

近红外光谱技术在食品微生物检测中的应用

周冰谷^{1*}, 花振新¹, 杨 荣², 林燕贞¹, 朱文亮¹

(1. 精益和泰质量检测股份有限公司, 广州 510670; 2. 广东恒兴饲料实业股份有限公司, 湛江 524000)

摘 要: 食品微生物受环境和时间的影响等因素产生变化, 并且检测周期长, 导致关系食品质量安全的微生物检测数据不能相对真实地反映食品微生物情况。近些年, 近红外检测技术因其高效、无损、快捷特点, 在食品微生物检测领域越来越受到重视。文章综述了近红外检测技术的原理、特点和检测过程, 以及食品中产毒真菌、食源性致病菌和食品腐败菌等检测方面的应用, 以期近红外检测技术在食品微生物检测中的应用研究提供参考, 促进食品微生物检测采用近红外进行在线快速检测。

关键词: 近红外光谱; 食品微生物; 检测; 综述

Application of near-infrared spectroscopy in food microorganism detection

ZHOU Bing-Gu^{1*}, HUA Zhen-Xin¹, YANG Rong², LIN Yan-Zhen¹, ZHU Wen-Liang¹

(1. Jingyihetai Quality Testing Co., Ltd., Guangzhou 510700, China; 2. Guangdong Evergreen Feed Industry Co., Ltd., Zhanjiang 524000, China)

ABSTRACT: Food microorganisms are affected by the environment, time and other factors change, and the detection period is long, leading to the food quality and safety of the microbial detection data can not reflect relatively real food microorganisms. In recent years, the near infrared (NIR) detection technology has been paid more and more attention in the field of food microorganism detection because of its high efficiency, nondestructive and rapidity. This paper reviewed the principle, characteristics and detection process of NIR detection technology, and its application in the detection of toxin producing fungi, food pathogenic bacteria and food spoilage bacteria. It is expected to provide references for the application research of NIR in food microorganism detection and promote the application of NIR in food microorganism field.

KEY WORDS: near-infrared spectroscopy; food microorganism; detection; review

1 引 言

据2006~2015年中国大陆地区食物中毒特征分析统计发现,“微生物性”食物中毒事件报导量以及导致食物中毒人数均位于首位^[1]。国家相关监管部门不断完善食品安全法律体系,规范和引导食品行业健康发展,为消费者的饮食安全提供有力保障^[2]。在食品采收、加工和处理过程中,可能会受到各种微生物的污染。随后的储存和流通过

程中,只有一小部分会发展并导致严重的恶化,抽取的样本的卫生质量不一定代表整个贮藏库的食品卫生质量^[3,4]。引起食物中毒的食品微生物多样^[5],传统的微生物检测方法主要为生化检验,操作程序繁杂,检测周期长^[6],易导致食品质量和安全监测滞后。较为先进的检测方法有质谱、核磁共振、基因芯片技术等^[7,8],检测成本相对较高。近红外光谱技术具有无损、快速等优点,在化工、农业、医药、环境等领域发展极为迅速^[9,10],本文主要综述近红外光谱

*通讯作者: 周冰谷, 主要从事食品、饲料检验与质量安全研究。E-mail: 279292258@qq.com

*Corresponding author: ZHOU Bing-Gu, Jingyihetai Quality Testing Co., Ltd., No.72, Yixiang Science & Technology Park, Nanxiang 2nd Road, Science City, Advanced and Innovative Tech Park, Guangzhou 510670, China. E-mail: 279292258@qq.com

技术在食品微生物检测应用中的研究, 以期科研人员提供参考, 实现对食品微生物快速无损检测, 提高效率、降低成本、保证食品质量安全。

2 近红外光谱技术

2.1 近红外光谱技术基本原理及特点

近红外光谱区的波长范围在780~2526 nm之间, 近红外光谱是由分子振动的非谐振性使分子振动从基态向高能级跃迁时产生。近红外光谱技术利用O-H、N-H、C-H等含氢基团化学键伸缩振动的倍频及合频吸收近红外光特点, 获得样本光谱中承载样本的物理、化学、生物学信息, 通过将采集样本光谱和测量参比值结合化学计量方法, 进行定标建模, 实现对未知样本参数的预测^[11,12]。

2.2 近红外技术检测微生物的过程

微生物由核酸、蛋白质等化学成分组成, 其成分对近红外光进行吸收, 提供不同特性的光谱^[13]。微生物定标样本的近红外光谱包含结构与组成等信息, 其性质参数与其结构、组成具相关性。因此, 样本的光谱与样本的组成性质参数的测量值也一定具有相关性, 应用化学计量学方法对其进行关联, 确立两者之间的定量或定性关系, 完成建模过程后, 无需将待预测样本进行生化检测, 仅需采集待预测样本的光谱即可将样本中的微生物进行定性、定量分析。即为定标建模和模型预测, 如图 1^[14,15]。

3 近红外在食品检测中的应用

3.1 食品中产毒真菌及其毒素的检测

产毒真菌是指产生真菌毒素的真核细胞型微生物, 其产生的毒素已经鉴定有 400 多种, 不同的真菌毒素具有不同毒性, 能损伤体细胞、致畸、致癌^[16-18]。

据联合国粮农组织调查估算, 全球每年受真菌毒素的污染的粮食约有 25%, 因污染严重而失去商业价值的农作物约有 2%^[19]。应用近红外光谱检测食品微生物的历史可追溯到 20 世纪 80 年代^[20], Levasseur-Garcia^[3]将 2016 年以前的玉米、小麦和大麦中镰刀菌、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、玉米赤霉烯酮、伏马毒素等应用红外光谱技术检测方法进

行了详细概述, 为该技术在谷物检测应用中起到很好的参考借鉴作用。我国主产稻谷, 金昌福等^[21]采用多元线性回归(multiple linear regression, MLR)建立稻谷在不同水分和温度条件下表面霉菌的定标模型, 模型验证预测值与化学值的验证决定系数为 0.897, 预测标准差为 33393 CFU/g; 沈飞等^[22]选取稻谷在 9000~4000 cm^{-1} 范围的光谱用偏最小二乘回归(partial least-squares regression, PLSR)建立的稻谷中的 4 种霉菌和菌落总数的定标建模, 该模型既能鉴别不同霉菌, 又能判别不同霉变程度, 总体准确率大于 85%, 还能进行定量分析, 其有效决定系数达到 0.8823, 验证均方根误差值为 0.339 Log CFU/g, 相对标准偏差值为 2.93, 从二者模型选择上来看, PLSR 优于 MLR^[21,22]。

果蔬的保鲜期常受到真菌影响。苹果较其他种类更易被扩展青霉污染, 其产生的扩展青霉素易导致肝脏和肾脏损伤^[23], 张亮^[24]应用近红外技术检测建立了苹果中扩展青霉及苹果汁中展青霉素的定标模型可进行定性和定量分析, 能将苹果在扩展青霉及其他不同霉菌、不同程度污染下, 有效区分出扩展青霉, 检出限为 1.5×10^3 个/mL; 不同基质中展青霉素的检测限分别为: 浓缩苹果汁中为9.76 $\mu\text{g/L}$; 鲜榨苹果汁中为9.54 $\mu\text{g/L}$; 水溶液中为9.29 $\mu\text{g/L}$ 。

花生是人们喜爱的坚果, 也是我国重要油料经济作物。但它容易受到黄曲霉污染, 部分黄曲霉菌产生毒素, 其中黄曲霉毒素 B_1 是一种极强的肝毒素, 可引起肝脏急性中毒和癌症^[25], 刘鹏等^[26]建立了5种产毒霉菌的定标模型, PLSR模型对样品中的菌落总数的预测结果为: 有效决定系数为0.8741、交互验证均方根误差为0.276 Log CFU/g, 剩余预测偏差为1.92, 总体预测比较理想, 不过黄曲霉组模型相对不足, 作者提出可能由于花生中霉菌未能充分混匀导致。

事实上, 食品中的毒素浓度非常低, 但由于毒素的毒性高效, 低浓度(每克中含几毫克或几纳克)即能产生明显毒性, 制样均匀度和采样代表性问题^[3,4,16-18,26], 加上近红外光谱目前还不够灵敏, 模型不够精准^[3], 除苹果汁中展青霉素的方法检出限满足食品安全标准 GB 2761-2017 中真菌毒素限量标准中要求以外, 其他暂不能满足^[3,16,21,22,24,26]。并非所有真菌都产生毒素, 利用近红外鉴别产毒真菌的菌种类型, 既可辅助监控预防产毒真菌的作用, 又能降低经济损失, 保证食品安全^[3,17,18]。

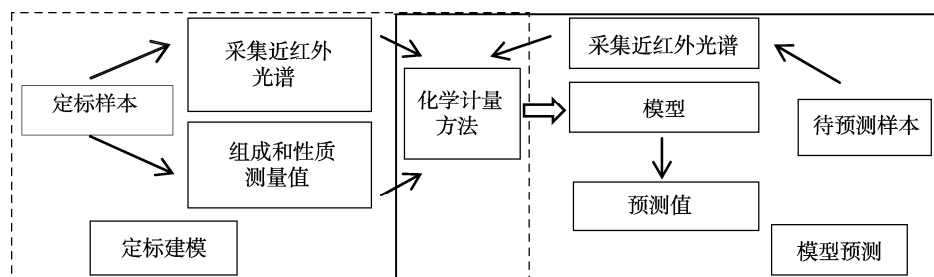


图 1 近红外光谱分析技术过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of near infrared spectrum analysis technology

3.2 食源性致病菌的检测

致病菌广泛存在我们的生活环境中。当人们食用被致病菌污染的食品时,人体可能会发生病变、中毒甚至突变、致癌等危害^[27,28]。岳田利等^[29]应用傅立叶变换近红外光谱技术(Fourier transform-near infrared, FT-NIR)可准确判别大肠埃希氏菌等6种标准菌株。刘建学等^[30]采用FT-NIR对未知样本中3种食源性致病菌(大肠埃希氏菌O157:H7、单增李斯特菌、金黄色葡萄球菌)进行预测判别,正确率均达到100%。在检测方法探索过程中,也存在一些问题,马凯旋^[31]对大肠埃希氏菌O157:H7、单增李斯特菌、金黄色葡萄球菌以及这3种细菌混合培养作为第4类菌为研究对象,采用3种方法建模进行对比选优,发现竞争性自适应重加权算法结合最小二乘-支持向量机模型最优,采集的致病菌近红外谱图受其浓度和培养时间影响较大,干扰检测结果,同时建议统一样品的浓度,以减少后期数据分析的难度,为进一步提高近红外光谱技术在该领域的适用性提供了很好的参考作用。

近红外光谱技术已应用到牛奶中的致病菌检测,王建明等^[32]利用FT-NIR研究了被阪崎肠杆菌、金葡萄球菌、大肠杆菌3种致病菌污染的牛奶研究发现,利用多元散射校正对光谱进行预处理,再结合PLS-判别分析(discriminatory analysis, DA)建立定标模型的预测性能较理想,可用鉴别乳制品中这3种致病菌的类别。牛奶中沙门氏菌的常规检测方法通常要花很长时间,Pereira等^[33]基于替代方法,研究应用近红外光谱鉴别被沙门氏菌不同程度污染的牛奶,采集的样本光谱结合PLS-DA建立定标模型,模型预测显示:脱脂奶粉样品校正均方根误差为0.1639,预测均方根误差为0.0971;全脂牛奶样品,校正均方根误差为0.1351和预测均方根误差为0.0928,可用于筛选牛奶中的沙门氏菌。

现有模型在研究中虽然能进行判别定性^[29-33],但食品安全国家标准GB 29921中对预包装食品致病菌有限量要求,其中单核细胞增生李斯特氏菌、沙门氏菌、大肠埃希氏菌O157:H7不得检出^[34],其精确度和灵敏度暂未能满足国家标准需求,有待进一步研究。

3.3 致食品腐败的微生物检测

食品在化学、内源酶及微生物作用下引起的腐败变质,导致食品降低或失去营养和商品价值^[35]。为合理掌握畜肉类货架期,快速无损检测方法凸显其优势,熊来怡^[36]提取猪肉在室温和冷藏温下贮藏时的近红外光谱特征值,通过零级模式动力学模型及主成分分析(principal component analysis, PCA),分别建立菌落总数的动力学模型和其与近红外光谱间的动力学模型,从而可利用近红外光谱技术实现无损检测猪肉的细菌菌落总数并预测其贮藏期。张雷蕾等^[37]将可见光谱与近红外光谱技术结合(1100~400 nm),

对冷却肉中菌落总数和颜色进行定标建模,所建定标模型能准确的检测冷却肉细菌总数。郭中华等^[38]将近红外高光谱图像技术和化学计量方法结合研究了冷鲜羊肉表面的细菌总数的检测方法,发现径向基函数人工神经网络模型预测效果最好。

假单胞菌是导致鸡肉变质的主要细菌,常见的主要有盖氏假单胞菌、嗜冷假单胞菌、莓实假单胞菌和荧光假单胞菌,陈全胜等^[39,40]均将腐败鸡肉进行生化培养筛选出并用聚合酶链反应(polymerase chain reaction, PCR)方法对这4种细菌进行鉴定,接着,前者结合其近红外特征信息结合PCA进行定标建模,其训练集和预测集的识率分别为99.17%和95.00%;后者用比色传感器结合近红外光谱技术,将其气味和近红外光谱特征信息结合PCA,再利用反向传播人工神经网络(back propagation neural network, BP-ANN)进行分别建模,模型预测,除莓实假单胞菌的识别率为98.75%,其余为100%。

在水产品品质检测方面,段翠^[41]以手持式近红外光谱仪为硬件,以牙鲆、鲈鱼、三文鱼为研究对象,发现样本在腐败过程中,微生物的生长曲线不是简单的直线成长,使用遗传算法(genetic algorithm, GA)+BP-ANN优于PLSR进行预测;建立的模型均取得良好效果。另外作者在使用仪器时,采用贴紧用消毒酒精处理15 min再风干过的两片载玻片的方式,并用保鲜膜将样品底部隔离,可有效解决样本交叉污染。

鸡蛋内部品质在无损检测领域得到填补,赵楠等^[42]应用近红外光谱技术对鸡蛋内部污染程度的可视化研究,根据鸡蛋内部污染程度及光谱特性的差异,建立了鸡蛋内部污染程度伪彩色图像,采用支持向量机(support vector machine, SVM)结合样本中菌落总数的光谱信息进行定标建模,模型能较好地预测鸡蛋中的菌落总数。

胡耀华等^[43]采用多元散射校正光谱预处理方法,以减少枣个体不均和光谱分布不均的影响,通过MLR建立的鲜枣内酵母菌落总数的近红外光谱模型,并结合鲜枣的近红外光谱,建立了鲜枣光谱吸光度值与贮藏时间的动力学模型,模型预测相关系数为0.996,标准偏差2.561%,可为鲜枣在室温下的安全贮藏提供参考。

大肠菌群是评价食品质量卫生指标之一,刘建学等^[44]对原料乳中大肠菌群的测定原理与测试方法进行了研究,发现偏最小二乘法和基于余弦相似度聚类+偏最小二乘法优于逐步回归方法,模型预测值与生化检测值之间的决定系数分别达到0.9126和0.9543。并且作者认为后者方法不适用于生产中对原料乳中大肠菌群数的检测。

脂环酸芽孢杆菌等耐热细菌是影响果汁生产的质量安全的主要微生物,王若男等^[45]应用FT-NIR对脂环酸芽孢杆菌属内种间的7株不同的标准菌株进行定标建模,模型

能100%准确判别标准菌类型。将上述建模的样本混入分离菌后再次定标建模,对15个样本进行预测以验证模型的稳健性和实用性,预测准确率为86.67%。

微生物直接关系到食品的质量卫生安全和货架期,在食用农产品^[36-43]、预包装食品^[44,45]领域均有研究应用近红外技术检测,细菌总数等腐败菌的多少与食品质量安全和货架期成反比关系,由细菌繁殖引起的食品形态性状的等变化通过在线检测,可大大缩短检测周期,减少质保成本,保证食品品质。

3.4 其他的微生物检测

研究发现真菌中蝙蝠蛾拟青霉和安络小皮伞菌发酵菌粉中含多种类似虫草的有益人体健康成分,逯城宇^[46]对比径向基神经网络(radial basis function neural network, RBFNN)和PLSR模型,分别开展了它们中的虫草酸、多糖、腺苷和蛋白质含量同时快速检测方法研究,对比发现:蝙蝠蛾拟青霉发酵菌粉中虫草酸和多糖RBFNN模型最佳,腺苷和蛋白质模型则PLSR模型更优;安络小皮伞发酵菌粉中虫草酸、多糖和蛋白质模型RBFNN模型最佳,而腺苷模型则PLSR模型更优。红曲菌也具有保健等价值,黄常毅^[47]采用氨基葡萄糖法测定生物量,应用遗传算法优选光谱波段并建立了预测红曲菌固态发酵生物量的定标模型,所建模型能够实现红曲菌固态发酵生物量的快速检测。发酵食品对人体有益^[6],酵母在食品中的应用非常广泛^[48],王玮等^[49]利用Antaris域型(FT-NIR)建立酵母菌定标建模,同时利用极限学习机(extreme learning machine, ELM)建立酵母菌生长过程4个阶段的分类模型,应用模型进行10次预测,其运行的训练集和测试集中的平均识别率分别为98.68%和97.37%。

有益微生物在食品中应用越来越广泛^[46-49],近红外技术可辅助微生物产品的生产,为保证微生物产品质量稳定,对其生产过程进行快速检测或在线监控,近红外技术对此具有很强的优势。

4 问题与建议

近红外光谱技术的定标模型的建立面临较多的问题。首先,需采集大量的样本光谱与样本的测量参比值,样本量的多少、均匀度、测量参比值的准确度直接影响到其定标模型代表性、稳定性和准确性,在前期的定标建模需要耗费大量精力与时间;其次,近红外检测技术是一种间接测量技术,前期选择样本的代表性和测量参比值的准确性以及选择合适计算模型的非常重要,而且采集到不同类型的食品微生物的近红外光谱信息特征各异,食品微生物种类繁多等;最后,在采集样本的光谱过程中,样本的基质不同以及微生物生长时间变化,其中混合其他微生物的种类和量不同均对其有干扰,再加上设备的灵敏度极限,影

响模型的准确度和检测限。这些问题导致定标建模和应用困难,有待更多的科研专家在这方面进行深入的研究。

要解决这些问题,可通过权威组织联合进行共享资源,不仅能快速强大采集食品微生物的近红外光谱和其对实测数据的数据库,还可相互降低人力、物力、财力、信息、时间等成本,实现参与者共赢。近红外光谱区的波长范围在780~2526 nm之间,使得近红外光谱技术在食品微生物检测中存在一定的局限性,可结合中红外光谱技术和远红外光谱技术等进行应用,以改善弊端扩大优势。

5 结语与展望

近红外光谱检测具有方便、快速、无损、多组分同时进行无损检测等优点,适用领域众多,具有广阔的应用前景。尽管其在前期待标建标阶段投入成本较大,但这个成本与后期应用时间长短成反比关系,从长远来看,综合成本持续下降的。相信在不久的将来,近红外光谱技术在食品微生物快速检测技术领域占据越来越重要地位,促使食品微生物快速检测技术领域迈上一个新的台阶。

参考文献

- [1] 王萍,宋晓冰. 2006-2015年中国大陆地区食物中毒特征分析[J]. 实用预防医学, 2018, 25(3): 257-260.
Wang P, Song XB. Characteristics of food poisoning in mainland China, 2006-2015 [J]. Pract Prev Med, 2018, 25(3): 257-260.
- [2] 闫文静. 新食品安全法制定变迁研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2015.
Yan WJ. Changes of food safety legal system in China [D]. Wuhan: Hubei University, 2015.
- [3] Levasseur-Garcia C. Updated overview of infrared spectroscopy methods for detecting mycotoxins on cereals (corn, wheat, and barley) [J]. Toxins, 2018, 10(1): 38.
- [4] In H, Jh TV. Microbial and biochemical spoilage of foods: An overview [J]. Int J Food Microbiol, 1996, 33(1): 1-18.
- [5] 王永华, 张水华. 食品分析(第二版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.
Wang YH, Zhang SH. Food analysis (2nd edition) [M]. Beijing: Chinese Light Industry Press, 2011.
- [6] 樊明涛, 赵春燕, 雷晓凌. 食品微生物学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2011.
Fan MT, Zhao CY, Lei CL. Food microbiology [M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2011.
- [7] 韩旭. 浅析食品企业微生物的检验技术与发展趋势[J]. 知识经济, 2018, (5): 67-68.
Hang X. Analysis of microbial inspection technology and development trend of food enterprises [J]. Knowledge Econ, 2018, (5): 67-68.
- [8] 朱群. 新技术在食品微生物检验检测中的应用[J]. 现代食品, 2018, (11): 105-107.
Zhu Q. Application of new technology in inspection and testing of food microorganisms [J]. Mod Food, 2018, (11): 105-107.
- [9] 张征立, 第丹丹, 萧王文, 等. 应用微型近红外光谱仪快速检测桑园土

- 壤有机质含量的方法[J]. 蚕业科学, 2018, 44(6): 923–928.
- Zhang ZL, Di DD, Xiao WW, *et al.* Rapid determination of soil organic matter in mulberry field by micro nearinfrared spectrometer [J]. Sci Sericult, 2018, 44(6): 923–928.
- [10] 杨晓丽, 黄晓寒, 杨秋艳. 近三年国内近红外检测应用研究进展[J]. 云南化工, 2018, 45(6): 1–3.
- Yang XL, Huang XH, Yang QY. National research advances of NIR detection in nearly three years [J]. Yunnan Chem Technol, 2018, 45(6): 1–3.
- [11] 武卫红, 董海平, 周爱敏, 等. AOTF-近红外光谱技术测定前列欣胶囊中欧前胡素、水分、细菌含量的即时快速检测分析[J]. 中国药房, 2010, 21(48): 4590–4594.
- Wu WH, Dong HP, Zhou AM, *et al.* Real-time rapid analysis method for the determination of peulustrin, moisture content and bacteriumin Qianlixin capsule by AOTF-NIR [J]. China Pharm, 2010, 21(48): 4590–4594.
- [12] 袁天军, 王家俊, 者为等. 近红外光谱法的应用及相关标准综述[J]. 中国农学通报, 2013, 29(20): 190–196.
- Yuan TJ, Wang JJ, Zhe W, *et al.* The review of application and standards of near infrared spectrometry [J]. Chin Agric Sci Bull, 2013, 29(20): 190–196.
- [13] Wang KQ, Pu HB, Sun DW. Emerging spectroscopic and spectral imaging techniques for the rapid detection of microorganisms: An overview [J]. Comprehens Rev Food Sci Food Saf, 2018, 17(2): 256–273.
- [14] Drott MT, Debenport T, Higgins SA, *et al.* Fitness cost of aflatoxin production in *Aspergillus flavus* when competing with soil microbes could maintain balancing selection [J]. Proceed Bio Sci, 2019, 10(1): 211–216.
- [15] 栢凤女. 大肠杆菌、单增李斯特菌近红外特征敏感组分的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.
- Bai FN. Study on near-infrared sensitive components from *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013.
- [16] GB 2761-2017 食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量[S]. GB 2761-2017 National food safety standard-Limit of mycotoxins in food [S].
- [17] Hussein HS, Brasel JM. Toxicity, metabolism, and impact of mycotoxins on humans and animals [J]. Toxicology, 2001, 167(2): 101–134.
- [18] Nurhan Ü. Systematic review of mycotoxins in food and feeds in Turkey [J]. Food Control, 2019, 97: 119–123.
- [19] 李美琴. 中欧粮食中真菌毒素控制的比较研究[J]. 粮食与饲料工业, 2013, 12(9): 63–67.
- Li MQ. Comparison study on EU-China mycotoxin management in grain [J]. Cere Feed Ind, 2013, 12(9): 63–67.
- [20] Davies AMC, Dennis C, Grant A, *et al.* Screening of tomato purée for excessive mould content by near infrared spectroscopy: A preliminary evaluation [J]. J Sci Food Agric, 1987, 39(4): 349–355.
- [21] 金昌福, 张强, 郑先哲, 等. 贮藏稻谷霉菌菌落总数近红外光谱预测模型[J]. 农机化研究, 2016, (10): 160–164.
- Jing CF, Zhang Q, Zheng XZ, *et al.* Near infrared spectrum prediction model of the total number of storage rice mould [J]. J Agric Mechaniz Res, 2016, (10): 160–164.
- [22] 沈飞, 魏颖琪, 张斌, 等. 稻谷有害霉菌侵染的近红外光谱快速检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(12): 3748–3752.
- Shen F, Wei YQ, Zhang B, *et al.* Rapid detection of harmful mold infection in rice by near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2018, 38(12): 3748–3752.
- [23] Iman S, Ipek G. The characteristics, occurrence, and toxicological effects of patulin [J]. Food Chem Toxicol, 2019, 129: 121–126.
- [24] 张亮. 扩展青霉和展青霉素的近红外检测技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- Zhang L. Application of near infrared spectroscopy on detection of penicillium expansum and patulin [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2010.
- [25] Accinelli C, Abbas HK, Little NS, *et al.* Biological control of aflatoxin production in corn using non-aflatoxigenic *Aspergillus flavus*, administered as a bioplastic-based seed coating [J]. Crop Protect, 2018, 107: 87–92.
- [26] 刘鹏, 蒋雪松, 沈飞等. 近红外光谱技术的花生产毒霉菌浸染快速检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(5): 1397–1402.
- Liu P, Jiang XS, Shen F, *et al.* Rapid detection of toxigenic fungal contamination in peanuts with near infrared spectroscopy technology [J]. Spectrosc Spectr Anal, 2017, 37(5): 1397–1402.
- [27] 宋宏新, 马娜. 食品中病原微生物快速检测方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(2): 127–130.
- Song HX, Ma N. A review rapid detection of pathogenic microbe in food [J]. Food Res Dev, 2005, 26(2): 127–130.
- [28] 吉礼, 车振明. 食品中微生物快速检测方法研究进展[J]. 生命科学仪器, 2008, 6(9): 51–53.
- Ji L, Che ZM. A Review rapid detection of microbe in food [J]. Lif Sci Instrum, 2008, 6(9): 51–53.
- [29] 岳田利, 王军, 袁亚宏等. 基于 FT-NIR 的微生物快速鉴定方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(11): 2945–2949.
- Yue TL, Wang J, Yuan YH, *et al.* Rapid identification of microorganisms based on Fourier transform near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spectr Anal, 2010, 30(11): 2945–2949.
- [30] 刘建学, 马凯旋, 韩四海, 等. 食源性致病菌近红外光谱改进贝叶斯判别模型的建立[J]. 农产品加工, 2018, (12): 22–26.
- Liu XJ, Ma KX, Han SH, *et al.* Improved bayes discriminant analysis on near infrared spectroscopy of food pathogens [J]. Farm Prod Process, 2018, (12): 22–26.
- [31] 马凯旋. 典型食源性致病菌近红外特征波长筛选方法的构建[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2018.
- Ma KX. Construction of the method for near-infrared characteristic wavelength screening of the typical food-borne pathogens [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2018.
- [32] 王建明, 李颖, 李祥辉, 等. 傅里叶变换近红外技术在乳制品微生物鉴别中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(S1): 56–57.
- Wang JM, Li Y, Li XH, *et al.* Study on the identification of microorganisms in milk and dairy products by Fourier transform near-infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spectr Anal, 2016, 36(S1): 56–57.
- [33] Pereira JM, Leme LM, Perdoncini MRFG, *et al.* Fast discrimination of milk contaminated with *Salmonella* sp. via near-infrared spectroscopy [J]. Food Anal Methods, 2017, 11(7): 1878–1885.
- [34] GB 29921-2013 食品安全国家标准 致病菌限量[S]. GB 29921-2013 National food safety standard-Limit of pathogen in foods

- [S].
- [35] 朱军莉, 冯立芳, 王彦波等. 基于细菌群体感应的生鲜食品腐败机制[J]. 中国食品学报, 2017, 17(3): 225–234.
- Zhu JL, Feng LF, Wang YB, *et al.* Spoilage mechanism of fresh food based on bacterial quorum sensing [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2017, 17(3): 225–234.
- [36] 熊来怡. 近红外光谱技术检测猪肉品质及其安全判别研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2012.
- Xiong LY. Quality detection and safety discrimination of pork with near infrared spectroscopy [D]. Xi'an: Northwest Agriculture & Forestry University, 2012.
- [37] 张雷蕾, 彭彦昆, 刘媛媛, 等. 冷却肉微生物污染和肉色变化的Vis/NIR光谱无损检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S1): 159–164.
- Zhang LL, Peng YH, Liu YY, *et al.* Non-invasive detection to TVC and color of chilled pork based on Vis/NIR spectroscopy [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2013, 44(S1): 159–164.
- [38] 郭中华, 郑彩英, 金灵. 基于近红外高光谱成像的冷鲜羊肉表面细菌总数检测[J]. 食品工业科技, 2014, 35(20): 66–68, 81.
- Guo ZH, Zheng CY, Jing L. Measurement of total viable count on chilled mutton surface based on near-infrared hyperspectral imaging technique [J]. Sci Technol Food Ind, 2014, 35(20): 66–68, 81.
- [39] 陈全胜, 王名星, 郭志明等. 鸡肉中假单胞菌的近红外光谱快速识别[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 328–334.
- Chen QS, Wang MX, Guo ZM, *et al.* Rapid identification of pseudomonas spp. in chicken by near-infrared spectroscopy [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2017, 48(8): 328–334.
- [40] Xu Y, Kutsanedzie FHY, Sun H, *et al.* Rapid pseudomonas species identification from chicken by integrating colorimetric sensors with near-infrared spectroscopy [J]. Food Anal Method, 2017, 11(4): 1199–1208.
- [41] 段翠. 几种海产鱼类菌落总数的近红外快速检测技术[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Duan C. Rapid determination of the total bacteria in marine fish by portable near infrared spectrometer abstract [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [42] 赵楠, 刘强, 魏康丽, 等. 基于近红外高光谱成像技术的鸡蛋污染过程中菌落总数可视化研究[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(3): 543–550.
- Zhao N, Liu Q, Wei KL, *et al.* Visualization of the total viable count of bacteria during the polluted process of eggs based on near infrared hyperspectral imaging technology [J]. J Nanjing Agric Univ, 2019, 42(3): 543–550.
- [43] 胡耀华, 刘聪, 何勇. 近红外光谱检测鲜枣酵母菌的动力学模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 922–926.
- Hu YH, Liu C, He Y. Kinetic model for determination of in fresh jujube using near infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2014, 34(4): 922–926.
- [44] 刘建学, 徐宝成, 钟先锋, 等. 原料乳中大肠菌群的近红外光谱快速分析[C]. 全国近红外光谱学术会议, 2006.
- Liu XJ, Xu BC, Zhong XF, *et al.* A rapid quantitation assay of microbes in milk based on near infrared spectroscopy [C]. The Chinese Conference on Near Infrared Spectroscopy. 2006.
- [45] 王若男, 岳田利, 袁亚宏, 等. 基于傅里叶变换近红外光谱的脂环酸芽孢杆菌种间分类鉴定[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(11): 3073–3077.
- Wang RN, Yue TL, Yuan LH, *et al.* Differentiation and identification of *Allicyclobacillus* strains by transform near infrared spectrum [J]. Spectrosc Spectr Anal, 2015, 35(11): 3073–3077.
- [46] 逯城宇. 近红外光谱分析技术在发酵菌粉品质快速检测中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Lu CY. Application of the near infrared spectroscopy technology in the rapid determination of fermentation powder [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [47] 黄常毅. 近红外光谱技术在微生物发酵过程中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- Huang CY. Research on the application of near infrared reflectance spectroscopy in microbial fermentation process [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [48] 田晓菊. 酵母属在食品工业中的应用[J]. 中国酿造, 2015, 34(4): 13–16.
- Tian XJ. Application of *Saccharomyces* in food industry [J]. China Brew, 2015, 34(4): 13–16.
- [49] 王玮, 江辉, 刘国海, 等. 近红外光谱法定性描述酵母菌的生长过程[J]. 分析化学, 2017, 45(8): 1137–1142.
- Wang W, Jiang H, Liu GH, *et al.* Qualitative prediction of yeast growth process based on near infrared spectroscopy [J]. Chin J Anal Chem, 2017, 45(8): 1137–1142.

(责任编辑: 武英华)

作者简介



周冰谷, 主要从事食品、饲料检验与质量安全研究。
E-mail: 279292258@qq.com