·药剂与工艺·

基于水分活度和玻璃化转变理论的泽泻饮片水分限度预测

赵宗艺[1]，先　蕊[2*]，王自敏[1]，尹显梅[1]，杨高婷[1]，赵璐璐[1]，兰志琼[1*]，刘　静[3]，王丽琼[4, 5]

1. 成都中医药大学药学院，四川 成都　611137
2. 泸州市中医医院，四川 泸州　646000
3. 四川农业大学生命科学学院，四川 雅安　625014
4. 重庆大学化学化工学院，重庆　401331
5. 乐山市食品药品检验检测中心，四川 乐山　614000

摘　要：目的　基于水分活度（water activity，A_w）和玻璃化转变理论揭示泽泻 *Alismatis Rhizoma* 饮片的水分吸附特性，为预测泽泻饮片的水分限度，优化其干燥加工、贮藏工艺提供新的理论依据。**方法**　采用静态称量法测定泽泻饮片在 15、25、35、45 ℃下及 A_w 0.11～0.90 内水分吸附等温线（moisture sorption isotherms，MSI），选用 GAB、BET、Peleg、Henderson、Oswin、Smith、Halsey 和 Caurie 共 8 个常见吸附模型对吸附数据进行拟合，确定其最佳拟合模型和参数。通过计算吸附过程的净等量吸附热（net equivalent adsorption，q_{st}）、微分熵和熵-焓互补理论等热力学性质的变化，探讨泽泻饮片水分吸附特性和机制。采用差示扫描量热法测定泽泻饮片的玻璃化转变温度（glass transition temperature，T_g），揭示水分含量对泽泻饮片 T_g 的影响。通过构建基于水分含量-A_w-T_g 的状态图，预测泽泻饮片的水分限度。**结果**　泽泻（饮片）和盐泽泻的吸附等温线呈“S”形，属于 II 型等温线，Peleg 模型为最佳拟合模型，热力学性质显示 2 种泽泻饮片的干燥终点应控制在 10.00%～15.00%，15.00%易达，其后速率减缓，低于 10.00%则耗能骤增；基于状态图分析，当贮藏温度为 20 ℃时，泽泻（饮片）水分含量应≤10.17%；盐泽泻水分含量应≤11.08%。**结论**　食品工业 A_w 和玻璃化转变理论可运用于泽泻饮片水分限度预测研究，为中药贮藏和加工研究提供了一种新的思路和方法。

关键词：泽泻；水分活度；玻璃化转变温度；吸附等温线；水分限度

中图分类号：R283.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2026)21 - 8432 - 12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.21.005

Moisture content limit prediction for *Alismatis Rhizoma* slices based on water activity and glass transition theory

ZHAO Zongyi[1], XIAN Rui[2], WANG Zimin[1], YIN Xianmei[1], YANG Gaoting[1], ZHAO Lulu[1], LAN Zhiqiong[1], LIU Jing[3], WANG Liqiong[4, 5]

1. School of Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China
2. Luzhou Traditional Chinese Medicine Hospital, Luzhou 646000, China
3. College of Life Science, Sichuan Agricultural University, Ya’an 625014, China
4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331, China
5. Leshan Food and Drug Inspection and Testing Center, Leshan 614000, China

Abstract: Objective　To reveal the moisture adsorption characteristics of Zexie (*Alismatis Rhizoma*, AR) slices based on the water activity (A_w) and glass transition theory, providing a novel theoretical basis for predicting the specified moisture limit and for optimizing the drying process and storage conditions. **Methods**　The moisture sorption isotherms (MSI) of AR slices were determined at 15, 25,

收稿日期：2026-06-25

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFC3507001）；成都中医药大学“杏林学者”学科人才科研提升项目（XCZX2022006）

作者简介：赵宗艺，硕士研究生，研究方向为中药质量控制。E-mail: 1305209115@qq.com

***通信作者：**兰志琼，副教授，硕士生导师，从事中药资源开发与利用研究。E-mail: lanlan1979512@126.com

先　蕊，硕士，从事中药质量控制研究。E-mail: 572863225@qq.com

35, and 45 ℃ within a A_w range of 0.11—0.90 using the static gravimetric method. Eight common adsorption models, namely GAB, BET, Peleg, Henderson, Oswin, Smith, Halsey, and Caurie, were employed to fit the adsorption data and to determine the best-fitting model and its parameters. The changes in thermodynamic properties, including the net equivalent adsorption (q_{st}), differential entropy, and the enthalpy-entropy compensation theory, were calculated to explore the moisture sorption characteristics and mechanisms of AR slices. The glass transition temperature (T_g) of AR slices was measured using differential scanning calorimetry to reveal the effect of moisture content on T_g. A state diagram based on the relationship between moisture content, A_w, and T_g was constructed to predict the specified moisture limit for storage. **Results** The adsorption isotherms of AR (decoction pieces) and salt-processed AR displayed an S-shaped curve, characteristic of type II isotherms. The Peleg model was identified as the best-fitting model. Thermodynamic analysis indicated that the drying endpoint for both types of slices should be controlled within 10.00%—15.00%. 15.00% is easily reached, drying slows thereafter, and below 10.00% energy consumption rises steeply. Analysis based on the state diagram showed that at a storage temperature of 20 ℃, the moisture content of AR (decoction pieces) should not exceed 10.17%, and that of salt-processed AR should not exceed 11.08%. **Conclusion** The theories of A_w and glass transition from the food industry can be applied to predict the specified moisture limit of AR slices. This provides a novel approach and methodology for the research on storage and processing of traditional Chinese medicines.

Key words: *Alismatis Rhizoma*; water activity; glass transition temperature; moisture adsorption isotherm; specified moisture limit

据统计，全球中药市场年规模已达数千亿美元，预计 2030 年将攀升至 5 500 亿美元[1]。快速扩张的市场格局对中药材贮藏运输过程中的质量稳定性控制提出了更高要求，亟须建立先进、科学的质量保障技术体系。在中药贮藏养护学基本理论中，贮藏条件是影响中药品质的重要外在因素，其中温度与相对湿度的控制尤为重要。水分不仅是影响中药品质的重要内在因素，更是衔接环境条件与中药材品质的核心纽带，环境温度升高会增强水分的迁移活性，促进中药材对环境湿度中水分的吸附[2]，从而进一步降低其自身稳定性[3]。《粮食安全储存水分》（GB/T 43994-2024）中指出在常规储藏和控温储藏条件下，粮食能够在当地安全度夏而不发热、不霉变的最高水分值为该粮食的安全储存水分值[4]，为保障中药流通中的质量，确定中药的水分限度至关重要。然而，中药目前常用的水分限度检测方法如长期留样观察法，耗时耗力且结果易受主观经验影响而产生误差[5]，亟待结合更为科学和客观的研究方法提供理论依据和数据参考。

水分活度（water activity，A_w）与玻璃化转变温度（glass transition temperature，T_g）是热力学领域表征物料水分状态与稳定性的核心指标，一直以来是食品工业中研究食品水分限度与保质期的经典参数。在平衡状态下，水分吸附等温线（moisture sorption isotherms，MSI）可体现 A_w 与水分含量之间的关联[6]，但食品通常处于非平衡状态，并且单一的 MSI 也无法解释食品在加工和贮藏过程中可能发生的全部变化，例如物态变化[7]。因此基于 T_g 的补充理论被提出，该理论认为物料贮藏温度低于其 T_g 时，物料处于稳定的玻璃态[8]。而物料的 T_g 受其水分含量的影响，水分含量越高，T_g 越低，因此可通过降低物料的水分含量提高其 T_g，以便于其贮藏[9]。两者联用在理论层面可更好地避免单一方法的局限性。近年来，结合 T_g 与 MSI 的方法已被证实能比单一方法更快速、更准确地预测食品如冻干柿片[10]、冻干香菇[11]、芒果[12]、菱角[13]等的水分限度，预测其保质期并优化加工、包装与贮藏工艺[14-15]。这些均为将该方法应用于中药水分限度预测提供了科学依据。

泽泻为东方泽泻 *Alisma orientale* (Sam.) Juzep. 或泽泻 *A. plantago-aquatica* Linn.的干燥块茎[16]，在中国、韩国、日本、越南、泰国等多国广泛用于治疗高脂血症、糖尿病、肥胖及癌症等病症[17-19]。中国是泽泻的最大产区，年产量可达 9 500 t[20]。研究表明泽泻富含淀粉，其淀粉质量分数最低为 0.25 g/g[21]。数据显示，泽泻中直链淀粉质量分数约为 0.25 g/g，蛋白质质量分数约 0.20 g/g[21-22]。淀粉和蛋白质是影响泽泻吸湿特性及贮藏稳定性的重要内在因素，共同影响了泽泻饮片的贮藏条件。

中药材通常会被加工为饮片以供贮藏流通以及临床应用，泽泻饮片是中药泽泻商品流通及贮存主要产品形式。相较于完整药材，饮片在高湿条件诱导下更易吸附环境中水分，从而发生霉变、虫蛀等变质现象，造成质量下降，甚至影响临床药效，并同时产生经济损耗。因此，本研究以富含淀粉与蛋白质的泽泻饮片为例[23]，重点探讨结合 T_g 与 MSI 预测其水分限度的方法应用，以期为富含淀粉或蛋白质类中药材的水分限度提供参考依据。

通过测定 MSI，探究了泽泻（饮片）与盐泽泻的水分含量与 A_w 之间的关系；同时通过测定 T_g 的变化，分析了水分含量与 T_g 的关联。最终，通过构建泽泻饮片水分含量-A_w-T_g 关系状态图，首次阐明水分对 2 种泽泻饮片贮藏稳定性的影响，预测泽泻饮片的贮藏水分限度，为进一步结合中药长期留样观察法研究确定泽泻饮片水分限度提供理论依据与数据参考。

1 仪器与材料

1.1 仪器

HD-6 型智能水分活度仪，无锡市华科仪器仪表有限公司；RTOP-400Y 型人工气候箱，浙江托普云农科技股份有限公司；Q200 型差示扫描量热仪，美国热分析仪器公司；BP121S 型电子分析天平，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；CTD-CT 型热风循环烘箱，成都通达干燥设备有限公司。

1.2 材料

泽泻（饮片）（批号 2202034）、盐泽泻（批号 2212079）均购买自四川新荷花中药饮片股份有限公司，经成都中医药大学兰志琼副教授鉴定为泽泻科泽泻属植物泽泻 *A. plantago-aquatica* Linn.的炮制加工品。

1.3 试药

氯化锂、氯化镁、碳酸钾、溴化钠、氯化钠、氯化钾、麝香草酚等均为分析纯，购自成都市科隆化学品有限公司。

2 方法与结果

2.1 样品的制备

随机选取大小、厚薄均匀的泽泻（饮片）和盐泽泻，每组样品（8.0±0.5）g，平铺于托盘中，置于 60 ℃的热风循环烘箱中干燥至恒定质量，采用烘干法测定样品的初始水分含量（X_0），分别为 5.04%和 5.33%。

2.2 水分吸附研究

2.2.1 泽泻（饮片）与盐泽泻的水分吸附测定 采用静态称重法测定泽泻（饮片）和盐泽泻在不同温度和 A_w 下的水分吸附数据[24]。温度控制采用 RTOP-400Y 人工气候室，相对湿度通过不同的饱和盐溶液控制，不同温度下各饱和盐溶液（氯化锂、氯化镁、碳酸钾、溴化钠、氯化钠、氯化钾）的 A_w 值见表 1。为防止霉菌生长，在 A_w 大于 0.7 的干燥器内放入 0.5 g 麝香草酚。实验中使用的氯化钠、氯化镁、碳酸钾等无机盐均为分析纯，质量分数≥99.9%。定期测量样品的质量，直到连续 2 次测量的质量差小于 0.3 mg，视为平衡，此时样品的水分含量视为平衡水分含量（equilibrium moisture content，X_e），每个实验重复 3 次。

表 1 不同温度下饱和盐溶液的 A_w 值（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 1 A_w values of saturated salt solutions at different temperatures ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

温度/℃	A_w		
	氯化锂	氯化镁	碳酸钾
15	0.113±0.001	0.332±0.002	0.440±0.004
25	0.113±0.001	0.329±0.002	0.435±0.003
35	0.113±0.001	0.323±0.003	0.432±0.002
45	0.113±0.002	0.316±0.003	0.430±0.002
温度/℃	A_w		
	溴化钠	氯化钠	氯化钾
15	0.577±0.007	0.762±0.004	0.865±0.003
25	0.566±0.006	0.751±0.002	0.851±0.004
35	0.547±0.003	0.747±0.002	0.836±0.003
45	0.535±0.004	0.739±0.001	0.816±0.003

2.2.2 泽泻（饮片）与盐泽泻的吸附等温线 以 A_w 为横坐标，不同温度（15、25、35、45 ℃）下的 X_e 为纵坐标，绘制泽泻（饮片）和盐泽泻的 MSI，结果如图 1 所示。当 A_w＜0.6 时，X_e 增长速率缓慢，而 A_w＞0.6 时，X_e 迅速增长。泽泻（饮片）和盐泽泻的 MSI 均呈“S”形，为 II 型等温线[25]。这类等温线在谷物、水果和种子等含有蛋白质和淀粉的生物制品中是典型的[26]。“S”形吸附等温线可分为 3 个区域，不同区域中水的能量状态不同。在区域 I（A_w＜0.2）中，吸附主要表现为单分子层吸附，水分子通过氢键牢固地结合在材料表面的极性位点上[26]。在区域 II（0.2＜A_w＜0.7）中，水分流动性增强，部分化学反应速率提高，从而引发材料的玻璃化-橡胶态转变；这部分是唯一可以通过调节 A_w 和水分含量来控制材料微生物的水分限度。当水分含量进入区域 III（A_w＞0.7）时，水分流动性进一步增大，导致不利化学反应速率和微生物生长速度急剧加快。

2.3 吸附模型研究

2.3.1 泽泻（饮片）和盐泽泻吸附模型的选择 选用 8 种食品、农产品行业常用的吸附模型对泽泻（饮片）和盐泽泻的吸附数据进行拟合[27-34]。表 2 总结了本研究中使用的模型方程。采用 Origin 2021 分析软件进行曲线非线性拟合，并采用决定系数（coefficient of determination，R^2）、残差平方和（sum

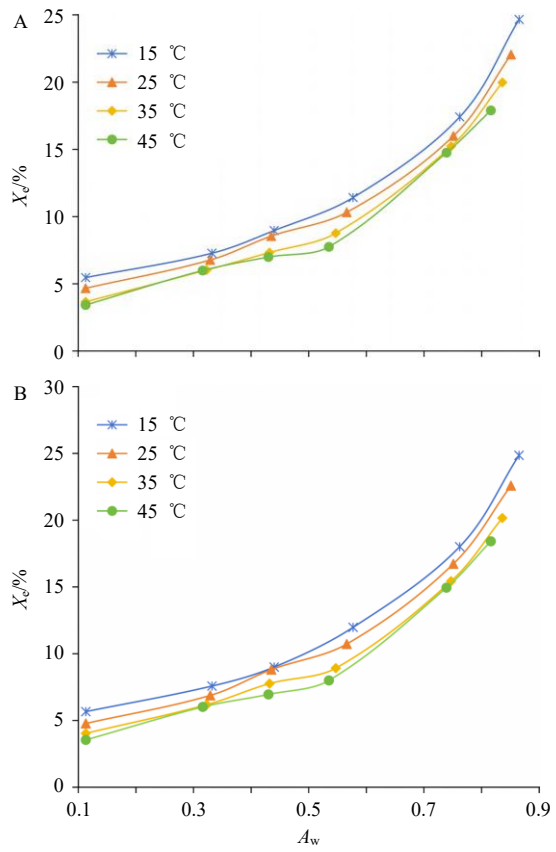


图 1　泽泻（饮片，A）和盐泽泻（B）在 15、25、35、45 ℃的 MSI

Fig. 1　MSI of plain *Alismatis Rhizoma* decoction pieces (ARP, A) and salt-processed *Alismatis Rhizoma* decoction pieces (SARP, B) at 15, 25, 35, 45 ℃

表 2　MSI 模型拟合公式

Table 2　MSI model fitting formula

模型	拟合公式
GAB[27]	$X_e=cKX_mA_w/[(1-KA_w)(1-KA_w+cKA_w)]$
BET[28]	$X_e=cX_mA_w/\{(1-A_w)[1+(c-1)A_w]\}$
Peleg[29]	$X_e=aA_w^c+bA_w^d$
Henderson[30]	$X_e=[-\ln(1-A_w)/a]e^{1/b}$
Oswin[31]	$X_e=a[A_w/(1-A_w)]e^b$
Smith[32]	$X_e=a-b[\ln(1-A_w)]$
Halsey[33]	$X_e=(-a/\ln A_w)e^{1/b}$
Caurie[34]	$X_e=e^{(a+bA_w)}$

X_m 为单分子层水分含量；a、b、c、d 和 K 为模型系数；表 3 同。X_m is monolayer moisture content; a, b, c, d, and K are model coefficients; Same as table 3.

of squares，SSE）与均方根误差（root mean square error，RMSE）评估模型的拟合精度，以 R^2 越接近 1，SSE 和 RMSE 越小为优。

2.3.2　泽泻（饮片）和盐泽泻吸附等温线的模型拟合及评价　泽泻（饮片）和盐泽泻与不同模型的拟合参数和相关系数见表 3。R^2 越接近 1，则 SSE、RMSE 值越小，说明模型拟合效果越好。Peleg 模型同样适用于无花果[35]、玉米[36]及积雪草[37]等物料的水分吸附描述。结果显示，Peleg 模型对泽泻（饮片）和盐泽泻的 MSI 拟合度最佳，其 $R^2>0.99$。其次为 Halsey、Smith、Oswin 和 GAB 模型，$R^2>0.97$。此外，通过比较模型预测值和实验实测值，进一步验证了 Peleg 模型的高拟合精度，结果如图 2 所示。

将表 3 得出的 Peleg 模型参数（a、b、c、d）代入 Peleg 模型方程式，即可得出泽泻（饮片）与盐泽泻在 4 个温度下的水分吸附 Peleg 模型表达式，结果见表 4。

在食品安全贮藏理论中认为 $A_w<0.9$，细菌不生长；$A_w<0.8$，大多数霉菌不生长；$A_w<0.6$，绝大多数微生物都无法生长[38]，当 $A_w<0.6$ 时，绝大多数微生物的生长和繁殖被完全抑制。如图 1 所示，当 $A_w>0.6$ 时，泽泻（饮片）和盐泽泻的 X_e 增长速率加快。因此，将 $A_w=0.6$ 时对应的 X_e 视为泽泻（饮片）和盐泽泻的相对水分限度。基于泽泻（饮片）和盐泽泻的 Peleg 模型，在 15、25、35、45 ℃时的泽泻（饮片）相对水分限度分别为 11.63%、11.00%、10.15%、9.75%，盐泽泻的相对水分限度分别为 11.82%、11.52%、10.34%、9.90%。

尽管 GAB 模型不是最优模型，但其模型参数可以得出样品的 X_m，是指被强烈吸附在物体表面特定部位的水量[39]。当水分含量低于其 X_m 时，此时被物体吸附的水无法作为自由水参与各种反应，因此可以把 X_m 定义为绝对水分限度[40]。如表 3 所示，泽泻（饮片）在 15、25、35、45 ℃的 X_m 分别为 5.29%、4.89%、4.28%、3.99%；盐泽泻的 X_m 分别为 5.40%、5.08%、4.40%、4.15%。在相同温度下，盐泽泻的 X_m 值高于泽泻（饮片），说明盐处理增加了饮片表面可用于吸附水分的活性位点数量。

2.4　净等量吸附热（net equivalent adsorption，q_{st}）和微分熵应用

2.4.1　q_{st} 和微分熵的测定　q_{st} 是指在固定温度和 A_w 下，打破水分子和材料之间的化学键所需要的能量[41]，q_{st} 可以反映水分子与饮片表面结合力的大小。由式（1）可知，q_{st} 是吸附热（sorption heat，Q_{st}）与纯水蒸发潜热（latent heat of vaporization，L_v）的差值，假设 q_{st} 不随温度变化，则可以根据式（2）进行计算[42]。

$$Q_{st}=q_{st}+L_v \quad (1)$$

表 3 泽泻（饮片）和盐泽泻吸附等温线模型拟合参数和相关系数

Table 3 Fitting parameters and correlation coefficients of adsorption isotherm models for ARP and SARP

模型	参数	泽泻（饮片）				盐泽泻			
		15 ℃	25 ℃	35 ℃	45 ℃	15 ℃	25 ℃	35 ℃	45 ℃
GAB	X_m	0.052 9	0.048 9	0.042 8	0.039 9	0.054 0	0.050 8	0.044 0	0.041 5
	c	-1.29×10^{44}	2.81×10^{44}	1.33×10^{45}	2.22×10^{45}	1.88×10^{44}	-2.25×10^{44}	6.08×10^{44}	-1.83×10^{45}
	K	0.909 1	0.916 3	0.944 0	0.959 7	0.906 0	0.914 1	0.939 3	0.950 6
	R^2	0.997 3	0.992 2	0.986 0	0.972 6	0.996 7	0.989 0	0.986 3	0.973 8
	SSE	0.000 4	0.000 1	0.000 2	0.000 3	0.000 1	0.000 2	0.000 2	0.000 3
	RMSE	0.003 8	0.005 8	0.007 2	0.009 3	0.004 0	0.007 0	0.007 1	0.009 1
BET	X_m	0.037 3	0.036 5	0.035 5	0.035 3	0.037 6	0.037 6	0.036 0	0.035 8
	c	2.57×10^{145}	2.73×10^{149}	-3.34×10^{141}	1.46×10^{3}	-6.93×10^{129}	1.25×10^{140}	2.19×10^{145}	-1.44×10^{146}
	R^2	0.864 8	0.893 9	0.951 1	0.962 8	0.855 6	0.886 8	0.944 3	0.958 1
	SSE	0.002 8	0.001 8	0.000 7	0.000 5	0.003 1	0.002 0	0.000 8	0.000 5
	RMSE	0.026 6	0.021 1	0.013 5	0.010 8	0.027 6	0.022 6	0.014 5	0.011 5
Peleg	a	0.106 9	0.109 4	0.095 0	0.087 2	0.109 8	0.253 3	0.254 1	0.233 4
	b	0.284 9	0.261 3	0.254 5	0.239 1	0.283 7	0.107 3	0.096 5	0.088 2
	c	0.317 6	0.399 4	0.411 5	0.412 9	0.323 0	4.398 4	4.560 7	4.118 4
	d	4.728 7	4.949 0	4.584 4	4.244 7	4.747 3	0.379 5	0.400 3	0.404 9
	R^2	0.998 5	0.998 9	0.999 2	0.995 7	0.998 0	0.998 9	0.998 9	0.996 2
	SSE	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 1
	RMSE	0.004 4	0.003 3	0.002 7	0.005 8	0.005 2	0.003 5	0.003 2	0.005 5
Henderson	a	14.064 4	15.659 8	14.279 3	14.911 1	14.307 6	15.023 1	14.731 7	15.441 7
	b	1.346 4	1.354 0	1.256 9	1.249 2	1.364 6	1.354 4	1.282 3	1.274 9
	R^2	0.951 1	0.961 2	0.967 3	0.965 0	0.951 2	0.966 5	0.965 4	0.966 3
	SSE	0.001 0	0.000 7	0.000 5	0.000 4	0.001 0	0.000 6	0.000 5	0.000 4
	RMSE	0.016 0	0.012 8	0.011 1	0.010 5	0.016 1	0.012 3	0.011 4	0.010 3
Oswin	a	0.103 5	0.096 5	0.086 9	0.082 6	0.105 2	0.099 6	0.088 9	0.084 4
	b	0.459 1	0.466 5	0.507 3	0.522 1	0.454 0	0.465 6	0.498 6	0.512 7
	R^2	0.987 0	0.991 4	0.991 1	0.984 9	0.987 3	0.992 6	0.990 1	0.986 0
	SSE	0.000 3	0.000 1	0.000 1	0.000 2	0.000 3	0.000 1	0.000 1	0.000 2
	RMSE	0.008 3	0.006 1	0.005 8	0.006 9	0.008 2	0.005 8	0.006 1	0.006 7
Smith	a	0.032 8	0.029 4	0.021 6	0.019 2	0.034 1	0.030 1	0.023 3	0.020 6
	b	0.102 7	0.097 2	0.095 9	0.093 1	0.103 1	0.100 5	0.096 1	0.093 3
	R^2	0.987 9	0.991 5	0.989 7	0.984 5	0.988 6	0.994 1	0.989 6	0.986 4
	SSE	0.000 3	0.000 1	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 1	0.000 2	0.000 2
	RMSE	0.008 0	0.006 0	0.006 2	0.007 0	0.007 8	0.005 2	0.006 3	0.006 5
Halsey	a	0.013 0	0.012 9	0.015 5	0.016 9	0.012 9	0.013 5	0.015 1	0.016 4
	b	1.725 0	1.676 6	1.531 6	1.465 6	1.742 4	1.681 2	1.556 1	1.490 3
	R^2	0.998 6	0.998 8	0.996 7	0.989 4	0.998 7	0.997 3	0.996 3	0.989 8
	SSE	0.000 2	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 1
	RMSE	0.002 7	0.002 3	0.003 5	0.005 8	0.002 7	0.003 5	0.003 7	0.005 7
Caurie	a	−3.421 4	−3.484 2	−3.665 2	−3.726 4	−3.390 6	−3.453 0	−3.620 7	−3.682 9
	b	2.285 8	2.273 6	2.426 5	2.445 4	2.258 6	2.273 6	2.383 8	2.402 1
	R^2	0.976 5	0.983 4	0.988 4	0.986 6	0.976 6	0.988 2	0.987 6	0.988 1
	SSE	0.000 5	0.000 3	0.000 2	0.000 2	0.000 5	0.000 2	0.000 2	0.000 1
	RMSE	0.011 1	0.008 4	0.006 6	0.006 5	0.011 1	0.007 3	0.006 8	0.006 1

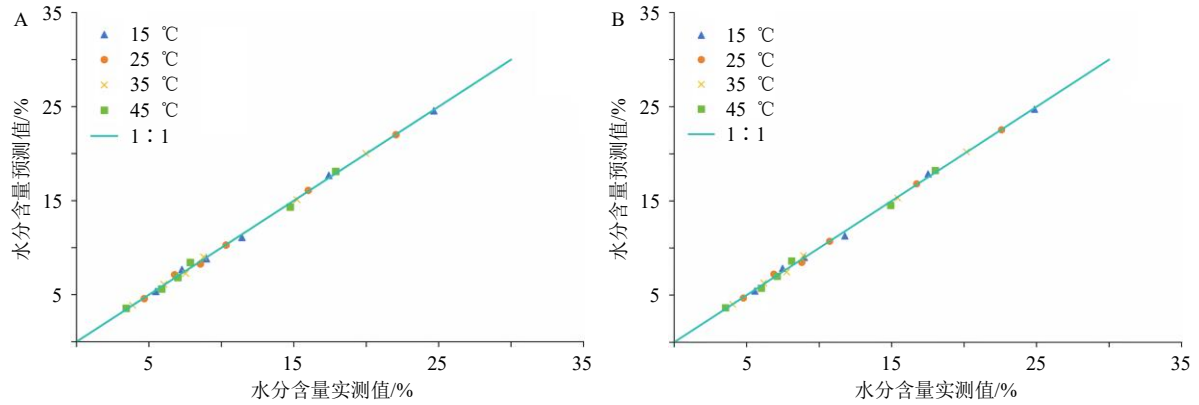


图 2 泽泻（饮片，A）和盐泽泻（B）水分含量 Peleg 模型预测值与实测值的关系

Fig. 2 Relationship between Peleg model-predicted and experimentally measured moisture contents of ARP (A) and SARP (B)

表 4 泽泻（饮片）和盐泽泻水分吸附 Peleg 模型表达式

Table 4 Moisture sorption Peleg model expressions for ARP and SARP

温度/℃	模型表达式	
	泽泻（饮片）	盐泽泻
15	$X_e=0.106\,9\,A_w^{0.317\,6}+0.284\,9\,A_w^{4.728\,7}$	$X_e=0.109\,8\,A_w^{0.323\,0}+0.283\,7\,A_w^{4.747\,3}$
25	$X_e=0.109\,4\,A_w^{0.399\,4}+0.261\,3\,A_w^{4.949\,0}$	$X_e=0.253\,3\,A_w^{4.398\,4}+0.107\,3\,A_w^{0.379\,5}$
35	$X_e=0.095\,0\,A_w^{0.411\,5}+0.254\,5\,A_w^{4.584\,4}$	$X_e=0.254\,1\,A_w^{4.560\,7}+0.096\,5\,A_w^{0.400\,3}$
45	$X_e=0.087\,2\,A_w^{0.412\,9}+0.239\,1\,A_w^{4.244\,7}$	$X_e=0.233\,4\,A_w^{4.118\,4}+0.088\,2\,A_w^{0.404\,9}$

$$[\partial(\ln A_w)/\partial(1/T)]_{X_e}=-(Q_{st}-L_v)/R=-q_{st}/R \quad (2)$$

微分熵（differential entropy，ΔS_d）与水分子和物料之间的吸引力和排斥力有关，其大小与材料的水分吸附位点数呈正比[43]，可由公式（3）Gibbs-Helmholts 方程计算。将吉布斯自由能（Gibbs free energy，ΔG）计算公式（4）代入式（3），即可得到式（5）q_{st} 与 ΔS_d 的关系[44]。

$$\Delta S_d=(q_{st}-\Delta G)/T \quad (3)$$

$$\Delta G=-\ln A_w \quad (4)$$

$$\ln A_w=-q_{st}/RT+\Delta S_d/R \quad (5)$$

T 为绝对温度（K），R 为气体常数［8.314 J/(mol·K)］

2.4.2 泽泻（饮片）和盐泽泻的水分吸附特性 基于 Peleg 模型的拟合数据，计算了泽泻（饮片）和盐泽泻的 q_{st} 和 ΔS_d。由式（5）可知，以 $1/T$ 为横坐标、$-\ln A_w$ 为纵坐标作图（图 3），可由曲线斜率计算 q_{st}，并由曲线截距计算 ΔS_d（图 4）。

如图 4 所示，随着 X_e 的增大，泽泻（饮片）和盐泽泻的 q_{st} 逐渐减小，最终趋于恒定。这是因为在吸附过程中，饮片的初始水分含量较低，表面有许多活性吸附位点，水分子与饮片表面紧密结合，形成单分子层水[45]。但随着吸附的进行，饮片表面的可吸附位点数量减少，被吸附的水分子逐渐转化为

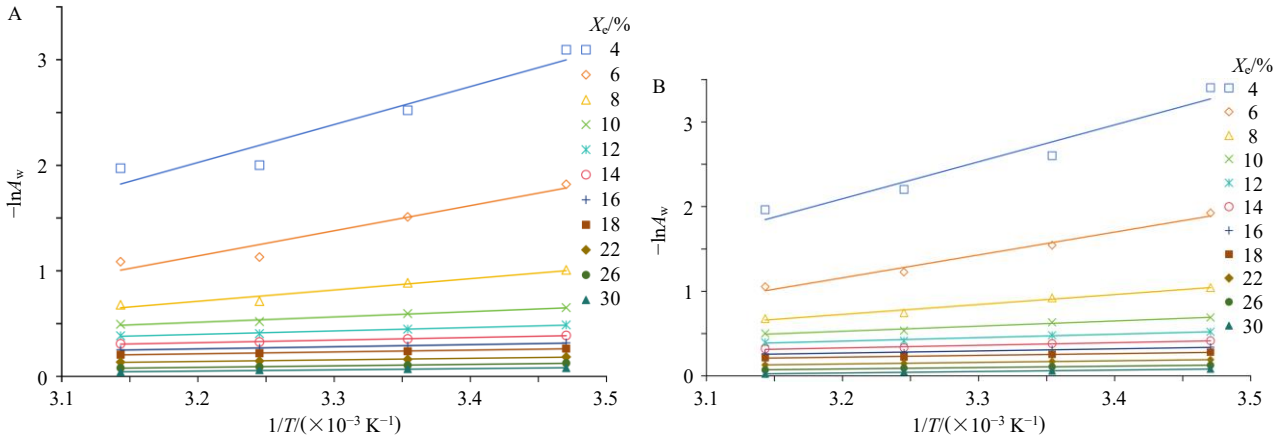


图 3 泽泻（饮片，A）和盐泽泻（B）水分吸附过程中 $1/T$ 与 $-\ln A_w$ 的关系

Fig. 3 Relationship between $1/T$ and $-\ln A_w$ for moisture adsorption of ARP (A) and SARP (B)

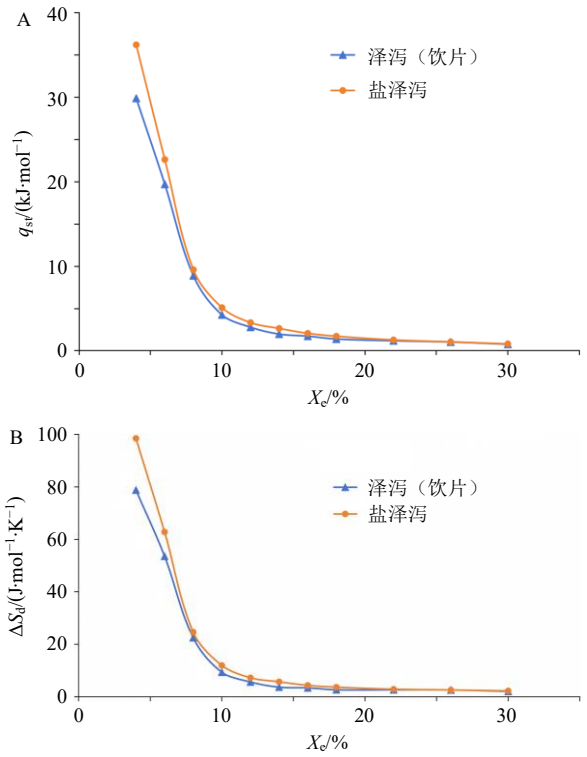


图 4　泽泻（饮片）和盐泽泻 q_{st} (A) 和 ΔS_d (B) 与饮片 X_e 的关系

Fig. 4　Relationships between q_{st} (A), ΔS_d (B) and X_e of ARP and SARP

多分子层水，使得水分子与饮片之间的相互作用力急剧减弱[46]。当 X_e 降低至 15.00%时，q_{st} 开始增加，当 X_e＜10.00%时，q_{st} 急剧增加。当饮片发生多分子吸附时，第 2 层以上的吸附力远小于单层吸附的吸附力，其吸附热值具有较大差异，此时可以认为饮片表面的活性位点基本被占据，形成紧密的单层结合状态，此时体系的含水量被认为是最佳 X_e，即为最佳干燥终点[47]。物料的高 q_{st} 意味着在干燥过程中需要更多的能量来蒸发物料产品中的水分[48]，结果显示，干燥至 15.00%，饮片的 q_{st} 始终很低，表明干燥较容易，低于 15.00%时，干燥速度减缓，耗能增加，低于 10.00%时，q_{st} 骤增，表明此时需要更大的能量。因此建议将泽泻（饮片）和盐泽泻的最终干燥水分控制在 10.00%～15.00%较为经济。

如图 4 所示，随着水分含量的增加，2 种泽泻饮片的 ΔS_d 与 q_{st} 相似，均呈下降趋势。ΔS_d 与材料水分吸附过程中吸附位点数量的变化有关[49]。随着吸附的进行，表面可吸附的位点数量逐渐减少，当 X_e＞15.00%时，ΔS_d 趋近于 0，表示表面可吸附的位点数量逐渐减少，最终趋近于 0。

此外，在整个吸附过程中，盐泽泻的 q_{st} 和 ΔS_d 始终高于泽泻（饮片）。该结果表明，盐泽泻（饮片）对吸附过程中的传热传质有较大的阻碍作用，对水分子的吸附需要消耗较多的能量。同时，盐泽泻比泽泻（饮片）有更多的吸附位点，能够吸附更多的水分。这种差异可能与加工后成分的变化有关。

2.5　熵-焓互补理论应用

2.5.1　熵-焓互补理论　利用熵-焓互补理论可以评价水分吸附过程的物理、化学现象，以及该过程中熵、焓变化规律，从而分析水分吸附过程的吸附机制，该理论表明，q_{st} 与 ΔS_d 之间存在线性关系，如式（6）。式中 T_β 为等速温度，单位为 K。ΔG_β 为 T_β 时的吉布斯自由能，单位为 kJ/mol。Krug 等[50]提出当等速温度（T_β）≠调和平均温度（T_{hm}）时，熵-焓互补理论是适用的。若 T_β＞T_{hm}，则吸附过程由焓驱动；若 T_β＜T_{hm}，则吸附过程由熵驱动。T_{hm} 可以通过式（7）计算。式中 n 为等温线数目。

$$q_{st}=T_\beta\Delta S_d+\Delta G_\beta \quad (6)$$

$$T_{hm}=n/\sum_{i=1}^{n} 1/T_i \quad (7)$$

2.5.2　泽泻（饮片）和盐泽泻的水分吸附机制　结果如图 5 所示，q_{st} 与 ΔS_d 之间存在良好的线性关系（R^2＞0.998）。因此，可以应用熵-焓互补理论对实验范围内泽泻（饮片）和盐泽泻的水分吸附过程进行评价[13]。由式（7）可得，调和平均温度 T_{hm} 为 302.67 K。由式（6）和图 5 计算可知，泽泻（饮片）和盐泽泻的 T_β 分别为 370.73、362.12 K，ΔG 分别为 388.70、379.07 J/mol。由于 T_β＞T_{hm}，表明该吸附过程是焓驱动的，同时泽泻（饮片）和盐泽泻的 ΔG 均大于 0，表明吸附过程是非自发的过程，因此，可通过控制环境水分条件实现泽泻饮片的安全贮藏。

2.6　T_g 测定及模型拟合

2.6.1　T_g 测定及模型拟合条件　采用差示扫描量热法（differential scanning calorimetry，DSC）测定不同水分含量样品的 T_g。称取约 10 mg 的样品置于密封铝坩埚中，并用空坩埚作为空白参考。实验操作参照楚文靖等[51]所述方法并稍作修改，扫描程序[52]：样品以 20 ℃/min 的速率从 25 ℃冷却至−80 ℃，平衡 5 min，然后以 20 ℃/min 的速率加热至 180 ℃。采用 DSC 软件分析样品的热流曲线，获取起始温度（heat flow curves of each sample's onset，T_{gi}）、中间温度（heat flow curves of each sample's middle，T_{gm}）和结束温度（heat flow curves of each sample's end，T_{ge}），并以 T_{gm} 作为样品的 T_g 值。采用 Gordon-Taylor 方程（式 8）对 T_g 曲线进行拟合[53]。

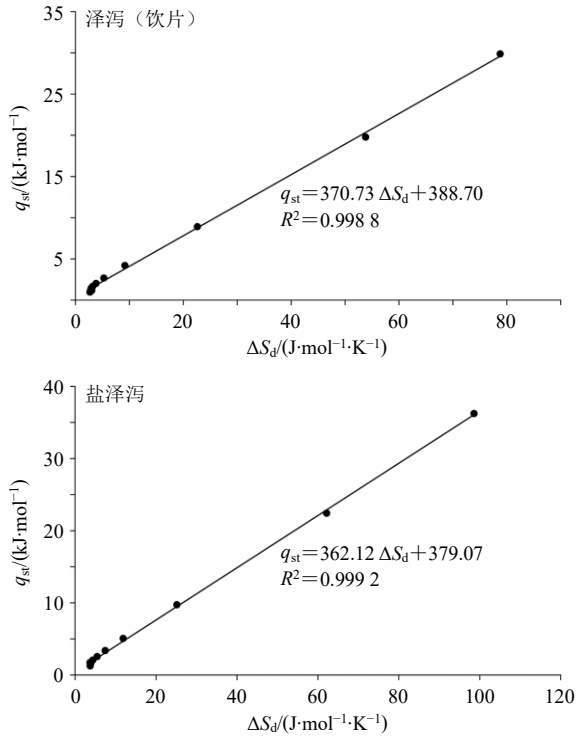


图 5 泽泻（饮片）和盐泽泻 q_{st} 和 ΔS_d 的关系

Fig. 5 Relationship between q_{st} and ΔS_d of ARP and SARP

$$T_g=(X_sT_{gs}+kX_wT_{gw})/(X_s+kX_w) \quad (8)$$

T_g 为样品 T_g（℃），X_s 为固体湿基质量分数，T_{gs} 为干燥样品的 T_g（℃），X_w 为固体湿基含水率，k 为模型系数，T_{gw} 为水的 T_g（取−135 ℃）

2.6.2 泽泻（饮片）和盐泽泻的 T_g 与临界水分含量 利用 TA Universal 软件分析升温过程中泽泻饮片的 DSC 热流曲线，泽泻饮片的 DSC 曲线如图 6 所示，图中 3 个温度点分别为玻璃化转变的初始点 T_{gi}、中点 T_{gm} 和终点 T_{ge}，通常将中点 T_{gm} 视为样品的 T_g。不同水分含量下泽泻（饮片）和盐泽泻的 T_g 如表 5 所示。结果显示随着饮片水分含量的增加，饮片的

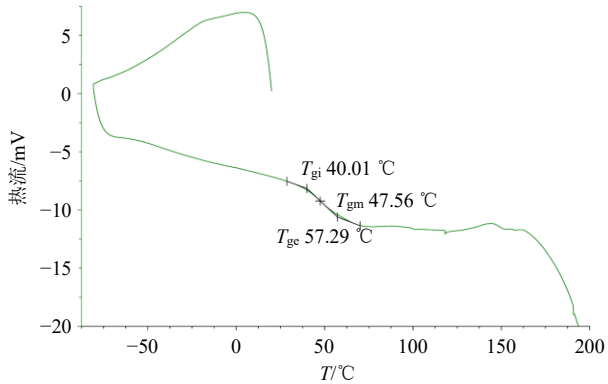


图 6 泽泻（饮片）样品的差示扫描量热曲线

Fig. 6 Differential scanning calorimetry curve of ARP sample

表 5 泽泻（饮片）和盐泽泻在不同水分含量下的 T_{gm}（$\bar{x}\pm s$, $n=3$）

Table 5 T_{gm} of ARP and SARP at different moisture contents ($\bar{x}\pm s$, $n=3$)

样品	X_e/%	T_{gm}/℃
泽泻（饮片）	2.71±0.02	98.41±0.30
	5.02±0.01	61.48±0.24
	6.72±0.03	42.54±0.50
	9.41±0.04	17.02±0.32
	14.35±0.04	−3.46±0.41
	17.91±0.07	−13.68±0.47
盐泽泻	3.02±0.04	98.66±0.61
	5.72±0.05	58.56±0.66
	7.09±0.09	47.43±0.53
	11.08±0.07	19.14±0.65
	13.80±0.06	3.31±0.55
	18.06±0.04	−13.05±0.38

T_g 降低。采用 Gordon-Taylor 方程对不同水分含量泽泻（饮片）和盐泽泻的 T_g 进行拟合，拟合曲线的 R^2 分别为 0.971 0 和 0.985 6，表明模型拟合较好。泽泻（饮片）模型参数 k=6.324 9，T_{gs}=130.954 3；盐泽泻模型参数 k=5.996 2，T_{gs}=135.767 2。

对比发现，盐炙后增加了泽泻饮片的 T_g，这与 Farahnaky 等[54]的研究结果相反即“NaCl 可明显降低马铃薯和木薯淀粉的 T_g”。该实验研究主体为淀粉，而泽泻是一个更加复杂的多成分混合物，除了含有淀粉，还含有蛋白质、脂肪、氨基酸等多种高分子化合物[22]以及三萜类、多糖、甾醇以及二萜类成分等次生代谢产物[55]。这表明，相对于马铃薯、小麦等食品，泽泻化学成分的平均摩尔分子量更大，并含有更多的芳香环及高极性的官能团，盐炙后与蛋白质、萜类和多糖的存在可能共同作用[56]，增加泽泻的 T_g，未来可进一步开展 NaCl 对于中药泽泻 T_g 的影响。

2.6.3 基于 A_w 和 T_g 理论的泽泻饮片状态图 结合图 7 与泽泻（饮片）和盐泽泻的吸附等温线和 T_g 曲线，可预测泽泻饮片样品的最佳储存条件。在不同的储存条件下，发生玻璃化转变的水分含量被认为是临界水分含量[57]。杨高婷等[58]研究中发现泽泻（饮片）和盐泽泻在阴凉环境（≤20 ℃）下贮藏效果优于常温。如图 7 所示，当泽泻（饮片）的 T_g=20 ℃，水分含量=10.17%，A_w=0.562；当盐泽泻的 T_g=20 ℃时，其水分含量=11.08%，A_w=0.582。玻璃化转变理论认为贮藏温度低于其 T_g 时，物料是

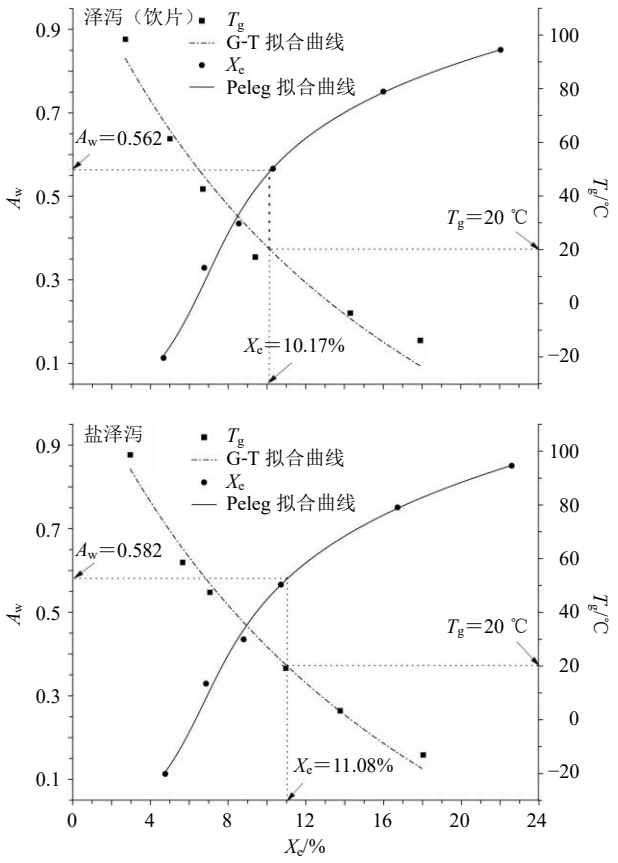


图 7　泽泻（饮片）与盐泽泻状态图

Fig. 7　Diagrams of status of ARP and SARP

稳定的。因此，当贮藏温度为 20 ℃时，泽泻（饮片）应满足水分含量≤10.17%，A_w≤0.562；盐泽泻应满足水分含量≤11.08%，A_w≤0.582。

3　讨论

泽泻（饮片）与盐泽泻的 MSI 均呈“S”形，属于 II 型等温线，Peleg 模型可以较好地预测泽泻饮片平衡条件下水分含量和 A_w 的关系。而通过 GAB 模型参数 X_m 可得出在 15、25、35、45 ℃的泽泻（饮片）的绝对水分限度分别为 5.29%、4.89%、4.28%、3.99%；盐泽泻的绝对水分限度分别为 5.40%、5.08%、4.40%、4.15%。

热力学分析显示，q_{st} 与 ΔS_d 随水分含量增加而降低；水分含量增至 10.00%后降速减缓，至 15.00%时趋于稳定并接近零。这提示当水分含量超过 15.00%时，水分与泽泻饮片的结合力很弱，仅需较少能量即可去除；而低于 10.00%时，水分结合紧密，脱除所需能量显著增加。2 种泽泻饮片的 T_g 随着水分含量升高而降低。当水分含量超过 14.00%时，T_g 已低于 0 ℃。通过构建的状态图可预测：在 20 ℃贮藏条件下，泽泻（饮片）的水分限度应≤10.17%（A_w≤0.562），盐泽泻应≤11.08%（A_w≤0.582）。

综合 MSI 模型与玻璃化转变理论，可进一步明确泽泻饮片的贮藏安全边界：MSI 显示在 20 ℃左右贮藏时，为防止水分吸附加速，2 种饮片的水分含量均建议控制在 12.00%以下。另一方面，T_g 与状态图显示，在 20 ℃下，为维持饮片处于分子运动缓慢，利于贮藏的稳定玻璃态，泽泻（饮片）水分含量应低于 10.00%，盐泽泻应低于 11.00%。若贮藏温度升高，则应进一步降低水分含量。在实际生产中，为平衡干燥成本与贮藏稳定性，可通过适当降低贮藏温度，允许饮片水分含量略有提高。此外，基于热力学性质结果，综合干燥效率以及经济性等因素，泽泻（饮片）、盐泽泻的干燥终点为 10.00%～15.00%。这比《中国药典》2025 年版规定的泽泻（饮片）、盐泽泻的水分限度（分别是 12.00%、13.00%）[15]范围更宽。但饮片的干燥工艺还应考虑干燥的方式和温度，以及饮片的性状和有效成分含量变化等因素，饮片的贮藏工艺还应考虑饮片的包装材料、包装方式等因素，因此未来应结合热力学理论预测结果与干燥方式、温度以及饮片质量变化、包装等因素，更深入、更全面地研究饮片干燥工艺，以及优化中药材或中药饮片的包装与贮藏技术。

在吸附过程中，可观察到除 15 ℃外，其余温度下泽泻饮片颜色均存在变深的现象，且温度越高，颜色变化越快越明显，这与课题组进行的泽泻贮藏实验结果一致[58]。同时贮藏实验也印证了本研究所构建理论模型的准确性和可靠性。初始水分含量在 9.30%，A_w＜0.50 的 2 种泽泻饮片，在阴凉条件（＜20 ℃）下贮藏 24 个月期间，水分含量和 A_w 始终较稳定，且水分含量均未超过 11.00%，A_w 也均未超过 0.60，此外未发生任何变质现象，各项指标成分检测也始终合格。也进一步证明，A_w≤0.60，是成功抑制泽泻饮片在贮藏期间发生吸湿潮解、维持水分平衡的关键。

本研究整合 A_w 与 T_g 2 大热力学理论，首次系统探究并阐明了 2 种泽泻饮片的水分吸附特性及吸附机制，科学预测了其水分限度。同时，丰富了基于 A_w 和玻璃化转变理论在中药饮片贮藏研究中的应用，为其他中药品种开展贮藏学研究提供了参考，可用于预测不同中药饮片的水分限度，可为不同饮片在不同仓储条件下制定差异化的水分含量控制标准增加一种新的、有效的分析工具。同时，该方法还可进一步推广至饮片生产企业的干燥工

艺优化研究，实现干燥终点判断由经验定性向数据定量的转变。此外，盐炙等炮制过程会改变饮片分子间相互作用，本方法可推广至中药其他辅料炮制研究如蜜炙、酒炙等，通过比较炮制前后 T_g-水分关系的变化，量化辅料对物料热力学特性的影响，为炮制火候、加辅料量等关键炮制工艺参数的控制提供更多物理、化学证据。

然而，本研究仍存在一定的局限性，有待后续深入探索。其一，小分子糖类成分虽被证实可影响饮片的水分吸附行为，但具体何种糖类组分及作用机制对泽泻饮片水分吸附特性产生调控作用，目前尚不明确。其二，盐泽泻经炮制后，其化学成分谱发生改变，且饮片表面残留的氯化钠颗粒亦会对水分吸附性能造成影响。尽管本研究揭示了泽泻（饮片）与盐泽泻在 X_m、表面吸附位点数量等关键指标上的显著差异，但关于盐泽泻炮制过程中氯化钠最佳残留量的界定，仍需结合药效学评价进一步优化。其三，虽近年来国内外干物料如枸杞子[3]、龙眼[59]、梅花饮片[60]、三七提取物[61]、泽泻汤提取物及颗粒[62]、假小喙菊[63]、五味子[64]的等温吸附线和热力学性质研究报道中均使用一批代表性样品研究物料吸附规律和吸附机制，预测了水分限度。但若要确定加工与贮藏水分限度，还需采用更多批次样品，结合其他影响饮片质量的影响因素开展更加全面、深入的研究与验证。本研究基于 A_w 与玻璃化转变理论，随机选取大小、厚薄均匀的样品成功构建了泽泻（饮片）和盐泽泻水分限度的预测模型，首次揭示了泽泻饮片的水分吸附规律。但后续还需进一步扩充多产地、多批次泽泻样品及多类别中药材开展更加全面、深入地研究，推动其在中药加工贮藏工艺优化中的实际转化。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Indrayanto G. Regulation and standardization of herbal drugs: Current status, limitation, challenge's and future prospective [J]. *Profiles Drug Subst Excip Relat Methodol*, 2024, 49: 153-199.

[2] Dharmasena D A N, Herath H M W P, Sivananthawerl T, *et al*. Optimization of drying and storage parameters of *Solanum Xanthocarpum* using moisture isotherms [J]. *Acta Hortic*, 2014(1054): 229-236.

[3] 宋慧慧, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 基于玻璃化转变及流动特性的枸杞粉贮藏稳定性研究 [J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 209-218.

[4] 粮食安全储存水分: GB/T 43994-2024 [S]. 2024: 1.

[5] 梅南菊, 赖长江生, 刘锦芮, 等. 中药原料保质期研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(20): 6611-6625.

[6] Jung J, Wang W J, McGorrin R J, *et al*. Moisture adsorption isotherm and storability of hazelnut inshells and kernels produced in Oregon, USA [J]. *J Food Sci*, 2018, 83(2): 340-348.

[7] Stępień A, Grzyb K. Comparison of critical storage parameters of the powders containing soy protein isolate and inulin, based on the concepts: Water activity and temperature of glass transition [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 230: 123174.

[8] 周国辉. 基于水分活度和玻璃化转变理论大米淀粉体系贮藏稳定性的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.

[9] Srinivasan Damodaran. 食品化学 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2020: 65-76.

[10] González C M, Llorca E, Quiles A, *et al*. Water sorption and glass transition in freeze-dried persimmon slices. Effect on physical properties and bioactive compounds [J]. *LWT*, 2020, 130: 109633.

[11] Zhao J H, Ding Y, Nie Y, *et al*. Glass transition and state diagram for freeze-dried *Lentinus edodes* mushroom [J]. *Thermochim Acta*, 2016, 637: 82-89.

[12] Zhao J H, Ding Y, Yuan Y J, *et al*. Effect of osmotic dehydration on desorption isotherms and glass transition temperatures of mango [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2018, 53(11): 2602-2609.

[13] Cheng X F, Zhang M, Adhikari B. Moisture adsorption in water caltrop (*Trapa bispinosa* Roxb.) pericarps: Thermodynamic properties and glass transition [J]. *J Food Process Eng*, 2020, 43(8): e13442.

[14] Stępień A, Witczak M, Witczak T. Sorption properties, glass transition and state diagrams for pumpkin powders containing maltodextrins [J]. *LWT*, 2020, 134: 110192.

[15] Witczak T, Stępień A, Gumul D, *et al*. The influence of the extrusion process on the nutritional composition, physical properties and storage stability of black chokeberry pomaces [J]. *Food Chem*, 2021, 334: 127548.

[16] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 239-240.

[17] Gao X, Sun C P, Yu Z L, *et al*. Correlation analysis between the chemical contents and bioactivity for the quality control of *Alismatis Rhizoma* [J]. *Acta Pharm Sin B*, 2018, 8(2): 242-251.

[18] Jang E, Lee J H. Promising anticancer activities of *Alismatis Rhizome* and its triterpenes via p38 and PI3K/Akt/mTOR signaling pathways [J]. *Nutrients*, 2021, 13(7): 2455.

[19] Zhao L L, Zhao W Q, Zhao Z Y, *et al*. Rapid discrimination

of *Alismatis Rhizoma* and quantitative analysis of triterpenoids based on near-infrared spectroscopy [J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2024, 321: 124618.

[20] 余振怀, 肖婕妤, 邓秋林, 等. 泽泻白斑病防治药剂筛选及药材安全风险评价 [J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(3): 785-790.

[21] 吴仲, 刘晓玲, 王刚. 泽泻抗性淀粉制备工艺的参数优化研究 [J]. 食品科技, 2010, 35(2): 187-190.

[22] 蓝梦柳, 杨利利, 严桂杰, 等. 泽泻不同部位药食功能成分分析比较 [J]. 食品科学, 2020, 41(20): 167-174.

[23] Tian T, Chen H, Zhao Y Y. Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, toxicology and quality control of *Alisma orientale* (Sam.) Juzep: A review [J]. *J Ethnopharmacol*, 2014, 158: 373-387.

[24] 兰志琼, 艾青青, 杨吉玉, 等. 基于水分吸附数学模型研究大黄的安全贮藏水分 [J]. 中草药, 2020, 51(12): 3165-3172.

[25] Brunauer S, Deming L S, Deming W E, *et al*. On a theory of the van der Waals adsorption of gases [J]. *J Am Chem Soc*, 1940, 62(7): 1723-1732.

[26] Baek M E, Jo Y, Chung N, *et al*. Effect of *E*-beam irradiation on microbial load, stability of active components, and anti-inflammatory activity of *Cnidii Rhizoma* and *Alismatis Rhizoma* [J]. *J Med Food*, 2019, 22(10): 1067-1077.

[27] Padinjarakoot N, Sabikhi L, Panjagari N R, *et al*. Adsorption isotherm and thermodynamic properties of high fiber reduced calorie multigrain biscuit [J]. *J Food Process Preserv*, 2020, 44(10): e14801.

[28] Brunauer S, Emmett P H, Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers [J]. *J Am Chem Soc*, 1938, 60(2): 309-319.

[29] Peleg M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms [J]. *J Food Process Eng*, 1993, 16(1): 21-37.

[30] Henderson S M. A basic concept of equilibrium moisture [J]. 1952, 33: 29-32.

[31] Oswin C R. The kinetics of package life. III. The isotherm [J]. *J Soc Chem Ind*, 1946, 65(12): 419-421.

[32] Smith S E. The sorption of water vapor by high polymers [J]. *J Am Chem Soc*, 1947, 69(3): 646-651.

[33] Halsey G. Physical adsorption on non-uniform surfaces [J]. *J Chem Phys*, 1948, 16(10): 931-937.

[34] Caurie M. A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1970, 5(3): 301-307.

[35] Hssaini L, Ouaabou R, Charafi J, *et al*. Hygroscopic proprieties of fig (*Ficus carica* L.): Mathematical modelling of moisture sorption isotherms and isosteric heat kinetics [J]. *S Afr N J Bot*, 2022, 145: 265-274.

[36] Uriarte-Aceves P M, Sopade P A. Water absorption kinetics of blue maize (*Zea mays* L.) and influence on wet-milling properties [J]. *J Cereal Sci*, 2023, 114: 103764.

[37] Azhar M D, Abd Hashib S, Ibrahim U K, *et al*. Moisture sorption isotherm and thermodynamic properties of *Centella asiatica* L. (CAL) powder [J]. *Chem Eng Commun*, 2021, 208(4): 573-582.

[38] 李红. 食品化学 [M]. 2 版. 北京: 中国纺织出版社, 2022: 39-43.

[39] Moraga G, Igual M, García-Martínez E, *et al*. Effect of relative humidity and storage time on the bioactive compounds and functional properties of grapefruit powder [J]. *J Food Eng*, 2012, 112(3): 191-199.

[40] Zhang Z S, Li X D, Jia H J, *et al*. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of tiger nuts: An oil-rich tuber [J]. *Lwt*, 2022, 167: 113866.

[41] Ben Slimane N, Bagane M, Mulet A, *et al*. Sorption isotherms and thermodynamic properties of pomegranate peels [J]. *Foods*, 2022, 11(14): 2009.

[42] Camaño Echavarria J A, Rivera Torres A M, Zapata Montoya J E. Sorption isotherms and thermodynamic properties of the dry silage of red tilapia viscera (*Oreochromis* spp.) obtained in a direct solar dryer [J]. *Heliyon*, 2021, 7(4): e06798.

[43] 程新峰, 潘玲, 徐保国, 等. 菊花粉水分吸附等温线及热力学特性 [J]. 食品科学, 2022, 43(3): 62-69.

[44] 夏晓霞, 薛艾莲, 寇福兵, 等. 冬枣粉吸湿的色泽、热力学特性及糖物质基础分析 [J]. 食品科学, 2022, 43(11): 29-38.

[45] 黄慧敏, 张爱玲, 龚明, 等. 甘草饮片及细粉吸湿特性和热力学性质的研究 [J]. 中药材, 2019, 42(10): 2357-2362.

[46] Arslan-Tontul S. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds [J]. *LWT*, 2020, 119: 108859.

[47] 程林, 罗晓健, 韩修林, 等. 中药饮片水分吸附与解吸附过程的热力学分析 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(18): 3490-3495.

[48] Zhu G F, Jin Q, *et al*. Moisture sorption and thermodynamic properties of *Camellia oleifera* seeds as influenced by oil content [J]. *Int J Agric Biol Eng*, 2021, 14(1): 251-258.

[49] Collazos-Escobar G A, Gutiérrez-Guzmán N, Váquiro-Herrera H A, *et al*. Water dynamics adsorption properties

of dried and roasted cocoa beans (*Theobroma cacao* L.) [J]. *Int J Food Prop*, 2020, 23(1): 434-444.

[50] Krug R R, Hunter W G, Grieger R A. Enthalpy-entropy compensation. 1. Some fundamental statistical problems associated with the analysis of van't Hoff and Arrhenius data [J]. *J Phys Chem*, 1976, 80(21): 2335-2341.

[51] 楚文靖, 孙悦, 肖柳柳, 等. 基于玻璃化转变理论的蓝莓粉吸湿机制 [J]. 食品科学, 2023, 44(3): 41-47.

[52] 任炜, 段续. 冻干怀山药贮藏条件研究 [J]. 食品研究与开发, 2016, 37(2): 187-190.

[53] Stępień A, Witczak M, Witczak T. The thermal characteristics, sorption isotherms and state diagrams of the freeze-dried pumpkin-inulin powders [J]. *Molecules*, 2022, 27(7): 2225.

[54] Farahnaky A, Farhat I A, Mitchell J R, *et al*. The effect of sodium chloride on the glass transition of potato and cassava starches at low moisture contents [J]. *Food Hydrocoll*, 2009, 23(6): 1483-1487.

[55] Shang W B, Wang B, Yuan H Y, *et al*. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of Zexie (*Alismatis Rhizoma*) [J]. *Chin Med Nat Prod*, 2025, 5(4): e213-e225.

[56] 周雅倩, 石磊, 林上阳, 等. 中药盐炙机理现代研究进展 [J]. 中成药, 2021, 43(10): 2774-2778.

[57] Al-Ghamdi S, Hong Y K, Qu Z, *et al*. State diagram, water sorption isotherms and color stability of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) [J]. *J Food Eng*, 2020, 273: 109820.

[58] 杨高婷, 先蕊, 王自敏, 等. 泽泻小包装饮片在不同包装贮藏条件下的品质变化分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2026, 32(2): 179-188.

[59] 周颖钿, 黄世鑫, 郑斯文, 等. 龙眼果粉的水分吸附特性研究 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 236-241.

[60] 韩童童, 饶小勇, 漆凤梅, 等. 基于水分活度和水分子流动性理论的梅花饮片安全储藏含水量分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(13): 151-156.

[61] 杨薇, 王雅洁, 汤成成, 等. 三七提取物吸湿性及其数学模型研究 [J]. 中药材, 2018, 41(3): 670-676.

[62] Han P J, Xue Z F, Zhang L N, *et al*. Moisture sorption and diffusion determination of Chinese herbal granules: Moisture-resistant effects of fluidized bed granulation with dextrin [J]. *Chin Herb Med*, 2018, 10(3): 290-297.

[63] Fedol A, Cheriti A, Ouahrani M R. Study of the moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of the medicinal plant *Launeae nudicaulis* from Algerian Sahara [J]. *J Eng Phys Thermophys*, 2020, 93(4): 816-826.

[64] 郑龙金, 龚明, 李颖萌, 等. 不同产地五味子等温吸附曲线及热力学性质研究 [J]. 药品评价, 2021, 18(24): 1487-1492.

[责任编辑 郑礼胜]