

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价

柏建坤^{1,2}, 李潮流^{2*}, 康世昌³, 陈鹏飞², 王建力¹

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 采用了欧共体 BCR 分步提取的方法, 对西藏雅鲁藏布江中段人口密集区的表层沉积物中的 9 种重金属元素 (Cd、Co、Ni、Cu、Zn、Pb、Cs、As 和 Cr) 不同赋存形态进行了研究, 分析了其形态分布特征。并分别用风险评价编码法 (RAC) 和沉积物质量基准系数法 (SQG-Q) 对沉积物重金属生物有效性进行了风险评价。结果表明: ① 元素 Cr、As 主要赋存于残渣态 (占 87% ~ 96%), Ni、Cu、Co 和 Cs 赋存特征较为相似, 来自非残渣态约占 20%, 元素 Cd 酸可提取态和可还原态约占 65%, 表现出较高的生物毒性; ② 由 RAC 评估得出 元素 Cd 有效态占 37.38%, 对环境构成高风险等级, 元素 Co、Ni、Cu 和 Zn 对环境的危害处于低风险状态, 元素 Pb、Cs、As 和 Cr 处于无风险状态, 单从重金属形态的生物有效性评价, 雅江沉积物对环境构成的风险排序为 Cd > Co > Ni > Cu > Zn > Pb > Cs > As > Cr; ③ 沉积物 SQG-Q 系数为 0.804, 具有中度的潜在生物毒性效应, 鉴于该研究重金属元素主要赋存于残渣态, 并且重金属平均含量除元素 Cr 和 Ni 外, 其余元素均小于 TEL 和 PEL 值, 所以, 该河段总体上处于较低的风险等级, 受到人为污染活动较少, 污染程度较低。

关键词: 重金属; BCR 方法; 赋存形态; 风险评价; 雅鲁藏布江

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3346-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.014

Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments

BAI Jian-kun¹, LI Chao-liu², KANG Shi-chang³, CHEN Peng-fei², WANG Jian-li¹

(1. School of Geography, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Nine heavy metals (Cd, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cs, As, Cr) of surface sediments collected from the Middle Part of the Yarlung Zangbo River were analyzed by BCR sequential extraction procedure. Based on speciation distributions of these metals, ecological risk of heavy metals was assessed with methods of risk assessment code (RAC) and sediment quality guideline quotient (SQG-Q). The results show that: ① Large part of Cr and As belong to residual fraction (87%-96%). Ni, Cu, Co and Cs have similar distribution characteristics (non-residual part accounts for approximate 20%). Correspondingly, mass fraction of Cd exists mainly in acid soluble and reducible fraction (65%), indicating high ecological risk level. ② Based on calculation of RAC method, Cd is of high risk to the environment (37.38%). Accordingly, Co, Ni, Cu and Zn are of low risk, and Pb, Cs, As and Cr pose extreme low risk to the environment. According to evaluation of heavy metal speciation distributions, the potential ecological risk of heavy metals is in the descending order of Cd > Co > Ni > Cu > Zn > Pb > Cs > As > Cr. ③ The SQG index of sediments is 0.804, indicating that studied river sediment has a moderate potential biological toxicity effect. Given most of heavy metals exists in residual fraction, the sediments of this region pose a low ecological risk to the environment.

Key words: heavy metal; BCR sequential extraction procedure; speciation distribution; ecological risk assessment; the Yarlung Zangbo River

水体重金属因具有较强的毒性、持久性和不可降解性被视为一种重要的污染物,而河流沉积物通常被看作水体重金属元素的源或汇,水体重金属与沉积物通过离子交换、络合作用、化学吸附及化学沉淀等多种方式使重金属元素在水体和沉积物中循环,这是元素地球化学循环的重要组成部分^[1~5]。沉积物中重金属的生物毒性不仅与其绝对含量有关,与重金属的赋存形态也有密切联系,其赋存形态

不同,重金属在沉积物与水体中的迁移性,生物有效性和毒性也相应不同,基于重金属赋存形态评价其生态风险逐渐成为该领域研究热点^[2,6~9]。目前对于水体重金属的研究主要集中在我国东部河流、湖

收稿日期: 2014-01-11; 修订日期: 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171398, 41271015); 冰冻圈科学国家重点实验室项目 (SKLCS-ZZ-2008-01)

作者简介: 柏建坤 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为青藏高原环境变化, E-mail: baijiankun2012@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lichao-liu@itpcas.ac.cn

泊和潮滩区域^[10~15],而对西部河流研究较少,雅鲁藏布江(雅江)作为青藏高原最重要的一条国际河流,其中段流经西藏人口最为密集的经济区和农业区,对其水体重金属的研究,对了解该区域污染情况与居民生活环境安全具有重要现实意义.但目前仅有沉积物中重金属元素含量的报道^[16,17],对其赋存形态和生物毒性的评价尚且没有,并且该流域的一些重金属元素如 As 的含量很高^[18],可能会对环境造成危害,因此对其赋存形态的研究显得尤为重要.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅江(图 1)起源于喜马拉雅山北麓杰马央宗冰川,平均海拔4 000 m,流域面积14 493 km²,河流自西向东,河流中段流经西藏人口最密集的经济区(拉萨)和农业区(日喀则地区);而且,雅江也是西藏一条重要的国际河流^[19,20].该区全年主要分为季风期(6~9月)和非季风期(10月~次年5月),季风期受到来自南亚的印度季风的影响,降水相对集中,非季风期受到西风带的控制气候干燥寒冷^[21,22].

1.2 样品采集与分析

本次研究一共采集 12 个样品(图 1).采样主要集中在雅江中段的年楚河流域和拉萨河流域,在河流约50 cm深度采集3~5 cm厚度的表层沉积

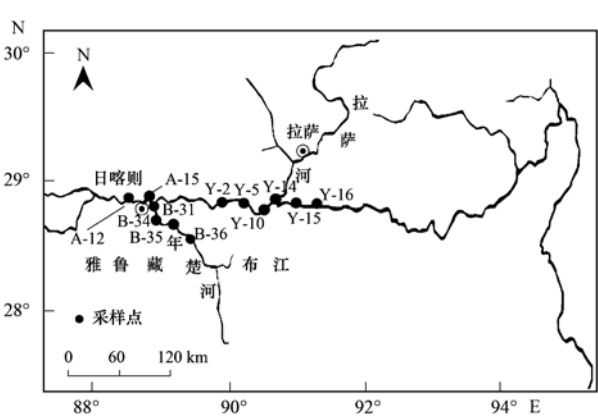


图 1 雅鲁藏布江地理区位及采样点示意

Fig. 1 Location map of the Yarlung Zangbo River and sampling sites

物,采集的样品盛放在低密度聚乙烯(LDPE)袋中密封保存,在实验室无尘通风环境下自然风干,并通过湿筛法得到<63 μm沉积物颗粒.样品不同形态提取采用欧共体标准物质局(Community Bureau of Reference)BCR方法^[23](表1).处理后的样品放置在4℃冰箱冷藏至测试,空白处理方法和流程与样品相同,重金属元素含量测试由电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,X-7 Thermo Elemental)测定.实验过程中用国家黄土标准参考物质(GBW07408)对仪器进行校准,并以标准溶液进行质量控制,采用平行双样同步分析,相对标准偏差(RSD)低于5%,准确度良好.

表 1 欧共体 BCR 分布提取方法流程
Table 1 BCR sequential extraction procedure

步骤	形态	提取方法	提取时间
I	酸可提取态	40 mL 0.11 mol·L ⁻¹ HOAc	16 h 振荡
II	可还原态	40 mL 0.50 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl	16 h 振荡
III	可氧化态	10 mL pH 2~3 H ₂ O ₂ 85℃水浴	1 h 偶尔振荡
		50 mL 1 mol·L ⁻¹ NH ₄ Ac pH 2~3	16 h 振荡
IV	残渣态	10 mL 王水	

1.3 评价方法

1.3.1 风险评估编码法

酸可提取态主要是指可交换的吸附的离子和碳酸盐结合的形态,该形态迁移性强,易跟水体发生交换,可以直接被生物利用,因此具有较高的生物有效性^[8,24].风险评估编码法(risk assessment code,

RAC)根据可交换态和碳酸盐结合态之和即酸可提取态占总量的质量分数高低来评价其重金属的生物有效性,重金属的生物有效性越高,其对环境构成的风险越大,反之亦然.风险评估编码法与重金属赋存形态组成紧密结合,是比较常用的沉积物重金属元素风险评估手段^[25~27].风险等级标准^[8]如表 2.

表 2 风险评估编码法的等级标准
Table 2 Grade standard of RAC

风险等级	无风险	低风险	中等风险	高风险	极高风险
酸可提取态占总量的质量分数/%	< 1	1~10	11~30	31~50	>50

1.3.2 沉积物重金属质量基准系数法

在诸多生态风险评价方法中,沉积物重金属质量基准系数法(sediment quality guidelines,SQGs)因综合考虑了重金属污染的相关因素,采用修订后的基准值,具备较高的可信度和可接受的不确定性水平而被广泛运用于重金属生态风险评价中^[28].其公式如下:

$$(PEL-Q)_i = \frac{c_i}{PEL_i} \tag{1}$$

$$SQG-Q = \frac{\sum_{i=1}^n (PEL-Q)_i}{n} \tag{2}$$

式中, $(PEL-Q)_i$ 为可能效应浓度系数, PEL_i (probable effect level) 为重金属 i 的可能效应浓度, c_i 为重金属 i 实测浓度, $SQG-Q$ 为得出的风险评估系数. 一般认为,若 $SQG-Q \geq 1.0$ 时,表明该元素对环境具有较高的潜在风险,若 $0.1 < SQG-Q < 1.0$,则认为存在中度的生物毒性效应, $SQG-Q < 0.1$ 则表明基本没受到重金属污染. PEL/TEL 还可对每种重金属的生物有效性进行评价:重金属元素浓度低于

TEL 时,生态风险等级较低;重金属元素浓度高于 PEL 时,生态风险等级较高.

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属元素含量及其特征

河流水体重金属主要来源于沉积物中,所以沉积物重金属的含量可以较好评估研究区受污染的程度^[29]. 表 3 为雅江表层沉积物中重金属元素的含量,从中可以明显看出,Cr 元素含量普遍高于其它元素和其他地区,这主要受到西藏铬矿或含铬矿物的影响^[18]. 而 Cd 元素含量却普遍偏低,与西藏土壤背景值和中国地壳丰度较为接近,但远低于中国东部河流沉积物含量,表明该地区 Cd 元素主要受到当地母岩风化的影响,受来自人类排放镉的贡献影响很小. 而且,元素 Co、Cu、Ni、Zn 的含量也接近或略高于西藏土壤背景值,说明这几种元素主要来源于当地母岩和土壤. 同时,元素 As 远大于地壳丰度,分别是世界地壳丰度和中国地壳丰度的 9 倍和 10.5 倍,其高值主要因为西藏广泛分布富含砷的

表 3 雅鲁藏布江表层沉积物重金属元素含量与其它区域对比¹⁾

Table 3 Heavy metal concentrations of the Yarlung Zangbo River sediments

项目	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Cs	Pb
雅江沉积物均值	135.34	16.81	79.59	39.9	83.04	19.94	0.08	22.5	23.12
西藏土壤背景值 ^[18]	77.4	11.6	32.1	21.9	73.7	18.7	0.08	19.4	28.9
中国地壳丰度 ^[30]	63	32	57	38	86	1.9	0.05	11	15
世界地壳丰度 ^[31]	110	25	89	63	94	2.2	0.2	1.4	12
珠江沉积物 ^[29]	73.49	221.9	—	86.58	—	—	2.34	—	77.83
海河沉积物 ^[29]	66.5	279	—	71.3	—	—	3.11	—	58.8

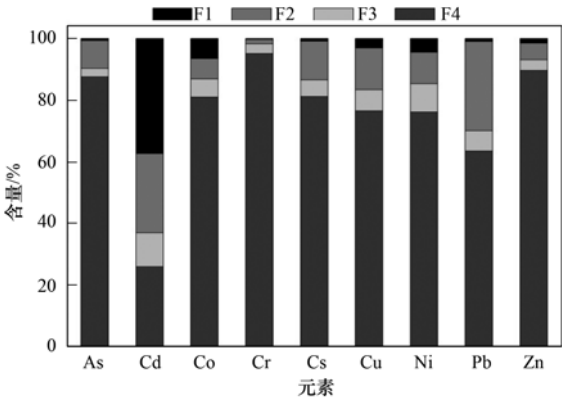
1) 沉积物样品粒径均为 $< 63 \mu m$, 单位均为 $mg \cdot kg^{-1}$

页岩和受到青藏高原较为频繁的地热活动影响,使含 As 的矿物在地热作用下易于溶解并随地热活动所释放的气液排出^[16,32]. 与中国东部河流相比,除元素 Cr 外,其它元素都远低于中国东部河流,说明该流域相对于东部河流受到人为污染活动较少,污染程度较轻.

2.2 重金属元素形态组成

重金属分级提取一般分为 4 种形态即酸可提取态、还原态、氧化态和残渣态,图 2 为雅江沉积物重金属元素形态分布. 大部分元素具有相似的特征,即重金属主要来源于残渣态(F4)部分,这在 Cr、Zn 和 As 这 3 种元素中的表现尤为明显(残渣态部分占 87% ~ 96%),其中,Cr 元素几乎全部存在于残渣态(95.1%),这主要因为该元素大部分存在于一些铝硅酸盐中,不易从矿物中分解析出^[33]. As 和 Zn 残渣态的高含量主要是因为该元素大部分来源

于自然风化物,继承了母岩的特性. Ni、Cu、Co 和 Cs 表现较为相似的特征,残渣态的组分占 75% ~



F1. 酸可提取态, F2. 还原态, F3. 氧化态, F4. 残渣态

图 2 雅鲁藏布江重金属元素形态分布

Fig. 2 Distribution of chemical speciation of heavy metals of Yarlung Zangbo River sediments

81%,在非残渣态中 Ni、Cu 和 Cs 还原态占的比例较大,其次为氧化态和酸可提取态. 元素 Cd 和 Pb 残渣态所占组分减少,Cd 元素尤为明显,非残渣态占 85%,说明 Cd 元素主要以酸可提取态和还原态存在(约占 65%),酸可提取态迁移性较强,可以直接被生物利用,一般可用来评价重金属的生物毒性. 由此,Cd 元素可以被看作该地区的污染指示元素. Pb 元素还原态所占组分较多(约占 30%),Pb 元素的富集主要与环境中的氧化还原条件和酸性条件有关,通常还原态能反映人类活动对环境的污染^[34].

2.3 重金属元素风险评价

2.3.1 风险评估编码法

雅江重金属元素 Cd、Co、Ni、Cu、Zn、Pb、Cs、As 和 Cr 酸可提取态占总量的质量分数分别为 37.38%、6.52%、4.48%、3.08%、1.47%、0.96%、0.87%、0.65%和 0.29%(图 3),其中,Cd 元素有效态含量最高(37.38%),依据风险评价编码法,Cd 存在对环境构成高风险的可能性,应当格外关注. 元素 Co、Ni、Cu 和 Zn 有效态含量在 1%~10%之间,对环境的危害处于低风险状态,元素 Pb、Cs、As 和 Cr 处于无风险状态,对环境基本不构成威胁. 与东部河流对比可以得出,雅江沉积物中同种元素酸可提取态所占比例明显低于东部污染较严重的河流如黄江和珠江的沉积物. 这一特征在元素如 Zn 和 Pb 中的表现更为明显,表明雅江仍处在

一个较低的污染风险等级. 总体上,如果不考虑各个元素的绝对含量,单从重金属形态的生物有效性来看,依据风险评估编码法等级划分,雅江沉积物对环境构成的风险排序为 Cd > Co > Ni > Cu > Zn > Pb > Cs > As > Cr.

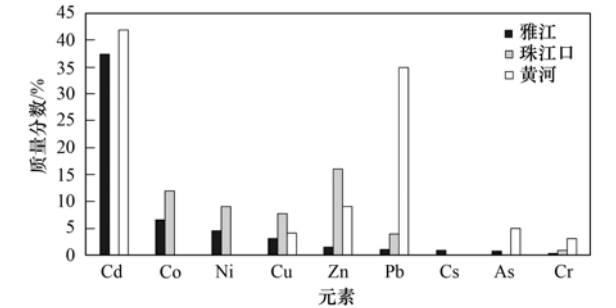


图 3 雅江沉积物酸可提取态质量分数与其它河流的对比^[35,36]
Fig. 3 Mass fraction of soluble of heavy metals of Yarlung Zangbo River and other rivers

2.3.2 沉积物重金属质量基准系数法

上述 RAC 评价方法主要针对重金属赋存形态来评价其生物有效性,没有综合考虑重金属的绝对含量,倘若元素背景值很低,即使处于较高的风险等级,也很难对环境构成危害^[7,37]. 相应地,沉积物重金属质量基准系数法(SQGs)综合考虑了重金属污染的相关因素,弥补了风险评估编码法的在绝对含量评价上的不足(表 4).

表 4 雅江沉积物重金属基准值和 PEL-Q 系数¹⁾

Table 4 PEL/TEL guideline level and PEL-Q of sediment heavy metals								
项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	SQG-Q
含量均值	135.34	79.59	39.9	83.04	19.94	0.08	23.12	
TEL	37.3	18	35.7	123	5.9	0.59	35	
PEL	90	36	197	315	17	3.53	91.3	
PEL-Q	1.50	2.21	0.20	0.26	1.17	0.02	0.25	0.804

1) TEL 和 PEL 含量单位均为 mg·kg⁻¹, TEL(threshold effect level)/PEL 见文献[37]

由公式(2)得出,雅江沉积物重金属 SQG-Q 系数为 0.804 > 0.1,表明该地区存在中度生物毒性效应. 其中,元素 Ni、Cr 和 As 所占的污染贡献较大,但考虑到这几种元素在赋存形态上主要来自于残渣态,与区域内背景值有关,所以该地区总体上重金属污染较少. 通过沉积物重金属含量均值与 TEL 和 PEL 的比较可以看出,除元素 Cr 和 Ni 外,其余元素都接近或小于 TEL 和 PEL,也说明研究区域内生物毒性效应较弱.

3 结论

- (1)雅江表层沉积物中,重金属元素 Cr、As 和 Cs 的含量高于世界平均地壳丰度,原因主要为西藏含铬矿物和含砷页岩以及该地频繁的地热活动影响. 该流域重金属含量远低于东部河流,说明雅江相对于东部河流受到人类污染活动影响较小.
- (2)在形态分布上,Cr、Zn 和 As 这 3 种元素主要赋存于残渣态(占 87%~96%),其中 Cr 元素基

本来自于残渣态(95.1%)。元素 Cd 和 Pb 的非残渣态占 85%,其中酸可提取态和还原态占约 65%,表现出较高的生物毒性,应引起关注。

(3)通过风险评估编码法评估表明,元素 Cd 对环境构成高风险等级,元素 Co、Ni、Cu 和 Zn 对环境的危害处于低风险状态,而元素 Pb、Cs、As 和 Cr 对环境基本不构成威胁。单从重金属形态的生物有效性来评价,雅江沉积物对环境构成的风险排序为 $Cd > Co > Ni > Cu > Zn > Pb > Cs > As > Cr$ 。

(4)雅江沉积物重金属 SQG-Q 系数为 0.804 > 0.1,表明该河流具有中度的生物毒性效应,其中元素 Ni、Cr 和 As 所占的污染贡献较大,但由于这几种元素主要存在于残渣态,与区域内背景值相关,所以该区域总体上受到人为重金属污染活动较少。从单个元素的 PEL-Q 得出,除元素 Cr 和 Ni 外,其余元素都小于 TEL 和 PEL 值,表明研究河段生态风险等级较低。

致谢:衷心感谢中国科学院青藏高原研究所拉萨部及各野外台站工作人员的帮助。

参考文献:

- [1] Gümgüm B, Öztürk G. Chemical speciation of heavy metals in the Tigris River sediment [J]. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2001, **13**(1): 25-29.
- [2] Yuan C G, Shi J B, He B, *et al.* Speciation of heavy metals in marine sediments from the East China Sea by ICP-MS with sequential extraction [J]. *Environment International*, 2004, **30**(6): 769-783.
- [3] Yang Z, Wang Y, Shen Z, *et al.* Distribution and speciation of heavy metals in sediments from the mainstream, tributaries, and lakes of the Yangtze River catchment of Wuhan, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(2-3): 1186-1194.
- [4] 范文宏,陈静生,洪松,等. 沉积物中重金属生物毒性评价的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2002, **25**(1): 36-39, 48.
- [5] 李非里,刘从强,宋照亮. 土壤中重金属形态的化学分析综述[J]. *中国环境监测*, 2005, **21**(4): 21-27.
- [6] Akcay H, Oguz A, Karapire C. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments [J]. *Water Research*, 2003, **37**(4): 813-822.
- [7] Liu J L, Li Y L, Zhang B, *et al.* Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan River source water [J]. *Ecotoxicology*, 2009, **18**(6): 748-758.
- [8] Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al.* Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**(1-4): 14-27.
- [9] 韩春梅,王林山,巩宗强,等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(12): 1499-1502.
- [10] Zhang W G, Feng H, Chang J N, *et al.* Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: an assessment from different indexes [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1533-1543.
- [11] 刘恩峰,沈吉,朱育新. 重金属元素 BCR 提取法及在太湖沉积物研究中的应用[J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(2): 57-60.
- [12] 钱嫦萍,陈振楼,毕春娟,等. 潮滩沉积物重金属生物地球化学研究进展[J]. *环境科学研究*, 2002, **15**(5): 49-51, 61.
- [13] 秦延文,苏一兵,郑丙辉,等. 渤海湾表层沉积物重金属与污染评价[J]. *海洋科学*, 2007, **31**(12): 28-33.
- [14] 王鸣宇,张雷,秦延文,等. 湘江表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(11): 2447-2458.
- [15] 张立成,董文江,郑建勋,等. 湘江河流沉积物重金属的形态类型及其形成因素[J]. *地理学报*, 1983, **38**(1): 55-64.
- [16] Li C L, Kang S C, Chen P F, *et al.* Geothermal spring causes arsenic contamination in river waters of the southern Tibetan Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(9): 4143-4148.
- [17] 陈鹏飞,李潮流,康世昌,等. 雅鲁藏布江表层沉积物地球化学元素研究[J]. *地球化学*, 2012, **41**(4): 387-392.
- [18] 成延整,田均良. 西藏土壤元素背景值及其分布特征 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [19] 郑伟,康世昌,冯新斌,等. 西藏雅鲁藏布江表层水中汞的形态与空间分布特征[J]. *科学通报*, 2010, **55**(20): 2026-2032.
- [20] Huang X, Sillanpää M, Gjessing E T, *et al.* Water quality in the southern Tibetan Plateau: chemical evaluation of the Yarlung Tsangpo (Brahmaputra) [J]. *River Research and Applications*, 2011, **27**(1): 113-121.
- [21] Li C L, Kang S H, Zhang Q G. Elemental composition of Tibetan Plateau top soils and its effect on evaluating atmospheric pollution transport [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2261-2265.
- [22] 高志友,王小丹,尹观. 雅鲁藏布江径流水文规律及水体同位素组成[J]. *地理学报*, 2007, **62**(9): 1002-1007.
- [23] Sahuquillo A, López-Sánchez J F, Rubio R, *et al.* Use of a certified reference material for extractable trace metals to assess sources of uncertainty in the BCR three-stage sequential extraction procedure [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1999, **382**(3): 317-327.
- [24] 刘宗平. 环境重金属污染物的生物有效性[J]. *生态学报*, 2005, **25**(2): 273-278.
- [25] Martley E, Gulong B, Louie H, *et al.* Metal partitioning in soil profiles in the vicinity of an industrial complex, New South Wales, Australia [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, **4**(2): 171-179.
- [26] 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.
- [27] 高彦鑫,冯金国,唐磊,等. 密云水库上游金属矿区土壤中

- 重金属形态分布及风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1707-1717.
- [28] Caeiro S, Costa M H, Ramos T B, *et al.* Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: an index analysis approach[J]. Ecological Indicators, 2005, **5**(2): 151-169.
- [29] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, **40**(3): 305-313.
- [30] 黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. 地球化学, 1994, **23**(2): 140-145.
- [31] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976, **1**(3): 167-174.
- [32] Guo Q H, Wang Y, Liu W. B, As, and F contamination of river water due to wastewater discharge of the Yangbajing geothermal power plant, Tibet, China[J]. Environmental Geology, 2008, **56**(1): 197-205.
- [33] Martin R, Sanchez D M, Gutierrez A M. Sequential extraction of U, Th, Ce, La and some heavy metals in sediments from Ortigas river, Spain[J]. Talanta, 1998, **46**(5): 1115-1121.
- [34] 唐凤舞. 南昌市街道灰尘重金属污染特征及形态分析研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010. 58-63.
- [35] 杨永强. 珠江口及近海沉积物中重金属元素的分布、赋存形态及其潜在生态风险评价[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007. 62-73.
- [36] 袁浩, 王雨春, 顾尚义, 等. 黄河水系沉积物重金属赋存形态及污染特征[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(11): 1966-1971.
- [37] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **39**(1): 20-31.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人