

唐沁漪, 唐 韬, 冯西博. 尿素与不同含量的柠檬酸配施对黑青稞籽粒灌浆特性、氮素利用及产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(11): 2167-2180.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.11.010

尿素与不同含量的柠檬酸配施对黑青稞籽粒灌浆特性、氮素利用及产量的影响

唐沁漪, 唐 韬, 冯西博

(西藏农牧大学植物科学学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: 本研究旨在明确西藏自治区山南市隆子县黑青稞栽培中提升产量的柠檬酸最优配施含量, 以当地隆子六棱黑青稞为材料, 设置 0 kg/hm² (CK)、15 kg/hm² (T1)、30 kg/hm² (T2)、45 kg/hm² (T3)、60 kg/hm² (T4) 共 5 个柠檬酸含量配施处理, 探究尿素与柠檬酸配施对黑青稞产量形成、籽粒灌浆动态、干物质积累及氮素吸收利用率的影响。结果表明, 与对照相比, 柠檬酸配施处理可提升黑青稞灌浆速率, 且增加各生育期不同部位的干物质积累量与氮素积累量, 其中, T2 处理效果最优; 柠檬酸配施处理整体上提升了营养器官花前贮藏的干物质转运量及氮素转运量, 提升开花期叶片的干物质与氮素分配占比, 进而显著提高光合同化物积累总量及其对植株物质供给的贡献率。穗粒数对黑青稞产量贡献最大; T2 处理较 CK 显著增产, 有效穗数、穗粒数和千粒重均显著增加。综上, 尿素配施 30 kg/hm² 柠檬酸 (T2) 可有效提高隆子黑青稞产量。

关键词: 黑青稞; 柠檬酸; 籽粒灌浆特性; 干物质; 氮素; 产量构成

中图分类号: S512.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)11-2167-14

Effects of combined application of urea and different contents of citric acid on grain filling characteristics, nitrogen utilization and yield of black highland barley

TANG Qinyi, TANG Tao, FENG Xibo

(College of Plant Science, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

Abstract: This study aimed to clarify the optimal application rate of citric acid for increasing yield in the cultivation of black highland barley in Longzi County, Shannan City, Xizang Autonomous Region. Using local Longzi six-row black highland barley as material, five citric acid application treatments were set up, including 0 kg/hm² (CK), 15 kg/hm² (T1), 30 kg/hm² (T2), 45 kg/hm² (T3), and 60 kg/hm² (T4). The effects of urea and citric acid application on black highland barley yield formation, grain filling dynamics, dry matter accumulation, and nitrogen utilization efficiency were investigated. The results showed

收稿日期: 2025-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060482); 西藏特色农牧资源研发省部共建协同创新中心——作物方向研究项目 (XZTSZY202001); 高原作物学创新团队建设项目 (XZNMXYRCDWJS-2024-11); 西藏自治区中央引导地方科技项目 (XZ202202YD0025C)

作者简介: 唐沁漪 (2001-), 女, 云南玉溪人, 硕士研究生, 主要研究方向为高原作物栽培生理与生态。(E-mail) 859658890@qq.com

通讯作者: 冯西博, (E-mail) fxb750217@126.com

that, compared with CK, citric acid application treatment increased the grain filling rate of black highland barley and enhanced the accumulation of dry matter and nitrogen in different parts at various growth stages, with T2 treatment being the most effective. Citric acid application enhanced the transport amount of dry matter and nitrogen stored in vegetative organs pre-flowering and increased the proportion of dry matter and nitrogen allocation in leaves during flowering, thereby significantly improved the total accumulation of photosynthates and their contribution to plant material supply. The

number of grain per spike contributed the most to black highland barley yield. The T2 treatment significantly increased yield compared to CK, with a significant increase in both effective spikelets and grain number per spike. In conclusion, applying 30 kg/hm² of citric acid with urea (T2) can effectively enhance the yield of Longzi black highland barley.

Key words: black highland barley; citric acid; grain filling characteristics; dry matter; nitrogen; yield components

大麦是最早被人类驯化且重要的作物之一,在食品加工领域扮演着关键角色。青稞(*Hordeum vulgare* var. *coeleste* L.),又名裸大麦,是属于大麦变种的一种作物。在成熟阶段,颖果与外壳分离,使得种子暴露在外^[1],青稞的不同颜色是由色素沉积在果皮和糊粉层所致^[2],包括白色、黑色、蓝色、黄色和紫青色^[3-4]。研究表明,黑青稞不仅具有独特的香味和口感,还富含丰富的营养成分。黑青稞富含蛋白质,可提供人体所需的各种氨基酸,改善消化系统功能,并且富含多种矿物质,如钙、铁、锌等,对人体健康至关重要。黑青稞还富含多种维生素,如维生素 B、维生素 E 等,具有抗氧化、抗衰老等功效^[5-7]。因此,黑青稞在高原地区的种植和发展具有重要的经济意义。

氮素作为植物生长发育的关键营养元素,对大麦的生理代谢及产品品质形成具有显著调控作用。黑青稞生育周期较长,若采用常规氮肥一次性基施的方式,难以满足全生育期的氮素需求,往往需要通过追肥补充养分。然而,追肥操作不仅增加劳动成本,过量施用还易引发氮素流失,对生态环境造成潜在威胁^[8]。西藏土壤普遍偏碱性,导致出苗率低、发育迟缓等问题,严重抑制作物生长。碱性土壤环境不仅降低养分利用效率,增加农业成本,更成为制约当地种植业规模发展的关键瓶颈。氮肥施用对作物干物质积累、产量构成要素具有正向调控效应,其中尿素按照推荐施氮量(RDN)供给营养,可显著促进谷物产量与秸秆生物量的协同增长^[9]。周新等^[10]的研究结果表明,采用改良的肥料配施模式时,黑青稞的光合性能得以增强,产量水平也随之提升。其中,柠檬酸作为高效肥料添加剂之一,在提升肥料利用效率、推动作物生长发育等方面具有显著效果。柠檬酸作为植物体内重要的有机酸,不仅深度参与组织器官的多种生理代谢进程,还可作为非生物诱抗因子,在调控植物抗逆响应中发挥关键作用^[11]。将柠檬酸添加到土壤中,能够刺激微生物的繁殖,进而提升其对氮元素和磷元素的生态稳定性,

这有助于保持营养供应并推动植物的生长发育^[12]。研究柠檬酸对黑青稞的干物质积累及氮素吸收利用对调控其生长发育具有重要意义。已有研究结果显示,柠檬酸通过调节土壤酸碱环境,显著提升了磷肥的农学利用效率与偏生产力,强化了作物对磷素的吸收转化能力。在农业生产中,合理追施柠檬酸可减少磷肥施用量,不仅能够优化番茄种植的投入产出比,还能通过提升肥料利用效率实现经济效益的增长^[13]。关于作物施用柠檬酸的研究已经取得大量成果,现有研究多集中于柠檬酸对土壤磷素活化的影响,但对氮素利用效率及干物质积累方面的调控机制尚不明确,尚未见柠檬酸对黑青稞籽粒灌浆特性方面的研究。本研究设置了 5 种不同柠檬酸含量处理方案,旨在探究其对黑青稞生理特性的影响,重点分析施用不同含量柠檬酸对黑青稞籽粒灌浆特性、氮素利用效率及干物质积累的作用,为青稞栽培提供科学合理的施肥指导。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

2024-2025 年,在海拔 3 914 m 的西藏自治区山南市隆子县忙措村(28.425 4°N,91.402 5°E)进行试验。试验区年平均日照时数为 3 005.9 h,降水量为 297.41 mm,平均温度为 5.5 °C,年无霜期为 238.3 d。气候特征为太阳辐射强烈,多大风日。试验所用土壤有机质含量为 14.59 g/kg,有效磷含量为 6.21 mg/kg,全氮含量为 0.85 g/kg,速效钾含量为 115.37 mg/kg,土壤酸碱度(pH 值)为 8.29。总体而言,该地土壤养分含量不高,肥力水平较低。

1.2 试验材料

试验材料选用来自西藏自治区山南市隆子县的当地农作物隆子黑青稞,六棱隆子黑青稞遗传性状稳定,由当地农业农村局提供。本研究使用的柠檬酸购自潍坊英轩实业有限公司。经课题组多次开展配方施肥试验,确定了适合隆子黑青稞生长的基肥施用标准:氮肥选用含 46%有效氮的常规尿素;所用磷肥为

过磷酸钙,其有效磷(以 P_2O_5 计)含量为 12%,其中水溶性磷占 P_2O_5 总量的 7%,硫元素(S)含量为 8%。钾肥选用硫酸钾,含 50%的 K_2O ,硫元素(S)含量为 18%。

1.3 试验设计

2024–2025 年,本研究的田间试验在西藏自治区山南市隆子镇忙措村开展,参考文献[14],试验采用随机区组设计方案,共设 5 个处理,分别为:(1)不施柠檬酸[0 kg/hm² (CK)];(2)施柠檬酸 15 kg/hm² (T1);(3)施柠檬酸 30 kg/hm² (T2);(4)施柠檬酸 45 kg/hm² (T3);(5)施柠檬酸 60 kg/hm² (T4)。各处理均采用基施方式施用肥料,其中过磷酸钙与硫酸钾的用量均为 135 kg/hm²,尿素的施用量为 135 kg/hm²。采用播种机统一播种,小区总面积 450 m²,行距 30 cm,设置 3 次重复。灌溉方式采用常规管理,田间操作与当地生产标准一致。

1.4 测定指标与测定方法

在黑青稞开花阶段和成熟阶段,在每个区域选择生长情况相似且穗形尺寸接近的黑青稞 20 株,开花期按叶片、茎秆(含叶鞘)及穗部 3 个组分取样;在成熟期,按叶片、茎秆(含叶鞘)、穗轴+颖壳及籽粒 4 个组分取样。所有样品统一放入鼓风干燥恒温箱,先在 105 °C 下杀青 30 min,再置于 80 °C 恒温环境中烘干至恒重,以计算各时期地上部干物质积累量。籽粒灌浆速率的计算参照周新等^[15]的研究方法,采用 Logistic 方程 $Y = K / (1 + Ae^{-bt})$ (t 为灌浆时间, Y 为开花后每隔 7 d 的千粒重, K 为理论最大千

粒重, A 为初值参数, B 为生长速率参数)对籽粒灌浆进程进行拟合,进而推算出一系列相关的灌浆参数。将所有的样本研磨,并使用 0.5 mm 的筛选网过滤。使用浓硫酸消煮处理样品,然后用凯氏定氮仪测定黑青稞各器官含氮量。

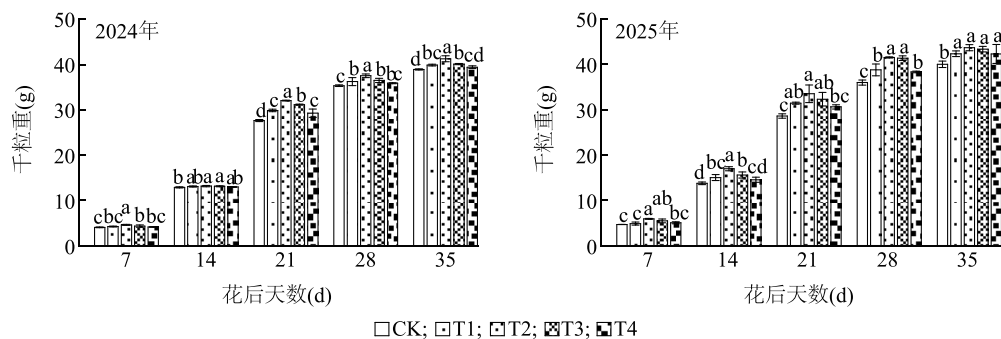
1.5 数据处理

利用 Curve Expert 1.4 模拟各个参数的灌浆流程并获取各种处理方式下的 Logistic 方程值,然后进行相应的灌浆参数计算,参考东强等^[16]的计算方法进行黑青稞干物质积累量、转运量、分配比例的计算。对于氮元素的累积、转移及分配的计算公式,采用了姜东等^[17]和于飞等^[18]的计算方法。利用 Microsoft Excel 2016 软件收集并整理数据,使用 DPS 数据处理系统进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 黑青稞灌浆动态分析

如图 1 所示,在灌浆过程中,花后 0~14 d 可界定为灌浆前期,该阶段的灌浆速率呈现出较为平缓的增长趋势,进入花后 14~28 d,植株进入灌浆中期,此时灌浆速率出现显著提升,呈现出快速增长的特征;而在花后 28 d 之后,即灌浆后期,灌浆速率增长较为缓慢。就千粒重而言,T2 处理的测定值最高,对照组(CK)的测定值最低。分析数据可知,自植株开花之后的各个观测时期,CK 和 T2 处理在测定指标上均呈现出显著的统计学差异($P < 0.05$),表明 T2 处理能显著提高黑青稞的千粒重。



CK: 不施柠檬酸; T1: 施柠檬酸 15 kg/hm²; T2: 施柠檬酸 30 kg/hm²; T3: 施柠檬酸 45 kg/hm²; T4: 施柠檬酸 60 kg/hm²。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 1 不同含量的柠檬酸对黑青稞千粒重的作用

Fig.1 Effects of different citric acid contents on the thousand-grain weight of black highland barley grains

由表 1 可以看出,经 Logistic 方程模拟计算所得的理论千粒重与实测千粒重具有较高的吻合度,其

决定系数为 0.996~0.999。这一结果表明,该方程可对黑青稞籽粒的灌浆动态过程进行精准拟合。研究

发现,尿素配施柠檬酸可显著提升黑青稞千粒重,这是由于柠檬酸的添加能够保障灌浆期物质供给更为充足,进而促进籽粒重量的增加。

表 1 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞籽粒灌浆的 Logistic 拟合影响

Table 1 Effects of different citric acid treatments on the Logistic fitting of black highland barley grain filling

年份	处理	实际千粒重(g)	理论千粒重(g)	模拟方程	决定系数
2024	CK	38.91	39.29	$Y = 39.29 / (1 + 44.00e^{-0.22t})$	0.999
	T1	39.86	39.76	$Y = 39.76 / (1 + 54.81e^{-0.24t})$	0.998
	T2	41.27	40.90	$Y = 40.90 / (1 + 68.13e^{-0.26t})$	0.996
	T3	40.09	39.72	$Y = 39.72 / (1 + 65.93e^{-0.25t})$	0.997
	T4	39.40	39.39	$Y = 39.39 / (1 + 52.95e^{-0.24t})$	0.998
2025	CK	40.00	40.34	$Y = 40.34 / (1 + 37.44e^{-0.22t})$	0.998
	T1	42.33	42.50	$Y = 42.50 / (1 + 42.41e^{-0.23t})$	0.999
	T2	43.66	44.30	$Y = 44.30 / (1 + 36.81e^{-0.23t})$	0.999
	T3	43.35	44.13	$Y = 44.13 / (1 + 44.37e^{-0.23t})$	0.999
	T4	42.27	42.62	$Y = 42.62 / (1 + 39.06e^{-0.22t})$	0.998

CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。

2.2 黑青稞籽粒灌浆关键生理参数动态特征研究

由表 2 可知,2024 年,CK 的最大灌溉速率(R_{max})为 2.16 g/d,与之相比, T1、T2、T3 和 T4 处理的 R_{max} 均比 CK 有所提升,其中 T1 处理提高了 10.65%,T2 处理则提高了 23.15%,T3 处理和 T4 处理也分别提高了 14.81%和 9.26%。

2025 年,CK 的 R_{max} 为 2.15 g/d,与之相比,T1、T2、T3 和 T4 处理的 R_{max} 比 CK 有所提升,其中 T1 处理提高了 11.63%,T2 处理增加了 15.81%,T3 处理和 T4 处

理也各自增加了 17.67%和 7.44%。2024 年和 2025 年,所有处理的最大灌浆速率出现时刻(T_{max})为 16.02~17.20 d,其中,T2 处理的 T_{max} 最小。灌浆期持续时间的变化区间是 33.91~38.63 d,相较于 CK,配施不同含量的柠檬酸会使灌浆持续时间减少。当施用相同量的氮肥时,配合柠檬酸的使用能够促进整个灌浆过程中各种参数的优化,包括渐增期灌浆速率、快增期灌浆速率、缓增期灌浆速率以及最大灌溉速率,并且能有效缩短快增期的持续时长(T_b)及缓增期的持续时长(T_c)。

表 2 不同含量的柠檬酸对黑青稞籽粒灌浆次级参数的影响

Table 2 Effects of different contents of citric acid on the secondary parameters of grain filling of black highland barley

年份	处理	R_{max} (g/d)	T_{max} (d)	T_1 (d)	T_2 (d)	T_3 (d)	T_a (d)	T_b (d)	T_c (d)	R_1 (g/d)	R_2 (g/d)	R_3 (g/d)
2024	CK	2.16	17.20	11.21	23.19	38.09	11.22	11.97	14.90	0.74	1.90	0.53
	T1	2.39	16.68	11.20	22.17	35.83	11.20	10.98	13.66	0.75	2.09	0.59
	T2	2.66	16.24	11.17	21.30	33.91	11.17	10.13	12.61	0.77	2.33	0.65
	T3	2.48	16.75	11.49	22.02	35.13	11.49	10.54	13.11	0.73	2.18	0.61
	T4	2.36	16.54	11.05	22.03	35.69	11.05	10.98	13.66	0.75	2.07	0.58
2025	CK	2.15	17.03	10.84	23.22	38.63	10.84	12.38	15.41	0.77	1.83	0.51
	T1	2.40	16.58	10.75	22.41	36.92	10.75	11.66	14.51	0.78	1.97	0.55
	T2	2.49	16.02	10.17	21.87	36.43	10.17	11.70	14.56	0.85	2.02	0.57
	T3	2.53	16.57	10.82	22.32	36.65	10.82	11.51	14.32	0.78	1.99	0.56
	T4	2.31	16.92	10.84	22.99	38.12	10.84	12.16	15.13	0.77	1.87	0.52

CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。 R_{max} 代表最大灌浆速率; R_1 代表渐增期灌浆速率; R_2 代表快增期灌浆速率; R_3 代表缓增期灌浆速率; T_{max} 代表最大灌浆速率出现时刻; T_a 代表渐增期持续时长; T_1 代表灌浆高峰期起始时间; T_b 代表快增期持续时长; T_2 代表灌浆高峰期终止时间; T_c 代表缓增期持续时长; T_3 代表灌浆期持续时间。

2.3 黑青稞籽粒灌浆特征参数与实测千粒重间的相关性分析

表3显示,在2024年,灌浆速率[R_{\max} 、 R_2 (快增期灌浆速率)、 R_3 (缓增期灌浆速率)]与千粒重(Y)之间存在极显著的正相关关系($P<0.01$),而灌浆时间[T_2 (灌浆高峰期终止时间)、 T_3 (灌浆期持续时间)、 T_b (快增期持续时长)、 T_c (缓增期持续时长)]与千粒重呈显著负相关($P<0.05$)。 R_{\max} 与 R_2 、 R_3 呈极显著正相关($P<0.01$)。表3还显示,在2025年,

最大灌浆速率(R_{\max})与千粒重(Y)之间呈极显著正相关($P<0.01$),灌浆速率(R_2 、 R_3)与千粒重(Y)之间存在显著的正相关关系($P<0.05$),而灌浆时间(T_3)与千粒重(Y)呈显著负相关($P<0.05$)。此外, R_{\max} 与 R_2 、 R_3 呈极显著正相关($P<0.01$)。结合试验地区昼夜温差大、灌浆后期温度低的情况,推测延长灌浆时间可能导致呼吸消耗增加或灌浆物质转移效率下降,从而降低千粒重。为了增加黑青稞的千粒重,可以提升 R_{\max} 、 R_2 和 R_3 。

表3 不同柠檬酸含量处理下黑青稞籽粒灌浆特征参数与实际千粒重的关联分析

Table 3 Correlation analysis between grain filling characteristic parameters and actual 1 000-grain weight of black highland barley under different citric acid contents treatments

年份	指标	Y	R_{\max}	T_{\max}	T_1	T_2	T_3	T_a	T_b	T_c	T_1	R_2	R_3
2024	Y	1.00											
	R_{\max}	0.97**	1.00										
	T_{\max}	-0.83*	-0.90*	1.00									
	T_1	0.14	0.15	0.26	1.00								
	T_2	-0.90*	-0.96**	0.97**	0.04	1.00							
	T_3	-0.91*	-0.98**	0.94**	-0.09	0.99**	1.00						
	T_a	0.13	0.14	0.27	1.00**	0.05	-0.08	1.00					
	T_b	-0.91*	-0.98**	0.90*	-0.19	0.97**	0.99**	-0.18	1.00				
	T_c	-0.91*	-0.98**	0.90*	-0.19	0.97**	0.99**	-0.18	1.00**	1.00			
	R_1	0.64	0.56	-0.74	-0.65	-0.62	-0.53	-0.66	-0.46	-0.46	1.00		
	R_2	0.97**	1.00**	-0.89*	0.17	-0.96**	-0.98**	0.16	-0.98**	-0.98**	0.55	1.00	
	R_3	0.97**	1.00**	-0.90*	0.16	-0.97**	-0.98**	0.15	-0.99**	-0.99**	0.55	1.00**	1.00
	2025	Y	1.00										
R_{\max}		0.96**	1.00										
T_{\max}		-0.80	-0.79	1.00									
T_1		-0.55	-0.46	0.90*	1.00								
T_2		-0.89*	-0.90*	0.97**	0.77	1.00							
T_3		-0.89*	-0.95**	0.89*	0.60	0.97**	1.00						
T_a		-0.55	-0.46	0.90*	1.00**	0.77	0.60	1.00					
T_b		-0.85*	-0.95**	0.73	0.35	0.87*	0.96**	0.35	1.00				
T_c		-0.85*	-0.95**	0.73	0.35	0.87**	0.96**	0.35	1.00**	1.00			
R_1		0.60	0.53	-0.92**	-0.99**	-0.81	-0.63	-0.99**	-0.41	-0.41	1.00		
R_2		0.89*	0.94**	-0.91*	-0.64	-0.98**	-1.00**	-0.64	-0.94**	-0.94**	0.69	1.00	
R_3		0.88*	0.94**	-0.92**	-0.66	-0.99**	-0.99**	-0.66	-0.93**	-0.93**	0.71	1.00**	1.00

CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸15 kg/hm²;T2:施柠檬酸30 kg/hm²;T3:施柠檬酸45 kg/hm²;T4:施柠檬酸60 kg/hm²。 Y 代表千粒重; R_{\max} 代表最大灌浆速率; R_1 代表渐增期灌浆速率; R_2 代表快增期灌浆速率; R_3 代表缓增期灌浆速率; T_{\max} 代表最大灌浆速率出现时刻; T_a 代表渐增期持续时长; T_1 代表灌浆高峰期起始时间; T_b 代表快增期持续时长; T_2 代表灌浆高峰期终止时间; T_c 代表缓增期持续时长; T_3 代表灌浆期持续时间。**表示在0.01水平上极显著相关;*表示在0.05水平上显著相关。

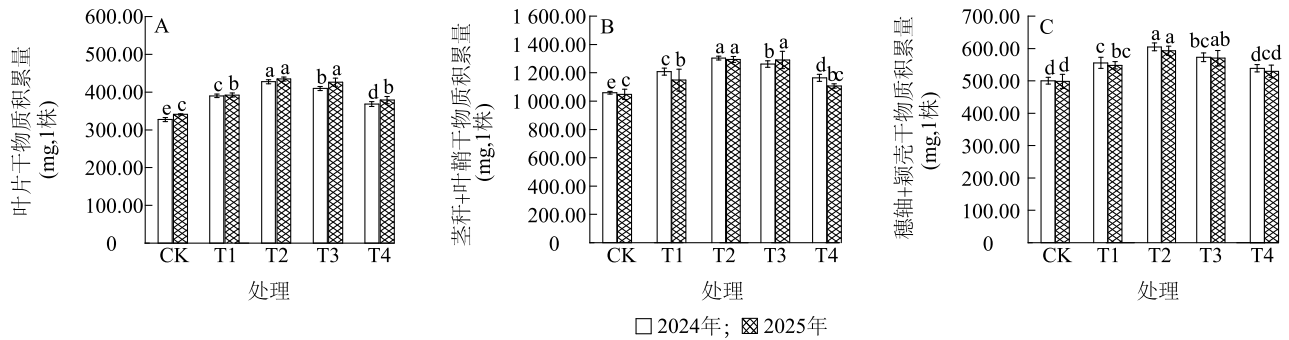
2.4 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞开花期干物质积累量及分配的影响

如图2所示,开花期黑青稞各部位的干物质积累量中,T1处理、T2处理、T3处理均显著高于CK,

各处理干物质积累量大小表现为T2处理>T3处理>T1处理>T4处理>CK。2024年生长季中,在相同的施氮量下,CK黑青稞开花期叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳每株干物质积累量分别为327.26 mg、

1 059. 17 mg、500. 38 mg, T2 处理黑青稞叶片、茎秆+叶鞘和穗轴+颖壳的每株干物质积累量较 CK 分别高 100. 16 mg、244. 02 mg、104. 68 mg。2025 年生长季中,在相同的施氮量下,CK 黑青稞开花期叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳的每株干物质积累量分别为 340. 84 mg、1 047. 49 mg、498. 31 mg, T2 处理黑青稞叶片、茎秆+叶鞘和穗轴+颖壳的每株干物质积累量较 CK 分别增加 93. 95 mg、246. 58 mg、94. 50 mg。在开花期,黑青稞各部分干物质积累量的分配比例

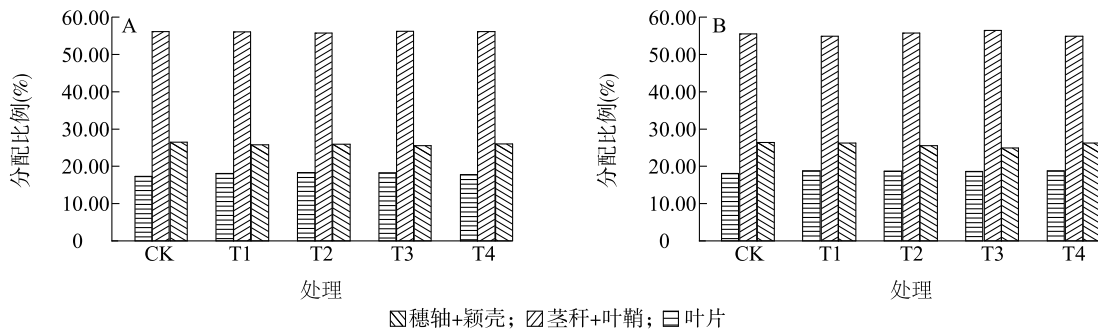
存在差异,其中茎秆+叶鞘的干物质积累量占比超过了 50. 00%,穗轴+颖壳的干物质积累量的分配比例为 24. 93%~26. 42%,叶片干物质积累量的分配比例为 17. 35%~18. 80%(图 3)。由此可知,配施柠檬酸能够增加黑青稞开花时期的叶片、茎秆+叶鞘和穗的干物质积累量,并且 T2 处理效果最好。尽管施用柠檬酸能提高叶片的干物质积累量的分配比例,但是会导致穗的干物质积累量的分配比例降低。



CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。不同小写字母表示在 0. 05 水平上差异显著。

图 2 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞开花期干物质积累量的影响

Fig.2 Effects of different citric acid contents on dry matter accumulation of black highland barley at flowering stage



A:2024 年;B:2025 年。CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。

图 3 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞开花期干物质积累量分配比例的影响

Fig.3 Effects of different citric acid contents on dry matter accumulation distribution of black highland barley at flowering stage

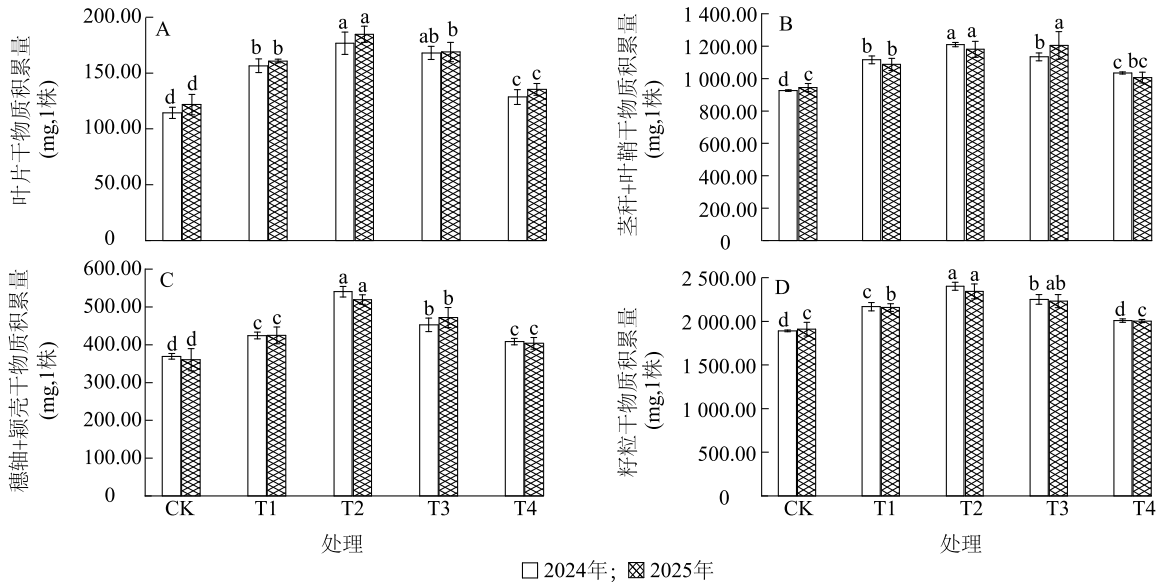
2.5 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞成熟期干物质积累量及分配的影响

由图 4 可知,黑青稞成熟期各部分干物质积累量表现为籽粒>茎秆+叶鞘>穗轴+颖壳>叶片,2024 年生长季中,不同含量的柠檬酸处理黑青稞成熟期各部位干物质积累量均显著高于 CK,表现为 T2 处理>T3 处理>T1 处理>T4 处理>CK。T2 处理黑青稞

成熟期叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳、籽粒的每株干物质积累量较 CK 分别高出 62. 28 mg、283. 25 mg、171. 03 mg、512. 51 mg。2025 年生长季中,黑青稞成熟期不同含量的柠檬酸处理各部位干物质积累量均高于 CK,其中 T2 处理在成熟期叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳、籽粒的每株干物质积累量较 CK 分别高出 62. 89 mg、235. 80 mg、158. 92 mg、434. 31 mg。相

较于开花阶段,黑青稞成熟期的叶片、茎秆+叶鞘组织及穗轴+颖壳这3个部位的干物质分配比例均呈现递减态势。在成熟植株各器官中,籽粒的分配比例最高,超过50.00%的干物质向籽粒集中;茎秆+叶鞘的干物质积累量分配比例为27.92%~29.54%;穗轴+颖壳组合的干物质积累量分配比例为10.81%~12.48%;而叶片的干物质积累量分配比例

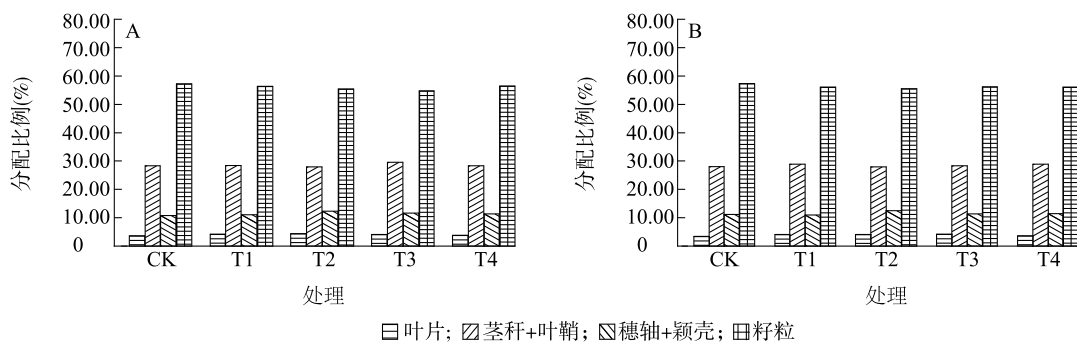
不足5.00%(图5)。由此可知,不同含量柠檬酸处理均可提升黑青稞成熟期叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳和籽粒的干物质积累量,且T2处理对黑青稞成熟期叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳和籽粒的干物质积累量提高效果最好;相较于CK,施用柠檬酸后能够提升叶片、穗轴+颖壳及茎秆+叶鞘的干物质积累量占比,但其呈现出的规律性较弱。



CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图4 不同含量柠檬酸处理对黑青稞成熟期干物质积累的影响

Fig.4 Effects of different citric acid treatments on dry matter accumulation of black highland barley at maturity stage



A:2024年;B:2025年。CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。

图5 不同含量柠檬酸处理对黑青稞成熟期干物质分配的影响

Fig.5 Effects of different citric acid treatments on dry matter distribution of black highland barley at maturity stage

2.6 不同含量的柠檬酸对黑青稞干物质转动态及籽粒充实的影响

由表4可知,2024年生长季中,开花前营养器

官干物质转运率与贡献率均以CK为最高,分别达到25.28%和25.24%;T2处理的干物质转运率与贡献率最低,分别为17.53%和17.05%。与之相反,

黑青稞在开花后通过同化作用积累干物质,干物质积累总量及贡献率均以 T2 处理为最高,分别为 10 435.54 kg/hm²与 82.95%;CK 的这 2 个指标值最低,分别为 6 558.53 kg/hm²和 74.76%。2025 年生长季中,营养器官的干物质转运率与贡献率均以 CK 为最高,分别达到 24.78%和 24.52%;T2 处理的这 2 个指标最低,分别为 18.95%和 18.73%。与之相反,黑青稞开花后的干物质积累量及贡献率均以 T2 处理最高,分别为 10 341.00 kg/hm²与 82.42%;CK 的这 2 个指标数值最低,分别为 6 914.86 kg/hm²和

75.48%。本研究结果表明,柠檬酸处理对黑青稞干物质分配具有调控作用。具体表现为:营养器官中花前贮藏的干物质向籽粒的转运效率下降,其对籽粒形成的物质贡献率相应减少;与此同时,花后阶段的光合产物积累量显著增加,其对籽粒灌浆的贡献率明显上升。这一现象表明,柠檬酸处理通过抑制营养器官贮备物质的转运过程,同时促进花后同化产物的持续供给,从而优化了黑青稞籽粒发育期的物质分配效率。

表 4 不同含量的柠檬酸对黑青稞干物质转运动态及籽粒充实的影响

Table 4 Effects of different contents of citric acid on the transfer kinematics of dry matter and grain fullness of black highland barley

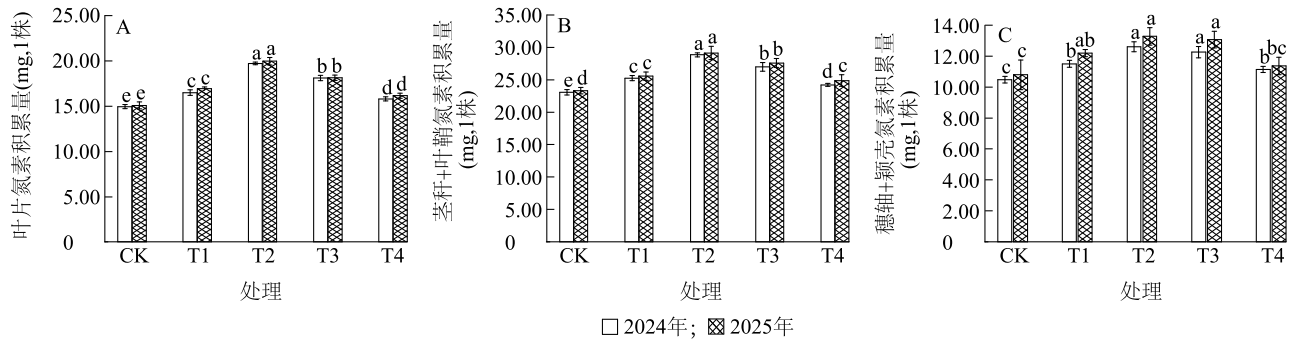
年份	处理	花前转运量 (kg/hm ²)	花前转运率 (%)	花前贡献率 (%)	花后贡献率 (%)	花后积累量 (kg/hm ²)
2024	CK	2 213.09±51.17b	25.28±0.78a	25.24±0.94a	74.76±0.94c	6 558.53±220.33d
	T1	2 238.00±110.24b	21.22±0.98b	21.10±1.41b	78.90±1.41b	8 393.16±683.06b
	T2	2 141.04±29.27b	17.53±1.07c	17.05±1.31c	82.95±1.31a	10 435.54±199.09a
	T3	2 479.50±135.34a	21.76±0.49b	21.68±0.70b	78.32±0.70b	8 950.76±240.55b
	T4	2 412.85±23.62a	24.07±1.27a	24.84±1.95a	75.16±1.95c	7 314.78±203.73c
2025	CK	2 245.78±165.75ab	24.78±0.48a	24.52±1.41a	75.48±1.41b	6 914.86±358.81c
	T1	2 061.39±142.95b	19.56±1.14b	18.95±1.87b	81.05±1.87a	8 835.16±459.69b
	T2	2 378.15±190.11a	18.95±2.52b	18.73±2.00b	82.42±1.09a	10 341.00±563.53a
	T3	2 272.88±188.98ab	19.21±1.19b	19.73±2.19b	80.27±2.19a	9 270.89±537.58b
	T4	2 345.98±174.95ab	23.67±1.84a	23.82±1.90a	76.18±1.90b	7 509.61±377.78c

CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。同一年份同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.7 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞开花期氮素积累与分配的影响

由图 6 可知,在黑青稞开花期,各营养器官的氮素积累量中,茎秆+叶鞘的氮素积累量最高,为 23.07~29.14 mg;叶片次之,为 15.02~20.08 mg;穗轴+颖壳的氮素积累量最低,为 10.48~13.28 mg。开花期各部位的氮素积累量中,T1 处理、T2 处理、T3 处理均显著高于 CK,其中 T2 处理各营养器官的氮素积累量提升最为明显。2024 年生长季中,在相同的施氮量下,黑青稞开花期 CK 叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳的每株氮素积累量分别为 15.02 mg、23.07 mg、10.48 mg,T2 处理叶片、茎秆+叶鞘和穗轴+颖壳的每株氮素积累量较 CK 分别高 4.80 mg、5.78 mg、2.13 mg。2025 年生长季中,在相同的施氮量下,黑青稞开花期 CK 叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳的每株氮素积累量分别为 15.15 mg、23.33 mg、

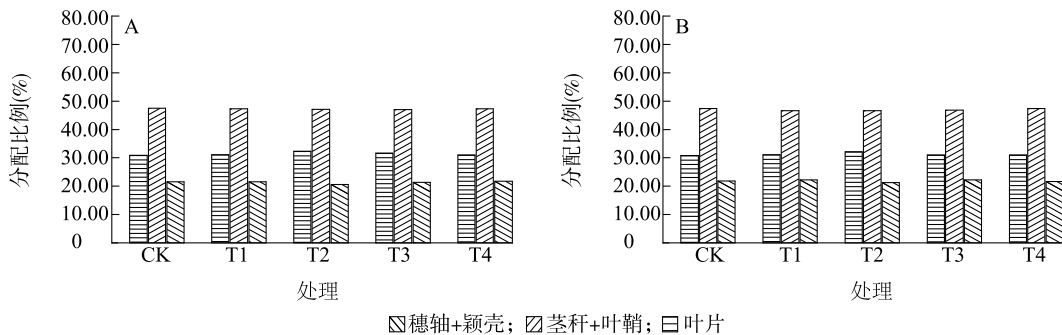
10.79 mg,T2 处理叶片、茎秆+叶鞘和穗轴+颖壳的每株氮素积累量较 CK 分别高 4.92 mg、5.81 mg、2.49 mg。图 7 显示,2024 年黑青稞开花期叶片每株氮素积累量的分配比例表现为 T2 处理>T3 处理>T1 处理>T4 处理>CK,茎秆+叶鞘每株氮素积累量的分配比例表现为 CK>T1 处理>T4 处理>T2 处理>T3 处理,穗轴+颖壳每株氮素积累量的分配比例表现为 T4 处理>CK 处理>T1 处理>T3 处理>T2 处理。2025 年黑青稞开花期叶片每株氮素积累量的分配比例表现为 T2 处理>T1 处理>T3 处理>T4 处理>CK,茎秆+叶鞘每株氮素积累量的分配比例表现为 T4 处理>CK>T3 处理>T1 处理>T2 处理,穗轴+颖壳每株氮素积累量的分配比例表现为 T1 处理>T3 处理>CK 处理>T4 处理>T2 处理。与 CK 相比,不同柠檬酸处理均提高了叶片的分配比例,降低了茎秆和叶鞘的分配比例。



CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 6 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞开花期氮素积累量的影响

Fig.6 Effects of different citric acid treatments on nitrogen accumulation of black highland barley at flowering stage



A:2024年;B:2025年。CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。

图 7 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞开花期氮素积累量分配比例的影响

Fig.7 Effects of different citric acid treatments on nitrogen accumulation distribution of black highland barley at flowering stage

2.8 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞成熟期氮素积累量与分配比例的影响

由图 8 可知,黑青稞成熟期 T1 处理、T2 处理、T3 处理各器官氮素积累量均显著高于 CK。与对照(CK)相比,T2 处理显著提高了黑青稞各器官的氮素积累量($P < 0.05$)。在 2024 年生长季中,T2 处理黑青稞叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳每株氮素积累量分别较 CK 增加 1.91 mg、2.70 mg、2.60 mg,籽粒每株氮素积累量提升最为显著,达 20.13 mg。在 2025 年生长季中,T2 处理对各器官氮素积累量的提升趋势与 2024 年一致,叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳每株氮素积累量较 CK 分别增加 1.89 mg、2.96 mg、2.32 mg;籽粒每株氮素积累量提升最显著,达 19.38 mg。在所有器官中,籽粒的氮素积累量分配比例最高,超过 50.00%的氮素向其集中;茎秆+叶

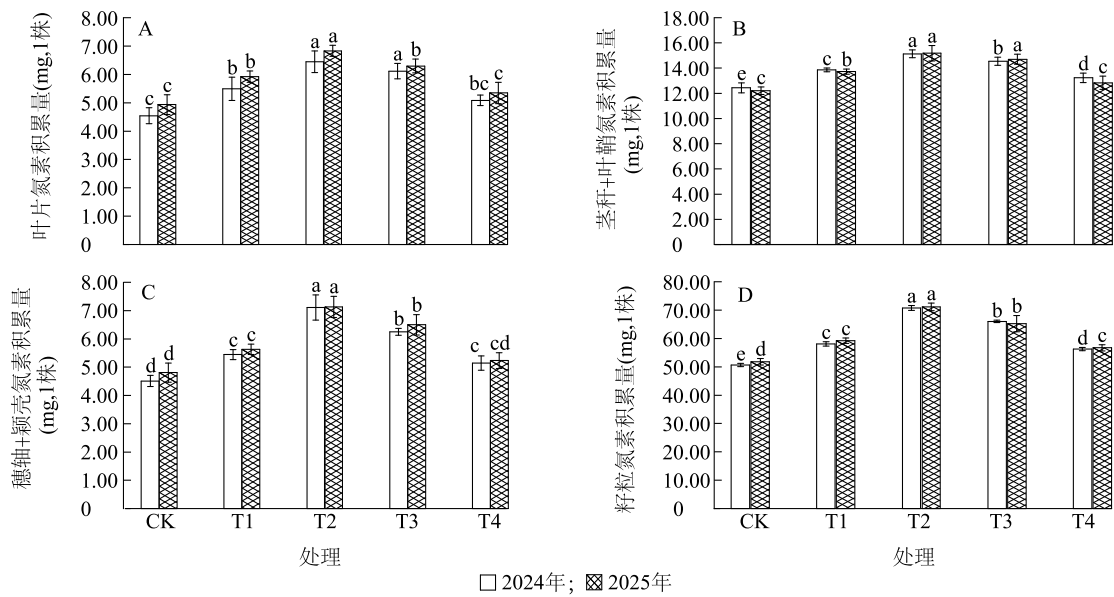
鞘的氮素积累量分配比例为 15.13%~17.24%;而穗轴+颖壳和叶片的氮素积累量分配占比均低于 7.00%,其中叶片的氮素积累量分配比例在各部位中处于更低水平(图 9)。由此可知,与对照(CK)相比,所有柠檬酸处理均不同程度地提高了叶片、茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳及籽粒的氮素积累量,其中 T2 处理的提升效果最为显著。此外,相较于 CK,施用柠檬酸后能够提升叶片、穗轴+颖壳和籽粒氮素积累量的分配占比,但其呈现出的规律性较弱。

2.9 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞氮素转运和花后氮素积累的影响

由表 5 可知,黑青稞营养器官花前氮素转运量表现为 T2 处理>T3 处理>T1 处理>T4 处理>CK,施用柠檬酸的各处理氮素转运量与 CK 差异显著。在 2024 年生长季中,开花前营养器官氮素转运率与贡

率均以 CK 最高,分别达到 55.76%和 53.49%;在各处理中,T3 处理氮素转运率最低,为 53.18%,T2 处理氮素贡献率最低,仅为 46.06%。黑青稞花后同化氮素的积累量和贡献率则是 T2 处理最高(38.17 mg 和 53.94%),CK 最低(23.55 mg 和 46.57%)。2025 年生长季中,营养器官开花前氮素转运率与贡献率均以 CK 为最高,分别达到 55.43%和 52.76%;在各处理中,T3 处理的氮素转运率最低,为 53.31%,而 T2 处理的氮素贡献率最低,仅为 46.87%。黑青稞花后同化氮素的积累量和贡献率

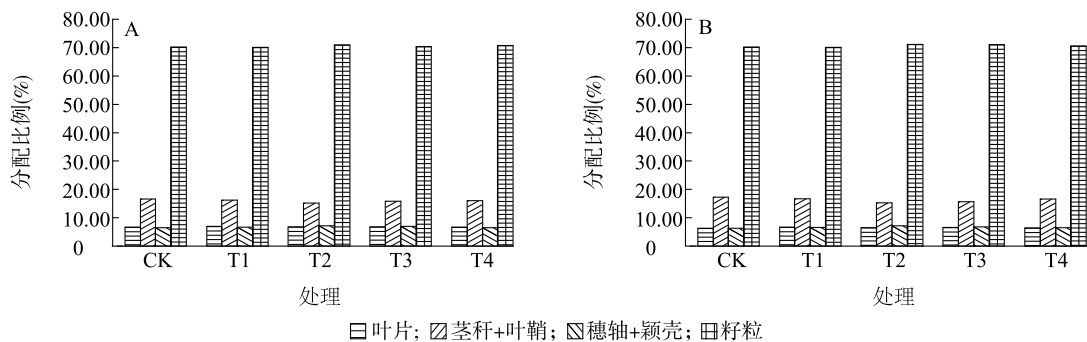
则是 T2 处理最高(37.79 mg 和 53.13%),CK 最低(24.45 mg 和 47.24%)。与对照(CK)相比,T2 处理的花后氮素贡献率提升幅度最为明显。研究结果表明,尿素与柠檬酸协同施用会影响黑青稞氮素代谢过程。柠檬酸处理通过双重机制调节氮素分配:(1)促进花前营养器官氮素贮存,使氮素积累量较对照提高;(2)抑制花前氮素向地上部分的转运,转运效率降低。这种调控策略有效增加了花后阶段籽粒可利用氮素量,形成了“前期积累-后期利用”的氮素高效利用模式,为获得高产奠定了生理学基础。



CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 8 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞成熟期氮素积累量的影响

Fig.8 Effects of different citric acid treatments on nitrogen accumulation of black highland barley at maturity stage



A:2024 年;B:2025 年。CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。

图 9 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞成熟期氮素积累量分配比例的影响

Fig.9 Effects of different citric acid treatments on nitrogen accumulation distribution of black highland barley at maturity stage

表 5 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞氮素转运和花后氮素积累的影响

Table 5 The impacts of varying citric acid contents treatments on nitrogen translocation and post-anthesis nitrogen accumulation in black highland barley

年份	处理	花前转运量 (mg)	花前转运率 (%)	花前贡献率 (%)	花后贡献率 (%)	花后积累量 (mg)
2024	CK	27.08±0.02e	55.76±1.01a	53.49±0.59a	46.57±0.59c	23.55±0.55d
	T1	28.52±0.26c	53.49±0.62b	49.11±0.52b	50.89±0.52b	29.56±0.63c
	T2	32.59±0.31a	53.19±1.16b	46.06±0.98c	53.94±0.98a	38.17±0.63a
	T3	30.56±0.62c	53.18±0.30b	46.29±0.80c	53.71±0.80a	35.46±0.51b
	T4	27.77±0.33d	54.22±1.07ab	49.35±1.07b	50.65±1.01b	28.51±0.83c
2025	CK	27.31±0.87d	55.43±0.47a	52.76±0.94a	47.24±0.94d	24.45±0.63d
	T1	29.50±0.51c	53.84±0.28b	49.80±0.38bc	50.20±0.38bc	29.74±0.56c
	T2	33.35±1.02a	53.37±0.77b	46.87±0.77d	53.13±0.77a	37.79±0.60a
	T3	31.39±0.60b	53.31±0.57b	48.16±1.91cd	51.84±1.91ab	33.86±2.67b
	T4	29.07±0.77c	55.40±1.00a	51.27±0.70ab	48.73±0.70cd	27.63±0.59c

CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.10 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞产量及构成因素的影响

采用灰色关联度分析法,对 2024 年、2025 年黑青稞产量与各构成因素(有效穗数、穗粒数、千粒重)的关联程度进行量化分析,以明确不同年份下主导产量形成的核心因素。由分析结果可知,2024 年黑青稞产量与各构成因素的关联系数表现为:穗粒数(0.744 0) > 千粒重(0.693 8) > 有效穗数(0.610 8),其中穗粒数与产量的关联度最高,是该年份影响产量的首要构成因素;2025 年黑青稞产量

与各构成因素的关联系数排序为:穗粒数(0.739 7) > 有效穗数(0.710 4) > 千粒重(0.584 5),穗粒数仍为与产量关联度最高的因素,表现出极强的年际稳定性。表 6 显示,在 2024 年生长季中,相较于对照组(CK),T2 处理下的籽粒产量、有效穗数、千粒重及穗粒数显著提升。在 2025 年生长季中,相较于对照组(CK),T2 处理的籽粒产量、有效穗数、千粒重及穗粒数显著提升。当施用相同数量的氮肥时,添加柠檬酸能使千粒重、有效穗数和穗粒数明显增加,进而实现总产量的大幅提升。

表 6 不同处理下黑青稞产量及其构成因子分析

Table 6 Analysis of yield and its constituent factors of black highland barley under different treatments

年份	处理	籽粒产量 (kg/hm ²)	有效穗数 (×10 ⁴ /hm ²)	千粒重 (g)	穗粒数 (粒)
2024	CK	5 640.00±72.11d	237.00±5.58c	38.91±0.14d	54.00±2.00b
	T1	5 840.00±69.28c	245.00±11.79ab	39.86±0.20bc	55.00±1.73b
	T2	6 313.33±117.20a	262.00±12.77a	41.27±0.65a	61.33±2.08a
	T3	6 026.67±50.33b	254.00±14.00ab	40.09±0.13b	56.67±2.08b
	T4	5 706.67±80.82cd	242.67±15.01bc	39.40±0.34cd	54.33±2.52b
2025	CK	5 836.67±150.44c	240.00±12.29b	40.00±0.72b	55.00±1.00b
	T1	6 093.33±115.90bc	252.33±6.66ab	42.33±0.64a	56.67±1.15b
	T2	6 490.00±191.57a	271.67±16.56a	43.66±0.68a	60.67±3.06a
	T3	6 216.67±80.21b	258.67±9.87ab	43.35±0.61a	57.33±1.53b
	T4	5 936.67±151.44c	246.00±9.17b	42.27±2.09a	56.00±1.00b

CK:不施柠檬酸;T1:施柠檬酸 15 kg/hm²;T2:施柠檬酸 30 kg/hm²;T3:施柠檬酸 45 kg/hm²;T4:施柠檬酸 60 kg/hm²。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

3 讨论

3.1 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞籽粒灌浆特性的影响

灌浆速率及灌浆持续时间对于小麦颗粒重量起着至关重要的作用,灌浆持续时间很大程度上受到外部条件的影响,而灌浆速率则更多地由基因调控并受营养供给影响^[19]。作为植物生长发育的关键营养元素,氮素对谷物类作物的产量形成具有显著调控作用。已有研究表明,作物产量与氮肥施用量呈非线性关系,在适宜范围内随施氮量增加而上升,但超过阈值后则呈现下降趋势^[20]。同时,籽粒重量作为产量构成要素,其变化规律表现为与施氮量呈正相关^[21]。张根柱^[12]的研究结果表明,向土壤中施加柠檬酸会对土壤内氮素与磷素的循环过程产生作用,同时能够促进土壤微生物的生长繁殖,进而增强微生物对氮元素、磷元素的生物固持能力。本研究中,配施柠檬酸的各组处理与 CK 相比,灌浆速率(R_{\max} 、 R_2 、 R_3)得到提高。柠檬酸有利于土壤氮素的保存和周转,从而进一步提高氮肥利用效率,提高黑青稞的灌浆能力。

籽粒灌浆进程对青稞千粒重的形成具有关键调控作用。千粒重主要受 2 个重要因素影响:灌浆速率和灌浆持续时间。灌浆速率和千粒重间存在正相关关系^[22],然而关于灌浆持续时间和产量关系的探讨却呈现出不同的结论。周竹青等^[23]的研究结果表明二者具有正相关关系,但是王丽娜等^[24]提出了相反的观点,她认为这两者并无明确的联系。本研究中,相关性分析结果表明,灌浆速率(R_{\max} 、 R_2 、 R_3)与千粒重呈极显著正相关,而灌浆持续时间(T_3 、 T_b 、 T_c)与千粒重呈显著负相关,说明灌浆速率是千粒重的主要决定性因素,尤其是快增期灌浆速率。延长灌浆时间并不增加千粒重,提高灌浆速率是增加千粒重的关键。然而,东强等^[25]的研究指出,灌浆持续时间(T_3 、 T_b 、 T_c)与千粒重(Y)存在极显著正相关,这个结论与本试验结果不同,后续需要更多的研究来深入探讨灌浆持续时间与千粒重之间的关系。

3.2 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞干物质积累分配及转运的影响

过量施用氮肥不仅会引发土壤污染问题,还会对作物生长产生抑制作用。而科学优化氮肥管理措施,能够有效促进作物植株对氮素的吸收利用,同时

提升干物质的积累与转运效率^[26]。张根柱^[12]研究发现,柠檬酸的添加可增加土壤中速效氮与速效磷的含量,这一现象表明,柠檬酸具备促进土壤养分活化与释放的作用。本研究结果表明,与对照相比,不同含量的柠檬酸处理在黑青稞生殖生长阶段(开花期与成熟期)均表现出物质积累优势。干物质的积累被视为黑青稞产量形成的基础,因为它为种子发育提供了重要的营养来源。而合理调控肥料运筹策略,能够对干物质的积累及分配起到优化调节作用^[27]。本研究结果表明,黑青稞在生殖生长关键时期(开花期与成熟期)的干物质分配特征与杨丽娟等^[28]的研究结果一致,但不同于马瑞琦等^[26]关于小麦的研究结果。后者指出开花期小麦茎秆的干物质分配比例为茎秆>叶片>穗,这种差异的产生或许与小麦品种的遗传特性差异或施肥管理方案的不同相关,但其具体成因仍需开展更为深入的研究。另有研究表明,籽粒能否发挥由遗传因素所决定的潜力,主要取决于籽粒可获取的同化物数量^[29-31]。生长中的籽粒同化物主要来源于当期净光合产物,一旦库器官的物质需求超出光合源的供应负荷,茎秆内预先储存的物质便会参与补充供应。本研究结果印证了这一理论:对黑青稞施用柠檬酸后,其营养器官在开花前积累的干物质转运率呈下降态势,与此同时,开花期叶片的物质分配比例有所上升。这种变化对叶片的光合性能提升作用明显,包括提高净光合速率、加快蒸腾速率、优化气孔导度等,最终推动开花后光合同化物积累总量增加,并提高其在植株物质供应中的贡献率。

3.3 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞氮素积累分配及转运的影响

氮素作为麦类作物生长发育的关键营养元素,其供给状况显著影响籽粒产量形成。灌浆阶段,籽粒氮素积累主要依赖于土壤氮素的持续吸收和营养器官中氮素的再分配。研究发现,生育后期叶片衰老进程加快,主要表现为蛋白质降解加剧和光合结构功能衰退,这些生理变化会降低叶片的光合同化能力并抑制氮素的吸收效率。在作物生育期中后期,籽粒产量形成受氮代谢关键酶活性的调控,并与植株氮素积累动态及营养器官的氮转运效率密切相关^[32],科学调控氮肥施用策略能够有效优化作物的氮代谢过程,促进氮素在植株体内的合理分配与高效利用^[33],柠檬酸能够以直接介入或间接参与的方式作用于植株的生长代谢过

程,进而对根部脲酶、蔗糖酶的活性及代谢物质的分泌过程产生影响。这一作用可增强根系的生理活性与养分转运效能,最终推动作物对养分的吸收利用效率^[34]。本研究结果显示,与对照(CK)相比,配施柠檬酸的各处理均能有效增加黑青稞在开花期、成熟期及花后同化物中的氮素积累量。具体表现为:在开花期,叶片氮素分配比例提高,而茎秆+叶鞘和穗部氮素分配比例相应降低;至成熟期,该调控效应进一步显现,叶片、穗轴颖壳复合体及籽粒的氮素分配率提高,同时茎秆+叶鞘氮素分配比例持续下降。这与李红梅^[35]的研究结果有一定的相似性。研究表明,小麦主要的氮元素吸收和储存发生在营养生长期,这个时期的花前氮元素积累量被视为影响小麦氮元素利用效率的重要因素^[36]。此外,不同的小麦品种在这一期间的氮素转运量和转运率也有所区别,如樊玉参等^[37]研究发现高氮元素吸收效率的小麦品种花前氮素转运量和转运率都明显超过那些氮元素吸收效率较低的品种。然而,薛艳芳等^[38]对于氮元素利用效率较低的小麦品种的研究结果表明,它们的花前氮元素转运量和转运率均较高,这会导致它们在开花后加速老化,从而对种子产量和氮元素利用效率产生负面效应。本研究中,施用柠檬酸的各处理黑青稞营养器官开花前储存的氮素转运总量呈现上升趋势,黑青稞营养器官花前贮藏氮素转运率和贡献率降低,进而促使花后黑青稞氮素积累量与贡献率的上升。

3.4 不同含量的柠檬酸处理对黑青稞产量及构成因素的影响

作物产量形成的物质基础与干物质的积累、分配及转运过程紧密相关^[39-40]。从物质来源角度分析,作物籽粒主要依赖两大组成部分:其一为开花前营养器官中预先积累并转运至生殖器官的干物质;其二是开花后通过光合作用新合成并持续积累的同化产物。本研究中,产量与穗粒数的关联系数最高,说明穗粒数对青稞产量起主要作用,这与朱明霞等^[41]的研究结果一致。本研究结果表明,配施柠檬酸的各处理,黑青稞的产量及其构成因素均得到了提高,其中 T2 处理产量及其构成因素均为最大值,这与龚芳芳等^[42]对刺梨的研究结果类似。柠檬酸在梨、辣椒等经济作物的栽培实践中也有着较为广泛的应用,其施用后能够使这类农产品的产量水平及品质性状获得显著改善^[43]。本研究仅在西藏隆子县开展了单点试验,后续拟在不同生态区及不同黑青稞品种中开展

验证试验,以进一步明确配施柠檬酸提升作物产量的普适性。目前关于柠檬酸对黑青稞灌浆特性和氮素利用方面的研究很少,所以本研究结果对于进一步研究黑青稞在柠檬酸处理后的灌浆特性、氮素利用和产量提升等方面的表现具有一定的参考意义。

4 结论

在黑青稞栽培过程中,尿素配施柠檬酸可显著提高籽粒灌浆速率,以 30 kg/hm² 柠檬酸处理(T2)效果最优;相关性分析结果表明,灌浆速率是调控千粒重的主导因素。尿素与柠檬酸配施还能显著提升开花期、成熟期营养器官的干物质积累量,优化不同生育阶段营养器官的干物质分配比例,同时降低花前干物质的转运效率及贡献率,进而促进花后光合同化物积累量及贡献率的提升,其中 T2 处理效果最优。氮素调控方面,配施柠檬酸可增强开花期植株氮素同化能力,促进氮素在营养器官的积累及向生殖器官的定向转运;在成熟期,配施柠檬酸可进一步优化植株氮素分配格局,表现为营养器官氮素滞留量增加、籽粒氮素分配比例显著提升。产量构成上,T2 处理通过显著增加有效穗数与穗粒数实现增产(穗粒数对产量贡献最大),千粒重对产量的贡献亦达显著水平。综合干物质累积、氮素吸收利用效率、灌浆速率及产量增加结果,建议黑青稞生产采用尿素配施 30 kg/hm² 柠檬酸的施肥方案,可兼顾养分供应与产量结构优化。

参考文献:

- [1] 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, 168.
- [2] 梁丽静,王松涛,贾俊杰,等. 不同青稞籽粒品质特性与酿酒品质关系分析[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 27-33.
- [3] 高伟,郝青婷,张泽燕,等. 施氮磷肥对小豆产量、根系形态及光合特性的影响[J]. 作物杂志, 2023(1): 109-114.
- [4] 沈彦合,胡尚连. 不同维生素浸种对玉米幼苗受钠盐胁迫后根冠比和多胺代谢的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(11): 2514-2519.
- [5] 马琦琦,李丽君,王斌,等. 微肥对植物生长作用及施用技术的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(13): 4-6.
- [6] 袁洋,董奇琦,贾佩岩,等. 间作下不同肥料对玉米花生生长发育、氮代谢及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(2): 129-139.
- [7] 林荣呈,杨文强,王柏臣,等. 光合作用研究若干前沿进展与展望[J]. 中国科学:生命科学, 2021, 51(10): 1376-1384.
- [8] WANG H Y, ZHANG D, ZHANG Y T, et al. Ammonia emissions

- from paddy fields are underestimated in China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235:482-488.
- [9] SARBAZ A, KUMAR S, KUMAR S, et al. Effect of integrated nitrogen management on the yield and economy of wheat variety WH1184[J]. *Journal of research in science and engineering*, 2022, 4(1):111-117.
- [10] 周新, 陈功喜, 赵香龙, 等. 磷肥配施硫酸锰对黑青稞生物量及旗叶光合特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(3):109-114.
- [11] 冯立娟, 尹燕雷, 焦其庆, 等. 石榴 PAL 基因的克隆与表达分析[J]. *核农学报*, 2018, 32(7):1320-1329.
- [12] 张根柱. 外源柠檬酸对壤土养分、酶活性及微生物活性的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- [13] 房福力, 姚志鹏, 林伟, 等. 柠檬酸对温室土壤磷有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(6):1166-1173.
- [14] 张靖, 刘强, 谢志清, 等. 柠檬酸与磷肥互作对河西绿洲灌区土壤理化性状及甜叶菊产量和品质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2022(7):37-42.
- [15] 周新, 朱定英, 赵香龙, 等. 缓释尿素配施黄腐酸对隆子黑青稞发育及籽粒灌浆特性的影响[J]. *作物杂志*, 2024(4):232-239.
- [16] 东强, 朱定英, 周新, 等. 缓释尿素配施黄腐酸对黑青稞干物质积累、分配及转运的影响[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(11):57-63.
- [17] 姜东, 谢祝捷, 曹卫星, 等. 花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响[J]. *作物学报*, 2004, 30(2):175-182.
- [18] 于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6):1311-1324.
- [19] MOTZO R, GIUNTA F, PRUNEDDU G. The response of rate and duration of grain filling to long-term selection for yield in Italian durum wheats[J]. *Crop & Pasture Science*, 2010, 61(2):162-169.
- [20] 徐银萍, 潘永东, 包奇军, 等. 灌水与肥密配置对甘啤 7 号大麦产量和蛋白质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(5):99-103.
- [21] 吴鹏年, 王艳丽, 李培富, 等. 滴灌条件下秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区春玉米产量和土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12):4177-4185.
- [22] 冯伟, 郭天财, 李晓, 等. 不同降雨年型下水分处理对大穗型小麦品种籽粒灌浆及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1):192-195, 199.
- [23] 周竹青, 朱旭彤. 不同粒重小麦品种(系)籽粒灌浆特性分析[J]. *华中农业大学学报*, 1999, 18(2):107-110.
- [24] 王丽娜, 韩玉林, 邹少奎, 等. 不同小麦品种粒重与籽粒灌浆特性探究[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(10):40-44.
- [25] 东强, 张毅, 朱定英, 等. 不同氮肥处理对黑青稞籽粒灌浆特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2023, 43(7):940-946.
- [26] 马瑞琦, 王德梅, 陶志强, 等. 不同筋型小麦干物质和氮素积累对追施氮量的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(4):622-631.
- [27] 陆增根, 戴廷波, 姜东, 等. 氮肥运筹对弱筋小麦群体指标与产量和品质形成的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(4):590-597.
- [28] 杨丽娟, 李晓航, 盛坤, 等. 灌水模式对不同小麦品种干物质积累、分配和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(5):10-16.
- [29] 杨丽, 贾志宽, 韩清芳, 等. 水肥条件对冬小麦旗叶光合特性及生物量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(12):83-90, 98.
- [30] BORRÁS L, SLAFER G A, OTEGUI M E. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal[J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(2/3):131-146.
- [31] OLMEDO PICO L B, VYN T J. Dry matter gains in maize kernels are dependent on their nitrogen accumulation rates and duration during grain filling[J]. *Plants*, 2021, 10(6):1222.
- [32] 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.
- [33] TEIXEIRA E I, GEORGE M, HERREMAN T, et al. The impact of water and nitrogen limitation on maize biomass and resource-use efficiencies for radiation, water and nitrogen[J]. *Field Crops Research*, 2014, 168:109-118.
- [34] 徐慧敏, 徐福利, 李宏智, 等. 低分子有机酸对辣椒生长发育及叶片活性氧代谢的影响[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(3):213-217.
- [35] 李红梅. 土壤累积态磷活化及棉花养分吸收对有机酸的响应[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2023.
- [36] 吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8):2593-2603.
- [37] 樊玉参, 石玉, 于振文, 等. 不同产量潜力小麦品种氮素积累与转运的差异[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(12):1496-1502.
- [38] 薛艳芳, 韩小伟, 张慧, 等. 不同氮效率玉米品种灌浆期氮素转运特性和产量对氮素形态的响应[J]. *玉米科学*, 2020, 28(3):163-172.
- [39] 潘德丰, 郭峻泓, 刘迎霞, 等. 施肥对不同生育期遮阴水稻干物质积累、产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(21):77-83.
- [40] 陆喜瞻, 朱海滨, 张凯激, 等. 控释氮肥一次性减量基施和密植对机插粳稻产量、品质及经济效益的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(8):1400-1411.
- [41] 朱明霞, 靳玉龙, 白婷, 等. 不同施肥水平下春青稞籽粒灌浆特性[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(22):72-76.
- [42] 龚芳芳, 樊卫国. 外源柠檬酸对石灰性黄壤养分活化及刺梨实生苗养分吸收与生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(11):2164-2177.
- [43] 邵微, 徐国益, 于会丽, 等. 低分子有机酸水溶肥提升梨叶片光合、养分吸收及果实品质[J]. *果树学报*, 2022, 39(6):992-1003.

(责任编辑:陈海霞)