和数量等因素。

本文比较了校园不同植物群落对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的消减率,发现 3 种类型植物群落对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的消减率略有差异,层次为乔灌木 3 层的植物群落对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的消减效果最佳,这与陈自新等^[28]、张新献等^[29]的研究结果相似,因此说明层次合理的绿地配置模式对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减作用明显。同时比较了不同植物群落对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度消减率的影响,发现植物群落对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减效果优于 PM_{10} 。

赵晨曦等^[30]对北京各县市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度特征进行研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与温度呈负相关、与相对湿度呈正相关,其中相对湿度对颗粒物的影响最大。本文通过探究校园植物群落 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受环境因子的影响中发现, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与温度呈一定负相关关系, R^2 值为 0.6436, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随温度的上升而有所下降。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与空气相对湿度呈正相关关系, R^2 值为 0.6344, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随着空气相对湿度的增加而增加。在探究环境因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的综合影响中,温度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在一定负相关关系,相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在一定正相关关系。因此建议,师生在校园空气湿度较大,天气闷热的状况下不要进行户外活动。

因此在优化校园环境和改善空气质量中,应将校园小气候要素与植物群落层次结合起来通过调节种植密度,合理选择植物的种类(如凤兰等颗粒物吸附能力较强的植物^[31]对)和搭配方式(如考虑乔木株高,冠形和叶形等可能影响空间郁闭度的因素),从而实现植物消减大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和改善空气质量的生态效益。校园的空气质量对师生们的生活至关重要,本文是对位于寒地城市的校园 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化进行研究,未来应加强对其他代表性区域校园的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化特征进行定量研究,从而能够更全面地探究降低空气中细颗粒物浓度的措施。

参考文献 (References):

- [1] 姜彩荣,刘红玉,李玉玲,李玉凤. 大气颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10})对地表景观结构的响应研究进展. 生态学报, 2016, 36(21): 6719-6729.
- [2] 张淑平,韩立建,周伟奇,郑晓欣. 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的气象影响因素解析. 生态学报, 2016, 36(24): 7897-7907.
- [3] 包红光,王成,杜万光,郭二果,王晓磊,贺然. 基于实地监测的城市林木调控 $\text{PM}_{2.5}$ 能力研究. 生态学报, 2020, 40(14): 4699-4709.
- [4] 杨维,赵文吉,宫兆宁,赵文慧,唐涛. 北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析. 环境科学, 2013, 34(1): 237-243.
- [5] 李新宇,赵松婷,李延明,郭佳. 北方常用园林植物滞留颗粒物能力评价. 中国园林, 2015, 31(3): 72-75.
- [6] 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. 生态环境学报, 2014, 23(2): 271-276.
- [7] 王华,鲁绍伟,李少宁,潘青华,张玉平. 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. 应用生态学报, 2013, 24(3): 869-877.
- [8] 邵锋,钱思思,孙丰宾,董丽,包志毅. 杭州市区春季绿地对 $\text{PM}_{2.5}$ 消减作用的研究. 风景园林, 2017, (5): 79-86.

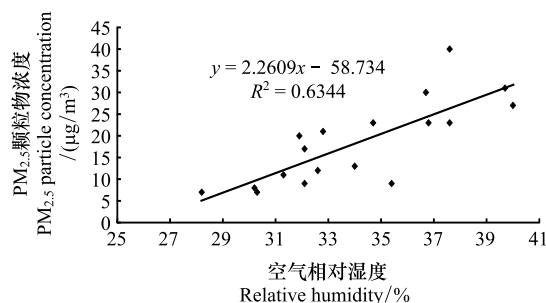


图 5 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物浓度与空气湿度的变化关系

Fig.5 Relationship between $\text{PM}_{2.5}$ particle concentration and air humidity

- [9] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environment Pollution*, 1998, 99(3): 347-360.
- [10] 孙淑萍, 古润泽, 张晶. 北京城区不同绿化覆盖率和绿地类型与空气中可吸入颗粒物(PM_{10}). *中国园林*, 2004, 20(3): 77-79.
- [11] 田志会, 刘佳明. 不同植物配置模式的大气颗粒物消减效应研究——以北京市中关村森林公园为例. *北京农学院学报*, 2020, 35(1): 50-54.
- [12] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboricultural Journal*, 2000, 24(2/3): 209-230.
- [13] Stone E, Schauer J, Quraishi T A, Mahmood A. Chemical characterization and source apportionment of fine and coarse particulate matter in Lahore, Pakistan. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(8): 1062-1070.
- [14] Thurston G D, Ito K, Lall R. A Source Apportionment of U.S. Fine Particulate Matter Air Pollution. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(24): 3924-3936.
- [15] 孙颖, 潘月鹏, 李杏茹, 朱若华, 王跃思. 京津冀典型城市大气颗粒物化学成分同步观测研究. *环境科学*, 2011, 32(9): 2732-2740.
- [16] Cheng Y, He K B, Du Z Y, Zheng M, Duan F K, Ma Y L. Humidity plays an important role in the $PM_{2.5}$ pollution in Beijing. *Environmental Pollution*, 2015, 197: 68-75.
- [17] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Li L. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles $PM_{2.5}$ in Chinese cities. *Environmental Pollution*, 2014, 194: 163-170.
- [18] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 李伟峰. 城市规模对大气污染物 NO_2 和 $PM_{2.5}$ 浓度的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5049-5057.
- [19] 赵丹, 崔毓萱, 刘筱玮, 王涵, 计红岩, 周晟, 岳桦. 寒地校园植物景观评价——以东北林业大学校园为例. *东北林业大学学报*, 2018, 46(9): 80-83, 88-88.
- [20] 李卫军, 邵龙义, 李金娟, 杨书申. 北京市大气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的污染水平特征研究. *环境与可持续发展*, 2006, (2): 18-20.
- [21] Janhäll S. Review on Urban Vegetation and Particle Air Pollution-deposition and Dispersion. *Atmospheric Environment*, 2015, 105: 130-137.
- [22] 郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 王惟, 刘常富. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展. *生态环境学报*, 2010, 26(6): 1465-1470.
- [23] Glavas S D, Nikolakis P, Ambatzoglou D, Mihalopoulos N. Factors affecting the seasonal variation of mass and ionic composition of $PM_{2.5}$ at a central Mediterranean coastal site. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(21): 5365-5373.
- [24] Tiwari, S, Chate, DM, Pragma, P, Ali K, Bisht D S. Variations in mass of the PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 during the monsoon and the winter at New Delhi. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12(1): 20-29.
- [25] 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. *生态学报*, 2016, 36(5): 1391-1399.
- [26] 王开燕, 王雪梅, 张仁健, 朱建军. 北京市冬季气象要素对气溶胶浓度日变化的影响. *环境科学研究*, 2008, 21(4): 132-135.
- [27] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 杨伟伟. 6 种城市绿地空气 $PM_{2.5}$ 浓度变化规律的研究. *安徽农业大学学报*, 2008, 35(4): 494-498.
- [28] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 张新献. 北京城市园林绿化生态效益的研究(3). *中国园林*, 1998, 14(3): 53-56.
- [29] 张新献, 古润泽, 陈自新, 李延明, 韩丽莉, 李辉. 北京城市居住区绿地的滞尘效益. *北京林业大学学报*, 1997, 19(4): 12-17.
- [30] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 张会兰, 赵冰清. 北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系. *环境科学*, 2014, 35(2): 418-427.
- [31] 季静, 王罡, 杜希龙, 金超, 杨海兰, 柳洁, 杨秋玲, 思尼, 李晶, 常彩涛. 京津冀地区植物对灰霾空气中 $PM_{2.5}$ 等细颗粒物吸附能力分析. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43(8): 694-699.