

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.01.007

姜平, 刘明, 康子悦, 等. 全谷物饮品稳定性的多尺度表征方法[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 48-55.

JIANG P, LIU M, KANG Z Y, et al. Multiscale characterized methods for the stability of whole grain drink[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1): 48-55.

# 全谷物饮品稳定性的多尺度表征方法

姜平<sup>1</sup>, 刘明<sup>1</sup>, 康子悦<sup>2</sup>, 田晓红<sup>1</sup>, 刘艳香<sup>1</sup>, 谭斌<sup>1</sup>✉

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油加工研究所, 北京 100037)

(2. 哈尔滨商业大学 食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150076)

**摘要:** 随着全谷物健康认知和科学饮食概念的普及, 消费者越来越关注形式各异的全谷物食品。全谷物饮品作为全谷物食品中的一种重要产品形式, 其物理稳定性是研究开发过程中面临的主要挑战。由于全谷物饮品是一种以水为连续相, 以淀粉、膳食纤维、蛋白质等为分散相的多相浊状液热力学不稳定体系, 其分离速度快, 严重影响消费者的可接受度。通过文献梳理, 总结了全谷物饮品稳定性的宏观、介观、微观、纳观等多尺度表征方法及特征化学组分的表征方法, 期望能为全谷物饮品的开发提供方法指导, 特征化学组分助力全谷物食品的快速的发展。

**关键词:** 全谷物饮品; 稳定性; 特征化学组分; 多尺度; 表征方法

中图分类号: TS210.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)01-0048-08

## Multiscale Characterized Methods for the Stability of Whole Grain Drink

JIANG Ping<sup>1</sup>, LIU Ming<sup>1</sup>, KANG Zi-yue<sup>2</sup>, LIU Yan-xiang<sup>1</sup>, TIAN Xiao-hong<sup>1</sup>, TAN Bin<sup>1</sup>✉

(1. Institute of Cereal &amp; Oil Processing, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150076, China)

**Abstract:** With the popularization of the concepts of whole grain health cognition and scientific diet, consumers are paying more and more attention to different forms of whole grain food. Whole grain drink is one of the important products made from whole grain, and the physical stability of whole grain drink is a major challenge in the process of research and development. Since whole grain drink is a thermodynamically unstable system of multiphase turbidite liquid with water as the continuous phase and starch, dietary fiber, protein as the dispersed phase, the separation speed of whole grain drink is fast, which seriously affected the acceptability of consumers. Based on literature review, the multiscale characterization methods of macroscopic, mesoscopic, microscopic and nano-scale for the stability of whole grain drink and characterization methods of the characteristic chemical components were summarized. This paper summarized the stability of whole grain drink characterized with multiscale methods, which could provide methodological guidance for the development of whole grain drink and facilitate the rapid development of whole grain foods.

**Key words:** whole grain drink; stability; characteristic chemical components; multiscale; characterization methods

收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (ZX2220)

Supported by: Fundamental Research Funds of non-profit Central Institutes (No. ZX2220)

作者简介: 姜平, 女, 1987年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为粮食加工利用。E-mail: jp@ags.ac.cn.

通讯作者: 谭斌, 男, 1972年出生, 博士, 首席研究员, 研究方向为粮食加工。E-mail: tb@ags.ac.cn.

全谷物含有丰富的人体必需营养素、多种微量矿物质及多酚、 $\gamma$ -谷维素、燕麦蕙酰胺等抗氧化活性成分<sup>[1]</sup>, 具有非常高的营养价值, 常见的全谷物种类主要包括稻米、小麦、玉米、大麦、燕麦、莜麦、青稞、高粱、小米、黍米、薏苡、菰米、荞麦、藜麦、籽粒苋等。全谷物食品(Whole grain foods)是指含有全谷物原料, 且全谷物含量不低于 50% 的食品。近三十多年来的研究结果表明, 更多的摄入全谷物可以降低人们对许多疾病(如中风、II 型糖尿病、心脏疾病等)的患病危险<sup>[2]</sup>, 同时还有利于预防胃肠癌症和体重控制<sup>[3-5]</sup>, 其健康功效已成为国际学术界的共识。全谷物饮品(Whole grain drinks)是指以全谷物为主要原料, 且全谷物含量达到规定比例的, 经加工调配制成的饮品<sup>[6]</sup>。由于全谷物饮品的出现, 一定程度上减少了奶制品的消费, 保护了动物权益, 在道德伦理、健康和环境等方面产生积极效应, 最近受到公众越来越多的关注<sup>[7]</sup>。目前有各种各样的谷物被用来加工成饮品, 如大米、燕麦、藜麦、小米、玉米等, 而以燕麦为基础研发的产品是最近各企业和科研学者们关注的重点。Markets and Markets 预测, 从 2020 年开始, 植物性饮品的复合年增长率为 11%, 到 2025 年将达到 367 亿美元<sup>[8]</sup>, 我国 2020 年植物蛋白饮料市场规模达 2 583 亿元, 占饮料行业的比重继续上升至 24.2%, 发展速度迅猛。

全谷物饮品不同于植物性饮品产品(如大豆饮品), 植物性饮品多是主要以蛋白质和油体组成的乳状液或悬浮液, 而全谷物饮品是一种以水为连续相, 以淀粉、膳食纤维、蛋白质、脂肪等为分散相的多相浊状液分散体系, 是一种热力学不稳定体系, 有一定的动力稳定性<sup>[9]</sup>。由于全谷物饮品体系中淀粉及膳食纤维含量高, 具有多分散的粒径分布, 这就导致其分离速度快, 贮藏期间会出现析水、沉淀、浮油、絮集等表现不稳定现象, 感官品质下降, 严重影响消费者的可接受度<sup>[10]</sup>。全谷物饮品在稳定性方面的质量差异很大, 这不仅取决于所使用原料的特性, 还取决于所使用的配方和加工工艺<sup>[9]</sup>, 目前研究学者多使用酶解、发酵、超细微粉碎等前处理方法及水胶体作为增

稠剂等方法以提高全谷物饮品的稳定性<sup>[11-14]</sup>, 提高消费者对全谷物饮品的接受度。

近年来, 随着人们对全谷物健康认知的提升, 全谷物食品的关注度逐年提高, 全谷物食品呈现出快速发展的趋势, 全谷物饮品作为其重要分支, 非常有必要对其进行深入研究。目前全谷物饮品面临的主要挑战就是产品的稳定性, 因此, 必须系统地描述体系的稳定性特征以对产品获得更好的理解和控制, 这反过来将促进更好品质的产品开发, 提高消费者接受度。本综述旨在总结多尺度表征全谷物饮品稳定性的方法, 包括一些经典方法以及新型的方法, 期望能为全谷物饮品的开发提供方法指导, 助力全谷物食品的快速发展, 切实提高我国粮食资源可食化利用率, 实施节粮减损, 降低碳排放, 提升国民健康水平。

## 1 多尺度科学内涵

“多尺度”是来源于现代物理学的一个多用于描述空间层次的概念, 它可以分为宏观、介观、微观和纳观四个尺度, 而在食品体系中的多尺度还可以表现为空间、时间、浓度及因素等多尺度, 如特征组分的空间尺寸大小、不同的反应时间、特征组分浓度的分布及动态变化以及食品加工过程中多种因素的耦合情况等。全谷物饮品稳定性的“空间多尺度”研究方法源自于物理学领域的常规设备, 如: 宏观层面主要是采用基于超速离心原理的 Lumifuge 稳定性分析仪及基于静态多光散射原理的 Turbiscan Lab<sup>®</sup> 稳定性分析仪和低场核磁共振技术(low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 等来分析相分离程度; 介观层面主要有等光学显微镜、层析方法等; 微观层面主要有激光粒度仪、激光共聚焦显微镜、显微成像、流变仪等; 纳观层面主要有扫描电子显微镜、核磁共振及光谱设备等<sup>[15]</sup>, 应用这些设备测定的数值、图像、图谱及建立的模型等也可以间接反映全谷物饮品“时间多尺度”稳定性、“浓度多尺度”稳定性及“因素多尺度”稳定性等。

在食品加工过程中, 这些不同尺度实际上是相互交织、相互影响的<sup>[15]</sup>。目前, 研究学者们对多分散全谷物饮品体系的稳定性主要从相分离(沉降系数等)的宏观尺度、粒径等介观尺度、

流变学界面特性等微观尺度及原子层次等纳观尺度等多方面开展研究。

## 2 全谷物饮品的多尺度表征方法

全谷物饮品加工环节的许多因素都可能影响全谷物饮品的稳定性，它不仅受体系物理变异性

(颗粒大小、zeta 电位、产品的厚度等)的影响，而且受体系化学变异性(蛋白质、淀粉结构等)的影响，其物理稳定性是生物聚合物成分之间微妙平衡的结果<sup>[16-17]</sup>，具体体现在应用各种不同尺度研究技术对其在不同研究深度层面表征的各个方面(如图 1)。

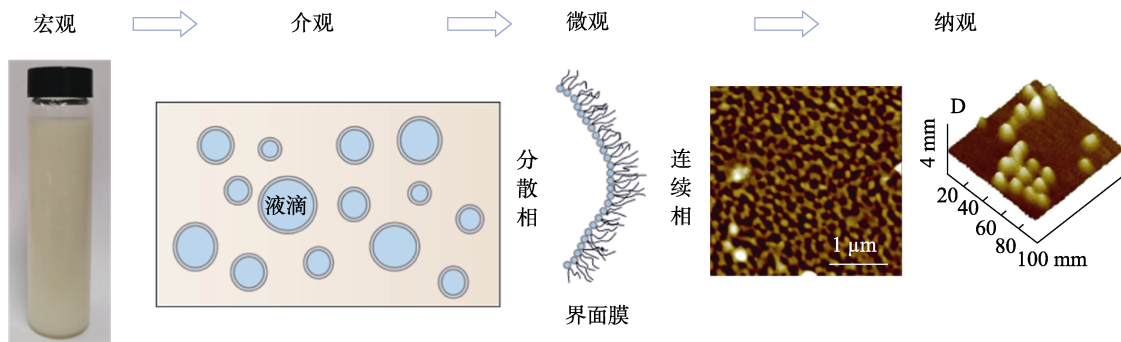


图 1 多尺度表征全谷物饮品稳定性示意图

Fig.1 Schematic diagram of multiscale characterization of stability of whole grain drink

下表 1 列出了常用于表征谷物饮品系统稳定性的一些经典方法，这些方法从视觉、粒径、电位、流变学、整体稳定性及蛋白质特性等方面进行分析，阐述不同加工方法或稳定剂的使用等手段对系统稳定性的影响<sup>[18]</sup>，每种方法在全谷物饮品中的应用各有利弊。

表 1 谷物饮品稳定性表征的经典方法  
Table 1 Classical methods for grain beverage system characterization

表征特性	表征方法
视觉	瓶试法、显微镜技术(光学显微镜、扫描电镜、透射电镜)
粒径	静态光散射
电位	动态光散射
流变学	粘度、流变仪
一般稳定性	Turbiscan Lab <sup>®</sup> 稳定性分析仪、Lumifuge 稳定性分析仪、超速离心方法
蛋白质分析	蛋白质含量及功能(乳化能力、起泡能力)

### 2.1 宏观尺度的表征方法

宏观体系其实是由许多独立的微元体组成的整体。全谷物饮品在放置一段时间后会出析水、沉淀、浮油、絮集等表观稳定性现象的变化，其相分离程度是宏观稳定性的最直观表达方式。传统的相分离程度研究方法是瓶试法，此方法虽然

简单直观，但耗时长，精确度较差<sup>[19]</sup>。在全谷物饮品这种颗粒尺寸较小的系统中，等待很长时间进行测量是不切实际的，可以使用离心机进行加速重力分离分析<sup>[20]</sup>，因此目前多采用 Turbiscan Lab<sup>®</sup>稳定性分析仪和 Lumifuge 稳定性分析仪对不太透明的产品进行浑浊度测定。此方法采用脉冲近红外光源对样品(无需稀释)透射光和散射光的强度随时间变化的情况进行跟踪测定，通过不同物质层对光的透射和散射之间的差异进而反映体系的相分离情况<sup>[21]</sup>。刘婷玉等<sup>[22]</sup>采用 Turbiscan 稳定性分析仪对储存于 4 °C 条件下燕麦乳的稳定性进行测定，记录了 24 h 内不稳定性指数(TSI)的变化情况，从而进一步解释不同灭酶方式对燕麦乳稳定性的影响；陈若辰等<sup>[23]</sup>采用 Lumifuge 稳定性分析仪测定了不同高压射流磨压力对全组分燕麦浆稳定性的影响，随着高压射流磨处理压力的增加，不稳定性指数越来越小，这表明全组分燕麦浆稳定性逐渐变好。这两种方法可以准确快速的表征相分离程度，但对于透光性较差、黏度较大的样品的测试结果还缺乏一定的准确性。

### 2.2 介观尺度的表征方法

介观尺度是介于纳米和微米之间的衡量尺

度。全谷物饮品分散相介观颗粒粒径随时间的变化直接反映了体系中液滴的聚集过程,从而间接反映了宏观尺度的相分离情况;而 zeta 电位可以表征体系中粒子的静电行为,从而进一步反映全谷物饮品的稳定性,因此颗粒粒径及 zeta 电位是全谷物饮品稳定性的重要指标。全谷物饮品颗粒粒径的表征方法通常有显微镜法、光散射法及低场核磁共振技术; zeta 电位通常采用动态光散射技术进行测定。

颗粒大小通常采用显微镜进行观察,但 SEM (扫描电镜)和 TEM (透射电镜)需要样本是低水分且导电的,因此并不适合观察全谷物饮品系统的微观结构<sup>[24]</sup>。激光共聚焦显微镜 (confocal laser scanning microscope, CLSM) 作为最近开发出的研究油水界面乳化性质的一种新方法,近年来被广泛用来研究乳状液或谷物饮品的液滴粒度<sup>[25-26]</sup>。CLSM 法制备液体样本的方法比较简单,只需直接向液体样本加入染料,快速混匀后滴加在玻片上直接进行上机观察即可,无需脱水。该法通过将不同的分散相进行染色后,利用激光激发一定范围内的光束使已染色的分散相液滴发出荧光,获得了样品内部不同物质的颗粒粒度及分散情况,结果更为直观,不需稀释即可提高图像分辨率<sup>[27-29]</sup>。Li 等<sup>[30]</sup>采用 CLSM 对全豆豆奶的微观结构进行了分析,图像清晰的反映了大部分油滴和蛋白质的形态、尺寸及分布状态。CLSM 法在全谷物饮品稳定性方面的应用具有原位测定、非接触性、无破坏性的特点,而且可以对各组分(油脂、蛋白、淀粉、膳食纤维等)微观精细结构变化进行观察,进一步精准改进和调控加工,具有非常大的使用价值。

饮品系统的颗粒大小分布还可以使用静态光散射技术来量化,如 Mastersizer 激光粒度仪,该方法利用粒子散射光的行为,通过输入参数(折射率、吸收率等)测定可得到其粒度分布状态图谱及平均粒径  $D_{x(50)}$ 、 $D_{x(90)}$ 、 $D_{[4,3]}$ 、 $D_{[3,2]}$  等结果。本文作者曾使用 Mastersizer2000 E 型激光粒度仪测定了冻融对红豆浓浆颗粒粒度的影响<sup>[31]</sup>,但该方法测量时需要将样品稀释到一定程度,从而可能改变了样品原有的微观结构;另外对于不同产

品类型的全谷物饮品需要使用不同的参数,结果可能无法进行比较。而 Turbiscan Lab<sup>®</sup> 稳定性分析仪(此设备在 2.1 中提到)则弥补了激光粒度仪的不足,它可以实现样品无需稀释的条件下对其粒度的直接测定<sup>[32]</sup>,从而实现对全谷物饮品颗粒粒径的原位表征,但该方法耗时较长,而且对于透光性较差的样品其测试准确性较差。

在本文 2.1 中提到的用于分析相分离情况的低场核磁共振技术(LF-NMR)还能用于测定分散相的粒度特征。通过该技术测量悬浮液体体系的弛豫时间,并计算固体颗粒的湿润比表面积(可利用的吸附表面积),进而用来研究分散相颗粒在溶剂中的分散性及稳定性等。Yang 等<sup>[33]</sup>应用 LF-NMR 对西兰花泥的平均粒径进行了分析,并基于比表面积及弛豫时间预测了其微观结构模型。LF-NMR 可以快速测定分散相粒径分布,操作简单,准确性好,且不受样品颜色的影响,较 Turbiscan 稳定性分析仪而言,应用范围更广泛,推断其是多相浊状液分散体系粒度重要的原位研究方法,但 NMR 序列参数选定困难,不适当的参数可能使结果出现较大偏差,在测试序列的选择与优化上有巨大的发展空间。

Zeta 电位通常采用动态光散射技术进行测定,该方法是基于带电粒子在外加电场作用下的电泳运动,其电泳迁移率被转化为 zeta 电位。通常 zeta 电位离零越远,电泳稳定性越高;在 zeta 电位  $\pm 30$  mV 时,可以实现适度的稳定性,在绝对值低于这一极限时,预计电斥力较弱并倾向于聚集,导致分离<sup>[34]</sup>。它受样品组成、有机物的存在、稀释介质的 pH 值和离子强度等因素的影响<sup>[14,16-17]</sup>,而且由于测试大颗粒样品需要稀释,因此这种方法被批评不能反映产品的实际情况,但它对系统稳定性的行为提供了额外的见解,仍被广泛使用<sup>[35]</sup>。

### 2.3 微观尺度的表征方法

从物理学角度来讲,微观层次的物质是具有波粒二象性的,因此微观尺度的表征方法主要有流变特性、激光共聚焦显微镜等。

粘度是全谷物饮品发生相分离的物理屏障,流变特性主要是用流变仪分析样品的表观粘度,

通过设置不同的剪切速率测定表观粘度的变化情况,进而反映样品不同的属性,如重力流动、咀嚼吞咽流动和食道流动的剪切速率典型范围分别为  $0.1\sim 10\text{ s}^{-1}$ 、 $10\sim 100\text{ s}^{-1}$ 、 $10\sim 1\,000\text{ s}^{-1}$ ;观察货架稳定性及口感评价的剪切速率分别为  $10\text{ s}^{-1}$  和  $100\text{ s}^{-1}$ ;添加水溶性胶体后粘度变化的稳定性等<sup>[9]</sup>。全谷物饮品是典型的非牛顿假塑性流体,流变学通过剪切应力或剪切速率扫描产生的流动曲线可以大致了解产品的流动特性,这一深入研究可以在粘度测定的基础上进一步了解产品在加工、储藏等环节的稳定性及感官特性;还可以确定稳定剂的最佳添加量<sup>[36]</sup>,该方法可用于指导全谷物饮品产品的研究开发。

激光共聚焦显微镜 (CLSM) 技术测定的基本原理已在本文 2.2 做过详细介绍,在此不再赘述。该技术在全谷物饮品稳定性微观尺度的分析主要是用于形貌结构的直接观测。黄素君<sup>[26]</sup>采用 CLSM 清晰地观测到不同高压射流磨压力制备的全燕麦浆中的蛋白体、油体微观结构及叠加图像,从微观结构角度分析了影响其稳定性的潜在因素。

#### 2.4 纳观尺度的表征方法

纳观尺度的表征对应原子层次的分析。全谷物饮品稳定性纳观尺度的表征方法主要有光谱设备、核磁共振及原子力显微镜等。

用于分析全谷物饮品稳定性的光谱学表征方法主要有拉曼光谱和荧光光谱。拉曼光谱 (Raman spectroscopy) 是一种能够表征分子振动能级的光谱,具有极高的分子特异性,但其散射强度较弱,它的主要优点是不受水分子的干扰<sup>[37]</sup>,既能提供蛋白质、脂肪的空间结构信息,又对分子具有非破坏性,可用于二级结构以及侧链等结构的分析<sup>[37-38]</sup>。拉曼光谱检测特定的化学键,可以用来识别特定的分子及其结构,因此该方法可以用来分析表征与全谷物饮品稳定性相关的食品成分和食品添加剂<sup>[39]</sup>。荧光光谱有两种主要类型:内在荧光光谱和外在荧光光谱。内在荧光光谱是指检测样品自身含有内源性荧光团,如蛋白质(可监测芳香族氨基酸色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸)、维生素(A、B<sub>6</sub>、E)、辅因子(NADH、FAD 和 FMN)、卟啉、叶绿素和一些核苷酸等;而外在荧光光谱

是指向检测样品中添加外源性荧光团以标记特定的分子或结合物,使研究人员能够跟踪给定系统的特定属性。由于蛋白质的展开与蛋白质的疏水性相关,因此监测全谷物饮品中蛋白质的疏水性可以进一步反映其乳化能力。全谷物饮品中蛋白质的疏水性既可以通过色氨酸的固有荧光来监测,也可以通过使用对蛋白质的疏水区域具有亲和力的外部荧光探针如 ANS (1-苯胺 8-萘磺酸) 和 CPA (顺式对萘酸) 来监测<sup>[40]</sup>。荧光光谱法是在三级结构层面上来解析蛋白质的构象差异<sup>[41]</sup>、同时分析其空间微环境变化的一种方法<sup>[42]</sup>,也可作为淀粉的测试分析方法<sup>[43]</sup>。荧光光谱技术已被应用于许多食品体系,其在全谷物饮品的应用方面主要是监测加工对蛋白质展开的影响;另外使用荧光光谱可以跟踪加热过程中美拉德反应产生的中间产品或其他生物标志物产生的内在荧光团来监测调控热处理程度<sup>[44-45]</sup>。

与光谱方法相比,核磁共振技术的灵敏度较低,但其得到的时域数据和光谱包含了大量关于样品的物理和化学性质的信息。核磁共振仪器有两类:高场核磁共振 (high field nuclear magnetic resonance, HF-NMR) 和低场核磁共振 (low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR),其中 LF-NMR 不受样品透光性的影响、测试精度较高,通过选取 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 脉冲序列和反转恢复脉冲序列对样品中油、水 <sup>1</sup>H 弛豫时间的差异分离出不同的信号,从而反映样品相分离情况<sup>[46]</sup>。该方法已被广泛用于观察样品在加工、储存过程中的相变、基体和水的分布、流变学性质和成分变化等物理现象<sup>[47-49]</sup>。

原子力显微镜 (AFM) 是利用其弹性微悬臂前端纳米级尖锐的微小探针与样品表面之间产生相互作用力,通过激光光束照射微悬臂的形变情况,经光电二极管接收转换成以图像信息表征出来的分析仪器<sup>[50-51]</sup>。AFM 技术对样品的损坏程度低且对样品导电性无要求,可以测试液态或水合状态的样品,分析可以达到分子级水平甚至原子级水平,具有高清晰度、高分辨率,细微结构特征探测等特点,因此已在食品大分子的组织结构(如多糖分子、蛋白质分子及其凝胶、结晶结构),

表面微观形貌和界面等方面得到广泛的应用,是一种具有发展潜力和广泛应用前景的显微技术<sup>[52-53]</sup>。有研究学者应用 AFM 技术对乳及乳胶体的表面信息以及胶体结构情况进行了研究<sup>[54-55]</sup>,但由于乳是一种胶体体系,而全谷物饮品是一种多分散相的浊液分散体系,对于这种更复杂的、多相多组分的食品体系结构还需要将 AFM 技术结合其它手段进行分析。

### 3 影响全谷物饮品稳定性的特征化学组分的表征方法

全谷物饮品中的分散相主要是淀粉、膳食纤维、蛋白质、脂肪等,因此这些化学成分在含量、结构及功能等方面的变化也可以从某种程度上间接反映体系的稳定性情况。如全谷物饮品的淀粉老化是影响其稳定性的一个重要原因,因此对全谷物饮品中直链/支链淀粉含量、损伤淀粉含量以及淀粉结构的分析也是稳定性表征的一种间接方式<sup>[23]</sup>;在全谷物饮品体系中,蛋白质含量、蛋白质的功能性和溶解度等功能特性影响蛋白质稳定全谷物饮品体系的能力<sup>[56]</sup>;可溶性膳食纤维含量的变化<sup>[57]</sup>、淀粉、蛋白质、脂质等各成分含量的比例关系<sup>[58]</sup>等都是影响全谷物饮品体系稳定性的重要因素,但与物理特性的表征方法相比,化学特性的表征方法相对耗时长,对其结构等分析还需提取纯化,测定程序较为繁琐,但其作为物理稳定性的内在机制的调控依据研究还是具有重要意义的。

### 4 结语与展望


近年来,随着全谷物健康认知和科学饮食概念的普及,消费者越来越关注形式各异的全谷物食品,全世界正掀起了一股全谷物食品的研发和消费风潮。我国《粮食节约行动方案》指出要“加快推进粮食加工环节节粮减损,提高粮油加工转化率”,“启动‘国家全谷物行动计划’,开发全谷物原料质量稳定控制、食用品质改良、活性保持等技术,推进全谷物粮油加工技术开发和应用”。而全谷物饮品作为全谷物食品中的一种重要产品形式,其物理稳定性是研究开发过程中面临的主

要挑战。本文主要总结了一些多尺度研究表征全谷物饮品稳定性的方法,期望能为从事全谷物饮品开发的工作人员们提供一些思路,而对于全谷物饮品稳定性的研究方面,下一步关键还是要考虑如何系统性、综合性、目标性地运用多尺度表征的技术方法,建立多种表征结果可以互相印证、互为因果、相互统一的稳定性研究体系,更为全面深入地探究全谷物饮品的稳定机制,以期更好地调控全谷物饮品加工各环节的影响因素,开发出更受消费者喜爱的全谷物饮品,助力我国全谷物食品快速发展。

### 参考文献:

- [1] 龚二生, 罗舜菁, 刘成梅. 全谷物抗氧化活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 364-369.  
GONG E S, LUO S J, LIU C M. Research progress in antioxidant activity of whole grain[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(2): 364-369.
- [2] 谭斌, 乔聪聪. 中国全谷物食品产业的困境、机遇与发展思考[J]. 生物产业技术, 2019, 6: 64-74.  
TAN B, QIAO C C. Dilemma, opportunity and thoughts on development of China's whole grain food industry[J]. Bio-industrial technology, 2019, 6: 64-74.
- [3] NEUENSCHWANDER M, BALLON A, WEBER K S, et al. Role of diet in type 2 diabetes incidence: umbrella review of meta-analyses of prospective observational studies[J]. British Medical Journal, 2019, 366: 12368.
- [4] WELCH R W. Nutrient composition and nutritional quality of oats and comparisons with other cereals[J]. Oats: Chemistry and technology, 2011, 95-107.
- [5] SEAH J Y H, KOH W P, YUAN J M, et al. Rice intake and risk of type 2 diabetes: the Singapore Chinese Health Study[J]. European Journal of Nutrition, 2019, 58(8): 3349-3360.
- [6] 饮料通则: GB/T 10789—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
General standard for beverage: GB/T 10789—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [7] ROSENFELD D L. The psychology of vegetarianism: Recent advances and future directions[J]. Appetite, 2018, 131: 125-138.
- [8] Markets and Markets. Dairy alternatives market by source (soy, almond, coconut, rice, oats, hemp), application (milk, cheese, yogurt, ice creams, creamers), distribution channel (supermarkets, health stores, pharmacies), formulation and region[R]. Global Forecast to 2025, 2020.
- [9] JESKE S, ZANNINI E, ARENDT E K. Evaluation of physicochemical and glycaemic properties of commercial plant-based milk substitutes[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2017, 72(1): 26-33.

- [10] 凌孟硕. 苦荞麦芽-小米复合谷物饮料的工艺研究[D]. 江苏: 江南大学, 2013.  
LING M S. Study on process of Tartary buckwheat malt and millet mixed cereal beverage[D]. Jiangsu: Jiangnan university, 2013.
- [11] 刘先隆, 刘磊, 赖婷, 等. 高营养全谷物燕麦浓浆的复合酶解工艺优化[J]. 现代食品科技, 2018, 34(7): 196-204.  
LIU X L, LIU L, LAI T, et al. Optimization of complex enzymatic hydrolysis of highly nutritious whole grain oat thick paste[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(7): 196-204.
- [12] 和树平, 陈璐, 金鹏, 等. 二麦薏仁发酵饮料的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 113-116.  
HE S P, CHEN L, JIN P, et al. Optimizing the processing technology of fermented barley, oat and coix seed beverage[J]. Food Research And Development, 2020, 41(15): 113-116.
- [13] 黄丽, 黄素君, 黄澳, 等. 高压射流磨制备全谷物浓浆饮品的研究[J]. 粮食与食品工业, 2022, 29(1): 15-21.  
HUANG L, HUANG S J, HUANG A, et al. Study on preparation of whole grain pulp beverage by high pressure jet mill[J]. Cereal and Food Industry, 2022, 29(1): 15-21.
- [14] MUNEKATA P, DOMINGUEZ R, BUDARAJU S, et al. Effect of innovative food processing technologies on the physicochemical and nutritional properties and quality of non-dairy plant-based beverages[J]. Foods, 2020, 9(3): 288.
- [15] 王强, 李琳, 鞠兴荣, 等. 多尺度结构变化与食品品质功能调控研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 1-11.  
WANG Q, LI L, GONG X R, et al. Research progress on multi-scale structural changes and functional regulation of food quality[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 1-11.
- [16] BERNAT N, CHAFER M, RODRIGUEZ G J, et al. Effect of high pressure homogenisation and heat treatment on physical properties and stability of almond and hazelnut milks[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 488-496.
- [17] MCCLEMENTS D J, NEWMAN E, MCCLEMENTS I F. Plant-based milks: A review of the science underpinning their design, fabrication, and performance[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(6): 2047-2067.
- [18] PATRA T, RINNAN Å, OLSEN K. The physical stability of plant-based drinks and the analysis methods thereof[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106770.
- [19] 黄翔峰, 王旭慧, 陆丽君, 等. 多尺度研究油水乳状液稳定性的技术进展[J]. 化工进展, 2016, 35(1): 26-33.  
HUANG X F, WANG X H, LU L J, et al. Technical progress of multiscale study on oil-water emulsion stability[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(1): 26-33.
- [20] KONTOGEOORGIS G M, SOREN K. Characterization methods of colloids-part I[M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [21] JIA L, HUANG X F, LU L J, et al. Turbiscan Lab® Expert analysis of the biological demulsification of a water-in-oil emulsion by two biodemulsifiers[J]. Journal of hazardous materials, 2011, 190(1-3): 214-221.
- [22] 刘婷玉, 佟立涛, 王丽丽, 等. 燕麦籽粒不同灭酶方式对燕麦乳稳定性和营养物质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(10): 22-28.  
LIU T Y, TONG L T, WANG L L, et al. Effects of different enzyme inactivating modes on the stability and nutrients of oat milk[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(10): 22-28.
- [23] 陈若辰. 高压射流磨制备燕麦全浆及对淀粉性质的影响研究[D]. 江西: 南昌大学, 2020.  
CHEN R C. Preparation of whole-component oats slurry by industry-scale microfluidizer and its effect on starch properties[D]. Jiangxi: Nanchang University, 2020.
- [24] AUTY M. Microscopy tools for product innovation[J]. Food Science and Technology, 2019, 33(4): 51-55.
- [25] AKHTAR M, MURRAY B S, AFEISUME E I, et al. Encapsulation of flavonoid in multiple emulsion using spinning disc reactor technology[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 34: 62-67.
- [26] 黄素君. 全谷物饮品的稳定性研究及产品开发[D]. 江西: 南昌大学, 2021.  
HUANG S J. Study on stability of whole grain beverage and product development[D]. Jiangxi: Nanchang University, 2021.
- [27] 陈晨, 陆乃彦, 范大明, 等. 激光共聚焦扫描显微镜技术在不同食品体系中的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(17): 4581-4586.  
CHEN C, LU N Y, FAN D M, et al. Application of confocal laser scanning microscope in food system[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(17): 4581-4586.
- [28] TAO L N, WANG P P, ZHANG T, et al. Preparation of multicore millimeter-sized spherical alginate capsules to specifically and sustainedly release fish oil[J/OL]. Food Science and Human Wellness:1-19.
- [29] RADFORD S J, DICKINSON E, GOLDING M. Stability and rheology of emulsions containing sodium caseinate: combined effects of ionic calcium and alcohol[J]. J Colloid Interface Sci, 2004, 274(2): 673-686.
- [30] LI Y T, CHEN M S, DENG L Z, et al. Whole soybean milk produced by a novel industry-scale microfluidizer system without soaking and filtering[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 291: 110228.
- [31] 姜平, 谭斌, 龚雪梅, 等. 冻融对红豆浓浆稳定性及流变学特性的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 166-172.  
JIANG P, TAN B, GONG X M, et al. Research on the effect of freeze-thaw on stability and rheological properties of red bean pulp[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 166-172.
- [32] 黄翔峰, 程航, 陆丽君, 等. 利用稳定性分析仪研究化学破乳过程[J]. 化工进展, 2010, 29(5): 825-830.  
HUANG X F, CHENG H, LU L J, et al. Investigation of chemical demulsification process by stability analyzer[J]. Chemical industry and engineering progress, 2010, 29(5): 825-830.
- [33] YANG J X, JIN X, CHEN X D. Investigation on effects of mechanical treatments on cellular structure integrity and vitamin C extractability of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) by LF-NMR[J]. Food and Function, 2018, 9: 2942-2950.
- [34] KUMAR A, DIXIT C K. Methods for characterization of

- nanoparticles[M]//Advances in nanomedicine for the delivery of therapeutic nucleic acids[M]. Woodhead Publishing, 2017: 43-58.
- [35] DICKINSON E. Particle-based stabilization of water-in-water emulsions containing mixed biopolymers[J]. Trends in food science & technology, 2019, 83: 31-40.
- [36] SILVA K, MACHADO A, CARDOSO C, et al. Rheological behavior of plant-based beverages[J]. Food Science and Technology, 2019, 40: 258-263.
- [37] JIN H, LU Q, CHEN X, et al. The use of Raman spectroscopy in food processes: A review[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2016, 51(1): 12-22.
- [38] 罗洁, 王紫薇, 宋君红, 等. 不同品种牛乳脂质的共聚焦拉曼光谱指纹图谱[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 125-129.
- LUO J, WANG Z W, SONG J H, et al. Lipid composition of different breeds of milk fat globules by confocal raman microscopy[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2016, 36(1): 125-129.
- [39] 蒋伊帆. 复杂食品基质中脂肪酸和蛋白质结构变化的拉曼光谱研究[D]. 合肥工业大学, 2021.
- JIANG Y F. Study on structural changes of fatty acid and protein in complex food matrix by Raman spectroscopy[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2021.
- [40] CASTRO A J, SWANSON B G, BARBOSA G V, et al. Pulsed electric field denaturation of bovine alkaline phosphatase[M]. Pulsed electric fields in food processing. CRC Press, 2019: 83-103.
- [41] 李杨, 孙禹凡, 赵城彬, 等. 体外模拟消化过程中大豆分离蛋白拉曼光谱和荧光光谱分析[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2): 266-272.
- LI Y, SUN Y F, ZHAO C B, et al. Analysis of raman spectroscopy and fluorescence spectroscopy for soy protein isolate during vitro simulated digestion process[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(2): 266-272.
- [42] 苗向硕, 常城铭, 何东芹. 表没食子儿茶素没食子酸酯和小米谷糠蛋白的相互作用研究[J/OL]. 粮油食品科技, 1-10.
- MIAO X S, CHANG C M, HE D Q. Research on the Interaction between Epigallocatechin Gallate and Millet Bran Protein[J/OL]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 1-10.
- [43] 张晋丹, 吴明伟, 冯旻. 作物淀粉的三维荧光光谱指纹分析鉴定方法[J]. 光学仪器, 2019, 41(3): 42-48.
- ZHANG J D, WU M W, FENG M. Three-dimensional fluorescence spectrum fingerprinting analysis method for crop starch[J]. Optical Instruments, 2019, 41(3): 42-48.
- [44] ANDERSEN C M, MORTENSEN G. Fluorescence spectroscopy: A rapid tool for analyzing dairy products[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2008, 56(3): 720-729.
- [45] SHAIKH S, O'DONNELL C. Applications of fluorescence spectroscopy in dairy processing: A review[J]. Current Opinion in Food Science, 2017, 17: 16-24.
- [46] CARNEIRO G F, SILVA R C, BARBOSA L L, et al. Characterisation and selection of demulsifiers for water-in-crude oil emulsions using low-field <sup>1</sup>H NMR and ESI-FT-ICR MS[J]. Fuel, 2015, 140: 762-769.
- [47] VAN D J, VODA A, WITEK M, et al. Time-domain NMR applied to food products[M]. Annual reports on NMR spectroscopy. Academic Press, 2010, 69: 145-197.
- [48] BARANOWSKA H M, SIKORA M, KRYSZYJAN M, et al. Evaluation of the time-dependent stability of starch-hydrocolloid binary gels involving NMR relaxation time measurements[J]. Journal of food engineering, 2012, 109(4): 685-690.
- [49] CAPITANI D, SOBOLEV A P, DI T V, et al. Portable NMR in food analysis[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2017, 4(1): 1-14.
- [50] SHEWRY P R, MILES M J, THOMSON N H, et al. Scanning probe microscopes applications in cereal science[J]. Cereal Chemistry, 1997, 74: 193-199.
- [51] 李芳菲, 夏秀芳, 孔保华. 原子力显微镜特点及其在食品中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(20): 216-220.
- LI F F, XIA X F, KONG B H. The research progress of characteristics of atomic force microscopy and its advance in food science[J]. Food Research And Development, 2016, 37(20): 216-220.
- [52] KIRBY A R, GUNNING A P, MORRIS V J. Atomic force microscopy in food research: A new technique comes of age[J]. Trends in Food Science and Technology, 1995, 6: 359-365.
- [53] 黄智慧, 黄立新. 原子力显微镜在食品研究中的应用[J]. 现代食品科技, 2006(3): 259-262.
- HUANG Z H, HUANG L X. The application of atomic force microscope in food research[J]. Modern Food Science and Technology, 2006(3): 259-262.
- [54] KIRBY A R, GUNNING A P, MORRIS V J. Imaging xanthan gum by atomic force microscopy[J]. Carbohydrate Research, 1995(7): 161-166.
- [55] 王丽娜. 南方水牛奶酪蛋白与其他乳源酪蛋白差异性的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- WANG L N. Study on differences of caseins from South China Buffalo and other breeds milk[D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2011.
- [56] MUNE M A M, SOGI D S. Emulsifying and foaming properties of protein concentrates prepared from cowpea and Bambara bean using different drying methods[J]. International journal of food properties, 2016, 19(2): 371-384.
- [57] 范晓波, 刘通通, 张晖, 等. 大麦预处理方法对大麦饮料品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(5): 167-171.
- FAN X B, LIU T T, ZHANG H, et al. Effect of pretreatment on the quality of barley beverage[J]. Food and fermentation industries, 2016, 42(5): 167-171.
- [58] 侯占群, 文剑, 吴逸民, 等. 谷物饮料关键制备技术及其稳定性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(10): 146-150.
- HOU Z Q, WEN J, WU Y M, et al. Recent advances in key technologies of cereal beverage[J]. Food and fermentation industries, 2012, 38(10): 146-150. 
- 备注:** 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。