

马永辉, 刘贵珊, 何建国, 等. 果蔬冷链过程中多尺度热质传递的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 9–17. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110311

MA Yonghui, LIU Guishan, HE Jianguo, et al. Recent Advances on Multi-scale Heat and Mass Transfer of Fruits and Vegetables during the Cold Chain Process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 9–17. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110311

· 未来食品 ·

果蔬冷链过程中多尺度热质传递的研究进展

马永辉¹, 刘贵珊^{1*}, 何建国¹, 康宁波¹, 陈首涛², 尹俊杰¹, 刘梦琪¹, 贾莉莉¹

(1. 宁夏大学食品与葡萄酒学院, 宁夏银川 750021;

2. 宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏银川 750021)

摘要: 果蔬冷链过程由于管控粗放、损耗大等问题易造成果蔬内部结构损伤, 引起品质劣变; 同时, 果蔬内部的水分和热量会发生动态迁移, 不利于果蔬的贮藏和销售。因此, 明确果蔬冷链过程多尺度热质传递机理是目前该领域亟待解决的问题。本文阐述了用于果蔬多尺度建模的数值成像技术, 探讨果蔬冷链过程热质传递机理的多尺度计算流体动力学建模方法, 以及建模中存在的基本问题和解决方案, 并优化现有的热质传递模型, 设计更高效合理的冷却系统, 以期对果蔬冷链过程多尺度热质传递机理研究和减损保鲜提供理论依据。

关键词: 果蔬, 冷链, 热质传递, 多尺度, 计算流体动力学

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)16-0009-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110311



本文网刊:

Recent Advances on Multi-scale Heat and Mass Transfer of Fruits and Vegetables during the Cold Chain Process

MA Yonghui¹, LIU Guishan^{1*}, HE Jianguo¹, KANG Ningbo¹, CHEN Shoutao²,
YIN Junjie¹, LIU Mengqi¹, JIA Lili¹

(1. School of Food & Wine, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The process of cold chain of fruits and vegetables can easily cause damage to the internal structure of fruits and vegetables and arouse quality deterioration due to problems such as extensive control and large losses. Meanwhile, the moisture and heat inside the fruits and vegetables would dynamically migrate, which is not a beneficial effect of the storage and sales on fruits and vegetables. Therefore, it is an urgent problem for studying multi-scale heat and mass transfer mechanism in the cold chain process of fruits and vegetables. This paper clarifies the numerical imaging technology for multi-scale modeling of fruits and vegetables, discusses the multi-scale computational fluid dynamics modeling method of heat and mass transfer mechanism in the cold chain process of fruits and vegetables, as well as the basic problems and solutions in modeling, and optimizes the heat and mass transfer models and designs more efficient and reasonable cooling systems, in order to provide a theoretical basis for the study of the multi-scale heat and mass transfer mechanism, loss reduction and preservation during the cold chain process of fruits and vegetables.

Key words: fruits and vegetables; cold chain; heat and mass transfer; multi-scale; computational fluid dynamics (CFD)

果蔬冷链是指果蔬从采后产地处理、加工、贮藏、运输、分销和零售至消费者全过程冷链系统的保鲜过程; 在这一系列环节中, 由于管控粗放, 外界贮藏环境温湿度等的波动以及内部的水分和热量会发生

动态迁移, 果蔬易发生腐败变质等问题, 不利于贮藏和销售。因此, 探究果蔬冷链过程的热质迁移问题, 需要考虑多个阶段、物理场和尺度的复杂性因素。“多尺度热质传递”问题涉及到许多领域, 具有多学

收稿日期: 2021-11-26

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大项目 (2018BCF01001)。

作者简介: 马永辉 (1998-), 男, 硕士, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程, E-mail: 1913771234@qq.com。

* 通信作者: 刘贵珊 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程, E-mail: liugs@nxu.edu.cn。

科交叉的性质,其数值模拟包括不同的尺度,包括原子或纳米尺度、中观尺度、微观尺度、宏观尺度或工程尺度^[1-3]。果蔬由不同的细胞组织(微观尺度)构成,装箱堆垛满载于一个大型工业冷库中呈现出宏观的工程尺度特征,这种分层结构说明果蔬及其冷链过程横跨多个尺度^[4-6],所以,现代果蔬冷链过程不是简单的降温贮藏过程,而是一个复杂的多尺度热质传递耦合过程。

目前,针对果蔬冷链过程的热质传递研究主要侧重宏观层面,有关其内部微观结构对热质传递的影响研究较少,而果蔬微观结构的变化一定程度上会影响果蔬的感官和物理及化学特性,对果蔬微观结构的解析有利于优化果蔬的预冷、贮藏和加工工艺^[2-3]。由于果蔬组织及其冷链过程的多尺度特性,以及该过程果蔬内部的水分和热量发生动态迁移,宏观尺度无法精确解析果蔬冷链过程热质迁移问题,需要结合微观尺度来研究果蔬与周围环境的热质传递机理,近年来随着显微成像技术和图像处理技术的发展,有助于无损获取果蔬微观结构视图,可视化果蔬的微观结构变化、建立精确的微观模型,以微观的动力学和扩散方程表征宏观特性的变化,两者相结合建立多尺度热质传递模型。因此,多尺度计算流体力学建模是目前研究果蔬冷链过程热质传递的一个新途径^[7]。

大型果蔬现代复杂冷链过程是包含多尺度的热质耦合传递过程,对复杂的果蔬结构以及多尺度冷却过程和系统的了解不足,通常导致设计的冷却系统较为低效,造成产品质量降低和能耗增大,并且易产生冷害和品质劣化。基于此,本文结合现有研究对果蔬冷链过程多尺度热质传递研究进展进行综述,介绍了果蔬及其冷链过程的多尺度特性以及多尺度建模的流程和方法、以及存在的问题和相应解决方案,以期对果蔬冷链过程中的减损保鲜提供一定的理论依据。

1 果蔬及其冷链过程呈现多尺度性

多尺度及跨尺度的生物热质传递问题是生命科学领域的前沿研究方向。果蔬结构组织及其冷链过程本质上是细胞(微观尺度, microscale)、表皮组织(介观尺度, mesoscale)、果蔬(宏观尺度, macroscale)、工程(宏观尺度, macroscale)等多尺度作用过程,大型果蔬现代冷链过程也是包含多尺度的耦合传递过程:冷链对象具有多尺度性、冷链过程冷源载体具有多尺度性、冷却系统具有多尺度性。多尺度跨尺度研究果蔬冷链的生物传热传质规律是大型果蔬冷链系统精准调控的科学基础。

1.1 冷链对象果蔬具有多尺度性

果蔬多细胞组成的组织及毛细通道为微观或介观尺度,而果蔬个体及冷链过程的托盘码垛表现为宏观尺度。对其定义如下^[8]:工业工程宏观尺度($10^0 \sim 10^3$ m):预冷设备、冷库等;单体宏观尺度($10^{-3} \sim 10^0$ m):肉眼可以观察和测量的果蔬个体;微介观尺度($10^{-6} \sim$

10^{-3} m)细胞、表皮组织等;因此,果蔬是一个庞大的多尺度集合体。同时,果蔬存在与环境的热质交换及生理代谢的复杂生物传热传质作用,对于微尺度水平如皮孔、裂纹、液滴或气孔的对流热和质量传递以及它们与微环境的相互作用的特性往往在宏观尺度水平上进行表征。

植物性食品材料,特别是水果和蔬菜是聚合物、矿物质、空气和水组成的多孔异质性结构^[9-10]。以苹果为例:在微观尺度上,果蔬细胞的当量直径大小在 $30 \sim 300 \mu\text{m}$ 之间,其固有的微观结构和细胞组织已被广泛研究并得到充分证明,苹果薄壁组织由细胞壁网络构成,主要由富含水分的液泡和大量充满气体的细胞间隙组成,水分和气体通过果蔬细胞和细胞壁以及细胞间隙,几乎占成熟苹果体积的 30%;在宏观尺度上,苹果可以暂存在包装盒里,也可以贮藏在具有典型特征长度为 10 m 的冷藏室里。果蔬冷链过程的多尺度特征如图 1 所示^[1-4]:

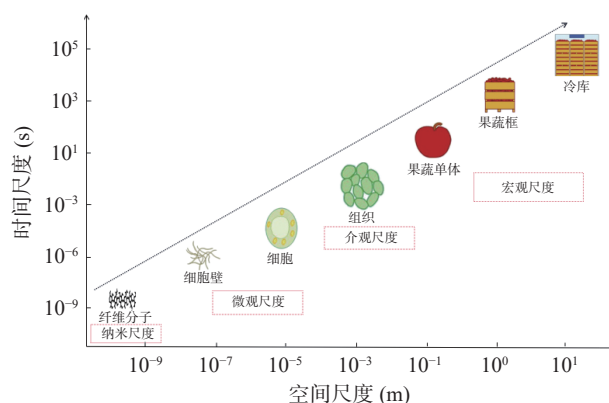


图1 果蔬冷链过程的多尺度特征

Fig.1 Multi-scale characteristics of fruits and vegetables during the cold chain process

1.2 冷链过程冷源载体具有多尺度性

冷空气或冷水是果蔬冷链过程冷源的主要载体,伴随装备性能、环境工况、果蔬对象的变化,主要呈现出湍流变化,具有连续的多尺度结构特点。果蔬冷藏库贮藏环境参数均匀性对于果蔬的贮藏品质有着重要影响,目前冷藏库大多采用冷风机直吹降温技术^[11],现代冷却技术大多数流动现象都涉及到湍流,湍流是一种三维、旋转、间歇、高度无序、扩散及耗散的流体运动。还有一些学者^[12-14]通过实验对比 standard k- ϵ 、RNG k- ϵ 、realizable k- ϵ 和 SST k- ω 四种湍流模型的适用性,结果表明气流中含有旋流流动时,选择 SST k- ω 湍流模型模拟计算得出的流场参数与试验结果更加吻合。

果蔬采后保鲜中的实际工业冷却过程中的冷源载体主要以湍流为特征,会影响对流传热和传质,特别是在产品界面,从而影响冷却产品的生理特性^[15-17]。层流和湍流可视化的关键区别是湍流中出现了多尺度的涡流运动,湍流是一种流体运动状态,其特征是具有不同时空尺度随机波动的瞬态复杂流动,包括多

相流、自由表面流、液滴等物理效应^[18-20]。在高雷诺数下,湍流运动可以很好地近似为三级过程,即平均运动、大尺度运动和小尺度运动,具有连续的尺度谱,从最大尺度湍流到最小的尺度^[21-23]。

1.3 冷却系统具有多尺度性

果蔬采后需要在冷藏条件下贮藏,消除田间热、减缓呼吸强度、降低酶活、抑制微生物生长繁殖,目前冷藏库冷却系统中最常用的是冷风机直吹强制空气冷却法,具有低成本、高效、灵活等特点^[24]。冷却系统的部件范围从微小的空间尺度到大型的工业尺度^[5-6]:强制通风系统通常由一个冷却单元组件和一个风扇组成,冷却单元组件带有制冷剂 and 冷却盘管,风扇迫使冷却空气流过盘管并到达堆叠的园艺产品上;产品可以大批量处理,也可以放在更大或更小尺度的容器或包装中^[25],这些容器或包装通常有通风口,允许冷却空气流向产品,冷却效率取决于容器和产品引起的流动阻力。

采后制冷系统主要通过最大限度地减少呼吸热的产生、延缓成熟过程、防止水分损失和微生物腐败来保持园艺产品的品质,长期以来,研究人员热衷于使用数学模型来优化采后制冷系统、预测园艺产品采后贮藏过程中发生的物理和化学现象。例如,从单个水果到将水果堆放在箱子中,甚至到满载的大型工业冷库的运输现象的建模在计算上具有挑战性^[26];如今,随着更强大的计算机以合理的价格出现,对大型制冷系统中园艺产品采后冷藏过程中的流体流动、热质传递及相关方面的应用研究从宏观尺度趋向非常小的空间和时间尺度。Delele 等^[27-28]引入了一个多尺度计算流体动力学模型来研究冷藏库中高压喷嘴蓄冷加湿系统:在最小尺度下,使用 DE-CFD 建模预测流过堆叠产品的冷风通量,以此来确定各向异性压力损失系数,并在一个更大尺度上预测了气流、温度、湿度和雾状水滴与一个加载冷藏库的优化效果。

所以,工业农业食品冷却系统具有从非常小的规模延伸到大工业规模的多尺度特征^[5-6,25],这是由于非常广阔的空间维度,可以跨越多个数量级,如图 2 所示:

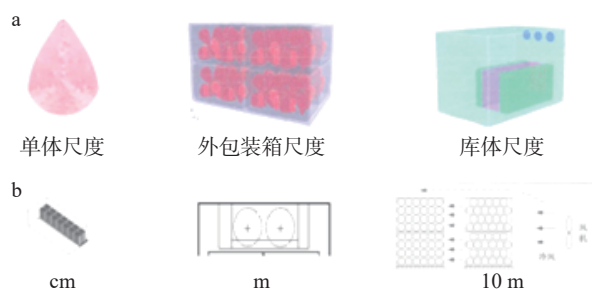


图 2 冷却系统的多尺度特性

Fig.2 Multi-scale characteristics of the cooling system

2 果蔬多尺度建模数值成像

多尺度建模的第一步通常是在多个尺度上可视化果蔬的结构,并构建可用于进一步分析的几何模

型。成像技术可以帮助重塑果蔬结构,现有的光学显微镜(optical microscope, OM)、透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)等信息成像技术本质上产生的几何信息大多数是二维的,在许多情况下远远不够。因此,研究人员一直在努力开发新的成像技术,以提高我们对果蔬结构的理解。以下主要讨论一些三维图像几何信息获取技术,这些图像可以转换成适用于多物理模型的数值离散化的固体模型。

2.1 X 射线计算机断层扫描成像

X 射线计算机断层扫描成像(x-ray computed tomography, X-ray μ CT)可以通过高达几百纳米的分辨率表征果蔬的 3D 微观结构,这些 3D 影像提供了果蔬内部微观结构的定性和定量信息,这种信息可以作为多孔结构物质的几何形状的参数,生成用于数值分析的几何 CAD 模型,或者通过直接使用三维图像来生成这种模型。

随着分辨率低于 1 微米甚至数百纳米的 CT 系统和同步加速器或激光的等离子体产生的软 X 光断层扫描法被引入实验室,开启了 X 射线成像的新时代,可以实现更高分辨率,目前,已经用于可视化各种不同类型的细胞结构。在食品科学领域, X-ray μ CT 技术特别适用于果蔬类多孔介质,因为孔隙和固体或液体基质之间的对比度非常明显^[29-30],现已被成功应用于表征苹果^[31-34]、梨^[35]、芒果^[36]、猕猴桃^[37]等果蔬的 3D 微观结构,从而有利于研究果蔬组织中热质迁移与各种病害相关性。

2.2 磁共振成像

磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)利用核磁共振原理,采用合适的序列对果蔬样品的整体或局部进行信息采集,形成数据空间,再将通过数学解码运算重建图像,对图像进行数据化客观分析,据此绘制成物体内部的结构图像。

MRI 结合其空间分辨率与多维弛豫通过适当的理论框架,可以在纳米尺度和中尺度上获得果蔬样本内部结构和动力学的详细视图。目前,磁共振成像已被广泛用于苹果^[38-40]、鲜枣^[41]的成像研究, Musse 等^[42]利用 MRI 获取了番茄的局部组织孔隙结构,实验结果表明,从视野和穿透深度来看 MRI 在测量果蔬表面微孔分布时更有效果。

2.3 激光扫描共聚焦显微成像

激光扫描共聚焦显微成像(confocal laser scanning microscope, CLSM)是近代发展起来并广泛应用于生命科学和分子生物学领域的新方法,将激光束聚焦到果蔬组织内的一个点并检测从该点发出的荧光来生成果蔬样本的 3D 图像;同时借助荧光标记,可以实时动态观察细胞结构、组织切片,再结合其他相关生物技术可用于原位获取果蔬样品的细胞

及组织的显微数值图像,提取微观结构的几何参数,重建细胞和组织的 3D 数值模型^[43]。

Wuyts 等^[44]使用 CLSM 高对比度三维成像方法对拟南芥叶片表皮和叶肉中的细胞形态进行了量化,研究了叶片表皮细胞结构生长变化与品质的关系;Straadt 等^[45]通过 CLSM 对马铃薯组织细胞进行了显微图像分析,研究了腌制过程中马铃薯组织细胞结构的具体变化;Jha 等^[46]使用 CLSM 对马铃薯冻藏期间的组织细胞结构进行了可视化 and 量化分析,深入研究了其在该过程产生的冻害现象;项海波等^[47]采用 CLSM 建立了蔬菜重金属污染评价方法,进一步为蔬菜的监管提供了新方法和理论基础;Veraverbeke 等^[48]利用 CLSM 重建了苹果表皮结构的显微图像,构建了苹果表皮结构的数值模型。

3 果蔬冷链过程多尺度计算流体动力学建模

数学建模有助于加深对果蔬在冷链过程中理化品质变化的理解,了解其保鲜过程中水分迁移和热量传递规律,有利于提高果蔬质量,优化工艺参数,节约能源。计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)建模是目前研究果蔬冷链过程传热传质的一个新途径,对于大型的工业冷却设备和系统,直接计算流体力学模型的方法因计算成本高,模拟时间与实际工业框架不兼容,几乎很难实现^[49-52],所以简化的多孔介质方法主要用于果蔬冷链过程的大型工业 CFD 建模^[53-56]。大型果蔬现代冷链过程是多尺度的耦合传递过程,为了更好地理解多尺度冷却过程和系统问题,需要改进当前的多孔介质模型和跨更大尺度的建模;近年来,功能更强大的计算机以相对低廉的价格问世,这使得对大规模冷却系统中的流动行为进行详细研究成为可能,甚至可以在非常小的空间范围内进行。多尺度 CFD 模型是相互关联的子模型的层次结构;其优势在于,可从不同空间和时间尺度描述农业食品冷却过程和系统行为,如今被正式用于解决上述一些问题^[7]。果蔬冷链过程的多尺度 CFD 建模主要采用连续型和离散型的建模方法^[49,57]。

3.1 连续型

有限元方法(finite element method, FEM)是一种采用数学逼近思想将连续体被划分为不相交的精确求解偏微分方程边值问题的一种数值分析方法,然后通过方程离散化获得该函数,进而推导求解这个连续域,从而得到问题解。FEM 具有计算精度高,普适性强(适应各种复杂几何形状)等特点,因而成为一种行之有效的求解各类物理场(流体场、温度场等)分布问题的计算模拟手段。

有限体积方法(finite volume method, FVM)是一种类似于有限元的离散化求解偏微分方程的数值算法。FVM 有两个主要的优点:第一,它在离散化的水平上施加了量的守恒,即质量、动量和能量在局部尺度上也保持守恒;其次,它通过充分利用任意网格来逼近复杂的几何形状。这种方法非常适合解决流

体运输问题,是许多商业 CFD 代码的基础^[58],具有很好的灵活性、守恒性、适应性、能够和有限元法完美地进行融合。

有限差分方法(finite difference method, FDM)是一种求偏微分(或常微分)方程和方程组定解问题的方法,简称差分法,也是 CFD 模拟的主要的数值解析方法之一。FDM 的基本思想是先把问题的定义域进行网格剖分,然后在网格节点上,按适当的数值微分公式把定解问题中的微商换成差商,从而把原问题离散化为差分格式,进而求出数值解,因此,具有简单、灵活以及通用性强等特点,容易在计算机上实现;然而针对果蔬冷链过程中的非稳态热传导,通过 FDM 所得到解则取决于初始条件和某些边界条件的设定。

3.2 离散型

格子玻尔兹曼方法(lattice boltzmann method, LBM)是计算流体力学领域中对玻尔兹曼方程进行离散化的一种非连续假设的介观尺度模拟方法。相较于其他基于连续体的宏观尺度计算流体力学模拟方法,LBM 基于流体微观特性,介于宏观连续模型和微观分子动力学模型之间,在多尺度建模方面具有一定的理论基础,是一种潜在的可行的离散建模技术,在未来的多尺度计算流体动力学建模中可以与当前的连续型技术互补使用。

果蔬及其冷链过程本质上是多尺度的集合体,包含纳米尺度和微米尺度的特征,无法通过宏观模型的设计来实现或解释,传统基于连续体的宏观尺度方法中的有限元法或有限体积法不再适用,因此可用的连续体模型的有效性范围有限。基于此,LBM 直接从离散模型出发,通过从不同的角度建立起宏观与微观、连续与离散之间的联系,为研究多尺度问题提供了一条有效的途径。与传统的计算流体力学方法相比,LBM 将空间、时间和动量离散化从而使复杂的边界问题简单化,具有天然的多尺度并行性、计算效率高等优点。

3.3 多尺度计算流体动力学建模在果蔬冷却系统和过程中的应用

目前,基于连续体的宏观尺度方法中的有限元法、有限体积法、有限差分法大多被应用于大型工厂载冷产品的 CFD 建模等方面(包括堆叠的包装箱和大型托盘的冷却过程以及冷藏车和冷藏系统的空载冷却);LBM 可以并行不同尺度下的 CFD 模拟,则被广泛应用于处理工程问题和描述流体运动等方面,在食品加工的多尺度模拟框架中,LBM 可以用作中尺度或宏观尺度的求解器,解析复杂几何形状(如多孔介质)的热质迁移问题,LBM 最适合微尺度和中尺度模拟,并且在食品科学中发现了比任何其他中尺度方法更多的应用^[59]。以下总结了多尺度计算流体力学建模果蔬冷链应用方面的一些应用,如表 1 所示。

表 1 多尺度计算流体动力学建模在果蔬冷链中的应用

Table 1 Application of multi-scale computational fluid dynamics modeling in the cold chain of fruits and vegetables

研究方法	建模软件	研究内容	研究结果	参考文献
FEM	ANSYS FLUENT	草莓(单体、包装箱、厢体码垛)压差预冷过程中的多尺度数值模拟	理论模拟与实验验证吻合较好, 建立了草莓预冷效果评价体系	[25]
FEM	COMSOL	对冷藏车箱内的对流传热进行数值模拟和实验分析, 研究冷气对流分布均匀性	对比实验数据, 预测的温度偏差为3~4 K, 模型具有可靠性	[60]
FEM	COMSOL	基于蔬菜的几何、生物学特性, 建立蔬菜的传热仿真模型, 研究蔬菜冷激处理(cold shock treatment, CST)过程的传热机理	模拟结果与实测结果较吻合; 同时, 在失重率、硬度和过氧化物酶活(POD)等品质特性方面, 2 ℃冷水处理40 min的CST对黄瓜的保鲜效果最好	[61]
FVM	ICEM ANSYS	采用直接计算流体力学方法研究苹果预冷过程中衬垫与箱壁间空隙对苹果预冷效果的影响	衬垫与箱壁间空隙宽度的最佳增量为7.5 mm时能获得最佳预冷效果, 为预冷过程中包装箱设计优化提供了新思路	[62]
FVM	ANSYS CFX 17.2	通过X-ray μ CT扫描生成水果数值模型, 模拟压差预冷时的降温过程	计算机辅助设计法有助于精确地模拟对流冷却过程, 提高冷链效率和冷却均匀性	[63]
FVM	ANSYS FLUENT 15.0	优化果蔬压差预冷过程中通风孔以及包装箱的设计参数	优化后的通风孔提高了冷却速率和均匀性、气流阻力和能源效率	[64]
FDM	编程计算	对果蔬气调贮藏冷却阶段温度变化进行数值模拟及实验验证	模拟温度与试验温度误差 ≤ 2 ℃, 试验结果与模拟结果吻合较好	[65]
FDM	VB6.0编程	建立柱状与球状果蔬的普适传热模型, 研究果蔬采后热处理过程的传热机理	模型能够准确预测多种边界条件下柱状与球状果蔬热处理时的组织温度变化, 模型预测值与实测值的平均相对误差及均方根误差均低于5%	[66]
LBM	OpenLB	研究冷藏车内冷空气流速和温度分布以及在湍流条件下的热性能, 并与冷藏车实验数据进行比较	模型能够准确预测冷却负载区域内的流速和温度分布, 同时量化通过隔热壁的热通量	[57]

4 果蔬多尺度建模中存在的基本问题和解决方案

4.1 基本问题

由于单独建模, 相邻尺度之间的桥接非常重要, 对果蔬冷链过程中多尺度建模的尺度桥接技术也一直具有挑战性。然而, 建立果蔬冷链过程多尺度 CFD 模型, 需要将不同尺度的模型耦合, 消除跨尺度的复杂性, 实现微-宏观尺度间的相互关联以及相互转化。因此, 如何实现果蔬及其冷链过程和系统及其相互作用在微观和宏观尺度的有机结合和联系, 弥合不同尺度之间的差距, 建立跨尺度、多过程相互作用的分析模型, 从而正确揭示各物理化学场的相互作用机理成为目前亟待解决的热点难题。

4.2 解决方案

果蔬冷链过程多尺度 CFD 模型是建立表述相应尺度变化的多尺度耦合数学模型, 能够进行多尺度跨尺度果蔬结构信息融合, 把微-宏观行为有机地联系起来进行多尺度耦合, 研究果蔬热质传递的变化规律。基于此, 以下概述了一些从微观尺度守恒定律推导至宏观尺度方程的升级方法, 能将微观平衡方程升级为相应的宏观平衡方程, 实现对微-宏观尺度热质传递耦合现象的全面描述。

a. 体积平均方法(the method of volume averaging with closure, MVA)^[67] 是一种对代表性体积单元(representative elementary volume, REV)内的微观守恒方程进行体积平均运算进而得到与宏观场量相关的宏观守恒方程的尺度耦合方法, 能够将微观和宏观连接起来, 实现微-宏观尺度的双向耦合。

b. 复合混合物理论(hybrid mixture theory, HMT)^[68] 是用来研究多孔介质多尺度热质迁移问题和热力学

方程的方法, 基于 HMT 中包含微尺度场方程的体积平均基础, 将混合理论与升级技术相结合, 通过质量、动量、能量和熵守恒定律可以从微观尺度升级到宏观尺度。

c. 热力学约束平均理论(thermodynamically constrained averaging theory, TCAT)^[69] 是一种宏观尺度模型公式的升级方法, 用于生成多孔介质系统中从微米到兆米尺度范围内与传输现象(质量、动量和能量)一致的封闭模型, 这种一致性为所有宏观尺度变量提供了微观尺度量的定义, 从微尺度连续介质守恒原理开始, 结合适当的微尺度热力学公式并将其平均到所需的尺度, 使微观尺度实验和计算方法能够用于模型的闭合、评估和验证。

d. 均质化理论(homogenization theory, HT)^[70] 一般用于分析具有两个或者多个尺度的物质系统, 可以把微观尺度和整体结构上的宏观尺度联系起来, 用于在两个尺度上求解非均匀域内物理现象的微分方程, 以获得更局部平均的域^[71], 这种通过双尺度展开的周期性均质化加假设使产生宏观特性的平均微尺度效应成为可能^[72]。

e. 重整化群理论(renormalization group theory, RGT)^[73] 提供了一种连接不同尺度层面上物理系统问题的策略, 通过逐步降低相应方程临界现象的多自由度, 在临界点上具有趋于无穷的特征关联长度而致微观特征长度被消除, 从而实现表征多粒子系统的整体平均特性, 其优势在于可以应用于各种环境和方式下的多尺度耦合问题。

果蔬冷链过程多尺度热质传递模型需要把微-宏观行为有机地联系起来进行尺度耦合, 研究果蔬热质传递的变化规律, 同时由于其复杂而新颖的特点, 导

表 2 不同解决方案在多尺度模型耦合中的应用

Table 2 Application of different solutions to multiscale model coupling

研究方法	研究对象类别	研究内容	研究结果	参考文献
MVA	多孔介质	基于MVA推导出颗粒填充柱微宏观尺度的函数关系, 结合数值模拟计算了对应颗粒填充柱内溶质的弥散系数	可以定性预测实际颗粒填充柱内的溶质弥散行为, 为开展更复杂的多尺度传递过程数值模拟研究奠定基础	[74]
MVA	多孔介质	基于MVA和热力学理论, 研究饱和土体跨尺度、多过程耦合问题	建立的饱和土体跨尺度、多过程耦合模型的热力学框架可以实现不同尺度间有机结合和联系	[75]
HMT	多孔介质	基于HMT建立了孔隙粘弹性聚合物的多尺度不饱和热质迁移模型	模型能够较准确地预测马铃薯油炸过程中组织孔隙中的水分含量和温度分布	[76]
HMT	多孔介质	基于HMT和有FEM研究了玉米籽粒干燥过程中的水分迁移问题	模型能较好的预测干燥过程中玉米籽粒皮下、胚乳、胚芽等不同区域的水分扩散通量	[77,78]
TCAT	多孔介质	基于TCAT模拟了多相多孔介质中的热质迁移现象	为多相多孔介质系统提供了精确的微观到宏观的尺度升级建模框架和模型	[79]
HT	多孔介质	基于HM推导出多孔金属锂电池动力学的质量和电荷传输方程, 建立了质量和电荷迁移模型	模型可以准确预测电池动力学的质量和电荷传输, 从而实现更高的运行效率、提高了电池性能	[80]
HT	多孔介质	基于HM研究了木材干燥过程中的导热现象, 建立了导热模型	模型预测了木材的导热系数, 根据微观尺度上元素组分的微观结构和物理性质可以推测宏观木材样品的整体变化	[81]
RGT	多孔介质	基于RGT与渗流方法相结合, 研究了裂缝介质中从微观尺度到宏观尺度的流体流动现象	为处理裂缝系统复杂的连通性以及所涉及的不同尺度与所需尺度之间的复杂关系提供了一种简便方法	[82]

致单一针对果蔬的多尺度耦合研究文献较少, 然而果蔬属于含复杂溶质液体的多孔体, 内部微观孔隙结构为各向异性介质, 更趋近于多孔介质, 因此可以将其作为含湿非饱和多孔体模型进行研究。基于此, 以下概述了一些从微观桥接至宏观尺度的方法可以解决不同尺度模型之间的耦合问题, 目前这些方法已经应用于土壤、木材、材料等多孔介质对象, 在果蔬中的应用较少, 如表 2 所示。就多孔介质的共性特点而言, 这些尺度耦合理论可为以后果蔬冷链过程不同尺度模型之间的耦合提供一定的理论和方法。

5 结语

目前, 国内外学者对果蔬冷链过程传热传质的研究主要侧重于宏观尺度, 然而随着数字化微尺度的测试分析技术的发展, 对微尺度组织结构的无损获取、探讨果蔬微观层面的热质传递现象, 建立果蔬多尺度热质传递模型研究趋于可行。相对于传统、宏观的果蔬个体或工程等过程仿真研究, 果蔬冷链过程多尺度、多相流和多物理场的生物传热传质科学规律研究可以建立双向多尺度耦合信息交流, 如较小尺度的热质迁移, 局部流体流动行为, 包装盒设计参数影响, 产品堆叠模式和几何特性等更多信息, 实现果蔬微观结构与宏观特性在冷链过程的耦合, 阐明果蔬冷链过程热质传递及对果蔬结构品质影响的多尺度数据模型, 为大型果蔬冷链过程热质传递的预测与系统精准调控提供科学基础。

果蔬冷链过程中多尺度热质传递问题体现了多学科交叉性、复杂性和前瞻性。因此, 还需要进行一系列相关研究, 以获取果蔬冷链过程外部品质变化和内部组织细胞结构变化的信息, 开发更准确的模型; 同时, 就多尺度问题的本质, 尺度间及层次间相互作用、耦合强度及机制以及理论研究方法和实验技术而言: 跨长度、跨时间和跨层次现象以及相应的多尺度耦合是复杂系统中重要问题之一, 相关模型的提

出、模型的选择、初始条件与边界条件的确定、不同尺度模型的耦合, 模拟方法和验证实验方法也存在着巨大的挑战。

参考文献

- [1] AJANI C, CURCIO S, DEJCHANCHAIWONG R, et al. Influence of shrinkage during natural rubber sheet drying: Numerical modeling of heat and mass transfer[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 149: 798–806.
- [2] EUSTON S R. Modelling and computer simulation of food structures[J]. *Food Microstructures*, 2013: 336–385.
- [3] HO Q T, VERBOVEN P, MEBATSION H K, et al. Micro-scale mechanisms of gas exchange in fruit tissue[J]. *New Phytologist*, 2009, 182(1): 163–174.
- [4] ABERA M K, AREGAWI W A, HO Q T, et al. Multiscale modeling of food processes[J]. *Module in Food Sciences*, 2016.
- [5] WU X H, CHANG Z J, ZHAO X L, et al. A multi-scale approach for refrigerated display cabinet coupled with supermarket HVAC system—Part I: Methodology and verification[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 87: 673–684.
- [6] WU X H, CHANG Z J, ZHAO X L, et al. A multi-scale approach for refrigerated display cabinet coupled with supermarket HVAC system—Part II: The performance of VORDC and energy consumption analysis[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 87: 685–692.
- [7] AJANI C K, ZHU Z W, SUN D W. Recent advances in multiscale CFD modelling of cooling processes and systems for the agrifood industry[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020(3): 1–16.
- [8] HO Q T, CARMELIET J, DATTA A K, et al. Multiscale modeling in food engineering[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(3): 279–291.
- [9] KHAN M, KUMAR C, JOARDDER M, et al. Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials[J]. *Drying Technology*, 2016, 35(3): 335–346.
- [10] OMAR M U H J, KARIM A. Development of a porosity pre-

diction model based on shrinkage velocity and glass transition temperature[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(15): 1988–2004.

- [11] 魏高亮. 纤维空气分布系统送风模式下果蔬冷藏库流场特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020. [WEI G L. Airflow and heat transfer characteristics in a cold storage for fruits and vegetables based on fiber air dispersion system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.]
- [12] DURET S, HOANG H M, FLICK D, et al. Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 46(2-3): 17–25.
- [13] LAGUERRE O, DURET S, HOANG H M, et al. Simplified heat transfer modeling in a cold room filled with food products[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 149: 78–86.
- [14] HOANG H M, DURET S, FLICK D, et al. Preliminary study of airflow and heat transfer in a cold room filled with apple pallets: Comparison between two modelling approaches and experimental results[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 76: 367–381.
- [15] DEFRAEYE T, VERBOVEN P, NICOLAI B. CFD modelling of flow and scalar exchange of spherical food products: Turbulence and boundary-layer modelling[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(4): 495–504.
- [16] TIAN Y, CHEN Z, ZHU Z, et al. Effects of tissue pre-degassing followed by ultrasound-assisted freezing on freezing efficiency and quality attributes of radishes[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020: 105162.
- [17] GETAHUN S, AMBAW A, DELELE M, et al. Analysis of airflow and heat transfer inside fruit packed refrigerated shipping container: Part I—Model development and validation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 203: 58–68.
- [18] DEFRAEYE T, VERBOVEN P, DEROMED, et al. Stomatal transpiration and droplet evaporation on leaf surfaces by a micro-scale modelling approach[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 65: 180–191.
- [19] GL A, AGB C, LBA C, et al. Direct numerical simulation of spray droplet evaporation in hot turbulent channel flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020: 160.
- [20] DRIKAKIS D, FRANK M, TABOR G. Multiscale computational fluid dynamics[J]. *Energies*, 2019, 12(17): 3272.
- [21] GEHRKE M, BANARI A, RUNG T. Performance of under-resolved, model-free LBM simulations in turbulent shear flows[M]. *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling*, 2020, 143: 3–18.
- [22] ARGYROPOULOS C D, MARKATOS N C. Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(2): 693–732.
- [23] HAMI K. Turbulence modeling a review for different used methods[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2021, 39(1): 227–234.
- [24] 白通通. 果蔬冷藏库竖壁贴附送风模式流场特性的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018. [BAI T T. Airflow and heat transfer characteristics in a cold storage for fruits and vegetables based on vertical wall attached jet[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.]
- [25] 王达. 果蔬压差通风预冷研究及其品质影响分析 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2016. [WANG D. Forced-air precooling research of fruit and vegetable and analysis of effects on its quality[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016.]
- [26] SAJADIYE S M, AHMADI H, ZOLFAGHARI M, et al. A multi-scale three-dimensional CFD model of a full loaded cool storage[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2013, 9(2): 163–178.
- [27] DELELE M A, SCHENK A, TIJSKENS E, et al. Optimization of the humidification of cold stores by pressurized water atomizers based on a multiscale CFD model[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(2): 228–239.
- [28] DELELE M A, SCHENK A, RAMON H, et al. Evaluation of a chicory root cold store humidification system using computational fluid dynamics[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 94(1): 110–121.
- [29] SCHOEMAN L, WILLIAMS P, DU PLESSIS A, et al. X-ray micro-computed tomography (μ CT) for non-destructive characterisation of food[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 47: 10–24.
- [30] WANG Z, HERREMANS E, JANSSEN S, et al. Visualizing 3D food microstructure using tomographic methods: Advantages and disadvantages[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2018, 9: 323–343.
- [31] QUANG T H, VERBOVEN P, SOLOMON W F, et al. A multiphase pore scale network model of gas exchange in apple fruit[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2014, 7(2): 482–495.
- [32] HERREMANS E, VERBOVEN P, BONGAERS E, et al. Characterisation of 'Braeburn' browning disorder by means of X-ray micro-CT[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 75: 114–124.
- [33] HERREMANS E, VERBOVEN P, DEFRAEYE T, et al. X-ray CT for quantitative food microstructure engineering: The apple case[J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research B*, 2014, 324: 88–94.
- [34] JANSSENS, VERBOVENP, NUGRAHAB, et al. 3D pore structure analysis of intact 'Braeburn' apples using X-ray micro-CT[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019: 159.
- [35] MUZIRI T, THERON K I, CANTRE D, et al. Microstructure analysis and detection of mealiness in 'Forelle' pear (*Pyrus communis* L.) by means of X-ray computed tomography[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2016, 120: 145–156.
- [36] CANTRE D, HERREMANS E, VERBOVEN P, et al. Characterization of the 3-D microstructure of mango (*Mangifera indica* L. cv. *Carabao*) during ripening using X-ray computed microtomography[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 24(8): 28–39.
- [37] CANTRE D, EAST A, VERBOVEN P, et al. Microstructural characterisation of commercial kiwifruit cultivars using X-ray micro computed tomography[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 92(3): 79–86.
- [38] HERREMANS E, MELADO-HERREROS A, DEFRAEYE T, et al. Comparison of X-ray CT and MRI of watercore disorder of

- different apple cultivars[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 87: 42–50.
- [39] KAMALT, ZHANGT, SONG Y K, et al. Water dynamics and physicochemical analysis of two different varieties of apple jam (Fuji) and (Yinduqing) by LF-NMR and MRI[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2018, 14(3).
- [40] DEFRAEYE T, LEHMANN V, GROSS D, et al. Application of MRI for tissue characterisation of 'Braeburn' apple[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 75: 95–105.
- [41] 孙炳新, 赵宏侠, 冯叙桥, 等. 基于低场核磁和成像技术的鲜枣贮藏过程水分状态的变化研究[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(5): 252–257. [SUN B X, ZHAO H X, FENG X Q, et al. Studies on the change of moisture state of fresh jujube during storage-base on LF-NMR and MRI[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(5): 252–257.]
- [42] MUSSE M, DE GUIO F, QUELLEC S, et al. Quantification of microporosity in fruit by MRI at various magnetic fields: Comparison with X-ray microtomography[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2010, 28(10): 1525–1534.
- [43] TURILLAZZI E, KARCH S B, NERI M, et al. Confocal laser scanning microscopy. Using new technology to answer old questions in forensic investigations[J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2008, 122(2): 173–177.
- [44] WUYTS N, PALAUQUI J C, CONEJERO G, et al. High-contrast three-dimensional imaging of the arabidopsis leaf enables the analysis of cell dimensions in the epidermis and mesophyll[J]. *Plant Methods*, 2010, 6(1): 17.
- [45] STRAADT I K, THYBO A K, BERTRAM H C. NaCl-induced changes in structure and water mobility in potato tissue as determined by CLSM and LF-NMR[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(8): 1493–1500.
- [46] JHA P K, VIDOT K, XANTHAKIS E, et al. Benchmarking of techniques used to assess the freeze damage in potatoes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 262(DEC.): 60–74.
- [47] 项海波, 刘东武, 张苗, 等. 基于叶绿素荧光强度分析蔬菜重金属污染[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(22): 3. [XIANG H B, LIU D W, ZHANG M, et al. Analysis of heavy metal pollution in vegetables based on the technique of laser scanning confocal microscope[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(22): 3.]
- [48] VERAVERBEKE E A, BRUAENE N V, OOSTVELDT P V, et al. Non destructive analysis of the wax layer of apple (*Malus domestica* Borkh.) by means of confocal laser scanning microscopy[J]. *Planta*, 2001, 213(4): 525–533.
- [49] AMBAW A, VERBOVEN P, DEFRAEYE T, et al. Porous medium modeling and parameter sensitivity analysis of 1-MCP distribution in boxes with apple fruit[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(1): 13–21.
- [50] THIJS D, DOMINIQUE D, PIETER V, et al. Cross-scale modelling of transpiration from stomata via the leaf boundary layer[J]. *Annals of Botany*, 2014, 114(4): 711–723.
- [51] MAJID S S, HOJAT A, MOSTAFA H S, et al. Evaluation of a cooling performance of a typical full loaded cool storage using mono-scale CFD simulation[J]. *Modern Applied Science*, 2012, 6(1): 102–119.
- [52] VERBOVEN P, FLICK D, NICOLA B M, et al. Modelling transport phenomena in refrigerated food bulks, packages and stacks: Basics and advances[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(6): 985–997.
- [53] DELELE M A, KUFFI K D, NICOLAI B, et al. CFD modeling to improve the performance of industrial cooling of large beef carcasses[M]. In book: *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*, 2018.
- [54] HAN J W, BADÍA-MELIS, YANG X T, et al. CFD simulation of airflow and heat transfer during forced-air precooling of apples[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(2): 1–11.
- [55] AMBAW A, DEKEYSER D, VANWALLEGHEM T, et al. Experimental and numerical analysis of the spray application on apple fruit in a bin for postharvest treatments[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 202: 34–45.
- [56] WU W, DEFRAEYE T. Identifying heterogeneities in cooling and quality evolution for a pallet of packed fresh fruit by using virtual cold chains[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 407–417.
- [57] GAEDTKE M, WACHTER S, RAEDLE M, et al. Application of a lattice boltzmann method combined with a smagorinsky turbulence model to spatially resolved heat flux inside a refrigerated vehicle[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2018, 76(10): 2315–2329.
- [58] HIRSCH C. Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics[M]. Elsevier Ltd, 2007.
- [59] VAN DER SMAN R G M. Lattice boltzmann simulation of microstructures[J]. *Food Sci Technol*, 2006, 166: 15–40.
- [60] CARDINALE T, FAZIO P, GRANDIZIO F, et al. Numerical and experimental computation of airflow in a transport container[J]. *International Journal of Heat & Technology*, 2016, 34(4): 734–742.
- [61] ZHAO Y, MINGFENG C, AIQIANG C, et al. Analysis about heat transfer of vegetables during cold shock treatment and preservation quality after storage[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13(3).
- [62] 宫亚芳, 曹玉会. 衬垫与箱壁间空隙对苹果预冷效果的影响[J]. *中国科学院大学学报*, 2021, 38(2): 198–206. [GONG Y F, CAO Y H. Effect of the gap width between tray and box wall on the precooling effectiveness of apples[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 38(2): 198–206.]
- [63] GRUYTERS W, VERBOVEN P, DIELS E, et al. Modelling cooling of packaged fruit using 3D shape models[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(3): 2008–2020.
- [64] BERRY T M, DEFRAEYE T, NICOLA B M, et al. Multi-parameter analysis of cooling efficiency of ventilated fruit cartons using CFD: Impact of vent hole design and internal packaging[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(9): 1481–1493.
- [65] 季阿敏. 果蔬气调贮藏冷却阶段温度变化的数值模拟及验证[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 25–28. [JI A M. Numerical simulation and experimental verification of temperature variation

during controlled atmosphere cold storage of fruits and vegetables [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5): 25–28.]

[66] 尹海蛟, 杨昭, 陈爱强. 果蔬热处理传热过程的数值模拟及验证 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 344–348. [YIN H J, YANG Z, CHEN A Q. Numerical simulation and experimental verification of heat transfer for fruits and vegetables during heat treatment [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 344–348.]

[67] AGUILAR-MADERA C G, ESPINOSA-PAREDES G. Neutron diffusion analysis of a fuel pebble with volume averaging method [J]. *Journal of Porous Media*, 2020, 23(4): 363–381.

[68] SANDHU J S, TAKHAR P S. Verification of hybrid mixture theory based two-scale unsaturated transport processes using controlled frying experiments [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2018, 110: 26–39.

[69] WEIGAND T M, SCHULTZ P B, GIFFEN D H, et al. Modeling non-dilute species transport using the thermodynamically constrained averaging theory [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(9): 6656–6682.

[70] WELSH Z G, KHAN M, KARIM M A. Multiscale modeling for food drying: A homogenized diffusion approach [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020: 292.

[71] JACOB B. Theory and applications of transport in porous media modelling phenomena of flow and transport in porous media [M]. Cham, Switzerland: Springer international publishing AG, 2018.

[72] BATTIATO I, FERREROV P T, Malley D O, et al. Theory and applications of macroscale models in porous media [J]. *Transport in Porous Media*, 2019, 130(1): 5–76.

[73] ICHISHIMA D, MATSUMURA Y. Renormalization group theory of molecular dynamics [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 5968–5968.

[74] 张照明, 王苗, 闫孝红. 颗粒填充柱内容质弥散系数的体积平均方法 [J]. *化学工程*, 2015, 43(3): 5. [ZHANG Z M, WANG

M, YAN X H. Solute dispersion in particle packed columns by volume averaging method [J]. *Chemical Engineering*, 2015, 43(3): 5.]

[75] 许照刚. 基于体积平均技术的饱和土体多过程耦合现象理论研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017. [XU Z G. The oretical study on multi-process coupling phenomena of saturated soil based on volume averaging technique [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.]

[76] TAKHAR P S. Unsaturated fluid transport in swelling poro-viscoelastic biopolymers [J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 109: 98–110.

[77] TAKHAR P S. Hybrid mixture theory based moisture transport and stress development in corn kernels during drying: Coupled fluid transport and stress equations [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 105(4): 663–670.

[78] TAKHAR P S, MAIER D E, CAMPANELLA O H, et al. Hybrid mixture theory based moisture transport and stress development in corn kernels during drying: Validation and simulation results [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 106(4): 275–282.

[79] RYBAK I V, GRAY W G, MILLER C T. Modeling two-fluid-phase flow and species transport in porous media [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 521: 565–581.

[80] ARUNACHALAM H, KORNEEV S, BATTIATO I, et al. Multiscale modeling approach to determine effective lithium-ion transport properties [C]//American Control Conference, IEEE, 2017.

[81] EITELBERGER J, HOFSTETTER K. Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point—a multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part II: Steady state moisture diffusion coefficient [J]. *Composites Science & Technology*, 2011, 71(2): 145–151.

[82] PIERRE G, YVES G. Flow in fractured media: A modified renormalization method [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(2): 177–191.