

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晚芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析

刘巍^{1,2}, 杨建军^{1,2*}, 汪君³, 王果³, 曹月娥^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 核工业 216 大队, 乌鲁木齐 830001)

摘要: 为研究准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状, 分析了研究区 Zn、Cu、Cr、Pb、Hg 和 As 这 6 种土壤重金属含量水平, 采用内梅罗指数法、地质累积指数法、潜在生态危害指数法对准东矿区土壤重金属进行评价, 并利用分层比较、降尘法以及距离分析, 结合统计分析法对金属污染来源进行分析。结果表明, 与环境质量 I 级标准相比, As 超标最严重, Cr 次之, Hg、Cu 超标率较小, Zn、Pb 未检出超限; 以环境质量 I 级标准为评价依据, 研究区土壤重金属总体处于轻度污染水平, 单项污染指数依次为 As(2.07) > Cr(0.95) > Cu(0.55) > Zn(0.48) > Hg(0.45) > Pb(0.38), 除 As 为重度污染外, 其他均为清洁水平; Hg 的地质累积指数为 1.14, 为中度污染; 研究区生态风险等级为中, 主要贡献因子是 Hg, 生态危害系数为 251.40; 重金属来源分析表明: Pb 在剖面中的变异性主要来自于煤炭燃烧或其他人为活动, Hg 和 As 元素可能共同来源于煤炭燃烧的释放, 距离矿区的远近不是影响重金属差异的主要因素, 还可能与地形、坡向、风向等其他因素有关。

关键词: 重金属; 土壤污染; 露天煤矿; 来源分析; 准东

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1938-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.043

Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang

LIU Wei^{1,2}, YANG Jian-jun^{1,2*}, WANG Jun³, WANG Guo³, CAO Yue-e^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China; 3. No. 216 Geology Party, Helium Industry, Urumqi 830001, China)

Abstract: The opencast mine of East Junggar Basin in Xinjiang is the largest self-contained coalfield in China, and the ecological environment of the opencast is very fragile because of its arid climate and poor soil. In this study, 50 soil samples (from 0 to 30 cm depth soil at intervals of 10 cm) in opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang were collected in order to explore the heavy metals contamination of the coal mining. The contents of zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cr), lead (Pb), mercury (Hg) and arsenic (As) were measured and the degree of pollution was assessed by Nemerow index, geo-accumulation (I_{geo}) index and potential ecological risk index. In addition, the layered comparison, dust fall and the distance between coal mine and samples location were used to analyze the source of heavy metals contamination. The results showed that value of As surpassed the Chinese soil quality standard class I (GB 15618-1995) mostly severely, followed by Cr, a relatively lower surpass was obtained by Hg and Cu, while Zn and Pb did not surpass the standard. According to the standard, the soil heavy metals content of research region was in light pollution status and the pollution index for each heavy metal followed the order of As (2.07) > Cr (0.95) > Cu (0.55) > Zn (0.48) > Hg (0.45) > Pb (0.38), which demonstrated a heavy pollution of As and clean status of others. Additionally, an I_{geo} value of 1.14 for Hg reflected a moderated pollution. The major contribution factor was Hg with a risk index of 251.40. The source analysis showed that the content of Pb in the surface soil (10-20 cm) was different from that in the deep layer (20-30 cm), which may be caused by coal combustion and other human activities. The sources of Hg and As were similar and may come from coal combustion. The distance to the mining area was not the major factor affecting the diffusion of heavy metals, other candidate factors included terrain, aspect and wind direction, etc.

Key words: heavy metals; soil contamination; opencast; sources analysis; East Junggar Basin

矿产资源是人类生产和生活的基本保障之一, 而在矿山开采过程中产生的重金属对植物的生长发育有抑制和毒害作用, 使植物在自然条件下生长受阻甚至无法定居, 对原本脆弱的生态环境造成严重影响, 还可能对经济发展产生制约, 危害到人类的身体健康^[1,2]。

煤矿开采所引起的矿区土壤重金属污染现象已经成为土壤生态环境保护的重大问题^[2]。近年来,

国内外学者针对煤矿开采造成的重金属污染及其产生的环境效应做了大量工作, 研究工作主要集中在矿区废弃地污染治理^[3]、矿区重金属污染下的生物

收稿日期: 2015-11-04; 修订日期: 2015-12-17

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划科学研究重点项目 (XJDX2012H13); 国家自然科学基金项目 (41461056)

作者简介: 刘巍 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持与荒漠化治理, E-mail: lv_mail@foxmail.com

* 通讯联系人, E-mail: yjjdfly@sina.com

效应^[2,4~7]、工业城市土壤重金属污染^[8]、煤矸石污染^[9]等方面,其中胡振琪等^[10]在煤矸石及煤矿复垦区重金属污染方面做了较为深入的研究。然而,由煤矿开采直接引发的土壤重金属污染并不多见^[11~13],干旱区脆弱生态系统下的露天矿区煤矿开采污染更是缺乏系统研究。姚峰等^[14]、李长春等^[15]在准东(准噶尔盆地东部)露天矿区对 Zn、Cu、Ni、Cr 这 4 种重金属污染评价及来源分析为本文提供了良好的参考依据,但在重金属来源分析方面,研究内容相对较少,分析方法比较常规。准东煤田总面积约 1.3 万 km²,煤炭资源预测储量 3 900 亿 t,占全国储量(5.56 万亿 t)的 7%,是中国最大的整装煤田。本文以干旱区脆弱生态环境下的新疆准东煤田露天矿区为研究对象,在已有的研究基础上增加特定的重金属元素,对该区域土壤重金属污染现状进行分析,以期为煤矿开采下的生物生理响应以及维持生态系统稳定性研究奠定基础,结合重金属来源分析为矿区环境污染防治和治理提供技术支持,并为新疆类似环境(吐鲁番-哈密地区露天煤矿)下露天矿重金属污染防治提供理论依据。

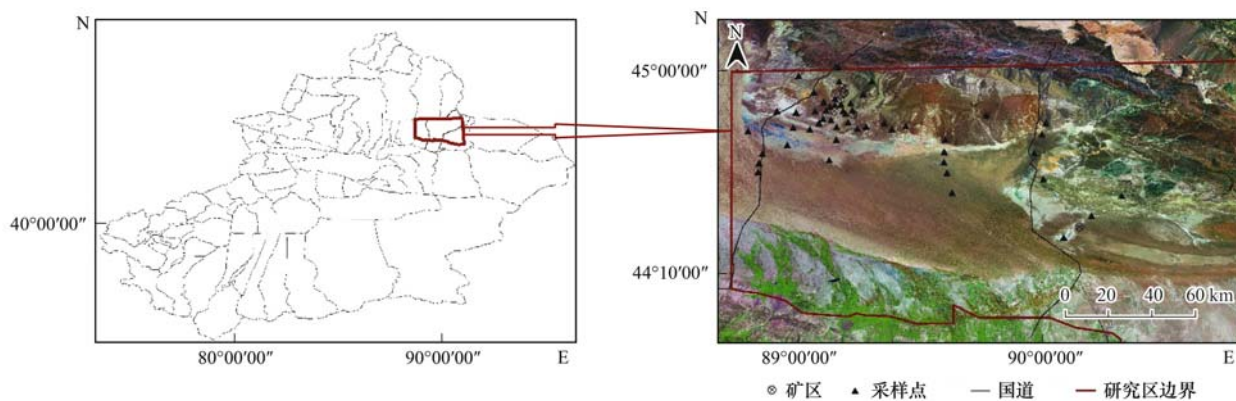


图1 研究区示意

Fig. 1 Study area

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

样品采集时间为 2014 年 7 月,设置 50 个土壤采样点,每个样点分 0~10、10~20、2~30 cm 三层取样,每层取 3 份,混合均匀后由样品袋封装,共 150 个样品,用 GPS 记录各个样点以及 9 个矿区的地理坐标。样品采回后自然风干,过 0.149 mm 筛,强酸消煮后,测定土壤锌(Zn)、铜(Cu)、铬(Cr)、铅(Pb)、汞(Hg)和砷(As)这 6 种重金属元素含量,其中 Hg、As 两种重金属元素使用普析通用 PF6-2 原子荧光光度计测定, Zn、Cu、Cr、Pb 这 4

1 研究区概况

研究区位于吉木萨尔县北部荒漠区,古尔班通古特沙漠南缘,为卡拉麦里西南山前戈壁荒漠地带,属典型的极端干旱大陆气候。常年少雨,日照充足,热量丰富,昼夜温差大,春秋季节多风,平均气温 7.0℃,多年平均降水量 183.5 mm,多年平均蒸发量 2 042.3 mm。全年主导风向为西北风,一般风力 3~5 级,多年平均风速 2.0 m·s⁻¹ 最大风速为 16.0 m·s⁻¹。土地利用类型以沙地、戈壁、裸土地和裸岩石砾地为主。植被稀少,属于蒙古类型的灌木和半灌木荒漠,主要植被有盐生假木贼 [*Anabasis salsa* (C. A. M.) Benth]、麻黄 [*Ephedra distachya* L.]、梭梭 [*Haloxylon ammodendron* (C. A. M.) Bunge], 常伴生少量猪毛菜 (*Salsola collina* Pall.)、驼绒藜 [*Ceratoides latens* (J. F. Gmel.) Reveal et Holmgren]、戈壁藜 [*Iljinia regelii* (Bunge) Korov.] 和霸王 [*Sarcosygium xanthoxylon* Bunge] 等植物,生长十分稀疏,覆盖度约为 3%~5%,土壤以灰棕色荒漠土为主。

种重金属元素使用日立 Z-2000 型原子吸收分光光度计测定。同时于 2014 年 5 月在各采样点 2 m 高处架设降尘缸,分别于 7、9、12 月收集降尘缸内样品,带回室内称重后混合,使用上述方法测得降尘的 Zn、Cu、Cr、Pb、Hg 和 As 含量。为保证数据的准确性,每个样品有 3 个重复,空白样品与标准溶液(国家标准物质样品信息中心,GBW07426)同时消煮,进行精密度以及回收率的计算,各个元素检出限、相对标准偏差、回收率见表 1。

2.2 评价方法

以国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995) I 级标准为评价依据,采用内梅罗指数法(Nemerow

表 1 质量控制
Table 1 Quality control

项目	锌 Zn	铜 Cu	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As
检出限	0.005 mg·L ⁻¹	0.01 mg·L ⁻¹	0.01 mg·L ⁻¹	0.02 mg·L ⁻¹	0.2 μg·L ⁻¹	5 μg·L ⁻¹
相对标准偏差/%	1.5	1.0	3.0	1.0	3.5	3.0
平均回收率/%	96.2	99.5	100.3	105.4	98.2	100.1

index)、地质累积指数法(geo-accumulation index)、潜在生态危害指数法(potential ecological risk index)这 3 种常见的指数评价方法^[16]对准东露天矿区土壤重金属污染水平及潜在的生态危害进行评价(表 2)。内梅罗指数计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i$$
$$P_{综合} = \sqrt{\frac{(P_i)^2 + (P_{i\max})^2}{2}}$$

式中, $P_{综合}$ 为内梅罗污染指数; P_i 为单项污染指数; C_i 为污染物实测值; S_i 为根据所需选取的评价标准; $\bar{P}_i$ 为单项污染指数平均值; $P_{i\max}$ 为最大单项污染指数。

地质累积指数法计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n/K \cdot B_n]$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数, C_n 为元素 n 在土壤中的含量, B_n 为土壤中该元素的地球化学背景值,为成岩作用引起的背景值变动系数(一般取 $K=1.5$),该方法无法对元素间或区域间潜在环境质量进行比较分析,因此可以与聚类方法相结合进行分析^[16]。

潜在生态危害指数法^[17]计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_{实测}^i / C_n^i$$

式中,RI 为采样点多种重金属综合潜在生态危害指数; E_r^i 单一重金属潜在危害系数; T_r^i 为采样点某种重金属毒性相应系数(根据 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数得到,为 $Zn=1 < Cr=2 < Cu=Pb=5 < As=10 < Hg=40$); C_r^i 为该元素的污染系数; $C_{实测}^i$ 为该元素实测含量; C_n^i 为该元素的评价标准。

表 2 土壤重金属污染等级划分标准

Table 2 Criteria of pollution grade of soil heavy metals

地质累积指数			内梅罗指数				潜在生态危害指数			
I_{geo}	分级	污染等级	P_i	污染等级	$P_{综合}$	污染等级	E_r^i	单一因子风险程度分级	RI	生态风险等级
<0	0	无污染	$P_i \leq 1$	清洁	$P_{综合} \leq 0.7$	清洁	<40	生态危害轻微	<150	生态危害轻微
0~1	1	无~中度污染	$1 < P_i \leq 2$	轻污染	$0.7 < P_{综合} \leq 1$	警戒线	40~80	生态危害中等	150~300	生态危害中等
1~2	2	中度污染	$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$1 < P_{综合} \leq 2$	轻度污染	80~160	生态危害较高	300~600	生态危害较高
2~3	3	中度~强污染	$P_i > 3$	重度污染	$2 < P_{综合} \leq 3$	中度污染	160~320	生态危害高	≥ 600	生态危害高
3~4	4	强污染			$P_{综合} > 3$	重度污染	≥ 320	生态危害极高		
4~5	5	强~极强污染								
>5	6	极强污染								

2.3 距离分析

根据样点以及矿区的地理坐标,可以计算出各个样点到每个矿区的距离,则样点到矿区的距离定义为:

$$D = \min\{d_{ij}\}; i = 1, 2, \dots, 50; j = 1, 2, \dots, 6$$

式中, D 为样点到矿区的距离(km); d_{ij} 为样点到某一矿区距离(km)。

2.4 数据分析方法

运用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理和统计分析,采用 Origin 8.0 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 表层土壤重金属含量

对数据进行描述性统计,得到各样点重金属含

量最大值、最小值、算数平均值、变异系数、标准差,并与新疆土壤重金属元素背景值^[18]、土壤环境质量(GB 15618-1995)Ⅰ级标准做比较,见表 3。与Ⅰ级标准相比,矿区土壤重金属中 Zn、Pb 含量均未超标,Cu 超标率仅为 2%,Cr 在 50 个样点中有 19 个超标,超标率为 38%,Hg 有 6 个超标,超标率为 12%,而 As 超标最严重,有 45 个样点超标,超标率为 92%。As 元素含量与Ⅲ级标准($30.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比,仍有 57%的超标率,其他元素均未超过Ⅱ级标准。

3.2 土壤重金属污染评价

以国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)Ⅰ级标准为评价依据,分别得出研究区 50 个土壤样点内梅罗指数、潜在生态危害指数,以新疆土壤元素为背景值计算出个样品地质累积指数,见表 4。

表 3 土壤重金属参数统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 3 Statistic values of soil heavy metals/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

统计参数	锌 Zn	铜 Cu	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As
最大值	81.23	36.15	187.06	19.96	0.51	55.39
最小值	26.24	6.80	30.85	4.41	0.01	1.48
平均值	48.00	19.27	85.42	13.29	0.07	31.00
标准差	12.15	6.58	50.11	3.84	0.10	11.95
变异系数	0.25	0.34	0.59	0.29	1.52	0.39
新疆土壤背景值	68.80	26.70	49.30	19.40	0.01	11.20
I 级标准(GB 15618-1995)	100.00	35.00	90.00	35.00	0.15	15.00
超标率/%	0.00	2.00	38.00	0.00	12.00	91.84

根据表 2 污染等级划分标准可以得出,Zn、Cu、Cr、Pb 等 4 种重金属地质累积指数均小于 0,处于无污染水平,Hg 最大,为 1.14,处于中度污染水平,As 次之,为 0.62,处于无-中度污染水平. 单项污染指数平均值 $As(2.07) > Cr(0.95) > Cu(0.55) > Zn(0.48) > Hg(0.45) > Pb(0.38)$,其中 As 处于中度污染水平,这与重金属含量分析 As 超标率最高这一结果一致,其他元素均处于清洁水平,研究区总体处于轻度污染状态,而研究区生态风险等级为中等,主要贡献因子是 Hg,生态危害系数为 251.40,生态危害高,在今后的土壤修复过程中应为主要治理对象,其他元素均表现为轻微危害程度.

由表 3 可以看出,由于研究区土壤重金属含量总体处于较低水平,因此 3 种评价结果整体上趋于一致,但对于具体评价结果的不同,其原因在于,地质累积指数由于主要考虑到地球化学背景值的影响,而单项污染指数会因为评价标准不同而有所变化,但其结果与重金属含量具有线性关系,因此与含量分析结果一致,潜在生态危害性指数由于考虑到不同重金属的毒害作用而进行了权重分析,将环境生态效应与毒理学联系起来,其评价结果会由于毒性系数作用而更偏重于毒理方面^[17]. 因此,综合 3 种评价方法可以得知,准东煤矿露天矿区土壤重金属主要治理对象为 Hg,其次为 As,其他重金属需做好防治措施.

表 4 土壤重金属污染评价结果
Table 4 Assessment results of soil heavy metal pollution

评价因子	锌 Zn	铜 Cu	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As	$P_{\text{综合}}/RI$	等级划分
I_{geo}	-1.15	-1.15	-0.03	-1.21	1.14	0.62	—	—
P_i	0.48	0.55	0.95	0.38	0.45	2.07	1.57	轻度污染
E_r^i	2.24	10.44	2.91	14.97	251.40	8.50	290.46	生态危害中等

3.3 重金属来源分析

3.3.1 分层比较

露天矿区地处古尔班通古特沙漠边缘,除采矿活动外,其他人为干扰较少,土层扰动较少,因此,通过比较表层土壤与深层土壤重金属含量,则可以证明重金属是否来源于自然成土过程. 分层测量土壤中 0~10、10~20、20~30 cm 重金属含量,并通过单因素方差分析发现,6 种土壤重金属中只有 Pb 在各层分布有差异($P < 0.05$),其他元素均无差异. 通过进一步多重比较(LSD)发现,其差异主要来源于表层 0~10 cm 与 20~30 cm 土壤之间,且表层含量大于底层,因此可以排除成土母质造成的影响. 此外,Pb 含量在研究区整体水平上的分层差异,应

该与频繁的人为活动有关.

3.3.2 降尘与表层土壤重金属含量比较

为进一步证明煤矿开采活动研究区土壤重金属含量的影响,分别收集并测量了各个样点土壤以及降尘中的重金属含量,各种金属含量如图 2 所示. 降尘中 Zn 元素含量超高是由于收集容器中含有镀锌防锈漆(锌含量 98.0%、铝含量 1.8%),影响了数据的准确性,因此不做重点分析. 将两组数据进行单因素方差分析,结果发现 Zn、Cu、Cr 和 Pb 这 4 种重金属含量均值在土壤与降尘中差异显著($P < 0.05$),而 Hg、As 两种重金属含量差异不显著($P > 0.05$),说明土壤和降尘的 Hg 和 As 含量具有一致性,而大气中 Hg 和 As 的来源部分是煤炭的燃

烧^[19,20],五彩湾露天矿区除煤炭开采以外还伴随着一系列的煤电、煤化工,因此可以推断,土壤中 Hg 和 As 部分可能来源于矿区的工业活动。

此外,通过相关分析可以进一步判断重金属来源是否相同,如表 5 所示,降尘中的 Hg 和 As 元素具有极高的相关性,说明其具有很好的伴生关系,来源相同,而土壤中的 As 与降尘中 Hg 和 As 都有较高的相关性,这进一步证明了土壤中的 As 元素是通过降尘进入土壤而非自然成土过程。此外 Zn 和 Cu 也是一对伴生性元素,其在土壤和降尘中含量相关系数分别为 0.88 和 0.61,但对于降尘中 Cr 与 Zn、Cu 表现出的复杂的相关关系还有待于进一步的探讨。

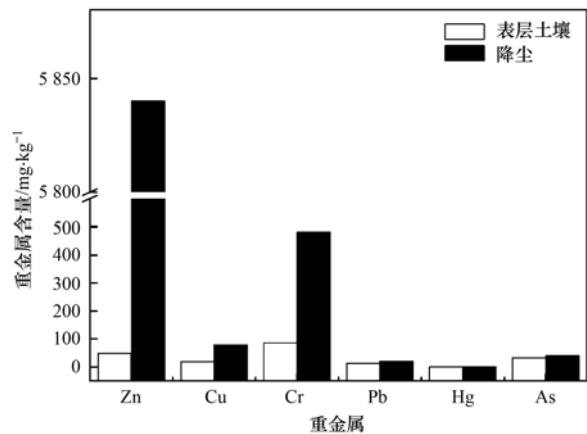


图2 表层土壤与降尘重金属含量
Fig. 2 Heavy metal contents in surface soil and falling dust

表5 土壤与降尘中重金属含量相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficients of heavy metal contents in soil and dusts												
	Zn1	Cu1	Cr1	Pb1	Hg1	As1	Zn2	Cu2	Cr2	Pb2	Hg2	As2
Zn1	1.00											
Cu1	0.88	1.00										
Cr1	0.30	0.42	1.00									
Pb1	0.08	0.15	-0.08	1.00								
Hg1	-0.24	-0.15	0.36	-0.22	1.00							
As1	0.28	0.26	0.01	0.33	-0.10	1.00						
Zn2	-0.06	-0.01	0.06	0.23	0.23	0.15	1.00					
Cu2	0.06	0.12	0.09	0.12	0.14	0.02	0.61	1.00				
Cr2	0.70	0.15	0.14	0.05	0.24	-0.04	0.49	0.96	1.00			
Pb2	-0.45	-0.28	0.06	-0.09	0.23	0.02	0.08	0.09	0.15	1.00		
Hg2	-0.05	-0.04	-0.04	0.19	0.19	0.72	0.05	-0.03	-0.03	0.39	1.00	
As2	-0.10	-0.03	0.04	0.12	0.27	0.61	0.02	0.02	0.06	0.56	0.94	1.00

1) 元素后 1 表示土壤,2 表示降尘

3.3.3 距离分析

为探讨距矿区远近对重金属含量的影响,根据距离定义,可以计算出各个样点到矿区的距离,将各样点按照距离进行聚类,最终将其分为两部分,第一部分共 37 个样点,距矿区平均距离为 8.81 km,最大值为 24.92 km,最小值为 1.86 km,可将其定义为近距样点;另一部分共 13 各样点,平均距离为 36.19 km,最大值为 44.43 km,最小值为 29.36 km,可将其定义为远距样点。将这两部分样点区分后进行单因素方差分析,结果发现 Zn、Cu、Cr、Pb、Hg 和 As 这 6 种重金属差异不显著(P 值分别为 0.05、0.07、0.36、0.74、0.65、0.68),因此可以推断出距离远近并不是矿区重金属分布的主要因素,可能还受到风向变化、微地形、以及矿区交叉的影响。此外,根据坐标点,利用反距离权重空间插值法预测出研究区土壤各重金属空间分布图,见图 3。可以看出,各种金属元素并非在矿区密集的区域含量高,多

数高值和低值都是呈片状分布的,这一方面可以证明与矿区的距离不是影响重金属空间分布差异的最主要因素,同时还说明空间插值得到的结果很大程度上受到采样点分布的制约。

4 讨论

土壤重金属准确的定量描述是评价重金属污染的基本前提,但对于重金属元素的选取,却没有统一的标准^[12,21,22],这可能是由于研究区环境特点以及对重金属毒害侧重点不一造成的。本研究针对特定的目标,结合前人研究,选取较为常用的 6 种重金属 Zn、Cu、Cr、Pb、Hg 和 As 为评价元素,对研究区污染现状及来源进行分析。目前学者^[23,24]多采用相关分析法、聚类分析法以及因子分析法判别某种元素是否来源于土壤母质或者具有相同的来源,对于其他来源,因研究对象不同而略有差别。由于本研究区地处荒漠区,位于卡拉麦里自然保护区边缘,在煤

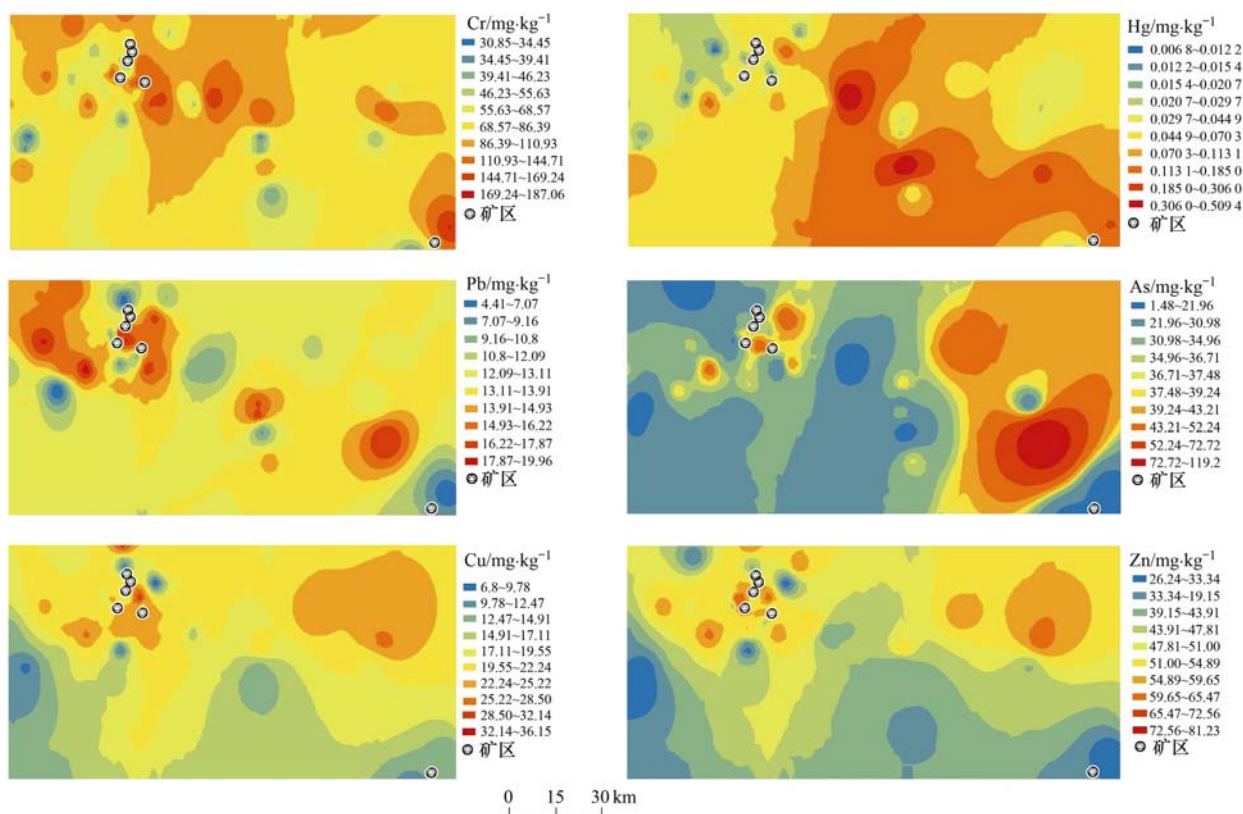


图3 重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals

矿开采以前几乎不存在其它人为干扰,土壤剖面未受人为扰动,因此重金属来源具有相对专一性,鉴于特殊的环境,以期能够找到开采活动对生态环境影响的新证据。

研究区中 Zn、Cu、Cr 这 3 种重金属元素并未表现出明显的污染状态,李长春等^[15]在该地区对 Zn、Cu、Ni、Cr 这 4 种重金属元素作了分析,结果表明,研究区土壤受 Cr 污染最严重,Zn、Cu、Ni 污染相对较轻,与本研究 Cr 超标率 38%,Cu 超标率 2%,Zn 未超标等结论一致。对于 Cr 污染来源,李长春等认为其主要受煤矿开采时煤尘和人为因素的影响,根据《新疆维吾尔自治区准东煤田五彩湾矿区总体规划(审批版)》(《规划》)煤质分析显示,煤层中不同程度的伴生有 Cr 元素,但在本研究中,未找到足够的证据来说明 Cr 元素含量的超标是来自于煤矿开采以及其他人为活动。姚峰等^[14]在研究区土壤重金属来源分析中表明,Zn 与 Cu 相关性极显著,与本研究结论一致,说明这两种元素应该具备较好的伴生性,且来源相同。

在本研究中 As 是超出评价标准最严重的元素,整体处于中度污染的水平。王国胜^[25]的研究表明,研究区原煤质为一级含 As 煤,但《规划》中显示煤

中伴生元素 As 含量值超过地壳值 100 倍,说明 As 在煤中含量较一般金属元素高,魏晓飞等^[26]研究表明,煤中的 As 具有较高的挥发性,硫化物中的沸点为 707.0℃,煤燃烧释放的飞灰中 As 占原煤含量的 84.6%^[27],且容易富集在细飞灰中,随颗粒物远距离扩散,从而造成了研究区整体 As 元素的污染。因此可以断定,燃煤释放的 As 是其扩散污染的重要渠道^[28]。鉴于 Hg 元素具有较高的毒害作用,其成为研究区另一个危害程度较大的重金属元素。降尘分析表明,降尘中 As、Hg 元素的含量与土壤中的 As、Hg 元素含量没有差异,因此,土壤中这两种元素来自于降尘。相关分析发现,降尘中的 Hg 元素与 As 具有极高的相关性,虽然未有证据表明研究区煤中是否含 Hg,但有研究^[29,30]证实煤炭燃烧会造成大气中 Hg 污染,与 As 元素不同的是,土壤中的 Hg 元素并未与降尘中的 Hg 具有良好的相关性,这可能与 Hg 在燃烧后的形态特征有关^[31]。

Pb 元素含量虽未超过环境质量标准,但其含量却在剖面中发生了变异,且表层含量高于底层,胡小娜等^[32]在干旱区绿洲灌漠土 Cu、Zn 和 Pb 的吸附解吸特征中提到,灰漠土对铅的吸附能力远远大于 Cu、Zn,武文飞等^[33]在油菜对重金属富集试验中也

得出 Pb 容易在土壤中形成难以移动的 PbCO_3 、 $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 PbSO_4 等络合物,因此可以推断,造成这种变异的原因,来自于某一时期的类活动,使得 Pb 元素在表层土壤中富集,并未向下层扩散.此外,虽然《规划》中表明煤中伴生有 Pb,并易随燃煤释放富集于细飞灰中扩散^[26,34],但未造成一定危害,应注意防范.

5 结论

(1)土壤重金属含量分析表明,除 Zn、Pb 含量未超出环境质量标准外,其余元素含量均检出超限,与环境质量一级标准相比,50 个样点中,其中 Cu 超标率为 2%,Cr 超标率为 38%,Hg 超标率为 12%,As 超标最严重,超标率为 92%.

(2)以国家土壤环境质量标准为依据,对研究区各元素污染评价得出:6 种元素中 Hg 与 As 元素都处于中度污染水平,其他元素均无污染;研究区整体处于轻度污染水平,生态风险等级为中等,主要贡献因子是 Hg,生态危害系数为 251.40,生态危害高.

(3)重金属含量剖面分析表明,Pb 元素在土层中发生了变异,降尘分析与相关分析表明,降尘与土壤中 Hg 和 As 元素含量具有一致性,具有共同的来源.与矿区的距离大小,并不是造成重金属含量分布差异的主要原因.

(4)准东煤田露天矿区煤矿开采应做好重金属元素 Hg 和 As 的治理工作,其他元素应加强防范.

参考文献:

- [1] 徐友宁,陈社斌,陈华清,等.大柳塔煤矿开发土壤重金属污染响应研究[J].中国矿业,2007,16(7):47-50,54.
- [2] 郭星亮,谷洁,陈智学,等.铜川煤矿区重金属污染对土壤微生物群落代谢和酶活性的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):798-806.
- [3] Yenilmez F, Kuter N, Emil M K, *et al.* Evaluation of pollution levels at an abandoned coal mine site in turkey with the aid of GIS[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(1): 12-19.
- [4] 黄小娟,江长胜,郝庆菊.重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征[J].生态学报,2014,34(15):4201-4211.
- [5] Candeias C, Melo R, Ávila P F, *et al.* Heavy metal pollution in mine-soil-plant system in S. Francisco de Assis - panasqueira mine (Portugal)[J]. Applied Geochemistry, 2014, 44: 12-26.
- [6] Chehregani A, Noori M, Yazdi H L. Phytoremediation of heavy-metal-polluted soils: screening for new accumulator plants in Angouran mine (Iran) and evaluation of removal ability[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(5): 1349-1353.
- [7] 施翔,陈益泰,王树凤,等.废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收[J].环境科学,2012,33(6):2021-2027.
- [8] 戴彬,吕建树,战金成,等.山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(2):507-515.
- [9] 廖四海,杜勇立,刘振华,等.煤矸石堆放地周围土壤中重金属的污染特性及评价[J].环境工程,2014,32(8):118-120,126.
- [10] 胡振琪,戚家忠,司继涛.不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价[J].农业工程学报,2003,19(2):214-218.
- [11] 陈家栋,潘宝宝,张金池,等.广东大宝山矿区土壤重金属含量及其影响因素[J].水土保持研究,2012,19(6):237-241,246.
- [12] 楚纯洁,周金凤.平顶山矿区丘陵坡地土壤重金属分布及污染特征[J].地理研究,2014,33(7):1383-1392.
- [13] Teixeira E, Ortiz L, Alves M, *et al.* Distribution of selected heavy metals in fluvial sediments of the coal mining region of Baixo Jacuí, RS, Brazil[J]. Environmental Geology, 2001, 41(1-2):145-154.
- [14] 姚峰,包安明,古丽·加帕尔,等.新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价[J].中国环境科学,2013,33(10):1821-1828.
- [15] 李长春,张光胜,姚峰,等.新疆准东煤田五彩湾露天矿区土壤重金属污染评估与分析[J].环境工程,2014,32(7):142-146.
- [16] 郭笑笑,刘丛强,朱兆洲,等.土壤重金属污染评价方法[J].生态学报,2011,30(5):889-896.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [18] 国家环境保护局,中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [19] 步青云,徐海红,李佳,等.我国燃煤电厂汞污染控制分析[J].环境保护,2014,(1):55-57.
- [20] 余明.降尘中砷污染源初探[A].见:自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(1)[C].重庆:中国科学技术协会学会学术部,2009.295-298.
- [21] 张菊,陈诗越,邓焕广,等.山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J].生态学报,2012,32(10):3144-3153.
- [22] 王贵,张庆辉,段丽丽.典型露天煤矿区土壤重金属潜在生态危险性评价——以黑岱沟露天煤矿为例[J].阴山学刊,2014,28(4):11-13.
- [23] 杨阳,周正朝,张福平,等.沱河沿岸土壤重金属分布特征及来源分析[J].干旱区研究,2014,31(2):237-243.
- [24] 穆叶赛尔·吐地,吉力力·阿布都外力,姜逢清.天山北坡土壤重金属含量的分布特征及其来源解释[J].中国生态农业学报,2013,21(7):883-890.
- [25] 王国胜.新疆准东煤田大井矿区东露天煤矿煤质特性分析

- [J]. 煤质技术, 2013, (5): 18-20.
- [26] 魏晓飞, 张国平, 李玲, 等. 黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1457-1462.
- [27] 郭欣, 郑楚光, 陈丹. 300MW 煤粉锅炉砷排放特征的实验研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 631-634.
- [28] 黄超, 田继军. 我国煤中砷赋存状态的研究进展[J]. 西部探矿工程, 2013, **25**(7): 100-103.
- [29] 王起超, 沈文国, 麻壮伟. 中国燃煤汞排放量估算[J]. 中国环境科学, 1999, **19**(4): 318-321.
- [30] 王圣, 王慧敏, 朱法华, 等. 基于实测的燃煤电厂汞排放特性分析与研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 33-37.
- [31] 殷立宝, 余亮英, 徐齐胜, 等. 不同煤种对烟气中汞的形态和分布的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1567-1571.
- [32] 胡小娜, 南忠仁, 王胜利, 等. 干旱区绿洲灌漠土 Cu、Zn 和 Pb 的吸附解吸特征[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2183-2188.
- [33] 武文飞, 南忠仁, 王胜利, 等. 单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3253-3260.
- [34] 方婷. 煤矿区中铅的环境地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行