

棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发的影响

李琦, 廖娜, 张妮, 茹思博, 侯振安*

(石河子大学农学院资源与环境科学系, 新疆 石河子 832003)

摘要: 土壤氨挥发是干旱区农田氮肥损失的重要途径之一, 通过田间试验研究了施用棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田土壤无机氮含量及氨挥发的影响。试验设对照、施用棉花秸秆($12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和等碳量生物炭($4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)三个处理, 每个处理设置不施氮肥和施氮 $450 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 两种条件。试验结果表明, 施用棉花秸秆和生物炭可显著降低土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量, 分别较对照降低 8.01%~19.88% 和 5.49%~9.90%。棉花秸秆及其生物炭处理土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量和脲酶活性在不施氮肥条件下显著降低, 而在施氮肥条件下显著增加。不施氮肥条件下, 棉花秸秆和生物炭处理土壤氨挥发较对照分别降低 22.06% 和 21.27%; 而在施氮 $450 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下, 分别降低 30.58% 和 40.59%。因此, 棉花秸秆及其生物炭还田都可以减少滴灌棉田氨挥发, 其中生物炭还田效果更显著, 是一种更好的秸秆利用方式。

关键词: 棉花秸秆; 生物炭; 滴灌; 氮肥; 氨挥发

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)10-1987-08 doi:10.11654/jaes.2014.10.016

Effects of Cotton Stalk and Its Biochar on Ammonia Volatilization from a Drip Irrigated Cotton Field

LI Qi, LIAO Na, ZHANG Ni, RU Si-bo, HOU Zhen-an*

(Department of Resources and Environmental Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Ammonia volatilization is an important pathway of fertilizer N loss in arid regions. A field study was performed to determine the effects of cotton stalk and its biochar on soil inorganic N concentrations and ammonia volatilization in a drip-irrigated cotton field with and without N fertilization. The experiment included three soil treatments: unamended soil (control), cotton stalk-amended soil ($12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), and biochar-amended soil ($4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). The amount of C inputs was the same in both cotton stalk and biochar treatments. Nitrogen fertilizer was applied at two rates: 0 or $450 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$. Compared with the unamended control, soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentrations were 8.01%~19.88% lower in the cotton stalk-amended and 5.49%~9.90% less in the biochar-amended treatment. Both soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentrations and urease activities were reduced by either cotton stalk or the biochar under no N fertilization, but increased under N fertilization. Under the unfertilized treatments, soil ammonia volatilization was 22.06% and 21.27% less in the cotton stalk-amended and biochar-amended soils than in the control, respectively. Under the fertilized treatments, however, ammonia volatilization was reduced by 30.58% in the cotton stalk-amended soil and 40.59% in the biochar-amended soil compared to the control. In conclusion, applying either cotton stalk or cotton stalk-derived biochar significantly reduces ammonia volatilization in drip-irrigated cotton fields. Biochar shows more effectiveness in lowering ammonia volatilization.

Keywords: cotton stalk; biochar; drip irrigation; nitrogen fertilizer; ammonia volatilization

土壤氨挥发是农田氮素损失的重要途径之一, 这不仅降低了氮肥利用率而且挥发释放的氨气还会对

环境造成污染^[1]。全世界施入土壤的氮肥中 1%~47% 以土壤氨挥发的形式进入大气^[2]。朱兆良等^[3]指出我国农田氮肥的氨挥发约为 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%。

土壤氨挥发受气候条件、土壤性质、施肥、灌溉以及耕作方式等多方面因素的影响^[4-8], 其根本在于影响土壤铵态氮的含量以及土壤对铵态氮和氨气的吸附能力。降低土壤中铵态氮含量, 增强土壤对铵态氮和

收稿日期: 2014-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(31160415); 新疆生产建设兵团杰出青年创新资金专项(2014CD002)

作者简介: 李琦(1989—), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事农业资源高效利用的研究。E-mail: liqi472560420@163.com

* 通信作者: 侯振安 E-mail: hzaty1@163.com

氨气的吸附能力是降低土壤氨挥发的主要途径^[9]。秸秆还田是世界上普遍重视的一项培肥地力的增产措施,在农业生产中推广使用多年,但有关秸秆还田对土壤氨挥发影响的研究较少,且研究结果不尽相同。现有的结果主要认为施用秸秆可以降低土壤铵态氮含量、减少土壤氨挥发^[10-11];但也有学者认为秸秆还田会促进土壤氨挥发,Wang等^[12]报道稻田施用小麦秸秆后土壤氨挥发增加15.8%~21.3%,认为可能是由于土壤铵态氮和pH增加以及氧化还原电位下降所致。

近年来,将农田废弃物(如秸秆)制成生物炭还田被认为是土壤增汇减排的一种关键途径^[13]。生物炭是一种含碳量高且更为稳定的有机碳,具有发达的孔隙结构,较大的表面积和阳离子交换量,对土壤中氮素的转化或损失途径具有显著影响^[14]。生物炭能够吸附NH₃^[15],通过提高土壤阳离子代换能力增强对NH₄⁺的固持作用^[16];同时,也会提高土壤氮素的硝化速率^[17],从而减少土壤氮素的气态损失^[18]。

新疆是我国重要的棉花生产基地,种植面积约占全国的1/3,总产量超过全国的50%。新疆拥有丰富的棉花秸秆资源,通常以直接还田利用为主。本试验通过对棉花秸秆两种不同利用方式(直接还田和制备成生物炭还田)下滴灌棉田土壤无机氮含量、脲酶活性以及氨挥发的监测分析,阐明棉花秸秆及其生物炭对土壤氨挥发的影响,为我国干旱地区秸秆和生物炭的合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2012—2013年在石河子大学农学院试验站进行。土壤类型为灌耕灰漠土,土壤质地为壤土,pH7.8,有机质9.42 g·kg⁻¹,全氮0.19 g·kg⁻¹,碱解氮36.76 mg·kg⁻¹,有效磷27.42 mg·kg⁻¹,速效钾284.82 mg·kg⁻¹,铵态氮1.72 mg·kg⁻¹,硝态氮6.87 mg·kg⁻¹。

棉花秸秆采自当地棉田,有机碳385 g·kg⁻¹,全氮1.60 g·kg⁻¹,全钾6.00 g·kg⁻¹。生物炭由棉花秸秆在450℃下厌氧热解6h制成(棉花秸秆制备生物炭的

转化率为37.5%),有机碳625 g·kg⁻¹,全氮0.89 g·kg⁻¹,全钾8.60 g·kg⁻¹。棉花秸秆和生物炭烘干粉碎,过2mm筛后备用。供试作物为棉花(品种为新陆早52)。

1.2 试验设计

研究采用田间小区试验,设对照(空白土壤)、施用棉花秸秆(12.0 t·hm⁻²)和棉花秸秆生物炭(4.5 t·hm⁻²,与秸秆等碳量)三个处理,分别用CK、ST、BC表示。每个土壤处理设置不施氮肥(N0)和施氮肥450 kg N·hm⁻²(N450)两种条件,其中450 kg N·hm⁻²为当地滴灌棉田的氮肥推荐用量。试验采用随机区组设计,6个处理,每个处理重复3次,共18个试验小区,小区面积2.16 m²,各小区间设0.80 m隔离带。

2012—2013年试验期间,棉花秸秆和秸秆生物炭在2012年试验开始前一次性施入,将棉花秸秆和秸秆生物炭与基肥混合后,均匀撒施于地表,随后翻耕入土,翻耕深度20 cm。在第二年(2013)试验期间进行农田土壤氨挥发动态监测,并测定相关土壤理化指标。

棉花种植采用覆膜栽培,一膜4行,行距配置为30 cm+60 cm+30 cm,株距10 cm。灌溉方式为膜下滴灌,一膜两管,滴灌毛管间距90 cm,滴头间距40 cm。试验棉田的灌水和施肥措施参照当地大田生产。为保证棉花出苗,播种后滴出苗水45 mm。棉花生长期灌溉定额为450 mm,6月上旬开始至8月中下旬结束,共灌水9次,灌水周期为7~12 d,每次灌水定额为45~60 mm(土壤含水量保持在田间持水量的60%~80%)。试验中磷、钾肥全部作基肥,施用量分别为105 kg P₂O₅·hm⁻²和75 kg K₂O·hm⁻²。氮肥使用尿素,除20%(90 kg N·hm⁻²)作基肥一次施入外,其余80%(360 kg N·hm⁻²)作追肥在棉花生长期分5次随水施入,从第3次灌水开始至第7次灌水结束,灌水施肥周期为7 d。2013年棉花生长期灌水和氮肥追施的具体时间和用量见表1。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤氨挥发监测

重点监测氮肥追施后的土壤氨挥发状况。根据滴灌棉田氮肥追施的具体情况,选择氮肥追施量较大且

表1 棉花生长期灌水和氮肥追施时间及用量

Table 1 Dates and amount of irrigation and N fertilizer during cotton growth season

灌水次数 Irrigation Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
灌水日期 Irrigation Date /m-d	06-06	06-18	06-28	07-05	07-12	07-19	07-26	08-05	08-17
灌水量 Irrigation amount/mm	45	45	45	60	60	60	45	45	45
施氮量 N rate/kg·hm ⁻²	—	—	60	80	80	80	60	—	—
灌水周期 Irrigation interval/d	12	10	7	7	7	7	10	12	

具有一定代表性的棉花生长阶段(花铃期)进行动态监测。土壤氮挥发的动态监测从第2次氮肥追施开始至第5次追施前结束(即第4~6次灌水),监测周期为21 d(7月5日至7月25日,分别在7月5日、7月12日和7月19日进行了三次灌水施肥,每个灌溉施肥周期为7 d)。氮挥发监测采用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀硫酸密闭吸收法^[19],将20 mL $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀硫酸加入50 mL的蒸发皿中,用铁丝架支起,使蒸发皿与地面保持7 cm的距离,蒸发皿上罩以高10 cm、直径15 cm、顶端封口的PVC管,每个处理随机设置三个监测点(置于作物行间,滴灌毛管的滴头正上方)。从7月5日灌水施肥的当天开始监测,每天早晨8:00取样,将蒸发皿中的稀硫酸倒入100 mL的三角瓶,用橡皮塞塞紧,同时向蒸发皿中重新加入20 mL稀硫酸。将三角瓶中的稀硫酸带回实验室,采用靛酚蓝-分光光度法测定氮挥发量。

1.3.2 土壤理化指标测定

土壤样品采样周期与氮挥发监测周期相同,在每个氮挥发监测点附近随机选择三个样点,分别于每次

灌水施肥后1、3、5 d用土钻采集0~20 cm土壤样品。一部分土样直接测定土壤含水量、pH、铵态氮和硝态氮含量,另一部分土样风干后测定脲酶活性。

土壤含水量采用烘干法测定;土壤pH采用pHS-3C型精密pH计(上海精密科学仪器有限公司)测定1:2.5土壤浸提液pH;土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提,全自动间断化学分析仪测定(SmartChem140, AnalytikJena AG);土壤脲酶活性采用次氯酸钠-苯酚比色法测定^[20]。

1.4 数据分析

数据处理和统计分析采用Microsoft Excel 2003和SPASS 11.5软件。

2 结果与分析

2.1 土壤pH和含水量

在一个灌溉施肥周期内(7 d),不同处理0~20 cm土壤pH和含水量的变化如图1所示(不同灌溉施肥周期内的趋势基本相似)。灌水施肥后土壤pH呈先降低后升高的趋势;N0条件下,BC和ST处理土壤

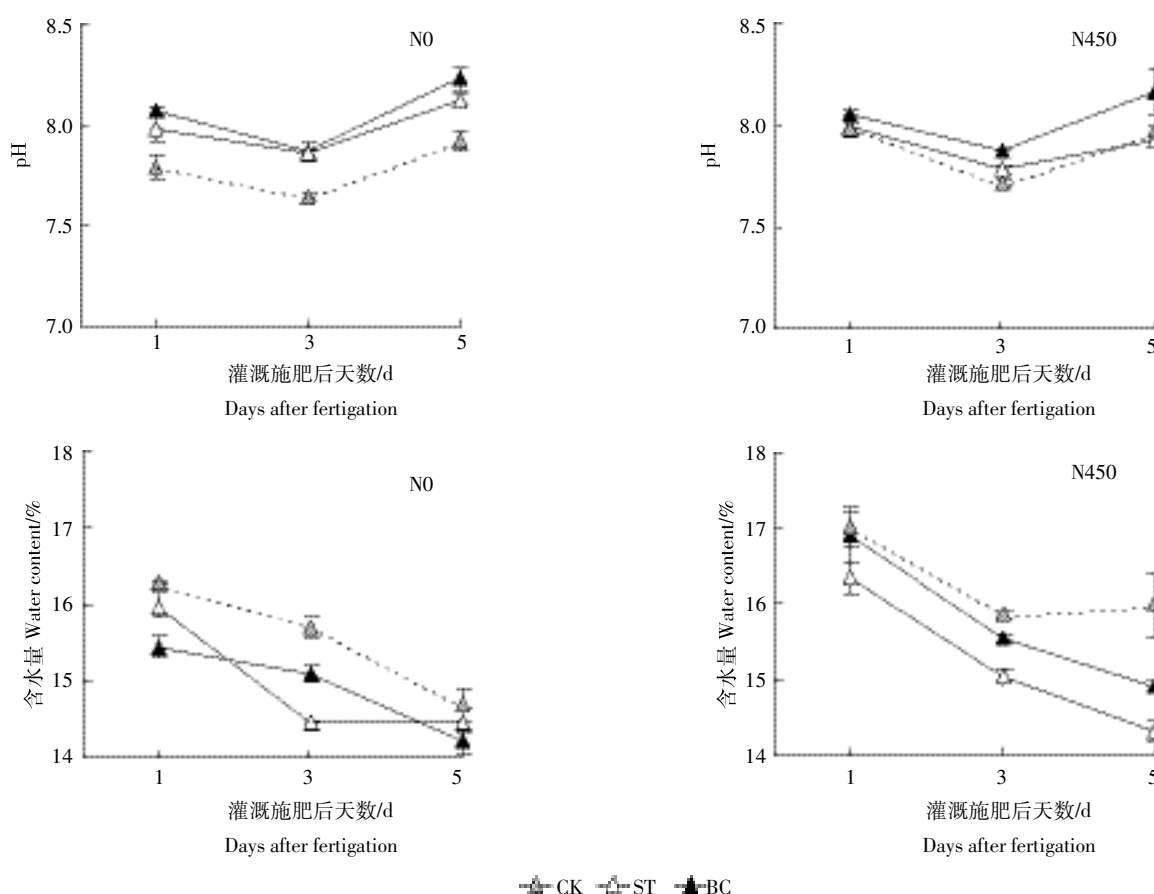


图1 不同处理对土壤pH和含水量的影响

Figure 1 Influence of different amendments on soil pH and water content

pH 显著高于 CK;N450 条件下,不同处理土壤 pH 在施肥后 1 d 差异较小,但在施肥后 3 和 5 d,BC 处理土壤 pH 显著高于 ST 和 CK。

总体上,灌水施肥后土壤含水量呈逐渐降低趋势。CK 处理土壤含水量显著高于 ST 和 BC 处理,尤其是灌水后第 5 d,N450 条件下,CK 处理土壤含水量较 ST 和 BC 处理分别增加了 11.67%和 7.21%。其主要原因可能是施用棉花秸秆和生物炭促进了棉花生长,植株水分蒸腾量增加,导致土壤含水量下降。

2.2 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量

灌水施肥后第 1 d,CK 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最高,ST 处理次之,BC 处理最低;第 3 d 时,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量表现为 $\text{BC} > \text{CK} > \text{ST}$;第 5 d 时,不同处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量差异不大(图 2)。N0 条件下,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在灌水后 1~5 d 呈逐渐降低趋势,CK 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降最快,其次是 ST 处理,BC 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的下降较为缓慢。从土壤铵态氮的平均含量来看,ST 和 BC 处理较 CK 分别降低 8.01%和 5.49%。N450

条件下,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈先增加后降低趋势,ST 和 BC 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均含量较 CK 分别降低 19.88%和 9.90%。

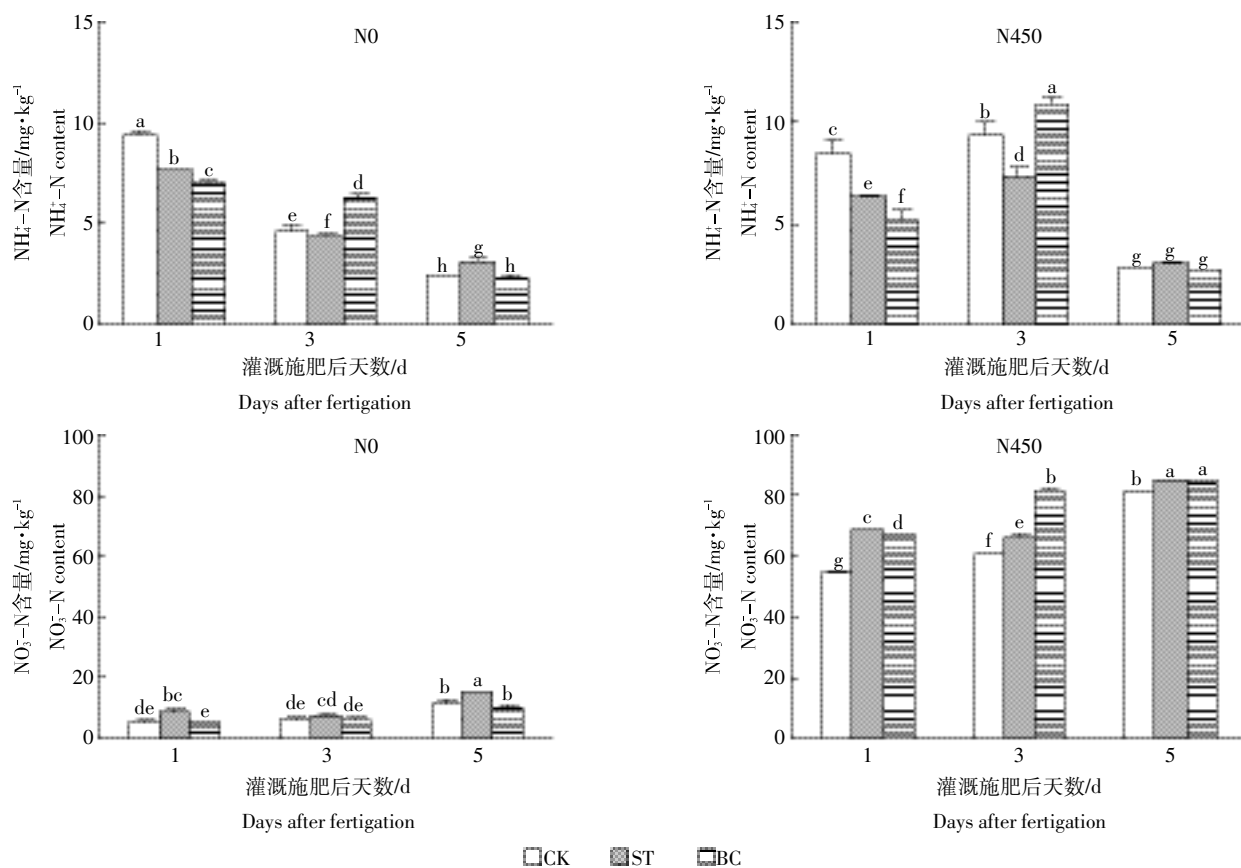
土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在灌水施肥后呈逐渐增加趋势(图 2)。N0 条件下,ST 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高,较 CK 平均增加 34.68%;BC 处理与 CK 差异不显著。N450 条件下,ST 和 BC 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均显著高于 CK,分别增加 11.82%和 18.98%,不同灌溉施肥周期内的趋势基本相似。

2.3 土壤脲酶活性

N0 条件下,土壤脲酶活性先增加后降低;ST 和 BC 处理土壤脲酶活性平均较 CK 分别降低了 5.59%和 5.32%(图 3)。N450 条件下,土壤脲酶活性显著增加且变化较小,仅在灌溉施肥后第 5 d 有所降低;ST 和 BC 处理土壤脲酶活性较 CK 分别平均增加了 0.93%和 8.72%。

2.4 土壤氨挥发动态

N0 条件下,土壤氨挥发的波动相对较小,没有出



不同小写字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$ 。下同

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between treatments. The same below

图 2 不同处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响

Figure 2 Influence of different amendments on soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations

现明显的高峰(图 4)。总体上,CK 的土壤氨挥发量在整个监测期间(7 月 5 日—7 月 25 日)都高于 ST 和 BC 处理。

N450 条件下,土壤氨挥发量明显增加(图 4)。不同处理土壤氨挥发均表现为每次灌溉施肥后迅速增加,随后逐渐降低,其中施肥后的 2~3 d 土壤氨挥发量最大。在三个灌溉施肥周期内(每个灌溉施肥周期为 7

d), 前 3 d 的土壤氨挥发量分别占 61.14%~69.80%(7 月 5 日—7 月 11 日)、60.95%~65.39%(7 月 12 日—7 月 18 日)和 61.59%~77.12%(7 月 19 日—7 月 25 日),平均占 66.52%。三个处理 CK、ST 和 BC 前 3 d 的土壤氨挥发量分别占 70.22%、67.69%和 61.66%。CK 处理的土壤氨挥发量在整个监测期间也均明显高于 ST 和 BC 处理。

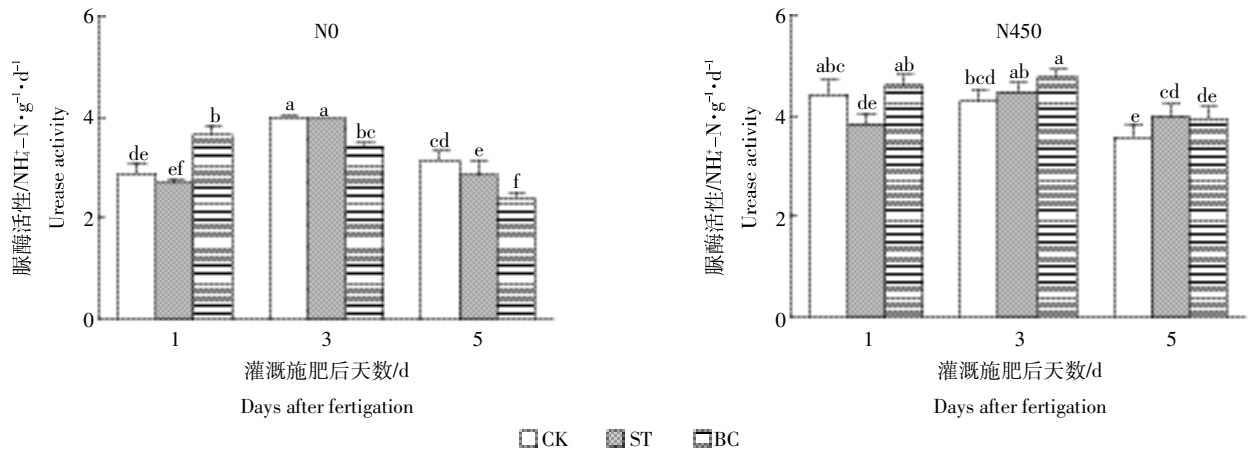
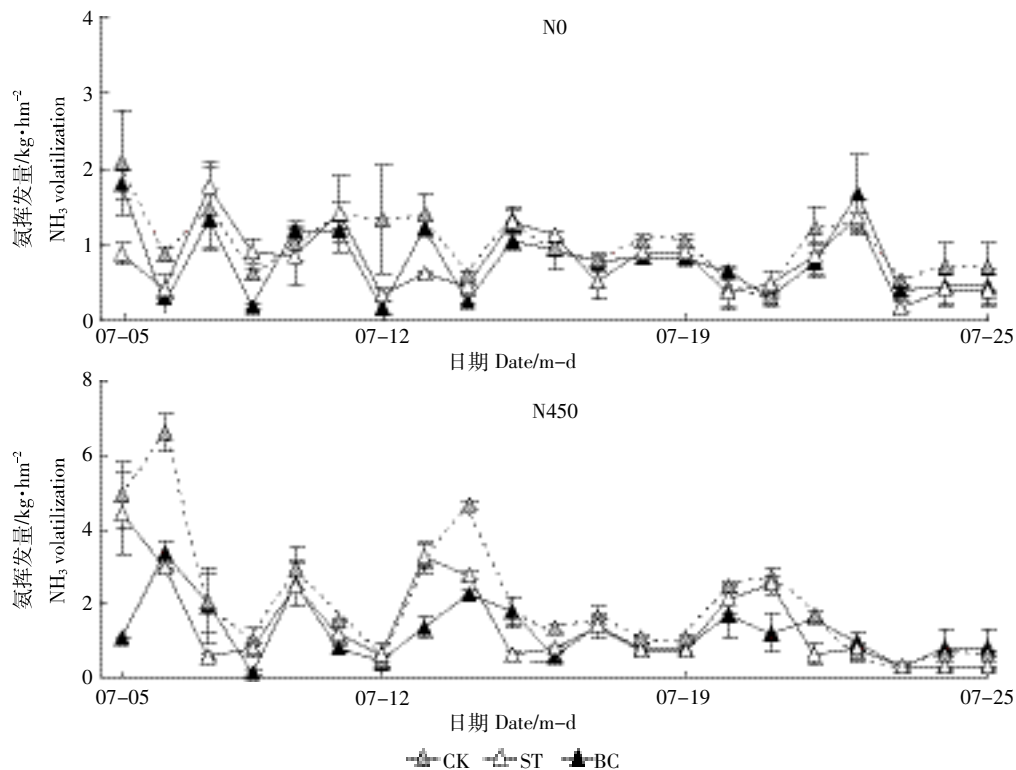


图 3 不同处理对土壤脲酶活性的影响

Figure 3 Influence of different amendments on soil urease activity



07-05、07-12 和 07-19 为三次灌溉施肥日期

Nitrogen was applied with irrigation water on three dates(07-05, 07-12 and 07-19)

图 4 监测期间的土壤氨挥发动态

Figure 4 Dynamics of soil ammonia volatilization during monitoring period

2.5 氨挥发积累量

试验监测期间不同处理的土壤氨挥发积累量见图5。N0条件下,ST和BC处理土壤氨挥发积累量差异不大,均显著低于CK,较CK分别降低22.06%和21.27%。N450条件下,BC处理土壤氨挥发积累量最低,ST处理次之,CK最高,ST和BC处理土壤氨挥发积累量分别较CK降低30.26%和42.81%。施用氮肥会显著增加土壤氨挥发量,N450条件下土壤氨挥发积累量较N0平均增加79.40%。

3 讨论

秸秆还田作为一种耕作措施已经推行多年,由于秸秆直接还田矿化分解速度快,秸秆经过高温厌氧处理得到的生物炭是一种含碳量高且更为稳定的有机碳^[13]。近年来,针对秸秆或生物炭对土壤氨挥发影响的研究已得到开展,但有关二者之间的比较研究还鲜见报道。土壤pH是影响土壤氨挥发的重要因素,普遍认为pH越高土壤氨挥发越强烈^[21-22]。本研究中不同处理土壤pH在7.7~8.2之间,施用生物炭土壤pH有所增加,但土壤氨挥发量却明显降低,这可能与生物炭具有很强的吸附作用有关。Chen等^[16]研究发现在pH=7(或8)时,生物炭的吸附作用可以显著降低氨挥发。

土壤 NH_4^+-N 含量是影响土壤氨挥发的关键因素^[9],土壤氨挥发速率随表层土壤 NH_4^+-N 含量的增加而增大^[23],降低土壤 NH_4^+-N 含量有利于减少土壤氨挥发。本研究表明不施氮肥条件下,棉花秸秆和生物炭处理土壤 NH_4^+-N 平均含量较对照分别降低8.01%和5.49%;施氮 $450\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下,土壤 NH_4^+-N 平均含量分别降低19.88%和9.90%。也有研究发现,施用

秸秆后土壤 NH_4^+-N 含量降低8%^[24],施用生物炭可以降低土壤 NH_4^+-N 含量13%~34%^[25],与本试验结果相似。同时,本试验还发现灌溉施肥后土壤 NH_4^+-N 含量总体呈降低趋势,但与棉花秸秆和对照处理相比,生物炭处理土壤 NH_4^+-N 含量的下降较为缓慢。土壤 NH_4^+-N 含量与脲酶活性密切相关,本研究表明,在不施氮肥条件下施用棉花秸秆和生物炭会降低土壤脲酶活性,而在施氮肥(尿素)条件下棉花秸秆和生物炭可显著增加脲酶活性。Yang等^[26]和Wu等^[27]也得到了相同的试验结果。施氮肥(尿素)条件下,秸秆和生物炭虽然提高了脲酶活性,但是土壤 NH_4^+-N 含量却显著降低,可能是施用棉花秸秆和生物炭增强了土壤对铵态氮的吸附,同时促进了硝化作用。本试验结果表明施氮肥(尿素)后,棉花秸秆和生物炭处理土壤 NO_3^--N 含量均显著高于对照。凌慧^[28]和Ball等^[29]的研究也分别得到了施用秸秆和生物炭可以促进硝化作用的结论。

本研究表明施用氮肥(尿素)、棉花秸秆以及生物炭都会对土壤氨挥发产生影响。在试验监测期间,施氮 $450\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下土壤氨挥发积累量较不施氮肥增加了79.40%,施用棉花秸秆和生物炭可以显著减少土壤氨挥发积累量,尤其是在施氮肥条件下,棉花秸秆和生物炭处理土壤氨挥发积累量较对照分别降低了30.26%和42.81%。目前一些学者也得到了相似的结果:Dong等^[11]研究发现不同处理土壤氨挥发损失量为单施尿素>尿素+玉米秸秆>尿素+小麦秸秆;Wang等^[30]试验结果表明施用芦苇秸秆可以减少氨挥发;Steiner等^[31]发现堆肥中添加不同量的生物炭可以减少氨挥发47%~55%,他们认为这是由于生物炭对 NH_4^+-N 和 NH_3 的吸附;Taghizadeh-Toosi等^[15]采用 ^{15}N

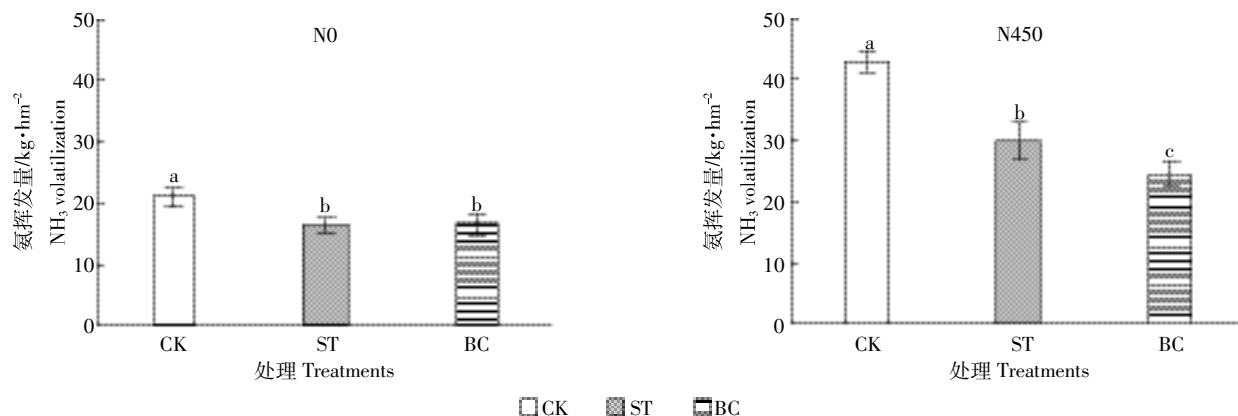


图5 监测期间的土壤氨挥发积累量

Figure 5 Cumulative ammonia volatilization from soils with different treatments during monitoring period

同位素标记尿素的试验结果表明施用 15、30 t·hm⁻² 生物炭均可以使氨挥发量减少 45%。

本研究发现,滴灌棉田土壤氨挥发在每次灌溉施肥后迅速增加,随后逐渐降低,土壤氨挥发损失集中出现在施肥之后的 2~3 d。虽然施用棉花秸秆和生物炭都可以显著减少土壤氨挥发积累量,但二者的氨挥发日动态存在明显差异:施肥后第 1 d,施用生物炭显著降低了土壤氨挥发,而施用棉花秸秆的作用不大;第 2 d,生物炭与棉花秸秆均显著降低了土壤氨挥发,但二者间差异不明显;第 3 d,棉花秸秆处理土壤氨挥发降低最明显。这说明棉花秸秆和生物炭在减少土壤氨挥发的机理方面可能存在差异。施用棉花秸秆可能主要是促进硝化作用,降低土壤 NH₄⁺-N 含量,从而减少了氨挥发;而生物炭一方面具有大量的孔洞结构、巨大的表面积和负电荷量,对土壤 NH₄⁺-N 有较强的离子交换吸附能力和一定吸附容量^[13],减少了氨挥发,另一方面也促进了硝化作用使 NH₄⁺转化为 NO₃⁻。有研究认为施用生物炭可以促进硝化作用^[29,32]:一是生物炭能够吸附酚类化合物,降低其对硝化过程的抑制作用^[33];二是生物炭表面吸附的氧化物如 CaO、MgO、CrO 等对 NH₄⁺-N 和 NH₃ 具有氧化作用^[34];三是生物炭的孔隙结构有利于微生物生长,提高土壤硝化微生物的数量和活性^[35]。

本研究连续开展了两年田间试验,在试验第二年对施用棉花秸秆及其生物炭的滴灌棉田土壤氨挥发进行了动态监测,结果表明施用棉花秸秆及其生物炭均可显著降低土壤氨挥发,且棉花秸秆制备成生物炭还田降低氨挥发作用比棉花秸秆直接还田更显著。但是,田间试验的环境条件变化较大,影响土壤氨挥发的因素很多,同时本研究仅监测了滴灌棉田连续三个灌溉施肥周期的土壤氨挥发,未能对农田全年的氨挥发动态和总量进行观测。因此,棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发的影响及其作用机制还需进一步系统、深入的研究。

4 结论

棉花秸秆及其生物炭还田都可以显著减少滴灌棉田土壤氨挥发。不施氮肥条件下,施用棉花秸秆和生物炭的土壤氨挥发差异不显著;但在施氮肥条件下,施用生物炭的滴灌棉田氨挥发显著低于施用棉花秸秆。因此,棉花秸秆制成生物炭还田有利于降低滴灌棉田土壤氨挥发,是一种较好的秸秆利用方式。

参考文献:

- [1] Lal R B, Kissel D E, Cabrera M L, et al. Kinetics of urea hydrolysis in wheat residue[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(8):1033-1036.
- [2] Tian G M, Cao J L, Cai Z C, et al. Ammonia volatilization from winter-wheat field top dressed with urea[J]. *Pedosphere*, 1998, 8(4):331-336.
- [3] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科技出版社, 1992: 171-185.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992, 171-185.
- [4] 朱兆良. 我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展[J]. 土壤, 1985, 17(1):2-9.
ZHU Zhao-liang. Progress of soil nitrogen and fertilizer for the wherea-hous of the study[J]. *Soil*, 1985, 17(1):2-9.
- [5] Sigunga D O, Janssen B H, Oenema O. Ammonia volatilization from Vertisols[J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(2):195-202.
- [6] Bussink D W. Relationships between ammonia volatilization and nitrogen fertilizer application rate, intake and excretion of herbage nitrogen by cattle on grazed swards[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1994, 38(2):111-121.
- [7] Marcote I, Hernández T, García C, et al. Influence of one or two successive annual applications of organic fertilizers on the enzyme activity of a soil under barley cultivation[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 79(2): 147-154.
- [8] Xu J G, Heeraman D A, Wang Y. Fertilizer and temperature effects on urea hydrolysis in undisturbed soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 16(1):63-65.
- [9] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2009, 9(1):1-6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2009, 9(1):1-6.
- [10] Shahandeh H, Cabrera M L, Sumner M E. Ammonia volatilization from urea, ammonium sulfate and NutraSweet sludge in bare and straw-covered soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, 23(7-8):775-786.
- [11] Dong W X, Hu C S, Zhang Y M, et al. Ammonia volatilization from urea incorporation with wheat and maize straw on a loamy soil in China[C]// The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium. Davis; Department of Plant Sciences, UC Davis, 2009.
- [12] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Effect of wheat straw application on ammonia volatilization from urea applied to a paddy field[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(1):73-84.
- [13] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2):395-419.
- [14] 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.
- [15] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, et al. A wood based low-temperature biochar captures NH₃-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353(1-

- 2):73–84.
- [16] Chen C R, Phillips I R, Condon L M, et al. Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilization from bauxite processing residue sand[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1–2):301–312.
- [17] 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.
- [18] Xu M G, Lou Y L, Sun X L, et al. Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(7):745–752.
- [19] 周伟, 田玉华, 曹彦圣, 等. 两种氨挥发测定方法的比较研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(5):1090–1095.
- ZHOU Wei, TIAN Yu-hua, CAO Yan-sheng, et al. A comparative study on two methods for determination of ammonia volatilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 47(7):745–752.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京:农业出版社, 1986:274–338.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and research methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986:274–338.
- [21] 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 Zhao-hui, ZENG Qing-ru, FANG Zhi, 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.
- [22] Dancer W S, Peterson L A, Chesters G. Ammonification and nitrification of N ass influenced by soil pH and previous N treatments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(1):67–69.
- [23] 杨淑莉, 朱安宁, 张佳宝, 等. 不同施氮量和施氮方式下田间氨挥发损失及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3):415–421.
- YANG Shu-li, ZHU An-ning, ZHANG Jia-bao, et al. Ammonia volatilization loss and its affecting factors under different amounts and ways of N application in field[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(3):415–421.
- [24] 黄华, 黄懿梅, 刘学玲, 等. 覆盖处理对猪粪秸秆堆肥中氮素转化和堆肥质量的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3):780–786.
- HUANG Hua, HUANG Yi-mei, LIU Xue-ling, et al. Effect of covering on nitrogen transformation and the quality of pig manure-straw compost[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3):780–786.
- [25] 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 Fan, LI Fei-yue, ZHAO Ling, et al. Influence of biochar on the transformation of ammonia nitrogen in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1016–1020.
- [26] Yang Y G, Yan J L, Ding C. Effects of biochar amendment on the dynamics of enzyme activities from a paddy soil polluted by heavy metals[J]. *Advanced Materials Research*, 2012(610–613):2129–2133.
- [27] Wu F P, Jia Z K, Wang S G, et al. Contrasting effects of wheat straw and its biochar on greenhouse gas emissions and enzyme activities in a Chernozemic soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(5):555–565.
- [28] 凌慧. 免耕与秸秆施用对农田土壤呼吸、硝化和反硝化作用的影响[D]. 南京:南京信息工程大学, 2012:23–24.
- LING Hui. Effect of no-tillage and straw addition on respiration rate, nitrification and denitrification in farmland soil[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012:23–24.
- [29] Ball P N, MacKenzie M D, DeLuca T H, et al. Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4):1243–1253.
- [30] Wang J Z, Hu Z Y, Zhou X Q, et al. Effects of reed straw, zeolite, and superphosphate amendments on ammonia and greenhouse gas emissions from stored duck manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4):1221–1227.
- [31] Steiner C, Das K C, Melear N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4):1236–1242.
- [32] Berglund L M, DeLuca T H, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12):2067–2073.
- [33] Kookana R S, Sarmah A K, Van Zwieten L, et al. Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences[J]. *Advances in Agronomy*, 2011, 112(10):103–143.
- [34] 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.
- [35] Streubel J D, Collins H P, Garcia-Perez M, et al. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(4):1402–1413.