



超高产大豆发育期不同节位叶片净光合速率与 SPAD 值变化分析

王弼琨¹, 于德彬², 赵洪颜¹, 孟凡钢², 张伟², 魏代霞³, 李志国³

(1. 延边大学 农学院, 吉林 延吉 133000; 2. 吉林省农业科学院 大豆研究所/大豆国家工程研究中心, 吉林 长春 130033; 3. 敦化市官地镇农业推广站, 吉林 敦化 133700)

摘要: 为了研究超高产大豆发育期内不同节位叶片的净光合速率(P_n)与相对叶绿素含量(SPAD 值)的关系,以超高产大豆品种吉育 86 为研究对象,以吉育 593 为对照品种,监测整个生育期不同节位叶片 P_n 和 SPAD 值变化,分析超高品种不同节位不同时期 P_n 与 SPAD 值变化规律。 P_n 变化规律为:两个品种下部节位变化规律相似,在 R1 期达到最大,在 R2 期下降。高产品种中部节位在 R3 期达到最大,在 R6 期下降,对照在 R2 期达到最大,在 R3 期下降。两个品种上部节位表现相似,在 R5 期达到最大,在 R6 期下降。SPAD 值变化规律为:两个品种各节位 SPAD 值变化规律相似,下部节位在 R2 期达到最大,在 R3 期下降。中部节位在 R3 期达到最大,在 R5 期下降。上部节位在 R5 期达到最大,在 R6 期下降。超高产品种各节位叶片具有更高的 SPAD 值。 P_n 与 SPAD 值相关性表现为,两个品种下部节位两个指标表现为不相关,高产品种中部节位在 R3 至 R7 期保持相关,对照在 R2 至 R3 期保持相关,超高产品种上部节位在 R5 至 R7 期保持相关,对照在 R6 至 R7 期保持相关。结果说明超高产品种不同节位叶片整个生育时期具有较高的叶绿素含量,中部节位叶片发育过程中光合功能优势显著,不但维持较高叶绿素含量,而且维持较高的光合速率,中上部节位净 P_n 与 SPAD 值保持相关的时期更长。

关键词: 大豆;超高产;光合速率;SPAD 值;生育期

Analysis of Net Photosynthetic Rate and SPAD Values of Super-High Yield Soybean Leaves at Different Nodes During Different Developing Stages

WANG Bi-kun¹, YU De-bin², ZHAO Hong-yan¹, MENG Fan-gang², ZHANG Wei², WEI Dai-xia³, LI Zhi-guo³

(1. College of Agriculture, Yanbian University, Yanji 133000, China; 2. Soybean Research Institute/National Engineering Research Center of Soybean, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 3. Agricultural Extension Station, Guandi Town, Dunhua City, Dunhua 133700, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between net photosynthetic rate(P_n) and relative chlorophyll content (SPAD value) of leaves at different nodes during the developmental period of super-high-yielding soybean, this study conducted with the super-high-yielding soybean variety Jiyu 86 as the research object and Jiyu 593 as the control variety. We monitored the changes of leaves and P_n and SPAD value at different nodes throughout the reproductive period, and analyzed the changes of P_n and SPAD value at different periods at different nodes of super-high-yielding varieties. The patterns of P_n were as follows, the changes in the lower nodes of the two varieties were similar, reaching the maximum at R1 and decreased at R2 stage. The middle node of the high-yielding variety reached the maximum at R3 and decreased at R6 stage, while the control reached the maximum at R2 and decreased at R3 stage. The upper nodes of both varieties showed similar performance, reaching the maximum at R5 and decreasing at R6 stage. The SPAD value change pattern were as follows, the SPAD value change pattern of each node of both varieties was similar, reached the maximum at R2 and decreased at R3 in the lower nodes, reached the maximum at R3 and decreased at R5 in the middle node, reached the maximum at R5 and decreased at R6 in the upper node. The leaves at each node of the ultra-high yielding varieties had higher SPAD value. The correlation between P_n and SPAD value were as follows, the two indicators at the lower nodes of the two varieties showed no correlation, the middle nodes of the high-yielding variety remained correlated from R3 to R7, and the control remained correlated from R2 to R3, and the upper nodes of the super-high-yielding variety remained correlated from R5 to R7, and the control remained correlated from R6 to R7. The leaves of the ultra-high yielding varieties had high chlorophyll content at different nodes throughout the reproductive period, and the middle node had a significant photosynthetic functional advantage during leaf development, maintained not only high chlorophyll content but also high photosynthetic rate, and the P_n of the middle and upper nodes remained correlated with SPAD for a longer period.

Keywords: soybean; super-high yielding; photosynthesis rate; SPAD value; reproductive period

收稿日期:2021-08-30

基金项目:国家现代农业产业技术体系(CARS-04-PS12);吉林省科技发展计划(YDZJ202102CXJD009)。

第一作者:王弼琨(1993—),男,硕士研究生,主要从事大豆光合生理研究。E-mail:wangbikun@outlook.com。

通讯作者:张伟(1979—),男,博士,研究员,主要从事大豆栽培生理研究。E-mail:zw.0431@163.com。

大豆[*Glycine max* (L.) Merr.]是重要的油料作物和高蛋白粮饲兼用作物,在我国国民经济中起着重要的作用^[1]。光合作用为地球上最为重要的反应之一,是作物产量形成的物质基础。大豆植株的光合能力是影响产量的重要因素之一,大豆鼓粒期叶片净光合速率(P_n)与其最终产量呈显著正相关关系^[2-3],提高大豆光合速率是进一步提高产量的关键^[4]。延长叶片的光合功能期^[5]或提高叶片的光合效率^[6]均可改善叶片的光合功能。

叶绿素是光合作用的主要色素,一定程度上反映植物的光合能力^[7]。叶绿素含量常被用来衡量叶片的光能利用能力,叶绿素含量的稳定期表示光合功能的持续期^[8-9]。SPAD 值为日本农林水产省农产园艺局开发的用于快速测量植物叶片叶绿素含量的仪器,被广泛使用在植物生理的研究中。水稻^[10]、棉花^[11]、玉米^[12]、大豆^[13]、小麦^[14]和烟草^[15]等作物叶片叶绿素含量均可使用 SPAD 值表示。

有研究表明,大豆的 R4、R5 期的净光合速率与叶绿素含量呈显著正相关关系,在 R6 期两者相关性减弱或不相关^[16]。也有研究表明在弱光下,光合速率会随着叶绿素含量升高而升高,而在光强达到饱和后二者相关关系不显著^[17]。近年来研究发现,较高叶绿素含量的植株不一定有较高的光合能力,叶片的衰老过程中叶绿素含量相当时,光合能力具有显著差异^[18-19]。本研究以超高产大豆品种吉育 86 和普通品种吉育 593 为试材,在 R1 到 R7 期对大豆不同节位的叶片的净光合速率和 SPAD 值进行跟踪测量,旨在研究不同产量类型品种生育时期不同节位叶片生长过程中 P_n 与 SPAD 值动态变化,明确不同产量类型大豆品种不同节位叶片衰老过程中两个指标变化特征,为高产大豆品种选育提供生理依据。

1 材料与方法

1.1 材料

超高产大豆品种吉育 86,普通产量品种吉育 593,均由吉林省农业科学院大豆研究所提供。

1.2 试验设计

2019 年于吉林省公主岭市吉林省农业科学院公主岭院区进行试验,试验基地(43.50°N,124.82°E)

属于温带季风气候。采用盆栽试验,盆高 30 cm,内径 22 cm。每个品种种植 20 桶,每桶两穴,每穴保苗 1 株。每次每桶浇水量相同,以保证水分条件相同。盆栽土壤中水解性氮 170.23 mg·kg⁻¹,有效磷 23.32 mg·kg⁻¹,速效钾 183.80 mg·kg⁻¹,有机质 28.12 g·kg⁻¹,pH5.56。

每个品种选择 3 盆,每盆标记 1 株健康无病虫害且长势具有代表性的植株作为测定对象。于 2019 年 7 月 1 日,第 5 节位叶片完全展开后 R1 期开始测量,随着生育期推进,每隔 7 d 左右,分别于 7 月 7 日(R1)、7 月 7 日(R1)、7 月 13 日(R1)、7 月 19 日(R2)、7 月 25 日(R2)、8 月 2 日(R3)、8 月 9 日(R3)、8 月 16 日(R4)、8 月 23 日(R5)、8 月 30 日(R5)、9 月 6 日(R6)和 9 月 10 日(R6)测定第 5、7、9、11、13、15、17、19 奇数节位三出复叶中间小叶,持续监测不同节位叶片发育过程中 P_n 和 SPAD 值变化,分别测 3 株。为分析不同部位叶片 P_n 和 SPAD 值的变化规律,对不同节位叶片进行分类:下部节位为第 5、7 节位;中部节位为第 9、11、13 节位;上部节位为第 15、17、19 节位。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 净光合速率 于晴天的 9:00—11:00 使用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400XT 便携式光合仪测定净光合速率(P_n)。光强(PAR)设定为 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,使用 CO₂ 缓冲瓶保证气流稳定。

1.3.2 SPAD 值 于同一天下午,使用日本美能达公司生产的 SPAD-502 型便携式叶绿素仪,在相应叶片主叶脉两侧各取 2 个点测量 SPAD 值。持续监测不同节位叶片发育过程中 SPAD 值变化。

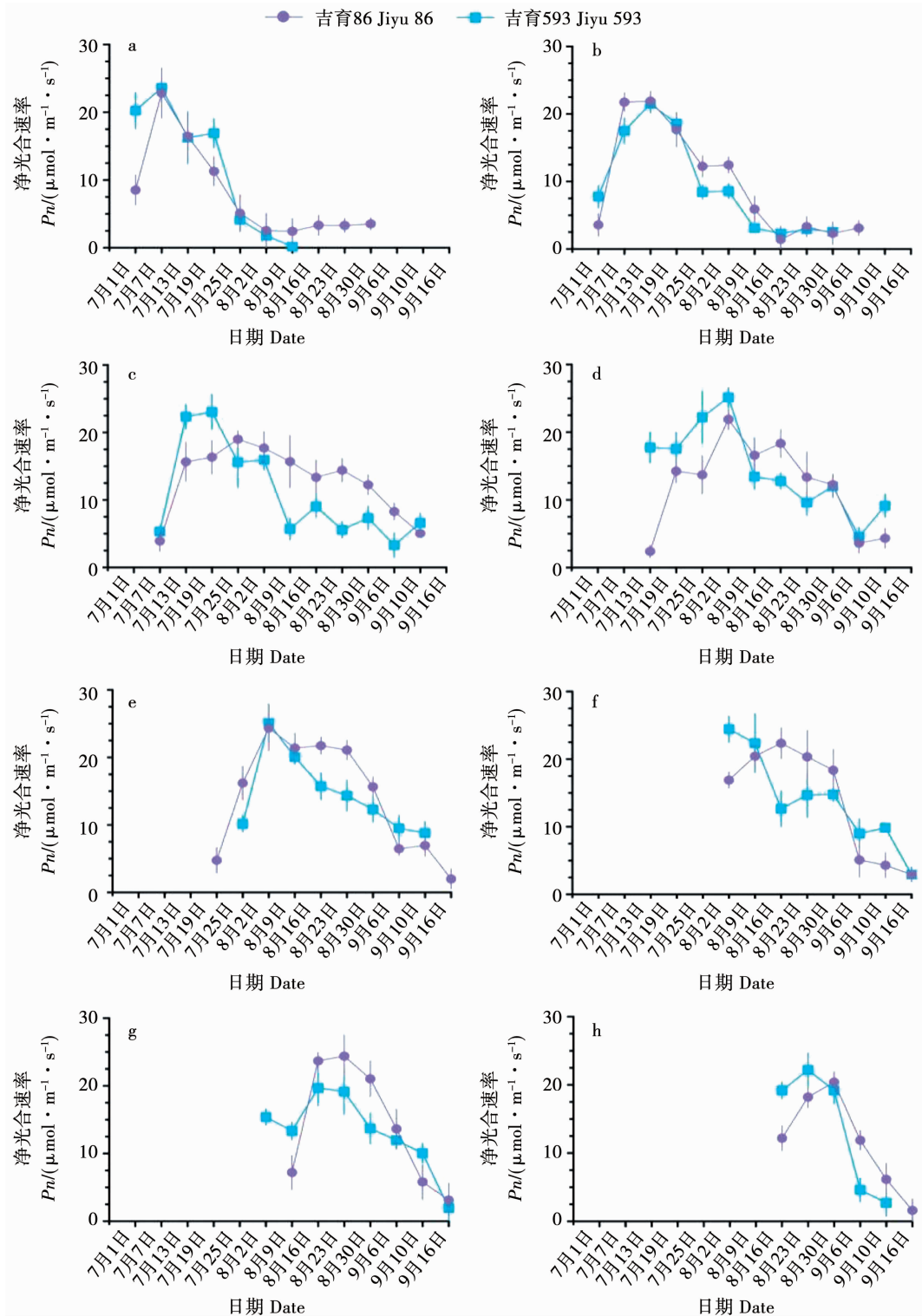
1.4 数据分析

采用 Excel 365 处理数据,使用 SPSS Statistics 26 进行 t 检验及相关性分析,使用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 两个大豆品种不同节位叶片净光合速率变化

两个品种下部节位叶片光合速率(P_n)变化规律相似。叶片在 R1 期展开,7 d 后 P_n 达到最大值,在最大值附近保持 7~14 d 后在 R2 期下降至 15 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(图 1a 和 b)。



注:a和b分别代表下部节位5和7节;c、d和e分别代表中部节位9、11和13节;f、g和h分别代表上部节位15、17和19节。下同。

Note:a and b represent 5th and 7th lower nodes respectively; c, d and e represent the 9th, 11th and 13th middle nodes respectively; f, g and h represent the 15th, 17th and 19th upper nodes respectively. The same below.

图1 两个品种不同部位叶片净光合速率变化

Fig. 1 The changes of leaf *Pn* in different parts of two cultivars

超高品种中部节位 R2 期叶片完全展开,*Pn* 开始升高,在 14 ~ 21 d 后的 R3 期达到最大。*Pn* 在最大值附近保持 21 ~ 28 d 后,在 R6 期下降至

15 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。对照品种中部节位在 R2 期叶片完全展开,*Pn* 开始升高,7 ~ 14 d 后达到最大值,在最大值附近保持 7 ~ 14 d 后,在 R3 期下降至

15 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(图 1c、d 和 e)。

上部节位两个品种表现相似,叶片在 R4 期完全展开,7 d 后 R5 期 P_n 达到最大值,在最大值附近保持 7~14 d,R6 期下降至 15 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(图 1f、g 和 h)。

结果说明两个品种下部和上部节位 P_n 变化规律相似,但超高产品种中部节位可维持更长时间的高光合速率。

2.2 两个品种不同节位叶片 SPAD 值变化

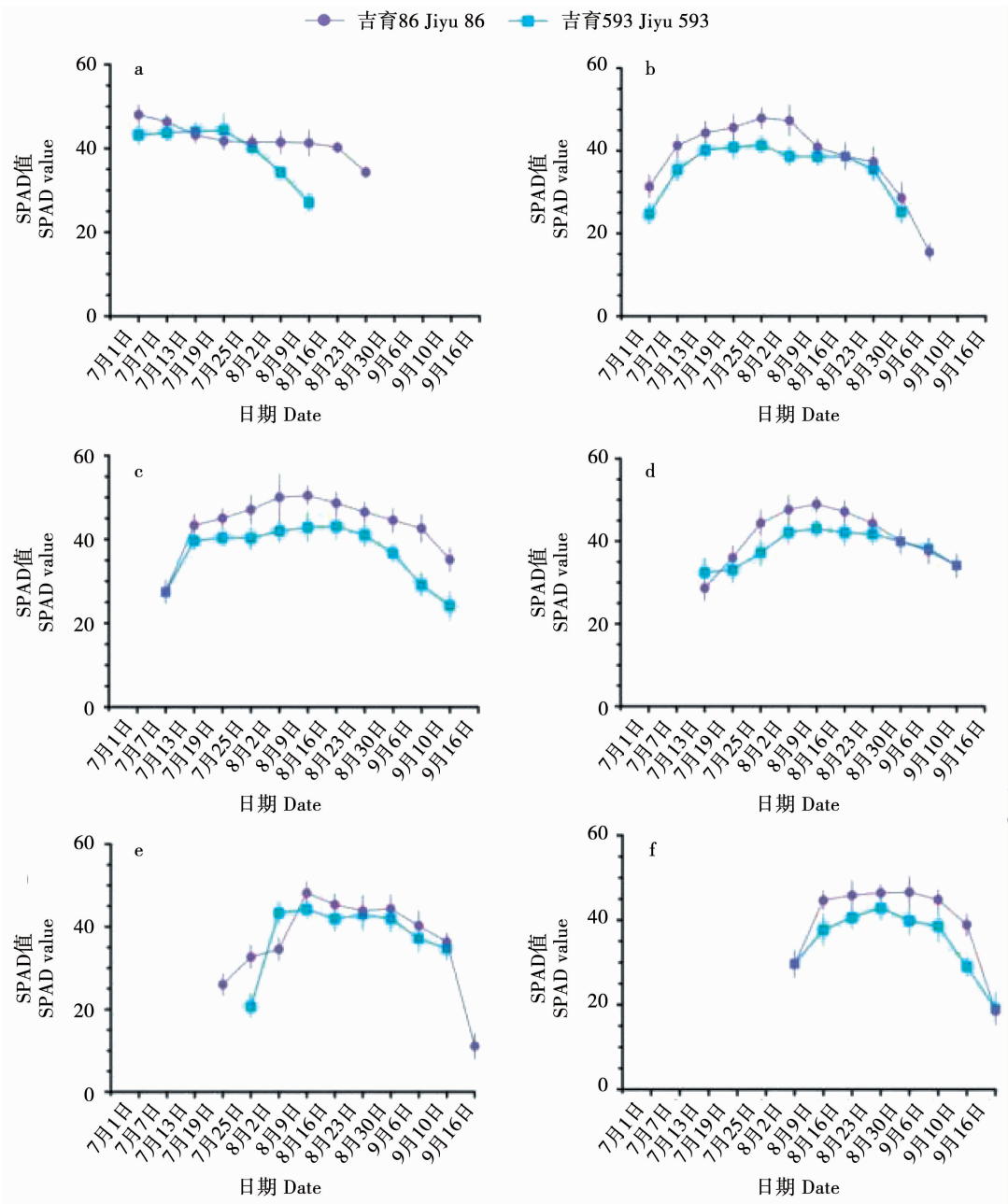
R6 期前,超高产品种吉育 86 各节位 SPAD 值均高于对照品种。超高产品种下部、中部和上部节位 SPAD 值分别比对照高 6.1%、6.7% 和 13.0%。

两个品种不同节位 SPAD 值变化规律相似,下

部节位叶片在 R1 期展开后 SPAD 值开始升高,在 R2 期达到最大值,稳定 14~21 d 后,在 R3 期后随着叶片衰老,叶绿素含量下降,SPAD 值开始下降(图 2a 和 b)。

中部节位叶片在 R2 期完全展开且 SPAD 值开始升高,经过 7~14 d 在 R3 期 SPAD 值达到最大值,在最大值附近稳定 28 d 左右,在 R5 期 SPAD 值开始下降(图 2c、d 和 e)。

上部节位叶片在 R4 期完全展开,SPAD 值开始升高,在 R5 期 SPAD 值达到最大,在最大值附近维持 14~21 d 后,于 R6 期开始下降。叶片功能期中部节位最长,下部位次之,上部最短(图 2f、g 和 h)。



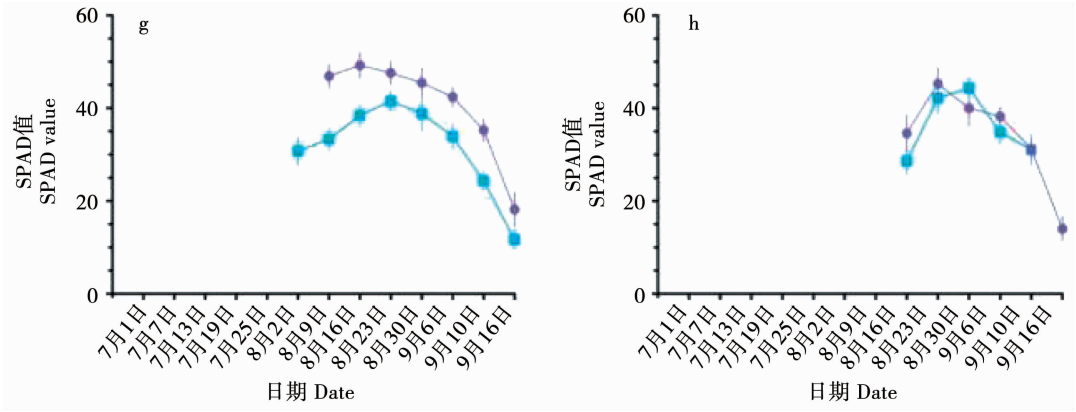


图2 两个品种不同部位叶片 SPAD 值变化

Fig. 2 The change trend of SPAD value for different position of the two cultivars

2.3 两个品种不同节位叶片净光合速率与 SPAD 值相关性

如表 1 所示,两个大豆品种下部节位叶片生长过程中 P_n 与 SPAD 值没有显著相关性。超高产品种中部节位 P_n 与 SPAD 值在 R3 至 R7 期相关性显著,相关系数大于 0.7。对照品种中部节位叶片 P_n 与 SPAD 值在 R2 至 R3 期具有相关性,而 R3 期后相关性不显著,说明超高产品种中部节位 P_n 与

SPAD 值变化趋势逐渐一致。超高产品种上部节位在 R5 至 R7 期 P_n 与 SPAD 值相关性达到显著,对照上部节位在 R6 至 R7 期 P_n 与 SPAD 值相关性达到显著。说明,超高产品种中、上部叶片 P_n 和 SPAD 值同步性更好,而对照品种 P_n 下降速率显著高于 SPAD 值下降速率,二者同步性差。研究结果说明超高产品种在叶片发育到衰老过程,不但维持较高叶绿素含量,而且维持了较高的光合活性。

表 1 不同生长时间不同节位净光合速率与 SPAD 值相关性

Table 1 The correlation between P_n and SPAD value of different nodes at different growing time

品种 Variety	节位 Node	日期 Date										
		7月13日	7月19日	7月25日	8月2日	8月9日	8月16日	8月23日	8月30日	9月6日	9月10日	9月16日
吉育 86	下部 Lower	0.486	0.357	0.418	0.448	0.550	0.612	0.662	0.682	0.693		
Jiyu 86	中部 Middle			0.771	0.905 **	0.855 **	0.713 *	0.609 *	0.684 **	0.724 *	0.782 **	0.805 **
	上部 Upper				0.771	0.405	0.345	0.503 *	0.685 *	0.783 **	0.830 **	0.571 *
吉育 593	下部 Lower	0.429	0.095	-0.111	-0.301	0.020	0.113	0.167	0.231			
Jiyu 593	中部 Middle		0.943 **	0.738 *	0.200	-0.077	-0.222	-0.179	0.003	0.171	0.315	0.384
	上部 Upper					0.314	0.310	0.448	0.569 *	0.783 *	0.558 *	0.632 **

注: * 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平存在相关性。
Note: * and ** indicate relationship at $P<0.05$ and $P<0.01$ level respectively.

3 讨论

光合作用不仅受到光照、水分、温度、土壤营养等^[20-21]环境因素的影响,还要受植株自身光能利用能力,叶片表面气孔因素和 CO_2 利用能力等非气孔因素的限制^[22]。实际表现为 P_n 在整个生育期内的变化曲线具有一定波动性,其整体规律为先升高到最大值后维持一段时间后开始下降。已有的研究表明,大豆叶片 P_n 与产量形成具有相关性^[23],尤其是在 R4 到 R6 期^[24],此时中部节位叶片光合功能最强,对有机物质积累贡献最多^[25],下部节位和上部节位叶片光合功能较弱,对有机物积累贡献少。本研究中,两个品种下部节位和上部节位可在高光

合速率($>15\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)维持时间相近,下部 7 d 左右,上部为 7~14 d 左右。高产品种中部节位可保持高光合速率 21~28 d,而对照只能保持 14 d 左右。下部节位两个品种规律相似,在 R1 期上升, R2 期下降。中部节位,高产品种在 R2 期上升, R3 期达到最大,于 R6 期下降,对照品种在 R2 期上升,同时期达到最大值, R3 期下降。上部节位两个品种规律相似, R4 期上升, R5 期达到最大值, R6 期下降。由此可见,中部节位叶片高光合功能持续期长,是超高产品种高产关键因素。

SPAD 值被广泛用作衡量植物叶片衰老的指标^[26], SPAD 值大小反映了叶片叶绿素含量大小^[27], SPAD 值的变化过程可看作叶片发育和衰老

过程^[28-29]。本研究中,两个不同类型品种间 SPAD 均值具有显著差异,在 R6 期前超高产品种各节位叶片平均 SPAD 值都显著高于对照,在满粒期前超高产品种叶片叶绿素含量更高,为维持高光合速率提供了物质基础。两个品种各节位 SPAD 值变化规律十分相似,下部节位在 R1 期开始上升,R2 期达到最大,在 R3 期下降。中部节位在 R2 期上升,R3 期达到最大值,R5 期下降。上部节位在 R4 期上升,R5 期达到最大值,R6 期下降。在 R6 期前超高产品种下、中和上部节位 SPAD 值比对照分别高 6.1%、6.7% 和 13.0%,超高产品种各节位叶片具有更高 SPAD 值。从结果中不难看出 P_n 的变化并不是在整个生育期内都与 SPAD 值变化保持一致。先前类似的研究已经表明在大豆的 R4、R5 和 R6 等时期, P_n 与 SPAD 值具有相关性^[16],研究内容主要为单个时期二者的相关性,缺乏二者在整个生育期内相关性变化的连续研究。

净光合速率和 SPAD 值相关性研究结果表明,两个品种在不同时期不同部位光合速率与 SPAD 值相关性具有差异。下部节位叶片发育过程中 P_n 与 SPAD 值相关性不显著;中部节位二者可在较长时间保持相关性,中部节位高产品种在 R3 至 R7 期两个指标保持相关性,对照在 R2 至 R3 期保持相关;上部节位保持相关时间短于中部节位,上部节位超高产品种在 R5 至 R7 期保持相关,对照在 R6 至 R7 值保持相关。高产品种中部和上部节位 P_n 和 SPAD 保持相关的时间要分别比对照多 42 和 7 d,高产品种中上部节位叶片衰老速率更慢, P_n 与 SPAD 值相关性更高。单从 SPAD 值来推断 P_n 是片面的,尤其是下部和上部节位的叶片。 P_n 会先于 SPAD 值下降, P_n 下降的原因可能是叶片中光合作用相关酶含量和活性的下降^[30],对于下部节位还可能是新展开的叶片蔽光导致 P_n 下降,而随后 SPAD 值的下降则可能是 P_n 下降的伴随过程^[31]。光合速率下降后有机物积累不足,导致叶片提前衰老,叶绿素开始分解进而导致 SPAD 值下降。

4 结论

与普通品种相比,超高产品种在满粒期前,下、中和上部节位均具有更高的 SPAD 值。超高产品种中部节位的光合能力具有明显优势,净光合速率与 SPAD 值在更长时间内保持较高的相关性;在下部和上部节位,超高产品种净光合速率无明显优势。

参考文献

[1] 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.)

[2] BOARD J E. Soybean cultivar differences on light interception and leaf area index during seed filling[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(1): 305-310.

[3] 张贤泽,马占峰. 大豆不同品种光合速率与产量关系的研究[J]. 作物学报,1986(1): 43-48. (ZHANG X Z, MA Z F. Study on the relationship between photosynthetic rate and yield of different varieties of soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 1986 (1): 43-48.)

[4] 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 No. 1 and its parents [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(4): 665-669.)

[5] 杨雪芹,陈婷婷,赵霞,等. 赤霉素与多效唑协同影响超级稻甬优 12 产量形成的作用途径分析[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(1): 53-61. (YANG X Q, CHEN T T, ZHOU X, et al. Mechanism behind the effects of GA₃ and PP₃₃₃ on grain yield formation of super rice Yongyou 12[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2016, 30(1): 53-61.)

[6] 李耕,高辉远,刘鹏,等. 氮素对玉米灌浆期叶片光合性能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 536-542. (LI G, GAO H Y, LIU P, et al. Effects of nitrogen fertilization on photosynthetic performance in maize leaf at grain filling stage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(3): 536-542.)

[7] 高阳,傅积海,章建新,等. 施氮量对高产春大豆光合特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(14): 34-40. (GAO Y, FU J H, ZHANG J X, et al. Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield of high-yield spring soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(14): 34-40.)

[8] LIN Z H, CHEN L S, CHEN R B, et al. CO₂ assimilation, ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, carbohydrates and photosynthetic electron transport probed by the JIP-test, of tea leaves in response to phosphorus supply[J]. BMC Plant Biology, 2009, 9(1): 1-12.

[9] 雷华,陈国祥,高志萍,等. 两优培九剑叶叶绿体衰退进程中的细胞生物学特性初探[J]. 中国水稻科学, 2008, 32(3): 279-284. (LEI H, CHEN G X, GAO Z P, et al. Cellular biological characteristics of chloroplast of flag leaves in super hybrid rice Liangyoupei9 during senescence [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 32(3): 279-284.)

[10] 王志东,陈宜波,龚蓉,等. 优质籼稻剑叶 SPAD 值与稻米品质相关性研究[J]. 中国水稻科学,2021, 35(1): 89-97. (WANG Z D, CHEN Y B, GONG R, et al. Correlation between SPAD value of flag leaf and rice quality of high quality indica rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2021, 35(1): 89-97.)

[11] 马宗斌,房卫平,谢德意,等. 氮肥和 DPC 用量对棉花叶片叶绿素含量和 SPAD 值的影响[J]. 棉花学报, 2009, 21(3): 224-229. (MA Z B, FANG W P, XIE D Y, et al. Effects of nitrogen application rates and dpc sparing doses on content of

- chlorophyll and SPAD value in leaf of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Cotton Science, 2009, 21(3): 224-229.)
- [12] 王囡囡. 不同玉米品种生育期叶片 SPAD 值的比较[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(16): 45-46, 133. (WANG N N. Comparison of leaf SPAD values of different maize varieties in different growth periods [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(16): 45-46, 133.)
- [13] 李方敏, 周治安, 张敏, 等. 作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J]. 湖北农学院学报, 2000, 20(1): 6-8. (LI F M, ZHOU Z A, ZHANG M, et al. Relationship between chlorophyll meter readings (SPAD readings) and chlorophyll content of crop leaves [J]. Journal of Hubei Agricultural College, 2000, 20(1): 6-8.)
- [14] 孙明馨, 刘琪, 王帅, 等. 基于高光谱的低温胁迫下冬小麦 SPAD 估算[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(6): 728-733. (SUN M X, LIU Q, WANG S, et al. SPAD estimation of winter wheat under low temperature stress based on hyper-spectrum [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 49(6): 728-733.)
- [15] 曾建敏, 姚恒, 李天福, 等. 烤烟叶片叶绿素含量的测定及其与 SPAD 值的关系[J]. 分子植物育种, 2009, 7(1): 56-62. (ZENG J M, YAO H, LI T F, et al. Chlorophyll content determination and its relationship with SPAD readings in flue-cured tobacco [J]. Molecular Plant Breeding, 2009, 7(1): 56-62.)
- [16] MA B L, MORRISON M J, VOLDENG H D. Leaf greenness and photosynthetic rates in soybean [J]. Crop Science, 1995, 35(4): 1411-1414.
- [17] CHEN Y, XU D. Two patterns of leaf photosynthetic response to irradiance transition from saturating to limiting one in some plant species [J]. New Phytologist, 2006, 169(4): 789-798.
- [18] 张子山, 李耕, 高辉远, 等. 玉米持绿与早衰品种叶片衰老过程中光化学活性的变化[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 93-100. (ZHANG Z S, LI G, GAO H Y, et al. Changes of photochemistry activity during senescence of leaves in stay green and quick-leaf-senescence inbred lines of maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(1): 93-100.)
- [19] CORNELIUS S B. The stay-green revolution: Recent progress in deciphering the mechanisms of chlorophyll degradation in higher plants [J]. Plant Science, 2009, 176(3): 325-333.
- [20] 呼和牧仁, 周梅, 翟洪波, 等. 影响树木光合作用因素的研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(2): 287-291. (HU H M R, ZHOU M, Z H B, et al. Research progress on factors affecting photosynthesis in tree [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 30(2): 287-291.)
- [21] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 等. 水稻光合作用研究进展及其影响因素分析[J]. 北方水稻, 2014, 44(5): 66-71. (ZHAO L M, LI M, ZHENG D F, et al. Analysis of the factors and their effect on the photosynthesis of rice [J]. North Rice, 2014, 44(5): 66-71.)
- [22] 夏冬冬, 何章, 刘冰, 等. 吉林省不同时期育成大豆品种叶片衰老过程中光合相关参数的研究[J]. 大豆科学, 2017, 36(4): 569-574. (XIA D D, HE Z, LIU B, et al. Study on photosynthetic parameters in leaves senescence of soybean varieties released at different ages in Jilin Province [J]. Soybean Science, 2017, 36(4): 569-574.)
- [23] 邹冬生, 郑丕尧. 大豆植株光合性能与干物质及荚粒形成关系的研究[J]. 大豆科学, 1991, 10(3): 217-225. (ZHOU D S, ZHENG P Y. Study on the relationship between photosynthetic performance and dry matter and pod formation in soybean plants [J]. Soybean Science, 1991, 10(3): 217-225.)
- [24] 李照君, 田汝美, 蒲艳艳, 等. 大豆光合指标日变化规律及其与产量关系研究[J]. 大豆科学, 2020, 39(4): 577-586. (LI Z J, TIAN R M, PU Y Y, et al. Study on diurnal variation of photosynthetic index and its relationship with yield in soybean [J]. Soybean Science, 2020, 39(4): 577-586.)
- [25] 杜维广, 张桂茹. 大豆光合作用与产量关系的研究[J]. 大豆科学, 1999, 19(2): 61-66. (DU W G, ZHANG G R. Study on the relationship between photosynthesis and yield of soybean [J]. Soybean Science, 2020, 39(4): 577-586.)
- [26] 傅金民, 张庚灵, 史春余, 等. 大豆开花后叶片衰老规律的研究[J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 796-801. (FU J M, ZHANG G L, SHI C Y, et al. Senescence law of leaf after soybean flowering [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 20(5): 796-801.)
- [27] 王文杰, 李雪莹, 王慧梅, 等. 便携式测定仪在测定叶片衰老过程中氮和叶绿素含量上的应用[J]. 林业科学, 2006, 42(6): 20-25. (WANG W J, LI X Y, WANG H M, et al. Application of portable meter for measuring leaf nitrogen and chlorophyll content in the process of leaf autumn senescence [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(6): 20-25.)
- [28] 时元智, 崔远来, 王力, 等. 氮磷调控及紫云英配施提高早稻冠层特性和产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 89-97. (SHI Y Z, CUI Y L, WANG L, et al. Regulation of nitrogen-phosphorus and Chinese milk vetch improve canopy characteristics and yield of early season rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 89-97.)
- [29] 李小红, 谢运河, 阳小凤, 等. 不同氮素浓度下大豆叶片 SPAD 值的动态变化研究[J]. 湖南农业科学, 2013(19): 39-42. (LI X H, XIE Y H, YANG X F, et al. Dynamic changes of SPAD value of soybean leaves under different nitrogen concentrations [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013(19): 39-42.)
- [30] 董雅致, 徐克章, 李大勇, 等. 不同氮素光合效率大豆品种叶片保护酶活性对施氮水平的响应[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(4): 395-401, 423. (DONG Y Z, XU K Z, LI D Y, et al. Response of protective enzyme activity of soybean variety leaves with different nitrogen photosynthetic efficiency to nitrogen application levels [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2015, 37(4): 395-401, 423.)
- [31] 吴含玉, 张雅君, 张旺锋, 等. 田间密植诱导抽穗期玉米叶片衰老时的光合作用机制[J]. 作物学报, 2019, 45(2): 248-255. (WU H Y, ZHANG Y J, ZHANG W F, et al. Photosynthetic characteristics of senescent leaf induced by high planting density of maize at heading stage in the field [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(2): 248-255.)