

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 ..... 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 ..... 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 ..... 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 ..... 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM<sub>10</sub>可替代源成分谱的建立方法及其应用 ..... 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 ..... 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 ..... 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 ..... 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 ..... 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 ..... 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 ..... 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 ..... 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 ..... 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 ..... 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 ..... 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 ..... 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 ..... 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 ..... 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 ..... 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 ..... 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 ..... 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 ..... 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 ..... 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 ..... 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe<sup>2+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>对厌氧氨氧化污泥活性的影响 ..... 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 ..... 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N<sub>2</sub>O 产生量的影响 ..... 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 ..... 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 ..... 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 ..... 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 ..... 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 ..... 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 ..... 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 ..... 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 ..... 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 ..... 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 ..... 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 ..... 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 ..... 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 ..... 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 ..... 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 ..... 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 ..... 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N<sub>2</sub>O 产生的影响 ..... 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 ..... 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 ..... 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 ..... 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 ..... 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

# 利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响

王成<sup>1,2</sup>, 夏学齐<sup>3</sup>, 张义<sup>4</sup>, 廖启林<sup>5</sup>, 杨忠芳<sup>3</sup>, 季峻峰<sup>2</sup>

(1. 南京市环境保护科学研究院, 南京 210013; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210093; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 芜湖海螺水泥有限公司, 芜湖 241213; 5. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018)

**摘要:** 环境中铅污染及其地球化学行为关系到生态环境安全和人类健康. 利用地球化学同位素方法研究长江下游典型地区土壤和河流悬浮物中铅富集特征和成因, 量化不同端元源对铅富集的影响, 对于环境科学发展以及铅污染治理具有重要促进作用. 结果表明, 南京城区表层土壤和长江下游悬浮物中的铅相对于当地背景土壤呈现出富集特征. 土壤和悬浮物的铅同位素相对于自然端元具有较高的<sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb和较低的<sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb比值, 为受到了人为铅输入影响的缘故. 铅同位素地球化学端元识别模型估算表明, 南京市土壤中的铅有 18% ~ 56% (平均 35%) 来自人为端元源, 而长江下游悬浮物样品中铅的人为端元源贡献率为 22% ~ 46% (平均 32%).

**关键词:** 铅同位素; 长江; 南京; 土壤; 悬浮物; 污染

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4251-06 DOI: 10.13227/j.hjx.2014.11.030

## Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique

WANG Cheng<sup>1,2</sup>, XIA Xue-qi<sup>3</sup>, ZHANG Yi<sup>4</sup>, LIAO Qi-lin<sup>5</sup>, YANG Zhong-fang<sup>3</sup>, JI Jun-feng<sup>2</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Environmental Protection, Nanjing 210013, China; 2. Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Wuhu Conch Cement Co., Ltd., Wuhu 241213, China; 5. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

**Abstract:** Lead pollution and its geochemical behavior have an influence on ecological environment and human health. It is of significance to study the characteristics and mechanism of Pb accumulation and to quantify the contributions of different environmental matrices to Pb accumulation in soils and river suspended matter in the representative fluvial delta area, such as the lower of the Yangtze River. The results showed that lead was enriched in the urban topsoil in Nanjing and the suspended matter in the lower of the Yangtze River. The urban topsoil and the river suspended matter showed higher <sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb and lower <sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb relative to the natural matrices, and this was resulted from the influence of the anthropogenic lead. The relative contribution of separate Pb sources was assessed with the Pb geochemical model, 18% - 56% (average 35%) Pb in Nanjing urban soil was derived from the anthropogenic matrices, and anthropogenic Pb contributed 22% - 46% (average 32%) of total Pb in the Yangtze River suspended matter.

**Key words:** lead isotopes; the Yangtze River; Nanjing; soil; suspended matter; contamination

铅是人类和生物的一种非必需元素且有毒. 自人类发展进入工业社会之后铅在土壤圈的地球化学循环很大程度上受到了日益增长的人为活动影响. 大量使用含铅工业品(如含铅汽油)使一些地区出现了土壤等地表系统铅污染<sup>[1,2]</sup>. 因此, 环境中铅富集和其地球化学行为受到环境科学、地球科学等领域普遍关注<sup>[3~5]</sup>. 铅的地球化学行为研究方法之中, 同位素技术是较新且有拓展空间的地球化学方法之一.

铅有 4 种稳定同位素: <sup>208</sup>Pb (52%)、<sup>206</sup>Pb

(24%)、<sup>207</sup>Pb (52%) 和 <sup>204</sup>Pb (1%). 铅同位素被学者们定义为环境污染的“指纹”<sup>[6]</sup>. 不同来源的铅有着不同的铅同位素组成, 通过测定铅同位素比值来判断铅的污染源成为过去对 Pb 同位素研究的主要方向<sup>[7~9]</sup>. 对地表系统常见铅源的同位素比值分

收稿日期: 2014-04-15; 修订日期: 2014-06-20

基金项目: 南京市环境保护科技项目(201306); 国家地质实验测试中心基本科研业务费专项(2013CSG-K04); 国土资源部公益性行业科研专项(201111021); 国家自然科学基金项目(40873081)

作者简介: 王成(1981~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为环境地球化学和土壤环境学, E-mail: wangcheng118@163.com

析表明,大气沉降、土壤等系统铅同位素组成常常呈现出自然端元铅和源自于铅矿石冶炼工业品的人为端元铅混合的特征<sup>[10, 11]</sup>. 铅同位素示踪技术涉及的端元物质不断完善,近年来,一些学者开始探索利用铅同位素混合模型来评估铅源,并取得较好效果<sup>[4, 12, 13]</sup>. 另外,也有一些学者在研究同位素稀释技术,利用 E 值和 L 值来评估土壤中铅等金属元素的生物有效性<sup>[14, 15]</sup>. 尽管如此,过去对铅同位素的研究多是界定不同端元的同位素组成特征和用于示踪污染源;对地表物质中铅的不同端元源贡献量化的研究尚较少.

南京是长江流域极为重要的城市,其地理位置恰处于长江下游转弯处,该地区发育了潮土、黄棕壤等土壤,铅本底值不高<sup>[16, 17]</sup>. 但是,近几十年快速发展的工业和加强的人类活动给南京地区乃至长江下游的表生环境输入了许多非自然因素物质. 南京东郊有栖霞山铅锌矿,持续开采矿石以及外延工业品的使用扩散势必对南京市以及长江下游带入一定的铅. 前人报道了南京等长三角地区存在着表层土壤的铅富集(污染)<sup>[18~20]</sup>,但是铅富集的成因和人为活动带来的铅贡献尚不清楚.

因此,本研究选择南京城区和长江下游来分析铅在地表富集的成因和量化各端元源对富集的影响,这对于认识三角洲生态环境中铅环境地球化学有着很好的借鉴意义.

## 1 材料与与方法

### 1.1 样品采集与预处理

图 1 给出了本次研究所采集的样品分布位置. 本研究在南京城区采集了 14 件表层土壤,其中两件采集于南京东郊栖霞山铅锌矿区. 表层土收集采用“十”字采样法,即每一件土壤样品由散布在 400 m<sup>2</sup> 范围内的 4 件分样混合组成. 土壤样品(包括剖面的分层样品)首先在自然条件下晒干,然后用 2 mm 的尼龙筛去除较大的碎屑、石块等杂物,接着用玛瑙研钵磨至 <0.15 mm,储存以备化学分析. 矿石样品采集于栖霞山铅锌矿,为方铅矿,矿石首先进行破碎,然后磨至 <0.15 mm.

长江悬浮物(共 14 件)采集工作在船上进行. 事先清洗采样容器聚乙烯塑料桶(50 L),并用酸清洗,最后用蒸馏水洗净. 采集江水于聚乙烯塑料桶(10 余桶),运往室内,江水用滤纸(0.45 μm)过滤,所得悬浮物在 60℃ 烘箱中干燥,备化学分析. 在个别采样点选择了丰水期和枯水期两次在相同位置采

样,作为两件样品处理. 长江底泥沉积物利用专门采样器采集河底表层沉积物样品,采样方法和样品预处理根据《中国地质调查局地质调查技术标准》(DD 2005-1)——多目标区域地球化学调查规范执行.

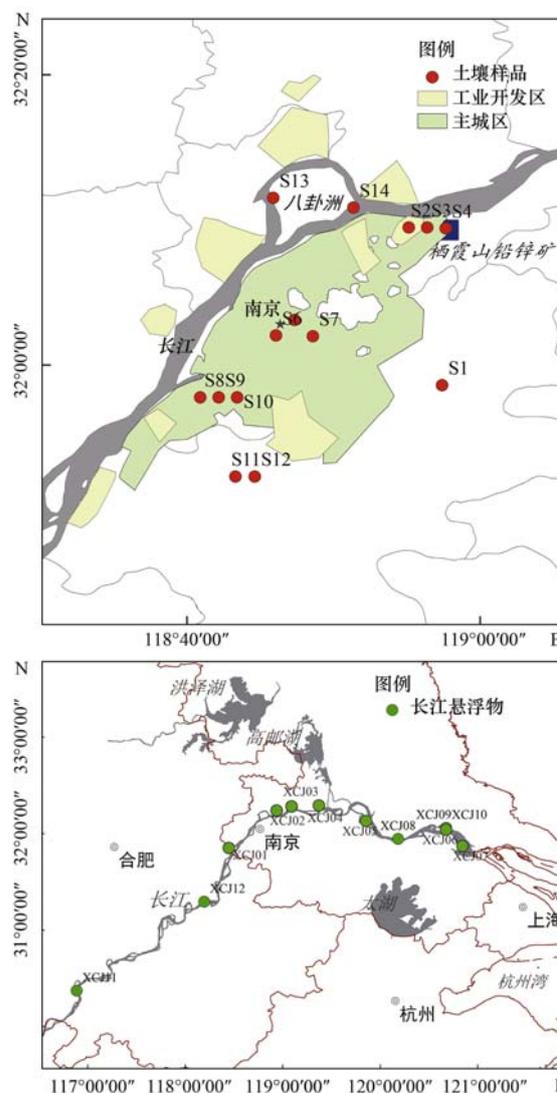


图 1 研究区和样品分布位置示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

### 1.2 样品化学分析与同位素分析

土壤、长江悬浮物、铅矿石样品用四联酸 HCl-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>-HF 消解, Pb 含量用 ICP-MS 分析测试. 样品 Pb 同位素分析方法参考文献[21],在核工业北京地质研究院用 ISOPROBE-T 质谱仪(英国 GV 公司生产)完成,仪器配备 9 个法拉第杯和 4 个离子计数检测器. 具体分析过程如下.

#### 1.2.1 样品的消解

称取 0.1 g 左右的样品于与聚四氟乙烯闷罐中,用硝酸及氢氟酸消解,待样品消解完成后,升高

温度将酸赶尽. 用盐酸将其转化成氯化物. 用 1 mL 浓度为  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐酸溶解试样, 冷却至室温.

### 1.2.2 交换柱的处理

将预处理的树脂 (AG 1-X8) 装入石英离子交换柱中, 树脂高 25 mm, 流速为 5 min 流过 1 mL. 用  $2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐酸、高纯水依次交替淋洗交换柱两次, 平衡交换柱, 备用.

### 1.2.3 铅的分离纯化

将试液加入交换柱内, 用烧杯 (10 mL) 接收流出液. 用 2.0 mL  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐酸溶液分四次淋洗交换柱. 用 1.5 mL  $6.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐酸分 3 次洗脱铅, 用试样杯接收洗脱液, 蒸干, 备热电离质谱计分析铅同位素比值.

### 1.2.4 铅同位素比值的测定

#### (1) 铅涂样

在超净工作台内, 用一滴磷酸溶解铅试样. 用微量注射器吸取 5 ~ 10  $\mu\text{L}$  硅胶悬浮液加于处理好的铼带的中央, 通电 1A, 当硅胶至近干, 用微量注射器将铅样加于铼带的硅胶处, 然后蒸干并红化. 将带插件装在样品盘上, 将样品盘装入质谱计离子源室中. 以上试剂均为亚氟蒸馏.

#### (2) 质谱测量

同位素测量在核工业北京地质研究院 ISOPROBE-T 质谱仪 (英国 GV 公司生产) 上完成, 仪器配备 9 个法拉第杯和 4 个离子计数检测器. 铅同位素采用静态多接收方式测量. Pb 同位素标准物质 NIST SRM981 的测量结果 (未进行分馏校正):  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.602$  (0.003 9%),  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.459$  (0.003 8%),  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.911$  (0.004 1%). 标准物质 NIST SRM981 的理论值为:  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.721$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.491$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.937$ . 实验室流程 Pb 本底为  $1 \times 10^{-10} \text{ g}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层土壤 Pb 含量与 Pb 同位素组成特征

14 件南京市表层土壤样品铅含量变化于 31 ~ 233  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均 119.2  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 明显高于长三角地区农业表层土壤样品总铅含量 (11.2 ~ 54.0  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 也大大超出了长三角地区土壤 Pb 背景值 ( $20.39 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \pm 1.20 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>. 根据中国土壤环境质量标准, 有 13 件样品铅含量超过 35  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 达到 2 级土壤标准<sup>[22]</sup>, 这些表明南京市表层土壤发生了铅富集. 表层土壤中超出土壤背景值的部分 Pb 与当地近 30 年加快的工业发展带来的环境影响

有直接关系. 南京市的铅矿石开采和冶炼、过去含铅汽油的使用等向土壤圈输入了外源铅, 从而引起了表层土 Pb 含量的大幅度上升.

长江下游悬浮物和底泥样品铅含量变化于 42 ~ 146  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $n = 14$ ), 平均 77  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 样品铅含量明显超过江苏灰潮土 (冲积土) 的背景值 25.32  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[18]</sup>, 这暗示了来自长江下游悬浮物中铅有相当的人为源输入.

### 2.2 人为、自然端元源铅同位素组成特征

表层土壤中铅的来源一般有两种: 深部土壤 (也即是背景土壤) 和人为活动带来的外源输入 (这里简称为人为端元铅, 主要有源于铅矿石开采、冶炼等工业含铅物质排放、含铅汽油燃烧后物质等). 长江悬浮物中的铅也可以归结为自然背景铅和人为活动输入铅. 因此, 在剖析土壤和长江悬浮物的铅同位素组成特征之前, 有必要先界定地表系统中人为端元铅和自然端元铅的同位素组成特征. 前人报道了含铅汽油等人为端元铅的同位素组成, 长三角地区含铅汽油和汽车尾气  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值为 1.117 ~ 1.142,  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  比值变化于 2.128 ~ 2.150 ( $n = 6$ )<sup>[24]</sup>, 其中  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值处于世界各地的含铅汽油和汽车尾气 ( $n = 103$ ) 均值变化范围内<sup>[6]</sup>. 长三角地区含铅汽油的  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值和欧洲等地含铅汽油的 1.04 ~ 1.14 ( $n = 25$ ) 基本一致<sup>[1]</sup>.

人为端元铅的另外一个主要来源是铅矿石开采冶炼产生的含铅物质扩散. 对南京市来说, 郊区的栖霞山铅锌矿的铅矿石是最重要的人为端元源. 铅矿石铅同位素组成特征并不像含铅汽油和汽车尾气那样在全世界具有较一致的变化范围, 不同地区或不同地质成因的铅矿石往往有很大的铅同位素组成差异<sup>[1,4,6,8]</sup>. 南京栖霞山铅锌矿的两件方铅矿样品  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值为 1.127 和 1.138, 处于欧洲铅矿石  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值 (1.064 ~ 1.203) 内; 同时也非常接近长三角地区含铅汽油和汽车尾气的铅同位素比值. 因此, 本文用南京铅矿石、长三角地区含铅汽油和汽车尾气的  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  均值 [1.13 ( $n = 7$ )] 作为南京市土壤人为端元源铅的特征值.

表层土壤中铅的自然来源主要是继承深层土壤中的成土母质铅, 深层土壤受人为干扰较少, 是地表系统中最接近自然端元的, 常被用来作为准自然单元来代替自然端元的地球化学属性. 南京周边地区农村深层土壤  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值为 1.190 ~ 1.195<sup>[25]</sup>, 对于表层土壤的自然端元铅同位素特征值, 国外研究报告认为自然端元铅在 1.20 ~ 1.23 之间<sup>[6,26,27]</sup>.

鉴于此,本研究将南京市土壤自然端元源铅的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 特征值设为 1.20.

### 2.3 南京市区表层土壤与长江下游悬浮物铅同位素组成特征

表 1 同时也给出了南京市表层土壤样品铅同位素组成. 表层土壤 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值变化于 1.137 ~ 1.187,  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值变化于 2.086 ~ 2.149. 铅同位

素比值变化范围处于长三角地区表层土壤铅同位素比值变化范围内<sup>[25]</sup>,与前人报道的南京城区土壤铅同位素组成( $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} = 1.165 \sim 1.183$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2.092 \sim 2.121$ ,  $n = 4$ )类似<sup>[8]</sup>(图 2). 长江下游悬浮物 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值变化于 1.168 ~ 1.184,  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值变化于 2.087 ~ 2.113, 铅同位素比值变化范围也处于长三角地区表层土壤铅同位素比值变化范围内<sup>[25]</sup>.

表 1 南京市区表层土壤和长江下游悬浮物铅含量以及铅同位素组成

Table 1 Pb concentrations and isotopic ratios of urban topsoil in Nanjing and suspended matter from the lower of the Yangtze River

样号	样品类型	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Pb/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	采样位置
S1	表层土壤	18.23	1.169	2.108	207	南京市区
S2	表层土壤	18.32	1.173	2.112	31	南京市区
S3	表层土壤	17.73	1.139	2.149	105	南京栖霞山矿区
S4	表层土壤	17.66	1.137	2.148	233	南京栖霞山矿区
S5	表层土壤	18.21	1.164	2.111	185	南京市区
S6	表层土壤	18.15	1.161	2.115	155	南京市区
S7	表层土壤	18.36	1.173	2.106	77	南京市区
S8	表层土壤	18.54	1.183	2.098	36	南京市区
S9	表层土壤	18.52	1.183	2.097	40	南京市区
S10	表层土壤	18.48	1.180	2.094	140	南京市区
S11	表层土壤	18.42	1.179	2.101	185	南京市区
S12	表层土壤	18.32	1.174	2.102	185	南京市区
S13	表层土壤	18.42	1.178	2.094	51	南京八卦洲
S14	表层土壤	18.60	1.187	2.086	39	南京八卦洲
XCJD1	长江底泥	18.51	1.180	2.098	70	南京
XCJD2	长江底泥	18.46	1.177	2.102	89	南京
XCJ01	长江悬浮物	18.35	1.169	2.113	118	南京
XCJ02	长江悬浮物	18.29	1.168	2.112	146	南京
XCJ03	长江悬浮物	18.29	1.169	2.111	121	仪征
XCJ04	长江悬浮物	18.49	1.180	2.097	66	镇江
XCJ05	长江悬浮物	18.48	1.178	2.100	67	扬中
XCJ06	长江悬浮物	18.49	1.179	2.098	67	张家港
XCJ07	长江悬浮物	18.36	1.173	2.105	70	太仓
XCJ08	长江悬浮物	18.50	1.182	2.091	69	江阴
XCJ09	长江悬浮物	18.52	1.183	2.089	42	张家港
XCJ10	长江悬浮物	18.53	1.184	2.088	46	张家港
XCJ11	长江悬浮物	18.53	1.184	2.087	53	安庆
XCJ12	长江悬浮物	18.50	1.182	2.088	52	芜湖

将南京市表层土壤和长江下游段悬浮物 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值与 Pb 含量作对应图解(图 3),可以发现,随着土壤、长江悬浮物 Pb 含量的增加, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 同位素比值呈现下降趋势,向人为端元 Pb 同位素组成特征靠拢<sup>[1,6,24]</sup>. 这暗示着土壤和长江悬浮物 Pb 含量的增加主要是由于人为 Pb 的输入引起的.

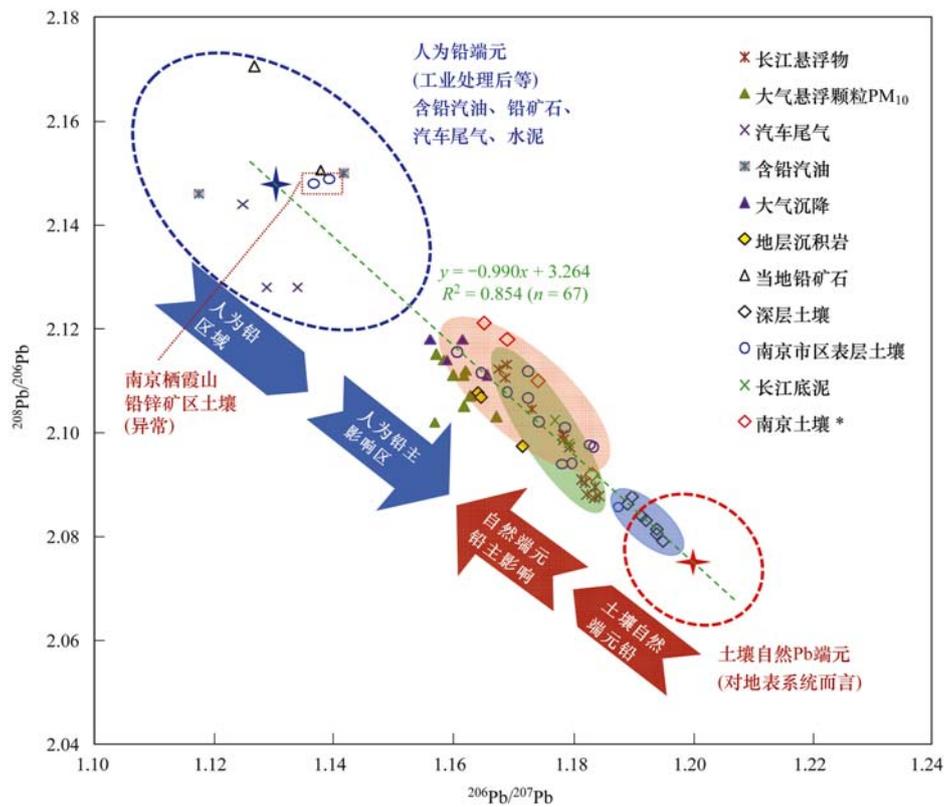
### 2.4 土壤和长江悬浮物中铅的人为端元源贡献估算

铅同位素比值图解(例如: $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 与 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 对应图)可用来区别铅的不同端元来源<sup>[6,28]</sup>. 本研究将南京地区的人为端元铅、深层土壤、地层岩石、长江悬浮物、表层土壤、大气沉降颗粒物、大气悬浮颗粒( $\text{PM}_{10}$ )等的同位素比值作 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$

与 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 对应图解(图 2). 可以看出,除了上文阐述的人为端元(铅矿石、含铅汽油和汽车尾气)和准自然端元(深层土壤)外,长江悬浮物、表层土壤、大气沉降颗粒物、 $\text{PM}_{10}$ 都分布在人为铅端元和自然铅端元之间,形成 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值分布的叠加区,这说明这些物质中既有自然铅也有人造铅. 将图 2 中所有的样品的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 拟合,得到两者之间的拟合方程(1).

$$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = -0.990 \times ^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} + 3.264, \\ R^2 = 0.854 (n = 67) \quad (1)$$

铅同位素的拟合方程(1)说明图 2 中各端元铅同位素组成分布就有线性关系,因此,可以利用典型



含铅汽油、大气沉降和 PM<sub>10</sub> 数据引自文献[24], 地层岩石和深层土壤数据引自文献[25], 南京土壤\* 数据引自文献[8]

图2 不同端元铅同位素组成特征

Fig. 2 Pb isotopes of different matrices

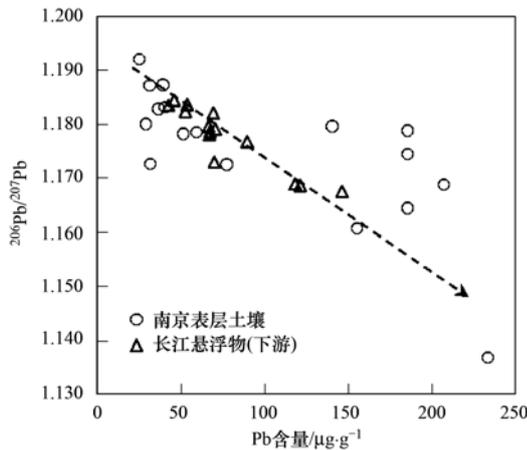


图3 表层土壤和长江悬浮物(底泥) Pb 含量与 <sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb 比值对应关系

Fig. 3 Pb concentration vs <sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb ratios of urban topsoil in Nanjing and the suspended matter in the lower of the Yangtze River

的铅同位素二段元识别模型来估算不同端元源对某一端元(如:土壤、长江悬浮物等)物质中铅的贡献. 本研究利用经典铅同位素识别污染源模型<sup>[6]</sup>来估算南京市表层土壤和长江下游悬浮物中人为铅所

占比例. 具体模型公式如下:

$$\text{样品中铅的人为端元源贡献率} = \frac{{}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{样品}} - {}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{自然背景特征值}}}{{}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{人为端元特征值}} - {}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{自然背景特征值}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, <sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb<sub>自然背景特征值</sub> 为 1.20, <sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb<sub>人为端元特征值</sub> 为 1.13. 将南京市表层土壤和长江下游悬浮物铅同位素比值代入公式(2), 可得到各样品中人为铅占样品总铅的比例. 结果显示, 除栖霞山铅锌矿区的两件表层土壤样品中人为端元铅占总铅比例达到 87% 和 90% 以外, 南京市土壤中铅的人为端元源贡献率在 18% ~ 56% 之间, 平均 35%. 其中, 靠近沿江的土壤样品中人为铅贡献率普遍低于城区中、东部的土壤样品, 这也说明此估算结果与实际铅影响状况是吻合的. 同理估算可得到长江下游悬浮物和底泥样品 (n = 14) 中人为铅贡献率为 22% ~ 46% (平均 32%). 表层土壤和长江下游悬浮物中的铅约有 30% 来自人为端元, 这说明人为活动对自然环境的影响已经达到相当程度, 土壤等地表物质的铅富集主要是人为活动引起的.

### 3 结论

(1) 相对于深层背景土壤, 南京城区表层土壤和长江下游悬浮物中的铅呈现出富集特征. 受人为端元铅的影响, 南京城区表层土壤和长江悬浮物较自然端元具有较高的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和较低的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值. 铅同位素示踪分析表明, 土壤和长江悬浮物的铅富集主要是人为铅输入引起的.

(2) 长江下游地区土壤、长江悬浮物、大气沉降、大气悬浮物( $\text{PM}_{10}$ )、含铅汽油、汽车尾气、当地铅矿石等不同端元的铅同位素比值 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 有显著的线性拟合关系.

(3) 铅同位素端元识别模型估算表明, 南京市土壤和长江下游悬浮物中铅的人为端元源贡献率在 18% ~ 56% 之间(平均 35%), 长江下游悬浮物样品中铅的人为端元源贡献率为 22% ~ 46% (平均 32%).

#### 参考文献:

- [ 1 ] Bindler R, Brännvall M L, Renberg I. Natural lead concentrations in Pristine boreal forest soils and past pollution trend; a reference for critical load models [J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**(19): 3362-3367.
- [ 2 ] 廖启林, 刘聪, 金洋, 等. 江苏省域土壤元素地表富集及其与人为活动的关系研究[J]. *第四纪研究*, 2013, **33**(5): 972-985.
- [ 3 ] 徐林波, 高勤峰, 董双林, 等. 靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 476-483.
- [ 4 ] Dawson J J C, Tetzlaff D, Carey A M, *et al.* Characterizing Pb mobilization from upland soils to streams using  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  isotopic ratios[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(1): 243-249.
- [ 5 ] 孙锐, 舒帆, 郝伟, 等. 典型 Pb/Zn 矿区土壤重金属污染特征与 Pb 同位素源解析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1146-1153.
- [ 6 ] Komárek M, Ettler V, Chrastný V, *et al.* Lead isotopes in environmental sciences: A review [J]. *Environment International*, 2008, **34**(4): 562-577.
- [ 7 ] 张桂林, 谈明光, 李晓林, 等. 上海市大气气溶胶中铅污染的综合研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(5): 831-836.
- [ 8 ] Zhang G L, Yang F G, Zhao W J, *et al.* Historical change of soil Pb content and Pb isotope signatures of the cultural layers in urban Nanjing[J]. *Catena*, 2007, **69**(1): 51-56.
- [ 9 ] 于瑞莲, 胡恭任, 袁星, 等. 同位素示踪技术在沉积物重金属污染溯源中的应用[J]. *地球与环境*, 2008, **36**(3): 245-250.
- [ 10 ] 朱赖民, 张海生, 陈立奇. 铅稳定同位素在示踪环境污染中的应用[J]. *环境科学研究*, 2002, **15**(1): 27-30.
- [ 11 ] 董辰寅, 张卫国, 王冠, 等. 上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 754-759.
- [ 12 ] Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, *et al.* Allocation and source attribution of lead and cadmium in maize (*Zea mays* L.) impacted by smelting emissions [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(3): 834-839.
- [ 13 ] Bollhöfer A, Rosman K J R. Isotopic source signatures for atmospheric lead: the Northern Hemisphere [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, **65**(11): 1727-1740.
- [ 14 ] Gray C W, McLaren R G, Gunther D, *et al.* An assessment of cadmium availability in cadmium-contaminated soils using isotope exchange kinetics [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2004, **68**(4): 1210-1217.
- [ 15 ] Tongtavee N, Shiwatana J, McLaren R G, *et al.* Assessment of lead availability in contaminated soil using isotope dilution techniques [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **348**(1-3): 244-256.
- [ 16 ] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [ 17 ] 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [ 18 ] Hao Y C, Guo Z G, Yang Z S, *et al.* Tracking historical lead pollution in the coastal area adjacent to the Yangtze River Estuary using lead isotopic compositions [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(3): 1325-1331.
- [ 19 ] 路远发, 杨红梅, 周国华, 等. 杭州市土壤铅污染的铅同位素示踪研究 [J]. *第四纪研究*, 2005, **25**(3): 355-362.
- [ 20 ] 夏学齐, 陈骏, 廖启林, 等. 南京地区表土镉汞铅含量的空间统计分析 [J]. *地球化学*, 2006, **35**(1): 95-102.
- [ 21 ] Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, *et al.* Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **241**(3-4): 617-633.
- [ 22 ] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准 [S].
- [ 23 ] 穆从如. 环境地球化学进展 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986. 78-84.
- [ 24 ] Zheng J, Tan M G, Shibata Y, *et al.* Characteristics of lead isotope ratios and elemental concentrations in  $\text{PM}_{10}$  fraction of airborne particulate matter in Shanghai after the phase-out of leaded gasoline [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(8): 1191-1200.
- [ 25 ] Wang C, Wang J H, Yang Z F, *et al.* Characteristics of lead geochemistry and the mobility of Pb isotopes in the system of pedogenic rock-pedosphere-irrigated riverwater-cereal-atmosphere from the Yangtze River delta region, China [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(9): 1927-1935.
- [ 26 ] Doucet F J, Carignan J. Atmospheric isotopic composition and trace metal concentration as revealed by epiphytic lichens [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(21): 3681-3690.
- [ 27 ] Teutsch N, Erel Y, Halicz L, *et al.* Distribution of natural and anthropogenic lead in Mediterranean soils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, **65**(17): 2853-2864.
- [ 28 ] 吴龙华, 张长波, 章海波, 等. 铅稳定同位素在土壤污染物来源识别中的应用 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 227-230.

## CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb .....	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility .....	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013 .....	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter .....	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM <sub>10</sub> .....	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer .....	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region .....	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds .....	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen .....	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake .....	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake .....	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet .....	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an .....	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff .....	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality .....	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process .....	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process .....	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein .....	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution .....	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor .....	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions .....	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress .....	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> .....	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration .....	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe <sup>2+</sup> and Fe <sup>3+</sup> on the Activity of ANAMMOX .....	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor .....	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N <sub>2</sub> O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge .....	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique .....	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil .....	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil .....	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle .....	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils .....	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis( <i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols .....	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator .....	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales .....	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years .....	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI <sub>Ac</sub> Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity .....	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables .....	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells .....	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals .....	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char .....	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer .....	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N <sub>2</sub> O Releases from Bioreactor Landfill .....	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth .....	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta .....	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation .....	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon .....	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

# 《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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