

不同湿度环境下中药浸膏粉体吸湿动力学模型拟合优选

朱诗竟¹, 丁青龙², 狄留庆^{1,3,4*}, 赵晓莉^{1,3,4}, 王令充¹, 祖强¹

1. 南京中医药大学药学院, 江苏 南京 210046

2. 常州102医院, 江苏 常州 213000

3. 江苏省中药高效给药系统工程技术研究中心, 江苏 南京 210046

4. 南京市中药微丸产业化工程技术研究中心, 江苏 南京 210023

摘要: 目的 筛选可以准确描述中药浸膏粉体吸湿过程的动力学模型, 科学量化吸湿过程, 为进一步研究通过中药浸膏粉体改变物理性质来控制吸湿性提供理论基础。方法 选择5种模型分别对51种代表性中药浸膏粉体在低、中、高3种相对湿度(33%、57%、73.5%)环境下的吸湿速率曲线进行拟合, 以拟合度相关系数(R^2)、残差平方(RSS)、信息准则(AIC)值为评价指标, 初步筛选拟合较优的动力学模型。结果 双指数模型和威布尔模型均能较好地反映中药浸膏粉体吸湿的动力学过程, 但双指数模型在不同湿度条件下的适用性较威布尔模型好。结论 双指数模型能较好地反映中药浸膏粉体的吸湿动力学过程。

关键词: 中药浸膏粉体; 相对湿度; 吸湿过程; 动力学模型; 优选

中图分类号: R283 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2013)20-2833-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2013.20.009

Optimization of moisture absorption dynamic model fitting for Chinese materia medica extract powder under different humidity conditions

ZHU Shi-jing¹, DING Qing-long², DI Liu-qing^{1,3,4}, ZHAO Xiao-li^{1,3,4}, WANG Ling-chong¹, ZU Qiang¹

1. College of Pharmacy, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210046, China

2. 102 Hospital of Changzhou, Changzhou 213000, China

3. Jiangsu Engineering Research Center for Efficient Delivery System of TCM, Nanjing 210046, China

4. Nanjing Engineering and Technology Research Center for TCM Pellets, Nanjing 210023, China

Abstract: Objective To optimize the kinetic model that could accurately describe the moisture absorption progress of Chinese materia medica (CMM) extract powder, to quantify the adsorption process scientifically and to provide the theoretical basis for the further study on controlling the hygroscopicity of CMM extract powder by changing the physical properties. **Methods** We chose five models fitting the hygroscopic rate curve of fifty-one kinds of typical CMM extract powder under the low-, mid-, and high-humidity conditions, as evaluation indexes in R^2 , RSS, and AIC values, to make the initial screening of optimum kinetic model fitting. **Results** Both the double exponential model and the Weibull distribution model could reflect the moisture absorption kinetics of CMM extract powder, but the double exponential model had a better adaptability than the Weibull distribution model under different humidity conditions. **Conclusion** The double exponential model is suitable for reflecting the moisture absorption kinetics of CMM extract powder.

Key words: Chinese materia medica extract powder; relative humidity; moisture absorption process; kinetic model; optimization

中药浸膏粉体是中药经提取、分离、浓缩、干燥等工艺处理所获得的中间物料, 通常具有较大的吸湿性^[1]。吸湿后的粉体流动性差、颜色变深, 甚

至发生潮解或霉变, 不仅影响制剂的成型, 甚至影响其有效性、安全性。中药浸膏粉体的吸湿过程^[2]首先表现为粉体表面吸收空气中的水分, 然后粉体

收稿日期: 2013-06-13

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”支持计划; 江苏省“青蓝工程”科技创新团队支持计划[苏教师(2008)30号]; 江苏省优势学科建设工程资助项目(ysxk-2010)

作者简介: 朱诗竟(1988—), 女, 南京中医药大学2011级药剂学硕士研究生。Tel: (025)85811230 E-mail: zsjzsj0427@126.com

*通信作者 狄留庆, 教授, 博士生导师, 研究方向为中药高效给药系统设计与评价。Tel: (025)85811230 E-mail: diliuqing@hotmail.com

中易溶性成分溶出形成水合物,当表面吸收水分达到饱和时,水分向内扩散、粉体表面发生溶解,粉体间隙形成液体桥从而导致粘连。

中药浸膏粉体吸湿性常以饱和吸湿量^[3]、吸湿速率^[4]和临界相对湿度^[5]等参数来表征。但单独采用一种或几种参数不能全面表征中药浸膏吸湿的特性。通过建立中药浸膏吸湿动力学模型能很好地解决上述参数的不足。Chu等^[6]运用 BET、GAB 模型描述中药提取物的吸附等温线,结合模型特征参数得出低分子糖的量与中药提取物吸湿性密切相关,并用参数来解释提取物吸湿过程的物理变化。关于中药浸膏粉体吸湿动力学模型的研究报道较少,因此优选吸湿动力学模型,科学量化中药浸膏粉体吸湿过程,为进一步研究中中药浸膏粉体的物理特性与吸湿过程参数的相关性,并进一步通过改变物理性质来控制吸湿提供了较好的理论基础。

目前,描述中药浸膏粉吸湿动力学模型主要有以下5种:零级过程模型、一级过程模型、一元二次曲线模型、双指数模型、威布尔模型。这些模型对中药浸膏粉体的吸湿曲线拟合在一定条件下均有一定的适用性。严云良等^[7]通过4种中药颗粒剂吸湿过程的数学模型应用研究,提出数学模型研究仍

需更多样本的吸湿数据分析,以验证相关模型的合理性。本实验依据中药配方颗粒生产实际相关信息,在易吸湿中药配方颗粒用浸膏目录中选取来自不同科属、不同药用部位的51种代表性中药浸膏粉体(表1)为研究对象,分别在相对湿度33%、57%、73.5%条件下测定粉体的吸湿时间曲线,以拟合度相关系数(R^2)、残差平方(RSS)、信息准则(AIC)为指标,评价上述5种模型用于中药浸膏粉体吸湿过程描述的适宜性,初步优选中药浸膏粉体吸湿动力学模型。

1 仪器与材料

DZF—6050型真空干燥机(上海精宏实验设备有限公司),SHB—III型真空抽滤泵(郑州长城科工贸有限公司),QE—300型中药粉碎机(武汉屹立工具有限公司),202型电热恒温干燥箱(上海索谱仪器有限公司),FA1204B型电子分析天平(上海精宏科学仪器有限公司)。氯化钠(批号10031920157)、溴化钠(批号11092823348)、氯化镁(批号12030523076),南京化学试剂有限公司;51种代表性中药浸膏饮片品种均购自安徽万生中药饮片有限公司并经南京中医药大学陈建伟教授鉴定,鉴定结果及其浸膏引湿性情况见表1。

表1 代表性中药浸膏粉体饮片来源及其引湿性情况

Table 1 Piece resources and hygroscopicity of representative CMM extract powder

饮片名称	基源鉴定	引湿情况
酒黄精	百合科植物黄精 <i>Polygonatum sibiricum</i> 的干燥根茎经酒制加工而成的炮制品	强
土茯苓	百合科植物光叶菝葜 <i>Smilax glabra</i> 的干燥根茎	较强
知母	百合科植物知母 <i>Anemarrhena asphodeloides</i> 的干燥根茎	强
麦冬	百合科植物麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i> 的干燥块根	较强
金钱草	报春花科植物过路黄 <i>Lysimachia christinae</i> 的干燥全草	强
醋五味子	木兰科植物五味子 <i>Schisandra chinensis</i> 的干燥成熟果实经加工而成的炮制品	较强
盐补骨脂	豆科植物补骨脂 <i>Psoralea corylifolia</i> 的干燥成熟果实经加工而成的炮制品	强
炒决明子	豆科植物决明 <i>Cassia obtusifolia</i> 的干燥成熟种子经加工而成的炮制品	较强
蜜甘草	豆科植物甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i> 的干燥根及根茎经加工而成的炮制品	强
槐米	豆科植物槐 <i>Sophora japonica</i> 的干燥花及花蕾	强
盐杜仲	杜仲科植物杜仲 <i>Eucommia ulmoides</i> 的干燥树皮经加工而成的炮制品	强
炒麦芽	禾本科植物大麦 <i>Hordeum vulgare</i> 的成熟果实发芽干燥并经加工而成的炮制品	较强
瓜蒌皮	葫芦科植物栝楼 <i>Trichosanthes kirilowii</i> 的干燥成熟果皮	强
天花粉	葫芦科植物栝楼 <i>Trichosanthes kirilowii</i> 的干燥根	较强
郁金	姜科植物温郁金 <i>Curcuma wenyujin</i> 的干燥块根	中等
砂仁	姜科植物春砂 <i>Amomum villosum</i> 的干燥成熟果实	较强
紫花地丁	堇菜科植物紫花地丁 <i>Viola yedonensis</i> 的干燥全草	强
炒牛蒡子	菊科植物牛蒡 <i>Arctium lappa</i> 的干燥成熟果实经加工而成的炮制品	较强

续表 1

饮片名称	基源鉴定	引湿情况
墨旱莲	菊科植物鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i> 的干燥地上部分	强
红景天	景天科植物大红花红景天 <i>Rhodiola crenulata</i> 的干燥块根和根茎	较强
酒萸肉	山茱萸科植物山茱萸 <i>Cornus officinalis</i> 的干燥成熟果肉经加工而成的炮制品	强
天麻	兰科植物天麻 <i>Gastrodia elata</i> 的干燥块茎	中等
制何首乌	蓼科植物何首乌 <i>Polygonum multiflorum</i> 的干燥块根经加工而成的炮制品	较强
龙胆草	龙胆科植物条叶龙胆 <i>Gentiana manshurica</i> 的干燥根和根茎	较强
地黄	玄参科植物地黄 <i>Rehmannia glutinosa</i> 的新鲜或干燥块根	强
红花	菊科植物红花 <i>Carthamus tinctorius</i> 的干燥花	较强
制女贞子	木犀科植物女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> 的干燥成熟果实经加工而成的炮制品	强
钩藤	茜草科植物钩藤 <i>Uncaria rhynchophylla</i> 的干燥带钩茎枝	强
山楂	蔷薇科植物山里红 <i>Crataegus pinnatifida</i> var. <i>major</i> 的干燥成熟果实	较强
枸杞子	茄科植物宁夏枸杞 <i>Lycium barbarum</i> 的干燥成熟果实	强
白芷	伞形科植物白芷 <i>Angelica dahurica</i> 的干燥根	中等
北沙参	伞形科植物珊瑚菜 <i>Glehnia littoralis</i> 的干燥根	较强
春柴胡	伞形科植物北柴胡 <i>Bupleurum chinense</i> 的干燥根	强
蜜桑白皮	桑科植物桑 <i>Morus alba</i> 的干燥根皮经加工而成的炮制品	较强
蜜麻黄	麻黄科植物草麻黄 <i>Ephedra sinica</i> 的干燥草质茎经加工而成的炮制品	强
制香附	莎草科植物莎草 <i>Cyperus rotundus</i> 的干燥根茎经加工而成的炮制品	较强
太子参	石竹科植物孩儿参 <i>Pseudostellaria heterophylla</i> 的干燥块根	较强
山药	薯蓣科植物薯蓣 <i>Dioscorea opposita</i> 的干燥根茎	中等
姜半夏	天南星科植物半夏 <i>Pinellia ternata</i> 的干燥块茎用鲜姜或鲜姜、白矾共煮干燥而成的炮制加工品	中等
川牛膝	苋科植物川牛膝 <i>Cyathula officinalis</i> 的干燥根	较强
怀牛膝	苋科植物牛膝 <i>Achyranthes bidentata</i> 的干燥根	强
淫羊藿	小檗科植物淫羊藿 <i>Epimedium brevicornum</i> 的干燥叶	强
熟地黄	玄参科植物地黄 <i>Rehmannia glutinosa</i> 的块根经加工而成的炮制品	强
菟丝子	旋花科植物南方菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i> 的干燥成熟种子	较强
醋延胡索	为罂粟科植物延胡索 <i>Corydalis yanhusuo</i> 的干燥块茎经加工而成的炮制品	强
制远志	远志科植物远志 <i>Polygala tenuifolia</i> 的干燥根经加工而成的炮制品	较强
泽泻	泽泻科植物泽泻 <i>Alisma orientalis</i> 的干燥块茎	强
青木香	马兜铃科植物马兜铃 <i>Aristolochia debilis</i> 的干燥根	较强
桂枝	樟科植物肉桂 <i>Cinnamomum cassia</i> 的干燥嫩枝	较强
玄参	玄参科植物玄参 <i>Scrophularia ningpoensis</i> 的干燥根	强
金银花	忍冬科植物忍冬 <i>Lonicera japonica</i> 的干燥花蕾或带初开的花	强

2 方法与结果

2.1 样品制备

分别称取 51 种中药饮片各 500 g, 加 10 倍量水, 煎煮 2 次, 每次 1 h, 滤过, 合并滤液, 浓缩、真空干燥得干浸膏。将干浸膏粉碎, 过 60 目筛, 得样品。

2.2 数据采集

分别取 51 种样品各约 1 g, 置于干燥至恒定质量的称量瓶中, 精密称定, 平行 3 份, 80 °C 真空干

燥至恒定质量, 转移至干燥器内放置 12 h 以上至脱湿平衡^[8], 取出, 精密称定质量, 将平行的 3 份样品分别置于底部盛有饱和氯化镁、溴化钠、氯化钠的干燥器中 (相对湿度分别为 33%、57%、73.5%), 分别在 0、1、2、3、6、9、12、24、36、48、60、72、96、120 h, 精密称定质量, 根据不同时间点下的质量变化, 计算该时间点的吸湿率 [吸湿率 = (吸湿后浸膏粉质量 - 吸湿前浸膏粉质量) / 吸湿

前浸膏粉质量], 绘制吸湿曲线。

2.3 数据分析

2.3.1 数据拟合 使用Origin 8.0数据分析软件对3种湿度下51种中药浸膏粉体的吸湿数据进行拟合, 得到5种动力学模型参数。模型公式见表2。

表2 5种动力学模型公式

Table 2 Equations of five kinetic models

方程名称	公 式
零级过程	$y = A + Bx$
一级过程	$y = a(1 - e^{-bx})$
一元二次曲线方程	$y = a + bx + cx^2$
双指数模型	$y = y_0 + A_1e^{-x/t_1} + A_2e^{-x/t_2}$
威布尔模型	$y = A - (A - B)e^{-(kx)^d}$

2.3.2 统计学分析 使用SPSS 19.0进行统计学分析, 对51种中药浸膏粉体数据的进行非线性拟合, 以分析得到 R^2 、RSS、AIC, 来评价5种动力学模型的拟合情况。并作箱形图分析。拟合结果 R^2 越接近于1, RSS越接近于0, AIC值越小, 表示该方程对中药浸膏粉体吸湿曲线的拟合度越高。

2.4 不同浸膏粉体在3种湿度条件下的5种动力学模型适用性比较

对51种中药浸膏粉体的吸湿数据进行拟合, 选取 R^2 、RSS、AIC为指标来评价模型拟合效果, 3个指标分别取平均值做箱形图, 各动力学模型的分析结果见图1~3。

2.4.1 相对湿度为33%时不同模型的适用性比较 数据拟合结果 R^2 越接近于1, 代表该方程对中药浸膏粉体吸湿曲线的拟合度越高, 由图4-a可知双指数模型、威布尔模型对所选取的51种浸膏粉体的吸湿特性均有较好的拟合度, 且双指数模型略好于威布尔模型; 一级过程模型、一元二次曲线方程模型拟合度次之, 零级过程的波动较大。图4-b为RSS的百分箱形图, 双指数模型、威布尔模型、一级过程模型对51种中药浸膏粉体吸湿数据拟合的RSS值均接近于0, 且波动较小; 一元二次曲线方程RSS值次之, 零级过程对浸膏粉体的吸湿数据拟合度较差, RSS值波动范围和绝对数值都偏大。图4-c为AIC百分箱形图, 其数值越小, 说明拟合度越好, 5种模型对51种中药浸膏粉体吸湿数据拟合度由高到低依次为双指数模型、威布尔模型、一级过程、一元二次曲线方程、零级过程。

2.4.2 相对湿度为57%时不同模型的适用性比较

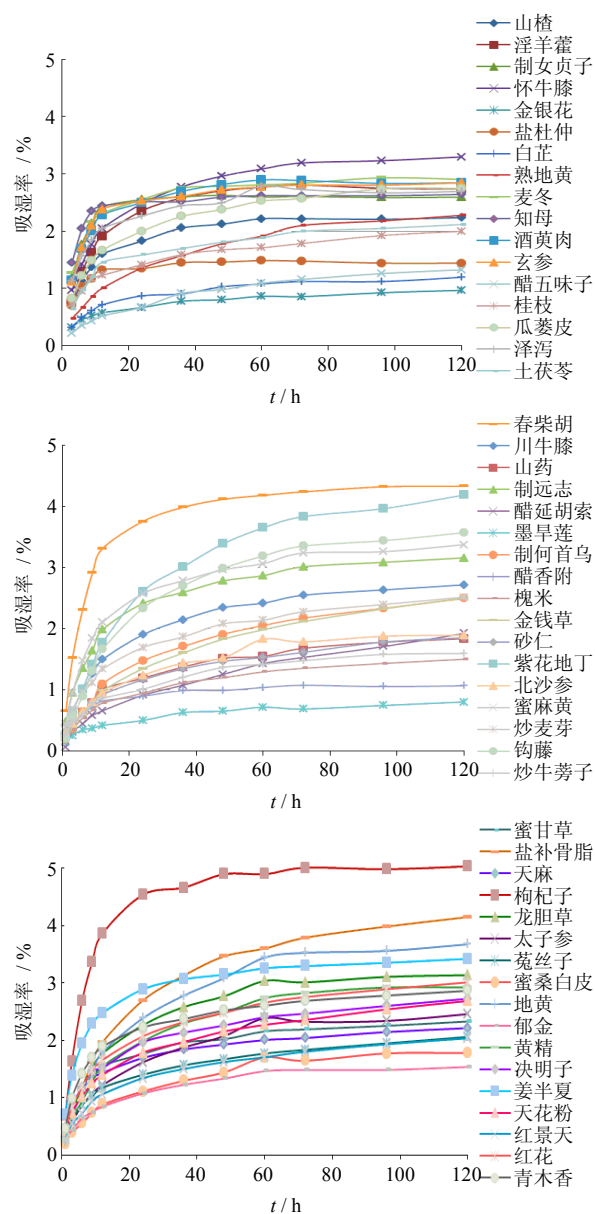


图1 相对湿度为33%时中药浸膏粉体120 h内的吸湿曲线
Fig. 1 Hygroscopic curves of CMM extract powder within 120 h under relative humidity of 33%

由图5-a可看出双指数模型、威布尔模型对所选取的51种浸膏粉体的吸湿特性均有较好的拟合度。图5-b为RSS的百分箱形图, 威布尔模型、双指数模型、一级过程模型对51种中药浸膏粉体吸湿数据拟合的RSS值均接近于0, 且波动较小。图5-c为AIC百分箱形图, 5种模型对51种中药浸膏粉体吸湿数据拟合度由高到低依次为双指数模型、威布尔模型、一级过程、一元二次曲线方程、零级过程。

2.4.3 相对湿度为73.5%时不同模型的适用性比较 图6是相对湿度为73.5%时, 3个分析指标的百分箱形图。由图6-a可知双指数模型、威布尔模型对

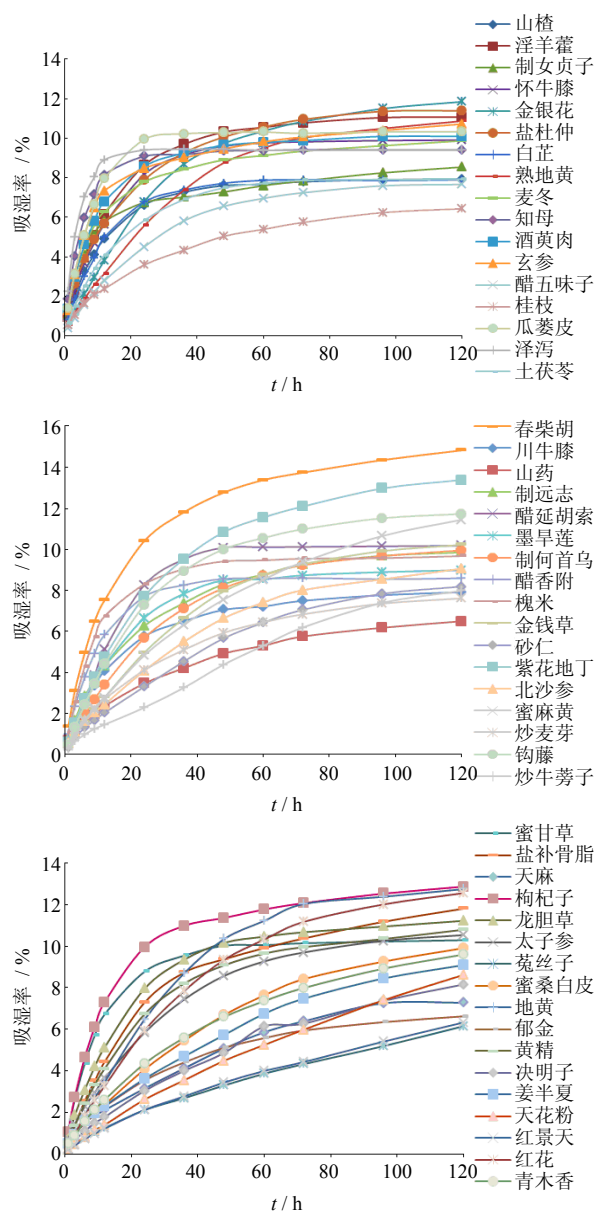


图 2 相对湿度为 57% 时中药浸膏粉体 120 h 内的吸湿曲线
Fig. 2 Hygroscopic curve of CMM extract powder within 120 h under relative humidity of 57%

所选取的 51 种浸膏粉体的吸湿特性均有较好的拟合度；一级过程模型、一元二次曲线方程模型拟合度次之。图 6-b 为 RSS 的百分箱形图，双指数模型、威布尔模型、一级过程模型对 51 种中药浸膏粉体吸湿数据拟合的 RSS 值均接近于 0 且波动较小；一元二次曲线方程 RSS 值次之，零级过程对浸膏粉体的吸湿数据拟合度较差，RSS 值波动范围和绝对数值都偏大。图 6-c 为 AIC 百分箱形图，5 种模型对 51 种中药浸膏粉体吸湿数据拟合度由高到低依次为双指数模型、威布尔模型、一级过程、一元二次曲线方程、零级过程。

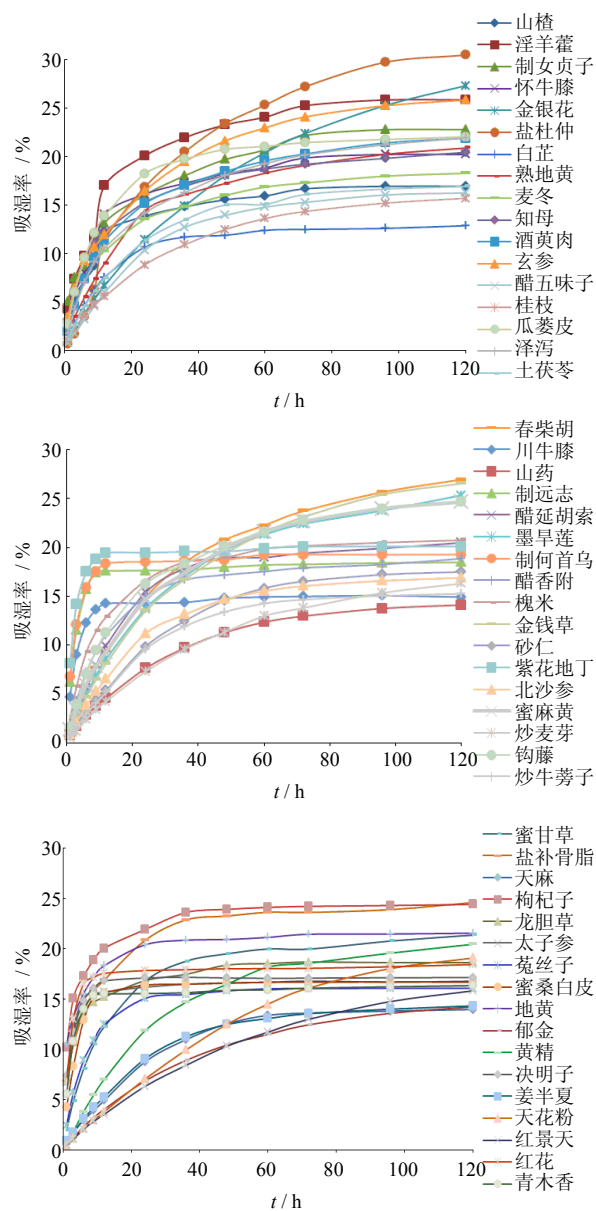
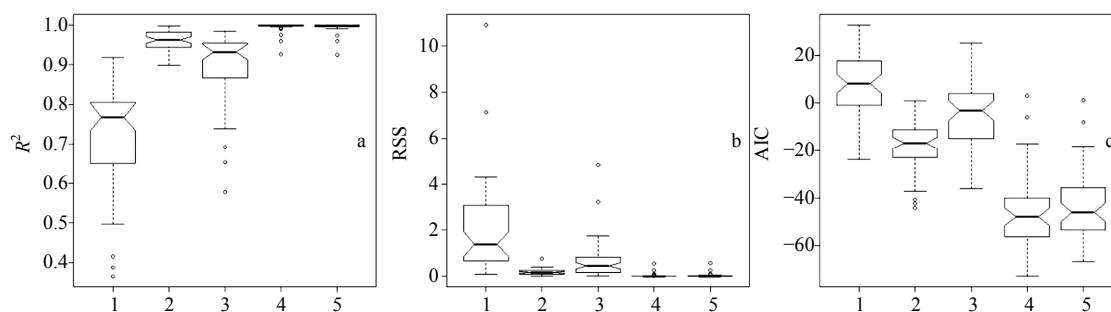


图 3 相对湿度为 73.5% 时中药浸膏粉体 120 h 内的吸湿曲线
Fig. 3 Hygroscopic curve of CMM extract powder within 120 h under relative humidity of 73.5%

2.5 湿度条件对 5 种模型适用性的影响

2.5.1 零级过程 由图 7 可知，运用零级过程拟合中药浸膏粉体吸湿数据时， R^2 均为 0.8 左右，RSS 随湿度的降低越来越接近 0，AIC 值随湿度的降低越来越小。并且 3 个湿度下的吸湿数据分析所得的 R^2 、RSS、AIC 差异较大。说明该模型适用性差，且低湿度环境较高湿度环境拟合效果好。

2.5.2 一级过程 由图 8 可知，运用零级过程拟合中药浸膏粉体吸湿数据时， R^2 均为 0.9 以上，RSS 均接近于 0，AIC 值随湿度的降低越来越小。并且 3 个湿度下的吸湿数据分析所得的 R^2 、RSS、AIC 有



1-零级过程 2-一级过程 3-一元二次曲线方程 4-双指数模型 5-威布尔模型, 图5、6同

1-zero-order process 2-first-order process 3-quadratic equation with one unknown 4-double exponential model 5-Weibull model, same as Figs. 5 and 6

图4 相对湿度为33%时3个分析指标的百分箱形图

Fig. 4 Box-plot of three analysis indicators under relative humidity of 33%

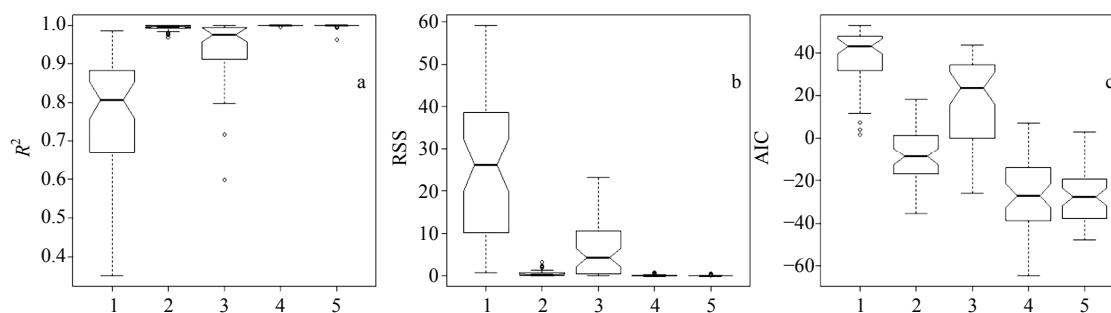


图5 相对湿度为57%时3个分析指标的百分箱形图

Fig. 5 Box-plot of three analysis indicators under relative humidity of 57%

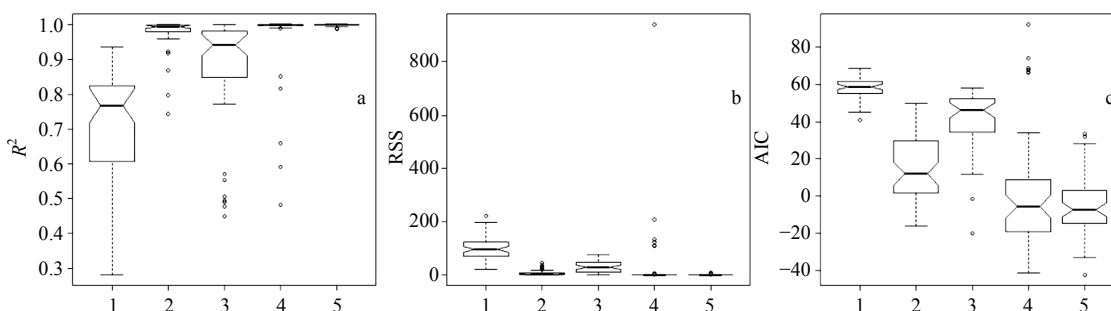


图6 相对湿度为73.5%时3个分析指标的百分箱形图

Fig. 6 Box-plot of three analysis indicators under relative humidity of 73.5%

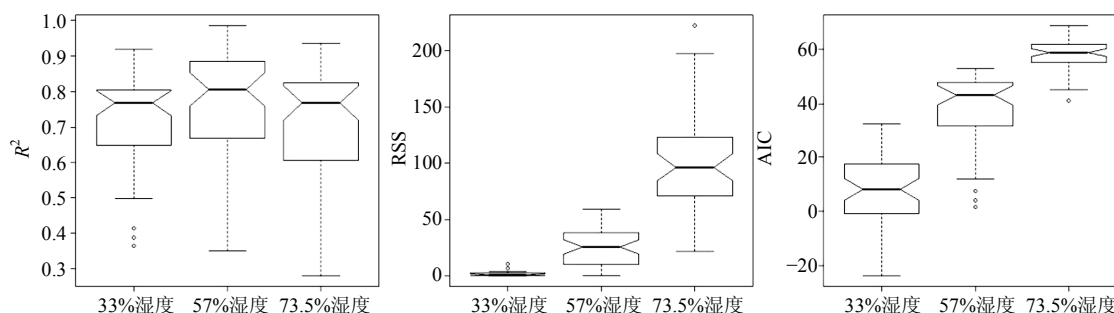


图7 运用零级过程拟合吸湿数据的分析指标的百分箱形图

Fig. 7 Box-plot of analysis indicators using zero-order kinetic fitting moisture absorption data

所差异。说明该模型适用性一般,且对相对湿度为57%的环境下实验数据的适用性相对较好。

2.5.3 一元二次曲线方程 由图9可知,运用零级过程拟合中药浸膏粉体吸湿数据时, R^2 均为0.9以上,RSS随湿度的降低越来越接近0,AIC值随湿度的降低越来越小。并且3个湿度下的吸湿数据分析所得的 R^2 、RSS、AIC差异较大。说明该模型适用性差,且低湿度环境较高湿度环境拟合效果好。

2.5.4 双指数模型 由图10可知,运用零级过程拟合中药浸膏粉体吸湿数据时, R^2 均接近于1,RSS均接近与0,AIC值随湿度的降低越来越小。3个湿度下的吸湿数据分析所得的 R^2 、RSS、AIC值差异甚小。说明该模型几乎不受湿度条件限制,适用性很好。

2.5.5 威布尔模型 由图11可知,运用零级过程拟合中药浸膏粉体吸湿数据时, R^2 均接近于1,RSS均接近于0,AIC值随湿度的降低越来越小。3个湿度下的吸湿数据分析所得的 R^2 、RSS、AIC值差异较小。说明该模型受湿度条件影响很小,适用性良好。

3 讨论

本实验结合中药配方颗粒实际生产情况,选择51种易吸湿中药配方颗粒制备用中药饮片,基源各不相同,具有较好的代表性。依据环境湿度变化范围,分别在低、中、高3种湿度条件下测得吸湿数据。本实验中选择5种常用且拟合度高的吸湿动力学模型进行比较,其他相关吸湿动力学模型尚未见报道。

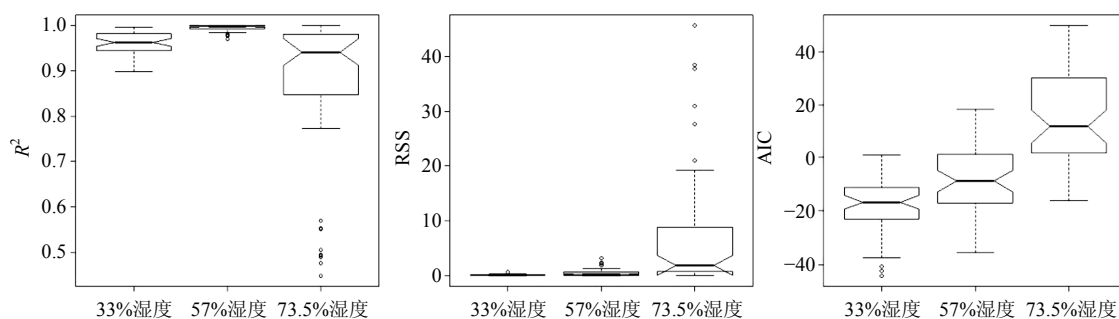


图8 运用一级过程拟合吸湿数据的分析指标的百分箱形图

Fig. 8 Box-plot of analysis indicators using first-order kinetic fitting moisture absorption data

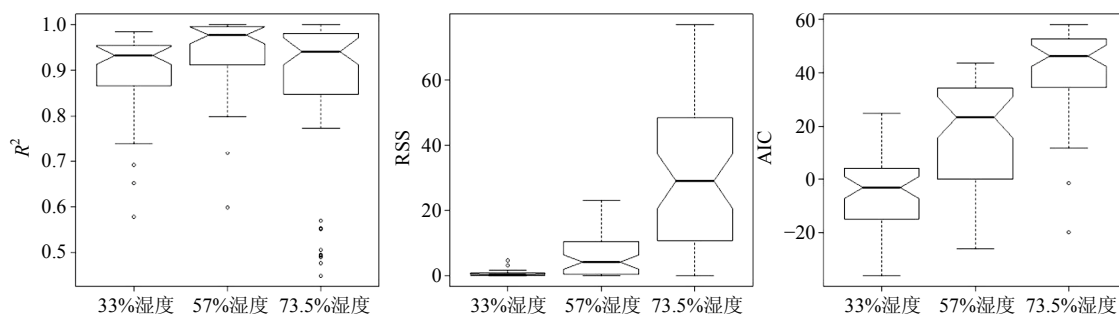


图9 运用一元二次曲线方程拟合吸湿数据的分析指标的百分箱形图

Fig. 9 Box-plot of analysis indicators using quadratic equation of one unknown fitting moisture absorption data

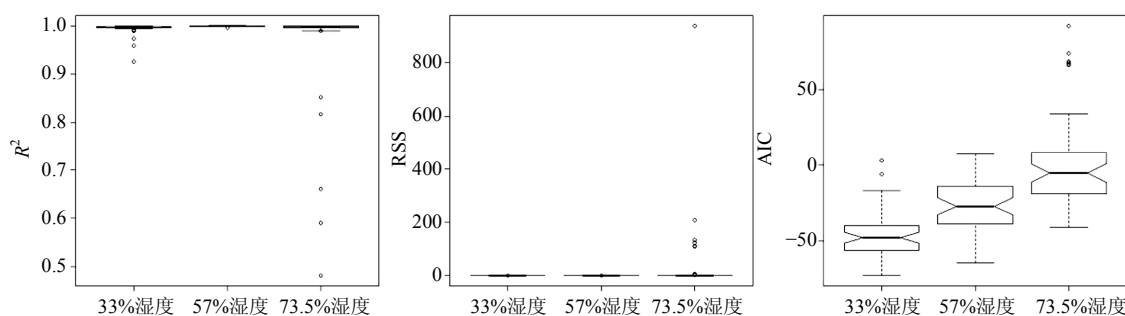


图10 运用双指数模型拟合吸湿数据的分析指标的百分箱形图

Fig. 10 Box-plot of analysis indicators using double exponential model fitting moisture absorption data

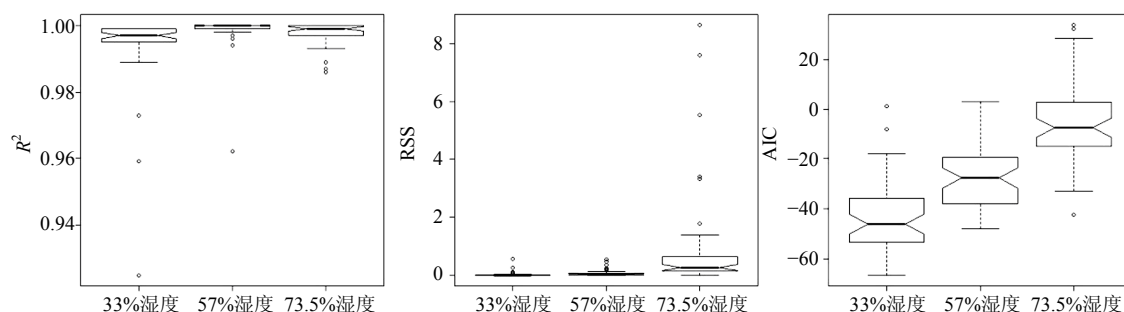


图 11 运用威布尔模型拟合吸湿数据的分析指标的百分箱形图

Fig. 11 Box-plot of analysis indicators using Weibull distribution model fitting moisture absorption data

对3种不同湿度下5种模型的拟合结果综合分析,可看出双指数模型和威布尔模型的拟合情况明显优于其他3种模型。通过比较3个湿度对模型的适用性的影响发现,双指数模型对3个湿度适用性均良好;威布尔模型对3个湿度的适用性微有差异。表明双指数模型能过准确描述中药浸膏粉吸湿过程,且不受实验湿度环境的影响。

双指数模型能很好地反映中药浸膏粉体的吸湿动力学过程。同时,双指数模型在假设中药浸膏粉体的表面吸附和水分从表层向内部扩散的过程中均为一级吸湿模型过程的条件下,符合Fick's定理以及能量物质守恒定律^[9]。中药浸膏粉体的物理学特性对吸湿过程参数的相关性联系有待于进一步研究。通过吸湿速率曲线可以直观比较吸湿性的强弱,吸湿动力学模型的建立为研究物理性质的改变对吸湿特性的影响提供了较好的理论依据。

参考文献

- [1] 杜松,刘美凤. 中药提取物吸湿、结块和发黏现象的机制分析[J]. 中草药, 2008, 39(6): 932-934.
- [2] Alakali J S, Satimehin A A. Moisture adsorption characteristics of Bambara groundnut (*Vigna subterranea*) powders [J]. *Agric Eng Int: CIGR J*, 2007, 29(9): 1-15.
- [3] 王莲,张荣泉,吕方,等. 不同辅料和制备工艺对藿精片吸湿性的影响[J]. 天津药学, 2011, 23(6): 22-24.
- [4] 张娜,姜文雅,魏莉,等. 热熔包衣技术对丹参颗粒吸湿性的影响研究[J]. 中成药, 2013, 35(1): 187-189.
- [5] 魏莉,林洁. 粉末包衣法改善小儿麻甘方口感与吸湿性的研究[J]. 中成药, 2008, 30(8): 1135-1139.
- [6] Chu K K W, Chow A H L. Impact of carbohydrate constituents on moisture sorption of herbal extracts [J]. *Pharm Res*, 2000, 17(9): 1133-1137.
- [7] 严云良,戴晓燕,吴巧凤,等. 4种中药颗粒剂吸湿过程的数学模型应用研究[J]. 中华中医药杂志, 2012, 27(11): 2963-2965.
- [8] 杜若飞,冯怡,刘怡,等. 中药提取物吸湿特性的数据分析与表征[J]. 中成药, 2008, 30(12): 1767-1771.
- [9] 熊耀坤,冯怡,肖飞艳,等. 从热力学和动力学角度探讨中药吸湿机制[J]. 中华中医药杂志, 2011, 26(5): 1189-1193.