

绿豆荚果发育及籽粒灌浆特性

张 璠 黄梦迪 吴会琴 杨 璞 高小丽*

(西北农林科技大学 农学院/旱区作物逆境生物学国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要 为探明绿豆开花后荚粒生长发育规律及籽粒灌浆和物质积累特性,以‘西绿1号’和‘安绿7号’绿豆品种为试验材料,对开花后绿豆荚色、粒色、荚长、荚宽、荚体积、籽粒体积、荚粒数、荚壳鲜重、荚壳干重、百荚鲜重、百荚干重、百粒鲜重和百粒干重等性状的变化进行测定,分析绿豆荚果发育过程中荚壳和籽粒干物质分配以及籽粒灌浆速率变化,用 Logistic 方程拟合灌浆过程,并进行相关性分析。结果表明:绿豆籽粒形成过程中,荚色从深绿色转为绿色再转为黑色,粒色从透亮青绿色到嫩绿色再到深绿色;荚长和荚宽为先增长后基本保持平稳的趋势,荚体积和籽粒体积的变化趋势均为先增长后下降再趋于平缓;籽粒含水量呈不断下降趋势,荚壳干物质分配指数不断降低,籽粒干物质分配指数不断增大,籽粒灌浆速率呈慢-快-慢的单峰曲线变化,在开花后 15 d 左右达到峰值,灌浆过程符合 Logistic 方程。相关性分析表明,绿豆百粒干重与百荚干重呈极显著正相关,百粒鲜重与籽粒体积呈极显著正相关,与荚宽、荚体积、荚壳干重呈显著正相关,与荚粒数呈显著负相关;百粒干重与最大灌浆速率呈极显著负相关,与平均灌浆速率呈显著负相关,与生长活跃期呈极显著正相关。因此,绿豆育种中应选育大荚品种,栽培中注重花后 15 d 前后的肥水供应,以保证籽粒灌浆饱满,实现高产优质。

关键词 绿豆; 荚果发育规律; 灌浆特性; 相关性分析

中图分类号 S522

文章编号 1007-4333(2019)04-0016-08

文献标志码 A

Pod development and grain filling characteristics of mung bean

ZHANG Jun, HUANG Mengdi, WU Huiqin, YANG Pu, GAO Xiaoli*

College of Agronomy/Arid State Key Laboratory of Crop Stress Biology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract In order to ascertain the growth and development of pods and the characteristics of grain filling and material accumulation after mung bean flowering, this study used mung bean cv. ‘Xilv 1’ and ‘Anlv 7’ as tested materials. The color of pod and seed, length of pods, width of pods, volume of pods, grain volume, grain number, fresh weight of pod shell, fresh weight per hundred pod, dry weight per hundred pod, fresh weight of one hundred and dry weight per hundred were measured. The changes of dry matter distribution and grain filling rate of pod shell and grain during the development of mung bean pod were analyzed using Logistic Equation to fit grouting process and correlation analysis was conducted. The results showed that in the process of mung bean grain formation, pod color changed from dark green to green to black, and the color of seed changed from translucent turquoise to tender green to dark green. The pod length and pod width increased first and then kept steady. The trend of pod volume and grain volume increased first and then decreased and finally stabilized, the grain water content decreased continuously, and the pod shell dry matter distribution index decreased while the dry matter partitioning index of grain increased continuously, the grain filling rate changed slowly-fast-slowed and reached the peak value about 15 days after flowering. The grouting process was in line with Logistic equation. Correlation analysis showed that there were a extremely significant positive correlation between 100-grain dry weight of mung bean and 100-pod dry weight, a extremely significant positive correlation between 100-grain fresh weight and grain volume, and a significant positive correlation with pod width, pod volume and pod shell

收稿日期: 2018-04-11

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-03-01)

第一作者: 张璠, 博士研究生, E-mail: 1047435872@qq.com

通讯作者: 高小丽, 副教授, 主要从事小宗粮豆作物高产栽培生理及产业开发研究, E-mail: gao2123@nwsuaf.edu.cn

dry weight, and a significant negative correlation with pod number. The 100-grain dry weight and maximum grain filling rate displayed extremely significant negative correlation. A significant negative correlation with the average filling rate and a significant positive correlation with the active growth period were discovered. Therefore, mung bean breeding should adopt varieties of large pods, pay attention to the supply of fertilizer and water around 15 days after flowering in order to ensure grain's full filling and finally achieve high yield and quality.

Keywords mung bean; pod developmental rules; filling characteristics; correlation analysis

绿豆(*Vigna radiata* L.)是豆科豇豆属的一年生栽培种,又名青小豆、藜豆和植豆,是我国的主要杂粮作物之一,已有2 000多年的种植历史^[1-2]。绿豆是我国传统药食兼用的食材,有“食中佳品,济世长谷”之美称。绿豆营养丰富,属高蛋白、中淀粉和低脂肪类食物,且医食同源,具有清热解毒、抗菌抑菌、降血脂、降血糖、抗肿瘤和预防癌症等功能,是现代绿色保健食品开发的重要资源^[3-4];其适应性广、抗逆性强,且生育期短、适播期长,具有根瘤固氮、培肥改良土壤的能力,是禾谷类、棉花和薯类等作物间作、套作和混作的适宜作物和良好的前茬作物,也是优良的减灾救荒填闲作物。绿豆在农业种植结构调整和高产、优质、高效农业发展中具有其他作物不可替代的重要作用^[5]。

目前,对绿豆农艺性状的研究多集中在种质资源的比较评价以及其与产量的相关性方面^[6-10],对籽粒形成、物质积累过程中籽粒农艺性状的变化过程则鲜有报道。籽粒灌浆过程影响作物最终粒重、产量以及品质,是生长发育的重要生物学过程,研究籽粒灌浆特性既有助于加深对粒重形成过程的认知,也有助于针对灌浆关键时期采取有效调控措施,从而达到优质高产^[11-13]。目前对作物灌浆特性的研究多集中在水稻^[14-15]、玉米^[16-18]和小麦^[19-20]等大宗作物上,对绿豆的相关研究鲜有报道。运用Richard模型对籽粒灌浆过程研究较为深入的是水稻,研究表明在保持籽粒最终生长量和结实率稳定的条件下,提高籽粒灌浆速率,对提高千粒重有重要作用^[21-24]。

本试验通过研究绿豆开花结荚到籽粒成熟过程中的荚粒生长变化情况,明确籽粒形成和干物质积累规律,探究绿豆荚果发育及籽粒灌浆特性,以期为绿豆高效栽培技术体系的研究以及开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试绿豆品种为‘西绿1号’和‘安绿7号’,分

别由西北农林科技大学农学院小杂粮课题组和安阳市农业科学院提供。

1.2 试验设计

试验在西北农林科技大学农作一站试验地进行,采用大区种植,行距40 cm,株距16.7 cm,小区面积150 m²。每品种均于盛花期8:00—9:00挂牌标记当天开放的花。自挂牌后第5天起,每5 d从各品种的挂牌荚中随机摘取测定样本,直至荚果变黑、籽粒变硬成熟(约花后25 d左右)。花后第5天荚果较小,摘取250荚,花后第10天荚果发育变大,摘取150荚,从花后第15天至取样结束,每次摘取100荚。每次摘取的豆荚样本分为5组分别测定相关指标,取平均值。

1.3 测定项目与方法

主要测定性状:荚长,cm;荚宽,cm;荚体积,mL;籽粒体积,mL;荚粒数,粒;荚壳鲜重,g;荚壳干重,g;百荚鲜重,g;百荚干重,g;百粒鲜重,g和百粒干重,g,并观察记录荚色和粒色。

对所采鲜样进行相应性状指标测定,杀青烘干后进行干样品指标测定。荚长和荚宽用游标卡尺测量,荚体积和籽粒体积用排水法测定,质量性状用分析天平测定。分析得出籽粒含水量^[25]变化、荚壳和籽粒干物质分配规律^[26]以及籽粒灌浆速率^[27]变化。

$$\text{籽粒含水量} = (\text{百粒鲜重} - \text{百粒干重}) / \text{百粒鲜重} \times 100\%$$

$$\text{荚壳(籽粒)干物质分配指数} =$$

$$\text{荚壳(籽粒)干重} / \text{荚干重}$$

$$\text{籽粒灌浆速率} = (\text{后一次取样百粒干重} - \text{前一次取样百粒干重}) / \text{取样间隔天数}$$

以开花后天数 t 为自变量,开花后每5 d测得的百粒重为因变量,应用Logistic方程对绿豆籽粒灌浆过程进行拟合,并利用方程推导出各特征参数,进行生长分析。Logistic方程 $y = A / (1 + B \cdot e^{-K \cdot t})$ 式中: t 为开花后天数,开花日计0 d; y 为花后百粒重,g; A 为籽粒百粒重终极生长量,g; B 为初值参

数; K 为生长速率参数; 由方程一阶导数和二阶导数推导出灌浆参数。

灌浆速率最大时的籽粒生长量 $W_{\max} = A/2, g$;
 每百粒种子最大灌浆速率 $G_{\max} = K \cdot W_{\max}/2, g/d$;
 达到最大灌浆速率的时间 $T_{\max} = (\ln B)/K, d$;
 每百粒种子平均生长速率 $G_{\text{mean}} = A \cdot K/6, g/d$;
 活跃生长期 $D = 6/K, d$ 。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 处理数据、作图, 采用 SPSS 进行 Logistic 方程模拟及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 绿豆荚果发育进程中荚色和粒色, 荚长和荚宽及荚体积变化

绿豆开花受精后, 子房开始膨大, 形成绿色的荚果, 荚中的籽粒也开始进入灌浆阶段。

在绿豆荚果发育进程中, 荚色变化表现为从深绿色到绿色再到黑色。粒色变化从透亮青绿色到嫩绿色再到深绿色。由图 1 可知, 2 个绿豆品种的荚长前期均增长较快, 在开花第 10 天以后则变化较小。‘西绿 1 号’荚长大于‘安绿 7 号’, 在开花后第 25 天‘西绿 1 号’荚长达到最大值, 为 12.45 cm; ‘安绿 7 号’荚长最大值则为 11.15 cm。由图 2 可知, 2 个绿豆品种的荚宽前期增长均较快, 在开花后第 15 天达到最大值。‘西绿 1 号’荚宽大于‘安绿 7 号’, ‘西绿 1 号’荚宽最大值为 0.679 cm; ‘安绿 7 号’荚宽最大值为 0.610 cm。由图 3 可知, 荚体积的生长变化情况整体上表现为先增大后减小的趋势, 在开花后第 15 天达到最大值, ‘西绿 1 号’最大值为 34.00 mL, ‘安绿 7 号’为 31.60 mL。后期随着荚粒的成熟, 水分减少, 荚失水收缩, 体积变小。

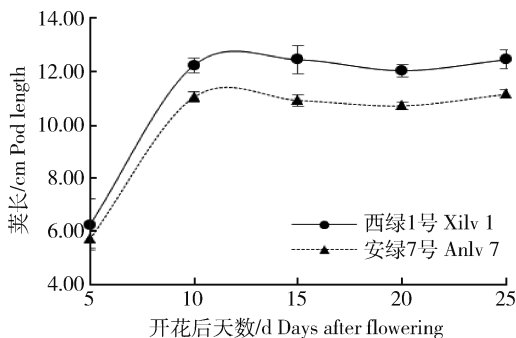


图 1 开花后绿豆荚长生长情况

Fig. 1 Growth conditions of mung bean pod length after flowering

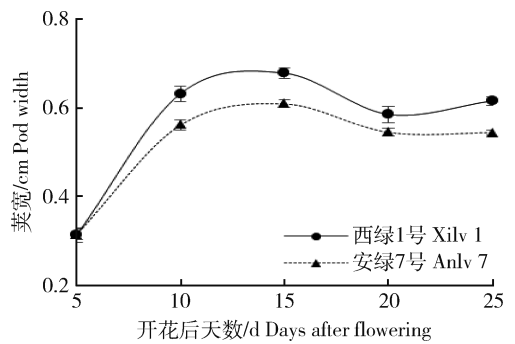


图 2 开花后绿豆荚宽生长情况

Fig. 2 Growth conditions of mung bean pod width after flowering

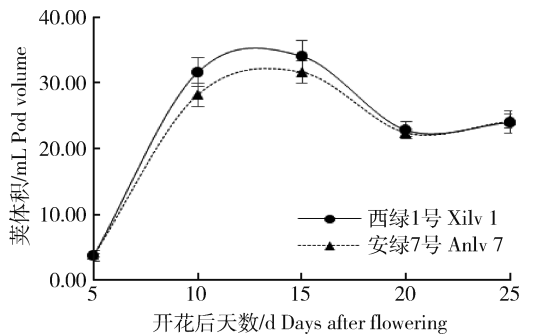


图 3 开花后绿豆荚体积生长情况

Fig. 3 Growth conditions of mung bean pod volume after flowering

2.2 绿豆籽粒灌浆进程中籽粒体积变化, 籽粒含水量及荚壳、籽粒干物质的转移与分配

由图 4 可知, 籽粒体积的生长变化情况整体为先增大后减小的趋势, 在开花后第 15 天体积达到最大值, ‘西绿 1 号’籽粒体积最大值为 15.60 mL, ‘安绿 7 号’为 13.00 mL。后期随着荚粒的成熟, 水分减少, 籽粒失水, 体积变小。由图 5 可知, 在绿豆籽粒灌浆过程中, 籽粒含水率呈下降趋势, 由开花后第 5 天的 80% 以上到籽粒成熟时的不足 15%。在开花后 15 d 内, 2 个绿豆品种籽粒含水率差异不大, 在开花 15 d 以后, ‘西绿 1 号’籽粒含水率明显高于‘安绿 7 号’, 成熟籽粒含水率‘西绿 1 号’为 14.00%, ‘安绿 7 号’为 6.96%。

以分配指数表示绿豆籽粒成熟过程中荚壳、籽粒干物质的转移与分配。由图 6 可知, 2 个绿豆品种的转移分配规律相同。在开花结荚前期, 干物质主要积累在荚壳部分, 分配指数 ≥ 0.9 , 而籽粒所占部分不足 0.1。但随着籽粒的逐渐灌浆成熟, 干物

质的积累则逐渐由荚壳转向籽粒,荚壳的分配逐渐减少,籽粒的分配不断增加。在籽粒成熟时,籽粒的分配指数 ≥ 0.7 ,荚壳则不足 0.3。

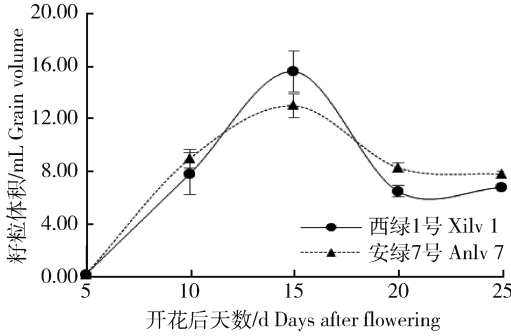


图 4 开花后绿豆籽粒体积生长情况

Fig. 4 Growth conditions of mung bean grain volume after flowering

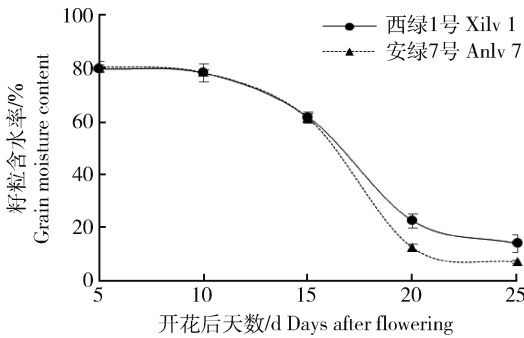


图 5 开花后绿豆籽粒含水率变化

Fig. 5 Changes of mung bean grain moisture content after flowering

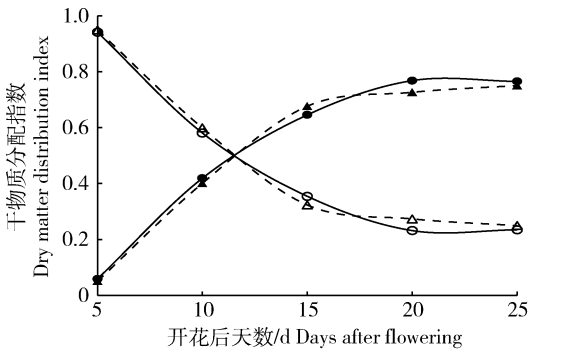


图 6 开花后绿豆荚壳、籽粒干物质转移分配规律

Fig. 6 Transfer and distribution rule about dry matter from mung bean pod shell and grain after flowering

2.3 籽粒灌浆特性

利用 Logistic 方程以开花后天数为自变量,对应的籽粒百粒干重为因变量,对 2 个绿豆品种的灌浆过程进行拟合,得出籽粒增重的模拟方程参数(表 1)。
‘安绿 7 号’和‘西绿 1 号’的曲线方程的决定系数分别为 0.997 和 0.998,表明符合度较高,方程可靠。

表 1 绿豆籽粒灌浆过程的 Logistic 方程参数估算值

Table 1 Parameters of the Logistic equation for mung bean grain filling process

品种 Variety	A	B	K	R ²
安绿 7 号 Anlv 7	6.709	1 145.193	0.574	0.997
西绿 1 号 Xilv 1	7.454	173.788	0.381	0.998

注:A, 终极生长量;B, 初值参数;K, 生长速率参数;R², 方程决定系数。

Note:A, the final grain weight; B, initial parameter; K, growth rate parameter; R², the determination coefficient of the equation.

建立籽粒增重的 Logistic 模拟曲线(图 7)。由图 7 可以看出,2 个绿豆品种的灌浆趋势一致,籽粒质量增加过程均呈“S”型曲线,即开始增长缓慢,然后进入快速增长阶段,最后增长又趋于缓慢,遵循“慢-快-慢”增长态势,符合 Logistic 方程。

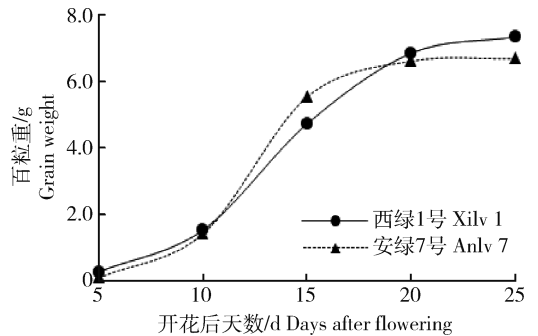


图 7 绿豆粒重增重的 Logistic 模拟曲线

Fig. 7 Logistic simulation curve of grain weight-increasing for mung bean

由图 8 可以看出,随着开花后天数的增加,2 个绿豆品种籽粒灌浆速率均呈单峰曲线变化,前期灌浆速度较慢,中期灌浆速度加快,后期灌浆速度又减慢,这与籽粒增长态势相一致。籽粒灌浆速率峰值出

现在开花后 15 d 左右,‘安绿 7 号’最大灌浆速率为 0.963 g/d,‘西绿 1 号’最大灌浆速率为 0.710 g/d,显著低于‘安绿 7 号’。‘安绿 7 号’最大灌浆速率和平

均灌浆速率高于‘西绿 1 号’,而达到最大灌浆速率的时间和生长活跃期则短于‘西绿 1 号’,灌浆速率最大时的籽粒百粒重也略小于‘西绿 1 号’(表 2)。

表 2 绿豆籽粒灌浆特征参数

Table 2 Parameters for mung bean grain filling character

品种 Variety	$G_{\max}/(\text{g/d})$	T_{\max}/d	W_{\max}/g	$G_{\text{mean}}/(\text{g/d})$	D/d
安绿 7 号 Anlv 7	0.963	12.271	3.355	0.642	10.453
西绿 1 号 Xilv 1	0.710	13.538	3.727	0.473	15.748

注: G_{\max} ,最大灌浆速率; T_{\max} ,达到最大灌浆速率时间; W_{\max} ,灌浆速率最大时的籽粒百粒重; G_{mean} ,平均灌浆速率; D ,生长活跃期。

Note: G_{\max} , maximum grain-filling rate; T_{\max} , the time reaching the maximum grain-filling rate; W_{\max} , weight of hundred kernel weight at the time of maximum grain-filling rate; G_{mean} , mean grain-filling rate; D , active growth period.

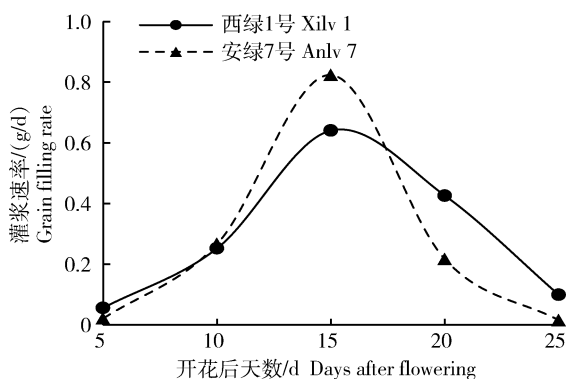


图 8 绿豆籽粒灌浆速率的 Logistic 模拟曲线

Fig. 8 Logistic simulation curve of grain-filling rate for mung bean

2.4 相关性分析

2.4.1 绿豆荚果农艺性状间的相关性分析

由表 3 可以看出,绿豆在整个籽粒形成过程中百粒干重与百荚干重呈极显著正相关($r=0.989, P<0.01$);荚壳干重与荚长、荚宽均呈极显著正相关($r=0.992, P<0.01$),与荚体积、籽粒体积呈显著正相关($r=0.955, P<0.05; r=0.883, P<0.05$),与荚粒数呈显著负相关($r=-0.897, P<0.05$);百粒鲜重与籽粒体积呈极显著正相关($r=0.984, P<0.01$),与荚宽、荚体积、荚壳干重呈显著正相关($r=0.915\sim 0.933, P<0.05$),与荚粒数呈显著负相关($r=-0.936, P<0.05$);百荚鲜重与荚

体积、荚壳鲜重呈显著正相关($r=0.898, P<0.05; r=0.915, P<0.05$);荚粒数与荚宽、荚体积、籽粒体积均呈显著负相关($r=-0.914\sim -0.884, P<0.05$);籽粒体积与荚宽、荚体积呈显著正相关($r=0.922, P<0.05; r=0.939, P<0.05$);荚体积与荚宽呈极显著正相关($r=0.984, P<0.01$),与荚长呈显著正相关($r=0.937, P<0.05$);荚宽与荚长呈极显著正相关($r=0.978, P<0.01$)。

2.4.2 籽粒干重与灌浆参数的相关性分析

对绿豆籽粒干物质积累过程中百粒干重与灌浆参数进行相关性分析,结果表明,百粒干重与最大灌浆速率呈极显著负相关($r=-0.990, P<0.01$),与生长活跃期呈极显著正相关($r=0.991, P<0.01$),与平均灌浆速率呈显著负相关($r=-0.986, P<0.05$),与达到最大灌浆速率的时间和最大灌浆速率时籽粒百粒重无显著相关性。

3 讨论

金文林等^[28]对小豆荚果发育过程及籽粒灌浆过程研究发现,小豆荚长和荚宽在快速增长后失水收缩,然后渐平稳至成熟,荚体积与荚长变化同步,荚鲜重与荚宽变化同步。籽粒体积的变化与开花后天数呈二次曲线关系,籽粒干重随着籽粒体积的增长而不断增加,并呈慢-快-慢“S”形曲线。本试验结果发现绿豆荚果生长发育过程与小豆类似。在绿豆

表 3 绿豆荚果农艺性状间的相关性

Table 3 Correlation of agronomic traits of mung bean

性状 Trait	PL	PW	PV	GV	GN	PSFW	FWPHP	FWPHG	PSDW	DWPHP	DWPHG
PL	1										
PW	0.978**	1									
PV	0.937*	0.984**	1								
GV	0.824	0.922*	0.939*	1							
GN	-0.862	-0.911*	-0.884*	-0.914*	1						
PSFW	0.424	0.536	0.676	0.601	-0.426	1					
FWPHP	0.694	0.806	0.898*	0.871	-0.726	0.915*	1				
FWPHG	0.859	0.933*	0.918*	0.984**	-0.936*	0.456	0.777	1			
PSDW	0.992**	0.992**	0.955*	0.883*	-0.897*	0.434	0.726	0.915*	1		
DWPHP	0.811	0.752	0.626	0.618	-0.723	-0.151	0.234	0.744	0.822	1	
DWPHG	0.717	0.652	0.511	0.531	-0.659	-0.288	0.104	0.672	0.732	0.989**	1

注: PL, 荚长; PW, 荚宽; PV, 荚体积; GV, 籽粒体积; GN, 荚粒数; PSFW, 荚壳鲜重; FWPHP, 百荚鲜重; FWPHG, 百粒鲜重; PSDW, 荚壳干重; DWPHP, 百荚干重; DWPHG, 百粒干重。

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: PL, pod length; PW, pod width; PV, pod volume; GV, grain volume; GN, grain number; PSFW, pod shell fresh weight; FWPHP, fresh weight per hundred pod; FWPHG, fresh weight per hundred grain; PSDW, pod shell dry weight; DWPHP, dry weight per hundred pod; DWPHG, dry weight per hundred grain.

* and ** Indicate a significant correlation at 0.05 and 0.01 levels (bilateral), respectively.

荚果生长发育过程中,开花初期(花后 5 d 前后),干物质积累主要用于荚壳的生长,荚长和荚宽不断增加,籽粒的干物质积累相对较少,含水量较高;开花后 5~10 d,灌浆速率逐渐增大,荚长和荚宽生长速率加快,相应地荚体积增长较快,干物质的积累对籽粒的分配逐渐加大,籽粒体积显著增大;开花后 10~15 d,灌浆速率持续增大,荚体积、籽粒体积及灌浆速率均逐渐增大至最大值;开花后 15~20 d,籽粒干物质积累不断增加,灌浆速率下降,籽粒随着脱水体积缩小,干重增加;在开花后 20~25 d,荚果成熟,籽粒干物质的积累达到最大值,灌浆速率降低。

绿豆荚果发育过程中荚体积和籽粒体积的变化表明,在灌浆过程中叶片等通过光合作用积累的有机物不断运向荚果,接纳光合产物的库需不断增大才能使源库协调一致顺利灌浆。荚体积和籽粒体积约在花后 20 d 左右基本定型,这时籽粒含水率从开始的 80% 降到 20% 左右,灌浆速率显著降低,含水

率降到 10% 左右时,灌浆基本停止,以后只是一个脱水过程,这与杨瑞因等^[29]对大麦籽粒灌浆过程的研究结果类似。

作物生长模拟方程可解释作物生长曲线形状,其推导出的特征参数具有生物学意义^[30]。前人以 Logistic 方程和 Richards 方程对水稻、玉米和小麦等作物的干物质积累特征进行了模拟。杨沈斌等^[15]认为光照主要通过影响籽粒最终重量间接作用于平均灌浆速率,温度则通过影响灌浆进程的快慢作用于平均灌浆速率。王平等^[31]认为适度灌水能显著提高灌浆速率,缩短灌浆持续时间,提前最大积累速率出现时间,最终实现干物质积累量的提高。本研究以 Logistic 方程对 2 个绿豆品种籽粒粒重增长过程和籽粒灌浆速率进行模拟,对所得灌浆参数与百粒干重进行相关性分析,结果发现百粒干重与最大灌浆速率呈极显著负相关,与平均灌浆速率呈显著负相关,与生长活跃期呈极显著正相关,与王晓慧等^[11]对春玉米的籽粒灌浆特性的研究结果相同。

4 结 论

本研究结果表明,绿豆荚果发育的整个过程中,荚色变化为从深绿色到绿色再到黑色,粒色变化为从透亮青绿色到嫩绿色再到深绿色,荚长、荚宽为先增长后基本保持平稳的趋势,荚体积和籽粒体积为先增长后下降再趋于平缓的变化趋势。干物质积累在开花结荚前期主要分配在荚壳,随着灌浆成熟逐渐向籽粒转移。绿豆籽粒灌浆速率呈单峰曲线变化,花后 15 d 左右达到峰值。因此,花后 15 d 前后为绿豆荚果生长的关键时期。

综合分析表明,绿豆育种中应选育大荚品种,栽培中注重花后 15 d 前后的肥水供应,源流库协调,以保证籽粒灌浆饱满,实现高产优质。

参考文献 References

[1] 刘岩,程须珍,王丽侠,王素华,白鹏,吴传书. 基于 SSR 标记的中国绿豆种质资源遗传多样性研究[J]. 中国农业科学,2013,46(20):4197-4209
Liu Y, Cheng X Z, Wang L X, Wang S H, Bai P, Wu C S. Genetic diversity research of mung bean germplasm resources by SSR markers in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013,46(20):4197-4209 (in Chinese)

[2] 吴传书,王丽侠,王素华,陈红霖,吴健新,程须珍,杨晓明. 绿豆高密度分子遗传图谱的构建[J]. 中国农业科学,2014,47(11):2088-2098
Wu C S, Wang L X, Wang S H, Chen H L, Wu J X, Cheng X Z, Yang X M. Construction of a genetic linkage map in mung bean[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014,47(11):2088-2098 (in Chinese)

[3] 田茜,张文兰,李群,颜廷进,李娜娜,戴双,蒲艳艳,丁汉凤. 绿豆的品质特性及综合利用研究进展[J]. 中国农学通报,2016,32(9):77-82
Tian Q, Zhang W L, Li Q, Yan T J, Li N N, Dai S, Pu Y Y, Ding H F. Research progress of quality characteristics and comprehensive utilization of mung beans[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016,32(9):77-82 (in Chinese)

[4] Yao Y, Chen F, Wang M F, Wang J S, Ren G X. Antidiabetic activity of mung bean extracts in diabetic KK-Ay mice[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2008, 56(19):8869-8873

[5] 高小丽,孙健敏,高金锋,冯佰利,柴岩,贾志宽. 不同基因型绿豆叶片衰老与活性氧代谢研究[J]. 中国农业科学,2008,41(9):2873-2880
Gao X L, Sun J M, Gao J F, Feng B L, Chai Y, Jia Z K. Leaf aging and reactive oxygen metabolism in different genotypes of mung bean[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9):

2873-2880 (in Chinese)

[6] 郭鹏燕,王彩萍,任杰成,赵吉平,许瑛,岳茂林. 不同地理来源绿豆农艺性状的遗传多样性研究[J]. 作物杂志,2017(6):55-59
Guo P Y, Wang C P, Ren J C, Zhao J P, Xu Y, Yue M L. Genetic diversity of agronomic traits of mung beans from different geographical sources[J]. *Crops*, 2017(6):55-59 (in Chinese)

[7] 乔玲,陈红霖,王丽侠,王素华,程须珍,张耀文. 国外绿豆种质资源农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2015,16(5):986-993
Qiao L, Chen H L, Wang L X, Wang S H, Cheng X Z, Zhang Y W. Genetic diversity of foreign mung bean germplasm resources by agronomic characters[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015,16(5):986-993 (in Chinese)

[8] 张盼盼,张洪鹏,张敬禹,陈豪,李冰,刘文彬,冯乃杰,郑殿峰. 绿豆种质资源农艺性状的因子分析及综合评价[J]. 中国农学通报,2017,33(6):34-41
Zhang P P, Zhang H P, Zhang J Y, Chen H, Li B, Liu W B, Feng N J, Zheng D F. Factor analysis and comprehensive assessment of agronomic characters of mung bean (*Vigna radiata* L.) germplasm resources[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017,33(6):34-41 (in Chinese)

[9] 朱慧珺,赵雪英,闫旭斌,张耀文. 利用灰色关联度分析绿豆农艺性状对其产量的影响[J]. 农学报,2015,5(6):10-14
Zhu H J, Zhao X Y, Yan H B, Zhang Y W. Effects of agronomic traits on the yield of mung bean using gray-relation analysis[J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(6):10-14 (in Chinese)

[10] 王桂梅,邢宝龙,张旭丽,刘飞,贺美忠. 不同群体密度对绿豆农艺性状和产量的影响研究[J]. 安徽农学通报,2015,21(11):23-24
Wang G M, Xin B L, Zhang X L, Liu F, He M Z. Effects of different population densities on yield and agronomic characteristics of mung bean[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2015,21(11):23-24 (in Chinese)

[11] 王晓慧,张磊,刘双利,曹玉军,魏雯雯,刘春光,王永军,边少锋,王立春. 不同成熟期玉米品种的籽粒灌浆特性[J]. 中国农业科学,2014,47(18):3557-3565
Wang X H, Zhang L, Liu S L, Cao Y J, Wei W W, Liu C G, Wang Y J, Bian S F, Wang L C. Grain filling characteristics of maize hybrids differing in maturities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014,47(18):3557-3565 (in Chinese)

[12] Poneleit C G, Egli D B. Kernel growth rate and duration in maize as affected by plant density and genotype[J]. *Crop Science*, 1979,19(3):385-388

[13] Rajcan I, Tollenaar M. Source, Sink ratio and leaf senescence in maize: II Dry matter accumulation and partitioning during grain filling[J]. *Field Crops Research*, 1999,60(3):245-253

[14] 赵黎明,李明,郑殿峰,顾春梅,那永光,解保胜. 灌溉方式对寒地水稻产量及籽粒灌浆的影响[J]. 中国农业科学,2015,48

- (22);4493-4506
Zhao L M, Li M, Zheng D F, Gu C M, Na Y G, Xie B S. Effects of irrigation regimes on yield and grain filling of rice (*Oryza sativa* L) in cold region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(22):4493-4506 (in Chinese)
- [15] 杨沈斌, 江晓东, 王应平, 申双和, 石春林, 王萌萌, 陈斐. 基于Richards 扩展方程提取水稻灌浆结实光温特性参数[J]. 作物学报, 2014, 40(10):1776-1786
Yang S B, Jiang X D, Wang Y P, Shen S H, Shi C L, Wang M M, Chen F. Charactering light and temperature effects on rice grain filling using extended richards' equation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(10):1776-1786 (in Chinese)
- [16] 史建国, 崔海岩, 赵斌, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21):4427-4434
Shi J G, Cui H Y, Zhao B, Dong S T, Liu P, Zhang J W. Effect of light on yield and characteristics of grain-filling of summer maize from flowering to maturity [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(21):4427-4434 (in Chinese)
- [17] 陆大雷, 闫发宝, 陆卫平. 糯玉米灌浆结实期籽粒淀粉理化特性变化[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23):4793-4800
Lu D L, Yan F B, Lu W P. Dynamics of physicochemical characteristics in two waxy maize varieties during grain filling [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(23):4793-4800 (in Chinese)
- [18] 张丽, 张吉旺, 樊昕, 刘鹏, 董树亭. 玉米籽粒比重与灌浆特性的关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12):2327-2334
Zhang L, Zhang J W, Fan X, Liu P, Dong S T. Study on correlation between specific gravity of maize grains and grain filling characteristics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12):2327-2334 (in Chinese)
- [19] 岳鹏莉, 王晨阳, 卢红芳, 刘卫星, 马耕, 王强, 胡阳阳. 灌浆期高温干旱胁迫对小麦籽粒淀粉积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(11):1489-1496
Yue P L, Wang C Y, Lu H F, Liu W X, Ma G, Wang Q, Hu Y Y. Effect of heat and drought stress on starch accumulation during grain filling stage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(11):1489-1496 (in Chinese)
- [20] 杨卫兵, 王振林, 尹燕桦, 李文阳, 李勇, 陈晓光, 王平, 陈二影, 郭俊祥, 蔡铁, 倪英丽. 外源 ABA 和 GA 对小麦籽粒内源激素含量及其灌浆进程的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13):2673-2682
Yang W B, Wang Z L, Yin Y P, Li W Y, Li Y, Chen X G, Wang P, Chen E Y, Guo J X, Cai T, Ni Y L. Effects of spraying exogenous ABA or GA on the endogenous hormones concentration and filling of wheat grains [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(13):2673-2682 (in Chinese)
- [21] 李杰, 张洪程, 龚金龙, 常勇, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 不同种植方式对超级稻籽粒灌浆特性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(9):1631-1641
Li J, Zhang H C, Gong J L, Chang Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Influence of planting methods on grain-filling properties of super rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(9):1631-1641 (in Chinese)
- [22] Ray S, Choudhuri M A. Effects of plant growth regulators on grain-filling and yield of rice[J]. *Annals of Botany*, 1981, 47(6):755-758
- [23] Yang J C, Zhang J H. Grain-filling problem in 'super' rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(1):1-5
- [24] Morita S, Yonemaru J, Takanashi J. Grain growth and endosperm cell size under high night temperatures in rice (*Oryza sativa* L)[J]. *Annals of Botany*, 2005, 95(4):695
- [25] 张冬梅, 刘洋, 赵永锋, 祝丽英, 黄亚群, 郭晋杰, 陈景堂. 不同杂种优势群玉米籽粒灌浆速率分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17):3323-3335
Zhang D M, Liu Y, Zhao Y F, Zhu L Y, Huang Y Q, Guo J J, Chen J T. Analysis of maize grain filling rate in different heterotic groups [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17):3323-3335 (in Chinese)
- [26] 杨再强, 张继波, 李永秀, 彭晓丹, 张婷华, 张静. 红光与远红光比值对温室切花菊形态指标、叶面积及干物质分配的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(8):2498-2505
Yang Z Q, Zhang J B, Li Y X, Peng X D, Zhang T H, Zhang J. Effects of red/far red ratio on morphological inde, leaf area and dry matter partitioning of cut chrysanthemum flower [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8):2498-2505 (in Chinese)
- [27] Gambín B L, Borrás L, Otegui M E. Kernel water relations and duration of grain filling in maize temperate hybrids[J]. *Field Crops Research*, 2007, 101(1):1-9
- [28] 金文林, 蔣陵秋. 小豆生长发育规律的研究Ⅲ:小豆籽粒灌浆进程及播后籽粒干物质转移速率的研究[J]. 北京农学院学报, 1988, 3(1):6-12
Jin W L, Jiang L Q. Studies on the growth and development of adzuki bean (*Vigna angularis Ohwi and Ohashi*) Ⅲ: Studies on process of seed filling and transfer tempo of seed dry matter after sowing in adzuki bean [J]. *Journal of Beijing Agricultural College*, 1988, 3(1):6-12 (in Chinese)
- [29] 杨瑞因, 邹振宏. 大麦籽粒灌浆、干物质积累进程的生理研究 [J]. 大麦与谷类科学, 1990, (4):8-12
Yang R Y, Zhou Z H. Physiological research on grain filling and dry matter accumulation in barley [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 1990, (4):8-12 (in Chinese)
- [30] Li G Q, Tang L, Zhang W Y, Cao W X, Zhu Y. Dynamic analysis on response of dry matter accumulation and partitioning to nitrogen fertilizer in wheat cultivars with different plant types [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(12):2258-2265