



云南低纬高原区与玉米间作的大豆品种耐荫性评价

谢榕洲¹, 崔兴洪², 张亮¹, 刘和湖³, 孙淳皓¹, 韩玉芝², 赵银月^{1*}

(1. 云南省农业科学院 粮食作物研究所, 云南 昆明 650205; 2. 会泽县农业技术推广中心, 云南 会泽 654200; 3. 德宏州农业技术推广中心, 云南 芒市 678400)

摘要:为评价云南地区不同大豆品种和玉米间作条件下的耐荫性,以云南省农业科学院粮食作物研究所选育的13个大豆品种为参试材料,在天然遮荫环境中与玉米带状间作复合种植,选择合适的耐荫鉴定指标,构建大豆耐荫评价模型,系统评价其耐荫性。通过相关性分析、主成分分析等多元分析方法,对11个测定性状指标的耐荫系数进行统计分析,系统评价参试材料的耐荫性和产量。结果表明:运用主成分分析,将各测定指标耐荫系数转化为4个无耦合的综合指标,覆盖了84.442%信息量;运用系统聚类,将13个育成品种按隶属函数分析所得的综合耐荫性评价(D值)分为3类:弱耐荫型(2个品种)、中等耐荫型(8个品种)、强耐荫型(3个品种);进一步运用逐步回归法构建耐荫性评价回归模型: $D = -0.878 + 0.973X_1 + 0.754X_7 - 0.072X_{11} - 0.128X_2$, $R = 0.995$, 调整后 $R^2 = 0.986$, 残差的标准差为0.02056。利用该方程得出,根据株高、单株粒数、倒伏等级、底荚高度这4个指标能有效鉴定云南大豆玉米带状复合种植下的大豆耐荫性。强耐荫品种云黄22、云黄20及中耐荫品种云黄13在间作条件下单株产量较高,适宜用于云南地区(低纬高原)与玉米等作物间作。中耐荫品种云黄17在净作条件下具有较好的产量表现,更合适用于云南省大豆净作生产。

关键词:大豆;耐荫性;主成分分析;隶属函数法;聚类分析;逐步回归

Evaluation of Shade Tolerance of Soybean Intercropping with Maize in Low Latitude Plateau Area of Yunnan Province

XIE Rongzhou¹, CUI Xinghong², ZHANG Liang¹, LIU Hehu³, SUN Chunhao¹, HAN Yuzhi², ZHAO Yinyue^{1*}

(1. Institute of Grain Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, Yunnan, China; 2. Agricultural Technology Extension Center of Huize County, Huize 654200, Yunnan, China; 3. Dehong Agricultural Technology Extension Center, Mangshi 678400, Yunnan, China)

Abstract: To evaluate the shade tolerance of different soybean varieties under the condition of intercropping with maize in Yunnan, 13 soybean varieties bred by the Institute of Food Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences were used as test materials. These soybean varieties were intercropped with maize in a strip intercropping pattern in a natural shading environment. Appropriate shade tolerance identification indicators were selected, a soybean shade tolerance evaluation model was constructed, and their shade tolerance was systematically evaluated. By means of multivariate analysis methods such as correlation analysis and principal component analysis, the shade tolerance coefficients of 11 traits were statistically analyzed, and the shade tolerance and yield of the tested materials were systematically evaluated. The results showed that the shade tolerance coefficients of each index were converted into four uncoupled comprehensive indexes by principal component analysis, which covered 84.442% information. By means of systematic clustering, the comprehensive shade tolerance evaluation (D value) of 13 cultivated varieties were divided into 3 categories: weak shade tolerance type (2 varieties), medium shade tolerance type (8 varieties) and strong shade tolerance type (3 varieties). The regression model for shade tolerance evaluation was further constructed by stepwise regression: $D = -0.878 + 0.973X_1 + 0.754X_7 - 0.072X_{11} - 0.128X_2$, $R = 0.995$, adjusted $R^2 = 0.986$, and standard deviation of residual = 0.02056. According to the equation, plant height, seeds number per plant, lodging grade and bottom pod height can effectively identify the shade tolerance of Yunnan soybean and corn under belt intercropping. It was found that Yunhuang 22, Yunhuang 20 and Yunhuang 13 had higher yield per plant under intercropping conditions, and were suitable for intercropping with maize in Yunnan region (low latitude plateau). The medium shade tolerant variety Yunhuang 17 had better yield performance under net cropping conditions and was more suitable for net cropping of soybean in Yunnan Province.

Keywords: soybean; shade tolerance; principal component analysis; membership function method; cluster analysis; stepwise regression analysis method

大豆是重要的油料和粮食作物,大豆籽粒含有丰富的植物蛋白和油分。中国是大豆消费量最大

的国家^[1],近年来我国对大豆需求量增大,大豆自给率较低,对外依存度较高^[2]。解决这个问题的关

收稿日期:2025-05-20

基金项目:云南省重大科技专项计划“适于与玉米间套种品种的培育及应用”(202502AE090014);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-CES29);云南省油料产业技术体系(2025KJTX005)。

第一作者:谢榕洲,男,硕士,研究实习员,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail:571621907@qq.com。

通讯作者:赵银月,女,硕士,研究员,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail:yinyuezhao25@126.com。

键之一在于扩种大豆,而大豆玉米带状复合种植能有效提高资源利用率和土地当量比,同时,大豆与多种作物间套作形成的“大豆+”模式是云南地区大豆种植的重要方式。因此,建立可靠的大豆耐荫评价体系,筛选耐荫大豆种质,对推进大豆玉米带状复合种植,提高土地资源利用率,优化大豆种植布局,扩大大豆种植面积,平衡作物生产结构、促进农业可持续发展具有深远的意义。

大豆玉米带状复合种植模式中,玉米作为高位作物对大豆产生遮荫作用,形成弱光胁迫,影响大豆的形态和产量^[3-4]。前人研究表明,将大豆遮荫后,会出现主茎伸长、茎秆变细、底荚高度上升、植株易倒伏、单株荚数减少、单株产量和百粒重下降等情况^[5-8]。荫蔽对大豆的株型相关性状、产量构成因子和生理生化过程均产生一定程度影响。遮荫显著降低大豆冠层的光合有效辐射,为增强光捕获能力,大豆叶片中的叶绿素和氮素含量提高,类胡萝卜素和叶绿素 a/b 值下降^[9]。与净作大豆相比,套作大豆的光合速率、气孔导度及蒸腾速率明显降低,最终导致套作大豆干物质积累减少、生物量下降^[10]。耐荫性是评价间作、套作大豆产量、品质及适应性的重要指标^[11]。不同品种大豆对遮荫胁迫响应不同^[12-13],选用对遮荫胁迫不敏感的耐荫大豆品种,在间套作模式下降低高位作物遮荫对其产量和品质造成的不利影响,可以实现高产稳产的目标^[14]。

构建不同地区大豆耐荫评价体系一直是大豆耐荫研究的关键之一。赵银月等^[15]研究表明,大豆玉米间作模式下,云南大豆的耐荫性可用3个株型相关性状(株高、有效节数和有效分枝数)、4个产量相关性状(单株荚数、单株粒数、单株粒重和单荚粒数)及倒伏等级等性状进行综合鉴定;汤复跃等^[16]对36份大豆品种(系)进行耐荫性评价,发现底荚高度、主茎节数、单株荚数和每荚粒数4个性状指标可作为广西地区大豆耐荫鉴定指标。前人研究发现,大豆的耐荫性受到品种、种植制度、气候条件和地形地势等多种因素的影响,较难建立长效准确的耐荫鉴定体系^[15]。随着本地区大豆育种工作不断推进,带状复种模式持续推广,需要不断对云南省近年审定的大豆品种进行耐荫性鉴定,以便及时筛选适合在该地区推广生产的大豆品种。

本研究以云南省农业科学院粮食作物研究所选育的13个大豆品种为参试材料,在大豆玉米带状

间作的自然遮荫条件下开展大豆耐荫性评价,设置净作大豆作为对照,以11个单项指标的耐荫系数为基础,通过主成分分析、隶属函数法、聚类分析等方法对参试材料的耐荫性和产量开展鉴定评价,筛选耐荫性较强的大豆品种,并建立适宜云南地区的耐荫性评价模型,为挖掘云南耐荫大豆种质资源、耐荫性育种及应用奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 材 料

研究于2022—2023年在云南省农业科学院嵩明科研基地(海拔1 890 m,25°17′21″N,103°17′05″E)进行。红壤土,肥力中等。供试玉米品种为云瑞999,13个大豆品种的相关信息详见表1,所有供试品种均为云南省农业科学院粮食作物研究所选育。

表1 供试品种及来源

Table 1 Varieties and sources tested

| 序号 | 品种 | 审定时间 | 审定编号 |
|--------|----------|---------------|-----------------|
| Number | Cultivar | Approval time | Approval number |
| 1 | 滇豆7号 | 2010 | 国审豆2010017 |
| 2 | 云黄12 | 2018 | 滇审大豆2018001号 |
| 3 | 云黄13 | 2018 | 滇审大豆2018002号 |
| 4 | 云黄14 | 2019 | 滇审大豆2019002号 |
| 5 | 云黄15 | 2019 | 滇审大豆2019001号 |
| 6 | 云黄16 | 2020 | 滇审大豆2020003号 |
| 7 | 云黄17 | 2020 | 滇审大豆2020002号 |
| 8 | 云黄18 | 2020 | 滇审大豆2020004号 |
| 9 | 云黄20 | 2021 | 滇审大豆2021002号 |
| 10 | 云黄21 | 2022 | 滇审大豆2022001号 |
| 11 | 云黄22 | 2022 | 滇审大豆2022002号 |
| 12 | 云黄25 | 2023 | 滇审大豆2023002号 |
| 13 | 中品661 | 1999 | 滇引大豆4号 |

1.2 试验设计

设置自然荫蔽遮光条件下大豆玉米间作和自然光条件下净作大豆(对照)2个处理。间作模式为玉米与大豆2:4,复合带宽2.5 m,行长5.0 m,小区面积12.5 m²,玉米行距40 cm,大豆行距30 cm,玉米大豆间距60 cm(图1)。大豆穴距20 cm,单穴2株,折合密度16.6万株·hm⁻²;玉米穴距13.5 cm,单穴1株,折合密度6.0万株·hm⁻²。净种模式,行长5.0 m,行距50 cm,穴距20 cm,每穴留苗2株,每个品种种植10行,折合密度20万株·hm⁻²,小区面积25 m²。分别于2022年5月30日、2023年5月20日播种。田间管理同大田生产。

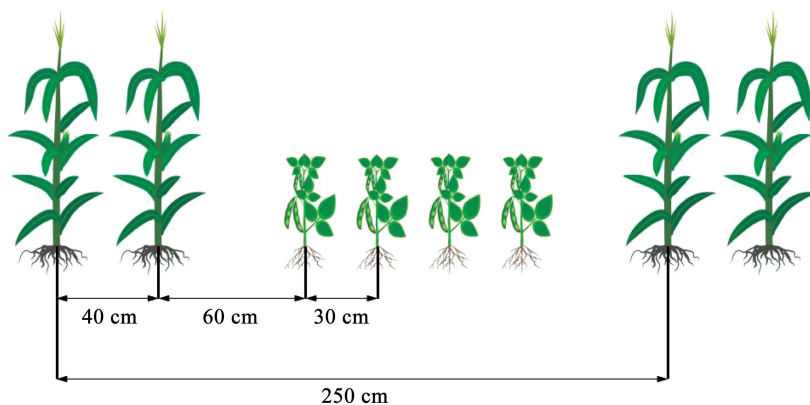


图 1 大豆玉米带状复合种植示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soybean and corn belt composite planting

1.3 方法

成熟期每小区选择长势均匀连续 10 株测量以下性状: 株高 (X_1)、底荚高度 (X_2)、有效节数 (X_3)、有效分枝数 (X_4)、单株荚数 (X_5)、单荚粒数 (X_6)、单株粒数 (X_7)、单株产量 (X_8)、百粒重 (X_9)、单位面积 (666.67 m^2) 产量 (X_{10}) 和倒伏等级 (X_{11})。将 2 年表型数据的平均值作为测定结果。

计算各测定性状指标的耐荫系数 (Shade Tolerance Coefficient, STC), $STC = \text{处理组性状测定值} / \text{对照组性状测定值}$ 。

参试品种综合指标隶属函数: $\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

参试品种综合指标权重: $W_j = P_j \sum_{j=1}^n P_j$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

对各参试品种耐荫性进行综合评价: $D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times W_j]$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。其中, X_j 代表第 j 个综合指标; X_{\min} 表示该指标的最小值; X_{\max} 表示该指标的最大值。 W_j 代表该综合指标在所有综合指标中的权重; P_j 代表主成分分析中各材料该综合指标的贡献率。

1.4 数据分析

使用 Excel 2013 进行数据统计及分析; 运用 SPSS 16.0 软件进行多元分析。

2 结果与分析

2.1 各单项指标的耐荫系数及相关分析

如表 2 所示, 对各性状指标的耐荫系数分析发

现, 倒伏等级、底荚高度和有效分枝数的变异系数较大, 分别为 33.28%、24.31% 和 21.37%, 说明遮荫对大豆的倒伏等级、底荚高度、有效分枝数产生了较大影响; 其次是单株粒数、单株荚数、单株产量、株高和单位面积 (666.67 m^2) 产量, 分别为 18.95%、18.70%、15.81%、14.55% 和 11.03%; 而有效节数、单荚粒数、百粒重的变异系数较小, 分别为 9.85%、9.08% 和 5.66%, 说明其表现较为稳定。与净作 (对照) 相比, 除云黄 13 遮荫后底荚高度下降 ($STC < 1$), 遮荫条件下其他参试大豆品种的株高、底荚高度均上升 ($STC > 1$), 所有参试品种的有效分枝数、单株荚数、单株粒数、单株产量、单位面积 (666.67 m^2) 产量均下降 ($STC < 1$)。大部分性状指标耐荫系数在不同品种间的变化无规律且无法根据各单项指标评价参试材料的耐荫表现, 说明应通过综合指标进一步评价大豆品种耐荫性。

相关性分析显示, 单株产量 (X_8) 与单株荚数 (X_5) 和单株粒数 (X_7) 呈极显著正相关; 单株粒数 (X_7) 与单株荚数 (X_5) 呈极显著正相关, 与有效分枝数 (X_4) 呈显著正相关; 而有效分枝数 (X_4) 与有效节数 (X_3) 呈显著正相关 (表 3)。这些单项性状指标的 STC 信息间具有关联性, 因此难以利用单项性状 STC 对耐荫性评价的贡献率进行描述和评价, 仅通过单项指标 STC 评价大豆品种耐荫性具有明显局限, 应进一步利用多元统计的方法开展鉴定评价, 并通过分析综合指标值消除单一指标带来的偏差, 以更科学地评估大豆品种的耐荫性。

表2 各品种11个性状指标的耐荫系数(STC)

Table 2 Shade tolerance coefficient (STC) of 11 characters indexes of each variety

| 品种名称 Cultivar | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
| 滇豆7号 Diandou 7 | 1.04 | 1.29 | 0.95 | 0.43 | 0.53 | 0.95 | 0.51 | 0.60 | 1.09 | 0.38 | 1.00 |
| 云黄12 Yunhuang 12 | 1.14 | 1.17 | 1.02 | 0.54 | 0.64 | 0.93 | 0.58 | 0.61 | 1.00 | 0.43 | 3.00 |
| 云黄13 Yunhuang 13 | 1.03 | 0.84 | 1.07 | 0.65 | 0.72 | 1.03 | 0.70 | 0.66 | 0.99 | 0.42 | 1.67 |
| 云黄14 Yunhuang 14 | 1.20 | 1.28 | 0.99 | 0.64 | 0.67 | 0.99 | 0.67 | 0.69 | 1.07 | 0.41 | 1.67 |
| 云黄15 Yunhuang 15 | 1.30 | 1.60 | 1.00 | 0.53 | 0.55 | 0.92 | 0.51 | 0.69 | 1.13 | 0.46 | 1.67 |
| 云黄16 Yunhuang 16 | 1.49 | 1.94 | 1.07 | 0.39 | 0.36 | 1.01 | 0.38 | 0.38 | 1.06 | 0.40 | 1.67 |
| 云黄17 Yunhuang 17 | 1.50 | 1.52 | 1.14 | 0.57 | 0.40 | 1.13 | 0.45 | 0.45 | 0.99 | 0.47 | 2.00 |
| 云黄18 Yunhuang 18 | 1.25 | 1.72 | 0.96 | 0.63 | 0.64 | 0.88 | 0.60 | 0.55 | 0.96 | 0.45 | 1.40 |
| 云黄20 Yunhuang 20 | 1.46 | 1.48 | 1.17 | 0.80 | 0.66 | 0.84 | 0.57 | 0.63 | 1.08 | 0.44 | 1.40 |
| 云黄21 Yunhuang 21 | 1.46 | 1.61 | 1.19 | 0.77 | 0.72 | 1.10 | 0.80 | 0.66 | 1.05 | 0.41 | 1.40 |
| 云黄22 Yunhuang 22 | 1.60 | 1.50 | 1.24 | 0.80 | 0.64 | 0.89 | 0.58 | 0.64 | 1.02 | 0.33 | 1.53 |
| 云黄25 Yunhuang 25 | 1.51 | 2.37 | 1.03 | 0.59 | 0.57 | 0.91 | 0.58 | 0.67 | 1.17 | 0.47 | 1.67 |
| 中品661 Zhongpin 661 | 1.20 | 1.51 | 0.89 | 0.53 | 0.62 | 0.90 | 0.68 | 0.69 | 1.06 | 0.52 | 3.00 |
| 平均值 Average | 1.32 | 1.53 | 1.06 | 0.61 | 0.59 | 0.96 | 0.59 | 0.61 | 1.05 | 0.43 | 1.78 |
| 标准差 SD | 0.19 | 0.37 | 0.10 | 0.13 | 0.11 | 0.09 | 0.11 | 0.10 | 0.06 | 0.05 | 0.59 |
| 变异系数 CV/% | 14.55 | 24.31 | 9.85 | 21.37 | 18.70 | 9.08 | 18.95 | 15.81 | 5.66 | 11.03 | 33.28 |

注: X_1 -株高; X_2 -底荚高度; X_3 -有效节数; X_4 -有效分枝数; X_5 -单株荚数; X_6 -单荚粒数; X_7 -单株粒数; X_8 -单株产量; X_9 -百粒重; X_{10} -单位面积(666.67 m²)产量; X_{11} -倒伏等级。

Note: X_1 - Plant height; X_2 - Bottom pod height; X_3 - Number of main stem segments; X_4 - Effective branching number; X_5 - Pods number per plant; X_6 - Number of pods; X_7 - Number of seeds per plant; X_8 - Yield per plant; X_9 - 100-seeds weight; X_{10} - Yield per 666.67 m²; X_{11} - Lodging class.

表3 11个性状指标STC的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of STC of 11 character indexes

| 项目 Item | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} |
|----------|---------|-------|--------|---------|---------|-------|---------|-------|-------|----------|----------|
| X_1 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| X_2 | 0.66 * | 1.00 | | | | | | | | | |
| X_3 | 0.69 ** | 0.01 | 1.00 | | | | | | | | |
| X_4 | 0.38 | -0.14 | 0.68 * | 1.00 | | | | | | | |
| X_5 | -0.31 | -0.42 | 0.08 | 0.69 ** | 1.00 | | | | | | |
| X_6 | 0.07 | -0.17 | 0.27 | -0.11 | -0.28 | 1.00 | | | | | |
| X_7 | -0.26 | -0.30 | 0.02 | 0.58 * | 0.88 ** | 0.05 | 1.00 | | | | |
| X_8 | -0.30 | -0.22 | -0.17 | 0.42 | 0.78 ** | -0.38 | 0.73 ** | 1.00 | | | |
| X_9 | 0.19 | 0.53 | -0.17 | -0.21 | -0.18 | -0.27 | -0.13 | 0.34 | 1.00 | | |
| X_{10} | -0.10 | 0.26 | -0.50 | -0.21 | -0.08 | -0.11 | 0.09 | 0.14 | 0.15 | 1.00 | |
| X_{11} | -0.19 | -0.15 | -0.33 | -0.22 | -0.00 | -0.05 | 0.09 | 0.08 | -0.20 | 0.53 | 1.00 |

注: X_1 -株高; X_2 -底荚高度; X_3 -有效节数; X_4 -有效分枝数; X_5 -单株荚数; X_6 -单荚粒数; X_7 -单株粒数; X_8 -单株产量; X_9 -百粒重; X_{10} -单位面积(666.67 m²)产量; X_{11} -倒伏等级。*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

Note: X_1 - Plant height; X_2 - Bottom pod height; X_3 - Number of main stem segments; X_4 - Effective branching number; X_5 - Pods number per plant; X_6 - Number of pods; X_7 - Number of seeds per plant; X_8 - Yield per plant; X_9 - 100-seeds weight; X_{10} - Yield per 666.67 m²; X_{11} - Lodging class.
* means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$.

2.2 大豆耐荫性的综合分析评价

2.2.1 主成分分析 如表4所示,前4个主成分累计贡献率为84.442%,说明该部分包含了耐荫性鉴定的大部分信息,因此可以选择主成分1~主成分4进行耐荫评价鉴定。主成分1主要是产量构成因子,包括单株荚数(X_5)、单株粒数(X_7)、单株产量(X_8),携带信息为30.672%;主成分2主要由株型

相关性状构成,包括株高(X_1)、有效节数(X_3)、有效分枝数(X_4)构成,携带信息为24.229%;主成分3由底荚高度(X_2)、百粒重(X_9)构成,携带信息为18.135%;主成分4由单荚粒数(X_6)、单位面积(666.67 m²)产量(X_{10})、倒伏等级(X_{11})构成,携带信息为11.406%。

2.2.2 隶属函数分析及综合耐荫评价值 进一步

分析耐荫系数的各主成分因子得分 ($F_1 \sim F_4$), 得到各综合指标的隶属函数值 $U(F_1) \sim U(F_4)$ 。在相同综合指标下, 隶属函数值即为该指标的耐荫评价得分 (变异幅度为 0.000 ~ 1.000), 得分越高代表该品种耐荫性越好。如品种云黄 22 的隶属函数值 $U(F_2)$ 得分为 1.000, 表明其在主成分 2 指标下表现为耐荫性强, 而云黄 16 的隶属函数值 $U(F_1)$ 得分为

0.000, 表明其在主成分 1 指标下表现为耐荫性差。计算各特征值占比即权重, 4 个综合指标的权重分别为 0.363, 0.287, 0.215 和 0.135, 分别将参试材料各综合指标的隶属函数值与其对应的权重相乘后相加, 得到各大豆品种综合耐荫评价价值 D , 即为参试品种耐荫性评价最终得分, 得分越高代表耐荫性越好, 据此评价耐荫性 (表 5)。

表 4 各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 4 Eigenvectors and percentage of accumulated contribution of principal components

| 主成分 Principal factors | 主成分 1 Factors 1 | 主成分 2 Factors 2 | 主成分 3 Factors 3 | 主成分 4 Factors 4 |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 特征值 Eigen value | 3.374 | 2.665 | 1.995 | 1.255 |
| 贡献率 Contribution ratio/% | 30.672 | 24.229 | 18.135 | 11.406 |
| 累计贡献率 Cumulative contribution ratio/% | 30.672 | 54.901 | 73.035 | 84.442 |
| 特征向量 Eigen vector | X_1 | | | |
| | -0.212 | 0.439 | 0.290 | 0.340 |
| | X_2 | -0.300 | 0.083 | 0.504 |
| | X_3 | 0.000 | 0.577 | 0.000 |
| | X_4 | 0.354 | 0.409 | 0.119 |
| | X_5 | 0.532 | 0.000 | 0.000 |
| | X_6 | -0.110 | 0.146 | -0.403 |
| | X_7 | 0.484 | 0.000 | 0.000 |
| | X_8 | 0.440 | -0.122 | 0.321 |
| | X_9 | -0.113 | -0.075 | 0.562 |
| | X_{10} | 0.000 | -0.374 | 0.225 |
| | X_{11} | 0.000 | -0.344 | -0.086 |

注: X_1 -株高; X_2 -底荚高度; X_3 -有效节数; X_4 -有效分枝数; X_5 -单株荚数; X_6 -单荚粒数; X_7 -单株粒数; X_8 -单株产量; X_9 -百粒重; X_{10} -单位面积 (666.67 m²) 产量; X_{11} -倒伏等级。

Note: X_1 -Plant height; X_2 -Bottom pod height; X_3 -Number of main stem segments; X_4 -Effective branching number; X_5 -Pods number per plant; X_6 -Number of pods; X_7 -Number of seeds per plant; X_8 -Yield per plant; X_9 -100-seeds weight; X_{10} -Yield per 666.67 m²; X_{11} -Lodging class.

表 5 各品系的主成分因子得分 (F_j)、权重、隶属函数值 $U(F_j)$ 、综合评价价值 D 及耐荫性综合评价Table 5 The principal component factor score (F_j), weight, membership function value $U(F_j)$, comprehensive evaluation value D and shade tolerance comprehensive evaluation of different strains

| 品种 Variety | F_1 | F_2 | F_3 | F_4 | $U(F_1)$ | $U(F_2)$ | $U(F_3)$ | $U(F_4)$ | D | 综合评价 Comprehensive evaluation |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|-------|----------------------------------|
| 云黄 21 Yunhuang 21 | 1.800 | 2.183 | -0.095 | 0.816 | 0.913 | 0.860 | 0.384 | 0.804 | 0.770 | 强耐荫 |
| 云黄 22 Yunhuang 22 | 0.736 | 3.042 | 0.303 | -0.316 | 0.752 | 1.000 | 0.459 | 0.547 | 0.732 | 强耐荫 |
| 云黄 20 Yunhuang 20 | 0.869 | 1.419 | 1.338 | -0.025 | 0.772 | 0.736 | 0.653 | 0.613 | 0.715 | 强耐荫 |
| 云黄 25 Yunhuang 25 | -0.946 | -0.198 | 3.185 | 0.270 | 0.497 | 0.474 | 1.000 | 0.680 | 0.623 | 中耐荫 |
| 云黄 14 Yunhuang 14 | 1.433 | -0.455 | -0.281 | -0.703 | 0.857 | 0.432 | 0.349 | 0.460 | 0.572 | 中耐荫 |
| 云黄 13 Yunhuang 13 | 2.374 | -0.268 | -2.140 | -0.374 | 1.000 | 0.462 | 0.000 | 0.534 | 0.568 | 中耐荫 |
| 云黄 18 Yunhuang 18 | 0.303 | -0.480 | -0.337 | 0.057 | 0.686 | 0.428 | 0.339 | 0.632 | 0.530 | 中耐荫 |
| 中品 661 Zhongpin 661 | 0.934 | -3.115 | 0.664 | 1.489 | 0.782 | 0.000 | 0.527 | 0.956 | 0.526 | 中耐荫 |
| 云黄 15 Yunhuang 15 | -0.507 | -0.993 | 1.289 | -0.607 | 0.563 | 0.345 | 0.644 | 0.482 | 0.507 | 中耐荫 |
| 云黄 12 Yunhuang 12 | 0.633 | -1.571 | -1.400 | 0.774 | 0.736 | 0.251 | 0.139 | 0.794 | 0.476 | 中耐荫 |
| 云黄 17 Yunhuang 17 | -2.672 | 0.898 | -1.511 | 1.681 | 0.235 | 0.652 | 0.118 | 1.000 | 0.433 | 中耐荫 |
| 滇豆 7 号 Diandou 7 | -0.731 | -1.027 | -0.608 | -2.732 | 0.529 | 0.339 | 0.288 | 0.000 | 0.351 | 弱耐荫 |
| 云黄 16 Yunhuang 16 | -4.226 | 0.566 | -0.408 | -0.330 | 0.000 | 0.598 | 0.325 | 0.544 | 0.315 | 弱耐荫 |
| 权重 Index weight | 0.363 | 0.287 | 0.215 | 0.135 | | | | | | |

2.2.3 耐荫性综合评价 对 D 值进行聚类分析, 将 13 个参试品种分为 3 大类: 第一类品种具有强耐荫性, 包含云黄 21、云黄 22 和云黄 20; 第二类品种具有中等耐荫性, 包含云黄 25、云黄 14、云黄 13、云黄 18、中品 661、云黄 15、云黄 12 和云黄 17; 第三类品种具有弱耐荫性, 包含滇豆 7 号和云黄 16 (图 2)。

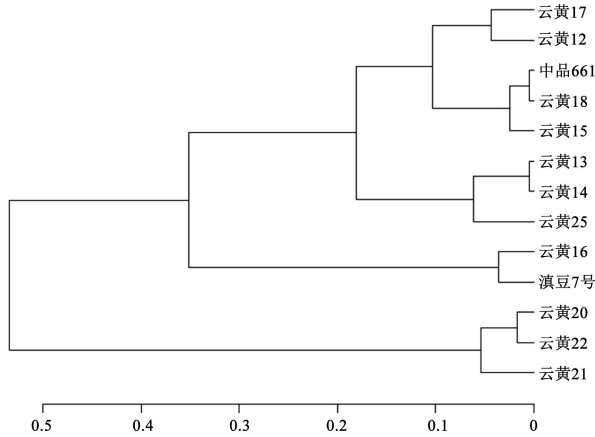


图 2 13 个大豆品种综合耐荫能力聚类

Fig. 2 Clustering of comprehensive shade tolerance of 13 soybean varieties (lines)

2.3 构建逐步回归模型及耐荫性鉴定指标选择

通过逐步回归分析法建立耐荫性评价回归模型为: $D = -0.878 + 0.973X_1 + 0.754X_7 - 0.072X_{11} - 0.128X_2$ ($P = 0.000$)。模型摘要结果显示: $R = 0.995$, 调整后 $R^2 = 0.986$, 残差的标准差为 0.020 56, 说明该模型拟合效果较好。结果表明, 云南低纬高原地区大豆玉米带状复合种植模式中可利用株高、单株粒数、倒伏等级和底荚高度作为性状指标建立回归方程, 评价鉴定大豆耐荫性。

2.4 间作条件下各参试大豆品种单株产量变化

由表 6 可知, 在净作条件下, 单株产量排名前 5 的品种分别是云黄 17、云黄 16、云黄 22、云黄 20 和云黄 13; 在间作条件下, 单株产量排名前 5 的品种分别是云黄 22、云黄 13、云黄 15、云黄 20 和云黄 25, 而耐荫性排名前 5 的品种分别是云黄 21、云黄 22、云黄 20、云黄 25 和云黄 14 (表 6)。综合分析表明, 大豆品种云黄 22 和云黄 20 在净作和间作条件下单株产量较其他参试品种稳定且具有较好的耐荫性, 而中耐荫品种云黄 13 在净作与间作条件下也具有较好的产量表现。中耐荫品种云黄 17 在间作条件下的产量低于云黄 22、云黄 20 与云黄 13, 但在净作条件下表现出极高的产量潜力。

表 6 各参试大豆品种在两种栽培条件下单株产量变化

Table 6 Changes in yield per plant of each tested soybean variety under two cultivation conditions

| 品种 Variety | 净作条件单株产量 Yield per plant under net cropping/g | 标准差 SD | 间作条件单株产量 Yield per plant under intercropping/g | 标准差 SD |
|---------------------|---|-----------|--|-----------|
| 云黄 22 Yunhuang 22 | 23.07 ab | 1.99 | 14.73 a | 2.37 |
| 云黄 13 Yunhuang 13 | 21.80 ab | 1.35 | 14.34 ab | 0.97 |
| 云黄 15 Yunhuang 15 | 20.27 b | 3.73 | 13.74 ab | 1.61 |
| 云黄 20 Yunhuang 20 | 21.99 ab | 4.34 | 13.66 ab | 3.08 |
| 云黄 25 Yunhuang 25 | 20.28 b | 3.33 | 13.66 ab | 2.44 |
| 云黄 21 Yunhuang 21 | 20.63 b | 1.77 | 13.61 ab | 8.94 |
| 滇豆 7 号 Diandou 7 | 21.35 ab | 3.78 | 12.76 ab | 1.50 |
| 云黄 12 Yunhuang 12 | 20.42 b | 2.19 | 12.43 ab | 1.98 |
| 云黄 17 Yunhuang 17 | 27.30 a | 1.44 | 12.15 ab | 0.67 |
| 云黄 18 Yunhuang 18 | 20.51 b | 2.30 | 11.31 ab | 1.45 |
| 云黄 14 Yunhuang 14 | 15.36 b | 2.17 | 10.53 ab | 1.19 |
| 中品 661 Zhongpin 661 | 15.45 b | 5.14 | 10.43 b | 2.00 |
| 云黄 16 Yunhuang 16 | 24.69 ab | 6.47 | 9.43 b | 1.94 |

注: 不同小写字母差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

3 讨论

在大豆、玉米带状间作种植模式中,玉米遮荫会影响大豆的生理和形态发育,导致大豆下胚轴变长^[17],叶面积减少^[18],株高变高、茎秆变细易倒伏,产量构成因素中单株荚数、单株粒数和单株产量下降^[5-8, 19]。我国大豆种植制度多样,生态类型复杂^[20],想要建立长效、通用的耐荫鉴定体系非常困难^[15]。因此,有必要对本地区大豆耐荫评价体系进行更新并对云南省已审定品种进行耐荫性及产量鉴定。

本研究选择与遮荫密切相关的株高、底荚高度、有效节数、有效分枝数、单株荚数、单荚粒数、单株粒数、单株产量、百粒重、单位面积(666.67 m²)产量、倒伏等级 11 个大豆性状指标,计算单个性状指标的耐荫系数并对其进行主成分分析,结果表明,产量相关性状和株型相关性状能有效评价大豆耐荫性,也表明遮荫条件下大豆植株的产量及株型相关性状会受到很大影响。进一步利用 4 个综合指标计算得到各品种的耐荫综合评价值 D 值,根据 D 值从大到小,可将材料划分为强耐荫、中耐荫、弱耐荫 3 种类型,并鉴定到株高、单株粒数、倒伏等级、底荚高度与大豆品种耐荫性较相关,这与前人鉴定到的耐荫指标均有重合^[6, 16-17]。本研究中,强耐荫大豆品种云黄 21 和云黄 20 在间作条件下的单株产量低于中耐荫品种云黄 13 和云黄 15,而弱耐荫品种滇豆 7 号间作的产量甚至高于中耐荫品种云黄 14。从植株的倒伏性来看,强耐荫品种云黄 21、云黄 22、云黄 20 与中耐荫品种云黄 13 在间作条件下表现出中度或重度倒伏,而中耐荫品种中品 661 在间作条件下表现为轻度倒伏。综合以上结果,进一步说明大豆耐荫性评价属于一项综合评价体系,虽然产量相关性状在该评价体系中至关重要,但是依然要考虑株型、倒伏等级等性状对耐荫性的影响。

于晓波等^[21]研究发现,套作下大豆产量分布向分枝集中,分枝产量对单株产量的贡献提升,主茎产量对单株产量贡献减小,说明在未来育种和研究中,应当更加重视分枝性状,采集分枝性状相关数据进行分析。

大豆是光周期敏感的短日作物,具有适应不同纬度的光周期适应性,不同大豆品种对环境变化的响应能力也会不同。云南省是以山地和高原为主的省份,其山地和高原约占全省总面积的 94%,同时季节变化和地域间差异较大,导致云南农业发展

受到地理条件限制。由于省域内地势多起伏,地貌复杂,生态环境丰富,造成云南省大豆品种类型、生产方式复杂多样,全省内以大豆间作套作模式为主要生产模式。因此,研究大豆耐荫性对促进大豆间作套作模式推广、耐荫大豆资源利用、耐荫性育种等均具有重要意义。

4 结论

本研究通过对 13 份云南省审定大豆品种的 11 个性状指标的耐荫系数进行多元统计分析,进而对参试材料的耐荫性和产量开展鉴定评价。运用主成分分析,将各测定指标耐荫系数转化为 4 个无耦合的综合指标,包含了 84.44% 信息量;通过计算各品种的综合耐荫性评价价值(D)并系统聚类,将 13 个育成品种分为 3 类:弱耐荫型、中等耐荫型、强耐荫型;通过逐步回归构建耐荫性评价回归模型: $D = -0.878 + 0.973X_1 + 0.754X_7 - 0.072X_{11} - 0.128X_2$, $R = 0.995$,调整后 $R^2 = 0.986$,残差的标准差 = 0.020 56。云南低纬高原地区大豆玉米带状复合种植模式中,可将株高、单株粒数、倒伏等级和底荚高度作为性状指标建立回归方程,进而评价大豆耐荫性。试验品种中,大豆品种云黄 22 和云黄 20 耐荫性较好,间作模式下单株产量较高,中耐荫品种云黄 13 的间作单株产量仅次于云黄 22,上述品种均可作为云南海拔 2 044 m 区域大豆玉米带状间作复种模式的优良大豆品种进行推广。同时,云黄 17 在净作条件下具有较好的产量表现,更合适利用于云南省海拔 1 944 m 以下大豆净作生产。

参考文献

- [1] 田志喜,刘宝辉,杨艳萍,等.我国大豆分子设计育种成果与展望[J].中国科学院院刊,2018,33(9):915-922.
TIAN Z X, LIU B H, YANG Y P, et al. Update and perspective of soybean molecular module-based designer breeding in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(9): 915-922.
- [2] 王文月,姚志鹏,于洋,等.我国大豆种业科技创新发展现状及对策建议[J].中国农业科技导报,2024,26(3):1-6.
WANG W Y, YAO Z P, YU Y, et al. Scientific and technological innovation of soybean seed industry in China: Current situation and strategy[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(3): 1-6
- [3] 刘卫国,邹俊林,袁晋,等.套作大豆农艺性状研究[J].中国油料作物学报,2014,36(2):219-223.
LIU W G, ZOU J L, YUAN J, et al. Research on the agronomic traits of relay cropping soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop

- Sciences, 2014, 36(2): 219-223.
- [4] FENG L, ALI RAZA M, CHEN Y, et al. Narrow-wide row planting pattern improves the light environment and seed yields of intercrop species in relay intercropping system[J]. *PLoS One*, 2019, 14(2): e0212885.
- [5] 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.
- [6] 连金番, 赵志刚, 姬月梅, 等. 弱光性对玉米间作下春大豆表型及产量性状影响的研究[J]. *宁夏农林科技*, 2023, 64(2): 5-10.
- LIAN J P, ZHAO Z G, JI Y M, et al. Study on the effects of weak light on phenotypic and yield traits of spring soybean under corn intercropping[J]. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2023, 64(2): 5-10.
- [7] 武晓玲, 谭千军, 陈钊杰, 等. 大豆苗期茎秆相关性状对荫蔽的响应[J]. *植物遗传资源学报*, 2015, 16(5): 1111-1116.
- WU X L, TAN Q J, CHEN F J, et al. Study on response of soybean stem characters to shading at seedling stage[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(5): 1111-1116.
- [8] 赵德强, 李彤, 侯玉婷, 等. 玉米大豆间作模式下干物质积累和产量的边际效应及其系统效益[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(10): 1971-1985.
- ZHAO D Q, LI T, HOU Y T, et al. Benefits and marginal effect of dry matter accumulation and yield in maize and soybean intercropping patterns[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(10): 1971-1985.
- [9] 崔亮, 苏本营, 杨峰, 等. 带状套作大豆群体冠层光能截获与利用特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(1): 43-54.
- CUI L, SU B Y, YANG F, et al. Relationship between light interception and light utilization of soybean canopy in relay strip intercropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(1): 43-54.
- [10] 覃思思, 刘卫国, 程彬, 等. 套作大豆耐荫品种筛选及农艺性状与产量的关系研究[J]. *中国油料作物学报*, 2020, 42(3): 390-400.
- QIN S S, LIU W G, CHENG B, et al. Screening of shade tolerant soybean varieties and the relationship between agronomic characteristics and yield[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2020, 42(3): 390-400.
- [11] 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.
- [12] BALTZER J L, THOMAS S C. Determinants of whole-plant light requirements in Bornean rain forest tree saplings[J]. *Journal of Ecology*, 2007, 95(6): 1208-1221.
- [13] 张立军, 孙旭刚, 李盛有, 等. 国内外大豆种质耐荫性综合评价及相关鉴定指标的筛选[J]. *大豆科学*, 2018, 37(4): 493-502.
- ZHANG L J, SUN X G, LI S Y, et al. Comprehensive evaluation for shade-tolerant and selection of identification indicators in soybean germplasms from China and abroad[J]. *Soybean Science*, 2018, 37(4): 493-502.
- [14] YANG F, WANG X, LIAO D, et al. Yield response to different planting geometries in maize-soybean relay strip intercropping systems[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 296-304.
- [15] 赵银月, 詹和明, 代希茜, 等. 云南间作大豆耐荫性综合评价及鉴定指标筛选[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(1): 81-91.
- ZHAO Y Y, ZHAN H M, DAI X X, et al. Comprehensive evaluation and screening identification index of shade tolerance of intercropping soybean[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(1): 81-91.
- [16] 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.
- [17] LIU W, ZOU J, ZHANG J, et al. Evaluation of soybean (*Glycine max*) stem vining in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. *Plant Production Science*, 2015, 18(1): 69-75.
- [18] FAN W, XU J M, LOU H Q, et al. Physiological and molecular analysis of aluminium-induced organic acid anion secretion from grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) roots[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17(5): 608.
- [19] 任梦露, 刘卫国, 刘小明, 等. 荫蔽信号对大豆幼苗生长和光合特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 499-505.
- REN M L, LIU W G, LIU X M, et al. Effect of shading signal on growth and photosynthetic characteristics of soybean seedlings[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 499-505.
- [20] 盖钧镒, 汪越胜. 中国大豆品种生态区域划分的研究[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(2): 139-145.
- GAI J Y, WANG Y S. A study on the varietal eco-regions of soybeans in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(2): 139-145.
- [21] 于晓波, 张明荣, 吴海英, 等. 净套作下不同耐荫性大豆品种农艺性状及产量分布的研究[J]. *大豆科学*, 2012, 31(5): 757-761.
- YU X B, ZHANG M R, WU H Y, et al. Agronomic characters and yield distribution of different shade tolerance soybean under monoculture and relay strip intercropping systems[J]. *Soybean Science*, 2012, 31(5): 757-761.