



劳洁玉,郑铭洁,黄永材,等.紫云英及氮肥减量下配施生物质炭对土壤理化性质和水稻产量的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(2):289-301.

LAO J Y,ZHENG M J,HUANG Y C,et al.Effects of Chinese milk vetch(*Astragalus sinicus* L.)and nitrogen fertilizer reduction combined with biochar on soil physical and chemical properties and rice yield[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(2):289-301.

# 紫云英及氮肥减量下配施生物质炭对土壤理化性质和水稻产量的影响

劳洁玉<sup>1</sup>,郑铭洁<sup>2\*</sup>,黄永材<sup>3</sup>,任震<sup>2</sup>,吴家森<sup>1</sup>,傅伟军<sup>1</sup>

(1.浙江农林大学 环境与资源学院/碳中和学院,浙江 杭州 311300;2.浙江省建德市农技推广中心土壤肥料站,浙江 建德 311600;3.浙江省建德市新水建设有限公司,浙江 建德 311600)

**摘要:**【目的】为减少化学氮肥的使用,通过盆栽试验探究在紫云英还田条件下,氮肥减量配施生物质炭对稻田土壤养分提升、水稻增产的作用,旨在明确在紫云英替代部分氮肥的基础上,更有利于培肥和增产的最佳减氮量和生物质炭添加比例,以期为实际生产应用提供科学依据。【方法】采用双因素水稻盆栽试验,以冬闲+常规施肥(CK)为空白对照,设置了4个(0.25%、0.5%、1%、2%)生物质炭添加比例,在追肥时设置3个(减氮10%、减氮20%、减氮30%)减氮比例,共设置13个处理组合,每个处理重复4次,共计52盆,生长周期120 d,水稻成熟后比较各处理对土壤理化性质及水稻产量、性状的影响。【结果】在紫云英还田下,减氮30%配施2.0%生物质炭显著提高了土壤pH( $P<0.01$ )与CK相比提高了12.02%;减氮20%配施2.0%生物质炭对土壤有机质(SOM)、有效磷(AP)、速效钾(AK)含量均具有极显著提升作用( $P<0.01$ ),显著提升了土壤全氮含量( $P<0.05$ ),比CK分别增加了38.8%、107.2%、25.4%、24.9%;减氮20%配施0.5%生物质炭时碱解氮含量显著提升了49.6%( $P<0.01$ )。紫云英还田下减氮30%配施1.0%生物质炭时产量最高,与CK相比分别显著增产18.7%( $P<0.01$ )。施加低量生物质炭(0.25%生物质炭)更有利于水稻地上部生物量积累,比CK显著增加了90.04%( $P<0.01$ )。相关性分析表明,土壤有机质、有效磷、速效钾是提升水稻产量的主要土壤环境因子( $P<0.05$ , $r>0.5$ )。【结论】紫云英、氮肥减量及生物质炭联合施用的培肥增产效果显著,紫云英还田下减氮20%配施2.0%生物质炭更有利于提升稻田土壤养分含量,减少氮素流失,促进水稻生长增产,但施加过量生物质炭对水稻产量及生物量具有一定的抑制作用,在追肥时减氮30%配施1.0%生物质炭对水稻增产效果最佳。

**关键词:**紫云英;水稻秸秆生物质炭;氮肥减量;土壤理化性质;水稻产量

中图分类号:S511;S142 文献标志码:A  
文章编号:1000-2286(2024)02-0289-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



收稿日期:2023-09-20 修回日期:2023-10-29

基金项目:世界银行浙江千岛湖及新安江水资源与生态保护项目(H20210012)

Project supported by World Bank Zhejiang Qiandao Lake and Xin'an River Water Resources and Ecological Protection Project(H20210012)

作者简介:劳洁玉,硕士生,orcid.org/0009-0007-8377-7243,laojieyu@stu.zafu.edu.cn;\*通信作者:郑铭洁,农艺师,主要从事土壤肥料技术推广、耕地保护及质量提升等研究,orcid.org/0009-0005-0401-6370,305484927@qq.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

## Effects of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and nitrogen fertilizer reduction combined with biochar on soil physical and chemical properties and rice yield

LAO Jieyu<sup>1</sup>, ZHENG Mingjie<sup>2\*</sup>, HUANG Yongcai<sup>3</sup>,  
REN Zhen<sup>2</sup>, WU Jiasen<sup>1</sup>, FU Weijun<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Resources, College of Carbon Neutrality, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. Soil Fertilizer Station, Agricultural Technology Promotion center of Jiande City, Jiande, Zhejiang 311600, China; 3. Xinshui Construction Co. LTD of Jiande City, Jiande, Zhejiang 311600, China)

**Abstract:** [Objective] In order to reduce the use of chemical nitrogen fertilizer, pot experiment was conducted to explore the effects of nitrogen (N) reduction combined with different ratios of biochar on improvement of soil nutrient and increase of rice yield under the condition of returning milk vetch to the field. The aim is to clarify the optimal nitrogen reduction and biochar addition ratio that are more conducive to fertilization and yield increase on the basis of replacing part of nitrogen fertilizer with Chinese milk vetch. The results could be used to provide scientific basis for production. [Method] A two-factor rice pot experiment was conducted, and four (0.25%, 0.5%, 1%, 2%) biochar addition ratios and three (10%, 20%, 30%) N reduction ratios during topdressing were set. A total of 13 treatment combinations were set, and each treatment was repeated four times. A total of 52 pots were grown for 120 days. The effects of each treatment on soil physicochemical properties, rice yield and characters were compared after rice ripening. [Result] The soil pH ( $P < 0.01$ ) was significantly increased by 12.02% compared with that of CK in the field with 30% N reduction combined with 2.0% biochar. The contents of soil organic matter (SOM), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) were significantly increased by 20% N reduction combined with 2.0% biochar ( $P < 0.01$ ), and the contents of soil total N ( $P < 0.05$ ) were significantly increased by 38.8%, 107.2%, 25.4% and 24.9% compared with that of CK. The content of alkali N was significantly increased by 49.6% when 20% N reduction was combined with 0.5% biochar ( $P < 0.01$ ). The highest yield was obtained when 30% N reduction 30% was combined with 1.0% biochar, which was significantly increased by 18.7% ( $P < 0.01$ ) compared with that of CK. However, the application of low biochar (0.25% biochar) was more beneficial to above-mentioned biomass accumulation, which was significantly increased by 90.04% compared with that of CK ( $P < 0.01$ ). Correlation analysis showed that soil organic matter, available phosphorus and available potassium in this study were the main soil environmental factors ( $P < 0.05$ ,  $r > 0.5$ ) to improve rice yield. [Conclusion] Combined application of milk vetch, N reduction and biochar has a significant effect on fertilizer cultivation and yield increase. The application of 20% nitrogen reduction combined with 2.0% biochar under Chinese milk vetch returning to the field is more conducive to improving the nutrient content of paddy soil. It can reduce N loss and promote rice growth and yield increase, but excessive application of biochar has a certain inhibitory effect on rice yield and biomass. 30% N reduction combined with 1.0% biochar in topdressing had the optimal effect on rice yield.

**Keywords:** milk vetch; rice straw biochar; nitrogen reduction; soil fertility; rice yield

【研究意义】我国是世界上主要的水稻生产国之一,水稻产量约为世界水稻产量的28%,我国65%以上的人口以稻米为主食<sup>[1]</sup>。在众多参与水稻生长发育过程的元素中,氮素对水稻的生长发育、产量提升的贡献率超过60%,并且,氮素是水稻等农作物合成核酸、磷脂和叶绿素等膳食蛋白的必需营养元素之一<sup>[2]</sup>。但是我国氮肥利用率较低,仅约30%。由于片面追求高产,氮肥利用过量现象普遍<sup>[3]</sup>。过量施用氮肥易造成土壤酸化、肥力下降、农业面源污染等环境问题,严重影响我国粮食的产量与安全<sup>[4]</sup>。【前人研究

进展]Zhang等<sup>[5]</sup>研究指出,绿肥具有固氮吸碳、提高土壤有机质、促进水肥协调等作用。紫云英是南方常见的绿肥作物,其固氮能力强大,研究<sup>[6-7]</sup>表明紫云英植株内78%的氮来自生物固氮,紫云英翻压还田后能为当季水稻提供大量的有效态氮,代替部分化肥,提高水稻产量。此外,研究<sup>[8]</sup>发现,生物炭是一种优良的土壤改良剂,其表面有丰富的官能团和阳离子,能降低作物根系养分积累所需的自由能,因此具有极强的吸附和保持养分的功能。为减少氮肥的使用,王利民等<sup>[9]</sup>研究表明紫云英配施减量20%、40%化肥仍能达到培肥增产效果,且具有良好的持续效应。徐彬等<sup>[10]</sup>研究发现在减氮条件下配施过高的生物质炭会降低水稻产量,80%化肥氮+5.0 t/hm<sup>2</sup>生物质炭处理下的增产效果最佳。谢志坚等<sup>[11]</sup>研究表明,减氮20%配施生物质炭基肥与紫云英联合还田可显著促进水稻氮素积累,促进产量提升。【本研究切入点】紫云英的腐化分解受耕翻时间、田间土壤温度湿度、翻耕量等因素影响明显,养分释放速率可控性较低,难以及时满足作物对养分的需求,因此,在翻压紫云英后仍需配施适量的化肥或有机肥料才能满足水稻生长发育的需求<sup>[12]</sup>。目前,已有较多的研究探明了种植紫云英、氮肥减量、施加生物质炭等措施对改善土壤理化性质,促进水稻增产的作用;但是同时应用以上3项措施,探究在紫云英培肥下不同的追肥减氮比例和生物质炭施加比例对土壤理化性质和水稻产量的综合作用的研究缺失。【拟解决的关键问题】在盆栽试验开展前,试验样地已展开为期2年(2020—2022年)的紫云英-水稻轮作下氮肥减量的大田试验。试验的结果表明:第2年大田土壤理化性质及水稻产量均有所下降,其中土壤有效磷含量和水稻产量最大降幅分别为45.2%和18.7%( $P<0.05$ )<sup>[13-14]</sup>。为减少化肥氮的使用,提高水稻绿色高效生产能力,本研究通过盆栽试验探究:在紫云英还田的基础上,何种追肥减氮比例和生物质炭添加比例最能提高稻田土壤理化性质指标和水稻产量。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与材料

盆栽试验于2022年5—10月在浙江农林大学试验大棚中进行,自然光照,温度25~35℃。盆栽供试土壤来自浙江省建德市航头镇珏塘村高标准农田示范区,供试土壤的基本理化性质如表1所示。2022年5月中旬分别采集冬种紫云英与冬闲(冬季不种植紫云英)稻田表层0~20 cm的耕层土壤,并连同根系一同采集盛花期紫云英样品,用以替代部分化肥;紫云英全氮含量为28.5 g/kg,含水率88.5%。生物质炭为水稻秸秆生物质炭,购于河南星诺环保材料有限公司,生物质炭外观为黑色粉末,其成分详见表2所示,水稻品种为晚稻“甬优15”,苗龄为16 d的水稻幼苗于2022年6月8日取自浙江省建德市航头镇珏塘村。肥料选择当地农户普遍使用的氮磷钾(18-12-16)复合肥、尿素和氯化钾。盆栽试验用盆为底径19.5 cm,高25.7 cm的无孔水培盆。

表1 供试土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of soil tested

试验土壤 Test soil	pH	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available P	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available K	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Organic matter	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Alkaline N	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total N
冬种紫云英土壤 Winter planting milk vetch soil	5.24	7.31	38.02	29.29	151.90	2.25
冬闲土壤 Winter fallow soil	5.29	7.94	39.33	25.61	145.80	1.06

表2 供试生物质炭样品养分含量

Tab.2 Nutrient content of biochar samples tested

样品 Sample	颗粒直径/ mm Diameter	燃烧温度/°C Temperature	碳含量/ (g·kg <sup>-1</sup> ) C content	氮含量/ (g·kg <sup>-1</sup> ) N content	灰分/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Ash content	O/C/ (g·kg <sup>-1</sup> )	H/C/ (g·kg <sup>-1</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) Specific surface area
生物质炭 Biochar	0.075	400~600	80.4	1.77	6.68	0.15	0.29	623

## 1.2 试验设计

采用双因素盆栽试验,以冬闲土壤+常规施肥(CK)为空白对照;CB<sub>1</sub>~KB<sub>3</sub>处理为冬种紫云英土壤盆栽,共设置 13 个处理,每个处理 4 次重复,盆栽共 52 盆,试验处理组合如表 3 所示。剔除石块和根系后每盆装入新鲜湿土 5 kg。剪成 2~3 cm 小段的紫云英以 250 g/pot 的量翻压进试验盆土壤中,并进行 2~3 cm 淹水处理<sup>[11]</sup>。在水稻移栽前 15 d 加入不同比例的生物质炭,并继续淹水<sup>[15]</sup>。CK 处理(常规施肥)中的化肥 N、P、K 含量为 225, 105, 150 kg/hm<sup>2</sup>。为保证水稻生长初期养分充足,本试验中的化学 N 肥以基肥和分蘖肥的方式,分 2 次施入。基肥期氮肥施用量相同,在追肥时进行减氮,N、P、K 施用量如表 3 所示,水稻移栽前 2 d 等量施入基肥。试验于 6 月 8 日插秧,每盆移栽长势大致一致的水稻幼苗 1 穴 2 株,保持表层水深 3~5 cm<sup>[16]</sup>。插秧 8 d 后追肥即施加分蘖肥,后续不再施肥。在水稻收获前 10 d 不再保持淹水状态,待水分落干后收获,生长期为 120 d。

表 3 试验处理设置及施肥量

Tab.3 Test treatment setting and fertilizer amount

编号 Serial number	生物质炭比例/% Biochar ratio	追肥减氮比例/% Nitrogen reduction ratio	紫云英处理 Milk vetch treatment	基肥施用量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Basal applying			追肥施用量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Application rate of topdressing	
				N	P	K	N	K
CK	0	0	冬闲				67.5	10
CB <sub>1</sub>	0.25	10	冬种紫云英				45.0	10
CB <sub>2</sub>	0.25	20	冬种紫云英				22.5	10
CB <sub>3</sub>	0.25	30	冬种紫云英				0	10
NB <sub>1</sub>	0.5	10	冬种紫云英				45.0	10
NB <sub>2</sub>	0.5	20	冬种紫云英				22.5	10
NB <sub>3</sub>	0.5	30	冬种紫云英	157.5	157.5	140	0	10
TB <sub>1</sub>	1	10	冬种紫云英				45.0	10
TB <sub>2</sub>	1	20	冬种紫云英				22.5	10
TB <sub>3</sub>	1	30	冬种紫云英				0	10
KB <sub>1</sub>	2	10	冬种紫云英				45.0	10
KB <sub>2</sub>	2	20	冬种紫云英				22.5	10
KB <sub>3</sub>	2	30	冬种紫云英				0	10

## 1.3 样品采集及测定

水稻性状及产量测定:本试验于水稻拔节期(30 d)、抽穗期(60 d)、灌浆期(90 d)、成熟期(120 d)分别测量水稻株高。水稻成熟期收获当天采集各处理 0~20 cm 的根际土样及表土以上的水稻植株样品。测定有效穗数,剥离籽粒后,测定实粒重量,同日经 105 °C 杀青 30 min、70 °C 烘干至恒重测定植株茎叶等地上部分生物量鲜重。

土壤基本理化性质分析:土壤 pH 和电导率以水土比 2.5:1 浸提,分别采用 pH 计和电导率仪测定<sup>[17]</sup>;土壤有效磷(AP)、土壤有机质(OM)、土壤有机碳(TOC)、土壤速效钾(AK)、土壤全氮(TN)、土壤碱解氮(AN)根据《土壤农化分析》第 3 版测定<sup>[18]</sup>。

## 1.4 数据处理

试验测定数据由 Excel 2021 软件整理后,采用 SPSS 26.0 软件和 Origin 2018 软件进行统计分析及图形绘制,采用 two-way ANOVA 进行双因素方差分析,基于 SSR 中的 Duncan 进行多重比较,数据均为 4 次重复的平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫云英培肥下不同减氮比例及生物质炭施加对土壤理化性质及肥力的影响

#### 2.1.1 对土壤 pH 和有机质的影响

对减氮比例和生物质炭比例两因子进行双因素方差分析(表 4)可知,不同比例的减氮处理单独作用

时对土壤pH无显著作用( $P>0.05$ ),但生物质炭和2种处理的交互作用均对土壤pH及有机质有极显著影响( $P<0.01$ )。如图1所示,与对照(CK)相比,随着生物质炭添加比例的增加,土壤pH及有机质均显著提升( $P<0.05$ )。土壤pH表现出了减氮30%>减氮20%>减氮10%的变化趋势;减氮30%配施2.0%生物质炭时的pH最高,为5.78,比CK提升了12.02%( $P<0.05$ )。生物质炭添加量相同时,减氮20%更有利于提升土壤有机质含量。与CK有机质含量38.85 g/kg相比,减氮20%配施2.0%的生物质炭的有机质含量显著提升58.8%( $P<0.05$ )。综上,减氮30%配施2.0%生物质炭和减氮20%配施2.0%生物质炭分别对土壤pH和有机质的提升效果最为明显。

表4 不同比例减氮处理及生物质炭处理下的土壤理化性质指标双因素方差分析  
Tab.4 Two-factor ANOVA of soil pH and conductivity under different ratio nitrogen reduction treatment and biochar treatment

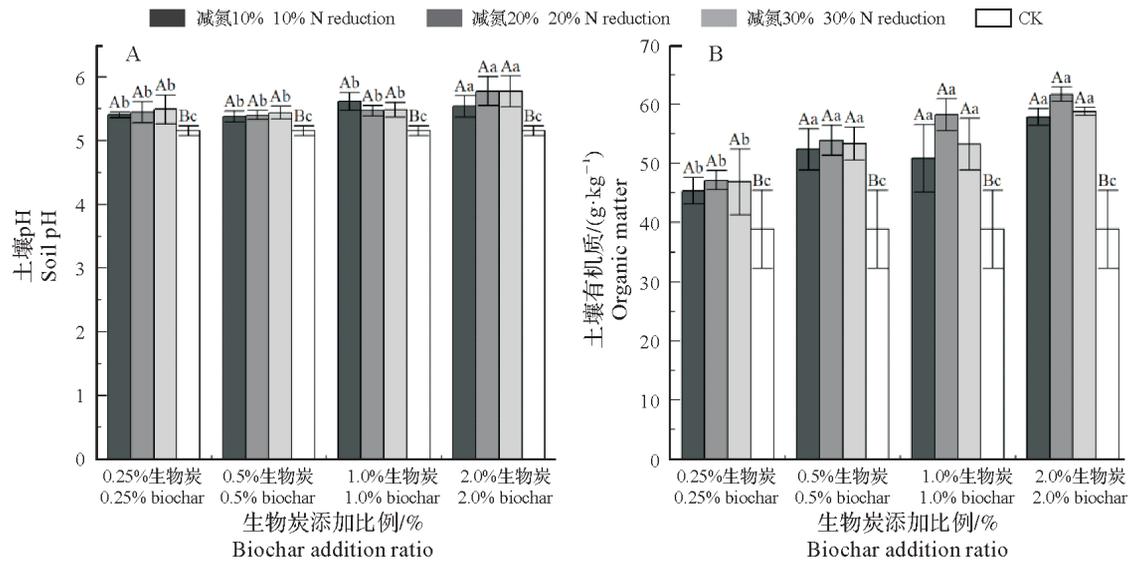
指标 Indicators	因子 Factor	F值 F-value	P值 P-value	偏Eta平方 Partial Eta squared	R <sup>2</sup>
土壤pH Soil pH	减氮处理	2.129	0.133	0.098	0.601
	生物质炭处理	2.198	0.104	0.145	
	减氮处理×生物质炭处理	4.357	0.002**	0.401	
有机质 Organic matter	减氮处理	0.266	0.768	0.013	0.841
	生物质炭处理	7.003	0.001***	0.350	
	减氮处理×生物质炭处理	16.672	0.000***	0.719	
全氮 Total N	减氮处理	2.243	0.126	0.147	0.549
	生物质炭处理	2.165	0.116	0.200	
	减氮处理×生物质炭处理	3.437	0.042*	0.442	
碱解氮 Alkaline hydrolyzed N	减氮处理	1.187	0.316	0.057	0.734
	生物质炭处理	1.552	0.216	0.107	
	减氮处理×生物质炭处理	11.541	0.000***	0.640	
有效磷 Available P	减氮处理	2.524	0.093	0.115	0.797
	生物质炭处理	12.168	0.000***	0.483	
	减氮处理×生物质炭处理	11.840	0.000***	0.64	
速效钾 Available K	减氮处理	0.275	0.761	0.014	0.629
	生物质炭处理	2.874	0.048*	0.181	
	减氮处理×生物质炭处理	7.500	0.000***	0.536	

\*\*\*和\*\*表示在 $P<0.001$ 和 $P<0.01$ 水平上极显著,\*表示在 $P<0.05$ 水平上显著。

\*\*\* and \*\* are extremely significant at  $P<0.001$  and  $P<0.01$  levels, \* is significant at  $P<0.05$  levels.

### 2.1.2 对全氮、碱解氮的影响

如表4所示,不同的减氮比例和生物质炭添加比例2种处理的主效应对土壤全氮和碱解氮的含量提升均无显著影响( $P>0.05$ ),但交互作用对土壤全氮和土壤碱解氮分别有显著作用( $P<0.05$ )和极显著作用( $P<0.001$ )。由图2可知,与CK全氮含量4.21 g/kg相比,各处理组的土壤全氮及碱解氮含量均显著提升( $P<0.05$ ),其中减氮30%配施2.0%生物质炭时(KB<sub>3</sub>)全氮含量最高,为5.25 g/kg,增幅为24.9%( $P<0.05$ )。除了KB<sub>3</sub>,当减氮量相同时,添加0.5%生物质炭时的全氮含量最高;当生物质炭添加比例大于0.5%时,碱解氮含量则随着生物质炭添加比例的增加而降低。当生物质炭添加比例为0.5%时,不同减氮处理下的碱解氮含量均为最高,其中减氮20%配施0.5%生物质炭(NB<sub>2</sub>)的含量最高,为190.85 mg/kg,与CK 127.54 mg/kg相比显著提升了46.9%( $P<0.05$ )。综上,减氮30%配施2.0%生物质炭对土壤全氮的提升效果最好,而减氮20%配施0.5%生物质炭时碱解氮含量最高。



误差线表示±标准差。不同大写字母表示各土壤理化性质指标在不同减氮处理下的组内差异达显著水平 ( $P<0.05$ )；不同小写字母表示各土壤理化性质指标在不同生物质炭处理下的组内差异达显著水平 ( $P<0.05$ )。

Different capital letters indicated that the soil physicochemical property indexes were significantly different under different nitrogen reduction treatments ( $P<0.05$ ). Different lowercase letters indicated significant differences in soil physicochemical property indexes under different biochar treatments ( $P<0.05$ ).

图 1 不同减氮比例和生物质炭比例下的土壤 pH(A) 及有机质(B) 的含量

Fig.1 Soil pH(A) and organic matter(B) contents under different N reduction ratio and biomass carbon ratio

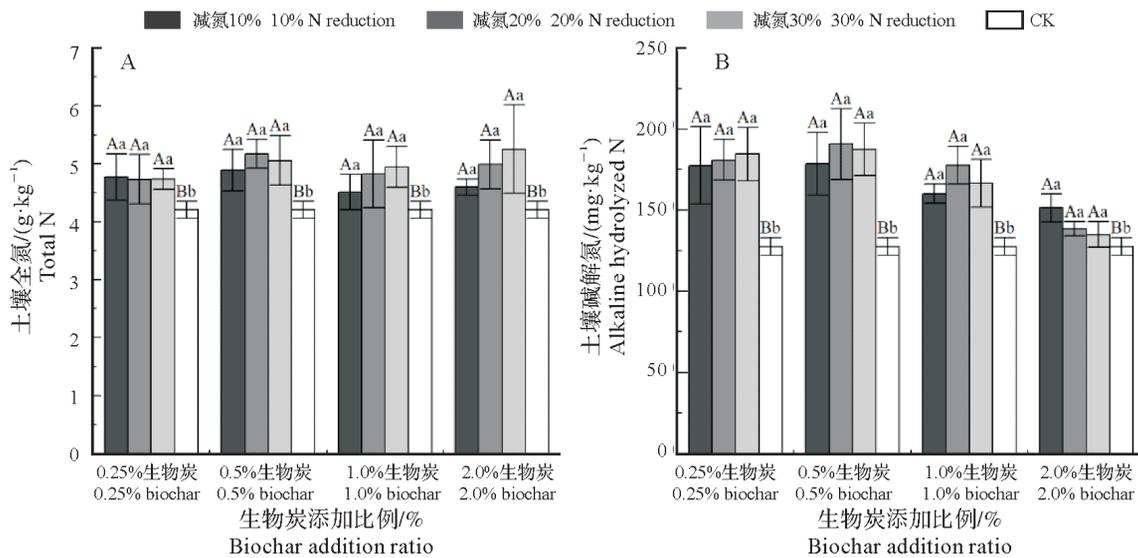


图 2 不同减氮比例和生物质炭比例下的土壤全氮(A) 及碱解氮(B) 的含量

Fig.2 The contents of total N(A) and alkali-hydrolyzed N(B) in soil under different N reduction ratio and biochar ratio

### 2.1.3 对土壤有效磷、速效钾土壤速效养分的影响

由表 4 双因素方差分析结果可知, 2 种处理的交互作用对土壤有效磷、速效钾的作用均达到了极显著水平 ( $P<0.001$ ), 生物质炭处理对土壤有效磷 ( $P<0.001$ )、速效钾 ( $P<0.01$ ) 具有极显著影响。由图 3 可知, 与 CK 土壤有效磷含量 7.22 mg/kg、速效钾 43.25 mg/kg 相比各处理的有效磷和速效钾的均显著提高 ( $P<0.05$ ), 其中, 添加 2.0% 生物质炭时, 不同减氮处理下的土壤有效磷及速效钾的含量均为最高, 土壤有效磷分别达到了 11.95, 13.71, 13.25 mg/kg, 显著增加 80.5%~100.3% ( $P<0.05$ ); 土壤速效钾含量分别达到了 53.50, 54.25, 52.50 mg/kg, 显著增加 23.7%~21.4% ( $P<0.05$ )。综上, 当生物质炭添加比例为 2.0%、减氮 20% 时的处理组合对土壤有效磷和速效钾的提升效果最好。

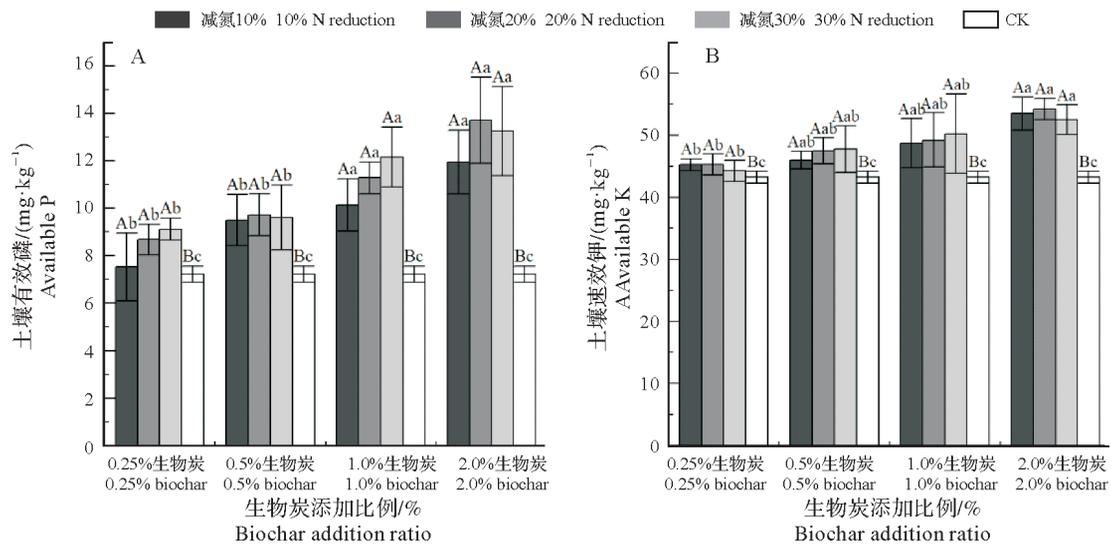


图3 不同减氮比例和生物质炭比例下的土壤有效磷(A)和速效钾(B)的含量

Fig.3 Content of available P(A)and available K(B)in soil under different N reduction ratio and biochar ratio

## 2.2 紫云英培肥下减氮配施生物质炭对水稻产量及水稻地上部生物量的影响

### 2.2.1 对水稻产量的影响

水稻产量可反映出施肥措施在实际种植过程中的综合作用。从表5可知,不同比例的减氮处理配合生物质炭处理增产效果明显,减氮处理对水稻产量有显著影响( $P < 0.05$ ),生物质炭处理则对水稻产量有极显著影响( $P < 0.001$ )。增加生物质炭添加比例,可提高水稻结实率和千粒质量,而添加1.0%生物质炭的不同减氮处理(TB<sub>1</sub>~TB<sub>3</sub>)的平均穗数、穗粒数实际产量均为最高,水稻实际产量分别最高达36.03,

表5 不同比例减氮处理及生物质炭处理下的水稻产量及生物量

Tab.5 Rice yield and biomass under different ratios of nitrogen reduction treatment and biochar treatment

处理 Treatment	水稻产量 Rice yield					水稻生物量/ (g·pot <sup>-1</sup> ) Rice biomass
	平均穗数/个 Average panicle number	穗粒数/个 Spike grain number	千粒质量/g Thousand grain weight	结实率/% Setting rate	水稻实际产量/ (g·pot <sup>-1</sup> ) Actual rice yield	
CK	13.25±0.96 <sup>Aa</sup>	96.26±16.11 <sup>Bb</sup>	28.00±2.05 <sup>Aa</sup>	60.3±0.06 <sup>Bb</sup>	21.48±4.38 <sup>Cc</sup>	36.15±2.34 <sup>Bb</sup>
CB <sub>1</sub>	14.00±1.41 <sup>ABab</sup>	129.81±10.13 <sup>Aa</sup>	28.25±2.72 <sup>Aa</sup>	58.7±0.05 <sup>Aa</sup>	29.76±0.94 <sup>ABb</sup>	68.70±4.75 <sup>Aa</sup>
CB <sub>2</sub>	12.75±1.26 <sup>Cab</sup>	123.48±18.46 <sup>Aa</sup>	26.55±1.23 <sup>Aa</sup>	66.7±0.10 <sup>Aa</sup>	27.47±3.30 <sup>Ab</sup>	65.95±1.35 <sup>Aa</sup>
CB <sub>3</sub>	12.75±0.96 <sup>Cab</sup>	85.00±12.35 <sup>Aa</sup>	27.40±0.67 <sup>Aa</sup>	73.9±0.12 <sup>Aa</sup>	20.80±3.04 <sup>Bb</sup>	56.33±3.91 <sup>Aa</sup>
NB <sub>1</sub>	9.50±2.08 <sup>ABc</sup>	145.8±39.06 <sup>Aa</sup>	26.95±1.68 <sup>Aa</sup>	73.5±0.07 <sup>Aa</sup>	26.15±1.70 <sup>ABb</sup>	57.30±2.83 <sup>Aa</sup>
NB <sub>2</sub>	9.75±2.50 <sup>Cc</sup>	149.96±38.65 <sup>Aa</sup>	27.05±2.73 <sup>Aa</sup>	83.6±0.09 <sup>Aa</sup>	31.34±2.59 <sup>Ab</sup>	61.28±2.29 <sup>Aa</sup>
NB <sub>3</sub>	11.25±1.50 <sup>Cc</sup>	131.21±27.69 <sup>Aa</sup>	26.95±0.82 <sup>Aa</sup>	78.8±0.12 <sup>Aa</sup>	30.54±3.96 <sup>Bb</sup>	60.17±2.08 <sup>Aa</sup>
TB <sub>1</sub>	11.75±1.50 <sup>ABab</sup>	151.94±52.51 <sup>Aa</sup>	27.00±1.20 <sup>Aa</sup>	79.1±0.10 <sup>Aa</sup>	36.03±3.74 <sup>ABab</sup>	55.55±2.87 <sup>Aa</sup>
TB <sub>2</sub>	13.25±0.96 <sup>Cab</sup>	149.94±18.88 <sup>Aa</sup>	26.90±2.28 <sup>Aa</sup>	80.7±0.07 <sup>Aa</sup>	42.71±3.734 <sup>ABab</sup>	58.03±2.87 <sup>Aa</sup>
TB <sub>3</sub>	12.75±0.50 <sup>Cab</sup>	169.33±23.25 <sup>Aa</sup>	26.20±1.90 <sup>Aa</sup>	82.3±0.08 <sup>Aa</sup>	46.01±3.32 <sup>Bab</sup>	57.49±3.02 <sup>Aa</sup>
KB <sub>1</sub>	10.50±2.08 <sup>ABab</sup>	134.33±24.17 <sup>Aa</sup>	28.25±4.17 <sup>Aa</sup>	76.8±0.04 <sup>Aa</sup>	29.64±3.48 <sup>ABa</sup>	62.07±4.61 <sup>Aa</sup>
KB <sub>2</sub>	10.75±2.20 <sup>Cab</sup>	153.22±13.56 <sup>Aa</sup>	27.60±3.40 <sup>Aa</sup>	80.0±0.05 <sup>Aa</sup>	35.24±6.54 <sup>Aa</sup>	64.40±6.51 <sup>Aa</sup>
KB <sub>3</sub>	10.50±1.29 <sup>Cab</sup>	130.84±16.82 <sup>Aa</sup>	29.80±0.43 <sup>Aa</sup>	80.1±0.12 <sup>Aa</sup>	32.18±2.29 <sup>Ba</sup>	63.64±2.88 <sup>Aa</sup>

不同大小写字母分别表示各指标在减氮处理和生物质炭处理之间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

Different upper and lower case letters indicate that the indexes are significantly different between nitrogen reduction treatment and biochar treatment ( $P < 0.05$ ).

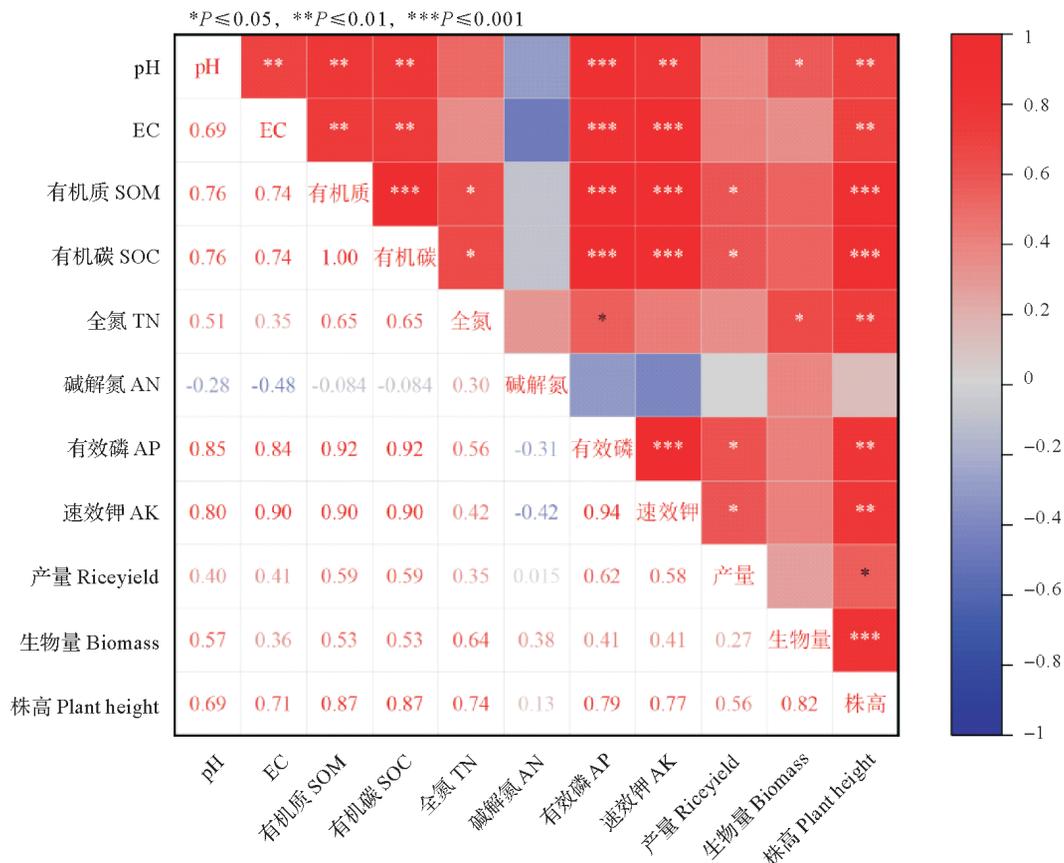
42.71, 46.01 g/pot, 与 CK 产量 21.8 g/pot 相比显著增产 67.7%、98.8%、114.2% ( $P < 0.05$ ), 其中减氮 30% ( $TB_3$ ) 时的产量最高。值得注意的是减氮 30% 配施 0.25% 生物质炭 ( $CB_3$ ) 的水稻产量为 20.80 g/pot 低于 CK 的水稻产量。添加生物质炭 1.0%、减氮 30% 增产效果最佳。

### 2.2.2 对水稻地上部生物量的影响

在减氮 10% 和 20% 的条件下, 添加 0.25% 生物质炭的生物量均为最高, 分别为 68.70 g/pot、65.95 g/pot、与 CK 生物量 36.15 g/pot 相比, 显著提升 90.04%、82.44% ( $P < 0.05$ )。生物质炭对生物量的作用由大到小依次为 0.25%、2.0%、0.5% 和 1.0%, 呈现先增加后下降再增加的趋势。而在减氮 10%、20% 配施 1.0% 生物质炭时的水稻地上部的生物量, 分别为 55.545 g/pot、58.03 g/pot 在相同的减氮比例处理中最低, 因此, 产量的增加可能会影响生物量的积累。综上, 生物质炭比例为 0.25%, 减氮 10% 时更有利于水稻地上部生物量积累。

### 2.3 紫云英培肥下减氮配施生物质炭土壤理化性质与水稻产量及水稻性状之间的相关性

以 10 个土壤理化性质和水稻农艺性状, 共 45 组指标组合为研究对象, 对其进行相关性分析。如图 6 所示, 共有 8 对指标之间相关性达到显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 17 对指标相关性达到了极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 其中电导率与速效钾 ( $r = 0.90$ )、有机质与有效磷 ( $r = 0.92$ )、有机质与速效钾 ( $r = 0.90$ )、有效磷和速效钾 ( $r = 0.94$ ) 4 对的指标相关系数达到 0.90 以上。速效钾与有效磷、有机质、电导率、pH 之间均存在极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。碱解氮几乎对土壤理化性质指标及水稻产量、性状指标几乎无正向影响。



\*表示各项指标的相关系数在  $P < 0.05$  水平上显著, \*\*, \*\*\*各项指标的相关系数在  $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$  水平上极显著。

\* indicates that the correlation coefficient of all indicators is significant at the  $P < 0.05$  level, and the correlation coefficient of \*\*,

\*\*\* indicators is extremely significant at the  $P < 0.001$  and  $P < 0.01$  levels.

图 4 不同减氮比例及生物质炭添加比例土壤理化性质、水稻产量及水稻性状之间的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of soil physicochemical properties, rice yield and rice traits with different nitrogen reduction ratios and biochar addition ratios

### 3 讨论

#### 3.1 紫云英培肥下不同减氮比例及生物质炭施加比例对土壤各项理化性质的作用

##### 3.1.1 对土壤pH和有机质的作用

生物质炭与氮肥减量措施可以有效改善因氮肥滥用而对稻田土壤造成的土壤酸化、土壤肥力下降等一系列问题。有研究<sup>[19]</sup>表明有机肥配合减氮可提高土壤pH,并且在生物质炭成炭过程中会富集吸附大量的碱性物质,带来大量的盐基离子进入土壤,能有效改良酸性土壤。与前人研究一致的是研究结果中减氮处理及生物质炭处理的交互作用显著地促进了土壤pH的提升,并且减氮30%对土壤pH的提升效果最好,这印证了毛妍婷等<sup>[20]</sup>得出的有机肥与减氮措施有利于减缓耕层土壤酸化的研究结论。刘敏等<sup>[21]</sup>研究认为,减氮15%配施生物质炭的措施能够提高土壤有机质含量,土壤培肥效果最佳。而在研究结果中,减氮20%时各生物质炭添加比例下的土壤有机质含量最高,这可能是由于减氮20%时的水稻土壤具有较为适宜的碳氮比,土壤碳氮比通过调节土壤微生物活性从而影响有机质的矿化,低碳氮比可提高土壤微生物活性,加速有机质矿化进而降低土壤肥力。因此在减氮20%时土壤碳氮比可能更为适宜,对提高水稻土壤养分的保蓄能力、土壤有机质的积累、土壤微生物和酶活性的调节有着更为积极的作用<sup>[22-23]</sup>。

##### 3.1.2 对土壤理化性质的作用

土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾等含量与施肥量密切相关。张云舒等<sup>[24]</sup>研究发现减施15%氮肥配施生物质炭可显著提高土壤全氮、碱解氮、有效磷含量、氮素利用效率。王慧等<sup>[25]</sup>研究表明单施紫云英的稻田会明显减产,翻压紫云英配施70%化肥有助于提升土壤肥力和水稻产量。本研究结果与之相符,减氮配施生物质炭2种处理的交互作用对土壤速效养分的含量具有显著的提升作用,效果显著。但研究结果显示,减氮处理单独作用时对土壤速效养分指标无显著作用,这可能是由于生物质炭和紫云英本身含有一定量的速效养分,且生物质炭疏松多孔的结构及更高的比表面积,土壤的盐离子交换量提高,更有利于吸附固定土壤中带电氮、磷等养分子<sup>[26-27]</sup>。此外,研究<sup>[28]</sup>表明氮肥配施生物炭的使氮肥向土壤有机氮库的转化,提高了氮肥的利用率和稳定性,故而施入土壤后可显著提高土壤全氮含量。生物质炭的添加量是影响研究结果中土壤速效养分含量的主要因素,土壤碱解氮的含量随着生物质炭的增加而降低,这可能与过量施加生物质炭降低了土壤孔隙度和透气性,导致土壤微生物活性降低进而抑制了土壤氮的矿化,使得表层土壤碱解氮含量减少<sup>[29]</sup>。李利霞等<sup>[30]</sup>研究发现生物质炭与氮肥配施时对土壤全磷淋失的抑制效果优于单独施加生物质炭,这与研究结果相符。同时研究<sup>[31]</sup>表明,在减氮的条件下,离子交换能力强的生物质炭的离子交换作用会使土壤升温加快,促进生物质炭中钾元素快速释放,进而提高土壤中钾离子的活度及扩散系数,供钾能力增强。由此可见,不同比例的氮肥减量配施生物质炭的处理组合对于土壤培肥和均衡养分具有较好的效果。

#### 3.2 紫云英培肥下不同减氮比例及生物质炭施加比例对水稻产量和水稻生物量的作用

##### 3.2.1 对水稻产量的影响

水稻生物量及产量能反映土壤肥力状况及施肥措施的有效性。相同的是,段建军等<sup>[32]</sup>研究结果表明氮肥减量19.00%~24.60%时配施生物质炭水稻产量更高。而在本研究结果中当减氮30%配施1.0%生物质炭(TB<sub>3</sub>)时水稻的增产最高,与对照(CK)相比产量显著增加了114.2%。已有较多研究表明过量施用生物质炭会抑制水稻产量增加<sup>[33]</sup>。这可能是由于过量施用生物质炭导致土壤碳氮比失衡,微生物活性降低,有机氮矿化速率降低,土壤速效氮含量减少,进而影响养分吸收,不利于水稻增产<sup>[34]</sup>。因此在本研究条件下施入1.0%生物质炭下的土壤碳氮比更为适宜。另外,减氮30%配施0.25%生物质炭的水稻产量却低于对照处理,与李敏等<sup>[35]</sup>研究结果相符:减氮30%时难以充分满足植株生长发育的营养需求,水稻所吸收的养分多数供给于水稻植株体,易出现植株氮素亏缺现象而减产,导致水稻结实率降低。

##### 3.2.2 对水稻地上部生物量的影响

研究结果显示,添加0.25%生物质炭的生物量最多,添加1.0%生物质炭的生物量最低,产量反而

最高。这一结果彭红宇等<sup>[36]</sup>的研究结果一致:在最佳的生物质炭施用量下更有利于植株生物量积累,过量施用会显著抑制生物量积累。原因可能是过量的生物质炭和过少的氮素会造成作物根部的氧化损伤,导致根系对土壤氮素的吸收作用减弱,因而会出现只有地上部秸秆生物量增长,而不长水稻籽粒的现象<sup>[37]</sup>。此外,施用适量的氮肥和生物质炭能促进水稻净光合速率和蒸腾速率同步提高,更有利于养分向上转移累积,促进水稻分蘖<sup>[38]</sup>。故而在本研究结果中水稻平均穗数随生物炭施加量的增加呈先增后减的变化趋势。综上,适量减少氮肥及添加适量的生物质炭的联合措施更有助于提升水稻产量和生物量。

### 3.3 研究的不足与展望

本研究的不足之处在于仅进行了一个水稻生长季的盆栽试验,试验中的氮肥减量和添加生物质炭的措施对土壤培肥、增产的效果有待长期监测,施入土壤后的生物质炭的持续作用和土壤碳氮比的变化有待进一步研究。另外,由于大田试验中存在着养分的淋溶和流失,盆栽试验中的养分不易流失,从而被植物充分利用,因此,应再进行一年盆栽试验探究生物质炭的持续作用,并应充分考虑通过盆栽试验得到的结果在大田试验中的可行性,施用化肥和生物质炭时应尽可能避免降雨天气,并适当增减生物炭的施用比例。

## 4 结 论

在提升土壤肥力方面:氮肥减量和施加生物质炭显著提升了土壤理化性质( $P < 0.05$ ),有效促进土壤肥力提升。减氮 20% 配施 2.0% 生物质炭显著提升了土壤有机质及总有机碳、有效磷、速效钾的含量( $P < 0.05$ ),较 CK 分别提升了 38.8%、107.2%、25.4%;减氮 30% 配施 2.0% 生物质炭则更有利于固定土壤有效氮,减少氮素淋失,土壤全氮含量提升了 24.9%。

在提高水稻生物量和水稻增产方面:施加过多的生物质炭对水稻产量及生物量具有一定的抑制作用。不同减氮比例下,添加 1.0% 生物质炭时水稻产量均为最高;减氮 30% 配施 1.0% 生物质炭时水稻产量最高,为 46.01 g/pot,增产 114.2%。减氮 10% 配施 0.25% 生物质炭时水稻地上部生物量最高,较 CK 提升了 90.0%,但水稻产量与生物量的增长趋势相反,施加 1.0% 生物质炭时的水稻生物量总体最低,说明产量的增加会影响水稻生物量的积累,水稻植株从土壤中吸收的养分更易向上在籽粒中聚集。

### 参考文献 References:

- [1] 周晓利,罗樊,王琪,等. 9个籼稻品系的对比试验[J]. 四川农业科技, 2022(9):4-7.  
ZHOU X L, LUO F, WANG Q, et al. Comparative testing of nine indica rice lines[J]. Sichuan agricultural science and technology, 2022(9):4-7.
- [2] MA S H, WANG G S, SU S M, et al. Effects of optimized nitrogen fertilizer management on the yield, nitrogen uptake, and ammonia volatilization of direct-seeded rice[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2023, 103(9):4553-4561.
- [3] LASSALETTA L, BILLEN G, GARNIER J, et al. Nitrogen use in the global food system: past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand[J]. Environmental research letters, 2016, 11(9):095007.
- [4] 舒晓晓,门杰,马阳,等. 减氮配施有机物质对土壤氮素淋失的调控作用[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1):186-191.  
SHU X X, MEN J, MA Y, et al. Regulation of reduced nitrogen and organic matter application on nitrogen leaching[J]. Journal of soil and water conservation, 2019, 33(1):186-191.
- [5] ZHANG Y B, WANG L, GUO Z H, et al. Revealing the underlying molecular basis of phosphorus recycling in the green manure crop *Astragalus sinicus*[J]. Journal of cleaner production, 2022, 341:130924.
- [6] CAI S Y, PITTELKOW C M, ZHAO X, et al. Winter legume-rice rotations can reduce nitrogen pollution and carbon footprint while maintaining net ecosystem economic benefits[J]. Journal of cleaner production, 2018, 195:289-300.
- [7] 吴建富,高绘文,颜晓,等. 紫云英和稻草还田替代部分化肥对水稻产量和土壤理化性质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(4):647-654.

- WU J F, GAO H W, YAN X, et al. Effect of milk vetch and straw incorporation partially replacing chemical fertilizer on rice yield and soil physical and chemical properties[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42(4): 647-654.
- [8] 胡玉莲, 郭朝晖, 徐智, 等. 镉污染水稻秸秆生物炭对土壤中镉稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(5): 204-211.
- HU Y L, GUO Z H, XU Z, et al. Effects of biochar from Cd-containing rice straw on stabilization of Cd in soils[J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2022, 38(5): 204-211.
- [9] 王利民, 黄东风, 何春梅, 等. 紫云英还田对黄泥田土壤理化和微生物特性及水稻产量的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4782-4797.
- WANG L M, HUANG D F, HE C M, et al. Impacts of the Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue incorporation on soil physicochemical, microbial properties and rice yields in yellow-mud paddy field[J]. *Acta ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4782-4797.
- [10] 徐彬, 王小利, 蒙焯熙, 等. 减氮配施生物炭对水稻产量及不同生育期氮素累积的影响[J]. *福建农业学报*, 2022, 37(12): 1528-1535.
- XU B, WANG X L, MENG R X, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction accompanied by biochar application on yield and nitrogen accumulation of rice at various growth stages[J]. *Fujian journal of agricultural sciences*, 2022, 37(12): 1528-1535.
- [11] 谢志坚, 吴佳, 段金贵, 等. 生物炭基肥与紫云英联合还田对红壤区早稻干物质累积和氮素利用特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1732-1739.
- XIE Z J, WU J, DUAN J G, et al. Effects of combined return of biochar-based fertilizer and milk vetch on dry matter accumulation and N use efficiencies of early rice in reddish paddy field of south China[J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2020, 26(9): 1732-1739.
- [12] 孔秋娣. 稻田套播紫云英高效栽培技术及其应用效果探讨[J]. *上海农业科技*, 2021(5): 137-138.
- KONG Q D. Discussion on the efficient cultivation technology and application effect of rice paddy sowing with milk vetch[J]. *Shanghai agricultural science and technology*, 2021(5): 137-138.
- [13] 吕永强, 郑铭洁, 吴家森, 等. 不同减量氮肥配施紫云英对田面水氮磷流失及水稻生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 148-155.
- LYU Y Q, ZHENG M J, WU J S, et al. Effects of different nitrogen reduction fertilizer combined with milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on the loss of nitrogen and phosphorus in field water and rice growth[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2022, 36(6): 148-155.
- [14] 吕永强. 氮肥减施配合紫云英培肥对田面水氮磷流失和水稻生长的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023.
- LYU Y Q. Effects of nitrogen fertilizer reduction and milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) cultivation on nitrogen and phosphorus loss in field surface water and rice yield[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2023.
- [15] 丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 等. 4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1655-1664.
- DING X R, YAN N Z, WANG Z F, et al. Effects of four amendments on fertility and labile organic carbon fractions of acid purple soil[J]. *Environmental science*, 2024, 45(3): 1655-1664.
- [16] 李东丽, 何秉宇, 王志强, 等. 干旱区水稻田温室气体排放特征[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(11): 2327-2333.
- LI D L, HE B Y, WANG Z Q, et al. Characteristics of greenhouse gases emission in rice field in arid areas[J]. *Journal of Zhejiang agricultural sciences*, 2021, 62(11): 2327-2333.
- [17] 宁川川, 陈悦桂, 柳瑞, 等. 减氮配施秸秆生物炭对双季稻产量和硅、氮营养的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 993-1001.
- NING C C, CHEN Y G, LIU R, et al. Effects of N fertilizer reduction combined with straw biochar application on the yield, Si, and N nutrition of double-cropping rice[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2023, 34(4): 993-1001.
- [18] 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 agrochemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [19] 苏梦迪, 马啸, 胡丽涛, 等. 高碳基肥减氮施用对土壤肥力和细菌多样性的影响[J]. 农业生物技术学报, 2022, 30(6): 1174-1185.
- SU M D, MA X, HU L T, et al. Effects of high-carbon basal fertilizers combined with nitrogen reduction on soil fertility and bacterial diversity[J]. Journal of agricultural biotechnology, 2022, 30(6): 1174-1185.
- [20] 毛妍婷, 刘宏斌, 陈安强, 等. 长期施用有机肥对减缓菜田耕层土壤酸化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1784-1791.
- MAO Y T, LIU H B, CHEN A Q, et al. Effects of long-term application of organic fertilizers on reducing soil acidification of plough layer in vegetable fields[J]. Ecology and environmental sciences, 2020, 29(9): 1784-1791.
- [21] 刘敏, 纪立东, 王锐, 等. 施用生物炭条件下减施氮肥对玉米生长和土壤的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(19): 216-222.
- LIU M, JI L D, WANG R, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction on maize growth and soil under biochar application[J]. Jiangsu agricultural science, 2021, 49(19): 216-222.
- [22] 李诗, 张俊辉, 胡钧铭, 等. 等氮替代施入生物炭对南方免耕早稻田温室气体排放的影响[J]. 中国农业气象, 2023, 44(10): 863-875.
- LI S, ZHANG J H, HU J M, et al. Effect of Isonitrogen substitution for biochar application on greenhouse gas emissions from southern no-till early rice fields[J]. Chinese journal of agrometeorology, 2023, 44(10): 863-875.
- [23] 吴东, 李茂森, 李帅兵, 等. 减氮条件下生物炭基肥对土壤养分及细菌群落结构的影响[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(4): 657-666.
- WU D, LI M S, LI S B, et al. Effects of biochar based fertilizer on soil nutrients and bacterial community structure under nitrogen reduction[J]. Journal of Henan agricultural university, 2023, 57(4): 657-666.
- [24] 张云舒, 唐光木, 蒲胜海, 等. 减氮配施炭基肥对棉田土壤养分、氮素利用率及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(9): 1372-1377.
- ZHANG Y S, TANG G G, PU S H, et al. Effect of biochar-based compound fertilizer on soil nutrients and cotton yield in irrigated sandy soil under nitrogen reduction condition[J]. Acta agriculturae boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(9): 1372-1377.
- [25] 王慧, 唐杉, 王允青, 等. 紫云英翻压对稻田土壤肥力和双季稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1384-1390.
- WANG H, TANG S, WANG Y Q, et al. Effects of the Incorporation of Chinese milk vetch on soil fertility and double rice yield[J]. Chinese journal of soil science, 2019, 50(6): 1384-1390.
- [26] 杨威, 屈忠义, 张如鑫, 等. 膜下滴灌制度与生物炭用量对玉米生长及水氮利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 313-322.
- YANG W, QU Z Y, ZHANG R X, et al. Effects of drip-irrigation schedule under film-mulching and biochar amount on corn growth and water-nitrogen use efficiency[J]. Journal of soil and water conservation, 2023, 37(1): 313-322.
- [27] 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 等. 生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 4162-4169.
- LIU X Y, WANG D M, ZHANG Z Z, et al. Effect of biochar with phosphorus fertilizer on soil nutrients, enzyme activity, and nutrient uptake of alfalfa[J]. Environmental sciences, 2023, 44(7): 4162-4169.
- [28] MA L J, HUO Q Y, TIAN Q Y, et al. Continuous application of biochar increases <sup>15</sup>N fertilizer translocation into soil organic nitrogen and crop uptake in drip-irrigated cotton field[J]. Journal of soils and sediments, 2023, 23(3): 1204-1216.
- [29] 方煜, 黄凯, 杨京民, 等. 石灰、生物炭对酸性土壤改良及玉米生长的影响[J]. 江西农业学报, 2022, 34(4): 80-87.
- FANG Y, HUANG K, YANG J M, et al. Effects of lime and biochar on acid soil improvement and maize growth[J]. Acta agriculturae Jiangxi, 2022, 34(4): 80-87.
- [30] 李利霞, 武桂芝, 于宗民, 等. 大沽河流域农田土壤磷有效性及全磷淋失影响因素试验[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 337-343.

- LI L X, WU G Z, YU Z M, et al. Experimental study on influencing factors affecting phosphorus availability and total phosphorus leaching in farmland soil in Dagu River Basin[J]. Journal of soil and water conservation, 2022, 36(2): 337-343.
- [31] 姚佳, 刘加欣, 苏焱, 等. 烟秆炭配施氮肥对玉米苗期生长及土壤特性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(3): 140-151.
- YAO J, LIU J X, SU Y, et al. Effects of combined application of tobacco stem biochar and nitrogen fertilizers on corn growth and soil properties in seeding stage[J]. Journal of agricultural science and technology, 2023, 25(3): 140-151.
- [32] 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.
- [33] 张珂珂, 宋晓, 郭斗斗, 等. 生物炭对潮土土壤肥力特征和氮肥利用效率的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(12): 73-80.
- ZHANG K K, SONG X, GUO D D, et al. Effects of biochar on fertility and nitrogen utilization efficiency in fluvo-aquic soil [J]. Journal of Henan agricultural sciences, 2022, 51(12): 73-80.
- [34] 王希贤, 吴君, 李磊, 等. 生物炭和氮肥对沿海沙地鼓节竹笋生长和光合特性的效应[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(2): 217-223.
- WANG X X, WU J, LI L, et al. Effects of biochar and nitrogen fertilizer on growth and photosynthetic characteristics of bamboo shoots of *Bambusa tuldoidea* 'Swolleninternode' in coastal sandy land[J]. Journal of Fujian agriculture and forestry university (natural science edition), 2022, 51(2): 217-223.
- [35] 李敏, 罗德强, 江学海, 等. 控水增密模式对杂交水稻减氮后产量形成的调控效应[J]. 作物学报, 2020, 46(9): 1430-1447.
- LI M, LUO D Q, JIANG X H, et al. Regulations of controlled irrigations and increased densities on yield formation of hybrid indica rice under nitrogen-reduction conditions[J]. Acta agronomica Sinica, 2020, 46(9): 1430-1447.
- [36] 彭红宇, 刘红恩, 王秋红, 等. 低温生物炭和化肥配施对冬小麦生长和土壤铅镉生物有效性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 212-219.
- PENG H Y, LIU H G, WANG Q H, et al. Effects of combined application of low temperature biochar and chemical fertilizer on growth of winter wheat and bioavailability of Pb and Cd in soil[J]. Jiangsu agricultural science, 2023, 51(4): 212-219.
- [37] 东强, 彭玉琳, 张毅, 等. 缓释尿素配施黄腐酸对黑青稞生物量及旗叶光合性能的影响[J]. 高原农业, 2023, 7(2): 118-124.
- DONG Q, PENG Y L, ZHANG Y, et al. Effects of slow release urea combined with fulvic acid on biomass and photosynthetic performance of flag leaf of black highland barley[J]. Journal of plateau agriculture, 2023, 7(2): 118-124.
- [38] 胡瑞文, 刘勇军, 荆永锋, 等. 深耕条件下生物炭对烤烟根系活力、叶片SPAD值及土壤微生物数量的动态影响[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1223-1230.
- HU R W, LIU Y J, JING Y F, et al. Dynamic effects of biochar on root vigor, leaf SPAD value and soil microbial quantity of flue-cured tobacco under deep tillage condition[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(6): 1223-1230.