

基于非渗透包装的米威化饼干二组分 食品间水分扩散特性研究

Modeling of moisture diffusion in two components food of rice made wafer with impermeable package

程学雨¹ 钱奕含¹ 卢立新^{1,2}

CHENG Xue-yu¹ QIAN Yi-han¹ LU Li-xin^{1,2}

(1. 江南大学, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food
Manufacturing Equipment & Tehnology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:以二组分食品—米威化饼干为试验对象,在 23 ℃ 条件下通过水分吸附动力学试验及水分扩散系数理论表征非渗透包装条件下米威化饼干二组分间水分有效扩散系数模型;通过 Fick 第二定律结合各组分初始条件、边界条件及各组分等温吸湿模型求得各组分间水分扩散的含水率与时间变化的关系,并在含水率介于 0.02~0.12 时对理论模型进行试验验证分析。结果表明,理论模型与试验数据吻合度高。

关键词:米威化饼干;二组分食品;水分扩散;阻隔包装

Abstract: In this study, a moisture diffusion model of two-component food rice made wafer under a non-permeable packaging condition was established on the basis of water adsorption kinetics experiment and water diffusion coefficient theory under the condition of 23 ℃; The relation between water content and time change of water diffusion among components was calculated based on the Fick's law, initial conditions, boundary conditions and moisture sorption isotherm, and then the model-calculated of moisture diffusion were tested and analyzed by experiment when the moisture content was between 0.02 and 0.12. The results showed that the experimental data could be fitted with the theoretical model very well.

Keywords: rice made wafer; two-component food; moisture diffusion; barrier packaging

多组分食品日新月异,组分的不同会导致组分间水

分扩散产生差异,对多组分食品间水分扩散的研究可为多组分食品的保质、防潮及货架期预测等提供借鉴^[1]。多组分食品一般是由高、低两种不同水分活度的食品或高、中、低 3 种不同水分活度的食品组成,水分一般是由水分活度高的组分向水分活度低的组分扩散。

在食品储存保质研究中,国内外对水分扩散的研究主要集中在对单组分食品的研究和由单组分食品组合形成的多组分食品的研究,对真正在售的多组分食品水分扩散研究较少。王雪媛等^[2]对苹果片短波干燥过程中水分扩散特性和玻璃化转变温度的变化规律进行了研究;陈思羽等^[3]对玉米果穗水分迁移规律等进行了研究;李兴军等^[4]利用重量法对大豆水分吸附速率和有效扩散系数进行了研究;Souraki 等^[5]通过对青豆在盐溶液中渗透过程的研究,建立了青豆水分和溶质扩散的数学模型;Shirkole 等^[6]利用物理化学特性对辣椒的吸附现象和水分迁移率进行建模。而对于由单组分食品组合形成的多组分食品,Chu 等^[7]对韧性饼干、猪肉脯及山楂片利用 Fick 第二定律解析模型求得水分扩散理论模型;陈亚慧等^[8]通过对饼干和琼脂凝胶在非渗透条件下水分扩散研究,得到饼干的水分有效扩散模型,并进行了试验验证;郝发义^[9]对饼干、果丹皮及凝胶的水分扩散系数模型进行了表征,并利用有限元分析对水分扩散过程进行了模拟;Jens^[10]通过对含葡萄干、烤杏仁、花生和香蕉片二元或三元混合物的封闭系统中水分传递进行了研究;O'Connor 等^[11]对即食面包和美国干酪片间水分迁移的抑制进行了研究。对目前市场上在售的多组分食品如三明治、夹心饼干等的研究尚未见报道,对多组分食品水分扩散的研究仍停留在理论阶段,并未对在售食品进行实际研究,在售多组分食品因组分的特性、占比等不同,各

基金项目:国家重点研发计划课题(编号:2016YFD0400701)

作者简介:程学雨,男,江南大学在读本科生。

通信作者:卢立新(1966—),男,江南大学教授,博士生导师,博士。E-mail: lulx21@126.com

收稿日期:2019-05-15

组分间的水分扩散更为复杂。

试验拟对二组分食品—米威化饼干进行试验研究,结合其等温吸湿模型及水分有效扩散系数理论求解 Fick 第二定律微分方程,建立非渗透包装条件下二组分食品间的水分扩散模型,并通过水分吸附动力学试验对理论模型进行验证,为米威化饼干等同类的多组分食品防潮保质包装等研究提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

米威化饼干:主要配料有小麦粉、乳糖、食用植物油、代可可脂巧克力制品、糯米粉、白砂糖、淀粉、乳粉,食品添加剂等,亿滋食品(北京)有限公司;

高阻隔性 PET/AL/PE 复合膜:上海易诺包装材料有限公司。

1.2 仪器与设备

恒温恒湿试验机:THS-AOC-100AS 型,庆声科技有限公司;

电子分析天平:AB204-N 型,梅特勒—托利多集团;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9030A 型,上海精宏实验设备有限公司;

有色印字连续封口机:FRW-1980 型,中国华联机械有限公司。

1.3 方法

1.3.1 等温吸湿试验 在温度 23 ℃、相对湿度 0.35~0.90 条件下对米威化饼干中的馅料和饼皮分别进行等温吸湿试验,采用静态称重法称量各湿度阶段馅料和饼皮的重量,并计算平衡含水率,最后通过理论模型拟合得到等温吸湿模型。

1.3.2 饼皮水分有效扩散系数试验 划分 10 个相对湿度阶段,对 3 组样品进行试验,取平均值。预先准备好 3 套带盖有机玻璃容器,尺寸和饼皮尺寸相同,确保饼皮中水分为单方向扩散,分别称量 3 组样品的初始质量,计算得到 3 组样品的初始含水率 X_0 ,然后将玻璃容器及样品放入设置好初始条件的恒温恒湿箱中,在相对湿度条件为 35%~45%,70%~80% 时,每隔 10 h 进行称重并改变湿度条件,湿度条件为 50%~65% 时,每隔 15 h 进行称重并改变湿度条件,因饼皮在中高水性范围内吸水较多,故增加中高水分活度阶段的吸水时间,确保结果准确。动力学试验的条件设置如表 1 所示。分别计算该湿度阶段的平均含水率和平衡含水率,采用 Crank^[12] 无限大平板模型计算各湿度阶段的扩散系数值 D_{eff} 。

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right], \quad (1)$$

表 1 饼皮水分吸附动力学试验的条件设置

Table 1 Conditions setting in water adsorption experimental of crust

相对湿度/%	时间/h	相对湿度/%	时间/h
35	0~10	60	60~75
40	10~20	65	75~90
45	20~30	70	90~100
50	30~45	75	100~110
55	45~60	80	110~120

式中:

X ——平均含水率, g/g;

X_0 ——初始含水率, g/g;

X_e ——平衡含水率, g/g;

L ——饼皮厚度, m;

t ——时间, s。

1.3.3 饼皮和馅料间水分扩散模型的建立与验证 将馅料放置于有机玻璃容器的底部,饼皮至于馅料的上部,并用高阻隔性薄膜进行密封,降低环境湿度影响。非渗透包装条件下二组分食品间水分扩散的数学模型如图 1 所示。

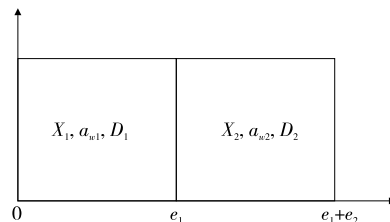


图 1 二组分食品间水分扩散的数学模型

Figure 1 Mathematical model of water diffusion between two components of food

Fick 第二定律适用于均匀介质中物质的非稳态扩散过程,采用该定律进行二组分食品间水分扩散理论推导时,因两组分的水分活度相差大且扩散时间短,故高水分活度组分含水率不会发生显著变化,认为该组分的水分扩散系数为常数即 D_1 恒定不变。故 Fick 第二定律可以表示为^[13]:

$$\frac{\partial X_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 X_1}{\partial^2 x}, \quad \forall t, 0 < x < e_1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_2 \frac{\partial X_2}{\partial x} \right), \quad \forall t, e_1 < x < e_1 + e_2, \quad (3)$$

式中:

X_1 ——高水分活度组分馅料的含水率, g/g;

X_2 ——低水分活度组分饼皮的含水率, g/g;

D_1 ——高水分活度组分馅料的扩散系数, m^2/s ;

D_2 ——低水分活度组分饼皮的扩散系数, m^2/s ;

e_1 ——高水分活度组分馅料的厚度, m;

e_2 ——低水分活度组分饼皮的厚度, m。

其中, D_1 不随含水率 X_1 变化; D_1 随含水率 X_2 的变化, 可根据 Tong & Lund 经验模型^[14]进行拟合:

$$D = D_0 \exp\left(\sum_{i=0}^n a_i X^i\right), \quad (4)$$

式中:

a_i ——模型参数;

D_0 ——模型参数;

n ——常数, 通常取 1~5 (根据拟合效果确定)。

通过采用线上法求解模型, 三点中央差分法对原微分方程处理, Fick 第二定律可以进一步表示为^[7]:

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{D_1}{\Delta x^2} [X_{1(x-\Delta x)} - 2X_{1x} + X_{1(x+\Delta x)}], \quad \forall t, 0 < x < e_1, \quad (5)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{D_{2(i)}}{\Delta x^2} [X_{2(x-\Delta x)} - \frac{D_{2(i)} + D_{2(i+1)}}{\Delta x^2} X_{2x} + \frac{D_{2(i+1)}}{\Delta x^2} X_{2(x+\Delta x)}], \quad \forall t, e_1 < x < e_1 + e_2. \quad (6)$$

在非渗透包装条件下水分沿厚度方向单向扩散, 故该方程的初始条件和外界边界条件为:

$$X_1(x, 0) = X_{10}, \quad (7)$$

$$X_2(x, 0) = X_{20}, \quad (8)$$

$$-D_1 \frac{\partial X_1}{\partial x} = 0, x = 0, \quad (9)$$

$$-D_2 \frac{\partial X_2}{\partial x} = 0, x = e_1 + e_2, \quad (10)$$

式中:

X_{10} ——馅料的初始含水率, g/g;

X_{20} ——饼皮的初始含水率, g/g。

假设在水分扩散过程中两组分接触面上的水分活度瞬时达到平衡, 两组分接触面的边界条件可以根据两组分的等温吸湿模型及水分迁移原理得到。

通过 Matlab 中 ode15s 算法结合式(2)~(8)及边界条件进行求解, 可求得饼皮(X_2)的含水率和时间的数值解。

非渗透包装条件下进行饼皮和馅料间水分扩散模型验证, 采用高阻隔性铝箔复合膜和有机带盖玻璃容器创造密闭环境, 试验过程中将样品放置于有机玻璃容器中并确保水分在二者间是单向扩散, 然后将高阻隔性铝箔复合膜用热封机封口, 再将密封好的样品放入温度为 23 ℃ 的恒温恒湿箱中。因前期水分扩散较快, 随着时间的推移水分扩散逐渐变慢, 故前期测量时间间隔短, 后期测量时间间隔长, 分别计算出对应时间下的含水率。设 3 次平行试验, 取平均值。

2 结果与分析

2.1 饼皮和馅料的等温吸湿模型

通过静态称重法及 Matlab 中 Levenberg and Marqu-

art 算法对等温吸湿试验数据拟合, 得到拟合曲线及对应的模型参数, 结果表明最适合表征饼皮和馅料的等温吸湿模型分别为 Lewicki 模型和 Peleg 模型^[15], 两种模型的拟合相关系数分别为 0.995 4、0.998 1, 拟合效果好。拟合曲线分别见图 2、3。

馅料的等温吸湿模型如式(11)。

$$X_1 = 3.638(a_w)^{43.35} + 0.06729(a_w)^{0.3036}. \quad (11)$$

饼皮的等温吸湿模型如式(12)。

$$X_2 = 0.0909\left(\frac{1}{a_w} - 1\right)^{-0.4212}. \quad (12)$$

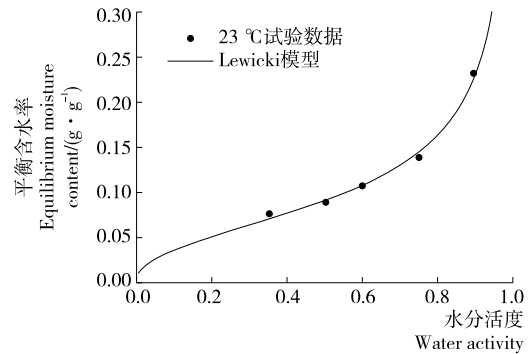


图2 饼皮等温吸湿模型拟合曲线

Figure 2 Fitting curves of isothermal hygroscopic model for crust

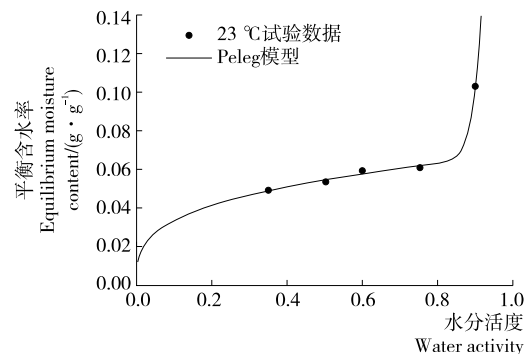


图3 馅料等温吸湿模型拟合曲线

Figure 3 Fitting curves of isothermal hygroscopic model for filling

2.2 米威化饼干饼皮的水分扩散系数模型

利用 Crank 无限大平板模型方程计算各湿度阶段的水分扩散系数, 再利用 Matlab 中 Levenberg and Marquart 算法对含水率和水扩散系数与 Tong & Lund 经验模型拟合, 得出最适合表征饼皮水分扩散系数的模型, 拟合曲线见图 4。

结果表明, $n=3$ 时拟合效果最好, 拟合指标 $R^2 = 0.9662$, 饼皮的水分扩散模型为:

$$D_{\text{eff}} = 1.657 \times 10^{-11} \times \exp(173.2X - 763.3X^2 - 200.7X^3). \quad (13)$$

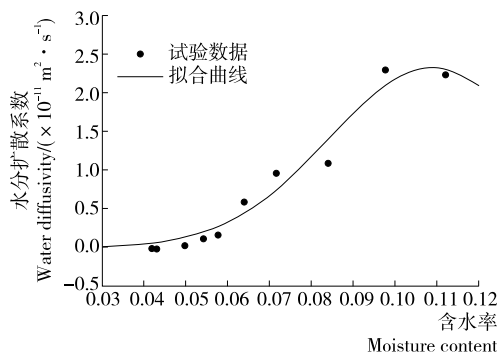


图 4 饼皮水分扩散系数和含水率的关系
Figure 4 Moisture content variation of effective diffusivity value of the crust

由图 4 可知,饼皮含水率在 4%~12% 时,饼皮的有效扩散系数为 $1 \times 10^{-12} \sim 2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$;饼皮的扩散系数随含水率的增大呈先增加后下降趋势,主要是由于初期含水率低,饼皮内部结构孔隙会急剧吸水,导致水分扩散系数急剧增加,后阶段由于含水率的增加导致饼皮内部结构发生改变,水分的增加会降低饼皮的孔隙率,水分扩散由气态扩散转化为液态扩散,故扩散速率会降低^[14]。

2.3 米威化饼干二组分间水分扩散模型验证

通过 Fick 第二定律结合各组分初始条件、边界条件及等温吸湿模型求得各组分间水分扩散的含水率与时间变化的关系并与试验数据进行比较。试验过程中仅对含水率边界为 0.12 g/g 前的理论模型部分进行验证。

分析得出,含水率介于 0.02~0.12 g/g 时,试验数据和理论模型的吻合度高,相关系数 $R^2 = 0.978 5$,具有较高的可靠性,表明该理论模型能很好地反映米威化饼干中饼皮的水分扩散。通过该模型的建立可以为米威化饼干的包装材料选择及防潮保质、货架期的预测提供指导。

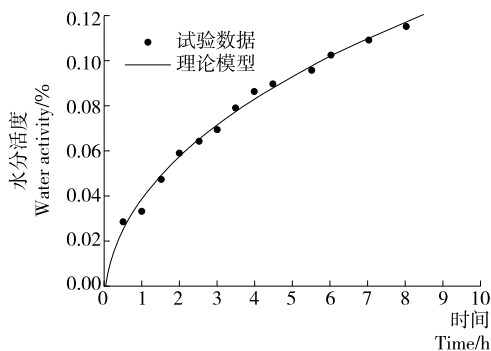


图 5 饼皮水分吸附动力学试验数据和数值解模型比较
Figure 5 Comparison between the experimental and model-calculated values of moisture content in crust

3 结论

在非渗透条件下通过结合米威化饼干各组分的等温吸湿模型,利用 Matlab 求解 Fick 第二定律的偏微分方程得出饼皮含水率 and 时间的数值解模型;并采用米威化饼干中的馅料及饼皮进行水分吸附动力学试验验证。结果表明,含水率介于 0.02~0.12 g/g 时,理论模型与试验数据吻合性高,证明该方法对米威化饼皮水分扩散系数模型的预测具有较高的可靠性。文章仅考虑非渗透条件下水分在组分间的扩散,下一步将研究渗透包装条件下包装外界环境中水分扩散到食品中,为多组分食品防潮包装货架期的预测提供依据。

参考文献

- [1] LABUZA T P, KAREL S M. Mathematical models for optimization of flexible film packaging of foods for storage[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(1): 150-155.
- [2] 王雪媛,高琨,陈芹芹,等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 275-281.
- [3] 陈思羽,吴文福,徐岩,等. 玉米果穗在自然通风过程中水分迁移的动力学分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 277-282.
- [4] 李兴军,任强,张来林,等. 重量法研究大豆水分吸附速率和有效扩散系数[J]. 食品工业科技, 2015, 36(21): 52-59.
- [5] SOURAKI B A, GHAFARI A, BAYAT Y. Mathematical modeling of moisture and solute diffusion in the cylindrical green bean during osmotic dehydration in salt solution[J]. Food & Bioproducts Processing, 2012, 90(1): 64-71.
- [6] SHIRKOLE S S, SUTAR P P. Modeling sorption phenomena and moisture migration rates in paprika (*Capiscum annum L.*) using physicochemical characteristics[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 55(2): 678-688.
- [7] CHU Zhen-hui, LU Li-xin, WANG Jun. Mathematical model for water transfer in multidomain food packed in permeable packaging [J]. Packaging Technology & Science, 2013, 26(S1): 11-22.
- [8] 陈亚慧,卢立新,王军. 非渗透包装下双组份食品间水分扩散模型研究[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 32-35.
- [9] 郝发义. 多组分食品防潮包装货架期的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [10] RISBO J. The dynamics of moisture migration in packaged multi-component food systems II: Analytical solutions and comparison to experimental moisture transfer rate results[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 58(3): 247-252.
- [11] O'CONNOR L J, FAVREAU-FARHADI N, BARRETT A H. Use of edible barriers in intermediate moisture food systems to inhibit moisture migration[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, DOI: 10.1111/jfpp13512.

(下转第 236 页)

证时间和人数岂是现代特膳验证方法可比拟的?

(4) 对传统中医药膳的认识不足。一是无数例中医药膳调理人体机能甚至治疗疾病的成功案例,以及近年来各地方兴未艾的食疗产业,都被有意或无意忽视,明显违背科学精神。二是中医药膳食品其适口性甚至作为美食的载体,是其他特膳所不具备的优点。三是国内外对特膳的规范主要注重其配方的组分和组成,极少有对加工过程、工艺条件的要求。而药膳作为一种特殊的食品,在烹制方法上也有其特点,除了一般的食品烹制方法外,还要根据中药炮制理论来进行原料的处理。四是传统中医药膳食品有着极其广泛的民间基础和认知,其产品的市场推广将明显易于新开发的那些特膳产品,是将中医药膳食品快速融入特膳产业、壮大中国特膳行业极为有利的基础条件。

5 产业融合发展的路径

(1) 组织中国知名中医专家从现有的传统药膳方剂中筛选公认、临床验证过的、无毒副作用、有显著养生或治疗作用的药膳方剂,并针对这些方剂制定原材料标准、炮制工艺标准。同时,允许其直接作为特膳食品进行生产及销售。药膳使用者要求经中医四诊诊断后,由中医师开具药膳配方。严格药膳食用的剂量和使用时间。

(2) 借助现代毒理学、药理学、营养学,以及生物膜技术、超临界萃取、超微粉碎等高新技术以及先进的剂型及辅料技术,引进现代分析、现代信息技术等手段,促进中医药膳产业的现代化^[18],实现中医药膳“食疗”的实用目标。

(3) 在各级食品安全机构、相关药膳评审委员会中增加资深中医学专家委员,尤其是中西医结合的跨界专家的介入,可以增强中医中药界在特膳产业中的话语权。

(4) 设立专项基金,鼓励西医、中医及食品科学家联合组建团队开展中医药膳的基础研究及临床应用研究的工作。例如,可以在医院食堂设置药膳灶,可以科室病房药膳食疗灶为重点,通过药膳食疗调理患者的体质,配合临床治疗,来提高疾病的治愈率,在临床上充分发挥作用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 预包装特殊膳食用食品标签[EB/OL]. (2014-05-02)[2019-03-15]. www.nhfp.gov.cn.
- [2] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 解读《解读中国防治慢性病中长期规划(2017~2025 年)》[EB/OL]. (2017-02-08)[2019-03-10]. www.nhfp.gov.cn.
- [3] 特膳食品产业潜力初现技术含量亟待提高[EB/OL]. (2010-07-08) [2019-03-10]. http://www.foods1.com/news/947898.
- [4] 钱姝静,徐建云.“上医治未病”在大健康时代中的学脉传承

与实践开新[J]. 中国中医基础医学杂志, 2018, 24(3): 337-338.

- [5] 韩军花. 中国特殊膳食用食品标准体系建设[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(1): 1-5.
- [6] 朱佳妮,张振宇,杨帆,等. 老年住院人膳食多样人与营养状况的关系[J]. 肠外与肠内营养, 2018, 25(3): 142-146.
- [7] 单峰,黄璐琦,郭娟,等. 药食同源的历史和发展概况[J]. 生命科学, 2015, 27(8): 1 061-1 069.
- [8] 安宜沛. 慢性心衰患者膳食现况调查及中医药膳调养研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2015: 4.
- [9] 龚光明,刘桢,张翥宇,等. 基于“治未病”理论以药膳馒头为主综合干预糖尿病前期的临床观察[J]. 成都中医药大学学报, 2018, 41(2): 25-28.
- [10] 赵军宁,华桦,杨安东,等. 广义中药学概论: 从中医“治未病”到中药大健康产业[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(21): 4 177-4 181.
- [11] 王达,王雪翎,陈宝贵. 浅谈药膳食材按体质分类的具体方法[J]. 天津中医药, 2011, 28(1): 54-55.
- [12] 韩军花. 中国特殊膳食用食品标准体系建设[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(1): 1-5.
- [13] 徐瑞平,吴海磊,徐兴大. 特殊膳食用食品与保健食品的认知行为调查分析[J]. 旅行医学科学, 2011(1): 38-41.
- [14] 袁丽华,许静,仇锦春. 个体化肠外营养治疗中儿科临床药师的作用[J]. 实用药物与临床, 2018, 21(8): 940-943.
- [15] KAISER M J, BAUER J M, RAMSCH C, et al. Frequency of malnutrition in older adults: a multinational perspective using the mini nutritional assessment [J]. J Am Geriatr Soc, 2010, 58(9): 1 734-1 738.
- [16] 夏新斌,杨勇,吴玉冰,等. 中医药膳食品认证管理现状探讨[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 207-210.
- [17] 姚菊峰,郭艳,董怡,等. 中医食疗的研究进展[J]. 解放军护理杂志, 2012(3): 38-39, 59.
- [18] 郑帅,郑艳,刘张林. 中国药膳的发展与思考[J]. 现代药物与临床, 2009, 24(2): 95-97.

(上接第 150 页)

- [12] ARABOSSE P, RODIER E, FERRASSE J H, et al. Comparison between static and dynamic methods for sorption isotherm measurements[J]. Drying technology, 2003, 21(3): 479-497.
- [13] BARTON G. The mathematics of diffusion 2nd edn[J]. Physics Bulletin, 1975, 26(11): 500-501.
- [14] GUILLARD V, BROYART B, BONAZZI C, et al. Moisture diffusivity in sponge cake as related to porous structure evaluation and moisture content [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(2): 555-562.
- [15] 程学雨,钱奕含,卢立新. 米威化饼干二组分食品的等温吸湿特性及模型表征[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 144-148.