



带状间作模式不同耐荫强度转基因大豆筛选及农艺性状评价

杨晓芳¹, 庞佳莹², 孟凡钢³, 饶德民³, 于德彬³, 王弼琨³, 王晓慧^{3*}, 张伟³

(1. 吉林农业大学 农学院, 吉林 长春 130118; 2. 吉林省农作物新品种引育中心, 吉林 长春 130062; 3. 吉林省农业科学院 大豆研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为分析不同米豆带状间作模式下转基因大豆品系的耐荫特性, 筛选适宜带状间作模式种植的转基因大豆品系, 本研究以生产上试种面积大、产量表现好的 17 个转基因大豆品系的 10 个成熟期农艺性状为研究对象。设置大田玉米和大豆种植比例分别为 2:2 和 4:4 两种带状间作模式, 在成熟期测定不同转基因大豆品系的耐荫相关农艺性状, 通过主成分、聚类与逐步回归等多元分析方法, 对不同转基因大豆品系进行耐荫性评价。结果表明: 荫蔽胁迫对大豆分枝数影响最大, 其变异系数达到 73.88%; 对节数、平衡点和株高影响较小, 变异系数分别为 10.91%、10.50% 和 9.98%。单性状相关分析发现, 底荚高度与荚数之间呈极显著负相关, 与茎重和荚重之间呈显著负相关; 节数与株高之间呈极显著正相关。主成分分析提取到 4 个主成分, 累计贡献率为 80.42%。采用隶属函数法计算各转基因大豆品系成熟期的综合耐荫性评价价值 D 值, 根据 D 值大小利用系统聚类分析的方法将 17 个大豆品系分为 3 类, 分别是: 强耐荫型, 包含 5 个大豆品系; 中等耐荫型, 包含 3 个大豆品系; 弱耐荫型, 包含 9 个大豆品系。中联豆 3051 的耐荫性最强, 中联豆 1343 的耐荫性最弱。对 D 值进行逐步回归分析得出耐荫性评价模型为 $D = -0.541 - 1.601X_1 + 0.882X_9 + 1.423X_5 + 0.674X_{10} + 0.368X_4$ 。通过模型可知, 底荚高度、荚重、节数、产量和茎粗可以作为玉米-大豆带状间作模式下的大豆耐荫性评价指标。

关键词: 带状间作; 耐荫强度; 转基因大豆品系; 主成分分析; 隶属函数法

Screening of Transgenic Soybean with Different Shade Tolerance Intensities and Evaluation of Agronomic Traits under Strip Intercropping Systems

YANG Xiaofang¹, PANG Jiaying², MENG Fangang³, RAO Demin³, YU Debin³, WANG Bikun³, WANG Xiaohui^{3*}, ZHANG Wei³

(1. College of Agriculture, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin, China; 2. Jilin Province New Variety Breeding Center, Changchun 130062, Jilin, China; 3. Soybean Research institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, Jilin, China)

Abstract: In order to analyze the shade tolerance characteristics of transgenic soybean lines under different corn-soybean strip intercropping systems and screen transgenic soybean lines suitable for strip intercropping patterns, we studied 10 agronomic traits of 17 transgenic soybean lines with large trial planting areas and good yield performance. We set up two strip intercropping patterns with a field corn and soybean planting ratio of 2:2 and 4:4. The shade tolerance-related agronomic traits of different transgenic soybean lines were measured at maturity. The shade tolerance of different transgenic soybean lines was evaluated by multivariate analysis such as principal component, cluster and stepwise regression. The results showed that shade stress had the greatest effect on the number of soybean branches, with a coefficient of variation of 73.88%; it had a smaller effect on the number of nodes, balance point and plant height, with coefficients of variation of 10.91%, 10.50% and 9.98% respectively. Through single-trait correlation analysis, it was found that the bottom pod height was significantly negatively correlated with the number of pods, and significantly negatively correlated with the stem weight and pod weight; the number of nodes was significantly positively correlated with plant height. The principal component analysis extracted 4 principal components, with a cumulative contribution rate of 80.42%. The membership function method was used to calculate the comprehensive shade tolerance evaluation value (D) of each transgenic soybean line at maturity. According to the D value, the 17 soybean lines were divided into 3 categories using the system cluster analysis method, namely strong shade tolerance type, including 5 soybean lines; medium shade tolerance type, including 3 soybean lines; and weak shade tolerance type, including 9 soybean lines. Zhongliandou 3051 had the strongest shade tolerance, while Zhongliandou 1343 had the weakest. The soybean lines with strong shade tolerance were Zhongliandou 3051, Zhongliandou 3048, Zhongliandou 3047, Zhongliandou 1349 and Zhongliandou 3050. The stepwise regression analysis of the D value showed that the shade tolerance evaluation model was $D = -0.541 - 1.601X_1 + 0.882X_9 + 1.423X_5 + 0.674X_{10} + 0.368X_4$, and through this model, it was found that bottom pod height, pod weight, number of nodes, yield and stem diameter can be used as evaluation indicators for soybean shade tolerance in the corn-soybean strip intercropping systems.

Keywords: strip intercropping; shade tolerance characteristics; transgenic soybean lines; principal component analysis; membership function method

收稿日期: 2025-08-02

基金项目: 吉林省自然科学基金面上项目(20240101241JC)。

第一作者: 杨晓芳, 女, 硕士研究生, 主要从事作物栽培生理研究。E-mail: 2633978146@qq.com。

通讯作者: 王晓慧, 女, 博士, 研究员, 主要从事大豆栽培生理研究。E-mail: nongdawxh@126.com。

大豆是世界上最重要的粮油兼用作物,也是人类优质蛋白的主要来源^[1]。我国作为世界第一大豆进口国,近年来,大豆常年进口约9 000万t。目前,国产大豆产量始终处于较低水平,提高大豆产能和自给率迫在眉睫。大豆-玉米带状间作种植技术是提高大豆自给率的有效方法之一,在2020、2022和2023年均被写入中央一号文件重点推广,《“十四五”全国种植业发展规划》明确2025年大豆玉米带状复合种植推广至5 000万亩。然而,传统大豆品种难以适应带状复合种植中除草难和抗性差的问题。转基因大豆通过定向基因编辑技术,转入抗除草剂和抗性基因,提高了大豆的抗性产量^[2]。在农业农村部公布的转基因大豆初审品种中,中联豆1341、1342、1343等品系凭借其生育期短、株型紧凑、强抗倒伏性与高耐荫性等综合农艺优势,展现出显著的推广潜力。大豆-玉米带状间作模式借玉米边行优势扩大了大豆的受光,在保证玉米产量的基础上,增加大豆产量^[3]。此模式中,大豆在开花结荚期受到玉米的荫蔽作用,光照不足,且影响大豆灌浆,导致产量较低^[4]。因此,筛选耐荫性强的品种是提高带状间作大豆产量的重要途径。许多学者在复合种植模式下对不同大豆品种的耐荫特性进行研究。赵志鑫等^[5]对25个春大豆品种进行遮荫胁迫,鉴定出6份强耐荫大豆材料,筛选出株高、底荚高度、单株粒数和平均节间长度4个指标作为黄淮海耐荫春大豆鉴定指标。汤复跃等^[6]通过遮光处理36份大豆材料,选取底荚高度、主茎节数、单株荚数、每荚粒数4个指标,用于鉴定广西复合种植大豆耐荫性。王艳丽等^[3]通过室内和大田两种模式对59个大豆品种的苗期和成熟期耐荫性进行评价,将其分为强耐荫型、中度耐荫型和弱耐荫型,并筛选出6份在苗期和成熟期耐荫性一致、抗倒性好且产量较高的材料。

虽然前人已就大豆-玉米带状间作模式下大豆耐荫性开展系列研究,但对转基因大豆品系耐荫性研究还鲜见报道。吉林省2023年开始小面积示范转基因大豆玉米品种,解决了米豆复合种植的除草难题,推动了我省米豆带状间作产业的快速发展,急需耐荫性强的转基因大豆品种。因此,本研究对转基因大豆品系的耐荫性进行鉴定和分类,以期选育适宜米豆带状间作的耐荫转基因大豆品种提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2023年5—10月进行,试验地点为吉林省农业科学院公主岭试验基地(43°30'N,124°48'E),此区域为温带大陆性季风气候类型。年平均气温5.6℃,年降水量450~650mm,无霜期125~140d,有效积温2 600~3 000℃,年日照时数2 500~2 700h。试验地耕作层土壤基本理化性质为:有机质、水溶性氮、有效磷和钾的含量分别为27.53 g·kg⁻¹、123.41、31.25和152.23 mg·kg⁻¹,土壤pH5.5,土壤类型为黑土。

1.2 材料

试验选用17个抗除草剂转基因大豆品系,这些品系生育期短、抗倒伏性强、株高中等、耐荫性好,在生产上试种面积大、产量表现优异,适合当地米豆带状间作种植,由吉林省农业科学院大豆研究所提供(表1)。

间作作物为抗草甘膦除草剂的转基因玉米品种登海605D,购买于中国种子集团有限公司。大豆和玉米同时于2023年5月7日播种,大豆的收获日期为2023年9月23日,玉米的收获日期为2023年9月30日。

表1 转基因大豆品系编号及名称

Table 1 Number and name of transgenic soybean strains

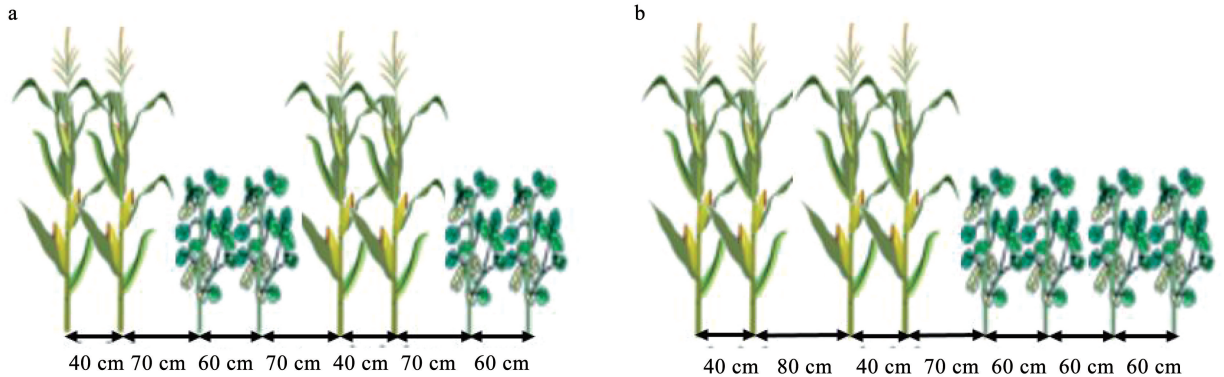
编号 Number	品系 Line	编号 Number	品系 Line
1	中联豆 1341	10	中联豆 1537
2	中联豆 1342	11	中联豆 1538
3	中联豆 1343	12	中联豆 1901
4	中联豆 1344	13	中联豆 3047
5	中联豆 1345	14	中联豆 3048
6	中联豆 1346	15	中联豆 3050
7	中联豆 1347	16	中联豆 3051
8	中联豆 1348	17	中联豆 3052
9	中联豆 1349		

1.3 试验设计

试验采取二因素裂区试验设计。主区为间作模式,分别为2:2(2行玉米:2行大豆)和4:4(4行玉米:4行大豆);副区为17个抗草甘膦的转基因大豆品系,3次重复。玉米宽窄行种植,宽行距80cm,窄行距40cm,玉米种植株距为18cm,每穴1株,种

植密度为 $9.2 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。大豆均匀垄种植,垄距 60 cm ,株距 8.3 cm ,种植密度为 $20 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$,带间距离 70 cm ,行长 10 m (图 1)。大豆带施入氮磷钾复合肥(N:P:K = 15:15:15) $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米带施入氮磷钾复合肥(N:P:K = 26:11:13) $1\ 335$

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,播种时一次性施入。玉米和大豆 3 叶期喷施 41% 的草甘膦异丙铵盐水剂进行田间茎叶除草,大豆和玉米的病虫害防治与当地植保措施同步进行,其他栽培管理措施均按照当地相关高产栽培要求实施。



注:a. 2 行玉米:2 行大豆;b. 4 行玉米:4 行大豆。

Note: a. 2 rows corn to 2 rows soybean; b. 4 rows corn to 4 rows soybean.

图 1 不同间作模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different intercropping modes

1.4 测定项目及方法

1.4.1 农艺性状 大豆成熟期(R8),每小区取中间连续的 10 株有代表性且长势一致的植株,将其带回实验室,按照《大豆种质资源描述规范和数据标准》^[7],测定底荚高度、平衡点、株高、茎粗、主茎节数、单株荚数和有效分枝数,待植株风干至恒重时,分别测定主茎干重和单株荚重。

1.4.2 产量测定 大豆成熟期(R8),在每个小区的 2:2 和 4:4 带型中,分别收割 5 m^2 未取样的完整带内所有大豆植株,脱粒测产,并按 13% 水分折算产量。

1.5 数据分析

以 Excel 2019 整理分析数据,用 SPSS Statistics 25.0 进行主成分、聚类与逐步回归等多元分析。

为便于统计与建模量化分析,对原始数据进行标准化处理,按统一尺度转换数据,实现量纲统一,公式为:相对值 = 2:2 模式处理性状值 / 4:4 模式处理性状值。

根据李春红等^[8]的方法计算不同转基因大豆品种综合指标隶属函数值 $u(X_a)$ 、权重 W_a 及转基因大豆品种综合耐荫评价价值 D 值,计算方法如下。

各综合指标的隶属函数值: $u(X_a) = (X_a - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

各综合指标权重: $W_a = P_a / \sum_{a=1}^n P_a$ 。

各大豆品种的综合耐荫评价价值: $D =$

$$\sum_{a=1}^n [u(X_a) \times W_a]$$

式中: X_a 为参试转基因大豆品系第 a 综合指标, X_{\max} 为综合指标最大值, X_{\min} 为最小值; W_a 是 a 指标权重, P_a 为种质资源 a 指标贡献率; D 值为大豆品种综合指标耐荫评价结果。

2 结果与分析

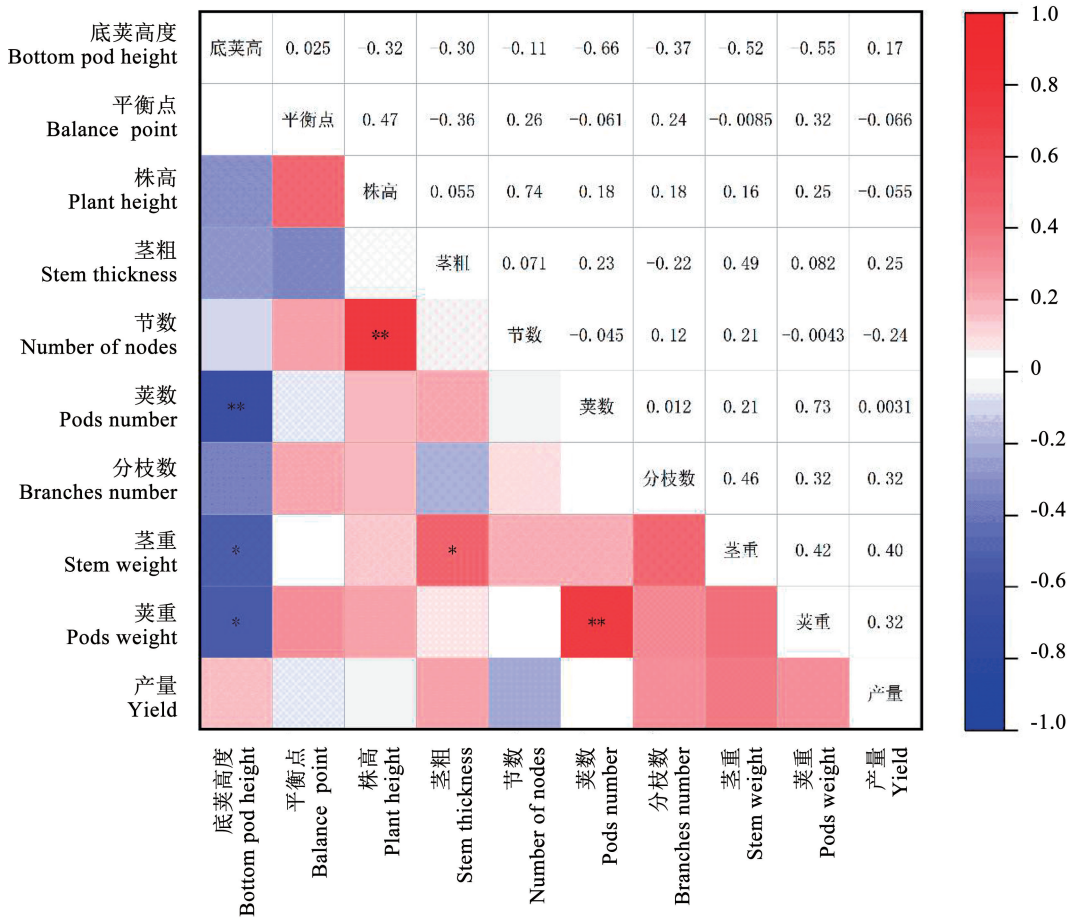
2.1 单性状指标的耐荫系数及其相关分析

各单性状指标的耐荫系数(STC)如表 2 所示: 荫蔽胁迫对大豆分枝数影响最大,其变异系数达到 73.88%;其次对荚重、茎重、茎粗、产量、单株荚数和底荚高度影响也较大,变异系数分别为 20.70%、20.32%、17.04%、17.70%、16.47% 和 16.01%;对节数、平衡点和株高影响较小,变异系数分别为 10.91%、10.50% 和 9.98%。与 4:4 处理相比,受荫蔽胁迫后,底荚高度、平衡点、株高、主茎节数和分枝数各性状均值较大,其余性状均值小于 4:4 处理。

由图 2 可知,底荚高度与荚数之间呈极显著负相关,与茎重和荚重之间呈显著负相关;节数与株高之间呈极显著正相关。因此,为剔除不同指标信息的重叠,可对信息进行降维整合。

表2 不同转基因大豆品系各性状指标的耐荫系数
Table 2 Shade tolerance coefficient of different transgenic soybean lines for each trait

品系 Line	底荚高度 Bottom pod height	平衡点 Balance point	株高 Plant height	茎粗 Stem thickness	节数 Number of nodes	荚数 Pods number	分枝数 Branches number	茎重 Stem weight	荚重 Pods weight	产量 Yield
中联豆 1341 Zhongliandou 1341	1.16	0.98	0.95	1.14	0.99	0.66	1.27	0.95	0.76	0.73
中联豆 1342 Zhongliandou 1342	1.30	0.85	1.11	1.23	1.14	0.71	0.00	0.88	0.44	0.83
中联豆 1343 Zhongliandou 1343	1.15	0.89	0.89	0.89	0.87	0.78	1.29	0.70	0.73	0.70
中联豆 1344 Zhongliandou 1344	1.21	1.18	1.22	0.61	1.22	0.81	2.17	0.74	0.91	0.68
中联豆 1345 Zhongliandou 1345	1.01	1.10	1.08	1.03	1.03	0.89	0.61	0.85	0.80	0.55
中联豆 1346 Zhongliandou 1346	0.98	0.89	0.95	0.80	0.92	0.94	0.33	0.67	0.71	0.47
中联豆 1347 Zhongliandou 1347	1.04	1.04	1.07	0.69	1.05	0.76	2.92	0.79	0.66	0.67
中联豆 1348 Zhongliandou 1348	1.13	0.89	0.89	0.90	0.86	0.81	0.55	0.69	0.75	0.78
中联豆 1349 Zhongliandou 1349	0.90	1.14	1.10	1.11	0.99	1.10	0.85	0.88	1.03	0.69
中联豆 1537 Zhongliandou 1537	1.14	1.17	1.12	0.80	0.87	0.67	1.00	0.71	0.65	0.71
中联豆 1538 Zhongliandou 1538	0.94	1.08	1.02	1.00	0.98	0.88	1.36	1.06	0.97	0.80
中联豆 1901 Zhongliandou 1901	1.36	1.10	0.99	0.83	0.91	0.77	0.88	0.91	0.96	0.97
中联豆 3047 Zhongliandou 3047	0.84	1.02	1.16	1.05	0.98	0.83	3.75	1.08	0.95	0.92
中联豆 3048 Zhongliandou 3048	0.79	0.86	1.13	1.08	0.99	1.09	0.93	1.10	1.07	0.80
中联豆 3050 Zhongliandou 3050	0.86	1.08	1.26	1.03	1.25	0.78	0.88	0.98	0.83	0.54
中联豆 3051 Zhongliandou 3051	0.80	1.02	1.03	1.03	1.02	0.97	3.33	1.36	0.99	0.84
中联豆 3052 Zhongliandou 3052	1.12	1.00	0.94	0.89	0.99	0.60	1.50	1.12	0.59	0.65
均值 Average	1.04	1.02	1.05	0.95	1.00	0.83	1.39	0.91	0.81	0.72
标准差 STDEV	0.17	0.11	0.11	0.16	0.11	0.14	1.03	0.18	0.17	0.12
变异系数 CV/%	16.01	10.50	9.98	17.04	10.91	16.47	73.88	20.32	20.70	17.70



注: * 和 ** 分别表示在 $P \leq 0.05$ 和 $P \leq 0.01$ 水平上差异显著。

Note: * and ** indicated significant differences at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$ levels, respectively.

图2 各性状耐荫系数的相关系数热力图

Fig. 2 Heat map of the correlation coefficient of shade tolerance coefficient for each trait

2.2 耐荫性综合评价

2.2.1 主成分分析 如表3所示,主成分分析提取到4个主成分,贡献率分别为31.329%、20.413%、15.033%和13.645%。4个主成分累计贡献率为80.421%,包含了原始数据80.421%的信息,所以选前4个指标进行耐荫性评价即可。每个特征值对应1个主成分,它表示该主成分所解释的方差量。特征值越大,说明该主成分越重要,因为它能解释更多的数据变异。由底荚高度、荚数和荚重构成的F1的特征值最大为3.133,并携带了31.329%信息;由株高和节数构成的F2的特征值为2.0413,携带了20.413%信息;由分枝数、茎重、产量构成的F3的特征值为1.503,携带了15.033%信息;由平衡点和茎粗

构成的F4的特征值为1.365,携带了13.645%信息。

2.2.2 隶属函数分析 基于主成分因子得分F1~F4进行隶属函数分析,计算各因子的隶属函数值 $U(F1) \sim U(F4)$,并据此对17个转基因大豆品种的耐荫性进行排序(表4)。根据各综合指标权重,计算得到各品种耐荫性综合评价值 D 。相同综合指标下,隶属函数值越大表明耐荫性越强,如中联豆3048的 $U(F1)$ 为1.000,表明中联豆3048在第一个综合指标评价下耐荫性最强,中联豆3050在第二个综合指标评价下耐荫性最强,中联豆3051在第三个综合指标评价下耐荫性最强及中联豆1342在第四个综合指标评价下耐荫性最强。

表3 各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 3 The eigenvectors and contribution rates of the principal components of each trait

项目 Item	主成分 Principal factors				
	F1	F2	F3	F4	
特征值 Eigenvalues	3.133	2.041	1.503	1.365	
贡献率 Contribution ratio/%	31.329	20.413	15.033	13.645	
累计贡献率 Cumulative contribution ratio/%	31.329	51.742	66.776	80.421	
特征向量 Eigenvector	X_1	-0.452	0.082	0.254	0.172
	X_2	0.133	0.489	0.276	-0.187
	X_3	0.301	0.476	-0.153	0.192
	X_4	0.193	-0.357	-0.333	0.469
	X_5	0.183	0.478	-0.234	0.405
	X_6	0.374	-0.183	-0.293	-0.427
	X_7	0.291	0.099	0.515	0.029
	X_8	0.410	-0.184	0.142	0.372
	X_9	0.451	-0.073	0.127	-0.351
	X_{10}	-0.452	0.082	0.254	0.172

注: X_1 -底荚高度; X_2 -平衡点; X_3 -株高; X_4 -茎粗; X_5 -节数; X_6 -荚数; X_7 -分枝数; X_8 -茎重; X_9 -荚重; X_{10} -产量。

Note: X_1 -Bottom pod height; X_2 -Balance point; X_3 -Plant height; X_4 -Stem diameter; X_5 -Number of nodes; X_6 -Number of pods; X_7 -Branches number; X_8 -Stem weight; X_9 -Pod weight; X_{10} -Yield.

表4 各品系的主成分因子得分(Fj)、权重、隶属函数值U(Fj)、综合评价值D及耐荫性综合评价
Table 4 The principal component factor score (Fj), weight, membership function value U(Fj), comprehensive evaluation value D and shade tolerance comprehensive evaluation of different strains

品系 Line	F1	F2	F3	F4	U(F1)	U(F2)	U(F3)	U(F4)	D	综合评价 Comprehensive evaluation
中联豆 3051 Zhongliandou 3051	2.0903	1.4041	1.7746	0.2167	0.9393	0.6067	1.0000	0.6988	1.5392	强耐荫
中联豆 3048 Zhongliandou 3048	2.2362	1.1684	1.0441	0.6663	1.0000	0.5050	0.5364	0.9252	1.4759	强耐荫
中联豆 3047 Zhongliandou 3047	1.6931	1.5263	1.5927	-0.0277	0.7740	0.6595	0.8846	0.5757	1.3400	强耐荫
中联豆 1349 Zhongliandou 1349	1.9816	1.3247	0.8896	-0.0292	0.8941	0.5724	0.4383	0.5749	1.2696	强耐荫
中联豆 3050 Zhongliandou 3050	1.2445	2.3151	0.8827	0.0051	0.5873	1.0000	0.4339	0.5922	1.2383	强耐荫
中联豆 1538 Zhongliandou 1538	1.4710	1.1109	1.1014	-0.0328	0.6815	0.4802	0.5727	0.5731	1.0553	中等耐荫
中联豆 1345 Zhongliandou 1345	1.0551	1.2602	0.6498	-0.0551	0.5084	0.5446	0.2862	0.5619	0.8430	中等耐荫
中联豆 1344 Zhongliandou 1344	0.7352	2.0163	0.8153	-1.1708	0.3753	0.8710	0.3912	0.0000	0.7520	中等耐荫
中联豆 1347 Zhongliandou 1347	0.5507	1.1917	0.8418	-0.6326	0.2985	0.5151	0.4080	0.2711	0.5671	弱耐荫
中联豆 1341 Zhongliandou 1341	0.3885	0.7537	0.8303	0.3296	0.2310	0.3260	0.4007	0.7556	0.5538	弱耐荫
中联豆 1346 Zhongliandou 1346	0.8115	0.2999	0.1989	0.0827	0.4071	0.1301	0.0000	0.6313	0.4435	弱耐荫
中联豆 3052 Zhongliandou 3052	0.1170	0.7828	0.9062	0.0722	0.1180	0.3385	0.4489	0.6260	0.4259	弱耐荫
中联豆 1342 Zhongliandou 1342	-0.1666	1.1846	0.2658	0.8149	0.0000	0.5120	0.0425	1.0000	0.4237	弱耐荫
中联豆 1901 Zhongliandou 1901	0.4901	0.6381	0.7671	-0.5005	0.2733	0.2761	0.3606	0.3376	0.4114	弱耐荫
中联豆 1537 Zhongliandou 1537	0.2046	0.9578	0.5040	-0.7248	0.1545	0.4141	0.1936	0.2246	0.2940	弱耐荫
中联豆 1348 Zhongliandou 1348	0.4234	-0.0015	0.3115	0.1285	0.2456	0.0000	0.0715	0.6544	0.2446	弱耐荫
中联豆 1343 Zhongliandou 1343	0.3514	0.0546	0.4462	0.0528	0.2156	0.0242	0.1570	0.6162	0.2431	弱耐荫
权重 Index weight	0.3896	0.2538	0.1869	0.1697						

注:F1~F4分别为依据隶属函数分析得出的主成分因子得分。U(F1)~U(F4)为各因子的隶属函数值。

Note: F1-F4 are the principal component factor scores obtained based on membership function analysis. U(F1)-U(F4) are the membership function value of each factor.

2.2.3 耐荫性综合评价 聚类分析表明:强耐荫型包含 5 个品种,耐荫性最强的为中联豆 3051, D 值为 1.539 2;中等耐荫型包含 3 个品种;弱耐荫型包含 9 个品种,耐荫性最弱的为中联豆 1343, D 值为 0.243 1。强耐荫品种为中联豆 3051、中联豆 3048、中联豆 3047、中联豆 1349 和中联豆 3050;中等耐荫品种为中联豆 1538、中联豆 1345 和中联豆 1344;弱耐荫品种为中联豆 1347、中联豆 1341、中联豆 1346、中联豆 3052、中联豆 1342、中联豆 1901、中联豆 1537、中联豆 1348 和中联豆 1343(图 3)。

2.3 逐步回归分析及耐荫鉴定指标选择

对 D 值进行逐步回归分析,得出耐荫性评价模型: $D = -0.541 - 1.601X_1 + 0.882X_9 + 1.423X_5 +$

$0.674X_{10} + 0.368X_4$ 。模型显示: $R = 0.989$,调整的 $R^2 = 0.979$,残差的标准差为 0.079 34。其中 R 为复相关系数,是模型的决定系数,表示自变量与因变量之间线性关系的强度和方向。 $R = 0.989$ 表示模型中的自变量解释了因变量变异的 98.9%,说明模型拟合度较好;调整后的 $R^2 = 0.979$ 考虑了模型中自变量的数量,用于比较不同大小模型的拟合优度,进一步确认了模型的有效性和合理性;残差的标准差为 0.079 34,它反映了实际观测值与模型预测值之间差异的程度,较小的值表示预测更精确。0.079 34 是相对较小的值,表明模型预测较为准确。据此可选出底荚高度、荚重、节数、产量和茎粗这 5 个性状指标作为耐荫鉴定指标。

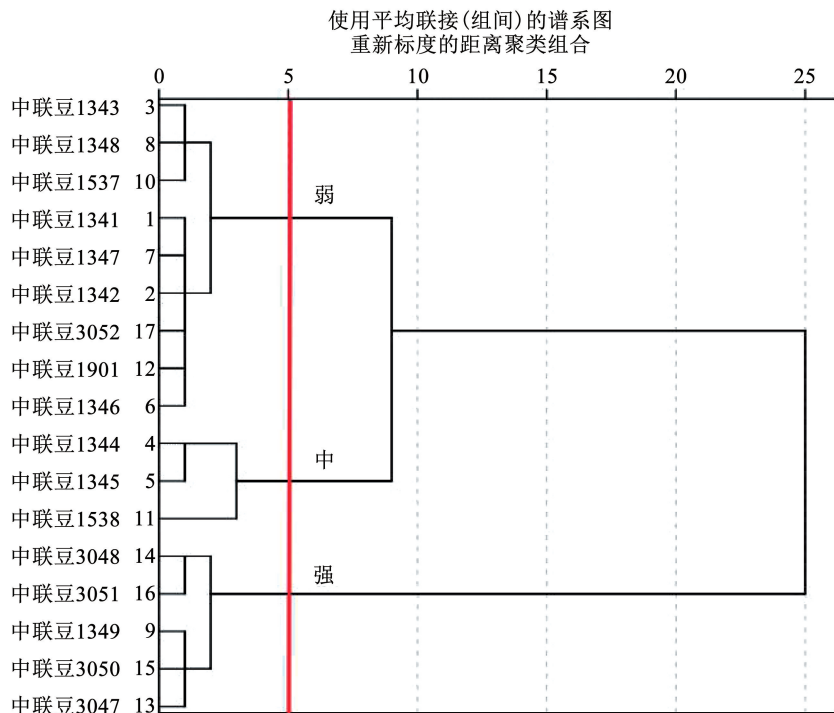


图 3 转基因大豆品系的谱系图

Fig. 3 The pedigree diagram of soybean lines

3 讨论

在玉米-大豆带状间作种植模式的大豆生育中后期时,玉米会对大豆形成遮挡,选择合适的大豆品种与玉米间作,减少大豆减产幅度^[3]。所以筛选耐荫蔽的大豆品种对米豆复合种植的产量及经济效益的提高具有重要意义。前人的研究多以自然光为对照,研究大豆品种的耐荫特性。本研究通过不同带型间作模式下大豆成熟期各性状的相关分析,研究不同转基因大豆品系的耐荫特性,更符合

转基因米豆带状间作的生产实际,可以为不同带型转基因米豆带状间作模式下的耐荫高产转基因大豆品种选育提供参考。

本研究通过主成分分析将具有相关性的 10 个性状指标降维整合为 4 个综合指标。然后借助隶属函数法,对这些综合指标进行量化处理,得出各参试转基因大豆品系的综合耐荫性评分(D 值)。为了进一步细化分类,研究采用了系统聚类分析方法,将 17 份大豆参试材料划分为三大类:5 个强耐荫型转基因大豆品系、3 个中等耐荫型转基因大豆

品系和9个弱耐荫型大豆品系,其中弱耐荫性转基因大豆品系占比最大,达到53%。前人对不同地区大豆品种耐荫性的研究也表明,中等耐荫和弱耐荫大豆品种的数量明显多于强耐荫大豆品种。晏云等^[9]以29个适宜在黄淮海种植的大豆品种为试验材料,将其分为6个强耐荫型大豆品种、22个中等耐荫型大豆品种和1个弱耐荫型大豆品种。孙旭刚等^[10]在东北地区对90份大豆种质资源进行耐荫鉴定,将其分为15个强耐荫型大豆品种、75个中间型和不耐荫型大豆品种。谭春燕等^[11]以30份贵州大豆种质资源为材料,将其分为6个耐荫型大豆品种、15个中间型大豆品种和9个敏感型大豆品种。

陈怀珠等^[12]模拟间套作的荫蔽情况,通过对大豆主要性状的耐荫研究,筛选出7个与荫蔽性相关显著的指标,采用综合方法评定大豆耐荫性。黄其椿等^[13]通过对32个菜用大豆品种设置遮阳网,研究不同遮光胁迫条件对大豆农艺性状的影响,通过产量与各指标的相关关系,筛选出6种耐荫系数高的菜用大豆品种。但陈怀珠等与黄其椿等根据相关性和显著性大小进行耐荫评价,获取的信息较为繁杂,进而影响最终的评价结果。目前,多数学者使用主成分分析、聚类分析及回归分析等进行耐荫性评价,并构建耐荫模型^[14-15]。在构建的耐荫模型中,使 X_1 (底荚高度)的系数绝对值最大,表明底荚高度对大豆耐荫性的影响最为显著, X_4 (茎粗)在本模型中的系数为正值0.368,表明较粗的茎对大豆植株的耐荫系数有正向贡献,这可能意味着在光照不足的环境中,主茎更粗的大豆植株具有更强的生长稳定性和抗逆性,从而表现出较高的耐荫系数^[16]。茎粗的增加提高了大豆植株的机械支撑能力,提高了内部的养分和水分运输效率,有利于大豆在逆境中的生长发育。产量与大豆植株的耐荫系数具有一定的正面联系,但产量性状易受环境影响^[17-18]。本研究筛选出的5个指标,与刘书华等^[19]筛选的5个指标、汤复跃等^[6]筛选的4个指标均有不同程度的重叠,其中底荚高度和产量指标与刘书华等^[19]相同,底荚高度和主茎节数指标与汤复跃等^[6]相同。且在构建的耐荫模型中,底荚高度作为影响评价模型程度最大的单项指标,其余指标可能因为选取试验材料不同,种植地区和选择指标的不同略有差异。本研究筛选出对转基因米豆间作耐荫性评价影响最大的5个性状指标,可作为转基因米豆带状复合种植条件下的大豆耐荫性鉴定指标。

4 结论

本研究按照耐荫性将17个参试大豆试材分类,其中强耐荫型包含中联豆3048、中联豆3051、中联豆1349、中联豆3047和中联豆3050,中等耐荫型包含中联豆1344、中联豆1345和中联豆1538,弱耐荫性包含中联豆1347、中联豆1341、中联豆1346、中联豆1342、中联豆1901、中联豆3052、中联豆1537、中联豆1348和中联豆1343。建立了大豆耐荫性评价数学模型: $D = -0.541 - 1.601X_1 + 0.882X_9 + 1.423X_5 + 0.674X_{10} + 0.368X_4$, $R = 0.989$,调整的 $R^2 = 0.979$,残差的标准差为0.07934。明确了底荚高度、荚重、节数、产量和茎粗等5个性状指标可用于鉴定与评价转基因米豆带状复合种植条件下大豆品系的耐荫性。

参考文献

- [1] WU T, YAO Y, SUN S, et al. Temporospatial characterization of nutritional and bioactive components of soybean cultivars in China [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2016, 93 (12): 1637-1654.
- [2] 孟凡凡, 杨春燕, 王广金, 等. 耐草甘膦除草剂转基因大豆与常规大豆的比较[J]. 大豆科技, 2019(4): 39-43.
MENG F F, YANG C Y, WANG G J, et al. Comparison of glyphosate-tolerant transgenic soybean varieties with conventional soybean varieties[J]. Soybean Science & Technology, 2019(4): 39-43.
- [3] 王艳丽, 王铭晨, 何芳, 等. 不同基因型大豆苗期与成熟期耐荫性探究[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(3): 558-566.
WANG Y L, WANG M C, HE F, et al. Shade tolerance at seedling and maturing stages of soybean with different genotypes [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023, 45 (3): 558-566.
- [4] 黄妙华. 玉米大豆间作品种筛选及田间配置研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
HUANG M H. Corn varieties of soybean intercropping system and configuration of the differences between research field [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [5] 赵志鑫, 傅蒙蒙, 李曙光, 等. 耐荫性春大豆品系筛选及耐荫指标鉴定[J]. 中国农学通报, 2023, 39(33): 25-32.
ZHAO Z X, FU M M, LI S G, et al. Shading-tolerant spring soybean: Genotypes screening and identification of shade tolerance indexes [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39 (33): 25-32.
- [6] 汤复跃, 梁江, 郭小红, 等. 广西间作大豆耐荫性综合评价及鉴定指标筛选[J]. 大豆科学, 2022, 41(6): 645-653.
TANG F Y, LIANG J, GUO X H, et al. Comprehensive evaluation

- and identification index screening of shade tolerance of intercropping soybean in Guangxi[J]. *Soybean Science*, 2022, 41(6): 645-653.
- [7] 邱丽娟,常汝镇,刘章雄,等. 大豆种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社, 2006.
- QIU L J, CHANG R Z, LIU Z X, et al. Soybean germplasm resource description specification and data standard[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006.
- [8] 李春红,姚兴东,鞠宝韬,等. 不同基因型大豆耐荫性分析及其鉴定指标的筛选[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(15): 2927-2939.
- LI C H, YAO X D, JU B T, et al. Analysis of shade-tolerance and determination of shade-tolerance evaluation indicators in different soybean genotypes [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(15): 2927-2939.
- [9] 晏云,李林,亢江飞,等. 黄淮海间作大豆耐荫性综合评价及其鉴定指标筛选[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(23): 88-94.
- YAN Y, LI Lin, KANG J F, et al. Comprehensive evaluation and identification index screening of shade tolerance of intercropping soybean in Huang-Huai-Hai region [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(23): 88-94.
- [10] 孙旭刚,李盛有,曹永强,等. 基于隶属函数值法评价大豆种质资源耐荫性[J]. *辽宁农业科学*, 2021(4): 42-44.
- SUN X G, LI S Y, CAO Y Q, et al. Evaluation of the shade tolerance of soybean germplasm resources based on the membership function value method[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2021(4): 42-44.
- [11] 谭春燕,杨文钰,陈佳琴,等. 山地环境下大豆耐荫种质资源的筛选[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(2): 140-146.
- TAN C Y, YANG W Y, CHEN J Q, et al. Screening of shaded soybean germplasm resources under the mountain environment[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2021, 47(2): 140-146.
- [12] 陈怀珠,孙祖东,杨守臻,等. 荫蔽对大豆主要性状的影响及大豆耐荫性鉴定方法研究初报[J]. *中国油料作物学报*, 2003, 25(4): 78-82.
- CHEN H Z, SUN Z D, YANG S Z, et al. Effect of shading on major characters of soybean and preliminary study on the identification method of soybean shade endurance [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2003, 25(4): 78-82.
- [13] 黄其椿,李初英,赵洪涛,等. 菜用大豆种质资源遮光胁迫下的耐荫性研究[J]. *西南农业学报*, 2012, 25(6): 2212-2217.
- HUANG Q C, LI C Y, ZHAO H T, et al. Research of shade-tolerant on vegetable soybean germplasm resources under shading stress [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(6): 2212-2217.
- [14] 李灿东. 大豆种质资源耐密性评价及鉴定指标筛选[J]. *大豆科学*, 2020, 39(5): 688-695.
- LI C D. Evaluation of density-tolerance in soybean germplasm resources and screening of its identification indexes [J]. *Soybean Science*, 2020, 39(5): 688-695.
- [15] 武晓玲,梁海媛,杨峰,等. 大豆苗期耐荫性综合评价及其鉴定指标的筛选 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(13): 2497-2507.
- WU X L, LIANG H Y, YANG F, et al. Comprehensive evaluation and screening identification indexes of shade tolerance at seedling in soybean [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13): 2497-2507.
- [16] 汪直华,汪娟媚,陈梦,等. 不同荫蔽程度及光照恢复对不同大豆品种光合生理的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2023, 41(5): 765-772.
- WANG Z H, WANG Y M, CHEN M, et al. Effects of different shade degrees and light recovery on photosynthetic physiology of different soybean varieties [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(5): 765-772.
- [17] 孙祖东,张志鹏,蔡昭艳,等. 大豆耐荫性评价体系的建立与中国南方大豆资源耐荫性变异[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(5): 792-801.
- SUN Z D, ZHANG Z P, CAI Z Y, et al. Establishment of an evaluation system of shade tolerance in soybean and its variation in Southern China germplasm population [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(5): 792-801.
- [18] 张礼凤,李伟,王彩洁,等. 山东大豆种质资源形态多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2006, 7(4): 450-454.
- ZHANG L F, LI W, WANG C J, et al. Morphological diversity of soybean germplasm resources in Shandong [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2006, 7(4): 450-454.
- [19] 刘书华,张黎杰,周玲玲,等. 苏北地区适宜玉米-大豆间作的耐荫大豆品种(系)评价及鉴定指标筛选[J]. *北方农业学报*, 2024, 52(2): 15-25.
- LIU S H, ZHANG L J, ZHOU L L, et al. Evaluation and identification index screening of shade-tolerant soybean varieties (lines) suitable for maize-soybean intercropping in northern Jiangsu [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2024, 52(2): 15-25.