

DOI: 10.5846/stxb201301180115

王成, 郭二果, 郅光发. 北京西山典型城市森林内 $PM_{2.5}$ 动态变化规律. 生态学报, 2014, 34(19): 5650-5658.

Wang C, Guo E G, Qie G F. Variations of $PM_{2.5}$ in typical recreation forests in the west mountain of Beijing, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5650-5658.

北京西山典型城市森林内 $PM_{2.5}$ 动态变化规律

王 成^{1,2,*}, 郭二果^{1,2,3,4}, 郅光发^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局森林培育重点实验室, 北京 100091;

2. 国家林业局城市森林研究中心, 北京 100091; 3. 呼和浩特市环境监测中心站, 呼和浩特 010030;

4. 呼和浩特市环境科学研究所, 呼和浩特 010030)

摘要: 城市森林内 $PM_{2.5}$ 浓度的状况可以直接反映城市森林对 $PM_{2.5}$ 的净化效果, 也是居民休闲游憩关心的森林环境问题。选择北京西山 3 种典型的游憩型城市森林, 通过对林内 $PM_{2.5}$ 浓度一年四季昼夜 24h 内变化的同步观测, 分析了不同类型城市森林内 $PM_{2.5}$ 浓度的季节变化、日变化以及影响因素, 结果表明: (1) 北京西山 3 种游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度多数时候远低于城区对照值, 在春、夏、秋三季都达到了国家城市化地区标准, 甚至在春季、秋季还达到了国家一类地区标准。(2) 城市森林在不同季节对 $PM_{2.5}$ 的净化效果存在差异, 林内 $PM_{2.5}$ 浓度总体上呈现冬季 > 夏季 > 秋季 > 春季的规律。(3) 林内 $PM_{2.5}$ 浓度在一天 24h 内有很大变化波动, 夜间浓度总体上高于白天, 日变化曲线近似呈“双峰双谷”型, 两个高峰出现在夜晚和早上, 两个低谷出现在凌晨和中午前后。一年四季白天低谷出现时间有所不同, 春季 15:00 左右、夏季 13:00—17:00、秋季 13:00—15:00、冬季 9:00—11:00。(4) $PM_{2.5}$ 在不同类型游憩林内的变化趋势和浓度值存在一定差异。郁闭度较大的侧柏林夜间 $PM_{2.5}$ 浓度总体上高于其它两种林型, 其高峰和低谷出现时间延迟, 高峰值大, 高峰期持续时间长, 且这种规律在秋季表现得更明显。(5) 基于上述研究认为, 北京西山城市森林为居民在 $PM_{2.5}$ 污染比较突出的都市背景下提供了一个相对清洁、健康的森林游憩环境, 春季、夏季、秋季全天以及冬季 9:00—11:00 均是森林中 $PM_{2.5}$ 状况健康而适宜外出游憩的时段。

关键词: 北京西山; 城市森林; $PM_{2.5}$; 日变化; 季节变化; 森林游憩环境

Variations of $PM_{2.5}$ in typical recreation forests in the west mountain of Beijing, China

WANG Cheng^{1,2,*}, GUO Erguo^{1,2,3,4}, QIE Guangfa^{1,2}

1 Research Institute of Forestry of CAF, Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry Administration, Beijing 100091, China

2 Research Center of Urban Forest, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

3 Huhhot Environment Monitoring Station, Huhhot 010030, China

4 Huhhot Research Institute of Environmental Science, Huhhot 010030, China

Abstract: The status of $PM_{2.5}$ concentration in the urban forest can directly reflect the function of urban forest reducing $PM_{2.5}$ pollution, and it is also the important environmental issue that residents concern about during recreating in forest. $PM_{2.5}$ concentrations in three recreation urban forests were simultaneously measured in typical days over the four seasons in the West Mountain of Beijing, China. We analyzed the seasonal and diurnal variation of $PM_{2.5}$ concentrations in three different recreation urban forests and their influencing factors in this study. The results were as follows: (1) $PM_{2.5}$ concentrations in three recreation forests in the West Mountain were much lower than that in the urban background of Beijing in most of the time over the year. $PM_{2.5}$ concentrations in three recreation forests achieved the national standard for urban

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费课题(201304301-05); 国家“十二五”科技支撑计划重大项目课题(2011BAD38B03)

收稿日期: 2013-01-18; **网络出版日期:** 2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wch8361@163.com

areas in spring, summer and autumn. Furthermore, the concentration was even as low as the national standard set for the first class region in spring and autumn. (2) $\text{PM}_{2.5}$ concentrations changed in the order of winter > summer > autumn > spring, indicating that the purifying effect of urban forests on $\text{PM}_{2.5}$ varied in different seasons. (3) $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in forest changed greatly in 24 hours a day. In general the concentrations during night time were higher than that of the day time, and diurnal variation curves showed nearly “two peaks and two vales”, with two peaks appearing at night and in the morning, and two troughs in the early morning and around noon. Throughout the year, vales appeared in the day time at around 15:00 in spring, 13:00—17:00 in summer, 13:00—15:00 in autumn, 9:00—11:00 in winter. (4) The trend and the values of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations were different from each other in three kinds of urban forests. In *Platycladus orientalis* forest with higher canopy density, the peak time and vale time of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations at night occurred later, $\text{PM}_{2.5}$ concentration was higher at peaks time, and the duration of the peak was longer than that in other two forests. Therefore, $\text{PM}_{2.5}$ concentration at night in *Platycladus orientalis* forest was higher than that in *Cotinus coggygia* forest and the mixed forest, especially in autumn. We, therefore, concluded that the urban forests in the West Mountain of Beijing can provide a relatively healthy forest recreation environment for the residents in the urban area. Spring, autumn and summer are the comparatively fine seasons for Beijing residents to recreate in the West Mountain, and the healthy time according to the status of $\text{PM}_{2.5}$ concentration are the whole day in spring, 9:00—17:00 in summer, the whole day in autumn and 9:00—11:00 in winter.

Key Words: West Mountain of Beijing; urban forest; $\text{PM}_{2.5}$; diurnal variation; seasonal variation; recreation environment of forest

近年来,在我国许多城市,空气悬浮颗粒物已经成为空气中的首要污染物,其浓度达到一定限值后会导致人体产生一系列疾病^[1],特别是空气动力学当量直径 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 的可吸入细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体健康的危害更大。2012 年国家环保部重新修订了《环境空气质量标准》,将 $\text{PM}_{2.5}$ 纳入环境空气污染物基本项目中,并在北京首先开展了 $\text{PM}_{2.5}$ 监测网络建设和数据公布等一系列工作。了解 $\text{PM}_{2.5}$ 变化规律以预防和减轻 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体健康和城市空气环境质量的影响,已经成为政府部门和社会各界关注的环境热点问题之一。城市森林是城市有生命的生态基础设施,也是居民休闲游憩的主要场所,对改善城市生态环境和满足居民生态休闲游憩需求发挥着重要作用。北京西山城市森林是北京重要的生态屏障,因环境优美、空气清新、景观多样而成为市民和游客进行徒步旅行、登高、健身、摄影等各种游憩活动的重要区域,因此该地区游憩型城市森林内 $\text{PM}_{2.5}$ 的状况不仅是游客关心的问题,而且也能反映城市森林对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的调控功能。目前有关 $\text{PM}_{2.5}$ 等空气颗粒物的详细研究主要集中在来源分析^[2-4]、成分解析^[5-6] 和危害评价^[7-8] 上,对城市森林内 $\text{PM}_{2.5}$ 动态变化研究还缺少时间尺度上连续完整的研究。本文以百望山地区的城市森林为对象,研究了北京西山 3

种游憩型城市森林 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在一年四季、各季全天 24 h 的动态变化规律,旨在为了解城市森林对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的调控功能,为“以人为本”的城市森林建设、森林游憩环境开发管理提供理论依据,并指导市民合理选择游憩时间和森林类型。

1 研究地概况

试验地位于北京西山东端的百望山森林公园内,公园面积 200 余公顷,植被覆盖率达 95% 以上,主要是以侧柏(*Platycladus orientalis*)为主的松柏林、以黄栌(*Cotinus coggygia*)为主的红叶林,以及侧柏、黄栌、油松(*Pinus tabulaeformis*)与其它野生灌木组成的混交林,海拔 190—200 m,是北京西山城市森林类型的典型代表。

2 研究方法

选择百望山森林公园 3 种典型游憩林:侧柏纯林(树龄 40a,树高 7 m,胸径 12.6 cm,面积 3000 余平方米,郁闭度 0.8)、黄栌纯林(树龄 40a,树高 5.5 m,胸径 12 cm,面积 10000 m^2 ,郁闭度 0.6)和以黄栌、构树(*Broussonetia papyrifera*)、油松、侧柏等构成的混交林(乔木树种 4 m 左右,胸径 9 cm,面积 5413 m^2 ,郁闭度 0.7)。地被物以荆条(*Vitex negundo* Var. *heterophylla*)和酸枣(*Choerospondias axillaris*)为主。

通过分析对比北京近年来的气象资料,将历年来不同季节出现频率最多的天气作为北京市的典型天气,跟踪记录天气预报并在监测日记录天气实况,经筛选后将天气实况与要选择的天气类型相符的观测数据作为典型天气的有效代表数据。2007 年在春、夏、秋、冬季分别选择典型天气 3 d,分别为:春季“连续晴天”、“晴转多云”、“雨后晴天”;夏季“桑拿天”、“雨后晴天”、“连续晴天”;秋季“雾霾后晴”、“风雨后晴”、“晴间多云”;冬季“连续晴天”、“雪后晴天”、“晴间多云”。每天均从 5:00—次日 5:00 进行 24 h 昼夜观测,每隔 2 h 观测 1 次,每次 3 种游憩林同步观测。测定人体平均呼吸高度 1.2—1.5 m 处 $PM_{2.5}$ 的浓度,每次 3 个重复。 $PM_{2.5}$ 监测仪器为英国 Turnkey Instruments 公司生产的 Dustmate 粉尘检测仪,该监测仪采用激光散射法,能快速检测在空气中直径范围在 0.4—20 μm 的可吸入颗粒物和粉尘浓度,对 $PM_{2.5}$ 浓度的采样精度为 0.01 $\mu g/m^3$ 。同时用小气候仪同步监测空气温度、空气相对湿度、风速和光照。各个季节颗粒物浓度取 3 次观测值的平均值。

3 结果与分析

3.1 $PM_{2.5}$ 浓度在 3 种游憩林内总体季节变化

从不同季节的变化趋势来看,3 种游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度无一例外地表现出冬季浓度最高,夏季次之,秋、春季浓度最低(表 1)。

在北京西山同步研究发现总颗粒物 TSP (total suspended particulate) 浓度在秋季最低,其它三个季节相差不大^[9-10];安俊岭等对北方 15 个大型城市 TSP 浓度的季节变化研究认为 TSP 污染在冬、春季最重,夏、秋季较轻^[1];吴志萍等 2006 年对清华大学校园绿地内空气颗粒物浓度变化进行观测研究后发现,TSP 浓度在秋季最低,春季最高,而 $PM_{2.5}$ 浓度在夏季最高,其次是冬季,秋季最低^[11-12];吴国平在广州、武汉、兰州、重庆等 4 城市的几所小学设点观测后发现, $PM_{2.5}$ 浓度在冬、春季最高,夏、秋季最低^[13];2003—2004 年徐敬等在北京舞蹈学院和中国气象局培训中心的监测结果显示 $PM_{2.5}$ 浓度在夏季最低,其它三个季节相差不大^[14]。这说明城市建筑环境下的颗粒物污染变化与森林中是不一样的,同时也表明:虽同为空气颗粒物, $PM_{2.5}$ 浓度的季节变化与 TSP 有很大的不同,北方地区不论在林内还是林外 TSP 浓度多在秋季最低,而 $PM_{2.5}$ 浓度在冬季和夏季较高,秋季和春季较低,具体随着观测地点、观测年限和当时气象条件的不同,出现最高值和最低值的季节会稍有变动。

表 1 3 种典型游憩林 $PM_{2.5}$ 浓度季节变化以及与北京市区值对照表

Table 1 Seasonal changes of $PM_{2.5}$ concentrations in three typical recreation forests and compare with background value in Beijing urban area

观测地点 Observation site	$PM_{2.5}/(\mu g/m^3)$				
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年均值 Annual value
本文 2007 年 侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i> forest	22.92	72.95	56.85	125.21	69.48
本文 2007 年 混交林 mixed forest	21.89	60.84	25.45	121.87	57.51
本文 2007 年 黄栌林 <i>Cotinus coggygria</i> forest	22.11	64.45	25.49	124.64	59.17
本文 2007 年 游憩林总体	22.30	66.08	35.93	123.91	62.06
2003—2004 年北京舞蹈学院和中国气象局培训中心 ^[13]	111	71	110	108	100
2006 年清华大学校园非绿地对照点 ^[10]	110.62	132.73	95.81	128.84	116
2007 和 2008 年奥运主场馆附近 ^[14]	—	71.2/52.8	—	—	—
2007 年北京市城区					148

北京西山游憩型城市森林内 $PM_{2.5}$ 浓度在冬季最高、夏季次之,春季最低的原因可能为:冬季燃煤和逆温天气一般对细颗粒的贡献较粗颗粒大^[15],所以北京市冬季 $PM_{2.5}$ 浓度最高;夏季是树木生长旺盛、叶量大、功能最强的时期,林分郁闭度也达到最大,但在空气污染比较突出、颗粒物污染源多的城市

大环境背景下,外部持续的污染源输入到林内,加之 $PM_{2.5}$ 本身不是以重力沉降为主的特点,森林树木是来不及完全滞纳这些颗粒物的,从而造成林内 $PM_{2.5}$ 浓度反而高出春季、秋季;春季虽有扬尘,但对细颗粒的贡献较粗颗粒小;夏季“桑拿天”可能更容易使细颗粒物集聚增多,一些气体挥发物光化学反应产

生的次生盐也是细颗粒物的重要来源^[16],所以游憩林内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在春季最低,冬季最高,夏季也较高。通常认为北京的秋季是环境最优良的季节,秋季空气颗粒物浓度也会最低,但本文的测定结果是秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略高于春季。究其原因,2007 年秋季气温下降较早,阴、雾天较多,逆温现象较重,这可能会对细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献更加显著。因此,春季与秋季的这种差异还以需要进一步研究。

3.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在游憩林内总体日变化

3.2.1 不同季节的日变化特征

(1) 春季 3 种游憩林内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化曲线基本上呈“双峰双谷”型,白天和夜间均有一个高峰和一个低谷,且夜间浓度普遍高于白天。具体的变化趋势是:在 7:00 前后出现一天中最大值,之后开始下降,到 15:00 降到一天中最低值,然后基本保持不断上升趋势直到次日 1:00 出现第 2 个高峰,之后在 3:00 前后有所下降,出现一个小低谷,但总体上仍然处在高浓度状态。

(2) 夏季游憩林 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化趋势仍然呈早

晚高,白天和凌晨低的“双峰双谷”型日变化曲线。两个高峰出现在 7:00 前后和 19:00—21:00, 15:00—17:00 和 23:00—3:00 左右是出现低谷的两个时间段,其中以 23:00—3:00 左右为一天中最低的时段(图 1)。

(3) 秋季 3 种游憩林内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化曲线仍呈“双峰双谷”型,总体也表现出早晚偏高的特点(图 1)。在 13:00—17:00 是全天浓度最低的时段,而高峰时段在不同林分间的差异很大,黄栌林和混交林在 9:00 左右和 21:00 左右出现高峰,而侧柏林晚高峰也是在 21:00,但从 1:00 后林内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度开始不断升高,到 5:00—7:00 达到高峰,并且在 3:00—7:00 时段都超出了国家城市化地区的标准。

(4) 与春季类似,冬季一天中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化与其它 3 个季节不同,虽然也表现出明显的夜间高于白天的变化特点,但从 13:00 之后到翌日 7:00 颗粒物浓度都处在超标状态,一天中浓度最低谷出现在 9:00—11:00,也只是略低于国家标准(图 1)。

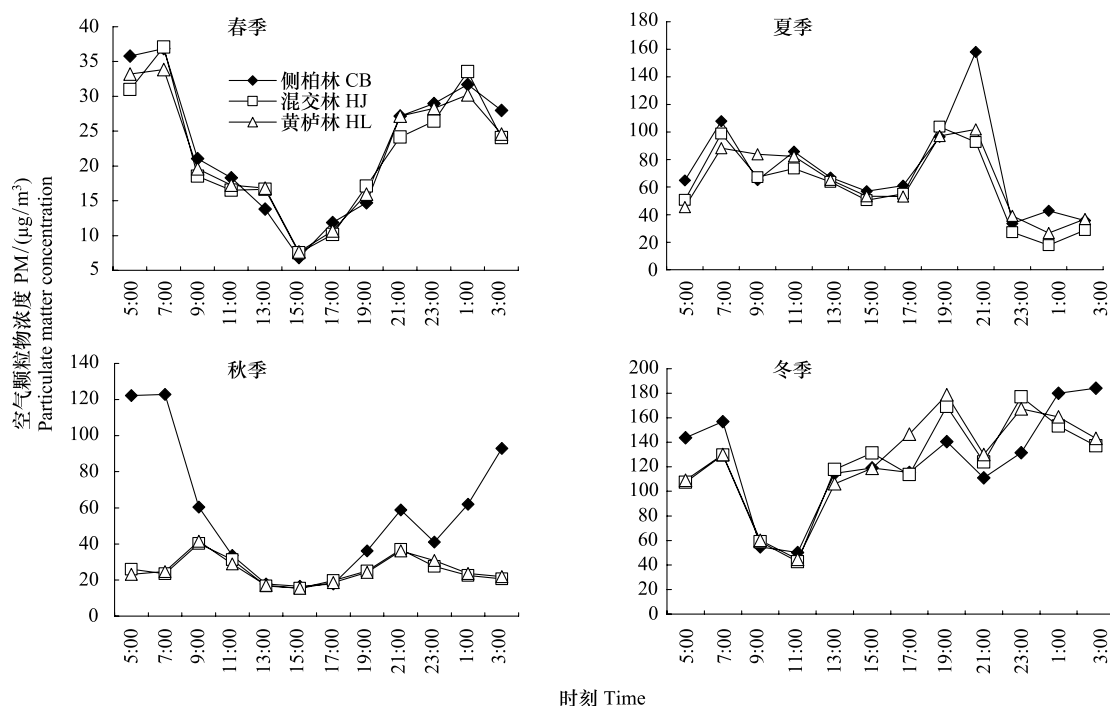


图 1 不同季节 3 种游憩林 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化

Fig.1 Diurnal variations of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in 3 kinds of recreation forests in different seasons

CB: 侧柏林 *Platycladus orientalis* forest; HJ: 混交林 the mixed forest; HL: 黄栌林 *Cotinus coggygria* forest

3.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 4 个季节的日变化差异分析

从不同季节日变化曲线分布的高低上看,除个

别时段(9:00—11:00 和 21:00)外,冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在一天当中均处于日变化曲线的最上方,而秋季和

春季处于日变化曲线的最下方(图2)。前面通过比较游憩林内 PM_{2.5} 浓度与国家日均值和北京市区内其它研究的观测值已经说明,北京西山游憩型城市森林内 PM_{2.5} 浓度多数时候远低于城区对照值,但在不同季节的不同时段游憩林内的 PM_{2.5} 浓度变化还

是有波动的,目前我国没有颁布关于 PM_{2.5} 浓度的小时均值,从图1和图2游憩林 PM_{2.5} 浓度在4个季度的日变化来看,它们的日变化规律有很高的相似性,但也存在着细微的差异,这种日变化特点为居民更科学选择游憩时段、游憩林分提供了理论依据。

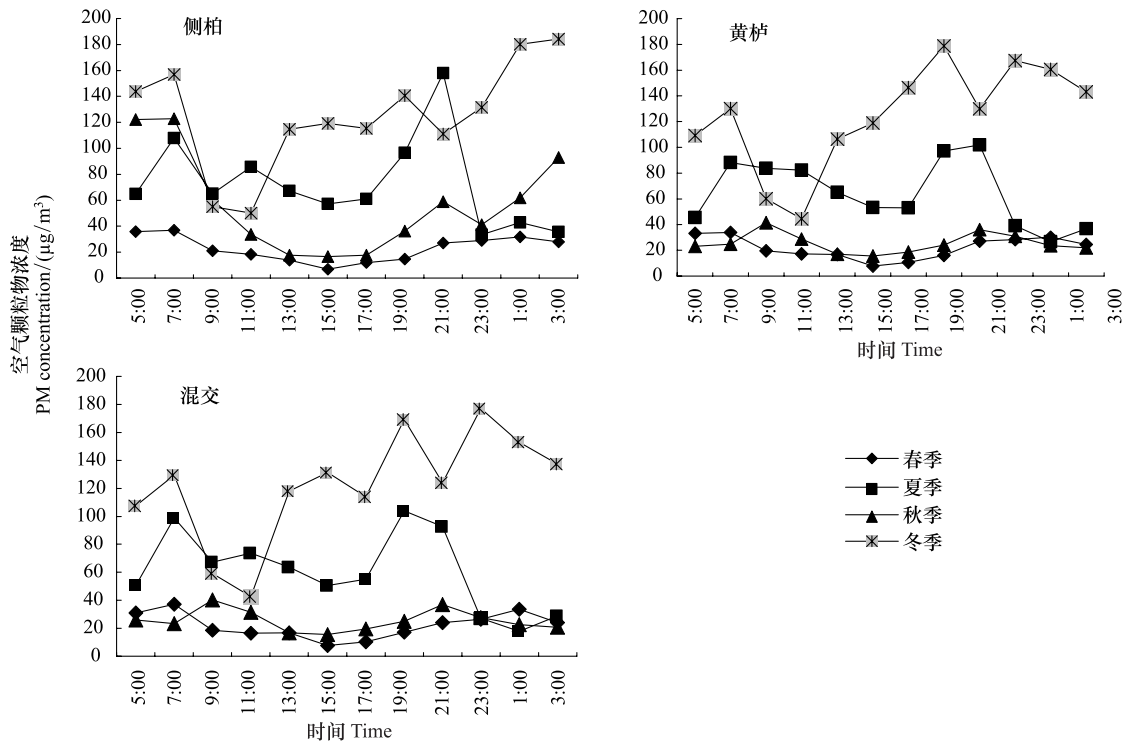


图2 3种游憩林不同季节 PM_{2.5} 浓度比较

Fig.2 PM_{2.5} Concentration in 3 kinds of recreation forests in different seasons

3.2.3 PM_{2.5}浓度日变化规律原因分析

PM_{2.5}浓度大小除与交通^[8,17]、工业和生活排放源^[3-4]有关外,还受大气层稳定程度等气象和天气因素^[18-19]以及人为活动^[2]的影响,通过对3种游憩林

一年内的 PM_{2.5} 浓度和同步监测的小气候指标的相关分析发现,在一定风速范围内 PM_{2.5} 一般与风速和空气温度呈显著负相关,而与空气相对湿度呈显著正相关(表2)。

表2 空气颗粒物与气象因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of PM and meteorological factors

项目 Item	光照强度 Light intensity	平均风速 Average wind velocity	最大风速 Maximum wind velocity	平均温度 Average temperature	最高温度 Maximum temperature	最低温度 Minimum temperature	平均湿度 Average humidity	最大湿度 Maximum humidity	最小湿度 Minimum humidity
相关系数 Correlation coefficient	-0.153	-0.303	-0.283	-0.293	-0.289	-0.296	0.458	0.458	0.413
显著水平 Significant level	0.002	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

那么导致游憩林内 PM_{2.5} 浓度出现上述日变化规律的主要原因可能是:白天光照强,气温高,空气

湿度小,特别是午后左右气温达到最高、空气湿度最低,一般风速也较大,也即大气混合层厚度最高,大

气最不稳定,湍流和对流充分发展,扩散稀释能力加强,相对频繁的空气湍流运动使 $PM_{2.5}$ 达到最低;相反,早晚和夜间气温低,空气湿度大,又加上风速较小,这种低温、高湿和相对静风的稳定气象状态不利于空气颗粒物的扩散和输送,使其聚集增多,所以早上和晚上是空气颗粒物浓度达到高峰的两个时间段。另外,7:00 左右和 19:00 左右是山下车流量、人流量的高峰期,山下产生的空气污染物也会输送到山上从而增加了 $PM_{2.5}$ 的浓度。而且对游憩林内人流量的调查统计,从 4:30(春夏季)或 5:00 左右(秋冬季)附近居民就开始进行晨练活动,直到 7:00(春夏季)—9:00(秋冬季)才逐渐离开,这也可能是 5:00 左右游憩林 $PM_{2.5}$ 浓度开始增加,9:00 左右达到最大的另一个原因。至于凌晨左右 $PM_{2.5}$ 浓度出现一个小低谷的原因,可能与空气湿度大将 $PM_{2.5}$ 凝结减少有关,也可能由于这段时间林内温度比市区温度高,使林内和山下市区进行城郊气流交换的结果。

3.3 不同林型内 $PM_{2.5}$ 动态变化对比

3.3.1 不同游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度日变化趋势对比

从不同类型游憩林内 $PM_{2.5}$ 日变化趋势对比来看(图 1 和图 2),春季 $PM_{2.5}$ 浓度日变化趋势 3 种游憩林基本一致。夏季白天大部分时间 3 种游憩林 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势相差不大,而夜间大部分时间侧柏林内浓度较其它两种林型高,特别是在夜间高峰时段 21:00 左右,是国家环保部新颁 $PM_{2.5}$ 浓度日均值最高限值的 2 倍多;而且侧柏林夜间高峰出现时间(21:00)较其它两种林型(19:00)有所延迟。秋季侧柏林 $PM_{2.5}$ 浓度日变化趋势与其它两种林型差异明显,侧柏林浓度几乎在一天内均居高不下,尤其是自 17:00 之后,侧柏林内 $PM_{2.5}$ 浓度除在 23:00 稍有降低外一直保持较高水平直到 7:00,并在 3:00—7:00 时段 $PM_{2.5}$ 浓度超出新颁布的国家 24 h 平均值标准,这也是如同夏季一样侧柏林夜间高峰出现晚且持续时间长的一种表现。冬季白天 3 种游憩林

$PM_{2.5}$ 浓度变化趋势基本相似,但在 1:00 之后侧柏林内 $PM_{2.5}$ 浓度明显高出黄栌林和混交林,这种趋势一直持续到 7:00。

上述 3 种游憩林的 4 个季度 $PM_{2.5}$ 浓度变化,均不同程度地反映出侧柏林 $PM_{2.5}$ 浓度在游憩林空气颗粒物整体浓度的某些高峰期最高,低谷时又最低,而且还表现出一定的高峰和低谷出现较其它两种类型林分晚,尤其在夜间这种差异更明显。这说明当来自交通污染和游客活动等污染源排放的 $PM_{2.5}$ 进入游憩林时,侧柏林由于林分郁闭度最大,对 $PM_{2.5}$ 具有巨大的阻挡作用,再加上侧柏针叶有比阔叶树更大的滞留粉尘能力^[8],使得 $PM_{2.5}$ 不容易进入侧柏林或进入时通过许多方式将其大大消减,这样, $PM_{2.5}$ 在侧柏林内聚集到最大值所需时间较其它类型林分长,而且 $PM_{2.5}$ 一旦进入侧柏林,又不容易扩散开来,所以使得侧柏林 $PM_{2.5}$ 浓度高峰出现延迟,高峰值最大,且高峰期持续时间较长,因而又延误了低谷时间的到来。同时,由于早晚时段的交通量和气候因素变化大,上述不同游憩林间的差异晚上到早上这段时间表现较白天更明显。从上述侧柏林 $PM_{2.5}$ 浓度的变化可以推断出,即使其它游憩林达到低谷,郁闭度较大的林分 $PM_{2.5}$ 浓度也许仍比较高,仍不是最佳游憩时间,到这类森林中游憩应适当延迟一些,尤其是凌晨的低谷时段。

3.3.2 不同游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度季节变化差异

上述不同游憩林 $PM_{2.5}$ 日变化趋势的不同使得游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度也存在差异,通过双因素随机区组方差分析后发现,春季 3 种游憩林 $PM_{2.5}$ 浓度差异不大,林分类型对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响不显著(表 3)。夏季侧柏林 $PM_{2.5}$ 浓度稍高一些,混交林稍低一些,但方差分析后差异也不显著。秋季 $PM_{2.5}$ 浓度在侧柏林内最高,其它两种类型林分差异不大。冬季 3 种游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度日均值非常接近。

表 3 不同游憩林 $PM_{2.5}$ 浓度平均值及差异显著性分析

Table 3 $PM_{2.5}$ concentrations and difference significant analysis between different recreation forests

季节 Seasons	侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i> forest	混交林 Mixed forest	黄栌林 <i>Cotinus coggygia</i> forest
春季 Spring	22.92	21.89	22.11
夏季 Summer	72.95	60.84	64.45
秋季 Autumn	56.85 *	25.45	25.49
冬季 Winter	125.21	121.87	124.64

* 代表与其它林型显著,显著水平 $\alpha=0.05$

从以上 3 种游憩林 $PM_{2.5}$ 浓度在不同季节的差异显著程度可以看出,随着冬、春、夏、秋的季节更替,侧柏林 $PM_{2.5}$ 浓度较混交林和黄栌林高的趋势越来越明显。究其原因可能是由于:春季北京风沙较大,空气颗粒物受整个城市等大环境的影响较游憩林不同树种类型的影响大,所以不同类型林分之间的差异就不显著了。对于夏、秋季特别是秋季,北京市风沙天气相对减少,空气质量相对最好,空气颗粒物受微环境(不同游憩林类型)的影响能够被显现出来:①侧柏林所处地势较低,郁闭度又相对较大,空气颗粒物不容易扩散而较高;②再加上 2007 年秋季阴雾天气多,扩散不良的林分更容易使空气颗粒物聚集增多;③而黄栌林和混交林密度和郁闭度较小,林地结构相对开阔,虽黄栌和其它灌木滞尘作用不及侧柏,但在其生长最为旺盛的夏、秋季也能有效降减空气颗粒物,这样侧柏林内 $PM_{2.5}$ 浓度自然高于混交林和黄栌林,所以秋季侧柏林 $PM_{2.5}$ 浓度显著高于其它两种类型林分。至于冬季,混交林和黄栌林内阔叶树种落叶,吸纳空气颗粒物能力下降,而侧柏林虽在夜间部分时段 $PM_{2.5}$ 浓度较高,但由于侧柏四季常绿,冬季仍然发挥了较大的阻挡、吸纳等降减空气颗粒物的作用,这样就抵消了 3 种游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度的差异;另外,冬季北京采暖和城市逆温天气使得整个城市 $PM_{2.5}$ 浓度又有所增加,大环境内 $PM_{2.5}$ 浓度较高也对不同游憩林 $PM_{2.5}$ 浓度的差异有一定的掩盖作用。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)北京西山城市森林内 $PM_{2.5}$ 浓度多数时候远低于城区对照值。从年均值来看,3 种典型游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度的年均值范围在 $57.51\text{--}69.48\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,远低于 2007 年公布的北京城区 $PM_{2.5}$ 浓度 $148\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的年均值;从年变化来看,春、秋两季达到了国家自然保护区、风景名胜区等一类地区 $35\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准,夏季浓度虽不是最低,也达到国家城市化地区 $75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准,同时低于北京奥运会前正在采取空气质量改善措施的奥运馆附近 $PM_{2.5}$ 浓度^[20];从日变化来看,春、夏、秋 3 个季节的一天当中基本上都可以达到国家城市化地区的标准,在污染最严重的冬季,9:00—11:00 这一时段森林中的 $PM_{2.5}$ 浓度也能够达

标。这说明北京西山城市森林为北京城市居民在都市空气污染背景下提供了一个相对健康的森林休闲游憩环境。

(2)游憩林内 $PM_{2.5}$ 浓度在一年内具有明显的季节差异,出现这种差异的原因与气候因素、天气状况、人为活动和游憩林结构类型等影响 $PM_{2.5}$ 排放、二次生成、消除和扩散的条件有关。由于以上影响因素的变化,各地学者对 $PM_{2.5}$ 浓度的季节变化的研究结果不完全相同^[1,9-14]。北京西山 3 种典型城市森林内 $PM_{2.5}$ 浓度呈现春季<秋季<夏季<冬季的规律,这主要由于北京冬季采暖和逆温天气较多、夏季“桑拿天”时间长等因素对 $PM_{2.5}$ 等细颗粒的贡献较大,同时与这 3 个季节是城市森林调控 $PM_{2.5}$ 功能比较强有关。

(3)北京西山城市森林内 $PM_{2.5}$ 浓度在一天 24 h 内是有很大变化波动的。3 种典型游憩林内夜间 $PM_{2.5}$ 浓度常常高于白天,日变化曲线一般呈“双峰双谷”型,两个高峰出现在夜晚和早上,两个低谷出现在凌晨和中午前后。本文同步调查研究发现 $PM_{2.5}$ 的这种日变化规律与北京市气象条件、交通流量和人为活动的特点有很大关系,这与其他学者的观点基本一致^[8-9,17,19]。不同季节的 $PM_{2.5}$ 浓度日变化差异主要表现在高峰和低谷的出现和持续时间上,春季夜间高峰持续时间长,而夏季的低谷不论白天还是夜间持续时间均较长,秋季和冬季日变化趋势较春夏季缓慢,且峰谷出现时间逐渐提前。

(4)北京西山不同类型城市森林对 $PM_{2.5}$ 的净化功能是有差异的。林分树种组成、密度结构、季相变化等都可能是影响林内 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势和浓度值的因素。在四季常绿、叶片粘性较大、林地郁闭度较高的侧柏林内, $PM_{2.5}$ 夜间高峰出现迟,高峰值大,且高峰期持续时间长,夜间低谷出现时间也延迟,所以侧柏林内 $PM_{2.5}$ 浓度较混交林和黄栌林高,而且这种差异还随季节而异,差异最明显的时期出现在北京整个城市大环境中空气颗粒物浓度较低、游憩林生理活动最为旺盛的夏、秋季。今后在游憩林建设中不仅要考虑选择吸滞粉尘能力强的树种,还应考虑合理的种植密度和郁闭结构,以达到对空气颗粒物的最佳消减效果。

(5)北京市民到西山城市森林休闲游憩的时间可以更科学的选择,游憩线路可以更合理的安排。

从 3 种游憩林内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度季节变化来看,春季、秋季、夏季是北京市民到西山城市森林游憩比较好的季节;从每天游憩的时段选择来看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在春季、夏季、秋季的全天,以及冬季 9:00—11:00 是北京西山游憩林比较健康的游憩时间;从林分类型选择来看,到郁闭度较大的侧柏林分内进行游憩活动,应选择较一般林地最佳游憩时间晚一些的时段。

4.2 讨论

(1)目前对森林具有降尘功能的认识是比较一致的,而对森林减缓空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的作用还存在不同的观点。近年来北京 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重季节主要是冬季,并认为污染源主要来自汽车尾气污染。但从北京市车辆使用情况来看,冬季车辆并不比其它季节多,汽车尾气排放量不应该有明显的季节变化。因此,冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重一方面可能是冬季气候、城市供暖等诸多因素相叠加作用的结果,但同时也应看到, $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重的冬季正值森林停止生长、落叶休眠、生态功能发挥最弱的季节,而其它空气质量相对较好的 3 季则是树木尚未落叶、生理活动旺盛的季节,出现森林净化功能降低和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染问题突出这种此消彼长的现象,也可能说明了森林对净化 $\text{PM}_{2.5}$ 污染具有重要作用。

(2)从本研究 3 种林分各季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值来看,通过与《2007 年北京市环境状况公报》公布的北京市城区和本研究样地所在的海淀区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值 $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $143 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 相比较,北京西山游憩型城市森林内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度多数时候远低于城区对照值,即使在 2008 年北京奥运会前(2007 年)采取空气质量改善措施时,城区奥运馆附近 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在夏季也达到了 $71.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[20],略高于北京西山游憩林内相应季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。按照国家城市化地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日均值 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准,2007 年时北京西山游憩林内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度只是在冬季超标。此外,与本试验同步观测的市区街头绿地相比,北京西山城市森林内空气颗粒物浓度远远低于市区的街头绿地^[10]。这些研究只是揭示了城市森林内部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化及其低于城市对照值的现象,但对城市森林降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的机理还不清楚,城市森林降低 $\text{PM}_{2.5}$ 的机理究竟是减缓风速、叶片吸滞等物理作用过程,还是气孔吸收、负氧离子综合等化学作用过程,抑或多种因素的共同作用,还需要更深入的研究。

(3)对城市森林减缓空气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的能力要客观评价。本研究表明,在 $\text{PM}_{2.5}$ 污染非常严重的城市大背景下,城市森林内部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度尽管远低于城市对照值,但也不能时刻均能达到国家一类区标准。城市森林不可能是容量无限的“吸尘器”,其减缓 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的能力是否有最大阈值的存在?城市森林净化 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的能力主要决定于其群落结构、生理活动等,不同类型的森林其最大能力是多少需要深入研究。所以从根本上来看解决问题的核心还是污染源治理,如果污染源的治理达到某种极限以后,城市森林的作用可能就会发挥得更显著,特别是城市化地区要达到国家标准向一类地区的标准靠近,建设城市森林,发挥森林对的 $\text{PM}_{2.5}$ 消减作用可能更为关键。

致谢:在野外数据观测和室内处理中,得到房城、孙志伟、于丽胖、李春媛、刘艳、李娟、许飞、郝婷婷、王艳英、陈玉娟、杨伟伟、侯晓静、胡立香、纪良、匙璟青、瞿聚鑫、谭飞理、周睿智、朱银飞、杨自立、苏艳、常璐等同学的帮助,特此致谢。

References:

- [1] An J L, Zhang R J, Han Z W. Seasonal changes of total suspended particles in the air of 15 big cities in Northern parts of China. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(1): 25-29.
- [2] Holmes N S, Morawska L, Mengersen K, Jayaratne E R. Spatial distribution of submicrometer particles and CO in an urban microscale environment. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(22): 3977-3988.
- [3] Yue W S, Lia X L, Liu J F, Li Y, Yu X H, Deng B, Wam T M, Zhang G L, Huang Y Y, He W, Hua W, Shao L Y, Li W J, Yang S S. Characterization of $\text{PM}_{2.5}$ in the ambient air of Shanghai city by analyzing individual particles. *The Science of the Total Environment*, 2006, 368(2/3): 916-925.
- [4] Yang F M, He K B, Ma Y L, Chen X, Cadle S H, Chan T, Mulawa P A. Characteristics and sources of trace elements in ambient $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing. *Environmental Science*, 2003, 24(6): 33-37.
- [5] Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, Vowles P D, Cohen D D, Bailey G M. Characterization of chemical species in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(22): 3773-3785.
- [6] Rodríguez S, Querol X, Alastuey A, Viana M M, Alarcón M, Mantilla E, Ruiz C R. Comparative PM_{10} - $\text{PM}_{2.5}$ source

- contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *Science of the Total Environment*, 2004, 328(1/3): 95-113.
- [7] Schwartz J. Air pollution and daily mortality: a review and meta analysis. *Environmental Research*, 1994, 64(1): 36-52.
- [8] Powe N A, Willis K G. Mortality and morbidity benefits of air pollution (SO_2 and PM_{10}) absorption attributable to woodland in Britain. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(2): 119-128.
- [9] Guo E G, Wang C, Qie G F, Fang C, Sun Z W, Zhou Z H. Seasonal variations of airborne particulate matter in typical recreation forests in the west mountain of Beijing. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(10): 55-57.
- [10] Guo E G, Wang C, Qie G F, Fang C, Sun Z W, Zhou Z H. Diurnal variations of airborne particulate matters in different seasons in typical recreation forests in West Mountain of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3253-3263.
- [11] Wu Z P, Wang C, Xu J N, Hu L X. Air-borne anions and particulate matter in six urban green spaces during the summer. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(12): 2153-2157.
- [12] Wu Z P, Wang C, Hou X J, Yang W W. Variation of air $\text{PM}_{2.5}$ concentration in six urban greenlands. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2008, 35(4): 494-498.
- [13] Wu G P, Hu W, Teng E J, Wei F S. $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} pollution level in the four cities in China. *China Environmental Science*, 1999, 19(2): 133-137.
- [14] Xu J, Ding G A, Yan P, Wang S F, Meng Z Y, Zhang Y M, Liu Y C, Zhang X L, Xu X D. Componential characteristics and sources identification of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(5): 645-654.
- [15] Kan H D, Chen B H. Particulate air pollution in urban areas of Shanghai, China: health-based economic assessment. *The Science of the Total Environment*, 2004, 322(1/3): 71-79.
- [16] Kim E, Hopke P K. Characterization of fine particle sources in the Great Smoky Mountains area. *The Science of the Total Environment*, 2006, 368(2/3): 365-573.
- [17] Latha K M, Highwood E J. Studies on particulate matter (PM_{10}) and its precursors over urban environment of reading, UK. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2006, 101(2): 367-379.
- [18] Cheng C C. Polycyclic aromatic hydrocarbon concentration and acute toxicity of airborne particulate matter: Using microtox as a toxicity screening tool. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2003, 23(3): 249-258.
- [19] Wiedinmyer C, Quayle B, Geron C, Belote A, McKenzie D, Zhang X Y, O'Neill S, Wynne K K. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(19): 3419-3432.
- [20] Li X, Liu Z R, Ren X Y, Li X, Wang Y S. Characteristics of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ during summer time of 2007 and 2008 at Beijing National Stadium. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2012, 35(2): 197-204.

参考文献:

- [1] 安俊岭, 张仁健, 韩志伟. 北方 15 个大型城市总悬浮颗粒物的季节变化. *气候与环境研究*, 2000, 5(1): 25-29.
- [4] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 陈旭, Cadle S H, Chan T, Mulawa P A. 北京大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中微量元素的浓度变化特征与来源. *环境科学*, 2003, 24(6): 33-37.
- [9] 郭二果, 王成, 鄯光发, 房城, 孙志伟, 周志海. 北京西山典型游憩林空气悬浮颗粒物季节变化规律. *东北林业大学学报*, 2010, 38(10): 55-57.
- [10] 郭二果, 王成, 鄯光发, 房城, 孙志伟, 周志海. 北京西山典型游憩林空气颗粒物不同季节的日变化. *生态学报*, 2009, 29(6): 3253-3263.
- [11] 吴志萍, 王成, 许积年, 胡立香. 六种城市绿地内夏季空气负离子与颗粒物. *清华大学学报: 自然科学版*, 2007, 47(12): 2153-2157.
- [12] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 杨伟伟. 6 种城市绿地空气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化规律的研究. *安徽农业大学学报*, 2008, 35(4): 494-498.
- [13] 吴国平, 胡伟, 滕恩江, 魏复盛. 我国四城市空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的污染水平. *中国环境科学*, 1999, 19(2): 133-137.
- [14] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 王淑凤, 孟昭阳, 张养梅, 刘玉彻, 张小玲, 徐祥德. 北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的成分特征及来源分析. *应用气象学报*, 2007, 18(5): 645-654.
- [20] 李雪, 刘子锐, 任希岩, 李昕, 王跃思. 2007 和 2008 年夏季北京奥运馆大气 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化特征. *大气科学学报*, 2012, 35(2): 197-204.