



# 大豆种皮裂纹的研究进展

崔晓培, 郑金焕, 胡冬梅

(荆州农业科学院 麦油研究所, 湖北 荆州 434000)

**摘要:**大豆是我国重要的经济作物,大豆种皮在不同的胁迫条件下会开裂形成裂纹。大豆种皮裂纹性状不仅会降低大豆种子的外观表现,还会影响种子的贮藏能力及活力,从而降低了大豆种子的商品价值。尽管人们早已注意到种皮裂纹这一性状,但国内外详细研究这方面的内容并不多。鉴于此,综述了大豆种皮构成、种皮裂纹的特点、引起种皮开裂的因素、裂纹的遗传分析、裂纹检测识别技术以及降低裂纹率措施研究进展,为未来大豆的抗种皮裂纹育种及种子加工贮藏提供可借鉴的理论依据。

**关键词:**大豆;种皮开裂;裂纹基因;裂纹检测

## Research Progress on Cracks in Soybean Seed Coat

CUI Xiao-pei, ZHENG Jin-huan, HU Dong-mei

(Institute of Cereal and Oil Crops, Jingzhou Academy of Agricultural Sciences, Jingzhou 434000, China)

**Abstract:** Soybean is an important cash crop in China. The seed coat of soybean will crack under different stress conditions and form cracks. Soybean seed coat crack traits not only reduce the appearance of soybean seeds, but also affect the storage capacity and vigor of seeds, thus reducing the commercial value of soybean seeds. Although people have already noticed the traits of seed coat cracks for a long time, there is not much detail in this area at home and abroad. In view of this, the paper reviewed the research progress of soybean seed coat composition, the characteristics of seed coat cracks, the factors causing of seed coat cracking, the genetic analysis of crack, the crack detection and identification technology, and the research progress of the crack reduction rate, so as to provide a theoretical basis for seed coat crack-resistant breeding and seed processing and storage of soybean for future.

**Keywords:** Soybean; Seed coat cracking; Crack gene; Crack detection

大豆[*Glycine max* (L.) Merr]是我国南方重要的粮食、油料兼用作物。大豆具有很高的营养与应用价值,不仅被广泛用作各类动物饲料的原料,并且还被应用于其它食品及多数工业行业<sup>[1]</sup>,与我们的生活有着密切的关系。在众多农产品中大豆作为高营养价值的绿色食品越来越受到人们的欢迎,但在大豆种植生产及加工运输过程中不可避免的会出现种皮裂纹的现象。大豆种皮在大豆籽粒生长发育中扮演很重要的角色<sup>[2]</sup>,而且种皮的完整性还影响到种子品质相关的许多性状<sup>[3]</sup>。现如今越来越多的人注意到种皮裂纹这一性状,大豆种皮裂纹性状不仅容易使籽粒和幼苗遭受微生物及害虫的侵害,并且还会导致籽粒蛋白质及油脂产量和质量籽粒品质的降低,造成部分大豆不能满足市场等级的要求,进而影响到大豆的经济价值。大豆籽粒品质的缺陷是大豆生产中影响产量的重要限制因素,特别是种皮裂纹性状,造成产量损失约计 8.6% ~ 12.3%<sup>[4]</sup>。由于部分种皮裂纹的籽粒背侧发生分裂,子叶经常暴露在外,容易造成子叶及籽粒内部

其它结构的破损,种皮损伤严重的会降低种子发芽力<sup>[5]</sup>和种子活力<sup>[3]</sup>,所以即使大豆种子作为饲料原料也必须严格限制大豆种皮的裂纹率,以达到降低大豆种子质量劣化的目的。随着人们对大豆籽粒品质要求越来越高,大豆籽粒是否存在种皮裂纹也被作为评价大豆种子质量的标准。本文综述大豆种皮结构及功能构成、裂纹形成的特点及时期、引起种皮开裂的因素、裂纹的遗传分析、裂纹检测识别技术以及降低裂纹率措施研究进展,并展望当下农业研究新技术,更好服务于种皮裂纹以及未来大豆科研。

### 1 种皮结构与功能

种子由种皮、胚乳和胚 3 部分结构构成。种皮从受精开始到成熟的每个过程均受基因的调控。种皮由围绕在胚珠周围的珠被细胞发育而来,受精前珠被细胞并未分化,随着受精过程的发生珠被细胞的细胞层向特化的细胞类型分化形成种皮<sup>[6]</sup>。在种子发育过程中,母体组织发生细胞程序性死

收稿日期:2019-02-21

基金项目:湖北省农业科技创新资助项目(2007-620-001-03)。

第一作者简介:崔晓培(1989-),女,硕士,主要从事大豆遗传育种和栽培研究。E-mail:1501993727@qq.com。

通讯作者:郑金焕(1975-),女,学士,副研究员,主要从事大豆遗传育种和栽培研究。E-mail:994406946@qq.com。

亡,为后代组织的生长提供了空间和养分,部分组织最后分化出种皮。大豆种皮是一种复合结构,具有典型的多层结构,其含有丰富的氨基酸、多肽、蛋白质、酚类、生物碱、萜类及类固醇等化合物<sup>[7]</sup>。在扫描电镜下大豆种皮的横断面明显的分为内层和外层两部分<sup>[8]</sup>,外层包括表皮层、栅栏层和滴漏细胞层,内层包括薄壁组织和糊粉层。成熟的大豆种皮由外到内有4层结构<sup>[1]</sup>,分别为栅栏层、滴漏细胞、部分粉碎的薄壁组织、糊粉层。大豆具有双卵类胚珠,胚乳的外层作为种皮的一部分粘附在内珠被上,胚乳层中的最外层分化成糊粉层,而胚乳剩余部分的大部分在成熟过程中退化。

种皮具有多种功能,其中大多数功能性进化是为了保护种子,促进种子内部胚和胚乳的发育。种皮在植物的生命周期中起着至关重要的作用。种子发育初期,种皮通过调节控制营养物质从母体植物传递到胚和胚乳的过程,从而控制种子的发育。种皮与种子胚乳、胚之间存在密切的联系。种皮在植物种子休眠和发芽过程中起重要的作用,如在种子干燥或成熟后,种皮为胚胎提供覆盖和保护作用,并且种皮还可以通过控制水分的吸收打破种子休眠、促使种子萌发,同时也参与种子发育过程,影响籽粒表观及内在品质<sup>[9]</sup>。在受精后的早期阶段种皮质量占整个种子质量的绝大部分,随着种子的不断成熟干燥,种子质量由重变轻,种子体积由大变小,这意味着种皮和胚乳共同决定种子大小,种皮需要通过弹性生长来响应种子发育过程的体积变化。此外,种皮中的某些细胞层可能会积聚大量的其它物质,如黏液或色素,这些物质会影响种子的整体形态。

## 2 种皮裂纹特点

### 2.1 裂纹的形成

大豆种皮裂纹性状不仅影响到大豆籽粒品质,同时还影响到贮藏能力和田间播种质量<sup>[10-11]</sup>。大豆种皮裂纹性状是由种皮开裂引起的,种皮开裂分为两种类型<sup>[12]</sup>,即不规则开裂(类型I)和网状开裂(类型II),绝大多数的大豆裂纹材料类型属于不规则开裂(类型I)。大豆种子在接近生理成熟时,种皮有时会呈现不规则的开裂<sup>[13]</sup>,致使种皮的外层细胞脱落,内部结构显露。裂纹是由种皮的表皮组织(栅栏细胞)和皮下组织的分离使下面的薄壁组织暴露出来而引起的<sup>[14]</sup>。

对已成熟的大豆种子观察表明,种皮开裂仅仅发生在种皮外层,包括角质层、栅栏细胞层以及滴漏细胞层的分离<sup>[15]</sup>,并在几处同时发生。种皮开裂

层的形状及滴漏细胞的方向表明,分离最初是沿着与种皮垂直的平面展开。最常见的开裂部位是垂直于种脊并与种脊相交处。另一开裂区域是平行并接近于种脐。偶尔裂斑将种脐全部包围,此时种皮完全开裂,使子叶暴露。还有一个开裂区域是珠孔两旁并沿着胚轴方向延伸。种皮开裂过程中还伴随着裂斑边缘的栅栏细胞和滴漏细胞的变化,它们不再与种皮表面垂直,相反的会形成细胞撕裂和错位,而且环绕开裂区域的滴漏细胞基部与其下部的薄壁细胞分离。随着种子的成熟,表皮组织沿着垂直于种脐外缘的方向分开,导致不同长度和宽度的裂口出现。

### 2.2 发生时期

由于植株授粉后珠被才开始逐渐分化形成种皮,所以一般种皮开裂性状出现在大豆植株生长过程中的鼓粒期到成熟期初期<sup>[16]</sup>。前人研究表明,一些较容易开裂的品种在成熟前期就开始出现裂缝,另一些抗裂性较好的品种在成熟中后期出现裂缝,开裂时间越早的品种裂缝越长。王亚琪等<sup>[17]</sup>研究结果发现种皮开裂突变体的开裂出现在生育期的始粒期(R5),种皮在缝隙处开裂。为了更好地研究种皮裂纹发生的时期,Yaklich等<sup>[11]</sup>通过光学和扫描电子显微镜检查种皮裂纹发生时期和形态变化,同时还测定了正常和种皮开裂的物理参数以及豆类中具有种皮裂纹的数量,结果表明种皮开裂从种子生长后期(R6)开始到种子生理成熟期(R7)均有发生。前面几种都是在正常生长环境下出现的种皮裂纹,但是外界各种因素是不断变化的,当有一些外界因素干扰时种皮裂纹的发生时期就是随机的,从授粉后的开花期(R1)到种子完全成熟期(R8)都有可能发生开裂。由此可见,种皮开裂时期并不固定,开裂的时间受品种和外界因素以及植物本身生理状况的相互影响。

### 2.3 出现裂纹的因素

大豆籽粒性状的表现值由基因型、生态环境以及基因型与生态环境互作3方面共同决定<sup>[18]</sup>。因此,大豆种皮的裂纹性状也是一个复杂的性状,导致种皮开裂的因素较多。

从不同大豆品种裂纹情况来看,一些相关基因型很大程度上影响到种皮开裂<sup>[19-20]</sup>,如色素基因<sup>[21]</sup>、查尔酮合成酶基因<sup>[22]</sup>、控制成熟的基因<sup>[23]</sup>以及控制种子重量的基因<sup>[12]</sup>等。种皮本身的生理生化特点也会引起种皮开裂,李兴军<sup>[13]</sup>提到种皮中酚类化合物的积累也是种皮破裂的原因。Radehuk等<sup>[10]</sup>也发现种皮中酚类化合物含量会影响种皮开裂。

生态环境方面,日常选育繁种过程经常出现一些大豆品种在种子成熟过程中遇到能促进种子增产的因素条件时,会有一部分种子发生种皮开裂,部分籽粒种皮开裂处子叶结构凸显出来。其原因是子叶组织与种皮组织分化速率不同,同时种皮开裂种子的重量、长度、厚度和宽度都比正常种子的大,差异显著,而且种皮开裂的种子表面积和体积也显著大于正常的种子,这是由于籽粒在发育成熟过程中受到增产因素刺激,子叶中物质大量储存以至突破种皮包裹,使得籽粒整体大于正常种子。然而,也有例外,如王亚琪等<sup>[17]</sup>的研究发现2个种皮开裂突变体的种子宽度、厚度、长度均比正常种子小,差异显著,并且粒型也不规则,种皮均皱缩。花期低温胁迫也是引起种皮开裂的重要因素,大量研究发现开花期的低温诱导也会导致种子种皮开裂<sup>[24]</sup>。

基因型与生态环境互作方面,大豆的含水量和干燥条件会对大豆籽粒表型造成一定程度的损害。从种皮开裂时种子的含水量测定结果来看<sup>[25]</sup>,种皮开裂种子的含水量略低于正常种子,说明在正常含水量条件下,低含水量的大豆种皮更容易受到损伤,可能与种皮的韧性结构有关。Kasai等<sup>[26]</sup>对Toyohomare和突变体THM的研究分析表明,突变体THM种皮中原花青素和木质素含量明显高于Toyohomare。Senda等<sup>[27]</sup>认为突变体THM的种皮开裂性状主要是由于该种皮中原花青素和木质素的沉积使种皮物理特性发生改变引起的,但不能排除木质素沉积所引起的防御反应的可能性<sup>[28-31]</sup>。前人研究也提出假设,说明品种退化极有可能也会引起种皮开裂。

最后,关于外在力的破坏对大豆种皮开裂的影响已有许多研究。在田间收获时,大豆种子种皮也会受到一定的损伤,脱粒作用会对籽粒产生一定的冲击力从而导致种皮的开裂,在外力严重的情况下不仅会使种皮开裂,还会导致子叶的破碎<sup>[32]</sup>。据报道,大豆种子加工过程中干燥的热空气会导致种皮和子叶的开裂,并且受损伤的籽粒在后续处理和运输过程中会增加种皮的破损几率<sup>[33]</sup>。

2.4 遗传特点

一些研究已经表明,种皮开裂不仅受环境影响还受遗传因子控制。在两种种皮开裂类型中,Nakamura等<sup>[12]</sup>指出网状开裂(类型II)受主效基因控制,而不规则开裂(类型I)属于复杂数量性状,开裂特性受多方面因素控制,故遗传效应并不明确。

虽然种皮裂纹受到国内外研究人员的关注,但大豆种皮开裂遗传研究并不多,在其它双子叶植物

中,种皮裂纹性状的遗传研究也不多。有研究发现鹰嘴豆种子突变体种皮开裂位点由两个独立遗传的基因控制<sup>[12]</sup>。孙业汉等<sup>[34]</sup>研究结果表明花生品种不同,种皮裂纹程度有较大的差异,F<sub>1</sub>代具有明显的杂种优势,F<sub>2</sub>代方差分析结果表明组间差异极显著,种皮裂纹存在真实的差异,双亲中只要有一方裂纹严重的,则杂交后代亦重,双亲皆轻的,其后代裂纹也轻,裂纹存在一定杂种优势。Yaklich等<sup>[11]</sup>的研究结果表明,某些因素可能影响荚内裂纹种子的数目,这究竟是由于基因型与环境互作对每个荚内种子的影响还是仅仅由于遗传原因引起的目前还尚不清楚。然而,可以肯定的是,如果荚内有1个有裂纹的种子,那么,荚内所有的种子很可能都是有裂纹的。种皮开裂存在品种间差异,所以,培育出抗种皮开裂的大豆品种是可能的。由于种皮开裂受环境条件的影响较大,即使同一品种在不同地区也会出现相互矛盾的鉴定结果。因此,排除环境干扰准确地评价出品种间的遗传抗性差异将至关重要<sup>[35]</sup>。王亚琪等<sup>[17]</sup>的研究发现2种种皮开裂突变体开裂性状均不同于其它种皮开裂性状,这种新性状可为进一步研究种皮裂纹遗传机制及种皮开裂的多样性提供理论依据。

3 种皮裂纹相关基因研究进展

控制大豆种皮开裂基因的遗传与定位的研究相对较少,遗传基础较复杂<sup>[19-20]</sup>,大多研究采用QTL定位。控制种皮开裂的基因通常与其它因素或其它性状相关联,如温度和颜色等。

3.1 种皮颜色调控基因

种皮开裂势必与种皮直接相关的形态特征有关,在众多大豆种皮性状的研究中,种皮颜色一直都是研究的热点<sup>[36-41]</sup>,其中李兴军<sup>[13]</sup>研究表明控制茸毛色以及种皮色基因与种皮不规则开裂(类型I)有密切联系。

种子种皮内部和周围的色素沉着也会引起种皮颜色改变,导致部分种子质量下降<sup>[42]</sup>。Dinah等<sup>[7]</sup>和续曲等<sup>[39]</sup>研究发现种皮内色素的含量与种皮开裂存在密切联系。Song等<sup>[21]</sup>提到大豆中种皮色素沉着主要由3个独立的遗传基因座控制,分别为I、R和T。遗传位点T包括2个等位基因,分别为显性T和隐性t,分别调控褐色茸毛和灰色茸毛两个性状。同时,有研究发现种皮结构的完整性与T位点的等位基因有关<sup>[43]</sup>。R和T基因座调控4种大豆种皮颜色,即黑色(R,T)、棕色(r,T)、不完全黑色(R,t)和浅黄色(r,t)。种皮开裂现象经常发生在具有浅黄色的tt基因型或不完全黑色种皮

中<sup>[44-45]</sup>。Kasai 等<sup>[26]</sup>发现日本黄大豆品种 Toyohomare 的突变体 THM(基因型为 *rrtt*)为浅黄色种皮,并且该种子种皮呈现出裂纹。

R 和 T 基因座共同决定花青素和原花青素的组成比例<sup>[46]</sup>,I 基因座决定种皮和种脐周围花青素和原花青素的空间分布<sup>[27]</sup>。种皮开裂受 T 位点基因表达影响,T 位点的基因通常与 I 位点基因结合发挥作用,从而诱导或抑制种皮开裂。Senda 等<sup>[22]</sup>认为无论 R 和 T 基因型如何组合,I 等位基因都会抑制花青素和原花青素在整个种皮和种脐周围的产生和积累,从而产生黄色种皮的大豆种子。Dinah 等<sup>[7]</sup>猜测种皮开裂可能与隐性 *t* 基因跟 *i* 基因互作导致控制色素合成途径中的某个或多种酶活性丧失有关。I 等位基因抑制种皮和种脐的色素沉着是由于编码查尔酮合成酶(CHS)基因沉默引起的,被称为 CHS 沉默<sup>[47-48]</sup>。有研究表明 GmIRCHS 转录产物诱导种皮中编码查尔酮合成酶(CHS)基因沉默从而抑制种皮和种脐的色素沉着<sup>[26,49]</sup>。与此同时,I 基因的表达也会受温度的影响。Ic 是种皮颜色变化耐受性等位基因,低温条件下抑制色素沉着<sup>[50-51]</sup>。

### 3.2 低温胁迫下的基因调控

大量研究表明,大豆植株在花期遭受低温胁迫时会引起种皮颜色改变<sup>[22,50,52]</sup>或者种皮开裂<sup>[24,53]</sup>,前者可能是由于低温条件下 CHS 沉默被抑制<sup>[50]</sup>,而后的调节机制仍在研究中。与含有种皮颜色改变的种子相比,种皮开裂的种子质量较低,导致大豆产量降低,严重影响其商业价值<sup>[24,53]</sup>。

多篇研究报道表明种子结构的耐寒性与控制色素的 T 位点等位基因表达有关<sup>[54-55]</sup>。Ha 等<sup>[56]</sup>的研究发现,大豆花期受到低温胁迫会引起种脐周围色素沉积而导致种皮开裂,这可能由于低温抑制相关酶活性而导致种皮成熟速率不一致或 RNA 沉默受到抑制<sup>[57]</sup>或种皮分化过程受阻引起<sup>[58]</sup>。Yamaguchi 等<sup>[24]</sup>研究了大豆冷胁迫下与种皮开裂耐受性相关的数量性状遗传位点(QTL)。Yamaguchi 等<sup>[53]</sup>开发了一种筛选抗种皮开裂植物的方法,在植物开花 10 d 后移至人工气候室进行为期 21 d 的低温处理(白天 08:00–18:00,18℃;晚上 18:00–08:00,13℃),该方法能够比较品种间种皮开裂耐受性,并且该筛选方法可用于培育耐种皮开裂的大豆品种。Yamaguchi 等<sup>[24]</sup>利用该筛选方法对耐种皮开裂品种 Toiku 248 与种皮开裂敏感品种 Yukihomeare 杂交育成重组自交系,通过 QTL 分析鉴定出两个稳定的位点为 *qCS8-1* 和 *qCS11-1*,并且耐种皮开裂型 Toiku 248 的种皮开裂指数显著低于种皮开裂敏感型 Yukihomeare。Yamaguchi 等<sup>[24]</sup>还发现种皮开裂敏

感型 Yukihomeare 具有 II 基因型,而耐种皮开裂型 Toiku 248 具有 IcIc 基因型。Toiku 248 的组织化学分析表明,Ic 不仅抑制种脐周围的原花青素积累,而且还抑制整个种子种皮中原花青素的积累。然而,尚未阐明种皮开裂的发生原理和抗性机制。Yang 等<sup>[59]</sup>提到茸毛颜色基因型可能是黄褐色(TT 或 Tt)或灰色(tt),并且发现低温诱导下茸毛色显性等位基因可降低种皮开裂程度,种皮色显性等位基因在灰毛(tt)条件下也能抑制种皮开裂。同样的,Senda 等<sup>[60]</sup>也利用敏感型黄种皮大豆品种 Yukihomeare 和耐种皮开裂型黄种皮大豆品种 Toiku 248 进行低温诱导发现,Yukihomeare 在 21 d 低温条件下表现出种皮开裂,原花青素在 Yukihomeare 的种皮背侧积累,但是低温处理的 Toiku 248 中原花青素的积累却受到抑制。所以,Senda 等<sup>[60]</sup>认为低温下原花青素的积累和木质素的沉积影响到种皮的物理特性,使种皮更容易发生开裂,并进一步分析揭示了 Yukihomeare 和 Toiku 248 种皮物理特性之间的差异。特别值得注意的是,在低温处理下,Yukihomeare 的种皮硬度降低,而 Toiku 248 的种皮硬度没有降低,这表明低温处理后 Toiku 248 的种皮柔韧性高于 Yukihomeare。低温条件下 Toiku 248 种皮的物理性质可能有助于其种子开裂耐受性,这也在一定程度上验证了 Sun 等<sup>[61]</sup>的发现。

### 3.3 其它因素下基因调控

除了色素和温度影响种皮开裂外,其它复杂因素相互之间也会影响到种皮的开裂。Matsumura 等<sup>[23]</sup>发现色素沉着基因与种子成熟基因 E1~E7 互作影响种皮开裂。Sun 等<sup>[61]</sup>研究表明大豆种子硬粒特性与种皮开裂有关。Nakamura 等<sup>[12]</sup>利用带有重度网状裂纹的日本地方品种 Uzuramame 和黑种皮轻微开裂突变体 Clark 杂交产生的 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub> 代植株进行遗传分析,结果表明,网状结构裂纹主要由 1 个主效基因控制,并且种子重量与平均开裂指数成正相关,控制种子重量有关的基因对种皮开裂程度也有影响。随后,Yamaguchi 等<sup>[53]</sup>在研究中发现种子重量与品种的种皮开裂率差异并不显著,于是指出种皮开裂是由种皮特性引起的而不是子叶生长引起。翟莹等<sup>[62]</sup>发现种皮中可溶性富脯氨酸蛋白 PRP1 含量的高低影响种皮开裂,但随后也发现 PRP1 水平的降低本身并不是开裂的原因,因为在不开裂的 *it* 基因型中也发现了较低水平的 PRP1。也有部分研究报告中解释说明了对于在 T 等位基因条件下的类黄酮羟化酶活性缺乏引起的种皮开裂,但到目前为止,这个问题仍然没有得到统一的解释。

## 4 种皮裂纹检测

目前种皮裂纹检测有人工肉眼法、化学法、物理法,这几类方法大多还停留在半人工阶段。人工肉眼观察有很大局限性,细微的裂纹不易被观察。早期通过四唑铵、氯化铁<sup>[63]</sup>、吡啶乙酸<sup>[64]</sup>等化学物质来检测种皮的损伤,用这种化学物质处理过的大豆种皮裂纹处会呈现出一种独特的颜色,这种颜色可以通过视觉或电子分色仪检测出来。根据破碎大豆比未破碎大豆吸收水分快、体积膨胀大来区分种皮破裂程度。Capeleti<sup>[65]</sup>通过巯基乙酸反应定量测定大豆种皮中木质素的含量进而判断种皮的机械损伤。de carvalho<sup>[66]</sup>用2.0%次氯酸钠溶液测定大豆种皮损伤,15 min内可以快速获得检测结果,具有即时效应,在降低产品使用浓度、用户环境的成本和风险方面具有优势。Utrecht等<sup>[67]</sup>分别利用次氯酸钠和吡啶乙酸对大豆种皮损伤进行定量分析,发现次氯酸钠会使破损的大豆种皮膨胀,而吡啶乙酸使有划痕或开裂的大豆种皮染色,同时发现吡啶乙酸的灵敏度较高,次氯酸钠试验的数据较为一致。

随着科学技术的快速发展,人们对图像处理技术的应用逐渐增多。近年来,视觉检测图像处理技术已经广泛用于各类产品的质量检测和控制,同时也逐渐成为种子表面裂纹检测的一种有效办法。与目视检测所不同的是,机器视觉图像检测技术可以做到非接触性、非破坏性和可重复性,特别是消除了与人类视觉检测相关的主观性、疲劳性、缓慢性和成本等。视觉检测图像处理技术在玉米、棉花、水稻等种子裂纹检测领域得到了广泛应用<sup>[68-70]</sup>。视觉检测系统由光源、图像采集装置和特征提取处理计算系统组成。最早由Gunasekaran等<sup>[33]</sup>采用计算机视觉系统对大豆种皮裂纹进行识别。以黑色为背景、白光为前照灯,来获取适合后续处理的大豆视频图像。通过计算机自带的软件开发相应的图像处理视觉系统,成功检测到裂纹。在谷物质量自动评估过程中使用计算机视觉系统和图像处理技术是最快捷的方式。丁然<sup>[4]</sup>利用随机森林的机器视觉与模式识别技术对大豆籽粒外观特征品质进行识别,有效提高了大豆品质识别水平。谭克竹<sup>[71]</sup>利用光谱信息和图像信息相融合的方法将化学计量学和大豆科学等诸多领域的知识结合起来,研究对大豆外观品质和内在品质进行快速且无损的检测方法,并在此基础上建立起大豆品质快速检测模型,开发出大豆品质检测系统。Pinto等<sup>[72]</sup>认为X射线图像分析技术可作为一种无

损检测大豆种子机械损伤的替代方法,并可从种皮损伤的种子中筛选出完整的活种子。Dell'Aquila<sup>[73]</sup>提到若要利用X射线图像分析技术得到更精确的检测结果,就需要在X射线图像分析软件开发领域进行更多的研究,以实现识别和量化种子的损伤类型。Pinto等<sup>[74]</sup>研究也认为图像分析技术对大豆种子机械损伤的评估具有重要的实用价值,可以对不同因素的影响进行详细观察。

依赖人工肉眼观测和传统的化学检测手段具有主观性强、速度慢、精度低等一系列缺点。人工检测客观性、准确性、快速性不足;化学检测周期长、破坏样本、造成一定的环境污染。利用计算机视觉图像处理技术可以实现籽粒的无损检测,而且具有非接触、安全、快速、环保等优点,这不仅为大豆种子的裂纹检测提供了一种新的途径,也为加工贮藏过程中的大豆种子提供更便捷、更安全的筛选方法。

## 5 降低裂纹率措施

目前关于种皮裂纹的防除主要通过抗种皮开裂育种来解决,同时配合农业技术措施进行有效的控制。大豆种皮开裂受环境的影响很大,同一品种在不同年份及不同地区会表现为不同的裂纹率,这在准确鉴定大豆品种的抗性时存在许多困难。Okabe<sup>[75]</sup>两年的试验表明,在大豆抗种皮开裂育种上可以应用弗卡隆处理来进行品种的抗性鉴定比较,进而筛选出抗种皮开裂的品种。Yamaguchi等<sup>[53]</sup>研究探索出在低温条件下筛选种皮开裂抗性的方法,植物在人工气候室开花后10 d开始进行21 d的低温处理,比较不同品种的抗开裂性,该筛选方法对抗种皮裂纹大豆育种有一定的参考价值。除了弗卡隆处理和低温处理方法外,还可以通过降低大豆开花结荚期间的人为干预,减轻外在力的施加来降低裂纹率;分子标记辅助选择也可以作为培育抗种皮开裂品种的有效方法;选择合适的收获、脱粒设备;必须要保证田间肥水的合理施用,避免种子在生长发育后期水分过足引起种子生长过快使得种皮胀裂;还可以通过加快品种繁育来延缓品种退化。

总的来说,降低裂纹率一定要加强人工选择,综合调整良种繁育体系,实施合理的田间管理方案,改善栽培条件,提升种子贮藏加工技术,做好品种管理工作。

## 6 展望

大豆在我国众多农产品中拥有特别的地位,它既是我国最主要的植物油来源,也是重要的植物蛋

白来源,同时大豆也是我国进口量最大的农产品之一。大豆种皮裂纹虽不像病毒病、灰斑病、胞囊线虫病等病害在研究和防除上被人们所重视,但随着人们对大豆籽粒品质要求越来越高,有关种皮裂纹发生原因、机理以及防除措施等研究也逐渐受到国内外的重视。种皮为保护胚胎和萌发的幼苗免受生物和非生物胁迫而进化出高度复杂的反应机制,同时也在控制发育方面发挥着关键作用。种皮的许多化合物对种子具有保护作用,同时还影响到各类豆制品的品质和价值,多种化合物可作为生产工业和生物医药创新型产品的原料,种皮确定的各类性状在很大程度上影响到种子的总体质量和其衍生产品的有效性。

目前对大豆基因组测序以及基因功能的研究在逐步深入,新技术的开发有可能改变种皮构成和种子产量,并有助于新品种的培育,也将加速种皮裂纹领域的研究。农业研究的目标是加速种子质量和产量的发展,所以科研人员在了解大豆栽培及育种关键技术的同时,还必须根据相应的种皮裂纹发生原因和机理来制定特定的防除措施,使其措施多样化以满足更多不确定的需求。

随着技术的发展,如何快速精确地检测农作物品质缺陷已经成为了各国研究的主要方向,但目前部分企业仍然应用人工方法对大豆进行品质检测,这样的情况下急需将计算机自动化与机器视觉图像检测技术应用在农业领域。通过机器视觉系统和图像处理技术可以根据不同的大豆籽粒外观对其进行分检以及对种子进行相应的质量评价,不仅可以促进农业生产自动化,而且可以保证农户的利益与效益,同时使我国农业发展具有更为有利的国际竞争优势。

参考文献

[1] Qutob D, Ma F, Peterson C A, et al. Structural and permeability properties of the soybean seed coat[J]. Botany, 2008, 86(3): 219-227.

[2] Le B H, Wagmaister J A, Kawashima T, et al. Using genomics to study legume seed development[J]. Plant Physiology, 2007, 144(2): 562-574.

[3] Moise J A, Han S, Gudynaite-Savitch L, et al. Seed coats: Structure, development, composition, and biotechnology[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 2005, 41(5): 620-644.

[4] 丁然. 基于随机森林大豆籽粒外观品质识别系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. (Ding R. Design and implementation of a random forest soybean seed appearance quality recognition system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. )

[5] Shelar V R, Shaikh R S, Nikam A S. Soybean seed quality during

storage: A review[J]. Agricultural Reviews, 2008, 29(2): 125-131.

[6] Haughn G, Chaudhury A. Genetic analysis of seed coat development in *Arabidopsis*[J]. Trends in Plant Science, 2005, 10(10): 472-477.

[7] Dinah Q, Fengshan M, Carol A P, et al. Structural and permeability properties of the soybean seed coat[J]. Botany, 2008, 86(3): 219-227.

[8] 弭忠祥, 赵小钊, 胡宝忠, 等. 大豆种子发育阶段种皮细胞壁表面糖蛋白的变化[J]. 大豆科学, 1999, 18(1): 18-22. (Mi Z X, Zhao X H, Hu B Z, et al. Changes of glycoproteins on the surface of seed coat cells in soybean seed development stage[J]. Soybean Science, 1999, 18(1): 18-22. )

[9] Figueiredo D D, Köhler C. Signalling events regulating seed coat development[J]. Biochemical Society Transactions, 2014, 42(2): 358-363.

[10] Radehuk V, Judmilla B L. Physical metabolic and developmental functions of the seed coat[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 1-17.

[11] Yaklich R W, Barla-Szabo G. Seed coat cracking in soybean[J]. Crop Science, 1993, 33(5): 1016-1019.

[12] Nakamura T, Yang D, Kalaiselvi S, et al. Genetic analysis of net-like cracking in soybean seed coats[J]. Euphytica, 2003, 133(2): 179-184.

[13] 李兴军. 豆类种皮的成分与功能[J]. 粮食科技与经济, 2010, 35(2): 39-42. (Li X J, Composition and function of legume seed coat [J]. Food Science and Technology and Economy, 2010, 35(2): 39-42. )

[14] Lisker N, Ben-Efraim A, Henis Y. Fungi growing on stored soybeans and their significance in lipid breakdown[J]. Annals of Applied Biology, 2008, 107(1): 117-126.

[15] Wolf W J, Baker F L, Bernard R L. Soybean seed-coat structural features: Pits, deposits and cracks[J]. Scann Electron Microsc, 1981, 3: 531-544.

[16] Yakl, R W, 何文安. 大豆种皮破裂研究[J]. 国外农学: 油料作物, 1995, 1: 34-36. (Yakl, R W, He W A. The research of soybean seed coat crack [J]. Foreign Agronomy: Oil Crops, 1995, 1: 34-36. )

[17] 王亚琪, 简朴, 费云燕, 等. 大豆 2 个种皮不完整突变体的形态特点与遗传分析[J]. 核农学报, 2017, 31(4): 621-626. (Wang Y Q, Jian P, Fei Y Y, et al. Morphological characters and inheritance of incomplete seed coat in two induced soybean mutants [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(4): 621-626. )

[18] 傅蒙蒙, 王燕平, 任海祥, 等. 东北春大豆籽粒性状的生态特性分析[J]. 大豆科学, 2016, 35(5): 705-716. (Fu M M, Wang Y P, Ren H X, et al. Analysis of ecological characteristics of spring soybean grain traits in northeast China[J]. Soybean Science, 2016, 35(5): 705-716. )

[19] Oyoo M E, Benitez E R, Matsumura H, et al. QTL analysis of seed coat cracking in soybean[J]. Crop Science, 2010, 50(4): 1230-1235.

[20] Oyoo M E, Githiri S M, Benitez E R, et al. QTL analysis of net-like cracking in soybean seed coats[J]. Breeding Science, 2010, 60(1): 28-33.

[21] Song J, Guo Y, Yu L J, et al. Progress in genes related to seed-coat color in soybean[J]. Genetic, 2012, 34(6): 687-694.

[22] Senda M, Kurauchi T, Kasai A, et al. Suppressive mechanism of seed coat pigmentation in yellow soybean[J]. Breeding Science, 2012, 61(5): 523-530.

[23] Matsumura H, Liu B, Abe J, et al. AFLP mapping of soybean maturity gene *E4* [J]. Journal of Heredity, 2008, 99(2): 193-197.

[24] Yamaguchi N, Taguchishibara F, Sayama T, et al. Quantitative trait loci associated with tolerance to seed cracking under chilling temperatures in soybean[J]. Crop Science, 2015, 55(5): 2100-2107.

[25] Yasui T, Toda K, Yamada T, et al. seed coat cracking of soybean [*Glycine max* [L.] Merr.] after soaking and cooking[J]. Cereal Chemistry Journal, 2017, 94(4): 717-722.

[26] Kasai A, Kasai K, Yumoto S, et al. Structural features of *GmIRCHS*, candidate of the I gene inhibiting seed coat pigmentation in soybean; Implications for inducing endogenous RNA silencing of chalcone synthase genes[J]. Plant Molecular Biology, 2007, 64(4): 467-479.

[27] Senda M, Yamaguchi N, Hiraoka M, et al. Accumulation of proanthocyanidins and/or lignin deposition in buff-pigmented soybean seed coats may lead to frequent defective cracking[J]. Planta, 2017, 245(3): 1-12.

[28] Delessert C, Wilson I W, Van D S D, et al. Spatial and temporal analysis of the local response to wounding in *Arabidopsis* leaves [J]. Plant Molecular Biology, 2004, 55(2): 165-181.

[29] Kim Y J, Kim D G, Lee S H, et al. Wound-induced expression of the ferulate 5-hydroxylase gene in *Camptotheca acuminata*[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2006, 1760(2): 182-190.

[30] Barros J, Serk H, Granlund I, et al. The cell biology of lignification in higher plants [J]. Annals of Botany, 2015, 115(7): 1053-1074.

[31] Soltani B M, Ehling J, Hamberger B, et al. Multiple cis-regulatory elements regulate distinct and complex patterns of developmental and wound-induced expression of *Arabidopsis thaliana* *4CL* gene family members[J]. Planta, 2006, 224(5): 1226-1240.

[32] Gagare K C, Bharud R W, Shelar V R, et al. Detection of mechanical damage to soybean seed surface using ferric chloride test [J]. Agricultural Science Digest, 2014, 34(4): 289-292.

[33] Gunasekaran S, Cooper T M, Berlage A G. Soybean seed coat and cotyledon crack detection by image processing[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1988, 41(2): 139-148.

[34] 孙业汉, 吕福顺, 王夫玉, 等. 花生种皮裂纹遗传的初步研究 [J]. 中国油料, 1994, 16(3): 33-37. (Sun Y H, Lu F S, Wang F Y, et al. Preliminary study on inheritance of cracks in peanut seed coat [J]. China Oil, 1994, 16(3): 33-37.)

[35] Babaei H R, Zeinali K H, Taleei A. Genetic analysis of agronomic traits and seed shattering resistance in soybean (*Glycine max*) [J]. Journal of The American Chemical Society, 2012, 95(6): 2028-2029.

[36] Yang K, Jeong N, Moon J K, et al. Genetic analysis of genes controlling natural variation of seed coat and flower colors in soybean [J]. Journal of Heredity, 2010, 101(6): 757-768.

[37] Gijzen M, Kufu K, Moy P. Gene amplification of the *Hps* locus in *Glycine max* [J]. BMC Plant Biology, 2006, 6(1): 6.

[38] 宋健, 郭勇, 于丽杰, 等. 大豆种皮色相关基因研究进展 [J]. 遗传, 2012, 34(6): 687-694. (Song J, Guo Y, Yu L J, et al. Advances in research on genes related to seed coat color of soybean [J]. Heredity, 2012, 34(6): 687-694.)

[39] 续曲, 郭勇, 邱丽娟. 褐色种皮大豆与其黄色种皮衍生亲本的表型及基因型比较 [J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(2): 284-288. (Xu Q, Guo Y, Qiu L J. Phenotype and genotype comparison between brown seed coat soybean and its yellow seed coat derived parents [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14(2): 284-288.)

[40] 王惠, 段玉玺, 陈立杰, 等. 一个与大豆黄色种皮相关的 RAPD 标记 [J]. 大豆科学, 2005, 24(1): 17-20. (Wang H, Duan Y X, Chen L J, et al. A RAPD marker related with yellow seed coat of soybean [J]. Soybean Science, 2005, 24(1): 17-20.)

[41] 金梅, 胡喜平, 姜延青, 等. 大豆褐色种皮衍生系农艺性状变化 [J]. 现代化农业, 2015, 426(1): 14-15. (Jing M, Hu X P, Jiang Y Q, et al. Changes of agronomic traits of soybean brown seed coat derived lines [J]. Modern Agriculture, 2015, 426(1): 14-15.)

[42] Takahashi R, Abe J. Soybean maturity genes associated with seed coat pigmentation and cracking in response to low temperatures [J]. Crop Science, 1999, 39(6): 1657-1662.

[43] Hyten D L, Choi I Y, Song Q, et al. A high density integrated genetic linkage map of soybean and the development of a 1536 universal soy linkage panel for quantitative trait locus mapping [J]. Crop Science, 2010, 50(3): 960-968.

[44] Zabala G, Vodkin L. Cloning of the pleiotropic *t* locus in soybean and two recessive alleles that differentially affect structure and expression of the encoded flavonoid 3' Hydroxylase [J]. Genetics, 2003, 163(1): 295-309.

[45] Qutob D, Ma F, Peterson C A, et al. Structural and permeability properties of the soybean seed coat [J]. Botany, 2008, 86(3): 219-227.

[46] Senda M, Kasai A, Yumoto S, et al. Sequence divergence at chalcone synthase gene in pigmented seed coat soybean mutants of the inhibitor locus [J]. Genes & Genetic Systems, 2002b, 77(5): 341-350.

[47] Senda M, Masuta C, Ohnishi S, et al. Patterning of virus-infected *Glycine max* seed coat is associated with suppression of endogenous silencing of chalcone synthase genes [J]. Plant Cell, 2004, 16(4): 807-818.

[48] Tuteja J H. Tissue-specific gene silencing mediated by a naturally occurring chalcone synthase gene cluster in *Glycine max* [J]. The Plant Cell Online, 2004, 16(4): 819-835.

[49] Kurauchi T, Kasai A, Tougou M, et al. Endogenous RNA interference of chalcone synthase genes in soybean; Formation of double-stranded RNA of *GmIRCHS* transcripts and structure of the 5' and 3' ends of short interfering RNAs [J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(11): 1264-1270.

[50] Kasai A, Ohnishi S, Yamazaki H, et al. Molecular mechanism of seed coat discoloration induced by low temperature in yellow soybean [J]. Plant & Cell Physiology, 2009, 50(50): 1090-1098.

[51] Ohnishi S, Funatsuki H, Kasai A, et al. Variation of *GmIRCHS*



- (*Glycine max* inverted-repeat CHS pseudogene) is related to tolerance of low temperature-induced seed coat discoloration in yellow soybean[J]. Theoretical & Applied Genetics, 2011, 122(3): 633-642.
- [52] Funatsuki H, Ohnishi S. Recent advances in physiological and genetic studies on chilling tolerance in soybean[J]. Japan Agricultural Research Quarterly JARQ, 2009, 43(2): 95-101.
- [53] Yamaguchi N, Yamazaki H, Ohnishi S, et al. Method for selection of soybeans tolerant to seed cracking under chilling temperatures[J]. Breeding Science, 2014, 64(1): 103-108.
- [54] Takahashi R, Benitez E R, Funatsuki H, et al. Soybean maturity and pubescence color genes improve chilling tolerance[J]. Crop Science, 2005, 45(4): 1387-1393.
- [55] Githiri S M, Yang D, Khan N A, et al. QTL Analysis of low temperature induced browning in soybean seed coats[J]. Journal of Heredity, 2007, 98(4): 360-366.
- [56] Ha B K, Kim H K, Kang S T. Mapping QTLs with epistatic effects and QTL-by-environment interactions for seed coat cracking in soybeans[J]. Euphytica, 2012, 186(3): 933-942.
- [57] Szittyi G. Low temperature inhibits RNA silencing-mediated defence by the control of siRNA generation[J]. European Molecular Biology Organization Journal, 2003, 22(3): 633-640.
- [58] Song Q J, Marek L F, Shoemaker R C, et al. A new integrated genetic linkage map of the soybean[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2004, 109(1): 122-128.
- [59] Yang D, Nakamura T, Ohtsubo N, et al. Seed coat cracking in soybean isolines for pubescence color and maturity[J]. Crop Science, 2002, 42(1): 71-75.
- [60] Senda M, Kawasaki M, Hiraoka M, et al. Occurrence and tolerance mechanisms of seed cracking under low temperatures in soybean (*Glycine max*) [J]. Planta, 2018, 248(2): 369-379.
- [61] Sun L, Miao Z, Cai C, et al. *GmHsl-1*, encoding a calcineurin-like protein, controls hard-seededness in soybean[J]. Nature Genetics, 2015, 47(8): 939-943.
- [62] 翟莹, 张军, 杨晓杰, 等. 大豆 *SbPRP3* 基因表达及转基因烟草非生物胁迫鉴定[J]. 西北植物学报, 2016, 36(7): 1331-1336. (Zhai Y, Zhang J, Yang X J, et al. Expression of *SbPRP3* in soybean and resistance ability in transgenic tobacco to abiotic stress[J]. Acta Botanica Borealis, 2016, 36(7): 1331-1336.)
- [63] Gagare K C, Bharud R W, Shelar V R, et al. Detection of mechanical damage to soybean seed surface using ferric chloride test [J]. Agricultural Science Digest, 2014, 34(4): 289-292.
- [64] Vanutrecht D, Bern C J, Rukunudin I H. Soybean mechanical damage detection[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(2): 137-141.
- [65] Capeleti I, Ferrarese M L L, Krzyzanowski F C, et al. A new procedure for quantification of lignin in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] seed coat and their relationship with the resistance to mechanical damage [J]. Seed Science and Technology, 2005, 33(2): 511-515.
- [66] de Carvalho T C. Identification of soybean seed coat damage[J]. Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science, 2013, 6(1): 85-90.
- [67] Utrecht D V, Bern C J, Rukunudin I H. Soybean mechanical damage detection[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(2): 137-141.
- [68] 张俊雄, 荀一, 李伟. 基于形态特征的玉米种子表面裂纹检测方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 951-956. (Zhang J X, Xun Y, Li W. Maize seed surface crack detection method based on morphological characteristics[J]. Optical Precision Engineering, 2007, 15(6): 951-956.)
- [69] 刘韶军, 王库. 基于机器视觉的棉种破损检测技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 186-189. (Liu S J, Wang K. Cotton seed damage detection technology based on machine vision[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 186-189.)
- [70] 吴杰. 基于显微图像处理的稻谷破损方式研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2014. (Wu J. Research on damage patterns of rice based on microscopic image processing[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.)
- [71] 谭克竹. 基于高光谱图像和机器视觉技术的大豆品质检测研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014. (Tan K Z. Soybean quality detection based on hyperspectral image and machine vision technology [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.)
- [72] Pinto T L F, Cicero S M, França Neto J B, et al. An assessment of mechanical and stink bug damage in soybean seed using X-ray analysis test [J]. Seed Science & Technology, 2009, 37(1): 110-120.
- [73] Dell'Aquila A. Towards new computer imaging techniques applied to seed quality testing and sorting[J]. Seed Science and Technology, 2007, 35(3): 519-538.
- [74] Pinto T L F, Mondo V H V, Gomes Júnior F G, et al. Image analysis for evaluating mechanical damages in soybean seeds [J]. Pesquisa Agropecuária Tropical, 2012, 42(3): 310-316.
- [75] Okabe A. Inheritance of seed coat cracking and effective selection method for the resistance in soybean (*Glycine max*) [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1996, 30(1): 15-20.