

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

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

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
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	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价

臧飞,王胜利*,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷

(兰州大学资源环境学院,兰州 730000)

摘要:采用 Tessier 连续提取法、相关分析、富集因子法 (EF) 和风险评价编码法 (RAC),研究了干旱区工矿型绿洲(以白银为例)城郊排污渠沉积物重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni、Cr 的形态分布规律及潜在环境风险。结果表明,东、西大沟沉积物中各重金属元素平均含量除 Cr 外,均明显高于甘肃省土壤背景值。富集因子法评价表明,东、西大沟沉积物中 Cd 富集较为严重,达极强污染水平。形态分析表明,东大沟沉积物中 Zn、Ni、Cr 以残渣态为主,Cu、Cd 以有机结合态为主,Pb 以铁锰氧化物结合态为主;西大沟沉积物中 Pb 以铁锰氧化物结合态为主,其余元素均以残渣态为主。风险评价编码法 (RAC) 结果显示,东大沟沉积物各重金属的风险等级为: Ni > Cd > Pb > Cu > Zn > Cr, 其中 Ni 的风险等级最高,处于高风险水平;西大沟沉积物各重金属的风险等级为: Pb > Cd > Ni > Cu > Zn > Cr。其中 Cd、Pb、Ni 风险等级最高,处于高风险水平。

关键词:工矿型绿洲;沉积物;重金属;形态;风险评价

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0497-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.02.017

Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region

ZANG Fei, WANG Sheng-li*, NAN Zhong-ren, WANG Zhao-wei, REN Ye-meng, WANG De-peng, LIAO Qin, ZHOU Ting

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The speciation distribution and potential environmental risk of Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, Cr in sediments in suburban outfall of industrial oasis region, Baiyin City were studied by Tessier sequential extraction method, correlation analysis, enrichment factor (EF) and risk assessment code (RAC). The results indicated that, the average concentration of heavy metals in sediments samples of Dongdagou and Xidagou streams exceeded the background levels in Gansu Province, with Cr, as an exception. The enrichment factor suggested that the enrichment of Cd in sediments of Dongdagou and Xidagou streams were very serious, which posed a strong pollution level. Furthermore, the analysis of chemical speciation indicated that Zn, Ni, and Cr in sediments of Dongdagou stream were mainly dominated by the fraction of residual, the existence of Cu and Cd was mainly in organic forms, while Pb was composed mostly by its Fe-Mn oxides fraction; Pb in sediments of Xidagou stream existed by Fe-Mn oxides fraction, other metals mainly appeared with the residual fraction. The risk assessment code (RAC) showed that the risk level of heavy metals in sediments of Dongdagou stream descended in the order: Ni > Cd > Pb > Cu > Zn > Cr, Ni posed a highest risk level. The risk level of heavy metals in sediments of Xidagou stream decreased in the order: Pb > Cd > Ni > Cu > Zn > Cr, Cd, Pb and Ni posed a highest risk level.

Key words: industrial oasis; sediment; heavy metals; speciation; risk assessment

干旱区绿洲由于有色金属矿藏的采掘、冶炼和加工等工业的兴起与发展,极大推动了城市社会经济的快速发展,同时也带来了严重的重金属污染问题^[1-3]。污染源长期向河流水体排放含有大量重金属元素的工业废水,使河流沉积物中富集了大量的重金属元素。重金属一般不能借助于天然过程从水生生态系统中消失,它们是累积性毒物,对饮用水水质、水生生物和生态系统构成潜在的威胁。吸附了重金属污染物的河流沉积物在一定的水环境条件下,会重新释放污染物,造成水体的二次污染,成为二次污染源^[4]。一些学者针对不同地区河流、湖泊沉积物中重金属进行大量研究^[5,6],结果表明,沉积

物重金属的生物毒性不仅与总量有关,更大程度上由重金属的形态特征所决定^[7,8]。因此,研究重金属在沉积物中的形态分布规律及潜在环境风险,对了解重金属的变化形式、迁移规律和生物毒性作用有十分重要的意义。

到目前为止,国内外对重金属形态的研究已经

收稿日期: 2014-06-25; 修订日期: 2014-09-04

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120211110018); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项 (lzujbky-2012-141); 国家自然科学基金项目 (51178209, 91025015)

作者简介: 臧飞 (1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染与控制修复, E-mail: zangf13@lzu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangshengl@lzu.edu.cn

取得了一些成果,不过这些研究的对象都集中在天然湖泊及江河河道等水体沉积物重金属的形态^[9,10],对于西北干旱区工矿型绿洲排污渠沉积物中重金属的形态研究则相对较少。白银位于甘肃省中部,是我国重要的以铜资源为主的资源型城市,以露天铜矿为代表的铜、铅、锌多金属硫化物矿山为主,城区工厂多且分布集中,废水废气排放量大。近年来,白银市生产、生活污水均分别由东、西大沟排入黄河,造成了东、西大沟和黄河白银段重金属的污染^[11]。东大沟起源于白银公司露天矿,自北向南穿过白银市东部市区,全长约 38 km,是白银市东部的一条排污渠,主要汇集了白银公司露天矿、西北铅锌厂、磷肥厂、氟化盐厂、银光化学工业公司等大中型企业的生产、生活污水及市区东部居民生活污水,最终进入黄河;西大沟起源于白银北面的灰土涝池,全长 30 km,主要接纳了西北铜加工厂、白银公司铝厂等企业的生产废水以及市区西部居民的生活污水,最终流入黄河。由于西北干旱区严重缺水,城郊农业生产中均有不同程度的利用含重金属的污水进行农业灌溉的历史^[12],这可能导致土壤和农作物的污染,对人体健康和生态环境构成了严重的威胁。本文以工矿型绿洲城市白银市城郊为研究区域,选取具有代表性的排污渠(东、西大沟)沉积物为研究对象,测定了东、西大沟沉积物中重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni、Cr 的含量,采用 Tessier 五

步连续提取法^[13],对比分析了东、西大沟沉积物中重金属的化学形态分布规律及潜在环境风险,以期 为工矿型绿洲城郊排污渠沉积物中重金属的污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

沿白银市城郊东、西大沟河流流向从上游到下游依次等间距分别选择 12 个样点,采样间距约为 2 km,共采集 24 个表层沉积物样品(0~5 cm)。为使样品具有代表性,采样时尽量选择水流较平缓的地方,并在同一样点周围采样 3 次,使样品可以反映该断面污染的实际情况,最后将同一断面采集的样品混合在一起组成一个样。其中 E01~E12 代表东大沟采样点沉积物,W01~W12 代表西大沟采样点沉积物。取样采用 GPS 精确定位,采样点分布详见图 1。将采回的沉积物样品于阴凉处晾干,剔除石块等异物,经研磨过 2 mm 尼龙筛备用。

1.2 分析测定方法

沉积物的理化性质采用土壤农业化学常规分析方法^[14]测定。其中 pH 值采用电位法;EC 值采用电导率法;有机质含量采用重铬酸钾容量法。沉积物重金属全量采用 HNO₃-HF-HClO₄ 三酸法消解^[13],化学形态采用 Tessier 五步连续提取法^[13]。用原子吸收光谱仪(Thermo Fishier, SOLAAR M6)测定重金

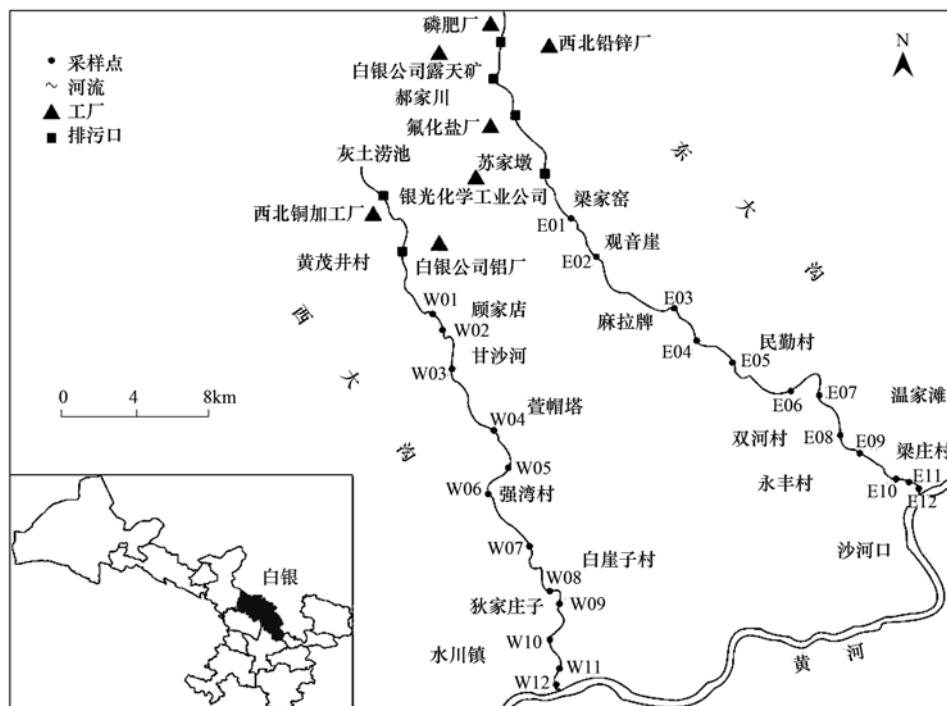


图 1 研究区域及采样点位置示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

属 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni、Cr 的含量。

1.3 质量保证

实验过程中采用 20% 的平行样、空白样、GSS-1 标准样进行质量控制,误差控制在 5% 以内,其中 GSS-1 的各重金属的回收率分别为 Cu(98.12%)、Zn(98.56%)、Cd(95.01%)、Pb(96.85%)、Ni(97.32%)、Cr(96.15%)。实验所用器皿均用 10% 的 HNO₃ 浸泡 24 h 以上,实验用水均为去离子水,供试试剂均为优级纯。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 CorelDRAW 12 软件进行数据处理和制图,并利用 SPSS 17.0 软件对数据进行相关性分析。

1.5 富集因子法

富集因子是用以定量评价污染程度与污染来源的重要指标,选择满足一定条件的元素作为参比元素,样品中污染元素质量分数与参比元素质量分数的比值与参比系统中二者质量分数比值的比率即为富集因子。

$$EF = (c_i/c_n)_{\text{样品}} / (c_i/c_n)_{\text{背景}}$$

式中, c_i 表示重金属元素 i 的浓度, c_n 表示标准化元素的浓度。Sutherland^[15] 根据富集因子的大小,将污染程度划分为 5 个等级,富集因子小于 2,认为该元素的污染程度为无污染到轻微污染;富集因子在 2~5 之间,为中度污染;5~20 之间为显著污染;20~40 之间为强烈污染;富集因子大于 40 为极强

污染。

1.6 风险评价编码法

目前国内外利用重金属形态分析工具研究风险,一般从分析几大化学相的可能生物利用的部分所占比例,然后判定所具有的环境风险性。根据形态分析方法对应的风险限值,认为沉积物中重金属有不同的结合相,这些结合相对应着不同的结合紧密程度,可以用风险评价编码法(RAC)来表征和规范^[16,17],当可交换态和碳酸盐结合态所占比例小于 1% 视为无风险;1%~10% 为低风险;11%~30% 为中风险;31%~50% 为高风险;大于 50% 为极高风险。

2 结果与讨论

2.1 沉积物主要理化性质及重金属的空间分布

由表 1 可见,东大沟沉积物 pH 值主要呈中性或弱碱性(6.78~8.22),样点 E03 的 pH 值最小(6.78);电导率为 153~353 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均值为 212 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;有机质含量为 11.95~29.01 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质最大值出现在样点 E05 处,为民勤村附近吊庄台桥上游 100 m 处沉积物。西大沟沉积物 pH 值主要呈碱性(8.79~9.31),样点 W03 的 pH 值最小(8.79),为甘沙河附近下游沉积物;电导率为 83~437 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均值为 204 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;有机质含量为 10.24~26.17 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 W01 和 W12 处有机质含量最大,均为 26.17 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 1 沉积物的主要理化性质¹⁾
Table 1 Physical and chemical properties of sediments

东大沟	pH	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	OM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	西大沟	pH	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	OM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
E01	7.40±0.07	162±1.10	13.09±0.65	W01	8.88±0.04	437±3.85	26.17±0.30
E02	7.35±0.06	172±2.60	22.76±0.83	W02	8.86±0.03	187±2.35	23.89±0.21
E03	6.78±0.03	190±3.50	20.48±0.42	W03	8.79±0.02	167±1.35	16.50±0.82
E04	6.79±0.04	164±2.20	23.89±0.69	W04	9.03±0.05	137±0.85	14.22±0.71
E05	7.94±0.09	353±4.23	29.01±0.45	W05	9.31±0.06	156±1.80	11.95±0.59
E06	8.00±0.05	153±1.65	15.36±0.76	W06	9.16±0.05	349±2.45	11.38±0.56
E07	8.22±0.09	177±2.85	14.79±0.73	W07	9.25±0.02	326±2.30	12.23±0.61
E08	7.33±0.06	208±3.40	11.95±0.59	W08	8.98±0.04	168±1.40	12.52±0.62
E09	7.63±0.08	214±3.70	13.09±0.65	W09	8.92±0.06	107±2.35	12.52±0.60
E10	8.13±0.04	187±1.35	15.93±0.79	W10	9.10±0.05	83±0.15	11.95±0.59
E11	7.32±0.02	247±3.35	11.95±0.59	W11	9.26±0.07	204±3.20	10.24±0.51
E12	8.06±0.07	317±4.15	14.22±0.71	W12	8.85±0.04	130±2.50	26.17±0.25
平均值	—	212±2.84	17.21±0.65	平均值	—	204±2.05	15.81±0.53

1) EC 为电导率,OM 为有机质,表中数据为平均值±标准差($n=3$)

本研究分析了 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni、Cr 共 6 种重金属元素,东、西大沟各采样点重金属含量分布如图 2 所示。

由表 2 可知,研究区沉积物重金属含量明显高于甘肃省土壤背景值^[18],表明该区域沉积物已被重金属污染。东大沟沉积物中 Zn 的含量最高,其均值

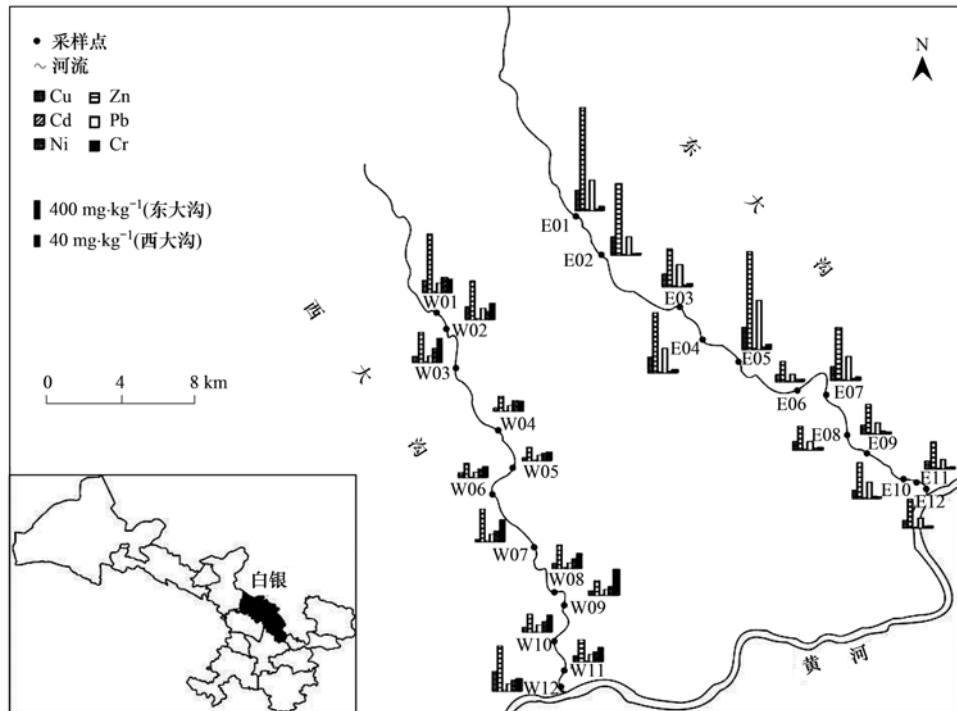


图2 东、西大沟沿程各采样点重金属含量分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal concentrations in sediment samples of Dongdagou and Xidagou streams

达 $1058.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 几近甘肃省土壤背景值的 15 倍, Pb、Cu、Ni 污染也很严重, 均值依次为 414.59 、 272.12 、 $41.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别是甘肃省土壤背景值的 22.05 倍、11.29 倍、1.18 倍, 在所有元素中, Cd 污染最为严重, 均值为 $10.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超出甘肃省土壤背景值的近 85 倍, Cr 仅个别样点含量高于甘肃省土壤背景值. 由图 2 可知, 东大沟中、上游沉积物样点 E01 ~ E05 处重金属含量较下游样点 E06 ~ E12 处普遍偏高, 这与上游磷肥厂、西北铅锌厂等排放的污水中重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni 等含量密切相关. 同土壤一样, 沉积物有机质含量影响着沉积物对重金属的吸附^[19]. 由于下游沉积物有机质含量低, 对重金属的吸附和累积能力弱, 使得重金属迁移能力增强, 进而出现下游样点沉积物重金属含量明显较中、上游低的现象. 表 2 表明, 西大沟沉积物中 Zn 的含量最高, 其均值达 $93.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是甘肃省土壤背景值的 1.36 倍, Pb、Cu、Ni 也有不同程度的污染, 均值依次为 24.73 、 24.51 、 $35.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别是甘肃省土壤背景值的 1.32 倍、1.02 倍、1.02 倍, 在所有元素中, Cd 污染最为严重, 均值为 $2.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超出甘肃省土壤背景值的近 23 倍, Cr 仅个别样点含量超出甘肃省土壤背景值. 由图 2 可知, 西大沟上游沉积物样点 W01 ~ W03 处重金属含量较中、下游偏高, 与上游西北铜

加工厂和白银公司铝厂排放的废水密切相关, 中、下游沉积物有机质含量较上游偏低, 对重金属的吸附和累积能力弱, 使得重金属迁移能力增强, 因而表现出重金属含量低的现象. 至于下游样点 W12 处重金属含量较高, 一方面受上游工厂长期排污的影响, 另一方面也与该样点有机质含量高有很大关系. 东、西大沟流域农田土壤重金属均存在不同程度的污染, 而本研究中东、西大沟沉积物重金属的分布与其相似, 表明东、西大沟与其污灌区农田土壤重金属的污染直接相关. 南忠仁等^[20]认为, 白银市土壤主要重金属污染物 Cu、Zn、Cd、Pb 中, Cd 污染最为严重, 需要引起重视. 另外, 环境中的 Cd 还来源于农药、化肥、燃煤等农业活动^[21~23], 因此, 由于风力及雨水冲刷等作用, 东、西大沟沉积物中的 Cd 可能来自于其周边土壤, 具体结果还有待于进一步研究.

环境中某元素的变异系数越高, 表明受人为因素干扰较多^[24]. 从东、西大沟沉积物重金属的变异系数来看, 各元素的变异系数均很高, 东大沟沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 的变异系数较大, 分别为 0.43、0.59、0.55、0.63, 表明这 4 种重金属可能存在点源污染^[25], 受到更多人为因素的干扰. Ni、Cr 的变异系数分别为 0.30 和 0.39, 相对其他元素亦受到很大程度的人为影响. 西大沟沉积物中 Cu、Zn 的变

异系数较大,分别为 0.73 和 0.53,受工业污染比较严重,Cd、Pb、Ni、Cr 的变异系数都低于 0.4,但在一定程度上受到人为因素的影响. 因此,人为因素是影响东、西大沟重金属变异的主要因素.

表 2 研究区重金属元素含量的统计特征/mg·kg⁻¹

Table 2 Statistic characters of heavy metal concentrations in study area/mg·kg ⁻¹											
元素	东大沟沉积物					西大沟沉积物					甘肃省土壤背景值
	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数	
Cu	484.78	152.16	272.12	118.09	0.43	67.98	7.18	24.51	17.80	0.73	24.10
Zn	2 231.55	433.44	1 058.90	620.77	0.59	201.24	46.38	93.32	49.18	0.53	68.50
Cd	21.41	4.86	10.25	5.59	0.55	3.97	1.53	2.78	0.92	0.33	0.12
Pb	1 062.28	162.17	414.59	259.77	0.63	39.16	18.90	24.73	6.14	0.25	18.80
Ni	69.03	28.14	41.64	12.69	0.30	53.62	25.02	35.78	8.18	0.23	35.20
Cr	112.55	31.36	61.32	24.13	0.39	88.41	30.80	54.73	18.48	0.34	70.20

为进一步探究东、西大沟沉积物重金属含量和 pH 值、有机质之间的关系,对其进行了相关性分析,结果见表 3. 从中可见,东大沟沉积物中 pH 值与多数重金属含量呈负相关;有机质与多数重金属含量呈正相关,其中与 Pb 呈极显著正相关($P < 0.01$),与 Cu 呈显著正相关($P < 0.05$),表明有机质对重金属的迁移转化过程有重要影响. 本研究中 Fe

含量与 Cu ($P < 0.01$)、Zn ($P < 0.01$)、Cd ($P < 0.01$)、Pb($P < 0.05$)均呈显著正相关,可能是因为沉积物中的 FeO_x 与各金属元素以难溶化合物相结合,导致更多残渣态重金属的形成^[26]. Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 之间互呈极显著正相关($P < 0.01$),说明这些重金属具有同源性^[27]. Ni 与其余 5 种元素相关性不显著,说明 Ni 与其他重金属来源相异.

表 3 东、西大沟沉积物重金属含量与 pH 值、有机质之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients of heavy metals, pH, and organic matter in sediments of Dongdagou and Xidagou streams									
	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	Fe	pH 值	OM
Cu	1	0.757 **	0.578 *	0.608 *	0.274	-0.175	0.367	-0.612 *	0.902 **
Zn	0.972 **	1	0.856 **	0.752 **	0.643 *	0.046	0.248	-0.540	0.882 **
Cd	0.880 **	0.936 **	1	0.665 *	0.372	0.082	0.052	-0.404	0.752 **
Pb	0.894 **	0.872 **	0.871 **	1	0.230	0.055	-0.040	-0.369	0.725 **
Ni	-0.146	-0.150	-0.048	0.096	1	0.213	0.340	-0.468	0.439
Cr	0.718 **	0.718 **	0.779 **	0.856 **	0.184	1	0.107	-0.347	-0.095
Fe	0.904 **	0.920 **	0.780 **	0.654 *	-0.299	0.501	1	-0.053	0.126
pH 值	-0.200	-0.080	0.160	-0.004	0.441	-0.031	-0.212	1	-0.707 *
OM	0.674 *	0.556	0.461	0.721 **	-0.043	0.384	0.443	-0.204	1

1) 黑体字为东大沟沉积物与 pH 值、有机质之间的相关系数,其他部分为西大沟沉积物与 pH 值、有机质之间的相关系数; ** 表示 P 值极显著($P < 0.01$); * 表示 P 值显著($P < 0.05$),下同

由表 3 可知,西大沟沉积物 pH 值与 6 种重金属均呈负相关,其中与 Cu 呈显著负相关($P < 0.05$);有机质与 Cu、Zn、Cd、Pb 呈极显著正相关($P < 0.01$),说明 pH 值和有机质含量均影响重金属的迁移转化. 西大沟沉积物中 Fe 含量与各重金属含量相关性均不显著. Zn 与 Cu($P < 0.01$)、Cd($P < 0.01$)、Pb($P < 0.01$)、Ni($P < 0.05$)均显著相关;Cd、Cu、Pb 之间显著相关,重金属之间显著相关可能是受到重金属长期积累和不同的沉积环境,以及其他因素的影响;Cr 与 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni 相关性不显著. 东、西大沟沉积物中 Ni 与其他重金属元素相关性不同,说明 Ni 在不同排污渠沉积物中受污染的同源性程度不同.

2.2 沉积物重金属的富集因子

本研究以甘肃省土壤背景值为参照,通常采用地壳中性质较为稳定的元素 Sc、Mn、Ti、Al、Fe 作为参比元素^[28]. 从实地测试结果看,Fe 含量是所有测试指标中最稳定的,因此选择 Fe 作为参比元素. 对东、西大沟各样点沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni、Cr 的含量与 Fe 含量的标准化比值进行计算,得到各采样点重金属的富集系数,其结果如图 3 所示. 从中可以看出,除 Ni、Cr 外,东大沟沉积物其他元素的富集系数均大于 2,表明这些元素存在不同程度的富集,其富集程度依次为: Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr,其中 Cd 的富集程度最大,平均富集系数为 84.41,最大富集系

数甚至达 157.10, 为极强污染水平; 其次是 Pb、Zn 和 Cu, 平均富集系数分别为 21.02、14.45 和 10.83, 达到显著污染到强烈污染水平; Ni(样点 E09 除外) 和 Cr 的富集系数均小于 2, 基本处于无污染或轻微污染。西大沟沉积物重金属的富集程度远低于东大沟, 其富集程度依次为: Cd > Zn

> Pb > Ni > Cu > Cr, 其中 Cd 的富集程度最大, 平均富集系数为 39.90, 为强烈污染水平, 但个别样点已达极强污染水平; Zn、Pb、Ni、Cu、Cr 的富集程度相对较低, 大部分样点的富集系数小于 2, 而 Zn、Pb 的平均富集系数大于 2, 分别为 2.23 和 2.19, 属中度污染水平。

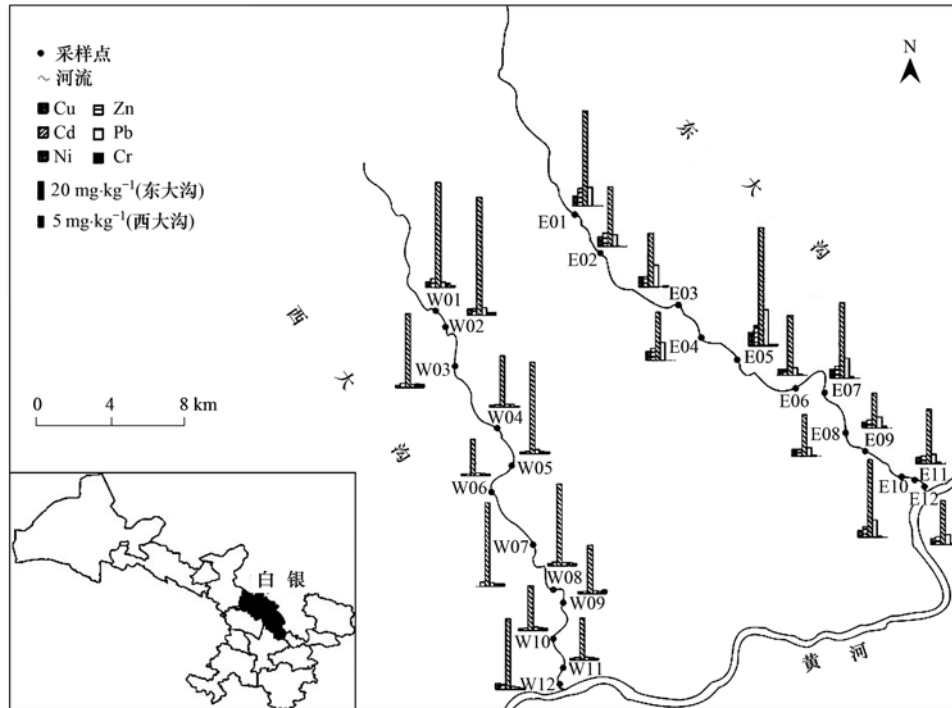


图3 东、西大沟各金属对 Fe 标准化的富集系数

Fig. 3 Metal enrichment factors of Dongdagou and Xidagou streams after normalization to Fe data

2.3 沉积物重金属的形态分布特征

由图 4 可知, 东大沟沉积物中 Zn、Ni、Cr 这 3 种元素的共同特点均为残渣态所占比例最高, 分别为 41%、32%、93%, 这与李小虎等^[1]所得出的结论一致。残渣态主要赋存于矿物晶格中, 只有在风化过程才能释放, 而风化过程是以地质年代计算的, 相对于生命周期来说, 残渣态基本上不为生物所利用^[29], 但 Zn 的总量超过了甘肃省土壤背景值, 需要引起足够重视。Cu 和 Cd 主要以有机结合态存在, 所占比例分别为 44% 和 31%, 许多研究也发现, 有机结合态是 Cu 在沉积物中的主要存在形态^[30-32], Cu 的有机结合态在样点 E10 处含量最高, 在 E08 处含量最低; 而 Cd 的可交换态所占重金属总量的比例在 6 种元素中最高 (8.52% ~ 31.22%), 说明 Cd 相比其他元素更容易迁移转化, 同时也具有更高的生物有效性^[33]。与 Cd 不同, Pb 的各形态中铁锰氧化物结合态所占比例较高 (33.32% ~ 63.75%), 远远高于碳酸盐结合态所占比例 (5.38% ~ 21.53%)

和有机结合态所占比例 (1.46% ~ 10.43%), 有研究认为, Pb 易与铁锰氧化物结合形成稳定的络合物, 在氧化条件下不易释放^[34], Pb 的铁锰氧化物占很大比重, 可能与沉积物含氧条件较好有关。根据可提取态重金属含量在总量中所占比例, 东大沟沉积物中各重金属的生物有效性大小顺序为: Cd (71.36%) > Pb (69.18%) > Ni (67.52%) > Cu (62.32%) > Zn (58.99%) > Cr (6.65%)。

图 5 表明, 西大沟沉积物中 Cu、Zn、Cd、Ni、Cr 这 5 种元素均是残渣态所占比例最高, 分别为 59%、68%、32%、37%、94%, 虽然这 5 种元素主要以残渣态存在, 但其部分样点的总量均超出甘肃省土壤背景值, 仍需引起关注。西大沟沉积物中 Cd 的可交换态占重金属总量的比例在 6 种元素中最高 (12.66% ~ 25.95%), 说明西大沟与东大沟沉积物中的 Cd 一样, 更容易迁移转化, 生物有效性高。Pb 主要以铁锰氧化物结合态存在, 所占比例为 33%, 这与刘恩峰等^[7]的研究结果相似, 值得注意的是,

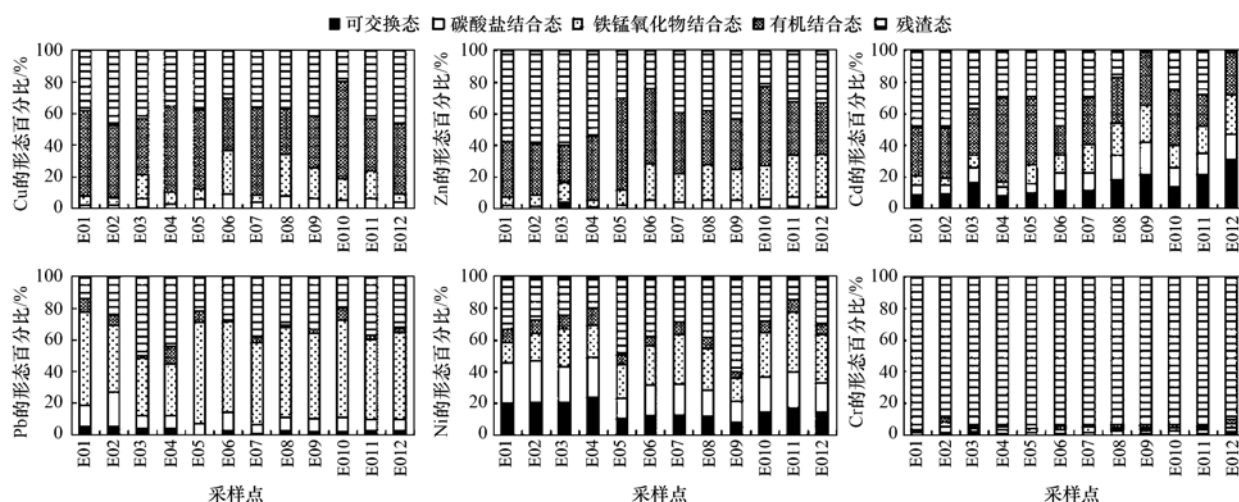


图4 东大沟各采样点重金属的形态分布

Fig. 4 Fraction distributions of heavy metals in sediments of Dongdagou stream

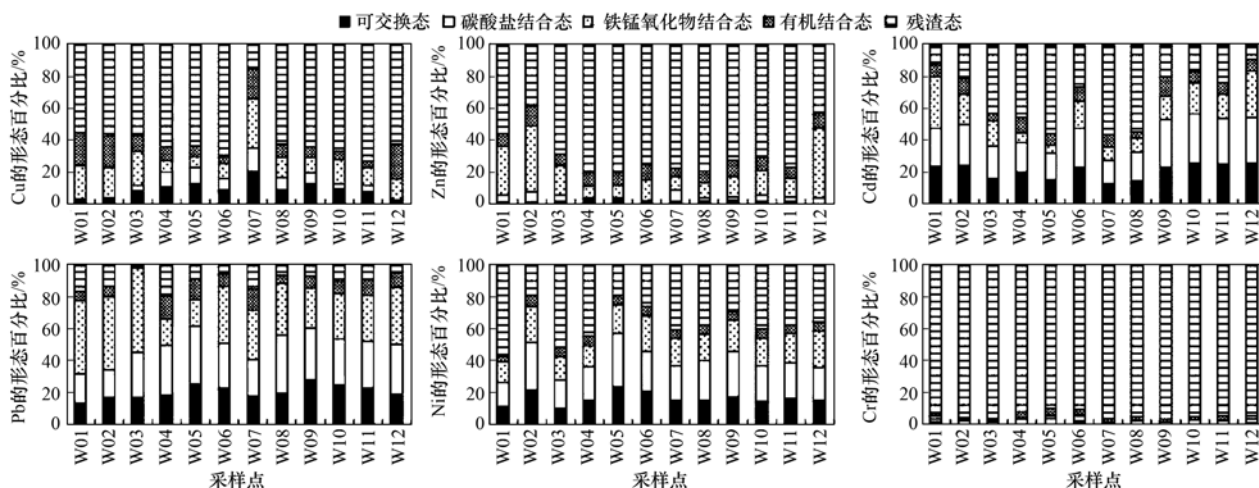


图5 西大沟各采样点重金属的形态分布

Fig. 5 Fraction distributions of heavy metals in sediments of Xidagou stream

Pb 的碳酸盐结合态(28%)和可交换态(20%)所占比例均很高,易随环境条件的变化与水体发生交换^[34,35]. 西大沟沉积物各重金属的生物有效性大小顺序为: Pb(90.22%) > Cd(67.8%) > Ni(63%) > Cu(40.68%) > Zn(31.7%) > Cr(5.92%).

沉积物重金属形态分布与重金属元素自身的性质有关,重金属总量与各形态相关系数的大小能反映沉积物重金属负荷水平对重金属形态的影响. 由表4可知,东大沟沉积物中所有重金属的总量与其残渣态均呈极显著正相关($P < 0.01$),除 Ni 和 Cr 外,Cu、Zn、Cd、Pb 的总量与有机结合态均呈极显著正相关($P < 0.01$),Cu、Zn 的总量与可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态相关性不显著,Cd 的总量与可交换态和碳酸盐结合态均显著相关

($P < 0.05$),Pb 的总量与碳酸盐结合态显著相关($P < 0.05$),与铁锰氧化物结合态极显著相关($P < 0.01$),Ni 的总量与碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态显著相关($P < 0.05$),Cr 与铁锰氧化物结合态呈极显著正相关($P < 0.01$),而与可交换态、碳酸盐结合态及有机结合态相关性不显著. 以上结果说明,重金属负荷水平对形态影响的显著性程度不同. 有研究认为,重金属生物有效性大小随重金属总量的增加极显著增强,污染程度越大,生物毒性越大,环境危害也越大^[26,36].

由表5可知,西大沟沉积物重金属总量与形态之间的相关关系与东大沟不同,Cu 的总量与可交换态和碳酸盐结合态呈显著负相关($P < 0.05$),而与其他形态均呈极显著正相关($P <$

0.01), Zn 除可交换态外,其他形态均与总量呈极显著正相关($P < 0.01$), Cd 的可交换态、碳酸盐结合态和有机结合态与总量呈极显著正相关($P < 0.01$), 铁锰氧化物结合态与总量呈显著正

相关($P < 0.05$), Pb 的铁锰氧化物结合态和残渣态与总量呈极显著正相关($P < 0.01$), Ni 和 Cr 除残渣态与总量呈极显著正相关外($P < 0.01$), 其他形态与总量相关性不显著.

表 4 东大沟沉积物重金属总量与不同形态的相关关系

Table 4 Relationship between the total concentration of heavy metals and different fractions in sediments of Dongdagou stream

形态	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr
可交换态	0.139	0.234	0.661 *	0.366	-0.350	-0.006
碳酸盐结合态	0.512	0.065	0.590 *	0.693 *	0.588 *	-0.055
铁锰氧化物结合态	-0.226	0.238	0.505	0.953 **	0.576 *	0.730 **
有机结合态	0.956 **	0.909 **	0.929 **	0.903 **	0.322	-0.536
残渣态	0.947 **	0.892 **	0.912 **	0.719 **	0.956 **	0.999 **

表 5 西大沟沉积物重金属总量与不同形态的相关关系

Table 5 Relationship between the total concentration of heavy metals and different fractions in sediments of Xidagou stream

形态	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr
可交换态	-0.640 *	0.415	0.760 **	0.512	-0.273	-0.089
碳酸盐结合态	-0.652 *	0.854 **	0.766 **	0.127	0.194	0.107
铁锰氧化物结合态	0.911 **	0.899 **	0.702 *	0.893 **	0.467	-0.269
有机结合态	0.976 **	0.901 **	0.753 **	0.272	0.567	0.172
残渣态	0.988 **	0.854 **	0.387	0.729 **	0.991 **	0.999 **

2.4 沉积物重金属环境风险评价

东、西大沟沉积物重金属的风险等级如表 6 所示. 东、西大沟沉积物样品中 Ni 分别为 21.26% ~ 49.44% 和 26.47% ~ 56.95%, 处于高风险水平, 所有样点的 Zn 和 Cr 均处于低风险水平, Cu 处于中低

风险水平. 东大沟沉积物中 Cd 和 Pb 处于中等风险水平, 而西大沟沉积物中 Cd 和 Pb 处于高风险水平. 东大沟沉积物中 6 种元素的风险等级为: Ni > Cd > Pb > Cu > Zn > Cr, 西大沟沉积物中 6 种元素的风险等级为: Pb > Cd > Ni > Cu > Zn > Cr.

表 6 东、西大沟沉积物中重金属的风险等级

Table 6 Risk level of heavy metals in sediments of Dongdagou and Xidagou streams

重金属	东大沟			西大沟		
	比例范围/%	平均值/%	风险等级	比例范围/%	平均值/%	风险等级
Cu	2.66 ~ 9.32	5.61	低	2.55 ~ 35.40	14.64	中
Zn	0.90 ~ 7.97	4.56	低	2.13 ~ 9.16	4.96	低
Cd	13.89 ~ 46.97	26.39	中	27.18 ~ 56.46	44.13	高
Pb	6.56 ~ 27.30	12.67	中	31.78 ~ 61.31	48.91	高
Ni	21.26 ~ 49.44	36.12	高	26.47 ~ 56.95	39.96	高
Cr	1.42 ~ 5.25	2.86	低	1.17 ~ 5.66	2.73	低

富集因子法与风险评价编码法结果有较大差异, 有很多样点用富集因子评价无污染, 其风险水平却很高. 如东、西大沟沉积物中重金属 Ni 的富集系数很低但风险水平却很高, 西大沟沉积物中 Cd 的富集系数明显大于 Pb 但其风险等级却低于 Pb. 说明选择不同的评价标准所得的评价结果是不一样的^[37]. 因此对排污渠沉积物中重金属的评价应该兼顾重金属总量和形态两方面的评价, 这样即不会忽视重金属总量很低而生物可利用性很高的情况, 又会对重金属总量高而生物可利用性很低造成严重污染的情况引起关注. 综合以上研究结果, 东、西

大沟沉积物均受到不同程度的重金属污染, 东大沟沉积物重金属污染要比西大沟严重, 因为东大沟主要以工业污染为主, 而西大沟则主要以生活污染为主, 因此对白银市东、西大沟沉积物重金属进行修复时, 应特别重视 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni 这 5 种重金属元素的修复.

3 结论

(1) 东、西大沟沉积物中重金属平均含量普遍超出甘肃省土壤背景值(除 Cr 外), Cd 污染最为严重. 相关性分析表明, pH 与多数重金属含量间呈负

相关,有机质与多数重金属含量间呈正相关,东、西大沟沉积物中 Ni 受污染的同源性程度不同。

(2)富集因子评价结果显示,东、西大沟沉积物中 Cd 的富集程度均最大,达到极强污染水平。除此之外,东大沟沉积物中 Pb、Zn、Cu 富集程度也较大,达到显著污染到强烈污染水平,其富集程度为: Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr。西大沟沉积物中 Zn、Pb 也有不同程度的富集,均达到中度污染水平,其富集程度为: Cd > Zn > Pb > Ni > Cu > Cr。

(3)重金属形态分析表明,东大沟沉积物中 Zn、Ni、Cr 均以较稳定的残渣态为主,Cu、Cd 主要以有机结合态存在,但 Cd 的可交换态所占重金属总量的比例要明显高于其他元素,Pb 的铁锰氧化物结合态所占比例明显高于其他元素。西大沟沉积物中 Cu、Zn、Cd、Ni、Cr 这 5 种元素均以残渣态存在,Cd 可交换态所占重金属总量的比例要明显高于其他元素,Pb 主要以铁锰氧化物结合态存在,但其碳酸盐结合态和可交换态所占比例也很高,易随环境条件的变化与水体发生交换。东、西大沟沉积物重金属的各形态含量与重金属总量呈现出不同程度的相关性。

(4)风险评价编码法(RAC)结果显示,东大沟沉积物中 Ni 的风险等级最高,处于高风险水平,Cd、Pb 处于中等风险水平,Cu、Zn、Cr 处于低风险水平,各元素的风险等级为: Ni > Cd > Pb > Cu > Zn > Cr。西大沟沉积物中 Cd、Pb、Ni 的风险等级最高,处于高风险水平,Cu 处于中风险水平,Zn 和 Cr 处于低风险水平,各元素的风险等级为: Pb > Cd > Ni > Cu > Zn > Cr。

参考文献:

- [1] 李小虎, 汤中立, 初凤友. 白银矿山水体和沉积物中重金属及其化学形态分布特征[J]. 地球与环境, 2008, **36**(3): 218-224.
- [2] 廖晓勇, 陈同斌, 武斌, 等. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例[J]. 地理研究, 2006, **25**(5): 843-852.
- [3] 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 等. 干旱区工矿型绿洲城郊农田土壤氟的形态分布特征及其影响因素研究——以白银绿洲为例[J]. 农业环境科学学报, 2013, **31**(12): 2407-2414.
- [4] 黄岁梁. 泥沙解吸重金属污染物动力学模式研究[J]. 地理学报, 1995, **50**(6): 497-505.
- [5] 卢少勇, 焦伟, 金相灿, 等. 滇池内湖滨带沉积物中重金属形态分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(4): 487-492.
- [6] 张朝生, 王立军, 章申. 长江中下游河流沉积物和悬浮物中金属元素的形态特征[J]. 中国环境科学, 1995, **15**(5): 342-347.
- [7] 刘恩峰, 沈吉, 刘兴起, 等. 太湖 MS 岩芯重金属元素地球化学形态研究[J]. 地球化学, 2004, **33**(6): 602-610.
- [8] 孙力, 杨元根, 白薇扬, 等. 黔西北土法炼锌区典型植物体内重金属的积累研究[J]. 地球与环境, 2006, **34**(2): 61-66.
- [9] 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1842-1848.
- [10] 朱广伟, 陈英旭, 周根娣, 等. 运河(杭州段)沉积物中重金属分布特征及变化[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(1): 65-69.
- [11] 南忠仁, 李吉均. 干旱区耕作土壤中重金属铅镉剖面分布及行为研究——以白银市区灰钙土为例[J]. 干旱区研究, 2000, **17**(4): 39-45.
- [12] 刘姣, 曹靖, 南忠仁, 等. 白银市郊区重金属复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, **46**(5): 39-43.
- [13] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 147-211.
- [15] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 611-627.
- [16] 王显炜, 徐友宁, 杨敏, 等. 国内外矿山土壤重金属污染风险评价方法综述[J]. 中国矿业, 2009, **18**(10): 54-56.
- [17] Perin G, Craboledda L, Lucchese M, et al. Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination [J]. Heavy Metals in the Environment, 1985, **2**: 454-456.
- [18] 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. 334-379.
- [19] 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 等. 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1067-1075.
- [20] 南忠仁, 李吉均. 白银市区土壤作物系统重金属污染分析与防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2002, **24**(3): 170-173.
- [21] Garcia R, Maiz I, Millan E. Heavy metal contamination analysis of roadsoils and grasses from Gipuzkoa (Spain) [J]. Environmental Technology, 1996, **17**(7): 763-770.
- [22] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1999, **54**(3): 267-277.
- [23] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 1-520.
- [24] Huang S S, Tu J, Liu H Y, et al. Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(36): 5781-5790.
- [25] 贾英, 方明, 吴友军, 等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(1): 147-

- 153.
- [26] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- [27] Yan C Z, Li Q Z, Zhang X, *et al.* Mobility and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Xiamen Bay and its adjacent areas, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **60**(7): 1469-1479.
- [28] Loska K, Wiechula D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. Environment International, 2004, **30**(2): 159-165.
- [29] Teasdale P R, Apte S C, Ford P W, *et al.* Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour, Western Tasmania [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, **57**(3): 475-487.
- [30] Mortimer R J G, Rae J E. Metal speciation (Cu, Zn, Pb, Cd) and organic matter in oxic to suboxic salt marsh sediments, Severn Estuary, Southwest Britain [J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, **40**(5): 377-386.
- [31] Zhang H, Ma D S, Xie Q L, *et al.* An approach to studying heavy metal pollution caused by modern city development in Nanjing, China [J]. Environmental Geology, 1999, **38**(3): 223-228.
- [32] Thomas R P, Ure A M, Davidson C M, *et al.* Three-stage sequential extraction procedure for the determination of metals in river sediments[J]. Analytica Chimica Acta, 1994, **286**(3): 423-429.
- [33] 黄兴星, 朱先芳, 唐磊, 等. 密云水库上游某铁矿区土壤重金属含量及形态研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(9): 1632-1639.
- [34] Li X D, Shen Z G, Wai O W H, *et al.* Chemical forms of Pb, Zn and Cu in the sediment profiles of the Pearl River Estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, **42**(3): 215-223.
- [35] 翁焕新, 沈忠悦, 陈建裕, 等. 沿海表层沉积物中重金属的有效结合态[J]. 地质科学, 2002, **37**(2): 243-252.
- [36] 侯明, 张利香, 那佳. 小麦根际土壤汞的分布和形态变化[J]. 生态环境, 2008, **17**(5): 1843-1846.
- [37] Keller C, Hammer D. Metal availability and soil toxicity after repeated croppings of *Thlaspi caerulescens* in metal contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2004, **131**(2): 243-254.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidic Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 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