

# 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硝酸盐的影响 ..... 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)

Fe<sup>0</sup>-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-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 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 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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)

# 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<sup>1,2</sup>, 殷淑华<sup>1</sup>, 徐建新<sup>2</sup>, 徐东昱<sup>1</sup>, 高丽<sup>3</sup>, 郝红<sup>1</sup>, 高博<sup>1\*</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450011; 3. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要:** 为全面了解三峡库区(重庆—宜昌段)干支流沉积物中钒的含量水平、空间分布、赋存形态、污染程度, 在三峡库区采集水体沉积物样品 67 个, 测定了沉积物中钒的含量及其化学赋存形态, 并采用地积累指数法和潜在生态危害指数法进行分析和评价. 结果表明: ①三峡库区研究区范围内沉积物中钒的含量范围为 89.4 ~ 175.2 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 123.7 mg·kg<sup>-1</sup>, 略高于长江沉积物背景值; ②库区沉积物中钒的空间分布特征主要呈现库区干流含量大于支流, 干流下游沉积物中钒含量高于上游; ③沉积物中钒含量的极值点出现在较发达县(区)附近, 考虑其来源可能是人为源汇入; ④库区沉积物中钒的赋存形态主要以残渣态为主, 所占质量分数为 80% ~ 89%, 并与总量呈现显著正相关关系; ⑤沉积物中钒污染程度较小, 潜在环境危害影响较弱.

**关键词:** 三峡库区; 沉积物; 钒; 赋存形态; 地积累指数法; 潜在生态危害指数法

中图分类号: X131.2; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3333-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.011

## Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing - Yichang Section)

GUO Wei<sup>1,2</sup>, YIN Shu-hua<sup>1</sup>, XU Jian-xin<sup>2</sup>, XU Dong-yu<sup>1</sup>, GAO Li<sup>3</sup>, HAO Hong<sup>1</sup>, GAO Bo<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In order to investigate the pollution characteristics of vanadium in sediments of the Three Gorges Reservoir (TGR), 67 sediment samples were collected from the section between Chongqing to Yichang in TGR. The concentration and chemical speciation of vanadium were measured and the spatial distribution of vanadium was discussed. Current pollution level of vanadium in TGR sediments was assessed by index of geoaccumulation and Hakanson ecological risk index. The results showed that: ①the range of vanadium concentrations in TGR was 89.4-175.2 mg·kg<sup>-1</sup> and the average concentration was 123.7 mg·kg<sup>-1</sup>, which was slightly higher than the background value in sediments of Yangtze River. ②the spatial distribution of vanadium in TGR sediments showed that vanadium concentrations in the mainstream of TGR were higher than those in tributaries and the vanadium contents in the sediments in downstream were higher than those in upstream in term of the mainstream of TGR. ③highest vanadium concentration was found in the sediment in a developed county, indicating that this high level of vanadium concentration was attributed to anthropogenic input. ④chemical forms of vanadium in sediments were mainly in residual state (80%-89%, mass fraction), which had a significant positive correlation with total concentrations in sediments. ⑤vanadium contamination degree and potential environmental risk in TGR sediments were weak.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; sediments; vanadium; chemical speciation; index of geoaccumulation; potential ecological risk index

重金属一般是指比重大于 5 的金属(密度大于 4.5 g·cm<sup>-3</sup>), 包括金、银、铜、铁等. 在环境污染方面所说的重金属主要是指铅、铬、镉、汞(水银)、以及类金属砷等生物毒性显著的重元素. 重金属不能被生物降解, 相反却能通过食物链在生物作用下不断富集, 最后进入人体造成慢性中毒<sup>[1]</sup>. 水体沉积物是水体中重金属的主要载体和重要归宿, 当水环境条件(如 DO、pH、温度等)发生改变时, 沉积物又可向水体中释放金属元素, 对河流造成二次污染<sup>[2]</sup>. 所以, 沉积物不但是污染受体同时也

是污染源<sup>[3]</sup>. 近年来, 国内学者对辽河、黄河、长江、海河、淮河、珠江、太湖流域内水体沉积物中重金属展开了广泛的研究<sup>[4-11]</sup>, 研究重点主要集中在重金属含量水平、空间分布规律、赋存形态及污染评价等方面. 到目前为止, 针对三峡库区范围内

收稿日期: 2016-01-15; 修订日期: 2016-04-10

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201501042); 水利部标准推广项目(1261230111031, 1261430112050)

作者简介: 郭威(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文水资源及水环境污染监测与评价, E-mail: wwbz0526@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: gaobo@iwhr.com

水系沉积物中重金属研究较少,并且已有对重金属元素的研究也主要是针对铜、铅、锌、镉、镍、铬、砷、汞等常规金属元素展开<sup>[12~15]</sup>,对三峡库区范围内非常规元素钒的研究较少.钒元素的相关研究表明:不同地区土壤中钒的含量有所不同,我国西南、中南地区(云南、贵州、广西、四川、湖北、湖南)明显高于其他地区<sup>[16]</sup>;环境中的钒主要来源有岩石风化、化石燃烧、矿业开采等<sup>[17]</sup>.近些年,随着采矿业、钢铁、化学工业的不断发展和人为排放的原因,污染造成钒中毒的人数也在不断增加<sup>[18]</sup>.钒中毒可以对人体健康构成严重的威胁,同时钒污染的水体对水生生物的毒性作用也十分明显<sup>[18,19]</sup>.

三峡工程是我国重大水利工程,是治理和开发长江的重要骨干工程,兼顾防洪、发电、航运、供水等多项功能<sup>[20]</sup>.受三峡工程影响,库区人口、经济以及城市得到了迅速发展,但同时也产生了一系列水环境问题<sup>[21]</sup>.尤其是沿江城市经济不断发展,大量农业、工业、城市生活的污染物排入江中,水环境污染问题日益凸显.本研究通过测定三峡库区(重庆—宜昌段)干支流共计67个点位的沉积物中钒元素的含量、化学形态,并探讨库区沉积物中钒的空间分布特征,同时采用地积累指数法和潜在生态危害评价法对沉积物中钒的污染现状进行评价,以期对三峡库区水环境中钒的污染防治提供科学参考依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品的采集与处理

#### 1.1.1 断面与采样点的设置

三峡库区是指长江流域内因三峡水电站的修建

从而被淹没的地区,包含了重庆市江津区至湖北省宜昌市共20多个县(区).库区属于亚热带湿润气候,地处四川盆地与长江中下游平原的结合部,跨越鄂中山区峡谷及川东岭谷地带,北靠大巴山、南依川鄂高原,整体呈现西高东低<sup>[22]</sup>.自三峡蓄水后,水域面积扩大,总面积约1 084 km<sup>2</sup>.三峡水库正常蓄水位175 m,汛期防洪限制水位145 m,枯水期消落最低水位155 m<sup>[23]</sup>.2009年三峡工程竣工后,水库实行水位调节管理方式:每年10月汛末开始蓄水,蓄水至175 m;翌年5月水位开始下降,6~9月水库水位维持在汛期最低水位145 m<sup>[24]</sup>.

考虑到三峡库区处于低水位时水体沉积物中重金属元素含量高于库区高水位时含量<sup>[14]</sup>,所以本研究选择在三峡库区处于低水位时对库区干、支流进行沉积物采样.于2015年6月在三峡库区(重庆—宜昌段)干支流共采集水体表层沉积物样品67个.其中,三峡库区干流共布设37个断面(其中上游段江北区—丰都县9个断面;中游段丰都县—奉节县13个断面;下游段奉节县—宜昌市15个断面),干流部分断面采用左、右岸分别采样;选取典型支流包括:乌江、渠溪河、澎溪河、磨刀溪、梅溪河、大宁河、沿渡河、青干河、香溪河,分别在距离支流河口2~4 km断面进行沉积物采集,采样点如图1所示.

#### 1.1.2 采样及保存

通过使用抓斗式底泥采样器提取底泥样品,样品用干净的聚乙烯样品袋包装,封口并标记后带回实验室进行冷干后,研磨过60目尼龙筛,混合均匀后用聚乙烯样品袋保存备用.

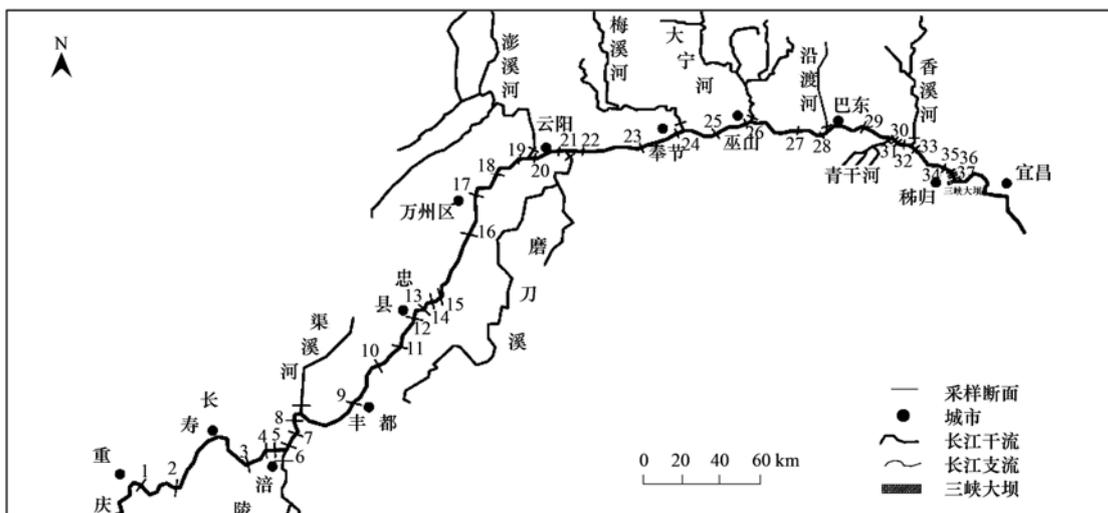


图1 三峡库区采样示意

Fig. 1 Sampling sites in the Three Gorges Reservoir region

## 1.2 主要仪器及试剂

实验仪器:聚四氟乙烯消解罐、CHRIST 冷冻干燥机、Milli-Q 高纯水发生器、超声波清洗器、电热鼓风干燥箱、电感耦合等离子体质谱仪(型号 ELAN DRC-e)、低速离心机(TD6M)、全温振荡培养箱。

试剂:高纯水(由 Milli-Q 型高纯水发生器制备)、过氧化氢(MOS 级)、硝酸(MOS 级)和氢氟酸(MOS 级),冰醋酸(优级纯),盐酸羟胺(优级纯),醋酸铵(优级纯)。

## 1.3 实验方法

沉积物钒总量测定方法:实验前消解罐均采用  $\text{HNO}_3$  (20%) 浸泡过夜,并用高纯水冲洗干净后备用,称量 40 mg 样品放入消解罐中,随后加入 2 mL  $\text{HNO}_3$  和 0.2 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 放置电热盘上 60℃ 保温 12 h,再敞口 120℃ 蒸干。自然冷却后加入 2 mL  $\text{HNO}_3$  (50%, 体积比), 放置电热盘上 60℃ 保温 2 h, 加入 2 mL HF 后, 将盛有样品的消解罐放入高压釜中 190℃ 消解 24 h (完全消解后的样品呈现澄清状态), 将消解罐放置电热盘上 120℃ 蒸至近干。自然冷却后, 加入 2 mL  $\text{HNO}_3$  (50%, 体积比) 和 2 mL 纯水, 电热盘 60℃ 条件下保温 1 h 后进行超声 15 min, 最后加入纯水定容至 80 g, 加入内标后采用 Elan DRC-e 型 ICP-MS (美国 Perkin-Elmer 公司) 测定样品中钒的含量。在分析沉积物样品的同时, 采用相同的程序分析了空白样品、平行样品以及国家土壤标准物质 GSS-9 (GBW07423, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所), 测定结果在标样的保证值范围之内。

形态分析采用改进 BCR 逐级提取方法<sup>[25]</sup>:  
①酸提取态:精确称量 0.5 g 沉积物后, 加入 80 mL 的离心分离管中, 再加入 20 mL 醋酸。拧紧盖子后放置在全温振荡培养箱 (22℃ ± 5℃) 振荡 16 h (振荡速率为 40 r·min<sup>-1</sup>)。振荡结束后进行离心 (3 000 r·min<sup>-1</sup>) 10 min, 分离上清液和残留物, 将上清液缓缓倒入聚乙烯小瓶中, 加入 0.2 mL 浓硝酸后保存在 4℃ 冰箱中。在残留物中加入 20 mL 蒸馏水, 振荡约

15 min 后离心 (3 000 r·min<sup>-1</sup>) 10 min。缓缓将上清液倒出舍弃, 同时尽量避免将固体残留物也倒出。

②可还原态:加入 20 mL 盐酸羟胺至上次离心分离管残留物中, 重复上述振荡、离心、分离、保存步骤。③可氧化态:加入 5 mL 过氧化氢至含残留物的离心管中, 将盖子轻轻盖住容器, 在室温中消解, 间歇振荡离心管。在 (85 ± 2)℃ 水浴锅中消解 1 h, 前 30 min 间歇性振荡离心管。揭开盖子使得溶液体积蒸发至 2 mL 左右, 再加入 5 mL 过氧化氢, 加热 1 h, 当体积减少至 1 mL 左右, 进行冷却。冷却后加入 25 mL 醋酸铵, 重复振荡、离心、分离、保存步骤。④残渣态:将固体残留物参照总量的实验测定过程进行。质量控制样品采用标准物质 BCR-701, 测定结果在标样的保证值范围之内。

在操作过程中, 对实验涉及的每个环节 (容器、溶剂、步骤) 都要求做空白对照来控制可能的污染, 确保重金属分析可靠。相关分析采用 SPSS 19.0 软件。

## 1.4 评价方法

### 1.4.1 地积累指数法

水体沉积物中重金属污染评价方法较多, 德国学者 Müller 提出的地积累指数法 (index of geoaccumulation,  $I_{\text{geo}}$ ) 是迄今为止应用最广泛的评价方法<sup>[12-14]</sup>。利用水环境沉积物中某一种重金属的总含量与其地球化学背景值的关系来确定重金属污染程度的定量指标。该方法仅需要获得重金属总的含量, 所以简单易行, 便于推广, 同时能够较为直观地反映外源重金属在沉积物中的富集程度, 数据具有较高的可比性, 计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left( \frac{C_i}{1.5B_i} \right) \quad (1)$$

式中,  $I_{\text{geo}}$  为地积累指数,  $C_i$  是指沉积物中某一重金属元素的实测含量;  $B_i$  为参比值是指全球沉积岩 (页岩) 中该元素的地球化学背景值<sup>[26]</sup> 130 mg·kg<sup>-1</sup>; 常数采用 1.5, 是考虑成岩作用可能会引起背景值变动而选用的系数。地积累指数共分为 7 个等级 (0 ~ 6 级), 表示污染程度由无到极强,  $I_{\text{geo}}$  与污染程度关系详见表 1。

表 1 地积累指数与污染程度分级

Table 1 Index of geoaccumulation and classification of pollution degree

$I_{\text{geo}}$	≤ 0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无 ~ 中度	中度	中 ~ 强度	强度	强 ~ 极强	极强

### 1.4.2 潜在生态危害评价方法

采用瑞典学者 Håkanson 在 1980 年提出的潜在

生态危害法进行定量计算<sup>[27]</sup>, 利用沉积物中重金属相对于工业化以前沉积物的最高背景值的比值及重

金属的生物毒性系数得到生态风险指数,并根据表2评价生态危害指数等级,该方法考虑了重金属毒性和污染对评价区域的敏感度以及区域背景值差异,计算方法如下:

$$E_i = T_i (C_s^i / C_n^i) \quad (2)$$

式中,  $C_s^i$  为表层沉积物中重金属  $i$  的实测含量,  $C_n^i$  为参比值,在实际计算时学者们对参比值的选取各不相同,为更好地反映三峡库区水体沉积物钒污染的情况,本研究采用长江流域沉积物背景值 ( $114.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[28]</sup>.  $T_i$  为毒性系数,由于目前还没有统一的钒的毒性系数,决定采用徐争启等<sup>[29]</sup>提出的钒的校正丰度数 ( $T=2$ ),该计算方法综合考虑了钒元素丰度原则、释放响应原理及钒在不同介质(火成岩、土壤、淡水、陆生植物和动物)中的丰度值.  $E_i$  为潜在生态危害指数.

表2 潜在生态危害指数及生态危害程度分级

Table 2 Potential ecological risk coefficient, risk index and classification of risk intensity

$E_i$	生态危害程度
<40	轻微
40~80	中等
80~160	强
160~320	很强
$\geq 320$	极强

## 2 结果与讨论

### 2.1 钒的含量水平与空间分布

三峡库区干支流沉积物中钒元素含量范围为

$89.4 \sim 175.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值为  $123.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,高于中国水系沉积物背景值 ( $80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、中国土壤背景值 ( $82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 及长江流域沉积物中钒背景值 ( $114.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[28, 30, 31]</sup>. 与国内其它地区相比,三峡库区沉积物中钒含量高于黄河沉积物 ( $90.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[32]</sup>、渤海莱州湾 ( $71.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[33]</sup>、珠江流域北江支流 ( $60.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[34]</sup>. 与国外其它地区相比,三峡库区沉积物中钒含量高于芬兰 ( $44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[35]</sup>,日本大阪湾、东京湾、广岛湾、九州湾 ( $66.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[36]</sup>、巴基斯坦 ( $98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[37]</sup>,低于俄罗斯喀拉海 ( $172 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[38]</sup>.

三峡库区干流段的钒元素平均含量为  $123.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 其中,干流上游段(重庆江北区—丰都县)平均含量为  $97.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,干流中游段(丰都县—奉节县)平均含量为  $116.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,干流下游段(奉节县—宜昌市)平均含量为  $144.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,自上游向下游呈现较为明显增长趋势(图2). 另外,干流采样点钒含量最大值为  $175.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,出现在距三峡大坝上游  $124 \text{ km}$  处. 该采样点左岸为巫山县县城,其来源考虑是受到巫山县采矿工业以及冶炼工业的污染影响;钒含量最小值为  $89.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,出现在距三峡大坝上游  $312 \text{ km}$  处. 本研究中干流断面采用左右岸分别采样,其中巫山县、奉节县、云阳县、万州区、忠县断面左岸沉积物中钒含量略大于右岸;秭归县断面右岸钒含量大于左

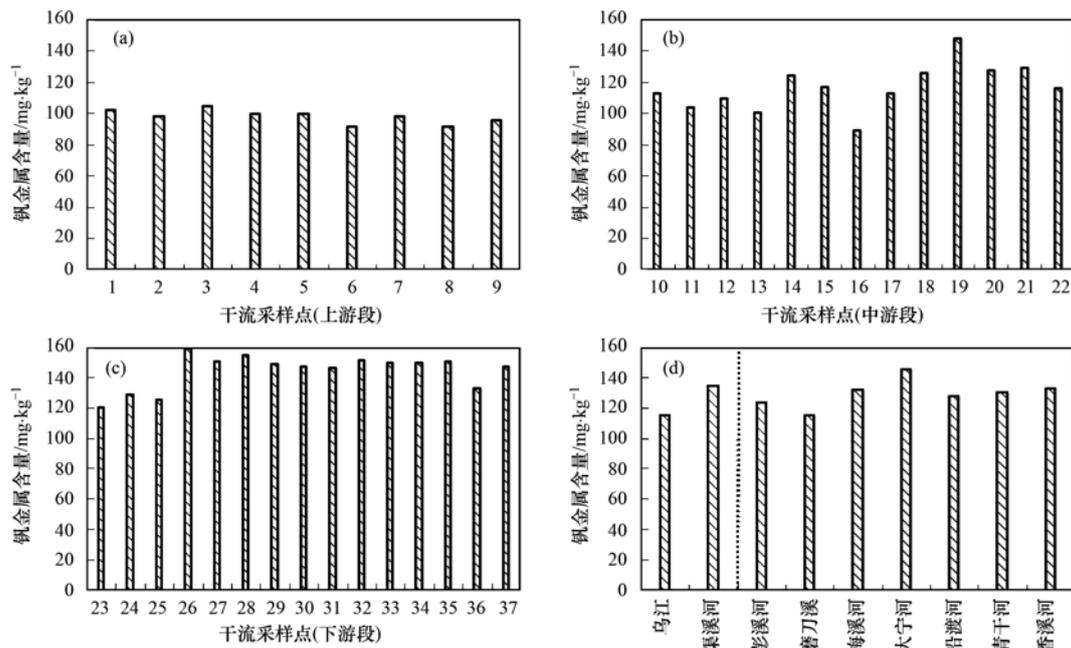


图2 三峡库区干、支流表层沉积物中钒含量分布

Fig. 2 Distribution of vanadium concentrations in the surface sediments of mainstream and tributaries of Three Gorges Reservoir

岸;这可能是受到了近城镇支流人为钒排放的因素影响。

三峡库区支流段钒含量平均值为  $128.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 其中, 最小值出现在磨刀溪 ( $115.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和乌江 ( $115.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); 最大值出现在大宁河 ( $145.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 大宁河与长江干流汇合处是巫山县县城所在地, 考虑干流最大值也出于此处, 验证了此处确实有外源汇入。库区干流上游段支流河口处对应的干流沉积物中钒含量小于支流含量, 中游段和下游段则正相反。这可能是因为三峡库区蓄水后, 库区水面变宽、流速变缓, 大量悬浮颗粒物开始在干流下游段近三峡大坝处沉降下来并发生吸附和积累, 使得库区下游段钒的含量明显高于上游; 同时库区干流中下游段多为发达城镇, 城市工业及生活垃圾等污染物排入江中也增加了沉积物中钒含量。

## 2.2 污染程度评价

采用两种不同方法(地积累指数法与潜在生态危害指数法)对三峡库区干支流沉积物中钒的污染水平进行了评价, 评价结果见表 3。评价结果显示: ①各采样点的钒的地积累指数( $I_{\text{geo}}$ )均小于 0, 说明库区目前整体呈现无污染状态, 但是干流段钒元素存在一定富集趋势。由于参比值使用的是钒元素在全球页岩中的平均值, 选取页岩是因为页岩的形成环境更接近于现代河流水体沉积物的形成环境, 钒在页岩中的平均值普遍是高于其他岩石, 较大的背景值可能会造成  $I_{\text{geo}}$  偏小; ②各采样点钒的潜在生态危害系数( $E_i$ )均小于 40, 生态危害程度评价为轻微等级。其中参比值选取长江水体沉积物背景值。

地积累指数法侧重于进行钒实测值与背景值的对比, 重在反映沉积物中钒的富集程度及外源汇入情况; 而潜在生态危害评价方法除了考虑沉积物中

钒的含量, 同时考虑了钒的生物毒性影响因素。综上所述, 三峡库区目前整体基本不存在钒的环境污染及潜在生态危害, 但是干流段钒的沿程富集会使库区下游段存在一定的潜在生态危害, 应当加强监测与防治。

表 3 三峡库区沉积物中钒污染等级及潜在生态风险评价

Table 3 Pollution levels and potential ecological risk assessment of vanadium in the sediments of Three Gorges Reservoir

河流名称	$I_{\text{geo}}$	污染程度(分级)	$E_i$	生态危害程度
上游段	-1.00	0	1.71	轻微
中游段	-0.74	0	2.04	轻微
下游段	-0.43	0	2.52	轻微
乌江	-0.75	0	2.02	轻微
渠溪河	-0.53	0	2.36	轻微
小江	-0.65	0	2.17	轻微
磨刀溪	-0.76	0	2.02	轻微
梅溪河	-0.56	0	2.31	轻微
大宁河	-0.42	0	2.55	轻微
沿渡河	-0.61	0	2.24	轻微
青干河	-0.58	0	2.28	轻微
香溪河	-0.55	0	2.32	轻微
区域均值	-0.66	0	2.16	轻微

## 2.3 形态分布特征

库区干(支)流沉积物中钒的不同赋存形态含量如下: 酸提取态含量范围为: 干流  $0.21 \sim 0.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、支流  $0.08 \sim 0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 可还原态含量范围: 干流  $16.4 \sim 21.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、支流  $13.2 \sim 19.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 可氧化态含量范围: 干流  $2.86 \sim 5.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、支流  $0.57 \sim 3.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 残渣态含量范围: 干流  $82.3 \sim 152.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、支流  $95.1 \sim 116.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。干流生物可利用态(酸提取态、可还原态、可氧化态)钒含量普遍高于支流, 并沿程呈现富集趋势; 从图 3 可以看出: 沉积物中的钒主要以残渣态形式存在, 所占质量分数为  $80\% \sim$

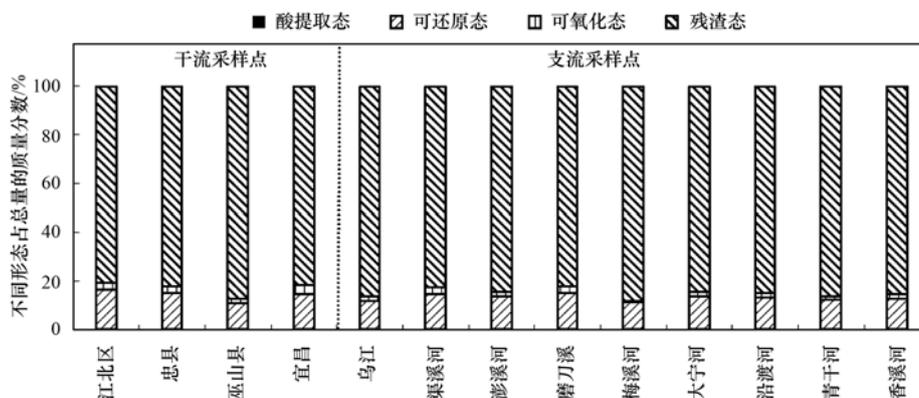


图 3 三峡库区沉积物中钒的化学形态

Fig. 3 Chemical forms of vanadium in sediments of Three Gorges Reservoir

89%。干流残渣态钒的含量变化与总量变化趋势基本相同,当总量增加时残渣态含量也增加,两者呈现显著性正相关( $R = 0.956, P < 0.01$ );沉积物中酸提取态钒含量极少,所占质量分数为 0.06% ~ 0.25%,当沉积物中钒总量增加时酸提取态钒含量呈现减少趋势;可氧化态钒所占质量分数为 10.6% ~ 16.1%;可还原态钒所占质量分数为 0.45% ~ 3.43%。

虽然当水环境化学条件发生变化时,酸可提取态、可还原态、可氧化态的钒都可能转化成易于被生物吸收利用的形态,将对水生生物造成威胁,但因为其含量较低,基本无生态危险;而残渣态钒一般不具有生物可利用性,对环境影响甚微。

### 3 结论

(1)三峡库区水体沉积物中钒含量高于长江流域沉积物中钒的背景值以及中国水系沉积物和土壤的背景值,并高于国内其他地区,与国外其他水系相比,三峡库区水体沉积物钒含量处于中等水平。

(2)三峡库区干流及主要支流中沉积物的钒金属含量在 89.4 ~ 175.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为 123.7  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,略高于长江水体沉积物背景值。钒金属含量分布特征主要呈现:干流下游段 > 支流 > 干流中游段 > 干流上游段,支流中大宁河沉积物中钒含量最高。

(3)地积累指数法和潜在生态危害指数法综合评价结果显示:目前三峡库区沉积物中钒具有轻微的生态风险,基本不存在环境危害影响,值得注意的是干流段钒元素存在一定富集趋势。

(4)沉积物中钒主要以残渣态存在(约占总量的 80% ~ 89%),不同形态所占质量分数呈现残渣态钒 > 可氧化态钒 > 可还原钒态 > 酸可提取态钒。生物可利用部分(氧化态、可还原态、酸可提取态)钒含量较低,不易对库区流域水环境中水生生物构成危害。

#### 参考文献:

- [1] Burton Jr G A. Metal bioavailability and toxicity in sediments [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(9-10): 852-907.
- [2] 张超莹,郑西来,陈蕾. 水库沉积物中铁、锰季节性释放的实验研究[J]. *水资源保护*, 2013, **29**(3): 79-82, 86.
- [3] 吕书丛,张洪,单保庆,等. 海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4204-4210.
- [4] 刘强,梁雷,王峰源,等. 辽河干流消落区沉积物重金属污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2220-2227.
- [5] 冯精兰,栗笑迎,刘群,等. 淮河流域沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. *人民黄河*, 2015, **37**(10): 81-85.
- [6] 郭晶,李利强,黄代中,等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(1): 44-51.
- [7] 冯精兰,胡鹏转,刘群,等. 黄河中下游干流沉积物中重金属的赋存形态及其生态风险[J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 178-185.
- [8] 王瑞霖,程先,孙然好. 海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3740-3747.
- [9] 牛勇,余辉,牛远,等. 太湖流域殷村港沉积物中营养元素及重金属污染特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(8): 1557-1562.
- [10] 孔明,彭福全,张毅敏,等. 环巢湖流域表层沉积物重金属赋存特征及潜在生态风险评估[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(6): 1863-1871.
- [11] 谢文平,王少冰,朱新平,等. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1808-1815.
- [12] 王健康,高博,周怀东,等. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评估[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1693-1699.
- [13] Gao B, Zhou H D, Yu Y, *et al.* Occurrence, distribution, and risk assessment of the metals in sediments and fish from the largest reservoir in China [J]. *RSC Advances*, 2015, **5**(74): 60322-60329.
- [14] Wei X, Han L F, Gao B, *et al.* Distribution, bioavailability, and potential risk assessment of the metals in tributary sediments of Three Gorges Reservoir; the impact of water impoundment [J]. *Ecological Indicators*, 2016, **61**: 667-675.
- [15] Gao L, Gao B, Wei X, *et al.* Assessment of metal toxicity and development of sediment quality guidelines using the equilibrium partitioning model for the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(22): 17577-17585.
- [16] 王云,魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [17] 滕彦国,矫旭东,左锐,等. 攀枝花矿区表层土壤中钒的环境地球化学研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(2): 278-283.
- [18] World Health Organization (WHO). Vanadium pentoxide and other inorganic vanadium compounds [R]. *Concise International Chemical Assessment Document 29*. Geneva: World Health Organization, 2001: 1-53.
- [19] Crans D C, Smee J J, Gaidamauskas E, *et al.* The chemistry and biochemistry of vanadium and the biological activities exerted by vanadium compounds [J]. *Chemical Reviews*, 2004, **104**(2): 849-902.
- [20] 王儒述. 三峡工程的环境影响及其对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, **11**(4): 317-322.
- [21] 王健康,周怀东,陆瑾,等. 三峡库区水环境中重金属污染研究进展[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2014, **12**(1): 49-53.
- [22] 黄真理,李玉樑,陈永灿,等. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [23] 刘会. 三峡库区水位变化对库岸影响的探讨[J]. *人民长江*, 2008, **39**(16): 91-93, 96.

- [24] 雷明, 李昌晓, 陈伟, 等. 三峡水库岸坡系统不同用地类型对土壤酶活性和土壤化学性质的影响[J]. 林业科学, 2013, **48**(11): 15-22.
- [25] Pueyo M, Mateu J, Rigol A, *et al.* Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(2): 330-341.
- [26] 黎彤, 倪守斌. 地球和地壳的化学元素丰度[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [27] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [28] 张立城, 余中盛, 章申. 水环境化学元素研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [32] 刘明, 范德江. 长江、黄河入海沉积物中元素组成的对比[J]. *海洋科学进展*, 2009, **27**(1): 42-50.
- [33] 胡宁静, 刘季花, 黄朋, 等. 渤海莱州湾表层沉积物中金属元素分布及环境质量[J]. *海洋学报*, 2012, **34**(2): 92-100.
- [34] Gao B, Lu J, Zhou H D, *et al.* The distribution, accumulation and potential source of seldom monitored trace elements in sediments of Beijiang River, South China[J]. *Water Science and Technology*, 2012, **65**(12): 2118-2124.
- [35] Loahmann E, Munari S, Amicarelli V, *et al.* Heavy metal: identification of air quality and environmental problems in the European Community (environment and quality of life) [M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1987.
- [36] Fukue M, Nakamura T, Kato Y, *et al.* Degree of pollution for marine sediments[J]. *Engineering Geology*, 1999, **53**(2): 131-137.
- [37] Naseem S, Sheikh S A, Qadeeruddin M, *et al.* Geochemical stream sediment survey in Winder Valley, Balochistan, Pakistan [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, **76**(1): 1-12.
- [38] Santos I R, Silva-Filho E V, Schaefer C E G R, *et al.* Heavy metal contamination in coastal sediments and soils near the Brazilian Antarctic Station, King George Island [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(2): 185-194.

## 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 <sup>0</sup> -PRB Systems .....	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd <sup>2+</sup> 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 <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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