

网络出版时间:2024-07-31 09:48 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2025.02.005
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240730.1238.009

氮肥对不同类型裸燕麦品种碳氮代谢的影响

张宇¹,赵宝平¹,柳妍娣¹,齐冰洁¹,苑志强¹,米俊珍¹,刘景辉¹,武俊英²

(1 内蒙古农业大学 农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2 内蒙古农业大学 职业技术学院, 内蒙古 包头 014000)

【摘要】【目的】探究施氮量对裸燕麦碳氮代谢的影响,明确影响不同裸燕麦品种穗粒数形成差异的氮素调控措施。【方法】选取穗粒数差异大的2个裸燕麦品种坝苽1号(穗粒数多)和定苽8号(穗粒数少)为试验材料,于2021—2022年采用随机区组设计进行大田试验,设置0、100和200 kg/hm² 3个施氮水平,测定和分析了不同氮素供应条件下裸燕麦干物质积累量、碳代谢相关酶活性、籽粒全氮含量、氮代谢相关酶活性及其对籽粒产量的差异。【结果】①施氮对2个裸燕麦品种的籽粒产量具有增加效应,其中在施氮100 kg/hm²时产量最高。②在100 kg/hm²施氮处理下,坝苽1号的干物质积累量、蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性、蔗糖合成酶(SS)活性、籽粒全氮含量、谷氨酰胺合成酶(GS)活性、硝酸还原酶(NR)活性和籽粒产量两年平均值较不施氮处理分别提高54.30%、33.35%、22.73%、6.05%、19.65%、23.64%和40.15%,定苽8号分别提高54.90%、34.60%、38.36%、4.66%、17.27%、12.88%和37.36%。施氮量对2个裸燕麦品种碳氮代谢的调控优势主要体现在灌浆期。③相关性分析表明,坝苽1号籽粒产量与碳氮代谢参数均呈显著正相关关系,尤其与碳代谢中SPS活性呈极显著正相关;定苽8号籽粒产量与氮代谢参数呈显著正相关关系,尤其与GS活性呈极显著正相关。【结论】增施氮肥对2个裸燕麦品种均有显著正向影响,坝苽1号表现出更优的碳氮代谢活性,实现碳氮代谢与产量同步正相关,SPS活性对产量的提高起主导作用;对定苽8号碳氮代谢影响较小,但生育后期的氮代谢优势较强,体现在较高的GS活性,从而弥补穗粒数少的不足,提高了籽粒产量。

【关键词】 裸燕麦;施氮量;干物质积累量;碳氮代谢;籽粒产量

【中图分类号】 S512.606.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2025)02-0040-09

Effects of nitrogen fertilizer on carbon and nitrogen metabolism of different naked oat cultivars

ZHANG Yu¹, ZHAO Baoping¹, LIU Yandi¹, QI Bingjie¹, YUAN Zhiqiang¹,
MI Junzhen¹, LIU Jinghui¹, WU Junying²

(1 College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;

2 Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou, Inner Mongolia 014000, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of nitrogen application on carbon and nitrogen metabolism of naked oats were studied, and the nitrogen control measures affecting the formation of grain number per spike of different naked oat varieties were clarified. 【Method】 Two naked oat varieties of Bayou 1 (with more grains per spike) and Dingyou 8 (with less grains per spike) with large differences in grain number per spike were selected as experimental materials. Field tests were conducted in 2021—2022 using a randomized block design, and three nitrogen application levels of 0, 100 and 200 kg/hm² were set. Dry matter accumulation, enzyme activities related to carbon metabolism, total nitrogen content and enzyme activities related to nitro-

【收稿日期】 2023-10-24

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31960378);内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0002);内蒙古自治区科技计划项目(2020-GG0037)

【作者简介】 张宇(2000—),女,内蒙古赤峰人,在读硕士,主要从事燕麦栽培生理研究。E-mail:2215425703@qq.com

【通信作者】 赵宝平(1982—),男,内蒙古乌兰察布人,教授,博士,博士生导师,主要从事燕麦栽培生理研究。

E-mail:zhaobaoping82@163.com

gen metabolism as well as their effects on grain yield of naked oats under different nitrogen supply conditions were measured and analyzed. 【Result】 ① Nitrogen application increased grain yield of the two oat varieties, and the highest yield was achieved when nitrogen application was 100 kg/hm². ② In 100 kg/hm² nitrogen treatment, the two-year average value of dry matter accumulation, SPS activity, SS activity, total nitrogen content, NR activity, GS activity and grain yield of Bayou 1 were increased by 54.30%, 33.35%, 22.73%, 6.05%, 19.65%, 23.64% and 40.15%, respectively, while those of Dingyou 8 were increased by 54.90%, 34.60%, 38.36%, 4.66%, 17.27%, 12.88% and 37.36%, respectively. The regulation of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism of naked oat cultivars was mainly reflected in the filling stage. ③ Correlation analysis showed that the grain yield of Bayou 1 had significant positive correlation with all parameters of carbon and nitrogen metabolism, especially with SPS activity in carbon metabolism. The grain yield of Dingyou 8 had significant positive correlation with nitrogen metabolism parameters, especially with GS activity. 【Conclusion】 Increased nitrogen application had significant positive effects on the two naked oat varieties. Bayou 1 showed better carbon and nitrogen metabolic activity with synchronous positive correlation between carbon and nitrogen metabolism and yield, and SPS activity played a leading role in increasing yield. It had less influences on carbon metabolism of Dingyou 8 with stronger nitrogen metabolism advantages in the later growth period, which was reflected in higher GS activity, so as to make up for the lack of fewer grains per spike and improve yield.

Key words: naked oats; nitrogen application amount; dry matter accumulation; carbon and nitrogen metabolism; grain yield

碳代谢和氮代谢是禾本科作物生长发育的两大基础代谢,碳代谢为氮代谢提供碳和能量来源,氮代谢为碳代谢提供酶和光合色素,两者相互促进和竞争,协调燕麦植株的生长发育,同时,它们还需要相同的还原力、ATP 和碳骨架^[1-2]。这表明碳氮代谢关联紧密,两者的协调程度不仅影响作物干物质积累量^[3]、作物生长发育进程,还关系到其产量高低^[4]。碳氮代谢受到基因型、栽培技术和环境的影响^[5-6]。目前,根据不同的栽培措施,可以在生产实践中获得超高的作物产量^[7-8]。合理施氮可以调节植物的碳氮平衡^[9-10]。在实际生产中,大多数农民存在盲目选种、过度施肥等问题,直接影响植物碳、氮代谢平衡,造成植株徒长,不利于产量的形成和提高^[11]。因此,合理调整施氮量,改善作物碳氮代谢平衡,促进籽粒灌浆和结实^[12],对实现农业可持续发展具有重要意义。

在决定燕麦产量的构成因素中,穗粒数是主要影响因素。在评估不同燕麦品种对干旱适应性和产量潜力的试验中,SADRAS 等^[13]研究发现,与粒质量相比,穗粒数对产量的影响更大,产量的下降主要是由于穗粒数的减少,而粒质量相对稳定。施用氮肥可有效增加分蘖数和穗粒数,有利于增加单位面积粒数^[14]。PELTONEN-SAINIO^[15]研究发现,增加播量和施氮量对小穗粒数无显著影响,但显著降

低了小穗数和穗粒数。此外,燕麦穗粒数与光合有效辐射的截获密切相关,合理施用氮肥可以最大限度地利用光合有效辐射,提高燕麦穗粒数^[16]。穗粒数与植物体内氮、碳水平密切相关,在保持一定氮水平供应的条件下,C/N 值越高越有利于穗粒数的生长和发育^[17]。以上研究说明,氮素对燕麦穗粒数的影响显著,但不同氮肥管理措施对燕麦穗粒数形成的生理机制影响尚不明确。

鉴于氮肥和碳、氮代谢对作物籽粒产量的重要影响,深入研究施氮量在裸燕麦生殖生长期对植株碳、氮代谢的影响,有利于促进裸燕麦高产高效生产。本研究以穗粒数较多的坝蓓 1 号和穗粒数较少的定蓓 8 号裸燕麦品种为供试材料,采用大田试验,设置不同施氮水平,研究不同氮素供应条件下裸燕麦干物质积累量、碳代谢相关酶活性、籽粒全氮含量、氮代谢相关酶活性及其对籽粒产量的影响,以期从碳氮代谢的角度进一步解析不同裸燕麦品种的产量对氮素响应的差异机制,为内蒙古地区裸燕麦品种优质化种植提供进一步的理论支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

本试验选用穗粒数差异大的 2 个裸燕麦品种坝蓓 1 号(A1,穗粒数较多,由河北省高寒作物研究所

选育)和定莪 8 号(A2,穗粒数较少,由甘肃省定西市农业科学研究院选育)。

1.2 试验地概况

试验于 2021—2022 年连续两年在内蒙古自治区包头市土默特右旗内蒙古农业大学现代农业博览园(110°33.3'E,40°29.5'N)进行。该区是典型的大青山洪积平原向土默川冲积平原过渡带,海拔 993.5 m,年均日照时数 3 056.3 h,年均气温 7.1 °C,年降雨量 339.8 mm,无霜期 132 d。试验地土质为沙壤土,0~20 cm 耕层土壤有机质含量 18.6 g/kg,全氮含量 1.60 g/kg,有效磷含量 6.0 mg/kg,速效钾含量 83 mg/kg,pH 值 7.47。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,设置施纯氮 0 kg/hm² (B1)、100 kg/hm² (B2)和 200 kg/hm² (B3) 3 个施氮水平,氮肥为尿素(N 46%),每个处理 4 次重复,共 24 个小区,小区面积 20 m²,小区间隔 0.5 m。各处理的磷、钾肥施用量均一致,磷肥 345 kg/hm² (Ca (H₂PO₄)₂),钾肥 82.5 kg/hm² (K₂SO₄)。裸燕麦分别于 2021 年 4 月 8 日和 2022 年 4 月 19 日人工条播,播种量均为 150 kg/hm²,行距为 20 cm,两年分别于 7 月初和中旬开始收获。其他栽培管理按照裸燕麦高产栽培技术规程执行。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 干物质积累量的测定 于成熟期取植株地上部样品,放入 105 °C 烘箱中杀青 30 min,80 °C 烘干至恒质量,冷却后称质量,计算干物质积累量。

1.4.2 碳代谢相关酶活性的测定 于孕穗期、抽穗期、灌浆期各取 15~20 株旗叶叶片,-60 °C 超低温冰箱保存。参考 LOWELL 等^[18]的方法测定蔗糖磷

酸合成酶(SPS)和蔗糖合成酶(SS)活性。

1.4.3 籽粒全氮含量的测定 于孕穗期、抽穗期、灌浆期各取 15~20 株麦穗,并分离出籽粒,处理后于 105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干至恒质量,干样粉碎后采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法测定籽粒全氮含量。

1.4.4 氮代谢相关酶活性的测定 用 1.4.2 节的叶片,参考王小纯等^[19]的方法测定谷氨酰胺合成酶(GS)活性,参考武丽等^[20]的方法测定硝酸还原酶(NR)活性。

1.4.5 产量及其构成因素的测定 于成熟期每小区取 1 m² 样方单独收获,并测定裸燕麦单位面积穗数、千粒质量、籽粒产量。同时每小区取 20 株裸燕麦进行室内考种,统计穗粒数。

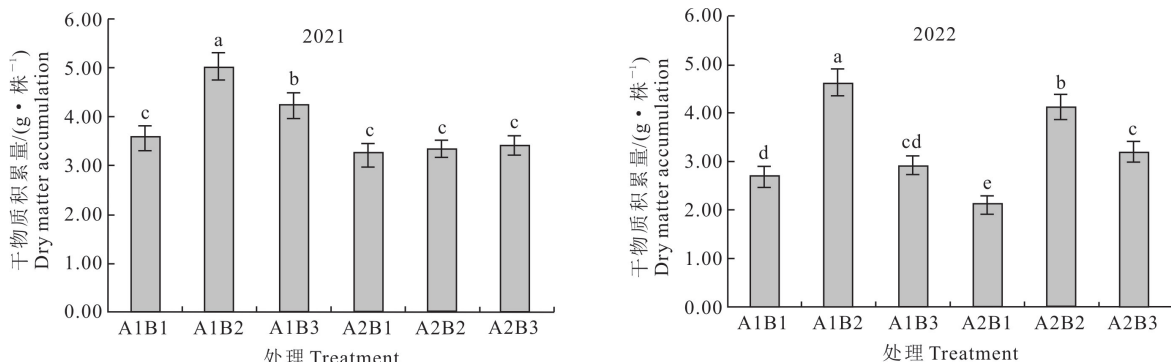
1.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 软件进行试验数据整理,用 SPSS 25.0、Origin 2021 进行统计分析和制图。

2 结果与分析

2.1 裸燕麦干物质积累量对氮素的响应

由图 1 可知,随施氮量的增加,2 个裸燕麦品种的干物质积累量呈先增加后降低趋势,均在 B2 处理达到最高值,而 B1 处理为最低值,且各处理间差异显著。与不施氮处理相比,在施氮条件下裸燕麦各品种的干物质积累量显著上升,而在 B3 水平时干物质积累量显著降低。2021 年,坝莪 1 号和定莪 8 号品种 B2 处理的干物质积累量较 B1 处理分别增加 39.30%和 1.80%;2022 年,坝莪 1 号和定莪 8 号品种 B2 处理的干物质积累量较 B1 处理分别增加 69.30%和 91.70%。



图柱上标不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。A1. 坝莪 1 号;A2. 定莪 8 号;B1. 施纯氮 0 kg/hm²; B2. 施纯氮 100 kg/hm²;B3. 施纯氮 200 kg/hm²。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments in same periods ($P < 0.05$). A1. Bayou 1; A2. Dingyou 8;B1. 0 kg/hm² nitrogen;B2. 100 kg/hm² nitrogen;B3. 200 kg/hm² nitrogen. The same below.

图 1 施氮量对 2 个裸燕麦品种成熟期干物质积累量的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen application on dry matter accumulation of two naked oat cultivars at maturity

2.2 裸燕麦叶片蔗糖代谢相关酶活性对氮素的响应

由图 2 可以看出,2 个裸燕麦品种叶片 SPS 和 SS 活性均在灌浆期达到峰值。2021 年,在灌浆期,坝苻 1 号品种 B2、B3 处理叶片的 SPS、SS 活性较 B1 处理分别增加 34.69%,25.98% 和 91.74%,11.15%;定苻 8 号品种 B2、B3 处理叶片的 SPS、SS 活性较 B1 处理分别增加 34.62%,35.64% 和 62.72%,22.34%。2022 年,在灌浆期,坝苻 1 号品

种 B2、B3 处理叶片的 SPS、SS 活性较 B1 处理分别增加 32.01%,19.48% 和 45.71%,59.87%;定苻 8 号品种 B2、B3 处理叶片的 SPS、SS 活性较 B1 处理分别增加 34.57%,41.07% 和 32.17%,17.09%。相同施氮量下,2 个裸燕麦品种间碳代谢生理参数整体表现为坝苻 1 号>定苻 8 号。增施氮肥处理下,灌浆期 2 个裸燕麦品种各生理参数均有提高。由此表明,适当施氮有利于提高灌浆期碳代谢的生理功能,促进光合作用物质的产生。

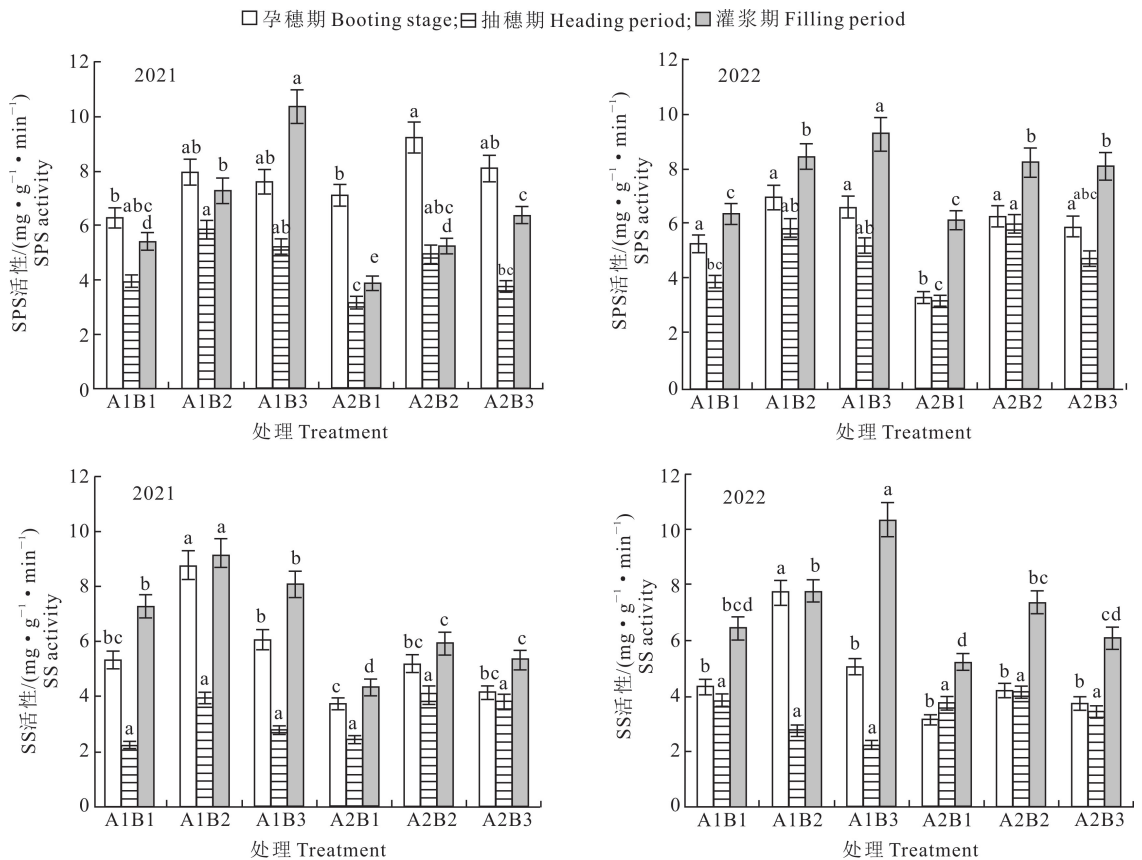


图 2 施氮量对 2 个裸燕麦品种叶片蔗糖代谢相关酶活性的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen application on sucrose metabolism related enzyme activities of two naked oat cultivars

2.3 裸燕麦籽粒全氮及叶片氮代谢相关酶活性对氮素的响应

由图 3 可以看出,氮肥对裸燕麦籽粒全氮含量存在显著调控效应,籽粒全氮含量随生育进程呈逐渐升高趋势。2 个裸燕麦品种籽粒全氮含量变化趋势基本一致。

由图 3 可以看出,灌浆期 NR、GS 活性的变化动态在不同裸燕麦品种间存在显著差异。在灌浆期随施氮量的增加,坝苻 1 号叶片的 NR、GS 活性呈先升高后降低趋势,以 B2 处理最高,但与 B3 处理差异不显著。2021 年,灌浆期 B2 处理坝苻 1 号叶

片的 NR、GS 活性较 B1 处理分别增加 18.8% 和 21.7%;2022 年,灌浆期 B2 处理的 NR、GS 活性较 B1 处理分别增加 20.5% 和 25.6%。在灌浆期随施氮量的增加,定苻 8 号叶片 NR 活性呈先升高后降低趋势,GS 活性呈持续升高趋势。2021 年,灌浆期 B2 处理定苻 8 号叶片的 NR、GS 活性较 B1 处理分别增加 21.2% 和 11.3%;2022 年,灌浆期 B2 处理的 NR、GS 活性较 B1 处理分别增加 13.3% 和 14.4%。相同施氮量下,2 个裸燕麦品种间氮代谢生理参数整体表现为坝苻 1 号>定苻 8 号。不同施氮量下,灌浆期坝苻 1 号各生理参数以 B2 处理较

优,定莪 8 号各生理参数以 B2、B3 处理较优。由此表明,适宜的施氮量有利于增强灌浆期的氮代谢生

理功能,促进氮素高效吸收利用。

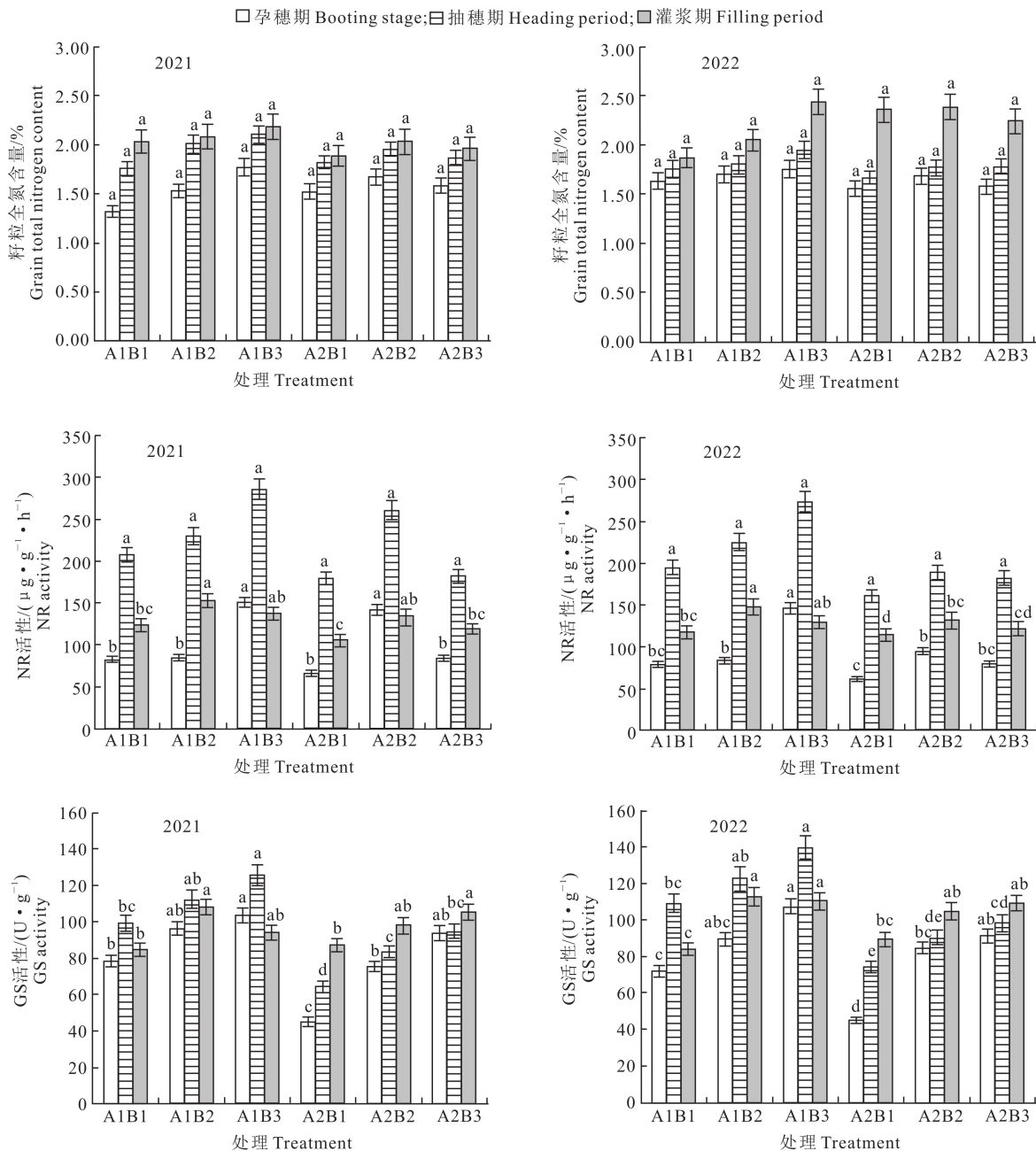


图 3 施氮量对 2 个裸燕麦品种籽粒全氮及氮代谢相关酶活性的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen application rate on total nitrogen and related enzyme activities of nitrogen metabolism of two naked oat cultivars

2.4 施氮量对 2 个裸燕麦品种籽粒产量及其构成因素的影响

由表 1 可以看出,2021—2022 年,施氮量对 2 个裸燕麦品种的籽粒产量及其构成因素均具有明显的调节作用,变化趋势基本一致,均以适量施氮(B2)处理最优,且处理间差异达到显著水平。2021 年,B2 处理下坝莪 1 号的穗数、穗粒数、千粒质量、

籽粒产量较 B1 处理分别提高 5.87%,49.23%,27.53%和 34.63%,定莪 8 号分别较 B1 处理提高 9.44%,28.84%,18.13%和 33.53%。2022 年,B2 处理下坝莪 1 号的穗数、穗粒数、千粒质量、籽粒产量较 B1 处理分别提高 6.39%,56.11%,37.41%和 45.66%,定莪 8 号分别较 B1 处理提高 11.78%,29.56%,22.80%和 41.19%。

表 1 施氮量对 2 个裸燕麦品种产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of nitrogen application on yield and component factors of two naked oat cultivars

年份 Year	裸燕麦品种 Naked oat variety	施氮水平 Nitrogen level	穗数/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) Panicle number	穗粒数 Kernel number per spike	千粒质量/g 1 000 grain weight	籽粒产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Grain yield
2021	A1	B1	412.35 \pm 4.24 c	71.80 \pm 1.60 e	16.78 \pm 0.16 e	1 651.65 \pm 10.76 c
		B2	436.57 \pm 3.31 a	107.15 \pm 1.87 a	21.40 \pm 0.17 a	2 223.56 \pm 16.74 a
		B3	421.05 \pm 6.12 b	78.10 \pm 1.07 c	19.42 \pm 0.16 b	1 753.75 \pm 16.83 c
	A2	B1	378.23 \pm 6.63 e	68.23 \pm 0.96 f	15.33 \pm 0.39 f	1 384.49 \pm 9.71 d
		B2	413.92 \pm 5.21 c	87.91 \pm 1.45 b	18.11 \pm 0.91 c	1 848.71 \pm 6.15 b
		B3	394.71 \pm 2.45 d	74.82 \pm 2.09 d	17.06 \pm 0.41 d	1 434.77 \pm 11.65 d
2022	A1	B1	392.57 \pm 3.76 c	67.49 \pm 1.28 d	14.32 \pm 0.16 e	1 514.79 \pm 7.21 cd
		B2	417.64 \pm 2.48 a	105.36 \pm 2.15 a	19.67 \pm 0.34 a	2 206.49 \pm 3.88 a
		B3	408.21 \pm 3.61 b	74.61 \pm 2.01 c	17.56 \pm 0.33 b	1 619.97 \pm 12.94 c
	A2	B1	365.29 \pm 3.27 d	65.08 \pm 1.36 e	13.64 \pm 0.54 f	1 268.27 \pm 13.27 e
		B2	408.32 \pm 4.31 b	84.32 \pm 1.47 b	16.75 \pm 0.17 c	1 790.73 \pm 6.14 b
		B3	387.63 \pm 2.44 cd	73.68 \pm 1.56 c	15.27 \pm 0.28 d	1 428.78 \pm 6.47 d

注:同列数据后标不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。A1. 坝苽 1 号;A2. 定苽 8 号;B1. 施纯氮 0 kg/hm^2 ;B2. 施纯氮 100 kg/hm^2 ;B3. 施纯氮 200 kg/hm^2 。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments for same varieties ($P < 0.05$). A1. Bayou 1; A2. Dingyou 8; B1. 0 kg/hm^2 nitrogen; B2. 100 kg/hm^2 nitrogen; B3. 200 kg/hm^2 nitrogen.

2.5 2 个裸燕麦品种碳氮代谢指标与产量及其构成因素的相关性

由表 2 和 3 可知,坝苽 1 号的籽粒产量与干物质积累量、SPS 活性、SS 活性、籽粒全氮含量、NR 活性、GS 活性呈显著或极显著正相关;干物质积累量与籽粒全氮含量及 SPS、NR、GS 活性均呈极显著正相关。说明碳氮代谢相关酶活性的提高有利于坝苽 1 号的干物质积累,从而提高其产量。定苽 8

号的籽粒产量与干物质积累量和 SPS、NR 活性呈显著正相关,与籽粒全氮含量、GS 活性呈极显著正相关。说明氮代谢相关酶活性的提高有利于定苽 8 号产量的形成。除此之外,碳代谢生理参数与穗数、穗粒数、千粒质量之间总体呈正相关,氮代谢生理参数与穗数呈显著正相关,与穗粒数、千粒质量相关性较弱。

表 2 坝苽 1 号碳氮代谢相关指标与产量及其构成因素间的相关关系

Table 2 Correlation between relevant indexes of carbon and nitrogen metabolism and yield of Bayou 1 and its constituent factors

指标 Index	穗数 Panicle number	穗粒数 Kernel number per spike	千粒质量 1 000 grain weight	籽粒产量 Grain yield	干物质 积累量 Dry matter accumulation	SPS 活性 SPS activity	SS 活性 SS activity	籽粒全氮 含量 Grain total nitrogen content	NR 活性 NR activity
干物质 积累量 Dry matter accumulation	0.99**	0.94**	1.00**	0.94**					
SPS 活性 SPS activity	1.00**	0.98**	0.98**	0.98**	0.99**				
SS 活性 SS activity	1.00*	0.96*	0.99*	0.96*	0.76	0.97**			
籽粒全氮 含量 Grain total nitrogen content	0.97**	0.70	0.56	0.82*	0.92**	0.89*	0.26		
NR 活性 NR activity	0.83	0.74	0.62	0.77*	0.90**	0.66	0.68	0.97**	
GS 活性 GS activity	0.82	0.76	0.66	0.80*	0.91**	0.75	0.72	0.94**	0.96**

注:*,** 分别表示差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)。下表同。

Note: *, ** indicate significant ($P < 0.05$) or extremely significant differences ($P < 0.01$). The same below.

表 3 定菽 8 号碳氮代谢相关指标与产量及其构成因素间的相关关系

Table 3 Correlation between carbon and nitrogen metabolism indexes and yield and component factors of Dingyou 8

指标 Index	穗数 Panicle number	穗粒数 Kernel number per spike	千粒质量 1 000 grain weight	籽粒产量 Grain yield	干物质 积累量 Dry matter accumulation	SPS 活性 SPS activity	SS 活性 SS activity	籽粒全氮 含量 Grain total nitrogen content	NR 活性 NR activity
干物质 积累量 Dry matter accumulation	0.91**	0.87*	0.84	0.87*					
SPS 活性 SPS activity	0.99**	0.97**	1.00**	0.88*	0.96**				
SS 活性 SS activity	0.98*	0.94*	0.96**	0.84	0.74	0.95**			
籽粒全氮 含量 Grain total nitrogen content	0.91**	0.69	0.55	0.96**	0.93**	0.67	0.28		
NR 活性 NR activity	0.96*	0.65	0.61	0.99*	0.95*	0.30	-0.59	0.88*	
GS 活性 GS activity	0.87**	0.67	0.60	0.94**	0.90**	0.26	-0.17	0.89*	0.87*

3 讨论

3.1 2 个裸燕麦品种干物质积累量对氮素的响应

早期水稻干物质积累与稻谷产量的关系并不密切,而中期和晚期干物质积累与稻谷产量呈显著或极显著正相关关系^[21]。不同小麦品种的干物质积累差异显著,并随施氮量的增加而增大^[22]。随施氮量的增加,成熟期中氮水平下晚稻干物质积累最高,再继续增施氮肥后,干物质积累量反而下降^[23]。本试验结果表明,随施氮量增加,2 个裸燕麦品种的干物质积累量均呈先增加后降低趋势,均在中氮处理时达到最高值,高氮时积累量下降,这与前人的研究结果一致。本研究相关性分析结果表明,成熟期裸燕麦干物质积累量与籽粒全氮含量呈极显著正相关,同时与产量呈显著或极显著正相关。表明中氮有利于不同裸燕麦品种成熟期干物质积累量的增加,从而有利于产量的增加,施氮量持续增加则不利于干物质积累及产量提升。

3.2 2 个裸燕麦品种碳代谢相关酶对氮素的响应

蔗糖磷酸合成酶(SPS)主要促进蔗糖的合成^[24],而蔗糖合成酶(SS)主要促进蔗糖的分解,并运输到储存器官,如籽粒^[25]。SPS 活性比 SS 活性更能反映籽粒对同化物的需求水平^[26]。由此可见,SPS 活性与植物干物质积累密切相关^[27]。进一步研究表明,SPS 活性也与产量有关,且 SPS 活性越高,稻谷产量越高^[28]。关于碳代谢相关酶活性对氮素响应的研究认为,随施氮量的增加明显促进了光合碳的固定及关键酶活性的增加,加速了蔗糖向淀

粉的转化,并为氮代谢提供了碳骨架^[29]。还有研究认为,随着氮素施用量的增加,水稻叶片 SS 活性变化并不明显^[30]。本试验中,2 个裸燕麦品种叶片 SS、SPS 活性的变化动态相同,整体呈先升高后降低的变化趋势,在灌浆期达到峰值;随施氮量的增加,裸燕麦叶片 SS、SPS 活性大幅度增加,说明叶片活性高、代谢旺盛,这与前人的研究结果基本一致。整个生育后期,相较于定菽 8 号,坝菽 1 号都维持着较高的碳代谢生理参数。相关性分析进一步表明,碳代谢相关酶活性与产量构成三因素均呈极显著正相关关系,其中坝菽 1 号籽粒产量与 SPS 活性呈极显著正相关,与 SS 活性呈显著正相关,说明 SPS 对坝菽 1 号产量的调控效应更大。坝菽 1 号产量构成三因素协调能力高于定菽 8 号,这可能使坝菽 1 号获得更多的穗粒数、更高的干物质积累量,从而提高产量。

3.3 2 个裸燕麦品种氮代谢相关酶对氮素的响应

硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)分别是氮同化、氨同化^[31]过程的 2 种氮代谢关键酶。研究认为,抽穗后小麦叶片中 GS 活性呈下降趋势,适量施用氮素能显著提升 GS 活性^[32],其活性与籽粒产量呈正相关^[33]。本研究结果与其一致,施氮可显著提高 2 个裸燕麦品种的籽粒全氮含量、叶片 NR 和 GS 活性;除此之外,2 个裸燕麦品种在氮代谢酶发挥调控作用的生育期存在差异,适量施氮 B2 处理的氮代谢酶优势主要体现在坝菽 1 号的灌浆期,却贯穿定菽 8 号的整个生育后期。定菽 8 号籽粒产量与叶片 NR 活性呈显著正相关,与 GS 活性呈极显著正相关,说明 GS 对定菽 8 号产量调控优势大

于 NR。适量增施氮肥使定菽 8 号生育后期维持较高的氮代谢酶活性,从而促进籽粒氮素的积累,弥补穗粒数少对产量的负面影响。

4 结 论

本研究中,随施氮量增加,2 个不同裸燕麦品种的产量呈先增加后降低趋势,在 B2 水平产量最高。在一定范围内增施氮素有利于成熟期裸燕麦干物质积累量的增加,并大幅度提高 2 个不同品种籽粒全氮含量,以及叶片 SS、SPS、NR、GS 活性。氮肥对裸燕麦碳氮代谢的调控作用主要在灌浆期。相较于不施氮处理,在增施氮肥时 2 个裸燕麦品种的产量显著提高,均在 100 kg/hm² 处理时达到峰值,同时穗粒数较多的坝菽 1 号品种产量更高。此外,2 个裸燕麦品种在达到中高施氮水平后继续增加施氮量对产量提升有限,可能的原因是 B2 处理下获得了较高的干物质质量,有利于产量提高;也可能是因为氮肥过量时植株贪高徒长造成倒伏,致使 B3 处理下燕麦的产量增加受阻。

[参考文献]

- [1] 李永庚,蒋高明,杨景成. 温度对小麦碳氮代谢、产量及品质影响 [J]. 植物生态学报,2003,27(2):164-169.
LI Y G, JIANG G M, YANG J C. Effects of temperature on carbon and nitrogen metabolism, yield and quality of wheat [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(2): 164-169.
- [2] 申丽霞,王璞. 玉米穗位叶碳氮代谢的关键指标测定 [J]. 中国农学通报,2009,25(24):155-157.
SHEN L X, WANG P. Deteiorminatn of C-N metabolism indices in ear-leaf of maize (*Zea mays* L.) [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 155-157.
- [3] 武志海,高娃,金鸿明,等. 不同施氮水平下 3 种类型粳稻光合特性及干物质积累分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(8):75-82.
WU Z H, GAO W, JIN H M, et al. Photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of 3 Japonica rice varieties under different nitrogen levels [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(8): 75-82.
- [4] 葛君,姜晓君. 施氮量对小麦旗叶光合特性、SPAD 值、籽粒产量及碳氮代谢的影响 [J]. 天津农业科学,2019,25(3):1-4.
GE J, JIANG X J. Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics, SPAD value, grain yield and carbon and nitrogen metabolism of flag leaves in wheat [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2019, 25(3): 1-4.
- [5] 宋建民,田纪春,赵世杰. 小麦光合碳、氮代谢平衡调节酶研究进展 [J]. 麦类作物,1997,17(6):52-55.
SONG J M, TIAN J C, ZHAO S J. Research progress of carbon and nitrogen metabolism balance regulating enzymes in wheat

- photosynthesis [J]. Tritical Crops, 1997, 17(6): 52-55.
- [6] 谢祝捷,姜东,戴廷波,等. 植物的糖信号及其对碳氮代谢基因的调控 [J]. 植物生理学通讯,2002,38(4):399-405.
XIE Z J, JIANG D, DAI Y B, et al. Sugar signal and its regulation on C/N metabolism gene in plant [J]. Plant Physiology Journal, 2002, 38(4): 399-405.
- [7] 胡承霖,姚孝友. 不同穗型小麦品种生长发育特性和产量形成的研究 [J]. 安徽农业科学,1991(3):207-213.
HU C L, YAO X Y. Study on the growth and development characteristics and yield formation of different panicle wheat varieties [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 1991(3): 207-213.
- [8] 朱云集,郭天财,王晨阳,等. 两种穗型冬小麦品种产量形成特点及超高产关键栽培技术研究 [J]. 麦类作物学报,2006,26(6):82-86.
ZHU Y J, GUO T C, WANG C Y, et al. Study on yield formation of winter wheat cultivars with different spike types and their key cultivation techniques for super high yield. [J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(6): 82-86.
- [9] 张迪,韩晓增. 长期不同植被覆盖和施肥管理对黑土活性有机碳的影响 [J]. 中国农业科学,2010,43(13):2715-2723.
ZHANG D, HAN X Z. Changes of black soil labile organic carbon pool under different vegetation and fertilization managements [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2715-2723.
- [10] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化 [J]. 土壤学报,2006,43(5):723-729.
XU M G, YU R, WANG B R. Changes of active organic matter and carbon pool management index in red soil under long-term different fertilization [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 723-729.
- [11] 王贺正,徐国伟,吴金芝,等. 不同氮素水平对豫麦 49-198 籽粒灌浆及淀粉合成相关酶活性的调控效应 [J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):288-296.
WANG H Z, XU G W, WU J Z, et al. Regulating effect of nitrogen fertilization on grain filling and activities of enzymes involved in starch synthesis of Yumai 49-198 [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 288-296.
- [12] 李双,司转运,申孝军,等. 水氮供应对灌浆期冬小麦籽粒淀粉合成相关酶活性及产量的影响 [J]. 麦类作物学报,2018,38(4):460-468.
LI S, SI Z Y, SHEN X J, et al. Effect of different water and nitrogen levels on starch synthesis enzyme activity in wheat grains during grain filling stage and wheat yield [J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(4): 460-468.
- [13] SADRAS V O, MAHADEVAN M, ZWER P K. Oat phenotypes for drought adaptation and yield potential [J]. Field Crops Research, 2017, 212: 135-144.
- [14] WEIGHTMAN R M, HEYWOOD C, WADE A, et al. Relationship between grain (1→3, 1→4)-β-d-glucan concentration and the response of winter-sown oats to contrasting forms of applied nitrogen [J]. Journal of Cereal Science, 2004, 40(1): 81-86.
- [15] PELTONEN-SAINIO P. Groat yield and plant stand structure of

- naked and hulled oat under different nitrogen fertilizer and seeding rates [J]. *Agronomy Journal*, 1997, 89(1): 140-147.
- [16] FINNAN J, BURKE B, SPINK J. The effect of nitrogen timing and rate on radiation interception, grain yield and grain quality in autumn sown oats [J]. *Field Crops Research*, 2019, 231: 130-140.
- [17] FISCHER R A. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1985, 105(2): 447-461.
- [18] LOWELL C A, TOMLINSON P T, KOCH K E. Sucrose-metabolizing enzymes in transport tissues and adjacent sink structures in developing citrus fruit [J]. *Plant Physiology*, 1989, 90: 1394-1402.
- [19] 王小纯, 熊淑萍, 马新明, 等. 不同形态氮素对专用型小麦花后氮代谢关键酶活性及籽粒蛋白质含量的影响 [J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 802-807.
WANG X C, XIONG S P, MA X M, et al. Effects of different nitrogen forms on key enzyme activity involved in nitrogen metabolism and grain protein content in speciality wheat cultivars [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 802-807.
- [20] 武丽, 张西仲, 唐兴贵, 等. 钼胁迫对烟草含钼酶和碳氮代谢关键酶的影响 [J]. *核农学报*, 2015, 29(12): 2385-2393.
WU L, ZHANG X Z, TANG X G, et al. Effect of molybdenum stress on molybdenum-containing enzymes and key enzymes of carbon and nitrogen metabolism in tobacco [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(12): 2385-2393.
- [21] 杨惠杰, 房贤涛, 谢祖钦. 不同施氮量对杂交水稻干物质生产的影响 [J]. *福建农业学报*, 2016, 31(4): 333-337.
YANG H J, FANG X T, XIE Z Q. Effect of different nitrogen levels on dry matter production of hybrid rice [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(4): 333-337.
- [22] 王贺正, 张均, 吴金芝, 等. 不同氮素水平对小麦旗叶生理特性和产量的影响 [J]. *草业学报*, 2013, 22(4): 69-75.
WANG H Z, ZHANG J, WU J Z, et al. Effects of different nitrogen levels on physiological characteristics and yield of flag leaves in wheat [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(4): 69-75.
- [23] 唐健, 唐闯, 郭保卫. 氮肥施用量对机插优质晚稻产量和稻米品质的影响 [J]. *作物学报*, 2020, 46(1): 117-130.
TANG J, TANG C, GUO B W. Effect of nitrogen application on yield and rice quality of mechanical trans-planting high quality late rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(1): 117-130.
- [24] 张莉, 荐红举, 杨博, 等. 甘蓝型油菜蔗糖磷酸合酶(SPS)基因家族成员鉴定及表达分析 [J]. *作物学报*, 2018, 44(2): 197-207.
ZHANG L, JIAN H J, YANG B, et al. Genome-wide analysis and expression profiling of SPS gene family in *Brassica napus* L. [J]. *Acta Agron Sin*, 2018, 44(2): 197-207.
- [25] 李永庚, 于振文, 姜东, 等. 冬小麦旗叶蔗糖和籽粒淀粉合成动态及与其有关的酶活性的研究 [J]. *作物学报*, 2001, 27(5): 658-664.
LI Y G, YU Z W, JIANG D, et al. Studies on the dynamic changes of the synthesis of sucrose in the flag leaf and starch in the grain and related enzymes of high-yielding wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(5): 658-664.
- [26] 孟维伟, 王东, 于振文. 施氮量对小麦氮代谢相关酶活性和籽粒蛋白质品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 10-17.
MENG W W, WANG D, YU Z W. Effects of nitrogen application rate on enzyme activities related to nitrogen metabolism and grain protein quality in wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(1): 10-17.
- [27] JORGE I, SARQUIS. Physiological traits associated with mass selection for improved yield in a maize population [J]. *Field Crops Research*, 1998, 56(3): 239-246.
- [28] 周卫霞, 董鹏飞, 王秀萍, 等. 弱光胁迫对不同基因型玉米籽粒发育和碳氮代谢的影响 [J]. *作物学报*, 2013, 39(10): 1826-1834.
ZHOU W X, DONG P F, WANG X P, et al. Effects of low light stress on kernel setting and metabolism of carbon and nitrogen in different maize (*Zea mays* L.) genotypes [J]. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(10): 1826-1834.
- [29] 马冬云, 郭天财, 查菲娜, 等. 种植密度对两种穗型冬小麦旗叶氮代谢酶活性及籽粒蛋白质含量的影响 [J]. *作物学报*, 2007, 33(3): 514-517.
MA D Y, GUO T C, CHA F N, et al. Effects of planting density on activities of nitrogen metabolism enzymes in flag leaves and grain protein content in winter wheat with two spike types [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(3): 514-517.
- [30] GAO Y J, LI Y, ZHANG J C, et al. Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dryland area of China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85(2): 109-121.
- [31] 姜丽娜, 刘佩, 齐冰玉, 等. 不同施氮量及种植密度对小麦开花期氮素积累转运的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(2): 131-141.
JIANG L N, LIU P, QI B Y, et al. Effects of different nitrogen application amounts and seedling densities on nitrogen accumulation and transport in winter wheat at anthesis stage [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(2): 131-141.
- [32] 赵艺欣, 王岩, 刘铁欧, 等. 铵态氮肥施用量对春小麦氮代谢的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2012, 40(3): 51-54.
ZHAO Y X, WANG Y, LIU Y O, et al. Effect of ammonium nitrogen fertilizer dosage on nitrogen metabolism of spring wheat [J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2012, 40(3): 51-54.
- [33] 杜少勇, 熊淑萍, 赵鹏, 等. 豫北高地力条件下施氮量对冬小麦花后氮代谢特征及产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(5): 882-886.
DU S Y, XIONG S P, ZHAO P, et al. Effect of nitrogen fertilizer on characteristic of nitrogen metabolism and yield after anthesis of wheat in the high fertility soil of north henan [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(5): 882-886.