大豆科学 Soybean Science
http://ddkx.haasep.cn
2022,41(6):645-653
DOI:10.11861/j.issn.1000-9841.2022.06.0645

广西间作大豆耐荫性综合评价及鉴定指标筛选

汤复跃,梁　江,郭小红,韦清源,陈文杰,陈　渊

(广西农业科学院 经济作物研究所/国家大豆产业技术体系南宁综合试验站,广西 南宁 530007)

摘　要:为探讨不同大豆品种(系)的耐荫特性,本研究筛选耐荫性鉴定指标,建立相对准确、稳定、高效的大豆耐荫性评价数学模型。以36个大豆品种(系)为试验材料,设遮光(玉米-大豆带状复合种植条件下形成的自然荫蔽条件)和自然光(清种)2个处理。将11个单项性状指标耐荫系数作为数据,运用主成分分析、隶属函数法、系统聚类和逐步回归分析方法对大豆耐荫性进行综合评价。结果表明:通过主成分分析,将11个单项性状指标耐荫系数转换为4个相互独立的综合指标,携带了74.722%的信息量;通过隶属函数法计算综合耐荫性评价值(*D*),并对其进行聚类分析,将36个大豆品种(系)划分为强耐荫型(2个)、中等耐荫型(9个)和弱耐荫型(25个)3大类;将11个单项性状指标耐荫系数作为自变量,*D*值作为因变量,采用逐步回归分析法建立最优回归方程:$D=-0.585+0.662X_2+0.152X_3+0.084X_5+0.211X_8$,$R=0.962$,调整的$R^2=0.915$,残差的标准差=0.036 16。筛选出底荚高、主茎节数、单株荚数和每荚粒数4个性状指标作为广西玉米-大豆带状复合种植条件下的大豆耐荫性鉴定指标。

关键词:大豆;耐荫性;主成分分析;隶属函数法;系统聚类分析;逐步回归

Comprehensive Evaluation and Identification Index Screening of Shade Tolerance of Intercropping Soybean in Guangxi

TANG Fu-yue, LIANG Jiang, GOU Xiao-hong, WEI Qing-yuan, CHEN Wen-jie, CHEN Yuan

(Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Nanning Comprehensive Station of Nation Soybean Industry Technology, Nanning 530007, China)

Abstract: This research aimed to explore the shade tolerance characteristics and identification index of soybean varieties (lines), and establish a relatively accurate, stable and efficient mathematical model for evaluating shade tolerance of soybean. There were two treatments (intercropping of soybean and maize; pure planting) with 36 soybean varieties (lines) as experimental materials. Eleven single character indexes were used as the data of shade tolerance coefficient, and the shade tolerance of soybean was comprehensively evaluated by using principal component analysis, membership function method, systematic clustering and stepwise regression analysis. The results showed as follows, the evaluation value of comprehensive shade tolerance was calculated by membership function method and analyzed by cluster analysis, 36 soybean varieties (lines) were divided into three categories: Strong shade tolerance (two varieties), medium shade tolerance (nine varieties) and weak shade tolerance (25 varieties/lines). The shade tolerance coefficient of eleven single trait indexes took as independent variable and D value as dependent variable, the optimal regression equation was established by stepwise regression analysis: $D=-0.585+0.662x_2+0.152x_3+0.084x_5+0.211x_8$ ($R=0.962$, $R^2=0.915$, $SD=0.036\ 16$). The lowest of pod height, nodes number of main stem, pods number per plant and seeds number per pod were selected as the identification indexes of soybean shade tolerance under intercropping of corn and soybean strip compound planting in Guangxi.

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

间套作是广西多熟制生态区高产高效的主要种植方式,玉米-大豆带状复合种植较清种在土地利用产出率、资源利用效率等方面表现出无法比拟的优势,成为广西大豆主要的种植模式之一[1-3]。但大豆与高秆作物玉米带状复合种植条件下,后期大豆受玉米荫蔽越来越严重,间作的玉米相对于大豆表现出极强的种间竞争优势[4-5]。因此筛选和培育强耐荫的大豆品种是提高玉米—大豆带状复合种植竞争力的重要途径之一。

在大豆玉米间套作种植系统中,提高低位作物大豆的耐荫性,是充分利用光热资源、提高作物产量的关键。李盛蓝等[6]研究表明,在玉米-大豆套作的种植模式下,大豆冠层光环境、叶脉和气孔特征的变化会影响大豆的光合能力,但不同耐荫性大豆品种的叶脉、气孔特征对荫蔽的响应存在差异。在玉米-大豆带状套作下,耐荫性较强的大豆材料的地上部分干物质积累量、光合能力和抗到能力可提

收稿日期:2022-06-03
基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-CES30);广西自然科学基金(2019GXNSFBA185007);广西农业科学院稳定资助科研团队项目(2021YT055);广西农业科学院基本业务费项目(桂农科2020YM118)。
第一作者:汤复跃(1984—),男,硕士,副研究员,主要从事大豆育种和栽培研究工作。E-mail:tfy0130@163.com。
通讯作者:陈渊(1971—),男,研究员,主要从事大豆育种和栽培研究工作。E-mail:chenyuan500@126.com。

高[7-9]。研究者主要在人工模拟的间套作条件或自然荫蔽条件下对大豆耐荫性鉴定指标进行研究筛选。刘卫国等[10]利用遮阳网模拟荫蔽胁迫环境,研究表明在苗期可应用扩张蛋白活性、赤霉素含量和乙烯释放量等生理指标作为筛选耐荫抗倒大豆品种的依据。武晓玲等[11]在正常光照和弱光两种光照环境下,运用多元统计方法对 19 个大豆品种利用苗期的 24 个性状指标的耐荫系数进行耐荫性综合评价,建立了包含叶片干重、气孔导度、株高和暗下最大荧光产量 4 个指标的大豆苗期耐荫性评价数学模型。陈怀珠等[12]、黄其椿等[13]模拟间套种条件,选择受荫蔽影响显著或与荫蔽相关性显著的指标计算综合耐荫系数,评定大豆种质的耐荫性。孙祖东等[14]以 60 份不同耐荫性类型的大豆为材料,设置 3 个不同遮光处理,分析播种后第 40、50 和 60 天耐荫指标的误差变异系数和表型变异系数,表明由 30% 遮光度条件下播种后 50 d 的株高和平均节间长构成的耐荫指数可相对准确、稳定、实用地评价耐荫性。李春红等[15]、赵银月等[16]创设玉米—大豆间作下自然荫蔽条件,利用多元分析方法分别对参试大豆品种(系)进行耐荫性综合评价,筛选出包含主茎节数等多个性状的大豆耐荫性鉴定指标。由于大豆生态类型复杂、种植模式多样[17],玉米—大豆带状复合种植是广西多熟制生态区高产高效的主要种植方式之一,但目前尚鲜见针对该地区玉米—大豆带状复合种植的耐荫性鉴定指标的研究报道。因此,本研究利用广西大豆大田生产中推广的春玉米 — 春大豆带状复合种植模式创造的自然荫蔽条件,以 36 个参试大豆品种(系)的 11 个单项性状指标耐荫系数为数据,运用主成分分析、隶属函数法、系统聚类和逐步回归分析方法对参试材料进行耐荫性综合评价,并建立可靠的耐荫性数学评价模型,为广西大豆耐荫性种质资源的鉴定和挖掘、品种筛选和选育及大豆生产应用提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试玉米品种为广西审定的半紧凑型玉米品种青青 500,由广西青青农业科技有限公司和南宁市正昊农业科学研究院联合选育;36 个供试大豆品种(系)名称及来源详见表 1。

1.2 试验地概况

试验于 2018—2019 年在广西南宁市广西农业科学院明阳基地(22°61′N,108°25′E)进行。土壤为赤红壤,播种前耕层(0 ~ 20 cm)混合土样 pH7.1,有机质含量 14.1 g·kg^{-1},全氮含量 0.062%,全磷含量 0.104%,全钾含量 0.20%,碱解氮含量 44.0 mg·kg^{-1},有效磷含量 12.4 mg·kg^{-1},速效钾含量 147.0 mg·kg^{-1}。地势平坦,肥力均匀,茬口一致,无遮阴,排灌良好。

表 1 供试品种及来源

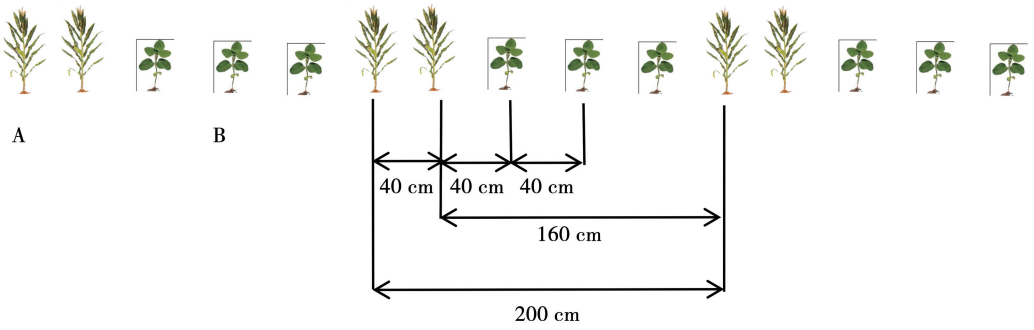
Table 1 Tested varieties(lines) and source

品种(系) Variety(line)	来源 Source	品种(系) Variety(line)	来源 Source
成豆 18 Chengdou 18	四川省农业科学院作物研究所	桂春豆 111 Guichundou 111	广西农业科学院经济作物研究所
赣豆 10 号 Gandou 10	江西省农业科学院作物研究所	桂春豆 112 Guichundou 112	广西农业科学院经济作物研究所
桂 1016 Gui 1016	广西农业科学院经济作物研究所	桂春豆 113 Guichundou 113	广西农业科学院经济作物研究所
桂春 11 号 Guichun 11	广西农业科学院经济作物研究所	华春 11 号 Huachun 11	华南农业大学
桂春 12 号 Guichun 12	广西农业科学院经济作物研究所	华春 2 号 Huachun 2	华南农业大学
桂春 13 号 Guichun 13	广西农业科学院经济作物研究所	华春 8 号 Huachun 8	华南农业大学
桂春 15 号 Guichun 15	广西农业科学院经济作物研究所	南春豆 31 Nanchundou 31	南充市农业科学院
桂春 16 号 Guichun 16	广西农业科学院经济作物研究所	莆豆 610 Pudou 610	莆田市农业科学研究所
桂春 1601 Guichun 1601	广西农业科学院经济作物研究所	莆豆 611 Pudou 611	莆田市农业科学研究所
桂春 1602 Guichun 1602	广西农业科学院经济作物研究所	泉豆 34 Quandou 34	福建省泉州市农业科学研究所
桂 1603 Gui 1603	广西农业科学院经济作物研究所	泉豆 17 Quandou 17	福建省泉州市农业科学研究所
桂春 1607 Guichun 1607	广西农业科学院经济作物研究所	泉豆 20 Quandou 20	福建省泉州市农业科学研究所
桂春 1608 Guichun 1608	广西农业科学院经济作物研究所	粤春 2016-2 Yuechun 2016-2	华南农业大学
桂春 18 号 Guichun 18	广西农业科学院经济作物研究所	粤春 2017-1 Yuechun 2017-1	华南农业大学
桂春 1805 Guichun 1805	广西农业科学院经济作物研究所	郑 1307 Zheng 1307	河南省农业科学院经济作物研究所
桂春 1807 Guichun 1807	广西农业科学院经济作物研究所	中黄 302 Zhonghuang 302	中国农业科学院作物科学研究所
桂春 1808 Guichun 1808	广西农业科学院经济作物研究所	中黄 306 Zhonghuang 306	中国农业科学院作物科学研究所
桂春 8 号 Guichun 8	广西农业科学院经济作物研究所	中黄 325 Zhonghuang 325	中国农业科学院作物科学研究所

1.3　试验设计

采用裂区设计,光照处理为主区,设遮光和自然光 2 个处理,品种(系)为副区,3 次重复。遮光处理为春玉米 — 春大豆带状复合种植条件下创造的自然荫蔽条件,玉米宽行 160 cm,窄行 40 cm,玉米宽行中间种 3 行春大豆,大豆与玉米间距 40 cm,大豆行距 40 cm,玉米穴距 20 cm,每穴留苗 1 株,大豆穴距 20 cm,每穴留苗 2 株,每个品种(系)种植 1 个宽窄行,小区面积 10 m^2(5 m × 2 m)。春大豆单作行距 40 cm,穴距 20 cm,每穴留苗 2 株,每品种 5 行,小区面积 10 m^2(5 m × 2 m)(图 1)。

2018 年 3 月 15 日同时播种春玉米、春大豆,春大豆于 6 月 11—28 日收获春大豆,于 7 月 14 日收获春玉米;2019 年 3 月 2 日同时播种春玉米、春大豆,于 6 月 5—23 日收获春大豆,于 7 月 10 日收获春玉米。其它栽培管理同大田生产。



注:A. 春玉米;B. 春大豆。

Note: A. Spring corn; B. Spring soybean.

图 1　春玉米 – 春大豆带状复合种植田间布置示意图

Fig. 1　Experimental plots arrangement of "spring maize-spring soybean" intercropping

1.4　方法

1.4.1　*农艺性状调查*　大豆成熟时,每个小区选取中间一行连续取大豆 10 株考种,取平均值;调查大豆株高 X_1、底荚高 X_2、主茎节数 X_3、有效分枝数 X_4、单株荚数 X_5、多粒荚比例 X_6、单株粒数 X_7、每荚粒数 X_8、单株产量 X_9、倒伏级别 X_{10} 和单产 X_{11},田间倒伏分级记载标准参照《大豆种质资源描述规范和数据标准》[18],取以上性状两年测定值的平均值。

1.4.2　*产量测定*　于每个大豆品种收获期,清种取小区中间 3 行 6.0 m^2(5 m × 1.2 m),带状取宽窄行中间 6.0 m^2(3 m × 2 m),测定产量,加上考种的产量,并折算为公顷产量。

1.4.3　*综合评价*　参照谢志坚[19]的方法计算各参试材料以下相关指标。

各性状的耐荫系数(STC) = 遮光处理性状值 / 对照性状值。

各品种(系)的综合指标值的隶属函数值 $U(F_j) = (F_j - F_{min})/(F_{max} - F_{min})$。根据特征值大于1 的准则提取主成分[11];$F_j$ 表示各品种第 j 个主成分因子的得分,F_{max} 表示各品种第 j 个主成分因子的得分最大值,F_{min} 表示各品种第 j 个主成分因子的得分最小值。

各综合指标的权重 $W_j = Cj/\sum_1^n Cj$,C_j 表示第 j 个主成分所对应的贡献率,W_j 表示第 j 个主成分在所有主成分指标中的重要程度。

各品种(系)的耐荫性综合评价值 $D = \sum_1^n [(U(F_j) \times W_j]$。$D$ 值为各品种(系)在自然隐蔽条件下由综合指标评定所得的耐荫性综合评价值。

进一步采用欧式距离(Euclidean distance)和最小离差平方和法(Ward's method)对各大豆品种(系)的耐荫性综合能力进行聚类分析。

将 11 个单项性状指标耐荫系数作为自变量,耐荫性综合评价 D 值作为因变量,运用逐步回归分析法结合 R、调整的 R^2 和残差的标准差,建立相对准确、稳定、高效的耐荫性评价回归模型。

1.5　数据分析

采用 Excel 2016 软件进行数据整理分析;采用 SPSS 19.0 软件进行主成分分析、系统聚类分析和逐步回归等多元分析。

2　结果与分析

2.1　单性状指标的耐荫系数及其相关分析

由表 2 可知,在各单性状指标的耐荫系数(STC)中,荫蔽胁迫对大豆倒伏级别(X_{10})和主茎节数(X_3)影响最大,其变异系数分别达到 61.73% 和 54.69%;其次对有效分枝数(X_4)、单株粒数(X_7)、单株荚数(X_5)、底荚高(X_2)、株高(X_1)、单株产量(X_9)和单产(X_{11})影响也较大,变异系数分别为 37.54%、30.91%、28.41%、26.39%、22.43%、21.35% 和 9.63%;对多粒荚比例(X_6)和每荚粒数(X_8)影响较小,变异系数分别为 9.86% 和 6.78%。与对照相比,受荫蔽胁迫后,倒伏级别(X_{10})、底荚高(X_2)、株高(X_1)、主茎节数(X_3)、多粒荚比例(X_6)和每荚粒数(X_8)各单一性状均值较大,其余单一性

状均值小于对照;不同大豆品种(系)倒伏级别(X_{10})性状值大于对照,单产(X_{11})性状值小于对照,其余性状指标值在各大豆品种(系)间的表现无规律;不同大豆品种(系)同一性状指标值变化幅度较大,同一大豆品种(系)各单项指标值变化幅度也较大。

由表3可知,单个性状指标的STC与其它1个或多个性状STC呈显著或极显著相关,相关性或大或小,单项指标提供的信息发生重叠。如性状单产(X_{11})与单株产量(X_9)之间呈极显著正相关,与多粒荚比例(X_6)之间呈显著正相关;单株产量(X_9)与多粒荚比例(X_6)、单株粒数(X_7)、每荚粒数(X_8)、倒伏级别(X_{10})和单产(X_{11})呈极显著相关。

因此,不能通过单项指标的耐荫系数直接判断大豆品种(系)耐荫性,需要在此基础上进一步通过主成分分析法进行分析评价,以消除各单项指标因信息重叠而带来的不合理影响。

表2 不同大豆品种(系)各性状指标的耐荫系数

Table 2 Shade tolerance coefficient (STC) of each characters index of different soybean cultivars (lines)

品种(系) Variety(line)	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
成豆18 Chengdou 18	0.79	1.09	0.81	0.84	0.90	1.00	0.94	1.04	0.62	1.00	0.39
赣豆10号 Gandou 10	1.04	1.35	1.00	1.07	0.82	1.17	0.91	1.11	1.07	1.00	0.37
桂1016 Gui 1016	1.30	1.49	1.23	0.80	0.88	0.92	0.83	0.93	0.67	7.00	0.25
桂春11号 Guichun 11	1.96	0.88	1.18	0.92	1.35	1.00	1.39	1.03	1.09	1.00	0.49
桂春12号 Guichun 12	1.68	1.20	0.90	0.64	1.02	1.01	1.01	0.99	0.98	5.00	0.49
桂春13号 Guichun 13	1.26	1.16	0.93	0.49	0.56	0.94	0.51	0.92	0.46	3.00	0.21
桂春15号 Guichun 15	0.93	1.47	3.90	0.98	0.93	1.20	1.06	1.13	0.95	5.00	0.44
桂春16号 Guichun 16	1.22	0.99	1.06	0.97	0.73	0.98	0.74	1.01	0.84	1.00	0.31
桂春1601 Guichun 1601	1.22	1.06	1.01	0.56	0.51	0.90	0.47	0.90	0.57	7.00	0.36
桂春1602 Guichun 1602	1.32	1.30	1.00	0.48	0.41	0.88	0.38	0.95	0.58	7.00	0.28
桂1603 Gui 1603	1.55	1.48	2.68	0.64	0.67	1.15	0.72	1.08	0.83	5.00	0.44
桂春1607 Guichun 1607	1.09	1.18	0.93	0.82	0.80	0.93	0.84	1.03	0.68	5.00	0.30
桂春1608 Guichun 1608	1.11	0.79	0.97	1.56	0.96	0.91	0.87	0.91	0.46	5.00	0.28
桂春18号 Guichun 18	1.22	1.23	1.15	0.72	0.79	1.12	0.86	1.09	0.95	1.00	0.37
桂春1805 Guichun 1805	1.22	1.40	0.98	0.81	0.97	0.93	0.84	1.01	0.69	7.00	0.32
桂春1807 Guichun 1807	1.48	1.63	1.16	1.02	0.87	0.94	0.84	0.97	0.74	5.00	0.28
桂春1808 Guichun 1808	1.37	1.57	0.99	0.73	0.68	0.97	0.67	0.98	0.58	5.00	0.26
桂春8号 Guichun 8	1.74	0.98	3.12	0.50	0.64	0.94	0.74	1.14	0.90	5.00	0.34
桂春豆111 Guichundou 111	0.97	0.85	0.92	0.56	0.50	1.06	0.50	1.01	0.96	3.00	0.41
桂春豆112 Guichundou 112	1.35	1.17	1.01	0.83	0.62	1.08	0.63	1.01	0.88	3.00	0.40
桂春豆113 Guichundou 113	1.14	1.10	1.05	0.72	1.05	1.19	0.94	0.88	1.07	3.00	0.47
华春11号 Huachun 11	1.23	1.52	0.96	1.26	0.96	0.99	0.99	1.03	0.85	3.00	0.32
华春2号 Huachun 2	1.02	0.83	0.96	0.76	0.86	0.97	0.88	1.02	0.92	3.00	0.37
华春8号 Huachun 8	1.04	2.61	0.91	1.32	1.06	1.23	1.18	1.11	1.16	3.00	0.47
南春豆31 Nanchundou 31	1.07	1.14	1.22	1.92	1.03	1.04	1.09	1.04	0.73	1.00	0.30
莆豆610 Pudou 610	0.91	1.08	0.85	0.72	0.58	0.87	0.57	0.99	0.76	3.00	0.38
莆豆611 Pudou 611	1.44	1.77	0.98	0.52	0.77	0.94	0.75	0.97	0.85	3.00	0.41
泉豆34 Quandou 34	0.68	1.10	0.92	0.67	0.60	1.09	0.64	1.07	0.99	1.00	0.34
泉豆17 Quandou 17	0.97	1.26	1.07	0.96	1.60	1.05	1.78	1.10	0.83	3.00	0.39
泉豆20 Quandou 20	1.07	1.11	0.98	0.42	0.77	0.99	0.77	1.00	0.92	2.33	0.37
粤春2016-2 Yuechun 2016-2	1.37	1.24	1.03	0.77	0.80	0.97	0.74	1.04	0.79	3.00	0.38
粤春2017-1 Yuechun 2017-1	1.12	1.44	0.91	0.82	0.94	0.88	0.94	1.00	0.76	1.00	0.44
郑1307 Zheng 1307	0.96	0.97	0.97	1.29	0.95	0.98	0.88	0.92	0.83	1.00	0.40
中黄302 Zhonghuang 302	1.06	1.23	0.97	0.88	0.75	1.08	0.81	1.10	0.97	1.00	0.30
中黄306 Zhonghuang 306	1.04	1.52	1.05	0.72	0.65	1.17	0.73	1.12	0.66	7.00	0.31
中黄325 Zhonghuang 325	0.92	1.10	1.00	0.60	0.70	1.10	0.72	1.04	0.78	1.00	0.31
均值 Average	1.19	1.26	1.19	0.84	0.82	1.02	0.84	1.02	0.82	3.37	0.36
标准差 *STDEV*	0.27	0.33	0.65	0.32	0.23	0.10	0.26	0.07	0.17	2.08	0.07
变异系数 *CV*/%	22.43	26.39	54.69	37.54	28.41	9.86	30.91	6.78	21.35	61.73	19.63

注:X_1-株高;X_2-底荚高;X_3-主茎节数;X_4-有效分枝数;X_5-单株荚数;X_6-多粒荚比例;X_7-单株粒数;X_8-每荚粒数;X_9-单株产量;X_{10}-倒伏级别;X_{11}-单产。下同。

Note:X_1-Plant height; X_2-Bottom pods height; X_3-Stem node number; X_4-Effective branches number; X_5-Pods number per plant; X_6-Multiple pods ratio; X_7-Seeds per plant; X_8-Seeds number per pod; X_9-Yield per plant; X_{10}-Lodging grade; X_{11}-Yield. The same below.

表 3　各性状耐荫系数的相关系数矩阵

Table 3　Correlation coefficient matrix of each character STC

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										
X_2	0.045	1									
X_3	0.222	0.053	1								
X_4	−0.187	0.117	−0.053	1							
X_5	0.087	0.113	−0.023	0.505**	1						
X_6	−0.241	0.312	0.275	0.144	0.169	1					
X_7	0.041	0.167	0.080	0.491**	0.967**	0.287	1				
X_8	−0.104	0.255	0.433**	0.069	0.133	0.553**	0.342*	1			
X_9	0.052	0.151	0.155	0.022	0.309	0.617**	0.386*	0.460**	1		
X_{10}	0.290	0.212	0.243	−0.245	−0.223	−0.245	−0.266	−0.208	−0.460**	1	
X_{11}	0.132	0.093	0.175	−0.044	0.387*	0.399*	0.405*	0.190	0.693**	−0.261	1

注:* 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平显著相关。

Note: * and ** indicate significant correlation at 5% and 1% level, respectively.

2.2　耐荫性综合评价

2.2.1　*主成分分析*　以不同大豆品种(系)11 个单项性状指标耐荫系数为数据,进行主成分分析的结果如表 4 所示,前 4 个主成分累计贡献率为 74.722%,且特征值大于 1,说明前 4 个主成分包含了 11 个单项性状指标耐荫系数的 74.722% 信息量,因此选前 4 个主成分进行耐荫性评价即可。第一个主成分主要由单株粒数(X_7)、单株产量(X_9)、单株荚数(X_5)、多粒荚比例(X_6)、单产(X_{11})和每荚粒数(X_8)构成,携带了 32.299% 信息;第二个主成分由主茎节数(X_3)和有效分枝数(X_4)构成,携带了 16.776% 信息;第三个主成分由株高(X_1)和倒伏级别(X_{10})构成,携带了 13.849% 信息;第四个主成分由底荚高(X_2)构成,携带了 11.798% 信息。

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		F_1	F_2	F_3	F_4
特征值 Eigen values		3.553	1.845	1.523	1.298
贡献率 Contribution ratio/%		32.299	16.776	13.849	11.798
累计贡献率 Cumulative contribution ratio/%		32.299	49.075	62.924	74.722
特征向量 Eigenvector	X_7	0.800	−0.398	0.351	0.029
	X_9	0.781	0.281	−0.213	−0.335
	X_5	0.705	−0.520	0.413	−0.057
	X_6	0.693	0.375	−0.300	0.244
	X_{11}	0.664	0.200	0.037	−0.521
	X_8	0.604	0.435	−0.135	0.332
	X_3	0.237	0.623	0.322	0.146
	X_4	0.401	−0.597	0.098	0.431
	X_1	−0.060	0.237	0.714	−0.439
	X_{10}	−0.469	0.327	0.616	0.267
	X_2	0.282	0.245	0.267	0.520

2.2.2　*隶属函数分析*　36 个大豆品种(系)耐荫系数的主成分因子得分即各品种(系)的综合指标值 $F_1 \sim F_4$ 及综合指标值的隶属函数值 $U(F_1) \sim U(F_4)$ 如表 5 所示,在同一个综合指标条件下,隶属函数值变化范围为 0 ~ 1.000,数值越大表明在自然荫蔽条件下的耐荫性越好,如华春 8 号 $U(F_1)$ 为 1.000,表

明华春 8 号在第一个综合指标评价下耐荫性最强，同理，桂春 1602、桂春 11 号和中黄 306 分别在第二、三和四综合指标评价下耐荫性最强。

2.2.3 各综合指标权重 根据各综合指标（主成分）贡献率大小计算得到 4 个综合指标的权重分别为 0.432，0.225，0.185 和 0.158（表 5）。

2.2.4 耐荫性综合评价 根据各综合指标权重计算得到各品种（系）耐荫性综合评价值 D（表 5）。根据 D 值进行聚类分析的结果如图 2 所示，将 36 个参试大豆品种（系）分为三大类：第一类为强耐荫性品种，包含 2 个品种，分别为桂春 15 号和华春 8 号；第二类为中等耐荫性品种，包含 9 个品种，分别为桂 1603、泉豆 17、桂春 8 号、桂春 11 号、中黄 306、赣豆 10 号、桂春 12 号、华春 11 号和桂春 18 号；第三类为弱耐荫性品种（系），包含南春豆 31 等 25 个品种（系）。

表 5 各品种（系）的综合指标值（F_j）、权重、$U(F_j)$、D 值及综合评价

Table 5 Value of each variety's comprehensive index (F_j), index weight, $U(F_j)$, D value and comprehensive evaluation

品种（系） Variety(line)	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
桂春 15 号 Guichun 15	1.589	2.049	0.616	1.463	0.825	0.947	0.743	0.903	0.850	强耐荫 High
华春 8 号 Huachun 8	2.364	0.449	0.185	1.828	1.000	0.586	0.635	0.981	0.836	强耐荫 High
桂 1603 Gui 1603	0.418	2.283	0.900	0.041	0.561	1.000	0.814	0.600	0.712	中等耐荫 Medium
泉豆 17 Quandou 17	1.910	-1.630	1.091	0.457	0.897	0.116	0.862	0.689	0.682	中等耐荫 Medium
桂春 8 号 Guichun 8	-0.164	2.254	1.312	-0.573	0.429	0.993	0.917	0.469	0.653	中等耐荫 Medium
桂春 11 号 Guichun 11	1.652	-0.712	1.645	-2.769	0.839	0.324	1.000	0.000	0.621	中等耐荫 Medium
中黄 306 Zhonghuang 306	-0.236	1.139	-0.113	1.916	0.413	0.742	0.561	1.000	0.607	中等耐荫 Medium
赣豆 10 号 Gandou 10	1.176	0.239	-1.253	0.474	0.732	0.538	0.276	0.692	0.598	中等耐荫 Medium
桂春 12 号 Guichun 12	0.536	0.263	1.351	-1.912	0.588	0.544	0.927	0.183	0.577	中等耐荫 Medium
华春 11 号 Huachun 11	0.373	-0.790	0.434	0.786	0.551	0.306	0.697	0.759	0.556	中等耐荫 Medium
桂春 18 号 Guichun 18	0.660	0.517	-0.882	-0.229	0.615	0.601	0.369	0.542	0.555	中等耐荫 Medium
南春豆 31 Nanchundou 31	0.745	-1.897	-0.069	1.489	0.635	0.056	0.572	0.909	0.536	弱耐荫 Low
桂春 1807 Guichun 1807	-0.505	-0.336	1.349	0.661	0.353	0.409	0.926	0.732	0.531	弱耐荫 Low
桂春 1805 Guichun 1805	-0.558	-0.247	1.196	0.617	0.341	0.429	0.888	0.723	0.522	弱耐荫 Low
桂春豆 113 Guichundou 113	0.822	-0.151	-0.293	-1.539	0.652	0.450	0.516	0.263	0.520	弱耐荫 Low
中黄 302 Zhonghuang 302	0.418	0.135	-1.254	0.444	0.561	0.515	0.276	0.686	0.517	弱耐荫 Low
莆豆 611 Pudou 611	-0.219	0.440	0.564	-0.764	0.417	0.584	0.730	0.428	0.514	弱耐荫 Low
粤春 2016-2 Yuechun 2016-2	-0.155	0.138	0.143	-0.475	0.432	0.516	0.625	0.490	0.495	弱耐荫 Low
桂春豆 112 Guichundou 112	-0.093	0.566	-0.473	-0.602	0.446	0.612	0.471	0.462	0.490	弱耐荫 Low
桂 1016 Gui 1016	-1.031	-0.334	1.465	0.785	0.234	0.409	0.955	0.759	0.490	弱耐荫 Low
桂春 18083 Guichun 1808	-1.114	0.090	0.688	0.859	0.215	0.505	0.761	0.774	0.470	弱耐荫 Low
粤春 2017-1 Yuechun 2017-1	0.181	-0.774	0.005	-0.706	0.507	0.310	0.590	0.440	0.468	弱耐荫 Low
桂春 1607 Guichun 1607	-0.637	-0.371	0.227	0.554	0.323	0.401	0.646	0.709	0.461	弱耐荫 Low
齐黄 34 Qihuang 34	0.132	0.409	-2.357	0.203	0.496	0.577	0.000	0.634	0.444	弱耐荫 Low
华春 2 号 Huachun 2	0.019	-0.378	-0.602	-0.759	0.471	0.399	0.439	0.429	0.442	弱耐荫 Low
中黄 325 Zhonghuang 325	-0.144	0.138	-1.560	0.217	0.434	0.516	0.199	0.637	0.441	弱耐荫 Low
泉豆 20 Quandou 20	-0.176	0.231	-0.774	-0.933	0.427	0.537	0.395	0.392	0.440	弱耐荫 Low
成豆 18 Chengdou 18	0.104	-0.916	-1.026	0.166	0.490	0.277	0.333	0.626	0.435	弱耐荫 Low
桂春 16 号 Guichun 16	-0.240	-0.455	-0.717	-0.325	0.412	0.382	0.410	0.522	0.422	弱耐荫 Low
郑 1307 Zheng 1307	0.189	-1.522	-0.615	-0.559	0.509	0.141	0.435	0.472	0.407	弱耐荫 Low
桂春豆 111 Guichundou 111	-0.377	0.783	-1.670	-1.008	0.381	0.661	0.172	0.376	0.405	弱耐荫 Low
桂春 1602 Guichun 1602	-2.068	0.702	0.451	0.166	0.000	0.643	0.702	0.626	0.373	弱耐荫 Low
桂春 1608 Guichun 1608	-0.966	-2.145	0.795	0.773	0.249	0.000	0.788	0.756	0.373	弱耐荫 Low
莆豆 610 Pudou 610	-0.891	-0.183	-0.939	-0.471	0.266	0.443	0.354	0.490	0.357	弱耐荫 Low
桂春 1601 Guichun 1601	-1.811	0.270	0.424	-0.510	0.058	0.545	0.695	0.482	0.352	弱耐荫 Low
桂春 13 号 Guichun 13	-1.901	-0.252	-0.244	0.236	0.038	0.427	0.528	0.641	0.311	弱耐荫 Low
权重 Index weight	0.432	0.225	0.185	0.158						

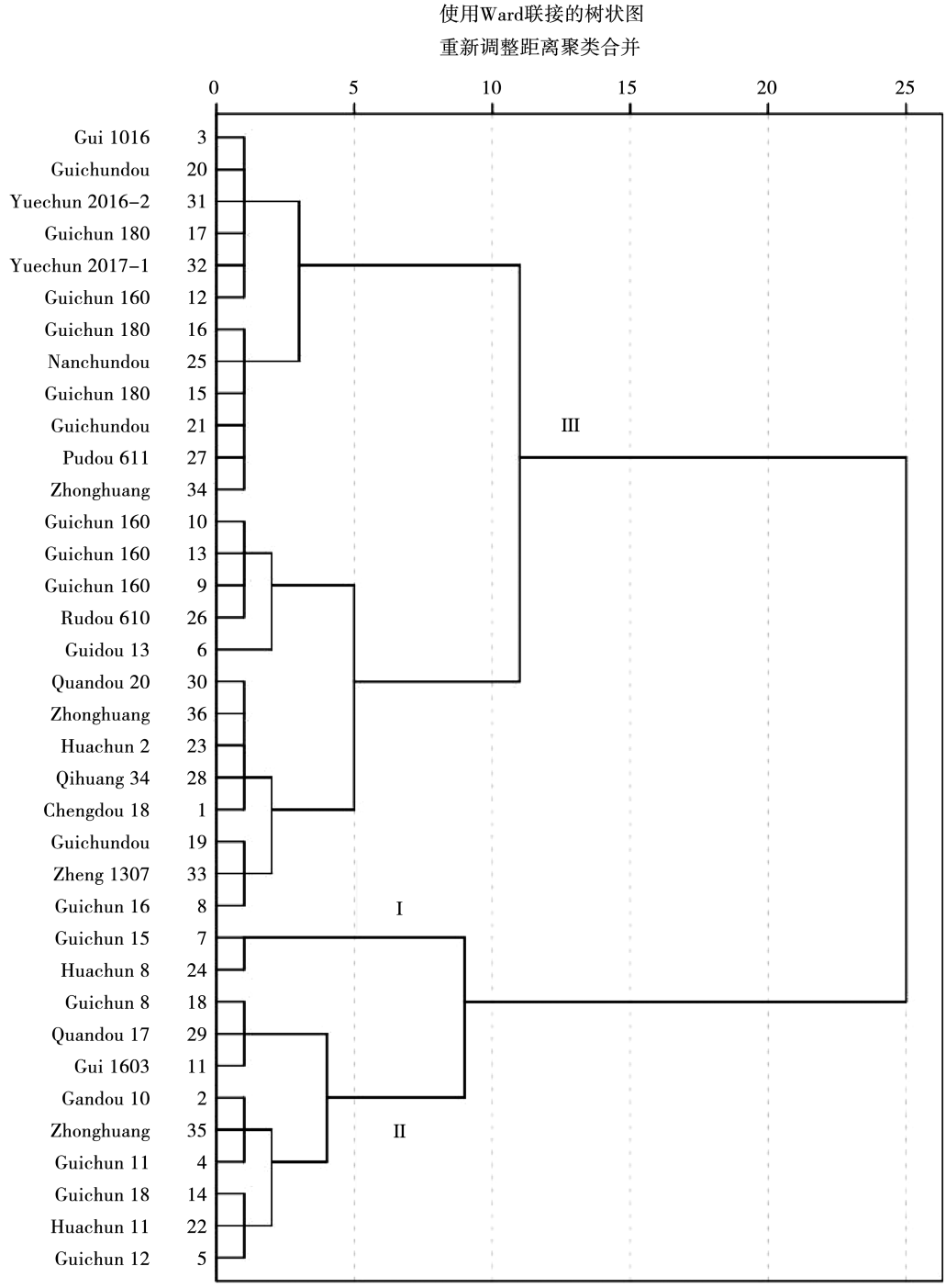


图 2　36 个大豆品种(系)综合耐荫能力聚类图

Fig. 2　Cluster dendrogram for shade tolerance of 36 soybean cultivars (lines)

2.3　逐步回归分析及耐荫鉴定指标选择

运用逐步回归分析法建立的耐荫性评价回归模型为:$D = -0.585 + 0.662X_2 + 0.152X_3 + 0.084X_5 + 0.211X_8$(P = 0.000)。

模型摘要结果显示:$R = 0.962$,调整的 $R^2 = 0.915$,残差的标准差 = 0.036 16。其中 R 为复相关系数,它表示模型中所有自变量与因变量之间的线性回归关系的密切程度大小,取值在 0 ~ 1 之间,R 值越大说明线性回归关系越密切;R^2 可决系数即是复相关系数的平方,调整的 R^2 越大表明模型拟合效果得越好;残卷的标准差(Std. Error of the Estimate)是残差的标准差,其大小反映了建立的模型预测因变量的精度,值越小说明建立的模型效果越好。分析表明该方程中的底荚高、主茎节数、单株荚数和每荚粒数这 4 个性状指标耐荫系数对大豆耐荫性有显著影响,利用其建立的回归方程拟合效果好且精度高,可以用于对广西大豆玉米带状复合种植条件下的大豆耐荫性评价。

3 讨论

本研究表明所有参试品种均能正常成熟,田间长势正常,这些品种均可在广西作春大豆种植。大豆与高秆作物玉米带状复合种植条件下,大豆后期受玉米荫蔽越来越严重,相较于清种(对照),株高变高、易倒伏,单株荚数、单株粒数和单株产量变低,与前人研究结果基本一致[7-8,16]。说明在玉米大豆间作系统中,耐荫胁迫是限制低位作物大豆产量的关键因子之一。因此,建立适宜广西的大豆耐荫性评价体系是有必要的。

目前,针对大豆耐荫性的评价指标和方法已有一些研究,陈怀珠等[12]、黄其椿等[13]通过模拟间套种条件,选择受荫蔽影响显著或与荫蔽相关性显著的指标得出综合耐荫系数来评定大豆种质的耐荫性,该方法简单易行,但忽略了各单项性状指标提供信息的重叠及重要程度,从而带来的不合理影响[14]。植物的耐荫性是由植物自身的遗传特性和诸多生物和非生物因素共同决定的,是一个重要的复合性状[20],大豆整个生育期对光照的反应都很敏感,不同种植模式、荫蔽程度等直接影响其在荫蔽条件下的生长发育[9,21-22],因此,对大豆的耐荫性评价时,应该对所研究的指标进行综合评价才更加有效。通过降维可用少数综合指标代替原本较多的单个指标,运用主成分分析、隶属函数法、聚类分析和逐步回归分析方法对大豆耐荫性进行综合评价已证明是一种有效的综合评价方法,武晓玲等[11]通过盆栽模拟荫蔽条件,建立了以大豆苗期性状对带状套作大豆的耐荫性进行综合鉴定评价的方法。李春红等[15]、赵银月等[16]通过创设的自然荫蔽条件,建立以大豆成熟期性状指标耐荫系数对带状间作大豆的耐荫性进行综合鉴定评价的方法。

本研究在广西大豆大田生产中推广的春玉米—春大豆带状复合种植创造的自然荫蔽条件下进行,鉴定筛选出相对准确、稳定、高效的大豆耐荫性鉴定指标。利用主成分分析将参试材料的 11 个单项指标转换成 4 个相互独立的综合指标,通过隶属函数法进一步得到参试材料综合耐荫性评价值(D),通过系统聚类将 36 个大豆参试材料划分为强耐荫型、中等耐荫型和弱耐荫型 3 种类型。

将 11 个单项性状指标耐荫系数作为自变量,D 值作为因变量,运用逐步回归分析法结合 R、调整的 R^2 和残差的标准差,建立相对准确、稳定、高效的耐荫性评价回归模型:$D = -0.585 + 0.662X_2 + 0.152X_3 + 0.084X_5 + 0.211X_8$,$R = 0.962$,调整的 $R^2 = 0.915$,残差的标准差 $= 0.036\ 16$。筛选出显著影响大豆—玉米间作耐荫性评价的 4 个性状指标,可作为广西玉米-大豆带状复合种植条件下的大豆耐荫性鉴定指标。

4 结论

按照耐荫性强弱将 36 个参试大豆试材划分为强耐荫型、中等耐荫型和弱耐荫型 3 大类,其中强耐荫型包含桂春 15 号和华春 8 号 2 个品种、中等耐荫型包含桂 1603、泉豆 17、桂春 8 号、桂春 11 号、中黄 306、赣豆 10 号、桂春 12 号、华春 11 号和桂春 18 号 9 个品种,弱耐荫性包含南春豆 31 等 25 个品种(系)。建立了大豆耐荫性评价数学模型:$D = 0.585 + 0.662X_2 + 0.152X_3 + 0.084X_5 + 0.211X_8$,$R = 0.962$,调整的 $R^2 = 0.915$,残差的标准差 $= 0.036\ 16$。筛选出底荚高(X_2)、主茎节数(X_3)、单株荚数(X_5)和每荚粒数(X_8)4 个性状指标,可作为广西玉米-大豆带状复合种植条件下的大豆耐荫性鉴定指标。

参考文献

[1] 汤复跃, 陈文杰, 韦清源, 等. 不同行比配置和玉米株型对玉米-大豆间种产量及效益影响[J]. 大豆科学,2019, 38(5): 726-732. (TANG F Y, CHEN W J, WEI Q Y, et al. Effects of row ratio and maize plant type on yield and benefit of maize-soybean intercropping [J]. Soybean Science, 2019, 38(5): 726-732.)

[2] TANG F Y, GOU X H, WEI Q Y, et al. Effects on agronomic traits, yield and benefit of one-year triple cropping "maize-soybean" strip intercropping system under reduced fertilizer application [J]. Agricultural Biotechnology, 2020, 9(3): 101-112.

[3] 汤复跃, 韦清源, 陈文杰, 等. 缓释 N 肥对一年三熟"玉米—大豆"间套作体系农艺性状、产量及效益影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(5): 734-741. (TANG F Y, WEI Q Y, CHEN W J, et al. Effects on agronomic traits, yield and benefit of one-year triple cropping "corn-soybean" intercropping system under slow-release N fertilizer[J]. Soybean Science, 2020, 39(5): 734-741.)

[4] 汤复跃, 韦清源, 陈文杰, 等. "春玉米‖春大豆/夏大豆"群体产量、效益及其种间竞争力的评定[J]. 西南农业学报, 2019, 32(7): 1518-1523. (TANG F Y, WEI Q Y, CHEN W J, et al. Evaluation on yield, benefit and and interspecific competitiveness of "spring maize ‖ spring soybean/summer soybean" intercropping [J]. Southwest China Jounal of Agricultural Science, 2019, 32(7): 1518-1523.)

[5] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、

氮营养表现及其种间竞争力的评定[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 50-58. (YONG T W, YANG W Y, XIANG D B, et al. Production and N nutrient performance of wheat-maize-soybean relay strip intercropping system and evaluation of interspecies competition[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1): 50-58.)

[6] 李盛蓝, 谭婷婷, 范元芳, 等. 玉米荫蔽对大豆光合特性与叶脉、气孔特征的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(1): 3782-3793. (LI S L, TAN T T, FAN Y F, et al. Effects of maize shading on photosynthetic characteristics, vein and stomatal characteristics of soybean [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 52(1): 3782-3793.)

[7] 刘婷, 刘卫国, 任梦露, 等. 遮荫程度对不同耐荫性大豆品种光合及抗倒程度的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(8): 1466-1475. (LIU T, LIU W G, REN M L, et al. Effects of shade degrees on photosynthesis and lodging resistance degree of different shade tolerance soybean [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 49(8): 1466-1475.)

[8] 宋艳霞, 杨文钰, 李卓玺, 等. 不同大豆品种幼苗叶片光合及叶绿素荧光特性对套作遮荫的响应[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(4): 474-479. (SONG Y X, YANG W Y, LI Z X, et al. The effects of shading on photosynthetic and fluorescent characteristics of soybean seedlings under maize soybean relay cropping [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2009, 31(4): 474-479.)

[9] 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.)

[10] 刘卫国, 蒋涛, 佘跃辉, 等. 大豆苗期茎秆对荫蔽胁迫响应的生理机制初探[J]. 中国农业科学, 2011, 33(2): 141-146. (LIU W G, JIANG T, SHE Y H, et al. Preliminary study on physiological response mechanism of soybean (*Glycine max*) stem to shade stress at seedling stage[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(2): 141-146.)

[11] 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]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 48(13): 2497-2507.)

[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阴性研究[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 Jounal of Agricultural Science, 2012, 25(6): 2212-2217.)

[14] 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.)

[15] 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.)

[16] 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 Q, 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.)

[17] 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.)

[18] 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: 60-61. (QIU L J, CHANG R Z, LIU Z X, et al. Descriptors and data standard for soybean(*Glycine* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 60-61.)

[19] 谢志坚. 农业科学中的模糊数学方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1983: 99-193. (XIE Z J. Method of fuzzy mathematics in agricultural science [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1983: 99-193.)

[20] 殷东生, 沈海龙. 森林植物耐荫性及其形态和生理适应性研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2687-2698. (YIN D S, SHEN H L. Shade tolerance and the adaptability of forest plants in morphology and physiology [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8): 2687-2698.)

[21] 韩天富, 盖钧镒, 王金陵, 等. 大豆开花逆转现象的发现[J]. 作物学报, 1998, 24(2): 168-171. (HAN T F, GAI J Y, WANG J L, et al. Discovery of flowering reversion in soybean plants [J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(2): 168-171.)

[22] 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: 296-304.