

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

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

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价

邱祖凯^{1,2}, 胡小贞^{1*}, 姚程¹, 张文慧¹, 许秋瑾¹, 黄天寅²

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 为揭示山美水库沉积物中污染物的空间分布状况, 测定了山美水库 47 个采样点 (包含 8 个柱状样) 的 TN、TP 及 OM 含量, 分析了各污染因子之间的相关性以及 C/N, 并对山美水库沉积物的污染层进行了污染状况评价。结果表明, 污染层 TN 平均含量为 $1\ 180\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, TP 平均含量为 $642\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, OM 的平均质量分数为 3.30%。其中 TN 与 TP 含量随着深度加深到正常层呈现稳定或较低的状态。污染层 C/N 整体远高于普通湖泊, 有机质大多由自然陆源贡献, 少部分由浮游动植物及藻类转化而来。相关性分析表明 TN、TP 和 OM 三者之间都呈极显著相关, 说明沉积物中氮磷多以有机形式存在, 且具有一定同源性。评价结果中有机氮及有机指数都为尚清洁的状态, 总磷为中度污染, 接近重度污染。

关键词: 山美水库; 沉积物; 氮; 磷; 有机质; 污染特征; 评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1389-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.025

Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China

QIU Zu-kai^{1,2}, HU Xiao-zhen^{1*}, YAO Cheng¹, ZHANG Wen-hui¹, XU Qiu-jin¹, HUANG Tian-yin²

(1. State Key Laboratory of Environment Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: In order to illuminate pollutants distribution characteristics in sediment of Shanmei Reservoir, sediment samples at 47 sampling stations were collected (include 8 column samples), and concentrations of total nitrogen, total phosphorus and organic matter in the sediment of each station were measured. C/N and the correlation of TN, TP and OM were also analyzed. Finally, pollution assessment for contaminated layer sediments was conducted. The results showed that the average contents of TN, TP and OM (mass fraction) were $1\ 180\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $642\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 3.30% in the contaminated layer of sediments. Concentrations of total nitrogen and total phosphorus were low and stable at the depth of the normal layer. C/N of the contaminated layer of sediments was much higher than those in normal lakes, which showed that large part of OM came from natural land-based sources. Besides, a small part of OM came from phytoplankton, zooplankton and algae. Any two of TN, TP and OM were significantly correlated. This result showed that most of the nitrogen and phosphorus were in the organic form, and they came from similar sources. Evaluation results showed that both organic index and organic nitrogen belonged to the clean category. TP was at a moderate pollution level but not far from the category of heavy pollution.

Key words: Shanmei Reservoir; sediments; nitrogen; phosphorus; organic matter; pollution characteristics; evaluation

近年来,随着社会经济的的发展和人口的激增,我国水体富营养化问题十分突出。其主要原因是由于水体中营养盐的含量不断增高^[1,2]。而沉积物是湖泊水体中营养盐的主要储蓄场所,当水体环境受到扰动时,沉积物中的营养盐就会再次进入水体,从而导致二次污染^[3~6],因此沉积物能很好地反映湖泊水体的污染程度^[7]。水库作为人工型湖泊,由于水较深、水体停留时间较长,在外源污染得到有效控制后,若沉积物受到污染则会较难恢复,长期处于富营养状态^[8~10]。而当前国内外对湖泊水体沉积物的营养盐含量、形态、空间分布以及释放机制有较多研究^[11~14],对水库沉积物的相关研究相对较少,水库是一种特殊的半人工半自然的水体,其物理、化

学及生态特征和湖泊相比会有所不同, Kaushik 等^[15]和 Burford 等^[16]的研究表明,水库相比湖泊与河流对污染物的截留沉积效果更明显,因此水库沉积物具有较高的研究价值^[17~19]。

山美水库是泉州市一座以灌溉为主,结合防洪、发电等综合利用的大型水库工程,也是泉州下属晋江、惠安、丰泽等 8 个市、县、区的主要供水水源,担负着 400 多万人的生活及生产用水。近年来,

收稿日期: 2015-11-06; 修订日期: 2015-11-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07510-001)

作者简介: 邱祖凯 (1991~), 男, 硕士, 主要研究方向为生态环境评价与修复, E-mail: 815562473@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: 1076850663@qq.com

由于流域周边的工业、农业以及畜牧业的影响,山美水库一直处于潜在的富营养化状态^[20]. 周真明等^[21]2006 年对山美水库流域沉积物氮磷的污染状况进行过研究,解析了其污染物的分布特征及来源,但是监测点位布置的较少,而且时间上也较为久远. 本文主要对山美水库的水库区沉积物氮、磷及有机质的含量、分布特征及相关性进行研究,并对其污染现状进行评价,以期为水库水污染控制及富营养化治理提供基础数据及科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山美水库($25^{\circ}09' \sim 25^{\circ}13'N$, $118^{\circ}23' \sim 118^{\circ}27'E$)是一座典型的亚热带山区深水水库. 1972 年建成投产,主库区位于福建泉州九都镇西部,水库库容为 4.72 亿 m^3 ,集雨面积 1 023 km^2 ,正常蓄水位 96.48,水深 15.3 ~ 46.6 m,年均出库水量约为 8.97 亿 m^3 . 水库的主要来水有三处,即上游的桃溪和海洋溪以及德化县大樟溪龙门滩水库跨流域调水. 山美水库污染来源主要是上游的农业面源污染以及桃溪流域永春县城的工业及生活污水. 山美水库作为当地重要水源地即承载着当地人口的生存与发展,也遭受了经济发展所带来的污染,整体呈现富营养化趋势^[22].

1.2 样品的采集与处理

为获取沉积物的基础数据,根据山美水库的水域功能将其分为入库区、中部区、近坝区和库尾区,在 4 个区总共布置 47 个采样点(1 ~ 12 号为入库区,13 ~ 23 号为中部区,24 ~ 37 号为近坝区,38 ~ 47 号为库尾区),采样点位见图 1. 其中在每个分区选取两个点位,采集柱状样(入库区的 8 和 11 号点位,中部区的 19 和 21 号点位,近坝区的 29 和 36 号点位,库尾区的 45 和 46 号点位),在采集柱状沉积样时,根据沉积物的表观特性由上至下将其分为污染层、过渡层和正常层,其中污染层是淤泥或以淤泥为主,流塑或流塑-软塑、部分点位有臭味,厚度在 3 ~ 40 cm 之间. 过渡层位于污染层之下厚度在 12 ~ 40 cm 之间,为淤泥质、流塑或半流塑、有臭味,偶见腐殖质,部分点位有薄沙,可塑性较好. 正常层位于过渡层之下,厚度在 10 ~ 40 cm 之间,为淤泥粉质黏土,流塑-软塑,微臭,切面较光滑,可塑性较差. 每一层的样品在该层底部采取,其中过渡层一般再分为 2 ~ 3 层,以便更好地研究其分布特征.

于 2015 年 4 月采用彼得森采泥器采集沉积物

污染层样,需要采集柱状样的采用沉积物柱状采集器采集,将采集的样品放入干净的聚乙烯自封袋中,然后带回实验室低温保存. 筛选一部分的样品进行冷冻干燥,另一部分保留以作备用. 冷冻干燥后的样品经研磨过 100 目的筛子分装于较小的聚乙烯袋中.

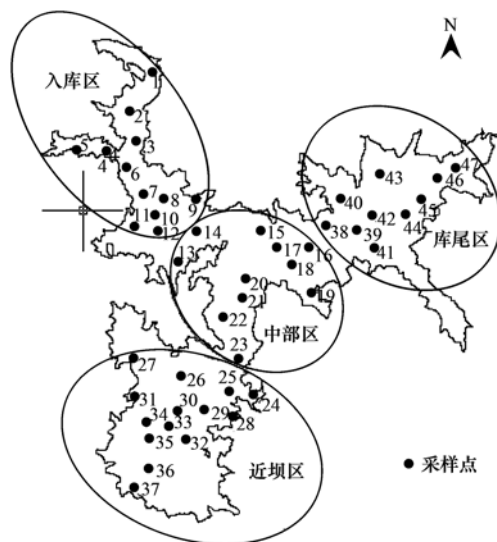


图 1 山美水库沉积物采样点位布置示意

Fig. 1 Location of sediment sampling sites of Shanmei Reservoir

对山美水库的沉积物样品进行总氮、总磷以及有机质的测定,其中总氮采用半微量凯氏定氮法,总磷采用 SMT 法,有机质采用重铬酸钾容量法^[23].

2 结果与讨论

2.1 污染层 TN 含量及其空间分布

山美水库沉积物污染层 TN 含量及空间分布见图 2.

山美水库沉积物污染层 TN 的平均含量为 1 180 $mg \cdot kg^{-1}$,其含量变化范围为 262 ~ 2 307 $mg \cdot kg^{-1}$,空间分布差异较大. 部分区域污染较为严重,如 17 (图 2 的中部)、46、47 号点位(图 2 的东北部)附近,沉积物总氮污染严重,均高于 2 000 $mg \cdot kg^{-1}$,而部分区域沉积物污染程度较轻,如 3、28、31、38 号点位附近(图 2 中颜色较浅区域),沉积物中总氮低于 500 $mg \cdot kg^{-1}$. 从各个分区的污染状况来看,库尾区(1 340 $mg \cdot kg^{-1}$) > 中部区(1 320 $mg \cdot kg^{-1}$) > 入库区(1 082 $mg \cdot kg^{-1}$) > 近坝区(1 040 $mg \cdot kg^{-1}$),其中库尾区与中部区的总氮含量明显高于入库区及近坝区,库尾区的总氮含量较高和该区域水较深且水动力交换较弱有关,泥沙淤积的时间较长,淤积较严重,另外水库东北边有村镇,村镇生活及农田面源带

来污染物直接入库. 而中部区处于众水汇入的区域, 水流从入库区流入中部区时, 断面突然拓宽, 流速减慢, 泥沙都在此处沉积, 并且受到水库水流顶托的影响, 此处的泥沙淤积也较严重^[24]. 此次采样期间处于枯水期, 大坝每天都向下游供水所以入库区及近坝区水流动较为明显, 水动力交换较强, 不利于污染物的沉积, 另外近坝区的大坝对于水体具有明显的截留作用, 这会使得周边区域的沉积物污染层发生剧烈的翻腾, 使得本贮存在沉积物中的污染物吸附在坝上或者是悬浮于水体当中.

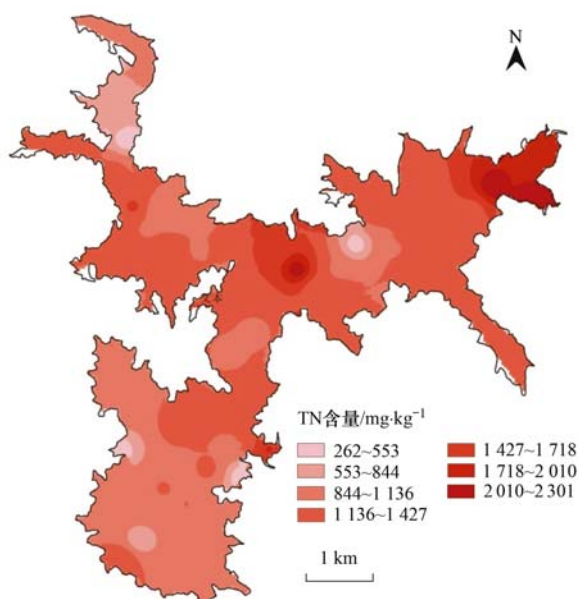


图2 山美水库沉积物污染层总氮含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of total nitrogen (TN) content in the contaminated layer of sediments of Shanmei Reservoir

2.2 污染层 TP 含量及其空间分布

山美水库沉积物污染层 TP 含量及空间分布见图 3.

山美水库沉积物污染层 TP 的平均含量为 $642 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其含量变化范围为 $161 \sim 1115 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 空间分布差异较大. 山美水库整体上 TP 污染较为严重, 如 7 和 11~17 号点位所处区域(图 3 中部及偏西部区域), TP 含量基本都高于 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在 17 号点位总磷更是达到 $1115 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 污染十分严重. 按照 US EPA(美国国家环保署)所制定的相关污染标准^[25], 山美水库沉积物整体已经接近重度污染($650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 部分区域已严重超过重度污染的规定值. 另外 TP 的分布状况与 TN 的分布状况有所不同, TN 在局部区域较高且污染严重区域较分散. 而 TP 则是存在一整片区域含量都较高的现象, 如图 3 中部及偏西部区域, 这是由于 TP 来源与 TN

有所不同, TN 主要来源于畜禽养殖、城镇生活、工业和农业污染, 而 TP 除了上述来源外, 上游泥沙的汇入是其主要来源之一^[7], 上述污染严重区域正处于水流速减缓, 泥沙沉积的区域. 从各个分区的污染状况来看, 中部区($749 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 入库区($670 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 库尾区($647 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 近坝区($530 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), TP 的区域污染状况也与 TN 有所差别, 因为水库沉积物本身就是一个极其复杂的体系, 各个污染因子都有其特性, 规律并不相同. 其中入库区的 TP 较高是由于部分含磷较高的泥沙在入库区即沉淀. TP 与 TN 的污染特征也有所相同的地方, 一是它们整体都表现为中部区较高的规律, 这与苟婷等^[26]在高州水库的研究结果类似. 二是近坝区的污染状况都相对较轻.

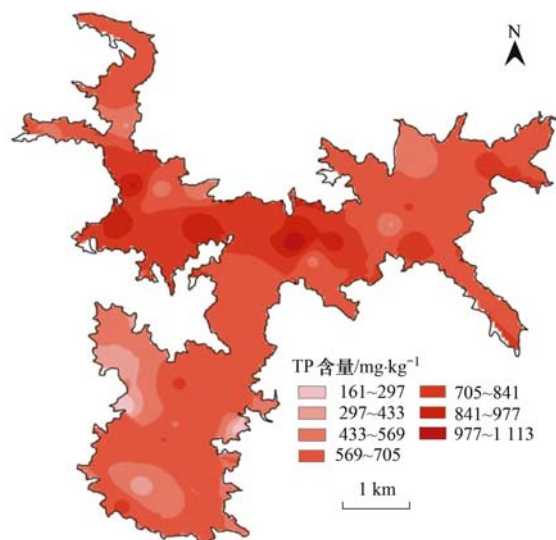


图3 山美水库沉积物污染层总磷含量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of total phosphorus (TP) content in the contaminated layer of sediments of Shanmei Reservoir

2.3 污染层 OM 含量及其空间分布

山美水库沉积物污染层 OM 含量及空间分布见图 4.

沉积物中的 OM 能够与重金属、有机物等发生一系列复杂的物理、化学反应, 是自然界中比较重要的一种胶体, 能较好地反映水体沉积物的营养状况^[27]. 山美水库沉积物污染层 OM 的平均含量(质量分数)为 3.30%, 其含量变化范围为 1.22%~5.23%, 空间分布差异较大, 其中 12、15、17、20、23 和 41 号点位(图 4 中颜色较深区域)OM 含量较高都超过 5%, 污染相对比较严重, 这与 TN 及 TP 的分布状况都有所不同, 据现场采样考察, 上述污染严重区域周边都有养殖鱼类, 养鱼过程中投放的一些有机饲料, 以及大量鱼类的排泄物等是上述点位

OM 较高的主要原因. 从各个分区的污染状况来看, 中部区 (4.09%) > 库尾区 (3.36%) > 近坝区 (2.95%) > 入库区 (2.94%), 整体分布形势与 TN 及 TP 类似, 即呈现中部区高、入库区及近坝区较低的特征. 这表明入库及出库水流作用是山美水库沉积物污染空间分布的主要影响因素, 这与国内相关研究成果较为相似, 即认为水动力因素是影响沉积物污染空间分布的主要因素^[28].

2.4 TN 和 TP 垂直变化及其空间分布

山美水库沉积物 TN 和 TP 的垂直变化及空间分布见图 5.

山美水库污染层、过渡层和正常层三者之间的 TN 含量没有显著差异 ($P > 0.05$), 其中污染层与正常层的 TN 含量呈显著差异 ($P < 0.05$), 但过渡层与污染层及正常层都没有显著差异 ($P > 0.05$), 这表明山美水库 TN 含量在垂向上变化并不大, 只有当深度加深到一定程度, 才有显著变化. 山美水库污染层、过渡层和正常层三者之间的 TP 含量呈极显

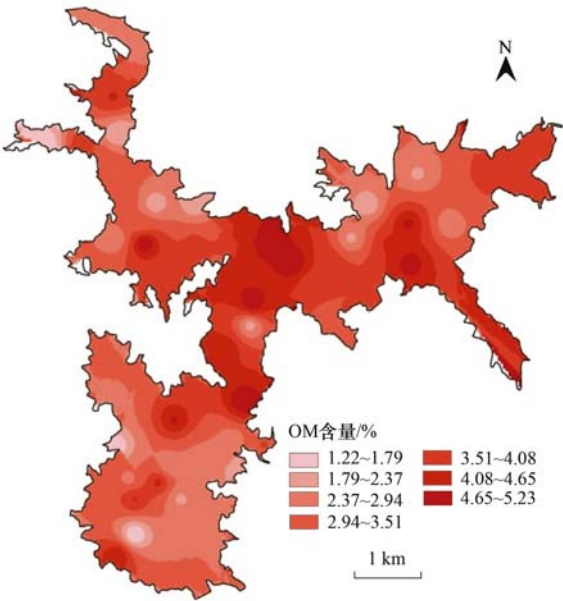


图 4 山美水库沉积物污染层有机质含量的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of organic matter (OM) content in the contaminated layer of sediments of Shanmei Reservoir

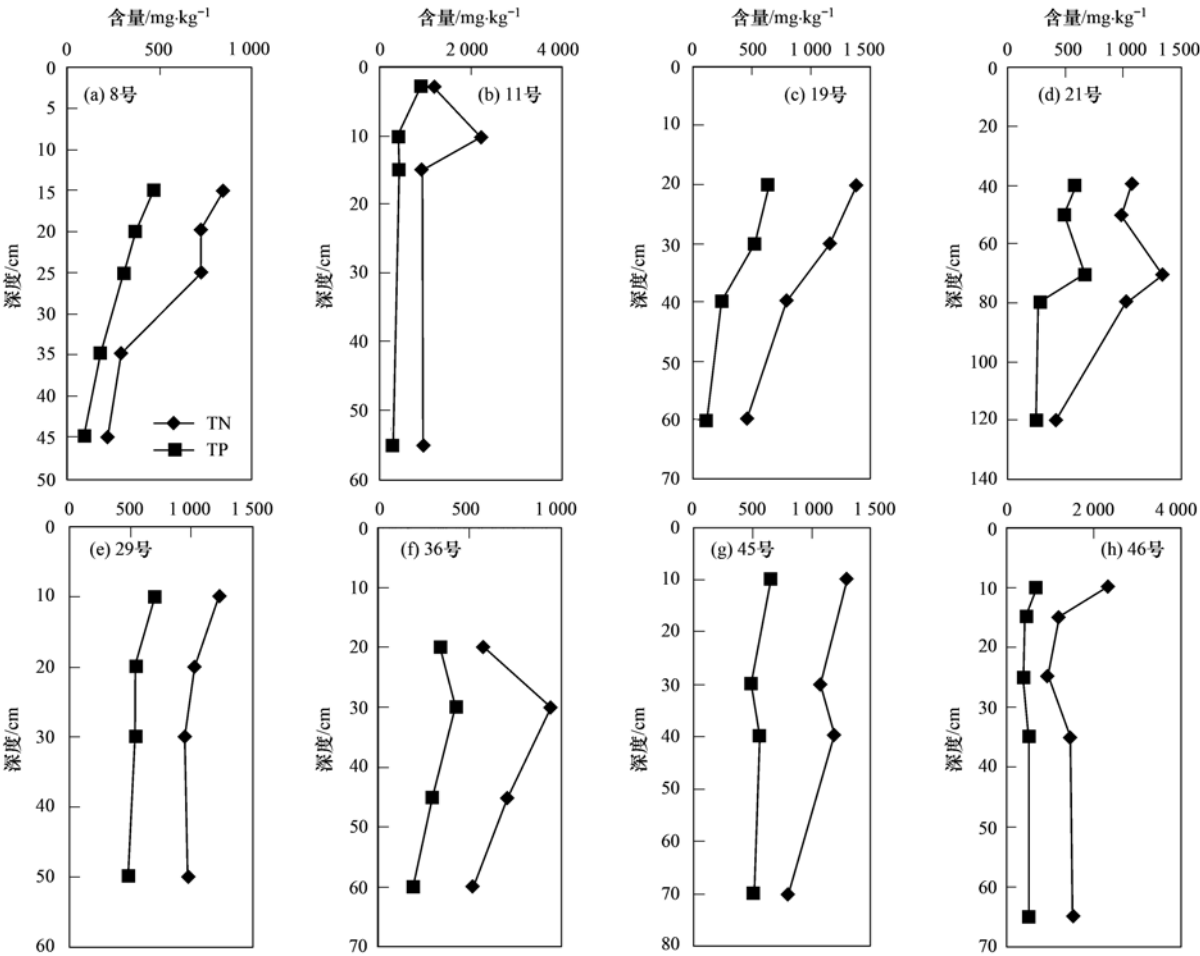


图 5 山美水库沉积物 TN 和 TP 含量及垂直分布
Fig. 5 Content and vertical distribution of total nitrogen and total phosphorus contents in sediments of Shanmei Reservoir

著差异($P < 0.01$),其中污染层与正常层的 TP 含量呈极显著差异($P < 0.01$),过渡层与污染层的 TP 含量呈显著差异($P < 0.05$),过渡层与正常层则没有显著差异($P > 0.05$),相对而言,TP 含量在垂直剖面上的差异性比 TN 大,这可能与山美水库整体水深有关,由于水深较深,污染层就已经处于一定的厌氧环境,促进了反硝化,使得污染层 TN 含量较低,让 TN 的垂向差异不明显,而含氧量对 TP 影响不大. 所选 8 个柱状样的垂直变化并不完全相同,但就其正常层 TN 和 TP 含量来看,要么是所有分层中最小,要么与其上一层含量相近,即当深度达到正常层时,TN 和 TP 含量较小且变化不大. 按 TN 和 TP 含量的垂直变化来看,入库区 8 号点位的 TP 和中部区 19 号点位 TN 与 TP 含量是随深度加深,逐渐降低,其余点位在过渡层都有所波动,并不是一直保持稳定的随深度下降趋势. 按照 EPA 制定的低污染标准($TN < 1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $TP < 420\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),入库区深度达到 15 cm 时,达到低污染标准,中部区的 19 号点位深度达到 30 cm 时,达到低污染标准,近坝区深度达到 30 cm 时,达到低污染标准. 剩余中部区 21 号点位及库尾区点位都处于高污染区域,深度达到正常层时,仍是不能达到低污染标准.

2.5 沉积物污染层中 C/N 比值

沉积物的 C/N 通常被用来分析沉积物中有机质的来源,这是因为不同的生物具有不同的 C/N,水生生物为 2.8 ~ 3.4,浮游动物与浮游植物为 6 ~ 13,藻类为 5 ~ 14,高等植物为 14 ~ 23,维管束陆生植物的 C/N 通常大于 20,而陆生禾木科或莎草科植物 C/N 可以高达 45 ~ 50^[19],总体来说,C/N 较高的一般表明为陆源有机质,较小的代表水体自身有机质. 山美水库沉积物污染层的 C/N 空间分布如图 6.

山美水库沉积物污染层 C/N 平均为 17.6,其变化范围为 6.1 ~ 46.2,空间分布差异非常大. 有 59.6% 都高于 14,这表明陆源物质输入的有机质是山美水库中有机质的主要来源. 剩下的 40.4% 也都高于 3.4,基本由浮游动植物及藻类转化而来. 就 C/N 而言,山美水库与一般湖泊相比有较大差异,一般湖泊沉积物的 C/N 处于 6 ~ 14^[29,30],一方面可能是因为山美水库陆源物质输入相对较多,另一方面山美水库相比一般湖泊水深较深,换水周期较长,沉积物中的有机质基本没有迁移,长期淤积,另外正由于水深较深,容易形成厌氧环境,反硝化作用会降低 N 的含量,进一步使 C/N 增高.

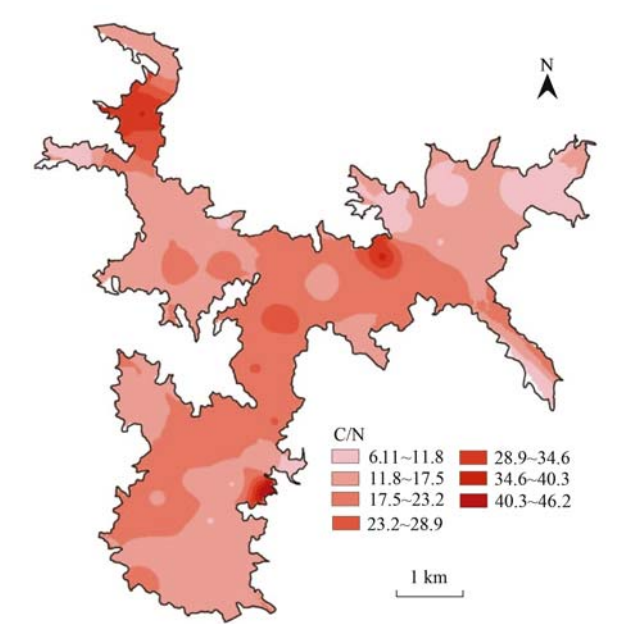


图 6 山美水库沉积物污染层 C/N 空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of C/N in the contaminated layer of sediments of Shanmei Reservoir

2.6 沉积物污染层中营养盐相关性分析

为探究山美水库沉积物污染层 TN、TP 和 OM 的相关性关系,采用 SPASS 22.0 对它们的含量进行 Pearson 相关性分析,具体结果见表 1.

表 1 山美水库沉积物污染层中有机质、总氮及总磷相关性分析¹⁾

Table 1 Correlations of organic matter(OM), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the contaminated layer of sediments of Shanmei Reservoir			
	OM	TN	TP
OM	1		
TN	0.523 **	1	
TP	0.540 **	0.587 **	1

1) ** 表示极显著相关,(样本数 = 47,显著性水平 $P < 0.01$)

根据表 1,OM、TN 和 TP 三者之间均呈极显著相关,且相关系数接近,相关研究表明水体沉积物总氮中的 70% ~ 90% 是以有机氮的形式存在的^[31],山美水库沉积物 TN 与 OM 的相关关系从侧面验证了该研究结果. TP 与有机质呈极显著相关是因为有机质也是磷的重要载体,相关研究表明,在沉积物中有机质和 P 尤其是 Po(有机磷)的生物地球化学循环有密切联系^[32,33]. TN 与 TP 之间较好的相关性则表明 TN 与 TP 的来源具有一定的同源性,就本研究而言,上游区域农业面源以及部分工业及生活污水是山美水库沉积物 TN 与 TP 的最主要来源之一,并且 TN 与 TP 都受到山美水库水动力因素的影响.

3 山美水库沉积物污染状况评价

当前仍缺乏统一的评价沉积物中营养盐状况的方法,常用的方法有富集系数法、有机指数法(包含有机氮评价)、污染指数法等^[34,35]. 其中采用最多的有机指数法缺乏对磷的评价,因此本研究在采用有机指数法(表2)评价山美水库碳氮的污染状况的同时,采用污染指数法评价山美水库磷的污染状况.

3.1 评价方法与评价标准

有机指数法常常被用来评价沉积物的营养状况,而有机氮则是判断沉积物所受氮污染程度的重要指标(表3). 计算方法和评价标准如下:

有机指数 = 有机碳(%) × 有机氮(%)

有机碳(%) = 有机质(%) ÷ 1.724

有机氮(%) = 总氮(%) × 95% (其中总氮需换算成百分比单位形式,即1 000mg·kg⁻¹ = 0.1%)

表2 沉积物有机指数评价标准

Table 2 Evaluation standards of organic index in sediments				
项目	有机指数			
	<0.05	0.05~0.2	0.2~0.5	≥0.5
类型等级	清洁 I	较清洁 II	尚清洁 III	有机污染 IV

表3 沉积物有机氮评价标准

Table 3 Evaluation standards of organic nitrogen in sediments				
项目	有机氮/%			
	<0.033	0.033~0.066	0.066~0.133	≥0.133
类型等级	清洁 I	较清洁 II	尚清洁 III	有机氮污染 IV

表5 山美水库沉积物污染层有机氮及有机指数

Table 5 Values of organic index and organic nitrogen in the contaminated layer of sediments of Shanmei Reservoir										
分区	有机氮					有机指数				
	最大值/%	最小值/%	平均值/%	类型	等级	最大值	最小值	平均值	类型	等级
入库区	0.141	0.041	0.103	尚清洁	III	0.404	0.044	0.181	较清洁	II
中部区	0.211	0.102	0.125	尚清洁	III	0.639	0.126	0.305	尚清洁	III
近坝区	0.164	0.025	0.099	尚清洁	III	0.367	0.028	0.186	较清洁	II
库尾区	0.219	0.035	0.127	尚清洁	III	0.494	0.045	0.258	尚清洁	III
全库	0.219	0.025	0.112	尚清洁	III	0.639	0.028	0.228	尚清洁	III

表6 山美水库沉积物污染层 TP 污染指数

Table 6 Pollution index of total phosphorus in the contaminated layer of sediments of Shanmei Reservoir				
分区	TP			
	最大值	最小值	平均值	污染程度
入库区	2.26	0.97	1.52	重度污染
中部区	2.53	1.19	1.70	重度污染
近坝区	1.68	0.37	1.20	中度污染
库尾区	1.79	0.96	1.47	中度污染
全库	2.53	0.37	1.46	中度污染

污染指数法常常被用于评价各个污染因子的污染状况,本文采用污染指数法对山美水库 TP 的污染状况进行评价. 计算方法和评价标准如下:

$$PI_i = C_i / C_{is}$$

式中,PI_i 为污染指数;C_i 为沉积物中*i* 污染因子的实测值,mg·kg⁻¹;C_{is} 为污染因子*i* 在沉积物中的标准值,mg·kg⁻¹. 这里的C_{is} 有的参考加拿大沉积物评价指南中的相关规定^[36]来取值,但是该指南当初是用于评价海洋沉积物的生态毒性,对于湖库而言并不适用,所以本研究参照国内湖泊沉积物评价的相关标准^[37],TP 的C_{is} 取 440 mg·kg⁻¹.

表4 沉积物污染指数评价标准

Table 4 Evaluation standards of pollution index in sediments				
PI	<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	>1.5
污染程度	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染

3.2 评价结果

采用上述方法对山美水库入库区、中部区、近坝区以及库尾区这4 个区域进行沉积物污染层营养盐状况评价,具体结果见表5 和表6.

根据表5,山美水库全库的有机氮与有机指数变化范围都较大,分别为0.025~0.219、0.028~0.639 之间. 有机氮与有机指数整体都处于尚清洁的状态,达到III 级,但是它们的最大值都达到了污染的级别,这表明库区内仍存部分区域污染较严重. 其中有机指数在入库区与近坝区处于较清洁的状态,达到II 级. 根据表6,山美水库TP 污染指数变

化范围较大为0.37~2.53 之间,整体上污染较为严重,全库 TP 处于中度污染,且接近重度污染,其中入库区与中部区的 TP 都处于重度污染,近坝区与库尾区处于中度污染. 整体评价结果表明山美水库的有机污染尚在可接受的范围内,但是山美水库作为当地重要水源地,当前的污染状况仍不容忽视. 而 TP 的污染则较为严重,人为干扰是一方面原因,另一方面山美水库是典型的亚热带深水库,整体

温度较高,相关研究表明温度较高会促进沉积物中微生物的矿化作用,从而使得部分有机质转化为无机磷,并且由于温度较高水生生物更新快,其死后残体等有机物也会大量分解矿化,进一步加剧山美水库沉积物中 TP 的积累。而水较深则易形成厌氧环境,从而促进反硝化的进行,TN 相对降低,TP 则显得较高^[37,38]。

4 结论

(1)山美水库沉积物污染层中 TN 平均含量为 $1\,180\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变化范围为 $262\sim2\,307\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; TP 的平均含量为 $642\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变化范围为 $161\sim1\,115\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; OM 的平均质量分数为 3.30%,变化范围为 1.22%~5.23%。其中 TP 污染较为严重,山美水库作为重要水源地内源负荷不容忽视。

(2)对山美水库沉积 TN 和 TP 含量的垂直分布进行研究,结果表明山美水库的沉积物 TN 和 TP 含量随着深度加深到正常层呈现稳定或较低的状态。除了污染较严重的点位,当深度加深到一定程度,山美水库沉积物 TN 和 TP 基本处于低污染状态。

(3)对山美水库沉积物污染层 C/N 进行研究,结果表明山美水库沉积物中的 C/N 整体高于普通湖泊。有机质大多由自然陆源及高等植物贡献。少部分由浮游动植物及藻类转化而来。

(4)对山美水库沉积物污染层 TN、TP 和 OM 进行 Pearson 相关性分析,结果表明它们三者之间都呈极显著相关。这说明沉积物中的氮磷多以有机形式存在,且来源上有一定的同源性。

(5)采用有机指数法和污染指数法对山美水库沉积物污染层的污染状况进行评价,结果表明山美水库沉积物污染层的有机氮及有机指数都处于尚清洁的状态,TP 属于中度污染,接近重度污染。

参考文献:

- [1] Batayneh A T. Toxic (aluminum, beryllium, boron, chromium and zinc) in groundwater: health risk assessment [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2012, **9**(1): 153-162.
- [2] 张永生,李海英,任家盈,等. 三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- [3] Varjo E, Liikanen A, Salonen V P, et al. A new gypsum-based technique to reduce methane and phosphorus release from sediments of eutrophied lakes: gypsum treatment to reduce internal loading[J]. Water Research, 2003, **37**(1): 1-10.
- [4] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, et al. Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 1551-1559.
- [5] Fang T, Liu J T, Xiao B D, et al. Mobilization potential of heavy metals: A comparison between river and lake sediments [J]. Water Air and Soil Pollution, 2005, **161**(1-4): 209-225.
- [6] Kadokami K, Li X H, Pan S Y, et al. Screening analysis of hundreds of sediment pollutants and evaluation of their effects on benthic organisms in Dokai Bay, Japan [J]. Chemosphere, 2013, **90**(2): 721-728.
- [7] 王岩,姜霞,李永峰,等. 洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(5): 484-491.
- [8] Gao L, Zhang L H, Hou J Z, et al. Decomposition of macroalgal blooms influences phosphorus release from the sediments and implications for coastal restoration in Swan Lake, Shandong, China[J]. Ecological Engineering, 2013, **60**: 19-28.
- [9] Wetzel M A, Wahrendorf D S, Von Der Ohe P C. Sediment pollution in the Elbe estuary and its potential toxicity at different trophic levels [J]. Science of the Total Environment, 2013, **449**: 199-207.
- [10] 李佳璐,姜霞,王雯雯,等. 蠡湖沉积物质量评估体系的构建[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 565-573.
- [11] 申秋实,周麒麟,邵世光,等. 太湖草源性“湖泛”水域沉积物营养盐释放估算[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 177-184.
- [12] 杨洋,刘其根,胡忠军,等. 太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(12): 3057-3064.
- [13] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [J]. Hydrobiologia, 2003, **506-509**(1-3): 135-145.
- [14] 朱永青. 淀山湖底泥沉积物氮磷营养盐释放及其影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(5): 70-77, 82.
- [15] Kaushik A, Kansal A, Santosh M, et al. Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: assessment by metal enrichment factor of the sediments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **164**(1): 265-270.
- [16] Burford M A, Green S A, Cook A J, et al. Sources and fate of nutrients in a subtropical reservoir[J]. Aquatic Sciences, 2012, **74**(1): 179-190.
- [17] 林秋奇,韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报, 2001, **21**(6): 1034-1040.
- [18] 张华俊,陈修康,韩博平,等. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1167-1175.
- [19] 王妙,王胜,唐鹤辉,等. 粤西三座重要供水水库沉积物营养盐负荷与重金属污染特征[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(5): 834-841.
- [20] 程劲竹,郭沛涌,刘宁,等. 山美水库表层沉积物黑碳分布特征及其对磷形态的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(4): 1012-1018.
- [21] 周真明,沈春花,赵志领,等. 山美水库流域表层沉积物中总磷、总氮分布特征及污染评价[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, **39**(4): 608-612.
- [22] 易成国,郭沛涌,路丁,等. 福建山美水库表层沉积物不同

- 形态硅分布特征及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 211-217.
- [23] 姜霞, 王书航. 沉积物质量调查评估手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 27-39.
- [24] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 393-398.
- [25] US EPA. Guidelines for the pollutional classification of great lakes harbor sediments[R]. Chicago Illinois; US EPA, 1977.
- [26] 苟婷, 李思阳, 许振成, 等. 高州水库沉积物中总氮与总磷的分布特征研究[J]. 环境科学与管理, 2014, **39**(7): 31-35.
- [27] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 961-968.
- [28] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3064-3069.
- [29] Talbot M R. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates[J]. Chemical Geology; Isotope Geoscience Section, 1990, **80**(4): 261-279.
- [30] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry: an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. Organic Geochemistry, 1993, **20**(7): 867-900.
- [31] 李辉, 潘学军, 史丽琼, 等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展[J]. 环境化学, 2011, **30**(1): 281-292.
- [32] Ribeiro D C, Martins G, Nogueira R, *et al.* Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal) [J]. Chemosphere, 2008, **70**(7): 1256-1263.
- [33] Ingall E D, Van Cappellen P. Relation between sedimentation rate and burial of organic phosphorus and organic carbon in marine sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, **54**(2): 373-386.
- [34] 刘琰, 续衍雪, 郑丙辉, 等. 清渭河许昌段表层沉积物污染评价[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(2): 5-10.
- [35] 叶华香, 臧淑英, 肖海丰, 等. 扎龙湿地表层沉积物营养盐空间分布特征及评价[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 1966-1976.
- [36] Mudroch A, Azcue J M. Manual of aquatic sediment sampling [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995.
- [37] 王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 703-709.
- [38] 王志齐, 李宝, 胡向辉, 等. 南四湖沉积物氮磷和有机质分布特征及其相关性分析[J]. 土壤通报, 2013, **44**(4): 867-874.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 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