

综述

食品中蜡样芽孢杆菌污染的预测模型及风险评估进展

王欣茹^{1,2}, 黄琼^{1,2}

(1. 南方医科大学公共卫生学院, 广东广州 510515; 2. 广东省疾病预防控制中心, 广东广州 511430)

摘要:蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)是一种食品中常见的食源性条件致病菌,其引发的食源性疾病不仅对食用者健康造成严重损伤,也对社会经济造成严重损失。本文综述了近年来国内外对食品中*Bacillus cereus*污染预测模型的研究及其在风险评估中的应用进展。将影响因素、食品基质、生产链环节、初级模型和次级模型常用拟合模型等进行总结,发现当前预测模型研究最多的是温度、食品成分、水分活度、pH值等因素对*Bacillus cereus*增殖影响,而温度是主要影响因素;食品主要集中于动物性食品和大米及其制品。Gompertz模型、Logistic模型、Baranyi模型、Weibull等模型常用于拟合生长或失活曲线,建立初级模型;二次多项式模型和平方根模型常用来拟合生长速率或延滞期的变化,建立次级模型;在此基础上,用软件系统建立三级模型。当前的风险评估研究仅涉及到生产环节或从销售到消费环节,尚未见到某类食品从原料环节到消费环节*Bacillus cereus*预测模型研究的报道。本文展望了食品中*Bacillus cereus*污染的风险评估研究,以期今后的研究提供参考。

关键词:蜡样芽孢杆菌; 风险评估; 食源性疾病; 模型

中图分类号: R155

文献标识码: A

文章编号: 1004-8456(2022)06-1366-09

DOI: 10.13590/j.cjfh.2022.06.040

Research progress in prediction models and risk assessment of *Bacillus cereus* contamination in foodWANG Xinru^{1,2}, HUANG Qiong^{1,2}

(1. School of Public Health, Southern Medical University, Guangdong Guangzhou 510515, China; 2. Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention, Guangdong Guangzhou 511430, China)

Abstract: *Bacillus cereus* (*B. cereus*) is a common foodborne opportunistic pathogen, which causes foodborne diseases to seriously affect consumers' health and social economy. This paper reviews the research progress on prediction models and its application in risk assessment of *B. cereus* contamination in food at home and abroad, and summarizes the factors, food categories, production chain, primary and secondary model fitting methods. It is found that the temperature, food ingredients, water activity, pH and so on affect the proliferation of *B. cereus*, and temperature is the main factor. Animal food and rice and its products were the main food categories. Gompertz model, Logistic model, Baranyi model, Weibull models etc are often used to fit growth or inactivation curves to establish primary models. Quadratic polynomial model and square root model are commonly used to fit the change of growth rate or lag time to establish the secondary model. On this basis, a three-stage model is established by software system. The current risk assessment studies only involve the production or from sales to consumption, and there is no report on the *B. cereus* prediction model of certain food from raw material to consumption. The prospect of quantitative risk assessment modeling of *B. cereus* contamination in food is put forward to provide reference for future research.

Key words: *Bacillus cereus*; risk assessment; foodborne disease; model

食品中致病菌污染所导致的食源性疾病是全球的公共卫生问题,据报道,由微生物危害引起的食

品安全问题约占总问题的40%左右^[1]。蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*, *B. cereus*)是一种常见的食品污染菌和食源性条件致病菌,*B. cereus*生长最适pH为6.0~9.0,最适温度为30℃~39℃,在普通琼脂培养18~24h,菌落呈不透明灰白色,偶尔产生黄绿色色素,表面粗糙似毛玻璃状或熔蜡状,边缘常呈扩展状,菌落直径达5~7mm,因其可产生芽孢,易在食品生产加工、运输、储存、销售、烹饪等各个环节造成污染。在吕鸿鑫等^[2]对一起*B. cereus*食源性疾病事件进行

收稿日期: 2022-03-04

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B111103001)

作者简介: 王欣茹 女 在读研究生 研究方向为公共卫生 E-mail: 1637816880@qq.com

通信作者: 黄琼 女 主任医师 研究方向为食源性疾病预防和暴发应对及公共卫生风险评估 E-mail: huangqiong@cdep.org.cn

流行病学调查时发现,85.29%(58/68)的病例均在进食食堂早餐后发病,以腹泻为主(92.6%);经病例对照分层分析,发现售卖汤河粉、汤米粉、炒米粉的设备为可疑设备;经实验室检测,在汤粉和6名疑似病例肛拭子中检出 *B. cereus*。

食源性 *B. cereus* 主要是由土壤、空气、水、尘埃和动物昆虫等带入,*B. cereus* 在豆豉中的检出率约为94%^[3],大米和淀粉中的检出率分别为93.75%和50%^[4],腐乳和豆浆中的检出率分别为84.2%和14.3%^[5],婴幼儿配方乳粉中的检出率为42.22%^[6],生菜中的检出率为6.7%^[7]。可见,*B. cereus* 分布范围广,在米饭、新鲜蔬菜、海鲜、乳制品及肉制品等各类食品以及生产设备环节中均可检出,且检出率高。被污染的食品在一定的储存温度、存放时间或烹饪方式下,易导致 *B. cereus* 或残存的芽孢生长繁殖,当 *B. cereus* 含菌量 $>10^5$ CFU/g(mL)时,易产生呕吐毒素或腹泻毒素,从而导致呕吐型食源性疾病或腹泻型食源性疾病;也有 *B. cereus $<10^5$ CFU/g(mL)时引发食源性疾病的相关报道。其中,腹泻毒素在56℃加热5 min可失活,通常在进食后6~15 h出现症状,若在食用前按照正确的方式储存或烹饪,可避免腹泻型食源性疾病的发生;由于呕吐毒素耐热、耐酸、较稳定,且一般限于含淀粉丰富的食品,即使经过热处理,食品中 *B. cereus* 菌量减少,依然有食源性疾病发生的可能性。根据文献报道,我国发生的 *B. cereus* 食源性疾病主要是以呕吐型为主,占75.9%;也有报道称以腹泻型为主,因其腹泻型毒素毒力基因的携带率高达80%以上^[8-9]。其主要症状包括腹泻、恶心、呕吐、头晕、发烧和四肢无力等,偶尔引起食用者眼部感染^[10],以及心内膜炎、脑膜炎、肺炎、骨髓炎和菌血症等非肠道疾病的发生,严重者可能出现肝衰竭而死亡;此外,与 *B. cereus* 相关的新生儿败血症尤其严重,可导致新生儿的死亡^[11-12]。*

食品中 *B. cereus* 污染完整的风险评估,一般引入预测微生物学模型,借用数学模型来预测食品中 *B. cereus* 污染水平,并确定影响其水平的主要因素,为提出风险控制措施提供理论依据。本文主要综述近年来食品中 *B. cereus* 预测模型的研究进展,以及在风险评估中的应用情况,并做出总结及展望,以完善 *B. cereus* 在食品中风险评估模型的研究。

1 食品中蜡样芽孢杆菌污染的预测模型

预测微生物学模型主要是通过数学模型对微生物生长状况进行定量分析,包括初级模型、次级模型和三级模型的构建,模型结果可使监测人员能够在没有进行微生物检测的前提下,预测微生物的

生长和死亡情况,为食品安全提供重要保障。预测微生物学模型可根据建立的方式分为动力学模型和概率模型,贺旺林^[13]通过建立真空包装哈尔滨红肠在4℃~25℃条件下的生长动力学模型,进而建立货架期预测模型来预测其剩余货架期。而动力学模型又根据微生物生长的4个时期(延滞期、对数期、稳定期和衰亡期),可将其分为生长模型和失活模型。

1.1 生长模型

近年来,国内外对食品中 *B. cereus* 污染的预测模型研究逐步深入,从以往的培养基基质转至食品基质,而国外涉及的食品基质种类较为丰富,包括培养基、肉及肉制品、乳及乳制品、大米及其制品、无菌超高温食品和冷藏-加工食品和蔬菜水果沙拉等即食类食品;而国内研究较多的是大米及其制品,这可能与国内饮食习惯以及引发食源性疾病暴发的食品有关。

仪淑敏等^[14]为研究15℃~44℃等不同温度下 *B. cereus* 在营养肉汤培养基中的生长状况,通过定量检测,拟合生长曲线,发现温度会影响其形状,若在最适温度(30℃~41℃)下 *B. cereus* 的延滞期较短,很快进入对数生长期;其中, *B. cereus* 在15℃、20℃、30℃、32℃、34℃和37℃生存曲线与MMF模型拟合度较高,在25℃、39℃和44℃的生长曲线与Richards模型拟合效果较好,其相关系数均 >0.995 ,标准差均 <0.51 。

大米及其制品在国内日常生活中扮演着重要的角色,为构建大米中 *B. cereus* 的预测生长模型,黄丹阳等^[15]采用SGompertz和Slogistic模型对10℃~43℃下 *B. cereus* 的定量检测数据分别进行拟合,发现SGompertz模型拟合度更高,可选其作为米饭中 *B. cereus* 的初级生长模型;用平方根和二次多项式模型分别拟合次级生长模型,发现二次多项式模型可以较好地预测米饭中 *B. cereus* 的生长温度与延滞期(λ)和最大比生长速率(μ_m)的关系,经验证, A_f (准确因子)=1.24, B_f (偏差因子)=0.92,故选择二次多项式模型拟合次级生长模型。HEO等^[16]、KIM等^[17]分别在建立熟米饭和添加了防腐剂的鲜面条中 *B. cereus* 的预测生长模型时,同样发现修正的Gompertz模型拟合其生长曲线效果较好,二次多项式模型拟合生长速率与生长曲线的效果较好。同样的,KANG等^[18]用修正的Gompertz模型拟合烟熏鸡肉在不同储存温度下 *B. cereus* 的生长曲线,在邱红玲等^[19]建立的复原乳中 *B. cereus* 的生长动力学模型中,也发现修正的Gompertz模型能较好地拟合其生长曲线。

而在林宇斌等^[20]关于鲜湿米粉中 *B. cereus* 在

5℃~35℃培养条件下预测生长模型的研究中,首先选用微生物初级生长模型中常用的4种S形模型分别拟合不同温度下鲜湿米粉中*B. cereus*的生长曲线,发现拟合度由高到低依次为Baranyi模型、MMF模型、Logistic模型和Gompertz模型。JUNEJA等^[21-23]也用Baranyi模型、Huang、修正的Gompertz模型和线性模型分别拟合熟豆、意大利面食和米饭长时间冷却过程中*B. cereus*的生长曲线,发现Baranyi模型拟合度最好。次级生长模型均选用Ratkowsky平方根模型拟合温度对生长速率和延滞期的影响,经验证,得出模型的 A_f 和 B_f 均接近1,说明该预测模型可靠且具有实际应用价值。建立食品在冷却过程中*B. cereus*的预测生长模型有助于食品行业预测和确定煮熟食品在冷却过程或不正确储存温度下食

品的安全性。

魏超等^[24]为控制芽苗菜工厂化生产中*B. cereus*的源头污染,通过人工污染种子,监测其生长、收获、储存等环节中*B. cereus*的变化;分别在4℃~35℃储藏时期定量检测*B. cereus*,利用Baranyi模型建立初级生长模型,经拟合不同温度下的生长曲线,发现有25.3%的芽苗菜被*B. cereus*污染,其中有8%的阳性样品污染水平 $>10^3$ CFU/g(mL);利用平方根模型建立次级模型,经计算 $A_f=1.02$ 、 $B_f=1.01$ 、RMSE(均方根误差) <0.15 ,表明预测值与观测值之间的离散程度较小。此外,发现*B. cereus*污染水平会随着储藏温度和时间的变化而变化,储藏温度是影响*B. cereus*增殖的主要因素,低温保存可有效控制污染程度。相关生长模型见表1。

表1 *B. cereus* 预测生长模型Table 1 The prediction growth model of *B. cereus*

菌株	食品基质	条件	初级模型	次级模型	R^2	参考文献
ATCC 49064和 DSMZ 4313	脑心浸液肉汤 培养基	T:10、15、20、25、30、35 A_w :0.992、0.983、0.975、0.965、 0.96、0.95、0.942、0.936 pH:5、5.5、6、6.5、7、7.5	Logistic模型			[25]
ATCC 49064和 DSMZ 4312	软烤贻贝	T:15、20、25、30 A_w :0.976、0.952、0.931、0.912 pH:5.01、5.50、5.93、6.52	Logistic模型		0.979	[26]
ATCC14579	复原乳	T:25、28、30、37、42	Gompertz模型	平方根模型	0.98	[19]
F4810/72	米饭	T:10、25、40 pH:5.4、6.1、6.8	Gompertz模型	二次多项式	0.986	[16]
<i>B. weihenstephanensis</i>	奶油意大利面和 胡萝卜汤	T:10、12、16、20、30 A_w :0.977、0.989、0.997	Baranyi-Roberts模型		0.98	[27]
分离出的 <i>B. cereus</i>	米饭	冷却时间6~21 h	Baranyi Gompertz模型 Logistic模型 Huang模型	平方根模型	0.991 0.903 0.938 0.925	[23]
ATCC 11778	草莓	T:7、15、25、30	Baranyi-Roberts模型		0.972~0.999	[28]

注:T:温度/℃, A_w :水分活度

1.2 失活模型

失活模型是为预测微生物在影响存活因素下的生长状态,一般用D值、Z值对其耐受性做初步评价,D值越大说明耐热性越强。JANŠTOVÁ等^[29]对6株*B. cereus*菌株在90℃~135℃下暴露不同时间的耐热性开展研究,随温度增加,D值降低,尤其是95℃~100℃,菌株耐热性显著降低。对食品中*B. cereus*失活模型的研究,大多考虑温度对其活性的影响,主要是因为日常烹饪时,热处理是最常见的食品处理方式,而热处理易激活*B. cereus*中耐热的休眠芽孢,加快芽孢的萌发。

DARYAEI等^[30]为评价压力-热联合处理米饭中*B. cereus*的失活效果,运用Line模型、Weibull模型和Logistic模型拟合600 MPa、60℃~85℃和0.1 MPa、85℃处理下的失活曲线,发现在600 MPa下,温度升高对*B. cereus*的失活率有显著影响;其中,在600 MPa、

60℃时,Weibull模型的拟合度较好,在75℃、85℃时,Logistic模型的拟合效果最好, A_f 更接近1;而在0.1 MPa、85℃时,*B. cereus*的失活曲线接近线性。结果表明,在600 MPa、60℃处理15 min,可有效灭活米饭中的*B. cereus*芽孢,在85℃处理4 min即可达到同样效果。在2019年,JUNEJA等^[31]也做过类似研究,发现在米饭在蒸煮过程中*B. cereus*的失活曲线,Weibull模型拟合度较线性模型好,RMSE在0.14~0.28范围内。

索标等^[32]定量检测即食牛肉中*B. cereus*在不同浓度肉桂醛、55℃~70℃条件下的污染水平,运用Weibull模型对其失活曲线进行拟合建立初级失活模型,二次多项式模型拟合温度和不同浓度对*B. cereus*生长的影响,建立次级失活模型,经验证, R^2 、 A_f 、 B_f 均接近1,说明该模型拟合效果较好,且发现当肉桂醛浓度相同时,温度越高,降低5 lgCFU/g(mL)所需

要的时间越短,而肉桂醛能明显降低即食牛肉中 *B. cereus* 的热抗性,以提高杀菌效果。除常见的温度或温度-时间的联合处理可影响蜡样芽孢杆菌的活性外,臭氧、等离子体活化水(Plasma activated water,

PAW)、光敏剂(如 ALA)、脉冲电场(Pulsed electric field, PEF)和抗菌可可粉联合处理、降低水分活度和 pH 值等处理方式,均可抑制 *B. cereus* 生长,有效降低其活性。相关预测失活模型见表 2。

表 2 *B. cereus* 预测失活模型
Table 2 The Prediction Inactivation Model of *B. cereus*

菌株	处理方式	条件	失活模型	R^2	RMSE	参考文献
ATCC 11783	PAW	T:55、40、25	Logistic 模型	0.99		[33]
			Weibull 模型	0.97		
			Line 模型	0.94		
ATCC 10987 ATCC 14579	微酸性电解水+ 苯扎氯铵	T:50、60	Weibull 模型	0.94~0.99		[34]
分离出的 <i>B. cereus</i>	热处理	T:85、87、90 A_w :0.973、0.980、0.987、0.995 pH:5.6、6.0、6.4	Gamma 模型			[35]
分离出的 <i>B. cereus</i>	臭氧		Weibull 模型	0.90~0.92		[36]
分离出的 <i>B. cereus</i>	热处理	T:90.5、95、99	Weibull 模型 Liner 模型		0.14~0.28 0.16~0.37	[31]
CECT	PEF+抗菌可可粉	T:5、15、35	Bigelow 模型	0.601~0.995	0.005~0.248	[38]
			Weibull 模型	0.769~0.967	0.012~0.375	
			Log-Logistic 模型	0.951~0.999	0.002~0.101	
			Gompertz 模型	0.9831~0.994	0.008~0.186	
			Line 模型	0.83~0.86	0.22~0.31	
ATCC 9818	压力-热联合处理	600 MPa、60~85 °C	Weibull 模型	0.86~0.92	0.14~0.26	[30]
			Logistic 模型	0.79~0.98	0.08~0.35	
		0.1 MPa、85 °C	Line 模型	0.96	0.12	
			Weibull 模型	0.93	0.21	
ATCC 14579	冷大气压等离子体	功率/W:39、43、46 处理时间/s:0~270	Weibull 模型		0.0521~0.0734	[38]
ATCC 12826	ALA	处理浓度/ mmol L^{-1} :3、7.5 处理时间/min:2、15、30、60	Weibull 模型			[39]

注:T:温度/°C, A_w :水分活度

综上所述,在食品中 *B. cereus* 的生长模型和失活模型研究中,温度和食品基质对模型有很大影响,除温度外,部分研究还综合考虑了温度-高压、pH 值、水分活度、物理和化学等其他因素对 *B. cereus* 在食品中增殖或失活的影响来建立生长或失活模型。食品中 *B. cereus* 初级生长模型的建立,主要利用修正的 Gompertz、Baranyi、MMF 等模型来拟合生长曲线,获得动力学参数;Logistic 模型和 Weibull 模型是失活模型中常见的拟合度较好的模型。在 KANG 等^[40]评价超声波对卤水和牛肉研制过程中 *B. cereus* 污染水平的影响时,发现 Weibull 模型对于所测定的数据具有良好的拟合度。平方根模型和二次多项式模型主要用于拟合影响因素与 *B. cereus* 生长速率、延滞期等动力学参数之间的关系,进而建立次级模型。而三级模型是在初级模型与次级模型的基础上形成的软件系统,其中,食品微型模型、病原菌建模程序、预测微生物学公共数据库(Combase)等比较典型。

2 食品中蜡样芽孢杆菌污染的风险评估应用

风险评估是出于特定目的而进行的,利用现有

的科学资料和适当的试验方式,根据危害的毒理学特征或感染性和中毒性作用特征以及其他相关的资料,对因食品中某些微生物危害的暴露对人体健康产生的不良后果进行识别、确认以及定量,最终确定污染物的摄入量及其对人体产生不良作用概率之间关系的风险特征数学描述的过程^[41]。其步骤一般分为 4 个部分:危害识别、危害描述、暴露评估、风险特征描述。定量风险评估是风险评估的最优模式,通过量化整个食品生产、加工和消费等环节中所存在的致病微生物危害,并将该危害与因其所导致疾病的概率直接联系起来,可为风险管理政策的制定提供理论依据。

而预测微生物模型的建立在风险评估中扮演着重要的角色,不仅可以预测食品货架期,也可估计食品中某阶段 *B. cereus* 的污染水平,进而通过风险评估提出风险环节和风险因素。1996 年,ZWIETERING 等^[42]应用预测微生物学模型来估计巴氏牛奶在消费环节中 *B. cereus* 的污染水平。2006 年,中国农业大学的褚小菊等^[43]又通过调查巴氏杀菌乳的运输、销售和消费等相关情况,结合预测微生物学方法建立了巴氏牛奶中 *B. cereus* 在流通领域

的暴露评估模型,运用@Risk 软件对模型的一次模拟进行 10 000 次运算,结果发现:在饮用冷藏销售的巴氏牛奶时,*B. cereus* >10⁵ CFU/g(mL)的概率为 0.38%;若未进行冷藏,则 *B. cereus* >10⁵ CFU/g(mL)的概率为 1.56%。诸寅等^[44]建立的微生物风险评估模型估计在婴幼儿最终摄入时,0.6%的婴幼儿配方粉溶液含有 >10⁵ CFU/g(mL)的蜡样芽孢杆菌量,且在喂养总时间 2、3 h 时,风险为零。PARK 等^[45]也基于计算流体力学和蒙特卡罗模拟方法建立年糕中 *B. cereus* 定量暴露评估模型。

综上所述,国内外对食品中 *B. cereus* 污染的风险评估研究很多,王静^[46]对发酵肉制品中有害微生物进行风险评估,KWON 等^[47]和 PARK 等^[45]分别对包装豆腐和包装年糕中的 *B. cereus* 致病风险进行定量评估等案例的报道,但当前风险评估研究环节仅涉及生产加工或零售消费阶段的,结果均表明,销售环节的温度、储藏温度和时间是影响 *B. cereus* 增殖的主要风险因素,而货架期冷冻储藏情况及消费量决定最终食品中 *B. cereus* 的污染浓度。尚未有某类食品从原料生产阶段到销售消费阶段整个产业链中 *B. cereus* 定量风险评估的研究报道。

3 讨论

微生物生长模型的构建可用来估计食品中 *B. cereus* 的含量,从而预测风险。当前,食品中 *B. cereus* 污染的风险评估模型的构建仍存在些许问题。

B. cereus 有嗜中温型和嗜冷型之分,NAUTA 等^[48]建立了冷熟蔬菜产品中嗜冷型和嗜中温 *B. cereus* 在零售至消费环节的暴露评估模型,发现有 0.9%~6.3%的蔬菜中嗜冷型 *B. cereus* 最终会超过 10⁵ CFU/g 的阈值水平,而嗜中温 *B. cereus* 很少超过阈值水平,但与总活菌数相比,其芽孢负荷预计高于嗜冷型 *B. cereus*。这可能是由于 *B. cereus* 中的萌发芽孢随着温度和时间的变化,激活了休眠芽孢,而芽孢又耐高温,所以导致嗜中温型 *B. cereus* 总活菌数中的芽孢负荷高于嗜冷型,若将嗜中温型 *B. cereus* 低温保存,可抑制休眠芽孢的萌发。可见,不同的食品有不同的储藏方式,即使在适宜的储藏条件下,也要针对食品可能被污染的不同致病菌进行严格监测,以保证食品的安全和质量。

由于 *B. cereus* 是一种条件致病菌,当菌量 >10⁵ CFU/g 时,产生呕吐毒素(Cereulide)或腹泻毒素会对人体健康造成威胁。由于食源性疾病的发生主要源于 cereulide 或腹泻毒素的产生,而建立不同食品基质中 cereulide 或腹泻毒素的预测模型,不仅可

更加准确预测食源性疾病类型,也可为食品储存或食用、烹饪等方式提供理论依据,以保障企业或消费者权益。BUSS 等^[49]和 ELLOUZE 等^[50]为了量化 *B. cereus* 生长与 cereulide 产生在乳制品中间混合产物中的潜在相关性,通过定量检测呕吐型标准菌株 F4810/72 在 12℃~20℃条件下的 *B. cereus* 和 cereulide,运用 Baranyi-Roberts 模型来拟合其数据,估计其动力学参数建立初级生长模型,用平方根模型拟合 μ_m 与温度之间关系。随着温度的升高,延滞期缩短,*B. cereus* 生长速度更快,cereulide 产生的时间更早,而 *B. cereus* 和 cereulide 的最大浓度与温度无关。王彤等^[51]采用修正的 Gompertz 模型建立米饭中 *B. cereus* 初级生长模型,并进行了产毒预测,结果发现,在 15℃~35℃条件下,*B. cereus* 在米饭中可产生肠毒素,若温度下降,则毒素产生的时间将会推迟。TIAN 等^[52]运用 Logistic 模型建立肉汤中 *B. cereus* 肠毒素的产生随 pH 和温度变化的概率模型,发现随温度的升高或 pH 接近 7.0 时,肠毒素产生的概率增加。

B. cereus 分布范围广,在生产环节的各个阶段都有可能造成污染,也可污染多种食品,除肉及肉制品、乳及乳制品和米饭及其制品外,蔬菜、水果、即食食品及食品原料等多种食品均易被污染。DE 等^[53]应用贝叶斯网络方法来计算在添加了芹菜、奶酪和小麦在内的即食沙拉中 *B. cereus* 的污染水平,并定量分析了特定生产步骤对 *B. cereus* 污染水平的影响。由于不同类别的食品基质与其加工、运输、烹饪等影响因素的不同,在构建模型的过程中需要考虑的变量也因此而有所差异,故应扩展研究不同食品基质中 *B. cereus* 的预测生长模型,建立其从原料到消费阶段的定量风险评估模型,分析主要影响因素和控制措施。RIGAUX 等^[54]为建立小胡瓜从农场到餐桌整条产业链中 *B. cereus* 的定量微生物风险评估模型,运用蒙特卡罗模拟方法进行贝叶斯推理,并且综合考虑了烹饪、巴氏杀菌和冷藏等影响因素。

完整的定量风险评估是需要结合危害特征描述中的剂量反应关系和暴露评估模型来预测 *B. cereus* 对消费者安全性造成威胁的可能性,故应深入研究关于 *B. cereus* 剂量反应关系和食品暴露风险评估。在国内,董庆利^[55]建立的销售和消费环节暴露评估模型显示,在消费阶段,*B. cereus* 含量 >10⁴ CFU/g 的概率为 3.07%;而销售环节的温度是 *B. cereus* 增殖的显著影响因素。2018 年,王晔茹等^[56]建立的婴幼儿配方粉中 *B. cereus* 污染的暴露评估模型估计在婴幼儿最终摄入 0.6%的婴幼儿配方粉溶液时,将含有高于 10⁵ CFU/mL 的 *B. cereus* 量。2019 年,PARK

等^[45]建立了 *B. cereus* 在包装年糕中定量暴露评估模型。为完整评估食品中 *B. cereus* 的风险,需完善国内不同食品基质中 *B. cereus* 定量风险评估缺少的数据,包括原料初步污染水平及其分布情况、暴露评估、剂量反应关系和动物模型等相关数据。2014年,董庆利等^[57]为建立米饭中 *B. cereus* 的剂量效应模型,发现修正的指数模型、对数概率模型和 Gamma 威布模型拟合效果优于其他模型,经验证, Gamma 威布模型的 A_f 、 B_f 优于前两者,故提出选用 Gamma 威布模型作为米饭中 *B. cereus* 的剂量效应模型的建议。2018年,王晔茹等^[58]也做过市售腐乳中 *B. cereus* 剂量效应模型的研究。

传统的预测微生物学模型方法是观察微生物在不同选择的恒定环境条件下的生长状况,通过观察拟合生长曲线,确定合适的生长模型和动力学参数;而一步动力学分析(One step dynamic analysis, OSDA)方法可允许样品暴露在不断变化的温度条件下,使其覆盖微生物生长的整个温度范围,有利于建立食品中微生物生长和生存的综合预测模型。HUANG 等^[59]利用 OSDA 方法确定模拟蛋炒饭动态过程中 *B. cereus* 的生长动力参数,建立了初级和次级模型相结合的综合模型,经确定性方法验证,该预测模型的 RMSE=0.5 lgCFU/g;经蒙特卡罗模拟方法,获得更准确的预测结果 RMSE=0.3 lgCFU/g。

4 总结与展望

食源性疾病的暴发不仅会损伤食用者的健康,也会造成社会经济的损失。有研究人员通过构建食源性疾病暴发的成本计算模拟模型发现,食源性疾病暴发损失的成本可能超过了采取预防控制措施的成本^[60]。而食源性疾病风险的发生,不仅与食品本身有关,还与食品所处环境有关,为有效预防和控制风险的发生,首先需要根据我国现状,合理地借鉴国外经验,整合已有数据和模型,建立适合国情的食品微生物危害控制和风险评估体系,以控制食品品质 and 安全性,从而更好地保护公众健康,保护食品贸易和经济效益。

由于各类食品的生产工艺、储存条件及其成分的差异,导致 *B. cereus* 在不同食品中的预测生长模型也不同。当前研究较多的是 *B. cereus* 在培养基、米饭、乳制品等食品中的预测生长模型,建议今后完善 *B. cereus* 在其他食品基质中的预测模型,以及交叉污染的研究,构建从原料生产环节到消费环节中 *B. cereus* 的风险评估模型,完善食品中 *B. cereus* 污染的风险评估,量化与食品相关的风险,提出 HACCP;可开展动物试验,构建食品中 *B. cereus* 量与 cereulide

和腹泻毒素的剂量反应关系,为食品中的限量阈值提供理论依据;监测食品中 *B. cereus* 的污染水平在采取控制措施后,及时对其效果进行评价,及时调整,以加强对消费者的保护,为国际贸易创造便利。

参考文献

- [1] 陈历刚,夏绪红,陶小庆. 食品微生物风险评估问题探究[J]. 食品安全导刊, 2016(6): 24.
CHEN L G, XIA X H, TAO X Q. Research on microbiological risk assessment of food [J]. China Food Safety Magazine, 2016, (6): 24.
- [2] 吕鸿鑫,何文军,林健,等. 一起蜡样芽孢杆菌食物中毒暴发调查[J]. 医学动物防制, 2020, 36(5): 507-509.
LV H X, HE W J, LIN J, et al. Investigation on an outbreak of food poisoning caused by *Bacillus cereus*[J]. Journal of Medical Pest Control, 2020, 36(5): 507-509.
- [3] 蒋荣荣,刘晓云,陈雅衡,等. 豆豉中蜡样芽孢杆菌污染情况分析[J]. 中国酿造, 2013, 32(3): 67-69.
JIANG R R, LIU X Y, CHEN Y H, et al. Investigation of contaminated *Bacillus cereus* in Douchi [J]. China Brewing, 2013, 32(3): 67-69.
- [4] 周璐,郑开伦,黄琼,等. 湿粉类制品蜡样芽孢杆菌污染风险及控制研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(2): 166-170.
ZHOU L, ZHENG K L, HUANG Q, et al. Research on the contamination and control measures of *Bacillus cereus* in wet rice products and starch products [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(2): 166-170.
- [5] 周婷婷. 蜡样芽孢杆菌在腐乳中的污染状况及其控制方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
ZHOU T T. Studies on the occurrence and inhibition of *Bacillus cereus* in the manufacture of fermented soybean curd [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [6] 闫韶飞,闫旭,甘辛,等. 我国市售婴儿配方乳粉中蜡样芽孢杆菌污染及其毒力基因调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(3): 286-291.
YAN S F, YAN X, GAN X, et al. Survey on contamination of *Bacillus cereus* and its virulence gene profiles isolated from retail infant formula in China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2015, 27(3): 286-291.
- [7] 肖兴宁,王珍,何天,等. 浙江省生菜致病微生物污染现状与分析[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(11): 2333-2335.
XIAO X N, WANG Z, HE T, et al. Status of pathogenic microbial contamination in lettuce in Zhejiang province [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61(11): 2333-2335.
- [8] 周帼萍,梁天光,丁淑娟. 1986—2007年中国299起蜡样芽孢杆菌食物中毒案例分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2009, 21(5): 450-454.
ZHOU G P, LIANG T G, DING S J. Analysis on 299 *Bacillus cereus* food poisoning cases in 1986—2007 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2009, 21(5): 450-454.
- [9] 刘成诚. 食源性蜡样芽孢杆菌风险评估及生物膜形成能力的

- 研究[D]. 广州: 暨南大学, 2018.
- LIU C C. Study on risk assessment and biofilm-forming ability of foodborne *Bacillus cereus* [D]. Guangzhou: Jinan University, 2018.
- [10] MURSALIN M H, LIVINGSTON E T, CALLEGAN M C. The *Cereus* matter of *Bacillus endophthalmitis*[J]. *Experimental Eye Research*, 2020, 193: 107959.
- [11] LOTTE R, HÉRISSÉ A L, BERROUANE Y, et al. Virulence analysis of *Bacillus cereus* isolated after death of preterm neonates, nice, France, 2013 [J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2017, 23(5): 845-848.
- [12] RAMARAO N, BELOTTI L, DEBOSCKER S, et al. Two unrelated episodes of *Bacillus cereus* bacteremia in a neonatal intensive care unit [J]. *American Journal of Infection Control*, 2014, 42(6): 694-695.
- [13] 贺旺林. 真空包装哈尔滨红肠货架期预测模型的建立[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- HE W L. Establishment of shelf life prediction model for vacuum packed Harbin red sausage [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015.
- [14] 仪淑敏, 张培正, 李远钊, 等. 蜡样芽孢杆菌在营养肉汤中的生长模型[J]. *食品研究与开发*, 2009, 30(9): 69-72.
- YI S M, ZHANG P Z, LI Y Z, et al. Growth of *Bacillus cereus* in nutritional broth [J]. *Food Research and Development*, 2009, 30(9): 69-72.
- [15] 黄丹阳, 曹慧, 徐斐, 等. 米饭中蜡样芽孢杆菌生长模型的建立[J]. *上海预防医学*, 2017, 29(6): 431-434.
- HUANG D Y, CAO H, XU F, et al. *Bacillus cereus* growth model established in cooked rice [J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2017, 29(6): 431-434.
- [16] HEO S K, LEE J Y, BAEK S B, et al. A response surface model to describe the effect of temperature and pH on the growth of *Bacillus cereus* in cooked rice [J]. *Journal of Food Protection*, 2009, 72(6): 1296-1300.
- [17] KIM B Y, LEE J Y, HA S D. Growth characteristics and development of a predictive model for *Bacillus cereus* in fresh wet noodles with added ethanol and thiamine [J]. *Journal of Food Protection*, 2011, 74(4): 658-664.
- [18] KANG K A, KIM Y, YOON K. Development of predictive growth models for *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* on various food matrices consisting of ready-to-eat (RTE) foods [J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2010, 30: 730-738.
- [19] 邱红玲, 唐晓阳, 王李伟, 等. 复原乳中三种常见致病菌的生长动力学模型构建[J]. *上海预防医学*, 2016, 28(5): 288-293.
- QIU H L, TANG X Y, WANG L W, et al. Growth kinetic model developed for three common pathogenic bacteria in rehydrated infant milk formula [J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2016, 28(5): 288-293.
- [20] 林宇斌, 李安平, 付湘晋, 等. 鲜湿米粉中蜡样芽孢杆菌生长预测模型构建[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(9): 78-81.
- LIN Y B, LI A P, FU X J, et al. Predictive growth models of *Bacillus cereus* in wet rice noodle. *Cereals & Oils*, 2017, 30(9): 78-81.
- [21] JUNEJA V K, MISHRA A, PRADHAN A K. Dynamic predictive model for growth of *Bacillus cereus* from spores in cooked beans [J]. *Journal of Food Protection*, 2017, 81(2): 308-315.
- [22] JUNEJA V K, GOLDEN C E, MISHRA A, et al. Predictive model for growth of *Bacillus cereus* at temperatures applicable to cooling of cooked pasta [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(3): 590-598.
- [23] JUNEJA V K, GOLDEN C E, MISHRA A, et al. Predictive model for growth of *Bacillus cereus* during cooling of cooked rice [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 290: 49-58.
- [24] 魏超, 李曦, 郭灵安, 等. 芽苗菜中蜡样芽孢杆菌的污染研究 [J]. *农产品质量与安全*, 2021, (2): 36-41.
- WEI C, LI X, GUO L A, et al. Study on contamination of *Bacillus cereus* in sprouts [J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2021, (2): 36-41.
- [25] 陈琛, 李学英, 杨宪时, 等. 环境因子交互作用下蜡样芽孢杆菌生长/非生长界面模型的建立与评价[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(12): 205-213.
- CHEN C, LI X Y, YANG X S, et al. Modeling and evaluating the growth/no growth boundaries of *Bacillus cereus*: Effect of temperature, pH, and water activity [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(12): 205-213.
- [26] 渠飞翔, 李学英, 杨宪时, 等. 软烤贻贝中蜡样芽孢杆菌生长/非生长界面模型的构建[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(10): 160-167.
- QU F X, LI X Y, YANG X S, et al. Establishment of growth/no growth interface model of *Bacillus cereus* on soft-baked mussels [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(10): 160-167.
- [27] ANTOLINOS V, MUÑOZ-CUEVAS M, ROS-CHUMILLAS M, et al. Modelling the effects of temperature and osmotic shifts on the growth kinetics of *Bacillus weihenstephanensis* in broth and food products [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 158(1): 36-41.
- [28] 魏超, 代晓航, 郭灵安, 等. 蜡样芽孢杆菌在草莓中的生长及预测模型的建立[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(9): 291-296.
- WEI C, DAI X H, GUO L G, et al. Growth and prediction model of *Bacillus cereus* in strawberry [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(9): 291-296.
- [29] JANŠTOVÁ B, LUKÁŠOVÁ J. Heat resistance of *Bacillus* spp. spores isolated from cow's milk and farm environment [J]. *Acta Veterinaria Brno*, 2001, 70(2): 179-184.
- [30] DARYAEI H, BALASUBRAMANIAM V M, LEGAN J D. Kinetics of *Bacillus cereus* spore inactivation in cooked rice by combined pressure-heat treatment [J]. *Journal of Food Protection*, 2013, 76(4): 616-623.
- [31] JUNEJA V K, OSORIA M, HWANG C A, et al. Thermal inactivation of *Bacillus cereus* spores during cooking of rice to ensure later safety of boudin [J]. *LWT*, 2020, 122: 108955.
- [32] 索标, 常玉婷, 王瑞, 等. 肉桂醛促进即食牛肉中蜡样芽孢杆菌热失活的动力学模型[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(12): 90-94.
- SUO B, CHANG Y T, WANG R, et al. Kinetic model of

- cinnamaldehyde promoting thermal inactivation of *Bacillus cereus* in ready-to-eat beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(12): 90-94.
- [33] BAI Y, IDRIS MUHAMMAD A, HU Y Q, et al. Inactivation kinetics of *Bacillus cereus* spores by Plasma activated water (PAW) [J]. Food Research International, 2020, 131: 109041.
- [34] TANGO C N, WANG J, OH D H. Modeling of *Bacillus cereus* growth in brown rice submitted to a combination of ultrasonication and slightly acidic electrolyzed water treatment [J]. Journal of food protection, 2014, 77(12): 2043-2053.
- [35] DAELMAN J, SHARMA A, VERMEULEN A, et al. Development of a time-to-detect growth model for heat-treated *Bacillus cereus* spores [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 165(3): 231-240.
- [36] BRODOWSKA A J, NOWAK A, KONDRATIUK-JANYSKA A, et al. Modelling the ozone-based treatments for inactivation of microorganisms [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(10): 1196.
- [37] PINA-PÉREZ C, SILVA-ANGULO B, RODRIGOD, et al. Synergistic effect of pulsed electric fields and cocoonOX 12% on the inactivation kinetics of *Bacillus cereus* in a mixed beverage of liquid whole egg and skim milk [J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 130(3): 196-204.
- [38] MUHAMMAD A I, LV R L, LIAO X Y, et al. Modeling the inactivation of *Bacillus cereus* in tiger nut milk treated with cold atmospheric pressure plasma [J]. Journal of Food Protection, 2019, 82(11): 1828-1836.
- [39] MUHAMMAD A I, LV R L, LIAO X Y, et al. Modeling the inactivation of *Bacillus cereus* in tiger nut milk treated with cold atmospheric pressure plasma [J]. Journal of Food Protection, 2019, 82(11): 1828-1836.
- [40] KANG D C, JIANG Y H, XING L J, et al. Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Bacillus cereus* by power ultrasound during the curing processing in brining liquid and beef [J]. Food Research International, 2017, 102: 717-727.
- [41] 佚名. 食品微生物安全风险评估[J]. 食品安全导刊, 2017(S1): 62-63.
- YI M. Risk assessment of food microbiological safety [J]. China Food Safety Magazine, 2017(S1): 62-63.
- [42] ZWIETERING M H, DE WIT J C, NOTERMANS S. Application of predictive microbiology to estimate the number of *Bacillus cereus* in pasteurised milk at the point of consumption [J]. International Journal of Food Microbiology, 1996, 30(1-2): 55-70.
- [43] 褚小菊, 冯力更, 张筠, 等. 巴氏牛奶中蜡样芽孢杆菌的风险评估[J]. 中国乳品工业, 2006, 34(6): 23-26.
- CHU X J, FENG L G, ZHANG Y, et al. Risk assessment of *Bacillus cereus* in pasteurized milk [J]. China Dairy Industry, 2006, 34(6): 23-26.
- [44] 诸寅, 宋筱瑜, 蔡强, 等. 10种限量值对婴幼儿配方粉中蜡样芽孢杆菌污染风险比较. 中国食品卫生杂志, 2018, 30(6): 635-638.
- ZHU Y, SONG X Y, CAI Q, et al. Risk comparison of ten limit levels of *Bacillus cereus* in powdered infant formula [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2018, 30(6): 635-638.
- [45] PARK H W, YOON W B. A quantitative microbiological exposure assessment model for *Bacillus cereus* in pasteurized rice cakes using computational fluid dynamics and Monte Carlo simulation [J]. Food Research International (Ottawa, Ont), 2019, 125: 108562.
- [46] 王静. 发酵肉制品中有害微生物安全风险评估[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- WANG J. The risk of harmful microorganisms in fermented meat product [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016.
- [47] KWON M J, RHEE M S, YOON K S. A risk assessment study of *Bacillus cereus* in packaged tofu at a retail market in Korea [J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(3): 339-350.
- [48] NAUTA M J, LITMAN S, BARKER G C, Et al. A retail and consumer phase model for exposure assessment of *Bacillus cereus* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 83(2): 205-218.
- [49] BUSS DA SILVA N, ELLOUZE M, ROUZEAU-SZYNALSKI K, et al. Predicting *B.cereus* growth and cereulide production in dairy mix [J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 364: 109519.
- [50] ELLOUZE M, BUSS DA SILVA N, ROUZEAU-SZYNALSKI K, et al. Modeling *Bacillus cereus* growth and cereulide formation in cereal-, dairy-, meat-, vegetable-based food and culture medium [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 639546.
- [51] 王彤, 林露, 胡洁云, 等. 基于米饭中蜡样芽孢杆菌初级生长模型的产毒预测 [J]. 中国食品学报, 2017, 17(1): 230-239.
- WANG T, LIN L, HU J Y, et al. The enterotoxigenic prediction of *Bacillus cereus* spp. based on its primary model in cooked rice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(1): 230-239.
- [52] DING T, WANG J, PARK M S, et al. A probability model for enterotoxin production of *Bacillus cereus* as a function of pH and temperature [J]. Journal of Food Protection, 2013, 76(2): 343-347.
- [53] DE CESARE A, VITALI S, TREVISANI M, et al. Microbiological and modeling approach to derive performance objectives for *Bacillus cereus* group in ready-to-eat salads [J]. Risk Analysis, 2017, 37(3): 408-420.
- [54] RIGAUX ANCELET C S, CARLIN F, NGUYEN-THÉ C, et al. Inferring an augmented Bayesian network to confront a complex quantitative microbial risk assessment model with durability studies: Application to *Bacillus cereus* on a courgette purée production chain [J]. Risk Analysis, 2013, 33(5): 877-892.
- [55] 董庆利. 蒸煮米饭中蜡样芽孢杆菌的定量暴露评估 [J]. 食品科学, 2013, 34(21): 306-310.
- DONG Q L. Quantitative exposure assessment of *Bacillus cereus* in cooked rice [J]. Food Science, 2013, 34(21): 306-310.
- [56] 王晔茹, 诸寅, 宋筱瑜, 等. 我国婴幼儿配方粉中蜡样芽孢杆菌污染的暴露评估模型初探 [J]. 生物加工过程, 2018, 16(3): 102-106.
- WANG Y R, ZHU Y, SONG X Y, et al. Quantitative exposure

assessment for *Bacillus cereus* contamination in powdered infant formula[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2018, 16(3): 102-106.

[57] 董庆利,王海梅,刘箐,等.米饭中蜡样芽孢杆菌剂量效应模型的构建[J].食品安全质量检测学报,2014,5(4):1021-1027.

DONG Q L, WANG H M, LIU Q, et al. Establishment of dose-response model for *Bacillus cereus* in cooked rice[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(4): 1021-1027.

[58] 王晔茹,宋筱瑜.基于3种模型的市售腐乳中蜡样芽孢杆菌风险的比较性评估研究[J].中国食品卫生杂志,2018,30(2): 193-196.

WANG Y R, SONG X Y. Evaluation of the risk of *Bacillus cereus* in commercial fermented bean curd based on three models. Chinese Journal of Food Hygiene, 2018, 30(2): 193-196.

[59] HUANG L H, HWANG C A. One-step dynamic analysis of growth kinetics of *Bacillus cereus* from spores in simulated fried rice-Model development, validation, and Marko Chain Monte Carlo simulation[J]. Food Microbiology, 2022, 103: 103935.

[60] BARTSCH S M, ASTI L, NYATHI S, et al. Estimated cost to a restaurant of a foodborne illness outbreak [J]. Public Health Reports (Washington, D C: 1974), 2018, 133(3): 274-286.

(上接第1360页)

欢迎投稿、欢迎订阅。

投稿网址: <http://www.zgspws.com>

订 阅:2022年《中国食品卫生杂志》。每期定价40元,全年240元。

订阅方式可以通过以下:

- 1、杂志官方网站订阅(详情见官网 www.zgspws.com、可咨询购买过刊)。
- 2、通过邮局订阅,邮发代号82-450。
- 3、通过杂志淘宝店,微信公众号线上购买(详情请扫描以下二维码关注)。

地 址:北京市海淀区紫竹院南路17号院3号楼102室

《中国食品卫生杂志》编辑部

电 话:010-68707221 邮政编码:100048 E-mail: spws462@163.com



杂志公众号



杂志淘宝店



杂志微店