

秦皇岛冬季典型污染时段 $PM_{2.5}$ 中重金属和 PAHs 的污染特征

周秀艳¹, 李娜¹, 刘明华², 王申博¹

(1. 东北大学秦皇岛分校 资源与材料学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 秦皇岛市环境保护监测站, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 为了探究近年来秦皇岛市大气中 $PM_{2.5}$ 污染特征和影响因素, 通过采集冬季重污染时段城区和开发区 $PM_{2.5}$ 样品, 使用等离子体发射光谱仪和气相色谱-质谱仪, 分别测定城区样品中 6 种元素 (Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd) 和 PAHs。结果表明, 秦皇岛城区 $PM_{2.5}$ 日平均质量浓度 $186 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 开发区平均质量浓度为 $118.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 城区 $PM_{2.5}$ 中各重金属元素的浓度水平排序为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Cd}$, 其中 Cd 为强-极强污染, Pb 为中-强污染, Zn 属于中等污染, Ni, Cu, Cr 等其他元素基本无污染。 $PM_{2.5}$ 中定性的检测到萘 (Nap)、菲 (Phe)、荧蒽 (Fla)、芘 (Pyr)、苯并(k)荧蒽 (BkF) 等单体。 $PM_{2.5}$ 日浓度与风速具有显著的负相关性, 与相对湿度呈正相关性。

关 键 词: $PM_{2.5}$; 污染特征; 重金属; 多环芳烃; 气象条件

中图分类号: X 513 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)11-1667-06

Characteristics of Heavy Metal and PAHs in $PM_{2.5}$ During Winter Pollution in Qinhuangdao

ZHOU Xiu-yan¹, LI Na¹, LIU Ming-hua², WANG Shen-bo¹

(1. School of Resource & Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. Environmental Protection Monitoring Station Qinhuangdao, Qinhuangdao 066000, China. Corresponding author: ZHOU Xiu-yan, E-mail: zxy@neuq.edu.cn)

Abstract: In order to explore the pollution characteristics and influencing factors of $PM_{2.5}$ in Qinhuangdao in recent years, the $PM_{2.5}$ samples from urban and development zones of Qinhuangdao during heavy pollution in winter were collected and analyzed. The quantities of 6 heavy metal elements (Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban samples were determined by plasma emission spectrometer and gas chromatography-mass spectrometry. The results show that the average daily mass concentration of $PM_{2.5}$ in Qinhuangdao urban is $186 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and the average concentration in the development area is $118.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The sequence of concentrations of heavy metals in urban $PM_{2.5}$ are $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Cd}$. Among them, Cd is strong to strong pollution, Pb is medium to strong pollution, and Zn is medium pollution, other elements such as Ni, Cu, Cr are basically pollution-free. The monomers of PAHs, such as Naphthalene (Nap), phenanthrene (Phe), fluoranthene (Fla), pyrene (Pyr), benzo(k)fluoranthene (BkF) and so on, are qualitatively detected in these samples of $PM_{2.5}$. The daily concentration of $PM_{2.5}$ is negatively correlated with wind speed and positively correlated with relative humidity.

Key words: $PM_{2.5}$; pollution characteristics; heavy metal; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); meteorological conditions

近年来, 由于雾霾污染的加剧, 大气颗粒物 (PM) 在中国倍受关注^[1]. 在研究 $PM_{2.5}$ 的时空分

布特征时发现, 中国中部和东部地区 $PM_{2.5}$ 污染最为严重^[2], 尤其是京津冀、长三角和珠三角地

区^[3-6]. 针对 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学成分、来源及污染特征进行了大量研究,发现在冬季, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等离子的浓度较高,而夏季较低,呈现明显的季节性特征^[7]. 在采暖期, $\text{PM}_{2.5}$ 中污染物以有机颗粒物或挥发性有机污染物为主,北京雾霾日时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等离子的浓度显著高于非雾霾日^[8],煤燃烧仍是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物的主要来源. 随着大气污染防治行动计划的施行,有人利用 WRF - CMAQ 模型系统评价了减排措施对京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低的影响^[9]. 当前,对于 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属、多环芳烃(PAHs)的研究成为重污染城市的热点^[10].

秦皇岛位于燕山山脉东段丘陵地区与山前平原地带,南临渤海湾,地势北高南低. 区域气候比较温和,受海洋影响较大,属于温带大陆性季风气候类型. 秦皇岛作为京津冀地区的重要节点城市,是连接京津冀与东北地区的枢纽,独特的地理位置与地形地貌越来越突显其在国民经济发展中的重要性,对城市的空气质量要求较高. 目前秦皇岛城区环境空气质量设有 5 个自动监测点位(其中包括秦皇岛市环境保护监测站),主要监测 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、CO 等大气污染物,全年环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数占比 34.9%,可见, $\text{PM}_{2.5}$ 是秦皇岛地区的主要环境空气污染物,但对于 $\text{PM}_{2.5}$ 中污染物特征的研究成果不多. 为此,笔者在冬季典型污染时段连续采集环境空气样品,分析其中重金属和 PAHs 的污染特征,并评估它们的潜在生态风险.

1 材料和方法

在秦皇岛冬季典型污染时段的城区和开发区

设置 2 个点位手工采样,其中城区点在秦皇岛市环境保护监测站楼顶(39°57'N,119°36'E,简称城区),城区采样点属于商业、居民混合区,西邻城市交通干线迎宾路约 200 m,北侧约 3 km 为秦皇岛火车站,周边主要为宾馆、酒店、商厦和住宅楼,于 2014 年 11 月~12 月连续采集环境空气样品. 开发区采样点位于东北大学秦皇岛分校校园内(39°55'N,119°33'E,简称开发区),该采样点南邻原第三污水处理厂,北邻开发区医院,东侧为住宅区,西侧紧邻外环路. 距离海边约 2 km,西侧约 5 km 为经济技术开发区,汇集了中信戴卡等加工贸易、高新技术产业,于 2016 年 11 月~12 月连续采集环境空气样品.

1.1 样品采集

采样仪器选用青岛崂应 2050 型中流量采样器,采样流量设置为 100 L/min,滤膜为石英膜(90 mm). 采样前将石英膜和包装用的铝箔置于马弗炉中,在 450~500℃ 高温下加热 2 h,放至室温后,再放入 25℃ 恒温恒湿箱,湿度控制在(50±5)% RH,平衡 24 h 后称量采样,采样后滤膜在相同的恒温恒湿设备中平衡,同一滤膜两次称量质量之差在 0.04 mg 以内,即达到平衡. 按照环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 手工监测方法技术规范(HJ 656—2013)要求,分别于 2014 年 11 月至 12 月、2016 年 11 月至 12 月在城区(见图 1 a)和开发区(见图 1 b)点位采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,每个点位有 3 台仪器同时采样,同时空白对照,每月均连续采集 5~8 d,每日持续采集 23 h 左右(当日 8:30 到次日 9:00),记作当日采集样品. 仪器故障及降雨、大雾、大风等天气停止采样. 共采集污染时段(微风或静风、雾霾天气、AQI 指数大于 100)有效样品 14 组,同步收集采样时段的气象资料.

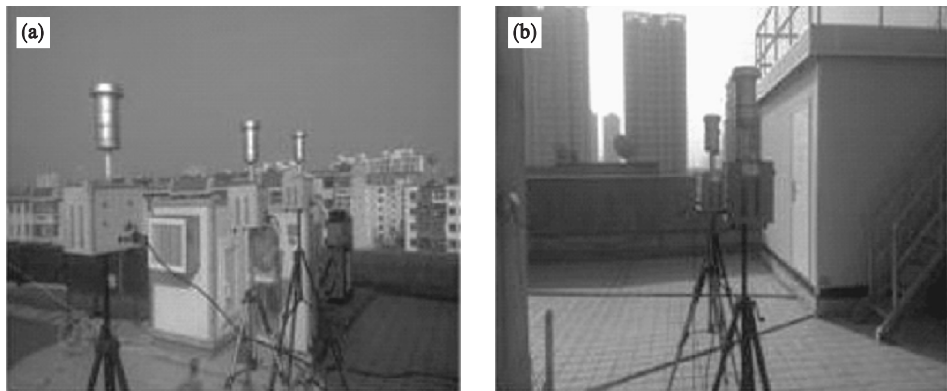


图 1 采样点位图
Fig. 1 Pictures of sampling sites
(a)—城区;(b)—开发区.

1.2 分析测定

采用电感耦合等离子体原子发射光谱-质谱联用仪(ICP-MS, NexION 300x, 美国 PE) 分析样品中 Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Cr 重金属元素浓度, (NexION 300x ICP-MS) 对重金属元素的检出限在 0.030~0.13 μg/L 之间. 样品前处理采用微波消解法, 将采样膜用陶瓷剪刀剪碎后置于 100 mL 聚四氟乙烯塑料内罐中, 加 5 mL HNO₃, 3 mL HF 和少许去离子水微波消解, 利用 0.45 μm 微孔滤膜对消解液过滤、定容. 在洁净的通风橱内, 用优级纯 1% HNO₃ 和去离子水配制的 1% HNO₃ 溶液, 将各标准物质混合配制成 1, 5, 10 和 20 mg/L 的标准溶液, 同时配制标准溶液. 在 ICP-MS 测定前, 打开 NexION 300 x 电源检查确保氦气供给系统和供电系统正常后, 再打开氦气开关进行抽真空(在 7.98×10^{-4} Pa 以下), 达到真空状态后点炬, 在仪器正常工作的情况下, 根据设置的参数先进标准空白溶液, 然后依次进混合标准溶液后查看曲线, 各个重金属标准曲线的相关系数大于 0.999 时, 测定样品.

参考 HJ 646—2013《环境空气和废气 气相和颗粒物中多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法》, 合成相邻采样日的 2 张采样膜为 1 次检测样品, 即合并 11 月 7 日和 8 日、9 日和 10 日、24 日和 25 日、26 日和 27 日的样品, 以保证能够检出目标污染物共 4 组, 分析 PAHs 的样品. 将各组样品经索氏提取器提取、浓缩、洗脱, 再经蒸馏浓缩、定容预处理后, 利用气相色谱-质谱联用仪(GCMS-QP 2010, 日本岛津) 分析 PAHs, 该仪器的各 PAHs 组分定量检出限均小于 2 pg/μL (10 倍信噪比). GC 部分的色谱柱为 Rtx-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 升温程序为起始 60 ℃, 保持 2 min, 以 10 ℃/min 的速率升至 280 ℃, 保持 10 min; MS 部分的电离方式为 EI, 离子源温度 220 ℃, 接口温度 280 ℃, 采集方式为全扫描 SCAN, 定量方法为内标法. 根据标准样品中化合物的保留时间及质谱图定性分析单体组成.

1.3 数据分析与评价方法

运用数理统计方法对分析的数据进行统计分析与相关性分析.

采用地累积指数法(I_{geo}) 评价 PM_{2.5} 中重金属元素的污染程度, 该方法不仅考虑自然地质过程造成的背景值的影响, 而且也充分注意人为活动的影响. 因此, I_{geo} 不仅反映重金属分布的自然

变化特征, 而且可以判别人为活动对环境的影响, 是区分自然变化与人为活动影响的重要参数:

$$I_{geo} = \lg[C_i / (k \times C_n)].$$

式中: C_i 是元素 i 在沉积物中的浓度; C_n 是沉积物中该元素的地球化学背景值(本文取河北省土壤背景值); k 是考虑背景值的差异而取的系数(一般取值为 1.5); 地累积指数分为 0~6 级, 表示污染程度由无至极强^[11].

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征

2014 年秦皇岛市 PM_{2.5} 年均质量浓度为 60 μg/m³, 超过国家环境空气质量二级标准(35 μg/m³)0.71 倍, 分别是该年度北京市和天津市 PM_{2.5} 年均值的 69.8% 和 72.3%, 秦皇岛在河北省 11 个城市空气质量由好到差排名中位列第 3. 相对而言, 秦皇岛环境空气质量在京津冀地区较好, 但在冬季采暖时段 PM_{2.5} 污染也很严重. 图 2 为 2014 年、2016 年秦皇岛冬季典型污染时段 PM_{2.5} 日质量浓度和空气质量指数(AQI) 的变化情况, 均为 PM_{2.5} 日质量浓度超过 75 μg/m³ 且为首要污染的时段. 2014 年采样期间城区 PM_{2.5} 质量浓度均值为 186 μg/m³, 最大值为 338 μg/m³, 超过二级标准限值的 3.51 倍(见图 2a); 2016 年开发区采样期间 PM_{2.5} 质量浓度均值为 118.88 μg/m³, 最大值为 197 μg/m³, 超过标准限值的 1.62 倍(见图 2b). PM_{2.5} 质量浓度变化与空气质量指数(AQI) 的变化趋势一致, 其中 2014 年 11 月 10 日 PM_{2.5} 浓度达到峰值时的 AQI 为 265, 属于重度污染的雾霾天气, 且空气中首要污染物是 PM_{2.5}.

图 3 为采样期间城区典型污染时段 PM_{2.5} 中各重金属元素的浓度变化, 平均质量浓度值 Cu 为 19.81 ng/m³, Pb 为 189.79 ng/m³, Zn 为 301.15 ng/m³, Cr 为 23.49 ng/m³, Ni 为 49.27 ng/m³, Cd 为 3.37 ng/m³, 各重金属元素的质量浓度水平排序为 Zn > Pb > Ni > Cr > Cu > Cd. 其中 2014 年 11 月 10 日 PM_{2.5} 浓度最高时样品中的 Zn, Ni, Cu 含量也最高, 对其物质来源需进一步探究. 与近年北京冬季 PM_{2.5} 中重金属元素的浓度水平相比^[12], Cu, Pb, Zn, Cd 元素浓度低于北京地区, 而 Cr, Ni 元素浓度相比较较高.

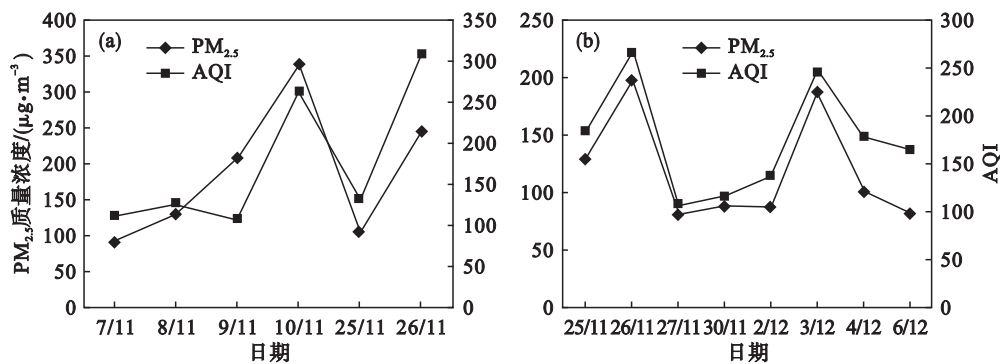


图2 $PM_{2.5}$ 日质量浓度和空气质量指数变化
Fig. 2 Variation of daily concentration of $PM_{2.5}$ and AQI
(a)—2014 年城区; (b)—2016 年开发区.

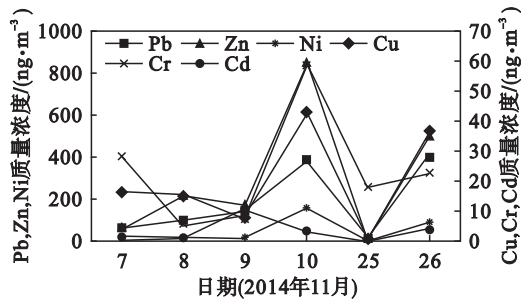


图3 秦皇岛 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的浓度水平
Fig. 3 Concentration of heavy metals in $PM_{2.5}$ at Qinhuangdao

表 1 为典型污染时段 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的地累积指数与污染分级,各重金属元素的污染程度排序为: $Cd > Pb > Zn > Ni > Cu > Cr$, 其中 Cd 为强 - 极强污染, Pb 达到中 - 强污染水平, Zn 属于中等污染, 这些元素污染可能与区域的金属加工贸易产业和近邻唐山的外源性输入有关; 而 Cu 和 Cr 为无污染, Ni 属于无 - 中等污染程度, 说明 Ni, Cu, Cr 主要来自于地壳源, 受区域背景值影响.

表 1 地累积指数和污染程度分级
Table 1 Index of geo-accumulation (I_{geo}) and its classification degree

重金属元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd
背景值/($ng \cdot mg^{-1}$)	21.8	21.5	78.4	68.3	30.8	0.094
I_{geo}	-0.72	2.56	1.36	-2.12	0.09	4.58
分级	0	3	2	0	0	5
污染程度	无	中 - 强	中	无	无 - 中	强 - 极强

可见, Cd, Pb 元素对环境生态存在潜在的生态风险, 对其环境效应和健康效应深入研究.

2.2 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 的污染特征

通过气相色谱质谱联用仪 (GCMS - QP2010) 对采集成成的 4 组样品分析优先控制的 16 种 PAHs, 定性地检测到奈 (Nap)、菲 (Phe)、荧蒹 (Fla)、芘 (Pyr)、苯并 [k] 荧蒹 (BkF) 等单体,

这些单体被检出的频率由高到低顺序是: $Phe > BkF > Fla > Nap > Pyr$. 其中 Phe 在 4 组样品中均被检出, BkF 有 3 组样品检出, Fla 有 2 组样品检出, Nap 和 Pyr 各有 1 组样品检出, 表 2 为秦皇岛、北京^[13]、天津^[14]、石家庄^[15] 地区环境空气中的 PAHs 单体.

表 2 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 单体
Table 2 Individual PAHs in $PM_{2.5}$

城市	Nap	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BbF	BkF	Bap	IcdP	DahA	BghiP
秦皇岛	○	-	★	-	▲	○	-	-	-	■	-	-	-	-
北京	▲	▲	★	▲	★	■	■	■	★	★	★	★	■	▲
天津	▲	★	★	★	-	■	▲	■	▲	▲	■	-	-	-
石家庄	▲	★	-	▲	○	★	★	■	★	★	■	○	▲	■

注: ★, ■, ▲, ○ 表示 PAHs 单体浓度由高到低, - 表示未检出.

从表 2 可见,秦皇岛检测出的 PAHs 单体种类明显少于周边其他地区,污染物来源于燃煤的主要有 Phe,Fla,其次是 Nap 和 Pyr,而其他地区燃煤产生的主要 PAHs 单体有苯并蒽(BaA)、屈(Chr)、苊(Pyr)、茚(Flu)、蒽(Ant),其次还有荧蒽(Fla)、Phe 和 Fla;秦皇岛来自于机动车尾气的检出物有 BkF,而北京、天津、石家庄等地除检出较高的 BkF 外,还有大量的苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(a)苊(BaP)、茚并(1,2,3-cd)苊(IcdP)、二苯并(a,h)蒽(DahA)、苯并(g,h,i)苊(BghiP)被测定出。

2.3 PM_{2.5}与气象因素的关系

统计分析 2014 年采样期间 PM_{2.5}日浓度与秦皇岛市气象台发布的气温、相对湿度、风向、风速的相关性发现,气温多在 -2 ~ 10 ℃左右,相对湿度较大,在 22% ~ 43 % 左右,PM_{2.5}浓度与气温负相关,但不显著;与相对湿度相关系数为 0.286,呈正相关,这与张淑平等^[16]研究北京、石家庄、太原等城市 PM_{2.5}浓度与相对湿度具有显著正相关性的结果一致(见表 3),说明相对湿度增加对 PM_{2.5}扩散是不利的。

表 3 PM_{2.5}日均浓度值与气象要素相关系数
Table 3 Correlation coefficient between concentration of PM_{2.5} and meteorological conditions

城市	相对湿度	气温	风速
秦皇岛	0.286 **	-0.054	-0.551 **
北京	0.522	0.073	-0.061
石家庄	0.527	0.376	0.330

注: ** 表示通过了 0.05 的显著性水平检验。

风向决定了污染物扩散的方向,PM_{2.5}浓度与风速具有较好的负相关性,相关系数为 -0.551。秦皇岛受海洋性气候影响较大,加之燕山山脉对气流的阻挡,PM_{2.5}典型污染日出现的风向为西风、西南 - 无持续风向占 57.1%,风力在微风、3 ~ 4 级 - 微风之间的雾霾天气占比 42.9%。当秦皇岛地区风向为东北风、东风、北风 - 无持续风向时,有利于大气污染物的扩散。秦皇岛处于唐山、北京、天津、石家庄等地的东北 - 东方向,与同期的上述地区相比,秦皇岛发生 PM_{2.5}污染的时段通常晚于这些地区十多小时,说明污染物与西南上风向唐山等地的外源性输入有一定关系,王燕丽等^[17]研究发现,秦皇岛 PM_{2.5}浓度受区外传输影响显著,达到 43.67%,受区内传输贡献为 21.42%,进一步印证了这一现象。风速决定了污染物扩散和稀释的快慢程度,风速小,水平输送能

力差,加上本地的大气污染物排放,在微风的气象条件下,污染物的扩散能力差,导致大气污染严重。因此,外源性污染物传输输入秦皇岛,与本地的污染源,在恰逢微风 - 静风的气象条件时,导致重污染天气出现。

3 结 论

1) 秦皇岛市典型污染时段城区 PM_{2.5}日平均质量浓度 186 μg/m³,开发区平均质量浓度为 118.88 μg/m³,PM_{2.5}质量浓度变化与 AQI 的变化趋势一致。

2) PM_{2.5}中各重金属元素的浓度水平排序为 Zn > Pb > Ni > Cr > Cu > Cd,其中 Cd 为强 - 极强污染,Pb 为中 - 强污染,Zn 属于中等污染,Ni,Cu,Cr 等其他元素基本无污染。PM_{2.5}中定性检测到 Phe,Fla,BkF,Nap,Pyr 等 PAHs 单体,应该进一步研究 PM_{2.5}中化学组分的空间变异性,以判断 PM_{2.5}的来源及其环境与健康效应。

3) 在研究的时段内,秦皇岛 PM_{2.5}日浓度与气温的相关性不显著,与相对湿度呈正相关,与风速相关系数为 -0.551,典型污染时段多出现在西风、西南风和静风天气。

参考文献:

[1] Zhou X H, Cao Z Y, Ma Y J, et al. Concentrations, correlations and chemical species of PM_{2.5}/PM₁₀ based on published data in China: potential implications for the revised particulate standard[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 518 - 526.

[2] Peng J, Chen S, Lu H L, et al. Spatiotemporal patterns of remotely sensed PM_{2.5} concentration in China from 1999 to 2011[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 109 - 121.

[3] Lang J L, Zhang Y Y, Zhou Y, et al. Trends of PM_{2.5} and chemical composition in Beijing, 2000 - 2015 [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 17(2): 412 - 425.

[4] Tan T Y, Hu M, Li M R, et al. New insight into PM_{2.5} pollution patterns in Beijing based on one-year measurement of chemical compositions [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 734 - 743.

[5] Ming L L, Jin L, Li J, et al. PM_{2.5} in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223: 200 - 212.

[6] Tao J, Zhang L M, Cao J J, et al. Source apportionment of PM_{2.5} at urban and suburban areas of the Pearl River Delta region, south China with emphasis on ship emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1559 - 1570.

[7] Wang S J, Zhou C S, Wang Z B, et al. The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM_{2.5}) distribution in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1800 - 1809.

[8] Zhang Y, Huang W, Cai T Q, et al. Concentrations and chemical compositions of fine particles (PM_{2.5}) during haze

and non-haze days in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2016,174:62 – 69.

[9] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, et al. The impact of the “ Air Pollution Prevention and Control Action Plan ” on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012 – 2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 197 – 209.

[10] Yin H, Xu L Y. Comparative study of PM₁₀/PM_{2.5}-bound PAHs in downtown Beijing, China: concentrations, sources, and health risks [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 177: 674 – 683.

[11] 周秀艳, 王恩德. 辽东湾潮间带底质重金属污染地累积指数评价 [J]. *安全与环境学报*, 2004, 4(2) : 22 – 24.
(Zhou Xiu-yan, Wang En-de. Method on how to apply index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution as result of inter-tidal sediments in Liaodong bay [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(2) : 22 – 24.)

[12] 王晴晴, 马永亮, 谭吉华, 等. 北京市冬季 PM_{2.5} 中水溶性重金属污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34 (9) : 2204 – 2210.
(Wang Qing-qing, Ma Yong-liang, Tan Ji-hua, et al. Characterization of water-soluble heavy metals of PM_{2.5} during winter in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(9) : 2204 – 2210.)

[13] 李晓, 钱枫, 何翔. 北京市西三环地区大气颗粒物中多环芳烃的分布特性 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(9) : 948 – 955.
(Li Yao, Qian Feng, He Xiang. Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulates

in the area of the 3rd West Ring road in Beijing City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26 (9) : 948 – 955.)

[14] 田芳, 祁士华, 杨丹, 等. 天津市塘沽区 PM_{2.5} 中 PAHs 的分布及来源识别 [J]. *安全与环境工程*, 2009, 16(5) : 53 – 56.
(Tian Fang, Qi Shi-hua, Yang Dan, et al. Distributions and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM_{2.5} in Tangu area, Tianjin City [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2009, 16(5) : 53 – 56.)

[15] 段二红, 张微微, 李璇, 等. 石家庄市采暖期大气细颗粒物中 PAHs 污染特征 [J]. *环境科学研究*, 2017, 30 (2) : 193 – 201.
(Duan Er-hong, Zhang Wei-wei, Li Xuan, et al. Characteristics of PAHs in fine atmospheric particulate matter in Shijiazhuang city in heating season [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(2) : 193 – 201.)

[16] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 冬季 PM_{2.5} 的气象影响因素解析 [J]. *生态学报*, 2016, 36(24) : 1 – 11.
(Zhang Shu-ping, Han Li-jian, Zhou Wei-qi, et al. Relationships between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological factors in winter at typical Chinese cities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24) : 1 – 11.)

[17] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域空气 PM_{2.5} 污染相互输送特征 [J]. *环境科学*, 2017, 38(12) : 4897 – 4904.
(Wang Yan-li, Xue Wen-bo, Lei Yu, et al. Regional transport matrix study of PM_{2.5} in Jing-Jin-Ji region [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12) : 4897 – 4904.)

(上接第 1661 页)

但过大的湍流将会把热量带离点火核心区域,使得粉尘云难以被点燃;点火能量与环境氧体积分数对着火延迟的影响较小。

2) 微米钛粉尘云的着火延迟时间不到 1 ms,即从点火源出现到粉尘爆炸发生过程十分短暂,除了在火焰传播初期利用惰化抑爆手段阻止爆炸或减小爆炸威力以外,还应避免事故隐患的出现,并重视泄爆、隔爆等减小事故后果的措施。

参考文献:

[1] 王梦蓉. AL Solutions 公司金属粉尘爆炸事故 [J]. *现代职业安全*, 2014(9) : 90 – 95.
(Wang Meng-rong. AL Solutions metal dust explosion accident [J]. *Modern Occupational Safety*, 2014 (9) : 90 – 95.)

[2] Li G, Yang H X, Yuan C M, et al. A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 39: 121 – 130.

[3] Mittal M. Explosion characteristics of micron- and nano-size magnesium powders [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 27(1) : 55 – 64.

[4] Wu H C, Kuo Y C, Wang Y h, et al. Study on safe air transporting velocity of nano grade aluminum, iron, and titanium [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23(2) : 308 – 311.

[5] Amyotte P R, Eckhoff R K. Dust explosion causation, prevention and mitigation: an overview [J]. *Journal of Chemical Health and Safety*, 2010, 17(1) : 15 – 28.

[6] Choi K, Sakasai H, Nishimura K. Experimental study on ignitability of pure aluminum powders due to electrostatic discharges and nitrogen’ s effect [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 35: 232 – 235.

[7] Miao N, Zhong S J, Yu Q B. Ignition characteristics of metal dusts generated during machining operations in the presence of calcium carbonate [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 174 – 179.

[8] Badiola C, Dreizin E L. Combustion of micron-sized particles of titanium and zirconium [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2) : 2237 – 2243.

[9] 任纯力. 粉尘云最小点火能实验研究与数值模拟 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 110 – 115.
(Ren Chun-li. Experimental investigation and numerical simulation of minimum ignition energy of dust cloud [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011: 110 – 115.)

[10] Gao W, Zhong S J, Miao N, et al. Effect of ignition on the explosion behavior of 1-Octadecanol/air mixtures [J]. *Powder Technology*, 2013, 241: 105 – 114.

[11] Eckhoff R K. Dust explosions in the process industries [M]. Boston: Gulf Professional Publishing, 2003.

[12] Krietsch A, Scheid M, Schmidt M, et al. Explosion behaviour of metallic nano powders [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 237 – 243.

[13] Shafirovich E, Teoh S K, Varma A. Combustion of levitated titanium particles in air [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 152: 262 – 271.

[14] Zhang Q, Zhang B. Effect of ignition delay on explosion parameters of corn dust/air in confined chamber [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 33: 23 – 28.