

动态高压微射流处理过程对多糖结构与理化性质的影响研究进展

李亚楠, 刘红芝, 刘 丽, 石爱民, 王 强*

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

摘 要: 动态高压微射流技术作为一种新兴的食品加工处理手段, 逐渐在多糖制备与改性过程中被广泛应用, 其能够通过物理作用影响多糖结构, 进而改变多糖的理化性质。本文主要综述动态高压微射流技术对多糖的提取和结构以及流变性、乳化性、凝胶性等理化性质的影响, 以及多糖结构与理化性质之间的关系的研究进展, 分析现有研究中存在的问题, 并对未来研究的重点方向进行总结和展望。

关键词: 多糖; 动态高压微射流技术; 结构; 理化性质; 构效关系

A Review on the Effect of Dynamic High-Pressure Microfluidization Treatment on Physico-chemical Properties and Structures of Polysaccharides

LI Yanan, LIU Hongzhi, LIU Li, SHI Aimin, WANG Qiang*

(Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: As an emerging means for food processing, dynamic high-pressure microfluidization is widely used in the extraction and modification of polysaccharides, which can change the structures of polysaccharides by physical means, thereby affecting their physico-chemical properties. This paper is focused on summarizing the effect of this technology on the extraction, structure, and physico-chemical properties such as rheology, emulsification and gel properties, as well as the relationship between the structure and properties of polysaccharides. Moreover, the existing problems in the research and its future development trends are proposed.

Key words: polysaccharides; dynamic high-pressure micro-fluidization (DHPM); structure; physico-chemical properties; structure-activity relationship

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)07-0211-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201507039

动态高压微射流技术是一种从高压均质工业应用中开发出来的, 集输送、混合、超微粉碎、加压、加温、膨化等多种单元操作于一体的新兴物理改性技术, 其工作原理是通过高速碰撞、高频振荡、瞬时压降、气穴作用、强烈剪切作用等实现对物料的改性, 压力可高达300 MPa, 该技术已被制药和食品企业用于生产较为稳定的乳状液, 目前, 该技术的正式命名在国内国际有较多种, 有动态高压微射流(dynamic high-pressure microfluidization, DHPM)、Microfluidizer、微射流均质机、瞬时高压作用(instantaneous high pressure, IHP)、高压均质(high-pressure homogenization, HPH)等。

多糖是由糖苷键结合而成的糖链, 结构层次有一级

结构和高级结构, 可以是线状或者分支状, 是一种相对分子质量较大的分子, 广泛存在于动物细胞膜和植物、微生物的细胞壁中。运用DHPM技术处理多糖, 能够打断长的分子链条, 降解多糖, 改变微粒的粒度和分子聚集状态, 使多糖的结构发生变化^[1-2], 进而影响其理化性质和生物活性。运用DHPM技术提取多糖或者进行结构修饰来改善其理化性质, 对多糖的开发利用具有重要意义。近几年来, DHPM技术在多糖的提取过程中开始逐步应用, 但关于该提取技术对多糖结构和理化性质的影响还未深入探究, 本文归纳总结动态微射流技术对多糖提取、结构和理化性质方面的影响, 对其中存在的问题进行分析, 并提出未来研究的重点方向。

收稿日期: 2014-05-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31271835); 国家国际科技合作专项(2012DFA31400); 中国农业科学院科技创新工程项目

作者简介: 李亚楠(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮油加工与功能食品。E-mail: liyananchina@163.com

*通信作者: 王强(1965—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为粮油加工与功能食品。E-mail: wangqiang@caas.cn

1 动态高压微射流处理多糖文献统计分析

通过Google学术、ScienceDirect、CNKI系列数据库对国内外动态高压微射流应用于多糖的相关文献进行统计,结果见表1。从2003年开始,动态高压微射流技术应用于多糖的研究报道呈上升趋势,国内外学者的研究主要集中在提取、结构和理化性质方面,但文献数量均较少。涉及结构(20篇)、理化性质(18篇)的文献较多,对多糖结构的研究主要集中在表面形态、粒径、一级结构、官能团、晶型等方面,而对多糖高级结构的研究较少。对多糖理化性质的研究主要集中在流变性、凝胶性、溶解性、吸水性、热力学特性等方面。对多糖的结构、理化性质的研究一直是持续进行的,从2008年开始有应用于多糖提取的研究报道。

表1 动态高压微射流处理多糖文献统计分析
Table 1 Statistical analysis of references regarding the application of DHPM in polysaccharides from 2003 to 2013

年度	提取	结构	理化性质	合计
2003	—	1	—	1
2004	—	1	1	2
2005	—	2	—	2
2006	—	—	—	0
2007	—	1	2	3
2008	1	1	—	2
2009	—	3	2	5
2010	2	4	2	8
2011	0	4	3	7
2012	—	2	5	7
2013	0	1	3	4
合计	3	20	18	41

注:—,该年度没有相关文献报道。

2 动态高压微射流处理对多糖的影响

2.1 动态高压微射流处理对多糖得率的影响

多糖原料的预处理及提取方法均会影响多糖的得率,采用一定的物理化学手段,如酶法^[3]、超声波^[4]、微波^[5]、动态高压微射流^[6]等,对多糖原料预处理或应用于提取过程中,能够提高多糖的得率。DHPM技术通过瞬时剪切、高速碰撞、瞬间压力降低等作用使样品溶液的固相颗粒粒度减小,细胞壁破裂,传质速率加快,进而提高多糖的得率^[6]。

涂宗财等^[6]研究了DHPM处理对玉米花粉破壁效果和含糖得率的影响,确定了DHPM破壁花粉和热水提取多糖的最佳条件。研究发现,在均质压力120 MPa、微射流处理1次、料液比1:20 (*m/V*)、提取温度70 ℃、提取时间2.5 h,提取两次的条件下,玉米花粉粗多糖的得率可达7.545%,比未经DHPM处理的样品得率高1.023%。

姜颖等^[7]采用DHPM技术对香菇子实体进行预处理,通过实验组和对照组的对比分析,研究此预处理方法对香菇多糖得率的影响。结果表明:在140 MPa、料液比1:60 (*m/V*)的条件下,多糖得率达到最高值6.755%,与对照组相比,DHPM处理实验组的香菇多糖提取效率得到显著改善。

2.2 动态高压微射流处理对多糖结构的影响

DHPM技术作为一种物理改性手段,能够通过高压均质途径打断多糖长的分子链条,降解多糖,改变单糖组成、微粒粒度和分子聚集状态,从而改变多糖的空间结构及分子内与分子间作用力。目前的研究主要集中在微射流不同压力、循环次数、料液比等因素变化对多糖结构的影响方面。

2.2.1 一级结构

多糖的一级结构是指多糖的单糖残基组成、排列顺序、相邻单糖残基的连接方式、异头物的构型及糖链有无分支、分支的位置及长短等^[8]。高速撞击和剪切等作用力能使糖链的连接变得薄弱,甚至断裂,引起多糖分子链的降解,对多糖的分子质量分布及单糖组成造成影响。

高甲氧基果胶在DHPM处理过程中,随着压力的增加,其平均分子质量和粒径减小,还原糖的量增加,但初级结构未发生改变^[9]。大豆多糖的主干半乳糖醛酸主链由聚鼠李糖半乳糖醛酸长链和聚半乳糖醛酸短链构成,经DHPM处理后,大豆多糖的单糖组成发生变化,某些单糖的含量会降低,甚至消失,且单糖含量的降低程度不同,可能是由于DHPM引起主链部分断裂,而侧链的氢键作用力较弱,使大部分侧链脱离主链。通过相对分子质量图谱对比可以发现,大豆多糖的相对分子质量减小,有的峰会消失,可能是由于DHPM处理使部分小分子多糖受作用力变成更加小分子质量的多糖,甚至是单糖;小分子糖脱离了糖链并在之后的透析过程中流失掉^[10]。Modig等^[11]研究发现高压均质对疏水改性淀粉(辛烯基琥珀酸酐淀粉)的影响程度依赖于改性淀粉分子起始分子质量的大小,高分子质量的改性淀粉经过压力处理后会呈现较大幅度的降低,均方旋转半径下降,较低分子质量的淀粉样品则不受影响。余海霞^[12]研究了DHPM对半纤维素(hemicellulose, HCL)组分HCLA结构的影响,由分子质量分布峰可以发现,随着处理压力的增加,主峰的分子质量以及峰面积值逐步降低,在60 MPa时出现小分子质量的峰。可能是经高压处理后,样品的分子链发生断裂,大分子裂解成小分子碎片,使主峰分子质量有所下降,压力越大,则裂解程度越强。高压使不溶性聚合糖之间的主链断裂或者降解成可溶性的单糖、低聚糖或小分子多糖,使HCLA的单糖组成发生较大变化。Kasaai等^[13]研究了微射流对0.1 mol/L乙酸中壳聚糖破碎化的影响,DHPM处理能够诱导乙酸溶液中壳聚糖的机械

降解、并适度分散壳聚糖,降解受压力、振荡强度、时间、分子质量和聚合物在溶液中的浓度影响较大,温度对其影响微弱,分子质量较高、浓度较低的壳聚糖溶液更容易受到机械降解。

2.2.2 高级结构

多糖的二级结构指多糖骨架链间以氢键结合所形成的各种聚合体,关系到多糖分子中主链的构象,不涉及侧链的空间排布^[8]。在氢键和静电力作用下,多糖分子可发生自缔合,如直链淀粉可通过分子内氢键的相互作用,使长链分子卷曲成螺旋形的构象。研究发现,经DHPM(200 MPa)处理后,玉米直链淀粉颗粒结构被破坏,淀粉分子之间相互交联缔合,排列成紧密的网状结构^[14]。Gulrez等^[15]研究了不同压力处理对黄原胶水溶液结构和构象的影响,将黄原胶配制成4 mg/mL的溶液,在25、50、75、100 MPa条件下循环处理3次,之后稀释至0.25 mg/mL,用凝胶渗透色谱和激光光散射联用进行测定,发现黄原胶的双链结构并未解离成单链,但是分子质量减小,经处理后的黄原胶分子在4℃条件下不会重新聚集,且该解离过程是不可逆的。

多糖的三级结构是多糖链一级结构的重复顺序,是由于糖残基中的羟基、羧基、氨基以及硫酸基之间的非共价相互作用,导致有序的二级结构空间形成有规则而粗大的构象^[8],是多糖的高级结构之一,对多糖的功能活性有重要影响。目前,在所查文献范围内,还未发现有DHPM技术对多糖三级结构影响的详细报道。

多糖的四级结构是指多聚链间以非共价键结合形成的聚集体^[8],淀粉结晶区的结构特征代表了短程分子内淀粉聚集态结构中的有序结构,可视为四级结构,结晶度的高低代表着聚合物结构的有序和无序程度。Kasemwong等^[16]研究了DHPM处理对木薯淀粉悬浮液的微观结构、结晶度和热力学特性的影响,DHPM处理后,较大的淀粉颗粒部分糊化,颗粒表面上形成了凝胶状结构,当压力增加时,结晶度条件下降,在150 MPa条件下处理的样品,含17.1%的结晶性葡聚糖聚合物比原淀粉25.8%的结晶度低,较低的结晶度意味着淀粉颗粒中结晶性葡聚糖聚合物的结构更无序。蜡质玉米淀粉的特征衍射峰随着压力的增大而逐渐减弱,晶体的有序化程度逐渐降低,结晶度也明显降低,当压力达到160 MPa时,特征峰基本消失,说明结晶结构明显被破坏^[17]。

2.3 动态高压微射流处理对多糖理化性质的影响

多糖具有独特的理化性质,如高渗透压、高黏性、吸水性、凝胶性等,国内的研究主要集中在淀粉、纤维素、大豆多糖方面,研究范围稍窄,国外在植物多糖、动物多糖、微生物多糖等方面均有涉及,研究范围较

广,主要通过压力、循环次数、料液比等因素变化来研究DHPM对多糖流变性、凝胶性、溶解性、吸水性、热力学特性等方面的影响。

2.3.1 流变性

在多糖的实际应用中,都要涉及到其流变行为,在食品领域研究较多的是多糖的黏度,在DHPM处理过程中,多糖链间相互缠绕时会增加黏度,而多糖分子链被拉直取向时,黏度则会减小。玉米淀粉经过DHPM处理后,布拉本德(Brabender)黏度减小,且随着压力的增大,减小幅度增大。但DHPM处理对玉米淀粉的热黏度和冷黏度稳定性影响不大^[18]。Silvestri等^[19]利用微射流均质机在不同的压力条件下处理黄芪胶,发现DHPM处理过程中的剪切作用和振荡作用会使得黄芪胶的特性黏度下降。Wang Yong等^[20]研究了均质技术对亚麻籽胶溶液流变特性的影响,发现亚麻籽胶溶液的表现黏度随均质压力的增加而降低,同时溶液温度逐渐升高。表现黏度的一致性指数 K 和流动行为指数 n 符合幂律模型,储能模量 G' 和损耗模量 G'' 模型参数也随着均质压力的增加而减小。

2.3.2 乳化性与增稠性

多糖经DHPM一定压力或者循环次数的处理,会使其中的亲水与疏水基团更多地暴露出来,增强其亲水亲油的能力。大豆多糖在DHPM处理过程中,处理达4次时,亲水与疏水基团暴露较多,分子质量及粒径分布向中分子质量靠拢,使得乳化性和乳化稳定性达到最高^[21]。Lagoueyte等^[22]研究了DHPM处理对黄原胶功能特性的影响,通过流变性、水化速率、吸水性和分子质量大小考察DHPM处理对黄原胶的影响。研究发现,DHPM处理过程中的高剪切速率、湍流强度和空化效应能够使黄原胶产生有序和无序构象的转变以及聚合物的降解,压力和循环次数均会降低黄原胶的流变性、水化速率、吸水性、分子质量大小等,最终使黄原胶的增稠和稳定性能降低。

2.3.3 凝胶性

DHPM处理会引起多糖分子的展开,其中的高温作用会促进疏水相互作用,分子链间结合力加强,促进凝胶作用。Ronkart等^[23]研究了DHPM处理对菊糖凝胶特性的影响,使菊糖分散体系在质量分数2%、7%和15%,30 MPa条件下微射流循环1、2、5次,结果发现,高剪切应力处理没有引起菊糖化学组成的变化,分散体系出现了类凝胶行为以及黏度的增加,可能是因为菊糖颗粒粒度减小,粒子间相互作用增强所致。通过光学显微镜和电子显微镜观察发现,菊糖颗粒之间及颗粒与水之间相互作用可形成网状凝聚体。

2.3.4 溶解性

豆渣膳食纤维经乳酸菌发酵及DHPM处理后,可溶性膳食纤维含量增加,膨胀力、持水力及结合水力

都得到了不同程度的提高^[24]。Majzoobi等^[25]研究了不同均质压力对玉米淀粉理化性质的影响, 当在140 MPa和200 MPa条件下均质两次后, 淀粉溶液温度从22 ℃升高至47 ℃; 强剪切和高压可能引起淀粉分子链的降解, 随着压力的增大, 淀粉的溶解度增大。

2.3.5 其他性质

微射流处理对物质的光学性质、导电率、固形物含量等也会有一定的影响。经DHPM破碎后的膳食纤维体系出现黏度略有增加、吸光度升高、折光率变小、总固形物含量下降等现象^[26]。Che Liming等^[27]研究发现DHPM处理能够使淀粉浆稀释, 随着压力的增加, 浆液温度升高、表观黏度下降、光透过率增加, 但是淀粉浆的导电率并未受到影响。当压力超过20 MPa时, 肿胀的淀粉颗粒在强烈的机械力作用下崩解, 使其表观黏度迅速下降, 并且由剪切稀释流体向牛顿流体转变, 进一步增加压力会打断淀粉分子长链, 此后, 表观黏度的变化与淀粉的分子质量密切相关。在受到强烈的剪切作用时, 纤维类大分子少部分转化为非消化性的可溶性多糖。

3 多糖结构与理化性质的关系

多糖的理化性质直接或间接受其结构的制约, 在多糖研究领域, 对其结构的研究是继续以后理化性质与生物活性研究的重要依据。因此, 研究多糖结构与性质之间的关系, 能为后续多糖构效关系的研究、多糖理化性质的应用提供理论基础^[28]。目前的研究主要集中在分子质量分布的变化、链的断裂、分支化度的变化对多糖理化性质的影响方面。

3.1 一级结构与理化性质的关系

DHPM处理淀粉, 可使物料之间发生猛烈的撞击和剪切振荡等作用, 引起结构破坏, 侧链部分断裂, 从而减弱分子链的作用力, 同时分子质量分布也发生了变化, 分子结构的改变使分子缠结点减少, 对流动产生的黏性阻力减小, 引起表观黏度降低^[29]。Lazaridou等^[30]研究了分子质量大小对燕麦 β -葡聚糖溶液和凝胶流变学特性的影响, 通过动态流变学研究发现, 所有的 β -葡聚糖样品, 除了最高分子质量的, 都能够形成凝胶, 且随着分子质量的增加, 凝胶时间、凝胶强度增加, 凝胶速率、脆度降低。由差示扫描量热法和动态流变测定法所确定的凝胶网络熔化温度随着 β -葡聚糖分子质量的增大而增加。DHPM处理能够破坏大米直链淀粉的颗粒结构, 使颗粒比表面积增大, 有序结构被打乱, 水分子与羟基结合机会相应增多, 导致DHPM处理后的直链淀粉溶解度增加, 直链淀粉颗粒表面由光滑变得粗糙, 比表面积增大, 暴露出更多的游离羟基, 促进其吸附性能。随着处理压力的增加, 部分支链淀粉的支链断裂使直链淀粉含

量增加, 因为直链淀粉易相互缔合, 使光线发生散射, 减弱光的透射, 从而导致直链淀粉含量越高, 淀粉糊的透明度越低^[31]。

3.2 高级结构与理化性质的关系

多糖的聚集体、三维网状结构、螺旋结构等使多糖溶液具有黏度、凝胶等特性, 姜舟婷^[32]研究发现, 结冷胶在水溶液中时, 摩擦系数会随着浸润时间的增加而增加, 使溶液黏度增大, 体现了结冷胶三维网状结构的不稳定性, 原因可能是高分子链的部分交联点溶解使得高分子链从“刚性”转变到“柔性”。Fariña等^[33]研究了白绢病菌的可溶性硬葡聚糖的分离及其物理化学特性, 主要包括流变性能、分子质量和构象特性。硬葡聚糖在中性或微碱性环境中(<0.15 mol/L NaOH)呈现三螺旋结构, 在高碱性环境中呈现单链状态, NaOH浓度高于0.15 mol/L时, 三螺旋结构解离, 可溶性硬葡聚糖黏度急剧下降。Gong Jianping等^[34]研究了具有负电荷依赖性多糖凝胶在有氧和水存在条件下的摩擦性质, 结果发现, 在外界压力超过一定值后, 结冷胶的交联点会逐渐松开或者解散, 胶凝的表面会溶解在溶液中, 流动行为增加, 表现出良好的润滑性质, 即摩擦系数降低, 在外界压力较大时, 凝胶中流出的液体具有较高的黏性。

研究发现, 膳食纤维内部纤维矩阵的完整度和网络结构对其水化性能影响较大, 万婕^[35]研究了DHPM改性过程中豆渣膳食纤维超分子结构变化与性质间的相关性, 通过多元二次回归方法, 考察粒度、密度和比表面积3个因素对其性质的交互影响。膳食纤维内部结晶结构保存越好、结构越致密, 其膨胀力越大; 膳食纤维的结构越松散, 样品的持水能力越强。改性膳食纤维样品结晶度的大小对膳食纤维酶解速率、溶解度等性质具有较大影响。随着样品结晶度的减小, 膳食纤维的酶解速率增加、溶解度升高、且样品的热稳定性下降。

4 结 语

综上所述, DHPM应用于多糖提取中的研究报道较少, 主要是通过对原料的预处理提高其多糖的得率。DHPM处理对多糖结构影响的研究较多, 主要集中在多糖分子链断裂、聚集体的形成、多糖基团暴露以及多糖表面形态的观察等, 而缺少DHPM处理对多糖在溶液中构象的影响方面的研究, 多糖在溶液中的构象对其理化性质和功能活性具有重要影响, 缺少该部分研究会影响到多糖理化性质及功能活性在实际生产中的应用。

DHPM处理对多糖理化性质影响的研究集中于溶解度、流变性、乳化性、胶凝性方面, 主要通过DHPM处

理次数、压力、剪切速率来研究多糖溶液的黏度、乳化性、起泡性的变化, DHPM技术对多糖凝胶体系黏弹性的研究较少。外界条件如pH值、温度、金属离子等对多糖理化性质的影响研究较多, 但对多糖通过DHPM处理后, 其理化性质在不同pH值、温度、离子强度等条件下变化规律的相关研究较少。

针对以上研究中存在的问题, 今后对DHPM处理对多糖理化性质与结构影响的研究应重点关注以下三方面: 1) 在现有DHPM处理对多糖结构影响的研究基础上, 进一步研究DHPM处理对多糖溶液构象的影响, 构象参数包括单位围长摩尔质量、持久长度、链的直径、高分子特征比等, 并推断其空间构象如无规线团、双螺旋、三螺旋、蠕虫状、棒状链、聚集体等在处理过程中的变化。2) 开展多糖经DHPM处理后, 其理化性质如流变性、凝胶性、溶解度、糊化性质等在外界pH值、温度、离子强度等条件下的变化规律研究, 为其理化性质在实际生产中的应用提供理论支撑依据。3) 采用统计软件进行构象参数、理化性质参数相关性分析, 建立多糖构象与理化性质相互关系的数学模型, 真正揭示多糖构象与理化性质之间的关系, 为多糖的功能化结构设计及加工过程调控奠定理论基础。

参考文献:

- [1] TSAI M L, TSENG L Z, CHEN R H. Two-stage microfluidization combined with ultrafiltration treatment for chitosan mass production and molecular weight manipulation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(4): 767-772.
- [2] 吴雪, 刘斌, 冯涛. 微射流均质机的超微粉碎机理分析[J]. *食品与机械*, 2009, 25(3): 65-68.
- [3] 谢红旗, 周春山, 杜邵龙, 等. 酶法提取, 超滤分离香菇多糖新工艺研究[J]. *食品科学*, 2007, 28(4): 217-219.
- [4] HRMÁDKOVÁ Z, EBRINGEROVÁ A, VALACHOVIČ P. Comparison of classical and ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Salvia officinalis* L.[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1999, 5(4): 163-168.
- [5] 樊黎生, 张声华, 吴小刚. 微波辅助提取黑木耳多糖的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(10): 142-144.
- [6] 涂宗财, 王艳敏, 刘成梅, 等. 动态超高压微射流技术在玉米花粉多糖提取中的应用[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(6): 212-214.
- [7] 姜颖, 涂宗财, 陈媛, 等. 动态超高压微射流预处理对香菇多糖得率的影响[J]. *食品科学*, 2010, 31(24): 62-65.
- [8] 王强, 刘红芝, 钟葵. 多糖分子链构象变化与生物活性关系研究进展[J]. *生物技术进展*, 2011, 1(5): 318-326.
- [9] CHEN Jun, LIANG Ruihong, LIU Wei, et al. Degradation of high-methoxyl pectin by dynamic high pressure microfluidization and its mechanism[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 28(1): 121-129.
- [10] 章文琴, 刘成梅, 刘伟, 等. 动态高压微射流技术对可溶性大豆多糖结构的影响[J]. *食品科学*, 2010, 31(9): 30-34.
- [11] MODIG G, NILSSON L, BERGENSTÅHL B, et al. Homogenization-induced degradation of hydrophobically modified starch determined by asymmetrical flow field-flow fractionation and multi-angle light scattering[J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(7): 1087-1095.
- [12] 余海霞. 动态高压微射流对半纤维素性质和结构的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2008: 55-70.
- [13] KASAAI M R, CHARLET G, PAQUIN P, et al. Fragmentation of chitosan by microfluidization process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2003, 4(4): 403-413.
- [14] 涂宗财, 尹月斌, 张璆, 等. 动态高压微射流对玉米直链淀粉结构的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 32(5): 1379-1382.
- [15] GULREZ S K H, AL-ASSAF S, FANG Yapeng, et al. Revisiting the conformation of xanthan and the effect of industrially relevant treatments[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 90(3): 1235-1243.
- [16] KASEMWONG K, RUKTANONCHAI U R, SRINUANCHAI W, et al. Effect of high-pressure microfluidization on the structure of cassava starch granule[J]. *Starch-Stärke*, 2011, 63(3): 160-170.
- [17] 涂宗财, 王强, 张博, 等. 动态超高压微射流对蜡质玉米淀粉颗粒结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2009, 35(11): 1-4.
- [18] 涂宗财, 张博, 任维, 等. 超高压微射流对玉米淀粉机械力化学效应的研究[J]. *食品工业科技*, 2008, 29(2): 172-174.
- [19] SILVESTRI S, GABRIELSON G. Degradation of tragacanth by high shear and turbulent forces during microfluidization[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 1991, 73(2): 163-169.
- [20] WANG Yong, LI Dong, WANG Lijun, et al. Effects of high pressure homogenization on rheological properties of flaxseed gum[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(2): 489-494.
- [21] 章文琴. 动态高压微射流技术对大豆多糖组分、结构及功能特性的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2010: 40-68.
- [22] LAGOUYEY N, PAQUIN P. Effects of microfluidization on the functional properties of xanthan gum[J]. *Food Hydrocolloids*, 1998, 12(3): 365-371.
- [23] RONKART S N, PAQUOT M, DEROANNE C, et al. Development of gelling properties of inulin by microfluidization[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(4): 318-324.
- [24] 陈媛. 微生物发酵和动态超高压微射流技术对膳食纤维的性质和结构的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2011: 39-69.
- [25] MAJZOBI M, SHAHBAZI M, FARAHNAKY A, et al. Effects of high pressure homogenization on the physicochemical properties of corn starch[C]//Food Symposium, 9-12 April 2013, Leuven, Belgium, 2013.
- [26] 刘成梅, 刘伟, 林向阳. Microfluidizer对膳食纤维溶液物理性质的影响[J]. *食品科学*, 2004, 25(2): 72-75.
- [27] CHE Liming, WANG Lijun, LI Dong, et al. Starch pastes thinning during high-pressure homogenization[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 75(1): 32-38.
- [28] 王兆梅, 李琳, 郭祀远, 等. 多糖结构修饰研究进展[J]. *中国医药工业杂志*, 2002, 33(12): 616-620.
- [29] 张博. 动态超高压微射流技术对蜡质淀粉改性的影响及其机理初探[D]. 南昌: 南昌大学, 2008: 30-77.
- [30] LAZARIDOU A, BILIADERIS C G, IZYDORCZYK M S. Molecular size effects on rheological properties of oat β -glucans in solution and gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2003, 17(5): 693-712.
- [31] 朱秀梅. 大米直链淀粉在动态超高压微射流均质中的机械力化学效应研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010: 26-66.
- [32] 姜舟婷. 生物大分子构象的理论与模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 149-183.
- [33] FARIÑA J I, SIÑERIZ F, MOLINA O E, et al. Isolation and physicochemical characterization of soluble scleroglucan from *Sclerotium rolfsii*. Rheological properties, molecular weight and conformational characteristics[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2001, 44(1): 41-50.
- [34] GONG Jianping, IWASAKI Y, OSADA Y. Friction of gels. 5. Negative load dependence of polysaccharide gels[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2000, 104(15): 3423-3428.
- [35] 万婕. 豆渣膳食纤维动态超高压微射流改性过程中超分子结构变化与性质的关系研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2009: 67-123.