

稻田冬季培肥对双季稻生长和土壤养分的影响

成小琳, 周玲红, 徐华勤*, 魏甲彬, 张浪, 唐剑武

(湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 以中嘉早 17 号为早稻材料, 以湘晚粳 12 号为晚稻材料, 设置稻田冬季养鸡、施用生物炭、养鸡配施生物炭 3 种处理, 以冬季休闲为对照, 研究各处理下水稻的生长和产量及其土壤养分变化。结果表明: 与对照相比, 施用生物炭处理各生育期早稻的分蘖数降低, 但二者差异无统计学意义, 各生育期晚稻分蘖数显著提高; 在双季稻生长的大部分时期, 养鸡和养鸡配施生物炭处理双季稻的分蘖数、叶面积指数、干物质质量和水稻产量构成均高于对照, 双季稻的实际产量显著提高, 产量增幅达 8.3%~19.1%; 养鸡配施生物炭处理双季稻田土壤的全氮、全磷和全钾含量提高。综合分析结果表明, 在双季稻田冬季养鸡配施生物炭是一种既能提高水稻产量, 又能提高土壤质量的冬闲田利用模式。

关键词: 水稻; 生物炭; 鸡粪还田; 水稻产量; 土壤养分

中图分类号: S511.062

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2018)01-0001-06

Effects of winter fertilization on soil fertility and the growth of double cropping rice

CHENG Xiaolin, ZHOU Linghong, XU Huaqin*, WEI Jiabin, ZHANG Lang, TANG Jianwu

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Taking rice varieties Zhongjiazao17 and Xiangwanxian12 as early rice and late rice material respectively, four treatments (chickens raising in the field in winter (chickens for short), biochar application in winter (biochar), the combination of chickens raising and biochar application in winter (chickens & biochar for short) and winter fallow (as control)) were conducted to study the effects of winter fertilization on the growth and yield of double-cropping rice and the nutrients changes of paddy soil. The results showed that compared with the control, the treatment of biochar reduced the tiller number of early rice slightly and increased significantly the tiller number of late rice in each growth stage. Both treatments of chickens and chickens & biochar increased the total number of tillers, leaf area index, dry matter and rice yield components in most of the growth period of double cropping rice. The yield of double cropping rice of the both treatments obtained 8.3%–19.1% increase, which was significant higher than that of the control. Moreover, the contents of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in the soil of biochar & chickens were increased at harvest time of late rice. The results of comprehensive analysis showed that biochar application combined with chickens raising in paddy field in winter is a mode of winter fallow field utilization that can improve both rice yield and soil quality.

Keywords: rice; biochar; chicken manure; rice yield; soil nutrients

随着城乡一体化进程的发展, 农民种植水稻的积极性持续下降, 稻田的冬季闲置面积增加^[1]。目前, 南方冬闲田利用模式主要有绿肥、油菜、马铃薯等冬季作物种植模式。这些利用模式经济

效益低, 农民的种植积极性不高^[2]。利用闲置土地在田间种草轮牧养鸡, 不仅可以提高闲置土地的经济产值, 还能提高土壤肥力, 减少后茬作物的化肥用量, 是一种经济效益、环境效益兼备的

收稿日期: 2017-06-01

修回日期: 2017-11-17

基金项目: 国家水稻岗位体系专家项目(CARS-01-30); 湖南省科技计划项目(2016WK2009)

作者简介: 成小琳(1991—), 女, 湖南衡山人, 硕士, 主要从事农业生态学研究, 14789757550@163.com; *通信作者, 徐华勤, 副教授, 主要从事农田生态学研究, xu7541@163.com

高值化循环农业模式^[3-5]。由于鸡粪中氮含量高,鸡粪还田腐解可使土壤碳氮比降低,所以还田鸡粪很快被微生物分解利用,鸡粪肥效难以保持。如何缓解这一矛盾,是农田轮牧、粪便原位还田研究的一个重要课题。

生物炭是一种利用价值很高的土壤调节剂,被誉为“黑色黄金”^[6]。添加了生物炭的土壤生产力比没有添加的高,且生物炭能稳定地存留于土壤中^[7]。鸡粪有机肥和生物炭的添加能为土壤中的微生物提供大量的氮源和碳源。养鸡过程中,新鲜鸡粪直接还田可使土壤有机碳和有机氮含量增加。生物炭的添加可提高土壤的碳氮比,这有可能减缓鸡粪的矿化速率,保持住鸡粪的肥效,以利于下一季作物利用。有关将生物炭与畜禽粪便配合施用对水稻生长及稻田土壤养分影响的研究尚少。笔者研究冬季稻田轮牧养鸡结合添加生物炭,将鸡粪原位还田后作为有机肥翻耕至土壤中,分析其对双季稻的生长和产量以及对土壤养分的影响,旨在为制定环境友好型高值化稻田种养模式提供参考。

1 试验区概况

试验在湖南农业大学耘园试验基地进行。试验区气候温和,雨水充沛,雨热同期,四季分明,年平均气温 17.2 °C, 年均降水量 1 361.6 mm。长沙地区 11 月下旬至翌年 3 月中旬, 平均气温低于 0 °C 的严寒期很短; 全年以 1 月最冷, 月平均气温为 4.4~5.1 °C, 作物可以安全越冬, 缓慢生长。试验地往年种植制度为稻-稻-冬闲制。土壤为潮泥土。

2 材料与方法

2.1 材料

供试早稻和晚稻品种分别为中嘉早 17 号和湘晚粳 12 号。供试生物炭为湖南省长沙市生物质能源利用研究中心提供的水稻谷壳生物炭。该生物炭是在高温(300~450 °C)下限氧碳化而成。供试土壤有机质含量为 24.39 g/kg, 全氮、全磷、全钾含量分别为 2.07、0.75、14.51 g/kg, pH 为 6.15。供试生物炭的总碳含量为 575.3 g/kg, 全氮、全磷、全钾含量分别为 1.9、10.4、12.9 g/kg, pH 为 9.19。

2.2 试验设计

试验于 2015 年 12 月至 2016 年 11 月进行。共

设 3 个处理:施用生物炭处理(处理 1),将生物炭与小区 0~15 cm 土层土壤均匀混合,施用量为 30 t/hm²;冬季稻田养鸡处理(处理 2),2015 年 12 月 3 日开始用定制的笼子养鸡,笼子大小为 3 m×3 m,在笼内饲喂 30 只土鸡,每 8 d 挪动 1 次鸡笼,共挪动 5 次,使得每个小区中鸡粪还田量均匀一致,养鸡期间不施用肥料;养鸡配施生物炭处理(处理 3)。以冬季休闲为对照。每个处理 3 次重复。共 12 个小区,每个小区面积为 27 m²(3 m×9 m)。小区随机区组排列。上一季晚稻收获后的稻草全部作清除处理。于各小区间起垄,覆膜隔开,单灌单排。

在相同时期,于试验田旁用相同的饲养方式笼养 3 只大小和品种相同的土鸡,每 3 d 收集鸡粪,并称取鸡粪的质量,估算田间鸡粪排放量。据报道,每个养鸡小区新鲜鸡粪的还田量约为 7.3 t/hm²。鸡粪便含水量为 52.31%^[8],风干鸡粪总 N、P₂O₅ 和 K₂O 含量分别为 10.3、9.4、8.7 kg/t^[9],因此,本研究中稻田鸡粪肥还田量的总 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别约为 359.0、327.6、303.2 kg/hm²。

处理 1 和对照早稻的纯氮、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 150、75、135 kg/hm²;晚稻的纯氮、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 180、105、150 kg/hm²。处理 2 和处理 3 的氮、磷和钾肥施用量,每季氮肥和钾肥比处理 1 和对照减少 20%,磷肥不变,即早稻的纯氮、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 120、75、108 kg/hm²;晚稻的纯氮、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 144、105、120 kg/hm²。磷肥作基肥一次性施用;氮肥按基肥、分蘖肥、穗肥质量比 4:2:4 施入;钾肥按照基肥、穗肥质量比 7:3 施用。

早稻于 2016 年 3 月 26 日播种,4 月 27 日移栽,7 月 15 日收获;晚稻于 2016 年 6 月 23 日播种,7 月 19 日移栽,10 月 27 日收获。水稻采用育苗移栽进行种植,早稻种植密度为 16.7 cm×20 cm,每穴 4 根基本苗;晚稻种植密度为 20 cm×20 cm,每穴栽 2 根基本苗。早、晚稻的水分管理、病虫害管理等其他管理措施均一致。

2.3 指标测定

2.3.1 水稻分蘖数、植株干物质质量和叶面积指数测定

早稻和晚稻移栽时各小区定点 10 蔸,每隔 7 d

记录 1 次茎蘖数,直至成熟期。观察、记录水稻分蘖盛期、孕穗期、齐穗期、灌浆期、成熟期的具体日期。

分别于早稻、晚稻的分蘖盛期、孕穗期、灌浆期、成熟期测定水稻植株的干物质质量。具体测定方法:按照各处理有效穗平均数于每个小区取 5 蔸水稻植株,剪去全部根系,在 105 °C 下杀青 30 min,之后在 80 °C 下用烘箱烘干至恒重,得到地上部分干物质质量。水稻叶面积指数采用长×宽积系数法测定。

2.3.2 产量及产量构成考察

于早、晚稻收获时每小区连续调查 120 穴水稻的穗数,求每小区穗数的平均数,再根据每小区平均穗数分别取水稻植株 5 蔸,风干后进行室内考种。考种项目为株高、有效穗数、每穗实粒数、空瘪粒数、千粒质量、结实率等。每个小区实割 200 穴植株,脱粒后测定实际产量。

2.3.3 早、晚稻收获时土壤全氮和全磷及全钾含量的测定

早、晚稻收获时,用直径 5 cm、深 20 cm 的圆形土钻于各小区内按“S”形采土样 5 钻,去除土样中的植物残体(根、茎和叶)和土壤中动物、石块等杂

物后混匀,用四分法取其中相对的 2 份土壤混合,装袋,风干,过 0.150 mm 筛后保存,待测。全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用紫外分光光度法测定;全钾含量采用火焰光度法测定^[10]。

2.3.4 数据分析

用 Microsoft Office Excel 2016 对试验数据进行初步整理后,用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析。

3 结果与分析

3.1 稻田冬季培肥对双季稻生长特性的影响

3.1.1 对双季稻不同生育期分蘖数的影响

由表 1 可知,无论在早稻生育期还是晚稻生育期,各处理分蘖数都在分蘖期达到了较高值,随后分蘖数开始减少,到成熟期降至最低。与对照相比,早稻生育期处理 2 与处理 3 在除成熟期外的前 3 个时期均显著高于处理 1 和对照,且与处理 1 和对照的差异显著($P<0.05$);处理 1 和对照水稻分蘖数各时期的差异均无统计学意义,处理 1 的比对照的略低,说明施用生物炭对早稻分蘖数没有促进作用,而养鸡处理,尤其是养鸡配施生物炭处理能够显著促进早稻分蘖。

表1 各处理不同生育期水稻的分蘖数

Table 1 Tiller numbers of rice in different growth period under different treatments

季别	处理	分蘖数				
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆期	成熟期
早稻	对照	(15.93±3.5)b	(15.36±3.1)b		(14.54±3.2)b	(13.30±2.3)b
	1	(14.67±1.1)b	(14.63±1.6)b		(13.21±0.8)b	(13.26±0.5)b
	2	(16.77±2.8)a	(17.33±2.9)a		(17.21±2.3)a	(13.50±1.1)b
	3	(16.07±0.5)a	(16.30±0.4)a		(16.37±0.3)a	(15.50±0.9)a
晚稻	对照	(17.13±3.4)b	(16.25±1.1)b	(14.30±3.1)b	(13.88±0.6)b	(13.59±1.3)b
	1	(20.13±1.3)a	(18.96±2.3)a	(16.83±0.5)a	(15.98±0.6)a	(15.21±0.9)a
	2	(20.50±0.5)a	(18.26±1.6)a	(17.06±0.3)a	(16.12±1.1)a	(15.68±2.6)a
	3	(20.80±0.4)a	(19.33±1.8)a	(17.40±2.9)a	(16.62±2.2)a	(16.30±1.6)a

表中同列不同英文字母表示不同处理间的差异水平($P<0.05$)。

处理 1、处理 2 和处理 3 晚稻各生育期的水稻分蘖数均显著高于对照($P<0.05$)。这表明生物炭在晚稻季也发挥了其独特的理化作用,促进了水稻根系的分蘖。

3.1.2 对双季稻不同生育期叶面积指数的影响

由表 2 可见,在整个生育期内,早稻和晚稻叶面积指数的变化动态相同,均呈先增后减的趋势。

早稻和晚稻的叶面积指数均在孕穗期达到最大值。早稻各处理分蘖期叶面积指数间的差异无统计学意义。除灌浆期外,自孕穗期至成熟期处理 2 和处理 3 的分蘖期叶面积指数与对照的差异显著($P<0.05$);处理 1 水稻叶面积指数只在成熟期与对照差异显著,表明早稻施用生物炭可使叶面积指数下降。除分蘖期和孕穗期外,与对照相比,晚稻各处理水稻的叶面积指数变化不大。

表2 各处理不同生育期水稻的叶面积指数

Table 2 Leaf area index of rice in different growth period under different treatments

季别	处理	叶面积指数				
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆期	成熟期
早稻	对照	1.31±0.3	(3.77±0.5)b		(3.00±0.6)b	(1.97±0.3)b
	1	1.71±0.3	(3.67±0.4)b		(3.80±0.5)b	(3.60±0.5)a
	2	1.75±0.5	(5.65±0.6)a		(3.83±0.1)b	(3.28±0.1)a
	3	1.73±0.5	(5.05±0.4)a		(4.92±0.6)a	(3.89±0.1)a
晚稻	对照	(2.64±0.5)b	(5.62±1.1)b	6.37±1.0	3.65±0.4	2.41±0.6
	1	(4.35±0.3)a	(5.63±0.6)b	6.69±1.2	3.55±0.5	2.20±0.3
	2	(3.89±0.6)a	(7.63±1.1)a	5.34±1.0	4.88±1.3	2.63±0.6
	3	(4.42±0.5)a	(8.76±0.3)a	6.27±0.4	3.76±0.2	2.59±1.1

表中同列不同英文字母表示不同处理间的差异水平($P<0.05$)。

3.1.3 对双季稻不同生育期干物质积累的影响

由表3可见,各处理早、晚稻的干物质质量均随生长时间的延长逐渐增加。除早稻分蘖期、孕穗期和晚稻灌浆期外,处理1、处理2和处理3水稻的干物质质量均显著高于对照($P<0.05$)。早稻灌浆期至成熟期,处理1、处理2和处理3的水稻干物质质量均显著高于对照($P<0.05$)。

各处理早、晚稻的干物质质量积累随生育期推进逐渐变大,且各时期占总干物质的比例也增大,但增加的幅度不同。对照处理早稻分蘖期、孕穗期、灌浆期的干物质质量占成熟期总干物质质量的比

分别为8.5%、44.0%、67.8%,处理1早稻的分别为8.6%、42.7%、67.2%,处理2早稻的分别为8.4%、49.8%、63.7%,处理3早稻的分别为9.4%、37.9%、60.5%。对照处理晚稻分蘖期、孕穗期、齐穗期、灌浆期的干物质质量占成熟期总干物质质量的比分别为15.1%、39.7%、61.3%、92.1%,处理1晚稻的分别为20%、40.7%、63.4%、88.1%,处理2晚稻的分别为20.2%、42.8%、71%、91.6%,处理3晚稻的分别为18.5%、42.3%、70.5%、89%,表明早稻和晚稻中后期施用生物炭、养鸡和养鸡配施生物炭处理的干物质质量积累量均高于对照。

表3 各处理不同生育期水稻植株的干物质质量

Table 3 Matter weight of rice in different growth period under different treatments

季别	处理	单株水稻植株的干物质质量/g				
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆期	成熟期
早稻	对照	83.7±10.3	431±56.6		(664.4±66.6)b	(980.1±102.3)b
	1	102.2±13.6	509.3±25.6		(800.0±69.8)a	(1 190.9±135.2)a
	2	93.5±20.6	555.5±36.4		(710.6±140.6)a	(1 115.2±222.4)a
	3	115.0±14.6	463.2±56.7		(740.0±55.6)a	(1 223.5±69.4)a
晚稻	对照	(247.3±96.5)b	(650.3±69.6)b	(1 004.2±123.6)b	(1 510.1±109.6)b	(1 638.9±145.6)b
	1	(346.8±56.3)a	(700.3±99.6)a	(1 100.1±104.3)b	(1 530.0±115.8)b	(1 735.4±154.4)a
	2	(357.7±35.9)a	(759.3±102.3)a	(1 260.4±105.8)a	(1 625.4±223.4)a	(1 773.7±214.6)a
	3	(349.1±25.4)a	(798.2±105.9)a	(1 330.6±150.3)a	(1 678.1±154.2)a	(1 885.5±111.7)a

表中同列不同英文字母表示不同处理间的差异水平($P<0.05$)。

3.1.4 对早、晚稻不同生育期产量与产量构成的影响

由表4可知,各处理有效穗数的变化幅度早稻为 $303.52\times 10^4\sim 326.79\times 10^4/\text{hm}^2$,晚稻为 $289.17\times 10^4\sim 325.36\times 10^4/\text{hm}^2$,其中,早稻只有处理1和处理3的有效穗数显著高于对照,晚稻只有处理2和处理3的有效穗数显著高于对照($P<0.05$)。各处理每穗粒数的变化幅度早稻为102.05~116.62,晚稻为

100.62~108.87,各处理间的差异和各处理与对照的差异均无统计学意义。3个处理早、晚稻的结实率和千粒质量与对照的差异均无统计学意义。本研究表明,早、晚稻的理论产量及实际产量均以处理3的最大,显著高于对照的($P<0.05$)。处理1、处理2、处理3的早稻实际产量分别比对照增产11.9%、12.3%和19.1%,晚稻分别比对照增产7%、8.3%和12.8%。

表4 各处理水稻的产量构成因素

季别	处理	有效穗数/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	理论产量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	实际产量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
早稻	对照	303.52c	102.05b	73.77	27.73	6.34c	5.87c
	1	326.79a	105.11b	73.53	27.44	6.92b	6.57b
	2	308.20bc	113.82a	73.70	27.13	7.01b	6.59b
	3	319.49ab	116.62a	74.82	27.02	7.46a	6.99a
晚稻	对照	289.17b	103.44a	84.00	24.73	7.39b	7.11c
	1	310.88ab	100.62a	84.65	25.38	7.92b	7.61b
	2	319.97a	105.03a	82.87	24.92	8.37a	7.7ab
	3	325.36a	108.87a	83.43	24.8a	8.77a	8.02a

同列不同字母示处理间差异显著($P < 0.05$)。

3.2 稻田冬季培肥对双季稻田土壤养分的影响

由表 5 可见,早、晚稻收获时,处理 3 水稻土壤的全氮含量和全钾含量均显著高于其他处理($P < 0.05$),说明添加生物炭增加了鸡粪肥效的持续性。与对照相比,处理 2 和处理 3 均显著提高了水稻土的全磷含量,但处理 2 和处理 3 间的差异无统计学意义;处理 1 的土壤只有全磷含量显著高于对照。

表5 各处理早稻和晚稻成熟期土壤的全氮和全磷及全钾含量

Table 5 Soil total N, P and K in maturity stage of rice under different treatments on g/kg

取样时间	处理	全氮含量	全钾含量	全磷含量
2016-07-16	对照	0.53b	13.82b	0.79b
	1	0.58b	14.01ab	0.94a
	2	0.63b	13.65b	0.91a
	3	0.72a	15.25a	0.95a
2016-10-28	对照	0.57b	8.97b	0.86b
	1	0.78b	9.71b	0.88b
	2	0.73b	9.90b	0.93a
	3	1.05a	10.26a	0.97a

同列不同字母示处理间差异显著($P < 0.05$)。

4 结论与讨论

研究表明,每生产 500 kg 稻谷,土壤对 N、 P_2O_5 和 K_2O 的消耗量分别为 7.55~9.55、4.05~5.10、9.15~19.1 kg^[11]。本研究中的鸡粪还田处理,鸡粪中 N、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为 359、327.6、303.2 kg/hm²,鸡粪即养鸡和养鸡配施生物炭处理的氮、磷、钾肥量理论上已经超过了早稻生长对氮肥和钾肥的需求,甚至还能满足晚稻对氮、磷、钾肥量的需求,因此,在早、晚稻种植中减少化肥用量理论上不会造成水稻减产。本研究中,养鸡和施用生物炭处理

均显著提高了双季稻产量,且以养鸡配施生物炭处理水稻产量的提高幅度最大。

通过对双季稻的生长特性进行考察,发现养鸡和施用生物炭以及养鸡配施生物炭处理均可提高双季稻的根系分蘖数、叶面积指数、有效穗数与每穗粒数,最终实现水稻产量的提高。有机肥、无机肥配合施用对提高水稻产量有明显促进作用,且主要是通过提高水稻功能叶的净光合速率和有效穗、每穗实粒数来提高水稻产量^[12]。叶面积指数通常与叶片的净光合效率具有较强的正相关关系^[13],因此,提高叶面积指数,也可提高水稻产量。本研究中,养鸡和施用生物炭以及养鸡配施生物炭处理均明显提高了叶面积指数,这为地上部干物质的供应、转化与积累提供了重要保障。水稻分蘖数是决定穗数的关键因素之一,而穗数又是构成产量的基础^[14]。本研究中,养鸡和施用生物炭处理以及养鸡配施生物炭处理的早、晚稻有效穗数均比对照的高,这可能是因为添加到土壤中的生物炭参与了土壤养分循环与固持,发挥了保肥作用^[7,15],从而使土壤氮素流失减少。

土壤中施用有机肥能显著提高土壤全氮含量,而有机肥、无机肥配施有利于改善土壤结构,提高土壤的保肥、保水能力^[16-19]。施生物炭土壤的有机碳含量提高,亦即随土壤中 C/N 的提高,土壤对氮素和其他养分的吸持能力增强^[20]。本研究中养鸡配施生物炭处理双季稻产量和土壤全氮、全钾含量均比施用鸡粪处理的高,说明鸡粪中养分的有效性在生物炭作用下得到了一定的保持,但生物炭保持鸡粪肥效的机制还有待研究。

总体而言,与对照相比,养鸡、施用生物炭和养鸡配施生物炭处理均能促进双季稻生长发育,提

高双季稻产量和土壤全氮、全磷、全钾含量, 尤其以养鸡配施生物炭处理的效果最好。

参考文献:

- [1] 谢昭良, 张腾飞, 陈鑫珠, 等. 冬闲田种植 2 种燕麦的营养价值及土壤肥力研究[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 47-53.
- [2] 王积军, 熊延坤, 周广生. 南方冬闲田发展油菜生产的建议[J]. 中国农技推广, 2014, 30(5): 6-8. DOI: 10.3969/j.issn.1002-381X.2014.05.002.
- [3] RASHAD F M, SALEH W D, MOSELHY M A. Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments for organic farming systems: 1. Composting, quality, stability and maturity indices[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(15): 5952-5960. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.103.
- [4] YANG H. Resource management, soil fertility and sustainable crop production: experiences of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 116(1): 27-33. DOI: 10.1016/j.agee.2006.03.017.
- [5] 周玲红, 魏甲彬, 唐先亮, 等. 冬季种养结合对稻田土壤微生物量及有效碳氮库的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(11): 103-114. DOI: 10.11686/cyxb2016032.
- [6] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1445-1451. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.01445.
- [7] SOHI S P, KRULL E, LOPEZ-CAPELE E, et al. A review of biochar and Its use and function in soil[J]. Advances in Agronomy, 2010, 107: 47-82. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)05002-9.
- [8] 邢文英, 李荣. 中国有机肥料养分数据集[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [9] 贾伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [11] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论: 南方本[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [12] STEINER C, TEIXEIRA W G, LEHMANN J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central amazonian upland soil[J]. Plant Soil, 2007, 291: 275-290.
- [13] 黄家雍, 唐仕云, 李翔, 等. 高产栽培模式中能源甘蔗的光合能力和叶面积指数比较分析[J]. 南方农业学报, 2011, 42(1): 22-25. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2011.01.005.
- [14] CHAN K Y, VAN ZWIETEN L, MESZAROS I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45: 629-634.
- [15] 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): 54-62.
- [16] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配比比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516-523.
- [17] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 236-241.
- [18] 袁小乐, 潘晓华, 石庆华, 等. 超级早、晚稻的养分吸收和根系分布特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 27-32.
- [19] 赵易艺, 张玉平, 刘强, 等. 有机肥和生物炭对旱地土壤养分累积利用及小白菜生产的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(14): 119-125.
- [20] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 278-284.

责任编辑: 尹小红

英文编辑: 梁和