

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响

王一宇¹, 王圣森², 戴九兰^{1*}

(1. 山东大学环境研究院, 青岛 266237; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225127)

摘要:为探明生物炭对黄河三角洲盐碱土壤氨(NH_3)挥发的影响,通过室内连续培养的方式,先测定改良的通气法对土壤 NH_3 挥发的回收率,再对比施加肥料颗粒与肥料水溶液对土壤 NH_3 挥发的影响,最后探究生物炭的种类、添加量及施肥种类对 NH_3 挥发速率和总量的影响。结果表明,以硫酸铵为氮源进行的 NH_3 挥发捕集实验, NH_3 回收率平均值高达100.30%。在相同施氮量下,施加尿素水溶液的处理比施加尿素颗粒的处理 NH_3 挥发减少了60.29%,施加硫酸铵水溶液的处理比施加硫酸铵颗粒的处理 NH_3 挥发减少了61.40%。相较于不添加生物炭只施用硫酸铵水溶液的空白处理,添加0.5%生物炭且施加生物炭种类为水稻300℃(RB-300)、水稻600℃(RB-600)、棉花300℃(CB-300)和棉花600℃(CB-600)的处理, NH_3 挥发总量分别减少了18.68%、16.16%、9.35%和8.26%,且施肥后2 d内 NH_3 挥发速率最大,占总挥发量的53.80%~64.02%。添加生物炭后, NH_3 挥发量随生物炭添加量的增加呈现出先降低后增加的趋势。因此,田间施肥前添加少量生物炭并结合水肥一体化管理技术,可以有效地减少 NH_3 挥发并提高氮肥利用率。

关键词:生物炭; NH_3 挥发; 肥料; 盐碱土; 水肥一体化技术

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3738-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812098

Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil

WANG Yi-yu¹, WANG Sheng-sen², DAI Jiu-lan^{1*}

(1. Environmental Research Institute, Shandong University, Qingdao 266237, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to investigate the effect of biochar on NH_3 volatilization in saline-alkali soils of the Yellow River Delta, continuous laboratory incubation was conducted. Firstly, the recovery rate of NH_3 volatilization by an improved aeration method was determined, the effects of fertilizer particles and aqueous fertilizer solution on NH_3 volatilization were then compared. Finally, the effects of biochar species, application amount, and fertilizer type on NH_3 volatilization rate and total amount were explored. The results showed that the average recovery rate of NH_3 reached 100.30% using ammonium sulfate as the nitrogen source. With the same rate of nitrogen application, the volatilization of NH_3 decreased by 60.29% in the treatment with urea as the aqueous solution compared to the treatment with urea particles, and decreased by 61.40% in the treatment with an ammonium sulfate aqueous solution compared to the treatment with ammonium sulfate particles. Compared with the control treatment (without the addition of biochar and with the addition of ammonium sulfate solution), the addition of 0.5% biochar derived from 300℃ rice biochar (RB-300), 600℃ rice biochar (RB-600), 300℃ cotton biochar (CB-300), and 600℃ cotton biochar (CB-600) reduced the total volatilization of NH_3 by 18.68%, 16.16%, 9.35%, and 8.26% respectively. The volatilization rate of NH_3 was at its highest within two days of fertilization, which accounted for 53.80%~64.02% of the total volatilization. After the addition of the biochar, volatilization of NH_3 decreased at first and then increased in proportion to an increase in biochar content. Therefore, adding a small amount of biochar before field fertilization, combined with the integrated management of water and fertilizer, can effectively reduce NH_3 volatilization and improve nitrogen use efficiency.

Key words: biochar; NH_3 volatilization; fertilizer; saline-alkali soil; water and fertilizer integration technology

氨(NH_3)挥发是氮素循环最主要的损失途径之一^[1~3],全球通过 NH_3 挥发途径导致的氮肥损失占全年施氮量的14%^[4],中国则高达10%~50%^[5]。挥发到大气中的 NH_3 是一种活性氮成分,对大气和生态系统均有广泛的影响^[6~8]。有研究表明,肥料的种类及形态、施肥方式、施肥量、气候条件和土壤性质等决定土壤 NH_3 挥发速率和挥发量^[9,10]。此外,种植和管理因素也会影响 NH_3 排放^[11~13],其根本在于通过影响土壤的铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量及土壤对 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 的吸附能力^[14,15],进而影响 NH_3 挥发。

近年来的研究表明,生物炭孔隙结构良好且具有较大的比表面积,施入土壤后能够吸附 NH_4^+ ^[16,17],在一定程度上对土壤中氮素的转化和损失途径具有显著影响^[18]。施入土壤中的生物炭,其表面的酸性官能团可与 NH_3 发生中和,使得 NH_3 被生物炭吸附^[19]。同时,添加生物炭使得土壤有机质含量增加,具有吸附能力的腐殖质也增

收稿日期: 2018-12-11; 修订日期: 2019-03-04

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2016CYJS05A02, 2018GSF117024); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800900, 2018YFD0800303)

作者简介: 王一宇(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态学, E-mail: 1406395420@qq.com

* 通信作者, E-mail: daijiulan@sdu.edu.cn

加,使得土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 减少,从而使土壤的 NH_3 挥发量减少^[20]. 当然也有研究表明生物炭的添加会增加土壤 NH_3 挥发,这是因为当土壤中施入大量的生物炭时会导致土壤色度改变,土壤变黑后其吸热能力增强,从而使得土壤的 NH_3 挥发量增加^[21].

目前,土地供需矛盾日益突出,盐碱地的防治与开发利用备受关注,改良盐碱地将其向农业土地资源扩展,可有效解决土地供需不足. 黄河三角洲地区分布着不同土体结构和盐渍化程度不一的各类盐渍土,黄河冲积年均造地 1.5 万亩^[22]. 然而,有关生物炭对黄河三角洲盐碱土壤 NH_3 挥发的影响报道甚少. 因此,本实验通过室内连续培养的方式,探究生物炭的种类、添加量、施肥种类对盐碱土壤 NH_3 挥发的影响,以期减少盐碱农田 NH_3 挥发,提高氮肥利用率和减少氮面源污染提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤和生物炭

供试土壤采自山东省东营市利津县的盐碱农田 ($37^{\circ}14'\text{N}$, $118^{\circ}52'\text{E}$), 土壤质地为粉土. 采集时去除表层浮土后,取 0~20 cm 表层土壤,供试土壤理化性质按照土壤农业化学分析方法测定^[23],测得的土壤理化性质如表 1 所示.

生物炭原材料为黄河三角洲地区普遍种植的水稻和棉花两种作物秸秆. 分别将一部分材料洗净烘干后放入马弗炉,先升温 30 min 至 200℃ 保温 1 h,再升温 20 min 至 300℃ 保温 4 h,断电后 30 min 冷

却至室温,制得棉花 300℃ 和水稻 300℃ 两种生物炭,分别标记为 CB-300 和 RB-300. 另一部分材料洗净烘干后放入马弗炉,先升温 30 min 至 200℃ 保温 1 h,再升温 80 min 至 600℃ 保温 4 h,断电后 30 min 冷却至室温,制得棉花 600℃ 和水稻 600℃ 两种生物炭,分别标记为 CB-600 和 RB-600. 制得的生物炭冷却后粉碎过 1mm 筛备用,测得的生物炭理化性质如表 2 所示.

1.2 实验设计

1.2.1 NH_3 挥发捕获装置的回收率

NH_3 挥发捕获装置改良于通气法^[24],采用磷酸-甘油吸收法捕集和 KCl 浸提的方法^[25]. 捕集瓶为高 17 cm、直径 7.8 cm 的圆柱型瓶子,瓶盖一侧带有 2 cm 的小孔. 在编号依次为 0、1、2、3、4、5 和 6 的 NH_3 挥发捕获装置瓶底各放一个 15 mL 的小烧杯,依次加入 10 mL 0.01、0.01、0.01、0.01、0.1、0.1 和 0.1 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液于小烧杯,随后依次加入 5 mL 含 N 分别为 0、50、100、200、400、800 和 1 600 mg·L⁻¹ 的硫酸铵溶液于 NH_3 挥发捕集瓶底. 迅速盖上含 5 mL 捕集液 (50 mL 磷酸, 40 mL 丙三醇,定容至 1 L) 的实验海绵 (直径为 8 cm,厚度为 3 cm),安装上带有直径 2 cm 小孔的杯盖 (小孔塞上浸满捕集液的海绵,用于隔绝空气中的 NH_3), NH_3 挥发捕获装置如图 1 所示. 轻轻摇晃瓶底打翻小烧杯使两种溶液混合,每组处理重复 3 次,将所有捕集瓶放在 22℃ ± 0.5℃ 的光照培养箱中连续培养 24 h.

表 1 供试土壤 (0~20 cm) 理化性质

Table 1 Basic properties of the top soil (0-20 cm)													
项目	pH	EC /mS·cm ⁻¹	CEC(+) /cmol·kg ⁻¹	总氮 /g·kg ⁻¹	含水率 /%	SOM /g·kg ⁻¹	粒径/%			有效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /g·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹
							黏粒	砂粒	粉粒				
数值	7.94	0.32	14.87	1.52	21.08	29.89	6.24	8.82	84.94	25.48	0.37	9.13	33.92

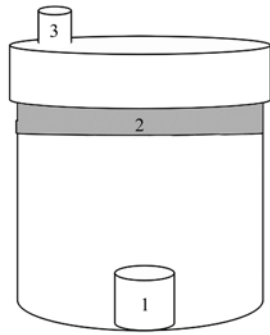
表 2 供试生物炭理化性质

Table 2 Basic properties of the biochar					
生物炭种类	pH	EC /mS·cm ⁻¹	CEC(+) /cmol·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	BET 比表面积 /m ² ·g ⁻¹
CB-300	8.61	13.56	7.53	16.54	1.01
CB-600	9.33	15.43	8.42	13.41	0.37
RB-300	8.95	14.41	8.11	15.64	0.65
RB-600	9.78	18.65	9.03	12.54	4.23

1.2.2 肥料种类与形态对盐碱土壤 NH_3 挥发的影响

称取一系列 50.00 g (Techcomp YP502N) 供试土壤于实验瓶中,按照实验设计施加肥料. 本实验共设 5 个处理,分别为:①不添加肥料的空白处理 CK,只添加 10 mL 去离子水于实验瓶中;②表施 400 mg·kg⁻¹ 的尿素颗粒 (以 N 计,下同),先添加

10 mL 去离子水后将 0.042 9 g (Sartorius BSA124S-CW) 尿素颗粒均匀洒施在土壤表层^[8, 16];③表施 400 mg·kg⁻¹ 的硫酸铵颗粒,先添加 10 mL 去离子水后将 0.094 4 g 硫酸铵颗粒均匀洒施在土壤表层;④表施 400 mg·kg⁻¹ 的尿素水溶液,均匀洒施 10 mL 4.290 0 g·L⁻¹ 的尿素水溶液于土壤表层;⑤表



1. 15 mL 小烧杯(内含 10 mL NaOH 溶液); 2. 实验海绵(直径为 8 cm, 厚度为 3 cm); 3. 带 2 cm 小孔的杯盖; 小孔塞上浸满捕集液的海绵, 用于隔绝空气中的 NH_3

图 1 NH_3 挥发捕获装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of NH_3 the volatilization capture device

施 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硫酸铵水溶液, 均匀洒施 10 mL $9.4380 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硫酸铵水溶液于土壤表层. 随后迅速安装上含 5 mL 捕集液的实验海绵, 每组处理重复 3 次, 将所有实验瓶随机排列放置于 $22^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 的光照培养箱中连续培养 31 d. 为更好地模拟田间情况, 在实验期间除刚开始时添加去离子水, 使土壤含水量为田间持水量的 80% 外, 不再添加去离子水. 完成施肥后即实验开始并记为第 1 d, 随后采样时间依次为第 3、5、7.5、11、16、21、26 和 31 d.

1.2.3 生物炭对盐碱土壤 NH_3 挥发的影响

本研究设计为多因素组间实验: ①生物炭种类包括 4 种, 分别为 CB-300、CB-600、RB-300 和 RB-600; ②生物炭添加量包括 4 种分别为 0%、0.5%、1% 和 2%; ③施肥种类包括两种, 分别为表施 10 mL $4.2900 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 尿素水溶液和表施 10 mL $9.4380 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸铵水溶液. 其中, 不添加生物炭只添加肥料的处理为空白处理.

称取一系列 50.00 g 供试土壤于实验瓶中. 按照实验设计, 分别将预先称量好的生物炭添加至实验瓶, 与土壤混匀后分别添加 10 mL 肥料水溶液, 随后迅速安装上含 5 mL 捕集液的实验海绵. 每组处理重复 3 次, 将所有实验瓶随机排列放置于 $22^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 的光照培养箱中连续培养 16 d. 为更好地模拟田间情况, 在实验期间除刚开始时添加去离子水, 使土壤含水量为田间持水量的 80% 外, 不再添加去离子水. 完成施肥后即实验开始并记为第 1 d, 采样时间依次为第 3、5、8、11 和 16 d.

1.3 NH_3 挥发的测定

挥发出来的 NH_3 被捕集于海绵中, 将海绵放入 $23 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 的塑料密封袋中, 分两次加入 100 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液浸提, 并用连续流动分析

仪(AutoAnalyzer 3 HR, SEAL, USA)测定浸提液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量.

NH_3 挥发捕获装置回收率计算如下:

$$R = \frac{m}{(c_0 \times V_0) - (c_1 \times V_1)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R 为 NH_3 回收率(%), m 为单个氨挥发捕集装置收集的氨量(mg), c_0 为实验开始时添加硫酸铵溶液的初始浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), V_0 为实验开始时添加硫酸铵溶液的体积(5 mL), c_1 为实验结束时瓶内溶液的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), V_1 为实验结束时瓶内混合液的体积(mL).

土壤 NH_3 挥发速率计算如下:

$$S = \frac{m}{0.05t} \quad (2)$$

式中, S 为 NH_3 挥发速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], m 为浸提液中铵态氮的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), t 为时间(d).

土壤 NH_3 挥发总量计算如下:

$$A = \sum S \times t \quad (3)$$

式中, A 为 NH_3 挥发总量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S 为 NH_3 挥发速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], t 为时间(d).

1.4 数据处理与分析

实验数据采用 Excel 2018 和 SPSS 24 进行处理分析, 计算其标准偏差, 组间采用最小显著差异法(LDS)进行多重比较, 显著性水平设置为 0.05, 作图软件选用 Origin 2017.

2 结果与分析

2.1 NH_3 挥发捕获装置的回收率

以硫酸铵为氮源进行的 NH_3 挥发捕集装置回收率实验, 结果如表 3 所示. 添加外源氮质量为 0.237 ~ 7.827 mg 时, NH_3 回收率高达 99.21% ~ 101.39%, 平均值为 100.30%. 表明这种改良于通气法的 NH_3 挥发捕集装置可以充分、稳定地回收挥发的 NH_3 .

2.2 肥料种类与形态对盐碱土壤 NH_3 挥发的影响

从图 2 可以看出, 表施尿素水溶液、硫酸铵颗粒和硫酸铵水溶液的处理均在第 3 d 时 NH_3 挥发速率最大, 分别为 17.48、16.96 和 $8.06 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 随后 NH_3 挥发速率逐渐降低, 21 d 后 NH_3 挥发过程基本完成. 而表施尿素颗粒的处理在第 10 d 时 NH_3 挥发速率达到峰值为 $13.60 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 随后 NH_3 挥发速率逐步降低, 实验结束后仍有少量的 NH_3 产生. 从图 3 可以看出, 在相同施氮量下, 不同肥料种类与形态的 4 组处理间 NH_3 挥发总量呈现出显著差异($P < 0.05$). 相较于表施肥料水溶液, 施用肥料颗粒导致的 NH_3 挥发总

量均显著增加. 其中, 相较于施加尿素颗粒, 施加硫酸铵颗粒, 施加硫酸铵水溶液减少了 61.40% 的 NH_3 挥发; 相较于施

表 3 NH_3 挥发捕获装置回收率实验结果

Table 3 Recovery rates of the NH_3 volatilization capture device			
编号	装置回收的 NH_3 质量/mg	溶液挥发的 NH_3 质量/mg	回收率/%
1	0.241 ± 0.007	0.237 ± 0.005	101.39 ± 0.853
2	0.487 ± 0.012	0.483 ± 0.021	100.95 ± 2.394
3	1.028 ± 0.005	1.021 ± 0.008	100.59 ± 1.234
4	1.821 ± 0.100	1.824 ± 0.081	99.78 ± 1.054
5	3.949 ± 0.061	3.980 ± 0.081	99.21 ± 0.460
6	7.819 ± 0.100	7.827 ± 2.735	99.89 ± 0.292

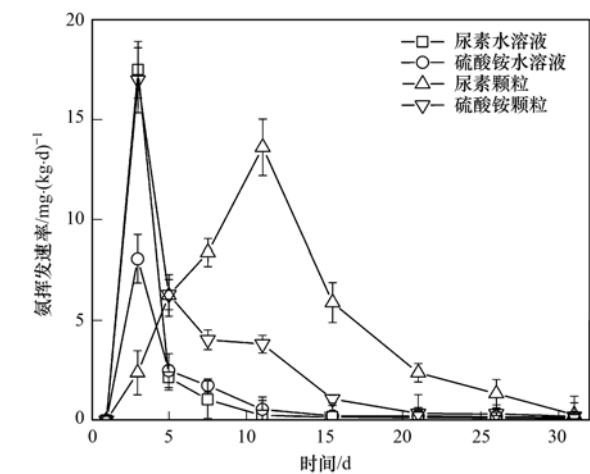


图 2 肥料种类与形态对 NH_3 挥发速率的影响

Fig. 2 Effects of fertilizer types and forms on ammonia volatilization rates

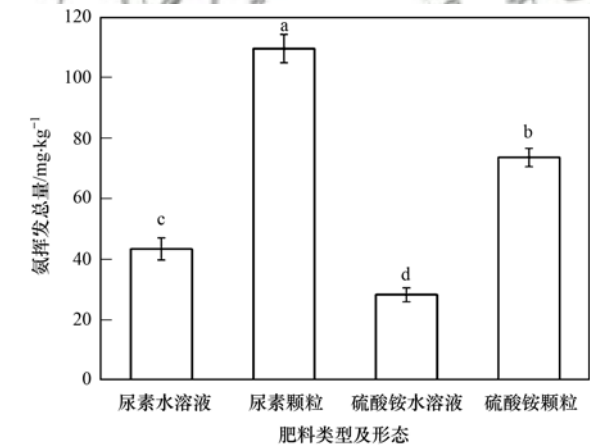


图 3 肥料种类与形态对 NH_3 挥发总量的影响

Fig. 3 Effects of fertilizer types and forms on total volatilization of ammonia

2.3 生物炭种类对盐碱土壤 NH_3 挥发的影响

NH_3 挥发降低率是指在施相同肥料种类下, 相较于不添加生物炭的处理, 添加生物炭的处理减少的 NH_3 挥发量占不添加生物炭处理的比率. 从表 4 可见, 添加 RB-300 后 50.00% 的处理减少了 NH_3 挥发, 且降低率为 7.14% ~ 18.68%; 添加 RB-600 后 33.33% 的处理减少了 NH_3 挥发, 且降低率为

4.19% ~ 16.16%; 添加 CB-300 后 33.33% 的处理减少了 NH_3 挥发, 且降低率为 6.49% ~ 9.35%; 添加 CB-600 后 33.33% 的处理减少了 NH_3 挥发, 且降低率为 5.65% ~ 8.26%. 可见, 添加 RB-300 后可有效减少 NH_3 挥发.

为明确 NH_3 挥发速率随时间的变化规律, 并针对减少 NH_3 挥发提供依据. 本研究选取添加 4 种生物炭均减少 NH_3 挥发的处理, 即在添加硫酸铵水溶液且生物炭添加量为 0.5% 下, 对添加 RB-300、RB-600、CB-300 和 CB-600 这 4 种生物炭分别进行 NH_3 挥发速率的测定, 结果如图 4 所示. 实验开始后迅速有 NH_3 挥发出来, 所有处理均在第 3 d 时 NH_3 挥发速率最大, 且施肥后 2 d 的 NH_3 挥发累计量占总挥发量的 53.80% ~ 64.02%. 只添加硫酸铵不添加生物炭的空白处理 NH_3 挥发速率为 $8.06 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 而添加 0.5% RB-300、RB-600、CB-300 和 CB-600 生物炭的处理, 相较于空白处理 NH_3 挥发速率降幅依次为 29.16%、18.36%、17.99% 和 4.84%. 随后 NH_3 挥发速率逐渐降低, 在第 5 d 时, 不添加生物炭的空白处理 NH_3 挥发速率为 $2.48 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 添加 0.5% RB-300、RB-600、CB-300 和 CB-600 生物炭的处理 NH_3 挥发速率依次为 2.32、1.89、2.15 和 2.05 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 相比于最大 NH_3 挥发速率, 降幅为 59.4% ~ 73.27%. 随着时间的推移, NH_3 挥发速率逐渐降低. 实验结束后, NH_3 挥发过程基本完成.

2.4 生物炭添加量对盐碱土壤 NH_3 挥发的影响

从表 4 可见, 当肥料种类与生物炭种类相同时, NH_3 挥发降低率由正数变为负数且呈现递减的趋势, 表明 NH_3 挥发总量均随生物炭添加量的增加呈现出降低后增加的趋势. 在生物炭添加量为 0.5% 时, 75.00% 的处理均不同程度减少了 NH_3 挥发且 NH_3 挥发降低率为 5.65% ~ 18.68%, 仅添加尿素水溶液且生物炭种类为 CB-300 和 RB-600 时增加了 NH_3 挥发. 在生物炭添加量为 1% 时,

37.50% 的处理不同程度减少了 NH₃ 挥发且 NH₃ 挥发降低率为 4.19% ~ 7.93%。而在生物炭添加量为

2% 时, 所有处理均增加了 NH₃ 挥发且 NH₃ 挥发增加率为 6.27% ~ 96.20%。

表 4 添加生物炭后的 NH₃ 挥发降低率¹⁾/%

Table 4 Percentage reduction of ammonia volatilization through the addition of biochar/%				
施肥种类	生物炭种类	添加 0.5% 的生物炭 NH ₃ 挥发降低率/%	添加 1% 的生物炭 NH ₃ 挥发降低率/%	添加 2% 的生物炭 NH ₃ 挥发降低率/%
尿素	RB-300	7.14a	-0.53b	-6.27bc
	RB-600	-16.05d	-33.01e	-47.35g
	CB-300	-11.78cd	-40.20f	-57.13h
	CB-600	5.65a	-7.68c	-31.03e
硫酸铵	RB-300	18.68a	7.93b	-6.94c
	RB-600	16.16ab	4.19b	-19.04d
	CB-300	9.35b	6.49b	-43.59e
	CB-600	8.26b	-14.96d	-96.20f

1) 在添加相同肥料种类下, NH₃ 挥发降低率(%) = $\frac{\text{添加生物炭的处理} - \text{不添加生物炭的处理}}{\text{不添加生物炭的处理}} \times 100$, 同一施肥种类(尿素、硫酸铵)下不同小写字母表示所有处理差异显著, $P < 0.05$

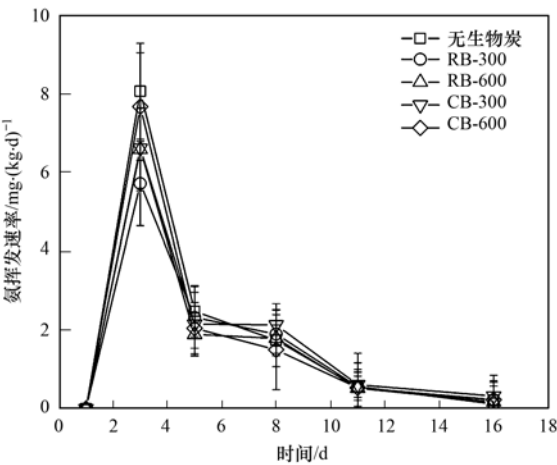


图 4 生物炭种类对 NH₃ 挥发速率的影响
Fig. 4 Effects of biochar species on ammonia volatilization rates

因此, 本研究选取施加硫酸铵水溶液且添加 RB-300 生物炭的处理, 分析其生物炭添加量随时间的变化规律, 结果如图 5 所示. 实验开始后迅速有 NH₃ 挥发出来, 且所有处理均在第 3 d 时 NH₃ 挥

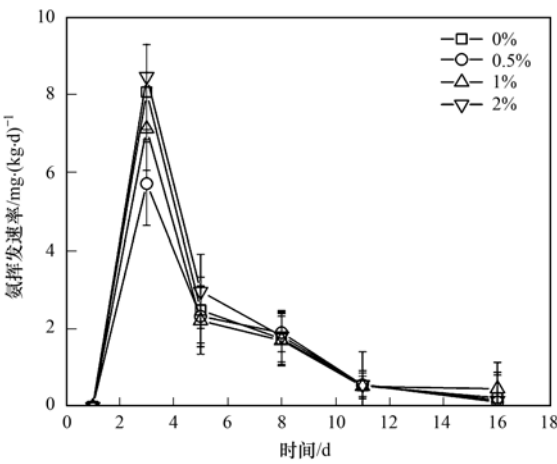


图 5 生物炭添加量对 NH₃ 挥发速率的影响
Fig. 5 Effects of biochar addition on ammonia volatilization rates

发速率最大, 且施肥后 2 d 的 NH₃ 挥发量占总挥发量的 53.80% ~ 61.76%。只添加硫酸铵不添加生物炭的处理 NH₃ 挥发速率为 8.06 mg·(kg·d)⁻¹, 添加 0.5%、1% 和 2% RB-300 生物炭的处理 NH₃ 挥发速率依次为 5.71、7.12 和 8.46 mg·(kg·d)⁻¹。随后 NH₃ 挥发速率逐渐降低. 本实验结束后, NH₃ 挥发过程基本完成。

2.5 施肥种类对添加生物炭的盐碱土壤土壤 NH₃ 挥发的影响

从表 4 可见, 相较于不添加生物炭的空白处理, 在施加尿素水溶液的条件下 83.33% 的处理均增加了 NH₃ 挥发, NH₃ 挥发增加率为 0.53% ~ 57.13%。但添加 0.5% RB-300 和 0.5% CB-600 的处理分别减少 7.14% 和 5.56% 的 NH₃ 挥发。在施加硫酸铵水溶液的条件下, 58.33% 的处理不同程度的减少了 NH₃ 挥发且降低率为 4.19% ~ 18.68%, 其余处理增加了 NH₃ 挥发且增加率为 6.94% ~ 96.20%。

因此, 本研究比较了在添加 0.5% 的 RB-300 生物炭下, 不添加肥料、添加尿素水溶液、添加硫酸铵水溶液这 3 个处理的 NH₃ 挥发速率, 结果如图 6 所示. 从中可见, 不添加肥料的处理, NH₃ 挥发速率在 0.16 ~ 0.33 mg·(kg·d)⁻¹ 之间. 而添加尿素和硫酸铵的处理, 呈现出相同的速率趋势, 均在第 3 d NH₃ 挥发速率最大, 分别为 15.90 mg·(kg·d)⁻¹ 和 5.71 mg·(kg·d)⁻¹。随后 NH₃ 挥发速率迅速降低, 在第 5 d 时, NH₃ 挥发速率的减幅为 85.91% 和 60.95%, 且施加硫酸铵的处理 NH₃ 挥发速率开始呈现大于施加尿素的处理。

3 讨论

改良后的 NH₃ 挥发捕集装置, NH₃ 回收率高达

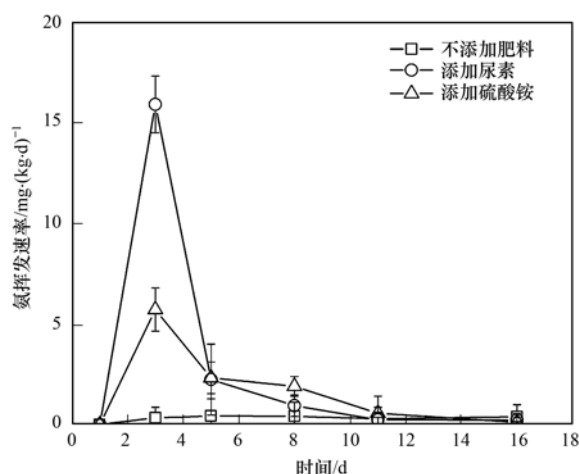


图6 施肥种类对添加生物炭后的 NH_3 挥发速率的影响

Fig. 6 Effects of fertilizer types on ammonia volatilization rates in soil after biochar addition

99.21% ~ 101.39%，平均值为 100.30%。说明可以有效地捕集挥发的 NH_3 ，从而为接下来的实验提供可靠的技术支持。在肥料形态对盐碱土壤 NH_3 挥发影响的实验中，施加肥料水溶液可以有效地减少 NH_3 挥发^[26]，且相较于传统的施加肥料颗粒可以减少 60% 左右。推测是因为肥料颗粒施入土壤后，尿素会在土壤表面发生水解产生氨气，硫酸铵颗粒含有 NH_4^+ ，会在土壤表面的固-液-气界面向气态 NH_3 转化。肥料水溶液可以随水分进入土壤内部，减少了在固-液-气界面向气态 NH_3 的转化，从而有效的降低了 NH_3 挥发^[27]。同时结合水肥一体化技术的灌溉施肥的肥效快、养分利用率提高的优点，可以避免肥料施在较干的表土层易引起的 NH_3 挥发损失、溶解慢等造成的肥效发挥慢的问题，尤其可以改善铵态氮和尿素态氮肥施在地表 NH_3 挥发损失的问题^[28, 29]。

在探究生物炭对 NH_3 挥发影响的实验中，盐碱土壤 NH_3 挥对不同种类生物炭的响应有很大差异。目前其它一些有关生物炭调控土壤 NH_3 挥发的研究结果也不尽相同^[30~32]，这些差异与供试生物炭自身特性、土壤类型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^[33, 34]。比较添加 RB-300、RB-600、CB-300 和 CB-600 这 4 种生物炭，添加 RB-300 的处理 NH_3 挥发降低率最大，故 RB-300 是最有效的生物炭材料。随着生物炭添加量的增加， NH_3 挥发总量均先降低后显著增加。推测原因是常规条件下热解的生物炭 pH 偏高。本实验使用未经酸化处理的生物炭，在生物炭添加量过高时， NH_3 挥发总量更大^[35, 36]。在施加相同生物炭的前提下，施加硫酸铵水溶液的处理比施加尿素水溶液的处理对减少 NH_3 挥发更有效。推测原因

是硫酸铵含有 NH_4^+ ，施用后可以直接被土壤吸附利用，而尿素溶液需要在土壤脲酶的作用下才能产生 NH_4^+ 。在这个过程中消耗 H^+ ，肥料周围伴有 pH 增高的现象，会导致向气态 NH_3 转化的增加，从而导致其较高的 NH_3 挥发产生^[37, 38]。

除此之外，在盐碱土壤中盐分会降低脲酶活性，从而影响 NH_3 挥发速率^[39, 40]。本研究在实验室控制条件下探讨了生物炭对 NH_3 挥发的影响，但是，田间条件下生物炭输入对土壤 NH_3 挥发的影响及土壤铵态氮的响应目前仍然不清楚，本研究可为田间条件下降低 NH_3 挥发提供有效理论依据，进而为生物炭及水肥一体化的使用提供技术支持。

4 结论

在相同施肥量下，相较于施加尿素和硫酸铵颗粒，施加尿素和硫酸铵水溶液的处理分别减少了 60.29% 和 61.4% 的 NH_3 挥发。施肥类型为硫酸铵水溶液且添加 0.5% 的 RB-300 生物炭的处理，可减少 18.68% 的 NH_3 挥发，且随着生物炭添加量的增加， NH_3 挥发总量呈现出减低后显著增加的趋势。相比于施加尿素水溶液，施加硫酸铵水溶液减少 NH_3 挥发效果更明显。

参考文献:

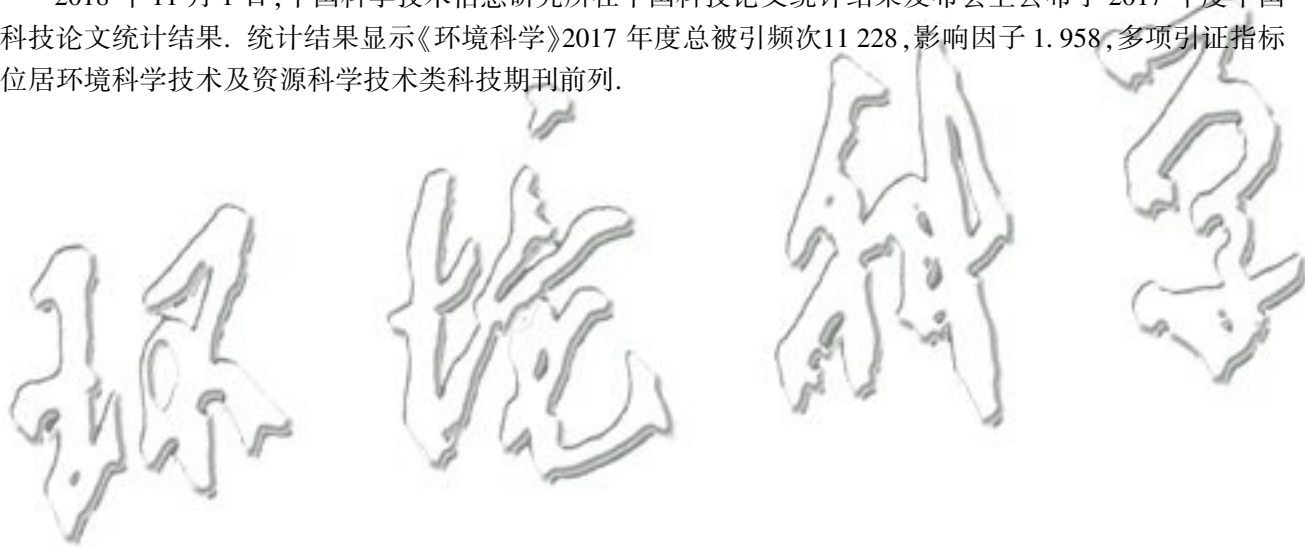
- [1] Wu W, Ma B L. Integrated nutrient management (INM) for sustaining crop productivity and reducing environmental impact: a review[J]. Science of the Total Environment, 2015, **512-513**: 415-427.
- [2] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, **514**(7523): 486-489.
- [3] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(10): 1501-1514.
- [4] Hu C S, Zhang Y M, Qin S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(10): 1501-1514.
- [5] Huo Q, Cai X H, Kang L, et al. Estimating ammonia emissions from a winter wheat cropland in North China Plain with field experiments and inverse dispersion modeling[J]. Atmospheric Environment, 2015, **104**: 1-10.
- [6] Huang X, Song Y, Li M M, et al. A high-resolution ammonia emission inventory in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, **26**(1): B1030.
- [7] 杨杉. 三峡库区典型小流域氮素气态损失动态变化及其主导因素——以开县野塘溪小流域为例[D]. 重庆: 西南大学, 2015. 3-7.
- [8] Zhang W, Li Y, Zhu B, et al. A process-oriented hydro-biogeochemical model enabling simulation of gaseous carbon and nitrogen emissions and hydrologic nitrogen losses from a subtropical catchment[J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 305-317.
- [9] Zhou G W, Zhang W, Ma L J, et al. Effects of saline water

- irrigation and N application rate on NH_3 volatilization and N use efficiency in a drip-irrigated cotton field[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, **227**(4): 103.
- [9] Liu T Q, Fan D J, Zhang X X, *et al.* Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in Central China[J]. *Field Crops Research*, 2015, **184**: 80-90.
- [10] Han K, Zhou C J, Wang L Q. Reducing ammonia volatilization from maize fields with separation of nitrogen fertilizer and water in an alternating furrow irrigation system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**(5): 1099-1112.
- [11] Zeng W Z, Ma T, Huang J S, *et al.* Nitrogen transportation and transformation under different soil water and Salinity conditions [J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2016, **23**(4): 677-693.
- [12] Shan L N, He Y F, Chen J, *et al.* Ammonia volatilization from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **38**: 14-23.
- [13] Danso E O, Abenney-Mickson S, Sabi E B, *et al.* Effect of different fertilization and irrigation methods on nitrogen uptake, intercepted radiation and yield of okra (*Abelmoschus esculentum* L.) grown in the Keta Sand Spit of Southeast Ghana [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, **147**: 34-42.
- [14] 周丽平. 不同氮肥缓释化处理及施肥方式对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. 1-7.
- [15] 丛日环, 张丽, 鲁艳红, 等. 长期秸秆还田下土壤铵态氮的吸附解吸特征[J]. *植物营养与肥科学报*, 2017, **23**(2): 380-388.
- Cong R H, Zhang L, Lu Y H, *et al.* Adsorption-desorption characteristics of soil ammonium under long-term straw returning condition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, **23**(2): 380-388.
- [16] Baiamonte G, Crescimanno G, Parrino F, *et al.* Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil [J]. *CATENA*, 2019, **175**: 294-303.
- [17] Li Y Y, Zhang F B, Yang M Y, *et al.* Effects of adding biochar of different particle sizes on hydro-erosional processes in small scale laboratory rainfall experiments on cultivated loessial soil [J]. *CATENA*, 2019, **173**: 226-233.
- [18] 钟婷. 秸秆炭化还田对稻田土壤氨挥发的影响及其机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017. 2-10.
- [19] 郑蕾, 王学东, 郭李萍, 等. 施肥对露地菜地氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(12): 4063-4070.
- Zheng L, Wang X D, Guo L P, *et al.* Impact of fertilization on ammonia volatilization and N_2O emissions in an open vegetable field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(12): 4063-4070.
- [20] Mandal S, Thangarajan R, Bolan N S, *et al.* Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat[J]. *Chemosphere*, 2016, **142**: 120-127.
- [21] 周杨. 秸秆生物黑炭对肥料氮在农田土壤中转化中迁移的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012. 39-47.
- [22] 宋静茹, 杨江, 王艳明, 等. 黄河三角洲盐碱地形成的原因及改良措施探讨[J]. *安徽农业科学*, 2017, **45**(27): 95-97, 234.
- Song J R, Yang J, Wang Y M, *et al.* Exploration of the reason and improvement measures of saline-alkali soil in the Yellow River delta[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, **45**(27): 95-97, 234.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 农业科技出版社, 2000. 35-80.
- [24] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. *植物营养与肥科学报*, 2002, **8**(2): 205-209.
- Wang Z H, Liu X J, Ju X T, *et al.* Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: venting method [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, **8**(2): 205-209.
- [25] Cabrera M L, Tyson S C, Kelley T R, *et al.* Nitrogen mineralization and ammonia volatilization from fractionated poultry litter [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(2): 367-372.
- [26] Abalos D, Sanchez-Martin L, Garcia-Torres L, *et al.* Management of irrigation frequency and nitrogen fertilization to mitigate GHG and NO emissions from drip-fertigated crops [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **490**: 880-888.
- [27] 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 等. 不同地表条件下生物炭对土壤氨挥发的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 348-354.
- Zou J, Hu X Y, Zhang Y Y, *et al.* Effect of biochar on ammonia volatilization from soils of different surface conditions [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 348-354.
- [28] 邓兰生, 张承林. 滴灌施氮肥对盆栽玉米生长的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2007, **13**(1): 81-85.
- Deng L S, Zhang C L. Effect of drip nitrogen fertigation on growth of maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, **13**(1): 81-85.
- [29] 李传哲, 许仙菊, 马洪波, 等. 水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2017, **33**(2): 469-475.
- Li C Z, Xu X J, Ma H B, *et al.* Research advances in fertigation technology improving water and fertilizer use efficiency [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **33**(2): 469-475.
- [30] 范会, 姜姗姗, 魏茨, 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.
- [31] 李琦, 廖娜, 张妮, 等. 棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发的影响[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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 王江伟. 秸秆黑炭对农田作物生长、土壤性质及氨挥发的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. 3-11.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, *et al.* Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, **42**(6): 1635-1642.
- [38] 杨晓云. 不同施肥条件下玉米农田灌淤土土壤氨挥发研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016. 79-88.
- [39] Pan C C, Liu C A, Zhao H L, *et al.* Changes of soil physico-chemical properties and enzyme activities in relation to grassland salinization [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **55**: 13-19.
- [40] Singh K. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, **27**(3): 706-718.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2018 年 11 月 1 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2017 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2017 年度总被引频次 11 228, 影响因子 1.958, 多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)