

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

不同地表条件下生物炭对土壤氨挥发的影响

邹娟, 胡学玉*, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬

(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘要: 为了探究生物炭对不同地表条件下土壤氨挥发的作用及其效应, 通过田间小区试验的方法, 探讨生物炭与作物种植覆盖双重影响下, 土壤氨的产生、土壤铵态氮含量、土壤脲酶活性的响应性变化. 试验设置了6个处理, 分别为CK+ (未施生物炭+种植作物)、BC0.5+ [施用生物炭 $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ + 种植作物]、BC4.5+ [施用生物炭 $4.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ + 种植作物]、CK- (未施生物炭+裸地)、BC0.5- [施用生物炭 $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ + 裸地]、BC4.5- [施用生物炭 $4.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ + 裸地]. 结果表明在作物种植条件下, 相对于CK+ 处理, BC4.5+、BC0.5+ 处理的土壤氨挥发随时间呈现先增加(前4 d内)后显著下降的态势, 降幅分别为9.95%~61.80%、7.97%~50.52% ($P < 0.05$); 但同期裸地条件下的BC4.5-、BC0.5- 处理的土壤氨挥发较CK- 处理则增加了40.02%~93.15%、28.09%~57.45% ($P < 0.05$). 在等量生物炭施用条件下, 作物种植土壤的氨挥发量明显低于裸地土壤, BC4.5+、BC0.5+ 较BC4.5-、BC0.5- 处理分别降低了27.10%~92.10%、13.17%~83.45% ($P < 0.05$), 但是CK+ 与CK- 处理间的土壤氨挥发量差异不显著. 上述结果说明作物种植覆盖地表对生物炭介导的土壤氨挥发具有一定的抑制效应. 作物种植条件下, BC4.5+、BC0.5+ 处理较CK+ 处理的土壤铵态氮和脲酶含量的最大增幅依次为69.25%、72.73%和93.61%、90.56% ($P < 0.05$), 但同期土壤氨挥发降低; 而裸地条件下, BC4.5-、BC0.5- 处理的土壤铵态氮和脲酶含量较CK- 呈下降趋势明显, 最大降幅依次为63.78%、95.70%和78.38%、92.64% ($P < 0.05$), 同时土壤氨的挥发量上升. 可见生物炭影响下的土壤氨挥发不仅与土壤铵态氮和脲酶含量的变化密切相关, 且作物种植覆盖地表的影响更为深刻.

关键词: 生物炭; 氨挥发; 铵态氮; 地表覆盖; 裸地

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0348-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706171

Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions

ZOU Juan, HU Xue-yu*, ZHANG Yang-yang, CHEN Yao-jun, WANG Xiang-qian, LIU Yang

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to explore the effect of biochar on the volatilization of ammonia in different surface soils, through the field test method, the responsiveness changes of ammonia volatilization, ammonium nitrogen, and urease were studied under the influence of biochar and crop cultivation. The study set six treatments: CK+, BC0.5+, and BC4.5+ (the biochar applied at 0, 0.5, 4.5 $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively, under the condition of crop cultivation), and CK-, BC0.5-, and BC4.5- (the biochar applied at 0, 0.5, 4.5 $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively, under the condition of bare land). The results showed that under the condition of crop cultivation, the ammonia volatilization of the BC4.5+ and BC0.5+ treatments increased in 4 days, then significantly decreased by 9.95%-61.80% and 7.97%-50.52% ($P < 0.05$), respectively, with respect to CK+. However, compared with CK-, the ammonia volatilization of the BC4.5- and BC0.5- treatments increased by 40.02%-93.15% and 28.09%-57.45% ($P < 0.05$), respectively. For the same amount of biochar application, the ammonia volatilization of the crop-planting soil was significantly lower than that of the bare land, and BC4.5+ and BC0.5+ declined by 27.10%-92.10% and 13.17%-83.45% ($P < 0.05$), respectively, compared with the BC4.5- and BC0.5-, and there was no significant difference between CK+ and CK-. The above results indicated that biochar-mediated soil ammonia volatilization was inhibited by the surface cover. Moreover, with respect to CK+, the maximum increase rates of the contents of ammonium nitrogen and urease in the BC4.5+ and BC0.5+ treatments were orderly at 69.25% and 72.73% and 93.61% and 90.56% ($P < 0.05$), but the soil ammonia volatilization decreased in the same period. The biggest decline of the soil NH_4^+ -N and urease content of BC4.5- and BC0.5- were 63.78% and 95.70% and 78.38% and 92.64% ($P < 0.05$), respectively. Simultaneously, the soil ammonia volatilization rose in the bare land compared with CK-. Therefore, the soil ammonia volatilization was inversely related to soil NH_4^+ -N and urease under the influence of biochar, and the effect of crop planting was more profound.

Key words: biochar; ammonia volatilization; ammonium nitrogen; land cover; bare land

收稿日期: 2017-06-16; 修订日期: 2017-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371485, 41071159); 湖北省自然科学基金重点项目(2014CFA116); 中央高校基本科研业务费专项(CUG170103)

作者简介: 邹娟(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: zoujuancy@126.com

* 通信作者, E-mail: huxueyu@cug.edu.cn

氨(NH_3)挥发是土壤生态系统氮素循环中最主要的氮损失途径之一,其结果不仅降低土壤氮素利用率,还会增加大气和水体环境负荷.我国农田氮肥损失中氨挥发约占11%,而在有利于氨挥发的条件下,氮肥的氨挥发损失率可高达40%~50%^[1].影响土壤氨挥发的因素众多,主要有土壤因素(土壤氮素水平、脲酶活性、土壤pH值、作物根际微域环境等)、农业措施^[2,3]和气候因素^[4,5]等,其根本在于影响了土壤的铵态氮变化及土壤对铵态氮(NH_4^+-N)和 NH_3 的吸附能力^[6].近年来的研究结果显示,生物炭因其具有发达的孔隙结构,较大的比表面积和阳离子交换量等特性,输入土壤后能够吸附 NH_3 ^[7],且通过提高土壤阳离子代换能力增强对铵离子(NH_4^+)的固持作用^[8],也会提高土壤的硝化速率^[9],对土壤中氮素的转化和损失途径具有显著影响^[10].

一项玉米种植的田间试验结果表明^[11],当生物炭用量分别为 $2.0\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $4.0\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 时,其土壤氨挥发量较未施生物炭处理的土壤分别降低24.07%、37.62%,且 NH_3 挥发量与土壤容重和 NH_4^+-N 含量呈极显著相关,这可能与生物炭对土壤颗粒组成及其吸附特性的改变有关^[12].然而,热裂解形成的生物炭pH通常偏高,施入土壤后短时间内即可显著提高土壤pH值,往往导致土壤氨挥发增加,在较高生物炭施加量时更为显著^[8,13].已经知道,土壤 NH_3 挥发是一个涉及土壤 NH_4^+-N 的产生及其在土壤水-气界面迁移转化

的复杂动力学过程,其间离不开土壤生物和土壤酶的作用.生物炭通过改变土壤理化及其生物学性状进而影响土壤氨的挥发,而土壤理化生性状的改变也会因地表条件等的不同而形成差异.本课题组前期的研究结果表明,种植作物条件下,因作物冠层结构的形成和发展,会显著削弱生物炭输入导致的地表反照率的降低效应,进而影响土壤碳循环和土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值^[14],同时也会影响土壤的 N_2O 释放^[15].那么同样条件下,土壤氮素损失的另一条途径——土壤 NH_3 挥发过程对不同地表条件下生物炭输入的响应性变化如何?对这一问题的探讨,有助于客观认识在生物炭与植被生长交叉作用下,大气雾、霾的贡献者之一 NH_3 产生的土壤过程以及土壤氮素的气态损失途径,也有助于客观评价热裂解生物炭对土壤氮素利用效率的影响.

1 材料与方法

1.1 田间试验地及供试生物炭概况

大田观测试验于2015年7月至10月进行.在湖北省武汉市洪山城郊农业区($30^\circ 31' 54''\text{N}$, $114^\circ 24' 09''\text{E}$)进行夏玉米种植,供试玉米品种为华糯五号甜糯玉米(江西省丰城市华裕种子有限公司提供).当地属亚热带季风气候,年均温 $15.8\sim 17.5^\circ\text{C}$,年降雨量1269 mm.供试地土壤为黄棕壤,质地为砂壤土.供试生物炭为 500°C 木质颗粒生物炭.耕层(0~20 cm)土壤和供试生物炭的基本理化性质如表1.

表1 耕层(0~20 cm)土壤和供试生物炭的基本理化性质

Table 1 Basic properties of the top soil and the biochar

项目	pH值	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	含水率/%	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
供试土壤	4.62	10.61	1.60	0.21	12.60	17.10	1.13
供试生物炭	8.60	566.00	6.20	0.96	13.80	—	—

1.2 试验设计

试验共设置6个处理:①CK+ (未施生物炭+种植作物);②BC0.5+ [施用生物炭 $0.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ +种植作物];③BC4.5+ [施用生物炭 $4.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ +种植作物];④CK- (未施生物炭+裸地);⑤BC0.5- [施用生物炭 $0.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ +裸地];⑥BC4.5- [施用生物炭 $4.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ +裸地].每个处理重复3次,总计18个小区,随机区组排列.每个小区 $1.80\text{ m}\times 1.25\text{ m}$,小区周围设置有1 m宽的保护行.玉米种植行距为40 cm,株距为30 cm,于2015年7月17日播

种,2015年9月28日收获.于种植前施用复合肥($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}$ 比例为15:15:15) $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤氨挥发监测

土壤氨挥发采用田间原位通气法^[16]测定.施肥、播种后,立即将氨气捕获装置轻放采样点位(作物种植小区的采样点均设置在作物行间)上,装置底部埋深5 cm.每个小区放1套装置,每套装置包括1个PVC管(内径15 cm,高20 cm),2层海绵(直径15 cm,厚4 cm)和1块正方形遮雨板(PVC材质,30 cm $\times$ 30 cm).海绵上均匀加入了20 mL磷

酸甘油(50 mL 磷酸加入 40 mL 丙三醇,定容至 1 L),放入 PVC 管装置内的上下两端.下层海绵距 PVC 管底端 10 cm,距地面 5 cm,用于捕获土壤挥发的氨气;上层海绵上表面与 PVC 管顶端相平,用于消除外界空气中的氨气对下层海绵的干扰.玉米发育期内,前期每隔 2~3 d 采集一次下层海绵样品,后期氨挥发量减少,每隔 7~15 d 采集一次.海绵中捕获的 NH_3 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提,再用纳氏试剂分光光度法测定浸提液氨氮的含量,其中检测限为 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 土壤 NH_3 挥发速率计算公式^[17]如下:

$$f = \frac{c \cdot V}{A \cdot t} \times 10^{-3}$$

式中, f 为氨气挥发速率, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; c 为浸提液中氨氮的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为浸提液的体积, mL; A 为吸收氨气的海绵的有效面积, m^2 ; t 为采样时间, h.

1.3.2 土壤理化指标测定

土壤样品采样周期为半个月一次,在每个小区内采用“S”形取样法,选择 5 个样点挖取 0~20 cm 土壤样品,充分混合.采集的土壤样品带回放入实验室的冰箱(4℃)中,一部分土样直接用于测定土壤铵态氮含量,另一部分土样风干后用于测定土壤脲酶活性、pH 值等.

土壤铵态氮采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提-靛酚蓝比色法^[18]测定;土壤 pH 采用 PHS-3D pH 计(上海精科仪器)测定;土壤脲酶活性采用次氯酸钠-苯酚比色法^[19]测定.

1.4 数据处理与分析

测试数据采用 Excel 2003 和 SPSS 22.0 进行分析,计算其标准偏差,组间采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,显著性水平设置为 0.05.作图软件选用 Origin 9.2.

2 结果与分析

2.1 生物炭对田间土壤氨挥发量的影响

不同地表条件下生物炭对土壤氨挥发的影响如图 1 所示.作物种植条件下,3 个不同生物炭处理的土壤氨挥发通量均随时间呈下降趋势,其中施用生物炭两天后(7 月 14 日),BC4.5+、BC0.5+、CK+ 处理的土壤氨挥发速率最高,依次为 1.47、1.25、1.24 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.另外,7 月 14 日和 7 月 16 日的监测结果显示,BC4.5+、BC0.5+ 处理的土壤氨挥发较 CK+ 处理依次高出 18.73%、1.12% 和

21.27%、-7.97%,且 3 个处理间差异不显著.但 7 月 18 日~8 月 4 日,即施生物炭后的 6~23 d 期间,4 次观测结果均显示 BC4.5+、BC0.5+ 处理的土壤氨挥发较 CK+ 处理下降,降幅分别为 9.95%~61.80%、7.97%~50.52% ($P < 0.05$).8 月 4 日后,3 个处理土壤的氨挥发量接近或低于检测限.

同时期的裸地条件下,7 月 14 日的监测结果显示,BC4.5-、BC0.5- 和 CK- 处理的土壤氨挥发量依次为 1.44、0.74、0.62 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,与种植作物的土壤一样,在施用生物炭两天后土壤氨挥发量最高,且 BC4.5- 与 BC0.5-、CK- 处理间差异显著.与作物种植土壤氨挥发量规律不同的是,7 月 16 日至 8 月 11 日(施用生物炭后 4~30 d)间,BC4.5-、BC0.5- 处理的土壤氨挥发量较 CK- 处理呈现出增加,其增幅分别为 40.02%~93.15%、28.09%~57.45% ($P < 0.05$).至 8 月 11 日后,土壤氨挥发量也接近或低于检测限.

对比不同地表条件即作物种植和裸地土壤氨挥发量的变化态势发现,在等量生物炭施用条件下,仅 7 月 14 日(即施生物炭 2 d 后)一次观测数据显示出作物种植土壤氨挥发量高于裸地土壤,BC4.5+、BC0.5+、CK+ 处理分别较 BC4.5-、BC0.5-、CK- 处理高出 0.04、0.52、0.62 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.而之后的数据显示,玉米作物种植土壤的氨挥发量明显低于裸地土壤,BC4.5+、BC0.5+ 较 BC4.5-、BC0.5- 处理分别降低了 27.10%~92.10%、13.17%~83.45% ($P < 0.05$),但是 CK+ 与 CK- 处理间的土壤氨挥发量差异不显著.另外,等量生物炭施用条件下,CK+、BC0.5+、BC4.5+ 的累积氨挥发量分别比 CK-、BC0.5-、BC4.5- 的低 -5.25%、28.07%、75.61% ($P < 0.05$).上述结果说明作物种植覆盖地表对生物炭介导的土壤氨挥发具有一定的抑制效应.

2.2 生物炭对土壤铵态氮的影响

图 2 表示不同量生物炭影响下作物种植及裸地土壤铵态氮的动态变化.种植作物条件下,7 月 18 日到 8 月 30 日期间的观测数据显示,BC4.5+ 处理的土壤铵态氮含量高出 CK+ 处理 36.97%~69.25% ($P < 0.05$);但 9 月 17 日~10 月 9 日,BC4.5+ 处理较 CK+ 处理的土壤铵态氮含量下降,且两处理间差异不显著.整个试验期间,BC0.5+ 处理的土壤铵态氮含量较 CK+ 处理增加了 5.53%

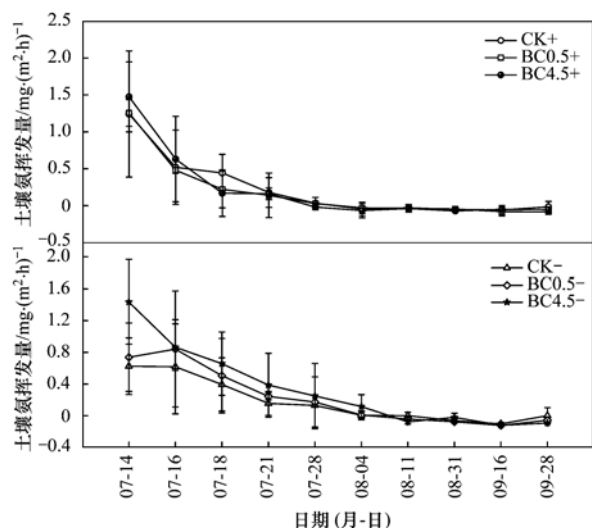


图1 不同生物炭用量条件下土壤的氨挥发

Fig. 1 Ammonia volatilization from soil in the different biochar addition treatments

~72.73% ($P < 0.05$). 可见, 生物炭处理增加了土壤铵态氮含量, 同期(7月18日~8月4日)土壤氨挥发受到抑制而下降.

裸地土壤 NH_4^+ -N变化规律与作物种植土壤略

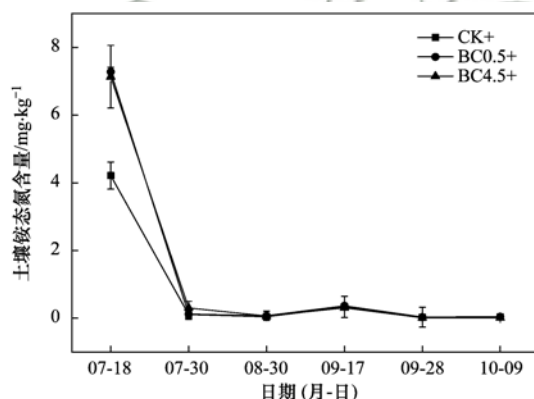


图2 生物炭输入对土壤铵态氮含量的影响

Fig. 2 Effect of biochar application on NH_4^+ -N concentration in the soil

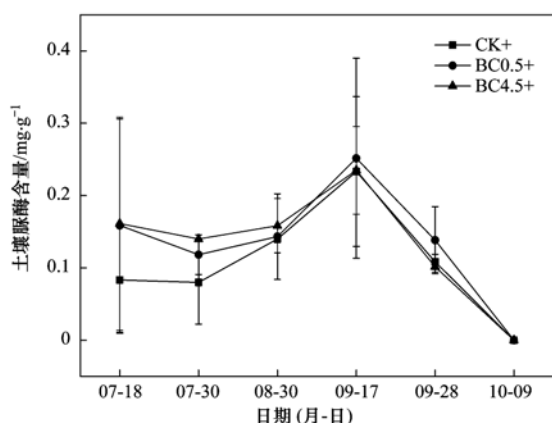
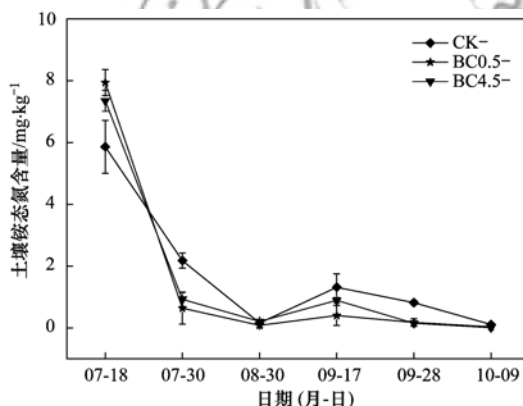
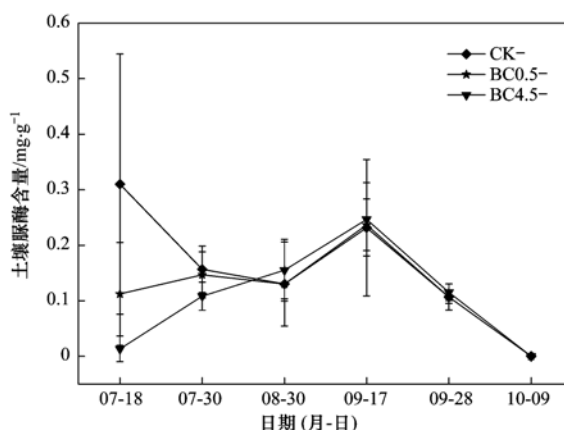


图3 生物炭对土壤脲酶活性的影响

Fig. 3 Effect of biochar on urease activity in the soil



有不同, 仅有一次(生物炭施入初期的7月18日)观测数据显示, 相较于CK-处理, BC4.5-、BC0.5-处理的土壤 NH_4^+ -N分别增加了25.44%、35.49%, 但从7月30日这个观测日之前起至10月9日, BC4.5-、BC0.5-处理土壤的 NH_4^+ -N含量分别比CK-低31.29%~92.64%、49.65%~78.38% ($P < 0.05$). 与此同时, BC4.5-、BC0.5-处理的土壤氨挥发则较CK-显著增加.

2.3 生物炭对土壤脲酶活性的影响

土壤脲酶是一种专性酶, 作用于线型酰胺的C—N键(非肽), 与土壤 NH_4^+ -N和 NH_3 的转化形成密切相关. 土壤脲酶活性可以反映土壤生态系统对氮素的需求和利用状况. 不同生物炭用量条件下土壤脲酶含量随时间的变化如图3所示. 作物种植条件下, 3个生物炭处理的土壤脲酶含量随时间呈先上升后下降的趋势; BC4.5+、BC0.5+、CK+处理土壤脲酶含量在整个观测期的平均值依次为0.16、0.16、0.13 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 2个生物炭处理与对照处理间差异显著. 相对于CK+处理, BC4.5+、BC0.5+处理的土壤脲酶分别增加了0.71%~

93.61%、1.36%~90.56%。生物炭的输入可提高作物种植条件下土壤铵态氮和脲酶含量。

裸地土壤的整个观测期内, BC4.5-、BC0.5-、CK- 处理的土壤脲酶含量的平均值依次为 0.13、0.15、0.19 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 生物炭输入裸地土壤脲酶含量下降。其中 7 月 18 日和 7 月 30 日的两次测定结果显示, BC4.5-、BC0.5- 处理较 CK- 处理的土壤脲酶分别下降了 95.70%、63.78% 和 30.87%、6.38% ($P < 0.05$)。但在 8 月 30 日~10 月 9 日期间的几次观测数据显示, 相对于 CK- 处理, BC4.5-、BC0.5- 处理的土壤脲酶活性略有增加, 增幅依次为 0.01%~2.14%、6.46%~19.17% ($P > 0.05$), 但同期 BC4.5-、BC0.5- 较 CK- 处理的土壤铵态氮含量下降明显, 可能是生物炭增强土壤对 NH_4^+ -N 的吸附, 同时促进了裸地条件下土壤的硝化反应所致, 这与李琦等^[20]的研究结果一致。

3 讨论

土壤氨挥发的高峰期通常发生在施肥后的 1~7 d 内^[20~22]。本研究中两种地表条件下, 所有处理的土壤氨挥发速率均在施肥后前两天内达到最高值, 且随试验时间的推进, 土壤氨挥发越来越弱, 最后趋于低于检测限。在作物种植条件下, 观测前期(7 月 18 日至 8 月 4 日)的结果显示, BC4.5+、BC0.5+ 处理的土壤氨挥发较 CK+ 处理分别下降了 9.95%~61.80%、7.97%~50.52% ($P < 0.05$)。可见作物种植覆盖地表对生物炭介导的土壤氨挥发具有一定的抑制效应, 这一点可由整个观测期不同地表条件下的氨累计挥发量来印证。观测期间, 等量生物炭施用条件下, CK+、BC0.5+、BC4.5+ 的累计氨挥发量分别比 CK-、BC0.5-、BC4.5- 的低 -5.25%、28.07%、75.61% ($P < 0.05$)。推测原因为: 生物炭对 NH_4^+ 具有较强的吸附作用^[9, 12], 可减少 NH_4^+ 转化为 NH_3 , 且作物生长需要氮素, NH_4^+ 和 NH_3 能被植物有效利用^[7], 致使土壤氨挥发量下降。而从土壤生态系统中不同氮素形态在其固-液-气界面的转化的角度, 也许可以看出同等条件下作物种植对生物炭介导的土壤氨挥发的抑制作用的一般机制。作物种植条件下土壤氨挥发的减少与植物生长对由有机氮矿化而来的铵态氮的吸收有关, 进而抑制了固-液-气界面 NH_4^+ -N 向气态氨 NH_3 的转化。并且在该系列过程中, 植物根系对固-液界面铵离子的吸收在先, 液-气界面由 NH_4^+ 向 NH_3 的转化在后。

在本研究中, 玉米种植条件下, 2 个生物炭处理土壤的 NH_4^+ -N 含量和脲酶活性均在未施用生物炭处理基础上有不同程度的增加, 且在观测前期尤为显著, 亦与此期相同处理土壤氨挥发量的降低效应相呼应。而在观测前期的裸地条件下, 2 个生物炭处理的土壤氨挥发较对照处理增加, 土壤铵态氮和脲酶含量则下降明显, 这在一定程度上验证了上述推测。另外, 这一结果也有可能与作物生长带来的根际作用或效应有关。一方面作物根系分泌物对根际土壤的生物活性有一定的促进作用, 致其脲酶活性增加, NH_4^+ -N 含量也相应增加^[23], 但同时作物生长对存在于固-液界面的 NH_4^+ -N 的吸收也增加^[7], 致使土壤氨挥发量下降。另一方面, 植物根系分泌的低分子量有机酸对根际土壤具有酸化作用^[24], 不利于土壤氨的挥发。尽管常规热解生物炭 pH 偏高, 往往会导致土壤氨挥发增加, 尤其在生物炭施用量较高时更为显著^[25~28], 但是本供试土壤酸性较强, 其 pH 值为 4.62, 生物炭对土壤 pH 的提高作用有限, 再加之作物种植条件下植物根系对由生物炭介导的土壤 pH 值升高具有一定的缓冲作用, 这可能是等量生物炭处理条件下裸地土壤氨挥发高于作物种植土壤氨挥发的原因之一。此外, 生物炭与植物根系分泌物发生表面缔合其表面负电荷增加, 对 NH_4^+ 吸附作用增强^[9, 12], 减少了该条件下 NH_4^+ (代换性) $\rightleftharpoons \text{NH}_4^+$ (液相) $\rightleftharpoons \text{NH}_3$ (液相) $\rightleftharpoons \text{NH}_3$ (气相) 的转化过程, 也是作物种植条件下生物炭介导的土壤氨挥发降低的原因之一。

本研究结果表明, 不同地表条件下土壤氨挥发对生物炭的响应不同。目前其它一些有关生物炭调控土壤氨挥发的研究结果也不尽相同。有研究显示生物炭可抑制太湖平原水稻土的 NH_3 挥发^[29], 生物炭可通过影响土壤微生物, 促进有机氮矿化对 NH_4^+ -N 进行补充^[20], 或减少微生物对 NH_4^+ -N 的同化^[30], 从而导致 NH_4^+ -N 不降反升, 土壤氨的挥发减少。也有研究显示生物炭促进东南丘陵区酸性红壤和华北平原碱性潮土氨的挥发^[29]。这些差异与供试生物炭自身特性、以及生物炭与不同土壤体系的相互作用所形成的不同环境条件有关^[2, 29, 31]。同时土壤氨挥发还受人为农业措施的影响, 优化水氮管理可显著降低氨的挥发^[32, 33]。可见, 田间条件下生物炭输入对土壤氨挥发的影响及土壤铵态氮的响应系统十分复杂, 其中作物种植、生物炭和土壤理化性质都存在明显的交互作用。本研究仅进行了单季作物、2 种生物炭施用量、两种地表条件的田间试

验观测, 观测指标也有限. 因此, 在较长时间尺度不同条件下, 生物炭影响下 NH_3 产生的土壤过程以及土壤氮素的气态损失途径及其影响机制都是可供探究的重要方面.

4 结论

(1) 裸地条件下, 相对于CK- 处理, BC4.5-、BC0.5- 处理的土壤氮挥发量分别增加了 40.02%~93.15%、28.09%~57.45% ($P < 0.05$); 但在作物种植条件下, BC4.5+、BC0.5+ 较CK+ 处理的土壤氮挥发仅在施炭的前4 d(7月14日至16日)内有所增加, 之后(7月18日~8月4日期间)显著下降, 降幅依次为 9.95%~61.80%、7.97%~50.52% ($P < 0.05$). 另外, 在等量生物炭施用条件下, 作物种植土壤的氮挥发量明显低于裸地土壤. 说明作物种植影响下生物炭对土壤氮挥发具有一定的抑制作用.

(2) 作物种植条件下, 相对于CK+ 处理, BC4.5+、BC0.5+ 处理的土壤 NH_4^+ -N和脲酶含量增加, 而土壤氮挥发量下降显著; 裸地条件下, BC4.5-、BC0.5- 处理较CK- 处理的土壤 NH_4^+ -N和脲酶含量呈下降趋势明显, 最大降幅依次为 63.78%、95.70%和 78.38%、92.64% ($P < 0.05$), 同时土壤氮的挥发量上升. 生物炭影响下的土壤氮挥发与土壤 NH_4^+ -N和脲酶含量的变化密切相关.

参考文献:

- [1] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 171-196.
- [2] 范会, 姜姗姗, 魏炎, 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.
- [3] 上官宇先, 师日鹏, 李娜, 等. 垄作覆膜条件下田间氮挥发及影响因素[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1987-1993.
Shangguan Y X, Shi R P, Li N, *et al.* Factors influencing ammonia volatilization in a winter wheat field with plastic film mulched ridges and unmulched furrows [J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 1987-1993.
- [4] Liu G D, Li Y C, Alva A K. Moisture quotients for ammonia volatilization from four soils in potato production regions [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, **183**(1-4): 115-127.
- [5] Liu G D, Li Y C, Alva A K. Temperature quotients of ammonia emission of different nitrogen sources applied to four agricultural soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, **71**(5): 1482-1489.
- [6] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氮挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(1): 99-104.
- [7] Li X, Ju X T, Zhang L J, *et al.* Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(1): 99-104.
- [8] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, *et al.* A wood based low-temperature biochar captures NH_3 -N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability [J]. Plant and Soil, 2012, **353**(1-2): 73-84.
- [9] Chen C R, Phillips I R, Condon L M, *et al.* Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand[J]. Plant and Soil, 2013, **367**(1-2): 301-312.
- [10] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, *et al.* Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. Plant and Soil, 2012, **350**(1-2): 57-69.
- [11] Knowles O A, Robinson B H, Contangelo A, *et al.* Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(17): 3206-3210.
- [12] 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.
- [13] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota-a review [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(9): 1812-1836.
- [14] 何飞飞, 梁云娜, 荣湘民, 等. 培养条件下生物炭对红壤菜地土壤氮挥发和土壤性质的影响[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, **36**(2): 299-304.
He F F, Liang Y S, Rong X M, *et al.* Effects of biochar on ammonia volatilisation and soil properties of vegetable-planting red soil in a laboratory [J]. Journal of Yunnan University, 2014, **36**(2): 299-304.
- [15] 张阳阳, 胡学玉, 张迪, 等. 生物炭对农田地表反照率及土壤温度与湿度的影响[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(8): 1234-1239.
Zhang Y Y, Hu X Y, Zhang D, *et al.* Effects of biochar on soil surface albedo, temperature and moisture in agricultural soil [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(8): 1234-1239.
- [16] 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 等. 生物炭介导的不同地表条件下土壤 N_2O 的排放特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 2093-2101.
Zou J, Hu X Y, Zhang Y Y, *et al.* Characteristics of biochar-mediated N_2O emissions from soils of different surface conditions [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 2093-2101.
- [17] Yang Y, Zhou C J, Li N, *et al.* Effects of conservation tillage practices on ammonia emissions from Loess Plateau rain-fed winter wheat fields [J]. Atmospheric Environment, 2015, **104**: 59-68.
- [18] 万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 等. 施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH_4 、 N_2O 和 NH_3 排放特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 892-900.

- Wan H F, Zhao C Y, Zhong J, *et al.* Emission of CH_4 , N_2O and NH_3 from vegetable field applied with animal manure composts[J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (3): 892-900.
- [18] 胡学玉, 艾天成, 洪军, 等. 环境土壤学实验与研究方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2011. 12-15.
- [19] 李伟, 袁亮, 赵秉强, 等. 增值尿素的氨挥发特征及其对土壤微生物量碳和脲酶活性的影响[J]. *腐植酸*, 2013, (6): 15-20.
- Li W, Yuan L, Zhao B Q, *et al.* Effects of value-added urea on ammonia volatilization, soil microbial biomass carbon and soil urease activity[J]. *Humic Acid*, 2013, (6): 15-20.
- [20] 李琦, 廖娜, 张妮, 等. 棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(10): 1987-1994.
- Li Q, Liao N, Zhang N, *et al.* Effects of cotton stalk and its biochar on ammonia volatilization from a drip irrigated cotton field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33** (10): 1987-1994.
- [21] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对日光温室土壤氨挥发影响[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(21): 4403-4414.
- Hao X Y, Gao W, Wang Y J, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization from greenhouse vegetable soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(21): 4403-4414.
- [22] 杜建军, 苟春林, 崔英德, 等. 保水剂对氮肥氨挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26** (4): 1296-1301.
- Du J J, Gou C L, Cui Y D, *et al.* Effects of water retaining agent on ammonia volatilization and nutrient leaching loss from N, P and K fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(4): 1296-1301.
- [23] 付学鹏, 吴凤芝, 吴瑕, 等. 间套作改善作物矿质营养的机理研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22** (2): 525-535.
- Fu X P, Wu F Z, Wu X, *et al.* Advances in the mechanism of improving crop mineral nutrients in intercropping and relay intercropping systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(2): 525-535.
- [24] 游蕊. 低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤汞赋存形态的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016. 29-43.
- You R. Effect of low molecular weight organic acids on the chemical speciation of mercury in the soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. 29-43.
- [25] Feng Y F, Sun H J, Xue L H, *et al.* Biochar applied at an appropriate rate can avoid increasing NH_3 volatilization dramatically in rice paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2017, **168**: 1277-1284.
- [26] 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.
- [27] Sun H J, Zhang H L, Min J, *et al.* Controlled-release fertilizer, floating duckweed, and biochar affect ammonia volatilization and nitrous oxide emission from rice paddy fields irrigated with nitrogen-rich wastewater[J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, **14**(1): 105-111.
- [28] 蒋朝晖, 曾清如, 方至, 等. 不同温度下施入尿素后土壤短期内 pH 的变化和氨气释放特性[J]. *土壤通报*, 2004, **35** (3): 299-302.
- Jiang Z H, Zeng Q R, Fang Z, *et al.* Short-term changes of pH and volatilization of ammonia from urea fertilizer in soil under different temperatures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, **35**(3): 299-302.
- [29] 王江伟. 秸秆黑炭对农田作物生长、土壤性质及氨挥发影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. 43-48.
- Wang J W. Effects of successive straw biochar application on crop growth, soil fertilizty and ammonia volatilization in three agricultural soils with varying properties and crop rotations[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. 43-48.
- [30] 杨帆, 李飞跃, 赵玲, 等. 生物炭对土壤氨氮转化的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(5): 1016-1020.
- Yang F, Li F Y, Zhao L, *et al.* Influence of biochar on the transformation of ammonia nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(5): 1016-1020.
- [31] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, *et al.* Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, **354**(1-2): 311-324.
- [32] 于红梅, 李子忠, 龚元石. 传统和优化水氮管理对蔬菜地土壤氮素损失与利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, **23**(2): 54-59.
- Yu H M, Li Z Z, Gong Y S. Comparison of nitrogen loss and use efficiency of vegetable in vegetable field under traditional and improved water and N-fertilizer management[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, **23**(2): 54-59.
- [33] 雷杨莉, 王林权, 薛亮, 等. 交替灌溉施肥对夏玉米土壤氨挥发影响[J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(4): 41-46.
- Lei Y L, Wang L Q, Xue L, *et al.* Effect of alternative irrigation and fertilization on soil ammonia volatilization of summer maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, **25**(4): 41-46.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i> (1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i> (27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i> (38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i> (49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i> (68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i> (109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i> (130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> (137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i> (152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i> (161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i> (170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i> (187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i> (195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i> (202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i> (212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i> (247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i> (269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i> (276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i> (284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i> (292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i> (310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i> (321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i> (339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i> (355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i> (363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i> (379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i> (389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i> (399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i> (406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i> (422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i> (430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i> (438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i> (450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i> (460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i> (467)