



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

施用南荻生物炭对水稻养分利用特征的影响

曾雯, 胡旺, 杨子戔, 张玉平

引用本文:

曾雯, 胡旺, 杨子, 张玉平. 施用南荻生物炭对水稻养分利用特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 689–698.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0393>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基施富硒有机肥料对玉米和土壤硒含量的影响

李圣男, 岳士忠, 李花粉, 乔玉辉

农业资源与环境学报. 2015(6): 571–576 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0140>

施用生物质炭对桃园土壤肥力及黄桃产量和品质的影响

钱九盛, 谢文逸, 何中华, 刘晓雨, 张旭辉, 郑聚锋, 李恋卿, 潘根兴

农业资源与环境学报. 2023, 40(3): 680–688 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0416>

秸秆生物炭对水稻生长及滩涂土壤化学性质的影响

张继宁, 周胜, 李广南, 孙会峰

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 492–499 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0332>

生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响

王悦满, 高倩, 薛利红, 杨林章, 李辉信, 冯彦房

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 58–65 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0162>

减肥条件下生物质炭施用对水稻田土壤细菌多样性的影响

陈重军, 凌学林, 邢龙, 冯健, 吴羽希, 范静, 孙远博, 廖方新

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 385–392 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0327>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曾雯, 胡旺, 杨子彧, 等. 施用南荻生物炭对水稻养分利用特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 689–698.

ZENG W, HU W, YANG Z Y, et al. Effects of the application of biochar derived from *Triarrhena lutarioriparia* on nutrient utilization characteristics in rice [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 689–698.

施用南荻生物炭对水稻养分利用特征的影响

曾雯, 胡旺, 杨子彧, 张玉平*

(湖南农业大学资源学院, 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 长沙 410128)

摘要:为实现南荻秸秆炭化利用,缓解洞庭湖区因秸秆处置不当造成的环境压力,评估南荻生物炭农用增效潜力,本研究选用南方第四纪红土母质发育的红黄泥和花岗岩母质发育的麻砂泥水稻土,设置6个不同用量的南荻秸秆生物炭处理(质量比0、1%、2%、4%、6%和8%,0–20 cm土层),采用水稻盆栽试验,探究南荻秸秆生物炭不同施用量对两种类型土壤水稻养分利用特征的影响。结果表明,南荻秸秆生物炭不同施用量和土壤类型对水稻各器官及地上部干物质累积、养分吸收均有影响。与不添加生物炭相比,添加生物炭处理下的麻砂泥和红黄泥水稻地上部干质量分别提高了0.6%~18.6%和15.5%~42.4%;添加4%生物炭的麻砂泥水稻地上部氮、磷和钾养分累积量分别提高了8.6%、10.5%和82.5%,红黄泥水稻分别提高了33.8%、100.0%和125.3%;二次回归方程与肥炭耦合模型拟合表明,麻砂泥和红黄泥水稻氮素利用的生物炭适宜添加量分别为2.51%和4.80%,磷素利用的生物炭适宜添加量分别为4.33%和7.03%,钾素利用的生物炭适宜添加量分别为4.67%和4.81%。因此,施用南荻生物炭有利于促进水稻氮磷钾养分累积和生长,生物炭添加量与土壤条件是影响肥炭耦合效应的重要影响因素。

关键词:南荻;生物炭;水稻;土壤;养分累积;肥炭耦合

中图分类号:S511;S181;X17 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)03-0689-10 doi: 10.13254/j.jare.2022.0393

Effects of the application of biochar derived from *Triarrhena lutarioriparia* on nutrient utilization characteristics in rice

ZENG Wen, HU Wang, YANG Ziyu, ZHANG Yuping*

(College of Resources, Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: To achieve the carbonization utilization of *Triarrhena lutarioriparia* straw and relieve the environmental pressure caused by improper disposal in the Dongting Lake area, the agricultural efficiency of biochar derived from *Triarrhena lutarioriparia* was clarified. Two typical paddy soils in southern China, namely reddish clayey soil developed from a Quaternary laterite parent material and granitic sandy soil developed from a granite parent material, were selected. Six treatments with different dosage of biochar (0, 1%, 2%, 4%, 6%, and 8% of the soil mass, 0–20 cm soil depth) were set. Rice pot experiments were conducted in 2020 to study the effects of different application rates of *Triarrhena lutarioriparia* biochar on rice nutrient utilization characteristics in two typical soils. The results showed different application rates of *Triarrhena lutarioriparia* biochar and soil types had certain effects on dry matter accumulation and nutrient uptake by rice organs and aboveground structures. With the addition of biochar, compared with the treatment without biochar, the accumulation of dry matter of rice increased from 0.6% to 18.6% and from 15.5% to 42.4% in the granitic sandy soil and reddish clayey soil, respectively. With the addition of 4% biochar, the accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients in the rice plant of the treatment increased by 8.6%, 10.5%, and 82.5% in the granitic sandy soil and by 33.8%, 100.0%, and 125.3% in the reddish clayey soil, respectively. The

收稿日期:2022-06-21 录用日期:2022-08-19

作者简介:曾雯(2001—),女,湖南衡阳人,本科生,主要从事农业资源利用与环境生态方面的研究。E-mail:july_zengw@163.com

*通信作者:张玉平 E-mail:zhyp2003@126.com

基金项目:湖南省重点研发计划项目(2019NK2021);国家重点研发计划项目(2018YFD0800500)

Project supported: The Key Research and Development Program of Hunan Province (2019NK2021); The National Basic Research Program of China (2018YFD0800500)

quadratic regression equation and fertilizer-carbon coupling model fitting showed that the optimal addition amounts of biochar in the granitic sandy soil and reddish clayey soil were 2.51% and 4.80% for nitrogen utilization, 4.33% and 7.03% for phosphorus utilization, and 4.67% and 4.81% for potassium utilization, respectively. Therefore, the application of *Triarrhena lutarioriparia* biochar is conducive to promoting the accumulation and growth of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in rice, and the amount of biochar added and soil conditions are important factors affecting the coupling effect of fertilizer and carbon.

Keywords: *Triarrhena lutarioriparia*; biochar; rice; soil; nutrient utilization; fertilizer and carbon coupling

洞庭湖南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)是多年生禾本科芒属C4草本植物,一直以来是造纸的主要原料,但为维护区域生态安全,国家关停了大批造纸企业,短期内南荻秸秆无法得到有效利用^[1]。2017年洞庭湖区南荻覆盖面积达8.38万hm²,年产秸秆91.03万t,占全国总产量的30%以上^[2]。南荻因失去其原有的主体利用价值,导致产业链条断裂,大面积南荻被弃收、腐烂,成为洞庭湖水体污染的重要来源^[1]。如此丰富的生物质资源未得到合理的开发和利用,不但造成资源浪费,而且增加生态环境污染风险。近年来,生物炭的研究为农业秸秆资源回收利用提供了新思路^[3-4]。生物炭具有发达的孔隙结构,表面拥有丰富的含氧官能团,碱性较强,可改良土壤理化性质,提高土壤养分有效性^[5],且其自身含有大量有机质和丰富的养分元素,可直接为作物生长提供养分,促进作物生长^[6]。南荻属于湿地植物,与稻秸等农作物秸秆相比,内部结构更为疏松多孔,且纤维素和木质素含量丰富,易于改性,是制备生物炭及炭基环保吸附剂的优良前体材料^[7]。近年来,南荻生物炭的制备、炭基肥料与调理剂研发成为热点研究^[8]。已有研究表明,土壤肥力水平、作物种类、管理方式、生物炭生产条件及原料、土壤性质等因素影响生物炭施用效果^[9],其效应在很大程度上取决于作物类型、土壤类型与肥力水平,以及生物炭原料特性、理化性质、施用量、施用方式等^[10-11]。南荻秸秆炭化还田是解决南荻资源化高效利用的重要途径,但由于其施用条件、施用量及其环境效应尚不明确,无法为其推广应用和后

期产品开发提供有效参数支撑。本研究采用水稻盆栽试验,选取南方两种典型母质发育的水稻土,研究南荻生物炭不同添加量对水稻养分吸收利用特征的影响,为南荻生物炭在水稻生产上高效利用提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试地点

温室大棚盆栽试验于2020年6—11月在湖南省长沙市湖南农业大学资源学院校内实习基地(28°11'14" N, 113°04'50" E)进行。

1.2 供试材料

供试水稻品种为湘晚粳13号。生物炭原材料为洞庭湖区野生南荻秸秆,经500℃高温密闭条件下炭化制成。供试肥料为水稻专用复合肥(N:P₂O₅:K₂O=22:6:12),由湖南沃博特生物科技有限公司提供。供试土壤为湖南双季稻区两种典型的水稻土——第四纪红土母质发育的红黄泥和花岗岩母质发育的麻砂泥,供试土壤及南荻生物炭基本理化性质见表1。

1.3 试验设计

采用水稻盆栽模拟土柱试验,装置为内径25 cm、高50 cm的PVC圆柱管。试验设置土壤类型和生物炭用量两个因子。供试土壤类型为麻砂泥(CM)和红黄泥(CH)。按照南荻生物炭添加量为土壤(0~20 cm)质量比0、1.0%、2.0%、4.0%、6.0%和8.0%,设置生物炭0(CH0、CM0)、生物炭1.0%(CH1、CM1)、生物炭2.0%(CH2、CM2)、生物炭4.0%(CH4、CM4)、生物炭

表1 供试土壤及生物炭基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil and biochar

供试材料 Material	有机质 OM/ (g·kg ⁻¹)	总碳 Total C/ (g·kg ⁻¹)	总氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	pH (1:2.5)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	灰分 Ash content/ %	比表面积 Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)	总孔体积 Total pore volume/ (cm ³ ·g ⁻¹)
红黄泥 Reddish clayey soil	2.95	—	0.51	0.18	11.1	4.88	11.7	—	—	—
麻砂泥 Granitic sandy soil	36.5	—	2.13	0.96	17.5	6.73	12.9	—	—	—
生物炭 Biochar	—	143.4	4.94	4.53	28.1	9.30	14.5	77.4	405.86	2.38

6.0%(CH6、CM6)、生物炭8.0%(CH8、CM8)共6个水平12个处理,每个处理3次重复。每个土柱土层高度40 cm,土壤质量19.4 kg,先将20~40 cm土层填满9.7 kg土壤,再将生物炭和0~20 cm土壤充分搅拌均匀后填入土柱。最后施入水稻专用复合肥(N:P₂O₅:K₂O=22:6:12),施肥量为200 kg·hm⁻²(以N计),每盆施用复合肥4.46 g。选择株型大小基本一致的水稻苗,每盆插植3蔸,每蔸2~3株。水稻移栽前灌水浸透土壤,插秧后模拟灌溉,孕穗期后每7 d模拟一次灌溉,每次灌溉各处理盆钵的水量基本一致,并确保水层深度3~5 cm,分蘖盛期晒田,后期干湿交替。其他采用常规措施管理。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 地上部干物质累积量及养分含量测定

于水稻成熟期,每个处理随机取5蔸水稻植株,样品分茎、叶、穗3个部位于105℃杀青后,70℃烘干至恒质量,测定质量后将样品粉碎。植株样品经浓H₂SO₄-H₂O₂消煮后,分别采用半微量-凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定植株氮、磷、钾含量。

1.4.2 养分偏生产力和收获指数计算公式

氮(磷、钾)偏生产力(kg·kg⁻¹)=施氮(磷、钾)处理产量/施氮(磷、钾)量 (1)

氮(磷、钾)收获指数=籽粒氮(磷、钾)累积量/总氮(磷、钾)累积量 (2)

1.5 数据处理与统计分析

采用Excel 2016和Origin 7完成相关数据处理和图表制作,采用LSD法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同生物炭施用量对水稻地上部干质量的影响

由表2可知,土壤类型和施用生物炭处理分别对水稻各器官及地上部干质量影响显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$ 或 $P<0.001$),但两者交互效应不显著,且麻砂泥种植水稻各处理地上部干质量明显高于红黄泥。施用南荻生物炭有利于提高两种类型土壤种植水稻的地上部干质量,且随着生物炭添加量的增加呈先增后减的变化趋势。麻砂泥土壤中,与CM0相比,CM6的水稻茎部干质量降低了1.7%,其余施用生物炭处理提高了1.8%~11.8%;CM1、CM2、CM4的水稻叶部干质量提高了2.5%~18.7%;CM8穗部干质量降低了1.2%,其余施用生物炭处理提高了8.8%~26.0%。总体上施用生物炭处理的水稻地上部干质量提高了0.6%~18.6%,其中CM4处理达显著水平。红黄泥土壤中,与CH0相比,施用生物炭处理的水稻

表2 不同处理水稻地上部干质量
Table 2 Dry mass of rice shoot under different treatments

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	干质量/(g·盆 ⁻¹) Dry mass/(g·pot ⁻¹)			
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	地上部 Shoot
麻砂泥 Granitic sandy soil	CM0	34.21±2.36b	24.79±1.80ab	30.56±4.58bc	89.56±8.70b
	CM1	34.84±3.38b	25.41±3.78ab	35.30±2.74abc	95.55±4.32ab
	CM2	36.40±2.39ab	27.11±1.71ab	37.01±2.43ab	100.52±4.77ab
	CM4	38.25±1.83a	29.43±1.73a	38.51±3.02a	106.20±4.13a
	CM6	33.62±1.56b	24.03±2.24b	33.24±3.12abc	90.89±6.02b
	CM8	35.79±1.03ab	24.11±1.04b	30.19±2.07c	90.09±3.76b
红黄泥 Reddish clayey soil	CH0	20.34±1.87d	17.76±0.67c	20.86±0.79b	58.96±3.24c
	CH1	25.79±1.56bc	19.23±2.36bc	23.11±2.57b	68.12±2.60bc
	CH2	25.05±1.11bc	22.03±2.13abc	24.68±2.22ab	71.77±4.90b
	CH4	31.07±2.19a	23.93±2.91a	28.98±3.42a	83.98±7.35a
	CH6	27.98±2.41ab	23.02±1.80ab	26.36±4.04ab	77.37±6.84ab
	CH8	24.02±0.67ed	21.60±0.93abc	23.48±1.31ab	69.09±2.17bc
方差分析(ANOVA)					
土壤类型(S)		***	***	***	***
生物炭处理(T)		**	*	**	***
S×T		ns	ns	ns	ns

注:相同土壤类型下同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$,ns表示不显著。下同。
Note: On the same soil type, different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$; * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, and ns means not significant. The same below.

茎、叶、穗部干质量和水稻地上部干质量分别提高了18.1%~52.8%、8.3%~34.7%、10.8%~38.9%和15.5%~42.4%,其中CH4处理增幅达显著性水平。

2.2 不同生物炭施用量对水稻地上部氮、磷、钾累积的影响

2.2.1 对氮素累积的影响

由表3可知,土壤类型对水稻各器官氮含量及累积量的影响效应极显著($P<0.001$),且施用生物炭显著影响了水稻穗部和地上部氮累积量($P<0.05$)。麻砂泥土壤中,施用生物炭处理的水稻叶部氮含量较CM0显著降低了10.8%~22.8%,其中CM8降幅最大,但各处理中水稻茎、穗的氮含量差异均不显著;与CM0相比,施用生物炭处理的水稻叶部氮累积量降低了4.3%~23.9%,穗部氮累积量增加了2.0%~28.6%,且CM6、CM8(叶部)和CM4(穗部)降幅或增幅显著;CM4地上部氮素累积量最高,且CM6、CM8显著低于CM4。红黄泥土壤中,与CH0相比,除CH8外施用生物炭处理的水稻茎部氮累积量提高了4.3%~27.5%,且CH4显著高于CH0和CH8,而茎部氮含量在各处理间均无显著性差异;叶部氮含量和氮累积量分别提高了5.5%~22.6%和11.1%~55.6%,且CH6与CH0间差异显著;穗部氮含量除CH2显著降低了11.4%外,各处理的氮含量和累积量均无显著性差异;CH4和CH6地上部氮累积量较CH0显著提高了33.8%和32.3%。

2.2.2 对磷素累积的影响

如表4所示,土壤类型对水稻各器官磷含量及累积量效应极显著($P<0.001$),施用生物炭处理除叶部磷含量及累积量和穗的磷累积量外,其他均达显著水平($P<0.01$ 或 $P<0.05$),但两者交互效应不显著。麻砂泥土壤中,施用生物炭对水稻各部位磷含量和累积量以及地上部磷累积量均无显著影响,但从地上部磷素累积的表观效应来看,CM2、CM4、CM6磷素累积较CM0增加了5.3%~10.5%。红黄泥土壤中,施用生物炭处理的水稻茎、叶、穗中磷含量较CH0处理分别提高了66.7%~264.3%、80.5%~180.5%和0~70.8%(CH2穗中磷含量除外),其中CH6处理茎、叶中磷含量增幅最大,CH8处理穗中磷含量增幅最大。与CH0处理相比,施用生物炭处理的水稻茎、叶、穗中磷累积量分别提高了125.0%~362.5%、100.0%~285.7%和17.1%~91.4%,其中茎、叶中磷累积量在CH6处理最高,穗中磷累积量在CH8处理最高。这说明施用生物炭显著提高了红黄泥水稻地上部各部分磷含量及累积量,且随着生物炭添加量的增加而升高,但对麻砂泥水稻地上部磷素累积影响不显著。

2.2.3 对钾素累积的影响

由表5可知,除穗的钾含量及累积量外,土壤类型和施用生物炭处理分别对水稻各器官钾含量及累积量影响效应显著($P<0.05$)或极显著($P<0.001$),但

表3 不同处理水稻地上部氮含量及累积量

Table 3 Nitrogen content and accumulation of rice shoot under different treatments

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	氮含量 N content/(g·kg ⁻¹)			氮累积量(g·盆 ⁻¹) N accumulation/(g·pot ⁻¹)			
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	地上部 Shoot
麻砂泥 Granitic sandy soil	CM0	16.25±1.29a	18.87±1.90a	16.22±0.83a	0.55±0.02a	0.46±0.01a	0.49±0.06c	1.51±0.01ab
	CM1	16.19±0.65a	16.83±0.58ab	16.80±1.35a	0.57±0.08a	0.43±0.09abc	0.59±0.01abc	1.58±0.04ab
	CM2	14.46±0.95a	16.32±0.60bc	16.25±0.85a	0.53±0.06a	0.44±0.01ab	0.60±0.04ab	1.57±0.05ab
	CM4	15.07±0.92a	14.86±0.73bc	16.31±0.81a	0.58±0.06a	0.44±0.04ab	0.63±0.07a	1.64±0.09a
	CM6	14.33±1.57a	14.66±0.89bc	16.46±0.82a	0.48±0.08a	0.35±0.01bc	0.54±0.03abc	1.38±0.05b
	CM8	14.80±1.10a	14.57±0.70c	16.71±0.07a	0.53±0.04a	0.35±0.01c	0.50±0.03bc	1.38±0.06b
红黄泥 Reddish clayey soil	CH0	8.80±0.72a	9.96±0.56b	14.17±0.38a	0.18±0.02bc	0.18±0.01d	0.30±0.01a	0.65±0.06b
	CH1	8.12±1.39a	10.51±0.48ab	14.12±0.44a	0.21±0.02abc	0.20±0.01c	0.33±0.05a	0.74±0.14ab
	CH2	7.47±0.88a	10.62±0.12ab	12.56±0.31b	0.19±0.01abc	0.23±0.03bc	0.31±0.04a	0.73±0.12b
	CH4	7.28±0.81a	10.94±1.40ab	13.35±0.68ab	0.23±0.04a	0.26±0.01ab	0.39±0.06a	0.87±0.12a
	CH6	7.94±0.43a	12.21±1.12a	13.82±0.44ab	0.22±0.01ab	0.28±0.01a	0.36±0.05a	0.86±0.13a
	CH8	7.77±0.10a	11.17±0.60ab	13.42±1.41ab	0.16±0.01c	0.27±0.02a	0.32±0.05a	0.75±0.02ab
方差分析(ANOVA)								
土壤类型(S)		***	***	***	***	***	***	***
生物炭处理(T)		ns	ns	ns	ns	ns	*	*
S×T		ns	***	ns	ns	***	ns	*

表 4 不同处理水稻地上部磷含量及累积量
Table 4 Phosphorus content and accumulation in rice shoot under different treatments

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	磷含量 P content/(g·kg ⁻¹)			磷累积量/(g·盆 ⁻¹) P accumulation/(g·pot ⁻¹)			
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	地上部 Shoot
麻砂泥 Granitic sandy soil	CM0	1.61±0.17a	1.20±0.05a	3.29±0.08a	0.055±0.004a	0.030±0.001a	0.101±0.017a	0.19±0.02a
	CM1	1.35±0.05a	1.12±0.12a	2.64 ±0.10a	0.047±0.005a	0.028±0.001a	0.093±0.005a	0.17±0.01a
	CM2	1.65±0.32a	1.10±0.13a	3.02±0.29a	0.059±0.009a	0.030±0.002a	0.112±0.018a	0.20±0.03a
	CM4	1.62±0.11a	1.03±0.18a	2.86±0.10a	0.062±0.006a	0.030±0.005a	0.110±0.012a	0.20±0.01a
	CM6	1.81±0.14a	1.16±0.04a	3.74±0.74a	0.061±0.008a	0.028±0.003a	0.122±0.015a	0.21±0.01a
	CM8	1.79±0.44a	1.03±0.21a	3.15±1.00a	0.064±0.014a	0.025±0.005a	0.093±0.023a	0.18±0.04a
红黄泥 Reddish clayey soil	CH0	0.42±0.17c	0.41±0.10c	1.68±0.35c	0.008±0.003c	0.007±0.002b	0.035±0.007c	0.05±0.01c
	CH1	0.70±0.10bc	0.74±0.17ab	2.00±0.35bc	0.018±0.004bc	0.014±0.001ab	0.047±0.014c	0.08±0.01bc
	CH2	1.31±0.26a	0.80±0.11ab	1.65±0.04c	0.033±0.006ab	0.018±0.002ab	0.041±0.005c	0.09±<0.01ab
	CH4	1.00±0.16ab	0.95±0.08a	1.68±0.19c	0.031±0.006ab	0.023±0.004a	0.049±0.009bc	0.10±0.01ab
	CH6	1.32±0.24a	1.15±0.47a	2.54±0.44ab	0.037±0.009a	0.027±0.012a	0.065±0.001ab	0.13±0.01a
	CH8	1.53±0.48a	0.79±0.13ab	2.87±0.25a	0.033±0.012ab	0.020±0.005ab	0.067±0.004a	0.12±<0.01a
方差分析(ANOVA)								
土壤类型(S)		***	***	***	***	***	***	***
生物炭处理(T)		**	ns	*	**	ns	ns	*
S×T		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

表 5 不同处理水稻地上部钾含量及累积量
Table 5 Potassium content and accumulation in rice shoot under different treatments

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	钾含量 K content/(g·kg ⁻¹)			钾累积量/(g·盆 ⁻¹) K accumulation/(g·pot ⁻¹)			
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	地上部 Shoot
麻砂泥 Granitic sandy soil	CM0	15.83±3.92b	19.46±0.52b	8.13±0.10a	0.53±0.09b	0.48±0.03b	0.25±0.04a	1.26±0.04c
	CM1	24.75±2.01a	31.38±3.78a	7.96±0.65a	0.86±0.05a	0.81±0.20a	0.28±0.02a	1.95±0.22b
	CM2	27.46±2.77a	28.17±1.43a	7.79±1.06a	1.00±0.14a	0.77±0.09a	0.29±0.03a	2.06±0.18ab
	CM4	26.67±0.74a	33.08±3.16a	7.79±0.68a	1.02±0.08a	0.97±0.11a	0.30±0.04a	2.30±0.18a
	CM6	30.71±4.48a	31.54±0.77a	8.83±0.75a	1.02±0.10a	0.76±0.08a	0.29±0.04a	2.08±0.04ab
	CM8	25.96±3.8a	32.54±1.65a	7.63±0.71a	0.93±0.14a	0.78±0.01a	0.23±0.03a	1.94±0.10b
红黄泥 Reddish clayey soil	CH0	14.58±1.43b	18.96±2.32b	5.79±0.39a	0.30±0.03c	0.34±0.03c	0.12±0.01b	0.75±0.03d
	CH1	21.71±2.20a	26.13±0.97a	5.88±0.31a	0.56±0.09b	0.50±0.05b	0.14±0.02ab	1.20±0.13c
	CH2	25.08±3.78a	26.96±0.77a	6.04±0.62a	0.63±0.09b	0.59±0.06ab	0.15±0.01ab	1.37±0.05bc
	CH4	26.79±3.03a	28.71±0.46a	6.00±1.25a	0.83±0.03a	0.69±0.09a	0.17±0.04a	1.69±0.09a
	CH6	23.54±1.90a	27.83±1.68a	5.92±0.16a	0.66±0.11ab	0.64±0.09ab	0.16±0.02ab	1.46±0.18ab
	CH8	24.25±2.48a	27.88±1.27a	6.08±0.21a	0.52±0.07b	0.68±0.04a	0.14±0.01ab	1.34±0.08bc
方差分析(ANOVA)								
土壤类型(S)		*	***	***	***	***	***	***
生物炭处理(T)		***	***	ns	***	***	ns	***
S×T		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

两者交互效应不显著。麻砂泥土壤中,与CM0相比,施用生物炭处理水稻茎、叶部的钾含量分别显著提高了56.3%~94.0%和44.8%~70.0%,钾累积量分别显著提高了62.3%~92.5%和58.3%~102.1%,地上部钾累积量显著提高了54.0%~82.5%。其中,水稻茎部钾含量在CM6处理最高,水稻叶部钾含量以及茎、叶和地上部钾累积量均在CM4处理最高,但各处理穗部钾累积量无显著差异。红黄泥土壤中,与CH0相比,施用生物炭处理水稻茎、叶钾含量分别提高了48.9%~83.7%和37.8%~51.4%,茎、叶、穗钾累积量分别提高了73.3%~176.7%、47.1%~102.9%和16.7%~41.7%,地上部钾累积总量提高了60.0%~125.3%,且除CH6外,

CH4地上部钾累积量显著高于其他处理。

2.3 不同生物炭施用量对水稻养分偏生产力与收获指数的影响

如图1所示,不同生物炭施用量对水稻氮、磷、钾肥偏生产力和收获指数均具有一定的影响。红黄泥和麻砂泥两种供试土壤条件下,添加生物炭有利于提高水稻氮、磷、钾肥偏生产力,且随着生物炭施用量的增加,水稻氮、磷、钾偏生产力均表现出先增后减的变化趋势。麻砂泥土壤中,与CM0处理相比,添加生物炭各处理的水稻氮、磷、钾偏生产力增幅为18.8%~56.6%,其中CM4处理增幅最大;红黄泥土壤中,与CH0处理相比,添加生物炭各处理的水稻氮、磷、钾偏生产力增幅为4.1%~33.7%,其中CM4处理增幅最大。

施用生物炭对水稻氮、磷、钾收获指数影响趋势各不相同。施用生物炭可明显提高麻砂泥土壤中水稻氮、磷收获指数,其增幅分别达33.1%~62.4%和13.2%~45.1%,而钾收获指数变化不显著;施用生物炭可显著降低红黄泥中水稻磷、钾收获指数,其降幅分别达13.5%~32.6%和25.2%~39.7%,而对氮收获指

数的影响并不显著。

2.4 水稻氮、磷、钾养分累积量与生物炭施用量间的拟合关系

由表6可知,将水稻植株氮、磷、钾养分累积量(Y)与生物炭施用量(x)进行拟合,植株氮、磷、钾养分累积量与生物炭用量的拟合方程为 $Y=ax^2+bx+c$ 。其中,麻砂泥土壤中,当 x 分别为2.51%、4.33%、4.67%时, Y_N 、 Y_P 、 Y_K 达到最大值,分别为1.58、0.20、2.31 $g \cdot 盆^{-1}$;而红黄泥土壤中,当 x 分别为4.80%、7.03%、4.81%时, Y_N 、 Y_P 、 Y_K 达到最大值,分别为0.86、0.12、1.65 $g \cdot 盆^{-1}$ 。这说明添加生物炭有利于促进水稻氮、磷、钾养分的累积,但因土壤性质差异,其适宜添加量及其促进效果有差异。从供试的两种土壤结果来看,麻砂泥和红黄泥两种土壤中,生物炭适宜添加量分别为4.8%~6.8%和2.5%~4.7%。

2.5 施用生物炭对水稻养分累积的肥炭耦合贡献

生物炭用量对水稻养分累积量的贡献主要分为土壤基础肥力(包括基础地力与复合肥)贡献和增施生物炭促进水稻养分累积的肥炭耦合贡献。由生物

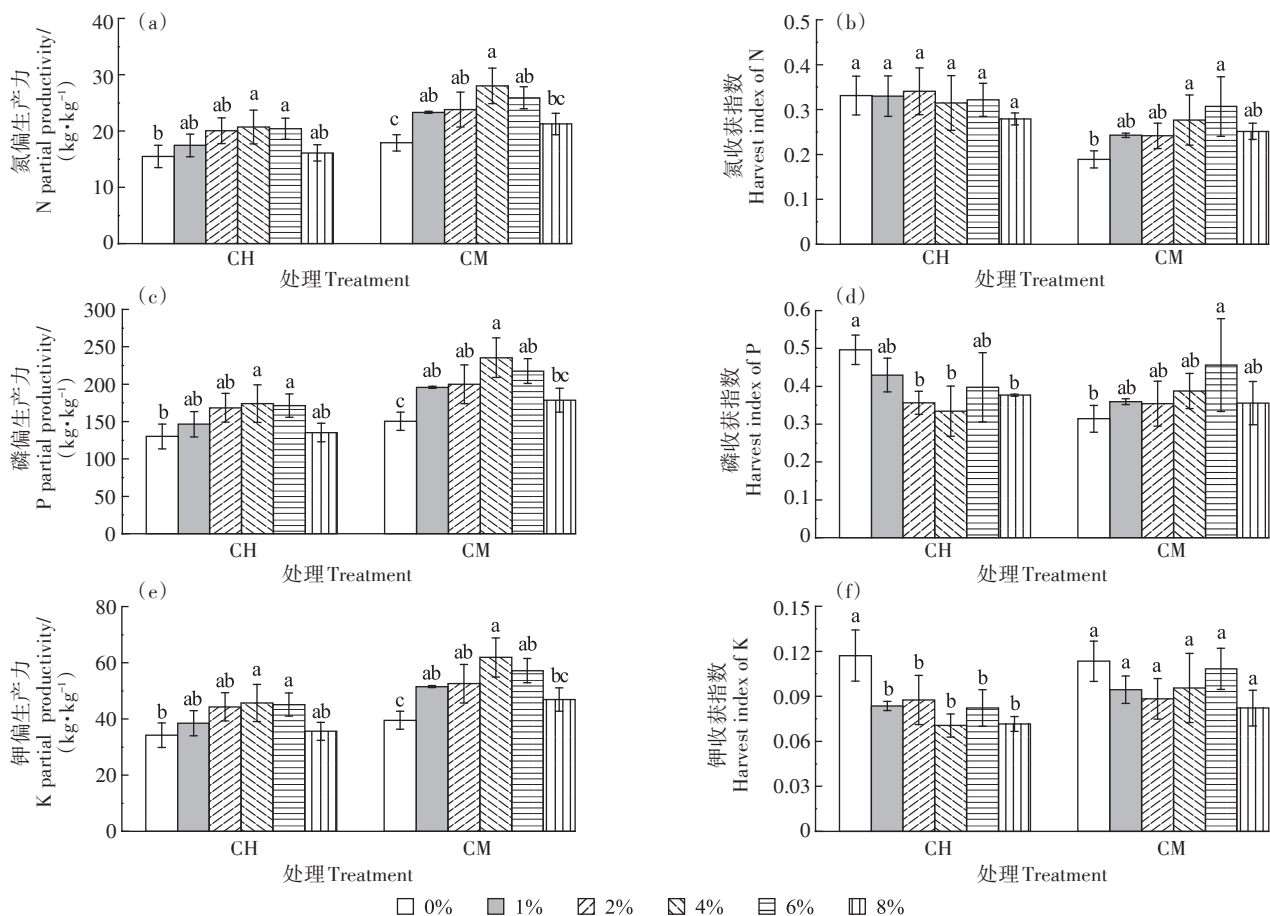


图1 不同处理水稻养分偏生产力与收获指数

Figure 1 Rice nutrient partial productivity and harvest index under different treatments

表6 生物炭施用量与各土壤类型水稻养分累积量的拟合关系
Table 6 Fitting relationship between biochar application rate and total N,P,K accumulation of rice in different types of soils

养分 Nutrient	土壤类型 Soil type	拟合关系方程 Fitting equation	R^2
N	麻砂泥	$Y_N = -79.591x^2 + 3.9885x + 1.5309$	0.6786
	红黄泥	$Y_N = -93.801x^2 + 9.0126x + 0.6404$	0.8858
P	麻砂泥	$Y_P = -13.32x^2 + 1.1533x + 0.1782$	0.4073
	红黄泥	$Y_P = -13.96x^2 + 1.9621x + 0.0545$	0.9376
K	麻砂泥	$Y_K = -409.4x^2 + 38.231x + 1.4192$	0.8481
	红黄泥	$Y_K = -359.23x^2 + 34.539x + 0.8173$	0.9269

注:拟合关系方程中 Y_N 、 Y_P 、 Y_K 分别代表植株氮、磷、钾养分累积变量, x 代表生物炭添加变量。

Note: In the fitting relationship equation, Y_N , Y_P , and Y_K represent the accumulation variables of plant nitrogen, phosphorus and potassium respectively, and x represents the addition variables of biochar.

炭施用量与植株养分累积量拟合关系方程(表6)可知,两种供试土壤条件下,随着生物炭施用量的增加,水稻植株养分累积量的变化呈先增后减的变化趋势。在各处理化肥用量一致的条件下,以单施化肥处理取得的水稻植株养分累积量作为土壤基础肥力贡献,将增施生物炭后各处理的植株养分累积增量视作生物炭与化肥交互作用下的肥炭耦合贡献,建立生物炭施用水稻养分累积的肥炭耦合贡献模型。

由图2可知,麻砂泥和红黄泥两种土壤中,生物炭用量分别为0~20 cm土层质量的2.51%和4.80%时,其肥炭耦合对水稻植株氮素累积贡献最大,分别达0.07 g·盆⁻¹和0.21 g·盆⁻¹,当生物炭用量超过0~20 cm土层质量的5.50%时,麻砂泥土壤中肥炭耦合贡献为负值。两种土壤的生物炭用量分别为0~20 cm土层质量的4.33%和7.03%时,其肥炭耦合对水稻植株磷素累积贡献最大,分别达0.01 g·盆⁻¹和0.07 g·盆⁻¹。两种土壤的生物炭用量分别为0~20 cm土层质量的4.67%和4.81%时,其肥炭耦合对水稻植株钾素累积贡献最大,分别达1.05 g·盆⁻¹和0.90 g·盆⁻¹。这说明在一定的生物炭施肥量条件下,土壤性质及其基础肥力水平的差异势必导致生物炭添加后的养分有效性不同,因而生物炭的适宜添加量和肥炭耦合贡献存在差异。

3 讨论

3.1 施用生物炭对水稻干物质生产的影响

本研究中,添加一定量的南荻生物炭可显著提高红黄泥和麻砂泥水稻土地上部干物质累积量($P < 0.05$),陈芳等^[12]以水稻秸秆炭、水稻谷壳炭和果木炭为研究对象,得出一致的研究结论。这可能是因为南荻生物炭与其他原料制备的生物炭均具有多孔结构,

提高了土壤透气性,有利于水稻根系生长,进而促进水稻地上部的生长^[13];而且其多孔、高碳特性有利于有益菌群数量和多样性增加,从而改善根际环境,促进作物生长^[14];此外,生物炭对土壤N等营养元素有吸附、缓释效应,强化了水稻生育后期养分的持续供应,进而促进其营养生长^[15]。本研究中的不同供试土壤结果表明,南荻生物炭对红黄泥水稻的干物质产量的促进效果显著高于麻砂泥,这可能与供试的红黄泥水稻土基础养分含量偏低、结构性差有关,而生物炭的特殊性能及其富含的养分与矿质元素大大提高了土壤对作物养分的供给能力,从而促进作物生长。

3.2 施用生物炭对水稻养分吸收利用的影响

施用生物炭对作物养分吸收利用效果主要取决于生物炭种类和数量、土壤与作物类型、环境条件等诸多因素^[16]。生物炭富含矿质养分,具有改良土壤酸性、增强土壤通透性、提升土壤持水能力和水稻根系活力^[17-18]的作用,而且能提高土壤微生物数量和活性^[19],进而促进水稻对养分的吸收。王耀锋等^[20]的研究表明,竹炭单施或与化肥配施均可促进水稻秸秆氮磷钾养分的累积。张爱平等^[21]研究认为添加生物炭能够促进水稻对氮的吸收。而张星等^[22]研究认为生物炭施用过多会提高土壤碳氮比,引起微生物与作物争氮,可能会降低植物对氮素的吸收。本研究表明,施用南荻生物炭降低了两种供试土壤的水稻茎、叶中氮含量,表明添加南荻生物炭减缓了水稻对氮素的吸收。这可能是由于南荻生物炭的多官能团、多孔性能强化了其对土壤中氮素的吸附固持,而且生物炭施用后短期内对微生物激发效应更为明显,提高了微生物固氮能力,导致作物可利用的有效氮降低。然而,柳瑞等^[23]认为,适度的减氮或配施稻秆生物炭能有效保持土壤养分,促进水稻对氮素的吸收,从而提高氮素

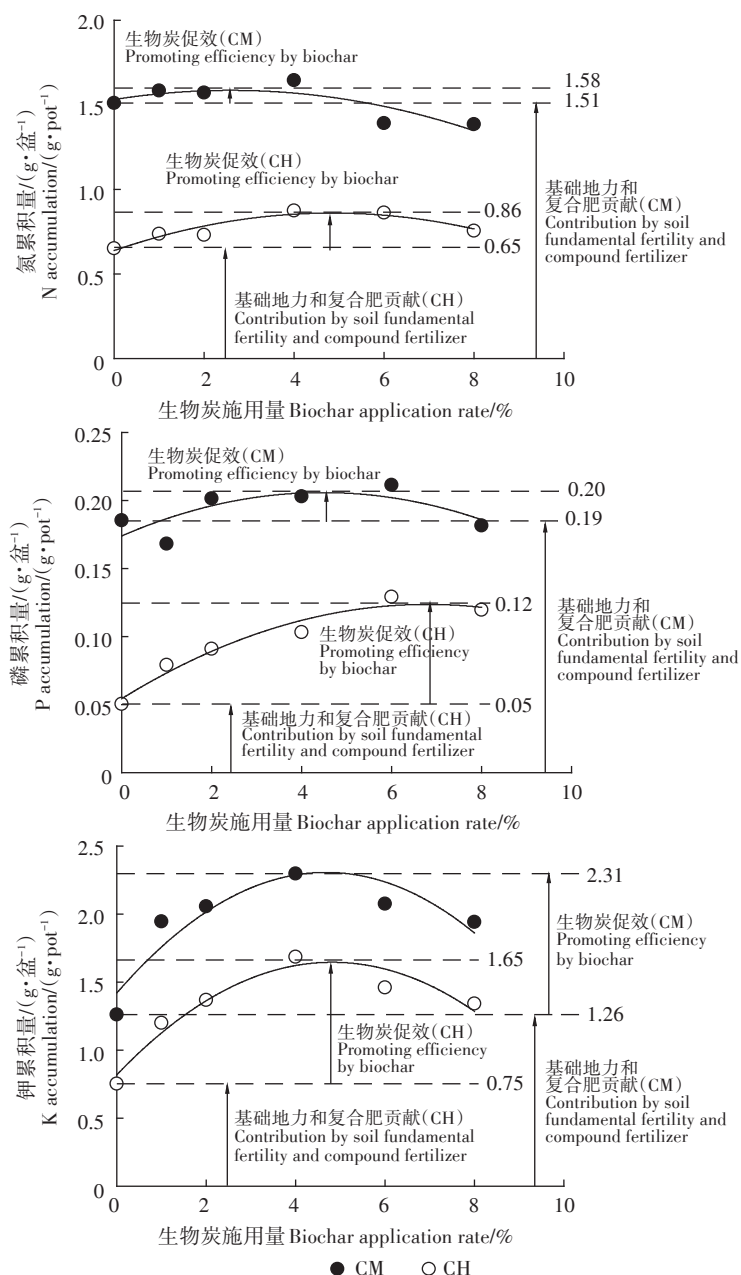


图2 生物炭施用对水稻养分累积的肥炭耦合贡献模型

Figure 2 Contribution model of fertilizer and carbon coupling to nutrient accumulation in rice

利用率。而王耀锋等^[20]和张爱平等^[21]研究发现,生物炭施用显著促进了作物收获期氮素总累积量的增加,但单位生物量氮素含量并未相应增加,这与本研究结果基本相符。本研究中,施用南荻生物炭降低了麻砂泥水稻茎和叶部氮含量及红黄泥水稻茎部氮含量,却显著增加了红黄泥水稻叶部氮含量和两种土壤水稻地上部氮素累积量。这可能是由于南荻生物炭施用提高了水稻籽粒与茎叶吸氮量比,促进氮素向水稻籽粒的分配^[24],从而降低茎叶中氮含量,而红黄泥土壤中氮素养分含量低,施用一定量的生物炭可提高土壤

供氮能力水平,进而促进水稻对氮的吸收。

施用生物炭可显著促进作物对磷、钾的吸收,且作物吸收磷、钾的量随生物炭施用量的提高而增加^[25]。在酸性土壤中施用生物炭,可提高土壤pH值,减少磷的固定,有利于促进水稻对磷素吸收^[5,26]。钟帅^[27]研究发现,施用生物炭显著促进了潜育化稻田花后水稻对钾的吸收,且水稻后期充足的钾供应可为碳水化合物向籽粒的转运奠定生理基础。本研究得出相似的结论,即水稻对磷、钾养分的吸收量与南荻生物炭的用量密切相关,南荻生物炭一定用量条件

下,随着生物炭用量的增加两种土壤类型水稻的磷、钾累积吸收量不断增加,但是持续增施生物炭可能导致水稻对磷的吸收累积降低。这可能是因为一定范围内,生物炭的多孔性等特性对磷、钾养分具有吸附缓释的功能,当用量过大,生物炭对磷的固持作用过强,有可能会减少水稻对磷的吸收。然而,生物炭对钾的高吸附性能可为水稻不断提供充足的钾源。

3.3 施用生物炭对水稻养分利用效率的影响

张爱平等^[21]研究发现,生物炭与氮肥配施可促进水稻对氮素的吸收,提高氮肥农学效率及利用率,且效果随生物炭用量增加而增加。曲晶晶等^[28]在湖南和江西的试验表明,小麦秸秆生物炭施用量为 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水稻氮肥利用率分别提高了20.33个百分点和17.58个百分点。王悦满等^[29]的研究表明,施加生物炭的水稻氮磷钾偏生产力较对照提高了9.81%~36.25%。本研究结果表明,当麻砂泥水稻土生物炭添加量分别小于0~20 cm土壤质量的2.51%(N)、4.33%(P₂O₅)、4.67%(K₂O)时,红黄泥水稻土生物炭添加量分别小于4.80%(N)、7.03%(P₂O₅)、4.81%(K₂O)时,水稻地上部氮、磷、钾养分累积量和偏生产力随着生物炭用量的增加而提高,这与已有的研究基本相符,但是,当生物炭超过以上用量后,其相应的养分利用效率会下降。其原因可能是:生物炭在一定用量范围内,其丰富的官能团和巨大的比表面积可吸附养分离子从而增强肥效^[30],还可通过提高土壤阳离子交换量,对养分吸附和缓释起到一定作用^[31],并且因为生物炭孔隙发达、比表面积大,施入土壤后可改善土壤通气状况,抑制反硝化作用,从而减少氮素损失,促进作物对氮素的吸收,进而提高氮肥利用率^[32]。此外,生物炭自身含有一定的养分,在与土壤的交互作用下会缓慢释放一些营养元素供植物利用^[20]。若持续增施生物炭,其丰富的官能团和较高的阳离子交换量促使肥料氮素养分被吸附固持,降低土壤有效态氮的供给,而土壤前期累积的生物炭逐渐释放所吸附的氮素养分,使土壤氮素供应性能提高,进而间接降低氮肥吸收利用率。

4 结论

(1)南荻秸秆生物炭施用量和土壤类型是水稻各器官及地上部干物质累积、养分吸收效应的重要影响因素。一定用量范围内,施用南荻生物炭可有效促进红黄泥和麻砂泥两种供试土壤条件下水稻氮、磷、钾养分吸收与干物质累积,且其效应与生物炭用量呈正相关关系。然而,若持续增施生物炭可能会降低其肥炭

耦合效应,导致水稻氮、磷、钾养分吸收累积量减少。

(2)因土壤性质及生物炭添加量不同,肥炭耦合对氮、磷、钾养分利用与累积的促进效果以及生物炭的适宜添加量有显著差异,通过线性回归与肥炭耦合效应模型拟合,麻砂泥水稻土的生物炭适宜添加量分别为0~20 cm土壤质量的2.51%(N)、4.33%(P₂O₅)、4.67%(K₂O),红黄泥水稻土生物炭适宜添加量分别为4.80%(N)、7.03%(P₂O₅)、4.81%(K₂O)。

参考文献:

- [1] 廖雄辉. 南荻炭基肥的开发与应用研究——一类南荻生物质新型用途的探索[D]. 长沙:湖南农业大学, 2020. LIAO X H. New miscanthus biomass utilization pathway: A case study of *Miscanthus lutarioriparius*: Based biochar fertilizers[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.
- [2] 赵媛媛, 汤楠, 李智慧, 等. 洞庭湖南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)腐解对水质的影响[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4):1188-1195. ZHAO Y Y, TANG N, LI Z H, et al. Effects of *Triarrhena lutarioriparia* residue decomposition on water quality in Lake Dongting[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(4):1188-1195.
- [3] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16):3324-3333. CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324-3333.
- [4] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8):2166-2172. LIU Y X, WANG Y F, LÜ H H, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8):2166-2172.
- [5] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4):219-230.
- [6] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):779-785. YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):779-785.
- [7] CUI X Q, HAO H L, HE Z L, et al. Pyrolysis of wetland biomass waste: Potential for carbon sequestration and water remediation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 173:95-104.
- [8] 李瑞瑞, 党佩佩, 李琛. 生物炭农田利用领域的研究热点与趋势:基于文献计量学的可视化分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(33):14440-14450. LI R R, DANG P P, LI C. Hotspots and emerging trends in the research area of agricultural application of biochar: Visualization analysis based on bibliometrics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(33):14440-14450.
- [9] 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 and Soil*, 2013, 373(1):583-594.
- [10] PURAKAYASTHA T J, BERA T, BHADURI D, et al. A review on

- biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security[J]. *Chemosphere*, 2019, 227: 345–365.
- [11] 肖婧, 徐虎, 蔡岸冬, 等. 生物质炭特性及施用管理措施对作物产量影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(10): 1827–1837. XIAO J, XU H, CAI A D, et al. A meta-analysis of effects of biochar properties and management practices on crop yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(10): 1827–1837.
- [12] 陈芳, 张康康, 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. CHEN F, ZHANG K K, GU S C, et al. Effects of kinds and application rates of biochar on rice growth and soil nutrients[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(5): 57–63.
- [13] 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. ZHANG W M, MENG J, WANG J Y, et al. Effects of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445–1451.
- [14] 田阿林, 雷涛, 邹应斌, 等. 施用生物炭对水稻生长生理特性及产量的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(3): 25–29. TIAN A L, LEI T, ZOU Y B, et al. Effects of biochar addition on growth physiological characteristics and yield of rice[J]. *China Rice*, 2018, 24(3): 25–29.
- [15] 汪勇, 吕茹洁, 黎星, 等. 生物炭对双季稻生长与土壤理化性质的影响及其后效[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 96–103. WANG Y, LÜ R J, LI X, et al. Effects of biochar on double-season rice growth and soil physical and chemical properties and its aftereffects[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4): 96–103.
- [16] 周加顺, 郑金伟, 池忠志, 等. 施用生物质炭对作物产量和氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 791–799. ZHOU J S, ZHENG J W, CHI Z Z, et al. Effects of biochar amendment on crop yield and the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(5): 791–799.
- [17] BASS A M, BIRD M I, KAY G, et al. Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and composted biochar in two tropical agronomic systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 459–470.
- [18] PENG X, YE L L, WANG C H, et al. Temperature and duration dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an ultisol in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2): 159–166.
- [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. XU Y X, HE L L, LIU Y X, et al. Effects of biochar addition on enzyme activity and fertility in paddy soil after six years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1110–1118.
- [20] 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. WANG Y F, LIU Y X, LÜ H H, et al. Effects of washing biochar and chemical fertilizers on rice yield and nutrient uptake[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 1049–1055.
- [21] 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. ZHANG A P, LIU R L, GAO J, et al. Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the Ningxia Yellow River irrigation region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1352–1360.
- [22] 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. ZHANG X, ZHANG Q W, LIU X R, et al. Effects of biochar on the key soil nitrogen transformation processes in agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(6): 709–716.
- [23] 柳瑞, 高阳, 李恩琳, 等. 减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 926–932. LIU R, GAO Y, LI E L, et al. Effects of reduced nitrogen and biochar application on plant growth, dry matter accumulation and rice yield[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, 29(5): 926–932.
- [24] 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(5): 671–675. CHEN L, QIAO Z G, LI L Q, et al. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5): 671–675.
- [25] GUNDALE M J, DELUCA T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal[J]. *Forest Ecology & Management*, 2006, 231(1/2/3): 86–93.
- [26] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844–4853. ZHANG B, LIU X Y, PAN G X, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4844–4853.
- [27] 钟帅. 生物质炭对潜育性稻田水稻营养的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013. ZHONG S. Effects of biochar on nutrition of rice in gleyed paddy fields[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [28] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚峰, 等. 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 288–293. QU J J, ZHENG J W, ZHENG J F, et al. Effects of wheat-straw-based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice[J]. *Journal of Ecology & Rural Environment*, 2012, 28(3): 288–293.
- [29] 王悦满, 高倩, 薛利红, 等. 生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 58–65. WANG Y M, GAO Q, XUE L H, et al. Effects of different biochar application patterns on rice growth and yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1): 58–65.
- [30] MAJOR J, LEHMANN J, RONDON M, et al. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1366–1379.
- [31] LEHMANN J, DA SILVA J P, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [32] 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. HAN X R, GE Y F, LI N, et al. Effects of continuous application of biochar on soil physico-chemical properties and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(4): 392–398.