



# 大豆光合指标日变化规律及其与产量关系研究

李照君<sup>1,2</sup>, 田汝美<sup>1</sup>, 蒲艳艳<sup>1</sup>, 官永超<sup>1</sup>, 刘艳<sup>3</sup>, 刘玉芹<sup>4</sup>, 李娜娜<sup>1</sup>, 丁汉凤<sup>1</sup>

(1. 山东省农作物种质资源中心, 山东 济南 250100; 2. 山东师范大学 生命科学学院, 山东 济南 250014; 3. 菏泽市农业科学研究院, 山东 菏泽 274000; 4. 临沂市农业科学院 作物所, 山东 临沂 266000)

**摘要:**为探究大豆光合特性日变化规律及其与产量相关性,更好地预测和评价大豆产量并筛选高产高光效大豆品种,以4个生育期差异较小、产量差异较大的大豆品种临豆9号、潍豆9号、荷豆12号和齐黄34为材料,测定不同品种在开花期、结荚期、鼓粒期和成熟期4个主要生育期的光合指标和叶绿素荧光参数变化规律及其与大豆产量的关系。结果表明:在开花期至成熟期,光合速率日变化呈单峰或双峰曲线,最高峰值出现在10:00;高产品种齐黄34在鼓粒期和成熟期光合速率日均值显著高于其它品种;产量在结荚期和鼓粒期与 $P_n$ 日均值、 $\Phi PS II$ 日均值呈显著正相关,与 $C_i$ 日均值呈显著负相关;鼓粒期和成熟期, $G_s$ 日均值与产量呈显著正相关,结果说明结荚期至成熟期, $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $\Phi PS II$ 日均值是高产、高光效品种鉴定评价的重要指标。

**关键词:**大豆; 光合指标; 叶绿素荧光参数; 日变化; 产量

## Study on Diurnal Variation of Photosynthetic Index and Its Relationship with Yield in Soybean

LI Zhao-jun<sup>1,2</sup>, TIAN Ru-mei<sup>1</sup>, PU Yan-yan<sup>1</sup>, GONG Yong-chao<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>3</sup>, LIU Yu-qin<sup>4</sup>, LI Na-na<sup>1</sup>, DING Han-feng<sup>1</sup>

(1. Shandong Center of Crop Germplasm Resources, Jinan 250100, China; 2. School of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 3. Agricultural Sciences of Heze, Heze 274000, China; 4. Crop Research Institute of Linyi Agricultural Sciences, Linyi 266000, China)

**Abstract:** In order to explore the law of diurnal variation of photosynthetic index of soybean and its correlation with yield, in order to predict and evaluate soybean yield and screen soybean varieties with high yield and high light efficiency. This study used four soybean varieties Lindou 9, Weidou 9, Hedou 12, and Qihuang 34 with small growth stage differences and large yield differences as materials. We measured the changes of photosynthetic indexes and chlorophyll fluorescence parameters in four main growth stages of different varieties, namely, flowering stage, podding stage, seed filling stage and maturation stage, and their relationship with soybean yield. The results showed the daily change of photosynthetic rate showed a single or double peak curve from the flowering stage to the mature stage, and the highest peak appeared at 10:00. The daily mean photosynthetic rate of high-yield variety Qihuang 34 was significantly higher than that of other varieties at seed filling and maturation stage. The yield during the podding stage and seed filling stage was significantly positively correlated with the daily average value of  $P_n$  and the daily average value of  $\Phi PS II$ , and was significantly negatively correlated with the daily average value of  $C_i$ . The average daily  $G_s$  was significantly positively correlated with yield during seed filling stage and maturation stage. It is showed that the daily average values of  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $C_i$  and  $\Phi PS II$  of podding stage to mature stage were important indicators for identification and evaluation of high-yield and high-light-efficiency varieties.

**Keywords:** Soybean; Photosynthetic index; Chlorophyll fluorescence parameter; Diurnal variation; Yield

大豆(*Glycine max*)是世界上重要的油料作物和人类最主要的植物蛋白源,在粮食供给和农业生产中占重要地位<sup>[1]</sup>。作为植物生长发育的基本环境因子<sup>[2]</sup>,光照对植物的生理功能,特别是光合作用有显著影响<sup>[3]</sup>。光合作用因其与净生产力的直接联系而被认为是植物生长的重要指标<sup>[4]</sup>,是生态系统初级生产力的源头,也是作物间生产力差异的主

要特征<sup>[5]</sup>,主要的光合作用指标有光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 $CO_2$ 浓度等<sup>[6-7]</sup>。光合日变化特征是作物光合对环境反应特性的重要方面,是光合机构—功能—环境在1 d内动态互作的表现<sup>[8]</sup>,是研究大豆季节生理特性的基础。

大豆是典型的 $C_3$ 植物<sup>[9]</sup>,其光合日变化随气候条件、生长环境以及大豆生育期的不同而变化,中

收稿日期:2020-02-27

基金项目:山东省农科院创新工程(CXGC2016A02,2019E15);山东省农业良种工程(2019LZGC004,2019LZGC017);山东省现代农业产业技术体系杂粮创新团队(SDAIT-15-01)。

第一作者简介:李照君(1993-),女,硕士,主要从事植物生理与分子生物学研究。E-mail: ydlizhaojun@163.com。

通讯作者:丁汉凤(1963-),男,博士,研究员,主要从事农作物种质资源收集保护与创新应用研究。E-mail: dingh2005@163.com;

李娜娜(1981-),女,博士,副研究员,主要从事作物种质资源鉴定与评价研究。E-mail: qyz1127@163.com。

午前后光合速率在饱和光强条件下有明显降低。同一时期,不同大豆品种之间的净光合速率日变化存在差别<sup>[10]</sup>,表现为单峰或双峰曲线<sup>[11-12]</sup>。不同生育期间,变化趋势也不相同<sup>[13]</sup>,例如大豆品种 Mukden 在盛花期呈现明显的双峰变化,在鼓粒期趋于平缓<sup>[14]</sup>。光合作用的两大组成部分分别是光反应和碳反应,叶绿素荧光的理论基础就来源于光合作用的光反应进程<sup>[15]</sup>。叶绿素荧光参数是能够反映植物光合作用机理和光合生理状况的变量或常数值,进而反映植物的内部情况<sup>[16]</sup>。胡志辉等<sup>[17]</sup>研究表明,叶绿素荧光参数在菜用大豆结荚期和鼓粒期与产量之间存在极显著正相关关系。袁慢慢等<sup>[18]</sup>通过研究不同气候条件对水稻剑叶光合作用日变化的影响,评估日变化对水稻生产的影响,为水稻高产品种选育提供光合生理依据。日变化过程中,光合作用受很多因素影响,品种特性是其中很重要的一项因子。白岚方等<sup>[19]</sup>在对灌浆期玉米光合特性日变化的研究中,成功筛选出高产优势品种,为后

续玉米高产高效栽培和品种选择都提供了很重要的实践指导意义。目前,对大豆特定生育期光合特性或不同时期多个光合指标的研究较多,但涉及多个生育期的光合特性日变化规律的研究较少,尤其是对不同生育期叶绿素荧光指标的日变化差异的研究鲜见报道。本研究以生育期差异小、产量差异较大的4个大豆品种为材料,通过测定不同生育期的光合特性日变化,以期探究品种间不同生育期光合日变化差异,明确各光合参数与产量的相关性,筛选与产量显著相关的光合指标,为高光效品种选择和高产育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为近年来山东省选育的4个生育期差异小、产量差异较大且品种特性突出的主推大豆品种临豆9号、潍豆9号、菏豆12号和齐黄34,品种信息详见表1。

表1 供试大豆品种信息

Table 1 Information of tested soybean varieties

品种 Variety	审定区域 Validation scope	蛋白含量 Protein content/%	油脂含量 Oil content/%	特性 Characteristic
临豆9号 Lindou 9	国家	45.59	19.13	高蛋白型
潍豆9号 Weidou 9	山东省	36.74	21.64	高油型
菏豆12号 Hedou 12	国家	43.20	18.18	区试对照品种
齐黄34 Qihuang 43	国家	42.77	21.26	高产、优质

1.2 试验设计

试验于2018-2019年在山东省农业科学院试验田进行。试验地为中壤土,前茬作物为小麦,地势平坦,肥力均匀。底肥施二胺 300 kg·hm<sup>-2</sup>,钾肥 225 kg·hm<sup>-2</sup>。随机区组排列,6行小区,每行长2 m,行距50 cm,株距10 cm,3次重复。6月14日条播,正常田间管理,10月25日收获。

每小区选取长势一致的3个单株进行挂牌标记,在开花期、结荚期、鼓粒期和成熟期,对第一节位完全展开叶的中间复叶进行测定。为减少指标日变化影响,先测定4个品种的第1株重复,再依次测定第2、3株重复,最后每个品种取3次测定数据的平均值。

选择无云晴天,测定光合指标和叶绿素荧光参数指标,测定时间为8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00,共6个测量时间点,每个品种3次重复。收获期测定4个品种的产量,并分析各指标与产量的相关性。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合指标测定 采用 LI-6400XT 便携式光

合作用测量系统测定光合指标净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $Tr$ )和胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )。测量条件设置为:内置LED红蓝光源,叶室内光强为1 000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,由CO<sub>2</sub>注入系统供应CO<sub>2</sub>气体,浓度设定为400 μmol·mol<sup>-1</sup>。

1.3.2 叶绿素荧光参数指标测定 采用 PAM-2500 叶绿素荧光仪测定叶绿素荧光指标,包括初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ ),光下最小荧光( $F$ )和光下最大荧光( $F'm$ )。测量最大光量子产量  $F_v/F_m$  前,将待测叶片暗适应处理20 min以上。计算相关参数:PSII 最大量子产量  $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ ;PSII 实际光化学量子产量  $\Phi_{PSII} = (F'm - F)/F'm$ ;光化学荧光淬灭系数  $qP = (F'm - F)/(F'm - F_0)$ ;非光化学荧光淬灭系数  $NPQ = (F_m - F'm)/F'm$ 。

1.3.3 产量测定 收获期对试验小区分别实收测产,取中间4行计产,脱粒后自然晒干,称量小区籽粒产量折合成单位面积产量。

1.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 分析软件进行统计分析和差异显著性检验;采用 Excel 2003 软件作图。

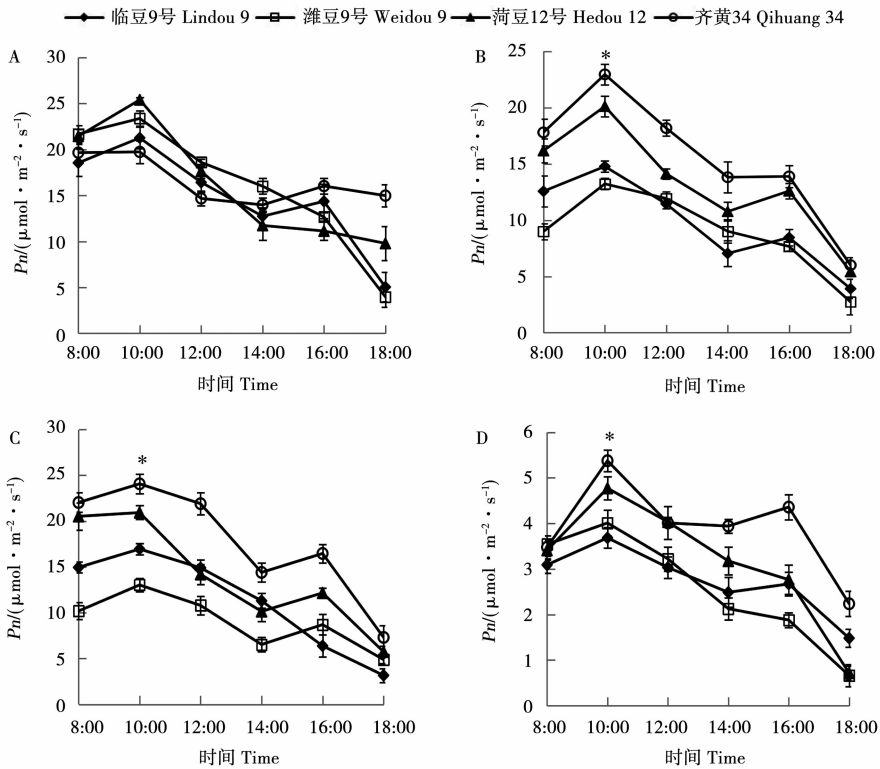
2 结果与分析

2.1 不同品种光合特性日变化规律研究

2.1.1 不同生育期  $P_n$  日变化 在不同生育时期,齐黄 34 的  $P_n$  均呈双峰典型曲线,其它品种在不同生育时期变化规律不同。临豆 9 号呈典型双峰变化,但在鼓粒期呈单峰曲线,潍豆 9 号呈典型单峰曲线,但在鼓粒期呈双峰曲线,荷豆 12 号在开花期和

成熟期呈单峰曲线,结荚期和鼓粒期呈双峰曲线;双峰值分别在 10:00 和 16:00,单峰曲线峰值在 10:00(图 1)。

品种间比较,在开花期各品种间差异不显著;结荚期至成熟期,齐黄 34 和荷豆 12 号  $P_n$  明显高于临豆 9 号和潍豆 9 号。鼓粒期,齐黄 34 的  $P_n$  达到峰值,与其它品种差异达显著水平,比最低的潍豆 9 号提高 84.73%(图 1)。



A:开花期; B:结荚期; C:鼓粒期; D:成熟期。\*:在 0.05 水平显著相关。下同。  
A: Flowering stage; B: Podding stage; C: Seed filling stage; D: Maturation stage. \*: There is significant correlation at 0.05 level. The same below.

图 1 各品种不同生育期  $P_n$  日变化

Fig. 1 Diurnal variation of  $P_n$  at different growth stages between varieties

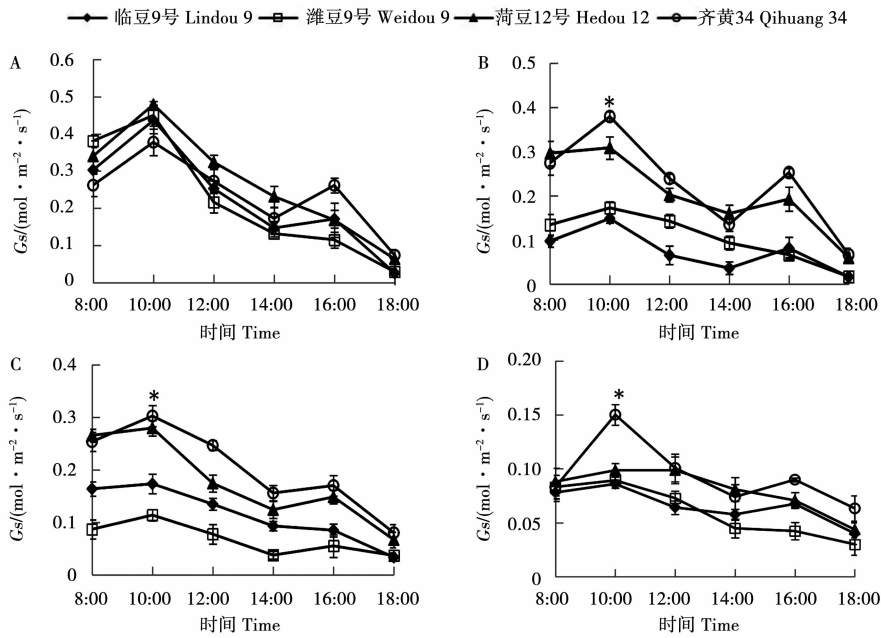
2.1.2 不同生育期  $G_s$  日变化 随生育时期推进,各品种间  $G_s$  日变化规律不同。齐黄 34 不同时期  $G_s$  日变化均呈现典型双峰曲线;临豆 9 号在鼓粒期呈单峰曲线,其它时期呈典型双峰曲线变化;潍豆 9 号在鼓粒期呈双峰曲线,其它时期呈典型单峰曲线变化;荷豆 12 号在开花期和成熟期呈单峰曲线,结荚期和鼓粒期呈双峰曲线。整体分析,各品种在上午 10:00 出现第一个高峰,也是全天最高值;12:00 – 14:00,  $G_s$  逐渐降低;至下午 16:00 左右,部分品种出现第二个高峰,随后降低。变化趋势与  $P_n$  趋于一致(图 2)。

品种间开花期各时间  $G_s$  差异不显著;结荚期和成熟期日峰值最高的齐黄 34 比最低的临豆 9 号峰

值分别提高 154.30% 和 74.42%,鼓粒期峰值最高的齐黄 34 比最低的潍豆 9 号提高 164.9%,品种间差异显著(图 2)。

2.1.3 不同生育期  $Tr$  日变化 在不同生育期,大豆  $Tr$  表现出不同的日变化趋势。开花期至鼓粒期,4 个品种的  $Tr$  日变化呈现典型双峰曲线;在上午 10:00 – 12:00,各品种出现全天最高值;在下午 16:00,出现第二个小峰值。至成熟期,大豆  $Tr$  表现出单峰曲线变化趋势,在上午 10:00 – 12:00 达到峰值,随后降低(图 3)。

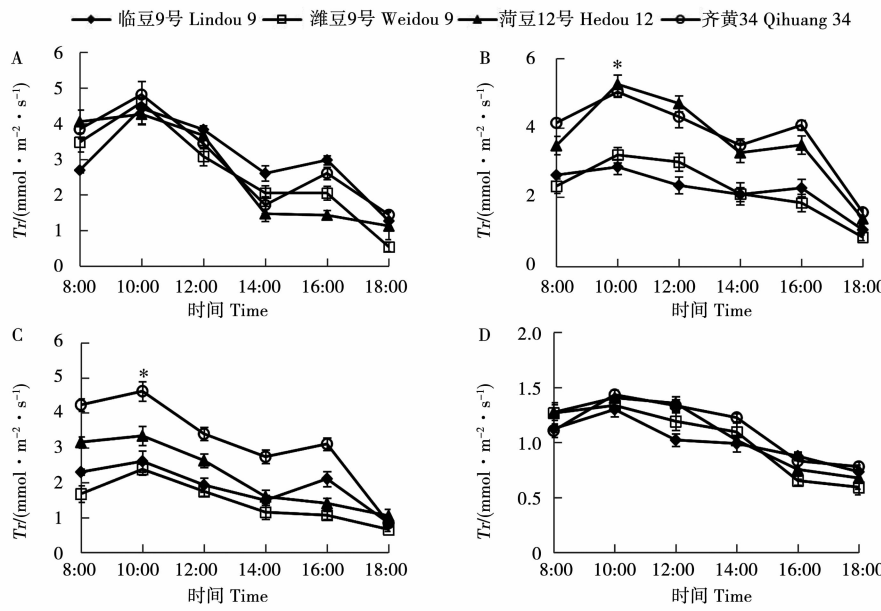
品种间比较,结荚期和鼓粒期差异明显,齐黄 34 和荷豆 12 号的  $Tr$  峰值显著高于临豆 9 号和潍豆 9 号,在开花期和成熟期差异不显著(图 3)。



A:开花期; B:结荚期; C:鼓粒期; D:成熟期。  
A: Flowering stage; B: Podding stage; C: Seed filling stage; D: Maturation stage.

图2 各品种不同生育期 *Gs* 日变化

Fig.2 Diurnal variation of *Gs* at different growth stages between varieties



A:开花期; B:结荚期; C:鼓粒期; D:成熟期。  
A: Flowering stage; B: Podding stage; C: Seed filling stage; D: Maturation stage.

图3 各品种不同生育期 *Tr* 日变化

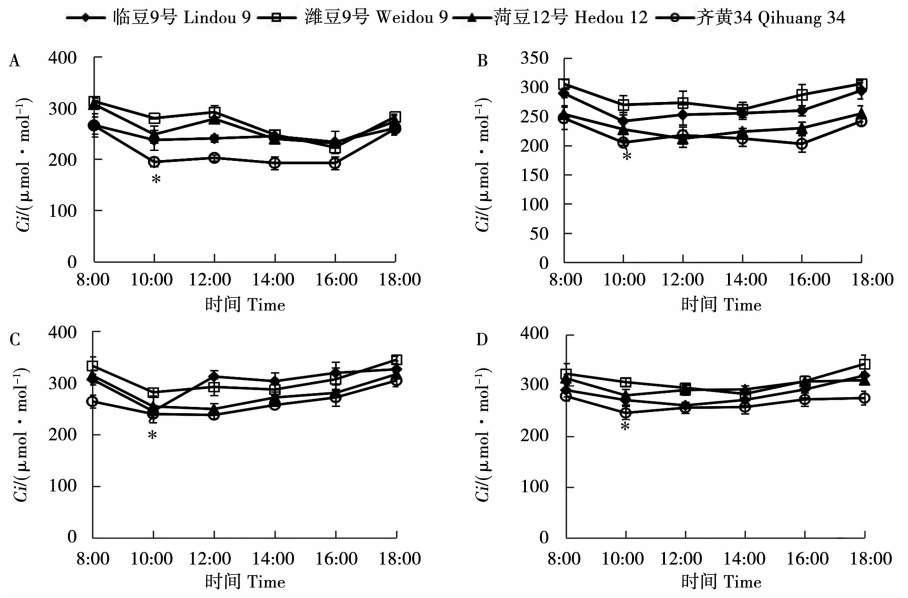
Fig.3 Diurnal variation of *Tr* at different growth stages between varieties

2.1.4 不同生育期 *Ci* 日变化 各时段4个品种 *Ci* 变化表现出与 *Pn* 相反趋势。在8:00出现最高峰, 然后随着气温和光照强度的增加开始逐渐下降, 至下午16:00后又逐渐回升。高产品种齐黄34的 *Ci* 在不同生育时期均低于其它品种, 与潍豆9号差异达显著水平(图4)。

2.2 不同品种叶绿素荧光特性日变化规律研究

2.2.1 不同生育期 *Fv/Fm* 日变化 各品种4个生

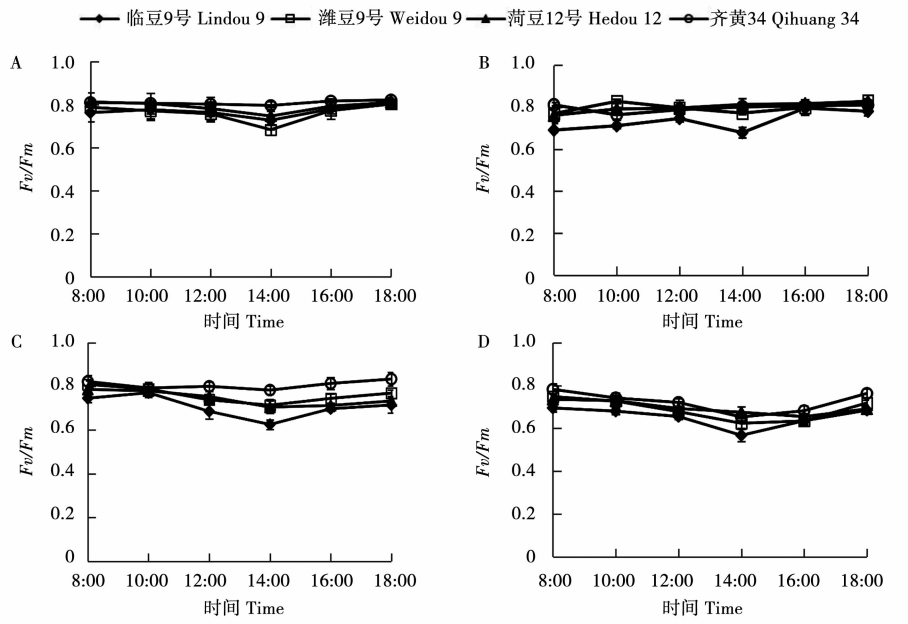
育期 *Fv/Fm* 日变化基本呈“V”型曲线, 在14:00左右达到最低值, 其它时间段数值相差不大, 整体趋于平缓。说明大豆光合作用在中午光强和温度较高的条件下受到暂时的抑制。随生育进程和叶片衰老的加深, *Fv/Fm* 谷值下降, 受到光抑制程度加深。品种间比较, 高产品种齐黄34的 *Fv/Fm* 值相对较高, 临豆9号和潍豆9号的叶片光合潜能水平较低(图5)。



A:开花期; B:结荚期; C:鼓粒期; D:成熟期。  
A: Flowering stage; B: Podding stage; C: Seed filling stage; D: Maturation stage.

图 4 各品种不同生育期  $C_i$  日变化

Fig. 4 Diurnal variation of  $C_i$  at different growth stages between varieties



A:开花期; B:结荚期; C:鼓粒期; D:成熟期。  
A: Flowering stage; B: Podding stage; C: Seed filling stage; D: Maturation stage.

图 5 各品种不同生育期  $F_v/F_m$  的日变化

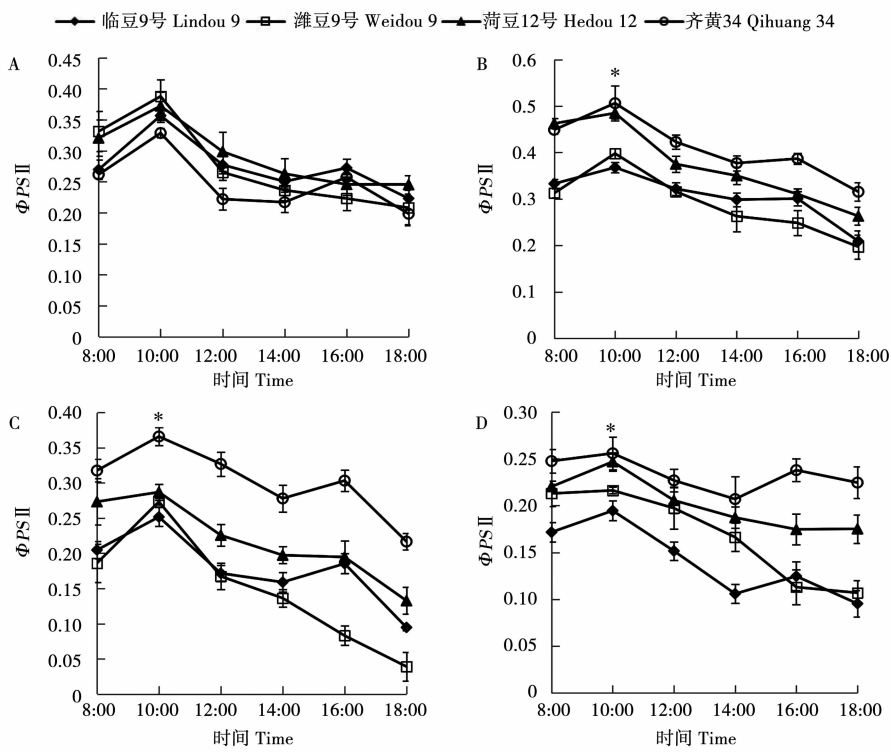
Fig. 5 Diurnal variation of  $F_v/F_m$  at different growth stages between varieties

2.2.2 不同生育期  $\Phi PS II$  日变化 不同生育时期,临豆9号和齐黄34的 $\Phi PS II$ 日变化呈典型双峰曲线,10:00出现峰值,16:00出现第二个小高峰;潍豆9号和菏豆12号的 $\Phi PS II$ 日变化呈典型单峰曲线,最高值出现在10:00(图6)。

品种间比较,高产品种齐黄34在结荚期至成熟期的 $\Phi PS II$ 明显高于其它品种,表现出较高的实际光合转化效率优势(图6)。

2.2.3 不同生育期  $qP$  日变化 不同生育时期, $qP$ 日变化曲线在品种间表现为不同趋势。临豆9号和齐黄34的 $qP$ 日变化呈典型双峰曲线,10:00出现峰值,16:00出现第二个小高峰;潍豆9号和菏豆12号的 $qP$ 日变化呈典型单峰曲线,最高值出现在10:00,与 $\Phi PS II$ 变化趋势相似(图7)。

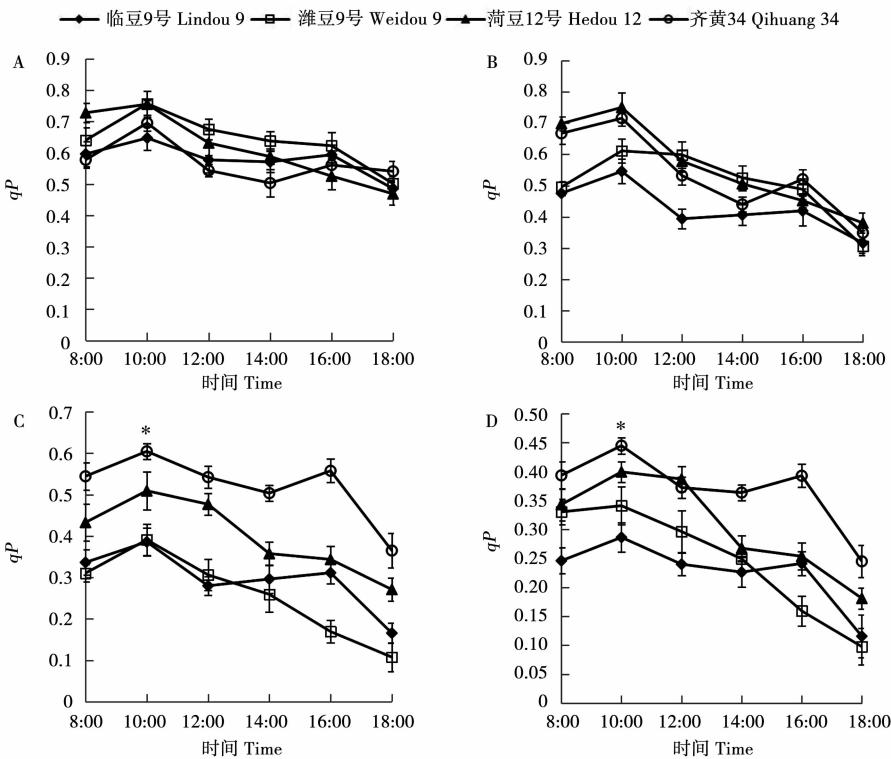
品种间比较,高产品种齐黄34在鼓粒期和成熟期均维持较高的 $qP$ 值,与其它品种差异显著(图7)。



A: 开花期; B: 结荚期; C: 鼓粒期; D: 成熟期。  
A: Flowering stage; B: Podding stage; C: Seed filling stage; D: Maturation stage.

图 6 各品种不同生育期  $\Phi PS II$  的日变化

Fig. 6 Diurnal variation of  $\Phi PS II$  at different growth stages between varieties



A: 开花期; B: 结荚期; C: 鼓粒期; D: 成熟期。  
A: Flowering stage; B: Podding stage; C: Seed filling stage; D: Maturation stage.

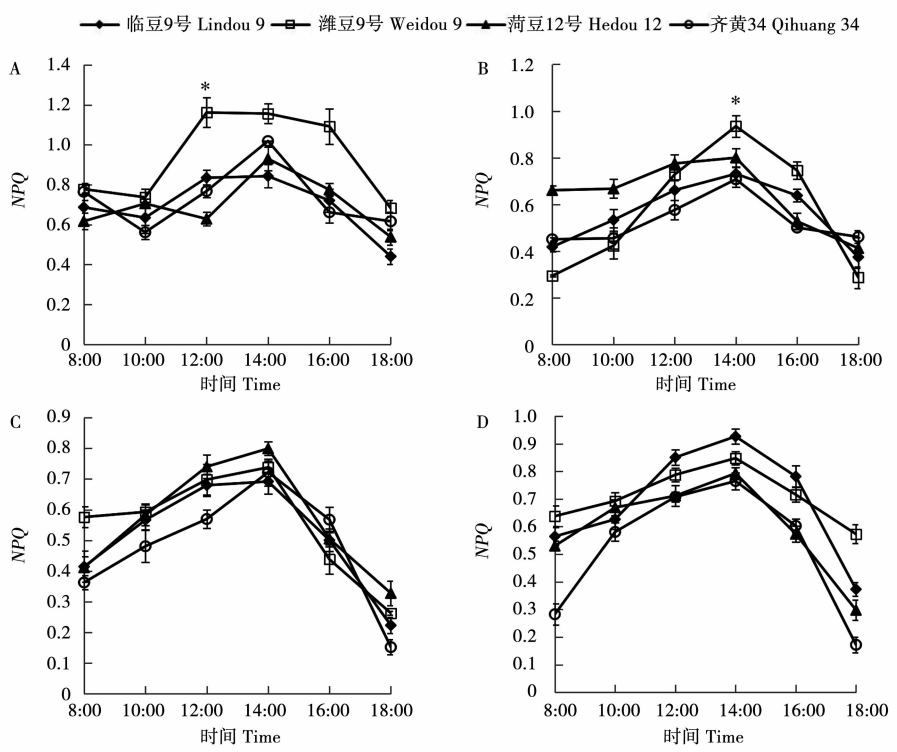
图 7 各品种不同生育期  $qP$  日变化

Fig. 7 Diurnal variation of  $qP$  at different growth stages between varieties

2.2.4 不同生育期  $NPQ$  日变化 不同生育时期,大豆  $NPQ$  日变化趋势基本一致,均呈现先升高后下降的趋势,最高值出现在 12:00 – 14:00(图 8)。

品种间比较,高产品种齐黄 34 表现出较低的

$NPQ$  值,以热耗散形式消耗的光能较少。潍豆 9 号在开花期和结荚期明显高于其它品种,光保护能力较强(图 8)。



A: 开花期; B: 结荚期; C: 鼓粒期; D: 成熟期。  
A: Flowering stage; B: Podding stage; C: Seed filling stage; D: Maturation stage.

图 8 各品种不同生育期  $NPQ$  日变化

Fig. 8 Diurnal variation of  $NPQ$  at different growth stages between varieties

2.3 不同生育时期光合特性与产量相关性分析

2.3.1 光合指标与产量相关性分析 不同品种的光合特性与产量的相关性分析如表 3 所示,不同生育时期, $P_n$ 、 $G_s$  和  $Tr$  日均值与产量呈正相关关系,且在结荚期  $P_n$  达到显著水平,成熟期  $G_s$  达到显著

水平,鼓粒期 3 项指标均达到显著水平;4 个生育时期, $C_i$  日均值与产量呈负相关关系,且在结荚期和鼓粒期达显著水平。说明在结荚期至成熟期的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $C_i$  日均值可以作为高产、高光效品种鉴定评价的重要指标(表 2)。

表 2 不同品种光合指标与产量相关性分析

光合指标 Photosynthetic index	相关系数 Correlation coefficient			
	开花期 Flowering stage	结荚期 Podding stage	鼓粒期 Seed filling stage	成熟期 Maturation stage
$P_n$	0.393	0.955 *	0.981 *	0.933
$G_s$	0.560	0.823	0.988 *	0.964 *
$Tr$	0.546	0.891	0.954 *	0.865
$C_i$	-0.803	-0.982 *	-0.954 *	-0.805

\*: 在 0.05 水平显著相关。下同。  
\*: There is significant correlation at 0.05 level. The same below.

2.3.2 荧光动力学指标与产量相关性分析 不同品种的荧光参数与产量相关性分析如表 3 所示,各指标与产量相关性在不同生育期表现不同。各时期  $Fv/Fm$  日均值与产量呈正相关,在开花期达到显著水平; $\Phi PS\ II$  和  $qP$  日均值在结荚期、鼓粒期和成

熟期与产量呈正相关, $\Phi PS\ II$  在结荚期和鼓粒期达到显著水平, $qP$  在鼓粒期达到显著水平;不同生育时期, $NPQ$  与产量呈负相关关系,在成熟期达到显著水平。表明在大豆产量形成的关键时期结荚期和鼓粒期, $\Phi PS\ II$  可作为评价大豆产量的重要指标。

表 3 不同品种荧光动力学指标与产量相关性分析

荧光动力学指标 Fluorescence kinetics index	相关系数 Correlation coefficient			
	开花期 Flowering stage	结荚期 Podding stage	鼓粒期 Seed filling stage	成熟期 Maturation stage
$Fv/Fm$	0.971 *	0.163	0.482	0.595
$\Phi PS\ II$	-0.449	0.957 *	0.953 *	0.767
$qP$	-0.710	0.460	0.957 *	0.858
$NPQ$	-0.740	-0.112	-0.586	-0.953 *

3 讨 论

作物光合特性日变化是生理生态多因素综合调控效应的最终反映,不同品种在不同生育期间动态变化不同。目前,对大豆的光合日变化研究结论不尽相同,有的结论表明大豆光合速率日变化呈单峰曲线,有的认为呈双峰曲线。本研究结果表明,光合速率日变化趋势在品种间和不同生育期间均存在较大差异,齐黄 34 在整个生殖生育期均呈典型双峰曲线,临豆 9 号、潍豆 9 号和荷豆 12 号则在不同生育期间有单峰曲线和双峰曲线的转变。因此,光合日变化不遵循固定模式,这与王建林等<sup>[20]</sup>、刘冰等<sup>[21]</sup>研究结果一致。

不同品种光合特性日变化规律的研究结果表明,不同生育时期的  $Pn$  最高峰值均出现在 10:00,标志着此时为光照、气温、温度和  $CO_2$  浓度的最佳配合。齐黄 34 在开花期至鼓粒期  $Pn$  日均值都维持较高值,且在鼓粒期达到各生育期间最高峰。临豆 9 号、潍豆 9 号和荷豆 12 号在开花期  $Pn$  日均值最高,之后逐渐降低,至成熟期维持较低水平。因此,品种  $Pn$  日变化因品种适应性而异,高产品种可显著提升生育后期光合能力。 $Gs$  日变化呈现与  $Pn$  正相关的变化趋势,品种间在结荚期至鼓粒期差异较大,开花期和成熟期品种间差异不显著。 $Tr$  日变化品种间有不同表现,临豆 9 号和齐黄 34 在开花期至鼓粒期呈双峰曲线,至成熟期表现出单峰曲线;潍豆 9 号和荷豆 12 号在不同生育时期均保持单峰曲线。Tuyen 等<sup>[22]</sup>和王兰兰等<sup>[23]</sup>研究结果表明  $Ci$  日变化表现出与  $Pn$  相反趋势。本研究中高产品种齐黄 34 鼓粒期的  $Pn$  达到峰值,与其它品种差异达显

著水平;在结荚期至成熟期  $Gs$  峰值高于其它品种,差异达显著水平;在不同生育时期  $Ci$  均低于其它品种,与潍豆 9 号差异达显著水平。光合特性指标与产量相关性分析可知,在结荚期和鼓粒期,产量与  $Pn$  日均值呈显著正相关关系,与  $Ci$  呈显著负相关关系。在鼓粒期和成熟期,产量与  $Gs$  日均值呈显著正相关关系。因此结荚期至成熟期的  $Pn$ 、 $Ci$  和  $Gs$  日均值是高产、高光效品种鉴定评价的重要指标。

叶绿素荧光参数的日变化反映植物对环境光强变化的重要生理调节过程<sup>[24-25]</sup>。 $Fv/Fm$  是  $PSII$  反应中心完全开放时的最大光能转换效率,表征植物叶片的最大光合能力, $Fv/Fm$  值的下降是判断植物发生光抑制的重要指标<sup>[26-27]</sup>。大豆日变化曲线均呈先降低后升高的趋势,在 14:00 处于一天中的低谷值,说明此时大豆叶片均受到光抑制,从而使光合机构活性降低;大豆叶片光合作用在中午光强和温度较高条件下其光合活性会受到暂时的抑制,但这种抑制是可逆的<sup>[28]</sup>,从日变化曲线在 14:00 之后逐渐回升可以印证。 $\Phi PS\ II$  反映实际光能转换效率,在未受到抑制情况下,与光合速率呈正相关关系。品种间  $\Phi PS\ II$  和  $qP$  的日变化趋势具有同一性,并且与  $Pn$  呈部分正相关;高产品种齐黄 34 的  $\Phi PS\ II$  和  $qP$  日变化在鼓粒期和成熟期与其它品种有明显差异。 $NPQ$  在中午前后达到峰值,保护大豆免受过强光照对光合结构的抑制和破坏,响应光合指标的午休现象。 $Fv/Fm$  日均值与产量呈正相关,且在开花期达到显著水平,说明叶片的原初光合潜能与光合能力和光能转化效率有直接关系。 $\Phi PS\ II$  和  $qP$  日均值在结荚期至成熟期与产量呈正相关,表明从结荚期开始进入产量形成的重要阶段,这与

$Pn$  和产量相关性趋于一致性,该结果与前人研究结论相吻合<sup>[29-30]</sup>;  $\Phi PS II$  日均值在结荚期和鼓粒期达到显著水平,可作为评价大豆产量的重要指标。 $NPQ$  日均值与产量呈负相关,说明当叶片光保护能力增强,热耗散消耗的光能增加,光合速率反而会下降,产量也随之下降;成熟期达到显著水平,可能与叶片衰老有关系,后期将进一步研究。

4 结 论

大豆光合速率日变化呈单峰或双峰曲线,最高峰值出现在 10:00;高产品种齐黄 34 在鼓粒期、成熟期  $Pn$  日均值均显著高于其它品种。结荚期和鼓粒期,产量与  $Pn$  日均值、 $\Phi PS II$  日均值呈显著正相关,与  $Ci$  日均值呈显著负相关;鼓粒期和成熟期,  $G_s$  日均值与产量呈显著正相关。结荚期至成熟期的  $Pn$ 、 $G_s$ 、 $Ci$  和  $\Phi PS II$  日变化均值,是高产、高光效品种鉴定评价的重要指标。

参考文献

[1] Xu C, Xia C, Xia Z, et al. Physiological and transcriptomic responses of reproductive stage soybean to drought stress[J]. Plant Cell Reports, 2018, 37(12):1611-1624.

[2] Sun X, Liu M J, Yang M Y, et al. Implications of terminal oxidases in the regulation of soybean photosynthetic performance under different lightintensities[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39(12):266.

[3] Kono M, Terashima I. Long-term and short-term responses of the photosynthetic electron transport to fluctuating light[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology. B, Biology, 2014, 137:89-99.

[4] Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming [J]. Nature, 2008, 451(7174):49-52.

[5] 范元芳, 杨峰, 刘沁林, 等. 套作荫蔽对苗期大豆叶片结构和光合荧光特性的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(2):277-285. (Fan Y F, Yang F, Liu Q L, et al. Effects of shading on leaf structure and photosynthetic fluorescence characteristics of soybean seedlings in maize-soybean relay intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(2): 277-285. )

[6] Berry J A,Beerling D J, Franks P J. Stomata: Key players in the earth system, past and present[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2010, 13(3):232-239.

[7] 郑盛华. 水分胁迫对玉米生理生态特性影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007. (Zheng S H. Studies on the ecoophysiological characteristics of maize under water stress[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Master Dissertation, 2007. )

[8] 闫建文,史海滨,李仙岳,等. 轻度盐渍化土壤水氮对玉米光合日变化的影响[J]. 灌溉排水学报,2014,33(3): 22-27. (Yan J W, Shi H B, Li X Y, et al. Effects of lightly salinized soil water and nitrogen on diurnal changes of corn photosynthesis [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 22-27. )

[9] Zhang Z S, Liu M J, Scheibe R, et al. Contribution of the alternative respiratory pathway to PSII photoprotection in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants[J]. Molecular Plant,2017,10(1): 131-142.

[10] 张伟,宋显军,谢甫绋,等. 不同大豆品种光合特性的比较[J]. 大豆科学,2008, 27(3):391-396. (Zhang W, Song X J, Xie F T, et al. Comparison on photosynthetic characteristics of different soybean varieties [J]. Soybean Science, 2008, 27 (3): 391-396. )

[11] 王凤敏,刘兵强,黄志平,等. 大豆杂优豆 1 号及双亲的光合特性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 665-669. (Wang F M, Liu B Q, Huang Z P, et al. Photosynthetic characteristics of hybrid variety Zayoudou 1 and its parents[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(4): 665-669. )

[12] Jia T J, An J, Liu Z, et al. Salt stress induced soybean *GmIFS1* expression and isoflavone accumulation and salt tolerance in transgenic soybean cotyledon hairy roots and tobacco[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2017, 128(2):469-477.

[13] 徐新娟,王伟,黄中文. 大豆品种主要光合指标日变化的研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(11):55-58, 62. (Xu X J, Wang W, Huang Z W. Studying on diurnal variation of main photosynthetic index of different soybean varieties[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(11):55-58, 62)

[14] 张瑞朋,杨德忠,傅连舜,等. 不同来源大豆品种光合速率日变化及其影响因子的研究[J]. 大豆科学,2007, 26(4):490-495. (Zhang R P, Yang D Z, Fu L S, et al. Research of photosynthesis diurnal variation and its affecting factors for different source soybean [J]. Soybean Science, 2007, 26(4): 490-495. )

[15] Saglam A, Chaerle L, van der Straeten D, et al. Promising monitoring techniques for plant science: Thermal and chlorophyll fluorescence imaging[M]//Ahmad P, Ahanger M A, Alyemeni M N, et al. Photosynthesis, Productivity and Environmental Stress. Hoboken: John Wiley and Sons,2019: 241-266.

[16] Yang P Q, van der Tol C, Verhoef W, et al. Using reflectance to explain vegetation biochemical and structural effects on sun-induced chlorophyll fluorescence [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 110-126.

[17] 胡志辉,汪艳杰,张丽琴. 菜用大豆施肥后荧光、光谱、光合等参数对产量的预测[J]. 浙江农业学报,2018, 30(8): 1355-1362. (Hu Z H, Wang Y J, Zhang L Q. Prediction of vegetable soybean yield with fluorescence, spectra, photosynthetic parameters after fertilization[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(8): 1355-1362. )

[18] 袁嫚嫚,朱建国,刘钢,等. 不同天气水稻光合日变化对大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高的响应-FACE 研究[J]. 生态学报,2018, 38(6):1897-1907. (Yuan M M, Zhu J G, Liu G, et al. Response of diurnal variation in photosynthesis to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature of rice between cloudy and sunny days: A free air CO<sub>2</sub> enrichment study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):1897-1907. )

[19] 白岚方,路战远,张向前,等. 不同玉米品种灌浆期穗位叶光合特性日变化及青贮产量差异研究[J]. 河南农业科学, 2020, 49(4): 29-37. ( Bai L F, Lu Z Y, Zhang X Q, et al. Diurnal variation of photosynthetic characteristics of panicle position leaf during filling period and difference of silage yield of

different maize varieties [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(4): 29-37. )

[20] 王建林, 齐华, 房全孝, 等. 水稻、大豆、玉米光合速率的日变化及其对光强响应的滞后效应[J]. 华北农学报, 2007, 22(2): 119-124. (Wang J L, Qi H, Fang Q X, et al. Diurnal changes of photosynthesis and its hysteresis to light in rice (*Oryza sativa* L.), soybean (*Glycine max* L. Merrill) and maize (*Zea mays* L.) [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(2): 119-124. )

[21] 刘冰, 白子裕, 孙禹, 等. 杂交大豆叶片光合相关参数日变化及其与环境因子关系[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(4): 77-79. (Liu B, Bai Z Y, Sun Y, et al. Diurnal changes of photosynthetic parameters and their relationship with environmental factors in hybrid soybean leaves [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(4): 77-79. )

[22] Tuyen D T D, Dunn T D, Clubb D, et al. Identification of new loci for salt tolerance in soybean by high-resolution genome-wide association mapping[J]. BMC Genomics, 2019, 20(1): 318.

[23] 王兰兰, 李琦, 宋晓芹, 等. 环境条件对植物叶绿素荧光参数影响研究进展[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(4): 362-367. (Wang L L, Li Q, Song X H, et al. Effects of environmental conditions on chlorophyll fluorescence parameters of plants [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 37(4): 362-367. )

[24] Prášil O, Kolber Z S, Falkowski P G. Control of the maximal chlorophyll fluorescence yield by the Q<sub>B</sub> binding site [J]. Photosynthetica, 2018, 56(1): 150-162.

[25] Umrani K, Bhatia V S, Pandey G P. Impact of elevated temperatures on specific leaf weight, stomatal density, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in soybean[J]. Photosynthesis Research, 2017, 131(3): 333-350.

[26] 周玉霞, 巨天珍, 王引弟, 等. 3种旱生植物的叶绿素荧光参数日变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 166-172. (Zhou Y X, Ju T Z, Wang Y D, et al. Study on diurnal variation of chlorophyll fluorescence parameters of three xerophytes [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(5): 166-172. )

[27] Kalaji H M, Jajoo A, Oukarroum A, et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(4): 102-116.

[28] 王瑞, 王宏富, 陈新霞, 等. 玉米大豆不同间作模式下大豆鼓粒期的光学特性[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(4): 16-20. (Wang R, Wang H F, Chen X X, et al. Optical characteristics of soybean at the seeding stage of corn under different intercropping patterns[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(4): 16-20. )

[29] 孙文帅, 秦宁, 王菲, 等. 白花丹参和紫花丹参叶绿素荧光日变化比较研究[J]. 特产研究, 2019, 41(1): 8-11. (Sun W S, Qin N, Wang F, et al. Comparative study on diurnal changes of chlorophyll fluorescence of *Salvia miltiorrhiza* bunge and *Salvia miltiorrhiza* bunge var alba C. Y. [J]. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 2019, 41(1): 8-11. )

[30] Wang X, Zhang H, Gao Y, et al. Characterization of Cu/Zn-SOD enzyme activities and gene expression in soybean under low nitrogen stress [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(8): 2692-2697.

## 《大豆科学》正式加入 OSID 开放科学计划

《大豆科学》于2019年8月1日起正式加入 OSID(Open Science Identity)开放科学标识计划。将通过在文章上添加开放科学二维标识码( OSID 码),为读者和作者提供一个与业界同行和专家学术交流的平台,同时提供一系列增值服务,提升论文的科研诚信。

读者可以通过微信扫描论文的 OSID 码,在手机上听论文作者的语音介绍,可以看到论文的重点彩图和实验视频,也可直接与作者进行一对一的交流、关注作者的研究动向等。这些功能有助于读者深入了解该研究的实际状况与实现过程。

作者可以通过专属的 OSID 码对所著论文添加语音,介绍写作背景、动机、趣事以及研究灵感。添加无法在传统印刷出版展示的附加说明,以便更好地展现研究成果,拓展论文的传播方式。同时,通过 OSID 平台每位作者都能拥有所著论文的学术圈和问答,与读者进行交流互动。此外,作者还可以在学术圈发布感兴趣的话题、最新的研究观点、问题征集、学术推荐等,扩大作者自身的影响力,增强与读者的联系。