

杂交小麦制种研究现状及展望

孔德真 聂迎彬 崔凤娟 桑伟 徐红军 田笑明

(新疆农垦科学院作物研究所 谷物品质与遗传改良兵团重点实验室, 石河子 832000)

摘要: 利用杂种优势对提高小麦单产具有重要作用, 杂交小麦制种是小麦种业未来发展的重要方向之一。目前, 小麦在强优势杂交组合选配方面取得较大进步。由于缺乏优异高异交结实率的制种亲本资源和高产高效杂交制种体系, 导致大面积制种效率低。因此, 探究杂交制种技术体系进展、亲本种质资源改良和生产流程标准化等方面的研究现状, 将有利于对杂交制种发展瓶颈和未来发展方向等问题的整体把握。综述杂交小麦制种技术的影响因素, 并通过商业化大田杂交作物与新型杂交小麦比较, 对杂交小麦快速商业化等方面提出建议, 对其发展趋势进行展望。

关键词: 杂交小麦; 杂交制种; 杂种优势; 精量穴播; 商业化育种

DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2022-0340

Research Status and Prospect of Hybrid Wheat Seed Production

KONG De-zhen NIE Ying-bin CUI Feng-juan SANG Wei XU Hong-jun TIAN Xiao-ming

(Institute of Crop Research, Xinjiang Academy of Agri-Reclamation Sciences/Key Lab of Xinjiang Production and Construction Corps for Cereal Quality Research and Genetic Improvement, Shihezi 832000)

Abstract: The utilization of heterosis plays an important role in improving wheat yield. Hybrid breeding in wheat is an important development direction for seed production. At present, great progress has been achieved in the strong heterosis combination of hybrid wheat. There are issues such as lack of excellent parents for hybrid combination and hybrid seed production system for high yield and high efficiency wheat, which leads to low seed production efficiency in large area. Therefore, to explore the development of hybrid seed production technology system, germplasm improvement of parental resources and seed production process standards will be conducive to summarizing the overall trend of the development bottleneck and future development direction of hybrid seed production. In this paper, the influencing factors of hybrid breeding in wheat are reviewed. Through the comparison between commercial hybrid crops and superior seed from novel hybrid wheat, some effective suggestions for rapid commercialization of hybrid wheat are put forward, and its future development trend is forecasted.

Key words: hybrid wheat; hybrid seed production; heterosis; precision hill-hole seeding; commercial breeding

小麦作为世界上重要的粮食作物, 为人类提供了 20% 食物热量^[1]。世界粮食安全问题首脑会议预测, 到 2050 年, 世界人口将达到 90 亿, 粮食产量增加到现在的 70%, 可能需要每年增加 4 400 万 t^[2]。但是, 在过去 10 年间, 小麦增产率均在下降^[1], 主要原因有三点: 一是在粮食作物生产中, 与玉米、

水稻相比, 小麦杂交种在生产上的应用利用率较低; 二是近年来, 由于自然环境 (主要是降水和温度) 的急剧恶化, 在小麦生长的关键期出现极剧变化, 导致小麦减产严重; 三是小麦作为六倍体生物, 基因组较大, 在杂种优势利用方面进展比较缓慢。但是, 普遍认为小麦杂种优势利用仍是提高小麦产量的有

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 兵团重点领域科技攻关 (2018AB040)

作者简介: 孔德真, 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 小麦杂种优势利用; E-mail: kongdezhen1746@163.com

通讯作者: 田笑明, 男, 研究员, 研究方向: 小麦杂种优势利用; E-mail: txming729@163.com;

聂迎彬, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 小麦杂种优势利用; E-mail: nieyingbin@126.com

效途径之一^[3]。

目前,小麦杂种优势利用途径有化学杀雄法、二系法、三系法。采用不同杂种优势利用方法,均在小麦杂交组合选配方面取得较大进展。目前,已经选育的杂交小麦品种表现出较强杂种优势,世界平均产量优势达 2.05 t/hm²,较最高的纯系品种增产 15%–30%,在秸秆质量、籽粒品质、肥料利用率、灌浆速率等性状均表现出一定的优势^[4–8]。在过去 60 年,与杂交水稻和玉米相比,杂交小麦研究和应用的商业化程度仍然较低。杂交小麦种植面积表现出逐渐增加的趋势,但是增长速率十分缓慢,目前杂交小麦品种的种植面积仅占全球种植面积的 1%^[9]。与其他作物杂种优势利用水平相比,制种成本和播种量是杂交品种成功商业化的关键因素。缺乏轻简化、规模化、机械化的高产高效制种技术,是制约杂交小麦商业化的主要因素。

当前杂交小麦制种方法主要有宽播幅比制种、行比制种与混播制种(图 1)。由于宽播幅比制种和行比制种在制种过程中存在程序复杂、制种成本高、制种产量低等问题,主要应用于三系杂交小麦不育系扩繁。Wilson^[10]在 1997 年提出一种降低制种成本的杂交小麦混合制种方法,制种过程中,在母本种子中物理性混入一定比例的父本种子,为母本提供足够花粉,减小花粉在授粉过程中的移动距离,进而提高母本异交结实率和制种产量。据报道,与(20:80)–(50:50)行比制种相比,混播制种模式可使产量增加 46%–76%^[11]。混播制种可作为杂交小麦制种选择的主流方法。但是,由于混播制种模式中混入了少量父本种子,从而影响了杂交种纯度,为了在混播制种过程中提高制种产量和种子纯度,杂交小麦育种工作者开展了一系列关于混播制种纯度和制种产量相关的研究。混播制种产量不仅与混入父本比例有关,还与田间管理和制种亲本本身异交特性密切相关;即与母本自身接受花粉的能力和父本散粉能力强弱有关;田间管理主要通过激素调控母本颖壳开张和柱头活力来提高异交结实率和田间机械去除父本提高种子纯度。2016 年,美国内布拉斯加州杂交小麦混播制种产生杂交种仅占该州小麦种植面积的 2.4%^[12]。一项高产高效小麦制种技术的推广应用,不仅需要优异亲本材料与轻简

田间制种模式相适应,还要适宜小麦杂交种种子生产标准和高效种子纯度检测方法。本文重点论述了不同制种亲本性状、制种模式、田间管理方法及种子生产标准对制种产量及杂交种推广的影响,并对杂交小麦制种发展方向进行了展望,为今后杂交小麦制种亲本的选育及高效制种方法的选择提供一定的思路和方法。

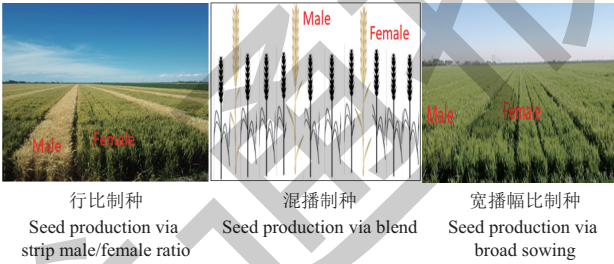


图 1 杂交种的生产方法

Fig. 1 Production methods of hybrid seeds

1 国内杂交小麦制种研究现状

杂交种生产作为杂交小麦大面积推广应用的一个重要环节。为了保证杂交种纯度,国内主要进行行比制种,制种程序繁琐,制种成本高,杂交小麦新品种推广面积较小。随着杂交小麦制种亲本材料的多样化,国内杂交小麦制种技术也逐渐表现出简易、高效、低成本的特点。云南省农业科学院粮食研究所以光温敏为特性的不育材料为重点,采用行比分期播种的制种方法,建立了一套简易、高效、实用的杂交小麦制种技术^[13]。由于光温敏二系杂交小麦制种环境受光照和温度影响较大,在制种前,首先要选择适宜制种区域,杂交制种播种方式,亲本材料种植密度和授粉时间都是杂交制种的关键技术。中国二系杂交小麦制种区域已经涉及四川、云南、安徽、河南等地,制种产量可以达到 4 200–4 650 kg/hm²,制种纯度保持在 96%–99%^[14]。聂迎彬等^[15]在新疆对选育的 AL 型三系杂交小麦新品种新冬 43 号开展了行比制种研究,制种产量达 4 500 kg/hm²,超过了目前杂交小麦行比制种产量平均水平。混播制种作为杂交小麦特殊的制种方式,多个杂交小麦育种单位已经开始小面积制种研究。北京市农林科学院赵昌平研究团队开展二系杂交小麦混

播制种, 制种产量达 6 000 kg/hm², 较行比制种产量增产 10%^[16]。但是, 混播制种生产杂交种纯度仍然是影响杂交小麦新品种大面积推广的主要因素。

2 母本特性对杂交小麦制种产量的影响

小麦是自花授粉作物, 小麦常规栽培品种的异交率最高为 6.05%^[17]。小麦杂交制种是通过异交结实, 母本异交结实率与制种产量呈正相关, 在小麦杂交制种过程中, 母本异交结实率与小花开花时间长短呈正相关性^[18]。母本异交结实率受颖壳开张角度、柱头外露、柱头活力时长、颖壳开张持续时间、小花二次开放时间影响较大。一般认为, 颖壳开张角度、柱头外露和穗下节长度是影响小麦不育系异交结实性的主要因素^[19]。小麦母本柱头长短决定了在小麦颖壳张开时, 柱头外露率大小, 决定了母本接受外来花粉的能力。研究表明, 小麦柱头大小为 2.13–5.2 mm 时, 小麦外来花粉接触到母本柱头就会在表面萌发。母本柱头活力对授粉成功率有较大影响, 在小麦开花后母本柱头活力时间与小花受精率呈正相关, 研究表明, 小麦柱头的有效活力为 2–13 d, 而接受外来花粉最强时间为 2–5 d^[20–21]。小麦柱头活力大小受外界因素影响较大, 小麦开花时的温度和湿度影响柱头活力时间, 温度越高、湿度越小柱头活力持续时间越短。田笑明研究员团队在新疆石河子地区, 对 2 个异交结实率不同的 AL 型细胞质雄性不育系单穗逐日小花开花时间和柱头活力研究发现, 小麦单穗柱头活力持续时间为 2–15 d。小麦内外颖尖张开角度大小可显著影响母本异交结实率(数据未发表)。小麦颖壳张开时, 不同材料之间 2 个前后小花颖片开张角度为 16–40°, 颖壳开张时间存在明显差异, 小麦颖壳开张时间为 12–20 min, 而小麦开花时间为 11–66 min^[22–23]。小麦开颖率与母本的总异交结实率极显著正相关($R=0.8314$), 说明开颖率是决定小麦不育系异交结实率的关键因素之一^[24]。由于小麦小花开花时间受光照和温度的影响较大, 小麦上午开花后, 如果未与外来花粉受精, 在下午可进行二次张开, 这样二次开花可以持续 2–3 d^[25]。杂交小麦结实率是一个遗传变异中等到高的性状, 同时受父本和母本共同性状的影响^[26]。针对不育系异交性状开展全基因组选择和分子标记选择

多性状聚合育种, 把多个有利于异交结实相关性状聚合到育种材料中, 可以提高杂交小麦制种产量。

3 父本对杂交小麦制种产量的影响

小麦杂交制种过程中父本为母本提供花粉, 母本的异交结实率与接受父本花粉数量、质量和时间呈正相关。杂交小麦制种过程中, 父本开花相关多个性状影响母本异交结实率和制种产量。父本花药外露率、花药大小、花药中花粉数量、花粉活性等均对母本异交结实率有较大影响。目前, 通过分子生物学技术可进行多个制种结实相关基因研究。Boeven 等^[27]采用全基因组选择方法, 可在后代材料中对花药外露性状进行选择, 准确率达 0.7。谭照国等^[28]已经成功克隆了花药开裂相关基因 *TaBG*, 过量表达该基因影响小麦花药的开裂, 影响亲本 BS336 花药的散粉能力。通过开发该基因相关的功能标记对恢复系父本材料进行分子辅助选择, 能快速准确选育出含有花药外露率高的亲本材料。小麦花药外露有助于花粉漂移, 提高母本授粉机率, 小麦花药破裂后, 花粉在漂移过程中其活性表现出逐渐降低的趋势。研究表明, 小麦散粉初期花粉粒活性为 81%–98.6%^[29]; 而小麦花粉活性和当时的环境有关系, 当田间温度为 20℃, 相对湿度为 60% 时, 小麦花粉可存活 30 min^[21]。花粉从花药破裂后, 如果未遇到适合萌发的环境, 可借助风力进行二次传粉授粉, 这也为杂交小麦制种过程中人工辅助授粉提供可能。小麦花药大小决定了散粉时花药内部所含有花粉粒数量, 单个花药长度为 3.0–5.1 mm^[30]。小麦在进化过程中形成了自花授粉模式, 在每朵小花中含有 3 枚花药, 每个花药中含有超过 10 万粒花粉, 当一个花药破裂时, 可足以提供多个开放小花的授粉。因此, 在小花开放时, 仅有部分花药破裂提供花粉, 品种之间差异较大。前人研究花药的破裂率为 14.1%–93%^[31], 小麦花丝长度与花药散粉的数量呈显著正相关($R=0.794$), 花药外露率与空气中的花粉数量亦呈显著正相关($R=0.818$), 为小麦异花授粉创造了条件^[32]。选择含有花药破裂率高的亲本材料作为父本, 增加授粉过程中的花粉量, 提高母本异交结实率。为了增加父本花药破裂后花粉萌发的概率, 在强优势杂交组合父母本期选择

时,父母本散粉日期的选择应该是“母等父”,选择母本开花期比父本早 2–3 d,母本穗颖壳张开柱头外露。父本花药破裂后,花粉的漂移主要靠风力推动,由于小麦花粉较其他作物花粉大而重,直径约为 60 μm ,在无风条件下,小麦花粉粒以约 60 $\mu\text{m/s}$ 的速度下沉,小麦 90% 的花粉都落在 6 m 范围内^[33]。为了增加花粉的漂移距离,在制种亲本选择时父本株高较母本株高高出 20 cm 以上,可以提高花粉授粉率。

4 栽培技术对杂交小麦制种产量的影响

利用制种组合父母本开花习性,选用合理制种方法和栽培技术可显著提高杂交小麦制种产量。在三系杂交小麦不育系繁殖过程中,由于不育系和同型保持系扬花期和株高一致,无法在同期播种做到“母等父”。为了改变父母本的花期,提高母本结实率,喷施不同浓度植物激素和微肥,促使母本开花期提前,颖壳张开,柱头活力时间延长,等待父本花药开裂进行授粉,有助于提高小麦的制种产量。赵颖等^[34]在小麦制种过程中给不育系小麦喷施烯效唑、Openau、硼肥 3 种化学物质,开颖角度明显增加,异交结实率提高 6.6%,制种产量可提高 22.2%。喷施一定量的“920”可以使不育系提早抽穗,延长柱头的授粉能力^[35]。陈世雷等^[18]将多效唑和赤霉素配合使用,使成穗数、株头外露率、雌蕊长度和颖壳张开角度分别增加 24.88%–66.51%、0.88%–4.57%、2.64%–6.16% 和 6.93%–14.35%,从而提高异交结实率和制种产量。父母本株高差对制种产量有一定的影响,为了提高父母本的株高差,在小麦起身期,给母本喷施一定量矮壮素,降低母本株高,给父本喷施一定量赤霉素,提高父本株高,增加父母本株高差约 20 cm,提高母本结实率。因此,根据制种亲本,采用特性选用合理药剂和田间管理方式可提高母本的异交结实率和制种产量。

在杂交小麦制种过程中,采用人工辅助授粉可显著提高制种产量。秦志列等^[36]研究发现,在不育系花后 4–8 d 进行辅助授粉,可显著提高母本的异交结实率。目前,杂交小麦制种时采用的辅助授粉方式有多种,王拯等^[37]在混播制种过程中,通过对竹竿、绳子、汽油喷药器和施药直升机进行辅

助授粉,发现直升机和绳子辅助授粉可显著提高制种产量,通过成本计算,直升机辅助授粉效率最高、成本最低。在人工辅助赶粉过程中,合理的赶粉时间和次数对制种产量有较大的影响,小麦母本(不育系)开花后,颖壳一直张开直到授粉或柱头失去授粉能力后关闭;父本每天有上午和下午 2 次开花高峰期,有时甚至到 18:00 时仍有开花,因此,赶粉次数越多产量增加越多^[38]。在适宜的时间段选用合理的赶粉方式可有效提高制种产量。

5 不同制种模式对杂交种产量和纯度的影响

杂交小麦杂交种纯度影响了杂交组合杂种优势和商业化应用。为了保证杂交种制种纯度,目前生产上采用行比制种方法,在收获时,对父本和母本分别收获,虽然能保证收获杂交种纯度,但是制种产量低,制种成本高。因此,针对提高行比制种产量开展相关研究,不育系播幅对制种产量的影响,周维等^[39]用化杀法在关中灌区对西杂一号开展行比制种,制种田以选择 2 行父本、6–9 行母本的行比播幅组合为佳。杨木军^[40]对“二系”杂交小麦云杂 5、6 号的最佳行比制种进行研究发现,父母本行比最佳比例为 2:6 时,制种产量和效益达到最佳,阮任武等^[41]在行比制种过程中氮肥使用量研究发现,杂交新组合父母本行比为 (2:5)–(2:6)、氮肥施用量为 300–450 kg/hm^2 的处理为最佳。由于杂交制种亲本特性不同,导致不同制种组合需要不同制种技术相适应。

为了适应杂交小麦大面积推广应用,混播制种模式逐渐应用于小麦杂交制种。混播制种虽然提高了制种产量,降低了制种成本,但是种子纯度明显降低。针对混播制种体系开展研究,首先进行制种亲本种质资源创新,柯杰^[42]对河南杂交小麦最新研究进展进行报道,茹振钢将对苯磺隆敏感致死基因导入不育系,花后坏死基因导入恢复系,开展混播制种进行不育系的扩繁和杂交制种使种子纯度达到 98% 以上。在水稻中已成功开展了药剂去除父本的混播制种研究,在父本恢复系中导入携带除草剂(苯达松)敏感基因,制种时在母本中混入少量父本,在授粉结束后喷施除草剂苯达松杀除父本,而未携带该基因的母本可以正常生长,在收获时可进

行混合收获^[43]，杂交小麦可借鉴该方法，开展混播制种。在杂交小麦制种过程中，采用机械去除父本穗开展混播制种，在亲本材料选择方面选择父本抽穗一致，株高较母本高 20 cm，在母本中混入一定量父本，在父本授粉结束后采用机械割除高于母本穗的父本，也可达到较高杂交种纯度。通过父本和杂交种种皮之间颜色差异，在混播制种后进行混收，采用选机进行筛选杂交种中的父本籽粒，从而提高杂交种的种子纯度。上述几种制种方法虽然去除了混播制种过程中的父本，由于除草剂药效和父本植株发育不齐，父母本生育期之间的差异，造成父本去除后仍有小部分父本穗混在母本群体中，可影响杂交小麦杂交种纯度和穗层整齐度。在混播制种过程中，混入父本比例对制种产量和纯度均有一定影响，Nie 等^[44]采用 3 个不同异交结实率和开花期的杂交组合开展不同混播比例对制种产量和纯度研究，在混入恢复系种子比例 6%–8% 时，制种产量和纯度均达到最佳。因此，开展混播模式制种研究不仅需要对亲本种质资源进行研究，还需要对制种过程中的混入比例进行研究，确定最优父本比例从而使产量和纯度达到最佳。

6 小麦杂交种子纯度检测

应用农作物的杂种优势，种子纯度是非常重要的^[45]。由于杂交种生产过程中容易产生父本生物学和机械混入，导致杂交种纯度降低。因此，建立一套快速、简单、准确的杂交小麦种子纯度检测方法十分必要。杂交小麦种子检测方法经历生态学鉴定、生理生化鉴定和分子标记鉴定 3 个阶段。生态学鉴定虽然简单、直观，但周期长、费时费工且易受环境影响，具有很大的局限性。利用杂交种之间的蛋白差异，通过酸性聚丙烯酰胺电泳建立不同品种之间的蛋白谱，从而鉴定杂交种纯度。赵伟等^[46]利用种子麦醇溶蛋白通过酸性聚丙烯酰胺凝胶电泳对西杂一号、西杂三号、西杂五号建立标准图谱库，可进行杂交种纯度鉴定。目前，采用亲本特异序列开发分子标记，建立杂交种纯度快速检测方法。杂交小麦标记开发主要是利用恢复系上特异恢复基因和不育系上不育基因特异序列开发功能性分子标记，桂安胜等^[47]以 CMS-AL 型为亲本材料，采用 BSA

和 SSR 标记，精确定位出了 1B 染色体上恢复基因在 *Xgwm413* 和 *Xbarc8* 之间，Nie 等^[44]采用 *Xbarc8* 标记，在 AL 型三系杂交小麦新品种新冬 43 号中混入不同比例恢复系，建立了三系杂交小麦纯度检测回归方程，可用于 AL 型杂交小麦杂交种纯度的快速检测。Tiwari 等^[45]对已经准确定位的 20 对恢复基因 SSR 标记，在 40 个杂交小麦杂交种和 14 个亲本上进行准确性验证，发现有 8 个标记可准确鉴定出杂交种和亲本材料，说明 SSR 标记可进行杂交种纯度间鉴定。随着杂交小麦不育系和恢复系相关主效基因的定位克隆，相关功能基因分子标记已经逐渐应用于杂交小麦育种的辅助选择和杂交种纯度鉴定，目前，实时荧光定量 PCR 检测方法用于杂交种纯度的检测，检测时可进行混样 PCR 检测，可大大减小检测工作量。但是，部分定量检测体系和功能序列开发仍然需要进一步优化，未来种子纯度检测技术可在该领域有所突破。

7 展望

7.1 创制新型亲本材料，简化杂交小麦制种程序

分子技术已经成功应用于杂交小麦育种过程，采用分子技术创制出一批适宜杂交小麦制种的亲本材料，通过相应田间管理技术，可以不断简化杂交小麦制种程序，提高制种效率，降低制种成本。目前，已经基于提莫菲维小麦 CMS 系统 1A、7D、1B、6B、6D、5D、7B 和 2D 染色体上成功定位 8 个恢复基因 (Rf1–Rf8)^[48–49]，通过对多个不育恢复基因定位和克隆，采用分子辅助聚合育种使多个恢复基因聚合在恢复系中，使新选育恢复系恢复力明显增强，提高杂交种自交结实和产量。采用转基因、基因编辑等技术已经成功创制适合杂交小麦制种的种质资源，如恢复系敏感除草剂^[50–51]、花后坏死基因导入恢复系、不育系叶色^[52]、种皮颜色^[53]、籽粒形状差异^[54]明显的材料，已被逐渐运用于作物制种研究。闫文利^[55]在恢复系中导入除草剂苯磺隆敏感基因 (*tsl*)，在父本授粉结束后，采用除草剂去除父本，可显著提高杂交种种子纯度。由于小麦是分蘖作物，每个分蘖穗之间发育存在差异，对除草剂敏感性存在差异，应该进一步了解分蘖穗差异对制种产量和纯度的影响，在田间管理过程中尽量减小分蘖穗之

间的生理差异,可以进一步提高制种产量和纯度^[40]。通过分子技术定向育种可以创造出杂交种籽粒大小、种皮颜色之间差异明显的亲本,在混播制种后混合收获,采用色选机和粒型筛选机进行区分父本和杂交种,简化制种程序,提高杂交种纯度。周杰强等^[56]采用水稻不育系(千粒重:14 g)和恢复系(千粒重:28.2 g)为亲本材料,选育水稻新品种卓两优 141 进行混播制种研究,由于籽粒之间差异明显,在制种收获后采用特制的狭长形筛孔筛子进行分离,实现杂种 F_1 和父本种子的高效分离,实现水稻机械化制种。杂交小麦种质资源创新过程中可参照杂交水稻杂交种和父本籽粒形状之间显著差异,开展特异亲本材料创制和相应制种加工技术相结合的方法,不断简化杂交小麦的制种过程,实现杂交种的机械化和商业化制种。

7.2 杂交小麦商业化和国家政策推动种子标准制定

由于水稻、玉米等大田杂交作物已经逐渐实现全球商业化,推动杂交制种技术的不断革新。杂交小麦目前处于局部的生产应用阶段,主要是由于缺乏适应大规模应用的强优势杂交小麦新品种和成熟的规模化制种技术。光温敏雄性二系杂交小麦制种受温度影响较大、适宜制种的区域较狭窄、制种土地分散、高成本制种方式是限制杂交小麦快速发展的主要因素。在作物种子生产全球化的今天,一个强优势杂交组合的推广,不仅需要有一个高产、高效制种技术规程,还需要流程化强的种业公司推动和不断投入,在制种过程中不断降低制种成本,提高种植杂交种生产带来的收益,从而达到杂交小麦的大规模应用。另一方面,目前,小麦的播种方式仍然处于“条播”状态,无法使单粒种子效应发挥到最大,致使部分小麦种子浪费,无法实现“种产比”最大化。小麦杂交种较常规品种具有较强的杂种优势,为了使杂交种的杂种优势表现出来,可以适当减少播种量,使小麦播种实现“精播”,可降低杂交小麦的用种子成本,加快杂交小麦品种的应用。小麦常规品种大田生产用种纯度为 99.9%,杂交小麦作为一种新型小麦品种,种子生产纯度无法达到常规种的水平。因此,需要抓紧制定小麦杂交品种

生产用种的种子标准,参考玉米、水稻杂交作物生产用种纯度 $\geq 96\%$,可适度降低杂交小麦品种用种纯度,降低杂交小麦用种成本。

8 结论

开展小麦杂种优势利用是小麦发展的重要方向。应该像当年杂交水稻攻关一样,在全国范围内整合杂交小麦的育种技术力量,开展多家育种单位和种业联合的杂交小麦育种和产业化关键技术攻关。利用多功能分子生物学技术,开展多组学与基因编辑技术相结合的选育方法,加快挖掘出能显著提高制种产量和小麦杂种优势的外源功能基因并加以利用,从而选配出杂种优势强、制种产量高的杂交小麦新组合。

杂交小麦的商业化育种有助于加快育种和制种技术不断创新。尤其是制种技术集成和应用方面,制种技术商业化可以使单一杂交种制种更加集中,田间管理更加趋于标准化,减小目前小规模制种选用隔离区和田间管理方面带来的浪费。目前,国家没有出台杂交小麦大田种子生产使用标准,若仍然使用常规小麦种子标准,这样相对于水稻和玉米稀植等大田作物的杂交种使用标准就有所偏高,增加了杂交小麦制种和用种成本。在杂交小麦商业化后国家应加快出台小麦杂交种的使用标准,有助于杂交种快速生产应用。

参考文献

- [1] Brenchley R, Spannagl M, Pfeifer M, et al. Analysis of the bread wheat genome using whole-genome shotgun sequencing [J]. *Nature*, 2012, 491 (7426): 705-710.
- [2] Whitford R, Fleury D, Reif JC, et al. Hybrid breeding in wheat : technologies to improve hybrid wheat seed production [J]. *J Exp Bot*, 2013, 64 (18): 5411-5428.
- [3] Mette MF, Gils M, Longin CFH, et al. Hybrid breeding in wheat [M] // *Advances in Wheat Genetics : From Genome to Field* Tokyo : Springer Japan, 2015 : 225-232.
- [4] Longin C, Mühleisen J, Maurer HP, et al. Hybrid breeding in autogamous cereals [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, 125 (6): 1087-1096.
- [5] Longin CFH, Gowda M, Mühleisen J, et al. Hybrid wheat :

- quantitative genetic parameters and consequences for the design of breeding programs [J]. *Theor Appl Genet*, 2013, 126 (11): 2791-2801.
- [6] Schwarzwälder L, Thorwarth P, Zhao YS, et al. Hybrid wheat: quantitative genetic parameters and heterosis for quality and rheological traits as well as baking volume [J]. *Theor Appl Genet*, 2022, 135 (4): 1131-1141.
- [7] 沈秋泉, 张全德, 黄纯农. 小麦二十四个亲本双列杂交配合力、遗传力和杂种优势的分析 [J]. *作物学报*, 1981, 7 (4): 217-224.
- Shen QQ, Zhang QD, Huang CN. The analysis of combining ability, heritability and heterosis of twenty four wheat parents with diallel crossing method [J]. *Acta Agron Sin*, 1981, 7 (4): 217-224.
- [8] Uddin MN, 周恒. 澳大利亚小麦杂种优势的研究 [J]. *麦类作物学报*, 1992, 12 (6): 4-7.
- Uddin MN, Zhou H. Studies on heterosis of wheat in Australia [J]. *Acta Triticeae Crops*, 1992, 12 (6): 4-7.
- [9] Longin CFH. Future of wheat breeding is driven by hybrid wheat and efficient strategies for pre-breeding on quantitative traits [J]. *Research & Reviews: J Botanical Sci*, 2016, 32-33.
- [10] Wilson P. Hybrid wheat development in Australia and a proposal for hybrid wheat blends for developing countries [R]. Mexico, CIMMYT, 1997, 17-22.
- [11] Koekemoer FP, Van Eeden E, Bonjean AP. An overview of hybrid wheat production in South Africa and review of current worldwide wheat hybrid developments [M] // Bonjean AP, Angus WJ, Van Ginkel M. *The world wheat book: a history of plant breeding*. Paris: Lavoisier, 2011: 907-950.
- [12] Baenziger PS, Rose D, Santra D, et al. Improving small grains varieties for Nebraska, State breeding and quality evaluation report to the Nebraska Wheat Development [R]. Utilization and Marketing Board, Nebraska, 2017.
- [13] 李绍祥, 顾坚, 田玉仙, 等. 云南杂交小麦制种技术研究进展 [J]. *种子*, 2011, 30 (7): 59-63.
- Li SX, Gu J, Tian YX, et al. Advance of hybrid wheat seed production in Yunnan [J]. *Seed*, 2011, 30 (7): 59-63.
- [14] Zhao CP. Research and application of hybrid wheat in China [J]. *Eng Sci*, 2013, 11 (5): 19-21.
- [15] 聂迎彬, 田笑明, 韩新年, 等. 高产优质杂交小麦新品种—新冬43号 [J]. *麦类作物学报*, 2014, 34 (11): 1450.
- Nie YB, Tian XM, Han XN, et al. A new hybrid wheat variety with high yield and good quality-Xindong 43 [J]. *J Triticeae Crops*, 2014, 34 (11): 1450.
- [16] 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): 66-73.
- Chen XJ, Yang BA, Fan JL, et al. Advances in utilization of heterosis in wheat [J]. *Seed*, 2022, 41 (1): 66-73.
- [17] Singh S, Chatrath R, Mishra B. Perspective of hybrid wheat research: a review [J]. *Indian J Agric Sci*, 2010, 80 (12): 1013-27.
- [18] 陈世雷, 何蓓如, 宋喜悦, 等. 多效唑拌种配合使用赤霉素对小麦温敏不育系制种性状的影响 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36 (12): 64-68, 76.
- Chen SL, He BR, Song XY, et al. Effect of the combined application of MET in seed dressing and spurting GA₃ on thermo-sensitive male-sterile wheat line in seed production [J]. *J Northwest A F Univ Nat Sci Ed*, 2008, 36 (12): 64-68, 76.
- [19] Khan MN, Heyne EG, Arp AL. Pollen distribution and the seedset on *Triticum aestivum* L. [J]. *Crop Science*, 1973, 13 (2): 223-226.
- [20] Singh SK. Character association and path coefficient analysis for yield and floral characters in wheat (*Triticum aestivum* L em Thell) [J]. *Crop Improv*, 2005, 32 (2): 124-129.
- [21] 李正德. 小麦柱头年龄与结实率及性状遗传的关系 [J]. *作物学报*, 1964 (2): 217-219.
- Li ZD. Relationship between stigma age and seed setting rate and trait inheritance in wheat [J]. *Acta Agron Sin*, 1964 (2): 217-219.
- [22] Vries APD. Flowering biology of wheat, particularly in view of hybrid seed production — A review [J]. *Euphytica*, 1971, 20 (2): 152-170.
- [23] Singh SK, Singh R. Floral biology and character association studies in wheat [J]. *Farm Sci J*, 2004, 13 (1): 21-23.
- [24] 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): 1671-1675.
- Li HS, Li SX, 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]. *J Triticeae Crops*, 2015, 35 (12): 1671-1675.

- [25] Hoshikawa K. Studies on the reopen floret in wheat [J]. *Jpn J Crop Sci*, 1960, 29 (1): 103-106.
- [26] Boeven PHG, Würschum T, Rudloff J, et al. Hybrid seed set in wheat is a complex trait but can be improved indirectly by selection for male floral traits [J]. *Euphytica*, 2018, 214 (7): 1-13.
- [27] Boeven PHG, Longin CFH, Leiser WL, et al. Genetic architecture of male floral traits required for hybrid wheat breeding [J]. *Theor Appl Genet*, 2016, 129 (12): 2343-2357.
- [28] 谭照国, 李艳梅, 白建芳, 等. 小麦 TaBG 的克隆及其在花药开裂中的潜在功能 [J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (13): 2710-2723.
- Tan ZG, Li YM, Bai JF, et al. Cloning of TaBG and analysis of its function in anther dehiscence in wheat [J]. *Sci Agric Sin*, 2021, 54 (13): 2710-2723.
- [29] Singh SK, Singh R. Variability and character association among floral traits and yield in bread wheat [*Triticum aestivum* (L.) em Thell] [J]. *Indian J Plant Genetic Resources*, 2001, 14 (2): 199-201.
- [30] Komaki MK, Tsunewaki K. Genetical studies on the difference of anther length among common wheat cultivars [J]. *Euphytica*, 1981, 30 (1): 45-53.
- [31] Singh SK, Joshi A. Variability and character association for various floral characters in wheat [*Triticum aestivum* (L.) em Thell.] [J]. *Indian J Genet Plant Breed*, 2003, 63 (2): 153-154.
- [32] 徐仲阳. 杂种小麦高效制种技术体系研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- Xu ZY. Study on seed production in hybrid wheat [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006.
- [33] Johnson RR, Brown CM. Use of DPX3778 to produce hybrid wheat Seed [J]. *Crop Sci*, 1978, 18 (6): 1026-1028.
- [34] 赵颖, 何觉民. 烯效唑和硼肥对杂交小麦制种产量的影响 [J]. *广东农业科学*, 2010, 37 (11): 17-18.
- Zhao Y, He JM. Influence of uniconazole and boron on the seed production of hybrid wheat [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2010, 37 (11): 17-18.
- [35] 奚亚军, 马键铨, 何蓓如, 等. 九二〇在杂交小麦不育系繁殖中的应用研究 [J]. *麦类作物学报*, 1996, 16 (2): 19-21.
- Xi YJ, Ma LJ, He BR, et al. Study on the application of 920 in the propagation of sterile lines in hybrid wheat [J]. *Tritical Crops*, 1996, 16 (2): 19-21.
- [36] 秦志列, 张凤廷, 叶志杰, 等. 不同花粉密度条件下光温敏雄性不育小麦 BS366 异交结实分析 [J]. *华北农学报*, 2007, 22 (4): 130-133.
- Qin ZL, Zhang FT, Ye ZJ, et al. Study on outcrossing rate in photo-thermo-sensitive male sterile wheat line BS366 under different pollen density [J]. *Acta Agric Boreali Sin*, 2007, 22 (4): 130-133.
- [37] 王拯, 张胜全, 叶志杰, 等. 杂交小麦种子生产中不同辅助授粉技术研究 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45 (17): 29-31.
- Wang Z, Zhang SQ, Ye ZJ, et al. Study on different supplementary pollination methods in hybrid wheat seed production [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2017, 45 (17): 29-31.
- [38] Singh SK. Evaluation of spring wheat [*Triticum aestivum* (L.) em Thell] germplasm for various floral characteristics [J]. *SAARC J Agric*, 2006, 4: 167-177.
- [39] 周维, 张改生, 刘宏伟, 等. 杂种小麦“西杂一号”高效制种技术的研究 I. 行比播幅的配置 [J]. *西北农业学报*, 2002, 11 (1): 41-43.
- Zhou W, Zhang GS, Liu HW, et al. Study on the seed production techniques of hybrid wheat XZ1 I dispose of row-ratio and drill-strip width [J]. *Acta Agric Boreali Occidentalis Sin*, 2002, 11 (1): 41-43.
- [40] 杨木军. 温光敏两系法杂交小麦技术体系的研究与应用 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- Yang MJ. Studies and application of thermo-photo-sensitive two-line system hybrid wheat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [41] 阮仁武, 严莉莉, 胡丹, 等. 父母本行比及氮肥施用量对杂交小麦制种产量及其构成因素的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2016, 44 (25): 14-17.
- Ruan RW, Yan LL, Hu D, et al. Effect of different row ratios between male and female parents and application amount of nitrogen fertilizer on hybrid wheat seed production and its component factors [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2016, 44 (25): 14-17.
- [42] 柯杰. 河南杂交小麦研究取得新进展 [N]. *中国科学报*, 2017-07-19.
- Ke J New progress was made in hybrid wheat research in Henan province [N]. *Chin J Sci*, 2017-07-19.
- [43] 刘延斌, 杨远柱, 刘建丰, 等. 杂交水稻亲本混播机械化制种

- 研究进展[J]. 作物研究, 2012, 26(1): 85-87, 102.
- Liu YB, Yang YZ, Liu JF, et al. Research progress of mechanization production of hybrid rice seed through parents' seeds mixed planting[J]. Crop Res, 2012, 26(1): 85-87, 102.
- [44] Nie YB, Kong DZ, Cui FJ, et al. Mixing AL type male sterile line and restorer line to producing wheat hybrid and molecular identification of hybrid line purity[J]. Seed Sci and Technol, 2021, 49(3): 1-11.
- [45] Tiwari A, Mishra DK. Application of SSR markers for purity testing of hybrid wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Int Res J Pure Appl Chem, 2020: 31-40.
- [46] 赵伟, 邵景侠, 张改生. 麦醇溶蛋白电泳技术在杂交小麦种子纯度鉴定中的应用[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(2): 223-225, 330.
- Zhao W, Shao JX, Zhang. GS Application of gliadin electrophoregrams in hybrid seed purity test of wheat[J]. J Triticeae Crops, 2007, 27(2): 223-225, 330.
- [47] 桂安胜, 聂迎彬, 马丽, 等. 小麦雄性不育系 AL18A 育性恢复基因的 QTL 定位[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(1): 1-6.
- Gui AS, Nie YB, Ma L, et al. Mapping QTLs of fertility restoring genes for AL-type male sterility line AL18A in wheat[J]. J Triticeae Crops, 2017, 37(1): 1-6.
- [48] Zhou WC, Kolb FL, Domier LL, et al. SSR markers associated with fertility restoration genes against *Triticum timopheevii* cytoplasm in *Triticum aestivum* [J]. Euphytica, 2005, 141(1/2): 33-40.
- [49] Sinha P, Tomar SMS, Vinod, et al. Genetic analysis and molecular mapping of a new fertility restorer gene Rf8 for *Triticum timopheevi* cytoplasm in wheat (*Triticum aestivum* L.) using SSR markers[J]. Genetica, 2013, 141(10/11/12): 431-441.
- [50] 张集文, 武晓智. 水稻光-温敏雄性不育系化学致死突变体的诱变筛选与初步研究[J]. 中国水稻科学, 1999, 13(2): 65-68.
- Zhang JW, Wu XZ. Screening and preliminary study on the chemical lethal mutant in rice photoperiod temperature sensitive male sterile line[J]. Chin J Rice Sci, 1999, 13(2): 65-68.
- [51] 王永杰. 水稻农林 8 号、农林 8 号 m cDNA 文库的构建和 BSL 基因的筛选[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2003.
- Wang YJ Construction of Nonglin 8 and Nonglin 8m cDNA library and screening of BSL gene in rice[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2003.
- [52] 张青, 符永庆, 钟其全, 等. 基于叶色标记不育系的杂交水稻全程机械化制种技术[J]. 杂交水稻, 2021, 36(5): 25-28.
- Zhang Q, Fu YQ, Zhong QQ, et al. Full mechanization seed production techniques of hybrid rice based on leaf color labeling sterile line[J]. Hybrid Rice, 2021, 36(5): 25-28.
- [53] 刘忠祥, 周宽基, 王世红. 兰州核不育小麦突变体的遗传研究及其应用[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 129-135, 141.
- Liu ZX, Zhou KJ, Wang SH. Studies and application of genetics of wheat recessive male sterile mutant[J]. Agric Res Arid Areas, 2010, 28(6): 129-135, 141.
- [54] 唐文帮, 张桂莲, 邓化冰. 杂交水稻机械化制种的技术探索与实践[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(2): 95-103.
- Tang WB, Zhang GL, Deng HB. Technology exploration and practice of hybrid rice mechanized seed production[J]. Chin J Rice Sci, 2020, 34(2): 95-103.
- [55] 闫文利. 小麦苯磺隆敏感致死基因的分子标记定位[D]. 新乡: 河南科技学院, 2015.
- Yan WL. Molecular mapping for tribenuron-methyl susceptible lethality gene in wheat[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2015.
- [56] 周杰强, 张桂莲, 邓化冰, 等. 水稻小粒不育系新组合卓两优 141 混播制种优势分析[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 320-331.
- Zhou JQ, Zhang GL, Deng HB, et al. Advantages of small grain male sterile lines in seed production for a new combination Zhuoliangyou 141 through the mixed-sowing manner[J]. Acta Agron Sin, 2022, 48(2): 320-331.

(责任编辑 李楠)