

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O₃ 生成潜势 曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)

利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)

沈阳市降水化学成分及来源分析 张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)

秦皇岛大气污染物浓度变化特征 刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)

禽类肉鸡生长过程 NH₃、N₂O、CH₄ 和 CO₂ 的排放 周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)

碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能 王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)

生物滴滤塔净化多组分废气的研究 张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)

在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气 金圣, 黄立维, 李国平 (2121)

模拟大气 CO₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响 赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)

一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法 华祖林, 汪靛 (2134)

HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究 李燕, 李兆富, 席庆 (2139)

基于非点源污染的水质监测方案研究 吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)

不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)

春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征 李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)

三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布 张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)

湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性 冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)

刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响 侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)

反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换 李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)

三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)

UV 和 H₂O₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究 张一清, 周玲玲, 张吉 (2205)

臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素 于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)

硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)

炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究 王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆隽鹤 (2225)

金属离子对 δ-MnO₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究 李非里, 牟华倩 (2232)

核壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除 刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)

有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究 闫梦玥, 庞志华, 李小明, 赵建宇, 罗隽 (2249)

纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征 于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 谷逢宇, 张靖天 (2256)

改性水凝胶的制备及其对 Pb²⁺、Cd²⁺ 吸附性能研究 吴宁梅, 李正魁 (2263)

直接大红 4BE 的磷钨酸均相催化还原脱色 魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)

基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)

Fenton 法处理竹制品废水生化出水的研究 郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)

二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响 李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)

进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)

接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)

聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究 杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)

体积分数传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析 李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)

我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价 汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)

麦穗鱼物种敏感性评价 王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)

不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究 雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)

桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究 钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)

直流电场处理后降线藻趋光性对 Cl⁻ 和 Hg²⁺ 的响应 王飞翔, 袁玲, 黄建国 (2350)

UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响 宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)

7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聃聃 (2361)

溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)

不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)

典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 陈建刚, 曹雪 (2383)

三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙昊 (2390)

北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征 陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永锋, 田青 (2399)

季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 李晓燕 (2407)

东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)

模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响 段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)

甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究 孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)

胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤铜含量及土壤酶活性影响 杨榕, 李博文, 刘微 (2436)

长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)

有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究 张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)

北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析 王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)

氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟 官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)

焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究 朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛义典 (2473)

富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能 李坤权, 李焯, 郑正, 张雨轩 (2479)

生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)

基于物质流分析的钾素流动与循环研究 白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)

《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)

季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响

李晓燕

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 为揭示季节变化对城市不同功能区地表灰尘重金属含量的影响, 分别于2010年7月和2011年2月在贵阳市城区采集对应灰尘样品, 从整个城区和不同功能区两个尺度分析季节变化对地表灰尘重金属分布的影响. 结果表明, 季节变化对贵阳市地表灰尘重金属含量影响最大的元素是Pb和As; 冬季灰尘中的As和Pb含量显著高于夏季, 元素更易在细粒级灰尘中富集; 受季节变化影响较大的功能区是城市广场和校园, 其次是住宅区. 夏-冬两季地表灰尘重金属粒级效应差异最大的元素是As和Pb, 差异较大的功能区是城市广场、校园, 最小的是商贸区. 铅同位素比值分析表明贵阳市地表灰尘Pb与柴油尾气尘、油漆碎片和土壤有关. 夏季降雨、冬季燃煤和夏冬两季温差等因素可能对贵阳市地表灰尘As和Pb含量季节变化有一定影响.

关键词: 重金属; 灰尘; 功能区; 季节变化; 贵阳市

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2407-09

Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City

LI Xiao-yan

(School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: To study the influence of season change on the level of heavy metal in outdoor settled dusts at both city and functional area scale, dust samples were collected in July 2010 and February 2011 from different functional areas in the Guiyang City. The results showed that among all heavy metal elements involved, Pb and As were most significantly affected by season change, with a significantly higher amount in winter than in summer, mostly accumulated in smaller particles of dust. Functional areas where heavy metal concentrations were most significantly affected by seasons were city square and school area, and followed by residential area. Elements that showed the greatest difference in distribution pattern in different fractions between summer and winter were As and Pb, while the functional areas that were most severely influenced were city square and school area, followed by residential area. The isotopic ratio analysis showed that the Pb in the outdoor settled dust in Guiyang was partly contributed by Diesel exhaust dust, paint chip and soil. Summer precipitation, coal-burning in winter and temperature difference between summer and winter may contribute to the seasonal change of the level of Pb and As in the dusts.

Key words: heavy metal; dust; functional area; season change; Guiyang City

近年来,城市地表灰尘重金属研究成为环境领域关注的热点. 许多学者对城市地表灰尘重金属水平及累积^[1, 2]、不同功能区含量及空间分布^[3, 4]、赋存形态^[5, 6]、粒级效应^[7, 8]和健康风险^[9, 10]等方面进行了研究, 结果表明城市地表灰尘中重金属含量均高于土壤背景值, 工业区、商业区等城市功能区重金属累积或污染严重^[11], 重金属易于在细粒级灰尘中富集, 对人群存在一定的健康风险^[12]. 城市地表灰尘重金属的研究结果为缓解和治理重金属污染, 改善城市环境提供了科学参考. 但目前大多数研究都是基于在某一时段采样分析获得数据的基础上对城市地表灰尘重金属水平及累积状况进行描述, 而对不同时段(季节)城市地表灰尘重金属分布特征的研究较少. 与城市土壤的成分相对稳定的性质不同, 城市地表灰尘来源复杂, 迁移性强, 它的半

衰期约为190~370 d^[13], 反映的只是一段时间内的环境指示; 另外诸多研究显示, 城市不同功能区地表灰尘重金属含量存在较大差异^[11, 14]. 那么, 不同时段(季节)城市地表灰尘重金属分布是否存在显著差异? 不同季节变化对不同功能区地表灰尘重金属含量的影响是否相同? 如有差异, 哪些功能区地表灰尘重金属受季节变化影响大? 哪几种元素更易受季节变化的影响? 这些问题都是地表灰尘重金属研究中值得关注和亟待解决的问题. 因此, 按不同季节对地表灰尘进行采样分析, 研究不同功能区地表灰尘重金属的季节变化特征, 更能揭示城市地表

收稿日期: 2012-08-30; 修订日期: 2012-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161079); 贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2011]2092)

作者简介: 李晓燕(1966~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向区域环境质量研究, E-mail: lxyan421@163.com

灰尘重金属的实际分布特征,从而为缓解和治理重金属累积或污染提供更细致的科学依据。

贵阳市是我国西南地区最发达的城市之一。中心城区面积 220 km²,具有人口密度高,交通拥堵等多数发达城市具有的通病。同时,贵阳城区三面环山,发展空间小,城区地形复杂,与其它大城市相比又显得狭小和拥挤,而且贵阳市冬季阴湿寒冷,不少家庭和商户采用回风炉燃煤取暖,季节活动差异明显。本研究分别在 7 月和 2 月采集对应灰尘样品,从整个城区和不同功能区两个尺度分析季节变化对地表灰尘重金属含量的影响,揭示城市地表灰尘重金属含量的季节分异特征和不同功能区地表灰尘重金属含量对季节变化的响应,探讨受季节变化影响最大的区域和元素,以期为缓解和治理灰尘重金属累积或污染提供科学依据,也为其它城市开展相关研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

贵阳市城区包括云岩、南明和小河区这 3 个行政区,老城区主要集中在云岩区南部和南明区北部的区域。本研究以贵阳市老城区为主要研究范围,按照中心密集外围稀疏的原则在贵阳市三城区进行布点,样点涵盖工业区(industrial area, IA)、住宅区(residential area, RA)、交通区(traffic area, TA)、城市广场(city square, CS)、校园(school, SA)、商贸区(commercial area, CA)和垃圾站(garbage stations, GS) 7 种功能区域(图 1)。分别在夏季(7 月)和冬季(2 月),在至少 3~4 d 无降雨后,无风的情况下采集灰尘,在每个样点采样区域内均匀布设分点,用毛刷和塑料撮箕扫取 4~5 个分样混合成 1 个综合样。交通区采样为贵阳市主干道十字路口的 4 个路口采集分样混合而成,商贸和垃圾站等没有固定区域的路边采样点,分别在街道两旁扫取 4~5 个分样组成 1 个分析样品,共获得 66 对灰尘样品。在 66 对样品中,根据不同的地理位置,选取 14 对(每个功能区 2 个)样品进行粒径分析。

根据前人研究结果:空气动力学直径 $\leq 100 \mu\text{m}$

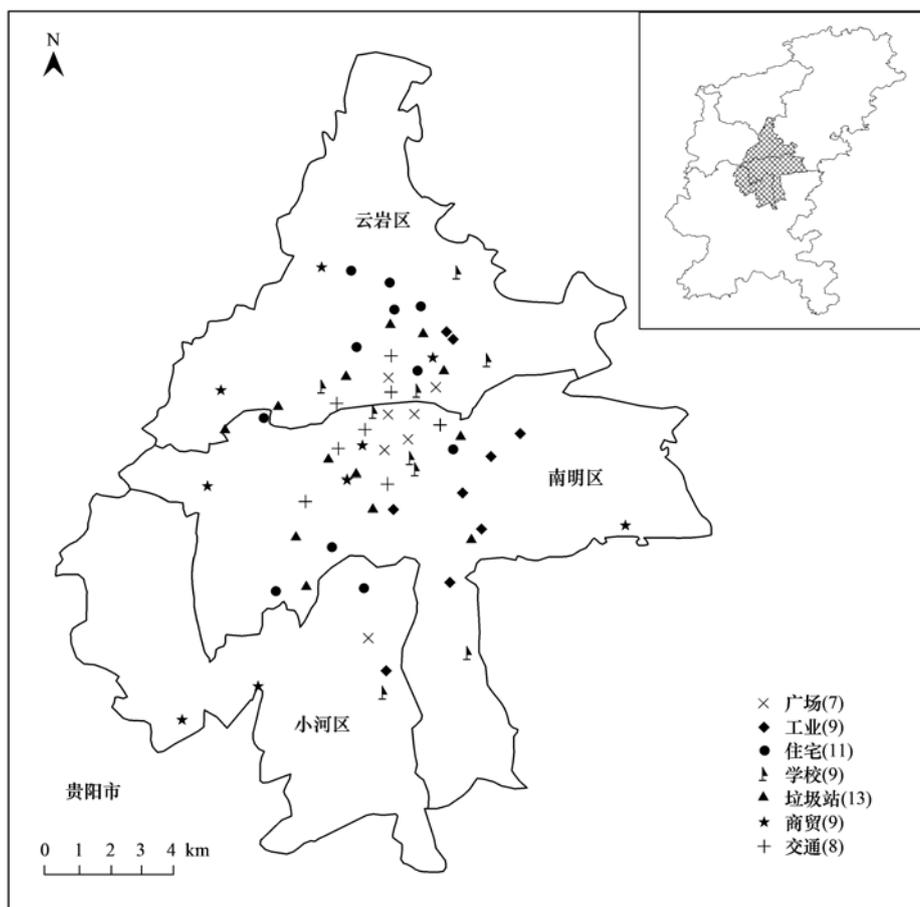


图 1 贵阳市城区地表灰尘采样点示意

Fig. 1 Dust sample sites in Guiyang City

或粒径更大的颗粒物都可能被人体吸入而损害健康^[15],杜佩轩等^[16]研究表明,来源于不同功能区的城市灰尘颗粒物粒径一般小于 50 目,故将作粒径分析的样品先过 425 μm 筛(40 目),然后用不锈钢筛逐级筛分为粗粒级(250 ~ 425 μm),中等粒级(250 ~ 105 μm)和细粒级($\leq 105 \mu\text{m}$)3 个粒级样品,备用,其余所有样品常温干燥后全部过 105 μm 筛,备用。

1.2 化学分析与数据处理

灰尘 As 采用 1:1 王水消解,硫脲等还原剂还原,氢化物发生-原子荧光光谱法测定(AF-640 原子荧光仪);灰尘 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 采用 HNO_3 - HClO_4 混溶,0.5% HNO_3 定容,ICP-MS 测定(Thermo XSERIES 2)。分析过程中分别按原始样品 10% 的比例插入国家土壤标准参比物质(GSS-4)和重复样进行质量控制。

Pb 同位素比值分析由核工业北京地质研究院分析测试研究中心按照 GB/T 17627-1999《岩石中铅锶钨同位素测定方法》测定,给出结果为²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值,所有误差均小于 0.008,符合 Pb 同位素测试精度要求。本研究根据以上 3 项比值换算成²⁰⁸Pb/²⁰⁷Pb 和²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 进行分析。

采用 SPSS 软件对数据进行正态检验和差异性分析。对不服从正态分布的数据进行数据转换,直至数据服从正态分布。在保证数据服从正态分布的前提下,对数据进行差异显著性检验。差异显著性检验 $P < 0.05$,表示两样本数据具有显著性差异。

灰尘重金属冬/夏比按照下式计算:

$$R_i = \frac{C_{ix}}{C_{id}}$$

式中, R_i 为灰尘重金属冬/夏比值, C_{ix} 为灰尘重金属冬季含量, C_{id} 为灰尘重金属夏季含量。 i 表示 As、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn。

2 结果与分析

2.1 不同季节地表灰尘重金属水平

贵阳市地表灰尘夏季 Cd 符合正态分布,其它元素符合对数正态分布;冬季灰尘 As、Cd、Pb 符合正态分布,Cu、Zn 离散度较大,符合对数正态分布,Ni 接近对数正态分布。为使均值更符合样本的平均水平,本研究用更接近样本中值的几何均值表征样本平均水平。表 1 显示冬季灰尘 As、Cu、Pb 和 Zn 的最小值和几何均值均高于夏季,Cd、Ni 的冬、夏季水平基本相当。与土壤背景值^[17]相比,冬季灰尘重金属含量超过 1 倍、2 倍土壤背景值的样本比率几乎全部高于或等于夏季,仅灰尘 Ni 含量超过 2 倍背景值的样本百分数冬季略低于夏季。从 66 个样点的冬/夏比值的几何均值来看,灰尘 Cd、Ni 和 Zn 季节变化不大,As、Cu 和 Pb 冬/夏比值均大于 1,说明这 3 种元素冬季灰尘含量高于夏季,而从样本数来看,Cu、Ni 和 Zn 冬/夏比大于 1 的样本数接近 50%,说明灰尘 Cu、Ni 和 Zn 含量在样本数上夏冬两季差异均衡,而 As、Cd 和 Pb 灰尘含量夏冬两季差异明显。进一步差异分析显示,冬季灰尘中的 As ($P = 0.003$) 和 Pb ($P = 0.001$) 含量显著高于夏季。

表 1 夏-冬两季地表灰尘重金属含量统计

Table 1 Level of heavy metals in dust in summer and winter

指标	项目	重金属/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$					
		As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
范围	夏季	7.80 ~ 79.0	0.100 ~ 3.57	29.9 ~ 1 237	23.2 ~ 2 339	26.8 ~ 541	157 ~ 13 685
	冬季	10.2 ~ 51.9	0.557 ~ 3.15	41.2 ~ 1 233	17.8 ~ 3 798	35.5 ~ 739	168 ~ 4 564
几何均值	夏季	17.4	1.28	133	50.0	93.2	435
	冬季	21.4	1.23	164	50.4	135	419
超过 1B/2B 样本/%	夏季	45.4/6.1	97/74.2	100/91.0	77.3/18.2	98.5/69.7	100/97.0
	冬季	75.8/12.1	100/83.3	100/95.5	81.8/15.2	100/89.4	100/98.5
冬/夏比(R)	几何均值	1.23	0.960	1.23	1.01	1.45	0.96
	大于 1 的样本/%	72.7	68.2	48.5	45.0	75.8	45.0

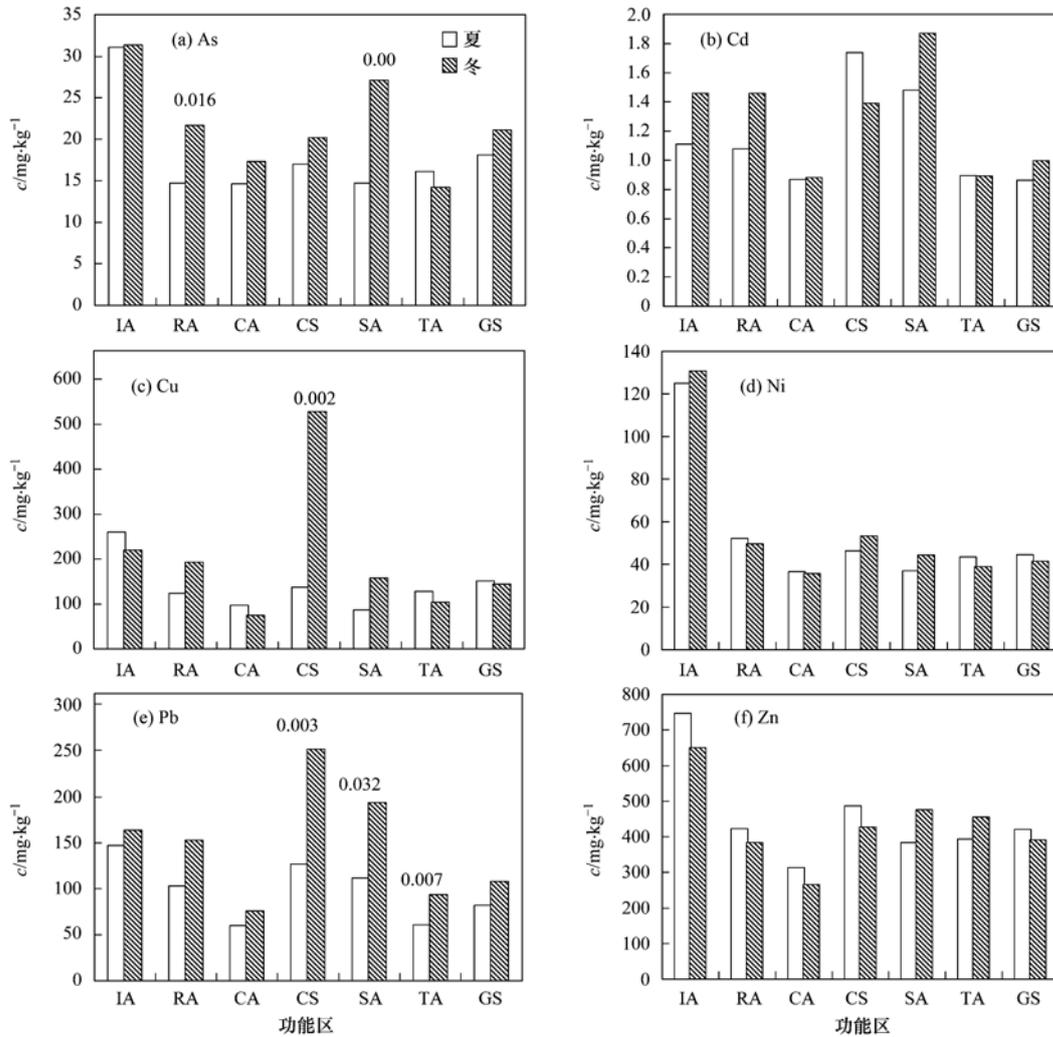
2.2 不同功能区地表灰尘重金属季节变化差异

图 2 显示不同功能区夏冬两季地表灰尘重金属几何均值分布。对于不同元素来说,夏冬两季地表灰尘 As 含量差异较大的功能区是住宅区(RA)和校园(SA),而且冬季灰尘 As 显著高于夏季,工业区

(IA)地表灰尘 As 的季节变化最小;城市广场(CS)夏季 Cd 高于冬季,商贸区(CA)和交通区(TA)季节差异不明显,工业区、住宅区、学校和垃圾站(GS)均显示冬季 Cd 高于夏季,但差异不显著;居民区、城市广场和学校地表灰尘 Cu 含量冬季均高于夏

季,但仅城市广场夏冬两季灰尘 Cu 含量存在显著性差异;所有功能区地表灰尘 Ni 和 Zn 的季节差异不明显;而所有功能区地表灰尘 Pb 均显示冬季高于夏季,且城市广场、校园和交通区夏冬两季灰尘 Pb 均存在显著性差异. 因此,季节变化对地表灰尘重金属含量影响最大的元素是 Pb,其次是 As;城市

广场、校园和交通区冬季地表灰尘 Pb 显著高于夏季,商贸区和住宅区冬季地表灰尘 As 显著高于夏季,而结合不同功能区单个元素冬/夏比值和 6 种元素平均冬/夏比值(表 2)综合分析得出,地表灰尘重金属水平受季节变化影响较大的功能区是城市广场和校园,影响最小的是商贸区.



IA:工业区(9); RA:住宅区(11); CA:商贸区(9); CS:城市广场(7); SA:校园(9); TA:交通区(8); GS:垃圾站(13); 图中柱状上方数字表示显著性差异 P 值

图 2 不同功能区夏-冬两季地表灰尘重金属水平

Fig. 2 Concentrations of heavy metals in dusts in different functional areas during summer and winter

表 2 不同功能区地表灰尘重金属冬/夏比值(R)

Table 2 Winter/summer concentration ratio of heavy metal in different functional areas

功能区(n)	重金属冬/夏比值(R)						
	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	平均
工业区(9)	1.01	1.32	0.84	1.05	1.11	0.87	1.03
住宅区(11)	1.48	1.35	1.55	0.95	1.48	0.91	1.29
商贸区(9)	1.19	1.02	0.77	0.98	1.27	0.85	1.01
广场(7)	1.19	0.80	3.85	1.15	1.99	0.88	1.64
校园(9)	1.85	1.27	1.82	1.20	1.74	1.24	1.52
交通区(8)	0.89	1.00	0.81	0.90	1.55	1.16	1.05
垃圾站(13)	1.17	1.15	0.96	0.93	1.31	0.93	1.07

2.3 不同季节地表灰尘重金属粒级效应

图3显示夏、冬两季城市地表灰尘重金属粒级效应(在3个粒级中的含量分布特征,主要指含量大小排序, $n=14$)表现各不相同. 细粒级($<105\mu\text{m}$)灰尘元素含量冬季明显高于夏季的元素有As、Cd和Pb,冬夏比分别为1.34、1.42和1.42. 夏、冬灰尘元素粒级效应基本相似的元素有Cd、Cu和Ni,但Cd和Cu在冬季各粒级灰尘中的含量均高于夏季,Ni的夏、冬含量差异不明显. Pb和Zn在夏、冬两季灰尘中的粒级效应存在一定差异,且Pb在

两季灰尘中的含量差异大于Zn,夏季Pb含量随粒级增大而升高,而冬季Pb主要在细、中粒级中富集,夏季Zn在细、中粒级中的含量相当,而冬季Zn在中等粒级中的含量略高于细粒级. 6种元素中夏、冬粒级效应差别最大的是As,夏季As在不同粒级灰尘中的含量差异不明显,而冬季灰尘As含量明显随着粒级的降低而升高,且As在细粒级中富集明显. 所以,季节变化对灰尘重金属粒级效应影响最大的是As和Pb,具体表现为冬季元素更易在较细粒级灰尘中的富集,影响最小的是Cd和Ni.

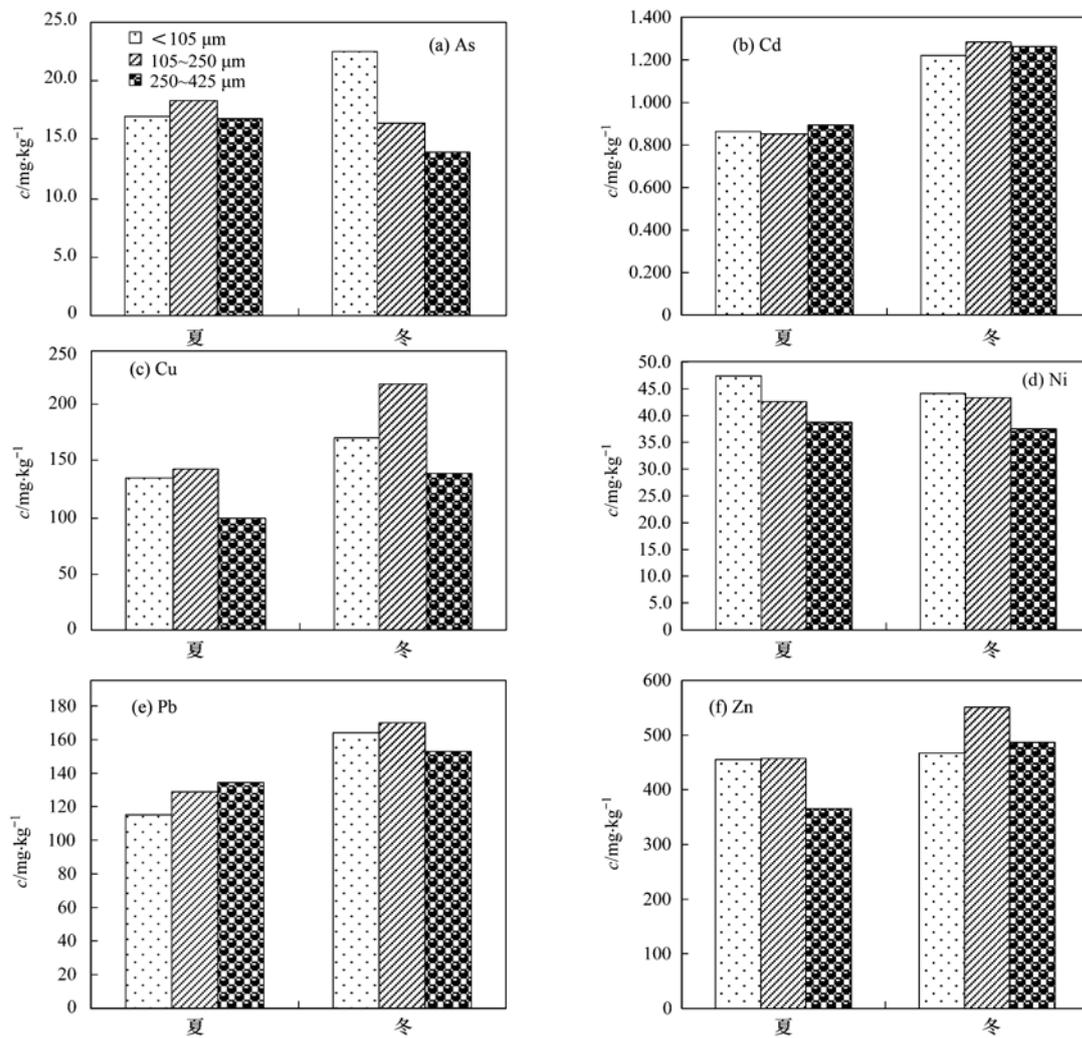


图3 夏、冬两季灰尘重金属粒级分布

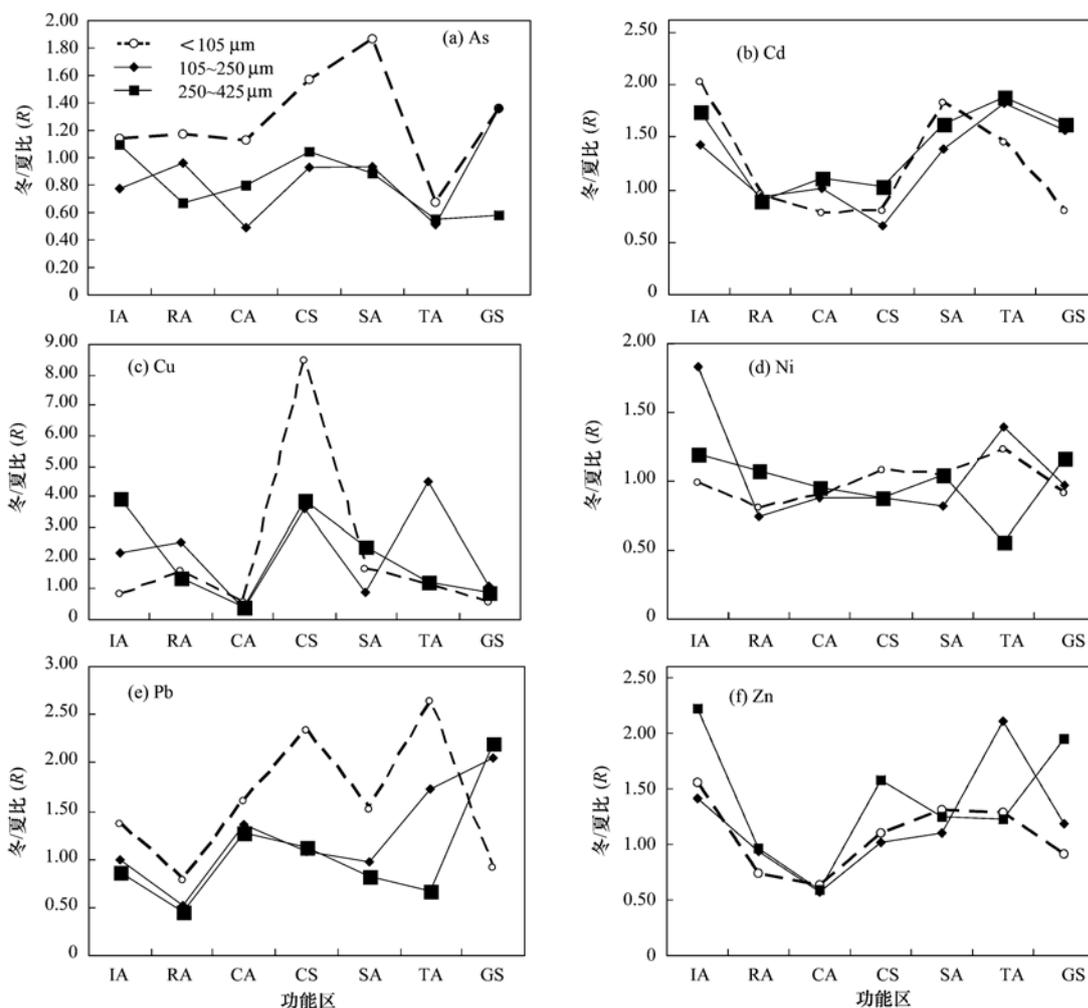
Fig. 3 Particle size distribution of heavy metals in dusts during summer and winter

2.4 不同功能区地表灰尘重金属粒级效应季节特征

将不同功能区地表灰尘不同粒级元素含量的冬/夏比(R)作图4. R 值越大,表示冬季含量越高,3个粒级的 R 值越接近,说明冬、夏两季元素粒级效应差异越小,反之,差异越大.

图4显示,不同元素冬夏灰尘粒级效应差异各

有不同,具体表现为:As在交通区差异最小,在学校、城市广场和住宅区表现为As在冬季细粒级灰尘中的富集;Cd表现为在垃圾站冬季中、粗粒级灰尘中的富集明显大于细粒级,而其它功能区粒级效应季节差异不悬殊;Cu在城市广场地表灰尘中的冬夏灰尘粒级效应差异最大,主要表现为冬季Cu



IA:工业区、RA:住宅区、CA:商贸区、CS:城市广场、SA:校园、TA:交通区、GS:垃圾站

图4 不同功能区不同粒径重金属含量冬/夏比

Fig. 4 Particle size distribution of winter/summer concentration ratio of heavy metal in different functional areas

在细粒级灰尘中的高度富集,商贸区粒级效应分异最小; Ni 在工业区和交通区的粒级效应季节分异明显,主要表现为工业区冬季 Ni 在中等粒级中的富集和交通区冬季 Ni 在粗粒级中含量的降低; 城市广场、学校和交通区均显示冬季 Pb 明显在细粒级中富集,而垃圾站粒级效应的季节分异特征与之相反; 交通区冬季 Zn 中等粒级灰尘中的富集程度远高于细粒级和粗粒级. 总的来看,季节变化对灰尘重金属粒级效应影响最大的元素是 As 和 Pb,主要表现为冬季 As 在住宅区、广场和学校、Pb 在广场、学校和交通区的地表灰尘细粒级中的高度富集; 季节变化对灰尘重金属粒级效应影响较大的功能区是城市广场、学校和交通区,而受影响最小的是商贸区,其中季节变化对商贸区地表灰尘的 Cu、Ni 和 Zn 粒级效应几乎没影响; 另外,住宅区地表灰尘 Cd 的粒级效应受季节变化的影响极小.

2.5 灰尘及环境物质 Pb 同位素比值分析

将 10 份冬、夏对应灰尘及周边环境物质土壤、煤灰、汽车尾气尘(包括汽油和柴油两种燃料)和学校地面收集到的油漆碎片作 Pb 同位素比值分析. 结果显示(表 3),环境物质 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 平均值民用燃煤灰最高,分别为 2.485 和 1.214,汽油排气灰最低,分别为 2.424 和 1.135,油漆碎片、柴油排气灰和灰尘 Pb 同位素比值较为接近,3 份土壤样本 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值范围跨度大,最高值高于民用燃煤灰,最低值与柴油排气灰和夏季灰尘比值相近.

比较不同季节灰尘 Pb 同位素比值发现,冬季灰尘 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 最低值、最高值和平均值均高于夏季灰尘,10 对灰尘样品中,分别有 70% 和 80% 的样本的 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值冬季高于夏季. 夏季灰尘 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值最低值均出现在工业区,最高值分别为垃圾站和

表 3 灰尘及环境物质 Pb 同位素比值

Table 3 Isotopic ratios of lead in environmental materials

物质	样本	范围		平均值	
		$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
土壤	3	2.459 ~ 2.470	1.173 ~ 1.227	2.464	1.197
民用燃煤灰	2	2.479 ~ 2.492	1.208 ~ 1.221	2.485	1.214
油漆碎片	2	2.458 ~ 2.466	1.163 ~ 1.164	2.462	1.163
汽油排气灰	2	2.423 ~ 2.425	1.135 ~ 1.136	2.424	1.135
柴油排气灰	2	2.459 ~ 2.461	1.170 ~ 1.172	2.460	1.171
夏季灰尘	10	2.450 ~ 2.463	1.157 ~ 1.188	2.456	1.172
冬季灰尘	10	2.455 ~ 2.466	1.165 ~ 1.190	2.459	1.177

商贸区; 冬季灰尘 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 最高值和最低值均出现在住宅区, 说明住宅区不同地理位置 Pb 同位素比值变异度较大, 冬季灰尘 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值最低值为工业区, 最高值为垃圾站. 总的来看工业区灰尘 Pb 同位素比值较低, 而垃圾站灰尘 Pb 同位素比值较高.

将不同物质 Pb 同位素比值作图 5. 结果显示冬、夏两季灰尘 Pb 同位素比值分离不明显, 除少数样本外, 多数灰尘样本 Pb 同位素比值均落在柴油排气灰、油漆碎片和部分土壤附近. 土壤 Pb 同位素比值分布较为分散, 2 份样本与灰尘接近, 1 份落在煤灰周围. 2 份汽油 Pb 同位素比值即为接近, 但都与灰尘及其它环境物质相隔甚远.

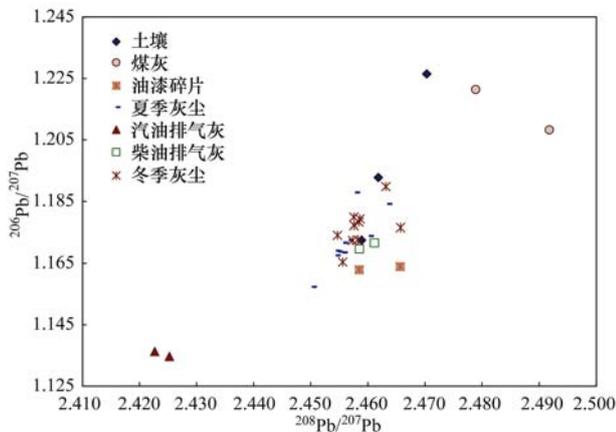


图 5 灰尘与环境物质 Pb 同位素比值关系

Fig. 5 Relation of Lead isotopic ratio in the dust and the potential sources

3 讨论

3.1 降雨对地表灰尘重金属含量的影响

城市地表灰尘重金属含量可能会受气候气象条件的影响, 特别是降雨对重金属含量的影响. 梁涛等^[18]对昆明市不同月份地表灰尘 6 种重金属含量及变化进行了研究, 结果显示, 7 月灰尘中 Pb 和 As 等元素明显低于 1 ~ 3 月, 而其他元素变化幅度不大. 张菊等^[19]研究显示上海小城镇地表灰尘中 Cr

和 Ni 含量夏季(7 月)显著高于春季(4 月). 气象、气候条件对污染物的迁移及累积具有深刻影响^[20]. 张晶晶等^[21]研究显示降雨形成径流将灰尘中富集重金属的颗粒物搬运进入水体, 灰尘对降雨径流中 Hg、As 的贡献较大. 田鹏等^[22]对北京市地表灰尘和径流中重金属粒级效应研究发现, 地表径流中的颗粒物粒级中位数为 50 ~ 75 μm , 雨水更易带走地表灰尘中的细粒级颗粒物, 同时导致降雨后地表灰尘中重金属含量的下降, 而受此影响最大的元素是 Pb, 最小的是 Zn.

本研究显示, 季节变化对地表灰尘重金属含量影响最大的元素是 Pb 和 As, 影响最小的元素是 Zn, 冬季灰尘中的 As 和 Pb 含量显著高于夏季, 这与上述研究结果颇为一致. 贵阳市常年雨量充足, 年平均总降水量为 1 129.5 mm, 夏季雨水约 500 mm, 占全年降雨量的 44.2%, 风力以微风为主, 常年无风沙^[23]. 为研究降雨对贵阳市地表灰尘重金属含量是否存在影响, 在 11 月两种天气情况下对贵阳市 5 个不同各功能区采样点连续 2 次采样, 结果表明(表 4), 天晴 6 d 后采集的地表灰尘中, 6 种重金属含量均高于中雨过后第二天地表灰尘中重金属含量, 其中差别最大的是 Pb, 两次灰尘 Pb 含量比值是 1.67, 其次是 As 和 Cd, 而 Cu、Ni 和 Zn 差异较小, 这种元素含量分布差异与冬、夏地表灰尘重金属含量差异较为一致. 因此, 降雨可能是导致冬-夏地表灰尘重金属分布差异的原因之一.

3.2 人类活动对地表灰尘重金属季节分布的影响

3.2.1 冬季民用燃煤对地表灰尘重金属的影响

Reheis 等^[24]对美国科罗拉多高原东部城市灰尘的研究显示城市土地利用类型(城市功能)对不同季节灰尘的沉降有着重要影响. 本研究显示住宅区和学校地表灰尘 As 含量和城市广场、学校等区域的地表灰尘 Pb 冬季显著高于夏季. 贵阳市冬季阴湿寒冷, 过去曾有用回风炉燃煤取暖的习惯, 夏、

表 4 不同天气下地表灰尘重金属水平

Table 4 Heavy metal concentrations in the dust under different weather condition

次数	取样时间及天气	重金属 ($n=5$)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
		As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
1	11月10日,中雨后第2d	13.0	1.41	54.4	47.5	126	419
2	11月15日,天晴6d后	18.3	1.96	64.8	54.2	211	464
	C_2/C_1	1.41	1.39	1.19	1.14	1.67	1.11

冬两季活动差异明显. 本研究在冬季采样中发现贵阳市某些住宅区和学校门卫室等区域仍采用燃煤取暖,对这些燃煤区采样点地表附近的煤灰取样分析,结果显示 As 的几何均值为 $27.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($n=10$), 分别是贵阳市夏季和冬季灰尘 As 平均含量的 1.56 和 1.27 倍,因此冬季燃煤倾倒的煤灰可能是冬季周边地表灰尘 As 含量增高的来源之一.

Pb 同位素比值分析可以用来识别物质来源^[25]. 灰尘 Pb 同位素比值虽然远小于燃煤灰,但冬季灰尘 Pb 同位素比值明显高于夏季,与民用燃煤灰的 Pb 同位素比值相对较近(图 4),说明冬季灰尘 Pb 受煤灰的影响大于夏季. 对于不同功能区来说,工业区 Pb 同位素比值较低,说明工业区灰尘 Pb 受燃煤灰影响最小,而垃圾站和住宅区灰尘 Pb 同位素比值较高(图 4 中灰尘比值最高端两点),与煤灰 Pb 同位素比值相对较近,说明垃圾站和住宅区地表灰尘 Pb 受燃煤的影响大于其它功能区,即这部分区域灰尘 Pb 可能来自于燃煤、柴油燃烧、漆片和土壤的综合影响.

3.2.2 交通活动对地表灰尘重金属的影响

本研究汽油排气灰来自某汽修厂废弃多年的两辆车的排气管道,汽油 Pb 同位素比值与其它环境物质远离的结果说明机车汽油燃烧已不再是环境 Pb 的主要输入来源. 但多数灰尘样本 Pb 同位素比值均落在柴油排气灰、油漆碎片和部分土壤附近,说明贵阳市地表灰尘 Pb 主要来源于机车柴油的燃烧、油漆碎片和部分土壤. 贵阳市不少中型客车和客货两用车以柴油为主要燃料,夏季地面温度高,地表对流强,柴油尾气尘进入空气后滞留时间长,漂移距离远,沉降到地表的份额相对较少,而冬天地表温度低,空气对流的弱,有利于柴油尾气尘在地表的沉降. 因此,虽然汽油 Pb 已不再是地表灰尘 Pb 的主要来源^[26],但机车尾气仍然是影响地表灰尘 Pb 含量的主要因素之一,特别是对冬季地表灰尘的影响,这可能也是交通区地表灰尘 Pb 含量冬季显著高于夏季的原因之一.

3.2.3 其它活动对地表灰尘重金属的影响

地表灰尘 Pb 同位素与油漆碎片极为接近,说明油漆碎片也是地表灰尘(特别是学校地表灰尘) Pb 的主要来源,而且冬季干燥,物品漆面更容易干裂引起碎片脱落,也可能导致学校等区域地表灰尘冬季 Pb 水平的提高.

城市广场、校园地表灰尘 As 和 Pb 冬季富集表现最明显可能还与本研究涉及的城市广场和大多数校园采样点都集中在城中心有关. 诸多研究表明城市中心地表和空气中干湿沉降所包含的污染物明显高于城郊和乡村^[27, 28]. 因而可能诸多因素引起的灰尘 As、Pb 含量冬季高于夏季在城市中心表现最为明显. 另外,杨孝智等^[29]关于北京地铁站内灰尘中 Pb、Hg 和 Cd 等 6 种重金属含量较高的研究结果,说明除机车运行、墙面维修和电镀金属腐蚀等地铁站内部影响因素外,人员的活动和聚集也是地表灰尘重金属迁移和累积的重要因素之一,而且这种途径对地表灰尘 Pb 的影响最大,而城市广场和学校都是大量固定或移动人群集中来往和停留的场所,大量人群的行走和驻足能将吸附重金属的灰尘带到驻地从而提高地表灰尘重金属的含量^[3]. 商贸区也是人员流动频繁的区域,但本研究商贸区多数采样点均偏离市中心,人员流动相对较少,故没有出现类似研究结果.

因此,贵阳市城市广场、校园等功能区地表灰尘 As 和 Pb 冬季显著高于夏季,是夏季降雨、冬季燃煤、柴油燃烧和油漆碎片的崩裂,以及所处地理位置的特点等多种因素综合影响的结果.

4 结论

(1) 季节变化对地表灰尘重金属含量影响最大的元素是 Pb,其次是 As; 冬季灰尘中 As 和 Pb 含量显著高于夏季,受季节变化影响最大的功能区是城市广场和校园,其次是住宅区.

(2) 夏-冬两季地表灰尘重金属粒级效应差异最大的元素是 As 和 Pb,具体表现为冬季元素更易在较细粒级灰尘中的富集,粒级效应受季节变化影响较大的功能区是城市广场、校园和交通区,受影响

最小的是商贸区, 季节变化对商贸区地表灰尘中 Cu、Ni 和 Zn, 对住宅区地表灰尘中 Cd 的粒级效应几乎没有影响。

(3) 贵阳市地表灰尘 Pb 与柴油尾气尘、油漆碎片和土壤有关。夏季降雨、冬季燃煤和夏冬两季温差等因素可能对贵阳市地表灰尘 As 和 Pb 含量季节变化有一定影响。

致谢: 贵州师范大学地理与环境科学学院 2008 级本科生常国栋和杜春丽同学参与部分采样与实验, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Ahmed K O, Al-Swaidan H M. Lead and cadmium in urban dust of Riyadh, Saudi Arabia[J]. *Science of the Total Environment*, 1993, **136**(1-2): 205-210.
- [2] Leharne S, Charlesworth D, Chowdhry B. A survey of metal levels in street dusts in an inner London neighbourhood [J]. *Environment International*, 1992, **18**(3): 263-270.
- [3] Caravanos J, Weiss A L, Blaise M J, et al. A survey of spatially distributed exterior dust lead loadings in New York City [J]. *Environmental Research*, 2006, **100**(2): 165-172.
- [4] 李海雯, 陈振楼, 王军, 等. 基于 GIS 的上海城市灰尘重金属空间分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(5): 803-809.
- [5] Banerjee A D K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India[J]. *Environmental Pollution*, 2003, **123**(1): 95-105.
- [6] Wang W H, Wong M H, Leharne S, et al. Fractionation and biotoxicity of heavy metals in urban dusts collected from Hong Kong and London[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 1998, **20**(4): 185-198.
- [7] Al-Chalabi A S, Hawker D. Retention and exchange behaviour of vehicular lead in street dusts from major roads[J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **187**(2): 105-119.
- [8] 李晓燕, 陈朋, 曹益金, 等. 贵阳市不同粒级地表灰尘中 As、Ni 水平及权重[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(2): 238-242.
- [9] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(4): 726-733.
- [10] 王晓云, 马建华, 侯千, 等. 开封市幼儿园地表灰尘重金属积累及健康风险[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(3): 583-593.
- [11] 张慧敏, 章明奎. 杭州不同功能区道路灰尘中污染物的分布和有效性[J]. *广东微量元素科学*, 2007, **14**(12): 14-18.
- [12] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- [13] Allott R W, Hewitt C, Kelly M R. The environmental half-lives and mean residence times of contaminants in dust for an urban environment; Barrow-in-furness [J]. *Science of the Total Environment*, 1990, **93**: 403-410.
- [14] 李晓燕, 李保冬, 陈朋, 等. 城市功能对地表灰尘 Cd 的影响——以贵阳市为例[J]. *华中农业大学学报*, 2012, **31**(4): 33-37.
- [15] Kennedy N J, Hinds W C. Inhalability of large solid particles [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2002, **33**(2): 237-255.
- [16] 杜佩轩, 田晖, 韩永明. 城市灰尘概念、研究内容与方法[J]. *陕西地质*, 2004, **22**(1): 73-79.
- [17] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-382.
- [18] 梁涛, 史正涛, 吴枫, 等. 昆明市街道灰尘重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *热带地理*, 2011, **31**(2): 164-170.
- [19] 张菊, 邓焕广, 王东启, 等. 上海郊区小城镇街道灰尘理化性质及重金属时空分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(6): 705-710.
- [20] 刘玉燕, 王玉杰. 干旱区气候条件对道路灰尘及土壤 Pd、Rh 累积的影响[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1528-1532.
- [21] 张晶晶, 毕春娟, 陈振楼. 上海市区地表灰尘对降雨径流中汞砷污染的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2011, (1): 194-202.
- [22] 田鹏, 杨志峰, 李迎霞. 公路地表灰尘及径流中颗粒物附着重金属对比研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(6): 14-18.
- [23] 贵阳市人民政府门户网站. 中国·贵阳[EB/OL]. <http://www.gygov.gov.cn/gygov/1441151880758558720/>, 2012.
- [24] Reheis M C, Urban F E. Regional and climatic controls on seasonal dust deposition in the southwestern US [J]. *Aeolian Research*, 2011, **3**(1): 3-21.
- [25] Dunlap C E, Alpers C N, Bouse R, et al. The persistence of lead from past gasoline emissions and mining drainage in a large riparian system; Evidence from lead isotopes in the Sacramento River, California[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(24): 5935-5948.
- [26] Davies D J A, Watt J M, Thornton I. Lead levels in Birmingham dusts and soils[J]. *Science of the Total Environment*, 1987, **67**(2-3): 177-185.
- [27] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 113-115.
- [28] 林俊杰, 刘丹, 方伟, 等. 万州道路灰尘重金属空间分布及污染评价[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(10): 89-92.
- [29] 杨孝智, 陈扬, 徐殿斗, 等. 北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(6): 944-950.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Hui-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, CAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Hui-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrain the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Posphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxial Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHANG Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行