

甘蓝型油菜籽的吸湿特性及其数学模型

杨玲¹, 陈建¹, 徐武明¹, 杨明金¹, 刘斌¹, 牛坡¹, 兰玉彬²

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆北碚 400715) (2. 美国农业部农业研究中心, 美国德克萨斯州 77845)

摘要: 油菜籽的吸湿特性影响油菜籽的收储工艺和储藏品质, 为了给甘蓝型油菜籽收储工艺和管理提供基础依据, 本文实验研究了甘蓝型油菜籽在温度为 0~30 °C, 相对湿度为 32%~88% 的条件下的吸湿特性, 比较了 7 种数学模型在甘蓝型油菜籽吸湿过程的适用性。结果表明: 甘蓝型油菜籽的吸湿性受温度和相对湿度的影响很大, 温度越高, 达到吸湿平衡所需要的时间越短, 相对湿度越大, 平衡含水率值越大, 达到吸湿平衡的时间越长; Peleg 模型的相关系数为 0.999, 卡方为 0.154 和均方根误差为 0.160, 是描述油菜籽吸湿特性的最佳数学模型; 随着温度的升高, 甘蓝型油菜籽的临界相对湿度增大, 降低储藏温度, 可以有效降低油菜籽的临界相对湿度; 随着平衡含水率的增加, 甘蓝型油菜籽的净等量吸湿热指数递减。

关键词: 甘蓝型油菜籽; 吸湿特性; 数学模型; 临界相对湿度; 净等量吸湿热

文章编号: 1673-9078(2014)10-30-35

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.10.006

Moisture Sorption Characteristics and Mathematical Models of Rapeseed (*Brassica napus*)

YANG Ling¹, CHEN Jian¹, XU Wu-ming¹, YANG Ming-jin¹, LIU Bin¹, NIU Po¹, LAN Yu-bin²

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Beibei 400715, China)

(2. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, College Station 77845, USA)

Abstract: The moisture sorption characteristics of rapeseed (*Brassica napus*) affect the storage quality of the crop and the techniques used in harvesting and storage. To provide a technical basis for the harvesting, storage, and management of rapeseed, this paper experimentally studied the moisture sorption characteristics of rapeseed at 0~30 °C and relative humidity of 32%~38%, and compared the applicability of seven mathematical models in the moisture sorption process of rapeseeds. The results showed that temperature and relative humidity were the main factors affecting the moisture sorption of rapeseed. With increasing temperature, the time needed for sorption equilibrium decreased, and with increasing relative humidity the equilibrium moisture content and time needed for sorption equilibrium increased. The net isosteric heat of rapeseed sorption exponentially decreased with increasing equilibrium moisture content. The Peleg model was considered to be the best mathematical model in describing the moisture sorption characteristics of rapeseed, with a correlation coefficient of 0.999, Chi-square value of 0.154, and root mean square error of 0.160. With increasing temperature, the critical relative humidity of rapeseed increased, and it is therefore considered that the critical relative humidity could be effectively decreased by decreasing the storage temperature. With the increase of equilibrium moisture content, the net isosteric heat of sorption of rapeseed exponentially decreased.

Key words: rapeseed (*Brassica napus*); moisture sorption characteristics; mathematical model; critical relative humidity; net isosteric heat of sorption

油菜籽是世界第三大植物油和第二大蛋白粉来源, 2012 年全球油菜籽产量达 6.48×10^{10} kg^[1]。我国是油菜籽的生产和消费大国, 长江流域是我国油菜籽的主产区, 种植面积和产量约占全国的 70%, 以种植甘蓝型油菜为主^[2]。油菜籽收获时含水率较高 (15%~
收稿日期: 2014-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31301575); 重庆市科委自然科学基金项目 (CSTC2012, JJA80027)

作者简介: 杨玲 (1974-), 女, 副教授, 研究方向: 农产品储藏与保鲜

通讯作者: 杨明金 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农业系统工程

30%w.b.), 收储条件很难控制, 如果处理或管理不当, 常易导致油菜籽发芽、发热、酸败及霉变^[3-4]。影响油菜籽储藏品质的因素较多, 其中温度、含水率和相对湿度的影响最显著, 因此应严格控制油菜籽的收储条件^[5-6]。油菜籽的蛋白质含量较高 (21%~24%), 相对于水稻、玉米和小麦等更容易吸湿, 且温度越高、相对湿度越大, 越容易达到吸湿平衡^[10]。平衡含水率和平衡相对湿度 (或水活度) 之间的关系常用吸湿等温线表示, 它能表示农产品或食品的吸湿特性。通过吸湿等温线可以获悉物料内部水分的相互作用, 为物料

干燥、包装、储藏等工艺操作的优化提供有用信息,并尽量保持物料储藏期间的品质^[1]。国内外学者和研究人员建立了许多基于经验或半经验的吸湿特性数学模型来描述农产品或食品的吸湿过程,如 BET (Brunauer, Emmett, and Teller) 模型、GAB (Guggenheim, Anderson, and de Boer) 模型、Oswin 模型、Halsey 模型、Peleg 模型等,并在实际应用中得到一些修正模型,但这些模型都不具有普适性,需针对特定物料选择或确定最佳模型^[8-9]。本文研究了温度和相对湿度对甘蓝型油菜籽吸湿特性的影响,比较了 7 种数学模型对甘蓝型油菜籽吸湿过程的适用性,通过实验数据计算得到甘蓝型油菜籽的净等量吸湿热,从而为甘蓝型油菜籽收储工艺和管理提供基础依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

1.1.1 材料与试剂

甘蓝型油菜籽(从重庆市油菜工程中心获得,人工清选,要求颗粒饱满、色泽均匀)、98%浓硫酸购于重庆川东化工有限公司、干燥器、保湿玻璃瓶和表面皿等。

1.1.2 主要仪器设备

DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;BC-2 型薄层干燥试验台,长春吉大科学仪器设备有限公司;DHS-250 恒温恒湿实验箱,上海林频仪器设备有限公司;AB2204L 型电子天平,梅特勒等。

1.2 方 法

1.2.1 含水率和相对湿度

油菜籽初始含水率 7.76% d.b.,通过薄层热风干燥获得。根据《油料水分及挥发物含量测定》(GB/T 14489.1-2008)测定含水率^[10]。

表 1 控制相对湿度用的硫酸溶液配制表

Table 1 Preparation of sulfuric acid solution for the control of relative humidity

相对湿 度/%	硫酸溶液		相对湿 度/%	硫酸溶液	
	硫酸/mL	水/mL		硫酸/mL	水/mL
32	68	100	65	34	100
42	57	100	72	27.5	100
58	39.5	100	88	10.8	100

硫酸溶液配制比例见表 1,以得到相对湿度分别为 32%、42%、58%、72% 和 88% 的油菜籽吸湿环境^[11]。用吸湿等温线表示物料平衡含水率 M_e 和一定温度下其

相应水分活度 a_w 之间的关系。物料的水分活度是在一定压力和温度下条件下,当物料处于平衡状态时的空气相对湿度 ϕ ^[12]。

1.2.2 吸湿率和临界相对湿度

将按表 1 配制的硫酸溶液分别装入同一型号保湿玻璃瓶,并贴上相应相对湿度标签,放入恒温恒湿箱中 0℃ 恒温放置 24 h,此时玻璃瓶内的相对湿度保持恒定。每次实验将约 3 g 油菜籽倒入表面皿中(称量精度 0.005 g,薄层放置),再将表面皿放入不同相对湿度保湿玻璃瓶,0℃ 恒温放置,每 24 h 称量油菜籽质量 1 次,直至油菜籽吸湿平衡(连续两次质量差小于 0.05% 视为吸湿平衡),从而得到油菜籽在 0℃ 条件下不同相对湿度的吸湿变化数据。改变恒温恒湿箱温度,重复以上步骤,可以得到其它对应温度的吸湿数据。根据吸湿数据由式(1)计算吸湿率:

$$r_s = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

注: r_s 为吸湿率,%; M_0 、 M_1 分别为吸湿前后含水率,%d.b.

吸湿率急剧上升时的相对湿度即为物料的临界相对湿度(Critical Relative Humidity, CRH)。一般农产品或食品在周围环境湿度低于临界相对湿度时,吸湿率很低并很快达到平衡,在高于临界相对湿度时,物料会大量吸湿直到饱和。温度不同,临界相对湿度也不同。因而临界相对湿度是农产品或食品吸湿特性的重要指标。在吸湿等温线的两端分别作吸湿等温线的切线,两切线交点所对应的相对湿度即为物料的临界相对湿度^[13]。

1.2.3 数学模型

运用 7 种模型(见表 3)对油菜籽吸湿等温线进行数据拟合验证,用相关系数 R^2 、卡方 χ^2 和均方根误差 $RMSE$ 3 个指标评价模型拟合效果,计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{e_exp,i} - M_{e_pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{e_exp} - M_{e_pre,i})^2} \quad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{e_exp,i} - M_{e_pre,i})^2}{N - n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{e_exp,i} - M_{e_pre,i})^2}{N}} \quad (4)$$

注: $M_{e_exp,i}$ 和 $M_{e_pre,i}$ 分别为第 i 个数据点的实验所得 M_e 和模型预测所得 M_e , %d.b.; N 为实验数据点的个数; n 为模型中参数的个数^[8]。

1.2.4 净等量吸湿热

净等量吸湿热反映了农产品或食品内水分和固相

间的结合强度，通过净等量吸湿热能计算从农产品或食品内去除一定量水分在理论上需要的最低能量。根据 Clausius-Clapeyron 热动力学方程推导出净等量吸湿热方程：

$$q_{st} = -R \left[\frac{\partial \ln a_w}{\partial (1/T)} \right] \quad (5)$$

注： q_{st} 为净等量吸湿热，kJ/kg；T 为绝对温度，K；R 为气体常数， $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})^{[8,14]}$ 。

1.2.5 数据分析

应用 Office 2010 (Excel) 软件进行绘图，用 SPSS 16.0 软件对实验数据进行回归拟合。

2 结果与讨论

2.1 吸湿等温线

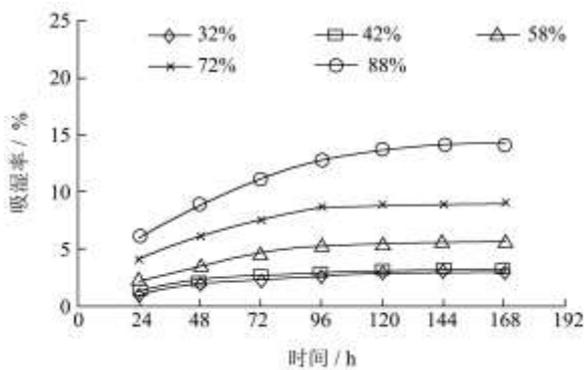


图 1 油菜籽在 0 °C 下的吸湿率曲线

Fig.1 Moisture sorption curve at 0 °C

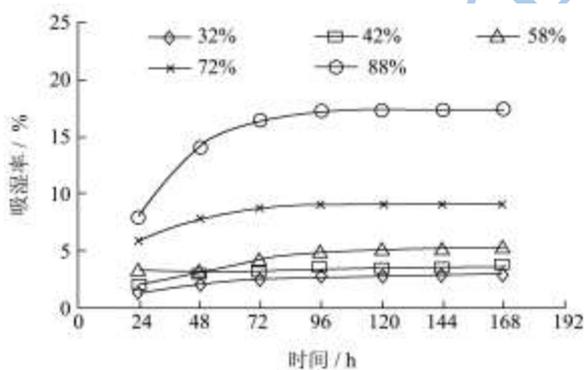


图 2 油菜籽在 10 °C 下的吸湿率曲线

Fig.2 Moisture sorption curve at 10 °C

图 1、图 2、图 3 和图 4 分别表示了含水率为 7.76% d.b. 的甘蓝型油菜籽在 0 °C、10 °C、20 °C 和 30 °C 条件下的吸湿率变化曲线。对比图 1~图 4 可以看出，在不同温度和相对湿度条件下，油菜籽随着时间的增加而逐渐达到吸湿平衡；温度越高，达到吸湿平衡所需要的时间越短，如在 30 °C 条件下，油菜籽经过 1~2 d 即达到吸湿平衡；相对湿度越大，平衡含水率值越大，达到吸湿平衡的时间越长。

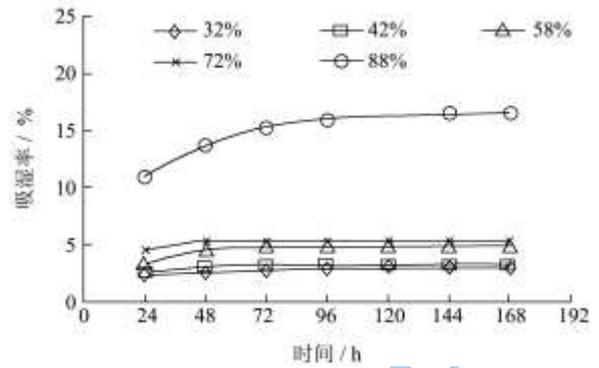


图 3 油菜籽在 20 °C 下的吸湿率曲线

Fig.3 Moisture sorption curve at 20 °C

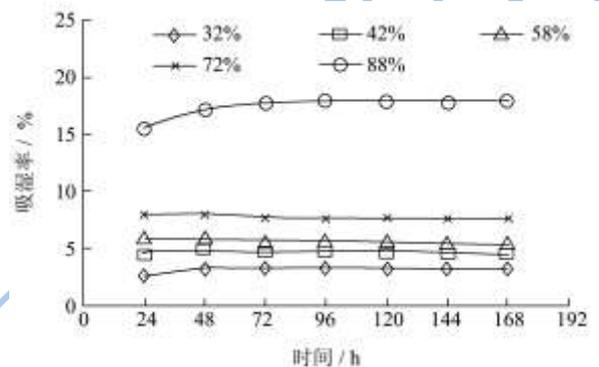


图 4 油菜籽在 30 °C 下的吸湿率曲线

Fig.4 Moisture sorption curve at 30 °C

表 2 油菜籽在不同水分活度下的平衡含水率

Table 2 Equilibrium moisture content of rapeseed at different

温度 / °C	water activity level 平衡含水率/%d.b.				
	$\varphi=0.32$	$\varphi=0.42$	$\varphi=0.58$	$\varphi=0.72$	$\varphi=0.88$
0	10.99	11.26	13.91	17.46	23.11
10	10.81	11.71	13.35	17.66	26.48
20	11.00	11.27	12.98	13.48	25.61
30	11.19	13.00	14.08	16.35	27.08

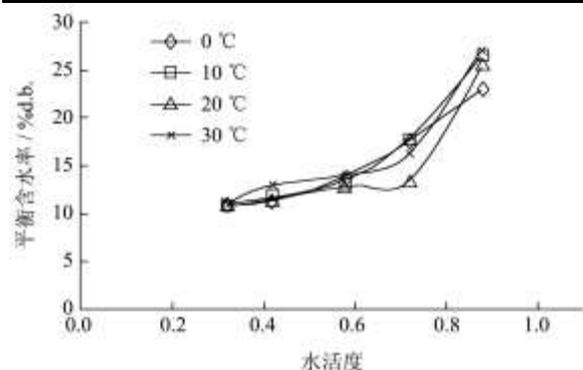


图 5 油菜籽吸湿等温线

Fig.5 Sorption isotherms for rapeseed

表 2 列出了在不同温度和不同相对湿度(水活度)条件下甘蓝型油菜籽的平衡含水率值，对应的吸湿等温线如图 5 所示。从表 2 和图 5 可以看出，水分活度

0.58~0.72 (即相对湿度 58%~72%) 区间是平衡含水率的分水岭; 当水分活度低于 0.58 时, 随着水分活度的增加, 平衡含水率平缓增加, 当水分活度高于 0.72 时, 随着水分活度的增加, 平衡含水率急剧增加。在油菜籽的储藏过程, 应控制油菜籽的水分活度水平, 即储藏环境相对湿度水平, 如《油菜籽干燥与储藏技术规程》(NY/T1087-2006) 规定油菜籽储藏时料堆内部的相对湿度 ≤ 60%^[9]。

2.2 模型适用性

为了进一步分析油菜籽的吸湿特性, 建立油菜籽吸湿等温线数学模型。运用表 3 中的 7 种模型对油菜籽在不同温度下的水活度和平衡含水率实验数据进行拟合, 拟合结果见表 3。从表 3 可以看出, 在温度为 0 °C~30 °C、水活度为 0.32~0.88 的条件下, Peleg 模型具有最大的相关系数, 最小的卡方和均方根误差, 是描述油菜籽吸湿特性的最佳数学模型。

表 3 油菜籽吸湿特性数学模型及其拟合指标

Table 3 Mathematical models related to the moisture sorption characteristics of rapeseed and their fitted results

模型	模型参数				拟合评价指标平均
	T=0 °C	T=10 °C	T=20 °C	T=30 °C	
1 GAB: $M_e = \frac{ABCa_w}{(1 - Ca_w) \cdot (1 - Ca_w + BCa_w)}$					
A	276.259	41.600	58.798	203.009	-
B	1.759	1.847	1.618	1.002	-
C	0.052	0.325	0.241	0.124	-
R ²	0.899	0.889	0.703	0.801	0.823
χ ²	5.190	9.147	22.104	15.749	13.048
RMSE	1.441	1.913	2.973	2.510	2.209
2 Modified BET: $M_e = \frac{Aa_w}{1 - Ba_w}$					
A	29.991	23.791	22.513	26.516	-
B	-0.231	0.180	0.147	0.059	-
R ²	0.914	0.884	0.700	0.802	0.825
χ ²	2.935	6.386	14.896	10.442	8.665
RMSE	1.327	1.957	2.990	2.503	2.194
3 Peleg: $M_e = A(a_w)^B + C(a_w)^D$					
A	3.369	11.592	14.694	17.366	-
B	-0.783	0.069	0.268	0.369	-
C	24.781	26.330	210.136	49.061	-
D	1.927	4.397	22.787	12.049	-
R ²	1.000	0.999	0.998	0.999	0.999
χ ²	0.011	0.111	0.259	0.236	0.154

RMSE	0.046	0.149	0.227	0.217	0.160
4 White and Eiring: $M_e = \frac{1}{A + Ba_w}$					
A	0.124	0.134	0.149	0.129	-
B	-0.092	-0.109	-0.123	-0.104	-
R ²	0.996	0.991	0.899	0.956	0.961
χ ²	0.153	0.479	5.025	2.329	1.997
RMSE	0.303	0.536	1.736	1.182	0.939
5 Halsey: $M_e = \left(-\frac{A}{T \ln(a_w)} \right)^B$					
A	264657.767	72767.851	57527.756	105196.991	-
B	0.353	0.430	0.436	0.414	-
R ²	0.990	0.994	0.922	0.973	0.970
χ ²	0.338	0.309	3.886	1.426	1.490
RMSE	0.451	0.430	1.527	0.925	0.833
6 Modified Halsey: $M_e = \left(-\frac{\exp(A + CT)}{\ln(a_w)} \right)^B$					
A	2.549	0.849	3.372	8.525	-
B	0.354	0.430	0.436	0.414	-
C	0.016	0.017	0.007	-0.009	-
R ²	0.990	0.994	0.922	0.973	0.970
χ ²	0.507	0.463	5.829	2.139	2.235
RMSE	0.451	0.430	1.527	0.925	0.833
7 Modified Smith: $M_e = (A + BT) - (C + DT) \cdot \ln(1 - a_w)$					
A	3.896	3.054	3.140	3.996	-
B	0.014	0.012	0.011	-0.010	-
C	29.784	74.802	56.880	74.621	-
D	-0.082	-0.232	-0.166	-0.217	-
R ²	0.994	0.985	0.885	0.952	0.954
χ ²	0.613	2.415	17.098	7.637	6.941
RMSE	0.350	0.695	1.849	1.236	1.033

注: A、B、C、D 为模型参数。

2.3 临界相对湿度

采用 Peleg 模型及参数拟合油菜籽的吸湿过程, 预测油菜籽在不同温度下的临界相对湿度 H_{CR}。方法如下: 根据表 3 中 Peleg 模型参数, 得到油菜籽在 0 °C、10 °C、20 °C、30 °C 时的吸湿等温线方程, 如油菜籽在 0 °C 的吸湿等温线方程为:

$$M_e = 3.369 \times (a_w)^{-0.783} + 24.781 \times (a_w)^{1.927} \quad (6)$$

通过对式(6)求导得到水活度分别为 0.32 和 0.88 时的吸湿等温线切线方程斜率, 从而得到两处的切线方程, 两切线交点所对应横坐标即为该温度下的临界

相对湿度 H_{CR} , 即 0.550。同样可以计算得到油菜籽在 10 °C、20 °C、30 °C 时的临界相对湿度值, 分别为 0.697、0.813、0.818。温度对临界相对湿度的影响如图 6 所示。从图 6 可以看出, 随着温度的升高, 临界相对湿度增大, 超过 20 °C 后, 临界相对湿度的增加趋于平缓。因而降低储藏温度, 可以有效降低油菜籽的的临界相对湿度, 从而延长油菜籽的储藏时间。

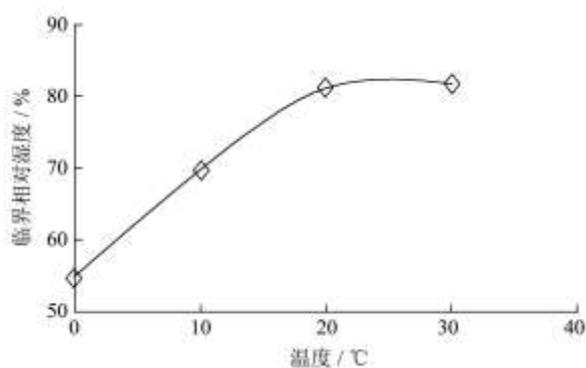


图 6 温度对临界相对湿度的影响

Fig.6 Effect of temperature on critical relative humidity

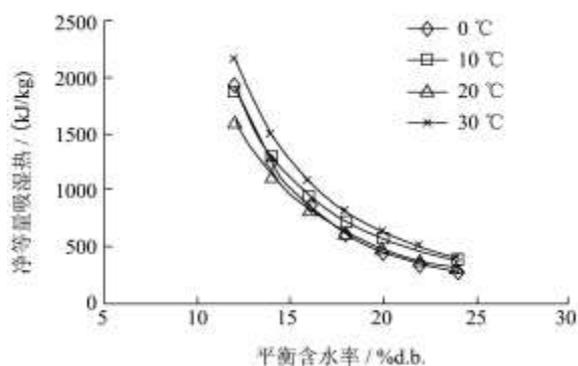


图 7 净等量吸湿热与平衡含水率关系曲线

Fig.7 Relationship between net isosteric heat of sorption and equilibrium moisture content

2.4 净等量吸湿热

表 4 油菜籽的净等量吸湿热

Table 4 Net isosteric heat of sorption of rapeseed

平衡含水率 / %d.b.	净等量吸湿热 / (kJ/kg)			
	T=0 °C	T=10 °C	T=20 °C	T=30 °C
12	1929.0	1870.8	1601.4	2163.2
14	1246.4	1307.2	1124.5	1490.7
16	853.9	958.2	827.8	1079.7
18	611.6	728.6	631.9	812.4
20	453.8	570.3	496.2	629.8
22	346.4	456.9	398.8	500.3
24	270.7	373.2	326.6	405.5

根据式 (5) 求解净等量吸湿热, 需选择含参数 T

的吸湿模型。Halsey 模型是含参数 T 的较佳吸湿模型, 选择该模型计算油菜籽的净等量吸湿热, 计算结果见表 4。净等量吸湿热与平衡含水率的关系曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 净等量吸湿热随平衡含水率的增加指数递减, 表明甘蓝型油菜籽在低含水率吸收水分时要比高含水率吸收水分时释放更多的热量。由于油菜籽临界相对湿度随温度的升高而增大, 油菜籽的吸湿性增强, 对于含水率较低的油菜籽储藏, 当环境温度较高时, 应特别注意油菜籽吸收水分以后所释放的热量而使油菜籽温度急剧升高, 从而导致油菜籽短期内发热和酸败, 若高温高湿持续时间较长, 也易于霉菌的滋生而导致霉变。

3 结论

通过实验研究得到了甘蓝型油菜籽的吸湿特性, 甘蓝型油菜籽的吸湿性受温度和相对湿度的影响很大, 温度越高, 达到吸湿平衡所需要的时间越短, 相对湿度越大, 平衡含水率值越大, 达到吸湿平衡的时间越长。在温度为 0~30 °C, 相对湿度为 32%~88% 的条件下, Peleg 模型具有最高的相关系数, 最小的卡方和均方根误差, 是描述油菜籽吸湿特性的最佳数学模型。随着温度的升高, 甘蓝型油菜籽的临界相对湿度增大, 因而降低储藏温度, 可以有效降低油菜籽的的临界相对湿度, 从而延长油菜籽的储藏时间。甘蓝型油菜籽的净等量吸湿热随平衡含水率的增加指数递减, 对于含水率较低的油菜籽储藏, 当环境温度较高时, 应特别注意油菜籽吸收水分以后所释放的热量导致油菜籽短期内发热和酸败。

参考文献

- [1] YANG Ling, YANG Ming-jin, CHEN Jian, et al. Status and development trend of rapeseed drying for seeding purposes [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(S2): 309-315
- [2] 李凤. 中国油菜籽生产区域比较优势分析[J]. 价值工程, 2013,32:170-172
LI Feng. Comparative advantage analysis of rapeseed production areas of China [J]. Value Engineering, 2013, 32: 170-172
- [3] 杨国峰, 丁超, 蔡浩飞, 等. 油菜籽干燥技术研究进展[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(5): 124-128
YANG Guo-feng, DING Chao, CAI Hao-fei, et al. Research and development progress on rapeseed drying technology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils

- Association, 2012, 27(5): 124-128
- [4] 杨国峰,和珊,丁超.油菜籽热风干燥后储藏品质的研究[J].中国粮油学报,2013,28(9):97-102
YANG Guo-feng, HE Shan, DING Chao. Study of the rapeseeds' quality during storage after hot-air drying [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(9): 97-102
- [5] Canola Growers Manual [EB/OL]. http://www.canolacouncil.org/canola_growers_manual.aspx, 2014-03-12
- [6] NY/T1087-2006,油菜籽干燥与储藏技术规程[S]
NY/T1087-2006, The technical regulations of rapeseed drying and storage [S]
- [7] 万忠民,李红,许进田,等.低温和气调储藏对油菜籽品质的影响[J].中国粮油学报,2012,27(8):79-84
WAN Zhong-min, LI Hong, XU Jin-tian, et al. The influence of low temperature and controlled atmosphere storage on quality of rapeseed [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(8): 79-84
- [8] Al-Mahasneh M A, Bani Amer M M, Rababah T M. Modeling moisture sorption isotherms in roasted green wheat using least square regression and neural-fuzzy techniques [J]. 2012, 90(2): 165-170
- [9] 李彦坡,麻成金,黄群,等.鸡蛋粉等温吸附特性研究[J].现代食品科技,2007,23(9):24-28
LI Yan-po, MA Cheng-jin, HUANG Qun, et al. Studies on the adsorption isotherms of egg powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23(9): 24-28
- [10] GB/T 14489.1-2008,油料水分及挥发物含量测定[S]
GB/T 14489.1-2008, Oilseed-determination of moisture content and volatile matter content [S]
- [11] 李嘉蓉.天然药物化学实验[M].北京:中国医药科技出版社,1987
LI Jia-rong. Natural pharmaceutical chemistry experiment [M]. Beijing: China Medical Science Press, 1987
- [12] 潘永康,王喜忠,刘相东.现代干燥技术(2版)[M].北京:化学工业出版社,2006
PAN Yong-kang, WANG Xi-zhong, LIU Xiang-dong. Modern Drying Technology(2nd edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006
- [13] 霍树春,李锋,李建科,等.不同比表面积山梨醇粉体的吸湿性实验研究[J].食品科学,2007,28(9):83-85
HUO Shu-chun, LI Feng, LI Jian-ke, et al. Study on hygroscopicity of different specific surface area of sorbitol [J]. Food Science, 2007, 28(9): 83-85
- [14] 李兴军,郑亿青,盛岩,等.油菜平衡水分及吸着等热研究[J].粮油食品科技,2013,21(5):32-36
LI Xing-jun, ZHENG Yi-qing, SHENG Yan, et al. Research on equilibrium moisture and isosteric heat of sorption of rapeseed [J]. Science and Technology of Cereals, oils and Foods, 2013, 21(5): 32-36