

生物质炭对黄瓜连作土壤理化性状、酶活性及土壤质量的持续效应

韩召强¹, 陈效民^{1*}, 曲成闯¹, 张晓玲¹, 张俊², 黄春燕², 刘云梅²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095; 2 如皋市农业科学研究所, 江苏如皋 226500)

摘要:【目的】探讨不同生物质炭施用量对连作黄瓜根区土壤环境的作用效果, 为用生物质炭修复黄瓜连作土壤以及在农业中的推广应用提供科学依据。【方法】以如皋市农业科学研究所大棚示范区为试验基地, 一次性向设施农田土壤中添加 0 (CK)、5 (C1)、10 (C2)、20 (C3)、30 (C4)、40 (C5) t/hm² 的生物质炭, 通过连续两年温室定位试验, 测定生物质炭施用后黄瓜连作根区土壤的物理性状、养分含量及酶活性的变化状况, 采用土壤质量指数 (SQI) 评价不同生物质炭施用量对黄瓜连作两季后土壤质量的影响。【结果】随着生物质炭施用量的增加, 第一季与第二季黄瓜根区土壤的理化性状变化趋势一致, 具体表现为容重不断降低, 土壤孔隙度、饱和含水量、田间持水量、饱和导水率、有效磷及有机质含量不断升高, 且当生物质炭施用量为 30 t/hm² (C4 处理) 时, 土壤中全氮、硝态氮和铵态氮含量最高。与 CK 相比, 生物质炭的施用可以减少黄瓜根区土壤 < 0.25 mm 粒径的微团聚体含量, 而增加 > 0.25 mm 粒径的大团聚体含量, 土壤中 0.25~0.5 mm 和 0.5~1 mm 粒径的团聚体含量都在高施用量 (40 t/hm²) 处理中达到最大值。生物质炭施用后的连续两季, 黄瓜根区土壤中脲酶与过氧化氢酶活性均随生物质炭施用量的增加呈先增加后降低的趋势, 其活性分别在生物质炭施用量为 30 t/hm² 和 20 t/hm² 时最大。当生物质炭施用量为 30 t/hm² 时, 两季黄瓜产量都达到最高, 分别为 3.24×10^4 kg/hm² 和 6.18×10^4 kg/hm²。通过土壤质量指数 (SQI) 对生物质炭施用后两季黄瓜土壤质量进行评价可知, 不同生物质炭施用水水平下土壤质量指数依次为 C4 > C5 > C3 > C2 > C1 > CK, 相应的土壤质量指数分别为 0.774、0.740、0.728、0.650、0.635、0.583。【结论】施用生物质炭对黄瓜连作田土壤的理化性状和酶活性均有显著影响, 高施用量 (40 t/hm²) 条件下对土壤物理性状改善效果最好, 当生物质炭施用量为 30 t/hm² (C4 处理) 时对黄瓜连作根区土壤的养分含量提升效果最佳。SQI 可以客观定量地评价生物质炭施用对连作黄瓜根区土壤质量的影响, 其分析结果表明改善黄瓜连作土壤环境的最佳生物质炭施用量为 30 t/hm²。

关键词: 生物质炭; 土壤理化性状; 脲酶; 过氧化氢酶; 土壤质量指数

Sustained effects of biochar application on physico-chemical properties, enzyme activities and quality of soil with continuous planting of cucumber

HAN Zhao-qiang¹, CHEN Xiao-min^{1*}, QU Cheng-chuang¹, ZHANG Xiao-ling¹, ZHANG Jun²,
HUANG Chun-yan², LIU Yun-mei²

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

2 Rugao Institute of Agricultural Sciences, Rugao, Jiangsu 226500, China)

Abstract: 【Objectives】This study investigated the sustained effects of biochar application on properties of root zone soil continuously planted with cucumber, providing scientific evidences for biochar remediation of continuous cucumber planting soil and widely use in agriculture. 【Methods】A greenhouse experiment was conducted at Rugao Institute of Agricultural Science, Jiangsu province. Biochar was applied only once at rates of 0, 5, 10, 20, 30, and 40 t/hm², denoted as CK, C1, C2, C3, C4 and C5, respectively, and physical properties, nutrient contents and enzyme activities of root zone soils continuously planted with cucumber were analyzed in

收稿日期: 2018-01-09 接受日期: 2018-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200305) 资助。

联系方式: 韩召强 E-mail: 2015103064@njau.edu.cn; * 通信作者 陈效民 E-mail: xmchen@njau.edu.cn

two consecutive years. The soil quality index (SQI) was used to evaluate the impact of different rates of biochar on quality of soil continuously planted with cucumber. 【 **Results** 】 The changes of soil physico-chemical properties with different rates of biochar in the first season were consistent with that in the second season. Biochar application reduced the soil bulk density, while increased the soil porosity, saturated water content, field moisture capacity, saturated hydraulic conductivity, available phosphorus and organic matter content, compared with the control without biochar application. The contents of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were greatest when biochar was applied at 30 t/hm². Compared with the control, biochar application reduced the mass content of < 0.25 mm soil aggregates, while increased the content of > 0.25 mm soil aggregates. The contents of 0.25–0.5 mm and 0.5–1 mm soil aggregates were greatest when biochar was applied at 40 t/hm². soil urease and catalase activity was greatest at biochar rates of 30 t/hm² and 20 t/hm², respectively, and showed the same trend of increasing at first and then decreased with increase rate of biochar in consecutive two cropping seasons. Cucumber yield in first and second seasons was 3.24×10^4 kg/hm² and 6.18×10^4 kg/hm², respectively, and was highest when biochar was applied at 30 t/hm². The analysis of SQI indicated that soil quality change in the order of C4 > C5 > C3 > C2 > C1 > CK. 【 **Conclusions** 】 The physico-chemical properties and enzymatic activities of the continuous cucumber cropping soil were significantly affected by biochar application. The optimal application rate of biochar was 40 t/hm² and 30 t/hm², respectively for soil physico-chemical properties and nutrient contents. The SQI can be used to clearly evaluate the effect of biochar application on continuous cucumber cropping soil. Biochar at 30 t/hm² was optimal in improving the properties of continuous cucumber cropping soil.

Key words: biochar; soil physico-chemical properties; urease; catalase; soil quality index

随着我国现代农业的不断发展,商品化设施蔬菜栽培面积逐年增加并呈规模化发展趋势,然而由于土壤和气候条件的限制及种植习惯等原因,蔬菜连作障碍发生日益严重。黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 作为我国设施农业生产中的主要蔬菜作物之一,在市场经济驱动下的商品化设施生产中普遍存在施肥不合理、复种指数过高、栽培种类单一等问题,造成土壤物理性质变劣、土壤养分失衡、土壤微生物学性质恶化、蔬菜产量和品质下降等连作障碍现象普遍发生^[1]。不同连作障碍现象发生原因差别很大,但主要来自于土壤,尤其是土壤理化性质的变劣及土壤微生物多样性失衡是造成作物产量和品质下降的主要因素。作为调整我国城乡种植业发展的重要经济作物,近年来黄瓜连作障碍的发生机制受到学者们广泛的关注,黄瓜连作障碍的防治已成为我国设施蔬菜生产亟待解决的问题之一^[2-3]。

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^[4-5],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,因而为土壤养分的吸附保持^[6]和作物根系的生长^[7]提供了有利的空间和条件,进而提高土壤的微生物活性。大量研究表明,施用生物质炭可以有效改善土壤的

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土壤酶活性^[8-9]。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。目前,关于生物质炭应用于农业生产的研究大多集中在小麦、玉米和水稻等粮食作物,而生物质炭施用对设施连作菜地系统中土壤特性以及作物生长发育的影响,尤其对设施条件下黄瓜连作土壤质量的影响还鲜见报道。有鉴于此,本研究通过设施大田试验,施用不同量的生物质炭对黄瓜连作条件下土壤理化性质和土壤酶活性的动态变化进行研究,并采用土壤质量指数(SQI)对不同生物质炭施用量条件下的土壤质量进行评价,筛选对黄瓜连作土壤质量有促进作用的最佳生物质炭施用量,以期为生物质炭的推广应用、黄瓜连作土壤的修复以及设施蔬菜生产的可持续发展提供技术支撑和科学依据。

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,全年降水量 1424.7 mm,年蒸发量 1000~1100 mm,

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%。全年平均气温 15.5℃, 全年日照时数 1700.6 h, 无霜期 231 d。

1.2 试验材料

供试土壤为江苏典型的潮土, 试验开始前没有进行过黄瓜的种植。土壤的基本性质为: 土壤 pH 6.44, 总孔隙度 60.79%, 容重 1.04 g/cm³, 黏粒含量 208.0 g/kg, 粉砂粒含量 719.2 g/kg, 砂粒含量 72.8 g/kg, 全氮 1.03 g/kg, 硝态氮 103.51 mg/kg, 铵态氮 4.54 mg/kg, 有效磷 142.12 mg/kg, 有机碳 17.88 g/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 pH 10.65, 容重 0.45 g/cm³, 比表面积 8.9 m²/g, 阳离子交换量 217.0 cmol/kg, 全氮 10.75 g/kg, 全磷 2.05 g/kg, 全钾 37.45 g/kg, 有机碳 364.72 g/kg, 灰分 22.44%。

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 2017 年 6 月 28 日, 在江苏省如皋市农业科学研究所大棚试验基地进行。第一季黄瓜种植时间为 2016 年 9 月 13 日至 12 月 15 日, 第二季黄瓜种植时间为 2017 年 3 月 16 日至 6 月 28 日。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。大棚面积 48 m × 16 m = 768 m²。试验共设 6 个处理, 分别为 CK (不施用生物质炭)、C1(5 t/hm²)、C2(10 t/hm²)、C3(20 t/hm²)、C4(30 t/hm²)、C5(40 t/hm²)。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 3 m × 7 m = 21 m², 保护行宽为 1.0 m, 走道宽及小区间排水沟宽均为 0.5 m。

黄瓜种植基肥采用复合肥 (N-P₂O₅-K₂O = 17-17-17), 施用量为 187.5 kg/hm², 于每季黄瓜种植前一次性施入, 每个小区施用基肥量保持一致。黄瓜在苗龄为 31 天时统一移栽, 株距为 25 cm, 行距为 50 cm。试验期间采取同样的管理措施 (大棚管理措施), 自然条件下生长, 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

采集每季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 0—15 cm 黄瓜植株根区土壤混合样品, 装入自封袋带回, 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 pH 及土壤有效磷、硝态氮、铵态氮的测定, 另一部分土样过 0.149 mm 筛用于土壤全氮和有机质的测定。

1.5 分析方法

在每季黄瓜成熟后采用环刀法测定土壤容重、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^[10] (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》^[11]。酶活性的测定用常规分析方法^[12], 脲酶采用靛酚蓝比色法, 过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法。在黄瓜收获期各施肥处理取果实样并记录全部单株黄瓜产量。

2 结果与分析

2.1 施用生物质炭对黄瓜连作土壤物理性质的影响

2.1.1 施用生物质炭对黄瓜连作土壤容重和水力学性质的影响 由表 1 可知, 生物质炭对连作黄瓜植物根区土壤的物理性质影响显著 ($P < 0.05$)。施用生物质炭后, 黄瓜第一季和第二季的根区土壤物理指标变化趋势基本一致, 土壤容重随着生物质炭施用量的增加呈下降趋势, 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。在黄瓜每季成熟期, 不同生物质炭施用量的土壤容重均较对照有所降低, 其中第一季 C4 和 C5 处理的土壤容重较对照显著降低, 降幅分别为 8.85% 和 10.62%, 而第二季 C5 处理的土壤容重较对照降低了 8.85%, 差异均达到显著水平。土壤孔隙度的处理间多重比较结果与土壤容重一致, 第一季 C4 和 C5 处理的土壤孔隙度较对照分别增加了 5.72% 和 7.53%, 第二季 C5 处理土壤孔隙度较对照增加了 5.70%, 均存在明显差异。与对照相比, 随着生物质炭施用量的增加, 第一季黄瓜根系土壤的饱和含水量、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%, 而第二季黄瓜根区土壤饱和含水量、田间持水量和饱和导水率增幅分别为 5.01%~32.27%、2.54%~31.58% 和 29.55~194.56%, 其中各处理第二季黄瓜根区土壤饱和含水量和田间持水量均高于第一季。

2.1.2 施用生物质炭对黄瓜连作土壤团聚体分布的影响 表 2 显示, 施用生物质炭两季后, 黄瓜根区土

表 1 施用生物质炭后黄瓜连作土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties of continuous cropping cucumber after biochar application

时期 Period	处理 Treatment	容重 (g/cm ³) Soil bulk density	孔隙度 (%) Porosity	饱和含水量 (%) Saturated water content	田间持水量 (%) Field capacity	饱和导水率 ($\times 10^{-5}$ cm/s) Saturated hydraulic conductivity
第一季 1 st season	CK	1.13 $\pm$ 0.02 a	57.65 $\pm$ 0.64 b	25.04 $\pm$ 0.13 d	17.44 $\pm$ 0.17 d	3.17 $\pm$ 0.40 e
	C1	1.12 $\pm$ 0.01 a	57.29 $\pm$ 0.45 b	32.04 $\pm$ 0.74 c	22.80 $\pm$ 0.38 c	3.23 $\pm$ 0.57 e
	C2	1.07 $\pm$ 0.05 ab	59.77 $\pm$ 1.81 ab	34.76 $\pm$ 0.89 c	24.34 $\pm$ 0.71 bc	5.21 $\pm$ 0.35 d
	C3	1.05 $\pm$ 0.05 ab	60.29 $\pm$ 1.89 ab	35.69 $\pm$ 0.45 c	25.46 $\pm$ 0.47 bc	6.19 $\pm$ 0.82 c
	C4	1.03 $\pm$ 0.04 b	60.95 $\pm$ 1.39 a	47.03 $\pm$ 3.24 b	27.04 $\pm$ 0.51 b	9.19 $\pm$ 0.16 b
	C5	1.01 $\pm$ 0.03 b	61.99 $\pm$ 1.08 a	54.90 $\pm$ 1.77 a	32.04 $\pm$ 3.58 a	10.29 $\pm$ 0.30 a
第二季 2 nd season	CK	1.13 $\pm$ 0.05 a	57.53 $\pm$ 1.81 b	43.69 $\pm$ 4.00 b	36.99 $\pm$ 1.77 b	4.23 $\pm$ 1.03 d
	C1	1.12 $\pm$ 0.03 a	57.83 $\pm$ 1.03 b	45.88 $\pm$ 1.95 b	37.93 $\pm$ 1.27 b	5.48 $\pm$ 1.10 c
	C2	1.11 $\pm$ 0.03 a	58.20 $\pm$ 1.30 b	47.18 $\pm$ 3.36 b	38.37 $\pm$ 3.20 b	5.88 $\pm$ 1.11 c
	C3	1.08 $\pm$ 0.04 ab	59.08 $\pm$ 1.63 ab	50.78 $\pm$ 4.39 ab	42.00 $\pm$ 1.67 ab	8.48 $\pm$ 1.62 b
	C4	1.08 $\pm$ 0.02 ab	59.35 $\pm$ 0.92 ab	52.5 $\pm$ 2.43 ab	43.94 $\pm$ 5.44 ab	10.80 $\pm$ 1.02 ab
	C5	1.03 $\pm$ 0.04 b	61.01 $\pm$ 1.43 a	57.79 $\pm$ 8.95 a	48.67 $\pm$ 6.65 a	12.46 $\pm$ 1.60 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters within the same column are significantly different at $P < 0.05$ level.

表 2 施用生物质炭后黄瓜连作土壤不同粒级团聚体含量

Table 2 Distribution of soil aggregates of different sizes in soils of continuous cropping cucumber after biochar application

时期 Period	处理 Treatment	团聚体百分含量 Aggregate content (%)					MWD	GMD
		>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm		
第一季 1 st season	CK	0.72 $\pm$ 0.10 d	1.75 $\pm$ 0.09 c	8.14 $\pm$ 0.35 bc	10.77 $\pm$ 0.86 c	78.62 $\pm$ 0.83 b	0.34 $\pm$ 0.004 c	0.30 $\pm$ 0.002 de
	C1	1.00 $\pm$ 0.09 d	1.60 $\pm$ 0.10 c	6.72 $\pm$ 0.23 c	9.60 $\pm$ 0.79 d	81.08 $\pm$ 0.97 a	0.33 $\pm$ 0.003 c	0.29 $\pm$ 0.002 e
	C2	2.86 $\pm$ 0.17 bc	1.67 $\pm$ 0.13 c	7.03 $\pm$ 0.46 bc	9.84 $\pm$ 1.05 d	78.60 $\pm$ 1.78 b	0.37 $\pm$ 0.008 b	0.31 $\pm$ 0.005 c
	C3	0.75 $\pm$ 0.21 d	6.01 $\pm$ 0.55 a	3.10 $\pm$ 0.38 d	10.93 $\pm$ 1.12 c	79.22 $\pm$ 2.01 b	0.37 $\pm$ 0.012 b	0.31 $\pm$ 0.006 cd
	C4	1.61 $\pm$ 0.42 c	3.36 $\pm$ 0.09 b	8.90 $\pm$ 0.42 b	13.17 $\pm$ 1.13 b	73.17 $\pm$ 1.00 c	0.38 $\pm$ 0.008 b	0.32 $\pm$ 0.003 b
	C5	4.84 $\pm$ 0.18 a	5.71 $\pm$ 0.54 a	11.27 $\pm$ 0.23 a	17.01 $\pm$ 0.69 a	61.17 $\pm$ 0.41 d	0.48 $\pm$ 0.008 a	0.37 $\pm$ 0.003 a
第二季 2 nd season	CK	1.00 $\pm$ 0.18 d	2.77 $\pm$ 0.23 cd	12.32 $\pm$ 0.92 d	16.38 $\pm$ 1.01 e	67.53 $\pm$ 1.74 a	0.38 $\pm$ 0.010 e	0.33 $\pm$ 0.006 d
	C1	1.94 $\pm$ 0.28 c	2.36 $\pm$ 0.14 d	14.37 $\pm$ 1.10 c	20.30 $\pm$ 1.8b c	61.03 $\pm$ 1.85 c	0.41 $\pm$ 0.012 d	0.35 $\pm$ 0.007 c
	C2	3.29 $\pm$ 0.06 ab	4.01 $\pm$ 0.10 b	11.25 $\pm$ 1.18 e	17.07 $\pm$ 1.06 de	64.39 $\pm$ 1.69 b	0.44 $\pm$ 0.008 c	0.35 $\pm$ 0.005 c
	C3	2.03 $\pm$ 0.21 c	2.98 $\pm$ 0.12 c	15.93 $\pm$ 1.07 b	18.70 $\pm$ 0.22 d	60.36 $\pm$ 1.38 c	0.43 $\pm$ 0.007 c	0.35 $\pm$ 0.005 c
	C4	2.97 $\pm$ 0.26 b	4.72 $\pm$ 0.19 a	16.03 $\pm$ 0.66 ab	22.29 $\pm$ 1.93 ab	54.00 $\pm$ 1.84 d	0.47 $\pm$ 0.001 b	0.38 $\pm$ 0.002 b
	C5	3.77 $\pm$ 0.22 a	4.66 $\pm$ 0.10 a	16.52 $\pm$ 1.00 a	24.00 $\pm$ 1.40 a	51.06 $\pm$ 1.74 e	0.49 $\pm$ 0.009 a	0.39 $\pm$ 0.006 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters within the same column are significantly different at $P < 0.05$ level.

壤 0.25~0.5 mm 和 0.5~1 mm 粒径的团聚体含量呈增加的趋势, 而 <0.25 mm 粒径的微团聚体含量不断减少。在黄瓜每一季的成熟期, 施用生物质炭的各处理土壤团聚体分布趋势表现出相同的规律, 即各

级别团聚体含量从高到低的顺序为 <0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm、>2 mm, 且随着生物质炭施用量的增加, 黄瓜根区土壤 <0.25 mm 粒径的团聚体含量逐渐减少, 而 >0.25 mm 粒径的团聚体含

量逐渐增加。土壤中 0.25~0.5 mm 和 0.5~1 mm 粒径的团聚体含量都在 C5 (40 t/hm²) 处理达到最大值, 第一季分别占总含量的 17.01% 和 11.27%, 第二季分别占总含量的 24.00% 和 16.52%。在两个采样时期, 与不施用生物质炭的处理相比, 当生物质炭施用量达到 10 t/hm² 以后, 土壤团聚体 MWD 和 GMD 均有显著提高, 说明土壤团聚体稳定性越高, 抗侵蚀能力越强。

2.2 施用生物质炭对黄瓜连作土壤养分含量的影响

如表 3 所示, 生物质炭的施用能够显著影响黄瓜连作土壤的养分含量。施用生物质炭后的连续两季, 土壤全氮、无机氮、有效磷及有机质含量均随生物质炭施用量的增加呈现增加的趋势, 其中第二季各处理土壤全氮、有效磷和有机质含量较第一季整体增加, 而硝态氮和铵态氮含量有所下降。当生物质炭施用量为 30 t/hm² (C4 处理) 时, 两个采样时期的土壤中全氮、硝态氮和铵态氮含量均达到最大。与 CK 相比, 黄瓜第一季成熟期 C4 处理土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量分别提高了 22.58%、45.63% 和 414.29%, 第二季成熟期分别提高了 22.60%、44.55% 和 10.47%, 但随着生物质炭用量的进一步增加, 土壤中氮含量出现降低的趋势。施用生物质炭后, 黄瓜第一季各处理土壤有效磷和有机质含量较 CK 分别提高了 19.37%~77.76% 和 10.39%~54.56%, 第

二季分别提高了 2.25%~39.41% 和 1.79%~54.76%。

2.3 施用生物质炭对黄瓜连作土壤酶活性的影响

2.3.1 施用生物质炭对土壤脲酶活性的影响 如图 1 所示, 施用生物质炭后, 每一季黄瓜根区土壤脲酶活性均随着生物质炭施用量的增加呈先增加后降低的趋势。总体上, 第二季各处理土壤脲酶活性较第一季有所增加。当生物质炭施用量为 30 t/hm² (C4 处理) 时, 第一季和第二季黄瓜根系土壤脲酶活性均达到最大值, 分别为 0.22 和 0.27 mg/(g·d), 较 CK 分别提高了 104.57% 和 47.37%, 差异达到显著性水平。随着生物质炭施用量的继续增加, 每一季黄瓜 C5 处理土壤脲酶活性虽然高于 CK, 但较 C4 处理显著降低, 说明当生物质炭施用量为 30 t/hm² (C4 处理) 时, 最有利于提高黄瓜植物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。

2.3.2 施用生物质炭对土壤过氧化氢酶活性的影响 由图 2 可知, 施用生物质炭两季后, 第二季黄瓜根区土壤过氧化氢酶活性较第一季整体出现降低的趋势。在每一季黄瓜的成熟期, 土壤过氧化氢酶的活性均随着生物质炭施用量的增加呈现先增加后降低的趋势。当生物质炭施用量小于 10 t/hm² (C2 处理) 时, 每一季各处理土壤过氧化氢酶活性较 CK 无明显变化, 但当生物质炭施用量达到 20 t/hm² (C3 处

表 3 施用生物质炭后对黄瓜连作土壤养分含量
Table 3 Soil nutrient content of continuous cropping cucumber after biochar application

时期 Period	处理 Treatment	全氮 (g/kg) Total nitrogen	硝态氮 (mg/kg) Nitrate nitrogen	铵态氮 (mg/kg) Ammonium nitrogen	有效磷 (mg/kg) Available phosphorus	有机质 (g/kg) Organic matter
第一季 1 st season	CK	0.93 ± 0.01 c	257.69 ± 7.95 d	6.89 ± 1.23 d	165.19 ± 10.37 d	14.24 ± 0.37 c
	C1	0.99 ± 0.03 bc	263.66 ± 0.35 d	23.25 ± 0.50 c	168.39 ± 3.33 d	15.72 ± 0.44 b
	C2	1.00 ± 0.01 bc	312.65 ± 2.81 c	25.21 ± 0.02 c	174.03 ± 1.54 d	15.99 ± 0.06 b
	C3	1.08 ± 0.01 ab	331.24 ± 1.99 bc	32.67 ± 0.16 b	201.31 ± 1.41 c	16.07 ± 0.01 b
	C4	1.14 ± 0.01 a	374.98 ± 19.53 a	35.08 ± 0.01 a	232.81 ± 4.74 b	22.00 ± 0.29 a
	C5	1.02 ± 0.02 bc	354.86 ± 5.03 ab	34.95 ± 0.35 a	293.65 ± 3.33 a	22.01 ± 0.43 a
第二季 2 nd season	CK	1.77 ± 0.01 c	130.07 ± 0.83 d	5.73 ± 0.05 d	184.12 ± 7.07 d	16.16 ± 1.07 c
	C1	1.87 ± 0.01 b	146.97 ± 0.71 c	6.04 ± 0.17 cd	188.27 ± 1.17 cd	16.45 ± 0.18 c
	C2	1.92 ± 0.01 b	160.33 ± 1.06 b	6.80 ± 0.10 b	197.16 ± 0.58 bcd	20.79 ± 1.04 c
	C3	1.93 ± 0.02 b	159.39 ± 0.35 b	7.39 ± 0.13 a	199.42 ± 5.02 bc	23.96 ± 0.55 b
	C4	2.17 ± 0.01 a	188.11 ± 0.95 a	6.33 ± 0.01b c	204.37 ± 0.22 b	24.26 ± 1.29 a
	C5	1.39 ± 0.06 d	186.45 ± 2.36 a	6.22 ± 0.25 cd	256.68 ± 3.28 a	25.01 ± 0.21 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters within the same column are significantly different at $P < 0.05$ level.

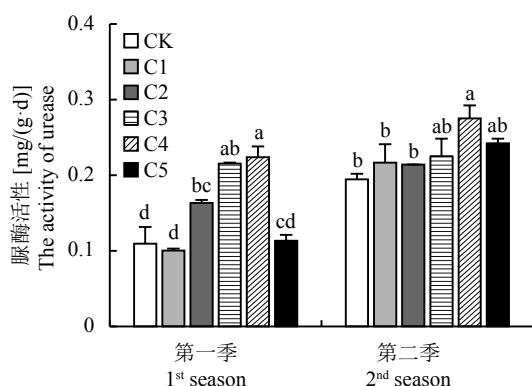


图 1 施用生物质炭后黄瓜连作土壤脲酶活性

Fig. 1 Activity of soil urease in continuous cropping cucumber soil after biochar application

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significant difference among treatments at $P < 0.05$ level.]

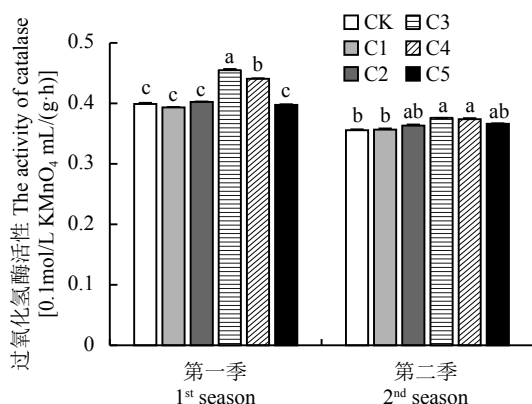


图 2 施用生物质炭后黄瓜连作土壤过氧化氢酶活性

Fig. 2 Activity of soil catalase in continuous cropping cucumber soil after biochar application

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significant difference among treatments at $P < 0.05$ level.]

理) 时, 第一季和第二季黄瓜根区土壤过氧化氢酶活性较 CK 显著增加且活性达到最高, 分别为 0.44 和 0.37 mL/(g·h), 较 CK 分别提高了 10.41% 和 5.69%。随着生物质炭施用量的继续增加, 第一季黄瓜根区土壤过氧化氢酶活性出现显著降低的趋势, 而第二季黄瓜根区土壤过氧化氢酶活性无明显变化, 其中第一季 C5 处理土壤过氧化氢酶活性较最大值 C3 水平降低了 14.42%, 差异达到显著性水平。说明生物质炭的施用对黄瓜连作土壤具有显著影响, 且适量的生物质炭可以显著提高土壤中过氧化氢酶的活性, 但过量的生物质炭也会抑制其活性。

2.4 施用生物质炭对连作黄瓜产量的影响

第二季各处理黄瓜产量较第一季整体有所增加

(图 3), 这可能是因为第一季为秋季黄瓜, 而第二季为夏季黄瓜, 季节性气温和湿度的差异对黄瓜的生长产生了较大的影响。随着生物质炭施用量的增加, 两季黄瓜的产量呈现出相同的趋势, 当生物质炭施用量为 30 t/hm² (C4 处理) 时, 第一季与第二季黄瓜的产量达到最高, 分别为 3.24×10^4 kg/hm² 和 6.18×10^4 kg/hm², 与 CK 相比显著提高。当生物质炭施用量为 40 t/hm² (C5 处理) 时, 各季黄瓜产量较 C4 处理有所降低, 但仍高于 CK 处理, 差异不显著。

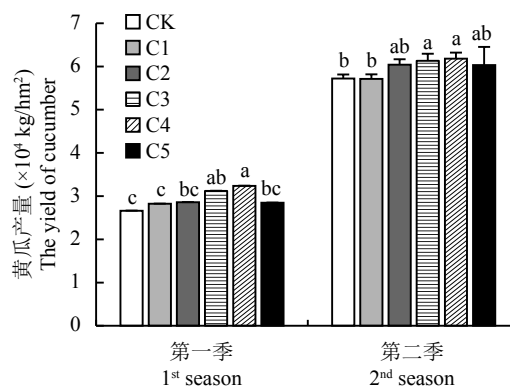


图 3 施用生物质炭后连作黄瓜产量

Fig. 3 Yield of continuous cropping cucumber after biochar application

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significant difference among treatments at $P < 0.05$ level.]

2.5 施用生物质炭对黄瓜连作土壤质量的影响

土壤质量可用土壤质量指数 SQI 来表示, 土壤质量指数 SQI 是根据各指标的隶属度值和权重来确定, 计算方法采用指数和法, 计算公式为:

$$SQI = \sum_{i=1}^n f_i \times w_i$$

式中: n 表示所有参评指标; f_i 和 w_i 分别表示第 i 种参评指标的隶属度值和权重。

隶属度值 $f(x)$ 的计算采用戒上型隶属函数方法, 即表示在某一范围内, 评价指标的增长与作物生长成正比, 低于或高于这个范围时, 指标变化对作物生长的影响很小。本研究在生物质炭施用后评价黄瓜连作两季土壤质量的指标包括土壤有机质、全氮、有效磷、大团聚体含量 (直径 > 0.25 mm)、饱和导水率和田间持水量。其隶属函数的解析式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x < a_1) \\ \frac{0.9(x - a_1)}{a_2 - a_1} + 0.1 & (a_1 \leq x \leq a_2) \\ 1.0 & (x \geq a_2) \end{cases}$$

式中: a_1 和 a_2 代表各评价指标的拐点值, 可通过相

关文献获得^[13-14]:

权重的大小反映了评价指标在土壤质量总水平总体构成中的重要性, 通过计算各个指标对土壤质量的贡献率来确定。利用主成分分析法, 先求出各个指标主成分的特征值和贡献率, 然后计算相应的载荷矩阵, 并求出各项指标的公因子方差, 方差的大小表示该项指标对总体变异的贡献, 由此可以得出各项指标的权重。

分别通过隶属函数和主成分分析得出各评价指标的隶属度值和权重(表 4 和表 5)。

土壤质量指数构成了总的土壤质量水平分值, 它综合反映了土壤质量状况, 是进行土壤质量等级划分的依据。根据表 4 隶属度值和表 5 权重系数计算出黄瓜连作两季后不同生物质炭水平下土壤质量

指数见图 4。由图 4 可知不同生物质炭水平下土壤质量指数依次为 $C4 > C5 > C3 > C2 > C1 > CK$, 相应的土壤质量指数分别为 0.774、0.740、0.728、0.650、0.635、0.583。根据张汪涛等^[15]的土壤质量等级划分标准, 将土壤划分为极低 ($SQI < 0.4$)、低 (0.4—0.5)、中 (0.5—0.6)、高 (0.6—0.8) 四个等级, 因此施用生物质炭后黄瓜连作土壤质量较 CK 提升了一个等级, 当生物质炭施用量 30 t/hm^2 时提升效果最为明显。

3 讨论

3.1 施用生物质炭对黄瓜连作土壤理化性状的影响

本研究结果表明, 生物质炭施用可以有效地提升土壤物理性状, 增加土壤中有机质和有效养分的

表 4 各评价指标隶属函数的拐点值及隶属度值
Table 4 The knee point and membership value of each evaluation index

评价指标 Evaluation index	拐点值 Knee point		隶属度值 Memberships value					
	a1	a2	CK	C1	C2	C3	C4	C5
有机质 Organic matter	6.00	30.00	0.481	0.492	0.655	0.774	0.785	0.813
全氮 Total nitrogen	0.50	1.75	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.741
有效磷 Available phosphorus	4.00	30.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
团聚体含量 Aggregate content	25.00	60.00	0.292	0.459	0.373	0.476	0.640	0.716
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	1.00	9.00	0.463	0.604	0.649	0.942	1.000	1.000
田间持水量 Field capacity	15.00	40.00	0.892	0.925	0.941	1.000	1.000	1.000
脲酶 Urease	0.14	0.30	0.407	0.531	0.517	0.579	0.861	0.675
过氧化氢酶 Catalase	0.08	0.22	0.348	0.350	0.364	0.391	0.387	0.371

表 5 各评价指标主成分分析结果及其权重系数
Table 5 The main component analysis result and weight coefficient of each evaluation index

主成分 Principal component	评价指标 Evaluation index	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate	累积贡献率 Accumulating contribution rate	公因子方差 Communality	权重系数 Weight coefficient
1	有机质 Organic matter	5.536	69.198	68.198	0.831	0.108
2	全氮 Total nitrogen	1.591	19.884	89.082	0.976	0.126
3	有效磷 Available phosphorus	0.589	7.362	96.444	0.984	0.128
4	团聚体含量 Aggregate content	0.259	2.232	98.676	0.938	0.122
5	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	0.026	0.324	100.000	0.981	0.127
6	田间持水量 Field capacity	0.000	0.000	100.000	0.983	0.127
7	脲酶 Urease	0.000	0.000	100.000	0.523	0.068
8	过氧化氢酶 Catalase	0.000	0.000	100.000	0.911	0.118

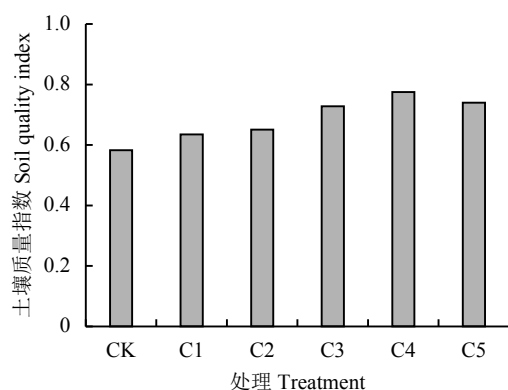


图4 不同生物质炭施用量水平下土壤质量指数
Fig. 4 Soil quality index under different biochar treatments

含量,且这种效应具有稳定的年限效应。随着生物质炭施用量的增加,土壤容重不断降低,土壤孔隙度、饱和导水率和田间持水量均呈增加的趋势,这可能是因为生物质炭本身密度较低,且具有巨大的比表面积及疏松多孔的结构,能够保持水分和空气,施入土壤后具有一定的稀释作用^[16]。此外,本研究中,生物质炭的施用可以显著减少土壤中微团聚(<0.25 mm)含量,同时增加0.25~0.5 mm和0.5~1 mm粒径的团聚体含量,提高团聚体的MWD和GWD值,其原因在于生物质炭本身含有的有机大分子等结构具有胶结和团聚作用,能促进微团聚体(<0.25 mm)向0.25~0.5 mm和0.5~1 mm粒径的团聚体转化,从而使0.25~1 mm粒径的团聚体含量随生物质炭施用量的提高而不断增加^[17]。另一方面,生物质炭施入土壤后更好地协调了土壤水、肥、气、热等条件,为微生物的生长与繁殖提供了优良的生活环境,进而提高了土壤微生物量和微生物活性,促进微生物产生了更多的分泌物,促进土壤颗粒的相互团聚,增加了团聚体的稳定性^[18-19]。因此,生物质炭的施用可以显著改善黄瓜连作土壤的物理性状,提高连作土壤的保水性。

生物质炭的施用能够显著影响黄瓜连作土壤的营养含量。本研究结果表明,施用生物质炭后的连续两季,土壤全氮、有效氮、有效磷及有机质含量均随生物质炭施用量的增加而升高。张伟明^[20]研究表明生物质炭中含有多种矿质营养元素,施入土壤后,在一定程度上会释放出这些营养元素,进而增加土壤中有效养分和有机质的含量。另一方面,靖彦等^[21]研究表明生物质炭对土壤养分具有保持能力,可以通过表面库仑力、氢键以及分子间的范德华力等将土壤养分离子吸附在土壤颗粒表面,能够有效

降低土壤中铵态氮和硝态氮的淋失。另外,生物质炭施入土壤后,微域中粘粒、有机质等显著增多,有机质与粘粒结合可形成稳定的有机无机复合体,且生物质炭发达的孔隙结构可有效地隔离微生物及其产生的胞外酶与孔隙内的有机质接触,在一定程度上抑制了有机碳的矿化^[22]。

3.2 施用生物质炭对黄瓜连作土壤酶活性的影响

土壤脲酶是土壤中主要的水解酶之一,其主要参与土壤中氮素的转化,对尿素在土壤中的水解及作物对尿素的利用有重大的影响^[23],它的活性可以表征土壤氮素状况。在本研究中,土壤中脲酶的活性随着生物质炭施用量的增加呈现先增加后降低的趋势,其活性在生物质炭施用量为30 t/hm²(C4处理)时达到最大。当生物质炭施用量小于30 t/hm²(C4处理)时,增施生物质炭改善了土壤微生物的生活环境,为微生物的生长提供了大量的营养元素,促使微生物分泌更多的脲酶^[24],同时施用生物质炭可以为土壤脲酶的酶促反应提供大量的基质,刺激土壤脲酶活性,使其活性增强。另一方面,周礼恺等^[25]研究表明,脲酶主要聚集在微团聚体上,随着团聚体粒径的增大,脲酶活性有下降的趋势,本研究结果与之基本一致。当生物质炭施用量大于30 t/hm²(C4处理)时,土壤中微团聚体(<0.25 mm)数量显著减少,而0.25~0.5 mm和0.5~1 mm粒径的团聚体含量显著增加,意味着土壤脲酶的载体大量减少,导致其活性降低。此外,本研究结果表明,第二季各处理土壤中的脲酶活性都高于第一季,这可能是由于第一季为秋季黄瓜,而第二季为春季黄瓜,种植时期的气温和湿度不同造成的。

生物呼吸过程和有机物的氧化反应产生的过氧化氢对土壤和生物均有一定的毒害作用,而土壤中的过氧化氢酶则能酶促过氧化氢分解为水和氧气,从而降低或解除过氧化氢的毒害作用^[26]。本研究结果表明,不同生物质炭施用量条件下,土壤中过氧化氢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/hm²(C3处理)时,其活性达到最大,这与许多学者的研究结果基本一致。一方面,朱美玲等^[27]研究表明有机质可以改变土壤孔隙度、通气度和土壤团粒结构,具有显著的缓冲作用和持水力,是各种酶的载体,为土壤酶发挥作用提供场所和适宜的条件。另一方面,Czimeczik等^[28]研究表明当土壤中有大量的生物质炭加入后会通过吸附酶分子而对酶促反应结合位点形成保护作

用, 从而阻止酶促反应的进行。因此, 当生物质炭施用量小于 20 t/hm^2 (C3 处理) 时, 生物质炭的施入增加了土壤的有机质, 为过氧化氢酶发挥作用提供适宜的场所和条件, 使土壤过氧化氢酶的活性显著提高。而当生物质炭的施用量大于 20 t/hm^2 (C3 处理) 时, 过量的生物质炭吸附了大量的过氧化氢的酶分子, 对过氧化氢酶的酶促反应结合位点形成了保护, 阻止了过氧化氢酶的酶促反应。

3.3 施用生物质炭对黄瓜连作土壤质量的影响

生物质炭添加到土壤中可以增加土壤有机碳的含量, 提高土壤有效性营养元素的含量, 从而促进植物生长, 同时还可以改变土壤的物理、化学和生物学性质。本研究通过分析土壤质量指数, 探讨了生物质炭施用两季后黄瓜连作的土壤质量, 研究结果表明, 生物质炭可以显著提高黄瓜连作后的土壤质量, 不同生物质炭施用量条件下土壤质量指数依次为 $C4 > C5 > C3 > C2 > C1 > CK$ 。根据土壤质量等级划分标准^[15], 不施用生物质炭的 CK 处理土壤质量等级为中级, 而施用生物质炭后的土壤质量等级为高级, 其中当生物质炭施用量为 30 t/hm^2 (C4 处理) 时, 土壤质量指数最大, 说明黄瓜连作两季后的土壤质量最高。各处理黄瓜产量的多重比较与土壤质量呈相同的趋势, 过量的生物质炭也不利于黄瓜的生长, 且第二季黄瓜产量较第一季明显升高, 这可能是第一季黄瓜为秋茬, 而第二季黄瓜为夏茬, 两个时期的温度和湿度差别较大所引起的。有研究表明^[29], 当适量的生物质炭施入土壤后, 生物质炭本身含有的碳、氢、氧、氮等元素以及 P、K、Na、Ca、Mg 等离子释放到土壤中后会显著提高土壤养分含量, 同时生物质炭本身特殊的物理性质也会改善土壤的物理性状, 提高了土壤的保水保肥性。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, 影响土壤的养分平衡, 进而降低土壤养分尤其是氮素的有效性, 导致土壤质量降低。同时生物质炭对土壤质量的影响效应还可能与原材料、加工工艺、施用量及土壤的肥力现状有关, 黄瓜连作土壤质量对生物质炭的响应机制还有待于进一步研究。

4 结论

1) 施用生物质炭可以改善黄瓜连作土壤的理化性状, 较高的生物质炭施用量 (40 t/hm^2) 处理对土壤的物理性状提升效果最好, 当生物质炭施用量为

30 t/hm^2 时对土壤养分含量提升效果最好。

2) 生物质炭施用后的连续两季黄瓜种植的土壤中脲酶和过氧化氢酶的活性均呈先增加后降低的趋势, 脲酶和过氧化氢酶的活性分别在生物质炭施用量为 30 t/hm^2 和 20 t/hm^2 时达到最高值。

3) 生物质炭可以提高黄瓜连作后的土壤质量, 对黄瓜有一定的增产效应, 在生物质炭施用量为 30 t/hm^2 时, 两季黄瓜产量均达到最高。

参 考 文 献:

- [1] Li N, Li H, Zhu F, *et al.* Relationships between soil microbial ecological characteristics and physical-chemical properties of vegetable garden soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2): 285.
- [2] 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析与防治措施[J]. *东北农业大学学报*, 2000, 31(3): 241–247.
Wu F Z, Zhao F Y, Liu Y Y. On the reasons of continuous cropping obstacles in vegetable facility gardening[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2000, 31(3): 241–247.
- [3] 孙光闻, 陈日远, 刘厚诚. 设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(14): 184–188.
Sun G W, Chen R Y, Liu H C. Causes and control measures for continuous cropping obstacles in protected vegetable cultivation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(14): 184–188.
- [4] 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.
- [5] Demirbas A. Biomass to charcoal, liquid, and gaseous products via carbonization process[J]. *Energy Sources*, 2001, 23(6): 579–587.
- [6] 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.
Liu R L, Jin J Y, Wu R G, *et al.* Study on the characteristics of potassium cycling in different soil-crop systems in northern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2): 123–132.
- [7] 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.
Wang X B, Cai D X, Zhang J Q, *et al.* Effects of corn stover incorporated in dry farmland on soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(4): 54–61.
- [8] 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.
Hua L, Zhang C, Ma H R, *et al.* Environmental benefits of biochar made by agricultural straw when applied to soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2489–2492.
- [9] 章明奎, Bayou W D, 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.
Zhang M K, Bayou W D, Tang H J. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil[J]. *Journal of Soil and*

- Water Conservation, 2012, 26(2): 127–131.
- [10] 白冰, 陈效民, 秦淑平. 黄河三角洲滨海盐渍土饱和导水率的研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 321–323.
- Bai B, Chen X M, Qin S P. Saturated hydraulic conductivity of seashore saline soil in Yellow River Delta[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 321–323.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- Guan S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [13] 姚荣江, 杨劲松, 陈小兵, 等. 苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(6): 2019–2027.
- Yao R J, Yang J S, Chen X B, *et al.* Fuzzy synthetic evaluation of soil quality in coastal reclamation region of north Jiangsu Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(6): 2019–2027.
- [14] 杨建军. 甘肃中部日光温室土壤质量研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, 2012.
- Yang J J. Study on soil quality of greenhouse in central Gansu [D]. Lanzhou: MS Thesis of Gansu Agricultural University, 2012.
- [15] 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 311–318.
- Zhang W S, Li X X, Huang W J, *et al.* Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12): 311–318.
- [16] Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol [J]. *Geoderma*, 2013, 209–210: 188–197.
- [17] Brodowski S, John B, Flessa H, *et al.* Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 539–546.
- [18] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability[J]. *Geoderma*, 1997, 75(3): 267–277.
- [19] 陶朋闯, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 231–235.
- Tao P C, Chen X M, Jin Z W, *et al.* Effects of biochar combined with nitrogen fertilizers on microbial biomass C, N and carbon-to-nitrogen ratio of upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 231–235.
- [20] 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: 沈阳农业大学博士学位论文, 2012.
- Zhang W M. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production[D]. Shenyang: PhD Dissertation of Shenyang Agricultural University, 2012.
- [21] 靖彦, 陈效民, 李秋霞, 等. 生物质炭对红壤中硝态氮和铵态氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 265–269.
- Jing Y, Chen X M, Li Q X, *et al.* Effects of biochar on ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6): 265–269.
- [22] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. *生态环境学报*, 2012, (11): 1795–1799.
- Hua L, Jin S S, Luo J J, *et al.* Effect of bio-char on the micro-environment characteristics and humus in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, (11): 1795–1799.
- [23] Guo Y, Li L, Wei C, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on biomass amount and soil enzymes activity of desert grassland in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(13): 249–256.
- [24] Xiao X, Zhu W, Xiao L, *et al.* Suitable water and nitrogen treatment improves soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities of paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(21): 91–98.
- [25] 周礼恺, 张志明, 陈恩凤. 黑土的酶活性[J]. *土壤学报*, 1981, (2): 158–166.
- Zhou L K, Zhang Z M, Chen E F. Enzymatic activities in black soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1981, (2): 158–166.
- [26] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 110–114.
- Guo T C, Song X, Ma D Y, *et al.* Effects of nitrogen application rate on soil enzyme activities in wheat rhizosphere[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 110–114.
- [27] 朱美玲, 贡璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(7): 2678–2685.
- Zhu M L, Gong L, Zhang L L. Soil enzyme activities and their relationships to environmental factors in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7): 2678–2685.
- [28] Czimczik C I, Masiello C A. Controls on black carbon storage in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): 1–8.
- [29] Davidson C M, Duncan A L, Littlejohn D, *et al.* A critical evaluation of the three-stage BCR sequential extraction procedure to assess the potential mobility and toxicity of heavy metals in industrially-contaminated land[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1998, 363(1): 45–55.