马春敏, 刘婉茹, 杨杨, 等. 外源物质对淀粉老化的抑制机理及其应用进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 460−469. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010183

MA Chunmin, LIU Wanru, YANG Yang, et al. Inhibition Mechanism of Starch Retrogradation by Exogenous Substances and Progress of Its Application[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 460−469. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010183

· 专题综述 ·

外源物质对淀粉老化的抑制机理及其应用进展

马春敏, 刘婉茹, 杨　杨, 徐　悦, 王　冰, 张　光, 边　鑫, 张　娜*

（哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028）

摘　要: 淀粉老化是指淀粉分子经糊化冷却后，由无序转变为有序结构的过程，大多数情况下淀粉老化现象会对淀粉及其制品的感官和储存质量产生不利影响。目前抑制淀粉老化方法有很多，其中添加外源物质被认为是一种有效的抑制手段。然而外源物质种类繁多，且目前缺乏外源物对淀粉老化抑制机理的系统性总结。因此，本文系统的综述了抗淀粉老化的外源物质种类，包括盐、脂质、蛋白质、非淀粉类碳水化合物、乳化剂及酶制剂等，并深入探讨了这些外源物质抑制淀粉老化的机理；另外，综述了外源添加抑制淀粉老化过程中，对淀粉分子的结构（形貌特性、短程有序性、长程有序性等）和理化特性（热特性、糊化特性、流变特性等）的影响，最后介绍了外源物在食品中的应用研究进展，以期为外源物质抑制淀粉老化的相关研究提供理论依据。

关键词: 外源物质, 淀粉老化, 机理, 应用

中图分类号: TS235.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0460−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010183

本文网刊:

Inhibition Mechanism of Starch Retrogradation by Exogenous Substances and Progress of Its Application

MA Chunmin, LIU Wanru, YANG Yang, XU Yue, WANG Bing, ZHANG Guang, BIAN Xin, ZHANG Na*

（College of Food Science and Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China）

Abstract: Starch retrogradation refers to the process which starch molecules transform from a disordered state to an ordered structure after gelatinization and cooling. In most cases, the phenomenon of starch retrogradation has an adverse effect on the sensory and storage qualities of starch and products. Currently, there are numerous methods for inhibiting starch retrogradation, among which the addition of exogenous substances is considered an effective inhibitory measure. However, there is a wide variety of exogenous substances, and there is a lack of a systematic summary of the mechanism by which exogenous substances inhibit starch retrogradation currently. Therefore, this paper systematically reviewes the types of exogenous substances that can resist starch retrogradation, including salts, lipids, proteins, non-starch carbohydrates, emulsifiers, and enzyme preparations, and so on. The mechanisms of these exogenous substances inhibit starch retrogradation were deeply explored. Moreover, the influence of exogenous additives on the structure (morphology, short-range order, long-range order, etc.) and physicochemical properties (thermal properties, gelatinization properties, rheological properties, etc.) of starch molecules during the process of inhibiting starch retrogradation was reviewed. Finally, the research progress of exogenous substances in food was introduced. This paper provides a theoretical basis for the

收稿日期: 2025−01−21

基金项目: 国家重点研发计划项目（2023YFD2100803, 2021YFD2100902-3）; 国家自然科学基金（32372387, 32402015）; 黑龙江省杰出青年基金项目（JQ2024C003）; 黑龙江省自然科学基金（PL2024C011）; 黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目（LJGXCG202080, LJGXCG202083）; 黑龙江省重点研发计划揭榜挂帅项目（2023ZXJ08B03）; 黑龙江省青年科技人才托举工程项目（2023QNTJ001）; 哈尔滨商业大学研究生创新科研项目（YJSCX2024-812HSD）。

作者简介: 马春敏（1992−）, 女, 博士, 研究方向: 大豆, 谷物化学与加工机理研究, E-mail: chunmin_ma@163.com。

*** 通信作者:** 张娜（1979−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 谷物化学与粮食高值化利用, E-mail: foodzhangna@163.com。

research on the inhibition of starch retrogradation by exogenous substances.

Key words: exogenous substances; starch retrogradation; mechanism; application

淀粉是谷物中含量丰富的一种多糖，加热使淀粉发生糊化现象，淀粉颗粒崩解，淀粉链结构由有序状态转变成无序状态[1−2]，此时淀粉颗粒膨胀、直链淀粉溶出。糊化后的淀粉经冷却，其内部氢键重组，分子链重新组合成有序的双螺旋结构，产生再结晶淀粉，形成新的结晶区，这种现象称为淀粉老化[3]。老化过程又分为短期老化和长期老化，随着放置时间的延长，直链淀粉会优先发生老化即短期老化，随后支链淀粉发生老化即长期老化过程。在老化发生过程中淀粉链会重新结合形成双螺旋结构，支、直链淀粉从无序状态重新形成有序晶体状态[4]。直链淀粉和支链淀粉的结构式/3D 立体结构及淀粉老化的过程如图 1 所示。淀粉老化通常被认为是有不良影响，此时淀粉链柔韧性减弱，吸水能力下降，水分散失，使得面包、大米等富含淀粉的食物品质大幅度下降，会发生食品变质等现象，这可能导致食品保质期和消费者接受度大幅度下降，导致浪费现象的发生，从而对食品加工构成重大挑战[5]。有研究学者以年糕作为研究对象，发现年糕新鲜蒸熟时，其质地柔软，然而随着放置时间的延长，其水分会随之蒸发，发生淀粉老化现象，使年糕变硬，从而导致消费者接受度下降[6]。Borad 等[7] 将大米和牛奶混合制成一种米制品甜品，经冷藏后淀粉老化，导致米粒变硬，产品变得粗糙且不可接受，再加热后也不能复原到原始状态。综上所述，目前老化现象对淀粉基食品品质影响严重，需要进一步改善。

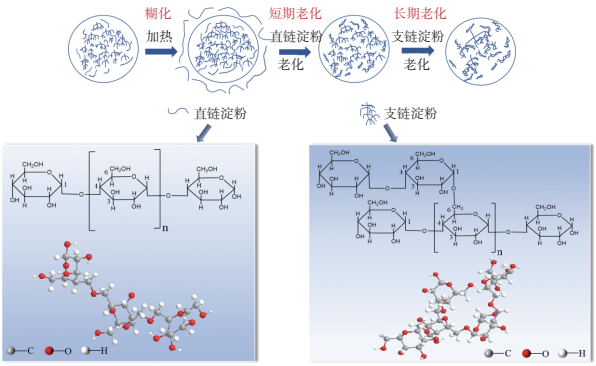


图 1　淀粉老化过程

Fig.1　Process of starch retrogradation

抑制淀粉老化的方法有物理法、化学法、酶法等方法。物理法包括热加工和非热加工技术，如微波、挤压、超声、超高压等处理方式。这些加工方式通过改变淀粉分子的环境和减少分子间相互作用从而抑制淀粉老化。化学法包括醚化、酯化、交联或分解反应（如水解和氧化），将官能团引入淀粉分子，减弱分子内氢键作用，降低淀粉回生值，从而减轻淀粉老化程度[8]。酶法，酶修饰通过改变糖苷键的比例、聚合度和链长分布来改变淀粉的分子结构，从而减少淀粉结晶面积来减缓老化过程。在淀粉基食品中常用的酶有 α-淀粉酶、β-淀粉酶、真菌淀粉酶等[9]。添加外源物质，使其与淀粉发生作用是抑制淀粉老化的有效手段之一，常用于淀粉基食品中，以达到改善食品风味、品质及延长食品保质期的作用。目前的研究大多聚焦在物理法、化学法、酶法处理对淀粉老化性质的影响，缺乏从外源物质角度对其抑制淀粉老化机理的系统性阐述，因此本文从外源添加物的种类、抑制淀粉老化的机理和其对淀粉结构、理化性质的影响等方面，将外源物抑制淀粉老化的作用机制及应用进行了总结，以期为日后进一步研究淀粉老化提供了基础性的理论建设。

1　常见外源添加物的种类及其抑制淀粉老化的机理

1.1　盐

盐离子对于淀粉老化所产生的影响，可基于霍夫梅斯特序列（Hofmeister Series）加以阐释[10]。Hofmeister Series 是指不同阴离子在水溶液中对水的结构和性质产生不同影响的现象。盐中不同阴离子对水的结构和性质产生不同影响，间接造成了盐对淀粉老化的影响。该序列根据离子改变水的氢键网络的能力将其分为 Chaotropes 和 Kosmotropes[11]。Chaotropes 被定义为“水结构破坏者”，其本质作用在于破坏水分子结构并引起盐效应。在淀粉体系中，这种盐效应具体表现为对淀粉分子与水分子间相互作用的干扰，改变淀粉分子间的相互作用强度，最终对淀粉老化过程产生影响。淀粉老化过程涉及淀粉分子从无序状态向有序状态的转变，而 Chaotropes 引发的盐效应打破了原本淀粉-水体系的平衡，加速或改变了淀粉分子重排的路径与速率。Kosmotropes 被定义为“水结构制造者”，具有很强的水合性，可以稳定大分子，并产生盐析效应[12]。在淀粉溶液体系中，盐离子凭借其电荷特性干扰淀粉分子与水分子之间的氢键网络。随着这种干扰的发生，淀粉分子周围原本与之紧密结合的水分子数量逐渐减少，淀粉分子间相互作用增强。此时，淀粉分子相互聚集，宏观上表现为盐析现象，从而影响淀粉的老化进程。

盐对淀粉老化进程的影响是一个受多因素协同调控的复杂过程。其中，盐的种类、淀粉的类型、盐浓度均为关键影响变量[13−14]。已有研究表明低 NaCl 浓度导致 Na^+ 占主导地位的水结构形成效应和静电相互作用[15]，因此当盐的质量分数高于 2% 时，可以抑制淀粉间氢键的形成，从而抑制淀粉老化[9]。目前有学者将常见的氯盐加入小麦粉中研究其对淀粉老化的影响，发现 NaCl、KCl 和 NaCl+KCl 的加

入均可以显著提高淀粉糊化温度(顺序为 NaCl> NaCl+KCl>KCl),与不添加盐的小麦粉相比,加入盐后,小麦淀粉中直链淀粉链长逐渐缩短,形成了更稳定的短链双螺旋结构,其中钠盐较钾盐相比抑制淀粉老化的效果更显著[16]。这与 Beck 等[17] 所得不同阳离子对淀粉老化影响的顺序 Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^{+}>K^{+} 的结果一致,并且可以得到在相同浓度下,二价盐比一价盐对淀粉老化抑制作用更加明显。图 2a 以 Na^{+}为例,从分子式中可以观察到 Na^{+}作用于直链淀粉取代氢键的形成。不仅如此 Na^{+}的加入还会使直链淀粉的长链转变为短链,使得直链淀粉链长缩短,聚合度随之下降(图 2a 中 m<n, m 和 n 为聚合度),从而抑制淀粉老化。

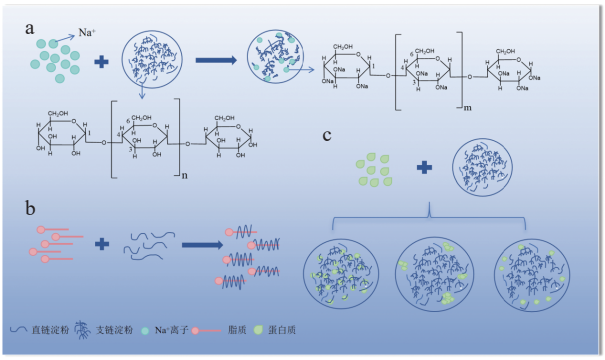


图 2 外源添加物抗淀粉老化机制图

Fig.2 Inhibiting starch retrogradation mechanism diagram of some exogenous additives

注: a: Na^{+}对直链淀粉结构的影响; b: 脂质对直链淀粉结构的影响; c: 蛋白质与淀粉的三种共存形式。

1.2 脂质

在脂质存在的情况下,直链淀粉倾向于缠绕成单一的左旋螺旋,形成疏水作用的直链淀粉复合物,被称为 V 型直链淀粉包合物[18],如图 2b 中所示,这种脂质-淀粉复合物可以抑制双螺旋结构的形成,抑制直链淀粉重结晶,从而抑制淀粉的老化。脂质的加入主要与直链淀粉相互作用,但目前也有研究表明支链淀粉也可与脂质相互作用,使其与直链淀粉相似的结合形成包合物[19]。从消化率角度分类,抗性淀粉 RS5 型淀粉即直链淀粉-脂质复合物,是指淀粉链与游离脂肪酸结合,螺旋结构和淀粉分子重新排列,最终形成抗性麦芽糖糊精的淀粉[20]。脂质链的长度对脂质-淀粉复合物的稳定性有很大影响。长链脂比短链脂具有更低的亲水性,从而防止脂质-淀粉复合物在外界因素(如加热)的影响下被破坏。

然而并不能单方面以脂肪酸链长短来判断抑制淀粉老化程度。Kang 等[21] 在馒头和小麦淀粉中添加了不同链长的脂肪酸对淀粉-脂复合物的形成进行了探究,发现碳链和酰基链较短的脂肪酸比碳链和酰基链较长的脂肪酸更有效地形成了淀粉-脂复合物。然而 Chen 等[22] 在方便面中加入不同链长的脂肪酸,却发现长链脂肪酸比短链的脂肪酸更能形成高阶结构的淀粉-脂复合物。这一相反现象的出现可能是样品自身蛋白质含量的不同。蛋白质分子可通过氢键、疏水相互作用等与淀粉分子、脂肪酸分子发生关联。一方面,蛋白质可能与脂肪酸竞争结合淀粉分子上的特定位点,影响淀粉-脂复合物的形成;另一方面,蛋白质的存在可能改变体系的微观环境,如影响水分分布、分子流动性等,间接作用于淀粉-脂复合物的形成过程,因此要根据实际情况进行判断。除此之外,磷脂作为特殊的脂质,其结构中既有亲水性的头部(磷酸和含氮碱基部分),又有疏水性的尾部(脂肪酸链部分),常以乳化剂的形式作为外源添加物抑制淀粉老化。有研究学者将大豆磷脂加入到小麦淀粉中,观察到直链淀粉-脂质复合物的形成,促进了面团中蛋白质和面筋网络的形成,从而延缓小麦粉和面包在室温下的老化。研究发现,样品中淀粉含量越高,磷脂对淀粉老化的抑制效果愈发显著[23]。Mohamed 等[24] 将卵磷脂分别添加至玉米淀粉和大米淀粉中。研究发现,在淀粉含量相对较高的玉米淀粉体系内,卵磷脂对淀粉老化的抑制作用更为显著。这一现象可能源于在高淀粉含量体系中,卵磷脂与淀粉的接触面积增大,能够形成更多稳定的复合物结构。这些复合物的大量生成,有效阻碍了淀粉分子间的有序聚集过程,进而使得卵磷脂对淀粉老化的抑制效果更为明显。

1.3 蛋白质

蛋白质是影响淀粉老化的主要因素之一[12]。蛋白质与淀粉共有 3 种共存模式(图 2c): a.淀粉和蛋白质不相互混合,两者在溶液中形成独立的富集相; b.蛋白质和淀粉相互作用。例如,当淀粉和蛋白质携带相反的电荷时,由于静电相互作用或范德华力,它们相互作用并形成共聚物; c.淀粉和蛋白质不是形成独立的富集相,也不是相互作用,而是构成单相混合物。当蛋白质加入到淀粉中时会阻止氢键的形成、促使水分子迁移从而使得淀粉老化受到抑制。研究发现,将乳清蛋白水解物加入到大米淀粉中,观察到乳清蛋白的加入阻碍了淀粉聚合物链间分子结合,并破坏氢键的形成。通过 Avrami 模型研究该体系的降解动力学,结果表明乳清蛋白能有效抑制淀粉再结晶,从而抑制淀粉老化[25]。Wang 等[26]将不同蛋白质含量(0%~8%)与复合米粉进行混合形成凝胶,发现随着蛋白质含量的增加,凝胶硬度增加,结晶度降低,米粉凝胶发生老化现象。蛋白质含量的增加导致复合米粉的糊化度不足,从而抑制面粉的长期老化。将大米蛋白加入到大米淀粉中,观察其对淀粉老化特性的影响发现[27],随着大米蛋白的增加(0%~16%),凝胶硬度逐渐降低,其还原焓和结晶速率也随之下降,促进了水分子的迁移,减弱了凝胶中结合水向自由水的转化,当蛋白质水平超过 12% 时,抗老化效应明显减弱,这可能是由于大米蛋白加入过多会形成二硫键,增加了凝胶强度和网络结构,但降低了大米蛋白

促进水分子迁移和限制水迁移的能力，最终降低大米蛋白的抗老化能力。这一现象的部分原因是由于蛋白质添加过多导致自发的蛋白质-蛋白质相互作用，取代了淀粉-蛋白质相互作用。因此采用添加蛋白质抑制淀粉老化时，建议优先选择 12% 及以下的添加量，此时对淀粉老化的抑制效果较为显著。

1.4　非淀粉类碳水化合物

非淀粉类碳水化合物是谷物、水果、蔬菜和豆类中最丰富的成分，也是人类营养中最重要的能量来源。根据其化学结构分为单糖（葡萄糖、果糖等）、低聚糖（蔗糖、乳糖、β-环糊精等）和多糖（β-葡聚糖、大豆可溶性多糖、黄原胶、海藻酸钠等）。单糖和低聚糖抑制淀粉老化是由于其增加了淀粉链间相互作用，延缓水分迁移速率，从而抑制淀粉老化，但并不是所有单糖和低聚糖均可抑制淀粉老化，要根据其是否与淀粉相容，若所选单糖和低聚糖与淀粉体系不相容，随着体系中淀粉含量的相对增加，淀粉分子间的相互作用将发生改变，进而加速淀粉的老化进程[5]。Woodbury 等[28] 分别将果糖、木糖、麦芽糖、阿洛酮糖等糖类添加至小麦淀粉体系中。研究结果显示，加入阿洛酮糖和果糖后，出现了促进支链淀粉老化的现象；而当添加木糖时，呈现出显著的抑制淀粉老化趋势。这一差异可能归因于不同糖类对淀粉分子迁移率的影响各不相同。不同糖类的分子结构、官能团特性存在差异，从而在淀粉体系中对分子间的相互作用产生不同程度的干扰，最终影响淀粉老化进程。因此在使用单糖和低聚糖抑制淀粉老化时要考虑糖种类、浓度与样品相容性等因素。

多糖与淀粉的相互作用可以延缓直链淀粉的相互作用、直链淀粉的再聚集和支链淀粉的再结晶，也可能与淀粉争夺水分子，从而抑制淀粉的老化[29]。Yuan 等[30] 从不同样品中提取 β-葡聚糖，在溶胶样体系和凝胶样体系进行测定分析，发现不同来源的 β-葡聚糖由于其分子特征和固体含量的差异，其抑制淀粉老化的能力不同，分子量越低、聚集态越高、扩散速率越高的 β-葡聚糖更容易与淀粉相互作用，抑制淀粉老化作用更为明显。对于属于多糖类的亲水胶体，常应用于各种淀粉类食品中，抑制淀粉老化。例如将海藻酸钠加入到玉米淀粉中，随着海藻酸钠的增加，玉米淀粉的回生值、储存模量和相对结晶度均降低，是由于海藻酸钠和直链淀粉分子之间形成氢键，限制了直链淀粉和支链淀粉的结合，还可能是由于海藻酸钠和直链淀粉或支链淀粉在结晶和老化过程中对可用水分子的有效竞争，从而抑制玉米淀粉老化过程[31]。综上所述，糖的种类决定了其与淀粉分子相互作用的模式与强度，浓度会改变体系内分子间作用力的平衡，而非淀粉类碳水化合物与淀粉的相容性则关乎体系的稳定性以及糖对淀粉老化抑制作用的有效发挥。只有全面权衡这些因素，才能更精准地调控淀粉老化过程。

1.5　乳化剂

乳化剂分为天然型乳化剂和合成型乳化剂，由于其自身含有羟基可与淀粉分子形成氢键，降低淀粉分子链间的缠绕结合，从而可以抑制淀粉老化。乳化剂还可以阻碍淀粉体系的水分散失，延缓因水分散失而导致的失水老化。不仅如此直链淀粉能与乳化剂的两亲性分子形成包合物，形成更稳定的 V 型淀粉结构。常用的天然乳化剂包括蛋白质类乳化剂（如乳清蛋白、大豆蛋白、猪血浆蛋白、米糠蛋白等）、磷脂类乳化剂（大豆磷脂、卵磷脂磷等）、多糖类乳化剂（海藻酸钠、黄原胶等）和部分生物乳化剂（如皂苷、鼠李糖脂以及从植物材料中分离出来或利用细菌、酵母或真菌发酵所获得的糖脂、脂蛋白和脂肽等）。目前天然型乳化剂中的生物乳化剂很少应用于抑制淀粉老化中，可能是由于其提取步骤繁杂，不利于实验操作。

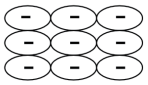
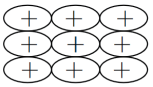
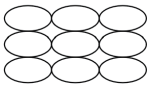
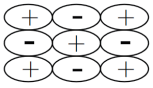
合成乳化剂依据其分子结构与电荷特性，可划分为阴离子型、阳离子型、非离子型以及两性离子型四类[32]。阴离子乳化剂与阳离子乳化剂的差异在于，分子的活性段（亲水性头部）分别携带负电荷与正电荷。两性离子乳化剂的分子结构中同时具备正电荷与负电荷，在溶液环境里，其电荷性质会依据酸度或 pH 发生变化，呈现出阳离子、阴离子或非离子状态。非离子乳化剂不带电荷，其分子结构由亲脂部分（含饱和/不饱和脂肪酸或脂肪醇）和亲水部分（含聚氧乙烯、聚氧丙烯或多元醇）构成。表 1 中列举了常见的抗淀粉老化的合成乳化剂，可以观察到乳化剂的加入会降低直链淀粉含量、淀粉结晶度、回生焓等性质，从而影响淀粉老化。

1.6　酶制剂

酶制剂分为淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶、葡萄糖氧化酶等，其中淀粉酶广泛应用于淀粉基食品之中，其主要是由于水解不同位点糖苷键，或者通过支链酶将分支点引入到直链淀粉中使得支链淀粉中长链转变为短链，降低淀粉重结晶，从而抑制淀粉老化。以 α-淀粉酶为例，在作用于小麦淀粉颗粒时，其沿着淀粉分子的 α-1,4 糖苷链依次水解，在非还原链末端生成麦芽糖。支链淀粉的团簇结构由多个淀粉分子通过分子间作用力聚集而成，α-淀粉酶对 α-1,4 糖苷链的水解，破坏了团簇结构中分子间的连接，使得团簇结构解体。同时，水解造成支链缩短，减少了支链间的相互作用，双重作用下实现对淀粉老化的抑制[43]。此外，α-淀粉酶与其他淀粉酶的区别在于其能使淀粉水解产生可溶性糊精。糊精是淀粉部分水解的产物，具有相对较小的分子质量和多样的结构。糊精含量与食品老化速率的降低呈正相关，原因在于糊精分子能够作用于淀粉分子，改变淀粉分子的排列方式。淀粉分子原本倾向于有序排列形成结晶，糊精的介入干扰了这种有序排列，阻碍了淀粉结晶的形成，从而减缓食品老化。研究表明，转谷氨酰胺酶显著影响了小

表 1 常见抗淀粉老化的合成乳化剂

Table 1 Synthetic emulsifiers commonly used in inhibiting starch retrogradation

类别		外源物名称	结果	参考文献
阴离子型		硬脂酰乳酸钠	硬脂酰乳酸钠的加入使面包体积增加，硬度降低，延缓了淀粉老化现象，其感官特性具有良好接受度。	[33]
		十二烷基硫酸钠	添加乳化剂抑制了粘合剂体系中淀粉分子的回生，制备具有更长保质期的胶粘剂，其中十二烷基硫酸钠在高直链淀粉基木胶的性能方面表现出最好的改善。	[34]
		羟丙基二淀粉磷酸酯	羟丙基二淀粉磷酸酯主要通过氢键和空间位阻与果冻中的直链淀粉结合来延缓 果冻的回生，其添加量为1%~4%时显著降低了果冻的硬度，并在冷藏过程中保持了其弹性。	[35]
阳离子型		十二烷基三甲基溴化铵	将十二烷基三甲基溴化铵和十六烷基三甲基溴化铵加入至纳米纤维与淀粉混合成的水凝胶中，提高了水凝胶的黏度，形成了更好的凝胶网络结构。	[36]
		壳聚糖	壳聚糖、甜菜碱和香兰素通过氢键相互作用、席夫碱交联和静电相互作用来改善淀粉性能，其中凝胶的硬度和热稳定性得到显著提高。	[37]
		低聚甲壳寡糖	壳寡糖的加入使得冷冻面团的硬度、水分含量明显降低，并且使面团表现出良好的持气能力，提高了冷冻馒头的品质。	[38]
非离子型		蒸馏单甘油酯	蒸馏单甘油酯的加入降低了馄饨的回生焓，并且得到同时加入甘油和乳化剂的样品淀粉回生现象明显减弱，即蒸馏单甘油酯是一种抑制无麸质馄饨卷中淀粉回生的有效乳化剂。	[39]
		蔗糖脂肪酸酯	将蔗糖脂肪酸酯加入至米粉中，使得米粉黏度增加，增强米粉的冻融稳定性。	[40]
		甘油单酯	甘油单酯等乳化剂的加入，降低了煎饼样品在冷藏条件下储存过程中的硬化现象。	[41]
两性离子型		十二烷基氨基丙酸 十二烷基乙氧基磺基甜菜碱 十八烷基二羟乙基氧化胺	两性离子型乳化剂既可以作为酸，也可以作为碱进行反应。有些以“内盐”形式存在，在等电点时表现出两性电解质反应。	[42]

麦粉的回生，是由于转谷氨酰胺酶导致淀粉颗粒吸水率的改变所致[44]。淀粉颗粒在水中会发生溶胀，吸水率影响着淀粉颗粒的溶胀程度和水分分布。转谷氨酰胺酶可能通过催化蛋白质分子间的交联反应，改变了小麦粉中蛋白质网络结构，间接影响了淀粉颗粒与水分子的相互作用，从而破坏了淀粉老化所需的水分条件。1,4-α-葡聚糖分支酶与淀粉反应作用位点为1,4-α-葡糖键，将其加入在面团之中，其在直链淀粉上引入分支结构，这种结构变化使得淀粉分子的空间位阻增大，分子间相互靠近和有序排列的难度增加。当用于制作面条时，制成的面条消化速度缓慢，回生率较低[45]。这是因为分支结构阻碍了淀粉分子在储存过程中的重结晶，使得面条消化速度减缓，回生现象得到有效抑制。

这些酶制剂在淀粉相关体系中，通过各自独特的作用机制，从分子结构重塑、水分环境调节等多方面对淀粉老化及相关食品特性产生重要影响，为食品加工过程中调控淀粉品质提供了多样化的手段。

1.7 其他

除前文所列举的用于抑制淀粉老化的外源物外，酚类化合物作为一类结构独特的有机化合物，在该领域展现出潜在的应用价值。酚类化合物分子结构中包含一个或多个芳香环，且芳香环上连接有多个羟基。这种特殊结构赋予酚类化合物独特的化学性质，尤其是其羟基具有提供氢原子的能力，使得酚类化合物具备较强的抗氧化活性，能够有效地清除体系中的自由基，抑制氧化反应的发生。在淀粉体系中，酚类化合物可能通过两种主要机制抑制淀粉老化。其一，酚类化合物能够与淀粉分子发生相互作用，改变淀粉分子的空间构象，进而阻碍淀粉分子的有序排列与聚集，抑制淀粉老化进程；其二，酚类化合物的抗氧化特性可有效减缓体系内的脂质氧化。脂质氧化产生的过氧化产物会干扰淀粉-水体系的稳定性，而酚类化合物通过抑制脂质氧化，避免了这些氧化产物对淀粉体系的不利影响，从而间接抑制淀粉老化。众多研究实例证实了酚类化合物在抑制淀粉老化方面的有效性。例如，将茶多酚添加至大米淀粉体系中，可显著抑制大米淀粉的老化进程[46]。此外，富含酚类化合物的芒果皮粉和桑叶粉，在分别添加至大米粉、糯米粉体系后，均表现出明显的抑制淀粉老化效果[47−48]。其作用机制可能为，酚类化合物与淀粉分子形成复合物，或者通过调节体系内的水分分布，干扰淀粉老化过程中分子间的相互作用，最终实现对淀粉老化的抑制。由此可见，在利用外源物抑制淀粉老化的研究范畴内，尽管当前已发现多种具有抑制效果的外源物，但可挖掘的外源物种类依旧十分丰富，可以进一步研究其对淀粉老化的抑制效果。

2 外源添加抑制淀粉老化过程中对淀粉分子的影响

2.1 外源添加抑制淀粉老化过程中对淀粉结构的影响

2.1.1 外源物添加对淀粉形貌特性的影响 外源物可以从水分调节、干扰分子链运动、空隙填充三方面影响淀粉微观结构从而抑制淀粉老化。在水分调节机制方面，以 β-葡聚糖为例，其能够显著增强淀粉的持水能力。在淀粉体系中，β-葡聚糖与水分子相互作用，稳定了淀粉颗粒周围的水合层。水合层的稳定对于维持淀粉颗粒的结构完整性至关重要，可有效防止

淀粉颗粒在糊化及后续冷却过程中出现过度膨胀和破碎的情况，从而使淀粉保持相对稳定且规则的微观结构[49]。从淀粉老化的本质来看，水分迁移会促使淀粉分子发生重排与聚集，而 β-葡聚糖通过增强持水能力，减少了水分迁移，进而抑制了淀粉分子的重排与聚集，最终实现对淀粉老化的抑制。Yang 等[50] 的研究通过扫描电子显微镜对添加 β-葡聚糖的大米淀粉体系进行观察，清晰地呈现了这一作用过程。在该研究中，可以明显观察到经糊化后的大米淀粉颗粒膨胀、破碎，并出现碎片；而添加 β-葡聚糖的大米淀粉，其颗粒形状更为规则，表面粗糙程度显著低于未添加组，且整体形态结构未发生明显变化。这一微观结构的差异表明，β-葡聚糖通过增强大米淀粉的持水能力，有效地抑制了淀粉老化过程中结构的变化。分子链运动方面，以壳聚糖为例，壳聚糖与直链淀粉相互作用，阻碍分子链重排，抑制淀粉分子无序聚集，避免淀粉分子形成规整的老化结构，因此通过扫描电镜可以明显观察到经糊化后的淀粉在添加壳聚糖后淀粉表面更为光滑[51]。蛋白质等外源物质的加入能够填充淀粉颗粒间空隙，使凝胶网络结构更紧凑，限制淀粉分子活动空间，减少淀粉分子相互靠近、重排的机会，最终实现对淀粉老化的抑制。Liu 等[52] 将外源蛋白（乳清蛋白、蛋清蛋白和大豆分离蛋白）分别加入到无麸质海绵蛋糕中，通过微观结构观察发现三组蛋糕中淀粉的结构均变得更加光滑、空腔更少，并且观察到膨胀的淀粉颗粒被连续蛋白凝胶包围，其可能是由于蛋白质的填充作用，使得凝胶网络结构更加紧凑。综上所述，可以通过扫描电子显微镜对淀粉形貌特性进行观察，能够有效判断外源物添加抑制淀粉老化情况。

2.1.2　外源添加物对淀粉短程有序性的影响　淀粉老化本质是分子链从无序向有序重排的过程，短程有序结构（双螺旋）的形成与聚集是关键环节。外源添加物的加入可能会增强淀粉持水能力或者影响氢键的形成，使得短程有序结构的形成受到阻碍，从而抑制淀粉老化。傅里叶变换红外光谱（FTIR）可通过特征吸收峰的变化，揭示外源物质对淀粉分子间氢键、水合状态及结晶结构的影响，为阐明外源添加物对淀粉短程有序性的影响提供分子层面依据。1047 cm^{-1} 归属于有序结晶区的 C-O 伸缩振动，反映双螺旋短程有序结构。淀粉分子的羟基（-OH）伸缩振动峰位于 3358 cm^{-1}，峰形宽窄与氢键强度相关：窄峰表示强分子内/间氢键（有序结构），宽峰或峰位红移（向低波数移动）表明氢键被削弱（无定形结构增加）。Zhang 等[35] 在豌豆淀粉中加入不同比例的羟丙基二淀粉磷酸观察到淀粉分子在 3358 cm^{-1} 处的带变宽并向更高的波数移动，即羟丙基二淀粉磷酸与淀粉相互作用减弱了淀粉分子间或分子内的氢键，降低了淀粉的老化程度。并且在 1644 cm^{-1} 附近的吸收峰因为羟丙基二淀粉磷酸的加入而得到了增强，即增强了淀粉的持水能力，影响淀粉链附近的水分迁移，即证明了其对淀粉老化得到了抑制。Wang 等[53] 也得到了类似结果，将不同链长脂肪酸加入到大米淀粉中，1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 的峰高比值减弱，即脂肪酸的加入增强了支链淀粉在结晶区域的交联能力，并与淀粉分子竞争水分子。由此可见外源物的添加会改变淀粉氢键结合能力、水合状态和结晶结构，进而对淀粉短程有序性产生影响。

2.1.3　外源添加物对淀粉长程有序性的影响　淀粉老化的长程有序结构是糊化后的淀粉分子从无定形状态经短程有序双螺旋结构，进一步聚集形成周期性排列的晶体结构的过程。这一过程涉及即成核（晶核的形成）、膨胀（晶核的生长）和成熟（晶体的完善或晶体的进一步生长）[12]，其结构类型（A 型、B 型、V 型）和结晶度直接决定淀粉老化程度。外源物的加入可以改变淀粉晶型，将老化速率最快的晶型 A 型转变为老化速率较慢 B 型和 V 型[22]。不仅如此外源物的加入还可以降低结晶度，从而对淀粉老化产生影响。长程有序通常以 X-射线衍射进行测定，其可用于研究晶体结构和晶体有序性，可用于判断淀粉老化程度。Li 等[54] 将转葡萄糖苷酶加入到糊化后的大米淀粉中，经 X-射线衍射处理观察到典型的 V 型晶体结构，加入转葡萄糖苷酶的大米淀粉随着转葡萄糖苷酶处理时间的增加，峰值强度变得更窄、更锐化。这说明转葡萄糖苷酶的加入，支链淀粉中分支密度更高、更均匀的短链数量增多，导致链长相似的对称短链分支的形成，即转葡萄糖苷酶的加入削弱了大米淀粉的结晶区，从而有效延缓了淀粉老化。Chen 等[55] 得到相似结果，XRD 图谱中有典型的 V 型结构产生。加入普鲁兰后，大米淀粉晶型从 A 型转变为 B 型，相对结晶度大幅度下降，即普鲁兰加入抑制了大米淀粉老化。由此可以观察到外源物质的添加可以影响淀粉长程有序中的晶体生长，降低结晶度，从而影响淀粉老化现象。

2.1.4　外源添加物对淀粉结构的其他影响　除以上叙述之外，外源物质的添加也会影响支、直链淀粉含量，直链淀粉含量越高则淀粉老化速度越快，而有些外源物质的加入会使得淀粉结构发生改变，使得长链或中链淀粉向短链淀粉转化，从而抑制淀粉老化。有研究学者在米饭中添加了 α-葡萄糖苷酶（AG）和分支酶（BE）并对米粒中的链长数量进行了测定，其观察到 α-葡萄糖苷酶和分支酶的加入降低了米粒中长链的百分比，即两种酶的添加会影响淀粉链长，最终使其抑制淀粉老化效果显著[56]。由此可见外源物的添加可以改变淀粉结构，在研究外源添加物抑制淀粉老化的效果时可对其结构进行进一步探究。

2.2　外源添加抑制淀粉老化过程中对淀粉理化特性的影响

2.2.1　外源添加物对淀粉热特性的影响　淀粉的热特性受到淀粉老化的影响，老化的淀粉通常具有较低

的糊化温度、更高的吸水性和糊化焓(△H),同时可能表现出较低的热稳定性。大多数外源添加物作用到淀粉中,淀粉中△H 逐渐降低,即此时热稳定性越好,抑制淀粉老化效果更加明显。可以通过观察样品的焓变值,了解样品的老化情况。动力学模型 Avrami 方程的应用可以对老化速率进行拟合,从而判断淀粉老化情况。老化过程中结晶度随时间变化可表示为:$X(t)=X_{\infty}[1-\exp(-kt^{n})]$。Tian 等[57] 将羟丙基 β-环糊精和 β-环糊精加入到大米淀粉中,观察到焓变显著降低,通过 Avrami 动力学研究,得到加入羟丙基 β-环糊精和 β-环糊精后速率常数(k)显著降低,即羟丙基 β-环糊精和 β-环糊精的加入会抑制淀粉老化。Zhang 等[58] 也观察到相似结果,将四种茶衍生物(茶多酚、茶水溶性提取物、茶多糖和绿茶粉)均能降低 3 和 7 d 样品的焓变,证明了添加外源物质可以降低淀粉老化效果。由此可见,外源物质通过减少结晶区比例、降低晶体稳定性、重构水分分布,使淀粉老化过程的糊化焓显著降低,热稳定性提升。

2.2.2 外源添加物对淀粉糊化特性的影响 糊化特性代表淀粉加热过程中粘度变化以及淀粉理化结构的变化。老化后的淀粉膨胀性会增加使得黏度下降、回生值增加。而加入外源物后会延缓淀粉老化过程,使得在同等时间下黏度下降幅度会延缓,其回生值会下降。Rolandelli 等[59] 在甘薯淀粉中分别添加果胶、瓜尔胶和没食子酸后发现,三者均使体系中黏度增加,其中瓜尔胶使得体系黏度增加的最大。可能是由于瓜尔胶高分子量、高亲水性和柔性链结构,在形成稳定网络和阻碍流体流动方面效果最优,故增黏作用最强,果胶次之,没食子酸增黏作用最低。这一现象与外源添加物的分子结构、亲水性及与淀粉的作用机制直接相关[60]。除此之外,回生值与冷却过程中直链淀粉和支链淀粉的老化过程有关,通过回生值可以得到果胶、瓜尔胶或没食子酸的加入使得淀粉老化程度均下降,这是因为没食子酸限制了从淀粉颗粒中浸出的直链淀粉分子的数量,并且会使得分子重排。而亲水性化合物的加入可能干扰了水和淀粉之间的相互作用,从而降低了分子迁移率,限制了直链淀粉和支链淀粉的重新结合,也可能通过范德华力和氢键相互作用与淀粉组分相互作用,阻碍了它们的重排,因此外源物的添加会影响淀粉的糊化特性。

2.2.3 外源添加物对淀粉流变特性的影响 淀粉流变特性(如黏度、弹性、剪切变稀行为)是其分子结构(短程双螺旋、长程晶体)与分子间相互作用(氢键、疏水作用、网络缠绕)的宏观体现。外源添加物通过调控淀粉老化过程中的有序结构形成,从分子层面重构淀粉网络,进而显著影响其流变行为。通过测定淀粉糊的流变特性,可以了解淀粉的老化的形态,从而指导食品加工中淀粉的应用和控制。加入外源添加物后淀粉储存模量(G')会呈现下降趋势。损耗模量 G"与储能模量 G'的比值动态流变损失系数 tanδ 可表达样品状态。tanδ 值越大,样品的流动性越强,随着外源添加物的加入样品的流动性会增加。有研究学者将多元醇加入到淀粉糊中发现,储存模量(G')虽呈现先快速上升后缓慢上升的趋势但均小于未加入多元醇的 G',这表明加入多元醇后淀粉老化受到抑制,即部分直链淀粉在糊化过程中与多元醇结合,阻碍了有序三维网络结构的形成并且多元醇的羟基结构与游离水结合,降低了体系中游离水含量,削弱淀粉分子的流动性。因此,直链淀粉重排变得困难,从而使淀粉老化速率降低[50]。Wu 等[61] 也得到了相似的结果,将绿茶多酚加入到大米淀粉中,经流变测定大米面团,观察到随着绿茶多酚的添加储存模量呈现下降趋势,并且 tanδ 增加,大米凝胶的黏性增强,结构更加疏松,表明淀粉老化受到抑制。由此可见,外源添加物的加入使淀粉样黏性增加,使得样品体系状态发生改变,从而影响淀粉流变特性,也进一步表明了外源物的添加会抑制淀粉老化。

2.2.4 外源添加物对淀粉其他理化特性的影响 除上述理化特性外,外源添加物的加入也会对淀粉的溶解性、膨润力、持水性及冻融稳定性等理化特性产生影响。Lan 等[62] 将大豆多糖和大豆油加入到玉米淀粉中,大豆多糖的加入使淀粉中的氢键增加了持水能力并降低了硬度,而大豆油增加了硬度,但保水性有限,而大豆多糖和大豆油的协同作用最大限度地提高了持水能力,降低了硬度,并显著抑制了淀粉老化。Li 等[63] 发现加入黑米花青素和挤压米糠可溶性膳食纤维形成的空间位阻抑制了淀粉的回生,增强凝胶保水能力与冻融稳定性,从而改善淀粉的凝胶性能。综上,外源物的添加对淀粉的理化特性均有明显影响。不同类型的外源物,凭借各自独特的分子结构与化学活性,通过氢键缔合、空间位阻、分子络合及网络构建等多种作用机制,改变淀粉分子间的相互作用与聚集态结构,从而对淀粉老化产生影响。

3 外源添加抑制淀粉老化在淀粉基食品中的应用

3.1 主食类食品

淀粉类食品通常作为主食类食品进行食用,为人体补充能量,但由于淀粉含量较高老化现象也更为明显,外源添加物的加入对主食类产品如米面条、面包等食用品质进行了改良。有研究学者将羟丙基淀粉加入在籼米淀粉中发现所制成的米面条结晶度、破损率、损失率均下降,具有较高的持水能力、拉伸特性,添加 3% 的羟丙基淀粉,可以提高米粉的品质,促进米稻产业的发展[64]。Gujral 等[65] 在米粉中加入瓜尔豆胶、黄原胶、刺槐豆胶和羟丙基甲基纤维素等不同的亲水胶体和 α-淀粉酶,制得的薄煎饼可以提供给乳糜泻患者,并且由于淀粉回生而在薄煎饼中发生的不良质地变化可以通过加入亲水胶体和 α-淀粉酶来延缓,其显示出较低的回生,保证食品食用品

质。Woo 等[66] 将源自植物乳杆菌（LpMA）的麦芽淀粉酶加入到小麦淀粉中，制成面包得到加入麦芽淀粉酶后的面包与未加麦芽淀粉酶的面包相比，回生速度慢了 4%，硬度降低了 25%。这一研究结果清晰地表明，麦芽淀粉酶的引入对面包品质具有积极的改良作用，有效抑制了淀粉回生进程，优化了面包质地。Raungrusmee 等[67] 在研究无麸质面条配方时发现加入黄原胶后随着浓度的增加，抗性淀粉含量显著降低，拉伸强度增加。此外，进一步添加菊粉和脱脂米糠显著降低了无麸质面条的升糖指数，尽管烹饪时间有所延长且硬度有所增加，但这种配方调整在改善产品健康属性方面具有重要意义。Liu 等[52] 将外源蛋白加入到面糊中，研究结果表明外源蛋白的加入不仅有效降低了糯米糕的豆腥味，更有助于产生诱人的香气与口感，使其具备良好的感官特性。综上所述，不同类型外源添加物在各类食品体系中展现出多元功效。它们不仅能够显著改善食品的品质，如延缓淀粉回生、优化质地、提升感官特性等，部分添加物还赋予食品降糖等特殊功能特性，为功能性食品及特殊膳食的开发提供了有力的理论与实践支撑。

3.2　非主食类食品

在现代快节奏生活模式的背景下，非主食类食品的消费规模日益庞大，已然成为食品消费领域中不容忽视的重要组成部分。然而，这类食品在生产与储存过程中，淀粉老化问题频繁出现，严重影响了食品品质。以年糕、果冻等常见非主食食品为例，淀粉老化导致其硬度增加，口感变差，极大地降低了消费者的接受度。为有效解决这一问题，通过添加外源物质来调控淀粉老化、提升食品品质并赋予其功能特性的方法备受关注。Zhang 等[35] 将羟丙基磷酸二淀粉酯（HPDSP）加入到灭菌豌豆淀粉所制成的果冻中，HPDSP 的添加显著降低了果冻的硬度，并在冷藏过程中保持了其弹性，当用量在 1%~4% 时对果冻品质的改善效果更为显著，充分证明了该外源添加物在抑制果冻淀粉老化方面的有效性。Fan 等[68] 探究了麦芽 α-淀粉酶对年糕理化性质及食用品质的影响，结果表明经处理后的年糕淀粉老化受到抑制，通过质地和感官评价确定改性的最佳酶浓度为 4.0×10^{-3} U/g，在此浓度下，年糕不仅在质地方面得到显著改善，且感官品质也达到了消费者可接受的水平。Naseer 等[69] 考察羧甲基纤维素和烘烤条件对低升糖指数无麸质米饼体外淀粉消化率和理构特性的影响，结果发现当烘烤温度为 185 ℃，烘烤时间为 22 min，羧甲基纤维素浓度为 0.8% 时，是用米粉开发无麸质低升糖指数饼干的理想条件。其中抗性淀粉含量从 2.85% 增加到 7.20%，而预测的升糖指数和升糖负荷分别从 50.12 和 30.07 下降到 44.60 和 17.51。还有研究学者从两种品种的碎米粒中提取淀粉，并使用 10% 的环氧丙烷对其进行改性，用于制备一种由牛奶、油、面粉或淀粉、盐和香料制成的白酱。最终得到经环氧丙烷的加入所得到的白酱溶胀力、溶解度、透光率百分比和保水能力均显著提高[70]。综上所述，外源添加物在非主食类食品中具有显著的抑制淀粉回生、提升食品品质和改善功能特性的作用。这些研究成果为非主食类食品的品质优化和功能升级提供了新的思路和技术途径，有助于满足消费者在快节奏生活中对高品质、功能性食品的需求，推动食品行业的健康发展。

4　结论和展望

淀粉老化导致淀粉糊的黏度增加、弹性降低，食品出现变硬、口感变差等问题，严重影响食品的品质和货架期。食品中添加的外源物质或者食品本身一些物质的存在，如盐、脂质、蛋白质、非淀粉类碳水化合物、乳化剂及酶制剂等，具有抑制淀粉老化的作用，能够干扰淀粉分子在冷却或储存过程中的淀粉分子结构，影响淀粉分子的理化特性。外源物的添加被用在很多食品中，有效调控了淀粉基食品的品质，赋予食品功能性质。因此，外源物的添加对淀粉老化的抑制研究具有重要意义。虽然目前外源物质对于淀粉老化的抑制作用已经在不同食品系统中得到验证，但对于抑制淀粉老化的常见外源物种类及它们对淀粉老化的抑制机理缺乏系统性的总结。本文系统性的总结了常见外源物质，包括盐、脂质、蛋白质、非淀粉类碳水化合物、乳化剂及酶制剂等，抗淀粉老化的机理和效果。从外源物加入对淀粉结构和淀粉理化特性影响两个方面，综述了其与抗淀粉老化特性的关系。最后，介绍了外源添加物抗淀粉老化在淀粉基食品中的应用研究进展。未来，对于能够抑制淀粉老化外源物质的来源还有待开发，如何将废弃原料中提取所需要的外源物质应用于淀粉基产品中，值得学者思考与研究。此外，外源物的添加对人体消化吸收和对人体的功能特性影响研究仍然有限，是一个值得进一步探究的方向。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] NIU Haili, ZHANG Mingcheng, XIA Xiufang, et al. Effect of porcine plasma protein hydrolysates on long-term retrogradation of corn starch[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 172−179.

[2] REZLER R, POLISZKO S. Temperature dependence of starch gel rheological properties[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(6−7): 570−577.

[3] ZHENG Xiaoyuan, ZENG Fankui. Inhibition of starch retrogradation: Advances in physical, chemical, and biological methods[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 306: 141390.

[4] WANG S J, LI C L, COPELAND L, et al. Starch retrogradation: A comprehensive review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, 14(5): 568−585.

[5] 王宏伟, 许可, 张艳艳. 淀粉老化的影响因素及其检测技术研究进展[J]. 轻工学报, 2021, 36(1): 17−29. [WANG Hongwei,

XU ke, ZHANG Yanyan. Research progress on the influencing factors of starch aging and its detection technology[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(1): 17−29.]
[6] LEE E S, SONG H G, CHOI I, et al. Effects of mung bean starch/guar gum-based edible emulsion coatings on the staling and safety of rice cakes[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116696.
[7] BORAD S G, PATEL A A, SINGH A K, et al. Effect of storage and reheating on textural properties of rice in dairy dessert as related to its pasting properties and microstructure[J]. LWT, 2017, 80: 485−491.
[8] SINGH J, KAUR L, MCCARTHY O J. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications: A review[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(1): 1−22.
[9] WU Kunrong, LI Caiming, LI Zexi, et al. Highly-branched modification of starch: An enzymatic approach to regulating its properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109433.
[10] WANG Wei, ZHOU Hongxian, YANG Hong, et al. Effects of salts on the gelatinization and retrogradation properties of maize starch and waxy maize starch[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 319−327.
[11] CASANOVA-MORALES N, ALAVI Z, WILSON C A M, et al. Identifying chaotropic and kosmotropic agents by nanorheology[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2018, 122(14): 3754−3759.
[12] CHANG Qing, ZHENG Baodong, ZHANG Yi, et al. A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186: 163−173.
[13] ZHANG Zhongwei, FAN Xiangyun, YANG Xiaoyan, et al. Effects of amylose and amylopectin fine structure on sugar-snap cookie dough rheology and cookie quality[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116371.
[14] FU Z, BEMILLER J N. Effect of hydrocolloids and salts on retrogradation of native and modified maize starch[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 36−48.
[15] HE Zhixiang, WANG Danli, LIAN Xijun, et al. The anti-retrogradation properties of maize amylopectin treated by being co-crystallized with NaCl[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 219: 508−518.
[16] LI Enpeng, LÜ Jiaqi, HUO Dongao, et al. Importance of amylose chain-length distribution in determining starch gelatinization and retrogradation property of wheat flour in the presence of different salts[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 308: 120648.
[17] BECK M, JEKLE M, BECKER T. Starch re-crystallization kinetics as a function of various cations[J]. Starch-Stä rke, 2011, 63(12): 792−800.
[18] PUTSEYS J A, LAMBERTS L, DELCOUR J A. Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 51(3): 238−247.
[19] BIENKIEWICZ G, KOŁAKOWSKA A. Effects of lipid oxidation on fish lipids: Amylopectin interactions[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2003, 105(8): 410−418.
[20] 张婧婷. 抗性淀粉的类型及其制备技术研究进展[J]. 现代面粉工业, 2021, 35(6): 26−33. [ZHANG Jingting. Research progress on types of resistant starch and its preparation technology[J]. Modern Flour Industry, 2021, 35(6): 26−33.]
[21] KANG Xuemin, YU Bin, ZHANG Huayong, et al. The formation and *in vitro* enzymatic digestibility of starch-lipid complexes in steamed bread free from and supplemented with different fatty acids: Effect on textural and retrogradation properties during storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 166: 1210−1219.
[22] CHEN Jin, CAI Haoliang, YANG Sha, et al. The formation of starch-lipid complexes in instant rice noodles incorporated with different fatty acids: Effect on the structure, *in vitro* enzymatic digestibility and retrogradation properties during storage[J]. Food Research International, 2022, 162: 111933.
[23] XU D, REN J, ALI B, et al. Water-in-oil soybean concentrated phospholipids hydrolysis based on the model of enzymatic deactivation and its application in bread[J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101412.
[24] MOHAMED A, PETERSON S C, GRANT L A, et al. Effect of jet-cooked wheat gluten/lecithin blends on maize and rice starch retrogradation[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(3): 293−300.
[25] HU Yu, HE Chengxin, ZHANG Meiying, et al. Inhibition from whey protein hydrolysate on the retrogradation of gelatinized rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 105840.
[26] WANG Lifeng, ZHANG Lei, WANG Hongling, et al. Insight into protein-starch ratio on the gelatinization and retrogradation characteristics of reconstituted rice flour[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 146: 524−529.
[27] WU Chunsen, GONG Xin, ZHANG Jian, et al. Effect of rice protein on the gelatinization and retrogradation properties of rice starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 125061.
[28] WOODBURY T J, MAUER L J. Oligosaccharide, sucrose, and allulose effects on the pasting and retrogradation behaviors of wheat starch[J]. Food Research International, 2023, 171: 113002.
[29] YU Zhen, WANG Yusheng, CHEN Haihua, et al. The gelatinization and retrogradation properties of wheat starch with the addition of stearic acid and sodium alginate[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 77−86.
[30] YUAN Tingting, ZHAO Siming, YANG Jingjing, et al. Structural characteristics of β-glucans from various sources and their influences on the short- and long-term starch retrogradation in wheat flour[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264: 130561.
[31] LI Qianqian, WANG Yusheng, CHEN Haihua, et al. Retardant effect of sodium alginate on the retrogradation properties of normal cornstarch and anti-retrogradation mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 1−9.
[32] MARHAMATI M, RANJBAR G, REZAIE M. Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of Oil-in-water Nanoemulsions: A critical review[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 340: 117218.
[33] GOMES-RUFFI C R, DA CUNHA R H, ALMEIDA E L, et al. Effect of the emulsifier sodium stearoyl lactylate and of the enzyme maltogenic amylase on the quality of pan bread during storage[J]. LWT, 2012, 49(1): 96−101.
[34] DIN Z U, XIONG H G, WANG Z J, et al. Effects of different emulsifiers on the bonding performance, freeze-thaw stability and retrogradation behavior of the resulting high amylose starch-based wood adhesive[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 538: 192−201.
[35] ZHANG Xueer, LIU Zhenyu, WANG Ling, et al. Effect of hydroxypropyl distarch phosphate on the retrogradation properties of sterilized pea starch jelly and its possible mechanism[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 247: 125629.
[36] HOSSAIN K M Z, CALABRESE V, DA SILVA M A, et al. Cationic surfactants as a non-covalent linker for oxidised cellulose nanofibrils and starch-based hydrogels[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 233: 115816.
[37] LIU Wenmeng, CHEN Long, MCCLEMENTS D J, et al. Vanillin-assisted preparation of chitosan-betaine stabilized corn starch gel: Gel properties and microstructure characteristics[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109510.
[38] JIANG Zhaojing, GUO Xiaona, XING Junjie, et al. Allevia-

tive effects of chitooligosaccharides on the quality deterioration of frozen dough subjected to freeze–thaw cycles[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 109016.
[39] PRAKAYWATCHARA P, WATTANAPAIROJ C, THIRATHUMTHAVORN D. Effects of emulsifier types and levels in combination with glycerol on the gelatinization and retrogradation properties of gluten-free rice-based wonton wraps[J]. Starch-Stä rke, 2018, 70(5−6): 1700227.
[40] MENG Yuecheng, SUN Minghui, FANG Sheng, et al. Effect of sucrose fatty acid esters on pasting, rheological properties and freeze–thaw stability of rice flour[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 64−70.
[41] YAMASHITA S, MATSUMIYA K, KOGO Y, et al. Emulsifiers efficiently prevent hardening of pancakes under refrigerated conditions *via* inclusion complexes with starch molecules[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105432.
[42] SARATHCHANDRAPRAKASH N K, MAHENDRA C, PRASHANTH S J, et al. Emulsions and emulsifiers[J]. The Asian Journal of Experimental Chemistry, 2013, 8: 30−45.
[43] ZHAI Yitan, LI Xiaoxiao, BAI Yuxiang, et al. Maltogenic α-amylase hydrolysis of wheat starch granules: Mechanism and relation to starch retrogradation[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107256.
[44] DANG L T K, IMAIZUMI T, NISHIZU T. Effects of transglutaminase on the retrogradation of wheat flour[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109924.
[45] JI Xiangqing, ZENG Cheng, YANG Dingkuan, et al. Addition of 1,4-α-glucan branching enzyme during the preparation of raw dough reduces the retrogradation and increases the slowly digestible fraction of starch in cooked noodles[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 104: 103431.
[46] WU Yue, CHEN Zhengxing, LI Xiaoxuan, et al. Effect of tea polyphenols on the retrogradation of rice starch[J]. Food Research International, 2009, 42(2): 221−225.
[47] SIRIAMORNPUN S, TANGKHAWANIT E, KAEWSEEJAN N. Reducing retrogradation and lipid oxidation of normal and glutinous rice flours by adding mango peel powder[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 160−167.
[48] PARK G Y, LIU Q, HONG J S, et al. Anti-staling and quality characteristics of Korean rice cake affected by mulberry (*Morus alba* L.) leaf powder fortification[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 97: 103133.
[49] LIU Suchen, XIAO Yuehuan, SHEN Mingyue, et al. Effect of sodium carbonate on the gelation, rheology, texture and structural properties of maize starch-*Mesona chinensis* polysaccharide gel[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 943−951.
[50] YANG Heng, TANG Mengqi, WU Wendi, et al. Study on inhibition effects and mechanism of wheat starch retrogradation by polyols[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 106996.
[51] 王昊翊, 张昆明, 唐湘毅, 等. 壳聚糖添加量对大米淀粉老化的影响[J]. 广西科技大学学报, 2024, 35(3): 132−137. [WANG Haoyi, ZHANG Kunming, TANG Xiangyi, et al. Effect of chitosan addition on the aging of rice starch[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2024, 35(3): 132−137.]
[52] LIU Yingnan, YU Shulei, JIANG Pengfei, et al. Effect of exogenous protein substitution in glutinous rice cake: Batter rheology, structure, and retrogradation behavior[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 119: 104006.
[53] WANG Bing, ZHENG Huixin, YANG Yang, et al. Effect of different chain-length fatty acids on the retrogradation properties of rice starch[J]. Food Chemistry, 2024, 461: 140796.
[54] LI Jiahao, ZOU Feixue, GUI Yifan, et al. Long-term retrogradation properties of rice starch modified with transglucosidase[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107053.
[55] CHEN Long, REN Fei, ZHANG Zipei, et al. Effect of pullulan on the short-term and long-term retrogradation of rice starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 415−421.
[56] OHMOTO C, TAGUCHI T, ONISHI M, et al. Retrogradation inhibition and intragranular distribution in cooked rice by addition of α-glucosidase (AG) and branching enzyme (BE)[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 140049.
[57] TIAN Yaoqi, LI Yin, JIN Zhengyu, et al. Comparison tests of hydroxylpropyl β-cyclodextrin (HPβ-CD) and β-cyclodextrin (β-CD) on retrogradation of rice amylose[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(3): 488−491.
[58] ZHANG Haihua, SUN Binghua, ZHANG Shikang, et al. Inhibition of wheat starch retrogradation by tea derivatives[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 134: 413−417.
[59] ROLANDELLI G, RODRÍGUEZ S D, DEL PILAR BUERA M. Modulation of the retrogradation kinetics of sweet potato starch by the addition of pectin, guar gum, and Gallic acid[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109211.
[60] 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(4): 345−352.
[61] WU Yue, NIU Meng, XU Hongli. Pasting behaviors, gel rheological properties, and freeze-thaw stability of rice flour and starch modified by green tea polyphenols[J]. LWT, 2020, 118: 108796.
[62] LAN Guowei, XIE Shumin, DUAN Qingfei, et al. Effect of soybean polysaccharide and soybean oil on gelatinization and retrogradation properties of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264: 130772.
[63] LI Jia, LIU Chun, WU Nana, et al. Interaction of anthocyanins, soluble dietary fiber and waxy rice starch: Their effect on freeze-thaw stability, water migration, and pasting, rheological and microstructural properties of starch gels[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 274: 133174.
[64] JIA Yunzhu, ZHANG Zhao, LI Man, et al. The effect of hydroxypropyl starch on the improvement of mechanical and cooking properties of rice noodles[J]. Food Research International, 2022, 162: 111922.
[65] GUJRAL H S, HAROS M, ROSELL C M. Improving the texture and delaying staling in rice flour chapati with hydrocolloids and α-amylase[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(1): 89−94.
[66] WOO S H, SHIN Y J, JEONG H M, et al. Effects of maltogenic amylase from *Lactobacillus plantarum* on retrogradation of bread[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 93: 102976.
[67] RAUNGRUSMEE S, SHRESTHA S, SADIQ M B, et al. Influence of resistant starch, xanthan gum, inulin and defatted rice bran on the physicochemical, functional and sensory properties of low glycemic gluten-free noodles[J]. LWT, 2020, 126: 109279.
[68] FAN Can, LI Xiaoxiao, WANG Yanli, et al. Effects of maltogenic α-amylase on physicochemical properties and edible quality of rice cake[J]. Food Research International, 2023, 172: 113111.
[69] NASEER B, NAIK H R, HUSSAIN S Z, et al. Effect of carboxymethyl cellulose and baking conditions on *in-vitro* starch digestibility and physico-textural characteristics of low glycemic index gluten-free rice cookies[J]. LWT, 2021, 141: 110885.
[70] MOIN A, ALI T M, HASNAIN A. Enhancing functional properties of rice starches through hydroxypropylation for development of reduced-fat white sauces[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138860.