

光温敏雄性不育小麦育性恢复研究进展

娄鸿耀¹ 李翰霖^{1,2} 秦志列¹ 曲曼古丽·库尔班³ 朱明慧³ 刘昌文³ 张胜全¹

(¹北京市农林科学院杂交小麦研究所, 100097, 北京; ²山西农业大学农学院, 030801, 山西晋中;

³喀什地区农业技术推广中心, 844099, 新疆喀什)

摘要 杂种优势利用是大幅度提高小麦综合生产能力的重要途径, 对保障粮食安全具有重要意义。鉴于制种成本低、恢复源广泛、较易获得优势组合等优势, 利用光温敏雄性不育系生产杂交小麦逐渐成为小麦杂种优势利用的主流技术。挖掘光温敏雄性不育小麦恢复源进而实现杂交种高度恢复是二系杂交小麦研究的重要科学问题之一, 本文对光温敏雄性不育小麦育性恢复及其影响因素和未来展望进行了探讨, 为推动杂交小麦走向应用提供参考。

关键词 小麦; 光温敏雄性不育; 育性恢复; 遗传; 环境

小麦是全球最重要的口粮作物之一, 探索和利用杂种优势是世界小麦科学研究的重要课题。经过100多年的研究与发展, 国内外进行小麦杂种优势利用的途径主要有三系法、化杀法、核不育法和两系法。三系法主要是以核质互作雄性不育(nuclear-cytoplasmic interaction male sterility, CMS)材料作为不育系, 与相应的恢复系和保持系形成三系配套。化杀法是利用化学杀雄剂(chemical hybridizing agent, CHA)诱导雄性不育, 并配套恢复系来使用。核不育法是利用核雄性不育(nuclear male sterility, GMS)材料, 通过染色体附加等手段创制不育系和保持系, 从而实现生产配套。两系法则是以光温敏雄性不育(photo-thermo-sensitive male sterility, PCMS)材料为不育系, 与相应的恢复系形成两系配套^[1]。

20世纪90年代, 中国小麦科学家先后发现并利用了小麦光温敏雄性不育材料, 创建了具有完全自主知识产权的中国二系杂交小麦技术体系, 开辟了小麦杂种优势利用的新途径, 使我国成为利用不育系实现杂交小麦商业化的唯一国家, 该技术也已被国际同行科学家公认为是今后小麦杂种优势利用的主流技术^[2]。小麦光温敏雄性不育材料在可育环境下具有正常结实表现, 可进行自我繁殖; 在不育环境下育性表现显著降低, 达到完全不育状态则

可用于杂交种生产。由于育性转换受光照和温度等环境因素的调控, 因此, 以光温敏雄性不育材料为亲本的杂交后代的恢复结实也会受到遗传背景和栽培环境等多方面影响, 其恢复程度高低直接决定了光温敏二系杂交小麦产量杂种优势水平。然而, 目前对光温敏雄性不育小麦恢复的研究报道较少, 杂交小麦应用仍处于初始阶段^[3-5], 这也使高效恢复源挖掘对于二系杂交小麦的推广和应用具有更重要的意义^[6]。

1 光温敏雄性不育小麦育性恢复特性

光温敏雄性不育属于核不育的范畴。理论上, 光温敏类型的雄性不育小麦可以被大部分小麦种质资源恢复, 但实际上只有少数材料能将光温敏不育系恢复到普通小麦的正常育性水平。研究^[7]表明, 同一恢复系对不同不育系的恢复程度不同, 不同恢复系对同一不育系的恢复程度也不同, 这表明光温敏不育系可能存在多种遗传类型, 其恢复机理十分复杂。此外, 杂交种F₁代的自交结实率也受到多种环境因素的影响, 这给二系杂交小麦的推广和利用带来了更大的挑战。自从在D²型细胞质雄性不育小麦农林26异质系中发现光照和温度会影响育性变化现象以来^[8], 我国学者先后发现并选育出一系列优良光温敏雄性不育系, 并逐渐探索出不同类型

作者简介: 娄鸿耀, 主要从事小麦遗传育种研究, E-mail: louhongyao@163.com

张胜全为通信作者, 主要从事小麦杂种优势利用与节水栽培研究, E-mail: zsq8200@126.com

基金项目: 北京市农林科学院青年科学基金(QNJJ202427); 北京市农林科学院改革与发展子课题(XMZZQN202303); 国家小麦产业技术体系(CARS-03-3); 新疆维吾尔自治区小麦产业技术体系疏勒综合试验站(XJARS-01); 喀什地区麦后复播棉花优质高产栽培技术研究及应用(KS2023004)

收稿日期: 2024-04-08; 修回日期: 2024-06-12; 网络出版日期: 2025-01-13

不育系育性转换条件^[9-13]。近年来,利用这些不育系以及配套的优良恢复系已选育出京麦、云杂和绵杂麦等系列杂交小麦新品种^[14-18],使二系杂交小麦研究逐渐走向生产。

2 光温敏雄性不育小麦育性恢复的影响因素

小麦作为异源六倍体作物,其光温敏不育杂种后代的育性恢复相对复杂^[19]。已有研究^[20]表明,遗传背景(不同年代、冬春性和基因等)、外界环境条件(地理纬度和温度等)以及栽培管理措施(灌溉、播种期和播种量等)均会对光温敏不育杂种后代育性的恢复产生影响^[21]。

2.1 遗传背景对雄性不育小麦育性恢复的影响

小麦作为异源六倍体作物,其遗传结构和基因组十分复杂^[22],光温敏雄性不育系小麦的恢复受到基因影响和控制^[23]。研究^[24]表明,在相同环境条件下,不同不育系之间的自然异交结实率存在显著差异,说明遗传因素对不育系异交结实率有着重要影响。T9023A/川农 26 的 F₂ 群体中可育株与不育株分离比符合 15:1,表明川农 26 携带有 T 型细胞质雄性不育的 2 对主效恢复基因,恢复基因决定了后代的育性。通过比较 5 种不同类型的细胞质雄性不育材料与 10 种不同类型恢复系杂交 F₁ 代的自交结实率发现, K 型细胞质雄性不育系易恢性最好, LK783 和中国春作为恢复源的恢复度均较高,但 LK783 的变异幅度较大,中国春变异幅度较小^[25],说明中国春恢复能力好且稳定。对于 BNS 系列小麦温敏雄性不育系而言,山东地区的小麦品种(系)中恢复源相对较多^[26]。目前,关于雄性不育小麦恢复基因的挖掘和利用研究的报道仍然较少,这也是杂交小麦走向应用急需突破的重要课题。

随着时间的推移,育种家们对小麦品种的改良也在不断变化^[27-28]。为了产生足够的遗传变异以满足改良需求,育种家们对种质资源的遗传选择也存在显著差异,从而导致不同时期育成品种具有明显不同的遗传背景^[29-30]。不同年代的小麦品种在小花的分化、退化和败育方面都存在着显著差异^[31],在农艺性状以及光合生理生态特性方面也表现不同^[32]。研究^[33-34]发现,不同历史阶段推广的主导小麦品种对 BS 系列光温敏雄性不育小麦恢复呈下降趋势,结实率最高差异接近 30%,这表明不同年代的小麦品种对光温敏雄性不育材料的恢复能

力可能存在显著差异。

冬小麦与春小麦在抗逆性、耐寒性、生育特性以及遗传背景等方面存在明显差异,其对光温敏雄性不育材料的育性恢复能力也有所不同。研究^[35]表明, C49S 系列温光敏核不育小麦杂种 F₁ 代的育性恢复与父本耐冷性存在密切关系, F₁ 代的耐冷性强于母本但弱于父本, 介于双亲不育临界值的平均水平。双亲不育临界值低的组合易恢复, 不育临界值高的组合恢复较差, F₁ 代表现出明显的偏父遗传特征。因此, 对于半冬性的 C49S 系列光温敏核不育小麦, 如果选用光照时长较长、不育临界值较低来源的春性种质作为恢复系, F₁ 代的不育临界值也较低, 表现为易于恢复; 而如果选用光照时长相对较短、不育临界值相对较高来源的半冬性/冬性种质作为恢复系, 则 F₁ 代的不育临界值也较高, 表现为恢复度一般。研究^[36]还发现, 在相同条件下, 春小麦的可育小花数和结实率均高于冬小麦, 春小麦的恢复能力相比冬小麦可能更强。因此, 冬春杂交可能在提高光温敏雄性不育小麦杂种后代恢复程度方面存在着正向积极效应。

2.2 地理来源对雄性不育小麦育性恢复的影响

光温敏雄性不育系育性转换受光照影响明显^[37], 纬度高低与光照时长关系密切, 因此推断不同地理来源的小麦种质对光温敏雄性不育小麦的影响可能存在明显不同^[38-39]。例如, BS 系列光温敏雄性不育小麦从北纬 30°到北纬 40°, 育性由不育向逐步转换可育^[40]; 在控制光温条件下, 不育系的自交结实率逐步改善^[41]。研究^[42]表明, 粘类小麦不育系的恢复源分布具有一定地理规律性, F₁ 代平均恢复度在 25%~40%的半恢复类型主要分布在北部冬麦区, 40%~50%的半恢复类型主要分布在南方冬麦区, 而高可育范围内的恢复类型则主要分布在黄淮麦区和长江中下游两大麦区, 还包括其他麦区的部分地区, 这些地区大多为我国小麦的遗传多样性中心。同样, F 型不育系等其他类型杂交后代在不同环境条件下结实率也会有所差异, 表现为以纬度为主要影响因素的环境诱导效应^[43-44]。由此, 我们认为, 因为地理位置不同造成受光差异, 这可能导致冬性小麦和春性小麦穗分化阶段的感光特性存在差异, 从而带来杂交后代表现出育性明显波动现象。基于以冬性为主的 BS 系列光温敏雄性不育小麦高度不育区间位于北纬 32.5°这一客观现实, 高效恢复源筛选的地理参考阈值可以设定为北纬 40°

及其以北或北纬 30°以南，这进一步印证了春性种质对冬性光温敏雄性不育小麦具有较好恢复能力、利于杂交后代恢复的研究设想，探索并揭示这种差异影响对于阐释光温敏雄性不育小麦恢复机制具有重要意义。

2.3 环境温度对雄性不育小麦育性恢复的影响

光温敏雄性不育小麦育性转换受温度影响显著，低温和高温均可导致不育，而各杂交后代的自交结实也会受温度的影响，即使是胞质不育类型的 K 型不育系育性恢复也受到明显的温度影响。研究^[45]表明，在二核期对 K 型杂交组合进行 35 °C 和 40 °C 高温处理，其恢复度明显降低，使用国内法恢复度分别降低 4.71% 和 12.62%，使用国际法恢复度分别降低 11.68% 和 21.45%。此外，研究^[46]发现，不育系 BS210 在可育环境条件下，育性敏感期如遇短暂低温（8 °C 持续 1 d 以上），将会导致自交结实率大幅下降，而在不育环境条件下，育性敏感期如遇到短暂高温（23 °C 持续 4 d 以上），会导致自交结实率上升。对 5 种细胞质雄性不育小麦杂交后代恢复情况进行比较，发现在大田自然条件下，它们的 F₁ 代自交结实率均为 0，表现为雄性不育，但高温处理过后（挑旗至扬花期）部分表现可育，其中 F₁ 代自交结实率最高可超过 30%^[47]，这表明除了光温敏雄性不育小麦外，其他类型的雄性不育小麦杂交后代恢复特性也表现有以温度为主要影响因素的环境诱导效应。传统认知上，在光温敏雄性不育小麦的可育区间，杂交后代应当能够实现高效稳定的恢复，而穗分化阶段的适宜温度则是重要保障。然而，考虑到杂交种广适种植的应用需求，半不育甚至不育区间内的高度恢复至正常结实才是恢复源挖掘的真正价值所在。鉴于小麦育性表达从高度不育到高度可育转换普遍存在的客观现实，不育系与恢复系不育表达的临界温度匹配、极值以及快速变化环境下的育性稳定性等，应当成为光温敏雄性不育小麦杂交种在克服环境温度快速变化不利影响、实现广适应用时需重点关注的问题。

2.4 管理措施对雄性不育小麦育性恢复的影响

在穗分化等水分临界期，水分供应不足会导致雌蕊和雄蕊发育不良，进而影响结实，严重水分胁迫使结实率明显下降^[48-50]。研究^[45]发现，在土壤干旱条件下，K 型不育小麦表现为高恢复度的组合降低，而低恢复度的组合提高，整体趋中，这可能与

干旱胁迫下分蘖成穗减少导致群体不足有关。播种期对杂交组合的恢复度有明显影响。研究^[35,41,51-52]表明，随播期推迟，C49S、BNS、BS 系列等光温敏雄性不育小麦杂种后代育性逐步提高。有研究^[53]指出，推迟播期导致每穗最大小花分化数减少，但每穗可孕小花数与最终穗粒数却呈增加趋势，小花存活率和结实率得到明显提高，这表明提高可孕小花数、小花存活率和结实率是晚播提高结实率的关键。然而，也有研究^[45]认为，K 型不育后代推迟播种期会明显降低组合的恢复度，这可能与试验材料的差异有关，具体原因还需进一步研究。播种量对杂交组合的育性影响较小，但高恢复度的组合随着播种量的提高，恢复度会有所降低。恢复力强的恢复系组配的组合受环境条件影响相对较小，合理的栽培措施有助于提高杂交组合的恢复度。由于成熟的杂交小麦品种应用较少，关于管理措施对光温敏雄性不育小麦杂交种育性恢复的影响尚没有系统研究。通过管理措施的调控，提高光温敏雄性不育小麦杂交种育性恢复与结实，可以在一定程度上弥补遗传背景差异带来的杂交种育性恢复波动、适应性差和适宜区域受限等问题，有利于挖掘环境与基因型友好互作的潜能。

3 展望

小麦作为世界第一大粮食作物，也和其他作物一样具有明显的杂种优势。研究^[54-55]表明，杂交小麦在产量、抗逆、农艺性状上都表现出明显的优势，主要表现在根系发达、根系活力强、茎秆粗壮、粒重高、抗逆性强。尤其是在盐碱、干旱和瘠薄条件下，杂交小麦能更有效地将有机物转移到籽粒中，具有更强的抗旱、耐盐碱和耐瘠薄的特性，能够获得更高的增产幅度，显现出明显的杂种优势^[56-57]。

小麦产量由单位面积穗数、穗粒数和千粒重构成，而穗粒数受每穗有效小花数和结实率共同影响。光温敏二系杂交小麦穗粒数的高低取决于组合的不育系育性可恢复性与恢复系恢复力的对应关系，以及环境和管理措施等因素。因此，应特别重视穗粒数的提高对杂交小麦产量杂种优势的贡献。光温敏雄性不育小麦由于其恢复源广泛和相对易恢复的特点，容易突破产量杂种优势。然而，在以高产为目标的强优势杂交小麦组合筛选中，虽然大多数杂交组合的穗数和粒重表现突出，但结实率通常不及常规品种，穗粒数并未表现出明显的杂种优

势,且在不同环境种植时恢复度产生较大变异。因此,高效且稳定的恢复已成为光温敏二系杂交小麦研究的重要内容,也是加快光温敏二系杂交小麦走向生产亟需解决的关键问题之一。

光温敏二系杂交小麦的育性恢复力既受遗传因素的制约,也受到生态环境的影响。为提高光温敏二系杂交小麦恢复度,首先,应从其遗传因素方面着手,加强对育性恢复机理的研究,并进行恢复基因的累加。根据现有的研究报道,雄性不育的育性恢复受主效和微效基因控制,但不同的恢复材料具有不同数量和效应的恢复基因,同一恢复基因在不同组合中的效应也存在较大差异。因此,有针对性地改良和培育恢复力高且稳定、广泛适用的恢复系对于挖掘杂交小麦产量优势至关重要。其次,应对优良的组合进行广泛的生态适应性鉴定,以寻找最适宜品种育性表达的生态环境,同时探索利用栽培措施来改善其生长环境,明确实现最佳恢复度的生产条件和保障要素,为提高光温敏二系杂交小麦结实性创造良好的生长环境。

参考文献

- [1] 陈晓杰,杨保安,范家霖,等. 小麦杂种优势利用研究进展. 种子, 2022, 41(1): 8.
- [2] 赵昌平. 中国二系杂交小麦研究进展与展望. 科学通报, 2022, 67(26): 3119-3128.
- [3] Li H, Li S, Abdelkhalik S, et al. Development of thermo-photo sensitive genic male sterile lines in wheat using doubled haploid breeding. BMC Plant Biology, 2020, 20: 1-10.
- [4] 赵昌平. 中国杂交小麦研究进展//第十五次中国小麦栽培科学学术研讨会论文集. 北京杂交小麦工程技术研究中心, 2012: 592-593.
- [5] Ter Steeg E M S, Struik P C, Visser R G F, et al. Crucial factors for the feasibility of commercial hybrid breeding in food crops. Nature Plants, 2022, 8: 463-473.
- [6] Singh S P, Srivastava R, Kumar J. Male sterility systems in wheat and opportunities for hybrid wheat development. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37: 1-13.
- [7] 张凤廷. 光温敏核雄性不育小麦的育性转换特点及恢复性研究. 北京: 中国农业科学院, 2004.
- [8] 付庆云, 曹银萍, 李友勇. 小麦光温敏雄性不育的研究和利用进展. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 576-580.
- [9] 董普辉, 何蓓如, 王宏娟, 等. 一种普通小麦光温敏不育系的发现及初步研究. 中国农学通报, 2009, 25(23): 215-219.
- [10] 陶军, 李生荣, 周强, 等. 中国西南温光型两系杂交小麦研究进展. 中国农学通报, 2017, 33(32): 1-8.
- [11] 杨雪桐. 小麦温敏雄性不育系偃展 4110S 育性转换的机制研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [12] 孙辉, 赵昌平, 岳洁茹, 等. 不同生态环境和日温差对 BS 型小麦光温敏雄性不育系育性转换和农艺性状的影响. 作物杂志, 2024(3): 40-46.
- [13] 胡浩然. 小麦温光敏雄性核不育系 K64S 育性转换规律研究. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- [14] 袁国强, 陶军, 何员江, 等. 杂交小麦研究进展与展望. 四川农业大学学报, 2023, 41(6): 973-980.
- [15] 李绍祥, 丁明亮, 李宏生, 等. 云南温光敏两系杂交小麦研究进展与思考. 科学通报, 2022, 67(26): 3197-3206.
- [16] 张胜全, 叶志杰, 任立平, 等. “十五”以来我国杂交小麦审定品种分析. 作物杂志, 2022(1): 38-43.
- [17] 阮仁武, 杨宇衡, 易泽林, 等. 杂交小麦新品种西南 11 号的选育. 中国种业, 2022(8): 122-124.
- [18] 曹光宇, 单天雷, 刘江, 等. 杂交小麦制种技术及除草剂在杂交制种提纯中的应用进展. 科学通报, 2022, 67(26): 3175-3184.
- [19] Murai K. Factors responsible for levels of male sterility in photoperiod-sensitive cytoplasmic male sterile (PCMS) wheat lines. Euphytica, 2001, 117: 111-116.
- [20] Li H S, Ding M L, Gu J, et al. Preliminary study on inheritance of stigma exertion in wheat thermo-photo sensitive genic male sterile line. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(6): 2726-2728.
- [21] Li Y F, Zhao C P, Zhang F T, et al. Fertility alteration in the photo-thermo-sensitive male sterile line BS20 of wheat (*Triticum aestivum* L.). Euphytica, 2006, 151: 207-213.
- [22] Zhang J K, Yu G D, Zong X F, et al. Effect of light intensity on fertility alteration of thermo-photo-sensitive genic male sterile wheat. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(2): 301-306.
- [23] Chen X D, Sun D F, Rong D F, et al. A recessive gene controlling male sterility sensitive to short daylength/low temperature in wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Zhejiang University Science B, 2011, 12: 943.
- [24] 聂迎彬, 孔德真, 崔凤娟, 等. 小麦 AL 型细胞质雄性不育系异交结实率的研究. 北方农业学报, 2018, 46(3): 1-6.
- [25] 董普辉, 朱先玉, 程亚丹, 等. 小麦 T 型细胞质雄性不育系 T9023A 的选育及育性恢复研究. 河南农业科学, 2017, 46(3): 25-28.
- [26] 姚盟, 叶佳丽, 杨智全, 等. 5 种细胞质雄性不育小麦败育的生物学特性及育性恢复. 麦类作物学报, 2015, 35(12): 1676-1684.
- [27] 王震. BNS 小麦温敏雄性不育系恢复系筛选及遗传表达分析. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [28] Sun Y Y, Liu X, Zhang S Q, et al. Wheat cultivars at different decades vary widely in grain-filling characteristics in Shaanxi Province, China. Cereal Research Communications, 2018, 46(3): 533-544.
- [29] Melonek J, Duarte J, Martin J, et al. The genetic basis of cytoplasmic male sterility and fertility restoration in wheat. Nature Communications, 2021, 12(1): 1036.
- [30] 赵双锁, 刘晓丹, 关丽云. 不同年代小麦育成种质的遗传变异比较分析. 河北农业科学, 2022, 26(3): 64-71.
- [31] Martínez L A, Rubio O P, Ponce A L, et al. A decade of temperature variation and agronomic traits of durum wheat (*Triticum durum* L.). Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(8): 741.
- [32] 文祥朋, 任伟, 孙克刚, 等. 不同穗型小麦小花发育过程中幼穗内同化物分配与穗粒数的关系. 江西农业学报, 2017, 29(8): 11-14.
- [33] 刘合芹. 不同年代推出的冬小麦农艺性状以及光合生理生态特性. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2002.
- [34] Abdelkhalik S, Ding M L, Gu J, et al. Analyzing combining ability and heterosis of thermo-photo sensitive genic male sterile wheat lines for hybrid development. Turkish Journal of Field Crops, 2019, 24(1): 98-105.

- [35] 谭昌华, 余国东, 李伯群, 等. C49S 温光敏核不育小麦杂种 F₁ 代的育性恢复. 西南农业学报, 1999(3): 26-29.
- [36] 王晓楠. 春小麦穗粒数改良潜力的研究. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
- [37] Murai K, Ohta H, Kurushima M. et al. Photoperiod-sensitive cytoplasmic male sterile elite lines for hybrid wheat breeding, showing high cross-pollination fertility under long-day conditions. *Euphytica*, 2016, 212: 313-322.
- [38] Chinoy J J. Effect of vernalization and photoperiodic treatments on growth and development of wheat. *Nature*, 1950, 165: 882-883.
- [39] Yuan S, Bai J, Guo H, et al. QTL mapping of male sterility-related traits in a photoperiod and temperature-sensitive genic male sterile wheat line BS366. *Plant Breeding*, 2020, 139: 498-507.
- [40] 孙辉, 张立平, 陈兆波, 等. BS 型小麦光温敏雄性不育系光合特性研究. 麦类作物学报, 2020, 40(1): 86-95.
- [41] 孙辉, 张立平, 侯起岭, 等. 人工控制条件下 BS 型小麦光温敏雄性不育系育性与光合特性的关系研究. 作物杂志, 2021(1): 7-15.
- [42] 郭艳萍. 粘类小麦雄性不育系育性基因分布区及其育性恢复性研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [43] 张新玲, 石书兵, 童婷, 等. 不同环境与播期对小麦雌性不育材料结实率影响的研究. 新疆农业科学, 2013, 50(3): 417-421.
- [44] 苑少华, 段文静, 白建芳, 等. F 型小麦雄性不育系恢复性研究. 麦类作物学报, 2018, 38(6): 654-660.
- [45] 高翔. 小麦 K 型不育系的育性恢复性能及环境稳定性表现. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [46] 权威. 光温敏核雄性不育小麦 BS210 育性转换规律的研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [47] 姚盟. 5 种细胞质雄性不育小麦败育的生物学特性与育性恢复. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [48] 严美玲, 郑建鹏, 殷岩, 等. 不同水分处理对小麦光合特性及灌浆特性的影响. 山东农业科学, 2022, 54(6): 55-59.
- [49] 路永强, 刘玉秀, 周发宝, 等. 不同水分供应对小麦氮素积累、分配和产量的影响. 西北农业学报, 2019, 28(11): 1760-1768.
- [50] 柳芳, 王传海, 申双和, 等. 土壤水分对小麦开花及结实的影响. 南京气象学院学报, 2002, 25(5): 671-676.
- [51] 张建奎. 重庆温光敏核雄不育小麦育性转换规律及不育机理研究. 重庆: 西南大学, 2006.
- [52] 周美兰, 茹振刚, 骆叶青, 等. 两系小麦不育系 BNS 雄性育性的转换. 核农学报, 2010, 24(5): 887-894.
- [53] 朱元刚. 推迟播期对冬小麦穗花发育的调控效应及其生理基础研究. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [54] 李会敏, 赵明辉, 王广才, 等. 冬小麦杂种优势表现及分析. 河北农业科学, 2011, 15(9): 50-53.
- [55] Gupta P K, Balyan H S, Gahlaut V, et al. Hybrid wheat: past, present and future. *Theoretical and Applied Genetics*, 2019, 132: 2463-2483.
- [56] 刘素霞. T 型小麦杂种优势在盐碱地表现的分析: II 盐碱地 T 型小麦子粒产量杂种优势形成的遗传分析. 河南农业大学学报, 1993, 27(4): 366-372.
- [57] 张凤廷, 赵昌平, 秦志列, 等. 耐盐碱杂交小麦新品种—京麦 189. 麦类作物学报, 2023, 43(8): 1080.

Research Progress on Fertility Restoration of Photoperiod-Thermo-Sensitive Male-Sterile Wheat

Lou Hongyao¹, Li Hanlin^{1,2}, Qin Zhilie¹, Qumanguli·Kuerban³,
Zhu Minghui³, Liu Changwen³, Zhang Shengquan¹

⁽¹⁾Institute of Hybrid Wheat, Beijing Academy of Agriculture and Forestry, Beijing 100097, China;

⁽²⁾College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, Shanxi, China;

⁽³⁾Kashgar Agricultural Technology Promotion Center, Kashgar 844099, Xinjiang, China)

Abstract The utilization of heterosis is an important way to greatly improve the comprehensive production capacity of wheat and is of great significance to ensure food security. Given the cost-effectiveness of seed production, diverse restoration sources, and the ease of accessing heterosis combinations, the adoption of heterosis through photoperiod-thermo-sensitive male-sterile wheat has gradually emerged as the prevailing technology in hybrid wheat research. Excavating the restoration reservoir of photoperiod-thermo-sensitive male-sterile wheat and achieving hybrid vigor restoration stands as a critical scientific question in the realm of two-line hybrid wheat. This article deliberates on the fertility rejuvenation of photoperiod-thermo-sensitive male-sterile wheat, its influencing factors, and future prospects. The purpose of this discussion is to provide information to promote the use of hybrid wheat.

Key words Wheat; Photoperiod-thermo-sensitive male sterility; Fertility restoration; Heredity; Environment