

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价

张兆永^{1,2}, 吉力力·阿不都外力^{1*}, 姜逢清¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以新疆博尔塔拉河为研究区,对河水、河床表层底泥及沿岸土壤中重金属 Cr、Cu、Hg、As、Cd、Pb 和 Zn 的来源、污染状况和潜在生态风险进行了研究. 结果表明:①从总体看,博尔塔拉河水体中 7 种重金属的含量均较低,但 Hg、Cd、Pb 和 Cr 的最高值明显高于地表水环境质量 II 类标准和 WHO 饮用水健康建议标准;表层底泥和沿岸土壤中重金属含量明显高于河水. ②相关分析和富集系数计算表明,河水、表层底泥及沿岸土壤中重金属 Hg、Cd、Pb 和 Cr 均来自沿岸工业生产、城镇生活、交通运输及农业生产中污染物排放;重金属 Cu、Zn 和 As 主要来源于流域自然地质背景及成土母质因素. ③污染评价表明 3 种介质中 7 种重金属的单因子污染指数值(P_i)和综合污染指数值(P_z)均小 1,属于安全等级,清洁水平. ④潜在生态风险评估表明博尔塔拉河表层底泥及沿岸土壤中 7 种重金属的单因子潜在生态风险(E_i^r)和综合潜在生态风险值(RI)均较低,未对水体及沿岸土壤环境造成危害.

关键词:重金属; 污染评价; 潜在生态风险; 河水; 表层底泥; 沿岸土壤; 干旱区绿洲; 博尔塔拉河

中图分类号: X131; X820.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2015)07-2422-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2015.07.013

Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China

ZHANG Zhao-yong^{1,2}, Jilili Abuduwaili^{1*}, JIANG Feng-qing¹

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper focuses on the sources, pollution status and potential ecology risks of heavy metals (Cr, Cu, Hg, As, Cd, Pb, and Zn) in the surface water, top sediment of river bed and soil along banks of Bortala River, which locates in the oasis region of Xinjiang, northwest China. Results showed that: ① As a whole, contents of 7 tested heavy metals of Bortala River were low, while the maximum values of Hg, Cd, Pb, and Cr in the river water were significantly higher than those of Secondary Category of the Surface Water Quality Standards of People's Republic of China (GB 3838-2002) and Drinking Water Guideline from WHO. Analysis showed that the heavy metals contents of top sediment on river bed and soils along river banks were significantly higher than those of the river water. ②Correlation analysis and enrichment factor (EF) calculation showed that in the river water, top sediment on river bed and soils along river banks, Hg, Cd, Pb, and Cr mainly originated from industrial emissions, urban and rural anthropogenic activities, transportation and agricultural production activities; While Cu, Zn, and As mainly originated from natural geological background and soil parent materials. ③ Pollution assessment showed that in three matrices, the single factor pollution index(P_i) and the integrated pollution index (P_z) of 7 heavy metals were all lower than 1, and they all belonged to safe and clean levels. ④Potential ecology risk evaluation showed that as a whole the single factor potential ecological risk (E_i^r) and the integrated potential ecology risks (RI) of 7 heavy metals were relatively low, and would not cause threats to the health of water and soil environment of river basin, while the potential ecology risks of Cd, Hg, Pb, and Cr were significantly higher than those of other heavy metals.

Key words:heavy metals; pollution assessment; potential ecology risk; river water; top sediment on river bed; soils along river banks; oasis in arid region; Bortala River

重金属是表征环境质量的重要指标,与健康状况息息相关^[1-3]. 自然环境条件下,河流中重金属的含量通常很低,但随着工业化和城市化进程的加快,由于不合理人类活动而形成的大气污染、水污染以及土壤污染将重金属元素过量供给了河流、湖泊等地表水,从而对其水环境及沿岸土壤环

境健康造成了严重的威胁^[4-6]. 与此同时,不同环

收稿日期: 2014-11-02; 修订日期: 2015-02-12
基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471098,41471173); 国家自然科学基金委-新疆联合基金项目 (U1138301)
作者简介: 张兆永(1985~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为干旱区环境演变与生态安全, E-mail: baiyangdian313@163.com
* 通讯联系人, E-mail: jilil@ms.xjb.ac.cn

境介质中重金属可以很容易通过物质循环进入食物链,又会对人体健康造成损害^[7~9]。

国外目前有关河流河水、沉积物及土壤中重金属的研究主要集中于经济迅速发展的沿海、港湾、工业园区以及其他受工农业生产、城市生活及交通运输污染影响明显的区域^[10~14]。在我国,相关研究主要集中于中、东部经济发达地区的河流、湖泊、湿地等地表水体,如长江、珠江、苏杭运河、湘江、松花江、鸭绿江和金沙江等^[15~19]。在生态环境极为脆弱的西北干旱区,近年来随着人类活动强度和范围的不断增大,人为污染物的排放正不断加剧绿洲河流、沉积物和沿岸土壤环境的重金属污染^[20~22]。然而,目前有关干旱区绿洲河流、沉积物和土壤重金属污染及生态风险的研究较少,此外国内外有关水体、沉积物和土壤这 3 种介质中的重金属研究相结合的案例更为缺乏。

本文以新疆绿洲博尔塔拉河为研究对象,通过采集河水、表层底泥和沿岸土壤样品,测取其中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 的含量,然后采用富集系数法、污染指数法和潜在生态风险指数法研究这 3 种介质中重金属的来源、污染状况和潜在生态风险,以期为准噶尔经济快速发展背景下博尔塔拉河流域重金属污染防治和生态环境保护提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

博尔塔拉河地处我国新疆西北部(东经 79°53′~83°53′,北纬 44°02′~45°23′),发源于博罗科努山别洪林达坂,向东流经温泉县、博乐市,然后在精河县境内接纳大河沿子河后折向北偏东方向注入艾比湖,博尔塔拉河全长 252 km,流域面积 1.14×10^4 km²(图 1)。流域气候冬夏漫长,春秋短暂,年平均气温 3.9℃。博尔塔拉河是温泉、博乐市和新疆生产建设兵团农五师灌溉的主要水源。博尔塔拉河也是准噶尔西部重要尾间湖泊——艾比湖的主要补给水源之一,其河流水量及水质变化不但对流域工农业生产、城市居民生活产生极大的影响,也对流域生态环境保护起着重要作用。近年来随着该区域绿洲经济的迅速发展,工、农业生产和城市建设、居民生活中不断增多的污染物排放,导致该区域地表水水质状况恶化,重金属含量超标^[23,24]。

1.2 样品采集与测试分析

样品采集时间为 2014 年 7 月。采样前,详细分

析了博尔塔拉河流域土地利用类型、河流水文状况,然后在数字底图上进行采样点布设,共设置河水、表层底泥及沿岸土壤样品采集点 21 组,63 个采样点。实地采样过程中,根据预设采样点周边实际环境状况,适当调整采样点的位置。采样过程中,每个采样点均采集 3 个平行样品。所有水样品均采集自博尔塔拉河 0~15 cm 表层,采集后装入聚乙烯塑料瓶;底泥样品采集于水下 0~10 cm 处表层,样品采集后装入聚乙烯样品袋中;土壤样品均采集自岸边 0.3~2 m 处 0~10 cm 表层土壤,样品采集后装入干净布袋。河水、表层底泥和沿岸土壤样品采集过程中均记录取样点位置、样品编号、颜色以及周围环境状况等信息。样品采集后运回中国科学院新疆生地所理化测试中心进行前处理和重金属元素的测取工作。

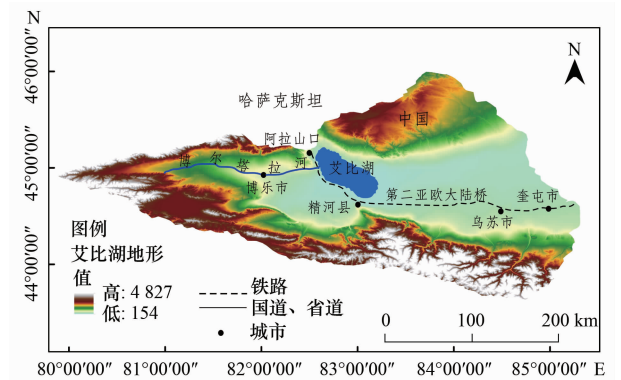


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Map showing the research area

样品运回实验室后,水样品采用 HNO₃-HF-HCl 直接消化,然后进行重金属测试;表层底泥和土壤在实验室经室温风干、去除杂物及敲碎等处理后,采用玛瑙无污染样品制备机将样品粉碎至粒径小于 100 目(0.25 mm)备用然后经 HNO₃-HF-HCl 消化。河水、表层底泥和沿岸土壤样品消化完毕后,Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 的含量采用等离子体质谱法(Inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry, ICP-MS 7500,美国)测定;As 和 Hg 的含量采用原子荧光光谱法(Atomic Fluorescence Spectrometry, AFS 8330,北京)测定。在样品测试过程中为避免污染,所有玻璃器皿、消解罐在使用之前均使用浓度为 5% 的硝酸浸泡 24 h,然后冲洗干净并烘干以便下次使用。样品测试、分析所用试剂均为优级纯;样品测试过程中重金属元素的测试准确度和精密密度采用国家沉积物标准物质(GBW 系列)进行检验,检验结果表明 3 种介质中 7 种重金属的回收率均介于

95.9% ~ 102.7% 之间,符合监控要求.

1.3 研究方法

根据测定的 7 种重金属数据,采用经典统计学方法分析其统计特征;采用相关分析方法和富集系数法分析其来源;采用单因子污染指数法、内梅罗污染指数法和汉克森潜在生态风险指数法(表 1)评价 3 种介质中重金属的污染状况和潜在生态风险;

采用国家地表水水质标准中的 II 类标准^[25] 以及 WHO 饮用水健康标准^[26],评价水样品中水质的超标状况;采用新疆土壤背景值和国家土壤质量二级标准(GB 15618-1995)^[27,28] 分析表层底泥和沿岸土壤中重金属的超标情况. 相关计算过程在 Spss 19.0 和 Matlab 7.0 软件中实现,图表采用 Corel Draw 12.0 软件进行处理、输出.

表 1 重金属污染及风险评价方法

评价方法	评价公式	参数及意义
富集系数法(EF)	$EF_s = \left(\frac{c_i}{c_n} \right)_{\text{测试}} / \left(\frac{c_i}{c_n} \right)_{\text{背景}}$	c_i 表示第 i 种重金属元素的浓度; c_n 表示标准化元素的浓度,在本研究中采用 Al 为标准元素; EF_s 为元素的富集因子,当元素富集因子小于或接近 1 时,可以认为该元素相对于沉积物或土壤来源基本没有富集,主要来源于自然环境;当元素富集因子大于 10,则表明元素除自然来源外还受人类活动影响 ^[29,30]
污染指数评价法	$P_i = \frac{C_i}{S_i}$ $P_z = \sqrt{\frac{\left(M_{\max} \frac{C_i}{S_i} \right)^2 + \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i} \right)^2}{2}}$	P_z 是重金属的综合污染指数; $M_{\max}$ 是最大浓度值; i 是重金属的类别; C_i 是重金属的测试值; S_i 是背景值; n 是评估的种类总数; P_i 是单因子污染指数 ^[31,32]
潜在生态风险评价法	$RI = \sum_i^M E_r^i = \sum_i^M T_r^i \times C_r^i = \sum_i^M T_r^i \times \frac{C_r^i}{C_n^i}$	RI 沉积物或土壤中重金属的潜在生态风险指数; E_r^i 是沉积物或土壤中单个重金属的潜在生态风险系数; C^i 为沉积物或土壤中重金属的实测值; C_r^i 为沉积物或土壤中某一重金属的污染参数; T_r^i 是沉积物或土壤中单一污染物的毒性系数. 结合相关文献本研究中沉积物或土壤中重金属的毒性系数分别为 Pb:5、As:10、Cu:5、Zn:1、Cr:2、Cd:30、Hg:40 ^[32,33]

2 结果与分析

2.1 重金属的统计特征

统计分析表明(表 2),博尔塔拉河河水中 7 种重金属 Pb、Cd、Hg、As、Cu、Zn 和 Cr 的平均值(最大值)分别为:0.045 (0.081)、0.007 5 (0.014)、0.000 77 (0.001 3)、0.004 2 (0.008 7)、0.003 9 (0.007 9)、0.028 (0.047) 和 0.059 (0.15) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据国家地表水水质标准中的 II 类标准^[25] 以及 WHO 饮用水健康标准进行评价^[26],博尔塔拉河河水中 7 种重金属的平均值未超过国家地表水水质 II 类标准以及 WHO 饮用水健康建议标准(表 2),表明博尔塔拉河水体中重金属总体含量较低. 从变异系数来看,所有取样点中重金属 Hg、Cd、Pb 和 Cr 的变系数平均值分别为:48.75%、38.27%、58.76% 和 44.71%,表明不同采样位置重金属含量的差异性较大^[35];从偏度上看,所有样点中 7 种重金属的平均大小顺序为:Pb > Hg > Cd > Cr > Zn > As > Cu.

博尔塔拉河表层底泥中重金属 Pb、Cd、Hg、As、Cu、Zn 和 Cr 的平均值(最大值)分别为 15.23

(21.25)、0.25 (0.57)、0.067 (0.36)、4.36 (8.94)、16.58 (25.28)、22.58 (42.75) 和 53.74 (69.57) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 7 种重金属的平均值和最大值均未超过国家土壤质量二级标准^[27],但 Hg、Cd、Pb 和 Cr 的平均值和最大值超过新疆土壤背景值^[28]. 从变异系数来看,所有样点中 Pb、Hg 和 Cr 的变异系数平均值均较大,分别为 68.54%、59.61% 和 36.17%. 从偏度上看,所有样点中 7 种重金属元素的平均值大小顺序为 Pb > Hg > Cr > As > Cu > Cd > Zn.

博尔塔拉河沿岸土壤中重金属 Pb、Cd、Hg、As、Cu、Zn 和 Cr 的平均值(最大值)分别为:19.57 (26.75)、0.47 (0.77)、0.076 (0.41)、5.37 (9.54)、19.55 (28.71)、26.52 (48.72) 和 56.79 (78.56) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 7 种重金属的平均值和最大值均未超过国家土壤质量二级标准,但 Hg、Cd、Pb 和 Cr 的平均值和最大值超过新疆土壤背景值;从变异系数来看,所有样点中重金属 Pb、Hg、Cr 的平均变异系数均较大,分别为 83.17%、99.58% 和 55.65%;从偏度上看,所有样点中 7 种重金属的平均值大小顺序为:Hg > Pb > Cr > Cu > As > Cd > Zn.

表 2 博尔塔拉河流域 3 种介质中重金属的分布特征

Table 2 Distribution characters of heavy metal contents in river water, sediment of river bed and soils along river banks of Boertala River												
介质	元素	最大值/水 /mg·L ⁻¹ ; 土、底泥 /mg·kg ⁻¹	最小值/水 /mg·L ⁻¹ ; 土、底泥 /mg·kg ⁻¹	均值/ 水 /mg·L ⁻¹ ; 土、底泥 /mg·kg ⁻¹	标准差/水 /mg·L ⁻¹ ; 土、底泥 /mg·kg ⁻¹	变异 系数 /%	峰度 /%	偏度 /%	新疆土壤 背景值 ^[28] /mg·kg ⁻¹	土壤二级质 量标准 ^[27] /mg·kg ⁻¹	地表水质 Ⅱ类标准 /mg·L ⁻¹ ^[25]	WHO 饮用 水标准 ^[26] /mg·L ⁻¹
河水 (n = 21)	Pb	0.081	ND	0.045	17.26	58.56	32.15	25.24	—	—	≤0.01	≤0.01
	Cd	0.014	ND	0.007 5	9.02	38.27	12.71	18.34	—	—	≤0.005	≤0.003
	Hg	0.001 3	ND	0.000 77	4.13	48.75	24.71	18.77	—	—	≤0.000 05	≤0.006
	As	0.0087	ND	0.0042	5.67	21.24	17.28	12.34	—	—	≤0.05	≤0.01
	Cu	0.0079	ND	0.0039	12.77	17.65	16.81	11.26	—	—	≤1.0	≤2
	Zn	0.047	0.0087	0.028	22.61	23.51	19.28	15.28	—	—	≤1.0	≤0.05
	Cr	0.15	ND	0.059	19.85	44.71	21.57	16.61	—	—	≤0.05	≤0.05
	Al	1.12	ND	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—
表层底泥 (n = 21)	Pb	21.25	0.021	15.23	20.19	77.58	44.19	28.74	11.2	350	—	—
	Cd	0.57	0.016	0.25	6.32	28.25	16.61	13.28	0.16	0.6	—	—
	Hg	0.36	0.002	0.067	5.81	69.81	37.24	19.63	0.055	1.0	—	—
	As	8.94	0.016	4.36	11.62	17.61	22.57	15.65	10.78	—	—	—
	Cu	25.28	0.014	16.58	16.81	14.27	23.16	14.61	29	100	—	—
	Zn	42.75	0.012	22.58	29.27	20.83	18.69	10.27	60.7	300	—	—
	Cr	69.57	0.024	53.74	18.14	42.51	23.17	17.25	47.4	250	—	—
	Al	18.56	1.22	12.39	—	—	—	—	—	—	—	—
沿岸土壤 (n = 21)	Pb	26.75	0.036	19.57	7.51	83.17	68.54	39.27	11.2	350	—	—
	Cd	0.77	0.022	0.47	4.46	32.18	32.27	17.63	0.16	0.6	—	—
	Hg	0.41	0.003	0.076	2.08	99.58	59.61	40.51	0.055	1.0	—	—
	As	9.54	0.019	5.37	7.74	26.81	28.19	19.44	10.78	—	—	—
	Cu	28.71	0.025	19.55	10.01	32.54	27.36	20.65	29	100	—	—
	Zn	48.72	0.016	26.52	21.27	36.19	19.71	11.87	60.7	300	—	—
	Cr	78.56	0.036	56.79	11.26	55.65	36.17	22.29	47.4	250	—	—
	Al	58.77	11.24	23.8	—	—	—	—	—	—	—	—

1) ND 表示未检出

2.2 重金属的相关分析

相关分析表明(图 2),博尔塔拉河河水、表层底泥和沿岸土壤中重金属 Hg-Pb、Hg-Cd、Hg-Cr、Pb-Cd、Pb-Cr 和 Zn-Cu、Zn-As、Cu-As 之间的相关性均较强. 其中河水中 Hg-Pb、Hg-Cd、Hg-Cr、Pb-Cd 和 Pb-Cr 的相关系数分别为 0.537、0.817、0.569、0.671 和 0.762 均达到极显著水平($P < 0.01$),Zn-Cu、Zn-As 和 Cu-As 之间的相关系数分别为 0.413、0.388 和 0.534,均达到显著性水平($P < 0.05$);表层底泥中 Hg-Pb、Hg-Cd、Hg-Cr、Pb-Cd 和 Pb-Cr 的相关系数分别为 0.682、0.828、0.581、0.694 和 0.811 均达到极显著水平($P < 0.01$),Zn-Cu、Zn-As 和 Cu-As 之间的相关系数分别为 0.469、0.401 和 0.516,均达到显著性水平($P < 0.05$);沿岸土壤中 Hg-Pb、Hg-Cd、Hg-Cr 和 Pb-Cr 的相关系数分别为 0.641、0.658、0.721 和 0.586,为极显著水平($P < 0.01$),Zn-Cu、Zn-As 和 Cu-As 之间的相关系数分别为 0.499、0.429 和 0.468,为显著性水平($P < 0.05$). 与此同时,在 3 种介质中重金属 Hg、

Pb、Cd、Cr 与 Zn、Cu、As 之间的组合大多表现为负相关或无明显相关关系,表明两组重金属可能分别存在不同来源. 下文通过计算富集系数进一步揭示其来源.

2.3 富集系数评价(EF)

以 Al 为参比元素分别计算博尔塔拉河河水、表层底泥以及沿岸土壤中重金属的富集系数(表 1、表 2). 计算结果表明(表 3)博尔塔拉河河水中 7 种重金属的富集系数的平均值大小顺序依次为 Cd > Hg > Pb > Cr > Cu > Zn > As; 7 种重金属的富集因子可以分为 3 类:第 1 类为 Cu、Zn 和 As,富集系数均低于 1,为不明显富集,表明河水中 Cu、Zn、As 应主要来自于流域自然地质背景;第二类为 Cr,富集系数为 0.98,接近 1,为轻微富集,表明河水中 Cr 的含量受自然地质以及人为污染物排放的共同影响;第三类为 Cd、Hg 和 Pb,其富集系数均大于 10,以 Cd 最大,在所有样点中其富集系数的平均值为 23.54;结合相关研究及采样点环境状况分析,在博尔塔拉河河水中 3 种重金属主要受流域工农业生产、城市

生活和交通运输污染物排放的影响^[29,36]。

博尔塔拉河表层底泥中 7 种重金属富集系数平均值大小顺序依次为 Pb > Hg > Cd > Cr > Cu > As > Zn; 可以明显分为 3 类(表 3):第 1 类为 Cu、As、Zn,富集因子均低于 1,表明应主要来源于流域自然地质背景;第二类为 Cr,富集系数为 0.94,接近 1,表明应受流域自然地质因素和人为因素的共同影响;第三类为 Cd、Hg 和 Pb,富集系数均大于 10,表明应主要受流域附近工农业生产、城市生活和交通运输中重金属污染物排放的影响^[30,36,38]。

博尔塔拉河沿岸土壤中 7 种重金属的富集系数

平均值大小顺序依次为 Hg > Cd > Pb > Cr > Cu > Zn > As; 7 种重金属的富集系数可以分为 2 类:第 1 类为 Cu、Zn、As,富集系数均低于 1,为不明显富集,表明博尔塔拉河沿岸土壤中重金属 Cu、Zn 和 As 等元素应主要来自于流域自然地质背景及成土母质等因素;第 2 类为 Pb、Cd、Cr 和 Hg,在所有样点中 4 种重金属富集系数的平均值为分别为 19.63、22.29、17.65 和 28.71;结合相关研究分析,表明在博尔塔拉河流域沿岸土壤中 4 种重金属主要受流域工农业生产、城镇生活污染物排放以及交通运输等因素的影响^[30,36,38]。

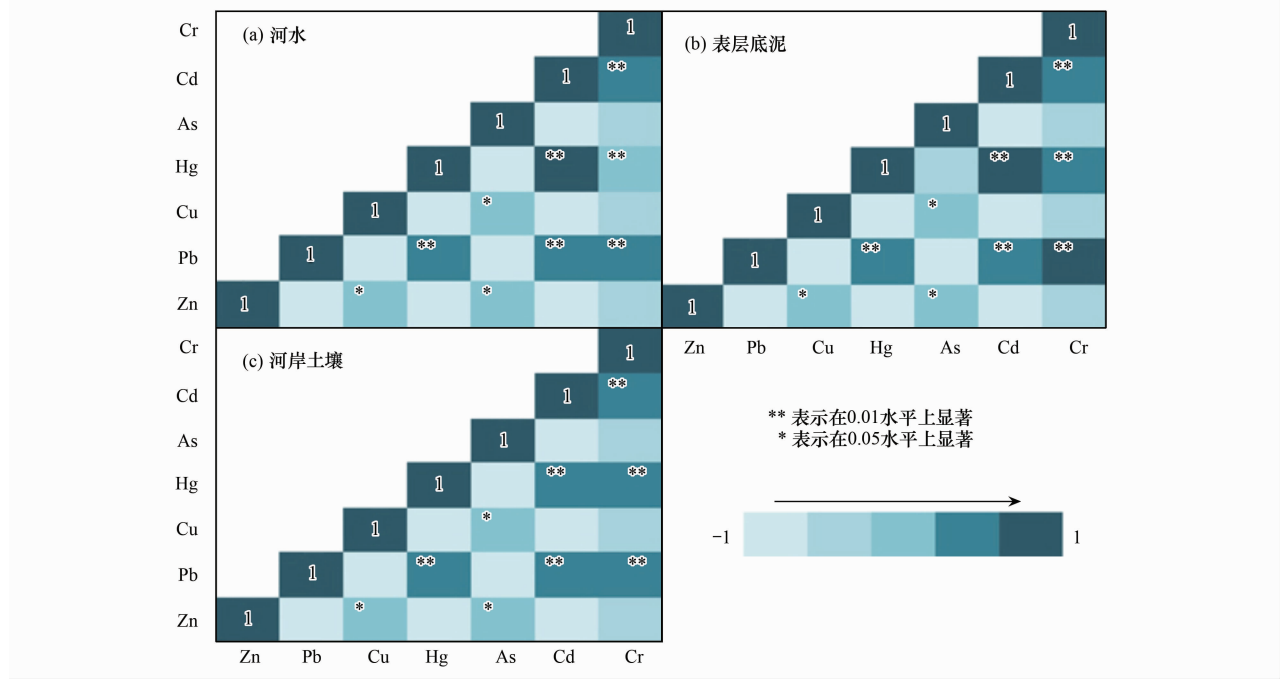


图 2 重金属的相关关系矩阵
Fig. 2 Correlation matrix of heavy metals

表 3 不同介质中重金属的富集系数

Table 3 Enrichment factors of heavy metals in different matrices

介质	富集系数 (EF)						
	Pb	Zn	Hg	Cr	Cd	Cu	As
河水	18.69	0.35	22.51	0.98	23.54	0.41	0.28
表层底泥	36.85	0.28	33.64	0.94	28.51	0.43	0.31
河岸土壤	19.63	0.41	28.71	17.65	22.29	0.58	0.36

2.4 重金属污染评价

在上文分析的基础上,依据国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的Ⅱ类水质标准来评价博尔塔拉河河水中重金属的污染状况^[25](表 1 和表 2)。评价结果(表 4)表明,博尔塔拉河河水中 7 种重金属的单因子污染指数值(P_i)和综合污染指数值(P_z)均小 1,属于安全等级,清洁水平,未出现污染状况,这也与水质评价结果一致。从数值大小

看,博尔塔拉河河水中 7 种重金属的单因子污染水平平均值大小顺序依次为: Hg > Pb > Cr > Cd > Zn > Cu > As,其中重金属 Pb、Cd、Cr 和 Hg 的单因子污染指数值于其他重金属,表明存在较大污染风险。

以新疆土壤背景值中重金属值为限值评估博尔塔拉河表层底泥中重金属的污染状况^[28](表 1、表 2、表 4),评价结果(表 5)表明,博尔塔拉河表层底泥中 7 种重金属的单因子污染指数值(P_i)和综合污

染指数值(P_z)均小 1,均属于安全等级,清洁水平;从数值大小看,所有样点中 7 种重金属的单因子污染指数的平均值大小顺序依次为: $Hg > Pb > Cr > Cd > Zn > Cu > As$,其中 Pb 、 Cd 、 Cr 和 Hg 的单因子污染指数值明显高于其他重金属,存在较大污染风险.

以新疆土壤背景值中重金属值为限值评估博尔塔拉河沿岸土壤中重金属的污染状况^[28](表 1、表

2、表 4),评价结果表明(表 5),在博尔塔拉河沿岸所有样点土壤中 7 种重金属的单因子污染指数值和综合污染指数值均小 1,表明未受污染;从数值大小看,所有样点中 7 种重金属的污染指数平均值大小顺序依次为: $Cd > Hg > Pb > Cr > Cu > Zn > As$,其中 Pb 、 Cd 、 Cr 和 Hg 的单因子污染指数值显著高于其他重金属,表明存在较大风险.

表 4 单因子污染指数及综合污染指数评价标准

Table 4 Standards for single factor pollution index and synthetic pollution index					
单因子污染指数 P_i	污染等级	污染水平	综合污染指数 P_z	污染等级	污染水平
$P_i \leq 1$	安全	清洁	$P_z \leq 0.7$	安全	清洁
$1 < P_i \leq 2$	警戒线	尚清洁	$0.7 < P_z \leq 1$	警戒线	尚清洁
$2 < P_i \leq 3$	轻度污染	受污染	$1 < P_z \leq 2$	轻污染	已受污染
$P_i > 3$	重度污染	受重污染	$2 < P_z \leq 4$	重污染	受重度污染

表 5 单因子污染指数法和综合污染指数评价

Table 5 Single factor index and synthetic pollution index of heavy metals								
介质	单因子污染指数 P_i							综合污染指数 P_z
	Pb	Zn	Hg	Cr	Cd	Cu	As	
河水	0.23	0.12	0.29	0.19	0.15	0.08	0.04	0.65
表层底泥	0.28	0.14	0.35	0.31	0.27	0.12	0.06	0.78
河岸土壤	0.34	0.16	0.44	0.32	0.45	0.17	0.08	0.97

2.5 重金属潜在生态风险评估

在来源及污染分析、评价的基础上,采用 Hankson 潜在生态风险法^[34]对博尔塔拉河表层底泥及沿岸土壤中 7 种重金属的潜在生态危害进行评估(表 1、表 6),评价结果(图 3)表明,博尔塔拉河表层底泥及沿岸土壤中 7 种重金属的综合潜在生态风险指数值(RI)均小于 40,属于较低的生态风险范围(表 6);从单个重金属的生态风险系数(E_r^i)来看(图 3),博尔塔拉河表层底泥及沿岸土壤中 Cd 、 Hg 、 Pb 、 Zn 、 Cu 、 As 、 Cr 的 E_r^i 平均值均小于 0.5,表明 2 种介质中重金属的潜在生态风险较小,环境状况较好.

表 6 重金属的潜在生态风险和污染水平评估

Table 6 Potential ecological risk coefficient (E_r^i) and risk index (RI) of heavy metals			
潜在生态风险系数	单因子生态风险	潜在生态风险指数	潜在生态危害程度
$E_r^i < 40$	低	$RI < 150$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_r^i < 160$	高	$300 \leq RI < 600$	高
$160 \leq E_r^i < 320$	重	$600 \leq RI$	重
$320 \leq E_r^i$	严重	/	/

从博尔塔拉河表层底泥及沿岸土壤中单个重金属元素对总的重金属潜在生态风险贡献来看(图 4),博尔塔拉河表层底泥及沿岸土壤中重金属 Cd 、

Hg 、 Pb 和 Cr 的潜在生态风险指数对总风险的贡献率分别为 25.7%、15.8%、22.4%、21.8% 和 36.7%、23.2%、25.1%、19.3%;而 2 种介质中其他重金属的潜在生态风险对 7 种重金属总的潜在生态风险的总贡献率仅为 14.3% 和 15.0%,表明博尔塔拉河表层底泥及沿岸土壤中重金属的生态风险主要由 Cd 、 Hg 、 Pb 和 Cr 引起,这也与污染评价的结果一致.

相关研究表明,我国东部地区的河流、湿地等地表水体及沉积物的重金属污染往往由于工业生产如矿业开采、电镀、建筑、印染、电子制造、旅游、城市化进程^[38~40]中含重金属污染物的排放引起.如张雷等^[41]对大辽河感潮段及其近海河口重金属分布及污染状况的研究和刘志杰等^[42]对黄河三角洲滨海湿地表层底泥重金属污染和潜在生态风险状况研究等都揭示了这种现象.而博尔塔拉河流域地处我国西北内陆,主要以农业产业为主,工业发展相对落后,但有第二亚欧大陆桥、国道、省道以及众多县乡道路经过,交通排放是主要污染物来源之一.此外,近年来,绿洲经济的迅速发展以及北部阿拉山口口岸保税区的设立也极大地促进了该区域交通运输业等产业的迅速发展,与国内外的贸易、联系大大便利.在此过程中,相关产业含重金属污染物的排放造成了环境中 Hg 、 Pb

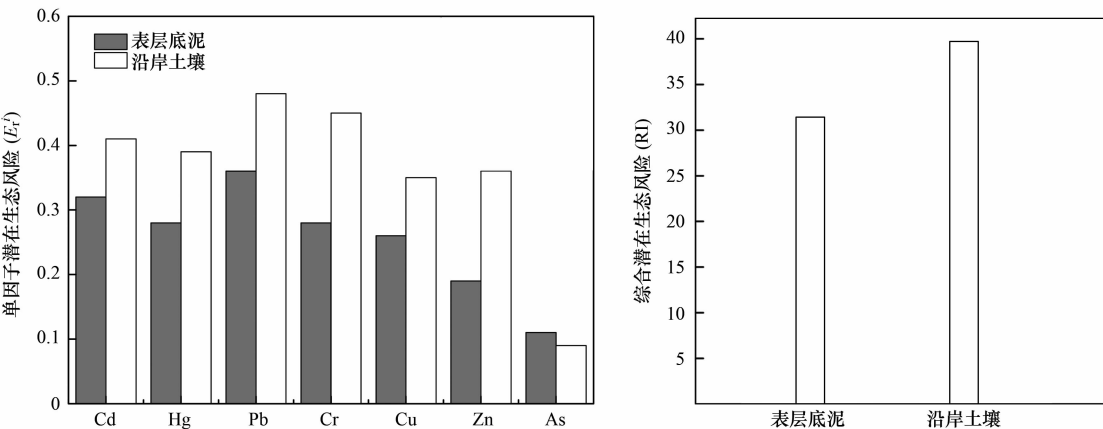


图3 潜在生态风险(E_r^i)和潜在综合危害指数(RI)

Fig. 3 Potential ecological risk coefficients (E_r^i) and potential ecology risk index (RI) of heavy metals

和 Cr 的含量增加. 与此同时,该区域少数石油化工、农副产品加工企业也有少量排放. 绿洲农业生产中污染排放造成的点源和面源污染也导致绿洲水体、土壤环境中相关重金属的含量较高^[27,28,52],并呈现累积现象. 对此应予以重视,采取有效措施减少污染物排放,保护良好的绿洲生态环境.

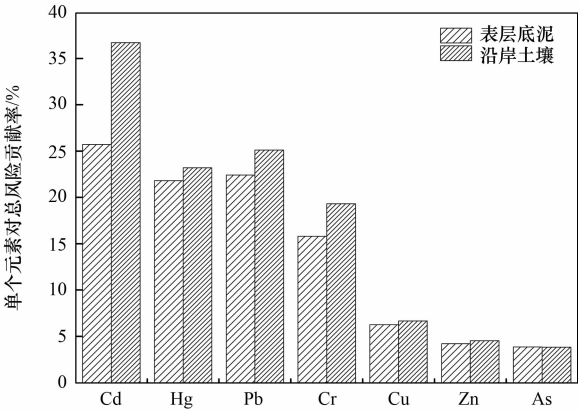


图4 不同重金属对潜在生态风险指数的贡献

Fig. 4 Contribution ratios of different heavy metals to potential ecological risk indices

3 结论

(1)统计分析表明,博尔塔拉河河水中 7 种重金属的含量相对较低,但 Hg、Cd、Pb 和 Cr 的最高值均高于地表水质量Ⅱ类标准和 WHO 引用水健康建议标准;博尔塔拉河表层底泥和沿岸土壤中重金属含量明显高于河水.

(2)相关分析和富集系数计算表明,博尔塔拉河河水、表层底泥及沿岸土壤中重金属 Hg、Cd、Pb 和 Cr 之间具有较强的相关性,主要受沿岸工业生

产、城镇生活、交通运输及农业生产中污染物排放的影响;重金属 Cu、Zn、As 之间具有较强的相关性,主要受流域自然地质背景和成土母质的影响.

(3)污染评价表明,博尔塔拉河河水、表层底泥及沿岸土壤中 7 种重金属的单因子污染指数值(P_i)和综合污染指数值(P_c)均小 1,属于安全等级,清洁水平,但 Cd、Hg、Pb 的污染指数相对较高.

(4)潜在生态风险评估表明,总体看博尔塔拉河表层底泥及沿岸土壤中 7 种重金属的单因子潜在生态风险(E_r^i)和综合潜在生态风险(RI)均较低,未对河流水体及沿岸土壤环境健康造成明显的危害,但 Cd、Hg 和 Pb 的潜在生态风险较高,应重视.

参考文献:

[1] Jin L, Liu J F, Ye B X, *et al.* Concentrations of selected heavy metals in maternal blood and associated factors in rural areas in Shanxi Province, China [J]. *Environment International*, 2014, **66**(2): 157-164.

[2] Gao X, Zhou F, Chen C T A. Pollution status of the Bohai Sea: An overview of the environmental quality assessment related trace metals[J]. *Environment International*, 2014, **62**(4): 12-30.

[3] 雷鸣,曾敏,胡立琼,等. 不同含磷物质对重金属污染土壤-水稻系统中重金属迁移的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(6): 1527-1533.

[4] 吴烈善,曾东梅,莫小荣,等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 309-313.

[5] 简敏菲,李玲玉,徐鹏飞,等. 鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1759-1765.

[6] 黄文,张玉龙,李海燕,等. 东江流域水环境中颗粒态和胶体态金属元素的分布和来源[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(1): 101-107.

[7] 常同举,崔孝强,阮震,等. 长期不同耕作方式对紫色水稻

土重金属含量及有效性的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2381-2391.

[8] 马建华, 马诗院, 陈云增. 河南某污灌区土壤-作物-人发系统重金属迁移与积累[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1517-1526.

[9] 孙丽娟, 段德超, 彭程, 等. 硫对土壤重金属形态转化及植物有效性的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(7): 2141-2148.

[10] 谭冰, 王铁宇, 朱朝云, 等. 洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 719-726.

[11] 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 等. 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1750-1758.

[12] 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 等. 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1516-1522.

[13] 白莉萍, 齐洪涛, 伏亚萍, 等. 北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4648-4654.

[14] Zhang Z Y, Abuduwaili J, Jiang F Q. Determination of occurrence characteristics of heavy metals in soil and water environments in Tianshan Mountains, Central Asia [J]. Analytical Letters, 2013, **46**(13): 2122-2131.

[15] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2599-2606.

[16] 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 等. 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2359-2367.

[17] 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 等. 应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1715-1724.

[18] 周军, 高风杰, 张宝杰, 等. 松花江表层沉积物有毒重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2701-2708.

[19] 刘月, 程岩, 李富祥, 等. 鸭绿江口近百年来重金属垂向沉积的污染评价[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(5): 489-494.

[20] 李梅英, 徐俊荣, 史志文. 浅析新疆巩乃斯河重金属时空分异特征[J]. 环境化学, 2009, **28**(5): 716-720.

[21] 马龙, 吴敬禄, 吉力力·阿布都外力. 新疆柴窝堡地区沉积物元素地球化学特征及其环境意义 [J]. 自然资源学报, 2013, **28**(7): 1221-1231.

[22] 穆叶赛尔·吐地, 吉力力·阿布都外力, 姜逢清, 等. 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.

[23] 张艳, 常顺利, 师庆东, 等. 艾比湖流域 2008 年丰水期水环境质量现状评价[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(6): 891-894.

[24] 张艳, 常顺利, 师庆东, 等. 农业面源污染对丰水期艾比湖流域水环境的影响[J]. 干旱区研究, 2010, **27**(2): 278-283.

[25] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准(GB 3838-2002) [S]. 北京: 中国环境科学出版社. 2002.

[26] WHO. Guidelines for drinking water quality [S]. (3rd ed.). Geneva: World Health Organization. 2011.

[27] 国家环境保护总局. 土壤环境质量标准(GB 15618-1995) [S]. 北京: 中华人民共和国国家环境保护局. 1995.

[28] 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. 329-368.

[29] 李山泉, 杨金玲, 阮心玲, 等. 南京市大气沉降中重金属特征及对土壤环境的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 22-29.

[30] 梁俊宁, 刘杰, 陈洁, 等. 陕西西部某工业园区采暖期大气降尘重金属特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(2): 318-324.

[31] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 天山山地表层土壤重金属的污染评价及生态风险分析[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(5): 608-616.

[32] 徐姗楠, 李纯厚, 徐娇娇, 等. 大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2075-2084.

[33] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.

[34] 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 等. 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1509-1515.

[35] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.

[36] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1021-1028.

[37] 黄顺生, 华明, 金洋, 等. 南京市大气降尘重金属含量特征及来源研究[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 161-166.

[38] 朱程, 马陶武, 周科, 等. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险[J]. 生态学报, 2010, **30**(15): 3982-3993.

[39] 杨玉飞, 黄启飞, 张霞, 等. 废物水泥窑共处置产品中重金属释放量研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1539-1544.

[40] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1561-1567.

[41] 张雷, 秦延文, 马迎群, 等. 大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3336-3345.

[42] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1182-1188.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and δ ¹³ C _{DIC} of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17β-estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行