

王静,丁树文,程益涵,等.化肥减量配施生物炭和秸秆对砂姜黑土区水稻产量、养分吸收和土壤碳的影响[J].华中农业大学学报,2024,43(5):116-125.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.05.013

化肥减量配施生物炭和秸秆对砂姜黑土区水稻产量、养分吸收和土壤碳的影响

王静¹,丁树文²,程益涵¹,万水霞¹,吴萍萍¹,廖斌³

1.安徽省农业科学院土壤肥料研究所/国家土壤质量太和观测实验站/养分循环与耕地保育安徽省重点实验室,合肥230031;2.华中农业大学资源与环境学院,武汉430070;3.武汉大学水利水电学院,武汉430079

摘要 为探讨砂姜黑土区养分资源高效管理和秸秆资源化利用方式,采用田间定位试验,连续2 a研究化肥减量配施生物炭和秸秆对该区域水稻产量、养分吸收和土壤碳的影响。试验设5个处理:①不施肥(CK);②常规施肥(100% NPK);③化肥减量20%(80% NPK);④化肥减量20%+秸秆(80% NPK+S);⑤化肥减量20%+生物炭(80% NPK+B),测定并分析水稻籽粒产量、地上部生物量、植株氮、磷、钾养分含量、土壤总有机碳(TOC)和微生物量碳(MBC)。结果显示,化肥减量20%配施生物炭或秸秆均有利于提高水稻产量和地上部生物量,且生物炭较秸秆的效果更为显著。化肥减量20%配施生物炭(80% NPK+B)处理的水稻产量和地上部生物量较100% NPK处理分别增加5.2%和4.7%,较80% NPK处理分别增加7.9%和7.2%;化肥减量20%配施秸秆(80% NPK+S)较100% NPK处理的水稻产量和地上部生物量分别增加3.4%和3.0%;80% NPK与100% NPK处理的籽粒和地上部生物量无显著差异;化肥减量20%配施生物炭显著提高了水稻地上部N、P₂O₅和K₂O养分积累量,较100% NPK处理分别提高了10.4%、7.2%和20.0%;化肥减量20%配施秸秆可显著提高氮、钾养分积累量,但却同时显著降低了磷素积累量;化肥减量20%配施生物炭或者秸秆,均有利于改善土壤总有机碳的累积,并且显著提高了土壤微生物量碳的含量,其中生物炭提高土壤总有机碳含量效果优于秸秆,而秸秆提高土壤微生物量碳含量效果优于生物炭。综合来看,在沿淮砂姜黑土区,化肥减量20%配施生物炭或者氮钾减量20%配施秸秆可增加或维持水稻产量,提高水稻对养分的吸收能力,利于固碳培肥。

关键词 化肥减量;生物炭;秸秆还田;养分吸收;土壤碳;水稻

中图分类号 S143.7; X522 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)05-0116-10

施用化肥作为农业生产的基础,是保障作物产量和粮食安全必不可少的措施^[1],然而,长期不合理的化肥投入也导致肥料利用率低下、资源浪费、大气和水体污染以及生物多样性降低等一系列资源环境问题^[2-3],严重制约了我国现代农业绿色可持续发展。因此,在保障国家粮食安全的前提下,如何通过科学合理的养管理措施来实现化肥减量提质增效与生态环境安全的协同发展,是现代农业高质量发展迫切需要解决的重大问题之一^[4]。

有机养分替代部分化肥作为农业减肥增效绿色生产的重要措施,在提升土壤质量、促进作物稳产高产、改善农田生态环境等方面具有积极影响,是促进

农业绿色可持续发展的有效途径之一^[5]。秸秆是农田生态系统一种重要有机养分资源,除富含纤维素、半纤维素、木质素和糖类等有机能源外,还含有作物生长所必需的氮、磷、钾和中微量营养元素,合理的秸秆还田不仅可以有效替代部分化肥,而且还有利于提高土壤肥力,改善土壤结构与功能、稳定作物产量、促进农田固碳减排^[6-8]。生物炭是农林废弃生物质在缺氧或有限氧条件下经亚高温(< 700 °C)热解碳化过程而形成的孔隙结构发达、比表面大、理化性质稳定的富碳物质,其在改善土壤性状和固碳减排,提高作物产量及肥料利用率等方面具有多重效益,已逐步在农业生产中广泛利用^[9-11]。然而,由于作物

收稿日期:2024-04-11

基金项目:安徽省重点研发计划项目(2022107020004);国家重点研发计划项目(2023YFD1902705-7);安徽省农业科学院科研项目(2024YL007);国家自然科学基金青年科学基金项目(41401308)

王静,E-mail:wangjinghf1982@163.com

通信作者:廖斌,E-mail:liaoabin5705@163.com

产量以及土壤特性对生物炭和秸秆还田的响应,受气候条件、替代比例、土壤类型、种植作物以及试验周期等各种因素的影响较大^[7,9-12],在实际生产中,具体到特定的地域和生产体系,对生物炭和秸秆的作用效果评估还需要进行针对性更强的科学试验。

沿淮平原地处我国南北气候过渡带、地势平坦、光温水热资源丰富,是我国重要的粮食生产区,在保障国家粮食安全中占有极其重要的地位。水稻-小麦轮作是该区域的主要种植模式,水稻种植主要以中熟中粳水稻品种为主,化肥投入采取的是“高投入、高产”的管理模式,不仅浪费了资源,而且对生态环境造成了不利的影响。同时,砂姜黑土是该区域广泛分布的一类中低产田,养分瘠薄、结构性能差、功能微生物缺乏等问题使得该地域自然资源优势、土壤生产潜力不能充分发挥^[13]。因此,如何保证该类中低产田在产量稳步提升的前提下兼顾化肥减施增效值得关注。鉴于此,本研究连续2 a在砂姜黑土区开展试验,以常糯1号为材料,研究化肥减量配施秸秆和生物炭对水稻产量、养分吸收、土壤总有机碳和微生物量碳等的影响,明确秸秆和生物炭在砂姜黑土区的节肥增产效果,探讨其调控土壤碳库的内在机制,旨在为该区域养分资源高效管理和秸秆资源化利用提供科学依据。

1 材料与方方法

1.1 试验地概况

本研究在沿淮平原典型稻麦轮作区的安徽省蚌埠市怀远县淮西现代农业示范区(117°04'12"E, 32°58'58"N)开展田间试验。该区域属于典型的暖温带半湿润季风气候区,年均气温15.3℃,年均日较差9.1℃,日照时数2 206 h,无霜期218 d,年均降水量874.6 mm,年内降水分布不均匀,多集中在6—8月。试验田种植制度为水稻-小麦轮作,土壤为潜育型水稻土砂姜黑土,2018年6月试验前0~20 cm耕层土壤基本理化性状:pH($m_{水}:m_{土}=2.5:1$) 6.27,有机质21.4 g/kg,全氮1.4 g/kg,碱解氮97.7 mg/kg, Olsen-P 18.5 mg/kg,速效钾104.9 mg/kg, CEC 251.3 mmol/kg。

1.2 试验设计

试验于2018和2019年连续2 a在水稻季开展,共设置5个处理:①不施肥(CK);②常规施肥(100% NPK);③化肥减量20%(80% NPK);④化肥减量20%+秸秆(80% NPK+S);⑤化肥减量20%+生物

炭(80% NPK+B),每个处理设3次重复,随机区组设计,每个小区面积为6.5 m×4 m。试验中常规施肥处理氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的用量分别为225、90、90 kg/hm²,此用量是周边92户农民平均施肥量。肥料品种为尿素(含N 46.2%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)和氯化钾(含K₂O 60%),其中氮肥分别按基肥、分蘖肥和穗肥40%、30%和30%施用,磷钾肥作为基肥一次性施入(表1)。小区间以宽50 cm、高30 cm的泥埂隔开,用厚质农膜包裹泥埂并压至犁底层以下防止串水串肥,实行单灌单排。本试验中秸秆和生物炭的用量主要是根据当地小麦秸秆还田投入量(6 000 kg/hm²)设置的,生物炭等碳量还田(表1)。小麦秸秆主要养分含量平均为:C 42.8%、N 1.82 g/kg、P 0.91 g/kg、K 6.92 g/kg。生物炭由河南三利新能源公司提供,是以小麦秸秆为原料,在500℃热裂解1 h制作而成,主要养分含量平均为:C 52.3%、N 4.4 g/kg、P 6.2 g/kg、K 50.6 g/kg, pH值平均为9.37。以当地主栽水稻品种“常糯1号”为供试材料,秧苗于每年6月上旬移栽,10月下旬收获。上茬小麦收获后将秸秆全部移出,粉碎成5 cm左右的小段备用。水稻移栽前,将秸秆或生物炭撒匀于相应处理的小区,立即用耙翻耕约5 cm深的土层内,且搅浆均匀,随后进行施肥移栽等,其他田间栽培管理措施与当地大田保持一致。

表1 不同处理化肥和有机碳施用量

Table 1 Application amounts of chemical fertilizer and organic carbon in each treatment kg/hm²

处理 Treatment	施用量 Application rate			
	氮肥 N fertilizer (N)	磷肥 P fertilizer (P ₂ O ₅)	钾肥 K fertilizer (K ₂ O)	有机碳 Organic C
CK	0	0	0	0
100% NPK	225	90	90	0
80% NPK	180	72	72	2 565
80% NPK +S	180	72	72	2 565
80% NPK +B	180	72	72	2 565

注:CK:不施肥;100% NPK:常规施肥;80% NPK:化肥减量20%;80% NPK +S:化肥减量20%+秸秆;80% NPK +B:化肥减量20%+生物炭。下同。Note:CK:No N fertilizer; 100% NPK: Conventional application of chemical fertilizer; 80% NPK: 20% reduction of chemical fertilizer; 80% NPK+S: 20% reduction of chemical fertilizer plus straw returning; 80% NPK +B: 20% reduction of chemical fertilizer plus biochar. The same as below.

1.3 样品采集与测试方法

1) 水稻产量及地上部生物量的测定。于水稻成

熟期,每个小区随机选取5蔸水稻植株,用不锈钢剪刀从根茎结合部剪断取其地上部分,待水稻植株自然风干后脱粒、称质量,计算草谷比,为了缩小草谷比的计算偏差,水稻籽粒和秸秆均自然风干至恒质量,保证两者在含水率上的一致性。所有小区均全部实收计产,收割后脱粒称质量,用谷物水分测定仪测定籽粒含水率,按照14.5%含水率折算籽粒产量。

2) 植株养分的测定。2019年水稻收获后,将采集的水稻植株样品分器官(籽粒和秸秆)于105℃杀青30 min,65℃烘干至恒质量,磨碎过0.25 mm标准筛后用于测定籽粒和秸秆的养分含量。样品经 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化后,分别用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定水稻籽粒和秸秆氮、磷、钾含量^[14],氮磷钾含量均以各部位烘干质量为基数表示。

3) 土壤理化性状的测定。试验开始前,以整个试验田块为采样单元,采用“S”法采集0~20 cm耕层土样,用于测定土壤基础理化性状。2019年水稻收获后,以每个试验小区为采样单元,采用“S”法采集0~20 cm深度5个位点土壤混合成1个样品,作为试验结束后土壤样品。采集的土壤样品剔除杂质后,过2 mm筛,分成2部分,一部分风干过筛,供理化性质分析用;另一部分储藏于4℃冰箱中用于测定土壤微生物量碳(MBC)的含量。土壤基本理化生化性质测定方法^[15-16]如下:土壤pH采用酸度计法测定($m_{水}:m_{土}=2.5:1$);土壤有机质和总有机碳采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定;土壤全氮采用浓 H_2SO_4 消化-凯氏定氮法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤Olsen-P采用0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用1 mol/L

NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定;土壤CEC采用 $BaCl_2-MgSO_4$ 法测定;土壤微生物量碳含量采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 溶液浸提法测定。

1.4 数据分析

试验数据采用Excel 2021进行整理和绘图,使用SPSS19.0软件进行统计分析,并采用最小显著性法(LSD)进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 化肥减量配施生物炭和秸秆对水稻产量和地上部生物量的影响

各处理的水稻产量及地上部生物量见表2。由表2可见,所有施肥处理水稻产量和地上部生物量均显著高于不施肥处理(CK)($P<0.05$),增加幅度分别为45.1%~56.4%和49.9%~60.7%。所有施肥处理中,化肥减量20%配施生物炭(80% NPK+B)处理的水稻产量、地上部生物量均最高,较常规施肥100% NPK处理分别显著增加5.2%和4.7% ($P<0.05$),较80% NPK处理,分别显著增加7.9%和7.2% ($P<0.05$)。化肥减量20%配施秸秆(80% NPK+S)处理与100% NPK处理相比,水稻产量和地上部生物量分别增加3.4%和3.0%,第1季差异不显著($P>0.05$),第2季差异达显著水平($P<0.05$),较80% NPK处理,水稻产量和地上部生物量差异均达显著水平($P<0.05$)。80% NPK+S和80% NPK+B处理间水稻籽粒和地上部生物量无显著差异($P>0.05$)。另外,化肥减量20%(80% NPK)处理与100% NPK处理相比,2季水稻产量、地上部生物量平均仅分别减少2.5%和2.4%,且差异未达显著水平($P>0.05$)。综合2季试验结果,水稻连续2季

表2 不同处理的水稻籽粒和地上部分生物量

Table 2 The grain and aboveground biomass of rice under different treatments

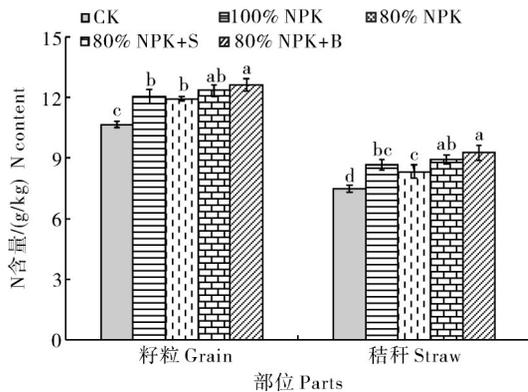
处理 Treatments	第1季 In the first season				第2季 In the second season				2季平均 Two years average			
	I / (kg/hm ²)	II / %	III / (kg/hm ²)	IV / %	I / (kg/hm ²)	II / %	III / (kg/hm ²)	IV / %	I / (kg/hm ²)	II / %	III / (kg/hm ²)	IV / %
CK	6 296.0d	—	12 715.1d	—	5 527.1c	—	11 133.6d	—	5 911.5	—	11 924.4	—
100% NPK	8 572.9bc	—	17 980.1bc	—	9 011.1b	—	18 634.9b	—	8 792.0	—	18 307.5	—
80% NPK	8 436.7c	-1.6	17 659.0c	-1.8	8 713.0b	-3.3	18 091.0 c	-2.9	8 574.8	-2.5	17 875.0	-2.4
80% NPK+S	8 826.3ab	3.0	18 431.0ab	2.5	9 359.4a	3.9	19 264.7a	3.4	9 092.9	3.4	18 847.9	3.0
80% NPK+B	9 026.9a	5.3	18 766.3a	4.3	9 469.2a	5.1	19 553.9a	4.9	9 248.0	5.2	19 160.1	4.7

注: I: 籽粒产量; II: 产量较100% NPK处理增加量; III: 地上部生物量; IV: 地上部生物量较100% NPK处理增加量。同列数据后不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著。Note: I: Yield; II: Percent increase in grain compared to 100% NPK treatment; III: Aboveground biomass; IV: Percent increase in aboveground biomass compared to 100% NPK treatment. Values followed by different small letters in the same column indicate significant difference at 5% level (LSD).

化肥减量20%，其产量和地上部生物量均与常规施肥处理差异不大，在沿淮砂姜黑土稻作系统适当减少化肥用量不会显著影响水稻产量，在化肥减施20%的条件下增施生物炭或者秸秆对水稻产量的提高均有促进作用，且生物炭较秸秆直接还田的增产效果更明显。

2.2 化肥减量配施生物炭和秸秆对水稻成熟期养分吸收的影响

1)氮素吸收。由图1可见，水稻成熟期所有施肥处理的水稻籽粒和秸秆含N量均较CK处理显著提高($P < 0.05$)，这说明单施化肥、化肥与秸秆或生物炭配施均可显著促进水稻对氮素的吸收。所有施肥处理中，80% NPK+B处理的水稻籽粒、秸秆含N量最高，显著高于100% NPK和80% NPK处理($P < 0.05$)，这说明，化肥减量20%条件下配施生物炭可以显著提高水稻植株含N量。80% NPK+S与100% NPK、80% NPK相比，籽粒和秸秆含N量无显著差异($P > 0.05$)。



柱上不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平(LSD检验),下同。Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 5% level (LSD), The same as below.

图1 不同处理第2季水稻籽粒和秸秆含氮量

Fig.1 N contents in grain and straw under different treatments in the second year

由图2可见，不同处理间水稻籽粒、秸秆和地上部N素累积量均存在显著差异($P < 0.05$)。单施化肥、化肥与秸秆或生物炭配施均显著提高了水稻籽粒、秸秆和地上部的N素累积量($P < 0.05$)，较CK处理分别增加了38.60~51.81、31.02~43.52和69.61~95.34 kg/hm²。所有施肥处理中，水稻籽粒、秸秆和地上部N素累积量均以80% NPK+B处理最高，较100% NPK处理分别显著增加10.0%、10.8%和10.4%，较80% NPK处理分别显著增加14.8%、18.7%和16.5% ($P < 0.05$)，说明化肥减量20%配施

生物炭可以显著增加水稻的N素吸收量。与100% NPK处理相比，80% NPK+S处理水稻籽粒、秸秆和地上部N素累积量分别提高6.4%、4.4%和5.5%，其中籽粒和地上部N素累积量的差异均达显著水平，并且也显著高于80% NPK处理($P < 0.05$)。表明在沿淮砂姜黑土区，化肥减量20%条件下配施生物炭或者秸秆可显著提高水稻对N素的吸收、同化和转运能力，从而为实现高产稳产奠定基础。

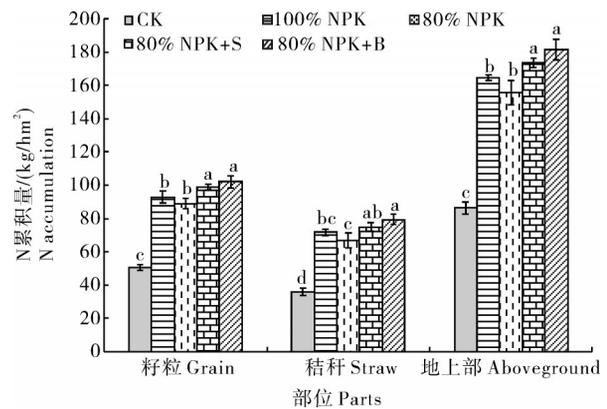


图2 不同处理第2季水稻籽粒、秸秆和地上部N素累积量
Fig.2 N accumulation of grain and straw under different treatments in the second year

2)磷素吸收。与N类似，单施化肥、化肥与秸秆或生物炭配施也显著提高了水稻成熟期籽粒和秸秆的磷素含量($P < 0.05$) (图3)。所有施肥处理中，80% NPK+B处理籽粒、秸秆P₂O₅含量均最高，显著高于80% NPK处理($P < 0.05$)，与100% NPK处理相比，也略有增加，但差异不显著($P > 0.05$)。与100% NPK处理相比，80% NPK和80% NPK+S处理的籽粒和秸秆P₂O₅含量均显著降低($P < 0.05$)。

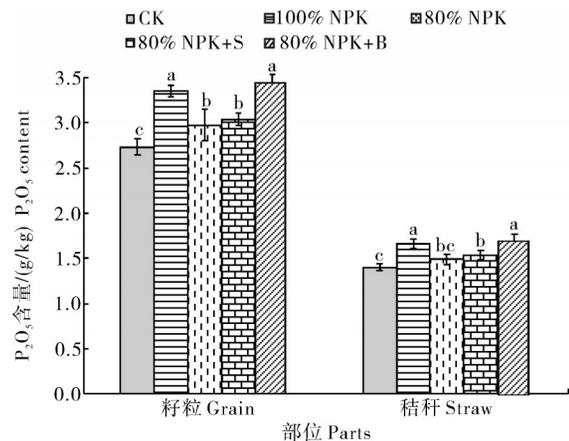


图3 不同处理第2季水稻籽粒和秸秆P₂O₅含量

Fig.3 P₂O₅ contents in grain and straw under different treatments in the second year

由图4可见,不同处理对水稻籽粒、秸秆和地上部 P_2O_5 累积量的影响存在显著差异。施肥显著促进了水稻对磷素的吸收,较CK处理分别增加了9.25~14.89,5.21~7.80和14.46~22.69 kg/hm²。所有施肥处理中,80% NPK+B处理的水稻籽粒、秸秆和地上部 P_2O_5 累积量均最高,均显著高于其他处理($P < 0.05$),较100% NPK处理分别增加7.8%、6.0%和7.2%,较80% NPK处理分别增加25.4%、21.7%和24.1%。而80% NPK+S处理籽粒、秸秆和地上部 P_2O_5 累积量均显著低于100% NPK处理,降低幅度分别为5.8%、6.0%和5.8%,但显著高于80% NPK处理($P < 0.05$)。由此可见,在沿淮砂姜黑土区,化肥减量20%条件下配施生物炭可显著提高水稻对磷素吸收能力,而配施秸秆却降低了对磷素的吸收。

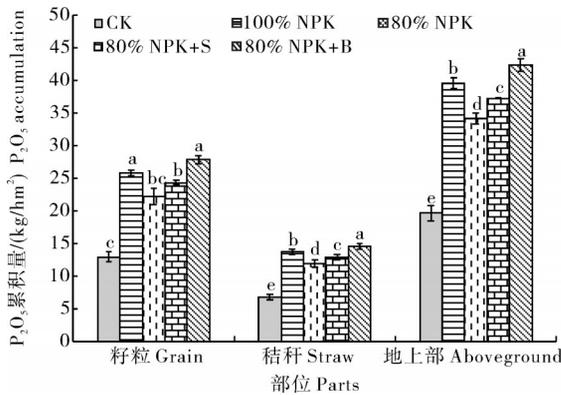


图4 不同处理第2季水稻籽粒、秸秆和地上部 P_2O_5 累积量
Fig.4 P_2O_5 accumulation of grain and straw under different treatments in the second year

3) 钾素吸收。由图5可见,单施化肥、化肥与秸秆或生物炭配施也显著提高了水稻成熟期籽粒和秸秆的钾素含量。与100% NPK和80% NPK处理相比,80% NPK+S和80% NPK+B处理的水稻籽粒、秸秆 K_2O 含量均显著提高($P < 0.05$),且80%

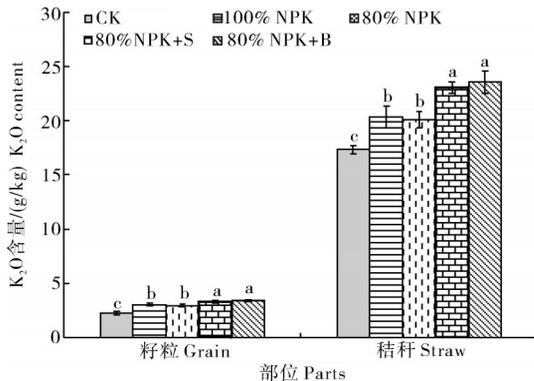


图5 不同处理第2季水稻籽粒和秸秆 K_2O 含量
Fig.5 K_2O contents in grain and straw under different treatments in the second year

NPK+B效果更显著。与100% NPK处理相比,80% NP处理的籽粒和秸秆的 K_2O 含量均表现出下降的趋势,但差异不显著($P > 0.05$)。

不同处理间水稻成熟期籽粒、秸秆和地上部 K_2O 累积量均存在显著差异(图6)。施肥显著促进了水稻对钾素的吸收,较CK处理分别增加了11.14~16.57,77.98~118.53和89.12~135.10 kg/hm²。与100% NPK处理相比,80% NPK+B和80% NPK+S处理籽粒 K_2O 累积量分别显著增加了17.7%和12.4%,秸秆 K_2O 累积量分别显著增加了20.3%和15.2%,地上部 K_2O 累积量分别显著增加了20.0%和14.8%。另外,与100% NPK处理相比,80% NPK的籽粒、秸秆和地上部 K_2O 累积量均表现出降低的趋势,但差异不显著($P > 0.05$)。由此可见,在沿淮砂姜黑土区,化肥减量20%条件下配施生物炭或者秸秆可显著提高水稻对钾素的吸收能力,有利于钾素的吸收积累。

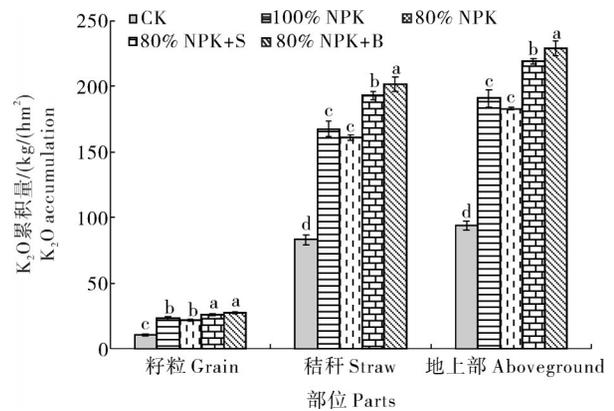


图6 不同处理第2季水稻籽粒、秸秆和地上部 K_2O 累积量
Fig.6 K_2O accumulation of grain and straw under different treatments in the second year

2.3 化肥减量配施生物炭和秸秆对土壤碳的影响

1) 土壤总有机碳。由图7可见,经过2季定位试验,化肥减量20%配施生物炭或秸秆均有利于水稻成熟期0~20 cm土层土壤总有机碳含量(TOC)的提升。80% NPK+B和80% NPK+S处理的土壤TOC含量较100% NPK处理(12.60 mg/kg)分别增加了10.5%和5.1%,较80% NPK处理(12.12 mg/kg)分别显著增加了16.2%和9.6%($P < 0.05$)。另外,各施肥处理的土壤TOC含量较CK处理(10.42 mg/kg)均显著提高($P < 0.05$),增加幅度为16.3%~35.1%。

2) 土壤微生物量碳。图8显示,经过2季定位试验,化肥减量20%配施生物炭或秸秆均显著提高了水稻成熟期0~20 cm土层土壤微生物量碳(MBC)的

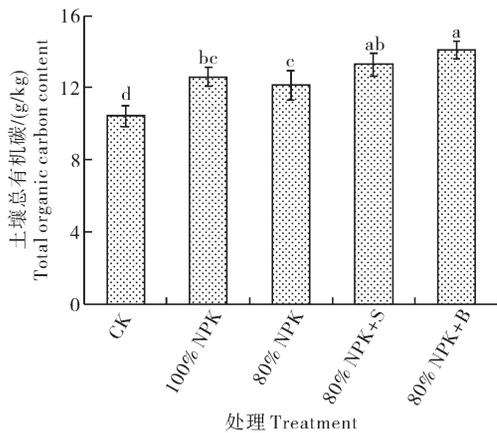


图7 不同处理第2季水稻成熟期各处理土壤总有机碳含量
Fig.7 Content of soil total organic carbon at maturity under different treatments in the second year

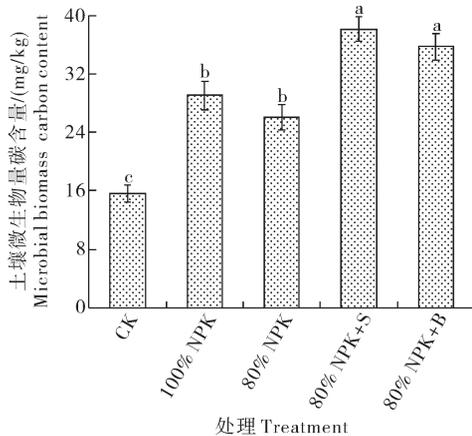


图8 不同处理第2季水稻成熟期各处理土壤微生物量碳含量

Fig.8 Content of soil microbial biomass carbon at maturity under different treatments in the second year

含量。80% NPK+S 和 80% NPK+B 处理的土壤 MBC 含量较 100% NPK 处理 (29.1 mg/kg) 分别显著增加了 23.9% 和 18.7% ($P < 0.05$), 较 80% NPK 处理 (26.1 mg/kg) 分别显著增加了 46.6% 和 37.2% ($P < 0.05$)。各施肥处理与 CK 处理相比, 土壤 MBC 的含量均显著增加 ($P < 0.05$), 增加幅度为 66.2% ~ 143.6%。

3 讨论

3.1 化肥减量配施生物炭和秸秆对水稻产量的影响

作物产量是品种、土壤特性、气候、施肥和栽培管理措施等多因素综合作用的结果, 也是农业持续发展的重要评价指标。关于生物炭和秸秆还田对水稻产量的影响, 目前大部分研究结果表明, 生物炭和秸秆还田对水稻产量的提升具有明显的促进作

用^[17-19], 也有少部分研究显示, 对水稻产量没有影响或影响不显著, 甚至出现减产的现象, 如 Zhao 等^[20] 研究认为, 与秸秆不还田相比, 秸秆还田均未对水稻产量产生显著影响; 张斌等^[21] 报道, 相同氮肥处理下, 连续 2 a 施用生物炭对水稻产量基本没有影响。生物炭和秸秆对水稻产量的效应存在差异, 可能与原料特性、土壤类型、替代比例、气候条件、肥料运筹以及试验周期等因素有关^[7, 11, 22-23]。本研究结果表明, 化肥减量 20% 条件下配施生物炭或秸秆有利于维持水稻产量的高产或稳产。原因可能在于: (1) 生物炭和秸秆在一定程度上可以改善土壤结构和生物学特性, 增加土壤通透性, 改善根际环境, 增强根系活力, 进而促进水稻生长发育^[7, 22-24]; (2) 秸秆和生物炭本身含有丰富的有机成分和营养元素, 是土壤养分的有效补给源。本试验中, 施用生物炭直接带入到土壤中的主要养分分别为 N 10.9 kg/hm²、P₂O₅ 12.5 kg/hm²、K₂O 50.0 kg/hm², 小麦秸秆还田带入的主要养分分别为 N 21.6 kg/hm²、P₂O₅ 69.6 kg/hm²、K₂O 299.1 kg/hm²。(3) 生物炭丰富的多微孔结构以及较大的比表面积对氮、磷等营养元素有吸附固持和缓释效应, 增强了水稻生育后期养分的持续供应性能, 提高了肥料利用率, 进而促进了水稻生长发育^[22]。然而, 水稻产量对生物炭和秸秆的响应, 取决于气候条件、替代比例、土壤类型、种植作物体系以及试验周期等各种因素的综合影响。因此, 对于生物炭和秸秆增产或减产的效果和机制研究仍需要多生态位点的长期定位试验。

3.2 化肥减量配施生物炭和秸秆对水稻养分吸收的影响

氮、磷是植物体内核酸、氨基酸、磷脂等许多重要化合物的成分, 钾则参与植物的新陈代谢, 这 3 种营养元素对于作物的生长发育与产量形成起着至关重要的作用, 其含量的多少及耦合状况, 可以从侧面反映出作物的生长发育和养分利用状况, 并将直接反映水稻的产量^[25]。本研究结果表明, 与常规施肥相比, 化肥减量 20% 配施生物炭显著提高了水稻地上部氮、磷和钾养分积累量, 特别对钾元素的提升效应更为显著, 这与许多学者的研究结果^[12, 19, 26-28] 一致。生物炭对水稻氮磷钾养分吸收的促进作用, 首先得益于其丰富的微观孔隙结构和巨大的比表面积, 通过改善土壤结构与生物学特性、提高土壤有机碳含量、增加土壤 pH 值和阳离子交换量、吸附固持养分等途径改善根际环境, 提升根系活力, 进而促进

水稻对氮磷钾等养分的吸收^[22-23];其次,生物炭和秸秆自身所携带的丰富的养分,能够作为土壤养分的有效补充,大大提高了土壤对作物养分的供给能力,从而也促进水稻对养分的吸收利用^[9,22-24]。化肥减量20%的条件下,同样作为有机肥源的秸秆尽管显著提高了水稻对氮钾的累积量,但却降低了水稻磷含量及吸磷量,造成这种现象的原因是,一方面本试验所用的小麦秸秆本身含磷量较低,且中稳性有机磷比例较高,其腐解直接释放到土壤中磷以及分泌的有机酸活化的土壤固定态磷不足以弥补磷肥减量引起的磷供应水平的下降^[29],另一方面秸秆类生物炭和秸秆C/P值较高,易引起磷的生物固持,进而使土壤有效磷含量降低,不利于水稻对磷素的吸收利用^[30]。因此,在本区域实施化肥减量措施时,应慎重考虑磷肥的减少比例,以免影响作物对磷素的吸收利用。

3.3 化肥减量配施生物炭和秸秆对土壤固碳的影响

土壤有机碳(SOC)作为土壤质量和土壤肥力的核心,与土壤的物理、化学以及生物学特性密切相关,在土壤养分循环中发挥重要作用^[31]。增加外源有机物料的投入是提高土壤有机碳固持、提升土壤肥力的重要手段。本研究结果表明,在沿淮砂姜黑土区,化肥减量20%配施生物炭或者秸秆均有利于0~20 cm土层SOC含量的提高,生物炭效果要优于秸秆,这与前人的研究结果^[32-33]一致。原因在于,一方面秸秆和生物炭均是含碳丰富的有机物料,还田后直接增加了外源有机碳的投入;同时,秸秆和生物炭还能促进作物根系生长和干物质累积,进而通过提高作物根系、残茬残留量以及根系分泌物来增加有机碳的投入;另一方面,秸秆和生物炭与化肥配施后有助于土壤团聚化作用以及结构的形成,可为有机碳提供物理保护作用,从而减少微生物对有机碳的矿化分解^[32,34]。生物炭提高土壤总有机碳含量效果优于秸秆,这是因为秸秆含有大量活性炭(纤维素和半纤维素等),其归还的碳通过土壤呼吸作用损失较多^[35],相比之下,生物炭则具有高度羧酸酯化和稳定的芳香化结构^[30,36],碳有效性较低,具有极强的生物化学稳定性和抗矿化降解能力,施入土壤后通过呼吸作用损失的碳较少,从而有利于有机碳的稳定保存,因此,生物炭和秸秆还田均可以提高土壤有机碳含量,但提高程度存在较大差异。

土壤微生物量碳(MBC)是土壤碳库中最为活跃

的部分,尽管数量少,在调控土壤养分循环方面发挥着十分重要的作用,是衡量土壤生物学肥力的重要指标^[32]。本研究发现,化肥减施配合秸秆或者生物炭能够显著增加土壤MBC的含量,且秸秆还田效果优于生物炭。秸秆还田显著提升土壤MBC的原因主要在于秸秆中含有丰富的碳、氮、钾及微量元素等养分,可为微生物生长、繁殖提供充足能源和基质,改善了土壤微生物繁育环境条件,从而提高了微生物的活性和数量^[37]。尽管生物炭中碳有效性较低,施入土壤仍可显著提高土壤MBC的含量,原因在于生物炭能够为土壤微生物的生长、繁殖提供充足的养分来源以及良好的栖息地,从而显著增加土壤微生物的数量,并最终改善土壤生物肥力^[38]。虽然生物炭和秸秆均可显著增加土壤MBC的含量,但秸秆对MBC含量的促进作用要高于生物炭。原因在于秸秆中可溶性物质、纤维素和糖类等可被微生物直接分解利用的碳、氮含量相对较高,而生物炭在制备过程中,活性较高的组分多转化为惰性物质,致使其生物活性降低,因而,生物炭还田条件下对土壤MBC的含量要低于秸秆还田。

综上,砂姜黑土区化肥减量20%配施生物炭或者秸秆均有利于水稻产量的提高,较常规施肥分别增加5.2%和3.4%;化肥减量20%条件下,配施生物炭可显著增加水稻氮、磷和钾养分吸收量,较常规施肥分别提高10.4%、7.2%和20.0%,配施秸秆可显著增加氮、钾吸收量,但却降低了对磷素的吸收;化肥减量20%配施生物炭或者秸秆有利于砂姜黑土总有机碳和微生物量碳含量的提升,其中生物炭提高总有机碳含量效果优于秸秆,而秸秆提高微生物量碳含量效果优于生物炭。综合来看,在砂姜黑土区,化肥减量20%配施生物炭或者氮钾减量20%配施秸秆可增加或维持水稻产量,提高水稻对养分的吸收能力,利于固碳培肥。

参考文献 References

- [1] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795. JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2014, 20(4): 783-795 (in Chinese with English abstract).
- [2] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273. ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2013, 19(2): 259-273 (in Chinese with English abstract).

- [3] XU J L, GAO Z Y, LIU S, et al. A multi-environmental evaluation of the N, P and K use efficiency of a large wheat diversity panel [J/OL]. *Field crops research*, 2022, 286: 108634 [2024-04-11]. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108634>.
- [4] 付浩然, 李婷玉, 曹寒冰, 等. 我国化肥减量增效的驱动因素探究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 561-580. FU H R, LI T Y, CAO H B, et al. Research on the driving factors of fertilizer reduction in China [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2020, 26(3): 561-580 (in Chinese with English abstract).
- [5] 吴多基, 姚冬辉, 范钊, 等. 长期绿肥和秸秆还田替代部分化肥提升红壤性水稻土酸解有机氮组分比例及供氮能力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 227-236. WU D J, YAO D H, FAN Z, et al. Long-term substitution of mineral fertilizer with green manure and straw increases hydrolysable organic nitrogen and N supply capacity in reddish paddy soils [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2022, 28(2): 227-236 (in Chinese with English abstract).
- [6] WANG Y L, WU P N, MEI F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase: a Meta-analysis [J/OL]. *Journal of environmental management*, 2021, 288: 112391 [2024-04-11]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112391>.
- [7] 赵金花, 陈林, 段衍, 等. 秸秆还田配合化肥减施对潮土作物产量及土壤肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(1): 189-200. ZHAO J H, CHEN L, DUAN Y, et al. Effects of straw returning instead of chemical fertilizer on crop yield and soil fertility in fluvo-aquic soil [J]. *Acta pedologica sinica*, 2023, 60(1): 189-200 (in Chinese with English abstract).
- [8] FAN W, WU J G, AHMED S, et al. Short-term effects of different straw returning methods on the soil physicochemical properties and quality index in dryland farming in NE China [J/OL]. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2631 [2024-04-11]. <https://doi.org/10.3390/su12072631>.
- [9] CHEN W F, MENG J, HAN X R, et al. Past, present, and future of biochar [J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 75-87.
- [10] 夏浩, 张梦阳, 刘波, 等. 生物炭对作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(3): 177-186. XIA H, ZHANG M Y, LIU B, et al. Effect of biochar on nitrogen use efficiency of crops: a Meta-analysis [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 177-186 (in Chinese with English abstract).
- [11] XIA H, RIAZ M, ZHANG M Y, et al. Biochar-N fertilizer interaction increases N utilization efficiency by modifying soil C/N component under N fertilizer deep placement modes [J/OL]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131594 [2024-04-11]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131594>.
- [12] 刘雅仙, 安宁, 吴正超, 等. 长期水稻秸秆及生物炭还田替代等养分化肥对寒地水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(10): 1771-1782. LIU Y X, AN N, WU Z C, et al. Effects of continuous replacing equal amount of chemical fertilizer nutrients with rice straw and straw biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in cold region [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2023, 29(10): 1771-1782 (in Chinese with English abstract).
- [13] 詹其厚, 袁朝良, 张效朴. 有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 420-425. ZHAN Q H, YUAN C L, ZHANG X P. Ameliorative effect and mechanism of organic materials on vertisol [J]. *Acta pedologica sinica*, 2003, 40(3): 420-425 (in Chinese with English abstract).
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese with English abstract).
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. LU R K. *Methods of soil agrochemical analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000 (in Chinese with English abstract).
- [16] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006. WU J S. *Determination method of soil microbial biomass and its application* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [17] 管方圆, 刘琛, 傅庆林, 等. 添加秸秆对水稻产量和土壤碳氮及微生物群落的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(2): 223-230. GUAN F Y, LIU C, FU Q L, et al. Effects of straw addition on rice yield, soil carbon, nitrogen, and microbial community [J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(2): 223-230 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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 (in Chinese with English abstract).
- [19] 段建军, 郭琴波, 徐彬, 等. 氮肥减量施生物炭对水稻产量和养分利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 298-308. DUAN J J, GUO Q B, XU B, et al. Effects of biochar application with reduced nitrogen fertilizer on rice yield and nutrient utilization [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2022, 36(6): 298-308 (in Chinese with English abstract).
- [20] ZHAO X L, YUAN G Y, WANG H Y, et al. Effects of full straw incorporation on soil fertility and crop yield in rice-wheat rotation for silty clay loamy cropland [J/OL]. *Agronomy*, 2019, 9(3): 133 [2024-04-11]. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030133>.
- [21] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物炭后稻田土壤性质、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 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究

- 回顾与展望[J].作物学报,2021,47(1):1-18.ZHANG W M, XIU L Q, WU D, et al.Review of biochar structure and physicochemical properties [J]. Acta agronomica sinica, 2021, 47(1):1-18 (in Chinese with English abstract).
- [23] 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 and physiological characteristics and yield of rice [J]. China rice, 2018, 24(3):25-29 (in Chinese with English abstract).
- [24] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等.水旱轮作制下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):587-594.WU J, GUO X S, LU J W, et al.Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yields in paddy-upland rotation system[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2012, 18(3):587-594 (in Chinese with English abstract).
- [25] TIAN D S, REICH P B, CHEN H Y H, et al.Global changes alter plant multi-element stoichiometric coupling[J]. The new phytologist, 2019, 221(2):807-817.
- [26] 李金焯,陈洁,吴建富,等.秸秆及其生物炭还田对水稻养分吸收分配和产量的影响[J].江西农业大学学报,2023,45(5):1118-1128.LI J Y, CHEN J, WU J F, et al.Effects of straw and its biochar returning on uptake and distribution of rice nutrients and rice yields[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(5):1118-1128 (in Chinese with English abstract).
- [27] 朱浩宇,高明,龙翼,等.化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J].环境科学,2020,41(4):1921-1929.ZHU H Y, GAO M, LONG Y, et al.Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field[J]. Environmental science, 2020, 41(4):1921-1929 (in Chinese with English abstract).
- [28] XIA H, RIAZ M, ZHANG M Y, et al.Biochar increases nitrogen use efficiency of maize by relieving aluminum toxicity and improving soil quality in acidic soil[J/OL]. Ecotoxicology and environmental safety, 2020, 196: 110531 [2024-04-11]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110531>.
- [29] 刘娜,马旭东,慕君,等.不同类型有机物料的生物磷组成及生物有效性[J].植物营养与肥料学报,2021,27(3):440-449.LIU N, MA X D, MU J, et al.The composition of organic phosphorus and bioavailability of different organic materials [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2021, 27(3):440-449 (in Chinese with English abstract).
- [30] 吴萍萍,王静,李录久,等.化肥减施下有机物料对砂姜黑土有机碳组分和养分含量的影响[J].核农学报,2022,36(11):2286-2294.WU P P, WANG J, LI L J, et al.Effects of organic materials applications on soil organic carbon fractions and nutrient contents in lime concretion black soil under chemical fertilizer reduction [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2022, 36(11):2286-2294 (in Chinese with English abstract).
- [31] 王毅,张俊清,况帅,等.施用小麦秸秆或其生物炭对烟田土壤理化特性及有机碳组分的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(2):285-294.WANG Y, ZHANG J Q, KUANG S, et al.Effects of wheat straw and its biochar application on soil physicochemical properties and organic carbon fractions in flue-cured tobacco field[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2020, 26(2):285-294 (in Chinese with English abstract).
- [32] 邓华,高明,龙翼,等.生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J].环境科学,2021,42(11):5481-5490.DENG H, GAO M, LONG Y, et al.Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land [J]. Environmental science, 2021, 42(11):5481-5490 (in Chinese with English abstract).
- [33] 赵占辉,张丛志,蔡太义,等.不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(10):1228-1235.ZHAO Z H, ZHANG C Z, CAI T Y, et al.Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2015, 23(10):1228-1235 (in Chinese with English abstract).
- [34] 徐国鑫,王子芳,高明,等.秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J].环境科学,2018,39(1):355-362.XU G X, WANG Z F, GAO M, et al.Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration [J]. Environmental science, 2018, 39(1):355-362 (in Chinese with English abstract).
- [35] 何甜甜,王静,符云鹏,等.等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J].环境科学,2021,42(1):450-458.HE T T, WANG J, FU Y P, et al.Effects of adding straw and biochar with equal carbon content on soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. Environmental science, 2021, 42(1):450-458 (in Chinese with English abstract).
- [36] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al.Biochar effects on soil biota: a review [J]. Soil biology and biochemistry, 2011, 43(9):1812-1836.
- [37] 黎嘉成,高明,田冬,等.秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J].草业学报,2018,27(5):39-50.LI J C, GAO M, TIAN D, et al.Effects of straw and biochar on soil organic carbon and its active components [J]. Acta praeagriculturae sinica, 2018, 27(5):39-50 (in Chinese with English abstract).
- [38] 杨宏伟,王小利,龙大勇,等.秸秆和生物炭还田对稻田土壤有机碳及其矿化的影响[J].江苏农业科学,2023,51(11):226-232.YANG H W, WANG X L, LONG D Y, et al.Effects of straw and biochar returning on soil organic carbon and its mineralization in paddy field [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2023, 51(11):226-232 (in Chinese with English abstract).

Effects of reducing chemical fertilizers combined with applying biochar and straw on yield of rice and nutrient absorption and carbon in soil in lime concretion black soil areas

WANG Jing¹, DING Shuwen², CHENG Yihan¹, WAN Shuixia¹, WU Pingping¹, LIAO Bin³

1. *Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences/National Agricultural Experimental Station for Soil Quality, Taihe/Anhui Province Key Laboratory of Nutrient Cycling and Arable Land Conservation, Hefei 230031, China;*

2. *College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

3. *College of Water Conservancy and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430079, China*

Abstract The reduction of chemical fertilizer combined with applying biochar and straw is an effective way of realizing the green and sustainable development of agriculture in China. A field plot experiment was conducted to study the efficient management of nutrient resources and the utilization of straw resources in the lime concretion black soil areas. The effects of reducing chemical fertilizers combined with returning straw to the field and biochar on the yield of rice, nutrient absorption and carbon in soil in the region were investigated for 2 consecutive years. 5 treatments including no fertilizer (CK), conventional application of chemical fertilizer (100% NPK), 20% reduction of chemical fertilizer (80% NPK), 20% reduction of chemical fertilizer plus straw returning (80% NPK+S), 20% reduction of chemical fertilizer plus biochar (80% NPK+B) were set up. The yield and biomass aboveground of rice, the content of N, P and K in plant, the content of total organic carbon (TOC) and microbial biomass carbon (MBC) in soil were measured and analyzed. The results showed that 80% NPK+S or 80% NPK+B was beneficial for increasing the yield and biomass aboveground of rice, with the effect of 80% NPK+B more significant than that of 80% NPK+S. The average yield and biomass aboveground of rice treated with 80% NPK+B was 5.2% and 4.7% higher than that with 100% NPK, and by 7.9% and 7.2% higher than that with 80% NPK, respectively. The average yield and biomass aboveground of rice treated with 80% NPK+S was 3.4% and 3.0% higher than that with 100% NPK, respectively. There was no significant difference in the average yield and biomass aboveground of rice between the 80% NPK treatment and the 100% NPK treatment. The accumulation of N, P₂O₅, and K₂O nutrients in the aboveground parts of rice treated with 80% NPK+B significantly increased, 10.4%, 7.2%, and 20.0% higher than that with 100% NPK. 80% NPK+S treatment significantly increased the accumulation of nitrogen and potassium in rice, but significantly reduced the accumulation of phosphorus in rice at the same time. 80% NPK+B treatment or 80% NPK+S treatment was beneficial for improving the accumulation of total organic carbon in soil and significantly increasing the content of microbial biomass carbon in soil. Among them, the effect of biochar on increasing the content of total organic carbon in soil was better than that of straw, while the effect of straw on increasing the content of microbial biomass carbon in soil was better than that of biochar. Overall, 80% NPK+B treatment or 80% NPK+S treatment can increase or maintain the yield of rice, improve nutrient absorption capacity of rice, and facilitate the fixation of organic carbon in soil in the lime concretion black soil areas along the Huai River.

Keywords reduction of chemical fertilizer; biochar; returning straw to the field; nutrient absorption; carbon in soil; rice

(责任编辑:张志钰)