

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

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

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁锋, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价

黄廷林, 刘飞, 史建超

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为了揭示水源水库沉积物中的营养元素分布对水体富营养化的影响, 以周村水库为研究对象, 采用现场取样及实验室分析方法, 探究了沉积物中营养元素的分布特征, 并对 TOC 与 TN、TP 的相关性进行了分析, 同时参考沉积物质量评价指南并采用综合污染指数对沉积物的污染状况进行了评价。结果表明, 周村水库研究区域沉积物 TOC 含量均随深度增加而下降, 而沉积物中氮负荷有增加的趋势, 磷则表现出表层富集现象, 表明周村水库沉积物营养盐负荷在加重; TOC 与 TN、TP 存在较好的相关性, 相关系数分别为 $r=0.68 (P<0.01)$ 、 $r=0.89 (P<0.01)$, TOC/TN 值表明, 纤维束植物碎屑是水库沉积物有机质的主要来源; 综合污染指数评价结果表明, 3 个采样点表层沉积物均达到重度污染程度, 表层沉积物中 TN、TP 含量分别为 $3\,273 \sim 4\,870 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $653 \sim 2\,969 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, TOC 含量为 $45.65 \sim 83.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 均超过沉积物质量评价指南规定的引发最低级别生态毒性效应的标准值, 周村水库沉积物存在较大安全风险, 水体面临富营养化威胁。

关键词: 水源水库; 沉积物; 营养元素; 污染评价; 富营养化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0166-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.01.022

Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir

HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The main purpose of this paper is to illustrate the influence of nutrients distribution in sediments on the eutrophication of drinking water reservoir. The sediments of three representative locations were field-sampled and analyzed in laboratory in March 2015. The distribution characteristics of TOC, TN and TP were measured, and the pollution status of sediments was evaluated by the comprehensive pollution index and the manual for sediment quality assessment. The content of TOC in sediments decreased with depth, and there was an increasing trend of the nitrogen content. The TP was enriched in surface sediment, implying the nutrients load in Zhoucun Reservoir was aggravating as the result of human activities. Regression analysis indicated that the content of TOC in sediments was positively correlated with contents of TN and TP in sediments. The TOC/TN values reflected that the vascular land plants, which contain cellulose, were the main source of organic matter in sediments. The comprehensive pollution index analysis result showed that the surface sediments in all three sampling sites were heavily polluted. The contents of TN and TP of surface sediments in three sampling sites were $3\,273\sim4\,870 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $653\sim2\,969 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the content of TOC was $45.65\sim83.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. According to the manual for sediment quality assessment, the TN, TP and TOC contents in sediments exceed the standard values for the lowest level of ecotoxicity, so there is a risk of eutrophication in Zhoucun Reservoir.

Key words: drinking water reservoir; sediment; nutrients; pollution evaluation; eutrophication

水库已逐渐成为城市重要的饮用水水源, 但国内大部分水库均面临富营养化问题^[1]。氮、磷等是水生生物生长所必需的营养元素, 同时也是水体富营养化的限制因素^[2]。营养物质通过地表径流等进入水库, 除部分被水生植物吸收和以各种形式存在于水体中, 仍有大量的营养物质在物理、化学及生物作用下, 沉积于水库的沉积物中^[3]。

大部分水库由于水体停留时间长、流动性差, 容易出现季节性分层现象^[4]。热分层的存在阻碍了上下水体间的物质交换, 使得底层水体长期处于厌氧还原状态, 造成沉积物中营养物持续向水体释放, 并导致水质恶化, 威胁用水安全^[5~7]。因而许多水库在外源得到有效控制的情况下, 水库水体富营养

化并未得到有效控制^[8]。

因此, 探明水库沉积物中营养元素的含量分布特征, 对于揭示水库沉积物碳、氮、磷的污染现状, 降低水体富营养化风险, 以及对水库水环境的修复与水质的改善工作有着重要的意义。

关于国内外沉积物营养元素的研究已经有所报道。有研究报道了湖泊沉积物中营养元素释放迁移的机制, 如美国佛罗里达的 Lake Apopka 湖湿地^[9]。一些研究报道了沿海养殖活动对海洋沉积物中营养

收稿日期: 2015-05-29; 修订日期: 2015-08-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC04B02)

作者简介: 黄廷林(1962~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水处理技术、水资源保护与水质控制、水环境修复, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

元素的影响,如 Greece 沿海^[10]、象山港海域^[11]. 也有研究报道了湖泊、河口沉积物中营养元素的分布情况,如美国的 Lake Erie 湖^[12]、长江口及邻近海域^[13]. 然而,目前关于沉积物营养盐的研究大多集中在湖泊、河流及海洋,对水源水库的研究却鲜见报道.

本研究对山东周村水库 3 个典型位置进行现场采样,对碳、氮、磷在沉积物中的垂向分布特征进行了测定分析. 探究了沉积物中有机质的来源,并对沉积物中碳与氮、磷的相关性进行了分析,同时参考沉积物质量评价指南并采用综合污染指数对研究区域沉积物进行了污染程度分析评价.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

枣庄市周村水库位于山东省枣庄市孟庄镇周村南(34°57'N,117°41'E),于 1960 年竣工,水面面积 8.54 km²,总库容 8 404 万 m³,平均水深 15 m,最大水深 19 m. 周村水库是枣庄市城市供水的重要水源,兼具防洪、发电、灌溉等功能. 该水库从 20 世纪 90 年代初期开始持续大量网箱养殖近 20 年,水体富营养化严重,大量的营养盐沉积在库底,造成二次污染. 近年来,政府部门取缔网箱养殖后水库水质有所改善,但沉积物营养盐的释放问题未得到解决,水库面临富营养化风险^[14,15].

1.2 样品采集

2015 年 3 月下旬,在周村水库选择 3 个典型位置:A(34°57'03.98"N,117°39'50.80"E)、B(34°56'51.58"N,117°40'31.26"E)、C(34°56'38.40"N,117°41'13.48"E)(图 1),现场采样进行分析. A 点水深 5.15 m,位于上游河流西伽河附近;B 点水深 9.40 m,位于库心附近;C 点水深 14.85 m,位于坝前深水区. 采样时,水库正处于水体混合末期,库底好氧状态从 2014 年 11 月中旬开始已持续约 4 个月.

采用柱状取泥器采集沉积物样品,采样完成后在现场迅速将沉积物沿深度方向按 1 cm 间隔切割成圆柱体形状. 将切割后的沉积物样品用封口袋密

封保存,样品带回实验室用离心机提取间隙水后,自然风干半个月. 将风干样品研磨过 100 目筛,置于封口袋中密封后于 4℃ 下保存以供分析^[16].



图 1 周村水库采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites in Zhoucun Reservoir

1.3 分析方法

沉积物总氮、总磷的测定参照杨柳燕等^[17]的沉积物总氮、总磷联合测定分析方法;沉积物有机碳的测定采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法^[18]. 每个采样点的泥样均为 3 个平行,对平行样结果取平均后进行分析. 研究中采用的主要仪器为:Hydrolab DS5(美国 HACH 公司),DR6000 分光光度计(美国 HACH 公司),TGL-16gR 离心机(上海安亭科学仪器厂),恒温培养箱(上海精宏)等. 数据处理及作图采用 Excel 2003 和 Origin 8.0.

2 结果与讨论

2.1 沉积物 TOC 剖面分布特征

碳是沉积物中的营养元素之一,也是氮、磷迁移转化的重要载体,对水体富营养化有着重要的影响^[19]. 周村水库研究区域表层沉积物中 TOC 质量分数为 4.56%~8.30%,平均值为 6.43%. TOC 在 A 点沉积物中垂向分布范围为 4.11%~4.73%,平均值为 4.43%;B 点沉积物中 TOC 质量分数为 2.65%~6.43%,平均值为 4.41%;C 点沉积物中 TOC 质量分数为 4.47%~9.23%,平均值为 6.31%(表 1).

A 点沉积物中 TOC 随深度增加略有下降;B 点沉积物中 TOC 在 3 cm 深度以内随深度迅速下降,

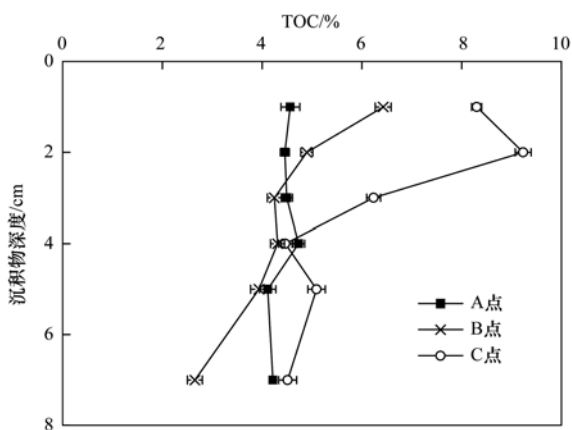
表 1 3 个采样点沉积物 TOC、TN 和 TP 质量分数¹⁾

Table 1 Mass fractions of TOC, TN and TP in sediments of three sampling sites

采样点	TOC/%		TN/%		TP/%	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
A	4.11~4.73	4.43	0.25~0.35	0.32	0.06~0.07	0.06
B	2.65~6.43	4.41	0.12~0.35	0.21	0.04~0.12	0.07
C	4.47~9.23	6.31	0.19~0.49	0.29	0.08~0.30	0.19

1) 表中数据表示为平均值±标准误差 (means±S. D) (n=3)

在 3~5 cm 深度基本保持不变,5 cm 以下急剧降低;C 点沉积物中 TOC 在 2 cm 以内随深度增加而升高,2 cm 以下随深度迅速降低,TOC 在表层的质量分数是底层的 1.84 倍(图 2). 周村水库 3 个采样点沉积物中 TOC 质量分数基本随深度增加而降低,主要原因是水生生物的排泄物及残骸逐渐在表层沉积物积累所致^[20].



图中数据表示为平均值 $\pm$ 标准误差 (means $\pm$ S. D.) ($n=3$)

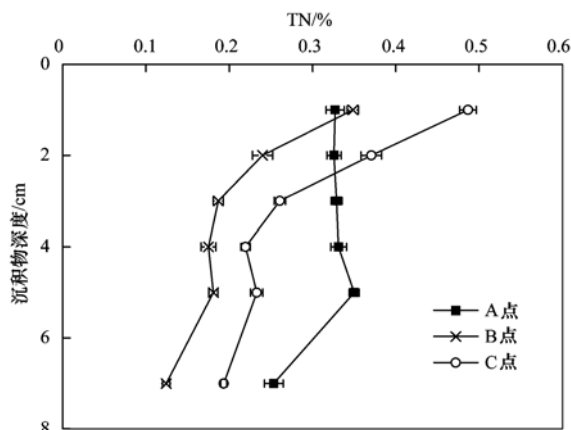
图 2 周村水库沉积物中 TOC 的分布

Fig. 2 Distribution of TOC in sediments of Zhoucun Reservoir

2.2 沉积物总氮和总磷剖面分布特征

氮、磷是水库沉积物中主要的营养元素,沉积物中的 TN 和 TP 含量能够反映营养状况以及受污染程度. 研究发现,周村水库 3 个采样点沉积物中的 TN 含量均较高,表层沉积物中 TN 的质量分数分布范围为 0.33%~0.49%,平均值为 0.39%,其中 C 点表层沉积物中 TN 质量分数明显比 A、B 两点高. TN 在 A 点沉积物中的质量分数为 0.25%~0.35%,平均值为 0.32%;B 点为 0.12%~0.35%,平均值为 0.21%;C 点为 0.19%~0.49%,平均值为 0.29%(表 1). 从周村水库 3 个采样点沉积物中 TN 的分布(图 3)可以看出,B、C 两点沉积物中 TN 的垂向分布特征相似,均在表层 3 cm 随深度迅速下降,从 3 cm 开始下降速度放缓. 而 A 点沉积物中 TN 在 5 cm 深度以内随深度缓慢增加,5 cm 以下迅速降低. 各个采样点表层沉积物中 TN 质量分数比底层高,说明周村水库沉积物氮负荷在逐渐加重,水库初级生产力在不断提高,水库存在富营养化加剧的潜在风险^[21];另外,厌氧条件导致氨氮向沉积物表层扩散也可能造成 TN 在沉积物表层的质量分数高而在底层的质量分数低^[22,23].

周村水库 3 个采样点表层沉积物中 TP 的分布范围为 0.07%~0.30%,平均值为 0.16%,TP 在各

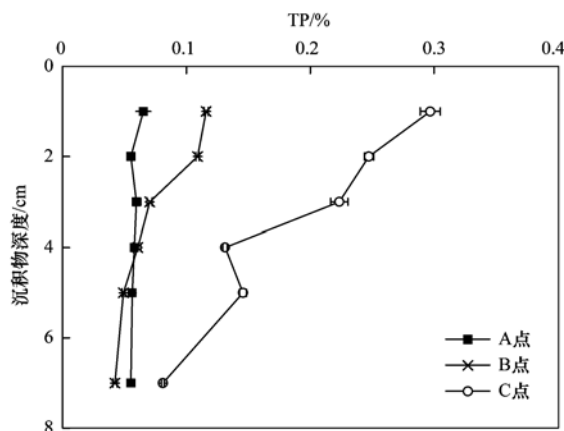


图中数据表示为平均值 $\pm$ 标准误差 (means $\pm$ S. D.) ($n=3$)

图 3 周村水库沉积物中 TN 的分布

Fig. 3 Distribution of TN in sediments of Zhoucun Reservoir

点表层沉积物中的分布差异较为明显,其中 C 点 TP 质量分数最高,分别是 A、B 点的 4.55 倍、2.56 倍. TP 在 A 点沉积物中的垂向分布范围为 0.06%~0.07%,平均值为 0.06%;B 点 TP 分布范围为 0.04%~0.12%,平均值为 0.07%;C 点沉积物中 TP 质量分数为 0.08%~0.30%,平均值为 0.19%(表 1). 从 3 个采样点沉积物 TP 垂向分布(图 4)可以看出,A 点沉积物中 TP 在表层和底层的质量分数并无明显的差异;B 点沉积物中 TP 质量分数随深度缓慢地下降;C 点沉积物中 TP 随深度迅速降低,沉积物表层 TP 质量分数是底层的 3.66 倍,呈现出表层富集现象,一方面是由于水库周边人类活动增加造成大量含磷污染物在表层沉积物中积累所致^[24];另外也可能是地球化学作用导致底层沉积物中的磷向表层发生迁移所造成的.



图中数据表示为平均值 $\pm$ 标准误差 (means $\pm$ S. D.) ($n=3$)

图 4 周村水库沉积物中 TP 的分布

Fig. 4 Distribution of TP in sediments of Zhoucun Reservoir

2.3 沉积物中碳与氮、磷的关系

2.3.1 TOC 与 TN、TP 的相关性分析

水生生物能按一定的比例吸收营养元素以满足自身生长的需要,其排泄物及残骸最终在沉积物中积累;沉积物中的营养元素在矿化过程中会相互影响,因而碳、氮和磷在沉积物中的分布存在着一定的相关性^[13]。

对周村水库 3 个采样点沉积物中 TOC 与 TN、TP 的相关性分析显示(图 5),TOC 与 TN 显著正相关($r=0.68, P<0.01, n=18$),线性方程为 $[TN]=0.0399[TOC]+0.0727$; TOC 与 TP 显著正相关($r=0.89, P<0.01, n=18$),线性方程为 $[TP]=0.0426[TOC]-0.1081$ 。沉积物中 TOC 与 TN、TP 均显著正相关,其中 TOC 与 TP 的相关系数更高,该结果表明周村水库沉积物有机质的矿化过程与沉积物中氮、磷,尤其是磷的物质来源和沉积变化过程有着密切的联系^[25,26]。Angeler 等^[27]研究发现,有机碎屑的分解过程往往伴随着氮、磷营养元素的释放。Eckerrot 等^[28]的研究表明,沉积物中有机质的输入对磷释放进入间隙水有着重要的影响。D'Angelo 等^[9]的研究

结果显示,沉积物有机质的分解量与间隙水中氨氮、溶解性磷的浓度变化值存在函数关系,有机质的分解过程是控制沉积物中氮、磷释放的关键因素。

2.3.2 沉积物 C/N 特征分析

沉积物中的 C/N 值在一定程度上反映了有机质来源的差异性,有纤维束植物碎屑 C/N 值大于 20,无纤维束植物的 C/N 值为 4~12,浮游动物的 C/N 值一般小于 7,浮游植物的 C/N 值为 6~14,藻类的 C/N 值为 4~10^[29~32]。因而,C/N 值也常被用来区分湖泊、水库和海洋等水体的沉积物中有机质的来源^[29,33]。

周村水库沉积物中 TOC/TN 分布见图 6,3 个采样点的表层沉积物中 TOC/TN 分布范围为 13.95~18.44,平均值为 16.48。A 点沉积物中 TOC/TN 分布范围为 11.74~16.63,平均值为 13.99; B 点沉积物 TOC/TN 值为 18.44~24.61,平均值为 21.54; C 点沉积物 TOC/TN 为 17.04~24.90,平均值为 21.89。TOC/TN 在 3 个采样点沉积物中均表现出表层低,底层高的垂向分布特征,一方面是由于上游禽类养殖污水的排放造成周村水库沉积物污染逐渐加剧,沉积物中 TN 呈现随深度增加而降低的分布特征,且 TN 随深度下降程度比 TOC 高;另一方面,沉积物底层比表层缺氧程度更高,厌氧条件促进了有机质中的氮矿化分解成 NH_4^+-N 并进入间隙水^[22],同时硝化作用受到抑制,生成的 NH_4^+-N 难以被微生物完全利用而逐渐积累^[23],在浓度梯度的作用下向沉积物表层扩散,导致 TOC/TN 在底层增高。其中,A 点沉积物中 TOC/TN 比 B、C 点略低。结果表明,周村水库采样点 A 处沉积物中的有机质主要来源于

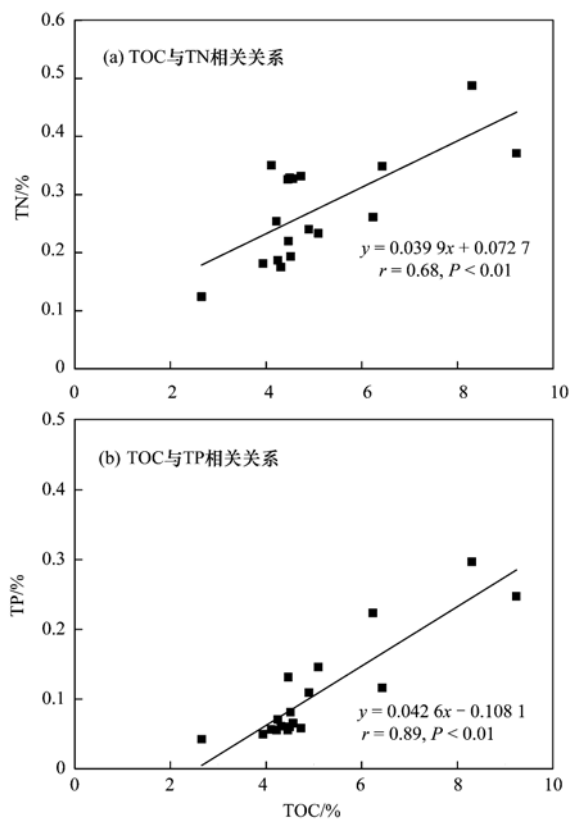
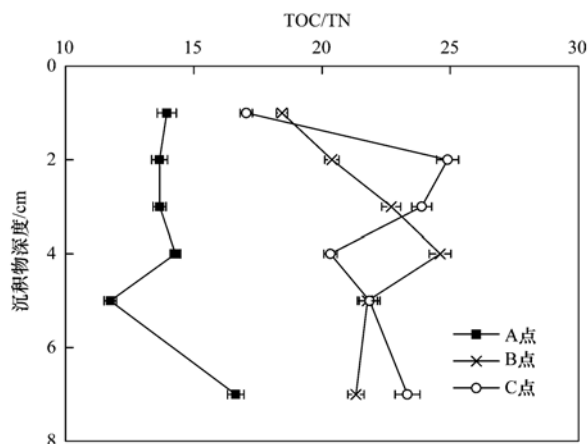


图 5 沉积物中 TOC 与 TN、TP 的相关关系

Fig. 5 Relationship between TOC and TN, TOC and TP in sediments of Zhoucun Reservoir



图中数据表示为平均值 ± 标准误差 (means ± S. D.) ($n=3$)

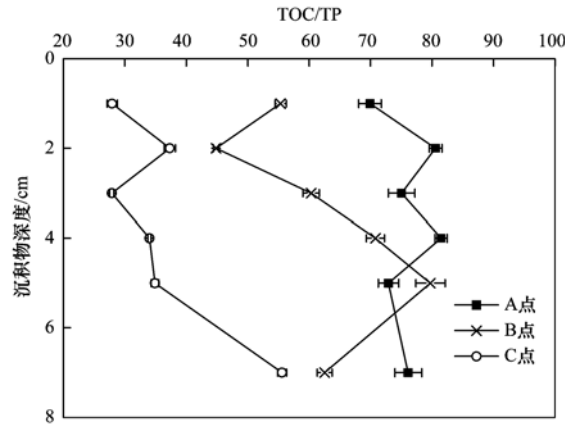
图 6 周村水库沉积物中 TOC/TN 分布

Fig. 6 Distribution of TOC/TN in sediments of Zhoucun Reservoir

浮游植物; B、C 两点沉积物中的有机质主要来源于陆源纤维束植物碎屑,陆源有机质进入水体后未能迅速分解氧化而沉积下来,造成 TOC/TN 值高^[25].

2.3.3 沉积物 C/P 特征分析

C/P 值在一定程度上能反映沉积物中有机碳与磷化合物的分解速率,并且能够体现沉积物中磷的主要存在形态^[34]. 周村水库 3 个采样点的表层沉积物中 TOC/TP 值分布范围为 27.96 ~ 69.91 (图 7),平均值为 51.07. A 点沉积物中 TOC/TP 垂向分布范围为 69.91 ~ 81.47,平均值为 76.00; B 点沉积物中垂向 TOC/TP 值在 44.87 ~ 79.73 间变化,平均值为 62.26; C 点沉积物 TOC/TP 在垂向的分布范围为 27.90 ~ 55.58,平均值为 36.28. 3 个采样点沉积物中 TOC/TP 均呈现随深度增加而升高的分布特征,一方面是由于,水库上游禽类养殖污水的排放导致大量含磷污染物在沉积物表层积累,形成表层富集现象;另一方面,周村水库沉积物中磷以无机磷形态为主(无机磷占总磷的 79% 以上),铁结合态磷是无机磷的重要组成部分,沉积物底层缺氧程度较表层严重,促进了有机磷矿化分解成溶解态^[35],铁结合态磷在厌氧条件下随 Fe(OH)₃ 的还原溶解而释放进入间隙水^[36],大量积累的 PO₄³⁻-P 向沉积物表层扩散,并且磷化合物分解程度随深度的增加速度比 TOC 快,导致 TOC/TP 随深度逐渐增大.



图中数据表示为平均值 ± 标准误差 (means ± S. D.) (n = 3)

图 7 周村水库沉积物中 TOC/TP 分布

Fig. 7 Distribution of TOC/TP in sediments of Zhoucun Reservoir

2.4 沉积物营养元素污染评价

目前对水库沉积物的污染状况,尚无统一的评价方法和标准. 本研究中参照加拿大安大略省环境和能源部(1992)制定的环境质量评价指南对周村水库沉积物的营养元素污染情况进行了分析,并通

过应用较广的综合污染指数对周村水库沉积物中的氮、磷污染程度进行了评价.

2.4.1 环境质量评价指南分析

加拿大安大略省环境和能源部(1992)制定的环境质量评价指南(表 2)根据沉积物中的污染物对底栖生物的生态毒性效应将沉积物分为 3 个等级:安全级,该级别下水生生物未出现生态毒性效应;最低级,该级别下沉积物已受污染,但大多底栖生物仍能承受;严重级,该级别下底栖生物群落受到严重损害^[37]. 按照该指南,沉积物中能引起最低级别生态毒性效应的 TN、TP 含量分别为 550 mg·kg⁻¹、600 mg·kg⁻¹,TOC 含量为 10 mg·g⁻¹;具有严重级别生态毒性效应的 TN、TP 含量分别为 4 800 mg·kg⁻¹、2 000 mg·kg⁻¹,TOC 含量为 100 mg·g⁻¹.

表 2 加拿大安大略省环境和能源部(1992)制定的沉积物质量评价指南

Table 2 Manual for sediment quality assessment formulated by Ontario Environment and Energy(1992)			
生态毒性效应	TN/mg·kg ⁻¹	TP/mg·kg ⁻¹	TOC/mg·g ⁻¹
安全级别	<550	<600	<10
最低级别	550 ~ 4 800	600 ~ 2 000	10 ~ 100
严重级别	≥4 800	≥2000	≥100

本研究的周村水库表层沉积物中,TN、TP 含量范围分别为 3 273 ~ 4 870 mg·kg⁻¹、653 ~ 2 969 mg·kg⁻¹,TOC 含量为 45.65 ~ 83.00 mg·g⁻¹(表 3). 与其他水库相比,周村水库表层沉积物中营养盐含量较高,其中 C 点 TP 含量远高于密云水库^[26],3 个采样点表层沉积物中 TOC 含量均比密云水库高. TN 在 3 个采样点表层沉积物中的含量均高于洋河水库^[38](1 594 ~ 2 694 mg·kg⁻¹),A、B 两点表层沉积物 TP 含量与洋河水库(625 ~ 940 mg·kg⁻¹)相近,而 C 点 TP 含量较高. 3 个采样点表层沉积物 TOC 含量均远高于洋河水库(9.03 ~ 13.30 mg·g⁻¹). 根据环境质量评价指南,研究区域中 A、B 两点表层沉积物中 TN、TP 和 TOC 均超过最低级别;C 点表层沉积物中的 TOC 超过最低级别,TN、TP 超过严重级别. 结果表明,3 个采样点沉积物中 TN、TP 和 TOC 浓度均具有生态风险效应,对环境有一定的潜在危害,需要控制水库营养元素的输入量,以降低周村水库水体发生富营养化的风险.

2.4.2 综合污染指数评价

综合污染指数可由单项污染指数公式(1)及公式(2)计算得到^[39]:

$$S_i = C_i/C_s \tag{1}$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中,FF 为综合污染指数, S_i 为单项评价指数或标准指数, S_i 大于 1 表示含量超过评价标准值; C_i 为评价因子 i 的实测含量; C_s 为评价因子 i 的评价标

准含量,其中 C_{STN} 为 $0.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, C_{STP} 为 $0.44 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [3]. F 为 n 项评价因子的评价指数平均值, $F_{\max}$ 为最大单项评价指数.

参考沉积物综合污染程度分级标准[40] (表 4), 可以得出周村水库研究区域内沉积物氮、磷的单项评价指数及综合污染指数(表 5).

表 3 周村水库沉积物碳氮磷污染程度评价¹⁾

研究区域	氮污染情况		磷污染情况		碳污染情况	
	TN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	生态毒性	TP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	生态毒性	TOC/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	生态毒性
A 点	$3\,273 \pm 108$	最低级别	653 ± 31	最低级别	45.65 ± 0.23	最低级别
B 点	$3\,485 \pm 67$	最低级别	$1\,167 \pm 17$	最低级别	64.27 ± 0.17	最低级别
C 点	$4\,870 \pm 99$	严重级别	$2\,969 \pm 81$	严重级别	83.00 ± 0.29	最低级别

1) 表中数据表示为平均值 ± 标准误差 (means ± S. D) ($n=3$)

表 4 沉积物综合污染程度分级标准

污染程度	S_{TN}	S_{TP}	FF	等级
未受污染	<1.0	<0.5	≤1.0	1
轻度污染	1.0~1.5	0.5~1.0	1.0~1.5	2
中度污染	1.5~2.0	1.0~1.5	1.5~2.0	3
重度污染	≥2.0	≥1.5	≥2.0	4

表 5 周村水库研究区域表层沉积物综合污染程度评价

研究区域	TN 评价指数		TP 评价指数		综合污染指数	
	S_{TN}	等级	S_{TP}	等级	FF	等级
A 点	4.89	4	1.48	3	4.12	4
B 点	5.20	4	2.64	4	4.61	4
C 点	7.27	4	6.75	4	7.14	4

由表 5 可以看出,研究区域内,A、B 和 C 点表层沉积物的 S_{TN} 分别为 4.89、5.20 和 7.27,均大于 2.0,3 个采样点的表层沉积物 TN 值均达到重度污染; S_{TP} 在 A、B 和 C 点的值分别为 1.48(属于 1.0~1.5 范围)、2.64(>1.5)和 6.75(>1.5),TP 在 A 点为中度污染,B、C 两点为重度污染;A、B 和 C 点 FF 值分别为 4.12、4.61 及 7.14,均超过 2.0,3 个采样点表层沉积物综合污染程度均达到重度污染.

两种评价方法的结果较为一致,均表明周村水库 3 个采样点沉积物都受到一定程度的污染,尤其是 C 点氮、磷污染最为严重. 如不控制外来污染,尤其是氮、磷的输入,周村水库沉积物污染程度势必逐渐加剧,并对上覆水造成威胁,水体也将面临富营养化风险.

3 结论

(1)周村水库 3 个采样点表层沉积物中 TOC 质量分数为 4.56%~8.30%,3 个采样点沉积物中 TOC 均随深度增加而下降;TN 质量分数在表层沉积物中的分布范围为 0.33%~0.49%,TN 垂向分布特征表明,3 个采样点沉积物氮负荷有加重的趋势;表层沉积物 TP 质量分数为 0.07%~0.30%,TP 在 3 个采样点沉积物中均呈现表层富集现象,说明周村水库沉积物污染在加剧.

(2)周村水库沉积物中 TOC 含量与 TN 含量极显著正相关($r=0.68, P<0.01$),TOC 含量与 TP 含量极显著正相关($r=0.89, P<0.01$). TOC/TN 值表明,采样点 A 处沉积物中有机质主要来源于浮游植物,而 B、C 点沉积物有机质主要来源于有纤维束植物碎屑.

(3)根据环境质量评价指南,研究区域中 A、B 点表层沉积物 TN、TP 和 TOC 均超过最低级别;C 点沉积物 TOC 超过最低级别,TN、TP 超过严重级别. 沉积物综合污染指数评价结果表明,周村水库研究区域中的 3 个采样点表层沉积物均达到重度污染程度. 评价结果表明,周村水库沉积物存在较大安全风险,水体面临富营养化威胁.

参考文献:

[1] 黄廷林,柴蓓蓓. 水源水库水质污染与富营养化控制技术研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 588-596.
[2] Xu H, Paerl H W, Qin B Q. Nitrogen and Phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Association for the Sciences of Limnology and Oceanography, 2010, 55(1): 420-432.
[3] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社,

- 1998, 110-111.
- [4] 邱华北, 商立海, 李秋华, 等. 水体热分层对万峰湖水环境的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 1039-1044.
- [5] Zhong J C, You B S, Fan C X. Influence of sediment dredging on chemical forms and release of phosphorus[J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(1): 34-44.
- [6] 黄廷林, 章武首, 柴蓓蓓, 等. 大水深水库内源污染特征及控制技术[J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(3): 1-4.
- [7] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(4): 1474-1480.
- [8] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制——技术、理论及应用[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 273-282.
- [9] D'Angelo E M, Reddy K R. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water; I. Distribution of dissolved nutrients in the soil and water column[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**(5): 928-936.
- [10] Farmaki E G, Thomaidis N S, Pasiadis I N, *et al.* Environmental impact of intensive aquaculture: Investigation on the accumulation of metals and nutrients in marine sediments of Greece[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **485-486**: 554-562.
- [11] 翟滨, 曹志敏, 蓝东兆, 等. 象山港养殖海域水体和沉积物中营养元素的分布特征及其控制过程的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007, (3): 49-56.
- [12] Pennuto C M, Burlakova L E, Karatayev A Y, *et al.* Spatiotemporal characteristics of nitrogen and phosphorus in the benthos of nearshore Lake Erie[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(3): 541-549.
- [13] 吕晓霞, 翟世奎, 于增慧. 长江口及邻近海域表层沉积物中营养元素的分布特征及其控制因素[J]. 海洋环境科学, 2005, **24**(3): 1-5.
- [14] 李凤岭, 李永敏. 利用周村水库城市供水水能资源开发梯级电站浅析[J]. 水利水电技术, 1999, **30**(4): 11-12.
- [15] 赵洪, 丛海兵, 倪金春, 等. 周村水库藻类在混合胁迫条件下的生长衰亡规律[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2520-2525.
- [16] 程香菊, 郭振仁, 刘国, 等. 大亚湾养殖区沉积物-水界面氮磷的释放通量及其在水体中的扩散迁移[J]. 热带海洋学报, 2014, **33**(4): 77-84.
- [17] 杨柳燕, 赵兴青, 肖琳, 等. 沉积物总氮、总磷联合测定分析方法[P]. 中国专利: 1869656, 2006-11-29.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 107-109.
- [19] 冯峰, 王辉, 方涛, 等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(3): 342-345.
- [20] 范成新. 漏湖沉积物理化特征及磷释放模拟[J]. 湖泊科学, 1995, **7**(4): 341-350.
- [21] 赵兴青, 杨柳燕, 于振洋, 等. 太湖沉积物理化性质及营养盐的时空变化[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 698-704.
- [22] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 359-366.
- [23] Khalil M K, Rifaat A E. Seasonal fluxes of phosphate across the sediment-water interface in Edku Lagoon, Egypt [J]. *Oceanologia*, 2013, **55**(1): 219-233.
- [24] 胡胜华, 叶艳婷, 郭伟洁, 等. 武汉严东湖近代沉积物中总氮、总磷与生物硅沉积及营养演化的动态过程[J]. 环境学报, 2011, **20**(1): 124-131.
- [25] 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.
- [26] 刘晓端, 徐清, 刘浏, 等. 密云水库沉积物-水界面磷的地球化学作用[J]. 岩矿测试, 2004, **23**(4): 246-250.
- [27] Angeler D G, Sánchez-Carrillo S, García G, *et al.* The influence of *Procambarus clarkii* (Cambaridae, Decapoda) on water quality and sediment characteristics in a Spanish floodplain wetland[J]. *Hydrobiologia*, 2001, **464**(1-3): 89-98.
- [28] Eckerrot Å, Pettersson K. Pore water phosphorus and iron concentrations in a shallow, eutrophic lake-indications of bacterial regulation[J]. *Hydrobiologia*, 1993, **253**(1-3): 165-177.
- [29] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, **114**(3-4): 289-302.
- [30] 朱松泉, 窦鸿身. 洪泽湖[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993. 95.
- [31] Mayers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. *Organic Chemistry*, 1993, **20**(7): 867-900.
- [32] 屠清瑛, 顾丁锡, 尹澄清, 等. 巢湖富营养化研究[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1990. 59-61.
- [33] Mayer L M. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(4): 1271-1284.
- [34] Faganeli J, Planinc R, Pezdirc J, *et al.* Marine geology of the Gulf of Trieste (northern Adriatic): Geochemical aspects[J]. *Marine Geology*, 1991, **99**(1-2): 93-108.
- [35] 于洋, 王晓燕, 吴在兴, 等. 沉积物中核酸态有机磷及其矿化过程研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(7): 1469-1472.
- [36] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(6): 738-742.
- [37] 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. 地球科学进展, 1998, **13**(4): 398-402.
- [38] 蔡金榜, 李文奇, 刘娜, 等. 洋河水库底泥污染特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(3): 886-893.
- [39] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(2): 111-117.
- [40] 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.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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