

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响

左乐¹, 吕昌伟^{1, 2*}, 何江^{1, 2}, 王伟颖¹, 颜道浩¹

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特 010021)

摘要: 以寒旱区湖泊乌梁素海为研究对象, 以有机磷降解过程中的形态转化为主线, 探讨了冰封期内底物添加与灭菌处理对有机磷释放特征的影响. 结果表明, 180 d 冰封期内, 灭菌处理(T_N)上覆水中可溶性总磷酸盐(DTP)和可溶性正磷酸盐(DIP)及可溶性有机磷(DOP)的质量浓度均高于底物添加处理(T_M), 揭示 T_M 体系中厌氧微生物的同化利用降低了上覆水中磷的质量浓度; 同时微生物驱动下铁的异化还原作用也是影响水-沉积物界面有机磷释放的重要机制. 释放周期内, 沉积物中活性有机磷(LOP)、总活性磷(TLP)的含量均减少; T_M 体系的中等活性有机磷(MLOP)含量先减少后增加, 非活性有机磷(NLOP)的含量先增加后减少; T_N 的MLOP含量波动性增加, NLOP的含量波动性减少. 释放初期(0~60 d), T_M 的MLOP含量高于 T_N , 而NLOP的含量低于 T_N ; 释放中末期(60~180 d), T_M 的MLOP含量低于 T_N , 而NLOP的含量高于 T_N . 揭示释放中沉积物MLOP与NLOP之间存在相互转化的可能性. 释放过程中, T_M 沉积物有机磷的相对含量降低, 无机磷的相对含量增高, 呈现有机磷向无机磷转化的趋势, 沉积物有机磷约有6.1%转化为无机磷, 揭示了冰封期内, 微生物可加速沉积物有机磷向无机磷的转化, 提高了磷的生物可利用性, 增加了沉积物磷向上覆水释放的风险.

关键词: 有机磷; 形态转化; 释放; 微生物; 沉积物

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4501-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.12.023

Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season

ZUO Le¹, LÜ Chang-wei^{1, 2*}, HE Jiang^{1, 2}, WANG Wei-ying¹, YAN Dao-hao¹

(1. College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2. Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: Organic phosphorus (OP) has been considered as an important pool for bioavailable phosphorus. In this work, impacts of microorganisms on the degradation and release of OP in sediments from Lake Wuliangsu Hai during freezing season were investigated using chemical sequential extraction methods. The results showed that the concentrations of dissolved total phosphorus (DTP), dissolved inorganic phosphorus (DIP) and dissolved organic phosphorus (DOP) in overlying water of the sterilization (T_N) treatments were higher than those of the substrate addition (T_M) treatments, indicating that the assimilation of anaerobic microorganisms and the disassimilation reduction of iron driven by microorganisms were the main mechanisms governing OP behavior and process across the water-sediments interface. The concentrations of labile OP (LOP) and total labile phosphorus (TLP) decreased during the releasing period. During the first 60 days, the concentrations of moderately labile OP (MLOP) of T_M treatments decreased, while those of the nonlabile OP (NLOP) increased. During 60-180 days, the MLOP concentrations of T_M treatments were found increasing, while those of NLOP decreased. During the beginning period (0-60 d), the concentrations of MLOP of T_M treatments were higher than those of T_N treatments, while the NLOP concentrations were lower than those of T_N treatments; and these trends were reversed during 60-180 days. These trends revealed the possibility of transformation between MLOP and NLOP during the releasing process. Furthermore, the percentage of OP was found decreasing, while inorganic phosphorus (IP) of T_M treatments increased, which indicated the transformation trend from OP to IP (about 6.1% of OP was transformed to IP) in sediments. On the basis of this work, it can be concluded that microorganisms can improve the transformation from OP to IP elevating the bioavailability and contribution of OP in the eutrophication process of lakes.

Key words: organic phosphorus; fractions transformation; release; microorganisms; sediments

有机磷在水生及陆地生态系统中的相对丰度较高, 具有潜在释放风险并能转变为生物可利用形式, 是水生植物可利用磷的潜在重要来源^[1]. 对于浮游植物和浮游细菌, 可溶性有机磷更易被其吸收利用^[2]. 例如, 在东京湾沉积物的研究中, 典型的有氧海洋条件下, 几天之内肌醇六磷酸(植酸)可完全水解为磷酸盐^[3]. 同样地, 在湖泊生态系统中, 有机磷

也可在数小时之内以生物可利用的形式从沉积物中释放到上覆水体中^[4]. 在北太平洋的透光层中发现溶解性有机磷是生物可利用磷的主要组成部分^[5].

收稿日期: 2015-06-03; 修订日期: 2015-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41003049, 41163006); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2015MS0404)

作者简介: 左乐(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: 603263806@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lcw2008@imu.edu.cn

Berelson 等^[6]在 Port Phillip 湾的营养盐循环研究中发现磷的内源再生量占湖泊溶解性磷酸盐的比例高达 72%,比内源性氮营养盐的产生量占外源性营养盐的比例超出 22%.

水-沉积物界面是溶解物质在生物体系与地球化学循环之间进行耦合作用的最初场所,也是水生生态系统物质循环不可缺少的环节^[7]. 目前,有关冰封期水-沉积物界面磷再生循环机制方面的研究尚鲜见. 实际上,冰封期内厌氧条件下,厌氧微生物的活性较强,沉积物中有机质的厌氧降解能直接导致沉积物中有机磷向水体释放,同时不溶性的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 变成可溶性的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 使与铁结合的磷大量释放进入水体,为春季初级生产力的提高提供了物源基础^[8-11]. 本文针对内蒙古高原湖泊冰封期的特点(150 d),以乌梁素海(WLSH)为研究对象,实验模拟了冰封期沉积物中有机磷的释放特征,初步探讨了底物添加与灭菌处理条件下,微生物活性与沉积物中有机磷释放间的关系,对探讨冰封期湖泊沉积物中有机磷释放的生物学机制,控制不同季节湖泊内源负荷和改善水环境质量,以及揭示有机磷的形态转化机制和重新认识有机磷在富营养化中的作用与贡献等均有重要意义.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

乌梁素海($40^{\circ}47' \sim 41^{\circ}03' \text{N}$, $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57' \text{E}$)系黄河改道后形成的牛轭湖,是内蒙古高原西部干旱区最典型的浅水草型湖泊,也是全球范围内荒漠半荒漠地区极为少见的具有生物多样性和环境保护等多功能的大型草型湖泊,现有水域面积约 330 km^2 ,平均水深为 0.8 ~ 1.0 m. 湖区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,属大陆性干旱、半干旱气候,月平均气温低于 0°C ,每年冰封期超过 150 d^[12]. 随着经济的发展和人类活动的愈加频繁,尤其是河套灌区农田退水的影响,近 10 年来乌梁素海富营养化进程加剧,面临严重的生态环境问题. 湖中现有大型水生植物共 6 科 6 属 11 种,以芦苇、龙须眼子菜和穗花狐尾藻为优势种,生长繁茂,遍布全湖^[13]. 乌梁素海已成为以大型水生植物过量生长为表征的重度富营养化草型湖泊,为世界上沼泽化进程最快的湖泊之一^[13].

1.2 研究方法 与材料

1.2.1 实验材料

2013 年 8 月于乌梁素海南部、中部和北部沉水

植物区系统采集表层沉积物样(KC mod B 型无扰动采样器,Swedaq),样品于封口聚乙烯塑料袋中冷藏保存,实验室中 -24°C 冷冻保存;同步采集并现场过滤上覆水样;同时现场监测 pH、温度、溶解氧(DO)等水质指标. 采样站位使用 GPS 定位.

1.2.2 沉积物营养盐释放模拟实验

本实验中,通过添加底物(T_M)和灭菌(T_N)两种处理方式促进或抑制微生物活性,考察冰封期微生物对沉积物中有机磷释放及形态转化的影响机制.

释放实验采用 WLSH 过滤水作为上覆水. 将从乌梁素海南部、中部和北部采集的表层沉积物除去植物和砾石等残渣,充分搅拌均匀,称取 $50.00 \text{ g} \pm 0.10 \text{ g}$ (湿重)沉积物置于 500 mL 培养瓶底部平铺,缓慢加入 400 mL 上覆水进行培养,并记录液面位置. T_M 处理添加葡萄糖作为微生物营养源,促进微生物生长繁殖; T_N 处理添加福尔马林进行灭菌. 分别于第 10、20、40、60、90、120、150、180 d 每个时间点取出各培养瓶进行水样及沉积物的分析测试. 采集样品时,同步测定 pH、氧化还原电位(ORP)、温度、DO 和电导率等指标. 实验体系于 N_2 氛、温度 4°C 的人工气候箱(模拟光照)中进行,模拟冰封期乌梁素海的水环境条件.

水样采集后,通过钼锑抗分光光度法^[14]测定可溶性总磷酸盐(DTP)和可溶性正磷酸盐(DIP),可溶性有机磷(DOP)含量由差值法获得, $\text{DOP} = \text{DTP} - \text{DIP}$. 沉积物采集后,充分混匀,通过邻菲罗啉分光光度法^[15]测定活性铁含量. 按美国农业部的连续提取方法^[16]测定形态磷的含量,该方法将沉积物中的有机磷分为活性有机磷(LOP)、中等活性有机磷(MLOP)、非活性有机磷(NLOP)共 3 种,其中 $\text{NaHCO}_3\text{-OP}$ 为活性有机磷(由 pH 为 8.5 的 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 提取),属吸附于沉积物的松散磷;中活性有机磷(MLOP)包括 HCl-OP (HCl 提取态有机磷, $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 提取)及 Fulvic Acid-OP(富里酸结合态有机磷, $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 提取);非活性有机磷(NLOP)则包括 Humic Acid-OP(胡敏酸结合态有机磷, $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 提取)和 Residual-OP(残渣态有机磷,沉积物灼烧后由 $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 提取).

DOP、DIP、DTP 的释放速率按下式计算:

$$R = V(c_n - c_0)/(S \cdot t) \quad (1)$$

式中, R 为释放速率 [$\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]; V 为柱中上覆水体积(L); c_n 、 c_0 为第 n 次和 0 次(即初始)

采样时 DOP、DIP、DTP 的浓度 ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$); S 为样品中水-沉积物接触面积 (m^2); t 为释放时间 (d). 所计算的 DOP、DIP、DTP 为平均表观释放速率.

2 结果与讨论

2.1 上覆水中磷浓度的变化特征

微生物在一定程度上影响着磷的释放和再生循环等界面行为与过程,特别是在有机质含量较高的湖泊中^[17, 18]. 沉积物中有相当数量的微生物具有将难溶性磷化合物转化为可溶性磷的能力^[19],提高磷的生物可利用性,进而影响上覆水中磷的浓度. 实验结果表明(图 1),180 d 冰封期内, T_N 上覆水中 DTP、DIP 及 DOP 的浓度均高于 T_M 的浓度. 厌氧条件下,微生物对沉积物中二价铁 (Fe^{2+}) 的含量影响显著. 冰封期内, T_M 沉积物中 Fe^{2+} 的含量约为 T_N 的 3 倍(图 2),表明实验体系中铁异化还原微生物的存在,同时揭示体系中厌氧微生物的同化利用对上覆水中磷浓度的影响作用.

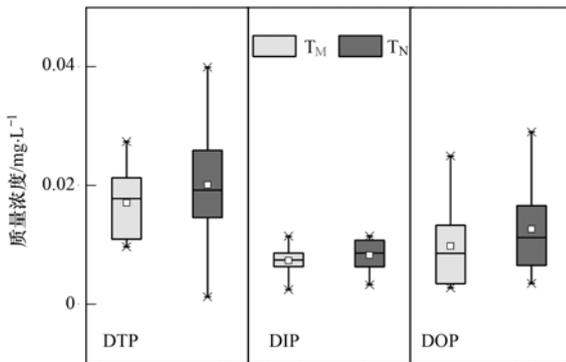


图 1 微生物对上覆水中磷的释放影响

Fig. 1 Effect of microorganisms on phosphorus release in overlying water

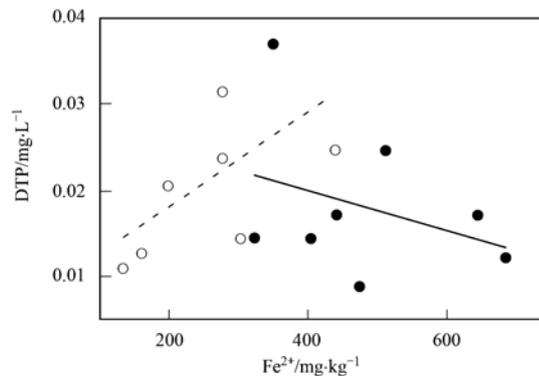
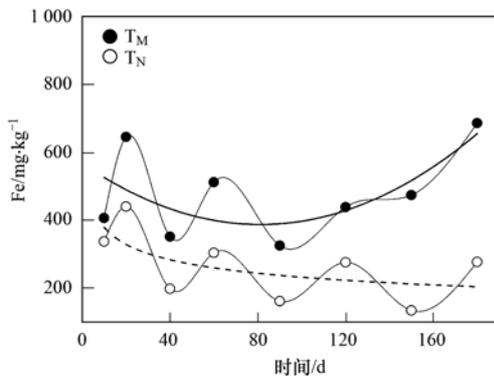


图 2 微生物对沉积物中 Fe^{2+} 释放影响

Fig. 2 Effect of microorganisms on Fe^{2+} release in sediments

T_M 结果表明(图 2),随着 Fe^{2+} 含量的增加,上覆水中 DTP 的浓度逐渐降低;而 T_N 结果相反,随着 Fe^{2+} 含量的增加,上覆水中 DTP 的浓度逐渐增加. 在 T_M 释放实验中,铁的释放量受微生物同化、异化作用的影响. 假单胞细菌为乌梁素海水体细菌优势类群^[20~22],在沉积物中也发现有脱铁杆菌和芽单胞菌等铁还原细菌^[22]. 因 Fe^{2+} 可作为电子供体,氧化亚铁硫杆菌等自养微生物可从 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 的过程中获取代谢所需的能量. 冰封期, T_M 的 DO 含量(平均值为 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)较低,微生物利用铁进行代谢,分解含铁有机化合物,最终以 Fe^{3+} 或 Fe^{2+} 形式释放出来. 冰封期为厌氧环境, Fe^{3+} 易于被还原为 Fe^{2+} ,故 T_M 的 Fe^{2+} 含量高于 T_N 的含量. 此外,乌梁素海为弱碱性湖泊,pH 值范围在 8.0~8.5 之间. 沉积物中 Fe^{2+} 向上覆水中迁移转化时,会被氧化为 Fe^{3+} ,针铁矿及其他铁(III)氧化物在中性 pH 环境中是带正电的,并具有较强吸附磷酸酯的功能^[23, 24],从而 Fe^{3+} 易结合上覆水中无机磷,形成 Fe-P,沉淀进入沉积物中,而氧化铁的表面可促进有机磷酸酯的水解,从而导致上覆水中 DIP 及 DOP 含量的降低,进而 DTP 的含量也降低. 因此,冰封期微生物驱动下铁的异化还原作用是影响水-沉积物界面有机磷释放的重要机制.

对于理想的水-沉积物界面,界面物质交换速率应保持不变,但在实际中,往往首先寻找释放速率相对稳定的时段为有效时段,然后再取在该有效时段下平均释放速率为释放强度数值. 对乌梁素海沉积物进行了 180 d 的释放实验,由释放速率变化图可知(图 3),释放速率变化曲线在实验初期(0~60 d)均有较大变幅,但每组的释放速率均在 60 d 后曲线逐渐变得较为平坦,表明所有释放实验在进行 60 d 后,释放速率趋于稳定. 释放实验结果表明水-沉积

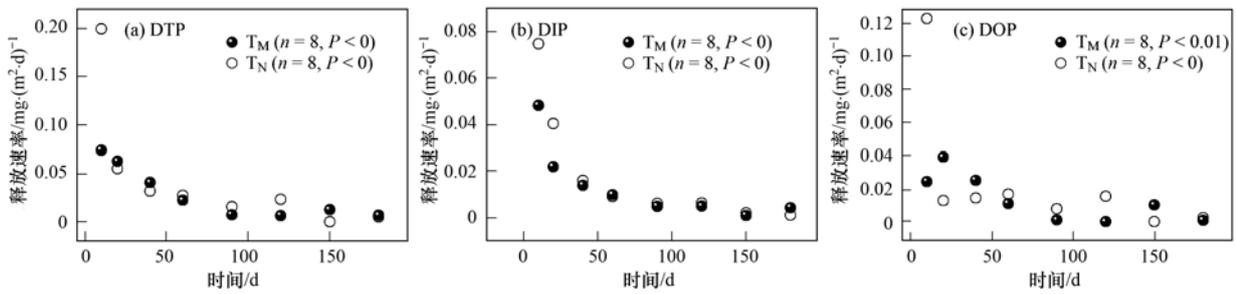


图3 乌梁素海模拟实验中释放速率变化

Fig. 3 DTP, DIP, DOP release rates from WLSH sediments

物界面 DTP、DIP、DOP 的释放速率均为正值,冰封期内 DTP、DIP、DOP 转移扩散的矢量方向指向上覆水,即乌梁素海沉积物向上覆水中释放的 DTP、DIP、DOP,沉积物表现为 DTP、DIP、DOP 的“源”。

对本研究中的释放速率与释放时间进行拟合(图3),拟合结果显示,上覆水中 DTP、DOP 及 DIP 均符合对数函数的释放规律($P < 0.01$),表明 0~40 d 内沉积物释磷过程为快速反应,随后该过程渐趋缓慢,与已有研究结果相符合^[25-27]。结合乌梁素海上覆水中有机磷分布、沉积物中磷形态的研究成果及乌梁素海为草型湖泊的生态特征^[7, 28],本研究所得出的乌梁素海沉积物在整个冰封期内均表现为上覆水中 DTP、DIP、DOP 源的结论,再次揭示了有机磷作为生物有效磷源的重要性,也表明有机磷在水-沉积物界面的环境地球化学行为对湖泊富营养化的重要影响。

2.2 沉积物中有机磷的形态变化特征

实验结果表明(图4),沉积物中有机磷的主导

形态为 HCl-OP 和 Re-OP,各形态有机磷含量分布趋势为 MLOP > NLOP > LOP。随着时间的推移,无论在何种条件下,LOP 的含量均为减少的。沉积物中,LOP 最易矿化易为动植物所吸收利用,活性最高,所以释放初期,含量明显降低。T_M 的 LOP 含量较 T_N 的偏低,而上覆水中 DIP、DOP 浓度也低于 T_N,由于沉积物中含有大量微生物,厌氧条件下通过酶解作用将 LOP 转化为可吸收利用的无机磷,供自身所需;乌梁素海是弱碱性湖泊,钙的含量较高(平均值为 $93.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[29],部分被磷酸酶水解的溶解性有机磷转化为无机磷,而且很快与 CaCO_3 结合形成 Ca-P,或者与金属、胡敏酸复合物结合^[30]。T_M 的 MLOP 含量先减少后增加,而 NLOP 的含量恰恰与 MLOP 相反,随着时间的推移呈现先增加后减少的趋势;T_N 的 MLOP 含量波动性增加,而 NLOP 的含量波动性减少。0~60 d,随着 LOP 的减少,一部分 MLOP 转化为 LOP 释放到上覆水中,同时还有一部

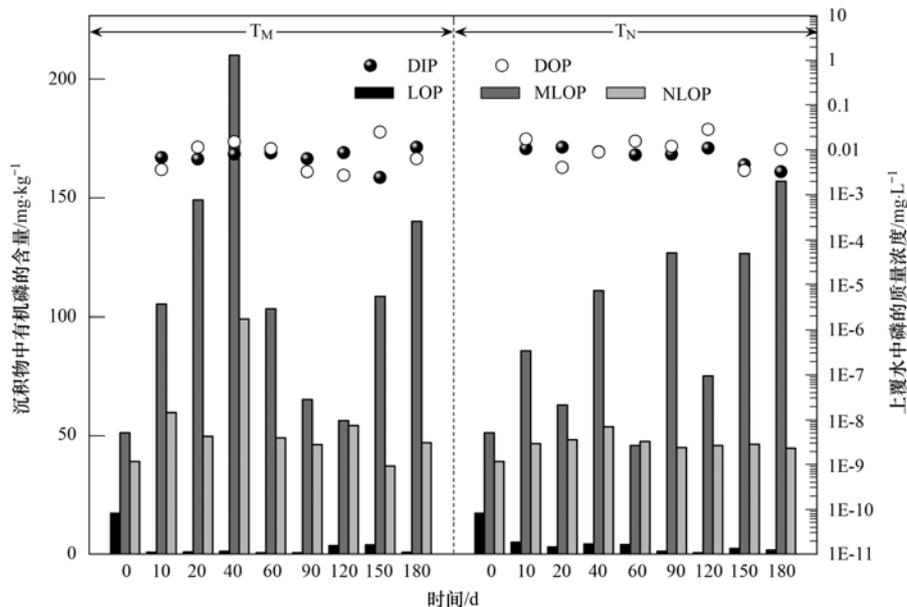


图4 微生物对有机磷的释放影响

Fig. 4 Effect of microorganisms on OP release

分 MLOP 转化为 NLOP, 导致 NLOP 的含量增加, 60 ~ 180 d, NLOP 又会转化为 MLOP.

释放周期内(图 5), T_M 的 LOP、TLP 含量先增加后降低, 而 T_N 的 LOP、TLP 含量逐渐降低, 0 ~ 90 d, T_N 的 LOP、TLP 含量高于 T_M , 而 90 ~ 180 d, T_M 的 LOP、TLP 含量高于 T_N . 释放初期, 因微生物可直接利用沉积物中的活性磷, 用于自身的生长繁殖, 从而导致 T_N 的含量高于 T_M 的含量. 分解无机磷的微生物主要包括假单胞菌属(如草生假单胞菌等)、无色杆菌属、黄杆菌属、氧化硫硫杆菌等^[31]. 解无机磷细菌对无机磷酸盐的溶解作用主要包括微生物通过呼吸作用放出 CO_2 , 周围的 pH 降低, 引起磷酸盐的溶解^[32]; 同时微生物在代谢过程中分泌有机酸, 通过质子酸化、络合溶解等作用促进磷的释放^[33]. 某些微生物能释放 H_2S , 可与 $FePO_4$ 作用, 产生 $Fe_3(PO_4)_2$ 和正磷酸盐离子; 解磷细菌能吸收 Ca^{2+} , 使 PO_4^{3-} 游离出来; 解磷细菌通过 NH_4^+ 的同化作用放出质子, 降低 pH, 从而引起磷酸盐的溶解^[34].

HCl-OP 在释放周期内呈现波动性变化(图 5), 0 ~ 60 d T_M 的含量高于 T_N , 60 ~ 180 d T_N 的含量高于 T_M . 释放周期内, FAOP 的含量先增加后减少, 0 ~ 60 d, T_N 的含量高于 T_M , 60 ~ 180 d, T_M 的含量高于 T_N , 但其变化幅度比 HCl-OP 小. $MLOP = HCl-OP + FAOP$, 其中 HCl-OP 的含量占 MLOP 含量的 75%

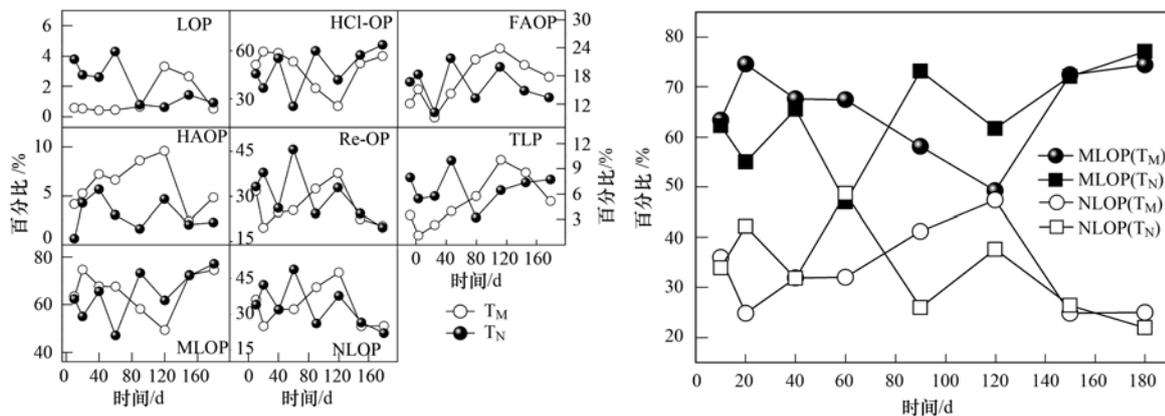


图 5 微生物对沉积物中各形态有机磷的释放影响

Fig. 5 Effect of microorganisms on the release of different fractions of OP in sediments

2.3 水-沉积物系统中磷的形态转化

冰封期内, 水-沉积物系统中, 多为厌氧环境. 解磷菌在好氧的条件下, 可将系统内的磷过量地存储在自身体内, 而厌氧条件下, 将磷释放出来. 实验结果表明(图 6), 冰封期内, T_M 和 T_N 上覆水中 DIP 的浓度先增加后减小, DOP 的浓度先减小后增加. 释放初期, T_M 的 DOP 相对浓度高于 T_N 的浓度, 但

左右, MLOP 的变化趋势与 HCl-OP 的趋势基本一致. 释放周期内, 随着时间的推移, Re-OP 的含量先增加后减少. HAOP 的含量在释放周期内先增加后减少, 且 T_M 的含量高于 T_N , 其变化范围较 T_N 的大, 但 HAOP 的变化幅度比 Re-OP 小. $NLOP = Re-OP + HAOP$, 其中 Re-OP 的含量占 NLOP 含量的 85% 左右, NLOP 的变化趋势与 Re-OP 的趋势基本一致. 0 ~ 60 d, T_N 的 NLOP 含量高于 T_M , 60 ~ 180 d T_M 的 NLOP 含量高于 T_N . 释放初期 0 ~ 60 d(图 5), T_M 的 MLOP 高于 T_N , 而 NLOP 的含量低于 T_N . 有研究表明, 解磷细菌可使沉积物中不能被植物利用的磷化物转变成可被利用的可溶性磷化物^[31, 35], 即可将 NLOP 转化为活性相对较高的 MLOP, 从而使得 T_M 的 MLOP 含量升高而 NLOP 的含量降低. 解有机磷细菌对有机磷的矿化作用主要是在微生物的代谢过程中产生一些胞外酶^[36], 并通过酶的作用使核酸和磷脂等典型的有机磷的 P—S、P—N 和 P—O 键断裂, 矿化出可溶性的正磷酸盐^[37], 并释放至上覆水体中, 供浮游植物利用. 60 ~ 180 d, T_M 的 MLOP 低于 T_N , 而 NLOP 的含量高于 T_N , 说明释放中后期沉积物中的肌醇六磷酸盐(植酸)在碱性条件下, 与沉积物中的钙盐相结合, 形成大量极难溶的植酸钙^[38], 揭示释放实验后期沉积物中 MLOP 存在向 NLOP 转化的可能性.

随着时间的推移, 释放中后期, T_N 的 DOP 相对浓度要高于 T_M 的浓度.

在厌氧条件下, 表层沉积物及沉积物表面 ORP (T_M 平均值为 329.18 mV, T_N 平均值为 195.613 mV) 较低, 铁、锰氧化物易被还原从而溶解度增大, 其吸附固定的磷被释放出来. 释放过程中, T_M 沉积物有机磷的相对含量降低, 无机磷的相对含量增高,

呈有机磷向无机磷转化的趋势,沉积物有机磷约有 6.1% 转化为无机磷;而 T_N 沉积物有机磷的相对含量升高,无机磷的相对含量降低,约有 4.3% 无机磷转化为有机磷,揭示了冰封期内,微生物可加速沉积物有机磷向无机磷的转化,提高了磷的生物可利用性,增加了沉积物磷向上覆水释放的风险. T_M 沉积物中有机磷的含量从 31.5% 降低到 25% 左右, T_N 的有机磷含量从 20% 左右增加到 25.2%,但 T_N 在释放初期和中期沉积物中磷的形态变化并不明显. T_M 的 LOP 含量先减小后增加, MLOP 的含量先减小后增加, NLOP 的含量逐渐减少. T_N 的 LOP 含量逐渐减少, MLOP 的含量逐渐增加, NLOP 的含量逐渐减少. 沉积物中无机磷的含量占总磷的含量 75% 左右, T_M 和 T_N 的 $NaHCO_3$ -IP 含量逐渐增加, T_M 的 HCl-IP 含量先增加后降低, T_N 的 HCl-IP 含量降低. 解磷细菌可使沉积物中不能被植物利用的磷化物转

变成可被利用的可溶性磷化物. 解有机磷细菌对有机磷的矿化作用主要是在微生物的代谢过程中产生一些胞外酶^[36],并通过酶的作用使核酸和磷脂等典型的有机磷的 P—S、P—N 和 P—O 键断裂,矿化出可溶性的正磷酸盐^[37],并释放至上覆水体中. 解无机磷细菌对无机磷酸盐的溶解作用主要包括微生物通过呼吸作用放出 CO_2 ,周围的 pH 降低,引起磷酸盐的溶解;同时微生物在代谢过程中分泌有机酸,通过质子酸化、络合溶解等作用促进磷的释放^[33]. *Clostridium butyricum* 在厌氧状态下,能将 PO_4^{3-} 转化为 HPO_3^{2-} 和 $H_2PO_2^-$,从而被植物吸收利用^[10]. 某些微生物能释放 H_2S ,其可与 $FePO_4$ 作用,产生 $Fe_3(PO_4)_2$ 和正磷酸盐离子,解磷细菌能吸收 Ca^{2+} ,使 PO_4^{3-} 游离出来;解磷细菌通过 NH_4^+ 的同化作用放出质子,降低 pH,从而引起磷酸盐的溶解^[34].

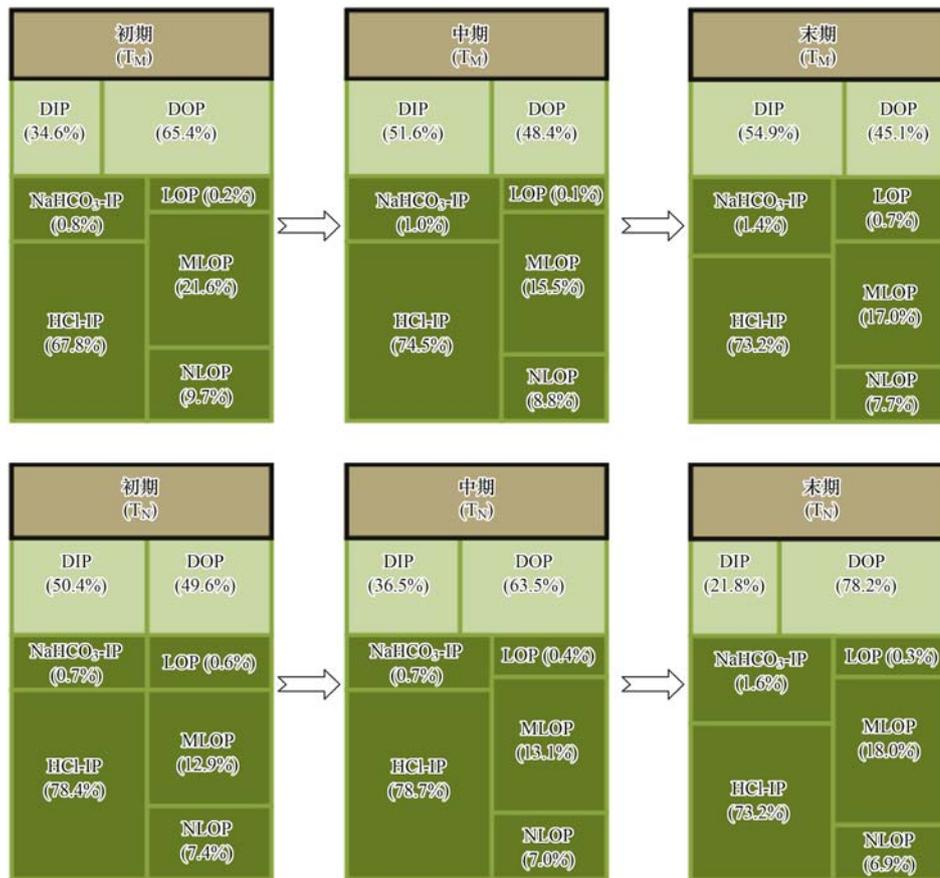


图 6 冰封期微生物对水-沉积物系统中磷形态转化的影响

Fig. 6 Effect of microorganisms on conversion of phosphorus fractions in water-sediments system during freezing period

3 结论

(1) 180 d 冰封期内, T_N 上覆水中 DTP、DIP 及 DOP 的浓度均高于 T_M 的浓度,揭示体系中厌氧微

生物的同化利用对上覆水中磷浓度的影响作用;同时微生物驱动下铁的异化还原作用也是影响水-沉积物界面有机磷释放的重要机制.

(2) 释放周期内,沉积物中 LOP、TLP 的含量均

减少; T_M 的 MLOP 含量先减少后增加, NLOP 的含量先增加后减少; T_N 的 MLOP 含量波动性增加, NLOP 的含量波动性减少. 释放初期(0 ~ 60 d), T_M 的 MLOP 含量高于 T_N , 而 NLOP 的含量低于 T_N ; 释放中末期(60 ~ 180 d), T_M 的 MLOP 含量低于 T_N , 而 NLOP 的含量高于 T_N , 揭示释放中沉积物 MLOP 与 NLOP 之间存在相互转化的可能性.

(3) 释放过程中, T_M 沉积物有机磷的相对含量降低, 无机磷的相对含量增高, 呈现有机磷向无机磷转化的趋势, 沉积物有机磷约有 6.1% 转化为无机磷, 揭示了冰封期内, 微生物可加速沉积物有机磷向无机磷的转化, 提高了磷的生物可利用性, 增加了沉积物磷向上覆水释放的风险.

参考文献:

- [1] 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 等. 滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4118-4126.
- [2] Cotner Jr J B, Wetzel R G. Uptake of dissolved inorganic and organic phosphorus compounds by phytoplankton and bacterioplankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(2): 232-243.
- [3] Suzumura M, Kamatani A. Isolation and determination of inositol hexaphosphate in sediments from Tokyo Bay[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, **57**(10): 2197-2202.
- [4] Gardolinski P C F C, Worsfold P J, McKelvie I D. Seawater induced release and transformation of organic and inorganic phosphorus from river sediments[J]. *Water Research*, 2004, **38**(3): 688-692.
- [5] Björkman K M, Karl D M. Bioavailability of dissolved organic phosphorus in the euphotic zone at Station ALOHA, North Pacific Subtropical Gyre[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(3): 1049-1057.
- [6] Berelson W M, Heggie D, Longmore A, et al. Benthic nutrient recycling in Port Phillip Bay, Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **46**(6): 917-934.
- [7] 关瑞, 吕昌伟, 何江, 等. 乌梁素海和岱海水-沉积物界面磷的扩散通量研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(8): 1609-1617.
- [8] Eckerrot Å, Petterson K. Pore water phosphorus and iron concentrations in a shallow, eutrophic lake—indications of bacterial regulation[J]. *Hydrobiologia*, 1993, **253**(1-3): 165-177.
- [9] 李文朝, 尹澄清, 陈开宁, 等. 关于湖泊沉积物磷释放及其测定方法的综述[J]. 湖泊科学, 1999, **11**(4): 296-303.
- [10] 李雄彪, 马庆英, 崔云龙. 酪酸梭状芽胞杆菌研究进展[J]. 中国微生态学杂志, 2006, **18**(4): 331-335.
- [11] 范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响[J]. 湖泊科学, 1997, **9**(4): 337-342.
- [12] 张京. 乌梁素海重金属的环境地球化学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013.
- [13] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局[J]. 地理研究, 2006, **25**(6): 1003-1012.
- [14] 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.
- [15] Lovley D R, Phillips E J. Rapid assay for microbially reducible ferric iron in aquatic sediments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, **53**(7): 1536-1540.
- [16] Kovar J L, Pierzynski G M. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters[M]. (2nd ed.). Blacksburg: Virginia Tech University, 2009.
- [17] Bedford B L, Walbridge M R, Aldous A. Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate North American wetlands[J]. *Ecology*, 1999, **80**(7): 2151-2169.
- [18] Attiwill P M, Adams M A. Nutrient cycling in forests[J]. *New Phytologist*, 1993, **124**(4): 561-582.
- [19] 吴丰昌. 云贵高原湖泊沉积物-水界面氮、磷和硫的生物地球化学作用和生态环境效应[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1995.
- [20] 赵春霞, 刘惠荣, 冯福应, 等. 乌梁素海可培养细菌丰度和多样性分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, **31**(2): 193-197.
- [21] 孙鑫鑫, 刘惠荣, 冯福应, 等. 乌梁素海富营养化湖区浮游细菌多样性及系统发育分析[J]. 生物多样性, 2009, **17**(5): 490-498.
- [22] 张晓军. 乌梁素海富营养化不同程度湖区水体和沉积物微生物群落多样性及进化分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [23] Baldwin D S, Mitchell A M. The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: a synthesis[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2000, **16**(5): 457-467.
- [24] 柳飞, 张延一, 严玉鹏, 等. 不同结构有机磷在(氢)氧化铝表面的吸附与解吸特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4482-4489.
- [25] 张新明, 李华兴, 刘远金. 磷酸盐在土壤中吸附与解吸研究进展[J]. 土壤与环境, 2001, **10**(1): 77-80.
- [26] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(1): 53-61.
- [27] 刘杰, 郑西来, 陈蕾, 等. 水库沉积物氮磷释放通量及释放规律研究[J]. 水利学报, 2012, **43**(3): 339-343.
- [28] 关瑞. 寒旱区湖泊沉积物中有机磷的地球化学特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.
- [29] 孙园园. 达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态分布及对比研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.
- [30] Reid T W, Wilson I B. 17 E. coli alkaline phosphatase[J]. *The Enzymes*, 1971, **4**: 373-415.
- [31] Asea P E A, Kucey R M N, Stewart J W B. Inorganic phosphate solubilization by two *Penicillium* species in solution culture and soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, **20**(4): 459-464.
- [32] Francko D A, Heath R T. UV-sensitive complex phosphorus:

- Association with dissolved humic material and iron in a bog lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 1982, **27** (3): 564-569.
- [33] 胡红青, 李妍, 贺纪正. 土壤有机酸与磷素相互作用的研究 [J]. *土壤通报*, 2004, **35**(2): 222-229.
- [34] 赵小蓉, 林启美. 微生物解磷的研究进展 [J]. *土壤肥料*, 2001, (3): 7-11.
- [35] Ternan N G, Mc Grath J W, Mc Mullan G, *et al.* Review: organophosphonates: occurrence, synthesis and biodegradation by microorganisms [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 1998, **14**(5): 635-647.
- [36] 张斌, 席北斗, 赵越, 等. 五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1491-1496.
- [37] Zbońska E, Maliszewska I, Lejczak B, *et al.* Degradation of organophosphonates by *Penicillium citrinum* [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 1992, **15**(6): 269-272.
- [38] Turner B L, Driessen J P, Haygarth P M, *et al.* Potential contribution of lysed bacterial cells to phosphorus solubilisation in two rewetted Australian pasture soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(1): 187-189.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发行人