

## 流变学在吞咽障碍饮食护理中的应用研究进展

徐家通 董琪荣 蔡志祥

浙江大学长三角智慧绿洲创新中心未来食品实验室, 嘉兴 314102

通信作者: 蔡志祥, Email: zxcai@zju.edu.cn

**【摘要】** 吞咽障碍已成为当今社会一项严重的健康问题。对饮食进行增稠和质构修饰可有效地降低吞咽障碍患者吸入性肺炎的发生风险,且已作为一种有效的非侵入式的治疗方法被广泛应用。对饮食的精确设计、准确评估以及食物从口腔输送到胃的过程分析都与流变学密不可分。本文旨在介绍吞咽障碍特医食品的标准,并总结剪切流变学(黏度、黏弹性、触变性、屈服应力、非线性流变学)和拉伸流变学在吞咽障碍特医食品设计和评估领域的最新研究进展。

**【关键词】** 吞咽障碍; 饮食护理; 流变学; 屈服应力; 大振幅振荡剪切

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(22578395)

**Funding:** National Natural Science Foundation of China (22578395)

DOI: 10.3760/cma.j.cn421666-20251009-00884

吞咽障碍(dysphagia)指食物经口到胃的过程存在障碍,导致患者在吞食稀流体或固体食物时发生哽咽和误吸,引起脱水、营养不良、水电解质功能紊乱等,进而使患者机体抗感染能力下降,严重者发生吸入性肺炎,并最终导致死亡<sup>[1]</sup>。研究报道,世界约4%的人口经历过不同程度的吞咽障碍,包含所有的年龄段(从新生儿到老年人),且主要集中于老年人<sup>[2]</sup>。由于全球老龄化的加剧,吞咽障碍也越来越普遍,现已成为当今社会一项严重的健康问题。

对于吞咽障碍,治疗方法包括物理治疗、药物治疗、心理治疗、外科治疗和饮食护理等<sup>[3]</sup>。这些方法中,采用增稠和质构修饰食物进行饮食护理作为一种非侵入式的治疗手段,被广泛应用。吞咽障碍饮食护理的两个主要目的是保证患者安全吞咽和补充营养,且首要目标就是安全吞咽<sup>[4]</sup>。增稠的食团可以延长吞咽食物的时间,给咽喉更多的反应时间,因此可促进安全吞咽<sup>[5]</sup>。

流变学是研究物质变形和流动行为的一门学科。增稠食物黏度和黏弹性的准确评估,以及食物从口腔转移到胃部过程的模拟,都与流变学密切相关<sup>[6]</sup>。因此,吞咽障碍研究逐渐从一个医学问题发展成为涉及了食品科学、营养学以及流变学的,新的多学科交叉研究热点,食品流变学也受到了国际食品学界的广泛重视<sup>[7]</sup>。本文旨在介绍吞咽障碍特医食品的标准,并总结剪切流变学(黏度、黏弹性、触变性、屈服应力、非线性流变学)和拉伸流变学在吞咽障碍特医食品设计和评估领域的最新研究进展。

### 吞咽障碍饮食的评价标准

研究表明,适宜的饮食可有效缓解吞咽障碍症状和提高吞咽障碍患者的生活质量<sup>[8-10]</sup>。美国吞咽障碍膳食工作组(national dysphagia diet, NDD, 2002)指南的建议,依据食物温度为25℃,且剪切速率50 s<sup>-1</sup>时的黏度将其分为四个等级,即稀薄型(1~50 mPa·s)、花蜜型(51~350 mPa·s)、蜂蜜型(351~1750 mPa·s)和布丁型(>1750 mPa·s)<sup>[11]</sup>。该指南成为标准

化吞咽障碍饮食的工具,但在发布仅一年后,就受到了众多挑战。2016年,提出了国际吞咽障碍膳食标准化框架(international dysphagia diet standardization initiative, IDDSI 框架)。该框架分为八个级别,范围从0到7,即增稠液体(0~4级)和质构修饰食物(4~7级)<sup>[12]</sup>。按照IDDSI框架的指南,对于液体食物采用10 mL的注射器进行重力流测试,以分析流动行为;对于固体级别分类则采用勺子倾斜和叉子按压测试,以定性评价配方的黏弹性、内聚性和质构。

相对于NDD指南,IDDSI框架对吞咽障碍患者饮食管理的评估有明显的进步,但每个级别食物的描述都是定性的,医护人员采用IDDSI对食物进行分类仍显困难且主观,也难以根据患者的自身情况精准定制其所需的饮食<sup>[13]</sup>。因此,对于吞咽障碍特医食物,流变学的研究仍然是重要且必要的。

### 流变学在吞咽障碍饮食中的应用

整个吞咽过程中,增稠或质构修饰的食物在口腔、咽部和食道内发生变形和流动,了解这些食物的流变学行为,以期对吞咽障碍患者量身定制饮食十分重要<sup>[13-14]</sup>;且流变学与结构高度相关,对其进行流变学研究可阐明食团在搅拌、加工、包装、储存和食用过程中的成分、质地和结构等的变化<sup>[7,15]</sup>。

#### 一、食物的黏度

黏度是评估吞咽障碍饮食的关键因素,它体现了食团流动的阻力。较高的黏度会延长食团在口腔和咽部输送时间,使会厌有充足的时间关闭以阻止食物进入气管<sup>[12]</sup>。一项针对66例吞咽困难患者的研究发现,与常规饮食相比,增稠的饮食可使吸入性肺炎发生率降低80%<sup>[16]</sup>。以老年脑卒中吞咽障碍患者为对象的研究发现,食物中含有黄原胶增稠剂的观察组的误吸程度评分和身体质量均显著优于只进行常规治疗的对照组( $P < 0.05$ )<sup>[17]</sup>。一项针对由四大病因(衰老、头颈癌、脑卒中和帕金森病)引起的口咽吞咽障碍患者饮食护理的临床研究表明,由黄原胶和改性淀粉配制的增稠剂的安全吞咽剪切黏度范围为250~1000 mPa·s<sup>[18]</sup>。流变性能与感官评价的相关性研究也

发现,老年人相较于年轻人,更偏好表现黏度高的食物<sup>[19]</sup>。但需要注意的是,过度增稠的饮食需要更大的舌部推力,也可能引发负面效果,例如食物粘附在咽部导致窒息,反而可能加重吞咽障碍<sup>[20]</sup>。Lin 等<sup>[21]</sup>的研究发现,增稠剂含量较低会导致米糊飞溅,而增稠剂含量过高又会产生更多残留,因此适中的增稠剂可提供足够的粘度和凝聚力以防止飞溅,且保持吞咽时食团的流动均匀,从而获得最佳的感官品质。对于吞咽障碍饮食这种非牛顿流体,剪切黏度高度依赖于剪切速率,因此剪切变稀程度也是关键因素之一<sup>[22]</sup>。目前,普遍将剪切速率为  $50 \text{ s}^{-1}$  时的黏度值作为饮食稠度的参考值,但此剪切速率只是口腔中食团的大致剪切速率,而吞咽时中咽部剪切率超过  $300 \text{ s}^{-1}$ ,咽下部剪切率可达  $900 \text{ s}^{-1}$ ,因此仍需全面分析增稠体系在不同剪切速率下的黏度<sup>[18]</sup>。还有研究发现,不同多糖增稠剂的剪切稀化行为也差异显著<sup>[10]</sup>,如刚性棒状黄原胶具有单调剪切变稀的特性,而分子链具有一定柔性的魔芋胶,在较低剪切速率下为牛顿流体,但在较高剪切速率下才会转变为剪切变稀行为<sup>[18]</sup>。

在咀嚼和吞咽过程中,食团会同时经历剪切流和拉伸流,因此仅凭剪切流变学无法充分评估增稠食物的吞咽安全性<sup>[23]</sup>。研究表明,具有相同剪切黏度的增稠食团可能呈现明显不同的拉伸特性,而这与食团的共聚性密切相关<sup>[12]</sup>。有研究采用毛细管断裂拉伸流变仪实时捕捉了双板间细颈行为和断裂过程,从而计算出拉伸黏度、松弛时间和细颈断裂时间等参数<sup>[23]</sup>。体外吞咽模型研究表明,高拉伸黏度体系的碎裂风险降低,可形成表面更光滑的紧凑食团,减少口腔吞咽后的残留物<sup>[24]</sup>。由于拉伸流变学与表面变形相关,因此表面张力也是决定拉伸特性的关键参数<sup>[12]</sup>。研究发现,流体的弹性可以对抗由表面张力驱动的毛细不稳定性,从而显著延缓细颈和断裂过程。与相同黏度的淀粉增稠样品相比,黄原胶基样品的细丝断裂时间延长数十倍,表明其具有更强的内聚性<sup>[13]</sup>。

## 二、食物的黏弹性

像吞咽障碍饮食这种兼具粘性与弹性的软物质,对其黏弹性的研究可促进更合理的饮食设计<sup>[13]</sup>。材料的粘弹性通常以其弹性模量 ( $G'$ ) 和粘性模量 ( $G''$ ) 及其相对值 (损耗角  $\tan\delta = G''/G'$ ) 进行分析。研究表明,具有弱凝胶特性的食团 (其  $\tan\delta$  值范围为 0.1~1.0) 在吞咽过程中可保持结构完整、顺畅地通过咽喉和食道,从而防止食物滞留咽喉,降低误吸风险<sup>[25]</sup>。Kyodo 等<sup>[16]</sup>采用喉镜对比了中度至重度吞咽困难患者在食用普通饮食和凝胶样细泥状食物时的咽喉残留物情况,结果发现,含凝胶剂的对照组的咽喉残留显著降低。研究指出,为评估食品体系的粘弹性特性,可采用振幅扫描、频率扫描、蠕变-恢复及应力松弛等测试方法,不仅可以揭示体系的微观结构特征,也有助于安全吞咽<sup>[13,26]</sup>。研究就通过振幅扫描发现,与黄原胶增稠样品相比,奇亚籽胶增稠样品的线性黏弹区较短,表明其质地更脆,这可能导致食团无法以凝聚性团块形式通过咽部,从而影响吞咽障碍患者的吞咽安全<sup>[25]</sup>。

## 三、食物的触变性

触变性是指某些软物质随时间变化的性质,即在应力作用下黏度降低,应力消除后逐渐恢复,这一特性可使原本浓稠难咽的食物在咀嚼和吞咽过程中更易流动,而在食物被吞咽后,剪切应力撤除时黏度逐渐恢复,可促进食团在食管内稳定通

过<sup>[27]</sup>。目前,吞咽障碍饮食护理中对于食物触变性的关注较少。触变性源于样品微观结构破坏与形成的竞争,可通过触变环和三段式触变恢复测试进行评估<sup>[28]</sup>。对于触变环,其触变性大小可由应力与剪切速率曲线间的面积计算得出,而三区触变恢复测试可分析样品的结构恢复特性。研究表明,触变性具有浓度依赖性,且受多糖分子量及分子间相互作用影响,如分子量越高、分子间相互作用越强的样品,其触变性越大;同时,触变性一般随作用时间的延长而降低。因此,高粘度的体系在减缓流动的同时,也会降低其触变性,更大程度地恢复其结构,并减少咽部残留<sup>[29]</sup>。吞咽障碍饮食的 3D 打印与触变性也密切相关,合适的触变性可促使材料在高剪切应力下保持低黏度以利于挤出,同时确保在打印后迅速恢复结构,以保持其结构的稳定性<sup>[30]</sup>。

## 四、食物的屈服应力

屈服应力是与材料内部网络结构密切相关的流变学参数,其代表触发流体流动所需的最小应力,可预测食团在口腔内的行为<sup>[29,31]</sup>。当舌部的推力低于食团的屈服应力时,舌部无法有效地推动食团移动,因此对于吞咽障碍患者,对食团的屈服应力进行评估尤为重要<sup>[31]</sup>。研究表明,食团的内聚性也与屈服应力密切相关,如黄原胶溶液比刺槐豆胶溶液的屈服应力更高,内聚性更强,在利用剑桥人造喉咙装置进行模拟吞咽时发现,黄原胶溶液的变形更为均匀<sup>[32]</sup>。Cichero 等<sup>[33]</sup>测量了  $50 \text{ s}^{-1}$  下黏度分别为  $320 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  和  $310 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  的增稠婴儿配方乳和钆基造影剂的屈服应力,发现前者的屈服应力为  $0.053 \text{ Pa}$ ,而后者的屈服应力则高达  $0.42 \text{ Pa}$ 。目前,量化屈服应力的方法包括蠕变法、阶跃剪切速率法、稳态剪切法、振幅扫描法以及大振幅振荡剪切 (large-amplitude oscillatory shear, LAOS) 法等<sup>[28]</sup>。由于屈服为松弛过程且测试时间尺度随条件变化,因此测得的屈服应力值往往受测试条件、设备及方法影响,差异可能超过一个数量级;同时,不同食团的屈服过程也存在差异,因此对食团屈服应力的确定需说明方法与条件<sup>[34]</sup>。吞咽障碍饮食的 3D 打印时,屈服应力对打印的质量十分重要,合适的屈服应力有利于打印出更精细的形状,并可支撑自身重量<sup>[35]</sup>。

## 五、食物的 LAOS

吞咽过程中,食团会在极短时间内经历快速、显著的非线性形变,LAOS 可通过调节应变/应力和频率范围,覆盖长的时空尺度,成为评估材料非线性行为的重要方法<sup>[36]</sup>。目前,研究 LAOS 的方法多种多样,如应力波形 (用于应变控制) 或利萨茹曲线 (定性分析)<sup>[36]</sup>。此外,傅里叶变换流变学、应力分解、切比雪夫多项式、应力分岔以及连续物理过程等可获取各类流变参数,以对其进行定量分析<sup>[37]</sup>。定性分析时,可通过观察应力波形或利萨茹曲线在不同应变幅值下的扭曲行为来评估其非线性响应<sup>[36]</sup>;傅里叶变换流变学技术则是将输出应力波形从时域转换至频域,从而获得一系列傅里叶级数<sup>[37]</sup>。基于对称性原理,总非线性应力响应可被分解成弹性应力和粘性应力。Ewoldt 等<sup>[38]</sup> (2008) 采用切比雪夫多项式拟合分解后的应力-应变曲线和应力-应变速率曲线定义了新的弹性模量和动态黏度,该方法可提供循环过程中的局部化信息。最近, Rogers 等<sup>[39]</sup>提出了连续物理过程方法,该方法可进一步分析周期内任意时刻的瞬态流变学行为 (应变软化-硬化、剪切增稠-变稀) 和物理过程,更清晰细致地揭示样品微观结构的变化。有研究发

现,菊粉和魔芋胶多糖可通过增强的肌原纤维蛋白凝胶的网络结构,来促进大形变下的应变硬化行为,这有利于改善轻度吞咽困难患者的咀嚼满意度<sup>[40]</sup>。目前,仍缺乏将 LAOS 与临床相结合的研究,这也需要得到更多的重视。

### 摩擦学在吞咽障碍饮食中的应用

吞咽食物是一个涉及多重动态过程的复杂机制,包括舌部与硬腭运动导致的增稠液体剪切变形、食物从口腔经咽部至食管过程中尺寸变化引发的拉伸变形,以及吞咽阶段以摩擦学行为为主导的吞咽过程<sup>[8]</sup>。吞咽摩擦学是指食物摄入过程中食团与口腔组织间的相互作用,包括相对运动中导致的润滑、摩擦和磨损。高的润滑程度被证明“易于吞咽”,并且是食物质地感官分析中常用的属性<sup>[41]</sup>。研究表明,多糖增稠流体均呈现三种润滑状态,即边界润滑、混合润滑和流体动力润滑<sup>[8]</sup>。在液体稠度相近的情况下,黄原胶增稠液体的润滑性能显著优于瓜尔胶或改性淀粉增稠液体,这可能与多糖构象、结构形态及其流变特性相关。因此,选择合适的多糖进行增稠或饮食调节可促进吞咽困难患者安全吞咽。

### 总结

吞咽障碍对个体身心健康影响显著,随着人口老龄化加剧,其社会问题属性也日益凸显。流变学在吞咽障碍患者饮食护理方面发挥着越来越重要的作用。相较于 NDD 和 IDDSI 指南,剪切黏度、粘弹性、触变性、屈服应力、LAOS 以及拉伸流变学性能可更准确地评价饮食,并通过模拟吞咽过程促进更安全的吞咽。目前,流变学参数与实际临床效果的关联研究还相对缺乏,应结合摩擦学、体外和体内研究、计算建模技术及实际临床实验,为合理设计以患者为中心、安全且营养的吞咽障碍食品铺平道路。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突

### 参 考 文 献

- [1] 窦祖林. 吞咽障碍评估与治疗[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2017: 34-35.
- [2] Abu-Ghanem S, Chen S, Amin MR. Oropharyngeal dysphagia in the elderly: evaluation and prevalence [J]. *Curr Otorhinolaryngol Rep*, 2020, 8(5): 34-42. DOI: 10.1007/s40136-020-00258-x.
- [3] 中国康复医学会吞咽障碍康复专业委员会. 中国吞咽障碍康复管理指南(2023 版)[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2023, 45(12): 1057-1072. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.12.001.
- [4] Garcia JM, Chambers EIV. Managing dysphagia through diet modifications [J]. *AJN Am J Nurs*, 2010, 110(11): 26-33. DOI: 10.1097/01.NAJ.0000390519.83887.02.
- [5] Liu X, Feng Y, Li R, et al. Comprehensive review of dysphagia and technological advances in dysphagia food [J]. *Food Res Int*, 2025, 199: 115354. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.115354.
- [6] Gallegos C, Turcanu M, Assegehegn G, et al. Rheological issues on oropharyngeal dysphagia [J]. *Dysphagia*, 2023, 38(2): 558-585. DOI: 10.1007/s00455-021-10337-w.
- [7] Newman R, Vilardeell N, Clavé P, et al. Effect of bolus viscosity on the safety and efficacy of swallowing and the kinematics of the swallow re-

- sponse in patients with oropharyngeal dysphagia: white paper by the european society for swallowing disorders (ESSD) [J]. *Dysphagia*, 2016, 31(2): 232-249. DOI: 10.1007/s00455-016-9696-8.
- [8] Dong Y, Lan T, Liu Z, et al. Shear, extensional rheology, and tribology of polysaccharide-thickened soy protein-based liquid systems for dysphagia management [J]. *Food Chem*, 2025, 463 (Pt 1): 141145. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.141145.
  - [9] Xie J, Bi J, Nicolas J, et al. Dysphagia food: Impact of soy protein isolate (SPI) addition on textural, physicochemical and microstructural properties of peach complex gels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 154: 110130. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2024.110130.
  - [10] Wang X, Chen Y, Dong M, et al. Comparisons of shear and extensional rheological properties of Tremella polysaccharide with commercial thickeners at different IDDSI levels for dysphagia management [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 156: 110377. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2024.110377.
  - [11] Zargaraan A, Rastmanesh R, Fadavi G, et al. Rheological aspects of dysphagia-oriented food products: a mini review [J]. *Food Sci Hum Wellness*, 2013, 2(3-4): 173-178. DOI: doi.org/10.1016/j.fshw.2013.11.002.
  - [12] Wang K, Zihang C, Dongling Q, et al. Polysaccharide-dextrin thickened fluids for individuals with dysphagia: recent advances in flow behaviors and swallowing assessment methods [J]. *Crit. Rev. Food Sci Nutr*, 2025, 65(12): 2236-2260. DOI: 10.1080/10408398.2024.2330711.
  - [13] Methacanon P, Gamonpilas C, Kongjaroen A, et al. Food polysaccharides and roles of rheology and tribology in rational design of thickened liquids for oropharyngeal dysphagia: a review [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2021, 20(4): 4101-4119. DOI: 10.1111/1541-4337.12791.
  - [14] Kongjaroen A, Methacanon P, Gamonpilas C. On the assessment of shear and extensional rheology of thickened liquids from commercial gum-based thickeners used in dysphagia management [J]. *J Food Eng*, 2022, 316: 110820. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110820.
  - [15] Rommel N, Hamdy S. Oropharyngeal dysphagia: manifestations and diagnosis [J]. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*, 2016, 13(1): 49-59. DOI: 10.1038/nrgastro.2015.199.
  - [16] Kyodo R, Kudo T, Horiuchi A, et al. Pureed diets containing a gelling agent to reduce the risk of aspiration in elderly patients with moderate to severe dysphagia: a randomized, crossover trial [J]. *Medicine*, 2020, 99(31): e21165. DOI: 10.1097/MD.00000000000021165.
  - [17] 孙彦君, 张静, 乔冉冉, 孔亚慧. 黄原胶类增稠剂对老年脑卒中后吞咽功能障碍的临床研究 [J]. *中华保健医学杂志*, 2021, 23(4): 362-365. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3245.2021.04.013.
  - [18] Ortega O, Bolívar-Prados M, Arreola V, et al. Therapeutic effect, rheological properties and  $\alpha$ -amylase resistance of a new mixed starch and xanthan gum thickener on four different phenotypes of patients with oropharyngeal dysphagia [J]. *Nutrients*, 2020, 12(6): 1873. DOI: 10.3390/nu12061873.
  - [19] Gi Chun Y, Jeong Kim Y, Young Lee I, et al. Relationship between rheological properties, sensory perception, and overall acceptability of thickened liquids for dysphagia in young and old healthy individuals [J]. *Food Res Int*, 2024, 188: 114511. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114511.
  - [20] Dewar RJ, Joyce MJ. Time-dependent rheology of starch thickeners and the clinical implications for dysphagia therapy [J]. *Dysphagia*, 2006, 21(4): 264-269. DOI: 10.1007/s00455-006-9050-7.

- [21] Lin Z, Liu S, Qiao D, et al. The possibility of the computer simulation-assisted IDDSI framework for the development of thickened brown rice paste [J]. *Food Chem*, 2025, 463 ( Pt 4 ): 141473. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.141473.
- [22] Wei Y, Guo Y, Li R, et al. Rheological characterization of polysaccharide thickeners oriented for dysphagia management: carboxymethylated curdlan, konjac glucomannan and their mixtures compared to xanthan gum [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106198. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106198.
- [23] Evageliou V. Shear and extensional rheology of selected polysaccharides [J]. *Int. J Food Sci Technol*, 2020, 55(5): 1853-1861. DOI: 10.1111/ijfs.14545.
- [24] Marconati M, Ramaioli M. The role of extensional rheology in the oral phase of swallowing: an in vitro study [J]. *Food Funct*, 2020, 11(5): 4363-4375. DOI: 10.1039/C9FO02327E.
- [25] Li L, Wang YQ, Zhang LD, et al. Gelation properties and swallowing characteristics of heat-induced whey protein isolate/chia seed gum composite gels as dysphagia food [J]. *Food Chem*, 2025, 464 ( Pt 2 ): 141712. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.141712.
- [26] Zhang S, Zhu S, Zhong F, et al. Fish collagen peptides, an effective starch gelatinization regulator, modify the processing properties and improve the nutritional value of wheat starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 149: 109612. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109612.
- [27] Li R, Wang P, Ma A, et al. Time-dependent thixotropy of dysphagia management-oriented polysaccharide solutions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 144: 109018. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109018.
- [28] Xu J, Wang P, Yuan B, et al. Rheology of cellulose nanocrystal and nanofibril suspensions [J]. *Carbohydr Polym*, 2024, 324: 121527. DOI: 10.1016/j.carbpol.2023.121527.
- [29] Guo Y, Zhou Z, Liao Q, et al. Rheological properties of stirred-type yogurt containing pea protein regulated by welan gum: implications for dysphagia-targeted medical foods [J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 167: 111435. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2025.111435.
- [30] Pant A, Lee AY, Karyappa R, et al. 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 114: 106546. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106546.
- [31] Nakauma M, Ishihara S, Funami T, et al. Swallowing profiles of food polysaccharide solutions with different flow behaviors [J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(5): 1165-1173. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2010.11.003.
- [32] Nishinari K, Turcanu M, Nakauma M, et al. Role of fluid cohesiveness in safe swallowing [J]. *npj Sci Food*, 2019, 3: 5. DOI: 10.1038/s41538-019-0038-8.
- [33] Cichero J, Nicholson T, Dodrill P. Liquid barium is not representative of infant formula: characterisation of rheological and material properties [J]. *Dysphagia*, 2011, 26(3): 264-271. DOI: 10.1007/s00455-010-9303-3.
- [34] Griebler JJ, Rogers SA. The nonlinear rheology of complex yield stress foods [J]. *Phys Fluids*, 2022, 34(2): 023107. DOI: 10.1063/5.0083974.
- [35] Zhang C, Wang CS, Girard M, et al. 3D printed protein/polysaccharide food simulant for dysphagia diet: impact of cellulose nanocrystals [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 148 ( Pt A ): 109455. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109455.
- [36] Xu J, Wang P, Zhou Z, et al. Nonlinear oscillatory rheology of aqueous suspensions of cellulose nanocrystals and nanofibrils [J]. *J Rheol*, 2024, 68(4): 491-508. DOI: 10.1122/8.0000808
- [37] Sun A, Gunasekaran S. Yield stress in foods: measurements and applications [J]. *Int J Food Prop*, 2009, 12(1): 70-101. DOI: 10.1080/10942910802308502.
- [38] Ewoldt RH, Hosoi AE, et al. New measures for characterizing nonlinear viscoelasticity in large amplitude oscillatory shear [J]. *J Rheol*, 2008, 52(6): 1427-1458. DOI: 10.1122/1.2970095.
- [39] Rogers SA. In search of physical meaning: defining transient parameters for nonlinear viscoelasticity [J]. *Rheol Acta*, 2017, 56: 501-525. DOI: 10.1007/s00397-017-1008-1.
- [40] Chen Q, Wu Y, Cao L, et al. Preparation and characterization of fish-derived protein gel as a potential dysphagia food: co-mingling effects of inulin and konjac glucomannan mixtures [J]. *Food Chem*, 2024, 460 ( Pt 3 ): 140742. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.140742.
- [41] Gamonpilas C, Kongjaroen A, Methacanon P. The importance of shear and extensional rheology and tribology as the design tools for developing food thickeners for dysphagia management [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108603. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.108603.

(修回日期:2026-01-12)

(本文编辑:阮仕衡)

## 《中华物理医学与康复杂志》第八届编辑委员会通讯编委组成名单

(按姓氏拼音顺序排序)

鲍勇 蔡斌 蔡西国 陈翔 陈卓铭 丁旭东 何晓阔 黄怀 贾杰 江山  
 康治臣 兰月 李旭红 李哲 刘雅丽 罗春 舒彬 宋振华 万春晓 王宏图  
 王红星 王永慧 温红梅 吴涛 夏文广 项洁 胥方元 徐光青 杨初燕 杨永红  
 余波 张立新 周云 朱美兰