

郑磊,姚小丹,张仙美,等. 抗落粒芝麻新品种选育进展与启示[J]. 江苏农业科学,2022,50(1):20-27.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.01.004

抗落粒芝麻新品种选育进展与启示

郑磊,姚小丹,张仙美,吴鹤敏,刘美茹,卫松山

(漯河市农业科学院,河南漯河 462300)

摘要:芝麻机械化联合收获已成为我国芝麻生产迫在眉睫的突出问题,其根本解决途径为选育适宜机械收获的芝麻品种。抗落粒是适合机械化收获芝麻品种的首要条件,相关研究具有重要的生产意义,是目前研究的重点方向。本文从闭蒴品种和半闭蒴品种 2 种抗落粒类型出发,对控制闭蒴基因的类型、应用以及不足进行了阐述;对半闭蒴品种选育中涉及的蒴果性状、抗落粒评价方法和育成品种进行了详细的综述;在此基础上,探讨了国内外相关研究对我国芝麻机械化育种带来的思路和启示。

关键词:芝麻;机械化;抗落粒;育种;进展;启示

中图分类号: S565.303 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)01-0020-07

在我国逐步实现工业化、城镇化、现代化这一经济社会发展大背景下,农业机械化是农业生产的必然要求。芝麻生产机械化程度低,特别是不能机械化联合收获已成为迫在眉睫的突出问题。机械化收获根本解决途径是宜机收芝麻的选育。目前芝麻品种开裂是完全机械化的首要障碍。裂蒴型品种在干旱天气下可达 60%~70% 的产量损失,降水后损失更大^[1]。大多数国际芝麻学术会议都将抗裂蒴品种选育作为最重要的方向之一^[2]。

抗裂蒴只是衡量籽粒保持能力的一个方面,抗落粒更为确切。从全球范围看,美国适合机械化收获的芝麻品种已经商品化,对抗落粒品种研究较为透彻。保加利亚、泰国、以色列、中国等国家近年来也开展了抗落粒芝麻品种的研究、选育与应用,其中有成功也有挫折。已发表的文献缺乏详实的抗落粒芝麻育种专题综述。笔者回顾了国内外、特别是美国的抗落粒芝麻品种的研究进展,以期为我国抗落粒芝麻育种提供思路和启示。

裂蒴性分为裂、轻裂、不裂 3 种^[3]。开裂品种不抗落粒;不裂(即闭蒴)品种不会落粒;轻裂(即半闭蒴)具有一定的抗落粒性。

1 闭蒴品种的选育

闭蒴品种不会落粒,芝麻育种家们最初目标都是选育闭蒴品种,除了寻找自然突变体,也用诱变的方法来创造突变体。

1.1 *id* 闭蒴突变体

Langham 在委内瑞拉发现了一个隐性单基因控制闭蒴的自然突变体,将其命名为 *id* (indehiscent) 基因^[4]。Nafie 研究后认为,*id* 闭蒴性状有 2 种不同的遗传模式:一些组合中表现为单基因控制,还有一些组合中表现为双基因控制^[5]。刘艳阳等利用 *id* 闭蒴材料,采用超级群体分离分析法 (Super-BSA),将闭蒴基因 *Sümdl* 定位在第 8 连锁群上。该基因属于 *KANDI* (*KAN*) 基因家族。与裂蒴亲本相比,闭蒴亲本中 *Sümdl* 基因第 2 个外显子及第 2 个内含子连接处缺失一段 14 bp 的序列 (TACAGGTAGCTATG), cDNA 序列缺失 77 bp,导致翻译提前终止,从而产生闭蒴性状^[6]。通过原核表达,证实了突变基因在翻译过程中提前终止^[7]。Zhang 等利用 *id* 闭蒴材料,采用关联分析的方法,将闭蒴基因定位在第 8 连锁群上,在闭蒴卷叶突变体中有 20 个核苷酸 (CAGGTAGCTATGTATATGCA) 突变为 6 个核苷酸 (TCTTTG),最终导致翻译提前终止^[8]。

Ashri 等发现隐性纯合 *id* 品种缝线处中果皮细胞层数的增加是闭蒴的主要原因,认为反复的吸湿和干燥造成蒴果壁上的张力不同,引起蒴果开裂,而这些增加的细胞阻止了其开裂^[9]。Day 研究认为,中央维管束和外果皮之间中果皮细胞层数的增

收稿日期:2021-05-08

基金项目:国家特色油料产业技术体系建设专项(编号:CARS-14);

河南省重大科技专项(编号:201300110600)。

作者简介:郑磊(1982—),男,河南鲁山人,硕士,副研究员,研究方向为芝麻遗传育种。E-mail:zml2518@163.com。

加是造成闭蒴的原因^[10]。

id 突变体具有基因多效性: 茎秆扭曲; 叶背和花上有凸起; 子叶和真叶呈杯状^[2]; 雌蕊短而弯曲导致大量不育, 产量低。*id* 闭蒴材料经过改良, 大多数问题都得到了改善^[11]。美国育种家相继选育出 genesa2、Rio、Palmetto 3 个品种^[12]。这些品种蒴果太硬, 很多蒴果在联合收割机里无法打开, 无法有效脱粒。如果加大机器转速, 则造成籽粒受损, 游离脂肪酸增加, 种子酸败^[2]。为此, Culp 提出了聚合蒴果薄皮基因和 *id* 基因来解决脱粒问题^[13]。Langham 详细介绍了美国芝麻育种家利用 *id* 突变体的所做的一些尝试^[2]; Kinman 利用薄皮基因的策略, 选育出 Baco、Delco。蒴果外壳薄, 更容易造成蒴果开口端卷曲, 无法有效脱粒。Yermano 通过增加蒴果长度, 以期增加蒴果在联合收割机的接触面积, 进而使蒴果开裂脱粒。他选育出的 *id* 闭蒴品种 R234 蒴果长 4.0 cm。蒴果长度的增加, 不但会造成更多的表面断裂, 而且脱粒时种子须移动更长的距离。Smith 从 R234 材料中选择了 Eli 和 Roy, 并改进了含有薄皮基因的 Baco。但上述品种仍然没有成功, 存在产量和酸败的问题。Sesaco 公司成立后, 在 Kinman 留下的材料中选出带有薄皮和 *id* 闭蒴基因的 S01 (Sesaco 01)。由于收获时种子受损严重, 只用了 1 年。S01 是 Sesaco 唯一的闭蒴品种^[12]。

1.2 无缝闭蒴(*gs*) 突变体

Langham 等发现了第 2 个闭蒴突变体(*gs*)^[2], 它也是隐性单基因控制的。因为没有缝线, 2 个心皮看上去只有 1 个心皮。*gs* 蒴果比 S01 果皮更薄, 在联合收割机里同样很难打开, 经过 5 年的选育, 最终被放弃^[11]。

1.3 诱变闭蒴突变体

在联合国粮农组织 (FAO) 和国际原子能机构 (IAEA) 的帮助下, 许多种植芝麻的发展中国家通过诱变来提高籽粒保持能力^[14]。Cagirgan 利用 γ 射线诱变出 8 个闭蒴突变体和 1 个半闭蒴突变体^[15]。Uzun 等利用群体分离分析法 (BSA) 法找到了与突变体连锁的扩增片段长度多态性标记 (AFLP)^[16]。Diouf 等利用钴 60, 300 戈瑞 (Gy) 和 400 Gy 辐射剂量, 获得 9 株闭蒴突变体, 他们认为 γ 射线的有效突变再加上有足够大的群体时, 容易获得闭蒴突变体^[17]。而 Mussi 等通过用 300 Gy 和 400 Gy 2 种剂量的 γ 射线照射开裂芝麻品种 Escoba Blanca, 没有产生闭蒴突变体^[18]。Wongyai 等用 500 Gy γ 射线

和 EMS 进行种子处理获得了延迟开裂和抗落粒芝麻突变体^[19]。Maneekao 等用 γ 射线和快中子获得了半闭蒴突变体^[20]。Peleg 等利用 EMS 诱变获得了闭蒴品系 S-91, 并将闭蒴基因定位在第 8 连锁群上, 利用鉴定出的单核苷酸多态性 (SNP) 开发了高分辨率熔解标记^[21]。

1.4 其他的闭蒴品种

Georgiev 等开展了芝麻机械化育种研究^[22], 起初, 研究人员认为只有闭蒴品种才能实现机械化收获^[23]。Georgiev 等从俄罗斯引进闭蒴芝麻资源 87010。利用该资源进行杂交, 后代出现诸如叶片变形、不育等不良性状, 然后经过多次杂交选择, 去除许多不良性状^[24]。经过多年努力改良, 他们发布了闭蒴品种 Viktoria。该品种的缺陷是田间干燥时间长, 成熟时, 闭蒴使种子的水分保持在 15% 以上; 产量较低, 采用联合收割机收获, 有 25% ~ 50% 的蒴果不能脱粒, 机械损伤的种子达到 50%^[23]。针对闭蒴材料, Ishpekov 等建议采用两段式收获^[25]: 先从植株上收获蒴果, 再将蒴果晾晒后脱粒 2 个步骤。其中, 如何收获蒴果尚未解决; 干燥后的蒴果脱粒已经解决——Kollev 等研发一种专门脱粒设备, 91% 的种子能够脱粒^[26]。

2 半闭蒴品种的选育

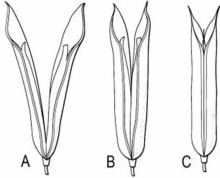
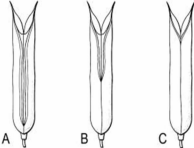
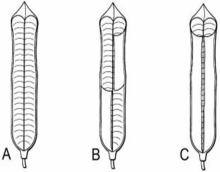
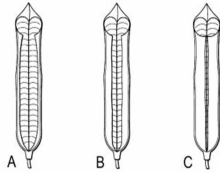
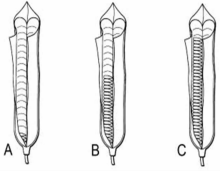
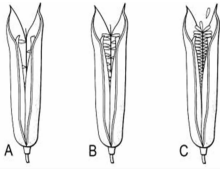
单基因控制的闭蒴具有完全的籽粒保持能力, 但存在着难以脱粒的问题。育种家们逐步认识到芝麻机械化联合收获需要满足 2 个条件: 一是收获前籽粒保持在蒴果内不能丢失, 二是在联合收割机内, 能够以最小的力将籽粒释放, 种子完好。籽粒保持和籽粒释放过多过少都不能实现机械化收获。育种家们通过聚合多个蒴果性状来实现二者的平衡^[27], 即选育蒴果顶部稍微开口的半闭蒴品种。

2.1 美国 Sesaco 公司半闭蒴品种研究进展

2.1.1 半闭蒴品种所需的蒴果性状 为了提高芝麻的籽粒保持能力, Sesaco 公司研究了芝麻干燥后蒴果的形态, 确立了蒴果开口 (capsule opening)、心皮开裂 (capsule split)、假膜完整性 (capsule membrane completeness)、假膜附着性 (capsule membrane attachment)、果皮收缩 (capsule constriction)、籽粒胎盘附着 (capsule placenta attachment) 6 个主要蒴果性状^[11], 每个性状评分为 0 ~ 8 级, 具体见表 1。

籽粒胎盘附着 (TP) 和蒴果开口 (TO) 是影响籽粒保持最重要的 2 个性状, 心皮开裂 (TS) 和果皮收

表 1 Sesaco 公司确定的适合机械化育种的 6 个蒴果性状^[12]

序号	蒴果性状	定义	图示	性状作用
1	蒴果开口(TO)	干燥后蒴果顶端开口量	 1 级:顶端开口几乎至底部,4 级:为开裂一半,7 级:几乎不开裂,8 级:不开裂。图 C (等级 7)是首选条件	蒴果应该在顶端开口。然而,如果开口太大容易失去种子,如果开口太小,蒴果内种子容易发霉,也会影响种子的释放
2	心皮开裂(TS)	心皮间裂开的程度,露出膜但不露出种子	 1 级:心皮沿缝线开裂几乎至底部,4 级:开裂一半,7 级:几乎不开裂,8 级:不开裂。图 A(等级 1)是首选条件	这一特性对籽粒保持不重要,但对籽粒释放至关重要
3	假膜完整性(TM)	心皮内假膜缺失的程度	 0 级:无假膜,1 级:大部分假膜不完整,4 级:一半的假膜不完整,7 级:完整的假膜,8 级:假膜没有一个孔,籽粒不能流出。图 C(等级 7)是首选条件	心皮内有假膜。它们应完整且尽可能宽,以提供一个表面将蒴果的两半固定在一起
4	假膜附着性(TA)	假膜和胎盘之间的分离量	 0 级:无假膜,1 级:分离距离大,4 级:分离距离中等,7 级:分离距离小。图 C(等级 7)是首选条件	心皮内有假膜。它们应尽可能宽,以提供 1 个表面,将膜盒的两半固定在一起。在蒴果进入联合收割机之前,膜间黏附力应足够强,以将 2 个部分固定在一起,但在蒴果进入联合收割机时,膜间黏附力应足够弱,以释放种子
5	果皮收缩(TC)	蒴果在种子周围的收缩程度,由胎盘被去除后剩余在蒴果中的种子量来表示	 1 级为去除胎盘后剩余很少种子,4 级为剩余一半种子,7 级为剩余大部分种子。中间(B)和右侧(C)之间的中间位置(等级 5)是首选条件	当蒴果干燥时,有一些蒴果,蒴果壁在种子周围收缩,将其固定。收缩有助于种子保持,但如果收缩过度,种子释放就会出现问題
6	籽粒胎盘附着(TP)	种子在胎盘上的附着强度	 1:极少的胎盘附着,4:部分胎盘附着,7:胎盘附着优良。图 C(等级 7)是首选条件	有些品系的种子从胎盘上脱落,而另一些品系的种子则附着在一起

注:图片参照文献[12],A 是 1 级,B 是 4 级,C 是 7 级。

缩(TC)是籽粒释放最重要的 2 个性状^[28]。所有性状都是相关的:假膜完整性(TM)和假膜附着性(TA)可以互补;非常好的籽粒胎盘附着(TP)可以

补偿更多的蒴果开口(TO)^[12]。

Sesaco 公司通过聚合以上 6 个性状培育出一系列半闭蒴品种,具体见表 2^[28]。

表 2 Sesaco 公司所用的具有 6 个蒴果性状的资源材料^[28]

材料	蒴果开口(TO)	心皮开裂(TS)	假膜完整性(TM)	假膜附着性(TA)	果皮收缩(TC)	籽粒胎盘附着(TP)	不良商品性状
118	✓	✓	✓				✓
700	✓	✓	✓	✓			✓
701	✓	✓	✓	✓			✓
702	✓	✓	✓	✓			✓
111	✓		✓		✓		✓
G8							
191		✓	✓			✓	
192		✓	✓			✓	
193		✓	✓			✓	

注:✓表示材料具有该蒴果性状。

2.1.2 抗落粒性的评价方法 上述蒴果性状主要用于新材料鉴定和亲本选择,随着各个性状的聚合,需要一种衡量后代品系籽粒保持总体效果的方法。Langham 先后采用籽粒保持评级(HLD)^[2]、直立抗落粒能力测试(USR)和倒置抗落粒能力测试(ISR)^[2]、振动筛抗落粒能力测试(SSR)^[28]、击鼓测试(drum test)^[29]等多种评价方法。

2.1.2.1 HLD 评级 HLD 评级由蒴果直立籽粒保持(capsule upright hold, TI)、蒴果倒置籽粒保持(capsule inverted hold, KE)和蒴果开口(capsule opening, TO)3 个指标的数字等级组成。TI 为干燥后植株上蒴果的种子量;KE 为从植株上轻轻取下蒴果,倒置旋转后留下的种子量。每个数字在 0~8 的范围内(0 = 无种子;1 = 少量种子;4 = 半蒴种子;7 = 大量种子;8 = 所有种子);TO 为蒴果开口。KE 是关键评级,其缺点为主观性强,同时评级会随着评价时间的推移而发生改变。因此,须要制定一种客观量化的评价方法^[2]。

2.1.2.2 USR 和 ISR 方法 Langham 制定了可以量化的 USR 和 ISR 方法^[30]。方法为取 10 个生理成熟绿色蒴果,直立放置干燥后,对掉落的种子称质量(m_1),模拟在植株直立情况下的落粒。然后模拟联合收割机收割作业,将蒴果旋转后从 15 cm 高落下 3 次,对掉落的种子称质量(m_2),留在蒴果里的种子称质量 m_3 ^[11]。总质量 = $m_1 + m_2 + m_3$ 、USR = (总质量 - m_1)/总质量、ISR = m_3 /总质量^[30]。

KE 评级和 USR 方法都不能进一步地进行区分籽粒保持优异的品系。此外,KE 评级和 USR 方法取决于测量时间,测量越早,得分越高^[30]。于是

Sesaco 公司制定了 SSR 方法。

2.1.2.3 SSR 方法 在所有种子成熟至第 1 个蒴果干燥之间,取 10 个蒴果,测籽粒产量。3 个月过后,在同一小区内再取 10 个蒴果,测籽粒产量。二者比值称为天气抗落粒性(weather shatter resistance)。由于成熟后需等待 3 个月测量,这种方法可操作性差,Sesaco 公司利用往复振荡器来模拟天气的影响。经过试验,确定了振幅 3.8 cm,频率 250 次/min,振荡 10 min,籽粒保持效果与天气抗落粒性相差最小,模拟了环境因素对籽粒保持的影响^[28]。SSR = (总质量 - m_1 - m_2)/总质量,用百分比表示。其中 m_1 和总质量与 ISR 公式对应含义相同, m_2 与 ISR 公式中的 m_2 有区别,表示蒴果经过机械振动后掉落的种子。用机械振动代替 15 cm 高处掉落的操作,实现了对蒴果冲击力量的标准化,并且速度更快^[12]。

2.1.2.4 击鼓测试 击鼓试验是将手指放在距离主茎中心约 1.2 cm 的地方,用食指和中指交替快速连续击打主茎,就像击鼓一样^[12]。嗒嗒声反映果皮收缩(TC)的程度,声音大表明蒴果里的种子松动,籽粒保持性稍差^[29]。该方法用于 IND(improved non-dehiscent)品种的主观判断。

2.1.3 发布的半闭蒴品种 根据籽粒保持能力和收获方式的不同,Sesaco 公司将半闭蒴品种命名为抗落粒品种(non-shattering, NOSHA)、联合收获品种(direct combine, DC)、抗裂蒴品种(non-dehiscent, ND)、改良抗裂蒴品种(improved non-dehiscent, IND)几个阶段^[12]。芝麻抗落粒术语尚未统一。如“2.1.1”节所述,蒴果的裂蒴性状(抗裂

蒴)是实现籽粒保持能力(抗落粒)的一个方面,Sesaco 公司将抗落粒和抗裂蒴并列起来命名的方式有待商榷。

起初,Sesaco 公司制定了一个抗落粒新品种的最低要求:先用铺条机割倒铺条晾干,然后用联合收割机捡起脱粒。这些品种被称为 NOSHA。1982 年发布第 1 个 NOSHA 品种。这类品种包括 S02 (Sesaco 02)、S03、S04、S05、S06、S07、S08、S09、S10、S12、S14。

下一步是 DC 品种,可以直接用联合收割机收获。1988 年发布第一个 DC 品种。发布的 DC 品种有 S11、S15、S16、S17、S18、S19、S20 和 S21。

1997 年,ND 品种问世,其标准为 SSR > 64.9%。ND 品种比 DC 品种籽粒胎盘附着能力更强,从而表现出更加优异的抗落粒性^[12]。发布的 ND 品种有 S22、S23、S24、S25、S26、S28、S29、S55。

IND 品种为改良 ND 品种,是 Sesaco 公司发布的最新品种。它保留了 ND 品种 SSR > 64.9% 的标准,同时要求通过击鼓测试^[30]。与 ND 品种的区别在于成熟后落粒的速度更慢^[29],芝麻收获适期 1 个月,植株上 85% 蒴果没有落粒,发布的 IND 品种有 S27^[31]、S30^[32]、S32^[33]、S33^[34]、S34^[35]、S35^[36]、S36^[37]、S37^[38]、S38^[39]、S39^[40]、S70^[41]。

2.2 保加利亚半闭蒴品种研究进展

Ishpekova 等认为半闭蒴品种蒴果应具有 5 个性状:蒴果顶端开口小;心皮开裂至蒴果一半;胎盘和假膜紧贴;蒴果上部狭窄;籽粒胎盘附着^[23]。Stamatov 等发现,蒴果狭窄的位置比蒴果狭窄的程度影响更大。狭窄处与底部的距离对籽粒保持影响最大,其次为籽粒胎盘附着强度^[42]。

Ishpekova 等利用 1 个由摆锤和测量记录电子系统组成的试验装置开展籽粒保持能力评判(摆锤试验)^[23]。方法为记载成熟时自然掉落的种子质量 m_{c1} ;摆锤撞击后,蒴果在惯性作用力下一部分种子脱落,脱落种子质量 m_{c3} ,剩余种子质量为 m_{c2} 。摆锤试验与 Sesaco 公司的 SSR 方法主要区别在于,前者为对蒴果施加的是惯性作用力,而后者为对蒴果施加的是碰撞力。Ishpekova 利用 3 个指标进行评价, $i_1 = m_{c1}/(m_{c2} + m_{c3})$ 、 $i_2 = m_{c2}/(m_{c1} + m_{c3})$ 、 $i_3 = m_{c3}/(m_{c1} + m_{c2})$,并认为 i_1 反映自然脱粒种子的多少,其值高的品种不适合机械收获; i_2 反映撞击后蒴果剩余种子的多少,主要蒴果狭窄等蒴果形状引起, i_2 值高说明须要打烂果皮后脱粒; i_3 反映籽粒胎盘附着

能力, i_3 值高说明可以正常脱粒^[43]。Stamatov 等研究认为, $i_3 \geq 1.5$,狭窄处与蒴果底部距离与蒴果之比 $\geq 60\%$ 时,籽粒保持可达 100%^[42]。

Ishpekova 等发布了 3 个半闭蒴芝麻品种,分别为 Aida、Nevena 和 Valya^[23]。

2.3 中国半闭蒴品种研究进展

师立松等测量计算蒴果长、蒴果宽等 10 项指标,通过多种统计学分析,认为裂口宽可以作为芝麻抗裂蒴性鉴定评价的指标,并筛选出 11 份高抗裂蒴种质^[44]。张秀荣等选育出微裂蒴品种中芝 78 和中芝 75,大田机收获机损率分别为 14.4%、10.8%^[45]。河南省农业科学院芝麻研究中心张海洋团队研发出的半闭蒴新品系豫芝 NS610 和豫芝 ND837,具有很好的籽粒保持性状(未发表)。

2.4 其他国家半闭蒴品种研究进展

Kang 通过将芝麻倒放在袋子里,称量干燥后掉在袋子里的种子;蒴果内种子脱粒并称量,计算落粒百分比来评估籽粒保持性^[46]。Shim 等选育的 Kopoom 品种具有抗裂蒴特性^[47]。

Gar 等用 3 个抗裂蒴指标(SRC1 表示晃动植株掉落的种子数;SRC2 表示蒴果倒置后保留的种子;SRC3 表示蒴果长度与开口长度的比值)、8 个 F_2 代群体进行了数量性状基因座(QTL)定位,利用中国农业科学院油料作物研究所发布的第 1 版芝麻参考基因组,将 8 个抗裂蒴 QTL 定位在 LG3、LG5、LG6、LG7、LG11、LG15、LG16 7 个连锁群上^[48]。

Dash 等测量了 10 个指标来检测抗落粒性状:干燥前心皮开裂长度(CS1)、干燥后心皮开裂长度(CS2)、干燥前蒴果开口大小(CO1)、干燥后蒴果开口大小(CO2)、翻转后损失种子数(UN)、翻转后损失种子质量(UW)、翻转后保留种子数(RN)、翻转后保留种子质量(RW)、种子总数(PSN)、种子总质量(PSW)。通过这些指标计算 6 个参数:心皮开裂程度 $ESC = (CS2 - CS1)/CL$,其中 CL 为蒴果长;蒴果开口程度 $ECO = (CO2 - CO1)/CL$,其中 CL 为蒴果长;直立抗裂蒴性 $USR = (UW + RW)/PSW$;倒转抗裂蒴性 $ISR = RW/PSW$;果皮收缩 $CCON = RN/PSN$;振动筛裂蒴性 $SSR = (PSW - UW)/PSW$ 。参数 USR 和 ISR 的计算采用 1998 年 FAO/IAEA 曼谷会议推荐的方法,其他参数差异较大。利用该评判标准,他们筛选出 7 个籽粒保持良好的品系作为亲本使用^[49]。

泰国农业大学利用 Sesaco 20 和具有延迟开裂特性的 KUDs6111 杂交选育出 C plus 1 和 C plus 2

等 2 个籽粒保持品种^[50]。Phumichai 等认为 C plus 1 是由 2 个基因重叠作用引起,并开发出了籽粒保持性状的序列特异性扩增区标记(SCAR)^[51]。此外,Wongyai 等利用籽粒保持芝麻品系与开裂芝麻品系杂交,采用 SSR 方法进行筛选,选育出半闭蒴芝麻新品种 KU21,籽粒保持可达 98%^[52]。

3 讨论与启示

3.1 闭蒴品种的选育

闭蒴品种能够完全解决籽粒保持的问题,主要缺点是不能有效脱粒,现在已经被大多数国家的育种研究者放弃。但随着新技术的发展,特别是专用脱粒机械的研发,也许能够为解决该难题提供新的思路。这不仅需要育种家的努力,还需要机械工程师的帮助。

3.2 半闭蒴品种的选育

半闭蒴品种是蒴果籽粒保持和籽粒释放平衡的结果,既具有一定籽粒保持的特性,又可以实现有效脱粒。其缺点为籽粒有不同程度的落粒损失,随着新品种的改良,只能接近手工收割的损失率。半闭蒴品种的主要目标就是提高籽粒的籽粒保持能力,降低落粒损失率。当包括人工等成本在内,种植抗落粒芝麻比手工收割裂蒴品种效益高时,抗落粒芝麻就可以推广,半闭蒴品种是目前各国抗落粒品种研发的重点方向。

关于芝麻抗落粒品种所需的蒴果性状,美国育种家总结得最为全面。保加利亚蒴果指标与美国大体相同,主要差异为蒴果收缩变为蒴果顶部狭窄。可以肯定的是,蒴果开口大小是影响籽粒保持性极其重要的性状。半闭蒴品种顶端有一个小的开口,势必造成成熟后在大风等自然条件下落粒,因此籽粒胎盘附着,特别是顶端胎盘附着可以阻挡蒴内的种子向外流失。在蒴果开口较小的前提下,胎盘附着强度和持续时间很大程度决定了品种的抗落粒性。此外,心皮沿缝线开裂是蒴果在联合收割机中籽粒顺利无损释放的关键因素,典型的佐证例子就是 *id* 闭蒴基因和 *gs* 闭蒴基因在修饰基因作用下,出现了蒴果顶部开口的杂交后代,由于心皮没有开裂,仍有很高的籽粒受损。笔者认为,蒴果开口、籽粒胎盘附着和心皮开裂是半闭蒴必须具备的蒴果性状,其他性状有待开展重复性的甄别,以确定最佳性状。

在籽粒保持效果评价方面,Ishpekoy 等利用上

述摆锤试验^[23]、Sesaco 公司的 USR 和 ISR 方法^[2]、自然风干的方法对同一组材料进行籽粒保持的评价^[53]。笔者根据其试验结果进行了分析,Sesaco 公司方法与自然风干方法相关系数高,可以反映田间抗落粒综合表现;可能是摆锤试验的计算方法^[43]的原因[笔者认为,摆锤试验 i_2 指标和 Sesaco 的 ISR 指标可以通过 $ISR = i_2 / (1 + i_2)$ 进行换算,由于缺乏 2 种方法对同一材料评价的原始数据,不能比较二者的效果],其指标没能很好地反映田间抗落粒表现,笔者推荐 Sesaco 公司的抗落粒评价技术。对于高代抗落粒品系,先采用田间主观判断的方法(如 HLD 评级或击鼓测试),评级高的优良品系再进行 SSR 等客观评价方法,可以大大减少工作量。

半闭蒴品种的籽粒保持是几个蒴果性状共同作用的结果。笔者认为遗传分析不宜如 Gar 等所做的那样,用品种抗落粒的综合表现作为考察指标^[48]。因为籽粒保持的综合表现不是一个性状,而是几个不同但具有相关性的蒴果性状共同作用的结果,性状不同的组合形式,可能表现出相同的籽粒保持效果,用抗落粒的综合表现作为考察指标有可能得不到准确的结果。应该对涉及的各个蒴果性状进行遗传研究,找出每个性状的主效 QTL,开展分子标记辅助选择和设计育种,才有可能迅速实现几个蒴果性状的聚合,加快抗落粒新品种选育进程。

抗落粒性涉及的蒴果性状是数量性状,从美国的育种经验看,通过反复杂交逐步提高了一些蒴果性状(如籽粒胎盘附着),进而提高了品种的籽粒保持能力。中国农业科学院油料作物研究所和河南省农业科学院芝麻研究中心的抗落粒材料必将为我国芝麻机械化收获育种做出巨大贡献,同时还须要发掘更多的具有籽粒保持蒴果性状的资源,丰富的半闭蒴资源会为抗落粒芝麻品种的选育提供更多的选择和可能。

致谢:衷心感谢河南省农业科学院芝麻研究中心梅鸿献博士提供部分文献、审阅初稿并提出宝贵意见!

参考文献:

- [1] Georgiev S, Stamatov S. Technology for developing sesame cultivars, suitable for mechanized harvesting[J]. Ecology and Future, 2005, 3 (2): 82–84.
- [2] Langham D R. Shatter resistance in sesame; IAEA – TECDOC – 1195 [R/OL]. (2001–01–01) [2021–01–08]. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20139242>.

- [3]张秀荣,冯祥运. 芝麻种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [4]Langham D G. Genetics of sesame[J]. Journal of Heredity,1946,37(5):149-152.
- [5]Nafie A N. The genetic control of indehiscence and the yielding ability of indehiscent genotypes of sesame (*Sesamum indicum* L.) [D]. Riverside:University of California,1980.
- [6]刘艳阳,郑永战,梅鸿猷,等. 一种芝麻抗裂蒴性检测引物、检测试剂盒及检测方法:CN107090516B[P]. 2019-09-27.
- [7]刘艳阳,武 轲,梅鸿猷,等. 芝麻抗裂蒴基因 *SiINDI* 的克隆与原核表达[J]. 河南农业科学,2020,49(5):63-68.
- [8]Zhang H Y, Miao H M, Wei L B, et al. Identification of a *SiCLI* gene controlling leaf curling and capsule indehiscence in sesame via cross - population association mapping and genomic variants screening[J]. BMC Plant Biology,2018,18(1):296.
- [9]Ashri A, Ladizinski G. Anatomical effect of the capsule dehiscence alleles in sesame[J]. Crop Science,1964,4(2):136-138.
- [10]Day J S. Anatomy of capsule dehiscence in sesame varieties[J]. Journal of Agricultural Science,2000,134(1):45-53.
- [11]Langham D R, Wiemers T. Progress in mechanizing sesame in the US through breeding [C]//Proceedings of the Fifth National Symposium, Atlanta:ASHS Press,2002.
- [12]Langham D R. Sesame mechanization (*Sesamum indicum* L.) A family's life journey[EB/OL]. (2019-02-07)[2021-04-10]. https://www.researchgate.net/publication/330937574_MECHANIZATION_OF_SESAMUM_indicum_-_A_family's_life_journey.
- [13]Culp T W. Inheritance of papershell capsules, capsule number and plant color[J]. Journal of Heredity,1960,51(3):146-148.
- [14]Zanten L V. Sesame improvement by induced mutations[C]//Sesame improvements by induced mutations. Vienna,2001.
- [15]Cagiran M I. Mutation techniques in sesame (*Sesamum indicum* L.) for intensive management; confirmed mutant [C]//Sesame improvements by induced mutations. Vienna,2001.
- [16]Uzun B, Lee D, Donini P, et al. Identification of a molecular marker linked to the closed capsule mutant trait in sesame using AFLP[J]. Plant Breeding,2003,122(1):95-97.
- [17]Diouf M, Boureima S, Diop T, et al. Gamma rays - induced mutant spectrum and frequency in sesame[J]. Turkish Journal of Field Crops,2010,15(1):99-105.
- [18]Mussi C, Nakayama H, Oviedo de Cristaldo R. Phenotypic variability in M1 populations of sesame (*Sesamum indicum* L.) with gamma ray irradiation[J]. Cultivos Tropicales,2016,37:74-80.
- [19]Wongyai W, Saengkaewsook W, Veerawudh J. Sesame mutations induction; improvement of non - shattering capsule by using gamma rays and EMS[C]//Sesame improvements by induced mutations. Vienna,2001.
- [20]Maneekao S, Srikul N, PooSri B, et al. Sesame improvement through mutation induction for reduction of seed loss at harvest (semi - shattering capsules) [C]//Sesame improvements by induced mutations. Vienna,2001.
- [21]Peleg Z, Teboul N, Gadri Y. Sesame cultivars suitable for mechanical harvest with enhanced yield and quality: US20180359981 [P]. 2018-12-20.
- [22]Georgiev S, Stamatov S, Deshev M. Requirements to sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars breeding for mechanized harvesting[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science,2008,14(6):616-620.
- [23]Ishpekov S, Stamatov S. Overview of sesame research in Bulgaria [J]. Russian Agricultural Sciences,2019,65(1):17-24.
- [24]Georgiev S, Stamatov S, Deshev M. Selection of parental pairs in the hybridization of sesame aimed at the creation of cultivars for mechanical harvesting, applying quantitative and complex assessment of the source material [J]. Agricultural Sciences,2014,6(16):39-45.
- [25]Ishpekov S, Petrov P, Trifonov A, et al. Technologies for mechanized harvesting of sesame in Bulgaria[J]. Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources,2015,61(4):13-15.
- [26]Kollev B, Ishpekov S, Stamatov S. Mechanized threshing of sesame capsules[J]. Agricultural Engineering,2012,49(3):14-21.
- [27]Langham D R. Phenology of sesame[C]//Issues in New Crops and New Uses. Alexandria:ASHS Press,2007.
- [28]Langham D R. Method for making non - dehiscent sesame: US6100452[P]. 2000-08-08.
- [29]Langham D R. Non - dehiscent sesame IND variety Sesaco: US8507750[P]. 2013-08-13.
- [30]Langham D R. Sesame capsule descriptors (*Sesamum indicum* L.) [EB/OL]. (2020-02-18)[2021-04-01]. https://www.researchgate.net/publication/339340169_Sesame_capsule_descriptors_Sesamum_indicum_L_WP2.
- [31]Langham D R. Non - dehiscent sesame variety Sesaco 27: US7964768[P]. 2011-06-21.
- [32]Langham D R. Non - dehiscent sesame variety sesaco 30: US7847149[P]. 2010-12-07.
- [33]Langham D R. Non - dehiscent sesame variety Sesaco 32: US7855317[P]. 2010-12-21.
- [34]Langham D R. Non - dehiscent sesame IND variety Sesaco 33: US8207397[P]. 2012-06-26.
- [35]Langham D R. Non - dehiscent sesame IND variety Sesaco 34: US8507750[P]. 2013-08-13.
- [36]Langham D R. Non - dehiscent sesame IND variety Sesaco 35: US8581026[P]. 2013-11-12.
- [37]Langham D R. Non - dehiscent sesame IND variety Sesaco 36: US8586823[P]. 2013-11-19.
- [38]Langham D R. Non - dehiscent sesame IND variety Sesaco 37: US9144220[P]. 2015-09-29.
- [39]Langham D R. Non - dehiscent sesame IND variety Sesaco 38: US9167795[P]. 2015-10-27.
- [40]Langham D R. Non - dehiscent sesame IND variety Sesaco 39: US9125372[P]. 2015-09-08.
- [41]Langham D R. Non - dehiscent pygmy sesame variety sesaco 70: US8058503[P]. 2011-11-15.

刘国强,顾轩竹,胡哲伟,等. 农业土壤有机污染生物修复技术研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(1):27-33.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.01.005

农业土壤有机污染生物修复技术研究进展

刘国强¹, 顾轩竹², 胡哲伟¹, 徐建¹

(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042; 2. 江苏省农业科学院, 江苏南京 210014)

摘要:随着城市化的进展,有机污染物及其衍生物直接或间接进入到农业土壤中,对土壤生态造成严重破坏。生物修复因其操作简单、成本低、对环境扰动少及无二次污染等优势成为土壤修复领域的热点。基于此,笔者对农业土壤有机污染现状、生物修复技术及外源强化生物修复手段等几方面进行了综述。微生物是生物修复中的主要参与者,对有机污染物具有巨大的代谢能力,并能通过与物理、化学或生物因素结合的几种外源生物强化方法提高被有机污染农业土壤的修复效率,但其对目标污染物的生物利用度、种类、浓度要求较高,且易受环境条件制约。通过基因工程技术鉴定新的污染物降解基因或开发高效工程菌株是提升生物修复技术实用性的重要方向。

关键词:农业土壤;有机污染;生物修复;土壤修复;研究进展

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)01-0027-07

土壤是人类赖以生存和农业生产的基础资源,土壤环境的健康程度与农产品的安全性息息相关。近些年,伴随着化肥、农药、农膜、污水灌溉及工业污染的广泛使用,农业土壤中的有机污染物严重超标。有机污染物的疏水性使其在土壤中大量积累,

并具有致癌、致畸、致突变等毒性,以及环境持久性和生物累积性特点^[1]。有机污染物持久性积累在土壤中会影响土壤理化性和生物学特性,破坏土壤的功能性。此外,有机污染物通过食物链等途径最终富集到人体内,威胁人类健康。因此,农业土壤有机污染修复迫在眉睫。

收稿日期:2021-04-14

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0801300)。

作者简介:刘国强(1988—),男,江苏东台人,硕士,助理研究员,主要从事土壤和地下水污染防治研究。E-mail:838247836@qq.com。
通信作者:徐建,博士,副研究员,主要从事企业用地土壤环境管理研究。E-mail:33395695@qq.com。

1 农业土壤有机污染现状

农业土壤有机污染物主要来源于人类活动,常见的有机污染物包括多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons,简称 PAHs)、有机卤代物中的多氯二

- [42] Stamatov S, Ishpekova S, Deshev M, et al. Seed retaining model of non-dehiscence sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes at ripening[J]. Scientific Papers, 2020, 63(1): 541-546.
- [43] Ishpekova S. Method for assessment the susceptibility of sesame genotypes for mechanized harvesting of the seed[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2015, 21(6): 1230-1233.
- [44] 师立松, 高媛, 黎冬华, 等. 芝麻抗裂蒴性鉴定方法研究及核心种质抗裂蒴性评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3520-3532.
- [45] 张秀荣, 游均, 黎冬华, 等. 一种高效机械化联合收获芝麻的方法: CN111990063A[P]. 2020-11-27.
- [46] Kang C W. Breeding for diseases and shatter resistant high yielding varieties using induced mutations in sesame [C]//Sesame improvements by induced mutations. Vienna, 2001.
- [47] Shim K B, Kang C W, Seong J D, et al. A new sesame cultivar, Kopoom with shattering resistance, high quality and yielding[J]. Korean Journal of Breeding Science, 2007, 39(1): 114-115.
- [48] Gar O, Zuckay A, Shalev G. Quantitative trait loci (QTL) associated

- with shatter resistant capsules in sesame and uses thereof: US10577623[P]. 2020-03-03.
- [49] Dash M, Imran M, Kabi M, et al. Assessment of genetic variability for capsule shattering characters in Indian sesame[J]. Electronic Journal of Plant Breeding, 2018, 9(2): 490-501.
- [50] Wongyai W. Potential use of non-shattering in sesame for breeding and yield improvement in Thailand[C]//Proceedings of the 2004 International Conference on Sesame Science. Seoul, 2004.
- [51] Phumichai C, Matthayathaworn W, Chuenpom N, et al. Identification of a scar marker linked to a shattering resistance trait in sesame[J]. Turkish Journal of Field Crops, 2017, 22(2): 258-265.
- [52] Wongyai W, Weeravut J, Kotcha A. Development of shatter resistant in sesame variety KU. 21 [C]//Proceedings of 50th Kasatsart University Annual Conference. Bangkok, 2018.
- [53] Stamatov S, Velcheva N. Assessment of genetic diversity in sesame germplasm as an initial material for Bulgarian breeding programs[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2020, 26(5): 1047-1052.