

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2026.0019

西瓜染色体易位及少籽西瓜育种研究进展

高素燕^{1,2}, 商纪鹏^{1,3}, 王 钦^{1,3}, 何 伟^{1,2}, 郝建全^{1,2}, 焦 荻^{1,2}

(1. 蔬菜生物育种全国重点实验室·天津市农业科学院·天津市蔬菜遗传育种企业重点实验室 天津 300381;
2. 天津市农业科学院蔬菜研究所 天津 300384; 3. 天津科润蔬菜研究所 天津 300384)

摘要: 随着消费水平的提高,人们对西瓜无籽化的要求逐渐提高,二倍体水平的无籽西瓜多是人工对雌花子房喷施植物生长调节剂后诱导单性结实而获得,无法在露地条件下大面积实施;传统的三倍体无籽西瓜,虽然做到了果实无籽化,也适宜在露地大面积种植,但存在采种量低、发芽率低、成苗率低的“三低”问题。染色体易位少籽西瓜既实现了种子数量的显著减少,具有生产和种植优势,同时无需辅助喷施药剂,可以实现大规模轻简化种植。本文系统综述了西瓜染色体易位的研究进展,重点阐述了近年来对西瓜染色体易位的产生途径、鉴定方法和遗传机制的研究,并对染色体易位在少籽西瓜育种上的应用现状及未来发展前景进行了展望,旨在为西瓜易位新种质的创制及少籽西瓜新品种选育提供参考。

关键词: 西瓜;染色体易位;少籽育种;诱变;细胞遗传学

中图分类号: S651 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2871(2026)05-001-06

Research progress on chromosome translocation and breeding of less-seed watermelon

GAO Suyan^{1,2}, SHANG Jipeng^{1,3}, WANG Qin^{1,3}, HE Wei^{1,2}, HAO Jianquan^{1,2}, JIAO Di^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Vegetable Biobreeding/Tianjin Academy of Agricultural Sciences/Tianjin Key Laboratory of Vegetable Genetics and Breeding Enterprises, Tianjin 300381, China; 2. Vegetable Research Institute, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Kernel Vegetable Research Institute, Tianjin 300384, China)

Abstract: With the improvement of consumption standards, the demand for seedless watermelon has gradually increased. At the diploid level, seedless watermelons are mostly obtained by artificially spraying plant growth regulators onto the pistil ovaries to induce parthenocarpy, the method cannot be widely implemented under open field conditions. Traditional triploid seedless watermelon, while achieving seedless fruit and suitability for large-scale open field cultivation, suffer from the “three-low” problems: Low seed yield, low germination rate, and low seedling survival rate. Chromosome translocation less-seed watermelon has significantly reduced seed number, offering both production and cultivation advantages, and they enable large-scale, simplified cultivation without the need for auxiliary chemical applications. This paper systematically reviews the research progress on chromosome translocation in watermelon, focus on elucidating recent studies on the generation pathways and mechanisms of chromosome translocation. Additionally, it discusses the current applications and future prospects of chromosome translocation in the breeding of less-seed watermelon. The objective is to propose strategies for the creation of new translocation-based germplasm and the breeding of less-seed watermelon cultivar.

Key words: Watermelon; Chromosome translocation; Less-seed breeding; Mutagenesis; Cytogenetics

易位是染色体结构变异的一种,是通过辐射、远缘杂交、基因编辑等获得非同源染色体间片段的相互易位,进而导致植物花粉或卵细胞的部分不育^[1]。国内外曾先后在玉米、大麦、水稻、花生等多

种作物上诱发了染色体易位^[2-10],并将获得的易位资源用于作物育种。易位少籽西瓜是利用染色体易位系亲本与普通二倍体亲本配制的杂种一代西瓜品种^[11],既实现了种子数量的显著减少,亦无需辅助

收稿日期:2026-01-08;修回日期:2026-02-28

基金项目:天津市自然科学基金(24JCQNJC01300);蔬菜生物育种全国重点实验室(天津);天津市财政种业创新研究专项(2025ZY-CX001)

作者简介:高素燕,女,副研究员,主要从事西瓜遗传育种研究。E-mail:gsygsy0321@163.com

通信作者:焦 荻,男,副研究员,主要从事西瓜遗传育种研究。E-mail:jiaodi1989@126.com

喷施药剂,栽培管理同普通二倍体西瓜^[12-14],可以实现大规模轻简化种植,具有生产和种植优势。此外,易位少籽与多倍体少籽(无籽)相比,具有种子生产成本低、发芽成苗率高、早熟、管理简单等优势,解决了“好吃又好种”问题,是大面积生产利用的有效途径^[15-17]。自20世纪70年代以来,国内外学者围绕西瓜染色体易位的诱导、鉴定、遗传机制与育种应用开展了一系列研究,取得了显著进展。本文旨在对相关研究进行系统梳理,以期为未来高效创制西瓜易位新种质及培育少籽西瓜品种提供参考。

1 西瓜染色体易位的产生途径

1.1 辐射诱变

通过 χ 射线或 γ 射线等电离射线诱发非同源染色体节间段相互易位导致花粉或卵细胞的部分不育是获得易位系的途径之一,然后通过优良易位系与正常系杂交获得杂种一代, F_1 表现少籽或无籽。通过易位系和正常野生型杂交,杂合易位 F_1 形成不同染色体“环”或“链”,Hiroyuki等^[18]利用 χ 射线照射种子,诱发了在1个单一染色体组内包含由4条染色体组成的“环4”和6条染色体组成的“环6”。朝井小太郎等^[19]用不同剂量 $Co^{60}\gamma$ 射线辐射处理8个二倍体西瓜品种的干种子,其中有7个品种获得了易位体,同时也证明了不同剂量的 $Co^{60}\gamma$ 射线均可以诱发染色体易位。王鸣等^[20]使用 $Co^{60}\gamma$ 射线对旭大和原始易位系及几个优良西瓜品种进行多次重复处理后发现,辐射处理在导致了非常复杂的染色体变异,易位次数增多的同时,杂合易位系的花粉育性和种子数也相应越少。吴进义等^[21]利用 $Co^{60}\gamma$ 射线辐照二倍体西瓜的干种子,从而获得稳定的易位系材料,并育成134-11、铃139等10个易位系。张涛等^[22]利用 $Co^{60}\gamma$ 射线辐照西瓜干种子,诱变染色体易位系,得到2个纯合的自交系。

1.2 回交转育

辐射诱变获得易位系虽然高效,产生的基因组不稳定性和其他不良突变是不可控的^[23],难以获得可直接用于育种的材料。利用易位系与优异育种材料进行回交转育,更容易获得具有目标性状的易位系材料。刘莉等^[13]利用从美国引进的具有2对染色体相互易位的品系Su-1和从日本红旭都中筛选的纯合花皮圆果材料JR-1进行回交转育,通过5代回交和3代自交成功获得具有2对染色体相互易位的综合性状优良的早熟纯系U-2。焦荻^[24]分别以

中育10号、华知A为染色体易位的供体亲本,利用回交转育结合分子标记辅助筛选出新的纯合易位系Crimson-TL、TWF-TL、T-5等。

1.3 基因编辑技术

随着生物技术的发展,利用CRISPR基因编辑技术诱导西瓜染色体定向易位成为一种可能。Schmidt等^[25]使用CRISPR/Cas9系统在植物基因组中高效诱导遗传性易位的方法,通过在同一条染色体上设计2个靶点,成功诱导了易位,并且这些易位可以在植物的后代中遗传。Nataljia等^[26]利用CRISPR系统在拟南芥中首次证实了人为介导的植物染色体定向易位,虽然效率极低(0.01%),但说明通过基因编辑手段可以实现精准的染色体易位。我国科学家基于自然突变来源的纯合易位系MT-a的易位断点序列位置,通过CRISPR/Cas9双靶点荧光载体,在西瓜栽培材料ZZJM上进行农杆菌和发根农杆菌侵染,探索CRISPR介导的染色体易位事件的发生,并成功在愈伤组织中检测出染色体易位事件,为今后在西瓜上定向诱导染色体易位、打破遗传连锁提供了可能^[27]。

2 西瓜染色体易位系的鉴定

2.1 细胞学鉴定

易位是染色体结构的变异,因此可以通过细胞学技术如核型分析、光学影像技术等进行变异结构的直观鉴定。王鸣等^[20]采用改良品红染色压片法在光学显微镜及扫描电子显微镜下观察到多种不同的易位染色体组成。薛志强^[28]对少籽西瓜种质材料F011及其 F_1 代进行了细胞学染色体鉴定,对西瓜花粉母细胞在染色体减数分裂过程中的材料进行取样、固定、解离、染色以及染色体压片中的一些主要参数进行了研究,为快速进行染色体鉴定提供了技术支持。葛洁^[29]以西瓜材料148(母本)、京母(父本)及其 F_1 代2018-Z-4为试验材料,观察 F_1 代减数分裂的染色体特征,在细胞学层面上明确了148杂交少籽表型是由于染色体片段发生了易位。

2.2 荧光原位杂交技术鉴定

寡核苷酸探针(Oligo-FISH)是以人工合成携带荧光基团的单链DNA或RNA序列为探针的荧光原位杂交技术,是染色体可视化的重要技术之一^[30]。基于Oligo-FISH的寡核苷酸序列探针可揭示染色质在细胞核、细胞质乃至组织结构中的位置^[31],对易位系进行遗传分析和鉴定,可以很清晰直

观地定位到易位染色体。由于 FISH 探针只适用于特定的已知序列,因此无法捕获整个群体的结构变异,对具体的易位断点检测存在局限性^[32]。在小麦、花生等作物上已有多个关于利用 Oligo-FISH 鉴定易位染色体的报道^[33-35],在西瓜上仅有徐兵划等^[36]基于 G42 西瓜基因组开发出了一套共计 20 350 个寡核苷酸探针,以西瓜染色体易位自交系 G59 为试验材料,利用该套探针鉴定出 G59 的 Chr6 和 Chr10 染色体部分片段发生了交换易位。

2.3 分子标记鉴定

分子标记辅助技术(MAS)可以快速选择育种材料中的基因型,有效解决表型观察的问题,已广泛应用于作物育种。基于 SSR、InDel、SNP 等分子标记开发不同易位系的连锁标记,能够实现对易位染色体的精准、快速转育^[37]。Tian 等^[38]通过全基因组二代测序的方法鉴定了基因组中的 SNP 和 InDels 位点,将易位区段定位于 15 936 420~18 030 714 之间,物理距离为 2.09 Mb。焦荻^[24]基于已经确定的纯合易位系(MT-a,b,c)的染色体易位断点,开发出能同时检测纯合野生型(WT-a,b,c)和纯合易位系(MT-a,b,c)的引物组,通过多重 PCR 检测,开发成为检测易位染色体的共显性标记。易位连锁标记经 F₂ 群体验证,共显性标记符合孟德尔 1:2:1 分离定律,且标记与表型共分离,说明基于易位断点开发连锁标记可以在分离后代中有效检测染色体相互易位的发生。

3 西瓜染色体易位的机制研究

3.1 染色体易位的细胞学行为

染色体易位的细胞学行为,主要在减数分裂前期 I 和中期 I 可以观察到清晰的细胞学特征^[39]。由于纯合易位系染色体在减数分裂时,能互相成为配偶而正常联会,染色体行为正常,因此可以形成正常的配子,育性也就得到恢复。在纯合易位体中虽然或多或少产生染色体片段的互换,但细胞中基因分量没有发生变化,在没有位置效应时,纯合易位系和正常二倍体植株几乎没有区别,相互易位纯合体同源染色体联会一切正常,形成的配子可育,无法产生少籽或无籽西瓜。染色体易位杂合体在减数分裂进行到中期 I 和后期 I 时,这两对非同源染色体如果发生邻近式分离,所产生的配子会存在重复和缺失,是不可育的。因此,2 对染色体的简单相互易位产生的杂合易位体是半不育的。刘莉等^[13]的研究结果证明了这一结论,发现 2 对染色体相互易

位可使西瓜花粉败育率达 49%,4 对杂合易位体,可使花粉败育率超过 60%。薛志强^[28]研究表明,二倍体易位系 F011、M05 花粉可育率 100%,F₁ 代花粉可育率仅为 22%,花粉可育率与籽粒数呈正相关。葛洁^[29]利用亚历山大染色法也证实了杂交一代的少籽比例与其花粉败育比例具有相关性。焦荻^[24]通过对纯合野生型、纯合易位系及其 F₁ 进行染色体行为观察,发现 3 组杂合易位 F₁ 在减数分裂终变期染色体联会异常,导致部分配子体遗传物质丢失,形成胚珠和花粉败育表型。

3.2 染色体易位发生的分子机制

随着近年来分子生物学技术的发展,对西瓜染色体易位的遗传及分子机制的研究也取得了突破性进展。西北农林科技大学基于基因组重测序、分子标记开发、图位克隆等技术,证实了易位杂合体 2018-Z-4 的少籽表型是由 1 条染色体片段易位造成的,并揭示了 Chr06 染色体上一段 2.09 Mb 片段发生易位导致少籽西瓜表型^[38]。焦荻^[24]、Jiao 等^[27]通过构建 F₂ 群体,对少籽性状极端表型池进行 BSA-seq 分析,定位少籽性状及其 QTL 关联位点,但是未定位到主效位点,说明少籽性状发生不受主效基因调控。同时采用 BSA-Seq 技术结合三代基因组测序以及细胞学技术,确定了 3 组不同来源的染色体易位系的易位断点,通过分子与 FISH 试验验证了染色体易位的发生机制。

4 染色体易位在少籽西瓜育种中的应用

4.1 易位少籽西瓜的特点

易位少籽西瓜在栽培技术和性状表现上与普通二倍体西瓜一样,与三倍体无籽不同,因为它只是在二倍体水平上由于染色体结构的改变引起了不育,因此不但具有种子少、食用方便、剖面商品性好等优点,而且能显著提高果肉含糖量,同时容易栽培,克服了三倍体无籽西瓜在性状和生产上的弊病。

与三倍体无籽西瓜相比,易位少籽西瓜具有以下特点,详见表 1^[20]。

少籽西瓜品种虽然弥补了三倍体无籽西瓜坐果难的缺陷,但因单瓜种子数少、花粉败育等因素造成坐果较普通二倍体西瓜差。因此在育种中应选用果肉紧密、易坐果的材料为目标转育材料,以提高少籽西瓜坐果性,减少空洞果的出现。在保护地种植时要注意配以授粉品种或用生长调节剂辅助坐果。

表1 三倍体无籽西瓜与染色体易位少籽西瓜比较

Table 1 Comparison between triploid seedless watermelon and chromosomal translocation less-seed watermelon

三倍体无籽西瓜 Triploid seedless watermelon	染色体易位少籽西瓜 Chromosomal translocation less-seed watermelon
1. 无籽,食用方便。但有些瓜中会出现少量着色秕籽和较多的白色秕籽 Seedless, convenient to eat. Few colored shriveled seeds and some white shriveled seeds	1. 种子较普通西瓜显著减少(减少程度与易位染色体对数有关),食用比较方便 Significantly fewer seeds compared to regular watermelon (the degree of reduction depends on the number of translocated chromosome pairs), more convenient to eat
2. 含糖量一般高于普通西瓜,但口感不及普通西瓜 Sugar content is generally higher than common watermelon, but the taste is not as good as common watermelon	2. 含糖量高于普通西瓜,口感与普通西瓜相同 Higher sugar content than common watermelon, the same taste as common watermelon
3. 皮厚,可食部分相对减少 Thick rind, less edible flesh	3. 无此缺点 No such disadvantage
4. 存在空心、畸形、异味等缺点 Defects such as hollow fruit, deformities, and off-flavors	4. 较少发生空心果 Less hollow fruit
5. 栽培技术相对要求较高 Higher cultivation techniques	5. 与普通二倍体一样容易栽培 It is easy for cultivation as common diploid watermelon
6. 种子价格昂贵 Higher seed price	6. 种子价格与普通西瓜相同 The same seed price as common watermelon
7. 育种周期较长 Longer breeding cycles	7. 育种周期与普通西瓜相同 The same breeding cycle as common watermelon

4.2 易位少籽西瓜育种现状

关于易位少籽西瓜育种的报道主要发生在中国、日本、韩国等国家,20世纪70年代以后,日本在这一领域中的研究陷于停顿状态,欧美等国家和地区则尚未开展这方面的研究。我国台湾省农业试验所凤山热带园艺分所在20世纪70年代曾用染色体易位技术育成了少籽小凤西瓜品系,其性状与普通小凤相同,但种子数较正常西瓜减少3/4,唯白色秕籽仍较大,尚需继续研究改进^[20]。广东省农业科学院生物研究所1978年开始进行西瓜染色体易位研究^[19],到1987年已培育出易红1号、易红5号等易位少籽杂交一代,2000年育成雄花退化系华知A,后经验证,该自交系为染色体异位系^[40-42]。王鸣等^[20]在1988年育成一批杂合易位少籽新品系,其中部分优良品系具有高产、优质、早熟和耐贮运的优点。新疆八一农学院、黑龙江省庆发农业发展有限公司、北京市农林科学院、荆州农业科学院、中国农业科学院郑州果树研究所等科研机构和种子公司也陆续育成新优二号、庆红宝、庆发8号、丰收一号、京抗2号、荆杂18、少籽巨宝等少籽西瓜品种^[43-48]。

进入21世纪,国内开展少籽育种研究的单位仅有天津科润蔬菜研究所,近年来育成了多个少籽西瓜品种,如黑鲨、津花四号、少籽黑橄榄等^[49-50],并在生产中大面积推广。同时,通过对种质资源的挖掘,发现由美国引进的种质资源材料久比利、Bush

以及国内资源中育十号中携带2对染色体相互易位,目前生产上育成的少籽西瓜品种多是以中育十号、久比利为易位源而育成的。

5 展望

西瓜是葫芦科重要的水果作物,在世界范围内具有极高的经济价值。无籽、少籽是西瓜果实的理想性状,因其具有食用方便、含糖量高、口感好等诸多优点而备受消费者青睐^[11]。二倍体水平的无籽西瓜,多是人工对雌花子房喷施植物生长调节剂后诱导单性结实而获得的。然而这种生产方式多在保护地设施栽培条件下进行,在露地大面积种植情况下难以实施。此外,人们出于食品安全角度考虑,多对生长调节剂处理的无籽西瓜有所抵触。目前在生产上也多是针对中、小果型西瓜品种进行无籽化处理,如小果型的无籽小吊瓜,中果型的无籽麒麟等,大多作为精品西瓜销售,而对于大面积露地栽培品种则无法实施。三倍体无籽西瓜的“三低”问题在生产中仍无法解决,限制了三倍体无籽西瓜的发展。二倍体易位少籽西瓜,不仅可以满足露地西瓜提升少籽品质的需要,同时克服了传统三倍体无籽西瓜的生产难题,在生产上已显现出明显优势,目前已占据我国露地西瓜栽培的一定面积,且有进一步扩大的趋势。

近年来,我国在西瓜染色体易位研究及少籽西瓜育种方面取得了重要进展,特别是在易位少籽发

生的遗传机制解析方面的研究居领先水平,但仍存在以下几方面不足:一是虽然有通过 CRISPR 介导的染色体易位发生,但诱导效率较低,需进一步探索优化基因编辑介导的西瓜染色体易位重组的遗传转化体系,从而加快易位新种质的创制;二是对易位少籽资源的收集、鉴定和评价工作相对不足;三是少籽品种集中在露地大果型和中果型品种,对于近年来比较热门的高档小果型品种仍较为欠缺。

针对上述问题,未来将重点开展以下几个方面的研究:一是建立高效的西瓜易位系分子辅助转育体系和遗传转化体系,加快西瓜易位新种质的创制;二是系统开展西瓜易位少籽种质资源的收集与精准鉴定,构建易位少籽资源库,为少籽西瓜育种奠定材料基础,三是针对目前西瓜生产中存在的问题及消费市场特点,育成不同类型、不同生育期的少籽西瓜新品种,满足市场需求。

参考文献

- [1] 庄丽芳, 仝增军. 植物染色体诱变研究与应用进展[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(1): 3-17.
- [2] WEBER D F. Use of maize monosomics and B-A translocations to map genes[J]. Plant Breeding Reviews, 1994, 12: 41-63.
- [3] OZIAS- AKINS P, JARRET R L. Nuclear DNA content and ploidy levels in the genus *Arachis*[J]. Journal of Heredity, 1994, 85(5): 382-385.
- [4] LAGUDAH E S, APPLS R. Wheat cytogenetics and cytogenomics: From translocation mining to epigenomics[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2019, 49: 8-14.
- [5] BIRCHLER J A, YAO H. Chromosome translocations in maize: From B-A interchanges to functional genomics[J]. Cytogenetic and Genome Research, 2015, 146: 71-82.
- [6] 朝井小太郎, 陈璞华, 吴进义, 等. 早造籼稻染色体易位系: “青威1号”“青威2号”[J]. 广东农业科学, 1986(3): 11-12.
- [7] 褚启人, 沈华志, 高元华, 等. 水稻相互易位系的易位点鉴定[J]. 科学通报, 1986(7): 548-550.
- [8] 姜慧芳, 段乃雄. 花生种质资源在育种中的利用[J]. 作物品种资源, 1998(2): 24-25.
- [9] 舒焕麟, 杨家秀, 杨足君, 等. 小麦-黑麦染色体代换易位系创新材料的选育及抗病性研究[J]. 四川农业大学学报, 2000, 18(4): 296-299.
- [10] 仝增军, 刘大钧, 陈佩度. 利用染色体 C-分带和双色荧光原位杂交技术鉴定普通小麦-黑麦-簇毛麦双重易位系 1RS·1BL, 6VS·6AL[J]. 遗传学报, 2001, 28(3): 267-273.
- [11] 刘文革. 无籽少籽西瓜研究进展[J]. 北方园艺, 1999(2): 35-37.
- [12] 肖光辉, 肖兰异, 罗赫荣, 等. 主要栽培因子对少籽西瓜产量和品质的影响[J]. 长江蔬菜, 1999(12): 26-29.
- [13] 刘莉, 焦定量, 段爱民, 等. 染色体易位对西瓜主要性状的影响[J]. 果树学报, 2006, 23(1): 81-84.
- [14] 王兴华. 染色体易位少籽西瓜小拱棚栽培技术[J]. 蔬菜, 2006(7): 16-17.
- [15] 李平, 郑金焕, 张明权, 等. 我国易位少籽西瓜研究回顾与展望[J]. 农业科技通讯, 2009(5): 7-8.
- [16] 胡永德. 无籽西瓜生产中的“三低”问题及其对策[J]. 江西园艺, 2004(1): 27.
- [17] 刘文革. 我国无籽西瓜产业发展状况与对策[J]. 长江蔬菜, 2010(8): 121-127.
- [18] HIROYUKI O, WATANABE T, NSHIYAMA I. Reciprocal translocation as a new approach to breeding seedless watermelon: I. Induction of reciprocal translocation strains by X-ray irradiation[J]. Canadian Journal of Genetics and Cytology, 1967, 9(3): 482-489.
- [19] 朝井小太郎, 吴进义, 陈璞华, 等. 诱发染色体易位培育少籽西瓜的研究[J]. 果树科学, 1987, 4(2): 31-32.
- [20] 王鸣, 张兴平, 张显, 等. 用 γ 射线诱发染色体易位选育少籽西瓜的研究[J]. 园艺学报, 1988, 15(2): 125-130.
- [21] 吴进义, 吴逸华, 谢锡林. 诱变选育西瓜染色体易位系的步骤及其杂交 1 代少籽组合的选配[J]. 中国瓜菜, 2013, 26(1): 1-6.
- [22] 张涛, 苏东涛. 西瓜染色体易位系对杂交一代西瓜性状的影响[J]. 山西农业科学, 2017, 45(8): 1225-1227.
- [23] MA X H, WANG Q, WANG Y Z, et al. Chromosome aberrations induced by zebularine in triticale[J]. Genome, 2016, 59(7): 485-492.
- [24] 焦获. 二倍体西瓜染色体易位少籽性状的遗传机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
- [25] SCHMIDT C, PACHER M, PUCHTA H. Efficient induction of heritable inversions in plant genomes using the CRISPR/Cas system[J]. The Plant Journal, 2019, 98(4): 577-589.
- [26] NATALJIA B Y, SCHMIDT C, PACHER M, et al. CRISPR - Cas9-mediated induction of heritable chromosomal translocations in *Arabidopsis*[J]. Nature Plants, 2020, 6(6): 638-645.
- [27] JIAO D, ZHAO H, SUN H, et al. Identification of allelic relationship and translocation region among chromosomal translocation lines that leads to less-seed watermelon[J]. Horticulture Research, 2024, 5(11): uhae087.
- [28] 薛志强. 西瓜 (*Citrullus lanatus*) 种质材料 F₀₁₁ 少籽机理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [29] 葛洁. 西瓜材料 148 杂交少籽机理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [30] MIKS-KRAJNIK M, BABUCHOWSKI A. 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes for direct detection of *Propionibacterium freudenreichii* in presence of *Lactococcus lactis* with multicolour fluorescence *in situ* hybridization[J]. Letters in Applied Microbiology, 2014, 59(3): 320-327.
- [31] TANG Z X, YANG Z J, FU S L, et al. Oligonucleotides replacing the roles of repetitive sequences pAs1, pSc119.2, pTa-535, pTa71, CCS1, and pAWRC.1 for FISH analysis[J]. Journal of Applied Genetics, 2014, 55(3): 313-318.
- [32] 李军师, 黄美瑕, 宋敏, 等. 八倍体小偃麦与普通小麦杂交后代中小麦染色体相互易位类型的鉴定[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(11): 1330-1338.
- [33] 杨漫宇, 杨足君, 杨武云, 等. 多重易位小麦新品种(系)的选育及细胞学鉴定[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(2): 127-133.

- [34] 付留洋. 基于全基因组序列分析的花生寡核苷酸探针研究与应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- [35] 杜培. 小麦、百萨偃麦草和花生染色体荧光原位杂交寡核苷酸探针(套)开发与应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [36] 徐兵划, 赵勤政, 顾妍, 等. 利用寡核苷酸探针鉴定西瓜染色体易位系及染色体易位系的应用[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(3): 37-44.
- [37] 张勇, 申小勇, 张文祥, 等. 高分子量谷蛋白 5+10 亚基和 1B/1R 易位分子标记辅助选择在小麦品质育种中的应用[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1743-1751.
- [38] TIAN S J, GE J, AI G, et al. A 2.09 Mb fragment translocation on chromosome 6 causes abnormalities during meiosis and leads to less seed watermelon[J]. Horticulture Research, 2021, 8(1): 256.
- [39] 秦素平, 张志雯, 董洪平, 等. 一个新小麦不育材料的形态特征及细胞学研究[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(6): 1034-1037.
- [40] 朝井小太郎, 吴进义, 陈璞华, 等. 染色体易位和倍数体技术在西瓜育种上的应用[J]. 广东农业科学, 1993(5): 19-22.
- [41] 吴进义. 西瓜雄花退化系华知 A 育成[J]. 中国西瓜甜瓜, 2000(4): 37.
- [42] 吴进义, 陈璞华, 谢锡林. 西瓜雄花退化系华知 A 的育成在西瓜育种上的应用前景[J]. 中国西瓜甜瓜, 2001(2): 8-9.
- [43] 张树森. 新优二号西瓜栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 1989(2): 36-37.
- [44] 张志发, 王洪军, 刘景生, 等. 优质高产西瓜新品种庆红宝[J]. 中国西瓜甜瓜, 1993(3): 3-4.
- [45] 张志发, 徐小利, 史宣杰, 等. 西瓜新品种庆发 8 号[J]. 园艺学报, 1999, 26(5): 349.
- [46] 周凤珍. 抗枯萎病、炭疽病西瓜新品种京抗 2 号和京抗 3 号的选育[J]. 中国西瓜甜瓜, 1993(4): 4-8.
- [47] 钟正发, 张华, 李平, 等. 少籽西瓜荆杂 18 高产优质栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2014(8): 295-296.
- [48] 尹文山, 马双武, 郑高飞, 等. 西瓜新品种少籽巨宝的选育[J]. 中国西瓜甜瓜, 1998(4): 2-5.
- [49] 焦定量, 段爱民, 张艳宁, 等. 早熟少籽西瓜新品种津花四号的选育[J]. 北方园艺, 2003(5): 36-37.
- [50] 孙振久, 焦定量, 段爱民, 等. 早熟小型西瓜少籽黑橄榄的选育[J]. 中国蔬菜, 2006(2): 30-31.