DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.10.007

面包吸附等温线的测定及测定方法比较

Determination of bread adsorption isotherm and comparison of determination methods

董 磊 肖 满 姜发堂

DONG Lei XIAO Man JIANG Fa-tang

(湖北工业大学生物工程与食品学院菲利普斯亲水胶体研究中心,湖北 武汉 430068)

(*Glyn O Philips Hydrocolloid Research Centre at HUT, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei* 430068, *China*)

摘要:目的:研究不同方法对测定面包吸附等温线的影响及在 25 ℃下面包含水率与水分活度的关系。**方法:**采用饱和盐溶液法(SSS)、动态水分转移规律分析仪法(DWT)和动态蒸汽吸附法(DVS)测定面包在 25 ℃下和 0.100～0.902 水分活度范围内的水分吸附等温线,采用 7 种吸附模型拟合结果。**结果:**面包的吸附等温线属于Ⅱ型曲线。采用 SSS 法和 DWT 法测定整个面包吸附等温线的最佳拟合模型分别为 Halsey 模型和 Peleg 模型;采用 DVS 法测定面包瓤和面包皮吸附等温线的最佳拟合模型分别是 Halsey 模型和 Oswin 模型。同时,SSS 法不限制面包体积和质量,但试验用时较长且高湿度下难以提供稳定湿度环境;DWT 法不限制面包体积和质量且能提供稳定的湿度条件;相对于 SSS 法和 DWT 法,DVS 法尽管可快速得到面包水分吸附等温线的结果,但该方法限制了面包的质量和体积且无法同时进行平行试验。**结论:**DWT 法更适合面包吸附等温线的测定。

关键词:面包;吸附等温线;饱和盐溶液法;动态水分转移规律分析仪;动态蒸汽吸附法

Abstract: Objective: This study focuses on investigating the effects of different methods on the determination of adsorption isotherm of bread and the relationship between moisture content and water activity of bread at 25 ℃. **Methods:** The water adsorption isotherms of bread at 25 ℃ and in the range of 0.100～0.902 water activity (A_W) were measured by saturated salt solution method (SSS), dynamic water transfer analyzer (DWT) and dynamic vapor adsorption method (DVS), and then seven different kinds of adsorption models were used to fit the results. **Results:** The adsorption isotherm of the bread belongs to the II curve. Halsey model and Peleg model are the best fitting models for measuring the whole bread adsorption isotherm by SSS method and DWT method respectively. Halsey model and Oswin model were the best fitting models for determining the adsorption isotherms of bread crumb and crust by DVS method. Though the SSS method could not limit the volume and quality of the bread, it is time-consuming and unstable in high-humidity condition. However, the DWT method could provide stable humidity conditions without limiting the volume or the quality of the bread. Compared with the SSS method and the DWT method, the DVS method could obtain the result quickly, but the quality and volume of the bread were limited. The results provide a theoretical basis for the choice of the adsorption isotherm measurement method and the quality control and storage stability of bread. **Conclusion:** DWT method is more suitable for the determination of bread adsorption isotherm.

Keywords: bread; adsorption isotherm; saturated salt solution method; dynamic water transfer law analyzer method; dynamic vapor adsorption method

吸附等温线在食品中是用来反映水分含量与水分活度关系的曲线,其直接反映了食品在不同环境条件下的水分转移行为,常被用于食品行业的 4 个方面:① 食品混合(确定如何组合食品以防止水分在组合食品的不同成分之间转移);② 食品干燥(确定建立最佳加工条件以达到节约能源的目的);③ 食品包装(确定包装材料的耐湿性及保证包装食品的品质);④ 食品贮藏(确定食品的保质期)。

面包是一种常见食品。水分又是面包制作时必不可少的成分,水分的多少直接影响面包的软硬性[1],且与面包紧致率呈反比[2],同时对面包口感评估、面包贮藏及面

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31671827)

作者简介:董磊,男,湖北工业大学在读硕士研究生。

通信作者:姜发堂(1964—),男,湖北工业大学教授,博士。

E-mail:jiangft@mail.hbut.edu.cn

收稿日期:2021-02-23

包新鲜度的评价十分重要,是影响面包老化的重要因素之一[3-4]。将面包水分控制在合理范围可保持面包的柔软度与湿润度,且可延长面包贮藏期[5]。目前,国内外对面包的等温线研究较少,Lind 等[6]采用饱和盐溶液法测定了面包皮和瓤的吸附等温线,观察到面包皮和瓤在水分吸附上存在差异并对这种差异现象进行了解释;Marcel 等[7]通过 VTI-SGA 100 蒸汽吸附分析仪对面包皮颗粒进行了水分吸附试验,使用包括 Fickian 扩散模型和经验指数模型在内的各种模型对逐步和振荡重量吸附试验进行了拟合;Besbes 等[8]采用动态蒸汽吸附(DVS)对面包瓤与皮之间的水蒸气吸附特性进行研究,发现面包瓤与皮的吸附性能受面包基质的影响。但相关研究都局限于面包局部吸附等温线的测定,针对整个面包吸附等温线的测定和采用不同方法测定吸附等温线的比较研究鲜见报道。

试验拟采用动态水分转移规律分析仪(DWT)、饱和盐溶液法(SSS)、动态蒸汽吸附法(DVS)3 种方法测定面包在 25 ℃下的吸附等温线,并对 3 种方法的测定结果进行比较,旨在为面包食品的品质控制和贮藏条件的选择提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

面包:法式小面包,(19±1) g/个,达利园食品有限公司;

电热恒温干燥箱:DHG-9.30A 型,上海精宏实验设备有限公司;

电子天平:FA3204B 型,上海天美天平仪器有限公司;

动态蒸汽吸附仪:DVS Intrinsic Plus 型,英国 Surface Measurement Systems 公司;

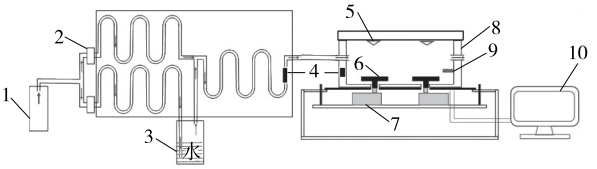
动态水分转移规律分析仪:SM-M-4-01 型,实验室自制;

游标卡尺:530-101 型,日本三丰公司。

1.2　试验方法

1.2.1　SSS 法测定面包吸附等温线　制备 9 种饱和盐溶液(LiCl、CH_3COOK、$MgCl_2$、K_2CO_3、NaBr、KI、NaCl、KCl 和 $BaCl_2$),相应的水分活度分别为 0.113,0.230,0.324,0.432,0.576,0.689,0.751,0.836,0.902,将饱和盐溶液分别盛于不同的干燥器中,取大小相同的小面包置于干燥器中。干燥器密封后放入电热恒温干燥箱,电热恒温干燥箱设定温度为 25 ℃,精度为±1 ℃。为防止微生物生长,在高湿度条件下(水分活度>0.6),将少量百里香酚加入干燥器内[9]。定期测定面包质量,当面包的重量变化小于其初始质量的 0.1%时,视为达到吸湿平衡。

1.2.2　DWT 法测试面包吸附等温线　DWT 仪器工作示意图如图 1 所示,在测定吸附等温线时,通过计算机程序设定所需的相对湿度或一系列相对湿度值,相对湿度通过两个质量流量控制器自动控制,一个用于控制干燥空气流量,另一个用于控制水饱和空气流量,二者按一定比例混合以达到选定的相对湿度。通过记录样品质量的变化得到样品在不同湿度下的水分吸附结果,据此绘制出吸附等温线。试验操作:取整个小面包置于 DWT 仪器样品盘上,设定仪器温度为 25 ℃,湿度分别为 10%,20%,30%,40%,50%,60%,70%,80%,90%。仪器称重系统实时获取样品重量并记录,如果连续 3 h 样品的重量变化≤0.002 g,视为达到水分吸附平衡。



1. 氮气瓶　2. 质量流量控制器　3. 蒸汽加湿器　4. 电加热板　5. 摄像头　6. 样品盘　7. 称重模块　8. 测试腔　9. 温度/湿度传感器　10. 计算机

图 1　动态水分转移规律和水分活度仪工作示意图

Figure 1　Dynamic water transfer law and water activity meter working diagram

1.2.3　DVS 法测定面包吸附等温线　由于 DVS 仪的样品最大量程为 200 mg,此方法不能对整个面包的等温吸附线进行测定,需要对面包样品进行取样处理。分别取面包的皮和瓤。面包皮选取规格为 10 mm×10 mm×1.80 mm,面包瓤选取规格为 10 mm×10 mm×10 mm。将样品放于 DVS 仪器内部的微量天平中,仪器内相对湿度设定程序为相对湿度 10%,20%,30%,40%,50%,60%,70%,80%,90%,仪器内部温度设定保持在 25 ℃恒定,每隔 60 s 记录样品质量一次,当样品的质量变化低于 0.002%/min 时判定样品达到吸附平衡。

1.3　模型拟合

选取 7 个常用于食品的吸湿等温线模型(见表 1),对面包的吸附等温线进行拟合。

1.4　统计分析

采用软件 Origin 2017 进行模型拟合,数据拟合度采用调整后的 R^2、平均绝对百分比误差(E)和标准误差(S_E)来判定,R^2 越高、E 和 S_E 越低,拟合精度越高;反之,模型拟合精度较低。分别由式(1)和式(2)计算 E 和 S_E 的值。

$$E=\frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{M_{exp}-M_{pre}}{M_{exp}}\right|, \tag{1}$$

$$S_E=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_{exp}-M_{pre})^2}{n-1}}, \tag{2}$$

表 1　吸附等温线拟合模型†

Table 1　Sorption isotherms models for equilibrium moisture

模型	模型表达式	参考文献
GAB	$M=\frac{M_0CKa_w}{(1-Ka_w)}(1-Ka_w+CKa_w)$	[10]
BET	$M=\frac{M_0C_ba_w}{(1-a_w)}(1-a_w+C_ba_w)$	[11]
Peleg	$M=A(a_w)^{C_1}+B(a_w)^{C_2}$	[12]
Oswin	$M=A(\frac{a_w}{1-a_w})^B$	[13]
Smith	$M=A+B\lg(1-a_w)$	[14]
Ighesias and Chirife	$M=A+B\left(\frac{a_w}{1-a_w}\right)$	[15]
Halsey	$M=\left[\frac{-A}{\ln(a_w)}\right]^{1/B}$	[16]

† M 为干基含水率，%；M_0 为单层含水率，%；a_w 为水分活度；C、K、C_b、C_1、C_2、A、B 均为模型常数。

式中：

E——平均绝对百分比误差，%；

S_E——标准误差，%；

M_{exp}——测量值，kg/kg·DB；

M_{pre}——通过拟合方程估算的值，kg/kg·DB；

n——数据点的数量，$n=9$。

2　结果与讨论

2.1　吸附等温线

2.1.1　饱和盐溶液法测定面包吸附等温线　图 2 表明面包的平衡含水率随水分活度的增加而增大。当水分活度＜0.751 时，平衡含水率虽然随着水分活度增加而增大，但其增加幅度明显低于水分活度＞0.751 时的。这是因为面包属于多孔结构食品，富含许多微孔，这些微孔随着水分活度增大，微孔上的水层越来越厚，凝结水在空隙处形成球面，随附加压强增大液体表面实际压力减少，表现实际水分含量增加变快[17]。由图 2 可知，在水分活度＜0.751 时，面包的吸附等温线表现出良好的重现性，水分活度＞0.751 后，面包吸附性的平行试验结果出现一定差异。这可能是面包个体差异（如面包空隙率）在高湿度下的吸附情况不同。

图 2 中可以看出面包吸附等温线呈 S 型，根据国际纯粹和应用化学联合会（IUPAC）对吸附等温线的分类[18]，面包吸附等温线属于Ⅱ型吸附等温线。

2.1.2　DWT 法测定面包吸附等温线　整个面包在 10%～90%的湿度环境下达到吸附平衡所需时间为 60～140 h（图 3），较 SSS 方法（需要 27 d）快很多。这是因为 DWT 法无需开箱测试，有助于保持测试腔中温度和湿度的稳定，减少人为称量过程的干扰。DWT 法与 SSS 法获得的结果类似，整个面包的初始平衡含水率约为 2.7%。在 25 ℃时面包的平衡含水率随水分活度的增加而增加（图 4），可能是由于面包中碳水化合物和蛋白质的亲水性所致。当水分活度为 0.1～0.7 时，随着水分活度的增加平衡含水率缓慢增加；当水分活度＞0.7 时，平衡含水率随之增加快速增大。

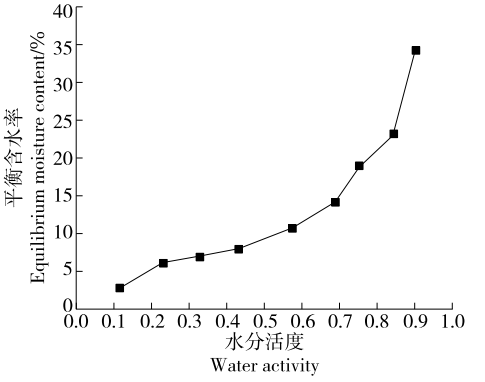


图 2　SSS 法测量的 25 ℃下面包的水分吸附等温线

Figure 2　Moisture adsorption isotherm of bread measured by SSS at 25 ℃

2.1.3　DVS 法测定面包皮和面包瓤的水分吸附等温线

面包皮和面包瓤样品的结果表明其属于Ⅱ型等温线的典型 S 形曲线（图 5），与 Lind 等[6]和 Besbes 等[8]测定的结果一致。由图 5 可知，在相同温度下，随着水分活度的增加，面包皮和面包瓤的平衡含水率也随之增加。在相同的水分活度下，面包瓤的平衡含水率高于面包皮，表明面包瓤比面包皮具有更强的吸湿性。面包皮与面包瓤吸湿性差异可以用面包烘烤过程中发生的物理和化学变化来解释：① 面包烘烤过程中发生淀粉糊化，导致外壳中存在连续的蛋白质相和不连续的非糊化淀粉相，而面包瓤和内壳则存在与蛋白质网络相关的糊化淀粉网络[19]；② 由于面团内部气体膨胀导致整个面团体积的增加，因此面包外皮的结构变得更为致密，形成了干燥的表面，该结构影响了面包外表皮对水分的吸附作用；③ 烘焙过程中面包外层的热暴露更加明显，并且由于烘烤过程中外壳和内瓤之间存在温差，影响了蛋白质和碳水化合物在面包皮和面包瓤中的含量，导致蛋白质在面包皮的含量明显高于面包瓤，不能被淀粉分解酶降解的糖在面包皮中的含量明显高于面包瓤[6]，造成面包皮的吸湿性弱于面包瓤。

2.1.4　3 种方法吸附等温线的比较　用 3 种方法测定了 25 ℃时面包、面包皮和面包瓤的吸附等温线（图 6），其均为 S 形曲线。在恒定温度 25 ℃条件下，面包、面包皮和

面包瓤平衡含水率随水活度的增加而增加。比较 SSS 法和 DWT 法测定曲线,发现当水分活度为 0.1～0.7 时,两种方法测得面包的吸附等温线几乎完全重叠(图 6),当水分活度＞0.7 时,DWT 法测定的面包平衡含水率值高于 SSS 法测定的,这是因为盐溶液相对湿度的不确定性在高相对湿度值区间更为显著[20]。高相对湿度下,不确定

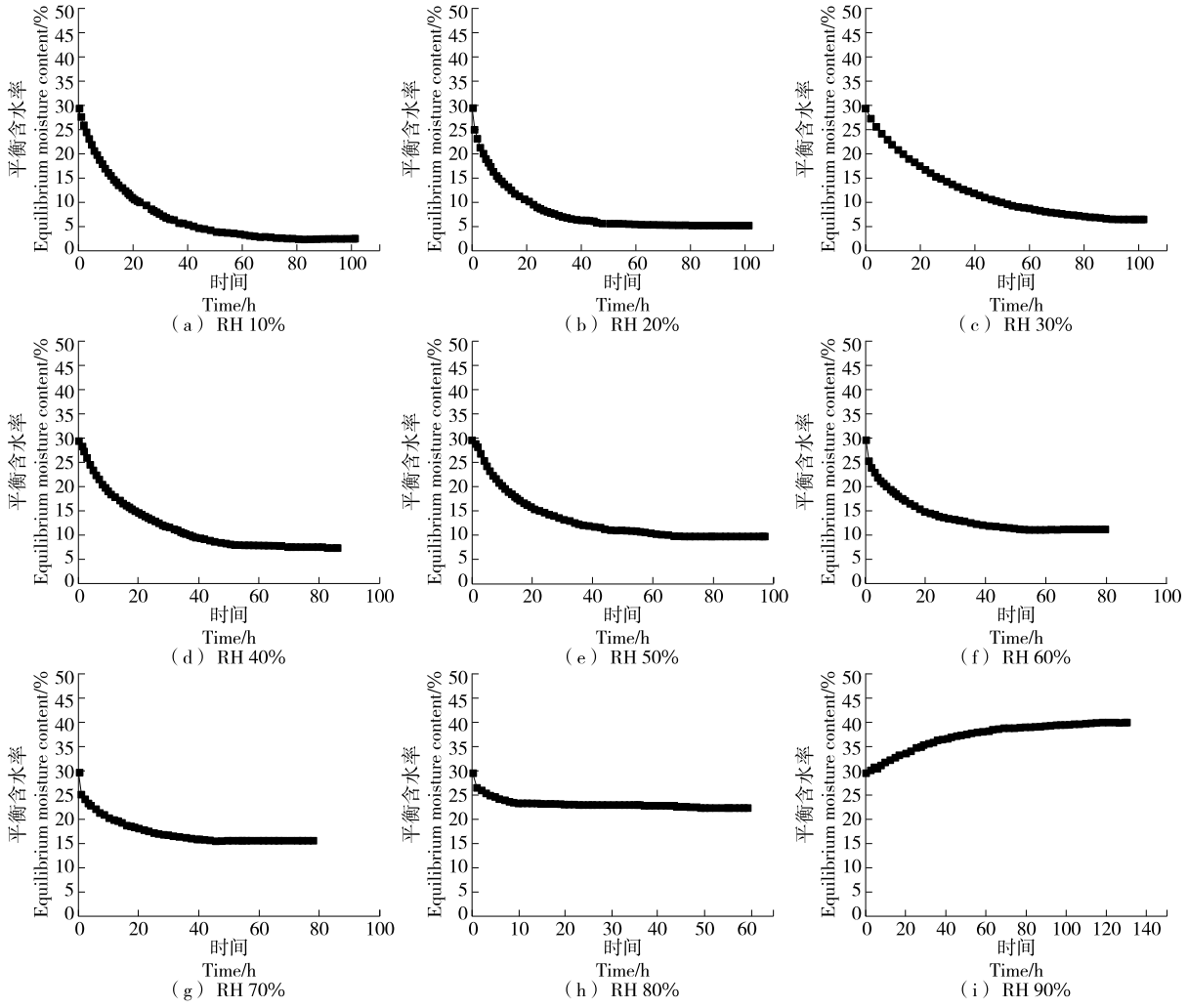


图 3　DWT 法测量的 25 ℃下全面包在不同相对湿度下的吸收率

Figure 3　Absorption rates of whole bread at different relative humidities measured by DWT at 25 ℃

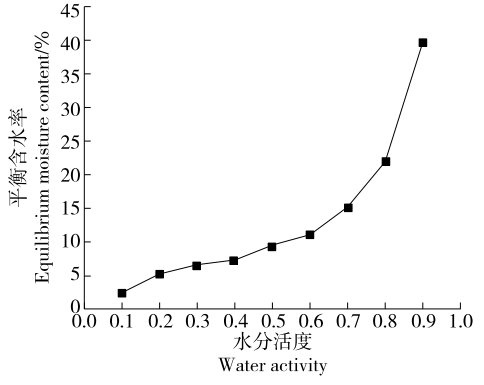


图 4　DWT 法测量的 25 ℃下面包水分吸附等温线

Figure 4　Moisture adsorption isotherm of bread measured by DWT at 25 ℃

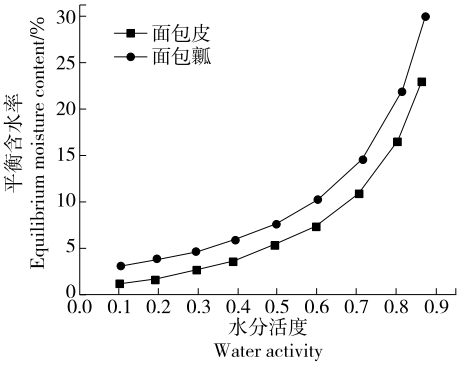


图 5　DVS 法测量的 25 ℃下面包皮和面包瓤的水分吸附等温线

Figure 5　Moisture adsorption isotherm of bread crust and crumb measured by DVS at 25 ℃

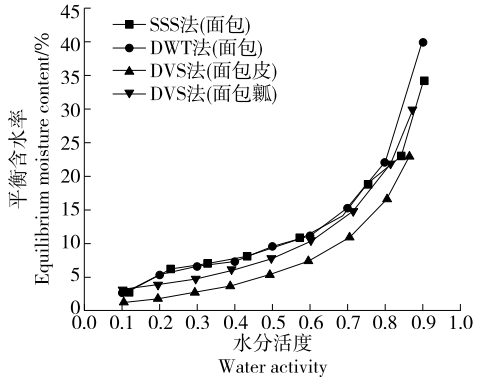


图 6　不同方法测定的面包样品的水分吸附等温线

Figure 6　Moisture adsorption isotherm of bread samples determined by different methods

度的增加并非来源于面包或人员操作，而是因为高湿条件下饱和盐溶液难以持续提供稳定的环境湿度[21]。虽然 DVS 法在高湿度下不存在此类问题，但从图 6 可知其结果仍与 DWT 法存在一定差异，该差异的产生可能源于样品代表性的影响，具体解释为：DVS 试验时，由于取样重量的限制用局部取样的样品代替整个面包样品进行试验，但面包不同部位孔洞大小不一致，从面包皮到面包瓤，孔洞明显变大，故局部取样无法代表整体样品进行试验。DWT 法测量了整个面包的吸附等温线，而 DVS 法则分别测量面包瓤和面包皮的吸附等温线，从试验结果来看面包瓤和面包皮的吸附情况难以代表整个面包的吸附情况。

2.2　吸附等温线的模型拟合

采用 7 种常见的数学模型，在水分活度 0.100～0.902 的范围内对面包的吸附等温线进行拟合，各模型的表达模式参数和统计学参数如表 2 所示。根据估计的标准误差(S_E)，平均绝对百分比误差(E)和调整后的 R^2，使用不同的模型对试验数据进行了分析。R^2 越高，E 和 S_E 值越低，表明拟合优度越好。依据判断标准，综合判断，通过表 2 及图 2、图 3、图 5 和图 6 可以看出，采用 SSS 法测定整个面包的数据，数学模型拟合度为 Halsey＞Oswin＞GAB＞Peleg＞Smith＞Ighesias and Chirife＞BET，使用 DWT 方法测得整个面包数据，模型拟合程度为 Peleg＞GAB＞Halsey＞Oswin＞Ighesias and Chirife＞BET＞Smith，使用 DVS 法测定面包瓤的数据，其拟合模型是 Halsey＞GAB＞Peleg＞Oswin＞BET＞Ighesias and Chirife＞Smith，采用 DVS 法测定面包皮，其数据拟合模型为 Oswin＞GAB＞Peleg＞BET＞Halsey＞Ighesias and Chirife＞Smith。综上，采用不同的方法测定面包吸附等温线，描述试验数据的最佳模型是不同的，表明试验方法对测定结果具有一定影响。从表 2 中可以看出，无论采什么方法测定面包整体或局部取样的吸附等温线，其曲

表 2　对 25 ℃下面包吸附数据拟合的不同模型的参数估计

Table 2　Estimated parameters of the different models fitted to the sorption data for bread at 25 ℃

模型	参数/常量	DWT	SSS	DVS	
				面包瓤	面包皮
GAB	M_0	5.051 84	5.378 43	4.666 90	4.267 32
	C	13.472 98	13.108 22	8.331 96	2.197 69
	K	0.971 77	0.934 18	0.970 30	0.959 56
	R^2	0.998 05	0.988 81	0.998 19	0.999 79
	S_E	0.509 80	1.057 10	0.392 22	0.106 78
	E	6.504 08	7.932 72	4.581 93	3.137 01
BET	M_0	4.168 08	3.674 27	3.943 05	3.305 63
	C_b	62.456 89	1.778 15	21.974 06	4.308 88
	R^2	0.986 65	0.934 23	0.992 92	0.996 12
	S_E	1.334 40	2.562 30	0.775 83	0.461 76
	E	14.255 18	20.345 83	4.827 59	6.785 19
Peleg	A	63.967 12	46.591 38	44.511 35	37.510 41
	B	15.304 76	17.344 88	10.438 15	12.050 67
	C_1	8.658 11	9.306 68	5.938 20	7.460 15
	C_2	0.723 08	0.808 08	0.596 97	1.186 62
	R^2	0.998 26	0.985 25	0.998 08	0.998 93
	S_E	0.482 30	1.213 50	0.403 41	0.242 26
	E	4.706 33	6.189 69	4.056 80	5.496 32
Oswin	A	9.231 63	9.563 36	8.114 77	5.502 60
	B	0.657 90	0.563 60	0.669 42	0.771 33
	R^2	0.991 74	0.989 63	0.996 03	0.999 81
	S_E	1.049 80	1.017 30	0.580 97	0.101 24
	E	10.229 46	7.362 89	8.169 50	2.289 96
Smith	A	−0.479 75	0.957 09	−0.226 57	−1.419 01
	B	−36.033 82	−30.069 54	−30.738 63	−25.795 67
	R^2	0.942 56	0.966 99	0.967 45	0.972 57
	S_E	2.768 00	1.815 20	1.663 01	1.227 98
	E	22.096 59	10.969 08	17.759 48	25.680 00
Ighesias and Chirife	A	4.660 43	5.635 76	3.490 95	1.566 69
	B	4.028 23	3.266 67	3.976 42	3.485 76
	R^2	0.987 58	0.962 47	0.990 02	0.989 54
	S_E	1.287 10	1.935 50	0.921 04	0.758 21
	E	15.426 47	18.390 96	9.259 62	17.056 20
Halsey	A	11.733 63	18.888 94	8.758 49	4.176 86
	B	1.279 00	1.475 74	1.224 62	1.065 05
	R^2	0.997 56	0.989 94	0.998 79	0.994 73
	S_E	0.570 70	1.002 10	0.320 02	0.538 40
	E	7.980 29	9.605 54	2.890 68	14.605 92

用线类型是一致的,均为Ⅱ型曲线,同时 GAB 方程拟合常数计算结果均为 $0<k<1$ 且 $C>2$,据此常数结果也可判定面包产品的吸附等温线为Ⅱ型曲线[22]。

3　结论

3 种方法测定的面包吸附等温线均属于Ⅱ型曲线。DVS 的时效性非常好,但使用此方法可以测试的质量和体积是有限的,质量较大的样品无法通过 DVS 方法测定吸附等温线。面包皮和面包瓤样品的 DVS 吸附曲线不同,表明其不能代表整个面包的吸附情况。SSS 方法适用于完整面包样品的吸附等温线测定,但测定过程中存在较多人为干扰操作,干燥器需经常打开进行样品称重操作,对干燥器内稳定的湿度环境造成影响,且该影响在相对湿度>80%时变得更加明显,对高湿度下面包的吸附情况产生影响。DWT 法中将面包限制在测试室中,提供了稳定温湿度环境,并进行自动化称量,不存在试验周边环境及操作人员对试验结果的影响,同时对质量较大的样品可以进行大容量多平行的测试如整个面包,可有效提高试验效率和试验结果的可靠性。

参考文献

[1] 赵俊芳, 吕银德, 豆康宁, 等. 面包加工工艺中水分的变化研究[J]. 食品研究与开发, 2013(17): 1-3.
ZHAO J F, LU Y D, DOU K N, et al. Study on the change rules of moisture in the processing of bread[J]. Food Research and Development, 2013(17): 1-3.

[2] LEVELS B C D. Effect of native lipids, shortening, and bread moisture on bread firming[J]. Cereal Chem, 1988, 65(5): 398-401.

[3] 熊凤萍, 赵亚军. 影响面包老化的因素[J]. 食品与机械, 1998(3): 3-5.
XIONG F P, ZHAO Y J. Influncing factors of the staling of bread[J]. Food & Machinery, 1998(3): 3-5.

[4] 邵颖, 魏宗烽. 影响面包老化因素研究进展[J]. 粮食与油脂, 2009(7): 9-10.
SHAO Y, WEI Z F. Research progress on bread staling[J]. Cereals & Oil, 2009(7): 9-10.

[5] 张守文. 面包科学与加工工艺[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 151-153.
ZHANG S W. Bread science and processing[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2011: 151-153.

[6] LIND I, RASK C. Sorption isotherms of mixed minced meat, dough, and bread crust[J]. Journal of Food Engineering, 1991, 14(4): 303-315.

[7] MEINDERS M B J, VLIET T V. Oscillatory water sorption dynamics of bread crust[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2 814-2 821.

[8] BESBES E, JURY V, MONTEAU J Y, et al. Water vapor transport properties during staling of bread crumb and crust as affected by heating rate[J]. Food Research International, 2013, 50(1): 10-19.

[9] MOREIRA R, CHENLO F, PRIETO D M, et al. Water adsorption isotherms of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(3): 1 077-1 082.

[10] BERG C. Description of water activity of food for engineering purposes by means of the GAB model of sorption[J]. Engineering Science in the Food Industry, 1984, 1: 119-131.

[11] BRUNAUER S, EMMETT P H, TELLER E. Adsorption of gases in multimolecular layers[J]. Journal of the American Chemical Society, 1938, 60(2): 309-319.

[12] CHEN Chia-chung, MOREY R V. Equilibrium relativity humidity (ERH) relationships for yellow-dent corn[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(3): 999-1 006.

[13] OSWIN C R. The kinetics of package life Ⅲ: The isotherm[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1946, 65(12): 419-421.

[14] SMITH S E. The sorption of water vapor by high polymers[J]. Journal of the American Chemical Society, 1947, 69(3): 646-651.

[15] IGLESIAS H A, CHIRIFE J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1976, 11(2): 109-116.

[16] HALSEY G. Physical adsorption on non-uniform surfaces[J]. The Journal of Chemical Physics, 1948, 16(10): 931-937.

[17] 兰景波, 康志茹. 固态食品吸湿滞后现象的形成机理[J]. 食品科学, 1992(3): 1-4.
LAN J B, KANG Z R. Formation mechanism of hygroscopic hysteresis of solid food[J]. Food Science, 1992(3): 1-4.

[18] ROUQUEROL J, ROUQUEROL F, LLEWELLYN P, et al. Adsorption by powders and porous solids[J]. Vakuum in Forschung und Praxis, 2010, 11(3): 191.

[19] PRIMO-MARTÍN C, PIJPEKAMP A V D, VLIET T V, et al. The role of the gluten network in the crispness of bread crust[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(3): 342-352.

[20] WESTURLUND E, THEANDER O, ÅMAN P. Effects of baking on protein and aqueous ethanol-extractable carbohydrate in white bread fractions[J]. Journal of Cereal Science, 1989, 10: 139-147.

[21] FENG C, JANSSEN H, FENG Y, et al. Hygric properties of porous building materials: Analysis of measurement repeatability and reproducibility[J]. Building & Environment, 2015, 85(2): 160-172.

[22] RUDY B, MATTHIEU L, JEAN-EMMANUEL A. Comparison of the saturated salt solution and the dynamic vapor sorption techniques based on the measured sorption isotherm of barley straw[J]. Construction & Building Materials, 2017, 141: 140-151.