

# 淀粉冻融稳定性的研究进展

王梦嘉<sup>1,2</sup>, 叶晓汀<sup>1</sup>, 吴金鸿<sup>1</sup>, 孙子文<sup>1</sup>,

黄伊雯<sup>1</sup>, 吕志红<sup>3</sup>, 陈以国<sup>3</sup>, 隋中泉<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 农业与生物学院, 上海 20240; 2. 上海雀巢有限公司, 上海 201613;

3. 邹城市熙来生物科技有限公司, 山东 273500)

**摘要:** 淀粉的冻融稳定性直接影响速冻面食的品质。综述了冻融处理对淀粉理化性质和结构特征的变化及冻融稳定性的主要影响因素, 对可能的作用机理进行了分析和探讨。为速冻面食的工业生产和品质优化提供了一定的理论参考。

**关键词:** 淀粉; 速冻食品; 冻融稳定性

中图分类号: TS 231 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2016)05-0019-05

## Research progress on freeze - thaw stability of starch

WANG Meng - jia<sup>1,2</sup>, YE Xiao - ting<sup>1</sup>, WU Jin - hong<sup>1</sup>, SUN Zi - wen<sup>1</sup>, HUANG Yi - wen,

LV Zhi - hong<sup>3</sup>, CHEN Yi - guo<sup>3</sup>, SUI Zhong - quan<sup>1</sup>

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. Nestle Shanghai co., Ltd., Shanghai 201613;

3. Zhoucheng Xilai Biological technology co. Ltd., Zhoucheng Shandong 273500)

**Abstract:** The freeze - thaw stability of starch affects directly the quality of frozen starch products. The effects of freezing - thawing cyclic treatment on physicochemical properties and structures of starch, its principal factors and the research progress in the related mechanisms were investigated, which provided some information for the development of frozen starch products in food industry.

**Key words:** starch; frozen food; freeze - thaw stability

随着社会发展和生活节奏的不断加快, 消费者对速冻食品(如面条、水饺、汤圆和米饭等主食)的需求日益增加。速冻食品通常采用快速冷冻和低温储存的工艺, 通过降低食品中水分含量和水分活度来减少微生物繁殖的风险、降低酶活性以及延缓食品原料间化学变化, 以此达到延长产品货架期和方便消费者食用的目的。然而, 速冻食品在运输、储存和消费过程中, 都会面临无法保证低温冷藏条件的问题。温度波动所导致的产品品质变化往往让消费者难以接受, 如产品口感变差、失水变硬、蒸煮后表皮开裂、失去弹性等。

淀粉冻融通常是指低温(如 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下对糊化或未糊化淀粉进行冷冻后再放置室温或者更高温度(如 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴)下使淀粉融化的过程。在此过程

中, 淀粉理化性质及颗粒结构的变化趋势和程度反映了淀粉的冻融稳定性, 也直接影响了相关速冻食品的品质特性。有关淀粉冻融稳定性的研究有助于进一步了解淀粉分子的内部结构, 推动了相关产品工业化生产条件的优化。

## 1 冻融过程对淀粉影响

冻融过程通过水分子和温度的作用改变淀粉的内部结构, 对淀粉的颗粒形态、质构特征、结晶状态和功能特性产生显著影响。一般而言, 这些影响效果不利于淀粉在冻融过程中保持结构的稳定。

### 1.1 冻融对淀粉颗粒形态影响

淀粉在冻融过程中, 循环过程形成的冰晶和机械力会对淀粉颗粒造成损伤。严娟等<sup>[1]</sup>研究了生糯米淀粉的冻融稳定性, 通过电镜扫描观察到经过多次冻融循环后, 淀粉颗粒棱角出现损伤, 表面变得更粗糙且出现许多凹洞。冻融过程中冰晶不断融

收稿日期: 2016-04-15

作者简介: 王梦嘉, 1990年出生, 女, 硕士研究生。

通讯作者: 隋中泉, 1981年出生, 女, 副教授。

解和再形成,反复对淀粉颗粒表面进行挤压,从而造成了上述的机械损伤并伴随部分淀粉的游离溢出。Szymonska 等<sup>[2]</sup>发现生马铃薯淀粉在超低温冻融处理后颗粒表面也发生了明显变化,可能的机理在于融解过程削弱了淀粉分子的双螺旋结构堆积能力,重塑了水分子在淀粉颗粒内的分布,内部结构的松散化和水分子对淀粉颗粒的持续压迫导致最终造成不可逆的结构破坏。此外,渗透入淀粉颗粒内部的水分子与淀粉分子的羟基端形成的氢键可能导致淀粉结晶区排序的紊乱,这同样使得颗粒表面出现了凹洞和破损<sup>[3]</sup>。Szymonska 和 Wodnicka<sup>[4]</sup>在对生马铃薯淀粉进一步的研究中指出,多次的冻融循环在显著提高淀粉颗粒的比表面区域和颗粒间隙的同时,显著减低淀粉的颗粒密度。这可能是由于在冻融过程中,直链淀粉分子和与淀粉颗粒结合的水分子从淀粉无定形区游离出,形成淀粉颗粒内部的空隙区域或打开了颗粒内部通道。由此可见,水分子在冻融过程中起到了重要作用,水分子的移动,结合和再分布导致淀粉结构变得松散且刚性下降,对淀粉内部和表面造成损伤并伴随部分淀粉分子的游离溢出。

### 1.2 冻融对淀粉质构影响

冻融过程中,淀粉会发生例如脱水收缩、硬化和海绵化等现象,这严重影响了相关食品的质构特征。Tao 等<sup>[5]</sup>在对生蜡质大米淀粉的冻融研究中指出,冷冻处理缩小了淀粉的糊化温度范围,并显著降低淀粉的峰值黏度,崩解值和最终黏度至原先的42.1%、37.5%、58%。对于几乎不含直链淀粉的蜡质淀粉而言,支链淀粉和颗粒膨胀度可能是影响黏度的主要因素,冻融过程中支链淀粉的持续溢出和加速重结晶老化导致黏度显著下降。此外,淀粉黏度还取决于淀粉颗粒的膨胀度、分散颗粒的刚性及其与连续相之间的相互作用<sup>[6]</sup>。Wang 等<sup>[7]</sup>研究了冻融对于糊化银杏、菱角、土豆和小米淀粉的影响,发现冻融循环增强了所有淀粉凝胶的硬度且使得它们的黏弹性降低,反复冻融通过扩大淀粉胶体的孔隙,促进冰晶的形成并破坏其网状结构影响质构。该研究还报道了支链淀粉含量和分子结构对淀粉质构的密切相关,冻融循环后淀粉凝胶的硬度与聚合

度31~36的长支链分子含量成正相关;淀粉凝胶的黏弹性与聚合度12~17的中等长度支链分子含量成正相关。可能的机理为形成低聚糖的双螺旋结构至少需要10个葡萄糖单位而少有短链分子,体系中双螺旋结构的形成主要依靠中等长度的支链分子,冻融处理后大量中等长度的支链淀粉分子被破坏或是游离溢出。上述研究都表明了对于糊化和未糊化淀粉而言,支链淀粉含量和其链长分布是冻融过程中决定质构变化的重要因素。

### 1.3 冻融对淀粉结晶影响

淀粉颗粒晶体结构主要由支链双螺旋结构形成,晶体类型分为A型、B型、C型和V型,C型被认为是介于A型和B型的中间类型<sup>[3]</sup>。通过X射线晶格衍射设备能直观检测到淀粉的晶型特征并计算淀粉结晶度<sup>[8]</sup>。A型结晶常见于谷物淀粉中,B型结晶常见于根茎类和高直链玉米淀粉中,C型结晶常见于豆类淀粉中,而当直链淀粉与水、碘以及其他有机物结合时可能会出现标准的V型结晶。淀粉颗粒的结晶度主要受以下几因素的影响:晶体体积、支链淀粉聚合度和含量、结晶区双螺旋结构、颗粒刚性和淀粉分子有序度<sup>[9-10]</sup>。学者们对冻融处理后淀粉的结晶变化进行了探索,严娟等<sup>[1]</sup>报道了冻融前后生糯米淀粉颗粒晶型不发生变化,仍保持A型。淀粉与水按1:1.5(质量比)比例混合,经冻融处理后淀粉相对结晶度由25.19%降低至21.34%,可能是由于经反复冻融后支链淀粉游离溢出导致结晶区比例减小。水分含量30%和40%的糯米淀粉的相对结晶度由25.19%分别提高至32.47%和31.65%,可能是由于增加的水分使得部分无定形区域转化成了微晶结构。此外,反复冻融破坏了淀粉双螺旋结构增加体系紊乱度,使得多次冻融之间的相对结晶度呈下降趋势。Chung 等<sup>[11]</sup>报道了酸水解和脱脂处理对冻融高直链玉米淀粉结晶状态和糊化特性的影响,脱脂淀粉的衍射强度略低于原淀粉,但晶型不发生变化。当淀粉受到较长时间酸水解后淀粉衍射峰值升高,由于酸水解打断了淀粉长链,降低了其移动性,所以在冻融过程时更容易发生重结晶而形成更多晶体结构。由此可见,冻融不改变淀粉原本晶型,而对淀粉结晶度的影响不尽相同。一

方面冻融过程破坏了淀粉原有的晶体结构,增加支链淀粉游离溢出以及削弱了双螺旋结构堆积能力,而另一方面却可能促进淀粉老化重结晶以及无定形区结构转化,从而增加新晶体,两者呈现竞争机制。

#### 1.4 冻融对淀粉功能特性影响

根据淀粉酶分解淀粉释放葡萄糖的速率将淀粉分为快速消化淀粉、缓慢消化淀粉、抗性淀粉。快速消化淀粉在摄入人体后的20 min内被迅速分解成葡萄糖并引起较剧烈的血糖波动;缓慢消化淀粉在摄入人体后的20至120 min间被缓慢分解成葡萄糖,对血糖波动影响相对较小;抗性淀粉不能被人体内淀粉酶分解成葡萄糖,但能在肠道内被微生物发酵利用<sup>[12]</sup>。缓慢消化淀粉和抗性淀粉由于其卓越的功能性而受到广泛关注。Tao等<sup>[5]</sup>报道了冻融处理会使蜡质大米淀粉中快速消化淀粉和缓慢消化淀粉的含量升高,而抗性淀粉的含量降低。10次冻融循环后的抗性淀粉含量从58.9%降至19%,而缓慢消化淀粉含量从23.8%升至50.3%。可能的机理为冻融处理使淀粉颗粒表面受损,内部通道打开,更多内部颗粒暴露于表面而更易受到淀粉酶的进攻,从而使相当部分的抗性淀粉转变为快速消化淀粉和缓慢消化淀粉。由此可见,冻融处理显著影响三类淀粉的比例,这些变化主要源于处理过程改变了淀粉内部结构,从而削弱淀粉的抗酶解能力。

## 2 影响冻融稳定性因素

工业化生产加工过程中通常通过筛选淀粉品种、与化学变性淀粉的复配、冻融条件和工艺的优化以及添加剂的合理使用等手段来提升速冻面食的冻融稳定性。

### 2.1 淀粉天然属性

淀粉老化率、持水能力是反映淀粉冻融稳定性的关键指标,老化和脱水程度同时受淀粉来源、分子空间结构、支直连淀粉比例、温度变化范围和淀粉浓度的影响<sup>[13]</sup>。表1罗列了Srichuwong等<sup>[14]</sup>研究的不同植物来源的糊化淀粉在1、3、5次冻融循环后的冻融稳定性。结果表明,在木薯、大米中没有观察到明显的淀粉失水现象,但是在魔芋、芋艿、食用美人蕉和香芋淀粉中持水率显著下降。同为粳稻品种的淀粉由于链长分布的不同,冻融稳定性也存在差异。

Varavinit等<sup>[15]</sup>研究了直链淀粉含量对冻融稳定性的影响,28%直链淀粉含量的大米淀粉失水率最高,18%直链淀粉含量的淀粉次之,5%直链淀粉含量的最低。此外,研究发现支链淀粉含量越高则大米淀粉总体冻融稳定性越高。可能的机理是高支链淀粉含量会形成更多的空间位阻现象,且淀粉短期的老化过程主要是直链淀粉的交联重排,这都减少了淀粉老化重结晶并阻碍水分子的析出<sup>[16]</sup>。淀粉的天然属性由其植物来源、基因型以及种植条件所决定,主要表现为支直链淀粉比例、淀粉空间结构以及淀粉同其他大分子(如脂质和蛋白质)交联作用的差异,这导致了淀粉包括冻融稳定性在内的不尽相同的理化性质。

### 2.2 淀粉变性方法

化学方法修饰天然淀粉与物理和酶方法相比,在食品工业中被更广泛应用于制备不同理化性质的变性淀粉。不同的化学试剂和修饰方法能不同程度影响淀粉的冻融稳定性<sup>[13]</sup>。Deetae等<sup>[17]</sup>对大米淀粉进行1%三偏磷酸钠交联处理、4%三聚磷酸钠交联处理以及两者复配对淀粉进行二次变性处理。结果表明,糊化的变性淀粉经过冻融处理后没有呈现出松散的海绵状结构,二次变性处理与前两种单独处理的变性淀粉相比淀粉凝胶的脱水收缩率降低,呈现出更好的冻融稳定性。可能的机理在于磷酸基团的引入延缓了崩解过程,更多水分子进入颗粒内部引起颗粒膨胀和黏度上升,高黏度提升了淀粉的持水能力。磷酸基团之间可能产生的电荷作用提升了淀粉结构的稳定程度,减少冻融过程中的机械损伤,并通过空间位阻效应减缓了淀粉老化和水分子的析出。化学变性淀粉操作简便适合工业化生产,对于不同来源的天然淀粉选择合适的化学变性方法能有效提升淀粉的冻融稳定性。

### 2.3 冻融条件

Charoenrein等<sup>[18]</sup>报道了快速冷冻同慢速冷冻相比能有效抑制淀粉老化、脱水缩合以及硬化。经快速冷冻处理的糊化淀粉的失水率为18.02%,远低于慢速冷冻的38.14%。可能的机理在于快速冷冻温度下降快,能实现迅速的淀粉橡胶态转化,从而抑制淀粉老化晶核的形成和成长,减缓淀粉老化。

在超慢速过冷状态处理下的淀粉老化率最高,但失水率仅为1.92%。老化与脱水缩合变化规律的矛盾是因为过冷状态使得部分晶体不同程度的融化从而形成大小不一的各种晶体并产生大小不一的孔。小孔隙中融化形成水被困在致密的淀粉凝胶体系中无法析出。此外,冻融循环次数也会显著影响淀粉的结构及稳定性。多次反复冻融伴随晶体的再形成,连续的挤压作用会削弱支链淀粉双螺旋结构并形成孔隙,导致土豆淀粉内部结晶的不可逆破坏,并影响淀粉溶解度、持水能力、吸附性和比表面积等。Szymonska 和 Wodnicka<sup>[4]</sup>报道了天然土豆淀粉经过10次冻融循环后,比表面积从0.36 m<sup>2</sup>/g增加到1.64 m<sup>2</sup>/g,平均孔径从1.3 nm增加到3.0 nm。多次冻融循环导致土豆淀粉颗粒密度的增加,而土豆淀粉颗粒的总孔容积在1次冻融处理后会成倍增加,但多次冻融循环对其无显著影响。由此可见,冻融温度、冷冻速率和循环次数通常会对同种淀粉的冻融稳定性产生不同程度的影响。

#### 2.4 添加剂

Ding 等<sup>[19]</sup>报道了添加大麦抗冻蛋白能提高速冻后面团的表现比热、面团融化温度的范围和玻璃态转化温度,同时降低了面团融化焓和冷冻水含量。抗冻蛋白也影响了冻融循环后面团的凝胶特性,降低了水分含量,减弱了冻融处理对水分流动性的影响以及水分的分布。Wang 等<sup>[20]</sup>在对木薯淀粉进行冻融实验时添加了氯化钠来观察其对淀粉冻融稳定性的影响,结果表明氯化钠延缓了淀粉的老化,提高氯化钠浓度可以减小淀粉凝胶内冰晶体积和重结晶交联作用。此外,淀粉内可冻水含量随着氯化钠浓度的增高而降低,且在冻融循环中阻碍淀粉分子间的相互作用。氯化钠的添加有效保证了冻融后木薯淀粉凝胶的品质和稳定性。Arunyanart 和 Charoenrein<sup>[21]</sup>研究了蔗糖对大米淀粉冻融稳定性的影响。在分别对0~20%蔗糖含量(质量分数)的大米淀粉进行5次冻融循环后,淀粉失水率显著下降,蔗糖浓度的升高促进了淀粉凝胶内孔隙缩小和周围淀粉结构的稳定性。淀粉体系内可冻水的含量也随着蔗糖浓度的升高而降低。亲水胶体常作为食品添加剂应用于食品中以改良其品质<sup>[6]</sup>,Lee 等<sup>[22]</sup>研究了9种

不同的多糖对土豆淀粉冻融稳定性的影响。结果表明,海藻酸钠、黄原胶和瓜儿豆胶不同程度地降低了冻融过程中淀粉凝胶的失水率,并能保留在凝胶内且保持稳定。亲水胶体的添加是能降低冻融淀粉的老化率,其中海藻酸钠的抑制作用最为显著。亲水胶体可能通过与淀粉分子间的电荷作用<sup>[23]</sup>或是氢键作用<sup>[24]</sup>维持淀粉的冻融稳定性。大分子有机物和无机盐的添加能通过改变水分子的运动和分布状态以及同淀粉分子发生相互作用而有效地降低淀粉老化率和失水率,提升淀粉冻融稳定性。20种常见淀粉在不同冻融循环次数下的失水率如表1所示。

表1 20种常见淀粉在不同冻融循环次数下的失水率

淀粉来源	脱水收缩率/%		
	冻融循环1次	冻融循环3次	冻融循环5次
块茎与根部			
魔芋	67.9 ± 0.6	75.5 ± 1.3	77.3 ± 0.7
甘薯	28.4 ± 0.7	69.0 ± 1.4	74.0 ± 2.8
竹芋	43.4 ± 3.1	65.1 ± 1.1	66.5 ± 1.6
芋头	20.7 ± 0.1	56.7 ± 0.2	67.2 ± 1.2
豆薯	8.9 ± 3.2	48.6 ± 3.2	63.7 ± 1.7
木薯	(-)	38.9 ± 0.7	51.5 ± 2.5
马铃薯	60.0 ± 1.7	71.5 ± 2.8	75.6 ± 4.1
美人蕉	73.5 ± 3.6	74.4 ± 2.4	74.9 ± 1.2
鲜山药	28.4 ± 2.3	67.4 ± 1.5	69.5 ± 1.5
谷物			
玉米	35.4 ± 1.9	69.5 ± 0.7	73.3 ± 2.4
糯玉米	9.6 ± 1.1	33.7 ± 2.1	53.9 ± 1.0
薏苡	4.2 ± 3.1	25.9 ± 3.3	46.5 ± 0.7
籼稻	45.7 ± 2.6	69.6 ± 3.7	74.9 ± 3.2
粳稻	(-)	(-)	7.3 ± 0.8
糯米	(-)	(-)	(-)
小麦	58.2 ± 1.4	60.2 ± 1.7	63.1 ± 3.8
其他			
绿豆	42.8 ± 0.7	64.5 ± 2.5	73.1 ± 0.9
莲藕	35.1 ± 2.5	64.6 ± 3.8	71.2 ± 0.2
莲子	52.6 ± 2.6	62.4 ± 1.9	65.2 ± 3.5
西米	21.7 ± 3.4	66.8 ± 0.4	68.8 ± 0.6

### 3 总结与展望

综述了冻融过程对淀粉的颗粒形态、凝胶质构、结晶状态和功能特性的影响,并列出了淀粉来源、淀粉变性技术、冻融条件以及添加剂等淀粉冻融稳定性的影响因素。这些研究不但部分揭示了冻融处理对淀粉结构的影响机理,更为速冻面食的品质改善提供了一定的理论支持。

速冻食品在食品行业中占据相当的市场份额,然而在其运输和贮藏过程中可能会经历多次冷冻和融化,从而影响产品品质。一方面,这对现代物流水平和冷链技术提出了更高的要求;另一方面,淀粉作为速冻面食的主要原料,其冻融稳定性直接影响了产品品质。因此,对淀粉在冻融稳定性方面的深入探索和研究将有助于进一步阐释冻融过程中淀粉内部结构如何发生变化,从而为其工业生产和品质优化提供一定的理论基础。

### 参考文献:

- [1] 严娟,杨娜,焦爱权,等. 冻融对糯米淀粉性质的影响[J]. 食品工业技术, 2012, 33: 109 - 112.
- [2] Szymońska J, Krok F, Komorowska - Czepirska E. Modification of granular potato starch by multiple deep - freezing and thawing [J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 52: 1 - 10.
- [3] Gunaratne A, Hoover R. Effect of heat - moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 49: 425 - 437.
- [4] Szymońska J, Wodnicka K. Effect of multiple freezing and thawing on the surface and functional properties of granular potato starch [J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19: 753 - 760.
- [5] Tao H, Yan J, Zhao J, et al. Effect of multiple freezing thawing cycles on the structural and functional properties of waxy rice starch [J]. PLOS ONE, 2015(10): 1371.
- [6] 刘星星,叶晓汀,姚天鸣,等. 亲水胶体对淀粉理化性质影响的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2015, 23: 22 - 25.
- [7] Wang L, Cheng W, Qiao Y, et al. The effect of freeze - thaw cycles on microstructure and physicochemical properties of four starch gels [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31: 61 - 67.
- [8] Lopez - Rubio A, Flanagan B M, Gilbert E P, et al. A novel approach for calculating starch crystallinity and its correlation with double helix content: A combined XRD and NMR study [J]. Biopolymers, 2008, 89: 761 - 768.
- [9] Ambigaipalan P, Hoover R, Donner E, et al. Starch chain interactions within the amorphous and crystalline domains of pulse starches during heat - moisture treatment at different temperatures and their impact on physicochemical properties [J]. Food Chemistry, 2014, 143: 175 - 184.
- [10] Ye X, Sui Z. Physicochemical properties and starch digestibility of Chinese noodles in relation to optimal cooking time [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 84: 428 - 433.
- [11] Chung H J, Jeong H Y, Lim S T. Effects of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze - thawed high amylose corn starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 54: 449 - 455.
- [12] Maki K C, Pelkman C L, Terry F, et al. Resistant starch from high - amylose maize increases insulin sensitivity in overweight and obese men. [J]. Journal of Nutrition, 2012, 142: 717 - 723.
- [13] 杨凤,姚天鸣,叶晓汀,等. 湿热处理技术对淀粉理化特性影响的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2015, 23: 21 - 24.
- [14] Srichuwong S, Isono N, Jiang H, et al. Freeze - thaw stability of starches from different botanical sources: Correlation with structural features [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87: 1275 - 1279.
- [15] Varavit S, Shobsngob S, Varayanond W, et al. Freezing and Thawing Conditions Affect the Gel Stability of Different Varieties of Rice Flour [J]. Starch - Stärke, 2002, 54(1): 31 - 36.
- [16] Sui Z, Yao T, Zhao Y, et al. Effects of heat - moisture treatment reaction conditions on the physicochemical and structural properties of maize starch: Moisture and length of heating [J]. Food chemistry, 2015, 173: 1125 - 1132.
- [17] Deetae P, Shobsngob S, Varayanond W, et al. Preparation, pasting properties and freeze - thaw stability of dual modified crosslink - phosphorylated rice starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 73: 351 - 358.
- [18] Charoenrein S, Preechathamwong N. Undercooling associated with slow freezing and its influence on the microstructure and properties of rice starch gels [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100: 310 - 314.
- [19] Ding X, Zhang H, Wang L, et al. Effect of barley antifreeze protein on thermal properties and water state of dough during freezing and freeze - thaw cycles [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 47: 32 - 40.
- [20] Wang G, Hong Y, Gu Z. Effect of NaCl addition on the freeze - thaw stability of tapioca starch gels [J]. Starch - Stärke, 2015, 67: 604 - 611.
- [21] Arunyanart T, Charoenrein S. Effect of sucrose on the freeze - thaw stability of rice starch gels: Correlation with microstructure and freezable water [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74: 514 - 518.
- [22] Lee M H, Baek M H, Cha D S, et al. Freeze - thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16: 345 - 352.
- [23] Shi X, Bemiller J N. Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 50: 7 - 18.
- [24] Liu H, Eskin N A M, Cui S W. Interaction of wheat and rice starches with yellow mustard mucilage [J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17: 863 - 869. 完