

猪炭和竹炭的理化特性差异及其对菜地土壤氨挥发的影响

陆扣萍^{1,2}, 郭茜^{1,2}, 胡国涛^{1,2}, 杨兴¹, 许晓丽^{1,2}, 王海龙^{1,2}

(1. 浙江农林大学 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 以动物源的猪炭和植物源的竹炭为试验材料, 探讨不同原材料制备所得生物质炭的特性差异。同时以南方设施菜地为研究对象, 试验以不施用生物质炭处理为对照(ck), 通过田间小区试验研究生物质炭的种类(猪炭和竹炭)和施用方式(一次施用和分批施用)对空心菜 *Ipomoea aquatica*-小青菜 *Brassica chinensis* 轮作土壤氨挥发的影响。结果表明: 猪炭的含磷量较高, 含碳量较低, 灰分含量高, 与竹炭的高含碳量和低灰分含量差别较大。土壤氨挥发速率与土壤温度呈极显著相关($P < 0.01$), 空心菜季土壤氨挥发损失高于小青菜季。猪炭和竹炭处理显著($P < 0.05$)降低了两茬空心菜季土壤氨挥发, 而对小青菜季土壤氨挥发没有显著性影响。与分批施用处理相比, 一次施用处理下第1茬空心菜季土壤氨挥发分别减少了28.7%和13.3%, 且猪炭的效果优于竹炭。对于第2茬空心菜季土壤氨挥发, 各生物质炭处理间没有显著性差异。与对照相比, 一次性施用 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 猪炭处理下空心菜-小青菜轮作周期土壤氨挥发总损失降低了41%。与竹炭相比, 猪炭对土壤氨挥发的抑制效果更佳。图3表4参29

关键词: 土壤学; 生物质炭; 设施菜地; 氨挥发; 施用方式

中图分类号: S143.1; S788.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)04-0647-09

Physiological and biochemical characteristics of pig versus bamboo biochars and their effects on ammonia volatilization in greenhouse vegetable production

LU Kouping^{1,2}, GUO Xi^{1,2}, HU Guotao^{1,2}, YANG Xing¹, XU Xiaoli^{1,2}, WANG Hailong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To evaluate the effect of feedstock materials on characteristics of biochar products from a pig-derived biochar (PB) and a bamboo-derived biochar (BB), biochar properties were evaluated and compared in a laboratory study. A field experiment was also carried out to evaluate the effect of PB and BB on soil ammonia volatilization in an *Ipomoea aquatica*-*Brassica chinensis* rotation system in a greenhouse at Banqiao Town, Lin'an City, Zhejiang Province, China. Treatments included (1) a control (no biochar); (2) one application of $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ PB (20-0-PB) prior to the first *I. aquatica* crop; (3) one application of $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of BB (20-0-BB) prior to the first *I. aquatica* crop; (4) two applications of PB with $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ being applied prior to the *I. aquatica* season and the remaining PB being applied prior to the *B. chinensis* season at an application rate of $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (10-10-PB); and (5) two applications of BB with $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ being applied prior to the *I. aquatica* season and the remaining BB being applied prior to the *B. chinensis* season at an application rate of $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (10-

收稿日期: 2016-09-14; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41401338, 21577131)

作者简介: 陆扣萍, 实验师, 从事农林生态系统碳氮循环和生物质炭的环境功能研究。E-mail: kkp111@163.com. 通信作者: 王海龙, 教授, 博士, 博士生导师, 从事生物质炭的环境功能和土壤修复研究。E-mail: hailong@zafu.edu.cn

10-BB). Results showed that PB had higher contents of phosphorus and ash as well as a lower content of carbon than those of BB; whereas, BB had a higher carbon content and a lower ash content than those of PB. The ammonia volatilization rate had a highly significant correlation ($P<0.01$) with soil temperature, and the ammonia volatilization losses in the *Ipomoea aquatica* crop season were higher than in the *Brassica chinensis* crop season. The PB and BB treatments significantly ($P<0.05$) reduced ammonia volatilization losses in the *I. aquatica* crop season, but had no significant effect in the *B. chinensis* crop season. Compared with the 10-10-PB or 10-10-BB treatments, ammonia volatilization losses were significantly ($P<0.05$) reduced with 20-0-PB (28.7%) and 20-0-BB (13.3%) treatments in the first *I. aquatica* crop season, and the PB treatment was more effective than the BB treatment. No significant differences between PB and BB treatments in the second *I. aquatica* crop season were found. Compared with the control, the 20-0-PB treatment reduced ammonia volatilization losses 41% over the whole rotation. In conclusion, pig biochar treatments appeared to be more effective than bamboo biochar treatments in reducing ammonia volatilization losses from the soil. [Ch, 3 fig. 4 tab. 29 ref.]

Key words: soil science; biochar; greenhouse vegetable; ammonia volatilization; application patterns

在中国集约化蔬菜种植地区, 氮肥施用量逐年增加, 南方设施菜地一年三季氮肥施用量高达 $0.9\sim 1.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[1]。大量施用氮肥导致养分资源利用率低, 菜地氮肥表观利用率平均水平仅为 $10\%\sim 20\%$ ^[2]。氨(NH_3)挥发是农田氮素损失的一个重要途径, 菜地土壤的氨挥发损失随施氮量的增加而增加。土壤温度的升高有利于氨态氮($\text{NH}_3\text{-N}$)形成, 气温升高可加速氨的运动和扩散, 从而增加土壤氨挥发损失。已有研究表明: 降低土壤中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量, 增强土壤对铵态氮和氨的吸附能力是降低土壤氨挥发的主要途径之一^[3-4]。目前, 对农田土壤氨挥发的研究大多集中在稻田或露地蔬菜中, 而有关大棚菜地的氨挥发研究较少, 尤其是利用生物质炭阻控菜地氨挥发的研究更为缺乏。生物质炭(biochar), 一般指生物质如农林废弃物、植物组织或动物骨骼等在缺氧条件下高温热解而形成的产物^[5-6]。大多数的生物质炭呈碱性, 具有丰富的孔隙结构和巨大的比表面积等特殊性质, 具有较强的吸附能力, 可有效固持养分, 同时能够减少温室气体排放^[7-8]。生物质炭的种类和用量可直接影响土壤氨挥发。添加棉花 *Gossypium hirsutum* 秸秆生物质炭处理可降低滴灌棉田 41% 的土壤氨挥发累积量^[9]。目前, 生物质炭的原材料以秸秆、木材等植物源农林废弃物、淤泥以及畜禽粪便等为主^[10-11], 以动物骨骼为原料制备骨炭的研究也较普遍^[12], 但是直接将病害动物炭化而制备生物质炭的相关研究较少。中国病死猪数量达 $2\ 000\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$, 其不合理处置带来的环境问题引起广泛关注。因此, 将病死猪热解制备成猪炭在解决环境问题的同时可为生物质炭来源的选择提供一个新途径。另一方面, 动物源生物质炭与植物源生物质炭的性质差异如何, 对土壤氨挥发的影响如何。这些都有待进一步研究。生物质炭施入土壤后随着时间会出现老化行为^[13], 那么在农业生产中生物质炭一次施入与分批多次施入之间的差异如何也尚不清晰。本研究分别选取动物源的猪炭和植物源的竹炭为试验材料, 探讨不同原材料制备所得生物质炭的特性差异, 同时以浙江苕溪流域设施菜地为研究对象, 通过田间小区试验研究生物质炭的种类、用量及施用方式对菜地土壤氨挥发的影响, 并探讨土壤氨挥发与温度之间的关系, 以期为中国南方设施菜地生物质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 2015 年 6-10 月在浙江省临安市板桥镇花戏村的设施蔬菜大棚中进行。试验地土壤为砂质黏壤土(砂粒 62.0%, 黏粒 15.5%, 粉粒 22.5%), 0~20 cm 土壤基本理化性质如下: pH(H_2O)值为 pH 4.23, 电导率 $0.10\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 有机质 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态氮 $66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 $88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $109\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试猪炭(PB)和竹炭(BB)分别由整头病死猪和竹产品加工剩余物在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 下缺氧热解制成。2 种生物质炭烘干粉碎, 过 3 mm 筛后备用。

1.2 试验设计

本试验选择空心菜 *Ipomoea aquatica*-小青菜 *Brassica chinensis* 轮作。第 1 季从 2015 年 6 月 18 日播种空心菜开始，2015 年 7 月 29 日收获第 1 茬空心菜，2015 年 8 月 19 日收获第 2 茬空心菜，生长周期为 65 d。第 2 季从 2015 年 9 月 9 日播种小青菜开始，2015 年 10 月 15 日收获，生长周期为 40 d。

两季蔬菜的有机肥(含氮量为 15.0 g·kg⁻¹ 的鸡粪)、五氧化二磷、氧化钾施肥量分别为 150, 50, 90 kg·hm⁻²，作为基肥一次性施入土壤。空心菜季化肥(氮)施用量为 150 kg·hm⁻²，采用 1 次基肥 1 次追肥的方式，按 50%和 50%的比例施加，第 1 茬空心菜收获后开始追肥。小青菜季化肥(氮)施用量为 75 kg·hm⁻²，作为基肥一次性施入土壤。氮肥施用普通尿素。

以不施加生物质炭处理为对照(ck)。在空心菜-小青菜轮作过程中，采用一次性施加 20 t·hm⁻² 和分 2 次(每季蔬菜各施 1 次)各施加 10 t·hm⁻² 生物质炭 2 种施用方式，共 4 个处理(表 1)。小区面积为 12 m²(3 m × 4 m)，重复 4 次·处理⁻¹，按照随机区组排列。化肥施入土壤后，再施用生物质炭，翻耕 20~30 cm，翻耕均匀后进行播种，分批施用生物质炭处理于 2015 年 6 月 18 日在播种空心菜时与肥料基肥一起完成第一批施加，于 2015 年 9 月 9 日播种小青菜当天与肥料基肥部分一同施加，完成剩余 10 t·hm⁻² 生物质炭的追施。田间水管理采用喷灌方法，在播种及施肥后进行充分喷灌，之后视土壤干湿情况适当浇水。

表 1 不同处理生物质炭的施用

处理	生物质炭类型 和施用方式	生物质炭施用量/(t·hm ⁻²)		
		空心菜	小青菜	总量
对照	不施生物质炭	0	0	0
10-10-PB	分批施猪炭	10	10	20
20-0-PB	一次施猪炭	20	0	20
10-10-BB	分批施竹炭	10	10	20
20-0-BB	一次施竹炭	20	0	20

1.3 样品的采集与测定方法

1.3.1 生物质炭基本理化性质的测定 生物质炭的 pH 值以 *m*(炭):*m*(水)=1.0:20.0，间接性搅拌 1 h 后，用 pH 计(FiveEasy Plus FE20，瑞士)测定。按 1:10 混匀，充分搅拌后在 25 ℃条件下用电导率仪(DDS-307 型，上海虹益仪器仪表有限公司)测定电导率(EC)。生物质炭灰分质量分数根据美国材料与试验协会(ASTM)D1762-1984《木炭的化学分析标准》测定。生物质炭的碳(C)和氮(N)质量分数用元素分析仪(Flash EA1112，美国菲尼根质谱公司)测定。有机碳、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾质量分数根据国际生物质炭协会(IBC)生物质炭标准法^[14]。生物质炭比表面积的测定采用 77 K 条件下氮气吸附法。步骤简述如下：样品在 573 K，10⁻² Pa 条件下脱气 8 h 后，在 0.05~0.30 相对压强下用表面分析仪(TristarII 3020,美国麦克仪器公司)测定比表面积。分别使用发射扫描电镜(SU-8010，日立公司，日本)和能谱仪(Aztec X-Max^N，美国牛津仪器公司)测定生物质炭的表面结构、形态和表面元素组成。

1.3.2 氮挥发采集与测定 氮挥发采用连续动力抽气密闭室法。每次施肥后进行喷灌浇水，于每日 8:00-10:00 和 14:00-16:00 分 2 次各连续抽气 2 h，连续采集 7 d，直到各施炭处理与对照之间无显著差异。详细方法介绍及氮挥发量计算参照文献[15]。同时记录每天土壤温度和气温。

1.4 土壤基本理化性质测定

土壤理化性质的分析测定参照鲁如坤《土壤农业化学分析方法》^[16]，其中，土壤 pH 值采用 *m*(土):*m*(水)=1.0:2.5，FE20 型酸度计[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]测定；土壤电导率按照 *m*(土):*m*(水)=1.0:5.0，采用 DDS-307 电导率仪测定；有机质采用外加热重铬酸钾氧化-容量法测定；土壤无机氮采用 2 mol·L⁻¹ 氯化钾溶液浸提，浸提液采用紫外分光光度计-双波长法测定硝态氮(NO₃⁻-N)，靛酚蓝比色法测定铵态氮(NH₄⁺-N)；有效磷(Olsen-P)采用 Olsen 法，0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠浸提，比色法(UVA 132122 分光光度计，美国热电公司)测定；速效钾测定采用 1.0 mol·L⁻¹ 的醋酸铵浸提-火焰分光光度法。

1.5 数据处理

应用 SPSS 17.0 进行数据分析，采用单因素方差分析和 Duncan’s 多重比较评价不同处理对土壤氮挥发速率、氮挥发累积量影响的显著性，表中不同小写字母表示处理 *P*<0.05 水平下具有统计学差异。采用一元线性回归分析法分析土壤氮挥发与土壤温度、大气温度的相关性。应用 Origin 8.0 和 Excel 2007 软件作图。

2 结果与分析

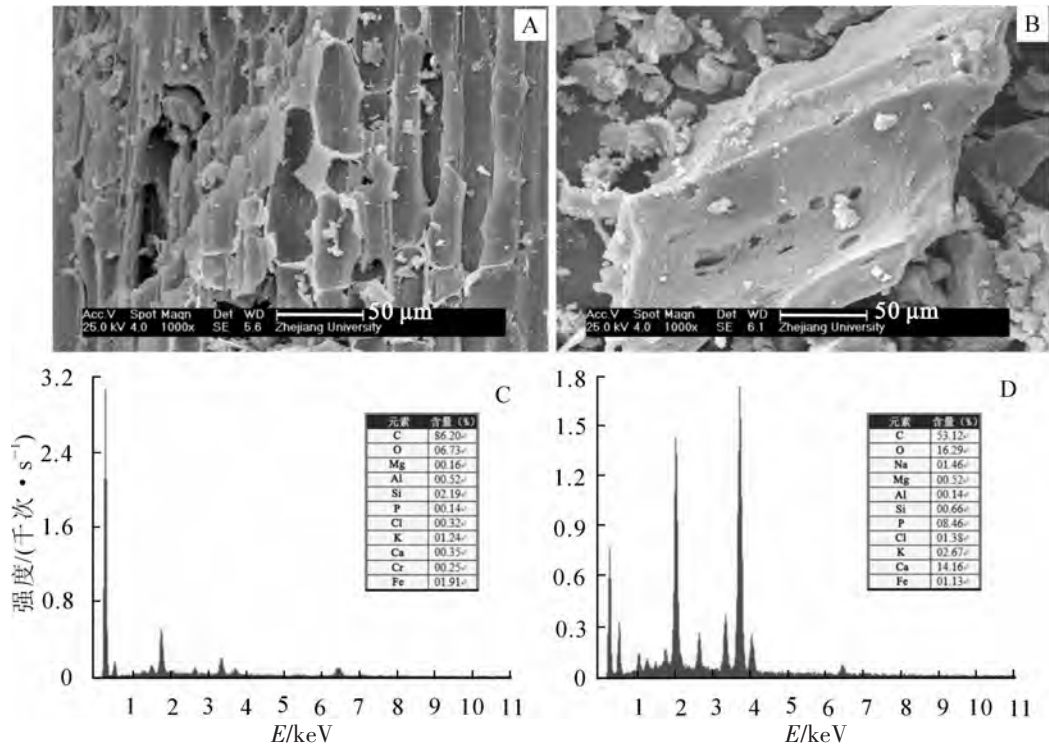
2.1 猪炭和竹炭的理化性质差异

表 2 表明：猪炭的 pH 值、电导率、灰分、比表面积和总氮、有效磷和速效钾质量分数都高于竹炭，竹炭的总碳、有机碳质量分数高于猪炭，竹炭的碳氮(C/N)比达到猪炭的 10 倍。虽然猪炭的总氮质量分数是竹炭的 4.4 倍，但猪炭和竹炭的 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 质量分数差异不大。值得注意的是，猪炭的有效磷质量分数达到 2 421 mg·kg⁻¹，是竹炭的 33.7 倍。图 1 显示了竹炭和猪炭的扫描电镜图，可以看出竹炭孔隙结构较规则，大小孔分布较均匀，而猪炭孔隙结构的发达程度明显弱于竹炭，猪炭的孔隙结构不规则，孔径大小不一，差别较大。此外，将竹炭和猪炭进行能量色散 X 射线检测，分析生物质炭表面某点的元素组成及含量(图 1)。结果表明：竹炭和猪炭表面的某一点主要由碳(C)和氧(O)元素组成，此外，还有少量的硅(Si)，镁(Mg)，铝(Al)，钾(K)，钙(Ca)和氯(Cl)等元素，而猪炭的钙和磷(P)含量高于竹炭。

表 2 猪炭和竹炭的基本理化性质

Table 2 Physicochemical properties of the pig and bamboo biochars

生物 质炭	pH 值	电导率/ (dS·m ⁻¹)	灰分/%	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全碳/ (g·kg ⁻¹)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)
猪炭	10.3	5.09	74.8	36.4	310.5	268	8.5	18.7	378	2 421.0	17.7	32.3
竹炭	9.5	1.58	26.9	8.2	702.5	667	85.7	15.1	391	71.8	7.8	6.0



A. 竹炭扫描电镜图, B. 猪炭扫描电镜图, C. 竹炭 EDS 图谱, D. 猪炭 EDS 图谱

图 1 生物质炭扫描电镜图和表面某位点能量色散 X 射线图谱

Figure 1 Scanning electron microscope images and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS) of the biochars

2.2 生物质炭对空心菜-小青菜轮作土壤氨挥发速率的影响

第 1 茬空心菜施基肥后，各处理下土壤氨挥发速率迅速增加，在第 3 天(6 月 20 日)出现氨挥发峰值，随后一段时间逐渐降低，至施基肥后第 6 天(6 月 24 日)接近对照处理水平(图 2)。与对照相比，在施肥后第 2~5 天，猪炭和竹炭处理显著($P<0.05$)降低了土壤氨挥发速率，其中以一次性施用 20 t·hm⁻²猪炭(20-0-PB)处理下土壤氨挥发速率最低。在施肥第 3 天，与对照相比，20-0-PB 处理下土壤氨挥发速

率降低了 51.7%。

追肥后第 2 天(8 月 1 日), 各处理下第 2 茬空心菜土壤氨挥发出现峰值, 至追肥后第 4 天(8 月 3 日)接近对照处理水平。与第 1 茬空心菜相比, 第 2 茬空心菜氨挥发速率较低。与对照相比, 猪炭和竹炭处理均显著($P<0.05$)降低了追肥后 1~3 d 土壤氨挥发速率, 且以一次性施用 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 竹炭(20-0-BB)处理下降幅最大。

小青菜季土壤氨挥发在施基肥第 1 天(9 月 9 日)出现峰值, 各处理下土壤氨挥发速率均显著($P<0.05$)低于空心菜季。与对照相比, 20-0-PB 处理在施肥后第 5 天和第 6 天显著($P<0.05$)降低了土壤氨挥发速率, 而其他生物质炭处理对小青菜土壤氨挥发没有显著性影响。

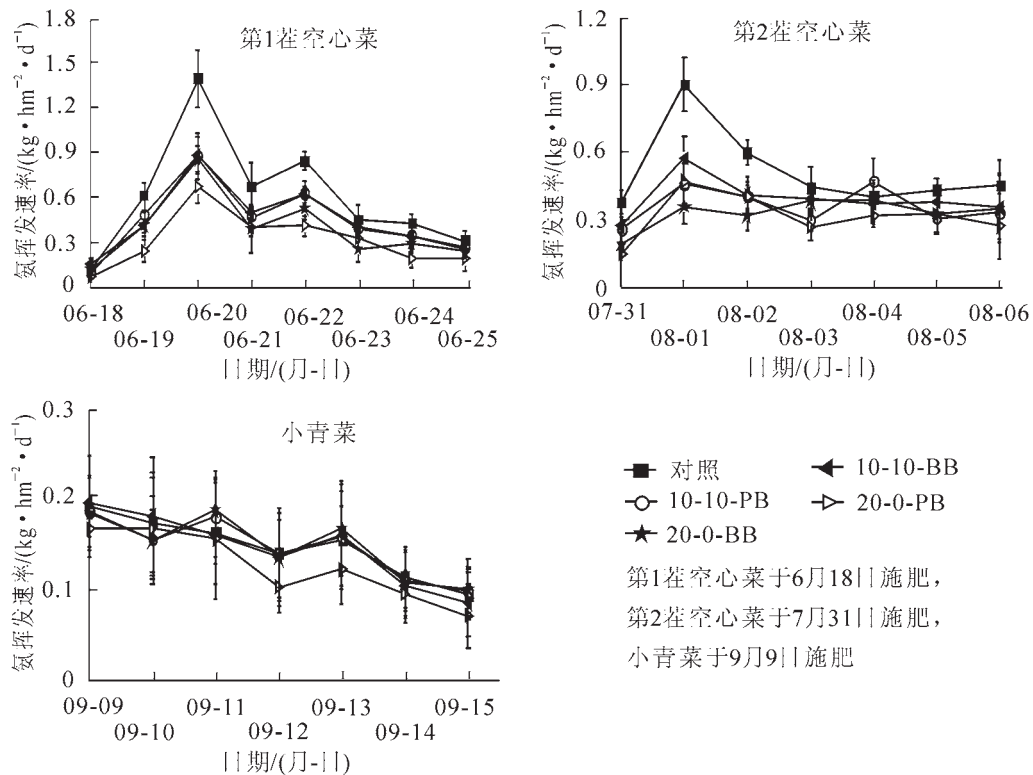


图 2 空心菜-小青菜轮作土壤的氨挥发速率

Figure 2 Soil ammonia volatilization rate in *Ipomoea aquatica*-*Brassica chinensis* rotation system

2.3 生物质炭对空心菜-小青菜轮作土壤氨挥发损失量的影响

与对照相比, 猪炭和竹炭处理显著($P<0.05$)降低了第 1 茬空心菜土壤氨挥发损失量, 且一次施用 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理效果优于 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理(表 3)。与 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理相比, 施用 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 猪炭和竹炭处理下第 1 茬空心菜氨挥发损失量分别减少了 28.7% 和 13.3%。对于一次性施用 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理, 猪炭处理下土壤氨挥发损失量显著($P<0.05$)低于竹炭处理。而施用 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下, 猪炭和竹炭处理间并无显著性差异($P>0.05$)。猪炭和竹炭处理均显著($P<0.05$)降低了第 2 茬空心菜氨挥发损失量, 但各生物质炭处理间无显著性差异。对于小青菜季, 与对照相比, 猪炭和竹炭处理对土壤氨挥发损失量没有显著性影响($P>0.05$)。从种植时间上来看, 土壤氨挥发损失量表现为: 第 1 茬空心菜>第 2 茬空心菜>小青菜。

猪炭和竹炭处理可显著($P<0.05$)降低空心菜季肥料的氨挥发损失率, 各处理下氨挥发损失率表现为: $20-0-PB<20-0-BB<10-10-PB<10-10-BB<$ 对照。猪炭和竹炭处理对于小青菜季氨挥发损失率并没有显著性影响。总的来说, 20-0-PB 处理下空心菜-小青菜轮作周期的氨挥发损失率最低。

2.4 土壤氨挥发与温度的相关性

两季蔬菜氨挥发监测阶段大气和土壤温度见图 3。由图 3 可以看出: 小青菜季的大气和土壤温度普遍低于两茬空心菜季。土壤氨挥发速率与温度的相关性表明(表 4), 各处理下土壤氨挥发速率与土壤温度均达到极显著相关($P<0.01$); 20-0-BB 处理下土壤氨挥发速率与大气温度之间无显著性相关, 而其他

处理与大气温度呈显著相关($P<0.05$)。

表 3 空心菜-小青菜氨挥发累积量及损失率

处理	空心菜			小青菜	
	氨挥发累积量/(kg·hm ⁻²)		氨态氮损失率/%	氨挥发累积量/(kg·hm ⁻²)	氨态氮损失率/%
	第 1 茬	第 2 茬			
对照	4.92 ± 0.81 d	3.57 ± 0.67 b	2.83	0.96 ± 0.24 a	0.43
10-10-PB	3.63 ± 0.22 c	2.49 ± 0.26 a	2.04	0.95 ± 0.25 a	0.42
10-10-BB	3.68 ± 0.18 c	2.72 ± 0.38 a	2.13	0.95 ± 0.27 a	0.42
20-0-PB	2.59 ± 0.56 a	2.17 ± 0.39 a	1.59	0.82 ± 0.35 a	0.36
20-0-BB	3.19 ± 0.48 b	2.28 ± 0.41 a	1.82	0.97 ± 0.25 a	0.43

说明：同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平；氨态氮损失率(%)=氨挥发损失量/(化肥氮用量+有机肥氮用量)。

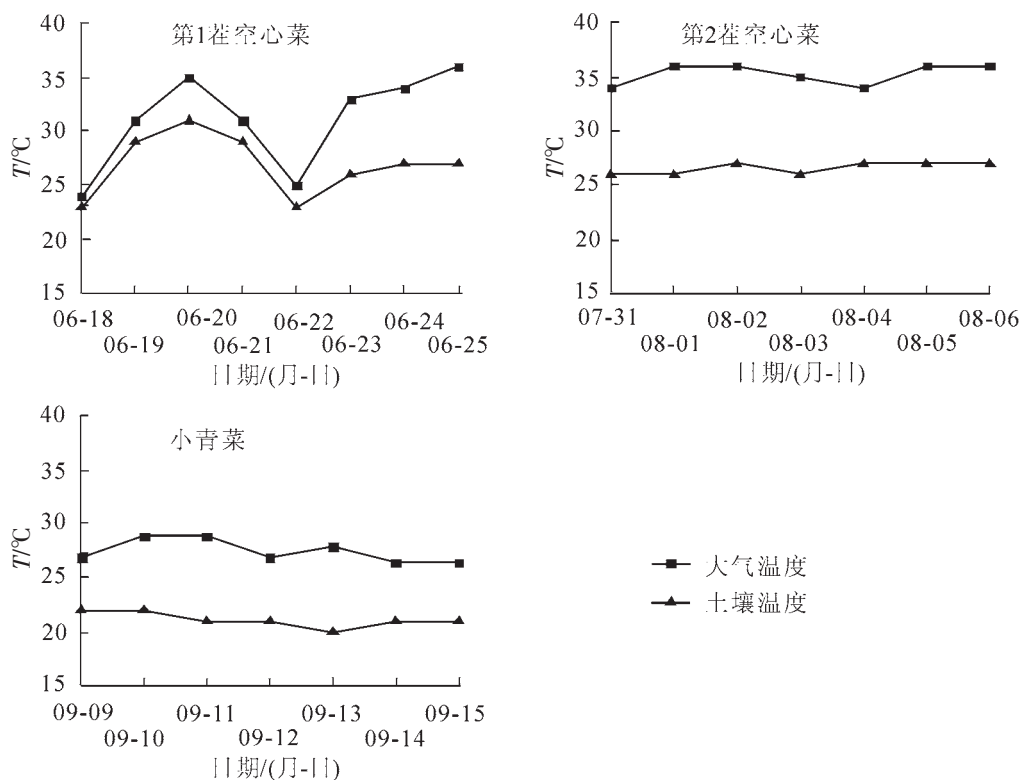


图 3 空心菜-小青菜轮作期间大气和土壤温度

Figure 3 Temperatures of air and soil during the *I. aquatica*-*B. chinensis* rotation experimental period

表 4 土壤温度、大气温度与土壤氨挥发速率的相关性

处理	对照	10-10-PB	10-10-BB	20-0-PB	20-0-BB
土壤温度	0.730**	0.747**	0.756**	0.716**	0.729**
气温	0.459*	0.424*	0.478*	0.521*	0.418

说明：** 表示极显著相关($P<0.01$)，* 表示显著相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 制备原料对生物质炭理化特性的影响

生物质炭来源广泛，不同来源的生物质炭理化性质千差万别。本试验分别选择动物源的猪炭和植物源的竹炭为原材料，在 650 ℃下制备成 2 种类型的生物质炭，因而两者理化性质差异较大。竹炭和猪炭的 pH 值均呈碱性，但猪炭的 pH 值高于竹炭。制备原料的元素相对含量对其制备而成的生物质炭的化

学组成具有直接的影响。在本试验中,由于病死猪中的营养元素质量分数较高,因而制得的猪炭中氮、磷、钾、钙质量分数均显著高于竹炭。同样,动物源的猪炭灰分含量会显著高于植物源的竹炭,主要是由于竹子含有大量的木质素。值得注意的是,猪炭的含磷量较高,含碳量较低,灰分含量高,这与植物源生物质炭的高含碳量和低灰分量差别较大。这种差别对土壤改良、污染土壤修复等方面的影响都有待进一步研究。

生物质炭施入土壤后,可以增加土壤的透气性,从而起到改善土壤物理结构的作用^[7-8]。生物质炭的比表面积和表面结构特征是影响其吸附性能的一个重要参数。在本试验中,猪炭的比表面积为竹炭的 5.4 倍,而其孔隙结构却不如竹炭发达。NGUYEN 等^[17]利用扫描电镜观察发现,畜禽废弃物如鸡粪生物质炭与植物生物质炭相比少了很多大的空隙结构,且表面较为光滑。这与本试验研究结果一致。

3.2 生物质炭种类和用量对土壤氨挥发的影响差异

本试验中,猪炭和竹炭的施用显著降低了空心菜施肥后 1~3 d 土壤氨挥发速率,主要原因在于生物质炭能够吸附固定铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和氨(NH_3),从而通过影响土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和氨之间的转化来影响土壤的氨挥发^[18]。生物质炭的原材料直接影响生物质炭的理化性质,从而影响其对土壤氮的吸附能力^[19]。在本试验中,猪炭对降低空心菜-小青菜轮作周期下土壤氨挥发损失的效果优于竹炭,这可能与猪炭较大的比表面积有关。生物质炭较大的比表面积和发达的孔隙结构导致其对氨有直接的吸附效果^[20]。

生物质炭对土壤氨挥发的影响除了与其种类有关,也与施用量有关。王海候等^[21]研究表明:与对照相比,生物质炭添加比例为 15% 和 20% 的处理降低了伊乐藻 *Elodea nuttallii* 堆肥体的氨挥发损失量,且 20% 处理效果更佳。本试验中,与 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理相比, $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的猪炭和竹炭处理下第 1 茬空心菜土壤氨挥发损失量显著降低,与王海候等研究结果一致。然而也有研究表明:生物质炭输入可以增加土壤氨挥发损失,主要是添加生物质炭提高了土壤 pH 值,从而对氨挥发起到促进作用^[22]。

3.3 生物质炭的老化对土壤氨挥发的影响

本试验中,猪炭和竹炭处理显著降低了第 1 茬空心菜土壤氨挥发损失量,且猪炭的效果优于竹炭, $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理效果优于 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 在第 2 茬空心菜中,虽然各生物质炭处理显著降低了土壤氨挥发,但是生物质炭处理间并没有显著性差异;在小青菜季,生物质炭处理对土壤氨挥发已没有显著性影响。生物质炭处理在不同生长季对土壤氨挥发的影响不同,这可能与生物质炭的老化过程有关。已有研究表明:生物质炭施入土壤后会与土壤发生一系列的生物化学反应,这些反应将引起生物质炭理化性质的改变,进而改变生物质炭的吸附能力^[23]。本试验中,随着生物质炭的老化,猪炭和竹炭对土壤氨挥发的影响从抑制到无影响,造成这种现象的主要原因可能是老化后的生物质炭理化性质发生了一系列变化,减少了生物质炭对土壤氮的吸附能力。已有研究表明,生物质炭施入土壤后,土壤中的可溶性有机碳被吸附到生物质炭表面,从而阻塞生物质炭的吸附位点^[24]。另一方面,与新鲜生物质炭相比,老化 3 个月后的生物质炭比表面积、微孔结构以及灰分含量都显著降低,从而降低生物质炭的吸附能力^[25]。

3.4 施氮量和温度对土壤氨挥发的影响

土壤氨挥发受施氮量、土壤温度、灌溉等多因素影响^[26]。本试验中,气温与土壤温度均与氨挥发速率呈显著正相关($P<0.05$),且土壤温度的影响更为显著($P<0.01$)。温度对土壤氨挥发的促进作用主要是由于温度升高,氨的溶解性降低,由 NH_4^+ 转化成氨的比例增多,促进了氨挥发^[27]。另外,温度升高可以增强土壤中脲酶的活性,进而促进尿素水解,增加了氨的释放^[28]。因此,气温与土壤温度的升高均有利于土壤氨挥发速率的增加。本试验中空心菜季的氨挥发损失量约为小青菜季的 5 倍,主要是因为空心菜季的化肥氮施用量是小青菜的 2 倍,且空心菜季生长季节的土壤温度、大气温度均高于小青菜季,土壤氨挥发损失主要发生在较为炎热的夏季,这与他人研究结果基本一致^[29]。本试验中,一次性施用 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 猪炭处理,空心菜-小青菜轮作下土壤氨挥发损失量最低,主要表现在一次性施用猪炭处理显著降低了空心菜季土壤氨挥发损失量。在小青菜季,10-10-PB 和 10-10-BB 处理下虽然追施了 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物质炭,但是对土壤氨挥发并没有显著性影响。

4 结论

与竹炭相比,猪炭的氮、磷、钙质量分数和灰分含量高,而含碳量较低。一次性施用 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 猪

炭处理对降低空心菜-小青菜轮作周期下土壤氮挥发损失的效果最优。

生物质炭处理在不同生长季对土壤氮挥发的影响不同。猪炭和竹炭处理显著降低了第1茬空心菜土壤氮挥发,且一次施用处理效果优于分批施用,一次施用猪炭的效果优于竹炭处理。随着时间的推移,虽然猪炭和竹炭处理均显著降低了第2茬空心菜的土壤氮挥发,但各生物质炭处理间没有显著性差异,而猪炭和竹炭处理对小青菜季土壤氮挥发没有显著性影响。

5 参考文献

- [1] SHI Weiming, YAO Jing, YAN Feng. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in south-eastern China [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2009, **83**(1): 73 – 84.
- [2] MIN Ju, ZHAO Xu, SHI Weiming, *et al.* Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China [J]. *Pedosphere*, 2011, **21**(4): 464 – 472.
- [3] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, **9**(1): 1 – 6.
ZHU Zhaoliang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. *Soil Environ Sci*, 2000, **9**(1): 1 – 6.
- [4] 李欠欠, 李雨繁, 高强, 等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氮挥发及氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(3): 571 – 579.
LI Qianqian, LI Yufan, GAO Qiang, *et al.* Effect of conventional and optimized nitrogen fertilization on spring maize yield, ammonia volatilization and nitrogen balance in soil-maize system [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2015, **21**(3): 571 – 579.
- [5] LEHMANN J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, **447**(7141): 143 – 144.
- [6] WANG Hailong, LIN Kunde, HOU Zhenan, *et al.* Sorption of the herbicide terbuthylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars [J]. *J Soil Sed*, 2010, **10**(2): 283 – 289.
- [7] 伍孟雄, 杨敏, 孙雪, 等. 生物质炭生物与非生物氧化特性研究进展[J]. 生态学报, 2015, **35**(9): 2810 – 2818.
WU Mengxiong, YANG Min, SUN Xue, *et al.* Research progress in the biotic and abiotic oxidation of biochar [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(9): 2810 – 2818.
- [8] 肖永恒, 李永夫, 王战磊, 等. 竹叶及其生物质炭输入对板栗林土壤 N₂O 通量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(3): 697 – 706.
XIAO Yongheng, LI Yongfu, WANG Zhanlei, *et al.* Effects of bamboo leaves and their biochar additions on soil N₂O flux in a Chinese chestnut forest [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2016, **22**(3): 697 – 706.
- [9] 李琦, 廖娜, 张妮, 等. 棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氮挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(10): 1987 – 1994.
LI Qi, LIAO Na, ZHANG Ni, *et al.* Effects of cotton stalk and its biochar on ammonia volatilization from a drip irrigated cotton field [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2014, **33**(10): 1987 – 1994.
- [10] LU Kouping, YANG Xing, SHEN Jiajia, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to *Sedum plumbizincicola* [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2014, **191**: 124 – 132.
- [11] MIERZWA-HERSZTEK M, GONDEK K, BARAN A. Effect of poultry litter biochar on soil enzymatic activity, ecotoxicity and plant growth [J]. *Appl Soil Ecol*, 2016, **105**: 144 – 150.
- [12] 张金利, 刘大伟, 杨庆. 骨炭对 Pb(II) 的吸附特性[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(5): 1784 – 1790.
ZHANG Jinli, LIU Dawei, YANG Qing. Adsorption behaviors of bone char to heavy metal Pb (II) [J]. *Chin J Environ Eng*, 2014, **8**(5): 1784 – 1790.
- [13] 何丽芝, 张小凯, 吴慧明, 等. 生物质炭及老化过程对土壤吸附吡虫啉的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 535 – 540.
HE Lizhi, ZHANG Xiaokai, WU Huiming, *et al.* Effect of biochars and aging process on soil adsorption of imidacloprid [J]. *Acta Sci Circumst*, 2015, **35**(2): 535 – 540.
- [14] YANG Xing, LIU Jingjing, MCGROUTHER K, *et al.* Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil [J]. *Environ Sci Poll Res*, 2016, **23**(2): 974 – 984.
- [15] SUN Haijun, ZHANG Hailin, WU Jiashen, *et al.* Laboratory lysimeter analysis of NH₃ and N₂O emissions and leach-

- ing losses of nitrogen in a rice-wheat rotation system irrigated with nitrogen-rich wastewater [J]. *Soil Sci*, 2013, **178** (6): 316 – 323.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 107 – 240.
- [17] NGUYEN B T, LEHMANN J, HOCKADAY W C, *et al.* Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, **44**(9): 3324 – 3331.
- [18] CHEN C R, PHILLIPS I R, CONDRON L M. *et al.* Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand [J]. *Plant Soil*, 2013, **367**(1): 301 – 312.
- [19] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(4): 779 – 785.
- YUAN Jinhua, XU Renkou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, **20**(4): 779 – 785.
- [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*, 2015, **142**: 120 – 127.
- [21] 王海候, 沈明星, 涂荣文, 等. 生物质炭对伊乐藻堆肥过程氮挥发的作用效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(11): 2266 – 2272.
- WANG Haihou, SHEN Mingxing, TU Rongwen, *et al.* Effects of biochar on ammonia volatilization during *Elodea nuttallii* composting [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2014, **33**(11): 2266 – 2272.
- [22] 杨帆, 李飞跃, 赵玲, 等. 生物炭对土壤氮氮转化的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(5): 1016 – 1020.
- YANG Fan, LI Feiyue, ZHAO Ling, *et al.* Influence of biochar on the transformation of ammonia nitrogen in soils [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2013, **32**(5): 1016 – 1020.
- [23] MARTIN S M, KOOKANA R S, van ZWIETEN L K E, *et al.* Marked changes in herbicide sorption-desorption upon ageing of biochars in soil [J]. *J Hazardous Mater*, 2012, **231/232**(6): 70 – 78.
- [24] ZHANG Honghua, LIN Kunde, WANG Hailong, *et al.* Effect of *Pinus radiata* derived biochars on soil sorption and desorption of phenanthrene [J]. *Environ Poll*, 2010, **158**(9): 2821 – 2825.
- [25] REN Xinhao, SUN Hongwen, WANG Fei, *et al.* The changes in biochar properties and sorption capacities after being cultured with wheat for 3 month [J]. *Chemosphere*, 2015, **144**: 2257 – 2263.
- [26] 聂文静, 李博文, 郭艳杰, 等. 氮肥与 DCD 配施对棚室黄瓜土壤 NH_3 挥发损失及 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(10): 2500 – 2508.
- NIE Wenjing, LI Bowen, GUO Yanjie, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and DCD application on ammonia volatilization and nitrous oxide emission from soil with cucumber growing in greenhouse [J]. *Acta Sci Circumst*, 2012, **32** (10): 2500 – 2508.
- [27] 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.
- [28] 何飞飞, 梁云姗, 荣湘民, 等. 培养条件下生物炭对红壤菜地土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 Feifei, LIANG Yunshan, RONG Xiangmin, *et al.* Effects of biochar on ammonia volatilization and soil properties of vegetable-planting red soil in a laboratory [J]. *J Yunnan Univ Nat Sci Ed*, 2014, **36**(2): 299 – 304.
- [29] 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氮挥发的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(21): 4403 – 4414.
- HAO Xiaoyu, GAO Wei, WANG Yujun, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization from greenhouse vegetable soil [J]. *Sci Agric Sin*, 2012, **45**(21): 4403 – 4414.