

[药材资源]

低场核磁共振结合物性分析研究黄芪软化机理

彭 杰¹, 马志国^{1,2}, 吴孟华^{1,2}, 钟淑梅³, 骆 维³, 廖鹏程³, 曹 晖^{1,4}, 张 英^{1,4*}
(1. 暨南大学岭南传统中药研究中心, 广东 广州 511400; 2. 国家中药现代化工程技术研究中心岭南资源分中心, 广东 广州 511400; 3. 九州天润中药产业有限公司, 湖北 武汉 430050; 4. 广东省中医药信息化重点实验室, 广东 广州 510632)

摘要: **目的** 研究软化过程中黄芪水分及物理特性的变化规律, 阐明软化机理。**方法** 对软化过程吸水动力学曲线进行非线性拟合, 构建黄芪吸水动力学模型; 采用低场核磁共振与磁共振成像技术 (LF-NMR/MRI) 测定黄芪水分相态变化及水分分布状态; 采用质构仪测定黄芪质构特性的变化; 分析软化时间、吸水率、LF-NMR 参数、质构特性之间的相关性。**结果** 软化过程中黄芪吸水动力学符合一级动力学方程, 非线性拟合结果良好, 决定系数大于 97.7%。同档次下, 软化温度越高, 吸水率变化趋势越显著; 同温度下, 药材档次越小, 吸水率变化趋势越显著。在 30 ℃ 下, 大、中、小档黄芪达到内外一致的时间分别为 14、12、8 h, 润透时的吸水率分别为 46.83%、42.03%、35.54%。润透前弛豫时间 T_2 大多为 0.1~10 ms, 润透后大多为 10~1 000 ms, 磁共振成像能观察到水分由外而内扩散, 12 h 时可观察到黄芪内部大部分都被水分浸润。黄芪软化前 8 h, 硬度、压缩循环功、粘力、黏性、胶着性分别下降了 67.7%、68.6%、86.3%、89.3%、73.3%; 在 12~24 h 各质构特性趋于稳定, 即润透后的药材内外硬度一致, 符合传统经验判断标准。同时, 软化过程中黄芪黄酮类成分不稳定, 黄酮苷可能会水解为对应的黄酮苷元。**结论** 吸水动力学模型结合低场核磁共振、磁共振成像、质构仪等客观手段可为阐明黄芪的软化原理提供科学依据。

关键词: 黄芪; 软化; 吸水动力学; 低场核磁共振; 磁共振成像; 质构仪

中图分类号: R282.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-1528(2023)01-0135-07

doi:10.3969/j.issn.1001-1528.2023.01.025

Softening mechanism of *Astragalus membranaceus* based on low-field nuclear magnetic resonance and texture analysis

PENG Jie¹, MA Zhi-guo^{1,2}, WU Meng-hua^{1,2}, ZHONG Shu-mei³, LUO Wei³, LIAO Peng-cheng³, CAO Hui^{1,4}, ZHANG Ying^{1,4*}

[1. Research Center for Traditional Chinese Medicine of Lingnan (Southern China), Jinan University, Guangzhou 511400, China; 2. Lingnan Branch of National Engineering Research Center for Modernization of Traditional Chinese Medicine Resources, Guangzhou 511400, China; 3. Joinative Traditional Chinese Medicine Industry Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Technology for Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510632, China]

ABSTRACT: **AIM** To clarify the mechanism of softening through researching the changes of water and physical properties of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao during softening process. **METHODS** *A. membranaceus* had its model of water absorption kinetics builded by the conduction of water absorption kinetics for non-linear fitting curve, and its water phase change and water distribution state determined by low-field nuclear magnetic resonance and magnetic resonance imaging technology (LF-NMR/MRI). The correlation among the following variables were analyzed as well: softening time, water absorption, LF-NMR parameters, and texture characteristics determined by texture analyzer. **RESULTS** *A. membranaceus* found its water absorption kinetics during softening process conforming to one order kinetics equation of good result of

收稿日期: 2021-12-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1711500); 国家自然科学基金项目 (82074015); 广东省中医药信息化重点实验室项目 (2021B1212040007)

作者简介: 彭 杰 (1997—), 男, 硕士生, 从事中药炮制机理研究。E-mail: 1227004691@qq.com

* **通信作者:** 张 英 (1976—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事中药炮制机理研究。E-mail: carolynzy@163.com

nonlinear fitting processing and greater than 97.7% coefficient, under which more significant changes of water absorption were noticed due to the higher moistening temperature and smaller grade of medicinal materials. Under the temperature of 30 ℃, *A. membranaceus* had its time to reach the internal and external consistency for the large, medium and small grades at 14 h, 12 h, and 8 h, respectively; and the water absorption rate during moistening was 46.83%, 42.03%, and 35.54%, respectively. The relaxation time T_2 prior to moistening and post moistening were determined to be mostly between 0.1–10 ms and 10–1 000 ms, respectively. MRI images revealed the diffusion of water from outside to inside, and thorough water infiltration inside of *A. membranaceus* at 12 h. *A. membranaceus* had its hardness, compression cycle work, viscosity, tackiness and adhesion reduced by 67.7%, 68.6%, 86.3%, 89.3% and 73.3% after the first 8 hours moistening, respectively; and its texture properties remained stable due to the consistent internal and external hardness of the medicinal materials from 12 h to 24 h, which is the same result according to the previous industry experience. Meanwhile, the moistening process brought changes to the flavonoids of *A. membranaceus* as the flavonoid glycosides hydrolyzed to the corresponding flavonoid aglycones was detected.

CONCLUSION The combination use of water absorption kinetic model, LF-NMR/MRI and texture analyzer provides the scientific basis of the principle of *A. membranaceus* during softening process.

KEY WORDS: *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao; soften; water absorption kinetics; low-field nuclear magnetic resonance; magnetic resonance imaging; texture analyzer

黄芪为豆科植物蒙古黄芪 *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao 或膜荚黄芪 *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. 的干燥根^[1], 具有补气固表、利尿托毒、排脓等功效^[2], 其饮片制备方法为除去杂质, 大小分开, 洗净, 润透, 切厚片, 干燥^[1], 其中“润”即采用水处理方式对药材进行软化, 目的主要是便于切片。目前, 关于黄芪软化的研究主要以指标成分含量、饮片合格率、弯折检查为因素来优化该工艺, 尚未涉及吸水动力学、水分相态、质地变化^[3], 导致软化程度判断缺少客观量化指标, 不利于饮片质量控制和智能化生产。

中药软化过程是水分缓慢渗入其内部的动态过程, 药材吸水后质量增加, 质地变软^[4], 故对水分、质地变化进行客观表征是阐明其机理的重要内容。低场核磁共振 (LF-NMR)、磁共振成像 (MRI) 技术因其灵敏度高、分析速度快、无创性、无破坏性、低成本等优势而被视为分析基质中水状态和分布的有力工具^[5], 前期报道采用两者对于制虾仁^[6]、人参^[7]、木瓜^[8]等的复水过程进行考察, 结果客观可靠。质构仪是一种多功能物性分析仪, 通过压缩、穿刺、剪切及拉伸等多种测试模式, 可表征硬度、黏附性、弹性、内聚性等多种物性特征参数, 结果客观、灵敏、准确^[9], 广泛应用于食品行业, 例如即食米^[10]、牛肉^[11]、方便面^[12]等, 为食品上市前质地测试的重要工具。

本实验构建软化过程中黄芪的吸水动力学模

型, 利用 LF-NMR/MRI、质构仪对软化过程中的水分相态、物性变化进行测定, 最后对软化时间、吸水率、低场核磁共振和质构仪各参数之间进行相关性分析, 以期阐明该药材软化传统经验的科学内涵和软化关键参数的筛选提供依据, 也为其他中药炮制传统经验的科学内涵研究提供新的研究范例。

1 材料

MesoMR23-060H-1 中尺寸核磁共振成像分析仪 (上海纽迈分析仪器股份有限公司); Brookfield CT3 质构分析仪 (美国 Ametek Brookfield 公司)。

黄芪 (批号 HQ0101、HQ0102、HQ0103) 购自甘肃岷县, 经暨南大学岭南传统中药研究中心张英副教授鉴定为豆科植物蒙古黄芪 *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao 的干燥根。对该药材参照《中药材商品规格等级-黄芪》进行分档, 并按照实际情况稍作修改, 将长≥40 cm, 头部斩口下 3.5 cm 处直径 1.4~1.7 cm 者定为大档; 长≥30 cm, 头部斩口下 3.5 cm 处直径 1.2~1.4 cm 者定为中档; 长≥30 cm, 头部斩口下 3.5 cm 处直径 1.0~1.2 cm 者定为小档。

毛蕊异黄酮葡萄糖苷 (批号 RFS-M02001902019)、毛蕊异黄酮 (批号 RFS-M02101903026)、芒柄花苷 (批号 RFS-M01301904002)、芒柄花素 (批号 RFS-C01811812016) 对照品均购自成都瑞芬思生物科技有限公司, 纯度均>97.0%。乙腈、磷酸为色谱

纯, 购自上海麦克林生化科技有限公司; 其余试剂均为分析纯; 水为纯净水, 购自华润怡宝饮料(中国)有限公司。

2 方法

2.1 吸水率测定 称取 3 档黄芪, 每档 200 g, 洗去泥沙后置于容器中, 分别在 10、20、30 ℃ 下软化, 为保持上下均匀每 2 h 翻堆 1 次, 喷淋适量清水保持水分, 连续操作 28 h。软化期间每 2 h 称定 1 次质量, 计算各时间点吸水率, 平行 3 次, 取平均值, 公式为吸水率 $=[(M_t-M_0)/M_0] \times 100\%$, 其中 M_t 为不同软化时间黄芪质量, M_0 为黄芪初始质量。

2.2 吸水动力学研究 采用 Origin 2018 软件, 以软化时间为横坐标, 吸水率为纵坐标, 对软化过程进行动力学非线性拟合。

2.3 水分迁移分析

2.3.1 横向弛豫时间 (T_2) 取不同软化时间的中档黄芪, 除去表面水分后称定质量, 装入直径 60 mm 的玻璃管中, 放进永久磁场的中心位置, 设定磁体强度 0.5 T, 磁体温度 (32 ± 0.1) ℃, 采用 Free induction decay (FID) 硬脉冲自由感应衰减序列获得样品中心频率, Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列测定 T_2 , 连续 3 次, 取平均值。测量条件为 TW (时间等待) 5 000 ms; TE (时间回波) 0.30 ms; NECH (回波数) 8 000; SW (信号接收带宽) 100 kHz; NS (扫描数) 4。NMR 分析软件和 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列用于收集弛豫信号, 以 100 000 进行同步迭代重建进行反演, 获得弛豫图。

2.3.2 磁共振成像 (MRI) 将样品置于射频线圈中央, 采集信号, 得到 T_2 加权图像, 采用图像处理软件对其进行绘图和处理。主要参数为 TE

(时间回波) 20 ms; TR (时间重复) 1 000 ms; 翻转角 90°; 重聚焦翻转角 180°; 平均值 4; 读取大小 256; 相位大小 192; RG 20 dB; PRG 高; FOV 100 mm×100 mm; 切片宽度 2.0 mm; 切片间隙 1.0 mm; 切片 5。

2.3.3 质构特性 采用 Brookfield CT3 物性测定仪测定, 设置参数为 TA-9 探头 (针状, 直径 1.0 mm, 长度 43 mm); 预测试速度 2.0 mm/s; 测试速度 1.5 mm/s; 返回速度 1.5 mm/s; 穿刺深度 5 mm; 数据频率 50 point/s; 测力传感器 10 000 g。质地数据由质构仪自带软件获取, 导出至 Excel 后使用 Origin 2018 64Bit 软件进行分析处理, 连续测定 3 次, 所得参数有样品硬度、粘力、黏性、胶着性等。触发点载荷设置为 4 g, 即当穿刺针受到 4 g 阻力时, 开始穿刺实验, 记录穿刺过程中穿刺负荷随穿刺时间变化的曲线, 曲线最高点对应的穿刺时间即为最大硬度时的时间, 对应的负荷即为硬度, 对应的穿刺针移动距离即为最大硬度时的位移。

2.3.4 指标成分 在 30 ℃ 下, 黄芪润透时间最短, 并且中档黄芪具有一定的代表性。因此, 本实验取适量中档黄芪, 在 30 ℃ 下软化不同时间, 切厚片干燥, 粉碎过筛后测定毛蕊异黄酮葡萄糖苷、毛蕊异黄酮、芒柄花苷、芒柄花素的含量^[13]。

3 结果

3.1 吸水动力学 由图 1~2 可知, 在 28 h 内吸水率随着软化时间延长、温度增加而升高, 但档次越高, 吸水率反而越低。结合黄芪软化的传统经验发现, 在同温度下各档次黄芪达到软化终点的时间相同, 以 30 ℃ 为例, 大、中、小档刚好润透的时间分别为 14、12、8 h, 吸水率分别为 46.83%、42.03%、35.54%。

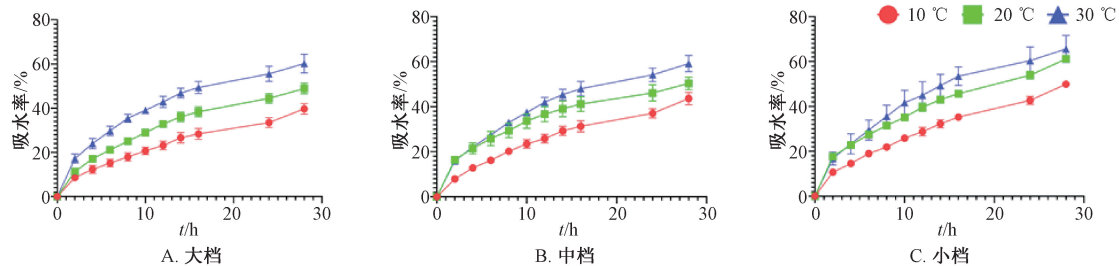


图 1 同档次不同温度吸水动力学曲线

Fig. 1 Kinetic curves for water absorption of the same grade at different temperatures

图 3、表 1 显示, ExpDec1 非线性方程能对黄芪数据较好拟合, R^2 均在 97.7% 以上, 表明软化过程中黄芪吸水率随软化时间的变化曲线符合一级

动力学方程, 即 $y=A_1 \times \exp(-x/t_1)+y_0$ 。另外, 同一档次下软化温度越高, 吸水率变化越显著; 同一温度下药材越小, 吸水率变化越显著。

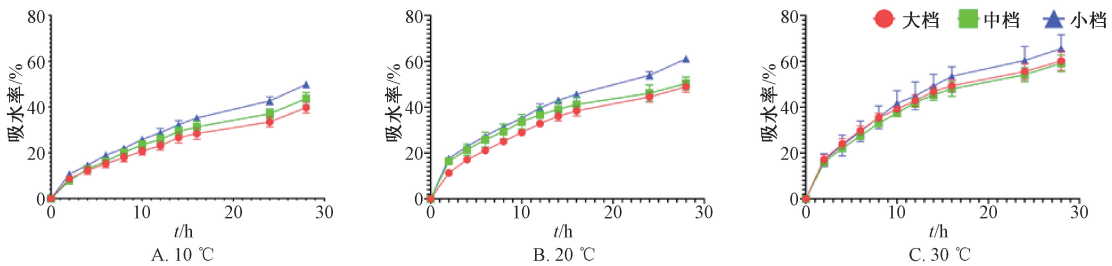


图 2 同温度不同档次吸水动力学曲线
Fig. 2 Kinetic curves for water absorption of different grades at the same temperature

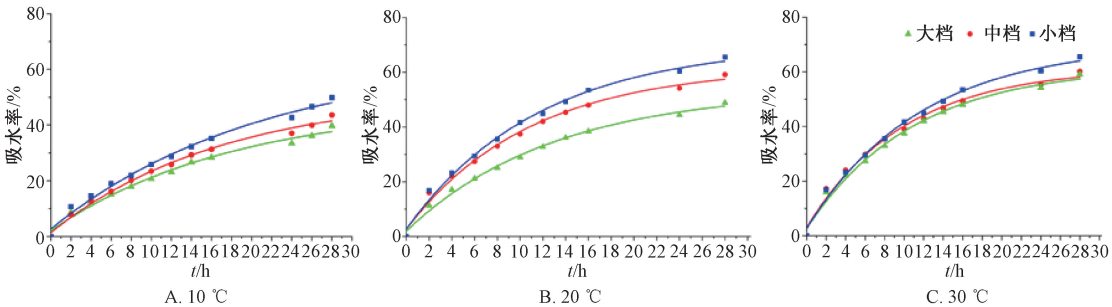


图 3 黄芪吸水动力学拟合曲线
Fig. 3 Water absorption kinetics for fitting curves of *A. membranaceus*

表 1 软化过程中黄芪吸水动力学拟合曲线系数
Tab. 1 Coefficients of water absorption kinetics for *A. membranaceus* during softening process

温度/℃	档次	参数			
		y_0	A_1	t_1	$R^2(\text{COD})/\%$
10	大档	47.610	-45.504	18.418	98.827
	中档	51.307	-49.881	17.201	99.334
	小档	64.232	-61.522	20.997	99.058
20	大档	53.567	-51.625	12.972	99.367
	中档	50.430	-47.131	9.933	98.142
	小档	66.331	-61.605	13.825	97.742
30	大档	61.590	-58.573	9.922	98.976
	中档	61.880	-59.247	10.863	99.174
	小档	70.091	-67.425	11.639	99.323

表 2 显示，黄芪吸水时质地逐渐软化，吸水能力随着软化时间的延长逐渐减弱，12 h 时吸水率达 42.03%，即达到软化终点，此时药材质地软化，易弯折，内无干心，符合传统软化终点的判断规则。

3.2 水分变化分析

3.2.1 横向弛豫时间 (T_2) 弛豫曲线表明浸润药材中存在 2 种水群，两者表现出不同的弛豫值，分别为 T_{21} (0~10 ms)、 T_{22} (10~1 000 ms)，对应结合水、自由水^[14]。较高的 T_2 弛豫时间与较弱的结合或较高的氢自由度一致， T_{21} 弛豫归因于由强氢键结合的水分子（单层水），与细胞壁中所含的水有关； T_{22} 代表与单层强结合的水分子（多层

水），包括细胞质和细胞外空间中所含的水^[15]。

表 2 在 30 °C 下中档黄芪吸水率和性状
Tab. 2 Water absorption rates and characteristics of medium-grade *A. membranaceus* at 30 °C

时间/h	吸水率/%	性状
0	0	质地坚硬,不易弯折
2	15.96	质地坚硬,不易弯折
4	22.09	质地坚硬,可弯折
6	27.43	质地坚硬,可弯折
8	33.00	质地软化,可弯折,内有干心
12	42.03	质地软化,易弯折,内无干心
16	47.98	质地软化,易弯折,内无干心,轻微伤水
24	54.16	质地软化,易弯折,内无干心,严重伤水

在 30 °C 下，中档黄芪软化条件为润透时间 12 h。由图 4 可知，随着软化时间延长， T_2 显著延长并向右移动，表明药材内部水的流动性逐渐升高；润透前 T_2 在 0.1~10 ms 范围内，表明此时水分进入药材内部，但由于相对吸水量不大，被仪器识别为“结合水”；伤水后 T_2 在 10~1 000 ms 范围内，表明此时水分大量进入导致药材内外水分充盈，被仪器识别为“自由水”，同时信号量逐渐增加，表明干药材持续吸水，刚好润透时的信号量最高值为未软化时的 2 倍。

3.2.2 MRI 图像 MRI 是能提供有关水含量或水分子迁移率信息的技术，可用于实时、无创、定量测量，检测水质子的自旋-自旋弛豫时间 (T_2)，提供有关水流动性的信息^[16]，更亮的 MRI 图像代表

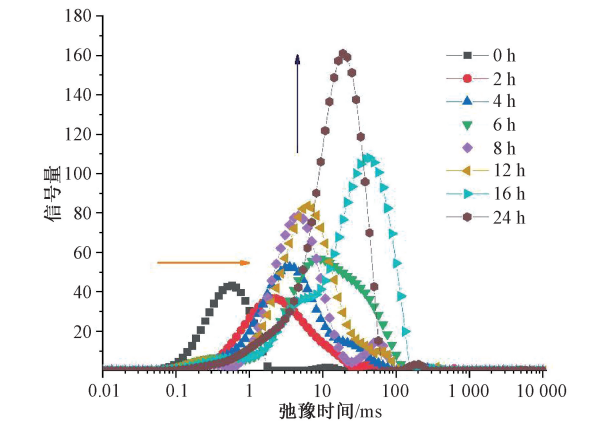


图 4 软化过程中黄芪 T_2 弛豫图谱

Fig. 4 T_2 relaxation map for *A. membranaceus* during moistening process

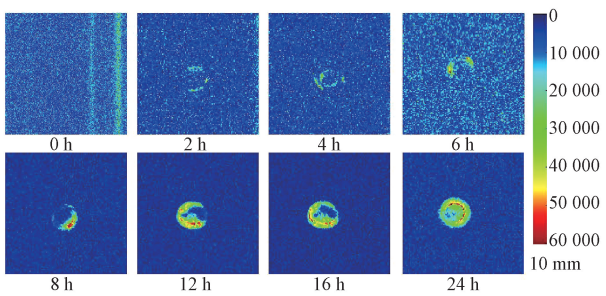
更强的共振信号和更高的质子密度，反之较弱的信号表明质子密度较低^[17]。黄芪软化的 MRI、原始图像分别见图 5~6。由图 5 可知，药材最初内部水分含量很低，故其成像模糊；随着软化时间延长，水分逐渐进入，图像逐渐清晰，可观察到水分由外而内扩散，在 12 h 时大部分都被浸润，而在 24 h 时充满水分，并且韧皮部和木质部交界处水分含量较高，有明显红色分界线。由图 6 可知，随着软化的进行水分自外而内进入，干心面积减少至消失，体积增加，从宏观的角度显现水分的变化状况。

3.3 物理特性研究 软化过程中黄芪硬度、压缩循环功、粘力、黏性、胶着性见表 3，再以穿刺时间为横轴，软化时间为纵轴，穿刺针移动过程中的负荷为竖轴绘制质构瀑布图，见图 7。由表 3 可

表 3 软化过程中黄芪物理特性参数

Tab. 3 Physical property parameters for <i>A. membranaceus</i> during softening process					
润制时间/h	硬度/g	压缩循环功/mJ	粘力/g	黏性/mJ	胶着性
0	1 836.0	52.6	735.0	8.4	1 842.0
2	1 767.5	40.9	569.0	4.2	1 742.0
4	1 200.5	23.0	289.0	2.9	1 165.0
6	791.0	16.1	112.0	1.4	1 182.0
8	593.0	16.5	101.0	0.9	492.0
12	555.5	12.5	73.0	1.0	501.0
16	546.0	14.4	77.0	1.2	434.0
24	537.5	10.2	76.0	1.4	350.0

3.4 指标成分含量测定 如表 4 所示，随着闷润进行，毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷含量降低，毛蕊异黄酮、芒柄花素含量升高；润透后毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量较最初降低近一半，但仍高于 2020 年版《中国药典》规定，表明软化对黄芪黄酮类成分有一定影响，但其初始含量高时在药材软



注：蓝色表示水分含量较低，绿色表示水分含量适中，红色表示水分含量较高。

图 5 软化过程中黄芪 MRI 成像

Fig. 5 MRI images for *A. membranaceus* during softening process



图 6 不同软化时间黄芪横切图

Fig. 6 Cross section images for *A. membranaceus* at different softening time

知，药材软化前 8 h 上述参数分别下降了 67.7%、68.6%、86.3%、89.3%、73.3%，12 h 后基本不变，即润透后内外硬度一致，符合传统经验。由图 7 可知，前 8 h 曲线呈现下降趋势，最高点的负荷即为硬度值，表明其间水分不断进入药材内部，对其起到一定软化作用；12 h 后曲线高度基本持平，表明此时已达内外一致，水分充分浸润药材，即达到软化终点。

化结束后仍可符合相关标准。

3.5 相关性分析 采用 SPSS 软件对软化时间、吸水率、低场核磁共振和质构仪相关参数进行 Pearson 相关性分析，结果见表 5。由此可知，软化时间、吸水率、结合水峰面积之间呈现显著正相关，相关系数 r 在 0.911~0.938 范围内，但均未与

表 4 各指标成分含量测定结果 (mg/g, $\bar{x}\pm s$, $n=3$)

Tab. 4 Results of content determination of various index constituents (mg/g, $\bar{x}\pm s$, $n=3$)

闷润时间/h	毛蕊异黄酮葡萄糖苷	毛蕊异黄酮	芒柄花苷	芒柄花素
0	1.070±0.075	0.125±0.016	0.269±0.062	0.218±0.084
4	0.738±0.006	0.251±0.045	0.151±0.036	0.372±0.150
8	0.692±0.018	0.246±0.045	0.151±0.034	0.365±0.148
12	0.651±0.035	0.317±0.040	0.143±0.033	0.451±0.174
16	0.647±0.068	0.306±0.038	0.140±0.035	0.440±0.169
24	0.629±0.018	0.303±0.035	0.136±0.031	0.437±0.166

表 5 物理特性参数相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of physical property parameters

参数	软化时间	吸水率	结合水峰面积	自由水峰面积	硬度	粘力	粘性	胶着性
软化时间	1	0.938 **	0.914 **	-0.156	-0.783 *	-0.696	-0.632	-0.846 **
吸水率		1	0.911 **	0.043	-0.907 **	-0.869 **	-0.844 **	-0.961 **
结合水峰面积			1	-0.138	-0.790 *	-0.718 *	-0.648	-0.842 **
自由水峰面积				1	-0.372	-0.425	-0.424	-0.192
硬度					1	0.971 **	0.899 **	0.955 **
粘力						1	0.961 **	0.872 **
黏性							1	0.769 *
胶着性								1

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

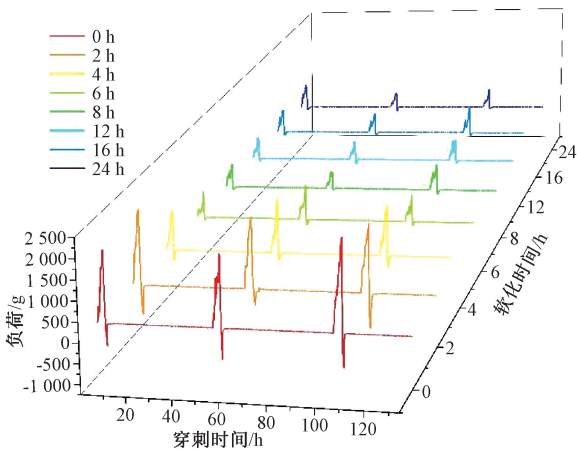


图 7 不同软化时间黄芪质构瀑布图

Fig. 7 Texture waterfall graph of *A. membranaceus* at different softening time

自由水峰面积表现出相关性;硬度、粘力等 4 种质构指标值与吸水率呈现负相关, r 在 $-0.961 \sim -0.844$ 范围内,同时质构仪各相关参数之间具有良好的相关性,表明随着闷润时间延长,吸水率、结合水峰面积不断增大,硬度、粘力、黏性、胶着性不断减小。

4 讨论与结论

黄芪会因吸水而引起质量增加,故计算润透终点的吸水率可为其终点判断提供依据。不同温度和档次的黄芪药材达到内外一致所需的时间和吸水率均不同,以 30℃ 为例,大、中、小档黄芪达到内

外一致的时间分别为 14、12、8 h,中档黄芪在 10、20、30℃ 下分别为 16、14、12 h,表明其润透的时间与档次呈正相关,但与软化温度呈负相关;单位时间内吸水率增速逐渐下降,表明黄芪吸水能力随着软化时间的延长而逐渐减弱,直至吸水饱和。再对各档次黄芪在不同温度下的软化过程进行非线性方程拟合,发现均符合一级动力学方程,故可在保证吸水率一致的前提下为终点判断提供依据。

干黄芪含水量很低,都为与某些大分子结合的结合水,几乎不含自由水,而随着软化的进行其含水量不断增加,低场核磁共振 T_2 弛豫曲线不断右移,弛豫面积不断增加,表明其间有大量外部自由水进入,软化过程中水分在发生质变的同时发生量变。进一步采用 MRI 图像表征软化过程中水分分布及变化规律,发现水分在软化起始阶段迅速进入木栓层,软化中期逐渐从木栓层进入到栓内层,软化后期则进入到坚实的木质部;水分由外向内均匀进入,在 12 h 时可充满大部分药材,而 24 h 时可充满整个药材,但软化初期黄芪水分含量太低,故 0 h 无法成像。另外,由于药材本身经过产地加工的干燥处理,导致其含水量较低,磁共振成像时响应值小,从而成像时背景出现蓝色噪点。

在软化的前 8 h,黄芪硬度、压缩循环功、粘力等物理特性参数随着软化时间延长逐渐下降,12 h 后趋于稳定,此时达内外一致。值得注意的

是, 质构仪负荷曲线中的负值是药材挤压探针所致, 由于药材各部位硬度不一, 曲线并非始终上升, 而是呈现曲折上升的现象。同时, 12 h 后药材大部分已充满水分, 表明质构参数和 MRI 图像可相互印证。

在黄芪软化过程中, 毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷含量降低, 毛蕊异黄酮、芒柄花素含量升高, 推测可能是其间糖苷类成分不稳定水解成对应的苷元^[3], 可能导致本身合格的药材经软化后反而出现不合格情况, 并且浪费人力物力, 造成经济损失。因此, 需要进一步研究上述指标成分水解机制以及预防方案。

综上所述, 本实验采用吸水动力学模型结合低场核磁共振、磁共振成像、质构仪等技术, 为阐明黄芪软化原理提供了科学依据, 可广泛应用于工业大生产的质量控制环节, 还能为其他根茎类药材的相关研究提供参考, 从而为中药加工、生产的现代化发展提供了新思路。

参考文献:

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2020 年版一部 [S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 315-316.

[2] 张 继, 徐纪民, 赵京春, 等. 黄芪的本草考证[J]. 中国药师, 1999, 2(4): 211-213.

[3] 杨志城, 张福明, 孙彩虹, 等. 基于 HPLC-DAD-ELSD 及响应面设计优化黄芪浸润工艺研究[J]. 中草药, 2020, 51(24): 6196-6204.

[4] 顾芳珍, 章臣桂. 药材软化动力学[J]. 中草药, 1993, 24(5): 260-262; 280.

[5] Ezeanaka M C, Nsor-Atindana J, Zhang M. Online low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) for food quality optimization in food processing [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2019, 12(9): 1435-1451.

[6] 程沙沙, 唐英强, 章 坦, 等. LF-NMR 和 MRI 对于制虾仁

复水过程水分状态及品质变化的研究[J]. 分析测试学报, 2017, 36(10): 1224-1229.

[7] 郑 尧, 雷 蕾, 艾 娇, 等. 人参鲜药干制/复水过程水分状态与化学成分变化规律研究[J]. 中草药, 2019, 50(14): 3302-3312.

[8] 崔 莉, 杜利平, 闫慧娇, 等. 皱皮木瓜真空冻干工艺优化及基于 LF-NMR 技术的复水特性研究[J]. 中国食品学报, 2019, 19(6): 124-133.

[9] 李瑶瑶, 张凯旋, 熊皓舒, 等. 质构仪在药物制剂研究中的应用进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(21): 226-234.

[10] Wongs J, Uttapap D, Lamsal B P, *et al*. Effect of puffing conditions on physical properties and rehydration characteristic of instant rice product[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2016, 51(3): 672-680.

[11] Ayrosa A, Pitombo R. Influence of plate temperature and mode of rehydration on textural parameters of precooked freeze-dried beef[J]. *J Food Process Preserv*, 2003, 27(3): 173-180.

[12] Jang A, Kim H, Shim J Y, *et al*. Correlation of thermal conductivity of instant noodles with their textural property for rehydration study[J]. *J Texture Stud*, 2016, 47(2): 87-91.

[13] 刘亚令, 耿雅萍, 黄小苏, 等. 基于 HPLC 法测定不同产地黄芪总黄酮和异黄酮的含量[J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2019, 39(5): 54-61.

[14] 刘沁荣, 王一硕, 张振凌, 等. 基于 LF-NMR/MRI 的丹参加工过程水分变化与色差相关性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2021, 33(5): 802-809.

[15] An K J, Wei L, Fu M Q, *et al*. Effect of carbonic maceration (CM) on the vacuum microwave drying of Chinese Ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices: drying characteristic, moisture migration, antioxidant activity, and microstructure[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2020, 13: 1661-1674.

[16] Sekiyama Y, Horigane A K, Ono H, *et al*. T-2 distribution of boiled dry spaghetti measured by MRI and its internal structure observed by fluorescence microscopy[J]. *Food Res Int*, 2012, 48(2): 374-379.

[17] Kirtil E, Oztop M H. H-1 nuclear magnetic resonance relaxometry and magnetic resonance imaging and applications in food science and processing[J]. *Food Eng Rev*, 2016, 8: 1-22.