

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝瑛, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态

王馨慧^{1,2}, 单保庆², 唐文忠^{2*}, 张超², 王闯^{2,3}

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘要: 选择北京市典型的非常规水源补给城市河流(凉水河)为研究对象, 采用王水水浴消解法和 BCR 三步提取法分析了表层沉积物中砷含量及其形态, 并利用富集系数法、风险评估指数法和沉积物重金属质量基准法对表层沉积物中砷进行评价。结果表明, 凉水河表层沉积物中总砷含量范围是 2.18 ~ 22.5 mg·kg⁻¹, 均值为 6.01 mg·kg⁻¹, 多数样点低于北京市土壤中砷的背景值; 沉积物中砷主要以残渣态(B4 态)存在, 平均含量为 3.93 mg·kg⁻¹; 沉积物中各形态砷所占的平均比例顺序为: 残渣态(B4 态) > 可还原态(B2 态) > 可氧化态(B3 态) > 弱酸可溶解态(B1 态), 其中生物有效态砷占总砷的平均比例为 39.61%。富集系数法分析结果显示凉水河表层沉积物中砷基本未出现富集; 风险评估指数法分析结果显示凉水河 60% 的采样点表层沉积物中砷含量呈中度风险, 40% 的采样点呈低风险; 沉积物重金属质量基准法分析结果显示凉水河 55% 的采样点表层沉积物中砷含量低于阈值效应水平(TEL), 40% 的采样点处于可能效应水平(PEL)和阈值效应水平(TEL)之间。

关键词: 城市河流; 表层沉积物; 砷; 赋存形态; 污染与风险

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0180-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.024

Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing

WANG Xin-hui^{1,2}, SHAN Bao-qing², TANG Wen-zhong^{2*}, ZHANG Chao², WANG Chuang^{2,3}

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Aquaculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Arsenic (As) content and speciation in the surface sediments of the typical urban river (Liangshui River) with unconventional water sources in Beijing were investigated by different methods, including BCR three-step sequential extraction procedure, enrichment factor (EF), risk assessment code (RAC) and sediment quality guidelines (SQGs). The results showed that total As contents in the surface sediments ranged from 2.18 mg·kg⁻¹ to 22.5 mg·kg⁻¹, with an average of 6.01 mg·kg⁻¹, and most of them were lower than the soil background value. In terms of speciation, As mainly existed in B4 (with an average content of 3.93 mg·kg⁻¹), and the contents of the four forms followed the sequence: B4 > B2 > B3 > B1. In addition, the percentage of biological available As was 39.61%. The EF values due to As showed there was not significant enrichment in most studied sediments. The analysis results of RAC showed that the surface sediments from 60% of the sampling sites posed moderate risk, and 40% of the sampling points showed low risk. The results of SQGs showed that As content in the surface sediments from 55% of the sampling points was below the threshold effect level (TEL), and that in 40% of the sampling points was between TEL and probable effects level (PEL).

Key words: urban river; surface sediments; As; speciation; pollution and risk

重金属污染是一个全球性的问题^[1,2]。沉积物是重金属污染物的“源”和“汇”,也是底栖生物的主要活动场所,聚集在沉积物中的重金属可能通过食物链的富集和放大作用对人类健康造成危害^[3]。当上覆水的环境发生改变时,沉积物中重金属可能会释放到水体中,对水生生态系统的健康造成影响^[4]。沉积物中重金属污染已经成为世界性的热点问题^[5-7],而重金属中的砷以其极强的毒性和致癌作用也备受国内外学者的关注^[8-10]。砷是一种在自然环境中广泛存在的类金属元素,是具有危害性的重要环境污染物,也是威胁人类健康的致癌物^[8]。环

境中的砷在自然过程(自然风化、生物活动和火山喷发等)和人类活动的综合作用下进行迁移,进入水体的砷化合物会随悬浮物的沉降进入沉积物并在沉积物中积累^[9]。积累在沉积物中的砷在环境条件发生改变时会发生二次污染^[11],危害生态环境,也可能通过食物链的生物放大作用威胁人类健康^[12]。

凉水河是北京市区主要的排水河道之一,主要

收稿日期: 2015-07-06; 修订日期: 2015-09-02

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAJ24B01)

作者简介: 王馨慧(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为沉积物重金属污染, E-mail: xhwangandy@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: wztang@rcees.ac.cn

以污水处理厂出水为补给水源。近年来,随着城镇建设的不断发展,城市生产/生活废水不断排入,凉水河的污染更加严重^[13]。目前已有部分学者对凉水河表层沉积物中重金属进行研究^[14~16],但关于凉水河表层沉积物中砷的研究较少。本文开展了对凉水河表层沉积物中砷的研究,因为重金属总量只能在一定程度上反映沉积物受污染程度,并不能很好地表达沉积物受到的生态危害性^[5]。因此本文在研究了凉水河表层沉积物中砷含量的基础上又研究了砷的赋存形态。结合凉水河表层沉积物中砷总量及其赋存形态情况,可以科学地评价凉水河表层沉积物中砷的污染现状并制定合理的防治措施。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

凉水河是北运河的主要支流之一,发源于石景山,流经海淀、宣武等区县,于榆林庄闸上游汇入北运河。凉水河全长 67 km,流域面积约 640 km²^[17]。凉水河是北京市南郊的主要排水河道,是典型的非常规水源补给城市河流^[15]。近年来,城镇建设较快,大量的污染物排入水体,对水体造成了严重的污染。根据凉水河水系空间分布情况以及污染源位置,在凉水河干流和主要支流选取了 24 个采样点(图 1)。具体分布如下:1~4 号采样点位于干流上游,5~7 号采样点位于干流中游,8~14 号采样点位于干流下游,15~24 号采样点位于主要支流。样品是 2014 年 7 月用抓斗式采样器平行 3 次采集的凉水河表层(0~10 cm)沉积物,采集样品装入自封袋并置于 4℃ 车载冰箱中运回实验室,将样品充分混匀、冷冻干燥、过 100 目尼龙筛,然后置于自封袋中

密封保存,待测。

1.2 实验方法

本研究采用中华人民共和国国家标准 GB/T 22105.2-2008 即土壤质量-总砷测定-原子荧光法(王水水浴消解法)测定凉水河表层沉积物中总砷含量,参考欧共体标准署提出的三步连续提取法^[18](BCR 法)测定各赋存形态的砷含量。BCR 三步提取法:弱酸可溶解态(B1 态),即可交换态及碳酸盐结合态;可还原态(B2 态),即 Fe/Mn 氧化物结合态;可氧化态(B3 态),即有机物及硫化物结合态;残渣态(B4 态),即结合在硅铝酸盐矿物晶格中的重金属。本研究中凉水河表层沉积物中砷的 B1 态、B2 态和 B3 态采用 BCR 法提取,B4 态用砷总量减去 B1 态、B2 态和 B3 态。凉水河表层沉积物中有机质含量采用烧失量法(loss on ignition, LOI)测定^[19]。凉水河表层沉积物中 Fe 含量测定采用王水-氢氟酸法进行微波消解^[20],消解后加 1~2 滴高氯酸,在电热板上 150℃ 赶酸 2 h,赶出消解液中多余的王水及氢氟酸^[15],消解液放置到室温后用超纯水定容至 100 mL,过 0.45 μm 水系滤膜并放入 4℃ 冰箱保存待测。

本研究所有提取液中的砷总量和各赋存形态的砷含量均采用瑞利 AF-610 型原子荧光光度计测定,Fe 含量用 ICP-OES (OPTIMA 2000DV, Perkin Elmer, USA)测定。在实验过程中,每批样品均同步分析空白、沉积物标准物质(GBW07304a)和重金属顺序提取形态标准物质(GBW07438),以减少误差并控制回收率。凉水河表层沉积物中砷总量的回收率控制在 97%~105% 之间;砷形态分析的每一步中,标准物质的回收率控制在 86%~112% 之间;Fe 回收率控制在 92%~107% 之间。

1.3 评价方法

本研究采用 3 种评价方法,即富集系数法、风险评估指数法和沉积物重金属质量基准法。富集系数法(enrichment factor, EF)是 Buat-Menard 等于 1979 年提出的^[21],该方法采用金属元素与惰性元素,一般选用 Fe 或 Al(本研究采用 Fe)的标准化之比来评价重金属污染的富集程度^[18,22],计算公式见文献^[23],其中砷和铁的背景值参考北京市土壤重金属背景值^[24]。风险评估指数法(risk assessment code, RAC)是基于沉积物中重金属不同的赋存形态而提出的^[7]。因以 B1 态存在的重金属键合较弱,易与上覆水相互交换,故将 B1 态视为有效态。RAC 通过计算有效态占重金属总量的

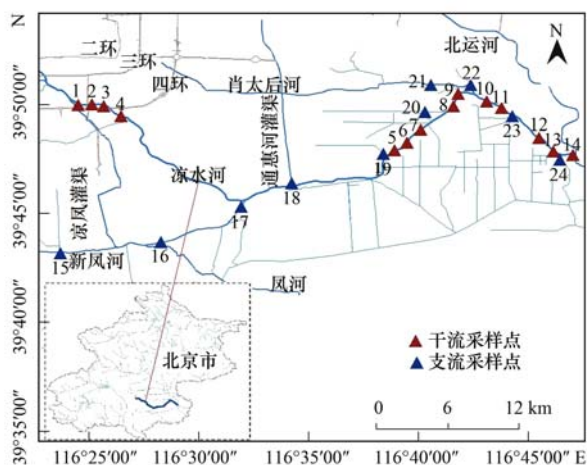


图 1 凉水河采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Liangshui River system

比例来评价沉积物中重金属的风险程度. 沉积物中重金属的质量基准法 (sediment quality guidelines, SQGs) 反映了沉积物中污染物对生物的毒性. 当某种沉积物中重金属含量低于阈值效应水平 (threshold effect level, TEL) 时, 一般认为沉积物未发生污染, 底栖生物不会出现不良反应; 当某种重金属含量高于可能效应水平 (probable effects level, PEL) 时, 则认为沉积物极有可能发生污染, 极易对底栖动物产生毒性, 同时会对生态系统造成损害; 当沉积物重金属含量介于二者之间时, 有可能发生不良生物效应和负面毒性效应^[9, 25]. 综合运用这 3 种评价方法可以高效地评价重金属对沉积物的污染程度, 有利于全面地分析沉积物中重金属的毒性及其对环境的风险.

EF 法的分级标准: 当 EF 处于 0.5 ~ 1.5 之间时, 表明沉积物中重金属没有发生富集, 主要是自然来源, 包括来自土壤和岩石圈的自然风化; 如果大于 1.5, 表明沉积物中重金属发生了富集, 主要是人为输入, 包括人类生产和生活带来的重金属污染^[19, 26]. RAC 法的等级划分: B1 态所占比例 (质量

分数) 小于 1%, 无风险; 1% ~ 10%, 低风险; 11% ~ 30%, 中度风险; 31% ~ 50%, 高风险; 高于 50%, 很高风险.

2 结果与分析

2.1 凉水河表层沉积物中砷含量及其形态分布

表 1 展示的是凉水河表层沉积物中砷总量和各形态砷含量, 图 2 展示的是凉水河表层沉积物中各形态砷占总砷的比例. 从中可知, 凉水河表层沉积物中砷总量在 2.18 ~ 22.5 mg·kg⁻¹ 之间, 均值为 6.01 mg·kg⁻¹. 从空间分布上看, 凉水河各河段表层沉积物中砷总量存在一定的差异, 干流上游表层沉积物中砷总量最高, 均值为 9.60 mg·kg⁻¹; 干流中游表层沉积物中砷总量最低, 均值为 4.32 mg·kg⁻¹; 干流下游表层沉积物中砷总量较低, 均值为 5.30 mg·kg⁻¹; 支流表层沉积物中砷总量较高, 均值为 5.57 mg·kg⁻¹. 从凉水河表层沉积物中砷总量的空间分布情况来看, 凉水河干流污染更为严重. 参考北京市土壤砷背景值^[24], 除 2 号样点外, 其他样点均低于背景值.

表 1 凉水河表层沉积物中各形态砷含量/mg·kg⁻¹

Table 1 Different forms of As content in the surface sediment of Liangshui River/mg·kg⁻¹

河段号	序号	总量	各形态含量					生物有效态的 百分比/%
			B1 态	B2 态	B3 态	B4 态	生物有效态	
干流上游	1	5.38	0.643	0.784	0.508	3.45	1.93	35.94
	2	22.5	1.64	1.38	1.13	18.3	4.15	18.46
	3	2.89	0.607	0.800	0.464	1.02	1.87	64.82
	4	7.62	0.216	0.645	0.611	6.14	1.47	19.34
干流中游	5	4.71	0.221	0.601	0.616	3.27	1.44	30.58
	6	3.55	0.569	0.801	0.476	1.70	1.85	52.07
	7	4.71	0.845	1.01	0.504	2.35	2.36	50.15
干流下游	8	4.88	0.548	0.689	0.511	3.13	1.75	35.84
	9	4.96	0.665	0.784	0.554	2.96	2.00	40.35
	10	7.48	1.30	1.51	0.609	4.06	3.42	45.73
	11	5.14	0.211	0.813	0.518	3.60	1.54	29.97
	12	6.00	0.682	0.559	0.584	4.18	1.83	30.40
	13	6.45	0.728	0.774	0.571	4.38	2.07	32.11
	14	2.18	0.101	0.627	0.523	0.926	1.25	57.44
	15	4.01	0.131	0.559	1.57	1.75	2.26	56.39
支流	16	2.81	0.173	0.606	1.14	0.883	1.92	68.52
	17	8.01	0.553	0.655	1.13	5.67	2.34	29.17
	18	5.53	0.549	0.786	1.07	3.13	2.40	43.46
	19	4.85	0.352	0.890	0.496	3.11	1.74	35.84
	20	4.97	0.783	0.851	0.460	2.88	2.09	42.12
平均值		6.01	0.571	0.833	0.670	3.93	2.07	39.61
最大值		22.5	1.64	1.51	1.57	18.3	4.15	68.52
最小值		2.18	0.101	0.559	0.460	0.883	1.25	18.46

由图 2 可知, 凉水河表层沉积物中各形态砷含量存在差异, 在凉水河干流上游、中游、下游及支流表层沉积物中均以 B4 态为主要赋存形态, 其中 B4 态所

占比例均值分别为 65.36%、55.74%、61.16% 和 59.25%, 平均百分比为 60.39%; B2 态所占比例均值分别为 14.22%、18.96%、16.58% 和 15.66%, 平均

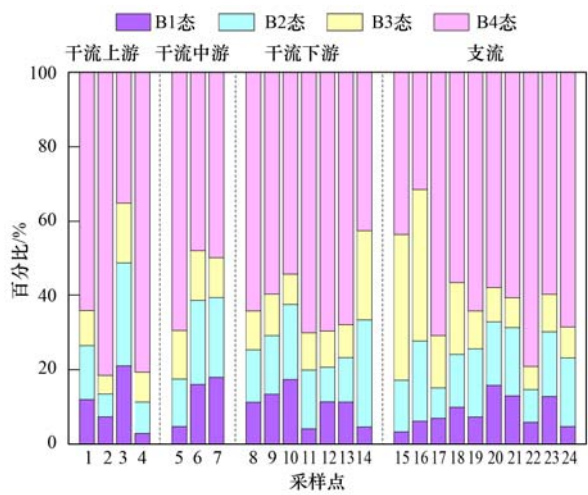


图2 凉水河表层沉积物中各形态砷比例分布
Fig. 2 Proportions of different As forms in the surface sediment of Liangshui River

百分比为 16.10%。总体来看,在凉水河干流上游、中游、下游及支流表层沉积物中,各形态砷所占比例大小顺序均为 B4 态 > B2 态 > B3 态 > B1 态。凉水河表层沉积物中砷主要以 B4 态存在,表明凉水河表层沉积物中砷的生物可利用性低。

重金属赋存形态中 B1 态在中性或者弱酸性条件下可以释放出来^[27],容易迁移转化到上覆水中,易对生态环境和水体生物造成危害,毒性极强,将其称为有效态^[1]; B2 态在水体中氧化还原电位降低或水体缺氧条件下可以释放出来^[18], B3 态在强氧化条件下可产生活性,将 B2 态和 B3 态称为潜在有效态^[1]; B1 态、B2 态和 B3 态共称为生物有效态。生物有效态砷在外界环境发生改变时,极有可能再次释放出来^[18,19],对水体环境造成二次污染,因此沉积物中生物有效态砷的含量是衡量沉积物中砷污染的重要因素。由表 1 可知,凉水河表层沉积物中生物有效态砷占有一定的比例,其范围为 18.46%~68.52%,平均比例为 39.61%。凉水河干流上游表层沉积物中生物有效态砷所占比例最低,平均比

例为 34.64%;凉水河干流中游表层沉积物中生物有效态砷所占比例最高,平均比例为 44.26%;干流下游表层沉积物中生物有效态砷所占比例较低,平均比例为 38.84%;支流表层沉积物中生物有效态砷所占比例较高,平均比例为 40.75%。凉水河表层沉积物中生物有效态砷主要以 B2 态形式存在,尤其在凉水河干流中游和干流下游表层沉积物中 B2 态所占比例较高,可能是因为城市污水不断排入水体,导致凉水河水质下降^[28],水体变黑变臭,致使水体呈厌氧状态,B2 态的重金属易被还原成生物可利用态,从而对水体造成二次污染^[3]。

2.2 凉水河表层沉积物中砷形态的相关性分析
为了探究凉水河表层沉积物中有机质对砷形态分布的影响,将砷的各形态含量和有机质进行对数标准化转换后利用 Pearson 相关性分析计算了各形态砷之间以及与有机质之间的相关系数,结果如表 2 所示。

在凉水河表层沉积物中,砷的 B4 态、总量与有机质呈显著正相关($P \leq 0.01$),其他形态与有机质有一定的相关性,但都不显著。凉水河表层沉积物中 B1 态、B2 态、B4 态砷与总砷在不同水平上显著相关,说明总砷受这 3 种形态砷的影响较大,其中 B4 态砷对总砷的影响最为显著,因为 B4 态砷是凉水河表层沉积物中砷的主要赋存形态。而 B4 态基本不被生物利用,一般视为不可利用态^[1],表明不能只用总砷来评价砷对生态环境的危害。B2 态和 B1 态成显著正相关,在一定程度上说明当沉积物的物理化学条件发生改变时,B2 态砷可能迁移转化成 B1 态,直接对生态环境造成污染^[15,17,18]。B3 态砷与其他各形态砷之间的相关性不显著,说明该形态的砷不易向其他形态砷迁移转化。此外,虽然 B3 态砷与 B1 态、B2 态和 B4 态砷的相关性不显著,但都表现出负相关趋势,可能说明 B3 态砷与 B1 态、B2 态和 B4 态砷具有不同的来源^[9]。

表 2 各形态砷含量和有机质之间的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between content of each form of arsenic and organic substance

	B1 态	B2 态	B3 态	B4 态	总量	有机质
B1 态	1					
B2 态	0.639 **	1				
B3 态	-0.190	-0.207	1			
B4 态	0.292	0.176	-0.141	1		
总量	0.577 **	0.491 *	0.228	0.775 **	1	
有机质	0.308	0.183	0.291	0.526 **	0.674 **	1

1) * 表示相关系数为 0.05 水平上显著(双尾检验); ** 表示相关系数为 0.01 水平上显著(双尾检验)

2.3 凉水河表层沉积物中砷污染评价

2.3.1 EF 法评价凉水河表层沉积物中砷的富集程度

重金属的富集系数可以在一定程度上表现重金属的富集程度,也可以反映出重金属的污染来源^[19]. 将凉水河表层沉积物中砷含量与铁含量进行标准化比值计算,得到砷的富集系数(图3). 如图所示,除了采样点2处表层沉积物中砷的富集系数大于1.5外,其他采样点中砷的富集系数均低于1.5,说明凉水河表层沉积物中除采样点2以外,其他采样点的砷均未出现富集;而采样点2处可能是因为周围有化工厂排入废水,造成了砷的富集.

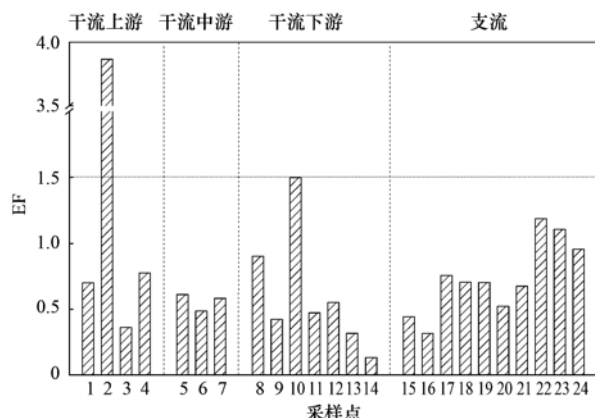


图3 凉水河表层沉积物中砷的富集系数
Fig. 3 Enrichment factor of As in the surface sediments of Liangshui River

2.3.2 RAC 法评价凉水河表层沉积物中砷的风险系数

在重金属各赋存形态中 B1 态的重金属在一定条件下易释放,且易于被生物吸收利用,毒性最强^[27]. 根据 RAC 风险评估指数法,以凉水河表层沉积物中 B1 态砷占总砷的百分比为基础,评价凉水河表层沉积物砷的风险程度,结果如图4所示. 在空间分布上,各个河段表层沉积物中 B1 态砷占总砷的比例均值均在22%以下;其中干流上游表层沉积物中 B1 态砷占总砷的比例均值为10.78%,中度生态风险;干流中游表层沉积物中 B1 态砷占总砷的比例均值为12.90%,中度生态风险;干流下游表层沉积物中 B1 态砷占总砷的比例均值为10.48%,中度生态风险;支流表层沉积物中 B1 态砷占总砷的比例均值为8.55%,低生态风险. 数据表明,凉水河干流表层沉积物中砷的风险程度高于支流表层沉积物中砷的风险程度,可能是由于干流接纳了大量的城市污水造成的. 根据图4进行数据分析发现有60%的采样点表层沉积物中砷含量呈中度风险,

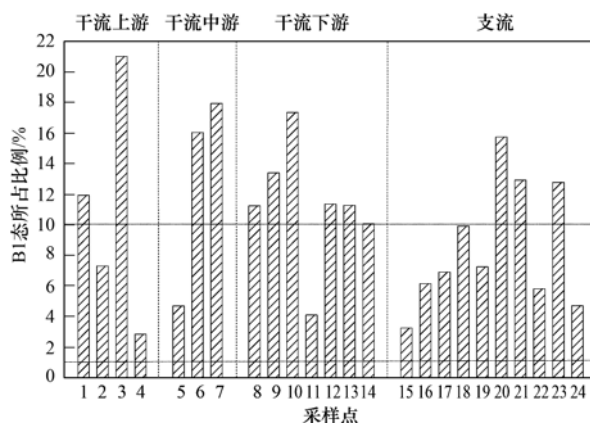


图4 凉水河表层沉积物中 B1 态砷占总量比例
Fig. 4 Percentage of As B1 in the surface sediment of Liangshui River

40%的采样点表层沉积物中砷含量呈低风险.

2.3.3 SQGs 法评价凉水河表层沉积物中砷的生物毒性

SQGs 法可以在缺乏生物毒性实验数据时对重金属的毒性做出评价,并具有一定的可靠性^[18,19]. 本研究参考加拿大淡水沉积物的基准^[25]进行分析和评价,其中 TEL 为 $5.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, PEL 为 $17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 将凉水河表层沉积物中砷含量与加拿大标准进行比较,如图5所示. 分析可知,采样点2的表层沉积物中砷含量高于 PEL,表明该处表层沉积物发生砷污染的频率较高,极易对底栖动物产生毒性,并易对凉水河的生态系统造成损害. 凉水河55%的采样点表层沉积物中砷含量低于 TEL,基本处于无污染无毒性状态;40%的采样点表层沉积物中砷含量处于 TEL 和 PEL 之间,认为砷的生物毒性效应偶有发生,对生态系统的损害较小.

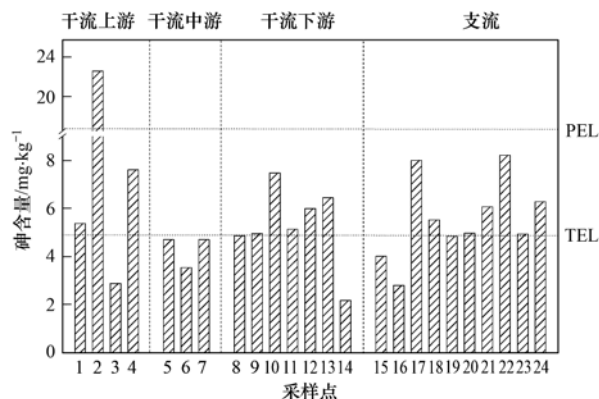


图5 凉水河表层沉积物中砷含量与质量基准比较
Fig. 5 Comparison of As contents in the surface sediments of Liangshui River with SQGs

通过 EF 法、RAC 法和 SQGs 法对凉水河的评价可知凉水河表层沉积物中砷基本无富集,而凉水

河 60% 的采样点表层沉积物中砷呈中度风险,40% 的采样点表层沉积物中砷偶尔会发生生物毒性效应。这种情况的发生可能是因为北京市土壤中砷的背景值本身处于一个较高的水平,即本身就处于 TEL 和 PEL 之间,有可能发生生物毒性效应。凉水河表层沉积物中砷的富集程度低而呈现中度风险的采样点较多,推测可能是因为凉水河表层沉积物中砷主要是自然输入,虽然该过程稳定,但是表层沉积物中的砷发生了迁移转化,稳定态的砷在外界环境发生变化的条件下转化成了有效态,对生态环境直接造成影响。因此在治理凉水河时,相关部门应将沉积物中存在的砷风险考虑到凉水河的水生态修复中。

3 结论

(1)凉水河表层沉积物中砷平均含量为 $6.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,主要以 B4 态为主,砷各形态含量所占比例大小顺序为 B4 态 > B2 态 > B3 态 > B1 态。

(2)EF 法分析凉水河表层沉积物中砷基本无富集;RAC 法分析凉水河 60% 的采样点表层沉积物中砷含量呈中度风险,40% 的采样点表层沉积物中砷含量呈低风险;SQGs 法评价凉水河 55% 的采样点表层沉积物中砷含量无生物毒性,40% 的采样点表层沉积物中砷含量偶尔会发生生物毒性效应。

参考文献:

- [1] Adamo P, Arienzo M, Imperato M, *et al.* Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port[J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(6):800-809.
- [2] Gao X L, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. *Water Research*, 2012, **46**(6): 1901-1911.
- [3] Varol M, Sen B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. *Catena*, 2012, **92**:1-10.
- [4] Mdegela R H, Braathen M, Pereka A E, *et al.* Heavy metals and organochlorine residues in water, sediments, and fish in aquatic ecosystems in urban and peri-urban areas in Tanzania[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, **203**(1): 369-379.
- [5] 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.
- [6] Zhang H G, Cui B S, Xiao R, *et al.* Heavy metals in water, soils and plants in riparian wetlands in the Pearl River Estuary, South China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1344-1354.
- [7] Sundaray S K, Nayak B B, Lin S, *et al.* Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments-A case study: Mahanadi basin, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186** (2-3): 1837-1846.
- [8] 张玉玺, 向小平, 张英, 等. 云南阳海砷的分布与来源[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3768-3777.
- [9] 李磊, 王云龙, 蒋玫, 等. 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2607-2613.
- [10] 李智圆, 杨常亮, 李世玉, 等. 砷污染治理后阳海沉积物砷的分布与稳定性[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(2): 41-47.
- [11] Chapman P M, Wang F Y. Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(22): 3937-3941.
- [12] Greenfield B K, Hrabik T R, Harvey C J, *et al.* Predicting mercury levels in yellow perch: use of water chemistry, trophic ecology, and spatial traits [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, **58**(7): 1419-1429.
- [13] Hu W, Wang H Y, Zha T G, *et al.* Metal contamination and fractionation in sewage-irrigated soils along the Liangshui River, Beijing, China[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2010, **19** (4): 487-503.
- [14] 唐文忠, 王立硕, 单保庆, 等. 典型城市河流(凉水河)表层沉积物中重金属赋存形态特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 3898-3905.
- [15] 王立硕, 毕见霖, 王馨慧, 等. 非常规水源补给城市河流表层沉积物重金属污染及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(3): 903-910.
- [16] 孟博, 刘静玲, 李毅, 等. 北京市凉水河表层沉积物不同粒径重金属形态分布特征及生态风险[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(5): 964-972.
- [17] 毕见霖, 王立硕, 王馨慧, 等. 非常规水源补给城市河流富营养化时空变化规律及风险研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1703-1709.
- [18] Chabukdhara M, Nema A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach[J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(8): 945-953.
- [19] 唐文忠, 王立硕, 张文强, 等. 天津市典型河网区沉积物中重金属分布及生态风险评价[J]. *环境工程学报*, 2014, **8** (6): 2174-2180.
- [20] Bettinelli M, Beone G M, Spezia S, *et al.* Determination of heavy metals in soils and sediments by microwave-assisted digestion and inductively coupled plasma optical emission spectrometry analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, **424** (2): 289-296.
- [21] Buat-Menard P, Chesselet R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, **42**(3): 399-411.
- [22] Guerra-García J M, García-Gómez J C. Assessing pollution levels in sediments of a harbour with two opposing entrances. Environmental implications [J]. *Journal of Environmental*

- Management, 2005, **77**(1): 1-11.
- [23] Zhang H, Shan B Q. Historical records of heavy metal accumulation in sediments and the relationship with agricultural intensification in the Yangtze-Huaihe region, China[J]. Science of the Total Environment, 2008, **399**(1-3): 113-120.
- [24] 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.
- [25] Burton Jr G A. Sediment quality criteria in use around the world [J]. Limnology, 2002, **3**(2): 65-75.
- [26] 张伯镇, 雷沛, 潘延安, 等. 重庆主城区次级河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(7): 2185-2192.
- [27] 李鹏, 曾光明, 蒋敏, 等. pH 值对霞湾港沉积物重金属 Zn, Cu 释放的影响[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(11): 2425-2428.
- [28] 郭婧, 荆红卫, 李金香, 等. 北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1511-1518.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2015 年 10 月 21 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 14 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行