

天津城区秋季 PM_{2.5} 质量浓度 垂直分布特征研究

孙玫玲^{1,2} 穆怀斌¹ 吴丹朱¹ 姚青¹ 刘德义³

(1. 天津市气象科学研究所 300074;

2. 南开大学环境科学与工程学院; 3. 天津市气候中心)

提 要: 为研究天津大气颗粒物的污染水平和时空分布特征,利用天津大气边界层观测铁塔(255m),分别在40m、120m、220m处设立监测点,通过监测到的PM_{2.5}的质量浓度,结合PM₁₀、能见度等资料来分析污染物的时空分布规律和分布特征。结果表明,天津城区PM_{2.5}污染水平相当严重,日均质量浓度远高于美国1997年制定的 $65\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的排放标准。混合层厚度和稳定度的变化对PM_{2.5}浓度变化有一定的影响,随混合层厚度的变化,不同高度PM_{2.5}质量浓度值有所不同。23时至11时,120m浓度明显高于其它各层,11—18时,由于大气扩散能力的增强,三层污染物质量浓度开始下降,而到了18—23时,低层污染物浓度较高,各层浓度总体趋势为 $120\text{m}>40\text{m}>220\text{m}$ 。PM_{2.5}质量浓度的日变化与稳定度的变化较一致。气象条件和早晚出行高峰期的影响导致PM_{2.5}的质量浓度出现峰值。PM₁₀与PM_{2.5}的总体变化趋势基本一致,说明污染物来源基本相同。能见度水平和细粒子污染水平呈现较好的负相关,细粒子质量浓度的高低是决定能见度好坏的主要因子。降水过程是颗粒物从大气中清除的重要机制。

关键词: PM_{2.5} 质量浓度 垂直分布

Vertical Distribution Characteristics of PM_{2.5} Mass Concentration in the Atmosphere over Tianjin

Sun Meiling^{1,2} Mu Huaibin¹ Wu Danzhu¹ Yao Qing¹ Liu Deyi³

(1. Tianjin Research Institute of Meteorological Science, 300074;

2. The College of Environmental Science and Engineer of Nankai University; 3. Tianjin Climate Center)

基金项目: 城市气象科学研究基金(UMF200607)、天津市自然科学基金(08JCYBJC10200)

收稿日期: 2008年1月14日; 修定稿日期: 2008年8月23日

Abstract: From October 1-31, 2006, the research set 3 monitoring points respectively in 40-meter, 120-meter, 220-meter platforms and monitored the air quality with PM_{2.5} concentration. Combined with PM₁₀ concentration and visibility range, the temporal and spatial distribution of pollutants was analyzed. The result indicated that PM_{2.5} concentration varies obviously at different vertical heights. The overall trend of pollutant distribution at three levels was 120-meter > 40-meter > 220-meter. The mixing-layer depth and atmospheric stability is the most important factors to influence PM_{2.5} concentration. PM_{2.5} concentration also varied in different time as follows: from 23:00 to 11:00, the concentration in 120-meter platform was significantly higher than other levels; from 11:00 to 18:00, due to the enhancement of atmospheric diffusion capacity, the pollutant concentration at three levels started to decline; from 18:00 to 23:00, the pollutant concentration at lower level showed higher value. Everyday the PM_{2.5} mass concentration varied in a certain regular way. PM_{2.5} concentrations peak usually was caused by weather condition and traffic exhaust. And it also indicated that in Tianjin city the overall varying trend of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration seems the same, there was a negative correlation between the visibility range and the level of fine particles pollution. The precipitation process is the important mechanism of removing particle from atmosphere.

Key Words: PM_{2.5} mass concentration vertical distribution

引 言

大气中颗粒物是影响人体健康、大气能见度和地球辐射平衡的重要污染物,同时也是大气化学反应的良好载体^[1],因此,人们越来越关注对颗粒物的研究,尤其是对细粒子的研究。虽然它在大气中的含量很少,但是它对环境 and 人体的危害都很大。有的颗粒物本身就是有毒物质,有的颗粒物还可以成为其他有毒物质的载体,随颗粒物粒径大小的不同,它们沉积在人呼吸系统的部位也不同,会对人体造成不同程度的伤害。大气中的颗粒物可以作为大气中一些化学反应的反应床,使空气污染变得更加错综复杂,通过吸收和散射太阳辐射而影响气候的变化^[2-4]。

大气颗粒物是造成城市空气污染的主要原因之一,已成为我国许多大中城市空气污染中的首要污染物,也是中国大气污染研究的重要内容之一。我国一些城市开展了针对

细粒子污染的研究,结果表明中国城市 PM_{2.5} 污染十分严重,广州、武汉、兰州、重庆四大城市 PM_{2.5} 日均值为 46~160 μg · m⁻³, 是美国 1997 年颁布的年均值标准 15 μg · m⁻³ 的 3~10 倍^[5]。天津作为环渤海经济中心,其环境质量受到越来越多的关注,为研究天津城区秋季细粒子在近地层的时空变化规律,作者在天津 255m 气象铁塔的不同高度进行了 PM_{2.5} 质量浓度的在线观测,分析了近地层 PM_{2.5} 的垂直分布特征,探讨近地层混合层高度和大气稳定度变化等对气溶胶质量浓度的影响。

1 实验与资料

实验地点位于天津市大气边界层梯度观测站(39°04′29.37″N, 117°12′20.11″E)高 255m 的观测铁塔(铁塔站),地处天津市二环路 with 外环路之间,西南面为住宅小区,东面 80m 处为友谊路立交桥,北约 150m 处快速

路,交通源对它有一定的影响。

采样仪器为美国安普 RP1400a 型颗粒物分析仪,该仪器基于微振荡天平的工作原理,利用 $PM_{2.5}$ 质量浓度与微振荡天平频率之间的相关关系测量 $PM_{2.5}$ 质量浓度。采样膜为锥形泰富隆(Teflon)膜。3 台颗粒物分析仪分别安装在气象铁塔 40m、120m、220m 观测平台上;风、温观测仪器安装在距离地面 5、10、20、30、40、60、80、100、120、140、160、180、200、220、250m 平台上,监测不同高度的气象要素,时间间隔为 20s。

本研究实验时间为 2006 年 10 月 1 日至 31 日,利用大气边界层梯度观测铁塔对天津城区近地层细颗粒物 $PM_{2.5}$ 质量浓度垂直分布进行 24 小时连续、实时的观测,比对环境监测中心的 PM_{10} 监测资料,同时结合同步观测的气象要素,对 $PM_{2.5}$ 的质量浓度变化特征和垂直分布影响进行了分析。能见度资料来源于同一站址的天津市城市气候监测站, PM_{10} 资料来源于天津市环境监测中心城区梅江站,距本实验地点约 1km。

2 数据分析

2.1 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征

来自环保部门的统计,天津市 2006 年可吸入颗粒物浓度年均值超过国家年均二级标

准,全年有 286 天(占 78%)可吸入颗粒物为首要污染物,其中影响因素主要是城市扬尘、煤烟尘、自然风沙尘和机动车尾气尘污染。我国现行的环境空气质量标准规定 PM_{10} 的二级质量标准为年均值为 $0.10mg \cdot m^{-3}$,日均值为 $0.15mg \cdot m^{-3}$,无 $PM_{2.5}$ 的质量标准。1997 年美国首次颁布了 $PM_{2.5}$ 的空气质量标准,年均值为 $15\mu g \cdot m^{-3}$,日均值为 $65\mu g \cdot m^{-3}$,2006 年又将日均值订正为 $35\mu g \cdot m^{-3}$,依此标准,天津城区秋季 $PM_{2.5}$ 质量浓度超标日出现频率较高。

从表 1 可以看出监测期间三层 $PM_{2.5}$ 日变化范围及超标情况。监测结果表明天津市城区可吸入颗粒物 $PM_{2.5}$ 污染水平相当严重,监测期间三层 $PM_{2.5}$ 质量浓度日均值全部超过美国 EPA1997 $PM_{2.5}$ 标准,超标日数都在 20 天以上,超标率均在 60%以上,最大日均值发生在 10 月 27 日的 120m 处。三层 $PM_{2.5}$ 质量浓度日均值与 EPA1997 年标准 $65\mu g \cdot m^{-3}$ 相比,最高超标倍数近 4 倍,与 EPA 新修订标准 $35\mu g \cdot m^{-3}$ 相比,个别污染日超标倍数高达 5~7 倍。天津城区高浓度的 $PM_{2.5}$ 主要来自人为污染源和氮氧化物等形成的二次污染物,同时监测期间雾日和静风出现频率高于其它季节,秋季大气稳定度主要为中性、稳定和不稳定三种类型,也是导致污染物堆积,浓度较大的主要原因。

表 1 不同高度 $PM_{2.5}$ 质量浓度水平

高度/m	月均值/ $\mu g \cdot m^{-3}$	日均值变化范围/ $\mu g \cdot m^{-3}$	超标天数*	超标率/%	超标倍数	超标天数**	超标率/%	超标倍数
40	98.4	4.6~179.3	21	67.7	1.5(1.2~2.8)	25	80.6	2.8(1.2~5.1)
120	110.4	6.5~242.9	20	64.5	1.7(1.2~3.7)	23	74.2	3.2(1.2~6.9)
220	90.9	5.8~202.0	21	67.7	1.4(1.1~3.1)	23	74.2	2.6(1.4~5.8)

* 与 1997 年 EPA 标准 $65\mu g \cdot m^{-3}$ 相比, ** 与 2006 年 EPA 修订标准 $35\mu g \cdot m^{-3}$ 相比

王庚辰等人对北京地区 $PM_{2.5}$ 的质量浓度的垂直分布进行了研究,发现其随高度的增加而减小。杨龙等对北京秋冬季近地层 $PM_{2.5}$ 质量浓度的垂直分布轮廓线进行了回

归分析,发现浓度随高度的变化成显著的对数递减关系。监测期间天津城区 $PM_{2.5}$ 各层质量浓总体趋势度从大到小为 $120m > 40m > 220m$,这与其他人研究结果不尽相同。各

层观测结果表明天津地区受污染严重的程度 120m 高于 40m 和 220m。天津城区在 120m 处存在高污染现象,可能与天津本地的污染源排放和气象条件有关,需要作进一步的研究。

2.2 PM_{2.5} 质量浓度垂直变化特征

在边界层中,风和湍流是影响大气扩散能力的主要动力因子,大气稳定度是主要热

力因子,混合层高度是风与大气稳定度的综合体现。混合层高度变化是影响污染物垂直扩散的主要因素,为研究混合层厚度变化对污染物浓度的影响,利用地面气象观测资料,采用国标法计算与实验同时段的大气混合层厚度,结果表明天津秋季混合层厚度的日变化规律明显,早晚低,中午高,随混合层高度的变化,各层 PM_{2.5} 的浓度也有明显的日变化。

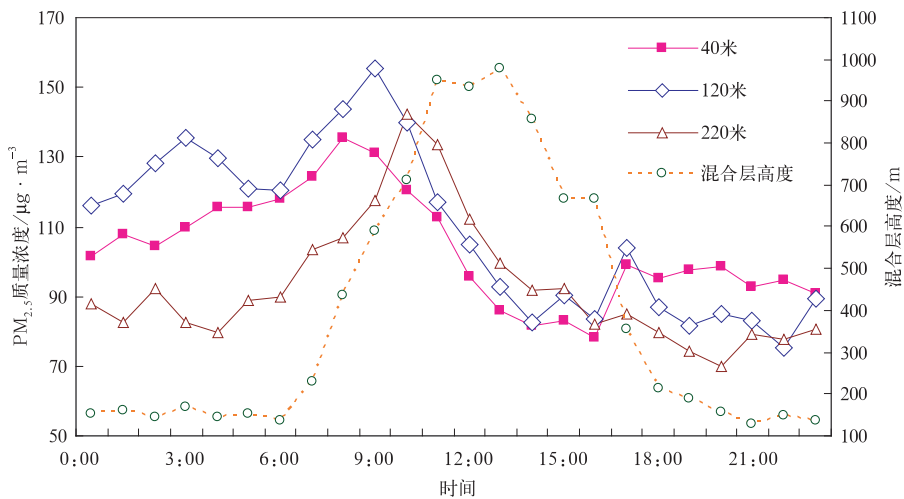


图 1 三层 PM_{2.5} 质量浓度日变化

由图 1 可见,随混合层高度的变化, PM_{2.5} 的质量浓度变化为 220m 单峰型,40m 为双峰型,而 120m 出现三峰型。夜间由于城市边界层的特性导致夜间逆温的存在,混合层高度变化范围在 120~190m 之间, PM_{2.5} 在 120m 浓度明显高于其它两层,从 22 时开始不断累积,由 $75\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到 $130\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,这主要是因为垂直方向上的湍流受到很强的抑制,逆温层增厚,导致 120m 污染物累积,污染物浓度增高;7 时开始,受出行高峰和建筑施工等污染源的影响,低层细粒子浓度快速增加,从 8—10 时, 40m、120m、220m 浓度相继达到日均最大值 135.6 、 155.2 、 $142.5\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,之后随混合层

高度迅速增加,对流运动的增强,颗粒物在混合层内不断扩散,导致三层颗粒物浓度同时持续上升后又快速下降;13 时,混合层厚度达到日最大为 980m,垂直方向上的湍流强度较大;随大气扩散能力的增强,污染物在混合层内充分混合、扩散,浓度不断被稀释,三层 PM_{2.5} 质量浓度同时下降,从高层到低层 PM_{2.5} 的浓度依次下降了 36 、 65 、 $52\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从 14 时开始,混合层厚度逐渐下降,19 时下降至 200m 以下,这段时间内交通污染源的影响大,PM_{2.5} 停留在低层大气很小的空间范围内,扩散能力减弱,导致 PM_{2.5} 浓度的从最低值开始累积升高,40m 和 120m 处 PM_{2.5} 质量浓度小幅增加,浓度水平从大到小

依次为 40m、120m、220m。混合层厚度的对污染物的扩散有明显的影晌作用,是影响天津城区秋季空气污染的重要气象参数之一。

2.3 PM_{2.5} 质量浓度日变化特征

由图 1 可见,PM_{2.5} 质量浓度一天中的峰值出现在上午 8:00—11:00,和下午 17:00—19:00 左右这个范围内,同时 120m 处在凌晨 2:00—4:00 也出现峰值。通过对监测期间逐时气象资料计算的大气稳定度变化分析可知,稳定类在天津城区秋季的频率较高,达到了 60%。大气稳定度日变化特征为早晨和夜间大气层结偏于稳定,中午偏于不稳定,反映了辐射的日变化对大气稳定度的影响。稳定度的变化对天津秋季 PM_{2.5} 浓度的变化水平有一定影响。由于采样所处的深秋季节,早晚气温较低,在早晨和夜间多为稳定类和中性类,大气层结稳定,空气对流弱、湍流小,稳定的层结阻挡污染物的扩散,使污染物滞留、累积,其质量浓度增大,随之上班出行高峰时间和建筑施工等污染源影响,导致污染物浓度不断增高并达到极值,三层 PM_{2.5} 浓度值均在 130 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。之后,太阳辐射强度大,地面增温强烈,对流运动增强,不稳定类为主,污染物的扩散能力增强,使细粒子浓度得到稀释降低至 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右。气象条件和早晚出行高峰期污染源的共同影响导致 PM_{2.5} 的质量浓度出现峰值。

2.4 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的关系

许多研究表明,PM₁₀ 和 PM_{2.5} 之间具有较好的相关关系。由于观测站内没安排 PM₁₀ 采样,利用天津市环境监测中心监测中心梅江站 PM₁₀ 小时平均资料相比较,从图 2 中所示,PM₁₀ 与 PM_{2.5} 的总体变化趋势基本一致。监测期间,PM₁₀ 质量浓度范围为 33~215 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,月均值为 121 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM₁₀ 观测数据与塔上 40m PM_{2.5} 的观测数据之间

有较好的相关性,相关系数(R_2)为 0.7678,表明污染物来源基本相同。对 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 数据进行分析,结果表明 PM_{2.5}/PM₁₀ 比值范围在 0.65~0.99 之间,平均值 0.86,比较吴国平等得到的广州、武汉、重庆和兰州 1995—1996 年变化范围 0.52~0.75 之间,邵龙义等在北京得到的 2001 年平均值 0.46,天津城区 PM_{2.5}/PM₁₀ 比值较高,主要原因除了监测站点位置的差异外,也表明天津地区秋季细粒子在 PM₁₀ 中占有较高的比例,人为污染较重。

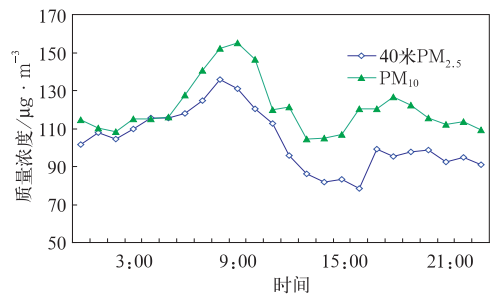


图 2 PM_{2.5} 与城区站 PM₁₀ 质量浓度

2.5 PM_{2.5} 与能见度的相互关系

图 3 给出了在秋季所观测的能见度和细粒子质量浓度的趋势,可以发现,能见度水平和细粒子污染水平呈现较好的负相关,即当细粒子质量浓度开始升高时,能见度便开始下降,而且能见度的波峰和谷底往往是细粒子质量浓度的谷底和波峰。许多研究结果表明,能见度和细粒子质量浓度呈现较好的负

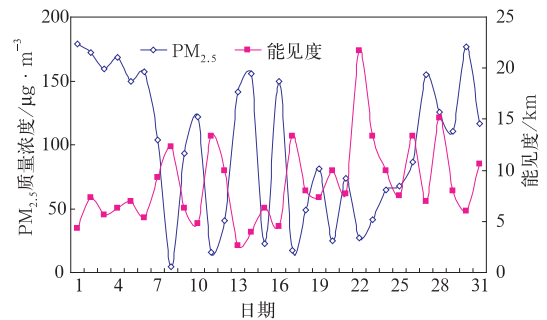


图 3 PM_{2.5} 与能见度的相互关系

相关,细粒子质量浓度的高低是决定能见度好坏的主要因子,细粒子的污染程度呈上升趋势,无疑细粒子污染是造成大气能见度下降的重要原因。

2.6 PM_{2.5} 与降水的关系

从图 4 可以看到,降水对细粒子的清除作用还是比较明显的,10 月份,共发生 3 次降水过程,降水期间 PM_{2.5} 质量浓度均有较大幅度的下降。其中 10 月 8 日降水量达到了 18.8mm,三层细粒子的浓度从降水前的约 $150\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 均下降到湿清除后约 $4\sim 6\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均为本月日均浓度值的最小值,10 月 11 日和 10 月 21 日是小雨天气,PM_{2.5} 质量浓度只有 $10\sim 30\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明降水过程是颗粒物从大气中清除的重要机制。在降水过程中,从高到低三层上的细粒子没有明显的分层现象。

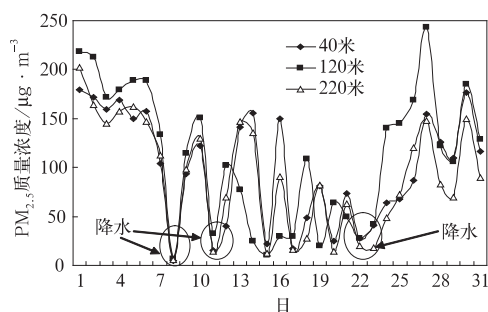


图 4 PM_{2.5} 日变化

3 结论与建议

(1) 天津城区 PM_{2.5} 污染水平相当严重,日均质量浓度远高于美国 1997 年制定和 2006 年新修订的排放标准,个别污染日超标倍数高达 5~7 倍。各层浓度总体趋势为 $120\text{m} > 40\text{m} > 220\text{m}$ 。

(2) 混合层厚度的变化对 PM_{2.5} 浓度变化有一定的影响,PM_{2.5} 各层的质量浓度值随混合层的变化有所不同,PM_{2.5} 的质量浓度变

化为 220m 单峰型,40m 为双峰型,而 120m 出现三峰型。23—11 时,120m 浓度明显高于其它各层,7 时始,受出行高峰和建筑施工等污染源的影响,三层 PM_{2.5} 的浓度都达到了日均最大值,11—18 时,三层 PM_{2.5} 的质量浓度随扩散能力的增加开始降低,18—23 时,40m 和 120m 处 PM_{2.5} 质量浓度小幅增加。

(3) 稳定度的变化对天津秋季 PM_{2.5} 浓度的变化水平有一定影响,稳定类在天津城区秋季的频率较高,达到了 60%。PM_{2.5} 平均质量浓度一天中的峰值常常出现在上午 8:00—11:00,和下午 17:00—19:00 左右这个范围内,凌晨 2:00—4:00 也出现峰值,气象条件和早晚出行高峰期污染源共同作用导致 PM_{2.5} 的质量浓度出现峰值。

(4) 环境监测中心 PM₁₀ 观测数据与塔上 40m PM_{2.5} 的观测数据之间有良好的相关性。PM₁₀ 与 PM_{2.5} 的总体变化趋势基本一致,说明污染物来源基本相同。天津城区 PM_{2.5}/PM₁₀ 比值较高,主要原因除了监测站点位置的差异外,也表明天津地区秋季细粒子在 PM₁₀ 中占有较高的比例,人为污染较重。

(5) 能见度水平和细粒子污染水平呈现较好的负相关。

(6) 降水过程是颗粒物从大气中清除的重要机制。

(7) 目前,我国还没有对 PM_{2.5} 进行大规模的系统研究,只有部分城市在个别点位进行了一些短期的研究,由于各城市对 PM_{2.5} 监测时间不平行,采用的监测方法也不统一(不同的监测方法测得的结果存在一定的差异),大大降低了各城市之间 PM_{2.5} 质量浓度的可比性,因此开展大规模的系统的 PM_{2.5} 的监测研究非常必要。建议防治大气污染,在控制污染源排放、改变能源结构、搞好环境规划的同时,开展大气污染物监测,应加快对

PM_{2.5}的研究,探明背景场的污染水平,尽快制订适合我国国情的 PM_{2.5} 空气质量标准,对于治理大气污染、研究对人体健康影响都十分重要。

参考文献

- [1] 徐晓峰,赵习方,张小玲,等.北京空气污染预报业务系统[J].气象,2005,31(01):63-66.
- [2] 刘爱君,杜尧东,王惠英.广州灰霾天气的气候特征分析[J].气象,2004,30(12):68-71.
- [3] 唐孝炎.大气环境化学[M]北京:高等教育出版社,1991.164.
- [4] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等.北京 PM_{2.5}浓度的变化特征及其与 PM₁₀、TSP的关系[J].中国环境科学,2002,22(6):506-510.
- [5] 于淑秋,林学椿,徐祥德.北京市区大气污染的时空特征[J].应用气象学报,2002,13(特刊):92—99.
- [6] 王淑英,张小玲.北京地区 PM₁₀污染的气象特征[J].应用气象学报,2002,13(增刊):177-184.
- [7] 扬龙,贺克斌,张强,等.北京秋冬季近地层 PM_{2.5}质量浓度垂直分布特征[J].环境科学研究,2005,18(2):23-28.
- [8] 王珩,于金莲.大气中 PM₁₀浓度的影响因素及其污染变化特征分析[J].上海师范大学学报:自然科学版,2004,33(3):98-102.
- [9] 邵龙义,时宗波,黄勤.都市大气环境中可吸入颗粒物的研究[J].环境保护,2000(1):24-29.
- [10] 王京丽,谢庄,张远航,等.北京市大气细粒子的质量浓度特征研究[J].气象学报,2004,62(1):104-111.
- [11] 王瑞斌,王明霞,安华.我国环境空气质量标准与国外相应标准的比较[J].环境科学研究,1997,10(6):35-39.
- [12] 宋宇,唐孝炎,张远航,等.夏季持续高温天气对北京大气细粒子的影响[J].环境科学,2002,23(4):33-36.
- [13] 宋宇,唐孝炎,方晨,等.北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J].环境科学学报,2003,23(4)468-471.
- [14] 黄鹂鸣,王格慧,王荟,等.南京市空气中颗粒物 PM₁₀、PM_{2.5}污染水平[J].中国环境科学,2002,22(4):334-337.
- [15] 刘大锰,黄杰,高少鹏,等.北京市区春季交通源大气颗粒物的污染水平及其影响因素[J].地学前缘,2006,13(2):228—233.
- [16] 吴国平,胡伟,滕恩江,等.我国四城市空气中 PM_{2.5}和 PM₁₀的污染水平[J].中国环境科学,1999,19(2):133-137.
- [17] 袁杨森,刘大锰,车瑞俊,等.北京市秋季大气颗粒物的污染特征研究[J].生态环境,2007,16(1):18-15.
- [18] Chen Y C, Simpson R W, Mactainsh G H. et al. Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Brisbane, Australia[J]. Atmos Environ,1997,31:3773-3785.
- [19] Christoforou C S, Salmon L G, Hannigan M P, et al. Trends in fine particle concentration and chemical composition in Southern California [J]. J Air Waste Manage Assoc,2000,50:43-53.
- [20] Wu Ye, Hao Jiming, Fu Lixin, et al. Vertical and horizontal profiles of airborne particulate matter near major roads in Macao, China [J]. Atmos Environ, 2002,36:4907-4918.