DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251015002
引用格式: 何扬波, 李国林, 周涛, 等. 淀粉老化机制及抗老化研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 170–177.
HE YB, LI GL, ZHOU T, *et al*. Research progress of starch retrogradation mechanism and anti-retrogradation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 170–177. (in Chinese with English abstract).

淀粉老化机制及抗老化研究进展

何扬波[1], 李国林[1*], 周　涛[2], 秦　沂[2], 史大鑫[2]

(1. 贵州省农业科学院现代农业发展研究所, 贵阳　550006; 2. 贵州秦纪煌食品有限公司, 毕节　551800)

摘　要: 淀粉是人体能量的重要来源, 是常见的食品原料。然而, 淀粉基食品易发生老化, 导致质地变硬, 口感变差, 品质下降。老化是淀粉基食品品质劣变的最重要的原因之一, 延缓淀粉老化可维持淀粉基食品的口感和品质, 延长保质期。本文介绍了淀粉老化的机制和影响淀粉老化的主要因素, 分析和比较了物理方法、天然外源添加物以及酶法等延缓淀粉老化的措施, 此外, 优化淀粉基食品加工工艺方法, 包装材料和储存条件也是延缓老化的有效措施。本文旨在总结淀粉基食品延缓老化的最新进展, 从而为淀粉食品加工提供科学依据和技术支持。

关键词: 淀粉基食品; 老化机制; 抗老化

Research progress of starch retrogradation mechanism and anti-retrogradation

HE Yang-Bo[1], LI Guo-Lin[1*], ZHOU Tao[2], QIN Yi[2], SHI Da-Xin[2]

(1. *Integrated Agricultural Development Research Institute*, *Guizhou Provincial Academy of Agricultural Sciences*, *Guiyang* 550006, *China*; 2. *Guizhou Qinjihuang Food Co*., *Ltd*., *Bijie* 551800, *China*)

ABSTRACT: Starch is an important source of energy for the human body and a common food ingredient. However, starch-based foods are prone to retrogradation, which leads to a hardened texture, poor taste and quality deterioration. Retrogradation is one of the most important reasons for the deterioration of the quality of starch-based foods. Delaying starch retrogradation can maintain the taste and quality of starch-based foods and extend their shelf life. The article introduced the mechanism of starch retrogradation and the main factors influencing it. It analyzed and compared measures such as physical methods, natural exogenous additives and enzymatic methods to delay starch retrogradation. In addition, optimized the processing technology of starch-based foods, packaging materials and storage conditions were also effective measures to delay retrogradation. The purpose of this article aims to summarize the latest progress in delaying retrogradation of starch-based foods, and provide scientific basis and technical support for starch food processing.

KEY WORDS: starch-based foods; retrogradation mechanism; anti-retrogradation

收稿日期: 2025-10-15
基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合成果[2023]一般 369)
第一作者: 何扬波(1990—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: 18945045441@163.com
***通信作者:** 李国林(1987—), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: lgl292@163.com

0 引　言

淀粉是植物通过光合作用合成的生物大分子, 是最常见的碳水化合物之一, 也是人体重要的能量供应体。淀粉及其深加工的产品广泛应用于食品产业, 同时也为其他领域如农业、医药、造纸、化工、石油等行业提供重要原料[1–2]。据统计, 60%的淀粉用于食品产业, 制成淀粉基食品, 例如, 面包、饼干和面条等[3]。

淀粉由直链淀粉和支链淀粉构成, 其中直链淀粉是由 *α*-*D*-吡喃葡萄糖通过 *α*-1,4-糖苷键连接形成的线形或轻度支化的葡聚糖链, 支链淀粉是由 *α*-1,4-糖苷键链接而成, 侧链则通过 *α*-1,6-糖苷键与主链链接而成的葡聚糖链[4]。直链淀粉和支链淀粉的分子结构以及比例和颗粒形态等因素决定了淀粉的物理化学性质[5]。淀粉具有易糊化、黏度高、透明度佳、保水性好等特点, 是许多休闲食品的良好原料[6]。但同时, 淀粉老化导致其保水能力降低, 硬度增加以及外观的劣变, 造成了不可估量的经济损失。同时, 淀粉老化可产生重结晶淀粉, 具有结构更稳定的双螺旋结构, 因此对热和酶都具有抗性。再结晶淀粉在小肠中吸收不良, 对葡萄糖摄取无影响, 在结肠中完全或部分发酵, 从而增强肠道健康。因此, 了解淀粉老化机制, 控制和延缓淀粉老化对于提高淀粉制品在储存过程中的质量和延长其保质期非常重要。本文综述了淀粉老化的原理和抗老化方法的最新进展, 从而为淀粉食品加工提供科学依据和技术支持。

1 淀粉的糊化与老化

1.1 淀粉糊化

糊化是老化的必经阶段, 糊化指淀粉溶液在加热条件下, 淀粉颗粒温度升高而吸水发生膨胀, 直链淀粉分子向外渗透, 从颗粒中浸出, 变成可溶性成分。淀粉溶液变成半透明黏稠的糊状物, 随着温度的升高, 淀粉颗粒逐渐膨胀, 破坏结晶区域内的氢键, 晶体结构消失, 支链淀粉颗粒的破裂导致整个体系的黏度上升, 当吸收足够的水分时, 整个颗粒会经历不可逆的膨胀过程[7]。

1.2 淀粉老化

淀粉老化也称老化, 是经糊化后的淀粉在冷却过程中从无序转变为有序的过程。淀粉老化过程复杂, 涉及淀粉分子链的重新排列和结晶[8]。老化通常经历 3 个阶段, 即成核、传播和成熟。在成核和传播过程中, 直链淀粉分子通过氢键自由移动和结合, 形成双螺旋结构。在随后的储藏过程中, 支链淀粉链在成熟阶段重组并形成有序结构逐渐再结晶[9]。老化是一个热力学平衡过程, 在加热过程中, 淀粉分子吸收能量, 从稳定状态转变为无序状态, 冷却后, 淀粉分子从无序状态变为有序状态时, 分子链排列更紧密, 这种有序排列会增强分子间的氢键和范德华力, 分子间作用力的增强会提高淀粉的机械强度[10]。

从时间上分, 淀粉的老化又可以分短期老化和长期老化两个阶段。短期老化是指淀粉经过糊化后, 在数小时内直链淀粉发生重结晶的过程, 此时颗粒外的直链淀粉开始迅速定向迁移, 通过氢键重新形成双螺旋结构和三维凝胶网络, 而长期老化的时间更长, 通常以支链淀粉分子的重结晶为主, 由于支链淀粉分子的分支较多, 所以老化过程中迁移和聚合受到的阻力更大, 老化的速度相对较慢, 具有热可逆性, 食物的老化变质多是由长期老化引起的[11–12]。同时, 短期老化和长期老化存在一定的联系, 直链淀粉重结晶形成的有序结构能够给支链淀粉分子提供晶核, 支链淀粉分子再以此为中心缓慢增长形成晶体[13]。

淀粉类食品在储藏期间极易发生老化现象, 使产品质地变硬, 表面粗糙, 弹性和风味也逐渐消失[14]。含淀粉的食品在加工或者烹饪过程中预热产生糊化, 这为老化提供了基础[15]。淀粉类产品的老化是全球食品工业中造成食物严重浪费的主要原因之一。对于大部分淀粉基主食产品而言, 淀粉的老化现象是有害的, 因此, 在实际生产过程中人们经常采用各种手段来抑制淀粉的老化, 从而改善淀粉基食品的品质。

2 淀粉老化的影响因素

影响淀粉老化的因素复杂多样, 主要有内部因素和外部因素。内部因素包括水分含量、淀粉结构; 外部因素包括储存的时间和温度[16]。

2.1 水分含量

水在淀粉的糊化和老化过程中起着至关重要的作用[7]。天然淀粉链通过氢键结合在一起形成双螺旋结构, 这限制了淀粉链的运动, 在糊化过程中, 随着温度的升高, 水分子会破坏淀粉链之间的氢键, 促使淀粉双螺旋解旋和单链的流动性增加; 老化过程需要水分子的参与, 水分子会使淀粉颗粒膨胀, 为淀粉链运动提供更多的空间, 水分子逐渐从凝胶化淀粉颗粒中分离出来, 随着温度的降低, 范德华力驱动淀粉链的重排和沉淀, 伴随着结晶度的增加, 老化程度增大[16]。因此, 淀粉基食品中水分含量决定了老化程度, 当水分含量在 60%~75%时, 淀粉最易发生老化。这是因为水分含量较低时, 淀粉分子链的迁移困难; 水分含量较高时, 虽然淀粉分子链迁移速率提高, 但由于浓度的降低, 淀粉分子交联缠绕和聚合有序的机会减少[17]。所以水分含量过高和过低都能延缓淀粉老化的发生。SLADE 等[18]的研究也证实了这种结论, 小麦淀粉溶液中水分含量在 27%~50%时, 淀粉的老化速率与水分含量呈正相关; 当水分含量在 50%~90%时, 淀粉老化速率与水分含量呈负

相关。

2.2 水分迁移

水分迁移是影响淀粉基食品老化的另一个重要因素。淀粉基食品在储存过程中内部和外部水分的动态变化显著影响其质地、口感和保质期，内部水分从淀粉颗粒向外迁移导致淀粉颗粒收缩和质地硬化[7]。研究表明，水分迁移促进直链淀粉和支链淀粉分子的重排，加速淀粉老化[19]。

2.3 淀粉的结构

淀粉中直链淀粉和支链淀粉的比例直接影响淀粉老化速率。总体来说，直链淀粉含量越高，老化速度较快，通常在几小时内完成，相反支链淀粉含量高，老化速度较慢，通常需要数天甚至数周[20]，这主要是因为直链淀粉的线性结构容易发生分子重排，促进双螺旋结构的形成和结晶过程，然而支链淀粉的高度分支结构导致糊化后分布更加无序，使支链淀粉分子难以重组为有序的晶体结构[21–22]。有研究表明，直链淀粉含量为 79.05%的玉米淀粉与普通玉米淀粉(25.43%直链淀粉含量)相比更容易老化[23]。此外，直链淀粉的链长也是影响老化的一个重要因素，链长较长的直链淀粉比链长较短的抗老化，这是因为链长越长，受到空间阻碍越大，链长较短的直链淀粉具有一定的灵活性，能够与相邻的淀粉分子形成氢键，较容易老化，增加直链淀粉的链长会显著影响老化的速度和程度[24]。同时，支链淀粉的外链长度和链间长度对老化速度也有影响，较长的外链有助于稳定双螺旋，而较长的嵌段间链提供了灵活性，促进了双螺旋的形成，加速老化形成[25]。

2.4 贮藏时间和温度

淀粉老化的程度和速率在不同温度下有所不同，老化是一个涉及成核和晶体生长的动力学过程，在淀粉玻璃化转变温度附近储存有利于成核，而在糊化温度附近储存则有利于晶体生长[26]。研究发现不同温度下直链淀粉的老化组织形态相差较大，4 ℃时促进了淀粉晶体成核速率，25 ℃下有利于淀粉重结晶晶体的增长[27]。丁文平等[28]同样发现 4 ℃和 25 ℃的储藏温度对大米淀粉老化的影响较大，4 ℃下支链淀粉重结晶速度更快且成核方式为一次成核，而 25 ℃则为逐渐成核。KIM 等[29]比较了大米淀粉在低温冷藏、室温储藏和冷冻放置 1、3 和 6 d 后的老化程度，研究结果表明，淀粉糊的老化程度在冷冻条件下最小。YU 等[30]也发现低温和超低温有利于抑制淀粉的老化。也有研究表明，变温储藏比恒温储藏可以抑制淀粉的老化程度[31]。与 25 ℃和 35 ℃相比，糯米淀粉在 4 ℃储藏时老化程度最大，凝胶中水分子逐渐转变为结合水，凝胶强度最大，相对结晶度较大[13]。大米淀粉老化程度随储藏时间的延长而增加，储存时间从 6 h 增加到 12 h，淀粉老化程度相应提高[32]。因此，应当根据不同淀粉种类和食品特性选择合适的贮藏温度。

3 抗老化措施

到目前为止，研究人员围绕提高淀粉基食品的品质开发出很多不同种类的抗老化方法。这些抗老化方法的原理均为抑制淀粉的分子重排和重结晶，但在不同食品种类中，抗老化的方法和呈现的效果略有差异。目前的淀粉抗老化方法主要分为物理方法，天然添加物，酶法和发酵等方法。

3.1 物理方法

物理方法通过改变淀粉分子的环境和减少分子间相互作用来抑制淀粉老化。这些方法因其简单性、成本效益和在食品工业中的广泛适用性而受到青睐。低温和超低温冷冻已被证明能有效抑制淀粉老化，YU 等[30]的研究表明在低温(–18 ℃)或超低温(–100 ℃)下储存 5 个月后，水稻中的支链淀粉不会老化，在 11 d 的储存期内，支链淀粉在低温下的老化明显延迟。速冻也是延缓淀粉老化的一个重要手段，EDWARDS 等[33]比较了鹰嘴豆淀粉在 4 ℃冷藏 72 h 和在–70 ℃下速冻并储藏 60 h 后老化的情况，发现速冻的淀粉老化程度明显减轻且消化率与未冷冻样品没有显著差异。NAUMENKO 等[34]使用 504 W/I 和 630 W/I 强度的超声波处理后的小麦粉制备面包，发现在超声波条件下形成的羟基离子具有很高的吸附性，显著降低了老化率，延长了面包的保质期。超高压处理可以降低淀粉再结晶的速率从而延缓淀粉的老化，GUO 等[35]采用 100~600 MPa 压力处理莲子淀粉，也能够抑制淀粉的老化。同样采用 600 MPa 处理的木薯淀粉比热处理(90 ℃)的淀粉具有更好的抗老化性能[36]。电离辐照处理(X-射线和电子束)对淀粉同样具有抗老化的作用，两种射线发射高能射线改变淀粉的内部结构和功能特性。X 射线和电子束照射显著降低了马铃薯淀粉的最终黏度和回生黏度，与电子束处理相比 X 射线的高穿透性导致淀粉的结晶度较低，导致淀粉具有出色的抗回生性能[37–38](表 1)。

表 1 不同物理抗老化方法

Table 1 Different physical anti-retrogradation methods

方法分类	处理方法	实施条件	应用实例	参考文献
物理方法	低温或超低温	(–18 ℃或–100 ℃)	水稻	[30]
	速冻	–70 ℃	鹰嘴豆	[33]
	超声波	504 W/I 和 630 W/I	小麦面包	[34]
	高压	600 MPa	莲子	[35]
	高压	100 MPa	木薯	[36]
	电子束和 X 射线	10 kGy	马铃薯	[38]

3.2　天然添加物

天然添加物是目前应用较为广泛, 成本最低的方式之一。在淀粉基食品的加工过程中, 添加某些食品成分会与淀粉形成复合物, 从而阻碍淀粉老化。

3.2.1　乳化剂

乳化剂可以与直链淀粉形成单螺旋 V 型复合物, 减少淀粉膨胀和直链淀粉浸出, 研究发现, 添加大豆卵磷脂、单甘油酯和甘油二酯改变了面包中水的再分配, 从而延缓了水分从面包屑向面包皮的迁移, 硬脂酰乳酸钠降低了面团的吸水性和膨胀能力, 这将更多的水分转移到蛋白质上, 从而使面团更蓬松、更柔软, 间接阻碍了淀粉老化[39]。邱惠等[40]研究食品乳化剂对糯米糕品质的影响及抗老化效果, 结果表明, 单独添加 0.6%蔗糖脂肪酸酯, 0.2%单硬脂酸甘油酯, 0.6%羟丙基二淀粉磷酸酯和 0.2%硬脂酰乳酸钠对糯米糕均具有良好的抗老化效果。

3.2.2　多　糖

多糖类被广泛用作延缓淀粉老化的添加剂。很多研究探索了使用多糖来改变淀粉老化行为。海藻糖的加入同样会延缓淀粉老化, 其通过阻碍水分子、面筋和淀粉之间的相互作用, 限制了储存过程中水的流动性[41]。海藻酸钠与刺槐豆胶具有协同抑制绿豆淀粉老化的作用, 二者复配比为 1:1 时协同作用最强, 抑制绿豆淀粉老化的效果最佳, 可能因为海藻酸钠与刺槐豆胶混合物可以抑制淀粉与水分子之间的紧密连接, 使较少的水分子留在结晶区, 从而阻止了非晶态向结晶态转变[42]。麦麸中提取的支化度较低的阿拉伯木聚糖与小麦淀粉之间的氢键相互作用, 可以阻碍支链淀粉的重排和直链淀粉在长期储存过程中的双螺旋生成来抑制淀粉的长期老化[43]。一种新型微生物多糖 Salecan 被证实具有延缓小麦淀粉老化的作用, 添加在馒头中可以抑制淀粉水分的迁移, 并在馒头冷藏过程中保持良好的品质[44]。XIE 等[45]探讨了果胶对糯米淀粉老化特性的影响, 果胶可以显著(P<0.05)降低糯米淀粉凝胶的老化焓和硬度。X 射线衍射结果表明, 果胶可以降低复合体系的相对结晶度, 果胶含量越高, 相对结晶度越低。当果胶含量为 10%时, 复合体系在冷藏 21 d 后的相对结晶度仅为 10.6%, 同时果胶显著改变了玉米淀粉凝胶的黏弹性(P<0.05), 并延缓了淀粉凝胶的老化。相较于低聚果糖, 低聚半乳糖等低聚多糖, 低聚木糖抑制淀粉老化的效果最为突出, 添加了 16%的低聚木糖的小麦淀粉具有较低的淀粉颗粒的孔隙率、粒径、结晶度和老化黏度, 说明低聚木糖显著抑制了淀粉老化[46]。HOU 等[47]发现阿拉伯木聚糖能够通过阻碍直链、支链淀粉分子的聚集、重排来抑制小麦淀粉的老化过程, 其中低分子质量阿拉伯木聚糖对小麦淀粉短期老化抑制效果好, 而高分子质量阿拉伯木聚糖对小麦淀粉长期老化具有良好的抑制效果, 低分子量阿拉伯木聚糖可以更明显地阻碍淀粉糊化, 因为它对直链淀粉浸出和直链淀粉-脂质复合物形成有明显的抑制作用, 同时抑制了直链淀粉的重结晶, 从而抑制了短期老化。然而, 高分子质量阿拉伯木聚糖主要延缓支链淀粉的重结晶, 对长期回生具有更显著的抑制作用。

3.2.3　蛋白质

蛋白质已被广泛添加到食品中以抑制淀粉老化。然而, 并非所有蛋白质都能有效延缓淀粉老化, 因为这取决于它们的性质和其他因素。LI 等[48]研究发现 4 种青稞蛋白(白蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白)可以明显抑制青稞蛋白的长期重结晶过程, 添加了白蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白的淀粉老化程度分别从 51.55%降低到 48.20%、35.06%、42.22%和 32.63%。豌豆分离蛋白增强了豌豆淀粉凝胶内的水分流动性, 抑制了直链淀粉的短期老化。在长期储存过程中, 豌豆分离蛋白降低了淀粉分子的老化焓和有序结构。相对结晶度和老化度分别降低了 40.6%和 29.9%, 结构分析显示, 豌豆分离蛋白降低了凝胶硬度, 并诱导豌豆淀粉形成弱凝胶, 从而延缓了支链淀粉的长期老化[49]。蛋清粉、大豆分离蛋白、乳清分离蛋白和小麦面筋已经被证明可以延缓小麦淀粉中双螺旋结构的形成和聚集, 减少氢键形成, 从而减缓老化过程[50]。在特定加工条件下, 豌豆蛋白和栗子淀粉通过氢键形成淀粉蛋白复合物, 这增加了抗性淀粉的形成, 抑制了长期和短期结晶的形成, 从而延缓了栗子淀粉的老化程度[51]。不同的蛋白质在影响淀粉回生方面表现出不同的机制, 可能是蛋白质可以调节水的可用性; 具有高水合能力的蛋白质可能会与淀粉竞争水, 导致一些水从糊化淀粉转移到蛋白质上。

3.2.4　其　他

郭婉雪[52]研究了添加瓜尔胶的方便湿面在煮制、蒸制、蒸煮结合和微波 4 种不同加工方式下的老化程度, 结果表明蒸煮结合的加工方式显著降低了方便湿面的结晶速率, 延缓了淀粉老化。

VERNON-CARTER 等[53]在玉米饼中添加 0.12 g/100 g 的花青素, 形成了花青素淀粉复合物, 相较于对照组, 硬度明显降低, 延缓了玉米淀粉的老化。面团中加入 α-环糊精和 γ-环糊精可有效提升面包品质, 形成直链淀粉-脂质-环糊精复合物, 在贮藏期内阻碍直链淀粉重排, 降低淀粉晶体的熔融焓, 延缓面包老化, 降低面包硬度[54]。用添加杜仲叶粉末(0.5%~1.0%)的小麦面粉后制成的面包中淀粉的再结晶受到抑制, 这导致面包质地更柔软, 孔隙率更高, 结合水比例增加, 老化焓降低, 相对结晶度降低, 最终达到了延缓面包老化的目的[55]。HAN 等[56]在面团中添加≤5%的橙皮粉, 可以增加面团形成时间, 减少面团老化, 从而提高面团吸水率, 这是因为橙皮粉中的葡萄糖醛酸与淀粉分子形成氢键, 使它们难以旋转和定向, 从而阻碍了它们在面团有限空间内的重排, 但当橙皮粉的添加量增加到 7%时, 多余的粉末通过分子间相互作用形成晶体, 作为淀粉聚合物分子之间的黏合剂, 反而促进了淀粉老化。

NIU 等[57]发现 2%猪血浆蛋白水解物能与玉米中直链淀粉相互作用, 减少玉米淀粉间氢键相互作用, 抑制玉米淀粉的短期老化。孙乐常等[58]发现蓝圆鲹分离蛋白酶解产物能够抑制大米淀粉在 4 ℃保存期间凝胶网络和微晶结构的形成, 同时可能限制了淀粉分子间的聚集, 抑制大米淀粉的短期老化。王心等[59]研究发现甜菜加工的副产物-甜菜果胶对小麦淀粉的短期和长期老化均有明显的抑制作用, 且随添加量的增加抑制老化的效果增强, 添加甜菜果胶后, 小麦淀粉的峰值黏度、终值黏度和相对崩解值显著提高(P<0.05), 而相对老化值显著降低(P<0.05)。

不同外源天然添加物抗老化方法总结如表 2。

3.3 酶 法

在淀粉类食品中添加酶制剂也是抑制淀粉老化的常用手段。这主要是因为酶的加入可以通过分解淀粉分子并减少其结晶度来减缓老化, 酶水解后, 淀粉的分子量降低, 支链淀粉链缩短, 糊精和小分子糖的数量增加, 直接影响淀粉网络的形成、支链淀粉的再结晶以及加工和储存过程中水的分布和流动性, 所有这些都有助于减少淀粉老化[60]。王辛等[61]在糯米糕团中添加 α-淀粉酶后发现随着酶量的增加, 抗老化的能力明显增强。

XIE 等[45]用不同葡萄糖当量(dextrose equivalent, DE)值的 α-淀粉酶或 β-淀粉酶水解糯米淀粉, 研究酶解糯米淀粉(enzymatically-hydrolyzed glutinous rice starch, EGS)对米糕抗老化的影响, 结果发现, 随着酶解程度的增加(DE<20), EGS 的抗老化效果越好, 当酶解程度过高(DE>20)时, 用糯米制成的米糕和面团坍塌明显, 抗老化作用降低且影响了产品品质; α-淀粉酶和 β 淀粉酶均对米糕表现较好的抗老化作用, β-淀粉酶水解糯米淀粉的抗老化性能要略优于 α-淀粉酶水解糯米淀粉。TAKAHASHI 等[62]探究了在蒸米饭的过程中添加脂肪酶对大米老化的影响, 结果发现脂肪酶产生的游离脂肪酸将大米中蛋白质产生的游离巯基(-SH)转化为二硫键, 降低了熟米饭中的游离巯基(-SH)含量, 改变了淀粉的溶胀特性, 最终抑制了淀粉的老化。麦芽糖淀粉酶水解小麦淀粉, 结果表明麦芽糖淀粉酶可以破坏淀粉颗粒中结晶区域, 经过麦芽糖淀粉酶处理之后的小麦淀粉老化得到显著抑制, 这可能是麦芽糖

表 2 不同外源天然添加物抗老化方法

Table 2 Different exogenous natural additives anti-retrogradation methods

方法分类		处理方法	实施条件	应用实例	参考文献
外源天然添加物	乳化剂	硬脂酰乳酸钠	0.2%、0.5%和 1.0%	全麦面粉	[39]
		蔗糖脂肪酸酯	0.6%	糯米糕	[40]
		单硬脂酸甘油酯	0.2%	糯米糕	[40]
		羟丙基二淀粉磷酸酯	0.6%	糯米糕	[40]
		硬脂酰乳酸钠	0.2%	糯米糕	[40]
	多糖	海藻酸钠与刺槐豆胶	1:1, 1.0%	绿豆淀粉	[42]
		阿拉伯木聚糖	-	小麦淀粉	[43]
		微生物多糖 Salecan	10 g/kg	小麦淀粉	[44]
		瓜尔胶	0.3%	方便湿面	[52]
		低聚木糖	16%	小麦淀粉	[46]
		阿拉伯木聚糖	1%、2%	小麦淀粉	[47]
	蛋白质	青稞蛋白(白蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白)	10%	青稞淀粉	[48]
		豌豆蛋白	3%、6%、9%、12%	豌豆淀粉	[49]
		豌豆蛋白	-	栗子淀粉	[51]
	其他	花青素	0.12%	玉米淀粉	[53]
		α-环糊精、γ-环糊精	2%、3%	面包	[54]
		杜仲粉	0.5%~1%	小麦粉	[55]
		橙皮粉	≤5%	小麦粉	[56]
		猪血浆蛋白水解物	2%	玉米淀粉	[57]
		蓝圆鲹分离蛋白酶解产物	3%、6%、9%	大米淀粉	[58]
		甜菜果胶	-	小麦粉	[59]

注: -表示未有此项, 下表同。

淀粉酶水解支链淀粉得到的短链结构限制了双螺旋的产生[63]。麦芽四糖淀粉酶处理大米淀粉、小麦淀粉和马铃薯淀粉均会导致直链淀粉解聚，增加短链淀粉的数量，结晶度明显降低，抑制了淀粉的长期老化，其中效果最明显的是小麦淀粉，其次是大米淀粉和马铃薯淀粉，作用机制为麦芽四糖的淀粉酶截留了水分子，从而阻止了分子间淀粉相互作用，并干扰了淀粉链之间的氢键，从而通过其空间阻碍抑制了老化[64]。

不同酶法抗老化措施如表 3 所示。

表 3　不同酶法抗老化措施

Table 3　Different enzymes anti-retrogradation measures

方法分类	处理方法	实施条件	应用实例	参考文献
酶法	*α*-淀粉酶	1.2%	糯米淀粉	[31]
	α-淀粉酶	2.9 U/g	糯米淀粉	[45]
	β-淀粉酶	1.59 U/g	糯米淀粉	[45]
	脂肪酶	-	大米	[62]
	麦芽四糖淀粉酶	-	大米	[63]

3.4　发　酵

近年来，发酵方法也被观察到对淀粉的老化具有较好的抑制作用，发酵方法分为直接发酵和间接发酵[3]。

直接发酵是发酵菌种直接与面粉混合均匀，加水后在特定的温度条件下直接发酵。经发酵后的面团称为酸面团，经酸面团制成的馒头在贮藏期间的硬度明显低于未发酵组，说明发酵过程抑制了小麦淀粉的老化，提高的馒头的贮藏品质[65]。同样经酸面团制作的米饼也发现老化过程明显减慢，米饼中支链淀粉重结晶减少[66]。

间接发酵是发酵菌种先与其他发酵底物发酵，发酵完成后再与面粉混合用于淀粉基食品的制作。PÉREZ-RODRÍGUEZ 等[67]用米曲霉发酵面包虫粉，经发酵后的面包虫粉冷冻干燥磨粉后添加到小麦粉中，制作成的面包与对照组相比，更柔软，品质更好。

发酵方法不仅可以抑制淀粉老化，提升淀粉基食品的贮藏品质，而且能够赋予淀粉食品更丰富的营养成分，具有良好的应用潜力，但在实践应用中需控制发酵的时间和温度，过度和不足的发酵可能带来其他不良的影响。

4　结束语

淀粉老化引起产品品质的下降，造成大量食品浪费，会给淀粉类食品生产企业造成巨大的经济损失，是制约行业发展的难点之一。虽然目前延缓淀粉改性的方法较多，但均存在各自的局限性，但酶法改性价格昂贵，且实际生产应用中工艺相对复杂，运用范围有限，物理改性无需添加其他物质，安全性高，环境友好，但需额外设备支持，投入较大。此外，大多数研究仍处于实验室规模，在实际应用中需要解决稳定性和成本效益问题。天然外源物质添加因其操作性和成本较低而在淀粉食品工业中得到了广泛的研究和应用，然而，这些外源物质添加量和种类很容易受到食品配方和生产过程的影响。添加物质还要符合相关国家标准的要求。发酵方法是比较安全的抗老化方法，但其应用的食品种类有限。此外，不同的加工方法的效果和适用性各不相同，需要进一步的研究来了解不同加工方法对淀粉老化的具体机制，以开发并结合多种一直淀粉老化的加工方法并优化生产工艺的集成，结合适宜的包装材料和贮藏条件，开发出适用于各种淀粉类食品的抗老化方法。

参考文献

[1] DOMINGUEZ-AYALA JE, SOLER A, MENDEZ-MONTEALVO G, *et al*. Supramolecular structure and technofunctional properties of starch modified by high hydrostatic pressure (HHP): A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291: 119609

[2] 甘森蓝. 不溶性膳食纤维、原花青素、阿魏酸联合作用对糯米淀粉特性的影响及在汤圆中的应用[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
GAN LS. Effect of insoluble dietary fiber, proanthocyanidins and ferulic acid on starch properties of rice and its application in dumplings [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2024.

[3] NIU WY, SUN HM, DAVID JM, *et al*. Recent Advances on anti-retrogradation technologies of starch-based foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2026: 105480.

[4] ROGER P, BELLO-PEREZ LA, COLONNA P. Contribution of amylose and amylopectin to the light scattering behaviour of starches in aqueous solution [J]. Polymer, 1999, 40(25): 6897–6909.

[5] BERTOFT E, TETLOW JI. Understanding starch structure: Recent progress [J]. Agronomy, 2017, 7(3): 56.

[6] QIU S, ABBASPOURRAD A, PADILLA-ZAKOUR OI. Prevention of the retrogradation of glutinous rice gel and sweetened glutinous rice cake utilizing pulsed electric field during refrigerated storage [J]. Foods, 2022, 11: 1306.

[7] QIU S, EMILE-PUNZALAN M, ABBASPOURRAD A, *et al*. High water content, maltose and sodium dodecyl sulfate were effective in preventing the long-term retrogradation of glutinous rice grains-a comparative study [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105247.1-105247.11.

[8] 王岩松, 李明, 魏益民, 等. 淀粉老化对水分状态的影响: 不同直支比体系比较研究[J]. 核农学报, 2025, 39(3): 556–564.
WANG YS, LI M, WEI YM, *et al*. effects of starch retrogradation on water status under different AM/AP ratios [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(3): 556–564.

[9] SINGH N, SINGH J, KAUR L, *et al*. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources [J]. Food Chemistry, 2003, 81(2): 219–231.

[10] CHEN L, REN F, ZHANG Z, *et al*. Effect of pullulan on the short-term and long-term retrogradation of rice starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 415–421.

[11] TIAN Y, XU X, LI Y, *et al*. Effect of *β*-cyclodextrin on the long-term retrogradation of rice starch [J]. European Food Research and Technology, 2008, 228(5): 743–748.

[12] MATIGNON A, TECANTE A. Starch retrogradation: From starch

components to cereal products [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 43–52.

[13] 刘妍. 环境条件对米淀粉老化特性的影响及在即食米糕中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
LIU Y. Effects of environmental conditions on the retrogradation characteristics of rice starch and its application in instant rice cakes [J]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.

[14] 张雨, 张康逸, 张国治. 淀粉老化过程机理及淀粉抗老化剂应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 316–321.
ZHANG Y, ZHANG KY, ZHANG GZ. Research progress on starch retrogradation process mechanism and application of starch anti-retrogradation agent [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 316–321.

[15] EVANS ID, HAISMAN DR. The effect of solutes on the gelatinization temperature range of potato starch [J]. Starch–Stärke, 1982(34): 224–231.

[16] NING J, FU B, TANG X, *et al*. Starch retrogradation in starch-based foods: Mechanisms, influencing factors, and mitigation strategies [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300(000). DOI:10.1016/j.ijbiomac.2025.140354

[17] 周国燕, 胡琦玮, 李红卫, 等. 水分含量对淀粉糊化和老化特性影响的差示扫描量热法研究[J]. 食品科学, 2009, 30(19): 89–92.
ZHOU GY, HU QW, LI HW, *et al*. DSC study of effects of water content on gelatinization and aging of starch [J]. Food Science, 2009, 30(19): 89–92.

[18] SLADE L, LEVINE H. Beyond water activity: Recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1991, 30(2-3): 115–360.

[19] BRIFFAZ A, BOHUON PJM, MÉO T, *et al*. Modelling of water transport and swelling associated with starch gelatinization during rice cooking [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121(1): 143–151.

[20] ZHOU X, WANG R, YOO SH, *et al*. Water effect on the interaction between amylose and amylopectin during retrogradation [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(4): 1671–1674.

[21] LI E, CAO P, CAO W, *et al*. Relations between starch fine molecular structures with gelatinization property under different moisture content [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 278: 118955.

[22] ZHU F, LIU P. Starch gelatinization, retrogradation, and enzyme susceptibility of retrograded starch: Effect of amylopectin internal molecular structure [J]. Food Chemistry, 2020. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.126036

[23] LIU R, XU C, CONG X, *et al*. Effects of oligomeric procyanidins on the retrogradation properties of maize starch with different amylose/amylopectin ratios [J]. Food Chemistry, 2017, 221(PT.2): 2010–2017.

[24] LI C, GIDLEY MJ. Starch structure and exchangeable protons contribute to reduced retrogradation of high-amylose wheat bread [J]. Food Chemistry, 2022(15): 385.

[25] VAMADEVAN V, BERTOFT E. Impact of different structural types of amylopectin on retrogradation-ScienceDirect [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 88–96.

[26] CHANG Q, ZHENG B, ZHANG Y, *et al*. A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186: 163–173.

[27] LU TJ, JANE JL, KEELING PL. Temperature effect on retrogradation rate and crystalline structure of amylose [J]. Carbohydrate Polymers, 1997, 33(1): 19–26.

[28] 丁文平, 丁霄霖. 温度对大米淀粉胶凝和回生影响的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2002(12): 32–34.
DING WP, DING XL. Effects of water content on the gelatinization and retrogradation of rice starch [J]. Cereal & Feed Industry, 2002(12): 32–34.

[29] KIM JO, KIM WS, SHIN MS. A comparative study on retrogradation of rice starch gels by DSC, X-ray and alpha-amylase methods [J]. Starch-Stärke, 1997, 49(2): 71–75.

[30] YU SF, MA Y, ZHENG XQ. Effects of low- and ultralow-temperature freezing on retrogradation and textural properties of rice starch gel during storage [J]. Journal of Texture Studies, 2012, 43(3): 175–186.

[31] KTH A, HRKA B, TWM A, *et al*. Isothermal and temperature-cycling retrogradation of high-amylose corn starch: Impact of sonication on its structural and retrogradation properties [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105650.

[32] CHAKRABORTY I, GOVINDARAJU I, KUNNEL S, *et al*. Effect of storage time and temperature on digestibility, thermal, and rheological properties of retrograded rice [J]. Gels, 2023, 9: 142.

[33] EDWARDS CH, VEERABAHU AS, MASON AJ, *et al*. *α*-amylase action on starch in chickpea flour following hydrothermal processing and different drying, cooling and storage conditions [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 259(9): 117738.

[34] NAUMENKO N, POTOROKO I, KALININA I, *et al*. The effect of ultrasonic water treatment on the change in the microstructure of wheat grain, dough, and wheat flour bread [J]. International Journal of Food Science, 2022(1): 1986438.

[35] GUO Z, ZENG S, ZHANG Y, *et al*. The effects of ultra-high pressure on the structural, rheological and retrogradation properties of lotus seed starch [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 285–291.

[36] VITTADINI E, ELEONORA C, EMMA C, *et al*. High pressure-induced tapioca starch gels: Physico-chemical characterization and stability [J]. European Food Research and Technology, 2008, 226: 889–896.

[37] 张秀宇, 鞠阳, 李文雅, 等. 淀粉改性及改性淀粉在食品中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(22): 11–21.
ZHANG XY, JU Y, LI WY, *et al*. Modification of starch and application of modified starch in foods [J]. Journal of Food Safty & Quality, 2024, 15(22): 11–21.

[38] LEI X, YU J, HU Y, *et al*. Comparative investigation of the effects of electron beam and X-ray irradiation on potato starch: Structure and functional properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123909.

[39] TEBBEN L, CHEN G, TILLEY M, *et al*. Improvement of whole wheat dough and bread properties by emulsifiers [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(2): 59–69.

[40] 邱惠, 庞庭才, 黄海, 等. 不同乳化剂对糯米糕品质的影响及抗老化研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(5): 15–20.
QIU H, PANG TC, HUANG H, *et al*. The effect of different emulsifiers on the quality and anti-staling of glutinous rice cake [J]. Food Research and Development, 2021, 42(5): 15–20.

[41] PENG B, LI Y, DING S, *et al*. Characterization of textural, rheological, thermal, microstructural, and water mobility in wheat flour dough and bread affected by trehalose [J]. Food Chemistry, 2017, 233(15): 369.

[42] 栾茜玉, 陈妍, 张一秀, 等. 海藻酸钠与刺槐豆胶协同作用对绿豆淀粉的短期和长期老化影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 112–120.
LUAN QY, CHEN Y, ZHANG YX, *et al*. Synergistic effects of sodium

alginate and locust bean gum on short- and long-term retrogradation of mung bean starch [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 112–120.

[43] YAN W, ZHANG M, ZHANG M, *et al*. Effect of wheat bran arabinoxylan on the gelatinization and long-term retrogradation behavior of wheat starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291: 119581.

[44] LIU Q, CHEN P, LI P, *et al*. Effects of salecan on the gelatinization and retrogradation behaviors of wheat starch [J]. Food Science and Technology/Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 2023, 186(000): 10.

[45] XIE J, WEI S, XU X, *et al*. Preparation, structure, and properties of enzymatically-hydrolyzed starch for slowing down the retrogradation of high starchy foods [J]. Starch–Stärke, 2022, 74: 2100213.

[46] SU H, TU JJ, ZHENG MJ, *et al*. Effects of oligosaccharides on particle structure, pasting and thermal properties of wheat starch granules under different freezing temperatures [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126209.

[47] HOU CD, ZHAO XH, TIAN MQ, *et al*. Impact of water extractable arabinoxylan with different molecular weight on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch [J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126477.

[48] LI J, LIN R, NIE M, *et al*. Effect of four highland barley proteins on the retrogradation and in vitro digestion properties of highland barley starch [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101915.

[49] XU K, KUANG J. Unraveling the mechanisms of pea protein isolate in modulating retrogradation behavior of pea starch [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 9.

[50] BAI J, ZHANG L, JIA XY, *et al*. Multi-scale structural changes and mechanistic analysis of wheat starch gels with common proteins in short-term retrogradation at low temperature [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 1.1–1.10.

[51] LI Y, HE Z, TU Y, *et al*. Understanding synchronous regulating effects of starch-protein interactions on starch digestion and retrogradation under thermal shear processing [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 329: 121767.

[52] 郭婉雪. 外源添加物及加工方式对方便湿面抗老化的影响及机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
GUO WX. Study on the effects of exogenous additives and processing methods on the anti-retrogradation of instant wet noodles and the mechanism [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.

[53] VERNON-CARTER EJ, ALVAREZ-RAMIREZ J, BELLO-PEREZ LA, *et al*. Supplementing white maize masa with anthocyanins: Effects on masa rheology and on the *in vitro* digestibility and hardness of tortillas [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 91: 8.

[54] ZHOU J, KEY, BARBA FJ, *et al*. The addition of *α*-cyclodextrin and *γ*-cyclodextrin affect quality of dough and prebaked bread during frozen storage [J]. Foods, 2019, 8(5): 174.

[55] HAN S, LIU X, CHEN S, *et al*. *et al*. Quality and staling characteristics of wheat bread improved by adding *Eucommia ulmoides* oliver leaf micropowder [J]. LWT-Food Science Technology, 2024, 198: 116008.

[56] HAN L, ZHANG J, CAO X. Effects of orange peel powder on rheological properties of wheat dough and bread retrogradation [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(2): 1061–1069.

[57] NIU HL, HAN Q, CAO CA, *et al*. Short-term retrogradation behaviour of corn starch is inhibited by the addition of porcine plasma protein hydrolysates [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 393–400.

[58] 孙乐常, 孙小舒, 林端权, 等. 蓝圆鲹分离蛋白酶解产物的制备及其抗大米淀粉老化特性[J]. 水产学报, 2024, 48(4): 376–390.
SUN LC, SUN XS, LIN DQ, *et al*. Preparation of enzymatic hydrolysate of blue round scad (*Decapterus maruadsi*) protein isolate and its anti-retrogradation effect on rice starch [J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(4): 049830.

[59] 王心, 闫璟圆, 张倩, 等. 甜菜果胶对小麦淀粉老化的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 169–176.
WANG X, YAN JY, ZHANG Q, *et al*. Effect of sugar beet pectin on the retrogradation of wheat starch [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(7): 169–176.

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

[61] 王辛, 周惠明, 蒋蕴珍. 传统糕团类食品抗老化技术的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2007(5): 23–24.
WANG X, ZHOU HM, JIANG YZ. A study on the anti-retrogradation technology for traditional Chinese rice cakes [J]. Cereal and Feed Industry, 2007(5): 23–24.

[62] TAKAHASHI K, HIRANO T, KUNIEDA M, *et al*. Effect of lipase addition on inhibition of starch retrogradation in rice [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110216.

[63] ZHAI YT, LI XX, BAI YX, *et al*. Maltogenic α-amylase hydrolysis of wheat starch granules: Mechanism and relation to starch retrogradation [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107256.

[64] CUI Y, LI X, GUO L, *et al*. Retrogradation inhibition of starches in staple foods with maltotetraose-forming amylase [J]. Food Chemistry, 2024(15): 449.

[65] WANG X, ZHAO R, YUAN W. Type I sourdough steamed bread made by retarded sponge-dough method [J]. Food Chemistry, 2020, 311(1): 126029.

[66] MENG L, KIM SM, ZHANG D, *et al.* Effects of different starter cultures on the quality characteristics and shelf-life of fermented rice cake [J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29: 1483–1490.

[67] PÉREZ-RODRÍGUEZ E, IBARRA-HERRERA CC, PÉREZ-CARRILLO E. Effect of incorporation of solid-state fermented edible insects *Tenebrio molitor* and *Sphenarium purpurascens* with *Aspergillus oryzae* in the elaboration of bread [J]. LWT, 2023, 184: 115003.

(责任编辑: 韩晓红　蔡世佳)