

直链淀粉和支链淀粉的表征

李海普, 李 彬, 欧阳明, 张莎莎
(中南大学化学化工学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 直链淀粉和支链淀粉是淀粉的两大主要组分, 它们在分子结构以及分子聚集态等方面的差异导致其物化特性有所不同, 具有不同直链和支链淀粉组成比例的淀粉在总体应用表现也不相同。本文通过讨论淀粉最新的研究进展, 对直链淀粉和支链淀粉的纯度、分子结构、相对分子质量、晶体特性、热焓特性、黏度特性等进行综述。

关键词: 直链淀粉; 支链淀粉; 表征; 物化特性

Advances in Characterization of Amylose and Amylopectin Starch

LI Hai-pu, LI Bin, OUYANG Ming, ZHANG Sha-sha
(School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: As two major constituents of starch, amylose and amylopectin are distinct in both molecular structures and molecular aggregation, which results in dissimilarity in their physico-chemical properties. Consequently, the application performance of starch is variable due to the ratio of amylose and amylopectin. Current progress in characterization such as purity, molecular structure, relative molecular weight, crystal characteristics, thermal enthalpy and viscosity of amylose and amylopectin has been reviewed in this paper, which will provide meaningful references for further investigations of structural and physicochemical characterization as well as the application of amylose and amylopectin.

Key words: amylose; amylopectin; characterization; physicochemical property

中图分类号: TS231

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2010)11-0273-05

淀粉是一种可再生、可生物降解的天然高分子物质, 在可持续发展意识不断增强的今天, 其不仅在食品工业中起着决定性的作用, 在材料、生物及医药等领域的应用也日益引人注目^[1-5]。直链淀粉和支链淀粉是淀粉的两大主要组分, 由于二者的分子结构、分子聚集状态各异, 从而使得不同来源的淀粉有各自的应用表现。已有研究表明^[6-10], 淀粉中直链淀粉和支链淀粉的比例和含量对淀粉的产品加工、物化特性等有着直接影响。同时, 直链淀粉和支链淀粉本身也有着不同的性能和用途, 比如直链淀粉具有良好的成模性、质构调整、凝胶性及促进营养素吸收等功能, 而支链淀粉具有抗老化特性、改善冻融稳定性、增稠作用、高膨胀性及吸水性等功能而被广泛应用于食品加工、包装材料的制造、水溶性及生物可降解膜、医药和建筑工业等领域^[11-16]。为了加深理解淀粉总体物性对直链淀粉、支链淀粉的依赖性、拓展直链和支链淀粉各自特性的有价应用, 必须对直链、支链淀粉进行有效分离, 进而对

其各自的分子结构及物化特性等进行详细剖析。

对于直链淀粉和支链淀粉的分离, 人们已经进行了很多研究, 并且有不少资料对这些工作进行了总结评述^[17-19]。而对分离后直链、支链淀粉产品的表征, 由于各研究侧重点的差异, 人们采用不同的方法及技术对产品的不同物化性能进行了研究, 本文着重就该方面的研究工作综述, 以促进我国直链、支链淀粉的深入研究以及淀粉工业的蓬勃发展。

1 直链淀粉与支链淀粉的纯度

在研究直链淀粉和支链淀粉的结构及性质之前, 首先要对分离纯化的直链淀粉和支链淀粉的纯度进行表征, 直链淀粉和支链淀粉的纯度表征方法有碘亲和方法、光谱分析法以及色谱分析法。

1.1 碘亲和方法

淀粉和碘之间存在着非常特殊、非常灵敏的相互作用, 这种作用会随着淀粉的植物来源不同而有差异, 但

收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50804055); 湖南省自然科学基金项目(09JJ3100)

作者简介: 李海普(1975—), 女, 副教授, 博士, 主要从事功能高分子的设计、合成及应用研究。

E-mail: lihaipu@mail.csu.edu.cn

主要取决于淀粉中直链淀粉的含量——直链淀粉含量越高、链长越大,结合的碘量会随之增多,并且作用形成的复合物亦越稳定,得到的碘亲和力也越大,因此可通过测定淀粉的碘亲和力以确定淀粉中直链淀粉的含量,作为评定直链淀粉级分纯度的一项指标。

碘亲和力的测定主要有 Schoch^[20]使用的方法:首先配制一定浓度的淀粉-碘化钾酸性溶液(由于酸性环境中,淀粉-碘复合物的稳定性较高),然后用碘酸钾标准溶液进行滴定,得到电位(电流)-碘酸钾溶液体积曲线,再借助外推法得到滴定终点及其对应的碘酸钾溶液体积。由式(1)~(3)分别计算出样品的结合碘量、碘亲和力以及直链淀粉的纯度。

$$\text{结合碘量}/\text{mg} = c(\text{KIO}_3) \times V(\text{KIO}_3) \times 3 \times 253.8 \quad (1)$$

式中: $c(\text{KIO}_3)$ 为标准 KIO_3 溶液的浓度/(mol/L); $V(\text{KIO}_3)$ 为滴定终点对应的 KIO_3 溶液体积/mL;3为消耗1mol KIO_3 生成3mol I_2 ;253.8为 I_2 的相对分子质量。

$$\text{碘亲和力}/\% = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

式中: m_1 为结合碘质量/mg, m_2 为样品干质量/mg。
纯度=碘亲和力/20% (3)

式中:20%为每克纯直链淀粉能结合200mg碘。

Schoch法测出的各直链淀粉碘亲和力分别为:玉米19.0%、小麦19.9%、马铃薯19.9%、木薯18.6%、银杏19.19%、葛根19.8%、稻米19.99%~20.31%、橡实18.94%~19.19%,支链淀粉的碘亲和力在0.005%~0.01%以下。可见直链淀粉的碘亲和力一般在19%~20%之间,当碘亲和力大于19.5%时,即可认为该样品为直链淀粉纯品。

实际情况中,由于不同种类的直链淀粉分子链长相差较大,得到的碘亲和力也会出现比较大的差异,如张娟等^[21]测得的自制芭蕉芋直链淀粉(纯度为87.19%)的碘亲和力只有10.4%。

1.2 光谱分析法

1.2.1 淀粉-碘复合物吸收光谱法

直链淀粉与碘形成的复合物吸收峰在600~680nm左右,而支链淀粉与碘形成的复合物吸收峰在520~590nm左右。利用这种复合物吸收峰的差异亦可对直链、支链淀粉的纯度进行表征。即利用紫外可见光谱仪于400~800nm范围内对样品进行吸收光谱扫描,而后根据图谱显示的最大吸收波长及相应峰形来确定直链淀粉和支链淀粉的相对纯度。

吉宏武等^[22]借助紫外可见光扫描对实验室分离的马铃薯直链、支链淀粉级分进行了表征,结果发现:直链淀粉的最大吸收峰为630nm,支链淀粉的为548nm;两者最大吸收波长及其峰形与文献^[23-24]完全吻合。而

后的凝胶色谱检测表明,直链淀粉的图中仅有一个峰,支链淀粉的虽然还有一个小峰,但非常弱,表明相应分离产品的纯度较高。这说明了吸收光谱法在淀粉级分检测中的适用性与可靠性。夏慧玲等^[25]也采用此法对分离的红薯直链淀粉进行了纯度表征,其最大吸收波长也是630nm。

1.2.2 蓝值比较法

蓝值是表示淀粉结合碘能力的另一个重要指标。直链淀粉线性聚合度高,蓝值较大,一般为0.8~1.2之间,而支链淀粉由于其侧链链长只有20~30个葡萄糖基,蓝值仅有0.08~0.22。

淀粉蓝值的测定一般采用 Gilbert等^[26]使用的方法,即将样品的酸性水溶液与碘-碘化钾试剂充分混合,放置一定时间待淀粉-碘复合物稳定后用紫外-可见分光光度计在500~700nm范围内对样品进行扫描,最高峰处的光谱波长为最大吸收波长 λ_{\max} ,测定样品在最大吸收波长处的吸光度 A_{\max} ,代入式(4)计算样品的蓝值:

$$\text{蓝值} = \frac{4 \times A_{\max}}{C_{\text{样品}}/(\text{mg}/100\text{mL})} \quad (4)$$

由于紫外-可见分光光度计比较常见且操作简单,因此光谱分析法成为淀粉级分纯度表征的一种常用手段。如高炜丽等^[27]测得自制直链淀粉($\lambda_{\max}=628\text{nm}$,蓝值=0.913)和标准直链淀粉($\lambda_{\max}=630\text{nm}$,蓝值=1.023)的最大吸收波长及蓝值相近,支链淀粉的最大吸收波长(548nm)与蓝值(0.087)也在相应的范围内,从而证明自制的直链淀粉和支链淀粉具有较高的纯度。

实验室在进行自制淀粉级分的蓝值测定中发现:淀粉样品的溶液酸度和碘-碘化钾试剂质量浓度对蓝值测定结果均有影响——在被测溶液中马铃薯直链淀粉质量浓度为5mg/100mL时,随碘-碘化钾试剂质量浓度从0.5mg/100mL增加到5mg/100mL,得到的吸光度从0.459升高到了1.306。这是由于碘-碘化钾试剂质量浓度太低时,少量的碘分子不足以完全占据淀粉的螺旋空腔而使测量的蓝值偏小;而太高(大于10mg/100mL)后,测试体系在紫外-可见光照射下很快便出现了絮凝现象,吸光度结果波动较大。因此建议碘-碘化钾试剂质量浓度选择在2mg/100mL左右为宜;由于碱性溶液中,淀粉-碘复合物的不稳定性也会导致测定的重现性稍差,因此测试体系应该保持为弱酸性环境。此外考虑到仪器误差因素,建议直链和支链淀粉的质量浓度最好在2~4mg/100mL和10~30mg/100mL范围内。

1.3 色谱分析法

1.3.1 高效液相色谱

高效液相色谱(HPLC)是20世纪70年代发展起来的一项高效、快速的分离、分析技术。其在淀粉及其组

分的定性、定量分析中近年来也有应用。

洪雁等^[28]比较了自制的直链淀粉与美国 Sigma 公司的标准玉米直链淀粉的高效液相色谱图,发现自制的直链淀粉均由一个主要的峰和一个很弱的峰组成,主要峰为直链淀粉,而弱峰可能是支链淀粉等杂质;自制直链淀粉的出峰时间(自制玉米淀粉 15.754min,自制马铃薯淀粉 15.610min,自制绿豆淀粉 15.976min)早于标准直链淀粉(16.197min),峰面积和峰高稍低于标准直链淀粉(峰面积 100%,峰高 3418BB),表明自制的直链淀粉中还是含有其他杂质。但自制直链淀粉的峰面积达到了 99%左右,可以认为分离得到的直链淀粉具有较高的纯度。孙忠伟等^[29]也利用此法对自制的芋头直链淀粉和支链淀粉纯度进行了表征,发现直、支链淀粉在高效液相色谱上均表现为一个峰,表明分离、提纯得到的直、支链淀粉非常纯。此两篇文章中所报道的色谱条件一样,均为:色谱柱 Ultrahydrogel™ Linear(300mm × 7.8mm),流动相 0.1mol/L NaNO₃ 溶液,柱温 45℃,流速 0.9mL/min,进样量 10 μL。

沈钟苏等^[30-31]则选用 Shim-pack DIOL-150 柱、用 DMSO 和 H₂O 的体积比为 1:4 的水溶液做流动相,对自制的桄榔、荔浦芋直链淀粉和支链淀粉纯度进行了表征。其操作流速为 1mL/min,柱温为室温,进样量为 20 μL。

在进行高效液相色谱检测中,建议选择的溶解剂和流动相要保证淀粉样品具有较好的溶解性,以不破坏链结构作为前提条件。

1.3.2 凝胶渗透色谱

凝胶渗透色谱(GPC)又称体积排阻色谱(SEC),是利用多孔填料柱将溶液中的高分子按体积大小分离的一种色谱技术,主要用于测定淀粉及级分的相对分子质量的分布。近几年,凝胶渗透色谱越来越多用于对直链淀粉和支链淀粉的纯度鉴定^[32-34],已经成为评定直链淀粉纯度的一项重要指标。

程科等^[34]用凝胶渗透色谱法对分离级分纯度进行表征,研究了结晶次数、大米品种、正丁醇溶液的浓度的影响。在色谱分析中,其采用的洗脱液为 50mmol/L 的 NaCl 溶液(含 0.02% 的叠氮钠),洗脱液流速为 16mL/h。结果发现:结晶的次数越多,同用量的正丁醇溶液浓度越高(结合的直链淀粉越多),支链淀粉的峰面积越小,得到的直链淀粉越纯。

凝胶渗透色谱法不仅可以对淀粉级分的纯度进行表征,更重要的是其可以同时提供级分的平均相对分子质量及相对分子质量分布。如程科等^[34]根据洗脱体积估算了 5 种自制大米直链淀粉的相对分子质量在 $4.6 \times 10^6 \sim 5.45 \times 10^6$ 范围内。

直链淀粉和支链淀粉纯度的表征手段多样,在实

际操作中,研究人员常会结合以上两种或几种方法共同对直链淀粉和支链淀粉的纯度进行鉴定。例如杨光等^[35]同时测定了自制直链淀粉的蓝值和碘亲和力,并结合凝胶色谱图对样品的纯度进行说明;洪雁等^[28]则结合蓝值、高效液相色谱、凝胶色谱对分离的淀粉级分纯度进行表征。

2 直链淀粉和支链淀粉的分子结构

直链淀粉是一种线形多聚物,由 α -D-1,4-糖苷键连接而成。已有研究表明^[36-38],除了直线型直链淀粉外,直链淀粉还含有相当一部分的分枝直链淀粉,分枝点是由 α -D-1,6-糖苷键连接而成,分枝点隔开很远,占总糖苷键的比例很小,因此它的物理性质基本上和直线型直链淀粉相同。分析直链淀粉分子结构的方法是通过测量标记还原端上的氢。例如 Takeda^[36]、Yoshida^[37]通过制备直链淀粉片段的 α -LDS(淀粉分解限制糊精)研究了分枝直链淀粉。

支链淀粉是一种高分枝的束状结构,主链通过 α -1,4-糖苷键连接而成,支链通过 α -1,6-糖苷键与主链相连,支链淀粉含有还原端的 C 链(主链),C 链具有很多侧链,称为 B 链(内链),B 链又具有侧链,与其他的 B 链和 A 链相连,A 链(外链)没有侧链。研究支链淀粉分子结构的方法(也适合于直链淀粉)是酶脱枝法,不同的酶有不同的作用模式,主要通过测量单位链长和分布、外链长度和内链分布及簇单元 3 个部分来完成。其中测定支链淀粉的单位链长长度和分布是最普遍的结构分析,单位链长的长度可以通过测量酶脱枝后葡萄糖残基的总量和非还原端的链数目来确定,也可通过 ¹H-和 ¹³C-核磁共振光谱所得到的信号来测量,对于宽范围的支链淀粉还可利用凝胶渗透色谱(GPC)和高效液相分子排阻色谱(HPSEC)来分析其单位链的结构。单位链长的分布可以利用 α -LDS 处理的柱型图来分析,也可以用毛细管电泳或 DNA 测定仪来分析。Hanashiro 等^[39]利用 2-氨基吡啶染色荧光标示还原端,然后进行脱枝,再 SEC 分离,最后从荧光散射中探测 C-链的分布,以此描述了支链淀粉的 C-链的分布。

通过测定外链长度和内链分布可以更加精确的了解链分布、位置及数目等信息,另外还可以很好的得到不同种类的链的信息,其方法是先采用外切淀粉酶水解除去外部侧链,然后研究留下来包含原有的分支结构和内链残基的极限糊精。

对簇单元的研究可以透析支链淀粉的分支情况,其方法是利用 α -淀粉酶(α -amylase)将支链淀粉水解为 α -限制糊精(α -limit dextrin),而后以异淀粉酶(isoamylase)去分支水解出 B 链,再以异淀粉酶和普鲁兰酶(pullulanase)去分支分解出所有的 A 链与 B 链,最后

计算出 A 链/B 链的比例即可推算出簇单元结构。

3 直链淀粉与支链淀粉的相对分子质量(聚合度)

不同来源品种淀粉的直链淀粉和支链淀粉聚合度有差异。直链淀粉的数均聚合度 DP 约在几百到几千,支链淀粉的数均聚合度 DP 在 $1 \times 10^3 \sim 3 \times 10^6$ 之间^[40-42]。

目前测定淀粉及级分相对分子质量的方法有甲基化法、高碘酸氧化法、 α -淀粉酶水解法和物理法等。一般化学方法测定的相对分子质量总是偏低,常使用的是现有的渗透压法、色谱法(1.3 节已作介绍)、光散射法、黏度法和高速离心沉降法等物理方法。其中光散射技术和色谱分离技术相结合,不但能测得大分子的重均相对分子质量、分子旋转半径与第二维里系数,还可测得相对分子质量分布,分辨相对分子质量大小不同的族群以及分子的形态、分枝率及聚焦态等,作为一种非常有效的工具,这项技术已在欧美、日本广泛使用,在我国近年也开始应用。

李玥等^[43]使用流变仪分离直链淀粉,结合高效液相分子排阻色谱(HPSEC)、多角度光散射仪(MALLS)及折光检测器(RI)连用系统,准确地测定了不同大米直链淀粉的相对分子质量分布($3.29 \times 10^5 \sim 2.75 \times 10^6$),并且测出其分子平均旋转半径在 33.8 ~ 52.2nm 之间。刘巧瑜等^[33]在入射光波长为 633nm、流速为 1.00mL/min 的散射条件下采用激光光散射仪,并结合凝胶渗透色谱鉴定了自制的稻米直链淀粉和支链淀粉的纯度之后,同时测定了直链淀粉和支链淀粉的相对分子质量。

4 直链淀粉和支链淀粉的晶体特性

淀粉颗粒由有序的结晶区和无序的无定形区两部分组成,这是由于组成淀粉的直链淀粉和支链淀粉晶体结构及比例含量不同造成的。直链淀粉和支链淀粉的晶体特性(聚集状态)可以通过 X-射线衍射法来加以研究。

杜先锋等^[44]利用 X-射线衍射表明:直链淀粉存在明显的结晶区,衍射角 2θ 在 7.7° 、 12.5° 、 19.6° 、 22.3° 处均有明显的吸收峰,呈结晶结构,而支链淀粉则无吸收峰出现,是典型的无定形结构。同样熊善柏^[45]、赵思明^[46]、杜先锋^[47]等测得分离纯化后的直链淀粉结晶度为 23% ~ 25%,支链淀粉则无晶体结构。其 X-射线衍射条件: X-射线管为铜对阴极, Ni 过滤器,电压 30kV,电流 25mA,扫描速度 4 %/min,发散狭缝 1° ,接收狭缝 0.3mm,防发散狭缝 1° ,测定范围 2θ 为 $3^\circ \sim 70^\circ$ 。

5 直链淀粉和支链淀粉的热焓特性

直链淀粉和支链淀粉的热焓特性可借助于热分析技术。热分析技术是研究物质在加热或冷却过程中产生某

些物理变化和化学变化的技术。常用的热分析技术包括差热技术(DTA)、示差扫描热分析(DSC)和热失重分析(TG),其中 DSC 法在淀粉及级分中应用得最多^[46,48]。

张艳霞等^[10]研究发现直链淀粉的含量对淀粉的热焓值和结晶特性呈现一定的相关性。国外研究了直链淀粉和支链淀粉对淀粉热特性的影响,发现淀粉的热特性跟淀粉中直链淀粉和支链淀粉比例含量以及支链淀粉的链长有很大的关系^[49-51],但在国内研究很少,尤其是直链淀粉和支链淀粉的热焓值未见报道,具体数据还有待于进一步研究。

6 直链淀粉和支链淀粉的黏度特性

高分子的黏度特性与其分子特性有密切关系,利用乌氏黏度计测定不同浓度的溶液与纯溶剂流出时间,从而可以得到增比黏度、比浓黏度和特性黏度。熊善柏等^[44]、赵思明^[46]、杜先锋^[47]测得直链淀粉的浓度-比浓黏度关系曲线呈良好的线性关系,而支链淀粉的浓度-比浓黏度关系曲线表现出了明显的二次多项式特征。但此方法测量时的温度、乌氏黏度计的平衡时间、秒表时间、黏度计是否垂直、黏度计的内壁是否清洁等因素导致测定的误差较大。

目前,淀粉及级分黏度特性的测试更多的转向采用旋转黏度计和快速黏度分析仪(RVA),其中 RVA 具有检测速度快、样品进样量少、灵活性强等优点,在国外已被广泛应用,主要用于测试温度变化过程中淀粉的糊化特性,近几年,在我国也得到了发展应用^[52-53]。

7 展望

作为一种可再生,可降解的天然高分子材料,淀粉的分离纯化、检测及物化特性已经有了较多的深入研究。近年来国内外正热衷于淀粉及其级分的改性衍化等研究以满足各应用领域的需求。但目前还存在许多问题,比如直链淀粉和支链淀粉的分子结构、聚集状态及晶体、热焓、黏度等物化特性和含量比例在淀粉的深加工和改性衍化过程中的影响还有待于进一步研究,另外直链淀粉和支链淀粉各自的独特功能特性也具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ALTSKAR A, ANDERSSON R, BOLDIZAR A, et al. Some effects of processing on the molecular structure and morphology of thermoplastic starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 71(4): 591-597.
- [2] WANG Zhifen, FANG Lin, ZHANG Kexi, et al. Application and research progress of starch in polymer materials[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2008, 12(19): 3789-3792.
- [3] 余雪松, 黄赤兵, 张银甫, 等. 多孔止血淀粉的制备及其生物相容性[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(32): 6270-6274.

- [4] 付蕾, 田纪春. 抗性淀粉制备、生理功能和应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(2): 206-210.
- [5] 李海普, 胡岳华, 蒋玉仁, 等. 变性淀粉在铝硅矿物浮选分离中的作用机理[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 697-701.
- [6] XIE Fengwei, YU Long, SU Bing, et al. Rheological properties of starches with different amylose/amylopectin ratios[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(3): 371-377.
- [7] LIU Hongsheng, YU Long, SIMON G, et al. Effects of annealing on gelatinization and microstructures of corn starches with different amylose/amylopectin ratios[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 77(3): 662-669.
- [8] LIU Hongsheng, YU Long, SIMON G, et al. Effect of annealing and pressure on microstructure of cornstarches with different amylose/amylopectin ratios[J]. Carbohydrate Research, 2009, 344(3): 350-354.
- [9] 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, 22(4): 33-37.
- [10] 张艳霞, 丁艳锋, 李刚华, 等. 直链淀粉含量不同的稻米淀粉结构、糊化特性研究[J]. 作物学报, 2007, 33(7): 1201-1205.
- [11] 卢敏, 殷涌光. 稻米直链淀粉研究进展[J]. 食品科技, 2005(8): 5-8.
- [12] WICKRAMASHINGE H A M, MIURA H, YAMAUCHI H, et al. Comparison of the starch properties of Japanese wheat varieties with those of popular commercial wheat classes from the USA, Canada and Australia[J]. Food Chemistry, 2005, 93(1): 9-15.
- [13] CHEN J J, LAI M F V, LIL C. Effects of compositional and granular properties on the pasting viscosity of rice starch blends[J]. Starch, 2003, 55(5): 203-212.
- [14] JUHASZ R, SALGO A. Pasting behavior of amylose, amylopectin and their mixtures as determined by RVA curves and first derivatives department of applied biotechnology and food science[J]. Starch, 2008, 60(2): 70-78.
- [15] HERMANSSON A M, SVEGMARK K. Developments in the understanding of starch functionality[J]. Trends in Food Science and Technology, 1996, 7(11): 345-353.
- [16] 罗永霞, 陈正宏, BUWALDA P. 全新蜡质马铃薯淀粉给休闲食品带来创新[J]. 中外食品, 2006(3): 58-59.
- [17] 刘洁, 刘亚伟. 直链淀粉与支链淀粉的分离方法[J]. 粮食与饲料工业, 2005(2): 15-17.
- [18] 余飞, 邓丹雯, 董婧, 等. 直链淀粉含量的影响因素及其应用研究进展[J]. 食品科学, 2007, 28(10): 604-608.
- [19] 王中荣, 刘雄. 高直链淀粉性质及应用研究[J]. 食品与油脂, 2005(11): 10-13.
- [20] SCHOCH T J. Iodimetric determination of amylose by potentiometric titration: standard method[C]/WHISTLER R L. Methods in carbohydrate chemistry. US Orlando: Academic Press, 1964: 157-160.
- [21] 张娟, 唐文凭, 王正武, 等. 芭蕉芋淀粉和直链淀粉提取、分离、鉴定及含量测定[J]. 食品科学, 2008, 29(9): 303-306.
- [22] 吉宏武, 丁霄霖. 马铃薯直链淀粉与支链淀粉的分离方法[J]. 食品科技, 2000(6): 6-7.
- [23] SCOTT J, MCGRANCE, HUGH J, et al. A simple and rapid colorimetric method for the determination of amylose in starch products[J]. Starch, 1998, 50(4): 158-163.
- [24] JARVIS C E, WALKER J R L. Simultaneous, rapid, spectrophotometric determination of total starch, amylose and amylopectin[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1993, 63(1): 53-57.
- [25] 夏慧玲, 王水兴, 潘阳. 红薯直链淀粉的分离纯化和检测[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(11): 47-49.
- [26] GILBERT G T, SPRAGG S P. Iodimetric determination of amylose iodine sorption: blue value[C]/WHISTLER R L. Methods in carbohydrate chemistry. New York: Academic Press, 1964: 168-169.
- [27] 高伟丽, 赵燕, 李建科. 丁醇沉淀法分离粗直链淀粉的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 271-274.
- [28] 洪雁, 顾正彪, 刘晓欣. 直链淀粉和支链淀粉纯品的提取及其鉴定[J]. 食品工业科技, 2004, 25(4): 86-88.
- [29] 孙忠伟, 张燕萍, 向传万. 芋头淀粉的分离和纯化[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(3): 117-121.
- [30] 沈钟苏, 陈全斌, 湛志华. 桃榔淀粉的级分及其凝胶色谱分析[J]. 广西科学, 2005, 12(2): 130-132.
- [31] 沈钟苏, 陈全斌, 湛志华. 荔浦芋淀粉的级分及其凝胶色谱分析[J]. 广西科学, 2005, 12(4): 303-305.
- [32] 敖自华, 王璋, 许时婴. 银杏淀粉的分离和纯化[J]. 食品科学, 2001, 22(1): 23-26.
- [33] 刘巧瑜, 赵思明, 熊善柏, 等. 稻米淀粉及其级分的凝胶色谱分析[J]. 分析检验, 2003, 24(3): 105-108.
- [34] 程科, 许永亮, 熊善柏, 等. 结晶法分离纯化大米直链淀粉[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(2): 170-173.
- [35] 杨光, 杨波, 丁霄霖. 直链淀粉和支链淀粉对抗性淀粉形成的影响[J]. 食品工业科技, 2008, 29(6): 165-167.
- [36] TAKEDA Y, HIZUKURI S, JULIANO B O. Purification and structure of amylose from rice starch[J]. Carbohydrate Research, 1986, 148(22): 299-308.
- [37] YOSHIDA H, NOZAKI K, HANASHIRO I. Structure and physico-chemical properties of starches from kidney bean seeds at immature, premature and mature stages of development[J]. Carbohydrate Research, 2003, 338(5): 463-469.
- [38] YOSHIMOTO Y, TAKENOCHI T, TAKEDA Y. Molecular structure and some physicochemical properties of waxy and low-amylose barley starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 47(2): 159-167.
- [39] HANASHIRO I, ABE J, HIZUKURI S. A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography[J]. Carbohydrate Research, 1996, 283(22): 151-159.
- [40] TESTER R F, KARKALAS J, QI Xin. Starch-composition, fine structure and architecture[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39(2): 151-165.
- [41] HIZUKURI S, TAKEDA Y, YASUDA M, et al. Multi-branched nature of amylose and action of debranching enzymes[J]. Carbohydrate Research, 1981, 94(2): 205-213.
- [42] HIZUKURI S. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance[J]. Carbohydrate Research, 1986, 147(2): 342-347.
- [43] 李玥, 钟芳, 麻建国. 大米直链淀粉分子量分布及分子旋转半径的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 36-41.
- [44] 杜先锋, 许时婴, 王璋. 葛根直链淀粉和支链淀粉分离纯化的研究[J]. 食品与发酵工业, 1998, 24(4): 18-21.
- [45] 熊善柏, 赵思明, 张声华. 稻米淀粉的理化特性研究 稻米直链淀粉和支链淀粉的理化特性[J]. 中国粮油学报, 2003, 18(2): 5-8.
- [46] 赵思明, 熊善柏, 张声华. 稻米淀粉的理化特性研究 不同类型稻米淀粉的理化特性[J]. 中国粮油学报, 2002, 17(6): 39-43.
- [47] 杜先锋, 许时婴, 王璋, 等. 葛根直链淀粉分子量的测定[J]. 合肥工业大学学报, 2001, 24(2): 203-206.
- [48] 张春红, 黄晓杰, 李心欣, 等. 高直链玉米淀粉性质的研究[J]. 食品科技, 2006, 31(3): 21-24.
- [49] SASAKI T, YASUI T, MATSUKI J. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation, and pasting properties of starches from waxy and nonwaxy wheat and their F1 seeds[J]. Cereal Chemistry, 2000, 77(1): 58-63.
- [50] WISCHMANN B, BLENNOW A, MADSEN F, et al. Bandholm: functional characterisation of potato starch modified by specific in planta alteration of the amylopectin branching and phosphate substitution[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(6): 1016-1024.
- [51] JANE J, CHEN Y Y, LEE L F, et al. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch[J]. Cereal Chemistry, 1999, 76(5): 629-637.
- [52] 汪明振, 罗发兴, 黄强, 等. 蜡质马铃薯淀粉的颗粒结构与性质研究[J]. 食品工业, 2008(1): 13-16.
- [53] 李良俊, 张晓冬, 沈新平. 莲藕淀粉 RVA 谱特征和淀粉粒形态的研究[J]. 园艺学报, 2006, 33(3): 534-538.