

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.20258

生物炭对双季稻生长与土壤理化性质的影响及其后效

汪 勇, 吕茹洁, 黎 星, 占 静, 王秋菊, 曾勇军, 胡水秀, 商庆银*

(作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室 / 江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室 / 江西农业大学双季稻现代化生产协同创新中心, 江西 南昌 330045)

摘 要: 为探究南方双季稻田施用生物炭的后效, 对比分析了当年新施用生物炭(施用量分别为 0、20 和 40 t·hm⁻², 以 B₀、B₂₀、B₄₀ 表示)和前 2 年施用生物炭(施用量与 B₂₀、B₄₀ 相同, 分别以 Y₂B₂₀、Y₂B₄₀ 表示)分别对双季稻生长与土壤理化性质的影响, 以期生物炭的合理施用提供理论和科学依据。结果表明, 生物炭及其后效均能够显著提高土壤 pH、有机碳和速效钾含量, 其中新施生物炭效应增幅均高于生物炭后效。与 B₀ 相比, 新施生物炭能够显著提高早、晚稻产量与地上部生物量, B₂₀ 和 B₄₀ 早稻产量分别显著提高 6.9%、12.6%, 晚稻产量分别显著提高 9.4%、8.3%; Y₂B₂₀、Y₂B₄₀ 早稻产量相较于 B₀ 分别显著下降 3.4%、4.6%, 对晚稻产量无显著影响。新施生物炭处理中, 早稻和晚稻茎、叶中氮素与磷素含量均显著降低, 而钾素含量随着生物炭施用量的增加呈显著上升趋势。前 2 年施用生物炭处理对早、晚稻氮素与磷素吸收量均无显著影响, 仅 Y₂B₄₀ 显著提高了晚稻钾素吸收量。新施生物炭处理氮、磷、钾吸收量随着生物炭施用量增加均呈上升趋势。与 B₀ 相比, B₄₀ 晚稻氮素吸收量显著增加 9.9%, B₂₀ 和 B₄₀ 早稻磷素吸收量分别显著增加 9.9%、9.1%, B₄₀ 晚稻磷素吸收量显著增加 9.1%; B₂₀、B₄₀ 早稻钾素吸收量分别显著提高 22.8%、39.9%, 晚稻分别显著提高 9.9%、19.5%。综上所述, 施用秸秆生物炭对双季稻产量、地上部生物量、养分吸收量与土壤理化性质的影响存在后效作用, 但是其后效较短, 应考虑适当补施生物炭。

关键词: 生物炭; 水稻; 产量; 养分吸收; 土壤肥力

水稻作为我国主要的粮食作物之一, 在我国粮食安全保障体系和农业生产中占重要地位^[1]。我国南方双季稻区水、热资源丰富, 作物生产潜力巨大, 然而, 由于大气酸沉降和过量施肥等因素影响, 致使我国南方双季稻田目前普遍面临土壤酸化、养分利用率低等土壤质量问题, 这严重制约着我国双季稻的持续稳定高产^[2]。长期过量施肥伴随的耕地酸化问题一直是国内外研究关注的重点, 而生物炭作为酸性土壤一种较为理想的改良剂成为近些年研究的热点^[3]。

生物炭是指生物质在高温厌氧的条件下裂解产生的稳定且不易分解的富碳物质, 其制取原料主要为农业生产过程中产生的作物秸秆、树枝、粪便等有机废弃物^[4]。近些年来, 由于其自身高稳定

性、吸附性、低容重与呈碱性等基本性质, 生物炭被广泛运用于增加土壤碳库、改良土壤、提高肥料利用率与减缓全球温室效应等方面^[5]。大量研究表明, 生物炭施入土壤后受风雨侵蚀、冻融变化等多种因素的长期影响, 其物理结构会发生改变^[6], 随着老化时间的延长, 表面可能发生氧化或酸化等反应^[7]。生物炭老化后理化性质的改变, 必然会导致其在对作物生长与改善土壤肥力等方面的差异。目前多数短期研究表明生物炭能够促进作物生长、增加作物产量^[8-9], 然而, 关于施用生物炭对作物生长的后效研究较少。吴震等^[10]在稻麦轮作系统中研究发现, 生物炭施用 3 年后依然能够显著提高作物产量, 增加土壤 pH 和有机碳含量, 但也有研究发现施用生物炭 2 年内对水稻产量均无显著性影响^[11-12]。陆峰等^[13]通过 2 年试验发现施用生物炭第 1 年对早、晚稻产量无显著性影响, 但第 2 年显著增加早、晚稻产量。由于受气候条件、生物炭种类、土壤类型、水肥管理、生物炭施用量等因子的影响, 关于施用生物炭对作物生长与土壤性质的短期效应和其后效仍存在一定争议^[14]。为探究南方双季稻田施用生物炭的后效, 本研究通过田间试验, 在同

收稿日期: 2020-05-07; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601833); 国家重点研发计划项目(2017YFD0301605)。

作者简介: 汪勇(1994-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事作物养分管理研究。E-mail: 1758746610@qq.com。

通讯作者: 商庆银, E-mail: sqyt@163.com。

一条件下对比研究了当年新施生物炭与前2年施用的生物炭对双季稻产量、养分吸收与土壤理化性质的影响,以期为生物炭运用于双季水稻增产与改善土壤肥力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017至2019年在江西省宜春市上高县泗溪镇曾家村试验基地(115°09'E, 28°31'N)进行,该地区年平均气温为17.5℃,近10年内年平均降水量为1650 mm,属于典型的亚热带季风气候。供试土壤为第四纪红色黏土发育而成的水稻土,试验前耕层0~20 cm土壤基本理化性状:pH值5.6、有机碳31.05 g·kg⁻¹、全氮2.85 g·kg⁻¹、碱解氮205.0 mg·kg⁻¹、有效磷22.3 mg·kg⁻¹、速效钾172.0 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验采取随机区组设计,设置5个处理,分别为:B₀(常规施肥不施生物炭)、B₂₀(当年新施的20 t·hm⁻²生物炭)、B₄₀(当年新施的40 t·hm⁻²生物炭)、Y₂B₂₀(前2年施用的20 t·hm⁻²生物炭)、Y₂B₄₀(前2年施用的40 t·hm⁻²生物炭)。B₂₀与B₄₀生物炭于2019年早稻移栽前7 d一次性施入,Y₂B₂₀与Y₂B₄₀生物炭于2017年早稻移栽前7 d一次性施入,其余时间不再施用生物炭。各处理设置3次重复,小区面积均为30 m²,每个小区具有独立灌水系统。2017至2019年田间施肥与管理保持一致。早、晚稻氮、磷、钾肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾。早、晚稻氮施用量分别为165和180 kg·hm⁻²,磷、钾肥均按N:P₂O₅:K₂O=2:1:2施用。氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=5:2:3施用,磷肥做基肥一次性施用,钾肥按基肥:穗肥=5:5施用。早、晚稻品种分别为株两优39和泰优871。早、晚稻栽插密度株距×行距分别为13.2 cm×23.3 cm和13.2 cm×26.7 cm,基本苗分别为3和2苗·穴⁻¹。早、晚稻田水分管理模式均采用栽插后浅水灌溉,分蘖末期排水烤田,复水后干湿交替直至收获前10 d左右断水。病虫害管理按照当地高产栽培模式进行。本试验施用生物炭(湖北金日生态能源股份有限公司)的炭化原料为水稻秸秆,裂解温度为350~500℃,生物炭基础性状为:pH值10.3,全碳505.1 g·kg⁻¹,全氮8.56 g·kg⁻¹,全磷2.37 g·kg⁻¹,全钾20.37 g·kg⁻¹。

1.3 指标测定

1.3.1 产量及其构成

水稻成熟期连续选取100茼水稻植株调查有效穗,按平均数选取长势均匀的水稻植株5茼,调查每穗粒数、结实率和千粒重。各小区水稻全部收割机械脱粒,折算水分后计算实际产量。

1.3.2 地上部生物量与养分吸收

水稻成熟期按各小区的平均有效穗数取具有代表性的5茼水稻植株,分茎、叶、穗3部分,105℃杀青30 min,80℃烘至恒重后称重,计算地上部生物量。将水稻各部位依次粉碎后测定氮、磷、钾养分含量。植株全氮采用Kjeltec 8400全自动凯氏定氮仪(福斯集团公司,丹麦)测定。磷、钾的测定采用浓硫酸-双氧水消解,火焰光度计测钾,钼锑抗分光光度法测磷。

1.3.3 土壤性状

2019年晚稻收获后采用五点法取各小区0~20 cm耕作层土壤,捏碎风干后过筛待测。采用Kjeltec 8400全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮;重铬酸钾氧化-外加加热法测土壤有机碳;土壤铵态氮和硝态氮采用1 mol·L⁻¹氯化钾浸提,靛酚蓝比色法测定铵态氮,紫外分光光度法测定硝态氮;土壤pH值采用pHS-3C pH测试仪测定(土水比为1:5);碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定有效磷,乙酸铵浸提-火焰光度计测定速效钾^[15]。

1.4 数据处理

采用Excel 2010软件进行数据处理,Origin 9.0作图,SPSS 20.0统计分析软件进行方差分析,LSD进行差异显著性检验(P=0.05)。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤理化性质的影响及其后效

由表1可知,与B₀相比,B₂₀、B₄₀有机碳含量分别显著提高21.0%、29.3%,pH分别显著提高4.3%、5.2%,铵态氮分别显著下降34.3%、25.6%,速效钾含量分别显著提高45.0%、77.4%,B₄₀有效磷含量显著提高16.1%。Y₂B₂₀、Y₂B₄₀有机碳含量分别显著提高12.8%、19.7%,pH分别显著提高1.4%、2.8%,速效钾含量分别显著提高32.5%、37.7%,铵态氮与有效磷含量无显著性差异。这表明前2年施用的生物炭依然能够有效提高土壤肥力,但土壤有机碳、pH、速效钾含量增幅均低于当年新施生物炭处理。

表 1 生物炭对晚稻成熟期土壤理化性质的影响及其后效

处理	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机碳 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH	铵态氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
B ₀	2.87 ± 0.08a	29.0 ± 1.1d	5.62 ± 0.04d	27.7 ± 1.4a	2.12 ± 0.09b	19.9 ± 0.9bc	91.5 ± 6.5c
B ₂₀	2.99 ± 0.09a	35.1 ± 0.4b	5.86 ± 0.02a	18.2 ± 0.2b	1.95 ± 0.05c	21.7 ± 0.3ab	132.7 ± 11.0b
B ₄₀	3.00 ± 0.10a	37.5 ± 1.2a	5.91 ± 0.03a	20.6 ± 6.4b	1.74 ± 0.08d	23.1 ± 1.6a	162.3 ± 12.9a
Y ₂ B ₂₀	2.97 ± 0.10a	32.7 ± 0.5c	5.70 ± 0.04c	28.5 ± 2.1a	2.06 ± 0.11bc	19.5 ± 1.2c	121.3 ± 8.5b
Y ₂ B ₄₀	2.94 ± 0.06a	34.7 ± 1.4b	5.78 ± 0.04b	29.1 ± 0.2a	2.34 ± 0.02a	20.1 ± 1.9bc	126.0 ± 4.4b

注：表中数据为“平均值 ± 标准差”，同一列中不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 生物炭对早、晚稻地上部生物量的影响及其后效

与前 2 年施用的生物炭相比，当年新施生物炭更有利于提高早、晚稻地上部生物量（图 1）。

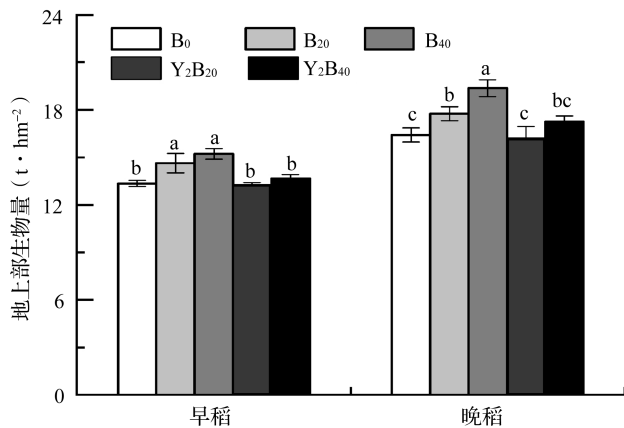


图 1 生物炭对早、晚稻地上部生物量的影响及其后效

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

与 B₀ 相比，B₂₀ 与 B₄₀ 早稻地上部生物量分别显著提高 9.6%、13.9%，晚稻分别显著提高 8.2%、18.0%。Y₂B₂₀、Y₂B₄₀ 早稻与晚稻生物量相较于 B₀ 均无显著性提升。

2.3 生物炭对早、晚稻产量的影响及其后效

由表 2 可知，与前 2 年施用的生物炭（Y₂B₂₀、Y₂B₄₀）相比，当年新施生物炭（B₂₀、B₄₀）能够显著提高早、晚稻产量。相较于 B₀ 处理，B₂₀ 和 B₄₀ 早稻产量分别显著提高 6.9%、12.6%，晚稻产量分别显著提高 9.4%、8.3%；Y₂B₂₀、Y₂B₄₀ 早稻产量相较于 B₀ 分别显著下降 3.4%、4.6%，而晚稻产量相比 B₀ 处理无显著性差异。B₂₀、B₄₀ 处理下早、晚稻有效穗数、每穗粒数均呈递增趋势，早稻结实率分别显著提高 7.6%、6.7%，晚稻结实率无显著性差异。Y₂B₂₀、Y₂B₄₀ 处理下早、晚稻有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重与 B₀ 相比均无显著性差异。

表 2 生物炭对早、晚稻产量的影响及其后效

	处理	有效穗数 (穗 · m ⁻²)	每穗粒数	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (t · hm ⁻²)
早稻	B ₀	363.5 ± 1.5ab	116.2 ± 4.1b	86.0 ± 2.5b	25.5 ± 0.1a	8.7 ± 0.1c
	B ₂₀	379.3 ± 13.8a	133.4 ± 6.2a	92.5 ± 1.4a	25.6 ± 0.3a	9.3 ± 0.3b
	B ₄₀	380.4 ± 9.2a	130.9 ± 6.4a	91.8 ± 1.5a	25.4 ± 0.3a	9.8 ± 0.4a
	Y ₂ B ₂₀	355.0 ± 10.2b	117.3 ± 2.6b	86.1 ± 2.0b	25.6 ± 0.3a	8.4 ± 0.2d
	Y ₂ B ₄₀	354.4 ± 13.4b	118.6 ± 9.1b	86.1 ± 3.1b	25.5 ± 0.3a	8.3 ± 0.2d
晚稻	B ₀	272.3 ± 5.5a	194.0 ± 8.0b	82.2 ± 0.5a	26.5 ± 0.2a	9.6 ± 0.3b
	B ₂₀	280.8 ± 16.3a	210.1 ± 9.0ab	81.5 ± 0.6a	26.5 ± 0.3a	10.5 ± 0.1a
	B ₄₀	283.8 ± 4.0a	214.5 ± 1.7a	84.4 ± 3.6a	26.9 ± 0.3a	10.4 ± 0.1a
	Y ₂ B ₂₀	259.3 ± 14.5a	198.2 ± 1.9b	83.0 ± 2.7a	26.7 ± 0.3a	9.7 ± 0.1b
	Y ₂ B ₄₀	273.0 ± 14.5a	202.5 ± 4.0b	83.9 ± 2.0a	26.5 ± 0.5a	9.5 ± 0.6b

2.4 生物炭对水稻各部位氮、磷、钾含量的影响及其后效

由表3可知,施用生物炭能够显著影响早、晚稻各部位中氮、磷、钾养分含量。与 B_0 相比, B_{20} 和 B_{40} 处理早、晚稻各部位氮素含量均显著下降,其中早稻穗部氮素含量分别显著下降6.0%、6.8%,晚稻穗部氮素含量分别显著下降4.5%、5.5%,但 B_{20} 与 B_{40} 处理间无显著性差异;水稻中磷素含量变化与氮素类似,与 B_0 相比, B_{20} 、 B_{40} 显著降低了早、晚稻茎和叶中磷素含量,而对穗中磷素含量

影响较小。当年新施生物炭与前2年施用的生物炭均有利于提高早、晚稻钾素含量。 B_{20} 、 B_{40} 显著提高早、晚稻茎叶中钾素含量,且随着生物炭施入量的增加茎和叶中钾素含量均呈递增趋势。相较于 B_0 , B_{20} 、 B_{40} 早稻茎中钾素含量分别显著提高7.1%、16.8%,晚稻茎中钾素含量分别显著提高6.3%、8.9%。 Y_2B_{20} 、 Y_2B_{40} 处理对早、晚稻茎叶中钾素含量增幅较小,仅晚稻茎中钾素含量分别显著提高3.1%、3.4%。各生物炭处理对早、晚稻穗中钾素含量均未见显著影响。

表3 生物炭对早、晚稻各部位氮、磷、钾含量的影响及其后效

(%)

元素	处理	早稻			晚稻		
		茎	叶	穗	茎	叶	穗
氮	B_0	0.52a	1.20a	1.33a	0.52a	0.96a	1.10a
	B_{20}	0.48bc	0.98b	1.25bc	0.49c	0.80c	1.05b
	B_{40}	0.47c	0.96b	1.24c	0.47c	0.75c	1.04b
	Y_2B_{20}	0.49b	1.15a	1.29ab	0.52ab	0.88ab	1.11a
	Y_2B_{40}	0.49b	1.14a	1.31a	0.51b	0.83bc	1.09a
磷	B_0	0.14a	0.15a	0.31a	0.23a	0.22a	0.28ab
	B_{20}	0.12b	0.12c	0.31a	0.18bc	0.16bc	0.27b
	B_{40}	0.11b	0.12c	0.31a	0.17c	0.13c	0.28ab
	Y_2B_{20}	0.13a	0.15ab	0.31a	0.22a	0.22a	0.29a
	Y_2B_{40}	0.13a	0.14b	0.30a	0.20ab	0.19ab	0.29ab
钾	B_0	4.22c	1.12b	0.31a	3.83c	1.17b	0.37a
	B_{20}	4.52b	1.33a	0.31a	4.07ab	1.31a	0.38a
	B_{40}	4.93a	1.45a	0.31a	4.17a	1.33a	0.37a
	Y_2B_{20}	4.41bc	1.13b	0.31a	3.95b	1.25ab	0.38a
	Y_2B_{40}	4.32bc	1.10b	0.32a	3.96b	1.23ab	0.38a

2.5 生物炭对早、晚稻养分吸收的影响及其后效

由图2可知,早稻 B_{20} 、 B_{40} 氮素吸收量与 B_0 相比无显著性变化,晚稻随着生物炭施用量的增加 B_{20} 、 B_{40} 氮素吸收量呈增加趋势,其中 B_{40} 显著增加9.9%。 Y_2B_{20} 、 Y_2B_{40} 与 B_0 相比晚稻氮素吸收量无显著差异,而早稻 Y_2B_{20} 处理氮素吸收量显著下降6.7%。与 B_0 相比, B_{20} 、 B_{40} 早、晚稻磷素吸收量均呈增加趋势,其中早稻 B_{20} 、 B_{40} 磷素吸收量分别显著增加9.9%、9.1%,晚稻 B_{40} 磷素吸收量显著

增加9.1%。 Y_2B_{20} 、 Y_2B_{40} 磷素吸收量与 B_0 相比早、晚稻均无显著性差异。当年新施生物炭能够显著提高早、晚稻钾素吸收量,且随着生物炭施用量的增加钾素吸收量呈增加趋势。与 B_0 相比, B_{20} 、 B_{40} 早稻钾素吸收量分别显著提高22.8%、39.9%,晚稻分别显著提高9.9%、19.5%。早稻 Y_2B_{20} 、 Y_2B_{40} 钾素吸收量与 B_0 无显著性差异,晚稻 Y_2B_{40} 钾素吸收量显著提高7.4%。

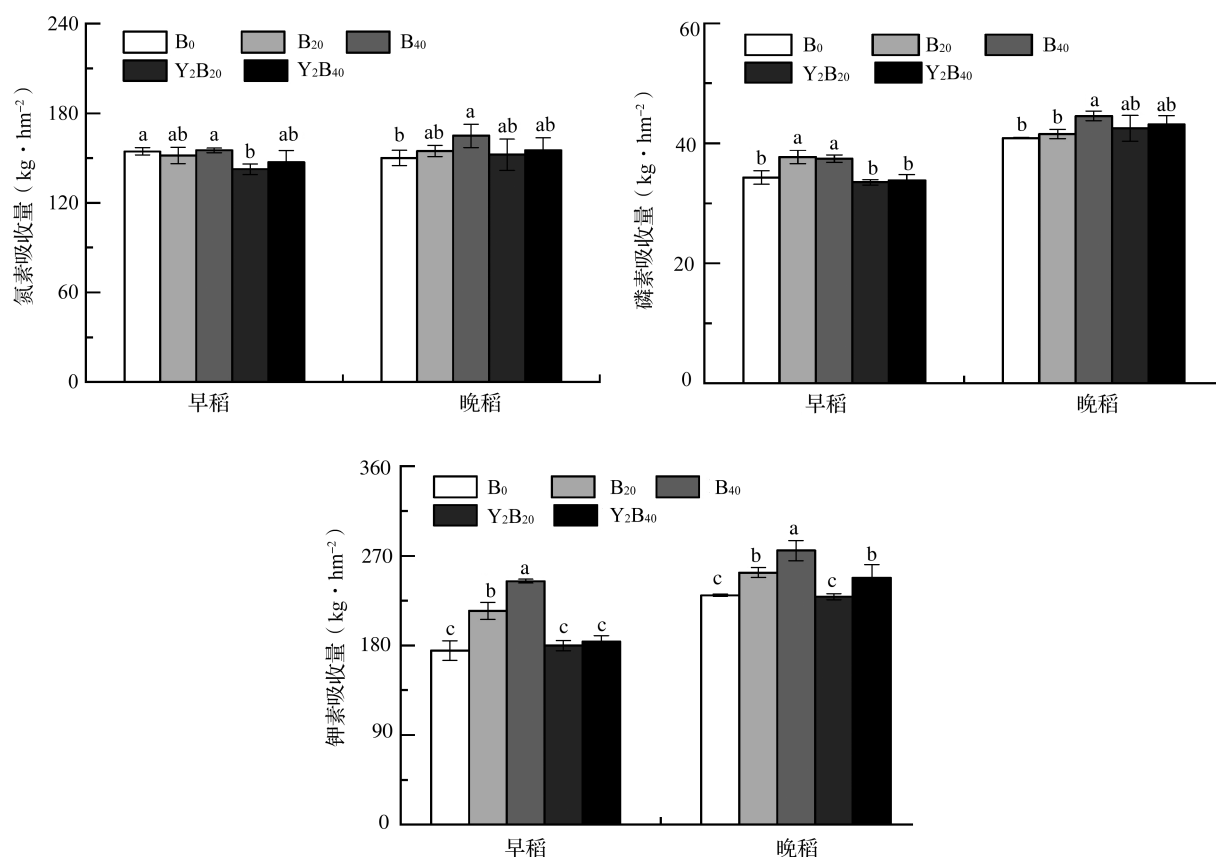


图2 生物炭对早、晚稻养分吸收的影响及其后效

3 讨论

3.1 生物炭对土壤理化性质的影响及其后效

本研究中当年新施生物炭能够显著提高土壤有机碳、pH与速效钾含量(表1),这与多数研究的结论相一致^[5, 16]。但在本研究中,前2年施用的生物炭处理土壤有机碳、pH、有效磷与速效钾含量均低于当年新施生物炭处理,这表明前2年施用的生物炭对稻田土壤肥力的提升能力明显降低。生物炭中的碳元素主要为稳定的芳香环结构,可长期稳定封存于土壤中^[17],其次仍含有部分不稳定碳,输入土壤后能够在短期内逐渐分解^[18],从而降低土壤有机碳含量;其次,随着施用年限的增加,施入土壤中的生物炭逐渐随水流失或向地下转移,从而使前2年施用的生物炭处理耕作层土壤有机碳含量低于当年新施生物炭处理。许云翔等^[19]研究发现生物炭施入稻田6年后依然能够显著提高土壤有机质与速效钾含量,但却显著降低了土壤pH。生物炭对酸性土壤pH的提升,主要因为其本身富含的碱性物质^[20],其本身含有的钾、钠、

钙、镁等矿质元素能够交换土壤氢离子^[21],降低土壤铝活性^[22],有助于对土壤pH的提升。施用生物炭所带来的碱性物质与矿质元素逐渐流失或被植株吸收,且生物炭发生氧化反应与酸化反应^[23],致使前2年施用的生物炭对土壤pH提升效果逐渐减弱。与多数研究结论类似,施用生物炭能够显著提高土壤速效钾含量^[19, 24]。生物炭本身富含钾元素,新施生物炭能够向土壤中释放大钾元素,从而短期内显著提高土壤速效钾含量,而前2年施用的生物炭提高土壤速效钾含量则可能与其强吸附性有关。曹殿云等^[25]、杨彩迪等^[26]均研究发现施用生物炭能够提高稻田土壤有效磷、总磷和无机磷含量,这与本研究中当年新施生物炭增加土壤有效磷含量相一致。前2年施用的生物炭对土壤有效磷含量无显著提升,可能原因为,一方面由生物炭本身向土壤提供的磷素养分逐渐被消耗,另一方面,前2年施用的生物炭改良土壤酸性能力减弱,减少了磷素矿化。多数研究表明施用生物炭能够长期增加土壤全氮含量^[20, 27-28],一方面生物炭本身含有的氮素能够提升土壤全氮含量,另一方面生物炭的

强吸附性和较高的碳氮比均能够促进土壤矿质氮素固定^[29], 从而提升土壤全氮。本研究中当年新施生物炭与前2年施用的生物炭处理均有增加土壤全氮的趋势, 但未达到显著性差异, 这与高悦等^[30]的研究结论类似。而当年新施生物炭处理显著降低土壤中铵态氮与硝态氮含量, 可能原因为当年新施生物炭显著增加早、晚稻地上部生物量(图1), 提高了晚稻对土壤中矿质氮素的吸收, 从而降低了土壤铵态氮与硝态氮含量。

3.2 生物炭对早、晚稻产量与地上部生物量的影响及其后效

本研究中, 当年新施生物炭与前2年施用的生物炭对早、晚稻产量与地上部生物量的影响存在明显差异(图1、表2)。当年新施生物炭能够通过增加有效穗数、每穗粒数和结实率显著提高早、晚稻产量和地上部生物量, 与多数研究中施用生物炭有利于作物生长和增产的结论相一致^[14], 而前2年施用的生物炭对早、晚稻地上部生物量均无显著影响, 甚至减少了早稻产量。不同试验条件下施用生物炭对作物产量影响不同, 吴震等^[10]研究表明生物炭使用3年后依然能够显著提高土壤肥力与作物产量, 而Qin等^[31]研究表明施用生物炭4年后对水稻产量无显著性影响, 同时Haefele等^[32]研究发现, 在较为肥沃的土壤中施用生物炭可能限制了土壤氮素有效性, 从而降低前3季水稻产量, 而在贫瘠的土壤中施加生物炭却使水稻增产16%~35%。目前关于施用生物炭降低作物产量多解释为其较高的碳/氮抑制了土壤氮素有效性, 减少了作物对氮素的吸收从而降低了作物产量^[5]。本研究中当年新施生物炭能够显著增加土壤磷、钾供应量, 同时显著增加了早、晚稻磷、钾吸收量, 尽管可能由于生物炭较高的碳/氮抑制了氮素有效性^[32], 导致早稻氮素吸收量没有增加, 但由于受磷、钾的正交互作用, 早稻地上部生物量依然显著提高。而前2年施用的生物炭对早、晚稻地上部生物量无显著增加可能与其对土壤磷、钾提升能力减弱有关, 磷、钾对水稻生长的促进能力减弱, 同时生物炭较高的碳/氮抑制了氮素吸收量, 从而可能降低了早稻产量。

3.3 生物炭对早、晚稻养分吸收的影响及其后效

生物炭本身能够向土壤中释放磷、钾、钠、钙、镁等矿质元素, 且由于其本身的微孔结构和较大的比表面积均有利于土壤对养分的吸附固持^[33],

同时有利于提高水稻对养分的吸收。目前多数研究表明施用生物炭能够增加水稻对氮素的吸收^[34-35], 但也有研究表明施用生物炭会降低水稻氮素吸收量^[36]。本研究中, 尽管当年新施生物炭显著增加了早稻地上部生物量, 但未增加早稻氮素吸收, 前2年施用的生物炭甚至降低了早稻氮素吸收量, 这表明当年新施生物炭与前2年施用的生物炭均有可能抑制了早稻氮素吸收。生物炭本身较高的碳/氮可能促使土壤氮素被微生物固持, 降低土壤氮素有效性从而影响水稻对氮素的吸收利用^[35]。而晚稻当年新施生物炭处理氮素吸收量呈增加趋势, 这可能与晚稻季较大的氮肥施用量和新施生物炭处理显著提高的生物量有关。早、晚稻氮施用量分别为165和180 kg·hm⁻², 晚稻季更多的氮素供给, 可能减弱了由于生物炭导致的土壤氮素被微生物固持所造成的影响; 其次, 当年新施生物炭处理较大的生物量可能增强了水稻对土壤氮素的吸收。当年新施生物炭能够增加早、晚稻磷素吸收量, 而前2年施用的生物炭对水稻磷素吸收量无显著提升, 可能原因为, 当年新施生物炭本身向土壤提供的磷素养分提高了土壤有效磷含量, 从而增加水稻磷素吸收量, 而前2年施用的生物炭向土壤供应的磷素则逐渐被消耗。与王耀峰等^[24]、斯林林^[37]研究结果类似, 本研究中当年新施生物炭能够显著增加早、晚稻钾素吸收量。前2年施用的生物炭虽有增加早、晚稻茎叶中钾素含量的趋势, 且40 t·hm⁻²生物炭处理对晚稻地上部钾素吸收量增幅显著, 但增幅均低于当年新施生物炭处理, 这可能与前2年施用的生物炭对土壤速效钾的提升低于当年新施生物炭有关。

4 结论

本研究结果表明, 前2年施用的生物炭依然能够显著提高土壤pH、有机碳与速效钾含量, 但增幅均低于当年新施生物炭处理。当年新施生物炭能够显著提高早、晚稻地上部生物量与产量, 而前2年施用的生物炭对早、晚稻地上部生物量无显著提升, 甚至降低了早稻产量。当年新施生物炭能够显著促进水稻对磷、钾的吸收, 而前2年施用的生物炭则影响较小。综上所述, 前2年施入的生物炭对土壤肥力的提升和促进水稻生长的能力均低于当年新施生物炭, 这表明南方双季稻田施用生物炭对土壤性状改良和水稻增产的后效并不长久, 后期应考虑适当增施。

参考文献:

- [1] 虞国平. 水稻在我国粮食安全中的战略地位分析[J]. 新西部(下半月), 2009(11): 31-33.
- [2] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160-167.
- [3] 张林, 林庆毅, 张梦阳, 等. 生物炭对不同土壤改良及生态效应影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(15): 54-58.
- [4] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
- [5] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79.
- [6] Guo Y, Tang W, Wu J G, et al. Mechanism of Cu(II) adsorption inhibition on biochar by its aging process[J]. Journal of Environment Sciences, 2014, 26(10): 2123-2130.
- [7] Heitkötter J, Marschner B. Interactive effects of biochar ageing in soils related to feedstock, pyrolysis temperature, and historic charcoal production[J]. Geoderma, 2015, 245-246: 56-64.
- [8] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2013, 5(2): 202-214.
- [9] 郑琴, 王秀斌, 宋大利, 等. 生物炭对潮土磷有效性、小麦产量及吸磷量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 130-136.
- [10] 吴震, 董玉兵, 熊正琴. 生物炭施用3年后对稻麦轮作系统CH₄和N₂O综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 141-148.
- [11] Dong Y, Wu Z, Zhang X, et al. Dynamic responses of ammonia volatilization to different rates of fresh and field-aged biochar in a rice-wheat rotation system[J]. Field Crops Research, 2019, 241: 107568.
- [12] Dong D, Yang M, Wang C, et al. Responses of methane emissions and rice yield to applications of biochar and straw in a paddy field[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(8): 1450-1460.
- [13] 睦锋, 廖萍, 黄山, 等. 施用生物炭对双季水稻产量和氮素吸收的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(10): 2062-2068.
- [14] 刘悦, 黎子涵, 邹博, 等. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1030-1038.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 史思伟, 娄翼来, 杜章留, 等. 生物炭的10年土壤培肥效应[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 16-22.
- [17] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(2): 777-793.
- [18] Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2016, 8(3): 512-523.
- [19] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭6年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1110-1118.
- [20] Yuan J, Xu R, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 3488-3497.
- [21] Laird D A, Brown R C, Amonette J E, et al. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar[J]. Biofuels Bioproducts & Biorefining, 2009, 3(5): 547-562.
- [22] 林庆毅, 张梦阳, 张林, 等. 老化生物炭对红壤铝形态影响的潜在机制[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 491-497.
- [23] 鞠文亮, 荆延德. 陈化处理对棉花秸秆生物炭理化性质的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 3853-3861.
- [24] 王耀锋, 刘玉学, 吕豪豪, 等. 水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1049-1055.
- [25] 曹殿云, 兰宇, 杨旭, 等. 生物炭调节盐化水稻土磷素形态及释放风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2536-2543.
- [26] 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1-8.
- [27] Nils B, Brenton L, Sita E, et al. Black carbon and soil properties at historical charcoal production sites in Germany[J]. Geoderma, 2014, 232-234: 236-242.
- [28] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54-61.
- [29] 张星, 张晴雯, 刘杏认, 等. 施用生物炭对农田土壤氮素转化关键过程的影响[J]. 中国农业气象, 2015, 36(6): 709-716.
- [30] 高悦, 张爱平, 杜章留, 等. 优化施氮条件下添加生物炭对宁夏灌区土壤条件和水稻生长的影响[J]. 中国农业气象, 2019, 40(5): 327-336.
- [31] Qin X, Li Y, Wang H, et al. Long-term effect of biochar application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system: A four-year case study in south China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 1390-1401.
- [32] Haeefe S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. Field Crops Research, 2011, 121(3): 430-440.
- [33] 王欣, 尹带霞, 张凤, 等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 248-257.
- [34] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1352-1360.

- [35] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 等. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 5998–6011.
- [36] 廖萍, 睦锋, 汤军, 等. 施用生物炭对双季稻田综合温室效应和温室气体排放强度的影响[J]. 核农学报, 2018(9): 1821–1830.
- [37] 斯林林. 生物炭配施化肥对稻田养分利用及流失的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

Effects of biochar on double-season rice growth and soil physical and chemical properties and its aftereffects

WANG Yong, LÜ Ru-jie, LI Xing, ZHAN Jing, WANG Qiu-ju, ZENG Yong-jun, HU Shui-xiu, SHANG Qing-yin*
(Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding/Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045)

Abstract: In order to explore the aftereffects of applying biochar in the double-season rice fields in southern China, this study compared and analyzed the effects of new biochar application (application rates are 0, 20 and 40 t · hm⁻², expressed as B₀, B₂₀ and B₄₀) and biochar application two years ahead (the application rate is the same as B₂₀ and B₄₀, respectively expressed as Y₂B₂₀ and Y₂B₄₀) on the growth of double-season rice and the physical and chemical properties of the soil, with a view to providing theoretical and scientific basis for the rational application of biochar. The results showed that biochar and its after effect significantly increased pH, the content of soil organic carbon and available potassium, and the effect of newly applied biochar was higher than that of biochar applied 2 years in advance. Compared with B₀, the new application of biochar significantly increased the yield of early and late rice and aboveground biomass. The yields of B₂₀ and B₄₀ early rice were significantly increased by 6.9% and 12.6% respectively, and the yield of late rice was significantly increased by 9.4% and 8.3% respectively; for Y₂B₂₀ and Y₂B₄₀, compared with B₀, the yield of early rice decreased significantly by 3.4% and 4.6%, respectively, and had no significant effect on the yield of late rice. In the newly applied biochar treatment, the nitrogen and phosphorus contents in the stems and leaves of early rice and late rice were significantly reduced, while the potassium content showed a significant upward trend with the increase of biochar application. The application of biochar treatment two years ahead had no significant effect on the absorption of nitrogen and phosphorus in early rice and late rice. Only Y₂B₄₀ significantly increased the absorption of potassium in late rice. The absorption of nitrogen, phosphorus and potassium in the newly applied biochar showed an upward trend with the increase of biochar application. Compared with B₀, nitrogen absorption of B₄₀ late rice increased significantly by 9.9%, phosphorus absorption of B₂₀ and B₄₀ early rice increased significantly by 9.9% and 9.1%, respectively, and phosphorus absorption of B₄₀ late rice increased significantly by 9.1%; the absorption amount of potassium of B₂₀ and B₄₀ early rice increased significantly by 22.8% and 39.9%, respectively, and the late rice increased significantly by 9.9% and 19.5%. In summary, there is an aftereffect of the application of straw biochar on the yield, aboveground biomass, nutrient absorption of double-season rice and soil physical and chemical properties, but its aftereffect is shorter, and appropriate supplementation of biochar should be considered.

Key words: biochar; rice; yield; nutrient absorption; soil fertility