

基于近红外光谱的橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长预测

张嘉雯, 刘佳元, 封雨桐, 孙佳怡, 周彬静, 屠康, 潘磊庆

Growth Prediction of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in Orange Juice Based on Near-infrared Spectroscopy

ZHANG Jiawen, LIU Jiayuan, FENG Yutong, SUN Jiayi, ZHOU Binjing, TU Kang, and PAN Leiqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

培养基成分对酸土脂环酸芽孢杆菌生长及芽孢形成的影响

Effect of Medium Component on Growth and Spore Formation of *Alicyclobacillus acidoterrestris*

食品工业科技. 2018, 39(19): 84-89 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.19.015>

全球食品领域近红外光谱应用研究文献计量分析

Bibliometric Analysis of Near-infrared Spectroscopy in Global Food Areas

食品工业科技. 2021, 42(18): 41-47 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120265>

酸土脂环酸芽孢杆菌危害及其控制研究进展

Research Progress on Harm and Hazard Control of *Alicyclobacillus acidoterrestris*

食品工业科技. 2019, 40(12): 347-353 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.12.056>

基于近红外光谱技术的白酒基酒中乳酸的快速检测

Rapid Determination of Lactic Acid in Base Liquor Based on Near Infrared Spectroscopy

食品工业科技. 2018, 39(20): 212-216 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.20.035>

近红外光谱法快速测定榨菜中亚硝酸盐含量

Rapid Detection of Nitrite Contents in Mustard Tuber by Near Infrared Spectroscopy

食品工业科技. 2019, 40(6): 245-251 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.06.041>

基于近红外光谱的鸡蛋产地溯源

The Origin of Eggs Based on Near Infrared Spectroscopy

食品工业科技. 2020, 41(22): 227-231 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020107>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张嘉雯, 刘佳元, 封雨桐, 等. 基于近红外光谱的橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长预测 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 137–145.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050024

ZHANG Jiawen, LIU Jiayuan, FENG Yutong, et al. Growth Prediction of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in Orange Juice Based on Near-infrared Spectroscopy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 137–145. (in Chinese with English abstract).
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050024

· 生物工程 ·

基于近红外光谱的橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长预测

张嘉雯, 刘佳元, 封雨桐, 孙佳怡, 周彬静, 屠康, 潘磊庆*
(南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095)

摘要: 酸土脂环酸芽孢杆菌 (*Alicyclobacillus acidoterrestris*) 是引起橙汁劣变的主要微生物, 为研究酸土脂环酸芽孢杆菌在橙汁中的生长规律, 利用近红外光谱获取橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌含量的信息, 采用标准化 (autoscale)、多元散射校正 (multiplicative scatter correction, MSC)、标准正态变换 (standard normal variate, SNV)、去趋势化 (detrend) 对光谱进行预处理, 结合化学计量学, 构建近红外光谱与酸土脂环酸芽孢杆菌含量预测模型。在此基础上, 将近红外光谱转换为酸土脂环酸芽孢杆菌预测菌落数据, 并采用“一步法”直接基于预测菌落数构建橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长模型。结果表明, 利用标准化进行光谱预处理建立的偏最小二乘 (partial least squares, PLS) 模型对橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌含量的预测效果相对较好, 其预测决定系数 (prediction determination coefficient, R_p^2) 与预测均方根误差 (root mean square error of prediction, RMSEP) 分别为 0.733 和 0.242 lg CFU/mL, 相对分析误差 (relative percent deviation, RPD) 为 1.919。4 种预测模型的均方误差 (mean square error, MSE) 介于 0.0046~0.0300 lg CFU/mL 之间; 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 介于 0.068~0.173 lg CFU/mL 之间; 赤池信息准则 (akaike information criterion, AIC 值) 介于 -66.383~ -53.944 之间, 且 Huang-full 模型的 3 种指标相较更小, 较适合描述橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长。将近红外光谱获得预测菌落数构建的 4 种生长模型与平板计数法构建的生长模型分别进行相关性分析, 发现 4 种模型的相关系数 (r) 均大于 0.900, 且 Huang-full 模型的拟合效果最优。所构建的模型通过准确因子 (accuracy factor, A_f) 和偏差因子 (bias factor, B_f) 进行验证, 证实模型均具有良好的可靠性。因此, 利用近红外光谱分析结合适当的化学计量学方法描述酸土脂环酸芽孢杆菌生长预测是可行的。

关键词: 酸土脂环酸芽孢杆菌, 近红外光谱, 生长模型, 一步法, 食品预测微生物学

中图分类号: TS207.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)06-0137-09

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2022050024](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050024)

本文网刊: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.13386/j.issn1002-0306.2022050024.html>



Growth Prediction of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in Orange Juice Based on Near-infrared Spectroscopy

ZHANG Jiawen, LIU Jiayuan, FENG Yutong, SUN Jiayi, ZHOU Binjing, TU Kang, PAN Leiqing*

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: *Alicyclobacillus acidoterrestris* is the dominant spoilage bacteria resulting the deterioration of orange juice. To simulate the growth of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice, near-infrared (NIR) spectroscopy technique was used to predict the content of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice. Different spectral pre-processing methods, including autoscale, multiplicative scatter correction (MSC), standard normal variate (SNV) and detrend, coupled with chemometric regression were used to build the prediction model of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice by NIR spectroscopy. Based on that, the NIR predicted colony data of *Alicyclobacillus acidoterrestris* was used to develop the

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 南京农业大学 2021 年校级创新训练立项项目 (202118XX11); 江苏省重点研发计划项目 (BE2020693)。

作者简介: 张嘉雯 (2001-), 女, 本科, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: 9191810616@njau.edu.cn。

* 通信作者: 潘磊庆 (1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品无损检测、贮藏与加工, E-mail: pan_leiqing@njau.edu.cn。

growth model of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice by one-step approach. Results showed that, PLS model established by spectral pretreatment after Autoscale had relatively good prediction effect on the content of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice, with the prediction determination coefficient (R_p^2), root mean square error of prediction (RMSEP) and relative percent deviation (RPD) of 0.733, 0.242 lg CFU/mL and 1.919, respectively. Four different growth simulation models gave satisfactory predictions, with MSE values from 0.0046 to 0.0300 lg CFU/mL, RMSE values from 0.068 to 0.173 lg CFU/mL, AIC values from -66.383 to -53.944, respectively. Correlation analysis was performed between the four developed growth models based on the NIR prediction of colony number and the growth model constructed by plate counting method, and all of their correlation coefficients (r) were higher than 0.900. Particularly, the Huang-full model had the best ability to describe the growth of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice and showed the best fitting results. Besides, the good reliability of all developed models was verified by accuracy factor (A_f) and bias factor (B_f). Accordingly, this study indicated the potential to use NIR spectroscopy combined with advanced chemometrics to describe the growth prediction of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice.

Key words: *Alicyclobacillus acidoterrestris*; near-infrared spectroscopy; growth model; one-step approach; food predictive microbiology

酸土脂环酸芽孢杆菌(*Alicyclobacillus acidoterrestris*),又称嗜酸耐热菌,具有耐热嗜酸的特性,不仅能够有效对抗果汁加工时的高温灭菌,而且在pH值为酸性的果汁中也可以很好的生长^[1]。果汁在生产制造的高温灭菌时,大部分致病菌和致腐菌均能得到抑制^[2]。但由于酸土脂环酸芽孢杆菌的嗜酸、耐热、产芽孢、强抗逆性等特征,其芽孢可以抵抗果汁在加工过程中的杀菌过程而存活下来,因此只要环境条件适当,就能快速在果汁中生长,影响果汁的风味和品质^[3]。由酸土脂环酸芽孢杆菌导致的果汁酸败事件经常发生,许多研究和调查结果表明,酸土脂环酸芽孢杆菌广泛分布于果蔬产品生产和加工全过程中^[4],且在大部分果汁中的含量超标^[5]。所以酸土脂环酸芽孢杆菌是使得果汁劣变和败坏的主要原因,是在果汁生产加工过程中需要严格控制的微生物^[6]。芽孢萌发是细菌生长和繁殖的重要环节,同时失去极端抗性^[7]。在酸土脂环酸芽孢杆菌代谢时会产生一些酸性物质,但不会改变果汁本身的酸碱值,只在瓶底显现出一定的浊度^[8]。但菌体在代谢时仍会有一些次级代谢产物出现,比如2,6-二氯苯酚、邻甲氧基苯酚和2,6-二溴苯酚,导致果汁发生腐败变质^[9]。

预测微生物学是用于预测微生物对于特定环境变量反应的数学模型^[10],可以有效的管理微生物安全风险,它依靠数据库,并结合计算机来预测食品中微生物的生长或残余变化^[11]。预测微生物模型通常可以分为2类,包括一级模型和二级模型^[12]。一级模型主要是用来描述时间和微生物的生长数量之间的关系^[13-14],Gompertz模型、Baranyi模型及Huang模型等都是常用的初级模型^[15]。二级模型是用来描述环境因素对一级模型中参数的影响,主要包含平方根模型、响应面方程等^[13-14]。腐败菌以及一些食源性致病菌在食品生产、加工、储存和运输中的变化是预测微生物学的重要研究内容。微生物生长或死亡的状况主要是通过微生物预测模型的构建来进行预测的,可为食品质量安全提供重要的参考^[16]。目前,国内外关于橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长预测模

型的研究相对较少,主要包括平板计数法、分子生物学方法、免疫学方法等^[5],但是这些检测手段均难以实现生产线上进行快速识别预测及控制。

微生物预测模型已被广泛应用于食品领域,但大部分模型是在培养基培养条件下建立的^[17],不仅操作复杂,并且耗时费力。因此更需要开发快速高效的方法来作为微生物预测模型的数据来源。近红外光谱法是用来分析红外光和可见光之间波长范围的一种方法,该方法操作便捷、效率高,不消耗样品,成本较低,在同一时间可以完成多种不同化学指标的检测,并且在检测过程中不会产生污染,已被广泛应用于食品检测、微生物研究、药物分析等多个领域^[18]。微生物样本的近红外光谱由其结构和组成信息构成,因此,样本的光谱与样本的组成特性参数之间有较好的相关性^[19]。目前,尚未有采用近红外光谱技术对橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌快速检测的研究。

因此,本研究以橙汁为研究对象,通过测定在正常空气湿度和气体成分下,4、20、40℃三种不同温度橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的含量,来分析酸土脂环酸芽孢杆菌对橙汁品质的影响,同时利用近红外光谱技术,结合化学计量学,建立光谱与酸土脂环酸芽孢杆菌的联系。将近红外光谱预测的酸土脂环酸芽孢杆菌菌落数作为数据来源,通过“一步法”构建橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长预测模型,并将近红外光谱获得预测菌落数构建的生长模型与平板计数法构建的生长模型进行相关性分析,为橙汁生产加工中酸土脂环酸芽孢杆菌的快速识别预测与控制提供了理论方法和技术支持,为保障橙汁加工产品和行业的健康、快速发展提供了参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

酸土脂环酸芽孢杆菌(*Alicyclobacillus acidoterrestris*) 菌种编号 CMGCC 1.1801, 购买自中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心, 在4℃条件下保藏于南京农业大学食品科技学院实验室; 赣

南脐橙(*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) 购自南京市玄武区苏果超市(铁匠营社区店); 营养肉汤培养基 上海盛思生化科技有限公司; BAT 培养基 青岛高科技工业园海博生物技术有限公司。

紫外超净台 苏州苏净安泰有限公司; 立式压力蒸汽灭菌器 上海申安医疗器械厂; 恒温恒湿培养箱 南京贝蒂实验仪器有限公司; MXW-20DL 型涡旋混合仪 杭州齐威仪器有限公司; ANTARIS 傅里叶变换近红外光谱仪 美国 Thermo Nicolet 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理与接种 将酸土脂环酸芽孢杆菌菌种转接至营养肉汤培养基, 于 40℃ 条件下培养 24 h 进行活化, 在相同条件下进行二次活化后, 用无菌生理盐水将活化好的酸土脂环酸芽孢杆菌制成菌悬液, 并调整浓度至 $10^2\sim10^3$ CFU/mL, 备用。

挑选大小形态一致、新鲜的脐橙, 清洗、去皮、榨汁, 用纱布过滤装于玻璃瓶中, 采用巴氏杀菌法进行灭菌处理^[5]。在无菌环境下, 将活化的酸土脂环酸芽孢杆菌菌悬液接入橙汁, 并用 10 mL 的离心管进行分装, 使用封口膜进行封口处理, 置于 4、20、40℃ 的恒温培养箱中分别贮藏 288、120、46 h。贮藏过程中在合适的时间间隔取出 5 个橙汁样品用于近红外光谱检测和微生物含量检测。

1.2.2 微生物含量的测定 在无菌环境下, 将每 10 mL 的样品放置于无菌袋中, 加入 90 mL 生理盐水缓冲液, 使用涡旋混合仪混合均匀, 获得酸土脂环酸芽孢杆菌悬液。按照一定的稀释度进行稀释, 选择 2~3 个合适的梯度, 取 100 μ L 涂布于 BAT 培养基上, 于 40℃ 恒温培养箱中培养(48±1) h 后进行平板计数。

1.2.3 近红外光谱扫描与采集 将 Antaris II 傅里叶变换近红外光谱仪调整到透射模式, 进行样本近红外光谱数据的采集。采集光谱前以空气为背景进行背景光谱采集, 取不同温度下的橙汁样本进行近红外透射光谱的扫描, 每个样本重复采集 3 次, 取其平均光谱作为该样本的原始光谱。采集光谱所用参数设置如下: 扫描次数为 32 次, 增益 8x, 分辨率为 16 cm^{-1} , 扫描波数范围为 10000~4000 cm^{-1} 。

1.2.4 近红外光谱数据处理与评价方法 近红外光谱预处理可以消除尖峰、杂散光、噪声等干扰。本文采用的预处理方法包括标准化(Autoscale)、多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、标准正态变换(standard normal variate, SNV)、去趋势化(Detrend)。其中, 标准化(Autoscale)可以同时实现数据的中心化和标准化, 主要解决各变量之间因单位不同所引起权重不同的问题^[20]; 标准正态变换(SNV)可以对由样品不均匀导致的散射所引起的误差进行校正; 多元散射校正(MSC)作用与标准正态变换(SNV)类似^[21]; 去趋势化(Detrend)可以将分析集中在数据趋势本身的波动上, 消除获取数据时产生

的偏移对后续计算的影响。

在现代近红外光谱技术中, 偏最小二乘法(partial least squares, PLS)是一种被广泛应用的线性建模方法, 此方法通过提取光谱数据的特征向量, 实现光谱数据的压缩和降维^[22]。模型根据校正决定系数(calibration determination coefficient, R_c^2)、预测决定系数(prediction determination coefficient, R_p^2)、校正均方根误差(root mean square error of calibration, RMSEC)、预测均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)和相对分析误差(relative percent deviation, RPD), 对模型的预测性能进行评价。当模型的 $R_c^2, R_p^2 > 0.9$ 且 RMSEC 与 RMSEP 较小时, 可以认为该模型的准确度较高、性能稳定。RPD 一般用于评价模型的预测能力, $RPD \geq 1.4$ 表示模型可行, $RPD < 1.4$ 则说明该模型不可用于实际样品定量检测^[23]。其中, 决定系数、均方根误差和剩余预测偏差的计算公式如式(1)、(2)、(3)所示^[23]。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_a)^2} \quad \text{式 (1)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_p)^2} \quad \text{式 (2)}$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSEP} \quad \text{式 (3)}$$

式中: y_i 为样本实测值; \bar{y}_a 为样本实测均值; y_p 为样本预测值; SD 为预测集酸土脂环酸芽孢杆菌含量的标准差。

1.2.5 “一步法”建模与模型评价

1.2.5.1 一级模型 传统的微生物预测建模一般使用两步法, 即分别构建一级模型和二级模型, 在数据分析时会产生较大的误差。“一步法”是以微生物生长数据的整体优化分析为基础, 同时构建一级模型和二级模型, 误差较两步法更小, 对微生物的生长预测也更为准确。因此, “一步法”在预测微生物学建模中更有优势^[24]。

酸土脂环酸芽孢杆菌在橙汁中的生长曲线呈现滞后期、指数期和稳定期三个阶段, 因此, 选取 Huang 模型^[25~26] 和 No-lag phase 模型^[27~28] 作为一级模型来描述酸土脂环酸芽孢杆菌在橙汁中的生长, Huang 模型的方程见式(4)、(5)和(6), No-lag phase 模型的方程见式(7)。

$$Y = Y_0 + Y_{\max} - \ln [e^{Y_0} + [e^{Y_{\max}} - e^{Y_0}] e^{-\mu_{\max} B(t)}] \quad \text{式 (4)}$$

$$B(t) = t + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1 + e^{-\alpha(t-\lambda)}}{1 + e^{\alpha\lambda}} \quad \text{式 (5)}$$

$$\lambda = \frac{e^{\lambda}}{\mu_{\max}^m} \quad \text{式 (6)}$$

$$Y(t) = Y_0 + Y_{\max} - \ln [e^{Y_0} + (e^{Y_{\max}} - e^{Y_0}) e^{-\mu_{\max} t}] \quad \text{式 (7)}$$

式中, Y_{\max} 为细菌最大生长浓度($\lg \text{CFU/mL}$);

Y 为 t 时刻细菌的浓度($\lg \text{CFU/mL}$); Y_0 为初始阶段细菌的生长浓度($\lg \text{CFU/mL}$); μ_{\max} 为细菌最大生长速率(h^{-1}); t 为时间(h); h_0 为细菌所处的状态; A 、 α 、 m 为系数。

1.2.5.2 二级模型 分别采用 Full temperature range Ratkowsky 平方根模型^[29] 和 Suboptimal Ratkowsky 平方根模型^[30] 作为二级模型来评价橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌生长速率受温度的影响。其中 Full temperature range Ratkowsky 平方根模型的方程见式(8), Suboptimal Ratkowsky 平方根模型的方程见式(9)。

$$\sqrt{\mu_{\max}} = a(T - T_0)[1 - e^{b(T - T_{\max})}] \quad \text{式 (8)}$$

$$\sqrt{\mu_{\max}} = a(T - T_0) \quad \text{式 (9)}$$

式中, μ_{\max} 为细菌最大生长速率(h^{-1}); T_0 为细菌最低生长温度($^{\circ}\text{C}$); T_{\max} 为细菌最高生长温度($^{\circ}\text{C}$); a 、 b 为系数, Ratkowsky 平方根估测的 T_0 只是理论意义上的最低存活温度, 一般来说会低于细菌在实际生长环境中的最低生长温度。

1.2.5.3 评价方法 通过均方误差(mean square error, MSE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、赤池信息准则(akaike information criterion, AIC 值)^[31] 评价模型的适用性及拟合度, 其计算公式如式(10)、(11)、(12)所示。

$$\text{MSE} = \frac{\text{RSS}}{n - p} \quad \text{式 (10)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\text{RSS}}{n - p}} \quad \text{式 (11)}$$

$$\text{AIC} = n \ln \left(\frac{\text{RSS}}{n} \right) + 2(p + 1) + \frac{2(p + 1)(P + 2)}{n - p - 2} \quad \text{式 (12)}$$

式中, n 为实测值的数量; RSS 为残差平方和; p 为模型参数数量。

选取 2 组恒定温度(4 、 20 、 40 $^{\circ}\text{C}$)条件下的生长数据来构建和验证模型及参数的准确性, 并采用准确因子(accuracy factor, A_f)和偏差因子(bias factor, B_f)来评价模型的可靠性^[32]。 A_f 和 B_f 按式(13)、(14)计算。

$$A_f = 10^{\frac{\sum_{i=1}^n |\lg(N_{\text{预测}}/N_{\text{实测}})|}{n}} \quad \text{式 (13)}$$

$$B_f = 10^{\frac{\sum_{i=1}^n \lg(N_{\text{预测}}/N_{\text{实测}})}{n}} \quad \text{式 (14)}$$

式中: $N_{\text{实测}}$ 为菌落数的实测值(CFU/mL); $N_{\text{预测}}$ 为菌落数的预测值(CFU/mL); n 为实验次数。

1.3 数据处理

本研究采用 Matlab R2016a 和 WPS office Excel 分析软件处理近红外光谱数据; 采用预测微生物学专用软件 IPMPGlobalFit 对橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长数据进行拟合处理, 并用 OriginPro 软件作图。

2 结果与分析

2.1 近红外定量模型的建立

三个温度(4 、 20 、 40 $^{\circ}\text{C}$)的橙汁样品原始透射光谱如图 1 所示。在 $4000\text{~}10000\text{ cm}^{-1}$ 波长范围内, 不同温度的橙汁样品表现出基本相同的光谱形态, 趋势基本一致。近红外光谱反映的是含氢基团 X-H(X=C、N、O)振动的倍频吸收与合频吸收^[33], 游离 O-H 基团吸收峰在 $3590\text{~}3650\text{ cm}^{-1}$ 处。由图 1 知, 在波长 8000 和 10000 cm^{-1} 附近有明显的吸收峰, 且峰值处透光率不同, $8500\text{~}9000\text{ cm}^{-1}$ 有明显的伸缩振动, 避开了水分子吸收峰的干扰。

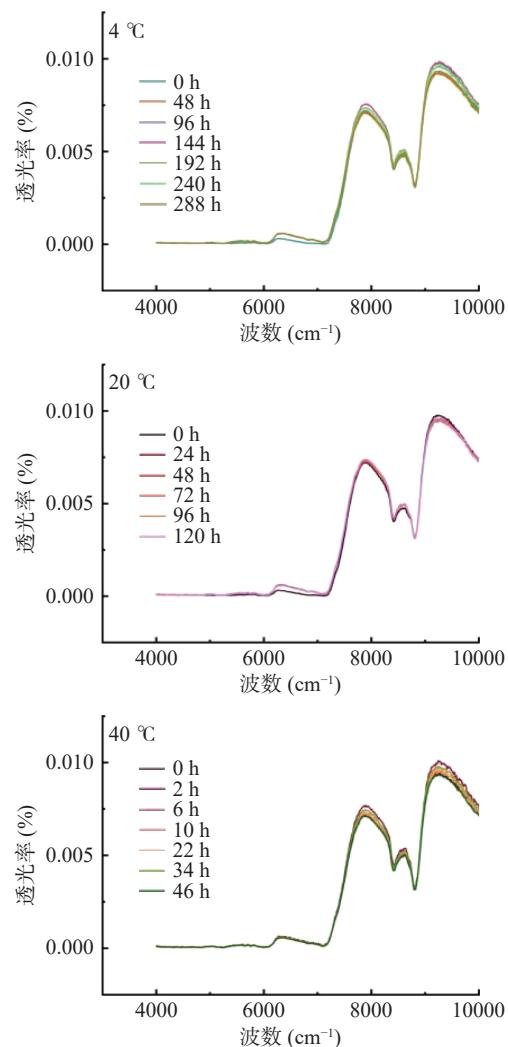


图 1 三个温度下橙汁样品的透射近红外光谱图
Fig.1 Transmission near-infrared spectra of orange juice samples at three temperatures

为了比较不同的预处理方法对三个温度橙汁样品中酸土脂环酸芽孢杆菌预测模型性能的影响, 将三个温度的橙汁样品所测得的光谱数据合并处理。三个温度橙汁样品在光谱扫描和微生物实验的过程中存在少数样品测量结果异常, 本研究采用主成分分析法(Principal components analysis, PCA)对三个温度橙汁样品光谱数据进行进行异常值剔除, 以提高模型准确度。

按照校正集与验证集之比近似为 3:1 的比例多次运行 Matlab 自带的随机算法以获取较好的分集结果, 其中 60 个样本组成校正集, 另外 20 个样本组成验证集。如表 1 所示, 三个温度的橙汁样品校正集的酸土脂环酸芽孢杆菌含量最小值为 2.259 lg CFU/mL, 最大值为 5.449 lg CFU/mL, 平均值为 4.233 lg CFU/mL, 标准差为 0.479 lg CFU/mL。

表 1 三个温度的橙汁样品校正集与验证集的酸土脂环酸芽孢杆菌含量

Table 1 Content of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in the calibration set and validation set of orange juice samples at three temperatures

样品集	样品数	酸土脂环酸芽孢杆菌含量(lg CFU/mL)			
		最小值	最大值	平均值	标准差
校正集	60	2.259	5.449	4.233	0.479
验证集	20	3.686	5.397	5.220	0.169

采用 Autoscale、MSC、SNV、Detrend 光谱预处理后分别建立 PLS 预测模型, 为后续生长拟合提供参考。其中三个温度的橙汁样品中酸土脂环酸芽孢杆菌含量的 PLS 模型预测效果如表 2 所示。

表 2 三个温度的橙汁样品中酸土脂环酸芽孢杆菌 PLS 模型的预测结果

Table 2 Results of PLS model for *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice samples at three temperatures

预处理方法	R_c^2	RMSEC (lg CFU/mL)	R_p^2	RMSEP (lg CFU/mL)	RPD
None	0.875	0.226	0.677	0.269	1.726
Autoscale	0.878	0.224	0.733	0.242	1.919
MSC	0.893	0.209	0.649	0.289	1.604
SNV	0.893	0.209	0.649	0.289	1.603
Detrend	0.873	0.228	0.712	0.254	1.829

由表 2 和图 2 可以看出, 预处理方法不同, 对原始光谱的影响效果也有所不同, 选择合适的预处理方法才能够改善模型的性能。与橙汁样品原始光谱建模效果相比, 由 MSC 和 SNV 预处理后模型的 R_c^2 值优于原始光谱建模, 但是由 MSC 和 SNV 预处理

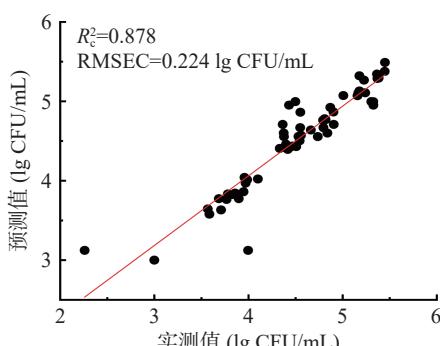


图 2 Autoscale-PLS 模型估计的酸土脂环酸芽孢杆菌含量测量值和预测值的散点图

Fig.2 Scatter plots of measured values and predicted values of *Alicyclobacillus acidoterrestris* contents estimated by Autoscale-PLS model

后模型的 R_p^2 和 RPD 值均不如原始光谱建模, 预测效果不佳。但用 Autoscale 和 Detrend 处理后的光谱所建立的模型 R_p^2 值均优于原始光谱模型, 模型 RPD 均在 1.5~2.0 之间, 预测结果较好。综合比较得出 Autoscale 预处理方法建立的模型预测性能相对较佳。

利用近红外光谱建立预测模型提供便捷、准确的无损检测方法, 具有广泛的应用前景。王军^[34]利用近红外光谱建立的线性判别模型对苹果汁中不同嗜酸耐热菌鉴别, 准确率达到 93.75%, 表明傅里叶变换红外光谱结合多元统计分析可以对嗜酸耐热菌不同菌株进行快速准确的鉴别。杨康^[35]建立了嗜酸耐热菌的红外快速检测模式, 并且对嗜酸耐热菌胞内的脂肪酸进行红外分析, 研究表明通过红外光谱特征可以对嗜酸耐热菌进行快速鉴定和检测。Mengshi 等^[36]研究发现使用近红外光谱技术可以快速判别果汁是否被脂环酸芽孢杆菌污染。张亮^[37]利用近红外光谱分析技术研究了鲜榨苹果汁和浓缩苹果汁中展青霉素的定性定量检测, 用矢量归一法预处理光谱得到鲜榨苹果汁中展青霉素检测模型的决定系数为 0.921, 内部交叉检验的预测集决定系数为 0.907, RMSEP 为 0.264 $\mu\text{g/L}$; 用最大最小归一化法预处理光谱得出浓缩苹果汁中展青霉素检验模型的决定系数为 0.935, 内部交叉检验的预测集决定系数为 0.927, RMSEP 为 0.532 $\mu\text{g/L}$, 研究表明近红外光谱分析技术能够用于鲜榨苹果汁和浓缩苹果汁中展青霉素的快速检测。

本研究发现三个温度的橙汁样品中酸土脂环酸芽孢杆菌的原始光谱建立的 PLS 模型 R_p^2 为 0.677, RMSEP 为 0.269 lg CFU/mL, RPD 为 1.726; 4 种不同预处理方法中, Autoscale 预处理光谱后建立的 PLS 模型的效果相对较好, R_p^2 为 0.733, RMSEP 为 0.242 lg CFU/mL, RPD 为 1.919。说明利用近红外光谱分析技术建立模型来预测橙汁样品中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长是可行的。

2.2 基于近红外光谱预测菌落数的生长模型构建

酸土脂环酸芽孢杆菌属于嗜热菌, 在低温环境生长会受到抑制, 所以 4 °C 培养初期, 橙汁样品中酸土脂环酸芽孢杆菌的数量增长不太明显, 仅在培养后期有所增加, 但生长曲线不完整。当培养温度为 20、40 °C 时, 橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长比较迅速, 其生长曲线完整, 包括迟滞期、对数期和稳定期三个阶段。

本文使用“一步法”数值分析方法对傅里叶近红外光谱仪预测的橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌菌落数进行分析拟合, 即一级模型和二级模型组合直接构建生长模型。主要使用 4 种一级和二级模型组合后的混合模型, 分别为 Huang-Full temperature range Ratkowsky 模型(命名缩写为 Huang-full 模型)、No-lag phase-Suboptimal Ratkowsky 模型(命名缩写为 No-

sub 模型)、No-lag phase-Full temperature range Ratkowsky 模型(命名缩写为 No-full 模型)、Huang-Sub-optimal Ratkowsky 模型(命名缩写为 Huang-sub 模型), 对 4、20、40 °C 条件下光谱预测菌落数的生长数据进行分析时, 数值分析迅速收敛。结果如表 3~表 6 所示。

根据表 3、表 5 可知, 由 Huang-full 模型和 No-full 模型拟合的橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的最低生长温度均为 10.30 °C, 最高生长温度分别为 58.40 和 59.20 °C。两种模型估计的最大生长浓度分别为 5.41 和 5.47 lg CFU/mL。据表 4、表 6 可知, 由 No-sub 模型和 Huang-sub 模型拟合的橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的最低生长温度分别是 11.20 和 10.70 °C。两种

模型估计的最大生长浓度分别为 5.35 和 5.33 lg CFU/mL。据研究可知, 酸土脂环酸芽孢杆菌嗜酸、耐热, 是一种好氧型的革兰氏阳性菌, 生长 pH 范围在 2.5~6.0 之间, 生长温度在 25~60 °C 之间^[38]。杨康^[35] 经过试验得到标准嗜酸耐热菌的生长温度为 28~60 °C; 分离嗜酸耐热菌的生长温度为 24~60 °C, 并且通过建立嗜酸耐热菌的生长模型, 从标准菌株的生物量模型中预测出标准嗜酸耐热菌的最大生物量约为 660 mg/L。冯鑫等^[39] 通过探索各种营养因子对酸土脂环酸芽孢杆菌生长的影响, 得出当培养液不含葡萄糖时, 酸土脂环酸芽孢杆菌的菌体总数可达 7.06 lg CFU/mL; 当培养基中葡萄糖浓度增加到 2 g/L 时, 酸土脂环酸芽孢杆菌的菌体总数为 7.66 lg

表 3 Huang-Full temperature range Ratkowsky 模型参数

Table 3 Parameters of Huang-Full temperature range Ratkowsky model

参数	估计值	标准误差	t值	p值	置信下限	置信上限	评估值			
							MSE	RMSE	AIC	r
a	0.0285	69.3	0.00	1.00×10 ⁻⁰	-154	155				
b	0.033	234	0.00	1.00×10 ⁻⁰	-521	521				
T ₀ (°C)	10.3	2140	0.01	9.96×10 ⁻¹	-4760	4780				
T _{max} (°C)	58.4	67100	0.00	9.99×10 ⁻¹	-150000	150000				
A	-4.07	41.5	-0.10	9.24×10 ⁻¹	-96.6	88.4				
m	2.09	11.3	0.18	8.57×10 ⁻¹	-23	27.2	0.0046	0.068	-66.383	0.963
Y _{0,4} (lg CFU/mL)	3.37	0.991	3.40	6.72×10 ⁻³	1.17	5.58				
Y _{0,20} (lg CFU/mL)	3.81	0.936	4.07	2.24×10 ⁻³	1.73	5.9				
Y _{0,40} (lg CFU/mL)	4.22	0.882	4.79	7.35×10 ⁻⁴	2.26	6.19				
y _{max} (lg CFU/mL)	5.41	1.22	4.45	1.24×10 ⁻³	2.7	8.11				

表 4 No-lag phase-Suboptimal Ratkowsky 模型参数

Table 4 Parameters of No-lag phase-Suboptimal Ratkowsky model

参数	估计值	标准误差	t值	p值	置信下限	置信上限	评估值			
							MSE	RMSE	AIC	r
a	0.019	0.00626	3.03	8.95×10 ⁻³	0.00556	0.0324				
T ₀ (°C)	11.2	2.46	4.56	4.45×10 ⁻⁴	5.94	16.5				
Y _{0,4} (lg CFU/mL)	3.2	0.737	4.34	6.83×10 ⁻⁴	1.62	4.78				
Y _{0,20} (lg CFU/mL)	3.85	0.721	5.34	1.04×10 ⁻⁴	2.3	5.4	0.0300	0.173	-53.944	0.907
Y _{0,40} (lg CFU/mL)	3.98	0.644	6.19	2.37×10 ⁻⁵	2.6	5.36				
y _{max} (lg CFU/mL)	5.35	0.566	9.46	1.85×10 ⁻⁷	4.14	6.56				

表 5 No-lag phase-Full temperature range Ratkowsky 模型参数

Table 5 Parameters of No-lag phase-Full temperature range Ratkowsky model

参数	估计值	标准误差	t值	p值	置信下限	置信上限	评估值			
							MSE	RMSE	AIC	r
a	0.026	96.3	0.00	1.00×10 ⁻⁰	-210	210				
b	0.0332	370	0.00	1.00×10 ⁻⁰	-807	807				
T ₀ (°C)	10.3	3270	0.00	9.98×10 ⁻¹	-7110	7130				
T _{max} (°C)	59.2	112000	0.00	1.00×10 ⁻⁰	-243000	244000				
Y _{0,4} (lg CFU/mL)	3.17	0.749	4.24	1.15×10 ⁻³	1.54	4.8	0.0131	0.115	-60.915	0.920
Y _{0,20} (lg CFU/mL)	3.72	0.775	4.81	4.29×10 ⁻⁴	2.04	5.41				
Y _{0,40} (lg CFU/mL)	4.21	0.735	5.73	9.53×10 ⁻⁵	2.61	5.81				
y _{max} (lg CFU/mL)	5.47	1.82	3.01	1.09×10 ⁻²	1.51	9.43				

表 6 Huang-Suboptimal Ratkowsky 模型参数
Table 6 Parameters of Huang-Suboptimal Ratkowsky model

参数	估计值	标准误差	t值	p值	置信下限	置信上限	评估值			
							MSE	RMSE	AIC	r
a	0.022	0.00923	2.39	3.44×10^{-2}	0.00191	0.0421				
T_0 ($^{\circ}$ C)	10.7	2.31	4.64	5.72×10^{-4}	5.68	15.8				
A	1.16	2.04	0.57	5.79×10^{-1}	-3.28	5.61				
m	0.602	1.15	0.52	6.10×10^{-1}	-1.9	3.11				
$Y_{0,4}$ (lg CFU/mL)	3.3	0.876	3.77	2.68×10^{-3}	1.39	5.21	0.0106	0.103	-65.168	0.949
$Y_{0,20}$ (lg CFU/mL)	3.89	0.871	4.46	7.76×10^{-4}	1.99	5.78				
$Y_{0,40}$ (lg CFU/mL)	4.27	0.706	6.04	5.86×10^{-5}	2.73	5.8				
y_{\max} (lg CFU/mL)	5.33	0.543	9.82	4.37×10^{-7}	4.15	6.51				

CFU/mL。唐翠娥等^[6]通过研究橙汁中主要营养成分对脂环酸芽孢杆菌生长的影响,发现当橙汁浓度为 100% 时,脂环酸芽孢杆菌的生长浓度约为 4.18 lg CFU/mL。本研究中, Huang-full 模型和 No-full 模型拟合出的酸土脂环酸芽孢杆菌最高生长温度和文献接近,且 4 种模型得到的最低生长温度均较低。

参数 MSE、RMSE、AIC 是评价模型拟合精度的重要指标,通常值越小,模型拟合的精度越高。可以看出, Huang-sub 模型和 No-full 模型的 RMSE、MSE、AIC 相近,无显著差异,可以认为这 2 种模型可以较好的拟合近红外预测橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长曲线。结果表明除 No-sub 模型,其他 3 种模型均能很好地拟合酸土脂环酸芽孢杆菌的生长,且 Huang-full 模型的 3 种指标相较更小,所以拟合的精度最高。因此相较于其它模型, Huang-full 模型更适合描述温度对橙汁样品中酸土脂环酸芽孢杆菌生长的影响。将近红外光谱获得预测菌落数构建的四种生长模型与平板计数法构建的生长模型分别进行相关性分析,可以看出 Huang-full 模型构建的相关性最高, r 为 0.963; No-sub 模型构建的相关性最低, r 为 0.907。总的来说, 4 种模型的相关系数均大于 0.900,且 Huang-full 模型的拟合效果最优。因此,可以判断基于近红外光谱预测菌落数建立的生长模型,可以代替基于平板计数构建橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长模型。

根据近红外预测的橙汁在 4、20、40 $^{\circ}$ C 条件下贮藏过程中酸土脂环酸芽孢杆菌的菌落数,分别利用 Huang-full 模型、No-sub 模型、No-full 模型和 Huang-sub 模型拟合得到生长曲线(如图 3 所示)。随着培养温度的升高,菌群从迟滞期进入对数期的时间缩短,对数期内菌群的生长速率也随着温度的升高而增大。

对近红外光谱获得预测菌落数构建的模型进行验证,验证结果见表 7。计算得出 4 种模型在各恒定温度(4、20、40 $^{\circ}$ C)条件下,近红外光谱预测得到的橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌菌落数的 A_f 和 B_f 值。由表 7 可知,所建立的模型 A_f 在 1.014~1.103 之间, B_f

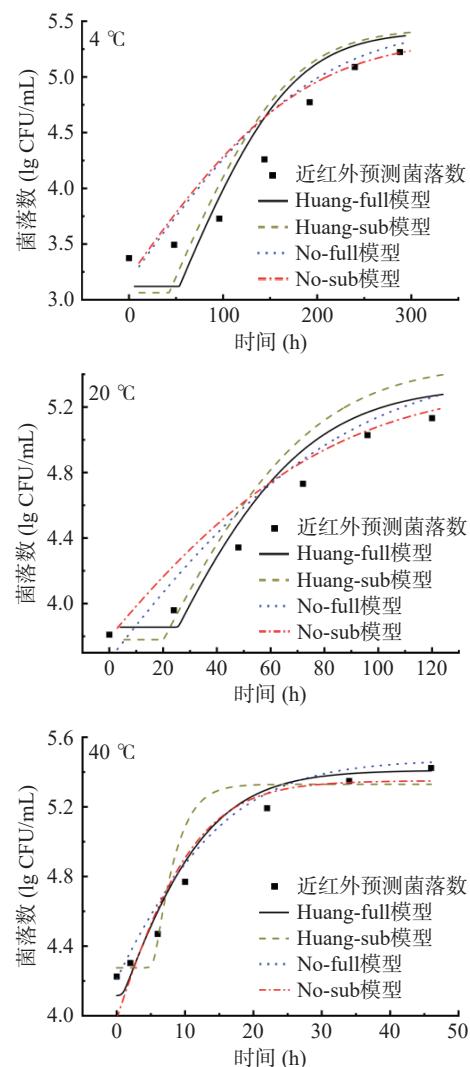


图 3 4 种模型在不同温度条件下拟合的近红外光谱预测橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长曲线

Fig.3 Growth curves of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice predicted by NIR spectra under different temperature conditions by four models

在 0.971~1.074 之间,且都较接近 1.000,说明本实验所建立的模型可靠性和稳定性较高。因此,4 种模型在 3 个贮藏温度下都具有较好的拟合效果,可以较好地预测橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌在不同贮藏温度下菌落总数的变化。说明近红外光谱技术能够较

表7 4种模型在不同温度条件下的验证结果
Table 7 Validation results of four models under different temperature conditions

模型	A_f			B_f		
	4°C	20°C	40°C	4°C	20°C	40°C
Huang-full	1.056	1.020	1.018	1.038	0.981	0.985
No-sub	1.090	1.033	1.043	1.063	0.983	0.992
No-full	1.103	1.017	1.014	1.074	0.995	0.991
Huang-sub	1.062	1.037	1.034	1.044	0.971	0.978

为准确的预测橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的菌落总数,且基于预测菌落数构建的模型较为稳定。

3 结论

研究基于橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌在4、20、40°C这3个温度下的近红外光谱和平板菌落计数法获得的微生物信息,采用“一步法”对近红外光谱预测的橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长数据进行分析,分别建立了Huang-full模型、No-sub模型、No-full模型和Huang-sub模型。结果表明,4种预测模型的MSE值介于0.0046~0.0300 lg CFU/mL之间;RMSE值介于0.068~0.173 lg CFU/mL之间;AIC值介于-66.383~-53.944之间,且Huang-full模型的3种指标相较更小,所以是描述橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌生长的最适模型,在不同温度条件下拟合度都较好。将近红外光谱获得预测菌落数构建的4种生长模型与平板计数法构建的生长模型分别进行相关性分析,其相关系数均大于0.900,且Huang-full模型的拟合效果最优。因此,可以证明基于近红外光谱预测菌落数建立的生长模型,可以代替基于平板计数构建橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌的生长模型。所构建的模型通过 A_f 和 B_f 值进行验证,证实模型均具有良好的可靠性。研究结果为有效监控橙汁中酸土脂环酸芽孢杆菌污染提供一定的参考,但在实际生产应用中,橙子品种、生产工艺波动等因素均有可能引起橙汁中的各成分的含量波动,若含量波动超出所建立的近红外模型范围,则会影响模型的预测精度。

参考文献

- [1] 高雯.浓缩果汁中嗜酸耐热菌和耐热霉菌的检测与研究[D].武汉:武汉轻工大学,2016:1~5. [GAO W. Detection and study of *Alicyclobacillus* spp. and heat resistant mould from the concentrated fruit juice[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016: 1~5.]
- [2] 姚培鑫,马小魁.浓缩果汁生产厂中嗜酸耐热菌的跟踪检测[J].饮料工业,2001,4(3):42~44. [YAO P X, MA X K. Online exploration of *Thermophilic acidophilic* bacteria in fruit juice concentrate manufacturers[J]. The Beverage Industry, 2001, 4(3): 42~44.]
- [3] 黄玉鑫,冯鑫,史文鑫,等.酸土脂环酸芽孢杆菌危害及其控制研究进展[J].食品工业科技,2019,40(12):347~353. [HUANG Y X, FENG X, SHI W X, et al. Research progress on harm and hazard control of *Alicyclobacillus acidoterrestris*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(12): 347~353.]
- [4] 王周利,蔡瑞,岳田利,等.果汁中脂环酸芽孢杆菌识别与控制研究进展[J].农业机械学报,2016,47(10):221~243. [WANG Z L, CAI R, YUE T L, et al. Review of identification and control technology of *Alicyclobacillus* spp. in fruit juice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 221~243.]
- [5] 张晨星,崔丽俊,于有伟,等.浓缩苹果汁中酸土脂环酸芽孢杆菌检测及控制措施研究进展[J].中国果菜,2021,41(1):33~42. [ZHANG C X, CUI L J, YU Y W, et al. Advances in the detection and control of *Alicyclobacillus* spp. in apple juice[J]. China Fruit and Vegetable, 2021, 41(1): 33~42.]
- [6] 唐翠娥,彭丽桃,李颖,等.橙汁主要营养成分及温度处理对脂环酸芽孢杆菌生长的影响[J].食品工业科技,2013,34(10):299~303. [TANG C E, PENG L T, LI J, et al. Effect of nutritional ingredient and temperature-treatment of orange juice on the growth of *Alicyclobacillus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(10): 299~303.]
- [7] 徐茜茜.酸土脂环酸芽孢杆菌(*Alicyclobacillus acidoterrestris*)芽孢形成及低pH条件下芽孢萌发的蛋白组学研究[D].新乡:河南科技学院,2017:1~5. [XU X X. Study on spore formation and proteomics of spore germination at low pH in *Alicyclobacillus acidoterrestris*[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2017: 1~5.]
- [8] EMANUELA C, ANTONIO B, MILENA S, et al. *Alicyclobacillus* spp.: New insights on ecology and preserving food quality through new approaches[J]. Microorganisms, 2015, 3(4): 625~640.
- [9] ORR R, SHEWFELT R, HUANG C, et al. Detection of guaiacol produced by *Alicyclobacillus acidoterrestris* in apple juice by sensory and chromatographic analyses, and comparison with spore and vegetative cell populations[J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(11): 1517~1522.
- [10] MCDONALD K, SUN D. Predictive food microbiology for the meat industry: A review[J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 52(1-2): 1~27.
- [11] 刘亚兵,何腊平,高泽鑫,等.食品微生物生长预测模型的研究[J].食品工业,2016,37(11):159~164. [LIU Y B, HE L P, GAO Z X, et al. Research on predictive model of food microorganism growth[J]. The Food Industry, 2016, 37(11): 159~164.]
- [12] GONZALEZ C, POSSAS A, CARRASCO E, et al. 'MicroHi-bro': A software tool for predictive microbiology and microbial risk assessment in foods[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 290: 226~236.
- [13] WHITING R, BUCHANAN R. A classification of models for predictive microbiology[J]. Food Microbiology, 1993, 10(4): 175~177.
- [14] 姬华.对虾中食源性弧菌预测模型建立及风险评估[D].无锡:江南大学,2012:6~8. [JI H. Establishment of predictive model and risk assessment for foodborne *Vibrio* spp. in Shrimp[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012: 6~8]
- [15] 牛犇,洪斌,穆井井,等.荧光定量PCR在预测微生物学中的应用[J].食品工业科技,2019,40(421):281~288. [NIU B, HONG B, MU J L, et al. Application of fluorescent quantitative PCR in predictive microbiology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(421): 281~288.]
- [16] 刘姗姗.李斯特菌生长预测模型的研究进展[J].天津农学

- 院学报, 2018, 25(3): 92–95. [LIU S N. Research progress in predictive models for *Listeria* growth [J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2018, 25(3): 92–95.]
- [17] GILL C, GREER G, DILTS B. The aerobic growth of *Aeromonas hydrophila* and *Listeria monocytogenes* in broths and on pork [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1997, 35: 67–74.
- [18] 褚小立, 陈瀑, 李敬岩, 等. 近红外光谱分析技术的最新进展与展望 [J]. *分析测试学报*, 2020, 39(10): 1181–1188. [CHU X L, CHENG P, LI J Y, et al. Progresses and perspectives of near infrared spectroscopy analytical technology [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020, 39(10): 1181–1188.]
- [19] 周冰谷, 花振新, 杨荣, 等. 近红外光谱技术在食品微生物检测中的应用 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(16): 5393–5398. [ZHOU B G, HUA Z X, YANG R, et al. Application of near-infrared spectroscopy in food microorganism detection [J]. *Food Safety and Quality Detection Technology*, 2019, 10(16): 5393–5398.]
- [20] 赵政. 猪肉新鲜度光谱模型的建立及传递方法研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. [ZHAO Z. The Establishment and transfer of the spectral model for pork freshness detection [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.]
- [21] 刘秋安, 徐芳芳, 张欣, 等. 基于近红外光谱技术和分类与回归树算法建立天舒片崩解时间预测模型 [J]. *中草药*, 2021, 52(16): 4837–4843. [LIU Q A, XU F F, ZHANG X, et al. Based on near-infrared spectroscopy technology and classification and regression trees algorithm to establish a prediction model of Tianshu Tablets disintegration [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(16): 4837–4843.]
- [22] 王健健. 基于傅立叶近红外光谱分析技术的南疆“温 185”核桃综合预测模型研究 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020. [WANG J J. Study on the comprehensive prediction model of "Wen 185" walnut in south Xinjiang based on Fourier near infrared spectroscopy [D]. Alxa: Tarim University, 2020.]
- [23] 崔蕴涵, 许金钗, 方智毅, 等. 莲子含水率近红外光谱检测模型构建 [J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(18): 130–135. [CUI Y H, XU J C, FANG Z Y, et al. Detection model of lotus seed water content based on near-infrared spectroscopy [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(18): 130–135.]
- [24] Simen A, Philippe N, Van I. A tutorial on uncertainty propagation techniques for predictive microbiology models: A critical analysis of state-of-the-art techniques [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2018, 282: 1–8.
- [25] HUANG L. Growth kinetics of *Listeria monocytogenes* in broth and beef frankfurters: determination of lag phase duration and exponential growth rate under isothermal conditions [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(5): E235–E242.
- [26] HUANG L. Optimization of a new mathematical model for bacterial growth [J]. *Food Control*, 2013, 32(1): 283–288.
- [27] FANG T, GURTNER J, HUANG L. Growth kinetics and model comparison of *Cronobacter sakazakii* in reconstituted powdered infant formula [J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(7–9): E247–E255.
- [28] FANG T, LIU Y, HUANG L. Growth kinetics of *Listeria monocytogenes* and spoilage microorganisms in fresh-cut cantaloupe [J]. *Food Microbiology*, 2013, 34(1): 174–181.
- [29] RATKOWSKY D, MCMEEKIN T, BALL A. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures [J]. *Journal of Bacteriology*, 1982, 154(1): 1222–1226.
- [30] RATKOWSKY D, LOWRY R, MCMEEKIN T, et al. Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range [J]. *Journal of Bacteriology*, 1983, 154(3): 1222–1226.
- [31] FENG C, DRUMMOND L, SUN D. Modelling the growth parameters of lactic acid bacteria and total viable count in vacuum-packaged Irish cooked sausages cooled by different methods [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2014, 49(12): 2659–2667.
- [32] 张玉华, 孟一, 郭风军, 等. 基于预测微生物学的冷却牛肉货架期预测模型的建立 [J]. *肉类研究*, 2019, 33(11): 61–66.
- [33] ZHANG Y H, MENG Y, GUO F J, et al. Predictive modelling for shelf-life determination of chilled beef based on predictive microbiology [J]. *Meat Research*, 2019, 33(11): 61–66.]
- [34] 朱金艳, 朱玉杰, 冯国红, 等. 基于近红外光谱技术联合极限学习机的蓝莓贮藏品质定量模型建立 [J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(16): 270–276. [ZHU J Y, ZHU Y J, FENG G H, et al. Establishment of quantitative models for blueberry storage quality based on near infrared spectroscopy combined with extreme learning machine [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(16): 270–276.]
- [35] 王军. 苹果汁中嗜酸耐热菌免疫分离及振动光谱法鉴定 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011: 50–53. [WANG J. Immunomagnetic separation of *Alicyclobacillus* species in apple juice and identification by vibrational spectroscopy [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2011: 50–53.]
- [36] YANG K. Study on kinetics and FT-IR rapid detection of *Alicyclobacillus acidoterrestris* originated from apple juice [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2007.]
- [37] MENGSHI LIN A, MURAD AL-HOLY B, SU-SEN CHANG A, et al. Rapid discrimination of *Alicyclobacillus* strains in apple juice by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Food Microbiology*, 2005, 105(3): 369–376.
- [38] ZHANG L. Application of near infrared spectroscopy on detection of *Penicillium expansum* and *patulin* [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2010.]
- [39] FENG X, HE C Y, XU X X, et al. Effect of medium component on growth and spore formation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(19): 84–89.]