



弱光下不同大豆品种光合能力综合评价

王贝贝, 何乾瑞, 张佳伟, 王仲林, 范元芳, 杨文钰, 杨 峰

(四川农业大学 农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室/四川省作物带状复合种植工程技术研究中心, 四川 成都 611130)

摘 要:为筛选不同光合能力的大豆品种,以 37 个大豆品种苗期光合能力的 16 个参数为研究对象,通过盆栽试验设置正常光照($1\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和遮荫光照($400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)两种光照环境,对大豆苗期光合能力进行综合评价。结果表明,用主成分分析法可以将 16 个单项指标转换为 4 个独立的综合指标,使用隶属函数法计算综合光合能力评价价值(D),根据其大小将 37 个大豆品种分为 3 类,第一类是强光合能力类型,第二类是中度光合能力类型,第三类是低光合能力类型。采用逐步回归法建立了大豆苗期光合能力评价数学模型, $D = -0.950 + 0.118X_{12} + 0.230X_{16} + 0.436X_9 + 0.122X_{14} + 0.037X_4 + 0.567X_5 + 0.065X_{10}$ ($R^2 = 0.970, P = 0.000\,1$),筛选出茎生物量、总生物量、实际光化学量子效率、柄生物量、蒸腾速率、PS II 有效光化学量子产量、叶面积 7 个鉴定指标,可用于套作大豆苗期光合能力评价指标。

关键词:大豆;苗期光合能力;多元统计分析;综合评价

Comprehensive Evaluation of Photosynthetic Capacity of Different Soybean Varieties Under Low Light

WANG Bei-bei, HE Qian-rui, ZHANG Jia-wei, WANG Zhong-lin, FAN Yuan-fang, YANG Wen-yu, YANG Feng
(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture/Sichuan Engineering Research Center for Crop Strip Intercropping System, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to screen soybean varieties with different photosynthetic capacity, 16 parameters of photosynthetic capacity of 37 soybean varieties at seedling stage were taken as the research objects. Two light environments, normal light ($1\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and shade light ($400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) were set up in pot experiments to comprehensively evaluate the photosynthetic capacity of soybean seedlings. The results showed that 16 individual indicators were converted into 4 independent comprehensive indicators with the principal component analysis method, and the comprehensive photosynthetic capacity evaluation value (D) was calculated with the membership function method. According to their values, 37 soybean varieties were divided into 3 categories. The first category belonged to the strong photosynthetic capacity type, the second category belonged to the moderate photosynthetic capacity type, and the third category belonged to the low photosynthetic capacity type. The mathematical model of soybean shade tolerance evaluation was established by stepwise regression method, $D = -0.950 + 0.118X_{12} + 0.230X_{16} + 0.436X_9 + 0.122X_{14} + 0.037X_4 + 0.567X_5 + 0.065X_{10}$ ($R^2 = 0.970, P = 0.000\,1$), 7 identification indexes of stem biomass, total biomass, actual photochemical quantum efficiency, stalk biomass, transpiration rate, PS II effective photochemical quantum yield and leaf area were screened for soybean seedling photosynthetic capacity evaluation indexes.

Keywords: Soybean; Seedling stage photosynthetic capacity; Multivariate statistical analysis; Comprehensive evaluation

大豆是一种重要的粮食、油料、饲料、经济兼用作物^[1]。近年来,由于受到多方面的冲击,大豆供需矛盾尤为突出^[2]。大豆植株的光合能力是影响产量的重要因素之一,明确大豆各品种苗期光合能力的强弱并确定其鉴定指标,对筛选适宜的间套作高光效大豆品种以及提高产量具有重要意义。禾本科-豆科是间套作的完美搭档,其中由于玉米是 C4 作物,大豆是 C3 作物,玉米-大豆间套作种植成为主要种植模式之一^[3]。大豆为喜温喜光作物,然而在生产中高秆作物玉米的遮荫会影响其形态生长和生理特性,最终显著影响作物产量和品质^[4-6]。

前人研究表明,植物对荫蔽的响应机制主要分为避荫和耐荫两种类型^[7]。大多数作物通过改变形态来适应荫蔽环境,表现为植株伸长生长、远离荫蔽环境以捕获更多的光,这种适应特征称为避荫反应^[8]。同时,与净作相比,荫蔽导致植株茎秆纤细易倒伏^[9],叶片变薄变少,总生物量降低但叶面积增大、茎长增加,加速开花以提前完成生命周期^[10]。在荫蔽情况下,植物的生理生化指标也发生改变^[7],荫蔽导致大豆的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)、PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)、光化学荧光猝灭系数(QP)、非光化学荧

收稿日期:2020-04-20

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0101500)。

第一作者:王贝贝(1995—),女,在读硕士,主要从事大豆生理研究。E-mail:1289902418@qq.com。

通讯作者:杨峰(1981—),男,博士,教授,主要从事玉米、大豆生理生态及高光谱感在农业上的应用研究。E-mail:f.yang@sicau.edu.cn。

光猝灭系数(NPQ)呈降低趋势^[11-12],类胡萝卜素含量、叶绿素 a/b 值降低^[13],大豆荚数减少、百粒重和产量^[14]低于净作大豆,但胞间二氧化碳浓度(*Ci*)、大豆叶片初始荧光(*F*₀)、*Fv*'/*Fm*'、*Fq*'/*Fm* 增加,叶绿素含量、种子蛋白质含量升高^[15],最终显著影响作物产量和品质^[6]。与避荫植物相比,耐荫性植物的光补偿点较低,植株相对生长速率慢^[16],根系大且侧根数量少^[17],叶面积比(LAR)较高,具有耐荫性的幼苗适应荫蔽的能力比成年植物更强^[16,18]。陈怀珠等^[19]选择受荫蔽影响显著的结荚期株高、收获期株高、最低结荚高度、结荚期生物产量、单株荚数、单株粒数、单株产量和百粒重等8个性状的变异程度与荫蔽程度极显著相关,可以以综合耐荫系数为指标对大豆耐荫性进行评价。李春红等^[20]认为成熟期主茎节数、分枝数、节间长度、抗倒性、单株荚数、百粒重和单株粒重等7个性状建立的回归方程对大豆耐荫性评价有着重要作用。武晓玲等^[21]认为通过测定叶片干重、气孔导度、株高和暗下最大荧光产量4个指标,建立可用于大豆苗期耐荫性评价的数学模型,可以进行大豆苗期耐荫性强弱的快速鉴定和预测。虽然前人对大豆耐荫性的指标

及评价方法进行了一定的研究,但主要是集中在间作条件下大豆成熟期的耐荫性以及不同程度的遮荫进行鉴定,在玉米-大豆带状复合种植的生产实践中,套作大豆主要是在苗期受到玉米的荫蔽胁迫(玉米大豆共生期)从而限制大豆光合能力的提高,最终影响产量^[22],已有的评价方法仅指出单个指标耐荫性或综合耐荫评价,在苗期受到荫蔽胁迫下,对不同大豆品种的苗期光合能力耐荫评价指标及品种选育的研究较少,亟需构建针对大豆苗期光合能力进行综合评价的方法。本研究以多种多元统计分析方法为基础,以生理参数和生物量等各指标的光合能力耐荫系数计算耐荫性综合评价值,对荫蔽胁迫下37个大豆材料的16个光合能力相关性状进行鉴定和分析,建立大豆苗期光合能力的数学评价模型,以为选育大豆苗期光合能力较强的品种提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为根据前期苗期形态结果(附表1)筛选的不同耐荫性的37个大豆品种(表1)。

表1 供试大豆品种及选育单位

Table 1 Cultivars and breeding units of the experimental soybean

品种 Cultivar	选育单位 Breeding unit	品种 Cultivar	选育单位 Breeding unit
苏豆1号 Sudou 1	江苏省农业科学院	淮豆2号 Huaidou 2	江苏省农业科学院
南农 J5-2 Nannong J5-2	江苏省农业科学院	淮豆3号 Huaidou 3	江苏省农业科学院
乐山大黄豆 Leshandahuangdou	四川省农业科学院	八月黄 Bayuehuang	四川省农业科学院
宝山大豆 Baoshandadou	上海市农业科学院	十月黄 Shiyuehuang	四川省农业科学院
武义大青豆 Wuyidaqingdou	浙江省农业科学院	宜兴绿豆 Yixinglyudou	江苏省农业科学院
贡选1号 Gongxuan 1	四川省农业科学院	南农 J005 Nannong J005	江苏省农业科学院
崇州黄豆 Chongzhouhuangdou	上海市农业科学院	南农 88-48 Nannong 88-48	江苏省农业科学院
通豆3号 Tongdou 3	江苏省农业科学院	南农 J011 Nannong J011	江苏省农业科学院
南圣 T1125 Nansheng T1125	四川省农业科学院	白大豆 Baidadou	四川省农业科学院
南圣 Z322 Nansheng Z322	四川省农业科学院	溧阳青豆 Liyangqingdou	江苏省农业科学院
南豆 12 Nandou 12	四川省农业科学院	本地大豆 1 Bendidadou 1	四川省农业科学院
桂夏3号 Guixia 3	广西省农业科学院	本地大豆 2 Bendidadou 2	四川省农业科学院
八月黄 Bayuehuang	江苏省农业科学院	本地大豆 3 Bendidadou 3	四川省农业科学院
靖江青豆 Jingjiangqingdou	江苏省农业科学院	崇州绿豆 Chongzhoulyudou	四川省农业科学院
海门青豆 Haimenqingdou	江苏省农业科学院	六月黄 Liuyuehuang	四川省农业科学院
启东黄豆 Qidonghuangdou	江苏省农业科学院	五峰黄豆 Wufenghuangdou	湖北省农业科学院
溧阳黄豆 Liyanghuangdou	江苏省农业科学院	双峰青豆 Shuangfengqingdou	湖北省农业科学院
海门节节豆 Haimenjiejiedou	江苏省农业科学院	常熟青豆 Changshuqingdou	四川省农业科学院
长寿战豆 Changshouzhandou	四川省农业科学院		

1.2 试验设计

试验于 2018 年在四川农业大学人工气候室进行,设置正常光照 $1\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (CK)和遮荫光照 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (S)两个光照强度处理,3 次重复,每个重复 2 盆,每盆 2 株,在 25 ℃ 条件下催芽 1 d,壤土与基质以 1:1 比例混合装入花盆(12 cm×10 cm×10 cm),播种后放置在不同的光照处理下,在植株生长到苗期(30 d)时测定相关性状,试验期间各处理的其它环境条件及管理措施保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标 选取有代表性的植株 5 株,选取长势均匀一致的各品种大豆幼苗 5 株,用卷尺测定植株地上部至顶端生长点的距离为植株株高;用游标卡尺测定植株基部子叶节间宽度为植株茎粗^[23]。

1.3.2 光合特性 选择取倒数第一片展开复叶,采用 Li-6400 便携式光合仪(美国 Li-COR 公司)测定净光合速率(photosynthetic rate, P_n) (X_1)、气孔导度(stomatal conductance, G_s) (X_2)、胞间二氧化碳浓度(intercellular CO_2 concentration, C_i) (X_3)及蒸腾速率(transpiration rate, Tr) (X_4),设定内置光源光强为 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 $450\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,室内温度为 25 ℃。5 次重复,计算平均值为其光合参数数值^[23]。

1.3.3 叶绿素荧光参数 选取倒数第一片展开复叶,用 CFI 叶绿素荧光成像系统(英国 Technologica 公司)测定 PS II 最大光化学量子产量($X_5, F_v/F_m$)、非光化学猝灭系数(X_6, NPQ)、PS II 有效光化学量子产量($X_7, F_q'/F_m'$)、化学荧光猝灭系数(X_8, Q_p)、实际光化学量子效率($X_9, F_q'/F_m'$)。测定过程中,使大豆叶片充分暗处理 15 min 后获得暗反应数据,设置光强 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 处理叶片 15 min 后获得光处理数据^[24],5 次重复,求平均值作为其荧光参数数值。

1.3.4 生物量 使用打孔法^[11]测定叶面积(X_{10}),将茎、叶、柄、根系分别装进信封放在烘箱中,105 ℃ 下杀青 1 h,然后在 75 ℃ 下烘干至恒重,用精确度为 0.000 1 g 的电子天平称量植株各器官干重,测定根系生物量(X_{11})、茎生物量(X_{12})、叶片生物量(X_{13})、叶

柄生物量(X_{14})、地上生物量(X_{15})及总生物量(X_{16})。

1.3.5 光合能力评价指标 参考谢志坚^[25]的方法计算基于光合能力分析的光合能力评价系数(Photosynthetic Capacity Evaluation Coefficient, $PCEC$): $PCEC = \text{荫蔽处理性状值}/\text{对照处理性状值}$ 。计算不同大豆品种各综合指标的隶属函数值 $u(X_j)$, $u(X_j) = (X_j - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min})$,其中, $j = 1, 2, 3, \dots, n$,求得各个品种各综合指标的隶属函数值,式中 X_j 表示第 j 个综合指标, X_{\max} 表示第 j 个综合指标的最大值, X_{\min} 表示第 j 个综合指标的最小值。计算各综合指标的权重 W_j , $W_j = P_j/\sum_{i=1}^n P_i$,其中, $j = 1, 2, 3, \dots, n$, W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重; P_j 表示经主成分分析所得各大豆品种第 j 个综合指标的贡献率。计算综合光合能力评价(dand comprehensive, D), $D = \sum_{i=1}^n [u(X_j) \times W_j]$,其中, $j = 1, 2, 3, \dots, n$, D 值为各大豆品种在荫蔽胁迫下由综合指标评价所得的光合能力综合评价值。

1.4 数据分析

使用 Excel 2016 软件对数据进行整理与分析;使用 SPSS 17.0 软件进行主成分分析、聚类分析及逐步回归等多元分析。

2 结果与分析

2.1 各项指标的光合能力评价系数及其相关分析

2.1.1 大豆苗期各指标的光合能力评价系数 由表 2 可知,在光合能力评价系数中, $Tr(X_4)$ 、 $G_s(X_2)$ 的变异系数最大,分别为 54%、46%,其次为净光合速率(X_1)、叶柄干重(X_{14})的变异系数较大,分别为 41%、34%,说明荫蔽胁迫对蒸腾速率、气孔导度、净光合速率、叶柄生物量的影响较大。与对照相比,不同大豆品种经荫蔽处理后,净光合速率、叶片干重、总生物量的光合能力评价系数下降($PCEC < 1$),而各品种的其余性状如气孔导度等在各品种的规律不一致,有的上升($PCEC > 1$),有的下降($PCEC < 1$),由于同一品种不同单项指标的光合能力评价系数以及同一指标不同品种的光合能力评价系数均有较大变幅,根据不同单项指标的光合能力评价系数直接判断其光合能力的强弱显然过于片面。各品种各指标的光合能力评价系数详见附表 2。

表2 大豆苗期各指标的光合能力评价系数(PCEC)综合统计

Table 2 Comprehensive statistics on evaluation coefficient of photosynthetic capacity of individual indicators in soybean seedling stage

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 ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
平均值 Average	0.78	1.11	1.01	1.04	0.99	1.04	0.98	0.97	0.95	0.95	0.54	0.79	0.61	0.58	0.66	0.63
标准差 SD	0.32	0.52	0.16	0.57	0.03	0.25	0.06	0.10	0.08	0.19	0.13	0.23	0.14	0.20	0.16	0.15
变异系数 CV/%	0.41	0.46	0.16	0.54	0.03	0.24	0.06	0.10	0.08	0.20	0.25	0.28	0.23	0.34	0.25	0.23

2.1.2 大豆苗期各指标光合能力评价系数的相关系数矩阵 通过分析16个形态生理指标的相关性发现,各指标间均有一定的相关性,导致多指标所提供的特征信息发生相互叠加(表3)。且每一个单项指标在不同大豆品种耐荫性下所起作用的大小也并不相同,表明大豆苗期耐荫性是一个复杂的综合性状,直接利用各单项指标对大豆耐荫性评价是不准确的。因此,需要在此基础上更进一步采用其它多元统计方法进行分析 and 评价。

表3 大豆苗期各单项指标光合能力评价系数的相关系数矩阵

Table 3 Photosynthetic capacity evaluation coefficient of each single index in soybean seedlings stage

指标 Index	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
X ₁	1.000															
X ₂	0.092	1.000														
X ₃	0.065	0.098	1.000													
X ₄	0.279	0.697**	0.094	1.000												
X ₅	0.362	0.239	0.786**	0.159	1.000											
X ₆	0.027	0.381	0.588*	0.086	0.598	1.000										
X ₇	0.375	0.118	0.731**	0.094	0.972**	0.412	1.000									
X ₈	0.433*	0.167	0.705**	0.116	0.878**	0.641*	0.813**	1.000								
X ₉	0.409	0.098	0.760**	0.100	0.933**	0.514*	0.915**	0.948**	1.000							
X ₁₀	0.332	-0.079	0.610**	0.006	0.698**	0.313	0.722**	0.622**	0.738**	1.000						
X ₁₁	0.542**	0.278	0.293	0.308	0.523*	0.404	0.443	0.491*	0.499	0.527*	1.000					
X ₁₂	0.309	0.236	0.438	0.267	0.527*	0.373	0.487	0.439	0.499	0.585*	0.550	1.000				
X ₁₃	0.245	0.109	0.545*	0.167	0.623*	0.364	0.608**	0.470	0.568*	0.683**	0.546	0.852**	1.000			
X ₁₄	0.193	0.185	0.338	0.066	0.411	0.299	0.372	0.238	0.326	0.402	0.513	0.775**	0.77**	1.000		
X ₁₅	0.349	0.155	0.483	0.179	0.590*	0.396	0.558*	0.433	0.517	0.666*	0.590*	0.691*	0.748**	0.622**	1.000	
X ₁₆	0.379	0.184	0.481	0.224	0.608**	0.447	0.555*	0.474	0.540*	0.668*	0.708**	0.691*	0.743**	0.619**	0.980**	1.000

*, ** 分别表示在5%和1%水平差异显著。
* and ** indicate significant difference at 5% and 1% level, respectively.

2.1.3 主成分分析 以供试大豆品种各单项指标的光合能力评价系数为基本,计算每一个主成分的特征向量和贡献率,并根据绝对值将不同的特征指标划分为不同主成分的每个特征向量。根据特征值大于1的原则,共提取4个主成分。前4项综合评价指标(CI1~CI4)的贡献率分别为30.75%、17.82%、13.13%和11.89%,累计贡献率达到73.59%,其余可忽略不计(表4)。4个主成分是独立的综合指标,承载了原始指标的大部分信息。第一主成分主要是Fv/Fm、茎生物量、叶生物量、叶柄生物量、地上生物量、总生物量,承载了原始数据信息量的30.75%,代表了4.920个原始指标;第二主成分主要是Gs、Tr、Fq'/Fm'、叶面积,承载了原始数据信息量的17.82%,代表了2.851个原始指标;

第三主成分主要是叶绿素荧光参数,包括 Qp 、 Fq'/Fm' ,承载了原始数据信息量的 13.13%,代表了 2.100 个原始指标;第四主成分主要是净光合速率、胞间二氧化碳浓度、 NPQ 、根系生物量,承载了原始数据信息量的 11.89%,代表了 1.902 个原始指标。

表 4 各个性状主成分的特征向量及贡献率

Table 4 Eigen vectors and contribution rates of principal components of each trait					
主成分 Principe factor		CI1	CI2	CI3	CI4
特征值 Eigen value		4.920	2.851	2.100	1.902
贡献率 Contribution ratio/%		30.752	17.821	13.128	11.887
累计贡献率 Cumulative contribution ratio/%		30.752	48.572	61.700	73.587
特征向量 Eigen vector	X_1	0.042	0.037	0.159	-0.397
	X_2	-0.017	0.298	-0.089	-0.013
	X_3	0.041	-0.066	0.036	0.365
	X_4	0.006	0.245	-0.043	-0.165
	X_5	0.142	-0.104	-0.123	0.123
	X_6	0.008	0.177	0.155	0.358
	X_7	0.066	-0.260	-0.216	-0.159
	X_8	-0.021	-0.019	0.451	0.029
	X_9	0.042	-0.175	0.338	-0.038
	X_{10}	0.130	-0.137	0.098	-0.037
	X_{11}	0.112	0.141	0.138	-0.166
	X_{12}	0.165	0.070	0.029	0.018
	X_{13}	0.173	0.011	-0.040	0.050
	X_{14}	0.162	0.050	-0.067	0.069
	X_{15}	0.172	0.051	-0.017	-0.006
	X_{16}	0.173	0.080	0.023	-0.020

2.2 光合能力综合评价

2.2.1 隶属函数分析 由表 5 可知,在同一综合指标条件下,隶属函数变化范围为 0.000 ~ 1.000,如溧阳黄豆的 $u(X_1)$ 最大为 1.000,而乐山大黄豆的 $u(X_1)$ 值最小为 0.000,如第一主成分的隶属函数主要反映植株生长情况,表明在此综合指标下,溧阳

黄豆的干物质积最大,而乐山大黄豆最小。

2.2.2 权重确定 权重反映了各综合指标贡献率的大小,计算获得 4 个综合指标的权重分别是 0.308,0.178,0.131 和 0.119,表明第一主成分贡献率最高,第四主成分贡献率最小(表 5)。

表 5 各参试品种的综合指标值(CI)、权重、 $u(X_j)$ 、 D 值及综合评价

Table 5 The value of each material's comprehensive index (CI), index weight, $u(X_j)$, D and comprehensive evaluation										
品种 Cultivar	CI1	CI2	CI3	CI4	$u(X_1)$	$u(X_2)$	$u(X_3)$	$u(X_4)$	D	综合评价 Comprehensive evaluation
苏豆 1 号 Sudou 1	2.943	3.072	2.113	2.941	0.126	0.298	0.653	0.459	0.315	弱耐荫
南农 J5-2 Nannong J5-2	3.775	4.419	2.030	3.193	0.331	0.512	0.564	0.472	0.439	中度耐荫
乐山大黄豆 Leshandahuangdou	2.576	2.966	2.070	2.769	0.000	0.000	0.596	0.335	0.189	弱耐荫
宝山大豆 Baoshandadou	3.476	3.628	1.909	2.496	0.240	0.444	0.437	0.310	0.336	弱耐荫

续表 5

品种 Cultivar	CI1	CI2	CI3	CI4	$u(X_1)$	$u(X_2)$	$u(X_3)$	$u(X_4)$	D	综合评价 Comprehensive evaluation
武义大青豆 Wuyidaqingdou	2.908	3.445	2.266	3.152	0.119	0.231	0.816	0.430	0.321	弱耐荫
贡选 1 号 Gongxuan 1	4.247	3.943	1.755	3.122	0.477	0.450	0.221	0.435	0.418	中度耐荫
崇州黄豆 Chongzhouhuangdou	4.065	4.909	2.047	3.283	0.444	0.520	0.572	0.562	0.504	中度耐荫
通豆 3 号 Tongdou 3	5.755	3.842	1.949	3.341	0.815	0.406	0.471	0.538	0.610	中度耐荫
南圣 T1125 Nansheng T1125	4.251	3.723	2.000	3.061	0.483	0.473	0.534	0.470	0.488	中度耐荫
南圣 Z322 Nansheng Z322	4.530	3.728	2.060	3.246	0.489	0.323	0.577	0.482	0.463	中度耐荫
南豆 12 Nandou 12	5.196	4.189	2.234	3.169	0.657	0.472	1.000	0.509	0.620	强耐荫
桂夏 3 号 Guixia 3	4.413	3.992	2.078	3.194	0.464	0.417	0.630	0.518	0.491	中度耐荫
八月黄 Bayuehuang	4.546	4.421	1.842	3.228	0.502	0.428	0.318	0.461	0.445	中度耐荫
靖江青豆 Jingjiangqingdou	4.778	4.599	1.878	3.165	0.594	0.521	0.380	0.455	0.516	中度耐荫
海门青豆 Haimenqingdou	5.174	3.218	1.779	2.766	0.690	0.406	0.261	0.332	0.487	中度耐荫
启东黄豆 Qidonghuangdou	4.511	4.010	1.631	3.291	0.502	0.387	0.060	0.536	0.401	弱耐荫
溧阳黄豆 Liyanghuangdou	6.166	4.717	2.073	3.990	1.000	0.427	0.602	0.676	0.677	强耐荫
海门节节豆 Haimenjiejiadou	3.225	3.339	1.592	2.519	0.254	0.334	0.000	0.000	0.232	弱耐荫
长寿战豆 Changshouzhandou	3.686	6.338	1.803	3.766	0.299	0.486	0.274	0.641	0.395	弱耐荫
淮豆 2 号 Huaidou 2	4.492	5.168	1.722	3.052	0.439	0.450	0.152	0.440	0.391	弱耐荫
淮豆 3 号 Huaidou 3	4.062	6.508	1.781	3.460	0.365	0.530	0.230	0.575	0.415	中度耐荫
八月黄 Bayuehuang	3.938	6.089	1.747	2.656	0.342	1.000	0.201	0.283	0.358	弱耐荫
十月黄 Shiyuehuang	4.059	3.547	1.817	3.285	0.391	0.357	0.281	0.536	0.386	弱耐荫
宜兴绿豆 Yixinglyudou	3.291	3.380	2.058	3.961	0.223	0.178	0.568	0.583	0.332	弱耐荫
南农 J005 Nannong J005	4.231	4.464	1.956	3.274	0.431	0.376	0.460	0.492	0.433	中度耐荫
南农 88-48 Nannong 88-48	4.953	3.360	1.958	3.604	0.608	0.320	0.461	0.553	0.503	中度耐荫
南农 J011 Nannong J011	3.802	3.339	1.921	3.411	0.345	0.249	0.409	0.487	0.356	弱耐荫
白大豆 Baidadou	3.855	3.111	1.922	3.128	0.367	0.259	0.420	0.426	0.360	弱耐荫
溧阳青豆 Liyangqingdou	3.868	2.623	1.818	3.030	0.375	0.189	0.289	0.368	0.314	弱耐荫
本地大豆 1 Bendidadou 1	4.125	3.924	2.086	3.692	0.434	0.331	0.623	0.609	0.471	中度耐荫
本地大豆 2 Bendidadou 2	5.202	4.662	1.796	3.555	0.651	0.483	0.266	0.617	0.536	中度耐荫
本地大豆 3 Bendidadou 3	5.072	3.775	2.050	3.758	0.619	0.350	0.579	0.679	0.556	中度耐荫
崇州绿豆 Chongzhouliyudou	4.560	4.264	1.849	3.808	0.518	0.401	0.323	0.677	0.480	中度耐荫
六月黄 Liuyuehuang	4.041	3.166	1.725	3.124	0.418	0.323	0.182	0.474	0.362	弱耐荫
五峰黄豆 Wufenghuangdou	4.213	3.581	1.820	3.448	0.444	0.318	0.290	0.539	0.401	中度耐荫
双峰青豆 Shuangfengqingdou	5.046	3.883	2.074	3.796	0.630	0.338	0.612	1.000	0.565	中度耐荫
常熟青豆 Changshuqingdou	4.549	5.619	1.761	3.133	0.485	0.449	0.206	0.416	0.416	中度耐荫
权重 Index weight					0.308	0.178	0.131	0.119		

2.2.3 综合评价及分类 根据光合能力评价值 D 值,对各材料的光合能力进行排序。采用最大距离法对 D 值进行聚类分析,将 37 个供试品种划分为 3 类:南豆 12 和溧阳黄豆为第一类,综合性能较好,属于强光合能力类型;通豆 3 号、双峰青豆、本地大豆 3、本地大豆 2、靖江青豆、崇州黄豆、南农 88-48、桂夏 3 号、南圣 T1125、海门青豆、崇州绿豆、本地大豆 1、南圣 Z322、八月黄、南农 J5-2、南农 J005、贡选 1 号、常熟青豆、淮豆 3 号、五峰黄豆为第二类,

其综合性能适中,属于中度光合能力类型;启东黄豆、长寿战豆、淮豆 2 号、十月黄、六月黄、白大豆、八月黄、南农 J011、宝山 791、宜兴绿豆、苏豆 1 号、武义大青豆、溧阳青豆、海门节节豆和乐山大黄豆为第三类,其综合性能较差,属于弱光合能力类型(图 1)。其中,溧阳黄豆的 D 值最大,为 0.677,表明其光合能力最强;乐山大黄豆的 D 值最小,为 0.189,表明其光合能力最弱。

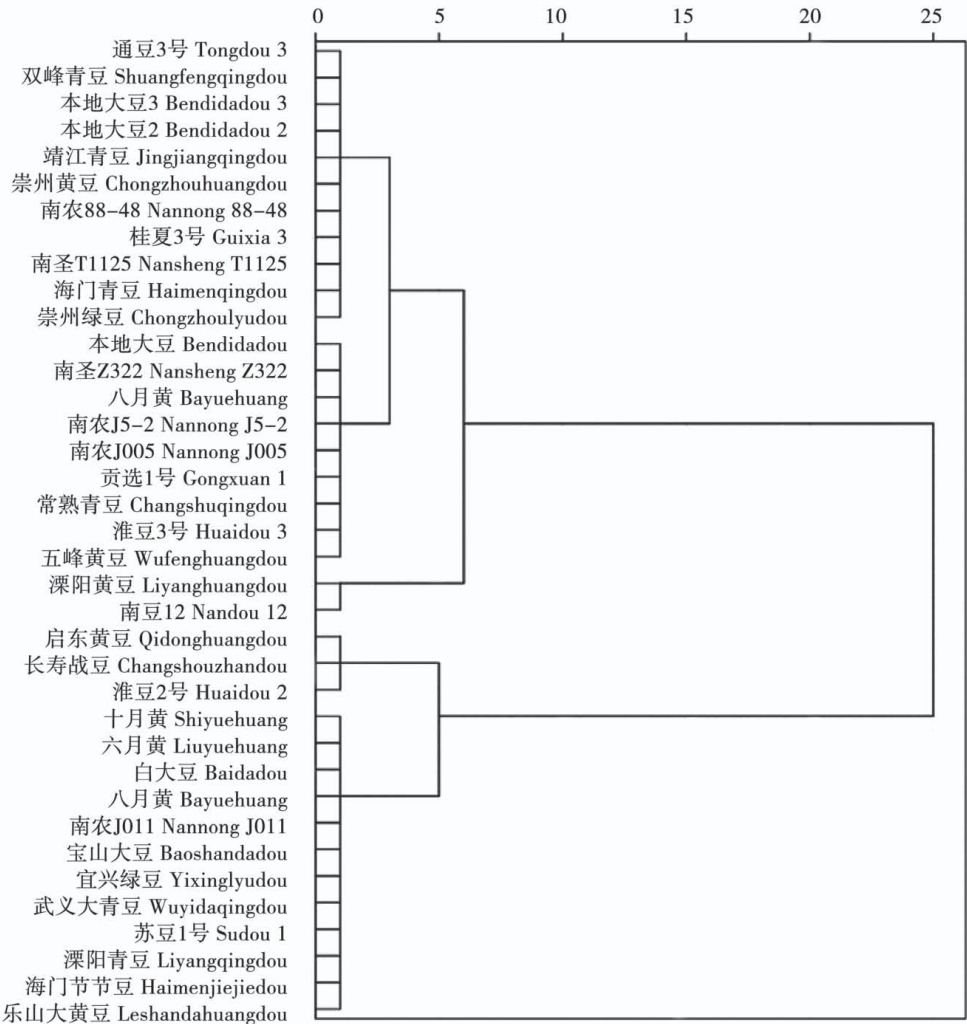


图 1 参试大豆品种聚类树状图

Fig. 1 The dendrogram of tested soybean varieties

2.3 回归分析及光合能力鉴定指标的选择

为了进一步阐明这些指标与品种光合能力的关系,选择可靠的光合能力鉴定指标,得到可用于评价大豆幼苗光合能力的数学模型,以耐荫综合评价值(D 值)为因变量,以各单项指标的光合能力耐荫系数为自变量,用逐步回归法建立最优回归方程: $D = -0.950 + 0.118X_{12} + 0.230X_{16} + 0.436X_9 + 0.122X_{14} + 0.037X_4 + 0.567X_5 + 0.065X_{10}$ ($R^2 =$

0.970, $P = 0.0001$)。由方程可以看出,在 16 个单项指标中,茎生物量、总生物量、实际光化学量子效率、叶柄生物量、蒸腾速率、PSII 有效光化学量子产量和叶面积等 7 个指标对大豆光合能力有显著影响,该方程可用于大豆苗期光合能力的综合评价。

2.4 不同品种光合能力类别的特征分析

根据聚类 and 逐步回归结果,不同光合能力类型大豆在对照和遮光处理下各主要性状的平均值如

表 6 所示。比较遮光处理后不同光合能力类型大豆材料的表现特征:第一类(强光合能力):茎生物量和总生物量高,实际光化学量子效率高,叶柄生物量高,蒸腾速率高,PS II 有效光化学量子产量高,叶面积大;第二类(中度光合能力):茎生物量和总生物量较高,实际光化学量子效率较高,叶柄生物量

较高,蒸腾速率较高,PS II 有效光化学量子产量较高,叶面积较大;第三类(弱光合能力):茎生物量和总生物量低,实际光化学量子效率低,叶柄生物量低,蒸腾速率低,PS II 有效光化学量子产量低,叶面积最小。

表 6 不同光合能力类型及性状的表现特征
Table 6 The performance characteristics of different photosynthetic ability types

性状 Trait	类型 Type	对照 CK	遮光 Shade
茎生物量 Stem biomass/g	强光合能力	0. 67 ± 0. 39	0. 50 ± 0. 13
	中度光合能力	0. 57 ± 0. 04	0. 47 ± 0. 16
	弱光合能力	0. 52 ± 0. 23	0. 34 ± 0. 15
总生物量 Total biomass/g	强光合能力	2. 60 ± 0. 63	1. 91 ± 0. 19
	中度光合能力	2. 35 ± 0. 54	1. 65 ± 0. 42
	弱光合能力	2. 16 ± 0. 64	1. 14 ± 0. 36
实际光化学量子效率 OE <i>Fq'/Fm'</i>	强光合能力	0. 26 ± 0. 02	0. 28 ± 0. 02
	中度光合能力	0. 26 ± 0. 02	0. 28 ± 0. 02
	弱光合能力	0. 25 ± 0. 01	0. 26 ± 0. 00
叶柄生物量 Leaf stalk biomass/g	强光合能力	0. 35 ± 0. 59	0. 09 ± 0. 02
	中度光合能力	0. 14 ± 0. 09	0. 08 ± 0. 03
	弱光合能力	0. 11 ± 0. 06	0. 05 ± 0. 03
蒸腾速率 <i>Tr</i> /(g· m ⁻² ·h ⁻¹)	强光合能力	2. 15 ± 1. 20	2. 12 ± 1. 05
	中度光合能力	2. 14 ± 0. 88	1. 83 ± 0. 91
	弱光合能力	1. 59 ± 1. 30	1. 24 ± 0. 77
PS II 有效光化学量子产量 <i>Fv'/Fm'</i>	强光合能力	0. 79 ± 0. 02	0. 79 ± 0. 02
	中度光合能力	0. 77 ± 0. 02	0. 79 ± 0. 03
	弱光合能力	0. 76 ± 0. 04	0. 78 ± 0. 00
叶面积 Leaf area/cm ²	强光合能力	3. 67 ± 0. 08	3. 54 ± 0. 04
	中度光合能力	3. 42 ± 0. 74	3. 20 ± 0. 81
	弱光合能力	3. 29 ± 1. 19	2. 66 ± 0. 95

3 讨 论

植物的耐荫性是一个重要的复合性状,由植物自身的遗传特性以及生物、非生物因素共同决定^[18,26],而植物的光合能力又直接反映了植物的生长情况。很多学者利用综合评价方法对不同作物的耐荫性^[20-21]、耐寒性^[27]和耐旱性^[28]等方面进行了研究。利用单项指标或多项指标提出了多种鉴定甘蓝型油菜、玉米等植物耐荫性的方法^[29-30],而

作物耐荫性评价可从种质特性、环境条件、相关指标等多方面进行综合评价分析,结果更具有代表性^[31]。

近年来,为保障我国大豆需求,同时确保主粮生产,玉米-大豆带状复合种植模式在我国四川、山东、河南等多个地区发展迅速,筛选出的适宜西南地区间套作的高光效大豆品种对进一步提高间套作大豆产量具有重要意义^[32]。陈怀珠等^[19]和黄

其椿等^[33]提出采用综合耐荫系数来评价大豆的耐荫性,虽然该方法简便易行,但是未考虑各指标对耐荫性的影响是不同的。为此,李春红等^[20]和武晓玲等^[21]提出了以每一项指标的耐荫系数为基本,利用多元统计法对大豆耐荫性进行综合评价,将不同耐荫性的大豆品系归类,弥补了前人方法的不足,为作物耐荫性评价提供了参考。

耐荫性评价因研究目的、种植模式、试验材料和选择指标等方面不同而对耐荫性分类的结果也不尽相同^[34],是在特定条件下的综合评价,而作物的光合能力等指标对耐荫性极为敏感,光合能力的强弱会影响作物的产量。针对大田生产中存在的实际问题,研究玉米荫蔽对套作大豆苗期生长发育的影响,并以大豆苗期光合能力为中心,利用大豆品种的表型、物质积累和光合参数等,对大豆幼苗的光合能力进行多元回归分析,采用主成分分析法把 16 个单项指标转换成 4 个综合指标,用隶属函数分析法得到各综合指标的评价值(D 值),通过 D 值聚类分析,将 37 个供试品种划分为强光合能力、中度光合能力和弱光合能力 3 种类型。其中南豆 12 属于强光合能力,与武晓玲等^[21]耐荫性品种筛选试验结果一致。在具体生产实践中,陈元凯等^[11]、宋艳霞等^[12]将南豆 12 品种与玉米进行套作,其形态特性、生理特性、产量等方面的耐荫性要优于桂夏 3 号、桂夏 7 号。采用逐步回归法建立了最优回归方程 $D = -0.950 + 0.118X_{12} + 0.230X_{16} + 0.436X_9 + 0.122X_{14} + 0.037X_4 + 0.567X_5 + 0.065X_{10}$,筛选出与光合能力显著相关的 7 个鉴定指标:茎生物量、总生物量、实际光化学量子效率、叶柄生物量、蒸腾速率、PS II 有效光化学量子产量、叶面积,这与李春红等^[20]和武晓玲等^[21]部分试验结果一致。本研究表明,荫蔽胁迫导致蒸腾速率降低、叶面积减小、同时根系长度下降,直接影响了根系生物量和茎、叶柄生物量,造成这一现象的原因可能是荫蔽胁迫影响了根系对水分吸收,进而影响了叶片气孔闭合^[32]。 Fv/Fm 和 Fq'/Fm' 反映了植物对光能的吸收和传递,在荫蔽条件下, Fq'/Fm' 增加和 Fv/Fm 降低表明荫蔽导致大豆幼苗叶片 PSII 反应中心的光合电子传递速率下降,导致聚集在 PSII 反应中心的光能过剩,为了维持光能的正常运转,通过降低散热量提高大豆叶片的光化学反应效率。该规律可以为选择和鉴定高光效品种提供

依据。

本研究中各品种的苗期株高、茎粗、主茎节数随生育时期增加呈上升趋势且品种间差异显著,划分为 3 种光合能力类型,强光合能力和中度光合能力类型品种的 10,20,30 d 的株高、茎粗、主茎节数表现为株高中等或较高、茎粗较大、主茎节数适中的品种耐荫性较好(附表 1),为今后选育光合能力较强的大豆品种提供了一定的理论基础。

前人研究表明,农艺性状对荫蔽胁迫最敏感,荫蔽降低了大豆光合作用,地上部分合成的干物质质量减少^[23]。为获得更多光能,更多干物质向茎部分配,而向根部分配减少,导致根系的伸长没有充足的能量供应,从而根系表面积和根系总体积减小^[35]。然而,不同光合能力鉴定指标对荫蔽的敏感程度、不同指标间有何关系等问题目前尚无定论,且多数研究未将生物量和光合能力指标结合起来考虑。本研究表明,强光合能力品种的 Fq'/Fm' 、 Fv/Fm 相比中度光合能力和弱光合能力品种分别呈增加和降低趋势,这与杨才琼等^[32]研究结果基本一致;强光合能力品种的茎生物量、总生物量、叶柄生物量、叶面积、蒸腾速率相比中度光合能力和弱光合能力类型品种增加,这些指标是反映植物生命活动强弱的关键。另外,本研究并未指出植物地下部分活动强弱、不同品种的光能传递能力与苗期耐荫性的关系,后续需要深入研究。

4 结 论

通过测定 37 个大豆品种的 16 个与苗期光合能力相关参数,评价得到强光合能力大豆品种 2 个、中度光合能力大豆品种 20 个和弱光合能力大豆品种 15 个,并建立了大豆苗期光合能力评价数学模型。在相同处理条件下,茎生物量、总生物量、实际光化学量子效率、叶柄生物量、蒸腾速率、PS II 有效光化学量子产量、叶面积可以作为套作大豆品种苗期光合能力鉴定指标,研究结果可为大豆苗期强光合能力品种的选育提供参考。

参考文献

[1] Singh R J, Hymowitz T. Soybean genetic resources and crop improvement[J]. Genome, 2011, 42(4): 605-616.

[2] 杨文钰,雍太文,任万军,等. 发展套作大豆,振兴大豆产业[J]. 大豆科学, 2008, 27(1): 1-7. (Yang W Y, Yong T W,

- Ren W J, et al. Develop relay-planting soybean, revitalize soybean industry[J]. Soybean Science, 2008,27(1):1-7.)
- [3] 查霆,钟宣伯,周启政,等. 我国大豆产业发展现状及振兴策略[J]. 大豆科学, 2018,37(3): 458-463. (Zha T, Zhong X B, Zhou Q Z, et al. Development sstatus of China's soybean industry and strategies of revitalizing[J]. Soybean Science, 2018,37(3): 458-463.)
- [4] Yang F, Liao D, Wu X, et al. Effect of aboveground and belowground interactions on the intercrop yields in maize-soybean relay intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2017, 203:16-23.
- [5] 王一,杨文钰,张霞,等. 不同生育时期遮阴对大豆形态性状和产量的影响[J]. 作物学报,2013,39(10):1871-1879. (Wang Y, Yang W Y, Zhang X, et al. Effects of shading at different growth stages on different traits and yield of soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013,39(10):1871-1879.)
- [6] 易九红,张超凡,黄艳岚,等. 遮荫对作物产量和品质的影响及其生理响应研究进展[J]. 作物研究, 2013,27(1):68-73. (Yi J H, Zhang C F, Huang Y L, et al. Effect of shading on crop yield and quality and its' physiological response [J]. Crop Research, 2013,27(1):68-73.)
- [7] Gommers C M M, Visser E J W, Onge K R S. Shade tolerance: When growing tall is not an option[J]. Trends in Plant Science, 2013,18(2):65-71.
- [8] Schmitt J, Stinchcombe J R, Hesche M S. The adaptive evolution of plasticity: Phytochrome-mediated shade avoidance responses [J]. Integrative and Comparative Biology, 2003, 43 (3): 459-469.
- [9] 任梦露,刘卫国,刘婷,等. 荫蔽胁迫下大豆茎秆形态建成的转录组分析[J]. 作物学报, 2016,42(9):1319-1331. (Ren M L, Liu W G, Liu T, et al. Transcriptome analysis of stem morphogenesis under shade stress in soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016,42(9):1319-1331.)
- [10] Brainard D C, Bellinder R R, Tommaso A D. Effects of canopy shade on the morphology, phenology, and seed characteristics of Powell amaranth (*Amaranthus powellii*) [J]. Weed Science, 2005,53(2):175-186.
- [11] 陈元凯,冯铃洋,Raza M A,等. 四川地区玉米/大豆带状套作对大豆形态、叶绿素荧光特征及系统产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2019,27(6):870-879. (Chen Y K, Feng L Y, Raza M A, et al. Effect of maize/soybean relay strip intercropping system on soybean morphology, chlorophyll fluorescence, and yield in Sichuan area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019,27(6):870-879.)
- [12] 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.)
- [13] 王竹,杨文钰,吴其林. 玉/豆套作荫蔽对大豆光合特性与产量的影响[J]. 作物学报, 2007, 33 (9): 1502-1507. (Wang Z, Yang W Y, Wu Q L. Effects of shading in maize/soybean relay-cropping system on the photosynthetic characteristics and yield of soybean [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33 (9): 1502-1507.)
- [14] Nagata M, Yamamoto N, Miyamoto T. Enhanced hyphal growth of arbuscular mycorrhizae by root exudates derived from high R/FR treated *Lotus japonicus* [J]. Plant Signal Behavior, 2016, 11 (6): e1187356.
- [15] Su B Y, Song Y X, Song C. Growth and photosynthetic responses of soybean seedlings to maize shading in relay intercropping system in southwest China[J]. Photosynthetica, 2014,52(3):332-340.
- [16] Valladares F, Niinemets Ü. Shade Tolerance, akey plant feature of complex nature and consequences [J]. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics,2008,39(1):237-257.
- [17] Zadworny M, Comas L H, Eissenstat D M. Linking fine root morphology, hydraulic functioning and shade tolerance of trees [J]. Annals of Botany,2018,112(2):451-462.
- [18] Casal J J. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade[J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, 64 (1): 403-427.
- [19] 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 main characters of soybean and preliminary study on identification methods of soybean tolerance[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences[J], 2003,25(4):78-82.)
- [20] 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.)
- [21] 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.)
- [22] Chang T G, Zhu X. Source-sink interaction: A century old concept under the light of modern molecular systems biology[J]. Journal of Experimental Botany,2017, 68(16): 4417-4431.
- [23] 于晓波,罗玲,曾宪堂,等. 套作弱光胁迫对大豆苗期根系形态和生理活性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015,37(2):61-69. (Yu X B, Luo L, Zeng X T, et al. Response of roots morphology and physiology to shading in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,

2015,37(2):61-69.)

[24] 武晓玲,张丽君,聂邵仙,等. 弱光对大豆苗期生长及光合荧光特性的影响[J]. 大豆科学,2014,33(1):53-57. (Wu X L,L Zhang L J,Nie S X, et al. Effects of low light on growth and photosynthetic fluorescence characteristics in soybean seedling [J]. Soybean Science,2014,33(1):53-57.)

[25] 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.)

[26] 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: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(8):2687-2698.)

[27] 武辉,侯丽丽,周艳飞,等. 不同棉花基因型幼苗耐寒性分析及其鉴定指标筛选[J]. 中国农业科学,2012,45(9):1703-1713. (Wu H, Hou L L, Zhou Y F, et al. Analysis of chilling-tolerance and determination of chilling-tolerance evaluation indicators in cotton of different genotypes [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012,45(9):1703-1713.)

[28] 罗俊杰,欧巧明,叶春雷,等. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 作物学报,2014,40(7):1259-1273. (Luo J J,Ou Q M,Ye C L, et al. Comprehensive valuation of drought resistance and screening of indices of important flax cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica,2014,40(7):1259-1273.)

[29] 梁颖,李加纳. 甘蓝型油菜耐荫性的品种差异[J]. 作物学报,2004,30(4):360-364. (Liang Y, Li J N. The varietal difference of tolerance to low light intensity in rape (*Brassica napus* L.) plants[J]. Acta Agronomica Sinica,2004,30(4):360-364.)

[30] 袁刘正,李潮海,王秀萍,等. 不同玉米自交系耐荫性比较[J]. 玉米科学,2018,16(6):19-23. (Yuan L Z, Li C H,Wang X P, et al. Comparison of shade- tolerance among different maize (*Zea Mays* L.) inbred lines [J]. Journal of Maize Sciences, 2008,16(6):19-23.)

[31] 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):41-47. (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):41-47.)

[32] 杨才琼,胡宝予,吴海军,等. 黑豆种质苗期耐荫性评价及其根系对弱光胁迫的响应[J]. 中国生态农业学报,2017,25(6):893-902. (Yang C Q, Hu B Y,Wu H J, et al. Evaluation for shade tolerance of black soybean germplasms and their root structure response to shade stress at seedling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2017,25(6):893-902.)

[33] 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 of Agricultural Sciences, 2012,25(6):2212-2217.)

[34] 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.)

[35] 吴雨珊,龚万灼,廖敦平,等. 带状套作荫蔽及复光对不同大豆品种(系)生长及产量的影响[J]. 作物学报,2015,41(11):1740-1747. (Wu Y S,Gong W Z,Liao D P, et al. Effects of shade and light recovery on soybean cultivars (lines) and its relationship with yield in relay strip intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica,2015,41(11):1740-1747.)

附表 1 供试大豆品种及形态特点								
Table 1 Cultivars and morphological characters of the experimental soybean								
品种 Cultivar	株高 Plant height/cm			茎粗 Stem diameter/cm			主茎节数 Main stem nodes number	
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d	20 d	30 d
苏豆 1 号 Sudou 1	14. 83 ±0. 21	25. 53 ±2. 31	49. 57 ±1. 03	2. 38 ±0. 19	2. 68 ±0. 02	2. 92 ±0. 11	3. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00
南农 J5-2 Nannong J5-2	13. 37 ±0. 21	25. 60 ±0. 17	43. 37 ±0. 86	2. 34 ±0. 04	2. 65 ±0. 29	3. 73 ±0. 11	3. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00
乐山大黄豆 Leshandahuangdou	10. 20 ±0. 46	20. 77 ±0. 95	46. 60 ±1. 66	1. 93 ±0. 15	2. 50 ±0. 17	2. 53 ±0. 06	3. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00
宝山大豆 Baoshandadou	5. 53 ±0. 80	33. 27 ±5. 78	61. 20 ±2. 78	2. 12 ±0. 06	2. 33 ±0. 14	2. 76 ±0. 71	3. 00 ±0. 00	3. 00 ±0. 00
武义大青豆 Wuyidaqingdou	12. 67 ±0. 38	26. 30 ±0. 46	49. 73 ±0. 15	2. 07 ±0. 10	2. 80 ±0. 21	2. 48 ±0. 13	3. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00
贡选 1 号 Gongxuan 1	16. 33 ±1. 03	37. 03 ±0. 59	56. 93 ±2. 49	2. 29 ±0. 15	2. 91 ±0. 06	2. 89 ±0. 37	3. 00 ±0. 00	3. 67 ±0. 00
崇州黄豆 Chongzhouhuangdou	11. 53 ±1. 01	25. 00 ±0. 26	45. 40 ±0. 87	2. 75 ±0. 36	2. 87 ±0. 16	3. 17 ±0. 20	3. 00 ±0. 00	3. 00 ±0. 00
通豆 3 号 Tongdou 3	9. 90 ±0. 72	20. 97 ±0. 23	50. 80 ±2. 93	1. 57 ±0. 12	3. 75 ±0. 13	2. 80 ±0. 15	2. 33 ±0. 58	4. 00 ±0. 00
南圣 T1125 Nansheng T1125	13. 77 ±0. 40	36. 93 ±0. 86	65. 80 ±1. 35	2. 48 ±0. 12	2. 50 ±0. 17	3. 63 ±0. 20	2. 67 ±0. 58	5. 00 ±0. 58
南圣 Z322 Nansheng Z322	11. 20 ±0. 72	18. 50 ±0. 10	36. 73 ±0. 50	1. 78 ±0. 09	2. 23 ±0. 13	3. 13 ±0. 18	2. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 58
南豆 12 Nandou 12	6. 13 ±0. 25	11. 00 ±0. 69	27. 57 ±0. 35	2. 57 ±0. 25	2. 30 ±0. 06	3. 61 ±0. 15	2. 67 ±0. 58	4. 33 ±0. 00
桂夏 3 号 Guixia 3	8. 43 ±0. 65	12. 53 ±0. 49	23. 10 ±0. 10	1. 92 ±0. 06	2. 71 ±0. 16	2. 92 ±0. 05	3. 00 ±0. 00	5. 00 ±0. 58
八月黄 Bayuehuang	11. 53 ±0. 31	30. 97 ±1. 79	62. 10 ±7. 92	2. 67 ±0. 07	2. 53 ±0. 02	4. 20 ±0. 25	2. 00 ±0. 00	3. 00 ±0. 00
靖江青豆 Jingjiangqingdou	8. 83 ±0. 61	17. 30 ±1. 31	52. 23 ±4. 82	2. 16 ±0. 10	2. 53 ±0. 13	3. 30 ±0. 05	2. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00
海门青豆 Haimenqingdou	7. 23 ±0. 67	11. 73 ±0. 61	34. 63 ±1. 40	2. 25 ±0. 22	1. 87 ±0. 04	3. 43 ±0. 25	2. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00
启东黄豆 Qidonghuangdou	8. 00 ±1. 01	10. 17 ±1. 19	34. 47 ±0. 64	2. 48 ±0. 13	2. 27 ±0. 39	3. 65 ±0. 19	2. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00
溧阳黄豆 Liyanghuangdou	7. 53 ±1. 80	15. 60 ±0. 50	27. 80 ±1. 21	2. 33 ±0. 28	2. 03 ±0. 21	3. 43 ±0. 15	2. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00
海门节节豆 Haimenjiejiadou	6. 47 ±0. 85	8. 07 ±0. 25	27. 10 ±2. 55	2. 33 ±0. 06	2. 30 ±0. 14	3. 18 ±0. 62	1. 00 ±0. 00	4. 00 ±0. 00

续附表 1

品种 Cultivar	株高 Plant height/cm			茎粗 Stem diameter/cm			主茎节数 Main stem nodes number	
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d	20 d	30 d
长寿战豆 Changshouzhandou	11.00 ±0.36	14.43 ±1.12	26.03 ±2.75	1.68 ±0.05	2.78 ±0.09	2.66 ±0.02	2.00 ±0.00	4.00 ±0.00
常熟青豆 Changshuqingdou	13.27 ±1.81	17.30 ±2.05	42.47 ±5.77	2.03 ±0.15	2.83 ±0.11	2.69 ±0.20	2.00 ±0.00	4.00 ±0.00
淮豆 2 号 Huaidou 2	15.43 ±1.15	31.67 ±1.01	42.67 ±1.56	2.80 ±0.88	2.37 ±0.07	2.99 ±0.07	4.00 ±0.00	5.00 ±0.00
淮豆 3 号 Huaidou 3	9.73 ±0.76	27.77 ±2.26	56.83 ±9.04	1.72 ±0.05	2.53 ±0.11	2.49 ±0.25	3.00 ±0.00	5.00 ±0.00
八月黄 Bayuehuang	11.73 ±0.70	14.33 ±0.47	14.30 ±1.95	2.34 ±0.14	2.66 ±0.09	2.97 ±0.12	2.00 ±0.00	4.00 ±0.00
十月黄 Shiyuehuang	6.43 ±0.72	8.17 ±0.97	12.97 ±1.67	2.42 ±0.25	2.43 ±0.15	3.10 ±0.15	2.00 ±0.00	4.00 ±0.00
宜兴绿豆 Yixinglyudou	14.53 ±1.32	48.03 ±4.16	55.80 ±1.76	1.93 ±0.16	2.99 ±0.15	3.15 ±0.36	3.00 ±0.00	5.33 ±0.00
南农 J005 Nannong J005	11.60 ±0.35	24.27 ±2.06	60.97 ±5.78	2.06 ±0.13	3.14 ±0.11	2.56 ±0.14	2.00 ±0.00	4.00 ±0.00
南农 88-48 Nannong 88-48	13.50 ±0.61	39.63 ±6.54	55.50 ±2.01	1.34 ±0.15	2.42 ±0.12	2.26 ±0.04	3.00 ±0.00	4.00 ±0.00
南农 J011 Nannong J011	12.33 ±0.35	18.43 ±1.50	47.43 ±5.55	1.70 ±0.17	2.32 ±0.06	2.91 ±0.09	3.00 ±0.00	5.33 ±0.00
白大豆 Baidadou	5.90 ±0.60	9.30 ±0.98	20.90 ±2.34	2.59 ±0.03	2.97 ±0.60	3.18 ±0.21	2.67 ±0.58	4.00 ±0.00
溧阳青豆 Liyangqingdou	14.80 ±0.70	25.80 ±2.35	63.03 ±2.81	2.50 ±0.12	2.66 ±0.16	2.79 ±0.16	3.00 ±0.00	6.00 ±0.58
本地大豆 1 Bendidadou 1	9.80 ±0.46	17.17 ±0.58	32.10 ±2.23	2.07 ±0.06	2.78 ±0.17	2.77 ±0.09	2.67 ±0.58	4.00 ±0.00
本地大豆 2 Bendidadou 2	8.77 ±0.29	20.10 ±0.36	41.50 ±1.06	1.70 ±0.07	3.11 ±0.19	2.53 ±0.02	2.33 ±0.58	4.00 ±0.58
本地大豆 3 Bendidadou 3	11.53 ±0.60	18.57 ±0.64	35.80 ±1.13	1.51 ±0.07	3.07 ±0.06	2.58 ±0.18	2.33 ±0.58	4.00 ±0.58
崇州绿豆 Chongzhoulyudou	9.60 ±0.46	22.40 ±0.53	37.23 ±1.94	1.51 ±0.09	2.85 ±0.17	2.60 ±0.07	3.00 ±0.00	4.00 ±0.58
六月黄 Liuyuehuang	10.43 ±0.15	24.80 ±0.80	39.57 ±2.32	1.60 ±0.23	2.49 ±0.07	2.42 ±0.08	3.00 ±0.00	4.00 ±0.00
五峰黄豆 Wufenghuangdou	9.77 ±0.32	24.00 ±0.61	48.93 ±5.74	1.79 ±0.10	2.53 ±0.24	2.99 ±0.13	3.00 ±0.00	4.00 ±0.00
双峰青豆 Shuangfengqingdou	11.07 ±0.15	20.97 ±0.45	47.23 ±1.47	1.71 ±0.09	2.65 ±0.53	2.58 ±0.24	3.00 ±0.00	4.00 ±0.00

附表2 大豆苗期各指标的光合能力评价系数(PCEC)

Table 2 Evaluation coefficient of photosynthetic capacity of individual indicators in soybean seedling stage

品种 Cultivar	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
苏豆1号 Sudou 1	0.92	0.51	0.92	0.64	0.95	0.63	1.02	1.09	1.02	0.90	0.48	0.48	0.39	0.28	0.42	0.42
南农 J5-2 Nannong J5-2	0.62	0.96	1.04	1.00	0.98	1.01	1.00	1.01	1.02	1.46	0.53	0.68	0.53	0.37	0.61	0.61
乐山大黄豆 Leshandahuangdou	0.56	0.71	1.01	0.83	0.90	0.88	0.90	1.08	0.99	0.52	0.33	0.40	0.34	0.25	0.35	0.35
宝山大豆 Baoshandadou	0.65	0.63	0.97	0.76	0.95	0.50	1.07	0.88	1.02	1.17	0.38	0.67	0.53	0.30	0.57	0.46
武义大青豆 Wuyidaqingdou	0.72	0.81	1.00	0.91	0.95	1.13	0.92	1.24	1.02	0.81	0.30	0.52	0.35	0.28	0.42	0.39
贡选1号 Gongxuan 1	0.52	0.92	1.06	0.90	1.02	1.05	1.06	0.86	0.90	1.07	0.49	0.83	0.58	0.35	0.74	0.71
崇州黄豆 Chongzhouhuangdou	0.85	1.41	1.01	1.52	1.02	0.76	1.04	1.05	0.99	0.94	0.67	0.75	0.61	0.51	0.59	0.59
通豆3号 Tongdou 3	0.72	0.84	0.95	0.95	1.03	1.00	1.03	0.95	1.00	1.02	0.67	0.85	0.75	0.83	1.18	0.12
南圣 T1125 Nansheng T1125	0.87	0.49	1.03	1.00	1.02	0.76	1.11	0.97	1.03	1.13	0.40	0.63	0.59	0.50	0.82	0.70
南圣 Z322 Nansheng Z322	0.75	0.85	0.94	0.97	0.97	1.08	0.96	1.09	0.97	0.95	0.48	0.93	0.77	0.54	0.66	0.65
南豆12 Nandou 12	0.75	0.67	0.99	1.33	1.00	0.80	1.05	1.08	1.15	1.14	0.62	1.33	0.92	0.79	0.58	0.58
桂夏3号 Guixia 3	0.81	0.81	0.96	0.97	0.97	0.81	0.99	1.02	1.06	1.23	0.61	0.72	0.61	0.47	0.84	0.81
八月黄 Bayuehuang	0.37	1.33	1.35	1.05	0.98	1.04	0.97	0.94	0.91	1.07	0.46	0.88	0.72	0.56	0.73	0.67
靖江青豆 Jingjiangqingdou	0.50	1.55	1.29	0.94	1.03	0.97	1.05	0.91	0.97	1.06	0.41	0.91	0.66	0.86	0.70	0.63
海门青豆 Haimenqingdou	0.46	0.60	1.07	0.49	1.03	0.87	1.10	0.85	0.93	1.03	0.36	1.08	0.89	1.02	0.61	0.55
启东黄豆 Qidonghuangdou	0.88	1.21	1.06	1.02	0.99	0.87	1.03	0.81	0.83	0.75	0.48	0.84	0.62	0.67	0.73	0.65
溧阳黄豆 Liyanghuangdou	0.72	1.25	1.27	1.41	1.01	1.45	0.93	1.07	1.00	1.13	0.55	1.46	0.81	0.86	1.07	0.95
海门节节豆 Haimenjiejiadou	0.49	0.90	0.98	0.72	1.01	0.79	1.07	0.77	0.83	0.64	0.26	0.49	0.45	0.44	0.45	0.39
长寿战豆 Changshouzhandou	0.58	1.78	1.35	2.94	0.96	1.18	0.88	0.90	0.90	0.73	0.66	0.62	0.50	0.44	0.55	0.61
常熟青豆 Changshuqingdou	0.51	1.87	0.92	2.01	0.97	1.20	0.89	0.92	0.84	0.84	0.50	0.91	0.70	0.61	0.70	0.65
淮豆2号 Huaidou 2	0.88	1.74	0.65	1.70	0.94	1.01	0.96	0.91	0.81	0.77	0.52	0.92	0.62	0.55	0.76	0.70
淮豆3号 Huaidou 3	0.94	2.53	0.83	2.35	0.95	1.07	0.89	0.93	0.85	0.74	0.61	0.80	0.59	0.48	0.62	0.62
八月黄 Bayuehuang	0.47	2.36	0.59	1.99	0.96	1.05	0.95	0.88	0.87	0.80	0.55	0.71	0.52	0.62	0.57	0.55
十月黄 Shiyuehuang	0.92	0.69	0.66	0.79	0.98	0.99	1.00	0.94	0.88	1.06	0.73	0.78	0.54	0.47	0.63	0.66
宜兴绿豆 Yixinglyudou	0.51	1.31	1.13	0.45	0.98	1.88	0.86	1.10	0.96	0.75	0.44	0.63	0.42	0.35	0.46	0.46
南农 J005 Nannong J005	0.67	2.13	0.86	0.68	0.99	1.12	0.95	1.00	0.96	0.70	0.63	0.83	0.48	0.71	0.62	0.60
南农 88-48 Nannong 88-48	0.45	0.84	1.16	0.35	1.00	1.36	0.95	1.01	0.95	1.22	0.64	0.88	0.76	0.75	0.80	0.77
南农 J011 Nannong J011	0.51	1.16	1.07	0.36	0.97	1.34	0.92	1.00	0.92	0.90	0.49	0.55	0.57	0.60	0.56	0.55
白大豆 Baidadou	0.51	0.84	1.00	0.44	1.00	1.12	0.98	0.97	0.95	0.85	0.49	0.69	0.51	0.58	0.55	0.54
溧阳青豆 Liyangqingdou	0.29	0.56	1.05	0.32	0.99	1.21	0.98	0.92	0.90	0.77	0.48	0.62	0.62	0.38	0.64	0.62
本地大豆1 Bendidadou 1	0.89	1.10	1.01	0.96	1.01	1.29	0.95	1.07	1.02	0.91	0.51	0.76	0.53	0.60	0.62	0.60
本地大豆2 Bendidadou 2	0.85	1.23	1.06	1.33	1.01	0.98	1.00	0.90	0.90	1.10	0.66	1.17	0.68	0.85	0.76	0.74
本地大豆3 Bendidadou 3	0.81	0.81	0.95	0.89	1.00	1.11	0.96	1.05	1.00	1.12	0.89	1.05	0.65	0.82	0.77	0.78
崇州绿豆 Chongzhoulyudou	0.89	1.18	1.05	1.00	0.98	1.17	0.95	0.95	0.90	1.13	0.69	0.73	0.77	0.60	0.76	0.72
六月黄 Liuyuehuang	0.68	0.57	0.96	0.63	1.00	0.90	1.03	0.85	0.88	0.93	0.59	0.62	0.55	0.62	0.63	0.63
五峰黄豆 Wufenghuangdou	0.73	0.85	1.04	0.79	0.99	1.16	0.97	0.93	0.89	0.97	0.51	0.66	0.62	0.70	0.65	0.59
双峰青豆 Shuangfengqingdou	0.92	1.02	0.97	1.01	1.00	1.12	0.97	1.05	1.02	0.89	0.78	0.97	0.75	0.91	0.71	0.71
平均值 Average	0.78	1.11	1.01	1.04	0.99	1.04	0.98	0.97	0.95	0.95	0.54	0.79	0.61	0.58	0.66	0.63
标准差 SD	0.32	0.52	0.16	0.57	0.03	0.25	0.06	0.10	0.08	0.19	0.13	0.23	0.14	0.20	0.16	0.15
变异系数 CV/%	0.41	0.46	0.16	0.54	0.03	0.24	0.06	0.10	0.08	0.20	0.25	0.28	0.23	0.34	0.25	0.23