DOI:10.12441/spyswjs.20240315005 [文章编号] 1673-1689(2025)07-0001-10

热可逆多糖凝胶的研究进展

周东昕[1] 张子傲[1] 陈 甦[1] 杨伟民[1] 孙嘉骏[1] 韩盛祖[1] 谢安宁[1] 李晓晓[1] 柏玉香[1,2,3,4*]

(1. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室,江苏 无锡 214122; 2. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 3. 江南大学食品安全与营养协同创新中心,江苏 无锡 214122; 4. 江南大学食品安全国际联合实验室 江苏 无锡 214122)

摘要: 热可逆凝胶在蛋糕、糖果、果冻、肉冻、流沙包等烘焙制品、肉制品及零食的加工中应用广泛。目前应用效果最佳的热可逆凝胶为明胶,其能与水结合形成透明凝胶,并且在接近人体口腔温度时即可融化,但明胶存在价格昂贵的问题。因此研究者将目光投向多糖类凝胶,期望获得更多具有不同性质的热可逆食品原料。作者综述了植物、藻类、微生物等天然来源及通过物理、化学和酶法改性获得的具有热可逆性的多糖凝胶,并对多糖凝胶的来源、结构、凝胶机制及产品应用情况进行总结,旨在为食品工业开发新型热可逆多糖原料提供参考,促进新型热可逆多糖凝胶在食品工业中的应用。

关键词: 多糖;热可逆;凝胶特性;淀粉

Research Progress in Thermo-reversible Polysaccharide Gels

ZHOU Dongxin[1] *ZHANG Ziao*[1] *CHEN Su*[1] *YANG Weimin*[1] *SUN Jiajun*[1] *HAN Shengzu*[1] *XIE Anning*[1] *LI Xiaoxiao*[1] *BAI Yuxiang*[1,2,3,4*]

(1. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Synergetic Innovation Center of Food Safety and Nutrition, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. International Joint Laboratory on Food Safety, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Thermo-reversible gels are widely applied in the processing of baking, meat, and snack products including cakes, candies, jelly, aspic, and steamed custard buns. Currently, the most effective thermo-reversible gel is gelatin, which can combine with water to form a transparent gel that melts when it is close to the temperature of the human oral cavity. However, gelatin is expensive. Therefore, researchers have turned their attention to polysaccharide gels, hoping to obtain more thermo-reversible food raw materials with different properties. The author reviews thermo-reversible polysaccharide gels from natural sources such as plants, algae, and microorganisms and those modified by physical, chemical, and enzymatic methods and summarizes the sources, structures, gelatinization mechanisms, and product applications of polysaccharide gels. It is expected to provide a reference for developing new thermo-reversible polysaccharide raw materials and promoting the application of new thermo-reversible polysaccharide gels in the food industry.

Keywords: polysaccharide; thermo-reversible; gel properties; starch

在食品工业中,许多食品体系需要经过反复的热加工处理,以实现多样化的产品形态和口感。其中,明胶应用最为广泛。明胶是一种从动物结缔组织中提取的大分子亲水胶体,由胶原蛋白部分水解而成[1]。该水解过程仅涉及维持螺旋稳定性的氢键和疏水键,当明胶分子形

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2023YFF1103600);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP221029,JUSRP422007)。

通信作者: 柏玉香(1986—),男,博士,研究员,博士研究生导师,主要从事淀粉酶法加工、淀粉结构衍生物制备、糖酶结构及催化机理、淀粉质食品开发与改良研究。E-mail: ybai@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2024-03-15 **修回日期:** 2024-05-08

成胶原氢键结构时，溶胶便转变为凝胶。因此，明胶具有独特的热可逆性，即可通过改变温度实现体系溶胶-凝胶状态的可逆转变，这种特性与部分食品体系需要进行反复热加工的生产工艺高度契合，深受研发者青睐并得到广泛应用[2]。

热可逆凝胶因其可塑性较强，具有广阔的应用前景[3]。受明胶热可逆特性的启发，研发者将目光投向植物、藻类、微生物等来源的多糖凝胶[4]，期待开发更多性质各异的食品原料，推动食品工业中热可逆产品的研发与应用。除天然存在的热可逆多糖凝胶外，淀粉作为一种具备凝胶性质的中性多糖，也备受国内外研究者关注。经酶法改性的热可逆淀粉凝胶，不仅具备淀粉凝胶价格低廉、易消化的特性，还具有满足加工需求的热可逆特性[5]，在新型热可逆食品体系的开发中极具潜力。

作者概述了近年来国内外关于各类热可逆多糖凝胶及淀粉类凝胶热可逆改造的研究进展，见表 1。分析了不同多糖凝胶的优缺点、改良后的特性及应用，以期为不同多糖凝胶在食品工业中的应用提供参考。

表 1　热可逆多糖凝胶的分类、性质及应用

Table 1　Classification, properties, and applications of thermo-reversible polysaccharide gels

多糖分类	工艺	名称	提取来源	优点	缺点	应用	参考文献
天然多糖	植物提取	魔芋多糖（KGM）	魔芋块茎	胶凝性好	受pH影响较大	薄膜制品、饮料行业	[6-13]
		谷物型β-葡聚糖	谷物	药用价值高		医疗领域	[14-19]
		低酯果胶（LMP）	细胞壁	弹性佳、风味释放佳	受离子浓度影响大、保质期短	低糖果酱、冰冻食品	[20-28]
	藻类提取	琼脂	红藻细胞壁	凝固性佳	弹性低、透明度差	肉类罐头、冷饮食品	[29-35]
		卡拉胶	红藻	增稠性好、凝冻性佳	脆性大、成本高	果冻、饮料、医疗领域	[36-41]
	微生物提取	微生物型β-葡聚糖	酵母细胞	透明度高、凝胶强度大		医疗领域	[14-19]
	微生物发酵	结冷胶	鞘氨醇单胞菌	适应性强	资本垄断、成本高	添加剂	[42-46]
		可得然胶	胞外发酵	透明度高、适应性强	提取工艺烦琐、水溶性差	乳制品、冷冻甜食	[47-50]
改性类多糖	物理混合	槐豆胶-黄原胶（XG）复配体系	国槐种子胚乳/黄杆菌	水溶性好、增香能力强	受环境影响较大	奶制品	[51-54]
		铁皮石斛多糖（DOP）-黄原胶（CG）复配体系	铁皮石斛/黄杆菌	可调节能力强	原料稀缺、成本高	生物医药	[55-57]
	化学改性	甲基纤维素		保持弹性和水分含量	易腐败、易破裂、环境污染大	素肉、减肥产品	[58-62]
		壳聚糖（CS）		生物安全性高、功能优异	成本高、未普及	贮藏保鲜	[63-67]
	酶法改性	热可逆淀粉	淀粉	成本低、安全无毒、易消化	熔融温度高、淀粉回生	糕点、奶制品、肉制品等	[68-77]

1　天然来源的热可逆多糖凝胶

1.1　植物源的热可逆多糖凝胶

1.1.1　KGM

KGM 来源于魔芋块茎，是一种中性杂多糖。其分子主链是 *D*-葡萄糖与 *D*-甘露糖按 1∶1.5 或 1∶1.6 的残基比例，通过 β-1，4-糖苷键连接而成[6-7]。

KGM 的可逆性较为特殊，当 pH<12.2 时，KGM 与水相形成黏性溶胶，并进一步形成热可逆凝胶；当 pH>12.2 时，溶液呈强碱性，形成热不可逆弹性凝胶[8]。与明胶相似，两者均可通过氢键改善凝胶特性，但 KGM 还可通过席夫碱反应形成

动态交联网络。此外，KGM的凝胶网络可通过物理共混的方式改善，对于明胶则主要是通过调节pH、温度等条件调控其凝胶特性[9]。

在薄膜制品制作中，利用KGM的成膜性可制备可食性包装材料、纸质食品材料等[10]；在饮料行业，加入KGM可通过增稠和提高持水性延长保质期[11]。但单一KGM与复配凝胶的胶凝性仍存在较大差距[12]，且其可逆性受pH的影响较大。因此，未来研究可聚焦于改善KGM的热稳定性，以及开发非碱条件下的热可逆凝胶制备新方法[13]。

1.1.2 *β*-葡聚糖

β-葡聚糖是一种具有凝胶特性的水溶性高分子多糖，已被证实存在于谷物、食用菌和微生物中[14]。目前关于*β*-葡聚糖作为热可逆凝胶的研究较少。Furuta等[15]发现，含有*β*-1，6支链的*β*-1，3-葡聚糖在5 ℃、质量分数2.0%以上时，可形成透明性良好的热可逆凝胶。与明胶不同，*β*-葡聚糖分子链上的羟基能与多价阳离子交联，这一化学结构使其与纯明胶凝胶存在显著差异[16]。王喆等[17]研究发现，在一定相对分子质量范围内，*β*-葡聚糖黏度随相对分子质量增大而升高，而凝胶强度与相对分子质量成反比。

在热可逆凝胶领域，解决*β*-葡聚糖热可逆转化的技术障碍是未来研究的重要方向[18]。此外，通过引入新型合成聚合物或天然生物活性分子，以及探索更先进的支化结构，或可增强*β*-葡聚糖热可逆凝胶体系的性能并拓宽其应用范围[19]。

1.1.3 LMP

果胶分为同质多糖和杂多糖，广泛存在于植物细胞壁和细胞间隙[20]。果胶分子结构呈树枝状，羧基大多以自由酸形式存在，根据甲酯化程度分为高酯果胶（HMP）与LMP。凝胶形成时，果胶通过交联和水分吸附作用使其分子链上的羧基和羟基与多价阳离子（Ca^{2+}、Mg^{2+}等）交联，中和电荷并降低极性，进而使果胶分子链相互连接形成三维网络结构[21]。

HMP的凝胶特性受pH和可溶性固形物的影响，常导致食品中糖分含量偏高[22]；而LMP不受pH和可溶性固形物的影响，可通过静电相互作用形成稳定凝胶[23-24]。相较于HMP，LMP弹性更佳且具备热可逆性[25]，但单独使用时胶凝度较低，若Ca^{2+}浓度控制不当，易出现脱水收缩、凝胶不均匀等问题[26]，影响产品品质。

目前，LMP常用于果冻、酸奶及多数无糖保健食品，在低糖果酱中的应用尤为广泛[22]。此外，添加LMP的冰淇淋口感、透光性和口味更佳[22]。但由于果胶分子间形成的不稳定聚集体结构会随时间延长发生解离，进而降低分子间作用力，导致表观黏度下降[27]，因此添加LMP的产品保质期较短。未来的研究可聚焦于分子改造或添加其他物质优化LMP的凝胶性能，使其应用更加广泛[28]。

1.2 藻类源的热可逆多糖凝胶

1.2.1 琼脂

琼脂是来源于红藻类细胞壁的水溶性藻类多糖，其侧链上的羟基等极性基团在形成凝胶时会产生静电相互斥力，导致分子链交联不稳定，进而形成非凝胶部分[29]。

琼脂能与某些物质形成络合物，在室温下形成凝胶的极限质量分数仅为0.004%，且凝胶强度高、具有热可逆性[30]。此外，琼脂融点与凝固点之间还存在特有的“滞后现象”[31]，使其在食品工业中得到广泛应用。在冷饮食品中，琼脂可抑制冰晶生成、提高抗热融性[32]；在肉类罐头中，琼脂凭借胶凝和赋形作用，可解决罐头中的脆碎及挂壁问题[33]。但与明胶相比，琼脂存在成胶时间长、弹性低、透明度差、无乳化作用等问题[34]。因此，未来对琼脂的研究及开发应聚焦于提升其快速热可逆性，使其在食品加工中快速完成凝胶-溶胶转化，以拓宽其应用场景[35]。

1.2.2 卡拉胶

卡拉胶是一类来源于红藻的高分子离子多糖，由3，6-脱水-*D*-半乳糖残基和*D*-半乳糖通过*α*-1，3-糖苷键和*β*-1，4-糖苷键连接形成的共聚物[36]。

卡拉胶的凝胶形成分为4个主要阶段：1）卡拉胶分子在热水中呈无规卷曲状；2）随温度下降，分子逐渐螺旋化形成单螺旋体；3）温度继续降低，分子间形成双螺旋体，构成立体网状结构；4）双螺旋体聚集形成凝胶。与明胶相似，卡拉胶也可通过螺旋体交联形成立体网络凝胶结构，区别在于卡拉胶为双螺旋体，而明胶为三螺旋体结构[37]。

卡拉胶因优异的增稠性与凝胶性在食品领域应用广泛。用卡拉胶制备的果冻口感更具弹性且便于贮存[38]；在冷冻制品中，卡拉胶可减缓冰晶体形成速度，降低速冻过程对食品品质的损伤[39]。但相对于其他凝胶剂，卡拉胶凝胶脆性

大，不利于保持食品的外观形状[40]，且高品质的卡拉胶需经过精制步骤，成本较高。因此，未来需提高其稳定性并开发更经济的生产与精制工艺，以拓宽其应用前景[41]。

1.3 微生物发酵类热可逆多糖凝胶

1.3.1 结冷胶

结冷胶是鞘氨醇单胞菌发酵产生的微生物多糖，由四糖重复单元聚合而成[42]，在溶液中以双螺旋结构存在。

结冷胶具有良好的悬浮性和热可逆性[43]。此外，当体系中添加二价或多价抗衡离子时，结冷胶可形成离子型凝胶，这与明胶通过蛋白质分子之间的氢键和范德华力维持胶凝状态的机制不同，这些差异导致两者在物理性质和生物活性上存在显著区别。

结冷胶凝胶应用于食品时可赋予产品良好的风味释放性，且稳定性强，适合作为添加剂用于多数食品[44]。但结冷胶在形成凝胶时对阳离子浓度敏感性较高，过高的阳离子浓度会减弱凝胶强度；同时，结冷胶工业加工步骤烦琐、产率低，限制了其作为热可逆凝胶在食品等领域的有效应用[45]。未来对结冷胶的研究需聚焦于提高其经济效益和生产效率，同时改善其机械性能和稳定性，以拓宽其应用范围[46]。

1.3.2 可得然胶

可得然胶是一种由微生物分泌的胞外三螺旋多糖，是由β-1，3-糖苷键交替连接成无分支的水不溶性葡聚糖线性大分子[47]。

相较于其他凝胶，可得然胶的悬浮液在环境温度 50~80 ℃时，会在临界温度下形成不稳定的低热可逆凝胶；当环境温度升高到 80 ℃以上时，悬浮液中的结合水转变为非结合水，自发形成高热不可逆凝胶[48]。

可得然胶在食品行业中应用广泛，在乳制品中，可得然胶可防止水分和营养物质流失[47]；在冷冻食品中，可得然胶可作为稳定剂提升食品的保形性[48]；在肉类食品中，可得然胶可提高产品的持水性、嫩度和弹性[49]。然而，可得然胶只有在加热条件下才能形成凝胶，高温加工条件可能导致食品中的热敏性物质挥发或变性，这一缺点可能限制其在部分食品中的应用[50]。因此，未来对可得然胶热可逆凝胶的研究可聚焦于通过物理或化学方法提升其凝胶强度和稳定性。

2 改性类热可逆多糖凝胶

天然热可逆多糖凝胶存在稳定性差、强度不足和品质劣变的问题，且易受 pH、温度、离子强度等多种因素影响。为改善这些缺陷，通过物理、化学或酶法对天然多糖进行改性处理，以制备性能更优、功能更全面的热可逆多糖凝胶，已成为当前及未来相关领域的研究热点。

2.1 物理混合类热可逆凝胶

多糖复配体系的凝胶分子结构及形成机理与明胶存在显著差异。该体系主要通过 2 种分子协同作用形成凝胶：一种充当骨架；另一种通过交联点与骨架相连，最终形成立体网络结构。这一形成机制与明胶的凝胶机制明显不同。

2.1.1 槐豆胶-XG 复配体系

槐豆胶是一种以半乳甘露聚糖为主要成分的植物多糖胶[51-52]；XG 是一种从黄杆菌中提取的阴离子多糖[53]。

槐豆胶本身是非凝胶天然多糖，研究者通常将其与 XG 复配以赋予体系热可逆性。研究表明，温度、复配比例及盐离子浓度对复配凝胶的热稳定性和凝胶强度影响显著[53]。在 80 ℃下，槐豆胶-XG 复配比例约 6∶4 时凝胶强度达到最大值；在 20~40 ℃时，凝胶强度增幅较小；40~60 ℃时，凝胶强度增幅较大；当温度升至约 100 ℃时，凝胶强度达到最大值。此外，盐的加入可增强多糖分子间的协同相互作用，提升凝胶化能力[53]。

在乳制品中，槐豆胶-XG 复配可作为酸奶制品的稳定剂[54]；将 XG、槐豆胶与瓜尔豆胶以特定比例添加到奶酪中，不仅能改善奶酪品质、丰富口感，还可以促进香味释放[54]。

2.1.2 DOP-XG 复配体系

DOP 来源于铁皮石斛茎部，其主链为β-1，4-*D*-葡甘露聚糖，乙酰基团连接于主链残基的 C-2 位氧原子上[55]。

DOP 溶液与 XG 溶液具有协同增效作用，两者复配后可制得热可逆凝胶[56]。但 DOP-XG 复配体系对于环境条件要求苛刻：当温度为 80 ℃时，需加热 45 min 才能使凝胶性能达到最佳。加热时间[55]和 DOP-XG 复配比例会显著影响复配凝胶的强度及热稳定性[57]。因此，未来研究需聚焦于探索 DOP 与 XG 的最优复配比例，以优化凝胶性能；同时改善高 XG 含量下的复配凝胶强度和热稳定性，提升凝胶的整体性能[55]。

2.2　化学改性类多糖

化学改性多糖的分子结构及其通过与交联剂结合降低极性以形成凝胶的作用机理，与明胶基于螺旋结构的相互作用存在一定差异[58-59]。

2.2.1　甲基纤维素

甲基纤维素是纤维素经强碱处理后，再与一氯甲烷和氧化丙烯发生醚化反应制得的非离子纤维素醚[60]。

甲基纤维素仅能溶解于常温或冷水，其溶液通常呈凝胶状，且水溶液黏度随温度升高持续下降，表现出热可逆性[61]。在食品领域，甲基纤维素凝胶的应用十分广泛[61]。向素肉中添加甲基纤维素，可显著改善其弹性和水分含量；将甲基纤维素添加到香肠等肉制品中，可降低表面张力、抑制脂肪聚集，从而降低生产成本[62]。此外，甲基纤维素稳定性强，适用于减肥食品的加工。然而，甲基纤维素仅在达到热凝胶起始温度后才显现出凝胶特性，导致其低温贮藏困难，易腐败变质[63]；同时，甲基纤维素凝胶脆性大、易破裂，限制了其在部分领域的应用[63]。因此，未来研究需聚焦于通过化学修饰或复合改性来提升甲基纤维素凝胶的机械强度[61]。

2.2.2　CS

CS是由*N*-乙酰-*D*-葡萄糖胺和*D*-葡萄糖胺组成的直链多糖，通常通过甲壳素脱乙酰化制备[64]。

近年来，CS因其良好的生物降解性、生物相容性和细菌耐受性，被广泛用于制备温敏水凝胶。但高相对分子质量的CS水溶性较差，不利于水凝胶网络结构的形成。研究发现，在CS体系中引入Ag^+可制备出流动性好、体系均匀稳定的半透明状CS-Ag热可逆凝胶体系，且该体系的相变速度率与反应温度呈正相关，具备可调控性[65-66]。

在食品保鲜领域，CS的功能基团不仅能维持食品的口感和新鲜度，还能抑制体系中杂菌生长，延长保质期[67]。然而，国内对CS胶凝性的研究尚处于起始阶段，其在食品工业中的应用尚未普及。因此，深入研究CS分子机制和凝胶形成机理或将成为未来的研究重点。

2.3　酶法改性类淀粉基热可逆凝胶

淀粉是由葡萄糖分子聚合而成的常见多糖，相对分子质量较大且具备凝胶性质——加热时糊化形成凝胶，但温度变化无法逆转其凝胶的状态，这一特性限制了其在重复性热加工产品中的应用。因此，通过改性解决淀粉的热不可逆性是当前相关领域的重要研究方向。

2.3.1　淀粉基热可逆凝胶的制备

2017年，研究者通过对多种已证明可用于制备热可逆凝胶的玉米基因型及玉米胚乳基因型淀粉进行研究，获得了一种由蜡质玉米突变体衍生的淀粉热可逆胶凝剂，其胚乳基因型含有少量隐性直链淀粉扩充基因[68]。GH77家族的4-*α*-糖基转移酶（4-*α*-glucanotransferase，4*α*GT，EC 2.4.1.25）已经被证实可用于改性淀粉制备热可逆淀粉凝胶[69]。天然淀粉抗回生能力较差，虽能形成凝胶但缺乏热可逆性，而4*α*GT改性淀粉凝胶有效解决了这一难题。目前，关于4*α*GT的催化机制及酶学性质的研究已较为成熟，其催化机制见图1。4*α*GT是一种多功能酶[70]，经其催化后，淀粉中的表观直链淀粉含量降低，支链淀粉的链长分布变宽，可显著改善淀粉的凝胶性能，具体效果与淀粉和4*α*GT的种类及来源有关。

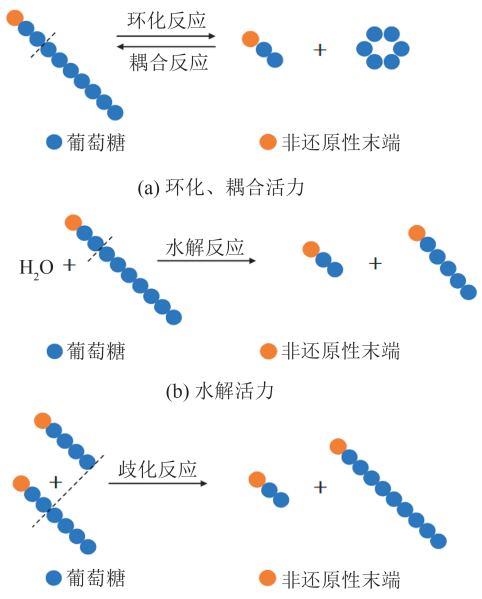


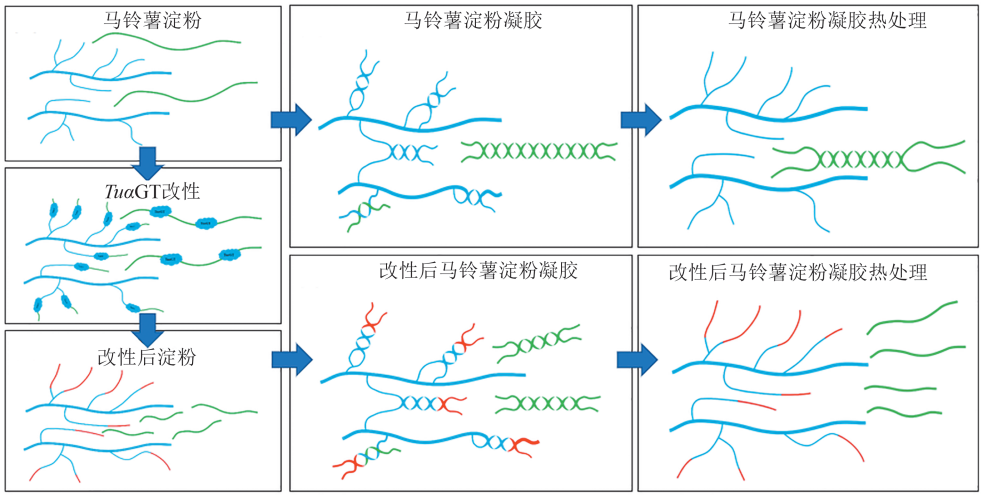
图1　4*α*GT催化机制图

Fig. 1　Catalytic mechanism of 4*α*GT

目前已有多个研究团队成功改性淀粉并赋予其热可逆性。Kaper等[71]克隆出嗜热菌来源的淀粉麦芽糖酶并对马铃薯淀粉进行改性，得到一种具备热可逆性的淀粉产物。有研究者利用*Thermus thermophilus* HB8来源的4*α*GT改性马铃薯淀粉，发现产物侧链长度增加，且在质量分数3%时表现出热可逆凝胶性质[72]。Do等[73]和

Kim 等[74]采用 *Thermus aquaticus* 来源的 4*α*GT 改性大米淀粉，发现改性淀粉因支链淀粉簇分子结构改变，在 4~70 ℃具有热可逆性。Li 等[75]使用 *Thermoproteus uzoniensis* 来源的 4-*α*-糖基转移酶（*Tua*GT）改性马铃薯淀粉、小麦淀粉、玉米淀粉、大米淀粉和豌豆淀粉这 5 种淀粉，并评估改性淀粉的热可逆性、流变特性和冻融稳定性等应用特性，发现仅改性马铃薯淀粉具备热可逆性。研究者推测改性淀粉的热可逆机制为：天然马铃薯淀粉被 *Tua*GT 修饰后，直链淀粉作为供体被消耗，支链淀粉的外链长度增加；原淀粉糊化后冷却回生时，除形成直链淀粉-支链淀粉双螺旋外，还会形成高度稳定的直链淀粉-直链淀粉双螺旋，这类双螺旋再加热时难以解离，进而影响热可逆性和流变性；而改性后，直链淀粉形成较短且稳定性差的双螺旋，再加热时易解离[75]，见图 2。

因此，4*α*GT 可改性淀粉制备具有独特热可逆性的淀粉凝胶。这类凝胶与明胶存在显著差异：4*α*GT 改性凝胶的部分性能（如凝结速度及透明度等）不及明胶[69]。另外，Hansen 等[76]研究经 4*α*GT 和 BE 修饰的各种植物源淀粉的凝胶结构，发现明胶凝胶的弹性和硬度较淀粉凝胶高，而 BE 处理虽能减少淀粉回生，但会对淀粉凝胶质地产生负面影响。Fan 等[77]对比单独使用 *Tua*GT 修饰与 *Tua*GT 和 *Neisseria polysaccharea* 来源的 AS 双酶处理的玉米淀粉，发现双酶处理可有效提升凝胶强度并保持热可逆性。随着相关研究的不断深入，改性淀粉凝胶的机理和性质逐渐清晰，通过工艺改良，其热应用价值将不断提升，应用范围有望拓展至新型食品领域。



蓝色代表原马铃薯淀粉；绿色代表供体直链淀粉；红色代表供体支链淀粉。

图 2　马铃薯淀粉修饰前后凝胶机制图

Fig. 2　Diagram of the gelatinization mechanism of potato starch before and after modification

2.3.2　淀粉基热可逆凝胶的应用

热可逆淀粉凝胶已应用于糕点、奶制品、肉制品等食品中。如英国 Warburtons 公司的低脂肪蛋糕，口感柔软、湿润且脂肪含量较低；美国 Kraft Heinz 公司的低卡路里面包，质地松软且热量低；澳大利亚 Bulla 公司的低脂肪冰淇淋，口感细腻、滑润且脂肪含量低。热可逆淀粉凝胶果冻是利用热可逆淀粉的凝胶特性制成的产品，其在高温下呈液态，冷却后呈凝胶状。相较于传统凝胶剂，热可逆淀粉凝胶果冻更契合“自然、健康”的概念。如台湾 B&G 食品公司生产的 Q-jelly 果冻，口感柔软爽滑；日本 UHA 味觉糖公司生产的 Puccho 果冻糖，口感富有弹性且爽脆，可添加水果块等原料；韩国新浪漫公司生产的 Mango Plate 果冻，富含芒果果汁，口感清新爽滑。

3　展望

凝胶类配料在食品行业中应用广泛，作者通过概述具有热可逆性的多糖凝胶，期望为可逆性凝胶配料及相关食品的开发提供参考。通常单一类型的多糖凝胶难以满足不同产品形态的应用需求。明确不同热可逆多糖凝胶的凝胶机制和应用性质，有助于通过物理混合、酶法改性等绿色手段开发新型配料。淀粉作为中性大分子多糖，具有资源丰富、食用安全等优势，目前已通过酶法改性

开发出热可逆淀粉凝胶，但其存在凝胶强度不足等问题。国外在淀粉基热可逆凝胶的产业化制备与应用方面已取得初步进展，而国内相关系统性研究仍存在较多空白。后续可针对淀粉基热可逆凝胶应用瓶颈，通过优化改性工艺或复配等方式，开发性质更优的淀粉基热可逆凝胶。此外，当前研究主要聚焦于多糖凝胶的热可逆性及应用，对其制备方法、作用机理等方面的研究相对较少，且过度依赖酶法改性可能导致生产成本上升和工艺复杂化。因此，未来研究需更注重热可逆凝胶的制备技术创新与性能改良，以推动凝胶类食品的技术革新与产业发展。

参考文献

[1] 文泉，汪雪娇，张晓鸣，等. 明胶质量浓度及凝冻强度对槟榔涂膜性能的调控作用[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(1)：60-68.
WEN Q，WANG X J，ZHANG X M，et al. Regulation of *Areca* nut coating properties by mass concentration and bloom strength of gelatin[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(1)：60-68.(in Chinese)

[2] 王学川，赵文莹，张慧洁. 明胶的改性及其在胶黏剂中的应用研究进展[J]. 陕西科技大学学报，2022，40(4)：100-108，120.
WANG X C，ZHAO W Y，ZHANG H J. Research progress on modification of gelatin and its application in adhesives[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology，2022，40(4)：100-108，120.(in Chinese)

[3] 肖劲东. 明胶乳化膜的制备与研究[D]. 天津：天津科技大学，2017.

[4] 杨镕，臧一宇，吴鹏，等. 多糖类食品胶体的功能特性及其在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品科学，2024，45(5)：283-292.
YANG R，ZANG Y Y，WU P，et al. Research progress on functional properties of polysaccharide-based food colloids and their application in food processing[J]. Food Science，2024，45(5)：283-292.(in Chinese)

[5] 范旭瑶. 4αGT和AS双酶制备增强型热可逆淀粉凝胶的机制研究[D]. 无锡：江南大学，2022.

[6] LIM E K，KEEM J O，YUN H S，et al. Smart nanoprobes for the detection of alkaline phosphatase activity during osteoblast differentiation[J]. Chemical Communications，2015，51(15)：3270-3272.

[7] 石文娟，苗丽坤，孙炜炜，等. 魔芋葡甘聚糖基热可逆凝胶研究进展[J]. 中国食品学报，2022，22(5)：422-433.
SHI W J，MIAO L K，SUN W W，et al. Research progress on the konjac glucomannan-based thermoreversible gels [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2022，22(5)：422-433.(in Chinese)

[8] 王元. 魔芋葡甘聚糖的性质及在食品中的应用[J]. 食品安全导刊，2021(19)：182-183.
WANG Y. Properties of konjac glucomannan and its application in food[J]. China Food Safety Magazine，2021(19)：182-183.(in Chinese)

[9] YE S X，ZONGO A W，SHAH B R，et al. Konjac glucomannan（KGM），deacetylated KGM（Da-KGM），and degraded KGM derivatives：a special focus on colloidal nutrition[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2021，69(44)：12921-12932.

[10] 张颖. 魔芋葡甘聚糖理化性质及应用前景[J]. 食品安全导刊，2023(18)：148-150.
ZHANG Y. Physicochemical properties and application prospects of konjac glucomannan[J]. China Food Safety Magazine，2023(18)：148-150.(in Chinese)

[11] 郭晟，李磊，周浩，等. 3种魔芋葡甘聚糖理化特性的比较研究[J]. 湖南农业科学，2012(9)：95-98.
GUO S，LI L，ZHOU H，et al. Comparative study on physical and chemical properties of three kinds of konjac glucomannan [J]. Hunan Agricultural Sciences，2012(9)：95-98.(in Chinese)

[12] 廖晴雨，张洪斌. 魔芋葡甘聚糖的功能化改性及应用[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版)，2022，50(5)：64-80.
LIAO Q Y，ZHANG H B. Functional modification and application of konjac glucomannan [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)，2022，50(5)：64-80.(in Chinese)

[13] 谭熙蕾，徐燕，周才琼. 魔芋葡甘露聚糖的功能特性及应用研究进展[J]. 食品研究与开发，2021，42(20)：214-219.
TAN X L，XU Y，ZHOU C Q. Research progress on the functional properties and application of konjac glucomannan [J]. Food Research and Development，2021，42(20)：214-219.(in Chinese)

[14] 孙丽婷，陈国芳，刘超. 糖尿病防治的“宝藏”：β-葡聚糖[J]. 中国临床研究，2023，36(5)：641-645.
SUN L T，CHEN G F，LIU C. The “treasure” for prevention and treatment of diabetes：β-glucan [J]. Chinese Journal of Clinical Research，2023，36(5)：641-645.(in Chinese)

[15] FURUTA A，IKEGAMI M，YAGUCHI T，et al. Transparent thermoreversible gels of β-(1→6)-branched β-(1→3)-glucan derived from the cauliflower mushroom *Sparassis crispa* [J]. Food Hydrocolloids，2023，142：108766.

[16] ZHAO B N，ZHANG Y Z，LI D D，et al. Hofmeister effect-enhanced gelatin/oxidized dextran hydrogels with

improved mechanical properties and biocompatibility for wound healing [J]. Acta Biomaterialia, 2022, 151: 235-253.

[17] 王喆,殷军艺,聂少平. 长裙竹荪β-葡聚糖结构特征和溶液性质[J]. 中国食品学报,2023,23(3):13-19.
WANG Z, YIN J Y, NIE S P. Structural characterization and solution properties of β-glucan from *Dictyophora indusiata* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23 (3): 13-19. (in Chinese)

[18] LIN Q Y, OWH C, LIM J Y C, et al. The thermogel chronicle: from rational design of thermogelling copolymers to advanced thermogel applications [J]. Accounts of Materials Research, 2021, 2(10): 881-894.

[19] NELE V, WOJCIECHOWSKI J P, ARMSTRONG J P K, et al. Tailoring gelation mechanisms for advanced hydrogel applications [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(42): 2002759.

[20] 胡文玥,单杨,李高阳,等. 低酯果胶凝胶质构特性的研究[J]. 食品与机械,2016,32(3):45-48.
HU W Y, SHAN Y, LI G Y, et al. Research on texture properties of low-methoxyl pectin gel [J]. Food & Machinery, 2016, 32(3): 45-48. (in Chinese)

[21] 任多多,江伟,孙印石,等. 果胶的分类、功能及其在食品工业中应用的研究进展[J]. 食品工业科技,2022,43(3):438-446.
REN D D, JIANG W, SUN Y S, et al. Research progress on the classification, function and application of pectin in food industry [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 438-446. (in Chinese)

[22] 杨旭东,郭绰,袁凯,等. 低酯果胶胶凝特性研究进展及应用[J]. 食品与发酵工业,2022,48(6):299-308.
YANG X D, GUO C, YUAN K, et al. Recent progress on gelation mechanism of low methoxyl pectin and its application in the food industry [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48 (6): 299-308. (in Chinese)

[23] 王璋,许时婴,汤坚. 食品化学:高等学校专业教材[M]. 北京:中国轻工业出版社,2006.

[24] PICOUT D R, RICHARDSON R K, ROLIN C, et al. Ca^{2+}-induced gelation of low methoxy pectin in the presence of oxidised starch. Part 1. Collapse of network structure [J]. Carbohydrate Polymers, 2000, 43 (2): 113-122.

[25] 赵文婷. 超高压辅助酶法制备低酯果胶及酶激活机理研究[D]. 北京:中国农业大学,2016.

[26] 吴香芝,张浩宇,何红影,等. 低酯果胶的氨基酸修饰及修饰物凝胶特性研究[J]. 发酵科技通讯,2019,48(4):197-203.
WU X Z, ZHANG H Y, HE H Y, et al. Study on gel properties of amino acid modified low methoxyl pectin and its modification [J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology, 2019, 48(4): 197-203. (in Chinese)

[27] 汪海波,徐群英,汪芳安. 低酯果胶的流变学性能研究[J]. 农业工程学报,2006,22(11):223-227.
WANG H B, XU Q Y, WANG F A. Rheological properties of low methoxyl pectin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (11): 223-227. (in Chinese)

[28] 刘新新,刘钟栋. 低酯果胶的提取与制备技术研究进展[J]. 食品与发酵工业,2019,45(24):278-284.
LIU X X, LIU Z D. Research progress on extraction and manufacture technique of low methoxyl pectin [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 278-284. (in Chinese)

[29] WANG T P, CHANG L L, CHANG S N, et al. Successful preparation and characterization of biotechnological grade agarose from indigenous *Gelidium amansii* of Taiwan [J]. Process Biochemistry, 2012, 47 (3): 550-554.

[30] 李琴梅,戚勃. 琼脂的物化特性及其在食品工业中的应用[J]. 中国食品添加剂,2009,20(6):170-174.
LI Q M, QI B. The physicochemical properties of agar and application in the food industry [J]. China Food Additives, 2009, 20(6): 170-174. (in Chinese)

[31] 达仁. 迅猛过热的琼脂市场现状及前景[J]. 中外食品,2005(12):59-60.
DA R. Overheating agar market and consideration of its prospect [J]. Global Food Industry, 2005(12): 59-60. (in Chinese)

[32] 刘梅森,何唯平,陈胜利. 魔芋胶、琼脂及他拉胶对软冰淇淋品质影响研究[J]. 中国乳品工业,2005,33(11):17-20.
LIU M S, HE W P, CHEN S L. Study on the influence of knojac gum, agar and *Tara* gum on soft-serve ice cream quality [J]. China Dairy Industry, 2005, 33(11): 17-20. (in Chinese)

[33] 王露楠. 低温速溶琼胶的制备、表征及其对罗非鱼鱼糜凝胶性能的影响[D]. 上海:上海海洋大学,2021.

[34] CHEN H J, CHEN F Q, XIAO Q, et al. Structure and physicochemical properties of amphiphilic agar modified with octenyl succinic anhydride [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117031.

[35] ZHAO D, LI D, QUAN F L, et al. Rapidly thermoreversible and biodegradable polypeptide hydrogels with sol-gel-sol transition dependent on subtle manipulation of side groups [J]. Biomacromolecules, 2021, 22(8): 3522-3533.

[36] 王帅棋,李裕. 卡拉胶凝胶性能及应用的研究进展[J].

当代化工研究，2020(22)：125-126.
WANG S Q，LI Y. Research progress on properties and application of carrageenan gel[J]. Modern Chemical Research，2020(22)：125-126.(in Chinese)

[37] 王玉丽，李婷，范玉文，等. 钾离子对罗望子胶/κ-卡拉胶复合凝胶特性的影响及机理分析[J]. 食品工业科技，2023，44(10)：78-83.
WANG Y L，LI T，FAN Y W，et al. Effect of potassium ions on the properties and mechanism analysis of tamarind gum/kappa-carrageenan composite gel[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(10)：78-83.(in Chinese)

[38] 潘绮琳，张阮冰，陈茂森，等. 卡拉胶在冬瓜果冻中的应用特性研究[J]. 农产品加工，2024(2)：27-31.
PAN Q L，ZHANG R B，CHEN M S，et al. Study on the application characteristics of carrageenan in *Benincasa hispida* jelly[J]. Farm Products Processing，2024(2)：27-31.(in Chinese)

[39] 黎钧铸，黄文晶，沈汪洋，等. 卡拉胶/α-淀粉酶复合冻融稳定性对馒头的影响[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(11)：82-89.
LI J Z，HUANG W J，SHEN W Y，et al. Effects of freeze-thaw stability of carrageenan/α-amylase complex on steamed bread[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(11)：82-89.(in Chinese)

[40] 袁超，桑璐媛，刘亚伟. κ-卡拉胶的功能特性及其应用研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版)，2016，37(4)：118-123.
YUAN C，SANG L Y，LIU Y W. Research progress in the functional characteristics of kappa-carrageenan and its applications[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)，2016，37(4)：118-123.(in Chinese)

[41] ZHU P N，HUANG W J，CHEN L Y. Develop and characterize thermally reversible transparent gels from pea protein isolate and study the gel formation mechanisms[J]. Food Hydrocolloids，2022，125：107373.

[42] MORRIS E R，NISHINARI K，RINAUDO M. Gelation of gellan：a review[J]. Food Hydrocolloids，2012，28(2)：373-411.

[43] 文春溪. 结冷胶生产工艺研究[D]. 郑州：河南工业大学，2014.

[44] 陈佳乐，水小溪，赵宝华，等. 结冷胶的生物合成及其应用研究综述[J]. 河北省科学院学报，2023，40(3)：45-52.
CHEN J L，SHUI X X，ZHAO B H，et al. Review on biosynthesis mechanism and application of gellan gum[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences，2023，40(3)：45-52.(in Chinese)

[45] 聂凌鸿，彭华松. 微生物胞外多糖：结冷胶的生产与应用前景[J]. 生命的化学，2002，22(2)：178-181.
NIE L H，PENG H S. Microbial extracellular polysaccharides：production and application prospects of gellan gum[J]. Chemistry of Life，2002，22(2)：178-181.(in Chinese)

[46] CONSTANTINOU A P，GEORGIOU T K. Pre-clinical and clinical applications of thermoreversible hydrogels in biomedical engineering：a review[J]. Polymer International，2021，70(10)：1433-1448.

[47] 张海龙，关志炜，杨俊杰. 可得然胶的性质及应用[J]. 中国食物与营养，2010，16(1)：36-39.
ZHANG H L，GUAN Z W，YANG J J. Properties of curdlan and its applications[J]. Food and Nutrition in China，2010，16(1)：36-39.(in Chinese)

[48] 伏佳静，马珂莹，蒲华寅，等. 可得然胶改善凉皮冷藏保存品质的机理研究[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(11)：90-97.
FU J J，MA K Y，PU H Y，et al. Mechanism of curdlan to improve Liangpi quality during refrigeration[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(11)：90-97.(in Chinese)

[49] 赵冰，李家鹏，陈文华，等. 可得然胶凝胶特性及其在西式火腿中的应用研究[J]. 食品科学，2014，35(21)：45-49.
ZHAO B，LI J P，CHEN W H，et al. Gel properties of curdlan gum and its application in western-style ham[J]. Food Science，2014，35(21)：45-49.(in Chinese)

[50] 刘咏梅，孙俞典. 可得然胶在食品加工领域的应用前景[J]. 广东蚕业，2019，53(9)：71-72.
LIU Y M，SUN Y D. Application prospects of curdlan gum in the field of food processing[J]. Guangdong Sericulture，2019，53(9)：71-72.(in Chinese)

[51] MCCLEARY B V. Modes of action of β-mannanase enzymes of diverse origin on legume seed galactomannans[J]. Phytochemistry，1979，18(5)：757-763.

[52] KOOIMAN P. Structures of the galactomannans from seeds of *Annona muricata*，*Arenga saccharifera*，*Cocos nucifera*，*Convolvulus tricolor*，and *Sophora japonica*[J]. Carbohydrate Research，1971，20(2)：329-337.

[53] 何东保，詹东风. 黄原胶与槐豆胶协同相互作用及其凝胶化的研究[J]. 林产化学与工业，1998，18(1)：12-16.
HE D B，ZHAN D F. Study on synergistic interactions and gelation of xanthan-locust bean gum[J]. Chemistry and Industry of Forest Products，1998，18(1)：12-16.(in Chinese)

[54] 刁虎欣，王锐. 黄原胶的结构性能及其在食品中的应用[J]. 食品研究与开发，1986，7(1)：36-38，7.
DIAO H X，WANG R. The structural properties of xanthan

gum and its application in food[J]. Food Research and Development,1986,7(1):36-38,7.(in Chinese)
[55] 侯芙蓉. 铁皮石斛多糖-黄原胶复合体系的凝胶特性及其应用研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2022.
[56] 井玉林. 铁皮石斛多糖的流变和凝胶特性及其应用研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2021.
[57] HOU Y J, ZHAO J Y, YIN J Y, et al. The synergistic gelation of *Dendrobium officinale* polysaccharide (Dendronans) with xanthan gum and its rheological and texture properties[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 141: 108674.
[58] LI X F, GUO C, YANG X, et al. Acid-induced mixed methylcellulose and casein gels: structures, physical properties and formation mechanism [J]. Food Chemistry,2022,366:130561.
[59] 王淑敏. 甲基纤维素复配食源性多糖体系构建运载姜黄素及生物可及性研究[D]. 杭州:浙江工商大学,2023.
[60] 颜正勇,孙子重,Wendy Soo,等. 超级热凝胶的甲基纤维素在食品中的应用[J]. 中国食品添加剂,2012,23(S1):278-286.
YAN Z Y, SUN Z C, SOO W, et al. Supergelling methylcellulose's food applications[J]. China Food Additives,2012,23(S1):278-286.(in Chinese)
[61] LEE J, WI G, CHOI M J. The rheological properties and stability of gelled emulsions applying to κ-carrageenan and methyl cellulose as an animal fat replacement[J]. Food Hydrocolloids,2023,136:108243.
[62] COUGHLIN M L, LIBERMAN L, ERTEM S P, et al. Methyl cellulose solutions and gels: fibril formation and gelation properties[J]. Progress in Polymer Science, 2021,112:101324.
[63] HONG F D, QIU P, WANG Y F, et al. Chitosan-based hydrogels: from preparation to applications, a review[J]. Food Chemistry:X,2024,21:101095.
[64] 郭蔓,赵华,张朝正. 壳寡糖的制备及应用研究[J]. 中国食品添加剂,2022,33(10):267-271.
GUO M, ZHAO H, ZHANG C Z. Preparation and application of chitosan oligosaccharides[J]. China Food Additives,2022,33(10):267-271.(in Chinese)
[65] HOFFMAN A S. Stimuli-responsive polymers: biomedical applications and challenges for clinical translation[J]. Advanced Drug Delivery Reviews,2013, 65(1):10-16.
[66] 徐世宽,张弘妹,戚鹏飞,等. 基于壳聚糖/银离子的可逆温敏水凝胶的制备与性能[J]. 精细化工,2024,41(5):1036-1042.
XU S K, ZHANG H M, QI P F, et al. Preparation and properties of reversible thermoresponsive hydrogels based on chitosan and silver ion[J]. Fine Chemicals,2024,41(5):1036-1042.(in Chinese)
[67] LI J H, ZHUANG S L. Antibacterial activity of chitosan and its derivatives and their interaction mechanism with bacteria: current state and perspectives[J]. European Polymer Journal,2020,138:109984.
[68] 谷类制品发展公司. 热可逆凝胶淀粉:CN108272068B[P]. 2020-11-06.
[69] 柏玉香,王禹,金征宇. 一种酶法制备凝胶强度可控的热可逆淀粉基凝胶的方法:CN110656139A[P]. 2020-01-07.
[70] 柏玉香,范旭瑶,王禹,等. GH77家族4-α-糖基转移酶在淀粉改性中应用的研究进展[J]. 食品科学,2021,42(19):242-249.
BAI Y X, FAN X Y, WANG Y, et al. Progress in the application of 4-α-glucotransferase, a member of the glycoside hydrolase 77 (GH77) family, in starch modification[J]. Food Science,2021,42(19):242-249.(in Chinese)
[71] KAPER T, TALIK B, ETTEMA T J, et al. Amylomaltase of *Pyrobaculum aerophilum* IM2 produces thermoreversible starch gels[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005,71(9):5098-5106.
[72] VAN DER MAAREL M J E C, CAPRON I, EUVERINK G W, et al. A novel thermoreversible gelling product made by enzymatic modification of starch[J]. Starch-Stärke,2005,57(10):465-472.
[73] DO H V, LEE E J, PARK J H, et al. Structural and physicochemical properties of starch gels prepared from partially modified starches using *Thermus aquaticus* 4-α-glucanotransferase [J]. Carbohydrate Polymers, 2012,87(4):2455-2463.
[74] KIM Y L, MUN S, RHO S J, et al. Influence of physicochemical properties of enzymatically modified starch gel on the encapsulation efficiency of W/O/W emulsion containing NaCl[J]. Food and Bioprocess Technology,2017,10(1):77-88.
[75] LI X X, WANG Y, WU J, et al. *Thermoproteus uzoniensis* 4-α-glucanotransferase catalyzed production of a thermo-reversible potato starch gel with superior rheological properties and freeze-thaw stability[J]. Food Hydrocolloids,2023,134:108026.
[76] HANSEN M R, BLENNOW A, FARHAT I, et al. Comparative NMR relaxometry of gels of amylomaltase-modified starch and gelatin[J]. Food Hydrocolloids, 2009,23(8):2038-2048.
[77] FAN X Y, WANG Y L, BAI Y X, et al. Enhancing gel strength of *Thermoproteus uzoniensis* 4-α-glucanotransferase modified starch by amylosucrase treatment[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2022,209:1-8.

(责任编辑:刘冬梅)