

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究 吴起鑫, 韩贵琳 (2145)

成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建 岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)

太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)

环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)

南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布 张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)

青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征 刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)

城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)

基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)

浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究 高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)

福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析 李雪丁 (2210)

HSPF 水文水质模型应用研究综述 李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)

城市降雨径流模拟的参数不确定性分析 黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)

利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度 姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)

嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定 谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)

重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)

南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)

宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)

影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)

大型底栖动物生物评价指数比较与应用 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)

青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征 王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)

青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)

用物理-生态集成技术局部控制富营养化 李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)

太湖氮素出入湖通量与自净能力研究 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)

富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应 袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)

巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)

南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究 方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)

东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究 林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)

嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)

电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源 王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)

基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)

渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)

崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)

白洋淀底泥重金属形态及竖向分布 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)

西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究 刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)

氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制 刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)

Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性 张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)

声电氧化处理扑热息痛的研究 戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)

粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究 白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)

利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究 张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)

Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究 王小蓉, 吴平霄 (2432)

核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究 武国正, 徐宗学 (2438)

A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究 翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)

系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究 蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)

氧化还原介体催化强化 *Paracoccus versutus* 菌株 GW1 反硝化特性研究 李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)

1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析 刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)

蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化 秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)

双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放特征及品种筛选研究 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜 (2475)

闽江河口短叶茳芰湿地 CH₄ 和 N₂O 排放对氮输入的短期响应 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)

青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征 彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)

不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)

土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)

多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应 潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)

不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究 梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)

废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究 伊元荣, 韩敏芳 (2522)

中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析 卢愿清, 史军 (2528)

《环境科学》征稿简则(2431) 《环境科学》征订启事(2532) 信息(2157, 2271, 2367, 2418)

富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应

袁探^{1,2}, 华玉妹^{*}, 朱端卫¹, 赵建伟¹, 蔡建波¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 德州市环境保护监测中心站, 德州 253034)

摘要: 采用室内模拟实验于厌氧条件下持续 6 周, 研究不同外源硫酸盐浓度下南湖沉积物和上覆水之间的硫酸盐转化及还原情况, 采用³¹P 核磁共振(³¹P-NMR) 研究沉积物磷组分所受影响. 结果表明, 硫酸盐输入促进了上覆水中 pH 值的升高, 而氧化还原电位则呈相反的变化趋势. 上覆水中 SO₄²⁻ 浓度随时间推移而降低, 但间隙水中 SO₄²⁻ 浓度的增加幅度并不与上覆水中降低幅度一致, 表明沉积物中 SO₄²⁻ 发生了转化. 沉积物的硫酸盐还原指数随 SO₄²⁻ 输入浓度的增大而增加, 沉积物中硫酸盐还原菌(SRB)的数量在第 2 周达到峰值, 输入硫酸盐的 S500 和 S1000 处理中 SRB 数量远远高于未加硫酸盐的对照(CK). 利用³¹P-NMR测定了南湖沉积物 NaOH-EDTA 萃取物中各种磷化合物的相对含量, 南湖沉积物中的磷组分主要有正磷酸盐、磷酸单酯、磷酸二酯和焦磷酸盐, 且正磷酸盐含量占绝对优势(占总磷的 84.10% ~ 95.54%), 沉积物中其它磷组分含量顺序为磷酸单酯 > 磷酸二酯 > 焦磷酸盐. 从总趋势来看, 硫酸盐促进了沉积物中正磷酸盐的释放, 且在硫酸盐还原菌数量较高时使沉积物中磷酸单酯、磷酸二酯和焦磷酸盐含量增加.

关键词: 沉积物; 硫酸盐还原菌; ³¹P 核磁共振; 磷酸单酯; 磷酸二酯

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2315-07

Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate

YUAN Tan^{1,2}, HUA Yu-mei^{*}, ZHU Duan-wei¹, ZHAO Jian-wei¹, CAI Jian-bo¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Dezhou Environmental Monitoring Central Station, Dezhou 253034, China)

Abstract: A six week experiment under indoor simulated condition was carried out to investigate the external sulfate transformation between the sediments and overlying water from Lake Nanhui in Wuhan, China, and the influence of sulfate on the phosphorus components was also studied. The results showed that the sulfate input increased the pH and lowered the Eh in the overlying water. The sulfate concentration in the overlying water decreased with time, and it was assumed that there existed an obvious transformation of sulfate to other forms of sulfur compounds according to the variation of sulfate concentration in the pore water. The sulfate reduction index increased with higher input content of sulfate. The amount of sulfate reducing bacteria (SRB) in the sediments achieved the peak value in the second week, and the SRB amounts of S500 and S1000 were much higher than that of the control. ³¹P-NMR was used to characterize the relative quantity of phosphorus compounds in the sediment extracts leached by NaOH-EDTA. The components of phosphorus in Nanhui Lake sediment were mainly orthophosphate, phosphate monoester, phosphodiester and pyrophosphate. The predominant one was orthophosphate (84.10% - 95.54% of total phosphorus). The contents of other phosphorus components were followed; phosphate monoester > phosphodiester > pyrophosphate, and they increased due to the input of sulfate during the first four weeks, and decreased in the last two weeks. The external sulfate accelerated the release of orthophosphate from sediments to overlying water in a whole, and increased the contents of phosphate monoester, phosphodiester and pyrophosphate in sediments when the amounts of sulfate reducing bacteria were high.

Key words: sediments; sulfate reducing bacteria; ³¹P nuclear magnetic resonance; phosphate monoester; phosphodiester

随着外源磷负荷控制的强化, 湖泊磷营养物质的释放已成为当前的关注热点^[1,2]. 沉积物磷的释放行为受到环境因素的影响, 同时输入湖泊的某些外源物也会对其产生作用, 硫酸盐因肥料的广泛施用以及酸沉降等原因而成为输入量较高的湖泊外源物^[3], 硫酸盐进入到水体环境后对磷的作用值得关注. 研究表明^[4,5], 硫酸盐输入到水体可能导致沉积物中磷释放而加剧水体的富营养化程度. 以往就硫酸盐对沉积物磷的作用多集中于运用磷形态分级浸提方法间接反映沉积物磷的变化, 如果能用更有效

的手段直接获得磷组分的信息, 则更有助于阐明硫酸盐对沉积物磷的作用. 近年来, ³¹P 核磁共振(³¹P nuclear magnetic resonance, ³¹P-NMR) 作为定性定量分析手段在湖泊沉积物样品的磷组分研究中得到运用^[6-8], 获得了一些沉积物磷组分的基本信息, 如正磷酸盐、磷酸单酯、磷酸二酯、焦磷酸盐、多聚磷酸盐

收稿日期: 2011-08-31; 修订日期: 2012-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809030)

作者简介: 袁探(1984 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境污染与修复, E-mail: y. t86@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ymhua@mail.hzau.edu.cn

和磷酸脂等在沉积物中的含量,而这些磷组分对外源硫酸盐的响应,目前尚不清楚.本研究以武汉富营养化湖泊南湖为对象,在室内模拟条件下采用 ^{31}P -NMR研究硫酸盐输入后沉积物中不同磷组分的变化,结合沉积物发生的硫酸盐还原过程进行分析,对于理解硫酸盐对沉积物磷的作用效应具有科学意义.

1 材料与方法

1.1 采样

湖北省武汉市南湖为长江流域的典型浅水湖泊,水域面积 7.63 km^2 ,深度为 $1.85\sim 2.50\text{ m}$,由于自20世纪90年代末大量生活污水直接排入其内,使其近年来常年处于富营养状态.2009年10月,于南湖湖心 $30^\circ 28' 27.9''\text{N}$, $114^\circ 21' 53.4''\text{E}$,利用彼得森采泥器取南湖表层沉积物,以及相应取样点的上覆水.所采南湖上覆水和沉积物的基本理化性质见表1.上覆水中总磷(TP)含量为 $3.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为劣V类水体,远远超过富营养化发生水平.沉积物的TP含量为 $1722.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质含量为 $30.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,水体呈弱碱性,Eh均为负值,表明水体处于还原状态.

表1 上覆水与沉积物基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of the overlying

指标	water and sediment		
	上覆水	间隙水	沉积物
pH	7.4	—	7.1
Eh/mV	-168	—	-214
TP	$3.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$2.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$1722.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	35.9	18.3	—
有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	—	30.8

1.2 实验设置

实验设置3个处理:对照组(CK)上覆水中不添加 SO_4^{2-} ,第2组(S500)、第3组(S1000)上覆水中输入 SO_4^{2-} 浓度分别为 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.将南湖表层沉积物混匀后装填于1.3 L容器,沉积物高度为7 cm,沉积物和上覆水的体积比为5:7,置于 25°C 恒温箱中缺氧培养6周.每周取样进行测定,取样之前先进行原位测定上覆水和沉积物的pH和Eh.上覆水取样时,用虹吸管吸取.新鲜沉积物在 $4000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度离心10 min得到间隙水.沉积物样品进行冷冻干燥预处理再进行测定.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 上覆水和沉积物的基本理化性质

pH和氧化还原电位(Eh)的测定采用电极法.沉积物有机质含量采用重铬酸钾氧化容量法^[9].上覆水和间隙水中TP采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解后,采用钼锑抗分光光度法测定.

1.3.2 SO_4^{2-} 和沉积物中硫酸盐还原菌(sulfate reducing bacteria, SRB)测定

上覆水和间隙水 SO_4^{2-} 测定采用铬酸钡光度法^[10].采用最大或然数法(most probable number, MPN)^[11]测定沉积物中SRB数量,即采用多试管发酵技术,定量逐步稀释沉积物样品至SRB培养基中,在 $(29\pm 1)^\circ\text{C}$ 下恒温培养21 d,如果试管内产生黑色沉淀并伴有硫化氢气味的表明阳性反应,采用MPN技术对被测样品中的SRB进行计数,求出每克沉积物样品中所含的SRB数量.

1.3.3 硫酸盐还原指数的计算

利用硫酸盐还原指数表征硫酸盐还原强度.冷冻干燥的沉积物样品,经 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 酸化处理后,使用德国Elementar公司产的Vario max chn元素分析仪测定沉积物中的有机碳含量, Axios advanced X射线荧光光谱仪(荷兰, PANalytical公司)测定沉积物中硫含量.计算硫酸盐还原指数^[12,13]: $(\text{TOC} + C_{\text{loss}})/\text{TOC}$.式中,TOC为有机碳含量, C_{loss} 为硫酸盐还原作用中被降解有机质的量, $C_{\text{loss}} = S(\%) \times 0.75$, $S(\%)$ 为硫的质量分数.

1.3.4 ^{31}P -NMR测定沉积物磷组分

取1 g冻干沉积物样品,加入混合配制的 $0.25\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 和 $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{EDTA}$ 的溶液10 mL,在往复振荡器 25°C 下振荡16 h,浸提液在 $15000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心10 min,上清液用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 水相针式滤膜过滤,滤液冷冻后用冷冻干燥机(美国Labconco公司,Freezone型)在 -40°C 下冻干.称取250 mg冻干粉末装于5 mL塑料离心管中,使用点动式漩涡振荡器将干粉重溶于0.6 mL重水与0.1 mL $10\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 的混合溶液.起初连续振荡2 min,随后静置2 h使混合物达到溶解平衡,其间每隔30 min振荡30 s.最后 $8000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心5 min.将上清液用注射器移入5 mm玻璃制核磁共振样品管中待测^[14].核磁共振波谱仪为瑞士Bruker公司产的AV 400型,测定时使用85%磷酸作为标准物质.

1.3.5 数据统计分析方法

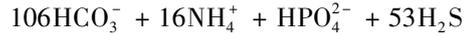
用SAS 8.1数据分析软件(SAS institute, 1999-2000)进行统计分析,统计分析采用方差分析,双重比较采用最小显著差法(LSD),检验水平为 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$.

2 结果与讨论

2.1 SO₄²⁻ 输入对上覆水 pH 和 Eh 的影响

上覆水 pH、Eh 的变化特征如图 1 所示. CK、S500 和 S1000 上覆水的 pH 值呈弱碱性,介于 7.09 ~ 7.52 之间,总体来说大小顺序为 CK < S500 < S1000, S500 和 S1000 的 pH 分别在第 2 或 3 周达到最高值. 实验期间 CK、S500 和 S1000 的上覆水 Eh 均低于 -100 mV, 在 -102 ~ -197 mV 范围内发生上下波动,且基本上随着硫酸盐输入浓度的增加而降低.

SO₄²⁻ 进入湖泊后作为电子受体被 SRB 利用,硫酸盐还原反应方程如下^[15]:



由上式可知,SRB 还原硫酸盐过程中,其代谢会导致部分有机磷转变为 HPO₄²⁻ 而释放,同时每还原 1 g SO₄²⁻ 生成 1.042 g 碱度,使水体 pH 值升高. 上覆水中 pH 和 Eh 变化是由于沉积物中硫酸盐还原的发生引起,因样品取自富营养化程度严重的南湖,所以上覆水处于还原状态,初始 Eh 即处于较低水平,同时实验持续过程中保持缺氧条件,使得 Eh 一直保持较低的范围. 实验中发现上覆水 Eh 随着硫酸盐浓度的升高而降低程度加剧,说明了硫酸盐输入浓度增加时,导致硫酸盐还原程度加剧,从而进一步降低了 Eh. 由于硫酸盐还原作用导致 SO₄²⁻ 浓度降低,随后 SRB 因缺乏足够底物而使硫酸盐还原作用减弱,因此第 3 周后表现出下降趋势.

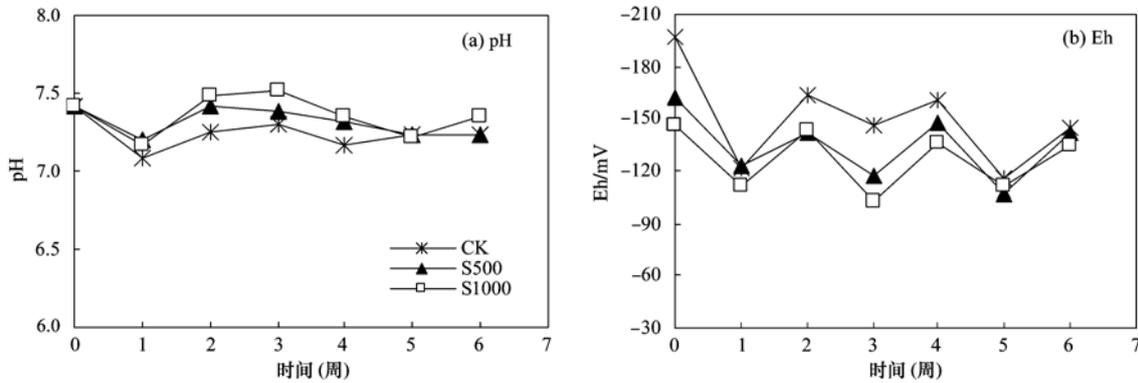


图 1 上覆水 pH 和 Eh 变化

Fig. 1 Variation in pH and Eh of the overlying water

2.2 SO₄²⁻ 在水体中变化及硫酸盐还原指数

2.2.1 上覆水和沉积物间隙水中 SO₄²⁻ 的变化

输入到上覆水中的 SO₄²⁻ 会因浓度梯度扩散作用而进入到沉积物中,在此发生硫酸盐还原作用而导致 SO₄²⁻ 浓度降低. 第 1 周, S500 和 S1000 的上覆水中 SO₄²⁻ 浓度急剧下降约 50% [图 2(a)], 第 6

周, SO₄²⁻ 浓度降至最低, S500 和 S1000 上覆水中 SO₄²⁻ 浓度分别下降至初始浓度的 4.2% 和 3.2%. CK 的 SO₄²⁻ 浓度始终低于 S500、S1000. 由图 2(b) 可知, 第 2 周时, CK、S500 和 S1000 间隙水中 SO₄²⁻ 浓度明显上升, 但是, 间隙水中 SO₄²⁻ 浓度上升幅度低于上覆水中的下降幅度, 这是由于沉积物中发生

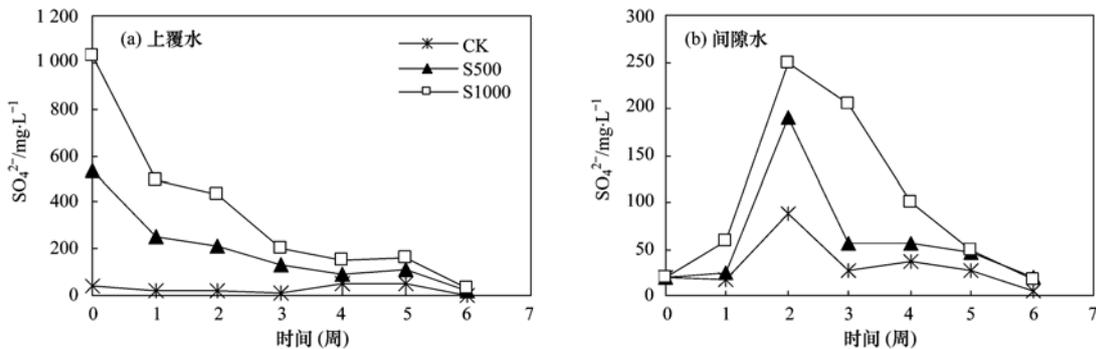


图 2 上覆水和间隙水中 SO₄²⁻ 变化

Fig. 2 Sulfate in the overlying water and the pore water

的硫酸盐还原作用消耗了间隙水中的 SO_4^{2-} . 第 2 周过后, 间隙水中 SO_4^{2-} 浓度迅速下降, 第 6 周时降至最低值.

2.2.2 沉积物中 SRB 数量变化

沉积物中 SRB 的 MPN 计数结果如图 3 所示. 所有沉积物样品中均有 SRB 检出, 增殖非常快, 并随上覆水中 SO_4^{2-} 输入浓度不同和时间变化而出现差异, 其中在上覆水中添加 SO_4^{2-} 的 S500、S1000 处理中, SRB 数量较大, 变化幅度(以干沉积物计, 下同)分别是 $29.8 \sim 2.6 \times 10^4$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ 和 $29.8 \sim 3.8 \times 10^4$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$, 比 CK 沉积物中的 SRB 数量($29.5 \sim 4.6 \times 10^3$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$) 高出了一个数量级, 3 个处理 SRB 数量变化都呈现先升后降的趋势, 高峰出现在第 2 周.

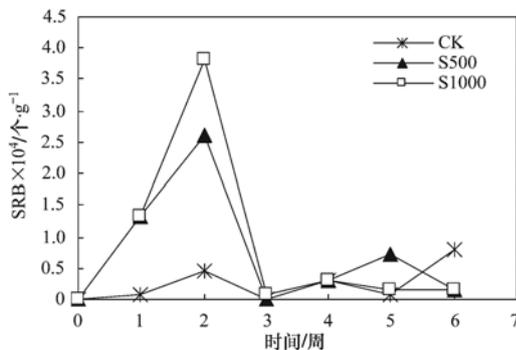


图 3 沉积物中 SRB 数量变化

Fig. 3 Sulfate reducing bacteria (SRB) amount in the sediments

SRB 在 pH 值为 5.5 ~ 8.0 之间可以生长, 生长的最适 pH 值为 7.0 ~ 8.0^[16]. 水体 pH 测定结果显示呈弱碱性, 因此湖泊 pH 有利于 SRB 生长, 进而可以促进硫酸盐还原作用进行. Eh 也是影响 SRB 生长的重要因素, 当 Eh 低于 -100 mV 时, SRB 才能较好生长, 硫酸盐还原作用方得以发生. 实验期间, 各处理的上覆水中 Eh 均低于 -100 mV, 也有利于硫酸盐还原作用的进行. SRB 可利用无机物和有机质作为电子供体, 如 H_2 (同时以 CO_2 提供碳源)、乳酸盐、乙酸盐和丙酸盐等^[17], 所采南湖沉积物中有机质含量高达 $30.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 能够满足 SRB 生长的需要.

S500 和 S1000 的 SRB 数量变化和间隙水中硫酸盐浓度变化特征较为相似, 对沉积物中 SRB 和间隙水中的 SO_4^{2-} 浓度进行相关性分析. SRB 利用 SO_4^{2-} 作为电子受体, 催化 SO_4^{2-} 还原的酶位于 SRB 细胞质内或位于细胞膜上, SO_4^{2-} 只有输送到细胞才能被还原^[18], 低浓度 SO_4^{2-} 对于硫酸盐还原的发生具有限制作用^[3], 由于 CK 沉积物间隙水中 SO_4^{2-} 浓度较低, SO_4^{2-} 向胞内的输送受限, 难以满足 SRB 的

生长与增殖的需要, 故 CK 沉积物的 SRB 数量变化没有规律, 与间隙水中 SO_4^{2-} 之间没有相关性 ($r = 0.107$). 而 S500 和 S1000 与间隙水中 SO_4^{2-} 之间均具有较好的相关性, 相关系数分别是 0.816、0.532. 第 2 周时间隙水 SO_4^{2-} 浓度达到最高值, 此时 S500 和 S1000 的 SRB 数量也达到最高, SRB 对间隙水 SO_4^{2-} 的利用使其浓度从第 3 周开始出现降低, 而后期 SO_4^{2-} 浓度降低进而使 SRB 增殖受限, 因此 SRB 数量也随其逐渐减少.

2.2.3 硫酸盐还原指数的变化

SRB 在有机碳源的矿化过程中起着重要作用, 如在海洋沉积物中约有 50% 的有机碳矿化是通过 SRB 完成的^[19]. 硫酸盐还原指数通过沉积物中有机碳和硫之间的计量关系, 可反映硫酸盐还原的强度, 即硫酸盐还原指数越大, 则硫酸盐还原强度越高. 对初始样和 CK、S500 和 S1000 第 1、3、5 周沉积物样品的硫酸盐还原指数进行测定, 如表 2 所示. CK 的沉积物中含有少量的 SO_4^{2-} , 会在缺氧条件下发生一定量的还原, 所以 CK 的硫酸盐还原指数随时间推移出现轻微增加. 硫酸盐还原指数随着上覆水中 SO_4^{2-} 输入浓度增大而增加, 同一处理随着时间的延长, 硫酸盐还原指数逐渐增大, 这是由于 S500、S1000 中有充足的 SO_4^{2-} 供应作为第一氧化剂, SRB 的呼吸作用导致 SO_4^{2-} 快速还原和连续消耗, 有机质快速氧化分解, 硫酸盐还原指数逐渐升高.

表 2 沉积物的硫酸盐还原指数

周数	CK	S500	S1000
0	1.092	1.092	1.092
1	1.095	1.097	1.095
3	1.110	1.101	1.121
5	1.110	1.114	1.168

2.3 沉积物磷重要组分的变化趋势

图 4 所示为第 2 周 S1000 沉积物 NaOH-EDTA 萃取浓缩液中所含磷的 ^{31}P -NMR 谱图, 该样品的有机磷含量在整个过程中最高. 从定性角度看, 按照化合物的成键类型, 将 ^{31}P -NMR 图谱中的磷化合物信号分为 4 类^[20], 并能够清晰地将主要的磷组分区分开来. 图 4 中从左至右, 分别为正磷酸盐、磷酸单酯、磷酸二酯和焦磷酸盐. Zhang 等^[21] 对长江流域的湖泊核磁共振结果除了检测出以上 4 种磷组分外, 还检测出含量为 0.1% ~ 0.2% 的磷酸酯, 在本研究中未能检出.

根据各信号积分面积计算出 3 个处理中沉积物

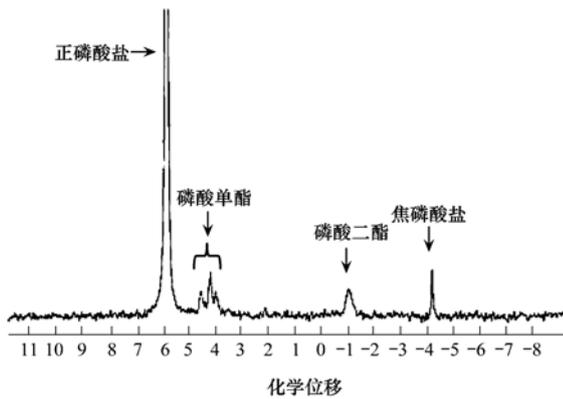


图4 沉积物 NaOH-EDTA 萃取物的磷化合物³¹P-NMR 谱图

Fig. 4 ³¹P-NMR spectra of NaOH-EDTA extracts of lake sediments. NaOH-EDTA 萃取浓缩液中的磷含量,对检测出的 4 类磷进行定量分析,其变化的总体趋势如图 5 所示. 从中可直观看出来, NaOH-EDTA 萃取浓缩液中绝大部分磷为正磷酸盐,占 TP 的 89.10% ~ 95.54%. S500、S1000 和 CK 相比,正磷酸盐[图 5(a)]含量存在显著差异($P < 0.05$),其含量大都低于 CK,在第 3 周时出现峰值,分别为 $1478.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1462.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,CK 最大含量出现在第 5 周,为 $1501.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而且, S1000 沉积物中正磷酸盐的含量也低于 S500. 这说明硫酸盐输入浓度越高,以正磷酸盐形式从沉积物中释放的磷越多.

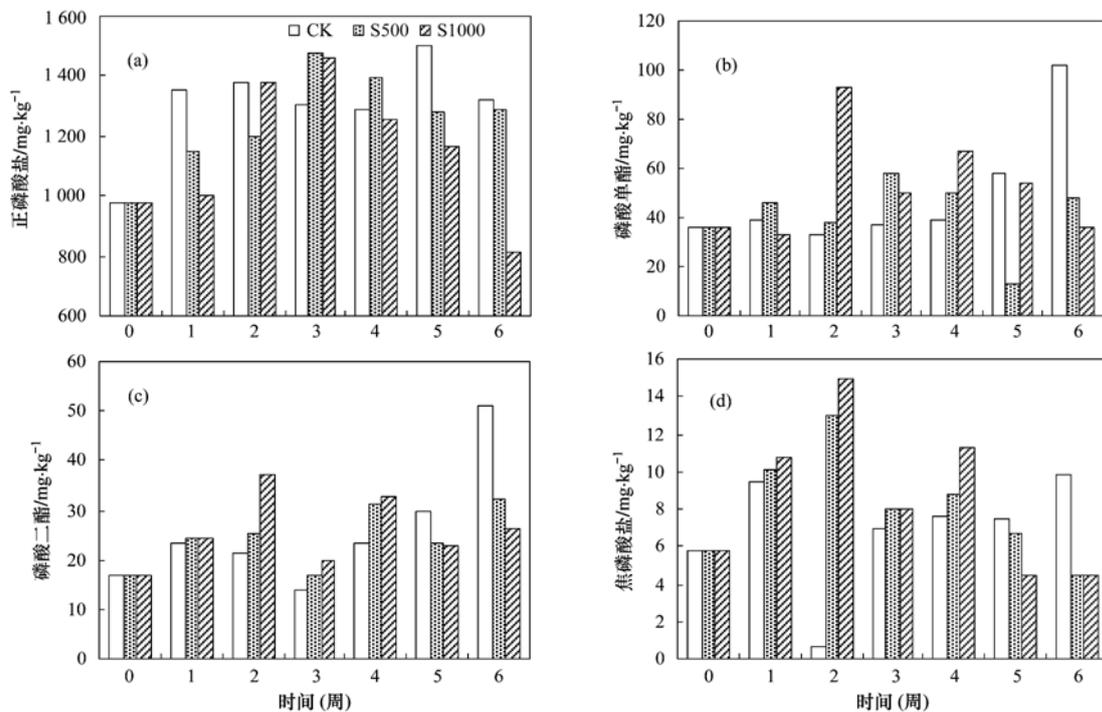


图5 沉积物 NaOH-EDTA 萃取物的正磷酸盐、磷酸单酯、磷酸二酯、焦磷酸盐含量的³¹P-NMR 分析

Fig. 5 Quantitative analysis of ³¹P-NMR spectra of NaOH-EDTA extracts of lake sediments, orthophosphate, phosphate monoester, phosphodiester and pyrophosphate

图5(b)、6(c)分别为磷酸单酯、磷酸二酯,这2种磷酯是沉积物中含量较高且非常重要的有机磷,虽然其本身活性较低,却是沉积物磷释放的潜在源,其矿化过程会产生活性磷酸盐^[22,23]. 本研究中磷酸单酯含量最高达 TP 的 6.89%,在 2~4 周,CK、S500 和 S1000 的磷酸单酯存在显著性差异($P < 0.01$). Ahlgren 等^[8]通过室内实验发现,在 20℃ 缺氧条件下沉积物中磷酸单酯含量为 $269 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于 20℃ 好氧条件下磷酸单酯含量. 借此可解释本研究中缺氧条件下 CK 沉积物中磷酸单酯含量也呈上升趋势的原因. 磷酸单酯包括多种有机磷化合物,植酸(肌醇六磷酸及其盐类)是最重要的磷酸单酯化合物^[6],一个植酸分子连接 6 个磷酸,具有特定的空间构型,具有良好的对称性,导致在³¹P-NMR 图谱中出现 3 个信号峰,峰形很特殊,峰面积比接近 1:1:1. 植酸可与多价阳离子结合而发生沉淀,与 Fe(OOH)的吸附能力很强,因此植酸易于在沉积物中发生累积^[24]. 硫酸盐输入浓度越高,沉积物中磷酸单酯含量则增加,可能是由于硫酸盐输入引起沉积物中铁磷的释放^[3],进而导致原来与铁结合的植酸发生释放,而到后期(5~6 周),铁又逐渐沉降到沉积物中,导致 S500 和 S1000 硫酸单酯含量低于 CK. 磷酸二酯主要包括 DNA 和 RNA 等具有遗传功

能的生物大分子,还包括磷壁酸、磷脂等生物细胞壁和细胞膜的重要组成部分,含量占 TP 的 1.62% ~ 3.35%,CK、S500 和 S1000 之间的变化趋势和差异与磷酸单酯甚为相似,而其含量总体来说是低于磷酸单酯的,这与其他研究者的结果一致^[25],磷酸二酯的降解首先是转化为磷酸单酯,然后再由磷酸单酯转化为正磷酸盐。

焦磷酸盐属于无机磷,可随着某些废水、肥料的输入而进入湖泊,主要是用于储存微生物能量的一种化合物,在液相中不稳定,能水解为正磷酸盐^[13,26,27]。研究发现焦磷酸盐是沉积物中分解相对较快的磷化合物,厌氧条件下易被微生物分解,在深度 2 cm 以下的沉积物难以检测到^[24]。沉积物焦磷酸盐含量的变化如图 5(d)所示,本研究采用的是水界面下 0 ~ 3cm 的表层沉积物,焦磷酸盐在整个过程中含量很低,为 0.05% ~ 1.0%。在第 2 周时 S500、S1000 沉积物中的焦磷酸盐出现峰值,后期发生下降。Reitzel 等^[6]认为焦磷酸盐对沉积物的磷释放起着重要作用,而本研究中焦磷酸盐因其含量很低,所以其对沉积物磷释放的贡献不及磷酸单酯和磷酸二酯。

SO₄²⁻ 输入后引起 SRB 的生长,而 SRB 对有机磷的作用体现在两个相反的方面,一方面可通过降解有机质以及改变沉积物的氧化还原条件,促进有机磷的释放,同时又可对磷进行同化而实现磷在沉积物中的滞留。磷酸单酯、磷酸二酯和焦磷酸盐这 3 种磷均属于生物磷,总的来说,在起始 4 周硫酸盐的输入提高了沉积物中生物磷含量,同时结合 SRB 的数量变化(图 3)得知,SRB 在第 2 周达到最高值,可能是 SRB 在合成代谢过程中将沉积物中的一部分无机磷加以利用而转化为有机磷,图 5(b)中可以看到第 2 周 S1000 的磷酸单酯含量是 S500 和 CK 的 2 倍以上。从第 3 周开始,SRB 因缺乏足够 SO₄²⁻ 作底物而数量锐减,虽然 SRB 衰亡,但厌氧条件下 SRB 所包含的生物磷较难被降解。在后 2 周,通过磷酸单酯、磷酸二酯和焦磷酸盐的变化,可推知出现了生物体的降解,特别是最后 1 周,S500 和 S1000 的生物磷含量显著低于 CK ($P < 0.01$)。

3 结论

(1) 上覆水中 pH 和 Eh 因 SO₄²⁻ 输入分别呈现上升和下降趋势,且硫酸盐输入浓度越高,则两者的变化越明显。

(2) 沉积物中 SRB 随上覆水中不同 SO₄²⁻ 输入

浓度和时间而出现差异,SO₄²⁻ 的输入明显促进了 SRB 的生长,SRB 数量在第 2 周达到峰值。外源 SO₄²⁻ 输入浓度越高,沉积物硫酸盐还原指数越高。

(3) ³¹P-NMR 测定沉积物中各种磷组分的转化,可检测出正磷酸盐以及磷酸单酯、磷酸二酯和焦磷酸盐。SO₄²⁻ 输入使沉积物中的正磷酸盐含量显著降低 ($P < 0.05$)。沉积物中其它磷组分含量顺序为磷酸单酯 > 磷酸二酯 > 焦磷酸盐,在起始 4 周硫酸盐提高了 S500 和 S1000 中这 3 种磷含量,但在最后 2 周其含量低于 CK。

参考文献:

- [1] Palmer-Felgate E J, Mortimer R J G, Krom M D, *et al.* Internal loading of phosphorus in a sedimentation pond of a treatment wetland: effect of a phytoplankton crash[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(11): 2222-2232.
- [2] 姜霞,王秋娟,王书航,等. 太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1285-1291.
- [3] Zak D, Kleeberg A, Hupfer M. Sulphate-mediated phosphorus mobilization in riverine sediments at increasing sulphate concentration, River Spree, NE Germany[J]. *Biogeochemistry*, 2006, **80**(2): 109-119.
- [4] Holmer M, Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review[J]. *Freshwater Biology*, 2001, **46**(4): 431-451.
- [5] Lamers L P M, Tomassen H B M, Roelofs J G M. Sulfate-induced eutrophication and phytotoxicity in freshwater wetlands [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, **32**(2): 199-205.
- [6] Reitzel K, Ahlgren J, DeBrabandere H, *et al.* Degradation rates of organic phosphorus in lake sediment [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **82**(1): 15-28.
- [7] Ahlgren J, Tranvik L, Cogoll A, *et al.* Sediment depth attenuation of biogenic phosphorus compounds measured by ³¹P NMR [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(3): 867-872.
- [8] Ahlgren J, Reitzel K, De Brabandere H, *et al.* Release of organic P forms from lake sediments [J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 565-572.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-34.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 164-165.
- [11] GB/T 14643. 5-93, 工业循环冷却水中硫酸盐还原菌的测定[S].
- [12] Lallier-Vergès E, Bertrand P, Desprairies A. Organic matter composition and sulfate reduction intensity in Oman Margin sediments [J]. *Marine Geology*, 1993, **112**(1-4): 57-69.
- [13] 魏中青,刘丛强,梁小兵,等. 贵州红枫湖沉积物中有机质的降解与微生物作用[J]. *科学通报*, 2005, **50**(14): 1486-1489.

- [14] 刘晋勇. 富营养化人工湖底泥磷的形态及迁移转化规律研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008. 35-37.
- [15] Van Houten R T, Hulshoff Pol L W, Lettinga G. Biological sulphate reduction using gas-lift reactors fed with hydrogen and carbon dioxide as energy and carbon source [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, **44**(5): 586-594.
- [16] Zhao H, Li A M, Wan B, *et al.* Isolation and physiology of a moderate halophilic sulfate reducing bacterium [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1995, **1**(1): 61-67.
- [17] Vasconcelos C, Mckenzie J A. Sulfate reducers-dominant players in a low-oxygen world? [J]. *Science*, 2000, **290** (5497): 1711-1712.
- [18] 蔡靖, 郑平, 张蕾. 硫酸盐还原菌及其代谢途径 [J]. *科技通报*, 2009, **25**(4): 427-431.
- [19] Jørgensen B B. Mineralization of organic matter in the sea bed—the role of sulphate reduction [J]. *Nature*, 1982, **296**(5858): 643-645.
- [20] Wang X J, Ding S M, Jiang H Q, *et al.* Characterizing of phosphorus in environmental model samples by ^{31}P -NMR spectroscopy [J]. *Soil Science*, 2008, **20**(1): 45-50.
- [21] Zhang R Y, Wu F C, He Z Q, *et al.* Phosphorus composition in sediments from seven different trophic lakes, China: A Phosphorus-31 NMR study [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(1): 353-359.
- [22] Bai X L, Ding S M, Fan C X, *et al.* Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2507-2513.
- [23] 范成新, 张路. 太湖——沉积物污染与修复原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 17-18.
- [24] De Groot C J, Golterman H L. On the presence of organic phosphate in some Camargue sediments: evidence for the importance of phytate [J]. *Hydrobiologia*, 1993, **252**(1): 117-126.
- [25] Hupfer M, Rütbe B, Schmieder P. Origin and diagenesis of polyphosphate in lake sediments: a ^{31}P -NMR study [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(1): 1-10.
- [26] Sundareshwar P V, Morris J T, Pellechia P J, *et al.* Occurrence and ecological implications of pyrophosphate in estuaries [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(6): 1570-1577.
- [27] 彭喜玲, 方海兰, 占新华, 等. 利用 ^{31}P 核磁共振技术研究污泥中磷在土壤中的形态转换 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(10): 2104-2110.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jiashan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-Dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH ₄ ⁺ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH ₄ , N ₂ O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH ₄ and N ₂ O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行