

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.11.015

麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌肠溶颗粒剂的制备及其性能研究

柴佳太¹, 李效文^{1,2}, 詹进锁¹, 张传伟¹, 姚日生¹

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽安生生物化工科技有限责任公司, 安徽 合肥 231299)

摘要:为开发益生菌制剂用的新包埋载体材料,以解决现有技术产品热稳定性差的难题,文章采用麦秸秆做载体材料负载罗伊氏乳杆菌,对负载罗伊氏乳杆菌的麦秸秆进行制粒包衣成肠溶颗粒剂,并对其相关性能进行研究。结果表明:麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌颗粒分别在 50、121 °C 下热处理 60 min,罗伊氏乳杆菌活菌量分别保持在 2.8×10^8 、 6.0×10^7 CFU/g;而对照组多孔淀粉负载罗伊氏乳杆菌颗粒在 50 °C 下热处理 60 min,罗伊氏乳杆菌活菌量为 2.3×10^7 CFU/g,在 121 °C 下热处理 60 min,罗伊氏乳杆菌几乎全部失活;用麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌制备成肠溶颗粒剂后的活菌量为 2.4×10^8 CFU/g,且在人工肠液中具有一定的缓释效果;而用对照组多孔淀粉负载罗伊氏乳杆菌制成肠溶颗粒剂后的活菌量为 2.6×10^7 CFU/g,在人工肠液中不具有缓释效果。因此麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌颗粒具有较好的耐热性能和一定的缓释效果。

关键词:麦秸秆;负载;罗伊氏乳杆菌;肠溶颗粒剂;耐热

中图分类号:TQ469 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)11-1533-07

Preparation and properties of *Lactobacillus reuteri* enteric-coated granules loaded on wheat straw

CHAI Jiatai¹, LI Xiaowen^{1,2}, ZHAN Jinsuo¹, ZHANG Chuanwei¹, YAO Risheng¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Anhui Anson Biochemical Technology Co., Ltd., Hefei 231299, China)

Abstract: In order to develop new embedding carrier materials for probiotic preparations and solve the problem of poor thermal stability of existing products, wheat straw was used as the carrier material to load *Lactobacillus reuteri*, and then the wheat straw loaded with *Lactobacillus reuteri* was granulated and coated to prepare enteric granules, and their related properties were studied. The results showed that when the *Lactobacillus reuteri* granules loaded on wheat straw were heat-treated at 50 °C and 121 °C for 60 min, the viable bacterial counts of *Lactobacillus reuteri* were respectively maintained at 2.8×10^8 CFU/g and 6.0×10^7 CFU/g. In the control group, when the *Lactobacillus reuteri* granules loaded on porous starch were heat-treated at 50 °C for 60 min, the amount of viable *Lactobacillus reuteri* was 2.3×10^7 CFU/g. When the *Lactobacillus reuteri* granules loaded on porous starch were heat-treated at 121 °C for 60 min, almost all *Lactobacillus reuteri* were inactivated. At the same time, it was also found that the viable amount of *Lactobacillus reuteri* loaded on wheat straw and prepared into enteric-coated granules was 2.4×10^8 CFU/g, and it had a certain slow-release effect in artificial intestinal fluid. In the control group, the viable amount of *Lactobacillus reuteri* loaded on porous starch and prepared into enteric-coated granules was 2.6×10^7 CFU/g, which showed no slow-release effect

收稿日期:2022-03-28;修回日期:2022-05-05

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(202003a05020060)

作者简介:柴佳太(1995—),男,甘肃永昌人,合肥工业大学硕士生;

姚日生(1962—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:rishengyao@163.com.

in artificial intestinal fluid. *Lactobacillus reuteri* granules loaded on wheat straw have better heat resistance and a certain slow-release effect.

Key words: wheat straw; loading; *Lactobacillus reuteri*; enteric-coated granules; heat resistance

0 引 言

益生菌制剂以其无毒、绿色安全、可提高动物生长率、抗病能力和长期稳定保存等优点而成为一种既健康又环保的新型饲料添加剂,且正在成为替代饲用抗生素的首选^[1-3]。文献[4]研究表明益生菌产品发挥益生作用的技术要求是其到达肠道的活菌数大于等于 10^6 CFU/g,然而,游离益生菌在动物的胃中会因受胃液和胃蠕动剪切作用失活,而无法再提供健康益处^[5-7],为此需要借助微囊或肠溶包衣颗粒剂等递送系统实现。

用于制造微胶囊的材料通常是生物聚合物,如海藻酸盐、角叉菜胶、明胶、黄原胶、蛋白质和淀粉等^[8-9]。使用较为广泛的海藻酸盐凝胶珠能在胃环境和储存过程中发挥保护作用,但其捕集不稳定且耐热效果较差^[10-12];在海藻酸盐凝胶中加入多孔淀粉虽然可以很好地解决海藻酸盐凝胶捕集不稳定的问题^[13],但不适用于较高温度的热加工工艺^[14-15]。因此,这类微囊化颗粒剂采用高能耗的低温(冷冻)真空干燥工艺加工^[16],致使制剂成本过高,从而使益生菌制剂在现有养殖业中的应用受到了严重制约^[17-18]。

肠溶包衣颗粒剂是采用湿法或干法制粒后干燥和喷液(喷雾)包衣加工而成的,其中包衣也是在加热条件下进行的;但是多数益生菌因本身耐热性差而难以耐受颗粒干燥和包衣所需要的加热加工过程,因此制剂中的活菌量显著下降^[19-21]。需要寻找益生菌制剂用的新包埋载体材料以解决现有技术产品热稳定性差、成本高的难题。在秸秆预处理与综合利用研究过程中,本文用麦秸秆替代多孔淀粉进行益生菌包埋,并取得了有益的效果。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

罗伊氏乳杆菌(CGMCC No. 0841)购于普通微生物菌种保藏管理中心;MRS 培养基、MRS 琼脂培养基均购于北京索莱宝科技有限责任公司;胃蛋白酶、胰蛋白酶均购于上海源叶生物有限公司;磷酸氢二钾购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;尤特奇 L30D-55 包衣材料购于安徽安生

生物化工科技责任有限公司;多孔淀粉购于苏州朗福生物科技有限公司;麦秸秆收集于合肥郊区。

EYQX-II 厌氧培养箱(青岛明博环保科技有限公司);Tescan MIRA3 热场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(捷克特斯肯公司);YXQ-LS-70A 立式压力蒸汽灭菌器(上海博讯医疗生物仪器股份有限公司);贝克曼 Avanti J-E 高速离心机(贝克曼库尔特国际贸易(上海)有限公司);PHS-3C pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司);DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器(巩义市予华仪器有限责任公司);DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);YK-60 摇摆颗粒机(南京东隆机械科技有限公司);UKBY-300 包衣机(福州法莫优科机械科技有限公司)。

1.2 麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌肠溶颗粒的制备

1.2.1 麦秸秆载体材料的制备

本实验将麦秸秆用纯化水进行洗涤,除去秸秆表面的灰分,晾干,将清洗过的秸秆粉碎,过 80 目的筛子,再将粉碎好的麦秸秆放置在干燥的环境中备用。

1.2.2 罗伊氏乳杆菌负载

本实验配置 4 批 1 500 mL MRS 液体培养基,按载体材料总质量 100 g 加入麦秸秆(质量分数分别为 0、10%、50%、100%)和多孔淀粉,在 121 °C 下共同灭菌 20 min,冷却后按 1% 的接种量接种罗伊氏乳杆菌,在 37 °C 厌氧条件下培养 48 h,培养结束后离心,获得负载罗伊氏乳杆菌的载菌秸秆。

1.2.3 肠溶颗粒的制备

在负载罗伊氏乳杆菌的载菌秸秆中加入适量黏合剂,混合均匀,使用 YK-60 摇摆颗粒机进行造粒,造粒结束后在 50 °C 下整理干燥 40 min,再用尤特奇 L30D-55 包衣材料对载菌颗粒在 50 °C 下进行包衣,增重 10%。

1.3 活菌量的测定

通过在 MRS 琼脂平板上进行计数来研究载菌过程中及制备得到的肠溶颗粒剂中微生物的活力。对可观察 15~300 个菌落的平板进行计数,记录菌落形成单位(colony forming units, CFU)^[22]。

1.4 载菌颗粒的耐热效果

分别取 1 g 未经包衣的麦秸秆的载菌颗粒置于 50、121 °C 的烘箱中进行热处理,处理一定时间后将颗粒取出置于 100 mL 0.9% 的生理盐水中,在 37 °C 的 DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器中释放 12 h 取样,按 1.3 中的方法测定释放在溶液中的活菌数量。

1.5 SEM 分析

使用 Tescan MIRA3 热场发射 SEM 观察麦秸秆、多孔淀粉的微观结构以及负载罗伊氏乳杆菌后的麦秸秆、多孔淀粉的微观结构。

1.6 人工胃肠液模拟释放

取 1 g 经过包衣的麦秸秆质量分数为 100% 载菌颗粒置于 100 mL 的人工胃液 (simulated gastric fluid, SGF) 中,在 37 °C 的 DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器中搅拌 2 h,然后转移至 100 mL 的人工肠液 (simulated intestinal fluid, SIF) 中,在 37 °C 的 DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器中搅拌 12 h,在一定时间点取样,按照 1.3 中的平板计数法测定释放在溶液中的活菌数量。

2 结果与讨论

2.1 麦秸秆对载菌颗粒中活菌量的影响

麦秸秆和多孔淀粉混合载体中麦秸秆质量分数对负载罗伊氏乳杆菌活菌量的影响如图 1 所示。

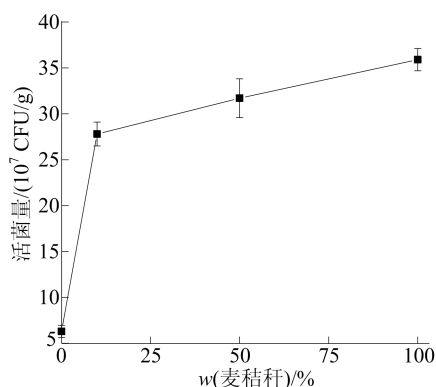


图 1 麦秸秆质量分数对载菌颗粒中活菌量的影响

从图 1 可以看出:载菌颗粒中的活菌量随着麦秸秆质量分数的增加而增加,且当麦秸秆质量分数为 0,即仅用多孔淀粉负载罗伊氏乳杆菌时,其制粒后活菌量为 6.3×10^7 CFU/g;当添加 10% 的麦秸秆后,活菌量增加 3.4 倍,为 27.8×10^7 CFU/g,大于 10^8 CFU/g;而当麦秸秆质量分

数从 10% 增加到 50%、100% 时,负载的活菌量增加了 15%、29%。因此,麦秸秆能够替代多孔淀粉对罗伊氏乳杆菌进行负载,且能够提高载菌颗粒中的活菌量,其可能是麦秸秆具有比多孔淀粉高的负载能力。

2.2 肠溶颗粒制备过程中活菌量的变化

用多孔淀粉和麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌的肠溶包衣颗粒剂制备过程各阶段活菌量的变化如图 2 所示。图 2 中,* 表示 $P < 0.05$ 样本间显著性差异。

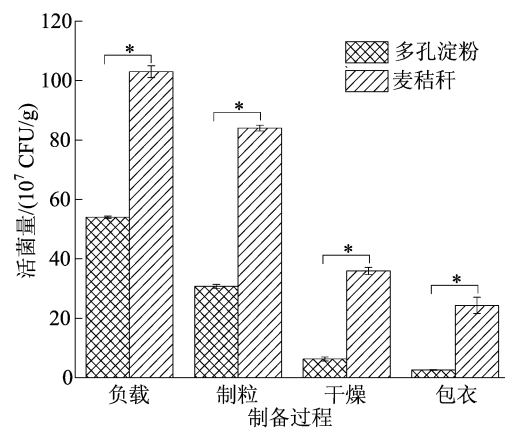


图 2 罗伊氏乳杆菌肠溶颗粒制备过程中活菌量的变化

从图 2 可以看出,在初始活菌量相同的情况下,多孔淀粉负载罗伊氏乳杆菌的量为 54×10^7 CFU/g,而使用麦秸秆后罗伊氏乳杆菌的负载量高达 105×10^7 CFU/g,即麦秸秆具有比多孔淀粉高的负载能力 ($P < 0.05$)。

由图 2 还可知,经过摇摆颗粒机制粒、50 °C 下整粒干燥和 50 °C 下包衣加工成型后,多孔淀粉负载的罗伊氏乳杆菌活菌量依次分别为 30.7×10^7 、 6.3×10^7 、 2.6×10^7 CFU/g,菌失活率相应地为 43.1%、79.5%、58.7%;而与麦秸秆负载的罗伊氏乳杆菌活菌量依次为 84.0×10^7 、 35.9×10^7 、 24.3×10^7 CFU/g,菌失活率相应地为 18.4%、57.5%、31.9%。在制备过程中,热致菌失活的作用比剪切带来的作用大,麦秸秆防止在机械剪切破碎以及热变性致罗伊氏乳杆菌失活的作用比多孔淀粉的大 ($P < 0.05$),即在菌制剂过程中,麦秸秆具有更高的保护能力。

2.3 载体材料的热性能与微观结构

2.3.1 载体材料的热性能

通过测试麦秸秆和多孔淀粉的导热系数,发现麦秸秆导热系数 ($0.08102 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) 比多孔淀粉导热系数 ($0.10800 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) 更低,说

明麦秸秆相比于多孔淀粉有更好的隔热效果,因此麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌后能对罗伊氏乳杆菌有更好的隔热保护效果,可以减少罗伊氏乳杆菌细胞因受热引起的水分流失,从而载菌颗粒中罗伊氏乳杆菌的耐热性能有了明显提升。

麦秸秆和孔淀粉载菌颗粒在 50 °C 下的耐热性能如图 3 所示。

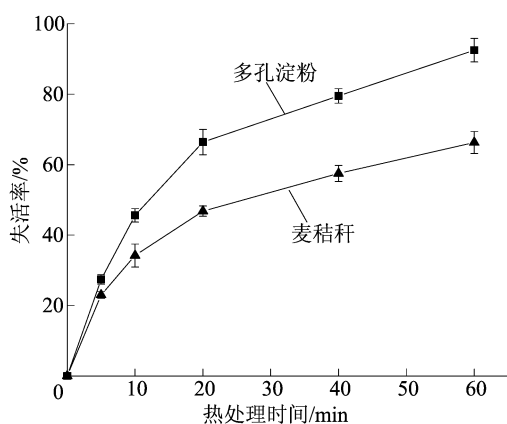


图 3 50 °C 下热处理时间对罗伊氏乳杆菌失活率的影响

从图 3 可以看出:随着热处理时间的增加,罗伊氏乳杆菌失活率也逐渐增大,但多孔淀粉载菌颗粒中罗伊氏乳杆菌的失活更明显;多孔淀粉和麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌后,经过制粒在 50 °C 下烘干 40 min,此时多孔淀粉载菌颗粒中菌的失活率接近 80%,而麦秸秆载菌颗粒中菌的失活率不到 60%;将热处理时间延长至 60 min,多孔淀粉载菌颗粒中菌的失活率达到 92.5%,活菌量仅为 2.3×10^7 CFU/g,而麦秸秆载菌颗粒中菌的失活率为 66.3%,活菌量大于 10^8 CFU/g。相比于多孔淀粉,麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌后有更好的耐热性能。

在制剂工艺中会涉及到一些较高温度的热加工工艺,因此尝试将多孔淀粉和麦秸秆的载菌颗粒在 121 °C 下进行热处理,对比载菌颗粒中菌的失活率如图 4 所示。

从图 4 可以看出:随着热处理时间的增加,罗伊氏乳杆菌的失活率也明显增加,特别是多孔淀粉载菌颗粒在 121 °C 下热处理 5 min 罗伊氏乳杆菌失活率达到 90% 以上,而麦秸秆载菌颗粒中罗伊氏乳杆菌失活率不到 30%,当多孔淀粉载菌颗粒在 121 °C 下热处理 40 min 罗伊氏乳杆菌失活率就达到 100%,即罗伊氏乳杆菌全部失活,而麦秸秆载菌颗粒中罗伊氏乳杆菌失活率仅接近 80%;当麦秸秆载菌颗粒在 121 °C 下热处理 60 min 时

失活率达到 90.5%,此时的活菌量为 6.0×10^7 CFU/g,意味着麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌后可在 121 °C 下进行热处理 60 min 而能保证活菌量大于 10^7 CFU/g。文献[13]报道,经过改性的多孔淀粉负载植物乳杆菌在 60 °C 下热处理 15 min 后活菌量从 1.6×10^9 CFU/g 减少到 3.2×10^6 CFU/g,尽管经过改性的多孔淀粉对植物乳杆菌具有很高的负载量,但因其隔热保护能力较差,经过热处理后的活菌量并不高,这类益生菌产品不宜采用热处理工艺。

通过对比上述结果可以进一步说明麦秸秆有较高的隔热保护能力,能够有效降低罗伊氏乳杆菌肠溶颗粒制备过程中罗伊氏乳杆菌因受热造成的失活,同时也使得麦秸秆负载益生菌制备肠溶颗粒的加工温度有了一定弹性。这将对益生菌制剂的较高温度的热加工工艺有重要参考价值。

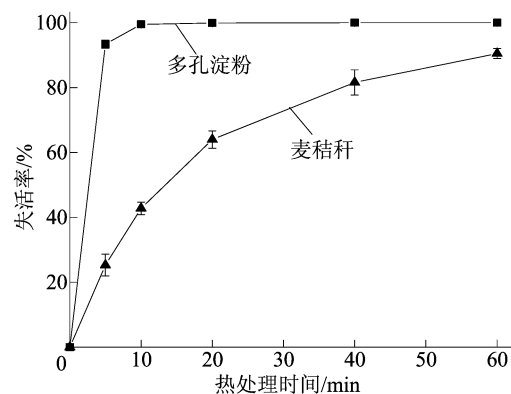


图 4 121 °C 下热处理时间对罗伊氏乳杆菌失活率的影响

2.3.2 载体材料的微观结构

麦秸秆和孔淀粉负载罗伊氏乳杆菌前、后结构的变化如图 5 所示。由图 5 可知:麦秸秆是由许多管束结构组成,管束直径为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$;多孔淀粉微球粒径为 $10 \sim 15 \mu\text{m}$,其表面具有许多孔洞结构,孔径为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$;罗伊氏乳杆菌的长度为 $1 \sim 3 \mu\text{m}$,直径约为 $0.5 \mu\text{m}$;在秸秆管束中集聚有大量的罗伊氏乳杆菌,而多孔淀粉微球孔洞内部只有少量的菌,罗伊氏乳杆菌多数在淀粉微球表面吸附。

从罗伊氏乳杆菌的尺度来看,其直径和长度与多孔淀粉孔径很接近,但远小于麦秸秆的直径,因此能够很容易进入到秸秆内部的,粘附在多孔淀粉微球表面。因为罗伊氏乳杆菌大部分能够负载到麦秸秆孔洞内部,所以在制粒过程中可以避免罗伊氏乳杆菌受到外部环境的影响而失活,相

反由于罗伊氏乳杆菌大多吸附在多孔淀粉表面,这将大大增加罗伊氏乳杆菌暴露在外环境中的

几率,从而导致制粒过程中罗伊氏乳杆菌的大量失活。

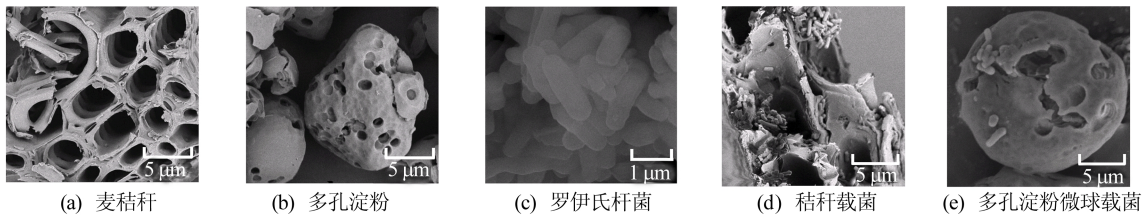


图 5 麦秸秆和 多孔淀粉负载罗伊氏乳杆菌前、后的结构

麦秸秆和 多孔淀粉经过压汞测试后所得的孔径分布如图 6 所示。从图 6 可以看出,麦秸秆孔径主要分布在 10 μm 左右,多孔淀粉孔径分布主要在 3 μm 左右。

压汞测试结果见表 1 所列。由表 1 可知,相比于 多孔淀粉,麦秸秆有更高的孔隙率、更大的比表面积和孔容,其平均孔径也大于 多孔淀粉。

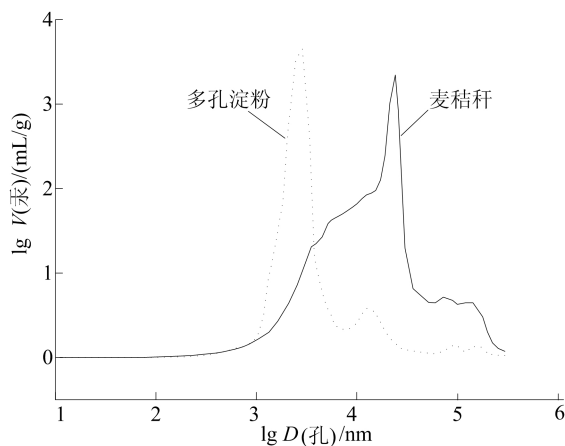


图 6 麦秸秆和 多孔淀粉孔径分布

表 1 麦秸秆和 多孔淀粉物性

| 载体材料 | 多孔淀粉 | 麦秸秆 |
|--------------------------|-------|-------|
| 孔隙率/% | 69.9 | 79.6 |
| 总孔面积/(m ² /g) | 1.503 | 1.944 |
| 平均孔径/μm | 3.2 | 7.8 |
| 总孔容/(mL/g) | 1.5 | 2.5 |

在一定程度上麦秸秆比 多孔淀粉有更大的负载罗伊氏乳杆菌的能力,这是由其孔容、孔径及孔隙率均比后者大所决定的,其较大孔容能为罗伊氏乳杆菌提供充足的负载空间,从而能为罗伊氏乳杆菌提供更好的物理保护结构。这种结构给罗伊氏乳杆菌提供了“盔甲”,能避免罗伊氏乳杆菌在制粒过程受到机械剪切影响而失活。因此,麦秸秆保护罗伊氏乳杆菌和高负载的能力共同作用

是麦秸秆载菌颗粒中的活菌量高于 多孔淀粉载菌颗粒的主要原因。

2.4 人工胃肠液模拟释放分析

经过肠溶液包衣制备的 多孔淀粉负载罗伊氏乳杆菌肠溶颗粒、麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌肠溶颗粒及其在人工胃肠液中的模拟释放曲线如图 7 所示。

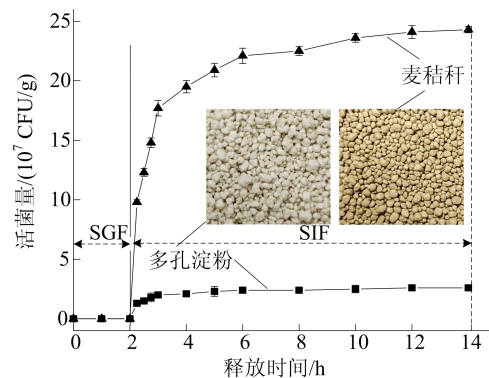


图 7 载菌肠溶颗粒人工胃肠液模拟释放曲线

由图 7 可知: 多孔淀粉与麦秸秆载菌肠溶颗粒在 SGF 中均没有释放,说明 多孔淀粉与麦秸秆载菌肠溶颗粒具有较好的耐酸性能;当肠溶颗粒转移至 SIF 中时, 多孔淀粉载菌颗粒在 SIF 中 60 min 时可以接近释放平衡,而麦秸秆载菌颗粒在 60 min 后依然在持续释放,具有一定的缓释效果。同时,可以看出:麦秸秆载菌颗粒经过包衣后比 多孔淀粉载菌颗粒有更高的活菌量,在 SIF 中释放 12 h 后, 多孔淀粉载菌颗粒释放的最大活菌量为 2.6×10^7 CFU/g,而麦秸秆载菌颗粒的活菌释放量达 2.4×10^8 CFU/g。其可能原因是麦秸秆具有较大的囊腔和管束结构,相比于 多孔淀粉有更高的孔隙率和较大的孔径,这会导致在秸秆内部可以负载大量罗伊氏乳杆菌,而 多孔淀粉内部负载量较少,罗伊氏乳杆菌只能吸附在 多孔淀粉表面,因此在释放过程由于肠溶性包衣膜溶解

后载菌颗粒会迅速散开,吸附在多孔淀粉表面的罗伊氏乳杆菌会很快从多孔淀粉表面脱落释放,而负载在秸秆内部的罗伊氏乳杆菌需要在一定时间后才能释放出来,这就会使麦秸秆载菌颗粒具有一定缓释效果。此外在肠道环境中,麦秸秆作为载体不容易被其他有害菌利用,因此不能作为有害菌的营养源,在较长时间的缓释过程中可以不断补充肠道内的益生菌,改善肠道菌群平衡,起到一定的益生作用。

3 结 论

本文研究了一种新的益生菌包埋载体,不仅可以实现益生菌的高包埋量,还可以增强益生菌的热稳定性。研究发现,用麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌并将其制备成肠溶颗粒剂后活菌量可达 2.4×10^8 CFU/g,且在肠道环境中具有一定的缓释效果。麦秸秆有较好的隔热保护效果,负载罗伊氏乳杆菌后能提高菌的耐热性能,其载菌颗粒在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下热处理 60 min,罗伊氏乳杆菌失活率仅为 66.3%,活菌量能达到 2.8×10^8 CFU/g;在 $121\text{ }^\circ\text{C}$ 下处理 60 min,罗伊氏乳杆菌失活率为 90.5%,但活菌量依然能达到 6.0×10^7 CFU/g。

本研究为益生菌的包埋、保护和输送提供了一种新的思路,对益生菌产品较高温度的热加工工艺有一定的参考价值。进一步的研究可能集中在麦秸秆负载罗伊氏乳杆菌的机理及制粒过程中剪切力对活菌量的影响和提高麦秸秆对罗伊氏乳杆菌的负载能力。

[参 考 文 献]

- [1] CHUPHAL N, SINGHA K P, SARDAR P, et al. Scope of archaea in fish feed; a new chapter in aquafeed probiotics? [J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2021, 13(6): 1668-1695.
- [2] KOSIN B, RAKSHIT S K. Induction of heat tolerance in autochthonous and allochthonous thermotolerant probiotics for application to white shrimp feed[J]. *Aquaculture*, 2010, 306(1/2/3/4): 302-309.
- [3] 张璐, 张敏红. 饲用益生菌产品评价研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2008(3): 21-24.
- [4] HOSSEINI S F, ANSARI B, GHARSALLAOUI A. Polyelectrolytes-stabilized liposomes for efficient encapsulation of *Lactobacillus rhamnosus* and improvement of its survival under adverse conditions[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131358.
- [5] SURONO I, VERHOEVEN J, VERBRUGGEN S, et al. Microencapsulation increases survival of the probiotic *Lactobacillus plantarum* IS-10506, but not *Enterococcus faecium* IS-27526 in a dynamic, computer-controlled in vitro model of the upper gastrointestinal tract[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2018, 124(6): 1604-1609.
- [6] GONZÁLEZ-FERRERO C, IRACHE J M, GONZÁLEZ-NAVARRO C J. Soybean protein-based microparticles for oral delivery of probiotics with improved stability during storage and gut resistance[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 879-888.
- [7] YEUNG T W, ARROYO-MAYA I J, MCCLEMENTS D J, et al. Microencapsulation of probiotics in hydrogel particles: enhancing *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* LM0230 viability using calcium alginate beads[J]. *Food & Function*, 2016, 7(4): 1797-1804.
- [8] DING W K, SHAH N P. Effect of various encapsulating materials on the stability of probiotic bacteria[J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(2): M100-M107.
- [9] ANAL A K, SINGH H. Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, 18(5): 240-251.
- [10] MALMO C, GIORDANO I, MAURIELLO G. Effect of microencapsulation on survival at simulated gastrointestinal conditions and heat treatment of a non probiotic strain, *Lactiplantibacillus plantarum* 48M, and the probiotic strain *Limosilactobacillus reuteri* DSM 17938[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 217.
- [11] GBASSI G K, VANDAMME T, ENNAHAR S, et al. Microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* spp in an alginate matrix coated with whey proteins[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2009, 129(1): 103-105.
- [12] WILLAERT R G, BARON G V. Gel entrapment and micro-encapsulation; methods, applications and engineering principles[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 1996, 12(1/2): 1-205.
- [13] LI H T, VAN THI T H, TURNER MARK S, et al. Encapsulation of *Lactobacillus plantarum* in porous maize starch[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2016, 74: 542-549.
- [14] RAMOS P E, CERQUEIRA M A, TEIXEIRA J A, et al. Physiological protection of probiotic microcapsules by coatings[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(11): 1864-1877.
- [15] BENAVENT-GIL Y, RODRIGO D, ROSELL C M. Thermal stabilization of probiotics by adsorption onto porous starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 197: 558-564.
- [16] TRIPATHI M K, GIRI S K. Probiotic functional foods: survival of probiotics during processing and storage[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 9: 225-241.
- [17] CHEN J, WANG Q, LIU C M, et al. Issues deserve attention in encapsulating probiotics: critical review of existing literature[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(6): 1228-1238.

- [18] BURGAIN J, GAIANI C, LINDER M, et al. Encapsulation of probiotic living cells; from laboratory scale to industrial applications[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(4):467-483.
- [19] MOKHTARI S, JAFARI S M, KHOMEIRI M, et al. The cell wall compound of *Saccharomyces cerevisiae* as a novel wall material for encapsulation of probiotics[J]. *Food Research International*, 2017, 96:19-26.
- [20] PICOT A, LACROIX C. Encapsulation of bifidobacterial in whey protein-based microcapsules and survival in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt[J]. *International Dairy Journal*, 2004, 14(6):505-515.
- [21] ESTEVINHO B N, ROCHA F, SANTOS L, et al. Microencapsulation with chitosan by spray drying for industry applications: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 31(2):138-155.
- [22] 邓紫琦, 丁一, 侯欣尧, 等. 基于孢粉素微胶囊的共包埋、保护及递送益生菌和乳糖酶的体系[J]. *食品科学*, 2022, 43(14):183-192.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 1532 页)

加了陶粒的吸附面积,理论上有利于陶粒吸附污水中的有害物质。

4) 投加陶粒后, SBR 反应器的 COD 去除率从 82% 提高至 87%, 氨氮去除率从 83% 提升至 86%, 若增加反冲洗装置, 反应器的去除率则有望达到 90% 以上。

[参 考 文 献]

- [1] DASH S, KAR B, PANDA L, et al. Use of sintered fly ash aggregate in pervious concrete[J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2021, 62(1/2/3):199-219.
- [2] 湛玲丽, 韩利雄, 李璟玮, 等. 高掺量煤矸石固废微晶玻璃结构与性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(4):1124-1132.
- [3] 李琴, 杨岳斌, 刘君, 等. 我国粉煤灰利用现状及展望[J]. *能源研究与管理*, 2022(1):29-34.
- [4] ZHANG X Q, PAN Y Y. Preparation, properties and application of gel materials for coal gangue control[J]. *Energies*, 2022, 15(2):557.
- [5] 杨艳茹, 麻永林, 王军. 粉煤灰-煤矸石质多孔陶粒的制备研究[J]. *矿冶工程*, 2018, 38(5):96-99.
- [6] 李强, 张敬申, 梁瑞恒, 等. 人工湿地新型陶粒基质的制备及除磷性能研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(12):13-22.
- [7] WANG Z, CHEN H J, PEI L Z, et al. Preparation and characterisation of environmental-friendly ceramsites from iron ore tailings and sludge[J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2021, 14(4):884-892.
- [8] 石稳民, 黄文海, 罗金学, 等. 污泥资源化制备轻质陶粒研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(2):5-10.
- [9] 杨稔, 马丽萍, 闫贝, 等. 煤泥制备陶粒滤料的研究[J]. *现代化工*, 2011, 31(7):59-61.
- [10] YANG Y H, WEI Z A, CHEN Y L, et al. Utilizing phosphate mine tailings to produce ceramsite[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155:1081-1090.
- [11] BAO T, CHEN T, WILLE M L, et al. Performance and characterization of a non-sintered zeolite porous filter for the simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in a biological aerated filter (BAF)[J]. *RSC Advances*, 2016, 6:50217-50227.
- [12] HU H B, HAN H J, WANG W, et al. Effect of coal gangue-fly ash ceramic (CFC) media on municipal wastewater treatment in a pre-denitrification biological aerated filter[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 31(1/2/3):372-378.
- [13] ZOU J L, XU G R, PAN K, et al. Nitrogen removal and biofilm structure affected by COD/NH₄⁺-N in a biofilter with porous sludge-ceramsite[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 94:9-15.
- [14] FENG Y, YU Y Z, QIU L P, et al. Impact of sorption functional media (SFM) from zeolite tailings on the removal of ammonia nitrogen in a biological aerated filter[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 21:704-710.
- [15] FENG X, JIN X, XIN F, et al. Resource utilization of laterite nickel ore smelting slag: research on ceramsite preparation process[J]. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, 2020, 127:236-237.
- [16] 喻学敏, 周军, 陈浩. 以橡胶颗粒与陶粒为生物滤池填料的运行效果研究[J]. *工业水处理*, 2021, 41(9):69-73.
- [17] LIU J D, TIAN C, JIA X L, et al. The brewery wastewater treatment and membrane fouling mitigation strategies in anaerobic baffled anaerobic/aerobic membrane bioreactor[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 127:53-59.

(责任编辑 吴 亮)