

李令金,李才明,班宵逢,等.从加工视角关注玉米产业链中的相关环节[J].江苏农业科学,2020,48(17):47-53.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.17.008

# 从加工视角关注玉米产业链中的相关环节

李令金<sup>1</sup>,李才明<sup>1,2,3</sup>,班宵逢<sup>1,2,3</sup>,程力<sup>1,2,3</sup>,李兆丰<sup>1,2,3</sup>,洪雁<sup>1,2,3</sup>,顾正彪<sup>1,2,3</sup>

(1.江南大学食品学院,江苏无锡 214122; 2.江南大学食品科学与技术国家重点实验室,江苏无锡 214122;

3.江苏省食品安全与质量控制协同创新中心,江苏无锡 214122)

**摘要:**玉米是我国三大主要粮食作物之一,是饲料和加工业原料的重要来源,也是一种主要的可再生能源作物。玉米产业链是在玉米生产和加工过程中形成的一条涵盖多个产业环节的技术经济流程,包括育种、种植、植物保护、采收、贮藏、加工、流通和消费等环节。其中,加工环节是实现玉米价值的重要途径,但加工品质的提升不仅与加工工艺和技术有关,还与原料的自身品质有关。通过对育种环节进行创新,可赋予原料玉米特殊的加工属性,实现玉米加工制品品质的“从无到有”;通过对种植、植物保护、采收、贮藏和流通环节进行把控,可减少原料玉米加工属性的损失,避免玉米加工制品品质的“从有到无”。因此,从加工的视角,对玉米产业链中的主要环节进行考量,旨在探究加工环节之前玉米原料的品质提升途径,为玉米加工特性的改善、加工效率的提高和加工品质的提升提供思路。

**关键词:**玉米;加工;品质;产业链;品种培育

**中图分类号:** S513.09

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-1302(2020)17-0047-07

玉米是全球产量最大、产业链最长、综合利用水平高的粮食作物。通过对甜玉米和糯玉米 2 个品种的果穗进行直接加工,可获得具有营养丰富、适口性较佳、风味独特等良好品质的鲜食玉米;对玉米籽粒中各成分进行分离、提取与转化,可加工成 3 500 多种产品,涉及玉米淀粉、玉米油、玉米蛋白、变性淀粉、淀粉糖、糖醇、乙醇、有机酸、聚乳酸等玉米制品,以及酶工程、发酵工业、饲料工业等相关衍生制品,加工后的产品附加值与原料玉米相比可增加 3~400 倍,是加工程度最高的粮食资源<sup>[1-3]</sup>。伴随着我国粮食安全战略的提出和粮食生产与消费形势的不断变化,玉米产业的规模和地位逐渐壮大,正在形成“粮-饲-经-能”一体化的四元结构属性,进而对玉米加工制品的品质提出了更高要求。

玉米加工制品品质的高低取决于加工环节的工艺和技术手段,也与原料本身的品质有着密切关系。我国玉米加工工艺和技术已日趋成熟、稳定,为进一步实现玉米制品的绿色化、高值化、功能化、营养化,需对原料玉米的品质进行把控,以推动我

国玉米加工制品竞争力的提升和国家粮食安全战略的实施。目前,我国关于玉米产前、产中主要生产环节的研究与产后玉米加工品质的需求存在一定程度的脱节,鲜食玉米、玉米制品及其衍生制品的加工遭遇发展瓶颈。新时期玉米产业的发展应着力于把控产前的育种和产中的种植、植物保护和贮藏等环节,分别从源头和过程对玉米加工品质进行提升。通过分子遗传学和基因组学手段,充分了解玉米籽粒中各组分的遗传基础,采用转基因、基因编辑、倍性育种和分子育种等现代育种技术,定向改造和修饰玉米中各营养组分的生物合成基因,赋予玉米加工制品优异的理化特性和应用性能。通过合理种植、绿色植保和科学贮藏,降低营养成分损耗和真菌毒素污染,减轻后期玉米制品的加工负担,推动玉米加工的绿色化和高值化。

玉米产业链是一个整体,产后玉米的加工品质与产前和产中密切相关。因此,本研究从加工角度出发,围绕玉米产业链的各个环节,介绍与玉米加工品质提升相关的主要生产要素和实现途径,并着重对育种环节进行阐述,以期对产前和产中玉米的研究和生产提供思路。

## 1 育种环节

传统玉米品种的培育一般以产量和抗病虫害为核心,但对于玉米制品的加工而言,淀粉、蛋白

收稿日期:2019-11-05

基金项目:国家玉米产业技术体系支持计划(编号:CARS-02-32)。

作者简介:李令金(1995—),男,安徽宿州人,博士研究生,从事玉米淀粉改性与应用方面的研究。E-mail:2238009732@qq.com。

通信作者:顾正彪,博士,教授,主要从事玉米质量安全及品质评价方面的研究。E-mail:zhengbiaogu@jiangnan.edu.cn。

质、油脂等组分的得率及各组分的理化特性与玉米品种的品质直接相关。以玉米中的主要成分淀粉为例,受限於其在玉米中的总含量和存在状态,现有的生产工艺仅能在有限范围内提高淀粉得率;另一方面,由于淀粉存在固有的性能缺陷,包括溶解度低、稳定性差、易消化等,在实际生产应用中需要对其进一步改性,这不仅增加了生产成本,也由于化学试剂的添加带来了一定的安全隐患<sup>[4-5]</sup>。因此,新时期玉米品种培育应在了解玉米中各组分生物合成机制的基础上,从源头调控淀粉、油脂、蛋白质等组分的含量、分布及精细结构,培育高淀粉、高油、低水分、高分支淀粉、高直链淀粉和特殊结构淀粉玉米等专用玉米品种,促进玉米加工品质的提升。

### 1.1 玉米组分的生物合成

玉米中各组分的生物合成是一个复杂的代谢过程。以玉米中主要成分淀粉为例,其在玉米籽粒中的生物合成需要 ADP - 葡萄糖焦磷酸酶 (AGPase)、淀粉合成酶 (SS)、淀粉分支酶 (SBE) 和淀粉去分支酶 (DBE) 等酶的精准调控和协同作用<sup>[6]</sup>。首先,AGPase 以葡萄糖为底物,形成淀粉合成所需的单体原料;随后,SS 利用 AGPase 提供的单体合成直链淀粉和支链淀粉原型;而 SBE 和 DBE 则分别通过分支的创建和水解对淀粉原型进行修饰,最终形成特定精细结构的淀粉<sup>[7-10]</sup>。

玉米中各组分的生物合成过程主要受到相关酶的调控,而酶的表达与分泌则受到相关基因的调控。部分基因片段的缺失或外源基因片段的引入,会对相关酶的表达和功能产生重要影响。一方面,基因的改变会导致酶表达量的上调或下调,进而对酶催化能力产生重要影响;另一方面,所表达的酶蛋白结构中某些活性位点氨基酸可能会出现缺失或突变,不仅会导致酶结构的变异,还会导致其亚功能化或产生新的功能<sup>[7]</sup>。

### 1.2 高淀粉玉米的培育

淀粉是非常重要的工业原料,而高淀粉含量的玉米能够有效提高加工时的淀粉得率,并降低副产物的含量,进而提高加工效率和产品收益。玉米籽粒中淀粉含量的高低与生物合成阶段淀粉的合成速度有着紧密关系。淀粉的合成首先需要足够的前体物质 ADP - 葡萄糖 (ADP - Glc),该物质是由淀粉质体内的葡萄糖 - 1 - 磷酸 (Glc - 1 - P) 和 ATP 在 AGPase 催化下形成的,是淀粉生物合成过程中的限速步骤<sup>[11]</sup>。AGPase 的催化过程是一个 ADP -

Glc 供体的变构过程,受到变构效应因子调节,当 3 - 磷酸甘油酸 (3 - PGA) 存在时,AGPase 的催化活性被激活,反之,当无机磷酸盐存在时,其催化活性得到抑制<sup>[12]</sup>。因此,通过基因修饰手段提高 AGPase 或 3 - PGA 的表达量,或对 AGPase 的重要功能区域进行改造以降低其对无机磷酸盐的敏感性,是培育高淀粉玉米品种的关键。

高淀粉玉米的培育不仅要提高玉米中淀粉的总含量,同时也要降低淀粉的分离难度。淀粉的制备一般采用传统的湿磨工艺,其中,湿磨收率和可湿磨性 (分离容易程度) 是评价生产淀粉用玉米的重要指标<sup>[13]</sup>。淀粉颗粒主要由蛋白质基质包裹存在于玉米的胚乳中,胚乳又分为角质胚乳和粉质胚乳,与角质胚乳相比,粉质胚乳粉质区的细胞较大,淀粉团粒既大且圆,蛋白质基质较薄,有利于淀粉制备时浸泡时间的降低、研磨效率的提高和淀粉收率的增加<sup>[14]</sup>。因此,当玉米主要用于淀粉生产时,应培育高淀粉含量和粉质区比例大的玉米品种。

### 1.3 高油玉米的培育

玉米中除了含有淀粉、蛋白质和纤维素等主要成分外,油脂含量也占有较高的比例。玉米油富含不饱和脂肪酸、植物甾醇和生育酚等,主要分布在玉米籽粒的胚芽中,是一种健康优质的食用油脂<sup>[15-16]</sup>。其中,玉米油中的不饱和脂肪酸以多不饱和脂肪酸为主,如亚油酸;植物甾醇的含量高达 989 mg/100 g,约为橄榄油的 5 倍;生育酚含量达到 89 mg/100 g,约为橄榄油的 4 倍<sup>[17-18]</sup>。玉米油的摄入能够抑制胆固醇的内源合成,促进胆固醇排泄,改善肠道菌群混乱,从而保护高脂高胆固醇膳食造成的血脂异常和代谢紊乱,同时在预防和改善心血管疾病方面具有重要的应用潜力<sup>[19-20]</sup>。我国是食用植物油加工和消费大国,但食用油自给率连年下降<sup>[21]</sup>。大力开展高油玉米品种的培育,提高玉米油产量,能够有效改善国产油脂的自给率和营养健康水平。

三酰基甘油 (TAG) 的生物合成在玉米籽粒油的积累中起着重要作用,籽粒中油脂的积累速率与 DGAT1 的活性呈较强的正相关关系<sup>[22]</sup>。DGAT1 是一种限速酶,是催化甘油三脂生物合成中肯尼迪途径的最后一步,通过改造 *DGAT1* 基因,调控玉米籽粒中 DGAT1 的活性,可以提高并改善玉米籽粒中油的含量和组成<sup>[23-24]</sup>。Zheng 等发现,*DGAT1* 基因的异位表达 (该基因的 469 位含有苯丙氨酸),可使油脂和油酸含量分别增加 41% 和 107%<sup>[25]</sup>。目前,一

系列高油玉米品种相继问世,但均未实现大规模普及,主要是由于玉米籽粒含油量与籽粒产量呈负相关关系,不利于玉米产油商业化的实现<sup>[26]</sup>。因此,新时期的高油玉米育种应在保证玉米籽粒产量稳定的同时,提高玉米籽粒含油量。

#### 1.4 低水分玉米的培育

低水分玉米是由遗传性状决定的一类玉米品种,表现为在正常采收期条件下具有较低的水分含量。低水分玉米植株能够在生理成熟期迅速降低籽粒水分,从而缩短采收后的干燥时间,避免籽粒霉变,实现玉米加工品质的提高<sup>[27]</sup>。目前,在我国玉米主产区北方春玉米种植区,玉米采收时的平均水分含量约为 30%,而美国品种的玉米成熟后籽粒中水分低至 18%~20%<sup>[28-29]</sup>。玉米生理成熟度和籽粒成熟过程中的干燥速率(GDR)是决定玉米采收时水分含量的 2 个主要因素<sup>[27]</sup>。生理成熟度可由采收时间决定,而 GDR 则受遗传基因性状和环境的影响<sup>[30]</sup>。其中,环境因素是人为不可控因素,因此遗传基因性状的改善是提高 GDR 的关键。GDR 受加性基因效应控制,具有较高的遗传力,可实现稳定遗传。GDR 是一种难以测定的遗传性状,研究生理成熟后玉米的天然 GDR 遗传机制是寻找相关基因的基础<sup>[27]</sup>。目前,已有研究报道采用基因定位的方法将与 GDR 相关的数量性状位点定位在遗传图谱上,但具体的 GDR 调控机制仍不明确,有待进一步研究<sup>[31]</sup>。

#### 1.5 高分支淀粉玉米的培育

高分支淀粉玉米不等同于已规模化生产的高支链淀粉玉米(蜡质玉米),高分支淀粉玉米加工得到的淀粉应具有较高的分支程度,即  $\alpha-1,6$  糖苷键比例与普通玉米淀粉相比显著增加。高分支淀粉通过分支簇的空间位阻效应,延缓或抑制淀粉重结晶,可以用来替代化学改性淀粉,提高淀粉基食品的贮藏稳定性<sup>[32]</sup>。此外,通过提高淀粉的分支程度,能够阻碍消化酶的有效结合,延缓消化进程,促进慢消化淀粉和抗消化淀粉比例的提高。慢消化淀粉可以为人体持续、缓慢供能,用来加工中低血糖生成指数(GI)值的产品,改善糖尿病人的血糖应答;抗消化淀粉能够在结肠发酵产生短链脂肪酸,改善肠道菌群,预防肠道疾病,调节糖脂代谢,具有较高的功能和营养价值<sup>[33-34]</sup>。随着社会经济水平的提高和人类生活模式的改变,肥胖、糖尿病和结肠癌等问题逐渐涌现,并呈快速增长趋势,严重困扰着人类的身体健康,因而高分支淀粉玉米品种的

培育有着广阔的应用前景和 market 价值<sup>[35]</sup>。

支链淀粉的合成需要大量酶的共同作用,包括 SS、SBE、DBE 和激酶等,它们在支链淀粉的合成中发挥着不同的作用<sup>[35]</sup>。玉米淀粉颗粒中的 SBE 亚型又细分为 SBE I a、SBE II a 和 SBE II b<sup>[36]</sup>。其中, SBE II b 主要负责转移 DP 6 和 DP 7 链段,在提高淀粉的分支程度方面扮演着核心角色<sup>[37]</sup>。有报道称,在缺少 SBE II b 的玉米突变体中,支链淀粉具有较少的分支和较高比例的长链,相似的研究结果在大米淀粉中也有报道<sup>[36,38]</sup>。通过调控 SS 和 SBE 的表达水平,或基因修饰 SBE 的活性,或改变 SBE 转移链的长度等,均可制备出预期的淀粉分支结构<sup>[39]</sup>。相比于 SBE 在体内表达水平的上调, SBE 活性的改变和转移链长度的调控对淀粉分支精细结构的进一步修饰有着重要意义,是未来值得关注的研究方向。

#### 1.6 高直链淀粉玉米的培育

高直链淀粉具有抗剪切力强、成膜性好等特点,是一种重要的工业原料,可作为功能性成分、食品添加剂、药物辅料或吸水剂,用于食品、医疗、纺织、造纸、包装等行业<sup>[40-41]</sup>。此外,高直链淀粉是一类抗消化淀粉,能够抵御胃肠道中淀粉酶类物质的水解作用,是一种天然的膳食纤维,能够调节糖尿病人群的血糖应答,同时可被结肠中的益生菌作用产生短链脂肪酸,促进肠道有益菌群的生长繁殖,维护肠道健康,增加结肠血液流量,缓解结肠炎症,降低结肠癌和其他癌症的发病风险<sup>[42-44]</sup>。目前,抗消化淀粉的制备主要包括物理法、酶法和化学法等,这些制备手段工艺繁琐,存在安全隐患,且制备的抗消化淀粉在食品中的添加量受到一定限制,与具备天然抗消化特性的高直链淀粉相比,其应用性和市场竞争力基本处于劣势<sup>[44]</sup>。

与支链淀粉的生物合成不同,直链淀粉主要是由颗粒结合型淀粉合成酶(GBSS)催化合成的,当 GBSS 的表达下调时,直链淀粉的合成会受到严重抑制<sup>[6]</sup>。Yoo 等分别沉默 GBSS 基因和下调 GBSS 表达水平后,显著降低了直链淀粉的含量<sup>[45-46]</sup>。高直链淀粉玉米品种的培育可通过 2 种策略实现:通过上调 GBSS 的表达水平,直接提高淀粉颗粒中直链淀粉的含量;通过沉默 SBE 相关基因或下调 SBE 的表达水平,抑制支链淀粉的合成,可间接提高直链淀粉的相对含量<sup>[44]</sup>。相比于直接途径中酶表达水平的上调,间接途径的可操作性更强,如采用核糖核酸(RNA)干扰、反义 RNA 抑制和 SBE 相关基因

敲除等手段<sup>[44,47]</sup>。直链淀粉含量的提高仅是培育高直链淀粉玉米品种的一个方面,对高直链淀粉植株淀粉总产量的提高和直链淀粉精细结构的调控,则是进一步改善高直链淀粉应用性能和功能、营养品质的关键,也是未来的研究重点。

### 1.7 特殊结构淀粉玉米的培育

特殊结构淀粉的构建及目标玉米加工制品的制备,可以从 2 个角度出发,即功能性和营养性。通过模拟交联、醚化和酯化等化学改性手段,采用基因编辑和分子育种等技术改造玉米中的淀粉合成基因,在淀粉分子的羟基位点引入醚键、酯键等特征性官能团,可以合成天然改性玉米淀粉(马铃薯淀粉便是天然的含磷酸酯键的淀粉)。通过引入环化基因片段,合成具有较大分子内空腔的特殊结构淀粉,可用于功能因子和药物活性成分的包埋。通过引入麦芽低聚糖生成酶基因片段,可以表达出作用于淀粉分子并形成麦芽低聚糖的酶类。

玉米籽粒中各营养成分的生物合成是一个高度调控的代谢过程,需要多种酶的协同作用,而这些催化反应中所涉及的酶组成了一个复杂的基因网络,其中大多数是具有多种亚型的多基因组家族成员。玉米籽粒中相关生物合成基因的鉴定和筛选是转基因、基因编辑和分子育种等现代育种手段的前提,也是实现玉米遗传品质改善的基础。

## 2 种植环节

通过育种环节对玉米特定基因片段进行改造和修饰,虽然能够在根源上改善玉米加工品质的遗传特性,但由于受到栽培技术、土壤、气候、肥料、农药等因素的影响,玉米植株和籽粒的发育过程不完全依赖于基因的调控,导致玉米成熟后籽粒的结构、容重和营养物质组成等发生不同程度的改变,进而对其加工特性产生影响<sup>[48-50]</sup>。对于不同加工用途的玉米,应根据生长期各组分合成阶段的不同,特定调控籽粒容重大小和营养物质组成。

### 2.1 容重

玉米籽粒容重是受众多基因控制的数量性状,在影响容重的众多因素中,不同基因型玉米的特定籽粒遗传特性是决定容重的先天性因素,而种植环境的变化是影响容重的后天性因素<sup>[51-52]</sup>。容重可以真实地反映玉米的成熟度、完整度和使用价值,是国际上商品品质的评价指标,但容重的高低不等于加工的适宜程度,须要根据待加工的产品而

定<sup>[53]</sup>。研究表明,玉米籽粒的容重大小与硬度值、蛋白质含量等呈正相关关系,与淀粉含量呈显著负相关关系<sup>[54-55]</sup>。对于生产淀粉用玉米,容重过低的玉米籽粒比重较轻,很难与浸泡水充分接触,不利于浸泡工艺的进行;而容重过高的玉米籽粒中的硬质胚乳比例也较高,需要较长的时间才能达到充分溶胀,同样会给浸泡工艺带来负担<sup>[13]</sup>。

### 2.2 营养物质组成

营养物质的组成与加工之间最密切的关联是最终加工产品的收率。增施肥料可提高籽粒中粗蛋白含量、粗脂肪含量和氨基酸总量,氮、钾是增加玉米籽粒蛋白质及氨基酸含量的重要营养因子,钾肥能显著提高籽粒中粗蛋白质、淀粉、还原糖、水溶性糖、蔗糖含量<sup>[56-57]</sup>。科学合理施肥可以促进玉米的营养生长,增加玉米籽粒的有机养分,对改善玉米籽粒质量具有一定的促进作用,能明显提高玉米的品质。玉米籽粒在不同生长期的营养组分积累状态,不仅与气候、肥料等种植环境因素密切相关,也会受到组分与组分之间相互作用的影响。若灌浆前期蛋白质大量合成,淀粉的积累受到影响,导致胚乳不够充实饱满;若成熟期蛋白质大量合成,淀粉的积累基本完成,则蛋白质的积累会填充胚乳空隙使容重升高<sup>[52,58]</sup>。

## 3 植物保护环节

植物保护环节一般与种植环节相辅相成,主要是对玉米植株在种植环节可能会遭受的昆虫和病菌侵染进行防控,避免植株受到病虫害侵染,包括玉米大斑病、玉米小斑病、玉米圆斑病、玉米锈病、玉米纹枯病、玉米矮缩花叶病、玉米粗缩病、玉米黑粉病、玉米丝黑穗病、玉米茎软腐病和玉米全蚀病等<sup>[59]</sup>。病虫害的形成不仅会导致玉米产量大规模缩减,更会对玉米籽粒加工品质带来严重影响<sup>[60]</sup>。

病虫害对玉米籽粒加工品质的影响主要包括 2 个方面。首先,由于种植期间病虫害的侵染,造成成熟后的玉米籽粒携带真菌毒素污染进入储藏环节,并在储藏环节中进一步扩大污染范围。待加工玉米籽粒若存在真菌毒素污染,在正式产品加工之前须要额外脱毒,不仅会导致工艺负担的增加和加工成本的提高,同时加工产品的安全特性也无法得到保障。其次,由于植物保护措施不当,导致成熟后的玉米籽粒携带化学农药污染进入加工环节和待加工产品中。

全面防控生长期可能遭遇的病虫害威胁,合理应用植物保护措施,降低真菌毒素污染和化学农药残留,对玉米加工品质的提升有着重要意义。传统植物保护手段一般采用甲基硫菌灵、高效氟氯氰菊酯、甲基阿维菌素苯甲酸盐、多菌灵和代森锰锌等化学农药对玉米植株可能遭遇的病虫害进行防控,但却存在毒性高、易残留、易产生抗药性等缺点<sup>[59]</sup>。因此,新时期的玉米植物保护可以从以下 2 个方面进行着手:(1)开发出高效、低毒、环保的新农药或植保素,如生物合成具有抗菌特性的玉米萜类植保素,用于玉米植株的抗菌、抗虫<sup>[60]</sup>; (2)依托玉米植株的病虫害发生机制,进行生物防控,如采用白僵菌、赤眼蜂、复合生物菌粉等<sup>[61-62]</sup>。

## 4 采收环节

采收环节对玉米加工特性的影响主要由采收时期和采收方式所决定。进入灌浆期以后,淀粉合成较为迅速,随后进入乳熟期、蜡熟期和完熟期,蜡熟期后籽粒干质量一般能够达到最大值,而完熟期时,水分含量则逐渐降低,淀粉、蛋白质等物质在含量及结构上有所改变,籽粒也逐渐变硬<sup>[63]</sup>。其次,由于采收方式的不同,玉米籽粒会遭到不同程度的破坏,破损率的提高将为后期玉米制品的加工带来负担。因此,生产环节中应把握玉米的最佳采收时期,并运用适宜的采收方式,以确保后期玉米制品加工的便捷性及产品品质的提升。

### 4.1 玉米淀粉含量及结构

玉米淀粉含量决定加工后的淀粉收率,其结构则决定了淀粉的理化特性和应用性能。玉米籽粒发育过程中淀粉的合成受到多种酶的调控,且由于不同淀粉酶类在作用方式和作用时期方面存在差异,玉米籽粒中淀粉的精细结构在采收之前持续处于动态变化之中<sup>[7]</sup>。目前,关于同采收期玉米品质的报道更加关注于各组分含量的变化,对于淀粉、蛋白质等组分精细结构的研究较为缺乏,而组分的精细结构是决定其加工特性和应用性能的关键因素。因此,应加强对不同采收期各组分精细结构差异的研究,为以加工为导向的玉米籽粒的采收提供理论支撑。

### 4.2 玉米破损率

破损玉米在贮藏期间易被微生物侵袭和破坏,导致营养物质组成发生变化和毒素的积累,增加了玉米的加工负担,降低了加工收率。此外,破碎玉

米的小碎片会影响浸泡液通过玉米物料时的正常流动,使浸泡不均匀,同时,从裸露的胚乳表面冲刷下的淀粉团粒易被洗入浸泡液,导致在蒸发时淀粉团粒糊化形成黏稠的浸泡液,进一步增加了淀粉湿磨工艺的难度。

### 4.3 玉米杂质含量

玉米湿磨厂接收的大量脱芯籽粒可能含有大小不一的玉米芯、皮壳、沙子、野草种子及其他杂质,直接增加了湿磨工艺的原料预处理负担。此外,杂质的脱除能力是有限的,一些不易脱除的杂质会随着玉米浆料共同进入湿磨工艺,导致最终淀粉、蛋白类产品的纯度受到影响。

## 5 贮藏环节

玉米籽粒是具有生物活性的有机体,其呼吸作用的强度会随着贮藏过程中氧气浓度、温度和湿度等环境因素的变化而发生改变,且随着储藏时间的延长而发生自然陈化现象,导致营养物质组成及各组分的精细结构发生改变,进而对玉米的加工特性和应用性能产生重要影响<sup>[64]</sup>。充分了解贮藏期间玉米籽粒组分分布及精细结构的变化机制,并通过有效技术和手段对其进行合理调控,可为玉米制品的加工和应用方向提供理论指导。

### 5.1 营养物质组成

贮藏会影响玉米中各组分含量的变化,进而影响目标加工制品的收率。在贮藏过程中,影响玉米质量的主要因素还包括温度、水分、二氧化碳含量、氧气含量、谷物特性、昆虫、老鼠、地理位置和贮藏设施,这些因素会导致可溶性蛋白和消化性蛋白含量降低、脂肪酸增加,蛋白质和脂肪酸与直链淀粉或支链淀粉形成复合物,最终改变产品的营养特性和物理特性<sup>[65]</sup>。酶活性的改变也会引起各组分的改变,最终导致能量的损失和游离脂肪酸的产生。因此,应用适当的贮藏条件和贮藏方法抑制玉米自身的生命活动,降低营养成分的劣变,可以改善玉米的加工品质。

### 5.2 淀粉精细结构

精细结构与淀粉的理化特性密切相关,贮藏会影响淀粉的精细结构,进而影响淀粉的加工特性和应用性能。玉米籽粒中的内源酶在长期的贮藏过程中会缓慢作用于糖苷键,导致淀粉颗粒结构、晶体结构和分子结构的改变;淀粉分子之间的相互作用也一直处于动态变化之中,随着水分、温度等贮

藏环境的变化,分子链的结合方式和结晶程度会相应地发生改变<sup>[65]</sup>。贮藏时间与玉米的加工品质之间不存在严格的正相关或者负相关关系,须明确贮藏期间各组分精细结构变化的机制,并根据加工方向和产品用途选择合适的贮藏时间的玉米原料。

## 6 结语

加工视角下的玉米产业链包括育种、种植、植物保护、采收和贮藏环节,涵盖与玉米加工特性密切相关的诸多生产要素,同时也存在较多领域的研究空白。在以加工品质提升为导向的推动下,或有望改善玉米产业链生产和研究的盲目性,减轻产后玉米制品的加工负担,并赋予玉米加工制品优异的理化特性和应用性能,推动玉米加工产业的绿色化、高值化和功能化发展,为我国玉米加工制品竞争力的提升和国家粮食安全战略的实施提供新思路。

## 参考文献:

- [1] 石桂春,刘 熙. 玉米加工利用的现状与途径[J]. 玉米科学, 1998(4):68-70.
- [2] 石桂春. 美国玉米加工业的历史与现状[J]. 玉米科学, 2001(2):83-84,86.
- [3] 龚魁杰,李青,陈利容,等. 山东鲜食玉米产业发展现状与对策[J]. 山东农业科学, 2017,49(1):141-147.
- [4] Bemiller J N. Starch modification: challenges and prospects[J]. Starch - Stärke, 1997,49(4):127-131.
- [5] Waliszewski K N, Aparicio M A, Bello L A, et al. Changes of banana starch by chemical and physical modification[J]. Carbohydrate Polymers, 2003,52(3):237-242.
- [6] Zeeman S C, Kossmann J, Smith A M. Starch: its metabolism, evolution, and biotechnological modification in plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2010,61(1):209-234.
- [7] Qu J Z, Xu S T, Zhang Z Q, et al. Evolutionary, structural and expression analysis of core genes involved in starch synthesis[J]. Scientific Reports, 2018,8(1):1-16.
- [8] Cross J M, Clancy M, Shaw J R, et al. Both subunits of ADP - glucose pyrophosphorylase are regulatory[J]. Plant Physiology, 2004,135(1):137-144.
- [9] Denyer K, Waite D, Motawia S, et al. Granule - bound starch synthase I in isolated starch granules elongates malto - oligosaccharides processively[J]. Biochemical Journal, 1999,340(1):183-191.
- [10] Yamanouchi H, Nakamura Y. Organ specificity of isoforms of starch branching enzyme (Q - enzyme) in rice[J]. Plant and Cell Physiology, 1992,33(7):985-991.
- [11] Ball S G, Morell M K. From bacterial glycogen to starch: understanding the biogenesis of the plant starch granule[J]. Annual Review of Plant Biology, 2003,54:207-233.
- [12] Hannah L C. Starch synthesis in the maize endosperm[J]. Maydica, 2005,50(3/4):497-506.
- [13] 杨 平,郭景勋. 高温烘干对玉米湿法加工的影响[J]. 粮油食品科技, 2009,17(2):1-4.
- [14] 伊祖涛,张海艳. 不同玉米品种角质和粉质胚乳淀粉粒的粒度分布特征[J]. 吉林农业科学, 2015,40(4):108-112.
- [15] Moral R, Escrich R, Solanas M, et al. Diets high in corn oil or extra - virgin olive oil differentially modify the gene expression profile of the mammary gland and influence experimental breast cancer susceptibility[J]. European Journal of Nutrition, 2016,55(4):1397-1409.
- [16] Kim J Y, Kim M - J, Yi B, et al. Effects of relative humidity on the antioxidant properties of  $\alpha$  - tocopherol in stripped corn oil[J]. Food Chemistry, 2015,167:191-196.
- [17] Maki K C, Lawless A L, Kelley K M, et al. Corn oil improves the plasma lipoprotein lipid profile compared with extra - virgin olive oil consumption in men and women with elevated cholesterol: results from a randomized controlled feeding trial[J]. Journal of Clinical Lipidology, 2015,9(1):49-57.
- [18] 杨波涛,陈凤香,莫文莲,等. 我国食用植物油维生素 E 含量研究[J]. 粮油加工, 2009(9):52-55.
- [19] Maki K C, Lawless A L, Kelley K M, et al. Corn oil intake favorably impacts lipoprotein cholesterol, apolipoprotein and lipoprotein particle levels compared with extra - virgin olive oil[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2017,71(1):33-38.
- [20] 王铁非. 玉米油甾醇对高脂高胆固醇膳食仓鼠胆固醇代谢调控及肠道菌群的影响[D]. 天津:天津科技大学, 2016.
- [21] Meng G Y, Li M Y, Zhou J, et al. Analysis of production and demand of main oil plants and oils in China[J]. China Oils and Fats, 2016,41(10):1-5.
- [22] Kennedy E P. Biosynthesis of complex lipids[J]. Federation Proceedings, 1961,20:934-940.
- [23] Li Q Z, Hu L Z, Guo J J, et al. Molecular characterization of two type I acyl - CoA:diacylglycerol acyltransferase genes in maize[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2016,30(3):453-461.
- [24] Settlage S B, Kwanyuen P, Wilson R F. Relation between diacylglycerol acyltransferase activity and oil concentration in soybean[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1998,75(7):775-781.
- [25] Zheng P Z, Allen W B, Roesler K, et al. A phenylalanine in DGAT is a key determinant of oil content and composition in maize[J]. Nature Genetics, 2008,40(3):367-372.
- [26] Moro G V, Santos M F, Bento D A V, et al. Genetic analysis of kernel oil content in tropical maize with design III and QTL mapping[J]. Euphytica, 2012,185(3):419-428.
- [27] Wang Z H, Wang X, Zhang L, et al. QTL underlying field grain drying rate after physiological maturity in maize (*Zea mays* L.)[J]. Euphytica, 2012,185(3):521-528.
- [28] Zhang L G, Wang Z H, Zhang L. Analysis of combining ability of kernel dehydration rate after physiological maturity in maize[J].

- Crops, 2007(3):52–55.
- [29] Cardoso W S, Borem A, Karam D, et al. Influence of the moisture at harvest and drying process of the grains on the level of carotenoids in maize (*Zea mays*) [J]. Food Science and Technology, 2015, 35(3):481–486.
- [30] Friske E, Schuelter A, Schuster I, et al. Genetic diversity of maize lines for traits related to maturity and yield components [J]. Australian Journal of Crop Science, 2018, 12(12):1820–1828.
- [31] Sala R G, Andrade F H, Camadro E L, et al. Quantitative trait loci for grain moisture at harvest and field grain drying rate in maize (*Zea mays* L.) [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2006, 112(3):462–471.
- [32] Li W W, Li C M, Gu Z B, et al. Relationship between structure and retrogradation properties of corn starch treated with 1,4- $\alpha$ -glucan branching enzyme [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52(52):868–875.
- [33] Ren J Y, Li C M, Gu Z B, et al. Digestion rate of tapioca starch was lowed through molecular rearrangement catalyzed by 1,4- $\alpha$ -glucan branching enzyme [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84:117–124.
- [34] Li Y, Ren J Y, Liu J, et al. Modification by  $\alpha$ -D-glucan branching enzyme lowers the in vitro digestibility of starch from different sources [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107:1758–1764.
- [35] Li C, Gilbert R G. Progress in controlling starch structure by modifying starch-branching enzymes [J]. Planta, 2016, 243(1):13–22.
- [36] Yuan R C, Thompson D B, Boyer C D. Fine-structure of amylopectin in relation to gelatinization and retrogradation behavior of maize starches from 3 wx-containing genotypes in 2 inbred lines [J]. Cereal Chemistry, 1993, 70(1):81–89.
- [37] Nakamura Y, Utsumi Y, Sawada T, et al. Characterization of the reactions of starch branching enzymes from rice endosperm [J]. Plant and Cell Physiology, 2010, 51(5):776–794.
- [38] Butardo V M, Fitzgerald M A, Bird A R, et al. Impact of down-regulation of starch branching enzyme IIb in rice by artificial microRNA- and hairpin RNA-mediated RNA silencing [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(14):4927–4941.
- [39] Wu A C, Gilbert R G. Molecular weight distributions of starch branches reveal genetic constraints on biosynthesis [J]. Biomacromolecules, 2010, 11(12):3539–3547.
- [40] 张晓晓, 黄丽婕, 陈杰, 等. 淀粉基食品包装膜材料的研究进展 [J]. 包装工程, 2018, 39(3):83–88.
- [41] 陈龙凤. 高直链玉米淀粉的提取、性质与应用的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [42] Keenan M J, Zhou J, Hegsted M, et al. Role of resistant starch in improving gut health, adiposity, and insulin resistance [J]. Advances in Nutrition, 2015, 6(2):198–205.
- [43] 朱平, 孔祥礼, 包劲松. 抗性淀粉在食品中的应用及功效研究进展 [J]. 核农学报, 2015, 29(2):327–336.
- [44] Dupuis J H, Liu Q, Yada R Y. Methodologies for increasing the resistant starch content of food starches: a review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2015, 13(6):1219–1234.
- [45] Yoo S H, Jane J L. Structural and physical characteristics of waxy and other wheat starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(3):297–305.
- [46] Visser R G F, Suurs L, Bruinenberg P M, et al. Comparison between amylose-free and amylose-containing potato starches [J]. Starch-Starke, 1997, 49(11):438–443.
- [47] Wei C X, Xu B, Qin F L, et al. C-type starch from high-amylose rice resistant starch granules modified by antisense RNA inhibition of starch branching enzyme [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(12):7383–7388.
- [48] 李尚中, 樊廷录, 赵刚, 等. 旱地玉米不同覆盖栽培模式的土壤水热特征及产量品质效应 [J]. 草业学报, 2018, 27(4):34–44.
- [49] 李文阳, 王长进, 方伟, 等. 不同生育期高温对玉米子粒品质及淀粉糊化特性的影响 [J]. 玉米科学, 2017, 25(1):82–86.
- [50] 安江勇, 葛皓, 肖厚军, 等. 施用缓释肥对玉米产量及其性状和品质的影响 [J]. 西南农业学报, 2015, 28(5):2148–2153.
- [51] Johansson E, Prieto-Linde M L, Gissén C. Influences of weather, cultivar and fertiliser rate on grain protein polymer accumulation in field-grown winter wheat, and relations to grain water content and falling number [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(11):2011–2018.
- [52] 张静, 王彩红, 赵永锋, 等. 玉米种质资源子粒容重和品质性状差异性分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(5):832–839.
- [53] 王琳. 玉米容重相关性分析 [J]. 粮油仓储科技通讯, 2009, 25(3):37–38.
- [54] 郭淑春, 李学军. 用容重评定玉米质量方法的研究 [J]. 粮油储藏, 1996(5):33–34.
- [55] Ohnson L, Fox S R. Relationships among maize quality factors [J]. Cereal Chemistry, 1991, 68(6):602–605.
- [56] 姜佰文, 逢妍, 于亚利, 等. 氮钾配比对寒地玉米干物质积累、产量及品质的影响 [J]. 玉米科学, 2014, 22(1):137–142.
- [57] 刘鹏. 不同胚乳类型玉米籽粒品质形成机理及调控研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- [58] 张军杰. 玉米自交系淀粉合成及其关键酶活性变化与玉米 *sbe* 的克隆与表达 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.
- [59] 王凯. 玉米三个重要生长期植保方案研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [60] 毛红洁. CYP71Z18 在玉米蒴类植保素生物合成中的功能鉴定及应用 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [61] 刘士亮, 王颖, 杨化恩, 等. 植保关键技术对玉米产量的影响 [J]. 农业科技通讯, 2015(7):56–58.
- [62] 张影. 玉米病虫害绿色防控技术初探 [J]. 福建农业, 2015(6):135.
- [63] 郭强于, 赵贵元. 不同采收期对糯玉米子粒品质的影响 [J]. 作物杂志, 2017, 33(2):126–129.
- [64] 杨露, 赵江涛, 谭会泽, 等. 储藏玉米陈化机制及品质判定进展 [J]. 饲料研究, 2016(24):49–53.
- [65] 王文华, 郭丽. 储藏温度对玉米胚芽和胚乳生理变化的影响 [J]. 粮食与油脂, 2019, 32(5):68–71.