

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

电厂燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学组分特征

王毓秀¹, 彭林^{2*}, 王燕¹, 张腾¹, 刘海利¹, 牟玲¹

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 华北电力大学环境与化学工程系, 北京 102206)

摘要: 采集了阳泉市具有代表性的燃煤电厂除尘器下载灰, 测定了其 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素、离子及 EC(元素碳)、OC(有机碳)的含量水平, 对其化学组分特征进行了研究, 并运用分歧系数法对阳泉与其他地区的燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱之间的相似程度进行了比较。结果发现, 阳泉市电厂燃煤锅炉排放的细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)中主要组分为 SO_4^{2-} 、Ca、 NO_3^- 、OC、EC、Al、Si、Na、Fe、Mg 以及 Cl^- , 占 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量的 57.22%; Pb 在燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中相对富集系数最大, 达到 10.66~15.91, 呈显著富集; 无烟煤和劣质煤燃烧后烟尘的 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱之间的分歧系数为 0.072, 认为这两个成分谱必定相似, 与其他城市所建立的燃煤烟尘成分谱相比, 阳泉市燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分具有特异性, 尤其是 Ca 含量明显高于国内其他地区燃煤烟尘 Ca 的排放。

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; 燃煤烟尘; 成分谱; 富集因子; 分歧系数

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0060-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.01.009

Characteristics of Chemical Components in $\text{PM}_{2.5}$ from the Coal Dust of Power Plants

WANG Yu-xiu¹, PENG Lin^{2*}, WANG Yan¹, ZHANG Teng¹, LIU Hai-li¹, MU Ling¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Environment and Chemical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The ashes under dust catcher of typical power plants in Yangquan was collected and the contents of elements, irons, EC (elemental carbon) and OC (organic carbon) were measured in $\text{PM}_{2.5}$. The characteristics of its chemical composition was studied and the degree of similarity of coal dust's source profiles of $\text{PM}_{2.5}$ between Yangquan and other cities were compared using the coefficient of divergence method. The result indicated that the main chemical components of $\text{PM}_{2.5}$ from the coal dust were SO_4^{2-} , Ca, NO_3^- , OC, EC, Al, Si, Na, Fe, Mg and Cl^- , accounting for 57.22% of the total mass. The enrichment factor of Pb in $\text{PM}_{2.5}$ of coal dust was the largest with a significant enrichment condition, reaching 10.66-15.91. The coefficient of divergence of source profiles of $\text{PM}_{2.5}$ between blind coal and fault coal was 0.072, so it was believed that they must be similar. Compared with other cities, the chemical composition of coal dust in Yangquan had specificity, in particular, the content of Ca was obviously higher than those in other domestic cities.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; coal dust; source profiles; enrichment factor; coefficient of divergence

近年来,我国大中型城市雾霾天气逐年增多^[1-3],大气颗粒物已经成为影响我国城市空气质量的首要污染物^[4]。 $\text{PM}_{2.5}$ 是空气动力学当量直径小于等于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物^[5],对灰霾天气的形成和人体健康有很大的影响^[6-9]。探讨 $\text{PM}_{2.5}$ 中的元素组成及来源已成为目前研究的热点^[10-14]。其中,燃煤锅炉排放的颗粒物已成为城市大气颗粒物污染的重要来源,引起了研究者的广泛关注^[15-17],不同研究者所建立的不同城市的煤烟尘的成分谱之间存在较大的差异。

阳泉市地处京津冀三角的边缘, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度经常处于居高不下的状态,为有效地防治大气颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)污染,亟需对阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源进行解析。化学质量平衡(CMB)模型是目前应用最广泛的进行源解析研究的受体模型^[18],而这种模型需要以本地的源成分谱作为输入参数。阳泉作为中国著名的无烟煤产地,煤炭储量丰富,研究其燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$

中的化学组分特征对阳泉市大气颗粒物污染防治意义重大,目前关于阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 燃煤电厂化学组分特征的研究还未见报道。

本研究同时采集阳泉市 5 家燃煤电厂锅炉除尘器下载灰,通过再悬浮方式将颗粒物同时采集到聚丙烯滤膜和石英滤膜上,测定 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素、离子以及 EC、OC 的含量水平,建立阳泉市电厂燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱,以期对阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析研究工作提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 排放源选择及样品的采集

选择阳泉市电力行业 5 家电厂(表 1),分别用

收稿日期: 2015-06-17; 修订日期: 2015-08-21

基金项目: 山西省基础研究项目(2015021170); 国家自然科学基金项目(41373008)

作者简介: 王毓秀(1990~),女,硕士研究生,主要方向为大气污染防治, E-mail: wangyuxiu123@126.com

* 通讯联系人, E-mail: penglin6611@163.com

表 1 采样点位具体信息

Table 1 Information of sampling sites

企业名称	采样点位	煤炭使用种类	除尘方式
GYEDC	2 号机组	无烟煤	布袋除尘
LCDC	1 号机组	中煤、煤矸石、原煤	布袋除尘
HPDC	1 号机组	无烟煤	电除尘 + 布袋除尘
YGDC	1 号机组	无烟煤	布袋除尘
ZFGSFC	3 号机组	煤矸石、中煤、原煤	旋风除尘 + 电除尘

滤筒采集其除尘器下的灰各约 1 kg, 装入聚四氟乙烯塑料袋中运回实验室。

1.2 样品的前处理

样品经 150 目筛筛分后, 筛下物避光低温 (4℃) 保存。将样品置于再悬浮装置后, 使用 TH-150C 型中流量采样器同时采用聚丙烯和石英滤膜进行平行采集 PM_{2.5} 样品。

1.3 样品的处理和分析

将采样后的聚丙烯滤膜剪碎放入锥形瓶中, 加适量去离子水润湿, 再加入分析纯的 HNO₃ 15 mL, HClO₄ 5 mL; 将锥形瓶放在电炉上加热, 温度控制在 100℃ 以下; 试样与酸不断反应, 当酸剩余约 3 mL 时, 将锥形瓶取下冷却, 加少量去离子水, 过滤残渣, 定容 15 mL, 待测。过滤后的残渣放回原锥形瓶中, 用 2% KOH 溶液 30 mL 煮沸 0.5 h, 再过滤定容于 50 mL 容量瓶, 检测 Si 容量。对预处理好的聚丙烯滤膜样品使用 ICP-9000 (N + M) 型等离子体发射光谱仪分析测试 Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Cd、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Co 这 18 种无机元素。

用 1/4 石英膜的样品, 将样品浸泡在 10 mL 去离子水中, 摇匀, 置于超声波浴下提取 10 min, 然后静置, 取上层清液用于离子色谱分析。对处理好的 1/4 的石英膜样品使用青岛盛瀚 CIC-200 型离子色谱仪测定 NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺、Na⁺、Mg²⁺、NH₄⁺ 这 7 种离子; 另取 1/4 的石英膜样品使用德国生产的 Elementar Analysensysteme GmbH vario EL cube, 分析元素碳 EC、有机碳 OC。

1.4 质量保证和质量控制 (QA/QC)

采样前石英膜经马弗炉高温灼烧以除去吸附的有机物; 采样完成后的石英膜称重后置于锡箔纸内于 4℃ 冷藏避光保存; 聚丙烯膜称重后, 放入干燥器中于 22℃ 恒温条件保存。为保证前处理及分析方法的可靠性, 选择 GSD6 沉积物标准样进行相同的处理和分析, 同时取空白滤膜按照相同步骤进行空白实验, 结果表明目标物回收率大于 85%, 平行样测

定相对标准差 (RSD) 均小于 7%, 且空白膜中元素及离子含量均低于检出限, 不会对结果造成影响。

1.5 富集因子分析法

运用地球化学富集因子分析法^[19] 分析不同煤种的下载灰中微量元素的富集因子, 从而进一步对比与原煤中各元素含量的差异。计算公式如下:

$$K = \frac{(C_{ia}/C_{Fea})}{(C_{ic}/C_{Fec})}$$

式中, C_{ia} 、 C_{Fea} 分别为劣质煤和无烟煤燃烧排放的 PM_{2.5} 中或无烟煤燃烧排放的 PM_{2.5} 中元素 i 及 Fe 的含量, %; C_{ic} 、 C_{Fec} 分别为原煤中 i 及 Fe 的含量, %。

根据富集因子的大小, 可以将元素的富集程度分为 5 个级别^[20], 见表 2。

表 2 富集因子分级表

Table 2 Grade table of enrichment factor

K 值	富集程度	污染级别
<1 或 1~2	无富集或轻微富集	1
2~5	中度富集	2
5~20	显著富集	3
20~40	强烈富集	4
>40	极强富集	5

1.6 分歧系数分析法

运用分歧系数法^[21] 可以分析同一粒径不同区域的煤烟尘成分谱之间的相似程度, 其计算公式如下:

$$C_{jk} = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2}$$

式中, C_{jk} 为分歧系数, j 、 k 为参与计算的成分谱编号, P 为参与计算的组分的个数, x_{ij} 指 j 成分谱中 i 组分的含量。

C 值越接近于 0, 说明 2 个成分谱非常相似, C 值越接近于 1, 说明 2 个成分谱组分相差越大。姬亚芹将若干城市的成分谱按照不同的分析系数代入 CMB 受体模型进行解析, 结果表明: 在其他源和受体成分谱不变的条件下, 分歧系数在 0.2 以下的 2 个成分谱的源解析结果相同, 本研究中以 0~0.2 为

2 个成分谱必定相似,0.2 ~ 0.5 可能相似,0.5 ~ 1 必定不相似为基础来分析.

2 结果与讨论

2.1 分析结果

对 5 家电厂的除尘器下载灰中的成分进行分析测试,结果见图 1.

2.2 燃煤烟尘 PM_{2.5}源成分谱的确定

对分析结果进行归一化处理,取其均值得到阳泉市电厂燃煤烟尘 PM_{2.5}成分谱,见表 3. 阳泉市电力行业燃煤锅炉排放的颗粒物(PM_{2.5})中主要组分为 SO₄²⁻、Ca、NO₃⁻、OC、EC、Al、Si、Na、Mg、Fe 以及 Cl⁻,其他各种微量、痕量重金属元素所占的比例很低.

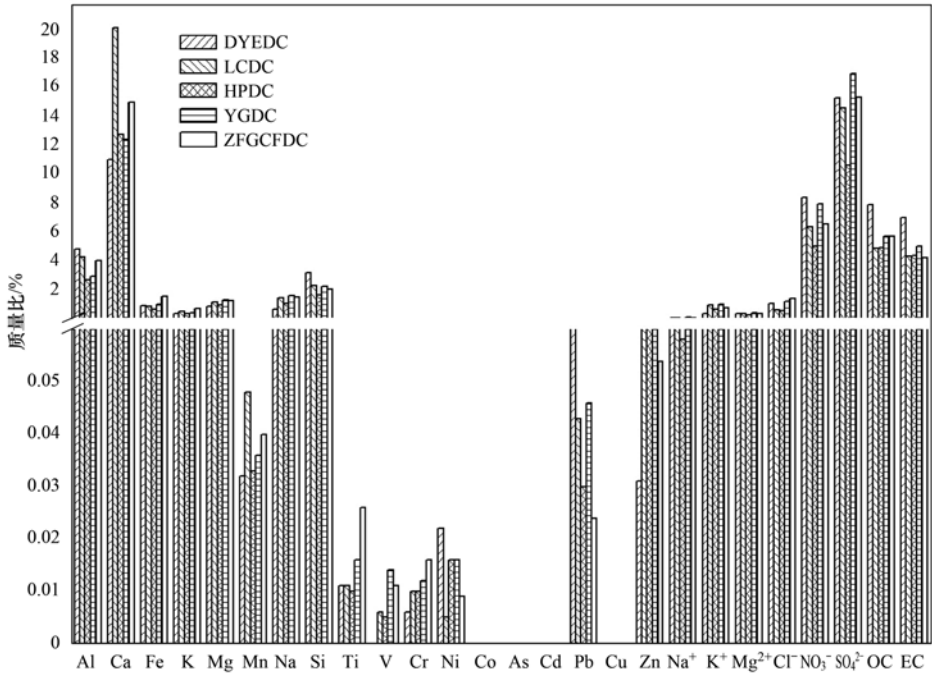


图 1 阳泉市电厂燃煤烟尘中各化学成分的质量比

Fig. 1 Mass fractions of chemical components in coal dust of power plants in Yangquan

表 3 阳泉市电厂燃煤烟尘 PM_{2.5}成分谱/%

Table 3 PM_{2.5} source profiles of coal dust of power plants in Yangquan/%

电力行业 PM _{2.5} 源谱	SO ₄ ²⁻	Ca	NO ₃ ⁻	OC	EC	Al	Si	Na	Mg	Fe	Cl ⁻
大于 1% 的化学组分	14.54 ± 1.57	14.25 ± 2.63	6.89 ± 1.05	5.86 ± 0.83	5.03 ± 0.82	3.80 ± 0.75	2.33 ± 0.36	1.31 ± 0.31	1.15 ± 0.16	1.04 ± 0.23	1.02 ± 0.30

根据 5 家电厂煤炭使用种类的不同,将其分为 2 类,一类是以无烟煤为燃料的电厂,一类是以煤矸石、中煤等劣质煤为燃料的电厂. 通过对煤烟尘 PM_{2.5} 化学成分的测定结果进行分类处理,得到两类煤质燃烧后的烟尘成分谱,见图 2.

由图 2 可知,Ca 是劣质煤电厂除尘器下载灰中最丰富的组分,含量为 (17.53 ± 2.55)%,其次为 SO₄²⁻,含量为 (14.95 ± 0.39)% ; SO₄²⁻ 是无烟煤电厂中含量最丰富的组分,含量为 (14.27 ± 2.43)%,其次为 Ca,含量为 (12.06 ± 0.69)% ; TC 在两种烟尘中的含量都居于第三位,在劣质煤和无烟煤中含量分别为 (9.66 ± 0.35)%、(11.71 ± 2.18)%. 可以发现劣质煤燃烧排放的 PM_{2.5} 中 Ca 的含量约是无

烟煤中的 1.5 倍,这与劣质煤中 Ca 的含量较高有很大关系;此外,劣质煤燃烧排放的 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、Al、Na、Fe、Mg、Cl⁻ 的含量略高于无烟煤,TC、NO₃⁻、OC、Si 的含量略低于无烟煤. 造成这种差异的原因有多种,除与锅炉的燃烧方式、燃料的性质等因素^[22]有关外,还与除尘方式有关.

2.3 不同煤种的除尘器下载灰 PM_{2.5}中元素的富集程度

由图 3 可知,Pb 在无烟煤与劣质煤燃烧排放的 PM_{2.5} 中的富集系数最大,且在无烟煤中明显高于劣质煤,分别为 15.91、10.66,均为显著富集;Ni 在无烟煤 PM_{2.5} 中富集因子为 6.48,显著富集,在劣质煤中为 4.25,中度富集;Zn 在无烟煤中富集因子为

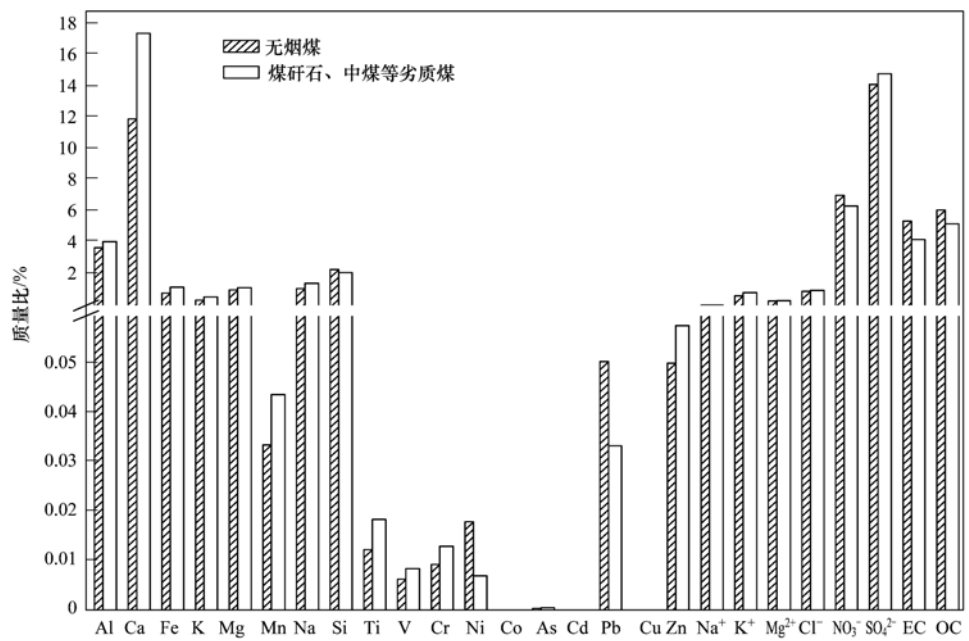


图2 无烟煤与劣质煤燃烧后烟尘 PM_{2.5} 中化学组分的比较

Fig. 2 Comparison of chemical composition between PM_{2.5} in dusts from combustion of blind coal and fault coal

4.61, 中度富集, 在劣质煤中为 5.31, 显著富集; Cr 在无烟煤与劣质煤中的富集因子分别为 2.29、3.25, 均为中度富集; V 在无烟煤与劣质煤中的富集因子分别为 1.17、1.57, 均为轻微富集; 其他微量元素富集系数均小于 1. 分析造成富集系数差

异的原因除与煤质的不同有关外, 其燃烧方式、除尘方式及锅炉的负荷等因素也会对元素的富集系数产生影响.

2.4 阳泉市燃煤烟尘 PM_{2.5} 化学成分谱与国内外成分谱比较

表 4 比较了不同地区的燃煤烟尘的 PM_{2.5} 化学成分谱, 可以发现不同地区不同研究者建立的燃煤烟尘 PM_{2.5} 成分谱中主要化学组分所占质量分数存在着较大的差异, 这与其燃烧方式、除尘方法以及建立源谱的方式、采样方法、分析方法均有关. 其中由于煤质的不同造成煤中挥发分含量的不同, 燃烧方式的不同, 会影响煤炭燃烧充分的程度, 进而导致飞灰中含碳量的差异, 以及建立源谱过程中计算方法、统计方法的不同均会影响成分谱的建立.

阳泉市电厂燃煤烟尘 PM_{2.5} 中, Ca 含量明显高于国内其他地区, 与美国 Texas、Mexico 的数据相

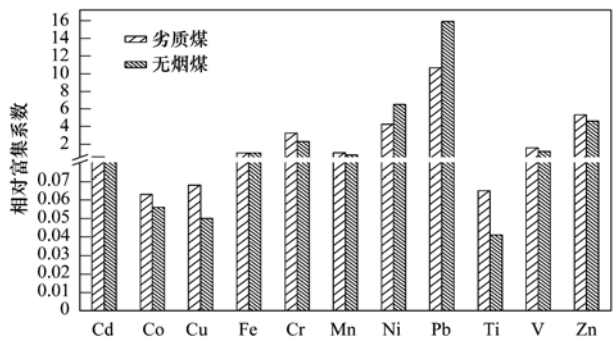


图3 微量元素的相对富集系数

Fig. 3 Relative enrichment factor of trace elements

表 4 不同地区燃煤烟尘 PM_{2.5} 源谱中主要化学组分比较 /%

Table 4 Comparison of major chemical components in coal dust PM_{2.5} source profile from different cities/%

城市	OC	EC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg	Al	Ca	Fe
阳泉	5.86	5.03	1.02	14.54	1.15	3.80	14.25	1.04
石家庄 ^[16]	0.25	1.82	0.17	0.75	—	15.14	1.67	2.39
上海 ^[17]	1.88	0.33	0.68	23.25	0.72	4.16	5.51	1.96
北京 ^[23]	2.47	2.66	14.05	17.09	—	—	—	—
辽宁抚顺 ^[24]	1.30	13.13	—	—	0.47	9.57	1.05	6.79
浙江宁波 ^[25]	9.76	8.24	0.12	0.70	0.37	7.24	6.88	3.41
美国 Texas、Mexico ^[26]	27.18	1.38	0.89	28.74	0.84	5.30	16.55	3.61
美国 Colorado ^[27]	69.49	26.08	0.19	3.32	0.04	0.06	0.21	0.07

近,是不同于国内其他地区燃煤源谱最突出的特点;OC 含量略高于国内其他地区,可能是本地区燃煤工况不佳、除尘设施不完善导致; SO_4^{2-} 含量与北京接近,低于上海的水平,但远高于国内其他地区;Al、Fe 含量均略低于国内其他地区;Mg 含量略高于其他地区; Cl^- 含量略高于其他地区,但远远低于北京。

表 5 阳泉市电厂燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱与其他城市分歧系数

Table 5 Coefficient of divergence of $\text{PM}_{2.5}$ source profiles between Yangquan and other cities

石家庄	上海	北京	辽宁抚顺	浙江宁波	美国 Texas、Mexico	美国 Colorado
0.568	0.303	0.356	0.433	0.382	0.276	0.589

阳泉与石家庄、美国 Colorado 之间的相似系数分别为 0.568、0.589,表明阳泉市电力行业燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱与石家庄、美国 Colorado 不存在相似性;与上海、北京、辽宁抚顺、浙江宁波、美国 Texas、Mexico 之间的相似系数在 0.276~0.433 之间,表明阳泉市燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱与这些城市存在可能的相似性,表明不同地区燃煤烟尘成分谱存在差异。因此,在进行 $\text{PM}_{2.5}$ 的源解析工作时,不同的地区应建立各地本土的源成分谱,避免盲目借鉴外来成分谱,以提高源解析工作的准确性与可靠性。

3 结论

(1) 阳泉市电厂燃煤锅炉排放的颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 中主要组分为 SO_4^{2-} 、Ca、TC、 NO_3^- 、OC、Al、Si、Na、Fe、Mg 以及 Cl^- , 其他各种微量、痕量重金属元素所占的比例很低。

(2) Pb 在煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中相对富集系数最大,达到 10.66~15.91,呈显著富集,煤烟尘中富集系数大于 1 的微量元素还有 Zn、Ni、Cr、V。

(3) 无烟煤和劣质煤燃烧后煤烟尘的 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱之间的分歧系数为 0.072,可以认为这两个成分谱必定相似;不同地区不同研究者建立的煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 源成分谱中主要化学组分所占比例存在着较大的差异。

(4) 在进行 $\text{PM}_{2.5}$ 的源解析工作时,不同的地区应建立各地本土的源成分谱,避免盲目借鉴外来成分谱,以提高源解析工作的准确性与可靠性。

参考文献:

- [1] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 584-588.
- [2] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. Atmospheric Research, 2009, **94**(2): 238-245.
- [3] 张逢生, 王雁, 闫世明. 1975-2010 年阳泉市霾气候特征及

运用分歧系数法计算本研究得到的两种煤种燃烧后烟尘的成分谱之间的分歧系数为 0.072,因此可以认为这两个成分谱必定相似。

根据表 4 各个城市的源成分谱,计算得到阳泉市燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱与其他城市的分歧系数,见表 5。

- 其气象影响因素特征分析[J]. 山西科技, 2014, **29**(1): 50-52.
- [4] 杨仪方, 钱枫, 谢婷, 等. 北京市春季大气颗粒物污染特性研究[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(7): 44-47, 51.
- [5] 王平利, 戴春雷, 张成江. 城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(1): 83-87.
- [6] 杨卫芬, 银燕, 魏玉香, 等. 霾天气下南京 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(1): 12-17.
- [7] 高健, 张岳狮, 王淑兰, 等. 北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(11): 1201-1207.
- [8] 杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 北京 2013 年 1 月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 282-288.
- [9] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in haze-fog episodes in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [10] 刘凤娟, 彭林, 牟玲, 等. 忻州市市区大气颗粒物中的元素组成特征[J]. 环境化学, 2014, **33**(2): 313-320.
- [11] You W, Zang Z L, Pan X B, *et al.* Estimating $\text{PM}_{2.5}$ in Xi'an, China using aerosol optical depth: A comparison between the MODIS and MISR retrieval models [J]. Science of the Total Environment, 2015, **505**: 1156-1165.
- [12] Marcazzan G M, Ceriani M, Valli G, *et al.* Source apportionment of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in Milan (Italy) using receptor modelling [J]. Science of the Total Environment, 2003, **317**(1-3): 137-147.
- [13] Ho K F, Cao J J, Lee S C, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in urban area of Hong Kong [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **138**(1): 73-85.
- [14] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, *et al.* Seasonal trends in $\text{PM}_{2.5}$ source contributions in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(22): 3967-3976.
- [15] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 燃煤锅炉排放颗粒物成分谱特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(11): 1928-1933.
- [16] 齐堃, 戴春岭, 冯媛, 等. 石家庄市 $\text{PM}_{2.5}$ 工业源成分谱的建立及分析[J]. 河北工业科技, 2015, **32**(1): 78-84.

- [17] 王玮, 汤大钢, 刘红杰, 等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, **13**(1): 1-5.
- [18] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 上海 $\text{PM}_{2.5}$ 工业源谱的建立[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(8): 1354-1359.
- [19] 王起超, 邵庆春, 周朝华. 不同粒度飞灰中 16 种微量元素的含量分布[J]. 环境污染与防治, 1998, **20**(5): 37-41.
- [20] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 用富集因子法评价我国城市土壤风沙尘元素的污染[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2006, **39**(2): 94-99.
- [21] 姬亚芹. 城市空气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究[D]. 天津: 南开大学, 2006.
- [22] 周新刚, 刘志超, 路春美, 等. 燃煤电厂锅炉飞灰含碳量影响因素分析及对策[J]. 节能, 2005, **278**(9): 45-47.
- [23] Song Y, Tang X Y, Xie S D, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing in 2004[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **146**(1-2): 124-130.
- [24] 金永民. 抚顺市大气颗粒物主要排放源的成分谱研究[J]. 中国环境监测, 2007, **23**(2): 58-61.
- [25] 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 宁波市环境空气中 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(5): 549-555.
- [26] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al.* Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study[J]. Chemosphere, 2004, **54**(2): 185-208.
- [27] Watson J G, Chow J C, Houck J E. $\text{PM}_{2.5}$ chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995[J]. Chemosphere, 2001, **43**(8): 1141-1151.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行