

氮肥减量施生物炭对水稻产量和养分利用的影响

段建军¹, 郭琴波², 徐彬², 蒙婳熙², 刘安凯³, 侯再芬⁴, 梁国太⁴, 王小利²

(1.贵州大学烟草学院,贵州省烟草品质研究重点实验室,贵阳 550025;2.贵州大学农学院,

贵阳 550025;3.贵州省农业农村厅,贵阳 550001;4.贵州省思南县农业农村局,贵州 铜仁 565100)

摘要:为解决水稻生产过度依赖化肥及其环境和高效利用问题,探讨贵州黄壤稻田科学施用生物炭。在贵州省思南县典型黄壤稻田开展氮肥不减量(T0)和氮肥减10%施2.5 t/hm²(T1),氮肥减20%施5.0 t/hm²(T2),氮肥减30%施7.5 t/hm²(T3),氮肥减40%施10.0 t/hm²生物炭(T4)和不施肥对照(CK)共6个处理3次重复田间小区随机区组试验,研究了氮肥减量施生物炭对水稻产量、产量构成和氮磷钾养分吸收利用的影响。结果表明,氮肥减量施生物炭显著影响贵州黄壤稻田水稻产量、产量构成、地上部氮磷钾积累量和利用效率。水稻产量和氮磷钾积累量随氮肥减量和生物炭用量增加先增大后减小。2019年、2020年和2021年水稻实际产量和理论产量均分别以T2、T3和T2最高,较T0分别显著增产16.04%、17.94%和14.73%以及55.72%、64.08%和118.91%,水稻籽粒N、P₂O₅和K₂O积累量、偏生产力、农学效率、表观利用率和收获指数均较高,是较好的氮肥减量施生物炭处理。产量—施生物炭量回归方程和极值分析表明,2019年、2020年和2021年氮肥分别减量21.76%、24.60%和19.00%(即32.64、36.90、28.50 kg/hm²)施生物炭量5.44、6.15、4.75 t/hm²时水稻产量最高(分别为7.80、8.57、8.03 t/hm²),较T0分别增产22.52%、18.78%和13.74%。氮肥减量施生物炭显著提高氮磷钾化肥利用率,但导致化肥+生物炭磷和钾利用率降低,因此,贵州黄壤稻田施生物炭时应氮磷钾化肥同步减量,降低比例以氮磷钾减量19.00%~24.60%,施生物炭5.00~6.25 t/hm²为宜。研究结果对指导贵州黄壤稻田氮磷钾化肥减量和施生物炭具有重要指导意义。

关键词: 氮肥; 水稻产量; 产量构成因素; 养分积累量; 养分利用效率; 生物炭; 黄壤稻田

中图分类号: S153.6; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0298-11

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.036

Effects of Biochar Application with Reduced Nitrogen Fertilizer on Rice Yield and Nutrient Utilization

DUAN Jianjun¹, GUO Qingbo², XU Bin², MENG Ruoxi²,

LIU Ankai³, HOU Zaifen⁴, LIANG Guotai⁴, WANG Xiaoli²

(1.College of Tobacco, Guizhou University, Guizhou Provincial Key Laboratory of Tobacco Quality,

Guiyang 550025; 2.College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025; 3.Agriculture and Rural Department of Guizhou Province, Guiyang 550001; 4.Agriculture and Rural Bureau of Sinan County, Tongren, Guizhou 565100)

Abstract: This study aimed to solve the problem of excessive dependence of rice yield on pure chemical nitrogen fertilizer, the environmental problem and high efficiency utilization of chemical nitrogen fertilizer, and even the scientific application of biochar in paddy field. A field experiment was conducted from 2019 to 2021 in Sinan county, Guizhou province. Taking no fertilization as the control (CK), five treatments of chemical nitrogen fertilizer dosages: T0~T4, i.e., 100%, 90%, 80%, 70% and 60% of nitrogen fertilizer, respectively, was set up under the principle of equal total nitrogen application. The rice yield, yield components and nitrogen, phosphorus and potassium uptake and utilization were studied. The results showed that biochar application with reduced nitrogen fertilizer significantly affected the yield, yield composition, aboveground nitrogen, phosphorus and potassium accumulation, and nitrogen, phosphorus, and potassium utilization efficiency of rice. The grain yield and nitrogen, phosphorus and potassium accumulation of rice increased first and then decreased with the increase of biochar application amount and the decrease of nitrogen fertilizer. The

收稿日期:2022-03-27

资助项目:国家自然科学基金项目(31860160,41361064);贵州大学培育项目(贵大培育[2019]12号)

第一作者:段建军(1976—),男,博士,副教授,主要从事耕地土壤保育与肥力提升、土壤养分循环及土壤环境研究。E-mail:2501050402@qq.com

通信作者:王小利(1979—),女,博士,教授,主要从事土壤养分管理、植物营养与施肥等研究。E-mail:xlwang@gzu.edu.cn

highest actual and theoretical rice yield were found under T2, T3 and T2 respectively in 2019, 2020 and 2021, which three significantly increased by 16.04%, 17.94% and 14.73%, and 55.72%, 64.08% and 118.91%, respectively, compared with T0. The accumulation of N, P₂O₅ and K₂O, partial productivity, agronomic efficiency, apparent utilization, and harvest index of rice grains were also higher. So T2 and T3 were the relatively better treatments with reduced nitrogen fertilizer application of biochar. The regression equation of yield-biochar application and extreme value analysis showed that the applied nitrogen fertilizer decreased by 21.76%, 24.60% and 19.00%, respectively in 2019, 2020 and 2021, i.e., 32.64, 36.90 and 28.50 kg/hm². The highest rice yield (7.80, 8.57 and 8.03 t/hm², respectively) was obtained at the biochar application of 5.44, 6.15 and 4.75 t/hm², these yields were increased by 22.52%, 18.78% and 13.74%, respectively, compared with T0. Application of biochar with reduced N fertilizer significantly increased the utilization rate of N, P and K of chemical N, P and K fertilizers, but decreased the utilization rate of that of the chemical fertilizers plus biochar. Therefore, N, P and K fertilizers should be reduced simultaneously when applying biochar in Guizhou yellow soil paddy fields, the reduction percentage of which are 19.00%~24.60% and best application rate of biochar is 5.00~6.25 t/hm². This study has important guiding significance for N, P, and K fertilizer reduction and biochar application in yellow soil paddy fields in Guizhou Province.

Keywords: nitrogen fertilizer; rice yield; yield components; nutrient accumulation; nutriment use efficiency; biochar; paddy field of yellow soil

中国稻田面积约 3.10×10^7 hm², 稻米产量约占粮食总产量的 35%, 在保障粮食安全方面作用举足轻重; 同时每年产生水稻秸秆超过 2.00×10^8 t^[1-2], 其农业应用如直接还田在土壤养分循环、化肥减量和作物增量方面作用重大^[3]。但水稻秸秆直接还田引起稻田 CH₄ 排放增加、病虫害加重和出现僵苗等现象尚待有效解决^[4-5]。生物炭是无氧或限氧条件下秸秆等生物材料高温裂解生成的 pH 高、微孔多、比表面积和 CEC 大、吸附能力和碳稳定性强的富碳富营养物质^[6-7], 在培肥改良土壤、增加土壤固碳和缓解全球气候变化方面成效突出^[8-11], 越来越多地被用于农田以改良土壤和增加产量^[12-13]。氮、磷和钾是植物必需大量营养元素, 对水稻生长发育、产量和产量形成具有重要作用^[14-15], 如 2008—2017 年施肥使中国水稻平均增产 80.80%^[16]。但过量施肥也导致养分利用率急剧下降和严重环境污染^[17]。大量研究^[18-22]表明, 施生物炭或生物炭与化肥配施能促进水稻养分吸收、干物质积累和产量提高, 改良土壤结构, 提高氮利用率, 增加水稻有效分蘖, 促进水稻穗粒形成。如减氮 20% 配施生物炭可促进养分吸收, 增加水稻产量^[23-25], 减氮 40% 配施生物炭粳稻增产 20% 以上, 氮肥农学利用率大于 20 kg/kg^[26]。但也有研究^[27]指出, 持续施生物炭对杂交中籼稻产量无显著影响。因此氮肥减量施生物炭对水稻产量和养分利用的影响可能随氮肥施用水平、生物炭种类和用量、氮肥减量比例, 以及具体稻田生态系统而异, 当前关于氮肥减量施生物炭对贵州黄壤稻田水稻产量、产量构成和养

分特别是磷钾积累和利用影响的研究尚较少。因此, 本研究基于 2019—2021 年连续 3 年的黄壤稻田氮肥减量施生物炭田间小区试验, 研究氮肥减量施生物炭对水稻产量和产量构成因素、养分积累和吸收利用的影响, 以期为贵州黄壤稻田化肥减量和生物炭科学施用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于贵州省铜仁市思南县塘头镇许家坝村的思南县农业绿色试验示范基地内 (108°11′35″E, 27°45′35″N)。试验于 2019 年 3 月开始, 试验开始前稻田为水稻—油菜轮作, 试验开始后改种单季水稻, 冬季自然休闲。该区属中亚热带季风性湿润型气候区, 海拔 398.0 m, 年均气温 17.5 ℃, 年均降水量 1 200 mm。试验地土壤为黄壤性水稻土, 其基本理化性质为 pH 5.86, 有机质含量 29.62 g/kg, 全氮含量 1.39 g/kg, 碱解氮含量 133.00 mg/kg, 有效磷含量 37.16 mg/kg, 速效钾含量 182.07 mg/kg。

1.2 试验设计与试验材料

按等氮量原则共设 6 个处理, 各处理氮磷钾化肥养分和生物炭用量及总养分量见表 1。试验重复 3 次, 共 18 个小区, 田间完全随机区组排列。小区面积 30 m² (5 m×6 m)。

供试化肥为含 N 46.2% 的尿素、含 P₂O₅ 16% 的普通过磷酸钙和含 K₂O 60% 的氯化钾; 水稻秸秆生物炭由南京勤丰众成生物质新材料有限公司生产, 炭

化温度 450 ℃,pH 8.65,有机碳含量 667.22 g/kg,全氮含量 5.99 g/kg,全磷含量 1.99 g/kg,全钾含量 27.15 g/kg。水稻品种为“中浙优 8 号”,由浙江勿忘农种业股份有限公司提供。

表 1 不同处理生物炭和化肥养分用量及其总养分量

处理	生物炭/ (t·hm ⁻²)	化肥用量/(kg·hm ⁻²)			生物炭养分量/(kg·hm ⁻²)			总养分量/(kg·hm ⁻²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T0	0	150	148	230	0	0	0	150	148	230.00
T1	2.5	135	148	230	15	5	67.88	150	153	297.88
T2	5.0	120	148	230	30	10	135.75	150	158	365.75
T3	7.5	105	148	230	45	15	203.62	150	163	433.62
T4	10.0	90	148	230	60	20	271.50	150	168	501.50

2019—2021 年每年 4 月中旬育秧,5 月中旬插秧,水稻行株距均为 40 cm×20 cm,生物炭和化肥每年均按表 1 施用。其中生物炭和磷肥及 50%钾肥作基肥于整地时一次施入小区土壤;包括生物炭氮的氮基追比为 5:5,且仅用化学氮肥追肥,并按分蘖肥:穗肥为 2:3 分 2 次撒施于对应小区,钾肥基追比为 5:5,追肥部分于分蘖期一次施入对应小区。所有小区其他田间管理措施和管理时期均与当地水稻生产保持一致。

1.3 水稻样品采集、测定指标与方法

各试验小区水稻于每年 9 月初成熟时按小区收获并测产。另按小区每小区分别称取混合均匀的水稻籽粒 100 g,65 ℃烘 48 h 测定含水量,计算水稻籽粒烘干重,并按收购标准含水量 13.5%折算为标准产量。水稻收获时从每个小区随机选取 6 穴水稻并收获地上部,脱粒后,分别将籽粒和秸秆置于 105 ℃烘箱中杀青 30 min 后,于 65 ℃下恒温烘至恒重,测定干物质质量,籽粒和秸秆样品粉碎后,H₂SO₄—H₂O₂联合消解—凯氏定氮法测定全氮,钼锑抗比色法测定全磷和火焰光度法测定全钾含量^[28]。

1.4 计算公式

施入稻田土壤的化肥和生物炭 N、P₂O₅ 和 K₂O 及总养分利用效率采用计算公式分别为:

积累量(kg/hm²)= $\frac{\text{含量}(\%)}{\text{生物量}(\text{kg/hm}^2)\times 100\%}$

最大可能偏生产力(kg/kg)= $\frac{\text{施肥处理籽粒产量}(\text{kg/hm}^2)}{\text{施肥量}(\text{kg/hm}^2)}$

最大可能农学效率(kg/kg)= $\frac{\text{施肥处理籽粒产量}(\text{kg/hm}^2)-\text{不施肥处理籽粒产量}(\text{kg/hm}^2)}{\text{施肥量}(\text{kg/hm}^2)}$

最大可能有观利用率(%)= $\frac{\text{施肥处理地上部养分积累量}-\text{不施肥处理地上部养分积累量}}{\text{施肥量}}\times 100\%$

养分收获指数= $\frac{\text{籽粒养分积累量}}{\text{地上部养分积累量}}$

1.5 数据计算与统计分析

数据用 Microsoft Office Excel 365 软件进行整理、计算和图表绘制,SPSS 28.0 软件进行处理间方

差分析,Ducan 法多重比较,Lingo 19.0 进行极值分析,显著性水平均为 P=0.05。

2 结果与分析

2.1 氮肥减量施生物炭对水稻产量的影响

2.1.1 氮肥减量施生物炭对籽粒产量的影响 氮肥减量施生物炭显著影响水稻籽粒产量(图 1)。2019 年 CK 和 T0~T4 水稻籽粒产量分别为 5.65,7.29,7.27,8.46,7.37,6.84 t/hm²,T0~T4 较 CK 分别增产 29.02%,28.76%,49.72%,30.36%和 21.05%,T1 和 T4 较 T0 分别减产 0.21%和 -6.18%,T2 和 T3 较 T0 分别增产 16.04%和 1.04%。2020 年 CK 和 T0~T4 水稻产量分别为 5.99,7.22,8.31,8.38,8.52,8.09 t/hm²,T0~T4 较 CK 分别增产 20.56%,38.67%,39.95%,42.19%和 35.05%,T1~T4 较 T0 分别增产 15.02%,16.08%,17.94%和 12.01%。2021 年 CK 和 T0~T4 水稻产量分别为 5.57,7.06,7.77,8.10,7.65,6.85 t/hm²,T0~T4 较 CK 分别增产 26.75%,39.50%,45.42%,37.34%和 22.98%,T1~T3 较 T0 分别增产 10.06%,14.73%和 8.36%,T4 较 T0 减产 2.97%。

方差分析和多重比较表明,2019 年水稻产量 T0~T3均显著高于 CK,T4 与 CK 之间,T0~T3 之间,以及 T0、T1、T3 和 T4 之间均无显著差异。2020 年水稻产量 T0~T4 均显著高于 CK,T1~T4 显著高于 T0,T3 显著高于 T4(p<0.05),而与 T1 和 T2 之间差异不显著,T1、T2 和 T4 之间差异不显著(p>0.05)。2021 年 T0~T2 显著高于 CK 和 T4(p<0.05),T0~T3 之间,T3 与 CK 之间以及 CK 与 T4 之间均无显著差异(p>0.05)。

2019 年、2020 年和 2021 年水稻产量与施生物炭量间的拟合二次函数分别为 y=-0.0609x²+0.6623x+6.0026(R²=0.856 8),y=-0.0339x²+0.4169x+7.2897(R²=0.943 2)和 y=-0.0434x²+0.4127x+7.0511(R²=0.990 7)[y 为含水量 13.5%的水稻产量(t/hm²);x 为施生物炭量(t/hm²),表 2]。极值分析表明,2019 年、2020 年和 2021 年氮肥

减量比例分别为 21.76%,24.60%和 19.00%,即氮肥减量分别为 32.64,36.90,28.50 kg/hm²和施生物炭量分别为 5.44,6.15,4.75 t/hm²时水稻产量最高,分别为 7.80,8.57,8.03 t/hm²,较 CK 分别增产 44.44%,42.97%和 44.17%,较 T0 分别增产 22.52%,18.78%和 13.74%。

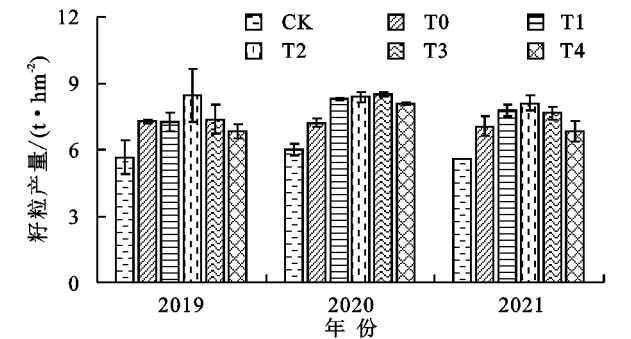


图 1 氮肥减量施生物炭对水稻产量的影响

表 2 水稻产量与氮肥减量施生物炭量之间的拟合函数及极值

年份	拟合函数	R^2	最大产量/ (t·hm ⁻²)	减氮肥量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥减量 比例/%	施生物炭量/ (t·hm ⁻²)
2019	$y = -0.0609x^2 + 0.6623x + 6.0026$	0.8568	7.80	32.64	21.76	5.44
2020	$y = -0.0339x^2 + 0.4169x + 7.2897$	0.9432	8.57	36.90	24.60	6.15
2021	$y = -0.0434x^2 + 0.4127x + 7.0511$	0.9907	8.03	28.50	19.00	4.75
平均	$y = -0.0383x^2 + 0.3916x + 7.1585$	0.9441	8.13	32.68	21.79	5.45

注: y 为含水量 13.5% 的水稻产量(t/hm²); x 为施生物炭量(t/hm²)。

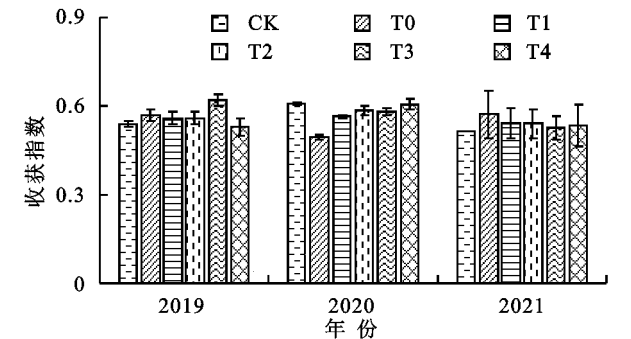


图 2 氮肥减量施生物炭对水稻收获指数的影响

2.1.3 氮肥减量施生物炭对产量构成的影响 氮肥减量施生物炭显著影响水稻单位面积有效穗数、穗粒数(2020 年除外)、结实率、千粒重和理论产量(表 3),但年际波动较大。2019 年水稻单位面积有效穗数 T0~T4 较 CK 分别增加 3.35%,3.18%,4.69%,4.35%和 2.68%,其中 T0、T2 和 T3 显著高于 CK 和 T4。千粒重 T0~T4 比 CK 分别增加 2.60%,3.03%,2.16%,7.79%和 0.43%,仅 T3 与 T4 和 CK 之间达到差异显著水平($p < 0.05$)。穗粒数 T0~T4 较 CK 分别增加 4.29%,10.69%,11.50%,5.66%和 4.46%,T1 和 T2 显著高于 CK($p < 0.05$)。T1~T4 有效穗数、结实率和千粒重较 T0 均有增有减,穗粒数较 T0 均有增加,但均未达到显著差异水平。理论产量 T2 显著高于 CK 和 T0,但与和 T1 和 T3 间差异不显著($p > 0.05$)。2020 年单位面积水稻有效穗数 T1~T4 较 CK 分别

2.1.2 氮肥减量施生物炭对收获指数的影响 收获指数是作物收获时籽粒产量与地上部生物量之间的比值,生理上反映作物同化产物在繁殖器官和营养器官间的分配比例,农学上反映作物群体光合同化物转化为经济产品的能力,是评价作物产量水平和栽培成效的重要指标。氮肥减量施生物炭显著影响水稻收获指数(图 2)。2019 年 CK 和 T0~T4 收获指数分别为 0.54,0.57,0.56,0.56,0.62 和 0.53,其中 CK、T0、T1、T2 和 T4 显著小于 T3 且相互之间均无显著差异($p > 0.05$)。2020 年 CK 和 T0~T4 收获指数分别为 0.61,0.49,0.56,0.58,0.58 和 0.61,其中 T0~T3 显著小于 CK($p < 0.05$),T4 与 CK 差异不显著($p > 0.05$),T1~T4 均显著大于 T0($p < 0.05$)。2021 年 CK 和 T0~T4 收获指数分别为 0.51,0.57,0.54,0.54,0.53 和 0.54,所有处理之间均无显著差异($p > 0.05$)。

增加 36.57%,33.59%,47.76%,43.18%和 20.90%,其中 T0~T3 与 CK 之间差异均达到显著水平($p < 0.05$)。千粒重 T0~T4 比 CK 分别增加 4.13%,12.40%,12.45%,8.35%和 9.84%,且 T1~T4 与 CK 之间均达到差异显著水平($p < 0.05$)。穗粒数 T3 比 CK 增加 5.77%,但未达显著差异水平,其他处理均有不同幅度减小,但亦均未达到差异显著水平。有效穗数 T1 和 T4 分别比 T0 降低 2.19%和 11.48%,T2 和 T3 比 T0 分别增加 8.20%和 4.84%,且仅 T2 与 T0 间达到差异显著水平($p < 0.05$)。千粒重 T1~T4 依次比 T0 增加 7.97%,8.01%,4.07%和 5.50%,且 T1、T2 和 T4 与 T0 之间均达到差异显著水平($p < 0.05$)。穗粒数除 T1 比 T0 略有减小外,T2~T4 均略有增加,但差异均不显著($p > 0.05$)。结实率除 T1 显著高于 T3 和 T4 外,其他各处理间均无显著差异。理论产量 T0~T4 均显著高于 CK,T2 和 T3 比 T0 显著增加,T1 和 T4 比 T0 有增有减,且均未达显著差异水平。T1~T4 之间除 T2 和 T3 显著高于 T4 外,T1、T2 和 T3 之间以及 T1 和 T4 之间差异均不显著($p > 0.05$)。2021 年单位面积水稻有效穗数 T1~T4 之间无显著差异,且均显著高于 CK 和 T0,其中较 CK 分别显著增加 36.57%,33.59%,47.76%,43.18%和 20.90%,较 T0 分别显著增加 20.79%,19.78%,9.71%和 15.79%。穗粒数 T1~T4 较 CK 和 T0 均有增加,其

中 T1~T4 均与 CK 达到显著差异水平,与 T0 仅 T2 达到显著差异水平。结实率 T0~T4 均显著高于 CK,但仅有 T1 高于 T0,且差异不显著($p>0.05$), T2~T4 均低于 T0,且 T2 达到差异显著水平($p<0.05$)。理论产量方面,T1~T4 均显著高于 CK,且 T1~T4 除 T3 外均显著高于 T0。

表 3 氮肥减量施生物炭对贵州黄壤稻田水稻产量构成因素的影响

年份	处理	有效穗数/($\times 10^4$ 穗 $\cdot$ hm $^{-2}$)	穗粒数/粒	结实率/%	千粒重/g	理论产量/(t $\cdot$ hm $^{-2}$)
2019	CK	199.33 $\pm$ 4.93b	194.33 $\pm$ 5.86b	61.67 $\pm$ 0.63c	23.08 $\pm$ 1.33b	5.51 $\pm$ 0.01d
	T0	206.00 $\pm$ 3.46a	202.67 $\pm$ 6.03ab	77.70 $\pm$ 3.81ab	23.71 $\pm$ 0.71ab	7.69 $\pm$ 0.32bc
	T1	205.67 $\pm$ 3.06ab	215.11 $\pm$ 9.54a	74.73 $\pm$ 2.54b	23.84 $\pm$ 0.89ab	7.86 $\pm$ 0.40abc
	T2	208.67 $\pm$ 3.06a	216.67 $\pm$ 6.03a	80.30 $\pm$ 1.48a	23.60 $\pm$ 0.63ab	8.58 $\pm$ 0.58a
	T3	208.00 $\pm$ 2.65a	205.33 $\pm$ 14.84ab	75.67 $\pm$ 0.62b	24.94 $\pm$ 0.15a	8.05 $\pm$ 0.61ab
	T4	204.67 $\pm$ 1.53ab	203.00 $\pm$ 5.00ab	75.67 $\pm$ 2.51b	23.23 $\pm$ 1.02b	7.28 $\pm$ 0.26c
2020	CK	138.96 $\pm$ 1.80c	212.42 $\pm$ 5.39a	94.64 $\pm$ 0.77abc	23.11 $\pm$ 0.10c	6.82 $\pm$ 0.08c
	T0	189.78 $\pm$ 3.11b	205.75 $\pm$ 9.22a	94.81 $\pm$ 0.90abc	24.06 $\pm$ 0.59bc	9.39 $\pm$ 0.07b
	T1	185.63 $\pm$ 19.01ab	204.42 $\pm$ 6.15a	95.76 $\pm$ 0.13a	25.98 $\pm$ 0.55a	9.86 $\pm$ 0.64ab
	T2	205.33 $\pm$ 26.94a	206.04 $\pm$ 16.35a	95.22 $\pm$ 0.28abc	25.99 $\pm$ 0.73a	11.00 $\pm$ 0.32a
	T3	198.96 $\pm$ 30.71ab	224.67 $\pm$ 22.17a	93.64 $\pm$ 0.35bc	25.04 $\pm$ 1.01ab	11.19 $\pm$ 0.69a
	T4	168.00 $\pm$ 11.21bc	211.29 $\pm$ 24.61a	93.11 $\pm$ 2.17c	25.38 $\pm$ 0.39a	9.01 $\pm$ 0.11b
2021	CK	144.44 $\pm$ 10.49b	181.65 $\pm$ 28.08c	83.02 $\pm$ 3.80c	24.93 $\pm$ 0.11c	5.50 $\pm$ 1.37d
	T0	156.95 $\pm$ 9.39b	216.28 $\pm$ 25.48bc	92.56 $\pm$ 0.75a	25.37 $\pm$ 0.57ab	7.98 $\pm$ 1.24c
	T1	189.58 $\pm$ 11.03a	226.54 $\pm$ 21.92b	92.91 $\pm$ 1.02a	25.78 $\pm$ 1.04ab	10.29 $\pm$ 1.33ab
	T2	194.44 $\pm$ 9.85a	275.03 $\pm$ 16.55a	87.31 $\pm$ 0.17b	25.81 $\pm$ 0.68ab	12.04 $\pm$ 0.84a
	T3	175.83 $\pm$ 8.04a	224.07 $\pm$ 17.31b	91.21 $\pm$ 0.65a	26.26 $\pm$ 0.19a	9.43 $\pm$ 0.70bc
	T4	184.72 $\pm$ 13.87a	253.64 $\pm$ 21.83ab	90.19 $\pm$ 0.23ab	26.47 $\pm$ 0.73a	11.14 $\pm$ 0.63ab

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 氮肥减量施生物炭对水稻籽粒氮、磷和钾积累量的影响

氮肥减量施生物炭显著增加水稻籽粒 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分积累量(图 3)。2019 年 T1~T4 水稻籽粒 N 积累量均显著高于 CK,且 T1 和 T2 显著高于 T0,T0 氮积累量较 CK 亦有增加,但差异不显著($p>0.05$)。水稻籽粒 P₂O₅ 积累量除 T2 显著高于 CK 外,其他处理之间均无显著差异。所有处理 K₂O 积累量均无显著差异。2020 年 T0 水稻籽粒 N、P₂O₅ 和 K₂O 积累量分别由 CK 的 46.32,10.79,9.50 kg/hm² 增加到 63.38,11.84,11.96 kg/hm²,增幅分别为 36.83%,9.73%和 25.89%,除 P₂O₅ 积累量未达到差异显著水平外,N 和 K₂O 积累量均达到显著差异水平($p<0.05$)。T1~T4 水稻籽粒 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分积累量比 T0 依次分别增加(21.94%,69.45%和 17.55%),(11.92%,45.48%和 7.00%),(15.72%,155.64%和 27.13%) 和(3.50%,66.70%和 12.65%),除 K₂O 积累量差异均不显著外,N 和 P₂O₅ 积累量均达到显著差异水平($p<0.05$)。其中 T1 水稻籽粒 N 积累量增幅最大,但与 T3 之间差异不显著($p>0.05$);T3 水稻籽粒 P₂O₅ 积累量增幅最大,且与 T1,T2 和 T4 之间均达到显

著差异水平($p<0.05$);T1~T4 水稻籽粒 K₂O 积累量之间均无显著差异。2021 年,水稻籽粒 N、P₂O₅ 和 K₂O 积累量均以 T2 最高,且除与 T3 均无显著差异外,均显著高于其他各处理($p<0.05$)。

2.3 氮肥减量施生物炭对水稻氮、磷和钾利用的影响

2.3.1 氮肥减量施生物炭对氮利用的影响 氮肥减量施等氮量生物炭显著影响水稻对施入的化肥氮和化肥+生物炭氮偏生产力、农学效率、表观利用率和养分收获指数(表 4)。其中不考虑生物炭氮情况下,2019 年化肥氮最大可能偏生产力 T2~T4 均显著高于 T0 和 T1,最大可能农学效率 T2 显著高于 T0 和 T1,最大可能表观利用率 T1、T2 和 T3 均显著高于 T0($p<0.05$),所有处理之间氮收获指数无显著差异。2020 年 T1~T4 化肥氮最大可能偏生产力、最大可能农学效率和最大可能表观利用率均显著高于 T0($p<0.05$);氮收获指数 T0 最小,且显著低于 CK 及 T1~T4($p<0.05$)。2021 年化肥氮最大可能偏生产力 T4 最高,且 T1~T4 均显著高于 T0($p<0.05$),但 T2~T4 之间差异均不显著,且均显著高于 T1($p<0.05$);最大可能农学效率仅 T2 和 T3 显著高于 T0($p<0.05$),且 T2 最高;最大可能表观利用率 T2 最

高,且显著高于 T0、T1 和 T4($p<0.05$);氮收获指数 T0 最高,且显著高于 CK 和 T1($p<0.05$)。

考虑生物炭氮情况下,化肥+生物炭氮最大可能偏生产力 2019 年 T2 最高,但与 T0、T1 和 T3 间差异均不显著($p>0.05$);2020 年 T3 最高且与 T1 和 T2 差异不显著($p>0.05$);2021 年 T2 最高,且与 T1 和 T3 差异均不显著($p>0.05$)。化肥+生物炭氮最大可能农学效率 2019 年 T2 最大,但仅显著高于 T4

处理($p>0.05$),而与其他处理无显著差异;2020 年 T3 最大,但与 T1 和 T2 差异不显著($p>0.05$),而显著高于 T0 和 T4($p<0.05$);2021 年亦 T2 最大,且与 T1 和 T3 差异不显著($p>0.05$)。化肥+生物炭氮最大可能表观利用率 2019 年 T2 最大,并显著高于 T0 和 T4 ($p<0.05$);2020 年 T1 最大,除 T3 差异不显著外,显著高于其他各处理($p<0.05$);2021 年 T2 最大,亦显著高于除 T3 外的所有其他处理($p<0.05$)。

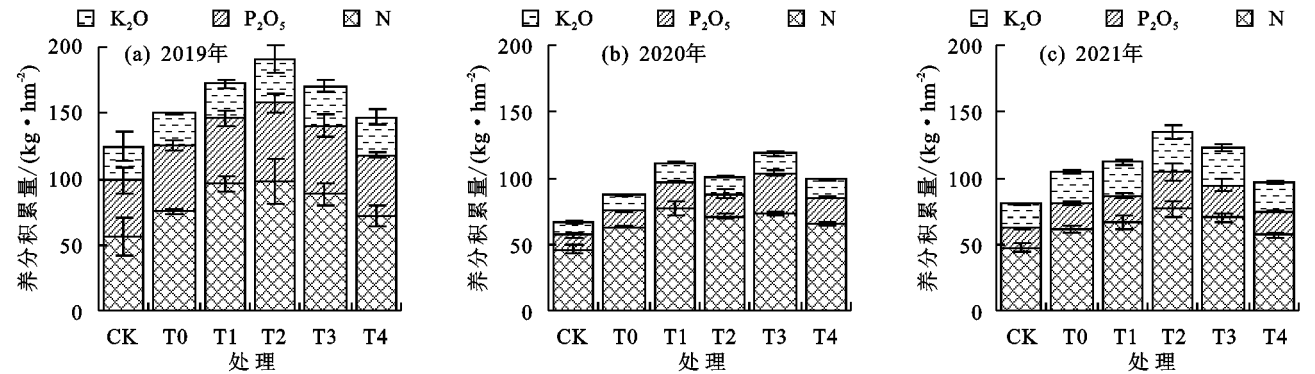


图 3 氮肥减量施生物炭对水稻籽粒养分积累量的影响

表 4 氮肥减量施生物炭对水稻氮利用的影响

年份	处理	最大可能偏生产力/(kg·kg ⁻¹)		最大可能农学效率/(kg·kg ⁻¹)		最大可能表观利用率/%		收获指数
		氮肥	氮肥+生物炭	氮肥	氮肥+生物炭	氮肥	氮肥+生物炭	
2019	CK	—	—	—	—	—	—	0.67±0.07a
	T0	48.60±0.59b	48.60±0.59ab	10.93±0.59b	10.93±0.59ab	21.01±0.44c	21.01±0.44b	0.66±0.01a
	T1	53.88±3.04b	48.50±2.74ab	12.03±3.04b	10.83±2.74ab	40.47±4.72ab	36.43±4.25a	0.70±0.01a
	T2	70.49±9.96a	56.41±7.97a	23.41±9.96a	18.73±7.97a	49.88±15.80a	39.92±12.64a	0.69±0.03a
	T3	70.15±6.28a	49.13±4.40ab	16.34±6.28ab	11.44±4.40ab	40.73±9.74ab	28.52±6.82ab	0.71±0.01a
	T4	75.99±3.44a	45.63±2.07b	13.22±3.44ab	7.93±2.07b	31.48±8.07bc	18.90±4.85b	0.65±0.03a
2020	CK	—	—	—	—	—	—	0.74±0.01a
	T0	39.43±1.01e	39.43±1.01c	6.73±1.01d	6.73±1.01c	11.38±0.20c	11.38±0.20c	0.63±0.01c
	T1	50.38±0.32d	45.35±0.29ab	14.05±0.32c	12.65±0.29ab	22.94±3.75ab	20.64±3.38a	0.72±0.01a
	T2	57.21±1.51c	45.78±1.21a	16.33±1.51b	13.07±1.21a	20.51±1.88b	16.41±1.50b	0.71±0.02ab
	T3	66.42±0.82b	46.52±0.57a	19.71±0.81a	13.80±0.57a	25.74±1.30a	18.02±0.91ab	0.69±0.02b
	T4	73.60±0.51a	44.19±0.31b	19.10±0.51a	11.46±0.31b	21.42±1.18b	12.85±0.71c	0.74±0.01a
2021	CK	—	—	—	—	—	—	0.66±0.02b
	T0	47.08±3.66c	47.08±3.66bc	9.97±3.66b	9.97±3.66bc	9.26±2.07b	9.26±2.07cd	0.74±0.02a
	T1	57.55±1.79b	51.81±1.61ab	16.32±1.79ab	14.69±1.61ab	14.07±3.48b	12.66±3.14bc	0.66±0.03b
	T2	67.60±2.91a	54.10±2.33a	21.21±2.91a	16.97±2.33a	24.36±5.11a	19.49±4.09a	0.71±0.04ab
	T3	72.86±2.60a	51.03±1.83ab	19.85±2.60a	13.90±1.82ab	21.59±2.94a	15.11±2.06ab	0.69±0.05ab
	T4	73.87±5.22a	44.35±3.14c	12.02±5.22b	7.22±3.13c	10.33±2.79b	6.20±1.68d	0.69±0.05ab

2.3.2 氮肥减量施生物炭对磷利用的影响 无论是否考虑生物炭带入的磷,氮肥减量施生物炭 2019 年磷最大可能偏生产力、最大可能农学效率和最大可能表观利用率和收获指数均以 T2 最高(表 5)。其中不考虑生物炭带入土壤磷的情况下,磷最大可能偏生产力、最大可能农学效率和最大可能表观利用率 T2 比T0 分别增加 16.02%,71.30%和 89.95%;考

虑生物炭带入土壤磷的情况下,磷最大可能偏生产力、最大可能农学效率和最大可能表观利用率 T2 比 T0 分别增加 8.71%,60.47%和 77.97%。2020 年不考虑生物炭带入磷的情况下,磷最大可能偏生产力、最大可能农学效率和最大可能表观利用率均以 T3 为最高,较 T0 分别增加 17.94%,104.99%和 2 175.00%;考虑生物炭带入磷的情况下,磷最大可能偏生产力、

最大可能农学效率和最大可能表观利用率分别以 T1、T1 和 T3 为最高,较 T0 分别增加 4.45%,70.67%和 1 668.33%。2021 年不考虑生物炭带入的磷的情况下,磷最大可能偏生产力、最大可能农学效率和最大可能表观利用率均以 T2 为最高,较 T0 分别增加

14.88%,70.30%和 181.36%;考虑生物炭带入的磷的情况下,磷最大可能偏生产力、最大可能农学效率和最大可能表观利用率分别以 T0、T2 和 T2 为最高,最大可能农学效率和最大可能表观利用率较 T0 分别增加 41.58%和 133.90%。

表 5 氮肥减量施生物炭对水稻磷利用的影响

年份	处理	最大可能偏生产力/(kg·kg ⁻¹)		最大可能农学效率/(kg·kg ⁻¹)		最大可能表观利用率/%		收获指数
		氮肥	氮肥+生物炭	氮肥	氮肥+生物炭	氮肥	氮肥+生物炭	
2019	CK	—	—	—	—	—	—	0.61±0.03a
	T0	49.26±0.60ab	49.26±0.6ab	11.08±0.60ab	11.08±0.60ab	21.29±0.45b	21.29±0.45b	0.66±0.04a
	T1	49.15±2.78ab	47.55±2.69abc	10.98±2.78ab	10.62±2.69ab	36.91±4.31ab	35.71±4.17a	0.64±0.03a
	T2	57.15±8.07a	53.55±7.57a	18.98±8.07a	17.78±7.57a	40.44±12.81a	37.89±12.00a	0.67±0.01a
	T3	49.77±4.46ab	45.21±4.05bc	11.59±4.46ab	10.53±4.05ab	28.89±6.91ab	26.25±6.28ab	0.62±0.15a
	T4	46.21±2.09b	40.73±1.85c	8.04±2.09b	7.08±1.85b	19.14±4.91b	16.88±4.33b	0.59±0.02a
2020	CK	—	—	—	—	—	—	0.62±0.04c
	T0	39.96±1.02c	39.96±1.02b	6.82±1.02c	6.82±1.02c	0.60±0.25c	0.60±0.25d	0.58±0.03c
	T1	45.96±0.29ab	41.74±0.27a	12.82±0.29ab	11.64±0.27a	6.15±0.78b	5.59±0.70b	0.70±0b
	T2	46.38±1.22a	38.57±1.02c	13.24±1.22a	11.01±1.02a	4.24±1.93b	3.52±1.60c	0.71±0.08b
	T3	47.13±0.58a	36.15±0.45d	13.98±0.58a	10.73±0.45a	13.05±1.36a	10.01±1.04a	0.79±0.01a
	T4	44.76±0.31b	31.86±0.22e	11.61±0.31b	8.27±0.22b	5.94±0.45b	4.22±0.32bc	0.77±0.02ab
2021	CK	—	—	—	—	—	—	0.59±0.03a
	T0	47.71±3.70bc	47.71±3.70a	10.10±3.70bc	10.10±3.70a	2.95±0.93b	2.95±0.93ab	0.62±0.03a
	T1	52.50±1.64ab	47.67±1.48a	14.89±1.64ab	13.52±1.48a	3.54±1.36b	3.22±1.24ab	0.54±0.02a
	T2	54.81±2.36a	45.58±1.96a	17.20±2.36a	14.30±1.96a	8.30±4.41a	6.90±3.67a	0.60±0.08a
	T3	51.69±1.85ab	39.65±1.42b	14.08±1.85ab	10.80±1.42a	6.49±2.75ab	4.98±2.11ab	0.61±0.06a
	T4	44.92±3.17c	31.98±2.26c	7.31±3.17c	5.20±2.26b	2.10±0.64bc	1.49±0.46b	0.59±0.09a

2.3.3 氮肥减量施生物炭对钾利用的影响 不考虑生物炭带入的 K₂O 的情况下,2019 年、2020 年和 2021 年 K₂O 最大可能偏生产力均以 T2 为最大,分别较 T0 增大 16.03%,16.10%和 14.89%,且 2020 年和 2021 年均显著大于 T0;K₂O 最大可能农学效率分别以 T2、T3 和 T2 最高,分别较 T0 增大 71.25%,104.78%和 50.62%,且 2020 年和 2021 年均显著大于 T0;K₂O 最大可能表观利用率分别以 T2、T3 和 T2 为最高,分别较 T0 增大 89.93%,31.78%和 26.45%,且均达到显著差异水平($p<0.05$)。考虑生物炭带入的 K₂O 的情况下,K₂O 最大可能偏生产力 2019 年、2020 年和 2021 年分别以 T0、T1 和 T1 为最大,且 2019 年和 2020 年均显著高于其他处理,2021 年与 T0 和 T2 无显著差异;K₂O 最大可能农学效率分别以 T2、T1 和 T2 最高,分别较 T0 增大 7.71%,76.31%和 26.45%,且 2020 年和 2021 年均显著大于 T0($p<0.05$);K₂O 最大可能表观利用率分别以 T1、T3 和 T2 为最高,分别较 T0 增大 33.87%,96.26%和 100.41%,且 2020 年和 2021 年均达到显著差异水平($p<0.05$)。K₂O 收获指数 2019 年以 T3 最高,但各处理之间未达到差异显著水平($p>0.05$);2020 年 CK 最高,且

显著高于除 T4 的所有处理($p<0.05$);2021 年 T0 最高,除与 T1 和 T4 达到显著差异外($p<0.05$),与 T2 和 T3 差异不显著($p>0.05$)(表 6)。

2.3.4 氮肥减量施生物炭对氮磷钾总利用的影响 考虑和不考虑生物炭带入的 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分情况下,氮肥减量施生物炭均显著影响水稻对 N、P₂O₅ 和 K₂O 总养分的生产力、农学效率、表观利用率和收获指数($p<0.05$)(表 7)。其中不考虑生物炭带入的 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分情况下,2019 年、2020 年和 2021 年氮磷钾总生产力分别以 T2、T3 和 T2 为最大,较 T0 分别增大 23.03%,28.93%和 21.84%,且均显著高于 T0($p<0.05$);总农学效率也分别以 T2、T3 和 T2 最高,分别较 T0 增大 81.35%,124.08%和 80.57%,且 2020 年和 2021 年均显著大于 T0($p<0.05$);总表观利用率分别以 T2、T1 和 T2 为最高,分别较 T0 增大 101.34%,86.69%和 139.43%,且均达到显著差异水平($p<0.05$)。考虑生物炭带入的 N、P₂O₅ 和 K₂O 的情况下,总生产力 2019 年、2020 年和 2021 年分别以 T0、T1 和 T1 最大;总农学效率分别以 T2、T1 和 T2 最高;总表观利用率分别以 T1、T1 和 T2 为最高。总收获指数 2019 年、2020 年和 2021 年分别以 T3、T4 和 T0 最高。

表 6 氮肥减量施生物炭对水稻钾利用的影响

年份	处理	最大可能偏生产力/(kg·kg ⁻¹)		最大可能农学效率/(kg·kg ⁻¹)		最大可能表观利用率/%		收获指数
		氮肥	氮肥+生物炭	氮肥	氮肥+生物炭	氮肥	氮肥+生物炭	
2019	CK	—	—	—	—	—	—	0.16±0.06a
	T0	31.70±0.38ab	31.70±0.38a	7.13±0.38ab	7.13±0.38ab	13.70±0.29b	13.70±0.29ab	0.14±0.01a
	T1	31.63±1.79ab	24.42±1.38b	7.06±1.79ab	5.45±1.38abc	23.75±2.77ab	18.34±2.14a	0.14±0.02a
	T2	36.78±5.20a	23.13±3.27b	12.21±5.20a	7.68±3.27a	26.02±8.24a	16.36±5.18a	0.18±0.03a
	T3	32.02±2.87ab	16.99±1.52c	7.46±2.87ab	3.96±1.52bc	18.59±4.45ab	9.86±2.36bc	0.19±0.01a
	T4	29.74±1.35b	13.64±0.62d	5.17±1.35b	2.37±0.62c	12.32±3.16b	5.65±1.45c	0.16±0.03a
2020	CK	—	—	—	—	—	—	0.12±0.01a
	T0	25.71±0.65c	25.71±0.65bc	4.39±0.65c	4.39±0.65c	0.85±0.15c	0.85±0.15c	0.08±0d
	T1	29.58±0.19ab	27.77±0.18a	8.25±0.19ab	7.74±0.18a	1.76±0.17ab	1.65±0.16ab	0.10±0.01bc
	T2	29.85±0.79a	26.41±0.70b	8.52±0.79a	7.54±0.70a	1.21±0.40bc	1.07±0.35bc	0.01±0.02c
	T3	30.32±0.37a	25.37±0.32c	8.99±0.37a	7.52±0.31a	2.26±0.85a	1.89±0.71a	0.10±0.01bc
	T4	28.80±0.20b	22.85±0.16d	7.47±0.20b	5.93±0.16b	1.50±0.29abc	1.19±0.23abc	0.11±0.01ab
2021	CK	—	—	—	—	—	—	0.12±0.02ab
	T0	30.70±2.38bc	30.70±2.38a	6.50±2.38bc	6.50±2.38bc	2.42±0.69bc	2.42±0.69b	0.14±0a
	T1	33.78±1.05ab	31.71±0.98a	9.58±1.05ab	8.99±0.98ab	3.08±0.76abc	2.89±0.72ab	0.10±0.02b
	T2	35.27±1.52a	31.21±1.34a	11.07±1.52a	9.79±1.34a	5.48±2.35a	4.85±2.08a	0.13±0.01a
	T3	33.26±1.18ab	27.83±0.99b	9.06±1.19ab	7.58±0.99ab	4.19±1.27ab	3.50±1.06ab	0.13±0.01a
	T4	28.90±2.04c	22.94±1.62c	4.70±2.04c	3.74±1.62c	1.61±0.31c	1.28±0.25b	0.10±0.02b

表 7 氮肥减量施生物炭对水稻对化肥氮磷钾和化肥+生物炭氮磷钾总养分利用的影响

年份	处理	最大可能偏生产力/(kg·kg ⁻¹)		最大可能农学效率/(kg·kg ⁻¹)		最大可能表观利用率/%		收获指数
		化肥	化肥+生物炭	化肥	化肥+生物炭	化肥	化肥+生物炭	
2019	CK	—	—	—	—	—	—	0.38±0.08b
	T0	13.81±0.17b	13.81±0.17a	3.11±0.17ab	3.11±0.17ab	5.97±0.13b	5.97±0.13b	0.40±0.02ab
	T1	14.18±0.80b	12.11±0.68a	3.17±0.80ab	2.70±0.68ab	10.65±1.24ab	9.09±1.06a	0.43±0.03ab
	T2	16.99±2.40a	12.56±1.77a	5.64±2.40a	4.17±1.77a	12.02±3.81a	8.88±2.81a	0.45±0.03ab
	T3	15.25±1.37ab	9.87±0.88b	3.55±1.37ab	2.30±0.88b	8.85±2.12ab	5.73±1.37b	0.47±0.03a
	T4	14.61±0.66ab	8.35±0.38b	2.54±0.66b	1.45±0.38b	6.05±1.55b	3.46±0.89b	0.39±0.03ab
2020	CK	—	—	—	—	—	—	0.42±0.01ab
	T0	11.20±0.29d	11.20±0.29c	1.91±0.29c	1.91±0.29c	3.90±0.10d	3.90±0.10c	0.32±0.01c
	T1	13.26±0.08c	12.19±0.08a	3.70±0.08ab	3.40±0.08a	8.73±1.28b	8.03±1.17a	0.40±0.02ab
	T2	13.78±0.37b	11.68±0.31b	3.93±0.37ab	3.33±0.31a	6.90±1.09c	5.84±0.93b	0.39±0.03b
	T3	14.44±0.17a	11.29±0.14c	4.28±0.18a	3.35±0.14a	10.81±1.03a	8.45±0.80a	0.40±0.01ab
	T4	14.15±0.10ab	10.23±0.08d	3.67±0.10b	2.65±0.07b	6.88±0.11c	4.97±0.08bc	0.43±0.01a
2021	CK	—	—	—	—	—	—	0.32±0.03bc
	T0	13.37±1.04c	13.37±1.04ab	2.83±1.04bc	2.83±1.04bc	4.51±1.04bc	4.51±1.04bc	0.37±0a
	T1	15.15±0.47ab	13.92±0.43a	4.29±0.47ab	3.95±0.43ab	6.11±1.51abc	5.61±1.39bc	0.29±0.03c
	T2	16.29±0.70a	13.80±0.60a	5.11±0.70a	4.33±0.60a	10.87±3.63a	9.21±3.07a	0.35±0.01ab
	T3	15.84±0.56a	12.38±0.44b	4.31±0.57ab	3.37±0.44ab	8.67±2.05ab	6.79±1.60ab	0.35±0.02ab
	T4	14.21±1.00bc	10.27±0.73c	2.31±1.00c	1.67±0.72c	3.44±0.54c	2.49±0.39c	0.29±0.04c

3 讨论

3.1 氮肥减量施生物炭对水稻产量和收获指数的影响

本研究结果表明,氮肥减量施生物炭水稻籽粒产量较常规施肥显著增加(图 1)。2019 年、2020 年和 2021 年氮肥减量 20%,30%和 20%施生物炭 5.0,7.5,5.0 t/hm²产量均显著高于 T0,3 年的增产幅度

分别达 16.04%,17.94%和 14.73%。同时产量与施生物炭量回归方程极值分析结果表明,2019 年、2020 年和 2021 年氮肥减量 21.76%,24.60%和 19.00%施生物炭量 5.44,6.15,4.75 t/hm²时最高水稻产量分别为 7.80,8.57,8.03 t/hm²,分别较 T0 增产 22.52%,18.78%和 13.74%,但增产幅度逐年降低。阿力木·

阿布来提等^[29]研究表明,低氮配施生物炭显著提高水稻产量,施氮量超过 235 kg/hm²时配施生物炭对产量影响不明显;Feng 等^[30]盆栽试验表明,水稻配施 0.5%和 3.0%焦炭及 0.5%水热炭较单施氮肥增产 1.8%~7.3%,而配施 3.0%水热炭减产 60.40%。本研究中氮肥减量施生物炭连续 3 年的增产效果逐年降低可能与生物炭的累积效应有关。张萌等^[31]研究表明,减氮 10%~30%配施生物炭能够保证水稻增产;曹小闯等^[32]研究表明,缓控释复合肥减氮 20%+生物炭和稳定性复合肥减氮 20%+生物炭处理水稻产量显著高于常规施氮和减氮 20%处理;向伟等^[33]研究指出,常规施氮+10 t/hm²生物炭和减氮 30%+10 t/hm²生物炭与常规施氮(180 kg/hm²)处理相比显著增加水稻产量,增幅达 9.9%~11.9%。水稻产量构成因素是评价、估算和进行产量分解合成的重要因素和指标,有重要理论和实际价值。水稻产量由有效穗数、穗粒数、千粒重和结实率四大因素构成^[34]。本研究表明,与 CK 相比,氮肥减量施生物炭 T1~T3 有效穗数、千粒重和理论产量均显著增加。张爱平等^[35]研究表明,常规施肥添加生物炭显著增加水稻籽粒产量,并随生物炭用量增加而增高,增产率在 15.26%~44.89%,水稻产量与生物炭用量呈显著正相关关系,同时水稻株高和穗粒数也随生物炭用量的增多而增加;不施氮肥情况下,添加生物炭对水稻产量及产量构成没有显著影响。本研究中水稻穗粒数不是单纯随生物炭配施比例增大而增大,可能原因是本研究采用等氮量原则,即随生物炭施用量增加,化学氮肥氮量减少,而总氮保持不变。因此在生物炭增加时氮肥减少,由于生物炭自身结构特点,其中的氮大部分为有机氮,当生物炭用量达到一定水平后,有效态氮不能满足水稻良好生长发育要求,因而产量开始下降,产量构成要素也分别产生不同响应。有研究^[21-22]表明,与单纯减氮相比,减氮补施生物炭增加水稻有效分蘖数,减氮 40%补施生物炭显著增加早稻产量,而本研究结果中减氮 20%或 30%补施生物炭效果最好,这可能与当地气候条件、土壤自身肥力水平、水稻品种以及生物炭性质和生物炭及化肥后效等都有一定关系^[7]。郭晓彦等^[36]研究发现,紫云英还田配合常规施氮的 60%~80%与常规施氮相比可显著提高水稻株高 8.2%~10.4%,与本研究结果相似。实际上,大量研究^[37-42]表明,有机无机配施显著提高肥料利用率,增加作物产量,提高作物品质,并培肥土壤、提升地力。农业生产中也提倡有机无机肥料配施。生物炭作为一种生物有机物质的碳化制剂,既

含有丰富有机质,又含有各种矿质养分,既可看作土壤改良剂、溶质吸附剂甚至生物质燃料,也可看作一种或一类特殊新型有机肥料。因此,减氮配施生物炭可以看作一种新的特殊有机无机肥配施,既可减少化肥用量,又可通过生物炭改善土壤环境,以及二者之间交互作用促进水稻生长发育,增加水稻有效穗数、穗粒数、千粒重和株高,最终提高水稻籽粒产量。

3.2 氮肥减量施生物炭对水稻籽粒氮磷钾养分积累量的影响

养分积累量是水稻养分吸收利用的直接静态体现,多数土壤和作物施氮特别是适量施氮直接影响干物质生成、积累和分配^[43]。不同营养元素特别是其肥料因养分状态、形态和价态等不同对作物产量的作用和贡献不同,受最小养分率、不同养分营养功能和增产效率等支配。与有机肥类似,生物炭也属全养分肥料,其中磷、钾和钙、镁等矿质元素含量较高,低温制备生物炭含氮量也较高,同时生物炭微孔结构和大比表面积利于土壤吸附固持养分^[44],影响氮磷钾等养分的吸收。也有研究^[45]表明,生物炭促进水稻吸收氮。本研究表明,与 T0 相比,氮肥减量施生物炭水稻籽粒 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分积累量均显著增加,这与生物炭化肥配施促进水稻氮吸收^[18]、持续施生物炭显著促进梗稻吸收氮^[46]和钾^[47-48]及水稻秸秆生物炭使晚稻氮、磷和钾吸收量显著增加^[25]等结果一致。由于生物炭富含氮磷钾养分,如本试验中水稻秸秆生物炭全 N、P₂O₅ 和 K₂O 含量分别为 5.99,1.99,27.15 g/kg,施用 2.5 t/hm²生物炭带入土壤的 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别为 15.00,5.00,67.88 kg/hm²。因此,生物炭促进水稻氮磷钾积累具有直接供应和间接促进 2 种作用,并且为更好地节约肥料资源和提高肥料利用,生物炭施用时应同时减少氮磷钾肥的用量。

3.3 氮肥减量施生物炭对水稻 N、P 和 K 养分利用的影响

本研究结果表明,无论是否考虑生物炭带入的氮磷钾养分,T1~T3 氮、磷和钾最大可能偏生产力、农学效率、表观利用率和收获指数均较 T0 增大;除 2021 年总养分收获指数外氮磷钾总养分生产力、农学效率、表观利用率和收获指数也较 T0 高,与晏军等^[49]、王耀锋等^[47]、王悦满等^[48]及何大卫等^[46]的研究结果一致。杨胜玲等^[42]研究发现,有机肥和生物炭替代 25%氮肥水稻氮积累量和氮收获指数增加。向伟等^[33]研究结果表明,常规施氮+10 t/hm²生物炭和减氮 30%+10 t/hm²生物炭氮肥利用率较常规施氮(180 kg/hm²)显著增加 7.7%~8.1%,其中 2018 年和 2019 年

减氮 30%+10 t/hm² 生物炭氮肥偏生产力分别增加 57.1%和 52.3%。田发祥等^[50]研究表明,与常规施化学氮肥相比,减氮 30%有机肥无机肥配施处理促进水稻 N 吸收,提高肥料利用率。适量施用生物炭短期内改善土壤理化性质,提高氮肥利用效率^[51]。但由于生物炭施用向土壤引入大量的磷和钾而使生物炭带入土壤的磷钾随氮肥减量水平增加而增大,总体上造成磷钾利用效率随生物炭施用量增加而降低。因此,在进行生物炭和有机肥替代化肥的研究中应同时考虑有机肥和生物炭对氮磷钾化肥的替代,以避免造成磷钾肥特别是钾肥资源的浪费。

4 结 论

氮肥减量 10%~40%范围内等氮量生物炭替代氮肥田间小区试验表明,生物炭替代氮肥显著影响贵州黄壤稻田水稻籽粒产量和产量构成、地上部氮磷钾的积累和及氮磷钾的利用效率。与 T0 处理相比,T2 和 T3 籽粒标准产量和理论产量均显著增加。水稻籽粒 N、P₂O₅ 和 K₂O 积累量,以及 N、P₂O₅ 和 K₂O 偏生产力、农学效率、氮肥表观利用率和收获指数也以 T2 和 T3 较高,是相对较理想氮肥减量施生物炭处理水平。而 2019—2021 年 3 年的产量—氮肥减量施生物炭量回归方程和极值分析结果表明,氮肥减量 19.00%~24.60%(平均 21.79%)施生物炭量分别为 5.44,6.15,4.75(平均 5.45)t/hm² 时可获得最高水稻产量,分别为 7.80,8.57,8.03(平均 8.13)t/hm²,较 CK 分别增产 44.44%,42.97%和 44.17%(平均 43.86%),较 T0 分别增产 22.52%,18.78%和 13.74%(平均 18.35%)。同时,氮肥减量施生物炭时因生物炭含磷钾特别是含钾量高而引入大量有效钾,需要同时考虑对磷钾肥减量。研究结果对贵州黄壤稻田氮肥及磷钾肥减量施生物炭和水稻增产、提高化肥利用率以及生物炭科学施用管理具有重要意义。

致谢:本研究得到国家自然科学基金项目 31860160,41361064 和 31360503 以及贵州大学培育项目(贵大培育[2019]12 号)的联合资助,特此感谢。项目实施过程中得到贵州省农业农村厅和贵州省思南县农业农村局工作人员的大力支持和帮助,以及得到思南县农业绿色试验示范基地管理人员的大力支持和协助,特此一并感谢。

参考文献:

[1] 彭术,王华,张文钊,等.长期氮肥减量深施对双季稻产量和土壤肥力的影响[J].植物营养与肥科学报,2020,26(6):999-1007.

[2] 彭春艳,罗怀良,孔静.中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J].中国农业资源与区划,2014,35(3):14-20.

[3] 毕于运.秸秆资源评价与利用研究[D].北京:中国农业科学院,2010.

[4] Qi Y Z, Zhen W C, Li H Y. Allelopathy of decomposed maize straw products on three soil-born diseases of wheat and the analysis by GC-MS[J].Journal of Integrative Agriculture,2015,14(1):88-97.

[5] 徐华,蔡祖聪,贾仲君,等.前茬季节稻草还田对稻田 CH₄ 排放的影响[J].农业环境保护,2001,20(5):289-292.

[6] Shang G F, Shen G Q, Liu L, et al. Kinetics and mechanisms of hydrogen sulfide adsorption by biochar[J]. Bioresource Technology,2013,133:495-499.

[7] 张伟明,陈温福,孟军,等.东北地区秸秆生物炭利用潜力、产业模式及发展战略研究[J].中国农业科学,2019,52(14):2406-2424.

[8] Yin X H, Chen J N, Cao F B, et al. Short-term application of biochar improves post-heading crop growth but reduces pre-heading biomass translocation in rice[J]. Plant Production Science,2020,23(4):522-528.

[9] Huang M, Fan L, Jiang L G, et al. Continuous applications of biochar to rice: effects on grain yield and yield attributes[J].Journal of Integrative Agriculture,2019,18(3):563-570.

[10] Kim J, Yoo G, Kim D, et al. Combined application of biochar and slow-release fertilizer reduces methane emission but enhances rice yield by different mechanisms[J].Applied Soil Ecology,2017,117:57-62.

[11] Cayuela M L, van Zwie Ten L, Singh B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2014,191(15):5-16.

[12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soil[J].Soil Science Society of America Journal,2006,70(5):1719-1730.

[13] 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.

[14] 孙园园,孙永健,杨志远,等.不同形态氮肥与结实期水分胁迫对水稻氮素利用及产量的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(3):274-281.

[15] 剧成欣,周著彪,赵步洪,等.不同氮敏感性粳稻品种的氮代谢与光合特性比较[J].作物学报,2018,44(3):405-413.

[16] 韩天富,马常宝,黄晶,等.基于 Meta 分析中国水稻产量对施肥的响应特征[J].中国农业科学,2019,52(11):1918-1929.

[17] Guo J J, Fan J L, Zhang F C, et al. Blending urea and slow-release nitrogen fertilizer increases dryland maize yield and nitrogen use efficiency while mitigating ammonia volatilization[J].Science of the Total Environment,2021,790:e148058.

[18] 隋阳辉,高继平,刘彩虹,等.东北冷凉地区秸秆还田方式对水稻光合、干物质积累及氮素吸收的影响[J].作

- 物杂志,2018(5):137-143.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 柳瑞, Abdul Hafeez,李恩琳,等.减氮配施稻秆生物炭对稻田土壤养分及植株氮素吸收的影响[J].应用生态学报,2020,31(7):2381-2389.
- [22] 刘遵奇,兰宇,杨铁鑫,等.减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(4):544-551.
- [23] 张璐,黄晶,高菊生,等.长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J].农业工程学报,2020,36(5):106-112.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 夏琼梅,胡家权,董林波,等.氮肥减量后移对云南高原水旱轮作下梗稻群体质量及产量的影响[J].中国水稻科学,2020,34(3):266-277.
- [27] 赵春容,范龙,陈佳娜,等.杂交水稻:不同氮肥水平下生物炭施用对杂交中籼稻产量的影响[J].杂交水稻,2022,37(4):115-120.
- [28] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2001.
- [29] 阿力木·阿布来提,余冬立.基于 ORYZA_V3 模型的海涂水稻生物炭施肥优化措施研究[J].灌溉排水学报,2021,40(9):66-71,78.
- [30] Feng Y F, He H Y, Xue L H, et al. The inhibiting effects of biochar-derived organic materials on rice production[J]. Journal of Environmental Management, 2021,293:e112909.
- [31] 张萌,魏全全,肖厚军,等.生物质炭对贵州黄壤朝天椒减氮的生物效应及氮肥利用率的影响[J].土壤学报,2019,56(5):1201-1209.
- [32] 曹小闯,吴龙龙,朱春权,等.不同灌溉和施肥模式对水稻产量、氮利用和稻田氮转化特征的影响[J].中国农业科学,2021,54(7):1482-1498.
- [33] 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.
- [34] 李超,刘思超,杨晶,等.不同有机肥部分替代基施化学氮肥对双季稻生长发育及产量的影响[J].南方农业学报,2018,49(6):1102-1110.
- [35] 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.
- [36] 郭晓彦,宋晓华,刘春增,等.紫云英翻压量和化肥用量对水稻生长、产量及经济效益的影响[J].山地农业生物学报,2014,33(5):7-12.
- [37] 李桂花,张雪凌,周吉祥,等.长期秸秆还田下有机无机配施及微量元素和缓释肥的施用对双季稻产量和肥料利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2021(6):149-155.
- [38] 吴科生,车宗贤,包兴国,等.灌漠土长期有机配施土壤肥力特征和作物产量可持续性分析[J].水土保持学报,2021,35(3):333-340.
- [39] 张勇,徐智,王宇蕴,等.有机无机配施体系中有有机肥腐熟程度对化肥氮利用率的影响机制[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1051-1060.
- [40] 王飞,李清华,何春梅,等.稻秆与紫云英联合还田提高黄泥田氮素利用率和土壤肥力[J].植物营养与肥料学报,2021,27(1):66-74.
- [41] 卜容燕,李敏,韩上,等.有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J].应用生态学报,2021,32(1):145-153.
- [42] 杨胜玲,黄兴成,刘彦伶,等.长期有机肥无机肥配施对水稻氮素吸收、转运及产量的影响[J].中国稻米,2021,27(6):63-68.
- [43] 石鑫蕊,任彬彬,江琳琳,等.有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):154-162.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 何大卫,赵艳泽,高继平,等.生物炭和氮肥配施对梗稻产量形成、氮肥当季效应及其后效的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(12):2114-2124.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 晏军,王伟义,李斌,等.秸秆还田下化肥减施对苏北地区水稻产量与氮素吸收利用的影响[J].中国土壤与肥料,2021(5):74-82.
- [50] 田发祥,纪雄辉,石丽红,等.不同缓控释肥料减氮对洞庭湖区双季稻田氮流失与作物吸收的影响[J].农业现代化研究,2010,31(2):220-223.
- [51] 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.