

石 吕,薛亚光,韩 笑,等. 不同土壤类型条件下生物炭施用量对水稻产量、品质和土壤理化性状的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(23):222-228.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.23.033

# 不同土壤类型条件下生物炭施用量对水稻产量、品质和土壤理化性状的影响

石 吕,薛亚光,韩 笑,石晓旭,魏亚凤,杨美英,刘 建

(江苏沿江地区农业科学研究所/南通市循环农业重点实验室,江苏如皋 226541)

**摘要:**为探明如皋沙壤土和如东草甸土条件下生物炭施用对水稻产量品质和土壤理化性状的影响,以南粳 5055 为材料,进行了不同生物炭施用量(0、20、40、60、80 t/hm<sup>2</sup>)的盆栽试验。结果表明,施用生物炭可以增加水稻株高、干物质积累和叶片 SPAD 值,提高每盆穗数、结实率和实际产量,减短穗长,减少一次枝梗数和二次枝梗数,不同土壤类型趋势一致。每穗粒数和千粒质量则因土壤类型而异,草甸土条件下呈下降趋势,沙壤土条件下则先升后降。其中产量和施用生物炭之间呈正相关关系,草甸土条件下达显著水平( $r_1=0.918$ )。随着生物炭施用量的增加,糙米率、精米率以及整精米率逐渐上升,垩白粒率、垩白度逐渐下降,稻米蛋白质含量有所增加,胶稠度、直链淀粉含量和碱消值变化多不显著,其中胶稠度随生物炭施用量的增加有变长的趋势。施用生物炭显著降低了土壤的 pH 值,却显著提高了土壤 EC 值、阳离子交换量以及全氮、速效磷、速效钾、有机质的含量。此外,生物炭对沙壤土条件下水稻相关农艺性状、稻米品质、土壤 EC 值和养分含量的调节作用相对草甸土更为显著。

**关键词:**土壤类型;生物炭;产量;品质;土壤理化性状

**中图分类号:**S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)23-0222-06

作为一种新兴土壤改良剂,生物炭具有碳元素稳定、孔隙结构发达和比表面积大等特点,保水性能和吸附能力较强,与土壤充分混合后,可促进微团聚体的形成,有效降低土壤容重,同时能够提高土壤 pH 值、有机质含量和全氮含量,促进土壤矿质态氮的缓慢释放,增加作物对养分的吸收,减少养分淋溶损失,提高氮肥利用率,进而改善土壤结构和水、肥、气、热状况<sup>[1-3]</sup>。前人针对不同类型生物炭及施用量<sup>[4-5]</sup>、不同控水模式与生物炭添加<sup>[6]</sup>、生物炭与无机氮配施<sup>[7]</sup>、移栽密度和生物炭施用<sup>[8]</sup>等对水稻生长、抗倒伏能力、产量、土壤养分含量、稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响开展了系列研究。众多结果表明,施加生物炭能改善植株农艺性状和产量构成因素,增加干物质积累,实现水稻增产,改善水稻茎秆基部性状,增强抗倒伏能力<sup>[4,6,8]</sup>,改善土壤理化性状,增加各养分含量<sup>[4]</sup>,并

显著降低土壤中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量,从而显著降低全球变暖潜能值(GWP),降低温室效应<sup>[5]</sup>,同时减氮 30% 配施生物炭能有效降低稻田 N<sub>2</sub>O 排放,增加水稻产量,提高氮肥利用率<sup>[7]</sup>。

不同地区的气候条件、土壤类型、土壤肥力状况、生物炭的固有属性和适宜施用量在一定程度上存在诸多差异,均会影响生物炭作用于作物产量及生物量的最终效用<sup>[9]</sup>。目前关于生物炭对作物品质影响的研究已有很多,但对稻米品质影响的研究鲜有涉及<sup>[10]</sup>。位于江苏南通如东中西部至如皋中东端有一条东西向的带状区域的水稻土,富含有机质,系由长江冲击形成的 2 万 hm<sup>2</sup> 草甸土,素有“苏北乌克兰”之称,符合无公害稻米产地环境条件<sup>[11]</sup>,该地区所产的如东大米在国内市场具有较高的知名度。本研究通过草甸土和沙壤土 2 种典型土壤类型条件下的盆栽试验,探讨不同生物炭施用量对水稻农艺性状、产量品质和土壤特性的具体影响,旨在为南通地区优质水稻生产过程中生物炭的大面积应用提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

试验于 2019 年 6—10 月在江苏沿江地区农业

收稿日期:2022-02-09

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0300903-02);国家自然科学基金青年科学基金(编号:31601254)。

作者简介:石 吕(1991—),男,江苏泰州人,硕士,助理研究员,主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail:840241001@qq.com。

通信作者:刘 建,硕士,研究员,主要从事耕作栽培学研究。  
E-mail:ntliuj@sina.com。

科学研究所盆栽场实施。试验盆钵规格为口径 29 cm,高度 27 cm。沙壤土取自江苏沿江地区农业科学研究所内试验田,草甸土取自如东县曹埠镇直港村大田,基本理化性质如表 1 所示。试验所用生物炭由江苏省如皋市鑫森新能源科技有限公司提供,其基本性状:pH 值 7.77,有机质含量为 313.49 g/kg,全氮含量为 13.45 g/kg,碱解氮含量为 343.93 mg/kg,全磷含量为 7.53 g/kg,速效磷含量为 1 313.16 mg/kg,全钾含量为 19.64 g/kg,速效钾含量为 13 166.67 mg/kg,阳离子交换量(CEC) 0.33 cmol/kg。

表 1 供试土壤的基本性质

土壤类型	pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
沙壤土	8.49	9.03	0.54	32.20	8.37	36.33
草甸土	7.76	32.25	1.92	159.13	13.18	133.33

1.2 试验设计

试验设土壤类型与生物炭施用量 2 个因素。土壤类型设沙壤土、草甸土 2 种。生物炭施用量设 0、20、40、60、80 t/hm<sup>2</sup> 5 个水平,分别记为 C<sub>0</sub>、C<sub>20</sub>、C<sub>40</sub>、C<sub>60</sub>、C<sub>80</sub>。随机区组设计,3 次重复,各重复准备 10 盆。试验用土提前人工过 5 mm 筛,每个盆钵装土量为 13.14 kg(含水率为 8.7%)。供试水稻品种为南粳 5055,于 6 月 25 日移栽,双本栽插,每盆 3 穴。常规氮肥运筹,施纯氮 20 kg/667 m<sup>2</sup>,基肥:分蘖肥:穗肥=4:2:4,促花肥:保花肥=6:4,同时基肥施用磷酸二氢钾 1 g/盆。按常规水稻大田生产规程管理。

1.3 测定项目与方法

分别于水稻拔节期、抽穗期用 SPAD-502Plus 手持叶绿素仪测定水稻主茎展开剑叶上、中、下部叶绿素含量,取其平均值表示该叶片叶绿素的相对含量。水稻成熟后,每处理实收计产 3 盆,并选取 3 盆长势比较均匀的水稻用于考种、生物量和养分含量测定。同时每个处理选取 3 盆长势比较均匀的水稻合在一起,晒干并存放 3 个月以上,使其含水量稳定在 14% 左右,将稻谷用小型精米机和粉碎机加工成米粉后,过 100 目筛,用于稻米品质测定。于水稻分蘖期、有效分蘖临界叶龄期、拔节期、抽穗期及成熟期,取盆栽上层 20 cm 土样,风干磨细,过 10 目筛,用于土壤理化性状及养分含量分析。植株全氮含量采用全自动凯氏定氮法测定,全磷含量采用钒

钼黄比色法测定,全钾含量采用火焰光度法测定。稻米加工品质(糙米率、精米率、整精米率)、外观品质(垩白粒率、垩白度、长宽比)、直链淀粉含量、胶稠度和碱消值的测定方法按农业行业标准《米质测定方法》(NY/T 83—2017)执行。蛋白质含量采用凯氏定氮法测定,再乘以换算系数 5.95 即为蛋白质含量。土壤 pH 值和电导率(EC)采用 Mettler pH 计直接测定,水土比为 5:1;土壤 CEC 值采用 EDTA-乙酸铵盐交换法测定。采用全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮含量,0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量,1.0 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定土壤速效钾含量,重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 整理数据, SigmaPlot 10.0 绘图, SPSS 19.0 进行相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用量对水稻农艺性状及产量的影响

从表 2 中可以看出,沙壤土水稻穗长、一次枝梗数和二次枝梗数有高于草甸土水稻的趋势,尤其是二次枝梗数表现明显,而每盆穗数则与之相反。不添加生物炭(C<sub>0</sub>)情况下,沙壤土水稻株高、每穗粒数、结实率、千粒质量和实际产量均低于草甸土水稻,而同等生物炭添加量条件下趋势相反。可见,沙壤土水稻株高、每穗粒数、结实率、千粒质量和实际产量对生物炭的施用相对更敏感,其中增产率均达到 50% 以上。随着生物炭施用量的增加,水稻株高、每盆穗数、结实率和实际产量呈增加趋势,其中草甸土条件下 C<sub>60</sub> 结实率虽有所下降,但与 C<sub>0</sub> 相比未达显著差异水平(P>0.05),穗长变短,一次枝梗数和二次枝梗数减少,不同类型土壤趋势一致。每穗粒数和千粒质量因土壤类型而异,草甸土条件下呈下降趋势,沙壤土条件下则先升后降,并在 C<sub>20</sub> 和 C<sub>40</sub> 处理均呈提高趋势。

进一步对水稻产量和生物炭施用量进行相关性分析,结果如图 1 所示。不同土壤类型条件下,水稻产量与生物炭施用量呈正相关关系,其中,草甸土条件下相关系数(r<sub>1</sub>)为 0.918(P<0.05),沙壤土条件下相关系数(r<sub>2</sub>)为 0.826(P>0.05)。

2.2 生物炭施用量对水稻剑叶 SPAD 值和成熟期干物质积累的影响

由表 3 可见,与产量趋势类似,水稻成熟期茎

表 2 生物炭施用量对水稻农艺性状及产量的影响

土壤类型	生物炭处理	株高 (cm)	穗长 (cm)	一次枝梗数 (个/穗)	二次枝梗数 (个/穗)	每盆穗数	每穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	实际产量 (g/盆)	增产率 (%)
草甸土	C <sub>0</sub>	71.7d	15.3a	12.8a	20.8a	41.0d	116.2a	86.9c	27.6a	111.3c	—
	C <sub>20</sub>	73.9c	15.0a	12.1ab	19.2b	46.7c	108.2b	87.8bc	27.6a	117.2b	5.3
	C <sub>40</sub>	75.5bc	14.3b	11.8b	17.4c	56.0b	97.7c	89.9b	27.5a	128.7a	15.6
	C <sub>60</sub>	76.1b	13.8bc	11.7b	16.4cd	62.0a	96.0c	86.3c	26.1ab	129.6a	16.4
	C <sub>80</sub>	83.6a	13.1c	11.3b	15.7d	64.7a	90.4d	94.1a	25.2b	130.1a	16.9
沙壤土	C <sub>0</sub>	62.1c	16.5a	13.2a	23.8a	38.7c	112.6b	73.4c	26.7ab	82.2c	—
	C <sub>20</sub>	80.2b	16.4a	12.6a	23.3a	41.7bc	131.4a	89.2b	27.8a	128.3b	56.1
	C <sub>40</sub>	81.4b	15.6b	12.5a	22.7a	44.0b	121.2ab	91.8b	27.6a	129.3b	57.3
	C <sub>60</sub>	83.0a	14.7c	11.5b	20.3b	50.3a	116.4b	95.0a	26.2b	139.6a	69.8
	C <sub>80</sub>	83.6a	14.3c	11.4b	19.6b	53.7a	109.4b	95.5a	25.7b	138.4a	68.4

注:同列数据后不同小写字母表示相同土壤类型的处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下表同。

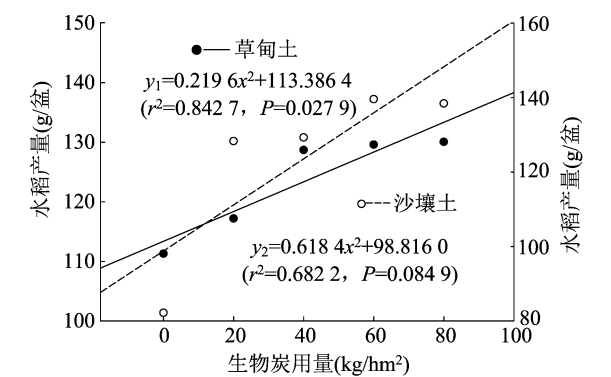


图1 生物炭施用量与水稻产量的相关性分析

表 3 生物炭施用量对水稻成熟期干物质积累的影响

土壤类型	生物炭处理	茎鞘质量 (g/盆)	叶片质量 (g/盆)	穗质量 (g/盆)	总干物质积累量 (g/盆)
草甸土	C <sub>0</sub>	50.7c	24.7c	122.0c	197.4c
	C <sub>20</sub>	53.0c	25.8c	126.1c	204.9c
	C <sub>40</sub>	63.4b	29.7b	129.1bc	222.2b
	C <sub>60</sub>	66.2ab	30.9ab	136.7ab	233.8ab
	C <sub>80</sub>	67.2a	32.6a	141.4a	241.2a
沙壤土	C <sub>0</sub>	50.0c	23.8c	94.1c	167.9c
	C <sub>20</sub>	51.6c	24.5bc	140.3b	216.4b
	C <sub>40</sub>	55.5b	25.6b	142.7b	223.8b
	C <sub>60</sub>	58.2b	27.9a	149.0a	235.1a
	C <sub>80</sub>	63.0a	28.7a	150.2a	241.9a

鞘、叶片、穗质量和总干物质积累量均随生物炭施用量的增加而逐渐提高,生物炭对沙壤土条件下成熟期水稻穗质量及总干物质的调节作用要高于草甸土,其中 C<sub>80</sub>处理总干物质积累量增幅高达 44.1%。

施用生物炭有提高水稻剑叶 SPAD 值的作用,不同生育时期和土壤类型条件下趋势基本一致(图 2)。其中草甸土条件下,生物炭对剑叶 SPAD 值的

影响较小,仅 C<sub>60</sub>和 C<sub>80</sub>处理达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),而沙壤土条件下剑叶 SPAD 值变化则相对较为敏感。

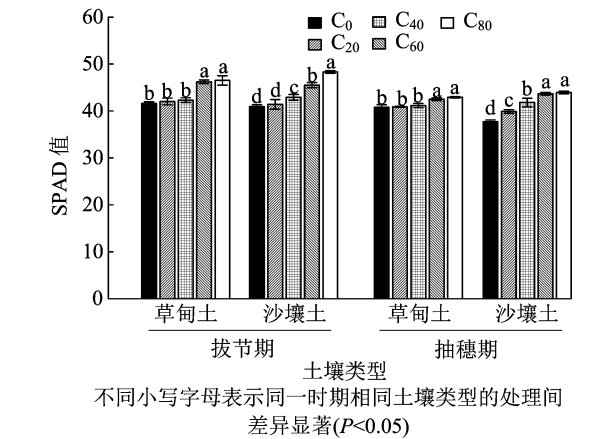


图2 生物炭施用量对水稻剑叶 SPAD 值的影响

2.3 生物炭施用量对稻米品质的影响

从稻米加工品质和外观品质来看,草甸土水稻总体优于沙壤土水稻。糙米率、精米率、整精米率随生物炭施用量的增加呈提高趋势,垩白粒率与垩白度则与之相反,外观品质有改善的趋势,不同土壤类型表现一致(表 4)。

与不施生物炭(C<sub>0</sub>)相比,草甸土条件下,糙米率、精米率和整精米率增幅分别为 0.48% ~ 2.05%、0.98% ~ 3.79%和 7.02% ~ 20.21%,垩白粒率和垩白度降幅分别为 1.21% ~ 16.97%和 16.46% ~ 43.04%;沙壤土条件下,糙米率、精米率和整精米率增幅分别为 1.99% ~ 4.73%、1.59% ~ 6.65%和 0.61% ~ 12.27%,垩白粒率和垩白度降幅分别为 4.65% ~ 23.26%和 4.82% ~ 42.77%。

表 4 生物炭施用量对稻米加工品质和外观品质的影响

土壤类型	生物炭处理	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)	垩白粒率 (%)	垩白度 (%)	长宽比
草甸土	C <sub>0</sub>	83.0c	71.3c	47.0d	16.5a	7.9a	1.7a
	C <sub>20</sub>	83.4bc	72.0bc	50.3c	16.3a	6.6b	1.6a
	C <sub>40</sub>	83.5bc	72.0bc	50.5c	16.0a	4.6c	1.7a
	C <sub>60</sub>	84.3ab	73.5ab	53.5b	14.5b	4.5c	1.7a
	C <sub>80</sub>	84.7a	74.0a	56.5a	13.7b	4.5c	1.7a
沙壤土	C <sub>0</sub>	80.4c	69.2c	48.9b	21.5a	16.6a	1.7a
	C <sub>20</sub>	82.0b	70.3bc	49.2b	20.5ab	15.8a	1.7a
	C <sub>40</sub>	83.0ab	71.4bc	50.1b	19.5b	11.9b	1.7a
	C <sub>60</sub>	83.2ab	72.1ab	50.6b	17.5c	11.6b	1.7a
	C <sub>80</sub>	84.2a	73.8a	54.9a	16.5c	9.5c	1.7a

可见,生物炭对沙壤土水稻加工品质和外观品质的调控效应有大于草甸土的趋势。

由表 5 可知,不论施用生物炭与否,草甸土条件下稻米蛋白质含量、直链淀粉含量和胶稠度均表现出一定的优势,尤其是蛋白质含量相对突出。不同土壤类型条件下,生物炭有助于稻米蛋白质的积累,并且均在 80 t/hm<sup>2</sup> 显著增加最多,草甸土和沙壤土稻米分别增加 0.3、0.5 个百分点;而对直链淀粉含量、胶稠度和碱消值的变化基本无显著影响 ( $P>0.05$ ),其中胶稠度随生物炭施用量的增加有变长的趋势。

表 5 生物炭施用量对稻米蒸煮营养品质的影响

土壤类型	生物炭处理	蛋白质含量 (%)	直链淀粉含量 (%)	胶稠度 (mm)	碱消值
草甸土	C <sub>0</sub>	5.9b	10.0a	80.2b	6.8a
	C <sub>20</sub>	6.0ab	10.4a	80.4b	6.9a
	C <sub>40</sub>	6.1ab	10.3a	81.0ab	7.0a
	C <sub>60</sub>	6.1ab	10.1a	83.0a	6.9a
	C <sub>80</sub>	6.2a	10.2a	83.0a	7.0a
沙壤土	C <sub>0</sub>	4.9c	9.7a	80.0a	6.9a
	C <sub>20</sub>	5.1bc	10.2a	80.4a	6.9a
	C <sub>40</sub>	5.1bc	10.1a	80.5a	7.0a
	C <sub>60</sub>	5.2ab	9.8a	81.0a	7.0a
	C <sub>80</sub>	5.4a	10.1a	82.0a	7.0a

2.4 生物炭施用量对土壤理化性质及养分含量的影响

就整个生育期来说,土壤电导率(EC)在 C<sub>0</sub>、C<sub>20</sub> 和 C<sub>40</sub> 处理呈“V”字形变化,拔节期达最低值,在 C<sub>60</sub> 和 C<sub>80</sub> 处理呈线性下降,且草甸土 EC 值始终高于沙壤土(表 6)。2 种类型土壤条件下,生物炭施用均显著提高了土壤 EC 值,且生物炭施用量越高,EC 值增加越多。可以发现,沙壤土条件下土壤 EC 值

对生物炭施用的响应更为敏感,相比于 C<sub>0</sub> 处理,C<sub>20</sub> 处理在各时期增幅即达到 193.3%、123.7%、70.6% 和 53.8%,明显高于草甸土条件下各时期的 89.0%、74.5%、41.3% 和 47.1%。

表 6 不同生育期生物炭施用量对土壤电导率( EC )的影响

土壤类型	生物炭处理	电导率( dS/m )			
		分蘖期	有效分蘖 临界叶龄期	拔节期	抽穗期
草甸土	C <sub>0</sub>	0.82e	0.55e	0.46e	0.87e
	C <sub>20</sub>	1.55d	0.96d	0.65d	1.28d
	C <sub>40</sub>	2.55c	1.63c	1.44c	1.61c
	C <sub>60</sub>	3.21b	2.51b	2.16b	1.87b
	C <sub>80</sub>	3.97a	3.58a	3.27a	2.06a
沙壤土	C <sub>0</sub>	0.45e	0.38e	0.34e	0.52e
	C <sub>20</sub>	1.32d	0.85d	0.58d	0.80d
	C <sub>40</sub>	2.41c	1.63c	0.69c	1.00c
	C <sub>60</sub>	3.13b	2.33b	1.48b	1.38b
	C <sub>80</sub>	3.44a	3.20a	2.59a	1.52a

由表 7 可以看出,化学性质方面,草甸土和沙壤土条件下土壤 pH 值的变化范围分别为 7.62~8.20 和 8.13~8.55,呈碱性,生物炭的施用显著降低了土壤 pH 值( $P<0.05$ ),却显著提高了土壤阳离子交换量( $P<0.05$ ),且两者变化与生物炭施用量之间呈线性关系。至于不同养分含量,生物炭有助于土壤中有機质、全氮、速效磷和速效钾含量的显著提高,并呈现一定的正相关关系,其中 2 种类型土壤的速效磷和速效钾含量在不同生物炭施用量情况下增幅均超过了 100%,最高为沙壤土条件下 C<sub>80</sub> 处理速效磷含量相比 C<sub>0</sub> 增加了 1 875.0%。

此外,无论添加生物炭与否,草甸土中土壤养分含量均明显高于沙壤土,而且生物炭对沙壤土土壤养分含量的调节增效作用显著高于草甸土。相

比于对照( $C_0$ ),生物炭的施用使得沙壤土中土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾含量最大提高了 4.3、2.7、19.8、15.3 倍,明显高于草甸土中相应的 2.0、1.3、4.9、6.9 倍。同时草甸土条件下,土壤阳离子交换量高于沙壤土,pH 值低于沙壤土,但两者对生物炭施用的响应均为草甸土更为敏感。

表 7 生物炭施用量对土壤化学性质和养分含量的影响

土壤类型	生物炭处理	pH 值	阳离子交换量 ( $\text{cmol/kg}$ )	有机质含量 ( $\text{g/kg}$ )	全氮含量 ( $\text{g/kg}$ )	速效磷含量 ( $\text{mg/kg}$ )	速效钾含量 ( $\text{mg/kg}$ )
草甸土	$C_0$	8.20a	9.90e	31.48d	2.08d	15.7c	97.0e
	$C_{20}$	7.83b	11.10d	42.20c	2.38c	45.6b	196.5d
	$C_{40}$	7.77bc	11.50c	47.70b	2.45bc	47.1b	297.0c
	$C_{60}$	7.64c	12.05b	48.97b	2.56b	47.3b	342.0b
	$C_{80}$	7.62c	13.10a	62.50a	2.79a	77.0a	668.0a
沙壤土	$C_0$	8.55a	8.30d	8.37d	0.58d	3.2e	26.0e
	$C_{20}$	8.42b	8.75c	15.45c	0.83c	11.0d	66.0d
	$C_{40}$	8.27c	9.15b	27.51b	1.23b	38.5c	126.0c
	$C_{60}$	8.24c	9.35ab	28.96b	1.26b	47.2b	342.0b
	$C_{80}$	8.13d	9.45a	35.63a	1.56a	63.2a	397.0a

3 讨论与结论

3.1 不同土壤类型条件下生物炭施用量对水稻农艺性状和产量的影响

生物炭对作物生长的影响因自身类型和施用量不同而不同<sup>[12]</sup>,其丰富的氮、磷、钾等矿质元素以及有机碳营养可供作物吸收利用,并可通过提供有机与无机养分达到促进作物生长与土壤培肥的目的。有研究发现,施用一定量生物炭能够增加水稻株高和叶片 SPAD 值,促进群体干物质积累,增加有效穗数和产量,使得收获指数提高<sup>[4,8]</sup>,产量与生物炭施用量两者间呈一定正相关关系,但当施用量过高时,水稻产量却表现为降低趋势<sup>[13]</sup>。黄雁飞等<sup>[14]</sup>研究发现,施用生物炭可使水稻穗长变长,增加每穗粒数和结实率,对千粒质量则无显著影响,同时减氮 30% 配施生物炭能有效降低稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放,增加水稻产量,并提高氮肥利用率<sup>[7]</sup>。本研究结果表明,随着生物炭施用量的增加,水稻株高、成熟期干物质和生长期 SPAD 值均有所增加,每盆穗数、结实率和实际产量亦呈增加趋势,而穗长变短,一次枝梗数和二次枝梗数减少,每穗粒数和千粒质量则因土壤类型而异,草甸土条件下呈下降趋势,沙壤土条件下则先升后降。这与前人研究结果<sup>[4,13-14]</sup>并不完全一致,可能与不同试验生物炭种类、土壤类型质地及酸碱性等因素有关。产量的增加主要得益于每盆穗数与结实率的提高,这与牛同旭等<sup>[15]</sup>基施生物炭主要通过同时促进有效分蘖来增加有效穗数和提高结实率达到增产的结论<sup>[15]</sup>一致。

此外,本研究中因草甸土的有机质和养分含量明显高于沙壤土,不论添加生物炭与否,其水稻穗数都明显高于沙壤土水稻,而株高、每穗粒数、结实率、千粒质量和实际产量仅在不施用生物炭情况下高于沙壤土水稻,同等生物炭添加量条件下趋势则相反,说明生物炭对沙壤土条件下水稻的生长及相关农艺性状的调节作用更为显著。陈芳等<sup>[4]</sup>研究发现,木炭因其碳含量过高,导致吸附能力增强,释放有效养分的能力减弱,使得水稻土壤中的速效氮磷钾含量大大下降<sup>[4]</sup>。因此,生物炭应用过程中,应先明确不同土壤类型肥力质地状况以及不同施肥模式、施肥量下相宜的生物炭种类和施用量,以保证土壤中养分释放与固定维持相对平衡,作物养分需求与实际利用相协调,避免生物炭水平过高,降低速效矿质养分含量,不利于作物的正常生长。

3.2 不同土壤类型条件下生物炭施用量对稻米品质的影响

前人研究发现,在常规施肥的基础上增施适量生物炭<sup>[10]</sup>和氮肥减量联合生物炭施用<sup>[16]</sup>不同程度上均有利于稻米品质的改善。牛同旭等<sup>[15]</sup>研究发现,施用生物炭一定程度上提高了加工品质和外观品质,有提高稻米直链淀粉含量的趋势,蛋白质含量因生物炭施用量变化不一<sup>[15]</sup>。可见,前人关于生物炭施用对稻米品质的影响结论不一,主要因为稻米品质是由环境、基因以及基因与环境互作共同决定的,且不同的品质性状受这 3 个因素的影响并不相同。本研究表明,施用生物炭可明显提高水稻糙米率、精米率和整精米率,且随施用量增加呈提高趋

势,而垩白粒率和垩白度则与之相反,外观品质有改善的趋势;同时有助于稻米蛋白质的积累,而对直链淀粉含量、胶稠度和碱消值的变化基本无显著影响,其中胶稠度随生物炭施用量的增加有变长的趋势。这可能是因为生物炭中的钾素以及钙、锰、锌等微量元素含量较高,从而促进了植株体内相关酶的合成,达到改善稻米品质的效果<sup>[17]</sup>。此外,本研究中草甸土稻米加工品质、外观品质和蒸煮营养品质(蛋白质含量、直链淀粉含量和胶稠度)总体优于沙壤土水稻,而且生物炭对沙壤土水稻加工品质和外观品质的调控效应呈现大于草甸土的趋势。

### 3.3 不同土壤类型条件下生物炭施用量对土壤理化性状及养分含量的影响

生物炭在酸化土壤防治方面具有一定作用<sup>[1]</sup>。已有研究结果表明,作为酸性土壤的中和剂,施用生物炭后,酸性土壤的 pH 值会提高<sup>[18]</sup>,但对碱性土壤作用不明显<sup>[19]</sup>。而生物炭自身含有的一些交换性阳离子,如  $Mg^{2+}$ 、 $K^{+}$ 、 $Ca^{2+}$  等,在与土壤充分混合后将与其中的  $Al^{3+}$ 、 $H^{+}$  进行交换,使其浓度降低<sup>[20]</sup>,进而调节 pH 值;同时盐基饱和度和土壤阳离子交换性能有所提高,有助于土壤保肥能力的改善<sup>[21-22]</sup>。陈芳等研究发现,施用一定量生物炭能够提高土壤 pH 值和 EC 值,增加土壤有机质、速效氮磷钾和总养分含量<sup>[4]</sup>。黄雁飞等研究发现,总体来说,生物炭的施用可增加土壤有效磷、速效钾和全氮的含量,显著提高土壤 pH 值和有机质含量,却降低了土壤全磷、全钾和碱解氮的含量<sup>[14]</sup>。本研究发现,生物炭施用显著提高了土壤 EC 值、阳离子交换量、有机质、全氮、速效磷和速效钾含量,与前人研究结果<sup>[4,14]</sup> 基本一致。土壤有机质含量的提高是因为生物炭本身的大比表面积以及丰富的孔隙结构可有效吸附土壤中的活性有机物质,从而减少土壤有机质的矿化<sup>[23]</sup>;生物炭有抑制土壤呼吸的作用,可减少土壤有机碳的矿化率<sup>[24]</sup>。而土壤速效磷、钾含量的提高可能是因为生物炭的添加不仅为土壤微生物提供了充足的碳源,而且生物炭表面附有的丰富孔隙结构能够充当微生物良好的栖息地,为解磷、解钾细菌提供有利的生长环境,从而活化土壤中磷、钾养分,提升土壤养分供给能力<sup>[25-26]</sup>。同时本研究中生物炭施用显著降低了土壤 pH 值,这可能是由于本试验条件下的 2 种类型土壤均呈碱性,而草甸土 EC 值、养分含量始终高于沙壤土,但是生物炭对沙壤土 EC 值和土壤养分含量的调节增

效作用却显著高于草甸土,因此针对特定土壤类型需选择合适的生物炭施用量。

尽管短时期内生物炭可通过改善土壤理化性状达到水稻增产的目的,但随着生物炭的老化,其作用效果势必会大大减弱。因此,在今后试验中,有必要对生物炭的合理施入间隔进行进一步深入探讨与验证。

### 参考文献:

- [1] 韩晓日,葛银凤,李娜,等. 连续施用生物炭对土壤理化性质及氮肥利用率的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2017,48(4):392-398.
- [2] 勾芒芒,屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2013(5):1-5.
- [3] 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.
- [4] 陈芳,张康谷,谷思诚,等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 华中农业大学学报,2019,38(5):57-63.
- [5] 涂保华,胡茜,张艺,等. 基于不同类型秸秆制备的生物炭对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 江苏农业学报,2019,35(6):1374-1380.
- [6] 苗智英,邵光成,房凯,等. 不同控水模式、生物炭添加对水稻抗倒伏能力及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2019:1-9.
- [7] 向伟,王雷,刘天奇,等. 生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(22):4634-4645.
- [8] 梁传斌,李建国,沈枫,等. 移栽密度和施用生物炭对水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(2):240-247.
- [9] 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.
- [10] 郭琴波,王小利,段建军,等. 施用生物炭对黄壤稻田水稻品质及氮肥利用效率的影响[J]. 作物研究,2021,35(4):287-292.
- [11] 钱宗华,陆亚云,徐红梅. 如东县优质稻米生产发展现状及对策[J]. 安徽农学通报,2008,14(23):124-125.
- [12] 王欢欢,任天宝,元野,等. 生物质炭与氮肥配施对植烟土壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(12):52-57.
- [13] 陈盈,张满利,刘宪平,等. 生物炭对水稻齐穗期叶绿素荧光参数及产量构成的影响[J]. 作物杂志,2016(3):94-98.
- [14] 黄雁飞,陈桂芬,熊柳梅,等. 不同秸秆生物炭对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 南方农业学报,2020,51(9):2113-2119.
- [15] 牛同旭,郑桂萍,姜玉伟,等. 生物炭对垦粳 5 号产量及品质的影响[J]. 中国稻米,2018,24(6):76-79.
- [16] 史登林,王小利,刘安凯,等. 黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应[J]. 环境科学,2021,42(1):443-449.
- [17] Khan M A, Kim K W, Wang M Z, et al. Nutrient-impregnated charcoal: an environmentally friendly slow-release fertilizer[J].

万小琪, 窦维卉, 杨 雪, 等. 不同农艺型措施对温室黄瓜连作土壤的改良效果[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(23): 228–234.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.23.034

# 不同农艺型措施对温室黄瓜连作土壤的改良效果

万小琪, 窦维卉, 杨 雪, 谢 洋, 张 宁, 武春成

(河北科技师范学院园艺科技学院/河北省特色园艺种质挖掘与创新利用重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

**摘要:**为探究不同农艺型措施对温室黄瓜连作土壤的改良效果, 采用田间试验, 研究单施有机肥(CK)、微生物菌肥配施有机肥(MF)、高碳堆肥配施有机肥(CF)、微生物菌剂配施有机肥(MA)、生物炭和木霉菌配施有机肥(BT)5个处理对温室黄瓜产量、土壤化学性质以及土壤微生物多样性等方面的影响。结果表明, 与CK相比各处理黄瓜小区产量提高了1.17%~5.94%, 其中BT处理提高效果最为显著。MF处理提高了土壤pH值、电导率(EC值)及有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量; BT处理提高了土壤pH值及有机质、速效钾含量, 降低了土壤EC值。在土壤细菌群落门水平下, BT处理提高了酸杆菌门(Acidobacteriota)的相对丰度, 显著降低了放线菌门(Actinobacteriota)的相对丰度; MF处理提高了变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度。土壤真菌门水平下MF明显降低了子囊菌门(Ascomycota)的相对丰度。不同施肥处理下, 引起细菌和真菌群落结构变化的主要土壤环境因子为有机质和速效磷含量。综合分析认为, 微生物菌肥配施有机肥(MF)和生物炭、木霉菌配施有机肥(BT)2种措施可以改善土壤化学性质, 优化土壤微生物环境, 促进黄瓜生长。

**关键词:** 黄瓜连作土壤; 生物炭; 微生物菌肥; 高碳堆肥; 微生物多样性

**中图分类号:** S156; S642.206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)23-0228-07

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是我国主要栽培的设施蔬菜, 具有产量高、经济效益好的特点。但随着

设施黄瓜栽培年限的增加, 导致了土壤化学性质和土壤微生物环境的恶化, 降低了黄瓜的产量, 制约了设施黄瓜产业的持续性发展。

目前设施蔬菜连作土壤改良方面的研究较多, 如采用土壤消毒, 或者施入微生物菌肥、有机物料、生物炭等均能起到一定的改良效果。微生物菌肥通过微生物的生命活动, 产生植株所需的特定养分, 从而促进土壤中的物质转化和调控植株生长<sup>[1]</sup>。田伟等研究表明, 微生物菌肥能促进植株生长, 促进土壤中有益微生物的繁殖<sup>[2-4]</sup>。张玉博等

收稿日期: 2021-12-29

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2019YFD1001903); 河北省重点研发计划(编号: 21326901D); 河北省现代农业产业体系项目(编号: HBCT2018030209); 河北省创新能力提升计划(编号: 205676154H)。

作者简介: 万小琪(1997—), 女, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: 2685145112@qq.com。

通信作者: 武春成, 博士, 教授, 主要从事设施蔬菜栽培生理与土壤连作障碍研究。E-mail: wuchuncheng1979@126.com。

Environmentalist, 2008, 28(3): 231–235.

[18] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 436–442.

[19] 杨铁钊, 杨志晓, 林 娟, 等. 不同烤烟基因型根际钾营养和根系特性研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 646–651.

[20] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235–246.

[21] 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.

[22] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—A

meta-analysis of literature data[J]. Plant & Soil, 2013, 373(1/2): 583–594.

[23] 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.

[24] (Han) Weng Z, van Zwieten L, Singh B P, et al. Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(5): 371–376.

[25] 刘赛男. 生物炭影响土壤磷素、钾素有效性的微生态机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.

[26] Chen J H, Sun X, Zheng J F, et al. Biochar amendment changes temperature sensitivity of soil respiration and composition of microbial communities 3 years after incorporation in an organic carbon-poor dry cropland soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2018, 54(2): 175–188.