

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究

吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新*, 张敏

(华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘要: 运用室内静态模拟的方法, 设置静态释放组(A组)和饲料添加组(B组), 研究了池塘残饵分解对底泥氮、磷释放的影响。结果表明, A组 DO 高于 B组($P < 0.05$), A组 pH 值为中性, B组 pH 值呈弱酸性。添加饲料后, B组硝态氮低于 A组($P < 0.05$), 而 B组活性磷高于 A组($P < 0.05$)。实验第 2~14 d, A组氨氮高于 B组($P < 0.05$), 此后 B组氨氮升高, 实验结束时 B组氨氮高于 A组($P < 0.05$)。研究表明, 添加饲料的 B组, 初期氨氮和硝态氮的释放都受到抑制。静态释放的 A组, 氮的释放变化是先上升, 后降低的趋势, 而饲料添加的 B组, 氮的释放变化趋势则是先降低, 后升高。B组饲料分解向上覆水释放大量的磷, 活性磷的变化呈现先上升后下降的趋势。

关键词: 池塘残饵; 底泥; 上覆水; 静态条件; 氮磷释放

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2178-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.019

Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment

LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, ZHAO Feng, XIE Cong-xin, ZHANG Min

(College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The effect of feed residues on release law of nitrogen and phosphorus in water-sediment interface was studied under the simulated condition in laboratory. Two sets of conditions were applied in this study, static condition (A group) and feed add condition (B group). The results show that DO in A group is higher than that in B group ($P < 0.05$). The pH value is neutral in A group, but pH value of B group became weak acidic. After adding the feed, nitrate nitrogen concentration in A group is higher than that in B group ($P < 0.05$), but orthophosphate concentration in A group is lower than that in B group ($P < 0.05$). At the 2-14th day of experiment, ammonia concentration in A group is higher than that in B group ($P < 0.05$), but since then the ammonia concentration in B group begins to rise. At the end of the test, ammonia concentration in B group is higher than that in A group ($P < 0.05$). At the beginning of the experiment, ammonia and nitrate nitrogen release restrained in B group. Nitrogen increases first, and then decreases in A group, but the changing regulation is completely opposite in B group. Feed decomposition can produce a large amount of phosphorus in B group, at the same time, orthophosphate changing regulation increases first and then decreases.

Key words: feed residues; sediment; overlying water; static state; nitrogen and phosphorus release

池塘养殖过程中大多以投喂人工配合饲料为主, 养殖鱼类对其有限的利用造成有机物沉积进入底泥。有研究表明, 饲料中 70% 左右的氮、磷会以不同的方式进入养殖水体^[1]。饲料投入是池塘氮、磷输入的主要形式, 而底泥积累是池塘氮、磷输出的主要形式^[2,3]。池塘底泥积累的有机物在微生物的作用下分解产生氮、磷营养盐^[4], 而水体中氮、磷营养盐的积累会导致养殖水质恶化, 这已经成为了鱼类疾病频繁发生的主要原因, 所以研究池塘底泥氮、磷的释放对调节池塘水质和健康养殖有着重要的意义。

现阶段的研究多集中于探究物理、化学和生物因素对底泥氮、磷释放的影响, 例如溶氧、温度、pH 值、扰动、水流速度、底泥厚度、微生物活性等方面^[5~12]。同时室内模拟是研究底泥氮、磷释放的重要手段, 此法易于控制实验条件, 可以连续监测底

泥-水界面营养盐的变动。有研究发现, 河流底泥的有机质是影响无机氮释放的重要因子^[11], 湖泊沉积物表层的有机碎屑分解形成的高浓度磷会阻止沉积物磷的释放^[13]。然而池塘残饵对底泥氮、磷释放的影响尚缺乏研究, 所以本实验运用室内模拟的方法, 对残饵作用下的底泥氮、磷释放规律和释放通量进行初步分析。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验用底泥于 2012-11-08 在湖北省荆州市公安

收稿日期: 2013-09-26; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 国家大宗淡水鱼类产业技术体系(nycytx-49-09); 国家科技支撑计划项目(2012BAD25B06); 淡水池塘工程化改造与环境修复技术研究与示范行业专项(201203083)

作者简介: 吕元蛟(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为池塘养殖环境, E-mail: 1023758330@qq.com

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

县崇湖渔场草鱼养殖池塘,使用彼得逊采泥器采集.底泥装入封口塑料袋中,在实验室筛除杂质,并将其充分混匀.混匀的底泥一部分用于测定间隙水氮、磷营养盐浓度和底泥理化性质,另一部分用于模拟实验.采集底泥的同时采集池塘水,池塘水经过 0.45 μm 孔径的微孔滤膜过滤后,测定其氮、磷营养盐浓度(氨氮、硝态氮、亚硝态氮、活性磷、总氮、总磷),过滤池塘水放入冰箱内 4℃ 保存备用.实验用饲料为人工配合饲料.实验装置为 6 个柱状玻璃器皿($r=6\text{ cm}$, $h=60\text{ cm}$),分 A、B 两组,每组 3 个重复.

1.2 实验方法

A 组加入混匀的底泥至 6 cm 刻度线,然后缓慢加入过滤池塘水至 26 cm 刻度线,B 组加入的底泥和过滤池塘水与 A 组相同,实验期间 A、B 两组均封口遮光静置.加注完毕静置 24 h 后,测定氮、磷营养盐浓度,A 组不添加任何物质,B 组加入 3 g 饲料(实验期间只添加 1 次),24 h 后再测定氮、磷营养盐浓度.此后每隔 1 d 测定 1 次,实验持续 18 d.每次取样用 50 mL 注射器抽取 150 mL 水样,再添加备用的过滤池塘水至原水位处,尽量避免扰动底泥.实验结束后采集 A、B 两组的表层 2 cm 底泥,80℃ 烘干后待测.

1.3 测定方法

上覆水溶解氧(DO)、水温、pH 值采用哈希

HACH HQ40d 双路输入多参数数字化分析仪测定,氨氮采用纳氏试剂比色法(GB 17479-87),硝态氮采用紫外分光光度法(HJ/346-2007),亚硝态氮采用分光光度法(GB 7493-87),总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89),活性磷采用钼锑抗分光光度法^[14],总磷采用钼酸铵紫外分光光度法(GB 11893-89),底泥含水率参考文献^[15],底泥总碳、总氮采用元素分析仪测定,底泥总磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 法,底泥有机质采用马弗炉干灰分法^[15].所测得数据见表 1 和表 2.

1.4 计算方法及数据分析

氮、磷释放通量采用下面公式计算:

$$F = \frac{M}{A \cdot t}$$

式中, F 为底泥氮、磷释放通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; A 为柱状玻璃器皿的截面积; M 为第 n 天释放量 (mg): $M = V \times c_n - V \times c_{n-1} + V_1(c_{n-1} - c)$; V 为上覆水体积 (mL); V_1 为采样体积 (mL); c_n 为第 n 天氮、磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c 为每次采样后补充的过滤水氮、磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); t 为采样间隔时间.

实验数据采用平均数 ± 标准差表示,采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),用 Duncan 法进行多重比较.相关分析采用 Pearson 简单相关系数.取 $P < 0.05$ 为差异显著水平.

表 1 实验用饲料和底泥的理化性质

项目	饲料/%			初始底泥/%				
	总碳	总氮	总磷	总碳	总氮	总磷	含水率	有机质
参数	40.93	5.08	1.56	2.44	0.29	0.13	63.36	4.78

表 2 初始上覆水和初始底泥间隙水氮、磷浓度

项目	初始上覆水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				初始底泥间隙水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$
参数	3.51	2.73	0.048	0.018	9.72	0.46	0.028	0.38

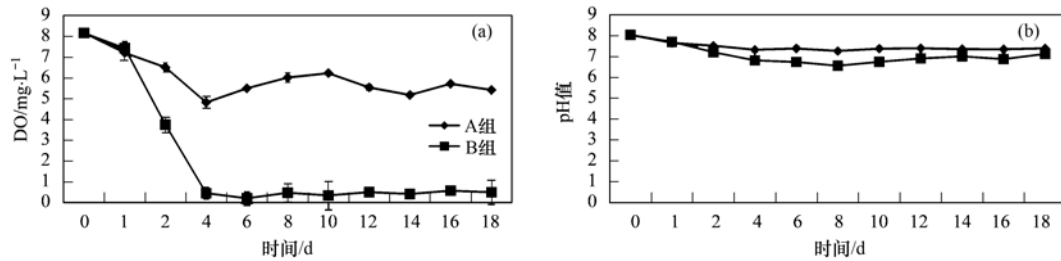
2 结果与讨论

2.1 残饵对上覆水中 DO 与 pH 值的影响

上覆水中 DO 变化,如图 1(a) 所示.实验开始后,A 组 DO 逐渐下降后稳定在 $(4.82 \pm 0.30 \sim 6.23 \pm 0.69) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. B 组添加饲料后,DO 迅速下降,第 4 d 后 DO 稳定在 $(0.20 \pm 0.06 \sim 0.57 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.第 2 d 开始,B 组 DO 显著低于 A 组 ($P < 0.05$).

上覆水中 pH 值变化,如图 1(b) 所示.实验期间 A 组 pH 值稳定在 $(7.27 \pm 0.13 \sim 7.66 \pm 0.02)$. B 组添加饲料后,pH 值从 (7.71 ± 0.07) 下降至 (6.56 ± 0.04) ,此后缓慢上升至 (7.13 ± 0.09) .

实验开始后,A 组 DO 下降,此后上覆水处于有氧状态 ($\text{DO} > 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而 B 组 DO 下降后,上覆水处于厌氧状态 ($0.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \text{DO} < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),两组 DO 相比较说明饲料的分解消耗了更多的溶解氧,从而导致底泥-水界面形成厌氧环境.



图中横坐标 0 d 表示实验初始水样的测定值

图 1 上覆水 DO、pH 值变化

Fig. 1 Changes of DO, pH value in overlying water

研究表明,有机物的厌氧分解分为两个阶段.第一阶段有机物分解产生大量有机酸,pH 值随之降低,第二阶段随着甲烷细菌繁殖,有机酸被分解,pH 值逐渐增大^[16].添加饲料后,B 组 pH 值先下降,后升高,这与上述研究结果一致.如图 2(a)所示,B 组后期氨氮浓度上升明显,氨氮对 H^+ 可以起到一定的中和作用^[16].

2.2 氮的释放规律

2.2.1 残饵对上覆水中氮浓度变化的影响

添加饲料前,A、B 两组上覆水中氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总氮浓度无显著差异($P > 0.05$).添加饲料后,A、B 两组氮的释放规律呈现出明显不同.

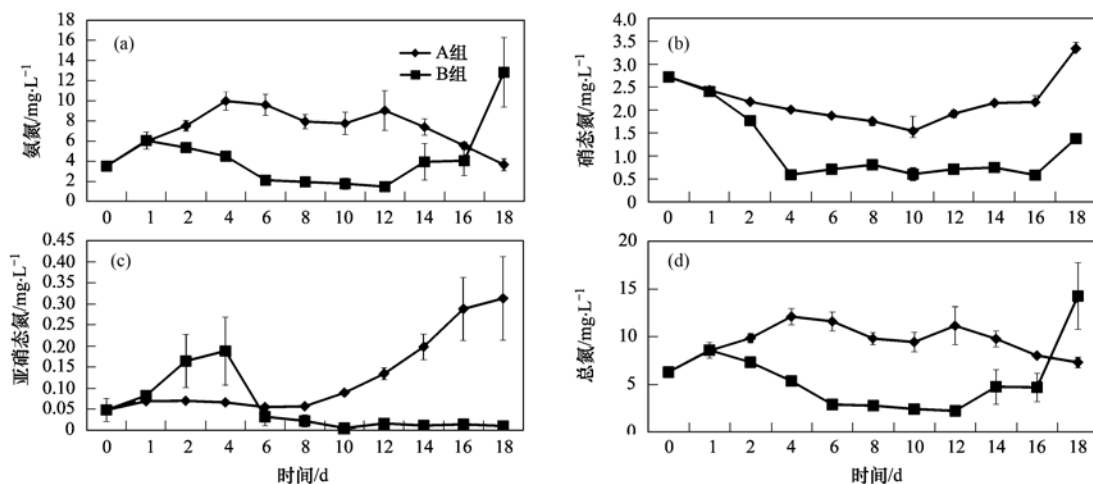
氨氮浓度变化如图 2(a)所示. A 组氨氮持续上升,第 4 d 达到最大值(9.99 ± 0.92) $mg \cdot L^{-1}$,此后呈下降趋势. B 组在添加饲料后,氨氮逐渐下降,第 12 d 降至最低值(1.47 ± 0.04) $mg \cdot L^{-1}$,此后开始上升,第 18 d 达到最大值(12.86 ± 3.46) $mg \cdot L^{-1}$.实验第 4~14 d 之间,B 组氨氮显著低于 A 组($P < 0.05$).

组($P < 0.05$).

硝态氮浓度变化如图 2(b)所示. A 组硝态氮先下降后上升.添加饲料后, B 组硝态氮逐渐下降,第 4 d 下降至最低值(0.59 ± 0.04) $mg \cdot L^{-1}$,此后趋于稳定.实验第 4 d 开始 B 组硝态氮显著低于 A 组($P < 0.05$). A 组硝态氮与氨氮呈极显著负相关($r = -0.874, P = 0.000$),而 B 组硝态氮与氨氮无相关关系($r = 0.343, P = 0.302$).

亚硝态氮浓度变化如图 2(c)所示. A 组亚硝态氮在前 8 d 相对稳定,此后显著上升($P < 0.05$),实验结束时上升到(0.31 ± 0.09) $mg \cdot L^{-1}$,是初始浓度的 7 倍.添加饲料后, B 组亚硝态氮快速上升,第 4 d 达到最大值(0.19 ± 0.08) $mg \cdot L^{-1}$,在第 6 d 降低后趋于稳定.

总氮浓度变化如图 2(d)所示. A 组在第 4 d 达到最大值(12.12 ± 0.86) $mg \cdot L^{-1}$,此后缓慢下降到(7.33 ± 0.56) $mg \cdot L^{-1}$.添加饲料后, B 组总氮逐渐下降,在第 14 d 开始上升.实验结束时 B 组总氮为(14.28 ± 3.48) $mg \cdot L^{-1}$,显著高于 A 组($P < 0.05$).



图中横坐标 0 d 表示实验初始水样的测定值

图 2 上覆水氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总氮的浓度变化

Fig. 2 Changes of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen and total nitrogen in overlying water

上覆水中氨氮、硝态氮与 DO、pH 的相关性, 如表 3 所示. A 组氨氮与 DO 和 pH 均为极显著负相关($P < 0.01$), 而 B 组氨氮与 DO 和 pH 均无相关关系($P < 0.05$). A 组硝态氮与 DO 无相关关系($P < 0.05$), 与 pH 为显著正相关($P < 0.05$). B 组硝态氮与 DO 和 pH 均为极显著正相关($P < 0.01$).

表 3 上覆水氨氮、硝态氮浓度与 DO、pH 的相关分析¹⁾

项目	nitrate nitrogen with DO, pH			
	DO		pH	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
A 组氨氮	-0.569	0.034	-0.588	0.029
B 组氨氮	0.112	0.743	0.298	0.374
A 组硝态氮	0.385	0.243	0.571	0.033
B 组硝态氮	0.956	0.000	0.941	0.000

1) *r* 为 Pearson 系数; $P < 0.05$, 表示差异显著; $P < 0.01$, 表示差异极显著

底泥释放氨氮,是由于底泥表层有机物氨化作用生成氨氮,积存于间隙水中,然后通过浓度差扩散进入上覆水^[4].如表 2 所示,间隙水氨氮浓度高于上覆水,氨氮向上覆水扩散,初期 A 组上覆水氨氮浓度升高,而间隙水中硝态氮浓度低于上覆水,硝态氮向底泥扩散,初期 A 组上覆水硝态氮浓度降低. A 组氨氮与 DO、pH 均为显著负相关,这与前人的研究结果一致^[11,17,18].实验后期 A 组氨氮下降、硝态氮上升,同时 A 组氨氮与硝态氮呈现显著负相关,这说明后期 A 组消化作用明显,氨氮向硝态氮转化.实验中期,B 组硝态氮下降后趋于稳定.研究发现,当上覆水中 $DO < 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,微生物会利用硝态氮中的氧进行反硝化作用,硝态氮浓度降低并趋于稳定^[7,19].上覆水中 DO 向底泥的渗透能力是调节硝化作用的关键因子^[20],B 组硝态氮始终低于 A 组,说明 B 组硝化作用受到低 DO 的抑制.添加饲料后,B 组氨氮下降明显,分析其原因:①有机质是影响氨氮在沉积物上吸附的主要因素,去除有机物的沉积物对氨氮的吸收能力明显降低^[21].②B 组亚硝态氮上升,说明亚硝化细菌把部分氨氮转化为亚硝态氮^[22].石广福^[23]研究表明,饲料加入实验水族箱后(水族箱内并未铺设底泥),氨氮先下降后上升,且温度越高升高得越快(分别研究了 20、25、30℃).这与本研究添加饲料后,B 组氨氮变化相似,不同的是本实验氨氮下降时间较长,分析其原因:①本实验水温较低,实验期间上覆水平均温度为 $(10.5 \pm 1.42)^\circ\text{C}$.温度影响微生物活性,从而影响饲料的

矿化分解速率,低温导致氨氮的再生速率减慢.②本实验装置内铺设了 6 cm 的池塘底泥,底泥可以起到缓冲和维持水体氮营养盐浓度的作用^[24],所以延长了氨氮下降时间.有研究发现,厌氧条件有利于底泥向上覆水释放氨氮^[8,10,11,12,25],同时厌氧环境在一定程度上减少了硝化作用对氨氮的消耗^[26],B 组后期氨氮上升明显,说明在饲料分解的情况下 $(0.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < DO < 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1})$,上覆水易积累氨氮,恶化水质.

2.2.2 残饵对上覆水中氮形态的影响

实验初期,A 组氮释放形态以氨氮为主,氨氮最多时占 $(83.08 \pm 1.69)\%$.实验后期 A 组则以硝态氮为主,比例为 $(16.43 \pm 1.65 \sim 46.13 \pm 5.39)\%$.实验期间 B 组氮释放形态主要是氨氮,比例为 $(66.84 \pm 2.11 \sim 89.61 \pm 2.55)\%$,B 组硝态氮比例为 $(9.69 \pm 1.27 \sim 43.75 \pm 3.15)\%$,且比例逐渐降低.添加饲料后,B 组氨氮比例高于 A 组,而 B 组硝态氮比例低于 A 组,这说明 A 组硝化作用强于 B 组.

2.2.3 氮释放通量变化

氨氮释放通量如图 3(a)所示. A 组在第 1 d 达到最大值 $(489.86 \pm 82.23)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,此后逐渐下降,实验后期多为负值.添加饲料前 B 组为 $(507.53 \pm 88.45)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,添加饲料后迅速变为负值,一直持续到第 12 d,第 18 d 激增到 $(884.83 \pm 241.88)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

硝态氮释放通量如图 3(b)所示. A、B 两组变化相似,前 10 d 均为负值,此后逐渐上升,最大值都出现在第 18 d,分别为 $(112.70 \pm 9.84)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $(65.19 \pm 6.16)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

亚硝态氮释放通量如图 3(c)所示. A 组前 8 d 处在一个较低水平上,此后逐渐上升. B 组前 4 d 均为正值,释放明显,第 6 d 变为负值,表现为吸收.第 10 d 后 A 组亚硝态氮释放通量高于 B 组.

总氮释放通量如图 3(d)所示. A 组前 4 d 的平均值为 $(450.66 \pm 83.81)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,释放明显,第 14~18 d 为负值,表现为吸收. B 组添加饲料后一直为负值,第 14 d 开始变为正值并逐渐上升,第 18 d 达到最大值 $(974.36 \pm 243.61)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

2.3 磷的释放规律

2.3.1 残饵对上覆水中磷浓度变化的影响

活性磷浓度变化如图 4(a)所示. A 组活性磷在第 4 d 达到最大值 $(0.061 \pm 0.03)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此后缓慢下降并趋于稳定.添加饲料后,B 组活性磷快

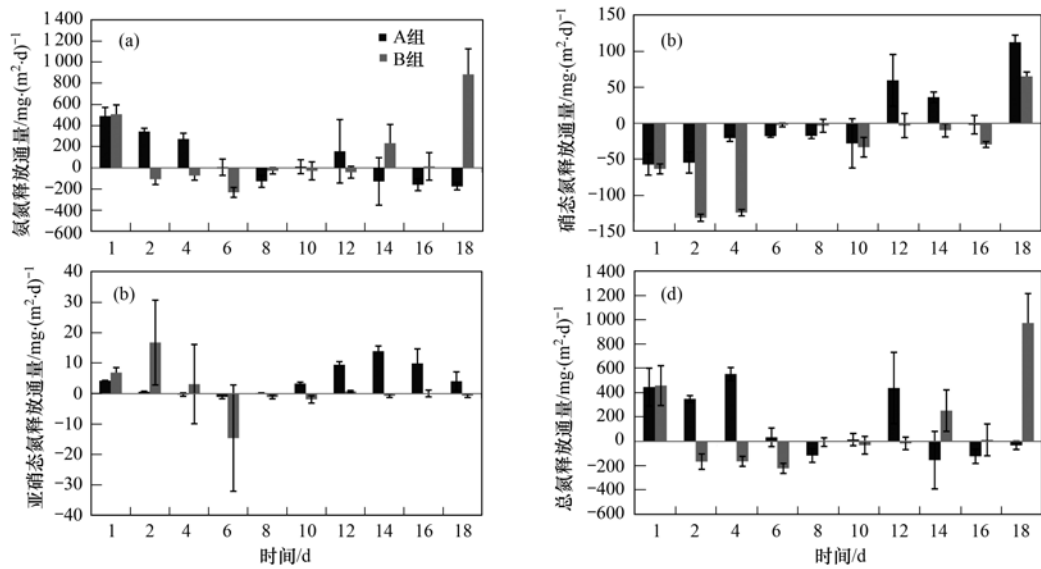


图 3 上覆水氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总氮释放通量的变化

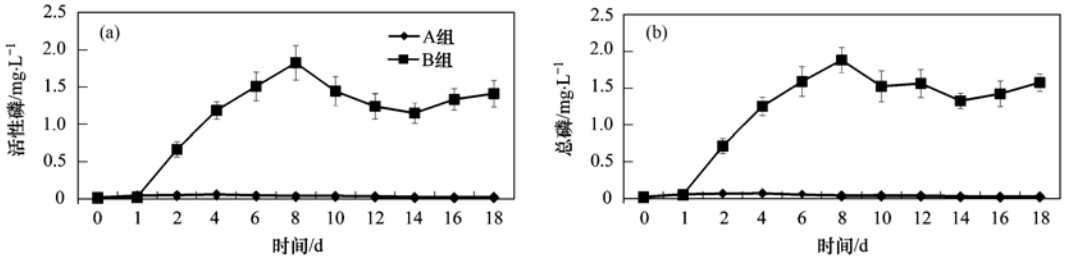
Fig. 3 Changes of ammonia nitrogen flux, nitrate nitrogen flux, nitrite nitrogen flux and total nitrogen flux in overlying water

速上升,第 8 d 达到峰值 $(1.83 \pm 0.23) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,第 12 d 以后趋于稳定. 添加饲料后,B 组活性磷显著高于 A 组 ($P < 0.05$).

总磷浓度变化如图 4(b) 所示. 总磷的变化趋势与活性磷相似,同时实验期间活性磷是总磷释放的主要形态. A、B 两组总磷都表现为先上升后下

降,实验后期趋于稳定. 添加饲料后,B 组总磷显著高于 A 组 ($P < 0.05$).

上覆水中活性磷与硝态氮、DO 和 pH 的相关性,如表 4 所示. A 组活性磷与硝态氮、DO 和 pH 均无相关关系 ($P > 0.05$),而 B 组活性磷与硝态氮、DO 和 pH 均为极显著负相关 ($P < 0.01$).



图中横坐标 0 d 表示实验初始水样的测定值

图 4 上覆水活性磷、总磷的浓度变化

Fig. 4 Changes of orthophosphate, total phosphorus in overlying water

表 4 上覆水活性磷浓度与 DO、pH、硝态氮浓度的相关分析¹⁾

Table 4 Correlative analysis between orthophosphate with DO, pH and nitrate nitrogen

项目	DO		pH		硝态氮	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
A 组活性磷	-0.377	0.253	-0.504	0.114	-0.34	0.306
B 组活性磷	-0.879	0.000	-0.896	0.000	-0.871	0.002

1) *r* 为皮 Pearson 系数; $P < 0.05$,表示差异显著; $P < 0.01$,表示差异极显著

研究表明,底泥-水界面的磷浓度差决定磷的扩散方向^[27]. 由表 2 可知,初始底泥间隙水活性磷浓度比上覆水高,扩散作用导致 A 组实验初期上覆水中活性磷浓度上升,此后逐渐降低至初始浓度水平,分析其下降的原因:①初期浓度差导致活性磷释放

后,进一步释放需要依靠底泥-水界面有机质的分解^[25~27],A 组缺少外源有机物. ②A 组 DO 较高 ($\text{DO} > 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),且 pH 值始终大于 7. 研究发现,上覆水 DO 较高时, Fe^{2+} 会被氧化为 Fe^{3+} , Fe^{3+} 可与活性磷结合,且中性或碱性条件下, Fe^{3+} 更容易

形成胶体,从而吸附上覆水中的活性磷^[17,19]。添加饲料后,B组上覆水中活性磷迅速浓度上升,且活性磷浓度显著高于A组,这说明饲料分解会引起上覆水活性磷浓度升高,这与蒋艾青等^[28]研究残饵对水质的影响结果相似。研究表明,厌氧环境会促进底泥释放磷^[8,10,29]。B组活性磷达到峰值后下降明显,分析其原因:①研究发现,当上覆水中活性磷浓度达到 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,无论DO高低,底泥都会吸收磷^[30]。②有机物分解产生的腐殖质能与铁、铝等形成复合体,增加了无机磷吸附位点,加强了对磷的吸附^[31]。B组活性磷与硝态氮呈负相关,这与周劲风等^[32]研究结果一致,也有研究发现,反硝化细菌与

活性磷负相关,活性磷升高会抑制池塘中反硝化作用,从而氮营养盐过剩,产生污染^[33]。

2.3.2 磷释放通量变化

活性磷释放通量如图5(a)所示。A组在静置1d后达到最大值(1.52 ± 0.47) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,此后多为负值,表现为底泥对活性磷的吸收。B组在添加饲料后1d达到最大值(127.88 ± 43.21) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,然后缓慢下降。

总磷释放通量如图5(b)所示。A、B两组总磷释放通量相差较大。A组总磷释放通量除第1d外,其余均为负值。B组总磷释放通量在投饵后1d达到最大值(53.00 ± 13.31) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,随后逐渐下降。

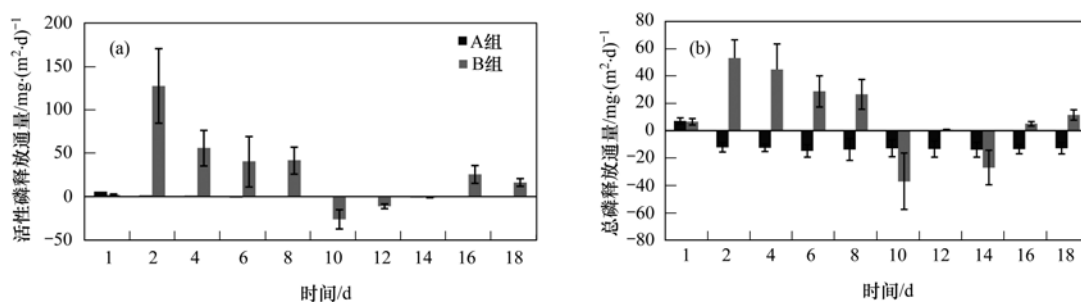


图5 上覆水活性磷、总磷释放通量的变化

Fig. 5 Changes of orthophosphate flux, total phosphorus flux in overlying water

2.4 实验前后底泥组分对比

如图6所示,实验前后A、B两组底泥中的总碳、总氮、总磷和有机质均无明显差异($P > 0.05$),同时实验结束时A组和B组之间也无明显差异($P > 0.05$),这说明添加饲料对底泥组分无明显影响。有研究发现,养殖池塘底泥一般没有大量有机质的积累^[34]。

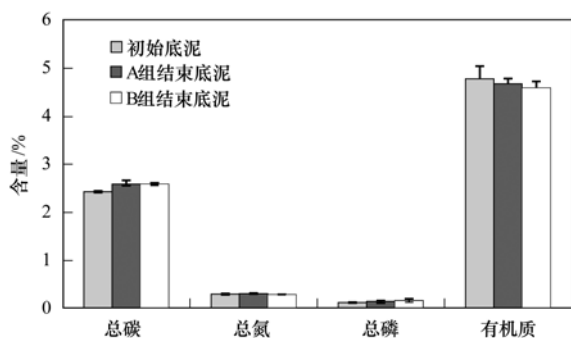


图6 实验前后底泥组分对比

Fig. 6 Composition of sediments before and after the experiment

3 结论

(1) 饲料分解导致上覆水形成厌氧环境,同时上覆水pH值呈弱酸性。

(2) 添加饲料的B组,初期氨氮、硝态氮的释

放受到抑制。静态释放的A组和饲料添加的B组,氮的释放变化趋势相反,前者呈现出先升高后降低的趋势,后者则是先降低后升高。

(3) 饲料分解向上覆水释放大量的磷。饲料添加的B组,活性磷的变化呈现先上升后下降的趋势。静态释放的A组,底泥对磷的释放不明显。

参考文献:

- [1] 薛飞,周维仁,徐为民. 鱼类氮、磷营养与水体环境[J]. 河北渔业, 2004, (3): 1-3.
- [2] 高攀,蒋明,赵宇江,等. 主养草鱼池塘水质指标的变化规律和氮磷收支[J]. 云南农业大学学报, 2009, 24(1): 71-77.
- [3] 舒廷飞,温琰茂,汤叶涛. 养殖水环境中氮的循环与平衡[J]. 水产科学, 2002, 21(2): 30-34.
- [4] 雷衍之. 养殖水环境化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004. 118-128.
- [5] 徐徽,张路,商景阁,等. 太湖水土界面氮磷释放通量的流动培养研究[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 66-71.
- [6] 方秀珍,谢骏. 池塘淤泥中细菌对含氮物质转化效率的研究[J]. 大连水产学院学报, 1999, 14(1): 70-74.
- [7] 蒋小欣,阮晓红,邢雅因,等. 城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及DO水平对底质氮释放的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 87-91.
- [8] 胡雪峰,高效江,陈振楼. 上海市郊河流底泥氮磷释放规律

- 的初步研究[J]. 上海环境科学, 2001, **20**(2): 66-70.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 吴群河, 曾学云, 黄钥. 河流底泥中 DO 和有机质对三氮释放的影响[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(5): 34-39.
- [12] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 曝气复氧对富营养化水体底泥氮磷释放的影响[J]. 生态环境, 2005, **14**(6): 812-815.
- [13] 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.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-246.
- [15] 克劳德 E·博伊德著. 林文辉译. 池塘养殖底质[M]. 广州: 广东科技出版社, 2004. 408-422.
- [16] 汪晋三, 黄新华, 程国佩. 水化学与水污染[M]. 广州: 中山大学出版社, 1990. 463-464.
- [17] 付春平, 钟成华, 邓春光. pH 与三峡库区底泥氮磷释放关系的试验[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004, **27**(10): 125-127.
- [18] 梁淑轩, 贾艳乐, 闫信, 等. pH 值对白洋淀沉积物氮磷释放的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(36): 20859-20862.
- [19] 李文红, 陈英旭, 孙建平. 不同溶解氧水平对控制底泥向上覆水体释放污染物的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(2): 170-173.
- [20] Rysgaard S, Risgaard-Petersen N, Sloth N P, *et al.* Oxygen regulation of nitrification and denitrification in sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(7): 1643-1652.
- [21] 王而力, 王嗣淇, 薛扬. 沉积物不同天然有机组分对氨氮吸附特征的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(5): 544-549.
- [22] Hargreaves J A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds [J]. *Aquaculture*, 1998, **166**(3): 181-212.
- [23] 石广福. 养殖斑点叉尾鮰残饵和粪便对水质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2009. 33-34.
- [24] 郁桐炳, 沈丽红. 池塘淤泥对水中氮营养盐影响的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2006, (1): 82-85.
- [25] Moore P A, Reddy K R, Graetz D A. Nutrient transformations in sediments as influenced by oxygen supply [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, **21**(3): 387-393.
- [26] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: I 氮的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(3): 786-791.
- [27] 罗玉红, 高婷, 苏青青, 等. 上覆水营养盐浓度对底泥氮磷释放的影响[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2011, **21**(6): 71-74.
- [28] 蒋艾青, 郑陶生, 杨四秀. 池塘残饵分解对养殖水环境影响的研究[J]. 水利渔业, 2006, **26**(5): 81-85.
- [29] Gomez E, Durillon C, Rofes G, *et al.* Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O₂ and loading influence [J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2437-2447.
- [30] 徐轶群, 熊慧欣, 赵秀兰. 底泥磷的吸附与释放研究进展[J]. 重庆环境科学, 2003, **25**(11): 147-149.
- [31] Gerke J, Hermann R. Adsorption of orthophosphate to humic-Fe-complexes and to amorphous Fe-oxide [J]. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1992, **155**(3): 233-236.
- [32] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: II 磷的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(3): 792-796.
- [33] 谢骏, 方秀珍, 郁桐炳. 池塘氮循环中各种细菌与理化因子的相关性研究[J]. 水生生物学报, 2002, **26**(2): 180-187.
- [34] 杜旭彤, 谢骏, 王广军, 等. 池塘底泥营养盐释放的室内模拟实验[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(27): 13224-13226.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行