

死猪炭和竹炭对菜地土壤理化性质和蔬菜产量的影响

郭茜^{1,2}, 陆扣萍^{1,2}, 胡国涛³, 杨兴¹, 袁国栋⁴, 沈磊磊⁵, 王海龙^{1,2,4}

(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; 3. 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沭 276700; 4. 广东大众农业科技股份有限公司, 广东 东莞 523169; 5. 浙江省宁波市畜牧兽医局, 浙江 宁波 315012)

摘要: 以浙江省临安市板桥镇的田间蔬菜大棚为研究样地, 采用空心菜 *Ipomoea aquatica*-小青菜 *Brassica chinensis* 轮作模式, 研究了死猪炭和竹炭对大棚蔬菜生长产量和土壤理化性质的影响。试验以不施用生物炭处理为对照 (ck), 分别设置 1 次施用 (一次性施加 20 t·hm⁻²) 与 2 次施用 (20 t·hm⁻² 均分 2 次施加) 2 种方式。结果表明: 与对照相比, 1 次施用死猪炭处理显著 ($P < 0.05$) 提高了空心菜和小青菜土壤 pH 值, 而竹炭处理对土壤 pH 值无显著性影响。1 次施用和 2 次施用死猪炭处理使小青菜产量显著 ($P < 0.05$) 提高了 44.14% 和 47.38%。而竹炭的 2 种处理却降低了第 1 茬空心菜产量。1 次施用死猪炭和竹炭处理仅显著 ($P < 0.05$) 提高了空心菜根系全氮质量分数, 对小青菜季根系全氮质量分数无显著性影响, 而 2 次施用死猪炭处理显著 ($P < 0.05$) 使小青菜根系全氮质量分数提高了 29.46%。死猪炭和竹炭的施用对土壤硝态氮质量分数、蔬菜地上部全氮质量分数均无显著性影响。与竹炭相比, 施用死猪炭在改善土壤 pH 值、提高作物产量方面具有更好效果。此外, 相比于 2 次施用, 采用 1 次施用死猪炭的方式更为经济合理。图 4 表 4 参 38

关键词: 土壤学; 死猪炭; 竹炭; 土壤理化性质; 蔬菜产量; 氮

中图分类号: S154.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)02-0244-09

Greenhouse soil properties and vegetable yield with dead pig and bamboo biochars

GUO Xi^{1,2}, LU Kouping^{1,2}, HU Guotao³, YANG Xing¹, YUAN Guodong⁴, SHEN Leilei⁵, WANG Hailong^{1,2,4}

(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; 3. Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd, Linshu 276700, Shandong, China; 4. Guangdong Dazhong Agriculture Science Co. Ltd., Dongguan 523169, Guangdong, China; 5. Ningbo Bureau of Animal Husbandry and Veterinary, Ningbo 315012, Zhejiang, China)

Abstract: A field experiment was conducted to determine the effect of dead pig (DPB) and bamboo (BB) biochars as well as their application patterns on yield and nitrogen (N) content in vegetables and on soil properties (pH, electrical conductivity, and N content) in an *Ipomoea aquatica*-*Brassica chinensis* rotation system at Banqiao Town, Lin'an City, Zhejiang Province, China. Treatments included (1) a control (no biochar); (2) one application of 20 t·hm⁻² of 20-0-BB and (3) 20-0-DPB prior to the first *I. aquatica* crop; and two applications of biochars with 10 t·hm⁻² being applied prior to the *I. aquatica* season and the remaining biochars [(4) 10-10-DPB or (5) 10-10-BB] being applied prior to the *B. chinensis* season at an application rate of 10 t·hm⁻². The treatments were laid out based on randomized complete block design with four replications. The plant

收稿日期: 2016-04-21; 修回日期: 2016-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41401338, 21577131); 广东省东莞市引进创新科研团队资助项目(2014607101003); 浙江省宁波市生态循环农业科技示范推广项目(2015ST007)

作者简介: 郭茜, 从事水土资源利用研究。E-mail: gxxdx90@163.com。通信作者: 王海龙, 教授, 博士, 博士生导师, 从事水土资源利用、土壤污染修复等研究。E-mail: nzhailongwang@gmail.com

shoots of *I. aquatica* and *Brassica chinensis* in each plot were harvested after growth for 65 and 40 days, respectively. At each harvest time, five plants and five soil cores (0–200 mm) respectively from each plot were randomly collected and bulked for chemical analysis. Results showed that in the *I. aquatica* crop season, the 20-0-DPB treatment significantly increased ($P<0.05$) the *I. aquatica* crop yield and soil pH. Also, the 20-0-DPB and 10-10-DPB treatments significantly increased ($P<0.05$) yield of *B. chinensis*; whereas, the 20-0-BB and 10-10-BB treatments significantly decreased ($P<0.05$) the *I. aquatica* crop yield. Additionally, the 20-0-DPB and 20-0-BB treatments significantly increased N ($P<0.05$) in roots of *I. aquatica* Forsk but not in *B. chinensis*. The 10-10-DPB treatment significantly increased ($P<0.05$) *B. chinensis* root N. Finally, biochar treatments had no significant effect on soil nitrate or vegetable shoot N. In conclusion, the dead pig biochar was more effective than the bamboo bio-char for increasing soil pH and vegetable yield with one application of dead pig biochar at $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ appearing to be better than two split applications. [Ch, 4 fig. 4 tab. 38 ref.]

Key words: soil science; dead pig bio-char; bamboo bio-char; soil properties; vegetable yield; nitrogen

随着各地农业产业结构调整步伐的加快, 设施栽培尤其是大棚蔬菜栽培面积逐年扩大, 已成为高效农业的重要组成部分。在蔬菜生产过程中, 菜农往往采用过量施加肥料来保证高产, 而大量施加氮肥也带来了土壤养分利用率降低^[1]、氨挥发加剧^[2]以及氧化亚氮(N_2O)排放升高^[3]等环境问题。近年来, 向土壤中添加改良剂以解决不合理施肥带来的一系列环境问题受到了广泛关注^[4]。生物质炭是生物质在完全或部分缺氧的环境下经高温热解得到的难溶性固态产物^[5]。大部分的生物质炭呈碱性, 并具有多孔及较强的吸附能力, 故可以有效改善土壤理化性质、固持养分, 同时降低土壤养分流失带来的水体富营养化和温室气体排放^[6]。生物质炭可以提高土壤对铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的吸附能力, 有效固持氮肥, 减少养分流失^[7]。张万杰等^[8]在研究秸秆炭与氮肥配施效果的过程中, 发现秸秆炭可使菠菜 *Spinacia oleracea* 产量增加 57.3%。原材料的选择直接影响生物质炭的性质^[9]。目前, 生物质炭的原材料主要以秸秆、稻壳等植物源为主^[10-12], 而动物源生物质炭主要以骨炭为主, 且对其研究主要集中于重金属吸附方面^[13], 鲜有对土壤养分及理化性质影响效果方面的研究报道。若能将完整的病死猪作为原材料经高温热解制备成病死猪炭, 不仅可以有效解决病死猪处理难的问题, 也可为生物质炭原材料的选择提供一个新的来源。在中国长江三角洲区域, 为满足蔬菜种植需要, 菜地多由水稻田改种而来。在此类设施土壤条件下, 生物质炭的田间效果不同于室内培养试验, 施用量也难以把握。另外, 生物质炭 1 次施入与 2 次施入之间的差异如何也尚不清楚。鉴于此, 我们选择死猪炭和竹炭作为土壤改良剂, 通过田间小区试验研究生物质炭的种类、用量及施用方式对大棚菜地土壤理化性质、蔬菜产量以及蔬菜氮吸收等方面的影响, 以为生物质炭应用于农业生产提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况及供试材料

本研究于 2015 年 6–10 月在位于浙江省临安市板桥镇花戏村的田间蔬菜大棚中进行。该大棚由水稻田改种而来, 具有 2 a 以上的蔬菜栽培历史。大棚使用面积为 $8\text{ m}\times 48\text{ m}$, 土地闲置 6 个月(2015 年 1–6 月)后进行试验。试验地耕层土壤为砂质黏壤土 [$V(\text{砂粒}):V(\text{黏粒}):V(\text{粉粒})=62.0:15.5:22.5$], 供试耕层土壤(0–200 mm)的基本理化性质为 pH(1 : 2.5 H_2O)4.23, 有机质 $40.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态氮 $66.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $17.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $90.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 $88.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $109.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 电导率 $0.10\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

供试蔬菜为泰国空心菜 *Lpomoea aquatica*, 于 2015 年 6 月 16 日播种, 播种后第 4 天进行间苗, 2015 年 7 月 29 日收获第 1 茬空心菜, 2015 年 8 月 19 日收获整株, 生长周期为 65 d。小青菜 *Brassica chinensis* 品种为苏州青, 于 2015 年 9 月 9 日播种, 播种后第 7 天进行间苗, 2015 年 10 月 15 日收获整株, 生长周期为 40 d。

供试生物质炭为死猪炭(dead pig biochar, DPB), 购买于浙江悟能环保科技发展有限公司。竹炭(bamboo biochar, BB), 购买于宁波兴达炭业有限公司。死猪炭和竹炭均在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 缺氧条件下制备。

1.2 试验设计

空心菜季各小区内有机肥、尿素、磷肥和钾肥的施加量分别为 10 000, 150, 50 和 90 kg·hm⁻²。其中有有机肥、磷肥和钾肥作为基肥一次性施入土壤。尿素采用 1 次基肥和 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。小青菜季各小区有机肥、尿素、磷肥和钾肥的施加量分别为 6 000, 75, 50 和 90 kg·hm⁻², 均作为基肥一次性施入土壤。

各小区内施加的生物质炭总量均为 20 t·hm⁻², 采用 1 次施加和 2 次均施的方式(表 1)。生物质炭的 2 次均施, 第 1 次与基肥配施于空心菜种植时, 第 2 次于小青菜种植当天施加。本试验共计 5 个处理, 以不施加生物质炭为对照(ck), 10-10-DPB, 20-0-DPB, 10-10-BB 和 20-0-BB, 小区面积为 12 m²(3 m × 4 m), 重复 4 次处理, 采用随机区组排列方式。田间水分管理采用喷灌方法, 在播种及追肥后进行充分喷灌, 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加量

Table 1 Biochar application rates of different treatments

处理	生物质炭类型	施加量/(t·hm ⁻²)		
		空心菜	小青菜	总量
对照 ck	不添加生物质炭	0	0	0
10-10-DPB	死猪炭	10	10	20
20-0-DPB	死猪炭	20	0	20
10-10-BB	竹炭	10	10	20
20-0-BB	竹炭	20	0	20

1.3 样品的采集与分析测定

1.3.1 植物产量及养分的测定 收获每个小区全部的空心菜和小青菜, 以地上部鲜质量计产。随机选取具有代表性的植株 5 株·小区⁻¹, 经杀青、烘干、研磨过 60 目筛后采用浓硫酸-过氧化氢法进行消煮, 消煮液用于植物全氮的测定。碱解扩散法^[14]测定植物全氮质量分数。

1.3.2 土壤样品采集及基本理化性质的测定 蔬菜收获当天, 采集每个小区内均匀分布的 5 点耕层土壤(0~200 mm), 挑去肉眼可见的杂质, 充分混匀, 过 2 mm 筛。四分法分离出部分土壤用于测定无机氮。其余土壤风干后, 用于测定电导率和 pH 值。土壤无机氮用 2 mol·L⁻¹ 氯化钾溶液浸提。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); 土壤电导率按照 V(土):V(水)=1:5, 由电导率仪(DDS-307)测定; 土壤 pH 值按照 V(土):V(水)=1.0:2.5, 由 pH 计(FE20)测定^[14]。

1.3.3 生物质炭基本性质的测定 生物质炭 pH 值以 V(炭):V(水)=1.0:20 测定; 生物质炭的碳、氢、氮质量分数用元素分析仪(Flash EA1112, Thermo Finnigan, 意大利)测定; 生物质炭电导率是将生物质炭和去离子水按质量体积比 1:10 混匀, 充分搅拌 30 min, 静置后用电导率仪测定; 生物质炭灰分根据美国 ASTM 标准 D1762-84 *Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal* 测定。生物质炭比表面积由全自动比表面积和空隙分析仪(Tristar II 3020, Micromeritics Instrument Corporation, 美国)测定; 生物质炭表面官能团用傅里叶变换红外光谱(FTIR, Nicolet is 10, 美国)分析测定。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 和 Origin 8.0 绘制图表, SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 死猪炭和竹炭的理化性质

死猪炭的 pH 值和灰分均高于竹炭, 且总孔容积为竹炭的 24.8 倍, 比表面积为竹炭的 5.4 倍。而竹炭的碳氮比(C/N)是死猪炭的 10.1 倍(表 2)。

从傅立叶变换红外线光谱分析图谱(图 1)可以看出: 死猪炭和竹炭在 3 400 cm⁻¹, 1 590 cm⁻¹ 和 1 100 cm⁻¹ 处都具有吸收峰, 表明 2 种生物质炭表面均含有羟基(—OH), 羧基(—COOH)和碳酸根(CO₃²⁻)等含氧官能团^[15], 且死猪炭所呈现出的吸收峰强度高于竹炭, 说明死猪炭表面含有较多的羟基和

表 2 生物质炭的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of biochar

生物质炭	pH 值	氢/ (g·kg ⁻¹)	氮/ (g·kg ⁻¹)	碳/ (g·kg ⁻¹)	氮/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比	电导率/ (dS·m ⁻¹)	灰分/%	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔容积/ (cm ³ ·g ⁻¹)
竹炭(BB)	9.48	1.03	27.90	70.25	0.82	85.70	1.58	26.9	6.00	0.005
死猪炭(DPB)	10.34	0.81	64.50	31.05	3.64	8.50	5.09	74.8	32.33	0.124

碳酸根。死猪炭灰分含量是竹炭的 2.8 倍，也表明其表面以氧化物或碳酸盐形式存在的钾、钙、钠、镁等矿质元素含量远高于竹炭。

2.2 生物质炭对土壤 pH 值和电导率的影响

与对照(ck)相比，1 次施用死猪炭处理显著($P < 0.05$)提高了空心菜和小青菜季土壤 pH 值，而 2 次施用竹炭的处理仅提高了小青菜季土壤 pH 值，且与 1 次施用竹炭处理相比，2 次施用处理下小青菜季土壤 pH 值显著($P < 0.05$)升高(表 3)。死猪炭的 2 种不同施炭方式对土壤 pH 值无差异影响。与对照相比，1 次施用死猪炭处理显著($P < 0.05$)提高了第 1 茬空心菜土壤电导率，所有生物质炭处理对第 2 茬空心菜土壤电导率均无显著性影响。与对照相比，2 次施用猪炭处理可使小青菜季土壤电导率提高 50%，而 1 次施用猪炭处理对土壤电导率无显著性影响。1 次施用竹炭处理显著($P < 0.05$)提高了土壤电导率，而 2 次施用处理下土壤电导率却表现出下降趋势。

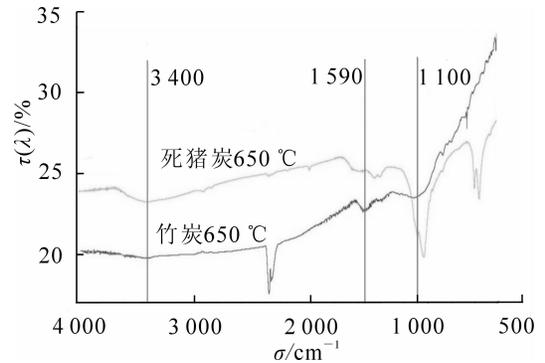


图 1 生物质炭的红外光谱

Figure 1 Fourier transform infrared spectrometry of biochars

表 3 不同处理对土壤 pH 值、电导率的影响

Table 3 Effects of biochar treatments on soil pH and electrical conductivity

处理	pH 值			电导率/(dS·m ⁻¹)		
	空心菜		小青菜	空心菜		小青菜
	第 1 茬	第 2 茬		第 1 茬	第 2 茬	
对照 ck	4.22 ± 0.07 b	4.24 ± 0.02 b	4.95 ± 0.10 b	0.17 ± 0.03 b	0.20 ± 0.01 a	0.14 ± 0.02 b
10-10-BB	4.44 ± 0.15 ab	4.40 ± 0.15 ab	5.40 ± 0.06 a	0.16 ± 0.03 b	0.25 ± 0.03 a	0.09 ± 0.02 c
20-0-BB	4.48 ± 0.08 ab	4.37 ± 0.09 ab	4.97 ± 0.10 b	0.18 ± 0.05 b	0.23 ± 0.06 a	0.20 ± 0.02 a
10-10-DPB	4.44 ± 0.32 ab	4.34 ± 0.05 ab	5.16 ± 0.06 ab	0.24 ± 0.06 ab	0.28 ± 0.07 a	0.21 ± 0.04 a
20-0-DPB	4.70 ± 0.57 a	4.61 ± 0.16 a	5.38 ± 0.12 a	0.32 ± 0.06 a	0.27 ± 0.04 a	0.12 ± 0.01 bc

说明：第 1 茬 7 月 29 日采集的耕层土壤样品；第 2 茬 8 月 19 日采集的耕层土壤样品。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 生物质炭对土壤硝态氮和铵态氮质量分数的影响

由表 4 可知：与对照相比，2 次施用竹炭处理显著($P < 0.05$)降低了第 1 茬空心菜土壤的铵态氮(NH₄⁺-N)质量分数。死猪炭和竹炭的施用对第 2 茬空心菜土壤的铵态氮质量分数无显著影响。与对照相比，2 次施用竹炭处理下小青菜季土壤铵态氮质量分数降低了 22.7%，而死猪炭的施用对土壤铵态氮质量分数无显著影响。2 种生物质炭对土壤硝态氮质量分数无显著影响。

表 4 不同处理对土壤硝态氮和铵态氮质量分数的影响

Table 4 Effect of biochar treatments on contents of nitrate and ammonium in the soils

处理	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)			铵态氮/(mg·kg ⁻¹)		
	空心菜		小青菜	空心菜		小青菜
	第 1 茬	第 2 茬		第 1 茬	第 2 茬	
对照 ck	114 ± 23 ab	196 ± 32 a	203 ± 23 a	21.29 ± 1.81 a	28.16 ± 13.62 a	7.36 ± 1.22 a
10-10-BB	71 ± 13 b	205 ± 50 a	223 ± 128 a	11.54 ± 2.38 b	24.94 ± 7.45 a	5.63 ± 0.97 b
20-0-BB	103 ± 23 ab	175 ± 65 a	184 ± 8 a	14.56 ± 2.74 ab	25.83 ± 11.79 a	8.01 ± 0.96 a
10-10-DPB	139 ± 36 a	198 ± 74 a	129 ± 19 a	19.16 ± 5.46 a	23.47 ± 11.00 a	6.64 ± 0.24 ab
20-0-DPB	110 ± 27 ab	189 ± 72 a	197 ± 51 a	16.90 ± 4.36 ab	16.16 ± 6.44 a	6.54 ± 0.13 ab

说明：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.4 生物质炭对蔬菜产量的影响

1 次施用死猪炭处理下的空心菜第 1 茬产量最高，且显著($P < 0.05$)高于死猪炭 2 次施用处理(图 2)。而竹炭的 2 次与 1 次施用处理均显著($P < 0.05$)降低了第 1 茬空心菜的产量，分别降低了 49.5%和

52.5%。与对照相比，1次施用死猪炭能够显著($P < 0.05$)提高第2茬空心菜的产量，死猪炭的2次与1次施用处理分别使小青菜产量提高44.14%和47.38%。整个轮作周期中，竹炭的1次施用与2次施用处理之间无显著性差异。

2.5 生物质炭对蔬菜根系氮质量分数的影响

与对照相比，死猪炭的2种处理与竹炭的2种处理均显著($P < 0.05$)提高了空心菜根系的总氮质量分数，分别提高了171%，121%，78%和92%(图3)。对于小青菜季，仅2次施用死猪炭处理显著($P < 0.05$)提高了小青菜根系总氮质量分数，与对照和1次施用死猪炭处理相比，分别提高了29.5%和42.7%。竹炭的施用对小青菜季植物根系的总氮质量分数无显著性影响。

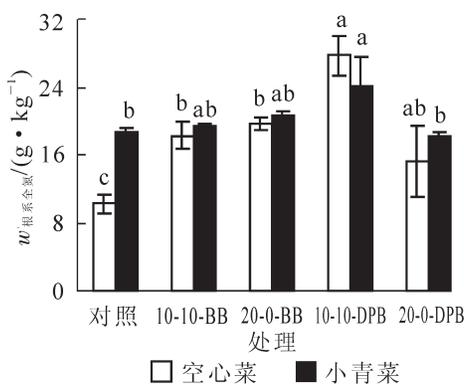
2.6 生物质炭对蔬菜地上部氮质量分数的影响

从图4可以看出：与对照相比，死猪炭和竹炭对空心菜-小青菜轮作期间蔬菜地上部总氮质量分数没有显著影响，且死猪炭和竹炭的2种施用方式间无显著性差异。

3 讨论

3.1 生物质炭对土壤理化性质的影响

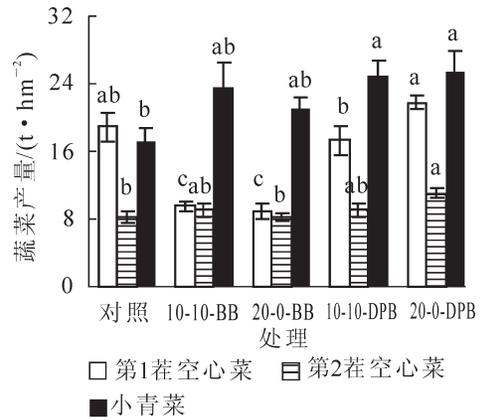
与对照相比，本研究中1次施用死猪炭处理能够提高土壤的pH值。张祥等^[16]研究发现：随着花生 *Arachis hypogaea* 壳炭施加量的增加，黄棕壤的pH值也随之增加。死猪炭的pH值、灰分及表面官能团均高于竹炭，因此，对土壤pH值的影响也更为显著。刘玉学等^[17]研究发现：在pH 6.82的土壤上，仅一次性高施加量(20, 40 t·hm⁻²)的竹炭可以显著($P < 0.05$)提高土壤pH值。本试验中竹炭的添加量最大为20 t·hm⁻²，且土壤pH值仅为pH 4.23，因此，本研究中1次施用竹炭处理对提高土壤pH值并无显著性效果。本研究中，追施竹炭后，2次均施竹炭处理对提高苏州青土壤pH值的效果优于1次施用处理。这可能是由于生物质炭施入土壤一段时间后会发生老化行为，老化后的生物质炭对土壤pH值的影响开始逐渐减弱^[18]。



相同系列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图3 不同处理对空心菜-小青菜根系全氮质量分数的影响

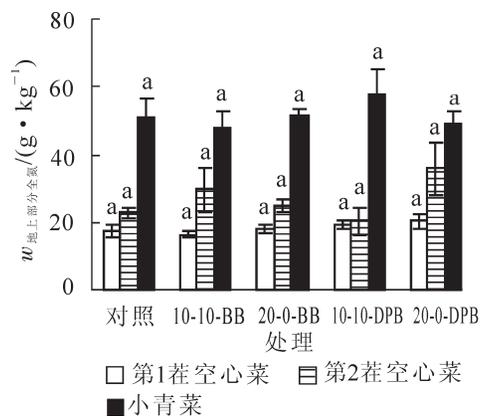
Figure 3 Effect of biochar treatments on nitrogen contents in the vegetable roots



第1茬7月29日采集的空心菜地上部分，第2茬8月19日采集的空心菜地上部分，相同系列小写字母不同表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同处理对蔬菜产量的影响

Figure 2 Effect of biochar treatments on vegetable yield



第1茬7月29日采集的空心菜地上部分，第2茬8月19日采集的空心菜地上部分。相同系列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图4 不同处理蔬菜地上部氮质量分数

Figure 4 Effect of biochar treatments on nitrogen contents in the vegetable shoots

在设施栽培中，由于土壤长期得不到雨水淋洗，土壤盐分容易积累^[19]。添加生物质炭后，除生物质

炭本身携带的盐基离子外，还可以通过生物质炭自身的吸附性，降低土壤水分的淋失，提高土壤含水率^[20]，从而使得土壤溶液中盐基离子在土壤中富集，提高土壤电导率。随着生物质炭施用量的增加，土壤对水分的吸附能力也增强，因此，对提升土壤电导率的效果也越明显。由于本研究中选择的竹炭本身电导率较低，因而对空心菜季土壤电导率无显著性影响。虽然死猪炭和竹炭的施加不同程度地提高了土壤电导率，但供试土壤仍未达到轻微盐渍土^[21]的含盐量，因而并不影响蔬菜的生长。

生物质炭对土壤铵态氮的吸附能力受土壤酸碱性的影响，在土壤 pH 值接近中性时，生物质炭对铵离子(NH_4^+)和氨(NH_3)吸附能力才能发挥出来^[22]。在本研究中，由于土壤本身酸性较强，生物质炭的施加降低了土壤的酸度，引起了铵态氮的大量挥发。因此 1 次施用死猪炭的处理对土壤铵态氮质量分数没有显著影响，随着添加量的增加，土壤 pH 值显著($P < 0.05$)提高，促进了土壤氨挥发量的增加，这可能与其对铵态氮吸附固持作用相互抵消，从而对土壤铵态氮质量分数无显著影响。竹炭具有较高的碳氮比，而生物的固氮能力与土壤碳氮比值呈正比^[23]，因此，可以显著降低土壤中铵态氮质量分数。

施加死猪炭和竹炭对土壤硝态氮质量分数没有显著影响，这与陈心想等^[24]研究发现生物质炭的施加显著($P < 0.05$)提高土壤铵态氮和硝态氮质量分数结果不同。原因可能是由于本研究菜地在使用前经过半年的闲置、曝晒，土壤本身的通气条件较好，因而土壤本身进行了较强的硝化反应^[25]，故施加 2 种生物质炭对土壤的硝化速率影响甚微。另一方面，由于整个轮作期时间较短(105 d)，同时所选用生物质炭的粒径为 3 mm，从而导致生物质炭与土壤的相互作用时间较短、接触面积较小、生物质炭表面的氧化程度较低，因此，对提高土壤硝态氮和铵态氮质量分数的效果不显著。

3.2 生物质炭对空心菜-小青菜轮作下蔬菜产量的影响

死猪炭和竹炭对蔬菜产量的影响与施加量有关。生物质炭对蔬菜产量的影响不仅与其对土壤养分的吸附固持能力有关，也可能是生物质炭的施加促进了土壤中有益菌群数量的增加，增强了土壤的生态功能^[26-27]。有研究表明：生物质炭施入土壤后会降低土壤容重^[28]，增加土壤的持水能力，并改善土壤酸性状况，更有利于根系的生长发育与生理功能的协同发展^[17]，而生物质炭的施加也会改变土壤中养分(磷、钾、钙和镁)的有效性^[29]，从而促进产量的增加。

在本研究中，竹炭处理导致第 1 茬空心菜产量显著($P < 0.05$)降低。这可能是由于竹炭在制备过程中存在大量焦油和树脂等，附着在生物质炭表面，从而抑制作物的生长^[30]。随着时间推移，土壤中生物质炭表面发生老化，其表面含氧官能团和阳离子交换量均有增加^[31]，所以在第 2 茬空心菜及小青菜生长季，施加竹炭处理对其产量无显著影响。可见，生物质炭对作物产量的影响受到多种因素的交互作用，所以其对产量的具体影响机制和作用效果尚不明确。

3.3 生物质炭对植物氮吸收的影响

生物质炭对蔬菜根系全氮质量分数的影响不仅与施加量有关，还与生物质炭种类有关。生物质炭的施加可以改善干旱条件下土壤的紧实度，增加土壤的孔隙度^[32]，死猪炭相比较于竹炭具有较高的比表面积，因此，随着施加量的增加可以更好地降低土壤容重，促进根系生长^[33]，从而提高作物对养分的吸收。而生物质炭在水土交融下释放出的乙烯、激素类物质对根系生长也会产生影响^[34]。并且，生物质炭施入土壤后，在提高土壤 pH 值的同时，由于其表面的氢氧根离子(OH^-)与硝酸根(NO_3^-)有竞争作用^[35]，也会影响植物根系的氮吸收能力。

死猪炭和竹炭的施加对空心菜和小青菜 2 种蔬菜植株总氮质量分数均没有显著影响，与张晗芝等^[36]的研究结果一致。本研究使用的生物质炭具有较高的含氮量，由于制备生物质炭温度高于 500 °C 时，氮将不具有生物有效性，植物也无法吸收、利用^[37]。同时，本研究中 2 种生物质炭具有较高的碳氮比，施入土壤后，可能会导致氮的固定，降低土壤氮的有效性，限制植物对其吸收^[38]。

4 结论

1 次施用死猪炭的处理能够显著($P < 0.05$)提高空心菜和小青菜季土壤 pH 值，而竹炭处理对土壤 pH 值无影响。死猪炭处理能够显著($P < 0.05$)提高小青菜产量，而竹炭处理下第 1 茬空心菜产量显著($P < 0.05$)下降。1 次施用死猪炭和竹炭处理可显著($P < 0.05$)提高空心菜根系全氮质量分数，2 次施用死猪炭处理显著($P < 0.05$)提高了小青菜根系全氮质量分数。与 2 次施用相比，1 次施用死猪炭的方式更为

经济合理。

5 参考文献

- [1] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略[J]. 土壤学报, 2014, **51**(2): 216 – 225.
WANG Huoyan, ZHOU Jianmin. Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51**(2): 216 – 225.
- [2] 叶世超, 林忠成, 戴其根, 等. 施氮量对稻季氨挥发特点与氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, **25**(1): 71 – 78.
YE Shichao, LIN Zhongcheng, DAI Qigen, *et al.* Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season [J]. *Chin J Rice Sci*, 2011, **25**(1): 71 – 78.
- [3] 梁国庆, 周卫, 夏文建, 等. 优化施氮下稻-麦轮作体系土壤 N₂O 排放研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(2): 304 – 311.
LIANG Guoqing, ZHOU Wei, XIA Wenjian, *et al.* Effect of optimized nitrogen application on N₂O emission from paddy field under wheat-rice rotation system [J]. *Plant Nut Fertil Sci*, 2010, **16**(2): 304 – 311.
- [4] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(3): 631 – 638.
WANG Dongfeng, WANG Guo, LI Weihua, *et al.* Effects of different fertilization modes on vegetable growth, fertilizer nitrogen utilization, and nitrogen loss from vegetable field [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20**(3): 631 – 638.
- [5] ANTAL M J, GRONLI M. The art, science, and technology of charcoal production [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2003, **42**(8): 1619 – 1640.
- [6] AHMAD M, RAJAPAKSHA A U, LIM J E, *et al.* Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review [J]. *Chemosphere*, 2014, **99**(3): 19 – 33.
- [7] 刘玮晶, 刘焯, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(5): 962 – 968.
LIU Weijing, LIU Ye, GAO Xiaoli, *et al.* Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2012, **31**(5): 962 – 968.
- [8] 张万杰, 李志芳, 张庆忠, 等. 生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(10): 1946 – 1952.
ZHANG Wanjie, LI Zhifang, ZHANG Qingzhong, *et al.* Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot experiment [J]. *J Agro-environ Sci*, 2011, **30**(10): 1946 – 1952.
- [9] ALEXIS M A, RASSE D P, RUMPEL C, *et al.* Fire impact on C and N losses and charcoal production in a scrub oak ecosystem [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **82**(2): 201 – 216.
- [10] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(7): 1361 – 1369.
LI Ming, LI Zhongpei, LIU Ming, *et al.* Effects of different straw biochar on nutrient and microbia community structure of a red paddy soil [J]. *Sci Agric Sin*, 2015, **48**(7): 1361 – 1369.
- [11] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 稻壳基生物炭对生菜 Cd 吸收及土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(2): 207 – 214.
WANG Yanhong, LI Mengjun, TANG Mingdeng, *et al.* Effect of rice husk biochar on lettuce Cd uptake and soil fertility [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2015, **23**(2): 207 – 214.
- [12] 赵殿峰, 徐静, 罗璇, 等. 生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J]. 西北农业学报, 2014, **23**(3): 85 – 92.
ZHAO Dianfeng, XU Jing, LUO Xuan, *et al.* Effect of biochar on soil nutrients, growth and chemical composition of tobacco [J]. *Acta Agric Boreal-Occident Sin*, 2014, **23**(3): 85 – 92.
- [13] 林爱军, 张旭红, 苏玉红, 等. 骨炭修复重金属污染土壤和降低基因毒性的研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 232 – 237.
LIN Aijun, ZHANG Xuhong, SU Yuhong, *et al.* Chemical fixation of metals in soil using bone char and assessment of the soil genotoxicity [J]. *Chin J Environ Sci*, 2007, **28**(2): 232 – 237.

- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 308 – 315.
- [15] 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.
- [16] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(8): 979 – 984.
ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cuncang, *et al.* Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the south China region [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2013, **21**(8): 979 – 984.
- [17] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 不同稻秆炭和竹炭施用水水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(6): 1438 – 1444.
LIU Yuxue, WANG Yaofeng, LÜ Haohao, *et al.* Effects of different application rates of rice straw biochar and bamboo biochar on yield and quality of greengrocery (*Brassica chinensis*) and soil properties [J]. *Plant Nut Fertil*, 2013, **19**(6): 1438 – 1444.
- [18] DONG Da, YANG Mengliu, WANG Cheng, *et al.* Responses of methane emissions and rice yield to applications of biochar and straw in a paddy field [J]. *J Soil Sediment*, 2013, **13**(8): 1450 – 1460.
- [19] ZWIETEN L V, KIMBER S, MORRIS S, *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant Soil*, 2010, **327**(1/2): 235 – 246.
- [20] 吕一甲, 屈忠义. 生物炭肥料对河套灌区耕层土壤肥力及含水率影响的研究[J]. 节水灌溉, 2015(3): 18 – 21.
LÜ Yijia, QU Zhongyi. Effect of biochar fertilizer on topsoil of soil fertility and moisture content in Hetao Irrigation Area [J]. *Water Sav Irrig*, 2015(3): 18 – 21.
- [21] 张芙蓉, 赵丽娜, 张瑞, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良及甜瓜生长的影响[J]. 上海农业学报, 2015, **31**(1): 54 – 58.
ZHANG Furong, ZHAO Lina, ZHANG Rui, *et al.* Effects of biochar on saline soil improvement and melon growth [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2015, **31**(1): 54 – 58.
- [22] CHEN Chengrong, PHILLIPS I R, CONDRON L M, *et al.* Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand [J]. *Plant Soil*, 2012, **367**(1/2): 301 – 312.
- [23] CUSACK D F, SILVER W, McDOWELL W H. Biological nitrogen fixation in two tropical forests: ecosystem-level patterns and effects of nitrogen fertilization [J]. *Ecosystems*, 2009, **12**(8): 1299 – 1315.
- [24] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(20): 6534 – 6542.
CHEN Xinxiang, HE Xusheng, GENG Zengchao, *et al.* Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(20): 6534 – 6542.
- [25] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(10): 2075 – 2080.
ZHOU Guiyu, DOU Sen, LIU Shijie. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2011, **30**(10): 2075 – 2080.
- [26] STEINER C, DAS K C, GARCIA M, *et al.* Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol [J]. *Pedobiologia*, 2008, **51**(5/6): 359 – 366.
- [27] BEESLEY L, MORENO-JIMÉNEZ E, GOMEZ-EYLES J L. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil [J]. *Environ Poll*, 2010, **158**(6): 2282 – 2287.
- [28] 陈伟, 周波, 束怀瑞. 生物炭和有机肥处理对平邑甜茶根系和土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(18): 3850 – 3856.
CHEN Wei, ZHOU Bo, SHU Huairui. Effects of organic fertilizer and biochar on root system and microbial functional diversity of *Malus hupehensis* Rehd [J]. *Sci Agric Sin*, 2013, **46**(18): 3850 – 3856.
- [29] MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, *et al.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. *Plant Soil*, 2010, **333**(1): 117 – 128.
- [30] YAMATO M, OKIMORI Y, WIBOWO I F, *et al.* Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the

- yield of maize (*Zea mays*), cowpea (*Vigna unguiculata*) and peanut (*Arachis hypogaea*) and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia [J]. *Soil Sci Plant Nut*, 2006, **52**(4): 489 – 495.
- [31] LIANG B, LEHMANN J, SOLOMON D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70**(5): 1719 – 1730.
- [32] CHAN K Y, ZWIETEN L V, MESZAROS I, *et al.* Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment [J]. *Aust J Soil Res*, 2007, **45**(8): 629 – 634.
- [33] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(12): 119 – 124.
- LI Zhongyang, QI Xuebin, FAN Xiangyang, *et al.* Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, **31**(12): 119 – 124.
- [34] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, **39**(8): 1445 – 1451.
- ZHANG Weiming, MENG Jun, WANG Jiayu, *et al.* Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice [J]. *Acta Agron Sin*, 2013, **39**(8): 1445 – 1451.
- [35] 陆景陵. 植物营养学: 上册[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [36] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(11): 2713 – 2717.
- ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, *et al.* Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(11): 2713 – 2717.
- [37] 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.
- [38] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(15): 16 – 25.
- HE Xusheng, ZHANG Shuqing, SHE Diao, *et al.* Effects of biochar on soil and fertilizer and future research [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, **27**(15): 16 – 25.