

基于云模型的益生菌微胶囊干燥技术评价

刘治芹¹, 陈俊亮¹, 任广跃^{1,2*}, 段 续^{1,2}, 曹伟伟¹, 李琳琳¹

¹河南科技大学 食品与生物工程学院 河南洛阳 471023

²粮食储藏安全河南省协同创新中心 郑州 450001)

摘要 益生菌微胶囊的干燥制备技术是保证益生菌在长期贮存期间稳定性的关键。为客观评价现有不同干燥技术对益生菌微胶囊的干燥效果。通过分析喷雾干燥(B_1)、真空冷冻干燥(B_2)、流化床干燥(B_3)以及微波真空冷冻干燥(B_4) 4 种干燥技术在益生菌微胶囊干燥中的应用, 构建益生菌微胶囊干燥技术多过程分级评价指标体系。基于排队理论确定了水分特性、外观特性、结构特性、化学特性、生物特性及评价因子的序列等级和权重。同时引入黄金分割率法以及云发生器原理综合构建了益生菌微胶囊干燥技术云评价模型, 定量评价 4 种干燥方式对于益生菌微胶囊的干燥效果。结果表明: 4 种干燥技术的综合评价云分别为: $Z_{B1}(0.4624, 0.0674, 0.0088)$ 、 $Z_{B2}(0.5810, 0.0591, 0.0106)$ 、 $Z_{B3}(0.6772, 0.0595, 0.0111)$ 、 $Z_{B4}(0.7635, 0.0582, 0.0119)$ 。对于益生菌微胶囊的干燥性能综合排序为 $B_4 > B_3 > B_2 > B_1$ 。本研究方法与结论可为丰富及完善益生菌微胶囊干燥技术研究提供理论参考。

关键词 干燥技术; 益生菌; 微胶囊; 云模型

文章编号 1009-7848(2023)06-0246-12 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.06.025

益生菌是一类通过适量摄取而对宿主产生有益作用的活性微生物^[1], 其通过消化食糜中的营养进行新陈代谢, 分解食物中难以消化的组分, 并分泌对人体有益的代谢产物, 抑制有害菌群的繁殖, 从而被广泛应用于食品、生物、医药等领域^[2-5]。然而, 其抗逆性较差, 且易受温度、氧气、水分、压力和剂量配方等因素的影响, 在加工、运输、贮藏以及消化过程中菌数量和活性下降, 使最终发挥的益生功效远低于理论阈值^[6]。为保证益生菌益生功效的正常发挥, 常用微胶囊包埋技术将益生菌包埋在肠溶性壁材中, 以此增强菌体对不良环境的抵抗性及在肠道适宜条件下的释放性。

根据原理和操作方式的不同可将微胶囊制备技术分为 3 类, 分别为建立在化学反应基础上形成囊壁的化学方法, 改变介质条件、利用不同相分离形成囊壁的物理化学方法及利用机械或其它物理作用形成囊壁的物理方法^[7]。上述微胶囊制备过程通常在水相中进行。研究表明当益生菌微胶囊

以湿囊状态贮存时, 益生菌活性往往会因运输、储存和应用过程中的环境因素而减弱, 而以粉末形式存在时其活性却明显提升^[8]。为改善益生菌在长期贮藏期间的存活率等性能指标, 需对微胶囊进一步干燥。近年来, 随着干燥技术手段与研究方法的不断发展, 针对益生菌微胶囊的干燥研究取得了一些进展。研究人员分别采用喷雾干燥、真空冷冻干燥、流化床干燥以及微波真空冷冻干燥等方式对益生菌微胶囊进行干燥^[9-12]。其中, 喷雾干燥具有成本低廉和便于工业化生产等优势, 逐渐被应用于益生菌微胶囊的干燥^[13]。目前在益生菌微胶囊的喷雾干燥技术主要有: 常规喷雾干燥技术、超声波真空喷雾干燥技术、静电喷雾干燥技术、喷雾冷冻干燥技术, 两段式喷雾干燥技术、多级喷雾干燥技术。这些干燥技术大多停留在试验研究阶段, 各有优劣, 急需新型干燥技术的不断完善和快速发展, 以满足现代工业化生产的需求。真空冷冻干燥是在低温下进行, 水分升华发生在物质表面, 是去除热敏性材料中水分的最佳方式, 可以维持产品理化性质及生物活性, 如色、香、味等^[14]。Rodrigues 等^[15]对比了真空冷冻和喷雾干燥两种干燥方式, 并将其连续喂食 18 只成年猫 20 d。对饲料样品进行微生物学评估, 根据其微生物含量、pH 值和粪便评分进行表征, 研究结果表明, 与喷雾干

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172352); 河南省科技攻关项目(202102110077); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2020GGJS072)

第一作者: 刘治芹, 女, 硕士生

通信作者: 任广跃 E-mail: guangyueyao@163.com

燥相比,真空冷冻干燥可以更好地保持益生菌的活性。流化床涂层干燥是一种将包封剂喷涂到流化粉末床上来生产包衣颗粒的方法。Strasser 等^[16]研究了流化床干燥和冷冻干燥工艺及保护剂对乳酸尿肠球菌和植物乳杆菌存活和贮藏稳定性的影响,发现在没有添加保护剂的情况下,这两种菌株在流化床干燥过程中损失更大,添加保护剂后流化床干燥明显作用效果优于冷冻干燥。微波真空冷冻干燥技术是一种将微波场与真空冷冻相结合的干燥技术,从内到外对物料进行加热,加热较为均匀,适合益生菌、酶和蛋白质等对温度敏感产品的干燥^[17]。由于微波的特性,能量以电磁波的形式进入物料内部对物料进行整体加热,提升了干燥速率,减少干燥时间,可以显著节省因真空和冷阱工作而消耗的能量,从而降低能耗。微波真空冷冻干燥的产品具有产品质量高、干燥效率高、能量利用率高等显著优势。不同干燥制备方式因干燥机理不同,对于益生菌微胶囊的干燥作用效果也不尽相同,且益生菌微胶囊干燥过程是一个多指标参与、多要素关联、多层次驱动的复杂过程。虽然现有研究已就不同干燥制备技术的干燥过程及作用机理进行了系统分析,但针对不同干燥方式对益生菌微胶囊干燥效果的理论研究与综合评价相对较少。

鉴于此,本文以喷雾干燥、真空冷冻干燥、流化床干燥以及微波真空冷冻干燥这 4 种干燥技术为综合评价对象,引入云模型,分层构建益生菌微胶囊干燥技术多过程分级评价指标体系。基于黄金分割原则、排队理论、云发生器原理综合构建益生菌微胶囊干燥技术综合评价云模型,并对 4 种干燥技术的干燥效果进行定量评价。采用模糊综合评判与云重心法验证评价结果,为完善益生菌微胶囊干燥技术提供理论参考。

1 多过程分级评价指标体系构建

益生菌微胶囊的干燥过程是多系统分解、多要素关联、多状态表征的复杂模糊体系。本文以不同干燥方式对于益生菌微胶囊的干燥效果作为目标层,将整个目标体系分解为多层次的结构关联及分解单元。将喷雾干燥 B_1 、真空冷冻干燥 B_2 、流化床干燥 B_3 、微波真空冷冻干燥 B_4 这 4 种干燥方

式作为评价对象,将不同干燥方式对于益生菌微胶囊的干燥效果描述为“干燥效果差 A_1 ”、“干燥效果较差 A_2 ”、“干燥效果中等 A_3 ”、“干燥效果较好 A_4 ”、“干燥效果好 A_5 ”。已有研究表明,通过不同干燥技术处理得到的益生菌微胶囊综合特性主要在其水分特性、表观特性、粉质特性、化学特性以及生物特性等方面存在显著差异^[18-20]。通常水分特性是评价微胶囊干燥效果的重要指标,水分活度过高或过低都会对菌体造成损伤,同时水分特性也会影响益生菌微胶囊贮藏稳定性及胃肠道靶向释放。表观特性与粉质特性是影响食品感官特性的重要指标。生物特性及化学特性是保证益生菌微胶囊在长期贮藏期间稳定性及能否应用于食品中的关键。因此,为满足评价体系构建过程中所必需的综合性和代表性及可比性原则。本文分别从水分特性 C 、表观特性 D 、粉质特性 E 、化学特性 F 以及生物特性 G 这 5 种特性对 4 种干燥效果进行评定。结合 5 种特性在益生菌微胶囊总体特性方面的具体表征,又可进一步将其进行深层次的分解。其中,表征水分特性的因子可描述为水分活度 C_1 、水分含量 C_2 、吸湿性 C_3 以及溶解性 C_4 ;表征表观特性的因子可表征为粒径 D_1 及色差 D_2 ;粉质特性因子可描述为堆积密度 E_1 、表面特征 E_2 、硬度 E_3 、休止角 E_4 及分散度 E_5 ;表征化学特性的因子可分解为耐酸性 F_1 、玻璃化转变温度 F_2 及热稳定性 F_3 ;表征生物特性的因子可表征为肠道溶出性 G_1 、贮藏稳定 G_2 以及胃酸耐受性 G_3 。益生菌微胶囊干燥技术多过程分级评价指标体系如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 云模型

云模型是一种通过不确定性语言对复杂评价系统的随机性与波动性进行定量刻画的数学模型^[21],很好的对以往评价过程中存在的随机性以及模糊性进行了结合,可以更加客观且准确的实现不同干燥技术对益生菌微胶囊干燥效果评价中受多因素耦合影响的多源性机理评价问题。按照云模型的评价机理,每一个评价的云模型都可将正逆向云发生器 CG 作为基础,以 Ex (期望)、 En (熵)、 He (超熵)这 3 个云数字特征实现对多因素

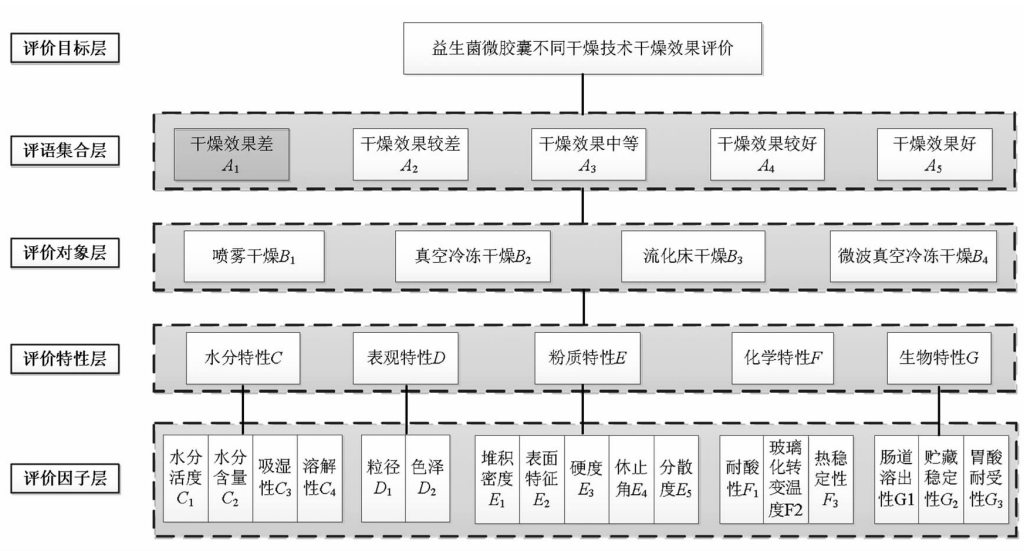


图1 不同干燥方式在益生菌微胶囊中的干燥效果评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of drying effect of different drying methods in probiotic microcapsule

耦合关联问题的定量表征。其中, Ex (期望)可以反映出云滴的重心分布位置, 即代表不同干燥技术干燥效果、驱动因子及驱动特性的隶属度的中心值; En (熵)主要用于描述云滴分布的模糊性及离散度, 反映不同干燥技术干燥效果、驱动因子及驱动特性的可能取值范围; He (超熵)主要用于描述云滴分布的厚度, 用来反映干燥效果、驱动因子及驱动特性与隶属度中心值的偏离程度^[22]。云模型的概念特征原理图如图2及图3所示, 其依据定

量与定性间的转换关系, 将分析过程分为正向云发生器和逆向云发生器。其中, 正向发生过程是指将定性概念转换成定量数值, 通过得到的定量云模型参数(Ex 、 En 、 He)生成云滴, 而逆向发生过程则与之相反。这种评价方法的使用可实现对受多因素耦合影响的多源性机理评价问题的定量转化, 具体的实现过程包括: 依次不同干燥技术干燥效果的评语集云模型, 评价等级的标准云模型以及隶属度云模型。

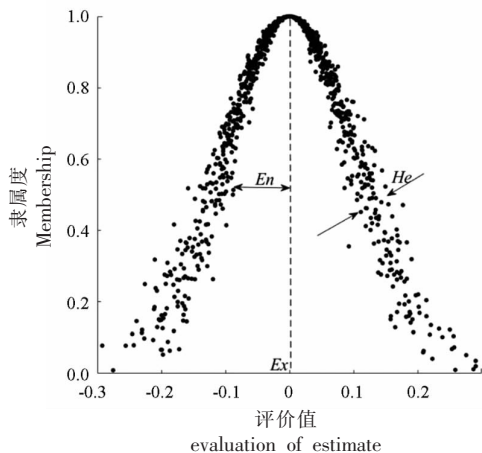


图2 正态云模型数字特征

Fig.2 Normal cloud model digital features

2.2 评价标准云与指标赋权

益生菌微胶囊干燥效果评语集的确立是为实现不同干燥方法对于益生菌微胶囊干燥效果的定

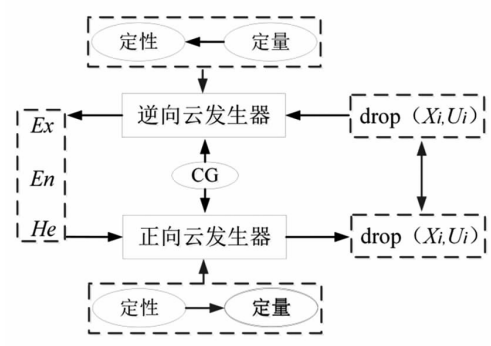


图3 云发生器原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of cloud generator

性状态定量化揭示, 这种等级确定过程中受多要素影响从而表征出明显的模糊性, 传统评价方法虽然在一定程度上消除了这种模糊性, 但受指标

的多源性及非线性影响, 往往存在评价结果偏离客观性, 且灵活性较差。结合前文构建的多过程分级评价指标体系, 本文引入黄金分割率法^[23], 确定评语集为 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\} = \{\text{干燥效果差, 干燥效果较差, 干燥效果中等, 干燥效果较好, 干燥效果好}\}$, 因而本文以此为基础构建基于云模型的标准评价云。定义 $Ex \in [0, 1]$, 当 Ex 接近于 0.5 时, 即表明评价等级为评语集的中间等级 (干燥效果中等), 结合黄金分割原则, 定义两两等级之间的等级折算系数为 0.618, 即 $En_{\min} = 0.618En_{\max}$, $He_{\min} = 0.618He_{\max}$, 在此, 以“干燥效果较好 A_4 ”与“干燥效果好 A_5 ”为例, 计算如下:

“干燥效果较好 (A_4)”云数字参数:

$$Ex_4 = Ex_3 + (1 - 0.618)(x_{\max} + x_{\min}) / 2 = 0.691$$

$$En_4 = (1 - 0.618)(x_{\max} - x_{\min}) / 6 = 0.064$$

$$He_4 = He_3 / 0.618 = 0.0081$$

“干燥效果好 (A_5)”云数字参数:

$$Ex_5 = 1; En_5 = En_4 / 0.618 = 0.103$$

$$He_5 = He_4 / 0.618 = 0.0131$$

计算可得各评价等级云数字特征分别为 A_1 (0, 0.103, 0.1031)、 A_2 (0.309, 0.064, 0.0081)、 A_3 (0.50, 0.031, 0.005)、 A_4 (0.691, 0.064, 0.0081)、 A_5 (1, 0.103, 0.0131), 通过 MATLAB 仿真得图 4。

指标赋权是评价问题中的核心内容, 传统评价方法可归分为两类, 分别为主观赋权与客观赋权。其中主观赋权虽然可以很大程度上把控指标的重要性, 但主观性较为突出; 客观赋权通过数学模型分析, 有效摒弃了人为经验性的干扰, 但往往忽略了指 标的实际重要性, 造成评价结果不能真实反映实际问题。为确保评价结果的可靠性, 本文引入综合赋权的方法^[24], 将主观信息与客观信息进行有效融合, 计算过程如下:

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{-2\ln(\frac{2(i-1)}{n})}}{6}, & 1 < i \leq \frac{n+1}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{-2\ln(2 - \frac{2(i-1)}{n})}}{6}, & \frac{n+1}{2} < i \leq n \end{cases} \quad (1)$$

式中: n ——指标个数; i ——排队等级。

2.3 隶属度与综合评价云

基于云发生器原理, 界定评价阈值为 [0~1], 结合已有 4 种干燥方式对益生菌微胶囊干燥方法的

研究, 根据他们采用不同干燥方式对于益生菌微胶囊的干燥效果, 依据评语层对评价因子层进行打分, 基于 3δ 原则以及 $He < 1/3En$ 原则^[25]对源评价分值进行有效剔除选, 确保评价分值的客观准确性, 隶属度云计算过程如图 5 所示。

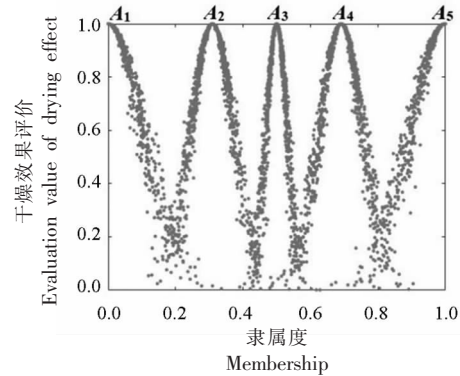


图 4 干燥效果评价标准云

Fig.4 Drying effect evaluation standard cloud

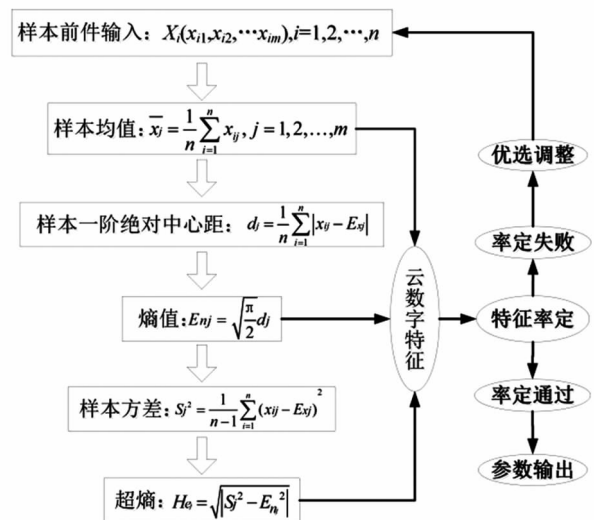


图 5 隶属度云模型计算过程

Fig.5 Membership cloud model calculation process

基于各指标权重及与隶属度云模型依据式 (2) 计算综合评价云。

$$\begin{cases} Ex = \sum_{i=1}^m E_{xi} \omega_i \\ Ex = \sqrt{\sum_{i=1}^m (En_i^2 \omega_i)} \\ He = \sum_{i=1}^m He_i \omega_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, m ——指标个数; ω_i ——各指标权重。

评价因子权重的判定结果,分别对评价因子层与评价特性层进行排队等级确定,并按照排队等级进一步求解各层对应权重。评价因子层及评价特性层各要素权重计算分析结果见表1及表2。

3 结果与分析

3.1 指标权重计算结果

根据已有针对益生菌微胶囊干燥效果评价中

表1 “评价因子层”分级指标权重

Table 1 "Evaluation factor layer" grading index weight

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	D_1	D_2	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	F_1	F_2	F_3	G_1	G_2	G_3
排队等级	1	1	2	2	1	2	3	1	2	3	2	1	2	2	2	2	1
权重	1	1	0.70	0.70	1	0.50	0.61	1	0.73	0.61	0.73	1	0.65	0.65	0.65	0.65	1
归一化	0.29	0.29	0.21	0.21	0.67	0.33	0.17	0.26	0.20	0.17	0.20	0.44	0.28	0.28	0.28	0.28	0.44

表2 “评价特性层”分级指标权重

Table 2 Grading index weight of "evaluation characteristic layer"

指标	C	D	E	F	G
排队等级	1	3	3	2	1
权重	1	0.61	0.61	0.73	1
归一化	0.25	0.16	0.16	0.18	0.25

由表1可知,排队序列等级为1级的评价因子分别为:水分活度 C_1 、水分含量 C_2 、粒径 D_1 、表面特征 E_2 、耐酸性 F_1 、胃酸耐受性 G_3 ,表明这些评价因子对益生菌微胶囊理化特征的影响程度相对较高,其权重值较高。而堆积密度 E_1 与休止角 E_4 对于益生菌微胶囊理化特性的代表性则相对较低。同理由表2可知,水分特性与生物特性的权重值相对较高,表明这两种评价特性对于益生菌微胶囊理化特征的驱动性较为显著。

3.2 隶属度云模型计算结果

3.2.1 因子层隶属度云模型计算结果 根据已有关于益生菌微胶囊干燥效果的文献梳理以及试验

过程数据采集分析,对益生菌微胶囊的不同干燥方式依据评语集合层进行分值评价,为确保评价结果的客观性,综合考虑不同研究人员在分析过程中的特殊性,主要包括已有研究中不同研究人员所包埋的菌种、所选壁材、干燥的工艺手段等,对于每一种干燥效果从不同评价角度进行评价并设定评价样本量为5份,评定值域设定为[0,1]。将所有评定结果进行数据可靠性甄选调整,将最终获得的有效评价结果基于隶属度云发生器原理,分别计算不同干燥方式下各评价因子对应的隶属度云,计算结果如表3~表6所示。

表3 喷雾干燥法因子层隶属度云模型

Table 3 "Factor layer" membership cloud model for spray drying method

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	D_1	D_2	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	F_1	F_2	F_3	G_1	G_2	G_3
期望	0.41	0.43	0.42	0.45	0.45	0.43	0.51	0.55	0.52	0.52	0.53	0.48	0.42	0.47	0.51	0.43	0.47
熵	0.082	0.087	0.113	0.075	0.04	0.051	0.072	0.044	0.056	0.073	0.031	0.062	0.081	0.043	0.054	0.061	0.07
超熵	0.005	0.002	0.009	0.005	0.011	0.008	0.007	0.008	0.011	0.013	0.015	0.007	0.013	0.011	0.006	0.012	0.011

表4 真空冷冻干燥法因子层隶属度云模型

Table 4 "Factor layer" membership cloud model for vacuum freeze drying

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	D_1	D_2	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	F_1	F_2	F_3	G_1	G_2	G_3
期望	0.55	0.57	0.56	0.55	0.54	0.55	0.56	0.55	0.58	0.59	0.55	0.56	0.57	0.60	0.66	0.65	0.63
熵	0.055	0.062	0.071	0.061	0.025	0.062	0.117	0.111	0.012	0.043	0.078	0.052	0.028	0.037	0.055	0.054	0.06
超熵	0.002	0.012	0.017	0.015	0.007	0.004	0.015	0.01	0.011	0.009	0.012	0.013	0.005	0.008	0.01	0.016	0.015

表 5 流化床干燥法因子层隶属度云模型

Table 5 "Factor layer" membership cloud model for fluidized bed drying

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	D_1	D_2	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	F_1	F_2	F_3	G_1	G_2	G_3
期望	0.61	0.64	0.65	0.67	0.72	0.75	0.68	0.61	0.66	0.65	0.64	0.65	0.65	0.67	0.70	0.73	0.72
熵	0.085	0.054	0.077	0.09	0.048	0.071	0.101	0.047	0.065	0.051	0.049	0.044	0.038	0.042	0.041	0.053	0.05
超熵	0.011	0.007	0.009	0.012	0.014	0.017	0.009	0.007	0.004	0.009	0.011	0.012	0.015	0.009	0.016	0.012	0.008

表 6 微波真空冷冻干燥法因子层隶属度云模型

Table 6 "Factor layer" membership cloud model of micro vacuum freeze drying

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	D_1	D_2	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	F_1	F_2	F_3	G_1	G_2	G_3
期望	0.69	0.75	0.66	0.73	0.72	0.71	0.76	0.78	0.77	0.74	0.73	0.79	0.76	0.78	0.83	0.85	0.84
熵	0.082	0.055	0.081	0.047	0.042	0.075	0.101	0.048	0.055	0.064	0.039	0.052	0.041	0.037	0.054	0.06	0.05
超熵	0.017	0.015	0.008	0.012	0.011	0.016	0.011	0.012	0.007	0.014	0.015	0.013	0.007	0.006	0.008	0.011	0.015

3.2.2 特性层隶属度云模型计算结果 同理可得 算结果如表 7~表 10 所示。
4 种干燥方式下各评价特性对应的隶属度云,计

表 7 喷雾干燥法特性层隶属度云模型

Table 7 "Characteristic layer" membership cloud model for spray drying method

指标	C	D	E	F	G
期望	0.4263	0.4434	0.5281	0.4604	0.4700
熵	0.0895	0.0439	0.0558	0.0636	0.0634
超熵	0.0049	0.0101	0.0107	0.0098	0.0099

表 8 真空冷冻干燥法特性层隶属度云模型

Table 8 "Characteristic layer" membership cloud model for vacuum freeze drying

指标	C	D	E	F	G
期望	0.5579	0.5433	0.5645	0.5740	0.6440
熵	0.0619	0.0411	0.0842	0.0423	0.0569
超熵	0.0108	0.0060	0.0113	0.0094	0.0139

表 9 流化床干燥法特性层隶属度云模型

Table 9 "Characteristic layer" membership cloud model for fluidized bed drying

指标	C	D	E	F	G
期望	0.6397	0.7299	0.6447	0.6556	0.7172
熵	0.0767	0.0566	0.0638	0.0418	0.0486
超熵	0.0096	0.0149	0.0079	0.0120	0.0114

表 10 微波真空冷冻干燥法特性层隶属度云模型

Table 10 "Characteristic layer" membership cloud model of micro vacuum freeze drying

指标	C	D	E	F	G
期望	0.7095	0.7167	0.7578	0.7788	0.8400
熵	0.0683	0.0551	0.0628	0.0452	0.0541
超熵	0.0135	0.0127	0.0118	0.0094	0.0119

3.3 综合评价与分析

同理,由评价特性层云数字特征按照隶属云模型计算原则,可得到不同干燥方式干燥效果的综合评价云数字特征,分别为:喷雾干燥 Z_{B1} (0.4624, 0.0674, 0.0088)、真空冷冻干燥 Z_{B2} (0.5810, 0.0591, 0.0106)、流化床干燥 Z_{B3} (0.6772, 0.0595, 0.0111)、微波真空冷冻干燥 Z_{B4} (0.7635, 0.0582, 0.0119)。将不同干燥方法的干燥效果综合评价云与标准云 MATLAB 仿真显示见图 6。结合 4 种干燥方式的综合评价云数字特征分布结果和评价标准云的分布可知,喷雾干燥 B_1 、真空冷冻干燥 B_2 、流化床干燥 B_3 、微波真空冷冻

干燥 B_4 分别属于“干燥效果较差 A_2 ~干燥效果中等 A_3 ”、“干燥效果中等 A_3 ~干燥效果较好 A_4 ”、“干燥效果较好 A_4 ”、“干燥效果较好 A_4 ~干燥效果好 A_5 ”,从评价结果来看,4 种干燥方式对于益生菌微胶囊的干燥效果综合排序为“微波真空冷冻干燥 B_4 >流化床干燥 B_3 >真空冷冻干燥 B_2 >喷雾干燥 B_1 ”;4 种干燥方式对应的熵 (En) 分别为 0.0674, 0.0591, 0.0595 及 0.0582,超熵 (He) 分别为 0.0088, 0.0106, 0.0111 及 0.0119,熵 (En) 与超熵 (He) 评价数值均较小,且 He/En 均小于 1/3,表明评价结果可靠且雾化程度相对较低。

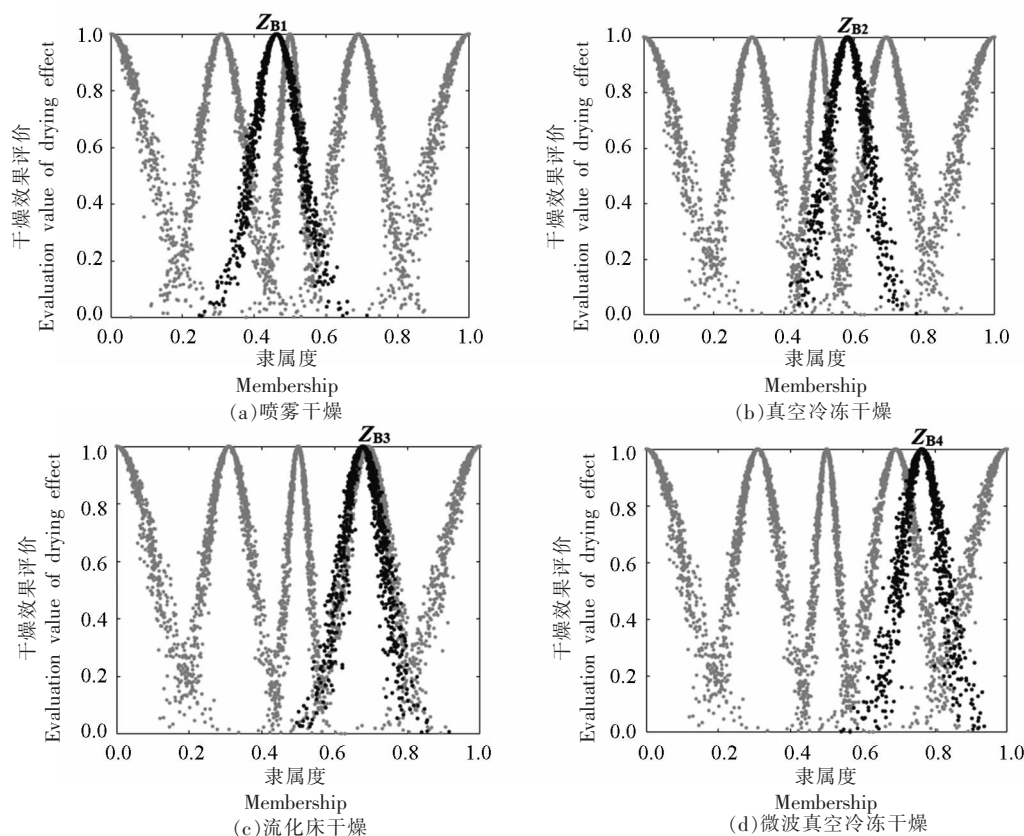


图 6 不同干燥方式干燥效果综合评价结果云图

Fig.6 Comprehensive evaluation results of drying effects of different drying methods

4 讨论

将云模型应用到益生菌微胶囊的不同干燥方法干燥效果评价中,从评价结果来看,4 种干燥方式的干燥效果性能从优到劣分别为微波真空冷冻干燥 B_4 、流化床干燥 B_3 、真空冷冻干燥 B_2 以及喷雾干燥 B_1 。为验证评价结果可靠性,在此分别引入模糊综合评判模型^[26]以及云重心评判模型^[27]对 4

种干燥方法对益生菌微胶囊的干燥效果进行评价,并对 3 种模型评价结果进行误差分析,结果如表 11 所示。由分析结果可知,3 种评价模型的评价结果较为接近,最大误差为 1.19%,最小误差仅为 0.45%。此外,综合评价云模型有 3 个云数字特征。相比其余两种方法的一个特征数字,其评价结果更客观可信。

表 11 评价结果误差分析

Table 11 Error analysis of evaluation results

干燥方法	综合评价云模型	模糊综合评判模型	云重心评判模型	误差值 1	误差值 2
喷雾干燥 B_1	(0.4624,0.0674,0.0088)	0.4645	0.4547	0.45%	1.67%
真空冷冻干燥 B_2	(0.5810,0.0591,0.0106)	0.5914	0.5743	1.79%	1.15%
流化床干燥 B_3	(0.6772,0.0595,0.0111)	0.6836	0.6685	0.95%	1.28%
微波真空冷冻干燥 B_4	(0.7635,0.0582,0.0119)	0.7739	0.7549	1.36%	1.13%

注:表中误差值 1、误差值 2 分别为模糊综合评判法、云重心评判法与综合评价云的误差值。

结合评价结果来看,4 种干燥方式对于益生菌微胶囊的干燥作用效果中,干燥效果最差的为喷雾干燥,这主要由于喷雾干燥在干燥过程中施加的高温、渗透胁迫、脱水和氧等条件对益生菌膜类物质,如脂肪酸、胞内蛋白质、核糖体、DNA 和 RNA 等造成机理损伤。Desmond 等^[28]、Andreia 等^[29]、Sultan 等^[30]及 Mukundan 等^[31]分别就副干酪乳杆菌、嗜酸乳杆菌、布氏链球菌及 β -半乳糖苷酶活性的乳链球菌采用喷雾干燥法进行了微胶囊的制备与机理研究。研究发现虽然可以通过调整喷雾干燥参数及制备材料,如入口/出口温度、流量、雾化空气压力、在干燥室内停留时间以及壁材改善这种干燥模式的原生损伤作用,但受其固有干燥模式的缺陷制约,喷雾干燥微胶囊粉末中的残余水分含量较高,而益生菌微胶囊在储存过程中水分含量高,会加速细胞的死亡,导致粉末黏在旋风和收集瓶上,增加操作难度,降低产率;其次干燥效果较差的为真空冷冻干燥,由于真空冷冻干燥过程中益生菌经历低温、低水活性等不利环境条件的影响,导致益生菌胞内或胞外形成冰晶,从而对细胞造成机械损伤。为在一定程度上缓解这种损伤,Wang 等^[32]、Holkem 等^[33]分别探究了菌株在不同的预冷冻温度、不同的保护剂下真空冷冻干燥后存活率的变化趋势。发现在一定条件下,改变预冻温度及适当添加保护剂可以提高植物乳杆菌的存活率,表明预冻温度及保护剂会改变细胞膜完整性、膜透性和乳酸脱氢酶活性从而影响菌的生存能力。此外,Huang^[34]、Rengadu^[35]、Lelia^[36]、Paula^[37]、付博等^[38]分别就双歧杆菌、罗伊氏乳杆菌、干酪乳杆菌、乳双歧杆菌以及植物乳杆菌采用真空冷冻干燥的方式进行了不同壁材微胶囊的制备与研究,并探究了真空冷冻干燥与喷雾干燥两

种干燥方式制备下的微胶囊理化特性。研究表明,真空冷冻干燥活菌数高于喷雾干燥,水分含量较低,且其溶解性优于喷雾干燥制备的菌粉,但真空冷冻干燥耗能高、效率低,菌粉保藏期较短;流化床干燥对于益生菌微胶囊的干燥效果相对较好,这与流化床喷涂方法以及在流化床操作中可控的多变量有关,流化床干燥通过控制过程变量(入口空气温度、空气速度、喷雾速率、雾化压力),环境变量(环境空气温度、环境空气相对湿度)和热力学变量(出口空气温度和出口空气相对湿度)等要素^[8],以此来对益生菌微胶囊的干燥过程中的理化性质及粉质特性进行控制,干燥后的微胶囊呈球状,结构坚固,而真空冷冻干燥的微胶囊则具有多孔、易碎的结构特性。Silva 等^[39]以海藻酸钠和海藻酸钠-虫胶共混物为壁材,采用共挤压技术制备了乳杆菌微胶囊,对这一结论进行了验证;相比于其它 3 种传统干燥方法,微波真空冷冻干燥对于益生菌微胶囊的干燥效果最好,微波真空冷冻干燥是一种将微波场与真空冷冻相结合使用的干燥技术,从内到外对物料进行加热,物料受热较为均匀,且相比于传统的干燥技术,干燥时间明显缩短、干燥速率明显提高、能耗明显降低。Ambros 等^[12,40]采用微波真空冷冻干燥对 2 种代表性的乳酸杆菌和动物双歧杆菌进行了干燥,评估了其存活率和细胞膜完整性。研究表明微波冷冻干燥后的存活率和膜完整性与传统冻干过程相比,对于乳酸菌而言几乎可以在所有微波冷冻干燥工艺条件下存活,对于动物双歧杆菌而言在适宜的工艺条件下存活率达 96%。

5 结论与展望

喷雾干燥、真空冷冻干燥、流化床干燥以及微

波真空冷冻干燥4种干燥方式干燥效果综合评价云数字特征分别为: $ZB_1(0.4624, 0.0674, 0.0088)$ 、 $ZB_2(0.5810, 0.0591, 0.0106)$ 、 $ZB_3(0.6772, 0.0595, 0.0111)$ 、 $ZB_4(0.7635, 0.0582, 0.0119)$ 。其云滴重心分布分别隶属“干燥效果较差 A_2 ~干燥效果中等 A_3 ”、“干燥效果中等 A_3 ~干燥效果较好 A_4 ”、“干燥效果较好 A_4 ”、“干燥效果较好 A_4 ~干燥效果好 A_5 ”区间。4种干燥方式对于益生菌微胶囊的干燥效果综合排序为“微波真空冷冻干燥>流化床干燥>真空冷冻干燥>喷雾干燥”。本文通过类比分析4种益生菌微胶囊干燥技术,将解决系统性、模糊性以及不确定问题具有显著优势的云模型应用到益生菌微胶囊干燥技术干燥效果的综合评估中。相比于传统评价方法,综合评价云的评价结果更全面,丰富、客观且可信。这为食品与生物领域的干燥技术效果综合评价提供了一种新思路。

益生菌微胶囊的生理活性功能虽被广泛研究,并应用于生物活性物质保护及益生菌类产品开发等众多领域,但因其理化特性所存在的缺陷,如受水分特性、化学特性及生物特性不稳定性的影响,限制了其在生物医药及食品领域的应用。通过多种干燥技术处理可以改善益生菌的包封、递送和释放,提高其在人体内的生物利用率,然而,益生菌微胶囊对这些干燥技术的响应机制仍需探明,从而揭示其在各种运载体系中的消化吸收和代谢机制。

参 考 文 献

- [1] FAO/WHO. Health and nutritional properties probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria[R]// Report on Joint FAO/WHO Expert Consultation on Evaluation of Health and Nutritional Properties of Probiotics in Food Including Powdered Milk with Live Lactic Acid Bacteria C6rdoaba. Argentina: FAO/WHO, 2001.
- [2] WU J W, WEI Z H, CHENG P, et al. Rhein modulates host purine metabolism in intestine through gut microbiota and ameliorates experimental colitis[J]. *Theranostics*, 2020, 10(23): 10665–10697.
- [3] VASILJEVIC T, SHAH N P. Probiotics—from metchnikoff to bioactives[J]. *International Dairy Journal*, 2008, 18(7): 714–728.
- [4] 吕瑞瑞, 杨成聪, 赵飞燕, 等. 益生菌 Probio-XR 对远航海员肠道中乳酸菌菌群的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(9): 71–78.
LÜ R R, YANG C C, ZHAO F Y, et al. Effect of probiotics probio-XR on intestinal lactic acid bacteria in long-sea-voyage sailors[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(9): 71–78.
- [5] SAMUEL C F, TREVOR D L. Systematic discovery of probiotics[J]. *Nature Biotechnology: The Science and Business of Biotechnology*, 2015, 33(1): 47–49.
- [6] PRISCO A D, MAURIELLO G. Probiotication of foods: A focus on microencapsulation tool[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 48: 27–39.
- [7] DESAIK K, PARK H J. Recent developments in microencapsulation of food ingredients[J]. *Drying Technology*, 2005, 23(7): 1361–1394.
- [8] BROECKX G, VANDENHEUVEL D, CLAES I J J, et al. Drying techniques of probiotic bacteria as an important step towards the development of novel pharmabiotics[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2016, 505(1/2): 303–318.
- [9] FLORES-ANDRADE, ENRIQUE, JIMENEZ, et al. Effect of water activity on the stability of *Lactobacillus paracasei* capsules[J]. *LWT—Food Science & Technology*, 2015, 60(1): 346–351.
- [10] RAY S, RAYCHAUDHURI U, CHAKRABORTY R. An overview of encapsulation of active compounds used in food products by drying technology[J]. *Food Bioscience*, 2015, 13(1): 76–83.
- [11] AMBROS S, MAYER R, SCHUMANN B, et al. Microwave-freeze drying of lactic acid bacteria: Influence of process parameters on drying behavior and viability[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 48: 90–98.
- [12] RAJAM R, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* (MTCC 5422) with fructooligosaccharide as wall material by spray drying[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 773–780.
- [13] BARBOSA J, TEIXEIRA P. Development of probiotic fruit juice powders by spray-drying: A review[J]. *Food Reviews International*, 2017, 33(4): 335–358.

- [14] JULIEN A, SEVERINE V. A review on experimental determination and optimization of physical quality factors during pharmaceuticals freeze-drying cycles[J]. *Drying Technology*, 2017, 36(2): 129-145.
- [15] RODRIGUES B M, OLIVO P M, O SMA RI M P, et al. Microencapsulation of probiotic strains by lyophilization is efficient in maintaining the viability of microorganisms and modulation of fecal microbiota in cats [J]. *International Journal of Microbiology*, 2020, 2020(1/2): 1-10.
- [16] STRASSER S, NEUREITER M, GEPPL M, et al. Influence of lyophilization, fluidized bed drying, addition of protectants, and storage on the viability of lactic acid bacteria[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 107(1): 167-177.
- [17] DUAN X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, WANG R. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(4): 444-453.
- [18] PODDAR D, DAS S, JONES G, et al. Stability of probiotic *Lactobacillus paracasei* during storage as affected by the drying method[J]. *International Dairy Journal*, 2014, 39(1): 1-7.
- [19] CHALINE, CAREN, COGHETTO, et al. Viability and alternative uses of a dried powder, microencapsulated *Lactobacillus plantarum* without the use of cold chain or dairy products[J]. *Lwt Food Science & Technology*, 2016, 71: 54-59.
- [20] MARIA F Z, REINHEIMER J A, VINDEROLA G, et al. Effects of conventional and nonconventional drying on the stability of *Bifidobacterium animalis* subsp. lactis INL1[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2020, 73(3): 625-633.
- [21] 胡石元, 李德仁, 刘耀林, 等. 基于云模型和关联度分析法的土地评价因素权重挖掘[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(5): 423-427.
- HU S Y, LI D R, LIU Y L, et al. Mining weights of land evaluation factors based on cloud model and correlation analysis[J]. *Wuhan Daxue Xuebao (Geomatics and Information Science of Wuhan University)*, 2006, 31(5): 423-427.
- [22] 张杨, 严金明, 江平, 等. 基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 252-258.
- ZHANG Y, YAN J M, JIANG P, et al. Normal cloud model based evaluation of land resources ecological security in Hubei province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(22): 252-258.
- [23] 傅鹤林, 黄震, 黄宏伟, 等. 基于云理论的隧道结构健康诊断方法[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(5): 794-801.
- FU H L, HUANG Z, HUANG H W, et al. Health diagnosis method of shield tunnel structure based on theory[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(5): 794-801.
- [24] 魏巍贤, 冯佳. 多目标权系数的组合赋值方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 1998(2): 14-16.
- WEI W X, FENG J. Study on multiobjective weights Combination Assigning Method [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1998(2): 14-16.
- [25] WANG J Q, PENG L, ZHANG H Y, et al. Method of multi-criteria group decision-making based on cloud aggregation operators with linguistic information [J]. *Information Sciences*, 2014, 274(274): 177-191.
- [26] 许江, 李克钢. 模糊理论在公路边坡稳定性分析中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(2): 61-64.
- XU J, LI K G. Application of fuzzy theory on slope stability assessment for expressway[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(2): 61-64.
- [27] 杨峰, 王碧垚, 赵慧波, 等. 基于云模型的战略预警信息系统效能评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(7): 1334-1338.
- YANG F, WANG B Y, ZHAO H B, et al. Effectiveness evaluation for strategy early-warning information system based on cloud model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(7): 1334-1338.
- [28] DESMOND C, ROSS R P, O'CALLAGHAN E, et al. Improved survival of *Lactobacillus paracasei* NF-BC 338 in spray-dried powders containing gum acacia[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2002, 93(6): 1003-1011.
- [29] ANDREIA A M L, ANTONIO M D A C, SOUZA M N M D, et al. Soy extract and maltodextrin as microencapsulating agents for *Lactobacillus acidophilus*: a model approach[J]. *Journal of Microencapsulation*, 2018, 35(7/8): 705-719.
- [30] SULTAN A, MUSTAFA E, ISMAIL T, et al. Mi-

- croencapsulation of probiotic *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* with different wall materials by spray drying[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2015, 63(1): 685–690.
- [31] MUKUNDAN S, MELO J S, SEN D, et al. Enhancement in β -galactosidase activity of *Streptococcus lactis* cells by entrapping in microcapsules comprising of correlated silica nanoparticles[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2020, 195: 111245.
- [32] WANG G Q, PU J, YU X Q, et al. Influence of freezing temperature before freeze-drying on the viability of various *Lactobacillus plantarum* strains [J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(4): 3066–3075.
- [33] HOLKEM A T, RADDATZ G C, NUNES G L, et al. Development and characterization of alginate microcapsules containing *Bifidobacterium* BB-12 produced by emulsification/internal gelation followed by freeze drying [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 71: 302–308.
- [34] HUANG X, GANZLE M, ZHANG H, et al. Microencapsulation of probiotic lactobacilli with shellac as moisture barrier and to allow controlled release[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(2): 726–734.
- [35] RENGADU D, GERRANO A S, MELLEM J J. Microencapsulation of *Lactobacillus casei* and *Bifidobacterium animalis* enriched with resistant starch from vigna unguiculata[J]. *Starch - Starke*, 2021, 73(7/8): 2000247.
- [36] LELIA P O, THORSTEN B, JENS S, et al. The influence of different polymers on viability of *Bifidobacterium lactis* 300b during encapsulation, freeze-drying and storage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(7): 4146–4155.
- [37] PAULA D D A, MARTINS E M F, COSTA N D A, et al. Use of gelatin and gum arabic for microencapsulation of probiotic cells from *Lactobacillus plantarum* by a dual process combining double emulsification followed by complex coacervation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 133: 722–731.
- [38] 付博, 马齐, 王卫卫, 等. 真空冷冻干燥与喷雾干燥长双歧杆菌的工艺比较研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(7): 188–192.
- FU B, MA Q, WANG W W, et al. Comparison of vacuum freeze-drying and spray-drying processes for active *Bifidobacterium longum* powder production[J]. *Food Science*, 2012, 33(7): 188–192.
- [39] SILVA M P, TULINI F L, RIBAS M 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(1): 582–590.
- [40] AMBROS S, FOERST P, KULOZIK U. Temperature-controlled microwave-vacuum drying of lactic acid bacteria: Impact of drying conditions on process and product characteristics[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 224(5): 80–87.

Evaluation of Probiotic Microcapsule Drying Technology Based on Cloud Model

Liu Zhiqin¹, Chen Junliang¹, Ren Guangyue^{1,2*}, Duan Xu^{1,2}, Cao Weiwei¹, Li Linlin¹

(¹College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan

²Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Zhengzhou 450001)

Abstract The drying preparation technology of probiotic microcapsules is the key to ensure the stability of probiotics during long-term storage. In order to objectively evaluate the drying effect of different drying techniques on probiotic microcapsules. In this paper, the applications of spray drying (B_1), vacuum freeze drying (B_2), fluidized bed drying (B_3) and microwave vacuum freeze drying (B_4) 4 in probiotic microcapsule drying were analyzed. The multi-process grading evaluation index system of probiotic microcapsule drying technology was constructed. Based on the queuing theory, the sequence grades and weights of water characteristics, apparent characteristics, structural characteristics, chemical characteristics, biological characteristics and evaluation factors were determined. At the same time, the cloud evaluation model of probiotic microcapsule drying technology was constructed by introducing the golden section method and cloud generator

principle, and the drying effects of four drying methods on probiotic microcapsules were quantitatively evaluated. The results showed that the comprehensive evaluation of the four drying techniques were Z_{B_1} (0.4624, 0.0674, 0.0088), Z_{B_2} (0.5810, 0.0591, 0.0106), Z_{B_3} (0.6772, 0.0595, 0.0111) and Z_{B_4} (0.7635, 0.0582, 0.0119), respectively. The comprehensive order of drying performance of probiotic microcapsules is $B_4 > B_3 > B_2 > B_1$. The research method and conclusion can provide theoretical support and useful reference for enriching and perfecting the drying technology of probiotic microcapsules.

Keywords drying technology; probiotics; microencapsulation; cloud model