

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.007

张志龙, 陈效民, 李小萌, 等. 生物质炭与化肥配施对连作黄瓜产量及肥料利用率的影响. 土壤, 2021, 53(1): 47–54.

生物质炭与化肥配施对连作黄瓜产量及肥料利用率的影响^①

张志龙¹, 陈效民^{1*}, 李小萌¹, 曲成闯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, 南京 210095; 2 如皋市农业科学研究所, 江苏如皋 226500)

摘要: 在如皋农科所进行黄瓜大棚试验, 设置按常规施肥(计为 100%, F)、减肥 10%(F-10%)和减肥 20%(F-20%)3 个施肥水平, 每个施肥水平下设置生物质炭添加量为 0 t/hm² (CK)、5 t/hm² (C1)、10 t/hm² (C2)、20 t/hm² (C3)、30 t/hm² (C4)和 40 t/hm² (C5) 6 个处理, 以 CK 和 CF(不施生物质炭也不施化肥)处理为对照, 测定和分析黄瓜产量以及肥料利用率等相关参数。结果表明, 在同一施肥水平下, 与 CK 处理相比, 添加生物质炭的处理组中黄瓜产量、肥料利用率及相关指标均达到显著增加水平($P<0.05$), C5 处理的黄瓜产量和氮、磷、钾肥料利用率均达到最大值。C5 处理的黄瓜产量和氮、磷、钾肥料利用率在 F 处理水平下分别为 27.60 t/hm²、23.75%、3.62% 和 24.85%, 与 CK 处理相比, 分别提高了 59.67%、337.44%、177.94% 和 120.69%; 在 F-10% 水平下分别比 CK 处理提高了 73.88%、163.82%、234.33% 和 183.24%; 在 F-20% 水平下分别比 CK 处理提高了 82.10%、148.73%、246.46% 和 215.66%。在相同生物质炭添加量的处理中, 化肥减施没有造成 C2、C3、C4 和 C5 处理中的黄瓜产量降低, 而肥料利用率均呈上升趋势, 在 F-20% 处理水平下达到最高, 其与传统施肥相比, CK、C1、C2、C3、C4 和 C5 的氮肥利用率分别提高了 135.42%、145.96%、116.94%、70.47%、63.33% 和 33.86%, 磷肥利用率分别提高了 69.26%、57.31%、59.78%、27.90%、67.91% 和 110.99%, 钾肥利用率分别提高了 27.90%、99.55%、84.75%、62.97%、60.91% 和 82.94%。本试验研究表明, 生物质炭与化肥配施是减缓连作障碍的有效途径。

关键词: 黄瓜产量; 肥料利用率; 农学效率; 偏生产力; 表观回收率

中图分类号: S154.4; S157.2 文献标志码: A

Effects of Biochar Combined with Fertilizer on Cucumber Yield and Fertilizer Use Efficiency Under Continuous Cropping

ZHANG Zhilong¹, CHEN Xiaomin^{1*}, LI Xiaomeng¹, QU Chengchuang¹, ZHANG Jun², HUANG Chunyan², LIU Yunmei²

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Rugao Institute of Agricultural Sciences, Rugao, Jiangsu 226500, China)

Abstract: The effects of biochar combined with fertilizer on cucumber yield and fertilizer use efficiency were investigated by a field experiment in order to provide a scientific basis for the improvement of fertilizer use efficiency and cucumber production. The field experiments were carried on the fluvo-aquic soil in Rugao city of Jiangsu Province, in which three fertilization levels were designed: 1) traditional fertilization (F), 2) reduce 10% fertilization (F-10%), and 3) reduce 20% fertilization (F-20%). For each fertilization level, six biochar application rates were setup (0, 5, 10, 20, 30 and 40 t/hm², designated as CK, C1, C2, C3, C4 and C5, respectively), with CK and CF (no biochar and no fertilization) as control. The results showed that, compared with CK at all fertilization levels, biochar treatments significantly increased cucumber yield, fertilizer use efficiency and related indicators ($P<0.05$). At F fertilization level, cucumber yield and N, P and K fertilizer use efficiencies in C5 treatments were 27.60 t/hm², 23.75%, 3.62%, and 24.85%, respectively, which increased by 59.67%, 337.44%, 177.94% and 120.69% compared with CK; At F-10% fertilization level, compared to CK, cucumber yield and N, P and K fertilizer use efficiencies in C5 treatments increased by 73.88%, 163.82%, 234.33% and 183.24%, respectively. At F-20% fertilization level, compared with CK, cucumber yield and N, P and K fertilizer use efficiencies in C5 treatments increased by 82.10%, 148.73%, 246.46% and 215.66%, respectively. In the same biochar rate treatments, cucumber yield was not reduced in C2, C3, C4 and C5 treatments, but the fertilizer use efficiency was significantly increased, which reached the highest at F-20% fertilization level, compared with F

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200305)、土壤与农业可持续发展国家重点实验项目(Y20160038)和中国博士后基金项目(2016M591884)资助。

* 通讯作者(xmchen@njau.edu.cn)

作者简介: 张志龙(1994—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事土壤氮素迁移转化过程研究。E-mail: zhangzhilong @issas.ac.cn

fertilization level, N fertilizer use efficiencies in CK, C1, C2, C3, C4 and C5 treatments increased by 135.42%, 145.96%, 116.94%, 70.47%, 63.33% and 33.86% respectively, P fertilizer use efficiencies increased by 69.26%, 57.31%, 59.78%, 27.90%, 67.91% and 110.99%, respectively, K fertilizer use efficiencies increased by 27.90%, 99.55%, 84.75%, 62.97%, 60.91% and 82.94%, respectively. This study proves further biochar combined with fertilizer is an effective way to alleviate the obstacles of continuous cropping of cucumber.

Key words: Cucumber yield; Fertilizer use efficiency; Agronomy efficiency; Partial factor productivity; Recovery efficiency

黄瓜是我国重要的大面积栽培蔬菜, 市场需求大, 经济效益高, 目前我国黄瓜总产量已居世界首位。但由于生产栽培条件及农田土地面积的限制和经济利益的驱使, 黄瓜连作现象普遍存在^[1]。且由于缺少科学指导, 存在化肥施用普遍过量的现象, 这些都是导致连作障碍的重要因素。连作障碍会导致土壤养分、物理性质、微生物区系等的变化, 影响作物对土壤养分的吸收, 从而影响作物的产量和品质^[2]。近年来, 随着对生物质炭的研究和利用, 发现生物质炭能在连作土壤中发挥持久的效果, 在降低土壤容重、增大土壤孔隙度、提高养分含量、增强酶活性^[3]、增加微生物生物量碳氮含量、调节土壤微生态环境和降低有毒元素的生物有效性等方面具有显著的效果^[4], 但是生物质炭对连作作物的养分吸收、减肥效果及产量等方面的影响却鲜有报道。因此, 本文在黄瓜连作土壤上通过生物质炭与化肥配施, 研究不同生物质炭添加量和不同施肥水平对连作黄瓜产量的影响, 测定黄瓜对养分吸收过程的相关参数, 探讨生物质炭与减肥配施对提高连作障碍土壤中植株肥料利用效率的作用效果, 为推广生物质炭应用、改良土壤理化性状、保护水土资源、提高作物产量和减少化肥施用量等方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验开始于 2016 年 9 月 13 日, 在江苏省如皋市农业科学研究所(120°28'54.7"E, 32°22'02.7"N)的设施大棚中进行, 该研究区为亚热带季风气候, 四季分明, 雨热同期。供试土壤类型为灰潮土, 养分含量较高, 土壤基本理化性质为: 容重 1.04 g/cm³, pH 6.44, 总孔隙度 60.79%, 有机碳 17.88 g/kg, 全氮 1.03 g/kg, 有效磷 142.12 mg/kg, 速效钾 455.33 mg/kg。

供试生物质炭是小麦秸秆在 500 °C 高温下碳化而成, 其基本理化性质如下: pH 10.65, 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%, 容重 0.45 g/cm³, 比表面积 8.9 m²/g。

供试黄瓜: 博美八号。

供试化肥: 金字牌 15-15-15 复合肥料。

1.2 试验设计

根据添加生物质炭量, 试验共设置 6 个处理, 分别为: CK(不施生物质炭)、C1(5 t/hm²)、C2(10 t/hm²)、C3(20 t/hm²)、C4(30 t/hm²)和 C5(40 t/hm²), 每个处理 3 次重复, 共 18 个小区, 采用随机区组排列。然后根据当地传统施肥量设置减施化肥处理, 将每个试验处理分成 3 等份的小区, 每个小区面积为 7 m², 中间用田埂隔开, 设计 3 个化肥施用量, 分别为 F(传统施肥量, 1 t/hm²)、F-10%(减少 10%, 0.9 t/hm²)和 F-20%(减少 20%, 0.8 t/hm²), 并设置空白组 CF(不施生物质炭也不施化肥)。生物质炭于第一季黄瓜种植前施入土壤, 以后不再施加, 化肥在每季黄瓜苗期移植前施入土壤。黄瓜每年连作两季, 在黄瓜生长 31 d 的苗期同一天移入试验大棚中。试验期间, 按照设施大棚标准措施管理, 根据黄瓜生长状况适当浇水和除草, 以满足黄瓜的正常生长条件。

1.3 样品采集和制备

在连作黄瓜第 5 季的成熟期, 采用 S 型路线采集 0 ~ 20 cm 土样, 每个小区采集 5 个点, 混合均匀后作为一个小区的代表性样品。将一部分鲜土立即挑去动植物残体及石块等, 过 2 mm 筛放入 4 °C 培养箱密封保存。另一部分于室内晾干后, 挑去动植物残体及石块等, 磨碎后全部通过 2 mm 筛, 保存在广口瓶中备用。

在第 5 季连作黄瓜成熟期采集植株样, 每个小区随机选择 3 株, 将黄瓜根部从土壤中挖出, 清洗干净, 并用吸水纸除去表面水分, 将根、茎叶、果实用剪刀剪开, 分别封进信封袋中。先将鲜样在 80 ~ 90 °C 烘箱中烘 15 ~ 30 min, 然后降温至 60 ~ 70 °C, 除尽水分, 最后在粉碎机中磨碎并过筛, 保存在广口瓶待测。

1.4 测试项目及方法

土壤 NH₄⁺-N 采用 KCl 浸提-蒸馏法测定, NO₃⁻-N 采用酚二磺酸比色法测定, 有效磷采用 NaHCO₃ 浸提-分光光度法测定, 速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定。

植物全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 奈氏比色法测定; 全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 钒钼黄比色法测定; 全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 火焰光度计法测定。

氮(磷、钾)肥利用率(%)=[(施肥区黄瓜吸收氮

(磷、钾)量-不施肥区黄瓜吸收氮(磷、钾)量]/氮(磷、钾)肥施用量 $\times 100$

氮(磷、钾)肥农学效率(kg/kg)=[施氮(磷、钾)区产量-不施氮(磷、钾)区产量]/氮(磷、钾)肥施用量

氮(磷、钾)肥偏生产力(kg/kg)=施氮(磷、钾)区产量/氮(磷、钾)肥施用量

表观回收率(%)=(施肥区地上部养分吸收量-不施肥区地上部养分吸收量)/施肥量 $\times 100$

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 进行相关的数据计算和图表绘制, 采用 SPSS19.0 进行聚类分析和双变量相关性分析, 通过 Duncan 法进行多变量显著性检验。

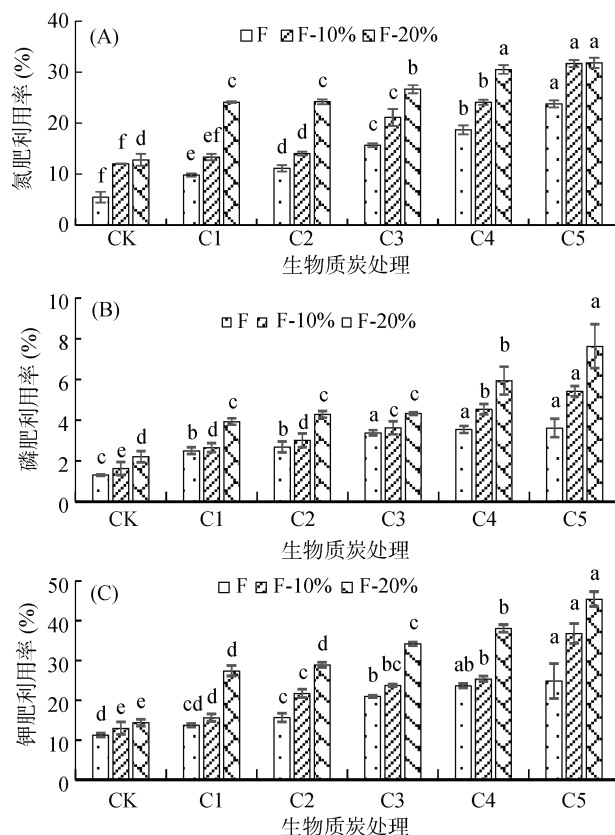
2 结果与分析

2.1 生物质炭与化肥配施对连作黄瓜肥料利用率的影响

由图 1 可知, 在同一个生物质炭处理组中, 随着化肥减施, 黄瓜对氮、磷、钾肥利用率均呈上升趋势。在 CK 组中, 随着化肥减施, 氮、磷、钾肥利用率最多分别提高了 7.35%、0.90% 和 3.14% 个百分点。相比 CK 组的单个元素肥利用效率的提高幅度, C1、C2、C3、C4 和 C5 处理组的氮、磷、钾肥利用率最少分别提高了 8.05%、0.94% 和 13.22% 个百分点, 均超过 CK 组的提升幅度, 说明添加生物质炭可以增加减肥处理带来的氮、磷、钾肥利用率提升效果, 大大促进了黄瓜对土壤中氮、磷、钾养分的吸收利用。在同一个施肥水平下, C1、C2、C3、C4 和 C5 处理的氮、磷、钾肥利用率相比 CK 处理均显著提高($P < 0.05$), 且在 C5 处理时达到最大值。在 F 水平下的 C5 处理, 氮、磷、钾肥利用率比 CK 处理分别提高了 337.38%、178.46% 和 120.69%; 在 F-10% 水平下的最大值比最低值分别提高了 163.95%、235.19% 和 183.22%; 在 F-20% 水平中最大值比最低值分别提高了 148.83%、246.82% 和 215.69%; 说明添加生物质炭可以显著提高连作黄瓜的肥料利用率, 减少化肥的损失, 促进作物生长发育。

2.2 生物质炭与化肥配施对连作黄瓜养分利用参数的影响

由表 1 可知, 减量施肥能提高生物质炭处理的氮磷钾肥农学效率、偏生产力及表观回收率, 其变化规律为 $F < F-10\% < F-20\%$ 。C1 ~ C5 处理组 F-20% 处理的农学效率比 F 处理提高了 17.72% ~ 30.97%, 偏生产力提高了 21.14% ~ 28.31%, 氮、磷、钾肥表观回收率分别提高了 32.24% ~ 110.32%、28.65% ~ 79.43% 和 55.73% ~ 89.00%。



(图中小写字母不同表示同一施肥处理下不同生物质炭处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 1 生物质炭与化肥配施对连作黄瓜肥料利用率的影响
Fig. 1 Effects of biochar combined with fertilizer on fertilizer use efficiency under continuous cropping of cucumber

同一施肥水平下氮、磷、钾肥的农学效率、偏生产力、表观回收率均表现为随着生物质炭添加量增加而上升的趋势, 并且 C1、C2、C3、C4 和 C5 处理与 CK 相比差异均显著($P < 0.05$), 且在 C5 处理时达到最高。F 水平下 C1 ~ C5 处理的农学效率较 CK 提高了 30.40% ~ 128.62%, 偏生产力提高了 14.10% ~ 59.67%, 氮、磷、钾肥表观回收率分别提高了 45.76% ~ 197.47%、57.17% ~ 132.62% 和 13.46% ~ 102.34%。在 F-10% 和 F-20% 处理的施肥水平下, 各指标的变化趋势与常规施肥处理基本一致。

2.3 生物质炭与化肥配施对土壤养分的影响

由表 2 可知, 在同一生物质炭处理组中, 随着化肥减施, 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 、有效磷和速效钾含量也随之降低, 其变化趋势均为 $F > F-10\% > F-20\%$, 说明降低化肥施用量会减少土壤中有效养分含量。在同一化肥施用量水平下不同生物质炭处理中各养分含量的变化趋势均表现为 $\text{CK} < \text{C1} < \text{C2} < \text{C3} < \text{C4} < \text{C5}$, 说明添加生物质炭能够有效地吸附土壤中的有效养分, 减少土壤中有效养分的流失。

表 1 生物质炭与化肥配施对黄瓜氮、磷、钾利用效率参数的影响
Table 1 Effects of biochar combined with fertilizer on N, P and K utilization parameters of cucumber

指标	施肥水平	养分	生物质炭处理					
			CK	C1	C2	C3	C4	C5
农学效率 (kg/kg)	F	N(P、K)	53.46 ± 5.81 e	69.71 ± 6.57 d	77.05 ± 11.23 d	90.41 ± 6.05 c	109.20 ± 6.06 b	122.22 ± 4.89 a
	F-10%	N(P、K)	48.96 ± 9.25 e	73.68 ± 14.82 d	92.38 ± 10.62 cd	105.78 ± 10.92 bc	123.95 ± 11.01 ab	135.84 ± 5.23 a
	F-20%	N(P、K)	50.28 ± 8.69 d	82.06 ± 9.18 c	100.91 ± 4.54 b	116.11 ± 16.41 b	140.08 ± 11.27 a	154.96 ± 8.26 a
养分偏生产力 (kg/kg)	F	N(P、K)	115.24 ± 5.81 e	131.49 ± 6.57 d	138.83 ± 11.23 d	152.19 ± 6.05 c	170.98 ± 6.06 b	184.00 ± 4.89 a
	F-10%	N(P、K)	117.60 ± 9.25 e	142.33 ± 14.82 d	161.02 ± 10.62 cd	174.43 ± 10.92 bc	192.59 ± 11.01 ab	204.48 ± 5.23 a
	F-20%	N(P、K)	127.50 ± 8.69 d	159.29 ± 9.18 c	178.13 ± 4.54 b	193.33 ± 16.41 b	217.30 ± 11.27 a	232.18 ± 8.26 a
表观回收率(%)	F	N	8.71 ± 0.382 f	12.69 ± 0.159 e	14.20 ± 0.282 d	18.16 ± 0.312 c	21.14 ± 0.902 b	25.90 ± 1.005 a
		P	1.79 ± 0.031 d	2.82 ± 0.040 c	2.95 ± 0.163 c	3.84 ± 0.077 b	3.89 ± 0.042 b	4.18 ± 0.310 a
		K	14.98 ± 0.474 f	17.00 ± 0.462 e	19.15 ± 1.072 d	24.51 ± 0.171 c	27.31 ± 0.414 b	30.32 ± 1.369 a
	F-10%	N	14.33 ± 0.243 e	16.04 ± 0.220 d	16.81 ± 0.179 d	23.41 ± 1.737 c	26.68 ± 0.556 b	33.96 ± 0.829 a
		P	2.21 ± 0.030 e	3.26 ± 0.047 d	3.31 ± 0.062 d	4.37 ± 0.231 c	5.06 ± 0.091 b	5.90 ± 0.175 a
		K	16.34 ± 1.505 e	19.15 ± 0.969 d	25.21 ± 1.042 c	26.91 ± 0.353 c	28.69 ± 0.522 b	38.50 ± 1.228 a
	F-20%	N	14.62 ± 0.841 d	26.69 ± 0.761 c	27.36 ± 0.336 c	29.16 ± 0.186 b	33.31 ± 0.776 a	34.25 ± 0.389 a
		P	2.57 ± 0.051 e	4.42 ± 0.183 d	4.80 ± 0.161 c	4.94 ± 0.108 c	6.83 ± 0.373 b	7.50 ± 0.213 a
		K	18.54 ± 0.867 e	32.13 ± 0.799 d	33.03 ± 0.393 d	38.17 ± 0.410 c	43.86 ± 2.387 b	48.14 ± 3.071 a

注：表中同一行数据小写字母不同表示同一施肥水平不同生物质炭处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平。

表 2 生物质炭与化肥配施对土壤养分的影响
Table 2 Effects of biochar combined with fertilizer on soil nutrients

施肥水平	生物质炭处理	土壤养分(mg/kg)			
		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	有效磷	速效钾
F	CK	4.47 ± 0.05 e	492.98 ± 5.89 e	88.57 ± 5.76 e	252.48 ± 11.80 e
	C1	5.95 ± 0.12 d	513.68 ± 5.33 e	198.36 ± 8.59 d	439.96 ± 13.26 d
	C2	6.13 ± 0.04 cd	566.36 ± 23.54 d	225.87 ± 12.12 d	506.04 ± 41.22 d
	C3	6.29 ± 0.06 c	593.93 ± 1.46 c	376.10 ± 12.14 c	608.52 ± 49.62 c
	C4	6.54 ± 0.08 b	706.41 ± 10.12 b	436.39 ± 52.27 b	726.03 ± 12.29 b
	C5	8.33 ± 0.23 a	880.19 ± 15.87 a	632.14 ± 52.65 a	1076.54 ± 70.81 a
F-10%	CK	4.10 ± 0.24 e	423.67 ± 9.41 d	82.20 ± 3.48 e	218.14 ± 13.75 f
	C1	4.77 ± 10.05 d	455.16 ± 9.76 d	183.46 ± 4.35 d	253.70 ± 12.08 e
	C2	4.74 ± 0.06 d	553.45 ± 10.39 c	201.35 ± 7.62 cd	297.36 ± 16.88 d
	C3	5.65 ± 16.8 c	592.90 ± 2.27 b	217.04 ± 4.99 bc	344.11 ± 11.33 c
	C4	6.09 ± 0.10 b	625.07 ± 12.31 b	250.85 ± 11.40 b	427.98 ± 15.06 b
	C5	6.95 ± 0.09 a	827.70 ± 48.82 a	356.31 ± 31.48 a	522.22 ± 12.87 a
F-20%	CK	3.78 ± 0.20 e	384.90 ± 16.91 e	78.80 ± 2.97 e	168.66 ± 17.12 d
	C1	4.53 ± 0.08 d	431.76 ± 12.82 d	114.05 ± 4.92 d	202.04 ± 3.84 c
	C2	5.45 ± 0.17 c	448.43 ± 3.08 d	134.49 ± 4.16 d	208.36 ± 0.68 c
	C3	5.08 ± 0.28 c	486.21 ± 9.56 c	215.07 ± 14.51 c	286.69 ± 6.39 b
	C4	5.87 ± 0.16 b	547.12 ± 24.07 b	231.76 ± 1.31 b	313.34 ± 17.96 b
	C5	6.41 ± 0.25 a	585.82 ± 11.24 a	344.16 ± 26.75 a	424.89 ± 37.03 a

注：表中同列数据小写字母不同表示同一施肥水平下不同生物质炭处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平。

2.4 生物质炭与化肥配施对连作黄瓜产量的影响

由图 2 可知，在未添加生物质炭的 CK 组中，各施肥水平下的黄瓜产量均为最低，并随着化肥的减施黄瓜产量呈现下降趋势。在 C1 组中，F 施肥水平下

的黄瓜产量高于 F-10% 和 F-20% 处理，但 F-10% 和 F-20% 处理的黄瓜产量并没有明显的差异。在 C2 ~ C5 各处理组中，3 种施肥水平下的黄瓜产量也没有明显的差异，说明添加生物质炭在黄瓜不减产的条件

下可以降低化肥的施用量。在同一个施肥水平下，不同生物质炭处理间随着生物质炭添加量的增加，黄瓜产量呈现上升趋势，在 C5 处理中达到最大值，3 个施肥水平下黄瓜产量分别为 27.60、26.60 和 27.86 t/hm²，比 CK 处理分别提高了 59.63%、67.51% 和 82.09%，说

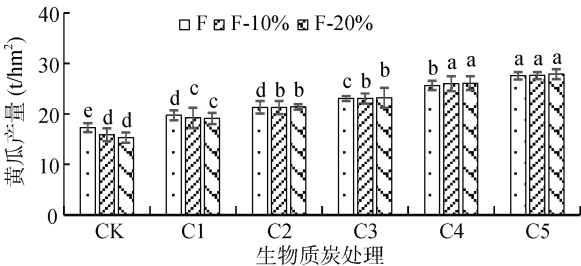


图 2 生物质炭与化肥配施对黄瓜产量的影响
Fig. 2 Effects of biochar combined with fertilizer on cucumber yield

明添加生物质炭可以显著提高黄瓜产量($P<0.05$)。

2.5 不同指标之间的相关性

由表 3 可知，黄瓜产量与农学效率、偏生产力、氮肥利用率、磷肥利用率、钾肥利用率、氮肥表观回收率、磷肥表观回收率、钾肥表观回收率和生物质炭添加量的相关性指数分别为 0.954、0.885、0.771、0.795、0.768、0.773、0.799、0.760 和 0.973，均呈极显著正相关关系，与施肥量的相关性指数为 0.017，呈正相关关系；农学效率、偏生产力、氮(磷、钾)肥料利用率、氮(磷、钾)肥表观回收率相互之间均呈极显著正相关关系；施肥量与农学效率、偏生产力、氮(磷、钾)肥料利用率、氮(磷、钾)肥表观回收率之间均呈负相关关系，其中与氮(磷、钾)肥料利用率、氮(磷、钾)肥表观回收率呈显著负相关关系。

表 3 各指标与生物质炭添加量和施肥量之间相关性
Table 3 Correlation between indicators and fertilization amount and biochar added amount

	产量	AE	PFP	FUEN	FUEP	FUEK	REN	REP	REK	施肥量	生物质炭量
产量	1										
AE	0.954**	1									
PFP	0.885**	0.983**	1								
FUEN	0.771**	0.898**	0.945**	1							
FUEP	0.795**	0.924**	0.959**	0.920**	1						
FUEK	0.768**	0.913**	0.959**	0.954**	0.968**	1					
REN	0.773**	0.902**	0.948**	0.999**	0.925**	0.959**	1				
REP	0.799**	0.933**	0.970**	0.947**	0.990**	0.971**	0.952**	1			
REK	0.760**	0.907**	0.957**	0.956**	0.958**	0.995**	0.961**	0.967**	1		
施肥量	0.017	-0.270	-0.443	-0.570*	-0.507*	-0.565*	-0.568*	-0.528*	-0.579*	1	
生物质炭量	0.973**	0.926**	0.863**	0.781**	0.782**	0.759**	0.775**	0.784**	0.750**	0	1

注：*、**分别表示指标间相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平；AE：农学效率；PFP：偏生产力；FUEN：氮肥利用率；FUEP：磷肥利用率；FUEK：钾肥利用率；REN：氮肥表观回收率；REP：磷肥表观回收率；REK：钾肥表观回收率。

2.6 生物质炭和化肥配施对黄瓜产量及肥料利用效率的聚类分析

对不同生物质炭与化肥配施处理下的连作黄瓜产量及肥料利用效率的作用效果进行聚类分析(图 3)，在欧氏距离为 3.0 时，所有的处理可以分为 5 类。

第一类包括 F 施肥水平下的 C1、C2、C3 处理和 F-10% 施肥水平下的 C1、C2 处理，黄瓜产量范围为 19.21 ~ 20.82 t/hm²，氮、磷、钾肥利用率范围分别为 9.79% ~ 15.62%、2.50% ~ 3.38% 和 13.74% ~ 21.77%。

第二类包括 F、F-10%、F-20% 3 个施肥水平下的 CK 处理，黄瓜产量范围为 15.30 ~ 17.29 t/hm²，氮、磷、钾肥利用率范围分别为 5.43% ~ 12.78%、1.30% ~ 2.20% 和 11.26% ~ 14.40%。

第三类包括 F-10% 施肥水平下的 C5 处理和 F-20% 施肥水平下的 C4、C5 处理，黄瓜产量范围为

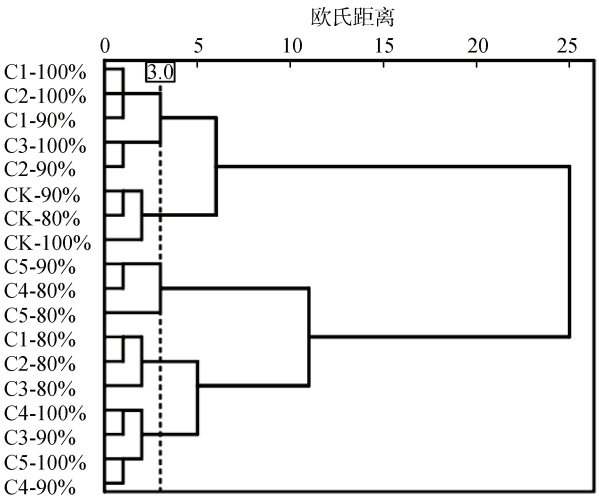


图 3 生物质炭与化肥配施的聚类分析
Fig. 3 Cluster analysis of biochar combined with fertilizer

26.08 ~ 27.86 t/hm², 氮、磷、钾肥利用率范围分别为 30.49% ~ 31.80%、5.43% ~ 7.63% 和 36.79% ~ 45.46%。

第四类包括 F-20% 施肥水平下的 C1、C2、C3 处理, 黄瓜产量范围为 19.11 ~ 23.20 t/hm², 氮、磷、钾肥利用率范围分别为 24.08% ~ 26.63%、3.93% ~ 4.32% 和 27.42% ~ 34.21%。

第五类包括 F 施肥水平下的 C4、C5 处理和 F-10% 施肥水平下的 C3、C4 处理, 黄瓜产量范围为 23.55 ~ 27.60 t/hm², 氮、磷、钾肥利用率范围分别为 18.67% ~ 24.06%、3.54% ~ 4.54% 和 23.67% ~ 25.38%。

综上所述, 黄瓜产量最高的是第三类, 其次是第五类; 氮肥利用率最高的是第三类, 其次是第四类; 磷肥利用率最高的是第三类, 其次是第四类和第五类; 钾肥利用率最高的是第三类, 其次是第四类。

3 讨论

3.1 生物质炭对肥料利用率的影响

土壤的肥力指标能够反映出土壤对作物的养分供给能力和保证作物正常生长的能力, 肥料利用率与作物的营养需求和土壤及肥料能够提供的养分含量密切相关^[5], 土壤中有效养分含量是影响肥料利用率的重要指标。本试验研究表明, 添加生物质炭可以提高土壤中氮、磷、钾的有效态含量, 其变化规律与周桂玉等^[6]、韩召强等^[3]的研究结果基本一致。生物质炭中的养分主要以碳酸盐的形式存在^[7], 其矿质养分含量低, 直接的养分作用是有限的^[8], 在连作土壤中添加生物质炭, 可以大大增加土壤对 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 NH₄⁺ 的吸持能力^[9], 直接降低了土壤养分的淋失, 间接提高了肥料利用率^[10]。添加量比较大的处理组, 随着连作次数的增加, 生物质炭中的碳酸盐养分随着中和土壤中的酸性物质而不断交换释放到土壤中消耗掉, 尤其在连作 4 季后, 生物质炭本身所含养分基本消耗殆尽^[11], 所吸持养分基本来自外源化肥。生物质炭一方面通过改善土壤理化性质影响氮素的循环过程, 另一方面通过其多孔特性和巨大的比表面积吸附固持氮素养分, 进而提高了土壤中有效态氮素含量, 而生物质炭对土壤中酚类化合物的吸收以及提高土壤中氨氧化细菌的丰度也能够促进土壤中的硝化作用, 进而提高土壤中的 NO₃⁻-N 含量^[12-13]。土壤中有效磷含量的增加是因为生物质炭通过降低对磷的吸附增强了磷的有效性^[14], 较高 pH 和 CEC 的生物质炭可以减少铁和铝的交换量进而增加磷

的活性^[15]。而土壤中有有效性钾含量升高的原因是生物质炭通过与土壤中的铝离子和氢离子交换, 间接提高了土壤有效钾含量^[16]。因此, 向连作土壤中添加生物质炭可以提高土壤中的有效性氮磷钾含量, 从而提高黄瓜对有效养分的吸收量, 增大其肥料利用率。

3.2 生物质炭对土壤质量的改良机制

生物质炭具有丰富的孔隙结构和巨大的比表面积, 添加到土壤中可以降低土壤容重, 提高土壤孔隙度, 它为黄瓜根系的生长提供了一个广阔的生长空间^[17], 其多孔的结构特性, 也有利于土壤储存水分^[18], 以备作物生育期吸收利用; 生物质炭加深了土壤颜色, 可以吸收更多的热量, 从而提高土壤温度^[19], 更有利于土壤微生物及植物根系的生长; 连作土壤呈酸性或微酸性, 导致土壤养分严重淋失, 而高温裂解的生物质炭具有更少的酸性挥发物及更多的灰分, 因此它提高了土壤 pH, 这些为作物的增产提供了良好的土壤环境。随着生物质炭在土壤中作用时间延长, 生物质炭被氧化产生羧基等官能团, 使土壤阳离子交换量增大, 生物质炭也可以产生正负电荷, 可以吸持土壤中以及化肥中的有效养分, 延缓肥料养分在土壤中释放和降低淋洗损失, 从而提高土壤保肥能力和缓冲性能, 为植株提供持续稳定的养分。以上生物质炭的种种优势改善了连作土壤的理化性质, 而导致黄瓜减产的直接原因是土壤生物病原菌和植物寄生性线虫^[20]。随着连作年限增加, 生物质炭长期在土壤中易被氧化成腐殖质, 其优越的孔隙结构和比表面积, 可以使各种反应酶与反应底物结合, 加速酶促反应的发生^[21]; 丰富的孔隙结构也为土壤微生物提供了可栖息生活的微环境, 生物质炭中含有一些低分子易分解的有机化合物, 是微生物易分解碳源, 有利于提高土壤微生物生物量和活性^[22]。有研究表明, 向微酸性土壤中添加生物质炭, 能明显改良土壤根际微生物群落结构, 提高土壤根际细菌和真菌的丰度, 维持土壤根际微生态平衡, 使根际微生态环境更有利于根系生长。

3.3 生物质炭与减量施肥对黄瓜产量的影响

Tan 等^[23]和张功臣^[24]等的研究显示向连作土壤中添加生物质炭可以提高作物产量及品质。本试验研究表明, 生物质炭与化肥配施, 与单施化肥或单施生物质炭处理相比, 黄瓜产量、肥料利用率、农学效率、偏生产力和表观回收率均有不同程度的提高, 且在相同水平的施肥处理中随着生物质炭量的增加, 连作黄瓜的产量、肥料利用率、农学效率、偏生产力和表观回收率均随之提高; 当化肥施用量比传统施肥量减少

10% 或 20% 时, 添加生物质炭量超过 10 t/hm^2 的炭-肥配施处理, 如: C2、C3、C4 和 C5 组的黄瓜产量并未出现减产现象, 且所施养分的肥料利用率、农学效率、偏生产力及表观回收率均有不同程度的提高。由相关分析可知, 黄瓜产量与肥料利用率、农学效率、偏生产力、表观回收率及生物质炭添加量呈极显著正相关关系。由此可以得出, 生物质炭通过改善土壤中有效养分状况, 提高所施养分的肥料利用率和表观回收率, 提高了所施养分的农学效率和偏生产力, 从而使黄瓜增产。以上结果可能的原因为: ①生物质炭具有极大的比表面积和孔隙度^[25-26]以及表面高密度的负电荷, 可以容纳并固定土壤中大量的无机离子及有机化合物^[27-28], 因此具有良好的缓释作用^[29-30], 土壤中摄入的有效养分在生物质炭中被大量保留, 避免了有效养分的淋溶流失或挥发损失, 为植物的生长提供了稳定长效的养分源; ②生物质炭提高了如固氮菌^[31]、硝化细菌等的根际微生物活性, 向土壤中不断提供养分, 补充了土壤中的消耗, 增加了土壤中养分含量; ③当地传统的施肥量过高, 导致土壤中积累了各种化学盐分, 造成土壤养分失调, 理化性质变差, 土壤性状恶化^[32], 而减少施肥量, 降低了土壤对盐基离子的摄入量, 从而减缓了土壤连作障碍; ④过量的化肥施用, 使养分吸收量与施肥量之比降低从而使肥料利用率过低, 反之化肥减施后对黄瓜的肥料利用率有促进作用。由此可见, 向连作土壤中添加生物质炭可以通过改善土壤理化性质和根际生态环境来提高作物的养分吸收从而达到减施化肥和增产的目的。

4 结论

1) 与单施生物质炭或化肥处理相比, 生物质炭与化肥配施, 可以显著提高连作黄瓜的产量、肥料利用率、农学效率、偏生产力及表观回收率。生物质炭与化肥配施可以明显提高连作土壤养分含量。

2) 在同水平施肥条件下, 添加生物质炭, 可以提高黄瓜产量、肥料利用率、农学效率、偏生产力及表观回收率。

3) 生物质炭添加量为 $10 \sim 40 \text{ t/hm}^2$ 时, 减施化肥 10%~20%, 不会引起黄瓜减产, 且对连作黄瓜的肥料利用率、农学效率、偏生产力及表观回收率起到促进作用。

4) 减施化肥 10% 与 40 t/hm^2 生物质炭、减施化肥 20% 与 $30 \sim 40 \text{ t/hm}^2$ 生物质炭的化肥与生物质炭配比对黄瓜产量及肥料利用率等方面具有最高的综合效率, 是比较高效的施肥模式。

5) 通过生物质炭对连作土壤养分的平衡作用, 弥补了化肥施用过或施用不足导致的对作物的消极影响, 从而促进黄瓜的生长, 提高了产量。

参考文献:

- [1] 周新刚. 连作黄瓜土壤生态环境特征及对黄瓜生长的影响[D]. 沈阳: 东北农业大学, 2011.
- [2] 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析防治措施[J]. 东北农业大学学报, 2000, 31(3): 241-247.
- [3] 韩召强, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 272-278.
- [4] 孔丝纺, 姚兴成, 张江勇, 等. 生物质炭的特性及其应用的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 716-723.
- [5] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [6] 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.
- [7] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 2011, 43(6): 857-861.
- [8] Yuan J H, Xu R K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China[J]. Soil Research, 2012, 50(7): 570-578.
- [9] Jones D L, Edwards-Jones G, Murphy D V. Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(4): 804-813.
- [10] Steiner C, Glaser B, Geredes Teixeira W, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(6): 893-899.
- [11] 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 and Soil, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [12] DeLuca T H, MacKenzie M D, Gundale M J, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 448-453.
- [13] Ball P N, MacKenzie M D, DeLuca T H, et al. Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1243-1253.
- [14] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2014, 42(5): 626-634.
- [15] Deluca T H, Gundale M J, MacKenzie M D, et al. Biochar effects on soil nutrient transformations//Lehmann J, Joseph

- S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. London: Earthscan Publications Ltd., 2009: 251–270.
- [16] Topoliantz S, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(1): 15–21.
- [17] 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.
- [18] Kurosaki F, Koyanaka H, Hata T, et al. Macroporous carbon prepared by flash heating of sawdust[J]. *Carbon*, 2007, 45(3): 671–673.
- [19] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(4): 591–596.
- [20] 曹海锋, 刘奇志, 谢文闻, 等. 小杆线虫(*Rhabditis* sp.)对温室黄瓜根际植物寄生线虫的抑制作用[J]. *植物病理学报*, 2007, 37(2): 210–210.
- [21] 熊佰炼, 谭必勇. 生物炭还田利用对土壤酶活性影响研究现状[J]. *遵义师范学院学报*, 2017, 19(3): 106–110.
- [22] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1301–1310.
- [23] Tan Z X, Lin C S K, Ji X Y, et al. Returning biochar to fields: A review[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 116: 1–11.
- [24] 张功臣, 陈建美, 赵征宇, 等. 生物质炭对设施连作土壤性质及黄瓜生长和产量的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(3): 659–666.
- [25] 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.
- [26] 徐楠楠, 林大松, 徐应明, 等. 生物炭在土壤改良和重金属污染治理中的应用[J]. *农业环境与发展*, 2013, 30(4): 29–34.
- [27] 陈旭超, 胡志彪, 陈杰斌, 等. 竹炭对铜(II)离子的吸附性能研究[J]. *龙岩学院学报*, 2007, 25(6): 78–80.
- [28] Cornelissen G, Gustafsson Ö, Bucheli T D, et al. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(18): 6881–6895.
- [29] Chan K Y, Xu Z. Biochar: Nutrient properties and their enhancement//Lehmann J, Joseph S, eds. *Biochar for environmental management science and technology*[C]. London: Earthscan, 2009: 67–84.
- [30] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [31] Noyce G L, Basiliko N, Fulthorpe R, et al. Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(6): 649–659.
- [32] 李成, 冯浩, 罗帅, 等. 垄膜沟灌对旱区农田土壤盐分及硝态氮运移特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 268–275.