

高源远, MAMU Yasmeen, 刘羽嘉, 等. 淀粉直支比定量技术及其在食品领域中的应用 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 456–464. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080300

GAO Yuanyuan, MAMU Yasmeen, LIU Yujia, et al. Quantification Technologies for the Determination of Amylose/Amylopectin Ratio in Starch and Their Applications in Food Field[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 456–464. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080300

· 专题综述 ·

淀粉直支比定量技术及其在食品领域中的应用

高源远, MAMU Yasmeen, 刘羽嘉, 彭星云*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 植物蛋白与谷物加工北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:天然淀粉中含有直链和支链两种形式的 α -D-葡聚糖, 二者的相对含量不仅与淀粉的糊化、老化、凝胶等理化性质和食品功能有关, 还决定着淀粉的经济价值。淀粉直支比定量技术在含淀粉的粮谷类作物育种、淀粉的高值化利用以及食品品质保障和创新等领域具有广泛的应用。本文综述了当前食品科学研究和加工制造领域对淀粉直支比定量技术的需求, 介绍和对比了各种经典和新型淀粉直支比定量技术的原理、优缺点和适用性, 对淀粉直支比定量技术在未来食品领域的潜在应用提出展望。

关键词:淀粉, 直支比定量, 粮食分级, 谷物品质, 食品研究与加工

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)18-0456-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080300



本文网刊:

Quantification Technologies for the Determination of Amylose/Amylopectin Ratio in Starch and Their Applications in Food Field

GAO Yuanyuan, MAMU Yasmeen, LIU Yujia, PENG Xingyun*

(Beijing Key Laboratory of Plant Protein and Cereal Processing, College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Natural starch mainly consists of two forms of α -D-glucan, i.e. amylose and amylopectin. The ratio of these two components is not only related to gelatinization, retrogradation, gelation and other physicochemical properties and food functions of starch, but also determines the economic value of starch. This means, the quantification technologies of amylose/amylopectin ratio determination can be widely used in grain crop breeding, high-value utilization of starch and the quality assurance and innovation of food. In this paper, the diverse demands of the quantification of amylose/amylopectin ratio in the field of food science research and production are reviewed. The principles, pros and cons, and applications of various classic and novel quantitative technology of amylose/amylopectin ratio are reviewed and compared. The innovative application of the quantitative technology of amylose/amylopectin ratio in future food-related fields is also prospected.

Key words: starch; quantitation of amylose-to-amylopectin ratio; grain grading; cereal quality; food research and production

淀粉是食品加工中的重要原料, 主要由分支频率 0.3%~0.5% 的线性直链淀粉和分支频率 4%~5% 的分支状支链淀粉组成^[1-3]。其中直链淀粉主要以单

螺旋形式分布在天然淀粉中, 其空腔可与脂肪酸等物质通过疏水作用形成络合物^[4-5]。直链淀粉含量高的天然淀粉更难在糊化等水热作用下吸水膨胀^[6-8], 冷

收稿日期: 2021-08-26

基金项目: 国家自然科学基金 (32001650)。

作者简介: 高源远 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: gaoyuanyuan@cau.edu.cn。

* 通信作者: 彭星云 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 淀粉科学、谷物和大豆食品加工, E-mail: pengx@cau.edu.cn。

却后分子间发生双螺旋和重结晶的速度也远大于支链淀粉^[9-10],因而直链淀粉比例高的食品在淀粉糊化时增稠效果差,冷却后更易形成凝胶,直接造成淀粉质食品储藏期品质变化^[8,11]。由此可知,直链淀粉与支链淀粉在微观结构和理化性质上存在较大差异,使直链与支链成分之比(简称为“直支比”)成为决定淀粉性质和食品功能的重要因素^[12]。

研究中通常也把淀粉直支比直接以直链或支链淀粉含量的形式来表示。高直链淀粉(直支比 0.43 以上)具备糊化困难、回生速率快、易结晶的特点,能更好地抵抗淀粉酶水解作用,可用于制作具有高膳食纤维或慢消化特点的食品^[13-14];低直支比的蜡质淀粉则在高黏度和高透明度的食品中具有广泛应用^[15]。除高、低直支比的明显差异外,细微的淀粉直支比差异也可对食品品质产生巨大影响。例如稻米的直支比被认为具有影响蒸煮难易程度、米饭质地和食味品质等作用^[16];小麦淀粉的直支比可以影响面包的蓬松度和品质稳定时间^[17],也能决定面条的韧性与粘弹性^[18];小米淀粉直支比影响小米膨化食品的膨化率和水溶性^[19];青稞淀粉直支比是青稞原粮酿造适用性的重要评价指标^[20];豆类淀粉中直支比是影响粉丝弹性与蒸煮损失的重要因素等^[21]。因此,对各种范围的淀粉直支比进行定量具有重要意义。

近年来,淀粉直支比作为反映淀粉及淀粉质食品原料特性、应用和经济价值的关键指标逐渐在科学界和产业界得到重视和应用^[22-26]。为此,本文将重点分析食品研究和加工领域针对淀粉直支比定量的技术需求,介绍和比较当前得到广泛运用的淀粉直支比定量技术,以便为开展面向未来科技和产业发展的淀粉直支比定量技术创新提供参考。

1 食品领域针对淀粉直支比定量的技术需求

粮食品质划分、食品工业原料分级以及食品配方和工艺研究等领域涉及各种形式的淀粉直支比定量,贯穿了从粮食收购到淀粉质食品储藏期品质预测等食品产业链的各个环节,明确各环节中对淀粉直支比定量技术的需求可以针对性地选择淀粉直支比定量方法,提高生产效率保障产品品质。

1.1 粮食收购、分级与加工适应性评价领域

1.1.1 粮食收购 大米、小麦、玉米等粮食的品质和主要用途与其所含淀粉的直支比密切相关。粮食作物在不同产区生长时面临的微环境(温度、湿度和土壤成分等)差异巨大^[27-29],常造成其中所含淀粉的直支比产生明显区别。企业在进行原料采购时需要依据淀粉直支比判断粮食的收购价值。对于依赖全国或全球粮食原料供应的大型食品企业,将不同产区和批次的粮食进行混收混用,容易导致工艺过程和终产品品质发生波动。因而在粮食收储阶段,对淀粉直支比定量提出迅速、准确、操作简易的需求。使用便携式仪器开展淀粉直支比的准确定量,有助于提升原料收购效率,降低原料积压成本,减少优质原料被抢收

转售的风险,避免劣质原料收储入库,也便于及时安排和调整各产区的收购计划。

1.1.2 粮食品质分级 在多种粮谷类作物中,淀粉直支比已作为粮食品质分级的重要指标之一。GB/T 19266-2008^[30]中规定,优质五常大米的直链淀粉含量为 15%~20%,其食味品质与胶稠度是区分优质一等和二等大米的标志,大米的食味品质与胶稠度等品质特性与淀粉直支比的密切关联已经得到广泛证实^[31-33],这种品质划分方式实质上也是基于两种等级大米淀粉直支比的差异。基于这种理念,GB/T 22438-2008^[34]中将河南原阳大米特等与优等大米的直链淀粉含量规定为 15%~19%;GB/T 19503-2008^[35]中沁州黄优级和一级小米的直链淀粉含量在 14%~20%之间。目前,已经有越来越多的标准和研究开始将淀粉直支比作为一种评价粮食品质的量化指标^[36-39],乃至用于名优粮食产品的原产地保护。因而在粮食品质分级阶段,淀粉直支比定量的需求为准确、精细。

1.1.3 食品加工适应性评价 近年来,淀粉直支比与淀粉质食品原料加工适应性之间的联系已经被广泛探讨。常见稻米的直链淀粉含量在 0%~35%左右^[40-41],一些研究中将稻米依据直链淀粉含量划分为低、较低、中等、较高、高直支比五个类别^[42],并分别研究了这五种类型稻米对应的加工特性。低直支比(<0.05)的糯性稻米适合做粘性大、抗回生的糍粑、汤圆、麻薯等糯米粉团类制品^[43]。较低直支比(0.06~0.14)的稻米蒸煮品质较好,粘性较大,冷却后质地柔软,食味性好^[31],适合做米粥类食品。较高直支比(0.26~0.33)的稻米兼顾蒸煮性与回生性,有柔软的口感和适宜加工的强度,适合做炒饭类即食或方便食品^[44-45]。中等直支比(0.15~0.25)的稻米兼具较低较高直支比淀粉的性质,食用品质也在二者之间。高直支比(>0.33)的稻米适合作为制作米粉的原料^[46]。以淀粉直支比来评价食品原料加工特性的方法在小米上也逐渐得到应用。有报道指出,较低直支比(约 0.06~0.14)的小米兼顾软糯与蓬松口感,适宜蒸煮加工^[47];而低直支比(<0.05)的糯小米适合经膨化加工后用来做小米速食粉^[48]。总之,针对不同品种和产区的粮食开展大规模、系统性的食品加工适应性评价有利于高效利用粮食资源,提高食品加工效率和产品品质,这对淀粉直支比定量技术提出了高通量和高精确度的要求。

1.2 食品配料与工艺控制领域

1.2.1 食品配料 淀粉广泛存在于食品的各种原辅料中,发挥着提供质地、增稠、稳定、凝胶、营养等不同功能^[49]。淀粉直支比常作为食品配料过程中重要的参考指标,以便设计合理的原辅料配比来优化食品的感官品质与食品功能。通过调节直支比可获得不同营养、健康、食味品质的食品:混合谷朊粉的高直支比糙米粉面包具有更强的抗消化能力^[50],有助于降低血糖响应和为肠道提供益生元;淀粉直支比为

0.15 时重组营养强化米的稻米质构及蒸煮品质最佳^[51]。调整淀粉直支比还被广泛用于获得符合预期的食味品质: 中等直支比(约 0.20)的粳米与低直支比(<0.05)的糯米按 3:1 混合制作的方便米饭, 其外观、质地和滋、气味品质最佳, 在货架期内的老化过程也更缓慢^[45]; 不同直支比稻米在蒸煮时注意水米比搭配可以获得最佳工艺和风味^[52]; 提高速冻米面类食品配方中低直支比淀粉的含量可以有效提升产品的粘性和弹性^[53]。不同直支比淀粉在不同 pH 和盐浓度下有不同表现, 加工时依据直支比选择盐与酸碱的添加量^[54]。总之, 对各种类别和不同批次的食品原辅料以及成品进行淀粉直支比定量对于食品配方研发和优化以及品质控制都十分重要, 在此环节应用的直支比定量技术应准确、精细。

1.2.2 食品工艺控制 淀粉直支比是决定含淀粉食品加工要求的重要因素。加工中常需要依据原料的直支比特性来控制合理的工艺参数。稻米淀粉的直支比是米粉生产中的关键控制指标, 不仅影响着米粉本身的品质, 还与米浆调制研磨参数、螺杆挤出熟化条件、老化和干燥工艺参数等密切相关^[55]。原料的淀粉直支比在白酒加工中与蒸煮加工条件有关; 加工高直支比的高粱等粮食原料需要合理延长蒸煮时间, 控制淀粉的糊化度, 便于后续发酵^[56]。淀粉直支比也决定着含淀粉物料在加工物料的输送和升降温等过程中的流变学特性、可压缩性、热传导性等物理特性^[57-60], 进而影响着实现有关工艺过程的设备选择和参数设置。对生产线上的含淀粉食品加工物料进行淀粉直支比的实时在线定量有助于实现食品加工过程的精准控制和智能化发展, 在此环节的直支比定量技术有智能、实时、准确的需求。

1.3 食品品质预测和检测

1.3.1 货架期品质预测 影响淀粉类食品货架期的主要因素是水分活度、微生物繁殖及淀粉回生。除微生物安全性之外, 淀粉老化是对淀粉类食品食味品质劣变影响最大的因素, 会大大缩短有关产品的品质保持时间(即最佳赏味期)^[61-62]。近年来, 已经有众多研究基于淀粉直支比或直(支)链淀粉含量建立了食品货架期品质变化的预测模型。通过直链淀粉含量建立鲜湿米粉货架期品质的预测模型^[63], 指导了长货架期鲜湿米粉产品的开发; 建立莲子汁直链淀粉含量、保质期和返生沉淀量之间的数学模型, 准确预测莲子汁保质期, 辅助莲子汁制作工艺的优化^[64]。对各种类型淀粉类产品的淀粉直支比进行定量是建立有关品质预测模型的基础, 因此, 在货架期品质预测环节淀粉直支比定量准确、精细。

1.3.2 品质检测 在产品进入市场流通的前后阶段都需要对商品质量进行评估与检测, 淀粉直支比含量是反映产品品质的重要指标。淀粉生产商需在各批次产品出厂前进行必要的淀粉直支比含量检测, 确保淀粉品质达到客户的使用需求。在淀粉直支比含量

对食品品质影响较大的产品中, 淀粉直支比含量的检测尤为重要, 例如在方便米饭中, 淀粉直支比较低的方便米饭复水时间短、复水率高, 回生程度小, 不易老化回生, 品质也就更高^[65-66]; 使用淀粉直支比含量高的原料制成的粉丝更有弹性, 更耐煮, 耐剪切和抗拉强度更强^[67]。虽然直链淀粉含量对食品品质影响较大, 但这项指标还并未在各类食品加工场所中实现普及。并且, 目前在部分会进行检测的企业品控部门和第三方检测机构中, 多依据 GB 7648-1987^[68] 与 GB/T 15683-2008^[69] 的要求开展直链淀粉和支链淀粉含量的检测。但目前的检测方法中预处理复杂、耗时长, 依赖熟练的技术人员操作, 总体检测效率还较低。因此, 在品质检测环节, 针对精准度和抗干扰性等进行优化的淀粉直支比检测方法是企业品控部门和检测机构提高工作效率的共同需求。

在食品生产加工的各环节都对淀粉直支比的定量提出特定化的需求。在与原料和产品品质管控相关的环节, 淀粉直支比的定量需求为准确度、精确度高, 准确无误地评估、反馈原料和产品的质量; 其中, 在原料收储和短保质期产品品质检测等类似环节, 具有检测时间长短决定生产线能否维持正常运转和产品品质能否保持的特点时, 对淀粉直支比的检测在准确的基础上增加了快速的要求。在与生产加工过程相关的环节, 淀粉直支比的定量直接指导生产线上原材料种类与用量的实时调整, 需要淀粉直支比定量技术具备智能、实时的性能。在收储整粒种子或需要保持谷物颗粒完整的场景下, 淀粉直支比检测技术需要具备无损的特点。此外, 便捷、人工操作步骤少且设备简便也是相关工作人员对淀粉直支比检测技术的共同需求。

2 淀粉直支比定量技术

目前有多种淀粉直支比定量技术已被用于食品科学研究与生产实践中, 较为常见包括: 碘比色法、碘电位滴定法、分子排阻色谱法、伴刀豆球蛋白法、近红外光谱法、差示扫描量热法等。这些方法的原理、优缺点和适用性差异巨大, 依据检测场景选择适用方法非常重要。

2.1 碘比色法

碘比色法是检测淀粉直支比的经典方法, 其主要原理是淀粉分子与碘反应产生不同颜色的络合物。具有相当聚合度的线性葡聚糖链容易形成单螺旋结构, 其中央具有 5.0~5.4 Å 的空腔^[4]。直径 3.6 Å 的碘分子可以在单螺旋空腔内呈链状排列, 形成淀粉-碘络合物^[5]。络合物的颜色与线性葡聚糖的聚合度(DP)有关: DP 12 以下不显色, DP12~15、20~30、35~40 以及 45 以上时分别呈现棕色、红色、紫色和蓝色^[70]。支链淀粉中葡聚糖链的平均聚合度大约为 20~30 DP, 而直链淀粉葡聚糖链的平均聚合度为 200~900 DP^[1]。因此, 直链和支链淀粉与碘形成的络合物分别成蓝紫色和红棕色。这两种络合物不同的

光学特性可以作为直链与支链淀粉的定量依据。此外,支链淀粉的精细结构也会影响络合物的颜色,例如随分支度降低与外支链聚合度增加,支链淀粉与碘形成的络合物颜色由红棕色向红紫色转变,从而干扰直链淀粉的准确定量^[71]。此外,络合物颜色的稳定性也与温度有关,当达到淀粉糊化温度时,线性葡聚糖分子的热运动加剧容易造成螺旋结构丧失,使络合物解体蓝色消失^[5,71],使用此方法时需注意环境温度。

目前利用淀粉与碘形成有色络合物来实现淀粉直支比定量的方法主要有以下几种。

2.1.1 单波长法 单波长法是目前最常用的淀粉直支比定量方法,在我国标准和国际标准中被广泛使用。利用直链淀粉与支链淀粉标准品配制成系列标准溶液并加入碘试剂显色,在 620 nm 处测定吸光值绘制标准曲线。待测样品经过分散、脱脂等预处理后,配制相应浓度的淀粉溶液测定其吸光值,代入标准曲线得到淀粉直支比^[72]。此方法适用于测定直链淀粉含量在 0~85% 的淀粉,相对标准偏差小于 0.1%^[73]。单波长法使用便捷,对仪器设备的要求低,但方法的准确度与淀粉种类相关。例如,测定糯玉米与高直链玉米淀粉样品直支比的准确性比普通玉米淀粉样品的准确性低^[73]。受淀粉标准品中线性葡聚糖链平均聚合度的限制,当淀粉样品中直链淀粉的聚合度较低或支链淀粉的精细结构与标准品存在较大差异时,单波长法的准确性也将受到影响^[72]。

2.1.2 双波长法 由于单波长法存在长支链淀粉与直链淀粉显色混淆致使直链淀粉含量偏高的问题,所以在此基础上提出了可以扣除支链淀粉干扰的双波长法^[74]。利用物质在两波长处有吸收时,两波长处吸光度差值与溶质浓度成正比的原理,将直链淀粉和支链淀粉的标准品配制系列溶液分别与碘反应,再应用分光光度计在波长 400~960 nm 区间进行光谱扫描。在同一个坐标系内作图,确定直链与支链淀粉的测定波长与参比波长,在测定波长的比色结果中扣除参比波长下的显色干扰,即可得到校正的直链淀粉含量^[72]。双波长法适用于直链淀粉含量 0~85% 或支链淀粉含量 45%~100% 的样品,检出限极低,相对标准偏差小于 1%^[73]。该方法扣除了背景偏差所以准确性较单波长法提高,但也增加了操作的复杂度,使淀粉直支比定量更加耗时。

2.1.3 改良碘比色法 Morrison(1983)在碘比色原理的基础上加以改良^[75],运用“蓝值”(20 °C 下 10 mg 无水淀粉在 100 mL 含碘试剂溶液中于 635 nm 处的吸光值)进行直链淀粉含量测算,通过直链含量计算公式与温度校正系数,不需标品即可得到干物质基直链淀粉含量。此方法还提供了表观直链淀粉含量与总直链淀粉含量的定量方法,可根据样品的脂肪含量和测试需求灵活选择。该方法对直链含量测定结果的变异系数为 0.2%~1.0%(除蜡质型淀粉的变异系数为 1.6%~1.8%),对于 DP 大于 230 的直链淀粉和

含正常支链淀粉(最大波长 535 nm 左右)的样品较为准确,而 DP 小于 200 或包含反常支链淀粉(最大波长大于 540 nm)的准确度较差。与经典碘比色法一样,Morrison 方法也会过高估计高直链淀粉样品中的直链淀粉含量。

2.2 碘电位滴定法

碘电位滴定法同样利用了淀粉与碘形成络合物的原理。电位滴定过程中,碘与淀粉形成络合物的阶段不会引起溶液介电性质变化,因而电流或电压保持相对稳定;当新加入的碘不能继续形成络合物时,游离碘能改变溶液的介电性质,产生可视的电位或电流变化^[73]。从电位(或电流)滴定曲线可以求出形成络合物的饱和碘量,进而换算出直链或支链淀粉含量。研究表明,100 g 直链淀粉和支链淀粉对应的饱和碘量分别为 20.1 和 1.0 g^[76]。因此,使用直链和支链淀粉标准品按一定比例配制成的溶液,通过电位滴定计算出其特定直支比对应的饱和碘量绘制标准曲线。该方法通过自动电位滴定仪与电极实现自动化的直支比测量,优点是较为灵敏、准确、操作较为简单^[77],但仍需要使用标准品。另外,滴定分析与建立标准曲线的过程较比色法更为复杂耗时,当样品中含有某些特殊离子时对结果测定有干扰。

2.3 分子排阻色谱法

淀粉中的直链和支链组分具有分子量与尺寸差异,二者在流经多孔凝胶色谱柱时的保留时间不同,因此可借助示差检测器和色谱峰面积直接测定出淀粉的直支比^[78]。分子排阻色谱法样品用量少,但前处理操作较为复杂,需要利用异淀粉酶和普鲁兰酶对淀粉样品进行脱支处理,每个样品的色谱检测时间长达 30 min 左右^[79]。该方法的重复性分析的标准偏差小于 0.6%,重现性好^[80]。但是方法所需检测器系统、色谱柱成本较高,适合在实验室环境中进行精密操作。同时,该方法的检测周期长,测试效率较低。

2.4 伴刀豆球蛋白法

伴刀豆球蛋白(ConA)可与分支葡聚糖非还原端的 α -D-吡喃葡萄糖或 α -D-甘露吡喃特异性结合形成沉淀,但不与线性葡聚糖反应^[81]。因此,可以利用 Con A 实现直链淀粉与支链淀粉的分离。目前已有基于此原理开发的直链淀粉含量分析试剂盒,主要步骤包括:精准称量的样品溶解于热二甲亚砜后用乙醇沉淀获得去脂分散淀粉,加入 Con A 在室温下静置 1 h 沉淀支链淀粉,离心后利用酶法显色反应测定上清中的直链淀粉含量。进一步结合总淀粉含量,可得到支链淀粉含量,并计算淀粉直支比^[82]。该方法的优点为样品用量少,适用范围广,不需要标品,直链和支链组分在定量过程中的相互干扰小,但精确度有待提高(纯淀粉的相对标准偏差在 5% 以下,谷粉的相对标准偏差在 10% 以内)^[83]。但该方法过程仍较为繁琐耗时,使用的仪器设备多,无法满足便捷性应用需求;且单个样品测量成本高,不适合大批量样品检测。

2.5 近红外光谱法

近红外光谱通过有机化合物在近红外区(波长 800~2500 nm)具有特征吸收的原理从光谱中识别物质组成与含量^[84]。直链淀粉在波长 1700~1800 nm 具有特征峰,可用于直链淀粉的快速无损定量。先利用质量分数 0~100% 的直链淀粉标准品进行光谱扫描,对图谱采用标准正态变量变换、多元散射校正、二阶求导、多重线性回归、最小二乘法等方法进行数据处理,建立并优化校准模型,再通过预测均方根误差和相关系数等指标评价模型性能^[85]。基于近红外光谱预测模型,可直接对淀粉样品进行扫描,将得到的近红外反射光谱处理后代入校准模型,得到样品直链淀粉含量。类似地,也可用此方法分别选择不同波段建立支链淀粉、总淀粉含量的模型,进而实现淀粉直支比的定量。近红外分析法的优势是实现了快速和无损的淀粉直支比检测,无需复杂的样品前处理过程,具备用于实时在线直支比定量监测的潜力^[86]。但该方法中数据采集与分析十分耗时,方法的准确性与模型性能以及建立模型所用的标品有关。因此,淀粉品种和结构变异对模型预测准确性的影响较大,同时样品中的淀粉来源复杂时也会使建模难度提升。目前,近红外分析法暂不适用于样品组成复杂、种类时常变更的检测环境。

2.6 差示扫描量热法

直链淀粉的螺旋结构可与溶血磷脂酰胆碱的极性端基团发生可逆络合作用^[87]。用淀粉标准品配制特定直支比的混合物,准确称量到坩埚中,加入一定浓度的溶血磷脂酰胆碱溶液,使用差示量热扫描仪按照一定的升温-降温-升温程序运行,测量样品在温度变化过程中的焓变值。由于温度变化会诱导溶血磷脂胆碱与直链淀粉的分离与络合,因此,可以建立焓变与直链淀粉含量关系的模型用于预测样品中的直链淀粉含量^[88]。该方法的优点是消耗样品量少,便于实现自动化检测;但测试成本高,十分耗时,对仪器设备要求也较高。有研究表明,该方法与碘比色法测得的数据相关性高($r=0.99$, $P<0.001$),准确度与碘比色

法相近^[89],但对某些淀粉(如马铃薯淀粉)的预测准确度不足^[90]。

以上总结了六种在食品科学研究中被认可、生产实践中有所应用的经典淀粉直支比定量方法。其中,碘比色法开发历史久,多次更迭优化,因对试剂、设备要求低,成本低且结果相较准确而在企业、检测机构中被广泛应用,但因其操作繁琐,对技术人员要求高,便利性不足,无法测定大批量材料而使应用受到限制。分子排阻色谱法是目前准确度、精确度最高的方法,但具备色谱方法共有的前处理复杂、仪器设备昂贵、测定时间长等问题,目前仅限于科学研究中使用。除了以上最常用的两种方法外,碘电位滴定法、伴刀豆球蛋白法、近红外法、差示扫描量热法等也各有特点,由于方法各有优缺点而使使用的场景有所限制,大多数还停留在实验室科学研究使用的阶段,无法投入生产当中。表 1 中总结了常用淀粉直支比检测方法的优缺点、检测指标、是否需要标准品等内容,供感兴趣的读者参考。

3 总结与展望

食品研究和加工领域对淀粉直支比定量提出了准确、简便、自动化、无损检测等多样化的需求。其中,现有的淀粉直支比检测技术(如碘比色法和酶法等)已经能基本满足实验室条件下淀粉科学研究、食品品质检测等方面的需求。基于碘比色法和酶法测试原理开发的试剂盒以及自动化测试仪器提升了操作便利性,但这些方法也常兼具耗时长、成本高、前处理复杂等缺点。

伴随近年来食品产业的发展,对原料品质和加工适应性开展大规模高效评价、针对生产过程和产品品质开展精准管控等行业新需求不断涌现。在这种背景下,淀粉直支比定量技术所面临的使用场景开始逐渐从条件设施齐备的实验室转移到环境条件复杂的原料采购地、生产线等区域,这种趋势也为发展新型直支比定量技术提出了新要求。取样方便无损、检测设备简单便携、便于实时定量和联网、具备微量高通量属性的淀粉直支比定量技术将有助于未

表 1 淀粉直支比定量技术特点与适用性对比

Table 1 Comparison of the characteristics and application of the technologies for the quantification of amylose-to-amylopectin ratio

名称	优点	缺点	检测目标	标准品	适用场景
碘比色法(单、双波长法及其改良方法)	原理简单,对仪器要求不高,测试成本低,结果较准确	前处理繁琐,操作技术性强,准确性易受淀粉种类、结构和测试环境影响	线性葡聚糖链与碘形成的有色络合物	除改良法外都需要	参照国家、国际、农业部或地方标准等的测试分析
碘电位滴定法	灵敏度高,受温度影响小,结果重现性好,较为准确	易受淀粉种类、结构和样品纯度等影响	游离碘诱导的溶液介电性质变化	需要	实验室
分子排阻色谱法	准确性高,结果精确可靠,节约样品,便于自动化测试	前处理复杂耗时,检测成本高,仪器设备要求高	淀粉分子或葡聚糖的分子量分布	不需要	实验室
伴刀豆球蛋白法	准确性高,适用样品范围广,节约样品,有市售试剂盒	检测成本高,耗时,对操作和实验条件要求较高,便捷性较差	葡萄糖与GOPOD试剂反应产生有色物质	不需要	AACC International Approved method, 实验室
近红外分析法	无损,简便,高效	准确性与模型有关,数据采集与分析难度大,易受样品中其它成分干扰	直链淀粉的近红外光谱特征峰	需要	实时、在线、连续化的测试分析
差示扫描量热法	节约样品,便于自动化测试	检测成本高,耗时,易受样品中其他热敏感性成分干扰	直链淀粉络合物的熔融熔	需要	实验室

来食品行业实现对淀粉质原料的系统分级和高效利用以及对淀粉质食品加工和产后过程的在线智能化。总之,发展面向未来食品行业需求的新型淀粉直支比定量技术具有广阔的前景。

参考文献

- [1] MANNERS D J. Recent developments in our understanding of amylopectin structure[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1989, 11(2): 87–112.
- [2] PEREZ S, BERTOFT E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review[J]. *Starch-Starke*, 2010, 62(8): 389–420.
- [3] 韩文芳, 林亲录, 赵思明, 等. 直链淀粉和支链淀粉分子结构研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(13): 267–275. [HAN W F, LIN Q L, ZHAO S M, et al. Recent advances in molecular structures of amylose and amylopectin[J]. *Food Science*, 2020, 41(13): 267–275.]
- [4] IMMEL S, LICHTENTHALER F W. The hydrophobic topographies of amylose and its blue iodine complex[J]. *Starch-Starke*, 2000, 52(1): 1–8.
- [5] PUTSEYS J A, LAMBERTS L, DELCOUR J A. Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physicochemical properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 51(3): 238–247.
- [6] 王中荣, 刘雄. 高直链淀粉性质及应用研究[J]. *粮食与油脂*, 2005, 18(11): 10–13. [WANG Z R, LIU X. Study on properties and application of high amylose starch[J]. *Journal of Cereals and Oils*, 2005, 18(11): 10–13.]
- [7] FREDRIKSSON H, SILVERIO J, ANDERSSON R, et al. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1998, 35(3): 119–134.
- [8] WANG S J, LI C L, COPELAND L. Starch retrogradation: A comprehensive review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety*, 2015, 14(5): 568–585.
- [9] LI C, HU Y, LI E. Effects of amylose and amylopectin chain-length distribution on the kinetics of long-term rice starch retrogradation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020: 106239.
- [10] SCHIRMER M, HÖCHSTÖTTER A, JEKLE M, et al. Physicochemical and morphological characterization of different starches with variable amylose/amylopectin ratio[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 32(1): 52–63.
- [11] GRAY J A, BEMILLER J N. Bread staling: Molecular basis and control[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2003, 2(1): 1–21.
- [12] QI Y Y, WANG N, YU J L, et al. Insights into structure-function relationships of starch from foxtail millet cultivars grown in China[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020: 155.
- [13] DENCHAI N, SUWANNAPORN P, LIN J, et al. Retrogradation and digestibility of rice starch gels: the joint effect of degree of gelatinization and storage[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(6): 1400–1410.
- [14] ZHONG Y Y, LIU L S, QU J Z, et al. Amylose content and specific fine structures affect lamellar structure and digestibility of maize starches[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 105994.
- [15] ŠÁRKA E, DVOŘÁČEK V. New processing and applications of waxy starch (a review)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 206: 77–87.
- [16] 张玉荣, 周显青, 杨兰兰. 大米食味品质评价方法的研究现状与展望[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(8): 155–160. [ZHANG Y R, ZHOU X Q, YANG L L. Present situation and expectation on methods for taste evaluation of rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2009, 24(8): 155–160.]
- [17] 雷宏, 王晓曦, 曲艺. 面粉中直链淀粉对面制品品质的影响[J]. *粮油加工*, 2009(3): 73–76. [LEI H, WANG X X, QU Y. Effect of amylose on flour products quality[J]. *Cereals and Oils Processing*, 2009(3): 73–76.]
- [18] 王晓曦, 徐荣敏. 小麦胚乳中直链淀粉含量分布及其对面条品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2007(4): 33–37. [WANG X X, XU R M. Amylose distribution in wheat endosperm and its influence on noodle quality[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2007(4): 33–37.]
- [19] 陈倩. 小米品质性状分析及膨化饼和薄脆饼干工艺优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. [CHEN Q. Analysis of quality traits of millet and process optimization of puffing cake and the crisp fritter biscuit[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2016.]
- [20] 金玮璿, 张晓蒙, 郝建泰, 等. 不同产区青稞原料成分差异性与酿造适用性的分析[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(1): 121–125. [JIN W Y, ZHANG X M, HAO J Q, et al. Macro-nutrition composition and brewing capability of tibetan hulless barley in different producing areas[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(1): 121–125.]
- [21] 范代超. 几种粉丝淀粉特性及其对食用品质的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013. [FAN D C. Effect of starch properties on eating quality of several starch noodles[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.]
- [22] ZHU B H, ZHAN J I, CHEN L, et al. Amylose crystal seeds: Preparation and their effect on starch retrogradation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020: 105805.
- [23] SEUNG D. Amylose in starch: Towards an understanding of biosynthesis, structure and function[J]. *The New Phytologist*, 2020, 228(5): 1490–1504.
- [24] ALTAYAN M M, AL DAROUICH T, KARABET F. Thermoplastic starch from corn and wheat: A comparative study based on amylose content[J]. *Polymer Bulletin*, 2021, 78(6): 3131–3147.
- [25] LUO X L, CHENG B, ZHANG W, et al. Structural and functional characteristics of japonica rice starches with different amylose contents[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2021, 19(1): 532–540.
- [26] ZHENG M J, YE A Q, SINGH H, et al. The *in vitro* digestion of differently structured starch gels with different amylose contents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021: 106647.
- [27] 汪磊. 环境对不同地区育成粳稻品种产量结构、穗部性状及米质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. [WANG L. Effect of environment on yield structure panicle traits and quality of japonica rice varieties bred in different regions[D]. Shenyang:

Shenyang Agricultural University, 2020.]

[28] 唐建军, 陈欣. 环境条件和稻米品质综述[J]. 耕作与栽培, 1985(5): 39-44. [TANG J J, CHEN X. Review of environmental conditions and rice quality[J]. Cultivation and Cultivation, 1985(5): 39-44.]

[29] 畅鹏飞, 修琳, 郑明珠, 等. 高温高湿贮藏对玉米淀粉合成关键酶的影响[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(11): 37-41. [CHANG P F, XIU L, ZHENG M Z, et al. Effects of high temperature and high humidity storage of corn grain on the activity of its key starch synthases[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(11): 37-41.]

[30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19266-2008 地理标志产品 五常大米[S]. 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 19266-2008 Geographical indication products: Wuchang rice[S]. 2008.]

[31] 夏凡, 董月, 朱蕾, 等. 大米理化性质与其食用品质相关性研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(5): 100-107. [XIA F, DONG Y, ZHU L, et al. Study on the relationship between physicochemical properties and edible quality of rice[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2018, 43(5): 100-107.]

[32] TAN Y F, CORKE H. Factor analysis of physicochemical properties of 63 varieties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82(7): 745-752.

[33] 马静, 安平永, 来常凯, 等. 宁夏水稻审定品种品质性状优化及影响因素分析[J]. 种子, 2017, 36(3): 88-92. [MA J, AN Y P, LAI C K, et al. Analysis of optimization and affecting factor on quality characters in examination and approval of rice varieties in Ningxia[J]. Seed, 2017, 36(3): 88-92.]

[34] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22438-2008 地理标志产品 原阳大米[S]. 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 22438-2008 Geographical indication product: Yuanyang rice[S]. 2008.]

[35] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19503-2008 地理标志产品 沁州黄小米[S]. 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 19503-2008 Geographical indication product: Qinzhou yellow millet[S]. 2008.]

[36] 唐为民. 以不溶于水的直链淀粉作为测定大米品质指标的重要性[J]. 粮食贮藏, 1979(3): 53. [TANG W M. The importance of water insoluble amylose as an index of rice quality[J]. Food Storage, 1979(3): 53.]

[37] ZHU D W, FANG C Y, QIAN Z H, et al. Differences in starch structure, physicochemical properties and texture characteristics in superior and inferior grains of rice varieties with different amylose contents[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 110: 106170.

[38] TECHAWIPHARAT J, SUPHANTHARIKA M, BE-MILLER J N. Effects of cellulose derivatives and carrageenans on the pasting, paste, and gel properties of rice starches[J]. Carbohy-

drate Polymers, 2009, 73(3): 417-426.

[39] 傅翠真, 朱智伟, 凌锦书, 等. 中国优质稻米品质的初步研究[J]. 中国粮油学报, 1987(2): 54-58. [FU C Z, ZHU Z W, LING J S, et al. A preliminary study on quality of high quality rice in China[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1987(2): 54-58.]

[40] 中岳正. 稻米直链淀粉研究综述[J]. 种子, 1988(5): 45-48. [SHEN Y Z. A review on rice amylose[J]. Seed, 1988(5): 45-48.]

[41] 明东风, 马均, 马文波, 等. 稻米直链淀粉及其含量研究进展[J]. 中国农学通报, 2003, 19(1): 68-71, 149. [MING D F, MA J, MA W B, et al. A review of rice amylose and its content[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2003, 19(1): 68-71, 149.]

[42] JULIANO B. Structure, chemistry, and function of the rice grain and its fractions[J]. Cereal Foods World, 1992, 37: 772-772.

[43] 李温静, 尹玉云. 浅谈糯米淀粉的性状及应用[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(3): 29-34. [LI W J, YIN Y Y. Briefly discuss the character and application of glutinous rice starch[J]. Food and Food Industry, 2017, 24(3): 29-34.]

[44] 陈忆凤, 朱勤, 滕云, 等. 风味即食米饭工艺研究[J]. 食品科学, 1995, 16(4): 25-28. [CHEN Y F, ZHU Q, TENG Y, et al. Study on the technology of instant rice with flavor[J]. Food Science, 1995, 16(4): 25-28.]

[45] 罗霜霜, 康建平, 张星灿, 等. 方便米饭品质改良研究进展[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(3): 78-84. [LUO S S, KANG J P, ZHANG X C, et al. Research progress on quality improvement of instant rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(3): 78-84.]

[46] 江正强, 李里特, 韩东海, 等. 方便鲜米粉加工技术的研究[J]. 中国粮油学报, 2001(4): 36-39. [JIANG Z Q, LI L T, HAN D H, et al. Processing technology of instant fresh mifen[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2001(4): 36-39.]

[47] 赵淑玲, 李洪, 吴芳兰, 等. 小米食味品质定量指标的初步研究[J]. 作物品种资源, 1989(3): 34-35. [ZHAO S L, LI H, WU F L, et al. Preliminary study on quantitative index of millet eating quality[J]. Crop Variety Resources, 1989(3): 34-35.]

[48] 孙霖霞, 郭晓冬, 李颖, 等. 速食小米粉膨化特性研究[J]. 粮油食品科技, 2012, 20(6): 6-10. [SUN C X, GUO X D, LI Y, et al. Study on the popping property of instant millet powder[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2012, 20(6): 6-10.]

[49] SANDHU K, SINGH N. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties[J]. Food Chemistry, 2007, 101(4): 1499-1507.

[50] 吴娜娜, 李莎莎, 谭斌, 等. 糙米直链淀粉含量对其面包质构和体外消化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(4): 33-37.

[WU N N, LI S S, TAN B, et al. Effect of amylose content of brown rice on texture properties and *in vitro* digestibility of bread[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(4): 33-37.]

[51] 马文, 李喜宏, 刘霞, 等. 支链淀粉与直链淀粉比例对重组营养强化米品质的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(11): 42-48.

[MA W, LI X H, LIU X, et al. Effects of amylopectin/amylose ra-

- tion on quality of reformed nutrition rice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(11): 42-48.]
- [52] PEREZ C M, JULIANO B O. Indicators of eating quality for non-waxy rices[J]. Food Chemistry, 1979, 4(3): 185-195.
- [53] 杨艳芳,周惠明,郭晓娜,等.糯小麦粉对速冻水饺品质的影响[J].中国粮油学报,2015,30(1): 8-12. [YANG Y F, ZHOU H M, GUO X N, et al. Effect of waxy wheat flour on the quality of frozen dumplings[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(1): 8-12.]
- [54] ZHANG T, LI K, DING X H, et al. Starch properties of high and low amylose proso millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes are differentially affected by varying salt and pH[J]. Food Chemistry, 2021: 337.
- [55] 苟青松,吴凡,王展,等.压榨型干米粉专用米关键指标的研究[J].食品科技,2020,45(2): 170-176. [GOU Q S, WU F, WANG Z, et al. Study on key indicators of special rice for pressed dry rice noodles[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(2): 170-176.]
- [56] 李秋涛,练顺才,常亮,等.直支链淀粉对白酒生产的影响[J].食品与发酵科技,2013,49(6): 76-79. [LI Q T, LIAN S C, CHANG L, et al. Amylose and amylopectin influence on liquor production[J]. Food and Fermentation Technology, 2013, 49(6): 76-79.]
- [57] 李俊超,刘钟栋,岑涛,等.小麦淀粉中不同性状淀粉对流变学性质的影响[J].食品工业科技,2008(7): 63-64,68. [LI J C, LIU Z D, CENG T, et al. Effect of different starch in wheat on the rheology properties of starch paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008(7): 63-64,68.]
- [58] KOWALSKI R J, GU B J, HAUSE J P. Waxy wheat extrusion: Impacts of twin-screw extrusion on hard red waxy wheat flour[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(6): 1118-1132.
- [59] LII C Y, TSAI M L, TSENG K H. Effect of amylose content on the rheological property of rice starch[J]. Cereal Chemistry, 1996, 73(4): 415-420.
- [60] 邱琛.碾米工艺对米粉品质的影响[D].上海:上海交通大学,2019. [QIU C. Effects of milling conditions on quality of rice flour[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.]
- [61] ZHU F, LIU P Z. Starch gelatinization, retrogradation, and enzyme susceptibility of retrograded starch: Effect of amylopectin internal molecular structure[J]. Food Chemistry, 2020: 126036.
- [62] 李慧娟,柴松敏.淀粉的老化机理及抗老化研究[J].粮食加工,2006(3): 42-45. [LI H J, CHAI S M. Study on retrogradation mechanism and antistaling of starch[J]. Grain Processing, 2006(3): 42-45.]
- [63] 胡云峰,王晓彬,张利苹.不同贮藏温度下鲜湿米线的品质变化动力学模型及其货架期预测[J].现代食品科技,2019,35(1): 89-96. [HU Y F, WANG X B, ZHANG L P. Dynamic model of quality change of fresh rice noodle in different temperatures and the prediction of its shelf life[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(1): 89-96.]
- [64] 郑宝东,曾绍校,李怡彬,等.莲子淀粉品质对莲子汁流变特性和保质期的影响的研究[J].农业工程学报,2005(12): 167-170. [ZHENG B D, ZENG S X, LI Y B, et al. Study on the effect of lotus seed starch quality on rheological properties and shelf life of lotus seed juice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005(12): 167-170.]
- [65] 李新华,洪玲,吕文彦.不同软米品系对方便米饭品质的影响[J].食品与发酵工业,2011,37(4): 145-148. [LI X H, HONG L, LÜ W Y. Effect of different soft rice on the quality of instant rice[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(4): 145-148.]
- [66] 王莉,张新霞,杨晓娜,等.方便米饭原料适应性的因子、聚类分析研究[J].食品工业科技,2015,36(3): 109-115. [WANG L, ZHANG X X, YANG X N, et al. Factor analysis and cluster analysis of adaptability of raw material for instant rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(3): 109-115.]
- [67] 胡肖容,廖卢艳.粉丝品质的研究进展[J].粮食与油脂,2016,29(3): 5-7. [HU X R, LIAO L Y. Research progress on the starch noodle[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(3): 5-7.]
- [68] 农牧渔业部. GB 7648-1987 水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法[S]. 1987. [Ministry of Agriculture, Animal Husbandry and Fisheries. GB 7648-1987 Determination of amylose in rice, corn and millet grains[S]. 1987.]
- [69] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 22438-2008 大米 直链淀粉含量的测定[S]. 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 22438-2008 Determination of amylose content in rice[S]. 2008.]
- [70] 程建军.淀粉工艺学[M].北京:科学出版社,2011. [CHENG J J. Starch technology[M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [71] 张巧杰.直链淀粉检测方法与技术研究[D].北京:中国农业大学,2005. [ZHANG Q J. Study on detection method and technology of amylose content[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.]
- [72] 杨有仙,赵燕,李建科,等.直链淀粉含量测定方法研究进展[J].食品科学,2010,31(23): 417-422. [YANG Y X, ZHAO Y, LI J K, et al. Research progress in determination methods for amylose content[J]. Food Science, 2010, 31(23): 417-422.]
- [73] 李莉.玉米淀粉中直链淀粉含量的分析测定方法研究[D].郑州:河南工业大学,2018. [LI L. Study on analysis of the amylose content in corn starch[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018.]
- [74] 曾凡远,赵鑫,周添红,等.双波长比色法测定马铃薯直链/支链淀粉含量[J].现代食品科技,2012,28(1): 119-122. [ZENG F K, ZHAO X, ZHOU T H, et al. Dual-wavelength colorimetric method for measuring amylose and amylopectin contents of potato starch[J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(1): 119-122.]
- [75] MORRISON W R, LAIGNELET B. An improved colorimetric procedure for determining apparent and total amylose in cereal and other starches[J]. Journal of Cereal Science, 1983, 1(1): 9-20.
- [76] 李海普,李彬,欧阳明,等.直链淀粉和支链淀粉的表征[J].食品科学,2010,31(11): 273-277. [LI H P, LI B, OUYANG M, et al. Advances in characterization of amylose and amylopectin starch[J]. Food Science, 2010, 31(11): 273-277.]
- [77] 陈俊芳,周裔彬,白丽,等.两种方法测定板栗直链淀粉含量

- 的比较[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(4): 93-95, 128. [CHEN J F, ZHOU Y B, BAI L, et al. Comparison of two methods for analyzing amylose content in chestnut[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(4): 93-95, 128.]
- [78] SARGEANT J G. Determination of amylose-amylopectin ratios of starches[J]. *Starch-Starke*, 1982, 34(3): 89-92.
- [79] PENG X Y, YAO Y. Small-granule starches from sweet corn and cow cockle: Physical properties and amylopectin branching pattern[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 74: 349-357.
- [80] CHAROENKUL N, UTTAPAP D, PATHIPANAWAT W, et al. Simultaneous determination of amylose content & unit chain distribution of amylopectins of cassava starches by fluorescent labeling/HPSEC[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 65(1): 102-108.
- [81] MATHESON N K. A comparison of the structures of the fractions of normal and high-amylose pea-seed starches prepared by precipitation with concanavalin A[J]. *Carbohydrate Research*, 1990, 199(2): 195-205.
- [82] YUN S H, MATHESON N K. Estimation of amylose content of starches after precipitation of amylopectin by concanavalin-a[J]. *Starch-Stärke*, 1990, 42(8): 302-305.
- [83] GIBSON T S, SOLAH V A, MCCLEARLY B V. A procedure to measure amylose in cereal starched and flours with concanavalin A[J]. *Cereal Science*, 1997, 25(2): 111-119.
- [84] CAMPBELL M R, MANNIS S R, PORT H A, et al. Prediction of starch amylose content versus total grain amylose content in corn by near-infrared transmittance spectroscopy[J]. *Cereal Chemistry*, 1999, 76(4): 552-557.
- [85] FERTIG C C, PODCZECK F, JEE R D, et al. Feasibility study for the rapid determination of the amylose content in starch by near-infrared spectroscopy[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2004, 21(2-3): 155-159.
- [86] 刘东莉. 不同链/支比玉米淀粉颗粒结构原位表征与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. [LIU D L. *In situ* characterization and analysis of the structures of maize starches with different amylose/amylopectin ratios[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.]
- [87] SIVERT D, HOLM J. Determination of amylose by differential scanning calorimetry[J]. *Starch-Starke*, 1993, 45(4): 136-139.
- [88] POLASKE N W, WOOD A L, CAMPBELL M R, et al. Amylose determination of native high-amylose corn starches by differential scanning calorimetry[J]. *Starch-Stärke*, 2005, 57(3-4): 118-123.
- [89] 郭星, 温其标. 测定直链淀粉含量的几种新方法[J]. 粮油加工与食品机械, 2006(4): 87-89. [GUO X, WEN Q B. Several new methods for the determination of amylose content[J]. Machinery for Cereals Oil and Food Processing, 2006(4): 87-89.]
- [90] MOORTHY S N, ANDERSSON L, ELIASSON A C. Determination of amylose content in different starches using modulated differential scanning calorimetry[J]. *Starch-Stärke*, 2006, 58: 209-214.