

乳酸菌微胶囊包埋技术与常用壁材的研究进展

Research progress of lactic acid bacteria microcapsule encapsulation technology and common wall materials

刘仁杰 李哲 毛思凝 梁珊 赵悦 王玉华

LIU Ren-jie LI Zhe MAO Si-ning LIANG Shan ZHAO Yue WANG Yu-hua

(吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林 长春 130118)

(College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

摘要:从提高乳酸菌在人体胃肠道的生存率出发,概述了微胶囊包埋技术的定义和发展历史,对几种微胶囊包埋技术界面聚合法、相分离法、喷雾干燥法、锐孔法、高压静电喷雾干燥法等优缺点进行分析;并结合乳酸菌微胶囊的常用壁材和乳酸菌包埋方法进行探讨,指出复配包埋、多层包埋和添加益生元等对乳酸菌的影响。

关键词:乳酸菌;微胶囊;包埋;常用壁材

Abstract: Improving the survival rate of lactic acid bacteria in human gastrointestinal tract, the article outlines the definition and development history of microcapsule encapsulation technology, and the commonly used and new microcapsule encapsulation technology. The advantages and disadvantages of interfacial polymerization, phase separation, spray drying, extrusion and high-pressure electrostatic spray drying methods were analyzed. The method of lactic acid bacteria encapsulation was discussed with the common wall materials of lactic acid microcapsules. Combined with the common wall materials of lactic acid bacteria microcapsules, the lactic acid bacteria encapsulation method was discussed, and the effects of compound encapsulation, multi-layer encapsulation and prebiotic supplementation on lactic acid bacteria were pointed out.

Keywords: lactic acid bacteria; microcapsules; encapsulation; common wall material

乳酸菌是对从发酵性碳水化合物中产生的大量乳酸的革兰氏阳性细菌的通称^[1]。乳酸菌隶属于乳酸菌科,形态差异大,有长杆、短杆或圆形^[2]。一些乳酸菌是人和

动物胃肠道和雌性生殖道的共生菌,可以改善人和动物的健康状况^[3],乳酸菌的益生功能在医药、食品和饲料等领域研究广泛。乳酸菌对肠道菌群具有重要影响,可与肠道有害微生物形成拮抗作用,抑制外袭菌的生长和定植,产生抗菌性代谢产物^[4]。部分乳酸菌还能激活特异性和非特异性免疫细胞,提高机体的免疫功能^[5]。乳酸菌细胞壁具有与变异原性物质结合的能力,使变异原不能活化,从而减弱或消除变异原物质的毒害作用^[6]。此外,乳酸菌能抑制致突变酶的活性及一些致癌物,起到抗肿瘤作用。

乳酸菌在肠道的活菌数 $>10^6$ CFU/mL 时才能发挥益生作用^[7]。然而绝大多数乳酸菌对不良环境抵抗力差,加工过程中易受温度、氧气、溶剂和机械压迫等影响,在人体消化道中易受胃酸和胆盐胁迫使活菌数大量降低,最终无法发挥益生功效。乳酸菌微胶囊包埋技术是一种乳酸菌的保护措施,可以增强菌体对外界不良环境的抵抗力,显著提高菌体的存活率,使其在肠道中定植,充分发挥乳酸菌益生功能^[8-11]。文章就乳酸菌微胶囊包埋技术的优缺点及改进常用壁材的包埋方法进行综述,以期对乳酸菌微胶囊的研究和应用提供理论参考和技术支撑。

1 包埋技术概述

微胶囊包埋是用特殊手段将需要包被的物质包裹在微小封闭的聚合物薄膜中形成 $1\sim 500\ \mu\text{m}$ 微囊的技术^[12-13]。被包埋的物质称为芯材,包埋使用的材料称为壁材。微胶囊技术将芯材与外界环境隔离,达到保护效果。在适当条件下,通过某些外部刺激和缓释作用,芯材物质能定点释放^[14]。

微胶囊包埋技术始于 20 世纪 30 年代,1936 年大西洋海岸渔业公司首次在液体石蜡中制备了鱼肝油明胶微胶囊并申请专利。1957 年穆尔企业公司申请了喷雾干燥制备微胶囊的专利,促进了微胶囊产业的发展。1958 年,各国申请了 20 多项关于微胶囊的专利,其中包括了相分

基金项目:科技部国家重点研发计划项目(编号:2017YFE0105400);吉林农业大学 2018 年省级大学生创新创业训练计划项目(编号:2018078)

作者简介:刘仁杰,女,吉林农业大学副教授,博士。

通信作者:王玉华(1972—),女,吉林农业大学教授,博士后。

E-mail: yuhua-ww@163.com

收稿日期:2019-05-12

离法制备微胶囊和明胶微胶囊固定化等,微胶囊制备技术的发明使微胶囊产业进入快速发展阶段。70 年代后,微胶囊技术的成熟扩展了微胶囊的应用范围,进入医药、农业、食品等行业^[15]。

2 微胶囊包埋方法对乳酸菌活性的影响

2.1 界面聚合法

界面聚合法是将两种活性单体分别溶解在两种不互溶的溶剂中,再使两种溶液进行不可逆的聚合反应,并在溶液界面处析出不溶性聚合物^[16]。界面聚合法的工艺成熟,反应条件温和,设备比较简单,反应迅速,易得到高分子量的聚合物。它适用于合成聚酰胺、聚亚胺酯等工业产品。但界面聚合的交联剂普遍存在毒性,影响乳酸菌的生存率,同时对人体有潜在危害,故难以广泛运用^[17]。此外,后续物料处理工艺繁杂,难以广泛推广。

2.2 相分离法

相分离法是通过改变温度、pH 值或加入凝聚剂等方法将芯材与壁材混合溶液的溶解度降低,凝聚形成浓稠液体并包裹芯材形成微胶囊的方法^[18]。根据分散介质以及芯材在水中溶解性的不同,可以将相分离法分为水相分离法和油相分离法。相分离法操作简单,材料来源广,在食品、药品中运用广泛。Silva 等^[19]使用相分离法制备双歧杆菌 Bb-12 微胶囊,包埋率达到 99.52%,与未经包埋的乳酸菌相比耐酸性显著增强,然而微胶囊粒径分布较宽,对乳酸菌的保护效果存在个体差异性。此外相分离法制备乳酸菌微胶囊过程中易出现微胶囊聚集,增加加工时间及成本。而且制备过程中的温度和 pH 值会影响微胶囊包埋效果,降低乳酸菌生存率,限制了相分离法的运用。

2.3 喷雾干燥法

喷雾干燥法是将芯材壁材分散均匀形成乳化液,通过雾化装置雾化成微小液滴,进一步受热干燥固化形成粉状微胶囊^[20]。喷雾干燥技术成熟,生产效率高,成品分散性好且适合连续生产。谢桂勉^[21]将乳酸菌进行喷雾干燥,发现乳酸菌生存率仅为 17.1%,表明高温干燥会大幅度降低乳酸菌的活性,改善高温制备条件是保证乳酸菌生存率的关键。吴德龙等^[22]发现进风口温度会影响乳酸菌活性,进风口温度 80 °C 以上时乳酸菌生存率会迅速下降。而郭云等^[23]研究发现,出风口温度对微胶囊的影响显著大于进风口,当出风口温度为 85 °C,菌体存活率仅为 33.18%,降低进风口温度,能改善微胶囊性能,提高乳酸菌活性。此外,Wongsasulak 等^[24]发现木薯淀粉颗粒具有耐热性能,其与蛋清蛋白形成的混合壁材可降低喷雾干燥对乳酸菌的损伤。喷雾干燥法生产效率高,但处理温度普遍较高,用于规模化生产的喷雾干燥设备体积较大且价格昂贵。

2.4 高压静电喷雾干燥法

高压静电喷雾干燥法是用喷枪将芯材溶液在电场作用下进行喷射,通过调节电场强度,改变芯材与壁材的表面张力,从而形成雾状液滴,最终在固化液作用下形成微胶囊^[25]。此法无需使用有机溶剂,作用条件温和,可调节微胶囊的粒径大小,反应迅速,生产效率高^[26]。Piyigraisrn 等^[27]运用高压静电喷雾干燥法快速制备的嗜酸乳杆菌微胶囊包埋率达到 90% 左右。此外,此法还可以与其他干燥技术结合,提高微胶囊性能。Yao 等^[28]运用高压静电喷雾干燥法与冷冻干燥法包埋的唾液乳杆菌具有较好的耐酸能力,与未经包埋的唾液乳杆菌相比,在模拟胃肠道试验中活菌数提高了 4 个对数级。目前高压静电喷雾干燥法在中国运用仍较少。

2.5 锐孔法

锐孔法是将芯材与壁材制成混合溶液滴入硬化液中,通过调节针或喷嘴的规格和下落的距离制备不同大小和形状的微胶囊。锐孔法操作简单,作用条件温和,包埋效率高,成本低,在乳酸菌包埋中被广泛运用。锐孔法可与其他干燥方式结合使用提高微胶囊性能。Janja 等^[29]将锐孔法与冷冻干燥法结合降低了微胶囊的水分活度,使乳酸菌活菌数在 2 个月内维持在 2×10^8 CFU/g 以上。然而,锐孔法生产效率低,难以形成规模化生产,且制备的微胶囊粒径较大,一般在 2 mm 左右。Silva 等^[30]发现将锐孔法与流化床干燥法结合制得海藻酸钠与虫胶混合物包埋的副干酪乳杆菌 BGP-1 微胶囊,微胶囊粒径为 0.71~0.86 mm,可降低微胶囊的粒径,并延长储藏期。

2.6 其他微胶囊包埋方法

此外,还有许多研究者进行不同类型的微胶囊研究。李清等^[31]使用微流体数字化喷射制备细胞微胶囊,研究表明通过驱动电压和微喷嘴内径控制细胞微胶囊的粒径大小和分布,平均粒径可小至 28 μm ^[31]。此法以外部宏驱动器影响微流道内部流动,可实现流体的序列可控,形成一定程度的生产自动化处理。张玉东等^[32]使用流体震动技术制备海藻酸钙微胶囊,研究表明通过对流体施加一定压力,使层流流体流速恒定,品质更稳定,其次在喷嘴部位施加一定的震动效果可使液滴之间分散效果更好。目前这些微囊化技术的研究尚未成熟,运用于乳酸菌包埋的研究仍未见报道。

3 乳酸菌微胶囊常用壁材的不足及改进方法

3.1 常用壁材

目前乳酸菌微胶囊的常用壁材有海藻酸钠和蛋白类等。海藻酸是从不同种类的海藻中提取的由 D-甘露糖醛酸和 L-古洛糖醛酸作为结构单元组成的杂多糖^[33]。海藻酸钠分子链上有许多游离亲水性基团(羟基和羧

基), Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Al^{3+} 等能占据海藻酸钠中的亲水空间, 并与羧基官能团上的氧原子螯合, 形成三维网状结构凝胶, 将菌体包埋其中^[34]。此过程反应速度快, 反应条件温和。尽管海藻酸钠作为壁材被广泛运用, 但也有不足之处: ① 海藻酸钠微胶囊表面孔径较大, 易造成细胞流失, 影响包埋率, 同时不能有效控制胃酸进入, 影响乳酸菌活性; ② 在极低 pH 值下海藻酸钠分子会被降解, 凝胶解聚, 保护效果下降; ③ 螯合物与阴离子能使海藻酸钠凝胶解聚, 仅用海藻酸钠包埋乳酸菌易出现突释和早释, 这种情况在进入肠道的初期较易出现, 进而使乳酸菌暴露在高胆盐环境下, 影响活性。

蛋白类壁材主要有乳清分离蛋白、大豆分离蛋白和明胶等。乳清分离蛋白亲水亲油, 可以迅速在芯材物质表面进行分子重排, 聚集形成致密均匀的蛋白质膜。乳清蛋白中的 β -乳球蛋白在低 pH 值下能够保持结构完整, 使乳清蛋白微胶囊具有良好的耐酸性^[35]。大豆分离蛋白中的蛋白分子具有较大数量的碱性氨基酸残基, 能够中和入侵微胶囊 H^+ , 维持微胶囊内部 pH 值的中性环境, 从而保护乳酸菌活性^[36]。明胶是胶原蛋白部分水解的一种天然高分子产物, 在低温条件下能形成凝胶结构。当环境 pH 值低于明胶等电点时, 明胶表面正电荷与负电荷能够相互作用, 使得微胶囊结构更紧实^[37]。然而在实际运用中, 蛋白类壁材还面临着以下挑战: ① 仅用蛋白类作微胶囊壁材制备时间缓慢, 包埋效率低; ② 蛋白质易被胃蛋白酶酶解, 使乳酸菌暴露在胃酸环境中, 失去活性; ③ 蛋白质分子中的疏水性基团易使微胶囊相互聚集。

3.2 改进微胶囊的方法

针对常用壁材的不足, 国内外研究者认为可以从复配包埋、多层包埋和添加益生元 3 个方面强化微胶囊性能, 提高乳酸菌在不利环境中的生存率。

3.2.1 复配包埋乳酸菌 选择两种或两种以上的壁材进行复配, 改变乳酸菌的包埋环境, 增强微胶囊的紧实程度, 往往能起到强化包埋效果的作用。复配可分两种: ① 改变壁材分子的化学结构以增强包埋效果。Liu 等^[38] 用聚丙烯酸钠接枝海藻酸钠制备微胶囊, 使微胶囊壁材中的羧基含量增加, 结构更紧实, 提高了壁材对胃酸的缓冲能力, 保护了乳酸菌的活性。但此法可能会使壁材的原有功能发生改变, 破坏微胶囊性能。② 不改变壁材的化学结构, 两种以上的壁材相互穿插缠绕形成更加紧密的凝胶结构。Huq 等^[39] 发现利用复配包埋的海藻酸钠—卵磷脂微胶囊颗粒密度和强度更高, 提升了微胶囊的耐胃酸能力, 增强了乳酸菌在肠道中的定植能力。此外, 蛋白类壁材与海藻酸钠复配包埋能制备出耐酸能力强的微胶囊。Laelorspoen 等^[40] 研究发现在 pH 值 1.2 (含胃蛋白酶) 的模拟胃环境中, 海藻酸钠—玉米醇溶蛋白复配壁材微胶囊比单一海藻酸钠微胶囊乳酸菌存活率

提高了 5 倍。豆类蛋白与海藻酸钠也可形成致密的凝胶结构, Khan 等^[41] 制备的豌豆蛋白—海藻酸钠复配微胶囊提高双歧杆菌在体外胃肠道试验中的存活率。

3.2.2 多层包埋乳酸菌 多层包埋能够根据壁材的不同性能形成多层级微胶囊结构, 充分发挥壁材的优势。Zaeim 等^[42] 将壳聚糖与海藻酸钠进行复配包埋和多层包埋, 对比发现多层包埋可增大微胶囊表面积, 提高乳酸菌包埋率和保护效果。Maria 等^[43] 发现壳聚糖具有抑菌性, 直接接触会降低乳酸菌活性, 运用多层包埋可将壳聚糖置于外层起抗菌效果, 提高微胶囊性能。Piyigraisrn 等^[27] 将蛋清蛋白和硬脂酸作为第一层壳层, 用木薯淀粉颗粒作为第二层壳层, 置于 70~100 °C 下 30 min 后发现, 嗜酸乳杆菌活性仅下降 1 个数量级, 外层壁材起到了隔热的效果。此外蛋清蛋白具有与乳清分离蛋白相似特性, 作为壁材能起到中和胃酸, 维持微胶囊内部 pH 值的效果。运用多层包埋, 将耐酸隔热的壁材置于外层, 易于释放的壁材置于里层, 既能克服不利环境, 又使乳酸菌在回肠部位准确释放定植。

3.2.3 添加益生元 常见的益生元有低聚糖、菊糖和抗性淀粉等。陈合等^[44] 发现菊糖、低聚果糖、低聚异麦芽糖、低聚木糖和低聚半乳糖可促进乳酸菌生长, 对乳酸菌起保护作用, 其中菊糖和低聚果糖效果最佳。胡珊等^[45] 分别添加 2% 的葡萄糖、低聚半乳糖、低聚果糖和菊粉于培养基中培养副干酪乳杆菌 R8, 发现添加 2% 菊粉效果最佳, 活菌数达 1.7×10^9 CFU/mL。然而, Cheow 等^[46] 研究发现增加抗性淀粉会使微胶囊表面粗糙, 使主要起耐酸作用的壳聚糖无法完整覆盖在微胶囊表面, 导致微胶囊的耐酸能力下降, 储藏性能降低和包埋率下降。因此, 对于益生元是否能改善微胶囊的性能尚未定论。

4 结论与展望

随着人们生活水平的提高, 消费者对于乳酸菌的益生功效也越来越看重。乳酸菌微胶囊包埋日益成熟, 有利于乳酸菌功能性食品的加工和应用, 使乳酸菌定植于肠道, 有效地提高人们的健康水平。因此, 乳酸菌微胶囊包埋的研究不可或缺。乳酸菌微胶囊的研究仍存在如下问题: ① 目前对于乳酸菌微胶囊包埋技术的研究大多集中于对单菌株的包埋, 但多种菌株共同包埋的研究却较少涉及; ② 近几年, 新型壁材和改性壁材的研究逐年增多, 但这些壁材的安全性尚不明确, 是否对乳酸菌的益生功能造成影响也尚不明确; ③ 在乳酸菌微胶囊的生产过程中添加益生元是否能够增强乳酸菌的活性目前尚不明确, 益生元的添加是否会使微胶囊粒径过大从而影响微胶囊包埋效果需进一步研究探索; ④ 乳酸菌微胶囊的功能性研究较少, 进行动物试验的方法仍不明确。

乳酸菌微胶囊的研究已经越来越受到广大科研工作

者的重视,目前主要针对乳酸菌微胶囊的制备方法,对于乳酸菌微胶囊功效的研究仍然缺乏,应该加大这方面的研究力度。更加深入地探索乳酸菌微胶囊的保护机理,可为有效保护乳酸菌提供理论依据。还可以根据不同人群制备不同类型的乳酸菌微胶囊,开发具有特定功效的功能性食品,满足人们的健康需要。同时,应考虑消费者对壁材的接受度,丰富乳酸菌微胶囊的产品种类。

参考文献

- [1] 杨云华, 陈金洁, 戴玉娇. 乳酸菌在畜牧业中的应用[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2016, 32(8): 230.
- [2] 闫刘慧. 泡菜中乳酸菌特性分析及模拟肠道存活定殖作用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 11-14.
- [3] 隋雯丽, 张日俊. 木耳提取物与乳酸菌混合发酵的营养价值及应用前景[J]. 饲料工业, 2014(S1): 41-43.
- [4] 王刚, 金星, 印伯星, 等. 1 株具有拮抗空肠弯曲杆菌作用的唾液乳杆菌的研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 6-12.
- [5] 张云霞. pSIP409-TA4 和 pSIP409-IL-2 复合功能型乳酸菌抗球虫效果的检测[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014: 9-13.
- [6] 赵煜. 具有拮抗空肠弯曲杆菌功效的乳酸菌的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 11-14.
- [7] 低聚糖对益生菌饮料活菌数量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 16.
- [8] LAVILLA L, PEREZ R, MARTINEZ M, et al. Characterization of functional, safety, and gut survival related characteristics of *Lactobacillus*, strains isolated from farmhouse goat's milk cheeses[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 163(2/3): 136-145.
- [9] TANZINA H, AVIK K, KHAN R A, et al. Encapsulation of probiotic bacteria in biopolymeric system[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(9): 909-916.
- [10] SANG Y L, YEON J J, MI J C, et al. Effect of coating method on the survival rate of *L. plantarum* for chicken feed[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2014, 34(2): 230-237.
- [11] GOSIEWSKI T, STRUS M, FYDEREK K, et al. Horizontal distribution of the fecal microbiota in adolescents with inflammatory bowel disease[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology & Nutrition, 2012, 54(1): 20.
- [12] 李莎莎. 微胶囊缓释包被酸化剂的作用机理及应用[J]. 畜牧兽医科技信息, 2015(1): 101.
- [13] LAWLESS H T, HEYMANN H. Sensory evaluation of food[J]. Cornell Hospitality Quarterly, 2010, 84(4): 664-668.
- [14] ALIKHANI M, GARMAKHANY A D. Effect of microencapsulated essential oils on storage life and quality of strawberry[J]. Quality Assurance & Safety of Crops & Foods, 2012, 4(2): 106-112.
- [15] 刘爱琴. 微胶囊技术的研究与应用[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(7): 5.
- [16] MICHIEL J T R, NIECK E B. Current trends in interfacial polymerization chemistry[J]. Progress in Polymer Science, 2016, 63: 86-142.
- [17] 汤蓓蓓. 界面聚合法制复合膜[J]. 化学进展, 2007, 19(9): 1 428-1 435.
- [18] 张冰清, 王懿, 万贤, 等. 相分离法制制备相变材料微胶囊[J]. 塑料, 2010, 39(1): 1-3.
- [19] SILVA T M D, LOPES E J, CODEVILLA C F, et al. Development and characterization of microcapsules containing Bifidobacterium Bb-12 produced by complex coacervation followed by freeze drying[J]. LWT-Food Science & Technology, 2018, 90: 412-417.
- [20] 吴东升, 金磊. 食品工业中的喷雾干燥法微胶囊化[J]. 食品工业科技, 1997(1): 78-82.
- [21] 谢桂勉. 两种干燥方式对酸奶干制品中乳酸菌活性的影响分析[J]. 轻工科技, 2011, 27(2): 10-11.
- [22] 吴德龙, 王志耕, 梅林, 等. 真空低温喷雾干燥法制备乳酸菌微胶囊的工艺参数优化[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 367-370.
- [23] 郭云, 孟祥晨. 喷雾干燥对发酵乳杆菌 KLDS1.0709 存活影响的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 109-111.
- [24] WONGSASULAK S, YOOVIDHYA T, BHUMIRATANA S, et al. Thermo-mechanical properties of egg albumen-cassava starch composite films containing sunflower-oil droplets as influenced by moisture content[J]. Food Research International, 2006, 39(3): 277-284.
- [25] ZHANG Yan-nan, ZHANG Ying-jie, ZHANG Ming-yu, et al. Synthesis of spherical Al-doping LiMn₂O₄ via a high-pressure spray-drying method as cathode materials for lithium-ion batteries[J]. JOM, 2019, 71(2): 608-612.
- [26] 徐敬宜. IgY 海藻酸钠-壳聚糖微囊的制备及其性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 14-22.
- [27] PITIGRAISORN P, SRICHAISUPAKIT K, WONGPA-DUNGKIAT N, et al. Encapsulation of *Lactobacillus acidophilus* in moist-heat-resistant multilayered microcapsules[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 192: 11-18.
- [28] YAO Ming-fei, WU Jiong, LI Bo, et al. Microencapsulation of *Lactobacillus salivarius* Li01 for enhanced storage viability and targeted delivery to gut microbiota[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 228-236.
- [29] JANJA M, TOMAZ R, ŠPELA Z, et al. Development of probiotic-loaded microcapsules for local delivery: Physical properties, cell release and growth[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2018, 121: 178-187.
- [30] SILVA M, TULINI F, RIBAS M, et al. Microcapsules loaded with the probiotic *Lactobacillus paracasei* BGP-1 produced by co-extrusion technology using alginate/shellac as wall material: Characterization and evaluation of drying processes[J]. Food Research International, 2016, 89

- (Pt 1): 582-590.
- [31] 李清, 侯丽雅, 朱丽, 等. 微流体数字化喷射制备细胞微胶囊及表征[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2014, 38(1): 89-93.
- [32] 张玉冬, 雷虹, 李元敬, 等. 流体震动技术制备海藻酸钙微胶囊与性能研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2016, 7(4): 59-67.
- [33] LIAKOS I, RIZZELLO L, SCURR D J, et al. All-natural composite wound dressing films of essential oils encapsulated in sodium alginate with antimicrobial properties[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2014, 463(2): 137-145.
- [34] 林贝贝. 海藻酸钙/聚丙烯酰胺凝胶膜的制备及在控制释放和分子印迹中的应用[D]. 天津: 天津工业大学, 2015: 8-9.
- [35] RAMOS O L, PEREIRA R N, MARTINS A, et al. Design of whey protein nanostructures for incorporation and release of nutraceutical compounds in food[J]. C R C Critical Reviews in Food Technology, 2015, 57(7): 1 377-1 393.
- [36] KARASEV D A, VESELOVSKY A V, LAGUNIN A A, et al. Determination of amino acid residues responsible for specific interaction of protein kinases with small molecule inhibitors[J]. Molecular Biology, 2018, 52(3): 478-487.
- [37] MARIA J M, LARAVILLOSLADA F, MARIA A R, et al. Microencapsulation of bacteria: A review of different technologies and their impact on the probiotic effects[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 27: 15-25.
- [38] LIU Yuan, SUN Ye, SUN Li-fan, et al. In vitro, and in vivo, study of sodium polyacrylate grafted alginate as microcapsule matrix for live probiotic delivery[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 24: 429-437.
- [39] HUQ T, FRASCHINI C, KHAN A, et al. Alginate based nanocomposite for microencapsulation of probiotic: Effect of cellulose nanocrystal (CNC) and lecithin [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 168: 61.
- [40] LAELORSPOEN N, WONGSASULAK S, YOOVIDHYA T, et al. Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* in zein-alginate core-shell microcapsules via electrospraying [J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7: 342-349.
- [41] KHAN N H, KORBER D R, LOW N H, et al. Development of extrusion-based legume protein isolate-alginate capsules for the protection and delivery of the acid sensitive probiotic, *Bifidobacterium adolescentis* [J]. Food Research International, 2013, 54(1): 730-737.
- [42] ZAEIM D, GHORANI B, SARABIJAMAB M, et al. Electrospray assisted fabrication of hydrogel microcapsules by single- and double-stage procedures for encapsulation of probiotics[J]. Food & Bioproducts Processing, 2017, 102: 250-259.
- [43] MARIA C, IZASKUN M, ARES R, et al. Microencapsulation of a probiotic and prebiotic in alginate-chitosan capsules improves survival in simulated gastro-intestinal conditions[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 142(1/2): 185-189.
- [44] 陈合, 宋雅娟, 王野, 等. 除氧剂及益生元对双歧杆菌 BB01 和 BB28 微胶囊化的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 5-10.
- [45] 胡珊, 黄皓, 梁卫驱, 等. 定向释放型乳酸菌微胶囊的制备[J]. 广东农业科学, 2014, 41(5): 138-140.
- [46] CHEOW W S, KIEW T Y, HADINOTO K. Effects of adding resistant and waxy starches on cell density and survival of encapsulated biofilm of *Lactobacillus rhamnosus* GG probiotics [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 497-505.
-
- (上接第 203 页)
- [24] LEE H, KIM J E, CHUNG M S, et al. Cold plasma treatment for the microbiological safety of cabbage, lettuce, and dried figs[J]. Food Microbiology, 2015, 51: 74-80.
- [25] MISRA N N, SCHLUTER O, CULLEN P J. Cold plasma in food and agriculture: Fundamentals and applications[M]. Amsterdam: Academic Press, 2016: 368.
- [26] ATTRI P, VENKATESU P, LEE M J. Influence of osmolytes and denaturants on the structure and enzyme activity of α -chymotrypsin [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2010, 114(3): 1 471-1 478.
- [27] ANDO Y, HAGIWARA S, NABETANI H. Thermal inactivation kinetics of pectin methylesterase and the impact of thermal treatment on the texture, electrical impedance characteristics and cell wall structure of Japanese radish (*Raphanus sativus* L.) [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 199: 9-18.
- [28] BAUER A, NI Y, BAUER S, et al. The effects of atmospheric pressure cold plasma treatment on microbiological, physical-chemical and sensory characteristics of vacuum packaged beef loin[J]. Meat Science, 2017, 128: 77-87.
- [29] KUZMINOVA A, KRETKOVÁ T, KYLIÁN O, et al. Etching of polymers, proteins and bacterial spores by atmospheric pressure DBD plasma in air [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(13): 135-201.
- [30] MA Ruo-nan, WANG Guo-min, TING Ying, et al. Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 300: 643-651.
- [31] MA Ruo-nan, YU Shuang, WANG Guo-min, et al. Effect of non-thermal plasma-activated water on fruit decay and quality in postharvest Chinese bayberries[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(11): 1 825-1 834.