

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

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

1960~2013年我国霾污染的时空变化 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化磷酸盐的影响 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe⁰-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO₂ 纳米颗粒对 Cd²⁺ 的吸附 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH₄、CO₂ 排放的短期影响 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系

王祖伟^{1,3}, 王祎玮^{1,2}, 侯迎迎^{1,3}, 包姗姗^{1,3}, 王子璐^{1,3}, 王倩倩^{1,3}

(1. 天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387; 2. 天津市建筑材料产品质量监督检测中心, 天津 300381; 3. 天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387)

摘要: 以于桥水库上游河流 33 个子流域采样点的重金属的监测数据为基础, 分析了河流水体沉积物中 Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn 等重金属的含量及空间分异特征, 探讨了重金属与子流域土地利用类型等景观格局的关系, 解析了重金属的来源。结果表明, 于桥水库上游三条河流水体悬浮颗粒物中 Cd、As、Cu、Cr 的平均含量高于土壤环境质量一级标准, 存在一定的生态风险。表层沉积物中 Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn 的平均含量分别为 0.32、30.39、33.49、58.20、90.16 和 94.80 mg·kg⁻¹, Cd、As、Cu 的平均含量和部分样品中 Pb、Cr、Zn 的含量超过土壤环境质量一级标准。三条河流表层沉积物中 Cd、Cr、Zn 的平均含量是淋河 > 沙河 > 黎河, Cu 的平均含量是淋河 < 沙河 < 黎河, As、Pb 的平均含量是沙河 > 淋河 > 黎河。于桥水库流域内土地利用类型对河流表层沉积物重金属的分布产生一定影响, 主要表现为林地和灌草地的分布决定了河流沉积物中重金属的自然分布趋势, 园地和工矿用地对 Cd、As、Pb、Cr 等的分布产生影响, 村镇居民用地和耕地对河流沉积物中重金属的总体分布未产生负面影响。

关键词: 于桥水库流域; 悬浮颗粒物; 表层沉积物; 重金属空间分异; 景观格局

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3423-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.021

Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir

WANG Zu-wei^{1,3}, WANG Yi-wei^{1,2}, HOU Ying-ying^{1,3}, BAO Shan-shan^{1,3}, WANG Zi-lu^{1,3}, WANG Qian-qian^{1,3}

(1. College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Building Materials Quality Inspection Center, Tianjin 300381, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Water Resource and Water Environment, Tianjin 300387, China)

Abstract: Yuqiao Reservoir, an important adjusting reservoir in the project of diverting water from the Luanhe River to Tianjin City, is an important water resource for Tianjin City. Concentrations and spatial variation characteristics of Cd, As, Pb, Cu, Cr, and Zn from 33 sub watershed sampling sites of Yuqiao reservoir and the relationship to landscape pattern were discussed. The result showed that average concentrations of Cd, As, Cu, Cr in suspended particulate matter were higher than Chinese environmental quality standard Grade one for soils, and there were ecological risks for them because they could arrive at Yuqiao reservoir. The average concentrations of Cd, As, Pb, Cu, Cr, and Zn in surface sediments were 0.32 mg·kg⁻¹, 30.39 mg·kg⁻¹, 33.49 mg·kg⁻¹, 58.20 mg·kg⁻¹, 90.16 mg·kg⁻¹ and 94.80 mg·kg⁻¹ respectively. The average concentrations of Cd, As, Cu and the concentrations of Pb, Cr, Zn in partial samples exceeded Chinese environmental quality standard Grade one for soils. The average concentrations of Cd, Cr, Zn in surface sediments of three tributaries increased in the order of Linhe River > Shahe River > Lihe Rier, Cu decreased in the order of Linhe River < Shahe River < Lihe River, and As, Pb increased in the order of Shahe River > Linhe River > Lihe Ricer. Land use types in Yuqiao reservoir basin had some impact on the distribution of heavy metal concentrations in river surface sediments. Woodland and shrub grass land determined the natural distribution trend of heavy metals in surface sediments. Gardenland and industrial & mining land usage had impact on Cd, As, Pb, Cr distributions. Farmland and village & town land usage did not produce negative influence on heavy metal distribution.

Key words: Yuqiao Reservoir basin; suspended particulate matter; surface sediments; spatial distribution of heavy metals; landscape pattern

近年来,随着城市化和工业化进程速度的加快,工业废水、生活污水和农业污水排放量日益增多,大量有毒有害污染废物通过地球化学循环进入并积累在河流、湖泊和海洋的沉积物中,破坏了水中固有的生态系统和水体的功能,造成河流、湖泊等水

体的严重污染。水体污染直接危害人体健康,并对工、农、渔等行业产生危害,对社会生活产生巨大

收稿日期: 2016-03-25; 修订日期: 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40973078)

作者简介: 王祖伟(1963~),男,博士,教授,主要研究方向为资源环境地球化学评价, E-mail: zuweiwang@126.com

的负面影响,水体安全问题已成为全球环保工作者重点关注的对象^[1-7].

于桥水库是天津市一座大型水库,是以防洪、城市供水为主,兼顾灌溉、发电等综合利用的大型水利工程. 1983年经过加固增容并纳入引滦入津工程以后,成为天津市唯一的生活饮用水和工农业用水水源地,其主要入库河流为沙河、黎河、淋河三大支流,其中以沙河水量最大,而黎河是引滦入津的输水河道. 近年来,随着流域及库区周边社会经济的迅速发展,点源和面源污染日趋严重,使入库污染负荷急剧增加,严重影响水库的水质,对此许多学者对于桥水库流域的点源、面源污染进行了研究^[8-19]. 进一步分析发现,目前对于桥水库污染的研究成果主要集中在水体富营养化上,虽然已经发现于桥水库库区沉积物有重金属污染的存在^[18,19],但明显缺乏对于桥水库水源地河流水体沉积物重金属的空间分布及与土地利用关系的研究内容. 本文选取于桥水库水源地三条支流为研究对象,通过分析各子流域河流水体悬浮物、表层沉积物中 Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn 等重金属的空间分布特征,探讨河流表层沉积物重金属与子流域土地利用类型等景观格局的关系,解析重金属的来源,以期为于桥水库上游的水源保护提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

于桥水库位于燕山山脉南麓,天津市蓟县城东 4 km,蓟运河左支流州河上游出口处(39°56'~40°23' N,117°26'~118°12' E). 于桥水库流域东西长 66 km,南北宽 50 km,流域总面积 2 060.0

km²,其中约 80% 位于河北省遵化市境内. 流域内的主要河流为淋河、沙河和黎河. 黎河发源于河北省迁西县燕山山脉丘陵区,北靠燕山,流域呈条形,总面积为 488 km²,与沙河汇流后入于桥水库. 沙河水系源于兴隆县大青山,干流流经遵化市,沿途接纳多条支流,汇入于桥水库,流域面积为 887 km². 沙河水系属于季节性河流,水系上半支在汛期之外经常处于断流状态,水系的下半支则是常年有水,但水量不多. 淋河源自兴隆县的若乎山,流经遵化市,自北偏西先入龙门口水库,而后流入于桥水库,流域面积约为 252 km²,淋河也具有季节性河流的特征^[8].

1.2 样点设置和样品采集

以于桥水库流域 2013 年 8 月的 Landsat8ETM 遥感影像为数据源,用 ENVI5.0 对其进行大气辐射校正、几何校正等预处理后,以 1:5 万地形图为基础,利用 ArcGIS 的水文分析模块,结合实地调查,将流域内河网划分为 33 个子流域^[8].

在 33 个子流域的末端设置采样点进行采样(图 1). 根据本流域河流属于季节性河流,非汛期部分河流断流这一特点,本研究对于桥水库三条支流进行汛期河道采样. 采样在雨后进行,采样时间为 2013 年 7 月 3 日,在降雨后 24 h 内进行采样. 对于水样,利用冲洗干净的聚乙烯取样瓶在子流域口附近采集,采集后冷藏到实验室尽快处理.

对于水体沉积物的采集,由于不同小流域之间地形地貌、土地利用/覆被和人类活动特征的差异比较显著,因而在每个小流域的下游出口处设置水体取样控制点^[20,21]. 用手持式 GPS 定位系统定位,使用自制采样器采集表层(0~5 cm 左右沉积物),



图 1 于桥水库上游子流域形态及采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sub-watersheds and sampling sites in Yuqiao reservoir basin

每样点由同一断面上 3~5 个等量子样混合而成。样品采集后装入聚乙烯塑料袋中于 0~4℃ 密闭冷藏保存,带回实验室待测处理。

1.3 样品处理及重金属测定

悬浮颗粒物的处理与重金属测定:先把 0.45 μm 的纤维微孔滤膜用稀硝酸浸泡,蒸馏水清洗,后自然风干至恒重。用经预处理的滤膜过滤分离上覆水与悬浮颗粒物,过滤后滤膜上的悬浮颗粒物采用冷冻干燥法获得,用 HNO₃ + HF + HClO₄ + HCl 微波消解后采用 ICP-MS(7500a 型,美国安捷伦公司)测定其重金属含量。

沉积物样品处理与重金属测定:采集的样品常温风干后,去除样品中贝壳、杂草、沙石等杂物,混合均匀。为了消除不同粒径沉积物样品对重金属吸附的影响,用玛瑙研钵研磨后,过 200 目尼龙筛,微波消解后采用 ICP-MS 测定其重金属含量。各元素的检出限分别为 Cd: 0.003 mg·kg⁻¹, As: 0.20 mg·kg⁻¹, Pb: 0.04 mg·kg⁻¹, Cu: 0.10 mg·kg⁻¹, Cr: 0.20 mg·kg⁻¹, Zn: 0.70 mg·kg⁻¹。

表 1 于桥水库上游支流子流域悬浮颗粒物中重金属元素含量/mg·kg⁻¹

Table 1 Heavy metal concentrations in suspended matter in water of tributaries in Yuqiao reservoir basin/mg·kg⁻¹

子流域	数据类型	Cd	As	Pb	Cu	Cr	Zn
淋河(n=8)	最大值	3.49	125.65	42.75	96.96	175.91	88.76
	最小值	0.02	44.35	4.90	5.29	77.11	6.17
	平均值	0.81	79.24	22.78	51.67	115.56	50.33
	标准差	1.19	34.62	14.53	34.78	35.04	30.25
	变异系数/%	147	44	64	67	30	60
沙河(n=19)	最大值	1.14	134.30	93.83	90.58	215.33	143.88
	最小值	0.30	24.39	26.71	32.71	112.71	39.06
	平均值	0.66	72.16	44.90	54.50	167.82	75.65
	标准差	0.26	35.30	24.27	19.09	32.97	31.53
	变异系数/%	40	49	54	35	20	42
土壤环境质量一级标准 (GB 15618-1995) ^[24]		0.2	15.0	35.0	35.0	90.0	100.0

从表 1 可知,淋河流域内水体悬浮颗粒物中除 Pb 和 Zn 的平均含量未超过土壤环境质量一级标准外,Cd、As、Cu 和 Cr 等 4 种重金属的平均含量均超过土壤环境质量一级标准。沙河流域内只有重金属 Zn 未超过土壤环境质量一级标准,其余 5 种重金属均已超过土壤环境质量一级标准。

整个流域中,河流水体悬浮颗粒物中 Cd 的平均含量(0.64 mg·kg⁻¹)超过土壤环境质量一级标准值 3 倍,As 平均含量(74.18 mg·kg⁻¹)超过土壤环境质量一级标准 5 倍,Pb 平均含量(34.61 mg·kg⁻¹)接近土壤环境质量一级标准,Cu 平均含量(55.08 mg·kg⁻¹)超过土壤环境质量一级标准值

1.4 质量控制与数据分析

每批消解均做 3 个空白样品与 2 个标准样品,标准样品采用国家地质试验测试中心生产的长江底部沉积物标准物质 GBW07309(GSD29),将由于试剂影响带来的误差减小到最低限度。每个样品测试 2 次,相对标准偏差均小于 10%,每 60 个样品做一次标准曲线,每 12 个样品做一次标线校正^[22,23]。

本研究采样点示意图采用 ArcGIS 10.0 绘制而成,表格数据采用 Excel 2010 完成,并运用 SPSS 19.0 统计软件对相关数据进行处理和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 于桥水库水源地河流水体重金属的空间分布特征

2.1.1 水体悬浮颗粒物中的重金属分布特征

于桥水库上游支流淋河、沙河(黎河没有收集到悬浮颗粒物,其原因是该河流是引滦入津输水河道,水质清澈)中河流水体悬浮物的重金属含量有所差异(表 1)。

1.6 倍,Cr 平均含量(142.03 mg·kg⁻¹)超过土壤环境质量一级标准值 1.6 倍,Pb 平均含量(65.55 mg·kg⁻¹)接近土壤环境质量一级标准。由于悬浮颗粒物能随河水进入水库中,显示有一定的生态风险。

淋河中 6 种重金属变异程度顺序是 Cd > As > Cu > Pb > Cr > Zn; 沙河中 6 种重金属变异程度是 Zn > Pb > Cr > As > Cu > Cd,说明河流中悬浮颗粒物中重金属含量差异很大,不同的河流的重金属含量不同。

两条子流域相比,沙河水体悬浮颗粒物中的 Pb、Cu、Cr 和 Zn 含量高于淋河,淋河 As 和 Cd 含量高于沙河。其原因是由于沙河上游经过分布有丰富

的矿产企业的河北省遵化市,因此,沙河受污染程度表现尤为突出,淋河相对污染程度较轻. 两条支流各子流域悬浮物重金属从上游到下游呈现下降的趋势,下游的富集程度低于上游.

2.1.2 表层沉积物的含量和空间分布特征

于桥水库三条支流 33 个子流域河流表层沉积物样品中 Cd 的含量为 $0.04 \sim 1.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 19 个采样点超过土壤环境质量一级标准值, 占总数的 57.6%, 平均含量为 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过土壤环境质量一级标准 1.6 倍. As 的含量为 $15.62 \sim 116.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全部超过土壤环境质量一级标准, 平均含量为 $30.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过土壤环境质量一级标准 2.03 倍. Pb 的含量为 $9.27 \sim 139.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 10 个采样点超过土壤环境质量一级标准, 占总数的 30.3%, 平均值为 $33.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 稍低于土壤环境质量一级标准 (0.96 倍); Cu 的含量为 $27.22 \sim 118.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 28 个采样点超过土壤环境质量一级标准, 占总数的 84.8%, 平均值 $58.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过土壤环境质量一级标准 1.66 倍. Cr 的含量为 $43.10 \sim 254.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 8 个采样点超

过土壤环境质量一级标准, 占总数的 24.2%, 平均值为 $90.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 未超过土壤环境质量一级标准; Zn 的含量为 $52.03 \sim 184.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 12 个超过土壤背景值, 占总数的 36%, 平均值为 $94.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 未超过土壤环境质量一级标准.

整个流域三条支流 33 个采样点的沉积物中, Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn 的变异系数分别为 21% ~ 76%、27% ~ 79%、54% ~ 86%、29% ~ 43%、27% ~ 49%、21% ~ 40%, Cr、Zn、Cu 的变异系数较小, 显示其来源的一致性, Cd、As、Pb 的变异系数较大, 显示其具有较复杂的来源.

流域北部区域沙河流域和淋河流域上游支流各采样点沉积物中 Cd 的含量较高 (图 2). Cd 的高值点和次高值点 24 号和 33 号采样点 Cd 的含量分别为 $1.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均位于沙河流域.

沉积物中 As 的较高含量位于流域中部偏西的沙河流域中西部地区, 高值点和次高值点 18 号和 10 号采样点 As 的含量分别为 $116.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $80.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 沙河流域西北部上游支流和淋河流域上游支流采样点沉积物中 Pb 的含量较高, 位于

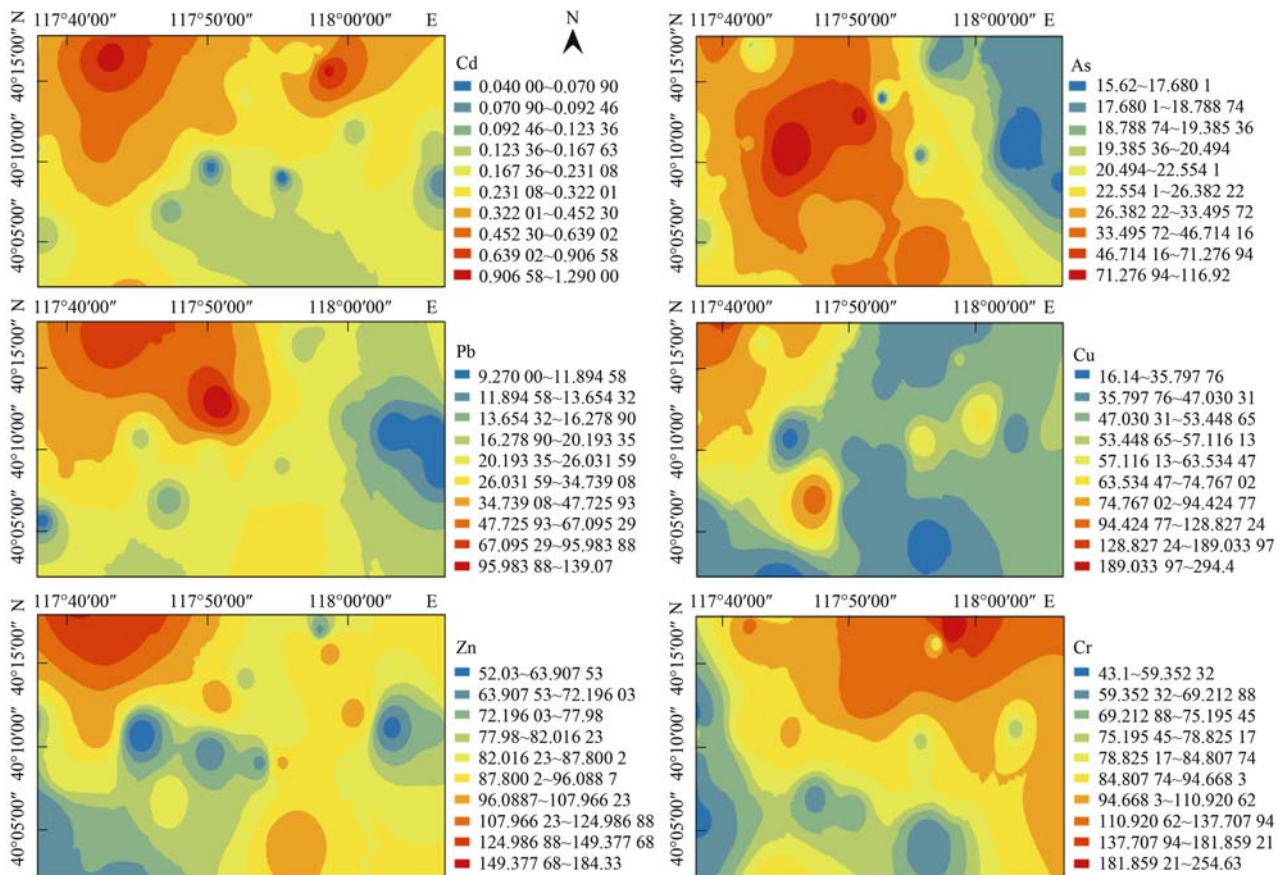


图 2 于桥水库流域沉积物重金属含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal concentrations in surface sediments in Yuqiao reservoir basin

沙河流域的高值点和次高值点 10 号采样点和 31 号采样点的 Pb 含量分别为 $139.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $98.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cu 和 Zn 具有相似的分布特征,二者在流域西北部淋河上游支流采样点沉积物中的含量相对较高,在黎河流域采样点沉积物中的含量较低. Cu 的高值点位于 21 号采样点,含量为 $118.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Zn 的高值点位于 27 号采样点,含量为 $184.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 沉积物中 Cr 在流域东北部含量相对较高,出现在沙河流域东北部上游支流采样点中,高值点为 6 号样点.

三条河流表层沉积物中 Cd、As、Pb 的平均含量是沙河 > 淋河 > 黎河, Cr、Zn 的平均含量是沙河 > 黎河 > 淋河, Cu 平均含量是淋河 > 沙河 > 黎河.

淋河、沙河和黎河河流表层沉积物中 Cd 含量的变异系数分别为 65%、96% 和 25%, As 为 63%、79% 和 43%, Pb 为 54%、86% 和 85%, Cu 为 43%、39% 和 32%, Cr 为 26%、44% 和 27%, Zn 为 21%、34% 和 42%, 显示沙河中河流表层沉积物中重金属的空间变化较大. 重金属中, Pb 的空间变化较大.

与流域的主要所在地河北省遵化地区土壤的重金属含量相比,河流表层沉积物中, Cd、Zn、Pb、Cu 的平均含量均明显高于土壤, Cr 的含量低于土壤^[25]. 与滦河流域相比,河流表层沉积物中 Cd 的含量基本一致,而其他元素的含量则明显偏高^[26]. 将引滦入津的河道黎河的表层沉积物中重金属的含量与滦河流域相比,发现二者 Cd、Pb、Cu 的平均含量基本一致,但黎河表层沉积物中 Cr、Zn、Ni 的含量较滦河流域偏高.

2.2 景观格局与支流沉积物重金属含量的关系

2.2.1 于桥水库流域景观格局分布特征

以于桥水库流域 2013 年 8 月的 Landsat8ETM 遥感影像为数据源,用 ENV 15.0 对其进行大气辐射校正、几何校正等预处理后,采用有监督分类法进行分类,结合实地调查进行影响后处理,将研究区域

的土地利用类型分为 6 类,流域内各种土地利用分布见图 3^[27].

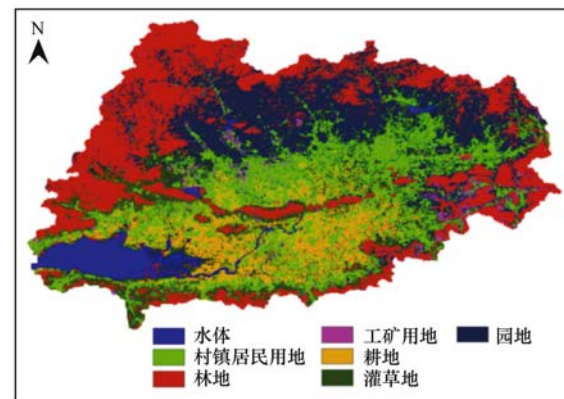


图 3 于桥水库子流域的土地利用类型分布

Fig. 3 Land use type distribution map of tributaries in Yuqiao reservoir basin

在整个流域中,以林地和园地的景观类型为主导,两者面积比例之和达 62.5%. 从上游到下游,农田和城镇比例增大. 33 个子流域景观类型面积比例差异较大,其中面积比例跨度最大的是林地,占各子流域面积的 0.73% ~ 91.90%; 其次为园地,占各子流域面积的 1.10% ~ 75.35%; 然后依次为城市建设用地、耕地和灌草地,其面积比例分别为 0.09% ~ 54.40%、0% ~ 47.10% 和 0% ~ 32.75%. 各子流域土地利用大部分是以林地为主,其次是园地用地,有少数区域居民用地占较大比例,这种土地利用类型的总面积占流域面积接近 90% 或更高.

2.2.2 景观格局与支流沉积物重金属的关系分析

本研究采用 33 个子流域中 6 种土地利用类型(林地、园地、灌草地、耕地、城镇以及工矿用地)的面积比例与表层沉积物中重金属(Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn)的含量进行相关分析. 由于 6 种土地利用类型面积比例与沉积物中重金属指标均不服从正态分布,因而采用 Spearman 相关分析方法进行讨论^[28],结果见表 2.

表 2 水体表层沉积物重金属含量与土地利用方式之间 Spearman 的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between heavy metal concentrations in surface sediments and land use ways

类型	Cd	As	Pb	Cu	Cr	Zn
林地	0.258	-0.031	0.228	0.455 **	-0.144	0.463 **
园地	0.100	0.218	0.163	-0.190	0.390 *	-0.135
耕地	-0.285	-0.154	-0.299	-0.297	-0.181	-0.348 *
灌草地	-0.145	-0.096	-0.205	-0.224	-0.102	-0.250
城镇用地	-0.355 *	-0.153	-0.347 *	-0.252	-0.111	-0.307
工矿用地	0.238	-0.176	0.122	0.066	-0.168	0.062

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

土地利用类型中,各子流域林地面积比例与 Cu、Zn 呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与 Cd、Pb 有一定的正相关关系,与 As、Cr 的相关关系较弱,表明林地面积比例越大,林地土壤对河流沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 的贡献越高.流域内林地主要分布于海拔较高、坡度相对较大的北部地区(图 3),而从图 2 的沉积物重金属含量的空间分布图上,明显看到 Cu、Zn、Cd、Pb 的高含量分布区也位于该区域.林地与沉积物中重金属的分布关系,显示流域内重金属的总体分布趋势受自然原因控制.

各子流域灌草地面积比例与重金属均呈负相关关系,表明灌草地面积比例越大,土壤中的重金属越不容易进入河流.灌草的大面积覆盖,一方面造成植物对土壤重金属的吸收,另一方面禁锢了土壤进入河流,从而产生灌草地面积比例与河流沉积物中重金属均呈现一定的负相关关系这一现象.

各子流域园地面积比例与河流沉积物中 Cr 呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与 As、Cd、Pb 有一定的正相关,与 Cu、Zn 呈现负相关关系,其原因是园地内果树种植过程中肥料和农药的使用,增加了土壤 Cr、As、Cd、Pb 的含量,而果树的生长对 Cu、Zn 微量营养元素的吸收,造成土壤中 Cu、Zn 含量降低,因此应关注园地种植过程中肥料和农药的使用对河流 Cr、As、Cd、Pb 的影响.

各子流域耕地面积比例与河流沉积物中重金属均呈负相关,与 Zn 呈显著负相关关系($p < 0.05$).耕地主要分布于流域内的中南部地区,与重金属的低值区分布一致,因此耕地的分布对河流表层沉积物中重金属的含量不产生影响.

各子流域村镇居民用地面积比例与河流沉积物中重金属均呈负相关关系,其中与 Cd、Pb 呈显著负相关关系($P < 0.05$),表明村镇建设规模的扩大未对河流成沉积物中重金属的含量产生负面影响.

各子流域工矿用地面积比例与河流沉积物中 Cd、Pb 有一定的正相关性,与其它重金属基本不相关或呈弱的负相关.而研究区内 Cd、Pb 的高值点所在子流域内均有矿山或选矿厂分布,因此矿产的采选是造成流域内沉积物中重金属 Cd、Pb 污染的主要原因.

三条河流流域内,沙河流域和淋河流域由于林地和园地面积分布较大,河流表层沉积物中重金属的含量相对较高;黎河流域林地和园地面积分布较小,耕地面积较大河流表层沉积物中重金属的含量相对较低.

3 结 论

(1)于桥水库上游三条河流水体悬浮颗粒物中 Cd、As、Cu、Cr 的平均含量高于土壤环境质量一级标准,存在一定的生态风险.

(2)表层沉积物中 Cd、As、Cu 的平均含量超过土壤环境质量 I 级标准,Pb、Cr、Zn 的平均含量低于土壤环境质量 I 级标准,但部分样品中的 Zn、Cd、Cr 的含量超过土壤环境质量一级标准;三条河流表层沉积物中 Cd、Cr、Zn 的平均含量是淋河 > 沙河 > 黎河,Cu 的平均含量是淋河 < 沙河 < 黎河,As、Pb 的平均含量是沙河 > 淋河 > 黎河.

(3)表层沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 的高含量区主要分布于流域北部地区的林地,重金属的低值区主要分布于流域灌草地所在区域,Cr、As、Cd、Pb 主要与园地分布有关,耕地和村镇居民用地未对河流沉积物中重金属的含量产生影响,工矿用地主要对 Cd、Pb 产生影响.

参考文献:

- [1] 范文宏,张博,陈静生,等. 锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 环境科学学报,2006, 26(6): 1000-1005.
- [2] Marengo E, Gennaro M C, Robotti E, *et al.* Investigation of anthropic effects connected with metal ions concentration, organic matter and grain size in Bormida River sediments[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 560(1-2): 172-183.
- [3] Woiitke P, Wellnitz J, Helm D, *et al.* Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(8): 633-642.
- [4] Zourarah B, Maanan M, Carruesco C, *et al.* Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution in the lagoon of Oualidia (Moroccan Atlantic coast)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 72(1-2): 359-369.
- [5] 蒲思川,冯启明. 我国水体污染的现状及其防治对策[J]. 中国资源综合利用, 2008, 26(5): 31-34.
- [6] 张华俊,陈修康,韩博平,等. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1167-1175.
- [7] 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.
- [8] 包珊珊,李崇巍,王祖伟,等. 天津于桥水库流域水体氮磷空间分异与景观格局的关系[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1609-1616.
- [9] 李崇巍,胡婕,王飒,等. 流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2430-2438.
- [10] 傅建文,张庆强,王立亚,等. 引滦输水污染物特征及对于桥水库水质影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 151-154.
- [11] 张森. 于桥水库周边区域污染负荷分布特征研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

- [12] 王立林, 王鸿雁, 杜玉凤. 于桥水库水环境质量现状评价及趋势分析[J]. 海河水利, 2007, (3): 18-20.
- [13] 王祖伟, 赵瑞雪, 王世猛, 等. 于桥水库周边农村生态示范区建设与水环境保护[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 251-254.
- [14] 李创宇. 于桥水库沉积物中营养盐释放特性试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [15] 胡婕. GIS 在水流域污染物调控决策中的应用[D]. 天津: 天津师范大学, 2012.
- [16] 张慧, 梁琼, 高如泰. 于桥水库水源地外源污染分析及环境保护对策[J]. 安徽农学通报, 2014, 20(1-2): 101-105, 144.
- [17] 赵爱华. 于桥水库入库河流水质评价及其趋势分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [18] 张凯. 于桥水库重金属污染程度评价及相关性分析[D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [19] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 天津主要水体表层沉积物中重金属污染特征[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 259-264.
- [20] 陈利顶, 张淑荣, 傅伯杰, 等. 流域尺度土地利用与土壤类型空间分布的相关性研究[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2497-2505.
- [21] Zahra A, Hashmi M Z, Malik R N, *et al.* Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah-Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan[J]. Science of the Total Environment, 2014, 470 - 471: 925-933.
- [22] Sarkar S, Ghosh P B, Sil A K, *et al.* Heavy metal pollution assessment through comparison of different indices in sewage-fed fishery pond sediments at East Kolkata Wetland, India [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(5): 915-924.
- [23] 潘延安. 重庆主城区次级河流沉积物重金属污染特征研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [24] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测, 1991, 7(1): 1-6.
- [25] 王志伟. 基于 GIS 的唐山市土壤重金属空间变异特征及污染评价[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
- [26] 郝红, 高博, 王健康, 等. 滦河流域沉积物中重金属分布特征及风险评价[J]. 岩矿测试, 2012, 31(6): 1000-1005.
- [27] 包珊珊. 天津于桥水库流域非点源污染的空间分布特征及影响因素分析[D]. 天津: 天津师范大学, 2015.
- [28] 周治年, 彭小娟. Pearson、Spearman 与 Kendall's Tau 相关分析的 Excel 实现[J]. 临床和实验医学杂志, 2012, 11(6): 461-463.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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