

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618)	
《环境科学》征稿简则 (1635)	
信息 (1724, 1769, 1800)	

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应

李如忠^{1,2}, 王莉^{1,2}, 刘超^{1,2}

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学纳米矿物与污染控制安徽普通高校重点实验室, 合肥 230009)

摘要: 2018年10月至2019年8月,在巢湖西半湖北侧滨岸筛选3个典型水塘洼地,采集表层沉积物及上覆水样,开展外源碳氮浓度梯度培养实验,解析底质反硝化速率对碳氮的限制性,并识别主要环境影响因素。结果表明:①洼地蒲草、水塘芦苇、水塘蒲草等3种植物丛沉积物对照样的反硝化速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$] 分别为 2.15 ~ 10.87 (均值为 6.47)、2.08 ~ 10.65 (均值为 6.97)、2.06 ~ 10.88 (均值为 6.76),彼此间差异性不显著;②总体上,外源氮(硝态氮)的添加可以明显提高沉积物的反硝化速率,表明硝态氮为反硝化过程的限制性因素;③外源碳(葡萄糖)的添加导致植物丛沉积物反硝化速率明显下降,表明有机碳对沉积物反硝化产生了抑制作用;④外源碳氮同时添加明显提高了沉积物反硝化速率,除10月洼地蒲草丛和6月水塘蒲草丛低碳氮浓度沉积物反硝化速率相对较高以外,其它情形均表现为高碳氮浓度沉积物反硝化速率更高。

关键词: 水塘洼地; 反硝化速率; 外源碳氮; 限制性因素; 巢湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1684-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910128

Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone

LI Ru-zhong^{1,2}, WANG Li^{1,2}, LIU Chao^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Nanominerals and Pollution Control of Anhui Higher Education Institutes, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: From October 2018 to August 2019, three typical ponds and bottomland were selected in the Chaohu lakeshore zone, where surface sediments and overlying water samples were collected simultaneously. A set of incubation experiments, along with exogenous carbon and nitrogen concentration gradients, were conducted to analyze sediment denitrification rates and its response to carbon and nitrogen limitation. Moreover, the main influencing factors for the sediment denitrification process were identified using correlation analysis method. The results showed that ① the denitrification rates of three plant plexus sediments were 2.15-10.87, 2.08-10.65, and 2.06-10.88 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$, with averages of 6.47, 6.97, and 6.76 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. Overall, there was no significant difference between them. ② In general, exogenous nitrogen addition could significantly increase denitrification rates of the three plant sediments, indicating that nitrate was the limiting factor for the sediment denitrification process. ③ Exogenous carbon addition resulted in a significant decrease in the denitrification rates of three plant plexus sediments, indicating that organic carbon inhibited the denitrification process. ④ Exogenous carbon and nitrogen added simultaneously displayed a dramatic effect on the increase of sediment denitrification rates. Except for the bottomland Pucuo in October and pond Pucuo in June, all other cases showed higher denitrification rates for high carbon and nitrogen concentration.

Key words: ponds and bottomland; denitrification rates; exogenous carbon and nitrogen; influencing factors; Lake Chaohu

氮是重要的生源要素,因此氮循环在整个地球环境系统中扮演中极为重要的角色,维系着人类及其它地球生命系统的生存和发展。由于近些年人类活动的不断加剧,导致全球新增“活性”氮量大幅增加,进而导致全球氮循环产生严重失调的倾向。众所周知,过量的氮输入到生态系统可能产生严重的生态危害性,如农作物氮的富集、水体富营养化和水生生态退化等。因此,氮素污染问题引起人们越来越多的关注^[1,2]。反硝化过程可以将 NO_3^- 从生态系统中完全去除,因此反硝化技术被认为是解决水体氮素污染的重要途径和机制^[3,4]。水塘洼地是河湖水系统的重要组成部分,也是非点源氮磷滞留和转化的重要场所。目前,针对水体沉积物反硝化问题的研究,

主要集中在大型河口滩涂湿地、湖泊、水库等大尺度缓流水体,以及不同尺度河流沟渠水体沉积物等^[5-7],而对小型水塘洼地湿地类型的重视程度相对不足。从水力特征看,由于空间尺度小及水体深度不大,水塘洼地常因缺乏有效的水源补给而表现出一定的干湿交替现象,这与湖库、河流等存在很大差别。水塘洼地是河湖水系常见的水体类型,由于数量较大,对调控陆地径流非点源污染负荷发挥着重要作用。因此,开展水塘洼地沉积物反硝化潜力及其影

收稿日期: 2019-10-18; 修订日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579061)

作者简介: 李如忠(1970~),男,博士,教授,主要研究方向为水环境保护与修复机制, E-mail: Lrz1970@163.com

响因素分析,对推动和促进流域水环境管理具有重要意义.

巢湖是我国五大淡水湖泊之一,湖泊富营养化颇为严重,高负荷的氮素污染状况成为困扰巢湖水体富营养化治理的难题之一^[8]. 据报道,巢湖流域非点源氮磷污染负荷已超过点源污染贡献水平,因此如何有效削减非点源氮磷入湖负荷,成为巢湖水环境治理的一项颇为棘手的难题. 巢湖流域大多为低矮丘陵岗地,河流水系发达,水塘洼地数量众多. 随着巢湖富营养化治理及环湖景观带建设的不断推进,环湖周边退耕还湖、退耕还湿初见成效,沿湖村落的搬迁使得滨岸地带水塘洼地的数量显著增加,如何有效发挥这种水体类型的氮磷滞留功效值得探究. 本研究拟以巢湖西半湖北侧滨岸带中村落搬迁后的三处典型水塘洼地为对象,通过对表层沉积物碳氮源添加的实验室培养分析,解析沉积物反硝化潜力及碳氮的限制性,并识别主要环境影响因素,以期对巢湖周边水塘洼地沉积物反硝化潜力提升提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

巢湖位于安徽省合肥市境内,是我国五大淡水湖泊之一. 巢湖流域属于北亚热带湿润季风气候区,年均气温约 16℃,年均降水量约 1 100 mm,其中 5~8 月降水量约占全年总降水量的 55%. 近年来,巢湖水体富营养化日趋严重,水华暴发频频发生. 巢湖流域河流水系发达,水塘洼地数量众多. 在近 10 多年巢湖环湖景观带建设,特别是西半湖景观休闲区建设过程中,沿湖村落搬迁后遗留的水塘、洼地也都经水景观改造逐步转变为景观湿地的重要组成.

本研究选择的三处水塘洼地位于巢湖西半湖北岸大堤外侧,介于塘西河和十五里河入湖河口之间,北邻巢湖景观大道环湖北路(见图 1). 该区域原为塘西村所在地,目前已改造建设成巢湖西半湖景观休闲带. 这里,水塘 1 近似于圆形,长宽约 60 m,滨水带芦苇和蒲草生长茂盛;水塘 2 长约 800 m,最宽约 80 m,两端为莲藕种植区,周边浅水区芦苇、蒲草生长茂盛,岸上滨水带大型水生/湿地植物生长浓密;洼地近似椭圆形,长约 90 m,最宽处约 60 m,底质主要为黏质土壤,水深较浅,冬季常处于干涸状态,大型植物种类单一,基本都为浓密的蒲草丛覆盖.

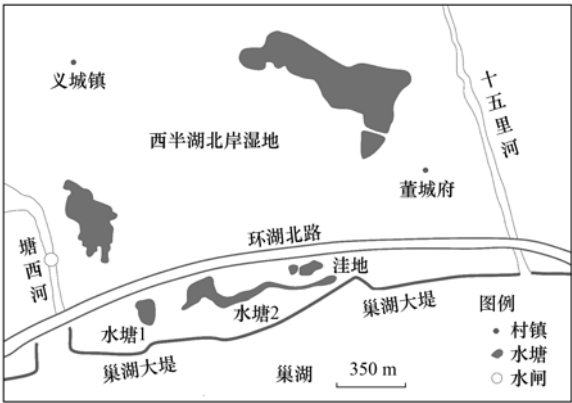


图 1 采样区域示意
Fig. 1 Sketch-map of the distribution of the sampling areas

表 1 为整个采样期间水塘洼地水质数据的统计平均值. 可以看出,3 个水塘洼地水体水质状况基本接近. TN 平均浓度高达 14.43 mg·L⁻¹,超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类水标准阈值 6.22 倍,NO₃⁻-N 浓度更是显著高于 NH₄⁺-N; TP 平均浓度为 0.54 mg·L⁻¹,略高于 V 类水标准,且 SRP 占 TP 百分比平均为 55.6%.

表 1 河流水质统计结果

Table 1 Mean value of water quality indices in the sampling areas											
项目		NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	SRP /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	ORP /mV	EC /μS·cm ⁻¹	TDS /mg·L ⁻¹	pH
水塘 1	芦苇 1	0.56	5.15	14.28	0.30	0.49	34.50	147.88	340.50	158.50	7.68
	蒲草 1	0.68	5.05	13.72	0.30	0.48	37.42	136.75	344.38	171.38	7.56
水塘 2	芦苇 1	0.67	6.00	14.30	0.27	0.60	38.48	147.63	359.38	185.13	7.64
	芦苇 2	0.77	5.58	14.63	0.32	0.55	39.79	113.38	346.50	173.38	7.78
	蒲草 1	0.70	4.82	15.46	0.32	0.56	39.67	99.63	441.25	224.38	7.84
	蒲草 2	0.65	5.10	14.94	0.35	0.57	40.09	107.25	490.75	240.88	7.81
洼地 ¹⁾	蒲草 1	0.39	4.99	14.23	0.25	0.51	34.58	110.38	407.88	195.88	7.80
	蒲草 2	0.47	4.78	14.21	0.29	0.54	30.21	110.38	374.25	204.63	7.73
	蒲草 3	0.32	4.68	14.12	0.30	0.55	32.56	116.00	386.63	208.13	7.81

1) 12 月和 2 月洼地蒲草采样位置出现干涸现象

1.2 样品采集与分析测试

根据 3 个水体植被类型及组成分布情况,将其

划分为水塘芦苇、水塘蒲草、洼地蒲草等 3 种类型植物丛,并设置 9 个采样点(表 1). 为增强采样点位的

代表性,每个采样点均布置在芦苇或蒲草占绝对优势且密集程度相对较高的区域,相应地覆盖面积基本都在 8 m^2 以上. 2018 年 10 月、12 月及 2019 年 2 月、4 月和 6 月,采集表层 2 ~ 5 cm 沉积物样及上覆水样. 采样期间水塘采样点处水深基本维持在 30 ~ 50 cm,洼地水深仅为 10 ~ 20 cm,且在 12 月和翌年 2 月出现干涸情况. 每个采样点采集沉积物约 1 000 g,现场测定 pH、水温 (T)、总溶解固体 (TDS)、电导率 (EC) 和氧化还原电位 (ORP). 一部分新鲜沉积物用于反硝化速率测定,其余部分放置于阴凉通风处自然风干,经研磨过 100 目尼龙筛,密封保存以备沉积物理化性质分析.

沉积物分析项目包括 TN、TP、有机质 (OM)、

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 pH 等,水样包括 TN、TP、OM、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、pH、溶解反应性磷 (SRP) 和 COD 等指标. 具体测定方法参见文献[9].

1.3 实验方案设计

称取相当于 1 g 烘干样的新鲜沉积物样于 50 mL 离心管中,采用硝酸盐剩余量法^[10-12]测定沉积物反硝化速率. 针对碳、氮外源添加设置 3 种情形,即单独添加碳、氮以及两者共同添加,每种情形均设置两个梯度(见表 2). 这里,2018 年 10 月未就单独添加碳情形开展培养实验. 为便于比较,针对上述 3 种情形设置一组空白对照样(添加同体积 20 mL 上覆水). 此外,对于上述每种处理方式均设置 3 个平行,并以平均值代表测试结果.

表 2 反硝化实验方案设计¹⁾

Table 2 Specific treatments for denitrification

处理方式	上覆水	KNO_3 ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	KNO_3 ($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	葡萄糖 ($1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	葡萄糖 ($6250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
空白对照	✓				
N1	✓	✓			
N2	✓		✓		
C1	✓			✓	
C2	✓				✓
N1 + C1		✓		✓	
N2 + C2			✓		✓

1) ✓ 表示添加 10 mL 相应溶液

将装有新鲜沉积物的离心管加塞密封,放置在恒温培养箱 30°C 环境条件下培养 48 h;然后采用 $3500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,分离过滤后测定 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度,并由滤液体积,估算剩余的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 量. 为确定新鲜沉积物的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量,称取相同质量的新鲜样,加入 20 mL $4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化钾溶液,采用 $3500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速离心 10 min,过滤后测定滤液中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度,再由滤液体积,计算单位质量沉积物的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 量,并将该测定值加上添加 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 量作为初始值,采用式(1)计算反硝化速率:

$$\text{反硝化速率} = \frac{M_{\text{培养前}} - M_{\text{培养后}}}{T_{\text{培养时间}}} \quad (1)$$

式中, $M_{\text{培养前}}$ 表示培养前单位质量沉积物的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $M_{\text{培养后}}$ 表示培养后单位质量沉积物的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $T_{\text{培养时间}}$ 表示沉积物在恒温培养箱的培养时间 (h).

1.4 数据处理

采用单因素方差分析 (one-way ANOVA), 解析 3 种植物丛沉积物反硝化速率的差异性; 采用 Spearman 系数表征反硝化速率与上覆水水质指标、沉积物理化指标的相关性. 相关数据处理及图形绘制由 Excel 软件完成.

2 结果与分析

2.1 沉积物氮磷污染特征

表 3 为整个采样期间 3 种植物丛沉积物基本理化指标的统计平均值. 可以看出, 3 个水体不同植物丛中, 除 OM 外, 其它各项指标相差不大. 总体上, 洼地蒲草的 OM 含量明显低于水塘芦苇、水塘蒲草. 另外, 洼地蒲草和水塘蒲草的最大变异系数分别为 10.84% 和 12.38%, 相应指标都为 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$; 水塘芦苇中 TP 的变异系数最大, 为 16.81%. 因此, 3 种植物丛沉积物基本理化性质的时空异质性不大.

3 种植物丛沉积物的 TN 和 TP 均值分别为 $1595.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $462.044 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均低于巢湖表层沉积物 TN 和 TP 含量 (分别为 $1737.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $691.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[13], 显著低于邻近的十五里河沉积物 (分别为 $1884.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1068.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[14]. 采样区沉积物 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量均值为 $444.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显低于十五里河氨氮含量 ($597.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但高于巢湖表层沉积物中氨氮含量 (春季蓝藻暴发前: $305.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[15]. 3 种植物丛沉积物 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量均值为 $142.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于十五里河沉积物 ($58.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 水塘芦

表 3 沉积物基本理化指标统计结果
Table 3 Mean values of physiochemical indices in sediments

项目		$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	TN / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	TP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	OM/%	pH
水塘 1	芦苇 1	443.946	136.766	1 572.200	409.723	6.76	7.25
	蒲草 1	459.707	147.947	1 631.035	469.105	7.40	7.22
水塘 2	芦苇 1	455.155	148.629	1 613.048	536.904	8.03	7.25
	芦苇 2	452.930	146.689	1 611.546	543.692	7.73	7.30
	蒲草 1	438.760	145.021	1 628.600	479.198	7.35	7.27
	蒲草 2	461.372	146.646	1 626.204	440.152	7.36	7.23
	蒲草 3	441.753	131.090	1 558.008	436.457	3.86	7.29
洼地	蒲草 2	418.367	133.770	1 560.421	431.588	4.10	7.16
	蒲草 3	425.598	141.878	1 561.497	411.583	3.98	7.25

苇、水塘蒲草 OM 均值分别为 7.50%、7.40%，显著高于巢湖表层沉积物中 OM 含量(5.86%)^[13]。

2.2 反硝化速率及对外源碳氮的响应

2.2.1 对照样反硝化速率

与碳氮梯度情形相比,不添加外源碳氮的沉积物对照样测得的反硝化速率可能更接近于采样点真实的反硝化潜力状况。3 种植物丛沉积物对照样反硝化速率的变化情况,见图 2。显然,整个采样期间,3 种植物丛的反硝化速率变化规律一致,且都表现为 2 月最低,6 月最高。整个研究期间,3 种水生植物丛沉积物对照样反硝化速率总体上不存在显著的差异性($P>0.626$),但在不同月份情况则稍有不同。其中,10 月洼地蒲草和水塘芦苇沉积物对照样反硝化速率呈极显著差异性($P=0.001$)、洼地蒲草和水塘蒲草之间也呈极显著差异性($P=0.008$);4 月洼地蒲草与水塘芦苇沉积物对照样反硝化速率呈现显著差异性($P=0.028$),其它月份不同类型沉积物对照样反硝化速率的差异性不明显。

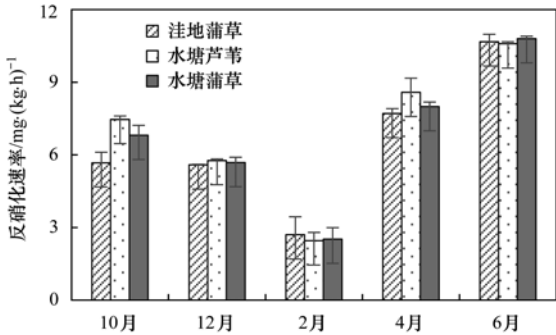


图 2 对照样反硝化速率变化特征

Fig. 2 Variations in the denitrification rates in the controls during the sampling periods

洼地蒲草对照样反硝化速率为 $(6.47 \pm 2.76) \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$, 水塘芦苇反硝化速率为 $(6.97 \pm 2.86) \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$, 水塘蒲草对照样反硝化速率值为 $(6.76 \pm 2.82) \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 。李如忠等^[12]采用硝酸盐剩余量法分别对合肥城郊小溪流水质状况良好

段和严重污染段沉积物反硝化速率进行了测算,得到反硝化速率分别为 $2.53 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $3.32 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 。秦如彬等^[11]也以该方法测算了合肥城郊受生活污水严重污染的沟渠沉积物反硝化潜力,得到反硝化速率为 $10.59 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$;测算得到受污水厂尾水影响的溪流沉积物反硝化速率为 $6.05 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 。牟晓杰等^[10]在对闽江河口芦苇湿地的研究中,得到污染严重滩涂湿地的反硝化速率约 $0.74 \sim 2.69 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 。不难推断,巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化潜力与这些溪流、湿地基本相当。

2.2.2 对外源氮的响应

在单独添加外源氮情形下,针对氮浓度梯度 N1 和 N2,不同采样时间 3 种植物丛沉积物反硝化速率变化情况,见图 3。与图 2 中相应的空白对照样相比,随着外源氮浓度的增加,3 种植物丛沉积物反硝化速率总体上表现出增大的趋势,但也出现了异常情况。具体地说,10 月洼地蒲草沉积物反硝化速率 N1 梯度时不仅没有增加反而下降,N2 梯度时下降幅度更显著;6 月洼地蒲草植物丛依旧延续这一特点。而且,6 月其它 2 种植物丛 N2 梯度相应的反硝化速率也远低于对照样和 N1 梯度。由于大部分情况下 3 种植物丛沉积物反硝化速率都表现出随着氮的投加量增加而快速增大的变化趋势,表明硝态氮是植物丛沉积物反硝化过程的限制因素^[16]。但上述异常情况也意味这种限制性不是固定不变的,而是具有一定的时间(或季节)变化性,尤以洼地蒲草植物丛沉积物表现更为明显。

总体上,N1 梯度下洼地蒲草与水塘芦苇沉积物反硝化速率存在极显著差异性($P=0.007$),洼地蒲草与水塘蒲草之间也表现出一定的差异性($P=0.074$),而水塘芦苇与水塘蒲草的差异性不显著($P=0.234$);N2 梯度下 3 种植物丛反硝化速率没有表现出明显的差异性($P>0.261$)。

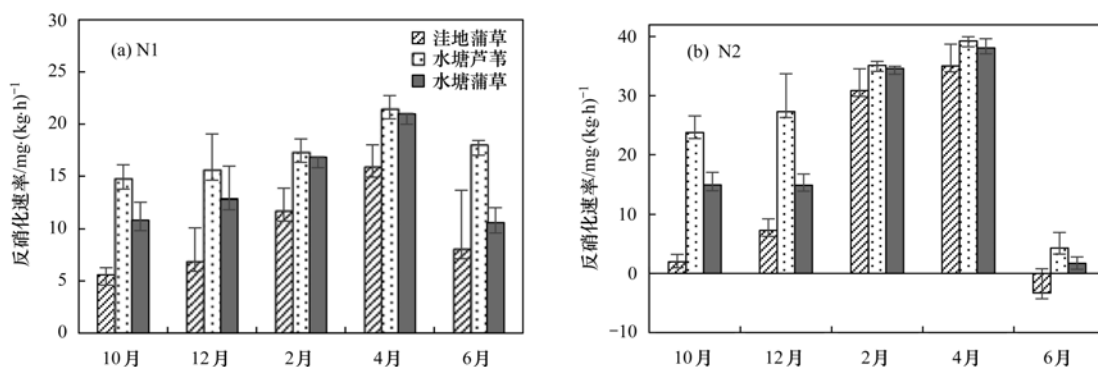


图3 不同氮梯度下沉积物反硝化速率变化情况

Fig. 3 Variations in the denitrification rates along the nitrogen gradient

2.2.3 对外源碳的响应

图4为单独添加外源碳情形下3种植物丛沉积物反硝化速率变化情况.与图2的对照样反硝化速率相比,单独增加外源碳时,整个采样期间3种植物丛沉积物反硝化速率均有大幅度下降,表明3种植

物丛沉积物反硝化进程受到碳的抑制.

洼地蒲草在2018年2月和4月出现负值,水塘芦苇和水塘蒲草在12月反硝化速率值也出现了负值.差异性分析结果表明,外加碳源情形下3种植物类型沉积物反硝化速率之间不存在显著差异性($P > 0.267$).

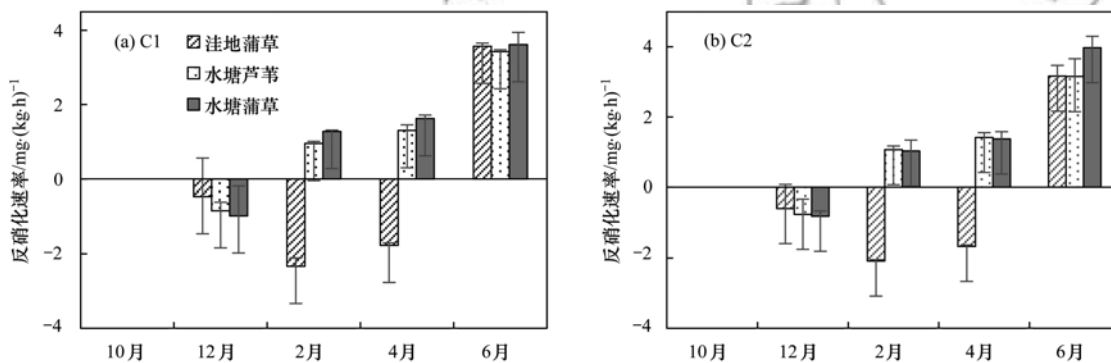


图4 不同碳梯度下沉积物反硝化速率变化情况

Fig. 4 Variations in the denitrification rates along the carbon gradient

2.2.4 对外加碳氮源的响应

图5为外源碳氮同时添加时,不同碳氮梯度下3种植物丛沉积物反硝化速率值随采样时间而变化的情况.与图2的对照样反硝化速率相比,N1 + C1梯度的沉积物反硝化速率都有了较为明显的提高;与N1 + C1梯度相比,总体上N2 + C2梯度的沉积物反硝化速率继续表现出较快的增长态势,表明外源碳氮同时添加可以促进3种植物丛沉积物的反硝化作用.但在N2 + C2梯度也出现了明显

的异常情况,即10月洼地蒲草、6月水塘蒲草植物丛沉积物反硝化速率反而低于N1 + C1梯度,但却依旧高于对照样反硝化速率值.这里,由于实验中滴入的碳和氮溶液体积相同,因此N1 + C1和N2 + C2梯度的C:N比值分别为15:1和25:1.换言之,大部分情形下碳氮比为25:1时的反硝化速率较15:1时更高.

与N1 + C1梯度相比,N2 + C2梯度下各采样时间3种植物丛沉积物反硝化速率的差异性相对更为

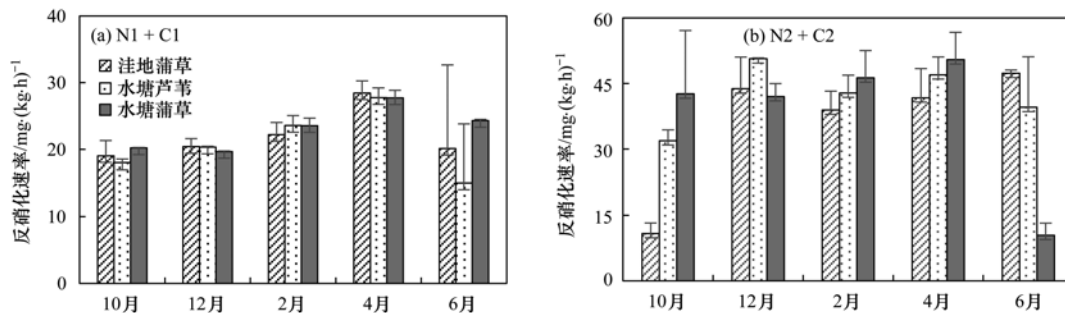


图5 不同碳氮梯度下沉积物反硝化速率变化情况

Fig. 5 Variations in the denitrification rates along the dual nutrient gradient

明显一些,但无论是 N1 + C1 梯度还是 N2 + C2 梯度,3 种植物丛沉积物反硝化速率之间的差异性均达不到显著性水平($P>0.417$).

与单添加氮(图 3),特别是单添加碳(图 4)相比,同时添加碳氮时各植物丛沉积物反硝化速率提高更显著,表明碳氮同时添加更有利于巢湖滨岸水塘洼地植物丛沉积物反硝化进程.

2.3 反硝化速率与环境因素的关系

对照样反硝化速率与上覆水水质指标的 Spearman 相关系数见表 4. 这里,3 种植物丛的对照

样反硝化速率均与 T 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度呈极显著相关关系,水塘蒲草沉积物还与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 表现出极显著相关性,水塘芦苇和水塘蒲草都与 TN 表现出极显著相关性. 虽然洼地蒲草对照样反硝化速率与 SRP 呈现显著相关,但总体而言与磷素关系并不密切,与 COD 浓度关系似乎更弱.

对照样反硝化速率与沉积物理化指标的 Spearman 相关系数,见表 5. 显然,与上覆水水质指标相比,沉积物理化指标与对照样反硝化速率的相关关系较弱,甚至不存在显著相关性.

表 4 对照样反硝化速率与水质指标 Spearman 相关系数¹⁾

Table 4 Spearman correlation coefficients between denitrification rates and water quality indexes							
类型	T	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	SRP	TN	TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	COD
洼地蒲草	0.834 **	-0.470	0.548 *	0.479	0.305	-0.642 **	0.220
水塘芦苇	0.860 **	-0.571	0.433	0.547 **	0.111	-0.799 **	0.297
水塘蒲草	0.872 **	-0.756 **	0.388	0.632 **	0.211	-0.788 **	0.284

1) * 表示 0.05 水平下的显著相关; ** 表示 0.01 水平下的极显著相关

表 5 对照样反硝化速率与沉积物理化指标 Spearman 相关系数

Table 5 Spearman correlation coefficients between denitrification rates and sediment physiochemical indexes						
类型	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	TN	TP	OM	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	pH
洼地蒲草	0.368	0.220	-0.268	0.466	0.034	-0.222
水塘芦苇	0.246	-0.229	-0.354	0.102	0.021	0.136
水塘蒲草	0.17	-0.468	-0.315	0.411	-0.004	-0.066

3 讨论

根据外源氮梯度下沉积物反硝化速率的变化情况,初步判定巢湖滨岸 3 个水塘洼地沉积物反硝化存在氮限制性. 但由图 3 也可以看出,并不是所有植物丛沉积物的高氮浓度反硝化速率都较低氮浓度情形的反硝化速率更高,尤其是 2019 年 6 月高氮浓度时 3 种植物丛沉积物反硝化速率较低浓度下降幅度在 90% 以上,洼地蒲草甚至还出现了负值. 笔者以为,这可能是由于水分、碳源或其它因素转变成为反硝化限制性因素的缘故. 实际上,Mulholland 等^[17]在对美国 72 条河流沉积物反硝化潜力的研究中,也发现当硝酸盐含量过高时,反硝化速率反而随着硝酸盐浓度的增加而下降. 本研究中,单独添加碳源,反硝化受到了明显的抑制作用,这可能是一方面采样区域为芦苇/蒲草浓密植物区,沉积物中经年存在大量的腐殖质植物残体,有机质含量较为丰富;另一方面,氮限制性的存在表明反硝化底物硝态氮的不足,此时进一步投入有机碳就会加剧硝态氮的不足,进而导致碳限制性的发生. 当然,有机碳对反硝化过程的影响也存在很大的不确定性和动态变化性,所得结论往往也不一致. 如 Herrman 等^[18]在对美国东北部农业源头溪流沉积物反硝化作用影响因素的研究

中发现,碳浓度的改变对沉积物反硝化速率没有影响,作者认为这可能与研究溪流有着丰富的 DOC 和沉积碳有关. 高雪梅等^[19]在对不同量的碳输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化速率的研究中发现,加入碳能使反硝化速率有一定的增加. 从生态化学计量学观点来看,生物体对碳氮等生源物质的利用往往遵从一定的化学计量关系,也就是说,服从一定的碳氮比. 因此,碳氮比往往被视为控制反硝化脱氮速率的重要因素. 本研究中,根据外源碳情形的分析,有机碳(葡萄糖)不是限制性因素而是抑制因素,但当碳氮同时添加时情况明显发生了转变,大部分情形下碳氮比为 25:1 时的反硝化速率较 15:1 时更高,表明碳氮比为 25:1 可能更适合 3 个水塘洼地沉积物反硝化^[20]. 因此,在设计反硝化速率的影响因素时,不能将碳和氮的反硝化效应生硬割裂开来,需要从整体上综合考虑两者的影响,即从碳氮比角度权衡碳氮的添加.

图 4 的外加碳情形下部分反硝化速率值出现了负值,尤其是洼地蒲草. 笔者以为,这可能与洼地蒲草处于干湿交替状态有很大关系. 根据采样记录,2018 年 12 月和翌年 2 月,洼地蒲草采样区处于干涸状态,塘底底质直接暴露在空气中,导致表层土壤的含氧量高,而水塘中采样点所在的芦苇、蒲草经年

被 30 cm 以上水体覆盖,沉积物的含氧量相对不足. 由于直接挖取表层沉积物且密封装袋,当天返回实验室后立即投入培养实验,使得洼地蒲草底质中残存的 O_2 含量相对较高. 本研究在培养实验中未排空离心管上部的空气,加之底质中残存 O_2 ,使得培养过程中可能发生一定的硝化作用. 而高浓度碳的抑制作用本身导致通过反硝化途径损失的硝态氮量明显降低,有时甚至低于残存 O_2 经硝化作用生成的硝态氮量,从而使得部分反硝化速率测定结果出现了负值. 牟晓杰等^[10]在以硝酸盐剩余量法对人为干扰活动(养殖塘、污染物排放和农业活动)对湿地土壤硝化-反硝化潜力影响的研究中,测得水稻田、养殖场土壤反硝化速率最低范围也出现了负值情况. 当前国内外普遍采用乙炔抑制法,利用乙炔抑制 N_2O 向 N_2 转化,将反硝化产物控制为 N_2O ,测定 N_2O 的产量来推算反硝化速率^[21~23]. 但硝酸盐剩余量法操作简单,安全方便,在对沉积物反硝化潜力及影响因素的初步分析中,仍具有显著的优越性.

对照样反硝化速率与上覆水水质指标 T 、 NH_4^+-N 存在显著的相关关系,这与大多数研究结论一致^[5]. 但对照样反硝化速率与水质指标中 $NO_3^- -N$ 含量呈负相关,似乎与人们的主观认知存在出入. 事实上,沉积物反硝化速率与水相中 $NO_3^- -N$ 浓度关系也很复杂,存在很多不确定性. 如汪银龙等^[24]从细菌角度研究汾河下游水体 *nirS* 型反硝化细菌群落组成与无机氮的关系,结果发现反硝化细菌的优势菌属红细菌属 *Rhodobacter*、陶厄氏菌属 *Thauera* 与水质指标中的 $NO_3^- -N$ 、 $NO_2^- -N$ 含量呈负相关. 本研究中,对照样反硝化速率与沉积物化学性质相关性较弱. 有学者指出,反硝化速率与沉积物 $NO_3^- -N$ 、 $NH_4^+ -N$ 含量存在正相关关系^[25, 26]. 但也有学者发现反硝化速率不受硝态氮、有机质或者磷的影响,如李飞跃等^[27]的研究发现反硝化速率与土壤硝态氮、氨氮浓度不具有显著的相关关系,牟晓杰等^[10]针对闽江河口湿地的研究也发现,土壤有机质、TN、TP 和可溶性碳含量以及电导率等与土壤硝化-反硝化作用不具有显著相关关系. 此外,王静等^[5]在对三峡库区小江支流蓄水和泄水期沉积物硝化反硝化特征的研究中发现,沉积物反硝化速率与沉积物理化指标(TN、 $NH_4^+ -N$ 、 $NO_3^- -N$)呈显著负相关.

4 结论

(1) 洼地蒲草、水塘芦苇、水塘蒲草 3 种植物丛沉积物对照样反硝化速率随时间变化较为明显,且彼此间总体上不存在显著差异性.

(2) 外源氮的添加促进了 3 种植物丛沉积物反

硝化进程,但随着氮浓度的增加,少数情况下沉积物反硝化速率反而下降.

(3) 外源碳的添加对 3 种植物丛沉积物反硝化速率都起到明显的抑制作用,尤以洼地蒲草沉积物的抑制作用更为明显.

(4) 碳氮同时添加较单独添加碳或氮情形更有利于沉积物反硝化进程,且碳氮比为 25:1 时的反硝化速率较 15:1 时更高.

参考文献:

- [1] Racchetti E, Bartoli M, Soana E, *et al.* Influence of hydrological connectivity of riverine wetlands on nitrogen removal via denitrification [J]. *Biogeochemistry*, 2011, **103** (1-3): 335-354.
- [2] Soana E, Balestrini R, Vincenzi F, *et al.* Mitigation of nitrogen pollution in vegetated ditches fed by nitrate-rich spring waters [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **243**: 74-82.
- [3] Roley S S, Tank J L, Grace M R, *et al.* The influence of an invasive plant on denitrification in an urban wetland [J]. *Freshwater Biology*, 2018, **63** (4): 353-365.
- [4] Unda-Calvo J, Martínez-Santos M, Ruiz-Romera E, *et al.* Implications of denitrification in the ecological status of an urban river using enzymatic activities in sediments as an indicator [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **75**: 255-268.
- [5] 王静, 刘洪杰, 雷禹, 等. 三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (3): 946-953.
Wang J, Liu H J, Lei Y, *et al.* Nitrification and denitrification rates in a small tributary, Nanhe River, of three gorge dam reservoir during water collection and release events [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (3): 946-953.
- [6] 李家兵, 张党玉, 吴春山, 等. pH 对闽江河口湿地沉积物氮素转化关键过程的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017, **31** (1): 272-278.
Li J B, Zhang D Y, Wu C S, *et al.* Effects of pH on the key nitrogen transformation processes of the wetland sediment in the min river estuary [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31** (1): 272-278.
- [7] Bellingier B J, Jicha T M, Lehto L P, *et al.* Sediment nitrification and denitrification in a lake superior estuary [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40** (2): 392-403.
- [8] 王菁晗, 何吕奇姝, 杨成, 等. 太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较(1981-2015 年) [J]. *湖泊科学*, 2018, **30** (4): 897-906.
Wang J H, He L Q S, Yang C, *et al.* Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algal bloom conditions among Lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi (1981-2015) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30** (4): 897-906.
- [9] 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.
- [10] 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 等. 人为干扰对闽江河口湿地土壤硝化-反硝化潜力的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33** (8): 1413-1419.
Mou X J, Liu X T, Tong C, *et al.* Effects of human disturbance on nitrification and denitrification potential in the min river estuarine wetland [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33** (8): 1413-1419.
- [11] 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 等. 城乡交错带典型溪流沟渠沉

- 沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 936-945.
- Qin R B, Li R Z, Gao S D, *et al.* Pollution characteristics and nitrification and denitrification potential of superficial sediments from streams in an urban-rural fringe [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 936-945.
- [12] 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 等. 人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4598-4606.
- Li R Z, Zheng X, Gao S D, *et al.* Nitrification and denitrification potential of benthic sediments in a suburban stream under intense human disturbance scenarios [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4598-4606.
- [13] 苗慧, 沈峥, 蒋豫, 等. 巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- Miao H, Shen Z, Jiang Y, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Chaohu Lake [J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- [14] 李如忠, 戴源, 刘晓薇, 等. 巢湖十五里河沉积物硝化速率的城乡梯度变化及相关性[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 688-695.
- Li R Z, Dai Y, Liu X W, *et al.* Gradient variation and correlation of sediment nitrification rates in urban and rural areas of Shiwuli River, Chaohu Lake Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(3): 688-695.
- [15] 孔明, 张路, 尹洪斌, 等. 蓝藻暴发对巢湖表层沉积物氮磷及形态分布的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1285-1292.
- Kong M, Zhang L, Yin H B, *et al.* Influence of algae bloom on distribution of total and speciation of nitrogen and phosphorus in the surface sediments from Lake Chaohu [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(5): 1285-1292.
- [16] Tuttle A K, McMillan S K, Gardner A, *et al.* Channel complexity and nitrate concentrations drive denitrification rates in urban restored and unrestored streams [J]. Ecological Engineering, 2014, **73**: 770-777.
- [17] Mulholland P J, Helton A M, Poole G C, *et al.* Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading[J]. Nature, 2008, **452**(7184): 202-205.
- [18] Herrman K S, Bouchard V, Moore R H. Factors affecting denitrification in agricultural headwater streams in Northeast Ohio, USA[J]. Hydrobiologia, 2008, **598**(1): 305-314.
- [19] 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 等. 不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N_2O 排放研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2731-2737.
- Gao X M, She D L, Yan X Y, *et al.* Denitrification loss and N_2O emission from different carbon inputs in orchard drains sediments[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2731-2737.
- [20] Waters E R, Morse J L, Bettez N D, *et al.* Differential carbon and nitrogen controls of denitrification in riparian zones and streams along an urban to exurban gradient [J]. Journal of Environmental Quality, 2014, **43**(3): 955-963.
- [21] Malghani S, Kim J, Lee S H, *et al.* Application of two contrasting rice-residue-based biochars triggered gaseous loss of nitrogen under denitrification-favoring conditions; a short-term study based on acetylene inhibition technique[J]. Applied Soil Ecology, 2018, **127**: 112-119.
- [22] 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.
- [23] Yuan H J, Zhang Z J, Qin S P, *et al.* Effects of nitrate and water content on acetylene inhibition technique bias when analysing soil denitrification rates under an aerobic atmosphere [J]. Geoderma, 2019, **334**: 33-36.
- [24] 汪银龙, 冯民权, 董向前. 汾河下游水体 *nirS* 型反硝化细菌群落组成与无机氮关系[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3596-3603.
- Wang Y L, Feng M Q, Dong X Q. Community composition of *nirS*-type denitrifying bacteria in the waters of the lower reaches of the Fenhe river and its relationship with inorganic nitrogen[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3596-3603.
- [25] 邓焕广, 张智博, 张菊, 等. 东鱼河春季沉积物反硝化脱氮作用与 N_2O 排放研究[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(1): 283-287.
- Deng H G, Zhang Z B, Zhang J, *et al.* Denitrification and N_2O emission in sediments of Dongyu River in spring[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(1): 283-287.
- [26] Salahudeen J H, Reshmi R R, Krishnan K A, *et al.* Denitrification rates in estuarine sediments of Ashtamudi, Kerala, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, **190**(6): 323.
- [27] 李飞跃, 汪建飞, 谢越, 等. 江苏句容水库农业流域农田土壤反硝化作用的研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(3): 638-643.
- Li F Y, Wang J F, Xie Y, *et al.* Denitrification of farmland soils in the agricultural watershed of Jurong reservoir, Jiangsu province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(3): 638-643.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)