

190 份大白菜自交系的遗传多样性分析及育种应用

张文静¹, 冯健起^{2,3}, 苏贺楠¹, 王培云^{2,3}, 马 骥²,
丁 聪^{2,3}, 魏小春¹, 张晓伟¹, 原玉香¹

(1. 河南省农业科学院蔬菜研究所 郑州 450002; 2. 开封市农林科学研究院 河南开封 475004; 3. 开封市种业实验室 河南开封 475004)

摘 要:为分析来源于 26 份亲本的大白菜高代自交系后代的主要表型性状与遗传多样性及其在育种上的应用潜力,对供试大白菜材料的 27 个主要表型性状进行变异分析、相关性分析,基于 27 对 InDel 标记进行遗传背景多样性分析。结果显示,27 份大白菜主要性状的变异系数在 10.10%~90.36%,变异丰富且多个表型性状具有高度相关性;选用的 27 对 InDel 标记的多态性信息含量变幅在 0.01~0.37,经过分析 190 份大白菜高代自交系遗传相似系数在 0.57~1.00,平均值为 0.65,遗传变幅较大,基于 InDel 标记和群体结构均能将供试大白菜材料分为 3 个亚群,其中来源于 16 东郊引 B 和开蔬七号的后代分离较大。综上所述,选用的 190 份大白菜自交系表型性状变异范围大、遗传多样性丰富,可为配置不同性状优异材料提供材料基础,为配置性状优异材料提供研究基础。

关键词:大白菜;表型性状;遗传多样性;InDel 标记

中图分类号:S634.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)08-026-11

Genetic diversity analysis and breeding application of 190 high inbred lines of Chinese cabbage

ZHANG Wenjing¹, FENG Jianqi^{2,3}, SU Henan¹, WANG Peiyun^{2,3}, MA Ji², DING Cong^{2,3}, WEI Xiaochun¹, ZHANG Xiaowei¹, YUAN Yuxiang¹

(1. Vegetable Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. Kaifeng Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Kaifeng 475004, Henan, China; 3. Kaifeng Seed Industry Laboratory, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: In order to analyze the major phenotypic traits and genetic diversity of 190 high-generation inbred lines derived from 26 parental lines, and evaluate their potential for breeding applications, this study conducted variation and correlation analysis on 27 major phenotypic traits of the test materials, along with genetic diversity analysis based on 27 pairs InDel markers. The results showed that the variation coefficient of the 27 phenotypic traits ranged from 10.10% to 90.36%, indicating substantial variability, with significant correlations observed among multiple traits. The InDel marker analysis revealed that the polymorphism information content ranged from 0.01 to 0.37, and the genetic similarity coefficient among the 190 high-generation inbred lines varied between 0.57 and 1.00, with an average of 0.65, suggesting considerable genetic variation within the population. Based on InDel markers and population structure analysis, the test materials could be divided into three subgroups, with the progeny derived from 16-Autumn introduced from eastern suburbs B and Kaishu No. 7 exhibiting greater segregation. In conclusion, the 190 Chinese cabbage inbred lines used in this study exhibit broad phenotypic variation and rich genetic diversity, providing valuable germplasm resources and theoretical support for parental selection and the development of superior trait combinations in Chinese cabbage breeding.

Key words: Chinese cabbage; Phenotypic trait; Genetic diversity; InDel marker

大白菜(*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)为原产于我国的十字花科芸薹属芸薹种的一个亚种,年种植面积约 180 万 hm²,在我国蔬菜产业中占有重要

地位^[1-2]。大白菜种类丰富,根据其结球与否可分为散叶变种、半结球变种、花心变种、结球变种;根据生长习性可分为春型、夏秋型、秋冬型;根据叶球结

收稿日期:2025-01-25;修回日期:2025-05-13

基金项目:中原科技创新领军人才(244200510041);河南省农业良种联合攻关(2022010504);国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23-G15);河南省农业科学院优秀创新团队(2024TD06);中原学者工作站(ZYGZZ2024124);白菜萝卜新品种选育与示范(254400510004)

作者简介:张文静,女,助理研究员,研究方向为大白菜抗病育种。E-mail:zhangwj050@163.com

通信作者:原玉香,女,研究员,主要从事蔬菜遗传育种研究。E-mail:yuxiangyuan126@126.com

构可分为平头直筒型、平头卵圆型、花心直筒型、花心卵圆型,以及根据合抱方式分类可分为合抱型、叠抱型、拧抱型^[1]。因此,具有丰富遗传多样性的大白菜群体在大白菜遗传育种中具有重要作用。钟世超等^[4]应用 STR 荧光标记法分析了 19 份大白菜材料的遗传多样性,根据遗传相似性系数将供试材料分为具有明显地域特征的 3 个类群。范伟强等^[5]分析了 33 份大白菜的 9 个质量性状和 5 个数量性状,结果显示叶球合抱类型和株型、颜色、质量、成熟度以及抗病性等可以反映大白菜种质的主要表型信息,并指出利用具有代表性的表型数据对大白菜的遗传多样性进行评价分析是科学合理的。韩睿等^[6]通过分析 47 份大白菜的农艺性状将受试群体分为 5 大类群,并辅以 SSR 分子标记,结果显示各品种间的遗传相似性系数相对较高。在生产上,通过调查大白菜的田间表型性状并辅以分子标记对大白菜进行遗传多样性分析,对培育优质的大白菜新品种具有重要的指导意义。

随着分子生物学技术的快速发展和植物全基因组测序的完善,基于植物基因组 DNA 序列开发的分子标记已被广泛应用于杂交种纯度鉴定、遗传多样性分析以及农艺性状关联分析等方面,在植物遗传育种中发挥着重要作用^[7]。InDel 标记是依据不同亲本间基因组中核苷酸序列的插入或缺失设计的 PCR 引物^[8],被广泛应用于大白菜的遗传育种中。王祥等^[9]利用 InDel 标记鉴定了大白菜农大 Q210 和农大 Q212 的杂交种纯度分别为 100%和 97.9%;薛银鸽等^[10]通过 InDel 标记对大白菜杂交种豫新四号、其亲本及杂交近缘种间的纯度,认为 InDel 标记在大白菜杂交种纯度室内快速检测中具有广阔的应用前景;冯健起等^[11]利用 InDel 标记鉴定了汴早九号杂交种纯度,与田间形态的鉴定结果吻合度高达 99.29%。高颖等^[12]将抽薹时间、开花时间与 InDel 标记进行关联分析,发现 10 个位点同时与两个性状相关。赵玉靖等^[13]通过 InDel 标记与重要农艺性状进行关联分析,发现 22 个 InDel 标记与受试材料的 12 个农艺性状相关。

通过分析 190 份大白菜高代自交系的 27 个田间表型性状,分析群体性状差异性,并选用 27 对 InDel 标记对其遗传背景多样性进行分析,根据遗传相似性系数进行聚类分析,可为后期遗传育种提供辅助工具。

1 材料与方法

1.1 材料

190 份大白菜高代自交系由开封市农林科学研究院提供,由 26 份大白菜品种自交多代衍生而来(表 1),2024 年 8 月,72 孔穴盘育苗,待幼苗长至 3 叶 1 心时定植于开封市农林科学研究院试验基地。

1.2 田间管理

选用穴盘基质育苗,挑选每份饱满的大白菜材料种子 12 粒,2024 年 8 月 10 日将挑选的种子播种于装有基质的穴盘中,出苗期间,温度维持在 25 °C。2024 年 9 月 2 日田间分畦定植。田间管理期间定期灌溉并观察,若有杂株,及时清理。在大白菜结球初期、末期以及收获期进行性状调查。

1.3 方法

1.3.1 大白菜主要性状调查及其变异分析 参考大白菜 DUS 测试标准,对大白菜成熟期的主要性状进行调查赋值,参照赵玉靖等^[13]将主要性状划分为 13 个数量性状和 14 个质量性状,并将质量性状进行赋值处理,具体评价标准见表 2。利用软件计算统计调查性状的最大值、最小值、均值、方差、变异系数、香农多样性指数和均匀度指数^[14],进而评价某性状的多样性和均一性。

1.3.2 大白菜基因组 DNA 的提取和定量 用 CTAB 法提取大白菜基因组 DNA,参照薛银鸽等^[10]的改良进行,试验在河南省农业科学院蔬菜研究所分子生物学实验室完成。测定提取到基因组 DNA 的质量浓度,并将质量浓度调整到 80 ng·μL⁻¹,备用。

1.3.3 InDel 引物来源 29 对 InDel 引物是河南省农业科学院蔬菜研究所根据大白菜全基因组测序结果(<http://www.brassicadb.cn>)开发的,并由上海生物工程技术有限公司合成,引物名称、所在染色体、正反向引物序列等信息见表 3。

1.3.4 PCR 扩增与检测 按照以下体系配制 10 μL PCR 反应体系:2×Es Taq MasterMix (Dye) (购自康为试剂公司) 5 μL、InDel 标记 F 引物 0.80 μL、InDel 标记 R 引物 0.80 μL、ddH₂O 3.40 μL。并按以下程序进行 PCR 反应:95 °C 预变性 5 min,95 °C 变性 30 s,55 °C 退火 30 s,72 °C 延伸 30 s、循环数 35,72 °C 延伸 10 min。制备 7%的聚丙烯酰胺凝胶,120 V,电泳 2 h 后,采用硝酸银染法对 PCR 扩增产物进行分析,并进行基因分型鉴定。

1.3.5 性状相关性分析 根据调查得到的大白菜主要性状,利用 IBM SPSS Statistics 进行性状相关

表 1 供试大白菜自交系来源
Table 1 Sources of inbred lines of tested Chinese cabbage

编号 Number	自交系来源 Inbred line source	材料编号 Material No.
1	17 早材(早元) 17-Springwood (Early Proterozoic)	KF-1, KF-2, KF-6
2	17 早材(晚长) 17-Springwood (Late growth)	KF-3, KF-4, KF-5
3	19 大青亲本 2 19-Daqing parent 2	KF-9, KF-10
4	16 秋东郊引 A 16-Autumn eastern suburbs A	KF-11, KF-12, KF-13, KF-14, KF-15, KF-17, KF-18, KF-19, KF-21, KF-22, KF-24
5	16 秋东郊引 B 16-Autumn eastern suburbs B	KF-25, KF-26, KF-28, KF-29, KF-30, KF-32, KF-33, KF-34, KF-36, KF-37, KF-38, KF-40, KF-41, KF-43, KF-44, KF-45, KF-47, KF-48
6	17 秋东郊引 A 17-Autumn eastern suburbs A	KF-50, KF-51
7	17 秋东郊引 B 17-Autumn eastern suburbs B	KF-52, KF-53, KF-54
8	绿笋 70 Green shoots 70	KF-55, KF-56, KF-57, KF-58
9	14 秋材 14-Autumnwood	KF-59, KF-60, KF-61, KF-62, KF-63, KF-64, KF-65, KF-66
10	15 秋材 15-Autumnwood	KF-67, KF-68, KF-69, KF-70, KF-71, KF-72, KF-73, KF-74, KF-75, KF-76, KF-77
11	16 秋材 16-Autumnwood	KF-78, KF-79, KF-80, KF-81, KF-82, KF-83, KF-84, KF-85
12	15 秋材#5 15-Autumnwood #5	KF-86, KF-87, KF-88, KF-89, KF-90, KF-91, KF-92, KF-93, KF-94, KF-95
13	天正橘红 62 Tianzheng Orange 62	KF-96, KF-97, KF-98, KF-99, KF-100, KF-101, KF-102, KF-103, KF-104
14	天正橘红 65 Tianzheng Orange 65	KF-105, KF-106, KF-107, KF-108, KF-109, KF-110, KF-111, KF-112, KF-113, KF-115, KF-116, KF-117, KF-118, KF-119, KF-120
15	北京桔红 2 号 Beijing Orange No. 2	KF-121, KF-122, KF-123, KF-124, KF-125, KF-126, KF-127, KF-128, KF-129, KF-130, KF-131, KF-132
16	17Z4 大-1 17-Z4 Large-1	KF-133, KF-134, KF-135, KF-137, KF-138, KF-139, KF-140, KF-141
17	17Z4 小-1 17-Z4 Small-1	KF-142, KF-143, KF-144, KF-160
18	17 省区 17Z4 小 17-Provincial district 17Z4 Small	KF-145, KF-146, KF-147, KF-148, KF-149, KF-150, KF-151, KF-152, KF-153
19	17Z4 大-2 17-Z4 Large-2	KF-154, KF-155, KF-156, KF-157, KF-158, KF-159
20	21 区试 W7 21-Regional test W7	KF-161, KF-162, KF-163, KF-164
21	开蔬七号 Kaishu No. 7	KF-165, KF-166, KF-167, KF-168
22	18 秋 32-2 18-Autumn 32-2	KF-169, KF-170, KF-171, KF-172, KF-173, KF-174, KF-175, KF-176, KF-177, KF-178, KF-179, KF-180, KF-181
23	18 秋 37-1 18-Autumn 37-1	KF-182, KF-183, KF-184, KF-185, KF-186, KF-187
24	18 秋 44 18-Autumn 44	KF-188, KF-189, KF-190, KF-191, KF-192, KF-193
25	18 秋 45 18-Autumn 45	KF-194, KF-195, KF-196, KF-197, KF-198, KF-199
26	早 50 Premature 50	KF-200, KF-201, KF-202, KF-203, KF-204

性分析,将分析得到的相关性系数以及显著性导出,利用 ChiPlot 在线作图(<https://www.chiplot.online/>)。

1.3.6 遗传相似性分析 根据聚丙烯酰胺凝胶电泳结果,对不同材料在每对引物产生的变异处进行标记,整理成一个由 0/1 构成的数据矩阵。根据多态性信息含量公式计算每个 InDel 标记位点的 *PIC*。并根据 *PIC* 值所属范围,将引物分为低度多态性信息引物(0~0.25)、中度多态性信息引物(0.25~0.50)和高度多态性信息引物(0.5~1.0)^[15]。利用 NTsys 软件对得到的 0/1 数据矩阵进行分析,计算遗传相似性系数,并利用 MEGA-X 软件对遗传相似性系数进行分

析,对 190 份大白菜材料进行 InDel 标记聚类分析。

1.3.7 群体结构分析 根据聚丙烯酰胺凝胶电泳结果,对不同材料在每对引物产生的变异处进行标记,整理数据矩阵,利用 Structure 软件对群体结构进行分析,分析最适 *K* 值,并基于分析结果,将群体进行亚群分类。

2 结果与分析

2.1 大白菜表型性状差异分析

对 190 份大白菜高代自交系的 27 个表型性状进行田间调查,分析结果见表 4,在受试群体中不同性状的变异系数差异较大,平均值为 31.51%。在数

表 2 大白菜成熟期主要性状及评价标准

Table 2 Main traits and evaluation criteria of Chinese cabbage at maturity stage

性状类型	性状	评价标准
Trait type	Character	Evaluation criterion
数量性状	株高 Plant height	cm
	外叶长 Outer leaf length	cm
	外叶宽 Outer leaf width	cm
	中肋长 Midrib length	cm
	中肋宽 Midrib width	cm
	中肋厚 Midrib thickness	cm
	叶球高 Leaf head height	cm
	叶球宽 Leaf head width	cm
	叶球毛质量 Gross mass of leaf head	kg
	叶球净质量 Net mass of leaf head	kg
	短缩茎长 Dwarf stem length	cm
	短缩茎宽 Dwarf stem width	cm
	外叶数 Number of outer leaves	片 Piece
	生长习性 Growth habits	1. 直立 Upright; 2. 半直立 Semi-upright; 3. 平展 Spreading
质量性状	侧芽 Lateral buds	1. 无 Without; 2. 有 With
	外叶形状	1. 近圆形 Subrounded; 2. 宽倒卵形 Broadly obovate; 3. 倒卵形 Obovate;
	Outer leaves shape	4. 长倒卵形 Obovate-oblong; 5. 长圆形 Oblong
	中肋颜色 Midrib color	1. 白色 White; 2. 绿白色 Greenish white; 3. 浅绿色 Light green; 4. 中等绿色 Medium green
	中肋横切面形状	1. 凹 Concave; 2. 平 Flat
	Transverse section shape of mid rib	
	叶球顶部闭合类型 Leaf ball top closure type	1. 开放 Open; 2. 半开放 Semi-open; 3. 闭合 Closed
	叶球抱合类型 Leaf ball hugging type	1. 拧抱 Twisted overlapping; 2. 合抱 Closed overlapping; 3. 叠抱 Imbricate
	叶球顶部形状 Leaf ball top shape	1. 尖 Pointed; 2. 圆 Rounded; 3. 平 Truncate
	叶球上部颜色 Upper color of the leaf ball	1. 白色 White; 2. 绿色 Green; 3. 黄色 Yellow; 4. 紫色 Purple
	叶球上部绿色 Green upper part of the leaf ball	1. 极浅 Very light; 2. 极浅到浅 Very light to light; 3. 浅 Light; 4. 浅到中 Light to medium; 5. 中 Medium; 6. 中到深 Medium to dark; 7. 深 Dark; 8. 深到极深 Dark to very dark; 9. 极深 Very dark
	叶球形状 Leaf ball shape	1. 球 Globe-shaped; 2. 头球 Round-headed; 3. 筒 Cylindrical; 4. 长筒 Long-cylindrical; 5. 炮弹 Drum-shaped
	叶球内叶颜色 Leaf color inside the leaf ball	1. 白色 White; 2. 浅黄色 Pale yellow; 3. 中等黄色 Medium yellow; 4. 橙色 Orange; 5. 紫色 Purple
	短缩茎形状 Short stem shape	1. 扁圆形 Oblate; 2. 近圆形 Suborbicular; 3. 近椭圆形 Subelliptic; 4. 锥形 Conical
	花蕾 Flower bud	1. 无 Without; 2. 有 With

量性状中,短缩茎长度变异系数最大(90.36%),叶球净质量、叶球毛质量、中肋长变异系数也较大,分别为 35.51%、29.32%、29.14%,短缩茎宽的变异系数最小(16.52%)。在质量性状中,叶球内叶颜色变异系数最大(50.89%),叶球上部绿色、外叶形状、短缩茎形状、叶球形状、中肋颜色等变异系数较大,分别为 49.67%、47.99%、45.79%、41.33%、43.73%,而中肋横切面形状的变异系数最小(10.10%)。

通过对不同性状的遗传多样性指数和均匀度指数进行分析,结果表明 190 份大白菜高代自交系

的香农多样性指数平均值为 2.25,均匀度指数平均值为 0.43,表明受试材料的遗传多样性丰富、均匀度较高。在 27 种调查性状中,中肋横切面形状的香农多样性指数最高,为 2.28。

2.2 大白菜表型性状相关性分析

由图 1 可知,大白菜的株高与外叶长、中肋长、叶球高度呈高度正相关(相关系数 ≥ 0.6),相关系数分别为 0.86、0.80 和 0.80;外叶长与株高、中肋长、叶球高呈高度正相关,相关系数分别为 0.86、0.87、0.73;外叶宽与中肋宽、中肋厚、叶球宽呈高度正相

表 3 InDel 引物信息
Table 3 The information of primers

引物名称 Primer name	染色体编号 Chromosome No.	正向引物 F(5'-3') Forward primer F (5'-3')	反向引物 R(5'-3') Reverse primer R (5'-3')
BrID10433	A01	CGTCACTTATACGGTTCACA	AACCCACTACTCGCTCTTCT
BrID10437	A01	CCCTCCTATGATTTGGAGTT	TTGGGTCAAGAAAGATATGG
BrID10415	A02	GACTGAACTCAGCCTATTGC	GGAACAAAATTGCAGAAGAC
BrID10447	A02	CACCTGCTCAGGAGTATTTT	ATTTGACTGCAGATGTCACC
BrID10291	A03	GGTTGACATAACCAACCAAG	TCAAGTAAGAAGTCTCTGATGC
BrID10401	A03	GTCGGATTTCCTTCTACACG	TGAACCTATCTTCCTCAACG
BrID90029	A03	TGTTCAATTGTTAGATAATGTTTTTG	TGGTCAACATAGATTGCACG
BrID90039	A03	TTTTTGGCTAACAAAGTGTAAAGG	TTGAGAAAGCTTAAATTGCCAC
BrID90107	A03	TCCGTCGGTTTCTAGTTCAAA	TTGTTGTGGTCCATTATGCAG
BrID90430	A03	GCACAAGTATTTTCTGCATC	TAGCATTGCACGATGTCAAA
BrID90057	A05	AACGTCATCCCACTCTACAAAAA	TCAACACTATCCAGACCCCA
BrID10375	A06	TAGAACATGTTGTCCGTGAA	GGTAGATTGGTTGATCCTG
BrID10395	A06	GCTGACATGTACCTTTTGAA	CATCTAAGACCGAGTCAAGC
BrID10941	A06	CAGAGTTTTGTTGGTTTTGG	TATCTTTTCGTTGTTCTCGC
BrID90005	A06	GCCATATGTCTGCAAAAGAAA	TCTAATCCATTGCCACAAAA
BrID90105	A06	GAAATACTACACATTTTCCAAAAC	TCGATAGGTAGGGTGCAATTTTC
BrID10329	A07	AACCTGGATAAAGACTGCAT	TCTTCGTCAACTCACTTCCT
BrID90043	A07	TCGCACATCACATTTCTG	AAGGAAATGATTCAACAACACT
BRMS005	A07	ACCTCCTGCAGATTCGTGTC	GCTGACCTTTCTTACCGCTC
BrID90464	A07	TTTGACTGAATGAAAGACTTTTGC	CGGGAAAACGATAAACGAAA
BrID10109	A07	TGCATAAGATAAGCTCCAC	GGAAGCTTTTGTGGTGTAG
BrID90111	A08	GCTCGTTCGCTAGGTTGACT	TTAGCGCTTCATCAGTGTGC
BrID10667	A09	TTCCGTGGAGTATCAGAGAT	GAAACTAGGGATTCTGTTTCT
BrID90367	A09	TTTCCATTGCTACCAGAGCC	GAAGTCGTGTCCATGCTTCA
BrID90069	A09	TCGAAATGATATTATGATGTTAGC	TTTCCCGTTGGTCTACTTGA
BrID90319	A09	TCCGAGGTCATCTCCTTAGC	ACACACGCTTTCATTGGGTT
BrID90147	A10	CGTCCCTCTTAAAGTTGCGT	AAGCCGACGTTTACAAGATAATT

关, 相关系数分别为 0.63、0.66、0.65; 中肋长与株高、外叶长、叶球高度呈高度正相关, 相关系数为 0.80、0.87、0.80; 中肋宽与外叶宽、中肋厚、叶球宽、短缩茎宽呈高度正相关, 相关系数分别为 0.63、0.70、0.62、0.65; 中肋厚与外叶宽、中肋宽、叶球宽呈高度正相关, 相关系数分别为 0.66、0.70、0.60; 叶球宽与外叶宽、中肋宽、中肋厚、叶球毛质量、叶球净质量、短缩茎宽高度相关, 相关系数分别为 0.65、0.62、0.60、0.67、0.69、0.65; 叶球毛质量与叶球宽、叶球净质量、短缩茎宽呈高度相关, 相关系数为 0.67、0.88、0.62; 抱合类型和叶球顶部闭合类型呈高度正相关, 相关系数为 0.86; 叶球上部颜色与叶球内叶颜色呈高度正相关, 相关系数为 0.71。

2.3 自交系的 InDel 标记分析

对 190 份大白菜自交系基于 27 对 InDel 标记进行 PCR 扩增, 电泳结果显示, 每对引物均能扩增

出清晰的 0~2 条带(图 2)。利用 PowerMarker 软件对本试验所选的 InDel 标记进行分析, 结果显示, 每个标记均能检测到 2 个等位基因; 每个标记的等位基因频率在 0.51~0.98, 平均等位基因频率为 0.74; 扩增标记的遗传多样性在 0.01~0.50, 平均遗传多样性为 0.34; 扩增标记位点的多态性信息含量(PIC)变幅在 0.01~0.37, 平均为 0.27, 表明所选引物多态性中等程度(表 5)。

2.4 大白菜自交系间的遗传相似性分析

利用 27 对 InDel 引物对 190 份大白菜自交系进行 PCR 扩增, 聚丙烯酰胺凝胶电泳带型结果显示, 上述引物在受测自交系中多态性为 100%。利用 NTSYS 对 190 份大白菜自交系材料进行遗传相似性系数计算, 大白菜自交系间遗传相似性系数(GS)在 0.57~1.00, 平均值为 0.65, 遗传变幅大。利用 MEGA-X 软件构建进化树, 如图 3 所示, 供试大

表 4 大白菜表型性状差异统计

Table 4 Differences statisticsin of phenotypic traits in Chinese cabbage

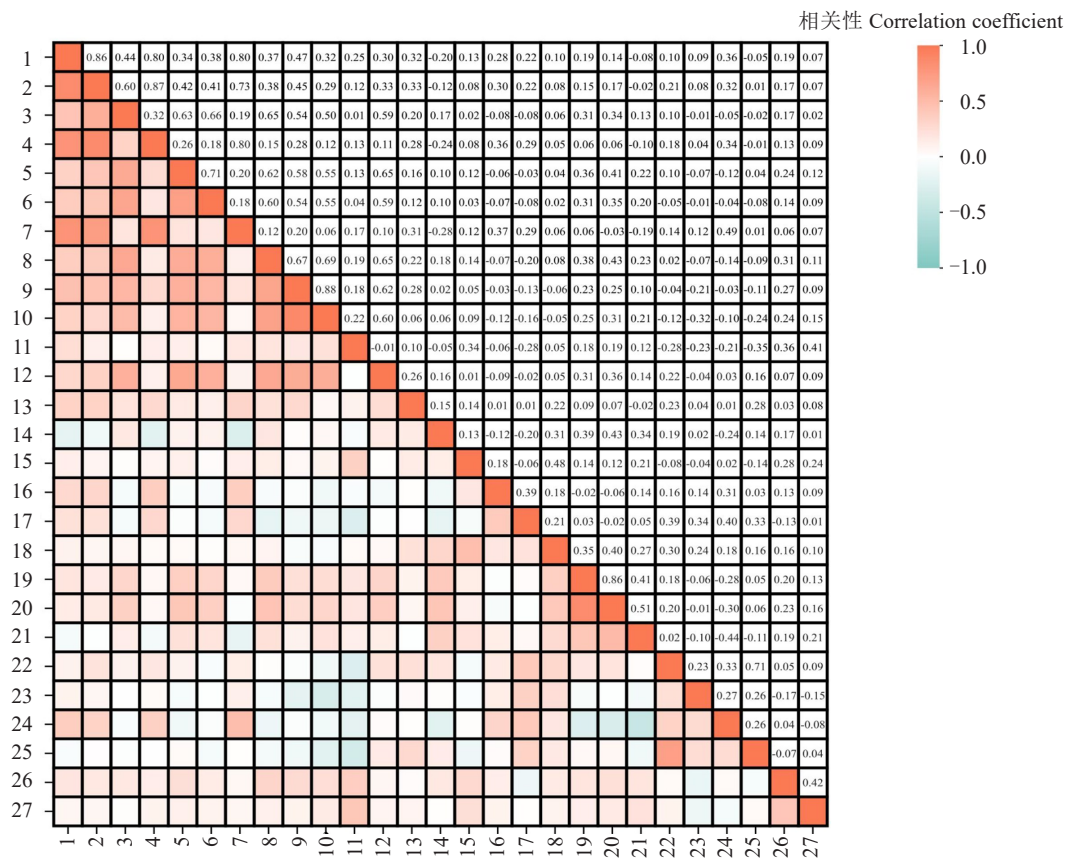
性状 Characters	变幅 Luffing		均值 Mean	方差 Variance	变异系数 CV/%	香农多样性指数 Shannon-Wiener index <i>H</i>	均匀度指数 Pielou's <i>J</i> index <i>J</i>
	Max	Min					
株高 Plant height/cm	55.00	17.50	32.69	46.16	20.78	2.27	0.43
外叶长 Outer leaf length/cm	54.00	19.50	33.62	39.64	18.73	2.27	0.43
外叶宽 Outer leaf width/cm	39.80	14.20	25.16	19.56	17.58	2.27	0.43
中肋长 Midrib length/cm	30.00	6.50	15.56	20.56	29.14	2.26	0.43
中肋宽 Midrib width/cm	11.80	3.90	6.38	1.17	16.98	2.27	0.43
中肋厚 Midrib thickness/cm	12.90	5.00	8.63	2.38	17.87	2.27	0.43
叶球高 Leaf head height/cm	42.00	11.00	24.17	36.22	24.90	2.27	0.43
叶球宽 Leaf head width/cm	24.70	8.20	14.64	8.94	20.42	2.27	0.43
叶球毛质量 Gross mass of leaf head/kg	3.05	0.50	1.73	0.26	29.32	2.26	0.43
叶球净质量 Net mass of leaf head/kg	1.95	0.15	1.01	0.13	35.51	2.25	0.43
短缩茎长 Dwarf stem length/cm	23.40	1.00	5.03	20.68	90.36	2.14	0.41
短缩茎宽 Dwarf stem width/cm	5.20	2.10	3.65	0.36	16.52	2.27	0.43
外叶数 Number of outer leaves	15.00	3.00	10.05	5.33	22.96	2.26	0.43
生长习性 Growth habits	3.00	1.00	1.44	0.27	36.00	2.25	0.43
侧芽 Lateral buds	2.00	1.00	1.10	0.09	27.29	2.27	0.43
外叶形状 Outer leaves shape	5.00	1.00	2.15	1.07	47.99	2.23	0.43
中肋颜色 Midrib color	4.00	1.00	1.74	0.58	43.73	2.24	0.43
中肋横切面形状 Midrib cross-sectional shape	2.00	1.00	1.01	0.01	10.10	2.28	0.43
叶球顶部闭合类型 Leaf bulb top closure type	3.00	1.00	2.71	0.27	19.13	2.27	0.43
叶球抱合类型 Leaf ball hugging type	3.00	2.00	2.73	0.20	16.36	2.27	0.43
叶球顶部形状 Leaf bulb top shape	3.00	1.00	1.69	0.32	33.65	2.26	0.43
叶球上部颜色 Upper color of the leaf bulb	3.00	1.00	1.97	0.42	32.64	2.26	0.43
叶球上部绿色 Green upper part of the leaf bulb	6.00	1.00	2.11	1.10	49.67	2.23	0.42
叶球形状 Leaf ball shape	5.00	1.00	2.87	1.41	41.33	2.23	0.43
叶球内叶颜色 Leaf color inside the leaf bulb	4.00	1.00	2.18	1.23	50.89	2.22	0.42
短缩茎形状 Short stem shape	4.00	1.00	2.99	1.87	45.79	2.23	0.42
花蕾 Flower bud	2.00	1.00	1.29	0.21	35.25	2.26	0.43
均值 Mean					31.51	2.25	0.43

白菜可分为 3 个主要类群,第Ⅰ类群包含 63 份材料,第Ⅱ类群包含 14 份材料,第Ⅲ类群包含 113 份材料。多份材料之间的遗传相似性系数为 1,可能与它们属于同一亲本的姊妹系相关。

第Ⅰ类群材料多表现为植株高大、最大外叶长和叶宽数值大、中肋长并宽、叶球高中等、短缩茎较长,除 KF-37 中肋横切面形状为平外,其余材料中肋横切面形状均为凹;生长习性多为直立、半直立,仅 KF-123 生长习性为平展;56 份材料无侧芽,9 份材料有侧芽;其余性状在此类群中无明显聚集现象。该类群材料主要来源于 16 秋东郊引 A、16 秋东郊引 B、17Z4 大-2、17Z4 小-1、17 省区 17Z4 小、18 秋 32-2、18 秋 37-1、18 秋 44、18 秋 45、19 大青亲本 2、21 区试 W7、天正橘红 65、北京桔红 2 号、开蔬七号、早 50 等。

第Ⅱ类群材料株高中等、最大外叶长和叶宽数值中等、叶球高中等、叶球宽较窄、叶球较轻、短缩茎短、14 份材料均无侧芽、中肋横切面形状为凹形、叶球上部颜色均为绿色、叶球形状主要为筒型和炮弹型、叶球内叶颜色多为浅黄或中等黄色、无花蕾,其余性状在此类群中无明显聚集现象。该类群材料主要来源于 16 秋东郊引 A、16 秋东郊引 B、开蔬七号等。

第Ⅲ类群材料多表现为植株较矮、最大外叶长较短、中肋长较短、叶球较矮、叶球质量中等,多数材料生长习性为直立或半直立,仅 KF-64 生长习性为平展;多数材料中肋横切面为凹形,其余均为平;顶部闭合类型多为半开放或闭合,仅 KF-28 和 KF-29 为开放类型,其余性状在此类群中无明显聚集现象。该类群自交系主要来源于 14 秋材、15 秋材、16 秋材、16 东郊引 B、17Z4 大-1、17Z4 大-2、17



注: 1. 株高; 2. 外叶长; 3. 外叶宽; 4. 中肋长; 5. 中肋宽; 6. 中肋厚; 7. 叶球高; 8. 叶球宽; 9. 叶球毛质量; 10. 叶球净质量; 11. 短缩茎长; 12. 短缩茎宽; 13. 外叶数; 14. 生长习性; 15. 侧芽; 16. 外叶形状; 17. 中肋颜色; 18. 中肋横切面形状; 19. 叶球顶部闭合类型; 20. 叶球抱合类型; 21. 叶球顶部形状; 22. 叶球上部颜色; 23. 叶球上部绿色; 24. 叶球形状; 25. 叶球内叶颜色; 26. 短缩茎形状; 27. 花蕾。

Note: 1. Plant height; 2. Outer leaf length; 3. Outer leaf width; 4. Midrib length; 5. Midrib width; 6. Midrib thickness; 7. Leaf head height; 8. Leaf head width; 9. Gross mass of leaf head; 10. Net mass of leaf head; 11. Dwarf stem length; 12. Dwarf stem width; 13. Number of outer leaves; 14. Growth habits; 15. Lateral buds; 16. Outer leaves shape; 17. Midrib color; 18. Midrib cross-sectional shape; 19. Leaf bulb top closure type; 20. Leaf ball hugging type; 21. Leaf bulb top shape; 22. Upper color of the leaf bulb; 23. Green upper part of the leaf bulb; 24. Leaf ball shape; 25. Leaf color inside the leaf bulb; 26. Short stem shape; 27. Flower bud.

图 1 大白菜自交系表型性状相关性热图
Fig. 1 Heatmap of phenotypic trait correlation of Chinese cabbage inbred lines

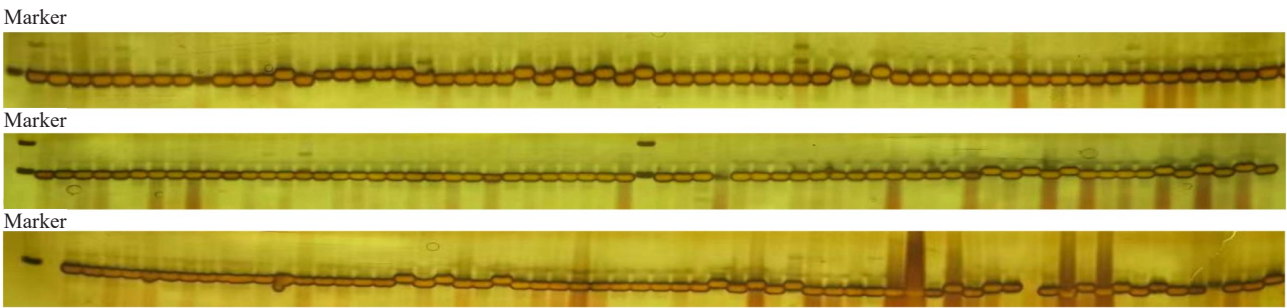


图 2 引物 BrID10395 对大白菜自交系的扩增结果
Fig. 2 Amplification of Chinese cabbage inbred lines by marker BrID10395

秋东郊引 A、17 秋东郊引 B、17 早材(早元)、17 早材(晚长)、18 秋 32-2、天正橘红 62、天正橘红 65、北京桔红 2 号、开蔬七号、绿笋 70 等。

2.5 大白菜自交系群体结构分析

根据 InDel 分子标记的基因分型结果, 利用

Structure 软件中的混合模型聚类分析法进行群体遗传结构分析, 如图 4-A 所示, 当 $K = 3$ 时, ΔK 出现最大值, $L(K)$ 和 $L'(K)$ 变化最大, 因此可将供试群体分为 3 个不同的亚群, 分别命名为 Q1、Q2、Q3 (图 4-B)。

表 5 InDel 标记位点的多态性参数
Table 5 Parameters of polymorphism of InDel marker

标记 Marker	主要等位基因频率 Major allele frequency	等位基因数量 Number of alleles	遗传多样性 Genetic diversity	多态性信息含量 Polymorphism information content
BrID10291	0.57	2.00	0.49	0.37
BrID10329	0.98	2.00	0.03	0.03
BrID10375	0.51	2.00	0.50	0.37
BrID10395	0.83	2.00	0.29	0.25
BrID10401	0.92	2.00	0.15	0.14
BrID10415	0.66	2.00	0.45	0.35
BrID10433	0.53	2.00	0.50	0.37
BrID10437	0.83	2.00	0.28	0.24
BrID10447	0.86	2.00	0.24	0.21
BrID10667	0.88	2.00	0.21	0.19
BrID10941	0.74	2.00	0.38	0.31
BrID90005	0.55	2.00	0.50	0.37
BrID90029	0.65	2.00	0.46	0.35
BrID90039	0.66	2.00	0.45	0.35
BrID90105	0.88	2.00	0.20	0.18
BrID90107	0.67	2.00	0.44	0.35
BrID90147	0.62	2.00	0.47	0.36
BrID90367	0.55	2.00	0.50	0.37
BrID90430	0.83	2.00	0.28	0.24
BrID90057	0.99	2.00	0.01	0.01
BrID90043	0.61	2.00	0.48	0.36
BrID90464	0.57	2.00	0.49	0.37
BrID10109	0.92	2.00	0.14	0.13
BrID90111	0.88	2.00	0.21	0.19
BrID90069	0.79	2.00	0.33	0.27
BrID90319	0.77	2.00	0.36	0.29
BrID90071	0.70	2.00	0.42	0.33
平均值 Mean	0.74	2.00	0.34	0.27

Q1 类群有 74 份材料,株高较矮、最大外叶短而宽、中肋长较短、叶球矮而轻、多数材料生长习性为直立或半直立,其余性状无明显聚集现象,该亚群 Q 值>0.6 的材料占比为 93.20%。Q1 类群材料主要由 17 早材(早元)、17 早材(晚长)、15 秋材、16 秋东郊引 B、17Z4 大-1、17Z4 大-2、18 秋 32-2、天正橘红 62、天正橘红 65、北京桔红 2 号材料衍生而来。群体结构分析所得的 Q1 群体与聚类分析的第 III 类群在性状聚集上具有相似性,除 KF-182 外,其余材料均位于聚类分析的第 III 类群。

Q2 类群有 49 份材料,株高中等、中肋较厚、叶球高且重、短缩茎短、多数无侧芽。在该亚群中,Q 值>0.6 的材料占比为 87.70%。Q2 类群材料主要由 14 秋材、15 秋材、16 秋材、16 秋东郊引 A、16 秋东郊引 B、17 秋东郊引 A、17 秋东郊引 B、绿笋 70 等

材料衍生而来。群体结构分析所得的 Q2 群体与聚类分析的 3 个类群在性状聚集上不具有相似性,其中 5 份材料位于前述进化树的第 I 类群,7 份材料位于前述进化树的第 II 类群、37 份材料位于前述进化树的第 III 类群。

Q3 类群有 67 材料,株高较高、叶长且宽、中肋长且厚、中肋横切面为凹形,与前述进化树中第 I 类群性状较为一致,在该亚群中,Q 值>0.6 的材料占比为 85.55%。Q3 类群材料主要由 16 东郊引 A、16 东郊引 B、17Z4 小-1、17 省区 17Z4 小、18 秋 32-2、18 秋 37-1、18 秋 44、18 秋 45、北京桔红 2 号、早 50、19 大青亲本 2 等材料衍生而来。其中,57 份材料位于前述进化树的第 I 类群,7 份位于前述进化树的第 II 类群,3 份位于前述进化树的第 III 类群。

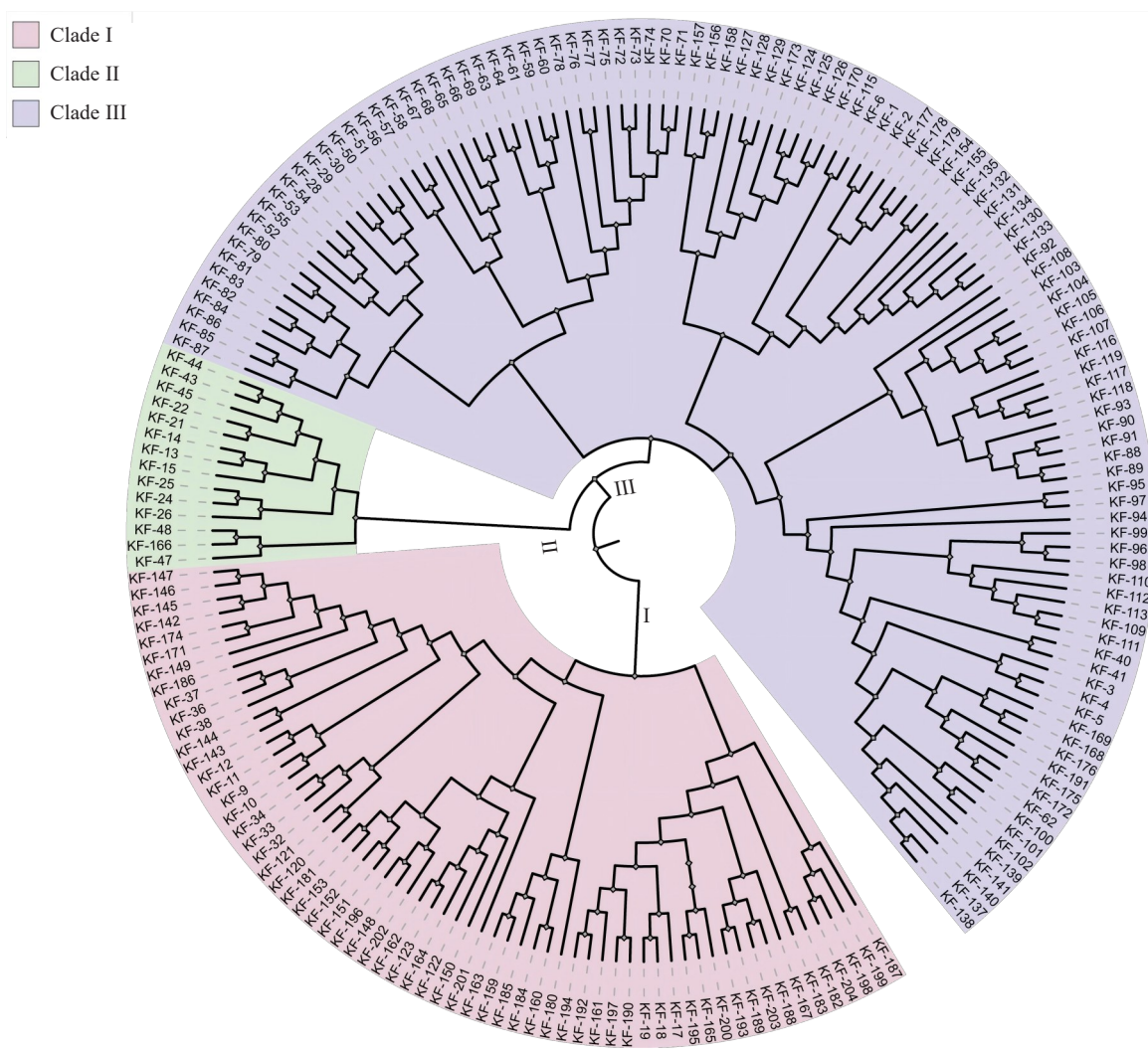


图3 大白菜自交系聚类分析图

Fig. 3 Cluster analysis of Chinese cabbage inbred lines

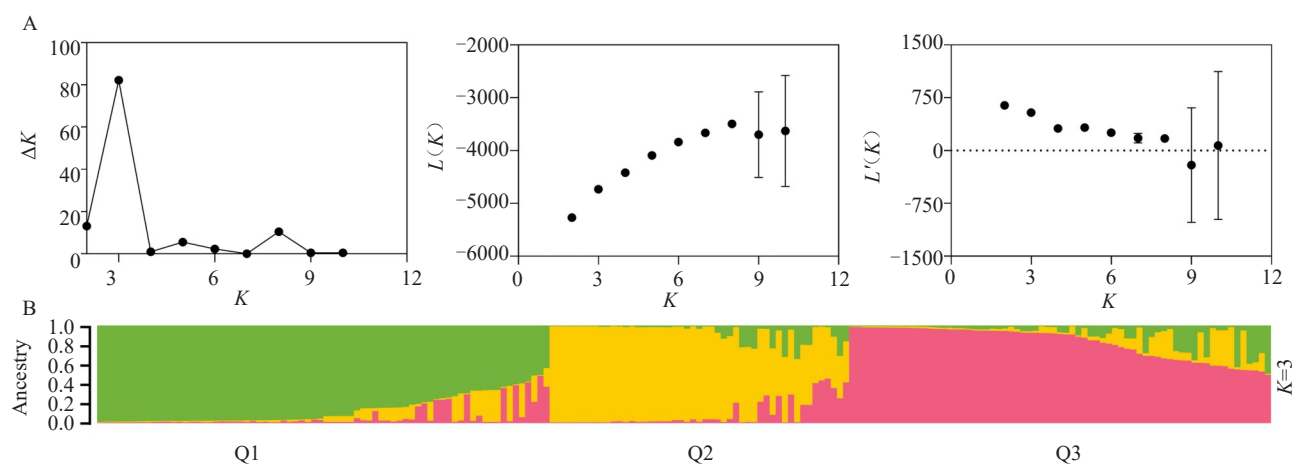


图4 大白菜自交系群体结构分析图

Fig. 4 Structure analysis of Chinese cabbage inbred lines

2.6 大白菜自交系遗传多样性的应用

利用 InDel 标记对 190 份大白菜进行多样性分析结果显示,上述供试群体遗传多样性丰富,可为配置优异大白菜亲本组合提供种质资源。其中, KF-158 外叶绿色、中肋白色、叶球黄白色、叶球高 21 cm、叶球直径 16 cm、叶球毛质量 1.95 kg、直立生长; KF-163 外叶绿色、中肋白色、叶球高 19.80 cm、叶球直径 19.70 cm、叶球毛质量 2.60 kg,半直立生长。将 KF-158 和 KF-163 互为父母本配制杂交组合,综合性状表现突出,并取名为汴早九号^[16]。在本次大白菜自交系的遗传多样性分析中, KF-158 位于第 III 类群、KF-163 位于第 I 类群,两者之间的遗传距离较远。KF-120 植株高度为 40 cm、外叶较长、中肋白色、中肋较长且宽、叶球顶部闭合、叠抱、叶球为头球形、叶球高度可达 25.50 cm、叶球毛质量可达 3.05 kg; KF-123 植株高度 30 cm、外叶较长、中肋白色、中肋长度中等、叶球顶部闭合、叠抱、叶球为头球形,但叶球高度为 16.60 cm、叶球毛质量为 2.50 kg。将 KF-120 和 KF-123 配置杂交组合,并命名为开蔬七号^[17],该品种在品种比较试验中表现优异。根据大白菜遗传相似性系数,将 KF-120 和 KF-123 划分到第 I 类群,但二者又分别属于 2 个不同的亚群分支。上述结果表明,对供试群体的遗传多样性分析是合理的,通过聚类分析可将亲缘关系较远的材料划分到不同的类群或者同一类群不同的分支,能够为后续杂交组合的配置提供参考。

3 讨论与结论

通过调查 190 份大白菜高代自交系的 27 个表型性状,分析变异系数、遗传多样性指数和均匀度指数,相关分析结果显示,受试群体表型性状变异范围大、遗传多样性丰富、均匀度高,可为配制不同性状优异材料提供基础。其中,短缩茎长的变异系数最大,与范伟强等^[9]的研究结果一致。这表明短缩茎的长度在不同的大白菜群体中可能属于比较广泛的变异。值得注意的是,中肋横切面形状的变异系数最小,但遗传多样性指数和均匀度指数却最高,可能原因是中肋横切面的变异范围虽然小,但变异种类丰富。利用软件对 190 份大白菜自交系进行相关性分析,结果显示大白菜的株高、外叶长、外叶宽、中肋长、外叶宽、中肋厚、中肋宽、叶球宽、叶球高、叶球毛质量、叶球净质量、短缩茎宽等性状相关性较高,中肋横切面形状与株高、外叶长呈高度负相关,中肋颜色与叶球宽、叶球顶部闭合类型、

抱合类型呈高度负相关。这表明大白菜自交系的各个性状之间可能存在一定程度的相关性,在品种培育过程中,可根据性状之间的关联性进行选育。

根据大白菜全基因组测序结果设计合成 27 对 InDel 标记,分析结果显示上述标记多态性较高。通过 InDel 标记结果进行统计分析,结果显示受试群体的遗传相似性系数变幅较大,表明受试群体遗传背景多样性丰富。根据遗传相似性系数,可将 190 份材料分为 3 个亚群,3 个亚群存在明显差异性性状,对受试群体进行结构分析,相关分析结果显示,当 $K=3$ 时,可将受试群体分为 3 个亚群。190 份大白菜自交系的群体结构分析与聚类分析具有一定的相似性,在分类上,主要以株高程度聚类,分为株高较高、中等以及矮 3 个级别。比如 I 类群多表现为植株高大、第 II 类群株高中等、第 III 类群株高较矮,而结构分析的 Q1 类群株高较矮、Q2 类群株高中等、Q3 类群株高较高,且除 KF-182 外,结构分析的 Q1 类群中其余 73 份材料均位于聚类分析的 III 类群中;两种分类方法在株高的基础上,又结合了其他不同的性状进行聚集分析,因此在分类上也存在一定的差异性,比如 Q2 类群有 49 份材料,其中 5 份材料位于前述进化树的第 I 类群,7 份材料位于前述进化树的第 II 类群,37 份材料位于前述进化树的第 III 类群; Q3 类群有 67 材料,其中 57 份材料位于前述进化树的第 I 类群,7 份位于前述进化树的第 II 类群,3 份位于前述进化树的第 III 类群。上述结果表明,在聚类分析和群体结构 2 种分析方法中, Q1 类群和 Q2 类群中的材料大多数能够与第 III 类群一致,而 Q3 类群中的材料,大多数能够与第 I 类群一致。这表明根据遗传相似性系数以及群体基因分型结果进行的结构分析均能将 190 份大白菜自交系进行聚类分析,但会出现聚集性状的差异,在结果上存在一定差异,可能与群体之间存在一定程度的基因交流有关。

笔者所用 190 份大白菜自交系材料共有 26 个不同来源,其中 16 东郊引 B、开蔬七号来源的材料后代分离较大,如 16 东郊引 B 来源的 KF-32、KF-33、KF-34、KF-36、KF-37、KF-38 位于聚类分析的第 I 类群, KF-25、KF-26、KF-43、KF-44、KF-45、KF-47、KF-48 位于聚类分析的第 II 类群, KF-28、KF-29、KF-30、KF-40、KF-41 位于聚类分析的第 III 类群;开蔬七号来源的 KF-165、KF-167 位于聚类分析的第 I 类群, KF-166 位于聚类分析的第 II 类群, KF-168 位于聚类分析的第 III 类群。这表明上述 2

个亲本杂合度高,异质性强,容易获得优秀的自交系。而16东郊引A、17Z4大-2、18秋32-2、18秋33-2、18秋44、天正橘红65、北京桔红2号来源的材料后代具有一定的分离,这表明上述亲本具有一定的杂合度,在育种上可以用于自交系的选育。

近年来,随着经济水平的提高,人们越发注重大白菜等蔬菜的优异性状,因此,在生产上培育具有优异性状的新品种具有重要意义。调查大白菜的表型性状,并结合InDel分子标记对种质资源遗传多样性进行分析在遗传育种上被广泛应用。笔者通过分析190份大白菜高代自交系的27个表型性状,结果表明该群体遗传多样性丰富、均匀度高,多个表型性状之间存在相关性;结合27对多态性InDel标记,对其遗传多样性和群体结构进行分析,均可将该群体分为3个类群,两种分类方法得到的结果具有一定的相似性和差异,相同来源的材料后代有的分离最较大,表明亲本之间存在一定的杂合度,能够为后续新品种的培育。本研究结果为开封地区乃至河南地区大白菜新品种的培育和推广提供了理论基础。

参考文献

- [1] 张凤兰,于拴仓,余阳俊,等.“十三五”我国大白菜遗传育种研究进展[J].中国蔬菜,2021(1):22-32.
- [2] 曹家树,曹寿椿,繆颖,等.中国白菜各类群的分支分析和演化关系研究[J].园艺学报,1997,24(1):35-42.
- [3] 高飞.不同品种大白菜生物学性状和品质比较研究[D].杭州:浙江农林大学,2013.
- [4] 钟世超,李潇萱,樊铭玺,等.应用STR荧光标记法分析大白菜品种遗传多样性[J].中国蔬菜,2023(11):22-33.
- [5] 范伟强,尹婧,王超楠,等.33个大白菜品种表型遗传多样性评价[J].中国瓜菜,2021,34(10):32-38.
- [6] 韩睿,赵孟良,孙世英,等.47份大白菜品种的遗传多样性研究[J].西北农业学报,2021,30(5):707-716.
- [7] 王忠华.DNA指纹图谱技术及其在作物品种资源中的应用[J].分子植物育种,2006,4(3):425-430.
- [8] JANDER G, NORRIS S R, ROUNSLEY, et al. *Arabidopsis* map-based cloning in the post-genome era[J]. Plant Physiology, 2002, 129(2):440-450.
- [9] 王祥,罗双霞,宋利军,等.利用InDel标记鉴定大白菜‘农大Q210’和‘农大Q212’种子纯度[J/OL].分子植物育种, 1-16 (2023-09-27). <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20230926.1626.006>.
- [10] 薛银鸽,原玉香,张晓伟,等.利用InDel标记鉴定大白菜杂交种豫新四号种子纯度[J].农业生物技术学报,2014,22(4):449-456.
- [11] 冯健起,王培云,等.利用InDel标记鉴定汴早九号大白菜杂交种纯度[J].中国瓜菜,2023,36(12):33-38.
- [12] 高颖,罗双霞,王彦华,等.大白菜抽薹开花时间与SSR和InDel标记的关联分析[J].园艺学报,2012,39(6):1081-1089.
- [13] 赵玉靖,卢银,冯大领,等.大白菜自交系背景选择InDel标记与重要农艺性状的关联分析[J].园艺学报,2021,48(7):1282-1294.
- [14] 罗双霞.大白菜主要农艺性状QTL定位及叶球发育相关基因表达分析[D].河北保定:河北农业大学,2016.
- [15] BOTSTEIN D, WHITE R, SKOLNICK M, et al. Construction of a genetic linkage map in man using restriction fragment length polymorphisms[J]. American Journal of Human Genetics, 1980(32):314-331.
- [16] 冯健起,丁聪,生园园,等.早熟大白菜新品种汴早九号的选育[J].长江蔬菜,2022(20):35-37.
- [17] 冯健起,丁聪,生园园,等.中熟大白菜新品种开蔬七号的选育[J].中国瓜菜,2023,36(6):128-131.