

# 不同天气下景观生态林内外大气颗粒物质量浓度变化特征

陈博<sup>1</sup>, 王小平<sup>1</sup>, 刘晶岚<sup>2\*</sup>, 陈峻崎<sup>3</sup>, 朱建刚<sup>3</sup>, 李春义<sup>4</sup>

1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学保护区学院, 北京 100083;  
3. 北京市林业碳汇工作办公室, 北京 100013; 4. 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091

**摘要:** 为了探讨景观生态林对大气颗粒物的调控作用, 以北京大兴区景观生态林为例(主要树种为旱柳 *Salix matsudana*), 研究不同季节、不同天气条件下景观生态林内大气颗粒物质量浓度差异以及林内和林外质量浓度对比。于2013年7月至2014年5月, 分四季选择不同天气类型, 采用水平同步监测法对林内和林外两个监测点3种粒径大气颗粒物(TSP、PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>)质量浓度和气象因子进行每日10h的连续监测(8:00—18:00)。结果表明, (1)晴朗天气景观生态林内 $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均处于较低水平, 分别为(61.53±21.73)~(174.32±36.01)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(28.91±10.34)~(94.87±20.45)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和(6.29±3.86)~(23.91±12.29)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 多云、扬尘、雾霾和雾霭天气颗粒物质量浓度较高, 污染明显加重, 雾霭天气下 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的增加效果更为明显, 而扬尘天气下 $\rho(\text{TSP})$ 显著增加。(2)雾滴对于PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>具有一定的湿清除作用, 也可以与霾粒子共同作用形成相对稳定的雾霭天气, 其颗粒物污染程度高于其他天气状况, 此时以粒径为2.5~10  $\mu\text{m}$ 的颗粒物污染为主。(3)夏、秋和春季晴朗微风天气(风速 $\leq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和扬尘天气林内 $\rho(\text{TSP})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 显著低于林外, 多云、轻微至轻度雾霭天气, 林内 $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均显著低于林外, 晴朗大风(风速 $> 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和雾霭天气林内 $\rho(\text{TSP})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 不显著高于林外, 雾霭天气林内 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 显著高于林外; 冬季不同天气下 $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 林内和林外对比没有明显规律。(4)空气相对湿度、风速和风向是观测时段内影响颗粒物质量浓度的主要因子。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与相对湿度呈线性正相关, 而与风速呈非线性负相关, 偏南风对颗粒物主要起输送和积累作用, 偏北风对颗粒物起到稀释和扩散作用。相对于TSP和PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>更易受近地面气象条件的影响而堆积或扩散。

**关键词:** 不同天气条件; 景观生态林; 大气颗粒物; 质量浓度

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.015

**中图分类号:** X16

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906(2015)07-1171-11

**引用格式:** 陈博, 王小平, 刘晶岚, 陈峻崎, 朱建刚, 李春义. 不同天气下景观生态林内外大气颗粒物质量浓度变化特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1171-1181.

CHEN Bo, WANG Xiaoping, LIU Jinglan, CHEN Junqi, ZHU Jiangang, LI Chunyi. Mass Concentration Variations of Airborne Particulate Matters Inside and Outside of A Landscape Ecological Forest under Different Weather Conditions [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1171-1181.

大气颗粒物是大气中重要的微量成分, 以固态或液态的形式悬浮于大气中(Alves et al., 2006; Shi et al., 2012), 通过吸收和散射太阳光直接影响全球辐射平衡, 且通过形成云凝结核间接影响气候(Charlson et al., 1992)。大气颗粒物(尤其是空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物)能够诱发心血管和呼吸道等疾病, 严重危害人体健康(陶燕等, 2014)。近年来, 随着经济和城市化进程的快速发展, 加之北京三面环山的地理环境不利于污染物的扩散(Chen et al., 2013), 空气污染日趋明显, 雾霾天气频发, 大气颗粒物已成为北京空气的首要污染物, 引起社会各界的广泛关注。

目前, 大气颗粒物的研究主要集中于浓度时空变化(杨复沫等, 2002; Gomišček et al., 2004; 韩素芹等, 2008)、化学组成分析(Wang et al., 2008; Chou et al., 2010)、来源解析(Sun et al., 2004; Zheng et al., 2005)及其与气象条件的关系等(车瑞俊等, 2007<sup>560-562</sup>; 蒲维维等, 2011; 赵晨曦等, 2014)。另外, 一些学者开始研究城市森林对大气颗粒物的调控作用, 已有研究表明城市森林对于大气颗粒物的质量浓度具有双重效应, 植物通过叶片和枝干吸附大气中悬浮的颗粒物, 可以减少大气颗粒物质量浓度(柴一新等, 2002; 王蕾等, 2006; 王会霞等, 2010), 而植物释放的有机挥发物、花粉

**基金项目:** 国家林业公益性行业科研项目(201304301); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFINT2015C12)

**作者简介:** 陈博(1983年生), 女, 博士研究生, 研究方向为森林生态。E-mail: 335859230@qq.com

\*通讯作者: 刘晶岚(1966), 女, 副教授, 主要从事城市森林与城市生态研究。E-mail: Liuji166@hotmail.com

**收稿日期:** 2015-04-16

和孢子等物质则可能增加大气颗粒物的质量浓度(Beckett et al., 1998),同时林分过密可能导致林内空气流通差,不利于污染物的扩散和稀释(Ries et al., 2001)。另有学者已初步探讨了不同林分结构对林内和林外大气颗粒物质量浓度差异的影响(殷杉等, 2007; 吴志萍等, 2007),而关于天气因素对城市森林内外大气颗粒物质量浓度差异的对比影响还缺乏时间尺度上连续完整的研究。

景观生态林是以生态公益林为主体的森林生态系统(李道军, 2013),强调景观效果与生态功能有机结合,具有城市背景的作用(查季清, 2011),对于维护生态平衡、促进森林旅游、推动环境发展有着重要的作用。因此,本文以北京大兴区景观生态林为例,于2013年7月至2014年5月,选择不同的天气条件,对3种粒径大气颗粒物(TSP、PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>)质量浓度和气象因子进行同步监测记录,旨在了解不同季节不同天气条件下,景观生态林内外大气颗粒物污染变化特征及质量浓度对比,并为城市大气污染防治和指导市民合理选择亲近森林的时间提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地大兴区大洼村景观生态林是2012年启动的“首都平原百万亩造林工程”的造林地块之一。研究区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温11.6℃,年均降水量630mm(田世丽等, 2013),土壤为冲击性砂土,土质疏松通透性好,保肥蓄水能力差,土壤pH值为8.44(谭炯锐, 2010)。在试验区设置林内和林外2个监测点,为了保证监测点具有相近的污染源,且避免监测点出现林缘效应,林内监测点设在景观生态林中心位置,距林缘50m,林外监测点设在林外距林缘50m的位置且四周空旷无高大乔木和建筑遮挡。林内试验样地主要乔木为旱柳(*Salix matsudana*),平均树高6m、平均胸径12cm,林缘伴生榆叶梅(*Prunus triloba*)和碧桃(*Prunus persica*)等少量花灌木。

### 1.2 天气条件选择

选择不同季节出现频率较高,且对大气颗粒物具有明显集聚、扩散等效应的天气类型作为典型天气开展林内和林外同步监测,跟踪记录天气实况。2013年夏季至2014年春季分别选择如下天气类型:夏季“晴朗微风”3d(7月23日、8月18日、8月19日),“雾霭转晴”2d(7月22日、7月28日),“多云”3d(7月26日、7月31日、8月20日),“轻度雾霾”3d(8月10日、8月13日、8月22日);秋季“晴朗微风”3d(9月20日、9月21日、10月26日),“晴朗大风”2d(11月10日、11月

17日),“晴间多云”2d(10月3日、11月9日),“雾霭”3d(9月13日、9月30日、10月4日);冬季“晴朗微风”2d(1月10日、1月12日),“轻度雾霾”3d(1月11日、1月13日、2月23日);春季“晴朗微风”3d(3月22日、3月29日、3月30日),“扬尘”3d(4月12日、4月20日、5月1日),轻度雾霾2d(3月23日、4月13日)。其中,“晴朗大风”定义为风速 $\geq 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,能见度 $> 10 \text{ km}$ 的天气;“雾霭”定义为相对湿度 $\geq 90\%$ ,能见度1~10km的天气(田谧, 2013)<sup>8-9</sup>;“轻度雾霾”和“轻度雾霾”定义为相对湿度 $< 90\%$ ,风速 $< 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,能见度分别为5~10km和3~5km的天气(田谧, 2013)<sup>10</sup>;“扬尘”定义为风速 $\geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,能见度1~10km的较干燥天气(周祥龙, 2010)。

### 1.3 指标测定和数据处理

每日8:00—18:00采用英国Turnkey仪器制造公司生产,且符合粉尘监测国家标准的Dustmate粉尘检测仪(分辨率:0.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;测量范围:0~6000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;粒径范围0.5~15 $\mu\text{m}$ )同步连续测定2个监测点距地面1.5m处的 $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ ,同时使用台湾衡欣az8918风速气温湿度三合一测试仪及TN-F三杯式风速表测定气温、相对湿度、风速和风向数据。同一季节相同的天气条件下,将每个监测点不同日期同一时段的数据取平均值进行统计分析。

所有数据应用Microsoft Excel 2003、SPSS 21.0和SigmaPlot 10.0分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同天气间的差异,采用配对样本T检验(Paired-Samples T Test)比较景观生态林内和林外的差异,采用偏相关分析(Partial Correlations)比较不同气象因子与颗粒物质量浓度之间的关系强弱;显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 夏季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物的变化

夏季,天气条件对大气颗粒物质量浓度具有显著影响,景观生态林内和林外 $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均表现为晴朗微风 $<$ 雾霭转晴 $<$ 多云 $<$ 轻度雾霾(表1)。其中,晴朗微风和雾霭转晴的天气林内和林外 $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值低于夏季总体平均值,特别是晴朗微风天气林内和林外 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 仅为夏季总体平均值的0.13和0.14。

表2方差分析显示,多云和轻度雾霾天气下,林内和林外3种粒径颗粒物质量浓度均显著高于晴朗微风天气;轻度雾霾天气下,林内和林外3种粒径颗粒物质量浓度也显著高于雾霭转晴天气;而雾

表 1 夏季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物日均质量浓度对比

Table 1 Diurnal average mass concentration comparison of particulate matters inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions in summer  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 

天气	林内			林外			林内/林外		
	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
晴朗微风(3 d)	79.79±18.95	38.26±9	8.22±3.34	93.18±21.24	43.08±9.52	9.48±4.23	0.86*	0.89*	0.87
雾霭转晴(2 d)	143.34±29.16	91.26±19	39.24±16.6	154.66±84.08	90.53±39.78	40.82±18.96	0.93	1.01	0.96
多云(3 d)	217.75±43.81	153.7±44.12	73.57±26.24	236.45±59.99	164.91±43.19	78.13±24.82	0.92*	0.93*	0.94*
轻微雾霾(3 d)	288.24±91.35	220.43±53.12	127.92±37.08	317.51±90.26	241.65±51.12	136.89±35.51	0.91*	0.93*	0.93*
夏季整体(11 d)	185.82±107.23	129.06±80.32	64.33±52.46	204.61±96.93	139.09±87.53	68.5±55.19	0.91*	0.93*	0.94*

数据为均值±标准差, \*表示相同天气条件下林内和林外同种颗粒物差异显著, 显著水平  $\alpha=0.05$

表 2 夏季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物日均质量浓度及小粒径颗粒物所占比例的方差分析

Table 2 Variance analysis results of particulate matters mass concentrations and ratios of finer particles inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions in summer

天气	林内					林外				
	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	(PM <sub>10</sub> /TSP)/%	(PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )/%	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	(PM <sub>10</sub> /TSP)/%	(PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )/%
晴朗微风	A	A	A	47.67±4.04 A	21.67±9.07 A	A	A	A	46.33±4.51 A	23.67±9.87 A
雾霭转晴	AB	AB	AB	63.5±0.71 B	41.5±9.19 B	AB	AB	AB	60.5±7.78 B	45±1.41 B
多云	BC	BC	B	71±7 B	47.33±4.04 B	BC	BC	B	70.33±8.96 B	47±6.08 B
轻微雾霾	C	C	C	78±10.39 B	58.33±13.65 B	C	C	C	76.67±8.15 B	56.67±12.58 B

数据为均值±标准差, 同列不同大写字母表示同种颗粒物不同天气条件下差异显著, 显著水平  $\alpha=0.05$

雾霭转晴与晴朗微风及多云天气相比, 林内和林外 3 种粒径颗粒物质量浓度差异均不显著。轻微雾霾天气下, 林内和林外  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  显著高于多云天气, 而  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  与多云天气相比则没有显著差异, 说明细颗粒物质量浓度明显增高是形成雾霾天气的主要条件。

出现以上情况的主要原因为: 夏季晴朗微风天气, 测定日平均能见度 24.5 km, 日均气压 100.6 kPa (数据来源于气象资料记录), 气温较高, 空气相对湿度最小, 风速在 1~3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的微风范围内, 大气处于不稳定状态 (秦艳等, 2005), 湍流较强, 对流充分, 有利于污染物扩散; 多云天气, 辐射减弱, 湍流不强, 相对湿度高于 60%, 有利于气体污染物转化为粒子; 轻微雾霾天气, 测定日平均能见度 5.17 km, 日均气压 100.58 kPa, 空气相对湿度较大, 风速最小 ( $<2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 大气处于静稳状态, 导致污染物积聚不易扩散; 雾霭转晴的天气, 测定日平均能见度为 7 km, 日均气压 100.17 kPa, 虽然日均相对湿度较高, 且日均风速较低, 但随着天气的变化, 空气相对湿度由高转低, 部分雾滴因重力沉降和湍流输送作用到达地面, 对颗粒物起到一定清除作用, 因此, 林内和林外  $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$  和  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  均显著低于轻微雾霾天气。

对不同天气条件下景观生态林内和林外 3 种粒径大气颗粒物质量浓度对比分析后发现 (表 1), 晴朗微风天气下, 林内  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  显著低于林外, 林内  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  也低于林外, 但差异不显著。多云和轻微雾霾天气下, 林内和林外 3 种粒径大气颗

颗粒物质量浓度均显著低于林外。雾霭转晴天气下, 林内和林外 3 种粒径大气颗粒物质量浓度均没有明显差异。以上现象的主要原因为: 夏季旱柳的生理活动比较旺盛, 对大气颗粒物的吸附和滞纳作用明显, 枝叶繁茂使得林内大气湍流和涡流运动显著强于林外, 有利于颗粒物沉降 (杨阿强等, 2011), 同时, 监测林地 53.5% 的郁闭度不会明显影响林内空气流通及颗粒物扩散。晴朗微风天气林内和林外  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  差异不显著可能与  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  处于极低的水平, 植被对其吸附和沉降作用不明显有关。一般来说, 大气颗粒物质量浓度水平越高 (不超过一定的阈值范围), 植被叶片的滞尘量和林冠层的沉降量越大 (邱媛等, 2008; 赵晨曦等, 2013)。

从小粒径颗粒物所占比例的日均值来看 (表 2), 4 种天气情况下, 林内和林外  $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$  均高于  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 。方差分析表明, 小粒径大气颗粒物所占比例的差异不如大气颗粒物质量浓度的差异显著, 虽然晴朗微风天气下林内和林外小粒径颗粒物所占比例显著低于其他 3 种天气情况, 但雾霭转晴、多云和轻微雾霾天气下林内和林外  $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$  和  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  均处于较高水平, 差异不显著。轻微雾霾天气下, 林内和林外  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  分别为 (58.33%±13.65%) 和 (56.67%±12.58%), 说明雾霾天气下可吸入颗粒物 ( $\text{PM}_{10}$ ) 中细粒子 ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 的含量大于粗粒子 ( $\text{PM}_{2.5-10}$ ) 的含量, 这之前关于北京  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  的平均值为 56.6% 的研究结果相吻合 (于建华等, 2004)<sup>47</sup>, 而其他天气情况下林内和林外  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  则低于 50%, 这可能与监测地土

壤砂性易起尘,粗颗粒物贡献比例相对较高有关。

对小粒径颗粒物所占比例林内和林外对比分析发现,PM<sub>10</sub>/TSP在不同天气条件下均表现为林内值高于林外,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>则表现为多云和轻微雾霾天气林内值高于林外,晴朗微风和雾霭转晴天气林内值低于林外。这是因为植被对不同粒径的颗粒物沉降速率不同,小于2 μm的颗粒物与粗颗粒物相比需要更长的沉降时间(Gao et al., 2001),这种差异在粒子浓度较高时尤为明显。

不同天气条件下颗粒物日均质量浓度的差异及小粒径颗粒物所占比例的差异与大气颗粒物日变化趋势有很大关系。由图1可见,轻微雾霾天气除外,其他天气情况下林内3种颗粒物质量浓度日变化趋势为:9:00之后颗粒物质量浓度逐渐下降,至13:00—15:00达最低值,随后逐渐回升。晴朗微风天气颗粒物质量浓度一直处于较低水平没有明显的波动;多云和轻微雾霾天气条件不利于林内污染物的扩散,颗粒物质量浓度一直处于较高的水平,ρ(PM<sub>2.5</sub>)上升的幅度更为明显,3种粒径颗粒物在各个时间段的质量浓度均显著高于晴朗微风天气;雾霭转晴天气颗粒物质量浓度日变化比较剧烈,早晨8:00—9:00,3种颗粒物质量浓度均较高,随着天气条件的改善,雾霭逐渐驱散,10:00后颗粒物质量浓度骤降,13:00以后颗粒物质量浓度一直处于极低水平接近晴朗微风天气,与表2方差分析的结果一致。

2.2 秋季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物的变化

表3显示,林内和林外3种粒径大气颗粒物日均质量浓度在不同天气下的对比情况为:晴朗大风<晴朗微风<晴间多云<雾霭,其中雾霭天气颗粒物质量浓度高达晴朗大风天气的20倍,秋季整体水平的3倍。方差分析显示,雾霭天气林内和林外3种粒径的颗粒物质量浓度均与其他天气情况下差异显著(表4)。主要原因如下:2013年北京秋季从9月份开始多数为阴天、多云及雷阵雨天气,相对湿度较高,测定日9月13日、9月30日和10月

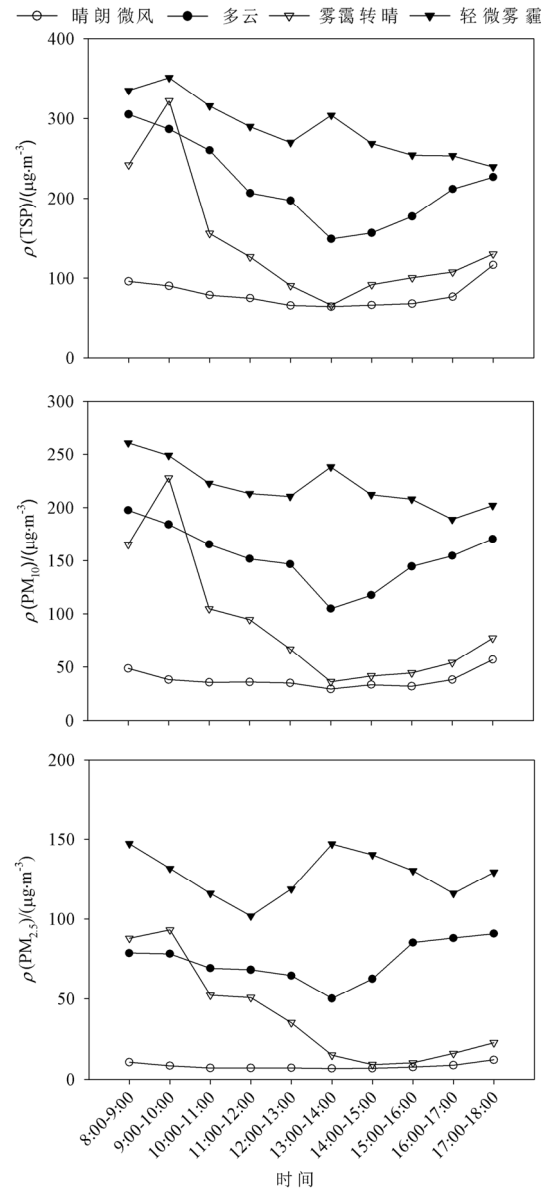


图1 夏季不同天气条件下景观生态林内大气颗粒物日变化比较  
Fig. 1 Diurnal variations of particulate matters under different weather conditions in landscape ecological forest in summer

4日林内相对湿度均高于90%,日均风速均低于1 m·s<sup>-1</sup>,能见度分别为3.4、4.5和4.9 km,这种持续的静风、阴湿天气使得大气逆温层增厚,有利于颗

表3 秋季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物日均质量浓度对比

Table 3 Diurnal average mass concentration comparison of particulate matters inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions in autumn

天气	林内			林外			林内/林外		
	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
晴朗微风(3 d)	141.4±52.36	79.63±32.31	23.91±12.29	187.71±49.88	99.58±33.79	24.85±12.8	0.75*	0.8*	0.96
晴朗大风(2 d)	114.47±15.8	62.81±11.51	11.45±0.84	95.34±18.73	52.07±2.94	11.87±1.48	1.2	1.2	0.96
晴间多云(2 d)	306.69±63.14	209.58±68.86	96.12±66.89	351.76±92.65	224.03±81.44	90.65±60.1	0.87	0.94	1.06
雾霭(3 d)	2169.36±987	2016.33±981.6	400±163.18	2138.4±976.66	1968.29±979.08	388.81±93	1.01	1.02	1.03*
秋季整体(10 d)	777.46±397.4	683.27±386.32	148.69±61.23	787.25±389.14	674.44±379.27	144.6±59.6	0.99	1.01	1.03

数据为均值±标准差,\*表示相同天气条件下林内和林外同种颗粒物差异显著,显著水平 α=0.05

粒物的积聚。晴天林内和林外各粒径颗粒物质量浓度明显降低，尤其在 11 月中旬开始刮较强的偏北风（风速 $>5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），偏北风所携带的较清洁空气对北京地区大气中颗粒物污染起到明显的扩散和稀释作用。

不同天气条件下林内和林外各粒径颗粒物质量浓度对比结果见表 3：晴间多云天气，林内和林外 3 种粒径颗粒物质量浓度均不具有显著差异；晴朗微风天气，林内  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  日均值显著低于林外，而  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  林内和林外差异不显著（与夏季晴朗微风天气下林内和林外对比结果一致）。晴朗大风天气，林内  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  不显著高于林外， $\rho(\text{PM}_{2.5})$  不显著低于林外，从林内和林外 3 种粒径颗粒物日变化情况可以看出（图 2），从 8:00 起在较强偏北风的作用下，各粒径颗粒物质量浓度均显著下降，11:00—12:00 降到极低水平，之后波动比较平稳，11:00 前 3 种粒径颗粒物质量浓度均为林外较高，随后  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  表现为林内显著高于林外，而林内和林外  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  则没有显著差异。导致以上结果的可能原因为：林外监测点为硬质铺装，沙尘相对较少，而林内监测点缺少地被植物覆盖，砂质土壤大面积裸露，在风速较大且空气干燥时容易出现局地起尘，对粗粒子  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  上升贡献较大（于建华等，2004）<sup>46</sup>。雾霭天气，林内  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  显著高于林外，而林内和林外  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  差异不显著。这说明环境相对封闭的林地，在高湿、静风的雾霭天气条件下对小粒径颗粒物（ $\text{PM}_{2.5}$ ）的积聚效果明显。

从表 4 可以看出， $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  在 4 种天气情况下差异均不显著， $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$  只有在雾霭天气下显著高于其他天气，说明秋季 4 种天气条件对小粒径大气颗粒物所占比例影响不显著。除了晴朗大风天气，其他 3 种天气条件下林内小粒径颗粒物所占比例均高于林外。雾霭天气林内和林外  $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$  的比值最高，分别达（ $89.33\% \pm 7.39\%$ ）和（ $86.99\% \pm 11.5\%$ ），而  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  的比值却降低与晴朗微风条件下的比值接近，出现这种情况的主要原因为空气相对湿度较大，小粒径颗粒物通过吸湿作用使本身

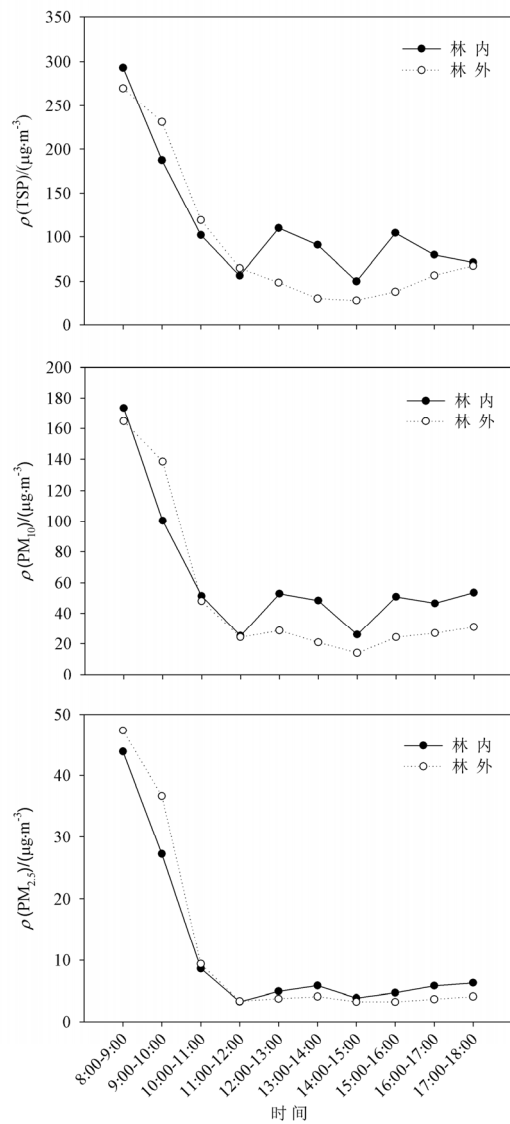


图 2 秋季晴朗大风天气下景观生态林内和林外大气颗粒物日变化比较  
Fig. 2 Diurnal variations of particulate matters in sunny-windy days inside and outside of a landscape ecological forest in autumn

所含液量增加，粒子涨大，大粒子数量增多（车瑞俊等，2007）<sup>560</sup>，导致空气中  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  显著增加， $\text{PM}_{2.5}$  含量降低。

### 2.3 冬季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物的变化

由表5和表6可见，无论是晴朗微风天气还是轻

表 4 秋季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物日均质量浓度及小粒径颗粒物所占比例的方差分析

Table 4 Variance analysis results of particulate matters mass concentrations and ratios of finer particles inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions in autumn

天气	林内					林外				
	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	(PM <sub>10</sub> /TSP)/%	(PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )/%	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	(PM <sub>10</sub> /TSP)/%	(PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )/%
晴朗微风	A	A	A	55.61±7.16 A	28.9±6.11 A	A	A	A	50.07±5.45 A	24.53±6.06 A
晴朗大风	A	A	A	54.7±2.5 A	18.41±2.03 A	A	A	A	55.38±7.8 A	22.91±4.15 A
晴间多云	B	B	B	67.45±8.56 A	42.93±17.81 A	B	B	B	62.81±6.6 A	38.1±12.98 A
雾霭	C	C	C	89.33±7.39 B	27.2±12.87 A	C	C	C	86.99±11.5 B	26.72±13.78 A

数据为均值±标准差，同列不同大写字母表示同种颗粒物不同天气条件下差异显著，显著水平  $\alpha=0.05$

表5 冬季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物日均质量浓度对比

Table 5 Diurnal average mass concentration comparison of particulate matters inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions in winter  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 

天气	林内			林外			林内/林外		
	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
晴朗微风(2 d)	61.53±21.73	28.91±10.34	6.27±3.86	58.84±21.79	28.33±10.9	6.33±3.98	1.05	1.02	0.99
轻度雾霾(3 d)	414.69±119.03	276.16±71.55	164.61±32.69	414.32±121.9	277.75±73.13	161.24±32.72	1	0.99	1.02
冬季整体(5 d)	273.43±211.24	177.26±144.66	101.27±89.77	270.72±213.21	177.9±146.18	99.28±87.97	1.01	1	1.02

数据为均值±标准差

表6 冬季不同天气条件下景观生态林内和林外小粒径颗粒物比例日均值比较

Table 6 Diurnal average ratios of finer particles inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions in winter

天气	林内/%		林外/%	
	PM <sub>10</sub> /TSP	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>	PM <sub>10</sub> /TSP	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>
晴朗微风	46.94±0.24	21.64±5.98	48.01±0.74	22.13±5.9
轻度雾霾	67.18±5.71	62.24±21.3	67.74±6.86	60.68±20.81

数据为均值±标准差

度雾霾天气, 3种粒径颗粒物质量浓度及小粒径颗粒物所占的比例在林内和林外均没有显著差异。主要原因为: 冬季旱柳树叶完全脱落, 树木新陈代谢变缓且处于休眠状态, 枝叶对颗粒物的吸附作用以及对前体污染物(SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>)的吸收作用皆明显减弱, 此时林木植株对颗粒物净化作用不显著。

从表5可以看出轻度雾霾天气下,  $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 极显著高于晴朗微风的天气。晴朗微风天气,  $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值均低于我国环境空气一类地区标准(TSP为120  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , PM<sub>10</sub>为50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , PM<sub>2.5</sub>为35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ); 而轻度雾霾天气,  $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值远超出我国环境空气二类地区标准(TSP为300  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , PM<sub>10</sub>为150  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , PM<sub>2.5</sub>为75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。冬季不同天气条件下颗粒物质量浓度的显著差异可以由两方面原因来解释: 冬季采暖期工业锅炉和采暖锅炉向大气中排放大量煤烟污染物, 遇到大气层稳定、风速小、逆温强度高强的气象条件, 稀释扩散困难, 增强的污染排放及不利的气象条件共同导致污染物质量浓度出现高值; 而冬季降雪和较强的偏北风却可以使颗粒物得到有效的扩散和稀释(于

建华等, 2004)<sup>46</sup>, 2014年1月份的气象记录数据显示, 1月1日—1月17日无降雪天气, 因而测定日1月10日和1月12日出现较低的污染物水平主要是受外来冷空气的影响, 逆温层被破坏, 同时偏北方向较强的干洁空气将大气污染物稀释。

表6显示, 轻度雾霾天气林内和林外细颗粒物所占比例(PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>)均较高(>60%), 说明冬季大量增加的采暖燃烧源对细颗粒物的贡献更大; 晴朗微风天气林内和林外PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>则没有表现出较高水平, 与夏季和秋季晴朗微风条件下的比值接近, 这说明气象条件的改善对小粒径颗粒物的扩散作用更为明显。

#### 2.4 春季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物的变化

春季林内和林外3种粒径颗粒物质量浓度均为晴朗微风<扬尘<轻度雾霾(见表7)。表8方差分析显示: 轻度雾霾时 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 显著高于晴朗微风和扬尘天气, 扬尘和轻度雾霾天气下 $\rho(\text{TSP})$ 差异不显著; 晴朗微风与扬尘天气下颗粒物质量浓度相比,  $\rho(\text{TSP})$ 差异显著, 而 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在两种天气下则没有显著差异。以上情况表明, 春季粗颗粒物对扬尘和雾霾天气均具有较大贡献, 而可吸入颗粒物和细颗粒物仅对雾霾天气具有突出贡献。春季测定日, 晴朗微风天气平均能见度为15 km, 扬尘天气平均能见度为7.3 km, 轻度雾霾天气平均能见度为4.7 km(数据来源于气象资料记录), 扬尘天气下 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 没有显著高于晴朗微风天气, 但能见度却明显降低, 可见, 非沙尘天气下的能见度水平一般由细粒子浓度决定, 而扬尘天气下大量的粗粒子也可能造成太阳辐射的削弱以

表7 春季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物日均质量浓度对比

Table 7 Diurnal average mass concentration comparison of particulate matters inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions in spring  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 

天气	林内			林外			林内/林外		
	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
晴朗微风(3 d)	174.32±36.01	94.87±20.45	16.65±5.26	217.99±23.62	118.02±16.07	17.99±5.58	0.8*	0.8*	0.93
扬尘(3 d)	331.3±108.14	144.08±57.75	51.54±26.33	400.22±116.6	176.67±70.3	63.97±34.75	0.83*	0.82*	0.81
轻度雾霾(2 d)	386.53±44.13	236.91±33.53	112.82±26.35	499.09±26.27	308.79±19.05	157.31±37.96	0.77*	0.77*	0.72*
春季整体(8 d)	286.24±115.67	148.83±69.77	53.78±44.64	353.25±134.17	184.38±83.6	66.73±58.77	0.81*	0.81*	0.81*

数据为均值±标准差, \*表示相同天气条件下林内和林外同种颗粒物差异显著, 显著水平 $\alpha=0.05$

表 8 春季不同天气条件下景观生态林内和林外大气颗粒物日均质量浓度及小粒径颗粒物所占比例的方差分析

Table 8 Variance analysis results of particulate matters mass concentrations and ratios of finer particles inside and outside of a landscape ecological forest under different weather conditions in spring

天气	林内					林外				
	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	(PM <sub>10</sub> /TSP)/%	(PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )/%	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	(PM <sub>10</sub> /TSP)/%	(PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )/%
晴朗微风	A	A	A	54.35±1.32 A	17.45±3.33 A	A	A	A	54.03±1.68 A	15.03±3.17A
扬尘	B	A	A	42.86±4.48 B	35.36±6.18 B	B	A	A	44.75±4.69 B	35.88±7.3 B
轻度雾霾	BC	B	B	61.1±2.4 A	46.99±6.32 BC	BC	B	B	60.83±0.23 A	48.23±13.81 BC

数据为均值±标准差，同列不同大写字母表示同种颗粒物不同天气条件下差异显著，显著水平  $\alpha=0.05$

及大气能见度的衰减。

从表 7 可以看出，不同天气条件下林内  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  均显著低于林外，轻度雾霾的天气林内  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  显著低于林外，其他天气条件下林内  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  不显著低于林外。以上结果说明，春季旱柳林对不同粒径的颗粒物均具有明显的净化作用，可能与植株叶量增加、蒸腾作用增强，林内风速显著降低有关。分析小粒径颗粒物所占的比例发现（表 8），3 种天气条件下，林内和林外  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  均低于 50%，轻度雾霾天气下  $\text{PM}_{10}$  在 TSP 中的比值明显低于夏季和冬季雾霾天气下的比值，粗粒子的优势地位反映出北京春季干燥多风的典型污染特征，同时春季监测点附近频繁的建筑活动，导致建筑扬尘增多，对大气较粗颗粒物质量浓度的增加也具有重要影响。

## 2.5 气象因子与颗粒物质量浓度的相关性分析

通过对四季不同天气条件下景观生态林内和林外颗粒物质量浓度变化差异的分析，发现气象因子对颗粒物质量浓度变化具有重要影响。图 3 显示，林内和林外气象因子的变化具有一致性，只是变化幅度存在差异，总体来说，林内相比于林外具有较高的相对湿度、较低的气温（冬季除外）和风速以及更为复杂的风向变化。故本文以林外监测点为例，分不同季节（冬季样本量少，未做偏相关分析）将观测的各粒径颗粒物质量浓度日均值与气象因子（相对湿度、气温、风速）数据进行偏相关分析，以期了解每一个气象因子与颗粒物质量浓度的相关性，如表 9 所示。偏相关系数的绝对值大小能够体现因子间相关性的强弱，通过全年对比发现，3 个气象因子与  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  的相关性最强，说明细颗粒物更容易受到近地面气象条件的影响而积聚或扩散，这与之前的研究结果一致（史宇等，2013）。从表 9 可以看出，在所选取的 3 个气象因子中，颗粒物质量浓度与相对湿度呈显著正相关关系，而与气温和风速偏相关性不显著。

为进一步分析气象因子对颗粒物质量浓度的影响规律，选取  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  日均值分别与日均相对湿度、气温和风速数据在二维坐标系上绘制成散点

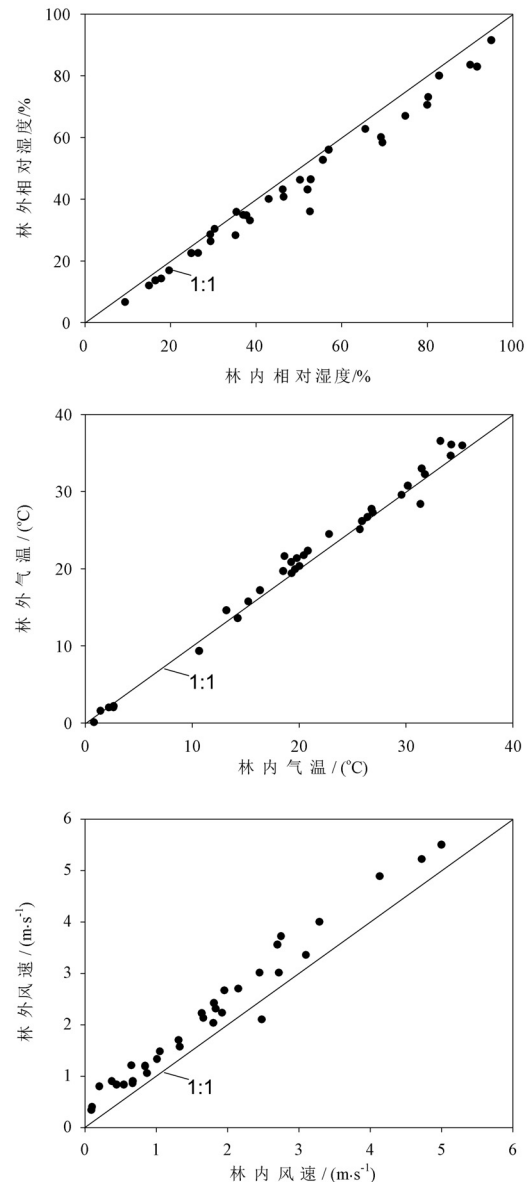


图 3 景观生态林内和林外相对湿度、温度、风速对比  
Fig. 3 Diurnal average value comparison of relative humidity, temperature and wind speed inside and outside of a landscape ecological forest

图，并进行拟合（见图 4）。拟合结果显示： $\rho(\text{PM}_{2.5})$  与相对湿度呈明显的线性正相关，与气温没有明显的拟合关系，与风速呈明显的指数负相关、拟合性较高。以上结果表明，相对湿度和风速对颗粒物质

表9 气象因子与大气颗粒物的偏相关系数

Table 9 Partial correlation coefficients of particulate matters and meteorological factors

项目	相对湿度	气温	风速	
夏季(11 d)	TSP	0.786*	0.181	-0.545
	PM <sub>10</sub>	0.907*	0.536	-0.587
	PM <sub>2.5</sub>	0.892*	0.600	-0.553
秋季(10 d)	TSP	0.851*	-0.132	0.140
	PM <sub>10</sub>	0.838*	-0.189	0.200
	PM <sub>2.5</sub>	0.894*	-0.200	0.363
春季(8 d)	TSP	0.720	-0.014	0.369
	PM <sub>10</sub>	0.783*	-0.427	-0.091
	PM <sub>2.5</sub>	0.792*	-0.381	-0.214
全年(29 d)	TSP	0.344	-0.069	-0.152
	PM <sub>10</sub>	0.488*	-0.076	-0.189
	PM <sub>2.5</sub>	0.562*	-0.150	-0.274

\*表示在  $\alpha=0.05$  水平上显著相关

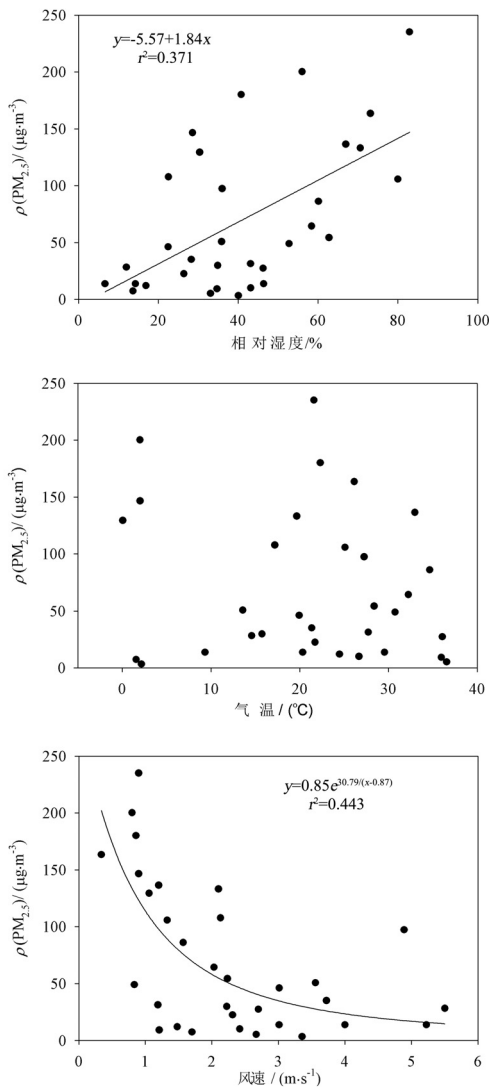


图4 PM<sub>2.5</sub> 日均质量浓度与相对湿度、温度、风速相关性

Fig. 4 Correlations between daily mean mass concentrations of particulate matters and relative humidity, temperature and wind speed

量浓度具有显著影响,在一定范围内,颗粒物质量浓度随相对湿度的增加呈线性升高、随着风速的增

大呈指数递减。温度对颗粒物浓度变化具有双重作用,随着温度的升高大气稳定性降低、对流运动和湍流交换加强、有利于颗粒物的扩散和输出;然而高温天气也会加快大气光化学反应的速率,利于二次气溶胶的生成,从而使细粒子质量浓度增加(林俊等,2009)。从表9也可以看出温度的复杂影响,夏季高温天气颗粒物质量浓度与气温呈不显著正相关,而春秋季节则呈现不显著负相关。

已有研究表明颗粒物污染具有区域性,北京与周边地区的大气污染物存在相互输送和交换的关系(蒲维维等,2011)<sup>717</sup>,而影响污染物输送量和扩散效果的主要因子除了风速还有风向,因此本文对不同天气条件下8个风向出现的频率及对应的颗粒物质量浓度水平进行了统计分析,以风向玫瑰图展示分析结果。从图5可以看出,全年晴朗的天气下偏北风向占主导,西北风向频率最高,东北风向次之;雾霾天气下盛行偏南风,西南和东南风向频率最高。分析对应颗粒物质量浓度风玫瑰图(图6)发现,偏北风向上, $\rho(TSP)$ 、 $\rho(PM_{10})$ 和 $\rho(PM_{2.5})$ 均出现最低水平;TSP和PM<sub>10</sub>在西南风向上的质量浓度远高于其他风向,而 $\rho(PM_{2.5})$ 在不同风向上并没有与二者表现出一致的变化趋势。出现以上差异的主要原因为,秋季所观测的雾霾天气的风向为西南方向,此时的 $\rho(TSP)$ 和 $\rho(PM_{10})$ 远高于其他天气条件下的质量浓度,而雾霾天气对 $\rho(PM_{2.5})$ 没有显著增加,因而 $\rho(PM_{2.5})$ 在西、西南、南、东南和东几个风向上分布比较均匀,集中在100~170  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。通过上述分析可以发现,北京地区盛行偏南风时易形成颗粒物污染,可能由于天津、河北省南部及山西省部分城市产生的污染物随风向输送至北京并

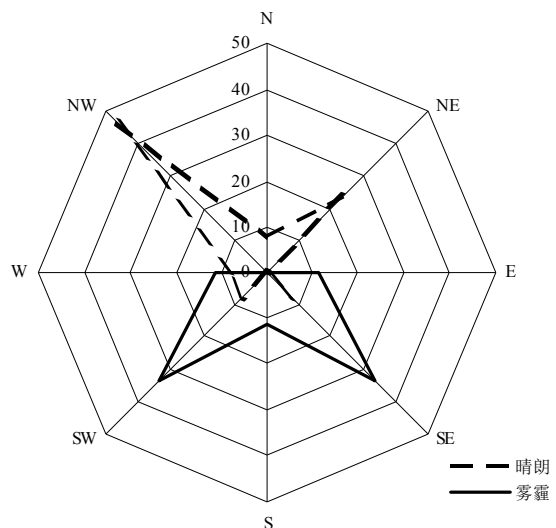


图5 林外监测点全年晴朗和雾霾天气风向的概率分布(%)

Fig. 5 The probability distribution of wind direction frequency of sunny and hazy days outside the forest in a whole year (%)

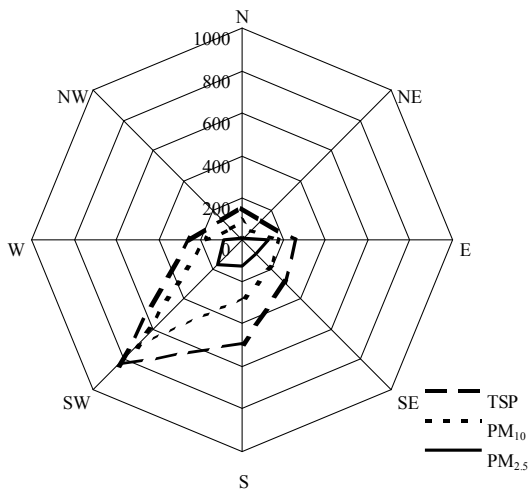


图6 林外监测点全年颗粒物质量浓度的风向玫瑰图 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

Fig. 6 The wind-rose diagram of particulate matters mass concentrations outside the forest in a whole year ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

被北部山区阻挡而积聚；盛行偏北风时，北风所携带的较清洁的空气对北京地区大气中颗粒物污染具有明显的扩散和稀释作用。有研究显示，偏北风向时，颗粒物质量浓度会随着风速的增大显著降低，此时风速对颗粒物起到扩散作用；而偏南风向时，颗粒物质量浓度可能随着风速的增大而增加，此时风速对颗粒物起到了输送和积累的作用（蒲维维等，2011）<sup>718-719</sup>，因而在分析风对颗粒物质量浓度影响时需要将风速和风向结合考虑。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

##### 3.1.1 相对湿度对景观生态林内大气颗粒物的影响

研究期内大气颗粒物特别是  $\text{PM}_{2.5}$  日均质量浓度与日均相对湿度呈显著正相关，这种相关性在特有的气候条件下才得以成立。监测期均避开了降水天气，相对湿度高往往反映了大气层结稳定，颗粒物易聚积。而降水天气相对湿度高则对应着降雨或降雪过程，颗粒物的质量浓度会在降水的湿清除作用下明显下降。日本广岛市曾用干湿沉降研究发现空气中多环芳香烃质量浓度在雨天低于晴天（Ozaki et al., 2006）。另有学者发现雨水对粗粒子的冲刷效果更明显，雨后粗颗粒迅速减少，可吸入颗粒物比重可能增大（郭二果等，2013）。本文研究发现，雾滴对于  $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{PM}_{10}$  也具有一定的湿清除作用。但如果大气相对湿度持续上升且未达到饱和状态，雾滴可与霾粒子共同作用形成相对稳定的雾霭天气，其颗粒物污染程度远高于其他天气状况。雾霭天气下，由于部分霾粒子吸湿膨胀，使得粒子半径增大， $\text{PM}_{10}$  中  $\text{PM}_{2.5}$  的比例明显下降，而 TSP 中  $\text{PM}_{10}$  的比例却明显上升，高达  $(89.33\% \pm 7.39\%)$ ，此时粒径为  $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$  的颗粒物所占的比重最高。

##### 3.1.2 风对景观生态林内大气颗粒物的影响

风对大气颗粒物的影响存在一定的复杂性和不确定性。本研究发现风速能使污染物扩散而减少，大气颗粒物质量浓度随风速增加呈指数下降。但是，当风速超过阈值时，地表的沙尘会被风带入空中，使得颗粒物质量浓度增大（车瑞俊等，2007）<sup>561</sup>。天气干燥时刮风会引起林内颗粒物质量浓度增加，尤其是地表相对裸露的林地，因而晴朗大风天气景观生态林内  $\rho(\text{TSP})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  不显著高于林外。另有研究显示，偏北风向时，颗粒物质量浓度会随着风速的增大显著降低；而偏南风向时，颗粒物质量浓度可能随着风速的增大而增加（蒲维维等，2011），因而在分析风对颗粒物质量浓度影响时需要将风速和风向结合考虑。

##### 3.1.3 天气条件与植被对大气颗粒物的复合影响

天气条件与植被的生长节律复合影响林内和林外颗粒物的浓度差异，夏秋季节旱柳植株生理活动旺盛、枝繁叶茂，对大气颗粒物及前体污染物（ $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ ）的阻滞和吸收作用明显；春季旱柳萌动较早，在北京3月中旬已开始发芽展叶，虽然叶量没有夏秋时节多，但生理活性已开始增强，蒸腾作用使得树冠周围湿度较林外显著增加，有利于促进粗颗粒物的沉降；冬季旱柳等阔叶树已完全落叶、处于休眠状态，对颗粒物的消减作用很弱，如若遇刮风天气裸露的林地极易起尘，导致林内颗粒物质量浓度高于林外。森林植被处于同一生长季时，植被叶片的滞尘量和林冠层的沉降量随颗粒物质量浓度的升高而增大，当颗粒物质量浓度达到阈值后，植被对颗粒物的消减作用减弱，此时林内相对封闭的空间则不利于颗粒物的扩散。

森林植被对颗粒物具有不同程度的阻滞、吸附和沉降效果，可以有效地降低大气颗粒物的质量浓度。但是林地环境颗粒物的来源比较复杂，包括植物释放有机挥发物所形成的二次气溶胶、花粉、孢子等物质（Beckett et al., 1998），可能引起大气颗粒物质量浓度增加。另外，不同的林分结构包括郁闭度、针阔比、乔灌木比等指标对森林调控大气颗粒物的效果具有重要影响。郁闭度为  $0.70\sim 0.85$  时，林带对 TSP 的净化效果最佳，净化率为  $50\%\sim 60\%$ （殷杉等，2007）；针阔混交林具有一定的滞尘优势，可弥补落叶树冬季对颗粒物净化效果显著减弱的缺陷；提高灌木或草本地被的覆盖率可以有效地抑制地表扬尘，减小粗颗粒物质量浓度。因而在探讨森林对颗粒物净化能力时要将选择高滞尘低排放的树种与林分结构和气象因子综合考虑以最大程度的发挥森林对颗粒物消减的积极作用，降低对颗粒物质量浓度增加的消极影响。

### 3.2 结论

(1) 不同天气条件显著影响景观生态林内大气颗粒物的质量浓度。晴朗天气下景观生态林内 $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均处于最低水平;多云、扬尘、雾霾和雾霭天气颗粒物质量浓度较高,污染明显加重,雾霾天气下 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的增加效果更为明显,而扬尘天气下 $\rho(\text{TSP})$ 显著增加;雾霭转晴的天气,各粒径颗粒物的质量浓度较低,与晴朗微风天气差异不显著。

(2) 不同天气条件显著影响景观生态林内和林外颗粒物浓度对比。夏季、秋季和春季,晴朗微风天气和扬尘天气林内 $\rho(\text{TSP})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 显著低于林外, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 不显著低于林外;多云、轻微至轻度雾霾天气林内 $\rho(\text{TSP})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均显著低于林外;晴朗大风和雾霭天气林内 $\rho(\text{TSP})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 不显著高于林外,雾霭天气林内 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 显著高于林外;冬季晴朗微风和轻度雾霾天气林内和林外3种粒径颗粒物质量浓度对比没有明显规律。

(3) 不同气象因子与颗粒物质量浓度的相关性不同,空气相对湿度、风速和风向是观测时段内影响其质量浓度的主要因子。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与相对湿度呈线性正相关,而与风速呈非线性负相关,偏南风对颗粒物主要起输送和积累作用,偏北风对颗粒物起到稀释和扩散的作用。相对于TSP和 $\text{PM}_{10}$ , $\text{PM}_{2.5}$ 更易受近地面气象条件的影响而堆积或扩散。夏、秋、春3个季节林内相对湿度高于林外,冬季林内和林外相对湿度没有明显差异;冬季林内气温高于林外,其他3个季节林内气温低于林外;风速在四季均表现为林内低于林外;林内风向较林外不稳定。

### 参考文献:

ALVES C, PIO C, CARVALHO A, et al. 2006. Atmospheric carbonaceous aerosols over grasslands of central Europe and a Boreal forest [J]. *Chemosphere*, 63(1): 153-164.

BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. 1998. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution [J]. *Environmental Pollution*, 99(3): 347-360.

CHARLSON R J, SCHWARTZ S E, HALES J M, et al. 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 255(5043): 423-430.

CHEN J Q, WANG X P, ZHU J G, et al. 2013. Building up a green Beijing—an ambitious urban forestry program [J]. *The Forestry Chronicle*, 89(2): 127-128.

CHOU C C-K, LEE C T, CHENG M T, et al. 2010. Seasonal variation and spatial distribution of carbonaceous aerosols in Taiwan [J]. *Atmosphere Chemistry and Physics*, 10(19): 9563-9578.

GAO Y, ANDERSON J R. 2001. Characterization of Chinese aerosols determined by individual-particle analysis [J]. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 106(D16): 18037-18045.

GOMIŠČEK B, HAUCK H, STOPPER S, et al. 2004. Spatial and temporal variations of  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$  and particle number concentration

during the AUPHEP-project [J]. *Atmospheric Environment*, 38(24): 3917-3934.

OZAKI N, NITTA K, FUKUSHIMA T. 2006. Dispersion and dry and wet deposition of PAHs in an atmospheric environment [J]. *Water Science and Technology*, 53(2): 215-224.

RIES K, EICHHORN J. 2001. Simulation of effects of vegetation on the dispersion of pollutants in street canyons [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 10(4): 229-233.

SHI W Z, WONG M S, WANG J Z, et al. 2012. Analysis of airborne particulate matter ( $\text{PM}_{2.5}$ ) over Hong Kong using remote sensing and GIS [J]. *Sensors*, 12(6): 6825-6836.

SUN Y, ZHUANG G S, WANG Y, et al. 2004. The Air-borne particulate pollution in Beijing-concentration, composition, distribution and sources [J]. *Atmospheric Environment*, 38(35): 5991-6004.

WANG W C, CHEN K S, CHEN S J, et al. 2008. Characteristics and receptor modeling of atmospheric  $\text{PM}_{2.5}$  at urban and rural sites in Pingtung, Taiwan [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 8(2): 112-129.

ZHENG M, SALMON L G, SCHAUER J J, et al. 2005. Seasonal trends in  $\text{PM}_{2.5}$  source contributions in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 39(22): 3967-3976.

查季清. 2011. 城市林业建设的新方式——景观生态林[J]. *安徽农学通报*, 17(15): 188-190.

柴一新, 祝宁, 韩焕金. 2002. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例[J]. *应用生态学报*, 13(9): 1121-1126.

车瑞俊, 刘大锰, 袁杨森. 2007. 北京冬季大气颗粒物污染水平和影响因素研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 24(5): 556-563.

郭二果, 王成, 鄯光发, 等. 2013. 北方地区典型天气对城市森林内大气颗粒物的影响[J]. *中国环境科学*, 33(7): 1185-1198.

韩素芹, 李培彦, 李向津, 等. 2008. 天津市近地层  $\text{PM}_{2.5}$  的垂直分布特征[J]. *生态环境学报*, 17(3): 975-979.

李道军. 2013. 景观生态林的营造与保护[J]. *内蒙古林业调查设计*, 36(5): 17-19.

林俊, 刘卫, 李燕, 等. 2009. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析[J]. *气象与环境学报*, 25(1): 1-5.

蒲维维, 赵秀娟, 张小玲. 2011. 北京地区夏末秋初气象要素对  $\text{PM}_{2.5}$  污染的影响[J]. *应用气象学报*, 22(6): 716-723.

秦艳, 施介宽. 2005. 大气环境影响评价中典型气象日的确定及其应用[J]. *四川环境*, 24(2): 54-56.

邱媛, 管东生, 宋巍巍, 等. 2008. 惠州城市植被的滞尘效应[J]. *生态学报*, 28(6): 2455-2462.

史宇, 张建辉, 罗海江, 等. 2013. 北京市 2012—2013 年秋冬季大气颗粒物污染特征分析[J]. *生态环境学报*, 22(9): 1571-1577.

谭炯锐. 2010. 北京大兴人工杨树林土壤呼吸动态与环境影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学: 6.

陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 2014. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. *环境科学学报*, 34(3): 592-597.

田谧. 2013. 京津冀地区霾污染过程大气  $\text{PM}_{2.5}$  及前体物变化特征研究[D]. 北京: 北京化工大学: 8-10.

田世丽, 夏敦胜, 余晔, 等. 2013. 北京市大兴区大气降尘环境磁学特征及其环境意义[J]. *中国沙漠*, 33(3): 832-839.

王会霞, 石辉, 李秧秧. 2010. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响[J]. *应用生态学报*, 21(12): 3077-3080.

王蕾, 高尚玉, 刘连友, 等. 2006. 北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J]. *应用生态学报*, 17(4): 597-601.

吴志萍, 王成, 许积年, 等. 2007. 六种城市绿地内夏季空气负离子与颗

- 颗粒物[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 47(12): 2153-2157.
- 杨阿强, 孙国清, 卢立新, 等. 2011. 基于 MODIS 资料的中国东部时间序列空气动力学粗糙度和零平面位移高度估算[J]. 气象科学, 31(4): 929-932.
- 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 2002. 北京大气细粒子 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成[J]. 清华大学学报, 42(12): 1605-1608.
- 殷杉, 蔡静萍, 陈丽萍, 等. 2007. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益[J]. 生态学报, 27(11): 4590-4595.
- 于建华, 虞统, 魏强, 等. 2004. 北京地区 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的变化特征[J]. 环境科学研究, 17(1): 45-47.
- 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 2013. 细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志, 32(8): 2203-2210.
- 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 2014. 北京地区冬春 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 35(2): 418-427.
- 周祥龙. 2010. 国标中几个沙尘天气术语的讨论[J]. 气象科学, 30(2): 234-238.

## Mass Concentration Variations of Airborne Particulate Matters Inside and Outside of A Landscape Ecological Forest under Different Weather Conditions

CHEN Bo<sup>1</sup>, WANG Xiaoping<sup>1</sup>, LIU Jinglan<sup>2</sup>, CHEN Junqi<sup>3</sup>, ZHU Jiangang<sup>3</sup>, LI Chunyi<sup>4</sup>

1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. The school of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Beijing Forestry Carbon Administration, Beijing 100013, China;

4. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China.

**Abstract:** To investigate the role of landscape ecological forests in controlling airborne particulate matters, this paper took a landscape ecological forest with dominating tree species of *Salix matsudan* in Daxing District of Beijing as an example to research the mass concentration variations of airborne particulate matters inside the landscape ecological forest and the mass concentration comparisons inside and outside the forest in different seasons and different weather conditions. The daily mass concentrations of TSP, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> as well as meteorological factors (8:00—18:00) were measured using horizontal synchronous monitoring method inside and outside the forest during one year period (July, 2013 to May, 2014). The results indicated that: (1) Daily mean  $\rho(\text{TSP})$ ,  $\rho(\text{PM}_{10})$  and  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  inside the forest were lower in sunny days than those under other weather conditions. These concentrations were  $(61.53 \pm 21.73) \sim (174.32 \pm 36.01) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $(28.91 \pm 10.34) \sim (94.87 \pm 20.45) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $(6.29 \pm 3.86) \sim (23.91 \pm 12.29) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively; cloud, dust, haze and fog aggravated the pollution of particulate matters; increased amplitudes of finer particulate matters were larger in hazy days, while those of coarser particulate matters were larger in dry windy days. (2) Fog droplets could reduce  $\rho(\text{PM}_{10})$  and  $\rho(\text{PM}_{2.5})$ , but these droplets with haze nuclei could also cause serious air pollution, when 2.5~10  $\mu\text{m}$  particles were the main pollutant of airborne particulate matters. (3) During summer, autumn and spring,  $\rho(\text{TSP})$  and  $\rho(\text{PM}_{10})$  were significantly lower inside the forest than those outside the forest in sunny days (wind speed  $\leq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) or dusty days,  $\rho(\text{TSP})$ ,  $\rho(\text{PM}_{10})$  and  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  were all significantly lower inside the forest in cloudy and slight hazy days, while the comparison results in sunny days (wind speed  $> 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and foggy days were contrary. During winter,  $\rho(\text{TSP})$ ,  $\rho(\text{PM}_{10})$  and  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  inside the forest had no significant difference with those outside the forest. And (4) air relative humidity, wind speed and wind direction were the main meteorological factors affecting particles concentrations in this study. The daily average  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  had significant linear positive correlation with relative humidity and nonlinear negative correlation with wind speed; southerly wind had a major role in exacerbating the air pollution of particulate matters, while northerly flow played important role of effective dilution and diffusion of these matters in monitoring sites.  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  was more likely to be affected by meteorological factors than  $\rho(\text{TSP})$  and  $\rho(\text{PM}_{10})$ .

**Key words:** different weather condition; landscape ecological forest; airborne particulate matter; mass concentration