

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
苾芻对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响

李洁, 张思凡, 肖琳*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化国家重点实验室, 南京 210023)

摘要: 氮是水生态系统初级生产力的限制性生源要素, 认识水体中氮的转化特征有利于调控和削减水体中过量的氮, 对维持水生态健康十分重要. 氨氧化细菌、氨氧化古菌以及反硝化细菌在氮循环中发挥关键作用. 通过在室内构建微宇宙模拟蓝藻水华的重复暴发, 发现在蓝藻水华暴发和衰亡短期内, TN、氨氮、TOC 浓度快速升高和 DO 急剧降低, 但后期逐渐得到恢复, 且水体中的 TN 在高浓度藻存在下迅速降低. 在蓝藻水华暴发和衰亡过程中, 太湖水体中氨氧化菌演化为 AOB 占优势, 氨氧化功能活性逐渐恢复, 有利于水体中氨氮的去除. 蓝藻水华暴发促进太湖水体中含 *nirS* 和 *nirK* 基因反硝化菌的数量增加至起始的 100 倍左右, 从而促进水体中总氮的去除.

关键词: 蓝藻水华; 理化因子; 氨氧化菌; 反硝化菌; 氮转化

中图分类号: X171.5; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2164-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.020

Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria

LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The biogeochemical cycle of nitrogen in the aquatic environment is the research hotspot in the world all the time. Nitrification and denitrification are the special processes of the microorganisms, and also the key steps in the nitrogen biogeochemical cycle possessing great significance in the freshwater ecosystem. In the processes of outbreaks of cyanobacterial blooms, total nitrogen, chlorophyll a, dissolved oxygen and pH decreased sharply, whilst dissolved organic carbon and ammonium nitrogen increased. The results of simulation of outbreaks of cyanobacterial blooms using micro-universe system in lab showed that the *amoA* gene abundance was reduced in the early stage and AOA was replaced by AOB gradually. Our results also showed that the amount of denitrifiers with *nirS/nirK* was elevated by also 100 times during the bloom outbreak, which can explain the promoted denitrification in the water during cyanobacterial bloom.

Key words: cyanobacterial blooms; physical and chemical factors; ammonia oxidizing bacteria; denitrifying bacteria; nitrogen transformation

水体富营养化所引起的蓝藻水华暴发已经造成很多的恶劣影响, 水质的恶化已严重影响到淡水生态系统生态安全、饮用水供给及经济可持续性发展^[1,2]. 蓝藻水华的暴发对水体的理化性质及水体中的微生物都存在影响. 首先, 水华藻类合成或分解产生大量有机物, 使水体中有机物含量骤增^[3]. 其次, 藻的光合作用及衰亡藻体降解会引发水体中溶解氧、二氧化碳浓度、pH 以及氧化还原电位的改变^[4~6]. 另外, 水华暴发期间藻体在表层聚集, 对水体中光线的遮挡影响下层水体中光合作用, 也会对水生生态系统的食物网产生影响^[7,8]. 而藻类产生的藻毒素等会对水体及沉积物中一些细菌产生抑制作用^[9], 同时促进某些藻类(如微囊藻)成为优势种群^[10]. 最后, 藻体本身也为水体中的微生物提供避难所^[11]. 在这些因素的共同影响下, 水体中的微生物群落结构和数量在蓝藻水华暴发过程中发生明显变化^[6,12,13], 进而影响到微生物所驱动的元素生物

地球化学循环^[14]. 有研究指出能够利用蓝藻暴发过程与水体中的氮循环微生物相互影响促进太湖水体中的氮去除^[15]. 不过, 目前关于蓝藻暴发过程对氮循环微生物具体影响的研究尚鲜见报道.

本研究通过在室内构建微宇宙模拟蓝藻水华的暴发, 目的在于: ①蓝藻水华暴发过程中理化因子和不同形态氮浓度的变化; ②蓝藻水华暴发对氮转化微生物数量和功能的影响.

1 材料与方法

1.1 体系构建

为了模拟太湖中的真实水体环境, 从太湖梅梁

收稿日期: 2015-10-10; 修订日期: 2016-01-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101006)

作者简介: 李洁(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物学, E-mail: 1035227946@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xiaolin@nju.edu.cn

湾湖区采集蓝藻水华和水样。所采样品在冰上保存并尽快运回实验室建立微宇宙。参照蓝藻水华暴发时的微囊藻水华生物量(约 $10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$),设置4组处理:①高浓度组 T1:在第0 d 添加微囊藻水华,使微囊藻水华生物量达 $10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;②高浓度水华重复暴发组 T2:在第0 d 和第15 d 添加微囊藻水华,使微囊藻水华生物量达 $10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;③低浓度组 T3:在第0 d 添加微囊藻水华,使微囊藻水华生物量达 $10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;④对照组 C:正常水样,不添加微囊藻。所有处理用10 L 玻璃缸(直径30 cm,高40 cm)于恒温室中 30°C 条件下培养,光照/黑暗周期为12 h/12 h。

1.2 样品的采集

在实验开始的第0、1、2、4、7、10、15、16、17、19、22、25、30 d 采集水样,每次采样时间均为上午09:00左右,采样时原位测定 pH 和溶解氧(DO)。所采样品装入已灭菌的聚丙烯塑料容器中冷藏保存。

1.3 理化指标的测定

溶解性有机碳(DOC)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^- \text{-N}$)、叶绿素 a(Chl-a)的测定均采用文献[16]中的方法。

1.4 潜在硝化速率(PNR)的测定

PNR 的测定参照文献[17]方法。将50 mL 水样用孔径为 $0.22 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤,过滤后所得滤膜剪碎并加至含有20 mL PBS ($8.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$, $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$, $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{HPO}_4$, $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaH}_2\text{PO}_4$; pH 7.4)的50 mL 离心管中,向管中添加硫酸铵和氯酸钾使两者的终浓度分别达 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。将此悬浮液置于 25°C 摇床暗培养24 h。然后悬浮液用5 mL KCl ($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 浸提后用 N -(1-基)乙二胺二盐酸盐法测定540 nm 下的吸光度(UV 2450 spectrophotometer; Shimadzu, Japan)。最终的PNR 结果用所测 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 含量计算并表示为 $\mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

1.5 DNA 的提取和定量 PCR

DNA 的提取参照文献[18]的方法进行。定量PCR 采用20 μL 反应体系(10 μL SYBR® Premix Ex Taq™ (Takara), 100 $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 引物和1.5 μL 模板DNA)。细菌和古菌的 *amoA* 基因分别采用 *amoA1F/amoA2R-TC* [19] 和 *Arch-amoAF/Arch-amoAR* [20], 所用条件为: 94°C , 2 min 后进行40个循环扩增 [94°C , 20 s; 57°C (AOB), 30 s 或者 55°C (AOA),

30 s; 72°C , 30 s]。反硝化基因 *nirK* 和 *nirS* 分别用引物为 1F/5R [21] 和 cd3af/r3cd [22]。 *nirK* 扩增条件为: 94°C , 2 min 后进行40个循环扩增 (94°C , 15 s; 60°C , 60 s), *nirS* 扩增条件为: 94°C , 2 min 后40个循环 (94°C , 30 s; 57°C , 45 s; 72°C , 45 s)。PCR 产物在 65°C 至 99°C 进行熔解曲线中的荧光测定,数据用 Rotor-Gene 6000 (version 1.7) 进行分析。标准曲线的制备参照 Chen 等 [23] 的方法。本实验 AOB *amoA* 扩增效率为 87% ~ 99% (R^2 为 0.992 ~ 0.999); AOA *amoA* 扩增效率为 100% ~ 109% (R^2 为 0.994 ~ 0.999); *nirK* 扩增效率为 103% ~ 109% (R^2 为 0.992 ~ 0.993); *nirS* 扩增效率为 105% ~ 109% (R^2 为 0.992 ~ 0.995)。

1.6 统计分析

定量PCR 数据和水体理化指标用 SPSS 13.0 软件进行 One-Way ANOVA (先采用 Z score 将数据标准化,去除偏差较大值)。平均数的比较采用 Fisher's LSD 检测。

2 结果与分析

2.1 理化指标的变化

第0~2 d,添加高密度微囊藻颗粒的处理(T1 和 T2) Chl-a 含量急剧下降(图1),在第2 d 分别降至 $1724 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1649 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,说明藻华迅速降解,但仍远高于低藻组 T3 的 $357 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和对照组的 $67 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。处理 T2 在第15 d 添加藻后,第16 d Chl-a 浓度又出现上升,而紧接着在第17 d 急剧下降。

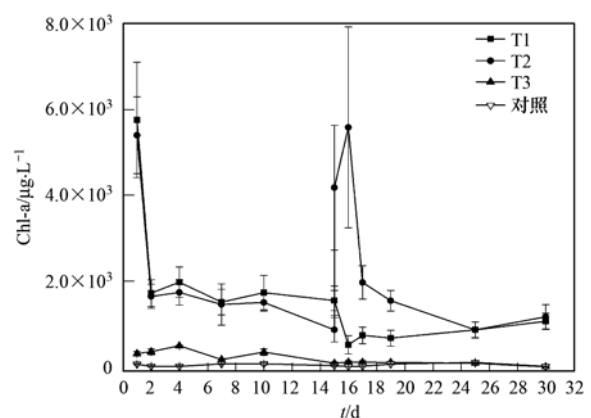


图1 各处理中叶绿素 a 的变化

Fig. 1 Changes of Chl-a in different groups

添加高密度微囊藻颗粒的处理(T1 和 T2) 的溶解氧(DO)在藻华降解过程中急剧下降(图2),在第2~7 d 均维持在 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度;到第10~15 d 时,处理 T1 和 T2 的 DO 出现回升。T2 的 DO 值在

第 15 d 由于再次添加藻华而迅速下降. 与 T1 和 T2 相比,低浓度藻华组 T3 和对照组均在第 2 d 之后 DO 值呈波动上升.

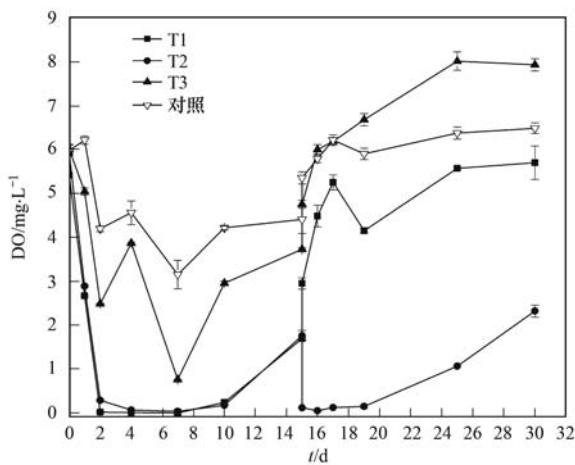


图 2 各处理中 DO 的变化

Fig. 2 Changes of DO in different groups

在第 0 ~ 4 d,添加高密度微囊藻颗粒的处理 (T1 和 T2) 中 pH 值在不断降低 (图 3),T3 的 pH 值在不断升高. 自第 7 d 起,T1 和 T2 的 pH 值与对照的差异逐步减小. 虽然 T2 的 pH 值于第 15 d 由于藻华的再次添加而明显降低,但随着藻华的降解,处理 T1 和 T2 的 pH 值不断上升,至第 30 d 时,T1 的 pH 值(9.19)已高于对照(8.56);而 T3 的 pH 值在第 10 d 时已高于对照.

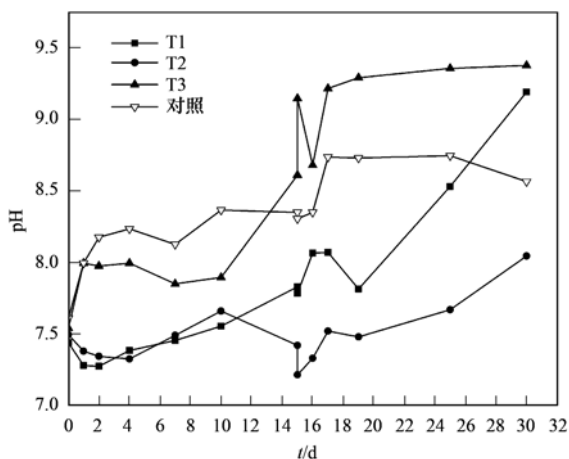


图 3 各处理中 pH 的变化

Fig. 3 Changes of pH in different groups

如图 4 所示,在第 2 d 时,添加高密度微囊藻颗粒的处理(T1 和 T2)的可溶性有机碳(DOC)含量分别达 $73.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $55.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,显著高于对照;但随后 T1 和 T2 处理的 DOC 含量又出现下降. 与对照和低浓度 T3 相比,含高浓度藻华组的 DOC

含量波动更剧烈.

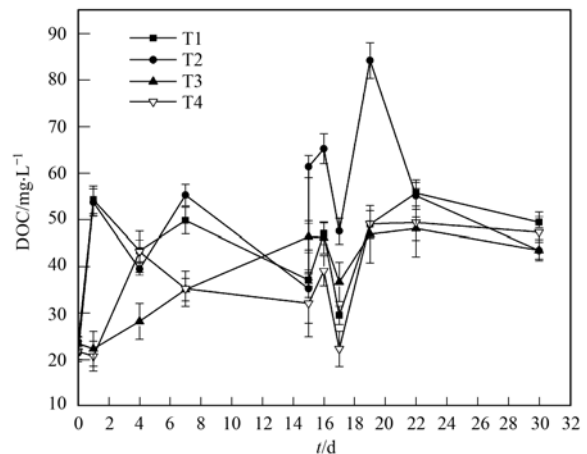


图 4 各处理中可溶性有机碳(DOC)的变化

Fig. 4 Changes of DOC in different groups

各浓度藻华处理的总氮(TN)总体呈下降趋势 (图 5). 添加高密度微囊藻颗粒的处理(T1 和 T2) 在第 0 ~ 1 d 的总氮含量降幅较大. 当在第 15 d 向处理 T2 中再次添加藻华后,其 TN 浓度再次升高,继而在第 16 ~ 17 d 时再次出现大幅降低,而在第 17 ~ 19 d 有小幅波动. T3 处理中 TN 在实验过程中呈缓慢下降.

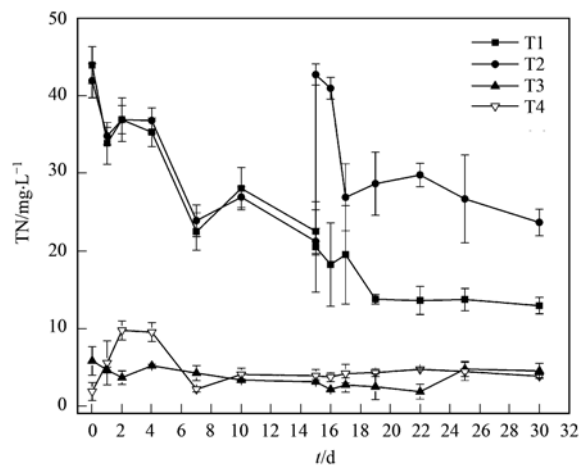


图 5 各处理中总氮的变化

Fig. 5 Changes of TN in different groups

添加高密度微囊藻颗粒的处理(T1 和 T2)的氨氮在第 2 ~ 4 d 出现大幅升高 (图 6),分别由 $3.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $12.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $14.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而后再在第 7 ~ 10 d 出现大幅降低,分别由 $17.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $16.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $5.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. T2 的氨氮含量在第 15 d 添加高浓度藻华后迅速降低,在第 17 d 又出现与第 2 d 相同的上升趋势,并于第 25 d 大幅降低,呈现出

与第 7 d 相同的趋势. 与处理 T1 和 T2 相比, T3 和对照的氨氮含量在整个培养过程中虽有波动, 但变化不明显.

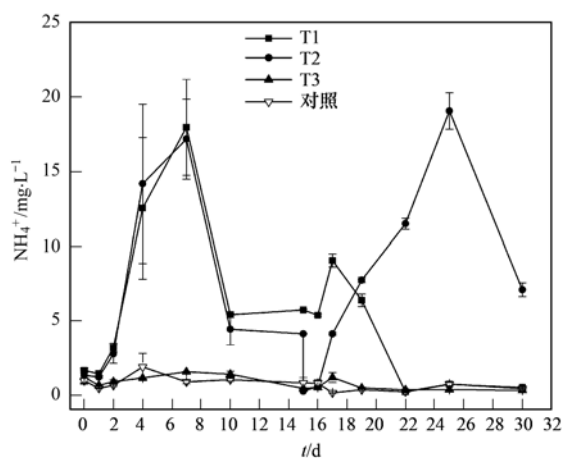


图 6 各处理中铵态氮的变化

Fig. 6 Changes of ammonium in different groups

添加高密度微囊藻颗粒的处理(T1 和 T2)的亚硝态氮含量在第 1~2 d 出现上升(图 7), 之后 T1 自 16 d 起持续上升; T2 在第二次添加蓝藻水华之后的第 15~17 d 亚硝态氮含量出现上升, 随后又在 20~25 d 呈现回落. T3 的亚硝态氮含量自第 4 d 起上升, 第 15 d 时达最大值, 之后变化较小.

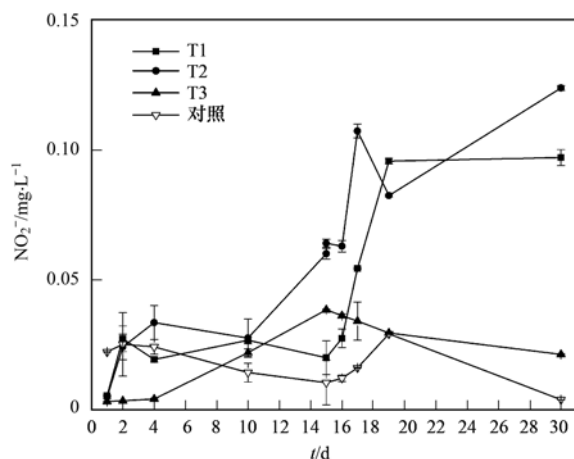


图 7 各处理中亚硝态氮的变化

Fig. 7 Changes of nitrite in different groups

与对照相比, 添加藻华的处理中硝态氮的含量均较低(图 8). 添加高密度微囊藻颗粒的处理(T1 和 T2)的硝态氮浓度在第 1~4 d 逐渐降低. T1 硝态氮含量在第 17 d 后波动上升, T2 硝态氮含量在第 15 d 再次添加高浓度藻华后一直维持在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. T3 硝态氮含量除第 1 d 的大幅降低外, 其余时间都在 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下波动.

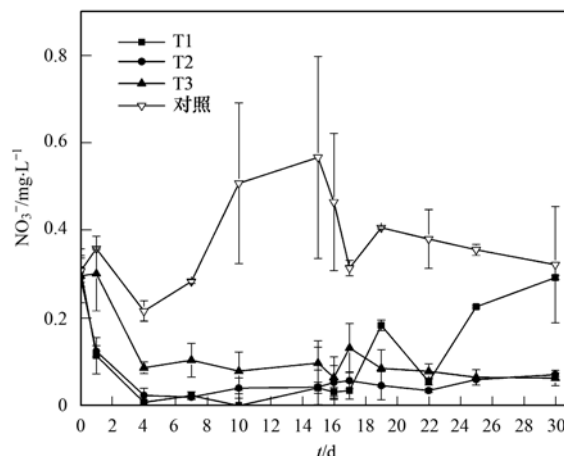


图 8 各处理中硝态氮的变化

Fig. 8 Changes of nitrate in different groups

2.2 PNR 的变化

由于 0~15 d 内只添加一次高密度微囊藻颗粒的处理(T1)与添加两次高密度微囊藻颗粒的处理(T2)的氮素变化趋势相同, 在 0~15 d 仅测试了 T2 的 PNR(图 9). T2 的 PNR 在第 4~15 d 呈上升, 在第 15 d 添加藻华后, 出现短暂下降, 在随后的第 16~19 d 逐渐上升, 第 19~20 d 呈现小幅回落后又波动上升; 处理 T1 的 PNR 在第 17~19 d 出现大幅上升, 继而在随后的第 19~30 d 内又逐渐下降, 至第 30 d 时回落至实验初的水平. T3 的 PNR 在第 15 d 起大幅上升, 第 19 d 后回落, 至第 30 d 时回落至对照水平.

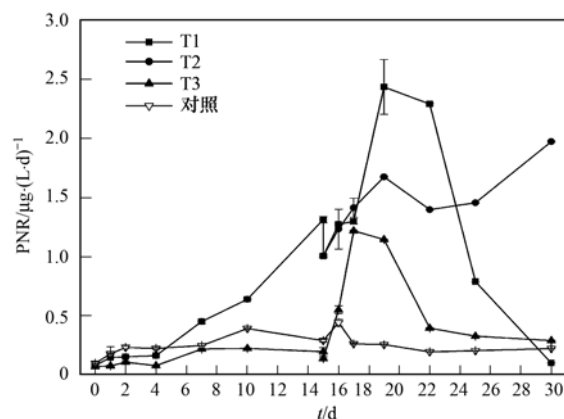


图 9 各处理中潜在硝化速率的变化

Fig. 9 Changes of the rate of potential nitrification in different groups

2.3 细菌 16S rRNA、古菌和细菌 *amoA*、*nirK*、*nirS* 基因丰度的变化

由于 T1 和 T2 的理化指标在第 0~15 d 内变化一致, 所以第 0~15 d T1 和 T2 的各基因丰度的定量均只取 T2 的样品来测定.

总体来看, 添加藻华后, 水体中细菌 16S

rRNA 丰度在短期内都有显著升高,但随之出现下降,而后又呈现回升趋势(图 10);且添加藻华越多,丰度升高的时间持续得越久,但随之降幅也越大.随着藻体的添加和衰亡,除 T2 外,其他处理和对照中细菌 16S rRNA 丰度均在下降后出现回升.

各处理中 AOA 和 AOB 的 *amoA* 基因相对丰度在添加藻华初期低于对照,但随着藻体的降解,在第 15 d 时,T1 和 T2 中 AOA 和 AOB 的 *amoA* 丰度高于对照(图 11).至第 30 d 时,T2 中 AOA 和 AOB 的 *amoA* 相对丰度远高于其他处理,这也与第 30 d 时 T2 中仍有较高的 PNR 活性相一致(图 11).同时,从 AOA 和 AOB 丰度的变化可以看到,在添加藻华的体系中,氨氧化菌由 AOA 占优势逐渐演变为 AOB 占优势.

定量 PCR 的结果表明,添加藻华后 *nirK* 和 *nirS*

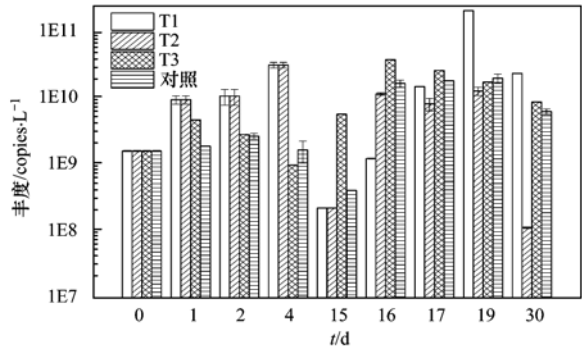


图 10 各处理中细菌 16S rRNA 丰度随时间变化

Fig. 10 Changes of the abundance of bacterial 16S rRNA in different groups over time

基因丰度在 1 d 内迅速上升,在经历短暂的下降后又呈现回升趋势(图 12).且添加藻华密度越大,*nirK* 和 *nirS* 基因丰度上升幅度越大.与 *nirK* 相比,*nirS* 基因丰度更高,在二次添加藻华的处理(T2)中,*nirS* 的丰度甚至可高达细菌总数的 29%.

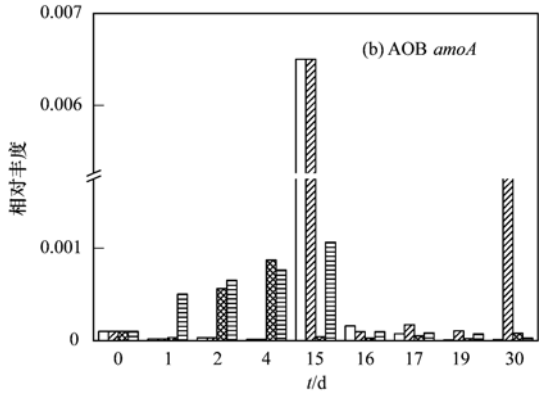
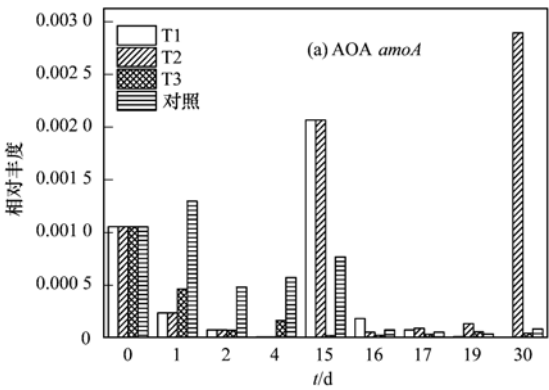


图 11 各处理中 AOA *amoA* 和 AOB *amoA* 基因相对丰度随时间变化

Fig. 11 Changes of the relative abundance of AOA *amoA* and AOB *amoA* over time

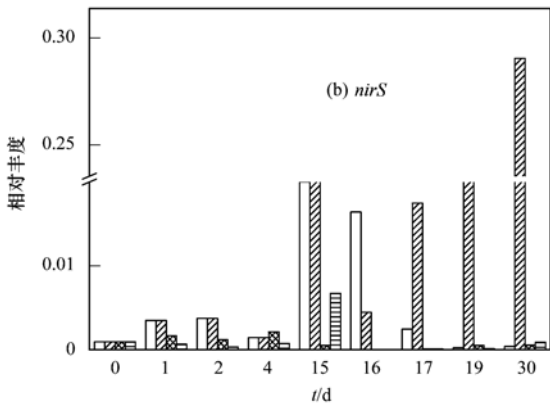
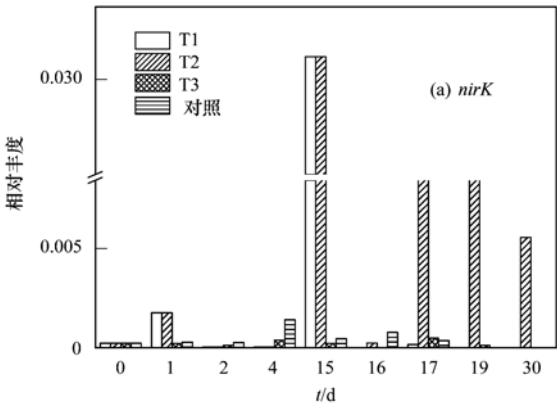


图 12 各处理中 *nirK* 和 *nirS* 基因相对丰度随时间变化

Fig. 12 Changes of the relative abundance of *nirK* and *nirS* over time

3 讨论

在本研究中,重复高密度藻华处理 T2 的理化因

子变化趋势在两次添加蓝藻水华后较一致,更表明水质受到蓝藻水华暴发的影响.在含有高浓度藻的水体中,其总氮浓度约为含低浓度藻水体的 8 倍,说

明由于高浓度藻体的输入,向水体中引入了大量的氮素.而大量藻体输入后,藻细胞迅速死亡降解,表现为 Chl-a 的含量在 2 天内剧烈下降至原来的约 30% (图 1),而低浓度藻组中,Chl-a 的含量仍有上升,说明在此浓度下,藻可以进行缓慢的生长.随着藻体的降解,水体中的 DO 浓度也降至约 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2),使水体处于缺氧的状态,有机质的缺氧降解产生的小分子有机酸造成水体中 pH 值的下降(图 3),藻体中蛋白降解所脱下的氨基由于缺氧而不能被及时氧化,积累在水体中,造成氨氮浓度大幅升高(图 6),对水质造成严重影响.但低浓度藻的输入对水体的各项理化指标没有显著性的改变,说明水体对低浓度藻的输入具有缓冲自净作用.在本研究中,高密度藻华处理 T1 的 DO 值在第 10 ~ 15 出现上升,而在第 2 ~ 15 d 该处理中的 Chl-a 浓度维持在 $1500 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上下,表明在藻华暴发后衰亡过程中,藻体并未完全死亡,而是在一个较低的密度进行光合作用维持生长,消耗 CO_2 并产生 O_2 ,这可能是导致水体中的 pH 值从第 4 d 起就开始缓慢上升的一个因素.

与对照相比,在微囊藻添加的处理组,总氮含量均降低,且添加微囊藻越多,总氮降低速率越快(图 5),硝态氮的变化也呈现类似的趋势. Chen 等^[15]利用同位素标记技术进行室内模拟蓝藻水华堆积对太湖水体氮转化的影响,发现高密度 ($4 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$) 微囊藻水华对水体中反硝化作用有促进作用,这与本研究的结果一致.

水体中氮的脱除通常是硝化-反硝化联合作用的结果.藻华短期内的快速降解导致水体中氨氮浓度升高给驱动硝化过程中关键步骤——氨氧化过程的氨氧化微生物提供了底物,有利于其增殖.同时,随着藻体的降解,DO 逐步回升,相应地,添加高浓度藻华组中 AOA 和 AOB 的 *amoA* 基因丰度大幅提高(图 11),表明水体中氨氧化微生物的丰度在逐渐恢复,与之相对应,水体中的氨氧化微生物活性在逐渐恢复,PNR 逐步上升(图 9),氨氮浓度大幅降低(图 6). Tuomainen 等^[24]在丝状蓝藻 *Aphanizomenon* sp. 和 *Nodularia* sp. 的非聚集丝 (non-aggregated filaments) 中检测到细菌的 *amoA* 基因,但在聚集丝 (aggregated filaments) 中却未检测到. 与非聚集丝相比,聚集丝内的氧气含量极低^[24],表明 DO 是影响氨氧化微生物活性的原因之一. 在本研究中, AOB 的丰度不断上升(图 11),最终超越 AOA 而处于优势,在这一方面源于 AOB 群落对氧气具有更高的亲

和力^[25],另一方面,如前面所讨论,水体中藻体的光合作用仍在产氧供利用,而并非完全的厌氧状态.同时随着藻华降解,氨氮浓度的升高提供了充足的底物,有利于在高氨氮情况下 AOB 在较高的铵态氮下相较 AOA 更竞争优势的形成^[26].

Zheng 等^[18]对玄武湖中藻华消亡期细菌进行研究,发现,游离和附生细菌都呈现快速增殖,其中大部分为 *Pseudomonas* 和 *Bacillus* 等可能具有反硝化功能的细菌. 衰亡藻体的降解为水体中提供了有机碳(图 4),消耗了水体中的氧气(图 2),为反硝化细菌的生长提供了良好的条件^[27]. 通过定量 PCR 对反硝化功能基因 *nirS* 和 *nirK* 进行定量分析,发现在添加藻华后 *nirK* 和 *nirS* 基因丰度均上升(图 11),且微囊藻密度越高,*nirK* 和 *nirS* 基因丰度上升幅度越大,甚至可达起始值的 100 倍以上,表明藻华对反硝化微生物的增殖和活性具有促进作用,且高密度藻华强于低密度藻华. 主要原因在于水华藻类的堆积在短期内会形成高氮(图 5)、低氧(图 2)和高 DOC(图 4)的环境,适合反硝化菌的生长. 相关性分析也表明,*nirK* 基因丰度与 *nirS* 基因丰度均与 DOC 呈正相关(*nirK* vs DOC: $r = 0.579$, $P = 0.001$, $n = 29$; *nirS* vs DOC: $r = 0.656$, $P < 0.001$, $n = 29$). 在 T2 处理中,重复添加藻华颗粒后(第 17 ~ 19d),*nirK* 和 *nirS* 基因丰度均再次增加,且 *nirS* 增加幅度大于第一次(第 1 d),见图 11. 与第一次添加藻华相比,第二次添加后的 T2 处理经历了 DO 值在第 1 ~ 19d 内好氧-厌氧-复氧-厌氧的大幅波动(图 2),这种含氧量波动的环境对反硝化更有利^[28];同时,藻华的反复暴发所引起水体中 DOC 浓度的升高也可能促进反硝化细菌的增殖. 在藻华降解的过程中,水体中含氧量逐渐回升(图 2),但 *nirK* 和 *nirS* 基因丰度在第 2 ~ 15 d 以及第 17 ~ 19 d 内并未下降,而出现上升(图 12),这可能与反硝化微生物在好氧条件下依然能保持较强的代谢活动有关^[29]. 本研究的结果表明,藻华暴发有利于氨氧化细菌和反硝化细菌丰度的提高,促进了藻华过程中氮从水体中大量去除.

4 结论

蓝藻水华暴发对水体中的理化因子造成严重影响,TN、氨氮、TOC 浓度的快速升高和 DO 的急剧降低,使水体处于缺氧状态. 但在蓝藻水华衰亡过程中,太湖水体中氨氧化菌的数量逐渐由 AOA 占优势演变为 AOB 占优势,氨氧化活性在缺氧情况下也

能逐渐恢复,对水体中氨氮的去除有贡献。水华的暴发造成的缺氧和高有机碳含量有利于太湖水体中反硝化菌的数量和功能活性的增加,在一定程度上有利于太湖水体中氮的去除。

参考文献:

- [1] 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 等. 蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 114-120.
- [2] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy[J]. Water Research, 2011, **45**(5): 1973-1983.
- [3] Alldredge A L, Passow U, Logan B E. The abundance and significance of a class of large, transparent organic particles in the ocean[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1993, **40**(6): 1131-1140.
- [4] Jensen M H, Lomstein E, Sørensen J. Benthic NH_4^+ and NO_3^- flux following sedimentation of a spring phytoplankton bloom in Aarhus Bight, Denmark[J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, **61**: 87-96.
- [5] de Figueiredo D R, Reboleira A S S P, Antunes S C, *et al.* The effect of environmental parameters and cyanobacterial blooms on phytoplankton dynamics of a Portuguese temperate lake[J]. Hydrobiologia, 2006, **568**(1): 145-157.
- [6] Chen M J, Chen F Z, Xing P, *et al.* Microbial eukaryotic community in response to *Microcystis* spp. bloom, as assessed by an enclosure experiment in Lake Taihu, China[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, **74**(1): 19-31.
- [7] Hansen J W, Udy J W, Perry C J, *et al.* Effect of the seagrass *Zostera capricorni* on sediment microbial processes[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, **199**: 83-96.
- [8] Christman G D, Cottrell M T, Popp B N, *et al.* Abundance, diversity, and activity of ammonia-oxidizing prokaryotes in the coastal Arctic Ocean in summer and winter[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, **77**(6): 2026-2034.
- [9] Ferreira F M B, Soler J M F, Fidalgo M L, *et al.* PSP toxins from *Aphanizomenon flos-aquae* (cyanobacteria) collected in the Crestuma-Lever reservoir (Douro river, northern Portugal)[J]. Toxicon, 2001, **39**(6): 757-761.
- [10] Gan N Q, Xiao Y, Zhu L, *et al.* The role of microcystins in maintaining colonies of bloom-forming *Microcystis* spp. [J]. Environmental Microbiology, 2012, **14**(3): 730-742.
- [11] Worm J, Søndergaard M. Dynamics of heterotrophic bacteria attached to *Microcystis* spp. (Cyanobacteria)[J]. Aquatic Microbial Ecology, 1998, **14**: 19-28.
- [12] Wu Q L, Zwart G, Wu J F, *et al.* Submersed macrophytes play a key role in structuring bacterioplankton community composition in the large, shallow, subtropical Taihu Lake, China[J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(11): 2765-2774.
- [13] Li H B, Xing P, Chen M J, *et al.* Short-term bacterial community composition dynamics in response to accumulation and breakdown of *Microcystis* blooms[J]. Water Research, 2011, **45**(4): 1702-1710.
- [14] 吴庆龙, 谢平, 杨柳燕, 等. 湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(11): 1115-1123.
- [15] Chen X F, Yang L Y, Xiao L, *et al.* Nitrogen removal by denitrification during cyanobacterial bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2012, **27**(2): 243-258. DOI: 10.1080/02705060.2011.644405.
- [16] 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.
- [17] Bernhard A E, Tucker J, Giblin A E, *et al.* Functionally distinct communities of ammonia-oxidizing bacteria along an estuarine salinity gradient[J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(6): 1439-1447.
- [18] Zheng X H, Xiao L, Ren J, *et al.* The Effect of a *Microcystis aeruginosa* bloom on the bacterioplankton community composition of Lake Xuanwa[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2008, **23**(2): 297-304.
- [19] Nicolaisen M H, Ramsing N B. Denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) approaches to study the diversity of ammonia-oxidizing bacteria [J]. Journal of Microbiological Methods, 2002, **50**(2): 189-203.
- [20] Francis C A, Roberts K J, Beman J M, *et al.* Ubiquity and diversity of ammonia-oxidizing archaea in water columns and sediments of the ocean[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, **102**(41): 14683-14688.
- [21] Braker G, Fesefeldt A, Witzel K P. Development of PCR primer systems for amplification of nitrite reductase genes (*nirK* and *nirS*) to detect denitrifying bacteria in environmental samples [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**: 3769-3775.
- [22] Michotey V, Méjean V, Bonin P. Comparison of methods for quantification of cytochrome *cd₁*-denitrifying bacteria in environmental marine samples[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(4): 1564-1571.
- [23] Chen X P, Zhu Y G, Xia Y, *et al.* Ammonia-oxidizing archaea: important players in paddy rhizosphere soil? [J]. Environmental Microbiology, 2008, **10**(8): 1978-1987.
- [24] Tuomainen J M, Hietanen S, Kuparinen J, *et al.* Baltic Sea cyanobacterial bloom contains denitrification and nitrification genes, but has negligible denitrification activity [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2003, **45**(2): 83-96.
- [25] Park H D, Regan J M, Noguera D R. Molecular analysis of ammonia-oxidizing bacterial populations in aerated-anoxic Orbal processes[J]. Water Science and Technology, 2002, **46**(1-2): 273-280.
- [26] Fukushima T, Wu Y J, Whang L M. The influence of salinity and ammonium levels on *amoA* mRNA expression of ammonia-oxidizing prokaryotes[J]. Water Science and Technology, 2012, **65**(12): 2228-2235.
- [27] Hansen L S, Blackburn T H. Effect of algal bloom deposition on sediment respiration and fluxes[J]. Marine Biology, 1992, **112**(1): 147-152.
- [28] Frette L, Gejlsbjerg B, Westermann P. Aerobic denitrifiers isolated from an alternating activated sludge system[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1997, **24**(4): 363-370.
- [29] Okada N, Nomura N, Nakajima-Kambe T, *et al.* Characterization of the aerobic denitrification in *Mesorhizobium* sp. Strain NH-14 in comparison with that in related *Rhizobia* [J]. Microbes and Environments, 2005, **20**(4): 208-215.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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