

# 大学教室颗粒物 PM<sub>10</sub> 化学组分特性及源解析

邓启红, 时冰冰, 李剑东, 路 婵

(中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘 要:** 对位于长沙市中南大学教室空气中的可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)进行3个月(2007年9~12月)的实时浓度监测与样本采集。颗粒物样本中的化学组分采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行分析, 并利用主成分分析法(PCA)对教室颗粒物进行源解析研究。研究表明: 大学教室空气中颗粒物污染十分严重, 平均质量浓度高达(176.56±57.63) μg/m<sup>3</sup>, 明显高于我国环境空气中颗粒物质量浓度标准; 教室颗粒物中的主要化学组分含量均比室外的高, 尤其是对人体健康危害较大的过渡金属元素更为显著; 教室颗粒物的主要来源按贡献量由大至小排列依次为土壤扬尘、煤燃烧、垃圾焚烧、工业排放、交通尾气。源解析结果为控制与降低教室颗粒物污染提供了科学依据与策略。  
**关键词:** 空气质量; 颗粒物; 化学组分; 源解析; 主成分分析法

中图分类号: X131.1; X831

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)02-0322-07

## Chemical composition and source apportionment of particulate matter (PM<sub>10</sub>) in university classrooms

DENG Qi-hong, SHI Bing-bing, LI Jian-dong, LU Chan

(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The inhalable particulate matter (PM<sub>10</sub>) was continuously monitored and sampled in the classrooms of Central South University at Changsha by Tapered Element Oscillating Microbalance 1400a (TEOM 1400a) from September to December, 2007. The chemical compositions of the PM<sub>10</sub> samples were analyzed by the X-ray fluorescence (XRF), and then the source apportionment of the classroom particles was investigated by the principal component analysis (PCA). The results show that the mean PM<sub>10</sub> concentration in classrooms is (176.56±57.63) μg/m<sup>3</sup>, which is much higher than the national PM<sub>10</sub> standard. The concentrations of the main chemical compositions of the classroom PM<sub>10</sub> are also higher than those outdoors. Five sources are identified by the source apportionment method and are respectively soil and dust, coal combustion, biomass burning, industrial emission, and vehicle exhaust. The present work provides a detailed understanding of the classroom particles and some scientific strategies for the pollution control so as to improve the air quality in university classrooms.

**Key words:** air quality; particulate matter; chemical composition; source apportionment; principal component analysis

可吸入颗粒物 PM<sub>10</sub>(粒径小于 10 μm 的颗粒物)由于能够可以进入人体呼吸系统, 甚至穿透肺泡进入人体血液循环, 严重威胁人们的身体健康。流行病学研究结果表明, 颗粒物浓度的增加与人类疾病(特别是呼吸系统和心脑血管等相关疾病)的发病率、致残率及死

亡率有显著的相关性<sup>[1-2]</sup>。教室内大量的教学板书及剧烈的学生活动(如上下课进出、嬉戏打闹等)导致空气中颗粒物浓度迅速升高, 这对长期暴露在该环境中的师生身体健康构成直接威胁<sup>[3-5]</sup>, 如我国的一项调查表明, 教师的急/慢性咽炎、急/慢性气管支气管炎患病

收稿日期: 2008-08-26; 修回日期: 2008-12-08

基金项目: 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(200545); 教育部新世纪人才支持计划资助项目(NCET-05-0688); 国家自然科学基金资助项目(50408019); 霍英东教育基金会高等院校青年教师优选资助课题(104006); 湖南省杰出青年科学基金资助项目(06JJ1001)

通信作者: 邓启红(1973-), 男, 河南潢川人, 教授、博士生导师, 从事室内空气质量研究; 电话: 0731-8877175; E-mail: qhdeng@mail.csu.edu.cn

率分别高达 23.3%, 73.9%, 4.0% 和 17.4%, 明显高于行政管理人員<sup>[6]</sup>。近年来, 教师和学生呼吸系统疾病明显增多, 教室内颗粒物污染逐渐得到人们的重视, 但目前的系统研究与报道非常少。

颗粒物的致病机理一直是国际社会共同关注的焦点。尽管目前尚未形成统一认识, 但越来越多的毒理学研究表明, 颗粒物毒性与其化学组分密切相关, 如 PM<sub>10</sub> 表面的过渡金属元素能诱导与催化多种化学反应, 产生活性很强的活性氧自由基 ROS, 对人体细胞组织与遗传物质 DNA 造成氧化性损伤, 最终导致器官疾病和癌症<sup>[7]</sup>。因此, 研究颗粒物化学组分特性是揭开其毒性面纱的重要手段。另一方面, 颗粒物化学组分是进行源解析的基础。由于颗粒物化学组分与其来源及形成过程有关, 根据颗粒物的化学组分特征就能够辨识出其主要来源, 并解析出每个污染源的贡献量大小及贡献元素, 从而为制定有效的污染控制策略提供科学依据<sup>[8-9]</sup>。

本文作者以位于长沙市的中南大学教室为对象, 系统研究教室内颗粒物的浓度水平、化学组分特性及其来源, 对于全面认识教室颗粒物污染及其毒性与控制具有重要意义。

## 1 颗粒物采样与化学组分分析

2007 年 9 月至 12 月, 对位于长沙市中南大学的 9 间教室中的颗粒物进行了实时浓度监测与样本采集。为进行对比分析, 选取教室附近的办公楼阳台进行室外浓度监测与样本采集。学校位于城市郊区, 背靠岳麓山, 周边有轻微工业污染。教学楼都是自然通风建筑, 教室以多媒体授课为主, 粉笔书写为辅。

采用大气颗粒物监测仪 TEOM1400a(Rupprecht & Patashnick, Co., USA)对教室与室外颗粒物浓度进行 24 h 实时监测。为分析颗粒物的化学组分, 利用 TEOM1400a 采样单元 ACCU 在 Teflon 滤膜(直径为 46.2 mm)上进行颗粒物样本采集(采样流量为 16.7 L/min)。室内样本仅在教室开放时段(School-time) 7:30~22:30 进行采集, 而室外样本进行 24 h 采集。样本颗粒物在空气中的平均质量浓度根据称重法获得, 为减小测量误差, 样本滤膜在采样前后分别置于恒温恒湿箱((25±0.5) °C, 湿度为(40±4%))保持 24 h 以上, 然后, 用电子天平进行称重。

本次实验分别采集教室和室外颗粒物样本 37 个。采用飞利浦 PW2424 型 X 射线荧光光谱仪 XRF 对样本颗粒物中的化学组分含量进行分析, 其中 50%以上

样本中高于 XRF 检出限的化学元素主要有 16 种: Al, Ca, Cl, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Si, Ti 和 Zn。

## 2 源解析方法与过程

源解析采用受体模型, 其主要思想是污染源散发的颗粒物与样本收集的颗粒物之间的化学组分质量守恒, 即颗粒物样本中各元素含量是不同污染源贡献元素质量的总和:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^p a_{ik} S_{kj} \quad (1)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m$ ;  $j=1, 2, \dots, n$ ;  $k=1, 2, \dots, p$ ;  $m$  为元素个数;  $n$  为样本个数;  $p$  为污染源数量;  $c_{ij}$  为颗粒物样本  $j$  中元素  $i$  的质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $a_{ik}$  为源谱, 即污染源  $k$  散发的元素  $i$  含量, %;  $S_{kj}$  为源贡献, 即污染源  $k$  贡献给样本  $j$  的质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。利用统计分析软件 SPSS 采用主成分分析法 PCA(Principal component analysis)对样本中的颗粒物来源进行解析, 主要分析过程与任务如图 1 所示。分析步骤如下:

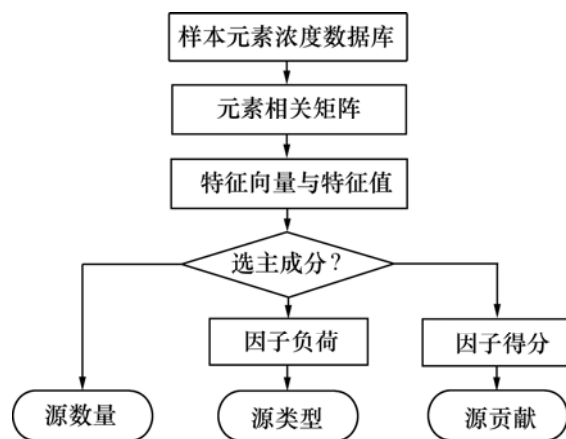


图 1 颗粒物源解析流程图

Fig.1 Procedure of source apportionment

a. 样本颗粒物中元素浓度标准化, 即

$$z_{ij} = \frac{c_{ij} - \bar{c}_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

式中:  $\bar{c}_i$  与  $\sigma_i$  分别为元素  $i$  在样本中的浓度平均值与标准差。

b. 对标准化数据矩阵( $[Z]_{i \times j}$ )进行协方差运算得到元素相关矩阵( $[R]_{i \times i}$ )。协方差矩阵反映了不同元素之间的相关性, 为判断不同元素的来源建立了基础。

c. 计算元素相关矩阵的特征值  $[A]_{ixi}$  与特征向量  $[Q]_{ixi}$ , 并按照特征值由大到小顺序排列。特征值越大, 表明元素浓度在对应的特征向量方向变化(以方差描述)越大。

d. 选取特征值大于 1 的前  $k$  个特征值与特征向量作为主成分(Principal components), 即引起样本元素浓度变化的主要因素或主要污染源数量( $p$ )。

e. 根据主成分特征向量与特征值分别计算主成分的因子负荷  $[L]_{kxi}$  与因子得分  $[F]_{kxj}$ 。

f. 根据因子负荷中元素负荷及元素特征判断主成分(颗粒物源)类型。

g. 根据因子得分进行多元线性回归得到源贡献 ( $S_{kj}$ ), 即

$$c_j = \zeta_0 + \sum_{k=1}^p \zeta_k f_{kj} \quad (3)$$

式中:  $c_j$  为样本  $j$  的质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $\zeta_k$  为  $c_j$  与  $f_{kj}$  之间的线性回归系数,  $\zeta_k f_{kj}$  为源贡献, 即  $S_{kj} = \zeta_k f_{kj}$ ;  $\zeta_0$  为 PCA 方法中没有考虑的其他次要成分(污染源)贡献量或称为误差。

h. 根据上述分析得到的污染源数量( $p$ )与污染源贡献量( $S_{kj}$ ), 由式(2)再次进行线性回归得到源谱( $a_{ik}$ )。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 教室 $\text{PM}_{10}$ 质量浓度

根据 2007 年 9 月至 12 月 TEOM1400a 实时监测的  $\text{PM}_{10}$  质量浓度结果进行时间平均, 可分别得到教室与室外在 3 个不同时段(教室开放时段 7:30~22:30, 夜晚 22:30~7:30, 0:00~24:00)  $\text{PM}_{10}$  平均质量浓度, 统计结果如表 1 所示。大学校园内室外颗粒物在上述 3 个时段的平均浓度分别为  $(139.98 \pm 71.63)$ ,  $(131.06 \pm 70.69)$  和  $(136.64 \pm 68.6) \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 基本上保持不变而且都在我国规定的环境空气颗粒物  $\text{PM}_{10}$  质量标准( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )之内, 说明大学校园内的空气质量总体上是比较好的, 这是因为校园位于岳麓山脚下并远离市区与交通主干道, 周围环境污染较少。但是, 教室在上述开放时段和 24 h 的平均质量浓度分别达到  $(176.56 \pm 57.63) \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $(160.77 \pm 52.78) \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 明显高于我国颗粒物空气质量标准, 说明教室颗粒物污染的严重性。比较教室与室外  $\text{PM}_{10}$  的质量浓度发现, 在教室开放时段室内  $\text{PM}_{10}$  的质量浓度 ( $176.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 明显高于室外质量浓度

( $139.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 而在夜间室内质量浓度( $134.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )与室外质量浓度( $131.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )基本一致, 说明教室在开放时段空气质量较差, 必然存在明显的颗粒物源。通过调查与比较教室在白天与夜晚的污染源情况发现, 教室颗粒物增加主要是由于学生上下课活动导致的颗粒物扬尘及教学板书带来的粉笔灰尘。

值得注意的是, 上述教室开放时段的平均质量浓度  $176.46(38.94 \sim 265.04) \mu\text{g}/\text{m}^3$  远高于欧美等发达国家平均质量浓度, 如捷克、荷兰、德国教室上课时  $\text{PM}_{10}$  浓度分别为  $42.3(12.9 \sim 76.2)^{[10]}$ ,  $81 \sim 157^{[11]}$  和  $64.9(18.3 \sim 178.4) \mu\text{g}/\text{m}^3$  <sup>[12]</sup>, 其主要原因可能是我国的室外空气中颗粒物浓度较高。

表 1 教室室内外  $\text{PM}_{10}$  质量浓度

Table 1 Concentration of classroom and outdoor  $\text{PM}_{10}$

	$\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$					
	教室内			教室外		
	开放时段	夜晚	24 h	开放时段	夜晚	24 h
平均值	176.46	134.27	160.77	139.98	131.06	136.64
标准偏差	57.63	59.72	52.78	71.63	70.69	68.60
最小值	38.94	22.56	32.80	16.00	11.54	14.33
最大值	265.04	235.0	222.65	226.74	244.35	233.34

#### 3.2 化学组分特性

表 2 所示为教室与室外颗粒物样本  $\text{PM}_{10}$  平均质量浓度、样本 XRF 分析得到的化学组分质量浓度、 $\text{PM}_{10}$  与化学组分在教室与室外的质量浓度百分比。如表 2 所示,  $\text{PM}_{10}$  质量浓度比表 1 中的略低, 是 TEOM 实时测试与滤膜称重差异造成的。

表 2 中数据表明, 教室颗粒物浓度是室外的 1.29 倍, 而且教室颗粒物中的每种化学组分浓度都明显比室外的高, 尤其是对人体健康危害较大的过渡金属元素 Fe, Mn, Ni, Cu, Zn 和 Pb 室内外浓度比分别为 1.23, 1.56, 1.47, 1.49, 1.41 和 1.51, 这进一步说明教室内存在特殊的颗粒物污染源。与国外(荷兰)教室相比<sup>[13]</sup>, 本文 Fe, Mn, Cu, Zn 和 Pb 教室浓度分别是对应元素的 0.9, 1.4, 10.9, 0.9 和 3.7 倍, 然而两者室外浓度比值分别是 4.8, 4.9, 32.2, 3.9 和 5.4, 说明国内外教室外环境差异比教室内环境差异更为显著, 这进一步说明我国教室污染严重的原因。



表 4 教室内/外 PM10 化学组分因子负荷

Table 4 Factor loadings for PM10 elements in classroom and outdoor

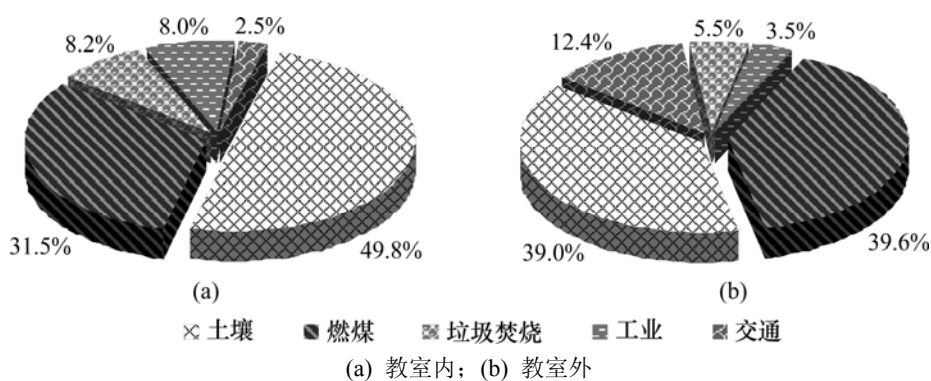
	教室内					教室外				
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5
Al	0.96	0.05	0.10	-0.08	0.09	0.53	0.79	0.23	0.02	0.07
Ca	0.78	0.04	0.12	-0.33	0.26	0.51	0.58	0.00	0.43	0.13
Cl	-0.25	-0.25	0.21	0.79	-0.04	-0.12	0.03	0.07	0.87	-0.12
Cu	0.06	0.21	0.01	0.07	0.88	0.30	0.19	0.80	0.16	0.23
Fe	0.36	0.67	0.39	0.04	0.24	0.57	0.63	0.32	0.25	0.23
K	0.27	0.50	0.72	0.06	0.07	0.81	0.32	0.28	0.21	0.10
Mg	0.91	0.00	-0.20	0.06	0.06	-0.07	0.97	-0.01	0.05	-0.01
Mn	0.03	0.76	0.06	0.02	0.17	0.53	0.06	0.03	0.38	0.59
Na	0.10	0.24	0.20	0.83	0.17	0.69	0.53	0.33	0.11	-0.03
Ni	0.07	0.76	-0.01	-0.09	-0.07	-0.04	0.09	0.12	-0.22	0.86
P	0.08	-0.25	0.74	0.37	0.12	0.78	0.39	0.33	-0.05	0.12
Pb	0.25	0.01	0.52	-0.05	0.61	0.48	0.13	0.73	0.17	-0.06
S	-0.18	0.20	0.88	0.17	0.04	0.86	0.11	0.41	-0.02	0.02
Si	0.94	0.17	0.14	-0.02	0.15	0.46	0.85	0.19	0.04	0.06
Ti	0.50	-0.03	0.09	0.15	0.63	0.32	0.64	0.47	0.06	0.28
Zn	-0.22	0.66	0.04	0.55	0.06	-0.01	0.14	0.25	0.74	0.56
特征值	3.91	2.59	2.45	1.95	1.79	4.44	4.06	2.15	1.86	1.36
方差	31.6%	20.8%	12.8%	7.7%	6.8%	55.5%	10.7%	9.5%	6.7%	4.3%
污染源	土壤	工业	煤燃烧	垃圾焚烧	交通	煤燃烧	土壤	交通	垃圾焚烧	工业

学校周边存在小型有色冶金工厂,因此,可认为主成分 2 代表工业污染源<sup>[4]</sup>。第三主成分中元素 K, P 和 S 负荷较高,它们通常产生于燃烧过程。经调查发现样本采集的教室周边有 4 个学生食堂,都以煤为主要燃料,所以主成分 3 代表煤燃烧产生的颗粒物。第四主成分的方差贡献率为 7.7%,其中元素 Cl 与 Na 的负荷很大,元素 Zn 也有中等负荷。由于 Zn 与 Cl 是垃圾(生物质)焚烧的特征元素<sup>[15]</sup>,因此,可判断主成分 4 主要来自室外垃圾焚烧,特别是秋冬季节校园内每天都有大量的树木枝叶与纸屑等垃圾进行焚烧处理。特征值最小对样本元素浓度变化影响最小的第五主成分方差贡献率仅为 6.8%,其元素 Cu, Pb 和 Ti 的负荷较大。Pb 主要来自于汽车燃料汽油, Cu 也通常来自汽车尾气<sup>[16]</sup>,因此,二者主要来自于汽车尾气排放。由于 Ti 元素在主成分 1(土壤)中也有中等负荷,这里说明该元素还来自于汽车行驶过程中带起的道路扬尘<sup>[17]</sup>。因此,主成分 5 可总体理解为交通污染源。由于采样教室远离城市主要交通干线,交通并不是影响

教室颗粒物成分的主要因素。

室外颗粒物主成分因子负荷与教室明显不同。第一主成分代表煤燃烧,方差贡献率为 55.5%,其特征元素 K, P 和 S 具有很高的负荷;第二主成分的方差贡献率为 10.7%,可认为是土壤扬尘,因为土壤特征元素 Al, Ca, Fe, Mg, Si 和 Ti 的负荷高;第三主成分则代表交通污染,因为汽车尾气特征元素 Pb 和 Cu 的负荷高,而且交通扬尘引起的元素 Ti 也有中等负荷;第四主成分 4 代表了垃圾焚烧源,其特征元素 Cl 和 Zn 负荷大;第五主成分代表了工业污染源,其中, Mn, Ni 和 Zn 负荷大。比较教室与室外主成分可看出,尽管教室与室外颗粒物浓度均受上述 5 种主要污染源的影响,但是,其影响程度不同,如教室颗粒物最主要的污染源是土壤,而室外颗粒物最主要的污染源则是煤燃烧。

图 2 所示为根据主成分分析法源解析计算得到的教室与室外颗粒物污染源的贡献量。可见,教室颗粒物污染源按照贡献量由大至小依次为:土壤扬尘

图2 教室内、外 PM<sub>10</sub> 散发源的贡献百分比Fig.2 Source contributions to PM<sub>10</sub> in classroom and outdoors

49.8%, 煤燃烧 31.5%, 垃圾焚烧 8.2%, 工业排放 8%, 交通尾气 2.5%, 而室外颗粒物污染源按照贡献量由大至小排列为: 煤燃烧 39.6%, 土壤扬尘 39.0%, 交通尾气 12.4%, 垃圾焚烧 5.5%, 工业排放 3.5%。值得注意的是, 上述污染源按照贡献量排列顺序与前面按照主成分排列顺序(表 2)是不同的, 如从影响程度上来看, 工业排放源对教室颗粒物元素浓度的变化是第二主要因素, 但从贡献量上来看, 是最小的。另外, 通过污染源贡献量的比较可看出, 室内外颗粒物污染来源是不同的, 特别是教室内土壤源贡献量的增加, 进一步说明了室内人员活动的影响。

### 3.4 教室颗粒物污染控制策略

从实验监测结果(表 1)可看出, 教室颗粒物污染十分严重, 明显超出我国的颗粒物空气质量标准。为了保护师生身体健康, 必须降低教室颗粒物浓度。根据上述源解析辨识出的教室污染的主要来源及其贡献, 采取以下措施可以有效控制或降低大学教室颗粒物污染: 第一, 降低教室内的土壤扬尘, 如经常清扫教室, 改善教学条件以减少黑板书写, 减小教室规模实行小班上课以减少学生活动等导致的室内土壤扬尘; 第二, 减少煤燃烧污染, 教学楼附近食堂或居民家庭尽可能使用液化气等清洁能源; 第三, 减少校园内的垃圾焚烧, 可将垃圾运输至垃圾站统一处理或进行填埋。

## 4 结论

a. 大学教室颗粒物 PM<sub>10</sub> 在开放时段平均质量浓度高达(176.56±57.63) μg/m<sup>3</sup>, 明显高于我国颗粒物空气质量标准, 说明教室颗粒物污染的严重性。

b. 教室颗粒物平均质量浓度是室外的 1.29 倍, 而且颗粒物中化学组分浓度明显高于室外, 尤其是对人体健康危害较大的过渡金属元素更为显著。

c. 源解析研究表明, 教室与室外颗粒物污染性质是不同的。教室颗粒物污染源按照贡献量由大至小依次为: 土壤扬尘(49.8%), 煤燃烧(31.5%), 垃圾焚烧(8.2%), 工业排放(8%)和交通尾气(2.5%), 而室外颗粒物污染源按照贡献量由大至小排列为: 煤燃烧(39.6%), 土壤扬尘(39.0%), 交通尾气(12.4%), 垃圾焚烧(5.5%)和工业排放(3.5%)。

d. 源解析技术通过辨识污染源的主要特征及其贡献, 为控制或降低教室颗粒物污染提供了科学有效的依据与策略。

### 参考文献:

- [1] Samet J M, Dominici F, Curriero F C, et al. Fine particulate air pollution and mortality in 20 US cities, 1987—1994[J]. *New England Journal of Medicine*, 2000, 343(24): 1742—1749.
- [2] Dominici F, Peng R D, Bell M L, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases[J]. *Journal of American Medical Association*, 2006, 295(10): 1127—1134.
- [3] Pope C A, Dockery D W. Acute health effects of PM<sub>10</sub> pollution on symptomatic and asymptomatic children[J]. *American Review of Respiratory Disease*, 1992, 145(5): 1123—1128.
- [4] Hoek G, Grunekreef B. Acute effects of a winter air pollution episode on pulmonary function and respiratory symptoms of children[J]. *Archives of Environmental Health*, 1993, 48(5): 328—335.
- [5] Zhang J, Hu W, Wei F, et al. Children's respiratory morbidity prevalence in relation to air pollution in four Chinese cities[J].

- Environmental Health Perspectives, 2002, 110(9): 961–967.
- [6] 胡衡生, 黄 励, 吴 杰, 等. 教室空气总悬浮颗粒物污染对教师健康的影响[J]. 环境与健康杂志, 2003, 20(4): 231–232.  
HU Heng-sheng, HUANG Li, WU Jie, et al. Effects of TSP in classroom air on teachers' health[J]. Journal of Environment and Health, 2003, 20(4): 231–232.
- [7] Gonzalez-Flecha B. Oxidant mechanisms in response to ambient air particles[J]. Molecular Aspects of Medicine, 2004, 25(1/2): 169–182.
- [8] Song Y, Xie S, Zhang Y, et al. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing using principal component analysis/absolute principal component scores and UNMIX[J]. Science of the Total Environment, 2006, 372(1): 278–286.
- [9] Thurston G D, Spengler J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston[J]. Atmospheric Environment, 1985, 19(1): 9–25.
- [10] Branis M, Rezacova P, Domasova M. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub> in a classroom[J]. Environmental Research, 2005, 99(2): 143–149.
- [11] Janssen N A H, Hoek G, Harssema H, et al. Childhood exposure to PM<sub>10</sub>: relation between personal, classroom, and outdoor concentrations[J]. Occupational and Environmental Medicine, 1997, 54(12): 888–894.
- [12] Frommea H, Twardellaa D, Dietrich S, et al. Particulate matter in the indoor air of classrooms-exploratory results from Munich and surrounding area[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(4): 854–866.
- [13] Janssen N A H, Hoek G, Brunekreef B, et al. Mass concentration and elemental composition of PM<sub>10</sub> in classrooms[J]. Occupational and Environmental Medicine, 1999, 56(7): 482–487.
- [14] Sun Y, Zhuang G S, Wan Y, et al. The air-borne particulate pollution in Beijing—concentration, composition, distribution and sources[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(35): 5991–6004.
- [15] Kuruvilla J, Saritha K, Kevin C, et al. Analysis of trace elements and ions in ambient fine particulate matter at three elementary schools in Ohio[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(4): 394–406.
- [16] Karar K, Gupta A K. Source apportionment of PM<sub>10</sub> at residential and industrial sites of an urban region of Kolkata, India[J]. Atmospheric Research, 2007, 84(1): 30–41.
- [17] Querol X, Alastuey A, Rodriguez S, et al. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(36): 6407–6419.