

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 ..... 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 ..... 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征及其对大气能见度的影响 ..... 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM<sub>10</sub> 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 ..... 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 ..... 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 ..... 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 ..... 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 ..... 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 ..... 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 ..... 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 ..... 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 ..... 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 ..... 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 ..... 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 ..... 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 ..... 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 ..... 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 ..... 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 ..... 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 ..... 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 ..... 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 ..... 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 的制备及其太阳光下降解土霉素 ..... 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 ..... 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 ..... 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 ..... 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 ..... 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 ..... 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 ..... 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 ..... 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 ..... 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物<sup>15</sup>N自然丰度对长期氮施加的响应 ..... 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 ..... 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 ..... 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 ..... 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 ..... 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 ..... 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 ..... 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe<sup>3+</sup> 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 ..... 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 ..... 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 ..... 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 ..... 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 ..... 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 ..... 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 ..... 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 ..... 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 ..... 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 ..... 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO<sub>2</sub> 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 ..... 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 ..... 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

# 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价

吴洋<sup>1,2</sup>, 杨军<sup>1</sup>, 周小勇<sup>1\*</sup>, 雷梅<sup>1</sup>, 高定<sup>1</sup>, 乔鹏伟<sup>1,2</sup>, 杜国栋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为全面了解广西都安瑶族自治县耕地土壤重金属污染特征和生态风险状况, 通过实地调查采样及土壤重金属含量分析, 利用单因子指数、内梅罗综合指数、Hakanson 潜在生态危害指数对都安县耕地土壤中 Cd、As、Ni、Zn、Cr、Sb、Cu、Pb 这 8 种重金属进行污染和生态风险评价。结果表明, 都安县耕地土壤重金属总体污染严重, 74.6% 的耕地土壤点位超标, Cd、As、Ni、Zn、Cr、Sb、Cu、Pb 的超标率依次为 70.6%、42.9%、34.9%、19.8%、19.6%、2.94%、1.59%、0.79%, 其中 Cd 和 As 超标率远远超过全国和广西水平, 是都安县主要的污染元素。都安县耕地土壤总体呈现“中度”生态风险, 其中 Cd 对生态风险贡献率达到 88%; 九渡乡东南部和保安乡与东庙乡结合部存在高生态风险。都安县耕地土壤重金属污染来自两个主要污染源, 其中刁江流域两岸受污灌耕地土壤中 As、Sb 污染可能主要来源于刁江上游的矿业活动。

**关键词:** 耕地; 重金属; 污染; 生态风险; 都安县; 刁江流域

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2964-08 DOI: 10.13227/j.hjlx.2015.08.032

## Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China

WU Yang<sup>1,2</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-yong<sup>1\*</sup>, LEI Mei<sup>1</sup>, GAO Ding<sup>1</sup>, QIAO Peng-wei<sup>1,2</sup>, DU Guo-dong<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For a comprehensive understanding of the pollution characteristics and ecological risk of heavy metals of farmland soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China, this study evaluated the cadmium (Cd), arsenic (As), nickel (Ni), zinc (Zn), chromium (Cr), antimony (Sb), copper (Cu) and lead (Pb) pollution situation using the single factor index, the Nemerow pollution index and the Hakanson ecological risk index. The results showed that heavy-metal pollution of farmland soil in Du'an County was serious. 74.6% of the soil samples had heavy metals concentrations higher than the Grade II of National Soil Environmental Quality Standard (GB 15618-1995). The over standard rates of Cd, As, Ni, Zn, Cr, Sb, Cu, Pb were 70.6%, 42.9%, 34.9%, 19.8%, 19.6%, 2.94%, 1.59%, 0.79%, respectively. Cd and As were the main contaminants in Du'an County, the pollution was far more serious than those of the national and Guangxi Zhuang Autonomous Region. In terms of the ecological risk, heavy metals of farmland soil in Du'an County showed a “middle” ecological risk, with Cd accounting for 88% of the total ecological risk. The north-west of Jiudu Town and the zone between Bao'an Town and Dongmiao Town were two areas with high ecological risk in Du'an County. The contamination of farmland soils in Du'an County was caused by two main sources, whereas the pollution of As and Sb of farmland soils near Diaojiang River was mainly caused by the upstream mining industry.

**Key words:** farmland; heavy metal; pollution; ecological risk; Du'an County; Diaojiang River Basin

耕地是人类赖以生存的基本资源和条件。近些年,我国耕地面积正在不断减少,污染却日益加剧,每年因重金属污染减产和超标的粮食各1 000多万t,损失至少200亿元<sup>[1]</sup>。据2014年环境保护部和国土资源部发布《全国土壤污染状况调查公报》显示,耕地土壤环境质量堪忧,目前全国近1/5耕地主要受到重金属污染。耕地土壤重金属污染影响农产品质量和食品安全,直接威胁着人体健康;同时,耕地土壤作为一个地区经济发展的要素之一,其质量的高低影响着地区工农业的发展。因此,耕地土壤污染状况详细调查对摸清土壤污染状况和实现农业安全生产显得非常重要和必要。

广西都安瑶族自治县(都安县)喀斯特地貌广

布,耕地面积为43 424 hm<sup>2</sup>,占全县总面积10.61%<sup>[2]</sup>,人地矛盾突出,是生态环境较差,资源环境保护与社会经济发展矛盾比较突出的地区<sup>[3]</sup>。都安县所属的河池市是我国有色金属之乡,矿业活动频繁,导致刁江沿岸土壤重金属污染严重<sup>[4,5]</sup>;都安县境内的刁江下游两岸的耕地土壤污染也较严重<sup>[6]</sup>。虽然对广西壮族自治区的农田土壤重金属污染进行了调查<sup>[7]</sup>,但至今尚未见到针对都安全县耕

收稿日期: 2015-01-21; 修订日期: 2015-03-17

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201309032, 201409044); 广西自然科学基金重大项目(2013GXNSFEA053002)

作者简介: 吴洋(1989~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境风险评估, E-mail: wuy.12s@igsrr.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: zhouxy@igsrr.ac.cn

地土壤重金属污染状况调查和评价的研究,且缺少对重金属锑(Sb)污染状况的调查.因此,本研究对广西都安县耕地土壤包括Sb在内的8种重金属污染进行较全面的调查,通过掌握耕地土壤重金属的污染状况和环境风险等级,以期对耕地土壤污染的有效防控和农作物的安全生产提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

都安县位于广西中部偏西,东经 $107^{\circ}46'$ ~ $108^{\circ}31'$ ,北纬 $23^{\circ}48'$ ~ $24^{\circ}35'$ ,地处云贵高原向广西过渡的斜坡地带,地势西北高、东南低.全县地形复杂,以喀斯特山地为主.都安县为农业县,境内无有色金属矿业活动,玉米是都安县的主要粮食作物之一,常年种植面积 $2.3$ 万 $\text{hm}^2$ [8].全县境内有红水河、刁江、澄江这3条河流,其中发源于南丹县车河镇的刁江的下游从都安县穿过,刁江上游地区有色金属矿区密集,矿业活动频繁[9],给刁江都安段两岸土壤带来重金属污染.

### 1.2 样品采集与分析

在都安县全境随机采集126个耕地土壤表层(0~20 cm)样品(图1).用GPS(map60CSx,中国)确定土壤样品的地理位置,多点混合后四分法保留1 kg.除去石块、植物根系和凋落物后,冷冻干燥,然后碾碎、过100目筛.用pH计测定土壤pH值.土壤重金属总量消解采用美国EPA制定的标准方法,

利用 $\text{HNO}_3$ 和30%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 消解[10].土壤As、Sb含量用原子荧光仪(科创海光AFS-9800,中国)测定,其他重金属含量用连续光源吸收光谱仪(耶拿contrAA700,德国)测定[11].每批样品消解时添加2个土壤成分分析标准物质GBW 07405(GSS-5)和空白作分析质量控制,测定偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内,选10%的样品做重复测试,相对误差在 $\pm 5\%$ 以内.

### 1.3 评价方法

耕地土壤重金属污染状况采用单因子指数法[12]和内梅罗综合污染指数法[13,14].生态风险评价采用Hakanson潜在生态风险指数[15],其中As、Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、Ni毒性响应系数参照Hakanson提出的参考值[16],Sb毒性响应系数参照林丽钦提出的参考值[17].

### 1.4 图形制作与数据处理

采用ArcGIS 9.3软件进行克里格插值和空间分析;运用SPSS 20.0和Excel 2013进行统计分析处理.

## 2 结果与分析

### 2.1 重金属污染评价

都安县耕地土壤样品中8种重金属含量数学统计结果如表1所示.As、Pb、Cd、Cu、Sb这5种重金属的数学统计结果中偏度和峰度均偏大,表示变化幅度大,说明大量土壤样本集中在高含量区域,与平均值偏离较远,且远远高于背景值,呈现高累积状况.

都安县土壤pH呈中性或弱碱性,在126个土壤样品中,只有14个点位呈现弱酸性,其余点位pH均称中性或弱碱性,都安县土壤pH平均值为7.58,最小值为4.87,最大值为8.88,变异系数为11.9%.单因子指数法评价中以《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准作为耕地土壤质量参比值,并对各个土壤点位的pH值选择不同的二级评价标准.Sb元素的土壤质量参比值参考《农用地土壤环境质量标准》(征求意见稿)参考值.8种重金属污染评价结果如表2所示.

在126个耕地土壤样本中,有94个土壤样本存在超标情况,超标率为74.6%.8种重金属均存在超标情况,超标率大小为: Cd > As > Ni > Zn > Cr > Sb > Cu > Pb;即Cd超标最为严重,有70.6%的土壤样本超标,平均超标6.85倍,达到重度污染水平,是都安县耕地土壤的主要污染元素;其次就是As,有42.9%的土壤样本超标,平均超标1.33倍,达到

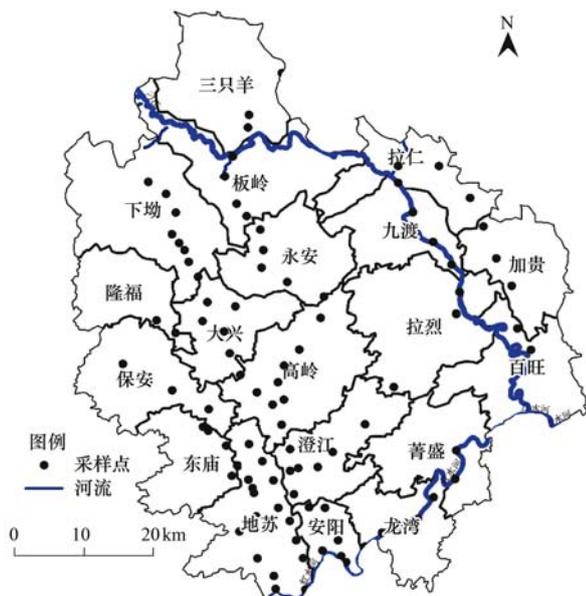


图1 广西都安县耕地土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of farmland soil sampling sites in Du'an County, Guangxi

表 1 广西都安县耕地土壤重金属含量特征

Table 1 Characteristics of heavy metal contents in farmland soil in Du'an County, Guangxi

元素	数据统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						
	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度	变异系数
pH	4.87	8.88	7.58	0.90	-1.28	1.20	0.119
Cd	0.095	223	4.11	19.8	11.0	122	4.82
As	1.13	700	33.2	69.9	7.7	69.3	2.10
Ni	nd <sup>1)</sup>	175	49.5	34.8	1.06	1.03	0.703
Zn	2.52	972	160	154	1.64	4.85	0.968
Cr	37.0	769	176	129	1.91	4.94	0.736
Sb	nd	52.7	1.54	6.07	7.08	54.6	3.94
Cu	4.68	313	35.2	30.7	6.21	53.9	0.870
Pb	0.77	456	48.7	50.9	4.95	34.4	1.04

1) nd 表示为未检出

表 2 广西都安县耕地土壤重金属污染状况评价

Table 2 Assessment of heavy metal contamination of the farmland soil in Du'an County, Guangxi

重金属	超标情况		污染评价	
	超标率/%	超标倍数	单因子指数	综合污染指数
Cd	70.6	6.85	重度	重度(3.06)
As	42.9	1.33	轻微	
Ni	34.9	0.83	清洁	
Zn	19.8	0.53	清洁	
Cr	19.6	0.70	清洁	
Sb	2.94	0.15	清洁	
Cu	1.59	0.35	清洁	
Pb	0.79	0.14	清洁	

轻度污染水平;其他 6 种重金属 Ni、Zn、Cr、Sb、Cu、Pb 的超标率依次为 34.9%、19.8%、19.6%、2.94%、1.59%、0.79%。同时,由单因子指数法得到 8 种重金属元素污染程度大小为: Cd > As > Ni > Cr > Zn > Cu > Sb > Pb。总体而言,都安县耕地土壤重金属的内梅罗综合污染指数为 3.06,达到重度污染水平。

## 2.2 重金属污染空间分布

由于土壤是一个不均匀、具有高度空间变异性的混合体,因此采集的土壤样本不能代表整个区域土壤,只能代表样本点本身的土壤质量状况。而利用 ArcGIS 软件结合 Kriging 插值法可以直观地了解研究区重金属污染和生态风险的空间分布。

如图 2 所示,Cd 是都安县耕地土壤污染最严重和污染面积最广的元素,在九渡、加贵、拉烈、高岭、大兴、东庙、隆福、保安、三只羊等乡镇出现了重度污染,特别是在九渡乡刁江段周边耕地土壤 Cd 含量出现最大值( $223 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );在拉仁、永安、澄江、地苏、三只羊等乡镇的大部分区域呈现中度污染,只有安阳、百旺乡的少部分区域表现为清洁状态。As 是都安县耕地土壤重金属污染面积第二大的元素,表现出区域性污染特征,在九渡乡刁江段附

近出现重度污染,在九渡、加贵、拉烈、高岭、大兴、东庙、隆福、保安、三只羊等乡镇主要呈现轻微污染。土壤 Ni 的污染主要分布在都安县西部的大兴、保安、东庙、地苏、隆福等乡镇。土壤 Zn、Cr 和 Sb 只有在都安县局部地区呈现轻微污染,其中 Sb 只在九渡乡的刁江段西岸大部分地区出现轻度污染。不过,Cu 和 Pb 元素没有出现区域污染情况,总体属于清洁水平。

图 3 为都安县耕地土壤重金属综合污染空间分布。全县耕地土壤基本上都被重金属污染,只是在不同区域的污染程度不同。在九渡、加贵、拉烈、拉仁、永安、澄江、地苏、大兴、隆福、高岭、东庙、保安等乡镇的部分区域都呈现重度污染态势,三只羊、板岭、下坳、永安、菁盛、加贵等乡镇的部分区域呈现中度污染,在安阳、龙湾、菁盛、百旺等乡镇的部分区域呈现轻度污染,只有在安阳乡的极少部分地区呈现清洁状态。不过,由于内梅罗综合指数过分突出污染指数最大的污染物对环境的影响和作用,即突出以污染程度最为严重的重金属,使其对环境质量评价的灵敏性不够高<sup>[18]</sup>,造成 Cd 在综合污染指数中占据了很大的比重,并没有完全反映污染特征,在一定程度上

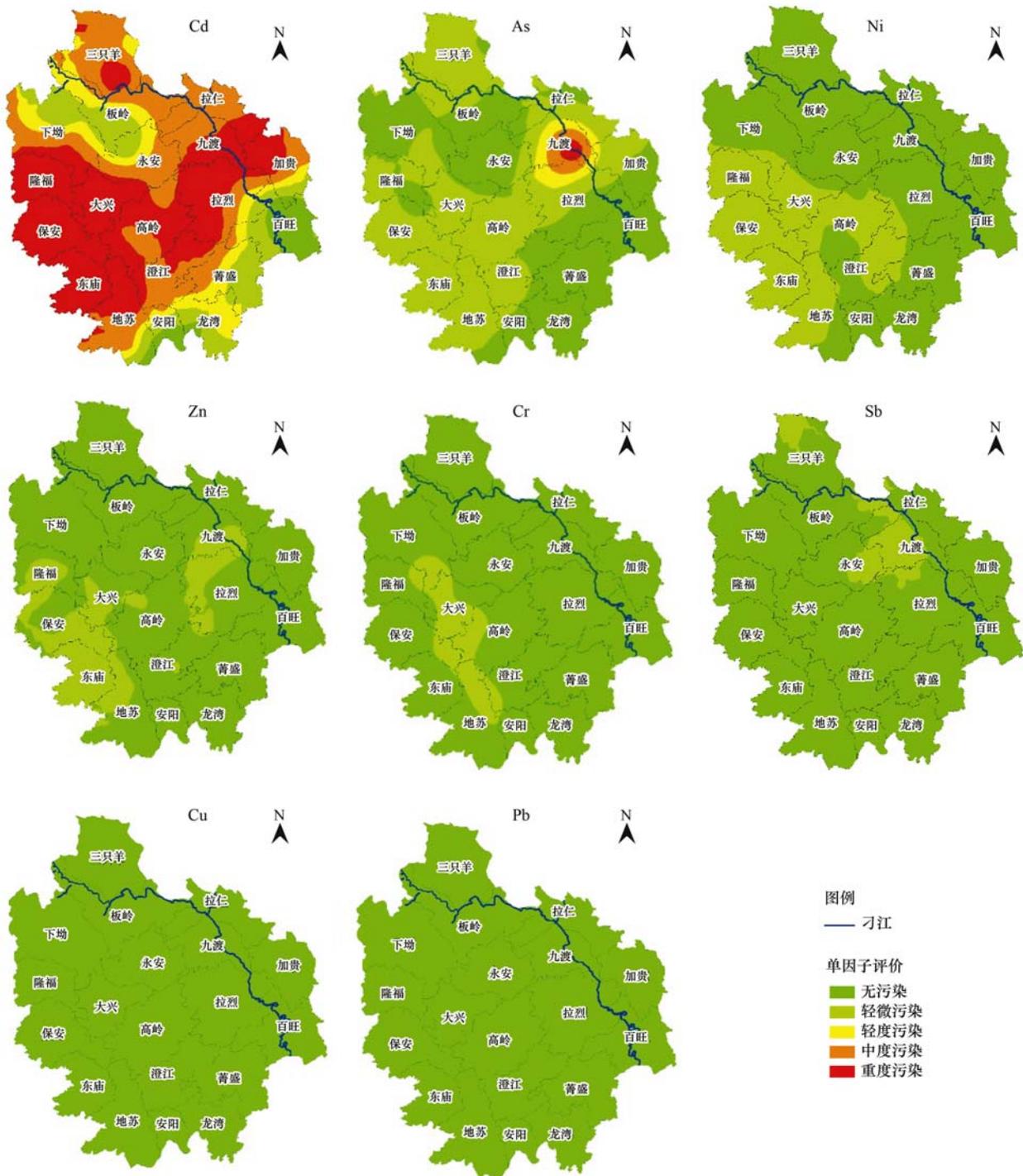


图 2 广西都安县土壤不同重金属污染分布

Fig. 2 Distribution of heavy mental contamination in soil of Du'an County, Guangxi

增加了重度污染范围.

### 2.3 重金属生态风险评价

由表3 结果所示,都安县耕地土壤 Cd 的风险等级属于“很强”,其余元素均呈现“轻微”风险. 全县土壤重金属污染潜在生态风险指数(RI)为 233,达到“中等”风险水平,其中 Cd 的贡献率达到 88%,是

构成生态风险最主要的污染元素.

利用 ArcGIS 软件结合 Kriging 插值法做出潜在生态风险指数分布图如图 4 所示,与内梅罗综合污染指数评价结果类似,“强”生态风险区有两处:一是刁江流经的九渡乡东南部,二是保安乡和东庙乡结合部. 都安县接近一半区域呈现“中等”生态风

表 3 广西都安县耕地土壤重金属污染生态风险评价

Table 3 Ecological risk assessment of heavy metals contamination of farmland soil in Du'an County, Guangxi

项目	As	Cd	Pb	Cu	Sb	Ni	Cr	Zn
$T_r^i$	10	30	5	5	40	5	2	1
$C_n^i$	25	0.6	350	100	10	60	250	300
平均值	33.2	4.11	48.7	35.2	1.54	49.5	176	159
$E_i$	13.3	206	0.696	1.76	6.16	4.13	1.41	0.53
风险等级	轻微	很强	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
RI	233							
风险等级	中等							

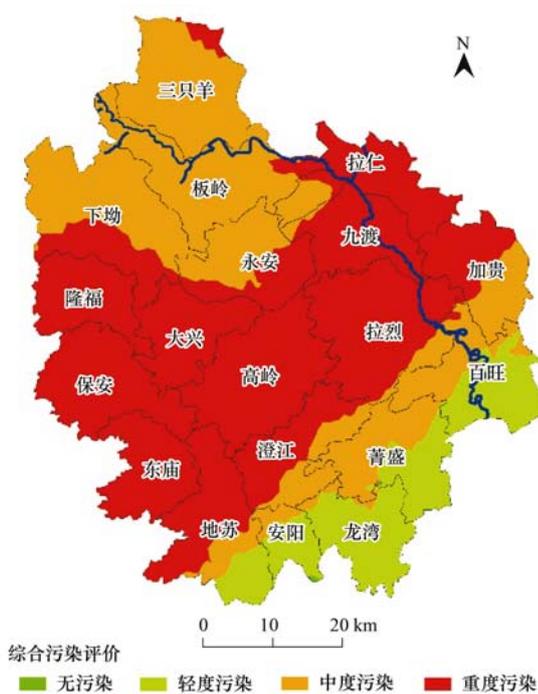


图 3 广西都安县土壤重金属综合污染分布

Fig. 3 Comprehensive contamination distribution of heavy metals in soil of Du'an County, Guangxi

险,主要分布在三只羊、九渡、拉烈、加贵、大兴、隆福、高岭、东庙、保安、澄江和地苏等乡镇。内梅罗综合指数法的计算公式中含有评价参数中最大的单项污染分指数,突出高污染重金属对土壤质量的影响,都安地区 Cd 污染最为严重,而在潜在生态风险评价中 Cd 的毒性系数较高,因而潜在生态风险分布和综合污染分布一致。

### 3 讨论

#### 3.1 耕地土壤总体污染状况

在广西都安县耕地土壤中,重金属超标率为 74.6%,远远高于全国耕地土壤点位超标率(19.4%);其中达到中度、重度污染的点位分别为 16.7%和 20.6%,也远高于全国耕地土壤的 1.8%

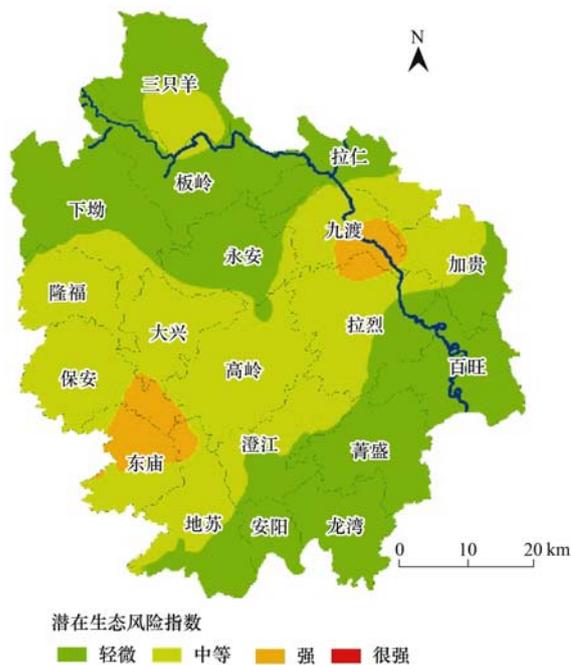


图 4 广西都安县耕地土壤重金属生态风险分布

Fig. 4 Ecological risk distribution of heavy metal contamination of soil in Du'an County, Guangxi

和 1.1%;同时,除 Pb 和 Cu 外,Cd、As、Ni、Cr、Zn 的点位超标率分别比全国土壤相应重金属的超标率高出 63.6%、40.2%、30.1%、18.5%和 18.9%。另外,都安县耕地土壤的 Cd 和 As 的点位超标率比广西农田旱地土壤的 Cd 和 As 超标率分别高出 26.5%和 20%<sup>[7]</sup>;因此,Cd 和 As 是全国、广西和都安县的主要污染元素。

#### 3.2 耕地土壤重金属污染来源分析

相关分析和主成分分析能够很好地辨别土壤重金属污染来源<sup>[19,20]</sup>。由表 4 可知,As、Pb、Cd、Zn、Sb 和 Cr、Ni、Cu、Cd 两组呈两两显著正相关( $P < 0.05$ ),没有体现出独立性,说明这些元素存在同源可能。

由表 5 的主成分分析结果可知,取特征值大于 1 的主成分,2 个主成分反映了 79.2%的都安县耕地土

壤重金属含量信息. 第一主成分的贡献率为 49.7%, As、Pb、Cd、Zn、Sb 元素有很高的正载荷; 第二主成分的贡献率为 29.4%, Cr、Ni、Cu、Cd 有很高的正载

荷. 由于都安县重金属污染较为严重, 所提取主成分不可能反映土壤背景值, 因此这两个主成分可能反映了两个可能的污染源或者污染途径.

表 4 广西都安县土壤重金属元素间相关性分析<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation analysis for the heavy metals contamination in soil of Du'an, Guangxi

	Pb	Cd	Zn	Cr	Cu	Ni	Sb
As	0.905 **	0.255 **	0.599 **	-0.011	0.074	-0.017	0.945 **
Pb		0.490 **	0.788 **	0.181 *	0.208 *	0.251 **	0.831 **
Cd			0.741 **	0.520 **	0.371 **	0.672 **	0.165 *
Zn				0.432 **	0.328 **	0.717 **	0.504 **
Cr					0.445 **	0.597 **	-0.136
Cu						0.432 **	0.028
Ni							-0.113

1) \* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 显著水平上相关性显著

表 5 主成分负荷和特征值

Table 5 Component matrixes and eigenvalues

组分	累积组分/%	Cd	As	Ni	Zn	Cr	Sb	Cu	Pb
主成分 1	49.708	0.754	0.733	0.603	0.942	0.477	0.641	0.443	0.886
主成分 2	29.445	0.399	-0.651	0.670	0.095	0.649	-0.729	0.447	-0.403

一般来说, 耕地土壤中重金属污染主要来源于污水灌溉<sup>[21, 22]</sup>、矿业活动<sup>[23]</sup>、交通运输<sup>[24]</sup>等. 第一主成分所示污染, 可能来源于刁江流域矿业生产活动. 刁江流域中上游地区, 矿业活动密集, 南丹县的大厂和车河两个矿区共 300 多家采选矿企业, 每天要排入刁江的尾矿砂约 6 000 t, 选矿废污水约 12 万 m<sup>3</sup>, 悬浮物 1 万 t 以上<sup>[25]</sup>. 刁江河水中 As、Cd、Pb、Zn 污染十分严重, 在刁江未治理前最大重金属质量浓度分别可达 154、2.51、29.3、343 mg·L<sup>-1</sup>, 分别超标 3 096、502、1 571、343 倍<sup>[25]</sup>. As 是刁江主要污染元素, 且以溶解态为主<sup>[9]</sup>, 根据蹇丽等<sup>[26]</sup> 2010 年在刁江都安县断面研究结果, 底泥 As 含量为 1 624 mg·kg<sup>-1</sup>, 受刁江影响的河漫滩 As 含量可达 1 130 mg·kg<sup>-1</sup>. 此外, 处于刁江中游的金城江区, 锑冶炼活动频繁, 矿渣堆 Sb 含量最高可达 7 119 mg·kg<sup>-1</sup>, 刁江上游河水监测中 Sb 最高质量浓度可达 0.63 mg·L<sup>-1</sup><sup>[27]</sup>, 大量 Sb 元素释放到环境中, 随刁江迁移到下游地区<sup>[28, 29]</sup>. 刁江流域重金属污染元素与主成分分析中第一主成分正载荷较高的元素相同. 由图 5 可知, 在九渡乡东南部附近地势降低, 大量河漫滩出现, 耕地面积也增大, 污水灌溉增多, 加上 As、Sb 等元素都表现出从上游至下游的迁移性<sup>[30]</sup>, 导致在刁江流经的九渡乡东南部耕地土壤重金属污染加剧, 出现高污染区; 而在地势较高的三只羊、板岭等乡镇附近没有出现类似的耕地土壤重金属污染.

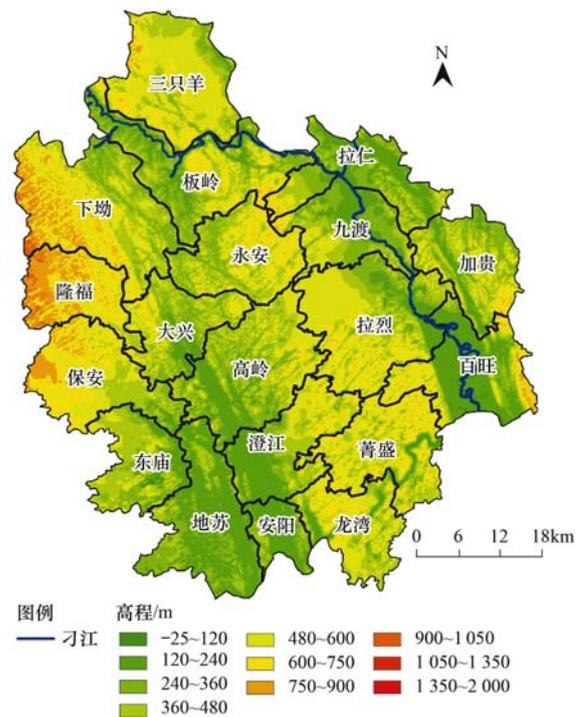


图 5 广西都安县高程

Fig. 5 Elevation map of Du'an County, Guangxi

根据主成分结果分析所示, 刁江流域重金属污染可能是都安县主要的污染源之一. 虽然受到刁江河水污灌影响的耕地与非污灌耕地土壤的重金属均为重度污染, 但是土壤中 As、Sb、Ni、Cr、Zn 这 5 种元素含量差异性显著 (表 6), 其中被刁江污灌的耕地土壤中 As 和 Sb 含量显著高于非污

灌区,且结合主成分分析第二主成分中 As、Sb 为负载荷,因此推测都安县耕地土壤 As 和 Sb 污染可能主要是由刁江上游矿业活动造成的. 由于大量的农用物资进入耕地土壤,可能会导致耕地土

壤重金属污染<sup>[32~36]</sup>,即农业生产活动带入的重金属也是导致耕地土壤重金属累积的重要因素,这可能与第二主成分中正载荷较高的 Cr、Ni、Cu、Cd 元素有关.

表 6 都安县受刁江河水灌溉耕地和非灌溉耕地的重金属特征比较<sup>1)</sup>

Table 6 Comparison of heavy-metal characteristics in between irrigation and non-irrigation farmland of Diaojiang River in Du'an County

统计	重金属平均含量/mg·kg <sup>-1</sup>								综合评价
	As	Cd	Pb	Cu	Sb	Ni	Cr	Zn	
污灌耕地	75.0	2.39	70.2	36.5	5.37	32.8	116	176	重度
非污灌耕地	25.4	2.66	47.3	37.7	0.72	57.4	193	200	重度
t 检验	2.89**	-0.49	1.84	-0.15	3.03**	-3.22**	-2.62*	-0.684	
sig.	0.005	0.628	0.068	0.880	0.003	0.002	0.010	0.496	
背景值	11.3 <sup>b</sup>	0.267 <sup>a</sup>	17.6 <sup>b</sup>	18.8 <sup>b</sup>	2.93 <sup>a</sup>	26.6 <sup>a</sup>	82.1 <sup>a</sup>	56.3 <sup>b</sup>	

1) \* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 显著水平上相关性显著; a 参考广西土壤元素背景值, b 参考河池市土壤背景值<sup>[31]</sup>

#### 4 结论

(1) 都安县耕地土壤重金属总体呈现重度污染,其中 Sb 在局部呈现轻微污染; 主要污染元素是 Cd 和 As, 其超标率明显高于全国和广西的耕地土壤.

(2) 都安县耕地土壤的 Cd 呈现“很强”的生态风险等级,其余元素均表现“轻微”生态风险,总体上表现为“中度”生态风险; 九渡乡东南部和保安乡与东庙乡结合部是都安县两个高生态风险集中区.

(3) 都安县耕地土壤重金属污染存在两个主要污染源,其中刁江流域两岸受污灌耕地土壤中 As、Sb 污染可能主要来源于刁江上游的矿业活动.

#### 参考文献:

- [1] 高翔云, 汤志云, 李建和, 等. 国内土壤环境污染现状与防治措施[J]. 江苏环境科技, 2006, 19(2): 52-55.
- [2] 蒙光丽. 广西都安县土地适宜性评价[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2000, 17(4): 46-51.
- [3] 胡宝清, 严志强, 廖赤眉, 等. 喀斯特石漠化与地质-生态环境背景的空间相关性分析——以广西都安瑶族自治县为例[J]. 热带地理, 2004, 24(3): 226-230.
- [4] 周兴, 宋书巧. 刁江流域重金属污染土地合理利用探讨[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 1999, 16(4): 93-97, 110.
- [5] 周永章, 宋书巧, 杨志军, 等. 河流沿岸土壤对上游矿山及矿山开发的环境地球化学响应——以广西刁江流域为例[J]. 地质通报, 2005, 24(10-11): 71-77.
- [6] 黄奎贤, 覃柳妹, 吴少珍, 等. 广西河池市重金属污染现状分析与治理对策[J]. 广西科学院学报, 2012, 28(4): 320-324, 329.
- [7] 凌乃规. 广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(4): 91-94.
- [8] 严桂青, 黄毅, 韦贵方, 等. 都安县春玉米不同品种小区对比试验研究[J]. 农业科技通讯, 2013, (12): 60-62.

- [9] 蹇丽, 黄泽春, 刘永轩, 等. 刁江水体多相介质中 As, Zn 和 Pb 的空间和季节分布规律[J]. 环境科学研究, 2010, 23(4): 445-451.
- [10] Zhai L M, Liao X Y, Chen T B, et al. Regional assessment of cadmium pollution in agricultural lands and the potential health risk related to intensive mining activities: A case study in Chenzhou City, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(6): 696-703.
- [11] Song B, Lei M, Chen T B, et al. Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(12): 1702-1709.
- [12] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2714-2720.
- [13] Wang L X, Guo Z H, Xiao X Y, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and downstream of the Xiangjiang River, Hunan Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 353-362.
- [14] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 不同土地利用方式下北京城区土壤的重金属累积特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2285-2293.
- [15] 乔鹏伟, 周小勇, 杨军, 等. 云南个旧锡矿区大屯盆地土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 地质通报, 2014, 33(8): 1253-1259.
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution-control. A sedimentologica approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [17] 林丽钦. 应用毒理学安全评价数据推算重金属毒性系数的探讨[A]. 见: 2009 重金属污染监测、风险评估及修复技术高级研讨会论文集[C]. 北京: 中华环保联合会能源环境专业委员会, 2009, 57-60.
- [18] 关伯仁. 评内梅罗的污染指数[J]. 环境科学, 1979, (4): 67-71.
- [19] Bonvka L, Vacek O, Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. Geoderma, 2005, 128(3-4): 289-300.

- [20] 赵彦锋, 郭恒亮, 孙志英, 等. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J]. 地理科学, 2008, **28**(1): 45-50.
- [21] 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 121-128.
- [22] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, *et al.* Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **109**(3-4): 310-322.
- [23] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题[J]. 地理研究, 2008, **27**(1): 201-212.
- [24] 郭广慧, 陈同斌, 宋波, 等. 中国公路交通的重金属排放及其对土地污染的初步估算[J]. 地理研究, 2007, **26**(5): 922-930.
- [25] 黄晨晖, 时坚, 莫日生. 近三十年来刁江流域水质状况的对比分析及其防治建议[J]. 环境研究与监测, 2009, **22**(3): 14-19.
- [26] 蹇丽, 黄泽春, 刘永轩, 等. 采矿业污染河流底泥及河漫滩沉积物的粒径组成与砷形态分布特征[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(9): 1862-1870.
- [27] 李玲, 张国平, 刘虹, 等. 广西大厂多金属矿区河流中Sb和As的迁移及环境影响[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(6): 682-687.
- [28] 项萌, 张国平, 李玲, 等. 广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 266-272.
- [29] 袁永强, 刘丛强. 广西某地金属冶炼废水外溢对农田土壤的污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3312-3317.
- [30] 刘永轩, 黄泽春, 蹇丽, 等. 广西刁江沿岸土壤As、Pb和Zn污染的分布规律差异[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 485-490.
- [31] 宋书巧, 梁利芳, 周永章, 等. 广西刁江沿岸农田受矿山重金属污染现状与治理对策[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, **22**(2): 152-155.
- [32] Nogueiroi R C, Alleoni L R F, Nachtigall G R, *et al.* Sequential extraction and availability of copper in Cu fungicide-amended vineyard soils from Southern Brazil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 931-937.
- [33] Chen W P, Krage N, Wu L S, *et al.* Arsenic, cadmium, and lead in California cropland soils: Role of phosphate and micronutrient fertilizers [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(2): 689-695.
- [34] 赵明, 蔡葵, 王文娇, 等. 施肥对大棚土壤有效态重金属含量及生物效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(S1): 26-31.
- [35] 商和平, 李洋, 张涛, 等. 畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 314-324.
- [36] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 等. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, **26**(2): 223-227.

## CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method .....	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing .....	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants .....	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM <sub>2.5</sub> and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China .....	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM <sub>10</sub> .....	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data .....	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin .....	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications .....	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River" .....	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City .....	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River .....	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau .....	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China .....	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory .....	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang .....	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region .....	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment .....	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ , $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China .....	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth .....	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application .....	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope .....	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment .....	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation .....	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline .....	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal .....	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems .....	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor .....	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone .....	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China .....	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China .....	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant $^{15}\text{N}$ Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China .....	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau .....	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere .....	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus .....	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation .....	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil .....	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag .....	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism .....	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation .....	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L. ....	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L. ....	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil .....	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable .....	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms .....	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation .....	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature .....	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure .....	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO <sub>2</sub> Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit .....	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs .....	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行