

DOI: 10.20103/j.stxb.202307071464

李笑寒,穆森,张祥,席子菡,姜博,王森,邱玲,高天.北方城市绿地对大气颗粒物浓度的削减作用对比研究.生态学报,2024,44(10):4051-4063.
Li X H, Mu S, Zhang X, Xi Z H, Jiang B, Wang S, Qiu L, Gao T. Comparison of the reduction effects of green space on atmospheric particulate matter concentration in northern cities. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4051-4063.

北方城市绿地对大气颗粒物浓度的削减作用对比研究

李笑寒,穆森,张祥,席子菡,姜博,王森,邱玲,高天*

西北农林科技大学风景园林艺术学院, 杨凌 712000

摘要: 尽管城市绿地能够改善空气质量,但由于实践中缺乏统一的绿地分类系统,很难从优化绿地植被结构的角度出发调节城市空气质量。因此,为了探究北方城市不同绿地削减大气颗粒物浓度效果的差异,构建了一套融入植被结构因子和物种组成的绿地分类系统,基于该分类系统,在北京、西安、宝鸡选取了 5 类共同常见的植被结构绿地类型,通过卫星图像判读与实地监测相结合的方式,探究了不同本底环境、植被结构、植物多样性、气象因子和时间因子对大气颗粒物浓度($PM_{2.5}$ 与 PM_{10})的影响。结果表明:(1)城市绿地率对大气颗粒物浓度造成显著影响,绿地率越高的本底环境下颗粒物浓度越低,即多绿本底<灰绿参半本底<灰色本底;(2)植被结构和植物多样性水平显著影响绿地的滞尘能力,北方城市中半开敞绿地的滞尘能力最好,其次为半闭合绿地与闭合绿地,开敞绿地滞尘能力最弱,植物多样性的增加将导致绿地内颗粒物浓度增加;(3)不同植被结构绿地内的大气颗粒物浓度受气象因素的显著影响,随温度和风速的增大而减小,随湿度的增大而增大;(4)北方城市绿地大气颗粒物浓度存在明显的季节和日变化规律,一年内大气颗粒物浓度在夏季最低,冬季最高;一天之内颗粒物浓度在 8:00—10:00 最低。上述研究结果以期为今后不同本底环境下以削减大气颗粒物浓度为导向的北方城市绿地规划与设计提供理论依据和实践方法。

关键词: 城市绿地;大气颗粒物;植被结构;气象因子;植物多样性

Comparison of the reduction effects of green space on atmospheric particulate matter concentration in northern cities

LI Xiaohan, MU Sen, ZHANG Xiang, XI Zihan, JIANG Bo, WANG Sen, QIU Ling, GAO Tian*

College of Landscape Architecture and Art, Northwest A&F University, Yangling 712000, China

Abstract: Although urban green space can make the air cleaner, the lack of a system to classify green space makes it difficult to improve air quality from the perspective of optimizing vegetation structure in practice. A classification system of green space that incorporates vegetation structure and species composition was constructed to explore the differences in reducing PM concentration among green spaces of different structures in northern cities. Based on the system, five common types of vegetation structure green spaces were selected in each of the three cities of Beijing, Xi'an, and Baoji. The effects of different background environments, vegetation structure, plant diversity, meteorological factors, and time factors on the concentrations of atmospheric particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}) were explored by combining interpretation satellite imagery and field measurements. The results are as follows: (1) Urban green space rate has a significant impact on the concentration of atmospheric particulate matter: the background environment with higher green space rate has lower concentration of particulate matter, which means the PM concentration in different background environments ascends in this order: green background, gray-green background, and gray background. (2) Vegetation structure and plant diversity significantly affect the dust-retention capacity of green spaces. As for various vegetation structures, the dust-retention

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31971722);陕西省林业科学技术创新计划项目(SXLK2021-0216, SXLK2023-0218)

收稿日期: 2023-07-07; **网络出版日期:** 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tian.gao@nwsuaf.edu.cn

capacity of the semi-open green space in northern cities marks the top, followed by semi-closed green space and closed green space, with the open green space at the bottom. When plant species diversity increases, the particulate matter concentration in the green space increases. (3) The concentration of atmospheric particulate matter in green spaces is significantly influenced by meteorological factors, decreasing with higher temperature and wind speed, and increasing with higher humidity. (4) There are obviously seasonal and daily changes in the concentration of atmospheric particulate matter in green spaces in northern cities. In the same year, the atmospheric particulate matter concentration is lowest in summer and highest in winter. The concentration of particulate matter is the lowest in the morning in one day. The results are expected to be used as the theoretical basis for future planning and design of green space concerned about atmospheric particulate matter reduction under different background environments.

Key Words: urban green space; particulate matter; vegetation structure; meteorology; plant diversity

大气颗粒物是中国城市空气污染的重要来源,绿地中的植物能够通过吸附和滞留降低大气颗粒物浓度。植被的空间结构影响着绿地的滞尘效果,大多数研究结果认为复杂的“乔-灌-草”植物群落滞尘效果最好,植被结构简单、绿量小的绿地滞尘能力不佳^[1-3]。相反,有研究表明多层绿地结构内的大气颗粒物浓度高于单层绿地结构^[4],林分密度过大会导致林内颗粒物浓度增加^[5]。不同植被结构的绿地承载着不同的生物多样性水平,不同本底下绿地的生物多样性水平往往影响大气颗粒物的浓度^[1,6]。此外,作为外部因素的气象因子和时间因素也影响着大气颗粒物聚集和扩散^[7-8]。

目前关于城市绿地滞尘的研究缺乏在景观和城市尺度的探索,且由于未考虑绿地斑块存在的本底环境以及生物多样性水平的影响,以往研究的结论往往存在差异。城市绿地结构类型分类体系尚无统一标准,缺乏问题导向性的参数化设计方法。因此,本研究以城市“景观尺度”为依托,形成一套具有统一标准的城市绿地结构分类体系,基于此,探索北方城市能够削减大气颗粒物浓度的绿地营建模式,以期今后不同城市、不同空间尺度下以呼吸健康为导向的城市绿地建设提供理论基础与参考。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象概况

基于全国 PM_{2.5}及 PM₁₀浓度空间分布并结合第一财经·新一线城市研究所《2017 城市商业魅力排行榜》一二三线城市划分选取 3 个北方典型城市:北京、西安、宝鸡的城市绿地作为研究对象(表 1)。三个城市同属于温带季风气候,经度跨度为东经 106.18°—117.4°,纬度跨度为北纬 33.35°—41.6°。

表 1 研究区域选择及其本底环境类型

Table 1 Selection of study area and its type of background environment

研究城市 City	本底环境类型 Type of background environment	所选研究绿地 Green space	研究城市 City	本底环境类型 Type of background environment	所选研究绿地 Green space
北京	多绿本底	北京奥林匹克森林公园	宝鸡	多绿本底	宝鸡人民公园
西安	多绿本底	西安世博园			渭河生态园
		大明宫国家遗址公园			宝鸡植物园
	灰绿参半本底	大雁塔广场及其周边		灰绿参半本底	渭河湿地公园
		清凉山森林公园			高新广场
	灰色本底	大寨路广场及唐城墙遗址公园			桥旁绿地
		环城公园			宝鸡文理学院
				灰色本底	城市公馆
					荣海盛世
					植物园居住区

1.2 城市绿地选择与分类

通过查看谷歌卫星图像和实地调研,在北京、西安、宝鸡三个城市选择植被群落层次多样,能代表该城市绿地特征的不同植被结构绿地类型。依据景观生态学对于城市景观空间尺度的定义($1\text{km}^2 < \text{面积} < 10\text{km}^2$),选取以路网为边界的景观斑块,在此基础上划分空间的本底类型,包括:多绿本底(城市绿地率 $>75\%$)、绿灰参半本底(城市绿地率 $35\%—75\%$)、灰色本底(城市绿地率 $<35\%$)^[7]。再通过植被水平结构(乔灌木冠幅的占比)、物种组成(林木类型)与植被垂直结构(林地的单层结构是指仅含乔木层,多层结构是指双层乔木层或乔木层与灌木层的组合)三类因子将绿地划分为不同植被结构绿地类型(表 2),形成一套统一标准的城市绿地分类体系^[1,6]。通过实地调研筛选出三个城市绿地中共同存在的五种植被结构绿地类型:开敞空间绿地、半开敞空间绿地、半闭合阔叶单层绿地、闭合阔叶单层绿地、闭合混交单层绿地作为研究对象(图 1),并选择灰色空间作为对照组。

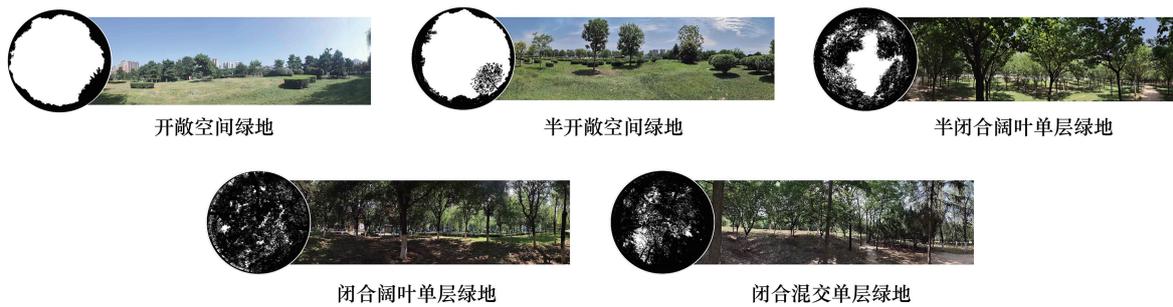


图 1 三个城市共有的 5 种植被结构类型实景图

Fig.1 Real photos of 5 types of vegetation structures that exist in the three cities

表 2 城市绿地结构分类体系

Table 2 The classification system of urban green space structure

	第一维度—横向结构 Level 1-horizontal structure	第二维度-物种组成 Level 2-species composition	第三维度-竖向结构 Level 3-vertical structure
具体分类 Specific classification	开敞式(乔灌木覆盖 $<10\%$) 半开敞式(乔灌木覆盖 $10\%—30\%$) 半闭合式(乔灌木覆盖 $30\%—70\%$) 闭合式(乔灌木覆盖 $>70\%$)	修剪草坪 阔叶林 针叶林 针阔叶混交林	— 单层 多层

1.3 实地监测

在北京、西安和宝鸡三个城市中不同本底环境内选择典型植被结构样地,每处样地内设置 3 处重复监测点。选取晴朗、无风或微风且监测前三天无降水出现的天气进行大气颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10})浓度监测,一天内进行 3 个时间段的数据监测($8:00—10:00$ 、 $12:00—14:00$ 、 $16:00—18:00$)。在成年人呼吸高度处($h=1.5\text{m}$),使用 MetOne 831 粉尘测量仪测量样地内的大气颗粒物浓度,并使用 Kestrel5500 手持气象站对样地内的温度、相对湿度、风速开展为期一年的连续监测。北京、西安和宝鸡三个城市的监测时间为 2019 年 1 月—12 月、2020 年 11 月—2021 年 11 月、2021 年 4 月—2022 年 3 月。

通过样带测量法对所选样地进行维管束植物多样性调研。每个研究区域内设置 3 条 30m 长的平行或“米”字形样带,设置的样带覆盖尽可能多的植物种类。记录每条样带上间隔 2m 的 1m 范围样带内接触样带或样带上方垂直处的植物种类和频次,植物总频度值为 3 条样带上出现的总频次,并对在样地范围内未出现在 3 条样带上的植物种类进行补录。使用 Shannon-Wiener 多样性指数(SHDI)和 Simpson 多样性指数(SIDI)反映各植被结构类型之间植物多样性的差异,公式如下:

$$\text{SHDI} = - \sum_{i=1}^m \left(\frac{A_i}{A} \right) \times \ln \left(\frac{A_i}{A} \right) \quad (1)$$

$$\text{SIDI} = 1 - \sum_{i=1}^m \left(\frac{A_i}{A} \right)^2 \quad (2)$$

式中, A_i 代表第 i 种植物的频度值, A 代表样方内所有植物频度值的总和, m 是样方中所有植物种类的总数。

1.4 数据处理

本研究使用 Microsoft Office Excel 进行数据录入, 使用 IBM SPSS Statistics 22 进行统计分析。分别将本底环境、植被结构、季节和时间作为自变量与三个城市共同监测的颗粒物浓度以及不同城市不同季节监测的颗粒物浓度之间建立一般线性模型, 将气象因子作为协变量进行分析。分别将植物多样性指数和气象因子与三个城市共同监测的颗粒物浓度以及不同城市不同季节监测的颗粒物浓度进行相关性分析, 以确定不同因素对城市绿地滞尘能力的影响。

2 结果与分析

2.1 本底环境对城市绿地大气颗粒物浓度的影响

在北方城市中, 不同的本底环境对绿地内大气颗粒物浓度产生极显著的影响(图 2), 三种本底环境中的大气颗粒物浓度两两之间均存在显著差异, 大气颗粒物浓度的平均值由低到高依次为多绿本底 < 灰绿参半本底 < 灰色本底(图 2)。

不同城市不同季节下, 本底环境对大气颗粒物浓度总体上具有极显著影响(图 3)。如图 3 所示, 西安市全年大气颗粒物浓度均呈现多绿本底 < 灰绿参半本底 < 灰色本底的趋势。北京在多绿本底下春季颗粒物浓度最低, 夏季最高(图 3)。宝鸡大气颗粒物浓度和本底的关系与粒径有关, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度全年均在多绿本底下最低, 在灰色本底下最高; PM_{10} 浓度均在多绿本底下最低, 除春季外最大值均出现在灰绿参半本底下(图 3)。

2.2 植被结构对城市绿地大气颗粒物浓度的影响

植被结构类型对北方城市绿地内大气颗粒物浓度产生极显著的影响(表 3、图 4)。其中, 开敞空间绿地的大气颗粒物浓度最高, 半开敞绿地大气颗粒物浓度最低, 两种半开敞和半闭合的空间大气颗粒物浓度低于完全开敞和闭合的空间。如图 4 所示, 不同粒径的大气颗粒物对植被结构的响应存在差异, 半开敞绿地和半闭合阔叶单层绿地的 PM_{10} 浓度低于灰色对照组, 开敞绿地和两类闭合绿地大气颗粒物浓度均高于对照组。 $\text{PM}_{2.5}$ 仅有半开敞空间绿地的大气颗粒物浓度低于对照组。

总体而言, 在西安和宝鸡 4 个季节中不同植被结构下的大气颗粒物浓度具有显著性差异, 而北京市植被结构间颗粒物浓度的差异仅存在于冬季的 PM_{10} 浓度中(表 3)。如图 5 所示, 北京秋冬两季闭合混交单层结构内颗粒物浓度最低。除春季半开敞空间大气颗粒物浓度最低外, 西安其余三季的半闭合阔叶单层结构中大气颗粒物浓度最低, 闭合阔叶单层结构大气颗粒物浓度普遍较高(图 5)。宝鸡大气颗粒物浓度与植被结构的关系呈现出冬春两季相似、夏秋两季相似的特点。冬春两季闭合混交结构颗粒物浓度最低, 两类乔灌木覆盖较少的空间(开敞、半开敞空间)颗粒物浓度较高; 夏秋两季闭合阔叶单层结构滞尘效果最好, 半开敞空间的滞尘效果最弱(图 5)。

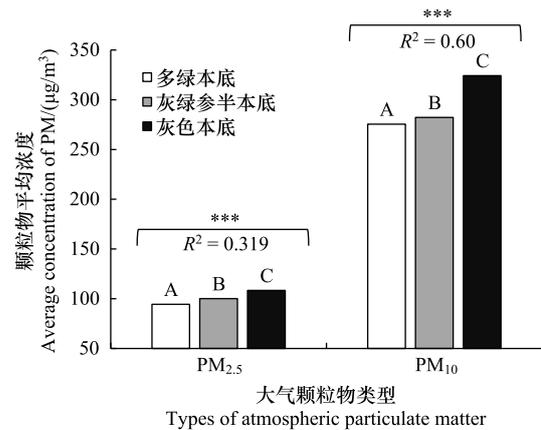


图 2 北方城市绿地不同本底环境下大气颗粒物平均浓度

Fig.2 The average concentration of atmospheric particulate matter under different background environments in green spaces in northern cities

同一组柱形图中两两柱间有相同字母的分组视为不存在显著差异, 无相同字母的分组两两间视为存在显著差异

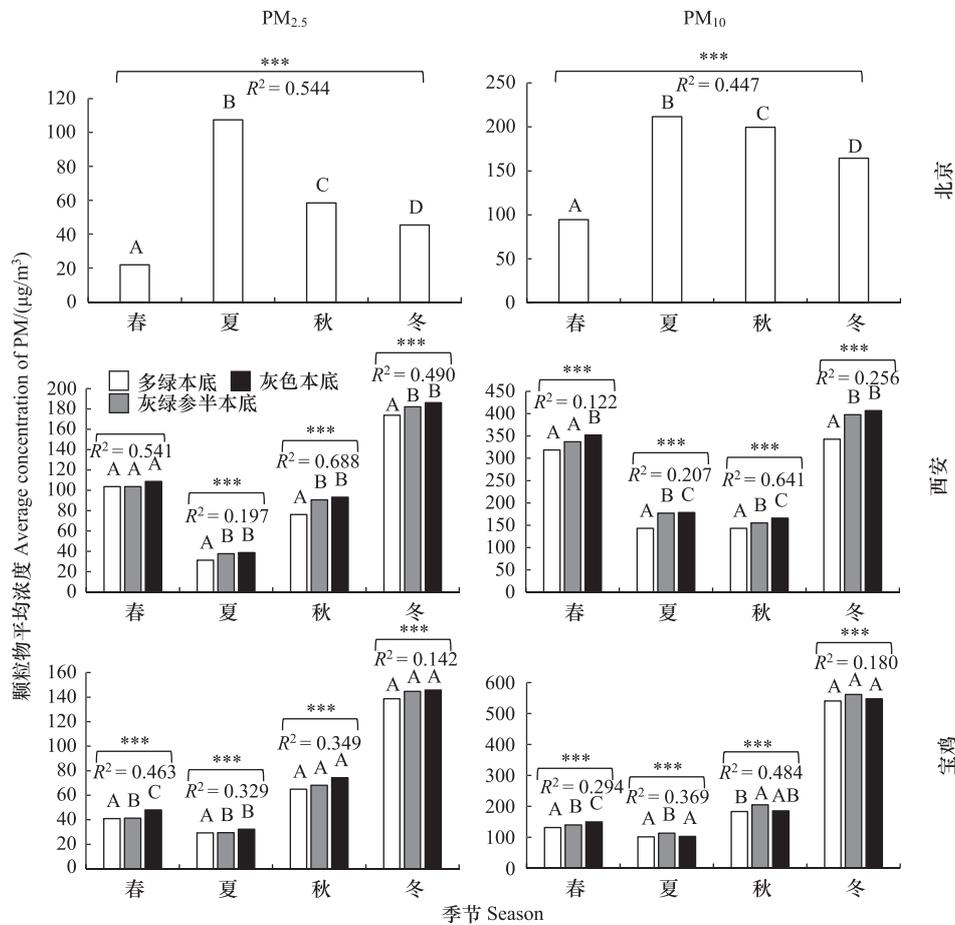


图 3 不同城市和季节的本底环境下大气颗粒物平均浓度

Fig.3 The average concentration of atmospheric particulate matter in background environments of different cities and seasons

同一组柱形图中两两柱间有相同字母的分组视为不存在显著差异,无相同字母的分组两两间视为存在显著差异

表 3 不同植被结构下大气颗粒物浓度差异性分析

Table 3 Analysis of differences in atmospheric particulate matter concentration under different vegetation structures

		PM _{2.5}		PM ₁₀	
		P	R ²	P	R ²
北方城市 Northern cities		<0.01	0.372	<0.01	0.178
北京	春	0.470	0.300	0.686	0.210
	夏	0.530	0.676	0.316	0.719
	秋	0.695	0.436	0.144	0.339
	冬	0.322	0.319	0.025	0.327
西安	春	0.050	0.542	<0.01	0.126
	夏	<0.01	0.152	<0.01	0.177
	秋	<0.01	0.687	0.010	0.636
	冬	0.013	0.484	<0.01	0.230
宝鸡	春	<0.01	0.483	<0.01	0.322
	夏	<0.01	0.320	0.041	0.064
	秋	0.125	0.328	<0.01	0.461
	冬	<0.01	0.160	0.010	0.200

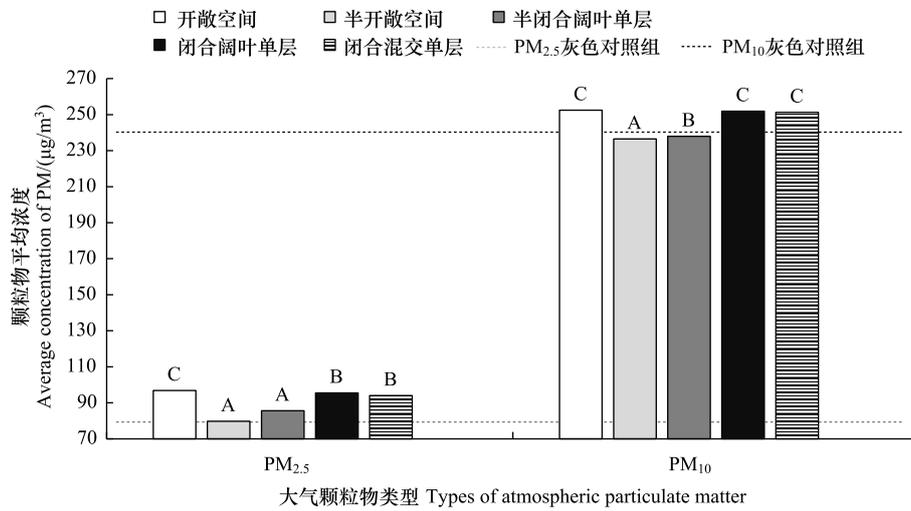


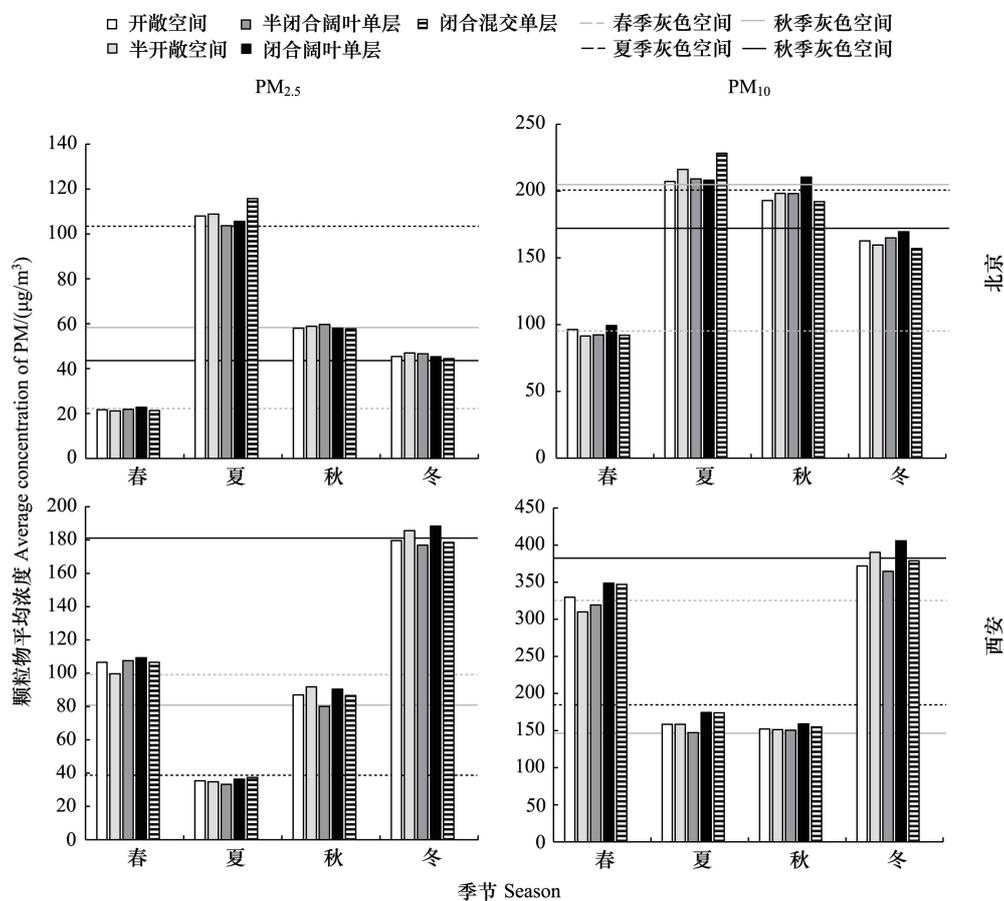
图 4 北方城市绿地不同植被结构内大气颗粒物平均浓度

Fig.4 The average concentration of atmospheric particulate matter in different vegetation structures of green spaces in northern cities

同一组柱形图中两两柱间有相同字母的分组视为不存在显著差异,无相同字母的分组两两间视为存在显著差异

2.3 植物多样性对城市绿地大气颗粒物浓度的影响

三个北方城市中共记录维管束植物种类 445 种,测得的 SHDI 值以及 SIDI 值和各层优势种见表 4。北方城市绿地内所监测的 SHDI 值、SIDI 值与大气颗粒物浓度存在极显著相关关系(图 6)。随着 SHDI 值在 0—3.4 区间内增大,大气颗粒物浓度呈现增大的趋势。随着 SIDI 值在 0—0.95 区间内增大,大气颗粒物浓度呈现



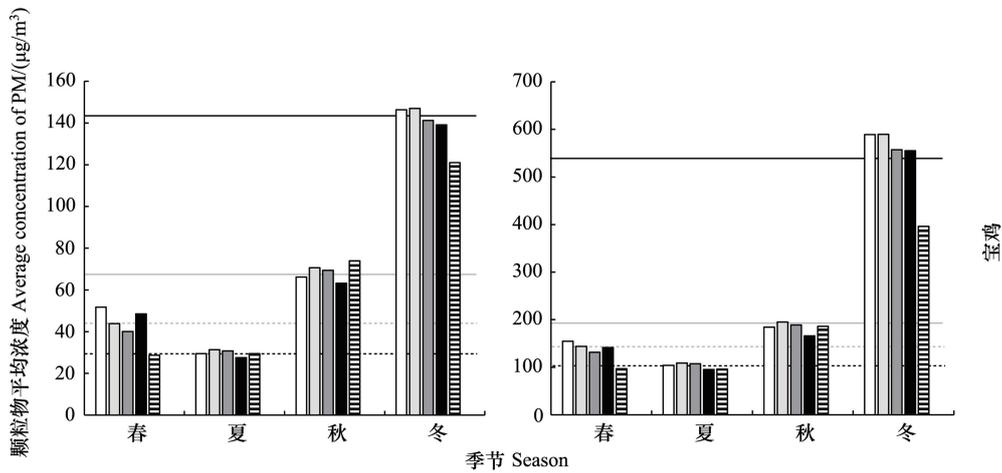


图5 不同城市和季节的植被结构下大气颗粒物平均浓度

Fig.5 Average concentration of atmospheric particulate matter under vegetation structure in different cities and seasons

增大的趋势。

不同城市和季节之间大气颗粒物浓度与两种植物多样性指数的相关性相同(图6)。除西安的 PM_{2.5} 浓度外,其余城市春季颗粒物浓度均与植物多样性指数呈负相关;除宝鸡 PM_{2.5} 浓度外,其余城市夏季颗粒物浓度均与植物多样性指数呈正相关。西安全年 PM_{2.5} 浓度与植物多样性均呈正相关,宝鸡则相反。

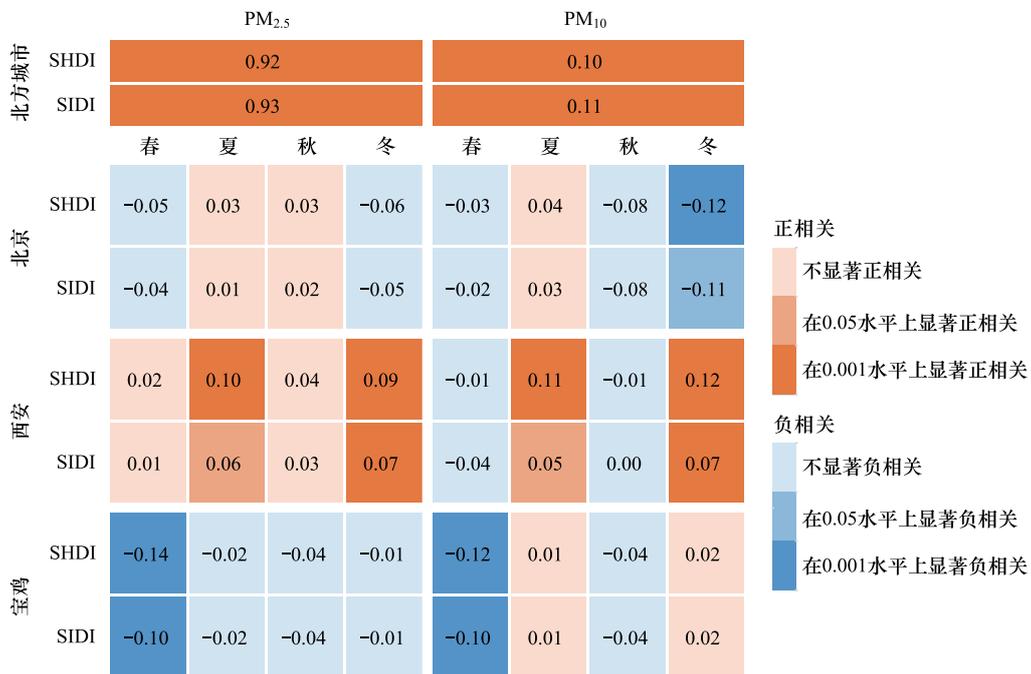


图6 植物多样性水平和大气颗粒物浓度的相关性

Fig.6 The correlation between the level of plant diversity and the concentration of atmospheric particulate matter

SHDI: Shannon-Wiener 多样性指数; SIDI: Simpson 多样性指数; 图中的数值为相关性系数

2.4 气象因素对城市绿地大气颗粒物浓度的影响

在三个北方城市绿地内,温度、相对湿度和风速对大气颗粒物浓度均产生极显著影响(图7)。在监测期

表 4 北方各城市绿地的香农多样性指数和辛普森多样性指数值及各层优势种

城市 City	平均 SHDI 值 Average SHDI value	平均 SIDI 值 Average SIDI value	Table 4 SHDI and SIDI of green spaces in northern cities, and dominant species in each layer		
			地被层优势种(出现频度 ≥ 10) Dominant species of ground cover layer (occurrence frequency ≥ 10)	灌木层优势种(出现频度 ≥ 10) Dominant species in shrub layer (occurrence frequency ≥ 10)	乔木层优势种(出现频度 ≥ 10) Dominant species in the tree layer (occurrence frequency ≥ 10)
北京	2.28	0.75	马唐 (<i>Digitaria sanguinalis</i>)	桤柳 (<i>Tamarix chinensis</i>)	银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>)
			紫花地丁 (<i>Viola philippica</i>)	欧洲荚蒾 (<i>Viburnum opulus</i>)	白蜡 (<i>Fraxinus chinensis</i>)
			牛筋草 (<i>Eleusine indica</i>)	接骨木 (<i>Sambucus williamsii</i>)	毛白杨 (<i>Populus tomentosa</i>)
			黄鹌菜 (<i>Youngia japonica</i>)	平枝栒子 (<i>Cotoneaster horizontalis</i>)	垂柳 (<i>Salix babylonica</i>)
			夏至草 (<i>Lagopsis supina</i>)	铺地柏 (<i>Juniperus procumbens</i>)	油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>)
			酢浆草 (<i>Oxalis corniculata</i>)	绣球荚蒾 (<i>Viburnum heteroaleari 'Sterile'</i>)	榆树 (<i>Ulmus pumila</i>)
			车前 (<i>Plantago asiatica</i>)		旱柳 (<i>Salix matsudana</i>)
			结缕草 (<i>Zoysia japonica</i>)		
			酢浆草 (<i>Oxalis corniculata</i>)	石楠 (<i>Photinia serratifolia</i>)	雪松 (<i>Cedrus deodara</i>)
			牛筋草 (<i>Eleusine indica</i>)	珊瑚树 (<i>Viburnum odoratissimum</i>)	女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)
西安	3.02	0.92	白车轴草 (<i>Trifolium repens</i>)	火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)	刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>)
			狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>)	黄杨 (<i>Buxus sinica</i>)	槐 (<i>Sophora japonica</i>)
			铁苋菜 (<i>Acalypha australis</i>)	八角金盘 (<i>Fatsia japonica</i>)	油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>)
			蛇莓 (<i>Duchesnea indica</i>)	紫荆 (<i>Cercis chinensis</i>)	槲 (<i>Melia azedarach</i>)
			婆婆纳 (<i>Veronica polita</i>)	贴梗海棠 (<i>Chaenomeles speciosa</i>)	棕桐 (<i>Trachycarpus fortunei</i>)
			紫花地丁 (<i>Viola philippica</i>)	海桐 (<i>Pittosporum tobira</i>)	栎 (<i>Koelreuteria paniculata</i>)
			酢浆草 (<i>Oxalis corniculata</i>)	小蜡 (<i>Ligustrum sinense</i>)	女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)
			狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>)	石楠 (<i>Photinia serratifolia</i>)	雪松 (<i>Cedrus deodara</i>)
			早熟禾 (<i>Poa annua</i>)	紫叶小檗 (<i>Berberis thunbergii</i>)	紫叶李 (<i>Prunus cerasifera 'Atropurpurea'</i>)
			白车轴草 (<i>Trifolium repens</i>)	金叶女贞 (<i>Ligustrum × vicaryi Rehder</i>)	日本晚樱 (<i>Prunus serrulata var. lannesiana</i>)
宝鸡	2.53	0.77	黑麦草 (<i>Lolium perenne</i>)	石榴 (<i>Punica granatum</i>)	旱柳 (<i>Salix matsudana</i>)
			酢浆草 (<i>Oxaliscorniculata</i>)		
			狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>)	小蜡 (<i>Ligustrum sinense</i>)	女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)
			早熟禾 (<i>Poa annua</i>)	石楠 (<i>Photinia serratifolia</i>)	雪松 (<i>Cedrus deodara</i>)
			白车轴草 (<i>Trifolium repens</i>)	紫叶小檗 (<i>Berberis thunbergii</i>)	银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>)
			蛇莓 (<i>Duchesnea indica</i>)	金叶女贞 (<i>Ligustrum × vicaryi Rehder</i>)	紫叶李 (<i>Prunus cerasifera 'Atropurpurea'</i>)
			黑麦草 (<i>Lolium perenne</i>)	月季 (<i>Rosa chinensis</i>)	日本晚樱 (<i>Prunus serrulata var. lannesiana</i>)
			马唐 (<i>Digitaria sanguinalis</i>)	火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)	旱柳 (<i>Salix matsudana</i>)
			麦冬 (<i>Ophiopogon japonicus</i>)	黄杨 (<i>Buxus sinica</i>)	槐 (<i>Sophora japonica</i>)
			北方城市	2.85	0.87
狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>)	石楠 (<i>Photinia serratifolia</i>)	雪松 (<i>Cedrus deodara</i>)			
早熟禾 (<i>Poa annua</i>)	紫叶小檗 (<i>Berberis thunbergii</i>)	银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>)			
白车轴草 (<i>Trifolium repens</i>)	金叶女贞 (<i>Ligustrum × vicaryi Rehder</i>)	紫叶李 (<i>Prunus cerasifera 'Atropurpurea'</i>)			
蛇莓 (<i>Duchesnea indica</i>)	月季 (<i>Rosa chinensis</i>)	日本晚樱 (<i>Prunus serrulata var. lannesiana</i>)			
黑麦草 (<i>Lolium perenne</i>)	火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)	旱柳 (<i>Salix matsudana</i>)			
马唐 (<i>Digitaria sanguinalis</i>)	黄杨 (<i>Buxus sinica</i>)	槐 (<i>Sophora japonica</i>)			
麦冬 (<i>Ophiopogon japonicus</i>)					

内,三个北方城市绿地温度变化区间为-9.6—46.9℃,相对湿度变化区间为 7.9%—82.9%,风速变化区间为 0—3.3m/s。在此区间内,大气颗粒物浓度与温度和风速呈负相关,与相对湿度呈正相关。不同粒径的大气颗粒物与气象因子的相关性基本相同。各个城市和季节大气颗粒物浓度与气象因子的关系如图 7 所示,整体上两类颗粒物浓度对气象因子的响应结果与北方城市的结果相同。

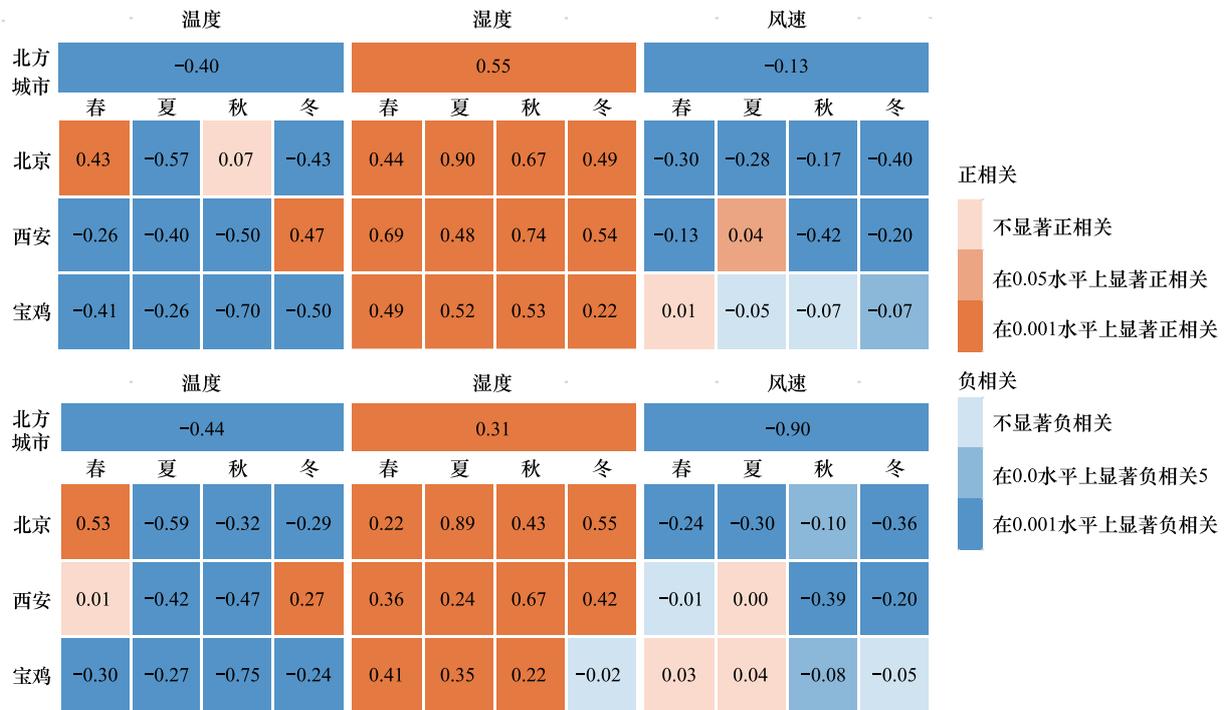


图 7 气象因子和大气颗粒物浓度的相关性 PM_{2.5}与气象因子的关系 PM₁₀与气象因子的关系

Fig.7 The correlation between meteorological factors and atmospheric particle concentration Relationship between PM_{2.5} and meteorological factors; Relationship between PM₁₀ and meteorological factors

图中的数值为相关性系数

2.5 时间对城市绿地大气颗粒物浓度的影响

季节对北方城市大气颗粒物浓度产生极显著性影响($P < 0.01$),一年当中大气颗粒物浓度在夏季最低,冬季最高(图 8)。西安与宝鸡颗粒物浓度均呈现夏秋低、冬春高的趋势,北京则相反(图 8)。如图 9 所示,一天之内,时间变化对北方城市绿地大气颗粒物浓度产生极显著影响($P < 0.01$),PM_{2.5}浓度在一天中的变化趋势为 16:00—18:00 < 12:00—14:00 < 8:00—10:00,PM₁₀浓度变化呈“V”形,在 12:00—14:00 到达最低值。具体到不同城市的不同季节,西安、宝鸡全年以及北京冬春两季的 PM_{2.5}浓度的日变化趋势均为 16:00—18:00 < 12:00—14:00 < 8:00—10:00(图 9)。除北京春季和西安春、夏、冬三季 PM₁₀浓度随时间逐渐降低外,其余城市的不同季节 PM₁₀浓度均呈现 12:00—14:00 低、8:00—10:00、16:00—18:00 高的特征(图 9)。

3 讨论与结论

3.1 本底环境对城市绿地削减大气颗粒物浓度效果的影响

本研究结果表明整体而言不同本底环境下城市绿地内大气颗粒物浓度存在显著差异,多绿本底对大气颗粒物浓度的削减能力最好。有研究发现在减少 PM_{2.5}、PM₁₀方面,本底环境为多绿本底的绿地滞尘能力最佳。中绿本底(灰绿参半本底)对 PM_{2.5}的滞尘效果优于少绿本底(灰色本底),而少绿本底(灰色本底)对 PM₁₀的滞尘能力则优于中绿本底(灰绿参半本底)^[1]。本底环境对大气颗粒物浓度的影响可能是由于绿化覆盖率不

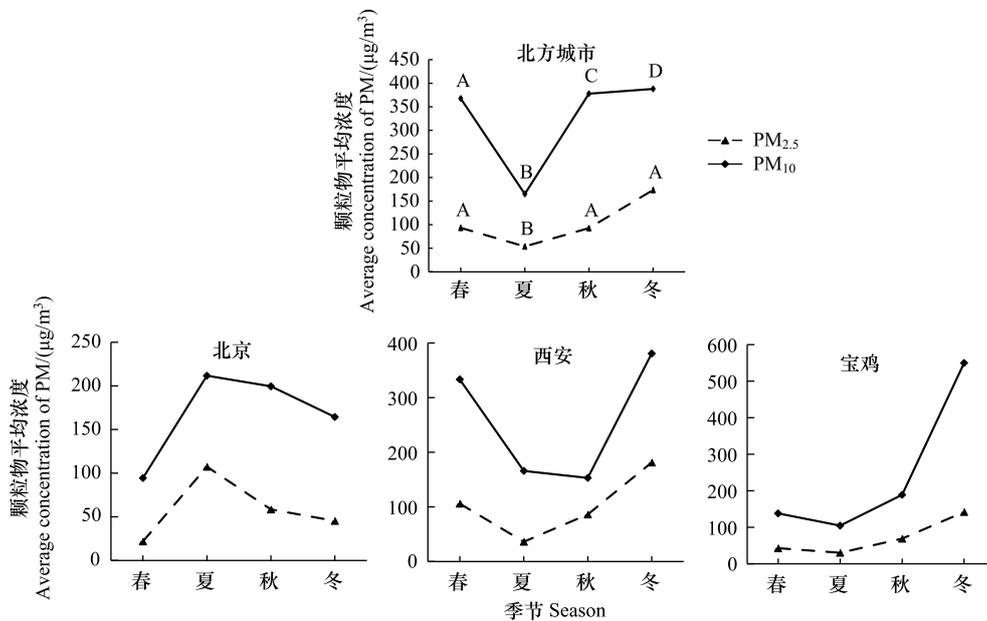


图8 季节与大气颗粒物浓度的关系

Fig.8 Relationship between seasons and atmospheric particulate matter concentration

同一折线中有相同字母的分组视为不存在显著差异,无相同字母的分组两两间视为存在显著差异

同造成的,植物本身具有滞留颗粒物的能力,且植被覆盖率较高的地区更不易受到外界污染物的影响^[9],有研究表明提高绿化率可以一定程度上降低 PM_{2.5}浓度^[10]。因此提高城市绿地率是北方缓解大气颗粒物污染的有效途径。

3.2 植被结构和植物多样性对城市绿地削减大气颗粒物浓度效果的影响

植被结构类型对大气颗粒物浓度存在极显著影响。绿地通过植物个体的微观结构和群落生态系统的沉降、阻滞、吸附和吸收等过程来削减大气颗粒物浓度^[11-12],植被的树体构造、高度、林冠层枝叶量和叶表面微环境等因素影响了植被的滞尘能力^[12-13]。

总体来看,开敞绿地在北方城市绿地共同出现的植被结构中对大气颗粒物的削减能力最弱,半开敞绿地对大气颗粒物的削减能力最强,不同城市和季节之间,滞尘能力最强的植被结构不同。研究发现森林降低大气颗粒物浓度的能力与林冠层郁闭度和叶面积指数显著正相关,而与草本高度和草本覆盖率呈现弱相关,因此植被削减大气颗粒物浓度的能力主要取决于树叶和树干^[14]。开敞草坪缺少可以有效削减大气颗粒物的乔灌木,这导致了开敞绿地内大气颗粒物浓度较高。随着植被群落结构复杂程度的加大,拥有较高植被郁闭度和较多林木类型的绿地削减大气颗粒物的能力更强^[6]。然而绿地的滞尘能力与植被结构复杂程度的关系往往并非简单的线性关系,植物是一种气流的多孔屏障,植被的空气动力学效应可以明显地改变局部空气质量^[15]。当群落树冠过疏时,不利于对颗粒物的截留,但过于复杂的植被结构又会影响群落内的风环境,阻碍空气流动。当含有大气颗粒物的气流通过树冠时,一部分大气颗粒物被植物体阻挡而掉落,在封闭绿地中,植被的垂直结构复杂,一定程度上阻碍了空气中的大气颗粒物沉降到地面,导致复杂群落内大气颗粒物浓度的增加^[16]。有研究表明,密集的植物冠层会导致当地污染物浓度更大的增加,叶面的沉积几乎不起作用^[17-19]。而随着季节的变化,植物形态和生理特征发生变化,这同时影响着植物对颗粒物的沉降和空气动力学效应,导致群落内大气颗粒物浓度的变化^[20]。对于北方城市整体而言,半开敞绿地(乔灌木覆盖 10%—30%)具有较丰富的乔灌木和适度的通透性,是降低大气颗粒物浓度最有效的群落。

不同的植被结构承载着不同的植物多样性水平^[21],目前国内外对于植物物种多样性与大气颗粒物相关性的研究相对较少。有研究发现植物物种多样性水平越高,大气颗粒物浓度削减效果越显著,不同粒径大小

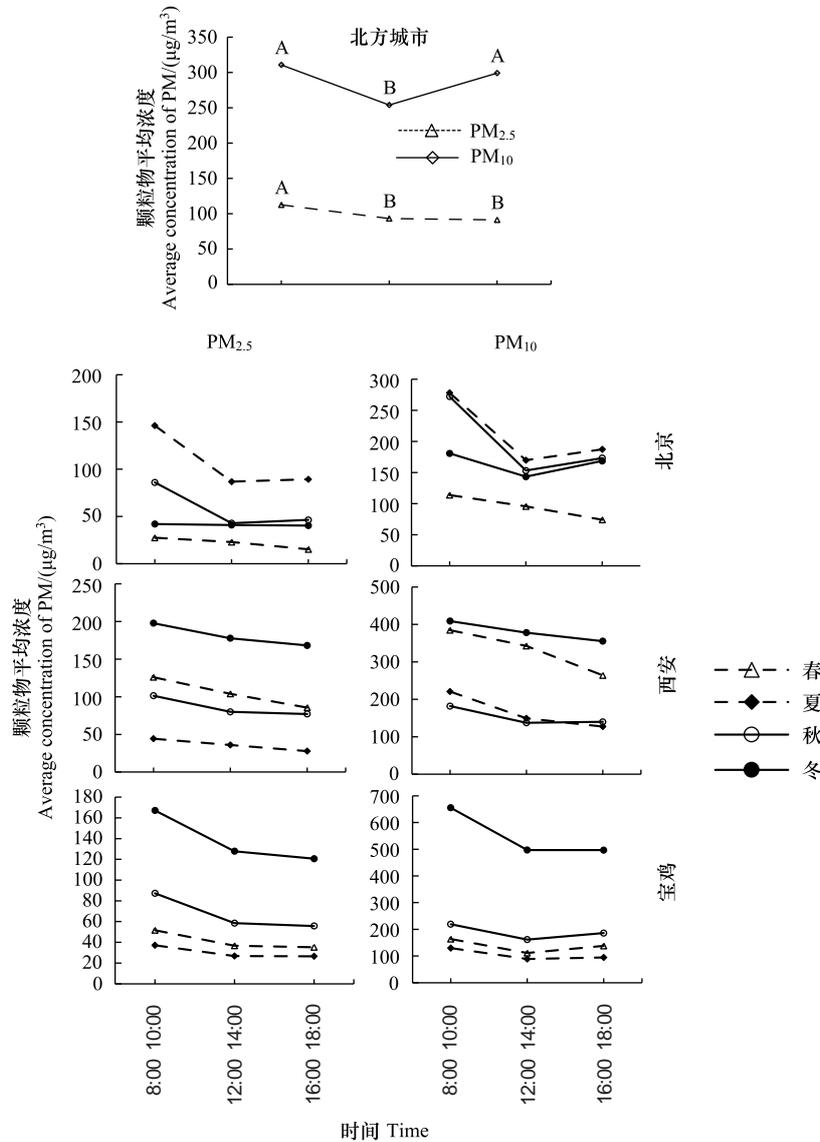


图9 时间与大气颗粒物浓度的关系

Fig.9 Relationship between time and atmospheric particulate matter concentration

同一折线中有相同字母的分组视为不存在显著差异,无相同字母的分组两两间视为存在显著差异

的大气颗粒物均表现出相同的削减趋势^[1,6],这与本研究得出的结论相反。这可能是由于植物多样性提高时,群落内植物自身产生的大气颗粒物增多。许多北方常见的园林植物会释放生物源颗粒物(即孢子和花粉)进而增加了空气中的颗粒物浓度;更丰富的植物种类意味着生物源挥发性有机化合物(BVOC)的增多,此类有机化合物将二次形成大气颗粒物^[22-23]。在未来的研究中应考虑在更广的生物多样性水平下进行监测,探究植物多样性与大气颗粒物浓度之间的关系。通过本研究也不难看出,城市绿地的滞尘能力并非与植物多样性和植被结构呈简单的线性关系,在实际以净化空气为目的的城市绿地营建时,并不能一味强调选择植物多样性高且植被结构复杂的绿地类型,应根据本底环境的实际情况进行不同植被结构绿地的组合配置。

3.3 气象和时间因子对城市绿地削减大气颗粒物浓度效果的影响

三个北方城市绿地在监测期间的气候变化区间内,大气颗粒物浓度与温度呈负相关,与相对湿度呈正相关,与风速呈负相关,这与前人的研究一致。温度的升高使植物光合作用增强^[24-25],且大气垂直对流作用加剧,加快了颗粒物的滞留和扩散^[26]。相对湿度增加时,大气颗粒物的布朗运动速度减慢,同时大气颗粒物中

有机盐等组分易吸水结晶,导致其浓度增加^[27]。在微观尺度下,较高的风速可以增加有效撞击达到更好的滞尘效果^[28],且较高风速有利于污染物的扩散,当风速持续几小时达到 3 至 4 级以上时,大气悬浮浓度显著降低^[29]。

整体上大气颗粒物的浓度在夏季最低,冬季最高,这与前人的研究结果一致^[30]。夏季是植物生长的全盛期,滞尘能力最强^[31]。且叶面积大小是影响植物滞尘量的主要因素^[32],北方落叶植物冬季叶面积的减少一定程度上影响了植物群落的滞尘能力。夏季空气对流较强,导致大气颗粒物浓度的降低^[33]。北方城市夏季降雨频繁,可以重置叶片的滞尘能力^[34]。此外冬季燃煤供暖和春季多发的沙尘天气导致了大气颗粒物浓度升高^[35-36]。受气象因素和人类活动的影响,大气颗粒物浓度的日变化显著。由于逆温现象,8:00—10:00 大气颗粒物浓度偏高,随着太阳辐射的增强,大气及城市下垫面的温度升高,大气颗粒物浓度逐渐降低^[37-38]。早晚高峰时间内,车辆废气排放及道路扬尘造成了大气颗粒物浓度的升高^[39-40]。因此,城市居民不宜过早外出晨练,晚高峰时间段同样不建议外出。

4 结论

通过对北方的典型一、二、三线城市的实地监测,本研究分析了不同本底环境、植被结构、植物多样性水平、气象因子和时间变化对绿地内大气颗粒物浓度的影响。结果表明(1)不同本底环境显著影响大气颗粒物浓度,绿地率越高的本底下的绿地滞尘能力越强,北方城市整体大气颗粒物浓度表现为多绿本底<灰绿参半本底<灰色本底。(2)植被结构显著影响绿地的滞尘能力,半开敞绿地的滞尘能力最好,其次为半闭合绿地与闭合绿地,开敞绿地滞尘能力最弱,不同城市和季节内植物群落的滞尘能力存在差异。(3)植物多样性显著影响绿地内的大气颗粒物浓度,北方城市大气颗粒物浓度随生物多样性指数的升高而升高。高生物多样性水平并不一定是削减大气颗粒物浓度的有利因素。西安全年 $PM_{2.5}$ 浓度与生物多样性指数呈正相关,宝鸡则相反,北京不同季节大气颗粒物浓度与植物多样性的关系不同。(4)在晴朗、无风或微风的条件下,大气颗粒物浓度与温度和风速呈负相关关系,与相对湿度呈正相关关系。(5)大气颗粒物浓度存在显著的季节变化和日变化趋势,一年当中分别在夏季和冬季到达极小值和极大值,不同大气颗粒物在春秋两季的浓度不同。一天之内,8:00—10:00 的大气颗粒物浓度最高,随着时间推移 $PM_{2.5}$ 在 16:00—18:00 达到最小值, PM_{10} 变化趋势呈现出“V”形,在 12:00—14:00 达到最小值。

综上所述,绿地的本底环境、植被结构、植物多样性、气象因子和时间因子等都对大气颗粒物浓度产生了显著影响,依据上述研究结果,实践中可以通过增加城市绿化覆盖率改善本底环境,增加使用有一定绿量且通透的半开敞空间绿地,避免使用过多种类的植物等措施提高绿地的滞尘能力。同时优化城市绿地的通风廊道设计,谨慎考虑水体等有增湿效果的设计要素的放置位置,对绿地的大气颗粒物浓度进行有效调控。同时建议使用者减少 8:00—10:00 和晚高峰时期在绿地的活动。

参考文献(References):

- [1] 张祥. 基于生态单元制图的宝鸡市不同植被结构绿地滞尘效应及影响因子研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [2] 刘学全,唐万鹏,周志翔,胡兴宜,邵天一,杨庭明. 宜昌市城区不同绿地类型环境效应. 东北林业大学学报,2004,32(5):53-54,83.
- [3] Baker W L. A review of models of landscape change. *Landscape Ecology*, 1989, 2(2): 111-133.
- [4] Jiang B, Sun C, Mu S, Zhao Z X, Chen Y Y, Lin Y W, Qiu L, Gao T A. Differences in airborne particulate matter concentration in urban green spaces with different spatial structures in Xi'an, China. *Forests*, 2021, 13(1): 14.
- [5] 陈博. 北京地区典型城市绿地对 $PM_{2.5}$ 等颗粒物浓度及化学组成影响研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [6] 刘芳. 城市森林公园不同植被结构绿地内大气悬浮颗粒物浓度研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [7] Westervelt D M, Horowitz L W, Naik V, Tai A P K, Fiore A M, Mauzerall D L. Quantifying $PM_{2.5}$ -meteorology sensitivities in a global climate model. *Atmospheric Environment*, 2016, 142: 43-56.
- [8] Madhavi Latha K, Highwood E J. Studies on particulate matter (PM_{10}) and its precursors over urban environment of Reading, UK. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 101(2): 367-379.
- [9] 江晨阳. 韶山风环境及城市植被对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.

- [10] 李帆. 多尺度下建成环境对城市 $PM_{2.5}$ 浓度的影响及治理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [11] 杜万光. 不同尺度下北京公园绿地颗粒物变化特征及影响因子研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [12] 王琴, 谢梦婷, 沈秋月, 柯智溢, 黄奕. 城市园林绿地消减大气 $PM_{2.5}$ 浓度研究进展. *世界林业研究*, 2021, 34(3): 46-51.
- [13] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [14] Liu X H, Yu X X, Zhang Z M. $PM_{2.5}$ concentration differences between various forest types and its correlation with forest structure. *Atmosphere*, 2015, 6(11): 1801-1815.
- [15] Mochida A, Tabata Y, Iwata T, Yoshino H. Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 1667-1677.
- [16] Setyan A, Zhang Q, Merkel M, Knighton W B, Sun Y, Song C, Shilling J E, Onasch T B, Herndon S C, Worsnop D R, Fast J D, Zaveri R A, Berg L K, Wiedensohler A, Flowers B A, Dubey M K, Subramanian R. Characterization of submicron particles influenced by mixed biogenic and anthropogenic emissions using high-resolution aerosol mass spectrometry: results from CARES. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(17): 8131-8156.
- [17] Wania A, Bruse M, Blond N, Weber C. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 2012, 94(1): 91-101.
- [18] Gromke C, Ruck B. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(16): 3287-3302.
- [19] Vos P E J, Maiheu B, Vankerkom J, Janssen S. Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 2013, 183: 113-122.
- [20] Perini K, Ottel  M, Giulini S, Magliocco A, Roccoliello E. Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system. *Ecological Engineering*, 2017, 100: 268-276.
- [21] Gao T, Hedblom M, Emilsson T, Nielsen A B. The role of forest stand structure as biodiversity indicator. *Forest Ecology and Management*, 2014, 330: 82-93.
- [22] Hartig T, Mitchell R, de Vries S, Frumkin H. Nature and health. *Annual Review of Public Health*, 2014, 35: 207-228.
- [23] 孟龄, 王效科, 欧阳志云, 任玉芬, 逯非. 北京城区气传花粉季节分布特征. *生态学报*, 2013, 33(8): 2381-2387.
- [24] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3/4): 115-123.
- [25] Dawson J P, Adams P J, Pandis S N. Sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate in the Eastern US: a modeling case study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(16): 4295-4309.
- [26] 包红光, 王成, 鄯光发, 杜万光, 孙丽. 城市公园外侧防护林结构对外源 $PM_{2.5}$ 的消减作用. *生态环境学报*, 2016, 25(6): 987-993.
- [27] 吴雁, 陈瑞敏, 王颀, 刘晓峰. 2013 年河北中南部 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度时间变化特征及其影响气象条件分析. *气象与环境科学*, 2015, 38(4): 68-75.
- [28] Lind n J, Gustafsson M, Uddling J, Watne  , Pleijel H. Air pollution removal through deposition on urban vegetation: the importance of vegetation characteristics. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 81: 127843.
- [29] 余新晓, 张志强, 夏新莉. 森林对 $PM_{2.5}$ 等颗粒物的调控功能与技术. 北京: 科学出版社, 2017.
- [30] 史宇, 林兰钰, 罗海江, 张殷俊, 陈远航, 于洋. 基于 GIS 的北京市林地覆被与 $PM_{2.5}$ 分布关联性分析. *生态环境学报*, 2016, 25(12): 1960-1966.
- [31] 高金晖, 王冬梅, 赵亮, 王多栋. 植物叶片滞尘规律研究——以北京市为例. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2): 94-99.
- [32] 陈芳, 周志翔, 郭尔祥, 叶贞清. 城市工业区园林绿地滞尘效应的研究——以武汉钢铁公司厂区绿地为例. *生态学杂志*, 2006, 25(1): 34-38.
- [33] 陈波, 李少宁, 鲁绍伟, 鲁笑颖, 陈军丽, 李辉. 北京大兴南海子公园 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度变化特征. *生态科学*, 2016, 35(2): 104-110.
- [34] Xu X W, Zhang Z M, Bao L, Mo L, Yu X X, Fan D X, Lun X X. Influence of rainfall duration and intensity on particulate matter removal from plant leaves. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 11-16.
- [35] 孙恩慧, 王璐琪, 赖小垚, 李岩, 孙静怡. 北方冬季农村供暖对 $PM_{2.5}$ 的影响及解决方案研究. *环境科学与管理*, 2013, 38(7): 90-93.
- [36] 冯永忠, 李永平, 杨改河. 西北地区沙尘暴发生的时空分布特征及其与气象要素的关系分析//中国农作制度研究进展 2010. 济南: 山东科学技术出版社, 2010: 744-749.
- [37] 刘旭辉, 余新晓, 张振明, 刘萌萌, 阮氏青草. 林带内 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 污染特征及其与气象条件的关系. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1715-1721.
- [38] 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.
- [39] Gertler A W, Gillies J A, Pierson W R. An assessment of the mobile source contribution to PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the United States. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 123(1): 203-214.
- [40] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 20: 249-253.