

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2019.01.012

马铃薯全粉平衡水分吸附等温线与 吸附等热研究

文韵漫¹, 李兴军², 陈治天³, 杨 瑾¹, 聂绪恒¹, 王 忻¹

(1. 云南省粮油科学研究院, 云南 昆明 650033;

2. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037; 3. 河南工业大学, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用静态称重法在温度 10~35 ℃、相对湿度 11%~96% 范围内测定了五种马铃薯全粉的平衡水分/平衡相对湿度 (EMC/ERH) 数据, 确定了多项式方程、修正 3 参数 Guggenheim-Anderson-de Boer (MGAB)、修正 Halsey (MHAE)、修正 Oswin (MOE) 为适合的等温线拟合方程, 采用多项式 EMC 方程分析马铃薯全粉的安全储运最大允许的含水率, 在 25 ℃、RH 60% 条件下, 绝对安全水分是 10.05%; 在 25 ℃、RH 70% 条件, 相对安全水分是 12.64%。采用 MHAE 分析马铃薯全粉水分吸附等热, 随着含水率增加到 17.5%, 马铃薯全粉水分吸附等热则以抛物线形式快速地减少, 之后随着含水率增加, 水分吸附等热则减少缓慢。在含水率 22%, 马铃薯全粉水分吸附等热接近纯水的吸附等热。

关键词: 马铃薯全粉; 水分吸附等温线; 水分吸附等热; 安全水分; 干燥终点

中图分类号: TS210.1; S379.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2019)01-0063-06

Study on equilibrium moisture sorption isotherm and isosteric heat of the potato flour

WEN Yun-man¹, LI Xing-jun², CHEN Zhi-tian³, YANG Jin¹, NIE Xu-heng¹, WANG Xin¹

(1. Yunnan Grain and Oil Science Research Institute, Kunming Yunnan 650033;

2. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037;

3. Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450001)

Abstract: The equilibrium moisture content (EMC) and equilibrium relative humidity (ERH) of five kinds of potato flour were determined by static weighing method at range of 10~35 ℃ and RH 11%~96%, respectively. The suitable isotherm fitting equation were determined with polynomial equation, Modified-Guggenheim-Anderson-deBoer (MGAB), Modified-Halsey (MHAE), and Modified-Oswin (MOE). The maximum allowable moisture content of potato flour during storage was analyzed by polynomial equations, the absolute safe moisture was 10.05% wet basis (w.b.) at 25 ℃ and 60%ERH, and the relative safe moisture was 12.64% at 25 ℃ and 70% ERH. The isosteric heat of sorption of potato flour decreased parabolically and rapidly with the increase of the moisture content to 17.5%. Then the isosteric heat decreased slowly with the increase of moisture content. When moisture content was 22%, the isosteric heat of moisture sorption of potato flour was close to that of pure water.

Key words: potato flour; moisture sorption isotherm; isosteric heat of sorption; safe moisture content; drying endpoint

马铃薯是各国人民重要的粮食作物之一, 全世界有 150 个国家和地区种植马铃薯, 年产量约

3.2 亿 t。我国是马铃薯主产区之一, 年产量已达 0.72 亿 t^[1]。研究表明, 马铃薯是一种营养比较均衡的食物, 脂肪含量和热量低, 含有优质的蛋白质、必需的维生素和矿物质^[2]。马铃薯全粉是马铃薯主要深加工产品之一, 马铃薯全粉由于特殊

收稿日期: 2018-07-05

基金项目: 云南省科技计划青年项目 (2017FD216)

作者简介: 文韵漫, 1988 年出生, 女, 硕士, 工程师。

的加工工艺和要求,在正常环境条件下储存期能达到 2 年,而且有效保留了马铃薯的营养价值和天然风味,是一种优质的食品原料^[3]。但是,马铃薯全粉的吸湿性和热力学参数缺乏研究。

吸湿性在许多食品和农产品品质的决定因子。吸湿产品与周围环境之间水蒸汽的传送是一个物理现象,对储藏期间的产品品质具有负面影响,大多数食品在高水分条件下容易败坏^[4]。食品通常在一个气候地区生产,在不同相对湿度的另外一个地区销售,食品与周围环境之间水蒸汽的传递以不同速度发生。因此,马铃薯全粉生产流通中,必须了解它储藏期间针对水分浸入后的品质变化情况,以便选择合适的包装材料,阻止水分迁移引起的面负效果^[5]。目前缺乏马铃薯全粉水分吸附等温线报道。

了解水分吸附的能量需求、状态及方式对设计有效的马铃薯全粉储藏系统非常重要。采用热力学方法分析食品的水分吸附等温线能够提供脱水期间的能量需求、微结构、表面物理现象、水分特性及吸附动力学^[6]。吸附等热也称为微分吸附热,用于固体颗粒吸附水的状态,可以定义为从马铃薯全粉除去一单位质量水需求的总能量。净吸附等热接近游离水潜在汽化热的材料含水率水平,被定义为产品中“结合水”数量的指示物^[7]。本研究的目的是收集马铃薯全粉在 10~35 ℃、RH 11%~96% 范围内的 EMC/ERH 数据,确定适合的等温线拟合方程,分析安全储运最大允许的含水率和吸附等热,为安全储藏马铃薯全粉提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

马铃薯全粉样品 1 号(品种:大西洋):德大食品配料有限公司;马铃薯全粉样品 2 号(品种:河南马铃薯):内蒙古富广食品有限公司;马铃薯全粉样品 3 号(品种:宁夏马铃薯):宁夏薯味仙食品科技开发有限公司;马铃薯全粉样品 4 号(品种:紫马铃薯):内蒙古希森马铃薯全粉有限公司;马铃薯全粉样品 5 号(品种:克新):德大食品配料有限公司;试剂氯化锂、醋酸钾、氯化镁、碳酸钾、硝酸镁、氯化铜、氯化钠、硝酸钾均为分析纯。

智能人工气候箱 PRX-350A:宁波海曙赛福实验仪器厂,温度偏差±1.0 ℃,经常用标准温度计校正;DHG9040A 智能性干燥箱:杭州蓝天仪器有限公司,温度偏差±1.0 ℃,经常用标准温度计校正;铝盒:直径 5 cm、厚度 2 cm;平衡水分测定所用密闭系统组成包括 250 mL 玻璃广口瓶、9 号橡皮塞、由 60 目铜网做成的小桶(直径 2.8 cm、高度 4 cm)。

1.2 平衡水分测定

采用静态称重法测定 5 个马铃薯全粉样品平衡水分^[8],即利用饱和盐溶液在 5 种恒定温度(10、20、25、30 及 35 ℃)下产生恒定的蒸汽压。马铃薯全粉含水率测定 3 g 样品,(103.0±1.0) 烘干 3 h。平衡水分等温线拟合方程,采用修正 Chung-Pfost (MCPE)、修正 3 参数 Guggenheim-Anderssonde Boer (MGAB)、修正 Henderson (MHE)、修正 Oswin (MOE)、修正 Halsey (MHAE)、多项式 6 个方程(如表 1)。SPSS 11.5 软件的非线性回归方法,在一系列迭代步骤中,将测定值和理论值之间的残差平方和最小化。通过决定系数 $R^2 = 1 -$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{pi})^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{mi})^2}$$

、残差平方和 $RSS =$

表 1 采用的平衡水分吸附方程

方程名称	表达式
MCPE	$rh = \exp\left[\frac{-A \cdot \exp(-C \cdot M)}{B + t}\right]$ 或 $M = \frac{1}{-C} \ln\left[\frac{(t+B) \cdot \ln(rh)}{-A}\right]$
MGAB	$rh = \frac{2 + \left(\frac{C}{t}\right)\left(\frac{A}{M} - 1\right) - \left[2 + \left(\frac{C}{t}\right)\left(\frac{A}{M} - 1\right)\right]^2 - 4(1 - C/t)}{2B(1 - C/t)}$ 或 $M = \frac{A \cdot B \cdot C / t \cdot rh}{(1 - B \cdot rh)(1 - B \cdot rh + C/t \cdot B \cdot rh)}$
MHAE	$rh = \exp\left[\frac{-\exp(A + Bt)}{M^C}\right]$ 或 $M = \left[\frac{\exp(A + Bt)}{-\ln(rh)}\right]^{1/C}$
MHE	$rh = 1 - \exp[-A(t+B)M^C]$ 或 $M = \left[\frac{\ln(1 - rh)}{-A(t+B)}\right]^{1/C}$
MOE	$rh = \frac{1}{1 + [(A + Bt)/M]^C}$ 或 $M = \left(\frac{A + Bt}{rh} - 1\right)^{1/C}$
多项式方程	$M = A \cdot rh^3 + B \cdot rh^2 + C \cdot rh + D \cdot rh^2 \cdot t + E \cdot rh \cdot t + F \cdot t + G$

注: rh 是平衡相对湿度(小数表示), M 是含水率(%干基), t 是温度(℃)。 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 是方程的参数。多项式方程来自文献^[9]。

$\sum_{i=1}^n (m_i - m_{pi})^2$ 、标准差 $SE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{pi})^2 / (n-1)}$ 及平均相对百分率误差 $MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n |(m_i - m_{pi}) / m_i|$,

分析模型的拟合情况。式中 m_i 是测定值, m_{pi} 是预测值, m_{mi} 是平均测定值, n 是测定数目($n=45$), R^2 是决定系数, RSS 和 SE 决定拟合的好坏, MRE 小于 10% 时模型拟合度好。残差分布包括随机和模式分布, 随机分布说明方程是最佳水分吸附等温线拟合方程。

1.3 水分吸附等热分析

吸附等热通常称为微分吸着热或汽化热, 用于指示固体颗粒吸收水分的状态。马铃薯全粉水分吸附等热 (h_s) 计算按照文献^[6,10], 由以下 5 个公式计算。

$$\frac{h_s}{h_v} = 1 + \frac{P_s}{rh} \times \frac{dT}{dP_s} \times \left. \frac{\partial rh}{\partial T} \right|_M \quad (1)$$

$$h_v = 2501.33 - 2.363t \quad (2)$$

$$P_s = \frac{6 \times 10^{25}}{(273.15 + t)^5} \times \exp\left(-\frac{6800}{t + 273.15}\right) \quad (3)$$

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{P_s}{(t + 273.15)} \times \left(\frac{6800}{t + 273.15} - 5\right) \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial rh}{\partial T} \right|_M = -\frac{B \times rh}{M^c} \times \exp(A + Bt) \quad (5)$$

上式中, h_s 是吸附等热 (kJ/kg), h_v 是自由水汽化潜热 (kJ/kg), P_s 是饱和蒸汽压 (Pa), A、B、C 是 MCPE 方程的参数。方程 5 中的自由水 h_v 是温度依赖的, 相对湿度对温度的导数 $\left. \frac{\partial rh}{\partial T} \right|_M$ 与采用的吸附等温线方程有关。本研究采用 MHAE 方程。

2 结果与分析

2.1 最佳平衡水分拟合方程确定

在 10~35 °C、RH11.3%~96% 范围内收集了 5 种马铃薯全粉各五条水分吸附等温线。M=f(rh, t) 形式和 rh=f(M, t) 形式的 MCPE、MGAB、MHAE、MHE 及 MOE 对它们的拟合系数和生物统计参数分别如表 2 和表 3。多项式方程对马铃薯全粉水分吸附等温线的拟合结果如表 4。

表 2 马铃薯全粉水分吸附等温线 M=f(rh,t)形式方程拟合

样品名	方程	方程系数			生物统计参数				残差分布
		A	B	C	RSS	SE	R ²	MRE/%	
样品 1	MCPE	621.699	139.292	0.153	117.453 1	2.796 5	0.948 9	13.43	模式
	MGAB	5.535	0.863	11 537.267	13.849 7	0.329 7	0.993 9	3.51	随机
	MHAE	4.912	8.03E-04	2.277	43.516 9	1.036 1	0.981 1	5.54	随机
	MHE	9.61E-05	205.662	1.464	116.276 4	2.768 5	0.949 4	14.05	模式
	MOE	10.637	-7.57E-03	2.696	41.613 3	0.990 8	0.981 9	7.57	随机
样品 2	MCPE	457.387	76.822	0.177	77.017 1	1.833 7	0.955 3	10.38	模式
	MGAB	5.596	0.836	2 405.139	26.550 4	0.632 2	0.984 6	5.61	随机
	MHAE	5.359	-2.50E-03	2.469	38.855 0	0.925 1	0.977 5	6.68	随机
	MHE	9.17E-05	138.699	1.643	99.950 1	2.379 8	0.941 9	12.66	模式
	MOE	10.627	-1.99E-02	2.947	36.574 6	0.870 8	0.978 8	6.36	随机
样品 3	MCPE	496.465	114.703	0.154	86.931 6	2.069 8	0.961 6	11.58	模式
	MGAB	5.523	0.859	1 281.631	15.060 5	0.358 6	0.993 4	3.23	随机
	MHAE	4.787	-3.50E-04	2.245	43.226 6	1.029 2	0.980 9	6.34	随机
	MHE	1.27E-04	171.221	1.437	81.220 2	1.933 8	0.964 2	11.66	模式
	MOE	10.395	-1.27E-02	2.655	27.746 7	0.660 6	0.987 8	4.84	随机
样品 4	MCPE	564.367	154.355	0.156	115.207 2	2.743 1	0.948 2	15.53	模式
	MGAB	4.809	0.881	1 641.246	13.331 5	0.317 4	0.994 1	3.14	随机
	MHAE	4.189	9.58E-04	2.097	39.276 5	0.935 2	0.982 3	6.87	随机
	MHE	1.63E-04	219.459	1.305	85.623 1	2.038 6	0.961 5	14.66	模式
	MOE	9.167	-6.02E-03	2.463	30.233 3	0.719 8	0.986 4	7.59	随机
样品 5	MCPE	396.73	88.313	0.179	81.417	1.938 5	0.951 9	13.42	模式
	MGAB	4.629	0.865	1 506.306	19.960 3	0.475 2	0.988 2	4.38	随机
	MHAE	4.44	-2.78E-03	2.228	37.392 7	0.890 3	0.977 9	6.84	随机
	MHE	2.11E-04	132.328	1.416	73.113 1	1.740 8	0.956 8	13.89	模式
	MOE	9.044	-2.01E-02	2.629	29.215 1	0.695 6	0.982 7	6.99	随机

表 3 马铃薯全粉水分吸附等温线 $rh=f(M, t)$ 形式方程拟合

种类	方程	方程系数			生物统计参数				残差分布
		A	B	C	RSS	SE	R ²	MRE/%	
样品 1	MCPE	1 069.437	162.948	0.203	0.128 7	3.07E-03	0.960 5	15.73	模式
	MGAB	5.813	0.841	3 235.743	0.033 9	8.08E-04	0.989 6	6.64	随机
	MHAE	4.786	-7.31E-03	2.169	0.029 8	7.10E-04	0.990 9	6.94	随机
	MHE	3.70E-05	193.761	1.886	0.169 6	4.04E-03	0.947 9	18.99	模式
	MOE	10.951	-3.07E-02	2.942	0.077 8	1.85E-03	0.976 1	13.04	随机
样品 2	MCPE	592.787	62.178	0.228	0.107 2	2.55E-03	0.967 1	11.12	模式
	MGAB	6.372	0.777	893.132	0.085 7	2.04E-03	0.973 7	9.92	随机
	MHAE	5.298	-1.41E-02	2.339	0.059 6	1.42E-03	0.981 7	10.2	随机
	MHE	5.61E-05	76.776	2.064	0.159 9	3.81E-03	0.950 9	15.93	模式
	MOE	11.308	-5.49E-02	3.213	0.078 8	1.88E-03	0.975 8	9.86	随机
样品 3	MCPE	853.229	147.964	0.194	0.066 0	1.57E-03	0.979 8	10.5	模式
	MGAB	5.731	0.844	1066.128	0.015 7	3.73E-04	0.995 2	3.95	随机
	MHAE	4.201	-6.73E-03	1.948	0.017 7	4.21E-04	0.994 6	5.45	随机
	MHE	5.73E-05	151.217	1.817	0.090 3	2.15E-03	0.972 3	12.98	模式
	MOE	10.724	-3.32E-02	2.737	0.027 8	6.61E-04	0.991 5	6.95	随机
样品 4	MCPE	1188.914	238.654	0.207	0.126 7	3.02E-03	0.961 2	15.29	模式
	MGAB	4.865	0.873	1735.609	0.018 2	4.35E-04	0.994 4	4.53	随机
	MHAE	3.868	-5.32E-03	1.918	0.023 6	5.63E-04	0.992 8	5.71	随机
	MHE	5.36E-05	288.538	1.678	0.148 2	3.53E-03	0.954 5	17.59	模式
	MOE	9.309	-2.12E-02	2.619	0.062 6	1.49E-03	0.980 8	11.26	随机
样品 5	MCPE	732.888	121.601	0.232	0.111 6	2.66E-03	0.965 8	13.21	模式
	MGAB	4.906	0.839	1069.481	0.038 3	9.11E-04	0.988 3	6.19	随机
	MHAE	4.082	-9.51E-03	2.0163	0.030 5	7.25E-04	0.990 7	6.28	随机
	MHE	9.32E-05	134.324	1.781	0.141 1	3.36E-03	0.956 7	16.55	模式
	MOE	9.198	-3.47E-02	2.769	0.060 5	1.44E-03	0.981 5	9.85	随机

表 4 多项式方程对马铃薯全粉水分吸附等温线的拟合

样品	多项式方程系数						生物统计参数				残差分布	
	A	B	C	D	E	F	G	RSS	SE	R ²		MRE/%
样品 1	85.244	-81.132	29.259	-0.320 6	0.269 2	-0.071 9	4.657	9.122 8	0.240 1	0.996 1	2.81	随机
样品 2	84.678	-86.159	29.798	-0.463 7	0.511 7	-0.167 7	5.991	9.483 6	0.249 6	0.994 5	2.54	随机
样品 3	87.958	-87.978	34.493	-0.414 6	0.347 2	-0.087 6	3.35	15.017 8	0.395 2	0.993 4	4.49	随机
样品 4	85.203	-75.876	23.737	-0.585 9	0.529 9	-0.111 5	4.213	11.081 5	0.291 6	0.995 1	3.54	随机
样品 5	75.357	-69.332	23.442	-0.524 5	0.461 4	-0.111 7	4.147	10.830 7	0.285 1	0.993 6	3.11	随机

表 5 是马铃薯全粉水分吸附拟合方程生物统计参数平均数比较,就 $M=f(rh, t)$ 形式,优劣次序是多项式>MGAB>MHAE>MOE>MCPE>MHE。就 $rh=f(M, t)$ 形式,优劣次序是 MGAB>MHAE>MOE>MCPE>MHE。多项式、MGAB、MHAE 均是马铃薯全粉水分吸附等温线的最佳拟合方程。表 6 给出了平均水分吸附等温线这几个方程的系数。由于 MCPE 能够区分温度对水分吸附等温线的影响,本研究也给出 MCPE 的系数。

2.2 温度和相对湿度对马铃薯全粉水分吸附等温线的影响

采用 MCPE、多项式、MGAB 方程预测的马

铃薯全粉的水分吸附等温线,如图 1、图 2、图 3。在同一温度下,随着 ERH 的增加,平衡水分 EMC 则增加。就 MCPE 方程,在同一温度下,在 RH 20%~75% 范围内,EMC 随 ERH 线性增加。在相同 ERH 下,EMC 随着温度增加则减少。MCPE 明显区分了温度对马铃薯全粉水分吸附等温线的影响。多项式方程在 ERH<40%和 ERH>60%,明显区分了温度对等温线的影响。MGAB 方程没有明显区分温度对等温线的影响。

2.3 马铃薯全粉安全储运水分分析

从表 7 看出,在 25 °C、RH 60%条件,马铃薯全粉的绝对安全水分是 10.05%;在 25 °C、RH 70%

表 5 马铃薯全粉水分吸附等温线拟合方程生物统计参数平均数比较

表达形式	方程	RSS	SE	R ²	MRE/%	残差分布	次序
M=f(rh, t)	MCPE	95.605 2	2.276 3	0.953 2	12.868	模式	5
	MGAB	17.750 6	0.422 6	0.990 8	3.974	随机	2
	MHAE	40.453 5	0.963 2	0.979 9	6.454	随机	3
	MHE	91.236 6	2.172 3	0.954 8	13.384	模式	6
	MOE	33.076 6	0.787 5	0.983 5	6.670	随机	4
	Polymail	11.107 3	0.292 3	0.994 5	3.298	随机	1
rh=f(M, t)	MCPE	0.108 0	2.57E-03	0.966 9	13.170	模式	4
	MGAB	0.038 3	9.13E-04	0.988 2	6.246	随机	1
	MHAE	0.032 2	7.68E-04	0.990 1	6.916	随机	2
	MHE	0.141 8	3.38E-03	0.956 5	16.408	模式	5
	MOE	0.061 5	1.46E-03	0.981 1	10.192	随机	3

表 6 马铃薯全粉水分吸附等温线方程系数

表达形式	方程	A	B	C	D	E	F	G	R ²	MRE/%
M=f(rh, t)	Polymail	83.724	-80.181	28.199	-0.460 8	0.4228	-0.109 9	4.465	0.996 1	2.95
	MGAB	5.202	0.862	2 127.622					0.993 5	3.53
	MHAE	4.725	-6.48E-04	2.259					0.982 3	5.89
	MCPE	493.049	109.849	0.163					0.955 2	12.53
rh=f(M, t)	MGAB	5.536	0.834	1 328.423					0.992 4	5.61
	MHAE	4.452	-8.71E-03	2.079					0.994 2	5.47
	MCPE	807.136	125.157	0.213					0.970 2	12.72

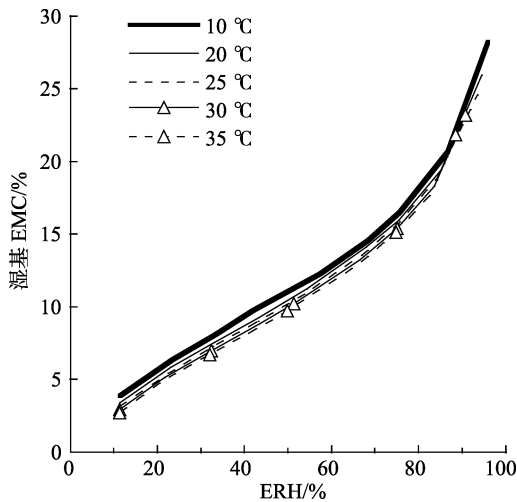


图 1 采用 MCPE 方程预测的马铃薯全粉平衡水分等温线

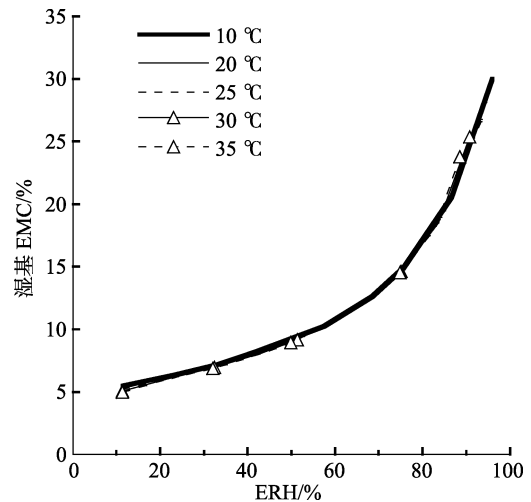


图 3 采用 MGAB 方程预测的马铃薯全粉平衡水分等温线

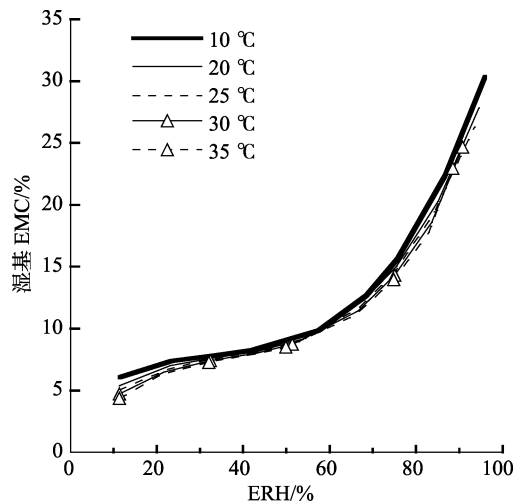


图 2 采用多项式方程预测的马铃薯全粉平衡水分等温线

表 7 采用多项式方程分析马铃薯全粉安全储运水分

ERH/%	含水率/(%湿基)				
	15	20	25	30	35
60	10.27	10.16	10.05	9.94	9.83
70	13.04	12.84	12.64	12.44	12.24

条件，马铃薯全粉的相对安全水分是 12.64%。

2.4 马铃薯全粉水分吸附等热随含水率的变化

从图 4 看出，在同一温度下，随着马铃薯全粉含水率增加到 17.5%，水分吸附等热则显著减少，之后随着含水率增加水分吸附等热则增加缓慢。在含水率 22%，马铃薯全粉吸附等热接近纯水的吸附等热。MHAE 方程显示了在含水率 >7.5%，随着温度增加，马铃薯全粉水分吸附等热则减少。

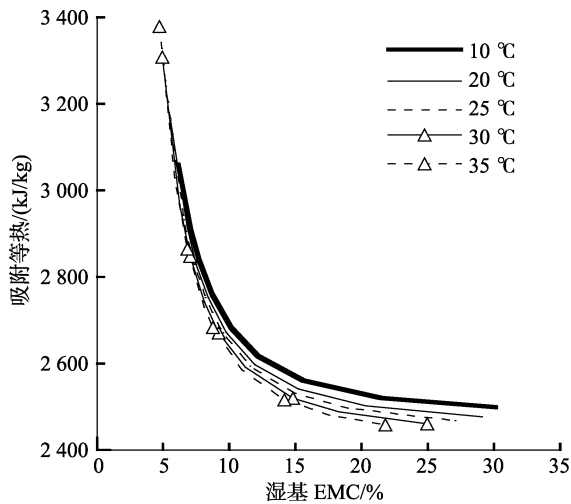


图 4 采用 MHAЕ 方程分析的马铃薯全粉的吸附等热变化

3 讨论与结论

本研究表明马铃薯全粉水分吸附等温线显示 S 型曲线，类似于小麦粉^[10]。小麦粉平衡水分吸附等温线，不管是吸附还是解吸，在 ERH 11.3%~96.0% 范围内，多项式、MGAB、MCPE、MHE、MOE 均能够很好地拟合等温线，而 MHAЕ 不适合小麦粉平衡水分吸附等温线^[10]。本研究采用同一实验系统测定马铃薯全粉平衡水分吸附等温线，则发现多项式、MGAB、MHAЕ、MOE 均适合拟合等温线，而 MCPE、MHE 不适合。ASABE 推荐 MHAЕ 是油料种子平衡水分吸附等温线的最佳拟合方程，MCPE 是谷物平衡水分吸附等温线的最佳拟合方程^[11]。这表明马铃薯全粉的吸湿特性不同于谷物及其淀粉，而可能类似油料类种子^[12]。

水分吸附等温线对确定食品临界水分、选择合适的包装材料很重要，对含水率引起品质劣变的食品可接受的水分活度 (a_w) 的选择也很重要，即 a_w 强烈影响食品品质、加工特性和微生物稳定性^[13]。李兴军等提出的多项式平衡水分方程用于我国五大粮种（小麦、稻谷、玉米、大米、大豆）挂面、小麦粉水分吸着等温线拟合，预测的安全水分值与实践相符合^[7,9-10]。此多项式方程用于小麦粉安全水分预测^[10]，在 25 °C、RH60% 条件下，小麦粉的绝对安全水分是 13.19%；在 25 °C、RH70% 条件，相对安全水分则是 14.71%。在本研究中，在 25 °C、RH60% 条件下，马铃薯全粉的绝对安全水分是 10.05%；在 25 °C、RH70% 条件下，马铃薯全粉的相对安全水分是 12.64%。这显示马铃薯全粉的安全水分明显低于小麦粉。安全水分

的测定不仅能够使马铃薯全粉在储藏期间保持其风味及品质，还能指导马铃薯颗粒在加工干燥过程中的干燥终点，更好的控制干燥温度及水分。

Öztekin 和 Soysal^[14]指出，在含水率约 16.7% 湿基时，小麦籽粒吸附等热接近纯水的吸附等热。本研究组^[8,10]发现，这个含水率对小麦籽粒约 15%，对小麦粉约 17.5%，接近苜蓿颗粒（13.8%）、翼豆种子（13.0%）^[15]。本研究显示含水率在 22% 时，马铃薯全粉水分吸附等热接近纯水的吸附等热。

参考文献：

- [1] ALI J, SIDDIQUEAFRIDI M, HUSSAIN A, et al. Comparative physiochemical and microbiological analysis of potato powder produce from two potato cultivar (*Solanum tuberosum* L.) grown in peshawar valley, pakistan[J]. World Applied Sciences Journal, 2015, 33 (2): 267-270.
- [2] KASHIF S, ABBASI, MASUD T, et al. Physico-chemical, functional and processing attributes of Some potato varieties grown in Pakistan[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(84): 19570-19579.
- [3] 李明月, 陈志成. 马铃薯全粉的生产工艺及应用前景[J]. 粮食与食品工业, 2016(5): 39-42.
- [4] DEMCZUK B, HOFFMANN-RIBANI R. Effects of environmental conditions on characteristics of annatto seed by-product[J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2012, 4(5): e20-e28.
- [5] COOKSEY K. Important factors for selecting food packaging materials based on permeability[D]. Ph.D thesis, Clemson University, Clemson, SC, 2004.
- [6] THORPE G R. Physical basis of aeration. In Navarro S, Noyes R. eds. The mechanics and physical of modern grain aeration management[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001: 135-144, 186.
- [7] LI Y, WANG X, JIANG P, LI X J. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of Chinese dried wheat noodles[J]. Journal of Stored Product Research, 2016, 67: 19-27.
- [8] LI X J, WEI Z Y, CAO Z Y, et al. Equilibrium moisture content and sorption isosteric heats of five wheat varieties in China[J]. Journal of Stored Products Research, 2011, 47: 39-47
- [9] 李兴军, 姜平. 采用一个多项式方程拟合粮食水分吸着等温线[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 90-94.
- [10] HAN X, WANG X, LI X J, JIANG P. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of Chinese wheat flours[J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2017, 9(4): 435-449.
- [11] ASABE Standards, D245.6: Moisture relationships of plant-based agricultural products[S]. St. Joseph, Mich: ASABE, 2012: 1-40.
- [12] 李兴军, 姜平, 周瑞宝. 豆粕平衡水分及吸着等热研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(5): 27-32.
- [13] Kayamak-Ertekin F, Gedik A. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples, and potatoes[J]. LWT-Food Science Technology, 2004, 37: 429-439.
- [14] ÖZTEKIN S, SOYSAL Y. Comparison of adsorption and desorption isosteric heats for some grains[J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development 2000, 2: 1-17.
- [15] AVIARA N A, AJIBOLA O. Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(2): 107-113.