ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第3期
2016年3月15日

目 次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 …… 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明(789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法…… 张华玲, 姚大军, 张雨,方子梁(795)
2014 年北京 APEC 期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析…… 何晓朗,谭吉华,郭送军,马永亮,贺克斌(801)
北京市夏季不同 O_3 和 $PM_{2.5}$污染状况研究 …… 王占山,张大伟,李云婷,董欣,孙瑞雯,孙乃迪(807)
2013 年 1 月南京北郊霾天气溶胶的光学特性 …… 王利朋,马嫣,郑军,崔芬萍,周瑶瑶(816)
上海典型持续性 $PM_{2.5}$重度污染的数值模拟 …… 常炉予,许建明,周广强,吴剑斌,谢英,余钟奇,杨辰(825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 …… 韩文亮,刘豫,陈海明,陈兴童,范涛(834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 …… 黎宝仁,陈洲洋,王剑斌,张再利,樊青娟,魏在山(847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 …… 孔秀君,张鹏,杨南南,梁生康(854)
面向 GOCI 数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 …… 杜成功,李云梅,王桥,朱利,吕恒(862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 ……
…… 周川,蔚建军,付莉,崔玉洁,刘德富,姜伟,Douglas Haffner,张磊(873)
三峡库区消落带水体 DOM 不同分子量组分三维荧光特征 …… 陈雪霜,江韬, 卢松, 魏世强,王定勇,闫金龙(884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 …… 冯精兰,席楠楠,张飞,刘书卉,孙剑辉(893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 …… 谢正兰,孙玉川,张媚,余琴,徐昕(900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 …… 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇(910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 …… 尹肃,冯成洪,李扬陬,殷立峰,沈珍瑶(917)
滆湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 …… 熊春晖,张瑞雷,吴晓东,冯立辉,王丽卿(925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 …… 王永艳,文安邦,史忠林,严冬春,朱波,唐家良(935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 …… 童银栋, 张巍, 邓春燕 , 王学军(942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 ……
…… 何立平 ,刘丹,于志国,周斌,杨振宇,兰国新,郭冬琴,林俊杰(950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响…… 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟,安思危, 王定勇(955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 …… 周静雯,苏保林,黄宁波,管毓堂,赵堃(963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 …… 贡丹燕,潘杨,黄勇,包伟,李倩倩(970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 …… 汪健,李怀正,甄葆崇,刘振东(980)
非水溶性醌加速菌 GWF 生物还原高氯酸盐的研究…… 张媛媛,郭延凯,张超,梁晓红,田秀蕾,牛文钰,廉静,郭建博(988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 …… 王文东,张轲,范庆海, 郑丹(994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 …… 顾怡冰,马邕文,万金泉,王艳,关泽宇(1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 ……
…… 李雨清,何江,吕昌伟,樊明德,王维,张瑞卿,谢志磊,汪精华,于波,恩和,丁涛(1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 …… 孙德帅,刘亚丽,张晓东,秦婷婷(1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 …… 方敦,田华婧,叶欣,何次利,但悠梦,魏世勇(1023)
3 种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 …… 谢黎,陈本寿,张进忠,卢松,江韬(1032)
HDTMA 改性蒙脱土对土壤Cr(Ⅵ)的吸附稳定化研究 …… 蒋婷婷,喻恺,罗启仕,吉敏,林匡飞(1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 …… 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜,汪印(1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 …… 张玉莹,陈秀荣,王璐,李佳慧,徐燕,庄有军,于泽亚(1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 …… 周健,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,完颜德卿,丁亮,邵经纬,赵蓉(1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 …… 端正花,潘留明,陈晓欧,王秀朵,赵乐军,田乐琪(1070)
游离氨(FA) 耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 …… 孙洪伟,吕心涛,魏雪芬,赵华南,马娟,方晓航(1075)
1 株 *Arthrobacter arilaitensis* 菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 …… 何腾霞,倪九派,李振轮,孙权,冶青,徐义(1082)
海洋菌株 y3 的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 …… 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,徐光耀,李津(1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例 …… 师晨迪,许明祥,邱宇洁(1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 …… 张延,梁爱珍,张晓平,陈升龙,孙冰洁,刘四义(1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 …… 周泉,王龙昌,熊瑛,张赛,杜娟,赵琳璐(1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 …… 方瑛,马任甜,安韶山,赵俊峰,肖礼(1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤 C、N、P、K 化学计量学特征 ……
…… 张海东,汝海丽,焦峰,薛超玉,郭美丽(1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 …… 张连科 ,李海鹏,黄学敏,李玉梅,焦坤灵,孙鹏,王维大(1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 …… 陈寻峰,李小明,陈灿,杨麒,邓琳静,谢伟强,钟宇,黄斌,杨伟强,张志贝(1147)
以预处理剩余污泥为燃料 MFC 产电性能及不连续供电的可行性 …… 赵艳辉,赵阳国,郭亮(1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 …… 王天娇,陈彤,詹明秀,郭颖,李晓东(1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 …… 耿静,吕永龙,任丙南,王铁宇(1171)
《环境科学》征订启事(1138) 《环境科学》征稿简则(1155) 信息(824,853,883)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价

王永艳[1,2],文安邦[1*],史忠林[1],严冬春[1],朱波[1],唐家良[1]

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所,山地表生过程与生态调控重点实验室,成都 610041; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 为了分析三峡库区支流消落带沉积泥沙的理化特征以及重金属污染的空间变化特征,选择 9 条典型一级支流,共采集 54 个消落带沉积泥沙样品,测定了粒径分布、容重、有机质(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、钾(K)等养分元素含量特征以及运用地累积指数评价铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn)等重金属. 结果表明消落带沉积泥沙粒径分布在空间上(乌江-磨刀溪)中值粒径呈波动变化; 支流消落带下部(160 ~ 165 m)沉积泥沙相比上部(165 ~ 175 m)偏粗,不同高程带砂粒和黏粒体积分数变化属于中等变异,粉粒属于弱变异. 独立样本 t 检验表明消落带上部和下部之间沉积泥沙特征差异不显著. 地累积指数评价表明支流消落带沉积泥沙只有 Zn 元素在珍溪河、龙洞河和龙河属于无-中的污染程度,Pb 元素在磨刀溪属于无-中的污染程度,其他元素在所选支流消落带均为无污染.

关键词:支流库湾; 沉积泥沙; 理化性质; 重金属; 三峡库区

中图分类号: X131; X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)03-0935-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.03.018

Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir

WANG Yong-yan[1,2], WEN An-bang[1*], SHI Zhong-lin[1], YAN Dong-chun[1], ZHU Bo[1], TANG Jia-liang[1]

(1. Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to analyze the spatial variation characteristics of grain diameter, nutrient elements and heavy metal pollution with deposition sediment in tributaries bay of the Three Gorges Reservoir, we selected 9 typical tributaries bay, 54 deposited sediment samples were collected from the riparian zone for analyzing grain diameter distribution, capacity, organic matter, nutrient elements of TN, TP and K, heavy metal elements of Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn. The results indicated that particle size distribution from Wujiang River in Fuling to the Modao stream in Yunyang presented a trend of fluctuation, deposited sediment at 160-165 m elevation was coarser than that at 165-175 m elevation, volume percent of sand and clay presented a moderate variation at both altitudes, while silt had small variation. Independent sample t test showed that characteristics difference between the upper and lower sediments in riparian zone was not significant. The geo-accumulation index of heavy metal pollutants in the sediment from riparian zone of the Three Gorges Reservoir tributaries bay indicated that, only Zn element in Zhenxi River, Longdong River and Long River, Pb element in the Modao Stream belonged to non-moderate pollution levels, whereas there were no pollution of all other elements in tributaries.

Key words: tributary bay; deposited sediment; physicochemical properties; heavy metal; the Three Gorges Reservoir

三峡水库消落带是库区水域与周边陆地环境的过渡地带,是由三峡水库“蓄清排浑”的人为运行调度形成的典型水陆交错带. 三峡库区自 2003 年蓄水开始形成,到 2010 年蓄水位 175 m 时,已经形成了垂直落差达 30 m(高程 145 ~ 175 m)面积约 349 km^2 的特大型狭长消落带. 受水库运行调度影响,库区消落带具有秋季蓄水-冬季淹水-春季泄水落干-夏季出露-秋季再蓄水的反季节水位涨落特点. 近年来消落带涌浪侵蚀、土地利用变化、非点源污染等生态环境问题备受关注[1~5]. 随着三峡工程后续工作规划的出台,消落带沉积泥沙对水、陆生态环境、对消落带污染物富集及侵蚀-沉积动态转化机制及其对消落带地貌演变的潜在影响问题,同时也是“后三峡”时期亟待认识并解决的新问题[6,7]. 目前对消落带的研究主要集中在消落带淹水导致的土壤理化性质的变化[8,9]、消落带泥沙沉积过程的定性评估以及水保措施[10,11]、退耕还林等措施对水库沉积泥沙的潜在影响[12].

春夏消落带出露期,当地农民利用这一宝贵的

收稿日期: 2015-08-12; **修订日期**: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430750); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-09)

作者简介: 王永艳(1989 ~),女,博士研究生,主要研究方向为环境恢复与水土保持,E-mail: wyyhu2008@126.com

* 通讯联系人,E-mail: wabang@imde.ac.cn

土地资源抢种抢收,大量施肥造成消落带土壤养分增多;而在秋冬水库蓄水时,消落带大量富集的养分及其它元素又可能随水体的长时间浸泡再次释放到水体中[13,14]. 初步监测结果显示,尽管长江干流水质与蓄水前相比基本稳定,但次级河流(支流)或库湾受江水顶托,一些养分元素如磷出现富集现象[15]. 蓄水后支流断面监测结果表明,80% 以上的支流、库湾达到中度-重度富营养状况[16],水华几乎年年春季暴发[17,18]. 因此,研究支流库湾消落带沉积泥沙特征,对于全面评价库区水环境质量,保护三峡水库"一泓清水"具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于2015 年 4 月消落带出露初期,选择三峡库区的涪陵到云阳长江一级支流(乌江、珍溪河、龙洞河、龙河、香水河、黄金河、汝溪河、彭溪河、磨刀溪)共 9 个典型支流消落带布设采样点(图 1),分两个高程 160 ~ 165 m(下部)、165 ~ 175 m(上部)采集样品. 所选消落带断面均是出露后尚未受扰动的,采样点基本信息如表 1,采样工具为自制圆形采样环及采样铲(图 2),采样环内径 10 cm,高 3 cm. 受上覆水动力条件影响,消落带同时发生侵蚀-沉积-再悬浮-再沉积的过程,本研究所指的沉积泥沙是经过沉积-侵蚀等过程之后最终沉积下来的净沉积泥沙.

1.2 样品测定

样品经自然风干,手工拣除枯枝落叶、作物根系及粗砾石等,过 2 mm 干筛备试. 颗粒组成测定分析采用英国马尔文公司研制生产的 MasterSizer 2000 型激光粒度仪测定. 将过 2 mm 土样多次四分法取 50 g 全磨细过 100 目尼龙网筛,采用德国 Elementar 公司生产的常量元素分析仪测定土壤全碳、全氮、K,测试质量 60 ~ 80 mg. 取 0.2 g 过 100 目土样以硝酸-氢氟酸(HNO_3-HF)消解配制土壤溶液备试:土壤全磷测定采用紫外可见分光光度计;

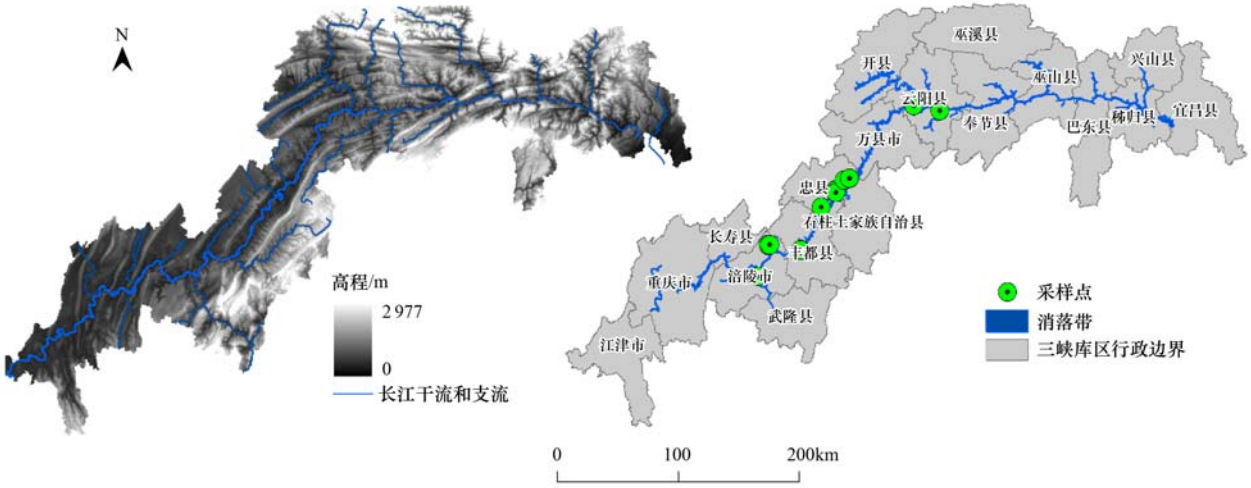

图 1 三峡库区范围及采样示意

Fig. 1 Scope and sampling sites in the Three Gorges Reservoir

图 2 采样点照片和采样工具

Fig. 2 Sampling site and sample collection tools

表 1　采样点基本信息

Table 1　Summary of the characteristics of the selected sampling sites

编号	采样点	所属支流	位置	淹没前土地利用	距河口距离/km
1	重庆市涪陵区团堡村	乌江	29°40′26.7″N, 107°23′18.2″E	玉米和狗牙根	5.0
2	重庆市涪陵区石牛村	珍溪河	29°54′21.52″N, 107°27′29.44″E	下部为杂草,上部玉米	1.2
3	重庆市涪陵区兰花洞桥	龙洞河	29°54′21.74″N, 107°28′25.62″E	下部为苍耳和狗牙根	1.0
4	重庆市丰都县	龙河	29°52′34.02″N, 107°44′41.68″E	石坎坡耕地	0.8
5	重庆市忠县任家镇	香水河	30°11′37.19″N, 107°54′59.32″E	苍耳	2.2
6	重庆市忠县黄金镇	黄金河	30°19′36.46″N, 108°02′26.29″E	玉米	2.0
7	忠县坪山大桥	汝溪河	30°23′53.62″N, 108°06′47.65″E	苍耳和狗牙根	4.0
8	重庆市云阳县瓦屋咀	彭溪河	30°57′51.26″N, 108°42′38.63″E	狗牙根和牛鞭草	6.5
9	云阳宝坪镇红电村	磨刀溪	30°55′49.32″N, 108°56′24.24″E	狗牙根和苍耳	0.7

美国 Perkin Elmer 公司生产的 NexION300X 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)用以测量 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等重金属元素.

1.3　研究方法与数据分析

1.3.1　数据分析

消落带不同高程带 160 ~ 165 m(下部)和 165 ~ 175 m(上部)土壤理化、养分含量、重金属的差异分析采用非参数进行两两比较,所有统计分析和相关分析运用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 进行处理.

1.3.2　重金属污染评价

重金属污染现状评价目前应用最普遍的一个方法是地累积指数法 I_{geo} 分析[19],近年来,国内将其用于评价土壤环境质量,并取得较好效果[20,21],该评价方法能同时考虑自然地质背景值和人为活动导致的重金属污染,因此,地累积指数可以用来判别人为活动对地理环境的影响,分析方法如下:

$$I^n_{geo} = \log_2\{C_n \mid 1.5B_n\}$$

式中,I^n_{geo}为重金属 n 的地累积指数,C_n 重金属 n 的含量; B_n为该重金属的地球化学背景值,本研究所采用的重金属地球化学背景值借鉴唐将等[22]对三峡库区重金属背景值的研究结果,根据 I^n_{geo}数值的大小将沉积物重金属分为 0 ~ 6 级,共 7 级(表 2).

表 2　地累积指数分级表

Table 2　Classification of geo-accumulation index

I_{geo}	≤0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	>5
等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

2　结果与分析

2.1　沉积泥沙粒径分布特征

本研究把泥沙粒径设定为 < 0.002、0.002 ~ 0.05、0.05 ~ 0.1、0.1 ~ 0.25、0.25 ~ 0.5、0.5 ~ 1、1 ~ 2 mm,根据美国农业部粒级制分为黏粒(< 0.002 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.05)、砂粒(0.05 ~ 2 mm). 变异系数(CV)即标准差与算数平均值的比值,不同高程带的不同粒径变异幅度可以用变异系数值来反映. 通常认为,CV < 10% 为弱变异,CV > 100% 为强变异,介于二者之间则为中等变异.

从横向库尾到库中看,沉积泥沙的中值粒径最小值出现在龙洞河消落带上部为 5.8 μm,最大值出现在磨刀溪的消落带下部为 25.7 μm,从涪陵乌江到云阳磨刀溪的中值粒径呈先变大后减小再增大的波动变化,这可能跟采样点地形,采样密度和累计沉积厚度不同有关. 从纵向不同高程带看,各采样点上部消落带沉积泥沙,砂粒、粉粒、黏粒体积分数分别为 9.2% ~ 34.7%、58.8% ~ 81.1%、5.8% ~ 15.8%(图 3); 下部为 12.4% ~ 30.2%、63.1% ~ 73.9%、6.7% ~ 19.6%. 消落带上部沉积泥沙各粒径变异系数排序为砂粒、黏粒、粉粒,分别为 59.6%、30.4%、13.4%,均为中等变异; 消落带下部各粒径变异系数排序为黏粒、砂粒、粉粒,分别为 35.9%、26.7%、5.5%,黏粒和砂粒为中等变异,粉粒为弱变异. 不同高程带空间变异幅度排序为:砂粒 42.7%、黏粒 32.3%、粉粒 9.8%.

2.2　沉积泥沙性质统计分析

三峡库区消落带泥沙中有机质含量主要受消落带的干湿交替,管理方式及污染物质的输入[23]. 从表 3 可以看到,从消落区乌江到磨刀溪,由于地形地貌的差异加之人类活动导致的土地利用方式不同以及采样时的天气等因素造成沿程的沉积泥沙中 TOC 等4种养分元素含量和Cr等5种重金属含量

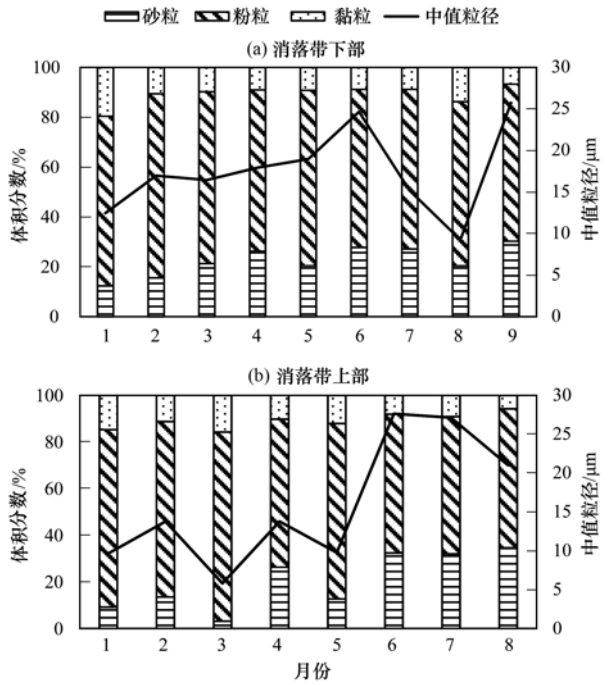

图 3 消落带沉积泥沙的不同高程带粒径分布特征

Fig. 3 Grain diameter distribution characteristics at different elevation of deposited sediment

有所差异. TOC、TN、K、TP 等 4 种常量元素以及重金属的含量平均值在消落带上部和下部差别不大,且 4 种常量元素 CV 值介于 10% ~100% 之间,均属于中等变异; 5 种重金属元素的 CV 值除了 Cr 小于 10%,属于弱变异之外,其他 4 种中金属均为中等变异.

对不同高程带的沉积泥沙的容重、养分元素和重金属含量做了独立样本 t 检验,从表 4 可以看到,各指标差异性均不显著($P > 0.05$),发现消落带上部和下部之间沉积泥沙理化特征差异不大,说明虽然三峡水库反季节蓄水形成高程达 30 m 的变幅消落带,这样的变幅并未导致沉积泥沙的 TOC、TN、TP、K 等养分元素和 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等 5 种重金属元素在不同海拔高程间的明显差异.

2.3 沉积泥沙重金属污染评价

三峡库区沉积物中重金属元素的地累积指数分级计算结果见表 5. 地累积指数 I_{geo} 值来看,本研究所选择的 9 条支流库湾消落带沉积泥沙重金属均为无污染或者轻度污染,表现为 Zn 元素在珍溪河、龙洞河和龙河的值在0 ~1之间,污染等级为1,属于无-中的污染程度,磨刀溪的 Pb 元素属于无-中的污染程度,其他元素的 I_{geo} 值均小于 0,均为无污染,总体来说,中游的重金属含量高,这可能是因为中游的消落带受人类活动影响较大,加之上游河水中携带的重金属会通过交换、扩散和沉淀等方式向中游消落区迁移.

表 3 沉积泥沙的养分元素和重金属元素含量特征值

Table 3 Feature values for concentrations of nutrient elements and heavy metals in the deposited sediment

特征值	高程带	容重 /g·cm^{-3}	全碳 /g·kg^{-1}	全氮 /g·kg^{-1}	K /g·kg^{-1}	全 P /g·kg^{-1}	Cr /mg·kg^{-1}	Cu /mg·kg^{-1}	Ni /mg·kg^{-1}	Pb /mg·kg^{-1}	Zn /mg·kg^{-1}
最小值	上部	1.1	10.7	1.4	16.2	0.2	61.1	11.9	16.4	8.5	75.6
	下部	1.2	8.2	1.1	22.5	0.3	59.6	15.9	17.0	14.4	66.8
最大值	上部	1.7	45.9	2.2	27.5	0.7	82.8	33.2	35.9	26.2	125.5
	下部	1.5	42.8	2.2	29.715	0.8	79.0	33.9	30.2	45.0	146.6
平均值	上部	1.3	18.0	1.7	22.3	0.4	70.0	23.6	27.0	19.7	93.4
	下部	1.4	17.6	1.7	25.3	0.5	70.7	22.9	25.3	22.3	102.6
标准差	上部	0.2	10.9	0.3	3.3	0.1	6.2	5.9	5.6	5.5	15.7
	下部	0.1	10.5	0.4	2.7	0.2	5.5	5.9	4.5	9.5	26.7
变异系数	上部	0.1	0.6	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2
	下部	0.1	0.6	0.3	0.1	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.3

表 4 消落带沉积泥沙元素含量垂直差异性分析

Table 4 Vertical difference of elements concentrations in the deposited sediment of the riparian zone

特征值	容重	TOC	TN	TP	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
T 值	-0.16	0.07	0.31	-0.96	-0.24	0.25	0.72	-0.71	-0.89
P 值	0.13	0.94	0.76	0.35	0.82	0.81	0.48	0.49	0.38

3 讨论

3.1 支流库湾消落带沉积泥沙影响因子分析

三峡水库支流库湾这一典型的区位特征,回水区消落带沉积受到水动力作用的减弱及细颗粒物、有机物等的吸附沉淀作用,同时受到长江干流倒灌

和来自支流上游的重金属元素受河水流动在入口处逐渐沉积的影响，加之本次调查的支流分布范围广，污染来源复杂，流域泥沙流失和人为活动的干扰，使得指标之间的关系更为复杂. 对 9 条支流库湾指标做相关性分析，表 6 表明除了 Ni 和 Zn 之间相关性不强之外，其他几种重金属元素之间都在 0.01 水平上彼此显著相关，说明这 Cu、Pb、Zn、Cr 这 4 种重金属具有相似的来源，农业面源污染、交通运输、矿石风化等都可能是重金属元素的来源. 另外值得注意的是 TN、TOC、K 和 Cu、Zn、Ni、Cr 之间也分别存在显著相关性，这是因为 N、K 等是农业生产的主要标志性污染物，农药和化肥的使用携带部分重金属元素. 所以在今后流域重金属污染防治中要重点加强农业面源污染的防治.

表 5　支流库湾消落带沉积泥沙重金属评价等级

Table 5　Index of geo-accumulation and classification of heavy metals pollution of the sediments in the riparian zone of typical tributaries bay

采样点	Cr			Cu			Ni			Pb			Zn		
	I_{geo}	含量 mg·kg^{-1}	级数	I_{geo}	含量 mg·kg^{-1}	级数	I_{geo}	含量 mg·kg^{-1}	级数	I_{geo}	含量 mg·kg^{-1}	级数	I_{geo}	含量 mg·kg^{-1}	级数
乌江	−0.7	71.3	0	−1.4	14.0	0	−1.4	16.7	0	−1.56	12.2	0	−0.27	87.1	0
珍溪河	−0.7	72.4	0	−0.7	22.1	0	−1.0	21.9	0	−1.24	15.1	0	0.01	104.7	1
龙洞河	−0.5	80.9	0	−0.2	33.6	0	−0.4	32.7	0	−0.39	27.2	0	0.19	119.7	1
龙河	−0.7	72.6	0	−0.6	24.8	0	−0.5	30.6	0	−0.69	22.2	0	0.24	118.9	1
香水河	−0.8	69.0	0	−0.6	25.1	0	−0.8	25.2	0	−0.91	18.6	0	−0.13	96.1	0
黄金河	−0.7	71.1	0	−0.8	21.3	0	−0.8	25.3	0	−1.10	16.7	0	−0.25	87.9	0
汝溪河	−0.9	64.1	0	−0.6	27.8	0	−0.7	29.9	0	−0.80	20.5	0	0.43	108.6	0
彭溪河	−0.7	70.2	0	−0.7	23.4	0	−0.7	27.9	0	−0.80	20.5	0	−0.27	86.4	0
磨刀溪	−0.9	61.6	0	−0.9	19.3	0	−0.8	25.4	0	0.33	35.6	1	−0.55	72.9	0

表 6　各元素之间的相关性分析[1)]

Table 6　Correlation analysis of elements in sediments of the Three Gorges Reservoir

	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	TN	TP	TOC	K
Cu	1								
Pb	0.554**	1							
Zn	0.453**	0.397**	1						
Ni	0.804**	0.480**	0.257	1					
Cr	0.453**	0.271**	0.392**	0.323*	1				
TN	0.546**	0.167	0.407**	0.402**	0.480**	1			
TP	−0.002	−0.119	0.091	−0.201	0.382**	0.255	1		
TOC	−0.263	−0.314*	0.097	−0.421**	0.220	0.243	0.209	1	
K	0.334*	0.100	0.047	0.284*	0.464**	0.293*	0.418**	−0.079	1

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关；* 表示在 0.05 水平上显著相关

3.2　蓄水对支流库湾消落带泥沙性质的垂直差异性影响

消落带上部和下部 TOC、TN 等养分元素含量的差异，从表 3 中可以看到，上部消落带的有机质和全氮含量略比下部高，这可能与不同高程带的淹没时间有关，由于三峡水库的蓄水特殊性，造成上部消落带淹没时间大概 90 d，而下部消落带长达 180 d（图 4），据现场调查采样时发现，由于上部消落带露出时间较早，受人为干扰，农民用来农业种植的可能性更大，所以养分元素要比下部略高.

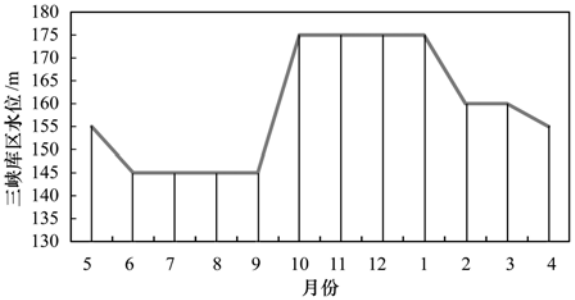

图 4　三峡水库年际水位示意

Fig. 4　Annual water levels of the Three Gorges Reservoir

3.3　支流库湾消落带泥沙重金属污染分析

与库区早期的研究结果对比见表 7，9 条支流库湾消落带沉积泥沙中 Cu、Cr、Zn 的含量均高于全国背景值，与三峡库区背景值和三峡库区的其他相关研究相比，只有 Zn 含量高于三峡库区背景值. 消落带处于相对开放的系统，影响因素较复杂，水体及上游城市排放重金属元素的输移等因素的影响，淹没后的土壤对重金属的吸附解吸变化趋势并不明

显. 叶琛等[19]对三峡水库干流消落区的研究发现渝北到秭归 12 个采样点的 Cu、Pb、Zn、Cd、As 含量呈现上游和下游含量高及中游含量低的空间格局,本研究 Cr 含量中上游较下游高,Cu 和 Zn 含量上游和下游含量低,中游含量相对较高,但是 Cu 的含量与相关研究相比总体偏低[24,25]; Ni 和 Pb 含量上游含量较低,中上游含量较高. Zn 含量高于三峡库区背景值,说明有潜在的 Zn 污染风险,为了防止重金属污染,今后支流库湾附近应减少开矿厂、机械制造等.

表 7 三峡库区消落带沉积泥沙重金属含量/mg·kg^{-1}

Table 7 Concentrations of heavy metals in sediments and soil of the riparian zone in the Three Gorge Reservoir/mg·kg^{-1}

项目	类型	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
全国[26]	背景值	61.00	22.60	26.90	26.00	74.20
三峡库区[22]	背景值	78.03	25.00	29.47	23.88	69.88
2006 年[27]	土壤	—	29.42	—	21.66	82.46
2007 年[28]	沉积物	78.8	59.15	—	63.21	126.76
2011 年[23]	沉积物	—	34.57	35.82	24.29	98.44
本研究	消落带泥沙	70.335	23.26	26.14	20.96	98.025

4 结论

(1)9 条支流库湾消落带沉积泥沙表现为支流消落带下部(160 ~ 165 m)沉积泥沙相比上部(165 ~ 175 m)偏粗,砂粒和黏粒体积百分比为中等变异,粉粒为弱变异. 从涪陵乌江到云阳磨刀溪中值粒径呈波动变化,沉积泥沙的中值粒径最小值出现在龙洞河消落带上部为 5.8 μm,最大值出现在磨刀溪的消落带下部为 25.74 μm.

(2)不同高程带的沉积泥沙的容重、养分元素和重金属含量独立样本 t 检验表明,各指标差异性均不显著($P > 0.05$),说明消落带上部和下部之间沉积泥沙特征差异不显著.

(3)支流库湾消落带沉积泥沙重金属评价均表现为无污染或轻度污染,中游的支流库湾消落带重金属含量较上游高. 只有 Zn 元素在珍溪河、龙洞河和龙河属于无-中的污染程度,磨刀溪的 Pb 元素属于无-中的污染程度.

参考文献:

[1] Zhang Q F, Lou Z P. The environmental changes and mitigation actions in the Three Gorges Reservoir region, China [J]. Environment Science & Policy, 2011, **14**(8): 1132-1138.

[2] Fu B J, Wu B F, Lü Y H, *et al*. Three Gorges Project: Efforts and challenges for the environment [J]. Progress in Physical Geography, 2010, **34**(6): 741-754.

[3] Xu X B, Tan Y, Yang G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions[J]. Earth-Science Reviews, 2013, **124**: 115-125.

[4] Su X L, Zeng B, Huang W J, *et al*. Effects of the Three Gorges Dam on preupland and preriparian drawdown zones vegetation in the upper watershed of the Yangtze River, P. R. China[J]. Ecological Engineering, 2012, **44**: 123-127.

[5] Yang F, Wang Y, Chan Z L. Review of environmental conditions in the water level fluctuation zone: Perspectives on riparian vegetation engineering in the Three Gorges Reservoir [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2015, **18**(2): 240-249.

[6] Shen G Z, Xie Z Q. Three Gorges Project: Chance and challenge [J]. Science, 2004, **304**(5671): 681.

[7] Li K F, Zhu C, Wu L, *et al*. Problems caused by the Three Gorges Dam construction in the Yangtze River basin: a review [J]. Environmental Reviews, 2013, **21**(3): 127-135.

[8] 苏维词. 三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J]. 长江科学院院报, 2004, **21**(2): 32-34, 41.

[9] 周永娟, 仇江啸, 王姣, 等. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2010, **30**(24): 6726-6733.

[10] 郭劲松, 黄轩民, 张彬, 等. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 213-219.

[11] Bao Y H, Tang Q, He X B, *et al*. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Hydrology Research, 2015, **46**(2): 212-221.

[12] 王海云, 程胜高, 黄磊. 三峡水库"藻类水华"成因条件研究[J]. 人民长江, 2007, **38**(2): 16-18.

[13] 谢德体, 范小华, 魏朝富. 三峡水库消落区对库区水土环境的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, **29**(1): 39-47.

[14] Sun R, Yuan X Z, Chen Z L, *et al*. Effect of three georges reservoir (Yangzi River) on the plant species richness in drawdown zone downstream the tributary river (Pengxihe River) [J]. Russian Journal of Ecology, 2012, **43**(4): 307-314.

[15] 郭劲松, 贺阳, 付川, 等. 三峡库区腹心地带消落区土壤氮磷含量调查[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(3): 311-317.

[16] 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 7-12.

[17] Tang Q, Bao Y H, He X B, *et al*. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Science of the Total Environment, 2014, **479-**

480：258-266.

[18] 胥焘，王飞，郭强，等. 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析[J]. 环境科学，2014，**35**(4)：1502-1508.

[19] 叶琛，李思悦，卜红梅，等. 三峡水库消落区蓄水前土壤重金属含量及生态危害评价[J]. 土壤学报，2010，**47**(6)：1264-1269.

[20] 常超，谢宗强，熊高明，等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报，2011，**26**(7)：1236-1244.

[21] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal，1969，**2**(3)：108-118.

[22] 唐将，钟远平，王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报，2008，**16**(4)：848-852.

[23] 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价[J]. 环境科学，2012，**33**(5)：1693-1699.

[24] 肖尚斌，刘德富，王雨春，等. 三峡库区香溪河库湾沉积物重金属污染特征[J]. 长江流域资源与环境，2011，**20**(8)：983-989.

[25] Ye C，Li S Y，Zhang Y L，*et al*. Assessing heavy metal pollution in the water level fluctuation zone of China's Three Gorges Reservoir using geochemical and soil microbial approaches[J]. Environmental Monitoring and Assessment，2013，**185**(1)：231-240.

[26] 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.

[27] 喻菲，张成，张晟，等. 三峡水库消落区土壤重金属含量及分布特征[J]. 西南农业大学学报(自然科学版)，2006，**28**(1)：165-168.

[28] 周怀东，袁浩，王雨春，等. 长江水系沉积物中重金属的赋存形态[J]. 环境化学，2008，**27**(4)：515-519.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 3

Mar. 15, 2016

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supermicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration ····· CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, *et al.* (789)

Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination ····· ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, *et al.* (795)

Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC ····· HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, *et al.* (801)

Different Air Pollution Situations of O_3 and $PM_{2.5}$ During Summer in Beijing ····· WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, *et al.* (807)

Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013 ····· WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, *et al.* (816)

A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of $PM_{2.5}$ in Shanghai ····· CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, *et al.* (825)

Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China ····· HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, *et al.* (834)

Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO_2/PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor ····· LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, *et al.* (847)

Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay ····· KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, *et al.* (854)

Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data ····· DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, *et al.* (862)

Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir ····· ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, *et al.* (873)

Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas ····· CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, *et al.* (884)

Distribution Characteristics and Source Apportionment of *n*-Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section ····· FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, *et al.* (893)

Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin ····· XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, *et al.* (900)

Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water ····· WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, *et al.* (910)

Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary ····· YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, *et al.* (917)

Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China ····· XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, *et al.* (925)

Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir ····· WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, *et al.* (935)

Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River ····· TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, *et al.* (942)

Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period ····· HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, *et al.* (950)

Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area ····· LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, *et al.* (955)

Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns ····· ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, *et al.* (963)

Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body ····· GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, *et al.* (970)

Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland ····· WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, *et al.* (980)

Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF ····· ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, *et al.* (988)

Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution ····· WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, *et al.* (994)

Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite ····· GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, *et al.* (1000)

Effects of Fulvic Acid on Absorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments ····· LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, *et al.* (1008)

Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anonic Dyes ····· SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, *et al.* (1016)

Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex ····· FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, *et al.* (1023)

Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil ····· XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (1032)

Adsorptive Stabilization of Soil Cr(Ⅵ) Using HDTMA Modified Montmorillonite ····· JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, *et al.* (1039)

Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge ····· WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, *et al.* (1048)

Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater ····· ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, *et al.* (1055)

Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation ····· ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, *et al.* (1061)

Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature ····· DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, *et al.* (1070)

Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria ····· SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, *et al.* (1075)

Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: *Arthrobacter arilaitensis* ····· HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, *et al.* (1082)

Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment ····· SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, *et al.* (1089)

Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province ····· SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)

Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices ····· ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, *et al.* (1106)

Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration ··· ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, *et al.* (1114)

Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration ··· FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, *et al.* (1121)

C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau ····· ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, *et al.* (1128)

Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou ····· ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, *et al.* (1139)

Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil ····· CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, *et al.* (1147)

Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel ····· ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)

Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash ····· WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, *et al.* (1163)

Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries ····· GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, *et al.* (1171)

《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 3 月 15 日　第 37 卷　第 3 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 3　Mar. 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