



# 国内外大豆种质耐荫性综合评价及相关鉴定指标的筛选

张立军, 孙旭刚, 李盛有, 宋书宏, 王文斌, 曹永强

(辽宁省农业科学院 作物研究所, 辽宁 沈阳 110161)

**摘要:** 为探讨大豆耐荫胁迫评价方法, 筛选鉴定大豆耐荫性状指标, 建立科学可靠的耐荫性评价的数学模型, 采用盆栽的方法, 设遮光和自然光照 2 个处理, 成熟期考种测量株高 ( $X_1$ )、主茎节数 ( $X_2$ )、节间长度 ( $X_3$ )、分枝数 ( $X_4$ )、单株荚数 ( $X_5$ )、单株生物量 ( $X_6$ )、单株产量 ( $X_7$ )、表观收获指数 ( $X_8$ ) 及百粒重 ( $X_9$ ), 对 82 份国内外大豆种质资源进行耐荫性评价, 并根据耐荫性数学评价模型确定合理高效的耐荫性鉴定指标。结果表明: 通过主成分分析将 9 个单项性状转换为 4 个相互独立的综合指标, 代表了全部数据 83.155% 的信息量; 通过隶属函数法计算综合耐荫评价价值 ( $D$ ), 并进行聚类分析, 将 82 份国内外大豆种质按照耐荫性的强弱划分强耐荫、中度耐荫和弱耐荫 3 种类型, 筛选出 14 个强耐荫型大豆种质; 通过逐步回归建立大豆耐荫性评价数学模型,  $D = 0.024 + 0.148X_2 - 0.094X_3 - 0.088X_5 + 0.408X_7 + 0.236X_9$  ( $R^2 = 0.997$ ), 并筛选出 5 个鉴定指标, 分别是主茎节数、节间长度、单株荚数、单株粒重和百粒重; 综合聚类和逐步回归结果发现, 强耐荫型大豆种质在遮光处理条件下具有较多的主茎节数, 较短的节间长度和较高的单株荚数和单株产量。

**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

## Comprehensive Evaluation for Shade-Tolerant and Selection of Identification Indicators in Soybean Germplasms from China and Abroad

ZHANG Li-jun, SUN Xu-gang, LI Sheng-you, SONG Shu-hong, WANG Wen-bin, CAO Yong-qiang

(Crop Institute of Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** In order to evaluate the methods of shade-tolerant in soybean, screen and identify the soybean shade tolerance traits, and establish a scientific and reliable mathematical model of shade tolerance evaluation, 82 soybean germplasms from China and abroad were treated under shading and natural light conditions in the pot-culture experiments, and the plant height ( $X_1$ ), main stem node number ( $X_2$ ), internode length ( $X_3$ ), branch number ( $X_4$ ), pods per plant ( $X_5$ ), biomass per plant ( $X_6$ ), yield per plant ( $X_7$ ), apparent harvest index ( $X_8$ ) and 100-seed weight ( $X_9$ ) were investigated at the mature period to evaluate the shade-tolerant and confirm the suitable and efficient indicators of shade-tolerance according to mathematical evaluation model. The results showed that the nine single indexes were transformed into four independent comprehensive components by principal component analysis, which represent 83.155% information of the raw data. The membership function analysis was used to calculate comprehensive shade-tolerance value ( $D$ ), and 82 landraces were divided into three types including high shade-tolerant, medium shade-tolerant and shade-intolerant through cluster analysis for  $D$  value. A mathematical evaluation model for soybean shade-tolerant germplasms was established by stepwise regression analysis,  $D = 0.024 + 0.148X_2 - 0.094X_3 - 0.088X_5 + 0.408X_7 + 0.236X_9$  ( $R^2 = 0.997$ ). Based on the model, five indexes were closely related to the shade-tolerance were screened out, including main stem nodes, internode length, pods per plant, yield per plant and 100-seed weight. That is to say, the high shade-tolerance types have more main stem nodes, shorter internode length, greater pods per plant and yield per plant.

**Keywords:** Soybean; Shade-tolerance; Principal components analysis; Membership function; Cluster analysis; Stepwise regression analysis

收稿日期: 2018-04-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0100201-1, 2017YFD0101304-2); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-004-CES11); 辽宁省中央引导地方科技发展专项 (2017108006)。

第一作者简介: 张立军 (1980 -), 男, 学士, 助理研究员, 主要从事大豆遗传育种与栽培研究。E-mail: zhanglj\_8005@163.com。

通讯作者: 曹永强 (1977 -), 男, 博士, 研究员, 主要从事大豆遗传育种与栽培研究。E-mail: yongqiangcao@hotmail.com;

王文斌 (1968 -), 男, 硕士, 研究员, 主要从事大豆遗传育种与栽培研究。E-mail: wwbin@163.com。

荫蔽胁迫导致间套作配置中大豆群体所受的光、气、温等条件不利于生长发育,从而降低了品种产量和品质,是当前间套作模式大面积应用与推广的最主要限制因素。田间条件下,光照不足会使大豆叶片质量、功能下降,例如:比叶重变小,叶绿素a/b值下降,光合速率下降,最终导致光合能力和物质生产能力的降低<sup>[1-3]</sup>。此外,遮荫处理使大豆株高、节间长度、子叶节高度、植株重心高度显著提高,而茎粗、主茎节数、有效分枝数则显著下降,根冠比失衡,大豆植株易发生倒伏<sup>[4-8]</sup>。然而,强耐荫型品种的茎秆抗折力高于弱耐荫型品种,从而倒伏指数相对较低<sup>[9]</sup>。因此,通过建立科学高效的大豆耐荫性评价体系,挖掘国内外大豆种质中耐荫性强的材料,对开展大豆耐荫性育种及推广间套作模式都具有重要意义<sup>[10-12]</sup>。前人对耐荫大豆品种的鉴定、筛选与评价进行了大量研究。陈怀珠等<sup>[7]</sup>选择与荫蔽相关性显著的株高、最低结荚高度、结荚期生物产量、单株荚数、单株粒数、单株粒重和百粒重7个性状为指标性状,以综合耐荫系数为指标评价大豆种质的耐荫性。武晓玲等<sup>[13]</sup>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个鉴定指标可进行大豆苗期耐荫性强弱的快速鉴定和预测。李春红等<sup>[7]</sup>通过逐步回归建立大豆耐荫性评价数学模型,并筛选出主茎节数、分枝数、节间长、抗倒指数、单株荚数、百粒重和单株粒重7个鉴定指标。孙祖东等<sup>[14]</sup>以60份不同耐荫性类型的大豆品种为材料,通过试验明确了耐荫鉴定时期,建立了由遮光度、耐荫鉴定指标和鉴定时期构成的耐荫性评价体系。但这些研究主要集中于国内近年来育成品种的耐荫性鉴定与评价,对国内外的农家品种资源研究不是很多,而农家品种资源具有较高的遗传多样性及潜在的耐荫特性,有必要开展相关鉴定、评价与筛选。为此,本研究采用了盆栽遮荫处理方法,在大豆出苗30 d开始采用30%消光率的针织尼龙网进行遮光处理,直至成熟,模拟玉米-大豆间作模式下大豆生长后期玉米对其荫蔽胁迫环境,通过计算不同大豆种质资源耐荫性综合评价,对82份国内外大豆种质资源进行耐荫性评价,并根据耐荫性数学评价模型确定出科学高效的耐荫性鉴定指标,从而为大豆耐荫种质资源的挖掘及创新提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为82份国内外大豆种质资源,由中国

农业科学院国家农作物种质资源库提供。其中,国内大豆品种48份(包含农家种34份),国外大豆品种34份。试验土壤取自辽宁省农业科学院试验田0~20 cm的表层土壤,前茬作物为玉米。土壤类型为棕壤,有机质含量12.6 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量1.65 g·kg<sup>-1</sup>,速效氮含量104 mg·kg<sup>-1</sup>,全磷含量0.25 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷含量16.5 mg·kg<sup>-1</sup>,全钾含量24.2 g·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量116 mg·kg<sup>-1</sup>,pH6.8。

1.2 试验设计

试验于2017年在辽宁省农业科学院院内盆栽场进行。试验采用盆栽方法,分自然光照处理(对照)和遮光处理,采用随机区组,每处理3盆。盆栽用塑料桶,规格为34 cm(上口直径)×28 cm(下口直径)×23 cm(高),桶底设直径2 cm左右的透水孔3个。每盆装干土15 kg。5月20日播种,每盆播种5~6粒,出苗后每盆保健壮苗2株。出苗后30 d开始采用消光率为30%的针织尼龙网进行遮光处理,直至成熟。

1.3 测定项目与方法

大豆成熟时,每盆取2株考种,测量株高( $X_1$ )、主茎节数( $X_2$ )、节间长度( $X_3$ )、分枝数( $X_4$ )、单株荚数( $X_5$ )、单株生物量( $X_6$ )、单株产量( $X_7$ )、表观收获指数( $X_8$ )、百粒重( $X_9$ )。

1.4 数据分析

参照李春红等<sup>[7]</sup>方法计算各性状指标的耐荫系数(shade tolerance coefficient, STC)、不同大豆种质资源各综合指标的隶属函数值、权重和各品种(系)综合耐荫评价值(D),采用SPSS 19.0软件进行相关分析、主成分分析、聚类分析和逐步回归分析。

STC = 遮光处理性状值/对照性状值 (1)

不同大豆种质资源各综合指标的隶属函数值:

$$u(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$
$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$
 (2)

各综合指标的权重:

$$W_j = pj / \sum_{j=1}^n pj \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$
 (3)

各大豆品种(系)的综合耐荫评价值:

$$D = \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times W_j] \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$
 (4)

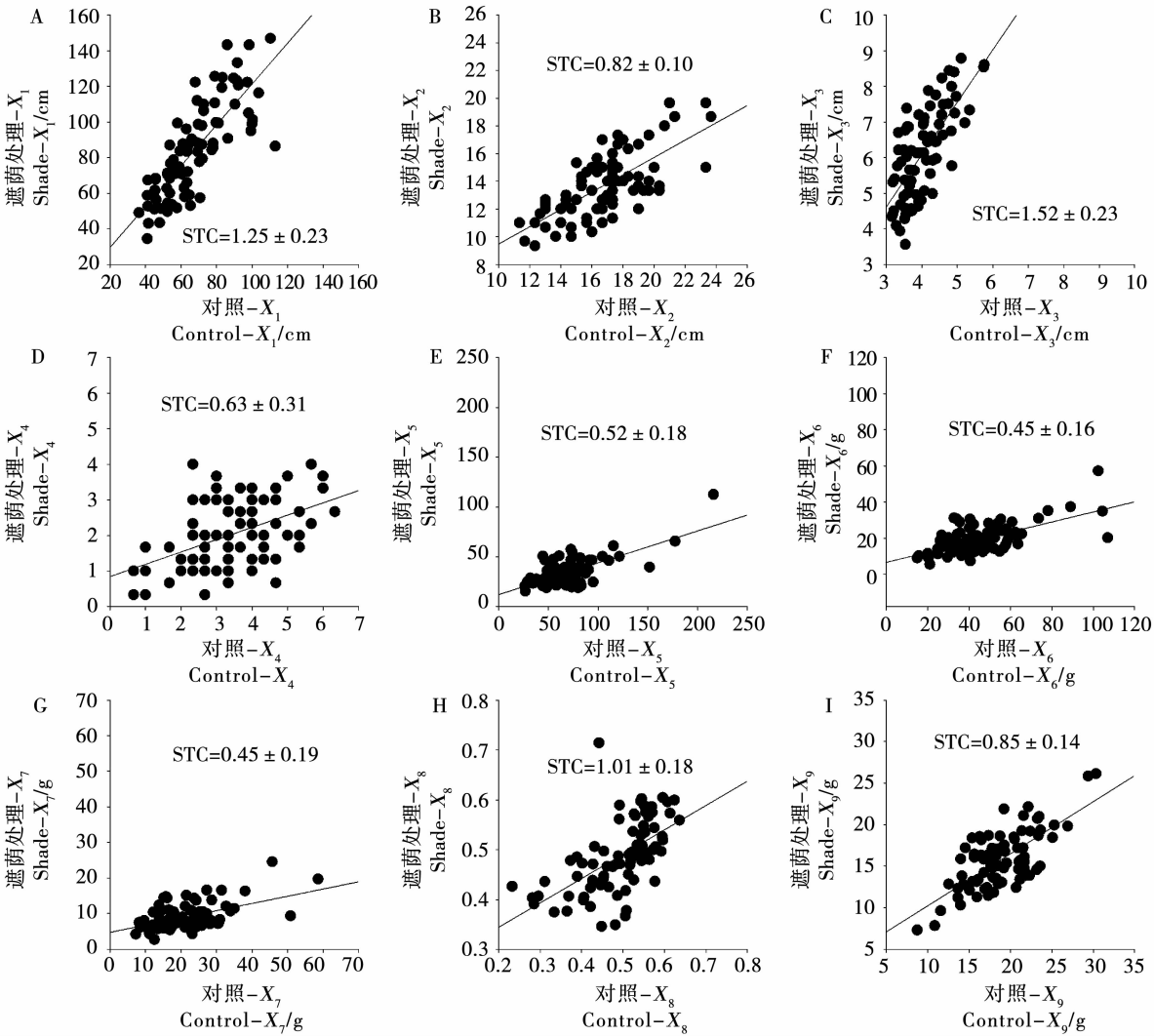
$X_j$ 表示第j个综合指标, $X_{\max}$ 表示第j个综合指标的最大值, $X_{\min}$ 表示第j个综合指标的最小值。 $W_j$ 表示第j个综合指标在所有综合指标中的权重; $p_j$ 为各种质资源第j个综合指标的贡献率。 $D$ 值为各大豆种质资源在荫蔽胁迫条件下由综合指标评价所得的耐荫性综合评价值。

2 结果与分析

2.1 遮荫处理对大豆农艺性状的影响及耐荫系数分析

方差分析结果表明,株高、单株荚数、节间长度、分枝数、单株荚数、单株生物量、单株产量、收获指数和百粒重在不同处理间存在显著或极显著差异,在基因型间差异达显著水平( $P < 0.05$ );处理和基因型间的互作效应达到显著水平( $P < 0.05$ )。遮光处理和对照条件下大豆的各单项性状的表现见图 1。根据各性状的耐荫系数(STC)发现,遮荫处

理总体上提高了大豆的株高和节间长度( $STC > 1$ ),降低了主茎节数、分枝数、单株荚数、单株生物量、单株产量、表观收获指数和百粒重( $STC < 1$ )。性状对遮荫处理的响应程度依次为:单株产量  $>$  单株生物量  $>$  节间长度  $>$  单株荚数  $>$  分枝数  $>$  株高  $>$  主茎节数  $>$  百粒重  $>$  表观收获指数。分析不同性状耐荫系数间的相关系数矩阵(表 1)发现,各单项性状的耐荫系数间存在一定程度的相关性,从而导致它们所提供的信息发生重叠,说明大豆耐荫性是多项性状的综合表现,需利用多元统计方法进行精准和全面的鉴定。



$X_1$ :株高;  $X_2$ :主茎节数;  $X_3$ :节间长度;  $X_4$ :分枝数;  $X_5$ :单株荚数;  $X_6$ :单株生物量;  $X_7$ :单株产量;  $X_8$ :表观收获指数;  $X_9$ :百粒重。  
 $X_1$ : Plant height;  $X_2$ : Nodes of main stem;  $X_3$ : Internode length;  $X_4$ : Branches;  $X_5$ : Pods per plant;  $X_6$ : Biomass per plant;  $X_7$ : Grain yield per plant;  $X_8$ : Apparent harvest index;  $X_9$ : 100-seed weight.

图 1 大豆种质各指标的耐荫系数  
Fig. 1 Shade tolerance coefficient (STC) of single index among soybean germplasms

表 1 各单项指标耐荫系数的相关系数矩阵  
Table 1 Correlation matrix of shade tolerance coefficient (STC) of each index

	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>
X <sub>1</sub>	1.000								
X <sub>2</sub>	0.597 **	1.000							
X <sub>3</sub>	0.749 **	-0.076	1.000						
X <sub>4</sub>	-0.274 *	-0.066	-0.282 *	1.000					
X <sub>5</sub>	0.318 **	0.334 **	0.114	0.287 **	1.000				
X <sub>6</sub>	0.372 **	0.348 **	0.179	0.089	0.866 **	1.000			
X <sub>7</sub>	0.279 *	0.258 *	0.137	0.056	0.789 **	0.897 **	1.000		
X <sub>8</sub>	-0.065	-0.047	-0.032	-0.062	0.136	0.136	0.549 **	1.000	
X <sub>9</sub>	-0.032	0.016	-0.020	-0.198	-0.087	0.166	0.147	0.050	1.000

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

2.2 基于综合性状隶属函数评价不同大豆种质的耐荫性

以不同大豆种质单项性状的耐荫系数进行主成分分析。根据特征向量在各因子中的最大绝对值所在位置将不同性状划分到不同的主成分之中。由表 2 可知,主成分分析特征值中 4 个成分的累计贡献率已达到 83.155%,具有较强的信息代表性。由此可将原来 9 个单项性状转换为 4 个新的相互独立的综合指标 (comprehensive index, CI),这 4 个主成分代表了原始性状携带的绝大部分信息,可以用于进一步耐荫性分析。

决定第 1 主成分大小的主要是单株荚数、单株

生物量和单株产量 3 个性状分量,主成分 1 相当于 3.265 个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的 36.273%。决定第 2 主成分大小的主要是株高、节间长度和分枝数 3 个性状分量,主成分 2 相当于 1.843 个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的 20.475%。决定第 3 主成分大小的主要是收获指数和百粒重 2 个性状分量,主成分 3 相当于 1.320 个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的 14.667%。决定第 4 主成分大小的主要是主茎节数 1 个性状分量,主成分 4 相当于 1.057 个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的 11.740%。

表 2 各性状主成分的特征向量及贡献率  
Table 2 Eigen vectors and contribution ratio of accumulated contribution of principal components

主成分 Principle factor		CI <sub>1</sub>	CI <sub>2</sub>	CI <sub>3</sub>	CI <sub>4</sub>
特征值 Eigen value		3.265	1.843	1.320	1.057
贡献率 Contribution ratio /%		36.273	20.475	14.667	11.740
累积贡献率 Cumulative contribution ratio /%		36.273	56.748	71.415	83.155
特征向量 Eigen vector	X <sub>1</sub>	0.617	-0.736 *	-0.169	-0.024
	X <sub>2</sub>	0.519	-0.227	-0.340	0.579 *
	X <sub>3</sub>	0.346	-0.724 *	0.088	-0.494
	X <sub>4</sub>	0.021	0.625 *	-0.534	-0.144
	X <sub>5</sub>	0.860 *	0.303	-0.241	-0.075
	X <sub>6</sub>	0.921 *	0.188	-0.004	0.076
	X <sub>7</sub>	0.900 *	0.311	0.257	-0.088
	X <sub>8</sub>	0.296	0.333	0.616 *	-0.314
	X <sub>9</sub>	0.095	-0.023	0.615 *	0.581

\* 表示某指标在各因子中的最大绝对值。  
\* Means the biggest absolute value of each index in all factors.

以各综合指标的隶属函数值和权重计算了各大豆种质综合耐荫能力的 D 值,并以此对其耐荫性强弱进行排序(表 3)。其中,铁丰 8 号的 D 值最大,为 0.693,表明其耐荫性最强;PSB543 的 D 值最小,为 0.230,表明其耐荫性最差。采用欧式距离离差平方和法对 D 值进行聚类分析(图 2),可将 82 份种质划分为 3 类:14 个强耐荫型,其 D 值为 0.553 ~

0.693;40 个中度耐荫型,其 D 值为 0.380 ~ 0.527;28 个弱耐荫型,其 D 值为 0.230 ~ 0.369。其中,强耐荫型大豆种质包括了 8 份国内种质(铁丰 8 号、吉林 3 号、方正秣食豆、小白豆、丰地黄、黑大豆、吉育 47 和漠河秣食豆)和 6 份国外种质(CΠ1271、FUN-ZHUN、Namcheon、WDD01273、MONETA 和 Suzumaru)。

表 3 各大豆种质的综合指标值、权重、u( Xj )、D 值及综合评价

Table 3 The value of each soybean germplasm’s comprehensive index ( CIx ), index weight, u( Xj ), value D and comprehensive valuation

品种( 品系 ) Cultivar ( Line)	种质资源编号 No.	CI <sub>1</sub>	CI <sub>2</sub>	CI <sub>3</sub>	CI <sub>4</sub>	u( X <sub>1</sub> )	u( X <sub>2</sub> )	u( X <sub>3</sub> )	u( X <sub>4</sub> )	D	综合评价 Comprehensive valuation
铁丰 8 号 Tiefeng 8	ZDD00738	2. 069	0. 766	0. 353	1. 150	0. 835	0. 586	0. 479	0. 710	0. 693	强耐荫 High
CⅡ1271	WDD02625	1. 023	1. 916	1. 131	1. 729	0. 622	0. 775	0. 620	0. 832	0. 689	强耐荫 High
FUN-ZHUN	WDD02920	2. 883	−0. 152	−0. 325	−0. 075	1. 000	0. 435	0. 355	0. 451	0. 670	强耐荫 High
Namcheon	WDD02174	1. 485	0. 432	3. 214	−1. 500	0. 716	0. 531	1. 000	0. 151	0. 641	强耐荫 High
吉林 3 号 Jilin 3	ZDD00338	2. 340	−1. 086	0. 936	−0. 371	0. 890	0. 281	0. 585	0. 389	0. 615	强耐荫 High
方正秣食豆 Fangzhengmoshidou	ZDD00326	1. 823	0. 817	0. 521	−1. 108	0. 785	0. 594	0. 509	0. 233	0. 611	强耐荫 High
小白豆 Xiaobaidou	ZDD00267	1. 973	0. 799	−0. 904	−0. 205	0. 815	0. 591	0. 249	0. 424	0. 605	强耐荫 High
WDD01273	WDD01273	0. 260	0. 982	1. 265	1. 710	0. 468	0. 621	0. 645	0. 828	0. 588	强耐荫 High
丰地黄 Fengdihuang	ZDD00377	1. 844	−0. 127	1. 254	−1. 711	0. 789	0. 439	0. 643	0. 106	0. 581	强耐荫 High
黑大豆 Heidadou	ZDD00691	0. 463	3. 284	0. 512	−1. 754	0. 509	1. 000	0. 508	0. 097	0. 571	强耐荫 High
MONETA	WDD02702	0. 857	1. 537	−0. 362	0. 347	0. 589	0. 713	0. 348	0. 540	0. 570	强耐荫 High
Suzumaru	WDD02152	0. 016	0. 803	1. 379	1. 803	0. 418	0. 592	0. 666	0. 848	0. 565	强耐荫 High
吉育 47 Jiyu 47	ZDD23713	1. 171	−0. 067	0. 016	0. 634	0. 652	0. 449	0. 417	0. 601	0. 554	强耐荫 High
漠河秣食豆 Mohemoshidou	ZDD00332	1. 057	0. 531	−0. 876	1. 117	0. 629	0. 547	0. 255	0. 703	0. 553	强耐荫 High
Bayfield	WDD02023	0. 591	0. 166	0. 168	0. 985	0. 535	0. 487	0. 445	0. 675	0. 527	中度耐荫 Medium
BC-14-1-3	WDD01052	1. 280	1. 408	−1. 329	−1. 385	0. 675	0. 691	0. 172	0. 175	0. 520	中度耐荫 Medium
青杂豆 Qingzadou	ZDD00674	0. 883	−0. 285	0. 217	0. 008	0. 594	0. 413	0. 454	0. 469	0. 507	中度耐荫 Medium
CⅡ691	WDD02599	−0. 242	1. 285	−0. 252	1. 707	0. 366	0. 671	0. 368	0. 828	0. 507	中度耐荫 Medium
CA5	WDD03137	1. 046	0. 850	−1. 119	−0. 672	0. 627	0. 600	0. 210	0. 325	0. 504	中度耐荫 Medium
PSB576	WDD02873	0. 617	0. 247	1. 397	−1. 346	0. 540	0. 500	0. 669	0. 183	0. 503	中度耐荫 Medium
丰收 1 号 Fengshou 1	ZDD00025	0. 004	0. 708	0. 146	1. 145	0. 416	0. 576	0. 441	0. 709	0. 501	中度耐荫 Medium
Saikai 20	WDD01215	0. 542	0. 024	0. 156	0. 392	0. 525	0. 464	0. 443	0. 550	0. 499	中度耐荫 Medium
大白眉 Dabaimei	ZDD00539	0. 763	−0. 391	0. 333	−0. 100	0. 570	0. 395	0. 475	0. 446	0. 493	中度耐荫 Medium
大粒黄 Dalihuang	ZDD00440	0. 857	0. 619	−0. 033	−1. 391	0. 589	0. 562	0. 408	0. 174	0. 492	中度耐荫 Medium
采种圃 Caizhongpu	ZDD00163	0. 311	−1. 476	0. 398	2. 524	0. 478	0. 217	0. 487	1. 000	0. 489	中度耐荫 Medium
黑河 3 号 Heihe 3	ZDD00042	0. 066	0. 010	0. 660	0. 738	0. 428	0. 461	0. 535	0. 623	0. 483	中度耐荫 Medium
CA31	WDD03160	0. 162	−0. 091	−0. 109	1. 172	0. 448	0. 445	0. 394	0. 715	0. 475	中度耐荫 Medium
牡丰 1 号 Mufeng 1	ZDD00059	0. 943	−1. 101	0. 207	−0. 146	0. 606	0. 279	0. 452	0. 436	0. 474	中度耐荫 Medium
Tokachi nagaha	WDD01252	0. 166	0. 662	−1. 149	1. 199	0. 449	0. 569	0. 205	0. 720	0. 474	中度耐荫 Medium
G. max-46	WDD02643	0. 765	0. 714	−1. 525	−0. 737	0. 570	0. 577	0. 136	0. 312	0. 459	中度耐荫 Medium
哈 1 号 Ha 1	ZDD00393	0. 805	−0. 242	−0. 111	−1. 115	0. 578	0. 420	0. 394	0. 232	0. 458	中度耐荫 Medium
Jangbaeeg	WDD02169	−0. 150	−0. 132	1. 223	0. 009	0. 384	0. 438	0. 637	0. 469	0. 454	中度耐荫 Medium
嘟噜梅 Dulumei	ZDD00485	0. 944	−1. 002	−1. 155	0. 443	0. 606	0. 295	0. 204	0. 561	0. 452	中度耐荫 Medium
KPS292( AGS292 )	WDD02350	−0. 995	1. 691	0. 342	0. 892	0. 213	0. 738	0. 477	0. 656	0. 451	中度耐荫 Medium
金元 1 号 Jinyuan 1	ZDD00383	−0. 456	−1. 005	2. 724	0. 215	0. 322	0. 295	0. 911	0. 513	0. 446	中度耐荫 Medium
PSB575	WDD02872	0. 458	−0. 565	−0. 012	−0. 153	0. 508	0. 367	0. 412	0. 435	0. 446	中度耐荫 Medium
ДВ 2846	WDD02913	−0. 076	−0. 219	0. 359	0. 513	0. 399	0. 424	0. 480	0. 576	0. 444	中度耐荫 Medium
元宝金 Yuanbaojin	ZDD00381	0. 188	−1. 113	1. 263	−0. 108	0. 453	0. 277	0. 644	0. 444	0. 442	中度耐荫 Medium
吉林小粒豆 Jilinxiaolidou	吉林小粒豆 CK-	0. 328	0. 266	−0. 649	1. 501	0. 348	0. 504	0. 296	0. 784	0. 439	中度耐荫 Medium
Tsurukogane	WDD02155	0. 034	−0. 370	−1. 137	1. 698	0. 422	0. 399	0. 207	0. 826	0. 435	中度耐荫 Medium
东农 4 号 Dongnong 4	ZDD00023	−0. 233	−0. 459	0. 509	0. 781	0. 367	0. 384	0. 507	0. 632	0. 434	中度耐荫 Medium

续表 3

品种(品系) Cultivar (Line)	种质资源编号 No.	CI <sub>1</sub>	CI <sub>2</sub>	CI <sub>3</sub>	CI <sub>4</sub>	u(X <sub>1</sub> )	u(X <sub>2</sub> )	u(X <sub>3</sub> )	u(X <sub>4</sub> )	D	综合评价 Comprehensive valuation
黑河 51 Heihe 51	ZDD00043	-0.840	0.665	0.692	0.422	0.244	0.569	0.540	0.556	0.421	中度耐荫 Medium
G. maxN136	WDD02675	-1.038	0.783	0.659	0.751	0.204	0.589	0.534	0.626	0.417	中度耐荫 Medium
黑河 54 Heihe 54	ZDD00044	-0.831	0.656	-0.202	1.191	0.246	0.568	0.377	0.719	0.415	中度耐荫 Medium
CHESTNUT	WDD02880	-0.344	0.430	1.498	-1.821	0.345	0.531	0.687	0.083	0.414	中度耐荫 Medium
ブローバ	WDD01226	0.563	-1.784	-0.535	0.358	0.529	0.166	0.317	0.543	0.404	中度耐荫 Medium
绿瓢黑豆 Lyurangheidou	ZDD00303	0.173	-0.302	-1.544	0.568	0.450	0.410	0.133	0.587	0.404	中度耐荫 Medium
Chockkuzan	WDD02148	-0.481	0.008	-0.508	0.834	0.317	0.461	0.322	0.643	0.399	中度耐荫 Medium
毛豆 Maodou	ZDD00127	0.169	-0.852	-1.089	0.640	0.449	0.320	0.216	0.602	0.398	中度耐荫 Medium
羊角密 Yangjiaomi	ZDD00159	-0.547	-0.990	1.418	0.170	0.304	0.297	0.673	0.503	0.395	中度耐荫 Medium
CHI-LU-SCHU	WDD02831	-0.692	2.073	-1.373	-0.689	0.274	0.801	0.164	0.322	0.391	中度耐荫 Medium
秃荚子 Tujiazi	ZDD00196	-0.691	-0.519	1.105	0.022	0.275	0.374	0.616	0.472	0.387	中度耐荫 Medium
PSB609	WDD02897	-0.744	0.005	0.319	0.248	0.264	0.461	0.472	0.520	0.385	中度耐荫 Medium
WDD01253	WDD01253	0.248	-0.917	-0.722	-0.497	0.465	0.309	0.283	0.362	0.380	中度耐荫 Medium
巴彦平顶香 Bayanpingdingxiang	ZDD00203	-0.043	-1.169	-0.665	0.295	0.406	0.268	0.293	0.530	0.369	弱耐荫 Weak
小金黄 1 号 Xiaojinhuang 1	ZDD00375	0.470	-1.015	-1.397	-0.672	0.510	0.293	0.160	0.325	0.369	弱耐荫 Weak
尤比列 Youbilie	尤比列	-0.801	1.231	-1.132	-0.400	0.252	0.662	0.208	0.383	0.364	弱耐荫 Weak
舒兰满仓金 Shulanmancangjin	ZDD00604	-0.351	-0.075	0.416	-1.655	0.344	0.447	0.490	0.118	0.363	弱耐荫 Weak
カニゾチ	WDD01230	0.296	-1.674	-1.068	0.088	0.475	0.184	0.219	0.486	0.360	弱耐荫 Weak
兰脐 Lanqi	ZDD00569	-1.061	0.079	0.162	0.330	0.199	0.473	0.444	0.537	0.357	弱耐荫 Weak
伊通满仓金 Yitongmancangjin	ZDD00605	-0.839	0.306	-0.280	-0.213	0.244	0.510	0.363	0.422	0.356	弱耐荫 Weak
Japan I	WDD01202	-0.192	-1.184	-1.435	0.821	0.376	0.265	0.153	0.641	0.347	弱耐荫 Weak
白毛霜 Baimaoshuang	ZDD00250	-1.848	0.610	0.921	0.655	0.040	0.560	0.582	0.606	0.343	弱耐荫 Weak
满仓金 Mancangjin	ZDD00078	-1.284	-0.516	1.027	0.256	0.154	0.375	0.601	0.521	0.339	弱耐荫 Weak
桦南小金豆 Huananxiaojindou	ZDD00269	-1.185	0.415	0.272	-0.530	0.174	0.528	0.464	0.355	0.338	弱耐荫 Weak
小白脐 Xiaobaiqi	ZDD00532	-0.844	-1.692	0.799	0.582	0.243	0.181	0.560	0.590	0.333	弱耐荫 Weak
珲春豆 Huichundou	ZDD00548	-0.371	-0.397	-1.457	-0.337	0.339	0.394	0.149	0.396	0.327	弱耐荫 Weak
海伦哪噜豆 Halenduludou	ZDD00261	-1.084	0.001	-0.122	-0.256	0.195	0.460	0.392	0.413	0.326	弱耐荫 Weak
元宝金 Yuanbaojin	ZDD00079	-1.533	0.465	0.635	-0.395	0.104	0.536	0.530	0.384	0.325	弱耐荫 Weak
六十天还家 Liushitianhuanjia	ZDD00252	-0.638	-0.808	-1.020	0.459	0.285	0.327	0.228	0.564	0.325	弱耐荫 Weak
WDD01264	WDD01264	-1.192	1.974	-2.272	-0.334	0.173	0.784	0.000	0.397	0.325	弱耐荫 Weak
紫花 1 号 Zihua 1	ZDD00378	-0.693	-1.012	0.323	-0.578	0.274	0.293	0.473	0.345	0.324	弱耐荫 Weak
大红脐 Dahongqi	ZDD00651	-1.213	0.663	-0.236	-1.209	0.168	0.569	0.371	0.212	0.309	弱耐荫 Weak
黑豆 Heidou	ZDD00686	-0.809	-0.603	-0.642	-0.265	0.251	0.361	0.297	0.411	0.309	弱耐荫 Weak
双城 4 号 Shuangcheng 4	ZDD00183	-0.923	-1.082	-0.186	-0.377	0.227	0.282	0.380	0.388	0.290	弱耐荫 Weak
荆山扑 Jingshanpu	ZDD00081	-1.318	-0.748	1.249	-1.218	0.147	0.337	0.642	0.210	0.290	弱耐荫 Weak
宝青绿大豆 Baoqinglyudadou	ZDD00296	-1.074	-0.008	-0.657	-1.275	0.197	0.458	0.294	0.198	0.279	弱耐荫 Weak
WDD01267	WDD01267	-0.339	-0.459	-1.251	-2.213	0.346	0.384	0.186	0.000	0.278	弱耐荫 Weak
蛟河紫花 1 号 Jiaozehizua 1	ZDD00554	-2.044	0.577	0.547	-0.511	0.000	0.555	0.514	0.359	0.278	弱耐荫 Weak
压破车 Yapoche	ZDD00219	0.163	-2.795	-0.681	-1.262	0.448	0.000	0.290	0.201	0.275	弱耐荫 Weak
Koreane 4	WDD01437	-0.649	-1.136	-0.827	-1.109	0.283	0.273	0.263	0.233	0.270	弱耐荫 Weak
PSB543	WDD02848	-1.752	0.161	-0.379	-1.411	0.059	0.486	0.345	0.169	0.230	弱耐荫 Weak
权重 Index weight						0.436	0.246	0.176	0.141		

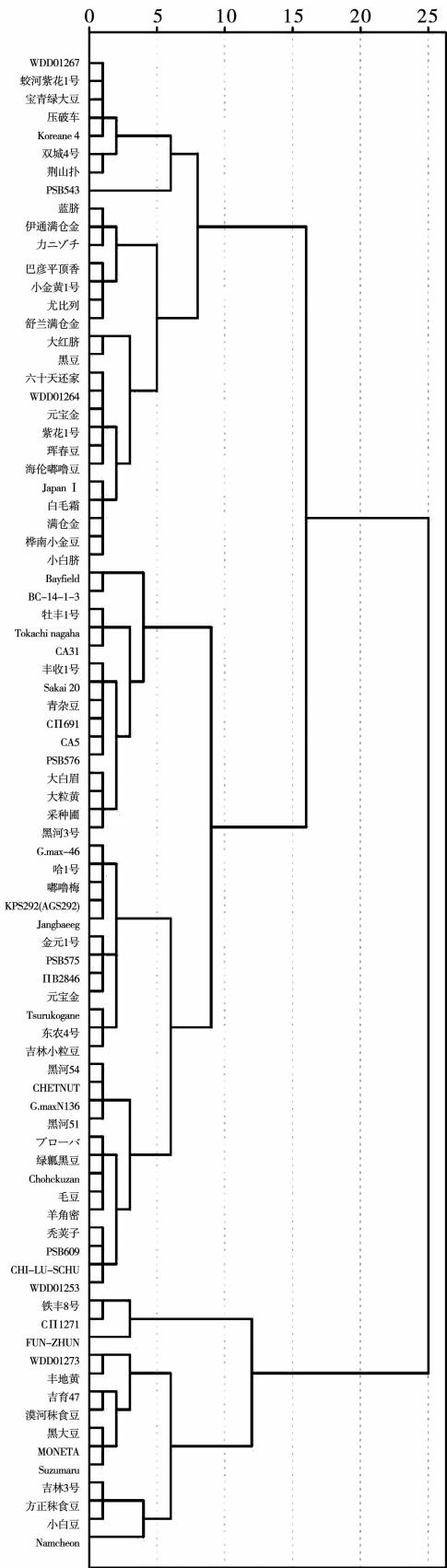


图2 82份大豆种质聚类树状图

Fig. 2 The dendrogram of clusters for 82 soybean germplasm

2.3 基于回归分析方法建立大豆耐荫性评价模型

为分析单项指标与耐荫性之间的关系,筛选可靠的耐荫鉴定指标,建立可用于耐荫性评价的数学模型,进行耐荫性预测,以耐荫性综合评价值(D值)作因变量,各单项指标的耐荫系数作自变量进行逐步回归分析,建立回归方程: $D=0.024+0.148X_2-0.094X_3-0.088X_5+0.408X_7+0.236X_9$ ,  $R^2=0.997$ 。用该回归方程对大豆耐荫性进行预测,其预测值与实际综合评价值(D)在各种质间的次序基本一致,两者高度相关( $R^2=0.997$ ,图3),说明在相同试验条件下测定主茎节数、节间长度、单株荚数、单株产量和百粒重5项性状指标,用该回归方程可以对大豆耐荫性进行预测,效果好、准确性高。

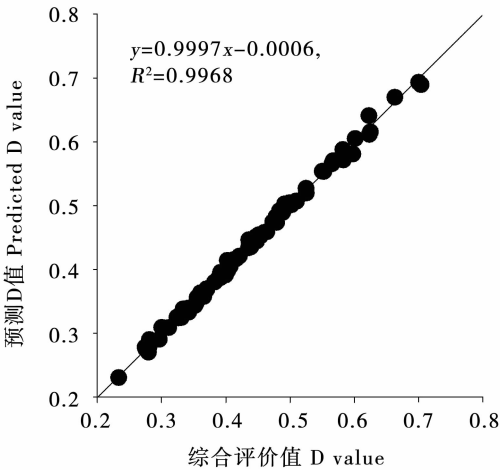


图3 基于回归方程的预测值与综合评价(D)的线性回归

Fig. 3 Linear regression of predicted value and comprehensive D value

2.4 不同耐荫类型种质的特性分析

根据聚类 and 线性回归分析的结果,将不同耐荫类型大豆种质在对照和遮光处理下5个主要性状的平均值列于表4。不同耐荫类型大豆种质在遮光处理后的表现表明,强耐荫型大豆种质具有以下特性:主茎节数较多,节间长度较短,单株荚数和单株产量较高,百粒重保持在中等水平;中度耐荫型大豆种质表现为主茎节数和节间长度适中,单株荚数和单株产量保持在中等水平,百粒重较高;而弱耐荫型大豆种质的主茎节数较少,节间长度较大,单株荚数、单株产量和百粒重较低。进一步比较发现,与国内强耐荫型大豆种质相比,国外强耐荫型大豆种质的主茎节数较多,节间长度较短,单株荚数、单株产量和百粒重较大。

表 4 不同耐荫类型各性状的表现特征  
Table 4 Description of different types to shade tolerance

性状 Trait	分类 Type	种质来源 Origin	对照 Control	遮光处理 Shade
主茎节数 Main stem node number	强耐荫 High	国内 ZDD	16. 71	13. 96
		国外 WDD	17. 67	14. 89
	中度耐荫 Medium	国内 ZDD	16. 12	13. 49
		国外 WDD	17. 02	14. 54
	弱耐荫 No	国内 ZDD	17. 30	13. 10
		国外 WDD	16. 67	13. 05
节间长度 Internode length/cm	强耐荫 High	国内 ZDD	3. 81	5. 93
		国外 WDD	3. 88	5. 54
	中度耐荫 Medium	国内 ZDD	3. 85	6. 02
		国外 WDD	3. 91	5. 71
	弱耐荫 No	国内 ZDD	4. 10	6. 32
		国外 WDD	4. 37	6. 78
单株荚数 Pods per plant	强耐荫 High	国内 ZDD	53. 88	42. 42
		国外 WDD	81. 28	53. 78
	中度耐荫 Medium	国内 ZDD	64. 00	31. 89
		国外 WDD	75. 92	36. 68
	弱耐荫 No	国内 ZDD	72. 30	27. 52
		国外 WDD	72. 76	31. 29
单株产量 Yield per plant/g	强耐荫 High	国内 ZDD	14. 24	11. 36
		国外 WDD	19. 85	13. 11
	中度耐荫 Medium	国内 ZDD	21. 08	9. 30
		国外 WDD	22. 26	10. 05
	弱耐荫 No	国内 ZDD	26. 08	7. 37
		国外 WDD	25. 95	6. 95
百粒重 100-seed weight/g	强耐荫 High	国内 ZDD	17. 33	14. 96
		国外 WDD	17. 16	17. 31
	中度耐荫 Medium	国内 ZDD	18. 68	17. 02
		国外 WDD	19. 03	15. 84
	弱耐荫 No	国内 ZDD	19. 31	14. 99
		国外 WDD	20. 09	14. 01

3 讨 论

前人采用不同评价方法对大豆耐荫性进行了大量鉴定工作。许多研究者选择与荫蔽密切相关的指标性状,并对指标性状的耐荫系数进行累加,获得各品种(系)耐荫系数,按照综合耐荫系数的排名,判断其耐荫性强弱,综合耐荫系数大,则耐荫性强,反之则耐荫性弱<sup>[15-16]</sup>。该方法具有简单易行的优势,但由于各指标对遮荫处理的响应水平不同,并且对耐荫性起的作用也不同,从而影响了耐荫性评价的准确性。正如本研究采用的单株产量、单株生物量和节间长度对遮荫处理的响应程度高于其它性状指标,若简单地将所有性状指标用于综合耐

荫系数的计算,则很难准确鉴定大豆种质的耐荫性。因此,一些研究者以各项指标的耐荫系数作为衡量耐荫性的指标,通过主成分分析、回归分析和聚类分析,运用多元分析方法对大豆耐荫性进行综合评价<sup>[7,17-18]</sup>,得到较好效果。

在多元分析过程中,主成分分析能够将原始的多个彼此相关的单项指标转换成少数几个新的且彼此独立的综合指标,在此基础上确定每个新的综合指标权重,进一步利用数学模糊的隶属函数分析法求出各综合指标评价值(D 值),D 值能够比较客观地反映各品种(系)的耐荫性。本研究通过主成分分析将 9 个单项性状转换为 4 个相互独立的综合指标,通过隶属函数法计算综合耐荫评价值(D),并



对其进行聚类分析,将 82 份国内外大豆种质按照耐荫性的强弱划分强耐荫型、中度耐荫型和弱耐荫型。另外,本研究计算的综合耐荫评价值(D)最大为 0.69,略低于李春红等<sup>[7]</sup>研究的最大值 0.75。主要原因是试验方法存在差异,为了实现鉴定条件和生产上一致,李春红等<sup>[7]</sup>采用田间条带复合种植的方式,本研究在盆栽试验条件下进行了人工遮荫处理,目的是提高大豆耐荫种质的精准度。然而,人工遮荫处理下的荫蔽强度和时间要普遍大于田间条带复合种植,从而导致综合耐荫评价值(D)偏低。

前人主要对国内育成大豆品种进行了耐荫性筛选与鉴定,而对农家品种的相关研究则较少。而现代栽培大豆品种多是近代以农家品种或地方品种为基础进行选育与系统改良而成<sup>[19]</sup>。在大豆品种选育过程中,育种者几乎没有考虑对耐荫性的选择,从而可能导致了一些与耐荫相关的重要基因的丢失。众所周知,农家品种或地方品种的遗传多样性较高,从而有利于耐荫基因型的选择<sup>[20]</sup>。另外,国外种质资源的引进与利用促进了中国大豆新品种产量的增长、品质的改进和抗性的提高,并且将拓宽国内大豆种质的遗传基础<sup>[21-22]</sup>。本研究鉴定出 14 份强耐荫型种质,其中包括了 8 份国内种质(铁丰 8 号、吉林 3 号、方正秣食豆、小白豆、丰地黄、黑大豆、吉育 47 和漠河秣食豆)和 6 份国外种质(CΠ1271、FUN-ZHUN、Namcheon、WDD01273、MONETA 和 Suzumaru)。进一步比较发现,与国内强耐荫型大豆种质相比,本研究采用的国外强耐荫型大豆种质的主茎节数较多,节间长度较低,单株荚数、单株产量和百粒重较大。这些国外强耐荫型大豆种质的挖掘也将对拓宽我国大豆遗传基础、实现优势互补以及耐荫型大豆品种的选育具有重要的应用价值。

4 结 论

利用耐荫性综合评价值将 82 份国内外大豆种质资源划分为强耐荫型、中等耐荫型和弱耐荫型 3 类,筛选出 14 个强耐荫型大豆种质,且主茎节数、节间长度、单株荚数、单株粒重和百粒重 5 个指标,可以用于大豆种质耐荫性的鉴定与评价。强耐荫型大豆种质在遮荫处理条件下主茎节数较多,节间长度较短,单株荚数和单株产量较高。同时,国外强耐荫型大豆种质相比于国内强耐荫型大豆种质具有更高的单株产量,可在我国大豆耐荫品种选育中作为基础材料充分利用。

参考文献

[1] 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. )

[2] 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. )

[3] 范元芳,杨峰,王锐,等. 弱光对大豆生长、光合特性及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(1): 71-76. (Fan Y F, Yang F, Wang R, et al. Effects of low light on growth, photosynthetic characteristics and yield of soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 38(1): 71-76. )

[4] Umezaki T, Yoshida T. Effect of shading on the internode elongation of late maturing soybean[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 1992, 36(3/4): 267-272.

[5] Roig-Villanova I, Martínez-García J F. Plant responses to vegetation proximity: A whole life avoiding shade[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 236.

[6] Gommers C M, Visser E J, St Onge K R, et al. Shade tolerance: When growing tall is not an option[J]. Trends in Plant Science, 2013, 18(2): 65-71.

[7] 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. )

[8] 王一,杨文钰,张霞,等. 不同生育时期遮荫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. )

[9] 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]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(8): 1466-1475. )

[10] 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, 7(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. )

[11] 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.

[12] 杨峰,崔亮,武晓玲,等. 不同空间配置套作大豆后期农学参数及光谱特征分析[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(3): 268-272. (Yang F, Cui L, Wu X L, et al. Soybean agronomic and hyperspectral characteristics at later stage under spatial patterns of maize-soybean intercropping[J]. Chinese Journal of Oil

Crop Sciences, 2012, 34(3): 268-272. )

[13] 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. )

[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] 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. )

[16] 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. )

[17] 孙艳, 高海顺, 管志勇, 等. 菊花近缘种属植物幼苗耐荫特性分析及其评价指标的确定[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1908-1916. (Sun Y, Gao H S, Guan Z Y, et al. Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of *Chrysanthemum grandiflorum* and its closely related genera[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1908-1916. )

[18] 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. )

[19] 夏正俊. 大豆基因组解析与重要农艺性状基因克隆研究进展[J]. 植物学报, 2017, 52(2): 148-158. (Xia Z J. Research progress in whole-genome analysis and cloning of genes underlying important agronomic traits in soybean[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2017, 52(2): 148-158. )

[20] 张彩英, 李喜焕, 常文锁, 等. 应用 SSR 标记分析大豆种质资源的遗传多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9(3): 308-314. (Zhang C Y, Li X H, Chang W S, et al. Genetic diversity analysis of soybean germplasm resources based on SSR markers [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2008, 9(3): 308-314. )

[21] 邱丽娟, 常汝镇, 袁翠平, 等. 国外大豆种质资源的基因挖掘利用现状与展望[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(1): 1-6. (Qiu L J, Chang R Z, Yuan C P, et al. Prospect and present statue of gene discovery and utilization for introduced soybean germplasm[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2006, 7(1): 1-6. )

[22] 关荣霞, 郭娟娟, 常汝镇, 等. 国外种质对中国大豆育成品种遗传贡献的分子证据[J]. 植物学报, 2007, 33(9): 1393-1398. (Guan R X, Guo J J, Chang R Z, et al. Marker-based evidence of broadening the genetic base of chinese soybeans by using introduced soybeans[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(9): 1393-1398. )