

缺体-四体染色体对小麦农艺性状和加工品质的影响

杨少伟¹,李煜²,吴倩¹,席甜甜¹,杨建光¹,罗佳¹,董剑¹,马守才¹,王军卫¹

(1.西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100; 2.内蒙古巴彦淖尔市农牧业科学研究所,内蒙古巴彦淖尔 015000)

摘要:小麦缺体-四体材料是一种重要的染色体遗传材料,通常被用来进行目的基因定位等研究,而对于缺体-四体小麦材料本身的农艺和品质性状的研究报道较少。为了解染色体缺失和重复对小麦主要农艺和品质性状的影响,对38份中国春缺体-四体材料进行了农艺、籽粒及面粉加工品质性状调查及分析。结果表明:缺体-四体材料的农艺性状变异系数表现为穗粒数>分蘖数>穗长>小穗数>株高;与对照(中国春)相比,N7D-T7A的小穗数显著增加($P<0.05$),N2A-T2B和N6B-T6A的穗粒数极显著降低($P<0.01$),N4B-T4A和N7D-T7A的株高显著增加,N6D-T6B的株高显著降低,N4A-T4B和N7A-T7B的穗长极显著变短,但是分蘖数上所有缺体-四体材料与对照无显著差异。缺体-四体材料的籽粒性状变异系数表现为千粒重>面积>长宽比>粒宽>粒长>周长;与对照相比,N3B-T3D、N3D-T3A、N3D-T3B、N6A-T6B、N6B-T6A的籽粒面积显著增加,N3B-T3A、N3B-T3D、N3D-T3B、N6A-T6B和N6B-T6A的粒宽极显著增加,N1B-T1A、N1B-T1D、N3A-T3D、N4A-T4B、N4A-T4D、N5B-T5D、N6A-T6D、N7A-T7B、N7A-T7D在长宽比上极显著降低,N2A-T2B的千粒重显著降低,在周长和粒长性状上所有缺体-四体材料与对照没有显著差异。缺体-四体材料的面粉品质性状变异系数表现为沉降值>湿面筋含量>粗蛋白含量>水分>淀粉;与对照相比,缺体-四体材料在面粉品质性状上存在差异,但不显著。缺体-四体材料的变异系数表现为稳定时间>形成时间>粉质质量指数>弱化度>吸水率;与对照相比,只有第一同源群缺体-四体材料在面团形成时间和稳定时间上表现出了显著差异,其中N1A-T1B面团稳定时间显著增加,N1A-T1D面团形成时间和面团稳定时间极显著增加,N1D-T1A面团形成时间显著增加,面团稳定时间极显著增加,而在其他指标上缺体-四体材料与对照均无显著差异。

关键词:小麦;缺体-四体;农艺性状;籽粒性状;面粉加工品质性状

中图分类号:S512.1;S330

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)04-0462-12

Effects of Nulli-Tetrasomic Chromosomes on Agronomic Traits and Processing Quality of Wheat

YANG Shaowei¹, LI Yu², WU Qian¹, XI Tiantian¹, YANG Jianguang¹,
LUO Jia¹, DONG Jian¹, MA Shoucai¹, WANG Junwei¹

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Bayannur Institute of Agriculture and Animal Husbandry, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: Nulli-tetrasomic materials are the important chromosomal genetic wheat materials, which have been used for target gene localization. However, fewer studies reported on the agronomic and quality traits of nulli-tetrasomic materials. In order to analyze the effects of chromosome deletions and duplications on major agronomic and quality traits of wheat, the agronomic, grain and flour processing quality traits of 38 nulli-tetrasomic materials were investigated. The results showed that coefficients of variation of agronomic traits showed grain number per spike>tiller number>spike length>

收稿日期:2024-05-03 修回日期:2024-12-03

基金项目:陕西省作物杂种优势研究与利用重点实验室后补助项目(2018SZS-22);陕西省重点研发计划项目(2023-YBNY-021, 2023-YBNY-024);西安市科技计划项目(23NYGG0021)

第一作者 E-mail:17325587293@qq.com(杨少伟);253734978@qq.com(李煜)

通讯作者 E-mail:wjw@nwsuaf.edu.cn(王军卫);mashoucai@nwsuaf.edu.cn(马守才)

spikelet number > plant height. Compared with the control (Chinese spring), the number of spikelets of N7D-T7A increased significantly; the number of grains per spike of N2A-T2B and N6B-T6A decreased significantly; the plant height of N4B-T4A and N7D-T7A increased significantly; the plant height of N6D-T6B decreased significantly; the spike length of N4A-T4B and N7A-T7B decreased significantly; yet there was no significant difference in the number of tillers between all nulli-tetrasomic materials and the control. The coefficients of variation of grain traits of the nulli-tetrasomic materials ranked as 1 000-grain weight > grain area > length-width ratio > grain width > grain length > perimeter; compared with the control, the grain area of N3B-T3D, N3D-T3A, N3D-T3B, N6A-T6B, and N6B-T6A increased significantly; the grain width of N3B-T3A, N3B-T3D, N3D-T3B, N6A-T6B, and N6B-T6A increased significantly, and the length-width ratio of N1B-T1A, N1B-T1D, N3A-T3D, N4A-T4B, N4A-T4D, N5B-T5A, N5B-T5D, N6A-T6D, N7A-T7B, and N7A-T7D decreased significantly. The 1 000-grain weight of N2A-T2B was significantly reduced, and there was no significant difference in circumference and grain length between all nulli-tetrasomic materials and the control. The variation coefficients of flour quality traits of the nulli-tetrasomic materials ranked as Zeleny > wet gluten content > protein content > moisture content > starch content; compared with the control, the nulli-tetrasomic materials had differences in flour quality traits, which are not significant. The coefficients of variation of nulli-tetrasomic materials ranked as stability time > development time > farinograph quality number > weakening value > water absorption; compared with the control, only the first homologous group nulli-tetrasomic materials showed significant differences in dough development time and stability time. Among them, the stability time of N1A-T1B dough reached significant differences, the dough development time and the stability time of N1A-T1D reached extremely significant differences, while there was no significant difference in other indices between the nulli-tetrasomic materials and the control. The results of this study lay a foundation for further analysis of the genetic effects of nulli-tetrasomic materials.

Keywords: Wheat; Nulli-tetrasomes; Agronomic traits; Grain traits; Flour processing quality traits

中国春非整倍体材料包括单体、端体、缺体、缺体-四体(缺四体)等,被广泛用于小麦遗传学研究^[1]。中国春缺四体是以中国春(Chinese spring, CS)为背景的 21 对同源染色体中缺失 1 对染色体,同时又增加 1 对其他部分同源染色体的遗传材料,由某条染色体的四体补偿另一个染色体的缺失,其染色体数仍然是 42 条^[2]。中国春缺四体材料在繁殖过程中由于异花授粉以及自身染色体配对异常等原因,造成缺四体材料不稳定,常常会出现缺失染色体漂移现象,在使用缺四体材料时需要对其真实性进行鉴定^[3-5]。

由于中国春缺四体独特的染色体构成常被用于小麦基因定位、远缘杂交染色体代换以及目标基因的定向转移等研究^[6]。比如,郭慧娟等^[7]利用中国春 N4B-T4A、N4A-T4B、N4D-T4A 研究小麦新种质 CH7015 中抗白粉病基因并将其定位于 4B 染色体的短臂。孙清栩等^[8]利用 7 个缺四体材料对小麦表皮模式建成因子基因 *TaEPFL1*

进行染色体定位,发现 *TaEPFL1.1* 位于 6D 染色体, *TaEPFL1.2* 位于 6B 染色体, *TaEPFL1.3* 位于 6A 染色体。李娟等^[9]利用中国春 N4B-T4A、N4A-T4B、N4D-T4B 材料发现小麦 K-型细胞质雄性不育系的育性基因 *CO11* 基因有 3 个拷贝,分别定位于小麦 4A、4B、4D 染色体。李欣等^[10]利用中国春 N5A-T5B、N5A-T5D、N5B-T5A、N5B-T5D、N5D-T5B 将小麦生长素结合基因 *TaABP1-D* 定位在小麦 5D 染色体。张蕾等^[11]根据中国春 N2A-T2D、N2B-T2D、N2D-T2A、N5A-T5B、N5B-T5D、N5D-T5B 的 SSR 标记鉴定结果,推测 CH7124 的 2B 和 5B 染色体上可能各存在一个耐盐相关 QTL。胡周波等^[12]利用中国春缺四体材料将 *Chi* 基因亚型——*Chi-1*、*Chi-2*、*Chi-3*、*Chi-4* 和 *Chi-6* 分别定位在 3A、2B、5B、1A 和 3D 染色体上。杨培浩等^[13]以普通小麦中国春及其 30 种缺四体为研究对象,对小麦籽粒戊聚糖含量进行遗传分析和鉴定,将调控小麦籽粒戊聚糖含量的基

因分别定位在 1D、2B、3B、4B、6A、7A 染色体上。这些研究结果充分展示了中国春缺四体材料在小麦遗传研究中的重要性。

长期以来,有关中国春缺四体的研究主要集中在新基因的染色体定位,对小麦染色体缺失和加倍后的农艺性状及加工品质的研究相对较少。本研究通过对 38 份缺四体材料的农艺性状、籽粒形态和面粉加工品质进行调查分析,以进一步利用缺四体材料的特殊遗传效应为小麦育种研究服务。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料共 39 份,包括 38 份中国春缺体-四体(缺四体)材料和中国春(对照),其中缺四体材料分别为 N1A-T1B、N1A-T1D、N1B-T1A、N1B-T1D、N1D-T1A、N1D-T1B、N2A-T2B、N2B-T2A、N2D-T2B、N3A-T3B、N3A-T3D、N3B-T3A、N3B-T3D、N3D-T3A、N3D-T3B、N4A-T4B、N4A-T4D、N4B-T4A、N4D-T4B、N5A-T5B、N5A-T5D、N5D-T5A、N5D-T5B、N6A-T6B、N6A-T6D、N6B-T6A、N6D-T6A、N6D-T6B、N7A-T7B、N7A-T7D、N7B-T7A、N7B-T7D、N7D-T7A、N7D-T7B。所有材料均由西北农林科技大学农学院小麦生殖

发育与杂种优势利用实验室提供。

1.2 方 法

1.2.1 DNA 的提取及 PCR 扩增

缺四体材料和对 照的基因组 DNA 提取采用常规 CTAB 法。PCR 反应体系 25 μL : 1.5 μL DNA (50 ng)模板, Mix(含 Taq 酶)12.5 μL (诺唯赞生物科技有限公司), 上游和下游引物(10 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)各 1 μL (表 1), ddH₂O 补齐至 25 μL 。PCR 反应程序为:95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 3 min;95 $^{\circ}\text{C}$ 15 s,55 ~ 60 $^{\circ}\text{C}$ 退火 30 s,72 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,35 个循环;72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 5min,4 $^{\circ}\text{C}$ 保存。使用 1%琼脂糖凝胶进行核酸检测,用 Bio-rad(伯乐,美国)凝胶成像分析仪观察并记录图像。

1.2.2 材料种植及农艺性状调查

分别于 2021 年和 2022 年的 10 月上旬将所有缺四体材料播种于陕西杨凌西北农林科技大学北校区小麦育种试验田。每个材料播种 4 行,行长 1.5 m,行距 25 cm,株距 3.3 cm,设有保护行。灌溉、施肥、除草等其他田间管理均按当地大田生产进行。分别于 2022 年和 2023 年 5 月下旬,每个材料随机选取 5 株,对株高、穗长、分蘖数、穗粒数和小穗数等农艺性状进行调查,农艺性状统计参照宫文萍等^[16]的方法。

表 1 染色体定位引物

Table 1 Primers used for chromosomal localization

序号 No.	引物名称 Primer	染色体 Chromosome	引物序列 Sequence of primer(5'-3')		参考文献 Reference
			正向 Forward	反向 Reserve	
1	Xgwm136	1A	GACAGCACCTTGCCCTTTG	CATCGGCAACATGCTCATC	[4]
2	Xwmc156	1B	GCCTCTAGGGGAGAAAAC TAACA	TCAAGATCATATCCTCCCAAC	[4]
3	Xwmc339	1D	CCGCTCGCCTTCTTCCAG	TCCGGAACATGCCGATAC	[4]
4	Xgwm552	2A	AAAAATCTCACGAGTCGGGC	CCCGAGCAGGAGCTACAAA	[4]
5	Xwmc361	2B	AATGAAGATGCAAATCGACGGC	ATTCTCGACTGAAAACAGGGG	[4]
6	CER1	2D	ATCCATTACCATGGCAACACGGCC	TCAAGCTTTTGACAGAGGAGTGAA	[14]
7	FBA1	3A	CCTAGTGCGTGCCCTGAGA	CGGAGAGGAACTGCCGAAT	[15]
8	FBA2	3B	ATCCTCGTAGCTCCGCCTA	TCATCGTCGCCTCCAGTTC	[15]
9	FBA3	3D	GTTTGT TTAGTTTGGGTTGG	AAGACCATACCATGATTCCA	[15]
10	FBA4	4A	AACGGTTCATCAGCCAAG	ACCAACAACGACCTTCAG	[15]
11	FBA5	4B	CGTCTGCTGCTCTCCTCAA	CTCCGTCCATCTCTTCCATCA	[15]
12	FBA6	4D	GGAGAAGTCACATACACCAT	AGGATGAGGAAGAGCAAGA	[15]
13	FBA7	5A	GCCGCAGGTGATGATGTCA	GAGACGAACCAACAACGCA	[15]
14	FBA8	5B	GGCAACCAGAGAAGGAAG	ATGGCACAGTCCAGTAGA	[15]
15	FBA9	5D	CTGGAGTGAAGAAAAGTACAATC	CGGACACAAGATATGAGAAC	[15]
16	Xbarc3	6A	TTCCTGTGTCTTTCTAAT	GCGAACTCCCGAACATTT	[4]
17	Xgwm508	6B	GTTATAGTAGCATATAATG	GTGCTGCCATGATATTT	[4]
18	Xcfd188	6D	AATGGCTTCACTGTTTGCCCT	AAATGGTCCCAGCATTCAAG	[4]
19	FBA19	7A	CGTCTCCATTCTCTGCCATC	CTAAGCCATCCACTGTTCCATC	[15]
20	FBA20	7B	GTGGACCGAACTTGAGACTTG	GTGACGAGATGCTTGCTGAG	[15]
21	Xwmc824	7D	CCGATGAACTTAAAAGTACC	CATGGATTGACACGATTGGC	[4]

1.2.3 籽粒和面粉品质性状调查与检测

在 2022 年和 2023 年 6 月中旬,待材料完全成熟后收获,脱粒干燥。随机选取小麦籽粒 48 粒,用 SC-G 考种仪(万深,中国)对粒长、粒宽、周长、面积、长宽比进行测量;使用 DA7250 近红外谷物分析仪(Perten,瑞典)测量小麦的粗蛋白含量、湿面筋含量、淀粉、沉降值、水分含量等品质性状;使用 4 g Micro-dough LAB 全自动粉质仪(Perten,瑞典)测量小麦面粉面团的吸水率、形成时间、稳定时间、弱化度、粉质质量指数等。每个样品测量 3 次,取平均值。

1.3 数据统计与分析

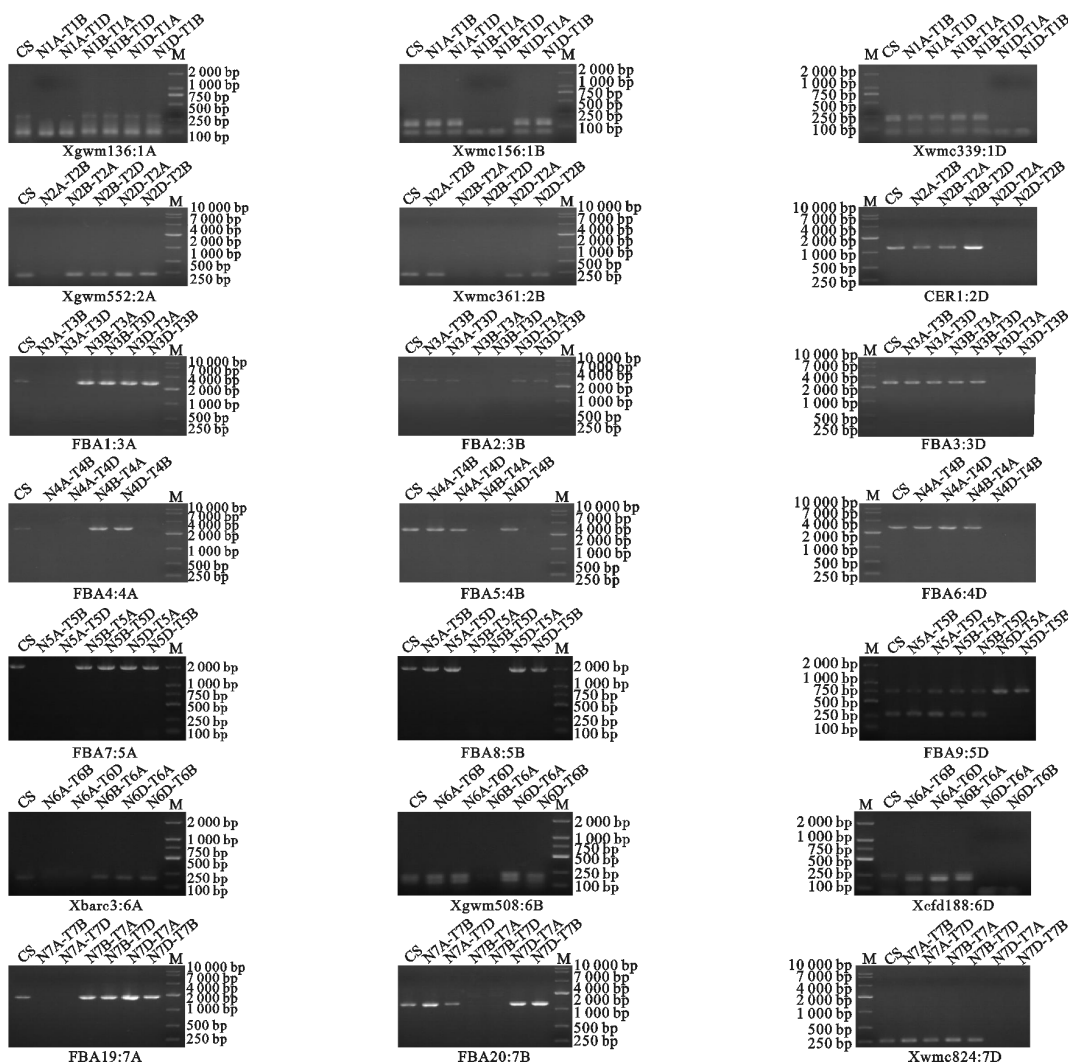
采用 Excel 2019 软件对数据进行初步统计

分析,利用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 缺四体材料的分子鉴定

利用已报道的染色体特异标记(表 1)对 38 份中国春缺四体材料及对照进行分子鉴定,当缺四体材料与对照有相同的扩增条带时则推断该材料为非真实的缺四体材料,只有未扩增出相同条带时即可推断其为真实的缺四体材料。由图 1 可知,38 个中国春缺四体材料在对应的缺失染色体上都未能扩增出相应的带型,表明所用试验材料真实可靠。



CS: 中国春; N1A-T1B, N1A-T1D, N1B-T1A, N1B-T1D, N1D-T1A, N1D-T1B, N2A-T2B, N2B-T2A, N2D-T2B, N3A-T3B, N3A-T3D, N3B-T3A, N3B-T3D, N3D-T3A, N3D-T3B, N4A-T4B, N4A-T4D, N4B-T4A, N4B-T4D, N5A-T5B, N5A-T5D, N5D-T5A, N5D-T5B, N6A-T6B, N6A-T6D, N6B-T6A, N6B-T6A, N6D-T6A, N6D-T6B, N7A-T7B, N7A-T7D, N7B-T7A, N7B-T7D, N7D-T7A, N7D-T7B 为中国春缺四体; M: 分子标记。

CS: Chinese Spring; N1A-T1B, N1A-T1D, N1B-T1A, N1B-T1D, N1D-T1A, N1D-T1B, N2A-T2B, N2B-T2A, N2D-T2B, N3A-T3B, N3A-T3D, N3B-T3A, N3B-T3D, N3D-T3A, N3D-T3B, N4A-T4B, N4A-T4D, N4B-T4A, N4B-T4D, N5A-T5B, N5A-T5D, N5D-T5A, N5D-T5B, N6A-T6B, N6A-T6D, N6B-T6A, N6B-T6A, N6D-T6A, N6D-T6B, N7A-T7B, N7A-T7D, N7B-T7A, N7B-T7D, N7D-T7A, and N7D-T7B were nulli-tetrasomic materials of Chinese Spring; M: Marker.

图 1 中国春缺四体材料的分子鉴定

Fig. 1 Identification of Chinese Spring nulli-tetrasomic materials using molecular markers

2.2 缺四体小麦农艺性状分析

2.2.1 主要农艺性状的表型分析

调查结果(表 2)显示,除分蘖数外,部分缺四体材料的小穗数、穗粒数、株高和穗长与对照均存在显著差异($P < 0.05$)。N7D-T7A 的小穗数显著高于对照,其余无明显差异。在穗粒数上,N2A-T2B、N6B-T6A 极显著均低于对照($P < 0.01$),

N3B-T3D、N3D-T3A、N4A-T4B 均显著低于对照,其中 N2A-T2B 的穗粒数最低,平均仅有 8 粒。N4B-T4A 和 N7D-T7A 的株高均显著高于对照,而 N6D-T6B 的株高显著低于对照。N4A-T4B、N7A-T7B 的穗长极显著低于对照,N1D-T1A、N2B-T2A、N4D-T4B、N6B-T6A、N6D-T6A 和 N7D-T7B 的穗长均显著低于对照。

表 2 缺四体材料和中国春的农艺性状表现

Table 2 Performance of agronomic traits of nulli-tetrasomic materials and Chinese Spring

材料 Material	小穗数 Spikelet number	穗粒数 Grain number per spike	分蘖数 Tiller number	株高 Plant height/cm	穗长 Spike length/cm
中国春 Chinese Spring	18.50±0.24	41.50±6.84	9.00±0.00	125.75±1.77	7.95±1.02
N1A-T1B	18.20±1.70	37.13±7.80	8.67±1.89	116.77±0.62	7.65±0.92
N1A-T1D	17.80±0.28	44.23±9.29	7.34±0.94	119.42±10.49	8.02±1.39
N1B-T1A	18.83±0.24	29.33±8.96	8.34±0.47	128.67±5.66	8.37±0.52
N1B-T1D	19.33±1.41	38.33±2.83	6.67±2.35	122.34±6.13	7.80±1.46
N1D-T1A	14.83±3.54	29.50±3.06	6.34±3.30	121.34±9.43	6.15±1.67*
N1D-T1B	16.83±0.24	28.57±8.49	6.67±1.89	121.67±3.30	7.47±0.75
N2A-T2B	16.93±0.38	8.77±3.12**	6.67±1.89	113.45±8.80	7.11±0.16
N2B-T2A	17.00±2.83	27.17±7.98	7.66±1.89	128.00±2.83	5.95±0.64*
N2B-T2D	16.50±2.12	28.33±4.24	10.17±2.60	135.25±6.72	6.92±0.12
N2D-T2A	20.17±1.18	28.17±0.71	7.67±1.41	134.17±4.48	6.92±1.06
N2D-T2B	16.50±0.71	34.83±6.85	7.83±0.23	110.75±5.77	6.94±0.37
N3A-T3B	18.50±1.65	36.67±7.54	6.34±0.94	130.42±7.66	6.72±0.64
N3A-T3D	22.33±2.36	26.33±3.77	6.00±1.89	115.92±8.13	7.44±0.33
N3B-T3A	15.67±3.30	29.17±4.85	7.00±2.36	119.67±2.35	7.10±0.14
N3B-T3D	16.57±0.80	22.37±5.37*	9.00±0.47	112.82±2.10	7.42±0.36
N3D-T3A	17.13±2.07	20.03±3.35*	7.17±1.18	118.97±9.00	7.45±0.16
N3D-T3B	19.23±0.80	44.50±10.61	9.00±1.41	116.24±0.62	7.55±0.07
N4A-T4B	16.33±1.41	18.50±4.48*	9.00±1.41	115.50±12.49	5.42±0.35**
N4A-T4D	18.83±1.65	37.83±4.01	8.50±0.24	130.00±0.95	8.14±0.65
N4B-T4A	20.17±4.95	35.50±7.31	7.17±1.65	145.00±8.02*	7.65±0.03
N4D-T4B	18.85±3.04	27.98±9.40	7.84±1.65	132.70±3.82	6.12±1.01*
N5A-T5B	15.00±0.047	24.83±2.12	8.00±1.41	132.25±7.18	7.53±0.19
N5A-T5D	15.33±0.94	26.83±3.06	8.17±3.06	123.50±8.24	8.08±0.12
N5B-T5A	18.33±1.41	30.50±4.48	7.67±1.89	123.50±16.73	7.02±0.92
N5B-T5D	16.83±1.65	37.17±3.06	6.50±2.12	132.50±0.24	6.73±0.09
N5D-T5A	19.33±0.00	41.33±6.50	7.84±1.65	128.67±5.18	7.08±0.35
N5D-T5B	18.83±0.24	28.17±3.54	10.00±1.41	131.25±8.13	7.00±1.41
N6A-T6B	18.17±1.18	41.83±4.01	8.17±3.53	121.67±6.60	7.08±1.53
N6A-T6D	18.33±1.41	40.83±0.24	9.34±0.47	130.00±4.24	9.42±1.29
N6B-T6A	19.13±4.07	16.25±5.67**	9.00±1.41	116.17±18.62	6.15±1.20*
N6D-T6A	18.33±1.41	43.83±1.18	10.50±4.83	117.83±6.36	5.72±0.07*
N6D-T6B	18.25±3.89	31.21±6.31	6.00±1.41	105.42±11.19*	7.21±0.06
N7A-T7B	16.00±0.47	34.00±5.42	10.00±1.88	119.50±8.24	5.70±0.67**
N7A-T7D	18.33±3.30	37.33±4.84	7.83±2.12	126.00±8.49	9.30±0.99
N7B-T7A	20.17±2.59	34.00±0.47	9.00±0.00	122.67±0.00	8.08±0.35
N7B-T7D	21.33±4.24	41.83±4.48	8.67±4.24	116.92±10.93	8.42±0.83
N7D-T7A	24.17±1.18*	42.67±4.24	8.67±1.14	142.58±1.77*	8.75±1.53
N7D-T7B	17.17±1.65	34.17±9.66	8.17±2.12	127.75±5.06	5.83±0.47*

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$ 。下同。

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$ 。The same in tables 4 and 8.

2.2.2 主要农艺性状的表型变异

通过对小穗数、穗粒数、分蘖数、株高和穗长农艺性状表型变异进行分析,结果(表3)发现,5个农艺性状的变异系数范围为6.86%~25.81%,变异较大。变异系数从大到小依次为穗粒数、分蘖数、穗长、小穗数、株高。其中穗粒数变异系数最大(25.81%),变化范围为8.77~44.50个;株高变异系数最小(6.86%),变化范围为105.42~145.00 cm。这表明染色体的缺失和增加对小麦的农艺性状影响较大。

2.3 缺四体小麦籽粒表型分析

2.3.1 籽粒主要表型分析

所有的缺四体材料与中国春在籽粒周长与粒长上没有显著差异(表4)。与对照中国春相比,N3B-T3D、N3D-T3A、N3D-T3B、N6A-T6B和N6B-T6A的籽粒面积均显著增加;N1B-T1A、N1B-T1D、N3B-T3A、N3B-T3D、N3D-T3A、N3D-T3B、N4A-T4D、N4B-T4A、N6A-T6B、N6A-T6D、N6B-T6A、N6D-T6A和N7A-T7D的籽粒宽度均显著增加,其中N3B-T3A、N3B-T3D、N3D-T3B、N6A-T6B和N6B-T6A达到极显著水平;N1B-T1A、N1B-T1D、N3A-T3D、N4A-T4B、N4A-T4D、N5B-T5A、N5B-T5D、N6A-T6D、N7A-T7B和N7A-T7D的籽粒长宽比均极显著降低,N1D-T1A、N3A-T3B、N3B-T3A、N3B-T3D、N3D-T3B、N4B-T4A、N4D-T4B、N5D-T5A、N5D-T5B、N6A-T6D、N6B-T6A、N6D-T6A、N7B-T7D和N7D-T7B均显著降低;N2A-T2B的千粒重显著低于对照,只有29.18 g,其他缺四体材料的千粒重均未表现出显著变化。

2.3.2 籽粒主要表型变异

主要籽粒性状的表型分析发现,籽粒性状的变异系数范围为3.33%~6.41%,变异系数从大到小依次为籽粒面积、籽粒长宽比、粒宽、粒长和

籽粒周长(表5)。其中,千粒重的变异系数最大(9.13%),变化范围为29.14~41.39 g。周长的变异系数最小(3.33%),变化范围为15.32~17.46 cm。总体而言,染色体的缺失和增加对小麦籽粒性状的影响也较大。

2.4 缺四体小麦籽粒面粉品质性状的分析

2.4.1 面粉品质分析

由表6可以看出,中国春的粗蛋白含量(干基)为16.37%,有22个缺四体的粗蛋白含量高于对照,其中N2A-T2B的粗蛋白含量最高(19.19%),N3B-T3A粗蛋白含量最低(13.80%)。中国春的湿面筋含量为34.02%,有22个缺四体的面筋高于对照,其中N2A-T2B的湿面筋含量最高(40.56%),N3B-T3A的湿面筋含量最低(27.96%)。中国春的淀粉含量为65%,有16个缺四体的淀粉含量高于对照,其中N3B-T3A的淀粉含量最高(66.69%),N2A-T2B的淀粉含量最低(62.34%)。中国春的沉降值为81.09 mL,与粗蛋白和湿面筋含量一样,有22个缺四体的沉降值高于对照,其中N2A-T2B的沉降值最高(105.26 mL),N3B-T3A的沉降值最低(57.74 mL)。对照的水分含量在所有材料中最大(11.59%),N2A-T2B的水分含量最低(10.40%)。但是所有的缺四体材料与对照的粗蛋白、湿面筋和淀粉含量、沉降值、水分含量都没有表现出显著差异。

2.4.2 面粉品质性状的表型变异

面粉性状的表型变异分析发现(表7),变异系数范围为1.45%~13.32%,从大到小依次为沉降值、湿面筋、粗蛋白含量、水分含量、淀粉含量。沉降值的变异系数最大(13.32%),其变化范围为57.74~105.26 mL;淀粉含量的变异系数最小(1.45%),其变化范围为62.34%~66.69%。这说明不同染色体缺失和重复背景下沉降值受影响最大,淀粉含量受影响最小,较稳定。

表3 缺四体材料农艺性状的变异

Table 3 Variation of agronomic traits of nulli-tetrasomic materials

性状 Trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%
小穗数 Spikelet number per spike	24.17	14.83	18.16	1.91	10.67
穗粒数 Grain number per spike	44.50	8.77	32.34	8.35	25.81
分蘖数 Tiller number	10.50	6.00	8.04	1.18	14.67
株高 Plant height/cm	145.00	105.42	123.92	8.50	6.86
穗长 Spike length/cm	9.42	5.42	7.26	0.95	13.12

表 4 缺四体和中国春的籽粒性状表现

Table 4 Performance in grain traits of nulli-tetrasomic materials and Chinese Spring

材料 Material	面积 Grain area/mm ²	周长 Perimeter/mm	粒长 Grain length/mm	粒宽 Grain width/mm	长宽比 Length-width ratio	千粒重 1 000-grain weight/g
中国春 Chinese Spring	13.88±1.56	17.46±1.78	6.04±0.04	2.99±0.22	2.03±0.14	37.45±1.80
N1A-T1B	15.74±1.21	16.80±0.85	6.33±0.49	3.20±0.02	1.98±0.17	33.11±3.30
N1A-T1D	12.82±0.70	16.13±1.43	5.73±0.16	2.93±0.22	1.97±0.21	32.08±4.89
N1B-T1A	15.04±1.00	16.53±1.22	5.93±0.29	3.27±0.04*	1.82±0.07**	39.60±1.90
N1B-T1D	15.14±1.71	16.50±1.64	5.89±0.33	3.32±0.14*	1.78±0.02**	37.45±4.07
N1D-T1A	14.17±1.09	15.76±0.95	5.84±0.19	3.17±0.14	1.85±0.02*	31.58±4.19
N1D-T1B	13.38±0.95	15.81±1.23	5.82±0.28	2.96±0.08	1.97±0.03	30.06±2.28
N2A-T2B	13.35±0.75	15.75±0.26	5.79±0.11	2.97±0.11	1.96±0.04	29.18±3.01*
N2B-T2A	14.49±1.99	16.60±1.90	6.18±0.44	3.05±0.25	2.03±0.02	35.36±6.79
N2B-T2D	14.78±2.01	16.76±1.73	6.27±0.47	3.06±0.25	2.06±0.02	34.78±6.96
N2D-T2A	14.17±1.14	16.48±1.12	6.17±0.23	2.97±0.17	2.08±0.05	33.87±5.28
N2D-T2B	15.66±1.61	17.23±1.61	6.20±0.43	3.24±0.12	1.92±0.06	37.03±5.90
N3A-T3B	13.98±1.20	15.94±1.40	5.78±0.31	3.13±0.13	1.85±0.02*	33.49±3.94
N3A-T3D	13.58±0.18	15.32±0.13	5.61±0.06	3.14±0.01	1.79±0.02**	30.01±0.95
N3B-T3A	15.95±1.59	16.87±1.42	6.20±0.46	3.33±0.11**	1.86±0.08*	39.66±3.20
N3B-T3D	16.31±1.02*	17.31±0.58	6.24±0.07	3.33±0.30**	1.88±0.00*	40.97±0.83
N3D-T3A	16.18±1.55*	17.27±0.92	6.30±0.20	3.29±0.21*	1.93±0.06	39.46±5.57
N3D-T3B	16.31±1.02*	17.26±0.73	6.21±0.23	3.35±0.04**	1.86±0.04*	39.60±3.05
N4A-T4B	14.62±0.93	16.07±0.21	5.82±0.75	3.24±0.18	1.81±0.07**	34.89±3.09
N4A-T4D	15.48±1.88	16.48±1.37	5.93±0.48	3.32±0.14*	1.79±0.06**	38.33±6.52
N4B-T4A	15.84±1.09	16.86±0.80	6.15±0.27	3.32±0.10*	1.86±0.03*	39.85±1.46
N4D-T4B	14.00±0.59	15.95±0.59	5.79±0.13	3.14±0.07	1.85±0.00*	33.23±0.21
N5A-T5B	14.59±1.31	16.47±0.25	6.08±0.13	3.11±0.18	1.96±0.07	33.21±6.26
N5A-T5D	14.09±0.80	16.04±0.06	5.85±0.16	3.11±0.22	1.90±0.18	32.41±6.07
N5B-T5A	14.59±0.57	16.09±0.58	5.80±0.09	3.23±0.40	1.80±0.01**	33.30±1.20
N5B-T5D	14.26±0.17	15.98±0.36	5.70±0.07	3.19±0.10	1.79±0.08**	33.00±1.70
N5D-T5A	14.99±0.10	16.93±0.83	6.05±0.10	3.24±0.03	1.87±0.02*	38.74±2.66
N5D-T5B	14.44±0.68	17.42±0.76	5.95±0.19	3.20±0.09	1.87±0.00*	38.66±0.28
N6A-T6B	16.61±0.86*	17.35±1.21	6.39±0.25	3.38±0.05**	1.89±0.05	41.39±2.59
N6A-T6D	14.48±0.36	16.23±0.59	5.79±0.20	3.24±0.06*	1.79±0.09**	35.25±1.69
N6B-T6A	16.58±0.07*	16.79±0.08	6.17±0.06	3.41±0.04**	1.82±0.04*	36.94±7.38
N6D-T6A	15.81±1.01	16.91±1.05	6.14±0.25	3.31±0.08*	1.86±0.03*	39.08±3.13
N6D-T6B	14.11±1.18	16.02±0.75	5.95±0.22	3.07±0.15	1.94±0.03	33.00±3.85
N7A-T7B	14.22±0.58	16.29±1.14	5.75±0.25	3.19±0.15	1.81±0.07**	33.98±1.96
N7A-T7D	14.76±0.16	16.30±0.56	5.83±0.14	3.27±0.12*	1.79±0.11**	36.66±0.40
N7B-T7A	13.95±0.13	16.24±0.72	5.99±0.13	3.04±0.02	1.98±0.06	32.33±0.04
N7B-T7D	13.95±1.11	15.84±0.87	5.77±0.31	3.15±0.05	1.84±0.07*	33.40±3.48
N7D-T7A	15.42±1.12	17.21±1.51	6.33±0.33	3.15±0.10	2.01±0.04	35.65±2.67
N7D-T7B	14.92±0.98	16.70±1.41	5.94±0.38	3.23±0.00	1.84±0.12*	35.38±3.66

表 5 缺四体和中国春籽粒性状的变异

Table 5 Variations in grain traits of the nulli-tetrasomic materials

性状 Trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%
面积 Grain area/mm ²	16.61	12.82	14.79	0.95	6.41
周长 Perimeter/mm	17.46	15.32	16.51	0.55	3.33
粒长 Grain length/mm	6.39	5.61	5.99	0.21	3.46
粒宽 Grain width/mm	3.41	2.93	3.19	0.13	3.92
长宽比 Length-width ratio	2.08	1.78	1.89	0.08	4.43
千粒重 1 000-grain weight/g	41.39	29.14	35.47	3.20	9.13

表 6 缺四体材料和中国春的面粉品质性状表现

Table 6 Performance of flour quality traits of the nulli-tetrasomic materials and Chinese Spring

材料 Material	粗蛋白含量 Protein content/%	湿面筋含量 Wet gluten content/%	淀粉含量 Starch content/%	沉降值 Zeleny/mL	水分 Moisture content/%
中国春 Chinese Spring	16.37±3.80	34.02±8.92	65.00±2.93	81.09±15.22	11.59±0.64
N1A-T1B	16.61±0.08	34.50±0.25	65.28±0.61	82.49±0.01	10.93±0.34
N1A-T1D	17.06±0.45	35.55±1.01	64.41±0.94	87.72±4.60	10.88±0.01
N1B-T1A	16.63±0.96	34.57±2.23	64.39±0.27	83.07±7.58	10.41±0.25
N1B-T1D	15.77±0.66	32.56±1.57	65.12±0.24	76.58±5.42	10.91±0.04
N1D-T1A	16.45±1.77	34.13±4.11	64.94±1.69	82.76±14.69	10.89±0.43
N1D-T1B	17.60±1.46	36.80±3.39	64.26±1.41	90.65±10.91	10.83±0.21
N2A-T2B	19.19±1.60	40.56±3.84	62.34±1.30	105.26±15.16	10.40±1.13
N2B-T2A	17.04±0.39	35.57±0.83	64.34±0.96	88.01±4.09	10.56±0.18
N2B-T2D	16.65±1.01	34.61±2.34	64.73±1.34	83.25±8.24	10.67±0.19
N2D-T2A	17.53±1.66	36.70±3.84	63.88±1.92	91.47±14.50	10.50±0.22
N2D-T2B	16.10±0.95	33.38±2.23	64.97±1.44	79.21±8.20	10.64±0.06
N3A-T3B	16.54±0.19	34.38±0.42	64.64±0.70	82.60±1.26	10.88±0.01
N3A-T3D	18.05±1.18	37.85±2.72	64.86±1.41	93.47±9.73	10.92±0.22
N3B-T3A	13.80±1.29	27.96±2.89	66.69±1.51	57.74±8.29	10.96±0.06
N3B-T3D	17.14±0.25	35.72±0.63	64.27±0.24	87.95±2.78	10.57±0.21
N3D-T3A	18.96±0.23	40.01±0.46	62.86±0.83	104.08±1.13	10.47±0.20
N3D-T3B	15.89±0.26	32.90±0.56	65.42±0.54	77.25±2.34	11.21±0.06
N4A-T4B	18.68±0.85	39.38±1.58	63.88±0.56	100.22±7.50	10.71±0.02
N4A-T4D	18.40±1.88	38.70±1.92	63.82±0.78	97.50±4.91	10.51±0.13
N4B-T4A	14.81±2.63	30.36±4.35	66.27±1.73	68.93±8.01	10.88±0.12
N4D-T4B	15.15±2.63	31.12±6.06	66.20±2.12	69.44±10.01	10.95±0.40
N5A-T5B	16.63±3.66	34.63±8.51	64.99±2.98	83.87±14.31	10.73±0.27
N5A-T5D	15.22±3.32	31.28±7.69	65.95±2.70	72.80±13.17	10.85±0.32
N5B-T5A	15.34±3.25	31.62±7.50	65.43±2.31	74.86±12.48	10.78±0.08
N5B-T5D	15.05±4.62	30.92±10.67	66.11±2.88	71.41±17.27	11.11±0.16
N5D-T5A	16.56±1.90	34.42±4.43	64.73±1.85	82.09±8.53	10.89±0.24
N5D-T5B	16.48±4.36	34.25±10.10	64.65±2.96	81.32±16.69	10.81±0.01
N6A-T6B	14.16±0.59	28.84±1.36	66.22±0.85	62.43±2.92	10.75±0.34
N6A-T6D	16.98±0.76	35.39±1.73	64.54±1.12	85.13±5.83	10.57±0.07
N6B-T6A	18.98±1.01	40.03±2.34	62.77±1.12	102.49±7.88	10.91±0.39
N6D-T6A	15.25±0.66	31.34±1.52	65.13±1.45	72.71±6.69	11.25±0.09
N6D-T6B	15.47±1.51	31.90±3.51	65.09±2.11	75.57±12.99	10.88±0.14
N7A-T7B	18.38±0.23	38.64±0.055	63.91±0.16	96.10±2.41	10.74±0.01
N7A-T7D	17.35±0.05	36.27±0.09	64.62±0.39	87.55±0.01	10.78±0.31
N7B-T7A	15.75±0.36	32.42±1.03	65.11±0.21	74.59±6.42	10.79±0.30
N7B-T7D	15.12±0.06	31.04±0.08	65.64±0.48	70.92±1.70	10.73±0.30
N7D-T7A	15.55±0.88	32.04±2.02	65.42±0.75	75.55±6.58	11.22±0.07
N7D-T7B	15.20±0.58	31.23±1.38	65.61±0.16	73.16±4.01	10.94±0.64

表 7 缺四体面粉品质性状的变异表现

Table 7 Variations of flour quality traits of the nulli-tetrasomic materials

性状 Trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%
粗蛋白含量 Protein content/%	19.19	13.80	16.51	1.33	8.08
湿面筋含量 Wet gluten content/%	40.56	27.96	34.30	3.11	9.06
淀粉含量 Starch content/%	66.69	62.34	64.85	0.94	1.45
沉降值 Zeleny/mL	105.26	57.74	82.39	10.97	13.32
水分含量 Moisture content/%	11.59	10.40	10.82	0.24	2.22

由图 2 可以看出,第一同源群的缺四体材料在粗蛋白含量、湿面筋含量、淀粉、沉降值上较其他同源群相对稳定,变异程度较小。第一同源群的粗蛋白含量变化范围为 15.77%~17.60%,其他 6 个同源群的变化范围为 13.80%~19.19%。第一同源群的湿面筋含量变化范围为 32.56%~36.80%,其他 6 个同源群的变化范围为 27.96%~40.56%。第一同源群的淀粉含量变化范围为 64.26%~65.28%,其他 6 个同源群的变化范围为

62.34%~66.69%。第一同源群的沉降值范围为 76.58~90.65 mL,其他 6 个同源群的变化范围为 57.74~105.26 mL。但第一同源群的水分含量变化范围比其他 6 个同源群,为 10.41%~11.59%,其他 6 个同源群的变化范围为 10.40%~11.25%。由此说明籽粒品质性状的粗蛋白含量、湿面筋含量、淀粉含量、沉降值等指标主要与第一同源群染色体密切相关。

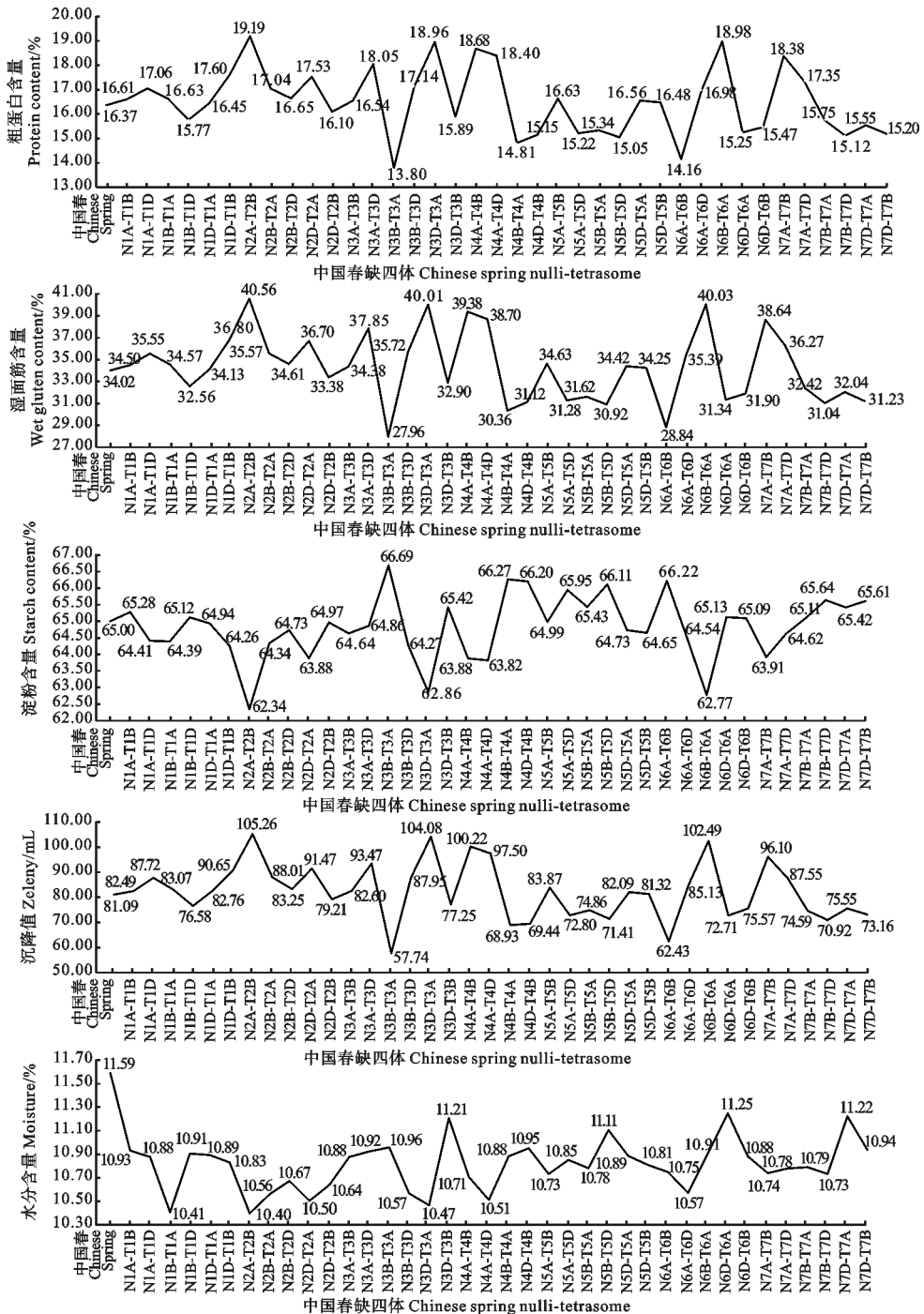


图 2 缺体-四体材料和中国春的籽粒品质性状表现

Fig. 2 Performance of grain quality traits of the nulli-tetrasomic materials and Chinese Spring

2.5 缺四体小麦面团品质性状的分析

2.5.1 面团品质性状的分析

由表8可以看出,所有缺四体材料与对照在吸水率、弱化度和粉质质量指数上没有表现出显著差异,而第一同源群缺四体材料在面团形成时间和稳定时间上表现出了显著差异。N1A-T1B

的面团稳定时间显著长于对照;N1A-T1D的面团形成时间和稳定时间长于对照,并达到极显著水平;N1D-T1A的面团形成时间显著长于对照,而稳定时间极显著长于对照。其他材料没有显著性差异。由此表明,面团品质性状受第一同源群的染色体缺失和重复影响较大。

表8 缺四体材料和中国春面团品质性状的表现

Table 8 Performance of dough quality traits of the nulli-tetrasomic materials and Chinese Spring

材料 Material	吸水率 Absorption/%	形成时间 Development time/min	稳定时间 Stability time/min	弱化度 Weakening slope/FU	粉质质量指数 Farinograph quality index/mm
中国春 Chinese Spring	63.88±8.63	1.77±0.16	1.80±0.57	134.95±28.28	38.85±7.00
N1A-T1B	65.12±1.04	2.62±0.81	4.90±1.41*	122.45±59.56	49.25±15.05
N1A-T1D	64.57±2.59	5.89±1.52**	7.40±1.29**	92.46±54.22	58.60±7.70
N1B-T1A	63.99±1.27	0.85±0.17	0.50±0.14	262.40±17.67	5.15±2.57
N1B-T1D	64.60±1.00	1.89±0.05	2.75±0.63	179.93±45.89	35.95±11.84
N1D-T1A	64.69±3.57	3.51±1.53*	6.10±1.40**	89.97±21.21	56.85±0.92
N1D-T1B	66.07±3.61	1.13±0.04	0.90±0.28	187.43±47.42	25.65±11.69
N2A-T2B	67.82±3.20	1.44±0.44	1.30±0.71	219.92±42.82	21.45±9.59
N2B-T2A	63.88±5.55	1.50±0.04	1.55±0.64	152.44±30.08	33.90±7.71
N2B-T2D	64.74±4.46	1.40±1.41	1.45±0.78	187.43±44.35	26.15±10.43
N2D-T2A	65.46±4.19	1.58±0.06	1.75±0.78	144.95±42.82	37.05±10.72
N2D-T2B	64.37±0.93	1.33±0.49	1.35±0.78	187.43±65.77	29.35±15.63
N3A-T3B	61.92±2.33	1.28±0.28	1.15±0.49	192.43±44.35	23.95±10.00
N3A-T3D	66.58±0.76	1.27±0.19	1.15±0.64	209.92±45.88	23.25±12.24
N3B-T3A	62.83±3.59	1.14±0.05	1.05±0.21	167.44±48.42	29.35±9.02
N3B-T3D	66.15±2.32	1.56±0.04	1.75±0.78	174.93±42.82	32.45±10.44
N3D-T3A	68.67±2.67	1.31±0.20	1.15±0.64	199.92±49.95	22.65±12.53
N3D-T3B	62.11±2.36	1.17±0.26	1.90±0.41	187.43±62.69	31.75±15.91
N4A-T4B	69.48±0.68	1.26±0.18	1.35±0.78	179.93±48.95	28.40±12.31
N4A-T4D	69.08±3.81	1.35±0.14	1.30±0.85	177.43±40.29	26.10±10.78
N4B-T4A	62.78±3.89	1.28±0.21	1.20±0.57	172.43±40.29	30.25±9.46
N4D-T4B	61.83±3.85	1.19±0.12	1.45±0.78	204.92±60.16	25.30±13.73
N5A-T5B	63.18±7.02	1.17±0.02	0.95±0.35	224.91±49.95	17.65±11.98
N5A-T5D	62.18±5.04	1.26±0.30	1.05±0.49	229.91±49.95	16.60±11.49
N5B-T5A	68.98±0.93	1.53±0.28	1.50±0.99	182.43±47.42	30.05±12.81
N5B-T5D	64.06±6.63	1.37±0.14	1.35±0.21	167.44±24.74	32.65±7.00
N5D-T5A	66.84±2.33	1.57±0.23	1.35±0.78	172.44±61.69	31.55±15.91
N5D-T5B	67.98±7.00	1.50±0.11	1.10±0.42	189.93±42.81	26.45±9.60
N6A-T6B	63.08±2.26	1.34±0.23	1.15±0.35	172.43±38.21	30.10±9.39
N6A-T6D	65.27±1.34	1.13±0.11	0.85±0.21	217.42±40.28	18.30±10.21
N6B-T6A	66.57±1.51	1.20±0.14	1.10±0.57	224.91±49.95	19.85±12.10
N6D-T6A	61.98±1.53	1.03±0.03	0.85±0.07	222.41±54.56	18.15±11.42
N6D-T6B	61.63±3.78	1.46±0.08	1.60±0.57	182.43±51.49	29.70±10.65
N7A-T7B	68.92±2.38	1.28±0.11	1.10±0.37	189.93±45.89	25.50±11.76
N7A-T7D	66.41±0.61	1.15±0.24	0.80±0.28	197.43±44.35	22.45±10.84
N7B-T7A	63.86±2.16	1.50±0.59	2.30±0.27	144.94±48.95	39.95±9.14
N7B-T7D	59.65±0.78	1.17±0.16	1.25±0.49	197.42±58.63	26.70±12.60
N7D-T7A	62.86±3.01	1.39±0.06	1.45±0.21	182.43±26.01	30.40±8.34
N7D-T7B	63.39±0.65	1.28±0.35	1.40±0.71	184.93±42.82	29.15±9.61

2.5.2 面团品质性状表型变异

面团品质性状的表型变异分析发现(表9), 面团品质性状的变异系数为3.71%~80.56%, 变异范围较大。变异系数从大到小依次为面团稳定时间、面团形成时间、粉质质量指数、弱化值、吸

水。面团稳定时间的变异系数为80.56%, 时间为0.50~7.40 min。吸水率的变异系数最小(3.71%), 变化范围为59.65%~69.48%。表明染色体缺失和重复对吸水率影响较小, 对面团稳定时间影响较大。

表9 缺四体材料面粉加工品质性状的变异表现

Table 9 Variation of flour milling quality traits of the nulli-tetrasomic materials

性状 Trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%
吸水率 Absorption/%	69.48	59.65	64.80	2.40	3.71
形成时间 Development time/min	5.89	0.85	1.54	0.83	54.08
稳定时间 Stability time/min	7.40	0.5	1.70	1.37	80.56
弱化度 Weakening slope	262.40	89.97	182.36	34.30	18.81
粉质质量指数 Farinograph quality number	58.60	5.15	29.15	9.99	34.27

3 讨论

中国春缺四体是一种独特的种质资源, 是用于遗传分析的重要材料。前人对其研究主要集中在新基因的染色体定位、种属间染色体代换、目标基因转移、SSR分子标记等方面, 对其遗传效应的研究相对较少。染色体的缺失和重复会对小麦主要农艺性状、籽粒性状、和面粉加工品质性状产生影响, 主要表现在小穗数、穗粒数、株高、穗长、籽粒面积、粒宽、籽粒长宽比、面团形成时间和面团稳定时间上, 而对籽粒品质性状的影响并不显著。

在农艺性状上, 与对照相比, 仅有N7D-T7A的小穗数显著增加, 表明7A染色体上可能存在与小穗数显著相关的位点, 这与李娜等^[17]的研究结果一致。李龙秀等^[2]认为, N2A-T2B、N2A-T2D、N4B-T4A、N4B-T4D和N4D-T4A的育性很低或完全不育, 在本研究中N2A-T2B的穗粒数显著降低, 甚至达到了极显著水平, 这与其结论一致; 但N4B-T4A的穗粒数与中国春未表现出显著差异, 育性正常, 这又与其结论存在偏差, 原因可能是因为穗粒数是由多基因控制的数量性状, 由基因型、环境以及两者共同影响来调控, 从而导致结论有所不同。N4A-T4B、N7A-T7B与对照相比穗长减少达到极显著水平, 表明4A和7A染色体上存在控制穗长的基因, 这与前人的研究结果一致^[18-19]。

在籽粒性状上, N3B-T3D、N3D-T3A、N3D-T3B、N6A-T6B、N6B-T6A的籽粒面积较对照显著增加, 籽粒长度与对照无显著差异, 籽粒宽度与

对照显著增加, 而籽粒面积又受籽粒长度和籽粒宽度的共同调控, 由此表明N3B-T3D、N3D-T3A、N3D-T3B、N6A-T6B、N6B-T6A籽粒面积增加的原因是籽粒宽度增加导致的, 表明在3A、3B、3D、6A、6B存在控制籽粒宽度的基因^[20-23]。与对照相比, N2A-T2B不仅穗粒数低, 而且千粒重也显著下降, 表明2A染色体上必然存在控制千粒重的基因^[24]。

从面团的重要指标形成时间、稳定时间来看, N1A-T1D、N1D-T1A面粉的形成时间显著提高, N1A-T1B、N1A-T1D、N1D-T1A面团的稳定时间显著提高, 其他材料无显著差异。本研究结果, 只有第一同源群染色体在品质指标上变异幅度较大, 而其他同源群染色体变异较小, 由此说明面团品质主要与第一同源群染色体有关, 这与前人认为*Glu-A1*、*Glu-B1*和*Glu-D1*位点对小麦面粉加工品质贡献起重要作用的研究结果一致^[25-26]。

本研究以38个中国春为背景的缺四体为材料, 利用分子标记验证了各株系的遗传组成, 在此基础上对这些株系的各项性状进行调查, 研究结果为进一步分析缺体-四体缺四体材料的遗传效应奠定基础。

参考文献:

[1] SEARS E R, MILLER T E. The history of Chinese Spring wheat [J]. *Cereal Research Communications*, 1985, 13: 261.
 [2] 李龙秀, 张连全, 王纯洁, 等. 三个新型人工合成缺四体小麦材料的细胞学观察[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(4): 888.
 LI L X, ZHANG L Q, WANG C J, et al. Cytological observation on three new synthetic nullisomic-tetrasomic wheat lines [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(4): 888.

- [3]李永强,何蓓如,陈小燕,等. 用微卫星标记辅助鉴定几种小麦缺体—四体[J]. 西北农业学报, 2006, 15(3): 9.
LI Y Q, HE B R, CHEN X Y, *et al.* Simple sequence repeats-assisted identification of several nulli-tetrasomes in wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2006, 15(3): 9.
- [4]卫笑,杨靖,孙海燕,等. 用于鉴定小麦缺四体真实性的 SSR 分子标记的筛选[J]. 中国农学通报, 2018, 34(20): 47.
WEI X, YANG J, SUN H Y, *et al.* Screening of SSR molecular markers for identifying the authenticity of nulli-tetrasomes of wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(20): 47.
- [5]徐勇,沈福成,王三根,等. 小麦缺四体的 SSR 辅助鉴定[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23(3): 202.
XU Y, SHEN F C, WANG S G, *et al.* Ssr-assisted identification of nulli-tetrasomes in wheat [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2001, 23(3): 202.
- [6]张改生,曹海录. 小麦非整倍体的遗传及其在育种中的应用[J]. 陕西农业科学, 1988, 34(2): 45.
ZHANG G S, CAO H L. Inheritance of wheat aneuploidy and its application in breeding [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 1988, 34(2): 45.
- [7]郭慧娟,贾举庆,李欣,等. 小麦种质 CH7015 中抗白粉病基因的 SSR 定位[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 203.
GUO H J, JIA J Q, LI X, *et al.* Mapping of resistance gene to powdery mildew in wheat cultivar CH7015 using SSR markers [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(6): 203.
- [8]清桐,曲继鹏,彭正松,等. 小麦表皮模式建成因子基因(*Ta-EPFL1*)的克隆、定位及表达分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(10): 3106.
SUN Q X, QU J P, PENG Z S, *et al.* Cloning, localization and expression analysis of epidermal patterning factor-like gene (*TaEPFL1*) in wheat [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(10): 3106.
- [9]李娟,阳文龙,刘冬成,等. 小麦 K-型细胞质雄性不育系 *COII* 基因的克隆与表达分析[J]. 分子植物育种, 2015, 13(3): 518.
LI J, YANG W L, LIU D C, *et al.* Cloning and expression analysis of *COII* gene from a wheat K-type cytoplasmic male sterility line [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2015, 13(3): 518.
- [10]李欣,张晓军,詹海仙,等. 小麦生长素结合基因 *TaABPI-D* 的表达与染色体定位[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1): 107.
LI X, ZHANG X J, ZHAN H X, *et al.* Expression and chromosomal localization of wheat *TaABPI-D* gene [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(1): 107.
- [11]张蕾,侯雅静,张晓军,等. 小偃麦渗入系耐盐性鉴定及其在 F₂ 群体中的遗传分析[J]. 山西农业科学, 2016, 44(3): 281.
ZHANG L, HOU Y J, ZHANG X J, *et al.* Identification and genetic analysis for salt-tolerance of wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression line and its F₂ population [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(3): 281.
- [12]胡周波,高翔,陈其皎,等. 普通小麦中国春 Chi 基因的克隆、染色体定位及原核表达[J]. 西北农业学报, 2014, 23(8): 25.
HU Z B, GAO X, CHEN Q J, *et al.* Cloning, chromosomal localization and prokaryotic expression of Chi genes from wheat cultivar Chinese spring (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(8): 25.
- [13]杨培浩,周立人,姚大年. 普通小麦基因组中籽粒戊聚糖含量的染色体控制[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 607.
YANG P H, ZHOU L R, YAO D N. Chromosomal control of the seed pentosan content in genome of Chinese spring (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(4): 607.
- [14]LI T, SUN Y, LIU T, *et al.* TaCER1-1A is involved in cuticular wax alkane biosynthesis in hexaploid wheat and responds to plant abiotic stresses [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42(11): 3077.
- [15]LÜ G Y, GUO X G, XIE L P, *et al.* Molecular characterization, gene evolution, and expression analysis of the fructose-1, 6-bisphosphate aldolase (FBA) gene family in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1030. [PubMed]
- [16]官文萍,楚秀生,韩冉,等. 单芒山羊草染色体组优异基因发掘[J]. 山东农业科学, 2015, 47(7): 11.
GONG W P, CHU X S, HAN R, *et al.* Excellent gene exploration from *Aegilops uniaristata* genome [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2015, 47(7): 11.
- [17]李娜,曹东,陈文杰,等. 柴达木盆地小麦产量相关性状 QTL 定位[J]. 分子植物育种, 2018, 16(4): 1164.
LI N, CAO D, CHEN W J, *et al.* QTL mapping of yield-related traits in wheat in Qaidam Basin [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(4): 1164.
- [18]LIU G, JIA L, LU L, *et al.* Mapping QTLs of yield-related traits using RIL population derived from common wheat and Tibetan semi-wild wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2014, 127(11): 2415.
- [19]LI F, WEN W, HE Z, *et al.* Genome-wide linkage mapping of yield-related traits in three Chinese bread wheat populations using high-density SNP markers [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2018, 131(9): 1903.
- [20]WILLIAMS K, MUNKVOLD J, SORRELLS M. Comparison of digital image analysis using elliptic Fourier descriptors and major dimensions to phenotype seed shape in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Euphytica*, 2013, 190(1): 99.
- [21]WILLIAMS K, SORRELLS M E. Three-dimensional seed size and shape QTL in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) populations [J]. *Crop Science*, 2014, 54(1): 98.
- [22]ZHAI H, FENG Z, DU X, *et al.* A novel allele of TaGW2-A1 is located in a finely mapped QTL that increases grain weight but decreases grain number in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2018, 131(3): 539.
- [23]MOHLER V, ALBRECHT T, CASTELL A, *et al.* Considering causal genes in the genetic dissection of kernel traits in common wheat [J]. *Journal of Applied Genetics*, 2016, 57(4): 467.
- [24]LIU D, ZHAO D H, ZENG J Q, *et al.* Identification of genetic loci for grain yield-related traits in the wheat population Zhongmai 578/Jimai 22 [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(7): 1985.
- [25]POPINEAU Y, DESHAYES G, LEFEBVRE J, *et al.* Prolamin aggregation, gluten viscoelasticity, and mixing properties of transgenic wheat lines expressing 1Ax and 1Dx high molecular weight glutenin subunit transgenes [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(1): 395.
- [26]BARRO F, BARCELÓ P, LAZZERI P A, *et al.* Functional properties of flours from field grown transgenic wheat lines expressing the HMW glutenin subunit *1Ax1* and *1Dx5* genes [J]. *Molecular Breeding*, 2003, 12(3): 223.