

小偃麦的创制及应用研究进展

程舒唯¹, 王惠¹, 赵心宇¹, 于晓宁², 高岐玉¹, 宋维富³,
杨雪峰³, 宋庆杰³, 丁佳蕊¹, 张会新¹, 张延明¹

¹黑龙江省分子细胞遗传与遗传育种重点实验室 / 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 哈尔滨 150025;

²黑龙江省农业科学院行政保卫处, 哈尔滨 150086; ³黑龙江省农业科学院作物资源研究所, 哈尔滨 150086

摘要: 偃麦草属是小麦近缘种属中应用较为广泛的野生资源之一, 作为小麦遗传改良和种质创新的重要基因源, 在创制小麦桥梁材料和遗传育种方面发挥了重要作用。小偃麦创制工作始于20世纪20年代, 是通过远缘杂交, 将偃麦草属植物的染色体或染色体组遗传成分导入到普通小麦中, 培育小偃麦(部分)双二倍体、异附加系、异代换系、易位系和渐渗系。小偃麦(部分)双二倍体主要是八倍体小偃麦(AABBDDXX, $2n=8x=56$)和六倍体小偃麦(AABBXX, $2n=6x=42$), 来源于偃麦草的染色体组(XX)多为混合染色体组(异源染色体组)。我国自20世纪50年代开始小麦与偃麦草远缘杂交工作, 创制了类型丰富的小偃麦, 在小麦抗病研究和新种质创制方面表现突出, 在此基础上培育出一系列高产优质的小麦品种。小偃麦创制过程中, 中间偃麦草(*Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D. R. Dewey)和3种长穗偃麦草(*Thinopyrum elongatum* (Host) D. R. Dewey × *poticum* (Podp.) Barkworth & D. R. Dewey)因易于同小麦杂交, 具有抗寒、抗旱、耐盐碱、抗小麦多种病虫害等特性, 成为创制小偃麦的主要亲本来源, 应用范围最广。本研究从5部分综述小偃麦的创制与应用研究进展, 旨在为小偃麦的研发利用和小麦遗传资源创新提供科学依据。

关键词: 小麦; 小偃麦; 中间偃麦草; 长穗偃麦草; 杂交

Progress on the Development and Application of Trititrigia in Wheat

CHENG Shu-wei¹, WANG Hui¹, ZHAO Xin-yu¹, YU Xiao-ning², GAO Qi-yu¹, SONG Wei-fu³,
YANG Xue-feng³, SONG Qing-jie³, DING Jia-rui¹, ZHANG Hui-xin¹, ZHANG Yan-ming¹

¹Key Laboratory Molecular Cytogenetic and Genetic Breeding of Heilongjiang Province/College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025; ²Administrative Security Division, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086; ³Crop Resources Institute, Heilongjiang Academy of Agriculture Sciences, Harbin 150086

Abstract: *Thinopyrum* Á. Löve, is one of the more widely used wild resources in the genus *Triticum* L., and an important donor source in wheat genetic improvement and germplasm innovation. The creation of Trititrigia Tzvelev began in the 1920s, which referred to the introgression of chromosome or genome genetic components of *Thinopyrum* Á. Löve into common wheat through distant hybridization, including Trititrigia Tzvelev (partial) amphidiploid, alien addition line, alien substitution line, translocation line and introgression line. The Trititrigia Tzvelev amphidiploid (partial) were mainly octaploid Trititrigia Tzvelev (AABBDDXX, $2n=8x=56$) and hexaploid Trititrigia Tzvelev (AABBXX, $2n=6x=42$). Most of the chromosomes (XX) from *Thinopyrum* Á. Löve were mixed chromosomes (heterologous chromosomes). Since the 1950s, the distant hybridization

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-09-04 网络出版日期: 2022-10-13

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220630002>

第一作者研究方向为分子细胞遗传育种, E-mail: 591492737@qq.com

通信作者: 张延明, 研究方向为分子细胞遗传育种, E-mail: yanmingz@hrbnu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0100102); 哈尔滨师范大学硕士研究生创新项目(HSDSSCX2021-09); 黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(202110231013)

Foundation projects: National Key Research and Development Program of China (2016YFD0100102); The Postgraduate Innovation Fund of Harbin Normal University (HSDSSCX2021-09); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students in Heilongjiang Province (202110231013)

between wheat and *Thinopyrum* Á. Löve has been developed in China, which was outstanding in the research of wheat disease resistance and the creation of new germplasm, on the basis of which a series of high yield and good quality wheat varieties have been cultivated. During the creation of Trititrigia Tzvelev, *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D. R. Dewey and three species of *Thinopyrum elongatum* (Host) D. R. Dewey \times *ponticum* (Podp.) Barkworth & D. R. Dewey) had the characteristics of cold resistance, drought resistance, saline-alkali resistance and resistance to a variety of wheat diseases and insect pests, so they have become the main parent sources of Trititrigia Tzvelev and had the widest range of application. This paper summarized the research progress of the creation and application of Trititrigia Tzvelev from five parts, in order to provide scientific basis for the research and utilization of Trititrigia Tzvelev and the innovation of wheat genetic resources.

Key words: wheat; Trititrigia Tzvelev; *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D. R. Dewey; *Thinopyrum elongatum* (Host) D. R. Dewey \times *ponticum* (Podp.) Barkworth & D. R. Dewey; hybridization

小麦是世界上重要的粮食作物之一。自20世纪30年代开始小麦遗传改良工作以来,我国培育出一大批高产优质小麦品种,有效提高了小麦生产水平。2021年我国小麦产量达1.34亿吨,比2020年增加了258.9万吨(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj>)。然而,小麦在其驯化过程中,遗传多样性逐渐降低,遗传背景日趋狭窄。热、冷、干旱等非生物危害以及病虫害等生物胁迫的日趋加重,严重影响了小麦产量和品质,而日益增加的人口数量 and 市场需求却对小麦生产提出更高要求,这使得现有小麦品种面临着新的挑战^[1]。为了解决这些问题,利用远缘杂交手段,将小麦野生近缘种中具有农艺价值的基因导入到小麦种质中,丰富小麦基因资源,创制对生物和非生物胁迫具有优异耐受性的小麦新品种,对于保障我国粮食安全生产具有重要意义^[2-3]。

偃麦草属(*Thinopyrum* Á. Löve)属于禾本科多年生疏丛根茎型禾草,有50余种,是小麦近缘种属中应用较为广泛的野生资源之一。我国有长穗偃麦草(*Th. elongatum* (Host) D. R. Dewey)、中间偃麦草(*Th. intermedium* (Host) Barkworth & D. R. Dewey)、硬叶偃麦草(*Th. smithii*)、毛偃麦草(*Th. trichophora*)等偃麦草属植物6种^[4]。该属植物对多种真菌具有抗性,是卷叶螨(*Aceria tosichella*)、菲利浦孢囊线虫(*Heterodera filipjevi*)、禾谷孢囊线虫(*Heterodera avenae*)等病虫害的有效基因源^[5-6],同时具有抗寒、抗旱、耐盐碱、品质优良等性状,可用作饲草,也是防风固沙、水土保持的理想植物^[7-8]。其中,中间偃麦草又称天蓝冰草、天蓝偃麦草,属于强冬性、长日照多年生禾本科植物,根系发达,再生能力强,具有耐寒、大穗多花等特点,对小麦纹枯病、条锈病、根腐病等病害免疫或高抗^[9-10],是小麦遗传改良中应用最成功的野生物种之一^[11]。

小偃麦是通过远缘杂交将偃麦草属植物的染色体或染色体组遗传成分导入到普通小麦中,包括小偃麦(部分)双二倍体、异附加系、异代换系、易位系和渐渗系。小偃麦(部分)双二倍体主要是八倍体小偃麦(AABBDDXX, $2n=8x=56$)和六倍体小偃麦(AABBXX, $2n=6x=42$),来源于偃麦草的染色体组(XX)多为混合染色体组(异源染色体组)。小偃麦创制工作始于20世纪20年代^[12],我国小麦与偃麦草远缘杂交工作自20世纪50年代开始,创制了一批八倍体、六倍体小偃麦和小偃麦衍生材料,在此基础上培育出一系列高产优质的小麦品种^[13-15]。在小偃麦创制过程中,中间偃麦草(*Th. intermedium* (Host) Barkworth & D. R. Dewey, $2n=6x=42$, JJJ^sJ^sStSt 或 StStJJ^sJ^s)和3种长穗偃麦草(*Th. elongatum* (Host) D. R. Dewey, $2n=2x=14$, EE; *Th. elongatum* (Host) D. R. Dewey, $2n=4x=28$, EEEE; *Th. ponticum* (Podp.) Barkworth & D. R. Dewey, $2n=10x=70$, EEEEEStStStSt 或 StStStStE^bE^bE^cE^cE^x 或 JJJJJJ^sJ^sJ^s)发挥最大、应用范围最广^[16-17]。本研究将从小偃麦(部分)双二倍体、小偃麦异附加系、小偃麦异代换系、小偃麦易位系和渐渗系、问题与展望5部分,综述小偃麦的创制与应用研究进展,旨在为小偃麦的研发利用和小麦遗传资源创新提供科学依据。

1 小偃麦(部分)双二倍体

1.1 八倍体小偃麦

八倍体小偃麦(AABBDDXX, $2n=8x=56$, X来源于偃麦草的混合染色体组)的偃麦草属亲本多为中间偃麦草和十倍体长穗偃麦草,遗传稳定性和可育性较高,易于同普通小麦杂交,杂种后代变异类型丰富,是创制小偃麦衍生材料的主要来源。

1.1.1 小麦-中间偃麦草部分双二倍体 前苏联的

H.B. 齐津利用中间偃麦草与小麦杂交、回交,得到带有56条染色体的不完全双二倍体杂种,但因产量不高、性状不稳定,而难以应用^[18-19]。1953年,孙善澄^[13]在我国开展了小麦-中间偃麦草的远缘杂交工作,创育出综合农艺性状突出、结实正常、抗逆性强、抗病能力优异的“中”系列八倍体小偃麦(中1~中5)。这些材料在小麦抗病育种研究中应用广泛,如中4和中5在抗大麦黄矮病等方面表现突出。以“中”系列材料为亲本,相继培育出龙麦8号、龙麦9号等一批新品种^[13]。

随后,利用不同的普通小麦品种与中间偃麦草杂交,研究者创制选育出多种类型的八倍体小偃麦,主要应用于小麦抗病、抗生物以及非生物胁迫等方面。如抗条纹花叶病和大麦黄矮病的TAF46^[20],抗大麦黄矮病和锈病的八倍体小偃麦78829^[21],矮化型八倍体小偃麦TAI7044^[22],兼抗叶锈病、秆锈病、条锈病与白粉病的八倍体小偃麦TAI7045、TAI7047和TAI8335^[23],具有秆矮、早熟、对光温不敏感等特点的矮秆小偃麦品系攀89074-1-1-1-1^[24],以及对禾谷孢囊线虫病具有抗性且多年生的八倍体小偃麦SX12-787、SX12-480、SX12-1150、SX12-1269等^[25]。

以普通小麦烟农15创制了山农“TE”系列八倍体小偃麦(双二倍体品系),如TE253、TE257、TE346等^[26-27],TE256、259、261、265、267等(附加了7对中间偃麦草染色体)^[28],这些材料大穗多粒,抗蚜虫,茎秆抗折能力较强,耐旱、耐盐,对白粉病和条锈病免疫或高抗^[28-30]。近期,另有3份抗条锈病、白粉病和蚜虫的“TE”八倍体小偃麦TE261-1、TE266-1和TE346-1被报道,它们带有14条由中间偃麦草的J、J^s、St组成的混合染色体^[31]。

普通小麦与中间偃麦草的亚种茸毛偃麦草(*Th. intermedium* (Host) Barkworth & D. R. Dewey subsp. *trichophorum* 2n=6x=42, JJJ^sStSt)杂交,创制出兼抗条锈病、叶锈病、纹枯病和白粉病的小麦-茸毛偃麦草部分双二倍体TE-3^[32]、TE1508^[15]。八倍体小偃麦与中间偃麦草杂交选育出了5个抗赤霉病的小麦-中间偃麦草部分双二倍体品系HS2-2、HS2-4、HS2-5、HS2-14和HS2-16,这些材料籽粒蛋白质含量均高于亲本,也带有中间偃麦草混合染色体组^[33]。

1.1.2 小麦-长穗偃麦草部分双二倍体 在长穗偃麦草的3种类型中,十倍体长穗偃麦草的应用最为成功,创制得到的八倍体小偃麦主要应用于抗小麦条纹花叶病、条锈病、赤霉病等小麦病害。利用十倍体长穗偃麦草与普通小麦杂交,获得了抗小麦条纹花叶病的小偃693^[34],抗赤霉病和褐斑病的SS5、SS156、

SS363和SS660^[35],对条锈病有较好抗性的部分双二倍体7430^[36],以及对小麦主要病害均有抗性的小偃68、小偃784、小偃7631^[37]和小偃7430^[38]等。长穗偃麦草与烟农15、山农辐63复合杂交产生了3个抗病八倍体小偃麦TE19、TE20和TE122^[39]。二倍体长穗偃麦草与栽培小麦杂交培育的抗白粉病和叶锈病的八倍体小偃麦BE-1,蛋白质和湿面筋含量及沉淀值则较为突出^[40]。此外,利用普通小麦与长穗偃麦草杂交,还得到一些具有抗病性的小麦-长穗偃麦草八倍体小偃麦,如40767-2、OK7211542、ORRPX、PWM209、PWM706、PWMIII、Agrotana等^[41-43](表1)。

1.1.3 八倍体小偃麦基因组与抗病性 八倍体小偃麦的亲本多为中间偃麦草、十倍体长穗偃麦草和普通小麦,其亚基因组的多样性,导致八倍体小偃麦中的外源染色体组往往是混合基因组(异源染色体组),这为八倍体小偃麦丰富的变异类型提供了遗传基础。现有研究中,仅材料HS2-2、HS2-5、HS2-14八倍体小偃麦外源染色体组由J染色体构成,其他已报道材料的八倍体小偃麦外源染色体组均为不同数目、成对存在的中间偃麦草染色体J、J^s和St组成的混合染色体组,部分材料也带有不同的易位染色体。山农“TE”系列的八倍体小偃麦外源染色体易位主要是J和St染色体易位,“中”系列八倍体小偃麦的小麦异源染色体多来自J^s与J、St染色体相互易位^[44](表2),这些材料对白粉病和多种锈病的抗性表现突出。普通小麦和十倍体长穗偃麦草创制的八倍体小偃麦染色体组也为混合染色体组,同样对多种常见小麦病害高抗和免疫(表1)。因此,利用八倍体小偃麦的桥梁材料优势,可将小麦多种病虫害抗性基因,通过创制异附加系、异代换系、易位系、渐渗系的方式导入到普通小麦中。研究表明,以二倍体的百萨偃麦草(*Th. bessarabicum* (Sävul. & Rayss) Á. Löve, 2n=2x=14, JJ)、拟鹅观草(*Pseudoroegneria strigosa* (M. Bieb.) Á. Löve, 2n=2x=14, StSt)和簇毛麦(*Dasyphyrum villosum* (L.) P. Candargy, 2n=2x=14, VV)基因组DNA为探针,通过顺序多色GISH技术(Genomic *in situ* hybridization),可将中间偃麦草染色体组认定为StStJJ^sJ^s(2n=6x=42)^[45],这为小麦-中间偃麦草衍生后代的染色体组分析提供了新的参考。

1.2 六倍体小偃麦

六倍体小偃麦是利用硬粒小麦与偃麦草杂交,再通过回交、连续自交而获得的小麦与偃麦草杂种后代。Schulz等^[46]利用硬粒小麦与中间偃麦草杂交,

经染色体加倍,在高代材料中选育出六倍体小偃麦, 但不稳定。但同样是硬粒小麦与中间偃麦草杂交, 得到的六倍体小偃麦 8704-1-89、363-1-21^[12], 则表现出强烈的杂种优势, 生长旺盛、分蘖多且粗壮, 穗大多花, 籽粒蛋白质含量高, 具有抗病性^[47]。利用硬粒小麦同四倍体长穗偃麦草杂交, 创制的六倍体小

偃麦 8801 和 8802^[12,48], 植株较矮, 分短芒型和无芒型, 花药为紫色和黄色两种, 结实率较高, 籽粒饱满且蛋白质含量高, 高抗锈病、白粉病等^[49], 且利用 8801 创制的 50 个衍生系, 70% 植株也表现出抗条锈病^[50]。不过, 六倍体小偃麦小穗排列稀疏, 脱粒困难, 产量较低, 应用范围远低于八倍体小偃麦。

表 1 小麦-长穗偃麦草(部分)双二倍体抗病性及特点与染色体组构成

Table 1 The disease resistance, characteristics and genome composition of wheat-*Th. elongatum* (Host) D. R. Dewey

名称 Name	染色体数目 Number of chromosomes	抗病性及特点 Disease resistance and characteristics	染色体组构成 Chromosomal constitution	参考文献 Reference
小偃 693 Xiaoyan 693	56	抗小麦条纹花叶病	40W+8J+8J ^S	[34]
SS156	56	抗褐斑病、赤霉病、小麦颖枯病	42W+14E	[35]
SS363	56	抗褐斑病、赤霉病	40W+14E+2W/E	[35]
SS660	56	抗褐斑病、赤霉病	40W+16E	[35]
SS5	56	抗褐斑病、赤霉病、小麦颖枯病	42W+14E	[35]
7430	56	抗条锈病	40W+10J ^S +6J	[36]
小偃 68 Xiaoyan 68	56	抗秆锈病	—	[37]
小偃 784 Xiaoyan 784	56	抗大麦黄矮病、秆锈病	42W+12St+2E ^a 或 E ^b	[37]
小偃 7631 Xiaoyan 7631	56	抗秆锈病	—	[37]
小偃 7430 Xiaoyan 7430	56	抗秆锈病	44W+10St+2E	[38]
山农 TE19 Shannong TE19	54	免疫条锈病	40W+4St+8E ^c	[39]
山农 TE20 Shannong TE20	56	免疫白粉病、条锈病	42W+2St+10E ^a +2E ^b	[39]
山农 TE122 Shannong TE122	56	免疫白粉病、条锈病	42W+2St+8E ^a +4E ^b	[39]
BE-1	56	抗叶锈病、白粉病, 免疫叶锈病, 高蛋白	40W+16E	[40]
40767-2	49	抗大麦黄矮病	35W+8J ^S +6J/J ^S	[42]
OK7211542	56	抗小麦条纹花叶病、黄矮病	38W+8J+8J ^S +2W/J	[41]
PWM209	56	抗小麦条纹花叶病, 免疫叶锈病	37W+9J+8J ^S +2W/J	[41]
ORRPX	56	抗小麦条纹花叶病、黄矮病	40W+8J+8J ^S	[42]
PWM706	54~56	抗小麦条纹花叶病, 免疫叶锈病	42W+(6-8)J+6J ^S	[42]
PWMIII	56	抗小麦条纹花叶病, 免疫叶锈病	40W+10J+6J ^S	[42]
Agrotana	56	抗花叶病、卷叶螨、秆锈、根腐病	40W+8J+8J ^S	[43]

—表示原文献未提供; W 表示小麦染色体; / 表示染色体易位或代换; () 表示染色体的数目或染色体类型; 、表示可能; 下同

— means the original text was not provided; W indicates the wheat chromosome; / indicates the translocation chromosome or substitution chromosome;

() indicates the number range of chromosome or the type of chromosome; 、 indicates a possibility; The same as below

表 2 小麦-中间偃麦草(部分)双二倍体主要特点及染色体组构成

Table 2 The resistance, characteristics and genome composition of wheat-*Th. intermedium* (Host) Barkworth & D. R. Dewey

名称 Name	染色体数目 Number of chromosomes	抗病性及特点 Disease resistance and characteristics	染色体组构成 Chromosomal constitution	参考文献 Reference
中 1 Zhong1	53~56	高抗条锈病	42W+2St+4J ^S +4J+2W/T	[44]
中 2 Zhong2	53~56	高抗条锈病	42W+2St+4J ^S +4J+2St/J ^S	[44]
中 3 Zhong3	56	免疫锈病, 高抗黄矮病	42W+4St+4J ^S +2St/St/J ^S +2St/J+2J ^S /J ^S /St	[44]
中 4 Zhong4	54, 56	免疫锈病, 高抗黄矮病	42W+4St+4J ^S +2St/J ^S +2St/St/J ^S +2St/J	[44]
中 5 Zhong5	56	免疫锈病, 高抗黄矮病	40W+4St+2J ^S +2J ^S /W+2St/J ^S +2St/St/J ^S + 2St/J+2W/J ^S	[44]
TAF46	56	中抗小麦条纹花叶病、抗大麦黄矮病	42W+6St+8E(J)	[20]
78829	56	抗锈病、大麦黄矮病	42W+6St+4St/J ^S +2J/J ^S +2J ^S	[21]
TAI7044	56	矮化型	42W+6St+8E/J	[22]
TAI7045	56	高抗小麦白粉病、条锈病、根腐病	42W+8St+4J ^S +2St/J ^S	[22]
TAI7047	56	高抗小麦白粉病、条锈病	42W+10J+2J ^S +2St/J ^S +2St	[22]
TAI8335	56	高抗叶锈、茎锈、条锈、白粉病	42W+2St+6J ^S +2J+4St/J	[23]
89074-1-1-1-1	54~56	免疫锈病、黄矮病	—	[24]
SX12-787	56	中抗燕麦孢囊线虫, 高抗非利普孢囊线虫, 多年生	42W+14(St, J, J ^S)	[25]
SX12-480	48	高抗燕麦孢囊线虫, 高抗非利普孢囊线虫, 多年生	32W+16(St, J, J ^S)	[25]

表2(续)

名称 Name	染色体数目 Number of chromosomes	抗病性及特点 Disease resistance and characteristics	染色体组构成 Chromosomal constitution	参考文献 Reference
SX12-1150	56	高抗燕麦孢囊线虫、菲利普孢囊线虫, 多年生	42W+14(St、J、J ^S)	[25]
SX12-1269	54	高抗燕麦孢囊线虫、菲利普孢囊线虫, 多年生	42W+12(St、J、J ^S)	[25]
山农 TE253-I Shannong TE253-I	56	抗白粉病、条锈病	42W+2St+8J ^S +2J+2J/St	[27]
山农 TE257 Shannong TE257	56	抗白粉病、条锈病	42W+2St+8J ^S +4J	[27]
山农 TE346 Shannong TE346	56	抗白粉病、条锈病	42W+2St+8J ^S +4J	[27]
山农 TE256 Shannong TE256	56	免疫白粉病,高抗条锈病、叶锈病	42W+2St+8J ^S +2J+2J/St	[28]
山农 TE259 Shannong TE259	55,56	免疫白粉病、条锈病、叶锈病	42W+2St+8J ^S +4J	[28]
山农 TE261 Shannong TE261	56	免疫白粉病、叶锈病,高抗条锈病	42W+2St+8J ^S +2J+2J/St	[28]
山农 TE265 Shannong TE265	56	免疫白粉病、条锈病、叶锈病	42W+6St+4J ^S +2J+2J/St	[28]
山农 TE267 Shannong TE267	56	抗白粉病、条锈病	42W+4St+10J ^S +4J	[27]
山农 TE262 Shannong TE262	56	免疫白粉病、条锈病、叶锈病	42W+2St+8J ^S +2J+2J/St	[28]
山农 TE263 Shannong TE263	55,56	免疫白粉病、条锈病、叶锈病	42W+2St+8J ^S +2J+2J/St	[28]
山农 TE267-1 Shannong TE267-1	56	中抗白粉病,高抗条锈病	42W+2St+8J ^S +4J	[28]
山农 TE270 Shannong TE270	54,56	免疫白粉病、条锈病、叶锈病	42W+2St+8J ^S +4J	[28]
山农 TE274 Shannong TE274	54,56	中抗白粉病、条锈病,高抗叶锈病	42W+4St+6J ^S +4J	[28]
山农 TE261-1 Shannong TE261-1	56	抗白粉病、条锈病、蚜虫	42W+2St+2J+8J ^S +2J/St	[31]
山农 TE266-1 Shannong TE266-1	56	抗白粉病、条锈病、蚜虫	42W+4St+2J+6J ^S +2J/St	[31]
山农 TE346-1 Shannong TE346-1	56	抗白粉病、条锈病、蚜虫	42W+2St+2J+8J ^S +2J/St	[31]
TE-3	54~56	高抗条锈病、叶锈病、纹枯病、白粉病	42W+8St+4J ^S +2J+2J/St	[32]
TE1508	54	高抗白粉病、条锈病、叶锈病、纹枯病	40W+8St+4J+2J ^S	[15]
山农 TE266 Shannong TE266	54	免疫白粉病、叶锈病,高抗条锈病	42W+4St+6J ^S +2J+2J/St	[28]
HS2-2	56	抗赤霉病,高蛋白	42W+10J+4(St或J ^S)	[33]
HS2-4	56	抗赤霉病,高蛋白	42W+10J+4(St或J ^S)	[33]
HS2-5	56	抗赤霉病,高蛋白	42W+14J	[33]
HS2-14	54	抗赤霉病,高蛋白	42W+12J	[33]
HS2-16	54	抗赤霉病,高蛋白	42W+12J	[33]

2 小偃麦异附加系

相比于小偃麦(部分)双二倍体而言,小偃麦异附

加系、代换系、易位系和渐渗系在生产实践中应用范围更广^[14]。利用来源于中间偃麦草的“中”系列八倍体小偃麦材料为亲本与普通小麦杂交,创制

出一系列小麦-中间偃麦草异附加系(表3)。两套小冰麦(小麦-中间偃麦草)异附加系,第一套 TAI-I 系列,为 TAI-11~TAI-17,材料母本为中2,回交亲本为新曙光1号(普通小麦);第二套 TAI-II 系列,为 TAI-21~TAI-27,亲本为中3、中4、中5和普通小麦涿城1号、垦149、3B-2等。在此基础上,又培育出优质、抗病的小冰麦32、33、35等,并大面积推广种植^[15]。利用中5与普通小麦杂交,得到的抗黄矮病附加系 Z4,附加的一对中间偃麦草染色体,带有未知的抗条锈病、叶锈病和秆锈病基因^[51]。利用

中4与普通小麦铭贤169杂交,选育出3个具有抗条锈病的小麦-中间偃麦草二体附加系 A1、A2、A3^[52]。应用缺体回交法,利用阿勃缺体与中2杂交,创制了高抗条锈病的附加系 Line1、Line2、Line4^[53];以阿勃缺体为母本,中4为父本,培育出7个小偃麦二体异附加系,其中 St3、St5、St7 对一些条锈病小种表现免疫^[54]。同样,利用阿勃缺体系与中4杂交,获得了带有1对7St染色体的小麦-中间偃麦草二体附加系 ES-24,在苗期和成熟期表现高抗条锈病^[55]。

表3 小偃麦异附加系抗病性及特点与附加染色体来源

Table 3 The disease resistance, characteristics and additional chromosome sources of wheat-*Thinopyrum* A. Löve alien addition lines

名称 Name	染色体数目 Number of chromosomes	系谱 Pedigree	抗病性及特点 Disease resistance and characteristics	附加染色体来源 Additional chromosomal sources	参考文献 Reference
TAI 11	44	中2/新曙光1号	叶片窄小,茎秆较细,籽粒瘦细, 发育缓慢	中间偃麦草	[15]
TAI 12	44	中2/新曙光1号	苗期叶片披垂、散软,籽粒细长, 有绒毛	中间偃麦草	[15]
TAI 13	44	中2/新曙光1号	叶片窄小,呈灰绿色,茎秆细, 籽粒长	中间偃麦草	[15]
TAI 14	44	中2/新曙光1号	叶片窄小、脆硬,呈灰绿色,茎秆细 且有弹性	中间偃麦草	[15]
TAI 15	44	中2/新曙光1号	叶片窄小,叶表面有短刺,节间长, 茎秆细	中间偃麦草	[15]
TAI 16	44	中2/新曙光1号	叶片脆硬、窄小,矮秆,茎秆细, 穗小	中间偃麦草	[15]
TAI 17	44	中2/新曙光1号	叶鞘有绒毛,茎秆软,小穗易脱落	中间偃麦草	[15]
TAI 21	44	中4/垦149	苗期叶片细长,圆锥形穗,颖壳厚 且多绒毛	中间偃麦草	[15]
TAI 22	44	中4/垦149	成株叶片上举,晚熟,穗细小, 籽粒小	中间偃麦草	[15]
TAI 23	44	中5/涿城1号	抗秆锈病,成株叶片窄小,茎秆细, 短芒	中间偃麦草	[15]
TAI 24	44	中5/涿城1号	叶形长而密集,晚熟,芒长,籽粒长	中间偃麦草	[15]
TAI 25	44	中3/3B-2	抗叶锈病,叶片窄小,茎秆细,穗小	中间偃麦草	[15]
TAI 26	44	中3/3B-2	叶色灰绿,叶鞘基部有刺,育性差	中间偃麦草	[15]
TAI 27	44	中3/3B-2	高抗黄矮病,叶片窄小、叶色灰绿, 茎秆细	中间偃麦草	[15]
Z4	44	宛7107/中5	免疫条锈病,叶锈病,秆锈病	中间偃麦草(St)	[51]
A1	44	中4/铭贤169	高抗条锈病、中抗白粉病、抗旱	中间偃麦草	[52]
A2	44	中4/铭贤169	抗条锈病	中间偃麦草	[52]
A3	44	中4/铭贤169	抗条锈病	中间偃麦草	[52]
Line1	44	阿勃缺体/中2	高抗条锈病、叶锈病	中间偃麦草	[53]
Line2	44	阿勃缺体/中2	高抗条锈病	中间偃麦草	[53]
Line4	44	阿勃缺体/中2	高抗条锈病	中间偃麦草	[53]
St3	44	阿勃缺体/中4	免疫条锈病	中间偃麦草(St)	[54]
St5	44	阿勃缺体/中4	免疫条锈病	中间偃麦草(St)	[54]
St7	44	阿勃缺体/中4	免疫条锈病	中间偃麦草(St)	[54]
ES-24	44	阿勃缺体/中4	高抗条锈病	中间偃麦草(7St)	[55]
L1	44	小麦/中间偃麦草	抗黄矮病	中间偃麦草	[56]

表3 (续)

名称 Name	染色体数目 Number of chromosomes	系谱 Pedigree	抗病性及特点 Disease resistance and characteristics	附加染色体来源 Additional chromosomal sources	参考文献 Reference
CH366	44	TAI7045/普通小麦晋太170	高抗或免疫条锈病	中间偃麦草	[57]
TA3681	44	普通小麦/中间偃麦草	抗条锈病	中间偃麦草(1St)	[58]
CHadd7001	44	TAI7047/晋太170	免疫白粉病	中间偃麦草(J ^S)	[59]
CHadd7002	44	TAI7047/晋太170	免疫白粉病	中间偃麦草(J ^S)	[59]
910180	44	中5/PH85-4	高抗条锈病、白粉病, 高蛋白质, 抗旱	中间偃麦草	[60]
DAL66	44	烟农15/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草	[61]
II-1-7-1	44	烟农15/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草(E)	[62]
II-3-3-2	44	烟农15/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草(E)	[62]
E99015-8	43	烟农15/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草(E)	[62]
E99009	44	烟农15/中间偃麦草	抗白粉病、条锈病	中间偃麦草(E)	[62]
E99010	44	烟农15/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草(E)	[62]
E99006	44	烟农15/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草(E)	[62]
Line15	44	烟农15/中间偃麦草	免疫白粉病	中间偃麦草	[63]
山农120211	44	烟农15/中间偃麦草	免疫白粉病, 耐盐	中间偃麦草(2E)	[64]
Shannong 120211					
SN6306	44	烟农15/中间偃麦草	抗旱	中间偃麦草(J)	[65]
C076	44	宛7107/无芒中4	抗条锈病	中间偃麦草	[66]
AF2	44	川麦107/中间偃麦草	免疫条锈病、高抗白粉病	中间偃麦草(E)	[67]
AF3	44	川麦107/中间偃麦草	矮秆	中间偃麦草(St)	[67]
CI 17881	44	CI 15092/中间偃麦草	抗眼斑病	中间偃麦草(J ^S)	[5]
Du-DA3E	30	Langdon/8801	旗叶面积大	四倍体长穗偃麦草(3E)	[68]
Du-DA6E	30	Langdon/8801	旗叶面积大, 小穗粒数多、穗粒 数高	四倍体长穗偃麦草(6E)	[68]
1-27	44	普通小麦/十倍体长穗偃麦草	抗白粉病	十倍体长穗偃麦草	[69]
山农87074-519	44	十倍体长穗偃麦草/ 鲁麦5号/济南13	免疫条锈病	十倍体长穗偃麦草(St)	[70]
Shannong 87074-519					
87074	44	小偃86083/济南13	高抗条锈病、白粉病, 矮秆	十倍体长穗偃麦草	[60-71]
913267	44	小偃7430/多年生1号	高抗条锈病、白粉病	十倍体长穗偃麦草	[60]
93506-2	44	小偃693/鲁麦5号	高抗条锈病、白粉病, 抗旱	十倍体长穗偃麦草	[60]
913099	44	小偃87224/山农辐63// 鲁麦8号	高抗条锈病、中抗白粉病、矮秆、高 蛋白质	十倍体长穗偃麦草	[60]
30201	44	小偃7430/2鲁麦1号	高抗条锈病、中抗白粉病、抗旱、 矮秆	十倍体长穗偃麦草	[60]
WTA55	43	小偃7430/3/小偃81	抗条锈病	十倍体长穗偃麦草	[38]

利用小麦-中间偃麦草部分双二倍体与普通小麦杂交, 创制的抗病异附加系还包括抗黄矮病附加系 L1^[56], 抗条锈病附加系 CH366^[57]、TA3681^[58], 对白粉病免疫的 J^S 染色体异附加系 CHadd7001、CHadd7002^[59], 以及兼抗条锈病和白粉病的异附加系 910180^[60]等。

以烟农15与中间偃麦草或八倍体小偃麦杂交, 先后选育出抗白粉病的异附加系 DAL66^[61], II-1-7-1、II-3-3-2、E99015-8、E99009、E99010、E99006^[62], Line15^[63], 以及耐盐异附加系山农120211^[64]和抗旱异附加系 SN6306^[65](表3)。此外, 在普通小麦和中间偃麦草的杂交后代中, 还选育出抗小麦条锈病的

异附加系 C076^[66], 对白粉病高抗、条锈病免疫的附加系 AF2 和矮秆的 AF3^[67], 以及带有中间偃麦草 J^S 染色体 4Ai#2 的抗眼斑病材料 CI 17881^[5]。

在小麦与长穗偃麦草远缘杂交后代中, 创制出旗叶面积大的双体异附加系 Du-DA3E 以及小穗粒数多、穗粒数高的双体异附加系 Du-DA6E^[68], 选育出抗白粉病的异附加系 1-27^[69], 附加1对长穗偃麦草 St 染色体的抗条锈病异附加系山农87074-519^[70], 以及抗条锈病异附加系 87074、913267、93506-2、913099、30201^[60]和 WTA55^[38]。

总体来看, 小偃麦附加系在抗病方面表现优异, 主要应用于抗锈病和白粉病, 可进行深度的抗

病基因挖掘(表3)。

3 小偃麦异代换系

小偃麦异代换系也多应用在小麦抗病育种方面,主要为白粉病、锈病、赤霉病和眼斑病。其中,来源于中间偃麦草的异代换系包括:抗白粉病的E99018^[63]、山农0095和SN0606^[71-72]、CH-9916^[73]、抗秆锈病、白粉病的异代换系CH08-141^[74]和小穗数、千粒质量优于亲本的CH188^[75]、抗赤霉病异代换系

Z2^[43]。来源于长穗偃麦草的异代换系包括:旗叶面积较大的异代换系Du-DS1E(1B)^[68],具有磷高效特性的蓝粒异代换系蓝58^[76],抗叶锈病异代换系Ji806, Ji807和Ji859^[77-78],抗眼斑病异代换系SS767^[78],抗白粉病的山农87074-551、山农87074-526和山农87074-557^[79-80],抗条锈病的6J^S/6B异代换系X005^[36]和抗叶锈病的1J^S/1B双体异代换系SN19647^[81],兼抗白粉病和条锈病的1J^S/1D双体异代换系CH10A5^[82](表4)。

表4 小偃麦异代换系抗病性及特点和外源染色体来源

Table 4 The disease resistance and characteristics of wheat-*Thinopyrum* A. Löve substitution lines and source of alien chromosomes

名称 Name	染色体数目 Number of chromosomes	系谱 Pedigree	抗病性及特点 Disease resistance and characteristics	外源染色体来源或位点 Alien chromosomal origin or locus	参考文献 Reference
E99018	42	烟农15/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草	[62]
山农0095 Shannong0095	42	烟农15/中间偃麦草	高抗条锈病	中间偃麦草	[71]
SN0606	42	烟农15/中间偃麦草	高抗白粉病	中间偃麦草	[72]
CH-9916	42	TAI7045/普通小麦	免疫条锈病,中抗白粉病	中间偃麦草/2D	[73]
CH08-141	42	TAI7047/晋太170	抗秆锈病、白粉病	中间偃麦草(J/B)	[74]
CH188	42	TAI7047/晋太170	小穗数、千粒质量优于亲本	6St/中间偃麦草	[75]
Z2	42	宛7107/中5	抗赤霉病	中间偃麦草/2D	[43]
Du-DS1E(1B)	28	Langdon/8801	旗叶面积大	十倍体长穗偃麦草(1E/1B)	[68]
蓝58 Blue 58	42	普通小麦/长穗偃麦草	磷高效	十倍体长穗偃麦草(4E/4D)	[76]
Ji806	42	Ji87050/小麦-十倍体长穗偃麦草部分双二倍体品系693	抗叶锈病	十倍体长穗偃麦草	[77]
Ji807	42	Ji87050/小麦-十倍体长穗偃麦草部分双二倍体品系693	抗叶锈病	十倍体长穗偃麦草	[77]
Ji859	42	Ji87050/小麦-十倍体长穗偃麦草部分双二倍体品系693	抗叶锈病	十倍体长穗偃麦草	[78]
SS767	42	普通小麦 Sac75//Sol/长穗偃麦草//Leapland/Meister amphiploid wheat/rye Br215	抗眼斑病	十倍体长穗偃麦草(4J/4D)	[78]
山农87074-526 Shannong 87074-526	42	十倍体长穗偃麦草/鲁麦5号/济南13	免疫白粉病、花叶病,抗叶锈病	十倍体长穗偃麦草	[79]
山农87074-551 Shannong 87074-551	42	十倍体长穗偃麦草/鲁麦5号/济南13	高抗白粉病	十倍体长穗偃麦草	[79]
山农87074-557 Shannong 87074-557	44	十倍体长穗偃麦草/鲁麦5号//济南13	免疫白粉病、条锈病	十倍体长穗偃麦草(2B/2E)	[80]
X005	42	7430/普通小麦	抗条锈病	中间偃麦草(6J ^S /6B)	[36]
SN19647	42	八倍体小偃麦 SNTE20/济麦22	抗白粉病、叶锈病	中间偃麦草(1J ^S /1B)	[81]
CH10A5	42	普通小麦7182/长穗偃麦草	抗白粉病、叶锈病	十倍体长穗偃麦草(1JS/1D)	[82]

4 小偃麦易位系和渐渗系

小偃麦易位系多是通过八倍体小偃麦与普通小麦杂交而来,主要应用在抗病方面,如抗白粉病、锈病、赤霉病等,是新抗病基因的重要来源。其中,

带有中间偃麦草遗传成分的易位系材料包括:对多种病原菌具有抗性的T3BS·J易位系中10-149^[19],抗白粉病易位系GP143^[26],对白粉病免疫的易位系YU25^[83]、易位系AF-1^[67],带有A/E和A/St基因组易位的高抗条锈病易位系中梁27^[84],抗条锈病易位

系 ZH811^[85]、WTT11^[86]、TA5566 和 TA5567^[58] 等。研究表明,在籽粒品质高于地方小麦品种的两个抗条锈病品系 CH4131 和 CH4132 中,中间偃麦草染色体片段易位到小麦 1BS 末端,形成 T3Ai-1BS.1BL 结构,推测抗条锈病基因 *YrCH-1BS* 来自中间偃麦草^[87]。

带有十倍体长穗偃麦草遗传成分的易位系,在生产上发挥作用最大的是抗锈病的小偃 6 号^[88]。其他抗病材料包括:对小麦条锈病流行混合小种具有广谱抗性的 4DS/4S 易位系 GDR1-8^[89];对赤霉病抗性较好的西农 509、511 和 529,这 3 份材料在 7E 染色体上的抗赤霉病基因同前人报道的 *Fhb7* 基因不同^[2];抗根腐病的蓝粒附加易位系 54-40-2-5-29,其中有两对自发易位的染色体来自十倍体长穗偃麦草的 J 和 J^s 基因组^[90]。另外,带有四倍体长穗偃麦草遗传成分的整臂易位系 Du-T1AS·1EL^[68],为小麦产量特性研究提供了新材料。

与易位系相比,携带目的性状的小偃麦渐渗系更具有利用价值,主要应用除了抗白粉病和条锈病以外,还包括耐盐、耐低磷胁迫等,新抗病基因的发现也多于易位系材料。携带长穗偃麦草遗传成分的渐渗系材料包括:耐盐渐渗系 II-I-8、II-2、II-1-3^[91],抗倒伏渐渗系 31505-1^[92],带有抗白粉病基因 *Pm5I*^[93] 和抗条锈病基因 *Yr69*^[94] 的渐渗系 CH7086,带有抗白粉病基因 *PmSN0293* 的渐渗系 SN0293-2 和 SN0293-7^[95]。携带中间偃麦草遗传成分的渐渗系材料包括:抗白粉病、条锈病的渐渗系 CH5382^[96],带有抗白粉病基因 *Pm40* 的渐渗系 GRY19^[97],带有抗白粉病基因 *Pm43* 的渐渗系 CH5025^[98],带有抗白粉病基因 *PmCH7124* 的渐渗系 CH7124^[99],带有抗白粉病基因 *PmL962* 的渐渗系 L962^[100],带有抗条锈病基因 *Yr50* 的渐渗系 CH223^[101],带有抗条锈病基因 *YrL693* 的渐渗系 L693^[102],以及具有耐低磷胁迫的渐渗系山农 304^[103](表 5)。

表 5 小偃麦易位系、渐渗系的抗病性及特点和外源染色体来源或位点

Table 5 The disease resistance and characteristics of wheat-*Thinopyrum* Á. Löve translocation lines and introgression lines and sources or loci of alien chromosomes

名称 Name	染色体数目 Number of chromosomes	系谱 Pedigree	抗病性及特点 Disease resistance and characteristics	外源染色体来源或位点 Alien chromosomal origin or locus	类型 Type	参考文献 Reference
中 10-149 Zhong 10-149	44	Shen 373/Zhong 5//Zhe 246882	抗白粉病、条锈病	3BS/J	易位系	[19]
GP143	42	烟农 15/中间偃麦草	抗白粉病、条锈病	中间偃麦草	易位系	[26]
YU25	42	TAI7047/川麦 107	免疫白粉病	中间偃麦草	易位系	[83]
AF-1	42	川麦 107/中间偃麦草	免疫白粉病	中间偃麦草	易位系	[67]
中梁 27 Zhongliang 27	42	普通小麦/中 4	高抗条锈病	A/E、A/St	易位系	[84]
ZH811	42	(中国春/中间偃麦草)/晋麦 33/ 临 4133	抗条锈病	5D/E ^e	易位系	[85]
WTT11	42	小偃 343/小偃 78829	抗条锈病	中间偃麦草/2D	易位系	[86]
TA5566	42	普通小麦/中间偃麦草	抗条锈病	3A/7J ^s	易位系	[58]
TA5567	42	普通小麦/中间偃麦草	抗条锈病	3A/7J ^s	易位系	[58]
CH4131	42	CS/Z1141/Taichung29	抗条锈病	3Ai/1B	易位系	[87]
CH4132	42	CS/Z1141/Taichung29	抗条锈病	3Ai/1B	易位系	[87]
小偃 6 号 Xiaoyan 6	42	普通小麦/十倍体长穗偃麦草	抗条锈病	十倍体长穗偃麦草	易位系	[88]
GDR1	42	小偃 2798/(陕优 225/Y98206)	抗条锈病	4DS/4St	易位系	[89]
GDR2	42	小偃 2798/(陕优 225/Y98206)	抗条锈病	4DS/4St	易位系	[89]
GDR3	42	小偃 2798/(陕优 225/Y98206)	抗条锈病	4DS/4St	易位系	[89]
GDR4	42	小偃 2798/(陕优 225/Y98206)	抗条锈病	4DS/4St	易位系	[89]
GDR5	42	小偃 2798/(陕优 225/Y98206)	抗条锈病	4DS/4St	易位系	[89]
GDR6	42	小偃 2798/(陕优 225/Y98206)	抗条锈病	4DS/4St	易位系	[89]
GDR7	42	小偃 2798/(陕优 225/Y98206)	抗条锈病	4DS/4St	易位系	[89]
GDR8	42	小偃 2798/(陕优 225/Y98206)	抗条锈病	4DS/4St	易位系	[89]

表5(续)

名称 Name	染色体数目 Number of chromosomes	系谱 Pedigree	抗病性及特点 Disease resistance and characteristics	外源染色体来源或位点 Alien chromosomal origin or locus	类型 Type	参考文献 Reference
西农 509 Xinong 509	42	小偃 693/小偃 597	抗赤霉病	7E	—	[2]
西农 511 Xinong 511	42	小偃 693/小偃 597	抗赤霉病	7E	—	[2]
西农 529 Xinong 529	42	小偃 693/小偃 597	抗赤霉病	7E	—	[2]
54-40-2-5-29	44	中国春/十倍体长穗偃麦草部分双二倍体 Agrotana	抗根腐病, 蓝粒	十倍体长穗偃麦草	易位系	[90]
Du-T1AS·1EL	28	Langdon/8801	抗倒伏	十倍体长穗偃麦草 (1E/1B)	易位系	[68]
II-I-8	42	普通小麦/十倍体长穗偃麦草	耐盐	十倍体长穗偃麦草	渐渗系	[91]
II-2	42	普通小麦/十倍体长穗偃麦草	耐盐	十倍体长穗偃麦草	渐渗系	[91]
II-1-3	42	普通小麦/十倍体长穗偃麦草	耐盐	十倍体长穗偃麦草	渐渗系	[91]
31505-1	42	普通小麦/十倍体长穗偃麦草	抗倒伏	十倍体长穗偃麦草	渐渗系	[92]
CH7086	42	普通小麦/十倍体长穗偃麦草	抗白粉病、条锈病	十倍体长穗偃麦草	渐渗系	[93-94]
SN0293-2	42	SNTE20/Jimai 22	抗白粉病	十倍体长穗偃麦草	渐渗系	[95]
SN0293-7	42	SNTE20/Jimai 22	抗白粉病	十倍体长穗偃麦草	渐渗系	[95]
CH5382	42	普通小麦/TAI7044	抗白粉病、条锈病	中间偃麦草	渐渗系	[96]
GRY19	42	普通小麦/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草	渐渗系	[97]
CH5025	42	普通小麦/中间偃麦草	抗白粉病	中间偃麦草	渐渗系	[98]
CH7124	42	小偃麦 TAI8335/晋麦 33	抗白粉病	中间偃麦草	渐渗系	[99]
L962	42	MY11/YU25	抗白粉病	中间偃麦草	渐渗系	[100]
CH223	42	Jinmai 33/TAI7047//2*Jing 411	抗条锈病	中间偃麦草	渐渗系	[101]
YrL693	42	MY11/YU25	抗条锈病	中间偃麦草	渐渗系	[102]
山农 304 Shannong 304	42	烟农 15/中间偃麦草	耐低磷	中间偃麦草	渐渗系	[103]

5 问题与展望

经过研究人员近百年的努力,通过远缘杂交和染色体工程手段,创育出变异类型丰富的各类小偃麦,其中八倍体小偃麦(部分双二倍体)和小偃麦异附加系最多,通过这些“桥梁”,偃麦草中大量控制优异农艺性状的基因逐步被导入到普通小麦中,为小麦遗传育种,特别是抗病育种提供了新的途径。例如,通过国审的抗赤霉病新品种中科 166,其亲本就是高抗赤霉病的六倍体小偃麦^[12]。小偃麦取得的显著成果,使它成为利用小麦野生近缘物种进行小麦遗传资源创新的典型代表。不过,由于偃麦草属基因组和小麦基因组的复杂性和育种、分析鉴定

技术的局限性,小麦与偃麦草杂种后代的选择和应用还面临一些挑战:一方面,小偃麦的应用主要体现在抗病育种上,小偃麦优异种质资源其他方面的特性尚没有充分发挥出来,说明小偃麦的选育策略尚显单一,面对新时期的生产需要和资源需求,特别是种业需求,小偃麦的选育策略应更具兼容性和特色性。在选育抗病材料的同时兼顾选择偃麦草的其他重要农艺性状,发挥其高蛋白、耐寒性和抗逆性等特点,创制生态适应性更广、蛋白质含量更高的小麦新种质;面对小麦突出病害,利用偃麦草属植物进行定向选择,创制选育更具实用性的抗病遗传资源材料等。另一方面,小偃麦创制手段多处在育种“1.0-2.0”水平,较长的创制选育周期,使得小偃

麦创制要付出极大的时间成本。同时,面对远缘杂交产生的海量变异材料,需要持续多代的鉴定筛选,传统的鉴定选育手段在选育范围、鉴定精度上已显不足,对于带有目标性状的小片段易位系和渐渗系,难以实现精准分析,从而错失来之不易的重要遗传资源。因此,如何对小偃麦后代进行表型和基因型的高效、精准选择和鉴定,挖掘和解析重要农艺性状的主效基因,以及在导入优良外源基因的同时,减轻遗传累赘、缩减育种周期、提高选择效率、升级育种水平,将是日后小偃麦研究的重点之一。

目前,分子生物学、基因组学、生物信息学发展迅速,在保持原有遗传育种优势的前提下,充分利用新技术、新方法,如 SLAF-seq 技术^[104]、SNP 芯片^[41]等,对偃麦草属植物的基因组进行深度探究和整合,可为小偃麦优异基因挖掘、鉴定和利用提供新的途径。利用 ND-FISH 和 Oligo-FISH 可精确识别小麦-中间偃麦草衍生后代的染色体组成及重排^[21]。研究表明长穗偃麦草在缺乏 *Ph1* 基因的情况下,约有 134 个基因经同源重组被转移、渗入到小麦中,长穗偃麦草和小麦在宏观水平上表现了很好的共线性^[105]。利用传统染色体工程技术,结合基因组学分析手段,已将携带 *Fhb7* 基因的长穗偃麦草染色体成分导入到栽培小麦品种,在小麦抗赤霉病育种中取得了重大突破^[106]。目前二倍体长穗偃麦草、中间偃麦草已完成了基因组的测序和组装,而小麦基因组研究更是日新月异,进入了泛基因组研究的新时期,越来越多的研究人员投入到麦类作物基因组研究中,这些成果将为今后深度高效开发和利用偃麦草属基因资源提供更多依据。

致谢:感谢中国农业科学院作物科学研究所李洪杰研究员为本文提供的研究数据和修改建议。

参考文献

- [1] 罗秀丽,杨忍,徐茜.全球人口与粮食的空间错位演变及影响因素分析.自然资源学报,2021,36(6):1381-1397
Luo X L, Yang R, Xu Q. Spatial mismatch evolution of global population and food and its influencing factors. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1381-1397
- [2] 刘新伦,王超,牛丽华,刘志立,张录德,陈春环,张荣琦,张宏,王长有,王亚娟,田增荣,吉万全.普通小麦-十倍体长穗偃麦草衍生新品种抗赤霉病基因的分子鉴别.中国农业科学,2017,50(20):3908-3922
Liu X L, Wang C, Niu L H, Liu Z L, Zhang L D, Chen C H, Zhang R Q, Zhang H, Wang C Y, Wang Y J, Tian Z R, Ji W Q. Molecular identification of FHB resistance gene in varieties derived from common wheat-*Thinopyrum ponticum* partial amphiploid. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(20): 3908-3922
- [3] 刘成,韩冉,汪晓璐,宫文萍,程敦公,曹新有,刘爱峰,李豪圣,刘建军.小麦远缘杂交现状、抗病基因转移及利用研究进展.中国农业科学,2020,53(7):1287-1308
Liu C, Han R, Wang X L, Gong W P, Cheng D G, Cao X Y, Liu A F, Li H S, Liu J J. Research progress of wheat wild hybridization, disease resistance genes transfer and utilization. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(7): 1287-1308
- [4] 张婧.六种春小麦新种质的分子细胞遗传学研究.哈尔滨:哈尔滨师范大学,2017
Zhang J. Molecular cytogenetics of six new spring wheat germplasm. Harbin: Harbin Normal University, 2017
- [5] Li H J, Arterburn M, Jones S S, Murray T D. Resistance to eyespot of wheat, caused by *Tapesia yallundae*, derived from *Thinopyrum intermedium* homoeologous group 4 chromosome. Theoretical and Applied Genetics, 2005, 111(5):932-940
- [6] Li H J, Cui L, Li H L, Wang X M, Murray T D, Conner R L, Wang L J, Gao X, Sun Y, Sun S C, Tang W H. Effective resources in wheat and wheat-*Thinopyrum* derivatives for resistance to *Heterodera filipjevi* in China. Crop Science, 2012, 52(3): 1209-1217
- [7] Li H J, Wang X M. *Thinopyrum ponticum* and *Th. Intermedium*: The promising source of resistance to fungal and viral diseases of wheat. Journal of Genetics and Genomics, 2009, 36(9): 557-565
- [8] Lin Z S, Huang D H, Du L P, Ye X G, Xin Z Y. Identification of wheat-*Thinopyrum intermedium* 2Ai-2 ditelosomic addition and substitution lines with resistance to barley yellow dwarf virus. Plant Breeding, 2010, 125(2): 114-119
- [9] Li H J, Conner R L, Murray T D. Resistance to soil-borne diseases of wheat: Contributions from the wheatgrasses *Thinopyrum intermedium* and *Th. ponticum*. Canadian Journal of Plant Science, 2008, 88(1): 195-205
- [10] 刘紫垠,王长有,陈春环,吉万全.小麦-中间偃麦草衍生后代的细胞学和 SSR 标记鉴定.麦类作物学报,2013,33(3):435-439
Liu Z Y, Wang C Y, Chen C H, Ji W Q. Cytologic and SSR identification of derivatives from wheat-*Thinopyrum intermedium*. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(3): 435-439
- [11] 蒋勃,张淑欣,王惠,史玥,李紫琪,朱蕾,宋维富,杨雪峰,宋庆杰,李新玲,张延明.中间偃麦草种质改良及基因组学育种研究进展.植物遗传资源学报,2020,21(6):1385-1394
Jiang B, Zhang S X, Wang H, Shi Y, Li Z Q, Zhu L, Song W F, Yang X F, Song Q J, Li X L, Zhang Y M. Genetic improvement and genomics-assisted breeding of the germplasm resource *Thinopyrum intermedium*. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(6): 1385-1394
- [12] 韩方普,李集临.小偃麦细胞遗传学.北京:中国农业科技出版社,1994:46-47
Han F P, Li J L. Cytogenetics of trititrigia. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1994: 46-47

- [13] 孙善澄. 追求与探索. 北京:中国农业出版社, 2015: 37-46
Sun S C. Pursuit and exploration. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2015: 37-46
- [14] 傅向东, 刘倩, 李振声, 张爱民, 凌宏清, 童依平, 刘志勇. 小麦基因组研究现状与展望. 中国科学院院刊, 2018, 33(9): 909-914
Fu X D, Liu Q, Li Z S, Zhang A M, Ling H Q, Tong Y P, Liu Z Y. Research achievement and prospect development on wheat genome. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(9): 909-914
- [15] 庞劲松, 刘宝. 小冰麦研究回顾与展望-纪念郝水院士逝世10周年. 东北师大学报:自然科学版, 2020, 52(3): 1-13
Pang J S, Liu B. Review and outlook of *Triticum aestivum-Agropyron intermedium* research-Commemorating the 10th anniversary of academician Hao Shui's death. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2020, 52(3): 1-13
- [16] Kumar A, Chunduri V, Sharma S, Kumar A, Kumari A, Kapoor P, Kaur S, Garg M. Transfer of *Thinopyrum elongatum* chromosome-specific IEL. 1AS translocation to hard wheat could not improve targeted bread-making quality-Failure and lessons learned. Journal of Cereal Science, 2021, 101: 1-03277
- [17] 陶军, 兰秀锦. 小麦-中间偃麦草 2A/6St 代换系 014-459 的分子细胞遗传学鉴定. 作物学报, 2022, 48(2): 511-517
Tao J, Lan X J. Molecular cytogenetic identification of wheat-*Thinopyrum intermedium* 2A/6st substitution strain 014-459. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(2): 511-517
- [18] H.B. 齐津. 多年生小麦. 北京:农业出版社, 1982: 59-95
H.B. Q J. Perennial wheat. Beijing: Agricultural Press, 1982: 59-95
- [19] Cui L, Ren Y K, Bao Y G, Nan H, Tang Z H, Guo Q, Niu Y Q, Yan W Z, Sun Y, Li H J. Assessment of resistance to cereal cyst nematode, stripe rust and powdery mildew in the wheat-*Thinopyrum intermedium* derivatives and their chromosome composition. Plant Disease, 2021, 105(10): 2898-2906
- [20] Cauderon Y. Genome analysis in the genus *Agropyron*. Hereditas, 1966, 2: 218-234
- [21] Yu Z H, Wang H J, Yang E N, Li G R, Yang Z J. Precise identification of chromosome constitution and rearrangements in Wheat-*Thinopyrum intermedium* derivatives by ND-FISH and Oligo-FISH painting. Plants-Basel, 2022, 11(16): 2109
- [22] 杨志坚, 胡河生, 王志国. 矮化型八倍体小偃麦的选育. 生态农业研究, 1996, 4(2): 73-77
Chang Z J, Hu H S, Wang Z G. On breeding dwarf octoploid *Trttrigia*. Chinese Journal of Eco-agriculture, 1996, 4(2): 73-77
- [23] Chang Z J, Zhang X J, Yang Z J, Zhan H X, Li X, Liu C, Zhang C Z. Characterization of a partial wheat-*Thinopyrum intermedium* amphiploid and its reaction to fungal diseases of wheat. Hereditas, 2010, 147(6): 304-312
- [24] 杨足军, 任正隆. 导入矮秆基因的小偃麦材料的细胞学和储藏蛋白研究. 四川农业大学学报, 2000, 18(2): 104-108
Yang Z J, Ren Z L. Cytological and seed storage protein analysis of dwarf lines with wheat-*Thinopyrum intermedium* chromatin. Journal of Sichuan Agricultural University, 2000, 18(2): 104-108
- [25] Cui L, Ren Y K, Zhang Y M, Tang Z H, Guo Q, Niu Y Q, Yan W Z, Sun Y, Li H J. Characterization of resistance to cereal cyst nematode, agronomic performance, and end-use quality parameters in four perennial wheat-*Thinopyrum intermedium* lines. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 594197
- [26] 王洪刚, 朱军, 刘树兵. 利用细胞学和 RAPD 技术鉴定抗病小偃麦易位系. 作物学报, 2001, 27(6): 886-890
Wang H G, Zhu J, Liu S B. Identification of *Tritelytrigia* translocation line with disease resistance by cytology and RAPD analysis. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(6): 886-890
- [27] Bao Y G, Wu X, Zhang C, Li X F, He F, Qi X L, Wang H G. Chromosomal constitutions and reactions to powdery mildew and stripe rust of four novel wheat-*Thinopyrum intermedium* partial ajmphioids. Journal of Genetics and Genomics, 2014, 41(12): 663-666
- [28] 亓晓蕾, 鲍印广, 李兴锋, 钱兆国, 王瑞霞, 吴科, 王洪刚. 十个八倍体小偃麦的细胞学鉴定和染色体构成分析. 作物学报, 2017, 43(7): 967-973
Qi X L, Bao Y G, Li X F, Qian Z G, Wang R X, Wu K, Wang H G. Cytological identification and chromosome composition analysis of ten octoploid trititrigia accessions. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(7): 967-973
- [29] 刘树兵, 王洪刚, 高居荣. 抗白粉病小麦-中间偃麦草八倍体小偃麦的鉴定//洪绶曾. 21世纪小麦遗传育种展望-小麦遗传育种国际学术讨论会文集. 郑州: 中国农业科技出版社, 2001: 309-312
Liu S B, Wang H G, Gao J R. Identification of wheat-*Thinopyrum intermedium* amphiploid resistant to powdery mildew//Hong F Z. Prospects of wheat genetics and breeding for the 21st century-paper collection of international wheat genetics and breeding symposium. Zhengzhou: China Agricultural Science and Technology Press, 2001: 309-312
- [30] 林小虎, 周印富, 张志雯, 陈于和, 马为民, 贺字典, 王洪刚. 兼抗白粉病和条锈病的八倍体小偃麦的鉴定. 麦类作物学报, 2008, 28(4): 686-690
Lin X H, Zhou Y F, Zhang Z W, Chen Y H, Ma W M, He Z D, Wang H G. Identification of octoploid trititrigia with resistance to powdery mildew and stripe rust. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(4): 686-690
- [31] Cui Y, Xing P Y, Qi X L, Bao Y G, Wang H G, Wang R R, Li X F. Characterization of chromosome constitution in three wheat-*Thinopyrum intermedium* amphiploids revealed frequent rearrangement of alien and wheat chromosomes. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 129
- [32] 杨足君, 刘登才, 李光蓉. 一个多抗性小麦中间偃麦草新种质的遗传鉴定. 四川大学学报:自然科学版, 2000, 37(S1): 20-25
Yang Z J, Liu D C, Li G R. Genetic identification of a new wheat *Thinopyrum intermedium* germplasm with multi-resistance. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2000, 37(S1): 20-25
- [33] Wang H, Cheng S W, Shi Y, Zhang S X, Yan W, Song W F,

- Yang X F, Song Q J, Jang B, Qi X Y, Li X L, Friebe B, Zhang Y M. Molecular cytogenetic characterization and fusarium head blight resistance of five wheat-*Thinopyrum intermedium* partial amphiploids. *Molecular Cytogenetics*, 2021, 14(1): 15
- [34] Li G R, Zhang T, Yu Z H, Wang H J, Yang E N, Yang Z J. An efficient Oligo-FISH painting system for revealing chromosome rearrangements and polyploidization in *Triticeae*. *Plant Journal*, 2021, 105(4): 978-993
- [35] Oliver R E, Xu S S, Stack R W, Friesen T L, Jin Y, Cai X. Molecular cytogenetic characterization of four partial wheat-*Thinopyrum ponticum* amphiploids and their reactions to *Fusarium* head blight, tan spot, and *Stagonospora nodorum* blotch. *Theoretical and Applied Genetics*, 2006, 112(8): 1473-1479
- [36] Hu L J, Li G R, Zeng Z, Chang Z J, Liu C, Yang Z J. Molecular characterization of a wheat-*Thinopyrum ponticum* partial amphiploid and its derived substitution line for resistance to stripe rust. *Journal of Applied Genetics*, 2011, 52(3): 279-285
- [37] Zheng Q, Lv Z L, Niu Z X, Li B, Li H W, Xu S S, Han F P, Li Z S. Molecular cytogenetic characterization and stem rust resistance of five wheat-*Thinopyrum ponticum* partial amphiploids. *Journal of Genetics and Genomics*, 2014, 41(11): 591-599
- [38] Jia H W, Feng H, Yang G T, Li H W, Fu S L, Li B, Li Z S, Zheng Q. Establishment and identification of six wheat-*Thinopyrum ponticum* disomic addition lines derived from partial amphiploid Xiaoyan 7430. *Theoretical and Applied Genetics*, 2022, DOI: 10.1007/s00122-022-04185-x
- [39] He F, Xing P Y, Bao Y G, Ren M J, Liu S B, Wang Y H, Li X F, Wang H G. Chromosome pairing in hybrid progeny between *Triticum aestivum* and *Elytrigia elongata*. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 2161
- [40] Sepsí A, Molnár I, Szalay D, Molnár-Lang M. Characterization of a leaf rust-resistant wheat-*Thinopyrum ponticum* partial amphiploid BE-1, using sequential multicolor GISH and FISH. *Theoretical and Applied Genetics*, 2008, 116(6): 825-834
- [41] Fedak G, Chen Q, Conner R L, Laroche A, Comeau A, Pierre C A. Characterization of wheat-*Thinopyrum* partial amphiploids for resistance to barley yellow dwarf virus. *Euphytica*, 2001, 120(3): 373-378
- [42] Chen Q. Detection of alien chromatin introgression from *Thinopyrum* into wheat using S genomic DNA as a probe—a landmark approach for *Thinopyrum* genome research. *Cytogenetic and Genome Research*, 2005, 109(1-3): 350-359
- [43] Zheng Q, Lv Z L, Niu Z X, Li B, Li H W, Xu S S, Han F P, Li Z S. Molecular cytogenetic characterization and stem rust resistance of five wheat-*Thinopyrum ponticum* partial amphiploids. *Journal of Genetics and Genomics*, 2014, 41(11): 591-599
- [44] Chen Q, Conner R L, Li H J, Sun S C, Ahmad F, Laroche A, Graf R J. Molecular cytogenetic discrimination and reaction to wheat streak mosaic virus and the wheat curl mite in Zhong series of wheat-*Thinopyrum intermedium* partial amphiploids. *Genome*, 2003, 46(1): 135-145
- [45] Cseh A, Yang C, Hubbart-Edwards S, Scholefeld D, Ashling S S, Burrige A J, Wilkinson P A, King P I, King J, Grewal S. Development and validation of an exome-based SNP marker set for identification of the St, J¹ and J² genomes of *Thinopyrum intermedium* in a wheat background. *Theoretical and Applied Genetics*, 2019, 132(5): 1555-1570
- [46] Schulz S J, Mcneal S J, Mcneal F H. Alien chromosome addition in wheat. *Crop Science*, 1977, 17(6): 891-896
- [47] 李集临, 曲敏, 张延明. 小麦染色体工程. 北京: 科学出版社, 2001: 50-60
- Li J L, Qu M, Zhang Y M. Wheat chromosome engineering. Beijing: Science Press, 2001: 50-60
- [48] 韩方普, 李集临, 张贵友, 白瑞珍, 祁适雨. 硬粒小麦与天兰偃麦草杂交选育六倍体小偃麦的研究. *黑龙江农业科学*, 1991(2): 10-12
- Han F P, Li J L, Zhang G Y, Bai R Z, Qi S Y. Breeding of hexaploid *Thinopyrum* by crossing durum wheat with *Thinopyrum* Tianlan. *Heilongjiang Agricultural Science*, 1991(2): 10-12
- [49] 宋维富, 赵蕾, 赵海滨, 张延明, 李集临. 六倍体小偃麦与普通小麦杂交后代的分子细胞遗传学检测. *核农学报*, 2014, 28(9): 1549-1558
- Song W F, Zhao L, Zhao H B, Zhang Y M, Li J L. Molecular and cytogenetical identification of offsprings between common wheat and *Triticum trititrigia* (6X). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(9): 1549-1558
- [50] Li D, Long D, Li T, Wu Y, Wang Y, Zeng J, Xu L L, Fan X, Sha L, Zhang H Q, Zhou Y H, Kang H Y. Cytogenetics and stripe rust resistance of wheat-*Thinopyrum elongatum* hybrid derivatives. *Molecular Cytogenetics*, 2018, 11(1): 1-9
- [51] Larkin P J, Banks P M, Lagudah E S, Appels R, McIntosh R A, Chen X, Xin Z Y, Ohm H W. Disomic *Thinopyrum intermedium* addition lines in wheat with barley yellow dwarf virus resistance and with rust resistance. *Genome*, 1995, 38(2): 385-394
- [52] 张忠军, 楼东芳, 张美蓉. 3个抗条锈病小偃麦附加系中偃麦草染色体同源性鉴定. *北京农业大学学报*, 1995, 21(1): 85-89
- Zhang Z J, Lou D F, Zhang M R. Identification of two pairs of *Agropyron intermedium* chromosomes with resistance to puccinia striiformis in different wheat aline addition lines. *Journal of Agricultural University of Beijing*, 1995, 21(1): 85-89
- [53] 李凤珍, 吉万全, 王长有, 吴金华. 小麦-中间偃麦草衍生系的分子细胞遗传学鉴定. *麦类作物学报*, 2005, 25(5): 14-17
- Li F Z, Ji W Q, Wang C Y, Wu J H. Molecular cytogenetic identification of wheat-*Thinopyrum intermedium* derivative lines. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(5): 14-17
- [54] 王长有, 吉万全, 薛秀庄, 王秋英. 小麦-中间偃麦草异附加系条锈病抗性的研究. *西北植物学报*, 1999, 19(6): 54-58
- Wang C Y, Ji W Q, Xue X Z, Wang Q Y. Studies on yellow rust resistance of wheat-*Th. intermedium* alien disomic addition lines. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, 19(6): 54-58
- [55] Wang S W, Wang C Y, Feng X B, Zhao J L, Deng P C, Wang Y J, Zhang H, Liu X L, Li T D, Chen C H, Wang B T, Ji W Q. Molecular cytogenetics and development of St-chromosome-specific molecular markers of novel stripe rust resistant wheat-*Thinopyrum intermedium* and wheat-*Thinopyrum ponticum*

- substitution lines. *BMC Plant Biology*, 2022, 22(1):111
- [56] Banks P M, Larkin P J, Bariana H S, Lagudah E S, Appels R, Waterhouse P M, Brettell R I S, Chen X, Xu H J, Xin Z Y, Qian Y T, Zhou X M, Cheng Z M, Zhou G H. The use of cell culture for subchromosomal introgressions of barley yellow dwarf virus resistance from *Thinopyrum intermedium* to wheat. *Genome*, 1995, 38(2): 395-405
- [57] 郑瑗, 李欣, 贾举庆, 郭慧娟, 雷梦林, 张树伟, 常利芳, 畅志坚, 乔麟轶, 陈芳, 张晓军. 抗条锈病小偃麦附加系 CH366 的 FISH 鉴定. *山西农业科学*, 2021, 49(3): 278-280, 284
- Zheng Y, Li X, Jia J Q, Guo H J, Lei M L, Zhang S W, Chang L F, Chang Z J, Qiao L Y, Chen F, Zhang X J. FISH identification of wheat-*Thinopyrum intermedium* addition line CH366 with resistance to stripe rust. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(3): 278-280, 284
- [58] Li J B, Bao Y G, Han R, Wang X L, Xu W J, Li G R, Yang Z J, Zhang X J, Li X, Liu A F, Li H S, Liu J J, Zhang P, Liu C. Molecular and cytogenetic identification of stem rust resistant wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines. *Plant Disease*, 2022, DOI: 10.1094/PDIS-10-21-2274-RE
- [59] 张晓军, 畅志坚, 阎晓涛, 詹海仙, 李欣. 2 个抗白粉病小偃麦附加系的 GISH 鉴定. *山西农业科学*, 2011, 39(2): 103-105
- Zhang X J, Chang Z J, Yan X T, Zhan H X, Li X. GISH analysis of two *Thinopyrum intermedium* derived wheat addition lines resistant to powdery mildew. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(2): 103-105
- [60] 姜丽君, 王洪刚, 孔令让, 张德水. 12 个优良小麦种质系的细胞学和性状特点的研究. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 1995, 26(3): 273-279
- Jiang L J, Wang H G, Kong L R, Zhang D S. Studies on cytology and main traits of twelve new wheat germ plasm lines. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition*, 1995, 26(3): 273-279
- [61] 王洪刚, 张建民, 刘树兵. 抗白粉病小麦-中间偃麦草附加系的细胞学和 RAPD 鉴定. *西北植物学报*, 2000, 20(1): 64-67
- Wang H G, Zhang J M, Liu S B. Identification of wheat-*Elytrigia intermedium* alien addition line with resistance to powdery mildew by cytology and RAPD analysis. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(1): 64-67
- [62] 刘树兵, 王洪刚. 抗白粉病小麦-中间偃麦草(*Thinopyrum intermedium*, 2n=42) 附加系的选育及分子细胞遗传鉴定. *科学通报*, 2002, 47(19): 1500-1503
- Liu S B, Wang H G. Breeding and molecular cell genetic identification of powdery mildew resistant wheat *Thinopyrum intermedium* (2n=42). *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(19): 1500-1503
- [63] 林小虎, 王黎明, 李兴锋, 陆文辉, 赵逢涛, 李文才, 高居荣, 王洪刚. 抗白粉病八倍体小偃麦和双体附加系的鉴定. *作物学报*, 2005, 31(8): 1035-1040
- Lin X H, Wang L M, Li X F, Lu W H, Zhao F T, Li W C, Gao J R, Wang H G. Identification of octoploid *Thinopyrum* and alien disomic addition lines with powdery mildew resistance. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(8): 1035-1040
- [64] 徐林涛, 马莹雪, 张超, 吴瑕, 亓晓蕾, 何方, 鲍印广, 王洪刚. 抗白粉病耐盐小麦-中间偃麦草附加系‘山农 120211’的鉴定. *西北植物学报*, 2014, 34(9): 1757-1763
- Xu L T, Ma Y X, Zhang C, Wu X, Qi X L, He F, Bao Y G, Wang H G. Identification of wheat-*Thinopyrum intermedium* alien disomic addition line ‘Shannong 120211’ with resistance to powdery mildew and salt tolerance. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(9): 1757-1763
- [65] 黄春丽, 宋静, 李全权, 郭庆东, 田秋菊, 高居荣, 王洪刚, 封德顺. 小偃麦附加系 TaXTH 基因的克隆与生物信息学分析. *山东农业科学*, 2015, 47(7): 1-6
- Huang C L, Song J, Li Q Q, Guo Q D, Tian Q J, Gao J R, Wang H G, Feng D S. Cloning and bioinformatics analysis of TaXTH from wheat-*Thinopyrum* alien addition line. *Shandong Agricultural Science*, 2015, 47(7): 1-6
- [66] 胡英考, 辛志勇, 陈孝. 抗条锈病小麦-中间偃麦草附加系的生化与分子标记. *西北植物学报*, 2002, 22(1): 136-140
- Hu Y K, Xin Z Y, Chen X. Biochemical and molecular markers of a yellow rust resistance wheat-*Th. intermedium* addition line. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(1): 136-140
- [67] 石丁溧, 傅体华, 任正隆. 抗白粉病小麦-中间偃麦草染色体小片段易位系的选育与鉴定. *植物病理学报*, 2008, 38(3): 298-303
- Shi D L, Fu T H, Ren Z L. Development and identification of a small-fragment-translocation line of wheat and *Agropyrum intermedium* resistant to powdery mildew. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2008, 38(3): 298-303
- [68] 段亚梅, 罗贤磊, 陈士强, 高勇, 陈建民, 戴毅. 硬粒小麦-长穗偃麦草附加系、代换系和易位系的创制. *作物学报*, 2021, 47(7): 1402-1414
- Duan Y M, Luo X L, Chen S Q, Gao Y, Chen J M, Dai Y. Creation of durum wheat-*Thinopyrum elongatum* addition lines, substitution and translocation lines. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(7): 1402-1414
- [69] Li X J, Hu X G, Hu T Z, Li G, Ru Z G, Zhang L L, Lang Y M. Identification of a novel wheat-*Thinopyrum ponticum* addition line revealed with cytology, SSR, EST-SSR, EST-STS and PLUG markers. *Cereal Research Communications*, 2015, 43(4): 544-553
- [70] 刘爱峰, 王洪刚, 郝元峰, 段友臣, 王玉海, 吴新儒, 李岩, 朱玉丽, 高居荣. 抗条锈病小偃麦双体附加系山农 87074-519 的鉴定. *分子细胞生物学报*, 2007, 40(3): 217-223
- Liu A F, Wang H G, Hao Y F, Duan Y C, Wang Y H, Wu X R, Li Y, Zhu Y L, Gao J R. Identification of *Tritelytrigia* alien disomic addition line Shannong 87074-519 with yellow rust resistance. *Journal of Molecular Cell Biology*, 2007, 40(3): 217-223
- [71] 王黎明, 林小虎, 张平杰, 张志雯, 王玉海, 赵逢涛, 高居荣, 李文才, 李兴峰, 王洪刚. 小麦-中间偃麦草二体异代换系

- 山农 0095 的选育及其鉴定. 中国农业科学, 2005, 38(10): 1958-1964
- Wang L M, Lin X H, Zhang P J, Zhang Z W, Wang Y H, Zhao F T, Gao J R, Li W C, Li X F, Wang H G. Breeding and characterization of wheat-*Thinopyrum intermedium* alien substitution line Shannong 0095. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 1958-1964
- [72] 王黎明, 王合坚, 李萍, 王洪刚. 小偃麦种质系 SN0606 的形态学和细胞学分析. 安徽农业科学, 2007, 35(28): 8825-8829
- Wang L M, Wang H J, Li P, Wang H G. Morphological and cytological analysis on germplasm line SN0606 of *Trititrigia*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(28): 8825-8829
- [73] 任永康, 畅志坚, 詹海仙, 张晓军, 董春林, 温智坚. 小麦-中间偃麦草异代换系的细胞学和 SSR 标记鉴定. 山西农业科学, 2007, 35(1): 22-25
- Ren Y K, Chang Z J, Zhan H X, Zhang X J, Dong C L, Wen Z J. Cytological and SSR identification of wheat-*Elytrigia intermedium* alien substitution line. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2007, 35(1): 22-25
- [74] 胡静, 李欣, 阎晓涛, 任永康, 郭慧娟, 詹海仙, 乔麟轶, 畅志坚, 张晓军. 一个新的小麦-中间偃麦草异代换系的分子细胞学鉴定. 山西农业科学, 2014, 42(5): 425-427, 431
- Hu J, Li X, Yan X T, Ren Y K, Guo H J, Zhan H X, Qiao L Y, Chang Z J, Zhang X J. Identification for a new wheat alien substitution lines derived from *Th. intermedium* by molecular cytology. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(5): 425-427, 431
- [75] 罗小军, 乔麟轶, 李欣, 郭慧娟, 阎晓涛, 张树伟, 常利芳, 闫金龙, 畅志坚, 张晓军. 小麦-中间偃麦草代换系 CH188 分子细胞学鉴定. 山西农业科学, 2020, 48(3): 317-320
- Luo X J, Qiao L Y, Li X, Guo H J, Yan X T, Zhang S W, Chang L F, Yan J L, Chang Z J, Zhang X J. Molecular cytogenetic identification of wheat-*Thinopyrum intermedium* substitution line CH188. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(3): 317-320
- [76] 李振声, 穆素梅, 周汉平, 李滨, 英加. 蓝粒小麦(蓝 58), 蓝单体小麦和蓝粒小麦易位系. 中国专利: CN1435086A, 2003-08-13
- Li Z S, Mu S M, Zhou H P, Li B, Ying J. Blue grain wheat (blue 58), blue monomer wheat and blue grain wheat translocation line. Chinese Patent: CN1435086A, 2003-08-13
- [77] Li H J, Chen Q, Conner R L, Guo B H, Zhang Y M, Graf R J, Laroche A, Jia X, Liu G S, Chu C C. Molecular characterization of a wheat-*Thinopyrum ponticum* partial amphiploid and its derivatives for resistance to leaf rust. *Genome*, 2003, 46(5): 906-913
- [78] Li H J, Arterburn M, Jones S S, Murray T D. A new source of resistance to *Tapesia yellundae* associated with a homoeologous group 4 chromosome in *Thinopyrum ponticum*. *Phytopathology*, 2004, 94(9): 932-937
- [79] 王洪刚, 李丹丹, 刘树兵, 高居荣, 李兴锋. 抗白粉病小偃麦异代换系的细胞学和 RAPD 鉴定. 西北植物学报, 2003, 23(2): 280-284
- Wang H G, Li D D, Liu S B, Gao J R, Li X F. Identification of Tritelytrigia alien substitution line with powdery mildew resistance by cytology and RAPD analysis. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(2): 280-284
- [80] 刘爱峰, 李豪圣, 刘建军, 程敦公, 宋健民, 王洪刚. 小偃麦异代换系抗病基因的鉴定及其 SSR 分子标记. 分子植物育种, 2008, 6(2): 257-262
- Liu A F, Li H S, Liu J J, Cheng D G, Song J M, Wang H G. Identification of disease resistance gene in Tritelytrigia alien addition line and its SSR molecular marker. *Molecular Plant Breeding*, 2008, 6(2): 257-262
- [81] Li M Z, Wang Y Z, Liu X, Li X F, Wang H G, Bao Y G. Molecular cytogenetic identification of a novel wheat-*Thinopyrum ponticum* 1J^S(1B) substitution line resistant to powdery mildew and leaf rust. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 727-734
- [82] Wang Y Z, Cao Q, Zhang J J, Wang S W, Chen C H, Wang C Y, Zhang H, Wang Y J, Ji W Q. Cytogenetic analysis and molecular marker development for a new wheat-*Thinopyrum ponticum* 1J^S(1D) disomic substitution line with resistance to stripe rust and powdery mildew. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 1282
- [83] 马强, 罗培高, 任正隆, 蒋华仁, 杨足君. 两个抗小麦白粉病新基因的遗传分析与染色体定位. 作物学报, 2007, 33(1): 1-8
- Ma Q, Luo P G, Ren Z L, Jiang H R, Yang Z J. Genetic analysis and chromosomal location of two new genes for resistance to powdery mildew in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(1): 1-8
- [84] 李爱博, 李金荷, 宋建荣, 王化俊, 张耀辉, 尚勋武, 曹世勤, 李葆春. 小麦-中间偃麦草抗锈易位系中梁 27 的鉴定及分析. 麦类作物学报, 2015, 35(11): 1489-1493
- Li A B, Li J H, Song J R, Wang H J, Zhang Y H, Shang X W, Cao S Q, Li B C. Identification and analysis of zhongliang 27, a wheat-*Thinopyrum intermedium* translocation line with resistance to stripe rust. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(11): 1489-1493
- [85] 王音, 冯志威, 葛川, 赵佳佳, 乔玲, 武棒棒, 闫素仙, 郑军, 郑兴卫. 普通小麦-六倍体中间偃麦草易位系的抗条锈鉴定及应用评估. 作物学报, 2021, 47(8): 1511-1521
- Wang Y, Feng Z W, Ge C, Zhao J J, Qiao L, Wu B B, Yan S X, Zheng J, Zheng X W. Identification of seedling resistance to stripe rust in wheat-*Thinopyrum intermedium* translocation line and its potential application in breeding. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(8): 1511-1521
- [86] Yang G T, Zheng Q, Hu P, Li H W, Luo Q L, Li B, Li Z S. Cytogenetic identification and molecular marker development for the novel stripe rust-resistant wheat-*Thinopyrum intermedium* translocation line WTT11. *aBIOTECH*, 2021, 4: 343-356
- [87] Zheng X W, Tang C G, Han R, Zhao J J, Liu C, Qiao L, Zhang S W, Qiao L Y, Ge C, Zheng J. Identification, characterization

- and evaluation of novel stripe rust resistant wheat-*Thinopyrum intermedium* chromosome translocation lines. *Plant Disease*, 2020, 104(3): 875-881
- [88] 李万隆, 李振声, 穆素梅. 小麦品种小偃6号染色体结构变异的细胞学研究. *遗传学报*, 1990, 17(6): 430-437
Li W L, Li Z S, Mu S M. A cytological study of chromosomal structure changes in a common wheat variety, xiaoyan No. 6. *Acta Genetica Sinica*, 1990, 17(6): 430-437
- [89] 郝薇薇, 汤才国, 李葆春, 郝晨阳, 张学勇. 小麦-十倍体长穗偃麦草广谱抗锈易位系的鉴定及分析. *中国农业科学*, 2012, 45(16): 3240-3248
Hao W W, Tang C G, Li B C, Hao C Y, Zhang X Y. Analysis of wheat-*Thinopyrum ponticum* translocation lines with broad spectrum resistance to stripe rusts. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(16): 3240-3248
- [90] Li H J, Conner R L, Chen Q, Li H Y, Laroche A, Graf R J, Kuzuk A D. The transfer and characterization of resistance to common root rot from *Thinopyrum ponticum* to wheat. *Genome*, 2004, 47(1): 215-223
- [91] Chen S Y, Xia G M, Quan T Y, Xiang F N, Jin Y, Chen H M. Introgression of salt-tolerance from somatic hybrids between common wheat and *Thinopyrum ponticum*. *Plant Science*, 2004, 167(4): 773-779
- [92] Chen G L, Zheng Q, Bao Y G, Liu S B, Wang H G, Li X F. Molecular cytogenetic identification of a novel dwarf wheat line with introgressed *Thinopyrum ponticum* chromatin. *Journal of Biosciences*, 2012, 37(1): 149-155
- [93] Zhan H X, Li G R, Zhang X J, Li X, Guo H J, Gong W P, Jia J Q, Qiao L Y, Ren Y K, Yang Z J, Chang Z J. Chromosomal location and comparative genomics analysis of powdery mildew resistance gene *Pm51* in a putative wheat-*Thinopyrum ponticum* introgression line. *PLoS ONE*, 2014, 9(11): e113455
- [94] Hou L Y, Jia J Q, Zhang X J, Li X, Yang Z J, Ma J, Guo H J, Zhan H X, Qiao L Y, Chang Z J. Molecular mapping of the stripe rust resistance gene *Yr69* on wheat chromosome 2AS. *Plant Disease*, 2016, 100(8): 1717-1724
- [95] Li M Z, Yuan Y Y, Ni F, Li X F, Wang H G, Bao Y G. Characterization of two wheat-*Thinopyrum ponticum* introgression lines with pyramiding resistance to powdery mildew. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 943669
- [96] 詹海仙, 李光蓉, 张晓军, 李欣, 畅志坚. 小偃麦渐渗系对白粉病和条锈病抗性的遗传分析. *华北农学报*, 2012, 27(5): 163-167
Zhan H X, Li G R, Zhang X J, Li X, Chang Z J. Inheritances of resistance to powdery mildew and stripe rust in cryptic alien introgression from *Thinopyrum intermedium*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(5): 163-167
- [97] Luo P G, Luo H Y, Chang Z J, Zhang H Y, Zhang M, Ren Z L. Characterization and chromosomal location of *Pm40* in common wheat: A new gene for resistance to powdery mildew derived from *Elytrigia intermedium*. *Theoretical and Applied Genetics*, 2009, 118(6): 1059-1064
- [98] He R L, Chang Z J, Yang Z J, Yuan Z L, Zhan H X, Zhang X J, Liu J X. Inheritance and mapping of powdery mildew resistance gene *Pm43* introgressed from *Thinopyrum intermedium* into wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 2009, 118(6): 1173-1180
- [99] 李建波, 乔麟轶, 李欣, 张晓军, 詹海仙, 郭慧娟, 任永康, 畅志坚. 小麦-中间偃麦草渗入系抗白粉病基因 *PmCH7124* 的分子定位. *作物学报*, 2015, 41(1): 49-56
Li J B, Qiao L Y, Li X, Zhang X J, Zhan H X, Guo H J, Ren Y K, Chang Z J. Molecular localization of powdery mildew resistance gene *PmCH7124* in wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression line. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 49-56
- [100] Shen X K, Ma L X, Zhong S F, Liu N, Zhang M, Chen W Q, Zhou Y L, Li H J, Chang Z J, Li X, Bai G H, Zhang H Y, Tan F Q, Ren Z L, Luo P G. Identification and genetic mapping of the putative *Thinopyrum intermedium*-derived dominant powdery mildew resistance gene *PmL962* on wheat chromosome arm 2BS. *Theoretical and Applied Genetics*, 2015, 128(3): 517-528
- [101] Liu J, Chang Z J, Zhang X J, Yang Z J, Li X, Jia J Q, Zhan H X, Guo H J, Wang J M. Putative *Thinopyrum intermedium*-derived stripe rust resistance gene *Yr50* maps on wheat chromosome arm 4BL. *Theoretical and Applied Genetics*, 2013, 126(1): 265-274
- [102] Huang Q, Li X, Chen W Q, Xiang Z P, Zhong S F, Chang Z J, Zhang M, Zhang H Y, Tan F Q, Ren Z L, Luo P G. Genetic mapping of a putative *Thinopyrum intermedium*-derived stripe rust resistance gene on wheat chromosome 1B. *Theoretical and Applied Genetics*, 2014, 127(4): 843-853
- [103] Zhang X, Cui C H, Bao Y G, Wang H G, Li X F. Molecular cytogenetic characterization of a novel wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression line tolerant to phosphorus deficiency. *The Crop Journal*, 2021, 9(4): 816-822
- [104] Liu L Q, Luo Q L, Li H W, Li B, Li Z S, Zheng Q. Physical mapping of the blue-grained gene from *Thinopyrum ponticum* chromosome 4Ag and development of blue-grain-related molecular markers and a FISH probe based on SLAF-seq technology. *Theoretical and Applied Genetics*, 2018, 131(11): 2359-2370
- [105] Baker L, Grewal S, Yang C Y, Hubbart-Edwards S, Scholefield D, Ashling S, Burridge A J, Przewieslik-Allen A M, Wilkinson P A, King I P, King J. Exploiting the genome of *Thinopyrum elongatum* to expand the gene pool of hexaploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 2020, 133(9): 2213-2226
- [106] Wang H W, Sun S L, Ge W Y, Zhao L F, Hou B Q, Wang K, Lyu Z F, Chen L Y, Xu S S, Guo J, Li M, Su P S, Li X F, Wang G P, Bo C Y, Fang X J, Zhuang W W, Cheng X X, Wu J W, Dong L H, Chen W, Li W Y, Xiao G L, Zhao J X, Hao Y C, Xu Y, Gao Y, Liu W J, Liu Y H, Yin H Y, Li J Z, Li X, Zhao Y, Wang X Q, Ni F, Ma X, Li A F, Xu S S, Bai G H, Nevo E, Gao C X, Ohm H, Kong L R. Horizontal gene transfer of *Fhb7* from fungus underlies *Fusarium* head blight resistance in wheat. *Science*, 2020, 368(6493): 5435