

温湿度对不同吸湿剂吸湿特性及动力学模型影响

赵亚, 石启龙, 王相友, 王娟

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255049)

摘要: 采用静态吸附法研究了无水氯化钙、六偏磷酸钠、山梨糖醇、魔芋葡甘聚糖、壳聚糖、活性氧化铝粉和膨润土等 7 种吸湿剂在不同温度 (2、10、18 °C) 和相对湿度 RH (76%、86%、96%) 下放置 15 d 时的吸湿特性。结果表明, 温度一定时, 吸湿量随 RH 升高而增加; RH 一定时, 吸湿量随温度变化略有差异。采用 Weibull 模型拟合吸湿量数据, 得到吸湿动力学参数 M_{∞} 和 β , 通过线性回归得到 M_{∞} 和温湿度的关系。除山梨糖醇外, Weibull 模型与吸湿量拟合精度较高。 M_{∞} 较高的吸湿剂为无水氯化钙 (1.117~2.137 g H₂O/g)、六偏磷酸钠 (0.297~0.856 g H₂O/g) 和山梨糖醇 (0.083~38.567 g H₂O/g), 其 β 值范围为: 无水氯化钙 (25.5~119.8 h)、六偏磷酸钠 (91.2~290.0 h) 和山梨糖醇 (1.1~185.6 h)。壳聚糖和膨润土的 M_{∞} 受温度、RH 的共同影响, 而六偏磷酸钠和山梨糖醇的 M_{∞} 仅受 RH 的影响。研究结果可为双孢蘑菇 MA 贮藏期间 RH 控制提供理论依据。

关键词: 温度; 相对湿度; 吸湿剂; 动力学模型

文章编号: 1673-9078(2014)12-158-163

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.12.027

Effect of Temperature and Relative Humidity on Absorption Characteristics and Kinetic Models of Different Absorbent

ZHAO Ya, SHI Qi-long, WANG Xiang-you, WANG Juan

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The static adsorption method was employed to investigate the moisture absorption characteristics of seven different moisture absorbents, including calcium chloride (CaCl₂), sodium hexametaphosphate, sorbitol, konjac glucomannan (KGM), chitosan, activated aluminum oxide powder, and bentonite, which were exposed to different temperatures (2 °C, 10 °C, and 18 °C) and relative humidities (RHs) (76%, 86%, and 96%) for 15 days. The results showed that moisture absorption for the same absorbent increased with increasing RH at a fixed temperature, while moisture absorption varied for different absorbents with elevated temperature at a fixed RH. The Weibull model was used to fit the experimental moisture content data; the model parameters of M_{∞} and β were obtained, and the relationship between M_{∞} and temperature/humidity was established using linear regression analysis. Except for sorbitol, the accuracy of fit of the moisture content data to the Weibull model was high. The moisture absorbents with high holding capacities (M_{∞}) were CaCl₂ (1.117~2.137 g H₂O/g), sodium hexametaphosphate (0.297~0.856 g H₂O/g), and sorbitol (0.083~38.567 g H₂O/g), with β ranges of 25.5~119.8 h, 91.2~290.0 h, and 1.1~185.6 h, respectively. The M_{∞} values of chitosan and bentonite were found to be dependent on temperature and RH, while those of sodium hexametaphosphate and sorbitol were only affected by RH. These results will provide a theoretical basis for RH control during modified atmosphere (MA) storage of *Agaricus bisporus*.

Key words: temperature; relative humidity; moisture absorber; kinetic model

气调包装 (MAP) 是根据不同果蔬生理特性, 由 2 种或多种气体组成的混合气体替代包装袋内气体, 借助果蔬自身呼吸作用和包装材料选择性渗透作用, 形成适合产品保藏的微环境, 以达到降低果蔬呼吸作

收稿日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31301819)

作者简介: 赵亚 (1974-), 女, 实验师, 主要从事农产品加工与贮藏工程研究

通讯作者: 王相友 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工与贮藏工程研究

用、延长保鲜期的目的^[1]。呼吸旺盛的原料如食用菌由于采后高呼吸速率和蒸腾作用及塑料薄膜低水分传输速率间的不平衡, 导致包装环境内具有较高的相对湿度 (RH), 使水分在包装薄膜内壁凝结成雾甚至回滴, 容易导致菌褶褐变、菌盖变粘滋生微生物, 导致其商品价值显著降低。目前, 食用菌 MAP 保鲜技术主要集中在不同温度、湿度及其它处理因素对包装内气体组成、采后生理指标影响等方面。冯云霄等发现不同种类和厚度的保鲜膜对气体和水的通透产生很大影响, 引起皇冠梨代谢紊乱^[2]。王相友等发现双孢蘑

菇的贮藏品质和贮藏的温度、时间和相对湿度具有较大关系^[1]。杨文建等用含纳米粉体的聚乙烯复合包装材料保鲜双孢蘑菇时,保鲜袋内有水雾和膜内表面结露现象,导致双孢蘑菇品质下降^[4]。庄卫东提出现有大多数薄膜的透湿率不足以满足果蔬包装的需求^[5]。RH是果蔬贮藏保鲜的重要条件之一,一种可行的办法就是在MAP基础上结合吸湿剂保鲜果蔬,赵晓梅等把保鲜纸应用于赛买提杏贮藏取得一定效果^[6]。但吸湿剂应用于食用菌类则鲜有报道,而且不同吸湿剂在不同温湿度条件下的吸附特性及动力学研究有助于吸湿剂的合理筛选,但这方面缺乏系统、深入研究。此外,吸湿剂种类很多,其吸湿效果取决于吸湿速率和吸湿量。Shirazi等采用10g山梨糖醇、木糖醇、氯化钠、氯化钾、氯化钙等为吸湿剂,用于番茄20℃贮藏期间RH控制,贮藏48d时包装袋内RH分别为75%、80%、75%、85%和35%^[7]。Villaescusa等采用山梨糖醇和硅胶控制蘑菇包装袋内RH,研究表明山梨糖醇促进了蘑菇质地劣化速度,而硅胶增加了蘑菇的失重率^[8]。此外,魔芋葡甘聚糖、壳聚糖、膨润土、六偏磷酸钠和活性氧化铝均有一定的吸湿作用,但其作为吸湿剂用于果蔬、食用菌MAP过程中RH控制方面则未见报道。基于此,本实验对无水氯化钙、六偏磷酸钠、山梨糖醇、魔芋葡甘聚糖、壳聚糖、活性氧化铝粉和膨润土等7种吸湿剂在不同温湿度下对其吸湿量和吸湿动力学进行了研究,以期为食用菌或其他果蔬MAP贮藏期间RH的调节提供理论依据和技术参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

无水氯化钙;钠基膨润土;六偏磷酸钠;活性氧化铝粉;山梨糖醇;魔芋葡甘聚糖;壳聚糖均为食品级。氯化钠;氯化钾;硝酸钾均为分析纯(AR)。

1.2 仪器设备

YHZ-98A恒温恒湿箱,上海一恒科学仪器有限公司;101-2B型电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;AUY220电子分析天平,日本岛津。

1.3 试验方法

1.3.1 吸湿剂预处理

分别将各吸湿剂置于热风干燥箱中,60℃干燥1h备用^[9~10]。

1.3.2 吸湿量的测定

吸湿剂干燥后,称取1.000g于预先恒重的称量瓶中,置于装有不同饱和溶液的干燥器的内隔板上,饱和盐液分别为NaCl、KCl、KNO₃,其平衡RH分别为76%、86%、96%^[11]。密封后放于恒温箱中吸湿,其温度分别为2、10、18℃。2℃和10℃模拟双孢蘑菇MA贮藏温度^[11,12],18℃模拟超市冷藏柜贮藏温度。定期测量吸湿剂的质量。双孢蘑菇贮藏时间约为10d^[13],本实验吸湿剂吸附时间为15d,当吸湿剂由粉末状变为液态时停止实验。每个处理重复3次,平行2次。吸湿量计算方法见公式(1)。

$$M_t = \frac{W_t - W_i}{W_i} \quad (1)$$

式中, M_t 为吸潮剂吸湿量,g/g; W_t 为t时间吸湿剂的质量,g; W_i 为吸湿前吸湿剂的质量,g。

1.3.3 Weibull模型

Machado和Mahajan研究表明,Weibull模型最适合用于描述物料吸湿特性^[14~15]。因此,采用Weibull模型拟合各吸湿剂吸附特性数据,得到吸湿剂的动力学参数,Weibull模型见公式(2)^[15]。

$$M_t = M_0 + (M_\infty - M_0) \times [1 - e^{-(t/\beta)^\beta}] \quad (2)$$

式中, M_∞ 为平衡时最大吸湿量,g H₂O/g; β 为模型参数,表示水分吸附过程中速率高低,即完成63%的吸附所需要的时间; M_0 为吸潮剂最初的水分含量,g H₂O/g;当吸潮剂绝干时为0。

1.3.4 模型分析系数

模型拟合精度通过决定系数(R^2)、平均相对误差(MRE)判定, R^2 越高,MRE越低,模型拟合精度越高。一般来说,要求MRE < 10%^[16]。MRE计算方法见公式(3)。

$$MRE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(M_{\text{expt}} - M_{\text{pred}})}{M_{\text{expt}}} \right| \quad (3)$$

式中, M_{expt} 为实验吸湿量,g H₂O/g; M_{pred} 为实验预测吸湿量,g H₂O/g。

1.4 数据分析

采用Matlab 6.5软件对Weibull模型进行拟合求解,采用SPSS 17.0软件进行线性回归分析和方差分析。

2 结果与分析

2.1 温湿度对吸湿剂吸湿量的影响

温度2℃,RH 76%、86%、96%条件下,7种不同吸湿剂的吸湿量随时间变化曲线如图1所示。可以看

出,除膨润土和魔芋葡甘聚糖除外,同一吸湿剂其吸湿量随着RH增加而增加。温度2℃,RH 86%、96%时,膨润土和魔芋葡甘聚糖的吸湿量曲线较接近,吸附前期,RH 86%时的吸湿量略高于RH 96%。温度2℃、RH 76%时,山梨糖醇吸湿量较低,但是当RH增加至RH 96%时,山梨糖醇的吸湿量由0.108 g H₂O/g增加至0.547 g H₂O/g,说明温度2℃时,RH对山梨糖醇的吸湿量有显著影响。山梨糖醇的吸湿量分别在的第13 d(RH= 86%)和第9 d(RH= 96%)超过六偏磷酸钠,吸湿量仅低于无水氯化钙,说明随RH对山梨糖醇的吸湿量影响较大。温度10℃,RH 76%、86%、96%条件下,7种不同吸湿剂的吸湿量随时间变化曲线如图2所示。可以看出,同一吸湿剂的吸湿量随RH增加增加。不同RH下,六偏磷酸钠(0.369~0.791 g H₂O/g)和山梨糖醇(0.130~0.507 g H₂O/g)的吸湿量浮动范围较大。说明温度10℃时RH对六偏磷酸钠和山梨糖醇的吸湿量有显著影响。温度18℃,RH 76%、86%、96%条件下,7种不同吸湿剂的吸湿量随时间变化曲线如图3所示。可以看出,除无水氯化钙外,同一吸湿剂吸湿量随RH增加而增加。无水氯化钙的吸湿量较大且3条曲线较接近。吸湿38 h时,RH 76%时,无水氯化钙的吸湿量(0.884 g H₂O/g)高于RH 86% (0.701 g H₂O/g)和96% (0.801 g H₂O/g)时的吸湿量。六偏磷酸钠(0.295~0.709 g H₂O/g)和山梨糖醇(0.073~0.482 g H₂O/g)吸湿量浮动范围较大,说明18℃时RH对这2种吸湿剂的吸湿量有显著影响。

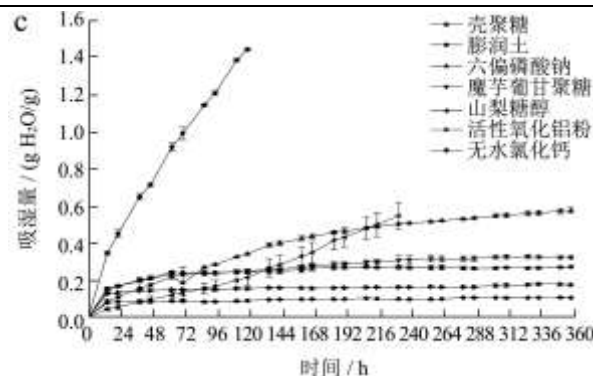
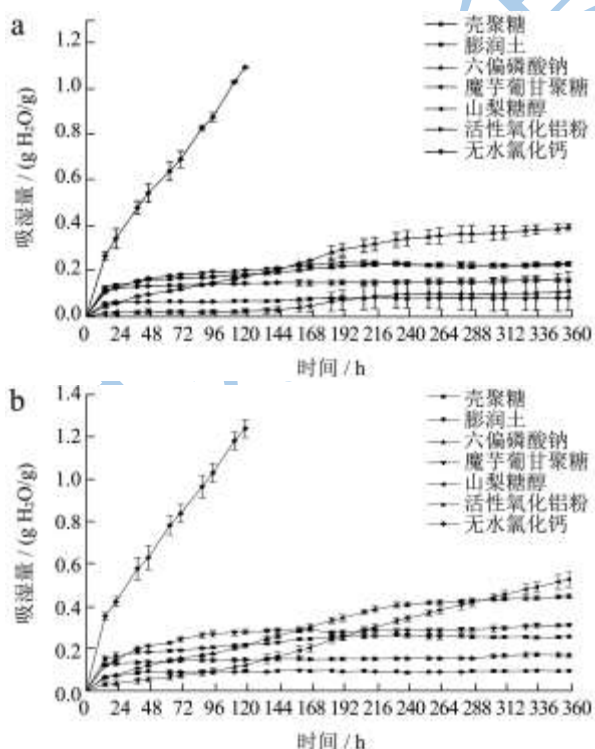


图1 温度2℃时,RH对吸湿剂吸湿曲线影响

Fig.1 Effect of relative humidity on moisture absorption capacity of various absorbents at 2℃

注: a: 76%, b: 86%, c: 96%。

由图1~3还可以看出,RH相同时,各吸湿剂的吸湿量随温度升高变化略有差异。例如,当RH由76%增加至96%时,无水氯化钙的吸湿量由1.102 g H₂O/g增加至1.445 g H₂O/g;六偏磷酸钠的吸湿量由0.369 g H₂O/g增至0.791 g H₂O/g;山梨糖醇的吸湿量由0.130 g H₂O/g增至0.546 g H₂O/g;魔芋葡甘聚糖的吸湿量由0.223 g H₂O/g增至0.531 g H₂O/g。当温度由2℃升高至10℃,六偏磷酸钠、木糖醇和魔芋葡甘聚糖的吸湿量范围分别为0.570~0.783 g H₂O/g、0.507~0.833 g H₂O/g和0.322~0.531 g H₂O/g,而温度由10℃升高至18℃时,木糖醇吸湿量又降低至0.432 g H₂O/g。

此外,不同温湿度下,魔芋葡甘聚糖、壳聚糖、活性氧化铝粉和膨润土一般2~3 d就达到吸湿平衡,甚至1d内即达到吸湿平衡。无水氯化钙的最大吸湿量和吸湿速率都是最大的,温度2℃,RH 96%条件下118 h时吸湿量达到1.445 g H₂O/g,18℃,RH 96%条件下62 h时吸湿量达到1.312 g H₂O/g,最大吸湿量稍有差距原因在于吸湿终点不确定。尽管无水氯化钙吸湿量较大,但其易潮解。在温度10℃和18℃时吸湿62 h呈现液态;温度2℃时,118 h时呈现液态,且吸湿过程中其表面有明显的液态水,但即使全部呈现液态吸湿量仍然持续增加。本研究结果和Song等报道的基本一致^[7]。山梨糖醇在不同温湿度下也存在易潮解的问题,如温度2℃,RH 96%吸湿的230 h,温度10℃,RH 86%下吸湿的206h,温度10℃,RH 96%吸湿的158 h,温度18℃,RH 86%吸湿的182 h,温度18℃,RH 96%吸湿的110 h时呈现液态,山梨糖醇在不同温湿度下吸湿速率仅次于无水氯化钙,特别呈现当RH较高时具有高效的吸湿功能。例如当温度2℃,RH 76%时山梨糖醇第15 d吸湿量为0.108 g H₂O/g,温度2℃,RH 96%时山梨糖醇吸湿量能达到0.547 g H₂O/g。六偏磷酸钠在实

验测定时间内吸湿量持续增加,即使到第15 d仍持续吸湿,最大吸湿量仅次于无水氯化钙。

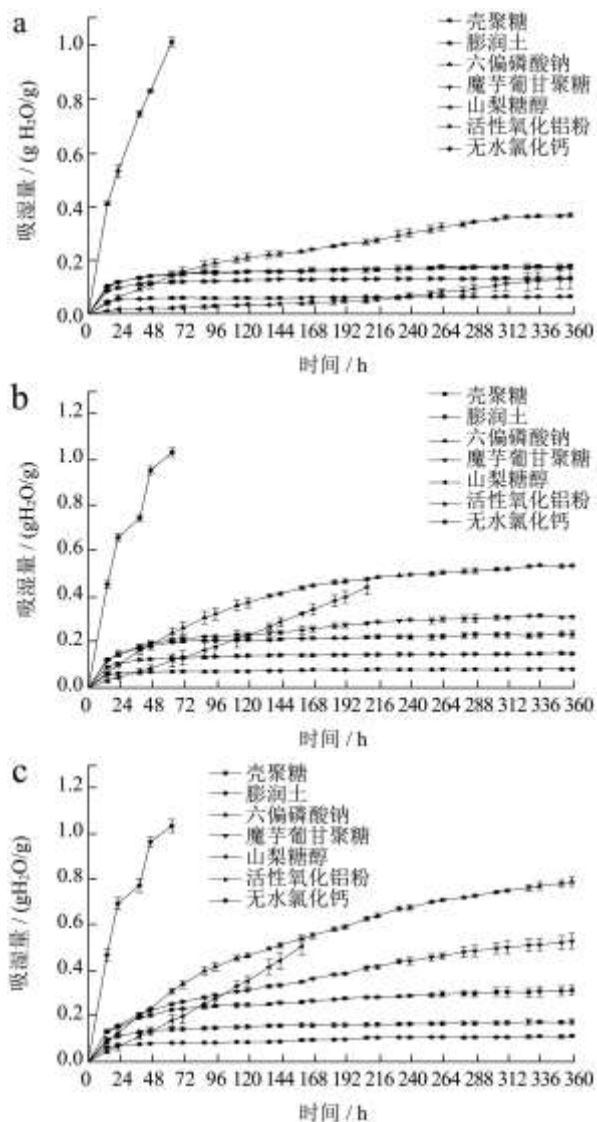


图2 温度 10 °C 时, RH 对吸湿剂吸湿曲线影响

Fig.2 Effect of relative humidity on moisture absorption capacity of various adsorbents at 10 °C

注: a: 76%, b: 86%, c: 96%。

新鲜双孢蘑菇的蒸腾速率很高,温度10 °C、RH 96%条件下蒸腾速率为0.25 mg/(cm²·h)^[11]。基于此,250 g蘑菇在贮藏5 d内会产生14.4 g水,这需要吸湿剂具有高吸湿量的同时还要具有持续吸湿的特性。温度2、10、18 °C, RH 76%条件时,无水氯化钙吸湿量最大(1.102 g H₂O/g),其次是六偏磷酸钠(0.390 g H₂O/g)和活性氧化铝球(0.321 g H₂O/g)。吸湿15 d时六偏磷酸钠呈粉末状吸湿量继续持续增加,但活性氧化铝球趋于平衡;温度2、10、18 °C, RH 86%、96%条件下无水氯化钙吸湿量最高(1.445 g H₂O/g),其次是六偏磷酸钠(0.791 g H₂O/g)和山梨糖醇(0.547 g H₂O/g),吸湿15 d时六偏磷酸钠呈粉末状吸湿量继续持续增加。活性氧化铝球、

魔芋葡甘聚糖和壳聚糖在吸附的前期吸湿速度较快,但很快趋于吸附平衡。综上所述,不同温湿度下,吸湿量由高到低的吸湿剂依次为:无水氯化钙(1.013~1.445 g H₂O/g),六偏磷酸钠(0.251~0.791 g H₂O/g),山梨糖醇(0.073~0.547 g H₂O/g),魔芋葡甘聚糖(0.143~0.531 g H₂O/g),壳聚糖(0.149~0.314 g H₂O/g),活性氧化铝粉(0.133~0.240 g H₂O/g),膨润土(0.002~0.114 g H₂O/g)。六偏磷酸钠可以长时间吸附;山梨糖醇高RH下吸湿速度较高。

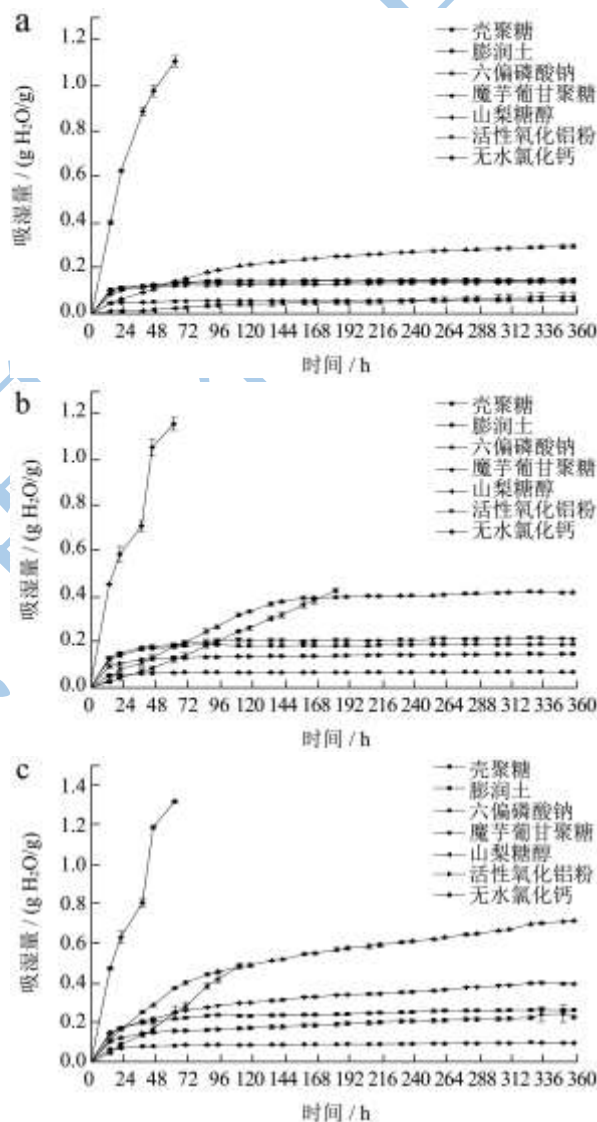


图3 温度 18 °C 时, RH 对吸湿剂吸湿曲线影响

Fig.3 Effect of relative humidity on moisture absorption capacity of various adsorbents at 18 °C

注: a: 76%, b: 86%, c: 96%。

2.2 吸湿剂吸附动力学

2.2.1 吸湿剂动力学参数的确定

各吸湿剂在不同温湿度下动力学参数如表1所示。可以看出,温度2、10、18 °C, RH 76%、86%、96%

时, 除山梨糖醇外, 各吸湿剂 R^2 均大于0.803, $MRE < 10\%$, 模型拟合精度较高。壳聚糖、膨润土、魔芋葡甘聚糖、活性氧化铝粉模型拟合 M_∞ 范围和 β 范围与实验所得范围基本吻合。六偏磷酸钠的 M_∞ 范围为0.297~0.856 g H₂O/g, 与实验所得范围较接近(0.251~0.791 g H₂O/g), β 范围91.2~290.0 h。无水氯化钙的 M_∞ 范围为1.117~2.137 g H₂O/g, 略高于实验所得范围(1.013~1.445 g H₂O/g), β 范围25.5~119.8 h。温度一定时, M_∞ 随着RH的增加而增大; RH一定时, M_∞ 、 β 随着温度变化规律不明显, 和实验所得结果一致。尽管 R^2 均大于0.909, 但仅温度10 °C、RH 86%、96%, 18°C、RH 76%、86%条件下 $MRE < 10\%$, 因此仅这些条件下模型拟合精度较高, 在此条件下, 山梨糖醇的 M_∞ 范围为0.083~34.057 g H₂O/g, 与实验所得范围(0.073~0.507 g H₂O/g)偏差较大, β 范围1.1~185.6 h。

表1 温湿度对吸湿剂吸湿动力学参数影响

Table 1 Effect of temperature and humidity on kinetic parameters of absorbents

吸湿剂	温度/°C	RH/%	M_∞ /(g H ₂ O/g)	β /h	R^2	MRE/%
壳聚糖	2	76	0.215	35.7	0.860	8.22
	2	86	0.245	30.7	0.870	7.49
	2	96	0.260	23.1	0.958	3.88
	10	76	0.165	19.2	0.938	4.61
	10	86	0.222	22.6	0.962	3.76
	10	96	0.289	38.4	0.931	6.18
	18	76	0.145	13.9	0.966	2.48
	18	86	0.187	14.8	0.991	1.62
	18	96	0.245	21.4	0.941	4.83
无水氯化钙	2	76	1.667	119.80	0.985	7.38
	2	86	1.623	89.2	0.984	7.07
	2	96	2.093	104.90	0.994	5.04
	10	76	1.245	39.5	0.995	3.11
	10	86	1.146	28.5	0.981	4.56
	10	96	1.117	25.5	0.983	4.09
	18	76	1.378	37.8	0.999	2.00
	18	86	1.657	52.2	0.963	7.71
	18	96	2.137	66.4	0.971	6.82
膨润土	2	76	0.073	13.7	0.820	8.12
	2	86	0.090	13.5	0.980	2.44
	2	96	0.095	11.1	0.849	6.36
	10	76	0.062	10.7	0.964	3.20
	10	86	0.077	13.0	0.936	4.39
	10	96	0.101	22.9	0.803	9.48
	18	76	0.057	10.0	0.965	2.50
	18	86	0.068	10.3	0.978	2.13

六偏磷酸钠	18	96	0.088	14.6	0.937	4.15
	2	76	0.351	290.00	0.979	9.79
	2	86	0.588	228.10	0.985	7.00
	2	96	0.631	148.50	0.995	3.93
	10	76	0.417	175.70	0.987	6.01
	10	86	0.557	106.50	0.999	1.23
	10	96	0.856	149.40	0.997	2.53
	18	76	0.297	95.7	0.998	1.75
	18	86	0.445	96.5	0.978	9.42
魔芋葡甘聚糖	18	96	0.679	91.2	0.985	4.30
	2	76	0.222	34.2	0.959	4.27
	2	86	0.289	34.6	0.979	3.02
	2	96	0.302	44.6	0.891	8.51
	10	76	0.166	20.1	0.946	4.56
	10	86	0.294	51.8	0.914	8.13
	10	96	0.524	116.60	0.957	9.41
	18	76	0.140	14.4	0.979	2.16
	18	86	0.209	17.6	0.973	2.75
山梨糖醇	18	96	0.367	58.4	0.946	6.93
	2	76	3.611	1.1	0.909	29.44
	2	86	33.409	2.4	0.988	15.26
	2	96	37.211	1.7	0.979	10.92
	10	76	5.723	1.8	0.932	18.77
	10	86	26.904	1.3	0.996	4.70
	10	96	34.057	1.1	0.996	3.67
	18	76	0.083	185.60	0.979	7.43
	18	86	24.998	1.1	0.997	8.69
活性氧化铝粉	18	96	38.567	9.1	0.991	11.22
	2	76	0.146	11.1	0.939	3.64
	2	86	0.151	10.9	0.902	4.51
	2	96	0.159	11.3	0.913	4.47
	10	76	0.129	15.8	0.973	2.69
	10	86	0.144	17.4	0.968	3.03
	10	96	0.164	21.2	0.935	4.70
	18	76	0.131	15.2	0.970	2.97
	18	86	0.141	16.1	0.966	3.12
18	96	0.205	42.5	0.841	9.47	

7种吸湿剂模型拟合较好且吸湿量较高的为: 无水氯化钙(1.117~2.137 g H₂O/g)、六偏磷酸钠(0.297~0.856 g H₂O/g)和山梨糖醇(0.083~38.567 g H₂O/g)。 β 值范围分别为: 无水氯化钙(25.5~119.8 h)、六偏磷酸钠(91.2~290.0 h)和山梨糖醇(1.1~185.6 h)。其中山梨糖醇的 M_∞ 值和 β 值范围较大, 可能是山梨糖醇属于III型吸湿等温线^[12], 当低湿时吸湿量较小, 但当处在一个高湿环境中则能吸较高数量的水直至变为饱和溶液原因。

2.2.2 M_w 和温湿度的关系表2 M_w 与温湿度关系Table 2 Relationship between M_w and temperature/humidity

名称	M_w 回归方程	R^2
壳聚糖	$M_w = -0.003 T + 0.004 RH - 0.137$	0.890
无水氯化钙	$M_w = 0.0176 RH + 0.0912$	0.170
膨润土	$M_w = -0.001 T + 0.0012 RH - 0.043$	0.932
六偏磷酸钠	$M_w = 0.018 RH - 1.042$	0.812
魔芋葡甘聚糖	$M_w = 0.011 RH - 0.674$	0.674
山梨糖醇	$M_w = 1.674 RH - 121.203$	0.888
活性氧化铝粉	$M_w = 0.002 RH - 0.023$	0.592

各吸湿剂和温湿度关系方程(置信度95%)如表2所示。可以看出,壳聚糖、膨润土、六偏磷酸钠、微晶纤维素和山梨糖醇的 M_w 和温湿度相关性紧密($R^2 > 0.812$),其中对壳聚糖和膨润土的 M_w 受温度、RH的影响,六偏磷酸钠和山梨糖醇的 M_w 仅受RH的影响。而无水氯化钙、魔芋葡甘聚糖和活性氧化铝粉模型拟合精度不高。

3 结论

3.1 无水氯化钙吸湿速度快且吸湿量大,但易液化;六偏磷酸钠吸湿量仅次于无水氯化钙,但其持续吸湿时间较长;山梨糖醇在高RH下吸湿速度较高;其它吸湿剂的吸湿速度和吸湿量较小。

3.2 单一吸湿剂不能满足双孢蘑菇MA贮藏吸湿需要,需在本研究基础上进行复配,从而得到最适配比。

参考文献

- [1] 卢立新.果蔬气调包装理论研究进展[J].农业工程学报,2005,21(7):175-180
LU L X. Research advances in theories for modified atmosphere packaging of fruits and vegetables [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 175-180
- [2] 冯云霄,李丽梅,关军锋,等.功能性MA包装对皇冠梨贮藏品质和褐变的影响[J].河北农业科学,2008,12(11):16-17,32
FENG Y X, LI L M, GUAN J F, et al. Effect of functional modified atmosphere packaging on storage quality and browning of Huangguan pear [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(11): 16-17, 32
- [3] 王相友,朱继英,李霞.双孢蘑菇采收后贮藏品质预测模型[J].农业机械学报,2010,41(6):103-107,112
WANG X Y, ZHU J Y, LI X. Predictive mathematical model for storage quality of *Agaricus bisporus* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 103-107, 112
- [4] 杨文建,单楠,杨芹,等.纳米包装材料延长双孢蘑菇贮藏品质的作用[J].中国农业科学,2012,45(24):5065-5072
YANG W J, SHAN N, YANG Q, et al. Effect of nano-packing material on improvement of preservation quality of *Agaricus bisporus* [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2012, 45(24): 5065-5072
- [5] 庄卫东.不同保鲜薄膜袋包装对‘松风本’龙眼果实低温贮藏效果的影响[J].热带作物学报,2013,34(10):2031-2037
ZHUANG W D. Different film bag packaging on cold storage behavior of ‘songfengben’ longan fruits [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(10): 2031-2037
- [6] 赵晓梅,张谦,徐麟,等.自制壳聚糖保鲜纸对鲜杏贮藏效果的影响[J].北方园艺,2010,(10):197-201
ZHAO X M, ZHANG Q, XU L. Effect of self-made Chitosan storage paper storage on fresh apricot [J]. Northern Horticulture, 2010, (10): 197-201
- [7] Shirazi A, Cameron A C. Controlling relative humidity in modified atmosphere packages of tomato fruit [J]. HortScience, 1992, 27(4): 336-339
- [8] Villaescusa R, Gil M I. Quality improvement of *Pleurotus* mushrooms by modified atmosphere packaging and moisture absorbers [J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 8(1): 169-179
- [9] Song Y, Lee D S, Yam K L. Predicting relative humidity in modified atmosphere packaging system containing blueberry and moisture absorbent [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2001, 25(1): 49-70
- [10] Johnson P N T, Brennan J G. Kinetics of moisture absorption by plantain flour [J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(1): 33-36
- [11] Mahajan P V, Oliveira F A R, Macedo I. Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(2): 281-288.
- [12] 石启龙,王相友,王娟,等.不同贮藏温度对双孢蘑菇生理特性的影响[J].食品工业科技,2005,26(3):165-166,169
SHI Q L, WANG X Y, WANG J, et al. Effect of different temperature on physiological characteristics of *Agaricus bisporus* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2005, 26(3): 165-166, 169
- [13] Lukasse L J S, Polderdijk J J. Predictive modelling of post-harvest quality evolution in perishables, applied to mushrooms [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(2/3): 191-198
- [14] Machado M F, Oliveira F A R, Cunha L M. Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture

- uptake by ready-to-eat breakfast cereal [J]. International Journal of Food Science and Technology, 1999, 34(1): 47-57
- [15] Mahajan P V, Rodrigues F A S, Motel A, et al. Development of a moisture absorber for packaging of fresh mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(3): 408-414
- [16] Garcia-Pascual P, Sanjuan N, Melis R, et al. Morchella esculenta (morel) rehydration process modeling [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(4): 346-353

现代食品科技