

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靓 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 退建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧灰渣浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究

韩建刚^{1,2}, 曹雪²

(1. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; 2. 江苏大学环境学院, 镇江 212013)

摘要: 滨海湿地是海陆相互作用的交错过渡地带, 具有敏感而复杂的环境过程与功能价值。以典型滨海湿地崇明东滩为原型, 采集湿地沉积物及海水样品, 通过土柱模拟方法, 研究了半月潮(15 d左右为周期的“大潮”)与日潮(一个太阴日内出现的涨潮和落潮)水分生态过程沉积物 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N与溶解性有机氮(DON)含量以及硝酸还原酶(Nar), 亚硝酸还原酶(Nir), 羟胺还原酶(Hyr)活性等的变化, 旨在揭示滨海湿地潮汐驱动下沉积物周期性干湿交替过程氮素动态变化规律及还原机制。半月潮过程中, 沉积物变干期间(含水量从35%降至5%~7%), 硝化作用占主导地位。随着干燥程度的加剧(含水量从5%~7%降至0%~3%), 沉积物中数量可观的 NO_3^- -N和 NO_2^- -N转化为DON。然而, 随着干湿交替频次的增加, NO_3^- -N和 NO_2^- -N向DON的转化率显著降低。干燥沉积物淹水变湿后(含水量从0%~3%升至37%~45%), NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N与DON含量平均增加1~3倍。淹水后Nar、Nir活性的迅速升高表明, NO_3^- -N和 NO_2^- -N的还原明显改善。3个培养周期沉积物Nar与Nir活性、Hyr活性与 NH_4^+ -N含量之间呈现极显著的正相关性, NO_3^- -N、 NO_2^- -N含量的减少与 NH_4^+ -N含量的增加也显著相关。结合湿地沉积物干湿交替过程“低氮高碳”特征, 可以认为, 氨化途径主导了半月潮过程 NO_3^- -N的还原。相比较而言, 日潮过程中, NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N以及DON的含量均较为稳定, 分别为 (3.0 ± 0.3) 、 (1.2 ± 0.1) 、 (133.3 ± 4.3) 和 $(41.1 \pm 10.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此, 日潮过程对沉积物氮素动态变化的影响较小。

关键词: 滨海湿地; 干湿交替; 半月潮; 日潮; 氮; 硝酸还原酶; 氨化

中图分类号: X144; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2383-07

Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study

HAN Jian-gang^{1,2}, CAO Xue²

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. School of the Environment, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The coastal wetland, a key transitional zone between land and ocean, is a complex and sensitive ecosystem with special environmental processes and functional values. Sediment and sea water samples were taken from Chongming east intertidal flat, a typical coastal wetland in China. Sediment cores were incubated under simulated spring tides (approximately twice a month) and semi-diurnal tides (two almost equal high tides and two low tides in a lunar day), to define the responses of nitrogen to periodical alternation of drying and re-flooding. The contents of NO_3^- -N, NO_2^- -N, NH_4^+ -N, dissolved organic N (DON), and the activities of nitrate reductase (Nar), nitrite reductase (Nir), and hydroxylamine reductase (Hyr) in sediments were determined during the incubation. Nitrification stood in a dominant position during the drying period with sediment moisture decreasing from 35% to 5%-7% in simulated spring tides. The NO_3^- -N and NO_2^- -N were found to be substantially converted into DON following a further exsiccation (the sediment moisture decreased from 5%-7% to 0%-3%). However, the conversion rates decreased with the increase of drying and rewetting cycles. Following the rewetting of dried sediments (from 0%-3% to 37%-45%), the contents of NO_3^- -N, NO_2^- -N, NH_4^+ -N and DON increased to 1 to 3 times that of the dry sediments. Nar and Nir activities in sediments rapidly increased after the rewetting, indicating that the reduction of NO_3^- -N and NO_2^- -N were substantially enhanced. Significant positive correlations were found between Nar and Nir activities, and Hyr activities and NH_4^+ -N contents during the simulated spring tides. Moreover, the decreases of NO_3^- -N and NO_2^- -N contents were observed to be significantly correlated to the increases of NH_4^+ -N contents. Combined with the fact that the sediment had a high organic carbon content but a very low NO_3^- -N content, it can be concluded that the reduction of NO_3^- -N and NO_2^- -N following the rewetting was dominated by nitrate ammonification. In contrast, NO_3^- -N, NO_2^- -N, NH_4^+ -N and DON contents in sediments were relatively stable during semi-diurnal tides, which were (3.0 ± 0.3) , (1.2 ± 0.1) , (133.3 ± 4.3) and $(41.1 \pm 10.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. This indicated that semi-diurnal tides slightly affected the variations of nitrogen contents in the wetlands.

Key words: coastal wetlands; drying and rewetting; spring tides; semi-diurnal tides; nitrogen; nitrate reductase; nitrate ammonification

收稿日期: 2012-09-19; 修订日期: 2012-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40905070); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD); 南京林业大学引进高层次人才和高层次留学回国人员科研基金项目(YJ 2012-08)

作者简介: 韩建刚(1976~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为湿地环境过程, E-mail: hanjiangang76@126.com

滨海湿地氮素转化的环境效应与机制研究近年来因全球气候变化及政府间碳减排义务的分配而备受关注. Groffman 等^[1]基于滨海湿地典型的“氮汇”特征,建议美国政府积极评估该生态系统 N_2O 的排放以应对未来温室气体相关国际公约的履行与谈判需求. 我国拥有面积约 $6.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的滨海湿地^[2],作为海陆间物质交换过程中最重要的中间场所,在近年沿海经济快速发展背景下,大量含氮营养盐与污染物在滨海湿地迅速积聚. 及时探讨和明确滨海湿地氮素动态及其转化机制,对进一步揭示和评估该生态系统的环境效应具有重要意义.

滨海湿地是海陆相互作用的交错过渡敏感地带,在月球和太阳的引潮力下,沉积物频繁经历半月潮(以 15 d 为周期的“大潮”)和日潮(一个太阴日内出现的涨潮和落潮)驱动下的独特的周期性干湿交替过程^[3]. 沉积物周期性的淹水与出露对氮素的迁移、转化等产生重要影响^[4,5]. 作为自然界最普遍和最频繁发生的水分生态过程,尽管以往有关干湿交替对氮素动态影响的研究取得了许多重要进展^[3-10],但大多数研究并未对其周期性效应进行深入探讨,并且,目前已有的相关结论也并不一致,甚至相互矛盾. 例如,一些研究者认为干湿交替对氮素矿化的影响甚微^[11],但另外一些却认为其可以显著减少^[12]或增加^[13]氮素的矿化. 因此,围绕滨海湿地独特的周期性干湿交替过程,继续深入研究沉积物氮素转化及其机制显得尤为必要.

反硝化(denitrification)和氨化(nitrate ammonification)过程在湿地氮素转化研究中备受关注,两者竞争利用 NO_3^- -N 并产生不同的环境效应. 前者有利于消除系统中 NO_3^- -N 的累积但贡献于温室效应气体的排放^[14]; 后者则是显著提高了氮素的生物利用性^[15-17]. 以往对反硝化过程的研究相对较多,对氨化过程的关注较为薄弱. 氨化一般指 NO_3^- -N 在硝酸还原酶(Nar)、亚硝酸还原酶(Nir)、羟胺还原酶(Hyr)等的次第催化下依次还原为 NO_2^- -N、 NH_2OH 和 NH_4^+ -N 的过程^[15-16, 18]. 显然,3 种还原酶的活性与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的转化、归宿及其环境效应等密切相关. 系统研究 Nar、Nir、Hyr 活性对干湿交替过程的响应,无疑将有助于进一步揭示湿地沉积物氮素还原的机制.

本研究以长江入海口典型滨海湿地——崇明东滩为原型区域,模拟其半月潮与日潮等干湿交替水分生态过程,系统分析了沉积物氮素含量动态以及 Nar、Nir、Hyr 等还原酶活性的响应特征,以期为揭

示滨海湿地潮汐驱动下周期性干湿交替过程氮素动态变化规律及其还原机制,为湿地氮素转化的环境过程评价与调控对策研究提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 区域概况

崇明东滩位于崇明岛的东部,0 m 线以上面积约 246 km^2 ,滩涂最宽处在 10 km 以上,是目前长江口规模最大的潮汐滩涂湿地. 区域盛行东亚季风,年均温度 15.7°C ,多年平均最高水温 28°C (8 月),最低水温 6.7°C (1 月). 年降雨量 1123.7 mm ,主要集中在 6~10 月. 潮汐属非正规半日浅海潮. 农历每月初一、十五前后两三天内,各发生一次大潮;一个太阴日(24 h 50 min)内出现两次高潮和两次低潮,涨潮和落潮过程的时间几乎相等(6 h 12.5 min). 从大堤向海方向依次分布着芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]、互花米草 (*Spartina alterniflora* Lois.) 和海三棱藨草 (*Bolboschoenoplectus mariqueter*) 等植被,草滩外侧为光滩,光滩和盐沼的界线位于中潮位和小潮高潮位之间,平均盐度为 $0.1\% \sim 0.3\%$ ^[19].

1.2 样品采集

基于高潮滩带和中潮滩带水文过程与植被特征的显著差异,2010 年 9 月 26 日在崇明东滩湿地北八激按照“平行线”^[20]采样原则分别在高潮滩带和中潮滩带采集 0~20 cm 表层沉积物样品及其上覆水样. 沉积物样品风干后用木棍碾压,过 1 mm 尼龙筛. 水样冷藏(4°C)保存. 水样与沉积物样品的基础理化性状如表 1. 水样中有机碳含量采用总有机碳分析仪测定;沉积物中有机碳含量采用重铬酸钾外加热法;pH 值用 pH 计测定(水土比 2.5);水中全氮采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法;土壤全氮采用半微量开氏法;水样与沉积物 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 含量均采用比色法测定($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提,连续流动注射分析仪).

1.3 干湿交替过程模拟

取若干个 100 mL 的聚氯乙烯培养管,分别加入 60 g 沉积物样品,缓慢加入 20 mL 湿热灭菌后的海水样,扎上透气封口膜, 30°C 烘箱中静置 10 d 进行预培养. 由于半月潮过程主要使高潮滩带沉积物经历明显的干湿交替,因此,半月潮过程模拟主要以高潮滩带沉积物为对象;中潮滩带虽然也受半月潮影响,但其沉积物的干湿交替过程主要由日潮控制,对其主要进行日潮过程模拟.

表 1 水样与沉积物样品的基础理化性状¹⁾

Table 1 Basic physicochemical property of water and sediment samples							
指标	项目	有机碳	pH 值	全氮	硝态氮 (NO ₃ ⁻ -N)	亚硝态氮 (NO ₂ ⁻ -N)	铵态氮 (NH ₄ ⁺ -N)
水样		2.2	7.9	5.5	1.6	0.0	0.0
沉积物	高潮滩带	14.1	8.4	1.6	8.4	1.2	56.2
	中潮滩带	17.5	8.2	1.6	7.9	1.0	80.3

1) 单位为水样:mg·L⁻¹; 沉积物有机碳、全氮:g·kg⁻¹; 无机氮:mg·kg⁻¹

(1)半月潮过程 预培养结束后,采样 1 次(随机取 3 个培养管,小心的将培养管内样品全部挖出,尽量混合均匀),之后,向其余培养管内加海水样,保持 1 cm 上覆水层,维持 6 h. 6 h 期间,每 2~3 h 采样 1 次. 6 h 后,虹吸法去除上覆水层. 称重法监测土柱含水量变化. 在 15 d 的培养周期内,当含水量变化至 40% 左右、30%~20%、20%~10% 和小于 10% 时分别采样. 15 d 后,再次向其余培养管内加海水样,保持 1 cm 上覆水层,维持 6 h. 按前一周期采样和培养. 连续培养 3 个周期(45 d).

(2)日潮过程 预培养结束后,采样 1 次. 之后,向其余培养管内加海水样,保持 1 cm 上覆水层,维持 6 h. 6 h 期间,每 2~3 h 采样 1 次. 6 h 后,虹吸法去除上覆水层. 分别在第 9、12、24 h 时采样. 24 h 后,再次向其余培养管内加海水样,保持 1 cm 上覆水层,维持 6 h. 按前一周期采样和培养. 连续培养 3 个周期(3 d).

1.4 氮素含量与 Nar、Nir、Hyr 活性分析方法

随机取出 6 份沉积物样品(湿样),3 份用于无机氮(NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N)含量分析,同时分析浸提液总溶解性氮(TDN)含量,DON 含量通过 TDN 减去无机氮含量得到,分析方法分别见文献[21,22]. 另外 3 份样品用于 Nar、Nir、Hyr 活性测定,测定方法见文献[18, 23~24],无酶对照采用干

热灭菌方法(180℃×3 h). Nar、Nir、Hyr 活性分别以 10 g 沉积物(烘干基)在 24 h 内消耗的 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 与生成的 NH₄⁺-N 表示. NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 含量采用比色法测定. 每次采样均采用烘干法(105℃×24 h)测定沉积物含水量.

2 结果与分析

2.1 半月潮过程沉积物氮素含量与 Nar、Nir、Hyr 活性的变化

半月潮过程模拟的第 1 个周期,沉积物含水量变化在 35%~46% 区间时,NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 含量分别维持 2~5 mg·kg⁻¹ 和 1~3 mg·kg⁻¹,NH₄⁺-N 与 DON 含量呈现增加趋势(图 1). 变干过程中(含水量从 35% 降至 5%),NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 含量均迅速上升至 50.0 mg·kg⁻¹ 左右,但 NH₄⁺-N 含量从 97.1 mg·kg⁻¹ 降至 30 mg·kg⁻¹ 左右,DON 含量从 78.8 mg·kg⁻¹ 降至 23.6 mg·kg⁻¹. 随着沉积物的进一步干燥(含水量<5%),NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 含量分别降至 3.2 mg·kg⁻¹、2.0 mg·kg⁻¹,NH₄⁺-N 含量整体小幅增加,DON 含量快速升至 65.3 mg·kg⁻¹ 左右.

干燥沉积物的淹水(含水量从 0% 升至 45%,第 2 个周期开始)使 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 以及 DON 含量不同程度的增加. NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 含量在

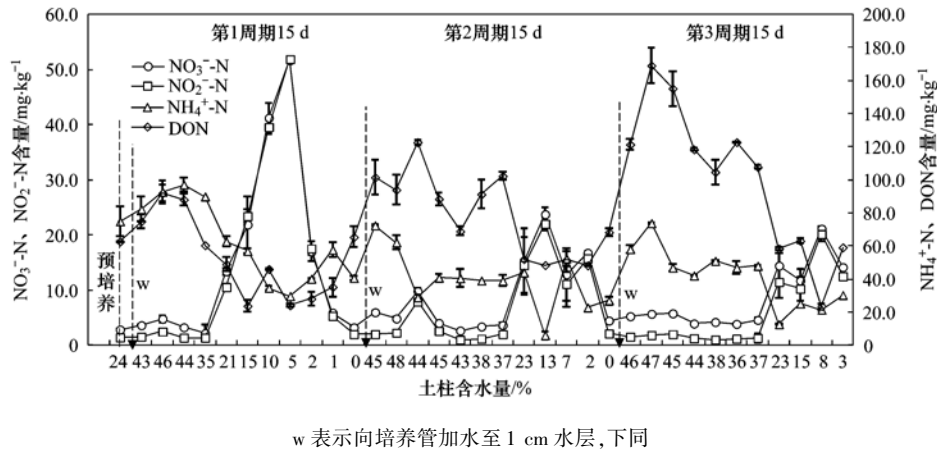


图 1 半月潮过程沉积物氮素含量的变化特征

Fig. 1 Changes in nitrogen concentrations during the cycles of spring tides

6 h 内分别升至 $9.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $7.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (含水量为 45% ~ 44%), 此后迅速回落至 $2 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的低含量水平 (6 ~ 48 h, 含水量 37% ~ 45%); $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量在 2 h 内迅速增至 $72.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 此后开始逐渐下降; 6 ~ 48 h 其含量维持在 $30 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (含水量为 37% ~ 44%)。DON 含量在淹水后迅速上升, 然后在较高含量水平呈现降低-升高的交替变化。沉积物再次变干-淹水-再变干过程, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 DON 含量的变化特征与前一周期相似。

图 2 可见, 半月潮过程沉积物 Nar、Nir 活性在 3 个培养周期中的变化较为一致。当沉积物含水量从 40% 左右降至 13% ~ 15% 时, 两种酶的活性均呈现逐渐下降趋势, 分别从 $9 \sim 11 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 降

至 $3 \sim 6 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$, $9 \sim 11 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 降至 $2 \sim 4 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 。随着沉积物的进一步干燥 (< 13% ~ 15%), Nar、Nir 活性相对稳定, 分别为 $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 和 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 。干燥后的复水使 Nar、Nir 活性迅速增加。第 1 次复水后, Nar、Nir 活性分别从 $4.0 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 和 $4.6 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 增高至 $9.4 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ($0 \sim 2 \text{ h}$) 和 $9.9 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ($0 \sim 12 \text{ h}$); 第 2 次复水过程 Nar、Nir 活性分别从 $4.2 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 、 $5.4 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 升至 $9.9 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ($0 \sim 6 \text{ h}$)、 $9.7 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ($0 \sim 6 \text{ h}$)。相比较而言, Hyr 活性对半月潮过程沉积物水分变化并不敏感。

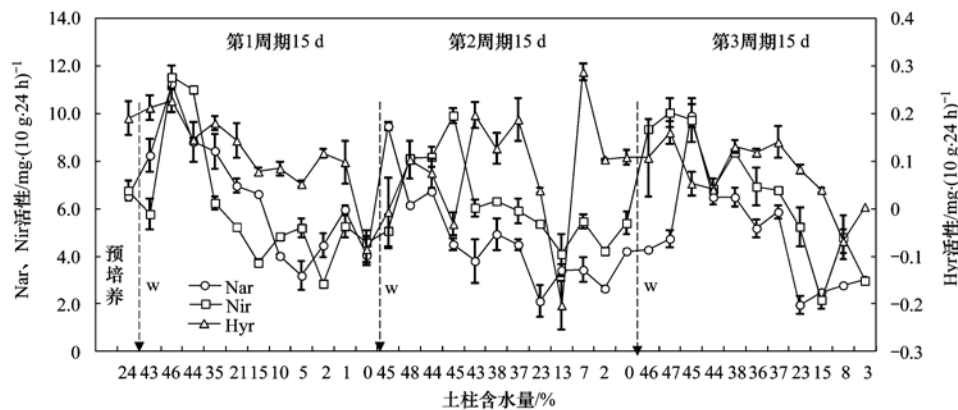


图 2 半月潮过程沉积物 Nar、Nir、Hyr 活性变化

Fig. 2 Nar, Nir and Hyr activity variations during the cycles of spring tides

2.2 日潮过程沉积物氮素含量与 Nar、Nir、Hyr 活性的变化

日潮过程中, 沉积物含水量变幅较小 (52% ~ 56%)。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 以及 DON 含量分别为 (3.0 ± 0.3) 、 (1.2 ± 0.1) 、 (133.3 ± 4.3) 和

$(41.1 \pm 10.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3)。3 个培养周期 Nar、Nir 活性的变化也较为稳定, 平均分别为 $(7.2 \pm 1.4) \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 和 $(8.5 \pm 1.2) \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ (图 4), Hyr 活性在整个培养过程中剧烈波动。

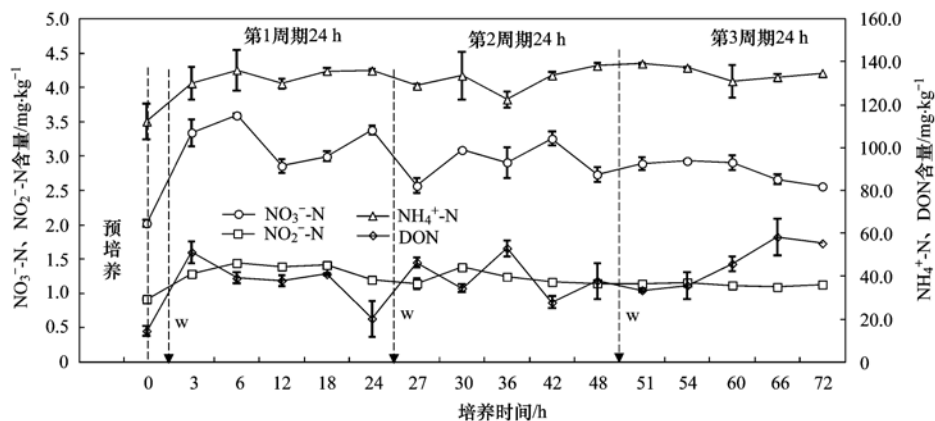


图 3 日潮过程沉积物氮素含量的变化特征

Fig. 3 Changes in nitrogen concentrations during the cycle of semi-diurnal tides

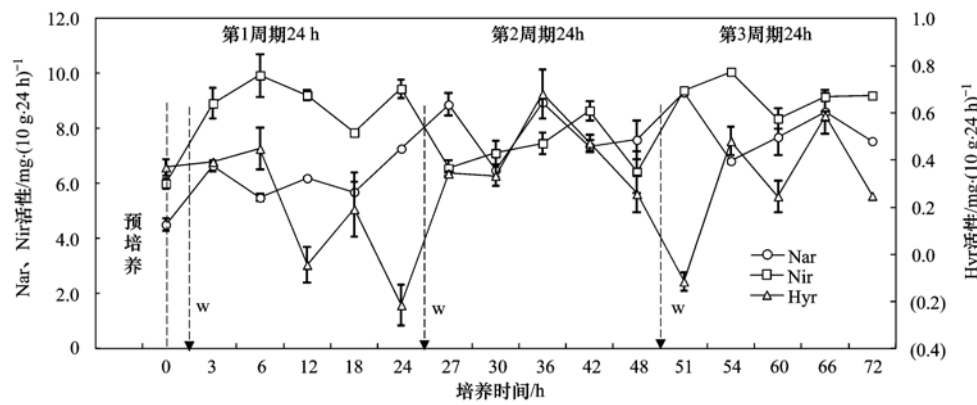


图4 日潮过程沉积物 Nar、Nir、Hyr 活性变化

Fig. 4 Nar, Nir and Hyr activity variations during the cycle of semi-diurnal tides

2.3 氮素含量、Nar、Nir、Hyr 活性之间的相关性

半月潮过程中, 沉积物 Nar、Nir 活性与 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量之间呈现显著负相关, 与 NH_4^+ -N、DON 含量之间呈现显著正相关(表 2). Hyr 活性与 NH_4^+ -N 含量之间表现为极显著正相关. 此外, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量与 NH_4^+ -N、DON 含量之间呈现显著或极显著负相关, NO_3^- -N 与

NO_2^- -N 含量、Nar 与 Nir 活性均呈现极显著正相关关系. 日潮过程中, 沉积物 Nar 活性与 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量之间呈现显著和极显著负相关, Hyr 活性与 DON 含量之间表现为显著正相关(表 3). 此外, DON 含量还与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 含量之间表现出显著的负相关关系, NO_3^- -N 与 NO_2^- -N 含量之间显著正相关.

表 2 半月潮过程沉积物氮素含量、Nar、Nir、Hyr 活性间的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between nitrogen concentrations, Nar, Nir and Hyr activities during the cycle of spring tides						
相关系数	NO_3^- -N	NO_2^- -N	NH_4^+ -N	DON	Nar	Nir
NO_2^- -N	0.995 **					
NH_4^+ -N	-0.441 *	-0.435 *				
DON	-0.723 **	-0.765 **	0.290			
Nar	-0.412 *	-0.421 *	0.765 **	0.409 *		
Nir	-0.431 *	-0.463 **	0.539 **	0.660 **	0.556 **	
Hyr	-0.304	-0.299	0.563 **	0.167	0.313	0.303

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; Spearman 等级相关(双尾检验); $n = 34$

表 3 日潮过程沉积物氮素含量、Nar、Nir、Hyr 活性间的相关性¹⁾

Table 3 Correlation between nitrogen concentrations, Nar, Nir and Hyr activities during the cycle of semi-diurnal tides						
相关系数	NO_3^- -N	NO_2^- -N	NH_4^+ -N	DON	Nar	Nir
NO_2^- -N	0.543 *					
NH_4^+ -N	0.139	-0.076				
DON	-0.509 *	-0.176	-0.504 *			
Nar	-0.565 *	-0.774 **	-0.254	0.274		
Nir	0.386	0.031	0.325	-0.136	-0.251	
Hyr	-0.057	-0.063	-0.427	0.563 *	0.082	-0.178

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; Spearman 等级相关(双尾检验); $n = 15$

3 讨论

半月潮 3 个观测周期中, 随着沉积物的变干(含水量从 35% ~ 48% 降至 5% ~ 7%), NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量迅速升高. 这表明, 硝化作用主导了该时段氮素的转化过程. 然而, 随着干燥程度的进一

步加剧(沉积物含水量从 5% ~ 7% 降至 0% ~ 3%), 第 1、2、3 观测周期 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量的下降幅度分别为 94%、96%; 65%、81% 和 33%、38%. 根据 Dail 等^[25] 和 Ruckauf 等^[26] 的研究报道, 沉积物变干过程中 NO_3^- -N 的减少主要是转化为有机氮. 本研究中期 DON 含量显著升高的现象(增幅

为 $17 \sim 41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 印证了这一结论. 进一步对 3 个连续周期 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的减少量与同期 DON 增加量进行测算和比较, 发现前者的减少量依次是后者增加量的 2.4、1.0 和 0.4 倍. 由此可见, 半月潮过程中, 当沉积物从高含水量依次经历变干和干燥过程时, 数量可观的 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 转化为 DON. 随着干湿交替频次的增加, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 向 DON 的转化率显著降低.

干燥沉积物淹水变湿后 (37% ~ 45% 含水量), NH_4^+ -N、DON 含量在 2 ~ 6 h 内增加了 2 ~ 3 倍. 此后, NH_4^+ -N 含量逐渐回复至较稳定的水平; 但 DON 含量波动变化在较高水平. 该变化的主要原因在于, 干燥沉积物突然淹水引起氮素矿化作用明显改善^[27, 28]. 相比较而言, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量虽然也在短期 (6h) 内增加了 1 ~ 2 倍, 但这并不像以往研究^[29]所报道的 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 会因为变湿后硝化作用的显著改善而出现积累, 其在 12 h 内便降至很低水平. 该变化可能与滨海湿地干湿交替背景下 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 还原酶的特性有关.

Nar、Nir 和 Hyr 等可依次催化 NO_3^- -N 还原生成 NH_4^+ -N^[16, 18]. 3 种酶是典型的底物诱导型还原酶, 氧分压对其活性产生显著影响. 变干过程, 尽管 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量迅速增加, 但 Nar、Nir 活性逐渐降低. 这表明, 氧分压的增加抑制了酶活性. 当含水量 < 2% 时, Nar、Nir 活性维持在 $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 、 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot (10 \text{ g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$. 相比较发现, 该活性水平高出韩建刚等^[23]报道的北固山淡水湿地沉积物干湿交替过程相似含水量条件下 Nar 活性水平的 80 ~ 100 倍. 该现象可能与滨海湿地沉积物 Nar、Nir 对周期性干湿交替、碳氮水平 (高碳低氮) 以及盐碱度等的长期适应有关^[30 ~ 32].

干燥沉积物淹水变湿后, Nar、Nir 活性迅速升高. 尽管较高的酶活性持续时间较短 (2 ~ 6 h), 但这表明, 干燥沉积物淹水后 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 将出现一个短暂的还原高峰. 这与干燥沉积物淹水后 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量的变化相一致 (图 1). NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的还原可能通过反硝化过程生成 N_2O , 也可能由氨化途径转化为 NH_4^+ -N. 氨化途径中, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 经 Nar、Nir 次第催化还原为 NH_2OH , 而后由 Hyr 催化还原为 NH_4^+ -N. 表 2 中, Nar 与 Nir 活性之间极显著的正相关关系表明, NO_3^- -N 与 NO_2^- -N 还原具有高度的一致性与连续性. 尽管二者与 Hyr 活性之间未发现显著的相关关系, 但 Hyr 活性与 NH_4^+ -N

含量之间却呈现极显著的正相关关系. 这为 Nar、Nir、Hyr 活性变化与 NH_4^+ -N 生成之间的连续性提供了有力支持. 并且, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 与 NH_4^+ -N 含量之间显著的消长 (负相关) 关系表明, 一方面, NH_4^+ -N 的硝化作用使 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量增加; 另一方面, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的减少则可能是其通过氨化途径转化为 NH_4^+ -N. Hou 等^[32]对崇明东滩潮滩带沉积物反硝化与 N_2O 速率进行研究时指出, 反硝化与 N_2O 速率的高低主要取决于沉积物 NO_3^- -N 的含量水平. Strohm 等^[16]进一步明确“低氮高碳”环境 NO_3^- -N 的还原偏向于氨化途径, 反之, 反硝化过程主导 NO_3^- -N 的还原. 结合湿地沉积物高的有机碳含量 (表 1) 和淹水变湿后低的 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量 (图 1), 可以认为, 半月潮过程氨化途径主导了 NO_3^- -N 的还原.

相比较而言, 日潮过程中, NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 以及 DON 的含量均较为稳定, NH_4^+ -N [$(133.3 \pm 4.3) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 与 DON [$(41.1 \pm 10.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 的含量平均为 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 含量的 44、111 倍和 14、34 倍. 较高的含水量 (52% ~ 56%) 以及高且稳定的 Nar、Nir 活性可能是 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量保持在极低水平的主要原因. 日潮过程对沉积物氮素动态变化的影响较小.

4 结 论

滨海湿地半月潮水分生态过程中, 当沉积物从高含水量依次经历变干和干燥过程时, 数量可观的 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 转化为 DON. 随着干湿交替频次的增加, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 向 DON 的转化率显著降低. 干燥沉积物淹水后, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 将出现一个短暂的还原高峰. NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的还原主要经由氨化途径完成. 相比较而言, 日潮过程对沉积物氮素动态变化的影响较小.

参考文献:

- [1] Groffman P M, Gold A J, Addy K. Nitrous oxide production in riparian zones and its importance to national emission inventories [J]. Chemosphere, 2000, 2(3-4): 291-299.
- [2] 张晓龙, 李培英, 李萍, 等. 中国滨海湿地研究现状与展望 [J]. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 87-95.
- [3] 刘敏, 许世远, 侯立军. 长江口潮滩沉积物: 水界面营养盐环境生物地球化学过程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 6-27.
- [4] 张昆, 田昆, 吕宪国, 等. 纳帕海湖滨草甸湿地土壤氮动态对水文周期变化的响应 [J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2216-2220.

- [5] 王智超. 农田土壤硝态氮累积及干湿交替过程的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2006. 8-13.
- [6] 余小青, 杨军, 刘乐冕, 等. 九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3739-3747.
- [7] Yin S X, Chen D, Chen L M, *et al.* Dissimilatory nitrate reduction to ammonium and responsible microorganisms in two Chinese and Australian paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(8): 1131-1137.
- [8] Zhao B Z, Chen J, Zhang J B, *et al.* Soil microbial biomass and activity response to repeated drying-rewetting cycles along a soil fertility gradient modified by long-term fertilization management practices[J]. *Geoderma*, 2010, **160**(2): 218-224.
- [9] Yin K D, Harrison P J. Influences of flood and ebb tides on nutrient fluxes and chlorophyll on an intertidal flat[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, **196**: 75-85.
- [10] Laima M, Brossard P, Sauriau P G, *et al.* The influence of long emersion on biota, ammonium fluxes and nitrification in intertidal sediments of Marennes-Oléron Bay, France [J]. *Marine Environmental Research*, 2002, **53**(4): 381-402.
- [11] Kruse J S, Kissel D E, Cabrera M L. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, **69**(3): 247-256.
- [12] Muhr J, Franke J, Borken W. Drying-rewetting events reduce C and N losses from a Norway spruce forest floor[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(8): 1303-1312.
- [13] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, *et al.* Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(12): 2195-2204.
- [14] Zumft W G. Cell biology and molecular basis of denitrification [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 1997, **61**(4): 533-616.
- [15] Cruz-García C, Murray A E, Klappenbach J A, *et al.* Respiratory nitrate ammonification by *Shewanella oneidensis* MR-1 [J]. *Journal of Bacteriology*, 2007, **189**(2): 656-662.
- [16] Strohm T O, Griffin B, Zumft W G, *et al.* Growth yields in bacterial denitrification and nitrate ammonification[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(5): 1420-1424.
- [17] Mark J M, Peter J L, Yang L Y, *et al.* Nitrogen dynamics and microbial food web structure during a summer cyanobacterial bloom in a subtropical, shallow, well-mixed, eutrophic lake (Lake Taihu, China)[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 195-207.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社. 1986. 230-233.
- [19] 袁兴中, 陆健健, 刘红. 河口盐沼植物对大型底栖动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2002, **22**(3): 326-333.
- [20] 王红丽, 李艳丽, 张文佳, 等. 崇明东滩湿地土壤养分的分布特征及其环境效应[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(1): 1-5.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社. 2000. 42-56.
- [22] Jones D L, Shannona D, Daniel V, *et al.* Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(5): 749-756.
- [23] 韩建刚, 郑伟, 吴春笃, 等. 湿地硝酸还原酶活性变化的干湿交替驱动机制[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(5): 7-9.
- [24] 史云峰, 武志杰, 史奕, 等. 土壤羟胺还原酶活性测定方法的改进[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(7): 1133-1137.
- [25] Dail D B, Davidson E A, Chorover J. Rapid abiotic transformation of nitrate in an acid forest soil [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **54**(2): 131-146.
- [26] Rückauf U, Augustin J, Russow R, *et al.* Nitrate removal from drained and reflooded fen soils affected by soil N transformation processes and plant uptake[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(1): 77-90.
- [27] McIntyre E S, Adams A, Ford D J, *et al.* Rewetting and litter addition influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(1): 92-101.
- [28] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following re-wetting of soils beneath two semi-arid plant species[J]. *Oecologia*, 2005, **142**(2): 247-260.
- [29] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(6): 777-787.
- [30] Vega-Jarquín C, Valenzuela-Encinas C, Neria-González I, *et al.* Is nitrate reduction to nitrite possible in glucose-amended alkaline saline soil under aerobic conditions? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(11): 2796-2802.
- [31] Dendooven L, Alcántara-Hernández R J, Valenzuela-Encinas C, *et al.* Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(6): 865-877.
- [32] Hou L J, Liu M, Xu S Y, *et al.* The effects of semi-lunar spring and neap tidal change on nitrification, denitrification and N₂O vertical distribution in the intertidal sediments of the Yangtze estuary, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **73**(3-4): 607-616.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxical Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊