

外源染色体导入对小麦主要农艺性状的影响

汪晓璐, 韩 冉, 宫文萍, 程敦公, 郭 军, 曹新有, 翟胜男, 李法计, 訾 妍,
刘爱峰, 李豪圣, 宋健民, 刘 成, 刘建军

(山东省农业科学院作物研究所 / 农业部黄淮北部小麦生物学与遗传育种重点实验室 / 小麦玉米国家工程实验室, 济南 250100)

摘要: 小麦-近缘物种染色体附加系具有抗病抗逆等优良性状, 是向小麦转移其优异基因的重要桥梁材料。当前, 已有大量研究报道了近缘物种抗病抗逆基因向小麦的转移情况。然而, 外源染色体导入对小麦主要农艺性状影响的研究却鲜有报道。因此, 加强这方面的研究, 对综合评价和利用这些小麦远缘杂交材料具有指导意义。本研究通过 1 年 4 地田间试验, 对 103 份小麦-远缘物种染色体附加系的株高、穗长、旗叶长、旗叶宽、有效分蘖数、小穗数、单穗粒数和千粒重等农艺性状进行调查, 研究了外源染色体导入对小麦主要农艺性状的影响。结果发现, 与对照小麦相比, 希尔斯山羊草 4S[#]1、粗穗披碱草 5H^t、纤毛披碱草 3S^c、7S^c、5Y^c 和 7Y^c、簇毛麦 2V#3、大麦 4H、帝国黑麦 4R、长穗偃麦草 3E、5E 和 6E 染色体导入可使小麦穗长显著变长; 纤毛披碱草 5Y^c 染色体导入使小麦旗叶显著变小; 纤毛披碱草 7S^c 和 7Y^c 染色体导入可使小麦千粒重显著增加。上述筛选出的这些小麦-近缘物种染色体附加系值得利用染色体工程或理化诱变对其进行诱导, 获得近缘物种染色体结构变异体, 定位相关农艺性状基因。

关键词: 小麦; 外源染色体; 附加系; 农艺性状

Effects of Alien Chromosome on Main Agronomic Traits of Wheat

WANG Xiao-lu, HAN Ran, GONG Wen-ping, CHENG Dun-gong, GUO Jun, CAO Xin-you, ZHAI Sheng-nan,
LI Fa-ji, ZI Yan, LIU Ai-feng, LI Hao-sheng, SONG Jian-min, LIU Cheng, LIU Jian-jun
(Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Wheat Biology and
Genetic Improvement in the North Yellow & Huai River Valley, Ministry of Agriculture/National Engineering
Laboratory for Wheat & Maize, Jinan 250100)

Abstract: Chromosome addition lines of wheat-wild species have excellent traits such as disease resistance and stress tolerance, which is an important bridge material for the introgression of elite characters to wheat. Many studies have reported the increasing of disease resistance or stress tolerance when the wild relatives derived segments are present in wheat. However, the effects on agronomic traits caused by introgressions of alien chromosomes remain to be rarely reported. In this study, several agronomic traits consisting of plant height, spike length, flag leaf length and width, effective tiller number, spikelet number, grain number per spike and thousand-kernel weight in a set of chromosome addition lines were investigated at four field trials experiments. In relative to wheat control lines, the presence of introduced chromosomes *Aegilops searsii* Feldman & Kislev 4S[#]1, *Elymus trachycaulus* (Link) Gould 5H^t, *E. ciliaris* (Trin.) Tzvelev 3S^c, 7S^c, 5Y^c and 7Y^c, *Dasypyrum villosum* (L.) P. Candargy 2V#3, *Hordeum vulgare* L. 4H, *Secale cereal* L. 4R, *Lophopyrum elongatum* (Host) Á. löve 3E, 5E and 6E resulted in significant increase on spike length. When *E. ciliaris* (Trin.) Tzvelev 5Y^c chromosome is present,

收稿日期: 2020-01-06 修回日期: 2020-03-06 网络出版日期: 2020-03-26

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20200106001>

第一作者研究方向为小麦遗传育种, E-mail: xiaoluwang1989@hotmail.com; 韩冉为共同第一作者

通信作者: 刘成, 研究方向为小麦细胞遗传学, E-mail: lch6688407@163.com

刘建军, 研究方向为小麦遗传育种, E-mail: ljjsaas@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31971874); 泰山学者工程专项经费 (tsqn201812123); 山东省农业良种工程 (2019LZGC016)

Foundation project: National Natural Science Foundation of China (31971874), Taishan Scholars Project (tsqn201812123), Agricultural Seed Project of Shandong Province (2019LZGC016)

the wheat-wild addition lines showed markedly decrease on the size of flag leaf. The chromosomes of *E. ciliaris* (Trin.) Tzvelev 7S^c and 7Y^c were found to be associated with the increase of thousand-kernel weight. Thus, these chromosome addition lines in conjunction with future chromosome engineering and (/or) physicochemical mutagenesis induced structural variants become of interest to localize the agronomically-important genes.

Key words: wheat; alien chromosome; addition line; agronomic traits

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 在世界各地广泛种植, 是世界上主要的粮食作物之一。随着我国产业结构调整, 小麦播种面积大幅减少, 以及人口数量的增加, 都对小麦遗传育种提出了新的要求^[1]。由于在小麦育种中大量使用相同或相近的亲本、长期定向选择品种及栽培品种单一化等原因, 不仅造成现有小麦品种遗传基础日趋狭窄^[2], 限制了小麦产量和品质改良, 还使小麦对生物性和非生物性胁迫的脆弱性增加^[3]。小麦近缘种含有丰富的抗病抗逆基因^[4], 可以通过远缘杂交将其优良基因导入小麦, 这是拓宽小麦遗传基础^[4-6]和持续推进小麦育种取得进展的有效途径^[4, 7]。

小麦远缘杂交利用中, 应用最广和最成功的是黑麦, 其 1RS 染色体上携带 *Yr9* 和 *Pm8* 等抗病基因以及丰产基因而被广泛用于育种, 育成了大量小麦新品种^[8-9]。我国科学家将簇毛麦^[10-11]、偃麦草^[12-15]、冰草^[16-17]、山羊草^[18-19]、鹅观草^[20]、赖草^[21]、大麦^[22]和新麦草^[23-24]等外源染色质转移到了小麦, 培育出了一大批小麦育种所需的重要抗源, 如 Zhang 等^[10]通过导入簇毛麦 5V 染色体鉴定出了抗白粉病的小麦 - 簇毛麦 T5VS.5AL 易位系; Guo 等^[14]借助中国春 *Ph1b* 突变体诱导长穗偃麦草 7e12L 染色体与小麦 7DL 染色体部分同源重组, 创制了抗赤霉病的小麦 - 长穗偃麦草染色体小片段易位系 SDAU1881 和 SDAU1886, 并选育出了 SDAU1902、SDAU1903、SDAU1904 和 SDAU1906 等 4 个赤霉病抗性较好的小麦品系; Li 等^[17]利用 ⁶⁰Co- γ 辐照抗叶锈病和白粉病的小麦 - 冰草 2P 染色体二体附加系 II-9-3, 同时利用杀配子染色体 2C 对其进行诱导, 通过鉴定获得了 49 个小麦 - 冰草易位系; 余懋群等^[18]将易变山羊草、偏凸山羊草染色质导入栽培小麦, 创制了小麦 - 易变山羊草染色体易位系, 为小麦抗条锈病和禾谷孢囊线虫提供了有用资源; 孔令娜等^[20]和孔芳^[22]分别利用分子标记选育了更多的小麦 - 纤毛鹅观草异附加系和小麦 - 加州野大麦异附加系; 刘文轩等^[21]利用减数分裂期成株电离辐射选育小麦 - 大赖草易位系, 尤其是抗赤霉病易位系; Kang 等^[24]将华山新麦草与小

麦杂交, 获得了抗条锈病的小麦 - 华山新麦草双二倍体, 并将条锈抗性基因定位在华山新麦草 3Ns 染色体上。当前, 小麦 - 远缘杂交种质研究多集中在条锈、叶锈、秆锈和白粉等抗病基因的发掘与利用上^[10-23], 而外源染色体导入对小麦主要农艺性状影响的研究相对较少。因而, 加强这方面的研究, 对综合评价和利用小麦远缘杂交种质具有指导意义。

本研究通过 1 年 4 地田间试验, 对 103 份小麦 - 近缘物种染色体附加系的株高、穗长、旗叶长、旗叶宽、有效分蘖数、小穗数、单穗粒数和千粒重等农艺性状进行调查, 研究了外源染色体导入对小麦主要农艺性状的影响, 筛选出使小麦穗长变长、旗叶变小或千粒重增加的小麦 - 近缘物种染色体附加系, 为后续利用染色体工程或理化诱变方法创制小麦 - 近缘物种染色体易位系进而导入小麦进行遗传改良奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 104 份, 包括 103 份小麦 - 近缘物种染色体附加系和小麦品种中国春 (对照), 材料序号、种质库编号及名称等信息列于表 1, 其中, 中国春由电子科技大学杨足君教授提供; 序号为 8~14、28~41 和 87~90 的材料由河南农业大学刘文轩教授提供; 序号为 15~21、42~48 和 86~90 的材料由英国约翰英纳斯中心 (JIC, John Innes Centre) 的 Reader SM 教授提供; 序号为 98-104 的材料由美国加州大学戴维斯分校 Dvorak J 教授提供; 其余材料由美国堪萨斯州立大学小麦遗传与基因资源中心 (WGGR, Wheat Genetic and Genomic Resources Center) 的 Gill BS 教授提供。

1.2 试验设计

2015 年 10 月将上述材料分别播种于山东济南市 (山东省农业科学院作物研究所试验基地)、德州市 (德州市农业科学研究院试验基地)、菏泽市 (菏泽市农业科学院试验基地) 和临沂市 (临沂市农业科学院试验基地) 4 地, 浇水、施肥、锄草和病虫害处理等管理条件一致。采用随机区组设计, 每小区

7 行,株距 20 cm,行距 33 cm,31 株/行,行长 6 m。为了消除边际效应的影响,材料周边种植 18 行本实验室育成的小麦品种济麦 22 为保护行。2016 年 5 月下旬,每个材料随机选取 10 株对其株高、穗长、旗叶长、旗叶宽、有效分蘖数和小穗数等农艺性状进行调查。6 月中旬,在材料完全成熟后收获,手工脱粒后干燥,调查单穗粒数和千粒重,农艺性状统计方法参照宫文萍等^[25]。

1.3 数据处理

在 Microsoft EXCEL 2010 中计算各项农艺性状数据 4 地的平均值和标准差;利用在线 T-TEST 分析软件(<https://www.graphpad.com/quickcalcs/ttest1.cfm?Format=SD>)进行计算和数据差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 外源染色体导入对小麦株高的影响

与对照中国春相比,中国春-希尔斯山羊草 1S[#]1 附加系、中国春-单芒山羊草 6N 附加系、中国春-两芒山羊草 2M^{bi}#1 附加系、中国春-拟斯卑尔脱山羊草 2S[#]3 附加系、中国春-无芒山羊草 T4 和 7T 附加系、中国春-易变山羊草 5U[#]1 附加系、中国春-粗穗披碱草 1Hⁱ 附加系、中国春-纤毛披碱草 1Y^c 和 5Y^c 附加系、中国春-智利大麦 1H^{ch}+1H^{ch}S 附加系的株高显著降低(表 1),因此,相应的外源染色体可能携带降低株高的基因。

2.2 外源染色体导入对小麦穗部性状的影响

与对照中国春相比,中国春-希尔斯山羊草 4S[#]1 附加系的穗长显著变长、而 1S[#]1 附加系的穗长显著变短且 1S[#]1 和 7S[#]1 附加系的单穗粒数显著减少;中国春-单芒山羊草 6N 附加系的穗长和小穗数显著减少、5N 附加系的单穗粒数显著减少;中国春-卵穗山羊草 1M[#]1 和 7M[#]1 附加系的穗长和单穗粒数显著减少;中国春-两芒山羊草 2M^{bi}#1 附加系的小穗数和单穗粒数显著减少;中国春-无芒山羊草 T2 和 7T 附加系的穗长、小穗数和单穗粒数显著减少,T5 附加系的小穗数和单穗粒数显著减少且 T1、5T 和 T4 附加系的单穗粒数显著变少;中国春-易变山羊草 7U[#]1 附加系的穗长和单穗粒数显著减少且 7S[#]1、5U[#]1 和 6U[#]1 附加系的单穗粒数显著减少;中国春-拟斯卑尔脱山羊草 3S[#]3 附加系的小穗数显著减少且 2S[#]3、5S[#]3 和 7S[#]3 附加系的单穗粒数显著减少;中国春-高大山羊草 1S^l#3、5S^l#3 和 6S^l#3 附加系的单穗粒数显

著减少;中国春-簇毛麦 2V[#]3 附加系的穗长显著变长、而 3V[#]3 附加系的穗长显著变短且 7V[#]3 附加系的单穗粒数显著减少;中国春-纤毛披碱草 3S^c、7S^c、5Y^c 和 7Y^c 附加系的穗长显著变长、而 1S^c 附加系的穗长显著变短且 7S^c 和 5Y^c 附加系的小穗数显著减少;中国春-粗穗披碱草 5Hⁱ 附加系的穗长显著变长且 1Hⁱ、5Hⁱ 和 1Sⁱ 附加系的单穗粒数显著减少;中国春-大麦 4H 附加系的穗长显著变长、2H 附加系的单穗粒数显著减少;中国春-帝国黑麦 4R 附加系的穗长显著变长;中国春-长穗偃麦草 3E、5E 和 6E 附加系的穗长显著变长、1E 和 7E 附加系的单穗粒数显著减少(表 1),因此,相应的外源染色体可能携带影响小麦穗部性状的基因。

2.3 外源染色体导入对小麦旗叶长和旗叶宽的影响

与对照中国春相比,中国春-纤毛披碱草 5Y^c 附加系的旗叶显著变短(表 1),因此,5Y^c 染色体可能携带使旗叶变短的基因。

与对照中国春相比,中国春-高大山羊草 6S^l#3 附加系的旗叶显著变宽、而 1S^l#3 附加系的旗叶显著变窄;中国春-单芒山羊草 4N 附加系的旗叶显著变宽、而 5N、6N 和 7N 附加系的旗叶显著变窄;中国春-簇毛麦 6V[#]3 附加系的旗叶显著变宽、而 2V[#]3 附加系的旗叶显著变窄;中国春-大麦 4H 和 7H 单体附加系的旗叶显著变宽、而 2H 附加系的旗叶显著变窄;另外,中国春-希尔斯山羊草 1S[#]1 附加系,中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 和 2M^{bi}#1 附加系,中国春-卵穗山羊草 1M[#]1 和 2M[#]1 附加系,中国春-拟斯卑尔脱山羊草 2S[#]3 和 3S[#]3 附加系,中国春-无芒山羊草 T1、T3 端体、5T、T4、7T 和 T5 附加系,中国春-易变山羊草 3S[#]1 附加系,中国春-粗穗披碱草 1Hⁱ 附加系,中国春-纤毛披碱草 1S^c、1Y^c、5Y^c 和 7Y^c 附加系,中国春-长穗偃麦草 1E、2E 和 7E 附加系的旗叶显著变窄(表 1),因此,相应的外源染色体可能携带影响旗叶宽度的基因。

2.4 外源染色体导入对小麦有效分蘖数的影响

与对照中国春相比,中国春-希尔斯山羊草 1S[#]1 和 5S[#]1 附加系,中国春-高大山羊草 2S^l#3、4S^l#3 和 6S^l#3 附加系,中国春-单芒山羊草 6N 附加系,中国春-两芒山羊草 2M^{bi}#1 附加系,中国春-卵穗山羊草 4M[#]1 附加系,中国春-拟斯卑尔脱山羊草 2S[#]3 和 3S[#]3 附加系,中国春-无芒山羊草 5T 和 T4 附加系,中国春-易变山羊草 4U[#]1

表 1 104 份材料的序号、编号、名称及主要农艺性状统计

Table 1 The number, accession number, name and main agronomic traits of 104 materials

序号 Number	编号 Accession No.	材料名称 Material name	株高 (cm) Plant height	穗长 (cm) Spike length	旗叶长 (cm) Flag leaf length	旗叶宽 (cm) Flag leaf width	有效分蘖数 Effective tiller number	小穗数 Spikelet number	单穗粒数 Grain number per spike	千粒重 (g) Thousand-kernel weight
1	CS	中国春	120.80 ± 12.64	8.74 ± 0.66	29.52 ± 3.22	1.68 ± 0.08	26.23 ± 6.70	23.10 ± 2.22	65.43 ± 15.04	34.86 ± 3.29
2	TA3580	中国春 - 希尔斯山羊草 1S#1 附加系	97.04 ± 11.64*	7.34 ± 0.35**	27.05 ± 3.35	1.34 ± 0.13**	14.93 ± 5.91*	20.92 ± 2.21	34.86 ± 3.21**	27.00 ± 1.42**
3	TA3581	中国春 - 希尔斯山羊草 2S#1 附加系	108.27 ± 3.97	8.06 ± 0.82	27.63 ± 3.49	1.46 ± 0.20	19.33 ± 4.29	20.28 ± 2.95	49.68 ± 7.85	28.32 ± 2.66*
4	TA3583	中国春 - 希尔斯山羊草 4S#1 附加系	120.01 ± 7.42	10.32 ± 0.67*	31.20 ± 4.46	1.55 ± 0.12	26.13 ± 6.99	23.53 ± 1.68	62.75 ± 10.49	35.27 ± 1.62
5	TA3584	中国春 - 希尔斯山羊草 5S#1 附加系	110.82 ± 8.62	8.95 ± 0.66	30.86 ± 3.61	1.79 ± 0.07	15.30 ± 4.29*	22.90 ± 2.38	56.91 ± 6.96	33.77 ± 2.40
6	TA3585	中国春 - 希尔斯山羊草 6S#1 附加系	111.73 ± 8.89	9.57 ± 1.21	29.47 ± 4.32	1.84 ± 0.25	17.43 ± 3.20	22.75 ± 1.53	58.02 ± 3.52	31.99 ± 2.02
7	TA3586	中国春 - 希尔斯山羊草 7S#1 附加系	110.56 ± 9.98	8.56 ± 0.95	30.35 ± 2.98	1.56 ± 0.18	19.63 ± 7.39	20.35 ± 2.44	39.33 ± 7.06*	30.17 ± 1.06*
8	TA7543	中国春 - 高大山羊草 1S#3 附加系	109.54 ± 7.94	8.69 ± 0.28	28.41 ± 5.99	1.50 ± 0.09*	20.07 ± 9.61	23.23 ± 3.55	31.51 ± 14.79*	32.13 ± 2.16
9	TA7544	中国春 - 高大山羊草 2S#3 附加系	110.26 ± 6.96	8.06 ± 0.40	27.07 ± 7.22	1.49 ± 0.14	16.23 ± 3.31*	22.93 ± 1.28	47.96 ± 15.93	30.88 ± 1.51
10	TA7545	中国春 - 高大山羊草 3S#3 附加系	121.50 ± 5.55	9.43 ± 0.38	30.12 ± 6.20	1.75 ± 0.11	24.20 ± 7.67	24.65 ± 2.05	73.14 ± 18.25	37.93 ± 2.19
11	TA7546	中国春 - 高大山羊草 4S#3 附加系	103.52 ± 10.93	9.80 ± 0.81	30.81 ± 4.30	1.86 ± 0.13	10.13 ± 5.25**	21.47 ± 1.56	55.13 ± 10.67	31.49 ± 3.28
12	TA7547	中国春 - 高大山羊草 5S#3 附加系	109.25 ± 11.21	9.71 ± 1.00	31.77 ± 6.96	1.62 ± 0.16	20.47 ± 3.21	22.60 ± 3.36	37.31 ± 7.29*	34.86 ± 1.80
13	TA7548	中国春 - 高大山羊草 6S#3 附加系	106.24 ± 6.83	9.21 ± 0.48	27.80 ± 4.17	1.86 ± 0.10*	13.07 ± 6.08*	23.03 ± 1.63	42.87 ± 10.23*	35.34 ± 2.04
14	TA7549	中国春 - 高大山羊草 7S#3 单体附加系	116.09 ± 7.49	8.75 ± 0.43	29.45 ± 5.21	1.66 ± 0.14	22.97 ± 5.50	23.03 ± 1.90	60.60 ± 11.96	37.17 ± 4.25
15	1N	中国春 - 单芒山羊草 1N 附加系	113.75 ± 10.64	8.51 ± 1.10	26.70 ± 2.38	1.73 ± 0.04	23.06 ± 6.68	22.40 ± 2.31	61.75 ± 14.70	33.47 ± 1.53
16	2N	中国春 - 单芒山羊草 2N 附加系	107.16 ± 23.51	8.61 ± 0.50	29.52 ± 6.06	1.54 ± 0.17	23.93 ± 10.37	22.25 ± 1.43	65.82 ± 6.31	33.94 ± 2.43
17	3N	中国春 - 单芒山羊草 3N 附加系	111.88 ± 14.95	8.90 ± 0.87	30.30 ± 6.48	1.60 ± 0.29	23.43 ± 10.96	23.62 ± 3.15	70.47 ± 12.55	32.36 ± 3.05
18	4N	中国春 - 单芒山羊草 4N 附加系	114.84 ± 7.59	9.63 ± 1.79	32.38 ± 4.08	1.90 ± 0.08**	17.47 ± 7.74	21.43 ± 3.48	44.68 ± 22.20	32.04 ± 2.07
19	5N	中国春 - 单芒山羊草 5N 附加系	88.11 ± 30.30	8.29 ± 0.91	21.55 ± 6.16	1.37 ± 0.14**	14.88 ± 10.21	19.83 ± 3.26	21.40 ± 12.17**	29.77 ± 3.20
20	6N	中国春 - 单芒山羊草 6N 附加系	95.20 ± 4.20**	7.15 ± 0.29**	27.69 ± 5.01	1.39 ± 0.09**	18.00 ± 0.57*	16.90 ± 2.11**	58.25 ± 12.37	36.92 ± 2.95
21	7N	中国春 - 单芒山羊草 7N 附加系	109.46 ± 6.98	8.07 ± 0.48	26.63 ± 3.27	1.49 ± 0.07*	25.63 ± 3.09	19.43 ± 2.69	40.68 ± 13.68	33.78 ± 4.10

表 1 (续)

序号 Number.	编号 Accession No.	材料名称 Material name	株高 (cm) Plant height	穗长 (cm) Spike length	旗叶长 (cm) Flag leaf length	旗叶宽 (cm) Flag leaf width	有效分蘖数 Effective tiller number	小穗数 Spikelet number	单穗粒数 Grain number per spike	千粒重 (g) Thousand-kernel weight
22	TA7725	中国春 - 两芒山羊草 1U ^b #1 附加系	103.59 ± 6.34	8.31 ± 0.78	26.06 ± 2.43	1.58 ± 0.22*	20.13 ± 5.33	22.68 ± 3.02	61.43 ± 9.22	29.54 ± 3.13
23	TA7726	中国春 - 两芒山羊草 2U ^b #1 附加系	105.76 ± 10.02	7.97 ± 0.29	24.18 ± 4.50	1.48 ± 0.15	18.90 ± 4.20	20.45 ± 1.19	55.12 ± 7.18	29.61 ± 5.83
24	TA7729	中国春 - 两芒山羊草 5U ^b #1 附加系	108.19 ± 10.26	10.21 ± 1.02	25.34 ± 5.65	1.55 ± 0.13	32.00 ± 5.23	23.35 ± 2.66	51.83 ± 9.11	35.61 ± 2.45
25	TA7733	中国春 - 两芒山羊草 2M ^b #1 附加系	91.83 ± 11.47*	7.55 ± 0.83	24.76 ± 4.62	1.31 ± 0.14**	10.84 ± 1.18**	16.54 ± 1.70**	36.56 ± 5.33*	24.62 ± 0.86**
26	TA7734	中国春 - 两芒山羊草 3M ^b #1 附加系	111.71 ± 12.11	8.18 ± 0.19	29.71 ± 4.50	1.65 ± 0.11	24.23 ± 10.21	22.73 ± 2.17	62.66 ± 11.82	34.22 ± 2.65
27	TA7735	中国春 - 两芒山羊草 4M ^b #1 单体附加系	118.13 ± 8.34	8.83 ± 0.28	29.63 ± 6.24	1.74 ± 0.14	23.77 ± 5.65	23.43 ± 2.73	69.65 ± 20.55	35.14 ± 3.60
28	TA7655	中国春 - 卵穗山羊草 1M ^e #1 附加系	103.14 ± 10.63	6.97 ± 0.76*	27.70 ± 5.46	1.46 ± 0.15*	19.18 ± 2.26	20.53 ± 2.50	33.66 ± 5.76**	29.14 ± 2.04*
29	TA7656	中国春 - 卵穗山羊草 2M ^e #1 附加系	121.06 ± 7.39	7.90 ± 0.52	27.35 ± 5.24	1.47 ± 0.14*	30.63 ± 9.01	22.33 ± 2.40	49.08 ± 5.08	36.47 ± 1.49
30	TA7657	中国春 - 卵穗山羊草 3M ^e #1 附加系	123.78 ± 5.23	8.89 ± 0.98	30.35 ± 6.11	1.67 ± 0.19	28.03 ± 6.96	24.80 ± 3.18	65.86 ± 13.27	34.51 ± 1.81
31	TA7658	中国春 - 卵穗山羊草 4M ^e #1 附加系	107.90 ± 8.38	7.93 ± 0.79	32.73 ± 5.61	1.76 ± 0.12	13.53 ± 3.81*	21.75 ± 3.08	47.03 ± 11.52	33.03 ± 2.73
32	TA7659	中国春 - 卵穗山羊草 5M ^e #1 附加系	119.97 ± 5.50	8.44 ± 0.73	26.67 ± 3.90	1.86 ± 0.17	19.67 ± 5.09	23.15 ± 2.93	52.58 ± 6.28	35.19 ± 1.98
33	TA7660	中国春 - 卵穗山羊草 6M ^e #1 附加系	119.49 ± 9.71	8.63 ± 0.61	28.75 ± 2.65	1.76 ± 0.18	23.37 ± 3.39	23.00 ± 3.60	64.78 ± 14.86	35.72 ± 1.46
34	TA7661	中国春 - 卵穗山羊草 7M ^e #1 附加系	108.73 ± 15.68	7.53 ± 0.58*	30.98 ± 3.73	1.46 ± 0.16	17.99 ± 8.01	19.93 ± 4.04	32.58 ± 7.58**	30.95 ± 1.31
35	TA7689	中国春 - 拟斯卑尔脱山羊草 1S ^{#3} 附加系	106.15 ± 7.86	8.10 ± 1.05	27.54 ± 4.46	1.58 ± 0.09	26.67 ± 9.81	24.98 ± 3.00	56.19 ± 7.18	28.21 ± 1.33**
36	TA7690	中国春 - 拟斯卑尔脱山羊草 2S ^{#3} 附加系	90.05 ± 17.05*	8.16 ± 0.44	25.01 ± 5.04	1.27 ± 0.16**	13.65 ± 5.89*	21.28 ± 2.49	29.50 ± 3.02**	25.05 ± 5.07*
37	TA7691	中国春 - 拟斯卑尔脱山羊草 3S ^{#3} 附加系	104.40 ± 15.14	8.83 ± 0.37	24.57 ± 4.22	1.42 ± 0.12*	10.56 ± 2.96**	18.48 ± 1.98*	40.43 ± 17.84	30.78 ± 2.02
38	TA7692	中国春 - 拟斯卑尔脱山羊草 4S ^{#3} 附加系	114.88 ± 9.57	9.60 ± 1.42	32.83 ± 5.20	1.81 ± 0.13	26.33 ± 6.99	24.75 ± 4.30	59.93 ± 5.70	31.42 ± 1.02
39	TA7693	中国春 - 拟斯卑尔脱山羊草 5S ^{#3} 附加系	116.05 ± 7.70	8.58 ± 0.91	30.05 ± 4.03	1.58 ± 0.17	19.70 ± 9.46	23.75 ± 3.49	37.24 ± 4.28*	32.16 ± 1.17
40	TA7694	中国春 - 拟斯卑尔脱山羊草 6S ^{#3} 附加系	119.98 ± 4.35	9.53 ± 0.81	30.92 ± 3.26	1.80 ± 0.11	23.90 ± 0.85	24.50 ± 2.74	66.46 ± 9.09	35.84 ± 1.69
41	TA7695	中国春 - 拟斯卑尔脱山羊草 7S ^{#3} 附加系	105.84 ± 9.21	7.65 ± 0.73	30.51 ± 4.53	1.51 ± 0.18	19.27 ± 8.58	19.98 ± 2.65	34.32 ± 3.70*	28.45 ± 1.59*
42	JIC-21	中国春 - 无芒山羊草 T1 附加系	106.92 ± 8.14	7.66 ± 0.79	28.83 ± 2.40	1.42 ± 0.10**	14.50 ± 3.70	20.11 ± 1.22	38.90 ± 7.81*	26.50 ± 2.86**

表 1 (续)

序号 Number.	编号 Accession No.	材料名称 Material name	株高 (cm) Plant height	穗长 (cm) Spike length	旗叶长 (cm) Flag leaf length	旗叶宽 (cm) Flag leaf width	有效分蘖数 Effective tiller number	小穗数 Spikelet number	单穗粒数 Grain number per spike	千粒重 (g) Thousand-kernel weight
43	JIC-29	中国春 - 无芒山羊草 T2 附加系	100.11 ± 13.74	6.21 ± 1.11**	23.97 ± 6.17	0.98 ± 0.06	19.45 ± 6.03	19.01 ± 0.93*	31.09 ± 4.22**	22.55 ± 0.48**
44	JIC-22	中国春 - 无芒山羊草 T3 端体附加系	115.88 ± 5.82	8.06 ± 0.65	29.20 ± 3.68	1.47 ± 0.10*	22.63 ± 12.61	21.15 ± 2.23	48.63 ± 4.77	32.83 ± 3.79
45	JIC-23	中国春 - 无芒山羊草 5T 附加系	108.05 ± 17.52	10.07 ± 1.40	30.22 ± 2.29	1.53 ± 0.04*	15.70 ± 4.60*	21.33 ± 2.21	43.47 ± 5.86*	30.63 ± 2.06
46	JIC-24	中国春 - 无芒山羊草 T4 附加系	90.03 ± 4.86**	8.88 ± 0.96	27.49 ± 2.54	1.33 ± 0.05**	14.40 ± 3.51*	19.78 ± 2.15	39.90 ± 3.05*	30.32 ± 3.39
47	JIC-25	中国春 - 无芒山羊草 7T 附加系	102.67 ± 5.99**	7.83 ± 0.33*	28.99 ± 3.50	1.42 ± 0.08**	18.83 ± 2.42	19.05 ± 2.08*	28.69 ± 4.60**	28.87 ± 1.41*
48	JIC-27	中国春 - 无芒山羊草 T5 附加系	104.10 ± 15.34	7.89 ± 0.65	30.83 ± 3.54	1.44 ± 0.14*	18.41 ± 2.95	19.29 ± 1.93*	37.06 ± 3.77*	30.35 ± 0.30*
49	TA7594	中国春 - 易变山羊草 1S*#1 附加系	121.45 ± 10.67	9.63 ± 1.22	31.31 ± 4.79	1.70 ± 0.11	26.07 ± 11.47	23.54 ± 1.96	55.33 ± 15.40	30.45 ± 0.49*
50	TA7595	中国春 - 易变山羊草 2S*#1 附加系	122.36 ± 11.62	8.73 ± 0.67	28.42 ± 4.21	1.55 ± 0.10	24.87 ± 7.75	21.20 ± 1.96	56.96 ± 12.39	35.76 ± 3.22
51	TA7596	中国春 - 易变山羊草 3S*#1 附加系	111.07 ± 11.22	8.78 ± 0.25	25.42 ± 2.83	1.46 ± 0.09*	21.60 ± 9.99	21.03 ± 1.73	58.52 ± 5.59	31.67 ± 3.24
52	TA7597	中国春 - 易变山羊草 4S*#1 附加系	112.68 ± 8.97	9.24 ± 0.60	25.56 ± 4.60	1.58 ± 0.08	21.07 ± 11.28	22.25 ± 1.68	60.60 ± 9.35	30.79 ± 3.91
53	TA7599	中国春 - 易变山羊草 6S*#1 端体附加系	116.73 ± 4.90	9.12 ± 0.45	27.66 ± 3.80	1.74 ± 0.15	18.67 ± 5.34	20.98 ± 1.98	48.73 ± 7.28	36.07 ± 1.71
54	TA7600	中国春 - 易变山羊草 7S*#1 附加系	116.16 ± 8.86	8.62 ± 0.76	30.04 ± 6.65	1.67 ± 0.12	17.00 ± 3.61	20.70 ± 2.55	43.49 ± 4.46*	31.94 ± 1.73
55	TA7614	中国春 - 易变山羊草 1U*#1 附加系	114.12 ± 9.59	8.36 ± 0.17	26.51 ± 3.54	1.60 ± 0.05	22.83 ± 2.44	21.95 ± 2.80	60.72 ± 14.50	30.17 ± 2.02
56	TA7615	中国春 - 易变山羊草 2U*#1 附加系	121.89 ± 6.22	8.13 ± 0.48	30.44 ± 3.76	1.65 ± 0.14	23.77 ± 4.53	21.95 ± 2.31	68.80 ± 1.51	35.24 ± 0.37
57	TA7616	中国春 - 易变山羊草 3U*#1 附加系	116.17 ± 4.27	8.56 ± 0.43	27.96 ± 3.92	1.70 ± 0.12	22.77 ± 0.95	22.28 ± 2.85	67.39 ± 10.52	34.90 ± 3.31
58	TA7617	中国春 - 易变山羊草 4U*#1 附加系	107.57 ± 11.90	8.89 ± 0.24	28.58 ± 4.01	1.64 ± 0.08	15.18 ± 1.50*	20.94 ± 4.12	47.71 ± 4.87	27.68 ± 1.68**
59	TA7618	中国春 - 易变山羊草 5U*#1 附加系	85.34 ± 19.19*	8.53 ± 0.70	24.02 ± 3.00	1.53 ± 0.14	20.53 ± 0.51	17.85 ± 3.93	32.79 ± 6.92**	30.99 ± 4.67
60	TA7619	中国春 - 易变山羊草 6U*#1 附加系	106.42 ± 8.86	7.91 ± 1.09	31.88 ± 4.02	1.56 ± 0.09	22.43 ± 11.02	18.81 ± 2.76	30.33 ± 3.25**	33.03 ± 0.88
61	TA7620	中国春 - 易变山羊草 7U*#1 附加系	114.02 ± 14.09	7.24 ± 0.50*	29.63 ± 4.36	1.71 ± 0.16	20.88 ± 9.67	20.27 ± 3.28	39.37 ± 5.19*	31.89 ± 0.86
62	TA7552	中国春 - 粗穗披碱草 1H 附加系	96.43 ± 9.54*	7.71 ± 0.78	23.59 ± 5.33	1.38 ± 0.18*	8.82 ± 3.43**	21.86 ± 1.88	24.10 ± 7.61**	26.08 ± 1.34**
63	TA7557	中国春 - 粗穗披碱草 5H 附加系	100.38 ± 12.59	10.11 ± 0.78*	28.48 ± 5.02	1.58 ± 0.14	14.51 ± 1.77*	23.51 ± 1.61	36.27 ± 10.80*	34.70 ± 2.35

表 1 (续)

序号 Number.	编号 Accession No.	材料名称 Material name	株高 (cm) Plant height	穗长 (cm) Spike length	旗叶长 (cm) Flag leaf length	旗叶宽 (cm) Flag leaf width	有效分蘖数 Effective tiller number	小穗数 Spikelet number	单穗粒数 Grain number per spike	千粒重 (g) Thousand-kernel weight
64	TA7558	中国春 - 粗穗披碱草 6H ⁺ 附加系	103.90 ± 8.10	8.66 ± 0.39	27.42 ± 4.25	1.67 ± 0.17	16.33 ± 1.37*	21.57 ± 1.81	57.69 ± 3.95	31.66 ± 2.24
65	TA7559	中国春 - 粗穗披碱草 7H ⁺ 附加系	103.55 ± 9.80	8.87 ± 0.30	28.72 ± 5.02	1.63 ± 0.15	20.50 ± 12.44	20.70 ± 1.06	47.50 ± 6.43	29.16 ± 2.52*
66	TA7556	中国春 - 粗穗披碱草 1S ⁺ 附加系	101.97 ± 18.75	8.56 ± 0.66	27.80 ± 5.97	1.63 ± 0.17	10.63 ± 4.20**	22.92 ± 2.10	30.99 ± 2.04**	26.49 ± 2.71**
67	TA7583	中国春 - 纤毛披碱草 1S ⁺ 附加系	101.23 ± 19.09	7.25 ± 0.97*	25.62 ± 4.73	1.44 ± 0.10*	8.61 ± 3.80**	20.45 ± 3.51	40.33 ± 14.10	24.97 ± 3.58**
68	TA7705	中国春 - 纤毛披碱草 2S ⁺ 附加系	123.77 ± 10.73	8.38 ± 0.32	28.78 ± 2.59	1.67 ± 0.12	22.67 ± 3.83	22.08 ± 2.53	60.35 ± 12.88	33.67 ± 2.11
69	TA7706	中国春 - 纤毛披碱草 3S ⁺ 附加系	114.31 ± 16.55	10.43 ± 0.87*	29.00 ± 3.07	1.62 ± 0.10	21.37 ± 6.62	22.73 ± 1.65	64.01 ± 14.81	31.15 ± 1.62
70	TA7707	中国春 - 纤毛披碱草 7S ⁺ 附加系	127.47 ± 10.82	11.46 ± 1.74*	28.27 ± 2.09	1.74 ± 0.11	25.53 ± 6.22	19.88 ± 1.38*	56.16 ± 18.25	46.22 ± 3.32**
71	TA7584	中国春 - 纤毛披碱草 1Y ⁺ 附加系	92.34 ± 8.81*	8.20 ± 1.70	25.29 ± 5.13	1.49 ± 0.07*	13.69 ± 10.00	22.47 ± 2.60	53.74 ± 12.30	24.77 ± 1.80**
72	TA7708	中国春 - 纤毛披碱草 5Y ⁺ 附加系	96.17 ± 2.38**	12.00 ± 0.35**	21.62 ± 2.49**	1.32 ± 0.05**	12.92 ± 3.98*	17.82 ± 0.81**	45.45 ± 13.96	29.77 ± 3.35
73	TA7709	中国春 - 纤毛披碱草 7Y ⁺ 附加系	113.45 ± 12.97	12.65 ± 0.94**	29.29 ± 1.44	1.49 ± 0.03**	24.07 ± 5.36	23.00 ± 2.12	52.38 ± 15.49	41.05 ± 2.85*
74	TA7677	中国春 - 簇毛麦 1V#3 附加系	119.41 ± 10.57	9.90 ± 0.75	28.79 ± 4.36	1.74 ± 0.15	22.33 ± 8.07	22.85 ± 1.90	49.14 ± 5.75	34.23 ± 2.27
75	TA7678	中国春 - 簇毛麦 2V#3 附加系	122.94 ± 8.78	10.64 ± 1.21*	30.07 ± 4.96	1.45 ± 0.08**	24.83 ± 7.74	26.60 ± 3.40	62.14 ± 10.79	34.25 ± 3.36
76	TA7679	中国春 - 簇毛麦 3V#3 附加系	113.34 ± 5.63	7.55 ± 0.66*	28.84 ± 4.39	1.63 ± 0.05	19.70 ± 1.93	23.88 ± 1.47	57.23 ± 6.99	32.08 ± 0.93
77	TA7680	中国春 - 簇毛麦 4V#3 附加系	120.75 ± 11.02	8.90 ± 0.83	29.96 ± 3.60	1.57 ± 0.15	20.33 ± 5.18	23.48 ± 2.83	60.63 ± 2.91	30.27 ± 1.68*
78	TA7681	中国春 - 簇毛麦 5V#3 附加系	118.03 ± 8.05	8.77 ± 0.75	30.14 ± 4.68	1.71 ± 0.12	24.87 ± 5.92	23.63 ± 2.84	57.89 ± 6.70	34.25 ± 3.21
79	TA7682	中国春 - 簇毛麦 6V#3 附加系	107.23 ± 7.18	9.23 ± 1.49	27.08 ± 3.30	1.84 ± 0.04*	16.49 ± 9.79	21.53 ± 2.05	47.53 ± 11.32	33.55 ± 1.99
80	TA7683	中国春 - 簇毛麦 7V#3 附加系	117.46 ± 11.56	10.17 ± 1.16	25.38 ± 4.07	1.75 ± 0.15	18.15 ± 2.48	23.21 ± 2.71	42.83 ± 7.62*	38.98 ± 2.49
81	TA3698	中国春 - 大麦 2H 附加系	107.26 ± 13.16	9.73 ± 0.78	30.45 ± 5.16	1.39 ± 0.11**	12.92 ± 1.38**	22.24 ± 1.11	40.22 ± 11.34*	28.53 ± 4.58
82	TA3699	中国春 - 大麦 3H 附加系	110.56 ± 11.61	8.13 ± 0.90	28.38 ± 2.61	1.66 ± 0.24	13.46 ± 7.90*	21.66 ± 2.95	52.24 ± 21.75	26.84 ± 3.27*
83	TA3700	中国春 - 大麦 4H 附加系	109.41 ± 8.99	10.67 ± 1.36*	30.23 ± 2.78	1.96 ± 0.07**	17.50 ± 3.52	24.23 ± 2.65	61.85 ± 9.06	27.79 ± 3.31*
84	TA3701	中国春 - 大麦 5H 附加系	112.65 ± 7.37	9.46 ± 0.37	29.44 ± 5.48	1.61 ± 0.20	16.63 ± 3.52*	23.28 ± 2.69	49.41 ± 17.96	29.80 ± 1.76*

表 1 (续)

序号 Number.	编号 Accession No.	材料名称 Material name	株高 (cm) Plant height	穗长 (cm) Spike length	旗叶长 (cm) Flag leaf length	旗叶宽 (cm) Flag leaf width	有效分蘖数 Effective tiller number	小穗数 Spikelet number	单穗粒数 Grain number per spike	千粒重 (g) Thousand-kernel weight
85	TA3697	中国春 - 大麦 7H 单体附加系	116.02 ± 12.23	9.44 ± 0.36	28.35 ± 3.94	1.95 ± 0.12*	20.42 ± 10.95	21.97 ± 2.02	55.23 ± 3.40	28.25 ± 4.61
86	XX029	中国春 - 智利大麦 1H ^{ch} +1H ^{ch} S 附加系	91.35 ± 13.31*	9.13 ± 1.10	30.44 ± 4.35	1.67 ± 0.13	17.47 ± 7.43	21.85 ± 1.47	39.61 ± 28.73	30.75 ± 5.30
87	TA7588	中国春 - 智利大麦 4H ^{ch} 附加系	108.44 ± 22.76	10.68 ± 1.66	30.94 ± 4.74	1.68 ± 0.17	26.40 ± 6.60	24.93 ± 2.65	65.80 ± 5.22	31.76 ± 4.15
88	TA7589	中国春 - 智利大麦 5H ^{ch} 附加系	117.32 ± 5.21	12.23 ± 0.73	27.13 ± 6.14	1.50 ± 0.15	10.98 ± 3.77**	23.48 ± 1.15	57.42 ± 8.85	30.82 ± 5.49
89	TA7590	中国春 - 智利大麦 6H ^{ch} 附加系	116.72 ± 6.94	9.39 ± 1.57	29.31 ± 2.72	1.80 ± 0.09	21.77 ± 5.68	23.58 ± 1.94	63.66 ± 11.27	39.10 ± 2.83
90	TA7591	中国春 - 智利大麦 7H ^{ch} 附加系	121.75 ± 3.68	9.12 ± 0.44	29.93 ± 3.12	1.70 ± 0.07	20.27 ± 5.19	24.43 ± 2.08	65.04 ± 7.23	31.29 ± 3.84
91	TA3601	中国春 - 帝国黑麦 1R 附加系	107.92 ± 11.22	7.83 ± 0.98	27.81 ± 4.59	1.56 ± 0.14	19.67 ± 6.54	21.38 ± 2.40	54.73 ± 8.37	30.69 ± 3.00
92	TA3603	中国春 - 帝国黑麦 2R 附加系	127.25 ± 6.49	9.34 ± 0.70	31.02 ± 4.87	1.72 ± 0.05	28.87 ± 4.74	24.93 ± 2.67	70.98 ± 11.76	34.53 ± 1.99
93	TA3604	中国春 - 帝国黑麦 3R 附加系	113.90 ± 8.78	8.32 ± 0.51	30.82 ± 4.27	1.57 ± 0.23	21.53 ± 9.41	22.86 ± 2.71	63.68 ± 11.86	33.94 ± 2.12
94	TA3605	中国春 - 帝国黑麦 4R 附加系	109.88 ± 5.88	10.07 ± 0.55*	34.59 ± 3.11	1.85 ± 0.12	12.77 ± 2.14**	22.03 ± 1.80	54.40 ± 8.83	24.84 ± 4.01**
95	TA3606	中国春 - 帝国黑麦 5R 附加系	111.95 ± 5.98	8.44 ± 0.38	28.55 ± 6.25	1.61 ± 0.21	15.88 ± 3.39*	22.94 ± 2.75	52.40 ± 7.52	33.35 ± 1.40
96	TA3608	中国春 - 帝国黑麦 6R 附加系	120.94 ± 8.46	8.02 ± 0.41	29.60 ± 4.95	1.74 ± 0.15	22.10 ± 2.91	22.83 ± 2.34	60.23 ± 3.81	35.16 ± 1.64
97	TA3609	中国春 - 帝国黑麦 7R 附加系	125.58 ± 4.89	9.10 ± 0.35	30.84 ± 4.33	1.72 ± 0.12	26.27 ± 6.59	23.85 ± 1.91	67.05 ± 14.03	36.56 ± 2.16
98	TA3664	中国春 - 长穗偃麦草 1E 附加系	111.11 ± 6.26	8.34 ± 0.50	24.58 ± 4.47	1.47 ± 0.08*	27.07 ± 6.68	24.28 ± 3.46	41.91 ± 8.51*	29.95 ± 2.77
99	TA3665	中国春 - 长穗偃麦草 2E 附加系	104.47 ± 15.80	9.10 ± 0.97	26.22 ± 5.22	1.30 ± 0.09**	15.77 ± 2.17*	21.23 ± 2.17	48.48 ± 6.43	25.52 ± 0.93**
100	TA3666	中国春 - 长穗偃麦草 3E 附加系	120.43 ± 13.65	10.37 ± 0.75*	25.59 ± 4.52	1.59 ± 0.16	26.60 ± 6.09	23.65 ± 3.32	68.42 ± 4.04	31.57 ± 1.86
101	TA3667	中国春 - 长穗偃麦草 4E 附加系	115.78 ± 11.57	9.40 ± 0.25	29.84 ± 6.47	1.80 ± 0.16	16.70 ± 1.85*	23.78 ± 2.21	55.99 ± 11.46	32.43 ± 1.10
102	TA3704	中国春 - 长穗偃麦草 5E 附加系	112.07 ± 11.20	10.51 ± 0.45**	30.96 ± 3.45	1.59 ± 0.17	13.00 ± 6.45*	22.73 ± 1.61	46.51 ± 4.70	33.48 ± 1.64
103	TA3668	中国春 - 长穗偃麦草 6E 附加系	116.98 ± 5.93	11.04 ± 0.68*	25.84 ± 3.36	1.72 ± 0.18	17.80 ± 8.85	23.50 ± 2.11	64.9521.96	27.78 ± 7.03
104	TA3706	中国春 - 长穗偃麦草 7E 附加系	107.89 ± 7.87	8.99 ± 0.58	30.76 ± 3.84	1.43 ± 0.11*	21.00 ± 6.66	20.13 ± 1.33	42.20 ± 7.25*	32.88 ± 1.52

*代表差异显著 ($P \leq 0.05$); **代表差异极显著 ($P \leq 0.01$)* means the significant level at $P \leq 0.05$, ** means the significant level at $P \leq 0.01$

附加系,中国春-粗穗披碱草 1H¹、5H¹、6H¹ 和 1S¹ 附加系,中国春-纤毛披碱草 1S^c 和 5Y^c 附加系,中国春-大麦 2H、3H 和 5H 附加系,中国春-智利大麦 5H^{ch} 附加系、中国春-帝国黑麦 4R 和 5R 附加系,中国春-长穗偃麦草 2E、4E 和 5E 附加系的有效分蘖数显著减少(表 1),因此,相应的外源染色体可能携带使有效分蘖数减少的基因。

2.5 外源染色体导入对小麦千粒重的影响

与对照中国春相比,中国春-希尔斯山羊草 1S^s#1、2S^s#1 和 7S^s#1 附加系,中国春-两芒山羊草 2M^b#1 附加系,中国春-卵穗山羊草 1M^s#1 附加系,中国春-拟斯卑尔脱山羊草 1S^s#3、2S^s#3 和 7S^s#3 附加系,中国春-无芒山羊草 T1、T2、7T 和 T5 附加系,中国春-易变山羊草 1S^v#1、4U^v#1 附加系,中国春-粗穗披碱草 1H¹、7H¹ 和 1S¹ 附加系,中国春-簇毛麦 4V#3 附加系,中国春-大麦 3H、4H 和 5H 附加系,中国春-帝国黑麦 4R 附加系,中国春-长穗偃麦草 2E 附加系的千粒重显著降低(表 1),中国春-纤毛披碱草 1S^c 和 1Y^c 附加系的千粒重显著降低、而 7S^c 和 7Y^c 附加系的千粒重显著增加(表 1),因此,相应的外源染色体可能携带使小麦千粒重降低或增加的基因。

3 讨论

外源染色体的导入可能会对小麦农艺性状产生影响,这些影响主要表现在株高、穗长、旗叶长、旗叶宽、有效分蘖数、小穗数、单穗粒数和千粒重等方面。前人对单个小麦近缘物种染色体导入小麦对其农艺性状产生影响的研究报道较多^[26-34],但从多个生态点入手,系统性的对小麦族近缘植物染色体导入小麦对其农艺性状影响的研究还鲜为报道。本试验对 103 份小麦-近缘物种染色体附加系的农艺性状进行统计,发现部分外源染色体的导入对小麦的有效分蘖数、小穗数和单穗粒数具有负效应,但簇毛麦 2V#3 染色体导入使小麦穗长显著变长,旗叶显著变窄且小穗数、单穗粒数和千粒重均与中国春较相近,纤毛披碱草 7S^c 或 7Y^c 染色体的导入可使小麦千粒重显著增加(表 1),该结果为后续利用染色体工程或理化诱变诱导这两份材料进而定位优异农艺性状基因奠定了基础。由于本研究所用的部分小麦-近缘物种附加系与前人研究中所用的附加系相同或相近^[26-34],因此,笔者对二者结果的相同点和不同点进行了比较分析和讨论。

王海燕等^[26]发现小麦-簇毛麦 T4V#4S·4DL

易位染色体的导入对小麦有效穗数、小穗数和穗粒数无明显影响,但降低了受体小麦的千粒重。在本研究中簇毛麦 4V#3 的导入可显著降低小麦千粒重,与王海燕等^[26]的研究结果一致,表明簇毛麦 4VS 染色体上可能存在降低千粒重的基因。小麦-簇毛麦 T5V#4S·5DL 易位染色体的高代回交品系的株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒重等主要农艺性状与其轮回亲本相比,差异均不显著^[27],与本研究以 5V#3 附加系为材料的研究结果相同,说明簇毛麦 5VS 染色体对小麦农艺性状无显著影响。另外,我们近期的研究发现 T5V#3S·5DL 成株抗白粉病,由于簇毛麦 T5V#4S·5DL 上含抗白粉病基因 *Pm55*,因此 T5V#3S·5DL 上可能也含有 *Pm55* 或其等位基因。两个不同簇毛麦来源的 T5VS·5DL 均可作为小麦白粉病抗源应用于小麦育种工作。

除了上述与前人相互印证的研究结果外,本研究的结果还有一些与前人的报道存在差异。张艳等^[28]发现,中国春-大麦 2H 附加系与中国春相比,株高显著降低、穗长显著增加、穗粒数显著降低;董剑等^[29]发现中国春-簇毛麦易位系 T1V#3S·1DL 和 T1V#3L·1DS 的千粒重显著高于中国春。本研究发现中国春-大麦 2H 附加系与对照中国春相比穗粒数显著降低,但株高和穗长无明显变化;中国春-簇毛麦 1V#3 附加系与对照相比,农艺性状无显著差异。其原因可能是研究材料种植地域生态环境不同:张艳等^[28]和董剑等^[29]的研究材料所种植的地点分别为北京和杨凌,而本研究是对山东省 4 个生态点的数据进行平均,再与中国春数据进行比较,从某种程度上消除了环境对农艺性状统计结果的影响。

李桂萍^[30]等发现,小麦-簇毛麦 6V#4S·6AL 易位染色体对后代的小穗数、穗粒数、穗粒重和产量等农艺性状没有表现出明显的影响,对穗长和千粒重表现出一定的正向效应。本研究发现中国春-簇毛麦 6V#3 附加系增加了旗叶宽,对穗长和千粒重无影响。造成这种结果的差异的原因可能是 6V#4S·6AL 易位染色体对穗长和千粒重的影响并不是 6VS 染色体的导入导致的,可能是因为 6AL 染色体上控制千粒重的 QTL 缺失造成的^[35]。

胡阳杰^[31]以豫农 982(1RS·1BL 易位系)和 wheatear(7Ag·7DL 易位系)的杂交后代为研究材

料,发现 1RS·1BL 易位系可显著降低株高,提高穗粒数与小穗数。任天恒等^[32]将小麦-白粒黑麦易位系导入高产品系 A42912 可提高其千粒重和穗数。梁邦平等^[33]发现普通小麦品系 W770B 与墨西哥黑麦杂交育成的 1RS·1BL 易位系 8-2-1 的株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒重显著高于对照。本研究发现中国春-帝国黑麦 1R 附加系与对照相比,株高、穗粒数、小穗数和千粒重均无显著变化。造成这种差异结果的原因可能是:(1) 1RS 来源的黑麦不同;(2) 小麦 1BS 染色体存在与否的差异,因此本研究所用材料为附加系含 1BS,而与前述研究所用材料为 1RS·1BL 易位系,不含 1BS;(3) 黑麦 1R 或 1RS 染色体所在小麦背景不同。刘登才等^[36]发现长穗偃麦草的 4E 染色体对增加小穗数有很强的效应,而 1E 和 5E 染色体对增加小穗数有较弱的效应。郭军等^[37]发现长穗偃麦草 1E^e 染色体不仅降低了旗叶长和宽,还降低了穗粒数、小穗数和千粒重等性状,但显著增加了穗长。本研究发现长穗偃麦草 1E 和 4E 染色体导入都使小穗数增加,但与中国春相比,差异不显著,而且 1E 染色体比 4E 染色体增加的效应强,可能是环境和小麦背景不同导致的差异。

参考文献

- [1] 何中虎,庄巧生,程顺和,于振文,赵振东,刘旭. 中国小麦产业发展与科技进步. 农学学报, 2018, 8(1): 99-106
He Z H, Zhuang Q S, Cheng S H, Yu Z W, Zhao Z D, Liu X. Wheat production and technology improvement in China. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 99-106
- [2] 郝晨阳,王兰芬,张学勇,游光霞,董玉琛,贾继增,刘旭,尚勋武,刘三才,曹永生. 我国育成小麦品种的遗传多样性演变. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2005, 35(5): 408-415
Hao C Y, Wang L F, Zhang X Y, You G X, Dong Y C, Jia J Z, Liu X, Shang X W, Liu S C, Cao Y S. Genetic diversity evolution of wheat cultivars in China. Science in China Ser. C: Life Sciences, 2005, 35(5): 408-415
- [3] 徐国辉,王永斌,陈静,郭长虹. 杀配子染色体及其在创制小麦族染色体易位系中的应用. 中国农学通报, 2008, 24(10): 88-93
Xu G H, Wang Y B, Chen J, Guo C H. The gametocidal chromosome and its application in establishing wheat-alien translocation lines. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(10): 88-93
- [4] 董玉琛. 小麦的基因源. 麦类作物学报, 2000, 20(3): 78-81
Dong Y C. Gene pools of common wheat. Journal of Triticeae Crops, 2000, 20(3): 78-81
- [5] 吉万全,薛秀庄,王秋英,王长有, Fedak G, Patroski R, 刘广田. 中间偃麦草的 GISH 分析. 西北植物学报, 2001, 21(3): 401-405
Ji W Q, Xue X Z, Wang Q Y, Wang C Y, Fedak G, Patroski R, Liu G T. GISH analysis of *Thinopyrum intermedium*. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(3): 401-405
- [6] 张增艳,许景升,刘耀光,王晓萍,林志珊,辛志勇. 利用中间偃麦草抗病基因同源序列分离黄矮病抗性候选基因克隆. 作物学报, 2004, 30(3): 189-195
Zhang Z Y, Xu J S, Liu Y G, Wang X P, Lin Z S, Xin Z Y. Isolation of resistance gene candidates by a resistance gene analog of *Thinopyrum intermedium* and pooled-PCR. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(3): 189-195
- [7] 王述民,李立会,黎裕,卢新雄,杨庆文,曹永生,张宗文,高卫东,邱丽娟,万建民,刘旭. 中国粮食和农业植物遗传资源状况报告(I). 植物遗传资源学报, 2011, 12(1): 1-12
Wang S M, Li L H, Li Y, Lu X X, Yang Q W, Cao Y S, Zhang Z W, Gao W D, Qiu L J, Wan J M, Liu X. Status of plant genetic resources for food and agricultural in China(I). Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(1): 1-12
- [8] Ren T, Tang Z, Fu S, Yan B, Tan F, Ren Z, Li Z. Molecular cytogenetic characterization of novel wheat-rye T1RS. 1BL translocation lines with high resistance to diseases and great agronomic traits. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 799
- [9] 韩德俊,康振生. 中国小麦品种抗条锈病现状及存在问题与对策. 植物保护, 2018, 44(5): 6-17
Han D J, Kang Z S. Current status and future strategy in breeding wheat for resistance to stripe rust in China. Plant Protection, 2018, 44(5): 6-17
- [10] Zhang R, Sun B, Chen J, Cao A, Xing L, Feng Y, Lan C, Chen P. *Pm55*, a developmental-stage and tissue-specific powdery mildew resistance gene introgressed from *Dasypyrum villosum* into common wheat. Theoretical and Applied Genetics, 2016, 129(10): 1975-1984
- [11] Zhang R, Fan Y, Kong L, Wang Z, Wu J, Xing L, Cao A, Feng Y. *Pm62*, an adult-plant powdery mildew resistance gene introgressed from *Dasypyrum villosum* chromosome arm 2VL into wheat. Theoretical and Applied Genetics, 2018, 131(12): 2613-2620
- [12] Li Z S, Li B, Zhang Q, Li H W. Review and new progress in wheat wide hybridization for improving the resistance to biotic and abiotic stresses//Proceedings of the 12th International Wheat Genetics Symposium, Springer Open, 2015: 377-385
- [13] 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 Amphiploids. Journal of Genetics and Genomics, 2014, 41(12): 663-666
- [14] Guo J, Zhang X L, Hou Y L, Cai J J, Shen X R, Zhou T T, Xu H H, Ohm H W, Wang H W, Li A F, Han F P, Wang H G, Kong L R. High-density mapping of the major FHB resistance gene *Fhb7* derived from *Thinopyrum ponticum* and its pyramiding with *Fhb1* by marker-assisted selection. Theoretical and Applied Genetics, 2015, 128(11): 2301-2316
- [15] 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
- [16] Li H H, Jiang B, Wang J C, Lu Y Q, Zhang J P, Pan C L, Yang X M, Li X Q, Liu W H, Li L H. Mapping of novel

- powdery mildew resistance gene (s) from *Agropyron cristatum* chromosome 2P. Theoretical and Applied Genetics, 2016, 130 (1): 1-13
- [17] Li H H, Lv M J, Song L Q, Zhang J P, Gao A N, Li L H, Liu W H. Production and identification of wheat-*Agropyron cristatum* 2P translocation lines. PloS ONE, 2016, 11 (1): e0145928-e0145943
- [18] 余懋群, 田文兰. 易变山羊草携抗禾谷类根结线虫基因染色体向普通小麦的转移. 西南农业学报, 1994, 7 (3): 9-14
Yu M Q, Tian W L. Transferring alien chromosome with resistant gene to cereal root knot nematode from *Ae. variabilis* into bread wheat. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1994, 7 (3): 9-14
- [19] 朱振东, 周荣华, 董玉琛, 贾继增. 几个四倍体小麦山羊草双二倍体及其部分亲本的抗小麦白粉病基因分析. 植物遗传资源学报, 2003, 4 (2): 137-143
Zhu Z D, Zhou R H, Dong Y C, Jia J Z. Analysis of powdery mildew resistance genes in some tetraploid wheat-*Aegilops amphiploid* and their parents. Journal of Plant Genetic Resources, 2003, 4 (2): 137-143
- [20] 孔令娜, 李巧, 王海燕, 曹爱忠, 陈佩度, 王秀娥. 普通小麦-纤毛鹅观草染色体易附加系的分子标记鉴定. 遗传, 2008, 30 (10): 1356-1362
Kong L N, Li Q, Wang H Y, Cao A Z, Chen P D, Wang X E. Molecular marker analysis of wheat-*Roegneria ciliaris* additions lines. Hereditas, 2008, 30 (10): 1356-1362
- [21] 刘文轩, 陈佩度, 刘大钧. 利用减数分裂期电离辐射选育小麦-大赖草易位系的研究. 植物学报, 1999, 41 (5): 463-467
Liu W X, Chen P D, Liu D J. Development of *Triticum aestivum*-*Leymus racemosus* translocation lines by irradiating adult plants at meiosis. Acta Botanica Sinica, 1999, 41 (5): 463-467
- [22] 孔芳. 普通小麦-加州野大麦 (*Hordeum californicum*) 易附加系的选育及其白粉病抗性鉴定. 南京: 南京农业大学, 2006
Kong F. Development and characterization of *Triticum aestivum*-*Hordeum californicum* alien chromosome lines and powdery mildew resistance evaluation. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006
- [23] Ma D F, Hou L, Sun C, Zhang X, Yin J L, Guo Q Y, Zhu Y X. Molecular mapping of stripe rust resistance gene *YrH9017* in wheat-*Psathyrostachys huashanica* introgression line H9017-14-16-5-3. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18 (1): 108-114
- [24] Kang H Y, Zhang Z J, Xu L L, Qi W L, Tang Y, Wang H, Zhu W, Li D Y, Zeng J, Wang Y, Fan X, Sha L N, Zhang H Q, Zhou Y H. Characterization of wheat-*Psathyrostachys huashanica* small segment translocation line with enhanced kernels per spike and stripe rust resistance. Genome, 2016, 59: 221-229
- [25] 官文萍, 楚秀生, 韩冉, 王灿国, 孙正娟, 程敦公, 余晓丛, 刘成, 刘建军. 单芒山羊草染色体组优异基因发掘. 山东农业科学, 2015, 47 (7): 11-15
Gong W P, Chu X S, Han R, Wang C G, Sun Z J, Cheng D G, Yu X C, Liu C, Liu J J. Excellent gene exploration from *Aegilops uniaristata* genome. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47 (7): 11-15
- [26] 王海燕, 赵仁慧, 袁春霞, 张守忠, 肖进, 王秀娥. 小麦-簇毛麦 T4DL·4VS 易位染色体对小麦农艺性状的影响. 麦类作物学报, 2012, 32 (6): 1032-1036
Wang H Y, Zhao R H, Yuan C X, Zhang S Z, Xiao J, Wang X E. Effects of the *Triticum aestivum*-*Haynaldia villosa* T4DL·4VS translocation chromosome on the agronomic important traits in different backgrounds. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32 (6): 1032-1036
- [27] 张瑞奇, 冯祯高, 侯富, 陈树林, 别同德, 陈佩度. 普通小麦-簇毛麦 T5VS·5DL 易位染色体对小麦主要农艺性状、品质和白粉病抗性的遗传效应分析. 中国农业科学, 2015, 48 (6): 1041-1051
Zhang R Q, Feng Y G, Hou F, Chen S L, Bie T D, Chen P D. The genetic effect of wheat-*H. villosa* T5VS·5DL translocated chromosome on agronomic characteristics, quality and powdery mildew resistance of common wheat. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48 (6): 1041-1051
- [28] 张艳, 原亚萍, 陈孝, 李韬, 张勇, 何中虎. 大麦 2H 染色体对小麦农艺和品质特性的影响. 麦类作物学报, 2007, 27 (3): 402-406
Zhang Y, Yuan Y P, Chen X, Li T, Zhang Y, He Z H. Effect of barley 2H chromosome on agronomic traits and quality characteristics of common wheat. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27 (3): 402-406
- [29] 董剑, 杨华, 赵万春, 李晓燕, 陈其皎, 高翔. 普通小麦中国春-簇毛麦易位系 T1DL·1VS 和 T1DS·1VL 的农艺和品质特性. 作物学报, 2013, 39 (8): 1386-1390
Dong J, Yang H, Zhao W C, Li X Y, Chen Q J, Gao X. Agronomic traits and grain quality of Chinese Spring-*Dasypyrum villosum* translocation lines T1DL·1VS and T1DS·1VL. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39 (8): 1386-1390
- [30] 李桂萍, 陈佩度, 张守忠, 赵和. 小麦-簇毛麦 6VS/6AL 易位系染色体对小麦农艺性状的影响. 植物遗传资源学报, 2011, 12 (5): 744-749
Li G P, Chen P D, Zhang S Z, Zhao H. Effects of the 6VS/6AL translocation chromosome on agronomic characteristics of wheat. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12 (5): 744-749
- [31] 胡阳杰, 田芳慧, 宋全昊, 李法计, 孙道杰. 小麦 1BL/1RS 和 7DL·7Ag 易位对小麦主要农艺性状的遗传效应. 麦类作物学报, 2012, 32 (4): 610-615
Hu Y J, Tian F H, Song Q H, Li F J, Sun D J. Genetic effects of chromosome translocations 1BL/1RS and 7DL·7Ag on the main agronomic traits of common wheat. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32 (4): 610-615
- [32] 任天恒, 李治, 晏本菊, 杨漫宇, 谭飞泉, 任正隆. 新育成的 1RS·1BL 初级易位系 T956-13 的育种价值. 麦类作物学报, 2017, 37 (12): 1534-1540
Ren T H, Li Z, Yan B J, Yang M Y, Tan F Q, Ren Z L. Development of a novel primary 1RS·1BL translocation line T956-13 and its breeding value. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37 (12): 1534-1540
- [33] 梁邦平, 刁慧珊, 李家创, 袁凤平, 刘洋, 白宇皓, 李毛, 郝冬冬, 白升升, 武军, 赵继新, 杨群慧, 陈新宏. 小麦-黑麦抗条锈病 1BL/1RS 易位系 8-2-1 的鉴定. 麦类作物学报, 2018,

- 38(9): 1045-1052
- Liang B P, Diao H S, Li J C, Yuan F P, Liu Y, Bai Y H, Li M, Hao D D, Bai S S, Wu J, Zhao J X, Yang Q H, Chen X H. Identification of wheat-rye 1BL/1RS translocation line 8-2-1 with stripe rust resistance. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(9): 1045-1052
- [34] Gong W P, Han R, Li H S, Song J M, Yan H F, Li G Y, Liu A F, Cao X Y, Guo J, Zhai S N, Cheng D G, Zhao Z D, Liu C, Liu J J. Agronomic traits and molecular marker identification of wheat-*Aegilops caudata* addition lines. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1743
- [35] 李青芳. 小麦千粒重相关性状的 QTL 定位及分子标记开发. 泰安: 山东农业大学, 2016
- Li Q F. QTL mapping and molecular markers development for thousand grain weight related traits of wheat(*Triticum aestivum* L.). Taian: Shandong Agricultural University, 2016
- [36] 刘登才, 郑有良, 兰秀锦, 魏育明. *Lophopyrum elongatum* (Host) A. Löve 染色体对小麦小穗数的影响. *四川农业大学学报*, 2001, 19(2): 115-116
- Liu D C, Zheng Y L, Lan X J, Wei Y M. The effect of chromosome of *Lophopyrum elongatum* (Host) A. Löve on spikelet number in wheat. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2001, 19(2): 115-116
- [37] 郭军, 卢明娇, 武智民, 李豪圣, 宫文萍, 王灿国, 程敦公, 刘爱峰, 曹新有, 刘成, 翟胜男, 杨足君, 刘建军, 孔令让, 赵振东, 宋健民. 1E^e 染色体对小麦农艺和品质性状的影响研究. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(4): 854-860
- Guo J, Lu M J, Wu Z M, Li H S, Gong W P, Wang C G, Cheng D G, Liu A F, Cao X Y, Liu C, Zhai S N, Yang Z J, Liu J J, Kong L R, Zhao Z D, Song J M. Effects of *Thinopyrum elongatum* chromosome 1E^e on wheat agronomical and quality related traits. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(4): 854-860