

基于 CFD 的建模技术在食品冷链物流中的应用

翟希川, 刘永峰*, 王 烨, 库 婷

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 西安 710062)

摘 要: 随着消费者对食品新鲜度的不懈追求以及对食品安全问题的日益重视, 新的保鲜技术逐渐被发掘, 其中食品冷链物流是食品保鲜保质的一个非常重要的环节。本文分析了建模技术在冷链物流过程中的独特优势, 并对确定性模型在食品冷链物流的储藏、运输、陈列销售和售后终端贮藏四个环节运用, 尤其是计算流体动力学 (CFD) 的广泛和成功应用; 阐述了确定性模型的简化模型、随机性模型的建立在食品冷链物流中的应用进展并进行了深入分析; 最后针对今后我国冷链物流的主要研究问题做出总结, 以及对于后期建模技术的研究任务提出具体建议, 为实现我国冷链物流行业的快速发展以及保障生鲜食品安全提供参考方法和理论指导。

关键词: 食品; 冷链物流; 建模技术; 应用

Application of modeling techniques based on CFD in food cold chain logistics

ZHAI Xi-Chuan, LIU Yong-Feng*, WANG Ye, KU Ting

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

ABSTRACT: As more and more consumer pursued fresh food and paid more attention to food safety, new preservation technology began to be created, which included the important part of the food cold chain logistics. This paper analyzed the importance of modeling techniques in cold chain logistics process, and also discussed the application of deterministic model in four areas of storage utilization of the food chain logistics which included storage, transportation, sale and after-sale terminal display, especially in computational fluid dynamics (CFD) were widely and successfully applied; illustrated a simplified model of deterministic models, applications built on the progress of the food cold chain logistics in stochastic model and in-depth analysis, and finally, made a summary of the main research question for the future of cold chain logistics in China, as well as for the study of post-task modeling techniques make specific recommendations. So that the reference methods and theoretical guidance for rapid development of cold chain logistics industry and the protection of fresh food safety in China would be achieved.

KEY WORDS: food; cold chain logistics; modeling technique; application

基金项目: 陕西省农业科技攻关项目(2014K01-19-02)、陕西省青年科技新星项目(2014KJXX-51)、中央高校基本科研业务费专项(GK201502008)

Fund: Supported by the Shaanxi Agricultural Science and Technology Plan Projects of China (2014K01-19-02), the Shaanxi Project for Young New Star in Science and Technology (2014KJXX-51) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (GK201502008)

*通讯作者: 刘永峰, 副教授, 主要从事食品生物技术及营养学研究。E-mail: yongfeng200@126.com

*Corresponding author: LIU Yong-Feng, Associate Professor, College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, No.199, Chang'an South Road, Xi'an 710062, China. E-mail: yongfeng200@126.com

1 引言

食品冷链物流是一个复杂、庞大的系统,各个环节和各种因素之间相互交织、相互影响,只有将这些条件很好地结合,才能保证食品冷链物流的正常运行。要想把各部分之间的关系很好地联系起来,就需要一种模拟或简化方法。建模技术具有此优势,它是根据研究目的把实际单元或系统抽象简化为具体的模型的技术。建模是一种创造性劳动,必须透过事物复杂的表面现象,抓住其根本性质,找出解决问题的途径。目前,食品冷链中的建模主要是从模型建立、模型简化(或优化)及模型证实三个方面进行的,国内外的相关研究也主要是围绕确定性模型、随机模型及简化模型这三个方面开展的。本文主要针对建模技术在食品冷冻加工、冷冻贮藏、冷藏运输和冷冻冷藏销售等冷链物流环节的应用进行分析,指导农产品加工过程,使农产品从田间地头到餐桌消费各个环节的品质得到控制。

2 食品冷链物流中模型建立的特点

国内外研究发现,通过模型的构建能得出冷链物流系统中容易出现问题的环节及其原因,并为冷链物流过程提出合理化的指导思想和方法,使冷链物流完善合理。食品冷链物流模型的建立主要有以下几个方面的特点:

第一,模型的建立是基于因变量与自变量之间的关系,比较客观实际,因此不仅可以对生鲜易腐食品的温度变化进行预测,还可以为食品的货架期提供理论参考。Derens 等^[1]使用温度记录仪对冷鲜肉、肉制品和乳制品这三种类型的冷藏品进行全程监控,经数据模型分析发现,在冷链的运输、销售以及冰箱储藏这三个环节进行温度控制,能够较长时间保持产品品质。Morelli 等^[2]在冷链物流的运输、销售、冰箱储藏环节中对温度进行建模分析,推荐货架期为四周的产品最佳保藏温度为 4 °C。James 等^[3]在调查冰箱储藏食品过程中,建立了数据模型,发现冰箱温度过高会导致食品安全问题。

第二,模型是基于无数次测量建立起来的,比较稳定,因此温度引起的微生物变化的模型研究对于食品冷链物流也至关重要。Koutsoumanis 等^[4]多次记录巴氏奶在冰箱中不同储存位置的温度变化情况,通过建立温度模型,预测单增李斯特菌的危害。Landfeld 等^[5]在建模过程中,多次观察购买后放入家用冰箱期间单增李斯特菌的生长情况,发现有 27.3%产品会有严重的微生物污染,并且储藏时间和冰箱温度是影响微生物生长的最大因素。邹毅峰等^[6]在实验室模拟冷藏条件下巴氏杀菌乳中的微生物在运输过程中的详细变化,发现巴氏杀菌乳 8 °C 保藏时,配送时间应控制在 12 h 内,可以有效保持乳品的品质。

第三,冷链模型还能提供实时、在线、自动监控的可

能性,对于分析冷链各环节的关系以及存在的问题具有重要作用。林朝朋^[7]以生鲜猪肉供应链安全风险作为研究对象,运用区间值模糊综合评价法对比建立了评估模型,并以实际调研数据进行验证,发现生猪在养殖、运输和冷库贮藏环节的总安全风险为中等,在加工、配送、销售环节的安全风险都很高。除了冷链过程风险评估之外,对整个冷链系统的性能评估也是非常必要的。邹毅峰^[8]建立了冷链物流安全可靠度模型,用于评价冷链单元与系统的性能,经模型分析发现,冷链单元的失效率与食品经过冷链单元的时间和温度的平方成正比,单元之间的安全可靠性是相互独立的。

3 确定性模型在食品冷链物流中的应用

确定性模型是指不包含任何随机成份的模型,一旦确定输入的自变量和各个输入之间的关系,其目标输出也是确定的,与实验次数无关。针对冷链研究主要是从最小货损、效益最大、节能经济等角度切入,目标函数往往不尽相同,所得公式也有差异。目前,应用最多的是国外学者建立出计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的模型,即气体流速和温度分布可通过一组偏微分方程对质量、动量和能量进行预测。

3.1 确定性模型在食品贮藏过程中的应用

冷库中空气流速、不同区域之间的交换速率、气体温度、湿度、氧气和二氧化碳的浓度等对食品品质有决定性的影响。Hoang 等^[9]在一个空储藏室建立了一个用于计算气体流速、温度和湿度分布的瞬时三维 CFD 模型,采用两相空气产品模型研究了不同的空气流速、温度和相对湿度对菊苣的冷却特性的影响。鲍长生^[10]选取生鲜食品的进货量和进货周期、生鲜食品的多级库存的控制与调度、生鲜食品的配送管理三部分作为研究内容,将经典经济订货批量模型扩展并构建冷链物流的多级库存决策模型,提出冷链物流的安全需要兼顾体制、人、设施和设备、物流流程、计量与测试手段、环境因素等,此模型丰富了库存控制理论并提高了传统模型的应用空间。Delele 等^[11]建立的高压雾化系统模型可以对产品水分过多损坏所造成的品质降低情况进行良好的预测,并可用于研究影响加湿系统效率的操作参数,进而为之确定最佳条件。

3.2 确定性模型在食品运输过程中的应用

运输是影响食品品质的关键环节,确定性模型在国内外食品运输过程中得到了一定的应用,并进行着逐步的完善。冷藏车中一般通过控制集装箱形状、托盘大小、托盘的位置和装载的紧凑状况、空气输送速率及其流动情况等方面来实现运输过程中温度的调整。因此,在食品运输过程中建模,对于食品质量安全控制也具有实际意义。

Foster 等^[12]运用并分析 CFD 模型来量化 5 个大小不同的门的空气渗透率, 结果发现这些模型一般倾向于高估渗透率, 最大可达到 38.6%, 但由于这方面的研究比较复杂和抽象, 因此没能够更深一步的探究。Finn 等^[13]对二维 CFD 参数的研究发现, 托盘的气流速度从正面向背面方向减小, 而在托盘背面主要是自然对流模式。此后, Moureh 等^[14]在研究卡车模型的通风情况时, 利用通风管系统使车辆后部停滞区的空气流动增大, 同时降低前部空气的流动, 以此提高卡车内部空气均匀性。Tapsoba 等^[15]又运用三维 CFD 法研究开槽托盘上方和里面的通风情况, 通过应力方程模型 (Response Surface Methodology, RSM)、标准两方 κ - ϵ 模型和重正化群 (Renormalization Group, RNG) 的相互比较, 在数据结果中着重对托盘内部的空气流速与激光多普勒测速 (Laser Doppler Velocimetry, LDV) 进行比较, 发现了气流总趋势由 RSM 模型能很好地体现出来, 运输车内部水平方向上的气流从后面到前面呈现出很高的异质性, 而这些差异可能是由内部与外部空气在进行热交换时门缝隙的渗透造成的。黄欣^[16]以热平衡法为基础建立了由冷藏运输车外气象模型、围护结构传热模型、车内热平衡模型等组成的能耗分析与评价模型, 发现模型可以对能耗进行实例分析, 保障了食品安全, 节约了成本。黄纯辉^[17]根据食品冷链物流上的库存互补问题, 融合集群式供应链思想, 建立了基于物料清单耦合的供应商库存互补模型, 发现冷链中链间的库存互补能有效地从源头抑制顾客需求的波动, 从而减少物流成本; 还对运输中冷藏空箱的进出仓库、中转模型进行构建, 为长途运输的优化问题提供了新的研究方法和视角。

3.3 确定性模型在食品销售过程中的应用

对陈列柜设备的选择、配套设施的使用和产品的摆放位置等方面研究, 通过确定性模型的建立有利于延长产品的货架期、保障产品的品质。针对销售环节中的冷链建模, 最开始是基于陈列柜的设施配置、温度以及气流特性等单一因素的研究。Evans 等^[18]建模发现, 在前口开放式陈列柜里, 空气帘不仅能制冷, 还能隔绝周围的空气。Navaz 等^[19]构建出陈列柜内部和外部有空气幕分隔的二级域名模型, 认为在雷诺准数适用范围内, 跨越空气幕的温度梯度与动力梯度对夹层的渗透无任何作用; 增加夹层不一定直接增加渗透率, 这种相关性只增加混合条件下的整个空气幕; 另外, 对于冷藏柜内温度的探讨也有一定的进展。Smale 等^[20]强调通过 CFD 分析和实验所发挥的补充作用可以获取位于储藏柜前端的温度临界域, 而 Chen 等^[21]在基于室内环境的研究中指出, 陈列柜操作可极大影响幕帘的空气性能, 同时可通过送风和回风过程使环境温度上升, 进而引起陈列柜内温度的上升。

近几年, 关于陈列柜建模主要从多个影响因素出发, 使模型更加的完整合理。Cortella 等^[22]运用 CFD 模型去研

究陈列柜的几何形状、操作条件和周围环境对产品温度分布和气流模式的影响, 同时也将水分转移、热传导、对流和辐射考虑到该模型中, 使所建立的模型更具现实性。邹毅峰^[8]对食品冷链的安全可靠度进行了分析和评价, 证实了所建立的安全可靠度模型可用于预测食品的货架期; 要保证乳品销售安全必须保证冷藏陈列柜的温度在 10°C 以下, 并且每天最好对外层放置和里层放置的牛奶进行位置的调换, 该研究为巴氏杀菌乳的保藏提供了新的方法。

3.4 确定性模型在食品售后终端贮藏过程中的应用

确定性模型也多用于冰箱, 冰箱主要通过自然对流和气流转移实现热交换的, 这些与温度和湿度梯度有关。Lee 等^[23]对家用冰箱冷冻室的通风情况进行模拟, 通过数值计算发现通风流程十分复杂, 进口气流呈喷射状, 壁面上的气流呈冲击状或停滞状, 并且内部有较大的循环气流。此后, Laguerre 等^[24]相继又探究了带有湿润装置的冰箱在自然对流条件下的蒸发和冷凝状况, 通过建立三维 CFD 来模拟空气流动、传热和传质情况, 经模拟数值与实验测定值进行比较后发现, 蒸发和冷凝的位置可以被很好地预测。随着数值研究法在食品售后终端贮藏过程中应用的日渐成熟, Kinoshita 等^[25]运用数值方法研究家用冰箱在自然对流时蒸发器的位置对温度和速度分布的影响, 发现在水平位置上没有明显改变的温度场, 而在垂直方向上有明显的温度分布的作用。

4 确定性模型的简化模型在食品冷链物流中的应用

以 CFD 为代表的确定性模型可以针对温度、湿度和气体流速等确定参数进行量化并建立相关模型, 还可以对设备设计的昂贵费用或无法执行的测试等操作环境的影响效果进行预测。确定性模型作为一款功能强大的模拟工具, 但由于它需要许多单元而导致长的计算时间, 并使其模型的应用受到限制。关于时间的计算是 CFD 等确定性模型的劣势, 因此, 有必要对其进行简化。当多个设备在冷链中被同时用于研究和模拟多项目产品参数来实现“现实条件”时, 这些模拟则被优化为一组常微分方程或稳态代数方程组。在冷链装置的设计方面, Hoang 等^[26]观测前部和后部装载处空气的对流状况以及开关车厢门时空气渗透量测定值变化, 建立了冷藏车传热的简化模型, 通过模型分析发现前端接近通风装置处与后部装载处相比具有较高的气流和较低的温度, 使箱体气体分布不均匀。在冷链运输过程中, Zertal 等^[27]建立的车内装载托盘的气流简化模型, 整合了高液压网络系统, 认为在两个托盘间、托盘与壁面间存在着气流空间, 发现简化模型具有比确定性模型更好的定性作用。在冷链物流的终端储藏阶段, Laguerre 等^[28]建立的家用冰箱和冷藏陈列柜的简化模型可以使空气状况和负载温

度得到很好的预测,模型分析发现自然对流是导致冰箱中温度不均匀的主要因素,而在垂直开放式陈列柜中,周围空气透过空气幕的渗透作用导致柜内前面、底部温度比后面、上方温度高。

5 随机模型在食品冷链物流中的应用

随机模型是一种非确定性模型,变量间的关系以统计值的形式给出的,即模型中的任一外生变量不确定,并且随着具体条件的改变而改变。食品冷链随机参数包括设备顺序、环境温度、产品在设备中的位置和和设备中停留时间等。随机模型参数会受到诸多因素的影响,对其建模的研究思想和方法也不尽相同。

最初,国外学者主要围绕单个因素开展相关研究。Rosset 等^[29]运用随机模型研究了影响微生物生长的因素,指出微生物的生长受到初始微生物数量、生理状态、温度变化和生长动力学参数等随机参数的影响。随后,Rediers 等^[30]根据温度和微生物生长对冷链中的设备顺序进行了系统探讨,该研究仅仅基于测定温度的变化,没有建立模型去预测产品温度的变化。而 Flick 等^[31]以温度、水分含量、微生物数量等系统状态为特征,提出了一种基于冷链中产品的初始状态和操作条件下的新型建模方法,用于预测产品从农场到餐桌的变化。Hoang 等^[32]运用随机建模方法来预测冷藏陈列柜、购物篮及冰箱中微生物污染状况,发现在每一个环节中产品的平均温度与调查的数据相比较都有很好的一致性,但是对微生物的预测缺乏数据,很难和调查数据比较。

然而,将确定模型和随机模型结合起来的混合模型,使随机模型更加符合实际。贾培培^[33]对生鲜食品冷链物流系统流程进行分析,构建了多目标、多维变量、有约束的随机规划模型,并将混合动态系统建模方法应用于描述随机规划问题中,使所研究的模型能更好的满足实际冷链运营需要,这种研究方法不仅丰富了食品科学的研究方法和冷链系统工程理论,还补充了生鲜食品冷链中的不确定性问题的优化思想。还有报道指出,在不确定环境中对生鲜食品供应链进行建模,可用以保证食品品质和减少物流成本^[34,35]。

6 结 语

冷链物流为食品安全提供了重要保障,促进了生鲜食品行业的发展。随着冷链物流在我国的进一步扩大,其将朝着智能化、信息化、专业化、多元化、标准化和环保化方向发展。建模是冷链物流中的重要环节,有利于提高冷链物流食品的品质,降低食品安全事件发生率。对于建模的研究,将进一步加强冷链物流体系涉及到的管理、运输、制冷、食品、机械、经济、气候等学科的综合研究、提高学科之间的协同作用;由于随机模型的参数具有不确

定性且易变化,对它的研究还仍停留在以确定性方法解决这些不确定性问题的思想上;冷链物流建模也将进一步考虑冷链中各个环节、各个影响因素,将会把温度控制与记录、作业安全与作业效率、物流中心应急系统以及逆向冷链物流充分结合起来,以促进冷链物流的完善和健康发展。

参考文献

- [1] Derens E, Palagos B, Guilpart J. The cold chain of chilled products under supervision in France [C]. 13th World Congress of Food Science and Technology "Food is Life", Nantes, 2006, 17-21.
- [2] Morelli E, Derens E. Evolution des températures du saumon fumé au cours des circuits logistiques[J]. Revue Générale du Froid and du Conditionnement d'Air, 2009, 1090: 51-56.
- [3] James SJ, Evans J, James C. A review of the performance of domestic refrigerators [J]. J Food Eng, 2008, 87(1): 2-10.
- [4] Koutsoumanis K, Pavlis A, Nychas GJE, et al. Probabilistic model for *Listeria monocytogenes* growth during distribution, retail storage, and domestic storage of pasteurized milk [J]. Appl Environ Microb, 2010, 76(7): 2181-2191.
- [5] Landfeld A, Kazilova L, Houska M. Time temperature histories of perishable foods during shopping, transport and home refrigerated storage [C]. Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration, Prague, 2011.
- [6] 邹毅峰, 林朝朋, 傅伟. 巴氏杀菌乳冷藏配送期间的温度及品质变化 [J]. 食品工业科技, 2009, 2(30): 97-101.
- Zou YF, Lin CP, Fu W. Temperature and quality chance of pasteurized milk during refrigerated distribution [J]. Sci Technol Food Ind, 2009, 2(30):97-101.
- [7] 林朝朋. 生鲜猪肉供应链安全风险及控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- Lin CP. Study on the safety risks and controlling of fresh pork supply chain [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [8] 邹毅峰. 食品冷链物流的安全可靠度研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- Zou YF. Study on the safety reliability of food cold chain logistics [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [9] Hoang ML, Verboven P, De Baerdemaeker J, et al. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics [J]. Int J Refrig, 2000, 23 (2): 127-140.
- [10] 鲍长生. 冷链物流运营管理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- Bao CS. On operational management of cold chain [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] Delele MA, Schenk A, Tijssens E, et al. Optimization of the humidification of cold stores by pressurized water atomizers based on a multiscale CFD model [J]. J Food Eng, 2009, 91(2): 228-239.
- [12] Foster AM, Swain MJ, Barrett R, et al. Experimental verification of analytical and CFD predictions of infiltration through cold store entrances [J]. Int J Refrig, 2003, 26(8): 918-925.
- [13] Finn DP, Brennan SL. Sensitivity analysis using CFD of air distribution in transport refrigeration containers [C]. 21st IIR International Congress of Refrigeration, Washington DC, 2003.
- [14] Moureh J, Flick D. Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets [J]. Int J Refrig, 2004, 27(5): 464-474.

- [15] Tapsoba M, Moureh J, Flick D. Airflow patterns in a slot-ventilated enclosure partially loaded with empty slotted boxes [J]. *Int J Heat Fluid Fl*, 2007, 28(5): 963–977.
- [16] 黄欣. 冷链中易腐食品冷藏运输品质安全与能耗分析[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Huang X. The study on food's quality and energy analysis during refrigerated transportation in cold chain [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [17] 黄纯辉. 食品冷链物流运输服务网络优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
Huang CH. The optimization research of logistics and transportation service networks of food cold chain [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [18] Evans JA, Scarcelli S, Swain MVL. Temperature and energy performance of refrigerated retail display and commercial catering cabinets under test conditions [J]. *Int J Refrig*, 2007, 30(3): 398–408.
- [19] Navaz KH, Faramarzi R, Amin M. CFD design of air curtain for open refrigerated display cases [C]. In Da-Wen Sun (Ed.), *Computational Fluid dynamic in food processing*. The Chemical Rubber Company Press, 2007.
- [20] Smale NJ, Moureh J, Cortella G. A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications [J]. *Int J Refrig*, 2006, 29(6): 911–930.
- [21] Chen YG, Yuan XL. Experimental study of the performance of single-band air curtains for a multi-deck refrigerated display cabinet [J]. *J Food Eng*, 2005, 69(3): 261–267.
- [22] Cortella G, Manzan M, Comini G. CFD simulation of refrigerated display cabinets [J]. *Int J Refrig*, 2001, 24(3): 250–260.
- [23] Lee IS, Baek SJ, Chung MK, *et al.* A study of air flow characteristics in the refrigerator using PIV and computational simulation [J]. *J Flow Vis Image Proc*, 1999, 6: 333–342.
- [24] Laguerre O, Benamara S, Flick D. Numerical simulation of simultaneous heat and moisture transfer in a domestic refrigerator [J]. *Int J Refrig*, 2010, 33(7): 1425–1433.
- [25] Kinoshita D, Gasche JL. Influence of the evaporator position in static domestic refrigerators [C]. In *PROC 23rd Iir Int Cong Refrig*, Prague, 2011.
- [26] Hoang MH, Laguerre O, Moureh J, *et al.* Heat transfer modelling in a ventilated cavity loaded with food product: Application to a refrigerated vehicle [J]. *J Food Eng*, 2012, 113(3): 389–398.
- [27] Zertal N, Moureh J, Flick D. Simplified modelling of air flows in refrigerated vehicles [J]. *Int J Refrig*, 2002, 25(5): 660–672.
- [28] Laguerre O, Flick D. Temperature prediction in domestic refrigerator: Deterministic and stochastic approaches [J]. *Int J Refrig*, 2010, 33(1): 41–51.
- [29] Rosset P, Cornu M, Noel V, *et al.* Time-temperature profiles of chilled ready-to-eat foods in school catering and probabilistic analysis of *Listeria monocytogenes* growth [J]. *Int J Food Microbiol*, 2004, 96(1): 49–59.
- [30] Rediers H, Claes M, Peeters L, *et al.* Evaluation of the cold chain of fresh-cut endive from farmer to plate [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2009, 51(2): 257–262.
- [31] Flick D, Hoang HM, Alvarez G, *et al.* Combined deterministic and stochastic approaches for modeling the evolution of food products along the cold chain, Part I: Methodology [J]. *Int J Refrig*, 2012, 35(4): 907–914.
- [32] Hoang HM, Flick D, Derens E, *et al.* Combined deterministic and stochastic approaches for modelling the evolution of food products along the cold chain, Part II: A case study [J]. *Int J Refrig*, 2012, 35(4): 915–926.
- [33] 贾培培. 生鲜食品冷链物流系统的建模及优化研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
Jia PP. Modelling and optimization of logistics system in fresh-food cold chain [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.
- [34] Dabbene F, Gay P, Sacco N. Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, Part I: Background and methodology [J]. *Biosyst Eng*, 2008, 99(3): 348–359.
- [35] Dabbene F, Gay P, Sacco N. Optimisation of fresh food supply chains in uncertain environments, Part II: A case study [J]. *Biosyst Eng*, 2008, 99(3): 360–371.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



翟希川, 本科, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: 466312976@qq.com



刘永峰, 副教授, 主要研究方向为食品生物技术及营养学研究。

E-mail: yongfeng200@126.com