

水杨酸对小麦温敏雄性育性的影响

刘海英¹,黄康兴¹,茹振钢²,陈向东²,董娜²,
陈芸¹,孔陈源¹,苏晨¹,吕怡婷¹,王亚楠²

(1.河南师范大学生命科学学院,河南新乡 453007; 2.河南科技学院小麦中心,河南新乡 453003)

摘要:为探究水杨酸(salicylic acid,SA)对小麦温敏雄性育性的影响,以小麦温敏雄性不育系 BNS366 及其近等基因系郑麦 366 为试验材料,于 2021—2022 和 2022—2023 年生长季,在正常秋季播种(10 月 10 日—10 月 13 日)和晚播(12 月 1 日)条件下,自小麦雌雄蕊原基分化期至开花期,采用酶联免疫法测定了幼穗和花药中内源 SA 含量;于 2023—2024 年生长季,自药隔期至开花期前,采用 0、0.1、0.5、1.0、1.5 和 2.0 mmol·L⁻¹ SA 水溶液对小麦进行全株喷施处理,用 I₂-KI 法测定了花粉可育率,用国内法和国际法测定了自交结实率。结果表明,在 2021—2022 和 2022—2023 年生长季,在正常秋季播种(2021—2022 和 2022—2023)和 2021—2022 年生长季晚播条件下 BNS366 花粉全不育或高不育,其幼穗中 SA 含量在雌雄蕊原基分化期至四分体时期低于同播期的郑麦 366,花药中 SA 含量在单核中位期和三核期相比同播期的郑麦 366 较高;在 2022—2023 年生长季晚播条件下,BNS366 花粉可育,其药隔期幼穗和单核中位期花药中 SA 含量均高于郑麦 366。在 2023—2024 年生长季,与 CK(0 mmol·L⁻¹ SA)相比,2.0 mmol·L⁻¹ SA 处理下,正常秋季播种和晚播的郑麦 366 的国际法自交结实率均显著提高(增幅分别为 28.16 和 31.25 个百分点),正常秋季播种的 BNS366 的国内法和国际法自交结实率也均显著提高(增幅分别为 1.25 和 1.76 个百分点);在 0.5 mmol·L⁻¹ SA 处理下,晚播的 BNS366 的花粉可育率降低 37.97 个百分点,变化显著;在两个播期下,郑麦 366 和 BNS366 其他浓度 SA 处理的上述 3 个指标与 CK 差异均不显著。由此说明,在雌雄蕊原基分化期至四分体时期 BNS366 幼穗中内源 SA 含量的不足可能促使其雄性不育;外源 SA 对郑麦 366 可育植株和 BNS366 不育植株的自交结实率可能具有升高效应,对 BNS366 可育植株的花粉可育率具有降低效应。

关键词:小麦;温敏雄性不育;水杨酸;花粉可育率;自交结实率

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)09-1268-08

Effects of Salicylic Acid on Thermo-Sensitive Male Fertility of Wheat

LIU Haiying¹,HUANG Kangxing¹,RU Zhengang²,CHEN Xiangdong²,DONG Na²,CHEN Yun¹,
KONG Chenyuan¹,SU Chen¹,LÜ Yiting¹,WANG Yanan²

(1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China;

2. Center of Wheat Research, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: To explore the effect of salicylic acid(SA) on male fertility of thermo-sensitive genic male sterile wheat line BNS366, BNS366 and its near-isogenic line Zhengmai 366 were used as materials, which were sown under conditions of normal sowing in autumn(from October 10 to October 13) and late sowing(on December 1), respectively. In the growth seasons of 2021—2022 and 2022—2023, indirect enzyme-linked immunosorbent assays(ELISA) was used to detect the endogenous SA content in young panicles and anthers from the differentiation stage of pistil and stamen primordium to anthesis. In the growth season of 2023—2024, the wheat was sprayed with 6 different concentrations(0, 0.1,

收稿日期:2024-08-28 修回日期:2024-10-29

基金项目:河南省科技厅科技攻关项目(222102110216);河南省重大科技专项(221100110300);国家自然科学基金项目(31701502)

第一作者 E-mail:2217861000@qq.com(刘海英)

通讯作者 E-mail:rzgh58@163.com(茹振钢)

0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mmol · L⁻¹) of SA solution. The SA treatments began from the connective stage that the length of the spike was 1.0 cm and stopped just before anthesis. I₂-KI method was used to detect frequency of fertile pollen grains at anthesis stage. National and international methods were used to determine the self-seeding rate. The results showed that in the growth seasons of 2021—2022 and 2022—2023, compared with Zhengmai 366 sown on the same date, under the conditions of normal sowing in autumn (in the growth seasons of 2021—2022 and 2022—2023) and late sowing (in the growth season of 2021—2022), the content of SA in young panicles of BNS366 (completely or high level of male sterility) was lower from the differentiation stage of pistil and stamen primordium to the tetrad stage, and higher in anthers at the uninucleate stage with small-vacuole and the trinucleate stage, and for BNS366 (fertility) under the conditions of late sowing (in the growth season of 2022—2023), the SA content was higher in panicles at the connective stage and in anthers at the uninucleate stage with small-vacuole. In the growth season of 2023—2024, under the conditions of normal sowing in autumn and late sowing, under the treatment of 2.0 mmol · L⁻¹ SA, the international self-seeding rate of Zhengmai 366 was significantly increased by 28.16 and 31.25 percentage points than CK (0 mmol · L⁻¹), respectively, and under the conditions of normal sowing in autumn, the national and international self-seeding rate of BNS366 was significantly increased by 1.25 and 1.76 percentage points than CK, respectively. However under the conditions of late sowing, under the treatment of 0.5 mmol · L⁻¹ SA, the frequency of fertile pollen grains of BNS366 was significantly decreased by 37.97 percentage points than CK. Under the two sowing conditions, there were no significant differences in the three indices above mentioned of Zhengmai 366 and BNS366 under others SA treatments compared with CK. It was indicated that the lack of SA from the differentiation stage of pistil and stamen primordium to the tetrad stage might promote the occurrence of male-sterility; furthermore the exogenous SA increased the self-seeding rate of Zhengmai 366 (fertility) and BNS366 (male sterility), and decreased the frequency of fertile pollen grains of BNS366 (fertility).

Keywords: Wheat (*Triticum aestivum* L.); Thermo-sensitive genic male sterile (TGMS); Salicylic Acid; Frequency of fertile pollen grains; Self-seeding rate

小麦是中国主要粮食作物之一,河南是中国小麦主产区^[1]。光温敏雄性不育小麦是采用“二系法”杂交小麦的核心种质资源^[2]。小麦温敏雄性不育系 BNS 在河南新乡正常秋季播种(9月23日至10月17日时)能形成雄性全不育植株,可用于杂交种的配制;晚播(11月18日后)时其植株国际法自交结实率可恢复至 17.4%~56.2% (2007—2008 年生长季),雄性可育,可用于不育系的繁殖^[3-4]。在河南春季倒春寒天气出现的时段,低温持续时间和程度在年际间均有变化,会诱发 BNS 育性波动,因此如何对其育性进行有效调控是该地区杂交小麦高效制种体系中需要解决的重要科学问题。BNS366 由 BNS 转育而成,二者具有相似的育性转换规律,且 BNS366 雄性不育特性更加稳定,在杂交小麦制种中日益发挥重要的作用^[5]。前人围绕 BNS 系列小麦播期、生育期温度变化与育性表现的关系等方面开展了大量研究^[3-6],

但有关有效控制其育性波动的探索则相对薄弱。

水杨酸 (salicylic acid, SA) 可诱导并加强抗氰呼吸而表现为生热效应,植物可通过 SA 浓度变化来适应低温环境^[7-8],小麦则可以此提高拔节期的抗寒性^[9];SA 也影响植物的生殖发育和次生代谢,且与茉莉酸 (jasmonate, JA) 存在拮抗或协同效应^[10-12]。BNS366 的雄性不育与 JA 有关。研究发现,BNS366 雄性不育发生过程中存在内源 MeJA 不足的现象^[13],且在 2020—2021 年,喷施 100 μmol · L⁻¹ MeJA 可大幅度改善 BNS366 不育植株的雄性育性,对郑麦 366 和 BNS366 可育植株雄性育性则有相反的效应^[14]。BNS366 的雄性不育是否与 SA 有关,与 MeJA 相关前期研究结果相似还是相反,目前尚不清楚。本研究以 BNS366 和郑麦 366 为试验材料,在不同播期条件下,在 2021—2022 和 2022—2023 年生长季检测了花粉可育率、自交结实率和内源 SA 含量,在

2023—2024 年生长季,在外源 SA 喷施处理下,检测了花粉可育率和自交结实率,以期为 BNS366 雄性不育机制理论和采用化学调控手段降低其雄性育性波动风险提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为小麦温敏雄性不育系 BNS366 和高产小麦品种郑麦 366(与 BNS366 互为近等基因系),种子由河南科技学院小麦中心提供,在 2021—2022、2022—2023 和 2023—2024 年连续 3 个生长季种植在河南师范大学生命科学学院小麦试验田,每年采用正常秋季播种和晚播两个播期,其中三年正常播期分别为 10 月 13、11 和 10 日,晚播均为 12 月 1 日。小区面积 4.5 m²(3 m×1.5 m),行距 25 cm,株距 10 cm。在同一播期下,2021—2022 和 2022—2023 年生长季每种小麦材料种植 6 个小区,2023—2024 年生长季每种材料种植 10 个小区。小麦按一般大田方式管理。

1.2 试验设计

SA 购自上海麦克林生化科技有限公司,纯度为 99.5%。试验中 SA 水溶液设 0、0.1、0.5、1.0、1.5 和 2.0 mmol·L⁻¹ 6 个喷施浓度水平,分别以 CK、SA_{0.1}、SA_{0.5}、SA_{1.0}、SA_{1.5} 和 SA_{2.0} 表示。试验采用随机区组设计,每个浓度喷施 3 行,每个处理重复 3 次。在 2024 年春季,对不同播期材料,从药隔期开始(幼穗长度约 1 cm)至开花期前,每 3 d 进行一次全株喷施处理,喷施量为 100 mL·m⁻²。各处理均以中性洗涤剂(0.5%,v/v)为助剂,以便溶液在叶片上的粘附。喷施 SA 时,在处理区两侧分别用 3.6 m²(3 m×1.2 m)塑料薄膜将处理区与其他区域分隔开,以避免不同处理间相互干扰。

1.3 测定项目和方 法

1.3.1 内源 SA 含量的测定

在 2021—2022 和 2022—2023 年两个生长季,参照于振文、崔金梅等^[15-16]方法确定小麦幼穗发育时期,选择主茎穗或大分蘖穗,在雌雄蕊原基分化期(I 期)、药隔期(II 期)、花粉母细胞期(III 期)、二分体期(IV 期)和四分体期(V 期)取幼穗,在单核中位期(VI 期)、单核靠边期(VII 期)、二核期(VIII 期)、三核期(IX 期)和开花期(X 期)取穗中部小穗第 1、第 2 位小花的花药,液氮冷冻 30 min 后转入-80℃保存备用。采用间接酶联免疫(en-

zyme linked immunosorbent assay,ELISA)法测定内源 SA 含量,试验所用试剂盒由江苏酶免生物科技有限公司提供。

1.3.2 花粉可育率测定

参照刘海英等^[14]的方法收集、固定和保存代表性植株的主茎穗或大分蘖穗(10 株,每单株 1 个麦穗)。在所收集的样品中选择 3 个代表性穗(分别来自 3 个不同单株),采用全穗取粉法,用 I₂-KI 法检测花粉育性并计算花粉可育率(花粉可育率=(可育花粉数/花粉总数)×100%)^[17]。参照花粉不育率分级标准判断其花粉不育程度:花粉可育率为 0 时全不育;花粉可育率小于 5% 时高不育;花粉可育率为 6%~30% 时半不育;花粉可育率为 31%~50% 时低不育;花粉可育率大于 50% 时正常可育^[14]。

1.3.3 自交结实率测定

参照刘海英等^[14]方法,用国内法和国际法检测 10 个代表性单株的自交结实率^[5]。每个单株选 2 个样品穗,检测结果取平均值,10 个单株数据再取平均值。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2018 和 SPSS 27 进行数据处理、作图和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同播期下郑麦 366 和 BNS366 的育性表现

在 2021—2022 和 2022—2023 年生长季,在不同播期条件下,郑麦 366 的花粉均正常可育,能正常结实。BNS366 的花粉在正常秋季播种条件下两年全不育,不能结实;在晚播条件下,花粉可育率在 2021—2022 年生长季高不育,几乎不能结实,在 2022—2023 年生长季花粉可育率恢复至正常可育水平,结实能力提高(表 1)。这表明,郑麦 366 和 BNS366 之间育性差异明显。

2.2 郑麦 366 和 BNS366 内源 SA 含量的动态变化

在 2021—2022 年生长季,郑麦 366 幼穗和花药中 SA 含量在不同播期条件下基本均呈先增后降再回升的变化趋势。在正常秋季播种条件下,BNS366 的内源 SA 含量在 I 期较高,随之下降,在 III 至 V 期维持在较低水平,之后逐渐波动回升;在晚播条件下,内源 SA 含量在 I 期较高,II 期大幅下降,在 II 至 V 期维持在较低水平,在 VI 期后开始升高,在 VII 至 X 期维持在较高水平(图 1)。与晚播相比,在正常秋季播种下,郑麦 366 和 BNS366

表 1 小麦育性表现(2021—2022 和 2022—2023 年)
Table 1 Wheat fertility performance(2021—2022 and 2022—2023)

| 年份 Year | 材料 Material | 播种期(月/日) Sowing date (month/day) | 花粉可育率 Frequency of fertile pollen grains/% | 自交结实率 Self-seeding rate/% | |
|------------|------------------------|--|---|---------------------------|----------------------|
| | | | | 国内法 National | 国际法 International |
| 2021—2022 | 郑麦 366 Zhengmai 366 | 10/13 | 67.81a | 69.27a | 101.25a |
| | | 12/1 | 73.60a | 80.90a | 127.00a |
| | BNS 366 | 10/13 | 0.00b | 0.00b | 0.00b |
| | | 12/1 | 1.63b | 0.59b | 3.78b |
| 2022—2023 | 郑麦 366 Zhengmai 366 | 10/11 | 86.99a | 65.63b | 132.29a |
| | | 12/1 | 86.87a | 89.02a | 143.57a |
| | BNS 366 | 10/11 | 0.00b | 0.00d | 0.00c |
| | | 12/1 | 73.74a | 20.61c | 36.56b |

同一年份同列数值后的不同字母表示材料间差异显著($P < 0.05$)。

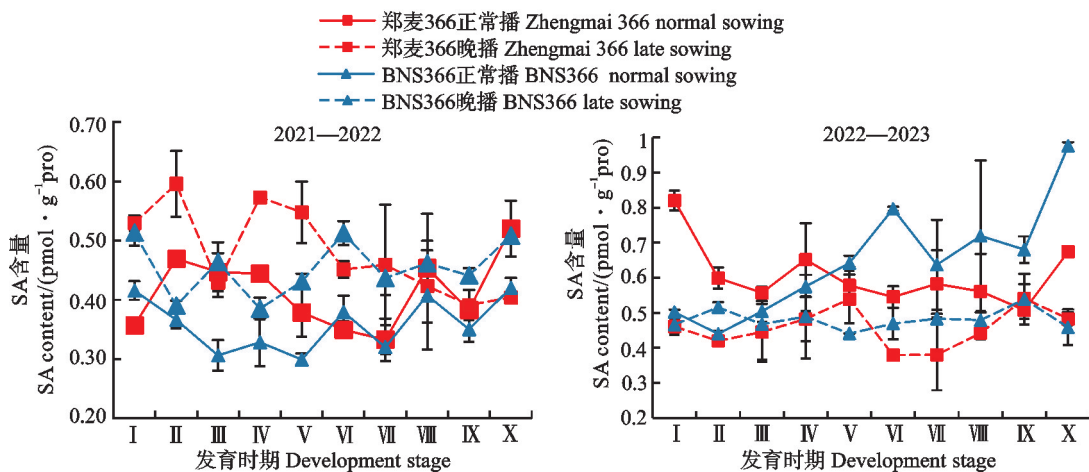
Different letters following the values in the same column in the same year indicate significant differences among materials at 0.05 level.

的内源 SA 含量均较低。在正常秋季播种条件下,与郑麦 366 相比,BNS366 的内源 SA 含量在 I 期显著提高,在 II 期、III 期、IV 期和 X 期均显著降低,其他时期变化不显著;在晚播条件下,与郑麦 366 相比,BNS366 的内源 SA 含量在 II 期、IV 期和 V 期均显著降低,在 VI 期和 X 期均显著提高,其他时期变化不显著。

在 2022—2023 年生长季,郑麦 366 的内源 SA 含量在不同播期条件下基本均呈“W”形变化趋势;BNS366 的内源 SA 含量在正常秋季播种条件下与郑麦 366 变化规律一致,在晚播条件下变化相对平稳(图 1)。与晚播相比,正常秋季播种条件下郑麦 366 和 BNS366 的内源 SA 含量较高(BNS366 在 II 期较低除外)。在正常秋季播种条件下,与郑麦 366 相比,BNS366 的内源 SA 含量

在 I 期和 II 期显著降低,在 VI 期、IX 期和 X 期均显著提高,其他时期变化不显著;在晚播条件下,与郑麦 366 相比,BNS366 的内源 SA 含量在 II 期和 VI 期均显著提高,其他时期变化不显著。

综合以上结果,与晚播条件相比,在正常秋季播种条件下,郑麦 366 和 BNS366 的内源 SA 含量在 2021—2022 年生长季较低,在 2022—2023 年生长季则较高。郑麦 366 的 I 至 V 期内源 SA 含量在 2021—2022 和 2022—2023 年生长季正常秋季播种条件以及 2021—2022 年生长季晚播条件下均存在刺激性增长现象;在三个生长季下,与同播期的郑麦 366 相比,BNS366 的 SA 含量在 I 至 V 期均较低,在 VI 和 IX 期均较高。在 2022—2023 年生长季晚播条件下,与郑麦 366 相比,BNS366 的 SA 含量在 II 和 VI 期均较高。



I 至 V 期所取样品为幼穗,其余时期取样花药。

The samples are young ears collected from stage I to stage V, and anthers were collected at the other stages.

图 1 郑麦 366 和 BNS366 幼穗和花药中的内源 SA 含量的动态变化(2021—2022 和 2022—2023 年)

Fig. 1 Dynamic changes of SA content in young ears and anthers of Zhengmai 366 and BNS 366(2021—2022 and 2022—2023)

2.3 外源 SA 对郑麦 366 和 BNS366 雄性育性的影响

在 2023—2024 年生长季,在正常秋季播种条件下,郑麦 366 的 CK 和 SA 处理花粉正常可育,能正常结实(表 2)。SA 处理下郑麦 366 的花粉可育率和国内法自交结实率与 CK 均无显著差异,但随 SA 浓度的升高,其花粉可育率呈先升高再下降的轻微变化趋势,其中 SA_{0.1} 处理的花粉可育率比 SA_{1.5} 处理提高了 15.07 个百分点,差异达到显著水平;SA_{2.0} 处理的国际法自交结实率比 CK 提高了 28.16 个百分点,差异显著,其他 SA 处理的国际法自交结实率与 CK 差异均不显著。

在晚播条件下,郑麦 366 的 CK 和 SA 处理

花粉正常可育,能正常结实。SA 处理下郑麦 366 的花粉可育率和国内法自交结实率与 CK 均无显著差异,但其国内法自交结实率随着外源 SA 浓度的升高呈先下降再回升的变化趋势,其中国内法自交结实率以 SA_{0.1} 处理最低,SA_{1.5} 处理最高;SA_{1.5} 处理分别比 SA_{0.1}、SA_{0.5} 和 SA_{1.0} 处理提高了 21.78、17.49 和 15.29 个百分点,SA_{2.0} 处理分别比 SA_{0.1} 和 SA_{0.5} 处理提高了 18.65 和 14.36 个百分点,差异均达到显著水平;国际法自交结实率的处理间变化趋势与国内法自交结实率基本一致,SA_{2.0} 处理比 CK、SA_{0.1}、SA_{0.5} 和 SA_{1.0} 处理的国际法自交结实率分别提高了 31.25、45.97、31.28 和 27.68 个百分点,SA_{1.5} 处理比 SA_{0.1}

表 2 不同 SA 处理下郑麦 366 和 BNS366 花粉可育率和自交结实率(2023—2024 年)
Table 2 Frequency of fertile pollen grains and self-seeding rate of Zhengmai 366 and BNS366 under different SA treatments(2023—2024)

| 材料 Material | 播种期 Sowing date/ Month/Day | 处理 Treatment | 花粉可育率 Frequency of fertile pollen grains/% | 自交结实率 Self-seeding rate/% | |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------|--|---------------------------|----------------------|
| | | | | 国内法 National | 国际法 International |
| 郑麦 366 Zhengmai366 | 10/10 | CK | 93.63ab | 63.02a | 103.22b |
| | | SA _{0.1} | 96.31a | 67.72a | 100.54b |
| | | SA _{0.5} | 94.35ab | 64.78a | 103.86b |
| | | SA _{1.0} | 90.39ab | 58.54a | 102.19b |
| | | SA _{1.5} | 81.24b | 64.43a | 113.42b |
| | | SA _{2.0} | 89.42ab | 65.36a | 131.38a |
| | 12/1 | CK | 97.25a | 81.18abc | 131.62bc |
| | | SA _{0.1} | 95.02a | 71.35c | 116.90c |
| | | SA _{0.5} | 94.88a | 75.64c | 131.59bc |
| | | SA _{1.0} | 96.23a | 77.84bc | 135.19bc |
| | | SA _{1.5} | 96.74a | 93.13a | 150.42ab |
| | | SA _{2.0} | 88.11a | 90.00ab | 162.87a |
| BNS366 | 10/10 | CK | 0.00a | 0.42b | 0.56b |
| | | SA _{0.1} | 0.00a | 0.00b | 0.00b |
| | | SA _{0.5} | 1.32a | 0.00b | 0.00b |
| | | SA _{1.0} | 0.00a | 0.00b | 0.19b |
| | | SA _{1.5} | 0.00a | 0.00b | 0.39b |
| | | SA _{2.0} | 0.63a | 1.25a | 1.76a |
| | 12/1 | CK | 92.65a | 30.67a | 60.16a |
| | | SA _{0.1} | 83.71ab | 37.46a | 57.28a |
| | | SA _{0.5} | 54.68b | 34.50a | 53.73a |
| | | SA _{1.0} | 70.81ab | 32.47a | 58.87a |
| | | SA _{1.5} | 65.50ab | 38.42a | 68.50a |
| | | SA _{2.0} | 81.03ab | 26.79a | 54.58a |

同一材料同一播期同列数据后的不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Different letters following the values in the same columns under the same sowing date for the same material indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

处理提高了 33.52 个百分点,差异均达到显著水平,其他 SA 处理的国际法自交结实率与 CK 差异均不显著。

在正常秋季播种条件下,BNS366 的 CK 和 SA 处理花粉全不育或高不育,不能结实或几乎不能结实。外源 SA 处理下 BNS366 的花粉可育率与 CK 差异均不显著;SA_{2.0} 处理的国内法自交结实率和国际法自交结实率分别比 CK 提高了 0.83 和 1.20 个百分点,比其他 SA 处理分别提高了 1.25 和 1.76 个百分点,差异达到显著水平,其他 SA 处理的国内法自交结实率和国际法自交结实率与 CK 差异均不显著。

在晚播条件下,BNS366 的 CK 和 SA 处理花粉正常可育,部分恢复结实能力。随 SA 处理浓度的升高,BNS366 的花粉可育率呈先降低再升高的基本变化趋势;与 CK 相比,SA_{0.5} 处理的花粉可育率降低了 37.97 个百分点,差异达到显著水平,其他 SA 处理的花粉可育率与 CK 差异均不显著;外源 SA 处理下 BNS366 的国内法自交结实率和国际法自交结实率与 CK 均无显著差异。

以上结果表明在 2023—2024 年生长季,SA_{2.0} 处理对在不同播期条件下郑麦 366 的国际法自交结实率,以及在正常秋季播种条件下 BNS366 的国内法自交结实率和国际法自交结实率均具有显著提高效应,可改善其雄性育性。SA_{0.5} 处理对晚播条件下 BNS366 的花粉可育率具有降低效应,可能降低了其雄性育性,外源 SA 对在不同播期条件下郑麦 366 和 BNS366 其他雄性育性指标没有显著调控效应。

3 讨论

3.1 不同生长季郑麦 366 和 BNS366 的雄性育性表现

已有研究指出,BNS 感受低温的敏感部位为发育的幼穗,日最低温度连续 5 d 低于 8 °C 是诱导其彻底不育的条件,在雌雄蕊原基分化期至药隔期对低温敏感性较差;在药隔期至四分体期对低温敏感性极强^[4]。BNS366 具有与 BNS 相似的育性转换规律^[5]。根据新乡日最低气温历史记录 (https://tianqi.2345.com/wea_history/53986.htm),在正常秋季播种条件下,郑麦 366 和 BNS366 在 2021—2022 和 2022—2023 年生长季,在 II 至 III 期均遭遇连续 7~8 d 持续低温刺激(0~7 °C),在 2023—2024 年生长季,则在 I 至 II

期遭遇连续 10 d 且较低温度的低温刺激(0~5 °C);在晚播条件下,2021—2022 年生长季二者在 II 至 III 期遭遇了累计 7 d 的低温刺激(3~7 °C),在 2022—2023 年生长季在 I 至 II 期遭遇了连续 7 d 且较低温度的低温刺激(0~7 °C),在 2023—2024 年生长季则没有遭遇持续时间超过 3 d 的低温刺激。因此,本试验能够基本满足不同材料育性表现的温度要求。

本研究结果显示,在 2021—2022 和 2022—2023 年生长季,在不同播期条件下郑麦 366 的花粉均可育,能正常结实;在正常秋季播种条件下 BNS366 的花粉均全不育,完全丧失结实能力,在晚播条件下,BNS366 的花粉在 2021—2022 年生长季高不育,几乎完全丧失结实能力,在 2022—2023 年生长季则正常可育,结实能力部分恢复,这与已有报道基本一致^[13],与上述决定郑麦 366 和 BNS366 育性表现的日最低气温变化分析结果相吻合。这表明本研究为明确小麦幼穗发育过程中内源 SA 含量的变化建立的实验模型基本安全可靠。需要指出的是,在 2021—2022 年生长季,在不同播期条件下 BNS366 表现出了相似的雄性不育特性,原因可能在于其遭遇了类似的低温刺激,其中在晚播条件下 BNS366 遭遇的低温刺激程度较弱,其雄性育性表现出轻微恢复的现象。

3.2 不同生长季郑麦 366 和 BNS366 内源 SA 含量的动态变化分析

已有研究指出,在 4 °C 低温适应 7 d 条件下,小麦抗寒性的提高伴随着内源 SA 的积累^[18];在遭遇持续低温刺激条件下,BNS366 不育植株的 MeJA 含量不足^[13]。本研究结果显示,在小麦幼穗发育过程中,郑麦 366 在 I 至 V 期出现内源 SA 含量的刺激性增长,BNS366 全不育或高不育植株则出现内源 SA 含量不足的现象,这与已有研究结果相一致或类似,可能与 BNS366 雄性不育的发生存在密切关系,且和 MeJA 的含量变化之间存在协同效应,对此尚待进一步研究。本研究还发现,BNS366 不育植株 SA 含量在 VI 和 VII 期较高,BNS366 可育植株 SA 含量则在 II 和 VI 期较高,这与 BNS 是一个具有高晚霜冻抗性不育系材料的研究结果相一致^[19]。

3.3 外源 SA 对郑麦 366 和 BNS366 雄性育性的影响

本试验结果显示,在 2023—2024 年生长季,在不同播期条件下郑麦 366 均可育;在正常秋季

播种条件下 BNS366 的花粉全不育,结实能力极低但未达到全不育水平,在晚播条件下,BNS366 的花粉正常可育,结实能力部分恢复,与 2022—2023 年生长季结果基本一致。这表明本研究为明确外源 SA 对郑麦 366 和 BNS366 雄性育性的影响建立的实验模型基本安全可靠。在 2023—2024 年生长季,在正常秋季播种条件下,BNS366 尽管在 I 至 II 期遭遇连续 10 d 且较低温度的低温刺激(0~5 °C),是在上述 3 个年份中持续时间最长,低温程度最强的时段,但与 2021—2022 年生长季晚播条件下 BNS366 表现出相似的雄性育性特征,并未达到 2021—2022 和 2022—2023 年两个生长季在正常秋季播种条件下 BNS366 完全丧失结实能力的水平,意味着 BNS366 对低温的敏感性在 I 至 II 期较弱,在 II 至 III 期较强,这与已有研究结果相一致^[4]。

SA 处理能够有效提高拔节期田间小麦的抗寒性,增加其株高、单茎干重和产量^[9]。SA 可显著影响黄瓜的性别表达,抑制雌花分化,并促进较低的节位上分化雄花^[20]。本试验基于上述 3.1 和 3.2 部分分析结果,在 2021—2022 和 2022—2023 年两个生长季,郑麦 366 和 BNS366 在幼穗发育的 II 至 III 期遭遇持续低温刺激条件下,郑麦 366 在 I 至 V 期幼穗中出现内源 SA 含量的刺激性增长,BNS366 则缺失了这种能力并可能导致其不育,因此在 2023—2024 年生长季设计了外源 SA 喷施试验,处理时间从 II 开始,至 X 期停止,但在此年,在正常秋季播种条件下郑麦 366 和 BNS366 在 I 至 II 期遭遇持续低温刺激,在晚播条件下二者遭遇散发低温刺激,SA 处理对在不同播期条件下郑麦 366 和在正常秋季播种条件下 BNS366 的花粉可育率均无显著调控效应,这可能与 SA 处理的开始时间晚于持续低温刺激时段有关;但 SA 处理对这三个生长季的国际法自交结实率均有显著提高效应,在正常秋季播种条件下 BNS366 的国内法自交结实率与 CK 相比也有显著提高,这与已有研究中 SA 能够改善小麦抗寒性的研究结果基本一致^[9],可能与 SA 对三个生长季雄性育性其他方面或雌蕊的发育改善有关,如果将 SA 处理的时间提早至 I 期以前,可能对小麦的雄性育性改善效果更好,对此尚待进一步研究。SA_{0.5} 处理对在晚播条件下 BNS366 的花粉可育率具有显著降低效应,与外源 SA 处理对冷胁迫下水稻幼苗生长存在“低促高抑”的效应

相一致^[21],与前期研究中 100 μmol·L⁻¹ MeJA 处理对在晚播条件下 BNS366 可育植株花粉可育率和自交结实率的降低效应相似^[14],原因可能在于在晚播条件下 BNS366 自身内源 SA 含量可以满足或部分满足其生长发育的需要,对 SA 的敏感度也较高,在未遭遇持续低温刺激条件下,采用外源 SA 处理,造成了其幼穗中 SA 含量的过量,降低了其雄性育性,且与 MeJA 之间具有协同效应。

值得注意的问题是,小麦内源合成的 SA 类物质含量受气温影响大,采用外源 SA 处理调控小麦雄性育性的效果也会不同,对此尚待进一步研究。

参考文献:

- [1]宋晓娜.河南:小麦第一省再创新高[J].农产品市场,2021(13):11.
SONG X N. Henan: The wheat yield of the top wheat-producing province reaches a new level [J]. *Agricultural Products Market*, 2021(13):11.
- [2]陈晓杰,杨保安,范家霖,等.小麦杂种优势利用研究进展[J].种子,2022,41(1):66.
CHEN X J, YANG B A, FAN J L, et al. Advances in utilization of heterosis in wheat [J]. *Seed*, 2022, 41(1):66.
- [3]张自阳,胡铁柱,冯素伟,等.温敏核雄性不育小麦 BNS 的育性转换规律初探[J].河南农业科学,2010,39(7):5.
ZHANG Z Y, HU T Z, FENG S W, et al. A preliminary study on fertility alteration of thermo-sensitive genic male sterile wheat line BNS [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010, 39(7):5.
- [4]张自阳.小麦温敏核雄性不育系 BNS 育性转换规律及其恢复性研究[D].新乡:河南科技学院,2010:40,41,53.
ZHANG Z Y. Fertility Changing and restoration of thermo-sensitive genic male sterile wheat line BNS [D]. Xinxing: Henan Institute of Science and Technology, 2010:40,41,53.
- [5]周美兰,扬庚武,孔得群,等.小麦温敏不育系 BNS366 育性研究[J].麦类作物学报,2014,34(10):1303.
ZHOU M L, YANG G W, KONG D Q, et al. Study on fertility of thermo-sensitive male sterile wheat line BNS366 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(10):1303.
- [6]李罗江,茹振刚,高庆荣,等. BNS 小麦的雄性不育性及其温光特性[J].中国农业科学,2009,42(9):3019.
LI L J, RU Z G, GAO Q R, et al. Male sterility and thermo-photosensitivity characteristics of BNS in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(9):3019.
- [7]刘伟,艾希珍,梁文娟,等.低温弱光下水杨酸对黄瓜幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响[J].应用生态学报,2009,20(2):441.
LIU W, AI X Z, LIANG W J, et al. Effects of salicylic acid on the leaf photosynthesis and antioxidant enzyme activities of

- cucumber seedlings under low temperature and light intensity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 441.
- [8] 何淑玲, 马令法, 杨敬军, 等. 外源水杨酸对低温胁迫下狭叶红景天幼苗生理及膜伤害的影响[J]. 北方园艺, 2015(17): 61.
HE S L, MA L F, YANG J J, *et al.* Effect of exogenous SA on physiological conditions and membrane damage of *Rhodiola kirilowii* seedling under stress of low temperature [J]. *Northern Horticulture*, 2015(17): 61.
- [9] 王维领. 低温锻炼和水杨酸对小麦低温胁迫的缓解效应及其生理机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 33.
WANG W L. Mitigative effect of cold priming and salicylic acid on low temperature stress in wheat and its underlying physiology mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 33.
- [10] 盛云燕, 何兴佳, 戴冬洋, 等. 甜瓜雄性不育两用系转录组测序与激素含量研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(4): 18.
SHENG Y Y, HE X J, DAI D Y, *et al.* Study on the transcriptome sequencing and hormone content in male sterile and fertile plants in melon (*Cucumis melo* L.) [J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2018, 30(4): 18.
- [11] 姜雯, 孙博, 祝显强, 等. 茉莉酸甲酯和水杨酸对膜荚黄芪柄花苷积累的影响[J]. 延边大学农学学报, 2023, 45(2): 9.
JIANG W, SUN B, ZHU X Q, *et al.* Effects of methyl jasmonate and salicylic acid on ononin accumulation of onion in *Astragalus membranaceus* [J]. *Agricultural Science Journal of Yanbian University*, 2023, 45(2): 9.
- [12] 高夕全, 曾晓春, 王树才, 等. 茉莉酸甲酯与水杨酸在诱导高粱和苏丹草颖花开放中的效应[J]. 中国农学通报, 2000, 16(3): 7.
GAO X Q, ZENG X C, WANG S C, *et al.* Effects of methyl jasmonate and salicylic acid on the blossom of spikelets in *Sorghum* and sudanese grass [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2000, 16(3): 7.
- [13] 刘海英, 冯必得, 茹振钢, 等. BNS 和 BNS366 小麦雄性不育与内源激素的关系[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 1.
LIU H Y, FENG B D, RU Z G, *et al.* Relationship between phytohormones and male sterility of BNS and BNS366 in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1): 1.
- [14] 刘海英, 陈芸, 茹振钢, 等. 外源茉莉酸甲酯对 BNS366 雄性育性的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(5): 559.
LIU H Y, CHEN Y, RU Z G, *et al.* Effects of exogenous methyl jasmonate on male fertility of BNS366 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(5): 559.
- [15] 于振文. 作物栽培学各论: 北方本[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 37-40.
YU Z W. *Crop cultivation* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 37-40.
- [16] 崔金梅, 吉凌芬. 冬小麦幼穗分化不同时期形态特征的图解[J]. 植物学通报, 1985, 20(4): 60.
CUI J M, JI L F. Graphical analysis of morphological characteristics of different stages of winter wheat young spike differentiation [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1985, 20(4): 60.
- [17] 刘海英, 甄俊琦, 茹振钢, 等. 不同取样方法对小麦小孢子和花粉育性检测的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(1): 30.
LIU H Y, ZHEN J Q, RU Z G, *et al.* Effect of different sampling methods on microspore development and pollen fertility detection of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(1): 30.
- [18] KOSOVÁ K, PRÁŠIL I T, VÍTÁMVÁS P, *et al.* Complex phytohormone responses during the cold acclimation of two wheat cultivars differing in cold tolerance, winter Samanta and spring Sandra [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(6): 567.
- [19] 孙海燕, 贾菲芸, 杨靖, 等. 小麦 BNS 雄性不育系晚霜冻抗性和低温不育特性观察[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(9): 1041.
SUN H Y, JIA F Y, YANG J, *et al.* Observation on late frost resistance and low temperature sterility of the BNS male sterile line in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(9): 1041.
- [20] 原永兵, 曹宗巽. 水杨酸在植物体内的作用[J]. 植物学通报, 1994, 11(3): 3.
YUAN Y B, CAO Z X. The role of salicylic acid in plants [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1994, 11(3): 3.
- [21] 徐芬芬, 叶利民, 付淑琴. 外源水杨酸对水稻幼苗抗冷性的影响[J]. 广东农业科学, 2010, 37(1): 18.
XU F F, YE L M, FU S Q. Effects of salicylic acid on resistance to cold stress of rice seedlings [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(1): 18.