

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响

郭安宁^{1,2}, 段桂兰^{2*}, 赵中秋¹, 唐仲³, 王杨扬¹, 王伯勋^{2,4}

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心土壤环境研究室, 北京 100085; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 土壤硝化作用和反硝化作用是闭合氮循环的重要步骤, 阐明在酸性土壤施用碳酸钙(CaCO_3)对土壤理化性质及土壤氮循环的影响, 可为农田质量稳定和可持续利用提供理论依据和技术支持. 以湖南省湘潭市酸性土壤为研究对象, 设计了4个 CaCO_3 施加量, 分别为0、2.25、4.5和7.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在种植一季水稻后, 分析了不同 CaCO_3 施加量对土壤理化性质、硝化作用和反硝化作用的影响. 结果表明 CaCO_3 的施加, 显著提高了土壤溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC) 762.10~868.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 促进土壤硝化作用[0.59~0.82 $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 以 NO_3^- -N/土计], 但当 CaCO_3 施加量达7.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时对硝化作用产生抑制, 土壤反硝化作用对 CaCO_3 的响应较为复杂. Pearson相关分析结果表明, 土壤硝化作用与土壤DOC显著正相关, 和 NH_4^+ -N含量显著负相关, 反硝化作用与 NO_3^- -N含量、土壤DOC显著正相关, 和含水量显著负相关.

关键词: 酸性土壤; CaCO_3 ; 硝化作用; 反硝化作用; 氮循环

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3483-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701145

Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil

GUO An-ning^{1,2}, DUAN Gui-lan^{2*}, ZHAO Zhong-qiu¹, TANG Zhong³, WANG Yang-yang¹, WANG Bo-xun^{2,4}

(1. College of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Department of Soil Environment Science, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Resources and Environment Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 4. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Soil nitrification and denitrification are important steps in closing the nitrogen cycle. Understanding the effects of CaCO_3 application on the physicochemical properties and nitrogen cycle in acid soil would provide some theoretical and technical information for stable and sustainable utilization of this agricultural soil. In this study, a field trial was conducted in Xiangtan city, Hunan province. In this field, the soil pH was 5.54, and CaCO_3 was applied at four levels: 0, 2.25, 4.5, and 7.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$. After one season of rice cultivation, the soil was sampled to determine dissolved organic carbon (DOC), NH_4^+ -N, and NO_3^- -N levels, and the potential nitrification rate (PNR) and denitrifying enzyme activity (DEA) were measured. The results showed that CaCO_3 application improved the content of soil DOC (762.10-868.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and PNR [0.59-0.82 $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]. However, excessive application of CaCO_3 (7.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) revealed an obvious inhibition on the activity of soil nitrification. Furthermore, the result of Pearson correlation analysis indicated that soil nitrification was positively correlated with soil DOC and negatively correlated with NH_4^+ -N content, whereas denitrification had a significant positive correlation with NO_3^- -N content and soil DOC, but a negative correlation with water content.

Key words: acid soil; CaCO_3 ; nitrification; denitrification; nitrogen cycle

近年来,化肥的过量使用和酸沉降的加剧导致了我国酸性土壤的面积在不断增加,酸度也在不断升高^[1]. 土壤酸化是土壤质量退化的重要形式,会引起土壤中养分的有效性降低、土壤的理化性质恶化、土壤微生物活性降低,另外土壤酸化能显著提高部分重金属的生物有效性,比如镉,从而导致稻米中重金属的累积^[2]. 日益加剧的土壤酸化问题已经对我国粮食生产和食品安全造成了威胁,引起生态环境的不断恶化,成为制约我国区域农业可持续发展的重要障碍,因此,如何合理有效地降低土壤酸化的危害成为我国南方水稻安全生产中重要课题.

酸性土壤施加石灰被认为是有效改良土壤酸性和控镉的重要措施. 我国南方主要使用的生石灰氧

化钙(CaO),但氧化钙遇水会产生急剧的化学反应,瞬间释放出大量的热量,容易伤害皮肤,刺激眼睛. 欧美国家通常用 CaCO_3 改良酸性土壤,因为 CaCO_3 不会像氧化钙遇水发生急剧反应, CaCO_3 具有缓慢中和土壤酸性和释放钙营养的特征,也便于使用^[3]. 尽管施石灰被认为是我国南方改良酸性土壤和镉污染耕地修复的蓝本,但目前为止施石灰对土壤理化性质及微生物活性的影响众说纷纭. 于宁

收稿日期: 2017-01-17; 修订日期: 2017-03-15

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403015); 浙江省自然科学基金项目(LY15D010001); 浙江省嘉兴市科技计划项目(2014AZ21001)

作者简介: 郭安宁(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为土地整治与生态恢复, E-mail: guoanning0084@163.com

* 通信作者, E-mail: duangl@rcees.ac.cn

等^[4]的研究表明施石灰明显使土壤酸化现象得以改善,对土壤酶活性也起到了不同程度的恢复作用. 但 Huber 等^[5]的研究表明施石灰提高了土壤表层腐殖质的矿化速率,导致土壤有机质含量降低;敖俊华等^[6]的研究表明大量施石灰不但会引起土壤板结,从而形成“石灰板结田”,而且会引起土壤钙、钾、镁等元素的失衡,继而土壤微生物活性降低,导致作物减产. 而且,当前尚未有在酸性土壤施加 CaCO_3 对土壤中氮循环的研究.

土壤氮循环直接受土壤微生物活性的影响,是反映土壤微生物活性的重要指标. 硝化作用 (nitrification) 和反硝化作用 (denitrification) 是土壤氮循环中的重要环节,对农田土壤环境的影响很大. 为了明确酸性土壤施加不同量的 CaCO_3 对土壤基本理化性质、土壤硝化和反硝化作用的影响,从而反映不同 CaCO_3 施加量对土壤微生物活性的影响,本文设计了酸性土壤不施加 CaCO_3 (CK)、 $2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施加量 (LC)、 $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施加量 (MC)、 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施加量 (HC) 4 个处理,分析了不同 CaCO_3 施加量对土壤理化性质、硝化作用和反硝化作用的影

响,以期为酸性土壤合理施加 CaCO_3 调节土壤酸性、提高土壤生产力、促进农业可持续发展提供理论依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 区域概况

田间试验位于湖南省湘潭县河口镇中湾村 ($\text{N}112^{\circ}53'$ 、 $\text{E}27^{\circ}46'$), 试验区属亚热带季风性湿润气候. 该区域水稻土普遍酸化,土壤 pH 通常为 5 左右,而且镉污染严重,所以当地推荐施用石灰.

1.2 试验设计

本文根据模型分别设置了 (I) 不施加 CaCO_3 (CK)、(II) $2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \text{CaCO}_3$ 施加量 (LC)、(III) $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \text{CaCO}_3$ 施加量 (MC)、(IV) $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \text{CaCO}_3$ 施加量 (HC) 4 种处理,每个处理重复 4 次,一共 16 个供试小区,每小区面积 30 m^2 ,用塑料薄膜包裹田埂将各小区分隔开,避免灌溉水串灌以及处理之间的交叉污染,各小区随机排列 (图 1),所选地块保证土壤性质均匀. 石灰在 2016 年 5 月底,即水稻移栽前 2 周施入土壤.

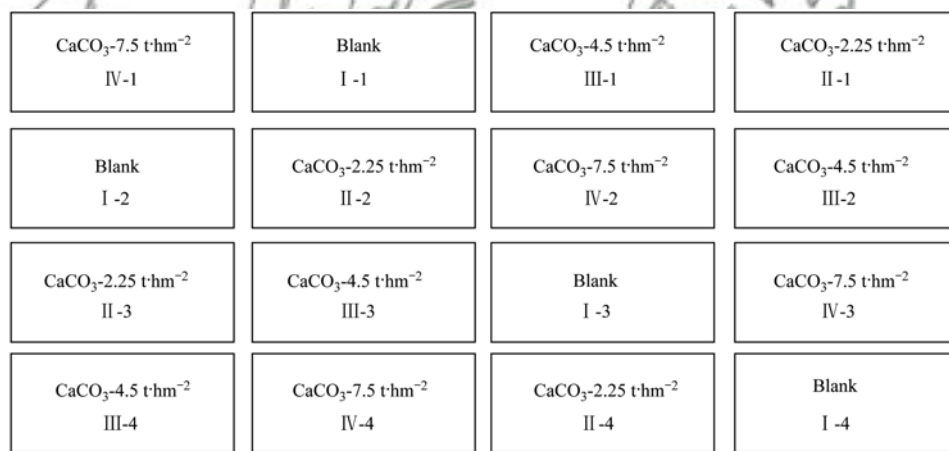


图 1 田间试验布置示意

Fig. 1 Plots showing the field experimental design

1.3 土样采集与预处理

于 2016 年 9 月 28 日水稻收获时期,在各小区内,按“梅花取样法”布点取样,剔除表面残留物,用土钻采集表层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤,用无菌树脂 (polyethylene terephthalate, PET) 袋封装后置于冰袋中以保证低温环境,带回实验室. 两周内取混合后的新鲜土样测土壤硝化潜势和反硝化潜势,另取一部分置于干燥通风的环境中风干处理,于 10 月底进行土壤基本理化性质的测定,将剩余的土样放于 -20°C 中保存备用.

1.4 土壤基本理化性质的测定

土壤溶解有机碳 (DOC) 的测定采用总有机碳测定仪测定,取通过 0.149 mm 孔径的风干土样 5 g ,按水土比 $5:1$ 的比例加入 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 K_2SO_4 ,在 25°C 下以 $215 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 30 min ,离心,用 $0.45 \mu\text{m}$ 薄膜过滤后稀释 5 倍,用 TOC 仪测定^[7].

土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的含量采用流动分析仪测定,取 5 g 鲜土,按水土比 $5:1$ 加入 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液,在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 1 h ,离心过滤,用连续流动分析仪 (SAN++ ,Skalar, Holland) 测定^[8].

1.5 土壤硝化潜势的测定

土壤硝化潜势(PNR)的测定采用氯酸盐抑制法,取5 g的鲜土,按水土比4:1加入含1 mmol·L⁻¹ (NH₄)₂SO₄的磷酸盐缓冲液(NaCl 8 g·L⁻¹,KCl 0.2 g·L⁻¹,Na₂HPO₄ 0.2 g·L⁻¹,NaH₂PO₄ 0.2 g·L⁻¹),用HCl调节pH为7.4;并加入10 mmol·L⁻¹的KClO₃溶液以抑制亚硝酸盐的氧化.将配好的土壤溶液放于25℃黑暗处180 r·min⁻¹振荡培养24 h,加入5 mL 2 mol·L⁻¹的KCl溶液浸提NO₂⁻,以N-(1-萘基)-乙二胺显色,静置20 min后,用紫外分光光度计在波长530 nm下测定^[9].

1.6 土壤反硝化潜势的测定

土壤反硝化潜势(DEA)的测定采用乙炔抑制法,取相当于4 g干土的鲜土置于120 mL的厌氧瓶中,加无菌水至总水量13 mL,180 r·min⁻¹水平振荡20 min以排除土壤孔隙中的空气,用针头向瓶内充高纯氮5 min,再向瓶中冲入10%乙炔(约11 mL),180 r·min⁻¹水平振荡20 min,再加入8 mL DEA溶液(KNO₃-N 56 mg·L⁻¹, dextrose C 288 mg·L⁻¹, chloramphenicol 2 mg·L⁻¹).采集气样,为培养0 h样品,2 h后,采集气样,用气相色谱仪(Agilent GC7890A)测定N₂O含量.冲入10%的乙炔是为了抑制硝化作用过程中N₂O的产生以及反硝化过程中N₂O还原为N₂,所以用测定的N₂O产生速率代表土壤反硝化潜势(denitrifying enzyme activity, DEA)^[10].

1.7 数据处理

本研究中基础数据的处理利用 Excel 2007 完成,采用 Pearson 相关分析法进行相关性分析,多组数据间的方差分析采用单因素方差分析 ANOVA.所有统计检验均用 SPSS 22 实现,P<0.05 即认为差异显著.

2 结果与分析

2.1 不同 CaCO₃ 施加量对土壤理化性质的影响

施用CaCO₃后土壤基本性质如表1所示.可见,施加CaCO₃对土壤DOC含量产生了显著的影响,对照组土壤DOC含量为762.10 mg·kg⁻¹;与之相比,LC处理土壤DOC提高了3.14%,为786.05 mg·kg⁻¹;MC处理土壤DOC提高了13.97%,达到了868.58 mg·kg⁻¹;而HC处理土壤DOC反而降低了0.65%,只有757.12 mg·kg⁻¹.表明酸性土壤随着CaCO₃施加量的增加,土壤DOC呈现先增加后下降的趋势,即适当施加CaCO₃有利于提高土壤中溶解有机碳含量,恢复土壤的肥力,但当CaCO₃施加量达到7.5 t·hm⁻²时,便会产生负向影响,引起土壤DOC含量降低.

土壤NH₄⁺-N的含量无显著性变化;NO₃⁻-N的含量变化显著,对照组土壤NO₃⁻-N含量为26.57 mg·kg⁻¹;与对照组相比,LC处理时土壤NO₃⁻-N降低了12.38%,为23.28 mg·kg⁻¹;MC处理与对照组相比,土壤NO₃⁻-N提高了14.37%,达到了30.39 mg·kg⁻¹;HC处理与对照组相比,土壤NO₃⁻-N降低了19.97%,只有21.26 mg·kg⁻¹.

表1 不同处理土壤的基本性质¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of the soil with different treatments

处理	含水量/%	DOC/mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹
CK	27.62±0.02 a	762.10±7.53 a	26.57±1.10a	1.75±0.06 a
LC	27.17±0.01 a	786.05±25.56 a	23.28±0.93b	1.72±0.22 a
MC	27.50±0.01 a	868.58±15.33 b	30.39±1.48c	1.42±0.28 a
HC	29.62±0.01 a	757.12±17.88 a	21.26±0.39b	1.38±0.12 a

1)表中数值为平均值±标准误(n=4);同一列中字母相同表示差异不显著,字母不同表示差异显著(P<0.05)

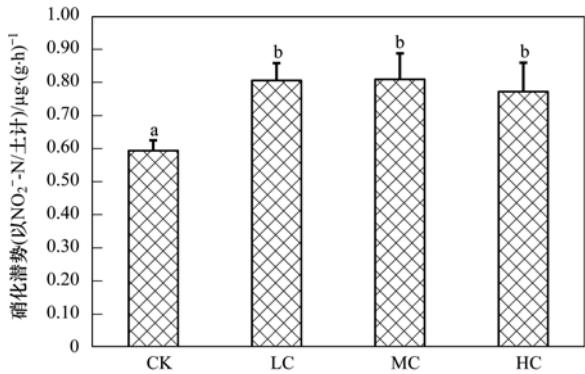
2.2 不同 CaCO₃ 施加量对土壤硝化潜势(PNR)的影响

硝化作用广义上是指从还原态的有机或者无机氮化物到氧化态的有机或者无机氮化物的生物转化过程,具体指通过硝化微生物的作用,氨或者铵盐被氧化为亚硝酸盐或者硝酸盐的过程^[11,12].由图2可看出,与对照组相比,CaCO₃处理对土壤硝化潜势有显著的提高作用(P<0.05),提高约34%.对照组土壤的硝化潜势为0.59 μg·(g·h)⁻¹(以NO₂⁻-N/土计,下同),而施用CaCO₃土壤的硝化潜势约为0.77

~0.82 μg·(g·h)⁻¹.

2.3 不同 CaCO₃ 施加量对土壤反硝化潜势(DEA)的影响

反硝化作用是指反硝化微生物在厌氧条件下将NO₃⁻逐级还原为NO₂⁻、NO、N₂O、N₂的生物化学过程.反硝化作用是闭合氮循环的重要步骤,关系到大气中温室气体N₂O的含量,也是农田氮肥损失的重要途径,因此,通常用降低土壤反硝化作用来保持土壤肥力^[13,14].本文通过测定土壤产生N₂O的速率来表征土壤反硝化微生物的活性.对不同



不同字母表示不同处理间的硝化潜势存在显著差异 ($P < 0.05$)
图2 不同 CaCO_3 梯度下土壤硝化潜势

Fig. 2 PNR of the soil treated with different amounts of CaCO_3

CaCO_3 处理的土壤反硝化潜势进行测定,结果如图3所示. 与对照组相比, CaCO_3 处理对土壤反硝化潜势起到了显著的抑制作用 ($P < 0.05$),LC 处理时土壤反硝化潜势减低了 16.31%,HC 处理时土壤反硝化潜势降低了 27.81%,但 MC 处理土壤反硝化潜势与 CK 处理无显著差异.

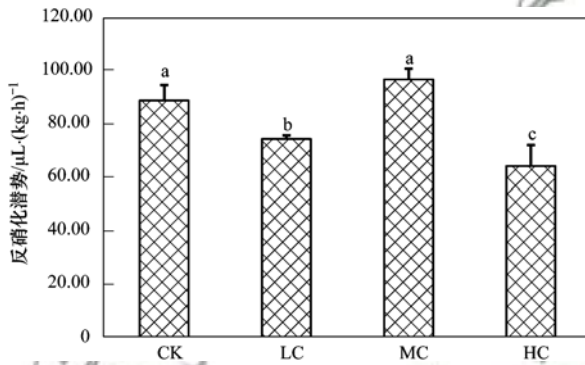


图3 不同 CaCO_3 梯度下土壤反硝化潜势

Fig. 3 DEA of the soil treated with different amounts of CaCO_3

2.4 土壤硝化潜势(PNR)和反硝化潜势(DEA)与主要理化性质的相关性变化

由表2所示,不同 CaCO_3 处理中土壤的硝化潜势和反硝化潜势与土壤的基本理化性质显著相关. 土壤硝化潜势与土壤 DOC 显著正相关,与土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量呈显著负相关. 而土壤反硝化潜势与土壤 DOC 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量呈显著或极显著正相关,与土壤含水量呈较强的负相关.

表2 土壤硝化潜势、反硝化潜势与土壤主要理化性质相关系数¹⁾

Table 2 Correlation analysis among soil PNR, DEA, and physicochemical properties

项目	含水量	DOC	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$
PNR	0.16	0.51 *	-0.02	-0.55 *
DEA	-0.67 *	0.58 *	0.79 **	-0.09

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著

3 讨论

土壤酸碱度是影响土壤肥力和土壤微生物活性的重要因素. 酸性土壤往往会提高重金属元素(如 Cd 和 Al 等)的生物有效性,加上有效养分易随降雨和灌溉的流失,致使土壤贫瘠化,农作物减产^[15]. 土壤 DOC 作为全球碳循环的重要组成部分,是评价土壤肥力、表征土壤质量状况的重要指标,对土壤微生物活性以及作物生长均产生重要影响^[16,17]. 本研究表明,土壤 DOC 在较低剂量石灰施用量的条件下随 CaCO_3 施加量的增大而提高 ($762.10 \sim 868.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这说明对酸性土壤施加适量 CaCO_3 ,促进了土壤 DOC 的增加,可能的原因是施加 CaCO_3 后,土壤微生物量及其活性增加,而微生物活性是影响土壤 DOC 产生和释放的重要因子,王莹等的研究也表明土壤 DOC 与土壤微生物量之间存在显著的正相关关系^[18]. 而 HC 处理中,土壤 pH 的增加却造成土壤 DOC 呈下降趋势,且含量低于对照组,可能的原因是 CaCO_3 施加量过大导致土壤微生物活性急剧降低,从而导致土壤 DOC 含量下降.

土壤硝化作用和反硝化作用是土壤氮循环的重要过程,对土壤及生态环境有重要的影响,硝化作用中产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 一方面增加了土壤中氮素营养的含量,另一方面大量的 NO_3^- 和相当数量的 NO_2^- 在强降雨和过量灌溉后,会淋失污染地下水,直接关系到饮用水的安全,还极易转化为亚硝酸胺 (NH_2NO),它已被证明是一种致癌、致畸、甚至导致胎儿死亡有害物质;反硝化作用也称脱氮作用,将硝酸盐还原为氮气,降低了土壤中氮素营养的含量,其中间产物 N_2O 是公认的温室气体,但反硝化作用可以消除因 NO_3^- 累积对地下水的污染以及对生物的毒害作用^[19]. 本研究表明,施加一定量的 CaCO_3 会促进土壤的硝化作用,但当 CaCO_3 施加量达到 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时便会抑制土壤硝化作用,影响土壤中 NH_4^+ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化. 造成硝化作用差异的原因主要可能是施加 CaCO_3 后土壤环境发生明显的变化,包括土壤 pH、土壤氮素组分及土壤 DOC 的变化等,刺激了微生物数量和活性的变化^[20,21]. 本研究中土壤反硝化作用变化较为复杂,LC 处理和 HC 处理都使得土壤反硝化作用显著降低,可能是受土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的影响,另外,施加 CaCO_3 后,土壤反硝化作用受多种环境因子协同影响,其中的机制仍需进一步深入研究.

土壤的硝化作用和反硝化作用主要是微生物活动的过程,土壤硝化作用以氨和亚硝酸根为能源,以二氧化碳为碳源,反硝化作用需要从有机质中获得基质和能量. 本研究表明,土壤硝化作用与土壤 DOC 呈较强的正相关,可能的原因是土壤 DOC 的增加提高了微生物活性,进而可提高土壤有机氮的矿化速率,从而为硝化细菌提供更多的能源及碳源(二氧化碳),这与孙波等^[22]的研究结果一致. 土壤硝化作用与 NH_4^+ -N 含量呈较强的负相关,这是由于施加 CaCO_3 促进了土壤的硝化作用,消耗掉大量的 NH_4^+ -N,导致 NH_4^+ -N 浓度降低^[23]. 本研究中土壤硝化作用与 NO_3^- -N 含量并无显著相关性,这与叶莉莎等^[24]的研究结果一致,可能的原因是土壤中硝态氮含量过高,不再是影响土壤硝化作用的主要因子. 土壤反硝化作用与 NO_3^- -N 含量呈极显著的正相关,与土壤 DOC 呈较强的正相关. 这是由于硝酸根是反硝化作用的第一电子受体,且反硝化细菌多数为化能异养,需要 DOC 为其提供能源,这与前人研究结果一致,Senbayram 等^[25]指出,土壤反硝化作用是由土壤中 DOC 和 NO_3^- -N 含量共同决定的. Velthof 等^[26]以草地土壤为研究对象,发现土壤 N_2O 通量与土壤含碳量有较弱的正相关关系. Eriksson 等^[27]对泻湖盐沼土壤研究发现反硝化作用与硝酸盐浓度呈显著正相关. 与前人研究结果不同的是,本研究中反硝化作用与土壤含水量呈较强的负相关,可能的原因是涝干过程中不同反硝化微生物对水分的响应存在差异,反硝化基因 *narG* 的微生物基因丰度与水分含量呈显著负相关,而 *nosZ* 基因微生物丰度并没有发生显著变化^[28]. 有研究指出,如果只考虑 CK 处理、LC 处理和 HC 处理时,反硝化作用显著降低,这是由于土壤反硝化作用中 NO_3^- 在接受有机质的电子而还原时,会产生 OH^- 离子,因此, H^+ 离子较多的酸性环境更有利于反硝化作用的发生^[29]. 而 MC 处理中之所以反硝化作用没有显著降低,可能是 MC 处理使土壤中 DOC 含量显著增加的原因.

4 结论

本文对施加 CaCO_3 调节的酸性土壤的理化性质、硝化作用和反硝化作用的变化特征进行了研究,结果表明,一定的 CaCO_3 施加可显著提高土壤的 DOC 含量,但当 CaCO_3 施加量达到 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤 DOC 含量开始显著下降; CaCO_3 的施加对土壤 NH_4^+ -N 含量无显著影响, NO_3^- -N 含量变化较为

复杂. 一定范围内 CaCO_3 施加量对土壤的硝化作用有促进作用,但当 CaCO_3 施加量达到 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时便会抑制土壤硝化作用,土壤反硝化作用对不同 CaCO_3 施加量的响应较为复杂. 土壤硝化作用与土壤 DOC 和 NH_4^+ -N 含量显著相关,反硝化作用与 NO_3^- -N 含量、土壤 DOC 和含水量显著相关. 综合分析认为,在本研究区域内,施加 CaCO_3 会明显改良酸性土壤,合适的 CaCO_3 施加会改变土壤氮素循环进程,对土壤氮素的相互转化产生影响,最佳的 CaCO_3 施加量为 $2.25 \sim 4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右.

参考文献:

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, **327** (5968): 1008-1010.
- [2] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4283-4290. Wang M E, Peng C, Chen W P. Effects of rice cultivar and typical soil improvement measures on the uptake of Cd in rice grains [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (11): 4283-4290.
- [3] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 750-759.
- [4] 于宁, 关连珠, 姜翼来, 等. 施石灰对北方连作烟田土壤酸度调节及酶活性恢复研究[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(4): 849-851. Yu N, Guan L Z, Lou Y L, *et al.* Lime application regulates soil acidity and restores enzyme activities in the fields cultivated continuously with tobacco, Northern China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(4): 849-851.
- [5] Huber C, Baier R, Göttlein A, *et al.* Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Högwald, Germany [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **233**(1): 11-20.
- [6] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 等. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(15): 266-269. Ao J H, Huang Z R, Jiang Y, *et al.* Effects of applying lime on the properties of acid soil and the growth of sugarcane [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26** (15): 266-269.
- [7] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [8] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [9] Kurola J, Salkinoja-Salonen M, Aarnio T, *et al.* Activity, diversity and population size of ammonia-oxidising bacteria in oil-contaminated landfarming soil [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2005, **250**(1): 33-38.
- [10] Carnol M, Hogenboom L, Jach M E, *et al.* Elevated atmospheric CO_2 in open top chambers increases net nitrification and potential denitrification [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(6): 590-598.

- [11] 方运霆, 莫江明, Per G, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, **24**(7): 1523-1531.
Fang Y T, Mo J M, Per G, *et al.* Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(7): 1523-1531.
- [12] 孙志高, 刘景双. 湿地土壤的硝化-反硝化作用及影响因素[J]. 土壤通报, 2008, **39**(6): 1462-1467.
Sun Z G, Liu J S. Nitrification-denitrification and its affecting factors in wetland soil—a review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(6): 1462-1467.
- [13] 陈晨, 许欣, 毕智超, 等. 生物炭和有机肥对菜地土壤 N_2O 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1912-1920.
Chen C, Xu X, Bi Z C, *et al.* Effects of biochar and organic manure on N_2O emissions and the functional gene abundance of nitrification and denitrification microbes under intensive vegetable production[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(5): 1912-1920.
- [14] 王亚男, 曾希柏, 王玉忠, 等. 施肥模式对设施菜地根际土壤微生物群落结构和丰度的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(3): 826-834.
Wang Y N, Zeng X B, Wang Y Z, *et al.* Effects of different fertilization regimes on community structure and abundance of soil microorganisms in greenhouse vegetable rhizosphere soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(3): 826-834.
- [15] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, **44**(4): 541-547.
Yuan J H, Xu R K. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils[J]. *Soils*, 2012, **44**(4): 541-547.
- [16] Six J, Conant R T, Paul E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, **241**(2): 155-176.
- [17] 李玲, 仇少君, 刘京涛, 等. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(5): 1407-1414.
Li L, Qiu S J, Liu J T, *et al.* Roles of soil dissolved organic carbon in carbon cycling of terrestrial ecosystems: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(5): 1407-1414.
- [18] 王莹, 阮宏华, 黄亮亮, 等. 围湖造田不同土地利用方式土壤活性有机碳的变化[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(4): 741-748.
Wang Y, Ruan H H, Huang L L, *et al.* Soil labile organic carbon of different land use types in a reclaimed land area of Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(4): 741-748.
- [19] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, **7**(3): 737-750.
- [20] 袁娜. 覆盖雷竹林土壤生化性质及其变化动态[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [21] 侯海军, 秦红灵, 陈春兰, 等. 土壤氮循环微生物过程的分子生态学研究进展[J]. 农业现代化研究, 2014, **35**(5): 588-594.
Hou H J, Qin H L, Chen C L, *et al.* Research progress of the molecular ecology on microbiological processes in soil nitrogen cycling[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, **35**(5): 588-594.
- [22] 孙波, 郑宪清, 胡锋, 等. 水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 206-213.
Sun B, Zheng X Q, Hu F, *et al.* Effect of temperature, rainfall and soil properties on farmland soil nitrification[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 206-213.
- [23] 张文娟, 余冬立, Agbna G H D, 等. 生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3979-3986.
Zhang W J, She D L, Agbna G H D, *et al.* Effects of biochar amendment and irrigation on denitrification losses in greenhouse tomato fields[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3979-3986.
- [24] 叶莉莎, 陈双林, 郭子武. 覆盖措施对雷竹林地土壤硝化和反硝化作用的影响[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(4): 966-971.
Ye L S, Chen S L, Guo Z W. Effects of mulching on soil nitrification and denitrification in a *Phyllostachys violascens* stand[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(4): 966-971.
- [25] Senbayram M, Chen R, Budai A, *et al.* N_2O emission and the $N_2O/(N_2O + N_2)$ product ratio of denitrification as controlled by available carbon substrates and nitrate concentrations[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, **147**: 4-12.
- [26] Velthof G L, Jarvis S C, Stein A, *et al.* Spatial variability of nitrous oxide fluxes in mown and grazed grasslands on a poorly drained clay soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(9): 1215-1225.
- [27] Eriksson P G, Svensson J M, Carrer G M. Temporal changes and spatial variation of soil oxygen consumption, nitrification and denitrification rates in a tidal salt marsh of the Lagoon of Venice, Italy[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **58**(4): 861-871.
- [28] Liu J B, Hou H J, Sheng R, *et al.* Denitrifying communities differentially respond to flooding drying cycles in paddy soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, **62**: 155-162.
- [29] Qu Z, Wang J G, Almøy T, *et al.* Excessive use of nitrogen in Chinese agriculture results in high $N_2O/(N_2O + N_2)$ product ratio of denitrification, primarily due to acidification of the soils[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(5): 1685-1698.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)