

· 中药农业 ·

高压输液法沉香通体结香技术的结香效果
及所产沉香品质分析[△]何欣^{1,2}, 黄颖^{1,2}, 暴正瀚^{1,2}, 孟慧^{1,2}, 李浩凌², 魏建和^{1,2}, 杨云^{1,2*}

1. 中国医学科学院 北京协和医学院 药用植物研究所 中草药物质基础与资源利用教育部重点实验室/濒危药材繁育国家工程实验室, 北京 100193;
2. 中国医学科学院 北京协和医学院 药用植物研究所 海南分所 海南省南药资源保护与开发重点实验室/国家中医药管理局沉香可持续利用重点实验室, 海南 海口 570311

[摘要] 目的: 评价高压输液法用于通体结香技术的可行性。方法: 分别在常压和 10、20、30 MPa 压力下采用通体结香技术处理白木香, 记录输液时间, 筛选最佳高压输液压力; 在晴天、夜晚、雨天和低温 4 种不同结香环境条件下采用常压和高压输液处理, 记录输液时间, 根据《中华人民共和国药典》(以下简称《中国药典》) 2020 年版沉香质量标准, 对处理 6 个月的沉香样品进行性状、显微观察, 浸出物、结香率、沉香四醇质量分数、特征图谱分析。结果: 20 MPa 为高压输液法通体结香技术最佳输液压力, 可显著缩短通体结香技术不同结香环境条件下的输液时间, 输液效率提高 129%~497%。20 MPa 压力下通体香品质均符合《中国药典》2020 年版标准, 沉香层呈棕黑色, 环形沉香层外有棕色星点状沉香外溢现象; 平均结香率、浸出物平均质量分数和沉香四醇平均质量分数分别为 11.69%、15.14% 和 0.45%, 与常压差异无统计学意义; 薄层色谱和特征图谱检测结果与对照药材一致。结论: 高压输液法通体结香技术能明显提高该技术的输液效率, 既不受天气和气候影响, 也不降低结香品质。该技术具有较强的可行性, 可在实际生产中推广应用。

[关键词] 沉香; 通体结香技术; 高压输液; 技术升级

[中图分类号] R282.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2023)04-0831-08

doi:10.13313/j.issn.1673-4890.20221026001

High-pressure Infusion Method in Whole-tree Agarwood-inducing Technique:
Inducing Effect and Agarwood QualityHE Xin^{1,2}, HUANG Ying^{1,2}, BAO Zheng-han^{1,2}, MENG Hui^{1,2}, LI Hao-ling², WEI Jian-he^{1,2}, YANG Yun^{1,2*}

1. Key Laboratory of Bioactive Substances and Resources Utilization of Chinese Herbal Medicine, Ministry of Education & National Engineering Laboratory for Breeding of Endangered Medicinal Materials, Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Science & Peking Union Medical College, Beijing 100193, China;
2. Hainan Provincial Key Laboratory of Resources Conservation and Development of Southern Medicine & Key Laboratory of State Administration of Traditional Chinese Medicine for Agarwood Sustainable Utilization, Hainan Branch Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Haikou 570311, China

[Abstract] **Objective:** To evaluate the feasibility of high-pressure infusion in the whole-tree agarwood-inducing technique (Agar-WIT). **Methods:** Agar-WIT was employed to treat *Aquilaria sinensis* under normal pressure, 10 MPa, 20 MPa, and 30 MPa, respectively. The infusion time was recorded, and the optimal infusion pressure was selected. Under four different environmental conditions of sunny day, night, rainy day, and low temperature, normal-pressure infusion and high-pressure infusion were used to induce agarwood, and the infusion time was recorded. According to the standards in the

[△] **[基金项目]** 国家重点研发计划项目 (2018YFC1706401); 中国医学科学院医学与健康科技创新工程项目 (2021-I2M-1-032)

^{*} **[通信作者]** 杨云, 研究员, 研究方向: 药用植物资源可持续利用; Tel: 0898-31589008, E-mail: yangyun43@aliyun.com

Chinese Pharmacopoeia (2020 edition), the agarwood samples after 6 months of treatment with Agar-WIT were studied in terms of appearance, microscopic characteristics, extract content, agarwood area ratio, agarotetrol content, and characteristic chromatogram. **Results:** The optimal pressure for the high-pressure infusion was 20 MPa, which significantly shortened the infusion time under different production conditions and increased the infusion efficiency by 129%-497%. The agarwood produced under 20 MPa showed the quality conforming to the standards in the *Chinese Pharmacopoeia* (2020 edition), with a brownish black agarwood layer and a brown star-shaped agarwood overflow outside the annular agarwood layer. The average agarwood area ratio, the average content of extract, and the average content of agarotetrol were 11.69%, 15.14%, and 0.45%, respectively, which had no significant differences from those of the agarwood produced under 1 MPa. The thin-layer chromatogram and characteristic chromatogram of the agarwood produced were consistent with those of the reference medicinal material. **Conclusion:** The high-pressure infusion method characterized by high infusion efficiency is not susceptible to weather or climate and does not compromise the agarwood quality. This method has strong feasibility and can be popularized in production.

[Keywords] agarwood; whole-tree agarwood-inducing technique (Agar-WIT); high-pressure infusion; technology upgrading

沉香为常绿乔木瑞香科 (Thymelaeaceae) 沉香属 (*Aquilaria* Lam.) 或拟沉香属 (*Gyrinops* Gaertn.) 植物含树脂的木材^[1]。白木香 *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg 是我国出产沉香的主要树种, 也是《中华人民共和国药典》(以下简称《中国药典》) 2020年版收载的国产药用沉香的唯一正品基原植物^[2]。沉香作为传统名贵药材和“龙檀沉麝”四大名香之首的贵细香料, 在中国、马来西亚、老挝、越南等国家和欧美地区国家应用广泛^[3-5]。但由于长期无节制砍伐, 沉香属植物资源逐渐减少, 已达濒危^[6-7]。目前, 所有沉香属及拟沉香属物种均被列为濒危物种^[8]。

种植的白木香树需要遭受外界伤害(真菌感染或物理、化学伤害), 经长时间积累, 才能诱导产生沉香^[9]。为了解决野生资源濒危、市场高品质沉香资源短缺的问题, 许多人工诱导技术被发明应用于沉香生产^[10-15]。通体结香技术(Agar-WIT)^[15-16]作为目前中国和世界其他沉香产区应用最广泛的人工结香技术, 具有成本低、产量高、操作简便等特点^[17-18], 所产通体香具有药用安全性^[19-20], 明显优于火烙法、结菌法、半断干法等其他传统人工结香技术^[12], 已在中国及东南亚国家超45万株沉香树上使用^[21]。其具体操作方法为选择晴天在距离地面50 cm处的白木香树体上钻孔, 孔深至木质部, 用输液装置输送结香液至小孔内, 通过植物自身的蒸腾作用将高效安全的结香液输送至植物的茎干、枝条等部位, 6~12个月后, 可在树干中形成沉香, 而后整株伐倒即得^[22]。

近年来, 通体结香技术被广泛应用于许多国家的沉香生产, 为了该技术能更好地应用和推广, 有

学者对结香产地^[8,18,21]、结香时间^[23-24]、白木香胸径、钻孔高度^[25]等通体结香技术影响因素及其对产香的影响进行了探究, 但尚未有对该技术本身操作优化升级的研究报道。因此, 本研究探究高压输液的最佳输液压力, 在晴天、雨天、夜晚、低温结香环境下, 通过对比高压输液和常压输液2种通体结香技术的输液时间, 分析2种通体香的性状、显微结构、结香率、浸出物、特征图谱及沉香四醇质量分数, 评价高压输液法通体结香技术的可行性, 为通体结香技术的升级和在国内外更好地应用推广提供依据。

1 材料

1.1 样品

沉香采自中国医学科学院药用植物研究所海南分所海口研发中心, 为试验田5年生白木香树。选取树体直径7 cm左右(离地1 m处)、无虫蛀霉斑、外观健康、无结香痕迹的笔直单杆树, 经中国医学科学院药用植物研究所海南分所杨云研究员鉴定为白木香 *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg。凭证标本保存于中国医学科学院药用植物研究所海南分所沉香鉴定中心标本馆。

1.2 仪器

CM1950型冰冻切片机(德国Leica公司); ECLIPSE80i型生物显微镜(日本尼康株式会社); HH-6型电热恒温水浴锅(江苏科技仪器有限公司); Mili-Q型纯水仪(美国Millipore公司); 2695/2475型高效液相色谱仪[沃特世科技(上海)有限公司];

AL104-IC 型电子天平[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; SB25-12DTDN 型超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司); DHG-9070A 型恒温电热鼓风干燥箱(上海-恒科学仪器有限公司)。

1.3 试药

沉香四醇对照品(批号: 111980-201904, 纯度: 98.6%)、沉香对照药材(批号: 121222-201203)均购自中国食品药品检定研究院;“通香一号”结香液为本课题组发明的沉香诱导结香液; FSC 22 Blue 冷冻包埋剂(美国 Surgipath 公司); GF₂₅₄ 薄层色谱板(批号: HX17444229, 德国 Merck 公司); 乙腈、甲酸(HPLC 级, 赛默飞世尔科技中国有限公司); 其他试剂均为分析纯。

2 方法

2.1 结香处理

高压输液压力考察: 在距离地面 1 m 处, 沿树体垂直方向钻 2 个小孔, 输液管连接高压输液瓶, 分别在常压和 10、20、30 MPa 4 种不同压力下采用通体结香技术输液处理, 每个处理重复 3 次, 记录输液时间, 确定高压输液的佳压力。

通体结香处理: 在晴天、雨天、夜晚、低温条件下, 按上述结香操作步骤, 分别于 20 MPa 和常压下采用通体结香技术结香, 每个处理重复 3 次, 记录输液时间, 结香 6 个月后收样, 样品信息见表 1。

2.2 样品前处理

伐倒的整棵沉香树锯掉树枝和上下方白木部分, 剥除外皮, 截成长 20 cm 的小段, 干燥, 留取部分沉香样品块用于后续结香率计算及显微鉴别, 按海南省地方标准《白木香通体结香树木剖香技术规程》(DB45/T 257—2013) [26] 要求, 将白木和腐烂部位等

未结香部分剔除, 剖取沉香, 香片打粉后分别过二号筛和三号筛, 备用。

2.3 沉香结香率计算

采收后的沉香树段分别于上、中、下 3 段位置, 切取厚度为 3 cm 左右的茎段。正上方分别拍取各茎段的横截面图, 按公式(1) 计算每棵树的结香率。采用 Photoshop 像素法 [24] 计算出各茎段的横截面平均像素 (N_c) 和结香区域平均像素 (N_A), 结香区域与横截面像素数之比等于结香层面积 (S_A) 与横截面面积 (S_c) 之比, 即每株树的结香率。

$$\text{结香率} = \frac{S_A}{S_c} = \frac{N_A}{N_c} \quad (1)$$

2.4 显微鉴别

将厚度约为 0.5 cm 的沉香样品在 70 °C 热水浴中浸泡 6 h 直至沉香样品块完全软化, 取出晾干后, 修剪成合适大小的方形样品小块(包含腐烂层、沉香层和白木层), 用适量冷冻包埋剂包埋, 冷冻切片切取 100 μm 的薄片, 水合氯醛透化剂中透化 6 h, 装片, 置于 4 倍物镜的显微镜下观察。

2.5 浸出物

按《中国药典》2020 年版(四部) [27] 通则 2201 项下醇溶性热浸法测定浸出物含量。

2.6 薄层鉴别

称取混合均匀的沉香样品粉末(过二号筛) 0.5 g, 乙醚 30 mL 提取, 超声振荡 1 h, 滤过, 蒸干滤液, 残渣加三氯甲烷 2 mL 溶解, 作为供试品溶液。另取沉香对照药材 0.5 g, 同法制成对照药材溶液。参照《中国药典》2020 年版 [2] 薄层色谱法(通则 0502), 吸取上述 2 种溶液 10 μL, 分别点于同一硅胶 GF₂₅₄ 薄层板上, 在三氯甲烷-乙醚(10:1) 条件下展开, 取出后晾干, 置紫外灯(365 nm) 下检视。

表 1 高压不同结香环境条件的沉香样品信息

结香日期/年-月-日	采收日期/年-月-日	结香情景	结香温度/°C	结香时间	结香压力	序号
2021-11-21	2022-05-20	晴天	30	9:00	常压	S1-1~S1-3
					20 MPa	S2-1~S2-3
2021-12-01	2022-06-01	夜晚	19	20:30	常压	S3-1~S3-3
					20 MPa	S4-1~S4-3
2021-12-20	2022-06-20	雨天	19	9:30	常压	S5-1~S5-3
					20 MPa	S6-1~S6-3
2022-01-18	2022-07-18	低温	16	9:30	常压	S7-1~S7-3
					20 MPa	S8-1~S8-3

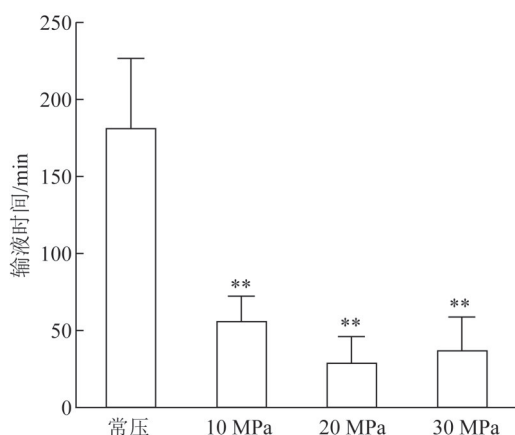
2.7 特征图谱和沉香四醇含量测定

按照《中国药典》2020年版方法^[2]测定特征图谱和沉香四醇含量。

3 结果

3.1 确定高压输液最佳压力

输液法通体结香技术不同输液压力的输液时间见图1。不同输液压力输液时间差异有统计学意义($P<0.01$)，10、20、30 MPa较常压均能大幅度缩短通体结香技术输液时间，高压输液效率较常压可提高216%~497%。其中，20 MPa压力下输液时间最短，输液效率最高，平均输液时间为31 min，较常压输液效率提高497%，为高压输液最佳压力。



注：与常压比较，** $P<0.01$ ；图2同。

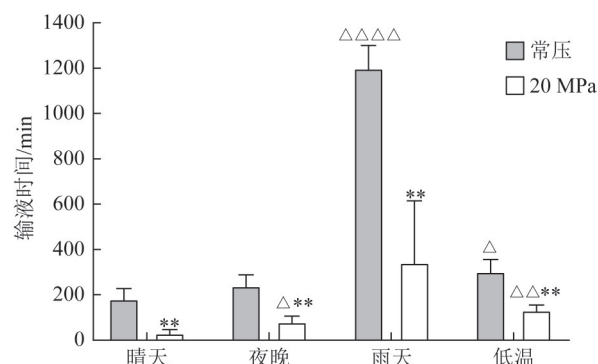
图1 输液法通体结香技术不同输液压力的输液时间 ($\bar{x}\pm s$, $n=3$)

3.2 输液时间

高压输液法通体结香技术的输液时间见图2。与常压相比，20 MPa在晴天、夜晚、雨天、低温4种结香环境下，均能显著缩短输液时间($P<0.01$)，输液效率可提高129%~497%，以晴天时提高效果最显著，输液时间可缩短83%。其中，20 MPa组和常压均以晴天时的输液时间最短，优于其他三组，不同结香环境条件输液时间从短到长分别为晴天、夜晚、低温、雨天。

3.3 性状

高压输液法通体结香技术所产沉香的横截面见图3，由内至外可分为腐烂层、沉香层、过渡层和白木层。20 MPa组通体香沉香层颜色较常压深，且均有点状沉香向外扩散的趋势。晴天20 MPa组



注：与晴天组比较， $\Delta P<0.05$ ， $\Delta\Delta P<0.01$ ， $\Delta\Delta\Delta P<0.0001$ ；图4、图6同。

图2 高压输液法通体结香技术的输液时间 ($\bar{x}\pm s$, $n=3$)

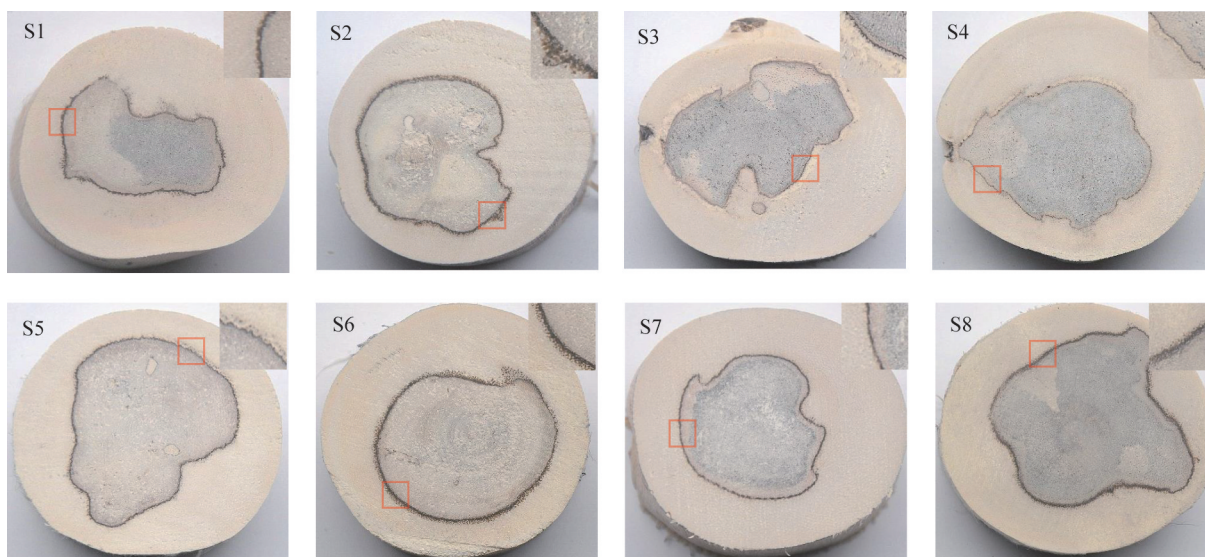
通体香沉香层与常压相比，从偶见浅褐色虚线变为棕黑色连续实线，且在环形沉香层外可见1圈明显的棕色星点状溢出，晴天组均无明显阻隔层形成。夜晚20 MPa组通体香较常压通体香沉香层颜色加深，阻隔层明显减少，由浅棕色虚线，可见1圈较厚白色阻隔层变为一半为深棕色实线、一半为浅棕色虚线，阻隔层仅虚线部分可见。雨天、低温20 MPa组通体香沉香层呈现明显棕黑色实线，且有深棕色星点状溢出，雨天20 MPa组未见明显阻隔层形成，雨天常压有较少不明显阻隔层。

3.4 结香率

通体结香技术通过高压输液产沉香的结香率见图4，20 MPa组通体香的平均结香率为11.69%，与常压通体香的平均结香率(10.82%)差异无统计学意义。其中，20 MPa组和常压组中晴天、雨天、低温的结香率差异无统计学意义；常压夜晚时的结香率显著低于晴天($P<0.05$)，仅为8.15%。

3.5 显微特征

高压输液法通体结香技术所产沉香的显微结构见图5，所有样品均可观察到导管、射线和木间韧皮部等显微结构；木间韧皮部呈“岛”状、条带状或椭圆状，细胞壁薄，内含黄棕色或棕色树脂；射线宽1~2列细胞，呈类长方形；充满黄棕色或棕色树脂，多与木间韧皮部相交；导管呈多角形或类圆形的单孔或复孔，少数导管有树脂填充。20 MPa组通体香木间韧皮部树脂较常压色度深、填充度高，与性状观察结果一致。晴天、夜晚、雨天、低温不同结香环境条件的木间韧皮部树脂的填充度和色度也存在一定差异，晴天组树脂呈黄棕色或棕褐色，



注: S1. 晴天常压处理; S2. 晴天20 MPa处理; S3. 夜晚常压处理; S4. 夜晚20 MPa处理; S5. 雨天常压处理; S6. 雨天20 MPa处理; S7. 低温常压处理; S8. 低温20 MPa处理; 图5、图7、图9同。

图3 高压输液法通体结香技术所产沉香性状

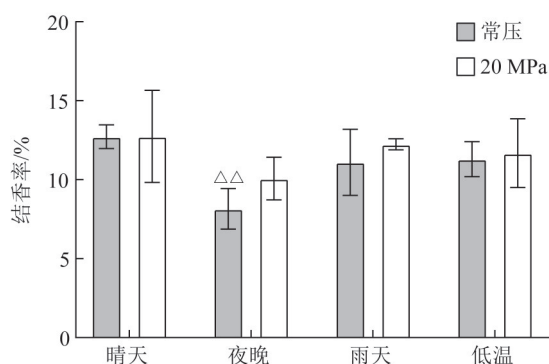


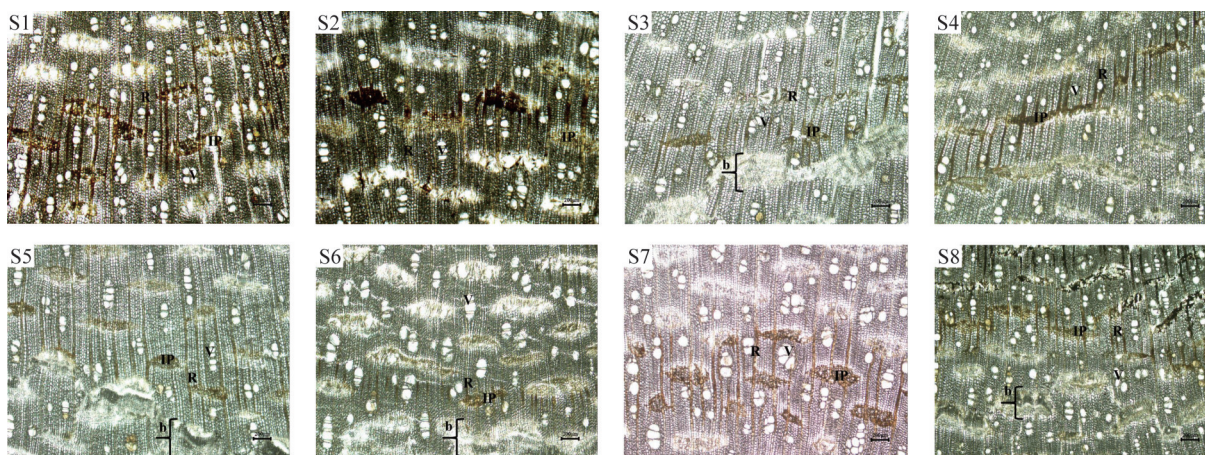
图4 高压输液法通体结香技术所产沉香的结香率
($\bar{x} \pm s, n=3$)

明显优于其他三组。夜晚常压观察到明显的阻隔层结构, 雨天常压、雨天20 MPa组、低温20 MPa组

观察到木间韧皮部异常膨大, 上下2个相连成团状, 推测为阻隔层形成的前体结构。

3.6 沉香的浸出物含量

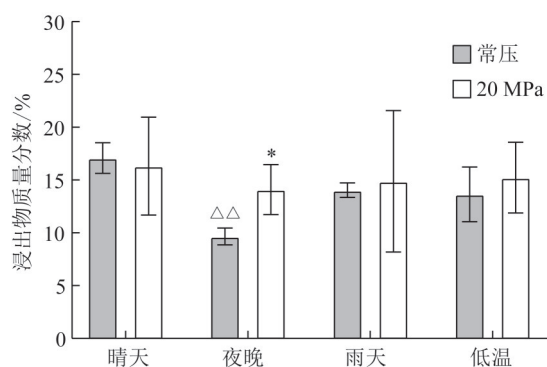
高压输液法通体结香技术所产沉香的浸出物质质量分数见图6, 20 MPa压力不同结香环境条件下所产通体香的浸出物质质量分数均已达到《中国药典》2020年版标准, 按浸出物质质量分数高低排序分别为晴天(16.33%)、低温(15.24%)、雨天(14.89%)和夜晚(14.11%), 平均浸出物质质量分数为15.14%, 与常压通体香平均浸出物质质量分数(13.61%)差异无统计学意义。常压晴天、雨天、低温时通体香的浸出物质质量分数均大于10.0%, 且与20 MPa组差异



注: R. 射线; V. 导管; IP. 木间韧皮部; b. 阻隔层。

图5 高压输液法通体结香技术所产沉香显微特征($\times 4$)

无统计学意义。常压夜晚时通体香的浸出物质量分数最低, 仅为9.66%, 未达到《中国药典》2020年版标准, 显著低于其他处理 ($P<0.05$)。

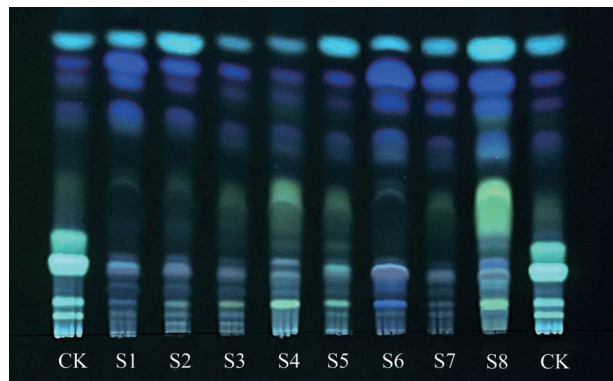


注: 与常压相比, * $P<0.05$; 图8同。

图6 高压输液法通体结香技术所产沉香的浸出物质量分数 ($\bar{x}\pm s, n=3$)

3.7 沉香的薄层色谱

高压输液法通体结香技术所产沉香样品的薄层色谱鉴别见图7。所有样品薄层色谱上的荧光斑点与沉香对照药材一致。结果表明, 高压输液法通体结香技术在晴天、夜晚、雨天、低温不同结香环境条件下结香处理获得的树脂均为沉香, 符合《中国药典》2020年版标准。



注: CK. 沉香对照药材; 图9同。

图7 高压输液法通体结香技术所产沉香样品的薄层色谱图

3.8 沉香四醇含量测定

高压输液法通体结香技术所产沉香的沉香四醇质量分数见图8。高压输液法通体结香技术所产沉香的沉香四醇质量分数均大于0.1%, 符合《中国药典》2020年版标准。20 MPa组通体香的沉香四醇质量分数为0.27%~0.65%, 平均值为0.45%, 与常压通体香沉香四醇的平均质量分数(0.54%)差异无统

计学意义。常压中晴天的通体香沉香四醇质量分数最高, 为0.77%, 夜晚时最低为0.18%。晴天、雨天、低温时20 MPa组与常压组通体香沉香四醇质量分数差异无统计学意义, 常压夜晚时的沉香四醇质量分数显著低于20 MPa组 ($P<0.05$)。

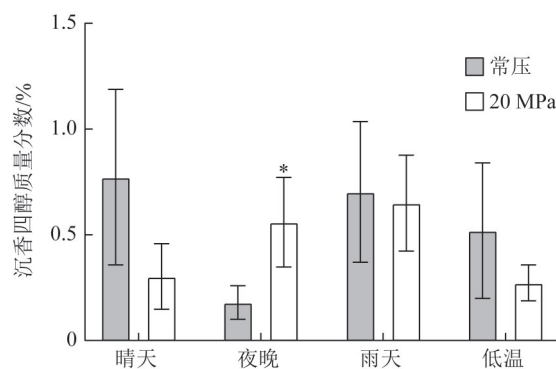


图8 高压输液法通体结香技术所产沉香的沉香四醇质量分数 ($\bar{x}\pm s, n=3$)

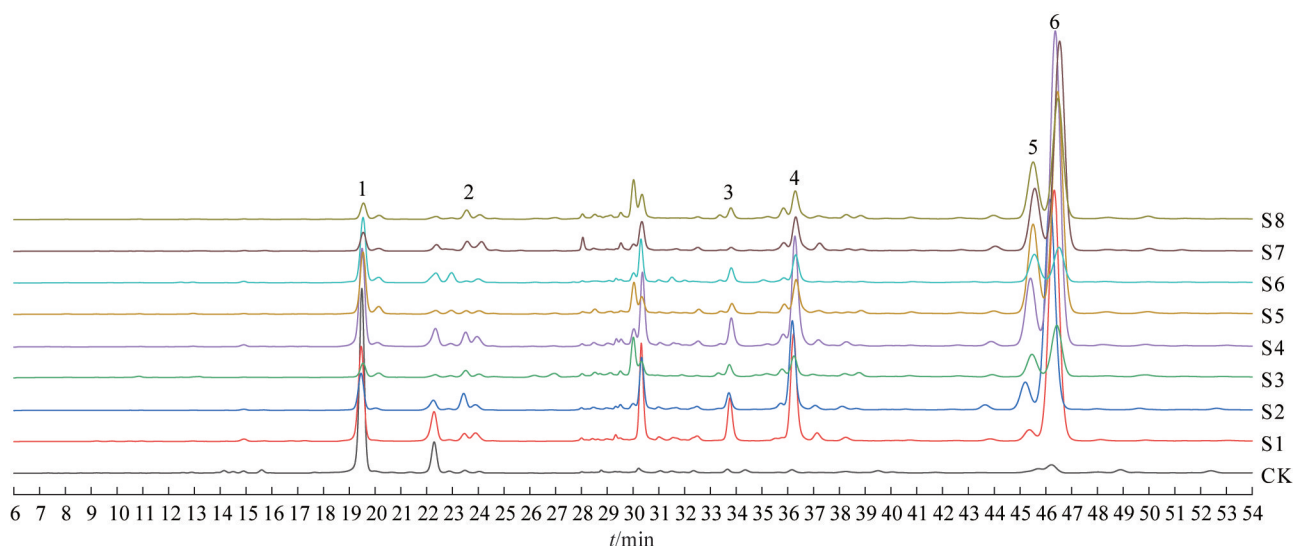
3.9 特征图谱

高压输液法通体结香技术所产沉香特征图谱见图9。通过高压输液和常压输液所产沉香样品的特征图谱均有6个特征峰, 与《中国药典》2020年版沉香特征图谱的6个特征峰相对应, 符合《中国药典》2020年版标准。

4 讨论

实际生产中, 通体结香技术受天气影响较大, 为了达到较好的输液效果, 通常需要在晴朗、光照充足、温度 $>25^{\circ}\text{C}$ 的上午结香^[22]。但本研究中常压操作时仅晴天的输液时间就长达3 h, 夜晚、低温、雨天等条件下输液时间更长, 如雨天的输液时间甚至是晴天的6.5倍。这说明常压操作存在输液时间较长的特点, 且无法实现全年、全天结香, 大大降低了该通体结香技术实施的效率。本研究发现, 通过提高输液压力能显著减少通体结香技术的输液时间, 晴天、夜晚、低温和雨天20 MPa压力输液(简称高压输液)通体结香技术的输液效率能提高129%~497%, 高压输液时晴天的输液时间可缩短到31 min, 大大节约了实际生产中的操作时间。因此, 高压输液能打破环境条件对通体结香技术的应用限制, 大幅度提高输液效率, 适用于实际生产。

本研究中高压通体香的品质均符合《中国药典》2020年版标准, 平均结香率、平均浸出物质量分数



注: 1. 沉香四醇; 2. 8-氯-2-(2-苯乙基)-5,6,7-三羟基-5,6,7,8-四氢色酮; 5. 6,4'-二羟基-3'-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮。

图9 高压输液法通体结香技术所产沉香特征图谱

和平均沉香四醇质量分数分别高达11.69%、15.14%和0.45%，与常压结果差异无统计学意义。晴天、雨天、低温时高压通体香与常压通体香的结香率、浸出物含量和沉香四醇含量差异无统计学意义，品质较为相似；夜晚高压通体香的浸出物含量和沉香四醇含量显著高于常压通体香，品质优于常压。这说明高压输液不会对通体结香技术造成不利影响，不会降低所产通体香品质。本研究还发现，各环境条件下高压输液通体香与常压输液通体香的浸出物含量与沉香四醇含量无正向相关性。此外，本课题组前期研究发现，通体结香技术产生沉香的过程会伴随阻隔层的形成，即在沉香层和过渡层之间形成1圈约1~5 mm厚的白色带状结构。阻隔层的形成原因是沉香层外围的部分木间韧皮部脱分化重新分裂，这是为了将受到伤害的组织和健康组织分隔开，阻止伤害在树体内扩展^[28]。本研究中也观察到部分常压输液通体香有1圈明显较厚的阻隔层，而高压输液通体香阻隔层明显减少，较常压输液在环形结香层外出现结香点状向外扩散现象，推测高压有可能延缓阻隔层的形成和积累，但该结论还需进一步验证。

针对全球高品质沉香需求越来越多的现状，结香技术也亟待升级更新。本研究采用高压操作对通体结香技术进行优化升级，在晴天、夜晚、雨天、低温4种不同结香环境条件下，探究高压输液对通体结香技术输液效率及产沉香品质的影响，结果表

明20 MPa为高压输液法通体结香技术的最佳输液压力，能显著提高通体结香技术的输液效率，突破天气和气候的限制，可在夜晚、雨天、低温等环境开展结香工作且不影响所产沉香品质，具有可行性和可操作性。研究结果为通体结香技术的升级和实际应用推广提供了依据和参考。

参考文献

- [1] BARDEN A, AWANG A N, MULLIKEN T, et al. Heart of the matter: Agarwood use and trade CITES implementation for *Aquilaria malaccensis* [M]. Cambridge: Traffic International, 2000.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2020:192.
- [3] JUNG D. The cultural biography of agarwood-perfumery in eastern Asia and the Asian neighbourhood[J]. J R Asiat Soc, 2013, 23(1): 103-125.
- [4] ARLENE L S, PAGE T. History of use and trade of agarwood[J]. Econ Bot, 2018, 72(1): 107-129.
- [5] 李月菲, 田从魁, 孟嘉星, 等. 沉香的化学成分及药理作用研究进展[J]. 国际药学研究杂志, 2019, 46(7): 495-506.
- [6] 田耀华, 原慧芳, 倪书邦, 等. 沉香属植物研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2009, 17(1): 98-104.
- [7] CHEN Y, LIU H, HEINEN J. Challenges in the conservation of an over-harvested plant species with high socioeconomic values[J]. Sustainability, 2019, 11(15): 1-13.
- [8] 刘洋洋, 杨云, 魏建和, 等. 不同产地通体香沉香药材的

- 质量分析[J]. 中国现代中药, 2014, 16(3): 183-186.
- [9] HASHIM H Y, KERR P G, ABBAS P, et al. *Aquilaria* spp. (agarwood) as source of health beneficial compounds: A review of traditional use, phytochemistry and pharmacology [J]. J Ethnopharmacol, 2016, 189: 331-360.
- [10] 李锦开, 李振纪. 中国木本药材与广东特产药材[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1994: 120.
- [11] 冯乃宪. 沉香内生真菌的初步研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [12] 陈怀琼. 白木香通体结香技术的初步评价[D]. 北京: 北京协和医学院, 2011.
- [13] 黄俊卿, 魏建和, 张争, 等. 沉香结香方法的历史记载、现代研究及通体结香技术[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(3): 302-306.
- [14] 曾幻添, 董文忠, 吴质朴. 沉香的人工结香[J]. 中草药通讯, 1978, 31(12): 3842-3842.
- [15] 魏建和, 杨云, 张争, 等. 输液法在白木香树上生产沉香的方法: CN 101755629A[P]. 2010-02-01.
- [16] LIU Y Y, CHEN H Q, YANG Y, et al. Whole-tree agarwood-inducing technique: An efficient novel technique for producing high-quality agarwood in cultivated *Aquilaria sinensis* trees[J]. Molecules, 2013, 18(3): 3086-3106.
- [17] ZHANG X L, LIU Y Y, WEI J H, et al. Production of high-quality agarwood in *Aquilaria sinensis* trees via whole-tree agarwood-induction technology [J]. Chin Chem Lett, 2012, 23(6): 727-730.
- [18] 杨云, 冯剑, 朱杰霄, 等. 中国及东南亚国家沉香树采用通体结香技术产沉香的质量比较[J]. 中国药理学杂志, 2019, 54(23): 1988-1994.
- [19] 侯文成, 王灿红, 冯剑, 等. 通体结香技术产沉香提取物对SD大鼠的慢性毒性研究[J]. 中国药理学杂志, 2019, 54(23): 1970-1975.
- [20] 刘洋洋, 田树红, 冯剑, 等. 通体结香技术产沉香的提取物灌胃KM小鼠的急性毒性研究[J]. 中国现代中药, 2017, 19(8): 1089-1090, 1096.
- [21] 刘洋洋. 通体结香技术产沉香的质量特征研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2018.
- [22] 海南省质量技术监督局. 白木香输液法通体结香技术规程: DB46/T 256—2013[S]. 海口: 海南省质量技术监督局, 2013.
- [23] 何欣, 张燕, 孟慧, 等. 通体结香技术处理30 d产沉香的品质监测[J]. 中国现代中药, 2022, 24(6): 1074-1082.
- [24] 张燕. 通体结香技术产沉香品质监测与白木香组培快繁技术研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2021.
- [25] 蒋谦才, 郭艳峰, 曾海亮, 等. 白木香通体结香质量的影响因素研究[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(4): 44-47.
- [26] 海南省质量技术监督局. 白木香通体结香树木剖香技术规程: DB46/T 257—2013[S]. 海口: 海南省质量技术监督局, 2013.
- [27] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 四部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 232.
- [28] 刘培卫, 杨云, 张玉秀, 等. 白木香结香过程中阻隔层的形成及其特性研究[J]. 植物研究, 2016, 36(5): 697-704.

(收稿日期: 2022-10-26 编辑: 戴玮)