

生物炭和园林废弃堆腐物对设施蔬菜的影响： I 土壤理化性质及产量

陈延华^{1,2,3}, 廖上强^{1,2,3}, 李艳梅^{1,2,3}, 张倩⁴, 郭宁⁵, 张琳^{1,2,3}, 杨俊刚^{1,2,3},
孙焱鑫^{1,2,3*}

(1.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2.农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097; 3.北京市缓控释肥料中心, 北京 100097; 4.德州市农产品质量安全监督检测中心, 山东 德州 253015; 5.北京市土肥工作站, 北京 100029)

摘要:以生物炭(BIC)和园林废弃堆腐物(GWC)为研究对象,设置快菜田间小区试验,比较了不同添加量对设施蔬菜土壤理化性质及产量的影响。结果表明:BIC和GWC都显著降低了土壤容重(4.29%~10.71%),增加了CEC、交换性Ca²⁺和土壤硝态氮含量,增幅分别为13.40%~19.62%、30.22%~56.89%和154.95%~628.76%;BIC显著增加了表层土壤的质量含水量和贮水量(3.36%~9.52%),降低了交换性Na⁺、ESP和SAR的含量,降幅分别为4.53%~12.48%、18.24%~23.58%和18.82%~27.56%;GWC对Mg²⁺升高起主要作用,升幅为7.94%~17.06%;两种材料的添加均显著增加了设施蔬菜产量,GWC 5 t·hm⁻²+BIC 15 t·hm⁻²的处理和单施BIC 10 t·hm⁻²的处理,分别比对照增产23.05%和19.78%,且对土壤理化性状改良效果显著,适宜在京郊设施菜地应用。

关键词:生物炭;园林废弃堆腐物;设施蔬菜;土壤理化性质;产量

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0913-07 doi:10.11654/jaes.2015.05.014

Impacts of Biochar and Garden Waste Compost on Greenhouse Vegetables: I. Soil Physicochemical Properties and Vegetable Yields

CHEN Yan-hua^{1,2,3}, LIAO Shang-qiang^{1,2,3}, LI Yan-mei^{1,2,3}, ZHANG Qian⁴, GUO Ning⁵, ZHANG Lin^{1,2,3}, YANG Jun-gang^{1,2,3}, SUN Yan-xin^{1,2,3}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resource, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Key Laboratory of Urban Agriculture (North), Ministry of Agriculture, P. R. China, Beijing 100097, China; 3. Research Center of Beijing Municipal Slow and Controlled Release Fertilizers Engineering Technology, Beijing 100097, China; 4. Supervision and Testing Center for Agricultural Product Quality of Dezhou, Dezhou 253015, China; 5. Beijing Soil Fertilizer Extension Service Station, Beijing 100029, China)

Abstract: Many studies have been conducted on the effects of biochar (BIC) or garden waste compost (GWC) on the growth of greenhouse vegetables. However, few reports have been focused on the combined effects of two types of materials. In this study, the combined effects of BIC and GWC at different ratios on soil physical and chemical properties and Chinese cabbage yields were studied in a field experiment. Results showed that: (1) Both BIC and GWC significantly reduced soil bulk density by 2.86%~10.71%, but increased CEC, exchangeable Ca²⁺, and soil nitrate content by 13.4%~19.6%, 30.2%~56.9%, and 155.0%~628.8%, respectively; (2) BIC applications significantly increased moisture content and total water content of top soil by 7.2%~12.7% and 5.0%~13.4%, while decreased exchangeable Na⁺, ESP and SAR by 4.5%~12.5%, 18.2%~23.6%, and 18.9%~27.6%, respectively; (3) Applying GWC significantly increased exchangeable Mg²⁺ by 7.9%~17.1%; (4) Applications of these two materials significantly increased Chinese cabbage yields, especially in the treatments of GWC 15 t·hm⁻²+BIC 15 t·hm⁻² and BIC 10 t·hm⁻², which increased the yields by 23.1% and 19.8%, respectively. Meanwhile, these two treatments significantly improved the soil physicochemical properties. Together, they could be recommended for application to greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs.

Keywords: biochar; garden waste compost; greenhouse vegetable; soil physicochemical properties; yield

收稿日期:2014-11-25

基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设(KJXC201104004, KJXC201204002);北京市缓控释肥料工程中心建设(z111105055311092);首都安全投入品科技服务绿色通道建设(d131100000813001);北京市农委项目(i2013_001108202_000019);现代农业产业技术体系北京市叶类蔬菜创新团队专项(blvt-08)

作者简介:陈延华(1980—),女,山东禹城人,助理研究员,主要从事废弃生物质资源化利用和设施土壤的改良研究。E-mail: yhchen55@126.com

* 通信作者:孙焱鑫 E-mail: Sunyanxin@sohu.com

近年来我国设施栽培迅速发展,由于长期覆盖栽培和高度集约经营,设施土壤质量退化现象越来越突出,主要表现为次生盐渍化、酸化、养分失调、微生物区系破坏、有害物质积累等几个方面^[1],严重制约了设施农业的可持续发展,因此设施土壤的改良越来越受到关注^[2-5]。农林废弃物的逐年增加会对生态环境造成威胁,将其用于改良土壤,经济、实用且环保,既解决了废弃物的污染,又实现了它的资源化利用,因而成为新的研究热点^[6-7]。

园林废弃物堆腐物可以改善土壤结构,增加土壤孔隙度,提高土壤的渗透性,降低土壤 pH 值和含盐量,因此适宜用来改良土壤^[8-9]。生物炭(Biochar)一般是指生物质如木材、农作物废弃物、植物组织或动物骨骼等在完全或部分缺氧和相对温度“较低”(<700℃)条件下热裂解而形成的固态产物^[10]。与土壤相比,生物炭具有较大的孔隙度和比表面积^[11]、较高的 pH、阳离子交换量(CEC)和 C/N^[12-13]。在作物生产领域,大量研究表明生物炭施于土壤不仅快速提升土壤稳定性碳库,而且有利于形成较大的孔隙度和比表面积,降低土壤容重^[14]、提高土壤 pH 值和 CEC^[15]、提高总孔隙度^[16]、降低土壤中 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的含量^[7]、降低土壤中硝态氮的淋失^[17]、提高作物产量^[18],而且生物炭富含稳定的碳元素,理化性质稳定,抗生物分解能力强,用于还田改土具有可持续和累积发挥作用的基础。因此,生物炭在土壤改良方面的应用前景广阔^[19-20]。

以往的研究集中在单一废弃物的应用方面,对于不同废弃物的综合比较及搭配使用的研究较少。本文选用生物炭和园林废弃堆腐物两种材料对设施蔬菜的土壤进行改良,并分析两者对蔬菜产量的影响,进而对两种材料进行综合评价,并确定最佳用量,以期对京郊有机废弃物的科学、合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验时间、地点

田间试验于 2013 年 10 月至 12 月在北京大兴区长子营镇白庙村温室进行,该温室已种植蔬菜 12 年,有盐渍化现象,土壤基础理化性状为:有机质 1.21%,全氮 0.103%、pH 值 7.32,硝态氮 12.33 mg·kg⁻¹,速效磷 50.72 mg·kg⁻¹,速效钾 130.21 mg·kg⁻¹。

种植蔬菜为京研快菜。10 月 8 日播种,12 月 30 日收获。

1.2 试验材料

园林废弃堆腐物由园林废弃物经过粉碎、堆腐制

得(市场购买)。pH 值 7.74,EC 值 1022 μS·cm⁻¹,全氮 1.62%,全磷 0.43%,全钾 1.20%。

生物炭由玉米秸秆、棉籽壳经粉碎、压型,在高温 400℃厌氧条件下通过干馏、分离等工序制得(市场购买)。pH 值 10.84,EC 值 4325 μS·cm⁻¹,CEC 13.0 cmol·kg⁻¹,全氮 1.25%,速效磷 238 mg·kg⁻¹,速效钾 1625 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设置

试验设 6 个处理:无添加(CK);添加园林废弃堆腐物 5 t·hm⁻²(G5);添加生物炭 10 t·hm⁻²(B10);添加园林废弃堆腐物 5 t·hm⁻²和生物炭 5 t·hm⁻²(G5B5);添加园林废弃堆腐物 5 t·hm⁻²和生物炭 10 t·hm⁻²(G5B10);添加园林废弃堆腐物 5 t·hm⁻²和生物炭 15 t·hm⁻²(G5B15)。废弃物的施用方式均为撒施地表后旋耕至 0~30 cm 表层土中。每处理的小区为 8 m×3 m,随机排列,株行距为 15 cm×15 cm,灌溉采用畦灌。施肥为常规施肥,施肥量各处理相同,基肥为 120 m³·hm⁻²农家肥,750 kg·hm⁻²复合肥(15-15-15),追施尿素 1 次,用量为 450 kg·hm⁻²。

1.4 测定指标及测定方法

每个处理小区取 3 个连续的 10 株,分别称重,然后根据棚内株数计算总产量。土壤样品在快菜收获后采集,用 20 cm 环刀取表层土,每个处理 3 个重复。土壤容重的计算采用公式“容重=重量/体积”^[21],即环刀内土壤重量比环刀体积;土壤密度的测定采用比重瓶法^[21];土壤孔隙度由公式“孔隙度=1-容重/密度”计算得到;土壤质量含水量用烘干法测得;表层土壤贮水量由公式“贮水量=密度×表层土壤体积×质量含水量”计算得到,表示 1 hm² 面积的 20 cm 表层土壤中贮存的水分总量;土壤硝态氮需要用鲜土测定,其余化学指标均用风干土测定。土壤硝态氮的测定用紫外分光光度法^[21],CEC 的测定用氯化铵乙酸铵法^[21];土壤交换性钠、钙、镁依据标准 NY/T 1615—2008 测定;钠碱化度(ESP)计算得到,为交换性钠离子占交换性阳离子总量的百分数;钠吸附比(SAR)计算得到,为溶液中钠离子浓度与钙镁浓度之和的平方根的比值。

1.5 统计分析

采用 Excel 2007 完成对试验数据的整理、计算和作图。通过 SPSS17.0 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验,显著性水平设为 0.05,结果以“平均值±标准误”表示。通过 SPSS17.0 统计软件的 2×2 双因素方差分析进行析因分析。

2 结果与分析

2.1 添加两种废弃物对土壤物理性状的影响

2.1.1 密度

各处理土壤密度值均分布在 2.6~2.8 g·cm⁻³ 之间,而且处理间无显著性差异(表 1),析因分析也得到同样的结论(表 2),说明本研究中园林废弃堆腐物和生物炭对土壤密度影响不大。

2.1.2 土壤容重

添加废弃物处理的土壤容重显著低于对照。土壤容重的降低,有利于改善土壤结构、耕性与土壤微生态环境。由表 1 可见,G5、G5B5 和 G5B15 处理的土壤容重分别比对照降低了 5.71%、4.29%、10.71%。两因素分析表明,园林废弃堆腐物的施用对降低土壤容重起主要作用,而 10 t·hm⁻² 的生物炭用量对减少土壤容重的影响较小(表 2)。

2.1.3 土壤孔隙度

土壤孔隙度的提高,对于改善土壤水、气、热的环境条件和促进作物生长意义重大。添加两种废弃物的处理与对照相比均增加了土壤的孔隙度,但仅有 G5B15 处理达到了显著性差异,增幅达到 12.58%(表 1)。两因素分析表明,G5 和 B10 处理对提高土壤孔隙

度作用不显著(表 2)。

2.1.4 土壤质量含水量

土壤含水量的增加是两种添加物吸水和保水功能的体现。由表 1 可见,两种添加物均提高了土壤含水量,除 G5 处理与对照差异不显著外,施生物炭处理均显著高于对照,其中 G5B15 处理土壤含水量最高,比对照高 12.68%。由表 2 可见,园林废弃堆腐物 5 t·hm⁻² 的用量对土壤含水量的影响不显著,生物炭对土壤含水量的增加起主要作用。

2.1.5 土壤贮水量

表层土壤贮水量除 G5 和 G5B10 处理与对照无显著性差异,其余处理均显著高于对照,B10、G5B5 和 G5B15 处理的土壤贮水量分别比对照高 10.06%、9.11%和 13.39%。两因素分析表明,园林废弃堆腐物 5 t·hm⁻² 的用量对土壤含水量的影响不显著,生物炭对土壤含水量的增加起主要作用。

2.2 添加两种废弃物对土壤化学性状的影响

2.2.1 阳离子交换量

CEC 是衡量土壤保肥、供肥性能和缓冲能力的重要指标。添加废弃物的处理与对照相比,均显著提高了土壤的 CEC 值(表 3)。G5、G5B5、G5B10、G5B15 和 B10 处理的 CEC 值分别比对照增加 16.99%、

表 1 废弃物对土壤物理性质的影响
Table 1 Effect of wastes on soil physical properties

处理 Treatment	密度/g·cm ⁻³ Density	容重/g·cm ⁻³ Bulk density	孔隙度/% Porosity	质量含水量/% Soil water content	土壤贮水量/m ³ ·hm ⁻² Total water content
CK	2.663±0.009a	1.40±0.01a	47.37±0.28b	15.38±0.13c	819.88±8.49c
G5	2.657±0.009a	1.32±0.03b	50.40±1.15ab	15.67±0.20c	833.01±13.38c
B10	2.660±0.015a	1.36±0.01ab	49.69±0.73ab	16.74±0.06b	902.40±10.50ab
G5B5	2.713±0.009a	1.34±0.02b	50.78±0.62ab	16.48±0.04b	894.58±0.57ab
G5B10	2.670±0.010a	1.36±0.02ab	48.96±0.69b	16.53±0.13b	861.11±26.19bc
G5B15	2.680±0.020a	1.25±0.02c	53.33±0.91a	17.33±0.18a	929.66±16.29a

注:每列的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different small letters within a column mean significant difference between different treatments($P<0.05$). The same below.

表 2 废弃物对土壤物理指标影响的析因分析
Table 2 Factorial analysis of waste effects on soil physical properties

因素 Factor	显著性水平 Statistical significance				
	密度/g·cm ⁻³ Density	容重/g·cm ⁻³ Bulk density	孔隙度/% Porosity	质量含水量/% Soil water content	贮水量/m ³ ·hm ⁻² Total water content
园林废弃堆腐物 Garden waste compost	ns	*	ns	ns	ns
生物炭 Biochar	ns	ns	ns	**	**
园林废弃堆腐物×生物炭 Garden waste compost×Biochar	ns	*	*	ns	ns

注:差异显著性 *** 表示 $P<0.001$, ** 表示 $P<0.01$, * 表示 $P<0.05$, ns 表示 $P>0.05$ 。下同。
Note: *, **, and *** mean significant difference from control at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively. ns: not significant at $P>0.05$. The same below.

13.40%、19.62%、19.14%和 14.12%,处理间差异不显著。由进一步的两因素方差分析发现(表 4),园林废弃堆腐物和生物炭及二者的交互作用对 CEC 的影响均达到极显著水平,说明两种材料都能显著提高土壤 CEC。

2.2.2 土壤硝态氮

由表 3 可见,快菜收获后表层土壤的硝态氮含量表现为添加两种废弃物的处理都显著高于对照。G5 最高,达到 $238.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,混和处理 G5B5、G5B10 和 G5B15 分别比 G5 低 38.6%、57.8%和 53.4%。B10 含量为 $83.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 G5B10 和 G5B15 无显著性差异。对 NO_3^- 含量进行的两因素方差分析说明,园林废弃堆腐物和生物炭及其交互作用对提高表层土壤硝态氮素的含量均有显著作用(表 4)。

2.2.3 交换性钠、钙、镁

交换性 Na^+ 是反映土壤碱化程度的一个指标,它的增加会引发土壤出现湿时膨胀、干时板结的现象,进而影响作物的生长发育。如表 3 所示,G5 和 G5B15 处理的交换性 Na^+ 含量与对照差异不显著,G5B5、G5B10 和 B10 处理分别比对照降低 7.40%、7.34%和 12.48%。两因素方差分析结果表明生物炭对 Na^+ 含量影响最大($P < 0.01$),而园林废弃堆腐物对 Na^+ 含量的影响不明显,且二者的交互作用对 Na^+ 含量影响亦不显著(表 4)。

交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 能够使土壤胶体有较强的粘结力,从而阻止土壤胶体的扩散,使盐土有良好的团聚性和导水、导气能力^[22]。如表 3 所示,两种废弃物的

加入提高了交换性 Ca^{2+} 的含量,G5、G5B5、G5B10、G5B15 和 B10 处理的 Ca^{2+} 含量分别比对照增加 30.40%、30.71%、48.20%、57.23%和 50.29%。对 Ca^{2+} 含量进行的两因素方差分析显示(表 4),两种废弃物及二者的交互作用对 Ca^{2+} 含量的提高都有显著作用。两种废弃物对交换性 Mg^{2+} 含量的影响有所差异,G5B5 和 B10 处理的 Mg^{2+} 含量与对照差异性不显著,G5B15、G5 和 G5B10 处理分别比对照增加 17.06%、13.55%和 7.94%。对 Mg^{2+} 含量进行的两因素方差分析显示,对 Mg^{2+} 含量的提高起主要作用的是园林废弃堆腐物, $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量对 Mg^{2+} 含量的提升作用不显著(表 4)。

2.2.4 土壤钠碱化度和钠吸附比

ESP 常被用来作为碱土分类及碱化土壤改良利用的指标和依据。ESP 为 5%~10%为轻度碱化土壤,10%~15%为中度碱化土壤,15%~20%为强碱化土壤^[23]。本研究中各处理土壤碱化度均低于 5%,说明供试土壤尚未发生碱化。除 G5 处理与对照无显著性差异外,其余处理均显著降低了 ESP,B10、G5B5、G5B10 和 G5B15 处理的 ESP 分别比对照降低 23.53%、18.24%、22.35%和 20.00%(表 3)。由表 4 的两因素方差分析可见,对 ESP 起主要作用的是生物炭,园林废弃堆腐物则无显著影响。

SAR 反映土壤中钙镁离子的存在对交换性钠离子的碱化作用的中和作用,也可以用于指导土壤的灌溉。SAR 值 15 可以作为钠质土和非钠质土的划分标准^[24]。添加两种废弃物的处理均显著降低了土壤的

表 3 废弃物对土壤化学性质的影响

Table 3 Effects of wastes on soil chemical properties

处理 Treatment	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^-/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{Na}^+/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{Ca}^{2+}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{Mg}^{2+}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	ESP/%	SAR
CK	$13.93 \pm 0.12\text{b}$	$32.72 \pm 3.29\text{d}$	$54.50 \pm 1.61\text{ab}$	$2.25 \pm 0.10\text{c}$	$0.428 \pm 0.003\text{d}$	$1.70 \pm 0.06\text{a}$	$12.59 \pm 0.24\text{a}$
G5	$16.30 \pm 0.15\text{a}$	$238.45 \pm 9.85\text{a}$	$57.67 \pm 1.22\text{a}$	$2.93 \pm 0.07\text{b}$	$0.486 \pm 0.010\text{ab}$	$1.54 \pm 0.08\text{ab}$	$11.60 \pm 0.19\text{b}$
B10	$15.90 \pm 0.06\text{a}$	$83.42 \pm 1.27\text{c}$	$47.70 \pm 1.19\text{d}$	$3.38 \pm 0.09\text{a}$	$0.453 \pm 0.003\text{cd}$	$1.30 \pm 0.05\text{c}$	$9.12 \pm 0.14\text{d}$
G5B5	$15.80 \pm 0.38\text{a}$	$146.44 \pm 8.21\text{b}$	$50.47 \pm 0.55\text{cd}$	$2.94 \pm 0.10\text{b}$	$0.452 \pm 0.011\text{cd}$	$1.39 \pm 0.06\text{bc}$	$10.22 \pm 0.04\text{c}$
G5B10	$16.67 \pm 0.32\text{a}$	$100.53 \pm 12.27\text{c}$	$50.50 \pm 0.86\text{cd}$	$3.33 \pm 0.06\text{a}$	$0.462 \pm 0.002\text{bc}$	$1.32 \pm 0.06\text{c}$	$9.70 \pm 0.10\text{cd}$
G5B15	$16.60 \pm 0.35\text{a}$	$111.10 \pm 4.85\text{c}$	$52.03 \pm 0.75\text{bc}$	$3.53 \pm 0.09\text{a}$	$0.501 \pm 0.012\text{a}$	$1.36 \pm 0.07\text{bc}$	$9.69 \pm 0.16\text{cd}$

表 4 废弃物对土壤化学指标影响的析因分析

Table 4 Factorial analysis of waste effects on soil chemical properties

因素 Factor	显著性水平 Statistical significance						
	CEC	NO_3^-	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	ESP	SAR
园林废弃堆腐物 Garden waste compost	***	**	ns	**	***	ns	ns
生物炭 Biochar	***	***	**	***	ns	***	***
园林废弃堆腐物×生物炭 Garden waste compost×Biochar	**	***	ns	**	**	*	**

SAR 值(表 3),G5、B10、G5B5、G5B10 和 G5B15 处理分别比对照降低 7.86%、27.56%、18.82%、22.95% 和 23.03%。两因素方差分析显示,生物炭对显著降低 SAR 起主要作用(表 4)。

2.3 添加两种废弃物对产量的影响

由图 1 可见,添加两种废弃物处理的产量均高于对照。两种废弃物单独施用, B10 处理的产量达到 $59.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,比 G5 高 16.74%;混和施用处理中,随着生物炭用量的增加,产量呈现递增趋势, G5B15 最高,达到 $60.97 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,比对照增加 23.05%。

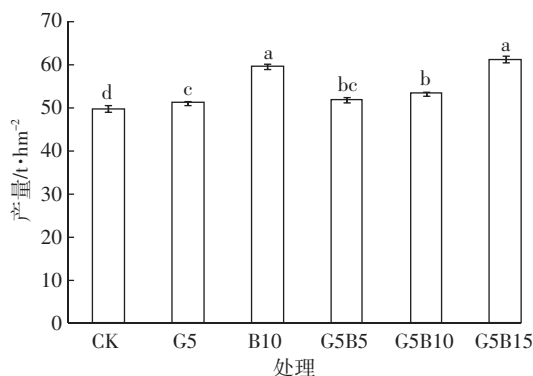


图 1 不同废弃物对产量的影响

Figure 1 Effects of different wastes on vegetable yields

3 讨论

本研究对土壤物理指标分析发现,添加生物炭和园林废弃堆腐物降低了土壤容重,提高了表层土壤的质量含水量和贮水量,增加了孔隙度但效果不显著,对土壤密度基本无影响,与多数研究结论相似^[15-16]。但是两种废弃物的作用并不完全相同:对于土壤容重,园林废弃堆腐物 $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的用量影响显著,而生物炭 $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的用量影响显著, $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的用量则不显著,说明对于土壤容重的影响,废弃物的用量是一个不容忽视的因素。生物炭对表层土壤的质量含水量和贮水量影响突出,表明同等灌溉量的情况下,生物炭能够比园林废弃物保持更多的水分,可以提高根际水分的利用效率;同时,由于生物炭具有对表层土壤的保水能力,可以设置减量灌溉的试验进一步研究其节水能力,推动节水农业的发展。两种废弃物对孔隙度的作用不显著,可能因为供试快菜生育期较短,而且生育期内灌溉方式为大水漫灌,灌水量充足,所以削弱了这两种材料对土壤孔隙度的影响。但是可以看出,生物炭在 $0 \sim 15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内,随着用量的增加,土壤物理指标的改善效果越来

越显著。这与生物炭的多孔结构是分不开的。

本文供试材料园林废弃堆腐物和生物炭都显著提高了土壤的 CEC,与前人研究结果一致^[15-16]。这是由于它们表面含有丰富的 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{CHO}$ 和 $-\text{OH}$ 等含氧官能团,这些含氧官能团可以改变土壤的理化性质与结构,使阳离子交换活动更加活跃,从而增加土壤阳离子交换总量,对提高土壤肥力与作物生长都具有积极作用^[29]。生物炭降低了交换性 Na^+ 含量,与钱晓雍等^[7]的结论相同,而园林废弃堆腐物对 Na^+ 含量影响不大,可能是因为生物炭的吸附量大于解析量;两种添加物都增加了 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量,与钱晓雍等^[7]的结论相反,可能是因为二者含有呈可溶态的灰分元素 Ca 、 Mg ,且释放出的养分含量高于两种材料所能吸附的养分含量,所以两种添加物能提高土壤的盐基饱和度,能够用作酸性土壤的改良剂^[26],而对于碱性土壤作用不显著^[15]。生物炭对 ESP 和 SAR 的降低也起主要作用,而且随生物炭用量的增加该作用更加显著,因此生物炭可以作为改良碱化土壤的材料,其功效有待进一步深入研究。

本研究中添加两种材料后土壤硝态氮在收获期均显著高于对照,有可能是两种材料的多微孔构造和强吸附能力降低了硝态氮的淋失,与 Clough 等^[27]、Dempster 等^[28]和杨放等^[17]的结论相同,也可能与供试材料释放出的硝态氮有关。本研究中两种材料混和添加的处理硝态氮低于 G5 处理,其原因一方面是生物炭对 NO_3^- 有较强的吸附作用^[29],另一方面是生物炭的 C/N 比较高,从而导致氮素被微生物分解利用,再者混合施用处理快菜生长旺盛、产量高,吸收了较多的硝态氮。

本研究中两种材料无论单独添加还是混和添加,都显著增加了设施快菜的产量,而且生物炭的效果比园林废弃堆腐物显著,与 Chan 等^[30]、张万杰等^[31]的结论相似,支持了增产观点。两种废弃物的增产作用,可能与二者对土壤理化性质的改良有关,可能也与材料本身带入的养分有关。G5B10 处理的产量低于 B10,即生物炭 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,再添加园林废弃堆腐物,产量不但不会继续增加,反而会降低,说明虽然两种有机废弃物都有增产效应,但是两种效应并不是简单的叠加关系,应注意它们之间的配比。

本文结合单因素和两因素分析方法,综合分析了两种材料对土壤理化性质的影响,试验设置中,园林废弃堆腐物只采用了经验量 $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,没有设立用量梯度,所以损失了园林废弃堆腐物用量大小与生物炭

用量大小交互作用产生的信息,需要进一步补充。废弃物对土壤的改良是对土壤物理、化学、生物性质等的综合改良过程,也是一个长期的过程,因材料不同、试验土壤不同、试验作物不同,效果会有差异。因此,对于设施蔬菜,下一步需要开展长期定位研究。

4 结论

生物炭和园林废弃堆腐物对设施快菜的土壤理化性状改良效果突出,均降低了土壤容重,增加了CEC、交换性 Ca^{2+} 和土壤硝态氮含量;生物炭显著增加了表层土壤的质量含水量和贮水量,降低了交换性 Na^+ 、ESP和SAR的含量;园林废弃堆腐物对 Mg^{2+} 升高起主要作用;两种材料的添加均显著增加了产量(G5B15和B10处理的增产量最高),且对土壤理化性状改良效果显著,适宜在京郊设施菜地应用。

参考文献:

- [1] 史 静, 张乃明, 包 立. 我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 787-794.
SHI Jing, ZHANG Nai-ming, BAO Li. Research progress on soil degradation and regulation of facility agriculture in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(7): 787-794.
- [2] 冯永军, 陈为峰, 张黄娜, 等. 设施园艺土壤的盐化与治理对策[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 111-114.
FENG Yong-jun, CHEN Wei-feng, ZHANG Huang-na, et al. Soil salinization and countermeasures in protected horticulture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(2): 111-114.
- [3] 施毅超, 胡正义, 龙为国, 等. 轮作对设施蔬菜大棚中次生盐渍化土壤盐分离子累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 548-553.
SHI Yi-chao, HU Zheng-yi, LONG Wei-guo, et al. Effect of crop rotation on ion accumulation in secondary salinization soil of vegetable field in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 548-553.
- [4] Lehmann J, Dailva J P, Sreiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [5] Noory H, Liaghat A M, Chaiehi M R, et al. Effects of water table management on soil salinity and alfalfa yield in a semi-arid climate[J]. *Irrigation Science*, 2000, 27(5): 401-407.
- [6] 陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1282-1289.
CHEN Yi-qun, DONG Yuan-hua. Progress of research and utilization of soil amendments[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3): 1282-1289.
- [7] 钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞, 等. 不同废弃物对设施菜地次生盐渍化土壤的修复效果[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 737-743.
QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, GUO Chun-xia, et al. Reclamation of secondary salinized soils in protected vegetable fields using different wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 737-743.
- [8] 刘 佳. 园林废弃物堆肥化研究及应用[D]. 天津: 天津城市建设学院, 2012.
LIU Jia. Research and application of garden waste composting[D]. Tianjin: Tianjin Institute of Urban Construction, 2012.
- [9] 周晓飞. 园林废弃物发酵基质对土壤pH值及含盐量的影响研究[J]. 绿色科技, 2013, 11: 207-209.
ZHOU Xiao-fei. Effects of garden waste fermentation matrix on the soil pH value and salt content[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2013, 11: 207-209.
- [10] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 395-419.
- [11] Gerard C, Zofia K, Stavros K, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(13): 3632-3640.
- [12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increase cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [13] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1-2): 9-20.
- [14] Busschei W J, Novak J M, Evans D E, et al. Influences of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. *Soil Science*, 2010, 175(1): 10-14.
- [15] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展[J]. 土壤与作物, 2012, 1(4): 219-226.
ZHANG Qian-feng, WANG Guang-hua. Research progress of physio-chemical properties of biochar and its effects as soil amendments[J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(4): 219-226.
- [16] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
ZHANG Wei-ming. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012.
- [17] 杨 放, 李心清, 邢 英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 972-977.
YANG Fang, LI Xin-qing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in saline soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 972-977.
- [18] 张 娜, 李 佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1569-1574.
ZHANG Na, LI Jia, LIU Xue-huan, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1569-1574.
- [19] 陈温福, 张伟明, 孟 军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.

- CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324-3333.
- [20] 陈温福, 张伟明, 孟 军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):821-828.
- CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Biochar and agro-ecological environment: Review and prospect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):821-828.
- [21] 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.
- LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Technology Press, 1999.
- [22] 何 莎. 劣质水灌溉条件下不同类型土壤盐碱化的影响研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2010.
- HE Sha. Effect of marginal water irrigation on salinize-alkalization of different soils[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2010.
- [23] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [24] 李小刚, 曹 靖, 李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(1):64-72.
- LI Xiao-gang, CAO Jing, LI Feng-min. Influence of salinity, sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(1):64-72.
- [25] Fuentes A B, Arbestain M C, Sevilla M, et al. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by phrolysis and hydrothermal carbonization of corn stover[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7):618-626.
- [26] Laird D A. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100:178-181.
- [27] Clough T J, Condron L M. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4):1218-1223.
- [28] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralization with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1-2):311-324.
- [29] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95:255-257.
- [30] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45:629-634.
- [31] 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 Wan-jie, LI Zhi-fang, ZHANG Qing-zhong, et al. Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot experiment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):1946-1952.