

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响

张文娟¹, 余冬立^{1,2*}, Gamareldawla H. D. Agbna¹, 夏永秋^{2*}

(1. 河海大学水利水电学院, 南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 生物炭添加和灌溉是番茄地常用的田间管理措施, 然而其对反硝化的影响还不清楚. 本研究种植试验设置 3 个灌溉量水平分别为估算作物生育期需水量 ET_0 的 50% (W50%)、75% (W75%)、100% (W100%) 和 3 个生物炭添加水平分别为 B0 (折合纯碳, 0)、B25 (折合纯碳, $25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、B50 (折合纯碳, $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 在 2014 年和 2015 年番茄收获后, 每个试验小区采集具有代表性的土样进行室内培养试验, 采用乙炔抑制法来研究土壤的反硝化损失和不加乙炔研究 N_2O 的排放量. 结果表明生物炭和灌溉量显著改变了土壤的理化性质. 与 B0 相比, 添加生物炭能够提高土壤全碳、全氮含量和 pH 值, 降低铵态氮、硝态氮含量, 而灌溉量降低了土壤中全氮和全碳的含量. 因此, 与 B0/W50% 相比, B25/W75% 和 B50/W100% 处理显著减少了反硝化损失量 ($P < 0.05$). 生物炭和灌溉量的交互作用对土壤无机氮含量和反硝化损失的影响均达到显著水平 ($P < 0.05$), 且对硝态氮的影响表现为灌溉量 > 生物炭添加量 > 两者交互作用, 对铵态氮的影响表现为生物炭添加量 > 灌溉量 > 两者交互作用, 对反硝化损失的影响表现为灌溉量 > 生物炭添加量 > 两者交互作用. 反硝化损失量与土壤中无机氮含量、 $(\text{CO}_2\text{-C})$ 矿化量与 N_2O 排放量均呈正相关关系. 不同生物炭添加量和灌溉量处理后明显影响了 $\text{N}_2\text{O}/D_N$ ($P < 0.05$), 培养结束时, 各处理下的 N_2O 累积排放量/ D_N 累积排放量差异较大, 介于 0.31% ~ 1.88%.

关键词: 生物炭; 灌溉; 反硝化; N_2O 排放; 累积排放量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3979-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.10.041

Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields

ZHANG Wen-juan¹, SHE Dong-li^{1,2*}, Gamareldawla H. D. Agbna¹, XIA Yong-qiu^{2*}

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Biochar addition and irrigation are normal farm practices for tomatoes management, while their impacts on denitrification are less known. In this study, three irrigation treatments (hereafter main plots) were set as 50% (W50%), 75% (W75%) and 100% (W100%) of reference evapotranspiration (ET_0), and the subplots coupled three biochar treatments at the rates of 0 (B0), $25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B25) and $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B50). Typical soil samples in each plot were collected when tomatoes were harvested in 2014 and 2015. We used acetylene inhibition method to study the denitrification loss, and also measured N_2O emissions of tomato soil without acetylene amendment. The results showed that biochar and irrigation significantly changed the physical and chemical properties of the soil. Adding biochar improved total carbon, total nitrogen content and pH of the soil, while reduced the content of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ compared to B0. On the contrary, irrigation reduced the amount of total nitrogen and total carbon content. As a result, both biochar and irrigation significantly reduced denitrification losses ($P < 0.05$). Moreover, the interaction of biochar and irrigation significantly reduced soil inorganic nitrogen and denitrification losses ($P < 0.05$), and the orders of the influencing factors of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were irrigation, biochar, their interactions in turn, the orders of the influencing factors of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were biochar, irrigation, their interactions in turn, the orders of the influencing factors of denitrification losses were irrigation, biochar, their interactions in turn. Denitrification losses were positively related to inorganic nitrogen content in the soil, CO_2 mineralization rates and N_2O emission rates. The ratio of $\text{N}_2\text{O}/D_N$, ranging from 0.31% to 1.88%, was significantly affected by biochar and irrigation treatment in the fields ($P < 0.05$).

Key words: biochar; irrigation; denitrification; N_2O emission; accumulative emissions

土壤反硝化是土壤氮素循环的重要环节, 其基本过程是: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$, 反硝化作用能够把土壤固定的氮和人为活化氮以 N_2 的形态返回到大气氮库中, 因而反硝化过程是土壤氮素损失的主要途径之一. 反硝化过程是复杂的微生物化学过程, 凡是对生物活动如活性、数量、种类等

收稿日期: 2016-03-23; 修订日期: 2016-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471238); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y412201423); 中央高校基本科研业务费专项(2015B14814); 江苏省自然科学基金项目(BK20161503)

作者简介: 张文娟(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田水土过程与侵蚀控制, E-mail: 1623562107@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: shedongli@hhu.edu.cn; yqxia@issas.ac.cn

有影响的因素对土壤反硝化作用均有影响,主要的影响因素可能包括:土壤含水量(通气状况)、土壤有机质、土壤质地、C/N 比、氮源的供应(NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、总氮的含量)、土壤 pH 和温度等土壤理化性质^[1~3]。

近年来,由于生物炭固碳技术的兴起,引起了科学家们的高度重视。生物炭施入土壤后对土壤各性质的影响,也受到越来越多研究者的关注^[4~6]。生物炭是一种由生物质材料(包括作物秸秆、木屑、动物粪便等)在无氧或缺氧条件下经低温裂解炭化形成的性质稳定、结构复杂、富含碳的有机物质^[7,8],生物炭中一般含有 60% 以上的 C 元素,含有的其它元素主要有 H、O、N 等,其次是灰分^[9],溶于水呈碱性,故生物炭往往呈碱性,生物炭的阳离子交换量也因此有所增加^[10~12]。相比其他土壤改良剂,含碳率高、比表面积更大、孔隙结构丰富、理化性质稳定是生物炭固有的特点,也是生物炭能够还田改土的重要结构基础。由于生物炭自身的特性,施入土壤后与土壤颗粒之间产生交互作用,改变了土壤的环境条件,从而影响 N_2O 的排放和反硝化过程。近年来蔬菜田用水在农业用水中的比重日趋增大,蔬菜的生产灌溉频繁,灌水量大,灌溉不仅影响土壤的含水量和孔隙度,改变土壤的氧化还原状态,而且影响氮在土壤剖面累积和分布^[13,14],也会影响反硝化过程。

目前国内外生物炭和灌溉对土壤反硝化过程的单独作用的研究已有很多,如 Singh 等^[15]发现,添加生物炭能够增加土壤的通气性,从而抑制反硝化作用产生的 N_2O 排放; Lehmann 等^[7]的研究结果表明生物炭的高 C/N 比,限制了氮素的微生物转化和反硝化作用; Klemmedtsson 等^[16]指出土壤水分是影响土壤的硝化作用和反硝化作用等生物化学过程的重要因子。但是直到现在,很少有人研究生物炭添加和灌溉量两者共同作用下对土壤反硝化过程的影响。本文选择连续两年施用生物炭和采用不同的灌水量的番茄地土壤为试验对象,研究生物炭和灌水量对番茄地土壤的反硝化损失的影响,有助于了解生物炭和灌水量对土壤反硝化损失影响的综合作用,以期为该地区农田土壤改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采集土壤的试验地基本情况

田间试验于 2014 年 4 月 14 日到 8 月 24 日和 2015 年 4 月 19 日到 8 月 18 日在河海大学南方地区

高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室节水与农业生态试验场($\text{N}31^\circ 86'$, $\text{E}118^\circ 60'$, 海拔 144 m)进行。试验区属亚热带湿润气候,冬冷夏热、四季分明,年平均降雨量为 1 021.3 mm,年平均蒸发量为 900 mm,年平均气温为 15.7℃,最热月平均温度为 28.1℃,年无霜期为 237 d,年均日照时数为 2 212.8 h。气象资料由试验站的自动气象站提供。试验区内土壤类型为黄棕壤,土壤容重为 1.20 ~ 1.35 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。土壤砂粒(0.02 ~ 2 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.02 mm)、黏粒(0 ~ 0.002 mm)的体积分数分别为 29.7%、41.4%、28.9%。

1.2 生物质炭基本性质

本试验所用生物质炭是由河南三利新能源公司提供,其炭化原料为小麦秸秆,350 ~ 550℃ 下限氧热裂解炭化制得。施入大田前将生物质炭磨碎并通过 2 mm 筛,使其混合均匀。生物质炭的基本性质^[17]为: pH(H_2O): 10.4,有机碳: 467 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮: 5.9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,并因收集时带有土粒粘附而含有 20.8% 的灰分,全磷: 14.43 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾: 11.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

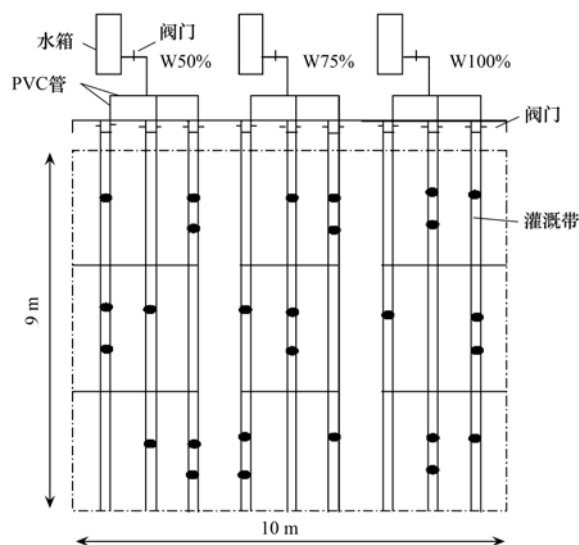
1.3 试验设计

种植试验采用完全随机区组设计,灌溉量作为主区,施生物炭量为副区,灌溉量的 3 个水平分别为估算作物生育期需水量 ET_0 的 50%、75%、100%,代表符号分别为 W50%、W75%、W100%,3 个添加生物炭水平分别为 B0(折合纯碳,0)、B25(折合纯碳,25 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、B50(折合纯碳,50 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$),共有 9 个处理(3 个灌溉水平 $\times$ 3 个添加生物炭水平),3 次重复,27 个小区,共 90 m^2 。灌溉作为主区随机排列,在每个主区中随机布置 3 个添加生物炭水平。试验点是设置在凸起的田床上,各田床中心距离 0.9 m,田床宽度 0.7 m,每个田床长 3 m,高 0.25 m。每个处理都有一个单独的滴管系统。

布置如图 1 所示,生物质炭在 2014 年 4 月番茄移栽前与氮肥一起翻埋于土壤耕层 10 cm 左右,其中氮肥 NPK(15:15:15)施用量为 1 400 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,尿素 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 为 42.86 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2015 年番茄季氮肥和生物质炭施用同 2014 年。

1.4 土壤样品采集与分析

在 2014 年和 2015 年番茄收获后,每个小区在滴灌管间随机选择 3 个点,且保证在种植田埂的左、中、右各有一个采样点,分别采取 0 ~ 10 cm 土层的土样,然后将这 3 个点的土壤混匀,用混匀的样品代表这个小区的土样,用塑料自封袋装好,共 27 袋土



小区中不含黑点代表 B0, 含一个黑点代表 B25,
含两个黑点代表 B50

图1 田间试验布置示意

Fig. 1 Plots of experiment

样,带回实验室一部分风干后用于测定土壤有机碳、全氮和 pH,另一部分用于室内培养试验. 土壤基本性质参照文献[18]测定: 土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定; 土壤 pH 采用蒸馏水(土水比 1:2.5)浸提,土壤酸度计测定.

1.5 培养试验设计与分析

两年培养试验设计相同: 将取回的袋装新鲜土样均分成 6 份(相当于 20 g 烘干土)充分混均于 318 mL 三角瓶中,均匀平铺在瓶底上,共 162 瓶(27 袋(6 份/袋)). 根据测得的土壤的含水率和土壤持水量,用移液枪向瓶中土样均匀地加入一定量的纯净水,使所有土壤样品的含水率达到土壤质量含水量为 60%,用带有两根橡胶管的橡皮塞塞住瓶口后,用 704 胶棒塞子周围密封. 将完全相同的 6 个培养瓶分为两组,每组 3 个重复,其中一组不加乙炔,用于测定 N_2O 和 CO_2 产生速率; 另一组在培养前充入 10% 的乙炔处理,即用抽气针筒从培养瓶中抽取 10% (体积分数) 的气体弃去,然后抽取同体积净化后的乙炔气体(纯度 > 99.9%^[19])通入培养瓶中,通入 10% (体积分数) 的乙炔可抑制反硝化过程中 N_2O 还原为 N_2 以及硝化作用过程中 N_2O 的产生,故所测定的 N_2O 质量浓度代表反硝化速率.

将 162 个三角瓶放入 25℃ 恒温培养箱下恒温培养. 通过之前的预试验(预试验培养时间为 158 h,分别在 4、14、26、50、74、110、158 h 时采集气

体样品)可得,试验进行到 50 h 时,土壤中氮素浓度已经很低,土壤的反硝化过程基本进行完全,之后反硝化速率基本为零,因此试验培养时间定为 50 h,分别在 4、14、26、50 h 时刻采集气体样品,每次抽完气体用保持瓶子与大气畅通 0.5 h,目的是把之前反应的存留气体完全排出,然后重新密封,乙炔处理中重新注入乙炔,重复之前操作. 样品在 12 h 内完成测定. N_2O 质量浓度均用 Agilent7820A 气相色谱仪分析测定,色谱柱为填充 80/110 目 Porapak-Q 的填充柱. ECD 检测器和色谱柱的温度分别为 330、55℃. 亚甲烷为载气(95% 氩气 + 5% 甲烷),流速为 $35 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,高纯氮气作为反吹气. CO_2 质量浓度也由 Agilent7820A 气相色谱仪同步分析测定; 试验结束后土壤样品立即用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 提取,用连续流动分析仪(Skalar San + + System)测定土壤中 $\omega(NH_4^+ - N)$ 与 $\omega(NO_3^- - N)$ 的含量.

N_2O 排放速率、反硝化排放速率和有机碳矿化速率计算公式如下所示:

$$Q = (W_2 - W_1) / [(T_2 - T_1) \times M] \quad (1)$$

$$W = c(V_g + V_l\alpha) \times 1000 \quad (2)$$

式中, Q 表示培养 T_2 后产生的 N_2O 排放速率、反硝化速率和有机碳矿化速率, $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$; T_1 表示培养初始时间,一般记为 0 h; T_2 表示培养持续时间; W_2 表示培养 T_2 后产生的 N_2O -N 或 CO_2 -C 总量, μg ; W_1 表示开始培养第一次采样时(T_1)所产生的 N_2O -N 或 CO_2 -C 总量, μg ; M 表示烘干土的质量, kg; c 表示测定采集气样中 N_2O -N 或 CO_2 -C 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_g 表示培养瓶气体总体积, L; V_l 表示培养桶内溶液体积, L; α 表示 Bunsen 系数, 25℃ 时为 0.55.

试验所得数据采用 Excel 整理分析后,对数据结果采用 SPSS(19.0 版本)进行交互作用和多重比较的分析^[20],并利用 Excel 制图.

2 结果与分析

2.1 生物炭添加对土壤基本性质的影响

生物炭添加和不同灌溉处理两年试验后,按照不同试验处理分别统计土壤全氮、全碳、铵态氮(以氮计)、硝态氮与亚硝态氮(以氮计)的含量,结果如表 1 所示.

由表 1 可知,与 B0 处理相比,在 2014 年和 2015 年期间在番茄地中添加一年和两年生物炭后,对土壤全碳含量增加效果明显($P < 0.05$),且随着生物炭施用量的增加而增加. 土壤添加生物炭后全

表 1 不同处理土壤的基本性质¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of soil with different treatments

处理		全氮/%		全碳/%		硝态氮 + 亚硝态氮 (以氮计) /mg·g ⁻¹		铵态氮(以氮计) /mg·g ⁻¹		pH (2015)
灌水量/%	添加生物炭水平	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015	
50	B0	0.21a	0.24a	0.67a	0.65a	1.21a	0.92a	0.018a	0.053a	8.47a
	B25	0.21a	0.33b	1.62b	3.25b	1.04a	0.70ab	0.011a	0.052a	8.68a
	B50	0.24b	0.43c	1.97c	6.47c	0.76a	0.58b	0.011a	0.046a	8.78b
75	B0	0.19a	0.21a	0.52a	0.63a	1.01a	0.90a	0.007a	0.047a	8.47a
	B25	0.21b	0.30b	1.23b	2.62b	0.89b	0.58b	0.004ab	0.043b	8.61b
	B50	0.21b	0.39c	1.88c	4.94c	0.71c	0.52b	0.003b	0.037c	8.66b
100	B0	0.17a	0.19a	0.47a	0.61a	1.05a	0.78a	0.006a	0.039a	8.49a
	B25	0.19b	0.28b	1.14b	1.72b	0.91a	0.57b	0.003b	0.030ab	8.63ab
	B50	0.22c	0.36c	1.82c	4.22c	0.39b	0.21c	0.003b	0.021b	8.68b

1) 表中 2014 和 2015 分别表示的是 2014 年和 2015 年,pH 缺失 2014 年的数据;同一列的不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$),下同

氮的变化与土壤有机碳含量的变化相似,与 B0 处理相比较,2015 年 B25 和 B50 处理全氮含量分别平均提高 42.6% 和 84.8%,全氮增加的可能原因一方面是生物炭向土壤中释放的氮素引起的^[21],另一方面是碳素为土壤微生物提供了更多的能源,因此增强了土壤的固氮作用,所以两年持续添加生物炭进入番茄地土壤后显著增加了土壤的全氮含量($P < 0.05$)。相反的,土壤各处理在相同生物炭添加量条件下,土壤中全氮和全碳的含量随灌水量的增加而减少,不同生物炭添加量和灌溉量的交互作用对全氮和全碳含量影响不显著。

土壤各处理在同一灌溉水平下土壤中硝态氮的含量随生物炭添加量的增加而减少,与 B0 处理相比较,B25 和 B50 处理硝态氮含量分别平均减少 20.9% 和 47.0%;铵态氮的含量变化亦是如此,与 B0 处理相比较,B25 和 B50 处理铵态氮含量减小幅度分别在 27.5% 和 38.6% 左右。土壤各处理在相同生物炭添加量条件下土壤中硝态氮的含量随灌水量的增加而减少,与 W50% 处理相比较,W75% 和

W100% 处理硝态氮含量分别平均减少 11.2% 和 28.7%;铵态氮的含量变化亦是随灌水量的增加而减少;而土壤 pH 随着生物炭的添加而显著增加($P < 0.05$)。不同生物炭添加量和灌溉量的交互作用对无机氮含量的影响达到显著水平($P < 0.05$),而对 pH 的影响不显著。

由图 2 可知土壤基本性质的变化及其与反硝化损失的关系,其中分别为番茄地土壤中硝态氮含量与反硝化损失量(培养 50 h 累积排放量)、土壤铵态氮含量与 N₂O 排放总量(培养 50 h 累积排放量)间的关系。

2.2 生物炭添加对反硝化的影响

由图 3 可以看出,相同灌水量条件下添加一年和两年不同量生物炭后番茄地土壤反硝化损失总量(D_N)(培养 50 h 累积排放量)估算(以每千克土壤的排放量计算)的试验结果。两年试验土壤中,与 B0 相比,B25 和 B50 处理的反硝化损失量变化相似,添加生物炭均显著减小了反硝化损失量($P < 0.05$),减小幅度第一年为 14.1% ~ 29.4%,次年

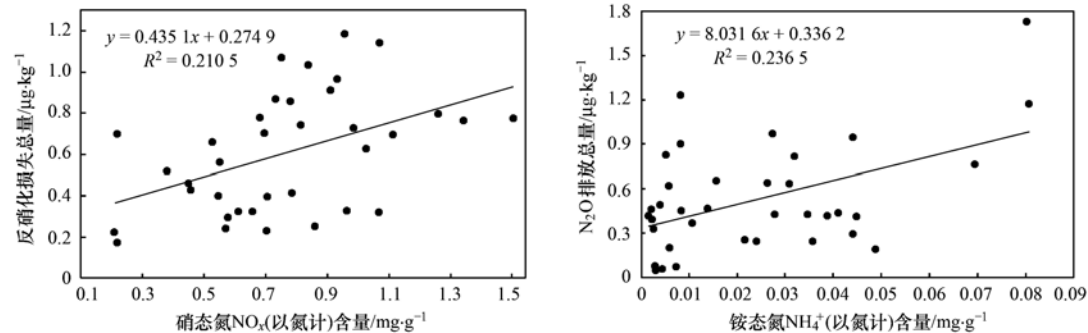


图 2 番茄地土壤中无机氮含量与反硝化损失量、N₂O 排放总量间的关系

Fig. 2 Relationship between inorganic nitrogen content in the soil and denitrification loss/N₂O emission

15.0% ~ 38.4%, 生物炭加入土壤时间越长, 减小反硝化损失量的效果越明显. B25 和 B50 处理的反硝化损失量之间除 2014 年 W50% 条件下, 其余处理均为差异不显著 ($P > 0.05$).

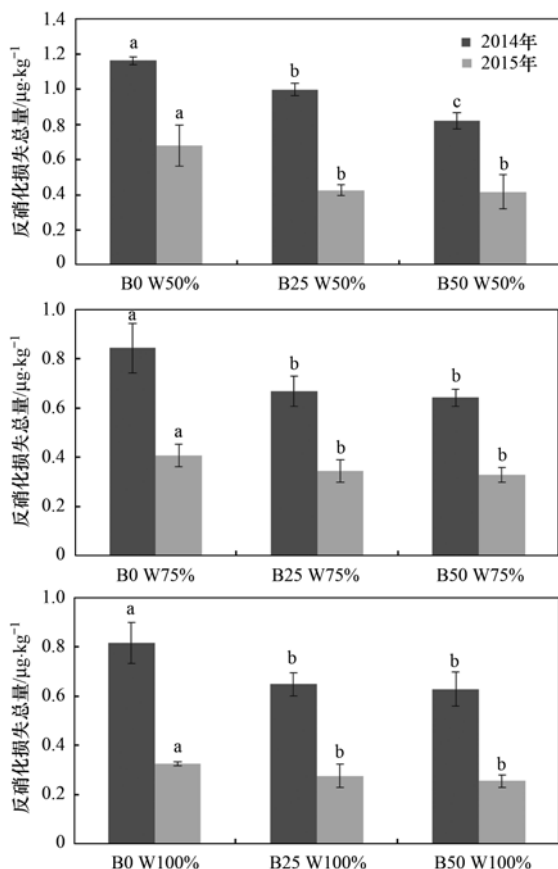


图3 相同灌水量条件下添加不同量生物炭后土壤反硝化损失总量

Fig. 3 Denitrification loss under different biochar amendments with the same irrigation

2.3 灌水量对反硝化的影响

由图4可以看出相同生物炭施用量条件下不同灌水量番茄地土壤反硝化损失总量(D_N) (培养50 h累积排放量)估算(以每千克土壤的排放量计算)的试验结果. 反硝化损失量两年变化相似, 田间灌溉量增加的处理明显减小了两年试验结束后番茄地土壤的反硝化损失量 ($P < 0.05$), 与 W50% 处理相比, W75% 和 W100% 处理的土壤反硝化损失量减小幅度两年相似, 分别是 21.8% ~ 35.1% 和 19.2% ~ 52.2%, 而反硝化损失量在两年中都表现为随灌水量增加而降低, 特别是高灌水量条件下.

2.4 生物炭添加和灌溉量的交互作用对反硝化损失的影响

经方差分析结果可知, 两年试验结果中不同生物炭添加量和灌溉量的交互作用对反硝化损失的影

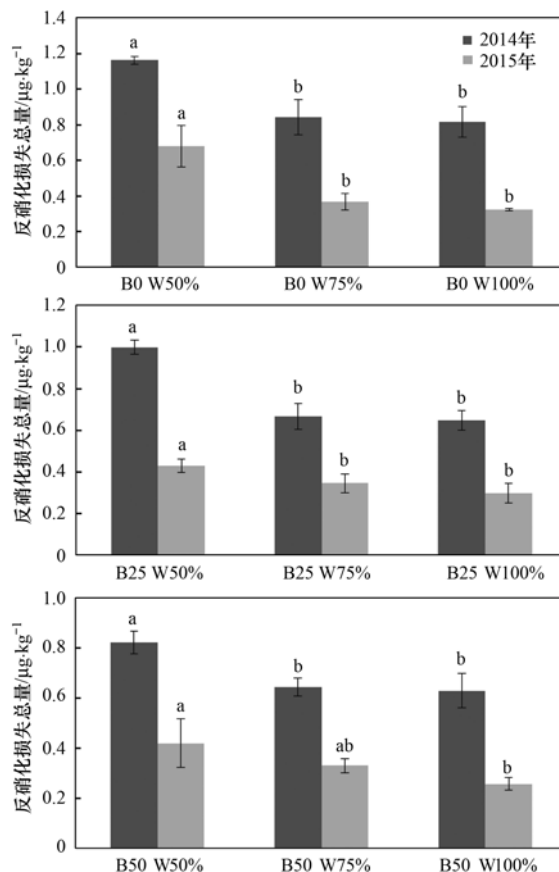


图4 相同生物炭施用量条件下不同灌水量土壤反硝化损失量

Fig. 4 Denitrification loss under different irrigation with the same biochar amendments

响均达到显著水平 ($P < 0.05$), 表明两因素处理组合对番茄产量的影响不是单因素效应的简单相加, 生物炭添加量和灌溉量的耦合效应共同影响番茄地土壤的反硝化损失. 表2为生物炭施用量和灌水量交互作用方差分析结果.

2.5 生物炭添加对 N_2O/D_N 的影响

试验中不加乙炔的处理用于测定 N_2O 的排放速率, 一般说来, 不加乙炔的处理测出的 N_2O 既包括硝化作用 ($NH_4^+ \rightarrow NH_2OH \rightarrow N_2O \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$) 产生的 N_2O , 也包括反硝化作用产生的 N_2O , 农田土壤 N_2O 排放量等于硝化和反硝化过程排放的 N_2O 之和^[22,23].

由表3可得, 不同量生物炭的添加明显影响了 N_2O 排放总量/反硝化损失量 (D_N) ($P < 0.05$), 随着生物炭添加量的增加 N_2O/D_N 比值逐渐减小, 随着灌溉量的增加 N_2O/D_N 也随之减小.

2.6 土壤有机碳 (CO_2-C) 矿化量与反硝化损失量的关系

培养试验中各时间点采集的气体亦对各处理下

表 2 生物炭施用量和灌水量交互作用方差分析结果¹⁾

Table 2 Variance analysis of the interaction between biochar and irrigation							
年份	来源	反硝化损失量 D_N / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/%	全碳/%	硝态氮 + 亚硝态氮 (以氮计)/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	铵态氮(以氮计) / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	pH
2014	生物炭用量 $\times$ 灌水量	4.87 *	2.55	1.76	4.21 *	4.13 *	—
	生物炭用量	14.77 *	73.78 *	81.73 *	14.53 *	19.31 *	—
	灌水量	36.11 *	4.09 *	6.25 *	18.86 *	3.82 *	—
2015	生物炭用量 $\times$ 灌水量	3.39 *	1.31	1.14	3.81 *	3.41 *	0.81
	生物炭用量	42.12 *	23.33 *	257.43 *	13.41 *	13.95 *	21.43 *
	灌水量	53.19 *	4.03 *	7.53 *	17.84 *	6.57 *	0.75

1) 表中数值均为显著性检验 F 值, * 表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著; pH 缺失 2014 年的数据

表 3 培养结束时添加不同处理的土壤氮素气体累积排放量

Table 3 Nitrogenous gas accumulation in different treatments in the end of incubation								
不同含水量 /%	处理	生物炭 输入梯度	N ₂ O 排放总量/μg·kg ⁻¹		反硝化损失总量 D _N /μg·kg ⁻¹		N ₂ O/D _N	
			2014	2015	2014	2015	2014	2015
50	未通乙炔	B0	1.15a	1.28a			0.94a	1.88a
		B25	0.77b	0.79b			0.78b	1.86a
		B50	0.54b	0.65b			0.66b	1.55b
	通乙炔				1.16a	0.68a		
					0.99b	0.43b		
					0.82b	0.42b		
75	未通乙炔	B0	0.64a	0.68a			0.75a	1.68a
		B25	0.33b	0.54b			0.49b	1.56b
		B50	0.25b	0.50b			0.38b	1.52b
	通乙炔				0.84a	0.41a		
					0.67b	0.35b		
					0.64b	0.33b		
100	未通乙炔	B0	0.28a	0.51a			0.34a	1.57a
		B25	0.22b	0.35b			0.33a	1.27b
		B50	0.19b	0.31b			0.31a	1.24b
	通乙炔				0.81a	0.33a		
					0.64b	0.28b		
					0.59b	0.25b		

番茄地土壤有机碳($\text{CO}_2\text{-C}$)矿化量(以每千克土壤的排放量计算)进行了测定,结果表明生物炭加入土壤后减少了土壤的有机碳($\text{CO}_2\text{-C}$)矿化量,这与文献[24,25]的研究结果一致;灌水量与土壤的有机碳($\text{CO}_2\text{-C}$)矿化量无显著相关关系. 土壤中硝化

和反硝化过程主要是微生物化学过程,而土壤微生物的活动需要从有机质中获得基质和能量,而有机碳($\text{CO}_2\text{-C}$)矿化可以为微生物活动提供这些基质和能量.

如图 5 为番茄地土壤反硝化损失量、 N_2O 排放

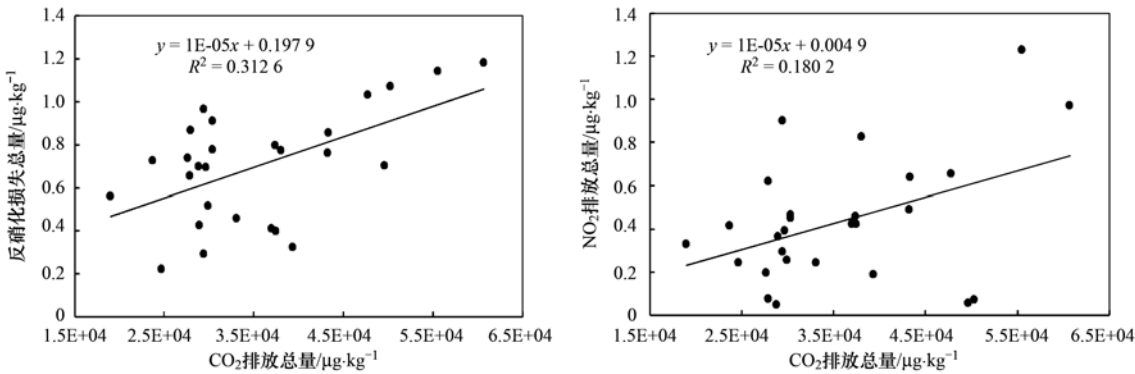


图 5 番茄地 N_2O 排放总量/土壤反硝化损失量与 CO_2 排放总量间的关系

Fig. 5 Relationship between denitrification loss/ N_2O emission and CO_2 mineralization

总量与 CO_2 排放总量之间的关系. 可以看出有机碳矿化量与反硝化损失量成正相关关系 ($n = 27$), 说明了番茄地土壤微生物发生有机碳 ($\text{CO}_2\text{-C}$) 的矿化作用的同时也促进了硝化反硝作用.

3 讨论

生物炭添加和灌溉能影响番茄地土壤 N_2O 排放及反硝化过程, 在整个室内培养过程中, 反硝化损失量 (D_N) 和 N_2O 排放量随着生物炭添加量和灌溉量的增大而显著降低. 田间试验下, 河南地区的玉米地施用 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭后 N_2O 排放量减少^[26]、太湖流域的稻田 N_2O 排放量下降 51%^[17] 等均与本研究结果一致, 这也可以从侧面解释土壤中全氮储量增加的原因. 这可能是由于生物炭具有多孔和低密度的特性, 施用后使得土壤容重降低^[27], 且能改善土壤通气状况, 降低厌氧程度^[28], 加上生物炭的高 C/N 比, 抑制了氮素微生物的反硝化作用从而减少 NO_x 的形成和排放^[7].

生物炭添加和灌水量减少 N_2O 排放和反硝化损失的机理可能与其影响土壤氮素在土壤中的再分布有关, 如高量生物炭的添加, 可明显降低土壤无机氮含量. 这一是由于生物炭的输入提高了土壤的阳离子交换量, 加上其具有较大的比表面积, 因而可吸附更多土壤中容易导致 N_2O 排放的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[29] 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[30]; 另一方面是生物炭刺激了土壤硝化作用^[31], 从而降低了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, 从而减少 N_2O 的排放. 另外, 高灌溉条件下, 很多氮会淋洗掉, 因而降低了土壤剖面中的氮浓度, 从而降低反硝化速率.

由图 2 中可知, N_2O 排放量、 D_N 与土壤无机氮含量之间均呈显著正相关关系. 可以得到, 生物炭的添加和灌溉量的增大减少了番茄地土壤中无机氮的含量, 这与文献[32, 33] 等指出的生物炭施用后土壤无机氮浓度降低的研究结果一致, 故而减少了土壤氮素的反硝化损失和 N_2O 排放量, 从这点来讲番茄菜地中添加生物炭对节能减排有一定的意义. 此外, 有研究表明, 生物炭施用后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋洗量显著下降^[34, 35], 这可能针对高灌溉量下引起的土壤氮素淋溶问题有一定的作用.

由表 1 和表 2 可得, 生物炭添加量、灌溉量以及两者的交互作用对土壤无机氮含量和反硝化损失的影响均达到了显著水平 ($P < 0.05$), 对硝态氮的影响表现为灌溉量 > 生物炭添加量 > 两者交互作用, 对铵态氮的影响表现为生物炭添加量 > 灌溉量

> 两者交互作用, 这可能是由于加入土壤中的生物炭以吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主^[29], 而灌溉引起的土壤氮素淋溶又以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主要形式^[36], 因此灌溉量大于生物炭添加量对硝态氮的影响, 而生物炭添加量大于灌溉量对铵态氮的影响; 对反硝化损失的影响表现为灌溉量 > 生物炭添加量 > 两者交互作用.

本研究中不同量生物炭添加明显影响了 $\text{N}_2\text{O}/D_N$, 随着生物炭添加量的增加 $\text{N}_2\text{O}/D_N$ 比值反而逐渐减小, 这之前学者研究的结果一致. 如 Bauhus 等^[37] 指出有机物可以降低土壤中 O_2 的浓度, 刺激土壤微生物活性, 同时提供更多的电子供体, 最终可以降低反硝化产物中 $\text{N}_2\text{O}/D_N$ 比值^[38].

4 结论

(1) 本研究表明, 生物炭和灌溉量显著改变了土壤的理化性质, 从生物炭的添加效果来看, 与 B0 相比, 生物炭的添加能够提高土壤全碳、全氮、pH 值含量, 降低铵态氮、硝态氮含量, 相反的, 土壤各处理在相同生物炭添加量条件下土壤中全氮和全碳的含量随灌水量的增加而减少, 与 B0/W50% 相比, B25/W75% 和 B50/W100% 处理显著减少了反硝化损失量 ($P < 0.05$).

(2) 生物炭添加量和灌溉量的交互作用对土壤无机氮含量和反硝化损失的影响均达到显著水平 ($P < 0.05$), 且对硝态氮的影响表现为灌溉量 > 生物炭添加量 > 两者交互作用, 对铵态氮的影响表现为生物炭添加量 > 灌溉量 > 两者交互作用, 对反硝化损失的影响表现为灌溉量 > 生物炭添加量 > 两者交互作用.

(3) 反硝化损失量与土壤中硝态氮含量、 N_2O 排放量与土壤铵态氮含量间均呈正相关关系; D_N 、 N_2O 排放量与土壤有机碳 ($\text{CO}_2\text{-C}$) 矿化量也成正相关关系.

(4) 不同生物炭添加量和灌溉量处理后明显影响了 $\text{N}_2\text{O}/D_N$ ($P < 0.05$), 培养结束时, 各处理下的 N_2O 累积排放量/ D_N 累积排放量差异较大, 介于 0.31% ~ 1.88%.

参考文献:

- [1] Robertson G P. Nitrification and denitrification in humid tropical ecosystems: potential controls on nitrogen retention[J]. Special Publications Series of the British Ecological Society, 1989, (9): 55-69.
- [2] Robertson K, Klemetsson L. Assessment of denitrification in organogenic forest soil by regulating factors[J]. Plant and Soil, 1996, 178(1): 49-57.
- [3] Ryden J C. Denitrification loss from a grassland soil in the field

- receiving different rates of nitrogen as ammonium nitrate [J]. *Journal of Soil Science*, 1983, **34**(2): 355-365.
- [4] Xu G, Lv Y C, Sun J N, *et al.* Recent advances in biochar applications in agricultural soils: benefits and environmental implications[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2012, **40**(10): 1093-1098.
- [5] Lehmann J, Kern, D C, Glaser B, *et al.* Amazonian dark earths: origin, properties, management [M]. Netherlands: Springer, 2003.
- [6] Sohi S, Lopez-Capel E, Krull E, *et al.* Biochar, climate change and soil: a review to guide future research[J]. *Csiro Land and Water Science Report*, 2009, **5**(9): 17-31.
- [7] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-a review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, **11**(2): 395-419.
- [8] Demirbas A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, **72**(2): 243-248.
- [9] 李飞跃, 汪建飞. 生物炭对土壤 N_2O 排放特征影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(4): 1005-1009.
- [10] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(11): 2930-2934.
- [11] Singh B P, Hatton B J, Singh B, *et al.* Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(4): 1224-1235.
- [12] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 3488-3497.
- [13] 苏涛, 王朝辉, 李生秀. 黄土高原地区农田土壤的硝态氮残留及其生态效应[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(2): 411-414.
- [14] 陈效民, 吴华山, 孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1217-1222.
- [15] Singh B P, Hatton B J, Singh B, *et al.* Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(4): 1224-1235.
- [16] Klemetsson L, Svensson B H, Rosswall T. Relationships between soil moisture content and nitrous oxide production during nitrification and denitrification[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, **6**(2): 106-111.
- [17] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(4): 469-475.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Walter H M, Keeney D R, Fillery I R. Inhibition of nitrification by acetylene[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, **43**(1): 195-196.
- [20] 刘万里, 薛茜, 曹明芹, 等. 用 SPSS 实现完全随机设计多组比较秩和检验的多重比较[J]. *地方病通报*, 2007, **22**(2): 27-29.
- [21] Dong D, Feng Q B, McGrouther K, *et al.* Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 153-162.
- [22] 孙志高, 刘景双, 杨继松, 等. 三江平原典型小叶章湿地土壤硝化-反硝化作用与氧化亚氮排放[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(1): 185-192.
- [23] 李英臣, 宋长春, 刘德燕, 等. 不同氮输入梯度下草甸沼泽土反硝化损失和 N_2O 排放[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(9): 1103-1107.
- [24] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO_2 释放的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 93-99.
- [25] 陈威, 胡学玉, 陆海楠. 生物炭输入对土壤本体有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2300-2305.
- [26] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2012, **351**(1-2): 263-275.
- [27] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, *et al.* Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**(4): 591-596.
- [28] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. *Soil Research*, 2010, **48**(7): 526-530.
- [29] Gai X P, Wang H Y, Liu J, *et al.* Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate[J]. *PLoS One*, 2014, **9**(12): e113888.
- [30] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, *et al.* Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, **95**(3): 255-257.
- [31] Ulyett J, Sakrabani R, Kibblewhite M, *et al.* Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(1): 96-104.
- [32] Case S D C, McNamara N P, Reay D S, *et al.* The effect of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from a sandy loam soil-the role of soil aeration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **51**: 125-134.
- [33] Chen J H, Liu X Y, Zheng J W, *et al.* Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, **71**: 33-44.
- [34] Major J, Rondon M, Molina D, *et al.* Nutrient leaching in a Colombian savanna oxisol amended with biochar[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(4): 1076-1086.
- [35] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, *et al.* Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2013, **206**: 32-39.
- [36] 尹海峰, 焦加国, 孙震, 等. 不同水肥管理模式对太湖地区稻田土壤氮素渗漏淋溶的影响[J]. *土壤*, 2013, **45**(2): 199-206.
- [37] Bauhus J, Meyer A C, Brumme R. Effect of the inhibitors nitrapyrin and sodium chlorate on nitrification and N_2O formation in an acid forest soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **22**(4): 318-325.
- [38] Wolf I, Russow R. Different pathways of formation of N_2O , N_2 and NO in black earth soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(2): 229-239.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行