

网络出版时间:2025-11-18

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251117.1418.010

MeJA 对光温敏雄性不育小麦 BS141 开花习性 & 异交结实的影响

岳洁茹, 侯起岭, 苑少华, 郝小聪, 白秀成, 王长华, 张凤廷, 赵昌平, 孙辉

(北京市农林科学院杂交小麦研究所/杂交小麦分子遗传北京市重点实验室, 北京 100097)

摘要: 茉莉酸甲酯(MeJA)可以诱导作物开花习性。为进一步明确 MeJA 对小麦光温敏雄性不育系开花习性、浆片及异交结实的调控作用,于花后第 2 天对小麦光温敏雄性不育系 BS141 进行 $4\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA 浸穗处理,同时以浸水穗作为对照,研究 MeJA 对不育系每日开颖率、日不同时间开花变化、柱头外露率、开颖角度、浆片形态及异交结实的影响。结果表明,MeJA 处理后,BS141 开颖率当天达到最大,比对照高出 31.45 个百分点,第 2 天开始显著低于对照,第 4 天—第 5 天与对照没有显著差异。在开颖率最大的时候授粉,可使 BS141 异交结实率比对照提高 24.77 个百分点。MeJA 处理后 BS141 的日开花高峰期主要集中在 13:00,而对照较分散。上午 10:00 统计 BS141 柱头外露率,发现 MeJA 处理的 BS141 柱头外露率在 5 d 内均低于对照。MeJA 处理的 BS141 每日最大开颖角度整体低于对照。由此说明通过喷施外源 MeJA,可使小麦光温雄性不育系开颖率在喷施当天达到最大,且开花高峰较集中,此时授粉可显著提高异交结实率,但喷施 MeJA 对柱头外露率和最大开颖角度作用不显著。

关键词: 小麦光温敏雄性不育系;茉莉酸甲酯;开花习性;浆片;异交结实

中图分类号: S512.1;S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)01-0123-07

Effects of Methyl Jasmonate on Flowering Habits and Outcrossing Seed Setting of Photo-Thermo Sensitive Male Sterile Wheat BS141

YUE Jieru, HOU Qiling, YUAN Shaohua, HAO Xiaocong, BAI Xiucheng,
WANG Changhua, ZHANG Fengting, ZHAO Changping, SUN Hui

(Institute of Hybrid Wheat, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Beijing Key Laboratory of Molecular Genetics in Hybrid Wheat, Beijing 100097, China)

Abstract: Methyl jasmonate(MeJA) can induce flowering habits. In order to further elucidate the regulatory role of MeJA on the flowering habits, lodicule morphology, and outcrossing seed setting rate of photo-thermo sensitive male sterile lines of wheat, this study immersed the wheat line BS141 with $4\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA at 2 days post-anthesis, using water-immersed spikes as a control. The effects of MeJA on the daily anthesis rate, temporal variations in flowering, the glume opening rate, anthesis angle, lemma morphology, and outcrossing seed setting were investigated. The results demonstrated that upon treatment with MeJA, the glume opening rate of the BS141 peaked on the day of treatment, showing an increase of 31.45 percentage points compared to the control group. However, starting from the second day, this number was significantly lower than that of the control. From the fourth to the fifth day, there was no significant difference compared with the control. Pollination at the time when the glume opening rate was the highest increased the outcrossing seed setting rate of BS141 by 24.77 percentage points compared with the control. The peak flowering period of the MeJA-treated

收稿日期:2025-05-12

修回日期:2025-09-23

基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20251004);国家小麦产业技术体系项目(CARS-03-3);国家重点研发计划课题(2022YFD1200803)

第一作者 E-mail:yuejieru@163.com(岳洁茹)

通讯作者 E-mail:sunhui802@163.com(孙辉);cp_zhao@vip.sohu.com(赵昌平)

BS141 was predominantly concentrated at 13:00, whereas the control was more dispersed. The stigma exertion rate of BS141 was statistically analyzed at 10:00 a. m. It was found that the stigma exertion rate of BS141 treated with MeJA was lower than that of the control within 5 days. The overall maximum daily opening angle of BS141 treated with MeJA was lower than that of the control group. Therefore, by spraying exogenous MeJA, the glume opening rate of wheat photo-thermo sensitive male sterile line could be maximized on the day of spraying, and the flowering peak was relatively concentrated. At this time, pollination could significantly increase the outcrossing seed setting rate. However, spraying MeJA had no significant effect on the stigma exertion rate and the maximum opening angle.

Keywords: Photo-thermo sensitive male sterile line of wheat; Methyl jasmonate; Flowering habits; Lodicule; Outcrossing seed setting

以光温敏雄性不育系为核心的二系杂交小麦技术体系是小麦杂种优势利用的重要途径之一,目前已进入产业化快速发展阶段^[1-3]。但在杂交种生产过程中,制种产量及 F_1 种子的优劣仍是制约二系杂交小麦大面积推广应用的关键^[4]。其中,最核心的是提升不育系的异交性能,需要各种措施综合配套实施,使不育系最大限度地获得恢复系的花粉,以提高不育系异交结实率,进而提高杂交小麦制种产量^[5]。研究表明,不育系开花习性是衡量其异交性能的重要指标,对小麦、水稻等作物的研究均发现不育系的开颖、柱头外露等开花习性与异交结实紧密相关^[6-8]。杨卫兵等^[4]研究表明,小麦不育系开颖率、柱头外露率与异交结实率呈极显著正相关,高开颖率或高柱头外露率的不育系均可获得较高的异交结实率。李宏生等^[5]研究认为,柱头外露率高的小麦不育系有助于提高杂交小麦异交结实率和制种产量。张廷松等^[9]报道,杂交水稻制种时选择柱头外露率及午前开花率高的不育系可提高异交结实率。

茉莉酸甲酯(MeJA)作为一种与抗逆性密切相关的化学调节及信号传导物质,参与多种逆境响应,可促进禾本科作物颖花开放。自1999年发现MeJA能快速诱导水稻开颖以来,已有将MeJA应用于杂交水稻制种中开花时间调控的探索^[10]。研究表明,MeJA对籼稻不育系开颖有明显的诱导效应,可使其在一天中出现明显的开花高峰,较好地与父本的开花高峰相遇,显著改善母本的柱头外露率,增加异交结实率,进而提高制种产量^[11]。喷施 $2\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA能诱导粳稻不育系形成开颖高峰,不同类型不育系对MeJA的响应速度不同,开颖高峰的持续时间也有差异^[12]。刘淑英等^[13]研究发现,不同浓度MeJA均可显著诱导小麦光温敏雄性不育系BS366离

体穗开颖, $4\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA能诱导连体穗开颖,且MeJA对不育系雌蕊没有副作用。缪晨琦等^[14]研究认为,MeJA可诱导BS366从抽穗到开花各个时期的麦穗提前开颖,并且诱导效应随发育时期的推迟而增强。此外,不育系的浆片位于外稃与雄蕊之间,由2片透明细胞构成的囊状突起组成,是介导颖花开放的重要器官,其通过膨大与收缩调节颖花开闭^[15-16]。但MeJA是否会对浆片造成影响,目前鲜见报道。

本研究以光温敏雄性不育系BS141为材料,设置 $4\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA处理,观察统计每日开颖率、日开花规律、柱头外露率及异交结实,分析MeJA处理对不育系浆片形态的影响及浆片大小与开颖角度的关系,进一步探索外源MeJA对不育系开花习性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为小麦光温敏雄性不育系BS141,株高71~79 cm,株型直立,长芒,白粒。河南邓州为其制种区,不育度在99%以上;北京顺义为繁种区,其育性可以较好地恢复,结实率达54.32%(表1)。授粉材料为常规小麦京411。

1.2 方法

1.2.1 材料种植

材料于2024年10月3日种植于花盆($26\text{ cm} \times 23\text{ cm}$),置于北京顺义田间,每盆留苗8株,共计6盆。每盆底施磷酸二胺 0.88 g 、尿素 0.63 g ,于四叶一心期每盆追施尿素 0.63 g 。春化完成后,将花盆移入温室,不育系光温敏感期为药隔期至单核期,在此时期移入人工气候室模拟不育条件(光照时长为 $12\text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$,平均温度为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$),出箱后移到温室用于后续试验。

表 1 2023—2024 年度 BS141 在两个生态点的田间表现

Table 1 Agronomic characteristics of BS141 at the two test locations in the 2023—2024 growth season

地点 Location	播种期(月-日) Sowing date (month-day)	抽穗期(月-日) Heading date (month-day)	开花期(月-日) Flowering date (month-day)	株高 Plant height/cm	小穗数 Number of spikelets	自交结实率 Self-seed setting rate/%
E1	10-20	4-4	4-10	79	23	0.36
E2	10-15	4-29	5-5	71	19	54.32

E1:河南邓州;E2:北京顺义。
E1:Dengzhou, Henan Province; E2: Shunyi, Beijing.

1.2.2 试剂配置

前期研究发现 0.5、1、2、4 mmol·L⁻¹ MeJA 均可诱导不育系 BS366 离体穗开颖,其中 4 mmol·L⁻¹ MeJA 诱导效应最强,同时可显著诱导田间连体穗开颖^[13],因此,本试验所用 MeJA 浓度为 4 mmol·L⁻¹。MeJA(95%)和表面活性剂吐温-20 均购自 Sigma 公司,用蒸馏水将 MeJA 稀释为 4 mmol·L⁻¹,溶液中含有 0.06%吐温-20 及 2%的无水乙醇,对照穗直接浸水处理。

1.2.3 试验处理

于不育系花后第 2 天早上 8:00,用 4 mmol·L⁻¹ MeJA 浸穗 30 s,以浸水穗作为对照(CK)^[17],每个处理均 3 盆重复,每盆分别选长势一致的 4 个主茎穗进行处理。其中,1 盆用于从处理当天开始记录每 1 h 内(上午 9:00 至下午 16:00)开颖小花数(不包括始花当天已经开颖的小花数),每天上午 10:00 统计柱头外露小花数及最大开颖角度,连续统计 5 d(始花后的第 2 天为统计的第 1 天),统计标准参考李宏生等^[5];1 盆用于处理第 2 天观察浆片表型;1 盆用于处理当天上午将各处理穗颖壳上部剪掉(剪颖),并套杂交袋,当天用京 411 对其人工饱和授粉(于下午 14:00—16:00 选择花粉量大的穗子),每个处理均授粉 4 个穗,用于统计不同处理的不育系异交结实率。

1.3 数据处理与分析

开颖率=开颖小花数/(有效小穗数×2)×100%

柱头外露率=柱头外露小花数/(有效小穗数×2)×100%

异交结实率=穗粒数/(有效小穗数×2)×100%

自交结实率=穗粒数/(小穗数×2)×100%

采用 Photoshop 2025 测量开颖角度,使用 Leica 体视镜拍摄浆片表型,利用 Graphpad 8 和 Excel 等软件对试验数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 试验材料育性表现

小麦光温敏不育系 BS141 在短日照低温条件(光照时长为 12 h·d⁻¹,平均温度为 12℃)下不育,长日照高温条件(光照时长为 14 h·d⁻¹,平均温度为 16℃)下可育,因此在育性敏感期将 BS141 放入人工气候室 12℃进行 12 h 处理,确保其达到不育状态。结果(表 2)显示,BS141 自交结实率 0.53%~0.65%,不育度在 99%以上。京 411 自交结实率达 89.30%。

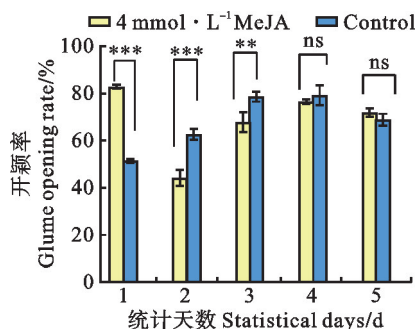
2.2 BS141 日开颖率变化及 MeJA 影响

于 MeJA 处理后比较 BS141 和对照的每日开颖率及两者之间的差异。结果(图 1)表明,4 mmol·L⁻¹ MeJA 处理穗与对照穗日开颖率变化趋势存在差异。MeJA 处理穗当天(1 d)的开颖率最大,为 82.92%,与对照穗(51.47%)差异极显著,第 2 天 MeJA 处理穗开颖率急剧下降(44.23%),第 3 天开始逐渐上升,第 4 天上升到 76.57%,第 5 天又下降;而对照穗在第 1 天开颖率最低(51.47%),随后开始升高,第 4 天开颖率达到最大(79.22%),第 2 天—第 3 天开颖率与处理穗差异极显著。

表 2 BS141 及京 411 在温室的育性表现

Table 2 Fertility performance of BS141 and Jing 411 in greenhouse

材料 Material	处理 Treatment	小穗数 Number of spikelets	穗粒数 Kernels per spike	自交结实率 Self-seed setting rate/%	始花期(月-日) Initial flowering stage(month-day)
BS141	MeJA	20.25	0.21	0.53	3-6
	CK	21.50	0.28	0.65	3-6
京 411 Jing 411		22.50	40.05	89.30	3-7



***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; ns: 无显著差异。下同。
ns: Not significant. The same in belows.

图 1 MeJA 处理和对照下 BS141 每日开颖率比较

Fig. 1 Comparison of daily glume opening rate of BS141 between MeJA treatment and control

2.3 MeJA 处理后 BS141 颖花开放日动态

为了分析不育系每日不同时刻的开花动态,以及 MeJA 处理对不育系开花的影响,连续 5 d 统计当日 9:00—16:00 的开花情况。结果(图 2)表明,BS141 MeJA 处理和对照在一天中开花都处于开-闭-开-闭的动态变化中。经 MeJA 处理的 BS141 当天迅速开花,开花数目最高达到 25 朵,比对照高将近 1 倍。从日开花高峰来看,处理后的 BS141 在前 3 d 开花高峰均集中在 13:00,第 4 天和第 5 天开花高峰在上午 10:00—11:00。而对照开花高峰较分散。

2.4 MeJA 处理对 BS141 柱头外露率及最大开颖角度的影响

每日上午 10:00 测定 BS141 处理和对照的柱头外露率及最大开颖角度,结果如图 3 所示。处理和对照的柱头外露率随着开花天数增加,均呈上升趋势。但是 MeJA 处理后 BS141 在 5 d 内柱头外露率为 13.19%~59.38%,均显著低于对照(18.75%~78.24%)(图 3A)。关于开颖角度,处理后 BS141 在 5 d 内最大开颖角度为 8.3° ~ 35.4° ,而对照最大开颖角度为 23.2° ~ 45.8° ,对照开颖角度整体高于处理的 BS141(图 3B,表 3)。

2.5 MeJA 处理对 BS141 浆片的影响及浆片大小与开颖角度的关系

研究表明,浆片吸水膨大促进开颖^[15-16],而 MeJA 也促进开颖。为初步分析浆片大小是否与开颖角度有关,MeJA 是否会对浆片大小产生影响,在处理的第 2 天(始花后 3 d),分别选择 MeJA 处理穗和对照穗的中部开颖角度大/小的小花浆片,于体视镜下拍摄其表型,结果如图 4 所示。

处理和对照浆片大小形态在花后 3 d 没有明显差异,MeJA 处理和对照自开颖角度大的浆片(图 4A、4C)与开颖角度小的浆片(图 4B、4D)也没有明显差异。

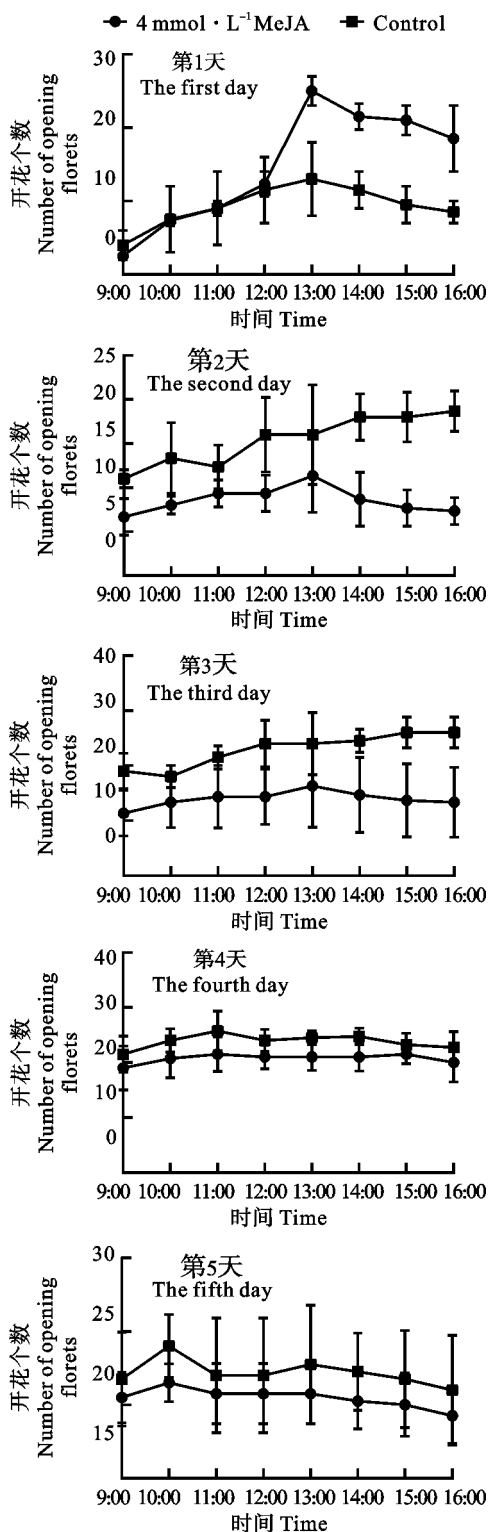


图 2 MeJA 处理和对照下 BS141 每日开花动态

Fig. 2 Flowering dynamic of BS141 att different time of day under MeJA treatment and control

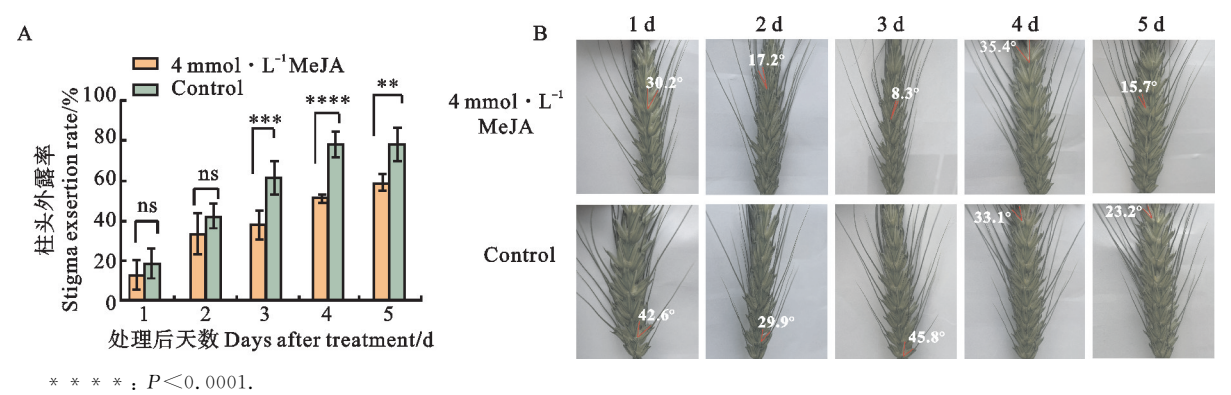


图 3 MeJA 处理和对照下 BS141 柱头外露率(A)及开颖角度(B)的变化

Fig. 3 Changes of stigma exertion rate (A) and glume opening angle (B) of BS141 under MeJA and control

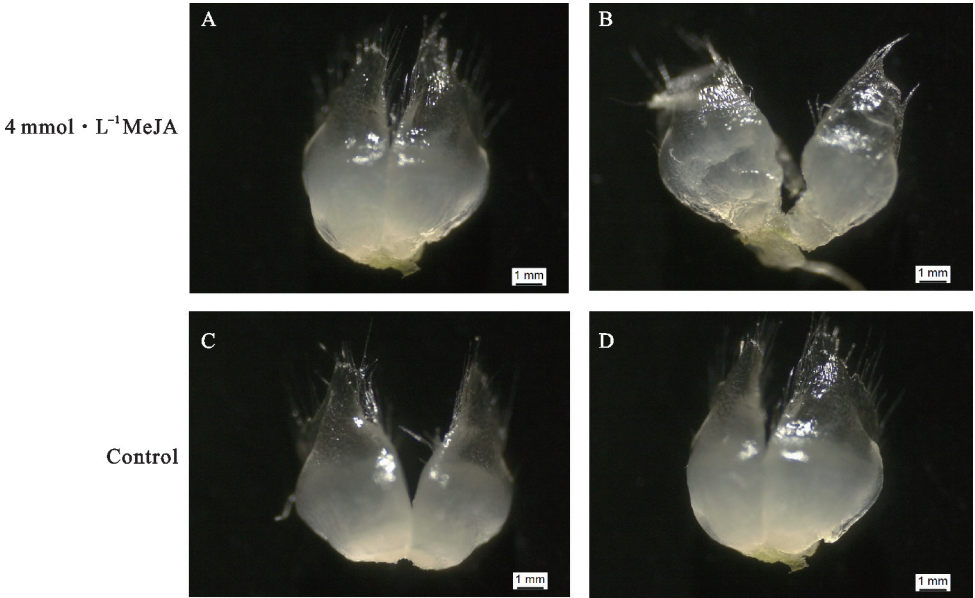
表 3 MeJA 处理后 5 d 统计的 BS141 最大开颖角度

Table 3 Maximum glume opening angle of BS141 during the continuous 5 days after MeJA treatment

处理 Treatment	不同时间的开颖角度 Glume opening angle at different statistical time/°				
	1	2	3	4	5
MeJA	30.2	17.2	8.3	35.4	15.7
Control	42.6	29.9	45.8	33.1	23.2

2.6 MeJA 处理对 BS141 异交结实的影响

对 BS141 于处理当天进行人工饱和授粉,结果表明,MeJA 处理后 BS141 的异交结实率(73.63%)显著提高,比对照(48.86%)增加了 24.77 个百分点。结合图 1 所示,处理当天开颖率最高,授粉后结实率高,说明喷施 MeJA 可增加开颖率,进而提高不育系异交结实率。



A 和 B:MeJA 处理下 BS141 同一穗位开颖角度大(A)和小(B)的小花浆片;C 和 D:对照下 BS141 同一穗位开颖角度大(C)和小(D)的小花浆片。

A and B:The lodicule with large(A) and small(B) opening angles at the same spikelet of BS141 under MeJA treatment; C and D:The lodicule with large(C) and small(D) opening angles at the same spikelet of BS141 under control.

图 4 MeJA 处理和对照下 BS141 浆片形态

Fig. 4 Lodicule morphology of BS141 under MeJA treatment and control

3 讨论

不育系通过颖壳的开闭来接受外来花粉而受精结实,所以开颖情况对异交结实至关重要。不育系开颖受温度、光照等环境影响,在制种过程中

也会因外界环境变化导致异交结实不稳定而影响制种产量,因此通过化学手段调控开颖是不育系花时调控的一个重要手段之一^[18-20]。本研究对不育系 BS141 进行 4 mmol · L⁻¹ MeJA 浸穗处理,结果发现 MeJA 能诱导其在 1 d 内迅速开颖,提高

开花集中度,使不育系异交结实率提高 24.77 个百分点,这与曾晓春等^[10]、张旺等^[11]和王依明等^[12]在水稻中所报道的结论一致。本研究中,未经 MeJA 处理的不育系日开花量呈先升后降的趋势,与前期研究结果一致^[21],而 MeJA 处理后不育系第 1 天大量开花,第 2 天开花数量显著降低,随后又逐渐升高,呈先降后升的趋势,关于这一开花规律在小麦中未见报道。水稻中研究发现,MeJA 处理后不育系在第 1 天迅速开花,随后开花数量呈逐渐降低的趋势^[17]。由此可见,MeJA 处理可有效提高不育系异交结实率,但其只能诱导不育系在短时间内迅速开颖,需在开颖期间及时授粉。这一有效措施可适当弥补不育系和恢复系花期不遇的问题,也是开花后期遇雨的应急解决办法。

本研究中,MeJA 处理未对浆片形态造成影响,且开颖角度大/小的小花浆片也没有显著差异。高庆荣等^[22]研究表明,CHA 小麦不育系在开颖始期浆片吸水膨大,导致开颖角度较大,但浆片最大时颖壳开张角度并不是最大,而不育系开颖角度最大时浆片已大量失水,说明雄性不育小麦颖壳的开张及维持不仅是浆片的作用。本研究重点观察了花后第 3 天的小花浆片形态,关于花期不同阶段开颖角度与浆片大小的关系后续需进一步研究。此外,本研究发现,MeJA 处理后,不育系柱头外露率降低,而水稻上 MeJA 处理能提高不育系柱头外露率^[23]。这可能归因于小麦是短日低温不育,而水稻是长日高温不育,小麦与水稻不育系开花习性可能有一定的差异。另外本研究只针对 BS141 小麦光温敏不育系进行了相关研究,不同材料间也可能存在一定差异,后续有必要对不同材料进行进一步研究。

参考文献:

[1]赵昌平.中国杂交小麦研究现状与趋势[J].中国农业科技导报,2010,12(2):5.
ZHAO C P. Status and trends of hybrid wheat research in China [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2010,12(2):5.
[2]赵昌平.中国二系杂交小麦研究进展与展望[J].科学通报,2022,67(26):3119.
ZHAO C P. Research progress and prospects of two-line hybrid wheat in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67 (26):3119.
[3]张爱民,黄铁城.小麦杂种优势利用途径与研究进展[J].作物杂志,1997(5):16.

ZHANG A M, HUANG T C. Utilization ways and research progress of wheat heterosis [J]. *Crops*, 1997(5):16.
[4]杨卫兵,高建刚,孙辉,等.小麦光温敏核雄性不育系开颖和柱头外露特征及其对异交结实能力的影响[J].麦类作物学报,2022,42(8):932.
YANG W B, GAO J G, SUN H, et al. Characteristics of glume opening and stigma exertion and their effects on outcrossing seed-setting rate in photo-thermo-sensitive genic male sterile lines of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022,42(8): 932.
[5]李宏生,李绍祥,赵红,等.开颖和柱头外露对小麦温光敏雄性核不育系异交结实的影响[J].麦类作物学报,2015,35 (12):1671.
LI H S, LI S X, ZHAO H, et al. Effects of glume opening and stigma exertion on outcrossing seed-setting of wheat thermo-photo-sensitive genic male sterile lines [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015,35(12):1671.
[6]邓则勤,黄显波,林成豹,等.水稻新育三系不育系特征特性观察与分析[J].福建稻麦科技,2019,37(1):5.
DENG Z Q, HUANG X B, LIN C B, et al. Observation and analysis of characteristics in new rice CMS line [J]. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2019,37(1):5.
[7]宗寿余,吕川根,林煜,等.水稻光温敏核不育系的开花习性研究[J].金陵科技学院学报,2005,21(4):56.
ZONG S Y, LÜ C G, LIN Y, et al. Studies on flowering habits of photo-thermo-sensitive genic male sterile lines of rice [J]. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 2005,21(4):56.
[8]杨友才,何觉民,刘雄伦.两个小麦光温敏不育系的育性与异交特性研究[J].湖南农业大学学报(自然版),1995,21(6): 550.
YANG Y C, HE J M, LIU X L. A study on the fertility expression and some characters of cross pollination of two photoperiod(thermo)-sensitive genic male-sterile wheat lines [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 1995,21(6):550.
[9]张廷松,赵福胜.11个水稻三系不育系的异交特性[J].贵州农业科学,2014,42(8):10.
ZHANG T S, ZHAO F S. Outcrossing characteristics of 11 new cytoplasm male sterile lines in rice [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014,42(8):10.
[10]曾晓春,周燮.茉莉酸甲酯(MeJA)诱导水稻颖花开放[J].植物学报,1999,41(5):111.
ZENG X C, ZHOU X. Methyl jasmonate induces the opening of spikelets in rice [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1999,41(5):111.
[11]张旺,曾晓春,周燮,等.茉莉酸甲酯在杂交粳稻制种中的应用研究[J].杂交水稻,2000,15(3):18.
ZHANG W, ZENG X C, ZHOU X, et al. Application of methyl jasmonate (MeJA) in hybrid seed production of Japonica rice [J]. *Hybrid Rice*, 2000,15(3):18.
[12]王依明,王冬翼,顾春军,等.茉莉酸甲酯喷施时间对粳型水稻不育系花时诱导效应研究[J].上海农业学报,2015,31

- (6):91.
- WANG Y M, WANG D Y, GU C J, *et al.* Effect of methyl jasmonate spraying time on japonica rice sterile lines' flowering habit [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2015, 31(6):91.
- [13] 刘淑英, 秦志列, 张风廷, 等. 茉莉酸甲酯与水杨酸对光温敏雄性不育小麦颖花开闭的调控[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(4):593.
- LIU S Y, QIN Z L, ZHANG F T, *et al.* Hormonal regulation of glume opening and closure of photo-thermo-sensitive male sterility wheat by methyl jasmonate and salicylic acid [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(4):593.
- [14] 缪晨琦, 秦志列, 赵昌平, 等. 不同时期茉莉酸甲酯处理对光温敏雄性不育小麦 BS366 颖花开放的诱导效应[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(4):564.
- MIAO C Q, QIN Z L, ZHAO C P, *et al.* Effect of methyl jasmonate on the induction of glume opening in photo-thermo-sensitive male sterile wheat line BS366 under different stages [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(4):564.
- [15] 王 忠, 顾蕴洁, 高煜珠. 水稻开颖机理的探讨Ⅲ: 浆片的结构及其在开颖过程中内含物的变化[J]. 作物学报, 1991, 17(2):96.
- WANG Z, GU Y J, GAO Y Z. Studies on the mechanism of the anthesis of rice Ⅲ: Structure of the lodicule and changes of its contents during flowering [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1991, 17(2):96.
- [16] 王 忠, 顾蕴洁, 高煜珠. 水稻开颖机理的探讨 V: 不育系与可育系浆片和花丝结构的比较[J]. 作物学报, 1994, 20(1):13.
- WANG Z, GU Y J, GAO Y Z. Studies on the mechanism of the anthesis of rice V: Comparison of lodicule and filament structure between sterile line and fertile line [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(1):13.
- [17] 王 义. 茉莉酸甲酯调节杂交水稻制种父母本花时、花期提高制种产量的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- WANG Y. Application of MeJA in control of rice florescence and flowering time in hybrid rice seed production for higher seed yield [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005.
- [18] 何永明. 内源茉莉酸(JA)在水稻颖花开放中的作用[D]. 南昌: 江西农业大学, 2012.
- HE Y M. The role of endogenous jasmonic acid in floret opening of rice [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2012.
- [19] 闫志强, 徐 海, 马作斌, 等. 籼稻与粳稻花时对茉莉酸甲酯(MeJA)响应的敏感性差异[J]. 中国农业科学, 2014, 47(13):2529.
- YAN Z Q, XU H, MA Z B, *et al.* Differential response of floret opening to exo-methyl jasmonate between subsp. Indica and subsp. Japonica in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(13):2529.
- [20] 林俊城, 田小海, 殷桂香, 等. 人工调节籼型杂交水稻不育系花时的研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8):2474.
- LIN J C, TIAN X H, YIN G X, *et al.* Artificial regulation of the flowering time of CMS lines in indica hybrid rice seed production [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8):2474.
- [21] 岳洁茹, 秦志列, 侯起岭, 等. BS 型小麦光温敏雄性不育系开颖规律研究[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(10):1254.
- YUE J R, QIN Z L, HOU Q L, *et al.* Study on glume opening changing patterns of BS type photo-thermo sensitive male sterile lines of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(10):1254.
- [22] 高庆荣, 于金凤, 刘保申. 不同小麦不育类型开颖特性的初步探讨[J]. 作物学报, 2004, 30(6):622.
- GAO Q R, YU J F, LIU B S. Primary studies on character of different male sterile wheat floret opening [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(6):622.
- [23] 杨 虎. 茉莉酸甲酯及其复配剂在杂交水稻制种中的应用[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014.
- YANG H. Application of methyl jasmonate and its compound agent in hybrid rice seed production [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014.