李浩浩,司晓霞,兰创业,等.196份不结球白菜遗传多样性分析及熵权-TOPSIS综合评价[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(6):49-61.
Li H H, Si X X, Lan C Y, et al. Genetic diversity analysis and entropy-weighted TOPSIS comprehensive evaluation of non-heading Chinese cabbage[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(6):49-61.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202503019

196份不结球白菜遗传多样性分析及熵权-TOPSIS综合评价

李浩浩,司晓霞*,兰创业,杨月芳,王静

(山西农业大学 园艺学院,山西 太原030031)

摘　要:[目的]分析不结球白菜的种质资源遗传多样性,筛选优质不结球白菜种质资源。[方法]本研究在全国范围内收集196份种质资源为试验材料,通过随机区组排列种植试验,运用相关性分析、主成分分析、聚类分析和熵权-TOPSIS综合评价探讨不结球白菜表型性状间关系。[结果]21个表型性状存在不同程度的变异,其中变异最大的是中心柱纵径,达到50.78%,最小的是株型,仅为11.96%;遗传多样性指数范围在5.16~5.27,株型的遗传多样性指数最大,叶面泡状程度遗传多样性指数最小,各不结球白菜性状遗传变异突出;采用主成分分析将21个表型性状分为5个主成分,5个主成分贡献率为21.29%、14.54%、9.19%、8.48%和5.71%,累积贡献率为21.29%~59.20%,所有成分均代表了不结球白菜表型性状的主要信息;相关性分析表明各性状之间存在关联性;聚类分析在欧氏距离0.98时将196份不结球白菜分为5个组群,筛选出了可用于耐热和耐寒材料的选育的种质;利用熵权-TOPSIS法对15个性状进行了评价分析发现:编号189、184、66等20个材料适宜作为优质亲本。[结论]所选不结球白菜资源具有显著的遗传差异和丰富的变异特性,包括株高、叶长、叶柄长、叶宽、菜心充实度、株型、束腰、叶片尖端形状、叶柄宽、叶柄厚、中柱纵径、叶数量和叶柄横切面形状在内的14个性状是引起不结球白菜表型差异的主要因素。

关键词:不结球白菜;遗传多样性;相关性分析;主成分分析;聚类分析;熵权-TOPSIS
中图分类号:S634.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)06-0049-13

Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation by entropy-weighted TOPSIS of 196 non-heading Chinese cabbage accessions

Li Haohao, Si Xiaoxia*, Lan Chuangye, Yang Yuefang, Wang Jing

(*College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, 030031, China*)

Abstract: [Objective] This study aimed to analyze the genetic diversity of germplasm resources and identify elite accessions in non-heading Chinese cabbage. [Methods] Using 196 germplasm resources collected nationwide, a randomized block design was implemented. The relationships among phenotypic traits were investigated through correlation analysis, principal component analysis (PCA), cluster analysis, and a comprehensive evaluation using the entropy-weighted TOPSIS method. [Results] The 21 phenotypic traits exhibited varying degrees of variation, with the central core longitudinal diameter showing the greatest coefficient variation (50.78%) and plant type the lowest(11.96%). The genetic diversity index ranged from 5.16 to 5.27, being highest for plant type and lowest for leaf blistering degree, indicating significant genetic variation. PCA categorized the 21 phenotypic traits into five principal components, with contribution rates of 21.29%, 14.54%, 9.19%, 8.48%, and 5.71%, respectively, and a cumulative contribution rate ranging from 21.29% to 59.20%, effectively capturing the main characteristics of the phenotypic data. Correlation analysis confirmed the significant interrelationship among the traits. Cluster analysis at a Euclidean distance of 0.98 grouped the 196 accessions into five distinct clusters, from which potential germplasms for breeding

收稿日期:2025-03-15　　**修回日期**:2025-07-09
基金项目:山西农业大学科技创新提升工程项目(CXGC2023031)
作者简介:李浩浩(ORCID:0009-0008-9937-565X),硕士研究生,研究方向:农作物遗传育种
*通信作者:司晓霞(ORCID:0009-0007-6557-5009),助理研究员,E-mail:sixiaoxia@sxau.edu.cn

heat-tolerant and cold-tolerant varieties were identified. Evaluation of 15 key traits using the entropy-weighted TOPSIS method indicated that 20 accessions, including Nos 189, 184, and 66, are suitable for use as high-quality parental lines. [Conclusion] The non-heading Chinese cabbage resources assessed possess significant genetic variation. Fourteen primary traits, including plant height, leaf length, petiole length, leaf width, heart filling degree, plant type, stem clasping, leaf tip shape, petiole width, petiole thickness, central core longitudinal diameter, leaf number, and petiole cross-sectional shape, were identified as the main traits underlying phenotypic differences in this crop.

Keywords: Non-heading Chinese cabbage, Genetic diversity, Correlation analysis, Principal component analysis, Cluster analysis, Entropy weight-TOPSIS

不结球白菜(*Brassica campestris* L.)属于十字花科芸薹属,是一年生或二年生草本植物,原产于中国,栽培历史悠久。在长江中下游地区以其鲜嫩、风味独特、营养丰富等特点深受人们喜爱。不结球白菜全国栽培面积约为140万hm^2(2100万亩),已成为我国第三大蔬菜作物,年产值1600亿元(人民币,下同)以上[1],在蔬菜的生产和供应方面占有重要的市场地位[2-3]。随着人们生活水平的不断提高,对不结球白菜的产量和品质也提出了更高的要求。因此,培育高产优质的不结球白菜品种已成为当前育种工作的核心目标。通过系统地收集和保存不结球白菜的种质资源,进行遗传多样性研究和鉴定,对促进育种进展和品种创新具有至关重要的意义。

目前表型性状是作物育种和生物学研究的起点和最终落脚点,开展表型性状调查并利用表型数据进行遗传多样性分析是大白菜种质资源高效利用的有效途径,该方法在玉米[4]、萝卜[5]、辣椒[6]、甜瓜[7]等多种作物上均有报道。国内外研究主要集中在品种的评价与鉴定方面,涵盖了遗传多样性、耐热性、表型特征以及分子标记等多个方面的分析。在不结球白菜遗传多样性分析中韩建明[8]最早对125份不结球白菜进行遗传多样性分析,通过变异性分析、主成分分析、聚类分析发现普通白菜和其它种类之间存在亲缘关系。何晓丽等[9]则通过多次田间调查和遗传多样性分析,对54份不结球白菜种质资源进行了全面评估,发现所收集的种质资源在质量性状和数量性状方面具有丰富的多样性和差异性。范伟强等[10]对天津地区的33个大白菜品种进行的表型多样性分析,结果显示大白菜品种间的变异性在短缩茎高方面最为显著,而叶球横径差异较小。并且通过主成分分析和聚类分析将样本分为6个组群,为大白菜新品种的推广和更新提供了参考依据。胡海娇等[11]通过对48份不结球白菜种质资源分别进行了田间表型鉴定和遗传多样性分析,研究发现多个数量性状存在显著的变异,不同种质资源可以通过系统聚类分为不同的类群,这些研究为不结球白菜的品种改良和资源利用提供了重要的数据支持。在耐热材料分析中余长春等[12]通过遗传多样性分析了自交不亲和系材料,并通过高温环境测定热害试验,发现不结球白菜(编号C72)热害指数最低,表明该材料具有较强的高温耐受性。另外Miao等[13]利用单核苷酸多态性分子标记技术,分析不同中国白菜品种的遗传多样性。Chand等[14]研究印度芥菜的遗传成分和多样性,基于不同的形态生理性状进行分析,利用统计学方法和遗传标记技术,评估不同品种之间的遗传变异和多样性,探讨其与形态和生理性状的关系。

本试验收集了47个地区的共196份不结球白菜种质资源,对196份不结球白菜进行表型遗传多样性分析、相关性分析、主成分分析、聚类分析和熵权-TOPSIS综合评价,旨在为不结球白菜育种质资源优异表型性状的发掘及其在育种上的高效应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为实验室前期从47个地区收集的196份种质,由山西农业大学园艺学院蔬菜所提供,信息见附表1。主要类型有:菘菜、快菜、长梗白菜、青梗菜、奶白菜(图1)。

1.2 试验方法

试验地点位于山西省晋中市榆次区东阳镇山西农业大学试验基地(37.82°N,112.87°E)。2023年9月1日,于温于温室大棚进行穴盘育苗,每个材料育苗60株。田间试验设计3次重复,每份材料种植15株,2023年9月20日定植到田间。采用



菘菜	快菜	长梗白菜	青梗菜	奶白菜
Brassica campestris var	Chinese cabbage for seedlings	Long stemmed cabbage	Brassi carapassp. chinensis	Shanghai Baby Pak Choi

图1　不结球白菜材料类型

Fig.1　Different types of non-heading cabbage materials

完全随机区组设计,小区种植面积为3 m^2。每份材料种植15株;种植模式为平畦覆膜栽培,膜上定植,每畦定植双行,株行距15 cm×15 cm,小区的四周设置保护行。在生长期统一进行栽培管理,防治病虫害。

2023年秋季进行田间鉴定,统一调查中心柱纵径、株型、束腰、株高、菜心充实度、叶片形状、叶片尖端形状、叶片叶缘波状、叶面泡状程度、叶片边缘状态、叶片颜色、叶面光泽度、叶脉鲜明度、叶数量、叶长、叶柄长、叶宽、叶柄宽、叶柄厚、叶柄颜色和叶柄横切面形状共21个表型性状(表1和表2)。根据GB/T19557.5—2017《植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南大白菜》和《不结球白菜种质资源描述规范和数据标准》[15]采集表型数据,每个材料随机调查5株,取平均值进行数据统计分析。

1.3　数据统计与分析

应用Excel 2016对源数据进行统计与整理。应用SPSS 26.0软件对21个性状进行香农多样性指数($h=-\sum[(pi)\times In(pi)]$)、变异系数计算,相关性分析、主成分分析和系统聚类分析;利用Origin 2021绘图软件绘制了相关性和系统聚类分析热图。最后利用熵权-TOPSIS综合评价模型对196份不结球白菜种质进行综合评分排序。

2　结果与分析

2.1　196份不结球白菜种质资源主要表型性状多样性分析

在196份不结球白菜种质资源中,21个表型性状呈现出明显的差异,变异系数介于13.96%至50.78%,表明变异性丰富(表3)。中心柱纵径的变异系数最大,为50.78%,变异为2.00~30.00 cm;其余性状的变异系数依次降低,中柱纵径50.78%>菜心充实度46.20%>叶柄长44.83%>叶柄厚40.04%>叶面泡状程度36.13%>叶柄颜色34.26%>株高34.01%>束腰31.15%>叶宽30.86%>叶长30.24%>叶片形状29.53%>叶柄宽27.67%>叶片颜色26.73%>叶片叶缘波状21.99%>叶片尖端形状21.21%>叶面光泽度20.88%>叶数量19.99%>叶片边缘状态18.49%>叶柄横切面形状17.29%>叶脉鲜明度13.96%>株型11.96%。结果表明:21个表型性状变异系数均大于10%,意味着这196份不结球白菜在中柱纵径,叶片数,株高等方面差异性较大,具有丰富的遗传多样性,有利于种质资源的筛选和比较。

2.2　相关性分析

通过不结球白菜种质资源相关性分析(图2)可知,在21个表型性状指标中,不结球白菜的中柱

表1 不结球白菜质量性状记载标准

Table 1 Recording standards for quality traits of non-heading cabbage

质量性状 Quality traits	记载标准 Recording standard
株型 Tree form	收获期,直立=1;半直立=2;塌地=3
束腰 Girdling	收获期,无=1;弱=2;中=3;强=4
菜心充实度 Richness of cabbage heart	收获期,松=1;中=2;紧=3
叶片形状 Blade shape	收获期,披针=1;卵圆=2;窄椭圆=3;椭圆=4;阔椭圆=5;近圆=6
叶片尖端形状 Blade tip shape	收获期,锐尖=1;钝尖=2;圆=3;阔圆=4
叶片叶缘波状 Blade edge wavy	收获期,无或极弱=1;弱=2;中=3;强=4
叶面泡状程度 Leaf surface bubble degree	收获期,无或极弱=1;弱=2;中=3;强=4
叶片边缘状态 Blade edge state	收获期,内卷=1;平展=2;外卷=3
叶片颜色 Leaf color	收获期,黄绿=1;浅绿=2;中等绿=3;深绿=4;墨绿=5;紫红色=6;紫色=7
叶面光泽度 Foliar gloss	收获期,无=1;弱=2;强=3
叶脉鲜明度 Leaf vein vividness	收获期,不明显=1;明显=2
横切面形状 Cross section shape	收获期,近圆=1;月牙=2;扁平=3
叶柄颜色 Petiole color	收获期,白色=1;绿白色=2;浅绿色=3;中等绿色=4

表2 不结球白菜数量性状记载标准

Table 2 Recording standards for the quantitative traits of non-heading cabbage

数量性状 Quantitative traits	记载标准 Recording standard
中柱纵径 Middle column longitudinal longitude	在收获期,将叶球纵剖,测量短缩茎基部到顶点的距离,单位:cm
株高 Plant height	在收获期,测量地面至植株最高处,单位:cm
叶数量 Leaf vein vividness	在收获期,调查叶片的数量,不包括已脱落叶
叶长 Leaf length	在收获期,测量外叶最长处,单位:cm
叶柄长 Petiole length	在收获期,测量外叶叶片基部到茎的附着点之间的距离,单位:cm
叶宽 Blade width	在收获期,测量外叶叶片中部或最宽处的横向距离,垂直于叶脉方向,单位:cm
叶柄宽 Petiole width	在收获期,测量外叶中段或略微靠近叶片基部的部位,垂直于叶柄的伸长方向,单位:cm
叶柄厚 Petiole thickness	在收获期,外叶叶柄在垂直于宽度方向的纵向直径,测量中肋最厚处,单位:cm

纵径与株型、叶数量、叶柄颜色、叶柄横切面形状呈正相关,与株高、叶面光泽度、叶长、叶柄长和叶宽呈负相关;束腰与菜心充实度、叶数量、叶柄颜色呈显著正相关,与株高、叶片性状、叶柄长和叶宽呈负相关;株高与叶长、叶宽、叶柄长和叶柄厚显著正相关,与叶片边缘状态、叶片颜色和叶柄颜色呈负相关;叶片形状与叶宽、叶面光泽、叶面颜色和叶片尖端形状呈正相关,与叶数量、叶长和叶柄长呈负相关;叶数量与株型、叶柄颜色、中柱纵径和菜心充实度呈正相关,与叶片形状和叶片尖端形状呈负相关;叶柄颜色与中柱,株型,束腰呈显著正相关,与叶面泡状程度、叶宽、叶片叶缘波状、叶片形状呈负相关;叶长与株高、叶柄长、叶宽呈正相关,与叶柄颜色、叶片颜色,束腰呈负相关。分析后发现表型性状指标间相关性显著,关联系数较强,指标信息间存在重叠,更有利于优良不结球白菜种质筛选。

2.3 196份不结球白菜种质资源主要表型性状指标的主成分分析

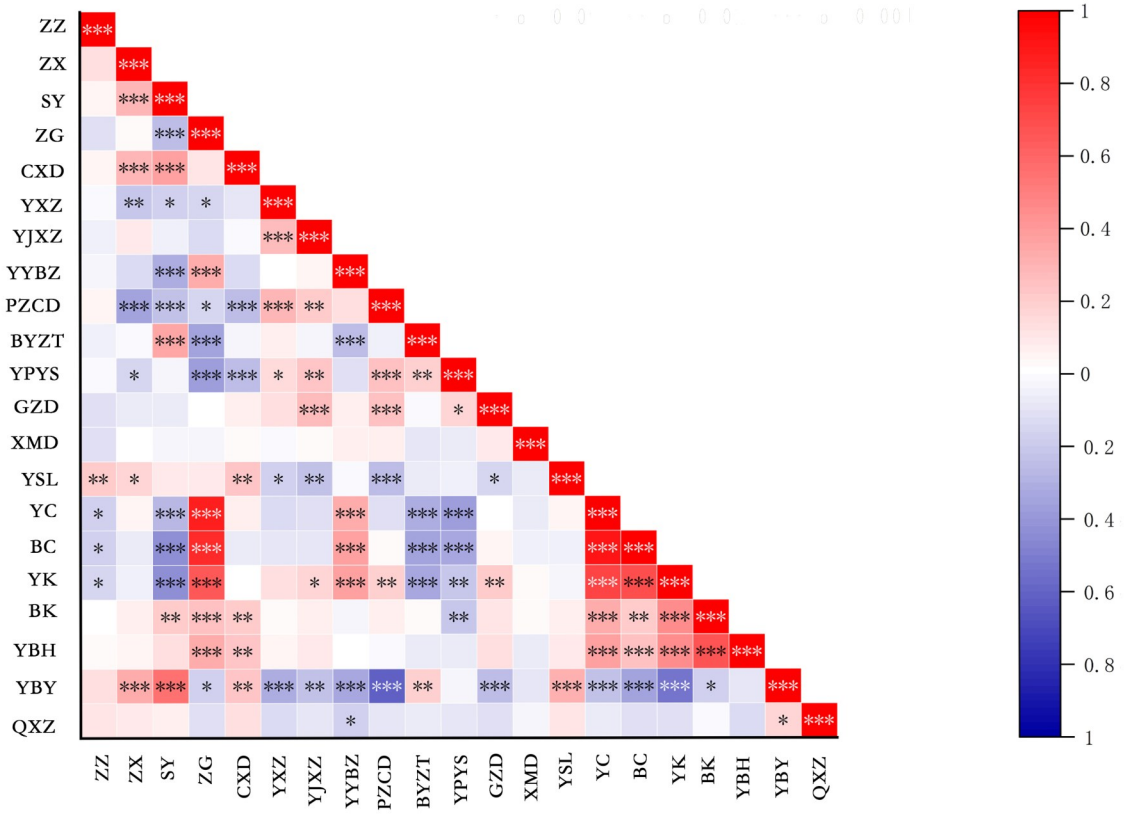
如表4所示,前5个主成分的贡献率为:5.71%、8.48%、9.19%、14.54%和21.29%对应的特征值为1.26、1.87、2.02、3.20和4.68。这些值均大于1,说明它们涵盖了主要的表型性状信息。因此,选取前5个主成分进行分析是合理且可靠的。第1主成分的特征值为4.68,贡献率为21.29%,以株高、叶长、叶柄长和叶宽,为主要性状。第2主成分的特征值为3.20,贡献率为14.54,以菜心充实度、株形和束腰为主要性状,说明第2主成分反映的是不结球白菜的株型和商品性信息。第3主成分的特征值为2.02,贡献率为9.19%,以束腰、叶片尖端形状、叶柄宽和叶柄厚为主要性状。第4主成分的特征值为1.87,贡献率为8.48%,以中柱纵径、叶数量和叶柄横切面形状为主要性状。说明第4主成分

表3　21个表型性状指标多样性分析

Table 3　Diversity analysis of 21 agronomic trait indicators

性状 Characters	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient	最小值 Minimum	平均数 Average	最大值 Maximum	多样性指数 Diversity index
中柱纵径/cm Middle column longitudinal longitude	7.07	3.59	50.78	2.00	6.00	30.00	5.17
株形 Tree form	1.94	0.23	11.96	1.00	2.00	2.00	5.27
束腰 Girdling	3.18	0.99	31.16	1.00	3.00	3.00	5.22
株高/cm Plant height	19.29	6.56	34.01	8.00	18.00	50.00	5.23
菜心充实度 Richness of cabbage heart	2.73	1.26	46.20	1.00	2.00	4.00	5.16
叶片形状 Blade shape	4.17	1.23	29.54	1.00	4.00	6.00	5.23
叶片尖端形状 Blade tip shape	3.14	0.67	21.22	2.00	3.00	4.00	5.26
叶片叶缘波状 Blade edge wavy	1.06	0.23	21.99	1.00	1.00	2.00	5.26
叶面泡状程度 Leaf surface bubble degree	1.33	0.75	36.13	1.00	1.00	4.00	5.16
叶片边缘状态 Blade edge state	2.78	0.52	18.50	1.00	3.00	3.00	5.26
叶片颜色 Leaf color	3.74	1.00	26.74	2.00	3.00	5.00	5.24
叶面光泽度 Foliar gloss	2.42	0.50	20.89	1.00	2.00	3.00	5.26
叶脉鲜明度 Leaf vein vividness	1.92	0.27	13.96	1.00	2.00	2.00	5.27
叶数量 Leaf vein vividness	15.01	3.00	20.00	9.00	15.00	23.00	5.26
叶长/cm Leaf length	19.90	6.02	30.24	9.50	19.00	44.00	5.25
叶柄长/cm Petiole length	8.87	3.98	44.84	3.00	8.00	26.00	5.19
叶宽/cm Blade width	11.55	3.57	30.86	5.50	11.00	24.50	5.23
叶柄宽/cm Petiole width	3.81	1.05	27.68	1.50	4.00	8.20	5.24
叶柄厚/cm Petiole thickness	0.71	0.28	40.04	0.20	0.70	1.70	5.20
叶柄颜色 Petiole color	3.62	1.24	34.26	1.00	4.00	5.00	5.21
横切面形状 Cross section shape	2.71	0.47	17.29	1.00	3.00	3.00	5.26

反映的是植株的耐抽薹信息。第5主成分的特征值为1.26,贡献率为5.71%,以株型、叶脉鲜明度和叶面光泽度为主要性状。



ZZ:中柱纵径;ZX:株型;SY:束腰;ZG:株高;CXD:菜心充实度;YXZ:叶片形状;YJXZ:叶片尖端形状;YYBZ:叶片叶缘波状;PZCD:叶片泡状程度;BYZT:叶片边缘状态;YPYS:叶片颜色;GZD:叶片光泽度;XMD:叶片鲜明度;YSL:叶数量;YC:叶长;BC:柄长;YK:叶宽;BK:柄宽;YBH:叶柄厚;YBY:叶柄颜色;QXZ:横切面形状。*表示$P<0.05$;**表示$P<0.05$;***表示$P<0.001$

ZZ:Stem longitudinal diameter;ZX:Plant type;SY:Stem constriction;ZG:Plant height;CXD:Core compactness;YXZ:Leaf shape;YJXZ:Leaf apex shape;YYBZ:Leaf margin waviness;PZCD:Leaf blistering intensity;BYZT:Leaf margin condition;YPYS:Leaf color;GZD:Leaf glossiness;XMD:Leaf distinctiveness;YSL:Number of leaves;YC:Leaf length;BC:Petiole length;YK:Leaf width;BK:Petiole width;YBH:Petiole thickness;YBY:Petiole color;QXZ:Cross-sectional shape. *indicated significant difference at $P<0.05$ level;**indicated significant difference at $P<0.01$ level;***indicated significant difference at $P<0.001$ level

图2 不结球白菜主要表型性状的相关性分析结果

Fig.2 Analysis results of the correlation of main phenotypic traits of non-heading cabbage

表4 主成分分析的21个性状各因子得分值

Table 4 Scores of each factor of 21 traits in principal component analysis

项目 Items	成分 Ingredients				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
中柱纵经 Middle column longitudinal longitude	−0.09	0.08	−0.02	0.12	0.48
株形 Tree form	−0.06	0.27	0.14	0.00	−0.24
束腰 Girdling	−0.24	0.22	0.35	0.02	−0.08
株高 Plant height	0.37	0.21	−0.05	−0.11	−0.01
菜心充实度 Richness of cabbage heart	−0.02	0.29	0.24	0.16	−0.19
叶片形状 Blade shape	0.03	−0.28	0.11	0.18	0.13

续表

项目 Items	成分 Ingredients				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
叶片尖端形状 Blade tip shape	0.03	−0.21	0.21	0.24	−0.23
叶片叶缘波状 Blade edge wavy	0.23	−0.08	−0.14	−0.13	−0.02
叶面泡状程度 Leaf surface bubble degree	0.09	−0.37	0.01	0.24	0.14
叶片边缘状态 Blade edge state	−0.20	−0.06	0.25	−0.07	0.08
叶片颜色 Leaf color	−0.14	−0.28	0.06	0.04	0.18
叶面光泽度 Foliar gloss	0.08	−0.17	0.21	0.21	−0.27
叶脉鲜明度 Leaf vein vividness	0.02	−0.06	0.00	0.04	−0.55
叶数量 Leaf vein vividness	−0.04	0.27	−0.01	−0.03	0.32
叶长 Leaf length	0.40	0.20	−0.04	−0.06	0.00
叶柄长 Petiole length	0.41	0.10	−0.12	−0.08	0.00
叶宽 Blade width	0.41	0.00	0.06	0.15	0.01
叶柄宽 Petiole width	0.17	0.15	0.40	0.29	0.14
叶柄厚 Petiole thickness	0.20	0.14	0.41	0.19	0.23
叶柄颜色 Petiole color	−0.27	0.32	0.06	−0.19	−0.01
横切面形状 Cross section shape	−0.11	0.20	−0.36	0.52	−0.03
特征值 Eigenvalue	4.68	3.20	2.02	1.87	1.26
贡献率/% Contribution rate	21.29%	14.54%	9.19%	8.48%	5.71%
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	21.29%	35.83%	45.01%	53.49%	59.20%

2.4　不结球白菜主要性状聚类分析

通过观察表型,发现中柱纵径值越高说明材料越容易抽薹,属于不耐寒材料。中柱值越低说明材料不易抽薹,属于耐寒材料。另外我们发现叶片数量和植株高度和产量是相关的,叶片数量越大和株高越高,说明产量可能越大。

对196份不结球白菜种质资源的21个性状进行聚类分析,在欧氏距离0.98处将其分为5个组群(图3),计算各类群性状的平均值(表5)。第1组群包括13份不结球白菜种质,该类种质平均中柱纵径9.2 cm,为各类群最高,株高19.7 cm、叶数量16.84、叶长20.84 cm、叶柄长8.76 cm、叶宽11.21 cm、叶柄宽3.8 cm、叶柄厚0.79 cm。特征为具有较高的中柱纵径9.2 cm,耐抽薹性差,不适合耐抽薹材料的选育。第2组群包括24份不结球白菜种质,该类种质平均中柱纵径6.77 cm、株高14.08 cm、叶数量11.91、叶长15.5 cm、叶柄长7.58 cm、叶宽12.15 cm、叶柄宽3.69 cm、叶柄厚

0.65 cm。中柱纵径为6.77 cm,特征为株高较小,菜心充实度低,适用于耐热矮棵青梗菜的选育。第3组群包括30份不结球白菜种质,该类种质平均中柱纵径5.6 cm,株高29.7 cm、叶数量14.9、叶长29.41 cm、叶柄长15.90 cm、叶宽17.48 cm、叶柄宽3.88 cm、叶柄厚0.77 cm。特征为中柱纵径最小,株型大,植株高,叶面积大,耐抽薹性较好,产量高,适合用于大棵耐抽薹材料的选育。第4组群包括37份不结球白菜种质,该类种质平均中柱纵径6.19 cm、株高20.85 cm、叶数量16、叶长20.79 cm、叶柄长9.26 cm、叶宽11.47 cm、叶柄宽4.83 cm、叶柄厚0.92 cm。特征为中柱纵径6.19 cm,植株高度为20.85 cm,束腰性强、菜心充实度高、商品性好,可用于耐热型青梗菜的选育。第5组群包括92份不结球白菜种质,该类种质平均中心柱纵径7.5 cm、株高16.5 cm、叶数量15.1、叶长16.96 cm、叶柄长6.8 cm、叶宽9.41 cm、叶柄宽3.3 cm、叶柄厚0.55 cm。特征为叶宽和叶柄宽为最小,其它性状处于中等。

2.5 196份不结球白菜基于熵权-TOPSIS法的不结球白菜综合评价

通过对不结球白菜21个表型性状指标的筛选,发现15个性状指标可以从多方面进行熵权-TOPSIS综合评价,这15个性状指标均与选育目标相关,能够较好反应该资源的综合性质,如表6所示。不结球白菜各表型性状信息熵和权重成反比,在15个性状中,菜心充实度的信息熵最小(0.93),权重最大(0.15),说明该指标离散程度较大,对材料综合评价影响较大,叶柄长信息熵最大(0.99),权重最小(0.01),对材料综合评价影响较小。

通过对196不结球白菜份材料的中柱纵径、株型、束腰,株高等15个主要表型性状进行综合评估,筛选出了排名前20的材料数据见表7和附图1,其中代号189、184、66为综合评价前三名(表8)。

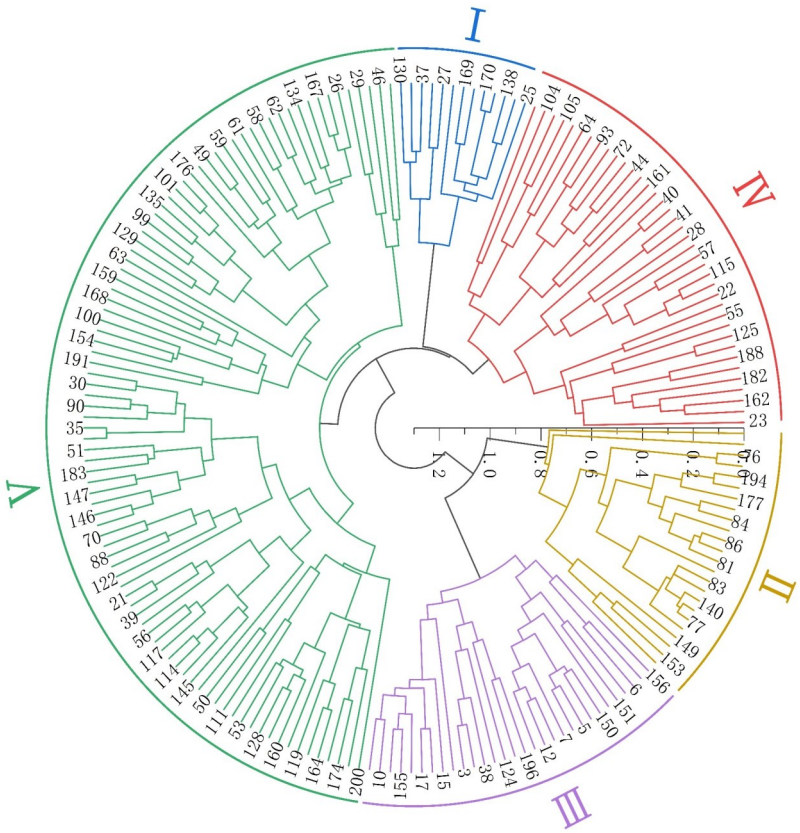


图3 196份大白菜种质资源聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of 196 Chinese cabbage germplasm resources

表5　聚类平均值

Table 5　Cluster averages

性状 Characters	第1聚类 First cluster	第2聚类 Second cluster	第3聚类 Third cluster	第4聚类 Fourth cluster	第5聚类 Fifth cluster
中柱纵径/cm Middle column longitudinal longitude	9.23	6.77	5.67	6.19	7.56
株形 Tree form	2.00	1.71	1.90	2.00	1.99
束腰 Girdling	3.38	2.58	1.63	3.85	3.51
株高/cm Plant height	19.77	14.08	29.77	20.85	16.51
菜心充实度 Richness of cabbage heart	2.77	1.71	2.47	2.97	2.97
叶片形状 Blade shape	3.92	5.42	4.10	4.00	3.98
叶片尖端形状 Blade tip shape	2.92	3.67	3.17	2.97	3.10
叶片叶缘波状 Blade edge wavy	1.00	1.08	1.30	1.00	1.00
叶面泡状程度 Leaf surface bubble degree	1.00	2.88	1.37	1.09	1.03
叶片边缘状态 Blade edge state	3.00	2.96	2.17	2.88	2.86
叶片颜色 Leaf color	3.77	4.75	3.20	3.44	3.78
叶面光泽度 Foliar gloss	2.23	2.75	2.53	2.32	2.35
叶脉鲜明度 Leaf vein vividness	1.00	1.96	1.97	2.00	1.99
叶数量 Leaf vein vividness	16.85	11.92	14.90	16.15	15.05
叶长/cm Leaf length	20.85	15.50	29.42	21.79	16.97
叶柄长/cm Petiole length	8.77	7.58	15.91	9.26	6.80
叶宽/cm Blade width	11.22	12.15	17.48	11.48	9.41
叶柄宽/cm Petiole width	3.85	3.69	3.88	4.84	3.35
叶柄厚 Petiole thickness	0.79	0.65	0.77	0.92	0.59
叶柄颜色 Petiole color	4.15	1.63	2.40	3.91	4.34
横切面形状 Cross section shape	2.77	2.63	2.60	2.53	2.82

3　讨论

种质资源是自然界中非常宝贵的材料和基因库,在优质种质发掘、优异性状和基因利用方面发挥重要作用,是新品种选育的基础[16]。

表6 不结球白菜各表型性状信息熵及权重

Table 6 Information entropy and weights of various phenotypic traits in non-heading Chinese cabbage

性状 Characters	信息熵 Information entropy	指标权重 Metric weights
中柱纵径 Middle column longitudinal longitude	0.96	0.09
株型 Plant type	0.99	0.02
束腰 Girdling	0.97	0.06
株高 Plant height	0.97	0.06
菜心充实度 Richness of cabbage heart	0.93	0.15
叶片形状 Blade shape	0.98	0.04
叶片先端形状 Blade tip shape	0.96	0.10
叶片颜色 Leaf color	0.97	0.07
叶脉鲜明度 Leaf vein vividness	0.98	0.04
叶数量 Number of leaves	0.99	0.03
叶长 Leaf length	0.97	0.07
叶柄长 Petiole length	0.99	0.01
叶宽 Blade width	0.97	0.07
叶柄宽 Petiole width	0.98	0.05
叶柄厚 Petiole thickness	0.97	0.06

变异系数和遗传多样性指数是种质资源多样性分析的常用参数和指标。变异系数越高,说明性状的离散程度越大,个体之间的差异越明显[17]。研究表明变异系数大于20%,可说明不同样本的多样性丰富[18]。本研究分析发现,中柱纵径、菜心充实度和叶柄长度变异较大,变异数较高。根据中柱总径的数值变异分析,表明在耐抽薹方面不同材料差距较大。菜心充实度和叶柄长度也有较大的变异系数,表明在产量和商品性方面也具有较大的变化。结合中柱纵径等变异数据,推测可能是植物抽薹以后,叶柄长度也有变化。中柱纵径变异性分析与肖艳等[19]、韩睿等[20]研究结果一致。本研究中遗传指数最大的是株型,与韩睿等[19]研究结果不一致,原因可能为材料和气候不同导致植物表型差异。

表7 排序前20不结球白菜综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of the top 20 non-heading Chinese cabbage in sorting

代号 Code	DI+	DI−	CI	排序结果 Sort the results
189	0.01	0.04	0.76	1
184	0.01	0.04	0.75	2
66	0.02	0.04	0.73	3
103	0.02	0.04	0.70	4
185	0.02	0.04	0.69	5
70	0.02	0.04	0.67	6
109	0.02	0.04	0.65	7
73	0.02	0.04	0.65	8
115	0.02	0.03	0.63	9
171	0.02	0.04	0.63	10
24	0.03	0.05	0.62	11
90	0.02	0.03	0.62	12
50	0.02	0.04	0.61	13
57	0.02	0.04	0.61	14
146	0.02	0.04	0.61	15
116	0.02	0.03	0.61	16
27	0.03	0.04	0.61	17
123	0.02	0.04	0.60	18
160	0.02	0.04	0.60	19
186	0.02	0.03	0.59	20

相关性分析和主成分分析是表型性状分析中常用的2种方法,用于评估2个或多个变量之间的关系强度和方向,能够将多个复杂的原始指标转化为几个互不相关且具有代表性的综合指标,通过提取主要因子,从而更加客观地筛选出优良种质[21]。本研究从21个表型性状中选取5个主成分,贡献率最高为21.29%,累计贡献率为59.20%,株高、叶长、叶柄长、束腰、中柱纵径、株型、叶数量等指标占据主要优势。这5个主成分基本能够说明原始指标的大部分信息,可作为不结球白菜的表型综合指标。研究发现不结球白菜的中柱纵径与株型、叶数量、叶柄颜色、横切面形状和菜心充实度呈极显著正相关,与株高、叶面光泽度、叶长、叶柄长和叶宽呈负相关。这与余阳俊等[22]研究结果一致。

熵权-TOPSIS综合评价和聚类分析是一种客

表8　前3名表型性状数据

Table 8　Data on the phenotypic traits of the top three

性状 Characters	代号 Code name		
	189	184	66
中柱纵径/cm Middle column longitudinal longitude	7.00	7.00	14.00
株型 Plant type	2	2	2
束腰 Girdling	4	4	4
株高/cm Plant height	19.00	19.00	18.00
菜心充实度 Richness of cabbage heart	4	4	4
叶片形状 Blade shape	5	5	5
叶片先端形状 Blade tip shape	4	4	3
叶片颜色 Leaf color	3	3	3
叶脉鲜明度 Leaf vein vividness	2	2	1
叶数量 Number of leaves	15.00	14.00	12.00
叶长/cm Leaf length	20.00	16.00	20.00
叶柄长/cm Petiole length	7.50	6.00	8.00
叶宽/cm Blade width	13.00	9.50	11.00
叶柄宽/cm Petiole width	3.50	3.00	5.00
叶柄厚/cm Petiole thickness	0.60	0.80	0.70

观赋权方法,常用于多指标评价问题中,以确定各指标的权重。该方法基于信息熵的原理,利用数据的离散程度来确定指标的权重[23-24]。TOPSIS法的核心思想是通过比较各个备选方案与理想解的接近程度来进行排序,其中理想解是所有指标中的最佳值集合,负理想解是所有指标中的最差值集合[25-26]。余忠浩等[27]采用TOPSIS法对109个大豆品种进行了分析,从中筛选出7个表现优异的品种,为大豆品种选育提供了科学依据。王文迪等[28]采用TOPSIS法对9份大豆进行了分析,对大豆进行了综合评价和排序,发现了通辽地区大豆选育的优良亲本。本研究采用熵权-TOPSIS综合评价法,对196份不结球白菜进行综合排序,筛选出20个优异材料。结合聚类分析在欧氏距离0.98时将196份材料分为了5个组群,第1组群叶片数最多,中柱纵径最大,说明此类材料不耐抽薹,不耐寒。第2组群类株高和叶柄较小,适用于耐热材料型矮棵青梗菜的选育。第3组群特征为中柱纵径短,但株型大,叶片大,耐抽薹性较好,产量高,适合用于大棵耐抽薹材料的选育。第4组群特征为中柱纵径适中,此类材料抽薹后,植株高度为20.85 cm,束腰性强,商品性好,可用于耐热型青梗菜的选育。第5组群叶宽和叶柄宽为最小,其他性状处于中等。

不结球白菜的表型鉴定在农业育种、品质提升、抗性研究等多个领域具有重要的指导意义,为改良不结球白菜的栽培和生产提供了科学依据。目前,本研究只针对表型性状进行分析,下一步可结合分子标记和基因编辑技术进行更深层次的分析。

4　结论

本研究通过遗传多样性分析、相关性分析、主成分分析、聚类分析和利用15个农艺性状进行了熵权-TOPSIS综合评价,对196份不结球白菜的21个表型性状进行多角度分析。由结果可知,所选不结球白菜材料遗传差异大,变异丰富。通过熵权-TOPSIS筛选出20个优质材料。

附加材料:附表1(试验材料编号及来源)、附图1(排序前20材料图片)见中国知网增强出版内容。

参　考　文　献

[1]侯喜林, 张昌伟, 李英,等. 江苏小白菜产业链关键技术的创新与应用[J]. 长江蔬菜, 2022, (24): 18-21.
Hou X L, Zhang C W, Li Y,et al. Innovation and application of key technologies in Jiangsu cabbage industry chain [J]. Changjiang Vegetables, 20, (24): 18-21.

[2]Piao Z Y, Ramchiary N, Lim Y P. Genetics of clubroot resistance in *Brassica* species [J]. Journal of Plant Growth Regulation,2009,28(3):252-264.

[3]Song X M, Li Y, Liu T K, et al. Genes associated with agronomic traits in non-heading Chinese cabbage identified by expression profiling[J]. BMC Plant Biology,2014,14:71.

[4]董永军. 玉米自交系表型性状调查与遗传多样性分析[D].

太原:山西大学,2018.
Dong Y J. Investigation on phenotypic traits and genetic diversity analysis of maize inbred lines[D]. Taiyuan: Shanxi University,2018.

[5]李亚东,罗小波,彭潇,等. 萝卜SNP和InDel分子标记开发及与表型性状关联分析[J]. 浙江农业学报,2024,36(5):1055-1066.
Li Y D, Luo X B, Peng X, et al. Development of SNP and InDel markers in radish and their association with phenotypic characters[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(5): 1055-1066.

[6]王雪艳,谢利芬,张婷,等. 鲜辣型辣椒品种筛选及相关性分析[J]. 浙江农业学报,2024,36(11):2490-2500.
Wang X Y, Xie L F, Zhang T, et al. Selection of delicious and spicy chili pepper varieties and correlation analysis[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(11): 2490-2500.

[7]迟翔丹,赵艳菲,王薇,等. 甜瓜种质资源遗传多样性分析与评价[J]. 中国瓜菜,2024,37(12):19-28.
Chi X D, Zhao Y F, Wang W, et al. Analysis and evaluation of genetic diversity of melon germplasm resources[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2024, 37(12): 19-28.

[8]韩建明,侯喜林,徐海明,等. 不结球白菜种质资源形态性状多样性分析[J]. 生物数学学报,2010,25(1):137-146.
Han J M, Hou X L, Xu H M, et al. Morphological diversity of non-heading Chinese cabbage (*Brassica* campestris ssp. chinensis Makino) germplasm[J]. Journal of Biomathematics, 2010, 25(1): 137-146.

[9]何晓丽,杨丹青,杜志杰,等. 不结球白菜形态性状及SSR遗传多样性关联分析[J]. 分子植物育种,2021,19(6):1919-1927.
He X L, Yang D Q, Du Z J, et al. Association analysis of morphological traits and SSR genetic diversity in non-heading Chinese cabbage[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(6): 1919-1927.

[10]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.
Fan W Q, Yin J, Wang C N, et al. Phenotypic genetic diversity evaluation of 33 Chinese cabbage varieties[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(10): 32-38.

[11]胡海娇,汪精磊,胡天华,等. 浙江省不结球白菜种质资源表型多样性分析[J]. 分子植物育种,2020,18(18):6187-6196.
Hu H J, Wang J L, Hu T H, et al. Phenotypic diversity analysis of non-heading Chinese cabbage germplasm resources in Zhejiang Province[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(18): 6187-6196.

[12]余长春,罗本钒,傅强,等. 不结球白菜遗传多样性分析以及耐热性鉴定[J]. 华中农业大学学报,2021,40(6):119-125.
Yu C C, Luo B F, Fu Q, et al. Genetic diversity and identification of heat tolerance of non-heading Chinese cabbages[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(6): 119-125.

[13]Miao L M, Xi D, Li X, Zhang C, et al. Genetic diversity analysis of non-heading chinese cabbage of resistance to clubroot disease based on SNP molecular markers [J]. Agronomy, 2023, 13(1): 245-245.

[14]Chand P S, Debnath S, Rahimi M, et al. Genetic variability, correlation, diversity, path coefficients and principal component analysis in Indian mustard [J]. International Journal of Computational Biology and Drug Design, 2023, 15(6): 445-46.

[15]李锡香, 沈镝. 不结球白菜种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2008.
Li X X, Shen Z. Specification and Data Standards for Description of Non heading Cabbage Germplasm Resources [M].Beijing: China Agricultural Press, 2008.

[16]胡齐赞,乔舒婷,董文其,等. 浙江地方芥菜种质资源表型鉴定及遗传多样性分析[J]. 分子植物育种,2021,21(4):1339-1354.
Hu Q Z, Qiao S T, Dong W Q, et al. Phenotype identification and genetic diversity analysis of mustard local germplasm resources in Zhejiang[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 21(4): 1339-1354.

[17]程晓欣,闫晋强,翟许玲,等. 葫芦科作物遗传多样性研究进展[J]. 中国瓜菜,2024,37(5):1-11.
Cheng X X, Yan J Q, Zhai X L, et al. Research progress on genetic diversity in Cucurbitaceae crops[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2024, 37(5): 1-11.

[18]赵彩霞,白玛央珍,杨广环,等. 不同类型油菜资源农艺性状鉴定及聚类分析[J]. 作物杂志,2025(5):120-127.
Zhao C X, Bai M Y Z, Yang G H, et al. Identification and cluster analysis of agronomic characters of different types of rapeseed resources[J]. Crops, 2025:(5):120-127.

[19]肖艳, 张倩倩, 原让花, 等. 基于主成分分析和聚类分析的大白菜耐抽薹种质资源评价[J]. 中国瓜菜, 20, 36(5):37-4.
Xiao Y, Zhang Q Q, Yuan R H, et al. Evaluation of bolting tolerant germplasm resources of Chinese cabbage based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Chinese Cucurbits and Vegetables, 20, 36(5):37-4.

[20]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.
Han R, Zhao M L, Sun S Y, et al. Genetic diversity of 47 Chinese cabbage varieties [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(5): 707-716.

[21]王丹丹,师建华,李燕,等. 基于主成分与聚类分析的辣椒主要农艺性状评价[J]. 中国瓜菜,2021,34(2): 47-53.
Wang D D, Shi J H, Li Y, et al. Evaluation of main agronomic traits of pepper based on principal component and cluster analysis [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(2): 47-53.

[22]余阳俊,陈广,刘琪. 大白菜晚抽薹性及其与开花叶片数的关系[J]. 北京农业科学,1996(3):32-34.
Yu Y J, Chen G, Liu Q. Late bolting of Chinese cabbage and its relationship with the number of flowering leaves [J]. Beijing Agricultural Sciences, 1996(3): 32-34.

[23]刘彦岑, 郭俊先, 郭阳, 等. 基于熵权-TOPSIS的哈密瓜田间水肥耦合评价[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 141-147.

Liu Y C, Guo J X, Guo Y, et al. Evaluation of water and fertilizer coupling in Hami melon field based on entropy weight-TOPSIS[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 141-147.

[24]高伟城, 王小平, 陈荣珠, 等. 基于化学模式识别和熵权TOPSIS法的不同品种枇杷叶品质分析研究[J]. 甘肃中医药大学学报, 2023, 40(5): 33-39.
Gao W C, Wang X P, Chen R Z, et al. Quality analysis of folia eriobotryae of different varieties based on chemical pattern recognition and entropy weight TOPSIS method [J]. Gansu University of Chinese Medicine, 2023, 40(5): 33-39.

[25]李远方, 侯军英, 杨永霞, 等. 基于MOPSO和TOPSIS的多目标优化温室黄瓜光环境调控模型[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 185-194.
Li Y F, Hou J Y, Yang Y X, et al. Multi-objective optimization of the light environment regulation model for greenhouse cucumber using MOPSO and TOPSIS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(19): 185-194.

[26]营毅, 周金星, 万龙, 等. 基于TOPSIS方法的喀斯特断陷盆地区番茄地下灌溉技术节水效益综合评价[J]. 节水灌溉, 2022, 26(2): 89-94.
Jian Y, Zhou J X, Wang L, et al. Comprehensive evaluation of water-saving benefits of subsurface irrigation technology for tomato planting in the karst faulted basin based on TOPSIS method[J]. Water-saving Irrigation, 2022, 26(2): 89-94.

[27]余忠浩,周伟,李志刚,等. 2002—2021年内蒙古自治区大豆主要性状变化分析及综合评价[J]. 中国农学通报,2022,38(34):14-21.
Yu Z H, Zhou W, Li Z G, et al. Analysis and comprehensive evaluation of main traits of soybean in Inner Mongolia from 2002 to 2021[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(34):14-21.

[28]王文迪,张智勇,刘晓芳,等. 基于熵权TOPSIS法的大豆种质资源综合评价[J]. 安徽农学通报,2024,30(18):20-23.
Wang W D, Zhang Z Y, Liu X F, et al. Comprehensive evaluation of soybean germplasm resources based on entropy weight TOPSIS method [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2024, 30(18):20-23.

(编辑:吕俊俐)