

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析

张春华, 黄廷林*, 方开凯, 周石磊, 夏超

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为了探究周村水库热分层前期氮素的变化趋势及其驱动因子, 于 2016 年 2~4 月定期对周村水库主库区进行水质指标监测, 并在采样点采集新鲜水样和表层沉积物, 实验室模拟水库氮素变化过程中, 水体和沉积物的反硝化作用量。结果表明周村水库在热分层初期, 库区总氮浓度由 $(2.28 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $(1.08 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝氮浓度由 $(1.66 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $(0.25 \pm 0.06) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮浓度总体变化不大, 亚硝氮的浓度几乎不变。与此同时, 叶绿素没有明显增加, 藻类的影响不大; 氮素降低主要由于好氧反硝化菌的反硝化作用造成。热分层初期水库的温度逐渐增加、DO、pH 的变化以及以小分子量为主的有机物组成均利用好氧反硝化菌的生长繁殖, 菌数从 $1.06 \times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $8.33 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{L}^{-1}$, 使得水库的反硝化作用增强, 水库氮素下降; 与此同时的模拟实验中, 仅有水体好氧反硝化菌作用时, 培养瓶的总氮去除量为 0.7 mg, 水体和表层沉积物共同作用时, 总氮去除量为 3.3 mg, 水体与表层沉积物的反硝化去除氮量之比大体为 1:4, 表层沉积物的反硝化作用是水库氮素去除的重要因素。

关键词: 氮素; 去除; 驱动因子; 沉积物; 好氧反硝化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4187-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201605153

Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir

ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin*, FANG Kai-kai, ZHOU Shi-lei, XIA Chao

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

Abstract: In order to explore the trend and driving factors of nitrogen in the early stage of the thermal stratification in Zhoucun reservoir, the water quality indicators in main reservoir area of Zhoucun reservoir were monitored regularly from February to April (2016). Meanwhile, the fresh water and surface sediments in the sampling point were collected to study the effect of water and sediment denitrification by simulation in laboratory. The results showed that: the concentration of TN decreased from $(2.28 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $(1.08 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the concentration of nitrate nitrogen decreased from $(1.66 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $(0.25 \pm 0.06) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, whereas the concentration of ammonia nitrogen and nitrite showed little change in the early thermal stratification of Zhoucun reservoir. At the same time, chlorophyll was not significantly increased, so the algae had little effect on nitrogen; the decreasing nitrogen was mainly due to the aerobic denitrification. Gradually increased temperature, the changes of DO and pH and the composition of organic matter (low molecular weight) were beneficial to the growth of aerobic denitrifying bacteria. Furthermore, the number of bacteria increased from $1.06 \times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{L}^{-1}$ to $8.33 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{L}^{-1}$, which enhanced the denitrification of the reservoir; Meanwhile, in the simulation experiments, the TN removal rates of water and water-sediment systems reached 0.7 mg and 3.3 mg, respectively. Water and sediment denitrification ratio was generally 1:4, and the aerobic denitrification of surface sediment was an important factor in the removal of nitrogen in reservoir.

Key words: nitrogen; removal; driving factor; sediment; aerobic denitrification

氮是生物所必需的营养元素之一,也是限制生物生产力的一种重要元素^[1~4]。它的潜在来源可分为天然来源和人为来源两种。随着经济的发展和人口的膨胀,全球每年通过人类活动新增的“活性”氮量急速上升^[4~8],导致氮循环严重失衡^[4,9],并且引发了广泛的环境问题:大气污染^[10,11]、 N_2O 等温室气体排放增加^[10]、土壤酸化^[12]、水体富营养化^[13~17]和生物多样性减少^[18]等,对生态环境和人类健康造成了极大影响。尤其进入 20 世纪以来,地表水体在世界范围内都出现了氮素浓度增加的趋势,带来了饮水安全等问题。因此,对于地表水体氮

循环变化的研究变得尤为重要。

在地表水体氮素变化过程中,氮素的消耗去除能够改善氮污染、解决人为固氮量增加所导致的氮循环严重失衡问题,成为氮循环研究的焦点^[4,7,19]。水体去除氮素主要包括生物脱氮、化学脱氮及颗粒物吸附沉降等过程^[20,21]。其中,生物脱氮方式主要

收稿日期: 2016-05-22; 修订日期: 2016-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478378); 国家科技支撑计划项目(2012BAC04B02)

作者简介: 张春华(1991~),女,硕士,主要研究方向为水处理理论与技术和水质微污染控制与水资源保护, E-mail: zhangchunh99@163.com

* 通讯联系人, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

有反硝化作用、厌氧氨氧化作用和甲烷厌氧氧化作用^[11,22,23]。但目前关于厌氧氨氧化和甲烷厌氧氧化过程的研究^[23,24]较少。并且有研究表明,反硝化过程是调节局部区域甚至全球尺度上氮循环的关键过程^[25],是被证明了的全球氮循环重要且必不可少的过程^[26]。马培等^[20]指出反硝化是公认的去掉河流氮素、解决河流氮污染的最佳途径。李飞跃^[27]对句容水库的反硝化作用进行了研究,指出反硝化对氮的去掉作用。

周村水库作为我国温带季节性分层水库^[28],水库从4~11月处于热分层期,从12月到翌年3月处于混合期。目前针对于水库热分层初期氮素降低的驱动因子的研究很少。鉴于此,本文选取了周村水库为研究对象,对水库热分层前期的氮素变化及其影响因子进行了分析,并且通过实验室模拟评估水体与沉积物的反硝化作用对氮素的影响,以期为水库水质改善、污染防治以及运行管理提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

周村水库位于山东省枣庄市市中区,水库流域面积121 km²,总库容8404万 m³,水面面积8.54 km²,全年水位波动不大。水库建成于1960年,主要的入库河流包括西伽河、下十河和徐洼河,目前是枣庄市主要的城市供水水源地,兼具防洪、发电、灌溉等功能。周村水库处于中纬度暖温带大陆性季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。参照曾明正等^[28]的研究,该水库在4~11月形成稳定的热分层,因此本实验于2016年2~4月水库热分层初期进行采样,该时期主库区平均水深10 m(图1)。选取了周村水库主库区的1个采样点,每月进行两次定期的水质指标和好氧反硝化菌数的测定。每月一次测定水库上游的入库流量和入库口TN浓度。采用GPS进行站点定位,取样点坐标分别为D1

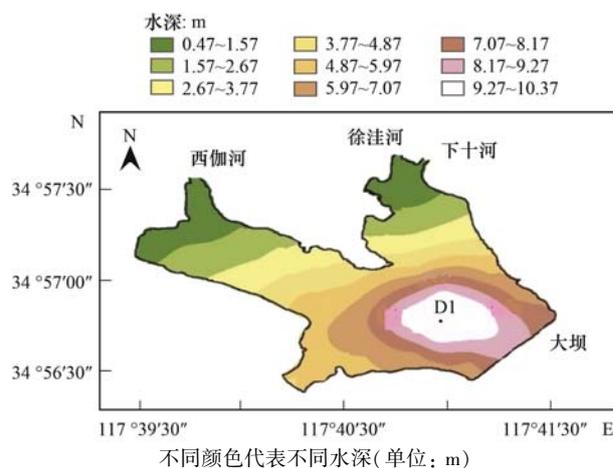


图1 周村水库水深及采样点位置示意

Fig. 1 Water depth of Zhoucun Reservoir and location of the sampling site

(34°56'46"N、117°40'54"E)。具体位置见图1。

1.2 模拟实验

3月初采集了取样点D1的新鲜水样、沉积物样品,用以实验室测定水库中水体和表层沉积物反硝化除氮的贡献量。实验室内取4个2 L的玻璃瓶分为两组,考察光照对反硝化脱氮的影响。其中一组的一个瓶子加入取样点1 cm厚的表层沉积物,然后通过虹吸作用用导管将水样缓慢转移到反应器至2 L,为了模拟水库状况,对泥的部分遮光处理;另一个瓶子同样倒入沉积物和水样,全部遮光处理排除藻类影响。另外一组的一个瓶子加入取样点的水样2 L,另一个瓶子加入水库水样后全部遮光处理排除藻类影响。依次编号为1-1、1-2、2-1、2-2(图2)。将玻璃瓶全部放入光照培养箱,调节光照时间、温度、溶解氧与水库同步。由于水样的氮浓度不高,实验装备的局限性,反应器体积仅2 L,好氧反硝化释放的氮气较少,难以收集,因此只定期测定4个瓶子的TN、硝氮、亚硝氮和氨氮浓度值。

1.3 测定方法

水质指标的测定参照文献^[29]。总氮含量的测定采用碱式过硫酸钾消解-紫外分光光度法,硝氮含

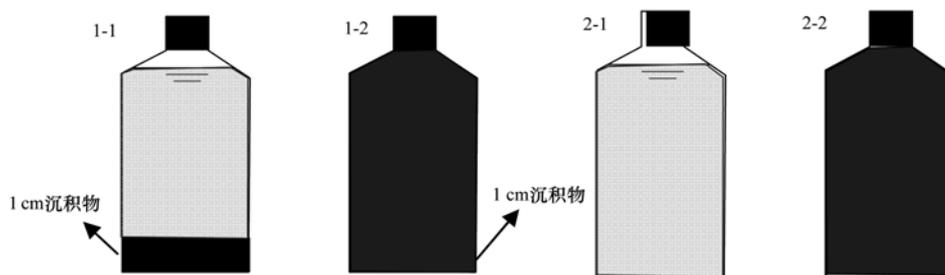


图2 模拟实验示意

Fig. 2 Schematic diagram of simulation experiment

量的测定采用紫外分光光度法,亚硝氮含量的测定采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法,氨氮含量的测定采用纳氏试剂比色法. 有机物分子量测定中膜过滤采用平行法,即水样用 $0.45\ \mu\text{m}$ 微滤膜过滤后,分别通过截留相对分子质量为 50×10^3 、 10×10^3 、 5×10^3 、 3×10^3 的超滤膜. 测定滤后液的 TOC,各分子量区间的有机物用差减法得到^[30]. 好氧反硝化细菌数量的测定采用平板计数,每个样品做 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 稀释度,每一稀释度做 3 个平行样.

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft office 2003 软件导出和处理数据;采用 Origin 8.0 软件作图.

2 结果与讨论

2.1 水库主库区环境因子变化

伴随着 2~4 月气温的季节性回升,水库表层水温不断升高,底层水温则上升较小,造成了表层与底层水体间温差的不断扩大[图 3(a)];表层水体的 DO 浓度略有升高,底层水体的 DO 浓度不断下降,进而形成缺氧环境[图 3(b)];随着表层水体藻类光合作用增强,消耗水中的 CO_2 ,使表层水体 pH 值略有上升. 随着水深增加 DO 浓度不断降低,兼性厌氧菌逐渐变得活跃,它们在自身的新陈代谢及对

水中有机质矿化降解的过程中,不断产生并积累 CO_2 ,致使底部水体 pH 值降低[图 3(c)];随着光照作用的增强,藻类繁殖,使得表层水体中的叶绿素浓度逐渐增多,并大于底层[图 3(d)]. 温度、DO、pH 和叶绿素的变化均说明水库逐渐向热分层状态过渡.

2.2 水库主库区氮素变化

周村水库 2~4 月期间测定的氮素指标变化见图 4,水库总氮浓度由 $(2.28 \pm 0.09)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $(1.08 \pm 0.09)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硝氮浓度由 $(1.66 \pm 0.09)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $(0.25 \pm 0.06)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮浓度上下波动,但总体变化不大,亚硝氮的浓度几乎不变.

利用上游监测的入库河流数据和入库口总氮浓度,估算上游来水中总 N 负荷值. 则根据式(1)^[31]:

$$W = (c_1 \times Q_1 + c_2 \times Q_2 + c_3 \times Q_3) \times 0.01 \quad (1)$$
 式中, W 为 2~4 月水库的上游入库总 N 负荷(t); Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 分别为上游西伽河、徐洼河、下十河的月入库量(万 m^3) 和对应的 TN 浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 0.01 为换算系数.

估算得 2~4 月上游来水中的总 N 负荷约为 61 t. 大气沉降量、生物固氮量作为水库氮素的来源,同样会增加水库的总氮量,水库的排水量大约为每天 3 万 t,此时水库处于热分层初期,上游的氮输入

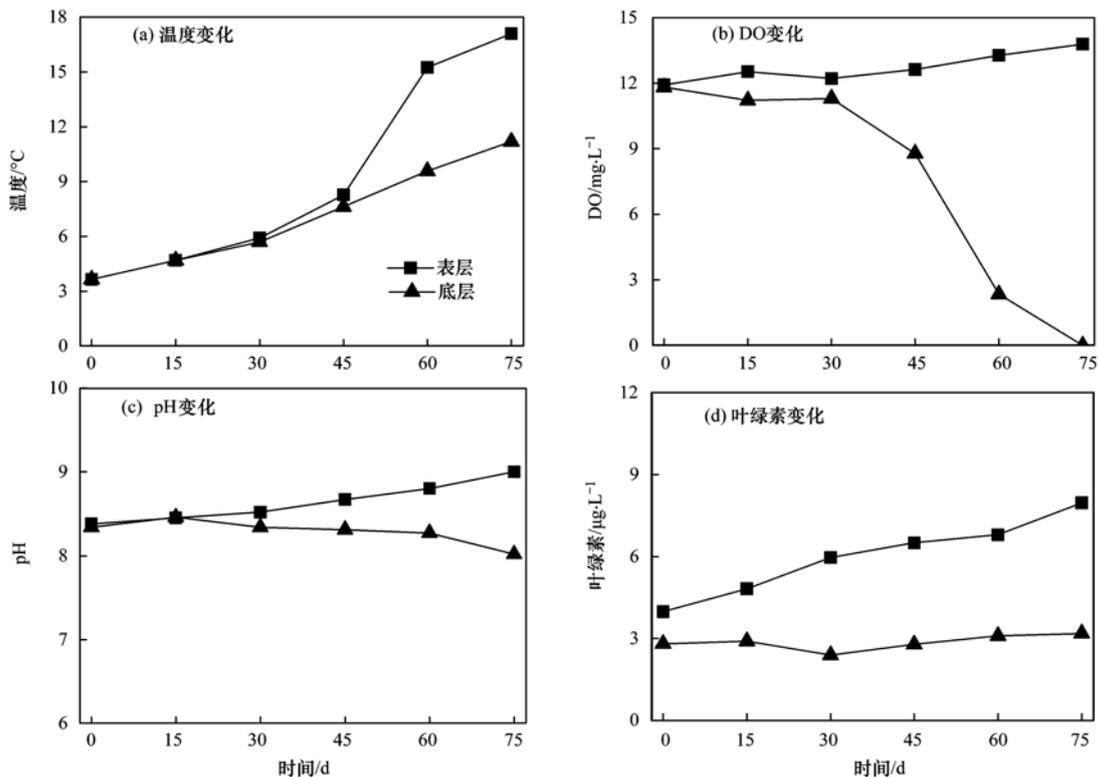


图 3 水库环境因子变化

Fig. 3 Changes of the environmental factors in reservoir

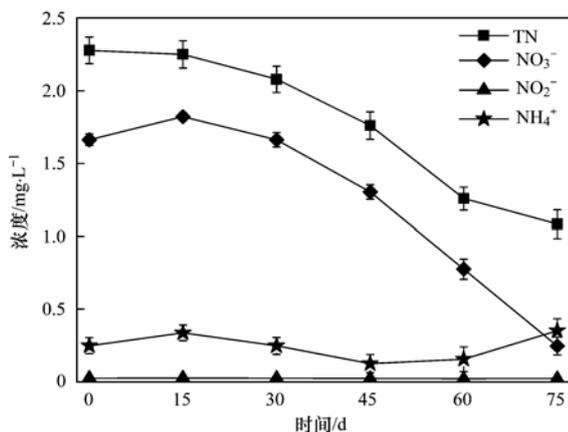


图4 水库 TN、NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺ 浓度变化

Fig. 4 Concentration changes of TN, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺ in reservoir

后,到达水库主库区几乎完全混合,全层浓度一致,因此排水量的大小并不会削减氮的浓度,但库区内总氮浓度却持续下降. 这表明,在水库中部分氮素被去除,使得测定的水库中总氮浓度降低.

对于水库中氮素的降低,目前研究较多的影响因素有藻类利用、反硝化作用等. 根据黄廷林等^[32]的研究可知,周村水库在2~4月的藻类种类发生变化,逐渐以硅藻、绿藻为主,但是数量没有较大变化,浮游植物丰度在 6.80×10^6 cfu·L⁻¹左右. 一般来说,水库的常见藻类只吸收利用无机态氮,主要有氨氮、硝氮和亚硝氮. 由于水库中亚硝氮浓度值较低,且浓度在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,几乎没有被藻类吸收利用. 近期不少研究证实^[33,34],由于藻类利用氨氮时能量消耗低,使得利用氨氮的藻类生长优于利用硝氮的藻类,因而藻类通常更倾向于吸收氨氮^[35]. 而水库中氨氮的浓度(图4)变化不大,可见藻类对氮的吸收利用量很小,其对氮素的影响可以

忽略不计.

2.3 反硝化作用影响分析

众所周知,好氧反硝化作用是微生物在有氧条件下进行的硝酸盐还原过程,在多种微生物的参与下,在硝酸盐还原酶(Nar)、亚硝酸盐还原酶(Nir)、一氧化氮还原酶(Nor)以及一氧化二氮还原酶(Nos)的作用下硝酸盐经四步还原反应,最终转化成氮气释放^[36]. 根据本课题组前期对周村水库的研究^[37,38],水库中存在具有高效反硝化作用的好氧反硝化菌. 相关研究^[39]表明温度、DO、pH及有机物构成是影响好氧反硝化菌反硝化作用的重要因素. 其中好氧反硝化菌的适宜生长温度^[40,41]在25~35℃之间,随着温度的升高会促进反硝化的进行^[42],而水库的温度[图3(a)]逐渐上升,利于好氧反硝化菌的生长. 有研究分析 DO^[41]在3~7 mg·L⁻¹之间,pH^[40,41,43]在中性偏碱时适宜好氧反硝化菌的生长,测定的水库2~4月的DO和pH[图3(b)和3(c)]均处于适宜生长区间. 同时根据超滤膜截留的分子量大小,将水库2~4月中溶解性有机物(DOC)划分为4个分子量区间,由水库中溶解性有机物不同分子量的浓度以及所占百分比的变化(图5)可知,溶解性有机物浓度在增加,小分子量的有机物($<3 \times 10^3$)呈现先减少后增多的趋势,主要是由于好氧反硝化菌的新陈代谢产物会溶解在水中,使水中的溶解性有机物含量增加^[44];菌的同化作用将水中亲水性小分子有机物转化成高分子细胞物质,使水中小分子有机物含量减少,大分子有机物含量有所增加^[45];环境中营养元素逐渐减少,藻类将储存的部分胞内物质降解利用转化为小分子有机物^[46]. 水中溶解性有机物分子量的变化是上述过程综合作用的结果. 小分子量有机物有利于反硝化的进行^[47],而此期间好氧反硝化菌的数量也在逐渐增多,由 $(1.06 \pm$

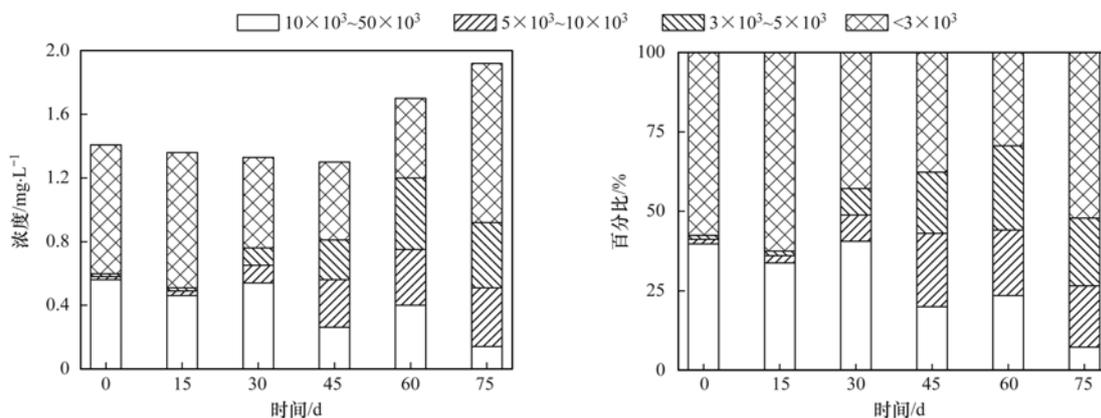


图5 水库溶解性有机物分子量的浓度和百分比变化

Fig. 5 Changes of the concentration and percentages of molecular weight of dissolved organics

$0.02) \times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $(8.33 \pm 0.03) \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{L}^{-1}$. 因此可以确定,2~4 月水库氮素的降低主要是由于水库好氧反硝化菌的反硝化作用.

2.4 模拟实验结果

实验室模拟期间的温度与 DO 见图 6, 大体与周

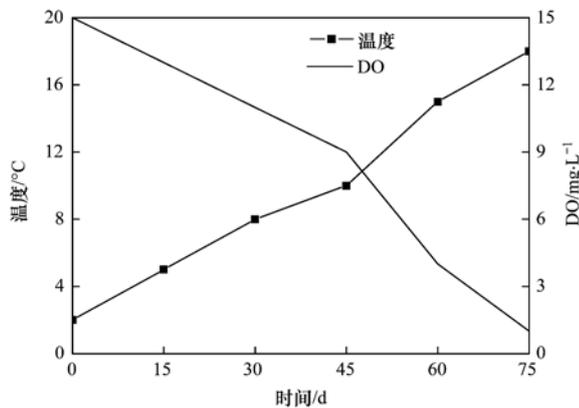


图 6 实验室模拟的温度和 DO

Fig. 6 Temperature and DO in the laboratory simulation

表 1 模拟实验中 TN、NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺ 的浓度变化/mg·L⁻¹

Table 1 Concentration changes of TN, NO₃⁻, NO₂⁻ and NH₄⁺ in the simulation experiment/mg·L⁻¹

指标	项目	编号			
		1-1	1-2	2-1	2-2
总氮	初值	2.11 ± 0.08	2.11 ± 0.06	2.20 ± 0.07	2.20 ± 0.08
	终值	0.43 ± 0.06	0.48 ± 0.07	1.85 ± 0.08	1.87 ± 0.06
硝氮	初值	1.38 ± 0.01	1.38 ± 0.01	1.56 ± 0.03	1.56 ± 0.01
	终值	0.00 ± 0.02	0.19 ± 0.01	1.66 ± 0.01	1.41 ± 0.02
亚硝氮	初值	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00
	终值	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
氨氮	初值	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.28 ± 0.01	0.28 ± 0.02
	终值	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.10 ± 0.01

3 结论

(1) 周村水库热分层前期(2~4 月),持续有上游入库氮量、大气沉降量和生物固氮量进入,但库区总氮呈现减少的趋势,主要是由于2~4 月期间水库温度、DO、pH 以及有机物的组分变化均有利于好氧反硝化菌的生长繁殖,使得水库的反硝化作用增强,进而导致总氮浓度降低.

(2) 实验室模拟了水体和沉积物反硝化作用对氮素的去除量,有水体和沉积物共同反硝化作用的瓶子,总氮的去除量为 3.3 mg,去除率达到 78.92%;仅有水体反硝化作用的瓶子内,总氮的去除量为 0.7 mg,去除率达到 21.08%. 水体与沉积物的反硝化去除氮量之比大体为 1:4,沉积物的反硝化作用是水库氮素去除的重要因素.

期水库环境同步.

两组实验的氮素指标变化见表 1. 可见模拟实验的氮素变化与实际水库变化大体一致. 其中 1-1 和 1-2 中氨氮、亚硝氮值较小且变化不大,总氮和硝氮的浓度均有明显下降;2-1 和 2-2 中氨氮、亚硝氮值较小且变化不大,硝氮几乎没有变化,总氮浓度下降但下降幅度不大. 1-1、2-1 与对应的 1-2、2-2 的 TN 浓度变化大体一致,可见藻类对于氮素的消耗利用较低,这与上述的结论一致. 同时,有水体和沉积物共同反硝化作用的瓶子,总氮的去除量为 3.3 mg,去除率为 78.98%;仅有水体反硝化作用的瓶子内,总氮的去除量为 0.7 mg,去除率为 21.02%,因此反硝化作用是氮素降低的主要因素,这与上述水库氮素降低原因的分析结果一致. 水体与沉积物的反硝化去除氮量之比大体为 1:4,因此沉积物的反硝化作用是水库氮素去除的重要因素,这与李飞跃^[27]研究的结论大体一致.

(3) 将来从分子生物学的角度进一步分析反硝化菌的群落结构和作用机制,同时开展相关反硝化菌剂的制备工作,为水库水质治理提供技术支持.

参考文献:

- [1] 邓美华, 谢迎新, 熊正琴, 等. 长江三角洲氮收支的估算及其环境影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1709-1716. Deng M H, Xie Y X, Xiong Z Q, et al. Nitrogen budgets of the Yangtse delta region and their effect on the environment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(10): 1709-1716.
- [2] 黄来明, 杨金玲, 张甘霖. 我国亚热带丘陵地区流域氮素的平衡与源汇特征[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 2981-2987. Huang L M, Yang J L, Zhang G L. Nitrogen budgets and source-sink characteristics of watershed in the hilly area of subtropical China[J]. Environmental Science, 2010, 31(12): 2981-2987.
- [3] 谢丽纯, 陈建耀. 近 10a 来珠江三角洲地区氮收支演变及区域差异分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 237-248. Xie L C, Chen J Y. Nitrogen budgets of the Pearl River Delta and its regional differences during the past decade[J]. Journal of

- Natural Resources, 2014, **29**(2): 237-248.
- [4] 高群, 余成. 城市化进程对氮循环格局及动态的影响研究进展[J]. 地理科学进展, 2015, **34**(6): 726-738.
Gao Q, Yu C. A review of urbanization impact on nitrogen cycle [J]. Progress in Geography, 2015, **34**(6): 726-738.
- [5] 邢光熹, 朱兆亮. 中国集水区氮收支的分析与估算[J]. 土壤学报, 2000, **37**(S1): 72-82.
Xing G X, Zhu Z L. Analysis and estimation of nitrogen sources and outputs in China watershed [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, **37**(S1): 72-82.
- [6] Alexander R B, Smith R A, Schwarz G E. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico[J]. Nature, 2000, **403**(6771): 758-761.
- [7] Trimmer M, Grey J, Heppell C M, et al. River bed carbon and nitrogen cycling: state of play and some new directions [J]. Science of the Total Environment, 2012, **434**: 143-158.
- [8] Piña-Ochoa E, Álvarez-Cobelas M. Denitrification in aquatic environments: a cross-system analysis [J]. Biogeochemistry, 2006, **81**(1): 111-130.
- [9] 王德宣, 赵普生, 张玉霞, 等. 北京市区大气氮沉降研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 1987-1992.
Wang D X, Zhao P S, Zhang Y X, et al. Atmospheric nitrogen deposition in urban area of Beijing[J]. Environmental Science, 2010, **31**(9): 1987-1992.
- [10] 陈青松, 李婷, 张世熔, 等. 城乡交错带土壤氮素空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, **36**(8): 2133-2141.
Chen Q S, Li T, Zhang S R, et al. Spatial distribution of soil nitrogen in an urban-rural fringe and its influencing factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(8): 2133-2141.
- [11] 鲍林林, 陈永娟, 王晓燕. 河流沉积物氮循环主要微生物的生态特征[J]. 微生物学通报, 2015, **42**(6): 1141-1150.
Bao L L, Chen Y J, Wang X Y. Ecological characteristics of nitrogen cycling microbes in river sediments [J]. Microbiology China, 2015, **42**(6): 1141-1150.
- [12] 刘泽睿, 王俊坚, 万师强, 等. 氮素输入与降水增加对温带草原土壤金属元素库存的影响[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(5): 1125-1131.
Liu Z R, Wang J J, Wan S Q, et al. Effects of nitrogen addition and increased precipitation on metal pools in temperate steppe, northern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, **35**(5): 1125-1131.
- [13] 邢光熹, 施书莲, 杜丽娟, 等. 苏州地区水体氮污染状况[J]. 土壤学报, 2001, **38**(4): 540-546.
Xing G X, Shi S L, Du L J, et al. Situation of nitrogen pollution in water bodies in Suzhou region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, **38**(4): 540-546.
- [14] 沈志良, 刘群, 张淑美, 等. 长江流域的氮收支[J]. AMBIO-人类环境杂志, 2003, **32**(1): 65-69.
Shen Z L, Liu Q, Zhang S M, et al. A nitrogen budget of the Changjiang River catchment [J]. Ambio-A Journal of the Human Environment, 2003, **32**(1): 65-69.
- [15] 吴雅丽, 许海, 杨桂军, 等. 太湖水体氮素污染状况研究进展[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 19-28.
Wu Y L, Xu H, Yang G J, et al. Progress in nitrogen pollution research in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(1): 19-28.
- [16] 陈法锦, 贾国东. 北江流域氮收支估算[J]. 热带地理, 2009, **29**(1): 11-15.
Chen F J, Jia G D. Nitrogen budgets of the Beijiang river basin [J]. Tropical Geography, 2009, **29**(1): 11-15.
- [17] 王迪, 李红芳, 刘锋, 等. 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1717-1723.
Wang D, Li H F, Liu F, et al. Interception effect of ecological ditch on nitrogen transport in agricultural runoff in subtropical China [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1717-1723.
- [18] van der Eerden L. Nitrogen on microbial and global scales [J]. New Phytologist, 1998, **139**(1): 201-204.
- [19] Seitzinger S, Harrison J A, Böhlke J K, et al. Denitrification across landscapes and waterscapes: a synthesis [J]. Ecological Applications, 2006, **16**(6): 2064-2090.
- [20] 马培, 李新艳, 王华新, 等. 河流反硝化过程及其在河流氮循环与氮去除中的作用[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(4): 623-633.
Ma P, Li X Y, Wang H X, et al. Denitrification and its role in cycling and removal of nitrogen in river [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(4): 623-633.
- [21] Zhao Y, Yang Z F, Xia X H, et al. A shallow lake remediation regime with *Phragmites australis*: incorporating nutrient removal and water evapotranspiration [J]. Water Research, 2012, **46**(17): 5635-5644.
- [22] Eittwig K F, Butler M K, Le Paslier D, et al. Nitrite-driven anaerobic methane oxidation by oxygenic bacteria [J]. Nature, 2010, **464**(7288): 543-548.
- [23] Zhu G B, Jetten M S M, Kusch P, et al. Potential roles of anaerobic ammonium and methane oxidation in the nitrogen cycle of wetland ecosystems [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **86**(4): 1043-1055.
- [24] Zhu G B, Wang S Y, Wang W D, et al. Hotspots of anaerobic ammonium oxidation at land-freshwater interfaces [J]. Nature Geoscience, 2013, **6**(2): 103-107.
- [25] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade [J]. Bioscience, 2003, **53**(4): 341-356.
- [26] Boyer E W, Howarth R W, Galloway J N, et al. Riverine nitrogen export from the continents to the coasts [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, **20**(1): GB1S91.
- [27] 李飞跃. 句容水库农业流域反硝化对氮的去除作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [28] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1337-1344.
Zeng M Z, Huang T L, Qiu X P, et al. Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir—Zhoucun Reservoir in north of China [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- [29] 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.
- [30] Zhou S L, Huang T L, Zhang H H, et al. Nitrogen removal characteristics of enhanced in situ indigenous aerobic denitrification bacteria for micro-polluted reservoir source water [J]. Bioresource Technology, 2016, **201**: 195-207.
- [31] 黄廷林, 秦昌海, 李璇. 石砭峪水库氮、磷营养盐季节变化及其收支分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, **45**(1): 111-116.

- Huang T L, Qin C H, Li X. Studies on the seasonal variation and budget of nitrogen, phosphorus of the shibianyu reservoir [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, **45**(1): 111-116.
- [32] 黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏, 等. 温带季节性分层水库浮游植物功能类群的时空演替[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1157-1166.
- Huang T L, Zeng M Z, Qiu X P, *et al.* Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in a temperate seasonally stratified reservoir [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1157-1166.
- [33] Dortch Q. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton [J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, **61**: 183-201.
- [34] McCarthy J J, Wynne D, Berman T. The uptake of dissolved nitrogenous nutrients by Lake Kinneret (Israel) microplankton [J]. Limnology and Oceanography, 1982, **27**(4): 673-680
- [35] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 不同氮源和曝气方式对淡水藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 101-104.
- Liu C G, Jin X C, Sun L, *et al.* Effects of nitrogen source and aeration mode on algae growth in freshwater[J]. Environmental Science, 2006, **27**(1): 101-104.
- [36] Gao H, Schreiber F, Collins G, *et al.* Aerobic denitrification in permeable Wadden Sea sediments[J]. The ISME Journal, 2010, **4**(3): 417-426.
- [37] 周石磊, 黄廷林, 白士远, 等. 贫营养好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 238-248.
- Zhou S L, Huang T L, Bai S Y, *et al.* Isolation, Identification, and nitrogen removal characteristics of oligotrophic aerobic denitrifiers[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 238-248.
- [38] 黄廷林, 张丽娜, 张海涵, 等. 一株贫营养异养硝化-好氧反硝化菌的筛选及脱氮特性[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(1): 113-120.
- Huang T L, Zhang L N, Zhang H H, *et al.* Screening and nitrogen removal characteristics of a heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(1): 113-120.
- [39] 杨新萍, 钟磊, 周立祥. 有机碳源及 DO 对好氧反硝化细菌 AD6 脱氮性能的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1633-1639.
- Yang X P, Zhong L, Zhou L X. Effect of carbon source and dissolved oxygen on denitrification by aerobic denitrifier *Pseudomonas mendocina* AD6 [J]. Environmental Science, 2010, **31**(6): 1633-1639.
- [40] Chen M X, Wang W C, Feng Y, *et al.* Impact resistance of different factors on ammonia removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium *Aeromonas* sp. HN-02[J]. Bioresource Technology, 2014, **167**: 456-461.
- [41] Zhang Q L, Liu Y, Ai G M, *et al.* The characteristics of a novel heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium, *Bacillus methylotrophicus* strain L7[J]. Bioresource Technology, 2012, **108**: 35-44.
- [42] Zaitsev G, Mettänen T, Langwaldt J. Removal of ammonium and nitrate from cold inorganic mine water by fixed-bed biofilm reactors[J]. Minerals Engineering, 2008, **21**(1): 10-15.
- [43] Zheng H Y, Liu Y, Gao X Y, *et al.* Characterization of a marine origin aerobic nitrifying-denitrifying bacterium [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, **114**(1): 33-37.
- [44] 董秉直, 李伟英, 陈艳, 等. 用有机物分子量分布变化评价不同处理方法去除有机物的效果[J]. 水处理技术, 2003, **29**(3): 155-158.
- Dong B Z, Li W Y, Chen Y, *et al.* Evaluation with the change of organics mw distribution for effect of organics removal by different treatment method[J]. Technology of Water Treatment, 2003, **29**(3): 155-158.
- [45] 罗晓鸿, 曹莉莉, 王占生. 不同分子量的有机物在净水工艺中的去除研究[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(4): 341-344.
- Luo X H, Cao L L, Wang Z S. Study on the removal of different molecular-weight organics by water purification process [J]. China Environmental Science, 1998, **18**(4): 341-344.
- [46] 古励, 郭显强, 丁昌龙, 等. 藻源型溶解性有机氮的产生及不同时期藻类有机物的特性[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2745-2753.
- Gu L, Guo X Q, Ding C L, *et al.* Formation of algae-derived DON and characterization of algae organic matter (AOM) from different stages [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(9): 2745-2753.
- [47] 张娅萍. 污水有机物分子量分布变化与污染物去除关系研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- Zhang Y P. The study on the relationship between the pollutant removal and the change of the organic matter molecular weight distribution in wastewater[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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