

YS 型小麦温敏雄性不育系 A3314 育性转换期间幼穗 和叶片中物质含量的变化

宋喜悦, 胡银岗, 马翎健, 李宏斌, 何蓓如

(西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 【目的】揭示 YS 型小麦温敏雄性不育系育性转换的有关生理生化机制。【方法】以 YS 型小麦温敏雄性不育系 A3314 为材料, 在拔节至开花期给予日平均温度 17.5 ℃(不育条件)和 22.0 ℃(可育条件)处理, 研究 A3314 不同发育阶段叶片和幼穗中脯氨酸、游离氨基酸、还原糖和可溶性糖含量的变化。【结果】在日平均温度 22.0 ℃处理条件下, A3314 叶片和幼穗中脯氨酸、游离氨基酸、还原糖和可溶性糖含量明显高于日平均温度 17.5 ℃处理, 尤其幼穗变化更为明显, 且 A3314 各种物质含量与其原同型保持系 TSP3314B 的变化趋势基本一致。【结论】在可育条件下(日平均温度 22.0 ℃), 温度变化导致的 YS 型小麦温敏雄性不育系 A3314 的育性转换伴随着脯氨酸、游离氨基酸、还原糖、可溶性糖含量的变化, 说明脯氨酸、游离氨基酸、还原糖、可溶性总糖的变化与该温敏不育系的育性密切相关。

【关键词】 小麦; YS 型温敏雄性不育系; 育性转换; 生理生化特性

【中图分类号】 S512.1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)08-0081-06

Changes of material content in panicles and leaves of YS type thermo-sensitive male sterile wheat line A3314 during transfer from sterility to fertility

SONG Xi-yue, HU Yin-gang, MA Ling-jian, LI Hong-bin, He Bei-ru

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The study was to reveal the related physiological biochemistry mechanism by which fertility was transformed YS wheat thermo-sensitive male-sterile line. 【Method】 Experiments on physiological biochemistry study of the thermo-sensitive male-sterile wheat line A3314, which was bred by applying the technology of Chinese invention patent ZL00105488.0, were processed through the daily average temperature 17.5 ℃ and 22.0 ℃ at three different developmental stages (pollen mother cell of formation, pollen mother cell meiosis and heading date) during transfer from sterility to fertility. Contents of proline, amino acid, reducing sugar and soluble sugar in panicle and leaves of thermo-sensitive male sterile wheat line A3314 were analyzed. 【Result】 Contents of proline, amino acid, reducing sugar and soluble sugar in panicle and leaves of thermo-sensitive male sterile wheat line A3314 under the daily average temperature 22.0 ℃ condition were higher than under the daily average temperature 17.5 ℃ condition without panicle and leaves, especially the changes in panicle were the most obvious. The changes of each material content in A3314 under daily average temperature 22.0 ℃ process condition were basically consistent with the change tendency of material content of the original same-type maintenance line TSP3314B. 【Conclusion】 During

* [收稿日期] 2008-11-10

[基金项目] 国家“863”计划项目(2001AA241043); 西北农林科技大学青年专项(06ZR018)

[作者简介] 宋喜悦(1968—), 男, 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士, 主要从事两系杂交小麦研究。E-mail: songxiyue@nwsuaf.edu.cn

transfer from sterility to fertility on YS type thermo-sensitive male sterile wheat line A3314 under fertile condition, contents of proline, amino acid, reducing sugar and soluble sugar in panicle and leaves have significance changes, which explains the changes of each material content are closely correlated to fertility of this thermo-sensitive male-sterile line.

Key words: wheat (*Triticum*); YS thermo-sensitive male sterile; fertility transfer; physi-biochemical character

小麦温敏雄性不育系具有无需保持系、恢复系很多、较易选配出优良杂交组合等优点, 在小麦杂种优势利用中占有十分重要的地位, 为我国农业发展和粮食增产做出了重大贡献。1992 年我国湖南、重庆相继育成小麦温、光敏雄性不育系^[1-3], 但这 2 种类型的温、光敏雄性不育系的制种安全性和可繁性, 只适应长江流域小麦产区的生态环境^[4], 在小麦主产区的中国北方因育性转换临界温度较低, 而不能表达完全雄性不育。近年来, 国内外研究了光周期敏感不育系, 但因恢复源极少、异交结实率极低而进展缓慢^[5-6]。

2000 年何蓓如等依据斯卑尔脱 1BS 存在紧密连锁的 K 型不育主效基因 *rfv1* 和 T 型不育系恢复基因 *Rf3* 的结果, 将斯卑尔脱 1BS 染色体片段导入普通小麦品系 3314 核基因组, 选育出具有该染色体片段的 K 型小麦温敏雄性不育系 A3314, 其温度敏感临界期为孕穗期, 当日平均温度 $< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 表现完全雄性不育, 可以用于杂交小麦制种; 而当日平均温度 $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 由不育稳定转换为可育, 可以实现不育系自繁。A3314 育性转换的临界温度高于已有的湖南 ES 系列和重庆 C49S 系列温敏不育系^[7]。

目前, 对小麦温敏雄性不育系 A3314 遗传、育种、生态适应性等方面进行了大量研究^[8-9], 但有关其雄性败育的生理生化机制研究甚少, 在育性转换过程中的生理生化机制研究尚未见报道。本研究以 YS 型小麦温敏雄性不育系 A3314 为材料, 在人为控温条件下, 对 A3314 不同发育阶段叶片和幼穗中脯氨酸、游离氨基酸、还原糖和可溶性总糖含量进行测定, 通过 A3314 在育性转换过程中各物质含量的变化, 探讨生理生化指标与 YS 型小麦温敏雄性不育系育性转换间的关系, 以期小麦温敏雄性不育系的应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为 YS 型小麦温敏雄性不育系 A3314 及其原同型保持系 TSP3314B(CK), 均由西北农林

科技大学二系杂交小麦课题组提供。

1.2 试验方法

1.2.1 试验处理方法 试验于 2004~2005 年在陕西杨凌西北农林科技大学试验农场农作一站试验地、农学院遗传工程中心实验室进行。

2004-10-06 大田播种 A3314 自交种子 8 盆和 TSP3314B 种子 4 盆, 每盆 15 株, 拔节后分别置于日照时数 13 h、日平均温度 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (不育条件) 和 $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (可育条件) 的人工气候箱中进行温度处理, 并根据植株外部形态选取花粉处于不同发育时期的麦穗。选穗标准是: 花粉母细胞形成期为, 旗叶与倒二叶之间的叶环距在 $0.5\sim 1.0\text{ cm}$, 穗顶在倒三叶的下部; 花粉母细胞减数分裂期为, 旗叶与倒二叶之间的叶环距在 2.0 cm 左右, 穗顶在倒二叶和倒三叶的中部; 小孢子形成期为麦芒抽出 $0.5\sim 1.0\text{ cm}$ 。对不同发育阶段的叶片和幼穗进行有关生理指标的测定。

1.2.2 测定项目及公式 花前每株主穗套袋自交, 灌浆后期调查套袋穗自交结实率。

自交结实率 / % =

$$\frac{\text{有效小穗基部 2 朵小花的结实数}}{\text{有效小穗数} \times 2} \times 100\%$$

脯氨酸含量测定参照张志良^[10]的方法, 游离氨基酸、还原糖、可溶性糖含量测定参考文献^[11]的方法。

1.3 数据处理

试验数据按 SAS 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理条件下 A3314 育性的变化

在不同日平均温度处理条件下, A3314 的育性表现不同, 在日平均温度 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理条件下表现完全不育, 自交结实率为 0; 在日平均温度 $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理条件下表现部分可育, 自交结实率为 61.2%, 其育性水平低于其原同型保持系 TSP3314B (96.4%), 说明 A3314 在可育条件下育性恢复不完全, 只是达到部分可育。

2.2 不同育性条件下 A3314 幼穗中脯氨酸与游离氨基酸含量的变化

由图 1 可见,在日平均温度 17.5 °C 处理条件下(不育条件),A3314 幼穗中脯氨酸含量在不同发育时期呈现急剧下降的趋势,由花粉母细胞形成期的 0.57 mg/g 下降到小孢子形成期的 0.09 mg/g,下降幅度达极显著水平($P=0.0085 < 0.01$);在日平均温度 22.0 °C 处理条件下(可育条件),A3314 幼穗中脯氨酸含量,在不同发育时期的表现与其原同型保持系的变化一致,一直处于上升趋势,但随着幼穗的发育,可育条件下 A3314 幼穗中脯氨酸含量整个时期都较其原同型保持系低,且越到后期二者差距越大。同时还可以看出,在日平均温度 22.0 °C 处理条件下(可育条件),小麦温敏雄性不育系 A3314 幼穗中脯氨酸含量,在小麦发育不同时期始终高于日平均温度 17.5 °C 处理,而且越到后期变化趋势越明显,由花粉母细胞形成期的差值 0.07 mg/g 变为小

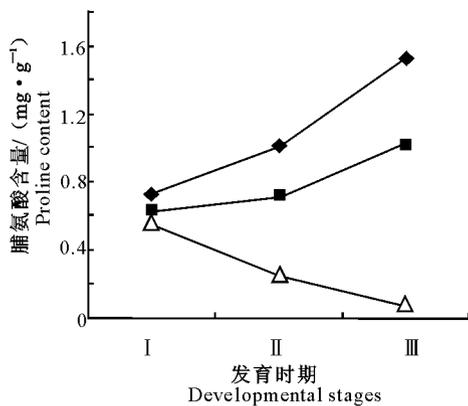


图 1 A3314 幼穗中不同发育时期脯氨酸含量的变化

—◆—, TSP3314B(22.0 °C); —■—, A3314(22.0 °C);
—△—, A3314(17.5 °C)

Fig. 1 Changes of proline content in A3314 panicles at different developmental stages

I. 花粉母细胞形成期; II. 花粉母细胞减数分裂期; III. 小孢子形成期。下同。

I. Pollen mother cell of formation period; II. Pollen mother cell meiosis period; III. Microspore

formation period. The same with the following tables

2.3 不同育性条件下 A3314 幼穗中还原糖和可溶性糖含量的变化

由图 3, 4 可以看出,无论是原同型保持系 TSP3314,还是不同育性条件下的 A3314,其幼穗中还原糖和可溶性糖含量的变化趋势基本一致,都呈现先降后升的趋势,但是在整个发育过程中,YS 型小麦温敏雄性不育系 A3314 在不育条件下(日平均温度 17.5 °C)幼穗中还原糖和可溶性糖含量都低于同时期可育条件下(日平均温度 22.0 °C),且远远低

于其原同型保持系 TSP3314B。由此可见,在日平均温度 22.0 °C 处理条件下, A3314 幼穗中还原糖和可溶性糖含量与其育性转换存在一定关系。

孢子形成期的 0.94 mg/g,进一步说明脯氨酸含量降低会引起小麦雄性败育。

游离氨基酸是蛋白质合成的前体。由图 2 可以看出,在日平均温度 17.5 °C 处理条件下(不育条件),A3314 幼穗中游离氨基酸含量在花粉母细胞形成期、花粉母细胞减数分裂期,与其原同型保持系 TSP3314B 差异较大,但与日平均温度 22.0 °C 处理条件下(可育条件)相差不大;至花粉母细胞减数分裂期三者都有所下降,但随着幼穗的发育,不育处理条件下 A3314 呈现下降趋势,从而使 A3314 在发育后期游离氨基酸匮乏,引起雄性败育;而可育处理条件下 A3314 及其原同型保持系 TSP3314B 幼穗中游离氨基酸含量逐渐上升,变化趋势一致,说明 A3314 在可育处理条件下育性发生了转换,但转换不完全,因此其游离氨基酸含量始终较正常可育的原同型保持系 TSP3314B 低,但在花粉母细胞减数分裂期以后远远超过不育处理条件下的 A3314。

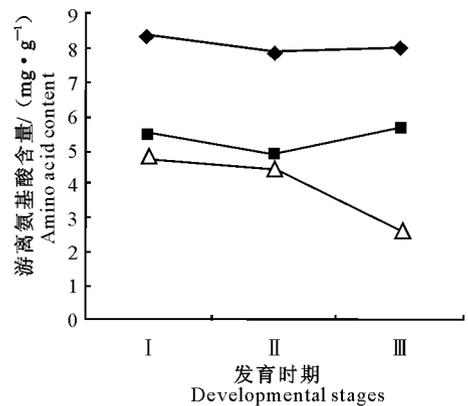


图 2 A3314 幼穗中不同发育时期游离氨基酸含量变化

—◆—, TSP3314B(22.0 °C); —■—, A3314(22.0 °C);
—△—, A3314(17.5 °C)

Fig. 2 Changes of amino acid contents in A3314 panicles at different developmental stages

于其原同型保持系 TSP3314B。由此可见,在日平均温度 22.0 °C 处理条件下, A3314 幼穗中还原糖和可溶性糖含量与其育性转换存在一定关系。

2.4 不同育性条件下 A3314 叶片中几种重要物质含量的变化

由表 1 可见,A3314 叶片中脯氨酸含量在 3 个发育时期表现一致,都呈现上升的趋势。在可育处理条件下(日平均温度 22.0 °C),A3314 叶片中脯氨酸含量在每一时期都显著大于不育处理(日平均温

度 17.5 ℃),尤其是在小孢子形成期,差异极显著,

但显著低于其原同型保持系 TSP3314B。

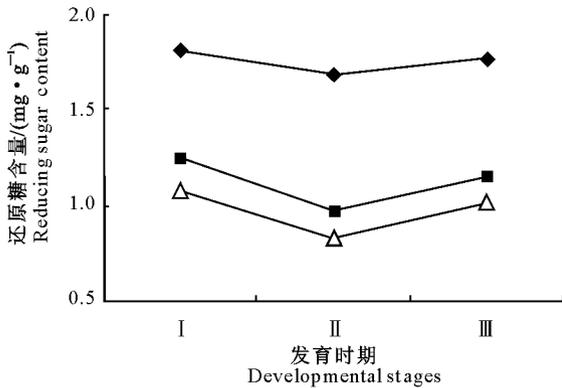


图 3 A3314 幼穗中不同发育时期还原糖含量的变化

—◆—, TSP3314B(22.0 ℃); —■—, A3314(22.0 ℃);
—△—, A3314(17.5 ℃)

Fig. 3 Changes of reducing sugar content in A3314 panicles at different developmental stages

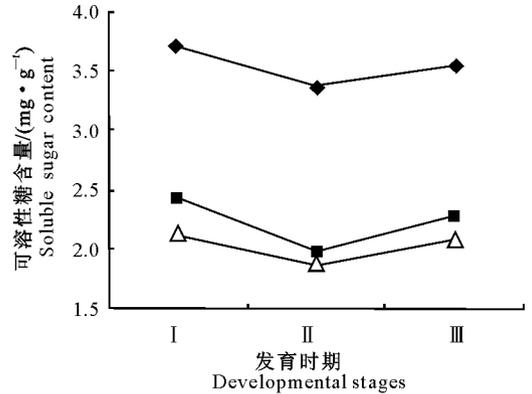


图 4 A3314 幼穗中不同发育时期可溶性糖含量的变化

—◆—, TSP3314B(22.0 ℃); —■—, A3314(22.0 ℃);
—△—, A3314(17.5 ℃)

Fig. 4 changes of soluble sugar contents in A3314 panicles at different developmental stages

表 1 不同育性条件下 A3314 叶片中几种物质含量的变化

Table 1 Comparison of contents of several kinds material in leaves during different developmental stages in different fertile conditions

项目 Content determination	处理 Trait	花粉母细胞形成期 Pollen mother cell of formation period	花粉母细胞减数分裂期 Pollen mother cell of meiosis period	小孢子形成期 Microspore formation period
脯氨酸 Proline	TSP3314B(22.0 ℃)	0.174±0.025 a	0.238±0.015 a	0.436±0.057 A
	A3314(22.0 ℃)	0.169±0.044 a	0.213±0.055 b	0.315±0.046 B
	A3314(17.5 ℃)	0.157±0.021 b	0.182±0.062 c	0.241±0.017 C
游离氨基酸 Free amino acid	TSP3314B(22.0 ℃)	6.271±0.11 a	5.863±0.18 A	6.441±0.11 A
	A3314(22.0 ℃)	6.644±0.25 b	5.716±0.25 A	6.515±0.06 A
	A3314(17.5 ℃)	5.983±0.01 c	5.038±0.20 B	5.723±0.15 B
可溶性糖 Soluble sugar	TSP3314B(22.0 ℃)	0.174±0.021 A	0.238±0.015 a	0.436±0.012 a
	A3314(22.0 ℃)	0.169±0.002 B	0.209±0.025 b	0.281±0.011 b
	A3314(17.5 ℃)	0.152±0.017 B	0.199±0.019 b	0.268±0.005 b
还原糖 Reducing sugar	TSP3314B(22.0 ℃)	2.135±0.012 A	1.842±0.079 A	2.072±0.016 A
	A3314(22.0 ℃)	1.808±0.096 B	1.423±0.046 B	1.716±0.063 B
	A3314(17.5 ℃)	1.331±0.011 C	1.127±0.019 C	1.293±0.009 C

注:a,b和c为0.05显著水平,A,B和C为0.01极显著水平。

Notes:a,b,and c indicates significance at 0.05 level,A,B,and C is extreme significance at 0.01 level.

由表 1 可以看出,在不同发育时期,A3314 叶片中游离氨基酸含量差异都达显著或极显著水平,且在整个发育时期,可育条件下 A3314 叶片中游离氨基酸含量都显著或极显著大于不育条件。说明 A3314 的育性转换可能是氨基酸含量的差异,特别是脯氨酸含量的显著差异造成的。

由表 1 还可以看出,A3314 叶片中可溶性糖含量变化趋势与幼穗中有所差异。在不同发育时期,不育、可育处理条件下 A3314 叶片中可溶性糖含量,与其原同型保持系 TSP3314B 都呈现上升的趋势,差异达显著水平。在不同发育时期,可育处理条件下 A3314 叶片中可溶性糖含量都高于不育处理,

但不同育性水平下 A3314 叶片中可溶性糖含量差异不明显。

由表 1 还可以看出,叶片中还原糖含量变化趋势与幼穗中一致,都呈现先降后升的趋势。在不同发育时期,可育处理条件下 A3314 叶片中还原糖含量都高于不育处理,且不同育性水平下 A3314 还原糖含量差异达到极显著水平。说明 A3314 叶片中还原糖含量对该温敏雄性不育系育性转换的影响较可溶性糖含量更为重要。

由此认为,A3314 不同育性水平下表现的生理生化代谢上的差异,有可能是其育性变化的结果。

3 讨论

3.1 YS型小麦温敏雄性不育系中脯氨酸和游离氨基酸含量的变化

氨基酸作为蛋白质的组成单位,与植物雄性不育的关系颇受研究者的重视^[12]。而前人的研究多集中在脯氨酸上,富含脯氨酸是正常花粉的又一重要特征,在花粉中它与含量丰富的碳水化合物互相配合,具有提供营养、促进花粉发育、发芽和花粉管伸长的作用,是花粉代谢活动中一种极活跃的物质,且可直接用于蛋白质的合成^[13]。花粉积累的脯氨酸部分来自营养体,部分由花药内谷氨酸转化而来。研究发现,在 CMS 系花药中脯氨酸含量较保持系低或缺乏的现象非常普遍。不育系花药中脯氨酸的降低或缺乏,必然导致花粉的正常发育受阻,产生花粉败育。因此研究认为,花药内的游离脯氨酸含量与其雄性育性呈正相关,并提出它是花粉粒及花粉育性的指标^[13]。对烟草、辣椒、茄子、萝卜、棉花的研究均表明,不育系花药内完全没有脯氨酸或脯氨酸含量明显低于其保持系^[14-18]。对小麦和玉米的研究也认为,脯氨酸缺乏是植物雄性不育系花粉败育的原因^[19-20]。在对光、温敏不育系的育性转换研究中,关于氨基酸与育性转换的关系,钟蕾等^[21]研究表明,割茬再生处理提高了不育水稻“培矮 64S”穗部游离脯氨酸含量。从本研究结果看,与雄配子育性转换密切相关的氨基酸,在日平均温度 22.0℃处理条件下,A3314 幼穗和叶片中脯氨酸、游离氨基酸含量均较日平均温度 17.5℃处理高。说明氨基酸含量变化,尤其是脯氨酸含量的变化与育性转换存在密切关系。

3.2 YS型小麦温敏雄性不育系中还原糖和可溶性糖含量的变化

花药中的物质含量产物多糖对小孢子的发育极其重要,它既是细胞的组成成分,也是小孢子发育过程中积累的营养物质。张丽等^[22]研究发现,萝卜不育系花蕾中各种物质含量低于其保持系,物质亏损与小孢子败育密切相关。胡美华等^[23]研究表明,榨菜胞质雄性不育系花药中葡萄糖和果糖含量均低于其保持系,在花器的不同发育时期还原糖含量均显著低于其保持系。董庆华等^[24]利用组织化学法对不同发育时期花蕾的研究表明,花药败育以前,不育系和保持系花药中多糖含量相当,但花粉败育之后,不育系中多糖含量明显低于保持系。王台等^[25]在光敏感核不育水稻育性诱导和转换过程中对叶片碳

水化合物的研究发现,在雌雄蕊形成期之后,农垦 58-s(可育条件)的蔗糖含量下降,淀粉和还原糖含量缓慢增加,而农垦 58-s(不育条件)的淀粉、蔗糖和还原糖含量均明显增加,推测长日照可能通过某些代谢环节影响了农垦 58-s 叶片内碳水化合物向雄蕊的运输,说明在花粉败育过程中,糖分的积累和代谢明显降低。物质含量紊乱及能量匮乏导致花粉正常发育受阻,引起败育的发生,相反则促进育性的转换。

本研究发现,无论叶片和幼穗,在日平均温度 22.0℃处理条件下,A3314 还原糖、可溶性糖含量明显高于日平均温度 17.5℃处理,尤其是幼穗中变化最为明显;且 A3314 在日平均温度 22.0℃处理条件下,各种物质含量变化与其原同型保持系 TSP3314B 变化趋势基本一致,说明各种物质含量的变化与该温敏不育系的育性密切相关。这与王台等^[25]的研究是一致的。

4 结论

本研究从生理生化角度分析了 YS 型小麦温敏雄性不育系 A3314 在日平均温度 17.5℃(不育条件)和 22.0℃(可育条件)处理条件下,不同发育阶段叶片和幼穗中脯氨酸、游离氨基酸、还原糖和可溶性糖含量的变化。结果表明,无论叶片和幼穗,A3314 在日平均温度 22.0℃处理条件下,脯氨酸、游离氨基酸、还原糖、可溶性糖含量明显高于日平均温度 17.5℃处理,尤其幼穗中变化最为明显;且 A3314 在日平均温度 22.0℃处理条件下,各种物质含量变化与其原同型保持系 TSP3314B 变化趋势基本一致。说明各物质含量的变化与该温敏不育系的育性密切相关。本研究对 YS 型小麦温敏雄性不育系的选育和应用具有一定的意义。

[参考文献]

- [1] 邹应斌,周美兰,何觉民.生态雄性不育小麦的育性转换机制[J].湖南农业科学,1992(6):5-7.
Zou Y B, Zhou M L, He J M. Mechanism of fertility alteration of ecological male sterile wheat [J]. Hunan Agricultural Sciences, 1992(6):5-7. (in Chinese)
- [2] 谭昌华,余国东,杨沛丰.重庆温光型细胞核雄性不育小麦的不育性研究初报[J].西南农业学报,1992,5(4):1-6.
Tan C H, Yu G D, Yang P F. Preliminary study on sterility of Chongqing thermo-photo-genet male sterile wheat [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalia Sinica, 1992, 5(4):1-6. (in Chinese)
- [3] 何立人,李正玮,张建奎,等.温光型雄性不育小麦 C49S 育性

- 转换与温度的关系 [J]. 西南农业大学学报, 1992, 18(4): 328-332.
- He L R, Li Z W, Zhang J K, et al. Research on the fertile change law of thermo-sensitive genic male sterile wheat C49S and the relation of its with the temperature [J]. Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalia Sinica, 1992, 18(4): 328-332. (in Chinese)
- [4] 张建奎, 刘刚, 冯丽, 等. 温光型细胞核雄性不育小麦 C49S 的育性及其适应性分析 [J]. 麦类作物学报, 2002, 22(2): 38-41.
- Zhang J K, Liu G, Feng L, et al. Analysis of the fertility and its adaptability of thermo-photo-sensitive genic male sterile wheat line C49S [J]. Journal of Triticeae Crops, 2002, 22(2): 38-41. (in Chinese)
- [5] Murai K, Tsunewaki K. The use of photoperiod-sensitive cytoplasmic male sterility in hybrid wheat breeding [M]. Beijing: 8th int. Wheat Gene Symp, 1993: 1261-1266.
- [6] 何蓓如, 孟荣华, 宋喜悦, 等. 粗厚山羊草细胞质普通小麦核代换系在中国不同光温地点的雄性育性变异 [J]. 西北植物学报, 1999, 19(6): 10-16.
- He P R, Meng R H, Song X Y, et al. The variation of male fertility of wheat nuclear substitutional lines in *Ae. crassa* cytoplasm in the region with different photo-thermo condition in China [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1999, 19(6): 10-16. (in Chinese)
- [7] 何蓓如, 董普辉, 宋喜悦, 等. 小麦温度敏感不育系 A3314 温敏特性研究 [J]. 麦类作物学报, 2003, 23(1): 1-6.
- He B R, Dong P H, Song X Y, et al. Study on the thermo-sensitivity of thermo-sensitive male sterile wheat lines A3314 [J]. Journal of Triticeae Crops, 2003, 23(1): 1-6. (in Chinese)
- [8] 宋喜悦, 何蓓如, 马翎健, 等. 小麦温敏不育系 A3314 温敏不育性的遗传研究 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1095-1099.
- Song X Y, He B R, Ma L J, et al. Genetic studying of thermo-sensitive male sterility on thermo-sensitive male sterile wheat line A3314 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6): 1095-1099. (in Chinese)
- [9] 宋喜悦, 何蓓如, 马翎健, 等. 温敏不育性 A3314 在中国不同生态地点的育性表现 [J]. 西北植物学报, 2004, 24(7): 1207-1210.
- Song X Y, He B R, Ma L J, et al. Variation of male sterility in regions on thermo-sensitive male-sterile line A3314 in wheat [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(7): 1207-1210. (in Chinese)
- [10] 张志良. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- Zhang Z L. The plant-physiology experiment instructs [M]. Beijing: Higher Education Publishing Press, 1990. (in Chinese)
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验技术 [M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000.
- Gao J F. Plant-physiology experiment technology [M]. Xi'an: World Books Publication Company, 2000. (in Chinese)
- [12] 吕志仁, 黄鹏. 水稻光温敏核不育系生理生化研究 [J]. 西南农业学报, 2000, 13(1): 21-25.
- Lv Z R, Huang L. Studies on physiologic biochemistry of photo sensitive genic male sterile lines in rice [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2000, 13(1): 21-25. (in Chinese)
- [13] 朱广廉, 曹宗巽. 花粉中的游离脯氨酸及生理功能 [J]. 植物生理学通讯, 1985(4): 7-12.
- Zhu G L, Cao Z X. Physiological fuction and free proline in anther [J]. Plant Physiology Communications, 1985(4): 7-12. (in Chinese)
- [14] 刘齐元, 朱肖文, 刘飞虎. 烟草雄性不育花蕾发育过程中几种物质含量的变化 [J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(3): 336-340.
- Liu Q Y, Zhu X W, Liu F H. Changes of the contents of several substances during the development of male sterile flower buds in tobacco [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2007, 29(3): 336-340. (in Chinese)
- [15] 孙立全, 霍治军, 常彩涛. 辣椒雄性不育系小孢子发育及脯氨酸等含量的研究 [J]. 华北农学报, 2003, 18(4): 39-41.
- Sun L Q, Huo Z J, Chang C T. Comparison of microsporegenesis and free praline content between sterile line and maintainer line of red pepper [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(4): 39-41. (in Chinese)
- [16] 郭丽娟, 申书兴, 张成合, 等. 茄子雄性不育系的可溶性糖、淀粉、氨基酸分析 [J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(4): 34-36.
- Guo L J, Shen S X, Zhang C H, et al. Studies on soluble suger, starch, free amino acid and free proline of male sterility in eggplant [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2004, 27(4): 34-36. (in Chinese)
- [17] 魏毓棠, 张丽, 张大昕. 萝卜雄性不育小孢子发育过程中物质代谢的研究 [J]. 辽宁农业科学, 2001(4): 8-10.
- Wei Y T, Zhang L, Zhang D X. Studies on material metabolism of male sterility in radish [J]. Journal of Liaoning Agricultural Sciences, 2001(4): 8-10. (in Chinese)
- [18] 宋宪亮, 孙学振, 刘英欣. 棉花 ms5ms6 核雄性不育花药中碳水化合物和游离氨基酸的变化 [J]. 棉花学报, 2001, 13(6): 334-336.
- Song X L, Sun X Z, Liu Y X. Carbohydrate and free amino acids in anthers of ms5ms6 genetic male sterile cotton [J]. Acta Gossypii Sinica, 2001, 13(6): 334-336. (in Chinese)
- [19] 朱广廉, 孙超, 曹宗巽. 太谷核不育小麦可育花药内游离脯氨酸的来源、利用及与不育花药败育的关系 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 1985, 11(2): 122-129.
- [20] 夏涛, 刘纪麟. 玉米细胞质雄性不育系物质代谢系统的研究 [J]. 华中农业大学学报, 1993, 12(1): 1-6.
- Xia T, Liu J L. Study on material metabolic system of cytoplasmic male sterility in maize (*Zermays* L.) [J]. Journal of Huazhong Agricultral, 1993, 12(1): 1-6. (in Chinese)