

杨慧卿,王根全,郝晓芬,等. 糯质谷子育种研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(20):41-47.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.20.010

# 糯质谷子育种研究进展

杨慧卿,王根全,郝晓芬,王晓宇,秦玉忠,宋艳芳

(山西省农业科学院谷子研究所,山西长治 046011)

**摘要:**品质是农作物最重要的经济性状,糯性作物育种研究是当前的热点研究问题之一。国内外学者对糯性作物开展了大量的研究,并取得了丰富的研究成果。本文从糯质谷子的鉴定、我国近年来的育成品种及影响糯质谷子品质形成的因素等 3 个方面总结了糯质谷子育种的一些研究进展,同时展望了糯质谷子育种的发展前景,可为糯质谷子种质资源全面系统研究提供理论基础。

**关键词:**谷子;糯质;育种;研究进展

**中图分类号:** S515.03 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)20-0041-07

中国是谷子(*Setaria italica*)种植的发源地,距今已有 8 700 年以上的栽培历史,栽培面积约 140 万  $\text{hm}^2$ ,年产量 270 万~450 万 t,约占世界总产量的 80%。谷子脱壳为小米,小米是北方人最喜爱的主要粮食之一,小米分为粳性小米、糯性小米和混合小米。小米营养丰富、易消化吸收。小米可以用来酿酒、酿醋,五粮液、汾酒以及南方人喜欢喝的小米黄酒、日本人爱喝的清酒,主要原料都是小米,山西陈醋的主要原料也是小米,谷子的消费已逐渐以健康保健食品形式被社会公众所接受<sup>[1]</sup>。因此,受消费形式的影响,小米的商品

品质、食味品质、蒸煮加工品质、糯性等,应该成为品质育种关注的重点,也就是说谷子育种关注的品质性状应该从传统的蛋白质、脂肪含量转移到这些市场需要的品质上来<sup>[2]</sup>。

糯谷子,别称黏谷子,起源于中国,主要分布在东南亚、中国、印度、非洲中部和中亚。中国糯谷子分布地区较广,但集中分布在华北地区(山西省、河北省)、山东省、陕西省和西南的贵州省。我国有 2 万多份谷子种质资源,类型非常丰富,其中糯性谷子地方品种 2 748 份,约占 8.1%。在国外糯小米因被评为“营养之王”而列为保健食品。它还具有较高的黏滞性和良好的适口性,制成品有甜香味,加温处理的糯小米淀粉具有较高的膨胀力和透明性,糯谷子以其优良的口感、高营养价值和消化速度越来越受到人们的欢迎<sup>[3-4]</sup>。糯小米为低糖作物,含糖量较低,有利于人们身体健康,特别有利于糖尿病等人群食用;但粘谷子生产长期以来不受重视,只有个别农家零星种植,品种混杂、退化,产量水平很低。选育品质优、产量高的糯质谷子新品种,不仅可以提高谷子的经济效益,还能拓展谷子应用领域,促进谷子深加工产业化进程<sup>[5]</sup>等。因此,深入研究谷子种质资源的品质性状,筛选适用不同用途的

收稿日期:2018-06-20

基金项目:山西省农业科技成果转化与示范推广项目(编号:2017CGZH28);山西省农业科学院生物工程育种(编号:17yzgc025);山西省农业科学院谷子研究所所长青年引导专项(编号:yydx05)。

作者简介:杨慧卿(1981—),女,山西长治人,硕士,副研究员,主要从事谷子育种与栽培研究。E-mail:feier325@sina.com。

通信作者:王根全,副研究员,主要从事谷子育种与栽培研究。

E-mail:gqwang1111@163.com。

[61]徐 起. 木麻黄害虫星天牛生活习性及防治[J]. 林业科学研究,1997,10(5):102-106.

[62]康文通. 相思拟木蠹蛾生物学特性及防治研究[J]. 华东昆虫学报,1998,7(2):41-44.

[63]黄金水. 木麻黄皮暗斑螟的发生与综合防治技术研究[J]. 林业科学,1995,31(5):421-427.

[64]黄金水,杨月娥,何益良. 多纹豹蠹蛾的初步研究[J]. 中国森林病虫害,1985(4):1-4.

[65]刘新旺,孟吉金,杜月飞. 蟋蟀危害苗木的防治[J]. 农村科技,2006(8):44.

[66]童立堂. 吹绵蚧发生规律及综合防治[J]. 安徽林业科技,2007(3):40.

[67]马海宾,康丽华,江业根,等. 我国木麻黄青枯病防治研究进展与对策[J]. 防护林科技,2011(5):44-45,48.

[68]林传凤. 海岸带木麻黄防护林更新造林技术研究[J]. 海峡科学,2006(3):37-39.

[69]黄金塔. 不同林分类型木麻黄蛀干害虫发生情况调查[J]. 防

护林科技,2010(5):50-52.

[70]林炳俊. 木毒蛾的发生与防治[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报,2007,20(6):37-38.

[71]陈海妹. 几种常见虫害防治方法的探讨[J]. 热带林业,2009,37(4):40-43.

[72]黄树军. 南安市森林病虫害防治策略[J]. 福建林业,2015(1):45-48.

[73]康丽华. 木麻黄根瘤内生菌——弗兰克氏菌对青枯病菌的抑制作用研究[J]. 林业科学研究,1999,12(1):45-49.

[74]何银忠,肖艳琼. 林木病虫害防治工作存在的问题及对策[J]. 农业与技术,2013,33(4):48.

[75]黄金水,何学友,叶剑雄,等. 防护林木麻黄主要蛀干害虫控制技术综述[J]. 防护林科技,2000(增刊2):1-6.

[76]魏 红. 吹绵蚧的为害与防治[J]. 中国园艺文摘,2009,25(10):55.

[77]曹 琳,戴 亮. 黑翅土白蚁和黄翅大白蚁的诱杀技术[J]. 农业与技术,2015,35(9):83-86.

谷子种质资源,对促进谷子的品质育种、指导加工利用有着重要意义。

本文从糯质谷子的鉴定、我国近年来的育成品种及影响糯质谷子品质形成的因素等 3 个方面综述糯质谷子育种的一些研究进展,以期对糯质谷子育种提供理论依据。

## 1 糯质谷子的鉴定

谷子的品质包括营养品质和食味品质,影响小米食味品质的间接指标是胶稠度、糊化温度和直链淀粉含量。小米中主要的可食部分是淀粉,含量在 50% ~ 60% 之间,淀粉的结构和性质不仅在一定程度上决定了食品品质,还直接影响到小米的加工工艺品质<sup>[6]</sup>。直链淀粉含量是影响小米品质和食味的主要因素,它与米饭的膨胀性、柔韧性、光泽度、黏性有密切关系<sup>[7-8]</sup>。谷子的野生型为粳谷类型,随着人们对糯性品种的偏爱和选择,部分粳型品种被逐渐驯化为糯性品种。糯性谷子胚乳中直链淀粉含量低,支链淀粉含量高,米饭柔软、有光泽、黏度大、口感较好<sup>[9]</sup>,而且糯小米淀粉分子量比普通小米小 20 多倍,食用消化率比普通小米高 20% 以上。

### 1.1 外观鉴定

谷子糯和非糯的区别:从形态上看,糯小米粒小、色淡黄或深黄、质地较硬。

### 1.2 理化性质鉴定

谷子的糯和非糯从理化性质上以直链淀粉含量的高低来确定,直链淀粉含量在 2% 以下的为糯谷<sup>[10]</sup>。根据日本学者 Nakayama 等的分类,依直链淀粉含量的不同可将谷子分为 3 类:直链淀粉含量在 17.0% ~ 31.9% 之间的为非糯类型,直链淀粉含量在 7.8% ~ 16.0% 之间的为低直链淀粉类型,直链淀粉含量为 0% ~ 3.5% 的为糯质类型<sup>[11]</sup>。日本冈山大学农学院植物育种实验室的 Fukunaga 等研究也表明,显性 *Waxy* 基因编码的籽粒直链淀粉含量为 17.0% ~ 31.9%,而隐性 *waxy* 基因编码的籽粒直链淀粉含量接近于 0,子粒胚乳为糯质类型<sup>[12]</sup>。

### 1.3 细胞学鉴定

Nakayama 等采用碘-碘化钾( $I_2 - IK$ )试剂对谷子染色,通过颜色变化来鉴定谷子的糯性与非糯性,但并未说明染色的浓度范围<sup>[11]</sup>。范国灿等发现,用显微镜方法可以判别稻米直链淀粉含量的大致范围<sup>[13]</sup>,在此基础上,樊巧利等确定了快速鉴定谷子糯性与非糯性的  $I_2 - IK$  最佳浓度和方法<sup>[14]</sup>。直链淀粉含量由高到低遇碘由蓝色变成褐色。溶于水的直链淀粉借助于分子内的氢键卷曲成螺旋状,第 1 个螺距由 6 个葡萄糖残基组成。如果在淀粉溶液中加入碘液,碘分子便嵌入带螺旋结构的空隙中,并且借助范德华力与直链淀粉联系在一起,形成一种络合物,该络合物能够较均匀地吸收波长范围为 440 ~ 750 nm 的可见光,并呈现出蓝色到褐色。

### 1.4 分子鉴定

分子标记是继形态标记、细胞标记和生化标记之后发展起来的一种新的较为理想的遗传标记形式,近十几年来发展非常迅速<sup>[15-17]</sup>。白辉等为得到一种鉴别糯质谷子的分子标记方法,利用糯质分型引物对十里香基因组进行 PCR 扩增和产物测序,结果表明,十里香的糯性由 IV 型糯质基因控制,即由 TSI-2 转座子插入到淀粉合成酶基因(Si006103m)内元 1

形成;根据该糯质基因设计出 2 对 InDel 标记引物 *waxy - TSI2/int1* 和 *waxy - int1 - 1F/4R*,扩增谷子基因组 DNA,若 *waxy - TSI2/int1* 引物组合能扩增至 984 bp 的扩增片段,并且 *waxy - int1 - 1F/4R* 引物组合不能扩增至 540 bp 的扩增片段,则该材料为含 IV 型糯质基因的糯质谷子,该标记组合可以准确鉴别谷子 IV 型糯质基因<sup>[18]</sup>。Kawase 等根据插入的转座子类型及插入位点的不同(插入转座子的大小为 1 ~ 9 kb,插入位点包括了内元区或外元区),将糯质基因分为 7 种类型<sup>[19]</sup>。

总之,在糯质谷子鉴定方面的研究发现,通过手搓籽粒等外观的感觉和经验来判断,没有严格的标准,鉴定的准确性差;而利用  $I_2 - IK$  溶液检测方法只能判断出该品种是糯或粳,具体糯质类型不能判断,也不好加以利用;因此,开发优质糯性基因的分子标记作为糯质资源筛选或糯质品种选育的辅助手段既方便简单,又能缩短常规育种的时间。然而,截至目前,关于各种糯质类型谷子鉴定方面的研究还很少,今后,应加强这方面的研究,开发出鉴定不同糯质类型谷子的分子标记方法,这对于优质谷子糯质资源的利用以及为糯质品种的选育具有重要意义。

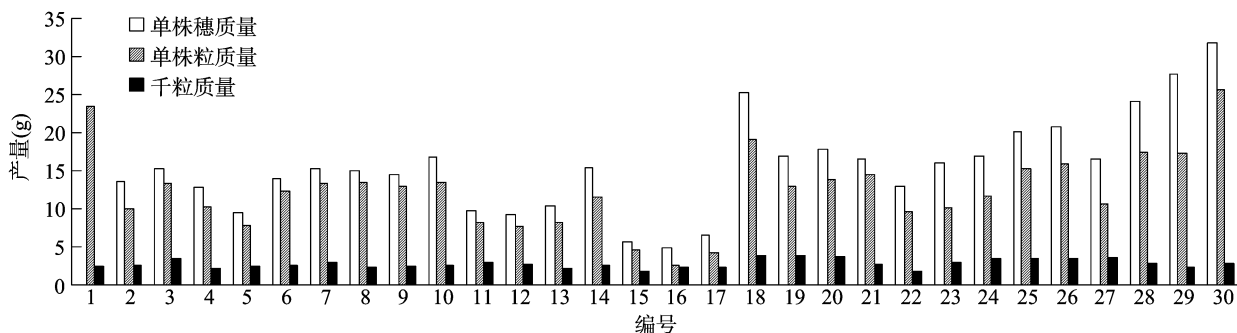
## 2 近年来我国糯质谷子育成品种概况

我国是世界上谷子资源保有量最丰富的国家,据统计,我国已鉴定编目的谷子遗传资源有 27 059 份,其中国内 26 536 份,国外 523 份;粳质品种 24 225 份,占 89.5%,糯质品种 2 834 份,占 10.5%。先后育成的糯性谷子品种有 3 741<sup>[20]</sup>、德糯 2 号<sup>[21]</sup>、张谷 8 号<sup>[22]</sup>、汾选 8 号<sup>[23]</sup>、冀创 1 号<sup>[24]</sup>、冀谷 30<sup>[25]</sup>等,均达优质米指标,是酿造黄酒、米醋的上乘原料,并可用于制作腊八粥、年糕之类餐桌调剂食品。我国谷子生态区划近 15 年的品种比较分析:西北春谷中晚熟区育成 1 个糯质谷子品种<sup>[26]</sup>、华北夏谷区育成 3 个糯质谷子品种<sup>[27]</sup>;而东北春谷区<sup>[28]</sup>和西北春谷早熟区<sup>[29]</sup>未见糯质谷子。2015 年以来在我国第 3 次全国农作物种质资源普查与收集行动中,收集到的 10 个省份谷子资源普查数据表明,截至目前,江西、广西、湖北等地糯质谷子品种资源相对丰富<sup>[30]</sup>。图 1 是我国近年育成糯质谷子的产量比较。总之,我国糯质谷子种质资源遗传多样性相对丰富,可以作为糯质谷子新品种选育的骨干亲本。

## 3 糯质谷子品质形成的影响因素

### 3.1 遗传机制

作物糯性主要取决于直链淀粉含量的高低,而直链淀粉合成受 *Waxy* 基因编码控制<sup>[31]</sup>,直链淀粉含量一般由 1 对主基因控制,高直链淀粉含量基因对低直链淀粉含量基因为不完全显性<sup>[32]</sup>或由 2 对基因控制<sup>[33-34]</sup>,遗传力高,适宜早世代选择,但有多基因控制<sup>[35-36]</sup>的报道。糯性基因(*Waxy* 或 *Wx*),又称蜡质基因,是野生型颗粒结合型淀粉合成酶(GBSS I)基因的隐性突变形式,广泛存在于多种禾谷类作物中,基因突变导致胚乳中直链淀粉和支链淀粉含量及比例发生变化,这也是糯性形成的根本原因<sup>[37]</sup>。*Waxy* 基因编码颗粒结合型淀粉合成酶(GBSS),GBSS 是合成直链淀粉的关键酶,广泛存在于大麦、小麦、谷子、玉米等作物<sup>[38]</sup>中。



数据来自中国作物种质资源信息网。横坐标编号 1~30 为糯质谷子品种: 1 为牡丹黄粘谷, 2 为锦谷 5 号, 3 为延夏谷 1 号, 4 为安革一号, 5 为安革二号, 6 为安革三号, 7 为安革四号, 8 为安革五号, 9 为安谷 30, 10 为安谷 346-11, 11 为安谷 221, 12 为安谷 396, 13 为鸭嘴粘, 14 为小乌谷子, 15 为老头半月粘谷, 16 为锦谷 11 号, 17 为锦谷 7-9, 18 为坝谷 280, 19 为坝 91-0962, 20 为坝 91-2034, 21 为 3702-2, 22 为早白糯, 23 为 7910-4-3-4, 24 为 7910-4-6, 25 为 7910-4-6-6, 26 为 7910-4-6-7, 27 为 7970-9-1-1, 28 为 8605-1-4-5-1, 29 为显 9B, 30 为显 10B

图1 近年育成的糯质谷子产量性状比较

毛丽萍等利用初级三体分析法和蛋白电泳对控制谷子胚乳糯性和非糯性的基因进行了研究,他们利用“豫谷 1 号”初级三体与所选亲本及  $F_1$  三体进行鉴定,同时进行细胞学鉴定,得出非糯与糯符合 3:1 的单因子分离规律,受 1 对等位基因控制,非糯性对糯性为完全显性;控制谷子糯性与非糯性的基因位于第 4 号染色体上,包括 14 个外显子和 13 个内含子<sup>[39]</sup>。Fukunaga 等的研究表明,在谷子中 *Waxy* 结构基因存在的 14 个外显子中 2~14 为基因编码区,通过序列预测分析发现,该基因编码蛋白含有 605 个氨基酸(包含具有 74 个氨基酸的转运肽和具有 531 个氨基酸的成熟蛋白)<sup>[12]</sup>。韩国首尔大学植物科学系的 Van 等通过对 *Waxy* 基因序列的分析表明,糯谷是由粳谷的 *Wx* 基因序列存在转座子插入引起的,同时,研究了世界不同地区谷子品种农艺性状和 *Wx* 基因序列变异,认为谷子 *Waxy* 基因序列存在 17 个非编码区的单核苷酸多态性(SNPs)和编码区的 3 个非同义 SNPs,在 exon1 - intron1 - exon2 区域连锁不平衡程度低、单倍型结构少,说明并非所有变异均导致糯性的改变<sup>[40]</sup>。日本国家农业科学研究的 Kawase 等的研究表明,糯谷从粳谷演变而来的原因是粳谷的 5 个位点分别存在转座子插入,*Waxy* 基因 exon1 - intron1 - exon2, exon3, exon10 和 exon13 位点的 11 个转座子插入引起 12 种等位变异<sup>[19]</sup>。

另有多项研究表明,*Waxy* 结构基因内部具有比较丰富的遗传多态性[SNPs 和插入缺失标记(Indels)],而多种转座子(ex1/TS12R, TS12F/ex2, ex2int2/TS17R 和 TS17F/ex4r)的插入是形成多态性的重要原因<sup>[41-43]</sup>。Fukunaga 等通过 Southern 杂交和 PCR 技术,比较了低直链淀粉含量和粳质类型谷子的 *Waxy* 基因结构,结果表明,*Waxy* 基因存在 7 种类型的限制性内切酶片段长度多态性(RFLP)转座子、大片段序列的插入以及位于 *Waxy* 基因附近的多倍体,其中独立插入片段可改变 *Waxy* 基因的表达,揭示了谷子 *Waxy* 基因影响表型的多源性<sup>[12]</sup>。陈晓敏等以引进的 53 份谷子为材料,对 *Waxy* 基因的 exon2 - exon4 区间进行了 SNP 位点检测,结果显示,非糯、低直链淀粉含量和糯质类型频率分别为 22.6%、54.7% 和 9.4%<sup>[44]</sup>。郭世华等通过对糯质与非糯谷子 *Waxy* 基因的 exon4 - exon9 区间进行 RT-PCR 分析表明,在糯质品种红粘谷和非糯品种赤谷 4 号 exon4 - exon9 区间的 cDNA 序列编码

的氨基酸序列中检测出 6 个氨基酸变异,非糯品种丰田 501 出现 3 个氨基酸变异<sup>[45]</sup>。孙宇燕等明确了春谷子 *Waxy* 基因的序列变异,研究中非糯品种赤谷 4 号在 6 815 位点和 6 816 位点都有 AA 的插入,且均在第 3 外显子上,其直链淀粉含量为 20.10%,表现为非糯;利谷 21 直链淀粉含量为 13.78%,为低直链淀粉含量类型,在编码区的外显子中未检测到 SNP 位点,但在非编码区 473~493 位点之间缺失大片段 TGTGGA GTGGATGGGGGT;糯质类型 A2-1 不育系共检测到 SNP 位点 22 处,其中有 5 处位于外显子上,结果说明,并非 *Waxy* 基因结构变异均导致谷子为糯质,非糯、低直链淀粉含量和糯质类型在外显子上的 SNP 位点分别为 17、22、8 个<sup>[46]</sup>。李涛等探讨了糯谷子 *Waxy* 基因序列多态性及其与禾谷类作物的相似性,采用特异 PCR 扩增产物测序和 DNASTar 软件分析糯谷子“十里香”*Waxy* 基因序列变异以及与小麦、玉米、水稻、糯谷子 *Waxy* 基因序列的相似性,以非糯类型“赤谷 16”的 *Waxy* 基因作为参考序列,GenBank 提取的糯谷子“十里香”*Waxy* 基因为测试序列进行比对,绘制了小麦、玉米、水稻、糯谷子 4 种禾谷类作物 *Waxy* 基因序列系统进化树;糯谷子“十里香”与小麦、玉米、水稻 *Waxy* 基因序列相似性分别为 26.8%、25.8%、25.5%<sup>[47]</sup>。综上所述,对糯性与非糯基因结构序列比较的研究较多,而针对不同类型的糯性基因结构多态性研究较少。今后,应加强对不同类型 *Waxy* 基因序列多态性的研究,通过分析 *Waxy* 基因序列的多态性为谷子遗传多样性及优质糯性谷子品质育种提供试验依据。

### 3.2 生态因素

谷子的品质性状主要是谷子品种自身的遗传特性及其周围的环境因素共同作用的结果,不同研究表明,尽管品种的遗传特性是品质的决定因素,但环境条件的变化对作物品质的影响也很大<sup>[48-49]</sup>,除遗传因素外,环境条件对直链淀粉含量也有显著影响,这些环境因子包括气候、温度、光照和水分等,另外,不同的栽培技术也会对直链淀粉含量有不同程度的影响。因此,可以通过改变谷子直链淀粉的含量相应地改变谷子的糯与非糯性,从而达到谷子品质改良的目的。

3.2.1 气候 近年来,气候变化及其生态、环境效应已成为科学家研究的焦点<sup>[50]</sup>。气候的任何变化都会对农业生产活动造成不同程度的影响<sup>[51-52]</sup>。沈士博等利用稻田开放式空

气中臭氧浓度增加 (Free Air gas Concentration Enrichment, FACE) 平台,在开放稻田条件下进行试验,以常规粳稻和杂交粳稻为供试材料,结果表明,适度臭氧胁迫使稻米垩白明显增加,胶稠度显著下降,但对 2 研究品种稻米直链淀粉含量和糊化温度均无显著影响,2 研究品种趋势一致<sup>[53]</sup>。李国瑜等研究了积温和降水量对抗拿捕净除草剂和糯性谷子新品种生长发育的影响,结果发现,谷子苗期对积温的反应比较敏感,拔节到抽穗阶段及全生育期降水量对谷子生长发育的影响较大<sup>[54]</sup>。

**3.2.2 温度** 由于全球气候变暖,近年来极端天气事件频发,对农业的影响越来越大<sup>[55]</sup>,作物生长发育过程中,特别是在关键生育时期如果遭遇不利的气象条件,将导致作物的产量及品质降低<sup>[56]</sup>。温度反常现象势必会对作物的生长、产量和品质的形成以及品种的适宜种植区域等产生重要的影响。蒋洪波等研究发现,抽穗开花期温度对产量构成因素的影响存在品种间基因型差异;与高温相比,低温对食味品质的影响更大,与常温下的稻米食味品质之间的差异达到显著水平<sup>[57]</sup>。

**3.2.3 土壤水分** 目前,在土壤水分对稻米直链淀粉含量影响方面的报道相对较少,蔡一霞等的研究表明,随着土壤水势的增加,水稻直链淀粉含量有增加的趋势但差异不显著<sup>[58]</sup>。但徐正浩等研究发现,随着水分含量的降低,水稻直链淀粉含量逐渐增加,且差异达到显著水平<sup>[59]</sup>。另外,蔡一霞等还报道,同一品种水稻在水作条件下比旱作条件下的直链淀粉含量略高<sup>[60]</sup>。

### 3.3 栽培措施

在研究作物生长环境与品质的关系时,既要重视土壤、气候等环境条件对作物品质形成的重要作用,也要研究施肥等农业措施对作物品质的定向调控,在大范围内,气候等综合生态条件对作物品质影响较大,但在小范围内,水肥条件对作物品质影响较大。不同年份、不同生态条件、不同栽培措施对谷子品质都有较大的影响<sup>[61]</sup>。吕晓飞通过研究不同宽窄行配比对谷子生长发育及籽粒产量和品质的影响发现,宽窄行 (40 cm + 20 cm) 种植条件有利于谷子各器官中积累的干物质及氮素向籽粒中转运,有助于蛋白质含量和灰分含量的增长,对提高籽粒品质起到了促进作用<sup>[62]</sup>。龙九州等以黔东南地方种施秉糯谷子为供试品种开展密度试验,结果表明,贵州黔东南谷子栽培的最佳密度为 60 万株/hm<sup>2</sup>,为谷子的规范生产提供了科学依据<sup>[63]</sup>。

其他因素如播期、施肥等对谷子籽粒品质也有一定的影响。Zhu 等研究了播期和地点对南粳 46 稻米品质及 RVA 谱的影响,随着播期的推迟,蒸煮食用品质下降;随着地点的南移,南粳 46 稻米加工品质、外观品质和蒸煮食用品质总体均呈先降后升的变化趋势;不同性状对地点和播期的反应不同,直链淀粉含量居两者之间<sup>[64]</sup>。张素梅研究了播期和密度对籽粒品质的影响,随着播期的推迟,谷子总淀粉含量呈先增加后减少的变化趋势,说明适当早播能够提高谷子总淀粉含量;不同密度处理对谷子总淀粉含量的影响差异达到极显著水平,从不同密度对谷子总淀粉含量影响的趋势来看,表现为谷子总淀粉含量随密度的增加呈减少的趋势<sup>[65]</sup>。张喜文等通过在晋东南屯留县试验点进行试验发现,随着施氮量的增加,

谷子籽粒蛋白质含量、直链淀粉含量、胶稠度均增加,籽粒中的粗脂肪、总淀粉、全磷含量则随施氮量的增加而下降<sup>[66]</sup>。赵晶研究了喷施钙肥对米质的影响,随钙肥浓度的逐渐增大,谷子直链淀粉、水分含量呈逐渐下降趋势<sup>[67]</sup>。史关燕等的研究表明,喷多效唑的最佳时期为谷子出苗后 9 叶期;喷施多效唑的最佳浓度为 0.4% ~ 0.5%;喷施多效唑后不会影响晋谷 21 号的谷子产量和小米品质<sup>[68]</sup>。张素梅的研究表明,喷施适宜的腐殖酸钾浓度能够改善谷子光合特性,提高谷子产量及蛋白质、淀粉含量;在谷子孕穗期喷施腐殖酸钾的浓度以 0.2% 为宜<sup>[69]</sup>。穆婷婷等的研究表明,适量的外源硒对谷子生理特性提升、营养品质改善和产量提高具有促进作用,也有利于富硒功能食品谷子的生产;综合分析,抽穗期喷施亚硒酸钠 67.84 g/hm<sup>2</sup> 为谷子叶面喷施硒的最佳施用期和最佳施用量<sup>[70]</sup>。李丹的研究表明,土壤含水量和氮的交互作用对谷子粗蛋白含量影响达到显著水平,同时,磷和钾交互作用及氮和磷的交互作用对谷子粗蛋白含量的影响均达到极显著水平<sup>[71]</sup>。郝科星等的研究表明,氮肥施用量的增加可以显著提高谷子产量以及蛋白质和碳水化合物的含量,但降低脂肪、纤维含量;磷肥施用量的增加有利于提高谷子产量以及蛋白质和纤维的含量,但会降低脂肪含量;钾肥施用量的增加有利于提高谷子产量以及灰分、碳水化合物、脂肪、纤维的含量,但会降低蛋白质的含量<sup>[72]</sup>。冯梦喜等通过盆栽试验对贵州省糯谷子干物质积累和肥料营养需求特征进行研究,结果表明,谷子干物质积累主要集中在生长中后期;在谷子的全生育期中,植株对 N、P、K 的吸收呈双峰曲线特征,植株全生育期对 N、P、K 的吸收比例为 1.00 : 0.09 : 0.49,每生产 100 kg 谷子分别需纯 N、纯 P、纯 K 3.53、0.31、1.72 kg<sup>[73]</sup>。

另外,稻谷在收获之后储藏过程中,温度、水分、储藏时间等都可能直接影响到直链淀粉含量<sup>[74]</sup>,从而影响稻谷的品质。张兴亮研究了在气体浓度为 8% O<sub>2</sub> + 20% CO<sub>2</sub>、8% O<sub>2</sub> + 30% CO<sub>2</sub>、8% O<sub>2</sub> + 50% CO<sub>2</sub>、8% O<sub>2</sub> + 80% CO<sub>2</sub>,环境温度 15 ℃,贮藏时间为 5 个月条件下,稻谷食味品质及其相关理化指标的动态变化,结果表明,在 80% CO<sub>2</sub> 气调储藏条件下,稻谷陈化度最低,能较大程度抑制不溶性直链淀粉含量和脂肪酸含量的上升趋势,有利于保持稻谷最佳的食味品质<sup>[75]</sup>。吴莉莉等对不同储藏条件下普通籼稻和优质籼稻在储藏过程中直链淀粉含量的变化以及在相同储藏条件下粮仓中不同部位稻米直链淀粉含量的变化情况进行了研究,结果表明,不同品种稻谷直链淀粉含量随着储藏时间的延长呈现上升趋势,普通籼稻直链淀粉含量明显高于优质籼稻;储藏温度对直链淀粉含量的影响不显著;在相同储藏条件下,粮仓中不同部位的直链淀粉含量变化差异不显著;储藏时间与直链淀粉含量变化呈显著正相关关系<sup>[76]</sup>。

此外,稻谷收获后要及时干燥,否则会对后续的稻谷生产加工和保藏产生重要影响。王永进等综述了稻谷干燥技术及工艺、稻谷干燥品质研究方面所取得的成果,并探讨了干燥工艺与稻谷干燥品质之间的关系,以期对稻谷干燥技术的研究提供参考<sup>[77]</sup>。杨慧萍等的研究证实,高温会阻止淀粉粒吸水、膨胀和糊化,使可溶性蛋白含量下降,降低食味品质,而低温影响较小;高温会减少支链淀粉含量,增加直链淀粉含量,使得稻谷营养品质受损<sup>[78]</sup>。因此,干燥过程中应尽量避免高

温时间过长。

### 3.4 与其他品质及 RVA 谱的相关关系

随着人们生活水平的不断提高,小米的食用品质越来越受重视,选育食用品质优异的谷子品种成为谷子育种工作者的一项重要任务。小米直链淀粉含量是影响米饭适口性的重要因素,直链淀粉在淀粉总量中所占的比例直接关系到稻米的蒸煮品质和食用品质<sup>[79]</sup>。通常直链淀粉的含量与米饭的柔软性、黏性、滋味、光泽等呈高度负相关关系,也就是说,直链淀粉含量较高的话,蒸煮时吸水多,米饭干燥蓬松,色泽暗,冷后发硬,食味差<sup>[80]</sup>;而直链淀粉含量低于 2.0% 时,则成为糯稻。樊巧利等的研究表明,糯质类型的小米不容易煮熟,非糯类型容易煮熟,糯谷子的米胶长度均小于非糯类型<sup>[14]</sup>。刘利成等的研究显示,直链淀粉含量是导致食味品质较差的主要因子,并与食味值呈极显著负相关关系<sup>[81]</sup>。陈能等的研究进一步指出,蛋白质含量对直链淀粉含量有负面影响<sup>[82]</sup>。孙艺丹的研究表明,谷子直链淀粉含量与含水量及蛋白质、脂肪、纤维素的含量呈负相关关系;谷子营养品质与直链淀粉相关程度由大到小依次是碳水化合物含量、灰分含量、纤维含量、含水量、脂肪含量、蛋白质含量;灰分含量是影响谷子直链淀粉含量、胶稠度的重要因素<sup>[83]</sup>。王丹丹等对 50 份谷子品质性状的相关性分析表明,直链淀粉含量与糊化温度和蛋白质含量分别呈显著正相关和极显著负相关关系,直链淀粉含量越低,糊化温度越低而蛋白质含量越高,说明低直链淀粉含量类型具有相对较低的糊化温度和较高的蛋白质含量,选择蛋白质含量较高的品种有利于增强胚乳的糯性<sup>[84]</sup>。而徐正进等对 95 个水稻材料的研究表明,蛋白质含量与食味值呈极显著负相关关系,直链淀粉含量与食味值呈正相关关系<sup>[85]</sup>。因此,随着研究的深入,发现直链淀粉含量对米饭的适口性并没有起决定性作用。借助快速黏度分析仪(rapid viscosity analyzer, RVA)获得的淀粉黏滞谱是米粉匀浆在加热-高温-冷却过程中黏滞性发生一系列变化形成的曲线,淀粉黏滞谱与稻米的蒸煮食味品质密切相关,目前被认为是评价稻米食味品质的重要指标<sup>[86-89]</sup>。

淀粉 RVA 谱特征值作为描述淀粉特性的综合指标已被广泛应用到稻米品质的评价中。大量研究表明,RVA 谱特征值与直链淀粉含量紧密相关。陈书强的研究表明,蒸煮食味品质与 RVA 谱特征值的相关性最高,同时指出峰值黏度为最重要的指标<sup>[90]</sup>。李刚等认为,低直链淀粉含量或糯稻材料的蒸煮品质与淀粉黏滞谱特性密切相关,且水稻品种的直链淀粉含量越低,其与 RVA 谱特征值的关系越密切,并指出,对水稻品种直链淀粉含量高低分级后再研究稻米蒸煮性质与淀粉黏滞谱特性间的关系是必要的<sup>[89]</sup>。Wang 等利用反义 Wx 基因构建遗传背景相同直链淀粉含量不同的转基因系,并对各系进行 RVA 谱分析,结果发现,直链淀粉含量不仅影响 RVA 谱特征值,还影响 RVA 曲线的变化趋势<sup>[91]</sup>。张欣等的研究表明,稻米的直链淀粉含量与最高黏度呈极显著负相关关系,最高黏度与食味值显著正相关,认为崩解值能较好地表示食味值<sup>[92]</sup>。金正勋等的研究结果则显示,灌浆中、后期最高黏度、最低黏度与食味值呈极显著正相关关系;而灌浆前期最高黏度、崩解值与食味值呈正相关关系,与最低黏度则呈负相关关系<sup>[93]</sup>。因此,选育直链淀粉含量较低的优质糯谷,在测定

直链淀粉含量的基础上再辅以 RVA 谱的测定是非常有必要的。

## 4 展望

从古至今人们非常重视糯米的应用,古人称糯米为五谷之王,有补肾健脾之功效。近年来,以杂粮为主,包括糯米等作为补充和调节的营养保健食品愈来愈多地进入人们的膳食结构中。由于糯米质地松软、营养丰富、美味可口,已成为都市居民高品质、调剂生活的时尚食品。数千年来人们一直采用糜子糯米和小米糯米做年糕、粽子、腊八粥以及酿造黄酒。近年来,糯小米酿酒、酿醋越来越成为企业家看重的热门,在大众逐渐重视饮食平衡、各种深加工企业不断涌现之际,开展糯谷新品种选育势在必行。

糯性基因(Waxy)的存在不仅能降低直链淀粉含量,还能影响淀粉的糊化、老化、胶黏性等品质和理化特性<sup>[94-96]</sup>。Waxy 基因结构在多种禾谷类作物中已经明晰,其突变位点也是重要的功能性分子标记位点,这对于糯质种质资源的分子辅助选育提供了一条新捷径。另外,我国的糯谷种质资源遗传多样性丰富,在不改变作物遗传特性的条件下,通过合理的栽培技术或手段来适当调节灌浆期淀粉合成关键酶活性,是提高糯质谷子种质产量和改善品质不容忽视的因素。多项研究表明,RVA 谱特征值与食味值密切相关,食味品质作为稻米品质评价的重要内容,越来越受到人们的重视。因此,相信利用分子标记辅助育种方法在谷子中挖掘糯性基因,有助于全面理解糯性机制,为糯谷育种奠定基础,同时,利用直链淀粉含量与 RVA 谱特征值等其他性状的相关性进行后代选择,有助于提高选择的准确性和效率。

## 参考文献:

- [1]刁现民. 中国谷子产业与未来发展[M]//中国谷子产业与产业技术体系. 北京:中国农业科学技术出版社,2011:20-30.
- [2]刁现民,程汝宏. 十五年区试数据分析展示谷子糜子育种现状[J]. 中国农业科学,2017,50(23):4469-4474.
- [3]李顺国,刘斐,刘猛,等. 我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议[J]. 农业现代化研究,2014,35(5):531-535.
- [4]张爱霞. 谷子的营养价值[J]. 河北科技报,2014,12(18):B04.
- [5]全建章,董立,马继芳,等. 粟糯性种质资源利用与新品种选育研究[C]//2011 中国作物学会学术年会论文集,2011.
- [6]Crosbie B G. The relationship between starch swelling properties, paste viscosity and boiled noodle quality in wheat flour[J]. Journal of Cereal Sciences, 1991,13(2):145-150.
- [7]刁现民. 谷子生物技术研究成果与未来方向[J]. 河北农业科学,2005,9(4):61-68.
- [8]李荫梅. 谷子育种学[M]. 北京:中国农业出版社,1997:396-400.
- [9]程方民,杨宝平,吴平. 小样品稻米直链淀粉含量的简易测定法[J]. 植物生理学通讯,2001,37(1):45-47.
- [10]包劲松. 稻米淀粉品质遗传与改良研究进展[J]. 分子植物育种,2007,5(增刊1):1-20.
- [11]Nakayama H, Afzal M, Okuno K. Intraspecific differentiation and geographical distribution of Wx alleles for low amylose content in endosperm of foxtail millet, *Setaria italica* (L.) Beauv. [J]. Euphytica, 1998,102(3):289-293.

- [12] Fukunaga K, Kawase M, Kato K. Structural variation in the *Waxy* gene and differentiation in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.]: implications for multiple origins of the waxy phenotype [J]. *Molecular Genetics and Genomics*, 2002, 268(2): 214–222.
- [13] 范国灿, 杨梢娜. 浅析显微镜快速判别稻米直链淀粉含量[J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(4): 511–513.
- [14] 樊巧利, 张瑞, 许子清, 等. 谷子农艺品质性状的变异分析与糯性鉴定[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(30): 72–78.
- [15] 贾继增. 分子标记种质资源鉴定和分子标记育种[J]. *中国农业科学*, 1996, 4(29): 1–3.
- [16] Jia G, Liu X, Schnable J C, et al. Microsatellite variations of elite *Setaria* varieties released during last six decades in China[J]. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0125688.
- [17] Jia G, Shi S, Wang C, et al. Molecular diversity and population structure of Chinese green foxtail [*Setaria viridis* (L.) P. Beauv.] revealed by microsatellite analysis [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(12): 3645–3656.
- [18] 白辉, 李志勇, 王永芳, 等. 谷子糯质基因共分离分子标记的研究[J]. *华北农学报*, 2016, 31(4): 7–12.
- [19] Kawase M, Fukunaga K, Kato K. Diverse origins of waxy foxtail millet crops in East and Southeast Asia mediated by multiple transposable element insertions [J]. *Molecular Genetics and Genomics*, 2005, 274(2): 131–140.
- [20] 刘虎先, 徐伟义. 糯谷“3741”[J]. *植物杂志*, 1993(1): 3.
- [21] 董保柱. 优质糯谷新品种“德糯2号”选育及示范[J]. *云南农业科技*, 2004(2): 33–34.
- [22] 潘忠, 徐娅梅, 缪纯庆, 等. 糯性谷子新品种张谷8号选育及栽培技术[J]. *中国种业*, 2017(1): 74–75.
- [23] 赵海云, 陈继富, 王宏丽, 等. 春播糯谷新品种淀粉8号的选育与产品加工[J]. *中国种业*, 2010(9): 89–90.
- [24] 全建章, 董立, 马继芳, 等. 抗锈糯质谷子新品种冀创1的选育研究[J]. *河北农业科学*, 2010, 14(11): 127–128.
- [25] 夏雪岩, 师志刚, 程汝宏, 等. 糯质白米谷子新品种冀谷30的选育研究[J]. *河北农业科学*, 2010, 14(11): 123–124, 126.
- [26] 张艾英, 郭二虎, 刁现民, 等. 2005—2015年西北春谷中晚熟区谷子育成品种评价[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(23): 4486–4505.
- [27] 张婷, 师志刚, 王根平, 等. 华北夏谷区2001—2015年谷子育种变化[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(23): 4475–4489.
- [28] 李志江, 马金丰, 李延东, 等. 东北春谷区近年来谷子育成品种的评价[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(23): 4507–4518.
- [29] 张艾英, 刁现民, 郭二虎, 等. 西北春谷早熟区谷子品种十五年变化趋势及主要性状分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(23): 4496–4511.
- [30] 第三次全国农作物种质资源普查与收集行动 [EB/OL]. [2018-03-05]. [www.cgrchina.cn/?page-id=12903](http://www.cgrchina.cn/?page-id=12903).
- [31] 朱志华, 李为喜, 刘芳, 等. 谷子种质资源品质性状的鉴定与评价[J]. *杂粮作物*, 2004, 24(6): 329–331.
- [32] Chang T T, Somrith B. In: Proc. of the workshop on chemical aspects of rice grain quality [J]. Los Banos, Laguna, Philippines: IRRI, 1979: 49–57.
- [33] Mckenzie K S, Rutger J. Genetic analysis of amylose content, alkali spreading score, and grain dimensions in rice [J]. *Crop Science*, 1983, 23(2): 306–313.
- [34] Stansel J W. The influence of heredity and environment on endosperm characteristics of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Diss abst*, 1966, 27: 488.
- [35] Bollich C N, Webb B D. Inheritance of amylose in two hybrid populations of rice [J]. *Cereal Chem*, 1973, 50: 631–636.
- [36] Puri R P, Siddeq E A. Inheritance of gelatinization temperature in rice [J]. *Indian Journal of Genetics & Plant Breeding*, 1980, 40(2): 450–455.
- [37] 李祥祚, 石明, 魏心元. 禾谷类作物胚乳淀粉合成及 *Waxy* 基因研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(12): 181–186.
- [38] 耿俊丽, 胡芳名, 张党权. 蜡质基因研究进展[J]. *中南林学院学报*, 2005, 25(4): 101–104.
- [39] 毛丽萍, 高俊华, 王润奇, 等. 谷子胚乳糯性(*wx*)基因的染色体定位研究[J]. *华北农学报*, 2000(4): 10–13.
- [40] Van K, Onoda S, Kim M Y, et al. Allelic variation of the *Waxy* gene in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.] by single nucleotide polymorphisms [J]. *Molecular Genetics and Genomics*, 2008, 279(3): 255–266.
- [41] Hunt H V, Denyer K, Packman L C, et al. Molecular basis of the waxy endosperm starch phenotype in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2010, 27(7): 1478–1494.
- [42] Araki M, Numaoka A, Kawase M, et al. Origin of waxy common millet, *Panicum miliaceum* L. in Japan [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2012, 59(7): 1303–1308.
- [43] Hachiken T, Ichitani K, Kawase M, et al. Geographic distribution of *Waxy* gene SNPs and indels in foxtail millet, *Setaria italica* (L.) P. Beauv. [J]. *Genet Resour Crop Evol*, 2013, 60(4): 1559–1570.
- [44] 陈晓敏, 李书田, 杨自力, 等. 谷子 *waxy* 基因 exon2–exon4 区间序列比对分析[J]. *分子植物育种*, 2015, 13(1): 98–105.
- [45] 郭世华, 王丹丹, 孙宇燕, 等. 糯质与非糯谷子 *Waxy* 基因 exon4~exon9 区间 RT-PCR 分析[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(6): 2228–2235.
- [46] 孙宇燕, 陈晓敏, 王丹丹, 等. 春谷子 *Waxy* 基因序列变异及其 SNP 分析[J]. *分子植物育种*, 2015, 13(7): 1494–1501.
- [47] 李涛, 王宏, 任芹勇, 等. 粳糯谷子 *Waxy* 基因序列变异及其与禾谷类作物的相似性[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(12): 1–10.
- [48] 包劲松, 夏英武. 稻米淀粉 RVA 谱的基因型×环境互作效应分析[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(2): 123–127.
- [49] Bao J S, Kong X L, Xie J K, et al. Analysis of genotypic and environmental effects on rice starch. 1. Apparent amylose content, pasting viscosity, and gel texture [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(19): 6010–6016.
- [50] 孙特生, 李波, 张新时. 北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应—以准格尔旗为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 6155–6167.
- [51] Deng Z Y, Zhang Q, Pu J Y, et al. The impact of climate warming on crop planting and production in northwestern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3760–3768.
- [52] 王晓晓, 杨晓光, 孙爽, 等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3091–3102.
- [53] 沈士博, 张顶鹤, 杨开放, 等. 近地层臭氧浓度增高对稻米品质的影响: FACE 研究[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1231–1238.

- [54] 李国瑜, 陈新军, 陈二影, 等. 积温和降水量对夏谷生长发育的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 165–176.
- [55] Lobell D B, Asner G P. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields [J]. Science, 2003, 299(14): 1032–1033.
- [56] 王晓群, 杨彦龙, 张宇, 等. 不同生育阶段气象因子对玉米产量及构成要素的影响分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(30): 68–73.
- [57] 蒋洪波, 马秀芳, 吕军, 等. 抽穗开花期温度对北方粳稻产量构成因素与食味品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(18): 64–66, 70.
- [58] 蔡一霞, 朱庆森, 王志琴, 等. 结实期土壤水分对稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 601–608.
- [59] 徐正浩, 朱丽青, 徐林娟, 等. 土壤水分供给对不同水稻的产量构成及其淀粉品质的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(6): 1249–1254.
- [60] 蔡一霞, 王维, 张祖建, 等. 水旱种植下多个品种蒸煮品质和稻米 RVA 谱的比较性研究[J]. 作物学报, 2003, 29(4): 508–513.
- [61] 岳海. 不同生态环境和不同栽培管理措施对谷子品质影响研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2005: 1–43.
- [62] 吕晓飞. 不均衡种植方式对谷子光合特征及产量和品质的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2016: 1–56.
- [63] 龙九洲, 李云珍, 李星, 等. 贵州黔东南地方种施秉糯谷子栽培密度研究[J]. 现代农业科技, 2014(8): 28–29.
- [64] Zhu Z, Zhao Q Y, Zhang Y D, et al. Effects of different sowing dates and sites on grain quality and RVA profile of nanjing 46, a popular cultivar of japonica rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(11): 1946–1952.
- [65] 张素梅. 播期和密度对谷子群体光合特性及籽粒品质的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2014: 1–52.
- [66] 张喜文, 宋殿珍, 刘源湘, 等. 氮肥和氮磷配合对谷子籽粒营养品质和食味品质的影响[J]. 土壤学报, 1992, 23(3): 122–123.
- [67] 赵晶. 筛选高产优质谷子品种及喷施钙肥对米质影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014: 1–52.
- [68] 史关燕, 杨成元, 李会霞, 等. 多效唑喷施浓度及时期对谷子性状及品质的影响[J]. 农学学报, 2015, 5(8): 31–35.
- [69] 张素梅, 张瑞栋, 李靖涛, 等. 腐殖酸钾对谷子产量和品质的影响[J]. 山西农业科学, 2014, 42(9): 968–970.
- [70] 穆婷婷, 杜慧玲, 张福耀, 等. 外源硒对谷子生理特性、硒含量及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(1): 51–63.
- [71] 李丹. 水肥耦合对谷子产量和品质的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2014: 1–45.
- [72] 郝科星, 李娜娜, 候富恩. 氮·磷·钾肥运筹对谷子品质与产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(13): 51–55.
- [73] 冯梦喜, 钱晓刚, 陈开富. 贵州糯谷子干物质积累与养分需求特征[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(4): 28–30.
- [74] 张玉华. 稻米直链淀粉含量及其影响因素研究[J]. 黑龙江农业科学, 2002(3): 34–37.
- [75] 张兴亮. 高 CO<sub>2</sub> 气调贮藏对稻谷食味品质的影响[J]. 农业技术与装备, 2015(8): 7–10.
- [76] 吴莉莉, 李琦, 熊宁, 等. 不同储藏条件对稻谷直链淀粉含量变化的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2015, 12: 27–30.
- [77] 王永进, 刘坤, 陈雪云, 等. 稻谷干燥技术及品质评价的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(31): 100–102, 105.
- [78] 杨慧萍, 蔡雪梅, 陈琴. 两种温度两种干燥方式对稻谷品质的影响[J]. 粮食储藏, 2013, 42(1): 34–38.
- [79] 王玉文, 李会霞, 田岗, 等. 小米外观品质及淀粉 RVA 谱特征与米饭适口性的关系[J]. 山西农业科学, 2008, 36(7): 34–39.
- [80] 赵淑玲, 李洪, 李萍. 小米直链淀粉含量与食味品质的关系[J]. 山西农业科学, 1987, 12: 1–2.
- [81] 刘利成, 闵军, 刘三雄, 等. 湖南优质稻品种品质指标间的相关性分析[J]. 中国稻米, 2015, 21(1): 30–33.
- [82] 陈能, 罗玉坤, 谢黎虹, 等. 我国水稻品种的蛋白质含量及与米质的相关性研究[J]. 作物学报, 2006, 32(8): 1193–1196.
- [83] 孙艺丹. 不同谷子品种主要农艺性状, 营养品质与食味品质的关系[D]. 晋中: 山西农业大学, 2016: 1–46.
- [84] 王丹丹, 徐文俊, 王卓, 等. 50 份谷子营养与食味品质的聚类和相关性分析[J]. 分子植物育种, 2017, 15(3): 1043–1052.
- [85] 徐正进, 陈温福, 马殿荣, 等. 辽宁水稻食味值及其与品质性状的关系[J]. 作物学报, 2005, 31(8): 1092–1094.
- [86] 隋炯明, 李欣, 严松, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征与品质性状相关性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 657–663.
- [87] 胡培松, 翟虎渠, 唐绍清, 等. 利用 RVA 快速鉴定稻米蒸煮及食味品质的研究[J]. 作物学报, 2004, 30(6): 519–524.
- [88] 贾良, 丁雪云, 王平荣, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征及其与理化品质性状相关性的研究[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 790–794.
- [89] 李刚, 邓其明, 李双成, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征与品质性状的相关性[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 99–102.
- [90] 陈书强. 粳稻米蒸煮食味品质与其他品质性状的典型相关分析[J]. 西北农业学报, 2015, 24(1): 60–67.
- [91] Wang X Q, Yin L Q, Shen G, et al. Determination of amylose content and its relationship with RVA profile within genetically similar cultivars of rice (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*) [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(8): 1101–1107.
- [92] 张欣, 施利利, 丁得亮, 等. 稻米蛋白质相关性状与 RVA 特征谱及食味品质的关系[J]. 食品科技, 2014, 39(10): 188–191.
- [93] 金正勋, 沈鹏, 金学泳, 等. 水稻籽粒淀粉合成关键酶活性与味度及 RVA 谱特性相关分析[J]. 西南农业学报, 2005, 18(5): 67–72.
- [94] Sang Y, Bean S, Seib P A, et al. Structure and functional properties of sorghum starches differing in amylose content [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(15): 6680–6685.
- [95] Han X Z, Campanella O H, Guan H P, et al. Influence of maize starch granule-associated protein on the rheological properties of starch pastes. Part II. Dynamic measurements of viscoelastic properties of starch pastes [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(3): 323–330.
- [96] Pedersen J F, Graybosch R A, Funnell D L. Occurrence of the *Waxy* alleles *Wx<sup>a</sup>* and *Wx<sup>b</sup>* in *Waxy* sorghum plant introductions and their effect on starch thermal properties [J]. Crop Science, 2007, 47: 1927–1933.