

乳酸菌发酵香菇汁过程中品质变化及动力学模型的建立

康馨月¹, 廖姿莹¹, 马一鸣¹, 胡国元^{1,2*}

(1. 武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 绿色化工过程教育部重点实验室, 湖北武汉 430205)

(2. 湖北裕国菇业股份有限公司, 湖北省香菇产业技术研究院, 湖北随州 441300)

摘要: 利用乳酸菌发酵香菇汁, 研究发酵过程中活菌数、理化指标及抗氧化活性的变化规律, 并采用 Logistic、SGompertz、Boltzmann 和 DoseResp 模型对发酵过程中乳酸菌生长、总酸生成及还原糖消耗进行非线性拟合, 建立乳酸菌发酵香菇汁的发酵动力学模型。结果表明, 乳酸菌在香菇汁中生长良好, 24 h 时活菌数最高, 为 8.95 log CFU/mL; 发酵过程中总酸、总酚、总黄酮、可溶性蛋白含量不断升高, 最高分别达到 6.86 g/L、232.82 mg/L、101.89 mg/L、291.25 μg/mL; DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基清除能力较发酵前分别提升了 54.46%、26.96% 和 211.84%。在乳酸菌生长和总酸生成的动力学模型中, 均采用 Dose Resp 模型最佳, R^2 分别为 0.9987 和 0.9998; Boltzmann 模型和 Dose Resp 模型均可用于定量描述发酵过程中还原糖的消耗情况, 两个模型的 R^2 均为 0.9996。因此, 利用乳酸菌发酵可提升香菇汁品质, 所选模型与实验值拟合度较高, 能够较好反映乳酸菌发酵香菇汁过程中的动力学特征, 为乳酸菌发酵香菇汁的进一步工业化生产提供理论依据。

关键词: 乳酸菌; 香菇汁; 发酵; 品质; 动力学模型

文章编号: 1673-9078(2024)11-140-148

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1285

Quality Change and Kinetic Model of *Lentinula edodes* Juice Fermentation by Lactic Acid Bacteria

KANG Xinyue¹, LIAO Ziyang¹, MA Yiming¹, HU Guoyuan^{1,2*}

(1.Key Laboratory for Green Chemical Process of Ministry of Education, School of Environmental Ecology and Bioengineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

(2.Hubei Shiitake Industry Technology Research Institute, Hubei Yuguo Gu Ye Co. Ltd., Suizhou 441300, China)

Abstract: Lactic acid bacteria was used for *Lentinula edodes* juice fermentation. The changing trends of viable bacterial counts, physicochemical indexes, and antioxidant activities during the fermentation process were investigated. The growth of lactic acid bacteria, total acid production, and reducing sugar consumption were fitted using the Logistic, SGompertz, Boltzmann, and Dose Resp models to establish the kinetic model for *Lentinula edodes* juice fermentation by

引文格式:

康馨月, 廖姿莹, 马一鸣, 等. 乳酸菌发酵香菇汁过程中品质变化及动力学模型的建立[J]. 现代食品科技, 2024, 40(11):140-148.

KANG Xinyue, LIAO Ziyang, MA Yiming, et al. Quality change and kinetic model of *Lentinula edodes* juice fermentation by lactic acid bacteria [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 140-148.

收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 湖北省乡村振兴科技支撑项目 (2022BBA144)

作者简介: 康馨月 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食用菌资源利用, E-mail: kxy1003@163.com

通讯作者: 胡国元 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 微生物资源的利用与开发, E-mail: hgy701@163.com

lactic acid bacteria. The results show that lactic acid bacteria grew well in *Lentinula edodes* juice, with the highest viable count (8.95 log CFU/mL) occurring at the 24th h. The total acid content, total phenolic content, total flavonoid content, and soluble protein content increased continuously during the fermentation process, reaching maximal values of 6.86 g/L, 232.82 mg/L, 101.89 mg/L, and 291.25 μ g/mL, respectively. The scavenging capacity of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical, hydroxyl radical, and superoxide anion radical increased by 54.46%, 26.96%, and 211.84%, respectively, compared with those before fermentation. The Dose Resp model was the best kinetic model for both the lactic acid bacteria growth and total acid production, with R^2 values being 0.998 7 and 0.999 8, respectively. Both the Boltzmann model and the Dose Resp model can be used to describe quantitatively the consumption of reducing sugars during the fermentation process, with R^2 values being 0.999 6 for both models. Therefore, the quality of *Lentinula edodes* juice can be improved via fermentation with lactic acid bacteria. The selected models fit well with the experimental values, which can reflect the kinetic characteristics of *Lentinula edodes* juice fermentation by lactic acid bacteria. This study provides a theoretical basis for further industrial production of fermented *Lentinula edodes* juice with lactic acid bacteria.

Key words: lactic acid bacteria; *Lentinula edodes* juice; fermentation; quality; kinetic model

香菇 (*Lentinula edodes*) 又名花蕈、花菇等, 属担子菌纲伞菌目口蘑科真菌, 是世界第二大栽培食用菌^[1]。在我国, 香菇主要种植于福建、湖北、浙江、安徽等地。其肉质鲜美, 香味醇厚, 深受广大消费者的青睐。香菇的营养价值很高^[2], 具有高蛋白、低脂肪的特点, 富含多种维生素和矿物质。同时, 香菇中含有香菇多糖、香菇嘌呤、香菇多酚、膳食纤维等功能性成分, 并具有抗肿瘤、抗氧化、免疫调节、抗病毒等活性, 因此, 在民间香菇素有“山珍”之称^[3]。

目前, 我国香菇产业发展与发达国家相比仍较落后, 加工利用率不高, 在精深加工技术方面存在不足^[4]。其中, 香菇汁作为一种香菇加工产品, 富有营养且风味独特, 但由于其口感较差, 严重影响了产品的市场销售。乳酸菌发酵是一种非常重要的食品加工技术, 在各类食品中已有广泛应用^[5]。将乳酸菌发酵技术用于香菇加工, 不仅可以增加香菇加工产品的鲜味^[6], 同时可以改善香菇柄的营养品质^[7]和香菇汁的生物活性功能等^[8]。

发酵动力学是研究发酵过程中菌体生长、底物消耗和产物生成随时间的变化规律, 并用数学语言对其进行描述, 可为发酵过程的工艺控制和工艺放大提供理论基础^[9]。已有研究多集中在对香菇发酵的工艺优化、发酵过程中营养物质及风味物质的分析, 忽视了对香菇汁发酵的动力学研究。

本研究以乳酸菌为发酵菌株, 对酶解提取出的香菇汁进行乳酸菌发酵, 对乳酸菌发酵香菇汁过程中的乳酸菌数、还原糖、多糖、可溶性固形物、总酸、总酚、总黄酮、可溶性蛋白、游离氨基酸含量及抗氧化活性进行测定, 并采用 Logistic 模型^[10]、

Boltzmann 模型^[11]、SGompertz 模型^[12] 以及 Dose Resp 模型^[13]拟合乳酸菌发酵香菇汁过程中乳酸菌生长、总酸生成和还原糖基质消耗情况, 基于相关系数等统计方法对模型的可靠性进行评判, 得出最适的拟合模型方程, 为乳酸菌发酵香菇汁的进一步工业化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

40 目香菇粉, 由湖北裕国有限公司提供; 植物乳杆菌 JYLP-002, 山东中科嘉亿生物工程有限公司; 纤维素酶 (50 000 U/g), 上海易恩化学技术有限公司; 硫酸, 西陇科学股份有限公司; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 考马斯亮蓝 G-250, 生工生物工程股份有限公司; Tris, 德国 BioFroxx 公司; 葡萄糖、3,5-二硝基水杨酸、氢氧化钠、酒石酸钾钠、亚硫酸钠、无水乙醇、硫酸亚铁、30% 过氧化氢、水杨酸、盐酸、焦性没食子酸等, 均为国药分析纯。

1.2 主要仪器设备

DSX-24L-I 手提式高压蒸汽灭菌器, 上海申安医疗器械厂; SPX-250F 生化培养箱, 上海龙跃仪器设备有限公司; T6 新世纪紫外分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; SW-CJ-2FD 超净工作台, 苏州净化设备有限公司; DK-S24 型电热恒温水浴锅, 上海精宏实验设备有限公司; PHS-25C 酸度计, 上海理达仪器厂; AL104 型电子天平, 梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司; SHZ-D (III) 循环水式

真空泵, 巩义市予华仪器有限责任公司。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

香菇粉→酶法制备香菇汁→调节 pH 值→装瓶→灭菌→接菌→发酵→发酵液

1.3.2 香菇汁的制备

料水比 1:20 (g/mL), 调节 pH 值至 4.5, 纤维素酶添加量为 800 U/g, 45 °C 酶解 1 h, 90 °C 灭酶活 10 min, 抽滤得到香菇汁。再调节 pH 值至 6.9, 量取 100 mL 香菇汁分装至 250 mL 锥形瓶中, 经高压灭菌 (121 °C、20 min) 后备用。

1.3.3 乳酸菌的活化

乳酸菌菌液 (含 4×10^7 CFU/mL): 将 0.3 g 乳酸菌菌粉添加至 75 mL 无菌水中, 于 30 °C 水浴锅中活化 30 min 待用。

1.3.4 香菇汁的乳酸菌发酵

取 4% 活化的乳酸菌菌液接种于分装香菇汁的锥形瓶中, 34 °C 下静置发酵 48 h。

1.4 指标测定

在发酵的 48 h 时间内每 6 h 进行乳酸菌活菌数、还原糖含量及总酸含量的测定。

1.4.1 乳酸菌活菌数的测定

按照 GB 4789.35-2016《食品安全国家标准食品微生物学检验乳酸菌检验》检测样品中的乳酸菌活菌数。

1.4.2 还原糖含量的测定

按照 NY/T 2742-2015《水果及制品可溶性糖的测定 3,5-二硝基水杨酸比色法》测定样品中的还原糖含量。

1.4.3 总酸含量的测定

按照 GB 12456-2021《食品安全国家标准食品中总酸的测定》测定样品中的总酸含量 (以乳酸计)。

1.4.4 多糖含量的测定

按照 GB/T 15672-2009《食用菌中总糖含量的测定》测定样品中的总糖含量。根据下式计算多糖含量^[14]:

$$c_a = c_b - c_c \quad (1)$$

式中:

c_a —样品中多糖含量, mg/mL;

c_b —样品中总糖含量, mg/mL;

c_c —样品中还原糖含量, mg/mL。

1.4.5 可溶性固形物含量的测定

使用手持式折光仪测定。

1.4.6 总酚含量的测定

参考魏倩婷^[15]的方法。

1.4.7 总黄酮含量的测定

参考宋超男^[16]的测定方法。

1.4.8 可溶性蛋白含量的测定

参考程雅清等^[17]的测定方法。

1.4.9 游离氨基酸含量的测定

参考张璐等^[18]的测定方法。

1.4.10 DPPH 自由基清除率的测定

将样品稀释 10 倍, 参考李秋阳^[19]的方法进行测定。

1.4.11 羟自由基清除率的测定

将样品稀释 10 倍, 参考 Chen 等^[20]的方法进行测定。

1.4.12 超氧自由基清除率的测定

参考颜飞翔等^[21]的方法并略作修改。取 1.0 mL 样品, 加入 4.5 mL 在 25 °C 条件下预热 20 min 的 50 mmol/L Tris-HCl 溶液 (pH 值为 8.2), 以及 0.4 mL 浓度为 25 mmol/L 的焦性没食子酸溶液, 混匀, 在 25 °C 条件下水浴 5 min, 然后加入 1 mL 浓度为 8 mol/L 的盐酸溶液, 调节波长为 325 nm, 测定吸光度值。以蒸馏水代替样液为空白组, 以蒸馏水代替焦性没食子酸溶液为对照组, 分别测定其吸光度值。根据下式计算超氧阴离子自由基清除率:

$$X = \left(1 - \frac{A_2 - A_1}{A_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

X —试样中超氧阴离子自由基清除率, %;

A_0 —1 mL 蒸馏水 + 4.5 mL 50 mmol/L Tris-HCl + 0.4 mL 25 mmol/L 焦性没食子酸 + 1 mL 8 mol/L 盐酸;

A_1 —1 mL 样品 + 4.5 mL 50 mmol/L Tris-HCl + 0.4 mL 蒸馏水 + 1 mL 8 mol/L 盐酸;

A_2 —1 mL 样品 + 4.5 mL 50 mmol/L Tris-HCl + 0.4 mL 25 mmol/L 焦性没食子酸 + 1 mL 8 mol/L 盐酸。

1.5 数据处理与分析

每组实验重复3次,结果取平均值,采用 Origin2021 软件进行作图分析,SPSS 27.0.1 软件进行显著性分析。选择 Logistic 模型、SGompertz 模型和 Dose Resp 模型分别对乳酸菌菌体生长和总酸生成情况进行非线性拟合,选择 Logistic 模型、Boltzmann 模型和 Dose Resp 模型对还原糖消耗情况进行非线性拟合,从相关系数 R^2 、均方误差 (Mean Square Error, MSE) 和准确因子 (Accuracy Factor, AF)、偏差因子 (Bias Factor, BF) 四个方面对模型的可靠性进行评价,从中选取拟合度高的模型进行定量描述^[22],如公式 (3)~(5) 所示:

$$MSE = \frac{\sum(V_0 - V_p)^2}{n} \quad (3)$$

$$AF = 10 \left[\frac{\sum \left| \lg \left(\frac{V_p}{V_0} \right) \right|}{n} \right] \quad (4)$$

$$BF = 10 \left[\frac{\sum \lg \left(\frac{V_p}{V_0} \right)}{n} \right] \quad (5)$$

式中:

MSE——均方误差;

AF——准确因子;

BF——偏差因子;

V_0 ——试验实际值;

V_p ——模型预测值;

n ——次数。

2 结果与讨论

2.1 乳酸菌发酵香菇汁过程中活菌数、还原糖和总酸含量的变化趋势

如图1所示,在发酵6h前,乳酸菌处于生长适应期,活菌数无明显增加 ($P > 0.05$),还原糖消耗速率较低,总酸积累缓慢。6~24h 乳酸菌进入对数生长期,代谢旺盛,大量消耗还原糖供给菌体生长,总酸含量显著增加;在发酵24h时,香菇汁中乳酸菌活菌数最高,由最初 6.22 log CFU/mL 增加至 8.95 log CFU/mL,此时还原糖含量为 0.62 mg/mL,总酸含量为 5.95 g/L。24h后,菌体生长进入稳定期;由于营养物质的消耗以及发酵产物的积累,乳酸菌在低 pH 环境下生长逐步受限,36h后菌体生长进

入衰亡期;48h时,活菌数降低至 8.06 log CFU/mL,发酵过程共消耗 1.78 mg/mL 还原糖,产生总酸 6.02 g/L。发酵过程中活菌数、还原糖和总酸含量的变化趋势与其他研究^[8,23]相似。

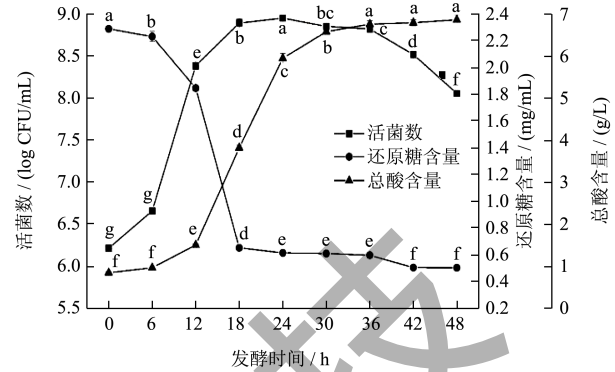


图1 乳酸菌发酵香菇汁过程中活菌数、还原糖和总酸的变化趋势

Fig.1 Changes in viable bacteria count, reducing sugar count, and total acid count during the fermentation of *L. edodes* juice by lactic acid bacteria

注:不同字母表示差异性显著 ($P < 0.05$)。下图同。

2.2 乳酸菌发酵香菇汁过程中多糖和可溶性固形物含量的变化趋势

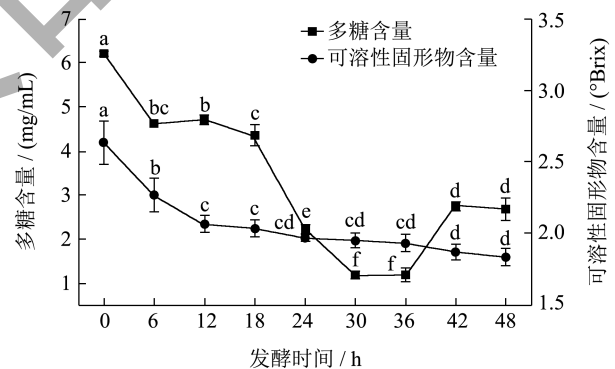


图2 乳酸菌发酵香菇汁过程中多糖、可溶性固形物的变化趋势

Fig.2 Changes in polysaccharide count and soluble solid count during the fermentation of *L. edodes* juice by lactic acid bacteria

乳酸菌发酵香菇汁过程中多糖和可溶性固形物含量的变化情况如图2所示。香菇汁中可溶性固形物含量在发酵前12h内显著降低 ($P < 0.05$),12h后下降减缓,在48h时降低至 1.83°Brix,与发酵前 (2.63°Brix) 相比下降了 30.42%。马剑等^[24]利用乳酸菌发酵梨汁,随着发酵的进行,可溶性固形物含量持续下降,说明乳酸菌在发酵过程中会利用可溶性固形物来维持自身生长代谢。

香菇多糖是香菇中的主要活性物质之一。由图2可知,发酵液0 h时多糖含量为6.22 mg/mL,在发酵前30 h内多糖含量快速降低,可能是由于乳酸菌产生大量胞外酶将多糖降解,以维持自身生长和代谢,在30 h时多糖含量降低至1.18 mg/mL;发酵36 h后,可能是由于乳酸菌代谢产生了胞外多糖导致多糖含量增加,48 h时多糖含量为2.67 mg/mL。

2.3 乳酸菌发酵香菇汁过程中总酚和总黄酮含量的变化趋势

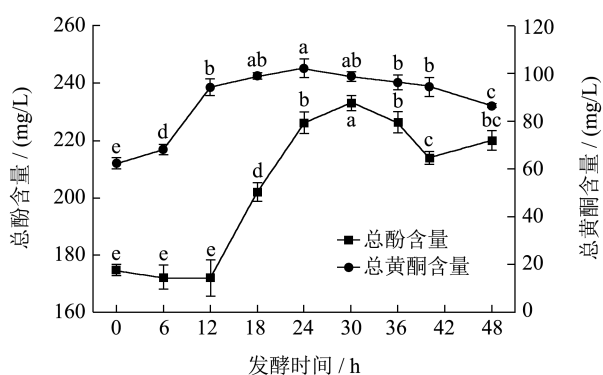


图3 乳酸菌发酵香菇汁过程中总酚和总黄酮的变化趋势

Fig.3 Changes in total phenolic content and total flavonoid content during the fermentation of *L. edodes* juice by lactic acid bacteria

香菇汁中含有总酚和总黄酮等活性成分。乳酸菌发酵香菇汁过程中总酚和总黄酮含量的变化情况如图3所示。在发酵初期,总酚含量没有发生显著变化($P>0.05$);在12 h时,香菇汁中总酚含量开始迅速升高,主要原因是发酵过程中乳酸菌能够将香菇汁中更多的糖基化酚类物质去糖基化,进而从细胞壁中释放出可溶性或不可溶性的结合态酚类化合物^[25];在30 h时,总酚含量达到最高,为232.82 mg/L,较发酵0 h提高了33.50%,之后出现下降趋势。在发酵24 h前,香菇汁中的总黄酮含量随发酵时间的延长而增加,在24 h时其含量达101.89 mg/L,较发酵前提高了58.60%。24 h后,总黄酮含量随发酵时间的延长逐渐减少。由于一定浓度的酚类物质会起到抑菌作用,而乳酸菌为了维持生长会降解酚类^[26],这一活动可能会导致总酚和总黄酮含量的降低。Yang等^[27]研究发现,桃汁经乳酸菌发酵后,总酚和总黄酮含量会随着发酵时间的延长先增加后降低,发酵后总酚和总黄酮含量分别可提高122.57%和27.68%。

2.4 乳酸菌发酵香菇汁过程中可溶性蛋白和游离氨基酸含量的变化趋势

香菇汁发酵过程中可溶性蛋白含量和游离氨基酸含量的变化情况如图4所示。在发酵前期(0~18 h),发酵液中可溶性蛋白含量显著提高($P<0.05$);18 h后,发酵液中可溶性蛋白含量增加缓慢,在48 h时达到291.25 $\mu\text{g/mL}$,较发酵0 h提高了43.64%。在发酵0~12 h内,发酵液中游离氨基酸含量迅速降低,12 h后无显著变化($P>0.05$),48 h时其含量由最初0.24 g/L降低至0.21 g/L。这一趋势可能是由于乳酸菌利用了香菇汁中的游离氨基酸以及其他营养物质合成蛋白,从而使蛋白含量增加。

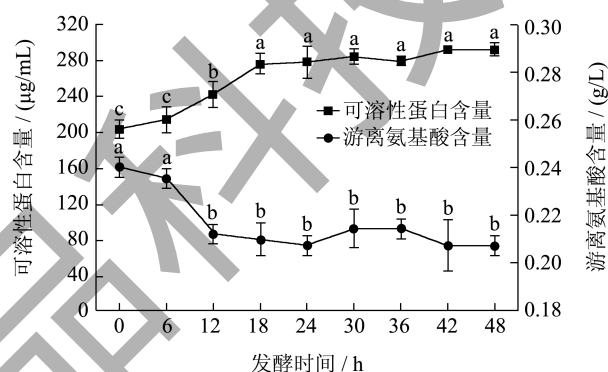


图4 乳酸菌发酵香菇汁过程中可溶性蛋白和游离氨基酸的变化趋势

Fig.4 Changes in soluble protein content and free amino acid content during the fermentation of *L. edodes* juice by lactic acid bacteria

2.5 乳酸菌发酵香菇汁过程中抗氧化活性的变化趋势

通过测定DPPH自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基清除率,研究乳酸菌发酵香菇汁过程中抗氧化活性的变化,结果如图5所示。香菇发酵液对3种自由基均有一定的清除能力。其中,DPPH自由基清除率在发酵前期快速升高,在36 h达到90.87%,与发酵前相比提高了54.46%;羟自由基清除率随着发酵的进行呈现出逐渐升高的趋势,在24 h达到65.42%,与发酵前相比提高了26.96%;超氧阴离子自由基清除率在发酵前24 h内增加缓慢,24~42 h内迅速升高,在42 h达到33.18%,与发酵前相比提高了211.84%。Zhang等^[28]研究发现蓝莓汁经乳酸菌发酵后对DPPH自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基的清除能力均有显著提高($P<0.05$)。

表 1 乳酸菌生长拟合方程及相关系数

Table 1 Lactic acid bacteria growth fitting equation and correlation coefficient

选择模型	拟合方程	R ²	MSE	AF	BF
Logistic	$x(t) = 8.9043 - \frac{2.6797}{1 + \left(\frac{t}{8.6479}\right)^{4.5889}}$	0.997 5	0.002 9	1.005 4	1.000 0
SGompertz	$x(t) = 9.1288 \times e^{-e^{-0.1050(t+8.2198)}}$	0.911 8	0.102 6	1.036 7	1.000 6
DoseResp	$x(t) = 6.1923 + \frac{2.6931}{1 + 10^{(9.0751-t) \times 0.2217}}$	0.998 7	0.001 5	1.003 4	1.000 0

表 2 总酸生成拟合方程及相关系数

Table 2 Fitting equation and correlation coefficient of total acid generation

选择模型	拟合方程	R ²	MSE	AF	BF
Logistic	$x(t) = 6.9081 - \frac{5.9883}{1 + \left(\frac{t}{18.1040}\right)^{5.6395}}$	0.999 7	0.002 2	1.026 2	1.001 7
SGompertz	$x(t) = 7.5204 \times e^{-e^{-0.1239(t-14.4769)}}$	0.967 0	0.202 8	2.053 5	0.532 9
DoseResp	$x(t) = 0.8239 + \frac{5.9034}{1 + 10^{(17.9952-t) \times 0.1406}}$	0.999 8	0.001 5	1.014 7	0.998 9

DPPH 自由基清除率和超氧阴离子自由基清除率在发酵后期均出现降低趋势，羟自由基清除能力在发酵后期趋于稳定。这可能是由于乳酸菌在发酵前期生长迅速，代谢旺盛，总酸、酚类、黄酮类、活性蛋白等代谢产物增加，使得发酵液的抗氧化能力提高^[29]；在发酵后期，整个发酵体系 pH 值降低以及活性物质的减少，使自由基清除能力出现降低趋势。

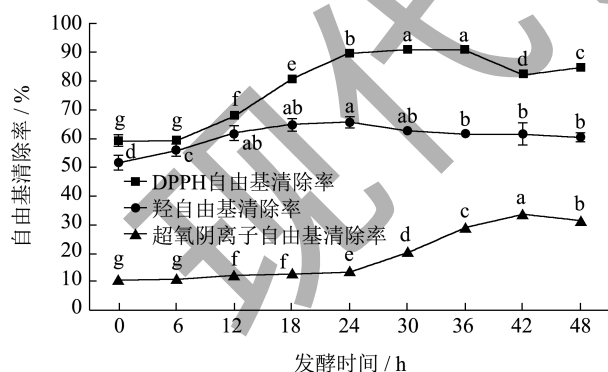


图 5 乳酸菌发酵香菇汁过程中抗氧化活性的变化趋势
Fig.5 Changes in antioxidant activity during the fermentation of *L. edodes* juice by lactic acid bacteria

2.6 乳酸菌发酵香菇汁的动力学模型建立

2.6.1 乳酸菌生长动力学模型

由图 1 可知，乳酸菌在发酵 36 h 后进入衰亡期。因此，本研究拟对 0~36 h 发酵期间内的乳酸

菌生长情况进行非线性拟合。采用 Logistic 模型、SGompertz 模型以及 Dose Resp 模型对乳酸菌生长情况进行非线性拟合，结果见表 1。3 个模型 BF 均在 0.95~1.05 之间，表明其均能有效预测乳酸菌的生长状况。由于 R² 和 AF 越接近 1，且 MSE 越小可表明模型越好。因此，与其他两个模型相比，Dose Resp 模型更适合于定量描述香菇汁发酵过程中乳酸菌的生长情况。拟合曲线如图 6 所示。

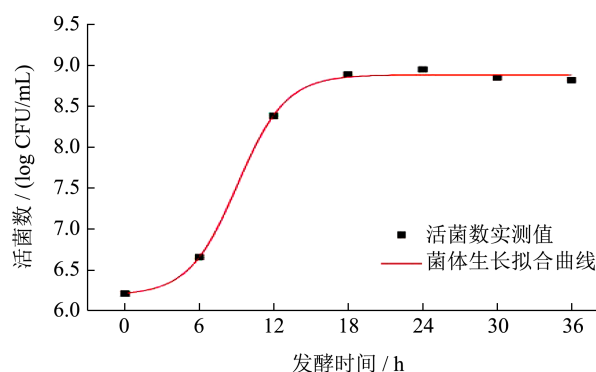


图 6 Dose Resp 模型下乳酸菌生长拟合曲线
Fig.6 Fitting curve of lactic acid bacteria growth under Dose Resp model

2.6.2 总酸生成动力学模型

采用 Logistic 模型、SGompertz 模型以及 Dose Resp 模型对总酸生成情况进行非线性拟合，结果见表 2。由于 SGompertz 模型的 R² 仅为 0.967 0，且

BF 较低, 相较另两种模型拟合效果欠佳。Logistic 模型和 Dose Resp 模型 R^2 均在 0.999 以上, BF 在 0.95~1.05 之间, 但由于 Dose Resp 模型的 R^2 和 AF 更接近于 1, 故选用 Dose Resp 模型对乳酸菌发酵香菇汁过程总酸生成情况进行定量描述。拟合曲线如图 7 所示。

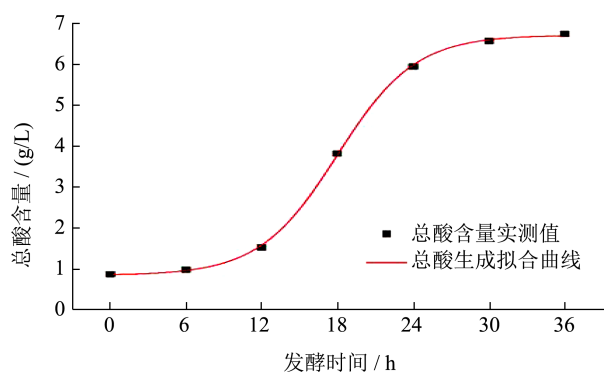


图 7 Dose Resp 模型下总酸生成拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of total acid generation under Dose Resp model

2.6.3 还原糖基质消耗动力学模型

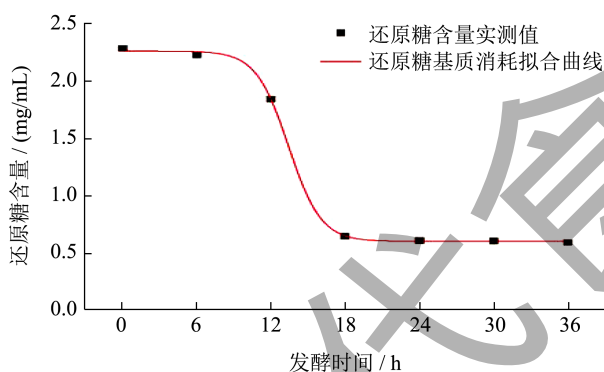


图 8 Boltzmann 模型下还原糖基质消耗拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of reducing sugar matrix consumption under Boltzmann model

采用 Logistic 模型、Boltzmann 模型以及 Dose Resp 模型对还原糖基质消耗情况进行非线性拟合,

结果见表 3。Logistic 模型、Boltzmann 模型以及 Dose Resp 模型 R^2 均在 0.999 以上, BF 均在 0.95~1.05 之间, 表明这 3 个模型均能有效预测还原糖基质的消耗状况。其中, Boltzmann 模型和 Dose Resp 模型的 AF 虽大于 Logistic 模型, 但其 MSE 和 BF 更小, 且这 2 个模型经过验证后得到的参数是相同的, 因此选用 Boltzmann 模型和 Dose Resp 模型定量描述乳酸菌发酵香菇汁过程中还原糖基质的消耗情况。拟合曲线分别如图 8 和图 9 所示。

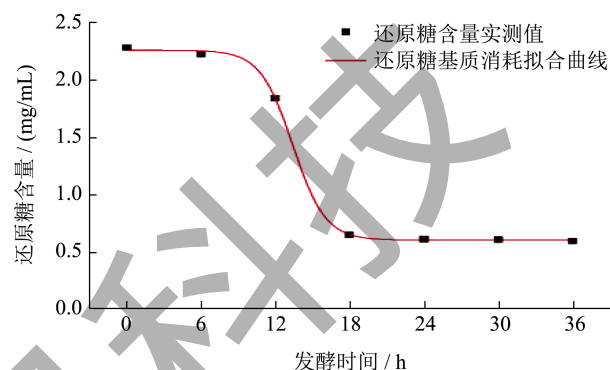


图 9 Dose Resp 模型下还原糖基质消耗拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of reducing sugar matrix consumption under Dose Resp model

2.7 乳酸菌发酵香菇汁过程中乳酸菌比生长速率、总酸比合成速率与还原糖比消耗速率变化

由图 10 可知, 乳酸菌在香菇汁中初期增长速度较慢, 经过一段时间的适应后, 乳酸菌加速增殖, 在 12 h 时比生长速率达到最大值, 随后缓慢下降直至停滞, 其比生长速率曲线呈钟形。在发酵过程中, 12 h 为乳酸菌比生长速率的最高时期, 而总酸的比合成速率在 18 h 时达到最高, 迟于菌体比生长速率的最高时期, 由此可见总酸的产生与菌体生长之间具有较强的关联性, 这是一种部分偶联型关系。

表 3 还原糖基质消耗拟合方程及相关系数

Table 3 Fitting equation and correlation coefficient for reducing sugar matrix consumption

选择模型	拟合方程	R^2	MSE	AF	BF
Logistic	$x(t) = 0.6068 - \frac{1.6532}{1 + \left(\frac{t}{13.2108}\right)^{11.4103}}$	0.9996	0.0003	1.0083	1.0001
Boltzmann	$x(t) = 0.6065 + \frac{1.6567}{1 + e^{\frac{t-13.4307}{1.3167}}}$	0.9996	0.0002	1.0089	1.0000
Dose Resp	$x(t) = 0.6065 + \frac{1.6567}{1 + 10^{(13.4307-t)(-0.3298)}}$	0.9996	0.0002	1.0089	1.0000

从还原糖比消耗速率曲线可以看出, 乳酸菌在发酵香菇汁过程中有两个时期对还原糖的利用最为迅速, 一个是菌体最高生长时期, 另一个是最大总酸合成时期, 还原糖基质既是供应生长所需要的能量, 又是充当产物合成的碳源, 还原糖比消耗速率与总酸比合成速率存在一定的正比关系。

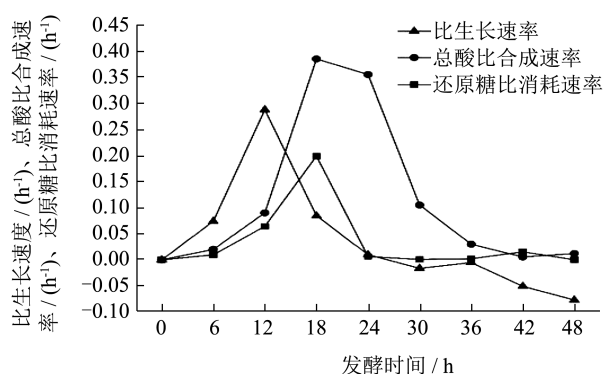


图 10 乳酸菌发酵香菇汁过程中乳酸菌比生长速率、总酸比合成速率和还原糖比消耗速率随时间的变化曲线

Fig.10 Change curves of the specific growth rate of lactic acid bacteria, the specific synthesis rate of total acid, and the specific consumption rate of reducing sugars with time during the fermentation of *L. edodes* juice by lactic acid bacteria

3 结论

本研究以香菇粉为原料, 经酶解制备香菇汁后, 加入植物乳杆菌进行发酵。发酵后, 发酵液呈浅橙色, 香菇香气浓郁, 酸度适中。结果表明, 乳酸菌在香菇汁中生长良好, 24 h 时活菌数达到最高, 为 8.95 log CFU/mL, 36 h 后菌体生长进入衰亡期; 发酵 0~24 h 内, 还原糖、多糖、可溶性固形物、游离氨基酸含量显著降低, 总酸、总酚、总黄酮、可溶性蛋白含量不断升高; 在 24 h 后, 还原糖、多糖、可溶性固形物、总酸、可溶性蛋白、游离氨基酸变化逐渐趋于平缓; 总酚和总黄酮在 30 h 后逐渐降低; 发酵过程中总酸、总酚、总黄酮、可溶性蛋白含量最高分别达到 6.86 g/L、232.82 mg/L、101.89 mg/L、291.25 μg/mL; 发酵后香菇汁的抗氧化活性提高, DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基清除率最高可达 90.87%、65.42% 和 33.18%, 较发酵前分别提升了 54.46%、26.96% 和 211.84%。

经分析乳酸菌发酵香菇汁过程中的乳酸菌活菌数、总酸含量和还原糖含量变化后发现, 在整个发酵过程中, 乳酸菌生长量、总酸含量和还原糖含量三者之间是相互关联的。使用 Logistic 模型、

Boltzmann 模型、SGompertz 模型和 Dose Resp 模型对菌体生长、总酸含量和还原糖含量进行非线性拟合, 并根据相关系数 R^2 和 MSE、AF 和 BF 等其他统计方法对拟合模型的可靠性进行评估。结果发现, Dose Resp 模型可以有效地对乳酸菌生长、总酸生成进行非线性拟合, Dose Resp 模型和 Boltzmann 模型均可以有效地对还原糖基质消耗进行非线性拟合。通过对乳酸菌发酵香菇汁过程中乳酸菌比生长速率、总酸比合成速率与还原糖比消耗速率变化情况进行分析后发现, 总酸的产生与乳酸菌的生长属于部分偶联型。

本研究探究了乳酸菌发酵香菇汁过程中的品质变化规律, 在此基础上建立了发酵动力学模型, 可以更好地了解发酵过程的动力学特征, 定量分析发酵过程, 并预测最终的实验指标。这为乳酸菌发酵香菇汁的工业化生产提供了理论支撑, 为扩大发酵规模提供了可能。

参考文献

- [1] 储婷, 尚俊军, 管婉, 等. 香菇菌丝后熟转色的转录组分析[J]. 菌物学报, 2022, 41(2): 260-273.
- [2] ZHOU X L, GUAN Q L, WANG Y L, et al. Effect of different cooking methods on nutrients, antioxidant activities and flavors of three varieties of *Lentinus edodes* [J]. Foods, 2022, 11(17): 2713.
- [3] 苑广志. 紫苏香菇风味米肠的研制[J]. 中国调味品, 2021, 46(11): 109-111, 117.
- [4] 王彬, 张明, 倪立颖, 等. 我国香菇加工产品市场发展现状与趋势[J]. 食药菌, 2023, 31(4): 229-233.
- [5] CHEN X, YUAN M L, WANG Y T, et al. Influence of fermentation with different lactic acid bacteria and *in vitro* digestion on the change of phenolic compounds in fermented kiwifruit pulps [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(5): 2670-2679.
- [6] CHEN Z Q, GAO H Y, WU W J, et al. Effects of fermentation with different microbial species on the umami taste of Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2021, 141: 110889.
- [7] 刘丽娜, 魏书信, 李顺峰, 等. 乳酸菌发酵香菇柄主要营养成分的变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(15): 4006-4012.
- [8] ZHANG M N, WANG X N, WANG X W, et al. Effects of fermentation with *Lactobacillus fermentum* 21828 on the nutritional characteristics and antioxidant activity of *Lentinus edodes* liquid [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(8): 3405-3415.
- [9] 张琪, 朱丹, 牛广财, 等. 沙棘果酒发酵动力学及其抗氧化

- 活性[J].食品与发酵工业,2019,45(15):53-58.
- [10] ZHENG Y, ZHAO C M, LI X W, et al. Kinetics of predominant microorganisms in the multi-microorganism solid-state fermentation of cereal vinegar [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2022, 159: 113209.
- [11] TAN X, CHEN F, HU W, et al. Response surface optimisation of technological parameters for producing *Ganoderma lucidum* by solid-state fermentation from *Panax notoginseng* residues and kinetics [J]. International Food Research Journal, 2023, 30(3): 709-722.
- [12] ZHANG J Y, YANG Y J, LV R Z, et al. Sugar reduction process of purple sweet potato concentrated juice by microbial fermentation for improved performance of natural pigments [J]. Biochemical Engineering Journal, 2023, 191: 108781.
- [13] CHEN L H, LI D N, REN L X, et al. Effect of non-*Saccharomyces* yeasts fermentation on flavor and quality of rice wine [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(1): 15058.
- [14] 陈灿辉,林彤,江文韬,等.响应面法优化笋头多糖微波-超声波辅助提取工艺[J].食品工业科技,2020,41(16):201-206,291.
- [15] 魏倩婷.香菇酚类物质的提取及功能学特性的研究[D].福州:福建农林大学,2011.
- [16] 宋超男.蓝靛果-沙棘发酵果汁研制及功能性评价[D].哈尔滨:东北农业大学,2022.
- [17] 程雅清,殷朝敏,李雨鸿,等.辐照裂褶菌多糖理化性质、体外消化模拟及益生菌发酵特性分析[J].食品与发酵工业,2023,49(6):50-56.
- [18] 张璐,曹晖,弓志青,等.酶解香菇柄蛋白制备抗氧化肽的工艺研究[J].食品工业科技,2016,37(23):233-238.
- [19] 李秋阳.香菇的液体发酵及其多糖的研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [20] CHEN H Y, ZENG J S, WANG B, et al. Structural characterization and antioxidant activities of *Bletilla striata* polysaccharide extracted by different methods [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 266: 118149.
- [21] 颜飞翔,董佳萍,陈龙,等.北五味子麦芽酵素的制备及其抗氧化活性[J].中国酿造,2019,38(12):116-119.
- [22] 张佩,陈默,胡国元.胞内羧甲基茯苓多糖的发酵动力学[J].食品与发酵工业,2020,46(6):49-53.
- [23] SUN X, ZHANG Y, LI F, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on chemical compounds, antioxidant capacities and hypoglycemic properties of pumpkin juice [J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102126.
- [24] 马剑,陈智玲,张宏志,等.乳酸菌发酵梨汁过程中的品质变化及其抗氧化活性研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(6): 123-128.
- [25] KWAW E, MA Y K, TCHABO W, et al. Effect of *Lactobacillus* strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2018, 250: 148-154.
- [26] 刘晓翠,殷晓翠,马嫒,等.不同乳酸菌复配发酵石榴汁的品质指标分析[J].食品工业科技,2019,40(17):48-55.
- [27] YANG W B, LIU J C, ZHANG Q, et al. Changes in nutritional composition, volatile organic compounds and antioxidant activity of peach pulp fermented by *Lactobacillus* [J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101894.
- [28] ZHANG Y, LIU W P, WEI Z H, et al. Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum* [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2021, 139: 110590.
- [29] LI T L, JIANG T, LIU N, et al. Biotransformation of phenolic profiles and improvement of antioxidant capacities in jujube juice by select lactic acid bacteria [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 127859.