网络出版时间:2026-01-09 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.07.010

催熟化控剂对荞麦成熟特性及品质的影响

李少飞,葛家豪,王奇,陈友秀,李雅馨,
杜敏龙,韩潇逸,高金锋
(西北农林科技大学 农学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】解决黄土高原北部荞麦主产区因籽粒成熟度不一致导致的荞麦机械化收获难的问题,探索适宜陕北地区荞麦机械化收获的催熟化控剂种类。【方法】以等花柱荞麦品种西农D4103为试验材料,于2023—2024年采用随机区组设计进行大田试验,以清水(CK)为对照,在灌浆期对荞麦叶片喷施激素型催熟化控剂乙烯利(ETH)、噻苯隆(TDZ)和除草剂型催熟化控剂敌草快(DCK)、草甘膦(PMG),分析不同催熟化控剂对西农D4103成熟特性、籽粒品质、产量及其构成因素的影响。【结果】①除草剂型催熟化控剂DCK和PMG显著影响了荞麦脱叶率和器官含水量,西农D4103在DCK处理下含水量最低,在PMG处理后脱叶率较对照显著提高130.48%。②催熟化控剂显著影响了荞麦籽粒成熟度和灌浆速率,与CK相比,TDZ处理显著提高了西农D4103籽粒最大灌浆速率,延长了籽粒灌浆活跃期,促进籽粒灌浆,有效提高了荞麦籽粒成熟度,显著提高了成熟籽粒占比。③与CK相比,TDZ处理提高了西农D4103淀粉和蛋白质含量,抑制荞麦脂肪积累;DCK和PMG处理下荞麦籽粒可溶性糖、蔗糖和脂肪含量显著提高,而黄酮含量显著降低。④与CK相比,激素型催熟化控剂TDZ处理显著提高了西农D4103单株粒数、单株粒质量、千粒质量和产量,而除草剂型催熟化控剂DCK和PMG处理下荞麦籽粒产量及其构成因素均有所降低。【结论】TDZ处理有效提高了西农D4103籽粒成熟度,促进产量提高。综合考虑,在灌浆期叶片喷施0.1%噻苯隆(TDZ)有利于改善荞麦成熟期特性,可作为黄土高原北部荞麦主产区机械化收获的重要依据。

[关键词] 荞麦;化学催熟;成熟特性;荞麦品质;荞麦产量
[中图分类号] S517 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)07-0087-09

Effects of ripening growth regulators on ripening characteristics and quality of buckwheat

LI Shaofei, GE Jiahao, WANG Qi, CHEN Youxiu, LI Yaxin, DU Minlong,
HAN Xiaoyi, GAO Jinfeng
(*College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to address the problem in mechanized harvesting of buckwheat in the northern Loess Plateau due to inconsistent seed maturity, to explore suitable ripening chemical control agents for mechanized harvesting of buckwheat in Northern Shaanxi. 【Method】 With equal-styled buckwheat variety Xinong D4103 as the experimental material, field experiments applying a randomized block design were conducted from 2023 to 2024. Distilled water treatment was adopted as the control (CK). During the grain-filling period, hormone-based ripening chemical control agents, such as ethephon (ETH) and thidiazuron (TDZ), and herbicide-based ripening chemical control agents, such as diquat (DCK) and glyphosate (PMG), were sprayed

[收稿日期] 2025-03-31 [修回日期] 2025-08-03
[基金项目] 陕西省小杂粮产业技术体系项目(K3031224005);陕西省现代种业振兴专项(K3031223130);陕西省重点研发计划项目"优质抗倒特色小杂粮新品种选育及栽培技术研究"(2025NC-YBXM-082)
[作者简介] 李少飞(2000—),男,山西运城人,在读硕士,主要从事杂粮栽培生理研究。E-mail:lishaofei0827@126.com
[通信作者] 高金锋(1976—),男,陕西咸阳人,教授,博士,博士生导师,主要从事杂粮栽培生理研究。E-mail:gaojf7604@126.com

on the leaves of buckwheat. The effects of different ripening chemical control agents on the maturity characteristics, seed quality, yield, and yield components of Xinong D4103 were analyzed.【Result】① The herbicide-based ripening chemical control agents DCK and PMG significantly affected the leaf abscission rate and organ water content of buckwheat. The lowest water content in Xinong D4103 was observed under DCK treatment, and the leaf abscission rate was significantly increased by 130.48% after PMG treatment compared with the control. ② Ripening chemical control agents significantly affected the seed maturity and grain-filling rate of buckwheat. Compared with CK, TDZ treatment significantly increased the maximum grain-filling rate of Xinong D4103, extended the active grain-filling period, promoted seed filling, and effectively improved the maturity of buckwheat seeds, increased the proportion of mature seeds. ③ Compared with CK, TDZ treatment increased the starch and protein content of Xinong D4103 and inhibited fat accumulation in buckwheat. Under DCK and PMG treatments, the content of soluble sugar, sucrose, and fat was significantly increased, while the content of flavonoids was significantly reduced. ④ Compared with CK, TDZ treatment of hormone-based ripening chemical control agent significantly increased the number of seeds per plant, the weight of seeds per plant, the thousand-seed weight, and the yield of Xinong D4103. However, the DCK and PMG treatments of herbicide-based ripening chemical control agents reduced the yield and yield components of buckwheat.【Conclusion】TDZ treatment effectively improved the seed maturity of Xinong D4103 and increased buckwheat yield. Upon comprehensive consideration, spraying 0.1% thidiazuron (TDZ) on leaves during the grain-filling period is beneficial for improving the maturity characteristics of buckwheat, which can serve as an important basis for mechanized harvesting of buckwheat in the northern Loess Plateau.

Key words: buckwheat; chemical ripening; maturity characteristics; buckwheat quality; buckwheat yield

荞麦(buckwheat)属于蓼科(Polygonaceae)荞麦属(*Fagopyrum*)一年生草本植物[1]。荞麦的多功能性和广泛的适用性,以及具有耐寒、抗旱、耐贫瘠、抗逆性强等突出的抗逆特性和生育期短的生长优势,在山地、旱地轮作倒茬和稳粮增收中发挥着关键作用[2];同时,荞麦独特的营养价值也为调节饮食结构提供了优质选择,这些显著特性使荞麦成为现代农业体系中不可或缺的重要作物,在全球粮食安全和营养健康领域持续发挥着特殊作用[3]。

机械化收获对于提高荞麦生产效率、降低生产成本具有重要意义。与传统人工收获相比,机械化收获可大幅提高工作效率,减少收获损失,保证荞麦品质[4]。但由于荞麦独特的生育特性,其籽粒成熟期不一致,在生育后期存在花朵、不同灌浆程度籽粒和成熟籽粒同株共存的情况[5];同时荞麦的生产过程较为繁琐、劳动负担较重,且荞麦产量低,整体经济效益较低,这些因素都制约着荞麦机械化产业的发展[6]。

催熟化控剂是一种生长调节剂,主要通过干预作物生理生化进程影响植物内源激素的合成、运输、代谢及其与受体的结合过程,进而调控信号转导通路,加速植物的生长发育进程,实现理想的脱叶催熟效果[7]。根据作用机制的不同催熟化控剂可以分为两大类,第一类是激素型化合物,其特点是不直接伤害植物组织,而是通过叶片吸收后调控植物内源激素平衡;第二类为触杀型化合物,包括草甘膦、敌草快等及其复配剂,这类化合物的作用机制是通过杀伤或杀死植物绿色组织,同时刺激乙烯的产生,实现催熟和脱叶效果。催熟化控剂的种类、浓度及喷施时间等因素都会随着作物、环境等因素发生变化,通过选择适合的催熟化控剂类型、适宜的浓度,并根据气象条件选择适合的喷施时间等措施,将催熟化控剂对作物产量和品质的不良影响降到最低,从而尽可能在不影响作物产量及品质的前提下,促进籽粒成熟,提高籽粒成熟度。目前化学催熟技术已经在棉花[8-10]、水稻[11-12]、小麦[13-14]、油菜[15-16]等作物生产上得到广泛应用。研究表明,在水稻、油菜等作物的成熟期施用草甘膦、噻苯隆、乙烯利等催熟化控剂,可显著降低籽粒和植株含水量,表现出明显的催熟效果[17]。另有研究表明,适宜浓度的催熟化控剂可以提高坐果率和单果质量,加快果实成熟,改善果实品质[18]。

提高荞麦生产机械化水平,加强荞麦机械化生产技术研究与推广应用,已成为进一步发展我国荞麦产业的当务之急。本试验基于荞麦无限花序且籽粒成熟时间不一致的生物学特性,针对黄土高原

北部地区有效水分、光热资源和土壤养分等多种因素对农业生产的共同限制及作物生产力的不确定性等问题，以提高荞麦适宜机械化收获为核心，提高荞麦籽粒成熟度为目标，探索催熟化控剂在荞麦机械化栽培过程中的合理配施及降本增效，提升荞麦收获质量，促进荞麦机械化生产，为荞麦高产优质轻简化栽培提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试材料为等花柱荞麦品种西农D4103。

供试催熟化控剂2种。激素型催熟化控剂：40%乙烯利（ETH），由武汉普洛夫生物科技有限公司生产，用量为2.221 L/hm^2；0.1%噻苯隆（TDZ），由武汉克米克生物医药技术有限公司生产，用量为0.835 L/hm^2。除草剂型催熟化控剂：20%敌草快（DCK）和30%草甘膦（PMG），由河南瑞德隆生物科技有限公司生产，用量分别为5.845和4.015 L/hm^2。

1.2　试验设计

试验于2023年和2024年连续2年在西北农林科技大学榆林小杂粮试验示范站（109.7 E，38.3 N）进行。试验区属于黄土高原区，为温带半干旱大陆性季风气候，年平均降水量为400 mm，年平均温度为10.5 ℃，无霜期150 d左右。

试验设置激素型催熟化控剂和除草剂型催熟化控剂各2种，以清水（CK）为对照，共设5个处理，每个处理重复4次，共20个小区（每个小区10 m^2），每小区种6行，行距33 cm，株距5 cm。2023年6月28日播种，10月1日收获；2024年6月30日播种，10月2日收获。试验地所有肥料作为基肥一次性施入，各小区肥料施用量一致，氮肥90 kg/hm^2，磷肥75 kg/hm^2，钾肥37.5 kg/hm^2。2023年和2024年，激素型催熟化控剂于荞麦灌浆期第17天喷施，除草剂型催熟化控剂于荞麦灌浆期第26天喷施。生育期内管理方式按照当地常规方式进行。

1.3　测定项目及方法

1.3.1　荞麦植株含水量测定　于荞麦灌浆期第23，29和35天（激素型催熟化控剂），第29，32和35天（除草剂型催熟化控剂），每小区选取5株有代表性、长势一致的植株，分别称量其茎、叶、籽粒质量，然后于恒温烘干箱中105 ℃杀青30 min，在80 ℃下烘干至质量恒定，并再次称其质量，计算荞麦茎、叶和籽粒含水量。

含水量=（鲜质量－干质量）/鲜质量×100%。

1.3.2　荞麦植株脱叶率测定　于荞麦灌浆期第17，23，29和35天（激素型催熟化控剂），第26，29，32和35天（除草剂型催熟化控剂），每小区标记5株有代表性、长势一致的植株，在相应取样时期测量标记植株叶片数量（标记值），以第1次测量的叶片数量为初始值，计算荞麦叶片脱叶率。

脱叶率=（标记值－初始值）/初始值×100%。

1.3.3　荞麦籽粒成熟度测定　随机取成熟收获后的荞麦籽粒500粒，称取每个单粒质量，以籽粒单粒质量≥0.03 g为完全成熟，0.02 g＜单粒质量＜0.03 g为未完全成熟，单粒质量≤0.02 g为未成熟。

1.3.4　荞麦灌浆速率测定　于荞麦灌浆期第10天，选择刚开始灌浆且大小一致的籽粒标记200个，从灌浆开始每隔3 d取样1次，直至完全成熟。每次取样10粒，立即在105 ℃烘箱内杀青30 min，然后在80 ℃下烘干至质量恒定。用Richards方程拟合籽粒生长动态。对Richards方程求一阶导数，即可得到籽粒灌浆的特征值：最大灌浆速率（G_{max}）、达到最大灌浆速率的时间（t_{max}）、平均灌浆速率$\overline{G}$和活跃灌浆期（D）[19]。

Richards方程：$W=A/(1+Be^{-Kt})^{-1/N}$。

$G_{max}=K/(1+Be^{-\ln(B/N)})^{-1/N}$；

$t_{max}=\ln(B/N)/K$；

$\overline{G}=AK/2(N+2)$；

$D=A/G=2(N+2)/K$。

式中：W为各时期荞麦籽粒质量；A为荞麦籽粒最终生长量；B、N为方程对不同处理所确定的参数；t为相对灌浆时间；K为拟合理论最高粒质量。

1.3.5　荞麦籽粒品质测定　取成熟收获后的荞麦籽粒，恒温烘干箱80 ℃烘干至质量恒定，去掉荞麦皮，放入研钵，研磨后过100目（孔径为0.15 mm）筛网，制成荞麦粉。采用双波长法测定淀粉、可溶性糖和蔗糖含量，采用全自动凯氏定氮仪测量蛋白质含量，用索氏提取法测量脂肪含量，利用$AlCl_3$-NaAc比色法测定黄酮含量。

1.3.6　荞麦产量及其构成因素的测定　在荞麦成熟期，每小区选取5株长势一致、有代表性的植株进行考种。测定荞麦籽粒数、单株籽粒质量和千粒质量，取平均值。荞麦成熟后每小区单独收获，测量产量。

1.4　数据处理与分析

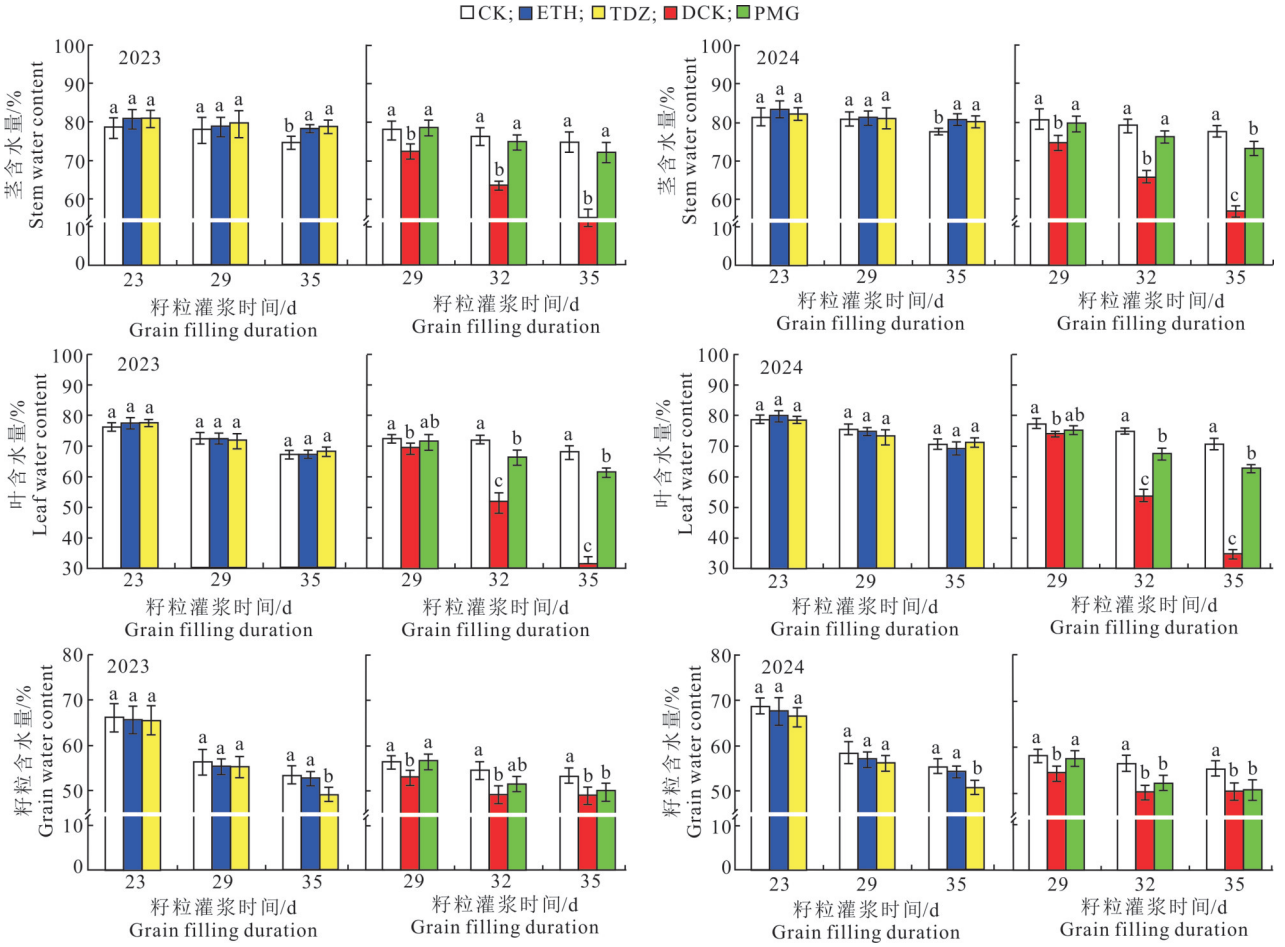
利用Microsoft Excel 2021进行试验数据的录

入与整理,使用SPSS 26.0软件进行试验数据的分析和统计,采用最小显著差法(least significant difference,LSD)比较各个处理之间的差异显著性,并使用Origin 2022软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 催熟化控剂对荞麦植株含水量的影响

2023年和2024年不同催熟化控剂处理下西农D4103植株各器官含水量的变化情况见图1。由图1可以看出,随着灌浆进程的推进,西农D4103植株各器官含水量逐渐降低,并在灌浆第35天达到最低,2年间含水量变化趋势总体表现一致。与CK处理相比,激素型催熟化控剂ETH和TDZ处理对西农D4103茎、叶含水量的影响不明显,在灌浆第35天显著降低了籽粒含水量,其中TDZ处理差异显著;除草剂型催熟化控剂DCK和PMG均降低了西农D4103植株各器官含水量,随着生育进程的推进,影响逐渐加大,其中DCK处理效果优于PMG处理。总体来看,DCK和PMG处理对荞麦各器官脱水效果显著。



图柱上标不同小写字母代表在同一时期不同催熟化控剂处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters in the figure legend indicate significant differences among different ripening regulator treatments during the same period ($P<0.05$).

图1 催熟化控剂对荞麦植株各器官含水量的影响

Fig. 1 Effects of ripening growth regulators on the organs water content of buckwheat plant

2.2 催熟化控剂对荞麦植株脱叶率的影响

由表1可以看出,不同催熟化控剂处理对西农D4103植株脱叶率均存在不同程度的影响,2年间荞麦脱叶率变化趋势基本一致。4种催熟化控剂处理均显著提高了西农D4103的脱叶率,随着灌浆进程的推进,脱叶率呈现不断升高的趋势,脱叶效果总体表现为PMG≈DCK>ETH≈TDZ,其中脱叶率在PMG处理下达到最高;与CK相比,西农D4103脱叶率在灌浆第29,32和35天年均分别增加了22.04%,65.53%和130.48%。总体来看,DCK和PMG处理有助于提高荞麦脱叶率。

表 1　催熟化控剂对荞麦植株脱叶率的影响

Table 1　Effects of ripening growth regulators on defoliation rate of buckwheat

年份 Year	处理 Treatment	脱叶率/% Defoliation rate			
		灌浆后 17 d 17 days after grain filling	灌浆后 23 d 23 days after grain filling	灌浆后 29 d 29 days after grain filling	灌浆后 35 d 35 days after grain filling
2023	CK	8.75±0.22 a	14.15±0.45 b	21.69±1.63 b	33.89±2.95 b
	ETH	8.75±0.22 a	16.47±0.42 a	25.64±1.88 a	40.74±2.71 a
	TDZ	8.75±0.22 a	15.97±0.30 ab	25.59±1.24 a	41.23±1.24 a
2024	CK	9.12±0.35 a	19.68±0.86 b	31.50±1.83 b	46.98±1.47 b
	ETH	9.12±0.35 a	22.39±0.65 a	35.31±2.19 a	55.90±3.43 a
	TDZ	9.12±0.35 a	20.54±0.69 ab	34.47±0.69 a	53.03±1.56 a
年份 Year	处理 Treatment	脱叶率/% Defoliation rate			
		灌浆后 26 d 26 days after grain filling	灌浆后 29 d 29 days after grain filling	灌浆后 32 d 32 days after grain filling	灌浆后 35 d 35 days after grain filling
2023	CK	17.23±0.94 a	21.69±1.63 b	27.42±1.91 c	33.89±2.95 c
	DCK	17.23±0.94 a	26.47±1.77 a	55.39±2.71 b	73.76±2.67 b
	PMG	17.23±0.94 a	25.57±1.45 a	60.26±2.66 a	88.11±2.11 a
2024	CK	24.30±1.24 a	31.50±1.83 b	35.75±1.74 c	46.98±1.47 c
	DCK	24.30±1.24 a	33.11±2.27 a	54.59±2.34 b	74.73±2.24 b
	PMG	24.30±1.24 a	31.26±2.32 a	59.37±1.38 a	88.68±1.52 a

注：同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note：Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

2.3　催熟化控剂对荞麦籽粒成熟度的影响

如表 2 所示，不同催熟化控剂对西农 D4103 籽粒成熟度影响显著，且 2 年间成熟度变化趋势基本一致。TDZ 处理下西农 D4103 成熟籽粒占比最高，其次为 ETH 处理。与 CK 处理相比，TDZ 处理显著提高了西农 D4103 成熟籽粒在全部籽粒中的占比，年均提高了 3.61%，而降低了未成熟籽粒在全部籽粒中的占比，年均降低了 3.76%；ETH 处理下未完全成熟籽粒在全部籽粒中的占比年均提高了 2.14%，而未成熟籽粒占比年均降低了 3.01%；DCK 处理下成熟籽粒占比下降，而未完全成熟籽粒占比提高。结果表明，TDZ 和 ETH 处理催熟效果优于 DCK 和 PMG 处理。

表 2　催熟化控剂对荞麦籽粒成熟度的影响

Table 2　Effects of ripening growth regulators on the maturity of buckwheat grains

年份 Year	处理 Treatment	成熟籽粒占比/% Ripe seed proportion	未完全成熟籽粒占比/% Imperfectly mature seed proportion	未成熟籽粒占比/% Immature seed proportion
2023	CK	68.42±1.46 b	18.15±0.41 c	13.43±0.44 a
	ETH	69.87±1.54 b	20.75±0.32 b	9.38±0.29 b
	TDZ	73.54±1.64 a	16.34±0.42 c	10.12±0.29 b
	DCK	61.99±1.23 c	23.25±0.24 a	14.76±0.39 a
	PMG	68.21±1.93 b	21.35±0.49 b	10.44±0.31 b
2024	CK	72.56±1.23 b	16.32±0.14 c	11.12±0.24 a
	ETH	73.84±1.01 ab	17.99±0.25 b	9.17±0.15 bc
	TDZ	74.65±1.17 a	18.42±0.23 b	6.93±0.23 c
	DCK	67.82±1.28 c	20.35±0.28 a	11.83±0.18 a
	PMG	70.25±1.53 bc	18.98±0.24 b	10.77±0.22 b

2.4　催熟化控剂对荞麦籽粒灌浆速率的影响

由表 3 可以看出，以 Richards 方程对西农 D4103 籽粒的灌浆进行拟合，各处理的曲线方程判断系数 $R^2=0.99$，表明 Richards 方程能够较好地拟合不同催熟化控剂处理下西农 D4103 籽粒的灌浆动态。与 CK 相比，TDZ 处理下最大灌浆速率（G_{max}）最大，年均较 CK 提高了 6.25%；达到最大灌浆速率的时间（t_{max}）最晚，较 CK 处理晚了 1.44 d；活跃灌浆期（D）最长，较 CK 增加了 2.22 d。总体来看，TDZ 处理对西农 D4103 籽粒灌浆速率改善效果最好。

2.5　催熟化控剂对荞麦籽粒品质的影响

由表 4 可以看出，不同催熟化控剂处理对西农 D4103 籽粒品质的影响不同，2 年间变化趋势基本保持一致。ETH 处理西农 D4103 籽粒淀粉含量最

高,DCK处理淀粉含量最低,二者与CK差异均不显著。各处理中以DCK处理西农D4103可溶性糖和蔗糖含量最高,其次为PMG处理,与CK处理相比差异显著,DCK处理年均提高了13.98%和16.42%,PMG处理年均提高了13.39%和11.68%。与CK处理相比,籽粒蛋白质含量在TDZ处理达到最高,且显著高于其他处理,年均提高了8.75%;而ETH和PMG处理西农D4103籽粒蛋白质含量较CK有所降低。与CK处理相比,DCK和PMG处理显著提高了西农D4103脂肪含量,而ETH和TDZ处理籽粒脂肪含量有所降低,但差异不显著。与CK相比,4种催熟化控剂处理西农D4103籽粒黄酮含量均有不同程度降低,且在DCK处理达到最低,显著低于其他处理。

表3 催熟化控剂对荞麦籽粒灌浆速率的影响

Table 3 Effects of ripening growth regulators on buckwheat grain filling rate

年份 Year	处理 Treatment	t_{max}/d	G_{max}/(g·hd^{-1})	$\overline{D}$/(g·hd^{-1})	D/d
2023	CK	22.03 c	0.48 b	0.27 a	19.94 b
	ETH	22.92 ab	0.49 ab	0.26 b	21.49 a
	TDZ	23.46 a	0.51 a	0.26 b	22.16 a
	DCK	22.68 b	0.47 c	0.27 a	19.10 c
	PMG	22.70 b	0.49 ab	0.27 a	20.25 ab
2024	CK	20.33 c	0.50 b	0.31 a	18.54 b
	ETH	21.04 b	0.51 b	0.30 ab	19.36 a
	TDZ	21.84 a	0.52 a	0.31 a	19.99 a
	DCK	19.88 d	0.47 c	0.29 b	18.04 b
	PMG	20.14 c	0.50 b	0.30 b	18.64 b

表4 催熟化控剂对荞麦籽粒品质的影响

Table 4 Effects of ripening growth regulators on the quality of buckwheat plants and grains

年份 Year	处理 Treatment	淀粉含量/% Starch content	可溶性糖含量/% Contents soluble sugar	蔗糖含量/% Sucrose content	蛋白质含量/% Protein content	脂肪含量/% Fat content	黄酮含量/‰ Flavonoid content
2023	CK	77.45±0.57 ab	5.08±0.11 b	2.74±0.12 b	9.63±0.16 c	1.82±0.14 ab	1.13±0.03 a
	ETH	78.37±0.53 a	5.28±0.15 b	2.93±0.13 ab	9.30±0.17 d	1.75±0.11 b	1.11±0.02 ab
	TDZ	78.14±0.55 a	5.26±0.16 b	2.91±0.13 ab	10.45±0.27 a	1.70±0.09 b	1.12±0.01 a
	DCK	76.86±0.31 b	5.79±0.16 a	3.19±0.12 a	10.03±0.21 b	1.91±0.12 ab	1.03±0.02 c
	PMG	77.91±0.46 a	5.76±0.15 a	3.06±0.13 a	9.58±0.17 c	2.06±0.12 a	1.07±0.02 bc
2024	CK	76.25±0.66 ab	5.23±0.16 b	2.44±0.07 b	10.07±0.23 c	2.61±0.06 b	1.10±0.02 a
	ETH	77.38±0.41 a	5.38±0.15 b	2.60±0.13 ab	9.49±0.26 d	2.33±0.07 c	1.08±0.02 ab
	TDZ	76.83±0.76 a	5.44±0.13 b	2.65±0.11 a	11.07±0.31 a	2.46±0.08 bc	1.09±0.01 a
	DCK	75.14±0.42 b	5.83±0.12 a	2.79±0.12 a	10.46±0.29 b	2.83±0.07 a	1.01±0.01 c
	PMG	76.58±0.51 a	5.74±0.14 a	2.73±0.13 a	9.84±0.28 cd	2.91±0.05 a	1.04±0.01 bc

2.6 催熟化控剂对荞麦产量及其构成因素的影响

催熟化控剂对荞麦产量及其产量构成因素的影响见表5。

表5 催熟化控剂对荞麦产量及其构成因素的影响

Table 5 Effects of ripening growth regulators on yield of buckwheat and its yield components

年份 Year	处理 Treatment	单株粒数 Grains number per plant	单株粒质量/g Grain weight per plant	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/(kg·hm^{-2}) Yield
2023	CK	357.22±6.72 b	9.98±0.72 b	27.39±0.11 b	736.25±12.56 b
	ETH	386.61±10.77 b	9.67±0.57 b	27.37±0.24 b	683.50±21.43 c
	TDZ	406.88±8.45 a	10.64±0.36 a	28.45±0.71 a	786.30±19.47 a
	DCK	325.65±5.52 c	9.27±0.36 c	27.22±0.50 b	647.51±17.61 c
	PMG	351.94±7.42 b	9.43±0.34 c	26.60±0.68 c	656.25±29.12 c
2024	CK	254.80±7.55 b	7.56±0.16 b	29.80±0.34 bc	713.21±17.64 b
	ETH	261.22±9.77 b	7.78±0.87 b	30.03±0.24 ab	707.98±21.53 b
	TDZ	307.28±9.51 a	8.82±0.29 a	30.56±0.21 a	742.18±10.73 a
	DCK	258.15±9.35 b	7.39±0.43 b	29.73±0.16 bc	663.45±10.85 c
	PMG	254.84±9.04 b	7.54±0.54 b	29.13±0.42 c	685.95±16.25 bc

由表 5 可以看出，不同催熟化控剂对西农 D4103 产量及其构成因素影响显著。TDZ 处理西农 D4103 产量及其构成因素达到最大，显著高于 CK 处理，其单株粒数、单株粒质量、千粒质量和产量年均较 CK 分别增加了 19.50%，24.13%，3.87% 和 4.05%；而 ETH、DCK 和 PMG 处理下其产量及构成因素均有不同程度降低，降幅总体表现为 DCK＞PMG＞ETH，在 DCK 处理下西农 D4103 单株粒数、单株粒质量、千粒质量和产量均最低，相比 CK 处理年均分别降低了 8.96%，5.21%，0.62% 和 12.05%。

3　讨　论

植株各器官含水量是衡量机械化收获适宜性的重要指标，植株茎秆含水量越低越有利于机械化采收[20]。有研究表明，施用催熟化控剂使茎秆含水量降低，能有效降低收割机的作业负荷，提高效率，减少籽粒损耗[21]。本研究发现，激素型催熟化控剂 ETH 和 TDZ 处理对西农 D4103 茎、叶和籽粒含水量无显著影响；而除草剂型催熟化控剂 DCK 和 PMG 处理均能显著降低各个灌浆时期茎、叶、籽粒含水量。这可能是由于除草剂型催熟化控剂能迅速破坏作物绿色组织细胞双层膜结构，使作物光合作用迅速终止，导致植物迅速失水，这与前人研究结果[22]相符合。

催熟化控剂可促进作物大部分叶片在机械化收获前快速脱落，改善田间通风透光情况，减小作物籽粒的含杂率并促进作物籽粒成熟，提高机械化收获的作业效率[23]。前人研究表明，施用催熟化控剂能有效促进作物叶片脱落和果实集中成熟，有利于作物机械化采收，提高机械化采收效率[24-25]。本研究发现，催熟化控剂对荞麦叶片脱叶效果影响显著，其中除草剂型催熟化控剂 DCK 和 PMG 处理脱叶效果要优于激素型催熟化控剂 ETH 和 TDZ 处理，TDZ 处理下西农 D4103 籽粒最大灌浆速率、灌浆活跃时间和成熟度显著高于 CK 处理，与前人研究结果[26]基本一致。本研究中，DCK 处理对西农 D4103 产生了较强的负面效果，可能是由于 DCK 破坏了叶片细胞膜结构，显著降低叶片的光合效率和叶绿素含量，减少光合作用和光合产物的合成及物质转运，从而抑制籽粒灌浆速率，缩短作物灌浆活跃期，影响籽粒的正常灌浆[27]。

实际生产中，除了考虑催熟化控剂对荞麦脱叶脱水效果的影响外，还应该考虑到应用催熟化控剂之后对荞麦籽粒产量和品质的影响。有学者发现，PMG 处理通过促进植株内源乙烯的合成加速作物成熟，促进光合产物向果实转运，进而影响作物的品质[28]。另有研究表明，TDZ 处理能通过改变作物体内碳代谢和氮代谢强度而保护作物内在酶系统，减少活性氧对作物的毒害作用，调控蛋白质及激素的合成[29]。本研究发现，与 CK 处理相比，激素型催熟化控剂 ETH 和 TDZ 处理提高了西农 D4103 淀粉、可溶性糖、蔗糖含量，降低了脂肪、黄酮含量，表明在灌浆期 ETH 和 TDZ 处理可以改善荞麦籽粒淀粉及可溶性糖含量，而对油脂积累不利，这与该催熟化控剂在大豆[30]、小麦[31]等其他作物中的作用效果相似；除草剂型催熟化控剂 DCK 和 PMG 处理显著提高了西农 D4103 籽粒可溶性糖和蔗糖含量，而淀粉、蛋白质、黄酮含量等均有不同程度的降低，这与 DCK 和 PMG 在其他作物上的研究结果[32-33]基本一致。另有研究发现，喷施噻苯隆（TDZ）能显著提高玉米产量，综合调控效果与增产作用比较显著[34]。在本研究中，与 CK 处理相比，TDZ 处理显著提高了西农 D4103 籽粒千粒质量和产量；而 ETH、DCK 和 PMG 处理降低了西农 D4103 荞麦籽粒千粒质量和产量，这可能是由于在催熟化控剂处理下，荞麦茎叶含水量的降低使得叶片光合效率减弱，抑制了籽粒灌浆，进而影响到荞麦籽粒千粒质量和产量[35]。

4　结　论

综合考虑不同催熟化控剂对西农 D4103 成熟特性、品质及产量的影响，噻苯隆（TDZ）处理提升了西农 D4103 籽粒最大灌浆速率，延长了籽粒灌浆活跃期，促进籽粒灌浆，提高成熟籽粒在全部籽粒中的占比，籽粒品质和产量均优于其他催熟化控剂处理。因此在荞麦灌浆期叶片喷施 0.1% 噻苯隆（TDZ）有利于荞麦成熟期特性的改善，可作为黄土高原北部荞麦主产区机械化收获的重要措施。

[参考文献]

[1]　林汝法，周小理，任贵兴，等. 中国荞麦的生产与贸易、营养与食品[J]. 食品科学，2005(1)：259-263.
LIN R F，ZHOU X L，REN G X，et al. Production trading nutrition and food of buckwheat in China[J]. Food Science，2005(1)：259-263.

[2]　黄小娜，张卫国，党威龙，等. 荞麦收获机械研究现状及发展趋势[J]. 农业机械，2018(10)：84-90.

HUANG X N,ZHANG W G,DANG W L,et al. Research status and development trend of buckwheat harvesting machinery [J]. Farm Machinery,2018(10):84-90.

[3] FANG X M,LI Y S,NIE J,et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photosynthetic characteristics agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.)[J]. Field Crops Research, 2018, 219: 160-168.

[4] 卢琦,郑德聪,刘芸,等. 我国荞麦机械化收获技术问题与思考[J]. 农业工程,2020,10(1):6-9.
LU Q,ZHENG D C,LIU Y,et al. Problems and thoughts on mechanized harvesting technology of buckwheat in China[J]. Journal of Agricultural Engineering,2020,10(1):6-9.

[5] 高新,谭杰,随顺涛,等. 四川苦荞生产全程机械化关键环节现状与发展[J]. 中国农机化学报,2024,45(11):283-289.
GAO X,TAN J,SUI S T,et al. Present situation and development of key aspects in the whole process mechanization of Sichuan tartary buckwheat production[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization,2024,45(11):283-289.

[6] WEN W,LI Z Q,SHAO J R,et al. The distribution and sustainable utilization of buckwheat resources under climate change in China[J]. Plants,2021,10(10):2081.

[7] 王爱玉,薛超,马亚杰,等. 不同施药器械喷施棉花脱叶催熟剂的效果比较[J]. 中国棉花,2022,49(10):16-19.
WANG A Y,XUE C,MA Y J,et al. Effects comparison of spraying cotton defoliant and ripening agents with different sprayers[J]. China Cotton,2022,49(10):16-19.

[8] 金路路,徐敏,王子胜. 脱叶催熟剂对棉花产量影响及应用效果分析[J]. 农学学报,2023,13(3):35-39.
JIN L L,XU M,WANG Z S. Defoliation & ripping agent:effect on cotton yield and application analysis[J]. Journal of Agriculture,2023,13(3):35-39.

[9] LI B P,LI F W,FEI Y,et al. Comparative physiological and transcriptomic mechanisms of defoliation in cotton in response to thidiazuron versus ethephon[J]. International Journal of Molecular Sciences,2023,24(8):7590.

[10] 张丽娟,秦宇坤,陈俊英,等. 高密度配合重化控处理对中早熟直播棉花生长发育和催熟效应的影响[J]. 湖北农业科学,2022,61(7):5-9.
ZHANG L J,QIN Y K,CHEN J Y,et al. Effects of high density combined with heavy chemical control on growth and ripening of direct seeding of mid-early maturity cotton[J]. Hubei Agricultural Sciences,2022,61(7):5-9.

[11] 施保国,邢华. 直播稻穗期应用复方乙烯利催熟增产效应试验[J]. 现代农业科技,2009(1):186-190.
SHI B G,XING H. Effect of compound ethephon on accelerating ripening and increasing yield at heading stage of direct seeding rice[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2009(1):186-190.

[12] 白杰,陈叶青,郭崇友. 敌草快航空施药技术对水稻催熟干燥的应用研究[J]. 世界农药,2019,41(4):56-58.
BAI J,CHEN Y Q,GUO C Y. The effect of aviation application technology of diquat on rice ripening and drying[J]. World Pesticides,2019,41(4):56-58.

[13] 刘京涛,刘炳强,吴振美,等. 立收谷水剂催熟对小麦机械收割效果的影响[J]. 作物杂志,2006(3):53.
LIU J T,LIU B Q,WU Z M,et al. Effect of ripening with vertical harvest water agent on mechanical harvest of wheat[J]. Crops,2006(3):53.

[14] 丁海慧,秦永龙,吴郁,等. 噻苯隆对小麦幼苗生长及氮代谢关键酶的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2025,46(2):58-65.
DING H H,QIN Y L,WU Y,et al. Effect of thidiazuron on growth of wheat seedlings and activity of key enzymes in nitrogen metabolism[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition),2025,46(2):58-65.

[15] 叶伟胜,马骏,斜羽倩,等. 油菜机械化生产中农艺与农机相结合的探索与实践[J]. 乡村科技,2021,12(2):123-124.
YE W S,MA J,DOU Y Q,et al. Exploration and practice of combining agronomy and machinery in mechanized production of rapeseed[J]. Rural Science and Technology,2021,12(2):123-124.

[16] 罗玉琴,向玉凤,彭霄,等. 化控催熟对直播油菜抗裂角性和籽粒品质的影响[J]. 四川农业与农机,2023(4):36-38,52.
LUO Y Q,XIANG Y F,PENG X,et al. Effects of chemical control and ripening on cracking resistance and grain quality of direct-seeded rape[J]. Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery,2023(4):36-38,52.

[17] 李林林,白玉超,刘楠楠,等. 化学脱叶剂及催熟剂在农作物上的应用现状[J]. 中国农学通报,2018,34(12):132-135.
LI L L,BAI Y C,LIU N N,et al. Chemical defoliant and ripener in crops:main application status[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2018,34(12):132-135.

[18] HUANG C,LIU X C,MA X T,et al. Enhancement of waterlogging tolerance and improvement of grain quality in waxy maize with exogenous edah:a mixture of ethephon and diethy laminoethyl hexanoate[J]. Journal of Agronomy and Crop Science,2024,210(4):e12729.

[19] 刘庆芳,李小康,刘保华,等. 冬小麦籽粒灌浆特性和旗叶光合特性对产量的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(19):61-67.
LIU Q F,LI X K,LIU B H,et al. Effects of grain filling characteristics and flag leaf photosynthetic characteristics on yield in winter wheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2022,50(19):61-67.

[20] 王小军. 山西省荞麦生产全程机械化技术发展近况及建议[J]. 农业技术与装备,2022(3):44-46.
WANG X J. Present situation and suggestions of the whole process mechanization technology of buckwheat production in Shanxi Province[J]. Agricultural Technology & Equipment,2022(3):44-46.

[21] 刘勇,杨明凤,白书军,等. 石河子地区机采棉不同时期喷施化学脱叶剂的效果[J]. 棉花科学,2020,42(6):28-31.
LIU Y,YANG M F,BAI S J,et al. Effects of spraying chemi-

cal defoliats in different period of machine picked cotton in Shihezi district[J]. Cotton Sciences, 2020, 42(6): 28-31.

[22] 王谊，杨丽红. 脱叶剂对棉花脱叶率和产量的影响[J]. 中国棉花，2014，41(4)：28-30.
WANG Y, YANG L H. Effect of cotton defoliant on the defoliation rate and yield in Xinjiang[J]. China Cotton, 2014, 41(4): 28-30.

[23] 周先林，覃琴，王龙，等. 脱叶催熟剂在新疆棉花生产中的应用现状[J]. 中国植保导刊，2020，40(2)：26-32.
ZHOU X L, QIN Q, WANG L, et al. Application status of defoliation and ripening agents on cotton production in Xinjiang[J]. China Plant Protection, 2020, 40(2): 26-32.

[24] 魏鑫，马清倩，李春艳，等. 脱叶剂喷施时间对棉花产量品质及种子化学成分的影响[J]. 新疆农业科学，2021，58(9)：1648-1655.
WEI X, MA Q Q, LI C Y, et al. Effects of defoliant spraying time on cotton yield, quality and chemical composition of seed[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(9): 1648-1655.

[25] 谢章书，谢学方，李侃，等. 不同脱叶剂对长江流域夏播短季栽培棉花脱叶催熟效果及产量和品质的影响[J]. 南方农业学报，2024，55(9)：2602-2612.
XIE Z S, XIE X F, LI K, et al. Effects of different defoliants on the defoliation, ripening effect, yield and quality of cotton in summer-sowing short-season cultivation in Yangtze River basin[J]. Journal of Southern Agriculture, 2024, 55(9): 2602-2612.

[26] 吴丽娜. 0.5% 噻苯隆可溶性液剂对春玉米生长发育及产量的影响[J]. 河南农业，2023(16)：40-41.
WU L N. Effects of 0.5% thibenuron soluble liquid on the growth and yield of spring maize[J]. Agriculture of Henan, 2023(16): 40-41.

[27] 王鹏年，刘大壮，闫昊，等. 不同化控剂处理对杂交大豆制种催熟效果的影响[J]. 大豆科学，2024，43(4)：463-470.
WANG P N, LIU D Z, YAN H, et al. Effects of different chemical control agents on ripening of hybrid soybean seed production[J]. Soybean Science, 2024, 43(4): 463-470.

[28] MARCELO S A D, GERARDO J V E, MARCIA M S P, et al. Glyphosate applied at a hormetic dose improves ripening without impairing sugarcane productivity and ratoon sprouting[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150503.

[29] 谢忠斌，叶春海，任雪岩，等. 乙烯利处理对采后菠萝蜜果实活性氧代谢的影响[J]. 热带作物学报，2018，39(1)：77-83.
XIE Z B, YE C H, REN X Y, et al. Effects of 1-MCP and ethephon treatment on reactive oxygen metabolism of postharvest jackfruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(1): 77-83.

[30] 舒凯，孟永杰，帅海威，等. 四川玉米-大豆带状套作复合群体产量变异及其影响因素分析[J]. 中国油料作物学报，2015，37(6)：832-837.
SHU K, MENG Y J, SHUAI H W, et al. Variation of combination yield of maize and soybean under maize-soybean intercropping system in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(6): 832-837.

[31] 张春明，兰汝佳，甘淳丹，等. 新型微量元素型叶面肥对春小麦旗叶衰老、籽粒产量和品质的影响[J]. 生态与农村环境学报，2019，35(1)：121-127.
ZHANG C M, LAN R J, GAN C D, et al. Effects of new microelement type foliar fertilizer on flag leaf senescence, grain yield and quality of spring wheat[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(1): 121-127.

[32] 姜福元，段志红，肖长惜，等. 除草剂催熟对油菜籽粒产量品质及残留量的影响[J]. 中国油料作物学报，2015，37(6)：820-826.
JIANG F Y, DUAN Z H, XIAO C X, et al. Herbicides artificial ripening effects on yield, quality and residues in rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(6): 820-826.

[33] 乔醒，程勇，陆光远，等. 敌草快对成熟期油菜脱水和种子质量的影响[J]. 中国油料作物学报，2015，37(2)：240-245.
QIAO X, CHENG Y, LU G Y, et al. Effect of diquat on dehydration of ripening rapeseed and seed quality[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(2): 240-245.

[34] 刘承德，曹导叶，陈继选，等. 噻苯隆对夏玉米农艺性状和产量影响的试验初报[J]. 黑龙江农业科学，2007(4)：58-59，74.
LIU C D, CAO D Y, CHEN J X, et al. Effects of tidiazuron tecnico on agronomic characters and yield of summer corn[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2007(4): 58-59, 74.

[35] 唐浩蓝，张金盈，丁晓雨，等. 催枯剂敌草快对油菜脱水效率及产量形成的影响[J]. 中国油料作物学报，2025，47(1)：135-142.
TANG H L, ZHANG J K, DING X Y, et al. Effect of diquat for desiccating efficiency and yield on rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 47(1): 135-142.

（责任编辑：屈李纯）