

可溶性膳食纤维提取的研究进展

郑文新, 刘占英, 石雅丽, 胡建华, 朱明达* (内蒙古工业大学, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要 膳食纤维具有多种营养功能特性, 在维持膳食平衡方面发挥重要作用, 根据其水溶性可分为可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维。目前, 提取可溶性膳食纤维的技术主要有物理法、化学法、酶法和微生物发酵法。综述了膳食纤维的定义及性质功能, 重点介绍了可溶性膳食纤维提取方法的研究进展, 并对膳食纤维提取技术的发展和进行了展望。

关键词 膳食纤维; 可溶性膳食纤维; 提取; 应用

中图分类号 TS201.2⁺3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)27-0107-03

Research Progress on Extraction of Soluble Dietary Fiber

ZHENG Wen-xin, LIU Zhan-ying, SHI Ya-li, ZHU Ming-da* et al (Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051)

Abstract Dietary fiber has a variety of nutritional functions and plays an important role in maintaining dietary balance. Dietary fiber may be classified as soluble dietary fiber or insoluble dietary fiber due to its water solubility. Nowadays, the extraction of soluble dietary fiber technology is mainly physical, chemical, enzymatic and microbial fermentation. The definition and function of dietary fiber were summarized. The research progress in the methods of extraction and application of soluble dietary fiber was mainly introduced. The application and process development of soluble dietary fiber were prospected.

Key words Dietary fiber; Soluble dietary fiber; Extraction; Application

随着人们膳食结构的改变和健康意识的增强, 膳食纤维的重要性日益凸显, 越来越多的研究人员专注于有关膳食纤维的研究。膳食纤维中的可溶性膳食纤维不仅能在维持膳食平衡方面发挥重要作用, 而且在预防结肠癌、心血管疾病和降低胆固醇等方面具有重要的生理功能, 同时还可以降低血脂含量、延缓小肠对葡萄糖的吸收速度, 从而预防糖尿病的发生。笔者对近年来国内外的可溶性膳食纤维提取纯化技术进行综述, 为进一步开发利用膳食纤维提供一定的参考。

1 膳食纤维简介

1.1 膳食纤维的定义 2009年6月国际食品法典委员会对膳食纤维作出了新的定义^[1]: 膳食纤维是指聚合度大于等于3的可食碳水化合物, 不能被人类的小肠内源酶水解, 且有以下特点: 天然存在于食物中的可食用碳水化合物, 由可食用原料经物理、酶或化学法获得的碳水化合物, 对健康表现出有益的生理作用。膳食纤维一般由不溶性植物细胞壁材料和细胞内非淀粉的水溶性多糖组成, 不同种类食物的膳食纤维组成、功能以及植物多糖的结构亦不同。

1.2 膳食纤维的分类 根据膳食纤维在水中的溶解性, 其被分为可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维。可溶性膳食纤维如 β -D-葡聚糖, 是一种水溶性多糖。此外, 水溶性也受某些官能团的存在、温度和离子强度的影响, 如果胶、瓜尔胶及黄原胶等亲水胶体。相比谷物而言, 水果和蔬菜中的膳食纤维大部分可溶, 可溶比例越高, 对健康的影响越重要^[2]。

1.3 膳食纤维的性质与功能 膳食纤维的物理化学性质主

要有持水力、膨胀力、持油力等。膳食纤维的水化性质主要是持水力和膨胀力。持水力是指1g干重的纤维在一定条件下束缚水、动力水和物理束缚水的总和。膨胀力是指纤维浸入水中, 对水的吸收能力。除了水化性能, 膳食纤维还具有对油的吸附能力, 持油力是指纤维和油混合离心后油保留的质量。这是一种与膳食纤维多糖结构、颗粒的表面性质、总电荷密度和亲水性相关的特性。

膳食纤维有控制体质、预防肥胖的作用。膳食纤维在大肠内发酵, 提供的能量低于普通碳水化合物。某些膳食纤维如菊粉可以在小肠内与蛋白质、脂肪等物质形成复合物, 不利于对蛋白质和脂肪的吸收, 从而达到一定的减肥作用^[3]。膳食纤维的水化作用可使粪便湿润、松软、量多、表面光滑, 可促进排便从而起到防治痔疮的作用^[4]。

2 可溶性膳食纤维的提取

目前, 对于不同来源的可溶性膳食纤维的提取技术有物理法、化学法、酶法和微生物发酵法。提取温度、提取时间、pH和溶剂等操作条件决定了可溶性膳食纤维的得率、结构和功能特性。目前的研究主要集中在提取技术和操作条件的组合优化, 在获得产品预期的收益和功能特性的同时, 尽量选择适宜的温度, 减少溶剂的消耗和操作的时间。

2.1 物理提取 物理法在可溶性膳食纤维的提取中应用广泛, 用物理法对原料进行预处理可改善膳食纤维的一些性质。传统的浸提法对膳食纤维进行提取可获得较高的提取率, 而一些新兴技术如微波、超声波和高压处理等, 与传统提取方法相比具有更好的效果。

2.1.1 物理和机械预处理。 Raghavendra等^[5]研究发现, 采取研磨减小膳食纤维粒子尺寸(550~1127 μ m)会提高水化性能, 然而低于550 μ m时水化性能会随着尺寸的减小而减弱。微射流技术对桃和燕麦中的不溶性膳食纤维的影响显示^[6], 当粒径达到亚微米级时, 一些不溶性膳食纤维变为可溶。经微射流后, 桃和燕麦中不溶性膳食纤维的平均粒径分

基金项目 国家自然科学基金项目(61361016); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(2013151412000); 呼和浩特市厅产学研协同创新科技合作项目(2015150103000137)。

作者简介 郑文新(1993—), 男, 辽宁锦州人, 硕士研究生, 研究方向: 生物质资源化利用。* 通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事生物质资源化利用研究。

收稿日期 2017-07-31

别从 204.6、111.1 μm 减少到 35.3、74.4 μm 。微射流处理后桃中膳食纤维的溶解性、持水力、膨胀力和持油力分别提高了 2.1、1.5、2.2 和 3.1 倍,而燕麦中分别提高了 3.6、2.1、1.3 和 3.7 倍。Zhu 等^[7]将小麦麸皮膳食纤维进行超细粉碎,发现其持水力及膨胀力均显著降低。研究表明^[5-7],减小孔径会增强锁水能力使水化性能增强,但是某些情况下,孔径减小会损伤纤维,使毛孔崩坏,导致水化性能下降。

2.1.2 浸提法。浸提法是提取蔬菜中膳食纤维的最常用的方法之一,一些膳食纤维甚至可在室温下搅拌得到,在高温下可得到更大的收益,然而浸提法提取率低于酶法或化学法。浸提法的水温、pH 和时间等条件的控制取决于要提取的膳食纤维的特性。一般情况下水温在 60~100 $^{\circ}\text{C}$,提取时间在 20 min~12 h。

Yeoh 等^[8]提到,提取果胶的常用方法是直接煮 2 h 以上。然而,由于长时间加热,有些多糖会降解。Basanta 等^[9]利用浸提法在不同的温度下提取李子中的果胶,提取时间为 2 h 以上,收率达 12%。随着加热时间变长,果胶的平均分子量下降。使用沸水煮时果胶产量显著增加,但果胶的黏度较低。Guo 等^[10]同样对橘皮热提取 1 h (80~82 $^{\circ}\text{C}$) 后,果胶产率达 15.47%。Ales 等^[11]用同样的方法对香菇进行了提取 (90 $^{\circ}\text{C}$, 30 min),提取出的多糖用于制药、化妆品和保健品。

研究表明^[8-9],浸提法破坏了多糖结构中相对较弱的糖苷键,导致细胞膨胀和破裂,引发颗粒粒径减小,从而增加细胞的表面积,改变多糖的性质。浸提温度增加对膳食纤维造成的影响最大,会导致质量大幅度降低。因此,有时此法会与酸性介质、溶剂、螯合剂或新技术结合,有助于从细胞壁中释放膳食纤维。

2.1.3 微波和超声波法。微波和超声波常用来辅助膳食纤维的提取,与传统的提取方法相比,其效率更高。微波通过引起细胞破裂来提取物质中的各种化合物。微波使生物体内产生热,在非均质材料内建立一个加热点,粒子爆炸,导致木质纤维素结构破裂^[12]。温度的快速增加,降低了黏度,并打破了样品的外膜,提高了提取率。超声波制造了一个连续的从高到低的压力周期,创造小气泡,气泡猛烈破裂引起气蚀。这种现象产生强烈的剪切力,使溶剂在固体中穿透的更深,从而增加了扩散速率^[13]。这个过程会导致植物组织细胞结构的破坏,溶剂更易达到细胞内部,从而更有效地释放细胞成分。

一项研究^[14]对常规法和微波辅助法提取果胶进行了比较,微波辅助法 (500 W, 3 min) 的收率为 24.2%,而传统的浸提法 (120 min) 的收率为 18.32%。Seixas 等^[15]对时间和微波功率对酸性介质中果胶得率的影响进行了研究,在 628 W 下进行 9 min 得到的收率最高。Guo 等^[10]在 500 W 下提取橘皮果胶 21 min,产率为 18.13%。

Xu 等^[16]将超声波法和浸提法结合在一起对柚子皮中的果胶进行提取,这 2 种方法的结合显著提高了提取率,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下处理 52 min 收率最高。Wang 等^[17]对超声辅助加热

提取和非辅助加热提取进行了比较,最佳的提取条件是 12.56 W/cm², 66.71 $^{\circ}\text{C}$, 27.95 min,提取率为 27.34%。与传统方法相比,超声波辅助提取率增加了 16.34%,温度降低了 13.3 $^{\circ}\text{C}$,时间减少了 37.78%。Benito-Román 等^[13]用超声辅助提取法提取小麦中的 β -葡聚糖,处理强度低时得到的 β -葡聚糖的分子量较高但提取率较低,而高强度的处理会导致 β -葡聚糖解聚。

2.1.4 高压法。高压处理已经成为提取可溶性膳食纤维的新兴技术。因为压力不受质量和时间的影响,高压处理法不同于常规的热处理,其具有均匀和瞬时的效果,同时该方法的主要优势是处理时间短。

高压处理法提取膳食纤维时,处理过程中可能发生结构修改,使膳食纤维的性质和功能改变。Guo 等^[10]研究了利用高压技术对果胶进行提取 (压力 100~600 MPa,处理时间 5~30 min,温度 10~30 $^{\circ}\text{C}$)。此法的最佳条件 (500 MPa, 55 $^{\circ}\text{C}$, 10 min) 的收益率 (20.44%) 明显高于传统的热法 (15.47%) 和微波法 (18.13%)。此外,得到的果胶黏度、流变特性、活化和凝胶特性都比热提取高。Mateos-Aparicio 等^[18]利用高静压技术改善了大豆豆渣中膳食纤维的功能。经高压处理后,豆渣中可溶性膳食纤维的含量由原来的 2.08% 变为 16.86% (60 $^{\circ}\text{C}$, 400 MPa),可溶性膳食纤维占比由原来的 4.6% 变为 37.2%,膳食纤维的持水力、膨胀力、持油力分别从原来的 6.84 g/g、9.09 mL/g、3.78 g/g 增加到 12.56 g/g、12.92 mL/g、7.97 g/g。

2.2 化学提取 化学提取法常用于获得不同来源的膳食纤维,经常在酸或碱条件下结合高温对可溶性膳食纤维进行提取。化学法的主要缺点是时间和温度等处理条件可能对食品基质造成损伤,同时这种方法可能会使提取出的多糖的官能团损坏,导致膳食纤维的功能丧失。

Xiong 等^[19]在酸性条件下 (115 $^{\circ}\text{C}$, 100 min, pH 4.5) 从蛋白质析析后的甘蔗渣中提取可溶性膳食纤维。在碱性条件下处理甘蔗渣温度在 50~90 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,时间为 1.5~3.0 h, pH 为 9~13。酸处理与碱处理相比膳食纤维的酯化程度低,并且分子量也较低。作者指出,多糖的分子量随着酯化程度的增加而增加,酯化度低的多糖具有较低的水性黏度和较好的乳活性。

Kosmala 等^[20]将乙醇不溶物去除后得到细胞壁多糖,并进行了一系列连续萃取,用水释放结合较弱的果胶,接着用 CDTA 释放由钙结合到细胞壁的果胶,Na₂CO₃ 提取高度甲基化的果胶,最后用 NaOH 和 NaBH₄ 处理 24 h 以释放半纤维素和其余废渣。

虽然化学法需要较长的处理时间和较高的处理温度,但仍然被广泛采用。目前科研人员一直采用改变溶剂或使用氧化剂、螯合剂等方法优化处理条件,从而提高膳食纤维的功能特性。

2.3 酶法提取 化学或物理提取过程是高效的,但是这些方法提取出的膳食纤维只有一部分在上消化道内可被吸收,而酶法提取的条件可模拟消化系统中的条件,提取的膳食纤

维吸收利用率更高。体外消化最常用的生物分子有胰酶、胃蛋白酶、胰蛋白酶、胰凝乳蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶。

Gamel 等^[21]测定了淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶对从燕麦麸皮中获得的 β -葡聚糖的溶解度和黏度的影响。加入酶使黏度增加,并促进燕麦麸皮多糖的释放。Villanuevasuárez 等^[22]对豆渣进行了一系列的酶提取,酶提取法导致可溶性膳食纤维的组分增加,并且提高了可溶与不溶纤维的比例。Meyer 等^[23]用酶法(62.5 °C, pH 3.5, 1 h)从无淀粉马铃薯浆中提取出了具有高分子量的果胶。Dominiak 等^[24]使用商业酶从橙皮中提取果胶,在 50 °C 下处理 4 h 得到最高产率(23%),其果胶的功能特性(如凝胶强度和黏度)与酸提取的果胶相似。陈小举等^[25]采用半纤维素酶水解法从梨渣中提取可溶性膳食纤维,在 58 °C 下添加 35 U 半纤维素酶,酶解 5 h 得到最高提取率 15.21%。相似地,李梁等^[26]利用纤维素酶(60 U/g, 49 °C, 7 h)辅助提取苹果梨渣中的可溶性膳食纤维,最佳得率为 15.31%。

酶法提取成功地克服了一些酸处理方法的缺点,如高温、低 pH、酸腐蚀并且需要中和以及去除过程中产生的大量的废物,但几乎所有的酶法提取都需要较长的时间和较高的温度。最近的研究发现^[27],用最小的酶处理作为一种创新的方法提取膳食纤维,通过最优的处理条件可在短时间内获得大量的膳食纤维。Thomassen 等^[28]发现了从马铃薯渣提取多糖的最佳条件:用 1% (W/W) 来自构巢曲霉的果胶裂解酶和来自棘孢曲霉的多聚半乳糖醛酸酶处理 1% (W/W) 马铃薯渣(pH 6, 60 °C, 1 min)。研究发现,酶提取技术与其他技术结合可提高膳食纤维的产量和功能。

2.4 微生物发酵法 发酵法是利用微生物发酵,消耗原料中的碳源、氮源,除去原料中的植酸,减少蛋白质、淀粉等成分,制取可溶性膳食纤维。主要采用曲霉、乳酸菌和链孢霉等微生物。曲霉发酵麦麸、果渣或豆渣是通过菌体分泌纤维素酶、半纤维素酶类物质,使不溶性纤维的糖苷键断裂,生成小分子多糖,转化为水溶性纤维,从而改善膳食纤维的生理活性。

令博等^[29]利用保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌混合菌作为发酵菌种在 40 °C 下发酵 21 h,从葡萄皮渣中提取出可溶性膳食纤维(17.25%)。王庆玲等^[30]以番茄皮渣为原料制备可溶性膳食纤维,他们发现,微生物发酵法制备番茄皮渣膳食纤维的最优工艺为接种量 0.2%、发酵温度 24 °C、pH 4,此条件下 SDF 的得率为 39.02%。

3 应用与展望

可溶性膳食纤维在食品工业中具有非常广泛的应用,其经常作为一种食品添加剂应用于食品工业中。如将膳食纤维添加到面点中可增强面团的吸水率、延长稳定时间并且增强面点的弹性^[31]。在肉制品中添加可溶性膳食纤维可增强口感、提高出品率、降低成本并且具有降脂作用,尤其适用于糖尿病患者^[32]。在饮料中添加可溶性膳食纤维可使微粒分布均匀、久存无沉淀、无胶质感还可以起到保健作用^[33]。

我国是人口大国同时也是食品产业大国,拥有丰富的食品加工副产物资源,为减少资源浪费并且保护环境,应加大

副产物的开发与利用,因此,开发与利用食品加工副产物资源已经成为了一种趋势。膳食纤维广泛存在于各种食品加工的副产品中,因其特殊的营养功能受到医学界、食品界乃至普通民众的广泛关注。目前国外提取膳食纤维的主要方法为化学法,拥有成熟的技术,已经应用到工业化生产中。但由于在加工过程中会对膳食纤维的理化性质产生影响,从而使其丧失营养保健功能,并且加工过程还会产生大量废物对环境造成污染,因此,目前研究人员一直在寻找一种条件温和且环保的方法代替传统方法,而酶法、微生物发酵法以及新兴技术(微波、超声波、高静压)因其条件温和且对环境无污染越来越受到研究人员的关注。

参考文献

- [1] MOLIST F, OOSTRUM M V, PÉREZ J F, et al. Relevance of functional properties of dietary fibre in diets for weanling pigs[J]. *Animal feed science & technology*, 2014, 189(3): 1-10.
- [2] ELLEUCH M, BEDIGIAN D, ROISEUX O, et al. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review[J]. *Food chemistry*, 2011, 124(2): 411-421.
- [3] 穆莎茉莉, 李洪军, 刘丽娜. 菊粉生理功能研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2006(6): 47-48.
- [4] 韩俊娟, 木泰华, 张柏林. 膳食纤维生理功能的研究现状[J]. *食品科技*, 2008, 33(6): 243-245.
- [5] RAGHAVENDRA S N, SWAMY S R R, RASTOGI N K, et al. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber[J]. *Journal of food engineering*, 2006, 72(3): 281-286.
- [6] CHEN J L, GAO D X, YANG L T, et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble fiber[J]. *Food research international*, 2013, 54(2): 1821-1827.
- [7] ZHU K X, HUANG S, PENG W, et al. Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber[J]. *Food research international*, 2010, 43(4): 943-948.
- [8] YEOH S, SHI J, LANGRISH T A G. Comparisons between different techniques for water-based extraction of pectin from orange peels[J]. *Desalination*, 2008, 218(1/2/3): 229-237.
- [9] BASANTA M F, PONCE N M A, ROJAS A M, et al. Effect of extraction time and temperature on the characteristics of loosely bound pectins from Japanese plum[J]. *Carbohydrate polymers*, 2012, 89(1): 230-235.
- [10] GUO X F, HAN D M, XI H P, et al. Extraction of pectin from navel orange peel assisted by ultra-high pressure, microwave or traditional heating: A comparison[J]. *Carbohydrate polymers*, 2012, 88(2): 441-448.
- [11] ALES P, ESCAUT A, CHOULOT J C. Polysaccharide extract of *Lentinus* and pharmaceutical, cosmetic or nutraceutical compositions comprising such an extract: US8383127[P]. 2013.
- [12] SARKAR N, GHOSH S K, BANNERJEE S, et al. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview[J]. *Renewable energy*, 2012, 37(1): 19-27.
- [13] BENITO-ROMÁN Ó, ALONSO E, COCERO M J. Ultrasound-assisted extraction of β -glucans from barley[J]. *LWT-Food science and technology*, 2013, 50(1): 57-63.
- [14] MERYEM B, CHAHRAZED B, LOIC P, et al. Bio-refinery of orange peels waste: A new concept based on integrated green and solvent free extraction processes using ultrasound and microwave techniques to obtain essential oil, polyphenols and pectin[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2014, 24: 72-79.
- [15] SEIXAS F L, FUKUDA D L, TURBIANI F R B, et al. Extraction of pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) by microwave-induced heating[J]. *Food hydrocolloids*, 2014, 38: 186-192.
- [16] XU Y T, ZHANG L F, BAILINA Y, et al. Effects of ultrasound and/or heating on the extraction of pectin from grapefruit peel[J]. *Journal of food engineering*, 2014, 126(4): 72-81.
- [17] WANG W J, MA X B, XU Y T, et al. Ultrasound-assisted heating extraction of pectin from grapefruit peel: Optimization and comparison with the conventional method. [J]. *Food chemistry*, 2015, 178: 106-114.

表7 2010—2015年土地利用面积转移矩阵
Table 7 Land use transition matrix from 2010 to 2015

土地利用类型 Land use type	道路 Road	堤坝 Dams	湖泊 Lake	荒草地 Wasteland	建设用地 Construction land	芦苇湿地 Reed wetlands	绿地 Green land	农田 Farmland	湿地 Wetlands	水口 Water outlet	盐田 Salina	养殖池塘 Breed pond	2015年合计 Total in 2015
草地 Grassland	—	167	—	1 463	464	163	60	13	1 834	11	2 077	139	6 391
道路 Road	1 121	17	—	—	—	—	—	—	—	2	166	—	1 306
堤坝 Dams	10	441	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	451
湖泊 Lake	—	—	241	—	—	—	—	—	—	—	—	—	241
建设用地 Construction land	28	1	—	396	3 406	—	38	99	396	5	415	158	4 942
绿地 Green land	—	—	4	—	4	2	509	—	24	—	—	—	543
农田 Farmland	—	—	—	—	—	—	—	75	—	—	—	51	126
湿地 Wetlands	21	16	6	10	63	11	—	34	449	16	524	136	1 286
水口 Water outlet	—	2	—	—	—	—	—	—	22	864	14	1	903
盐田 Salina	86	153	—	—	—	—	—	—	—	8	7 192	310	7 749
养殖池塘 Breed pond	12	76	—	—	61	—	—	74	84	8	647	4 737	5 699
2010年合计 Total in 2010	1 278	873	251	1 869	3 998	176	607	295	2 809	914	11 035	5 532	29 637

从以上分析可以看出,研究区域用地类型变化几乎都受到了人类活动的干预,随着当地经济发展战略重心的转移,土地利用空间格局在2005年后也随之发生了巨大的变化。

3 结论

(1)从生态学的角度来看,1990—2005年研究区域自然状态下生态过程相对稳定,景观边界形状复杂度和破碎度变化不大;2005年以后生态过程活跃度下降,不再处于稳定状态,景观边界复杂度和破碎度减小,土地利用类型增加并呈均衡化分布。

(2)从土地利用变化来看,2005年之前,土地利用类型面积的转化主要集中在盐田和养殖池塘上,且转化面积相对较小,整体土地利用方式和面积变化不大;2005年之后,随着营口南部海岸经济发展战略重心的转移,围填海不断加剧,原来大面积的低效盐田被回填,在西南部地区出现大量的鱼

虾养殖池塘,中部地区出现大面积的草地,北部由于城市化蔓延,建设用地持续增加。

参考文献

- [1] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1133-1142.
- [2] 索安宁, 关道明, 孙永光, 等. 景观生态学在海岸带地区的研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3167-3175.
- [3] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [4] 吴涛, 赵冬至, 张丰收, 等. 基于高分辨率遥感影像的大洋河口湿地景观格局变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1833-1840.
- [5] WALZ U, STEIN C. Indicators of hemeroby for the monitoring of landscapes in Germany [J]. Journal for nature conservation, 2014, 22(3): 279-289.
- [6] 肖翠, 解雪峰, 吴涛, 等. 浙江西门岛湿地景观格局与人为干扰度动态变化[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3255-3262.
- [7] 陶蕴之, 张甜, 梁琦珍, 等. 基于转移矩阵的环渤海土地利用研究[J]. 绿色科技, 2016(2): 4-7.
- [8] MATEOS-APARICIO I, MATEOS-PEINADO C, RUPÉREZ P. High hydrostatic pressure improves the functionality of dietary fibre in okara byproduct from soybean[J]. Innovative food science & emerging technologies, 2010, 11(3): 445-450.
- [9] XIONG X H, ZHAO L P, CHEN Y M, et al. Effects of alkali treatment and subsequent acidic extraction on the properties of soybean soluble polysaccharides[J]. Food & bioproducts processing, 2014, 94: 239-247.
- [10] KOSMALA M, MILALA J, KOŁODZIEJCZYK K, et al. Dietary fiber and cell wall polysaccharides from plum (*Prunus domestica* L.) fruit, juice and pomace: Comparison of composition and functional properties for three plum varieties[J]. Food research international, 2013, 54(2): 1787-1794.
- [11] GAMEL T H, ABDEL-AAL E S M, AMES N P, et al. Enzymatic extraction of beta-glucan from oat bran cereals and oat crackers and optimization of viscosity measurement[J]. Journal of cereal science, 2014, 59(1): 33-40.
- [12] VILLANUEVASUÁREZ M J, PÉREZCÓZAR M L, REDONDOCUENCA A. Sequential extraction of polysaccharides from enzymatically hydrolyzed okara byproduct: Physicochemical properties and *in vitro* fermentability [J]. Food chemistry, 2013, 141(2): 1114-1119.
- [13] MEYER A S, DAM B P, LÆRKE H N. Enzymatic solubilization of a pectinaceous dietary fiber fraction from potato pulp: Optimization of the fiber extraction process[J]. Biochemical engineering journal, 2009, 43(1): 106-112.
- [14] DOMINIAK M, SØNDERGAARD K M, WICHMANN J, et al. Application of enzymes for efficient extraction, modification, and development of functional properties of lime pectin[J]. Food hydrocolloids, 2014, 40(11): 273-282.
- [15] 陈小举, 吴学凤, 姜绍通, 等. 响应面法优化半纤维素酶提取梨渣中可溶性膳食纤维工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 18-23.
- [16] 李梁, 聂成玲, 薛蓓, 等. 响应面法优化酶辅助提取苹果梨渣中可溶性膳食纤维工艺及品质分析[J]. 中国食品添加剂, 2017(1): 156-163.
- [17] THOMASSEN L V, VIGSNÆS L K, LICHT T R, et al. Maximal release of highly bifidogenic soluble dietary fibers from industrial potato pulp by minimal enzymatic treatment[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2011, 90(3): 873-884.
- [18] THOMASSEN L V, LARSEN D M, MIKKELSEN J D, et al. Definition and characterization of enzymes for maximal biocatalytic solubilization of prebiotic polysaccharides from potato pulp[J]. Enzyme & microbial technology, 2011, 49(3): 289-297.
- [19] 令博, 田云波, 吴洪斌, 等. 微生物发酵法制取葡萄皮渣膳食纤维的工艺优化[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 178-182.
- [20] 王庆玲, 朱莉, 孟春棉, 等. 微生物发酵法制备番茄皮渣膳食纤维工艺优化[J]. 粮食与油脂, 2014(9): 52-55.
- [21] 赵振玲, 于功明, 刘洪武, 等. 海藻酸钠对面条质构影响的研究[J]. 粮食加工, 2008, 33(1): 78-81.
- [22] 刘云, 蒲彪, 张瑶. 膳食纤维在功能性肉制品中的应用[J]. 肉类研究, 2007(4): 30-32.
- [23] 陈思奇. 膳食纤维饮料生产工艺的研究[J]. 饮料工业, 2011, 14(8): 27-29.

(上接第109页)