

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目 次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439)	
《环境科学》征稿简则 (2479)	
信息 (2152, 2231, 2286)	

太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素

赵锋^{1,2}, 许海², 詹旭^{1*}, 朱广伟², 郭宇龙¹, 康丽娟², 朱梦圆²

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 反硝化和厌氧氨氧化是湖泊的重要脱氮过程, 对维持湖泊氮素平衡具有重要意义. 为了解大型富营养化浅水湖泊——太湖反硝化和厌氧氨氧化速率的时空变化及其影响因素, 于2020年春季和夏季选择太湖的梅梁湾、贡湖湾、竺山湾、大浦口、胥口湾和湖心区采集无扰动泥柱, 利用¹⁵N同位素示踪技术, 在恒温水浴条件下开展反硝化和厌氧氨氧化流动培养实验. 结果表明, 春季太湖不同湖区反硝化和厌氧氨氧化速率的空间分布差异较大, 反硝化速率为 $(27.74 \pm 8.45) \sim (142.43 \pm 35.54) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 厌氧氨氧化速率为 $(2.35 \pm 1.06) \sim (17.95 \pm 8.66) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 厌氧氨氧化对脱氮的贡献率相对较低, 为 $(7.82 \pm 1.71)\% \sim (11.20 \pm 1.53)\%$. 夏季竺山湾脱氮速率最高, 反硝化和厌氧氨氧化速率分别高达 $(165.68 \pm 62.14) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(33.56 \pm 10.66) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 厌氧氨氧化对脱氮贡献率达到了 $(16.85 \pm 1.78)\%$, 其他湖区的脱氮速率相对较低, 且没有十分显著的空间差异, 反硝化和厌氧氨氧化速率分别为 $(25.47 \pm 10.46) \sim (42.50 \pm 16.46)$ 和 $(2.65 \pm 0.94) \sim (5.95 \pm 2.65) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 厌氧氨氧化对脱氮的贡献率为 $(13.62 \pm 1.95)\% \sim (7.24 \pm 1.78)\%$. 总体来说, 夏季反硝化速率要普遍低于春季, 而厌氧氨氧化速率相对于春季并无明显下降. 统计分析表明, 反硝化和厌氧氨氧化速率与底物氮浓度呈显著的相关性($P < 0.01$), 说明氮浓度是不同湖区脱氮速率差异的主要控制因素. 此外, 厌氧氨氧化对脱氮的贡献率与叶绿素a的浓度呈现显著的正相关性($P < 0.05$), 说明蓝藻水华对厌氧氨氧化脱氮贡献率的变化有很大的影响, 具体的影响机制还有待进一步研究.

关键词: 反硝化; 厌氧氨氧化; 太湖; 硝酸盐; 脱氮速率

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2296-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008303

Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu

ZHAO Feng^{1,2}, XU Hai², ZHAN Xu^{1*}, ZHU Guang-wei², GUO Yu-long¹, KANG Li-juan², ZHU Meng-yuan²

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Lake and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Denitrification and ANAMMOX are the main nitrogen removal processes in lakes, which are of great significance for maintaining the nitrogen balance. Lake Taihu is a large, shallow lake. There are great spatial and temporal differences in the nutrient levels and algal blooms, which will affect the rates of denitrification and ANAMMOX. In order to understand the spatial and temporal variations in the denitrification and ANAMMOX rates and their influencing factors in Lake Taihu, undisturbed sediment cores were collected from Meiliang Bay, Gonghu Bay, Zhushan Bay, Dapukou Bay, Xukou Bay, and the center of Lake Taihu in the spring and summer of 2020. The results showed that the spatial distribution of the denitrification and ANAMMOX rates varied greatly in different areas of Lake Taihu in spring. The denitrification and ANAMMOX rates were $(27.74 \pm 8.45) \sim (142.43 \pm 35.54) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $(2.35 \pm 1.06) \sim (17.95 \pm 8.66) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. The contribution of ANAMMOX to nitrogen removal was relatively low, ranging from $(7.82 \pm 1.71)\%$ to $(11.20 \pm 1.53)\%$. In summer, the denitrification and ANAMMOX rates were $(165.68 \pm 62.14) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $(33.56 \pm 10.66) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. The nitrogen removal rates were relatively low in other areas where the denitrification and ANAMMOX rates were $(25.47 \pm 10.46) \sim (42.50 \pm 16.46) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $(2.65 \pm 0.94) \sim (5.95 \pm 2.65) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. The contribution of ANAMMOX to nitrogen removal was $(13.62 \pm 1.95)\% \sim (7.24 \pm 1.78)\%$. The denitrification rate in summer was generally lower than that in spring, while the ANAMMOX rate did not decrease significantly compared with that in spring. The statistical analysis showed that the denitrification and ANAMMOX rates were significantly correlated with the substrate nitrogen concentration ($P < 0.01$), which indicated that the nitrogen concentration was the main factor causing the difference in the nitrogen removal rates in different lake regions. In addition, there was a significant positive correlation between the contribution rate of ANAMMOX and the concentration of chlorophyll-a ($P < 0.05$), thereby indicating that cyanobacteria blooms have a great influence on the change in the contribution of ANAMMOX to nitrogen removal.

Key words: denitrification; ANAMMOX; Lake Taihu; nitrate; nitrogen removal rates

收稿日期: 2020-08-30; 修订日期: 2020-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41573076, 41671494, 41830757)

作者简介: 赵锋(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊氮循环, E-mail: 772137992@qq.com

* 通信作者, E-mail: xuzhan@jiangnan.edu.cn

氮是藻类生长的重要限制因子之一,水体氮浓度升高会导致藻类大量增殖,引起水体富营养化和蓝藻水华的发生^[1],给水生生态系统带来巨大危害^[2].近几十年来,关于地表水环境中活性氮去除过程的相关研究备受国内外学者广泛关注.长期以来,反硝化一直被认为是水体去除无机氮的唯一生物途径.20世纪90年代发现的厌氧氨氧化反应打破了这一传统观念^[3].目前国际上对海洋中厌氧氨氧化过程的研究已经十分成熟,发现其在海洋氮循环中的脱氮贡献率可高达79%^[4],但目前国内外对淡水系统厌氧氨氧化反应及其对脱氮贡献率的研究偏少.

在浅水湖泊中,由于底泥与水体接触比例更高,反硝化脱氮的能力更强^[5].而且浅水湖泊更容易发生富营养化^[6],湖泊的富营养化程度会影响湖体内的反硝化作用.有研究表明,富营养化湖泊的反硝化速率明显大于贫营养化湖泊和中度营养化湖泊^[7].但是关于浅水,富营养化湖泊中厌氧氨氧化作用对湖泊脱氮的贡献研究较少.反硝化菌是异养菌,厌氧氨氧化菌是自养菌,有研究表明,浅水湖泊中反硝化对氮去除的贡献率要远高于厌氧氨氧化^[8],因为沉积物与水界面更容易受到溶解氧和外源有机污染物的干扰,导致厌氧氨氧化菌活性受到抑制而被淘汰^[9].不同湖泊或同一湖泊不同湖区受人类活动的影响程度不同,其富营养化程度也不同,其对反硝化和厌氧氨氧化速率的影响还需要深入研究.

太湖是一个大型浅水湖泊,是长三角地区的重要水源地之一^[10].近几十年来,由于人类活动的影响,日益增加的工业,农业和生活污水排放加速了太湖水体富营养化进程^[11,12],不同湖区受人类影响程度的不同,其富营养化程度也大不相同.竺山湾、大浦口和梅梁湾等河道入湖的湖区污染尤为严重,而湖心区受人类影响小,污染相对较小.此外,不同湖区由于水质和沉积物的性质差异巨大,其主导的水生植物也大不相同,北部和西部为藻型湖区,以浮游植物为主,而东部胥口湾和东太湖为草型湖区,以沉水植物为主^[10].大量研究表明蓝藻和沉水植物都能显著影响到水体氮的脱除^[8,13],因此研究不同类型湖区的脱氮速率对深入了解氮的收支有重要的意义.关于太湖反硝化和厌氧氨氧化已经开展了相关研究工作^[13,14],但是研究多集中在单个湖区,缺乏对于不同湖区之间脱氮能力的比较.同时,以往的很多研究多是使用泥浆培养的方法测定反硝化和厌氧氨氧化潜力^[15,16].泥浆实验的曝气过程破坏了底泥的微环境,改变了原位条件下的溶解氧,同时底泥中大量的氨氮被搅起从而高估了厌氧氨氧化对脱氮的

贡献率.相比之下,无扰动泥柱流动培养的方法能更大程度地模拟湖泊的原位条件,减少了人为操作的影响^[17].徐徽等^[14]使用流动培养结合同位素示踪的方法测定了冬季梅梁湾反硝化和厌氧氨氧化的速率和贡献率,但是在计算反硝化速率时使用的是Rysgaard等^[18]提出的反硝化公式,其将厌氧氨氧化产生的²⁹N₂归结到了反硝化作用中从而低估了厌氧氨氧化对脱氮的贡献率.

基于以上问题,于2020年4月初和6月末采集了太湖不同湖区的无扰动泥柱进行流动培养,采用¹⁵N同位素示踪和膜进样质谱仪结合的技术测定反硝化和厌氧氨氧化速率,分析造成不同湖区脱氮速率差异的原因,以期深入认识湖泊系统氮素的归趋和循环机制.

1 材料与方法

1.1 采样点位

太湖是一个生态类型较为复杂的大型浅水湖泊,既有藻型湖区,又有草型湖区,还有草藻过渡湖区.梅梁湾、竺山湾和大浦口是藻型湖区,同时竺山湾和大浦口又是河道湖水入流的湖区,胥口湾是草型湖区,贡湖湾是过渡区,湖心区是沉积物较少的湖区^[10].4月的采样点位覆盖了4个湖区,包括梅梁湾、贡湖湾、竺山湾和湖心区,6月增加了两个湖区(大浦口和胥口湾),其中梅梁湾和湖心区由于原来的点位未采到形状良好的泥柱而有所变动.

4月的采样点位为梅梁湾8号、湖心区7号、贡湖湾3号和竺山湾4号.6月的采样点位选择梅梁湾1号(8号点位由于清淤工程未采到性状良好的泥柱而改为1号点)、贡湖湾3号、竺山湾4号、大浦口2号、湖心区5号(7号点未采到性状良好的泥柱而改为5号)和胥口湾6号(图1).

1.2 样品采集

2020年的4月和6月于太湖部分湖区用柱状采泥器采集无扰动泥柱,每个点位采集3根泥柱作为平行,泥柱内径90 mm,泥柱中沉积物高度约为10 cm左右.同步采集50 L上覆水,使用YSI 6600 V2(美国Yellow Stone公司)多参数水质测定仪测定上覆水pH、DO和温度等理化性质.

1.3 室内培养实验

为了尽量模拟太湖的原位环境,本研究采用流动培养法开展实验.流动培养法是目前被广泛应用的接近于原位情况下的反硝化厌氧氨氧化速率的测定方法.在流动培养的实验中,除了额外添加的¹⁵N外,其他条件都尽量与原位环境相一致(包括无扰动泥柱的性状,除硝氮以外的其他营养盐浓度,有机

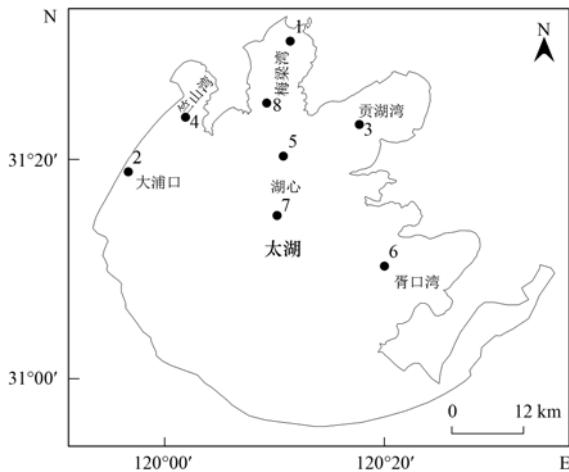


图1 泥柱采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites of sediment cores

碳浓度和溶氧浓度),设置的温度与采样时的原位温度一致,并进行了恒温控制.在每个泥柱中都添加了等量的 ^{15}N ,使硝氮本底值低的湖区加完 ^{15}N 后依然低,而本底值高的湖区加完 ^{15}N 后依然高.

泥柱尽量无扰动运回以避免破坏沉积物的性状和避免氧气的侵蚀,运回泥柱后避光预培养一天以消耗沉积物表面的硝酸盐.泥柱采用流动培养的方法测定反硝化和厌氧氨氧化速率^[16].在有机玻璃管上端塞入带有O型硅胶圈的活塞,使沉积物柱样上端形成无顶空的气密环境,上覆水体积约为270 mL,活塞上连接硅胶管作为进水管和出水管,保证硅胶管连接处不漏气,进水管距表层沉积物约1 cm,进水管低于出水管,通过流动培养的进出水循环形成垂直及水平方向的混合水流,使上覆水充分混合.流速通过蠕动泵调节,蠕动泵放置在出水口,流速设置为 $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,保证上覆水溶解氧变化较小,而且此流速下界面形态稳定.每根泥柱配备一个10 L的进水袋,进水袋中的原位水添加 $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ 进行处理,使添加完后 ^{15}N 的浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, ^{15}N 的最终丰度根据添加同位素后的硝氮浓度与未添加同位素的浓度的差值计算^[15].泥柱置于恒温水浴槽中进行恒温培养,温度设置为采样时湖水的温度.培养时间3 d,每24 h取一次样,使用12 mL的Labco质谱专用玻璃顶空瓶采集进水和出水样品,每个玻璃瓶内注射0.1 mL质量分数为50%的 ZnCl_2 杀死微生物来保存样品,用50 mL塑料离心管采集进水和出水样品,用 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤以备测定无机营养盐和DOC,在测定前水样保存于 -20°C 的冰箱中.

1.4 样品测定与分析

水体营养盐的测定使用Skalar连续流动分析仪(荷兰Skalar公司,SAN++型),DOC浓度通过TOC

测定仪测定,叶绿素a使用热乙醇提取法测定^[19].采用膜进样质谱仪测定培养实验中水体 $^{28}\text{N}_2$ 、 $^{29}\text{N}_2$ 和 $^{30}\text{N}_2$ ^[20].数据分析和作图使用Origin 9.0和Arcgis 10.2软件.

1.5 反硝化与厌氧氨氧化速率及贡献率的计算

反硝化速率计算公式^[21]:

$$V_{\text{DNF}} = \frac{2 \times (c_n - c_0) \times v \times 60}{S/F_N} \quad (1)$$

式中, V_{DNF} 为反硝化速率 $[\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$, c_n 为第 n 次取样时 $^{30}\text{N}_2$ 的浓度 $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$, c_0 为初始样品的 $^{30}\text{N}_2$ 浓度 $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$, v 为蠕动泵流速 $(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$, S 为泥柱底面积 (m^2) , F_N 为 ^{15}N 丰度,60为时间换算因子.

厌氧氨氧化速率计算公式^[22]:

$$V_{\text{ANAMMOX}} = \left[(c_n^* - c_0^*) + 2 \times \left(1 - \frac{1}{F_N} \right) \times \frac{(c_n - c_0)}{S/F_N} \right] \times v \times 60 \quad (2)$$

式中, V_{ANAMMOX} 为反硝化速率 $[\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$, c_n 为第 n 次取样时 $^{30}\text{N}_2$ 的浓度 $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$, c_0 为初始样品的 $^{30}\text{N}_2$ 浓度 $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$, c_n^* 为第 n 次取样时 $^{29}\text{N}_2$ 的浓度 $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$, c_0^* 为初始样品的 $^{29}\text{N}_2$ 浓度 $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$, v 为蠕动泵流速 $(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$, S 为泥柱底面积 (m^2) , F_N 为 ^{15}N 丰度,60为时间换算因子.

反硝化和厌氧氨氧化对脱氮贡献率的计算:

$$R_{\text{DNF}} = V_{\text{DNF}} / (V_{\text{ANAMMOX}} + V_{\text{DNF}}) \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{\text{ANAMMOX}} = V_{\text{ANAMMOX}} / (V_{\text{ANAMMOX}} + V_{\text{DNF}}) \times 100\% \quad (4)$$

式中, R_{DNF} 为反硝化贡献率, R_{ANAMMOX} 为厌氧氨氧化贡献率.

1.6 统计分析

为了探究太湖不同湖区脱氮速率的控制因子,将通过流动培养法所测得的反硝化,厌氧氨氧化速率和它们对脱氮的相对贡献率与采样时对应的原位环境因子进行相关性分析.统计分析软件为SPSS 19.

2 结果与分析

2.1 太湖水质的空间差异

不同湖区的水质情况如表1所示.春季水温在 20°C 左右,总体来看竺山湾的营养盐浓度最高,其中硝氮的浓度达到 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮和亚硝氮分别达到 $0.226 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.098 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,正磷酸盐浓度也最高,达到 $0.068 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,叶绿素a浓度为 $65.46 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,远超其他3个湖区.竺山湾DOC浓度达到 $4.443 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,也高于其它湖区.梅梁湾硝态氮、氨态氮、亚硝态氮、磷酸

盐的浓度分别为 0.571、0.057、0.007 和 0.012 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DOC 浓度为 4.277 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 贡湖湾水质情况也比较差,其中硝氮,氨氮,亚硝氮和磷酸盐浓度分别为 0.963、0.103、0.010 和 0.060 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,湖心区水质相对较好,硝氮、氨氮、亚硝氮和磷酸盐浓度分别为 0.526、0.052、0.009 和

0.008 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.
夏季平均水温超过 28℃ (表 1),比春季要高 9℃左右. 总体上,夏季不同湖区氨氮和磷酸盐浓度要高于春季,分别为 0.076 ~ 0.352 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.006 ~ 0.056 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而硝氮的浓度远低于春季 (0.003 ~ 1.069 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表 1).

表 1 各个点位上覆水水质参数

Table 1 Parameters of overlying water at the sampling sites										
月份	点位	温度 /℃	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Chl-a / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DOC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
4	湖心	19.372	8.56	3.83	8.22	0.526	0.052	0.009	0.008	3.961
4	贡湖	19.764	8.38	12.37	9.43	0.963	0.103	0.010	0.060	3.852
4	竺山	21.041	7.80	65.46	9.51	1.500	0.226	0.098	0.068	4.443
4	梅梁	20.685	8.45	20.77	9.01	0.571	0.057	0.007	0.012	4.277
6	梅梁	29.225	7.68	47.01	8.75	0.091	0.104	0.004	0.033	4.164
6	大浦	29.521	8.07	51.81	8.56	0.003	0.076	0.003	0.032	4.267
6	贡湖	27.692	8.06	45.76	8.88	0.114	0.158	0.0032	0.006	4.304
6	竺山	29.339	7.42	64.05	8.82	1.069	0.352	0.154	0.056	4.453
6	湖心	28.456	8.16	43.07	8.58	0.028	0.078	0.003	0.016	4.355
6	胥口	28.510	8.22	32.42	8.60	0.148	0.194	0.008	0.006	3.582

2.2 不同湖区反硝化与厌氧氨氧化脱氮的相对贡献率

流动培养结果显示 (图 2), 春季竺山湾的脱氮能力最强, 反硝化速率为 $(142.43 \pm 35.54) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 厌氧氨氧化速率为 $(17.95 \pm 8.66) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 反硝化对脱氮的贡献率在 4 个湖区中最低, 厌氧氨氧化对脱氮的贡献率在 4 个湖区

中最高, 分别为 $(88.80 \pm 4.62)\%$ 和 $(11.20 \pm 1.53)\%$; 贡湖湾次之, 反硝化速率为 $(72.78 \pm 11.83) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 厌氧氨氧化速率为 $(7.65 \pm 3.65) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 反硝化和厌氧氨氧化对脱氮的贡献率分别为 $(90.48 \pm 5.56)\%$ 和 $(9.52 \pm 1.52)\%$; 湖心区反硝化速率为 $(50.79 \pm 9.24) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 厌氧氨氧化速率为 (4.96 ± 2.62)

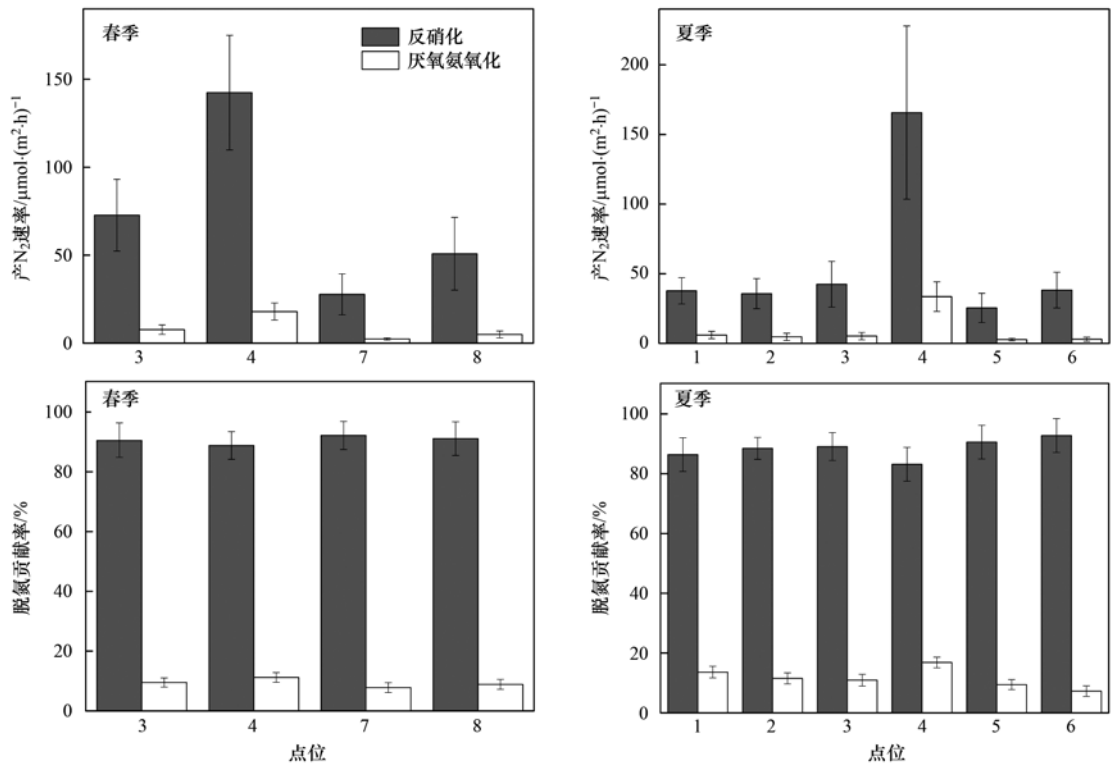


图 2 春季和夏季不同湖区脱氮速率与脱氮贡献率

Fig. 2 Nitrogen removal rates and contribution rates of different lake areas in spring and summer

$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,反硝化和厌氧氨氧化对脱氮的贡献率分别为 $(91.10\pm5.64)\%$ 和 $(8.90\pm1.62)\%$;梅梁湾反硝化速率最低,为 $(27.74\pm8.45)\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,厌氧氨氧化速率为 $(2.35\pm1.06)\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,反硝化对脱氮的贡献率最高,厌氧氨氧化对脱氮的贡献率最低,分别为 $(92.18\pm4.69)\%$ 和 $(7.82\pm1.71)\%$.

夏季竺山湾的脱氮能力最强,反硝化速率为 $(165.68\pm62.14)\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,厌氧氨氧化速率为 $(33.56\pm10.66)\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,反硝化对脱氮的贡献率在所有湖区中最低,厌氧氨氧化对脱氮的贡献率在所有湖区中最高,分别为 $(83.15\pm5.54)\%$ 和 $(16.85\pm1.78)\%$;其它5个采样湖区的脱氮速率相差不大,反硝化速率为 $(25.47\pm10.46)\sim(42.50\pm16.46)\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,厌氧氨氧化速率为 $(2.65\pm0.94)\sim(5.95\pm2.65)\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,反硝化和厌氧氨氧化对脱氮的贡献率分别为 $(86.38\pm5.65)\%\sim(92.76\pm5.57)\%$ 和 $(13.62\pm1.95)\%\sim(7.24\pm1.78)\%$.

2.3 反硝化和厌氧氨氧化速率与环境因子的相关性

反硝化与厌氧氨氧化速率与无机营养盐和溶解氧都呈现出了显著的相关性,其中,反硝化速率与硝

氮和亚硝氮浓度相关性最好,厌氧氨氧化与亚硝氮和氨氮相关性最好.温度、pH和叶绿素a的浓度与反硝化和厌氧氨氧化速率无明显相关性(表2).

3 讨论

3.1 氮浓度是限制春季和夏季反硝化和厌氧氨氧化速率的主要因素

相关性分析显示,反硝化速率与硝氮和亚硝氮浓度的相关性最好($P<0.01$,表2),说明底物的浓度对反硝化速率的影响最大.在污染严重的竺山湾地区,硝酸盐的浓度要远高于其他几个采样湖区,所以反硝化速率也最高.在春季,不同湖区硝氮的浓度差异比较大,反硝化速率也呈现了非常显著的差异,而在夏季,在采样的6个湖区中,除了竺山湾的硝氮浓度很高,其他5个湖区的硝氮浓度都处在一个很低的水平,所以竺山湾的反硝化速率很高,而其他几个湖区的反硝化速率很低,而且差异不很明显.此外还发现,尽管夏季的温度比较高,但是除了竺山湾外,其他几个湖区夏季的反硝化速率明显要比春季低,进一步说明夏季反硝化速率主要受氮浓度限制.溶解氧也是影响反硝化速率的重要因素($P<0.05$).大多数的反硝化菌是厌氧菌,它们对氧气很敏感,所以低溶解氧能促进反硝化菌的生长^[23].

表2 反硝化和厌氧氨氧化速率与环境因子的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between the denitrification and ANAMMOX rates and environmental factors

	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	DOC	温度	pH	DO	Chl-a
反硝化	0.848 **	0.962 **	0.839 **	0.781 **	0.426	-0.102	0.469	-0.635 *	0.515
厌氧氨氧化	0.689 *	0.978 **	0.876 **	0.686 *	0.458	0.113	0.300	-0.744 *	0.574

1) *表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关,**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关, $n=10$

厌氧氨氧化速率的空间变化与反硝化速率的变化比较同步,反硝化速率高的点位厌氧氨氧化速率也高.统计分析结果显示,厌氧氨氧化速率明显也是受底物氨氮,硝氮和亚硝氮的浓度限制($P<0.01$),同样,较低的溶解氧也有利于厌氧氨氧化反应的进行($P<0.05$)^[24],而且厌氧氨氧化速率与溶解氧的相关性显著高于反硝化速率与溶解氧的相关性,说明厌氧氨氧化相比于反硝化对低氧环境的依赖性更强.但是与反硝化速率相比,厌氧氨氧化速率明显要低很多.这是因为厌氧氨氧化菌是自养型厌氧菌,而太湖作为一个平均水深只有1.9 m的浅水湖泊,并没有明显的氧跃层,而且沉积物与水界面极易受到外界的干扰,比如溶氧的侵蚀,外源有机污染的输入,这些都能显著抑制厌氧氨氧化菌的活性^[24].

有趣的是,反硝化速率与氨氮浓度,厌氧氨氧化速率与硝氮浓度都呈现出了显著的正相关($P<0.05$,表2),这似乎不合常理.实际上,在自然水环

境中,反硝化和硝化反应往往是同时发生的,而硝氮除了河道入水和降雨等物理来源之外,只有氨氮硝化这一条生化途径^[25],高浓度氨氮的硝化过程为反硝化提供了充足的硝氮和亚硝氮底物.厌氧氨氧化与硝氮呈现显著正相关是因为氨氮耦合了硝氮反硝化生成的亚硝氮而实现了厌氧氨氧化过程.此外也有研究表明硝氮能作为电子受体代替亚硝氮参与厌氧氨氧化过程^[26].

3.2 蓝藻堆积有利于促进脱氮过程

除了温度升高的原因外^[27],蓝藻水华也很可能是促进湖泊脱氮潜力,导致夏季水体的脱氮速率受到氮限制的另一个重要原因.有研究表明,蓝藻水华使水库沉积物表面的厌氧氨氧化菌的丰度高了9~25倍且厌氧氨氧化菌丰度的改变与氮(如氨氮)和有机碳有关^[28].另外有多篇文献报道蓝藻能促进反硝化的发生^[13,29].蓝藻可能是通过改变水体溶解氧,或者为反硝化和厌氧氨氧化提供反应的底物而

促进脱氮过程的. 蓝藻的堆积会使下层的藻无法接触阳光而转为有氧呼吸, 当水柱中蓝藻的呼吸作用大于光合作用时, 水体的溶解氧就会降低, 蓝藻降解后会为水体提供大量的氨氮和有机碳, 保证了厌氧氨氧化和反硝化的发生. 同时有研究报导蓝藻能为反硝化菌提供附着的载体, 有大量蓝藻颗粒的水柱反硝化潜力很强^[30].

此外, 本研究发现反硝化和厌氧氨氧化速率都与磷浓度显著相关($P < 0.01$). 磷和氮是影响水体富营养化的重要因子, 磷浓度高的地方通常氮浓度也很高. 而且磷虽然不直接参与反硝化和厌氧氨氧化, 但作为限制水体初级生产力的因子^[31], 可能会间接影响到脱氮过程. 比如通过引起蓝藻水华来加速湖泊脱氮过程.

3.3 蓝藻水华促进厌氧氨氧化对脱氮的贡献率

厌氧氨氧化对脱氮的贡献率并不高(图2), 这说明反硝化作用是太湖脱氮的主要形式. 夏季厌氧氨氧化对脱氮的贡献率明显比春季要大, 而且水华严重的竺山湾厌氧氨氧化对脱氮的贡献率也明显高于其他几个采样湖区. 统计分析表明, 厌氧氨氧化对脱氮的贡献率与叶绿素 a 的浓度显著相关($P < 0.05$) 这说明蓝藻水华对厌氧氨氧化脱氮贡献率的变化有很大的影响. Lansdown 等^[32]的研究发现尽管厌氧氨氧化需要缺氧条件, 但是其可以通过耦合硝化反应产生的亚硝氮而达到一个可观的脱氮速率. 本研究发现夏季反硝化速率普遍低于春季, 但是厌氧氨氧化速率相比于春季并没有明显地下降. 这是因为尽管夏季硝氮的含量普遍低于春季, 但是氨氮和亚硝氮相比于春季却没有明显地下降, 甚至有所升高, 而且夏季水体的溶解氧并不低, 这说明水柱中可能存在较强的硝化作用, 而硝化作用为厌氧氨氧化提供了底物亚硝氮, 硝化作用耦合厌氧氨氧化作用的发生可能是夏季厌氧氨氧化速率并没有明显降低的原因之一. 有研究报道, 蓝藻死亡降解会导致沉积物氨氮的大量释放^[33], 同时, 蓝藻自身死亡降解也会产生大量的有机氮和氨氮^[34], 这说明蓝藻水华可以通过改变水体溶解氧、pH 和营养盐浓度而直接或间接影响到氨氮浓度, 最后影响到厌氧氨氧化对脱氮的贡献率.

4 结论

(1) 太湖氮磷浓度具有明显的季节变化, 夏季水体硝氮浓度显著降低, 而氨氮和磷酸根的浓度有所升高.

(2) 太湖沉积物反硝化速率和厌氧氨氧化速率春季呈现出明显的空间差异, 反硝化速率从高到低

依次为竺山湾, 贡湖湾, 湖心区和梅梁湾, 厌氧氨氧化速率从高到低依次为竺山湾, 贡湖湾, 湖心区和梅梁湾; 夏季除了污染较重的竺山湾外, 其他湖区的反硝化和厌氧氨氧化速率无明显的空间差异.

(3) 总体来看, 太湖沉积物夏季反硝化和厌氧氨氧化速率要普遍低于春季, 主要控制因子是水体氮的浓度.

(4) 蓝藻水华严重的湖区厌氧氨氧化对脱氮的贡献率明显高于其他湖区.

参考文献:

- [1] Zhang X K, Li B L, Xu H, *et al.* Effect of micronutrients on algae in different regions of Taihu, a large, spatially diverse, hypereutrophic lake[J]. *Water Research*, 2019, **151**: 500-514.
- [2] 汪岩山. 蓝藻水华对浮游细菌群落结构的影响及蓝藻生物质应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
Wang Y S. Bacterioplankton community structure in response to algal blooms and applications of algal biomass [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [3] 王沙沙, 潘阳, 谭宇杰, 等. 厌氧氨氧化技术现状、研究进展及主要影响因素[J]. *环境卫生工程*, 2020, **28**(1): 64-69, 73.
Wang S S, Pan Y, Tan Y J, *et al.* Status, research progress and main influence factors of anammox technology[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020, **28**(1): 64-69, 73.
- [4] Song B, Buckner C T, Hembury D J, *et al.* Impact of volcanic ash on anammox communities in deep sea sediments [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2014, **6**(2): 159-166.
- [5] Reisinger A J, Tank J L, Hoellein T J, *et al.* Sediment, water column, and open-channel denitrification in rivers measured using membrane-inlet mass spectrometry [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, **121**(5): 1258-1274.
- [6] Lang B, Medeiros A S, Worsley A, *et al.* Influence of industrial activity and pollution on the paleoclimate reconstruction from a eutrophic lake in lowland England, UK [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2018, **59**(4): 397-410.
- [7] Saunders D L, Kalf J. Denitrification rates in the sediments of Lake Memphremagog, Canada-USA[J]. *Water Research*, 2001, **35**(8): 1897-1904.
- [8] Roland F A E, Darchambeau F, Borges A V, *et al.* Denitrification, anaerobic ammonium oxidation, and dissimilatory nitrate reduction to ammonium in an East African Great Lake (Lake Kivu)[J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(2): 687-701.
- [9] Xie H T, Ji D D, Zang L H. Effects of inhibition conditions on anammox process [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, **100**, doi: 10.1088/1755-1315/100/1/012149.
- [10] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] 陆沈钧, 姚俊, 曹翔. 浅析太湖流域农业面源污染现状、成因及对策[J]. *水利发展研究*, 2020, **20**(2): 40-44, 53.
Lu S J, Yao J, Cao X. Status, causes and Countermeasures of agricultural non-point source pollution in Taihu Lake Basin[J]. *Water Resources Development Research*, 2020, **20**(2): 40-44, 53.
- [12] 朱昕阳, 蒋彩萍, 马晓雁, 等. 太湖流域浙江片区出入境水量、水质及污染物通量[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(3): 629-

640.
Zhu X Y, Jiang C P, Ma X Y, *et al.* Water quantity, quality and pollutant flux of inbound and outbound water in Zhejiang area of Taihu Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(3): 629-640.
- [13] 刘志迎, 许海, 詹旭, 等. 蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1261-1269.
Liu Z Y, Xu H, Zhan X, *et al.* Influence of cyanobacterial blooms on denitrification rate in shallow Lake Taihu, China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1261-1269.
- [14] 徐徽, 张路, 商景阁, 等. 太湖梅梁湾水土界面反硝化和厌氧氨氧化[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(6): 775-781.
Xu H, Zhang L, Shang J G, *et al.* Denitrification and anammox on the sediment-water interface in the Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(6): 775-781.
- [15] Yao Z B, Wang F, Wang C L, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation coupled to ferric iron reduction in the sediment of a eutrophic lake [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(15): 15084-15094.
- [16] 陈志浩, 覃云斌, 丁帮璟, 等. 宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 412-419.
Chen Z H, Qin Y B, Ding B J, *et al.* Denitrification and anaerobic ammonium oxidation in soil nitrogen migration process in a farmland of Wanshandang Lake[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 412-419.
- [17] Gao H, Schreiber F, Collins G, *et al.* Aerobic denitrification in permeable Wadden Sea sediments[J]. *The ISME Journal*, 2010, **4**(3): 417-426.
- [18] Rysgaard S, Risgaard-Petersen N, Nielsen L P, *et al.* Nitrification and denitrification in lake and estuarine sediments measured by the ^{15}N dilution technique and isotope pairing[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(7): 2093-2098.
- [19] 陈明, 孙洁梅, 李敏, 等. 水体中藻类叶绿素 a 提取方法的比较[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, **29**(4): 57-59.
Chen M, Sun J M, Li M, *et al.* Comparison for extracting chlorophyll-a from algae in water[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2017, **29**(4): 57-59.
- [20] 李进芳, 柴延超, 陈顺涛, 等. 利用膜进样质谱仪测定水稻土几种厌氧氮转化速率[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(7): 1541-1549.
Li J F, Chai Y C, Chen S T, *et al.* Measurement of denitrification, Anammox, DNRA rates, and net N_2 flux in paddy soil using a membrane inlet mass spectrometer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(7): 1541-1549.
- [21] Hou L J, Yin G Y, Liu M, *et al.* Effects of sulfamethazine on denitrification and the associated N_2O release in estuarine and coastal sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(1): 326-333.
- [22] Thamdrup B, Dalsgaard T. Production of N_2 through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(3): 1312-1318.
- [23] 王海燕, 赵远哲, 王文富, 等. 人工湿地脱氮影响因素及强化措施研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2020, **10**(4): 585-597.
Wang H Y, Zhao Y Z, Wang W F, *et al.* A review of influencing factors and enhanced measures for nitrogen removal of constructed wetlands[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, **10**(4): 585-597.
- [24] 冯宁, 张文文, 马晨曦. 厌氧氨氧化反应影响因素研究进展 [A]. 见: 2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集 (第一卷) [C]. 合肥: 中国环境科学学会, 2018.
- [25] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(5): 263-276.
- [26] Waki M, Yasuda T, Fukumoto Y, *et al.* Effect of electron donors on anammox coupling with nitrate reduction for removing nitrogen from nitrate and ammonium[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **130**: 592-598.
- [27] 孙小溪, 蒋宏忱. 湖泊微生物反硝化过程及速率研究进展 [J]. *微生物学报*, 2020, **60**(6): 1162-1176.
Sun X X, Jiang H C. Progress in microbially mediated denitrifying in lacustrine environments[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2020, **60**(6): 1162-1176.
- [28] Xue Y Y, Yu Z, Chen H H, *et al.* Cyanobacterial bloom significantly boosts hypolimnetic anammox bacterial abundance in a subtropical stratified reservoir [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, **93**(10), doi: 10.1093/femsec/fix118.
- [29] 肖琳, 杨佳怡. 水华对沉积物中氮的转化和去除的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4018-4022.
Xiao L, Yang J Y. Water bloom modified sediment nitrogen transformation and removal[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4018-4022.
- [30] Chen X F, Jiang H Y, Sun X, *et al.* Nitrification and denitrification by algae-attached and free-living microorganisms during a cyanobacterial bloom in Lake Taihu, a shallow Eutrophic Lake in China[J]. *Biogeochemistry*, 2016, **131**(1-2): 135-146.
- [31] Alvarez-Clare S, Mack M C, Brooks M. A direct test of nitrogen and phosphorus limitation to net primary productivity in a lowland tropical wet forest[J]. *Ecology*, 2013, **94**(7): 1540-1551.
- [32] Lansdown K, McKew B A, Whitby C, *et al.* Importance and controls of anaerobic ammonium oxidation influenced by riverbed geology[J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(5): 357-360.
- [33] 朱梦圆, 朱广伟, 王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 409-415.
Zhu M Y, Zhu G W, Wang Y P. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 409-415.
- [34] 余岑岑, 马杰, 许晓光, 等. 太湖近岸带草藻残体分解对水质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(2): 302-308.
Yu C C, Ma J, Xu X G, *et al.* Influence of decomposition processes of higher aquatic plants and algae on water quality near the shoreline of Lake Taihu [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2018, **37**(2): 302-308.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	 HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	 HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	 ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	 YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	 QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	 CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphotically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	 LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	 LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	 MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	 HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	 XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	 YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	 CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	 XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)