DOI:10.13193/j.issn.1673-7717.2026.09.002

凝聚态理论指导下基于 Ca^{2+} 交联的玉竹多糖防潮中间体的制备及评价

杨华生,段亚文,邓碧莲,肖音,楚瑞阁,吴璐
(江西中医药大学,江西 南昌 330004)

摘要:目的 在凝聚态理论指导下采用钙盐交联制备玉竹多糖中间体,降低其吸湿性,提高防潮性能,为中药浸膏的防潮提供新方法。方法 单因素实验考察交联剂种类及用量、多糖浓度及搅拌时间、速度、温度对防潮中间体吸湿率的影响,采用响应面法优化处方及工艺。测定防潮中间体的平衡吸湿率及临界相对湿度,采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry,DSC)测定玻璃化转变温度(T_g),扫描电镜(Scanning Electron Microscope,SEM)观察微观形态,流变仪测定表观黏度和黏弹性。结果 交联剂种类及用量、多糖浓度、搅拌温度对中间体吸湿率均有显著影响,其最优处方及工艺:磷酸氢钙5.0%,多糖浓度0.6 g/mL、搅拌温度50 ℃;防潮中间体评价结果显示,多糖、多糖+磷酸氢钙、防潮中间体的平衡吸湿率分别为22.87%、18.44%、15.04%,临界相对湿度分别为51.97%、56.53%、66.32%,T_g 分别为63.5 ℃、68.5 ℃、80.0 ℃;SEM显示玉竹多糖防潮中间体粒径较大,且颗粒之间有粘连;流变学分析发现,玉竹多糖防潮中间体表观黏度增加,弹性增加。结论 以高分子为有效成分的中药浸膏,可通过交联改变其凝聚态结构,进而降低吸湿性,提高防潮性能。

关键词:玉竹多糖;凝聚态;吸湿;防潮中间体
中图分类号:R285.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-7717(2026)09-0008-07

Preparation and Evaluation of Moisture-resistant Intermediates of Yuzhu (*Polygonatum odoratum*) Polysaccharide Based on Ca^{2+} Crosslinking Under Guidance of Condensed Matter Theory

YANG Huasheng, DUAN Yawen, DENG Bilian, XIAO Yin, CHU Ruige, WU Lu
(Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, Jiangxi, China)

Abstract: *Objective* Under the guidance of condensed matter theory, calcium salt cross-linking is used to prepare moisture-resistant intermediates of Yuzhu (*Polygonatum odoratum*) polysaccharide, reduce its hygroscopicity, improve moisture resistance and provide new methods for moisture-proofing of traditional Chinese medicine extracts. *Methods* Single-factor experiment investigated the effects of cross-linking agent type and dosage, polysaccharide concentration, stirring time, stirring speed and stirring temperature on moisture absorption rate of moisture-resistant intermediates, and used the response surface method to optimize the prescription and process. The equilibrium moisture absorption rate and critical relative humidity of moisture-proof intermediates were measured, and the glass transition temperature T_g was measured by differential scanning calorimeter (DSC), the microscopic morphology was observed by scanning electron microscope (SEM), and the rheometer was used to measure the apparent viscosity and viscoelasticity. *Results* The type and dosage of cross-linking agent, polysaccharide concentration and stirring temperature all had significant effects on the moisture absorption rate of the intermediate. The optimal prescription and process were 5.0% calcium hydrogen phosphate, polysaccharide concentration 0.6 g/mL and stirring temperature 50 ℃. The evaluation results of moisture-resistant intermediates showed that the equilibrium moisture absorption rates of polysaccharides, polysaccha-

基金项目:国家自然科学基金项目(81960724);江西省自然科学基金面上项目(20232BAB206171);江西省中医药管理局科技计划项目(2023A0380);江西省研究生创新专项资金项目(YC2023-S794)
作者简介:杨华生(1974-),男,湖南衡阳人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向:传统中医药理论及中药制剂。
通讯作者:楚瑞阁(1974-),男,河南郑州人,主任中医师,博士,研究方向:中医药防治消化系疾病(肿瘤)。E-mail:384861926@qq.com。
吴璐(1980-),女,湖南长沙人,副教授,硕士,研究方向:传统中医药理论及中药制剂。E-mail:wulu456@126.com。

rides + $CaHPO_4$ and moisture - resistant intermediates were 22.87%, 18.44% and 15.04%, respectively, with critical relative humidity of 51.97%, 56.53% and 66.32%, respectively, and the values of T_g were 63.5 ℃, 68.5 ℃ and 80.0 ℃, respectively. SEM showed that moisture - resistant intermediates of Polygonatum odoratum polysaccharide had a large particle size and adhesions between the particles. The rheological analysis has found that the apparent viscosity of moisture - resistant intermediates of Yuzhu (*Polygonatum odoratum*) polysaccharide and the elasticity increased. *Conclusion* Traditional Chinese medicine extracts with polymers as the active ingredient can change their condensed state structure through cross - linking, thereby reducing hygroscopicity and improving moisture resistance.

Keywords: Yuzhu (*Polygonatum odoratum*) polysaccharide; condensed matter; moisture absorption; moisture - resistant intermediates

1967 年,物理学家菲利普·安德森和福尔克尔·海涅首次提出了凝聚态理论[1]。所谓凝聚态,指由大量粒子组成且粒子间有较强相互作用的物理系统[2]。高分子凝聚态结构是指高分子链之间的排列和堆砌方式,宏观表现为液态和固态,液态包括溶液、黏流态等形式,固态则有结晶态、非晶态、取向态、织态等形式[3]。高分子凝聚态结构的形成是高分子链之间相互作用的结果,“交联反应”是改变高分子链相互作用的有效方法之一[4]。所谓交联反应,是指使用化学或物理方法使高分子链间产生化学反应形成三维网状结构,从而提高高分子材料综合性能的一种方法[5]。化学交联反应均应用交联剂,而 Ca^{2+} 盐是一种常用的交联剂,其通过“钙桥”和“氢键”促进高分子交联[6]。

凝聚态结构会影响高分子物质的诸多性质,包括力学性能、热稳定性、降解特性等[7-9]。研究还发现,凝聚态还会影响水、葡萄糖等极性分子在其中的转运性能[10-11]。海藻酸钠通过 Ca^{2+} 交联形成稳定的水凝胶网络结构,提高其阻湿性[12-13];在果胶里加入 Ca^{2+} 可形成果胶钙凝胶体系,与果胶比较,葡萄糖在果胶钙中的迁移速率明显降低[14]。据此推测,高分子凝聚态还可能导致高分子“吸湿”的改变,进而改善高分子的“防潮”性能。

玉竹多糖,是由果糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖醛酸等单糖缩合而成的杂多糖,属于高分子物质,是中药玉竹的主要有效成分之一,具有降血糖、抗肿瘤、抗氧化、抗疲劳及免疫调节等多种药理作用[15-16]。然而,玉竹多糖极易吸潮,这不仅不利于其保存,还会影响以玉竹多糖为中间体的产品的质量。因此,本研究在凝聚态理论的指导下,以钙盐为交联剂,制备玉竹多糖中间体,改变玉竹多糖高分子凝聚态结构,降低玉竹多糖的吸湿性,为玉竹多糖的防潮提供新方法,为中药浸膏的吸湿、防潮提供新视角。

1 仪器与材料

1.1 仪器

Discovery HR - 1 流变仪(美国 TA 仪器公司);Quanta 250 型扫描电子显微镜(美国 FEI 公司);Diamond DSC 型差示扫描量热分析仪(美国 Perkin Elmer 公司);真空干燥箱(上海恒科学仪器有限公司);85 - 1 恒温磁力搅拌器(国华企业集团有限公司)。

1.2 材料

玉竹饮片(安徽道源堂中药饮片有限公司,批号:191101);无水氯化钙(麦克林生物科技有限公司,批号:C805228)和葡萄糖酸钙(麦克林生物科技有限公司,批号:C805236);磷酸氢钙(湖州展望药业有限公司,批号:202105008);硫酸钙(湖南新绿方药业有限公司,批号:20220319);碳酸钙(湖南新绿方药业有限公司,批号:21011604)。

2 实验方法

2.1 玉竹多糖防潮中间体的制备

取玉竹药材,加水回流提取,过滤,将滤液浓缩为 1 g/mL(以生药量计);在上述浓缩液中加入 4 倍的无水乙醇,4 ℃冰箱静置过夜,过滤,即得玉竹多糖浸膏;取玉竹多糖浸膏,加水溶解,加入 Ca^{2+} 盐作为交联剂,置于磁力搅拌器上搅拌,水浴挥干,放入真空干燥箱中干燥,粉碎过筛,即得玉竹多糖防潮中间体。

2.2 吸湿率测定

取干燥的具塞称量瓶,置于放有过饱和氯化铵溶液(相对湿度 80%)的干燥器中,放置 24 h,精密称定质量 m_1;再取样品平铺于称量瓶中,厚度约为 1 mm,精密称定质量 m_2。将称量瓶敞口,并与瓶盖同置于上述条件下,25 ℃保存,24 h 后取出,精密称定,其质量 m_3。平行测定 3 次,按公式“吸湿率(%) = $(m_3 - m_2)/(m_2 - m_1) \times 100\%$”计算 24 h 的吸湿率[17]。

2.3 单因素实验

分别以氯化钙($CaCl_2$)、磷酸氢钙($CaHPO_4$)、硫酸钙($CaSO_4$)、碳酸钙($CaCO_3$)、葡萄糖酸钙($C_{12}H_{22}O_{14}Ca$)等 Ca^{2+} 盐为筛选对象,制备玉竹多糖防潮中间体,并与多糖、多糖 + Ca^{2+} 盐的物理混合物为对照,以吸湿率为指标,优选 Ca^{2+} 交联剂;在此基础上,考察交联剂用量为 2%、4%、6%、8%、10% 时防潮中间体吸湿率的变化;固定交联剂种类及用量,考察多糖浓度、搅拌时间、搅拌速度、搅拌温度对防潮中间体吸湿率的影响。

2.4 响应面实验

根据单因素实验结果,选择磷酸氢钙用量(A)、多糖浓度(B)、搅拌温度(C)为自变量,以 24 h 吸湿率(Y)为因变量,采用 Box - Behnken 响应面法进行工艺优化。按最优处方及工艺

制备三批玉竹多糖防潮中间体，比较吸湿率的实测值与预测值的大小，对优选结果进行验证。

2.5 玉竹多糖防潮中间体的评价

2.5.1 测试样品的制备 为研究玉竹多糖防潮中间体的特征及质量，将防潮中间体与不加交联剂的多糖，以及加了交联剂的物理混合物进行比较研究。取玉竹多糖及磷酸氢钙，按优选的处方及工艺，制备玉竹多糖防潮中间体，取中间体适量，粉碎，即得防潮中间体测试样品；取玉竹多糖，粉碎，得多糖测试样品；取玉竹多糖、磷酸氢钙，粉碎，混合，得多糖 + 磷酸氢钙物理混合物测试样品。

2.5.2 平衡吸湿率及临界相对湿度的测定 取以上 3 种样品适量，分别在 2、4、8、12、24、48、72、96、120 h 测定吸湿率，绘制吸湿 - 时间曲线；取以上 3 种样品，精密称定放于已恒重的称量瓶中，再将其置于相对湿度分别为 23%、43%、55%、69%、80%、84%、92% 的干燥器中，于 25 ℃下保存 72 h，精密称定，计算吸湿率；以吸湿率为纵坐标，相对湿度为横坐标作图，对图曲线两端做切线，切线交点对应的横坐标即为临界相对湿度。

2.5.3 差示扫描量热及扫描电镜分析 取以上 3 种样品适量，采用差示扫描量热法（different scanning calorimeter，DSC）测定样品玻璃化转变温度（T_g）；程序升温范围为 25 ~ 400 ℃，升温速率为 20 ℃/min，测试气氛为 N_2[18]；样品表面经粒子溅射仪喷镀金膜，应用扫描电镜（scanning Electron Microscope，SEM）观察样品的形貌特征[19]。

2.5.4 流变学特性分析 取以上 3 种样品适量，加纯化水搅拌均匀，分别得到多糖溶液、多糖 + 磷酸氢钙混悬液、防潮中间体混悬液 3 个液体样品。取上述液体样品适量，在 25 ℃条件下，测定流体类型及表观黏度[20]。给样品以恒定的频率（1 Hz）施加一个正弦应变，考察储能模量 G′和损耗模量 G″的变化规律，研究液体样品的黏弹性[21]。

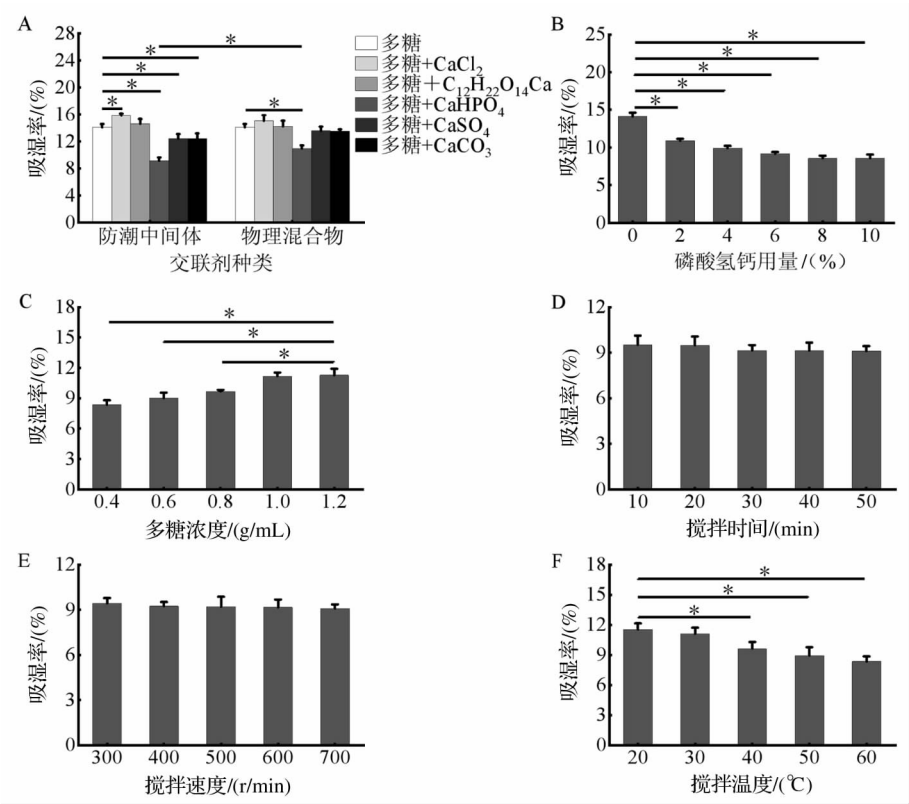
2.6 数据处理

数据采用 SPSS 21.0 软件进行显著性分析，采用 Design - Expert 8.0.6 中 Box - Behnken 进行模型建立和方差分析，采用 Origin 2019b 进行结果的绘图制作，所有实验均做 3 次平行，实验结果以平均值 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示。

3 实验结果

3.1 单因素实验

交联剂种类对防潮中间体吸湿性的影响，结果见图 1A。结果显示，与多糖比较，以磷酸氢钙、硫酸钙、碳酸钙为交联剂制备的防潮中间体吸湿率明显降低（$P < 0.05$），其中以磷酸氢钙为交联剂制备的中间体吸湿率最低，而以氯化钙制备的防潮中间体的吸湿率显著增加（$P < 0.05$）；与多糖比较，多糖 + 磷酸氢钙物理混合物的吸湿率也明显降低（$P < 0.05$），而其他交联剂与多糖的物理混合物吸湿率未见明显变化（$P > 0.05$）。因此，防潮中间体的交联剂确定为磷酸氢钙。磷酸氢钙用量对



注：A ~ F. 交联剂种类（A）、磷酸氢钙用量（B）、多糖浓度（C）、搅拌时间（D）、搅拌速度（E）、搅拌温度（F）对吸湿率的影响；* $P < 0.05$。

图 1 交联剂种类及用量、多糖浓度、搅拌时间、搅拌速度、搅拌温度对吸湿率的影响

防潮中间体吸湿性的影响，结果见图 1B。结果显示，吸湿率随磷酸氢钙用量的增加而降低（$P<0.05$），当磷酸氢钙用量增至 6% 后，吸湿率下降幅度趋于平缓，因此选择磷酸氢钙用量为 6%。

多糖浓度对防潮中间体吸湿性影响，结果见图 1C。结果显示，与浓度为 1.2 g/mL 比较，多糖浓度为 0.4、0.6、0.8 g/mL 时，防潮中间体的吸湿率显著减小（$P<0.05$）。因此本研究选择多糖浓度为 0.8 g/mL。如图 1D、E、F 所示，搅拌时间、速度对防潮中间体吸湿率无显著影响（$P>0.05$），而与搅拌温度为 20 ℃相比，搅拌温度为 40、50、60 ℃时，防潮中间体的吸湿率显著降低（$P<0.05$）。

3.2 响应面实验

根据单因素实验结果，选择磷酸氢钙用量（A）、多糖浓度（B）、搅拌温度（C）为自变量，以 24 h 吸湿率（Y）为因变量，采用 Box－Behnken－响应面法进行处方、工艺优化，结果见表 2；建立吸湿率对 3 个因素回归方程模型：$Y=8.52-A+0.33B-0.28C+0.12AB+0.12AC-0.038BC+0.56A^2+0.38B^2+0.32C^2$；方差分析显示，R 为 0.984 9，模型 $P<0.05$，失拟项 P 为 0.726 2，表明建立的模型有统计学意义，能对处方、工艺进行预测。各因素对吸湿率的影响为磷酸氢钙用量（A）＞多糖浓度（B）＞搅拌温度（C）；吸湿率与任意 2 个因素的三维响应面曲线见插页Ⅳ图 2。以吸湿率最小为目标，根据软件得出最佳处方及工艺情况，确定处方及工艺：磷酸氢钙用量 5.0%、多糖浓度 0.6 g/mL、搅拌温度 50 ℃。在上述优化工艺下进行 3 批验证实验，结果显示预测值为 8.08%，实测值为（8.06 ± 0.66）%。见表 1。

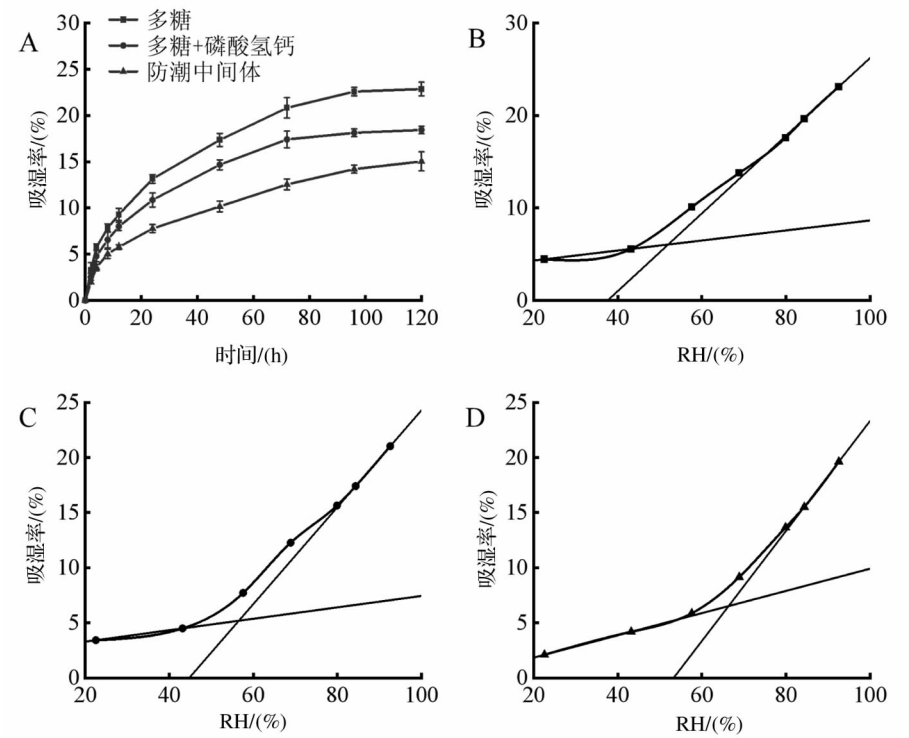
表 1 响应面实验结果

编号	A/(%)	B/(g·mL)	C/(℃)	吸湿率/(%)
1	4(0)	0.4(−1)	30(−1)	9.15
2	4	0.4	60(1)	8.65
3	2(−1)	0.7(0)	60	10.11
4	2	1.0(1)	45(0)	10.57
5	4	1.0	30	9.88
6	2	0.7	30	10.91
7	4	1.0	60	9.23
8	6(1)	0.4	45	8.11
9	6	0.7	30	8.45
10	2	0.4	45	10.15
11	6	1.0	45	9.01
12	4	0.7	45	8.56
13	4	0.7	45	8.92
14	4	0.7	45	8.45
15	6	0.7	60	8.13
16	4	0.7	45	8.44
17	4	0.7	45	8.23

3.3 玉竹多糖防潮中间体的评价

3.3.1 平衡吸湿率及临界相对湿度的测定 图 3A 显示，多糖、多糖＋磷酸氢钙、防潮中间体的平衡吸湿率分别为 22.87%、18.44%、15.04%；图 3B、C、D 显示，多糖、多糖＋磷酸氢钙、防潮中间体的临界相对湿度分别为 51.97%、56.53%、66.32%。以上结果表明，将玉竹多糖制备成防潮中间体后，吸湿率明显下降，防潮能力增强。

3.3.2 差示扫描量热及扫描电镜分析 差示扫描量热分析结



注：A：为平衡吸湿率；B－D：多糖（B）、多糖＋磷酸氢钙（C）、防潮中间体临界相对湿度（D）。

图 3 多糖、多糖＋磷酸氢钙和防潮中间体平衡吸湿曲线及临界相对湿度

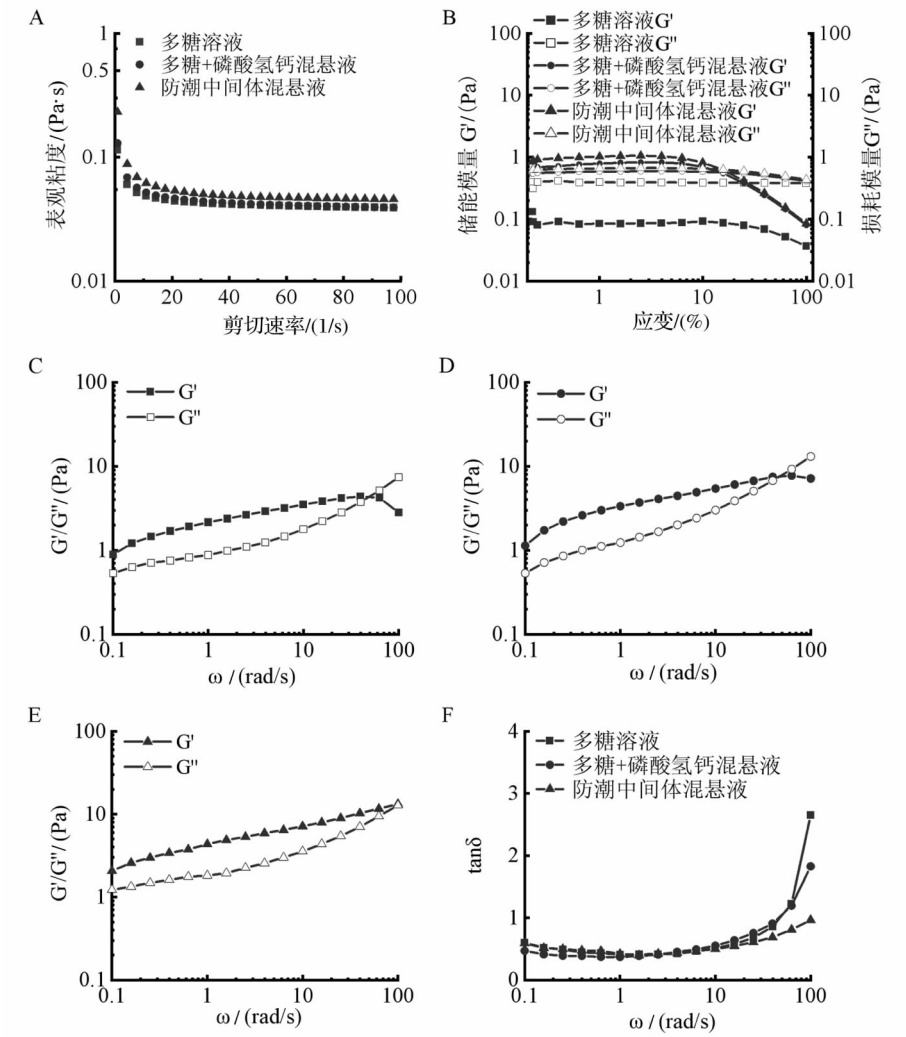
果见插页Ⅳ图 4A。插页Ⅳ图 4A 显示，多糖、多糖 + 磷酸氢钙、防潮中间体的 T_g 分别为 63.5 ℃、68.5 ℃、80.0 ℃；多糖、多糖 + 磷酸氢钙、防潮中间体的扫描电镜结果分别见插页Ⅳ图 4B、插页Ⅳ图 4C、插页Ⅳ图 4D。结果显示，多糖、多糖 + 磷酸氢钙颗粒表面较为平滑，粒径较小，颗粒之间分界明显，而玉竹多糖防潮中间体粒径较大，且颗粒之间有粘连。

3.3.3 玉竹多糖防潮中间体的流变学分析 图 5A 显示，多糖溶液、多糖 + 磷酸氢钙混悬液、防潮中间体混悬液的表观黏度随剪切速率的增加均明显下降，表现为“剪切稀化”，故均属于假塑性流体[22]。在初始剪切速率下，多糖溶液、多糖 + 磷酸氢钙混悬液、防潮中间体混悬液的表观黏度分别为 0.115、0.130、0.232 Pa·s，可见玉竹多糖交联后可增加表观黏度。

图 5B 显示，在应变在 0.5% ~6.0% 的范围内，3 种液体样品的 G′、G″均较为稳定，而当应变超过 6.0% 时，G′和 G″均明显降低。因此，本研究选择应变为 1% 进行频率扫描实验。损耗因子 tanδ 为 G″与 G′的比值，当 tanδ < 1 时，物质表现为弹性行为，tanδ > 1 是黏性行为[23]。角频率对 G′、G″的影响，结果见图 5C、D、E，角频率对 tanδ 的影响，结果见图 5F。图 5F 显示，在低 ω 下，多糖溶液、多糖 + 磷酸氢钙混悬液的 tanδ < 1，表现出弹性特征；在高 ω 下，多糖溶液、多糖 + 磷酸氢钙混悬液的 tanδ > 1，表现出黏性特征；而防潮中间体混悬液无论在低 ω 还是高 ω 下，G′始终大于 G″，使 tanδ 小于 1，均表现为弹性特征。

4 讨论

本文以氯化钙（$CaCl_2$）、磷酸氢钙（$CaHPO_4$）、硫酸钙（$CaSO_4$）、碳酸钙（$CaCO_3$）、葡萄糖酸钙（$C_{12}H_{22}O_{14}Ca$）等含 Ca^{2+} 的盐为考察对象，以吸湿率为指标，筛选玉竹多糖交联剂。结果显示，以磷酸氢钙为交联剂的中间体吸湿率最低，而以氯化钙为交联剂的中间体不仅不防潮，还有较强的吸湿性。磷酸氢钙属三斜晶系，吸水性较弱且无引湿性，物理化学性质稳定，具有良好的生物相容性和生物可降解性，是理想的离子交联剂[24]。氯化钙本身作为干燥剂，具有较强的吸湿性，作为交联剂使用时，当吸湿的作用大于交联产生的作用时，网络结构变



注：A：表面黏度；B：应变扫描；C ~ E：角频率对多糖溶液、多糖 + 磷酸氢钙混悬液（D）、防潮中间体（E）G′、G″的影响；F：角频率对 tanδ 的影响。

图 5 多糖、多糖 + 磷酸氢钙、防潮中间体的流变学分析

得松散导致分子间间隙增大,使交联性能下降[25]。

交联形成的交联产物,本质上改变了物质的凝聚态结构。本实验采用 Ca^{2+} 交联制备玉竹多糖防潮中间体,流变学分析发现,玉竹多糖交联后其表观黏度明显增加。这可能与以下两个方面有关。一方面,无水磷酸氢钙中的 Ca^{2+} 会通过离子键作用于多糖的游离羧基上,Ca^{2+} 与羧基基团形成二聚体,进而横向聚集成多聚体形成 Egg - box 结构[26-27];另一方面,Ca^{2+} 可以降低多糖链间静电作用,形成一定数量的氢键[26]。流变学分析还发现,玉竹多糖交联后其"弹性"也发生了改变。研究表明,线性高分子聚合物如天然橡胶,经过硫化处理后,在线性分子之间产生"硫桥":这些"硫桥"即交联结构将线性分子彼此联结起来,使在外力作用下分子之间不能产生滑动,从而增强了橡胶的弹性和机械性能[28]。还有研究发现,Ca^{2+} 能通过离子键合的方式与果胶中的半乳糖醛酸残基结合形成凝胶网络结构,从而改善果胶的弹性[29]。以上研究表明,玉竹多糖交联后其表观黏度、弹性均明显增加,表明其凝聚态发生了改变,差示扫描量热分析和扫描电镜也支持这一观点。

中药粉体的防潮很重要,与其稳定性、药效,甚至不良反应均密切相关。常用的粉体防潮方法包括降低比表面积、粉体包衣、粉体改性等方法[30]。本研究发现,玉竹多糖交联形成中间体后,平衡吸湿率由 22.87% 降低至 15.04%,临界相对湿度由 51.97% 提高到 66.32%;同时,交联剂磷酸氢钙用量较低,为中间体总重的 5.0%,且磷酸氢钙也是片剂、胶囊剂常用的稀释剂。制备防潮中间体工艺"取玉竹粗多糖复溶后,加入交联剂,搅拌,干燥",可见工艺简单,能耗也较低。总之,高分子的凝聚态与吸湿性密切相关,因此可基于凝聚态提高以高分子为有效成分的中药粉体的"防潮"性能。

参考文献

[1] 施郁. 评冯端和金国钧的《凝聚态物理学》[J]. 现代物理知识,2017,29(1):72.
[2] 巩龙延. 凝聚态物理课程思政教学实践[J]. 物理通报,2023(9):60-62,68.
[3] 刘文. 药用高分子材料学[M]. 北京:中国中医药出版社,2010:151-154.
[4] 王珏,胡丽,武美芹,等. NMR 技术测定 PVPP 交联度及其粉体可压缩性研究[J]. 药学学报,2022,57(2):474-479.
[5] 石敏. 双相原位微纤的结构形貌调控、成纤机制及复合材料构效关系研究[D]. 北京:北京化工大学,2023.
[6] 张彩霞,穆伟豪,高佳嘉,等. 盐离子-GDL 协同作用对酶解豆粕凝胶特性的影响[J]. 中国调味品,2025,50(4):67-75.
[7] GRANATO A V. Mechanical properties of simple condensed matter[J]. Mater Sci Eng A,2009,521:6-11.
[8] LIU N,WEI K,WANG L,et al. Organic-inorganic polyimides with double decker silsesquioxane in the main chains[J]. Polym Chem,2016,7(5):1158-1167.
[9] 王佳蕾,霍毅欣,杨宇. 聚乙烯塑料的微生物降解[J]. 微生物学通报,2020,47(10):3329-3341.
[10] KANMANI P,LIM S T. Development and characterization of novel probiotic-residing pullulan/starch edible films[J]. Food Chem,2013,141(2):1041-1049.
[11] 孙洋,徐晨凤,程凯旋,等. 魔芋葡甘聚糖凝胶质构特性对淀粉消化及食欲的影响[J]. 食品科学,2025,46(15):76-90.
[12] 王小芳,张寒,孙建明,等. 淀粉基复合可食膜制备和应用研究进展[J]. 食品与发酵工业,2025,51(16):403-410.
[13] VORWALD C E,GONZALEZ-FERNANDEZ T,JOSHEE S,et al. Tunable fibrin-alginate interpenetrating network hydrogels to support cell spreading and network formation[J]. Acta Biomater,2020,108:142-152.
[14] 孙磊,翟莉茹,韩剑,等. 中酯化度果胶离子络合复合物凝胶对葡萄糖迁移的影响[J]. 功能高分子学报,2008,21(4):391-396.
[15] 王晨,于栋华,阮佳鑫,等. 玉竹化学成分、药理作用研究进展及其质量标志物预测分析[J]. 中国现代应用药学,2025,42(1):158-172.
[16] 李芳,唐海峰,梁永林,等. 基于补益效应的玉竹药食同源功效研究进展[J]. 中草药,2025,56(2):680-695.
[17] 曲馨,张尚智,薄双琴,等. 金蕾颗粒成型工艺优化及其物理指纹图谱建立[J]. 中成药,2023,45(2):535-539.
[18] 冯春来,丁洋洋,李文静,等. 漆黄素固体分散体的制备[J]. 中成药,2017,39(12):2503-2507.
[19] 张芳,韩丽,张定堃,等. 乳糖微粉研磨改性降低白芷提取物吸湿性的工艺筛选及机制探究[J]. 中国实验方剂学杂志,2015,21(3):6-9.
[20] 李飞,李晓平,翁向丽,等. 戊二醛改性提高大豆胶粘剂耐水性能[J]. 大豆科学,2009,28(6):1062-1066,1070.
[21] 田文静,周瑶,黄群惠,等. 超声处理对肉苁蓉多糖流变学性质的影响[J]. 生物学通报,2021,56(2):48-53.
[22] YANG J L,YAO S Y,SONG Z G,et al. Investigation of cellulose nanocrystals fabricated *via* sulfuric acid combined with deep eutectic solvent route[J]. Heliyon,2024,10(20):e39184.
[23] 马小淇,王可心,于小帅,等. 亚油酸联合米谷蛋白对挤压大米淀粉复合物的影响[J]. 精细化工,2025,42(6):1341-1349.
[24] 靳雪阳. 微撞击流反应器制备无水磷酸氢钙材料及其性能研究[D]. 北京:北京化工大学,2022.
[25] 陈妮娜,曾稍俏. 萃取剂协同超声波提取香蕉皮果胶及果胶复合膜的制备[J]. 中国食品添加剂,2025,36(1):110-115.
[26] 李梦钰,刘会平,贾琦,等. 天冬多糖理化性质和流变学特性研究[J]. 食品与发酵工业,2021,47(5):48-56.
[27] 丁宁,艾连中,赖凤羲,等. 百香果皮果胶的分子特征及 Ca^{2+} 与 Zn^{2+} 致流变变化的研究[J]. 食品与发酵工业,2020,46(14):77-84.
[28] 高俊刚,李源勋. 高分子材料[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
[29] 彭小燕,木泰华,张苗,等. 超高压下 Ca^{2+} 与 Na^{+} 离子对甜菜果胶结构及流变性质的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(21):4335-4346.
[30] 刘怡,冯怡,徐德生. 中药提取物防潮制剂技术研究进展[J]. 中草药,2007,38(5):795-797.

凝聚态理论指导下基于 Ca^{2+} 交联的玉竹多糖防潮中间体的制备及评价

（正文见 8－13 页）

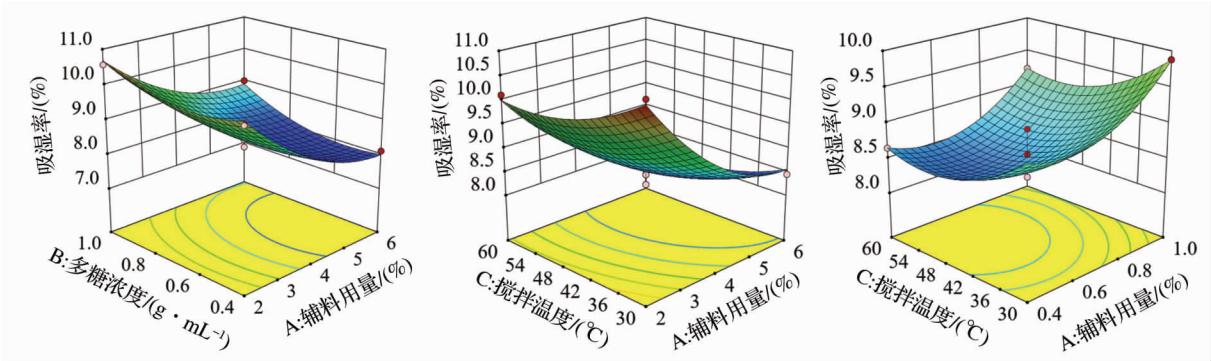
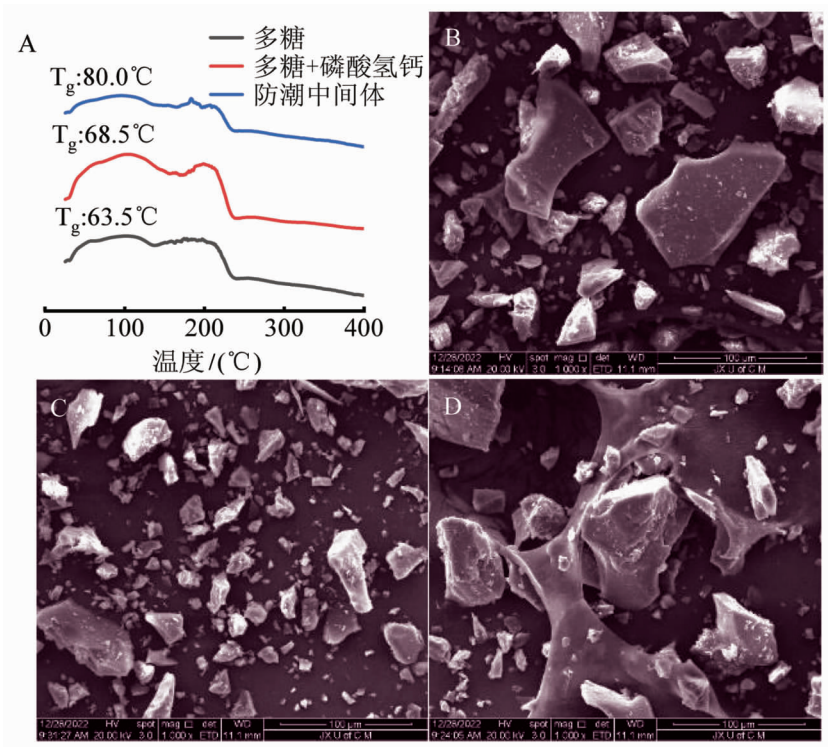


图 2　各因素交互作用对吸湿率影响的响应面图



注：A：玻璃化转变温度；B～D：多糖、多糖＋磷酸氢钙、防潮中间体 SEM 图。

图 4　多糖、多糖＋磷酸氢钙、防潮中间体的玻璃化转变及微观形态