

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

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

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国 2000 ~ 2010 年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区 VOCs 特征及 O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体 CDOM 中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH 对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA 对 Pd/Fe 体系还原脱氯 2,4-D 的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的 A ² O 与 BIOLAK 活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米 Ni/Fe 用于去除染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和 1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对 Cd 淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根 (AM) 对香蒲耐 Cd 胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状 Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及 N ₂ O 产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事 (557) 《环境科学》征稿简则 (594) 信息 (419,442,781)	

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价

余成^{1,2}, 陈爽^{1*}, 张路¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 坦噶尼喀湖是非洲第二深的湖泊, 拥有独特的生态系统, 为沿湖居民提供丰富的鱼类蛋白, 随着沿湖社会经济的发展和人口的快速增长, 坦噶尼喀湖面临着环境污染威胁。为了揭示坦噶尼喀湖的重金属外源输入, 本研究采集了湖泊东北部入湖河流的表层沉积物(16 个样点), 对沉积物重金属含量进行分析, 并应用潜在风险指数法对沉积物重金属的生态风险进行了评价, 同时分析了重金属分布与土地利用的关系。结果表明 Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 的平均含量分别为 18.4、21.2、0.05、6.6 mg·kg⁻¹ 以及 8.4 ng·g⁻¹; Zn、Pb、Cd 的含量最高值均位于布琼布拉城市入湖河流。潜在生态风险指数(RI)表明, 各重金属在各点位的生态风险系数均较低, 其中 Cd > Hg > Cu > Pb > Zn, Cd 是最主要的生态风险贡献因子, 所有点位均属于低潜在生态风险区。重金属含量与土地利用的关系表明, 城镇附近采样点重金属含量最高, 其次是河口湿地, 远离城镇的林草地重金属含量最低, 表明人类活动会增加河流表层沉积物重金属含量。在以后的研究中, 对城镇附近及河口湿地应给予重点关注。

关键词: 坦噶尼喀湖; 入湖河流; 表层沉积物; 重金属; 潜在生态风险; 土地利用

中图分类号: X142; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0499-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.013

Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika

YU Cheng^{1,2}, CHEN Shuang^{1*}, ZHANG Lu¹

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the second deepest lake in Africa, Lake Tanganyika plays an important role in supplying fish protein for citizens in the catchment. However, the lake is increasingly threatened by environmental pollution with the development of social economy and expanding of population. In order to reveal the external source of heavy metals in Lake Tanganyika, 16 surface sediment samples from the rivers which flow into the northeast of the lake were collected and analyzed. Besides the contents, the potential ecological risk indices (RI) of each heavy metal were also analyzed. Furthermore, the relationship between land use and the spatial distribution of heavy metals was also discussed. The average contents of Cu, Zn, Cd, Pb and Hg were 18.4, 21.2, 0.05, 6.6 mg·kg⁻¹ and 8.4 ng·g⁻¹, respectively, with the maximum values of Zn, Pb and Cd located in Bujumbura urban rivers. The data indicated that all the inflow rivers were at low potential ecological risk. RI of heavy metals ranked as the following order: Cd > Hg > Cu > Pb > Zn, as Cd being the key element contributing to the risk. The relationship between land use and heavy metals showed that the contents of heavy metals were highest in urban areas, followed by estuarine wetlands, and woodlands were least polluted by heavy metals. This distribution type implied that human activities could cause the heavy metal accumulation in the surface sediments of nearby rivers. The urban areas and estuarine wetlands need to be concerned in the further study.

Key words: Lake Tanganyika; inflow river; surface sediments; heavy metals; potential ecological risk; land use

在自然水生生态系统, 重金属含量通常处于较低水平。然而, 随着人口的快速增长和城市化进程的加快, 不合理的自然资源开发以及大量工业、农业生产活动所带来的水体重金属污染事件时常发生。通常, 水体中重金属主要来源于地质背景沉积、地表径流和大气干湿沉降等方面, 重金属进入水体以后, 可通过悬浮颗粒物沉降、化学沉淀等作用, 逐步蓄积至沉积物中。在环境条件(如 pH 值、氧化还原电位、盐度等)发生变化时, 沉积物中重金属会通过一系列的物理、化学及生物过程重新释放到上覆

水体中, 直接或间接地对水生生物产生致毒致害作用, 并通过生物富集、食物链放大等过程进一步影响人类健康^[1~4]。因此, 开展沉积物重金属方面的调查及研究对于环境安全和生物的健康十分重要。

关于沉积物重金属的研究工作在发达国家以及中国、印度等发展中国家开展得较多^[5~9],

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-09-10

基金项目: 中国科学院海外科教基地建设计划项目(SAJC201319)

作者简介: 余成(1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土地利用变化的水环境效应, E-mail: yucheng823@126.com

* 通讯联系人, E-mail: schens@niglas.ac.cn

而发展相对落后的非洲国家研究较少。尽管非洲工、农业活动水平较低,但是近年来工业采矿、化石燃烧、农业化肥及杀菌剂的大量使用等导致河流、土壤中重金属含量逐渐增加^[10]。同时,由于环境法规的不完善和执行不力,水生资源管理落后,对污水排放控制意识淡薄等,重金属污染问题不能忽视。

坦噶尼喀湖(Lake Tanganyika)位于赤道以南(3°~9°S),是世界第2深(最深处约1 470 m)、面积第6大(约32 900 km²)的湖泊,湖水永久分层,是一个几乎封闭的系统,大气沉降、降水和河流输入是主要外源输入。坦噶尼喀湖拥有很多特有物种^[11],是沿湖地区重要的水源和动物蛋白的主要来源^[12];除了两条最主要的人湖河流,布隆迪的Rusizi河和坦桑尼亚的Malagarasi河外,沿湖分布许多小河流。随着沿湖人口的剧烈增加和工农业活动的发展,部分河流、海湾和港口出现水质污染现象,尤其是位于流域东北部的城市河流,受人类活动影响强烈,水土流失、水质污染等环境问题严峻^[13,14]。坦噶尼喀湖流域重金属相关研究主要针对湖泊鱼类、湖泊沉积物等,如 Sindayigaya 等^[15]发现 90 年代坦噶尼喀湖鱼类重金属含量与其他湖体相比较低;Chale 等^[16]发现湖内双壳类 Pb 和 Fe 含量较高,湖泊近岸沉积物重金属含量远高于远岸沉积物。Semu 等^[10]研究表明坦桑尼亚农田土壤和烟叶中重金属含量与肥料和杀菌剂使用呈正相关性。以上研究对坦噶尼喀湖及其流域土壤中的重金属含量和分布规律有了初步的结论,但是缺乏对入湖河流水体及沉积物污染物的监测,难以掌握入湖河流重金属污染状况及其生态风险。本研究通过对坦噶尼喀湖入湖河流沉积物重金属的调查,了解重金属的污染状况及污染来源,并进行重金属潜在生态风险分析,以期为当地政府加强污染源控制提供数据支撑,这对于保护湖泊水生生物和生态系统,保障沿湖居民生活安全有一定的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择坦噶尼喀湖流域东北部入湖河流沉积物为研究对象,研究区域分属布隆迪共和国布琼布拉市辖区和坦桑尼亚联合共和国基戈马市辖区。布琼布拉和基戈马同属非洲中东部地区,属于热带干湿季气候,旱季与雨季区别明显,雨季一般为 10~4 月,旱季为 5~9 月。布琼布拉气温范围为 19~

29℃,平均气温 24℃,年降水量为 855 mm;基戈马地区气温范围为 19~28℃,平均气温为 23.5℃,年降水量为 977 mm。布琼布拉是坦噶尼喀湖流域最大的城市,人口密度最大,达 3 276 人·km⁻²^[17],该市囊括了布隆迪主要的工业项目如啤酒业、日用化工业、造纸业、奶制品加工业等。近年来,布琼布拉及其周边区域生态恶化持续加剧,环境问题日益突出。基戈马是位于坦桑尼亚西部的内陆城市,该市工业水平落后,经济活动以农业为主,种植的作物包括木薯、玉米、豆类、香蕉、土豆、咖啡和棕榈树等。然而,随着经济的发展和人口的迅速增长,外加该区域本身环境脆弱的特性,基戈马市及其周边水土流失现象日趋严重,环境压力持续增大。本文沿小流域河流选择代表性区域设置采样点(图 1),采集沉积物样品并进行重金属分布特征及其潜在生态风险研究。研究区土地利用类型如图 1 所示(土地利用分类数据来源于全球 30 m 分辨率土地利用产品 Globe Land 30, <http://www.globallandcover.com/>)。

1.2 样品采集

于 2014 年 3 月,在布琼布拉市 3 条主要入湖河流和坦桑尼亚基戈马 Luiche 河的支流、干流、河口湿地, Malagarasi 河河口湿地进行采样,采样点位 16 个,如表 1 所示。采用彼得森采样器采集表层沉积物样品。将采集的表层沉积物样品均匀混合后装入聚乙烯自封袋中密封,低温保存,并带回国内实验室进行预处理及分析。

表 1 采样点河流名称及位置信息
Table 1 Name and location of the sampling rivers

采样点	河流名称	经度/(°)	纬度/(°)	国家
1	Rusizi 河	29.271 1	3.352 8	布隆迪
2	Mutimbuzi 河	29.328 3	3.354 2	布隆迪
3	Mugere 河	29.352 8	3.480 1	布隆迪
4	Mtungurusi 河	29.878 9	4.606 2	坦桑尼亚
5	Luiche 河干流	29.879 6	4.605 8	坦桑尼亚
6	Luiche 河干流	29.864 8	4.651 1	坦桑尼亚
7	Mgonya 河	29.666 6	4.838 9	坦桑尼亚
8	Kidawe 河	29.831 2	4.874 5	坦桑尼亚
9	Luiche 河干流	29.740 2	4.867 9	坦桑尼亚
10	Kaseke 河	29.733 1	4.852 9	坦桑尼亚
11	Luiche 河口	29.693 8	4.927 5	坦桑尼亚
12	Luiche 河口	29.701 4	4.940 6	坦桑尼亚
13	Luiche 河口	29.705 4	4.932 7	坦桑尼亚
14	Malagarasi 河口	29.802 9	5.257 5	坦桑尼亚
15	Malagarasi 河口	29.819 8	5.234 7	坦桑尼亚
16	Malagarasi 河口	29.841 3	5.214 6	坦桑尼亚

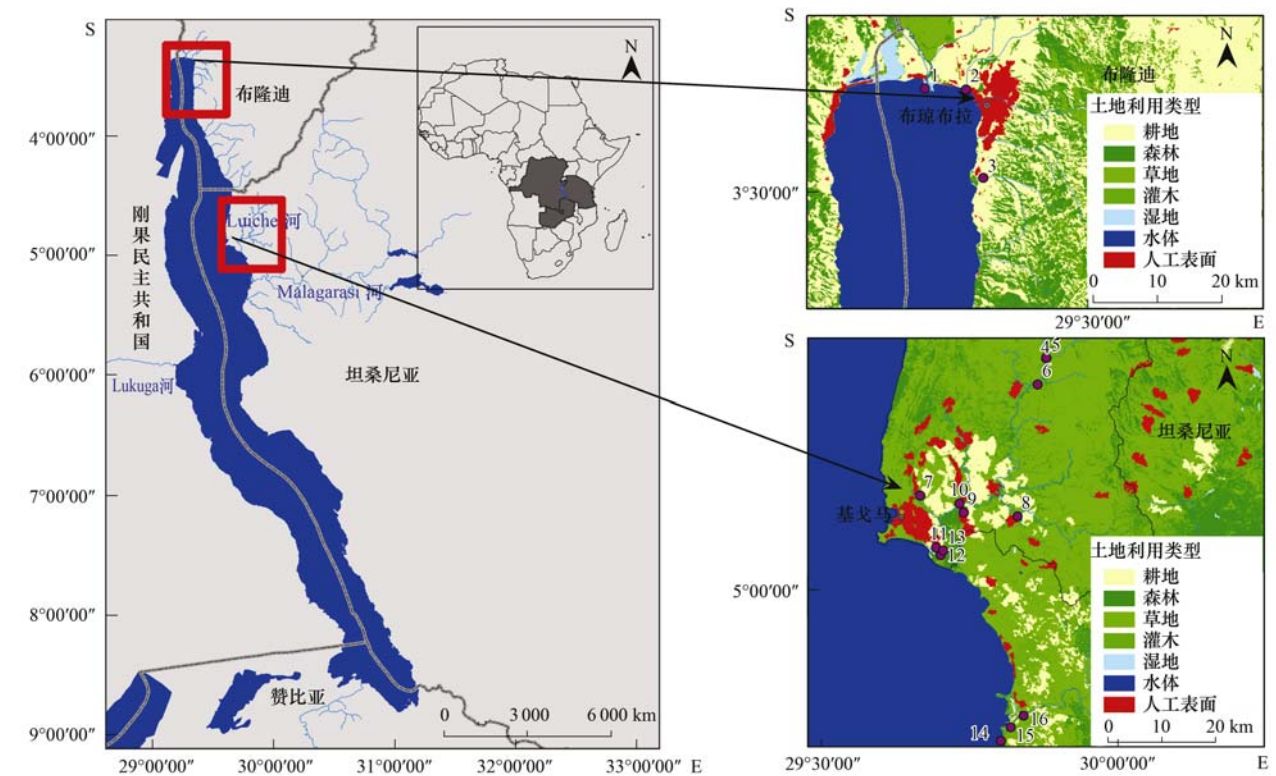


图1 研究区土地利用及采样点分布示意

Fig. 1 Land use of the study area and the location of the sampling sites

1.3 样品处理及分析方法

所采集的样品经自然风干后,去掉杂物及石块,经玛瑙研钵研磨处理,过 100 目尼龙筛,贮存备用. 重金属分析项目有: Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、Mn 和 Fe,其他金属包括: Al 和 Mg. 其中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,Fe、Al、Mn 和 Mg 用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES),Hg 采用全自动固体测汞仪测定,总有机碳(TOC)采用 EA3000 元素分析仪测定^[18].

1.4 潜在生态风险评价

沉积物重金属的生态风险采用 Hakanson 生态风险指数法(potential ecological risk index)^[19]进行评价. 潜在生态风险指数法是利用沉积学原理评价重金属污染状况以及对生物的影响,该方法不仅考虑单个金属的毒性污染,同时可以评价多种金属元素的协

同作用. 潜在生态风险指数法的计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i; (C_f^i = C_D^i / C_R^i) \quad (1)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (2)$$

式中, E_r^i 为单一重金属潜在风险指数; T_r^i 为重金属的生物毒性响应因子,反映了重金属在水相、固相和生物相之间的响应关系,本研究选择 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Hg 这 5 个指标对入湖河流表层沉积物进行潜在生态风险评价,Cu、Zn、Pb、Cd 和 Hg 的生物毒性响应因子分别为 5、1、5、30 和 40^[20]. C_f^i 为单一重金属污染指数; C_D^i 为重金属实测值; C_R^i 为重金属*i*的评价参照值(本研究选择非洲区域内陆水体未受污染沉积物重金属背景值^[21,22]. 根据 RI 的不同,将潜在生态风险划分为 4 种不同等级,如表 2 所示.

表2 E_r^i 和 RI 潜在生态风险分级标准

Table 2 Standard of the potential ecological risk according to E_r^i and RI

项目	潜在生态风险				
	低	中	高	严重	很严重
E_r^i	<40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	>320
RI	<150	150 ~ 300	300 ~ 600	>600	

2 结果与讨论

2.1 入湖河流表层沉积物重金属含量及分布特征

坦噶尼喀湖东北部入湖河流表层沉积物重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Mn、Hg 以及其他金属 Al、Mg 含量见表 3。由结果可以看出,除 Hg 外,其他金属在各河段表层沉积物中均有检出。表层沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Mn 和 Hg 的平均含量分别为 18.4、21.2、6.6、0.05、45.2、748 mg·kg⁻¹ 以及 8.4 ng·g⁻¹。Al 和 Mg 的平均含量分别为 48.9 mg·g⁻¹ 和 6.2 mg·g⁻¹。

由表 3 可得,除 Cu 外,Zn、Pb、Cd、Hg 含量均未超过 GESAMP^[21] 背景值,这几种重金属含量与 Odigie 等^[23] 在坦桑尼亚贡贝国家公园附近采集的坦噶尼喀湖湖泊沉积物重金属含量接近。Zn、Pb 及 Cd 的最大含量位于布琼布拉城市入湖河流,最低值均位于 Luiche 流域。布琼布拉城市入湖河流与

Luiche 支流、干流沉积物中 Hg 含量均较低。

有 2 个点位的 Cu 含量超过 GESAMP 背景值,占点位的 12.5%,沉积物中 Cu 含量与流域农田土壤施用肥料和杀菌剂有关^[10]。

Al、Fe、Mg、Mn 含量存在明显的区域差异,含量最高值都出现在五号点,含量最低值均出现在 7 号点。与 GESAMP^[21] 背景值相比,10 个点位 Fe 含量高于背景值,4 个点位 Mn 含量高于背景值。

将本研究与非洲其他地区的相关研究结果对比(表 4)发现,除 Fe、Mn 外,重金属含量均偏低。本研究区域处于东非坦噶尼喀湖流域,与非洲其他地区相比,工业和城市发展较慢,采矿业并不发达,因此重金属的产生量较低。同时当地市政设施水平较落后,降雨产生的径流部分并未进入河流,这也大大削减了污染物的输移量。另一方面,此区域大部分入湖河流的表层沉积物为砂质或砾石,对重金属的富集作用不明显。

表 3 表层沉积物重金属含量¹⁾

Table 3 Contents of heavy metals in surface sediments

采样点位	重金属指标								
	Cu /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹	Hg /ng·g ⁻¹	Al /mg·g ⁻¹	Fe /mg·g ⁻¹	Mg /mg·g ⁻¹	Mn /mg·kg ⁻¹
1	8.7	24.4	5.0	0.06	8	46.6	37.3	6.1	721
2	7.9	48.1	18.2	0.11 [▽]	未检出	55.3	52.1 ⁺	10.4	1 237 ⁺
3	13.8	48.4 [▽]	18.5 [▽]	0.07	14	75.8	41.6 ⁺	8.8	612
4	15.5	12.0	3.8	0.03	5	45.6	46.6 ⁺	4.7	531
5	5.1 [△]	6.2 [△]	3.3	0.02	6	78.0 [▽]	94.1 ^{▽+}	12.1 [▽]	1 715 ^{▽+}
6	45.8 ⁺	21.9	5.3	0.05	未检出	62.5	86.6 ⁺	9.7	1 366 ⁺
7	64.4 ^{▽+}	41.5	5.2	0.07	8	21.6 [△]	10.7 [△]	1.1 [△]	156 [△]
8	10.9	7.0	7.1	0.02 [△]	未检出	33.5	25.5	1.6	429
9	16.6	16.1	5.7	0.04	8	43.0	55.2 ⁺	5.9	588
10	7.2	8.6	5.1	0.04	未检出	26.7	19.1	1.8	163
11	17.2	15.3	5.6	0.04	10	43.8	41.1 ⁺	4.8	491
12	18.7	17.4	5.7	0.06	8	46.4	44.8 ⁺	5.3	564
13	15.9	14.4	5.6	0.06	6	45.8	38.1	4.2	444
14	6.8	9.8	2.6 [△]	0.04	未检出	33.7	35.9	6.0	529
15	17.9	21.1	3.9	0.04	19	58.7	45.8 ⁺	7.6	711
16	22.7	26.5	4.4	0.04	22 [▽]	64.9	49.4 ⁺	8.8	1 707 ⁺
平均值	18.4	21.2	6.6	0.05	8.4	48.9	45.2	6.2	747.8
参考值 ²⁾	33	95	19	0.11	50	—	41	—	770

1) △ 为含量最低值,▽ 为含量最高值,+ 表示超过背景值含量; 2) 参考文献[13,22]

表 4 非洲内陆不同水体沉积物重金属含量对比¹⁾/μg·g⁻¹

Table 4 Comparison of heavy metal concentrations in inland water sediments of Africa/μg·g⁻¹

地理位置	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe(×10 ³)	文献
尼罗河河口, 埃及	—	1.06	—	85.6	139.0	387	0.5	[24]
Wiwi 河, 加纳	0.21	0.16	13.4	4.7	16.0	—	—	[25]
Papenkuils 河, 南非	0.35	102.30	170.7	71.4	289.0	150	12.0	[26]
Swartkops 河, 南非	0.02	1.00	17.8	10.5	35.5	177	15.5	[26]
坦噶尼喀湖东北部入湖河流	0.01	0.05	6.6	18.4	21.2	748	45.2	本研究
背景值	0.05	0.11	19.0	33.0	95.0	770	41.0	[21,22]

1) “—” 表示缺失值

2.2 入湖河流表层沉积物重金属含量与土地利用关系

根据全球 30 m 分辨率土地利用产品 Globe Land 30,研究区用地类型可分为人工表面、耕地、林地、草地、湿地和水体这 6 类(图 2). 16 个采样点 1.5 km 缓冲区的土地利用结构如图 2 所示. 其中有 37% 的点位于(2、3、7、8、9、10)位于城镇附近,人工表面和耕地占 40% 以上; 44% 的点位于(1、11、12、13、14、15、16)位于河口湿地,草地和湿地是其主要用地类型; 19% 点位于(4、5、6)位于远离城镇的区域,草地和林地是其主要用地类型.

结合采样点位的重金属含量(表 3)可得,城镇附近的点位重金属含量相对较高,如 Cu 含量最高值出现在 7 号点,Zn 和 Pb 含量最高值出现在 3 号点,Cd 含量最高值出现在 2 号点; 根据表 5 可得,

除 Cu 和 Hg 外,Zn、Pb、Cd 的平均含量从高到低的区域依次为城镇附近、河口湿地和远离城镇的林草地,此现象说明河流沉积物重金属含量与土地利用类型密切相关,人类活动强烈的区域,由于径流输入的影响,河流表层沉积物重金属含量较高. Malagarasi 河上游分布的金矿(Geita-kahama goldfield)可能是河口湿地区域 Hg 含量高于其他两类作用区的主要原因,因为非洲地区汞广泛应用于铝矿厂.

经过实地调查,4、5 及 6 号点位所在区域多为次生草地,属于农田休耕地,周围的林地主要为棕榈林. 大片高大密植的棕榈在景观上具有森林特征,分类时被作为林地,但实为多年生油料作物,种植和生长过程中有施肥. 这些农田及棕榈林可能是导致此区域河流沉积物中 Cu 含量较高的原因.

表 5 三类作用区重金属含量

Table 5 Concentrations of heavy metals in three different functional zones					
作用区	Cu /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹	Hg /ng·g ⁻¹
城镇附近	20.1	28.3	10	0.06	7
河口湿地	15.4	18.4	4.7	0.05	11
远离城镇区(林草地)	22.1	13.4	4.1	0.03	5

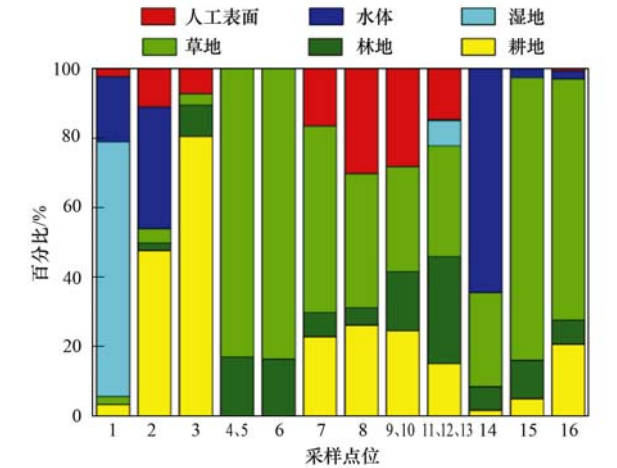


图 2 采样点 1.5 km 缓冲区土地利用结构
Fig. 2 Land use composition of buffer zones around monitoring sites

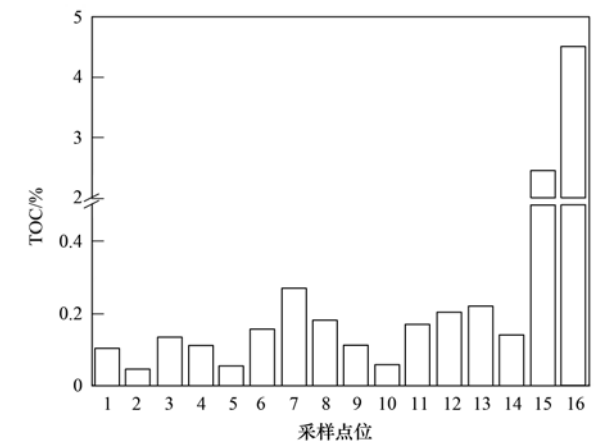


图 3 入湖河流表层沉积物 TOC 质量分数分布
Fig. 3 Distribution of the organic carbon in surface sediments in inflow rivers

2.3 表层沉积物重金属相关性分析与有机碳关系分析

河流、湖泊沉积物中各重金属元素间的相关性与元素的性质、吸附特征以及沉积环境有关,沉积物 TOC 含量是控制沉积物重金属分布特征的重要参数之一^[27]. 坦噶尼喀湖入湖河流表层沉积物 TOC 质量分数在 0.047%~4.511% 之间(图 3),TOC 质量分数最高值位于 Malagarasi 河口(15、16),其次是 Luiche 河口(11、12、13)和 7 号点,其他区域质量分数较低.

表 6 是入湖河流表层沉积物重金属含量之间以及与 TOC 含量相关关系表. 可以看出,Hg 与 TOC 显著相关,相关系数达 0.85 ($P < 0.01$),显示出 Hg 与沉积物中的有机质具有较强的结合力,沉积物中有机质的存在可能是影响 Hg 分布与富集的重要因子^[5]. Zn、Cd 及 Pb 显著相关; Al、Fe、Mg 和 Mn 显著相关($P < 0.01$). 通过以上分析说明,坦噶尼喀湖入湖河流表层沉积物重

金属元素 Zn、Cd、Pb 可能具有相似的输入源,且受沉积作用影响呈现较为相似的分布特征. Al、Fe、Mg、Mn 等元素的来源相同,其地球化学特性相近. Hg 与其他重金属元素没有显著的相关性,这可能与 Hg 在生物(微生物、藻类、水草等)的作用下富集有关^[28,29].

表 6 入湖河流表层沉积物重金属与其他金属和 TOC 相关关系¹⁾

Table 6 Relevance of heavy metals, other metals and organic carbon in surface sediments of inflow rivers

	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	Al	Fe	Mg	Mn	TOC
Cu	1.00									
Zn	0.37	1.00								
Cd	0.22	0.85 **	1.00							
Pb	-0.14	0.76 **	0.71 **	1.00						
Hg	0.11	0.31	0.01	0.02	1.00					
Al	-0.21	0.24	0.02	0.33	0.43	1.00				
Fe	-0.10	-0.14	-0.18	-0.04	-0.02	0.77 **	1.00			
Mg	-0.22	0.26	0.16	0.29	0.25	0.90 **	0.84 **	1.00		
Mn	-0.09	0.10	-0.01	0.06	0.26	0.78 **	0.81 **	0.87 **	1.00	
TOC	0.10	0.10	-0.09	-0.20	0.85 **	0.30	0.03	0.23	0.44	1.00

1) ** 表示 $\alpha=0.01$ 时显著相关, * 表示 $\alpha=0.05$ 时显著相关, $n=16$

2.4 沉积物重金属潜在生态风险评价

沉积物重金属潜在生态风险评价结果如表 7 所示,从单项风险指数来看,各重金属在各点位的生态风险系数均小于 40,均值范围为 (0.22 ~ 13.36),重金属潜在生态风险程度的大小顺序为: Cd > Hg > Cu > Pb > Zn, Cd 是最主要的生态风险贡献因子(范围为 4.21 ~ 28.91),这主要是由于 Cd 的毒性系数相对 Pb、Cu、Zn、Hg 等元素

较高,进而使得其潜在生态风险系数和生态风险指数的计算结果较大. 从综合风险指数来看,各点位均处于低潜在生态风险程度,风险指数范围为 9.07 ~ 37.62,平均值为 23.86. 从 3 个土地利用类型区的综合风险指数来看,城镇区综合风险指数平均值为 25.91,河口湿地为 25.21,林草地为 16.60,在以后的发展中应注意城镇与河口湿地的重金属污染问题.

表 7 各采样点的沉积物单项潜在生态风险指数 综合潜在生态风险指数及风险分级

Table 7 Individual and general indices of potential ecological risk, and risk grades assessment in surface sediments of inflow rivers at different sampling sites

采样点位	潜在生态风险系数 (E_i^i)					RI	风险等级
	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg		
1	1.31	0.26	15.59	1.31	6.10	24.57	低
2	1.19	0.51	28.91	4.80	—	35.41	低
3	2.09	0.51	18.60	4.88	11.54	37.62	低
4	2.34	0.13	8.16	1.00	4.32	15.95	低
5	0.77	0.07	4.21	0.88	4.91	10.84	低
6	6.93	0.23	14.45	1.40	—	23.01	低
7	9.76	0.44	18.41	1.37	6.75	36.72	低
8	1.65	0.07	5.47	1.88	—	9.07	低
9	2.51	0.17	11.38	1.50	6.60	22.16	低
10	1.10	0.09	11.94	1.33	—	14.46	低
11	2.60	0.16	11.58	1.47	8.00	23.81	低
12	2.83	0.18	15.08	1.51	6.24	25.84	低
13	2.40	0.15	15.12	1.49	4.96	24.12	低
14	1.03	0.10	10.87	0.69	—	12.70	低
15	2.71	0.22	11.90	1.03	15.28	31.14	低
16	3.44	0.28	12.02	1.16	17.39	34.28	低
平均值	2.79	0.22	13.36	1.73	8.37	23.86	低

3 结论

(1) 坦噶尼喀湖入湖河流表层沉积物中除 Cu、

Fe、Mn 外,其他重金属含量均低于非洲地区沉积物重金属背景值,同时也低于非洲其他地区河流沉积物重金属含量,造成此结果的原因主要是由于坦噶

尼喀湖沿湖社会经济发展水平较低、工农业水平落后,重金属产生量不高;且沿湖地区管网不发达,大部分径流并未进入河道,削减了污染物向河道的输移量。

(2)入湖河流重金属含量存在明显的区域差异。Zn、Pb 及 Cd 含量的最高值均位于布琼布拉城市河流,最低值均位于 Luiche 流域;Zn、Pb 及 Cd 存在显著相关性,表明这 3 种元素可能具有相似的输入源。Al、Fe、Mg 和 Mn 具有相似的空间分布特征,且显著相关,表明其具有较好的同源性。

(3)入湖河流表层沉积物重金属含量与土地利用结构关系分析表明,城镇附近点位重金属含量最高,其次为河口湿地和林草地。表明重金属含量与人类活动密切相关,人类活动强烈区域,河流表层沉积物重金属含量较高。

(4)Hakanson 潜在生态风险指数评价结果表明各重金属在各点位的生态风险系数均较低,其中 $Cd > Hg > Cu > Pb > Zn$, Cd 是最主要的生态风险贡献因子。虽然所有点位均位于低风险区,但是综合风险指数与土地利用结构密切相关,城镇附近点位综合指数最高,其次为河口湿地,林草地综合指数最低。因此在以后的研究中,应对城镇附近和河口湿地的重金属重点关注。

致谢:在非洲采样过程中,坦噶尼喀湖管理委员会(Lake Tanganyika Authority)环境执行主任 Gabreil Hazikimana 先生,课题组高群、王兆德、雷步云给予了大力帮助,孔明、唐陈杰、姚晓龙在实验测定过程中给予了帮助,申秋实对本文修改提出了很多宝贵意见。在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, **22**(6): 1470-1477.
- [2] Yu R L, Yuan X, Zhao Y H, *et al.* Heavy metal pollution in intertidal sediments from Quanzhou Bay, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(6): 664 -669.
- [3] Lim H S, Lee J S, Chon H T, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, **96**(2-3): 223-230.
- [4] 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.
- [5] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 186-193.
- [6] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价 [J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 260-265.
- [7] Jose J, Giridhar R, Anas A, *et al.* Heavy metal pollution exerts reduction/adaptation in the diversity and enzyme expression profile of heterotrophic bacteria in Cochin estuary, India [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2775-2780.
- [8] Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2775-2785.
- [9] Bryan G W, Langston W J. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review [J]. Environmental Pollution, 1992, **76**(2): 89-131.
- [10] Semu E, Singh B R. Accumulation of heavy metals in soils and plants after long-term use of fertilizers and fungicides in Tanzania [J]. Fertilizer Research, 1995, **44**(3): 241-248.
- [11] Coulter G W. Lake Tanganyika and its life [M]. London: Oxford University Press, 1991. 1-6.
- [12] Reynolds E J, Hanek G, Mölsä H, *et al.* Lake Tanganyika framework fisheries management plan: background, policy considerations and main elements. FAO/FINNIDA research for the management of the fisheries of Lake Tanganyika [R]. Bujumbura: Finnish International Development Agency, 1999.
- [13] Coulter G W. Vulnerability of Lake Tanganyika to pollution, with comments on social aspects [J]. Mitteilungen-Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie, 1992, **23**: 67-70.
- [14] Vandellanoot A, Robberecht H, Deelstra H, *et al.* The impact of the River Ntahangwa, the most polluted Burundian affluent of Lake Tanganyika, on the water quality of the lake [J]. Hydrobiologia, 1996, **328**(2): 161-171.
- [15] Sindayigaya E, van Cauwenbergh R, Robberecht H, *et al.* Copper, zinc, manganese, iron, lead, cadmium, mercury and arsenic in fish from Lake Tanganyika, Burundi [J]. Science of the Total Environment, 1994, **144**(1-3): 103-115.
- [16] Chale F M M. Trace metal concentrations in water, sediments and fish tissue from Lake Tanganyika [J]. Science of the Total Environment, 2002, **299**(1-3): 115-121.
- [17] Bigirimana J L. Urban plant diversity patterns, processes and conservation value in Sub-Saharan Africa: case of Bujumbura in Burundi [D]. Bruxelles: Université Libre de Bruxelles, 2012. 45.
- [18] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 446-457.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [20] 姜霞, 王雯雯, 王书航, 等. 竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算 [J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1189-1197.
- [21] GESAMP (IMO/FAO/UNESCO/WMO/IAEA/UN/UNEP, Joint

- Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). The review of health of the Oceans. GESAMP Reports and Studies No. 15[R]. Paris: UNESCO, 1982. 1-85.
- [22] Salomons W, Förstner U. Metals in the hydrocycle[M]. Berlin: Springer, 1984. 1-349.
- [23] Odigie K O, Cohen A S, Swarzenski P W, *et al.* Using lead isotopes and trace element records from two contrasting Lake Tanganyika sediment cores to assess watershed-Lake exchange[J]. Applied Geochemistry, 2014, **51**: 184-190.
- [24] Saad M A H, Fahmy M A. Occurrence of some heavy metals in surficial sediments from the Damietta estuary of the Nile[J]. Journées Études Pollutions Antalya (CIESM), 1985, **7**: 405-407.
- [25] Beeko C A, Biney C A. Trace metal concentrations in fish and sediment from the Wiwi; a small urban river in Kumasi, Ghana[J]. Tropical Ecology, 1991, **32**(2): 197-206.
- [26] Watling R J, Emmerson W D. A preliminary pollution survey of the Papenkuils River, Port Elizabeth[J]. Water SA, 1981, **7**(4): 211-215.
- [27] Bilali L E, Rasmussen P E, Hall G E M, *et al.* Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments[J]. Applied Geochemistry, 2002, **17**(9): 1171-1181.
- [28] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 25-32.
- [29] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 437-444.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 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