

大豆种皮裂纹评价及 QTL 定位研究进展

刘士榕^{1,2}, 徐彪^{1,2}, 赵娜¹, 董英山^{1,2*}, 袁翠平^{2*}

(1. 吉林农业大学, 长春 130118; 2. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心), 长春 130033)

摘要: 大豆种皮裂纹不仅降低种子外观品质与商品等级, 而且影响种子的发芽率和活力, 导致出苗不齐, 长势不一, 影响产量和品质。本文就大豆种皮裂纹的类型划分、鉴定评价及 QTL 定位等方面进行了综述, 以期改善大豆籽粒外观质量、培育优良品种提供参考。

关键词: 大豆; 种皮裂纹; 裂纹类型; 裂纹判定标准; QTL 定位

中图分类号: S565.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2026)02-0001-07

Research Progress in Evaluation of Soybean Seed Coat Cracking and QTL Mapping

LIU Shirong^{1,2}, XU Biao^{1,2}, ZHAO Na¹, DONG Yingshan^{1,2*}, YUAN Cuiping^{2*}

(1. Jilin Agricultural University, Changchun 130118; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research Center of China), Changchun 130033, China)

Abstract: Soybean seed coat cracking(SCC) not only reduces the appearance quality of seeds, leading to lower commercial quality, but also affects the seed germination rate and vigor, resulting in uneven seedling emergence and growth, and ultimately affecting yield and quality. However, this trait has not received sufficient attention, and relevant research remains limited. In this paper, a review was conducted on the research progress of SCC types, evaluation methods for soybean resistance to SCC, and QTL mapping. These findings are expected to provide references for improving the appearance quality of soybean seeds and breeding soybean varieties resistant to SCC.

Key words: Soybean; Seed coat crack; Crack type; Crack determination criteria; QTL mapping

大豆是全球种植的主要大田作物之一, 含有丰富的蛋白质和油脂, 被广泛用于食品、饲料、燃料等工业领域^[1-2]。在中国、日本、韩国等许多亚洲国家, 以大豆为基础配方的食品广受欢迎, 已成为传统食品的一部分^[3]。

大豆种子外观品质是决定其商业价值的重要因素^[4], 其中种皮裂纹(Seed Coat Cracking, SCC)是造成外观品质低下的一个重要性状^[5]。种皮裂纹会破坏大豆种子的光滑度和完整性, 是高端市场对大豆等级评定的影响因素^[6]。在加工过程中, 种皮裂纹会降低加工效率、影响产品质量^[7]。在萌发阶段会降低种子的发芽力与活力, 导致种子出苗率下降^[8]。

综上所述, 种皮裂纹是影响大豆品质和种子质量的重要性状, 关乎种子的商业价值^[9]。深入研究种皮裂纹形成机制, 培育抗裂纹品种对提高大豆质量具有重要意义。然而, 现阶段对该性状的深入研究较少。本文针对种皮裂纹的类型划分、鉴定评价、QTL 定位、降低裂纹率的措施等进行综述和讨论, 为种皮裂纹的遗传机制研究和品种选育提供参考。

1 种皮裂纹类型

种皮裂纹可分为不规则裂纹(Type-I)和网状裂纹(Type-II)两种类型^[10]。Type-I 种皮呈现不规则的裂纹, 导致种皮外层组织脱落, 内部结构显露(图 1)。Type-II 裂纹纵横交错, 相互连接形成类似网状的结构(图 2)。

Type-I 是一种常见的种皮裂纹类型, 裂纹的走向呈现出无规律可循的状态, 裂纹的长度、宽度以及分布位置都缺乏一致性和连贯性, 可能是

收稿日期: 2025-07-07

基金项目: 吉林省农业科学院结余经费项目(y45451510)

作者简介: 刘士榕(1996-), 男, 在读硕士, 从事野生大豆资源研究。

通信作者: 董英山, E-mail: ysdong@cjaas.com

袁翠平, E-mail: cpyuan2004@126.com

单个较长且曲折的裂纹,也可能是一些较短、方向各异的裂纹组合^[11]。这种裂纹可能是在大豆生长发育过程中,受外界非均匀的物理应力或者内部生理失衡导致的局部膨压变化而产生的,其种皮的表皮组织(栅栏细胞)和皮下组织(沙漏细胞)分离,使下面的薄壁组织暴露出来,从而形成不规则裂纹^[12]。

依据裂纹位置和延伸方向,Type-I分为两种,一种为表皮裂纹(图1 A),会导致种子发芽率和出苗率降低,不正常苗数增加,植株生长畸形、无主茎生长点、子叶折叠或发霉^[13]。大豆品种不同,种子表皮裂纹对种子的出苗率和不正常苗数影响程度也不同^[14]。另一种为侧面裂纹(图1 B),由于裂纹出现在种子一侧,并且向种子内部延伸,导致种子内部结构极易受到损伤以及病原菌的侵害,进而导致种子活力下降^[15]。



图1 大豆种皮的不规则裂纹类型(Type-I)
Fig. 1 Irregular crack type in soybean seed coat (Type-I)

Type-II的形成往往与种皮的组织结构特性以及特定的环境因素相关。从组织结构来看,种皮不同层次之间的连接方式、细胞排列等因素在一定程度上影响了裂纹的形成模式。当面临外界环境压力,如温度的剧烈波动或者湿度长期处于不适宜的状态时,种皮内部各层之间的应力差异逐渐积累,最终导致裂纹以网状的形式呈现,并且网状裂纹的节点和分支处往往是应力集中和结构薄弱点相互作用的结果^[16]。网状裂纹可能导致种皮的外层细胞脱落,内部结构显露。部分种皮裂纹的籽粒,背侧发生分裂,子叶经常暴露在外,容易造成子叶及内部其他结构的破损。



图2 大豆种皮的网状裂纹类型(Type-II)
Fig. 2 Type-II reticulate cracking pattern of soybean seed coat

2 种皮裂纹的评价

准确评价大豆种皮的裂纹程度,对大豆种质资源的研究与利用具有重要意义。目前,种皮裂纹的评价方法有两种。

《大豆种质资源描述规范和数据标准》^[17]在对样本中单个籽粒有无裂纹的评价基础上,计算裂纹籽粒所占比率,依据比率把该性状分为4个等级(表1)。

表1 大豆种皮裂纹的等级划分标准
Table 1 Grading standards for soybean seed coat cracks

等级	裂纹程度	裂纹程度描述
Grade	Cracking degree	Description of cracking degree
1级	不裂	所有的籽粒均无裂纹
3级	轻度裂纹	0<裂纹籽粒比率≤5%
5级	中度裂纹	5%<裂纹籽粒比率≤15%
7级	易裂	裂纹籽粒比率>15%

裂纹等级评价标准在国外也有相关研究。Srinivasan等^[18]针对单个籽粒裂纹程度作了评价(表2),然

表2 单粒大豆种皮裂纹等级划分标准
Table 2 Grading standards for seed coat crack levels in single soybean seeds

等级	裂纹程度	裂纹程度描述
Grade	Cracking degree	Description of cracking degree
0级	无裂缝	无裂缝
1级	轻微裂缝	只在一处有裂缝,比如只在珠孔处或者种脐的一侧有裂缝
2级	中等裂缝	在两处有裂缝,比如在珠孔和种脐的一侧,或者种脐两侧有裂缝
3级	严重裂缝	在珠孔和种脐两侧都有裂缝
4级	非常严重裂缝	种皮有多处裂缝,对于有裂口的种子,归为4级

后根据单个籽粒裂纹程度级别,按照下列公式计算样本的裂纹指数,用于样本的裂纹程度评价。

$$CI = \frac{\sum (s \times n)}{N} \times 100\%$$

式中, CI 为裂纹指数; s 为裂纹等级; n 为对应裂纹等级的种子数; N 为总种子数。

3 QTL 定位

挖掘稳定遗传的位点对理解大豆种皮裂纹遗传机制和培育抗裂品种至关重要^[19]。共有 5 项 QTL 定位研究发现调控大豆种皮裂纹的关键位点(表 3), 鉴定了 28 个 QTL 位点, 分布在 14 条染色体上, 揭示了大豆种皮裂纹是多基因控制的复杂性状。多项研究均将 QTL 定位在 2 号染色体, 而且 LOD 值和表型贡献率较高, 表明 2 号染色体可能存在关键位点。

不同 QTL 位点的 LOD 值和表型变异解释率差异显著, 如 $ncr2$ 、 $qSC2-3$ 、 $qSC8$ 、 $qSC19-1$ 等, 其 LOD 值达 8 以上, 表型贡献率 15% 以上, 为主效 QTL; 而 $qSC9$ 、 $qSCD15$ 和 $qSC19-2$, 虽然 LOD 值在 4.0 以上, 其表型贡献率只有 5.3% 或更小, 为微效 QTL。整体而言, 种皮裂纹是典型的多基因控制性状, 由主效基因和微效基因共同控制^[20]。

在不同环境下的 QTL 位置不同, 揭示了环境对种皮裂纹性状的影响作用。Ha 等^[21]在分析大豆种皮裂纹时发现, $qSCC2-1$ 在不同年份和不同地点的表现差异显著, 在 2005 年 Yeoncheon 环境中, 其表型贡献率为 13.2%, 2006 年 Suwon 环境中表型贡献率为 15.1%。在相同染色体上发现的位点虽相近, 但表型贡献率差异明显, 可能与栽培条件、温度和湿度等因素相关^[22-23]。

表 3 大豆种皮裂纹 QTL
Table 3 QTLs of soybean seed coat cracking

QTL	染色体 Chromosome	物理位置/bp Physical location	分子标记 Molecular marker	阈值 LOD	表型贡献率/% PVE	参考文献 Reference
$qSC2-1$	2(D1b)	837 860~859 912	AX-90397999 - AX-90477326	7.0	10.2	[8]
$qSC2-2$	2(D1b)	4 058 781~4 129 981	AX-90352789 - AX-90328934	11.5	11.4	[8]
$qSCC2-1$	2(D1b)	4 104 651~9 328 062	Satt216 - Satt157	5.9	15.1	[21]
$cr1$	2(D1b)	4 104 651~4 104 841	Satt216	4.8	27.2	[16]
$qSC2-3$	2(D1b)	4 222 566~4 369 723	AX-90405774 - AX-90342458	12.9	15.0	[8]
$qSCC2-2$	2(D1b)	43 443 481~45 267 222	Satt172 - Satt274	4.8	12.4	[21]
$qSCC3$	3(N)	3 197 845~36 674 461	Satt159 - Satt521	3.1	7.1	[21]
$ncr1$	4(C1)	44 301 701~44 301 893	Satt195	5.9	16.0	[24]
$ncr2$	4(C1)	44 849 757~45 285 294	GMES0512	8.6	32.4	[24]
$qSC6$	6(C2)	1 470 272~6 368 572	AX-90457808 - AX-90352417	6.8	11.2	[8]
$qSCC6$	6(C2)	12 336 492~15 756 491	Satt322 - Satt363	3.0	7.3	[21]
$cr2$	7(M)	2 025 244~2 025 524	Satt201	4.1	16.2	[16]
$qSCC8-1$	8(A2)	971 657~4 217 924	Satt480 - Satt177	2.7	6.6	[21]
$qSC8$	8(A2)	17 185 579~17 596 226	AX-90374998 - AX-90329948	16.6	17.3	[8]
$qSCC9$	9(K)	5 753 983~11 262 197	Satt137 - Satt167	7.4	19.3	[21]
$qSC9$	9(K)	42 358 891~46 182 296	AX-90430218 - AX-90445889	4.3	3.9	[8]
$qSC10-1$	10(O)	44 501 796~44 728 112	AX-90506930 - AX-90472723	7.2	10.7	[8]
$qSC10-2$	10(O)	45 818 758~45 969 241	AX-90490202 - AX-90513989	12.0	11.4	[8]
$qSCC11-1$	11(B1)	8 898 878~24 571 364	Satt197 - Satt298	2.8	8.8	[21]
$qSC12$	12(H)	7 992 664~8 085 400	AX-90336976 - AX-90436508	5.1	5.7	[8]
$qSCC13$	13(F)	17 875 691~22 489 622	Satt160 - Satt516	3.1	6.9	[21]
$qSCD15$	15(E)	5 331 364~6 085 794	Gm15_5312718-Gm15_6066709	5.0	5.3	[25]
$qSCC19$	19(L)	41 380 304~42 616 724	Set010 - Satt166	3.5	8.5	[21]
$qSC19-1$	19(L)	42 347 892~44 969 419	AX-90489570 - AX-90395600	8.9	15.6	[8]
$qSC19-2$	19(L)	44 969 419~45 576 271	AX-90395600 - AX-90472983	4.1	4.8	[8]
$qSCC20$	20(I)	1 287 393~27 664 834	Satt571 - Satt496	3.6	13.1	[21]
$qSC20$	20(I)	2 949 010~31 450 550	AX-90462479 - AX-90365081	6.3	6.8	[8]
$qSCD20$	20(I)	37 097 315~37 190 252	Gm20_36002148-Gm20_36095037	6.1	9.4	[25]

4 影响种皮裂纹的因素

4.1 温度

温度能影响细胞分裂,诱导大豆种皮物理外观变异^[26]。花期低温(约 15 °C)能诱导种皮裂纹以及种脐周围的褐变^[27]。Takahashi 等^[22-23]利用两个位点的近等基因系评价了两个色素位点 *T*(负责茸毛和种皮颜色)和 *I*(负责种皮颜色的分布)对低温诱导种皮裂纹的影响,推测低温可能通过抑制相关酶活性、影响 RNA 沉默或阻碍种皮分化过程等机制,诱导种皮裂纹^[14]。然而,耐种皮裂纹型品种在低温下种皮韧性较高,表明种皮的物理性质在低温条件下对种子裂纹耐受性起到重要作用^[28]。

4.2 水分

研究发现,种皮裂纹的种子含水量略低于正常种子,低含水量会使种皮更易受损,这可能与种皮的韧性结构有关^[29]。干燥导致种皮失去水分,使其物理性质由柔韧变为硬脆;同时,种子内部因失水速率和收缩程度不同产生显著内应力。当这些应力集中在种皮薄弱点时,脆化的种皮无法通过形变缓冲应力,直接发生脆性断裂,导致裂纹扩展^[30]。加工中的热空气会加速失水,加剧种皮脆化和收缩不均,从而放大裂纹风险。

4.3 成熟期

大豆种皮裂纹是在种子发育晚期(R6)至成熟期(R7)脱水过程中发生的^[9],因薄壁组织收缩异常引发的机械损伤^[31]。Kang 等^[8]对不同成熟期大豆种皮裂纹现象的研究表明,种皮裂纹程度因生育期天数的不同而不同,相关系数为-0.43。早熟组(成熟天数≤100 d)品种种皮裂纹程度往往较高,平均值为 20.0%;正常成熟组(100 d<成熟天数≤110 d)平均值为 12.1%;晚熟组(成熟天数>110 d)平均值为 4.3%。这可能是由于控制成熟期的基因与种皮裂纹基因间存在连锁或关联。

控制成熟的基因(*E* 系列基因)和色素沉着基因(*I*、*R* 和 *T* 基因)在调控种皮相关性状上有潜在联系,影响种皮裂纹^[32-33]。在实际观察中,种皮的颜色变化往往与种皮的质量和裂纹情况相关。如某些具有特定颜色(如深褐色、浅黄色)基因型的种皮更容易出现裂纹,这提示色素沉着基因可能与种皮裂纹有关^[34]。

4.4 物质积累等因素

在种子成熟过程中,当遇到促进种子增产的环境因素时,子叶组织与种皮组织分化速率不一致,子叶中物质大量储存导致籽粒增大,可能会

使部分种子发生种皮裂纹^[35]。

在褐皮大豆(*TT* 基因型)中,原花青素(PA)是合成关键结构物质木质素的前体,其沉积显著增加种皮机械强度,有效防止裂纹;而黄种皮大豆(*tt* 基因型)因关键基因突变阻断 PA 合成途径,导致木质素严重缺失,造成种皮结构脆弱、机械强度不足,最终在外部应力下极易裂纹。如突变体 THM 的种皮裂纹性状就与此相关^[36]。

4.5 遗传因素

种皮裂纹是一个受基因与环境互作影响的复杂性状,除了温度、水分和品种成熟期等对种皮裂纹有影响外,种皮裂纹受多个基因的影响或控制。对 167 个重组自交系(RILs)大豆种皮裂纹的遗传研究表明,大豆种皮裂纹性状的广义遗传力高达 81.5%,遗传因素在决定种皮裂纹变异中占据了主导地位^[5]。不同大豆品种在种皮特性上存在差异,有些栽培品种容易出现网状裂纹,这可能与特定的基因组合有关。这些基因可能影响种皮的结构、厚度、韧性等,使得某些品种在生长发育过程中或在环境胁迫下更容易产生裂纹^[20]。

不规则裂纹主要由两个隐性基因 *de1* 和 *de2* 控制^[10]。控制茸毛色以及种皮色的基因(如基因 *T* 和基因 *I*)与这种裂纹密切相关。Oyoo 等^[16]研究发现,查尔酮合成酶基因中的 *T* 位点基因与 *I* 位点基因相互作用,可诱导或抑制种皮裂纹,大豆具有双隐性基因型(*iitt* 或 *iktt*)时会产生严重的种皮裂纹,而其他等位基因组合则不会出现裂纹症状。开花和种子成熟相关基因也与裂纹相关,位于 2、9 和 12 号染色体上的 *qSC2-1*、*qSC9* 和 *qSC12* 这 3 个位点在定位区间内发现多个与开花和种子成熟相关的候选基因。*qSC12* 的标记区间包括 7 个基因,其中 *Glyma.12g095700* 与 NCBI 数据库中的种子成熟蛋白 PM37 相关。Yang^[20] 和 Watanabe^[37] 等在 10 号染色体上发现的 *E2* 位点也被报道在大豆脱荚试验的一个处理组中诱导种皮裂纹。还有报道指出,控制成熟的基因(如 *E* 系列基因)和色素沉着基因(如 *I*、*R* 和 *T* 基因座)在调控种皮相关性状上存在潜在联系,他们间的互作影响种皮裂纹^[32,34]。

此外,控制大豆硬实性的基因 *GmHs1-1* 与种皮裂纹密切相关,该基因的存在或变异可能会影响种皮的结构和特性^[38]。*GmHs1-1* 主要在大豆种皮的栅栏层(Malpighian layer)表达。大多数栽培大豆携带 *GmHs1-1* 等位基因,而少数硬实的地方品种携带 *GmHs1-1* 基因。在大豆的驯化过程中,野生大豆种皮硬实性向栽培大豆种皮吸胀性的转

变是由人工选择 *GmHs1-1* 基因内的1个点突变导致的,该突变改变了氨基酸,影响了蛋白质的 α -螺旋结构,导致基因功能减弱或丧失,从而使种皮具有吸胀性。但网状种皮裂纹QTL却被定位在与查尔酮合酶多基因家族成员、*PRP1*和*PRP2*基因以及成熟度基因*E1(fd1)*、*E4*、*E7*不同的位置,暗示这些基因可能不直接参与网状种皮裂纹^[11,24]。

5 降低裂纹率的措施

目前,关于大豆种皮裂纹防治措施以育种改良为主,虽取得一定成效,但仍存在环境管理精细化不足、收获加工环节损伤控制不均衡、抗裂优质种源相对缺乏等问题。为系统性降低裂纹率,大豆种皮裂纹的防控需结合种植环境管控、加工技术改进与遗传育种改良。

5.1 强化田间、环境管控

优化栽培措施,合理密植,通过降低田间荫蔽度、增强通风透光性,减少湿度累积导致的种皮软化^[39-40];平衡施肥,增施钙肥以增强细胞壁强度、增施硅肥以提升种皮机械抗性,并避免氮肥过量施用,防止籽粒过大撑破种皮^[41]。在种植环境调控上,需重点优化水分管理与干燥条件,种子成熟期应保持土壤湿度稳定,避免干旱后因突然降雨或灌溉导致籽粒快速吸水膨胀;收获后采用温度 ≤ 40 °C的渐进式干燥^[42],避免热空气直接吹向种子,同时将种子最终含水量控制在12%~13%,含水量过低($< 10\%$)会降低种皮韧性^[29]。种植过程中需预防花期低温:开花期(R1阶段)若遇低温(< 15 °C),可通过喷施芸苔素内酯等抗寒剂^[43],选择含耐寒基因*E1~E7*的抗低温品种^[44]。在仓储控温阶段,维持温度10~15 °C、湿度 $\leq 65\%$,以防种子因吸湿胀缩^[35]。

5.2 改进收获与加工技术

在收获与加工环节可通过优化加工措施减轻机械损伤,使用联合收割机时将脱粒滚筒转速控制在 ≤ 500 r/min,以减少籽粒撞击^[45];加工运输过程中增设软质传送带等缓冲装置,降低籽粒碰撞概率^[46];在籽粒分选环节,借助X射线识别技术提前筛除易裂籽粒^[47]。

5.3 创新遗传育种方案

在遗传育种策略上,规避与裂纹相关的成熟基因,尽量选择晚熟基因型;开发连锁的SNP等分子标记,用于早期筛选携带抗性位基因的株系;借助CRISPR等基因编辑技术或等位基因聚合手段,优化基因功能以增强裂纹抗性^[48]。

6 展望

近年来,大豆种皮裂纹现象越来越普遍,随着人们对大豆籽粒品质要求越来越高,有关种皮裂纹的研究也逐渐受到国内外的重视^[5]。种皮裂纹不仅降低了种子外观品质,更重要的是降低大豆发芽率与豆芽质量^[49]。因此,探讨种皮裂纹影响及机制,研发有效的种子防护技术,减少裂纹对发芽率的负面影响,对稳定并提升发芽率具有重要意义^[50]。尽管大豆种皮裂纹研究取得了一定的进展,但在种皮裂纹评价、抗裂纹基因发掘利用及裂纹自动化检测方面尚需进一步探讨。

6.1 种皮裂纹评价

在种皮裂纹标准方面,国内通过计算裂纹种子占调查材料的比例评价裂纹程度,具有检测快速、数据直观的优点^[17]。然而,目前国内科研标准尚未对单粒种子的裂纹类型、裂纹程度等方面进行评估,无法提供相关信息,在一定程度上影响对种子品质进行更为深入和准确的评估与针对性措施的制定^[51]。国外评价方法是在对样本中单粒种子裂纹程度分级的基础上,利用裂纹指数评价样本的裂纹程度。这不仅评价了样本裂纹程度,而且还明确了单个种子的裂纹类型与裂纹等级,有助于深入研究成因和影响机制,为抗裂纹育种和栽培管理措施提供依据。

我国拥有丰富的大豆种质资源,遗传多样性高,在种皮裂纹形态、深度、宽度等方面可能具有更广泛的变异^[52]。在评价大豆种皮裂纹时,可先依据裂纹形状、裂纹数量、位置进行初步分类,分析裂纹类型;再结合单粒种子裂纹程度,确定种皮裂纹类型与裂纹等级。检测时可利用化学染料检测方法或光学仪器等设备辅助判断裂纹类型和裂纹程度^[53]。

6.2 抗种皮裂纹基因发掘

国外针对环境对大豆种皮裂纹的影响、QTL定位等方面的研究相对较多,在14条染色体上定位到抗种皮裂纹相关的28个位点,其中,2号染色体上的主效位点在多环境中稳定表达,但大部分研究还停留在对基因的预测层面,缺少基因验证部分,侧重QTL定位广度而缺乏对相关基因的深度研究。

国内基因发掘研究较多,但对抗裂纹基因鲜有研究,且裂纹性状存在遗传因素多、环境与基因互作机制复杂、缺少对关键基因定位等问题。我国是世界上大豆种质资源最多的国家,具有丰富的栽培大豆和野生大豆种质资源^[54],可充分发

挥种质资源优势,通过筛选抗裂种质资源,收集不同生态区、不同品种类型的大豆样本,建立详细的种皮裂纹性状数据库^[55]。筛选出具有抗种皮裂纹特性的品种或品系,为后续研究提供丰富的材料基础。挖掘关键基因,解析种皮裂纹形成机制并培育抗裂纹新品种,对提升大豆种子质量与外观品质具有重要意义。

6.3 大豆种皮裂纹自动化检测

采用传统的人工方法判定大豆种皮裂纹程度具有主观性强、误差大的缺点^[56]。引入基于机器视觉和图像处理技术的自动化检测技术^[57],实现大豆种皮裂纹智能检测系统化,采用智能相机在可控光源环境下采集大豆样本高清RGB图像,通过动态阈值分割技术分离种子与背景^[58],并基于形态学抗噪算法,优化轮廓特征以消除噪声干扰;继而进行多维度特征提取量化圆形度、伸长率等轮廓参数以捕捉种皮裂纹导致的几何形变,转换Lab色彩空间分析色度差异,结合灰度共生矩阵解析表面纹理变化;集成形状、色彩及纹理特征构建BP神经网络分类器,通过反向传播算法训练模型识别裂纹特征模式;由模型决策信号触发机械臂联动气流吸附装置,实现裂纹种子的精准剔除。通过分析籽粒外观实现自动分拣与质量评价,不仅能减少人工检测误差,而且可提升检测效率。

参考文献:

- [1] 侯云龙,陈健,崔正果,等.大豆种子蛋白组分研究及育种应用进展[J].东北农业科学,2023,48(6):59-63.
HOU Y L, CHEN J, CUI Z G, et al. Research progress on soybean seed protein components and their application in breeding[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(6): 59-63. (in Chinese)
- [2] 程彤,吕紫佳,于德彬,等.东北地区大豆种质资源耐密抗倒性综合评价及品种筛选[J].东北农业科学,2024,49(6):11-17.
CHENG T, LYU Z J, YU D B, et al. Comprehensive evaluation of high-density tolerance and lodging resistance of soybean germplasm resources and variety screening in Northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(6): 11-17. (in Chinese)
- [3] 袁舟航,郝晓燕.我国大豆食品加工产业发展的短板制约与优化建议[J].粮油食品科技,2025,33(2):1-8.
YUAN Z H, HAO X Y. Short board constraints and optimization suggestions for the development of China's soybean food processing industry[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 1-8. (in Chinese)
- [4] MASUDA T, GOLDSMITH P D. World soybean demand: an elasticity analysis and long-term projections[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2009, 37(6): 1755-1759.
- [5] 崔晓培,郑金焕,胡冬梅.大豆种皮裂纹的研究进展[J].大豆科学,2019,38(4):656-663.
CUI X P, ZHENG J H, HU D M. Research progress on soybean seed coat cracking[J]. Soybean Science, 2019, 38(4): 656-663. (in Chinese)
- [6] 陈猛.国产大豆与进口大豆质量对比分析[J].质量与认证,2024(5):53-56.
CHEN M. Comparative analysis of quality between domestic soybean and imported soybean[J]. China Quality Certification, 2024 (5): 53-56. (in Chinese)
- [7] 马春芳,王彩华,刘军,等.高蛋白高膳食纤维豆腐生产工艺[J].食品工业,2020,41(5):44-47.
MA C F, WANG C H, LIU J, et al. Production technology of tofu with high protein and high dietary fiber[J]. The Food Industry, 2020, 41(5): 44-47. (in Chinese)
- [8] KANG B K, SEO J H, JO H, et al. High-density linkage map reveals QTL for type-I seed coat cracking in RIL population of soybean *Glycine max* L. Merr.[J]. Euphytica, 2020, 216(10): 153.
- [9] YAKLICH R W, BARLA-SZABO G. Seed coat cracking in soybean[J]. Crop Science, 1993, 33(5): 1016-1019.
- [10] OKABE A. Inheritance of seed coat cracking and effective selection method for the resistance in soybean *Glycine max*[J]. JARQ(Japan), 1996, 30(1): 15-20.
- [11] LIU H L. Inheritance of defective seed coat in soybeans[J]. Journal of Heredity, 1949, 40(12): 317-322.
- [12] LISKER N, BEN-EFRAIM A, HENIS Y. Fungi growing on stored soybeans and their significance in lipid breakdown[J]. Annals of Applied Biology, 1985, 107(1): 117-126.
- [13] 汪自强,唐桂香,王政逸.春大豆裂皮种子的活力及其与病原菌的关系[J].浙江农业学报,1996(1):61-62.
WANG Z Q, TANG G X, WANG Z Y. Vigor of cracked spring soybean seeds and its relationship with pathogens[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 1996(1): 61-62. (in Chinese)
- [14] 崔晓培,胡冬梅,郑金焕.种皮裂纹对大豆苗期生长及籽粒性状的影响[J].大豆科技,2021(1):27-34.
CUI X P, HU D M, ZHENG J H. Effects of seed coat cracking on seedling growth and seed traits of soybean[J]. Soybean Science & Technology, 2021(1): 27-34. (in Chinese)
- [15] DARWISH O, LI S, MAY Z, et al. A searchable database for the genome of phomopsis longicolla(isolate MSPL 10-6)[J]. Bioinformatics, 2016, 12(4): 233.
- [16] 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.
- [17] 邱丽娟,常汝镇.大豆种质资源描述规范和数据标准[M].北京:中国农业出版社,2006:56
- [18] SRINIVASAN A, ARIHARA J. Soybean seed discoloration and cracking in response to low temperatures during early reproductive growth[J]. Crop Science, 1994, 34(6): 1611-1617.
- [19] MOUNTS T L, LIST G R, HEAKIN A J. Postharvest handling of soybeans: effects on oil quality[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1979, 56(10): 883-885.

- [20] YANG D, NAKAMURA T, KALAISELVI S, et al. Genetic analysis of net-like cracking in soybean seed coats[J]. *Euphytica*, 2003, 133(2): 179–184.
- [21] 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.
- [22] TAKAHASHI R. Association of soybean genes *I* and *T* with low-temperature induced seed coat deterioration[J]. *Crop Science*, 1997, 37(6): 1183.
- [23] TAKAHASHI R, ASANUMA S. Association of *T* gene with chilling tolerance in soybean[J]. *Crop Science*, 1996, 36(3): 1755–1759.
- [24] 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.
- [25] ZHU Q, ESCAMILLA D M, WU X, et al. Identification and validation of major QTLs associated with low seed coat deficiency of natto soybean seeds(*Glycine max* L.)[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2020, 133(11): 3165–3176.
- [26] FRANCIS D, BARLOW P W. Temperature and the cell cycle [J]. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1988, 42: 181–201.
- [27] SUNADA K. Soybean grain quality as affected by low temperature treatments in plants(color of hilum, seed coat cracking)[J]. Report of the Hokkaido Branch, Crop Science Society of Japan and the Hokkaido Branch, Japanese Society of Breeding, 1982, 22(22): 34.
- [28] KUŹNIAR P, SZPUNAR-KROK E, FINDURA P, et al. Physical and chemical properties of soybean seeds determine their susceptibility to mechanical damage[J]. *Zemdirbyste Agriculture*, 2016, 103(2): 183–192.
- [29] YASUI T, TODA K, YAMADA T, et al. Seed coat cracking of soybean(*Glycine max* L. Merr.) after soaking and cooking[J]. *Cereal Chemistry*, 2017, 94(4): 717–722.
- [30] MARIANI V C, PERUSSELLO C A, CANCELIER A, et al. Hot-air drying characteristics of soybeans and influence of temperature and velocity on kinetic parameters[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2014, 37(6): 619–627.
- [31] WANG F, SUN X, LIU B, et al. A polygalacturonase gene PG031 regulates seed coat permeability with a pleiotropic effect on seed weight in soybean[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2022, 135(5): 1603–1618.
- [32] MATSUMURA H, LIU B, ABE J, et al. AFLP mapping of soybean maturity gene E4[J]. *Journal of Heredity*, 2008, 99(2): 193–197.
- [33] XU H, GUO Y, QIU L, et al. Progress in soybean genetic transformation over the last decade[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1–33.
- [34] SONG J, GUO Y, YU L J, et al. Progress in genes related to seed-coat color in soybean[J]. *Hereditas(Beijing)*, 2012, 34(6): 687–694.
- [35] SHELAR V R, SHAIKH R S, NIKAM A S. Soybean seed quality during storage: a review[J]. *Agricultural Reviews*, 2023, 44(1): 1–10.
- [36] 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): 659–670.
- [37] WATANABE S, XIA Z, HIDESHIMA R, et al. A map-based cloning strategy employing a residual heterozygous line reveals that the GIGANTEA gene is involved in soybean maturity and flowering[J]. *Genetics*, 2011, 188(2): 395–407.
- [38] SUN L, MIAO Z, CAI C, et al. GmHs1-1, encoding a calcineurin-like protein, controls hard-seededness in soybean [J]. *Nature Genetics*, 2015, 47(8): 939–943.
- [39] 吕锟.大豆耐密植评价方法建立及耐密植种质资源筛选[D].合肥:安徽农业大学,2022.
- [40] 李新茹,姚瑶,邢国杰,等.大豆光周期适应性的调控机制及基因编辑改良研究进展[J].*东北农业科学*,2025,50(3):41–49.
- LI X R, YAO Y, XING G J, et al. Research progress on regulatory mechanism of photoperiod adaptability and gene editing improvement in soybean[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2025, 50(3):41–49. (in Chinese)
- [41] 陈浩.大豆施肥管理分区实时划分及变量喷施液态肥控制方法研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2024.
- [42] 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.
- [43] YAMAGUCHI N, TAGUCHI-SHIOBARA 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.
- [44] FUNATSUKI H, OHNISHI S. Recent advances in physiological and genetic studies on chilling tolerance in soybean[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2009, 43(2): 95–101.
- [45] 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—A Research Journal*, 2014, 34(4): 289.
- [46] VANUTRECHT D, BERN C J, RUKUNUDIN I H. Soybean mechanical damage detection[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2000, 16(2): 137–141.
- [47] PINTO T L F, MONDO V H V, GOMES-JÚNIOR F G, et al. Image analysis in the evaluation of mechanical damage in soybean seeds[J]. *Tropical Agricultural Research*, 2012, 42(3): 310–316.
- [48] 汪六三,黄子良,王儒敬.基于近红外光谱和机器学习的大豆种皮裂纹识别研究[J].*农业机械学报*,2021,52(6):361–368.
- WANG L S, HUANG Z L, WANG R J. Identification of soybean seed coat cracking based on near-infrared spectroscopy and machine learning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 361–368. (in Chinese)
- [49] 张茜.大豆发芽过程中营养成分变化对豆芽产出比影响的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2024.
- [50] 赵星棋,郭泰,王志新,等.不同种衣剂对大豆种子萌发期及出苗期的影响[J].*中国种业*,2024(3):103–107. (下转第12页)

- SUN Y T, LIU T P, LONG W J, et al. Breeding and seed production techniques of high-quality and multi-purpose glutinous sorghum sterile line 72A[J]. Horticulture and Seedlings, 2023, 43(7): 83-85. (in Chinese)
- [9] 于淼,石贵山,李海青,等.糯高粱杂交种‘吉杂238’的选育及轻简化栽培技术[J].分子植物育种,2024(22):7477-7483.
- YU M, SHI G S, LI H Q, et al. Breeding and simplified cultivation techniques of glutinous sorghum hybrid ‘Jiza 238’[J]. Molecular Plant Breeding, 2024(22): 7477-7483. (in Chinese)
- [10] 孙远涛,刘天朋,龙文靖,等.高单宁糯高粱不育系1609A的选育及繁殖制种技术[J].中国种业,2023(9):147-150.
- SUN Y T, LIU T P, LONG W J, et al. Breeding and seed production techniques of high tannin glutinous sorghum sterile line 1609A[J]. China Seed Industry, 2023(9): 147-150. (in Chinese)
- [11] 孙美红,梁笃,郭琦,等.优质食用高粱新品种晋白糯1号的选育[J].育繁制种,2024(8):131-134.
- SUN M H, LIANG D, GUO Q, et al. Breeding of a new high-quality edible sorghum variety ‘Jinbainuo 1’[J]. Seed Breeding and Production, 2024(8): 131-134. (in Chinese)
- [12] 张静,张玲玉,郭鑫月,等.酿造高粱新品种汉青矮早5号的选育[J].耕作与栽培,2023,43(4):114-115.
- ZHANG J, ZHANG L Y, GUO X Y, et al. Breeding of a new sorghum variety, Hanqing Dwarf Early No.5[J]. Tillage and Cultivation, 2023, 43(4): 114-115. (in Chinese)
- [13] 孙远涛,龙文靖,李元,等.高配合力宜机收糯高粱不育系54A的选育[J].中国种业,2024(2):121-125.
- SUN Y T, LONG W J, LI Y, et al. Breeding of the sterile line 54A of high-yielding and suitable for mechanical harvesting glutinous sorghum[J]. China Seed Industry, 2024(2): 121-125. (in Chinese)
- [14] 张元卿,程庆军,高海燕,等.中早熟酿造高粱新品种晋杂54号的选育[J].育繁制种,2023(7):90-91,95.
- ZHANG Y Q, CHENG Q J, GAO H Y, et al. Breeding of a new early-maturing sorghum variety for brewing, Jinza 54[J]. Seed Breeding and Production, 2023(7): 90-91, 95. (in Chinese)
- [15] 张岩,陈燕萍,徐李娜,等.高粱新品种凤杂18号的选育[J].东北农业科学,2018,43(3):5-7.
- ZHANG Y, CHEN Y P, XU L N, et al. Breeding of a new sorghum variety Fengza 18[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2018, 43(3): 5-7. (in Chinese)
- [16] 杨微,高悦,李继洪,等.高粱雄性不育系吉2055A的创制与应用[J].东北农业科学,2023,48(2):23-26.
- YANG W, GAO Y, LI J H, et al. Creation and application of sorghum male sterile line Ji 2055A[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(2): 23-26. (in Chinese)
- [17] 杨微,侯佳明,高明超,等.早熟矮秆酿酒高粱杂交种吉杂149选育报告[J].东北农业科学,2018,43(4):5-6.
- YANG W, HOU J M, GAO M C, et al. Breeding report on early maturing, dwarf, and wine-making sorghum hybrid Jiza 149[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2018, 43(4): 5-6. (in Chinese)
- [18] 赵德,杨微,梁军,等.酿造用高粱杂交种吉杂163的选育过程及栽培与繁殖技术[J].现代农业科技,2023(11):23-25,29.
- ZHAO D, YANG W, LIANG J, et al. Breeding process, cultivation, and seed reproduction techniques of the brewing sorghum hybrid Jiza 163[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(11): 23-25, 29. (in Chinese)

(责任编辑:王 昱)

(上接第7页)

- ZHAO X Q, GUO T, WANG Z X, et al. Effects of different seed coating agents on soybean seed germination and seedling emergence[J]. China Seed Industry, 2024(3): 103-107. (in Chinese)
- [51] LEMES E M, CATAO H C R M. Soybean seed coat cracks and green seeds—predisposing conditions, identification and management[J]. Seeds, 2024, 3(1): 133-148.
- [52] 范元芳,王娟淑,杨梅,等.四川省大豆种质资源收集与鉴定评价[J].植物遗传资源学报,2024,25(6):931-944.
- FAN Y F, WANG X S, YANG M, et al. Collection, identification and evaluation of soybean germplasm resources in Sichuan Province[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(6): 931-944. (in Chinese)
- [53] 孙宪印,钱兆国,丛新军.红墨水染色法快速测定种子活力[J].现代种业,2002(3):41.
- SUN X Y, QIAN Z G, CONG X J. Rapid determination of seed viability by red ink staining method[J]. Modern Seed Industry, 2002(3): 41. (in Chinese)
- [54] GEBREGZIABHER B S, SHENG-RUI Z, AZAM M, et al. Natural variations and geographical distributions of seed carotenoids and chlorophylls in 1167 Chinese soybean accessions[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(9): 2632-2647.
- [55] 朱星鑫.大豆种质资源数据库的创建及应用[D].长春:吉林农业大学,2024.
- [56] 朱亚琪.浅析基于机器视觉的大豆种子品质检测与分选[J].现代食品,2024,30(2):8-10.
- ZHU Y Q. Brief analysis on quality detection and sorting of soybean seeds based on machine vision[J]. Modern Food, 2024, 30(2): 8-10. (in Chinese)
- [57] LIU D, NING X, LI Z, et al. Discriminating and elimination of damaged soybean seeds based on image characteristics[J]. Journal of Stored Products Research, 2015, 60: 67-74.
- [58] 陈满,倪有亮,金诚谦,等.基于机器视觉的大豆机械化收获质量在线监测方法[J].农业机械学报,2021,52(1):91-98.
- CHEN M, NI Y L, JIN C Q, et al. On-line monitoring method of soybean mechanized harvesting quality based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1):91-98. (In Chinese)

(责任编辑:范杰英)