

炭基有机肥配施氮肥对土壤团聚体结构及紫甘蓝产量品质的影响

武泽婷¹, 李小英¹, 杨 奔², 苏小娟¹

(1.西南林业大学水土保持学院,云南 昆明 650224; 2.保定市莲池区农业农村局,河北 保定 071030)

摘 要:为解决元谋坝区氮肥过量导致的土壤酸化和板结问题,以紫甘蓝为试材,采用二因素三水平随机完全区组设计,设置三个炭基有机肥底肥施用水平:15 t · hm⁻²(T1)、30 t · hm⁻²(T2)、45 t · hm⁻²(T3),基于当地常规氮肥量 420 kg · hm⁻²(N3),追施减量 100%、50%、25%氮肥的用量:0 kg · hm⁻²(N0)、210 kg · hm⁻²(N1)、315 kg · hm⁻²(N2),以不施肥处理为对照(CK),研究不同施肥量对土壤团聚体的分布和稳定性以及紫甘蓝产量与品质的影响,进而筛选合理的配施方案。结果表明:与 CK 相比,施用炭基有机肥配施不同水平氮肥处理均提高>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 粒级团聚体占比,减小 0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒级团聚体占比,其 R_{0.25}、MWD、GMD 值分别提升 13.11%~24.59%、55.13%~174.36%、20.83%~40.28%;炭基有机肥配施减量 50%和 25%氮肥处理间紫甘蓝的叶球质量、经济产量、生物产量差异不显著,但均较等量炭基肥配施常规施氮处理提高 10.01%~32.33%、8.69%~36.21%、3.10%~33.33%;等量炭基有机肥施用条件下,与配施常规施氮量相比,配施减氮处理氮农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥表现利用率分别提高 65.87%~216.33%、58.17%~172.42%和 0.32%~292.85%;T2N1 处理紫甘蓝叶球的维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白和花青素含量均高于其他处理,较相同条件下配施常规氮量(T2N3)处理分别显著提高 53.08%、13.86%、64.94%和 89.73%。双因素方差表明,炭基肥与氮肥有显著的交互作用。主成分综合评价表明,30 t · hm⁻²炭基有机肥与 210 kg · hm⁻²氮肥配合施用更有利于元谋地区紫甘蓝的绿色高产种植,同时实现紫甘蓝生产的减肥增效。

关键词:紫甘蓝;炭基有机肥;减量氮肥;水稳性团聚体;氮肥利用率;产量

中图分类号:S635; S147.2 **文献标志码:**A

Effects of biochar-based organic fertilizer combined with nitrogen fertilizer on soil aggregate structure, yield, and quality of purple cabbage

WU Zeting¹, LI Xiaoying¹, YANG Ben², SU Xiaojuan¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;

2. China Agricultural and Rural Bureau, Lianchi District, Baoding, Hebei 071030, China)

Abstract: To address the issues of soil acidification and compaction in the Yuanmou Basin caused by excessive nitrogen fertilizer application, a field experiment was conducted using purple cabbage as the test crop. A two-factor, three-level randomized complete block design was employed to examine the effects of varying fertilization rates on the distribution and stability of soil aggregates, as well as the yield and quality of purple cabbage. The experiment involved three application levels of biochar-based organic fertilizer: 15 t · hm⁻²(T1), 30 t · hm⁻²(T2), and 45 t · hm⁻²(T3). In addition, based on the local conventional nitrogen fertilizer rate of 420 kg · hm⁻²(N3), nitrogen fertilizer application was reduced by 100%, 50%, and 25%, resulting in the following treatments: 0 kg · hm⁻²(N0), 210 kg · hm⁻²(N1), and 315 kg · hm⁻²(N2). A control group (CK) received no fertilizer. Developing a comprehensive application plan to explore an optimal fertilization strategy by examining the effects of different fertilizer combinations on soil aggregate distribution and stability, as well as the yield and quality of purple cabbage. The results showed that, compared with CK, the application of carbon-based organic fertilizer combining

with different levels of nitrogen fertilizer increased the proportion of aggregate of >5 mm, $2\sim 5$ mm, $1\sim 2$ mm, $0.5\sim 1$ mm, and their $R_{0.25}$, MWD and GMD values were increased by 13.11% ~ 24.59%, 55.13% ~ 174.36% and 20.83% ~ 40.28%. There was no significant difference in the head weight, economic yield and biological yield of purple cabbage between the treatments of 50% and 25% reduction of biochar-based organic fertilizer combined with nitrogen fertilizer, but they were 10.01% ~ 32.33%, 8.69% ~ 36.21% and 3.10% ~ 33.33% higher than those of the same amount of biochar-based organic fertilizer combined with conventional nitrogen treatment. Under the same amount of biochar-based organic fertilizer application, compared with the conventional nitrogen application rate, the combined application of nitrogen reduction treatment increased the nitrogen agronomic utilization rate by 65.87% ~ 216.33%, the nitrogen partial productivity by 58.17% ~ 172.42% and the nitrogen fertilizer performance utilization rate by 0.32% ~ 292.85%, respectively. The combined application of biochar-based organic fertilizer and reduced nitrogen fertilizer significantly increased nitrogen agronomic efficiency, nitrogen partial factor productivity and nitrogen apparent efficiency. The contents of vitamin C, soluble sugar, soluble protein and anthocyanin in purple cabbage head treated with T2N1 were higher than those in other treatments, which were significantly increased by 53.08%, 13.86%, 64.94% and 89.73%, compared with the treatment of conventional nitrogen application (T2N3) under the same conditions. The two-way analysis of variance revealed a significant interaction between biochar-based organic fertilizer and nitrogen fertilizer. The principal component analysis indicated that the combined application of $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ of biochar-based organic fertilizer and $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of nitrogen fertilizer (T2N1) was more beneficial for the green and high-yield cultivation of purple cabbage in the Yuanmou area. This approach also achieved fertilizer reduction and increased efficiency in purple cabbage production.

Keywords: purple cabbage; biochar-based organic fertilizer; reduced nitrogen fertilizer; water-stable aggregates; nitrogen use efficiency; yield

我国甘蓝总产量占世界的 50% 左右^[1], 其中紫甘蓝 (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) 是结球甘蓝 (*B. oleracea* var. *capitata*) 的一个变型, 因其含有大量维生素和矿物质, 抗旱性强, 稳产, 耐贮运, 在健康食品市场中深受喜爱。随着市场需求的增加, 紫甘蓝种植面积呈逐年扩大的趋势^[2]。针对其喜肥耐肥的特性, 大多农户长期不合理或过量施用氮肥对土壤氮素循环产生了负面干扰, 导致土壤严重酸化和土壤易板结等问题, 从而降低作物产量和土壤生产力, 造成资源浪费和环境污染^[3-5]。有机肥替代化学肥料维持产量的施肥管理中, 氮素是作物高产的重要养分限制因子, 因此氮肥的过量施用普遍存在^[6]。较多研究表明, 适当减量施用氮肥, 既能保证作物产量和改善品质, 又能提高肥料利用率^[7-9]。特别是在干热河谷区的土壤水分和养分流失严重背景下, 氮肥的合理施用对提高作物产量和氮素吸收利用率、实现作物的绿色优质丰产高效具有重要意义。

炭基有机肥是以生物炭为载体混合一定比例的有机肥料制成的具有缓释性能的新型功能型生态肥料, 是生物炭农用的一种方式^[10-11]。生物炭与有机肥含大量有机质, 施用炭基有机肥可改善土壤环境和持续供给作物养分, 不仅能够有效缓解长期

过量施用氮肥带来的负面影响^[12], 还能直接或间接地参与土壤氮循环过程, 有利于提高肥料利用效率, 进而促进作物生长和产量提升^[6]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 通过影响土壤物理性质及养分循环转化来表征土壤肥力。王攀宇^[13]研究表明, 炭基有机肥较单施生物炭和有机肥能更好地促进微团聚体向大团聚体转化, 提高团聚体稳定性, 从而促进烤烟生长发育, 提高经济效益。李伟等^[14]通过 6a 的田间定位试验发现, 生物炭 $1\times 10^4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施氮肥 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有利于土壤中大水稳性团聚体的形成, 对提高耕层土壤团聚体稳定性及作物总产量效果最佳。谢婷婷^[15]研究发现, 炭基有机肥施入土壤后, 在作物生长发育期间缓慢释放养分, 可满足作物各生育时期对养分的需求, 更有利于作物吸收利用。张云舒等^[16]研究发现, 与常规施肥量相比, 炭基肥与减氮施肥方式下棉花产量均提高 2.0%, 氮素利用效率显著提高 11.9%。

目前, 应用减氮配施对土壤改良及作物生长影响已有较多研究^[16-18], 但减氮配施炭基有机肥对土壤改良及作物生长影响的研究较少, 且减量施氮肥及其与有机肥科学配施是解决干热河谷紫甘蓝种植土壤肥力问题的重要措施。基于此, 本研究根据紫甘蓝的生长周期, 对元谋坝区土壤中添加炭基有

机肥并以当地常规施氮肥量 25%逐级递减设计,以不施肥和单施炭基有机肥作为对照,探究炭基有机肥减量配施氮肥对土壤团聚体的组成和稳定性,以及紫甘蓝的产量、品质和氮肥利用率的影响,筛选出当地最佳配施减氮量,以期为干热河谷区炭基有机肥改良土壤及紫甘蓝减肥增产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年在云南省楚雄彝族自治州元谋干热河谷的云南省农业科学院热区生态农业研究所大田试验基地(25°42'N,101°53'E)进行。研究区地势为干热河谷平坝区,属南亚热带干热季风气候,多年平均气温 22.9℃,极端最高温度 42℃,光热资源充足,年均日照时数为 2 563 h,无霜期 305~331 d;年平均降水量 562 mm,蒸发量是降水量的 5~6 倍,雨季一般为 5—10 月。试验区土壤为燥红壤,试验前 0~20 cm 土层土壤基本理化性质:pH 值 6.67,有机质 13.32 g·kg⁻¹,全氮 0.55 g·kg⁻¹,水解氮 45.31 mg·kg⁻¹,有效磷 22.53 mg·kg⁻¹,速效钾 305.00 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

供试紫甘蓝为元谋坝区主要种植的品种‘普罗米悠’,由云南省农业科学院热区农业研究所培育,其生长周期约为 100~120 d。供试炭基有机肥(C:N:P₂O₅:K₂O=15.9:1.3:1.4:2.9)由云南天久农林公司提供,供试化肥中氮肥为尿素(N≥46.0%)和磷酸二氢钾。

1.3 试验设计

试验采用二因素三水平随机完全区组设计,因素一为炭基有机肥用量(底肥):15 t·hm⁻²(T1)、30 t·hm⁻²(T2)、45 t·hm⁻²(T3),因素二为化学氮肥用量(追肥):210 kg·hm⁻²(N1,常规氮肥量减施 50%)、315 kg·hm⁻²(N2,常规氮肥量减施 25%)、420 kg·hm⁻²(N3,常规氮肥量),以不施肥(CK)及单施炭基有机肥处理(T1N0、T2N0、T3N0)为对照,共计 13 个处理(表 1),各处理 3 个重复,共 39 个小区,小区面积为 2.5 m²,各小区栽植紫甘蓝 20 株。2021 年 10 月 27 日将所有小区土壤集中翻匀晾晒,除不施肥处理外,其余处理按试验设计将炭基有机肥作为底肥随机施入样地并与土壤混合均匀。起墒,低沟宽 30 cm,高墒宽 70 cm。墒面盖银灰双色膜,株行距为 30 cm×25 cm。2021 年 11 月 19 日选取长势均一及苗高 7~8 cm 的紫甘蓝幼苗于样地定植,定植后 10 d 进行第一次追肥(30%),其余氮肥

于莲座期(30%)、结球初期(20%)和结球中期(20%)分别进行一次追肥,共追肥 4 次,于 2022 年 3 月 12 日采收。除 CK 外,其余处理均于结球期配施 150 kg·hm⁻²磷酸二氢钾肥。试验期间平均 3~4 d 浇一次水,灌溉方式为地表滴灌,其余管理方式按当地习惯进行。

表 1 试验设计

Table 1 Design of field experiment

处理 Treatment	炭基有机肥 Biochar-based organic fertilizer /(t·hm ⁻²)	氮肥 Nitrogen fertilizer /(kg·hm ⁻²)	磷酸二氢钾肥 Potassium dihydrogen phosphate fertilizer /(kg·hm ⁻²)
CK	0	0	0
T1N0	15	0	150
T1N1	15	210	150
T1N2	15	315	150
T1N3	15	420	150
T2N0	30	0	150
T2N1	30	210	150
T2N2	30	315	150
T2N3	30	420	150
T3N0	45	0	150
T3N1	45	210	150
T3N2	45	315	150
T3N3	45	420	150

1.4 项目测定与方法

1.4.1 土壤团聚体 于紫甘蓝成熟采摘后,利用五点取样法采集耕层(0~20 cm)的原状土,样品稍干后过 10 mm 筛。利用团粒分析仪的筛组(孔径为 5.0、2.0、1.0、0.5、0.25 mm)进行湿筛分离后得出各粒级的百分含量。

1.4.2 紫甘蓝产量及氮含量 紫甘蓝成熟后,每个小区随机选取 10 株代表性紫甘蓝,烘箱 105℃杀青 30 min 后,65℃烘干至恒重后记作生物产量;去除外叶,可食用部分记作经济产量(精确到 0.01 g)。将干样粉碎密封保存,采用凯氏定氮法测定紫甘蓝氮含量。

1.4.3 叶球品质 紫甘蓝成熟期,采摘果实冷藏存于 4℃冰箱用于紫甘蓝品质的测定,其中,维生素 C 含量采用二甲苯萃取比色法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-350 染色法测定;可溶性糖含量采用苯酚法测定;花青素(以矢车菊素计)含量采用分光光度法,由山东青岛科创质量检测有限公司检测。

1.5 数据统计与分析

土壤团聚体稳定性指标:>0.25 mm 团聚体含量(R_{0.25})、平均重量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)参照以下公式计算:

$$R_{0.25} = 1 - \frac{M_{r < 0.25}}{M_T} \tag{1}$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i w_i \tag{2}$$

$$GMD = \exp \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \right] \tag{3}$$

式中, $\bar{x}_i$ 为任一粒径范围团聚体的平均直径(mm); w_i 为粒级团聚体重量占土壤样品干重的百分比(%); $M_{r<0.25}$ 为土壤粒径小于 0.25 mm 团聚体的质量(g); M_T 为团聚体总质量(g)。

氮肥利用率的定量指标能够从侧面反映作物对氮肥的利用状况,参照以下公式计算:

地上部氮积累量(NA)= 紫甘蓝地上部干质量/1000×紫甘蓝氮含量

氮农学效率(NAE)= (施氮处理经济产量-不施氮处理经济产量)/氮肥施用量×100%

氮肥偏生产力(NFP)= 施氮处理经济产量/氮肥施用量

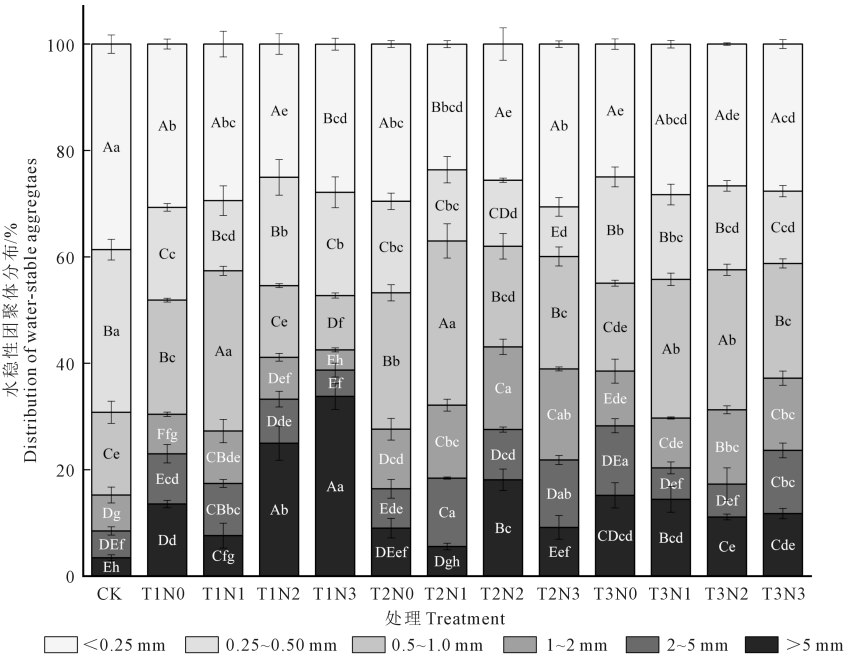
氮肥表观利用率(REN)= (施氮处理地上部氮积累量-不施氮处理地上部氮积累量)/氮肥施用量×100%

采用 SPSS 27.0 和 Origin 2021 进行数据处理和作图,用单、双因数方差分析比较分析不同处理下土壤团聚体分布及其稳定性、紫甘蓝产量、氮肥利用率和品质的差异,运用 Duncan’s 法对显著性差异进行多重比较,对数据进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 炭基肥与氮肥配施对土壤水稳性团聚体的影响

2.1.1 土壤水稳性团聚体分布 不同配施处理对燥红壤 0~20 cm 土层土壤水稳性团聚体的粒级分布有显著影响(图 1)。除 T1N3 处理外,与 CK 相比,其余配施处理>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 粒级占比均增加,0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒级占比减少。单施炭基有机肥处理(T1N0、T2N0、T3N0)下,团聚体>5 mm、2~5 mm、0.25~0.5 mm 粒级占比表现为 T3>T1>T2,<0.25 mm 粒级占比表现为 T1>T2>T3。低量炭基有机肥(T1)施用条件下,2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 粒级团聚体含量随着氮肥的增加先增加后减小,>5 mm 粒级占比则相反;中量炭基有机肥(T2)施用条件下,1~2 mm 粒级团聚体含量随着氮肥的增加而上升,0.25~0.5 mm 粒级表现相反;高量炭基有机肥(T3)施用条件下,0.25~0.5 mm 粒级团聚体含量随着氮肥的增加而下降。等量氮肥(N1、N3)配施炭基有机肥处理下,2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 粒级团聚体含量均表现为 T2>T1>T3;等量氮肥(N2)配施炭基有机肥处理中,>5 mm 粒级含量随着炭基有机肥的增加而减少,0.25~0.5 mm 粒级含量恰好相反。



注:不同小写字母表示同一粒径不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一处理不同粒径间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences between different particle sizes in the same treatment ($P<0.05$).

图 1 不同施肥处理下土壤水稳性团聚体分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of soil water-stable aggregate under different fertilization treatments

2.1.2 土壤水稳性团聚体稳定性 由表 2 可知,炭基肥与氮肥配施显著提高了土壤水稳性团聚体的稳定性,与 CK 相比,各处理 $R_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 分别提升 13.04%~24.46%、55.13%~174.36%、17.52%~39.18%。单施炭基有机肥(N0)条件下,各处理的 MWD 与 GMD 表现为 $T3>T1>T2$,且 $T3$ 较其余两个处理两指标分别显著提高 14.79%和34.71%、6.82%和 10.59%; $R_{0.25}$ 含量则随炭基有机肥含量增加呈增加趋势。低量炭基有机肥(T1)施用条件下, $R_{0.25}$ 指标在 N2 配施处理中最大,且其余配施处理组间差异不显著, MWD 、 GMD 均表现为 $N3>N2>N0>N1$;中量炭基有机肥(T2)施用条件下, $R_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 均表现为随着氮肥的增加而先增加后减小;高量炭基有机肥施用(T3)条件下,单施炭基有机肥的 $R_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 均高于配施氮肥处理。等量氮肥(N1)配施炭基有机肥处理中, $R_{0.25}$ 表现为 T2 较 T1 和 T3 配施处理分别显著提高 8.57%和 5.56%,且 MWD 、 GMD 均没有显著差异;等量氮肥(N2、N3)配施炭基有机肥处理中, $R_{0.25}$ 指标均无显著差异,且 MWD 、 GMD 均在 T1 配施处理中最大。T1N2 处理土壤水稳性团聚体综合稳定性最高。双因素方差分析结果显示,炭基有机肥配施氮肥对土壤水稳性团聚体的稳定性存在显著的互作效应。

表 2 不同施肥处理下土壤水稳性团聚体稳定性指标

Table 2 Soil water-stable aggregate stability indicators under different fertilization treatments

处理 Treatment	$R_{0.25}/\%$	平均重量直径 MWD/mm	几何重量直径 GMD/mm
CK	0.61±0.02g	0.78±0.03g	0.72±0.01h
T1N0	0.69±0.01f	1.42±0.02de	0.88±0.01ef
T1N1	0.70±0.02ef	1.22±0.07f	0.87±0.01fg
T1N2	0.75±0.02ab	1.90±0.11b	0.98±0.02a
T1N3	0.72±0.01cdef	2.14±0.13a	1.01±0.03a
T2N0	0.71±0.01def	1.21±0.10f	0.85±0.02g
T2N1	0.76±0.01a	1.27±0.02ef	0.90±0.01cde
T2N2	0.74±0.03abc	1.72±0.08c	0.98±0.02a
T2N3	0.69±0.01f	1.43±0.08de	0.92±0.02bed
T3N0	0.75±0.01ab	1.63±0.12c	0.94±0.03b
T3N1	0.72±0.01cdef	1.40±0.13de	0.89±0.02def
T3N2	0.73±0.01bcd	1.31±0.06ef	0.88±0.02ef
T3N3	0.72±0.01bcde	1.49±0.04d	0.92±0.01bc
方差分析 Variance analysis			
炭基有机肥(T) Carbon-based organic fertilizer	* *	* *	* *
氮肥(N) Nitrogen fertilizer	* *	* *	* *
T×N	* *	* *	* *

注:不同小写字母表示同一粒径不同处理间差异显著 ($P<0.05$); * * 表示 $P<0.01$ 水平显著。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), * * indicates $P<0.01$. The same below.

2.2 炭基有机肥与氮肥配施对紫甘蓝产量和氮肥利用率的影响

2.2.1 紫甘蓝产量 由表 3 可知,与 CK 相比,施加炭基有机肥处理的紫甘蓝叶球质量、经济产量、生物产量均显著提高,且相同施氮量条件下,3 个指标值均随炭基有机肥施用量增加呈大幅增加趋势。炭基有机肥配施减量氮肥处理也能进一步增加紫甘蓝叶球质量、经济产量、生物产量和经济系数,各处理 4 个指标分别较 CK 显著提高 60.23%~287.88%、59.48%~489.74%、46.60%~348.51%和 8.89%~33.33%。等量炭基有机肥施用条件下,叶球质量、经济产量、生物产量均表现为 $N1$ 、 $N2>N3>N0$,配施 $N1$ 和 $N2$ 施氮量处理间差异不显著,两者均显著高于单施炭基有机肥处理,3 个指标分别较 $N0$ 增加54.14%~175.30%、37.52%~127.79%、2.04%~22.00%。除单施炭基有机肥处理,等量炭基有机肥施用条件下,经济系数表现为与施氮量处理组间差异不显著。双因素方差结果显示,炭基有机肥和氮肥处理及其交互作用均对紫甘蓝经济产量和生物产量有显著影响。

2.2.2 氮肥利用率 由表 4 可知,等量炭基有机肥施用条件下,紫甘蓝的氮积累量表现出随施氮量的增加先增大后减小的变化趋势,T1N2、T2N1、T3N1 处理分别在相应炭基有机肥条件下氮积累量最大,分别较 CK 显著增加 77.11%、83.75%、97.80%,分别较 T1N0、T2N0、T3N0 处理显著增加 110.08%、47.83%、63.99%,其中 T3N1 处理氮积累量最大,与 T3N2 处理相比提升 25.79%。等量炭基有机肥施用条件下, NAE 和 NFP 表现出随施氮量的增大而不同程度降低,且处理间差异显著;炭基有机肥配施等量氮肥条件下, NAE 与 NFP 随炭基有机肥施用量增大而显著提升。 REN 在 $N3$ 施氮量配施不同比例的炭基有机肥处理间没有显著差异。 NAE 、 NFP 和 REN 均为 T3N1 处理最大,与 T2N1 和 T1N1 处理相比,T3N1 处理 NAE 分别显著提高 35.61%和86.80%, NFP 分别显著提高 27.86%和 62.75%, REN 分别显著增加 16.78%和 314.45%。双因素方差分析结果显示,炭基有机肥和氮肥处理及其交互作用极显著影响紫甘蓝的氮积累量、氮农学利用率、氮肥偏生产力及氮肥表现利用率。

2.3 炭基有机肥与氮肥配施对紫甘蓝品质的影响

2.3.1 维生素 C 含量 由表 5 可知,各施肥处理均能显著提高紫甘蓝维生素 C 含量,与 CK 相比,单施炭基有机肥处理甘蓝维生素 C 含量分别提高55.36%、93.93%、101.84%,炭基有机肥配施氮肥处理提高 43.50%~119.67%。低量炭基有机肥(T1)施用条件

表 3 不同施肥处理对紫甘蓝产量的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on yield of purple cabbage

处理 Treatment	叶球质量 Ball weight/g	经济产量 Economic yield /(kg·hm ⁻²)	生物产量 Biological yield /(kg·hm ⁻²)	经济系数 Harvest index/%
CK	324.38±51.35g	14540.28±670.40h	32359.35±2039.32h	0.45±0.02e
T1N0	519.74±77.67f	23188.22±4825.33g	47438.05±8697.06g	0.49±0.02de
T1N1	908.84±175.15d	52475.73±6678.51d	100265.90±3324.02d	0.52±0.05bcd
T1N2	945.08±116.96d	50510.70±449.95de	100030.90±788.77d	0.50±0.01d
T1N3	714.19±41.23e	38525.37±5360.83f	75200.85±7132.96f	0.51±0.02cd
T2N0	553.99±22.81f	26480.65±3086.36g	52234.90±2747.82g	0.50±0.03d
T2N1	1047.37±69.11cd	66793.64±5853.73bc	111974.05±5058.37bc	0.60±0.05a
T2N2	1108.50±75.40bc	72900.33±3624.40b	118985.45±12097.80b	0.61±0.03a
T2N3	952.07±97.25d	61451.03±7592.36c	108605.95±5057.27cd	0.56±0.05abc
T3N0	733.29±51.03e	43845.66±3743.31ef	85700.85±1928.43e	0.51±0.03cd
T3N1	1226.03±42.35ab	85402.46±4094.68a	142364.80±7523.44a	0.60±0.02a
T3N2	1258.20±38.14a	85750.14±3368.60a	145135.90±3222.45a	0.59±0.02a
T3N3	976.27±21.89cd	67585.10±2424.71bc	117855.35±972.44bc	0.57±0.02ab
方差分析 Variance analysis				
炭基有机肥(T) Carbon-based organic fertilizer	* *	* *	* *	* *
氮肥(N) Nitrogen fertilizer	* *	* *	* *	* *
T×N	ns	* *	* *	ns

表 4 不同施肥处理对氮肥利用率的影响

Table 4 Effects of different fertilization treatments on nitrogen use efficiency

处理 Treatment	氮积累量 NA /(kg·hm ⁻²)	氮农学利 用率 NAE /(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生 产力 NFP /(kg·kg ⁻¹)	氮肥表观 利用率 REN /%
CK	55.44±3.95g			
T1N0	46.74±2.23h			
T1N1	68.52±2.26f	180.64±31.80c	249.88±31.80cd	6.23±1.08e
T1N2	98.19±1.57b	114.19±1.43d	160.35±1.43e	13.57±0.50c
T1N3	81.51±2.9de	57.11±12.76e	91.73±12.76f	6.21±0.69e
T2N0	68.91±1.87f			
T2N1	101.87±4.68b	248.83±27.88b	318.07±27.88b	22.11±2.23b
T2N2	86.35±2.39cd	185.27±11.51c	231.43±11.51d	9.81±0.76d
T2N3	80.17±4.08e	111.69±18.08d	146.31±18.08e	5.89±0.97e
T3N0	66.87±3.63f			
T3N1	109.66±1.79a	337.44±19.50a	406.68±19.50a	25.82±0.85a
T3N2	87.18±1.68c	226.06±10.69b	272.22±10.69c	10.08±0.53d
T3N3	83.06±0.56cde	126.30±5.77d	160.92±5.77e	6.57±0.14e
方差分析 Variance analysis				
炭基有 机肥(T) Carbon-based organic fertilizer	* *	* *	* *	* *
氮肥(N) Nitrogen fertilizer	* *	* *	* *	* *
T×N	* *	* *	* *	* *

下,T1N1、T1N2、T1N3 处理维生素 C 含量分别较 T1N0 处理显著提升 22.04%、22.57%、25.05%,但三处理间无显著差异;中量(T2)和高量(T3)炭基有机肥施用条件下,甘蓝维生素 C 含量随氮肥配施量的增加而先增大后减小,均表现为 N1>N0>N2>N3,其中 T2N1 和 T3N1 分别较相应的单施炭基有机肥处理(T2N0 和 T3N0)增加 13.27%和8.54%,T2N2 和 T2N3 之间、T3N2 和 T3N3 之间无显著差异。可见炭基有机肥(T2、T3)配施低量氮肥对紫甘蓝维生素 C 含量提升效果最佳。

2.3.2 可溶性糖含量 由表 5 可知,紫甘蓝的可溶性糖含量在不同处理间差异显著,在 CK 处理下最高(103.99 mg·g⁻¹),与 CK 相比,单施炭基有机肥处理可溶性糖含量分别下降 54.91%、36.20%、20.39%,炭基有机肥配施氮肥处理降低 7.78%~52.39%。等量炭基有机肥施用条件下,甘蓝可溶性糖含量均表现为减氮 50%(N1)最大,T1N1、T1N2、T1N3 处理分别比 T1N0 处理增加 87.62%、74.88%、78.28%;T2N1 和 T2N3 较 T2N0 分别增加 36.51%和 19.88%,T2N2 则下降 2.70%;与 T3N0 相比,T3N1 处理增加 15.84 个百分点,T3N2 和 T3N3 处理分别减少 7.0 个和 40.2 个百分点。综上,施肥会降低紫甘蓝的可溶性糖含量,不同炭基肥配施氮肥水平下,与减氮 50%(N1)配施处理紫甘蓝可溶性糖含量降低幅度变小。

2.3.3 蛋白质含量 由表 5 可知,紫甘蓝叶中可溶性蛋白质含量为 4.48~9.02 mg · g⁻¹,与 CK 相比,单施炭基有机肥处理(T1N0 和 T3N0)甘蓝可溶性蛋白质含量分别降低 2.49%和 9.77%,但 3 个处理间无显著差异;而 T2N0 上升 13.75%。低量炭基有机肥(T1)施用条件下,N0、N1、N2 施氮量处理间无显著差异,T1N3 较 T1N0 处理升高 21.56%。中量(T2)和高量(T3)炭基有机肥施用条件下,甘蓝可溶性蛋白随氮肥配施量的增加而先增大后减小,均表现为 N1>N0>N2>N3。配施氮肥处理中,T2N1 处理可溶性蛋白质含量最高,其次为 T1N3 和 T3N1 处理,3 个处理分别较相应单施炭基有机肥处理显著提升 29.99%、21.56%、13.45%。综上,炭基有基肥(T2)配施减氮量 50%的氮肥较单施及其他配施处理对蛋白质含量增加效果更显著。

2.3.4 花青素含量 由表 5 可知,各处理间紫甘蓝花青素含量差异显著。与 CK 相比,单施炭基有机肥(T1N0)处理紫甘蓝花青素含量无明显变化,而 T2N0 和 T3N0 处理分别升高 6.84%和 16.27%。低量炭基有机肥(T1)施用条件下,N0、N1、N2 处理间无显著差异,T1N3 较 T1N0 处理提高 16.98%。中量(T2)和高量(T3)炭基有机肥施用条件下,与相应单施炭基有机肥处理(T2N0、T3N0)相比,T2N1 和 T3N1 处理紫甘蓝花青素含量分别显著上升 49.23%和 10.95%,T2N3 和 T3N3 分别显著下降 27.25%和 62.17%。T2N1 处理下紫甘蓝花青素含量最高,其次为 T3N1 处理,说明炭基有机肥(T2、T3)更有利于花青素含量的提升,配施尿素量增大,对紫甘蓝花青素的合成抑制性越强。

双因素方差分析结果显示,炭基有机肥和氮肥处理及其交互作用对紫甘蓝的维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白和花青素含量均有极显著影响(表 5)。

2.4 炭基有机肥与氮肥配施的综合评价

为全面系统地反映炭基有机肥与氮肥配施对土壤改良、紫甘蓝产量和品质的影响效果,通过主成分分析提取出 5 个主成分(表 6),贡献率分别为 47.685%、21.008%、15.919%、6.157%、3.410%,5 个主成分可以反映 94.180%的信息,表明其基本反映了 12 个指标所涵盖的大部分信息,可以用来反映炭基有机肥配施氮肥对土壤团聚体稳定性、紫甘蓝产量和品质的综合影响。从表 7 可以看出,第 1 主成分紫甘蓝叶球质量、经济产量、生物产量、经济系数和氮积累量载荷量最大;第 2 主成分土壤团聚体的 MWD 和 GWD 载荷量最大;第 3 主成分紫甘蓝叶中

的可溶性蛋白和花青素的载荷量最大;第 4 主成分紫甘蓝叶的可溶性糖载荷量最大;第 5 主成分土壤团聚体的 R_{0.25}和紫甘蓝的维生素 C 的载荷量最大。将主成分因子得分与方差贡献率加权得到综合指数(表 8),不同炭基有机肥配施氮肥处理中,T2N1 处理综合得分最高(0.751),T3N1 处理次之(0.729),说明炭基肥配施减量氮肥的处理效果较好,且炭基有机肥 30 t · hm⁻²+追施氮肥 210 kg · hm⁻²为最佳处理组合。

3 讨 论

3.1 炭基有机肥与氮肥配施对土壤团聚体的影响 土壤团聚体的形成和稳定对土壤结构和物理性质有重要影响,也会直接或间接影响作物产量^[19]。研究发现,炭基有机肥能改变团聚体粒级分

表 5 不同施肥处理对紫甘蓝品质的影响
Table 5 Effects of different fertilization treatments on quality of purple cabbage

处理 Treatment	维生素 C Vitamin C /(mg · 100g ⁻¹)	可溶性糖 Soluble sugar /(mg · g ⁻¹)	可溶性蛋白 Soluble protein /(mg · g ⁻¹)	花青素 Cyanidin /(g · kg ⁻¹)
CK	28.83±3.78f	103.99±2.19a	6.18±0.18c	4.24±0.12e
T1N0	44.79±3.69de	46.89±3.93g	6.03±0.80cd	4.24±0.24e
T1N1	54.67±3.13bc	87.98±5.32bc	5.65±0.18cd	4.04±0.13ef
T1N2	54.90±5.71bc	82.00±5.03cde	6.17±0.10c	4.28±0.14de
T1N3	56.01±3.22bc	83.60±3.59cd	7.33±0.50b	4.96±0.18c
T2N0	55.91±2.62bc	66.35±1.97f	7.03±0.33b	4.53±0.08d
T2N1	63.33±3.33a	90.57±2.04b	8.02±0.21a	6.76±0.29a
T2N2	46.10±2.98de	64.56±6.26f	6.17±0.16c	3.79±0.15fg
T2N3	41.37±1.23c	79.54±2.41de	5.47±0.36d	3.56±0.13g
T3N0	58.19±3.96ab	83.60±3.59cd	5.63±0.08cd	4.93±0.07c
T3N1	63.16±4.08a	86.26±0.42bcd	7.00±0.09b	5.47±0.16b
T3N2	49.78±3.01cd	75.72±2.72e	5.53±0.23cd	3.10±0.14h
T3N3	43.60±3.14de	49.51±3.26g	4.48±0.43e	3.04±0.09h
方差分析 Variance analysis				
炭基有 机肥(T) Carbon-based organic fertilizer	**	**	**	**
氮肥(N) Nitrogen fertilizer	**	**	**	**
T×N	**	**	**	**

表 6 主成分特征值及贡献率
Table 6 Eigenvalue and contribution rate of principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累计方差贡献率/% Cumulated variance contribution rate
1	5.722	47.685	47.685
2	2.521	21.008	68.694
3	1.910	15.919	84.613
4	0.739	6.157	90.770
5	0.409	3.410	94.180

表 7 各指标在各主成分中的因子载荷量

Table 7 Factor loading of each index in each principal component

指标 Index	成分 Component				
	1	2	3	4	5
>0.25 mm 团聚体含量 $R_{0.25}$	0.504	0.508	0.186	-0.225	0.548
平均重量直径 MWD	0.078	0.985	0.001	-0.052	0.081
几何重量直径 GMD	0.274	0.925	0.012	-0.148	0.179
叶球质量 Ball weight	0.953	0.153	-0.048	-0.016	0.189
经济产量 Economic yield	0.979	0.091	-0.078	-0.001	0.115
生物产量 Biological yield	0.947	0.147	-0.121	0.053	0.174
经济系数 Harvest index	0.904	0.065	0.072	-0.203	0.017
氮积累量 NA	0.804	0.282	0.328	0.226	0.062
维生素 C Vitamin C	0.286	0.280	0.464	0.039	0.753
可溶性糖 Soluble sugar	-0.004	-0.184	0.275	0.929	-0.020
可溶性蛋白 Soluble protein	-0.018	0.016	0.958	0.098	0.026
花青素 Cyanidin	-0.030	-0.003	0.879	0.210	0.302

表 8 主成分得分及综合得分

Table 8 Factor scores and comprehensive scores

处理 Treatment	主成分得分 Principal component score					综合得分 Composite score	综合排序 Comprehensive ranking
	1	2	3	4	5		
CK	-1.375	-1.709	-0.093	1.427	-1.645	-0.956	13
T1N0	-1.412	-0.197	0.018	-2.005	-0.076	-0.818	12
T1N1	-0.157	-0.733	-0.852	0.810	1.170	-0.188	10
T1N2	-0.126	1.486	-0.236	0.880	0.277	0.322	4
T1N3	-0.768	2.022	0.760	0.584	-0.536	0.252	6
T2N0	-1.014	-0.710	0.640	-0.996	0.612	-0.479	11
T2N1	0.847	-0.502	2.487	-0.048	0.394	0.751	1
T2N2	0.933	0.794	-0.045	-0.892	-1.054	0.352	3
T2N3	0.467	0.100	-0.696	0.317	-1.080	0.007	7
T3N0	-0.785	0.496	-0.508	0.556	1.761	-0.095	8
T3N1	1.428	-0.506	0.802	0.610	0.367	0.729	2
T3N2	1.362	-0.611	-1.047	0.036	0.187	0.256	5
T3N3	0.598	0.069	-1.232	-1.280	-0.377	-0.134	9

布,能更好地提高土壤团聚体的稳定性^[13]。本研究也发现,施用炭基有机肥对各粒级团聚体百分含量有显著影响,显著降低了<0.25 mm 粒级的占比,提高了 $R_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 值。这可能是因为炭基有机肥的孔隙结构和吸附性能促进土壤微团聚体向大团聚体转化,改善土壤结构^[14]。本试验中,土壤团聚体的稳定性随炭基有机肥施用量的增加而提升,配施氮肥后团聚体稳定性进一步提升;但 45 t·hm⁻² (T3) 处理下,与单施炭基有机肥相比,添加氮肥减小了 $R_{0.25}$ 、 MWD 和 GMD 值。这可能是因为高量炭基有机肥作为氮源已经补充了植株生长所需的氮素营养^[20],过量氮源会导致大团聚体转化为较小的团聚体^[19],从而影响团聚体的稳定性。王永平等^[21]通过连续 3a 研究发现,生物炭和氮肥配施对土壤团聚体稳定性有显著的互作效应,两者可协同改善土壤结构。本试验中,炭基有机肥和氮肥配施处理及其互作均对土壤水稳性团聚体的分布及稳定性有显著影响。

3.2 炭基有机肥与氮肥配施对紫甘蓝产量和氮肥利用率的影响

农业生产中经常存在施肥越多产量越高的误区,从而造成肥料利用率低及生产资源浪费的现象^[22]。因此降低氮肥施用量成为科学施肥的重要目标,提高氮素利用率是作物增产提质的有效手段。刘金雨^[7]基于关中地区常规化学氮肥施用量研究发现,减量施氮肥配施有机肥能够提高春甘蓝的单球质量和产量。本研究得到相似结论,即炭基有机肥配施减量 50% 和减量 25% 氮肥处理的紫甘蓝单球质量、经济产量和生物产量显著高于配施常规氮量和单施炭基肥处理。有研究表明,在同等施氮的条件下,适量减少氮素施用量,同时增加生物炭能够增加作物氮素利用率^[23]。张云舒等^[16]研究表明,炭基肥配施减氮 15% 化肥处理的作物产量较常规施肥和减氮 15% 化肥处理分别提高 2.0% 和 5.2%,氮素利用效率分别显著提高 26.96% 和 27.54%。李京京^[24]通过研究发现,施用炭基肥配合减氮处理下烤烟氮肥利用率显著高于常规处理,且氮肥利用率随炭基肥施氮量的增加而增加。本研究得出相似结论,即氮肥减量 50% 配施炭基有机肥处理的氮农学利用率 (NAE)、氮肥偏生产力 (NFP) 和氮肥表现利用率 (REN) 显著高于配施减量 25% 和常规施氮处理。究其原因,可能是炭基有机肥改善了土壤的物理性质^[25],增强了土壤养分的有效性^[26],从而为氮肥的保存和释放创造更有利的环境;但施氮量过高可能造成氮素利用不充分,最终影响氮素利用率^[27-28]。可见,添加炭基有机肥可以在减少氮肥用量的同时增加紫甘蓝的产量和氮肥利用率,但炭基有机肥的适用量及其对不同作物的减氮增产的效果不尽相同。

3.3 炭基有机肥与氮肥配施对紫甘蓝品质的影响

研究表明,炭基有机肥具有肥效稳定、养分持续释放等特点^[26],有助于土壤改良,同时提高作物对肥料的吸收和利用,从而提升产量和品质^[29-30]。兰慧至等^[31]通过研究炭基有机肥与化肥配合施用对马铃薯生长和产量及品质的影响发现,炭基有机肥与化肥均减半处理下马铃薯的品质表现优于化肥减半配施炭基有机肥最大量和化肥最大量配施炭基肥减半处理。本研究亦表明,紫甘蓝的维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白质和花青素含量均为 30 t·hm⁻² 炭基有机肥配施氮肥减量 50% (T2N1) 处理较 45 t·hm⁻² 炭基有机肥配施氮肥减量 50% (T3N1) 和 15 t·hm⁻² 配施常规施氮量 (T1N3) 处理有所提高,且均高于单施炭基有机肥处理。此外,

各处理的可溶性糖含量较 CK 有不同程度降低,一方面可能是配施的炭基有机肥改善了土壤结构,同时提高了土壤微生物的活性,微生物在分解有机质的过程中可能会促进更多的糖分转化为其他类型的有机物质,从而导致可溶性糖含量降低^[32];另一方面,施用有机肥有助于提高植物的光合效率,增加叶绿素含量^[33],促进更多的光合产物的合成,部分替代了可溶性糖,进一步降低其在植物体内的含量。综上可知,30 t·hm⁻²炭基有机肥配施氮肥减量 50%更有利于合成紫甘蓝中营养物质,同时可降低种植成本。

4 结 论

本试验条件下,炭基有机肥配施减量氮肥较不施肥处理土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 值分别提升 13.11%~24.59%、55.13%~174.36%、20.83%~22.22%。紫甘蓝的叶球质量、经济产量、生物产量较单施炭基有机肥分别显著增加 54.14%~175.30%、37.52%~127.79%、2.04%~22.00%。等量炭基有机肥施用条件下,配施减氮 50%处理的氮农学利用率(NAE)较其余配施处理显著提高 34.31%~216.30%;氮肥偏生产力(NFP)较配施减氮 25%显著增加 37.44%~55.83%,较常规氮量提升 117.39%~172.41%。45 t·hm⁻²炭基有机肥配施 210 kg·hm⁻²氮肥处理的氮肥表现利用率(REN)较其余配施处理显著提高 16.81%~316.06%。30 t·hm⁻²炭基有机肥配施 210 kg·hm⁻²氮肥处理的紫甘蓝叶的维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白和花青素含量最高,较其余施肥处理分别提升 0.27%~53.08%、2.70%~93.15%、22.95%~101.12%和 23.55%~122.17%。综合评价结果表明,30 t·hm⁻²炭基有机肥配施 210 kg·hm⁻²氮肥更有利于优化土壤结构及稳定性,改良土壤,同时可在减少 50%氮肥施用量的基础上提高紫甘蓝产量和品质,可在云南省元谋紫甘蓝生产实践中推广。

参 考 文 献:

[1] 肖宏儒,姚森,金月,等. 结球甘蓝生产全程机械化研究现状与对策[J]. 现代农业装备, 2019, 40(2): 9-16.
XIAO H R, YAO S, JIN Y, et al. Current status and countermeasures of mechanization research in cabbage production[J]. Modern Agricultural Equipments, 2019, 40(2): 9-16.

[2] 杨丽梅,方智远,刘玉梅,等. “十一五”我国甘蓝遗传育种研究进展[J]. 中国蔬菜, 2011, (2): 1-10.
YANG L M, FANG Z Y, LIU Y M, et al. Advances of research on cabbage genetics and breeding during the eleventh five-year plan in China[J]. China Vegetables, 2011, (2): 1-10.

[3] 李小英,陈丽美,李俊龙,等. 两种有机肥对云南元谋紫甘蓝光合特性及其产量和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40

(3): 145-153.

LI X Y, CHEN L M, LI J L, et al. Effects of two organic fertilizers on photosynthetic characteristics, yield and quality of purple cabbage in Yuanmou, Yunnan province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 145-153.

[4] 陈丽美,李小英,李俊龙,等. 竹炭与有机肥配施对土壤肥力及紫甘蓝生长的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(4): 774-783.
CHEN L M, LI X Y, LI J L, et al. Effects of combined application of bamboo charcoal and organic fertilizer on soil fertility and growth of *Brassica oleracea* var. capitata f. rubra[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(4): 774-783.

[5] 猴兆辉,秦启杰,吕剑,等. 不同水肥组合对高原夏季露地紫甘蓝产量和土壤理化性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 137-144.
GOU Z H, QIN Q J, LV J, et al. Effects of different water and fertilizer combinations on yield of purple cabbage and soil physical and chemical properties on plateau in summer[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 137-144.

[6] 刘兆辉,薄录吉,李彦,等. 氮肥减量施用技术及其对作物产量和生态环境的影响综述[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (4): 1-8.
LIU Z H, BO L J, LI Y, et al. Effect of nitrogen fertilizer reduction on crop yield and ecological environment: a review[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2016, (4): 1-8.

[7] 刘金雨. 减施氮肥配施有机肥对结球甘蓝产量及品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
LIU J Y. The effect of reducing nitrogen fertilizer and applying organic fertilizer on the yield and quality of cabbage[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.

[8] 裴雪霞,党建友,张定一,等. 化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质和水分利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 250-258.
PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on the yield, quality, and water use efficiency of dryland wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 250-258.

[9] 尚玮瑶,杨龙涛,万子龙,等. 化肥减量配施生物有机肥对紫甘蓝产量、品质及干物质和养分分配的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(2): 74-82.
SHANG W Y, YANG L T, WAN Z L, et al. Combined effects of chemical fertilizer reduction and bio-organic fertilizer application on purple cabbage yield, quality, dry matter, and nutrient distribution[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(2): 74-82.

[10] ZHU X G, LONG S P, ORT D R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2008, 19(2): 153-159.

[11] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.
CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Research progress and prospects of agricultural biochar[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3324-3333.

[12] 刘新宇. 密度炭基有机肥氮肥互作对甜菜(*Beta Vulgaris* L.)光能利用、蔗糖代谢的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
LIU X Y. The effect of density carbon based organic fertilizer nitrogen fertilizer interaction on light energy utilization and sucrose metabolism in sugar beet (*Beta Vulgaris* L.)[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.

[13] 王攀宇. 炭基有机肥对土壤团聚体有机碳分布及烤烟产质量的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
WANG P Y. The effect of carbon based organic fertilizer on soil ag-

gregate organic carbon distribution and tobacco yield and quality[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2023.

[14] 李伟, 代镇, 张光鑫, 等. 生物炭和氮肥配施提高土团聚体稳定性及作物产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 782-791.

LI W, DAI Z, ZHANG G X, et al. Combination of biochar and nitrogen fertilizer to improve soil aggregate stability and crop yield in Lou soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(5): 782-791.

[15] 谢婷婷. 炭基肥对玉米-白菜生长、光合特性及土壤理化性质的影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.

XIE T T. Study on the effects of charcoal based fertilizer on the growth, photosynthetic characteristics, and soil physicochemical properties of corn cabbage[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.

[16] 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 M, 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.

[17] 赵耀东, 侯江涛. 减氮配施生物炭对花生—油菜轮作系统土壤肥力和花生产量与氮素利用的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(23): 81-87.

ZHAO Y D, HOU J T. The effect of nitrogen reduction combined with biochar application on soil fertility, peanut yield, and nitrogen utilization in peanut rapeseed rotation system[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(23): 81-87.

[18] 普布仓决, 王金平, 姚丽茹, 等. 减氮下不同肥料配施对麦玉复种体系作物氮素积累分配及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2024, 33(5): 820-833.

PU BU C J, WANG J P, YAO L R, et al. Effects of different fertilizers on nitrogen accumulation and distribution and yield of wheat-maize multiple[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2024, 33(5): 820-833.

[19] WANG J J, SUN X, DU L N, et al. Appropriate fertilization increases carbon and nitrogen sequestration and economic benefit for straw-incorporated upland farming [J]. Geoderma, 2024, 441: 116743.

[20] 李夏, 汪玉瑛, 吕豪豪, 等. 炭基有机肥对设施番茄生长及其土壤性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 568-577.

LI X, WANG Y Y, LV H H, et al. Effects of biochar-based organic fertilizer on the growth and soil properties of greenhouse tomatoes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(3): 568-577.

[21] 王永平, 王岩, 涂德辉, 等. 生物炭和氮肥配施对椒园土壤团聚体结构及作物产量的影响[J]. 分子植物育种, 2023: 1-18. [2023-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231218.1810.022.html>.

WANG Y P, WANG Y, TU D H, et al. The effect of biochar and nitrogen fertilizer application on soil aggregate structure and crop yield in pepper orchard[J]. Molecular Plant Breeding, 2023: 1-18. [2023-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231218.1810.022.html>.

[22] XU X P, HE P, WEI J L, et al. Use of controlled-release urea to improve yield, nitrogen utilization, and economic return and reduce nitrogen loss in wheat-maize crop rotations[J]. Agronomy, 2021, 11(4): 723-723.

[23] 孙全平, 彭君, 索朗措姆, 等. 牛粪生物炭基肥对青稞生长、产量及氮素利用的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(30): 19-24.

SUN Q P, PENG J, SUO L C M, et al. Effects of cow faeces biochar fertilizer on growth, yield and nitrogen utilization of highland barley[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(30): 19-24.

[24] 李京京. 炭基肥料氮素有效性及对烤烟生长发育和品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.

LI J J. The nitrogen availability of carbon based fertilizers and their effects on the growth, development, and quality of tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017.

[25] 卢广远, 张艳, 王祥福, 等. 炭基肥料种类对土壤物理性质及玉米产量的影响[J]. 河北农业科学, 2011, 15(5): 50-53.

LU G Y, ZHANG Y, WANG X F, et al. Effects of carbon base fertilizers on soil physical properties and maize yield[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2011, 15(5): 50-53.

[26] 陈婧婷. 密度、炭基有机肥、氮肥交互作用对甜菜(*Beta Vulgaris* L.)氮素同化代谢的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.

CHEN J T. The effect of the interaction between density, carbon based organic fertilizer, and nitrogen fertilizer on nitrogen assimilation metabolism in sugar beet (*Beta Vulgaris* L.)[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.

[27] DU Q, ZHOU L, CHEN P, et al. Relay-intercropping soybean with maize maintains soil fertility and increases nitrogen recovery efficiency by reducing nitrogen input[J]. The Crop Journal, 2020, 8(1): 140-152.

[28] 唐江华, 苏丽丽, 徐文修, 等. 氮肥减施对棉花产量、干物质生产与氮素吸收利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 86-95.

TANG J H, SU L L, XU W X, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction on cotton yield, dry matter production and nitrogen uptake and utilization[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(2): 86-95.

[29] 王海候, 陆长婴, 沈明星, 等. 炭基有机肥对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 104-106, 107.

WANG H H, LU C Y, SHEN M X, et al. The effect of carbon based organic fertilizer on rice yield and soil nutrients[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(7): 104-106, 107.

[30] 靳书文. 炭基有机肥对黑土土壤碳氮组分及作物产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.

JIN S W. The effect of carbon based organic fertilizer on carbon and nitrogen components of black soil soil and crop yield[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.

[31] 兰慧至, 王泽宇, 王心慧, 等. 炭基有机肥配施化肥对马铃薯生长和产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (11): 120-126.

LAN H Z, WANG Z Y, WANG X H, et al. Effects of combined application of carbon-based organic fertilizer and chemical fertilizer on growth and yield and quality of potato[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023, (11): 120-126.

[32] 张伟彬. 不同比例化肥与有机肥配施对土壤碳组分及微生物碳代谢的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 188-195.

ZHANG W B. The effects of different proportions of chemical fertilizers and organic fertilizers on soil carbon composition and microbial carbon metabolism[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(15): 188-195.

[33] 赵长江, 鞠世杰, 贝丽霞, 等. 生物炭与化肥不同比例配施对生菜产量和品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2020, (2): 33-37.

ZHAO C J, JU S J, BEI L X, et al. Effects of different proportion of fertilizer to biochar on the yield and quality of lactuca sativa[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020, (2): 33-37.