

北方地区典型天气对城市森林内大气颗粒物的影响

郭二果^{1,2,3,4}, 王成^{1*}, 鄯光发¹, 蔡煜³ (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.呼和浩特市环境科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010030; 4.呼和浩特市环境监测中心站, 内蒙古 呼和浩特 010030)

摘要: 以北京西山几种游憩型城市森林为例, 在一年四季选择典型天气条件, 对 4 种粒径的大气颗粒物浓度进行全天 24h 监测, 研究北方地区不同季节典型天气因素白昼不同时段对不同结构的森林内不同粗细粒径的大气颗粒物浓度变化的影响。结果发现: 降雨使大气颗粒物浓度减少, 尤其粗颗粒物(TSP 仅为连续晴天的 0.58~0.68), 所以雨后晴天粒径较小的颗粒物所占比例会增加。不过, 有时在雨后的夜间由于空气湿度大大气颗粒物浓度也会增加。雪能够降低大气颗粒物浓度, “雪后晴天”4 种粒径颗粒物浓度均只有连续晴天的 0.2 倍。多云和雾霾天气使大气颗粒物污染加重, 尤其在夜间; 雾霾和多云对小粒径颗粒物浓度的增加效果明显。夏季高温高湿静风、闷热的“桑拿天”能使郁闭度较大的林地内大气颗粒物特别是细颗粒物浓度及其所占的比例显著增加, PM_{2.5} 的浓度是“连续晴天”的 2.53 倍。风在雨后能使大气颗粒物在一定程度上扩散减少, 而在天气干燥时刮风会增加城市森林内大气颗粒物的浓度, 且多云会加重干燥天气刮风后大气颗粒物的污染程度。春、冬季林地裸露的落叶阔叶树在刮风时大气颗粒物浓度较四季常绿、地表覆盖物多的针叶林高, 夏、秋季桑拿天和雾霾天郁闭度大的侧柏林大气颗粒物浓度较林地结构开阔的黄栌林高。

关键词: 典型天气条件; 城市森林; 大气颗粒物; 浓度

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)07-1185-14

Influence of typical weather conditions on the airborne particulate matters in urban forests in northern China.

GUO Er-guo^{1,2,3,4}, WANG Cheng^{1*}, QIE Guang-fa¹, CAI Yu³ (1.Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry Administration, Research Institute of Forestry of Chinese Academy of Forest, Beijing 100091, China; 2. Research Center of Urban Forest, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 3.Huhhot Research Institute of Environmental Science, Huhhot 010030, China; 4.Huhhot Environment Monitoring Station, Huhhot 010030, China). *China Environmental Science*, 2013,33(7): 1185~1198

Abstract: It is important to understand the effects of weather conditions on the flux and transportation of airborne particulate matters for assessing the role of urban forests may play in controlling those pollutants in the air. The daily concentration variation of airborne particulate matters with four diameters were measured under typical seasonal weather conditions throughout the year in urban forests with different structures located in the West Mountain of Beijing, China. Our objectives were to explore the influence of typical weather conditions on the concentration changes of airborne particulate matters in urban forests with different structures in four different seasons of the year. The results showed that: 1) the rainfall reduced the concentrations of coarser particulate matters as the total suspended particulate (TSP) concentration was only 0.58~0.68 of that measured on the days with clear sky conditions. The ratios of finer particulate matters in TSP increased in the clear daytime after rains. On the contrary, the concentrations of airborne particulate matters increased in the nighttime after rain due to the increased air humidity; 2) snowfall decreased the concentrations of airborne particulate matters. After snow the concentrations of airborne particulate matters of four diameters were only 0.2 of that measured over the days under clear sky conditions; 3) cloud and fog aggravated the pollution of airborne particulate matter, especially at night. Moreover, increased amplitudes of finer particulate matters were larger in foggy and cloudy days; 4) the concentrations of finer airborne particulate matters and their ratios in TSP were increased under high humidity, stable,

收稿日期: 2012-11-19

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)

* 责任作者, 研究员, wangcheng@forestry.ac.cn

and muggy “sauna” weather conditions in summer;5) wind reduced the concentrations of airborne particulate matters after rain to some degree. In contrast, the concentrations of airborne particulate matters was increased by wind under dry air conditions, specifically in cloudy days after wind;6) the concentrations of airborne particulate matters were higher in exposed deciduous forests in windy spring and winter, while they were higher in forest with higher canopy density in foggy and sauna days in summer and autumn.

Key words: typical weather condition; urban forest; airborne particulate matter; concentration

大气颗粒物是我国北方地区城市空气的首要污染物.目前有关城市大气颗粒物的详细研究主要集中在来源分析、成分解析和危害评价以及动态变化特征上^[1-9].对大气颗粒物变化的影响因素研究,多数报道是研究空气温、湿度^[10-11]和雾天^[12]的影响,以及交通车辆和人流量^[1,9,13-15]等人为活动的影响,另外还有一些学者研究沙尘暴^[16-19]以及火灾及其他烟雾事件^[19-20]对大气颗粒物的影响.对城市森林消减大气颗粒物效应及颗粒物在其中的变化情况,相关研究包括不同类型城市绿地内大气颗粒物浓度变化差异、行道树结构与交通污染物扩散、典型城市森林内大气颗粒物的季节变化以及不同季节的日变化等^[21-29].而对天气因素对城市森林内大气颗粒物的影响还缺少时间尺度上连续完整的研究.本文以北京西山几种游憩型城市森林为例,在一年四季选择典型天气条件,通过对 4 种粒径大气颗粒物浓度进行全天 24h 的监测,研究北方地区不同季节典型天气因素对不同结构的城市森林内不同粗细粒径的大气颗粒物浓度变化的影响,为了解城市大气颗粒物在各种天气状况下的污染变化特征和污染防治措施的实施提供参考.

1 研究方法

1.1 研究地概况

试验地百望山森林公园地处北京西山东端,颐和园北 3km 处,116°21'43"E~116°28'12"E,39°57'52"N~40°02'11"N.区域气候属暖温带大陆性季风气候,年均温度 11.6℃,年降水量 630mm 左右,约 70%集中在 7~8 月份,土壤多为褐土和棕壤,土壤发育层次不明显.百望山森林公园面积 200 余 hm²,主峰海拔 210m,植被覆盖率达 95% 以上,游憩林是以侧柏(*Platycladus orientalis*)为主的松柏林、以黄栌(*Cotinus coggygria*)为主的

红叶林,以及侧柏、黄栌、油松(*Pinus tabulaeformis*)与其他野生灌木组成的混交林,是北京西山城市森林的典型代表.

1.2 研究样地

选择北京西山百望山森林公园“历代名家碑林”周围的 3 种典型游憩型城市森林,分别是侧柏纯林(树龄 40a,树高 7m,胸径 12.6cm,面积 3000 余 m²,郁闭度 0.8)、黄栌纯林(树龄 40a,树高 5.5m,胸径 12cm,面积 10000m²,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 4m 左右,胸径 9cm,面积 5413m²,郁闭度 0.7).地被物以荆条(*Vitex negundo* Var. *heterophylla*)和酸枣(*Choerospondias axillaris*)为主.

1.3 典型天气条件的选择

通过分析对比北京近年来的气象资料,总结不同季度出现频率较多的天气类型,从中选择对大气颗粒物集聚、扩散、消除等效应明显的天气类型并综合考虑观测的可操作性,跟踪记录天气实况,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、冬四季分别选择最能代表北方气候条件的典型天气 3d:春季“连续晴天”(5 月 13 号)、“风后多云”(5 月 19 号)、“雨后晴天”(5 月 25 号);夏季“桑拿天”(7 月 26 日)、“雨后晴天”(8 月 9 号)、“连续晴天”(8 月 22 号);秋季“雾霾后晴”(10 月 20 号)、“风雨后晴”(11 月 2 号)、“晴间多云”(11 月 8 号);冬季“连续晴天”(11 月 30 号)、“雪后晴天”(12 月 13 号)、“晴间多云”(12 月 21 号).

1.4 指标测定和数据处理

每天均从 9:00~次日 9:00 进行 24h 昼夜观测,每隔 2h 观测一次,每次 3 种游憩型城市森林同步观测.用 Dustmate 烟尘检测仪测定人体平均呼吸

高度 1.2~1.5m 处 4 种不同粒径的大气颗粒物,即 TSP($d\leq 100\mu\text{m}$)、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{1.0}$ 的浓度,每次 3 个重复.同时用小气候监测仪同步监测空气温度、空气相对湿度、风速和光照.此外,连续记录网上(问天网天气在线)2007 年北京全年每日的天气实况(包括温度、湿度、风速、风向、降雨量、云量等).

用 SAS v8 进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 春季典型天气条件下大气颗粒物的变化

由表 1 可见,春季,天气因素对 4 种不同粒径大气颗粒物水平均有极显著的影响,“风后多云”4 种粒径大气颗粒物日平均浓度均显著高于其他 2 种天气($\alpha=0.05$),特别是在黄栌林内最明显.

表 1 春季不同天气条件下 3 种游憩林大气颗粒物日平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

天气条件	侧柏林				混交林				黄栌林			
	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{1.0}$	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{1.0}$	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{1.0}$
连续晴天	273.23	118.94	16.48	5.14	226.42	105.77	15.92	5.15	219.19	106.29	16.13	5.10
风后多云	361.10	175.20	30.19	10.87	375.69	179.35	30.61	11.06	406.84	189.15	30.89	11.08
雨后两天	252.51	131.51	22.07	5.20	271.72	136.44	19.14	4.65	267.33	138.64	19.30	4.31
春季总体	295.61	141.88	22.92	7.07	291.28	140.52	21.89	6.95	297.79	144.70	22.11	6.83

对不同林型分组讨论天气条件对其各种粒径大气颗粒物影响方差分析后知(表 2):在 $\alpha=0.05$ 下,不同天气条件对侧柏林 TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响差异均不显著;对其他 2 种林型,风

后多云和连续晴天 TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异均极显著,二者与雨后两天有一定差异;不同天气对 3 种林型 $\text{PM}_{1.0}$ 的影响均是风后多云与其他天气差异极显著.

表 2 春季游憩林不同天气条件下大气颗粒物方差分析结果

天气条件	侧柏林				黄栌林				混交林			
	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{1.0}$	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{1.0}$	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{1.0}$
连续晴天	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B
风后多云	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
雨后两天	A	A	A	B	B	AB	AB	B	AB	AB	AB	B
F 值	1.44	1.5	2.02	3.73	6.4	3.92	3.12	5.63	3.53	2.94	2.89	4.59

注:A、B字母相同代表差异不显著,不同代表差异极显著,显著水平 $\alpha=0.05$

不同天气条件下游憩林大气颗粒物日均值的差异与不同天气条件游憩林大气颗粒物日变化趋势的差异有很大关系.根据以上方差分析的结果,这里粗、细颗粒物分别仅以有代表性的侧柏林 TSP(无显著差异)(图 1a)、黄栌林 TSP(风后多云与其他天气差异均显著)(图 1b)和侧柏林 $\text{PM}_{1.0}$ (3 种林型方差分析结果一致)(图 1c)为例来分析天气条件对大气颗粒物的影响.

不同天气条件下 TSP 总的日变化趋势是:由图 1 可见,风后多云 TSP 总体走势最高,特别是傍

晚后,这主要是因为测定日前几天无降雨,天气干燥,但前 2 日连续刮风(刮风时间 5 月 17 日 8:00~18 日 23:00,风的强度平均约 18km/h 左右),使空气中起尘量增加,再加上那天从傍晚开始天气转为多云,直至次日(20 日)下午降了阵雨,风后多云使得干燥的地面扬尘不易扩散而聚集增多.与傍晚后相比,上午天气晴朗使大气颗粒物浓度较低.不同林分相比,白天刮风时黄栌林起尘量较大,这可能由于黄栌林地表裸露,刮风时容易起尘,同时春季黄栌叶片未完全萌发出来,对颗粒物的

吸纳、消减作用小;相反,侧柏林地被物覆盖度大,不容易起尘,同时侧柏四季常绿,加上其叶片具粘性、有凹槽等特征,对颗粒物的吸纳、滞留作用较大,所以“风后多云”黄栌林内 TSP 浓度最高,侧柏林最低。

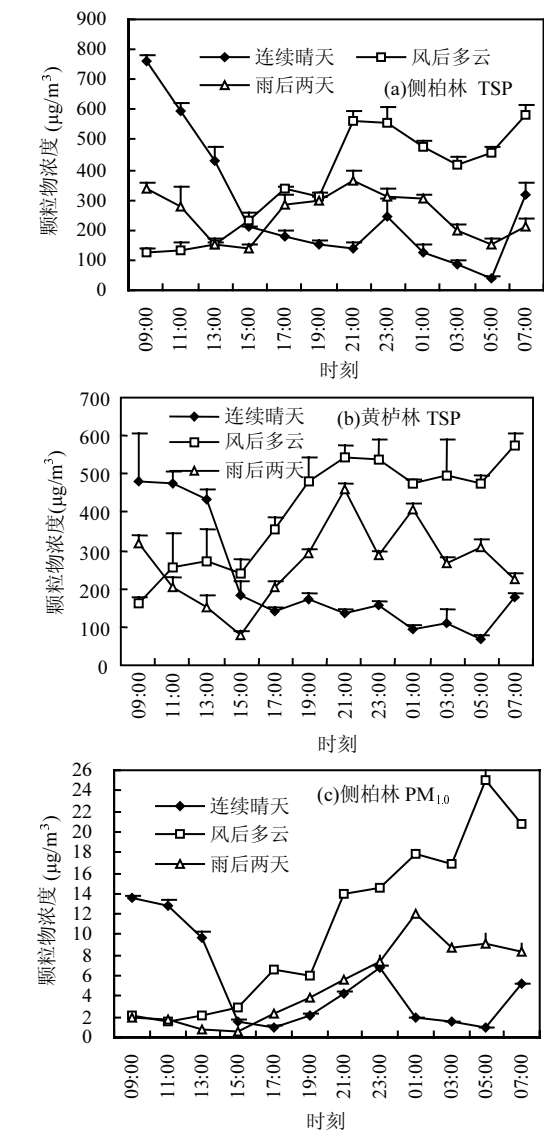


图 1 春季不同天气条件下游憩林大气颗粒物日变化比较
Fig.1 Diurnal variations of particulate matters on different weather conditions in recreation forests in spring

“雨后两天”(降雨时间 5 月 22 日 8:00~23 日 14:00,雨量平均约 7mm/6h 左右)白天 TSP 浓

度日变化总体走势在 3 种天气条件下居中(侧柏林)或处于下方(黄栌林),雨后空气湿润和白天风速较大使白天大部分时间颗粒物浓度相对较低,而晚上到次日凌晨,由于空气温度低(图 2a,b)、空气相对湿度大(图 2c,d)、风速小(图 2e,f),而大气颗粒物浓度与温度呈负相关,与空气湿度呈正相关^[1],所以颗粒物浓度一直保持较高水平。早上 9:00~11:00 TSP 浓度也相对较高,其原因可能与那天凌晨有轻微的降尘现象有关。

上述 3 种天气条件下的 TSP 浓度昼夜交替变化使侧柏林 TSP 日平均浓度在 3 种天气条件下无显著差异,黄栌林风后多云与其他 2 种天气呈显著差异。与 TSP 相比较,细颗粒 $PM_{1.0}$ 变化趋势与此基本相似(图 1c),只是风后多云 $PM_{1.0}$ 浓度增加趋势更明显,使得这天 3 种林型内 $PM_{1.0}$ 日平均值与其他 2 种天气差异均极显著。不仅如此,其他小粒径颗粒物所占的比例在夜间和清晨也是风后多云和雨后两天较连续晴天高(表 3)。且由表 4 可见,风后多云小粒径颗粒物所占比例日平均值随着粒径的逐渐降低而不断增高,这可能是多云天对细颗粒影响更显著的缘故。

2.2 夏季典型天气条件下大气颗粒物变化

由表 5 可见,雨后晴天 3 种林型内 4 种粒径大气颗粒物日平均浓度均最低,远低于其他天气条件和夏季总体平均值,特别是粗颗粒物 TSP,3 种林型中雨后晴天 TSP 浓度只为连续晴天的 0.58~0.68;除个别情况外桑拿天颗粒物浓度最高,尤细粒径颗粒物更明显,侧柏林桑拿天 $PM_{2.5}$ 的浓度是连续晴天的 2.53 倍。

方差分析显示,在 $\alpha=0.05$ 下,天气因素对大气颗粒物浓度的影响显著,其中 TSP 和 PM_{10} 浓度在雨后晴天与其他 2 种天气差异显著,而 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 浓度在桑拿天与其他 2 种天气差异显著。对不同林型分组讨论天气条件对各种粒径大气颗粒物浓度显著性方差分析后发现(表 6):3 种游憩林 TSP 浓度在雨后晴天与连续晴天均有显著差异,与桑拿天也有不显著差异;除侧柏林外, PM_{10} 浓度在 3 种天气条件下无显著差异; $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 浓度在桑拿天与其他 2 种天气条件差异显著。

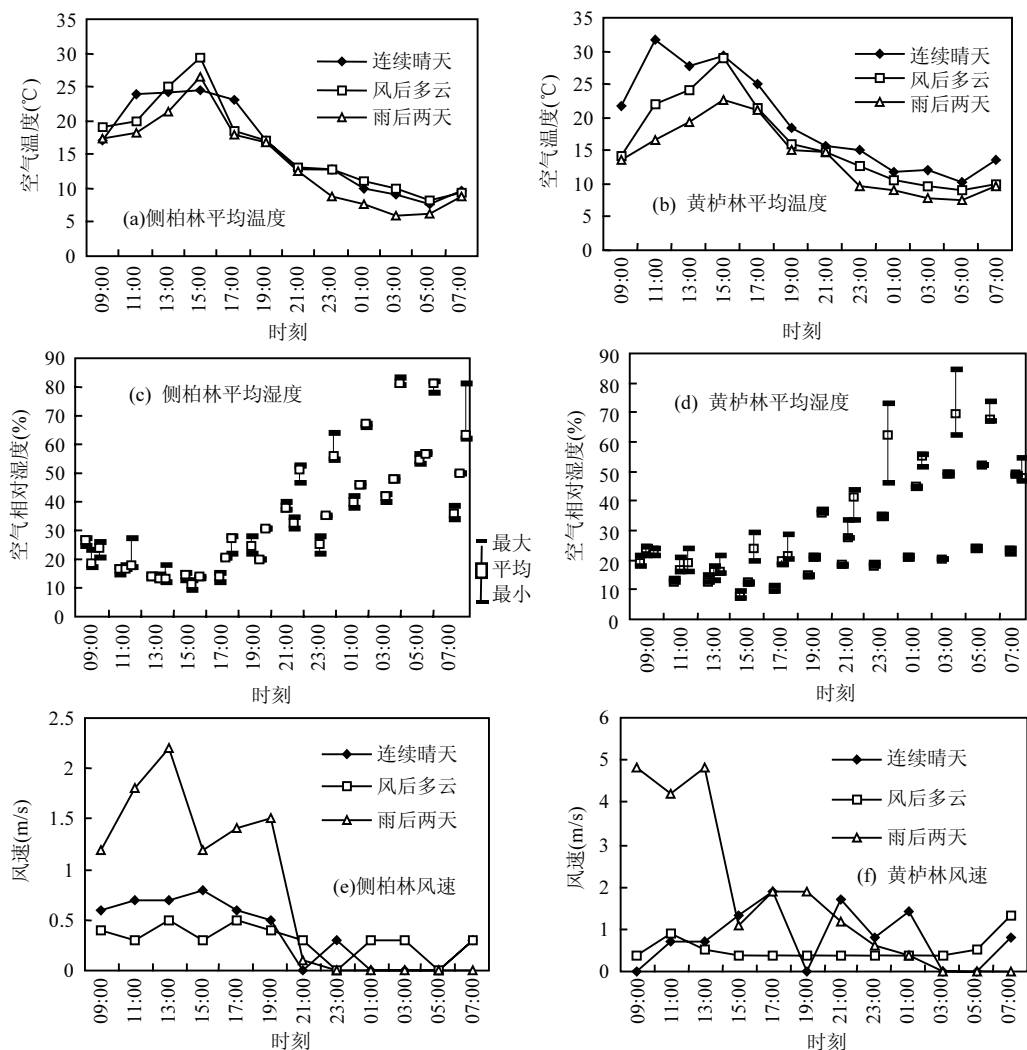


图 2 春季不同天气条件下游憩林气象因素日变化

Fig.2 Diurnal variations of meteorological factors in recreation forests on different weather conditions in spring

表 3 春季不同天气侧柏林细颗粒物所占比例日变化(%)

Table 3 Diurnal variations of ratios of finer particles on different weather conditions in recreation forests in spring(%)

时刻	连续晴天			风后多云			雨后两天		
	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}
9:00	44.44	12.66	31.85	41.41	12.98	31.05	46.49	8.40	14.23
11:00	42.83	14.73	34.20	42.55	10.65	27.01	46.66	8.88	14.90
13:00	49.47	14.01	32.51	43.07	10.69	30.90	38.90	7.40	16.37
15:00	42.13	9.35	18.91	38.38	10.08	33.38	35.96	7.16	17.70
17:00	37.47	8.39	19.31	40.82	12.85	37.59	44.87	9.90	19.02
19:00	35.96	14.28	26.83	44.23	12.43	35.07	50.78	12.57	19.91
21:00	41.89	21.95	32.33	46.88	15.00	35.31	53.87	14.85	19.41
23:00	39.41	18.69	38.13	47.68	15.40	35.76	52.29	17.43	25.86
1:00	57.85	9.44	28.31	52.09	18.84	38.26	59.78	22.89	28.58
3:00	33.89	19.98	26.03	50.73	21.23	37.52	64.48	25.99	26.30
5:00	47.76	20.43	23.87	61.67	25.24	35.31	68.03	30.77	28.50
7:00	42.85	13.54	28.59	51.13	18.87	36.82	61.61	27.47	23.52

表 4 春季不同天气条件下游憩林小粒径大气颗粒物比例日均值比较(%)

Table 4 Average diurnal ratios of finer particles on different weather conditions in recreation forests in spring(%)

天气条件	侧柏林			混交林			黄栌林		
	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}
连续晴天	43.00	14.79	28.41	46.77	15.42	30.09	48.50	15.20	29.72
风后多云	46.72	15.36	34.50	46.07	15.49	34.63	45.14	14.70	34.59
雨后两天	51.98	16.14	21.19	49.42	13.15	21.80	51.06	13.27	21.05

出现这种情况的主要原因为:“连续晴天”(数据由记录的天气资料整理而得),且白天气连续一周少云或无云,测定日(8 月 22 日)平均 温较高,空气相对湿度最小,风速又相对较大 能见度 21.5km,最高达 30km,除 14:00 外,其他 (图 3),这种晴朗的天气有利于大气颗粒物的 时刻云底均大于 2500m,日平均气压 1011hPa 扩散。

表 5 夏季不同天气条件下 3 种游憩林大气颗粒物日平均浓度(μg/m³)

Table 5 PM diurnal average concentrations in 3 recreation forests on different weather conditions in summer(μg/m³)

天气条件	侧柏林				混交林				黄栌林			
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}
桑拿天	326.46	237.90	116.58	47.70	271.32	195.26	96.27	40.85	281.02	199.44	95.95	40.66
雨后晴天	218.68	153.88	56.10	17.48	212.89	134.07	46.11	14.95	214.36	135.91	46.70	15.09
连续晴天	318.99	176.79	46.17	15.34	313.08	167.11	40.13	13.25	363.64	199.84	50.70	17.05
夏季总体	288.04	189.52	72.95	26.84	265.76	165.48	60.84	23.02	286.34	178.40	64.45	24.27

表 6 夏季游憩林不同天气条件下大气颗粒物方差分析结果

Table 6 variance analysis results of PM in 3 recreation forests on different weather conditions in summer

天气条件	侧柏林				黄栌林				混交林			
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}
桑拿天	A	A	A	A	AB	A	A	A	AB	A	A	A
雨后晴天	B	B	B	B	A	A	B	B	A	A	B	B
连续晴天	A	AB	B	B	B	A	B	B	B	A	B	B
F 值	3.21	2.51	6.44	11.80	5.12	2.06	4.34	8.07	2.78	1.77	6.02	10.14

注:A、B字母相同代表差异不显著,不同代表差异极显著,显著水平 α=0.05

相反,“桑拿天”离上一次雨距(7 月 18 日)约一周,雨后到测定日(7 月 26 日)连续多云或阴、轻雾,除雨后第 1 日外,其他天气能见度均在 15km 以下,且日最高温度 29.7~32.6℃,最低温度 22.1~24.9℃,日最大相对湿度 72%~92%,最小相对湿度 23%~53%,日平均风速 2.34m/s,最大值均没超过 5m/s.测定日日平均能见度 5.94km,最大时(17:00)也只有 12km,日平均气压 1006hPa,白天气温不是很高,而空气相对湿度较大,风速又最小(图 3),所以与连续晴天相比,大气颗粒物在这种高湿微风的“桑拿天”在白天的输送和扩散相对困难,尤其对郁闭度较大的侧柏林,这种闷热的天

气条件更容易使林内大气颗粒物聚集增多,特别是粒径较小的细颗粒物(图 4b);而在夜间由于“桑拿天”那天温度较“连续晴天”高,而大气颗粒物浓度与温度呈负相关^[11],使得这天与连续晴天天气条件下大气颗粒物浓度在夜间相差不大,甚至还要比连续晴天低。

3 种林分相比,桑拿天侧柏林大气颗粒物增加幅度较其他 2 种林型大,这除了侧柏林郁闭度大不容易使大气颗粒物扩散外,还可能由于夏季黄栌和其他阔叶树种生理活动最为旺盛,对大气颗粒物的消纳作用显现明显,所以黄栌林和混交林内大气颗粒物较低。

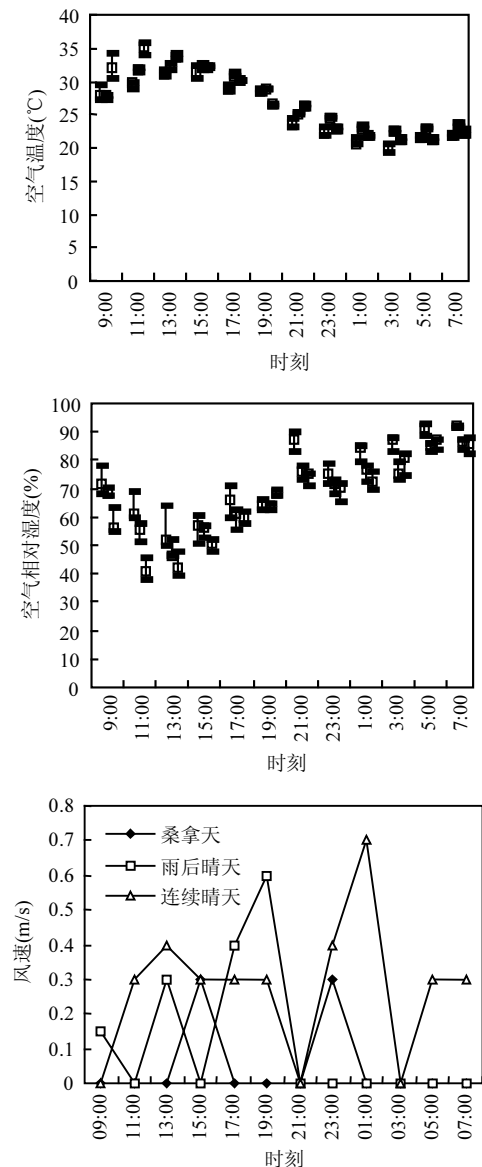


图3 夏季不同天气条件下游憩林气象因素日变化
Fig.3 Diurnal variations of meteorological factors in recreation forests on different weather conditions in summer

“雨后晴天”之前 10 多日连续多云、阴天与阵雨交替出现,降雨最多的是 7 月 30 日,持续时间 12h,降雨量最大达 33mm/6h,测定日(8 月 9 日)是雨后转晴的第 2 日,几乎全天天气晴朗,云底大于 2500m,观测时间内能见度均在 10km 以上(平均值 16km,最大值 25km),气压 1003hPa,其他小气候指标介于“桑拿天”和“连续晴天”之间.与连续晴

天相比,雨后晴天由于连续几天降雨的冲刷作用和测定日天气晴朗,大气颗粒物浓度在一天内各个时刻均有所下降,特别是 TSP 等粒径较大的粗颗粒物(图 4a).这说明降雨首先会冲刷掉粒径较大的颗粒物,而桑拿天对细颗粒的增加更明显.由表 7 可见,降雨和桑拿天小粒径颗粒物所占比例较高,特别是桑拿天最高.

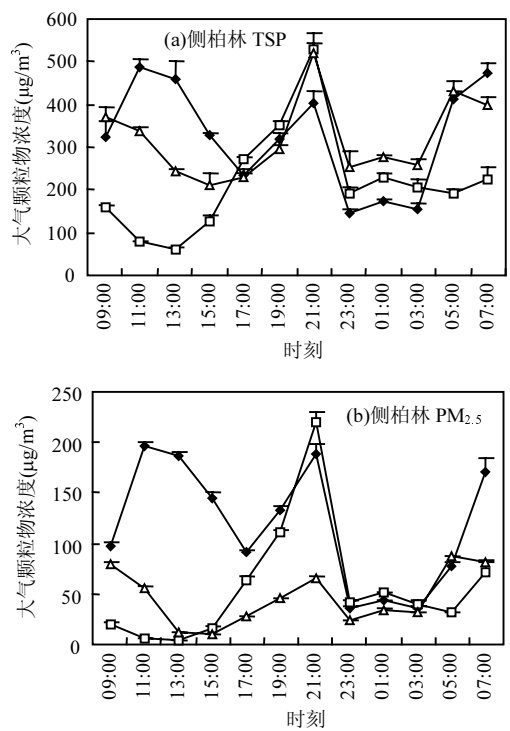


图4 夏季不同天气条件下侧柏林大气颗粒物日变化比较

Fig.4 Diurnal variations of particulate matters on different weather conditions in recreation forests in summer

◆ 桑拿天 □ 雨后晴天 ▲ 连续晴天

2.3 秋季典型天气条件下大气颗粒物变化

由表 8 可见,不管哪种游憩林的哪种粒径的大气颗粒物浓度均是在“雾霾后晴”最高,“风雨后晴”居中,其中“雾霾后晴”大气颗粒物浓度达到其他天气的 2 倍多.方差分析也显示,在 $\alpha=0.05$ 下,3 种游憩林 4 种粒径的大气颗粒物浓度均是雾霾后晴天与其他 2 种天气差异显著(表 9).

表 7 夏季不同天气条件下游憩林小粒径大气颗粒物比例日均值比较(%)

Table 7 Average diurnal ratios of finer particles on different weather conditions in recreation forests in summer(%)

天气条件	侧柏林			混交林			黄栌林		
	PM ₁₀ /	PM _{2.5} /	PM _{1.0} /	PM ₁₀ /	PM _{2.5} /	PM _{1.0} /	PM ₁₀ /	PM _{2.5} /	PM _{1.0} /
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
桑拿天	71.89	46.73	41.61	69.72	45.57	42.41	68.81	44.96	42.61
雨后晴天	65.47	29.46	30.89	59.46	28.83	31.52	60.34	28.86	31.45
连续晴天	54.31	24.03	32.24	52.38	21.92	31.69	53.50	23.27	32.39

表 8 秋季不同天气条件下 3 种游憩林大气颗粒物日平均浓度(μg/m³)

Table 8 PM diurnal average concentrations in 3 recreation forests on different weather conditions in autumn(μg/m³)

天气条件	侧柏林				混交林				黄栌林			
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}
雾霾后晴	328.97	242.81	126.97	49.08	214.56	125.78	39.91	16.63	221.18	127.70	39.36	16.65
风雨后晴	144.28	86.67	22.84	8.42	139.36	84.28	22.83	8.46	134.99	81.15	21.49	8.04
晴间多云	109.45	63.07	20.73	8.88	83.78	46.76	13.61	5.33	73.53	46.08	15.63	6.50
秋季总体	194.23	130.85	56.85	22.13	145.90	85.60	25.45	10.14	143.23	84.98	25.49	10.40

表 9 秋季游憩林不同天气条件下大气颗粒物方差分析结果

Table 9 variance analysis results of PM in 3 recreation forests on different weather conditions in autumn

天气条件	侧柏林				黄栌林				混交林			
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}
雾霾后晴	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
风雨后晴	B	B	B	B	B	A	B	B	B	A	B	B
晴间多云	B	B	B	B	B	A	B	B	B	A	B	B
F 值	9.88	8.64	7.86	8.6	11.94	10.15	8.76	10.05	7.55	7.68	8.81	11

注:A、B字母相同代表差异不显著,不同代表差异极显著,显著水平α=0.05

出现以上结果的原因主要是因为秋季总体上从9月份开始多数天气为阴、轻雾或少云轻雾,如9月12~18日、22~30日,10月份在测定日(10月20日)之前除14~19日外,其他时间几乎每天为阴雾天,能见度最高为10km左右,这种长时间阴雾天使得大气逆温层增厚,而且测定日夜间温度较低、相对湿度较高,且几乎静风(图5),这种气象条件下使大气颗粒物不易扩散,所以不管是哪种游憩林,“雾霾后晴”4种粒径大气颗粒物浓度几乎在一天内均高于其他2种天气,尤其在夜间这种差异更明显(图6)。不同林分相比较,侧柏林大气颗粒物浓度较高,这可能与仍具有一定颗粒物消减作用的黄栌林内环境开阔而侧柏林郁闭度高不易于大气颗粒物扩散有关。

“风雨后晴”在测定日前5d(10月28日)凌晨2:00~8:00降了雷暴雨和阵雨,雨量最大时为

11mm/6h,且从白天开始刮4~5级的偏北风,降雨的冲刷和风的扩散作用使大气颗粒物浓度有所降低。尽管如此,但“风雨后晴”仍处在秋季阴雾天的大环境中,尤其是10月24~27日雾变大,26日整个北京市能见度小于100m,这种情况下使得“风雨后晴”大气颗粒物浓度仍不太显著地高于其后一周的晴天(“晴间多云”)。

同时,不同天气条件相比较,小粒径大气颗粒物所占比例的差异不如大气颗粒物浓度的差异显著(表10),即雾霾后晴天小粒径大气颗粒物所占比例虽仍最高,尤其是侧柏林,但“风雨后晴”和“晴间多云”也较高,且与“雾霾后晴”差异不是很大。这说明雾天和多云对小粒径颗粒物增加明显,特别是对林内环境相对封闭的林地,而刮风和下雨对粗颗粒物的冲刷作用较大,从而使得雾霾天和风雨后的晴天小粒径大气颗粒物所占比例均大大增加。

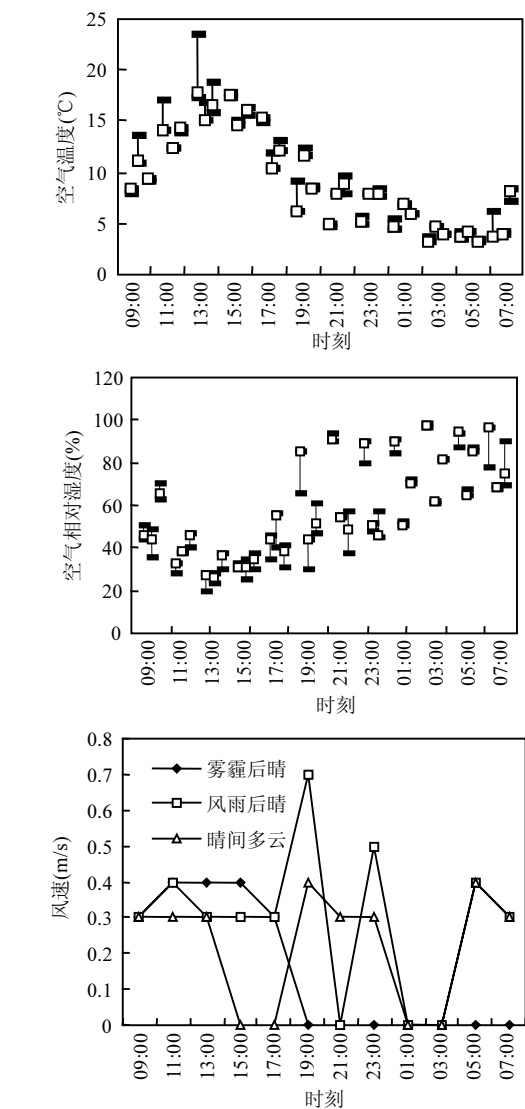


图5 秋季不同天气条件下侧柏林气象因素日变化
Fig.5 Diurnal variations of meteorological factors in *P. orientalis* forests on different weather conditions in autumn

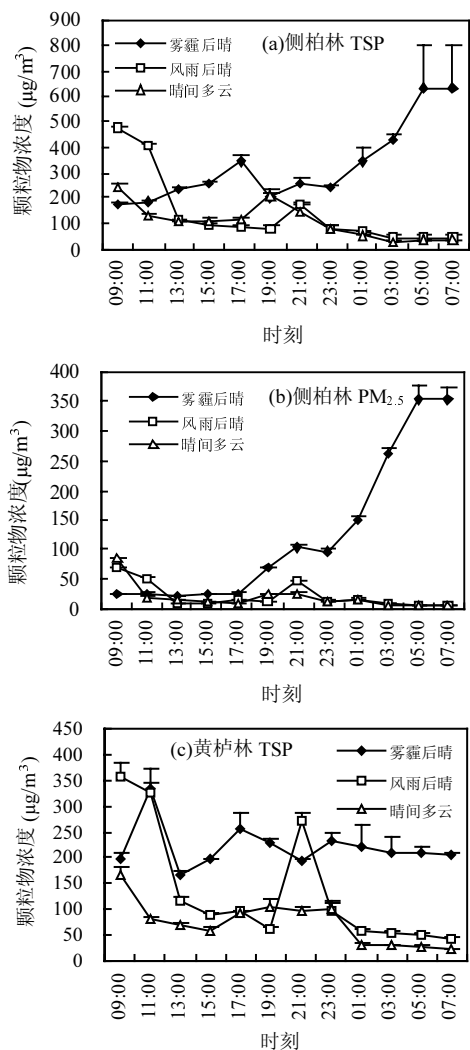


图6 秋季不同天气条件下游憩林大气颗粒物日变化比较
Fig.6 Diurnal variations of particulate matters on different weather conditions in recreation forest in autumn

表 10 秋季不同天气条件下游憩林小粒径大气颗粒物比例日均值比较(%) Table 10 Average diurnal ratios of finer particles on different weather conditions in recreation forests in autumnn(%)									
天气条件	侧柏林			混交林			黄栌林		
	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{1.0} /PM _{2.5}
雾霾后晴	68.64	43.15	39.94	59.40	31.43	40.82	58.01	30.42	41.50
风雨后晴	60.09	27.80	38.62	60.05	28.29	38.63	61.07	28.22	38.98
晴天多云	57.11	31.58	41.94	56.23	28.75	40.25	62.92	33.65	41.82

气颗粒物均在“雪后晴天”浓度最低(4 种粒径均为连续晴天的 0.2 倍),“晴间多云”最高(4 种粒径颗粒物为连续晴天的 1.39~3.68 倍),且在 $\alpha=0.05$ 下这种差异在 3 种游憩林内均显著(表 12).

这主要由于“雪后晴天”测定日前 2 日(12 月 10 日)从早上 5:00 到傍晚 17:00 连续降雪,平均降雪量 1mm/6h,雪在沉降过程中的冲刷作用使大气颗粒物浓度降低,而且至测定日(12 月 13 日)试验地地面仍被积雪覆盖,起尘量大大减少,所以大气颗粒物浓度在一天内均最低(图 7).

相反,“晴间多云”那天能见度即使在午后 14:00 左右也不到 10km,而且测定日前 2 日也多为阴雾天(平均能见度只有 7km 左右),云雾使得大气颗粒物不容易扩散而增加,所以不论是粗颗粒物还是细颗粒物,其浓度在一日内各个时刻均最高(图 7).3 种林分相比,黄栌林晴间多云大气颗粒物浓度最高,侧柏林最低,黄栌林 4 种粒径大气颗粒物浓度是侧柏林的 1.04~1.13 倍,这可能与冬季黄栌林落叶对大气颗粒物的消减作用小有关.

表 11 冬季不同天气条件下 3 种游憩林大气颗粒物日平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

天气条件	侧柏林				混交林				黄栌林			
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}
连续晴天	323.48	205.89	85.09	42.10	338.60	204.83	73.02	35.86	356.96	212.54	70.93	34.22
雪后晴天	75.55	42.70	18.34	9.48	65.38	34.89	12.15	6.36	57.76	32.26	12.19	6.42
晴间多云	453.03	362.62	272.20	125.83	487.59	362.57	280.44	123.34	470.84	380.32	290.79	141.63
冬季总体	284.02	203.73	125.21	59.14	297.19	200.76	121.87	55.19	295.18	208.37	124.64	60.76

表 12 冬季游憩林不同天气条件下大气颗粒物方差分析结果

天气条件	侧柏林				黄栌林				混交林			
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}
连续晴天	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
雪后晴天	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
晴间多云	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
F 值	77.99	57.01	58.63	51.24	53.80	61.37	70.83	61.25	89.60	80.08	70.53	62.36

注:A、B 字母相同代表差异不显著,不同代表差异极显著,显著水平 $\alpha=0.05$

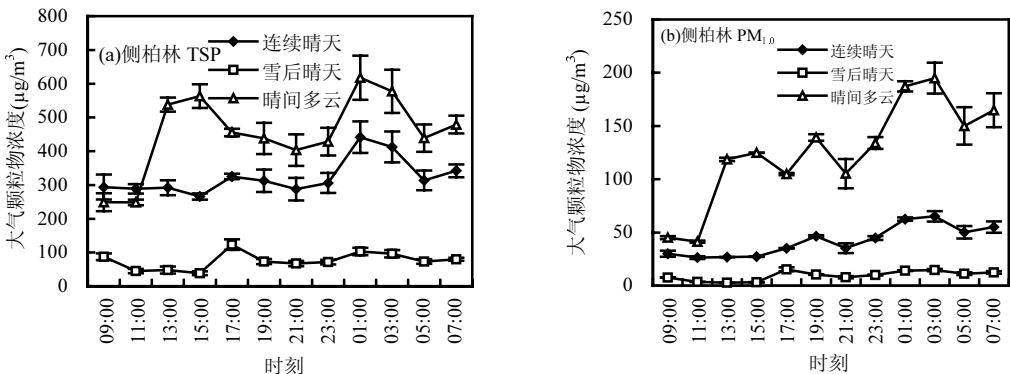


图 7 冬季不同天气条件下游憩林大气颗粒物日变化比较

Fig.7 Diurnal variations of particulate matters on different weather conditions in recreation forests in winter

另外,从不同天气小粒径大气颗粒物所占的比例还可以看出(表 13),雪在沉降过程中各种粒径大小的颗粒物均被凝结减少,而多云天气使小粒径大气颗粒物更不容易扩散,所以粒径较小的空颗粒物所占的比例在雪后晴天和连续晴天相差并不大,而晴间多云却明显高于其他 2 种天气。

表 13 冬季不同天气条件下游憩林小粒径大气颗粒物比例日均值比较(%)

天气条件	侧柏林			混交林			黄栌林		
	PM ₁₀ /	PM _{2.5} /	PM _{1.0} /	PM ₁₀ /	PM _{2.5} /	PM _{1.0} /	PM ₁₀ /	PM _{2.5} /	PM _{1.0} /
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
连续晴天	63.09	41.09	48.95	60.20	35.15	48.53	59.69	33.15	47.58
雪后晴天	55.60	41.60	51.05	53.00	34.31	51.45	56.60	38.16	52.04
晴间多云	78.72	73.52	46.38	73.70	75.30	44.40	80.47	75.03	48.48

3 讨论

3.1 降雨对城市森林内大气颗粒物的影响

本文在春、夏、秋季均研究了降雨后的晴天城市森林内大气颗粒物浓度的变化,发现降雨后大气颗粒物浓度均有不同程度的降低:春季“雨后两天”白天大部分时间颗粒物浓度相对较低;夏季“雨后晴天”大气颗粒物日平均浓度远低于夏季总体平均值和其他天气条件下的浓度;秋季处在 2007 年秋季阴雾天较多的大环境中的“风雨后晴”在测定日前 5 日降了暴雨,大气颗粒物浓度依然有所降低.关于降雨对大气颗粒物的影响,日本广岛市曾用干湿沉降研究发现空气中多环芳香烃浓度在晴天较高,在雨天显著降低^[30],与本研究结果相符.

另有学者发现雨水对粗粒子的冲刷效率明显,雨后大颗粒迅速减少,而可吸入颗粒物比重可能会加大^[31],本研究也证实了这一点,夏季“雨后晴天”3 种林型中粗颗粒物 TSP 只为连续晴天的 0.58~0.68,而细颗粒物浓度“雨后晴天”并未低于“连续晴天”,而且降雨后不仅可吸入颗粒物比重加大(为连续晴天的 1.13~1.21 倍),而且 PM_{2.5}/PM₁₀、PM_{1.0}/PM_{2.5} 均会增高.

这说明降雨的冲刷作用和雨后空气湿润使大气颗粒物浓度减少,而且降雨首先冲刷减少粗颗粒物,所以雨后晴天小粒径大气颗粒物所占的比例会增加.不过,有时在雨后的夜间由于空气湿度大大气颗粒物浓度也会增加,本文春季“雨后

两天”晚上到次日凌晨大气颗粒物浓度保持较高水平就是证明.另外,本文除雾霾天、桑拿天和冬季个别情况外,PM_{2.5}/PM₁₀ 在 20% 以下,低于全国 50%~70% 的比例,这是由于细颗粒物 PM_{2.5} 主要来源于交通车辆尾气排放、居民区生活和取暖燃烧以及气体挥发物化学反应产生的次生颗粒等,本研究地为远离城区上述污染源的城市森林内,所以 PM_{2.5} 所占的比例小.

3.2 降雪对城市森林内大气颗粒物的影响

雪覆盖地表能够减少扬尘,同时雪在沉降过程中可以通过冲刷、凝结作用降低大气颗粒物浓度,本文冬季“雪后晴天”大气颗粒物不论粗细其浓度在一天内均最低,“雪后晴天”4 种粒径颗粒物浓度均约为连续晴天的 0.2 倍,所以大气颗粒物不论粒径大小,降雪对其均有降减作用,这与美国洛根的部分调查结果相一致^[32].此外,在美国洛根还发现降雪能够导致逆温现象,从而引起空气污染事件^[32],本研究未发现降雪导致明显的逆温现象,这可能与降雪量、地区差异有关.

3.3 多云和雾霾对城市森林内大气颗粒物的影响

先前学者研究发现,南京冬季雾天颗粒物中 PAHs 浓度有增加的趋势^[12];新加坡雾天 PM_{2.5} 的平均浓度以及大多数化学成分都较晴天增加 2 倍^[33];马来西亚吉隆坡雾天空气多环芳烃中苯并芘(BaP)等显著增加,对人体健康的危险是平常的 4 倍多^[34];青岛市雾和霾均对粒径小

于 $1.0\mu\text{m}$ 的细颗粒物的贡献较大^[35]。本研究中秋季不管哪种游憩林的哪种粒径的大气颗粒物浓度均是在“雾霾后晴”最高,日平均值达到其他天气的 2 倍多,日变化反映出这种增高效应在夜间更明显;冬季“晴间多云”大气颗粒物浓度在一天内均最高,4 种粒径颗粒物为连续晴天的 1.39~3.68 倍。这说明多云和雾霾天气不利于大气颗粒物的扩散而使其污染加重,而这种加重效应在夜间更明显。

同时,本研究中发现冬季“晴间多云”细颗粒物浓度及所占比例较连续晴天高,秋季“晴间多云”和“雾霾后晴”小粒径大气颗粒物所占比例也较高,尤其对于郁闭度较高的侧柏林,这说明雾霾和多云对小粒径颗粒物浓度的增加效果明显,特别是对林内环境相对封闭的林地增加幅度更大。

3.4 桑拿天对城市森林内大气颗粒物的影响

夏季高湿静风、闷热的“桑拿天”也会有如雾霾和多云天的效果,能使郁闭度较大的林地内大气颗粒物特别是细颗粒物及其所占的比例显著增加。本研究中除个别情况外夏季桑拿天颗粒物浓度最高,郁闭度较大的侧柏林“桑拿天” $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度是“连续晴天”的 2.53 倍。

3.5 风对城市森林内大气颗粒物的影响

风对大气颗粒物的影响具有一定的复杂性和不确定性,先前有学者在美国犹他州、澳大利亚布里斯班等地的调查发现,一定量的风速能使污染物扩散而减少^[32],大气颗粒物浓度随风速增加而呈指数下降^[1],当风速为 3m/s 时,颗粒物扩散速率为 $0.1\sim 0.3\text{cm/s}$,风速为 9m/s 时,颗粒物扩散速率为 2.9cm/s ^[36]。本研究春季“风后多云”测定日前几日无降雨,天气干燥,且测定日前 2 日连续刮风,再加上那天从傍晚开始天气转为多云,结果使得“风后多云”4 种粒径大气颗粒物日平均浓度均显著高于其他 2 种天气,特别是在地被物较少的黄栌林内颗粒物浓度更高。而在秋季测定日白天刮 4~5 级偏北风但测定日前 5 日降了雷暴雨和阵雨的“风雨后晴”,大气颗粒物浓度较低。这说明雨后等空气和地面湿润时风能在一定程度上使大气颗粒物扩散减少,而在天气干燥时刮风会

增加城市森林内大气颗粒物的浓度,尤其是对地表相对裸露的林地,且多云会加重干燥天气刮风后大气颗粒物的污染程度。

3.6 天气条件与林地结构对颗粒物的复合影响

城市森林内大气颗粒物浓度除受大环境天气因素的影响外,还与林分结构、生长季节有关。春、冬季黄栌等阔叶树叶片未完全萌发甚至落叶,对大气颗粒物的消减作用弱,若林地裸露,北方天气春、冬季干燥,则容易起尘,刮风时大气颗粒物浓度较四季常绿、地表覆盖物多的针叶林高。夏、秋季树种生理活动较为旺盛,黄栌和其他阔叶树对大气颗粒物的消纳作用明显,若其林地结构开阔,遇桑拿天和雾霾天时林内大气颗粒物较郁闭度大的侧柏林高。

4 结 论

4.1 降雨能消减城市森林内大气颗粒物浓度,尤其对粗颗粒物消减作用明显,雨后 TSP 浓度只为连续晴天的 0.58~0.68,所以雨后晴天粒径较小的颗粒物质量浓度所占比例会增加。不过,有时在雨后的夜间,由于空气湿度大大气颗粒物浓度也会增加。

4.2 雪能够降低大气颗粒物浓度,“雪后晴天”4 种粒径大气颗粒物浓度均只有连续晴天的 0.2。

4.3 多云和雾霾天气使大气颗粒物污染加重,城市森林内 4 种粒径大气颗粒物浓度为连续晴天的 2 倍左右。从污染时段上来看,夜间污染较白天重;从颗粒物粒径来看,雾霾和多云对小粒径颗粒物浓度的增加效果较粗颗粒物明显。

4.4 夏季高温高湿静风、闷热的“桑拿天”能使郁闭度较大的城市森林内大气颗粒物特别是细颗粒物浓度及其所占的比例显著增加,“桑拿天” $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度是“连续晴天”的 2.53 倍。

4.5 风在雨后能使大气颗粒物在一定程度上扩散减少,而在天气干燥时刮风会增加城市森林内大气颗粒物的浓度,且多云会加重干燥天气刮风后大气颗粒物的污染程度。

4.6 天气条件对大气颗粒物的影响与城市森林结构有关,春、冬季林地裸露的落叶阔叶树在刮风时大气颗粒物浓度较四季常绿、地表覆盖物多

的针叶林高,夏、秋季桑拿天和雾霾天郁闭度大的侧柏林大气颗粒物浓度较林地结构开阔的黄栌林高。

参考文献:

- [1] 徐 虹,林丰妹,毕晓辉,等.杭州市大气降尘与 PM_{10} 化学组成特征的研究 [J]. 中国环境科学, 2011,31(1):1-7.
- [2] Yue W S, Lia X L, Liu J F, et al. Characterization of $PM_{2.5}$ in the ambient air of Shanghai city by analyzing individual particles [J]. The Science of the Total Environment, 2006,368(2/3):916-925.
- [3] 张懿华,段玉森,高 松,等.上海城区典型空气污染过程中细颗粒物污染特征研究 [J]. 中国环境科学, 2011,31(7):1115-1121.
- [4] Sergio R, Xavier Q, Andres A, et al. Comparative PM_{10} ~ $PM_{2.5}$ source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain [J]. Science of the Total Environment, 2004,328:95-113.
- [5] 黄祖照,王 杰,刘建国,等.广州城区大气细颗粒物粒谱分布特征分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(7):1177-1181.
- [6] 徐 敬,丁国安,颜 鹏,等.北京地区 $PM_{2.5}$ 的成分特征及来源分析 [J]. 应用气象学报, 2007,18(5):645-654.
- [7] 李 雪,刘子锐,任希岩,等.2007年和2008年夏季北京奥运馆大气与 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征[J].大气科学学报, 2012, 35(2):197-204.
- [8] 姚从容,陈 魁.城市环境空气质量变化规律及污染特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2007,21(5):50-52.
- [9] Latha K M, Highwood E J. Studies on particulate matter (PM_{10}) and its precursors over urban environment of reading, UK[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2006,101(2):367-379.
- [10] 杨复沫,贺克斌,马永亮.北京大气细粒子 $PM_{2.5}$ 的化学组成 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002,42(12):1605-1608.
- [11] Feng J L, Hu M, Chan C K, et al. A comparative study of the organic matter in $PM_{2.5}$ from three Chinese megacities in three different climatic zones [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(21):3983-3994.
- [12] 顾凯华,樊曙先,黄红丽,等.南京冬季雾天颗粒物中 PAHs 分布与气象条件的关系 [J]. 中国环境科学, 2011,31(8):1233-1240.
- [13] Lough G C, Schauer J J, Lawson D R. Day-of-week trends in carbonaceous aerosol composition in the urban atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(22):4137-4149.
- [14] Voravit C, Poonsup N, Keiichi T. Trend in lead content of airborne particles and mass of PM_{10} in the metropolitan Bangkok [J]. Journal of Health Science, 2004,50(1):86-91.
- [15] Salma I, Maenhaut W. Changes in elemental composition and mass of atmospheric aerosol pollution between 1996 and 2002 in a central European city [J]. Environmental Pollution, 2006,143(3):479-488.
- [16] Lee B K, Lee H K, Jun N Y. Analysis of regional and temporal characteristics of PM_{10} during an Asian dust episode in Korea [J]. Chemosphere, 2006,63(7):1106-1115.
- [17] Tsai Y I, Chen C L. Characterization of Asian dust storm and non-Asian dust storm $PM_{2.5}$ aerosol in Southern Taiwan [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(25):4734-4750.
- [18] Hou X M, Zhuang G S, Sun Y, et al. Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and fatty acids in $PM_{2.5}$ aerosols in dust season in China [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(18):3251-3262.
- [19] Wiedinmyer C, Quayle B, Geron C, et al. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(19):3419-3432.
- [20] Buzcu B, Yue Z W, Fraser M P, et al. Secondary particle formation and evidence of heterogeneous chemistry during a wood smoke episode in Texas [J]. Journal of Geophysical Research, 2006,111(D10):S1013-1-S1013-14.
- [21] 吴志萍.城市不同类型绿地大气颗粒物浓度变化规律的研究 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2007.
- [22] 郭二果.北京西山典型游憩林生态保健功能研究 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2008.
- [23] 于丽胖.城市道路绿化配置对大气颗粒物和 CO 扩散的影响 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2009.
- [24] 孙志伟.福州行道树空间结构对交通污染物扩散的影响 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2009.
- [25] 郭二果,王 成,彭镇华.城市空气悬浮颗粒物的理化性质及其健康效应研究综述 [J]. 生态环境, 2008,17(2):851-857.
- [26] 郭二果,王 成,彭镇华.城市空气悬浮颗粒物时空变化规律及影响因素研究 [J]. 城市环境与城市生态, 2010,23(5):34-37,41.
- [27] 郭二果,王 成,郝光发,等.北京西山典型游憩林空气悬浮颗粒物季节变化规律 [J]. 东北林业大学学报, 2010,38(10):55-57.
- [28] 郭二果,王 成,彭镇华,等.北京西山典型游憩林春季大气颗粒物日变化规律 [J]. 林业科学, 2009,45(6):145-148.
- [29] 郭二果,王 成,彭镇华,等.北京西山典型游憩林大气颗粒物不同季节日变化规律 [J]. 生态学报, 2009,29(6):3253-3263.
- [30] Ozaki N, Nitta K, Fukushima T. Dispersion and dry and wet deposition of PAHs in an atmospheric environment [J]. Water Science and Technology, 2006,53(2):215-224.
- [31] 沈恒华,黄世鸿,李如祥.TSP 的来源与气象因素对 TSP 测试的影响 [J]. 环境监测管理与技术, 1996,8(4):15-18,24.
- [32] Esmail M, Tess D, Randal S, et al. Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes (January, 2004) in Logan, Cache Valley, Utah, USA [J]. Atmospheric Research, 2006,79(2):108-122.
- [33] See S W, Balasubramanian R, Wang W. A study of the physical, chemical and optical properties of ambient aerosol particles in

- Southeast Asia during hazy and nonhazy days [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006,111(D10):S1008-1-S1008-12.
- [34] Omar NYMJ, Mon T C, Rahman N A. Distributions and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric aerosols of Kuala Lumpur, Malaysia [J]. *The Science of the Total Environment*, 2006,369(1-3):76-81.
- [35] 李瑞凡,石金辉,张代洲,等.天气条件及气团来源对青岛春季大气颗粒物数浓度谱分布的影响 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(8): 1392-1399.
- [36] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed [J]. *Global Change Biology*, 2004,6(8):995-1003.
- 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、常璐等同学的鼎力援助,在此深表感谢!
- 作者简介:** 郭二果(1978-),女,内蒙古凉城人,工程师,博士,主要从事城市生态及环境保护研究.发表论文 15 篇.

烷烃对二次有机气溶胶生成的贡献

中挥发性有机化合物(IVOCs)是一类重要的二次有机气溶胶前体物,在常用的化学物质传输模型中均有涉及,但最大的挑战是很难用传统的气相色谱方法将如此众多的 IVOCs 区分开来;相反,它们被归为未解决复杂混合物(UCM)类中,大概包括了庞杂的支链和环状烷烃群.为更好地理解 IVOCs 对 SOA 生成的贡献,采用不同类型的烷烃的一系列烟雾箱实验被开发,包括环状的、带支链的和直链的烷烃.这些实验重点关注在典型大气有机气溶胶和高浓度 NO_x 环境下,来自于 OH 自由基反应而新生成当 SOA.环烷烃生成的 SOA 比 3~4 个碳的直链烷烃生成 SOA 粒径大.对于相同碳数的烷烃,支链烷烃生成的 SOA 量最小, $C(\text{OA})$ 约为 $0.05\sim 0.08/15(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$.支链烷烃生成 SOA 的量取决于支链甲基在碳链中的位置.高分辨的气溶胶质谱数据显示,SOA 的氧碳比主要由前体物的碳数所决定,根据前体物的粒径大小,由 IVOCs 生成的 SOA 质谱图与环境数据中得到的氧化或者羟基化半挥发性有机气溶胶质谱图类似.根据新获得的数据,我们估计了 SOA 的生成潜势,由柴油燃烧和由 LJCM 气团贡献生成的 SOA 量要 4 倍于单环芳烃的贡献,与多环芳烃在典型大气环境中数小时氧化后的贡献相当.因此,来自于 IVOCs 生成的 SOA 是城市 OA 的重要组分,应包含在 SOA 模型中,本研究生成的数据可适用于此类模型的相关计算.

马英歌 译自《*Environmental Science Technology*》, 2012,46(16):8773-8781.