

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒数浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晟,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,万金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

基于 UNMIX 模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析

艾建超^{1,2}, 王宁^{1*}, 杨净¹

(1. 东北师范大学环境学院, 长春 130024; 2. 天津市第一中学, 天津 300051)

摘要: 采集松花江上游夹皮沟地区的土壤样品, 测定了 16 种金属元素的含量, 应用美国环境保护署推荐的 UNMIX 模型进行了土壤重金属的源解析研究, 并结合克里格插值法提取的 Hg、Pb 和 Cd 浓度等值线图与实际的调查, 佐证源解析的结果。研究表明: ①土壤样品中 Cd、Hg、Pb、Ag 浓度较高, 超过吉林省土壤背景值, 富集程度明显; ②UNMIX 方法解析出 4 个土壤重金属污染来源: 源 1 代表选矿、公路交通及垃圾排放等人类活动的污染, 源贡献率为 39.31%; 源 2 代表岩石风化和生物作用, 贡献率为 13.87%; 源 3 为土壤母质和施用化肥、居民燃煤导致的综合污染源, 贡献率 23.93%; 源 4 代表铁矿开采及运输, 贡献率为 22.89%。③研究区土地利用类型、人类活动调查、Hg、Pb、Cd 含量分布特征与 UNMIX 模型解析的结果是基本吻合的。

关键词: UNMIX 模型; 土壤重金属; 源解析; 克里格插值; 夹皮沟金矿

中图分类号: X144; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3530-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.040

Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model

AI Jian-chao^{1,2}, WANG Ning¹, YANG Jing¹

(1. School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. Tianjin No. 1 High School, Tianjin 300051, China)

Abstract: The paper determines 16 kinds of metal elements' concentration in soil samples which collected in Jipigou goldmine upper the Songhua River. The UNMIX Model which was recommended by US EPA to get the source apportionment results was applied in this study, Cd, Hg, Pb and Ag concentration contour maps were generated by using Kriging interpolation method to verify the results. The main conclusions of this study are: ①the concentrations of Cd, Hg, Pb and Ag exceeded Jilin Province soil background values and enriched obviously in soil samples; ②using the UNMIX Model resolved four pollution sources: source 1 represents human activities of transportation, ore mining and garbage, and the source 1's contribution is 39.1%; Source 2 represents the contribution of the weathering of rocks and biological effects, and the source 2's contribution is 13.87%; Source 3 is a comprehensive source of soil parent material and chemical fertilizer, and the source 3's contribution is 23.93%; Source 4 represents iron ore mining and transportation sources, and the source 4's contribution is 22.89%. ③the UNMIX Model results are in accordance with the survey of local land-use types, human activities and Cd, Hg and Pb content distributions.

Key words: UNMIX Model; soil heavy metal; source apportionment; Kriging interpolation; Jipigou goldmine

重金属污染来源广泛、危害严重, 且难以修复去除。因此, 遏制重金属的来源是控制大气、水体和土壤污染的关键所在。这也使得对重金属的源解析研究发展迅速。源解析研究最初起源于 20 世纪 60 年代的美国, 主要是应用模型进行定性分析或定量的计算。计算模型包括以污染源为对象的扩散模型(Diffusion Model)和以污染区域为对象的受体模型(Receptor Model)^[1,2]。而受体模型^[3]很快以其应用简便、解析解比较全面等优势取代了扩散模型成为源解析的重要方法。如 CMB (chemical mass balances)^[4,5]、EF (Enrichment Factor)^[6,7]、PMF (positive matrix factorization)^[8,9] 以及 FA (Factor Analysis) 等。大多数模型首先应用于大气颗粒物中污染物的源解析研究, 其中 FA 近年来应用在我国

土壤重金属的源解析研究中^[10~13]。

UNMIX 是美国环境保护署新颁布的源解析受体模型, 它直接利用受体浓度进行源的解析, 国外应用广泛。Larsen and Baker 最先使用 UNMIX 模型对巴尔的摩空气中的多环芳烃进行源解析, 得到交通尾气、燃煤、燃油和其它 4 个污染源^[14]; Callén 等^[15]应用 UNMIX 受体模型对西班牙 Zaragoza 地区的 PM₁₀ 样品进行源解析, 得到 5 个源, 分别是: 工业 + 交通源、海洋气溶胶源、生物质燃烧源、地壳源和重型车尾气排放源; Lee 等^[16]对韩国 Gwan 大气

收稿日期: 2014-01-09; 修订日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40673059)

作者简介: 艾建超(1987~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境污染与环境效应, E-mail: aijc799@nenu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: nwang@nenu.edu.cn

细颗粒物 $PM_{2.5}$ 进行源解析, 得到亚洲尘、生物质燃烧、柴油汽车尾气、汽油车尾气、二次硝酸盐、二次有机碳、二次硫酸盐等 7 大污染来源, 并计算各个源的贡献率; Keeler 等^[17] 用 UNMIX 法研究了美国俄亥俄州的湿沉降来源, 发现 6 个对大气汞有贡献的释放源: 磷产业、焚烧、镍工业、钢铁工业、燃煤以及地壳灰尘, 其中 3 个源的贡献率较大: 分别是燃煤 69%、垃圾焚烧 12%、镍工业 12%。国内应用 UNMIX 模型的先例较少, 一般用于解析大气污染物的来源。王启帆^[18] 应用 UNMIX-CMB 复合模型解析了英国伯明翰大学采样点 PAHs 的浓度数据, 得到全部源的组成和平均源贡献率; 冯小琼等^[19] 利用 CMB 和 UNMIX 模型综合分析了香港地区 VOCs 主要污染来源, 认为溶剂使用、机动车尾气排放和液化石油气 (LPG) 的大量使用造成了该地区的 VOCs 污染, 并建议采用两种以上模型对受体数据进行污染源解析, 李秀镇等^[20] 采用 CMB、富集因子和因子分析等手段对青岛市大气 $PM_{2.5}$ 元素组成及来源进行了研究, $PM_{2.5}$ 浓度采暖季高于非采暖季, 夏季最低, 非地壳来源的元素在 $PM_{2.5}$ 中所占比例较大; 张巍等^[21] 采用因子分析结合多元线性回归分析的方法研究了北京城市道路主干路、支路和自行车道地表径流中多环芳烃的源解析, 以机动车排放源为主, 燃煤和燃油源贡献也比较大。目前为止未见用此模型进行土壤中污染物源解析的研究报道。

松花江上游桦甸夹皮沟地区赋存金、银、铁等矿藏, 190 多年的黄金开采、混汞法工艺使当地大气、水体、土壤等环境介质中汞的污染较重^[22]。除此之外, 居民燃煤、交通运输、农田耕作等都使当地土壤中重金属含量不断增高。据调查发现, 夹皮沟地区土壤中的 Hg、Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 均超过吉林省土壤背景值^[23], 重金属污染严重。因此, 为了摸清该地区土壤中重金属的来源, 给区域环境污染综合整治提供科学依据, 本研究利用 UNMIX 模型、结合克里金插值和实际调查汞的分布特征等方法解析土壤重金属的来源。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

夹皮沟镇隶属于吉林省桦甸市, 松花江右岸。地理位置 $126^{\circ}16' \sim 127^{\circ}45'E$, $42^{\circ}34' \sim 43^{\circ}29'N$, 幅员面积 650 km^2 。该区地势由东南向西北逐渐倾斜, 平均海拔 350 m 以上, 山形险峻, 沟谷纵横, 河多流短, 呈现“两山夹一沟”的特殊地貌类型。该区属于

大陆性温带季风气候类型, 四季分明, 主导风向西南风, 年降雨量为 $650 \sim 850 \text{ mm}$, 雨热同季。区域内林草资源丰富, 植被覆盖率为 85% 左右, 可耕种土地比较少, 且多为坡耕地。夹皮沟金矿区地处辉发河深断裂带东南侧的北西-南东向深大断裂带上, 矿产资源丰富, 地下贮藏着金、银、铜、铁、铝、锌、钨以及硅、重晶等十几种价值非然的有色金属。镇内除分布有夹皮沟金矿、三道岔金矿、老牛沟金矿、老金厂金矿、板庙子金矿外, 还有通钢桦甸矿业公司铁矿等。

1.2 采样及测定方法

(1) 样品采集

2012 年 4 月下旬采集夹皮沟地区土壤表层的样品用于重金属的源解析。夹皮沟地区是典型的中山-沟谷相间地貌区, 省级和乡级公路分别沿夹皮沟河、老牛沟河和龚沙河沟谷东西向延伸, 居民点、矿区和农田等也顺公路排列。根据这样的地貌特征和土地利用类型, 采样点设置采用沿沟谷公路、兼顾全区的方法, 以夹皮沟镇区老金厂公社为中心, 沿道路分别向东北的五道沟方向、正东夹皮沟方向、东南的马家店方向和西北的板庙子方向, 每隔 3 km 布设一个采样点, 全区共设置了 28 个采样点, 覆盖面积达 240 km^2 。采样点涵盖居民点、矿区、农田、山区道路等各种土地利用类型。去除表土后, 用四分法采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 表层土壤样品, 样品采集后用自封袋密封带回实验室处理。

采样点布设见图 1, 采样点信息见表 1。

(2) 样品测定

土壤样品在实验室自然风干, 剔除动植物残体及碎石等杂物, 置于研钵中研磨, 过 80 目筛后放入聚乙烯自封袋中备用。用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定样品中 Mg、Ca、Al、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Mo、Ag、Cd、Hg、Pb、U 等金属元素含量。样品测试回收率在 $80\% \sim 110\%$, 相对标准偏差 $RSD \leq 10\%$, 满足分析测试要求。

1.3 源解析方法

(1) 源解析方法

UNMIX 是美国环保署新颁布的源解析模型, 运算的原理建立在①未知污染源对受体点的源贡献是各个源组分的线性组合; ②源中各个组分对受体点的贡献均是正值; ③样品中有一些源贡献很少或是没有贡献, 利用被选择物种在该受体点的数据, 进而估算源的数目、组成和贡献率等 3 个基本假设基础上。其计算公式如下:

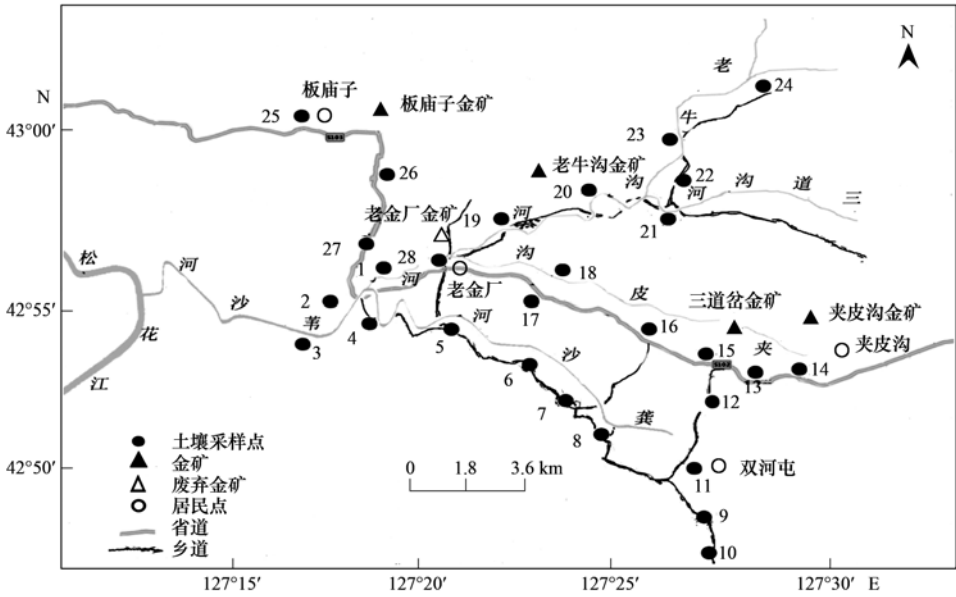


图 1 采样点布设示意

Fig. 1 Sampling points

表 1 土壤采样点信息

Table 1 Infomation of soil sampling points

采样点序号	采样点位置	土地利用类型	采样点序号	采样点位置	土地利用类型
1	板厂	乡道、农田	15	三道岔	小金矿、尾矿库、选矿厂、居民点
2	二道沟 1	乡道、河流汇流处	16	二道岔	省道、农田
3	大楞厂	乡道、居民点、农田	17	头道岔	省道、农田
4	二道沟 2	乡道、农田	18	北沟	乡道
5	岭前	乡道、农田	19	老牛沟	金矿、尾矿库
6	岭前 2	乡道、农田	20	高丽屯	小选矿厂
7	大河沿	乡道、农田	21	三道沟	支流汇合处、农田
8	小英沟	乡道、农田	22	四道沟 2	乡道、农田
9	马家店	居民点、林场	23	五道沟	乡道、农田
10	马家店 2	居民点、林场、林蛙养殖点	24	蛤蟆沟	乡道、林蛙养殖点
11	双河屯	乡道、居民点、农田	25	板庙子	金矿、居民点
12	兴安村	乡道、居民点、农田	26	三道沟-下岭	省道、铁矿开采点
13	庙岭	居民点、尾矿库	27	杨家店	省道
14	夹皮沟镇	金矿点、居民点、省道	28	老金厂	废弃金矿点、居民区、省道、河流汇流处

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^m F_{jk} S_{ik} + E$$

式中, c_{ij} 代表第 i 个样品 ($i = 1, \dots, N$) 中第 j 个物种 ($j = 1, \dots, n$) 的浓度大小; F_{jk} 代表第 j 个物种在源 k ($k = 1, \dots, m$) 中的质量分数, 也就是代表源的组成; S_{ik} 代表源 k 在第 i 个样品中的总量, 也就是代表源的贡献率大小; E 代表各个源组成的标准偏差。

UNMIX 模型的主要特点是将样品浓度作为计算参数, 免去了其他模型归一化的过程。另外, 模型把受体点的每一个样品当做一个多维空间处理, 每一维代表一个测定的物种, 通过主成分分析降低维

数而求解。降维方法采用边缘侦测技术鉴别出“边”, 通过寻找“边”确定单纯形的超平面, 各个超平面之间相交的顶点就代表了某一个污染源。因此, 找到了顶点即确定了源的组成。与因子分析法等其他受体模型比较, UNMIX 模型计算过程更简便, 解析结果更加准确。

(2) 源解析结果的验证

利用 Sufer 9.0 软件, 采用 Kriging 插值方法构建网格数据, 绘制出各采样点的金属浓度等值线。按照各种金属的浓度等值线分布, 结合对研究区实际情况的调查, 进一步分析土壤重金属的来源, 对源解析结果做一个补充和支持。

2 结果与讨论

2.1 土壤表层重金属的统计特征

应用 ICP-MS 分析测定了夹皮沟金矿区 28 个土壤采样点中 16 种金属元素的浓度. 各金属浓度统计特征见表 2.

由表 2 中可知:土壤样品中 Mg、Ca、Al 标准偏差较大,Mg、Cu、Hg、Pb 元素变异系数均 >1%,反映出各采样点重金属浓度的空间差异. Mo、Pb、Cd 和 Hg 的含量分别是当地土壤背景值的 2.29、4.98、6.04 和 18.3 倍; Ag 的含量是我国土壤背景

值的 7.5 倍,说明这几种元素在土壤中明显富集.

2.2 UNMIX 解析结果

(1)源成分分析

利用 UNMIX 6.0 软件,得出 28 个土壤采样点 16 种金属元素在可解析的多个源中的浓度分配情况. 其中 4 个源的 MinRsqr=0.82,代表 82% 的物种方差可由该模型解释,大于系统要求的最小值 (MinRsqr>0.8); Min Sig/Noise =2.86,大于系统要求的最低值 (Min Sig/Noise >2),由此可知,这 4 个源得出的解析结果是可信的. 各金属元素在 4 个源中的平均浓度见表 3.

表 2 夹皮沟金矿区表层土壤统计特征

Table 2 Jipigou goldmine topsoil statistical characteristics						
元素	吉林背景值 ¹⁾ /mg·kg ⁻¹	中国背景值 ²⁾ /mg·kg ⁻¹	浓度范围 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准偏差	变异系数 /%
Mg	7 800	—	0.018 8~573.2	141.72	157.67	1.11
Ca	16 700	—	188.8~2 640.9	776.03	559.76	0.72
Al	—	66 200	1 213.8~4 703.9	2 215.89	762.03	0.34
V	71.27	—	6.2~33.6	19.77	6.43	0.33
Cr	42.4	—	2.4~61.4	19.8	11.23	0.57
Mn	400	—	68.4~250.8	164.82	48.11	0.29
Fe	20 200	—	28~209.8	75.34	33.39	0.44
Ni	18.31	—	1.4~33.1	10.24	6.14	0.6
Cu	14.8	—	0.003 7~43.6	9.49	10.66	1.12
Zn	45.95	—	10~46.9	21.21	7.02	0.33
Mo	1.15	—	1.2~7.5	2.63	1.26	0.48
Ag	—	0.132	0.4~2.6	0.99	0.53	0.53
Cd	0.091	—	0.2~1.3	0.55	0.24	0.44
Hg	0.03	—	0.024~3.12	0.55	0.78	1.42
Pb	14.96	—	21.4~374.6	74.49	80.66	1.08
U	2.34	—	0.8~2.8	1.63	0.51	0.31

1) 吉林省土壤背景值,1995; 2) 中国环境监测总站,1990

表 3 各金属在各源中的平均浓度

Table 3 Metal concentrations in each source								
物种	源 1 /mg·kg ⁻¹	超背景值倍数	源 2 /mg·kg ⁻¹	超背景值 倍数	源 3 /mg·kg ⁻¹	超背景值 倍数	源 4 /mg·kg ⁻¹	超背景值 倍数
Mg	19.47	0	117.52	0.02	22.95	0	26.96	0
Ca	242.73	0.01	583.57	0.03	205.94	0.01	311.38	0.02
Al	1 384.81	0.021	1 705.9	0.03	1 391.79	0.02	1 328.96	0.02
V	8.41	0.12	10.05	0.14	11.12	0.16	8.6	0.12
Cr	6.1	0.14	5.39	0.13	10.23	0.24	6.33	0.15
Mn	91.78	0.23	90.14	0.23	91.42	0.23	95.06	0.24
Fe	39.98	0	41.61	0	28.89	0	46.7	0
Ni	2.92	0.16	3.24	0.18	5.33	0.29	3.36	0.18
Cu	5.02	0.34	1.84	0.12	1.26	0.09	4.54	0.31
Zn	14.98	0.33	10.99	0.24	10.43	0.23	14.28	0.31
Mo	2.13	1.85	1.08	0.94	1.8	1.57	1.19	1.04
Ag	0.93	7.05	0.1	0.76	0.52	3.94	0.5	3.79
Cd	0.46	5	0.13	1.44	0.23	2.56	0.33	3.6
Hg	0.77	25.8	0.37	12.27	0.01	0.4	0.22	7.23
Pb	79.65	5.32	14.3	0.96	18.18	1.22	28.43	1.9
U	1.04	0.44	0.72	0.31	1.37	0.58	0.76	0.33

UNMIX 解析的 4 个源分别如下.

源 1 中 Ag、Cd、Pb、Hg 含量分别超过吉林省土壤背景值的 7.05、5、25.8 和 5.32 倍,其他元素含量很低,认为该源主要解析为人类活动的释放. 夹皮沟矿区分布有 5 个金矿开采点,储量丰富,混汞法提金的历史 190 多年,该工艺在生产过程中会释放出大量的汞蒸汽而造成环境的污染. 虽然 2006 年以来混汞法采金技术被禁止,但研究区内土壤汞的污染仍很严重,达当地土壤背景值的 25.8 倍; Au 和 Ag 以伴生形式存在,金矿的开采和残留使土壤中 Ag 的含量较高; 研究表明丢弃的镍镉电池、堆放的垃圾及农药中都可能造成对土壤的镉污染; Pb 主要来源于含铅汽油、柴油的释放,研究区内多条省级公路和乡道,来往车辆较多,且大部分为汽油和柴油车. 汽油和柴油中的铅随尾气排放,以颗粒物形式降落在土壤中并富集,使源 1 中 Pb 达背景值的 5.32 倍. 综上,源 1 代表公路交通运输、采矿选矿及垃圾排放等人类活动对土壤造成的重金属污染.

源 2 的 16 个元素中仅有 Al、Mg 和 Ca 浓度分配较高,但仍低于吉林省的土壤背景值. 铝是地壳中丰度最大的元素之一,多以化合态存在于各种岩矿中,如长石、云母、高岭石、铝土矿等; 镁主要存在于菱镁矿和白云石中; 地壳中钙的含量也很高,大多来源于石灰岩和石膏等. 研究区内常见的岩石多为花岗岩和燕山期花岗岩,有闪长岩、闪长玢岩、花岗斑岩及长英岩等. 含金矿物以自然金、含银自然金为主,围岩为正长斑岩及绢云母片岩,矿物有石英、绿泥石、绢云母、方解石等. 岩石矿物经多年风化和生物作用逐渐变成小的矿物颗粒,在雨水的冲刷下,沉积于山间沟谷中,导致 Mg、Ca、Al 等元素在土壤中累积. 因此,源 2 可以代表岩石风化对金属的贡献,为自然作用源.

源 3 中 U、Mo、Cr、Ni、V 含量很高,表明源 3 是一个多类型的金属源. U、Mo、V 是土壤中的微量元素,主要来源于成土母质. 土壤中的 Ni 和 Cr 含量都很低,主要来源于人类活动的排放. 如大气中的镍主要源于化石燃料的燃烧(石油 1.4 ~ 64.0 mg·kg⁻¹,煤 15 mg·kg⁻¹)^[24]和居民燃煤等; 有报道称化肥中 Cr 含量也比较高^[25],一般氮肥、磷肥及过磷酸钙中 Cr 含量分别为 5 ~ 3 000、30 ~ 3 000 和 50 ~ 250 mg·kg⁻¹. 据统计,世界上通过肥料输入到土壤中的 Cr 为 0.03 ~ 0.38 t·a⁻¹. 本研究区内除了矿山之外,还有很多坡田种植玉米,播种时需要施用种肥或追肥,大多数使用磷肥或复合肥,均含有一定

的金属元素 Cr 并残留在土壤中. 从对源 3 数据的分析可见,既有自然因素的作用又有人为影响,而根据王启帆^[18]的研究结果: UNMIX 对数据量要求比较大,当数据量较少时无法区分贡献相似的源,而 UNMIX 将贡献相似的源归为一类,但不影响结果的准确性. 因此,源 3 可以认为是土壤母质和施用化肥、燃煤导致的综合污染源.

源 4 中 Mn、Fe、Cu、Zn 含量很高,表明源 4 对这 4 种元素有重要的贡献,Mn、Cu、Zn 分别超过背景值 0.24、0.31、0.31 倍. 王平利^[26]研究结果发现,锌是轮胎橡胶的主要成分,轮胎磨损和橡胶的碎片是重金属 Zn 进入土壤的主要来源; 郭平等^[27]也认为轮胎磨损产生的含 Zn 粉尘是土壤表层重金属的主要来源,由此可以认为,土壤中 Zn 主要来源于镇内道路车辆轮胎的磨损,即交通运输的影响. 研究区内分布有通钢桦甸矿业公司,主营铁矿开采和加工. 区内道路崎岖不平,在铁矿石运输过程中,常因颠簸使部分矿石落入道路两侧,致使土壤中铁的含量较高. 矿石中铁和锰经常伴生,所以土壤中锰的含量也比较高. 综上,源 4 可认为是铁矿石开采和运输导致的人为污染源.

(2)源贡献分析

UNMIX 解析出的 4 个污染源,各源贡献率见表 4.

表 4 UNMIX 源贡献				
Table 4 Source contribution of UNMIX				
污染源	源 1	源 2	源 3	源 4
源贡献/%	39.31	13.87	23.93	22.89

由表 4 可知: 源 1 占比例最大,贡献率为 39.31%,表明矿山开采、混汞法提金、垃圾堆放以及交通污染等活动是区域土壤重金属的主要来源; 源 2 代表岩石风化和生物作用源,贡献率为 13.87%,对区域土壤金属元素的贡献最弱; 源 3 代表土壤母质和施用化肥、燃煤综合源,源贡献率为 23.93%; 源 4 代表铁矿开采和运输源,源贡献率为 22.89%. 这样的源贡献分配可见,该区域人为活动造成的土壤重金属污染源贡献率远大于自然源.

2.3 重金属等浓度线验证结果

污染物的源解析带有一定的不确定性. 为了使解析结果更准确,利用 Sufer 9.0 软件、Kriging 插值的方法提取几种重金属的浓度等值线绘制分布图,结合对当地土地利用类型和人类活动的调查和分析,用以佐证源解析的结果.

(1)土壤-大气汞的污染规律

采集土壤样品的同时,用俄罗斯 Lumex 公司生产的 RA915⁺ 测汞仪同步采集了 28 个采样点土壤表层大气的总汞浓度. Kriging 插值方法绘制出土壤和大气汞浓度等值线图,分别见图 2 和图 3.

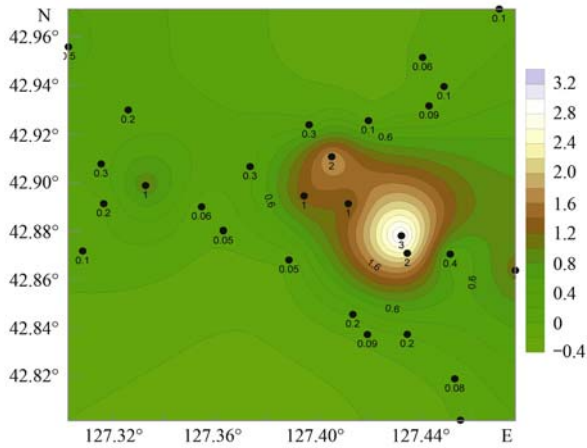


图 2 土壤汞的浓度等值线
Fig. 2 Contour map of Hg concentrations

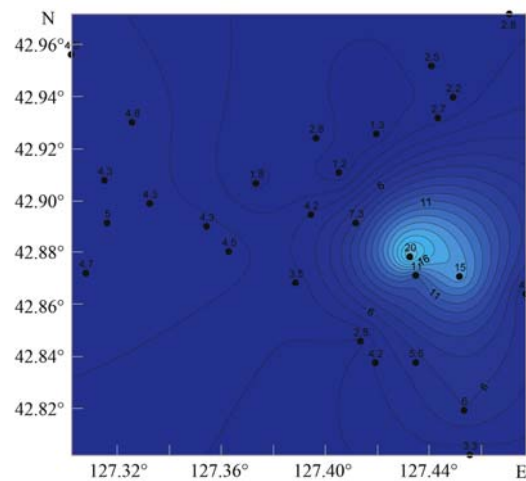


图 3 大气汞浓度等值线
Fig. 3 Contour map of atmosphere mercury concentrations

比较图 2 和图 3 可以清楚地看到,研究区土壤-大气汞的分布规律非常相近. 大气的高汞区出现在研究区东侧夹皮沟、三道岔以及老牛沟金矿一带. 土壤汞有两个峰值区,分别出现在研究区的东西两侧(1 号、12~18 号采样点周围),其中 15 号采样点最高,即为三道岔金矿和尾矿库所在地. 大气汞和土壤汞的分布规律均呈现以三道岔为中心峰值向四周递减的规律,说明金矿开采和混汞法选矿工艺带来的汞的流失影响仍然很大. 除了目前个别选矿作坊仍用混汞法工艺提金外,尾矿库和原来残留在土壤中的汞也会在山谷地形和特殊气象条件下发生迁

移和循环,通过干湿沉降作用积累在矿点周围表层土壤中. 此外,1、12、13 号采样点为板厂、兴安村及庙岭,这里是镇区的主要居民点,常年利用煤及木材取暖做饭燃煤中释放的汞则成为大气-土壤汞循环积累的又一来源. 由此可见,UNMIX 解析的源 1 中元素汞主要来源于矿山开采和燃煤释放等人类活动.

(2)Pb 和 Cd 的污染源分布

土壤中 Pb 和 Cd 的浓度等值线分布见图 4 和图 5.

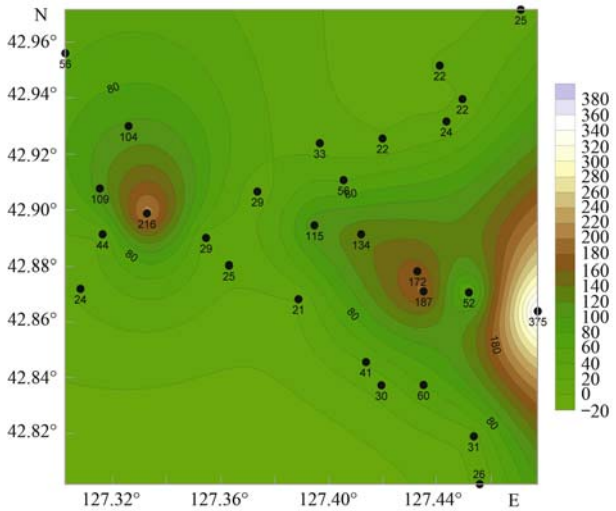


图 4 Pb 的浓度等值线
Fig. 4 Contour map of Pb concentrations

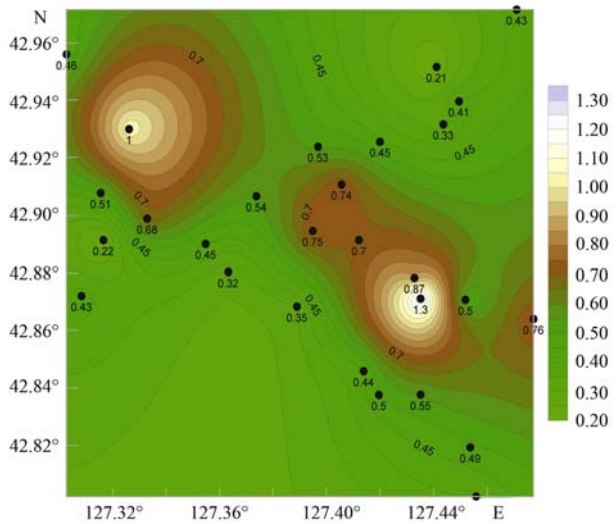


图 5 Cd 的浓度等值线
Fig. 5 Contour map of Cd concentrations

图 4 给出铅在研究区中的几个峰值,表明土壤的铅污染源集中在沿省道 S102 附近的 1、12、14 和 15 号采样点. 环境中铅的背景值很低,一般地区铅主要来源于汽油中的四乙基铅防爆剂,它随汽油燃

烧过程分解为无机铅及含铅氧化物,随汽车尾气排放后,经大气沉降在道路两侧的土壤中. 研究区内铅浓度的分布特征呈现沿主干道向两侧递减的趋势,可推断主要来源于汽车尾气的排放.

由图 5 可知,Cd 的峰值主要分布在 12、15、26 号采样点周围. Cd 主要来源于电镀、蓄电池生产、机械制造等工业生产和居民垃圾排放等. 经实地调查可知,区内没有电镀等生产企业,基本不存在工业生产带来的 Cd 污染,而土壤中 Cd 含量较高的 3 个采样点分布是兴安村、三道岔和三道沟-下岭几大居民点. 目前村里均无统一的垃圾站,居民直接将固体垃圾堆放在道路两旁,垃圾中废弃电池等含 Cd 废物,经雨水冲刷随地表径流进入附近土壤中. 所以,可证明 UNMIX 解析的 Cd 主要来源于居民生活垃圾的排放.

3 结论

(1) 28 个土壤样品 16 种金属元素中,Hg、Ag、Pb 和 Cd 明显富集,分别是当地或我国土壤背景值的 25.8、7.05、5.32 和 5 倍.

(2) 利用 UNMIX 方法解析出研究区的 4 个金属源:源 1 为采矿选矿、公路交通、居民垃圾堆放等人类活动,源贡献率 39.31%;源 2 岩石风化和生物作用等自然作用,源贡献率 13.87%;源 3 为土壤母质、化肥、燃煤等综合作用,源贡献率 23.93%;源 4 铁矿石开采和运输源,源贡献率 22.89%. 可见人为源所占比例高达 62.2% 之多,自然源贡献率仅为 13.8%,污染源中人为源贡献较大.

(3) 利用克里格插值模拟的 Hg、Pb 和 Cd 浓度等值线验证了 UNMIX 模型解析的结果,经调查,与研究区内的土地利用和人类活动基本吻合.

参考文献:

- [1] Gordon G E. Receptor models [J]. *Environmental Science and Technology*, 1980, **14**(7): 792-800.
- [2] Henry R C, Lewis C W, Hopke P K. Review of receptor model fundamentals [J]. *Atmospheric Environment*, 1984, **18**(8): 1507-1515.
- [3] Blifford I H Jr, Meeker G O. A factor analysis model of large scale pollution [J]. *Atmospheric Environment*, 1967, **1**(2): 147-157.
- [4] Huang L k, Yuan C S, Wang G Z, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM₁₀ during a brown haze Episode in Harbin, China [J]. *Particuology*, 2011, **9**(1): 32-38.
- [5] 冯银厂, 吴建会, 朱坦, 等. 济南市环境空气中 TSP 和 PM₁₀ 来源解析研究[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(2): 1-5.
- [6] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. *地质科技情报*, 2005, **25**(1): 65-72.
- [7] 郭海全, 郝俊杰, 李天刚, 等. 河北平原土壤重金属人为污染的富集因子分析[J]. *生态环境学报* 2010, **19**(4): 786-791.
- [8] 韩萌, 卢学强, 冉靓, 等. 天津市城区夏季 VOCs 来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(10): 76-80.
- [9] 丁问微, 王英, 李令军, 等. 基于 PMF 模式的北京大气污染特征分析[J]. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2010, **19**(1): 5-12.
- [10] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属环境风险测度与源解析[J]. *地球化学*, 2006, **35**(1): 88-94.
- [11] 王雄军, 赖健清, 鲁艳红, 等. 基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 671-676.
- [12] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市土壤表层土壤重金属来源解析[J]. *城市环境与城市生态*, 2009, **22**(5): 29-33.
- [13] 章明奎, 王浩, 张慧敏. 浙东海积平原农田土壤重金属来源辨识[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 1946-1954.
- [14] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(9): 1873-1881.
- [15] Callén M S, de la Cruz M T, López J M, *et al.* Comparison of receptor models for source apportionment of the PM₁₀ in Zaragoza (Spain) [J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(8): 1120-1129.
- [16] Lee H, Park S S, Kim K W, *et al.* Source identification of PM_{2.5} particles measured in Gwangju, Korea [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **88**(3-4): 199-211.
- [17] Keeler G J, Landis M S, Norris G A, *et al.* Sources of Mercury wet deposition in Eastern Ohio, USA [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(19): 5874-5881.
- [18] 王启帆. UNMIX-CMB 复合模型在环境空气中多环芳烃源解析的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. 26-30.
- [19] 冯小琼, 彭康, 凌镇浩, 等. 香港地区 2005-2010 VOCs 污染来源解析及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 173-180.
- [20] 李秀镇, 盛立芳, 徐华, 等. 青岛市大气 PM_{2.5} 元素组成及来源研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1438-1445.
- [21] 张巍, 张树才, 万超, 等. 北京城市道路地表径流及相关介质中多环芳烃的源解析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1478-1483.
- [22] 刘雪娇. 夹皮沟金矿区土壤中汞和甲基汞的空间分布及汞的生态风险评价[D]. 长春: 东北师范大学, 2011. 1-3.
- [23] 杨净, 王宁. 夹皮沟金矿开采区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(3): 595-600.
- [24] 廖自基. 环境中微量重金属元素的污染危害与迁移转化[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 140-162.
- [25] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 185-186.
- [26] 王平利. 成都市近地表大气尘的环境地球化学特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2004. 23-24.
- [27] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. *地理科学*, 2005, **25**(1): 108-112.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人