

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2019. 02. 019

生物炭对元谋燥红壤土壤肥力与番茄生长的影响^{*}

李新宇¹, 孟康¹, 李小英^{1,2}, 沈红芸¹, 张斌艳¹

(1. 西南林业大学生态与水保学院, 云南 昆明 650224; 2. 云南省高校土壤侵蚀与控制重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要: 采用室内盆栽试验, 分别在燥红壤中掺入稻壳 (DK)、烟秆 (YG)、橡胶木 (XJ) 3 种不同的生物炭, 每种生物炭共设置 5 个处理梯度 (按炭土比 1%、3%、5%、7%、10% 添加), 外加无生物炭添加的对照 CK 共 16 个处理, 研究生物炭对燥红壤土壤肥力与番茄生长的影响。结果表明, 稻壳炭 10% 处理土壤全磷较 CK 提升 207.15%; 烟秆生物炭 10% 处理对土壤全氮和速效钾较 CK 分别提升 337.54% 与 360.56%; 橡胶木生物炭 10% 处理对土壤有机质和速效磷较 CK 处理分别提升 247.98% 与 394.36%。3 种供试生物炭 15 种处理对土壤过氧化氢酶活性较 CK 处理下降 24.89%–136.58%; 土壤脲酶较 CK 处理除 XJ1、XJ3 与 XJ7 提升 54.83%、3.22% 和 38.71% 以外, 其余各处理均比 CK 处理较低; 土壤蔗糖酶活性较 CK 处理除 YG10 处理提高 8.77% 外, 其余处理均低于 CK 处理水平。15 种处理中橡胶木炭 1% 处理下的番茄植株生物量、根系体积、产量都达到最高, 较 CK 相比分别提高 120.00%、202.49% 和 368.62%。可得结论, 生物炭的添加能够显著提高元谋燥红壤的土壤肥力, 增加番茄产量, 可以作为土壤改良剂在元谋地区应用。

关键词: 稻壳炭; 烟秆生物炭; 橡胶木生物炭; 燥红壤; 土壤肥力; 番茄

中图分类号: S 641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2019) 02-0114-07

Effects of Biochar on Soil Fertility and Tomato Growth in Yuanmou Dry Red Soil

LI Xin-yu¹, MENG Kang¹, LI Xiao-ying^{1,2}, SHEN Hong-yun¹, ZHANG Bin-yan¹

(1. College of Ecology & Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224, P. R. China;

2. Key Lab of Soil Erosion and Control in Yunnan Universities, Kunming Yunnan 650224, P. R. China)

Abstract: Using indoor potted experiment method, put rice husk biochar (DK), tobacco stalk biochar (YG), rubber wood biochar (XJ) into red dry soil, each biochar were set up five processing gradient (by carbon soil ratio 1%, 3%, 5%, 7%, 10%) besides non-biochar added treatment CK, 16 treatment in total, to study the biochar effects on tomato growth and fertility of dry red soil. The results showed that soil total phosphorus treated with 10% rice husk carbon increased by 207.15% compared with CK. Soil total nitrogen and available potassium increased by 337.54% and 360.56% respectively after 10% treatment with tobacco stalk biochar compared with CK, 10% treatment with rubber wood biochar increased soil organic matter and available phosphorus by 247.98% and 394.36%, respectively. Compared with CK, the activity of soil catalase decreased by 24.89% to 136.58% in all 15 treatment. Compared with CK, soil urease increased by 54.83%, 3.22% and 38.71% only in XJ1, XJ3 and XJ7. Soil sucrose activity was 8.77% higher than that of CK treatment only in YG10 treatment, all other treatments did not reached the CK treatment level. Among all 15 treatments, the biomass, root volume and yield of tomato plants were the highest under 1% rubber wood biochar treatment, which were 120.00%, 202.49% and

^{*} 收稿日期: 2018-10-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505102), 云南省高校土壤侵蚀与控制重点实验室 (云教科 (2016) 37 号) 资助。

第一作者简介: 李新宇 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事环境生态与水土保持研究。E-mail: 1404755523@qq.com

通讯作者简介: 李小英 (1967-), 女, 副教授, 博士, 主要从事环境生态与水土保持研究。E-mail: lxying@126.com

368.62% higher than CK.

Key words: rice husk biochar; tobacco stalk biochar; rubber wood biochar; dry red soil; soil fertility; tomato

元谋县位于滇中高原北部金沙江干热河谷地带,境内自然资源丰富,冬春气候温暖,具有发展冬春季节露地蔬菜和冬繁作物种子、热带和亚热带水果的良好环境条件^[1]。其中番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 富含各种营养物质^[2],作为元谋地区特色农产品之一,自1977年试种以来,凭借独特的气候,番茄成为元谋地区最适宜种植的作物之一。2017年元谋地区番茄种植面积达4 866.67hm²。为了追求更高的经济效益以及更高的产量,菜地的化肥施用量是普通大田作物的数倍^[3],长期过多的化肥施用不仅不能保证肥料的利用率,还会对生态环境造成危害^[4]。开展减量施肥对番茄产量的影响研究,可以为金沙江干热河谷地区生态综合治理以及生态产业发展提供技术依据。

生物炭 (biochar) 是农林废弃物等生物有机材料在缺氧或低温条件下缓慢高温裂解获得的富含碳的有机质^[5]。国际生物炭协会 (International Biochar Initiative, IBI) 定义为“生物质在限氧环境中热化学转化产生的固体物质”^[6]。由于具有丰富的芳香结构、羧基团;且在热解的过程中生物质表面会形成丰富的孔隙,使其具有容重小、比表面积大、多孔等特性,生物炭在施入土壤后会对土壤性状产生影响。近年来,生物炭作为一种土壤改良剂频繁出现在国内国际各领域的研究报道中,大量相关研究表明,生物炭的添加可以增加土壤有机

碳含量、阳离子交换量^[7],提高土壤微生物量及活性,促进土壤稳定性团聚体形成^[8]。由于生物炭原材料来源广泛,制备工艺繁多,不同材料不同工艺所制备的生物炭特性不尽相同。有研究发现,生物炭对作物生长或产量的影响与生物炭的种类有关,例如含高挥发性物质的生物炭大多会抑制作物生长^[9];其次,在相同环境下,同种生物炭对不同作物效果不一^[10];还有研究认为,生物炭对作物生长或产量的影响与土壤类型有关^[11-13]。

由于在元谋地区尚未有生物炭使用的先例,且从未开展过相关领域的研究。因此,本研究以盆栽番茄为研究对象,通过施用不同比例的生物炭,分析不同种类的生物炭对元谋燥红壤土壤性状以及番茄生长发育和产量的影响,探索该地区适用的生物炭以及相应的施用量,为后续的田间试验提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在云南磷化集团科工贸有限公司日光温室内进行,采用盆栽试验。供试土样为燥红壤,土样采自云南省元谋县土林坝区,土样采回后对供试土样进行背景值分析。土样基本性质见表1。

表1 供试土样基本性质

Tab. 1 Basic properties of experimental soil

分类	全钾 /g · kg ⁻¹	全氮 /g · kg ⁻¹	全磷 /g · kg ⁻¹	有机质 /g · kg ⁻¹	pH 值	速效磷 /g · kg ⁻¹	容重 /g · cm ³	孔隙度 /%
燥红壤	30.04	0.51	0.18	7.43	8.77	3.32	1.51	43.15

表2 生物炭基本元素含量

Tab. 2 Basic element content of biochar

生物炭名称	C 质量分数 /%	N 质量分数 /%	H 质量分数 /%
稻壳生物炭	27.00	1.26	1.00
烟秆生物炭	2.88	90.81	3.72
橡胶木生物炭	61.42	1.10	1.80

试验用肥料为九禾尚品生产的商品复合肥,成分为 N : P₂O₅ : K₂O = 15 : 15 : 15; Total Nutrient ≥ 45%。供试作物为番茄 (美国大红 988)。

1.2 试验设计

试验采用3种生物炭分别为稻壳生物炭 (DK)、烟秆生物炭 (YG) 和橡胶木生物炭 (XJ)。生物炭用量共设置炭土质量百分比1%、3%、5%、7%、10%共5个水平,加上1个空白对照CK (不添加生物炭),共计16个处理,分别

试验用生物炭为稻壳生物炭、烟秆生物炭以及橡胶木生物炭。生物炭基本元素含量见表2。

是 DK1、DK3、DK5、DK7、DK10、YG1、YG3、YG5、YG7、YG10、XJ1、XJ3、XJ5、XJ7、XJ10、CK，每个处理重复 8 次。试验用花盆直径 25cm，高 30cm，每盆装土 3kg。番茄苗移栽前生物炭与燥红壤全部过 2mm 筛，按设定比例添加生物炭，充分混匀后装入花盆，定植时间为 2018 年 6 月 28 日，选择长势一致的番茄苗移栽，每盆 1 穴 1 株，施肥量统一为有机肥 1g/10d，9 月 18 日试验结束。

1.3 测定项目与方法

果实于 2018 年 9 月 18 日盆栽种植完成时全部采收进行产量测算；选取每种处理中长势平均的 3 株测试番茄对其土壤性状及植株生长状况进行分析。

土壤基本性状测定方法^[14] 土壤有机炭采用重铬酸钾-硫酸外加热法；土壤全氮采用凯氏定氮法；土壤全磷采用硫酸-高氯酸消煮法；土壤全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法；土壤速效磷采用盐酸-氟化铵浸提法；土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法；土壤过氧化氢酶活性采用高锰

酸钾滴定法；土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法；土壤蔗糖酶活性采用 3-5 二硝基水杨酸比色法。

植株生长状况测定 株高采用测量法；生物量及产量采用称量法；根系体积采用排液法；植株样本处理采用硫酸过氧化氢消煮法^[15]；植物全氮采用凯氏定氮法；植物全磷采用钼蓝比色法；植物全钾采用火焰光度计法。

试验数据采用 WPS 2019，SPSS 22 (IBM SPSS Statistic) 统计软件进行方差分析和多重比较 (LSD 法)，显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同生物炭添加对土壤养分的影响

由表 3 可知，与对照 CK 相比，生物炭的添加对燥红壤中有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾均有影响，总体而言影响的大小随生物炭添加量增加而增大。

表 3 不同生物炭与有机肥配施对土壤养分的影响

Tab. 3 Nutrient of soil under different biochar treatment

处理	有机碳 /g · kg ⁻¹	全氮 /g · kg ⁻¹	全磷 /g · kg ⁻¹	全钾 /g · kg ⁻¹	速效磷 /g · kg ⁻¹	速效钾 /g · kg ⁻¹
DK1	24.40±1.13 hi	0.82±0.07 g	0.10±0.01 g	12.61±0.40 g	0.42±0.05 e	5.39±0.08 k
DK3	43.11±1.86 e	1.10±0.15f	0.16±0.01 f	12.51±0.34 g	0.66±0.06 de	11.57±0.10e
DK5	29.08±0.89 g	1.14±0.05 f	0.31±0.00 c	22.17±0.27 c	1.50±0.06 b	9.16±0.10 h
Dk7	51.81±1.00 b	1.65±0.05 d	0.36±0.01b	22.18±0.57 c	1.02±0.05 cd	14.26±0.10 c
DK10	43.74±1.68 d	1.43±0.08 e	0.43±0.01 a	17.71±0.46 d	0.68±0.06 de	14.57±0.36 c
YG1	17.99±0.98 jk	1.20±0.13 ef	0.15±0.01 fg	28.18±0.50 a	0.25±0.06 e	6.47±0.19 j
YG3	27.80±1.50 gh	1.74±0.05 d	0.13±0.01 g	25.15±0.42 b	0.55±0.06 de	13.05±0.12 d
YG5	16.98±1.04 jk	2.15±0.11 b	0.23±0.00 d	17.33±0.46 de	0.34±0.04 e	6.84±0.08 j
YG7	38.11±1.48 f	1.84±0.08 c	0.19±0.01 e	17.64±0.42 d	1.51±0.52a	19.93±0.51 a
YG10	44.72±0.71 e	3.50±0.12 a	0.19±0.00 e	16.32±0.44 e	1.16±0.06 c	20.31±0.13 a
XJ1	22.65±0.74 i	0.77±0.08 g	0.09±0.02 h	12.74±0.49 g	0.85±0.06 cd	4.84±0.13 l
XJ3	24.04±0.78 hi	0.80±0.05 g	0.10±0.01 h	13.49±0.55 fg	0.78±0.05 d	7.71±0.11 i
XJ5	25.67±0.78 h	0.74±0.04 g	0.13±0.01 fg	14.35±0.45 f	0.87±0.06 cd	11.11±0.09 f
XJ7	47.31±0.67 c	1.94±0.05 c	0.21±0.02 de	12.82±0.55 g	0.78±0.06 d	16.67±0.16 b
XJ10	57.60±0.92 a	1.38±0.10 e	0.19±0.00 e	9.77±0.37 h	1.73±0.06 b	9.63±0.09 g
CK	16.60±0.14 k	0.80±0.05 g	0.14±0.01 fg	21.95±0.55 c	0.35±0.05 e	4.41±0.14 l

注：数值后不同字母表示处理间差异显著， $P < 0.05$ ，下同。

其中有机碳的影响最大，各处理与 CK 对比均有增加且出现显著性差异，其中以 XJ10 处理最高，提高了 247.98%，其余各处理提高 36.43% - 212.12%。

全氮以 YG10 处理最高，提升 337.54%，其余各处理分别提升 37.51% - 168.87%，而 DK1、XJ1、XJ3、Xj5 与 CK 处理之间没有显著性差异。

全磷以 DK10 处理最高，提升量为 207.15%，

其余处理中,除 XJ1、XJ3 与 CK 处理相比较少,DK1、DK3、YG1、YG3、XJ5 与 CK 处理相比均没有显著性差异。

全钾除 YG1、YG3 较 CK 有所提高,分别提高 29.23% 和 14.69%,其余各处理均未出现显著性提高或与 CK 相比较差。

速效磷以 XJ10 处理效果最优,提升量达 394.36%,其余处理中除 DK1、DK3、DK10、YG3、YG5 与 CK 没有显著性差异外,各处理都有所提升,提升幅度 112.82%–328.56%。

速效钾以 YG10 处理最好,提高 360.56%,其余处理除 XJ1 外均与处理有显著性差异,提升量在 22.22%–351.96% 之间。

2.2 不同生物炭添加对土壤酶活性的影响

由表 4 可知,过氧化氢酶活性范围为 2.91–1.23mg/g,对照 CK 最高且与其它处理均有显著性差异,说明生物炭的添加在燥红壤条件下显著降低了土壤中过氧化氢酶活性,降低幅度为 24.89%–136.58%,下降值随生物炭添加量的增加而减少。

脲酶活性中除 XJ1、XJ3 与 XJ7 较 CK 处理分别提升 54.83%、3.22% 和 38.71% 以外,其余各处理均比 CK 较低。其中又以稻壳生物炭 (DK) 处理下的脲酶活性最低,较 CK 低 675.00%–933.33%。

蔗糖酶活性表现为 YG10 处理最高,较 CK 提

高 8.77%。其余处理中,稻壳生物炭 (DK) 各梯度处理下的蔗糖酶活性较低,相比 CK 低 25.85%–214.17%,下降趋势随生物炭添加量的增加而降低。而橡胶木生物炭 (XJ) 处理下的蔗糖酶活性随生物炭添加量的增加而增加。

表 4 不同生物炭对土壤酶活性的影响

Tab. 4 Soil enzyme activities under different biochar treatment

处理	过氧化氢酶 /mg·g ⁻¹	脲酶 /mg·g ⁻¹	蔗糖酶 /mg·g ⁻¹
DK1	1.32±0.22 f	0.04±0.01 m	37.87±1.79 cd
DK3	1.23±0.05 g	0.04±0.01 l	37.52±1.47 cd
DK5	1.33±0.05 f	0.04±0.01 k	34.90±1.63 d
DK7	1.96±0.06 c	0.03±0.01 n	22.34±1.66 f
DK10	1.23±0.06 g	0.04±0.01 kl	15.17±1.29 g
YG1	1.56±0.06 e	0.07±0.02 j	48.10±1.86 b
YG3	1.98±0.06 c	0.09±0.02 h	39.13±1.81 c
YG5	1.65±0.06 de	0.18±0.02 e	46.71±1.60 b
YG7	1.75±0.05 d	0.14±0.02 f	46.85±2.36 b
YG10	1.74±0.07 d	0.11±0.02 g	51.84±1.52 a
XJ1	1.38±0.06 f	0.48±0.03 a	46.44±1.65 b
XJ3	1.68±0.05 de	0.32±0.03 c	20.03±0.85 f
XJ5	1.51±0.05 e	0.07±0.01 j	29.59±1.39 e
XJ7	1.75±0.04 d	0.43±0.02 b	48.68±1.21 b
XJ10	2.32±0.05 b	0.09±0.01 i	45.62±1.94 b
CK	2.91±0.05 a	0.31±0.01 d	47.66±2.23 b

2.3 不同生物炭对番茄生长的影响

不同生物炭对番茄生长的影响见表 5。

表 5 不同生物炭对番茄生长的影响

Tab. 5 Growth state of tomato under different biochar treatment

处理	株高 /cm	生物量 /kg	根系体积 /cm ³	植株全氮 /g·kg ⁻¹	植株全磷 /g·kg ⁻¹	植株全钾 /g·kg ⁻¹
DK1	86.46±2.45 b	0.51±0.03 c	22.29±0.82 cd	7.49±0.05 h	1.44±0.02 d	16.82±0.15 h
DK3	93.02±3.83 ab	0.32±0.03 de	22.49±0.40 cd	5.93±0.04 j	1.75±0.02 a	27.69±0.49 d
DK5	83.78±3.46 b	0.61±0.03 c	17.73±0.45 f	7.74±0.03 g	1.35±0.01 e	28.52±0.37 cd
DK7	85.97±3.41 b	0.39±0.03 d	21.49±0.38 d	9.54±0.04 d	1.52±0.02 c	22.36±0.26 f
DK10	89.53±4.06 b	0.77±0.06 b	18.49±0.39 ef	9.89±0.03 c	1.60±0.01 b	24.55±1.31 e
YG1	92.16±3.77 ab	0.23±0.02 e	16.19±0.53 f	5.89±0.04 j	1.06±0.01 g	21.15±0.09 g
YG3	98.61±6.32 ab	0.58±0.05 c	23.81±0.71 c	6.97±0.03 i	1.13±0.01 f	22.75±0.14 f
YG5	90.86±2.64 ab	0.71±0.07 bc	19.25±0.49 ef	9.30±0.02 e	0.81±0.02 h	21.46±0.12 g
YG7	84.75±3.49 b	0.67±0.03 bc	30.03±1.30 b	7.73±0.05 g	0.80±0.03 h	28.80±0.10 c
YG10	90.99±4.01 ab	0.26±0.04 e	18.68±0.42 ef	7.75±0.04 g	0.84±0.02 h	22.95±0.53 f
XJ1	94.43±3.86 ab	1.10±0.10 a	35.21±1.53 a	8.68±0.04 f	0.82±0.02 h	22.63±0.12 f
XJ3	84.92±3.23 b	0.37±0.04 d	13.61±0.56 g	5.15±0.04 k	0.74±0.01 j	15.51±0.09 i
XJ5	97.41±4.29 ab	0.23±0.04 e	19.67±0.53 e	2.32±0.03 l	0.70±0.01 k	31.87±0.16 b
XJ7	85.19±2.42 b	0.76±0.04 b	20.00±0.88 de	10.26±0.02 b	0.84±0.02 h	28.48±0.10 cd
XJ10	99.62±4.27 a	0.33±0.05 de	21.25±0.80 de	7.82±0.05 g	0.80±0.02 h	25.15±0.08 e
CK	92.46±3.33 ab	0.50±0.05 c	11.64±0.58 h	10.77±0.04 a	0.75±0.01 i	33.18±0.07 a

注：鲜重为去除果实植株称量结果。

分析表 5 可知,在燥红壤条件下生物炭的添加

对番茄植株的株高并没有明显的效果,各处理之间

较 CK 没有显著性差异；在生物量和根系体积上表现为 XJ1 处理最高，较 CK 分别提高 120.00% 和 202.49%；植株全氮和全钾均为 CK 表现最优，植物全氮中其余各处理较 CK 下降 4.97%–364.22%，植物全钾中其余各处理较 CK 下降 4.11%–97.26%；植物全磷中 DK3 处理最高，较 CK 高 133.33%，其余各处理较 CK 均有提升且有显著性差异，提升量在 6.67%–113.33% 之间。3 种生物炭中稻壳生物炭（DK）对植株全磷的提升效果要优于其余 2 种生物炭且有显著性差异。在相同添加量下稻壳生物炭（DK）对比烟秆生物炭（YG）植

株全磷提升 35.84%–90.85%，对比橡胶木生物炭（XJ）提升 75.98%–137.30%。

在产量方面（图 1），生物炭的添加对番茄的产量有显著影响，与 CK 处理相比，各处理有所增加且有显著性差异；对番茄产量提升最大的是 XJ1 处理，较 CK 处理提升 368.62%，其余各处理对番茄产量的提升量在 25.40%–289.71% 之间；3 种生物炭中，橡胶和烟秆生物炭对番茄产量的影响随生物炭添加量的增加呈上升趋势，而稻壳生物炭（DK）产量随生物炭添加量的增加呈下降趋势。

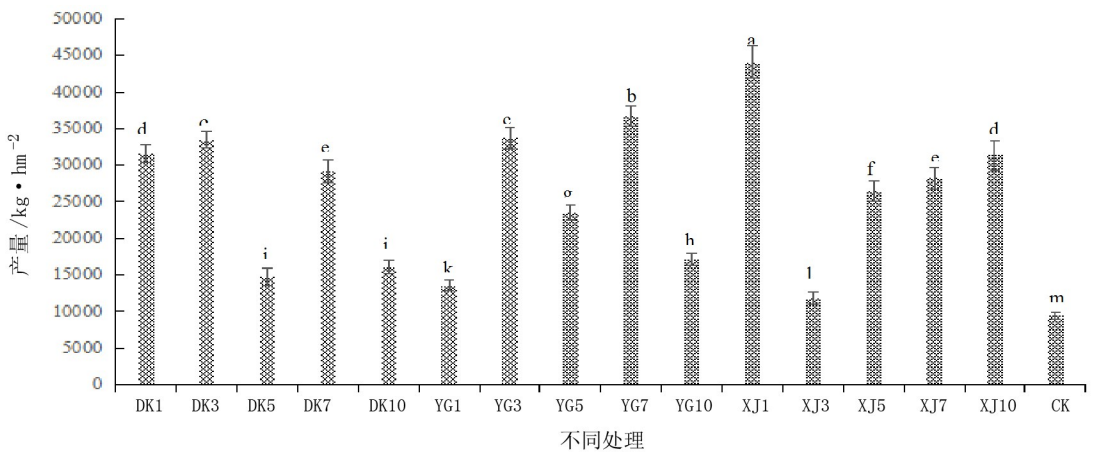


图 1 生物炭对番茄产量的影响

注：柱上不同字母表示处理间差异显著水平， $P < 0.05$

Fig. 1 The effects of biochar on tomato yield

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 通过盆栽试验发现，生物炭的添加能显著提升元谋坝区燥红壤的有机质、全氮、全磷的含量，同时也提高了燥红壤速效磷、速效钾的含量，养分的提升随生物炭添加量的增加而增加。稻壳生物炭 DK10 处理对土壤中全磷的提升效果最好，较 CK 提升 207.15%；烟秆生物炭 YG10 处理对土壤全氮和速效钾的提升效果最好，较 CK 分别提升 337.54% 与 360.56%；橡胶木生物炭 XJ10 处理对土壤有机质和速效磷的提升效果最好，较 CK 处理分别提升 247.98% 与 394.36%。

(2) 生物炭的添加对元谋坝区燥红壤的土壤酶活性没有显著影响，部分处理表现抑制效果。3 种供试生物炭 15 种处理对土壤过氧化氢酶活性较

CK 处理下降 24.89%–136.58%；土壤脲酶较 CK 处理除 XJ1、XJ3 与 XJ7 提升 54.83%、3.22% 和 38.71% 以外，其余各处理均比 CK 处理低；土壤蔗糖酶活性较 CK 处理除 YG10 处理提高 8.77% 外，其余处理均低于 CK 处理水平。

(3) 生物炭的添加能显著提高番茄植株的生物量、根系体积、植株全磷含量，同时生物炭的添加能提高番茄的产量。15 种处理中橡胶木炭 XJ1 处理下的番茄植株生物量、根系体积、产量都达到最高，较 CK 相比分别提高 120.00%、202.49% 和 368.62%，且与其余各处理有显著性差异。

3.2 讨论

(1) 不同生物炭添加对土壤养分的影响 土壤养分的吸收转化是一个复杂的过程，不仅与土壤养分含量和土壤不同养分之间的相互作用紧密相关，还与作物的生理特征有相关性。目前评价土壤肥力主要的养分指标有有机碳、土壤氮磷钾、土壤

速效氮磷钾等^[16-18]。本研究表明，在燥红壤条件下，生物炭的添加有助于提升燥红壤的有机碳、全氮、全磷的含量，同时还提高了速效磷、速效钾的含量。本试验中有机碳的增加原因是生物炭是一种富含有机碳的物质，施入土壤能够提高土壤的有机碳含量^[19]。由于生物炭对 NO_3^- 和 NH_4^+ 有较强的吸附能力，因此生物炭在施入土壤后对土壤氮素有一定的持留作用^[20]，这可能是本试验中土壤全氮提升的原因。由于生物炭是低温热解的产物，而制炭原材料中的磷需要到约 700°C 时才会挥发，因此生物炭本身含磷较高，同时，在热解过程之中，有机磷化学键断裂，生物炭中的可溶性磷酸盐浓度增加^[21]，因此生物炭添加到土壤中能够提高土壤中全磷与速效磷含量。本研究表明在燥红壤条件下，生物炭的添加对土壤速效钾影响较大，影响大小随生物炭添加量的增加呈上升趋势，原因其一可能是生物炭本身含有大量钾元素，其二可能是生物炭增强了土壤对游离态 K^+ 的吸附能力^[16]。

(2) 不同生物炭添加对土壤酶活性的影响

影响土壤酶活性的因素非常复杂。相关研究表明生物炭的添加能够提升土壤中脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶的酶活性^[22]。本试验中所选用的3种生物炭的土壤过氧化氢酶活性随生物炭添加量的增加呈上升趋势，但总体与CK相比较低；脲酶活性除XJ1、XJ3、XJ7较CK处理提升54.83%、3.22%和38.71%以外，其余处理较CK低；蔗糖酶除YG10处理较CK高8.77%外，其余处理与CK比较较低或未有显著性差异。造成以上结果的原因一方面可能是培养时间过短，生物炭的添加对土壤酶活性会先表现为抑制效果，这种效果会随时间推移逐渐消失^[23]；另一方面的原因可能是不同生物炭在不同土种上的表现不一，冯爱青等^[24]通过秸秆生物炭在棕壤酶活性的研究表明，秸秆生物炭与控释肥配施对棕壤玉米过氧化氢酶活性无显著性影响。

(3) 不同生物炭对番茄生长和产量的影响

生物炭具有良好的物理化学性质和养分调控作用，因此添加土壤后可以显著提高作物的生产力，其增产作用与生物炭的添加量、作物种类、土地类型有关^[25]。龚丝雨等^[26]的研究表明，增施生物炭可以显著提高烤烟生长旺期的生物量。勾茫茫等^[27]的研究表明，土壤中添加生物炭可以显著增加番茄植株的茎粗和根系生长，其中根系特征与番茄产量相关性最高。Asai等^[28]研究表明，生物炭与肥料配合施用能明显改善植物对N、P、K化学肥料的反

应。本研究中，生物炭的添加对番茄株高没有显著性影响，各处理之间没有显著性差异；对番茄植株的N、P、K含量而言，稻壳生物炭(DK)对植株全磷含量影响较大，各梯度处理全磷含量较CK提升80.83%–135.64%；而植株的全氮与全钾中各个处理均未达到CK处理水平；生物炭的添加对番茄植株的生物量与根系体积影响较大，在生物量和根系体积上表现为XJ1处理最高，较CK处理分别提高120.00%和202.49%；同时在产量上也表现为XJ1处理最优，较CK处理提高368.62%；其余处理也增产25.40%–289.71%，这与前人的研究结果一致。

综上所述，在元谋燥红壤条件下，生物炭的添加可以提高土壤养分，促进番茄生长，可以作为土壤改良剂应用在元谋地区。但不同生物炭对燥红壤土壤养分的提升效果不同，因此在后续的试验中可以考虑将不同种类的生物炭按一定比例混合施用观察效果。

参考文献：

- [1]王寿芹.元谋县绿色蔬菜产业发展现状和对策[A].中国基层农业推广体系改革与建设[C].2011.
- [2]袁宇霞,张富仓,张燕,等.滴灌施肥灌水下限和施肥量对温室番茄生长、产量和生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):76–83.
- [3]岳学文,潘志坚,李建查,等.有机肥添加对反季节番茄低声生物量分配的影响[J].热带农业科学,2017,37(7):6–9.
- [4]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):1569–1573.
- [5]Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. Black carbon in soils; the use of benzenecarboxylic acids as specific markers[J]. Org Geo Chem, 1998, 29(4): 811–819.
- [6]IBI. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil[S]. New York: International Biochar Initiative, 2012.
- [7]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(1): 178–181.
- [8]Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilization of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 577–585.
- [9]Zakaria M, Solaiman, Daniel V, et al. Biochars influ-

ence seed germination and early growth of seedlings [J]. *Plant and Soil*, 2012, 353(1/2): 273-287.

[10] Baronti S, Alberti G, Genesio L, *et al.* The Italian Biochar Initiative: Effects on soil fertility and crops production [C]//2nd International Biochar Conference - IBI. Newcastle: 2008.

[11] Tang G M, Ge C H, Xu W L, *et al.* Effect of applying biochar on the quality of grey desert soil and maize cropping in Xinjiang, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1797-1802.

[12] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, *et al.* Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 205-212.

[13] 李金文, 顾凯, 唐朝生, 等. 生物炭对土体物理化学性状影响的研究进展 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(1): 192-206.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 张山泉, 陈川, 徐沭, 等. 硫酸-过氧化氢消化法测定植株氮磷钾方法的改进 [J]. *土壤*, 2003(2): 174-175.

[16] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-轮作对水稻产量及土壤肥力的影响 [J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 343-349.

[17] 陈路红, 苏凯文, 郑伟, 等. 云南 2 种主要灌丛土壤有机碳分布特征及其影响因子研究 [J]. *西南林业大学学报*, 2017, 37(5): 106-113.

[18] 李甜江, 胡志芳, 戴益源, 等. 配方施肥对凤庆红茶叶幼林林分土壤的影响 [J]. *西部林业科学*, 2018, 47(1): 86-91.

[19] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学*

报, 2017, 23(2): 468-475.

[20] Lehmann J, Da S J P, Steiner C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.

[21] Liu Y X, Tang X, Yang S M, *et al.* Research progress on the effect of biochar on soil phosphorus conversion and its mechanism [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(6): 1690-1695.

[22] Shang J, Geng Z C, Wang Y L, *et al.* Effect of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Enzyme Activity in Tier Soils [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1142-1151.

[23] 周震峰, 王建超, 饶潇潇. 添加生物炭对土壤酶活性的影响 [J]. *江西农业学报*, 2015, 27(6): 110-112.

[24] 冯爱青, 张民, 路艳艳, 等. 控释氮用量及生物炭对玉米产量及土壤生物化学性质的影响 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 159-164.

[25] 刘园, Jamal K M, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 849-858.

[26] 龚丝雨, 钟思荣, 张世川, 等. 增施生物炭对烤烟生长及产量、质量的影响 [J]. *作物杂志*, 2018(2): 154-160.

[27] 勾茫茫, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1438-1352.

[28] Asai H, Samson B K, Stephan H M, *et al.* Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1): 81-84.

(编辑: 李甜江)