ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 38 卷 第 12 期
2017 年 12 月 15 日

目 次(卷终)

京津冀区域 $PM_{2.5}$ 污染相互输送特征 …… 王燕丽, 薛文博,雷宇,王金南,武卫玲(4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据"源""汇"景观的大气霾效应 …… 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆(4905)
基于多源数据的 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布预测与制图 …… 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 $PM_{2.5}$ 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 … 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉(4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 …… 张程,于兴娜,安俊琳,朱彬,林梦凡(4932)
菏泽市 $PM_{2.5}$ 碳组分季节变化特征 …… 刘泽珺,吴建会,张裕芬,梁丹妮,马咸,刘保双, 冯银厂,张勤勋(4943)
辽宁典型城市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 …… 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝(4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 …… 姚青, 刘子锐, 韩素芹,蔡子颖,刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思(4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 $PM_{2.5}$ 理化特征分析 …… 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 …… 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜(4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 …… 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远(4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 …… 董小芳, 杨华玮,张峦, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 …… 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷(5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 …… 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷(5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 …… 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静(5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 …… 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 职音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 …… 李艳利, 孙伟, 杨梓睿(5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应:以太湖乌溪港为例 …… 连慧姝, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影(5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 …… 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇(5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 …… 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思(5063)
北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险 …… 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅(5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 …… 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广(5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 …… 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪(5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 …… 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平(5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 …… 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励(5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 …… 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖(5116)
MIL-88A@ MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 …… 王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华(5124)
常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 …… 徐婷, 金艳青, 李勇(5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 …… 成雪君,王学江, 王浩,张志昊,赵建夫(5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 …… 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊(5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 …… 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良(5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 …… 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王骁静(5162)
游离氨(FA)对氨氧化过程氨逃逸影响试验 …… 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹(5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 …… 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾竞宇(5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 …… 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良(5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 …… 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽(5192)
活性污泥中硝化螺菌(*Nitrospira*)的富集及其动力学参数 …… 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博(5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 …… 张宁博, 李祥, 黄勇(5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 …… 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅(5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 …… 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军(5222)
长期暴露下纳米 TiO_2 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 …… 李慧婷, 崔福义(5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 …… 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟(5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 …… 张田, 许浩,茹淑华,苏德纯(5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 …… 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强(5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 …… 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振鸿, 薛罡, 高品(5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 …… 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞(5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 …… 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成(5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 …… 周雅, 毕春娟, 周枭潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一(5292)
基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 …… 高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒(5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发 …… 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊,邓泓(5308)
麦田 O_3 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 …… 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清(5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 …… 侯朋福, 薛利祥, 俞映倞, 薛利红, 范立慧, 杨林章(5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N_2O 排放的影响 …… 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼(5333)
成都平原不同类型沟渠 CO_2、CH_4 和 N_2O 排放通量特征及其影响因素 …… 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏(5344)
河流 CO_2 与 CH_4 排放研究进展 …… 王晓锋,袁兴中,陈槐,何奕忻,罗珍,刘恋,何宗苡(5352)
《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 …… (5367)
《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土N_2O排放的影响

石玉龙[1,2], 刘杏认[1*], 高佩玲[3*], 张晴雯[1], 张爱平[1], 杨正礼[1]
(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 3. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255000)

摘要: 基于山东滨州地区冬小麦-夏玉米轮作大田试验, 探究了施用生物炭和有机肥对夏玉米季土壤氧化亚氮(N_2O)排放的影响, 为盐碱土壤N_2O增汇减排提供理论依据. 试验按照不同处理氮、磷、钾含量相同原则, 设置对照 CK[N: 0.2 t·(hm²·a)⁻¹, P_2O_5: 0.12 t·(hm²·a)⁻¹, K_2O: 0.2 t·(hm²·a)⁻¹]、C1[5 t·(hm²·a)⁻¹生物炭]、C2[10 t·(hm²·a)⁻¹生物炭]、C3[20 t·(hm²·a)⁻¹生物炭]、M1[7.5 t·(hm²·a)⁻¹有机肥]、M2[10 t·(hm²·a)⁻¹有机肥]这6个处理. 结果表明, 施加生物炭和有机肥对土壤N_2O排放影响趋势基本一致, 排放高峰均出现在施肥(基肥和追肥)后, 累积排放量占整个生育期排放量的近一半; 与 CK 相比, C1、C2 分别降低N_2O排放的 45.3%、31.6%, 而 C3、M1、M2 分别增加了 17.3%、37.4%、27.6%. 施加生物炭和有机肥均会对土壤N_2O排放产生影响, 施加生物炭可以降低N_2O排放, 而施加有机肥则促进了N_2O排放. 因此, 生物炭对减少农田N_2O排放具有巨大潜力.

关键词: 氧化亚氮; 生物炭; 有机肥; 土壤 pH; 含水量; 硝态氮; 铵态氮
中图分类号: X820.6 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)12-5333-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201705035

Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N_2O Emission in the North China Plain

SHI Yu-long[1,2], LIU Xing-ren[1*], GAO Pei-ling[3*], ZHANG Qing-wen[1], ZHANG Ai-ping[1], YANG Zheng-li[1]
(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Agricutural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Based on the winter wheat-summer maize rotation field experiment, the effects of biochar and organic fertilizer on saline-alkali soil N_2O emissions in the summer maize season were studied in Binzhou in the Shandong Province to provide a theoretical basis for reducing N_2O emissions from saline-alkali soil. The experiment includes six treatments with three replications: CK [N: 0.2 t·(hm²·a)⁻¹, P_2O_5: 0.12 t·(hm²·a)⁻¹, K_2O: 0.2 t·(hm²·a)⁻¹], C1 [5 t·(hm²·a)⁻¹ biochar], C2 [10 t·(hm²·a)⁻¹ biochar], C3 [20 t·(hm²·a)⁻¹ biochar], M1 [7.5 t·(hm²·a)⁻¹ organic fertilizer], and M2 [10 t·(hm²·a)⁻¹ organic fertilizer]. The same nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer was applied for each treatment. The results showed that the dynamic trend of the soil N_2O fluxes among different treatments were similar. The peak N_2O emissions occurred after fertilization (base fertilizer and topdressing). The N_2O cumulative emission fluxes accounted for nearly half of the emissions during the whole growth period, and the N_2O emissions of the C1, C2, and C3 treatments were lower than that of CK after fertilization. Compared with CK, the N_2O cumulative emissions from C1 and C2 were reduced by 45.3% and 31.6%, respectively, but C3, M1, and M2 increased by 17.3%, 37.4%, and 27.6%, respectively. Biochar and organic fertilizer both affected N_2O emission fluxes. Applying biochar can reduce N_2O emissions, while organic fertilizer can increase N_2O emissions. In summary, biochar has a great advantage in reducing N_2O emissions in the farmland.

Key words: N_2O; biochar; organic fertilizer; pH; soil moisture content; NO_3^--N; NH_4^+-N

氧化亚氮(N_2O)是主要的温室气体之一, 其对全球气候变暖的贡献约占所有温室气体的7.9%[1], N_2O的分子增温潜势是二氧化碳(CO_2)的298倍[2]. 农业活动是N_2O的重要来源[3], 农业生产中所导致的N_2O排放量约占人类活动引起N_2O排放量的84%[4], 是土壤氮素重要的损失途径[5]. 农田大量氮肥输入促进土壤中硝化和反硝化反应, 释放大量N_2O[6]. 土壤中N_2O主要产生于土壤的硝化和反硝化作用[7], 土壤硝化作用产生N_2O有两种途径, 一个是氨氧化阶段, 氨被氧化成亚硝酸的同时产生副产物N_2O, 另一个是亚硝酸氧化为硝酸的过程中, 在低氧条件下发生歧化反应而产生N_2O[8].

收稿日期: 2017-05-04; **修订日期**: 2017-06-09
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-007); 国家自然科学基金项目(41773090, 31300375); 中央公益型科研院所基本科研业务费专项(BSRF201505)
作者简介: 石玉龙(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业生态系统碳氮循环, E-mail: shiyulong1123@126.com
* 通信作者, E-mail: liuxr1976@126.com; gaoplxj@163.com

反硝化作用是在无氧条件下将 NO_3^- 还原成 N_2 返回到大气氮库，在此过程中会生成中间产物 N_2O[9]. 现有研究表明，硝化和反硝化作用不仅受土壤温度、pH、含水量的影响，还受铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)两种反应底物的限制[10].

生物炭是有机物料在低氧条件下经高温热解得到的一种富碳固态物质[11]. 生物炭具有很高的稳定性，本身呈碱性，较大碳氮比[12]，空隙发达，表面积巨大[13]，并且还具有官能团丰富等特点[14]，可作为土壤改良剂而改变土壤理化性质，进而影响土壤氮素转化[15]. 研究表明，土壤中添加生物炭可以影响N_2O的排放[16]，由于所用材料与方法的不同，尚未得出一致结论. 基于室内试验，程效义等[17]在施用氮肥的基础上增施 20 $t\cdot hm^{-2}$ 和 40 $t\cdot hm^{-2}$的生物炭，发现添加生物炭处理均可显著减少N_2O排放. Case 等[18]认为向沙质土壤中添加生物炭可显著降低N_2O累积排放量，同时还发现施加生物炭可增加土壤NH_4^+-N固定，减少NO_3^--N，降低反硝化作用. 而胡俊鹏等[19]认为在对燥红壤施加生物炭之处，生物炭可显著促进土壤硝化作用，导致土壤N_2O在短时间内集中排放. 有机肥是中国最为传统的农业肥料[20]，现如今大量无机氮肥代替有机肥料，导致土壤N_2O的大量排放[21]. 农田施加有机肥能够增加土壤有机质含量，改变氮素的输入形态，为微生物活动提供了碳源和氮源，改变土壤C/N，通过影响微生物活动来影响硝化和反硝化作用，进而影响N_2O的排放[22, 23]. 有学者认为，有机无机配施条件下，有机肥能够持续改善土壤NH_4^+-N供给而促进N_2O排放[24]；而有研究则表明，有机无机配施或单施有机肥能够降低土壤N_2O的排放[25]. 有机肥对土壤N_2O排放的影响目前还未有一致结论.

盐碱地是我国重要的耕地后备资源[26]，但生产力低，土壤理化性质恶劣，还会引发诸多环境问题[27]. 生物炭和有机肥均可作为土壤改良剂，改变土壤理化性质，对N_2O的释放产生一定的影响. 以往研究大多集中在生物炭或有机无机配施对土壤N_2O排放的影响，并且试验多设置在南方稻田或酸性土壤，而针对华北平原盐碱地土壤中生物炭和有机肥对N_2O排放影响的对比研究尚未见报道. 因此，本文以华北平原冬小麦-夏玉米轮作系统为研究对象，探讨了生物炭和有机肥对盐碱地土壤N_2O排放通量的影响，通过寻求合理的施肥方式，以期为土壤氮循环、农田增汇减排、保护农业环境提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山东省滨州市滨城区滨北镇中裕生态产业园进行，该地区属于温带大陆性季风气候，多年平均气温 12.7℃，平均地面温度 14.7℃，平均日照时数2 632.0 h，年平均降水量 564.8 mm，降水多集中在 7～8 月. 作物种植方式为冬小麦-夏玉米轮作，土壤类型为盐碱土，2016 年试验前土壤的基本理化性质见表 1.

表 1 试验前土壤的基本理化性质

Table 1 Basic properties of the soil before the experiment

样品	有机质/$g\cdot kg^{-1}$	全氮/%	全钾/%	速效磷/$mg\cdot kg^{-1}$	水解性氮/$mg\cdot kg^{-1}$	速效钾/$mg\cdot kg^{-1}$
0～20 cm	13.7	0.09	2.1	70.6	83.4	227.0
20～40 cm	10.7	0.06	2.1	22.0	46.5	146.9

1.2 试验材料

试验所用生物炭购于山东省山东铭宸环卫设备有限公司，为 800℃下以棉花秸秆为原料，经 72 h 不完全燃烧制成的黑色粉末. 生物炭密度为 0.297 $g\cdot cm^{-3}$，pH 值为 8.6，含碳量为 73%，含氮量为 0.9%，有效磷含量为 0.08%，有效钾含量为 1.6%.

试验所用有机肥为免深耕有机肥，黑色颗粒状，其中 $N + P_2O_5 + K_2O \geqslant 5\%$，有机质含量 > 45%.

1.3 试验设计

本试验主要研究生物炭和有机肥对玉米季土壤N_2O排放的影响，试验共设置 6 个处理，每个处理 3 个重复，各处理均等量施用 N 200 $kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$，$P_2O_5$ 120 $kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$，$K_2O$ 200 $kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$，不足部分由尿素、磷酸二铵和硫酸钾等无机肥补充到等量养分. 生物炭、有机肥、磷肥、钾肥作为基肥一次性施入，氮肥中 1/3 尿素作为基肥，2/3 尿素追肥. 每个小区面积为 14 m × 10 m = 140 m^2. 试验设置对照 CK[N:200 $kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$，$P_2O_5$:120 $kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$，$K_2O$:200 $kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$]、C1[5 $t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$生物炭]、C2[10 $t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$生物炭]、C3[20 $t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$生物炭]、M1[7.5

t·(hm^2·a)$^{-1}$有机肥]、M2[10 t·(hm^2·a)$^{-1}$有机肥]这 6 个处理.

生物炭、有机肥及基肥尿素、磷酸二胺、硫酸钾由人工均匀撒施，小区旋耕 15 cm. 夏玉米于 2016 年 6 月 30 日播种，大田无灌溉设施，靠自然降雨. 因雨量充沛，趁阴雨天气于 7 月 28 日追肥一次，其余管理措施如除草、病虫防治等与当地农田管理方式一致，并于 10 月 11 日收获.

1.4　样品采集及测定

1.4.1　N_2O及土样采集与处理

利用静态暗箱进行气体采集，静态暗箱分为采样箱(50 cm×50 cm×50 cm)和底座，由不锈钢板制成. 箱体外包裹有泡沫保温层，内置温度感应器，空气搅拌风扇. 底座上部有密封水槽，保证在抽气过程中形成封闭空间. 采样点定于玉米垄间，于播种后随机确定，作为整个玉米季的固定气体采样点，每个处理 3 个重复.

气体采集时间为 2016 年 6 月 30 日～2016 年 10 月 2 日，每周采样一次，遇到雨天略做调整，7 月 28 日追肥，追肥前采样一次，追肥后连续采样 3 d，每天采样一次. 每次采集气样在上午 09:00～11:00，采样时间为 40 min，每 10 min 采集一次，使用带三通阀的针管将气样注入真空气袋.

每次采集完气体之后进行土样采集，利用土钻采集 0～20 cm 和 20～40 cm 土层土样，过 2 mm 筛，一部分鲜土用于测定含水量、NH_4^+-N和NO_3^--N含量，另一部分土样进行自然风干，用于测定土壤 pH.

1.4.2　测定方法

N_2O排放通量：用气相色谱仪(7890A)测定N_2O峰面积，N_2O检测器为 ECD(电子捕获检测器)，分离柱内填充料为 80～100 目 PorpakQ，载气为高纯氮气，尾吹气为 $ArCH_4$(Ar90%，$CH_4$10%)，尾吹气流量为 2 mL·min^{-1}. 检测器、柱温分别是 330℃和 60℃. 利用每组 4 个样品的气体峰面积与采样时间的回归斜率，求得N_2O排放通量. 计算公式：

$$F = \rho \times h \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中，F 为N_2O排放通量，μg·(m^2·h)$^{-1}$；ρ 为标准状态下N_2O气体密度，为 1.977 g·L^{-1}；h 为箱高，m；dc/dt 为采样箱内N_2O浓度变化率，μg·h^{-1}；T 为采样箱内的平均温度(℃).

N_2O累积排放量计算公式：

$$M = \sum \frac{(F_{i+1} + F_i)}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中：M 为土壤N_2O累积排放量，μg·m^{-2}；F 为N_2O排放通量，μg·(m^2·h)$^{-1}$；i 为采样次数；$t_{i+1} - t_i$ 为采样间隔天数.

pH 值：用 pH 计测定. 将过 2 mm 筛的自然风干土样称取 10 g 置于 50 mL 烧杯中，加入 25 mL 蒸馏水. 将容器密封后，用搅拌器搅拌 5 min，静置 1 h，然后用 pH 计测定.

土壤含水量：用烘干法[28]. 用精确度为 0.01 kg 的分析天平准确称取铝盒质量，然后称取 10～20 g 过 2 mm 筛的新鲜土样置于铝盒内称重. 将样品放入烘箱，在 105℃下烘干 12 h，取出土样冷却至室温，立即称重.

NH_4^+-N、NO_3^--N 含量：利用 $CaCl_2$ 浸提，采用 AA3 流动分析仪测定[29]. 称取 10 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤，置于 100 mL 塑料瓶中，加入 50 mL 0.01 mol·L^{-1}的 $CaCl_2$ 溶液，振荡 1 h，过滤，滤液冷冻保存. 测定前先解冻，然后用 AA3 流动分析仪测定.

1.5　数据分析

利用 Microsoft Office Excel 2003 进行数据整理，在 Origin 8.5 中进行绘图，在 SPSS 19.0 中进行数据分析，采用单因素方差分析和 LSD 法比较不同处理间N_2O排放量和累积排放量的差异，利用 Pearson 相关系数检验判断N_2O排放量与影响因子之间的相关性及显著性水平. 所有结果数据均以平均值±标准差的形式表达.

2　结果与分析

2.1　不同处理土壤N_2O通量的变化

由图 1 可见，整个玉米季不同处理N_2O排放通量变化趋势基本一致，均表现为先降低，后升高，再降低的趋势，前期变化幅度较大，后期基本保持在相对较低的排放水平. 5 cm 土层温度和 10 cm 土层温度变化趋势与N_2O变化较为一致，但总体波动范围在 10℃左右，但仅有 CK 与 20～40 cm 土层温度存在显著正相关关系. 整个玉米生育期中，各处理N_2O共出现 2 次排放峰，分别在播种后(6 月 30 日)、追肥后第 2 d(7 月 30 日). 播种后N_2O排放剧烈，其大小顺序为 M1 > M2 > C2 > CK > C3 > C1，M1、M2、C2、C1 与 CK 之间存在显著性差异，C3 与 CK 之间差异性不明显，但有机肥处理N_2O排放通量明显高于生物炭处理. 之后N_2O排放通量迅速减少，追肥当天(7 月 28 日)开始，不同处理N_2O排

放通量迅速上升，这与地温变化一致，并于 7 月 30 日出现峰值；与 CK 相比，C1、C2 分别减少 44.59% 和 45.16%，而 M1、M2 排放通量显著高于 CK，分别增加 23.54%、71.22%，C3 处理 N_2O 排放通量低于对照，但无明显差异. 8 月 9 ~ 16 日，生物炭和有机肥处理均低于 CK，且差异性显著. 播种 52 d 后不同处理(除个别处理)均处于较稳定的低排放水平，C2、M2 和 C3、M2 分别于 8 月 22 日和 9 月 17 日再次出现峰值，而 C1 和 C2 分别在 9 月 10 日和 9 月 17 日出现负值，且均低于 CK.

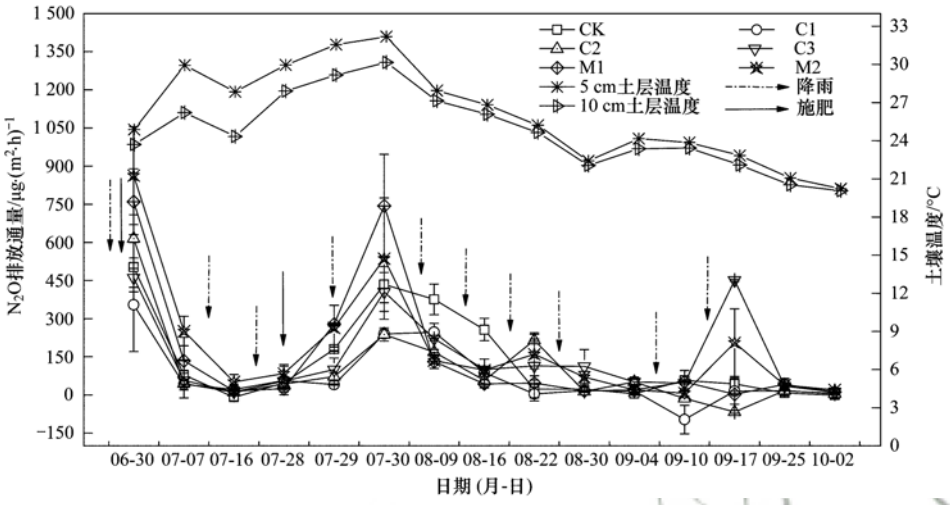
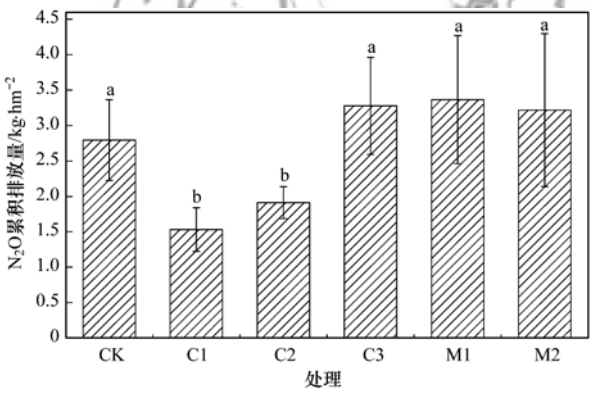


图 1 不同处理土壤 N_2O 排放变化

Fig. 1 Variation of soil N_2O emission flux with different treatments

总的来说，CK、C1、C2、C3、M1、M2 在追肥后 7 d 内累积排放量分别占整个生育期累积排放量的 37.11%、42.39%、43.63%、26.57%、48.16%、39.53%. 各处理在不同生育期对 N_2O 排放的影响不同，N_2O 累积排放量(图 2)大小顺序为：M1 > M2 > C3 > CK > C2 > C1；与 CK 相比，C1、C2 累积排放量分别降低 45.25%、31.56%，且存在显著性差异；C3、M1、M2 分别增加 17.33%、37.35%、27.57%，但无明显差异. 说明施加生物炭能够降低土壤 N_2O 的排放，但随生物炭施用量的增加，N_2O 累积排放量也会随之增加，C3 则增加土壤 N_2O 的排放. 同样，施加有机肥也增加了 N_2O 的排放，但 N_2O 累积排放量未随有机肥的增加而增加，说明合理施用有机肥仍然具有降低土壤 N_2O 排放的潜力.



不同小写字母表示 $P < 0.05$ 差异显著性水平

图 2 不同处理 N_2O 累积排放量

Fig. 2 N_2O cumulative emission flux with different treatments

2.2 不同处理土壤 pH、含水量的变化

由图 3 可知，整个玉米生育期不同处理土壤 pH 值的变化趋势基本一致. 两层土壤中，生物炭处理和有机肥处理 pH 值均低于对照处理. 0 ~ 20 cm 土层中，pH 值变化范围在 7.20 ~ 7.72 之间，总体表现为 CK > C1 > C2 > C3 > M1 > M2，C3、M1、M2 与 CK 之间存在显著性差异，C1、C2、C3 显著高于 M2，同样 C1 显著高于 M1. 20 ~ 40 cm 土层中，各处理 pH 值大小顺序为 CK > C2 > C1 > C3 > M1 > M2，其值均在 7.25 ~ 7.84 之间. 各处理均显著低于对照处理，C1、C2、C3 于 M2 之间差异性显著，而 M1、M2 之间无显著性差异. 通过相关性分析可知，两层土壤 pH 值间存在极显著相关关系($P < 0.01$)，并且 20 ~ 40 cm 土层 pH 值要高于 0 ~ 20 cm 土层 pH 值.

不同处理土壤含水量基本上表现为先增后减(图 4)，前期不同处理波动较小，进入 9 月后变化较大，0 ~ 20 cm 及 20 ~ 40 cm 土层含水量变化范围分别为 11.0% ~ 20.0% 和 10.2% ~ 20.1%. 追肥当日各处理出现较小峰值，进入 8 月之后各处理含

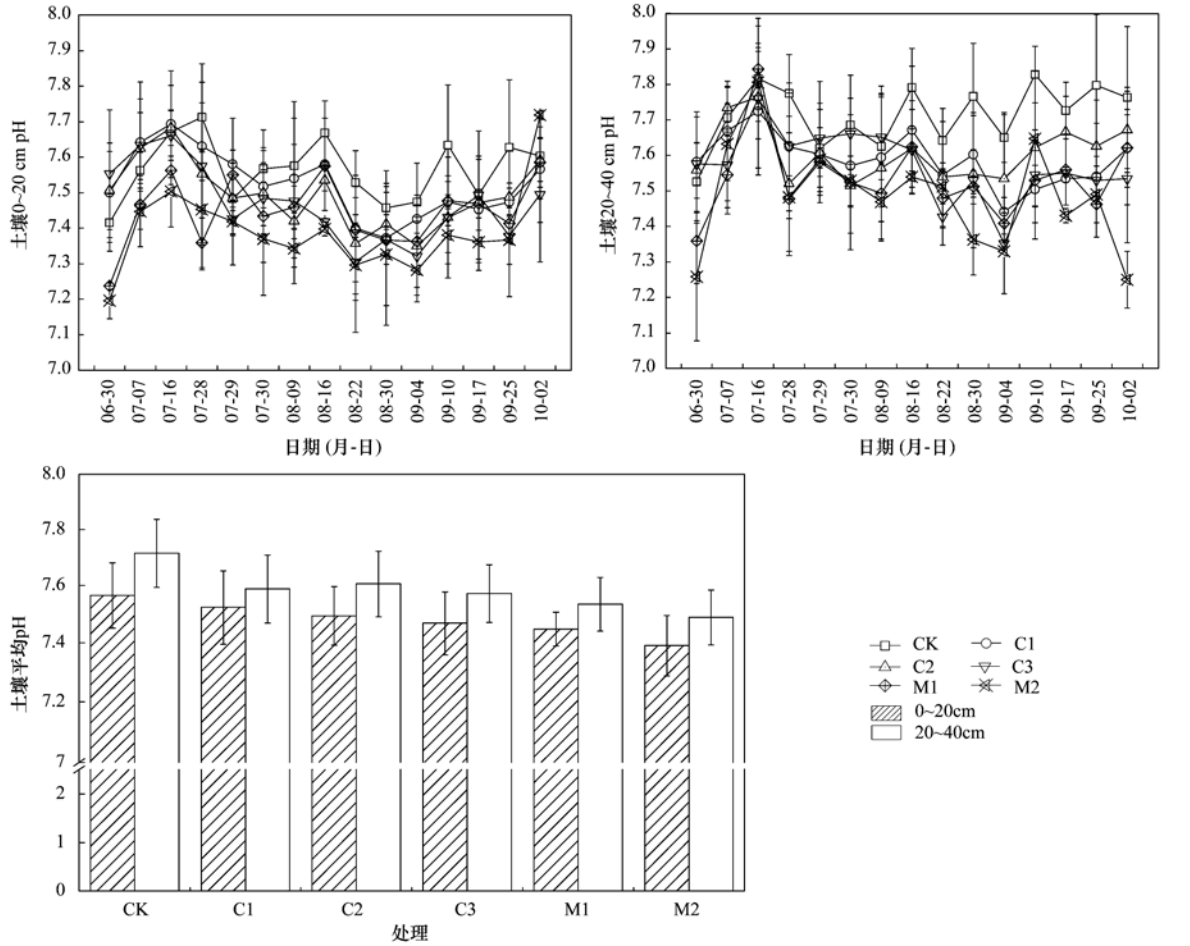


图 3　不同处理土壤 pH 的变化及平均 pH

Fig. 3　Variation and average of soil pH under different treatments

水量均处于较高水平，9 月各处理波动较大，但总体呈下降趋势. 0 ~ 20 cm 土层各处理平均含水量在 16.3% ~ 17.0%，与 CK 相比 C1、C2 降低了土壤含水量，但 C3、M1、M2 均高于 CK，不同处理之间无显著性差异. 20 ~ 40 cm 土层各处理平均含水量在 16.2% ~ 17.5%，除 C2 外 C1、C3、M1、M2 均可降低土壤含水量，C1 与 CK 相比含水量降低 5.3%，具有显著性差异，其余处理差异性不明显；与有机肥处理相比，C2、C3 可提高土壤含水量且 C2 与 M2 之间差异性显著，C1 则降低土壤含水量，与 M1、M2 无明显差异. 施加生物炭量的不同对土壤含水量的影响不同，随着生物炭量的增加，土壤含水量随之先增大后减小；有机肥施加后均表现出降低土壤含水量，但降幅随有机肥施用量的增加而减小.

2.3　不同处理土壤NH_4^+-N含量变化

图 5 玉米生育期各处理中，不同土层NH_4^+-N含量变化趋势基本一致. 播种后(6 月 30 日)，生物炭处理并无较大波动，但有机肥处理均达最大值，M1、M2 处理NH_4^+-N含量达到最大值，0 ~ 20 cm 分别为 8.53 mg·kg^{-1}、6.95 mg·kg^{-1}，20 ~ 40 cm 分别为 3.85 mg·kg^{-1}、4.92 mg·kg^{-1}，均显著高于 CK 和生物炭处理($P < 0.05$). 随后，M1、M2 处理中NH_4^+-N含量迅速下降. 7 月 7 ~ 16 日，各处理NH_4^+-N含量均有所下降，且 C3 处理显著高于 CK ($P < 0.05$)，M2 仅在 20 ~ 40 cm 土层与 CK 存在显著性差异($P < 0.05$)，其余各处理与 CK 无显著差异. 不同处理在追肥(7 月 28 日)当天达到峰值，0 ~ 20 cm 土层，与 CK 相比 C2、C3、M2 处理均可降低NH_4^+-N含量，但无明显差异，M1 显著高于 CK、C2、C3、M2($P < 0.05$)；20 ~ 40 cm 土层，C1、C2 小于 CK，而 C3、M1、M2 高于 CK，各处理之间并无显著性差异，但之后NH_4^+-N含量迅速下降. 试验发现，追肥后 2 ~ 12 d，各处理NH_4^+-N含量均有升高趋势. 8 月 16 日开始两层土壤NH_4^+-N含量开始降低，8 月 22 日 20 ~ 40 cm 土层开始NH_4^+-N含量迅速下降，9 月 17 日出现较小波动，之后各处理

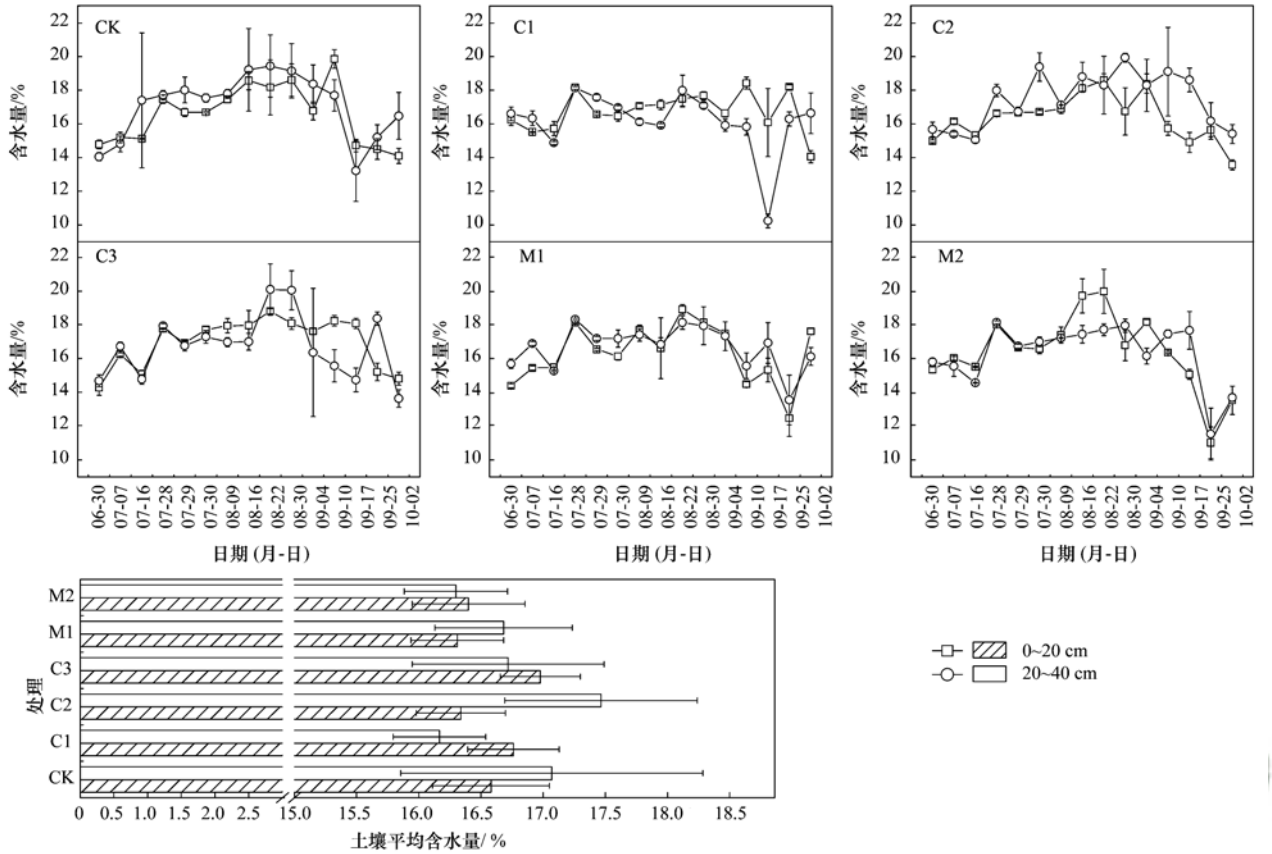


图 4 不同处理土壤含水量的变化及平均含水量

Fig. 4 Variation and average of soil moisture content with different treatments

NH_4^+-N含量均处于较低水平，直至玉米收获. 总的来说，0～20 cm 土层NH_4^+-N含量与 20～40 cm 土层并无明显差异. 与 CK 相比，施加生物炭和有机肥均可增加土壤 0～20 cm 土层NH_4^+-N含量，各处理表现为 M1 > M2 > C3 > C1 > C2 > CK，M1 显著高于 CK、C1、C2. 20～40 cm 土层 C1、C2 可降低NH_4^+-N含量，C3、M1、M2 与 0～20 cm 土层一致，可增加NH_4^+-N含量，各处理大小顺序为 M1 > M2 > C3 > C1 > CK > C2，且两层土壤中有机肥处理均高于生物炭处理.

2.4 不同处理土壤NO_3^--N含量变化

由图 6 可见，整个玉米生育期不同处理NO_3^--N含量变化趋势基本一致. 生物炭处理前期波动较小，后期变化幅度较大，有机肥在播种后及后期变化均较为剧烈. 总体上看，0～20 cm 土层NO_3^--N含量大于 20～40 cm 土层NO_3^--N含量，有机肥处理NO_3^--N含量显著大于生物炭处理($P<0.05$)，平均NO_3^--N含量表现为：0～20 cm 土层，M2 > M1 > C3 > C2 > C1 > CK；20～40 cm 土层，M2 > M1 > C1 > C3 > C2 > CK. 两层土壤中不同处理均显著高于 CK ($P<0.05$)，M1 与 M2 处理之间存在显著差异，而 C1、C2、C3 之间无显著差异. 说明施加生物炭和有机肥均能提高土壤NO_3^--N含量，且有机肥处理的提高幅度明显大于生物炭处理. 具体来看，不同时期提高幅度不尽相同，播种后生物炭处理并没有明显波动并且均低于 CK 的NO_3^--N含量，在 0～20 cm 土层，CK、M2 处理均达到最大值，分别为 46.50 mg·kg^{-1}、123.18 mg·kg^{-1}，且 M2 比 CK 高出 2.6 倍. 在 20～40 cm 土层中变化并不明显，仅有 M1 含量最高，达 70.11 mg·kg^{-1}，是 CK 的近 10 倍，生物炭处理略高于 CK. 7 月 28 日追肥当天 M1 处理NO_3^--N含量明显高于 CK 及生物炭处理，M2 处理仅提高了 0～20 cm 土层NO_3^--N含量，生物炭处理均高于 CK 但无显著差异. 追肥后各处理NO_3^--N含量均有所增加，于 7 月 29～30 日出现较小峰值. 随后 20 d 内，追肥对土壤两层土壤NO_3^--N含量影响不大，不同处理NO_3^--N含量逐渐减少，说明土壤中原有NO_3^--N正在被逐渐消耗. 8 月 16 日 C3 处理在 0～20 cm 土层NO_3^--N含量最先开始增加，与 CK 相比增加了 13.2 倍. 8 月 30 日开始，各处理NO_3^--N含量开始大幅度增加并且各处理波动较大，说明

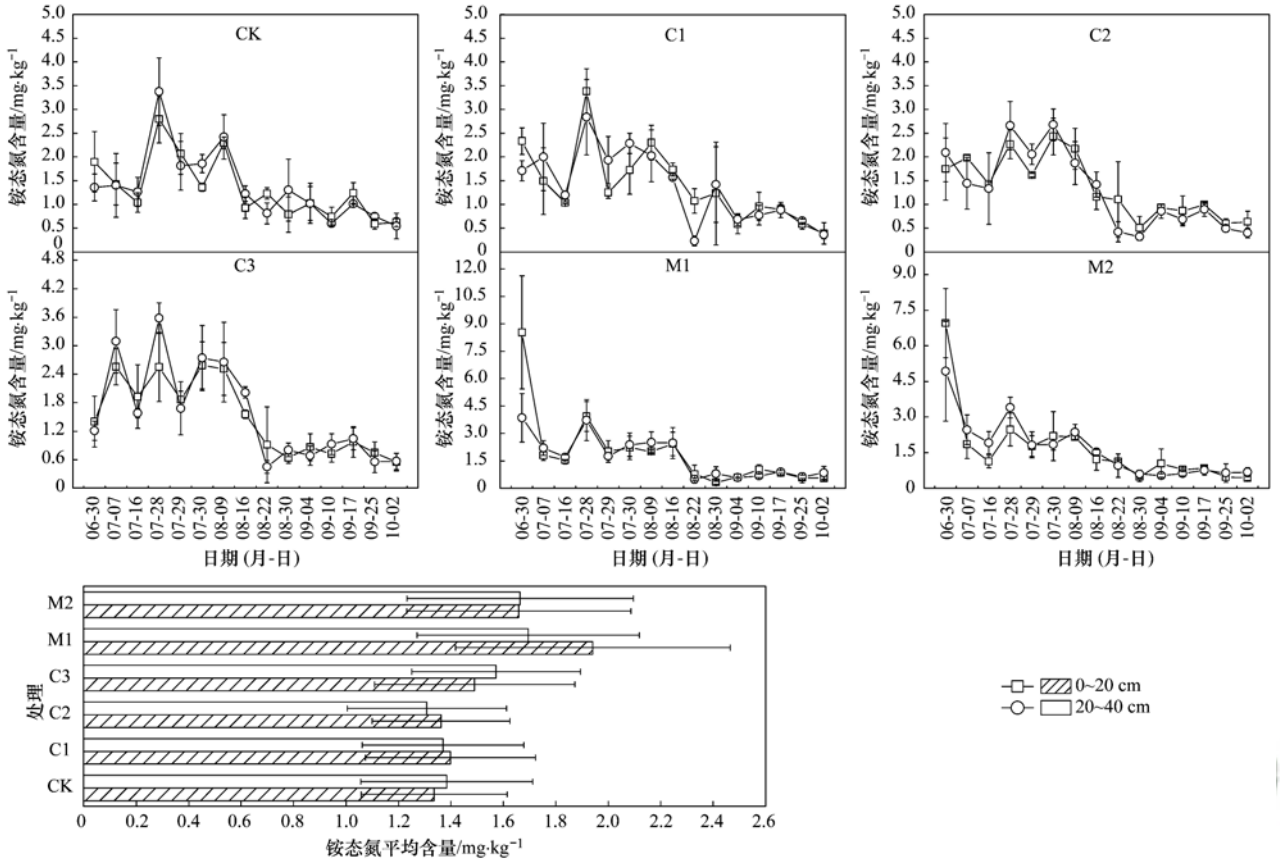


图 5　不同处理土壤NH_4^+-N含量变化及平均NH_4^+-N含量

Fig. 5　Variation and average of soil NH_4^+-N content with different treatments

NH_4^+-N开始大量转化为NO_3^--N. 生物炭和 M1 处理在迅速增加后缓慢降低，但 M2 一直处于较高水平，直至玉米收获. 整体上说，0 ~ 20 cm 土层NO_3^--N含量大于 20 ~ 40 cm 土层. 0 ~ 20 cm 土层中，与 CK 相比，C1、C2、C3、M1、M2 分别提高了 43.8%、68.7%（$P<0.05$）、74.5%（$P<0.05$）、123.4%（$P<0.05$）、243.3%（$P<0.05$），生物炭处理间无显著性差异，M1、M2 处理之间差异显著（$P<0.05$）. 20 ~ 40 cm 土层，C1、C2、C3、M1、M2 分别高于 CK 91.9%、65.7%、91.9%、174.3%、231.1%，且存在显著差异. 生物炭处理间差异均未达到显著性水平（$P>0.05$）.

2.5　玉米季N_2O排放通量与土壤 pH、含水量、NH_4^+-N和NO_3^--N相关性分析

土壤N_2O排放通量与土壤 pH 值、含水量相关性分析见表 2，仅有 CK 处理中 20 ~ 40 cm 土层土壤 pH 与N_2O排放通量之间存在显著负相关关系，其余处理中N_2O排放通量与土壤 pH 之间均无显著相关关系. 不同处理N_2O排放通量与土壤含水量相关关系均不显著.

表 2　N_2O排放通量与土壤 pH、含水量、NH_4^+-N和NO_3^--N相关性[1)]

Table 2　Correlation analysis between soil pH, moisture content, NH_4^+-N, NO_3^--N, and N_2O emission flux

处理	CK		C1		C2		C3		M1		M2	
土层/cm	0 ~ 20	20 ~ 40	0 ~ 20	20 ~ 40	0 ~ 20	20 ~ 40	0 ~ 20	20 ~ 40	0 ~ 20	20 ~ 40	0 ~ 20	20 ~ 40
pH	−0.254	−0.611*	0.100	0.135	−0.123	−0.423	0.109	0.124	−0.429	−0.338	−0.477	−0.277
含水量	0.054	−0.018	−0.125	0.118	0.041	−0.141	0.047	−0.161	−0.192	−0.033	−0.015	0.124
NH_4^+-N	0.391**	0.281	0.487**	0.452**	0.369*	0.396**	0.124	0.080	0.734**	0.530**	0.788**	0.552**
NO_3^--N	0.322*	−0.132	−0.323*	−0.441**	−0.285	−0.207	−0.401**	−0.129	0.331*	0.390**	0.439**	0.032

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关；* 表示在 0.05 水平上显著相关

土壤N_2O排放通量与土壤NH_4^+-N、NO_3^--N含量相关性分析见表 2. 除 C3 处理外，其它各处理N_2O排放通量均与土壤NH_4^+-N呈显著正相关关系（$P<0.05$）. 在 0 ~ 20 cm 土层，CK、C1、M1、M2 中N_2O

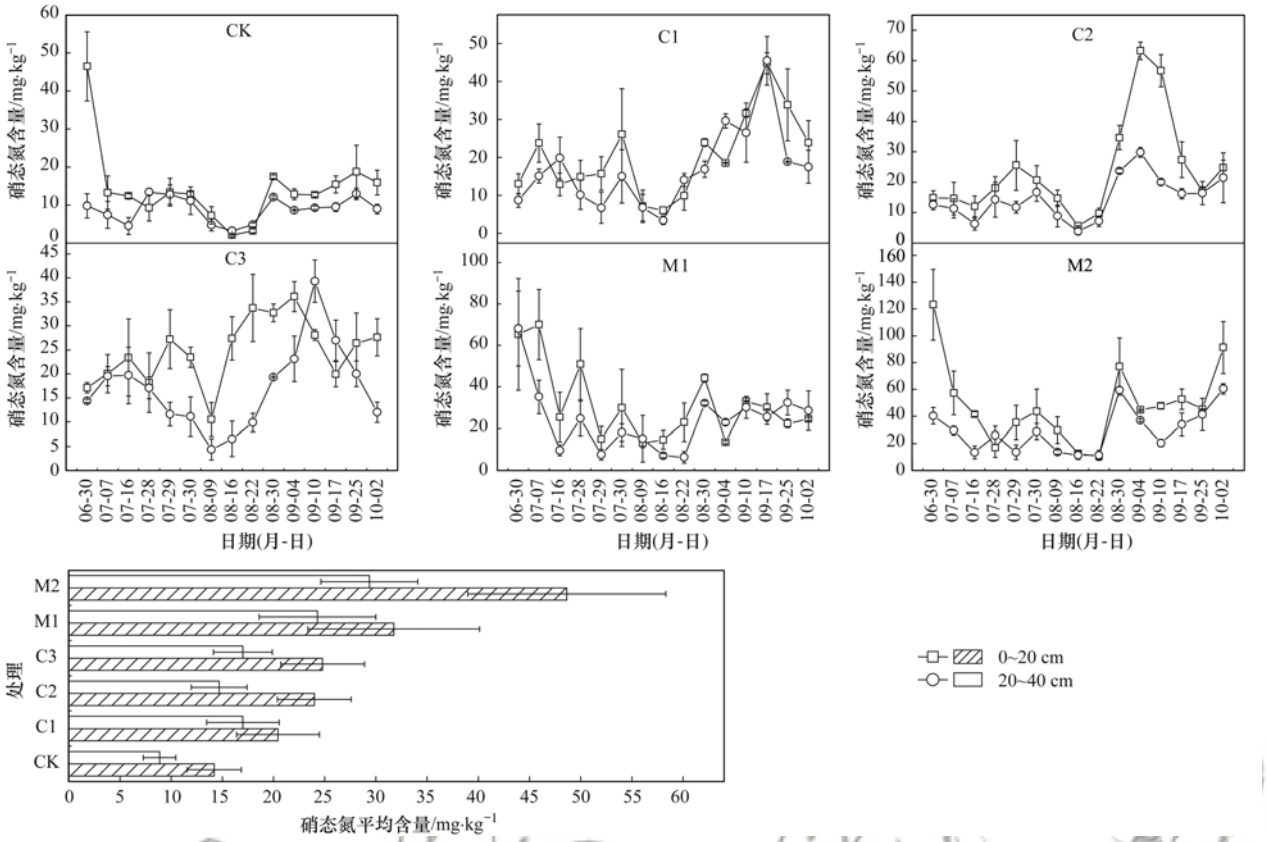


图 6 不同处理土壤NO_3^--N含量的变化

Fig. 6 Variation of soil NO_3^--N content with different treatments

排放与NH_4^+-N呈极显著的正相关关系($P<0.01$)，C2 处理中呈现显著正相关关系($P<0.05$)．20～40 cm 土层，C1、C2、M1、M2 处理中N_2O排放与NH_4^+-N呈现出极显著正相关关系($P<0.01$)，其余各处理相关关系均不显著．对于NO_3^--N来说，在 0～20 cm 土层，CK、M1、M2 处理中N_2O排放与土壤NO_3^--N表现出显著正相关关系($P<0.05$)，C1、C3 中N_2O与NO_3^--N呈现显著负相关关系($P<0.05$)．20～40 cm 土层，仅有 C1 处理中N_2O排放与土壤NO_3^--N表现出极显著负相关关系($P<0.01$)；M1 处理中，土壤N_2O排放通量与土壤NO_3^--N含量表现出极显著正相关关系($P<0.01$)．

3 讨论

土壤硝化和反硝化作用是土壤产生N_2O的主要途径[7]．大量研究表明，施肥后会促使土壤N_2O大量排放[19,24]．本试验研究结果显示，不同处理在播种和追肥后导致N_2O大量排放，说明对于盐碱地来说，施肥依然会促进土壤N_2O大量排放．施肥为土壤提供大量氮素，且施肥后均发生降水事件，此时土壤中具有较好的水肥条件，促进了氮素矿化和尿素的水解[30]，为土壤硝化和反硝化作用提供充足反应底物[24]，促进了土壤硝化作用和反硝化作用，有利于N_2O的排放[31]．He 等认为[32]，灌溉后之所以能促进土壤N_2O排放，可能是因为土壤干湿交替有利于刺激土壤反硝化作用而增加N_2O排放；李露等[33]的研究结果也表明，稻麦轮作系统中，小麦季追肥再加之降水后，出现明显的N_2O排放峰，与本试验研究结果一致．试验发现，施肥后一段时期内，盐碱土中NH_4^+-N逐渐积累，NO_3^--N逐渐较少，说明施肥后N_2O大量排放是由硝化和反硝化共同作用的结果．

大量研究结果表明，土壤中施加生物炭能够降低N_2O排放量[18,34,35]．本试验研究结果表明，施加生物炭水平在 5 $t·(hm^2·a)^{-1}$和 10 $t·(hm^2·a)^{-1}$时，能够降低盐碱土N_2O排放量．原因可能是生物炭通过改变硝化和反硝化作用底物数量来影响土壤N_2O的排放[36]．随着时间的推移土壤NH_4^+-N含量逐渐降低，NO_3^--N含量逐渐增加．较高的NH_4^+-N含量主要集中在玉米季前期，而NO_3^--N含量在玉米生育期后期保持在较高水平，这与张星等[29]的研究结果相吻合．NH_4^+-N是矿化作用的产物，同时也是硝化

作用的底物，施加生物炭能够促进土壤NH_4^+-N矿化和硝化作用[36]，有利于N_2O的释放，同时增加土壤NO_3^--N含量[37]，与陈晨等[38]的研究结果一致. 生物炭本身带有正电荷[29]，具有高孔隙度、比表面积大等特点，可以对土壤NO_3^--N产生吸附作用[37]，而减少反硝化细菌可利用的底物有效性，减弱反硝化作用，也可能是生物炭中含有某些成分，抑制NO_3^--N向N_2O转化酶的活性[39]，降低N_2O排放. 所以，生物炭虽然促进了土壤的硝化作用，但其通过降低NO_3^--N还原强度来减弱反硝化作用，总体表现出N_2O排放通量降低的结果. 但 Sánchez-García 等[16]的研究发现在典型钙质土中添加生物炭却使土壤N_2O排放量增加了 54%. 本研究中，施加生物炭 20 t·(hm^2·a)$^{-1}$促进了N_2O排放，但差异性并不显著. 试验发现 C3 处理中NH_4^+-N 含量高于 C1、C2，但差异性并不明显，说明 C3 中氮素矿化作用要强于 C1、C2，这有利于硝化作用的进行，原因可能是 C3 施炭量较大，且生物炭具有较高的 C/N，促进了土壤氮素的矿化和硝化作用. 但 C3 中NO_3^--N含量与 C1、C2 并无明显差异，可能是生物炭多孔性结构可以为土壤微生物提供充足的繁殖空间，大量好氧微生物的繁殖导致土壤中出现厌氧条件[40]，从而促进了 C3 处理中的反硝化作用，增加N_2O排放，这与王月玲等[41]的研究结果一致. 因此，确定生物炭的合理施炭量对减少盐碱地N_2O排放具有重要意义.

值得注意的是，与对照相比，不同生物炭处理均显著降低了盐碱地土壤 pH，并随着生物炭施用量的增加而降低，这与生物炭能够提高土壤 pH 值并不一致，以往报告中多集中在生物炭对酸性土壤的改良研究，关于盐碱地的相关报道较少. 本研究中向盐碱土中添加生物炭降低了土壤 pH，原因可能有以下三个方面：一是盐碱土中含有大量的Ca^{2+}和Mg^{2+}，而这些金属阳离子会与生物炭表面羧基官能团中H^+发生置换，致使土壤 pH 降低[42]；二是生物炭使土壤大量NO_3^--N累积导致土壤 pH 值下降[40]；三是随着时间的推移生物炭表面氧化而产生酸性物质[43]，引起生物炭周围土壤 pH 降低. 张瑞[26]在生物炭对滨海盐碱地改良研究中发现，分别施加生物竹炭和复合生物炭均显著降低了土壤 pH，与本研究结果一致. 所以施用生物炭对滨海盐碱地土壤具有一定的改良作用.

本研究表明，施加有机肥能够促进盐碱地N_2O排放，与 Dambreville 等[44]在玉米季试验中施加有机肥引起N_2O排放高于施加无机氮处理的结果一致. 首先，有机肥的输入为土壤微生物提供充足氮源和碳源，土壤微生物大量繁殖，大量吸收分解有机氮源，增加土壤矿质氮含量[45]，为土壤硝化和反硝化作用提供充足底物，通过相关性分析发现 0 ~ 20 cm 土层中，NH_4^+-N和NO_3^--N含量与N_2O排放通量之间存在显著正相关关系；其次，土壤好氧微生物的大量生长繁殖，降低了土壤中氧气含量，为土壤反硝化菌提供了良好的厌氧环境，间接促进土壤N_2O的排放[37,46]；再次，N_2O的排放也会受到土壤 pH 的影响，当 pH 在 7.0 ~ 8.0 时有利于土壤反硝化作用[31]. 本试验中，土壤 pH 均在此范围内，有利于反硝化微生物的生长繁殖，从而促进反硝化作用，增加N_2O排放. 另外，M1 大于 M2 排放量，这与陈哲等[24]的研究结果一致，原因可能是在等氮条件下N_2O排放主要受外源碳的限制[47]，Huang 等[48]通过模拟试验发现，土壤N_2O排放通量与土壤碳氮比呈现出负相关关系，降低碳氮比时，N_2O排放量也随即增加；也可能是因为随着有机肥施用量的增加对土壤反硝化作用的促进作用更为彻底，更多的N_2O转化为N_2；还有可能与试验土壤环境不同有关. 继续增加有机肥施用量是否能够降低盐碱地N_2O排放仍需进一步研究.

4　结论

(1)玉米生育期内，不同处理N_2O排放通量的动态变化基本一致；排放高峰均出现在施肥(基肥和追肥)后，排放量占整个生育期排放量的近一半. 与 CK 相比，生物炭处理降低了追肥后N_2O排放量，且施加生物炭的土壤N_2O排放通量低于施加有机肥处理.

(2)施加生物炭能够降低盐碱地N_2O排放，但效果并未随施加生物炭量的增加而加强，与对照相比 C1、C2 分别降低N_2O排放 45.3%、31.6%，C3 则促进了N_2O排放，增幅为 17.3%.

(3)施加有机肥表现出促进土壤N_2O排放，与 CK 相比，M1、M2 处理分别增加了 37.4%、27.6%，并随有机肥用量的增加而减弱，施加有机肥仍具有减缓土壤N_2O排放的潜力.

(4)施加生物炭和有机肥均能降低土壤 pH，因此，生物炭和有机肥均具有改良盐碱地的潜力.

参考文献：

[1] Barker T, Bashmakov I, Bernstein L, *et al*. Contribution of

working group III to the fourth assessment report of the IPCC: technical summary[A]. In: Metz B, Davidson O R, Bosch P R, *et al* (Eds.). Climate Change 2007: Mitigation contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Chang[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 27-93.

[2] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. Nature Geoscience, 2009, **2**(9): 659-662.

[3] Yang S S, Lai C M, Chang H L, *et al*. Estimation of methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in Taiwan[J]. Renewable Energy, 2009, **34**(8): 1916-1922.

[4] Smith P, Martino D, Cai Z C, *et al*. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, **118**(1-4): 6-28.

[5] 范会, 姜姗姗, 魏荧, 等. 农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH_3 和N_2O)减排效果比较: 以夏玉米季为例[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2906-2913.
Fan H, Jiang S S, Wei Y, *et al*. Assessment of gaseous nitrogen (NH_3 and N_2O) mitigation after the application of a range of new nitrogen fertilizers in summer maize cultivation[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2906-2913.

[6] Sun B F, Zhao H, Lü Y Z, *et al*. The effects of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, **15**(2): 440-450.

[7] Harter J, Weigold P, El-Hadidi M, *et al*. Soil biochar amendment shapes the composition of N_2O-reducing microbial communities[J]. Science of the Total Environment, 2016, **562**: 379-390.

[8] Hooper A B, Vannelli T, Bergmann D J, *et al*. Enzymology of the oxidation of ammonia to nitrite by bacteria[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 1997, **71**(1-2): 59-67.

[9] Firestone M K, Firestone R B, Tiedje J M. Nitrous oxide from soil denitrification: factors controlling its biological production[J]. Science, 1980, **208**(4445): 749-751.

[10] Kremen A, Bear J, Shavit U, *et al*. Model demonstrating the potential for coupled nitrification denitrification in soil aggregates[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(11): 4180-4188.

[11] 张洪培. 生物炭对旱作农田N_2O排放及硝化作用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Zhang H P. Effects of biochar on N_2O emissions and soil nitrification in dryland farming ecosystem[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

[12] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, *et al*. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, **45**(8): 629-634.

[13] Ghani W A W A K, Mohd A, da Silva G, *et al*. Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: chemical and physical characterization[J]. Industrial Crops and Products, 2013, **44**: 18-24.

[14] Li X M, Shen Q R, Zhang D Q, *et al*. Functional groups determine biochar properties (pH and EC) as studied by two-dimensional ^{13}C NMR correlation spectroscopy[J]. PLoS One, 2013, **8**(6): e65949.

[15] 赵凤亮, 单颖, 刘玉学, 等. 不同生物炭类型及添加量对土壤碳氮转化的影响[J]. 热带作物学报, 2016, **37**(12): 2261-2267.
Zhao F L, Shan Y, Liu Y X, *et al*. Impacts of different biochar types and application rates on urea transformation in soils[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, **37**(12): 2261-2267.

[16] Sánchez-García M, Roig A, Sánchez-Monedero M A, *et al*. Biochar increases soil N_2O emissions produced by nitrification-mediated pathways[J]. Frontiers in Environmental Science, 2014, **2**: 25.

[17] 程效义, 刘晓琳, 孟军, 等. 生物炭对棕壤 NH_3 挥发、N_2O 排放及氮肥利用效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(4): 801-807.
Cheng X Y, Liu X L, Meng J, *et al*. Effects of biochar on NH_3 volatilization, N_2O emission and nitrogen fertilizer use efficiency in brown soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(4): 801-807.

[18] Case S D C, McNamara N P, Reay D S, *et al*. Biochar suppresses N_2O emissions while maintaining N availability in a sandy loam soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **81**: 178-185.

[19] 胡俊鹏, 潘凤娥, 王小淇, 等. 秸秆及生物炭添加对燥红壤N_2O排放的影响[J]. 热带作物学报, 2016, **37**(4): 784-789.
Hu J P, Pan F E, Wang X Q, *et al*. Effects of addition of both stalk and biochar on N_2O emission from torrid red soil[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, **37**(4): 784-789.

[20] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 土壤肥料, 2004, (5): 12-16.
Wang L G, Li W J, Qiu J J, *et al*. Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2004, (5): 12-16.

[21] Reay D S, Davidson E A, Smith K A, *et al*. Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. Nature Climate Change, 2012, **2**(6): 410-416.

[22] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(11): 2037-2045.

[23] Yang B, Xiong Z Q, Wang J Y, *et al*. Mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensities by substituting chemical nitrogen fertilizers with organic fertilization strategies in rice-wheat annual rotation systems in China: a 3-year field experiment[J]. Ecological Engineering, 2015, **81**: 289-297.

[24] 陈哲, 陈媛媛, 高霁, 等. 不同施肥措施对黄河上游灌区油葵田土壤N_2O排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(1): 129-139.
Chen Z, Chen Y Y, Gao J, *et al*. Effects of different fertilization measures on N_2O emission in oil sunflower field in irrigation area of upper Yellow River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(1): 129-139.

[25] 翟振, 王立刚, 李虎, 等. 有机无机肥料配施对春玉米农田N_2O排放及净温室效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(12): 2502-2510.
Zhai Z, Wang L G, Li H, *et al*. Nitrous oxide emissions and net greenhouse effect from spring-maize field as influenced by combined application of manure and inorganic fertilizer[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(12): 2502-

2510.

[26] 张瑞. 生物炭对滨海盐碱土理化特性和小白菜生长的影响研究[D]. 上海：上海交通大学，2015.
Zhang R. Effects of biochar on coastal saline soil physicochemical properties and pakchoi growth [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[27] 郑悦. 生物炭与秸秆还田对盐碱地水稻土壤理化形状及产量的影响[D]. 大庆：黑龙江八一农垦大学，2015.

[28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京：中国农业出版社，2000. 20-50.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 20-50.

[29] 张星，刘杏认，林国林，等. 生物炭和秸秆对华北农田表层土壤矿质氮和 pH 值的影响[J]. 中国农业气象，2016，**37**(2)：131-142.
Zhang X, Liu X R, Lin G L, *et al*. Effects of biochar and straw return on mineral nitrogen and pH of the surface soil in farmland of the North China Plain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, **37**(2): 131-142.

[30] 杨莉琳，裴冬，胡春胜，等. 水肥配合对太行山山前平原高产区土壤矿质氮分布及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2005，**11**(1)：1-7.
Yang L L, Pei D, Hu C S, *et al*. Effects of treatments with water and fertilization on nitrate leaching loss in the piedmont of Taihang mountain [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, **11**(1): 1-7.

[31] 赵长盛，胡承孝，孙学成，等. 温度和水分对华中地区菜地土壤氮素矿化的影响[J]. 中国生态农业学报，2012，**20**(7)：861-866.
Zhao C S, Hu C X, Sun X C, *et al*. Influence of temperature and moisture on nitrogen mineralization in vegetable fields of central China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(7): 861-866.

[32] He F F, Chen Q, Jiang R F, *et al*. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in Northern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, **77**(1): 1-14.

[33] 李露，周自强，潘晓健，等. 不同时期施用生物炭对稻田N_2O和CH_4排放的影响[J]. 土壤学报，2015，**52**(4)：839-848.
Li L, Zhou Z Q, Pan X J, *et al*. Effects of biochar on N_2O and CH_4 emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(4): 839-848.

[34] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, *et al*. Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, **11**(6): 930-939.

[35] Harter J, Krause H M, Schuettler S, *et al*. Linking N_2O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community[J]. The ISME Journal, 2014, **8**(3): 660-674.

[36] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, *et al*. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **55**: 20-27.

[37] Kameyama K, Miyamoto T, Shiono T, *et al*. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcaric dark red soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, **41**(4): 1131-1137.

[38] 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.

[39] 屈忠义，高利华，李昌见，等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J]. 农业机械学报，2016，**47**(12)：111-118.
Qu Z Y, Gao L H, Li C J, *et al*. Impacts of straw biochar on emission of greenhouse gas in maize field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, **47**(12): 111-118.

[40] Martin S L, Clarke M L, Othman M, *et al*. Biochar-mediated reductions in greenhouse gas emissions from soil amended with anaerobic digestates[J]. Biomass and Bioenergy, 2015, **79**: 39-49.

[41] 王月玲，耿增超，王强，等. 生物炭对塿土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学，2016，**37**(9)：3634-3641.
Wang Y L, Geng Z C, Wang Q, *et al*. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3634-3641.

[42] 夏阳. 生物炭对滨海盐碱植物生长及根际土壤环境的影响[D]. 青岛：中国海洋大学，2015.
Xia Y. Impact of biochar-rhizosphere system on plant growth by affecting soil nutrient availability and microbial community in coastal saline soil [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.

[43] Cayuela M L, Van Zwieten L, Singh B P, *et al*. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **191**: 5-16.

[44] Dambreville C, Morvan T, Germon J C. N_2O emission in maize-crops fertilized with pig slurry, matured pig manure or ammonium nitrate in Brittany[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, **123**(1-3): 201-210.

[45] 蔡艳，郝明德，臧逸飞，等. 不同轮作制下长期施肥旱地土壤微生物多样性特征[J]. 核农学报，2015，**29**(2)：344-350.
Cai Y, Hao M D, Zang Y F, *et al*. Effect of long-term fertilization on microbial diversity of black loessial soil based on 454 sequencing technology[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, **29**(2): 344-350.

[46] Smith K. The potential for feedback effects induced by global warming on emissions of nitrous oxide by soils [J]. Global Change Biology, 1997, **3**(4): 327-338.

[47] Chadwick D R, Pain B F, Brookman S K E. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(1): 277-287.

[48] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, *et al*. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(6): 973-981.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 12

Dec. 15, 2017

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of $PM_{2.5}$ in Jingjinji Region, 2015 ····· WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, *et al.* (4897)

Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks ····· XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, *et al.* (4905)

Space-Time Estimations and Mapping of $PM_{2.5}$ Fine Particulates Based on Multi-source Data ····· XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, *et al.* (4913)

Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of $PM_{2.5}$ in East China ····· YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, *et al.* (4924)

Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing ····· ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, *et al.* (4932)

Seasonal Variation of Carbon Fractions in $PM_{2.5}$ in Heze ····· LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, *et al.* (4943)

Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ in Selected Cities in Liaoning Province ····· ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, *et al.* (4951)

Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin ····· YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, *et al.* (4958)

Physico-chemical Characteristic Analysis of $PM_{2.5}$ in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming ····· WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, *et al.* (4968)

Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 ····· DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, *et al.* (4976)

Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus ····· LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, *et al.* (4983)

Influence of ENSO Events on the Hydrogen (δ^2H) and Oxygen ($\delta^{18}O$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai ····· DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, *et al.* (4991)

Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China ····· CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, *et al.* (5004)

Spatial and Temporal Variability of CO_2 Emissions from the Xin'anjiang Reservoir ····· YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, *et al.* (5012)

Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area ····· ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, *et al.* (5020)

Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir ····· CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, *et al.* (5032)

Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas: A Case in the Taizi River Basin ····· LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)

Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall: A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin ····· LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, *et al.* (5047)

Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain ····· MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, *et al.* (5056)

Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model ····· XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)

Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing ····· CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, *et al.* (5074)

Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen ····· LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, *et al.* (5081)

Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems ····· LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, *et al.* (5090)

Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter ····· LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, *et al.* (5097)

Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent ····· LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, *et al.* (5106)

Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water ····· GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, *et al.* (5116)

MIL-88A@ MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate ····· WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, *et al.* (5124)

Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature ····· XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)

Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolital ····· CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, *et al.* (5139)

Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes ····· MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, *et al.* (5146)

Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater ····· LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, *et al.* (5154)

Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater ····· ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (5162)

Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process ····· SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, *et al.* (5169)

Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an ····· KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, *et al.* (5174)

Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX ····· WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, *et al.* (5184)

Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF Systemand Evolution Properties of Microorganisms ····· YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, *et al.* (5192)

Enrichment of *Nitrospira* in Activated Sludge and Kinetic Characterization ····· YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, *et al.* (5201)

Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate ····· ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)

Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor ····· ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, *et al.* (5215)

Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitritation in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR ····· SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, *et al.* (5222)

Long-term Impacts of TiO_2 Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor ····· LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)

Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta ····· ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, *et al.* (5237)

Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers ····· ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, *et al.* (5247)

Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir ····· HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, *et al.* (5256)

Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai ····· GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, *et al.* (5262)

Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City ····· SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, *et al.* (5272)

Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area ····· YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, *et al.* (5282)

Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai ····· ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, *et al.* (5292)

Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants ····· GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, *et al.* (5299)

Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice ····· SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, *et al.* (5308)

Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield ····· ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, *et al.* (5315)

Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields ····· HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, *et al.* (5326)

Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N_2O Emission in the North China Plain ····· SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, *et al.* (5333)

Flux Characteristics of CO_2, CH_4, and N_2O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain ··· FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, *et al.* (5344)

Review of CO_2 and CH_4 Emissions from Rivers ····· WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, *et al.* (5352)