

# 生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响

韩召强<sup>1</sup>, 陈效民<sup>1</sup>, 曲成闯<sup>1</sup>, 张晓玲<sup>1</sup>, 黄春燕<sup>2</sup>, 刘云梅<sup>2</sup>, 成艳红<sup>3</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095;

2. 如皋市农业科学研究所, 江苏 如皋 226500; 3. 江西红壤研究所, 江西 进贤 331717)

**摘要:** 分析生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响, 为生物质炭在农业中的推广应用提供科学依据。以如皋市农业科学研究所大棚示范区为试验基地, 通过田间小区试验, 研究了不同生物质炭施用量(0, 5, 10, 20, 30, 40 t/hm<sup>2</sup>)条件下土壤理化性状、酶活性及黄瓜产量变化。结果表明: 生物质炭施用对土壤理化性状及土壤酶活性有显著的影响。高施用量(40 t/hm<sup>2</sup>)处理对土壤物理性状的改良效果最好, 当生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup> 时对土壤养分含量提升效果最好。与对照相比, 施用生物质炭各处理土壤容重降幅为 0.88%~10.52%, 而土壤孔隙度、饱和含水量、田间持水量、饱和导水率、有机质、全氮、硝态氮、铵态氮和速效磷含量的增幅分别为 3.68%~7.53%, 27.96%~119.25%, 30.73%~55.05%, 1.89%~224.61%, 10.39%~54.56%, 6.06%~22.58%, 2.33%~45.63%, 235.71%~414.29% 和 19.37%~77.76%。土壤脲酶和过氧化氢酶的活性及黄瓜产量随着生物质炭施用量的增加均呈先增加后降低的趋势, 两种酶的活性分别在生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup> 和 20 t/hm<sup>2</sup> 时最大, 较对照分别提高了 104.57% 和 15.38%; 生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup> 时对黄瓜增产效果最好, 该处理下黄瓜产量较对照提高了 21.80%。主成分分析结果表明, 不同生物质炭施用量处理下的土壤质量次序为 C4>C5>C3>C2>C1>CK。在土壤中施用生物质炭不仅可以促进黄瓜增产, 改善土壤理化性状, 提高土壤养分含量, 还可以改良土壤生物学性质, 提升土壤酶活性。

**关键词:** 生物质炭; 土壤理化性状; 脲酶; 过氧化氢酶; 黄瓜产量

**中图分类号:** S157.39; S156.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2017)06-0272-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.042

## Effects of Biochar Application on Soil Physicochemical Properties, Enzyme Activities and Cucumber Yield

HAN Zhaoqiang<sup>1</sup>, CHEN Xiaomin<sup>1</sup>, QU Chengchuang<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>1</sup>,

HUANG Chunyan<sup>2</sup>, LIU Yunmei<sup>2</sup>, CHENG Yanhong<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

2. Rugao Institute of Agricultural Sciences, Rugao, Jiangsu 226500; 3. Red Soil Institute, Jinxian, Jiangxi 331717)

**Abstract:** In order to study the effects of biochar application on the soil physicochemical properties, enzyme activities and cucumber yield, and find a scientific basis for the popularization and application of biochar in agriculture, field experiments were conducted in greenhouse demonstration area, Rugao Institute of Agricultural Sciences, Jiangsu province. Biochar was incorporated into the soil at the rates of 0, 5, 10, 20, 30 and 40 t/hm<sup>2</sup>, respectively. The results showed that biochar application had significant effects on soil physicochemical properties and enzyme activities. The optimal rates of biochar application were 40 t/hm<sup>2</sup> and 30 t/hm<sup>2</sup> for improving the soil physicochemical properties and soil nutrient content, respectively. Biochar application reduced the soil bulk density by 0.88% to 10.52%, while increased the soil porosity, saturated water content, field water capacity, saturated hydraulic conductivity, organic matter, total nitrogen, the nitrate nitrogen content, ammonia nitrogen content and available phosphorus by 3.68% to 7.53%, 27.96% to 119.25%, 30.73% to 55.05%, 1.89% to 224.61%, 10.39% to 54.56%, 6.06% to 22.58%, 2.33% to 45.63%, 235.71% to 414.29% and 19.37% to 77.76%, respectively, compared with the control treatment. The activities of soil urease and catalase and the cucumber yield increased at first and then decreased with the biochar application increasing. The activities of soil urease and catalase were the highest when the biochar application

收稿日期: 2017-05-11

资助项目: 国家重点研发计划项目“耕地地力影响化肥养分利用的机制与调控”(2016YFD0200305); 江西省科技支撑项目(20151BBF60060)

第一作者: 韩召强(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土资源利用研究。E-mail: 2015103064@njau.edu.cn

通信作者: 陈效民(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源与环境物理过程研究。E-mail: xmchen@njau.edu.cn

amount were 30 t/hm<sup>2</sup> and 20 t/hm<sup>2</sup>, respectively, and they were increased by 104.57% and 15.38% compared with the control, respectively. The cucumber yield increased dramatically by 21.80% compared with the control treatment when the application rate of biochar was 30 t/hm<sup>2</sup>. The principal component analysis showed that the soil quality with different biochar application rates decreased in the order of C4>C5>C3>C2>C1>CK. The applying biochar in soil could not only increase cucumber yield, and improve the physical and chemical properties of soil and the soil nutrient content, but also improve the biological properties (such as: soil enzyme activities).

**Keywords:** biochar; soil physicochemical properties; urease; catalase; cucumber yield

生物质炭是由秸秆、粪肥及生活垃圾等有机物料在完全或部分缺氧的条件下经热裂解、炭化而形成的一类高度芳香化、难溶性的固态物质<sup>[1-2]</sup>,其表面发达的多孔结构及丰富的官能团可以降低土壤容重,增大土壤孔隙度,使土壤结构得到改善<sup>[3]</sup>,因而为土壤养分的吸附保持<sup>[4]</sup>和作物根系的生长<sup>[5]</sup>提供了有利的空间和条件,进而提高了土壤的微生物活性。因此,生物质炭运用于农业生产以提高土壤养分的含量促进作物生长已成为国内外研究的热点<sup>[6]</sup>。

大量研究表明,施用生物质炭可有效改善土壤持水性,增加土壤养分吸持容量和阳离子交换量(CEC),促进土壤稳定性团聚体形成,提高土壤有机质含量和酸性土壤的pH<sup>[7-9]</sup>。黄剑等<sup>[10]</sup>研究表明生物质炭能促进与N、P等矿质元素利用相关的土壤酶活性,而抑制参与土壤碳矿化等土壤的酶活性。因此,生物质炭可作为改良和培肥土壤、提高农作物的生产效率、促进农作物增产的农业可持续发展有效措施。黄瓜是我国重要的一种蔬菜作物,因其喜水喜肥,对土壤养分的需求量极大,而黄瓜根系较浅、好气性强且以水平分布为主,对土壤深层养分吸收能力差<sup>[11]</sup>,因此,施肥是改善黄瓜生长环境提高其产量的重要措施。而传统栽培模式往往重施化肥和偏施氮肥,导致土壤结构不良,土壤有机质含量明显下降。所以,采取施用生物质炭为主的施肥措施,实行有机栽培管理是今后黄瓜栽培技术的重要方向。目前,我国学者已着重研究生物质炭对于农业生产的作用,生物质炭施用对黄瓜生产的影响研究主要集中在生物质炭对黄瓜幼苗生长及对黄瓜枯萎病的防治效果方面的盆栽试验,而生物质炭施用在种植黄瓜的大田及对种植黄瓜土壤理化性状、酶活性和黄瓜大田生长效应研究鲜见报道。有鉴于此,本研究通过大田试验,采用施用不同量的生物质炭,研究土壤质量和土壤肥力的变化及对黄瓜产量的影响,以期为生物质炭在蔬菜作物上的推广应用、提高水土资源的利用效率及促进我国农业的可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区设在江苏省如皋市农业科学研究所(120°

28'54"E,32°22'02"N),属亚热带季风气候,全年平均气温15.5℃,全年日照时数1700.6h,无霜期231d。全年降水总量1424.7mm,年蒸发量1000~1100mm,干湿季节明显,降雨主要集中在6—9月,占全年雨量61%~69%;10月至翌年5月为旱季,蒸发量占全年蒸发量的40%~50%。

### 1.2 试验材料

供试土壤为江苏典型的潮土。土壤的基本性质为:土壤pH6.44,全氮1.03g/kg,有效磷142.12mg/kg,有机碳17.88g/kg,总孔隙度60.79%,容重1.04g/cm<sup>3</sup>,黏粒含量208.0g/kg,粉砂粒含量719.2g/kg,砂粒含量72.8g/kg。

本研究采用的生物质炭来自于江苏勤丰新材料科技有限公司,原料为小麦秸秆,炭化温度为500℃,小麦秸秆的35%被转化为生物质炭,生物质炭的pH10.65,阳离子交换量217.0cmol/kg,全氮10.75g/kg,全磷2.05g/kg,全钾37.45g/kg,有机碳364.72g/kg,灰分22.44%,容重0.45g/cm<sup>3</sup>,比表面积8.9m<sup>2</sup>/g。

供试黄瓜品种为博美8号。

### 1.3 试验设计

试验于2016年9月13日至2016年11月12日在江苏省如皋市农业科学研究所大棚试验基地进行。大棚面积48m×16m=768m<sup>2</sup>。试验共设6个处理,生物质炭用量分别为CK(不施用生物质炭),C1(5t/hm<sup>2</sup>),C2(10t/hm<sup>2</sup>),C3(20t/hm<sup>2</sup>),C4(30t/hm<sup>2</sup>),C5(40t/hm<sup>2</sup>)。每个处理设置3次重复,采用完全方案设计,随机区组排列,共18个小区,小区面积3m×7m=21m<sup>2</sup>,保护行宽为1.0m,走道宽及小区间排水沟宽均为0.5m。

黄瓜种植基肥采用复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=17-17-17),施用量为187.5kg/hm<sup>2</sup>,于黄瓜种植前一次性施入。生物质炭于2016年9月13日黄瓜种植前按照试验方案一次性施入各小区,并通过人工翻耕与表层土壤混匀,后期不再追施。黄瓜在苗龄为31天时统一移栽,株距为25cm,行距为50cm。试验期间采取同样的管理措施(大棚管理措施),自然条件生长,试验期间不追肥,定期除草。在黄瓜生长期间根据天气及黄瓜生长状况适量灌水,以满足黄瓜正常生

长发育所需。

1.4 土样采集

采集黄瓜成熟期植株根区土壤,每处理小区 5 点混合取样,四分法取为 0—15 cm 黄瓜植株根区土壤混合样品,自封袋盛装带回,室内自然风干(20 d),沿土块自然裂隙掰开,去除有机碎片后研磨,一部分土样过 2 mm 筛用于土壤速效磷、硝态氮、铵态氮及 pH 的测定,另一部分土样过 0.149 mm 筛用于土壤有机质和全氮的测定。

1.5 分析方法

在黄瓜成熟后采用环刀法<sup>[12]</sup>测定土壤容重、土壤孔隙度、土壤饱和含水量和土壤田间持水量;土壤饱和导水率采用恒定水头法<sup>[12]</sup>测定(结果换算成标准温度 10 ℃时的饱和导水率);土壤化学性质的测定方法参见《土壤农化分析》<sup>[13]</sup>。酶活性的测定用常规分析方法<sup>[14]</sup>,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定,脲酶采用靛酚蓝比色法测定。在黄瓜收获期各施肥处理取果实样记录全部单株黄瓜产量。

1.6 数据处理

采用 Excel 2013 及 SPSS 22 软件对试验数据进

行统计分析和作图。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)分析不同生物质炭用量对土壤理化性状、酶活性指标和黄瓜产量的影响,采用 Duncan 法进行多重比较,显著性水平设为 0.05。

2 结果与分析

2.1 施用生物质炭对土壤物理性质的影响

由表 1 可知,生物质炭对黄瓜植物根系土壤的物理性质有显著影响。土壤容重随生物质炭施用量的增加呈降低趋势,土壤孔隙度、饱和含水量、田间持水量及饱和导水率随生物质炭施用量的增加而增加。在黄瓜成熟期,不同生物质炭施用量的土壤容重均较对照有所降低,其中 C4 和 C5 处理的土壤容重较对照有显著降低,降幅分别为 8.84%和 10.62%。土壤孔隙度的处理间多重比较结果与土壤容重一致,其中 C4和 C5 处理的土壤孔隙度较对照分别增加了 5.72%和 7.53%,有明显差异。与对照相比,各处理土壤饱和含水量、田间持水量和饱和导水率增幅分别为 27.96%~119.25%,30.73~55.05%和 1.89%~224.61%。因此,施用生物质炭可以显著改善土壤的物理性状和土壤的水力学性质。

表 1 施用生物质炭对土壤物理性质的影响

| 处理 | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 孔隙度/%        | 饱和<br>含水量/% | 田间<br>持水量/%  | 饱和导水率/<br>(10 <sup>-5</sup> cm·s <sup>-1</sup> ) |
|----|------------------------------|--------------|-------------|--------------|--------------------------------------------------|
| CK | 1.13±0.02a                   | 57.65±0.64b  | 25.04±0.13d | 17.44±0.17d  | 3.17±0.40e                                       |
| C1 | 1.12±0.01a                   | 57.29±0.45b  | 32.04±0.74c | 22.80±0.38c  | 3.23±0.57e                                       |
| C2 | 1.07±0.05ab                  | 59.77±1.81ab | 34.76±0.89c | 24.34±0.71bc | 5.21±0.35d                                       |
| C3 | 1.05±0.05ab                  | 60.29±1.89ab | 35.69±0.45c | 25.46±0.47bc | 6.19±0.82c                                       |
| C4 | 1.03±0.04b                   | 60.95±1.39a  | 47.03±3.24b | 27.04±0.51b  | 9.19±0.16b                                       |
| C5 | 1.01±0.03b                   | 61.99±1.08a  | 54.90±1.77a | 32.04±3.58a  | 10.29±0.30a                                      |

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 施用生物质炭对土壤化学性质的影响

由表 2 可以看出,施用生物质炭可以显著改善土壤的化学性质,提高土壤的养分含量。随着生物质炭施用量的增加,各处理土壤 pH 均呈增加趋势,但与对照相比差异不显著。施用生物质炭后黄瓜根系土壤养分含量随着生物质炭施用量的增加呈不断上升的趋势。与 CK 相比,施用生物质炭的各处理黄瓜根系土壤全氮、硝态氮和铵态氮分别提高了 6.06%~22.58%,2.33%~45.63%和 235.71%~414.29%,土壤速效磷提高了

19.37%~77.76%,土壤有机质提高了 10.39%~54.56%。当生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup>(C4 处理)时,土壤中全氮、硝态氮和铵态氮含量均达到最大,但随着生物质炭施用量的进一步增加,土壤中氮含量出现降低的趋势。与 C4 处理相比,C5 处理土壤中全氮、硝态氮和铵态氮含量分别降低了 10.53%,5.63%和 2.86%。总体上,黄瓜根区土壤养分含量随着生物质炭施用量的增加而增大,表明施用生物质炭能够显著增加种植黄瓜土壤中的养分含量。

表 2 施用生物质炭对土壤化学性质的影响

| 处理 | pH         | 全氮/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 硝态氮/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 铵态氮/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 有机质/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|----|------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| CK | 7.72±0.01a | 0.93±0.01c                   | 257.69±7.95d                   | 6.89±1.23d                     | 165.19±10.37d                  | 14.24±0.37c                   |
| C1 | 7.75±0.02a | 0.99±0.03bc                  | 263.66±0.35d                   | 23.25±0.50c                    | 168.39±3.33d                   | 15.72±0.44b                   |
| C2 | 7.78±0.01a | 1.00±0.01bc                  | 312.65±2.81c                   | 25.21±0.02c                    | 174.03±1.54d                   | 15.99±0.06b                   |
| C3 | 7.79±0.01a | 1.08±0.01ab                  | 331.24±1.99bc                  | 32.67±0.16b                    | 201.31±1.41c                   | 16.07±0.01b                   |
| C4 | 7.82±0.11a | 1.14±0.01a                   | 374.98±19.53a                  | 35.08±0.01a                    | 232.81±4.74b                   | 22.00±0.29a                   |
| C5 | 7.86±0.02a | 1.02±0.02bc                  | 354.86±5.03ab                  | 34.95±0.35a                    | 293.65±3.33a                   | 22.01±0.43a                   |

2.3 施用生物质炭对土壤酶活性的影响

2.3.1 施用生物质炭对土壤脲酶活性的影响 如图 1 所示,黄瓜植株根区脲酶活性随着生物质炭施用量的增加总体呈现先增加后减少的趋势。当生物质炭施用量为 5 t/hm<sup>2</sup> (C1 处理) 时,脲酶活性最低为 0.10 mg/(g · d),与对照相比降低了 8.23%,但差异未达到显著水平。随着生物质炭施用量的进一步增加,脲酶活性开始显著大于对照,C2、C3 和 C4 处理分别较对照提高了 49.36%,96.89%和 104.57%。C5 处理的土壤脲酶活性虽然较对照提高了 3.66%,但未达到显著性水平,并且较 C4 水平显著降低。说明当生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup> (C4 处理) 时,最有利于提高黄瓜植株根区土壤的脲酶活性,且过量的生物质炭也不利于土壤中脲酶活性的提高。

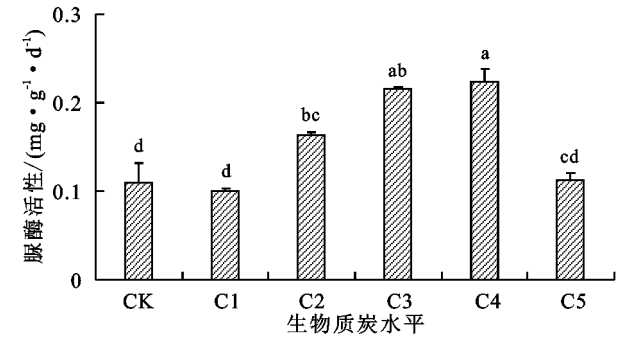


图 1 施用生物质炭对土壤脲酶活性的影响

2.3.2 施用生物质炭对土壤过氧化氢酶活性的影响

当生物质炭施用量为 5 t/hm<sup>2</sup> (C1 处理) 时,黄瓜根区土壤中的过氧化氢酶的活性略低于对照,差异不显著(图 2)。随着生物质炭施用量的继续增加,土壤中过氧化氢酶活性呈先增加后降低的趋势,当生物质炭施用量为 20 t/hm<sup>2</sup> (C3 处理) 时,土壤中过氧化氢酶活性最大为 0.15 mL/g,与空白对照相比增加了 15.38%,差异达到显著水平。当生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup> (C4 处理) 时,土壤中过氧化氢酶活性较 C3 水平显著降低,但仍然显著高于对照。随着生物质炭施用量的继续增加,C5 水平土壤中过氧化氢酶的活性较最大值 C3 水平降低了 14.42%,差异达到显著水平,并且低于对照,但差异不显著。说明适量的生物质炭可以显著提高土壤中过氧化氢酶的活性,但过量的生物质炭会抑制其活性。

2.4 施用生物质炭对黄瓜产量的影响

图 3 所示,生物质炭的施用可以提高黄瓜的产量。随着生物质炭施用量的增加,黄瓜产量呈先增加后降低的趋势。C1、C2、C3 和 C4 水平黄瓜产量与对照相比分别增加了 6.02%,7.52%,17.29%和 21.80%,其中 C3 和 C4 产量分别为 3.12 × 10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup> 和 3.25 × 10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup>,与对照相比有显著性差异。随着生物质炭施用量的继续增加,C5 水平黄瓜产量出现下降的

趋势,与 C4 水平相比降低了 12.35%,有显著性差异,但仍然高于空白对照,与空白对照相比增加了 6.77%。总体上,施用生物质炭可以提高黄瓜的产量,但过量的生物质炭也会抑制黄瓜的生长。

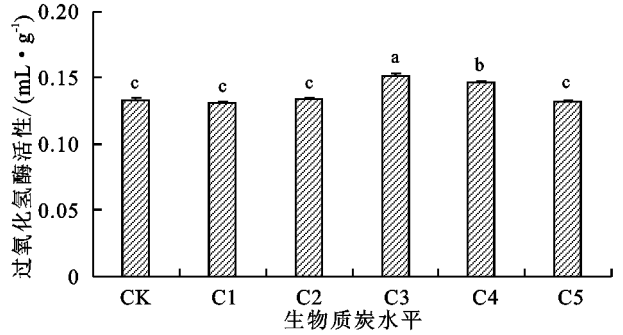


图 2 施用生物质炭对土壤过氧化氢酶活性的影响

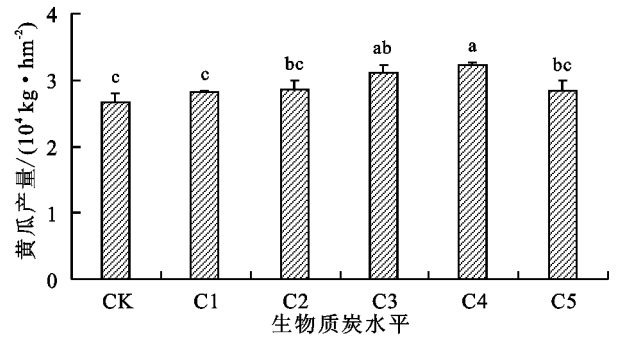


图 3 施用生物质炭对黄瓜产量的影响

2.5 土壤性质的主成分分析

如图 4 所示,对各土壤因子进行主成分分析,第一主成分 PC1 的方差贡献率为 66.36%,第二主成分 PC2 的方差贡献率为 27.96%,二者之和为 94.32%,可以代表系统内的所有信息。从特征值和贡献率可知,各主成分对土壤性质的影响力依次为 PC1 > PC2,PC1 所含信息量在两个主成分中较高。由土壤性质主成分载荷矩阵分布图可知,除脲酶、过氧化氢酶和全氮以外,其余土壤因子在 PC1 上均有较高的因子载荷(0.888 2~0.975 0);脲酶和过氧化氢酶在 PC2 上有较高的因子载荷。综合以上分析,大部分变量在 2 个主成分中有较高的因子载荷,说明这两个主成分可以反映由上述土壤因子所表征的土壤质量状况的高低。土壤理化性状在 PC1 上占有较高的权重,因此土壤理化性状可以敏感地反映施用生物质炭对黄瓜土壤质量影响状况。

不同生物质炭水平处理的土壤在两个主成分上的得分情况如表 3 所示。综合评价可知,不同生物质炭施用量处理的土壤质量水平差异较大,C4 (30 t/hm<sup>2</sup>) 处理土壤质量水平最高,而不施肥的 CK 处理土壤质量水平最低。这说明施用生物质炭能提高土壤肥力水平,尤其在生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup> 时对土壤肥力的提高最为明显。

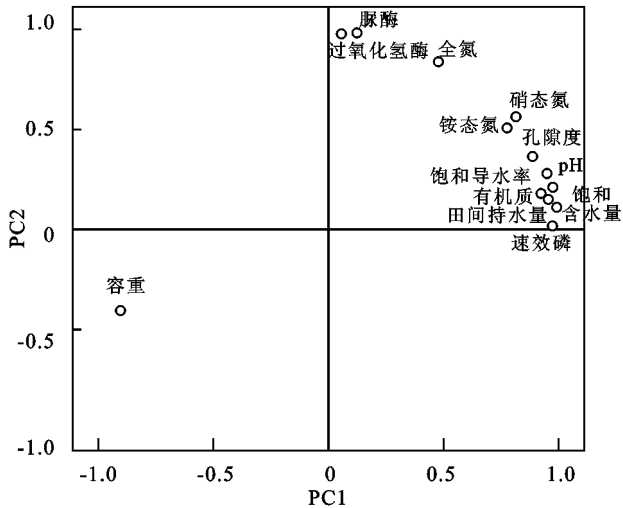


图 4 土壤性质主成分载荷矩阵分布

表 3 不同生物质炭水平的主成分得分及综合得分

| 处理 | 第一主成分    | 第二主成分    | 综合得分     | 排序 |
|----|----------|----------|----------|----|
| C4 | 1.69842  | −0.93402 | 0.86593  | 1  |
| C5 | 0.57448  | 1.16293  | 0.70637  | 2  |
| C3 | −0.2939  | 1.30077  | 0.16865  | 3  |
| C2 | −0.23756 | −0.06058 | −0.17458 | 4  |
| C1 | −0.61948 | −0.72057 | −0.61255 | 5  |
| CK | −1.12196 | −0.74853 | −0.95381 | 6  |

### 3 讨论

#### 3.1 施用生物质炭对土壤理化性状的影响

本研究表明,施用生物质炭可以显著改善种植黄瓜土壤的理化性状,随着生物质炭施用量的增加,土壤容重显著降低,土壤孔隙度、饱和含水量、田间持水量和土壤饱和导水率显著增加,且能够提高土壤 pH、土壤全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷以及土壤有机质的含量。已有研究结果表明,生物质炭能够显著降低土壤容重,增加土壤的孔隙度、饱和含水量、田间持水量及饱和导水率。其中李秋霞等<sup>[15]</sup>在旱地红壤中施用生物质炭一年后发现土壤容重从 1.25 g/cm<sup>3</sup> 降至 1.07 g/cm<sup>3</sup>,饱和导水率较对照增加了 2.3 倍。颜永毫等<sup>[16]</sup>在黄土高原典型土壤中施用不同种类的生物质炭后发现生物质炭添加量越大,土壤田间持水量增加程度越高。本研究与他们的研究结果基本一致,生物质炭施用量越高,土壤的物理性状改良效果越好。施用生物质炭后土壤容重降低可能是由于生物质炭本身孔隙结构发达,密度较低,施入土壤后有一定的稀释作用<sup>[17]</sup>。其次,生物质炭是由有机物高温下裂解而成,由于有机物内部气态或液态物质的生成释放会使生物质炭自身内部熔陷,形成孔径大小不一的微小孔隙,正因为这些孔隙的存在,使生物质炭具有良好的保水性能。因此,试验中随着生物质炭施用量的增加,土壤田间持水量不断提高。梁向峰等<sup>[18]</sup>研究表明土壤有机质是土壤结构形成和稳定作用的核心物质,土壤有机质通过改善土壤结构、土壤

胶体状况等,影响土壤饱和导水率,且土壤饱和导水率和土壤有机质含量有很好的正相关线性关系。由于生物质炭本身富含有机碳,因此随着生物质炭施用量的增加,土壤饱和导水率显著增加。土壤容重降低,土壤孔隙度、饱和含水量、田间持水量和土壤饱和导水率的增加,有效的改善了土壤的通气透水性,对黄瓜根系的生长和发育意义重大。

已有研究结果表明<sup>[19-20]</sup>,农田土壤中施入生物质炭可以提高土壤碳库量改善土壤质量和提高养分有效性。张哈芝等<sup>[21]</sup>通过盆栽试验显示,土壤中的有机碳随着生物质炭施用量的增加逐渐增加并达到显著线性相关,本研究结果与之一致。生物质炭施入土壤后土壤有机质含量增加,一方面可能是因为生物质炭能吸附土壤有机分子,通过表面催化活性促进小的有机分子聚合成土壤有机质<sup>[22]</sup>;另一方面,生物质炭发达的孔隙结构能够有效隔离微生物及其产生的胞外酶与孔隙内有机质接触,从而一定程度上抑制了土壤有机碳的矿化<sup>[23]</sup>。此外,生物质炭灰分中含有丰富的矿质元素,如 P、K、Ca 和 Mg 等,施入土壤后必然提高土壤中养分含量,并且灰分中的 Ca、Mg、K、Na 等盐基离子以氧化物或碳酸盐的形式存在,溶于水后呈碱性,可以中和土壤酸度<sup>[24]</sup>。但本试验土壤中全氮、硝态氮和铵态氮的变化趋势说明生物质炭的施用必须要注意量的控制。生物质炭施用量在合适的范围内能够快速释放土壤有效养分,而当生物质炭施用量较大时,由于土壤中微生物和黄瓜植株争夺土壤养分,尤其竞争土壤氮源的矛盾反而会抑制生物质炭向土壤中释放有效养分<sup>[20]</sup>。

#### 3.2 施用生物质炭对土壤酶活性的影响

土壤酶活性作为评价土壤肥力和土壤自净能力的重要指标之一,反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向。张丽琼等<sup>[25]</sup>研究表明土壤理化特性、肥力状况和农业措施对土壤酶活性有显著的影响。研究土壤酶活性的影响因素,提高土壤酶活性,对改善土壤生态环境、提高土壤肥力和作物产量具有重要意义。由本研究得到的土壤总体酶活性的指标可以看出,生物质炭施用量对土壤酶活性的影响显著,不同生物质炭施用量条件下,土壤酶活性表现出一定的规律性。随着生物质炭施用量的增加,土壤脲酶活性呈先增加后降低的趋势。土壤脲酶能催化尿素水解成氨,可以表征土壤中有机态氮向有效态氮的转化能力和土壤无机氮的供应能力。和文祥等<sup>[26]</sup>研究表明土壤脲酶活性与土壤有机质和全氮呈显著正相关。此外,脲酶活性主要集中在微团聚体上,随土壤粒径的增大,脲酶活性有下降的趋势<sup>[27]</sup>,这与本研究的脲酶活性变化规律基本一致。由于生物质炭不但含有丰富的有机碳,氮、磷和钾等

营养元素的含量也较高,随着生物质炭施用量的增加,土壤有机质和全氮含量显著提高,因此土壤脲酶活性显著增强。随着生物质炭施用量的进一步增加,其发达的孔隙结构和较低密度使土壤中脲酶的载体微团聚体含量大量减少,导致脲酶活性降低。综上,施用适量的生物质炭可以改善土壤生态环境,增强土壤中的脲酶活性,提高土壤有机氮的利用率。

过氧化氢酶促水解过氧化氢,其活性的高低在一定程度上可以反映土壤生物氧化过程的强弱。本研究表明,随着生物质炭施用量的增加,土壤中过氧化氢酶活性呈先增加后降低的趋势。生物质炭施入土壤后,土壤养分含量提高,增加植被地上及地下活细根生物量,促进根际微生物生长;此外,生物质炭丰富的有机碳可以改变土壤孔隙度、通气度与土壤团粒结构<sup>[28]</sup>,为土壤过氧化氢酶发挥作用提供场所和适宜条件。也有研究表明过氧化氢酶活性与土壤中 C/N 有显著的负相关关系<sup>[29]</sup>。因此,当生物质炭施入土壤后,过氧化氢酶的生存场得到改善,其活性显著增强,但随着生物质炭施用量的继续增加,土壤中 C/N 增大,生物质炭对过氧化氢酶活性的抑制作用要远大于对其促进的作用,导致过氧化氢酶的活性出现降低的趋势。

### 3.3 施用生物质炭对黄瓜产量的影响

本研究中,生物质炭施用量与土壤理化性质主成分分析的结果显示,土壤理化性状在 PC1 上占有较高的权重,因此土壤理化性状可以敏感的反映施用生物质炭对黄瓜土壤质量影响状况,不同生物质炭施用量处理的土壤质量水平差异较大,C4(30 t/hm<sup>2</sup>)处理土壤质量水平最高,而不施肥的 CK 处理土壤质量水平最低。说明生物质炭对土壤理化性状的改善和作物的增产有一定的积极作用。有研究表明<sup>[30]</sup>,施用生物质炭可以显著促进作物生长,增加作物地上部干物质的积累和作物产量,但当生物质炭施用量过高时黄瓜产量出现下降的趋势。Khan 等<sup>[31]</sup>的研究结果显示,当适量的生物质炭施入土壤后,生物质炭本身的养分会对作物生长有一定的促进作用,进而达到增产的作用。这是因为施用生物质炭后土壤物理性质的改善,如容重降低,土壤持水量和土壤孔隙度增加,为种子萌发和作物根系穿插提供有利条件。并且土壤 pH 的提高还可以降低土壤对磷的固定量,提高磷的生物有效性。但是当土壤中施入过量的生物质炭后,由于生物质炭含碳量高,会导致土壤 C/N 提高,进而降低土壤养分尤其是氮素有效性。因此,生物质炭的增产效应可能与生物质炭用量、土壤肥力状况以及生物质炭施入土壤中的时间长短等因素有关<sup>[32]</sup>,具有很大的不确定性。

## 4 结论

(1)施用生物质炭可以提高土壤肥力水平,当生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup> 时对土壤肥力的提高最为明显。

(2)随着生物质炭施用量水平的提高,黄瓜种植土壤中脲酶和过氧化氢酶活性均呈先增加后降低的趋势,脲酶和过氧化氢酶活性分别在生物质炭施用量为 20 t/hm<sup>2</sup> 和 30 t/hm<sup>2</sup> 时达到最大。

(3)生物质炭对黄瓜有一定的增产效应,在生物质炭施用量为 30 t/hm<sup>2</sup> 时为最佳。

### 参考文献:

- [1] Noritomi H, Kai R, Iwai D, et al. Increase in thermal stability of proteins adsorbed on biomass charcoal powder prepared from plant biomass wastes[J]. Journal of Biomedical Science and Engineering, 2011, 4(11): 692-698.
- [2] Demirbas A. Biomass to charcoal, liquid, and gaseous products via carbonization process[J]. Energy Sources, 2001, 23(6): 579-587.
- [3] 张忠河, 林振衡, 付娅琦, 等. 生物炭在农业上的应用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 11880-11882.
- [4] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 等. 我国北方土壤—作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 123-132.
- [5] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 等. 旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(4): 54-61.
- [6] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 146-151.
- [7] 花莉, 张成, 马宏瑞, 等. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2489-2492.
- [8] 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 963-967.
- [9] 章明奎, Waleign D B, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 127-131.
- [10] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 2012.
- [11] 赵志成, 杨显贺, 李清明, 等. 不同膜下滴灌方式对设施黄瓜生理特性及水分利用效率的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6597-6605.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-34.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [15] 李秋霞, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭对旱地红壤理化性状和作物产量的持续效应[J]. 水土保持学报, 2015(3): 208-213.
- [16] 颜永毫, 郑纪勇, 张兴昌, 等. 生物炭添加对黄土高原典

- 型土壤田间持水量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 120-124.
- [17] 张振华, 谢恒星, 刘继龙, 等. PAM 对一维垂直入渗特征量影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(3): 75-77.
- [18] 梁向锋, 赵世伟, 张扬, 等. 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 636-642.
- [19] Kimetu J M, Lehmann J, Krull E, et al. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 577-585.
- [20] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 445-454.
- [21] 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.
- [22] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 206-213.
- [23] 孙荣国, 韦武思, 王定勇. 秸秆—膨润土—PAM 改良材料对砂质土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 89-93.
- [24] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230.
- [25] 张丽琼, 郝明德, 臧逸飞, 等. 苜蓿和小麦长期连作对土壤酶活性及养分的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3191-3196.
- [26] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1232-1236.
- [27] 周礼恺, 张志明, 陈恩凤. 黑土的酶活性[J]. 土壤学报, 1981(2): 158-166.
- [28] 贾曼莉, 郭宏, 李会科. 渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2777-2784.
- [29] 樊军, 郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 II. 土壤酶活性与土壤肥力[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 146-150.
- [30] 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.
- [31] Khan M A, Kim K W, Wang M, et al. Nutrient-impregnated charcoal: An environmentally friendly slow-release fertilizer[J]. Environment Systems and Decisions, 2008, 28(3): 231-235.
- [32] 卢广远, 张艳, 王祥福, 等. 炭基肥料种类对土壤物理性质及玉米产量的影响[J]. 河北农业科学, 2011, 15(5): 50-53.

(上接第 241 页)

- [15] 任利沙, 顾日良, 贾光耀, 等. 灌浆期控水和施用控释肥对杂交玉米制种产量和种子质量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3108-3118.
- [16] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响[J]. 农业资源与环境科学学报, 2017, 34(2): 153-160.
- [17] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528.
- [18] 郭萍, 黄科程, 李孝东, 等. 普通、控释尿素配比对玉米物质积累及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 191-196.
- [19] 崔超, 高聚林, 于晓芳, 等. 不同氮效率基因型高产春玉米花粒期干物质与氮素运移特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1337-1345.
- [20] Noellsch A J, Motavalli P P, Nelson K A, et al. Corn response to conventional and slow-release nitrogen fertilizers across a Claypan Landscape [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 607-614.
- [21] Guo J M, Wang Y H, Blaylock A D, et al. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding ( $> 15 \text{ mg/hm}^2$ ) maize [J]. Field Crops Research, 2017, 204(3): 23-30.
- [22] 谢佳贵, 尹彩侠, 张路, 等. 春玉米控释氮肥施用技术研究[J]. 玉米科学, 2009, 17(5): 145-147.
- [23] 衣文平, 朱国梁, 武良, 等. 不同量的包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1497-1502.
- [24] 尹彩侠, 刘宏伟, 孔丽丽, 等. 控释氮肥对春玉米干物质积累、氮素吸收及产量的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(6): 108-113.
- [25] 赵斌, 董树亭, 张吉旺, 等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2010, 3(10): 1760-1768.
- [26] 易镇邪, 王璞. 包膜复合肥对夏玉米产量、氮肥利用率与土壤速效氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 242-247.
- [27] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 699-706.