

基于色泽变化的丹参“发汗”过程中水分迁移和指标性成分动态特征研究

王 川^{1,2,3}, 李宝国³, 刘 伟^{1,2}, 王 晓^{1,2}, 卢 恒^{1,2*}

1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省分析测试中心, 天然产物分离提取共性技术创新与应用山东省工程研究中心, 山东 济南 250014
2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)药学院, 山东省高等学校天然药物活性成分研究重点实验室, 山东 济南 250014
3. 山东中医药大学药学院, 山东 济南 250355

摘要: 目的 阐明丹参 *Salviae Miltiorrhizae Radix et Rhizoma* “发汗”过程中水分、色泽和指标性成分的动态变化特征, 初步探究丹参“发汗”过程水分迁移-色泽演变-指标性成分变化的关联性。方法 选择山东产丹参进行“发汗”处理, 利用低场核磁共振(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)及磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术分析丹参中水分迁移及分布特征; 采用高效液相色谱仪(high performance liquid chromatography, HPLC)、色差仪分别测定不同“发汗”程度丹参中丹酚酸B、丹参酮II_A、丹参酮I和隐丹参酮的含量与色度 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 值, 并进行Pearson相关性分析。结果 “发汗”过程以自由水散失为主, 弛豫峰逐渐向左迁移; MRI结果表明, 丹参中水分由中心向外周逐渐迁移; 横断面颜色呈现出由外向内, 由黄白色经褐色最终转为紫褐色的变化规律, 色度值 L^* 持续降低, a^* 、 b^* 和 ΔE 持续升高; 丹酚酸B和丹参酮类成分含量均呈先升高后降低的趋势, 并分别在轻度“发汗”丹参(SD3, 47.38 mg/g)和中度“发汗”丹参(SD7, 4.62 mg/g)中达到最高值; 丹酚酸B含量与 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 呈现显著相关性($P < 0.01$)。结论 通过明确丹参“发汗”过程中水分迁移和分布特征, 科学验证了“发汗促进药材内部水分外溢”的传统观点。揭示了“发汗”过程中丹参色泽和指标性成分的动态变化规律, 并初步探究水分驱动色泽“由外至内”加深及丹酚酸B含量变化的作用过程, 为丹参“发汗”工艺的优化提供参考。

关键词: 丹参; 发汗; 水分迁移; 色泽变化; 动态特征; 磁共振成像; 丹酚酸B; 丹参酮II_A; 丹参酮I; 隐丹参酮

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)05-1658-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.05.007

Study on dynamic characteristics of moisture migration and index components during “sweating” process of *Salviae Miltiorrhizae Radix et Rhizoma* based on color change

WANG Chuan^{1,2,3}, LI Baoguo³, LIU Wei^{1,2}, WANG Xiao^{1,2}, LU Heng^{1,2}

1. Shandong Engineering Research Center for Innovation and Application of General Technology for Separation of Natural Products, Shandong Analysis and Test Center, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, China
2. Key Laboratory for Natural Active Pharmaceutical Constituents Research in Universities of Shandong Province, School of Pharmaceutical Sciences, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, China
3. College of Pharmacy, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China

Abstract: Objective To elucidate the dynamic changes in moisture, color, and index components during the “sweating” process of Danshen (*Salviae Miltiorrhizae Radix et Rhizoma*, SMRR) and preliminarily explore the correlation between moisture migration, color evolution, and changes in index components. **Methods** SMRR samples from Shandong underwent the “sweating” process, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) were employed to analyze moisture migration and

收稿日期: 2025-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3503805); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-21); 中国中医科学院科技创新工程项目资助(CI2021B013)

作者简介: 王 川(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药质量控制与分析评价。E-mail: ccwang@163.com

*通信作者: 卢 恒(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 从事中药资源与质量控制研究。E-mail: locircle@163.com

distribution characteristics. The high-performance liquid chromatography (HPLC) and colorimeter were used to determine the contents of salvianolic acid B, tanshinone II_A, tanshinone I, cryptotanshinone and chromaticity values (L^* , a^* , b^* , and ΔE) of SMRR at different “sweating” degrees, respectively, followed by Pearson correlation analysis. **Results** The “sweating” process mainly involved free water loss, with relaxation peak gradually shifting leftward. MRI results indicated that moisture migrated from the core to the exterior of the roots. The cross-sectional color transitioned from the outer to inner layers, changing from yellowish-white to brown and finally to purplish-brown, with the L^* decreasing while a^* , b^* , and ΔE increasing continuously. The contents of salvianolic acid B and tanshinones initially increased and then decreased, reaching the highest values in lightly sweated SMRR (SD3, 47.38 mg/g) and moderately sweated SMRR (SD7, 4.62 mg/g) respectively. The content of salvianolic acid B exhibited a significant correlation with L^* , a^* , b^* and ΔE ($P < 0.01$). **Conclusion** By clarifying the characteristics of moisture migration and distribution during the “sweating” process of SMRR, this study scientifically validates the traditional view that “sweating promotes the outward diffusion of internal moisture in medicinal materials”. It reveals the dynamic changes in color and index components during “sweating” and preliminarily explores the role of moisture in driving the color deepening from the outside to the inside and changes in salvianolic acid B content, providing a reference for optimizing the “sweating” process of SMRR.

Key words: *Salviae Miltiorrhizae Radix et Rhizoma*; sweating; moisture migration; color change; dynamic characteristics; magnetic resonance imaging; salvianolic acid B; tanshinone II_A; tanshinone I; cryptotanshinone

丹参为唇形科鼠尾草属多年生草本植物丹参 *Salvia miltiorrhiza* Bge. 的干燥根和根茎^[1], 为我国传统大宗药材。其药用历史悠久, 始载于《神农本草经》, 具有活血祛瘀、通经止痛、凉血消痈等功效^[2], 为复方丹参滴丸、冠心丹参片等制剂的核心原料, 广泛应用于治疗冠心病、心肌梗死、心绞痛等心脑血管疾病^[3]。随着丹参市场价值及产业规模持续扩大, 保障其药材品质对丹参产业的高质量发展具有重要意义^[4]。产地加工技术是保障中药材品质形成的关键环节^[5], 而“发汗”作为传统产地加工方式之一, 是指将鲜药材用微火烘至半干或微煮、蒸, 使其在一定程度失水后, 堆置起来发热的方法^[6]。该方法赋予了中药材外观性状、化学成分、药效等诸多性能和表征, 对中药材的质量产生影响。《中国药典》2025年版规定玄参、杜仲、茯苓等药材均可采用“发汗”处理, 丹参“发汗”虽未纳入该法定标准, 但在山东、河南、四川等道地产区的丹参生产中, “发汗”均有广泛应用, 如2020年山东省颁布的《山东道地药材丹参药材标准》、2020年河南三门峡市颁布的《丹参栽培技术规程》及《浙江省中药炮制规范》2015年版均采用“发汗”工艺^[7-9]。

“发汗”可以促使药材内部水分外溢, 使得药材处于高温高湿胁迫环境中, 为酶促、氧化等反应提供了有利条件^[10], 进而影响药材外观性状和内在品质^[11]。目前, 关于丹参“发汗”研究多集中于未“发汗”与“发汗”样品之间化学成分和色泽的差异性分析, 如王婷等^[12]研究发现, 丹参“发汗”至断面变为紫红色时, 其酚酸类成分和丹参酮 II_A 的含量上升, 质量优于未“发汗”丹参; 而王晓宇等^[13]将丹

参“发汗”至断面呈深棕色时, 丹酚酸 B 含量显著降低, 丹参酮类成分则未受显著影响。然而对于丹参“发汗”过程中水分迁移规律、色泽及指标性成分变化的动态追踪及其关联性研究的缺乏, 极大地制约了对丹参“发汗”过程的精准解析。因此, 本研究采用低场核磁共振 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 及磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 技术, 实时研究丹参在“发汗”过程中水分迁移与分布特征, 同时借助色差分析技术和 HPLC 技术分析丹参“发汗”过程中色泽与指标性成分含量的动态变化规律; 在此基础上, 开展水分驱动色泽“由外至内”加深及丹酚酸 B 含量变化的初步探索, 以期为深入研究“发汗”处理对丹参品质的影响, 优化其“发汗”工艺提供理论依据。

1 仪器与材料

1.1 仪器

Meso MR23-060V-I 型核磁共振成像分析仪, 上海纽迈电子科技有限公司; NH-310 型色差仪, 广东三恩时科技有限公司; Waters e2695 型高效液相色谱仪和 2998 PDA 型二极管阵列检测器, 沃特世科技(上海)有限公司; DHG-9123A 型电热恒温鼓风干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; Epsilon 2-4 LSC plus 型真空冷冻干燥机, 德国 Marin Christ 公司; KQ-250E 型超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; PX125DZH 型十万分之一电子天平, 奥豪斯仪器(常州)有限公司。

1.2 材料

新鲜丹参于 2024 年 10 月采集自山东省临沂市

平阳县,经山东中医药大学李佳教授鉴定,为唇形科鼠尾草属多年生草本植物丹参 *S. miltiorrhiza* Bge. 的新鲜根和根茎。丹参的初始含水率测定,参照《中国药典》2025年版,用 0832 水分测定法中的烘干法(温度设定为 105 °C,干燥至恒定质量)进行测定,其值为 (75.74±0.35)%。对照品丹酚酸 B(批号 JB249847)、隐丹参酮(批号 J07HB184109)、丹参酮 II_A(批号 F18IB207456)和丹参酮 I(批号 A14IB222878),质量分数≥98.0%,上海源叶生物科技有限公司;超纯水,由美国 Millipore Direct-Q8UV-R 超纯水系统制备;甲醇(分析纯)、乙腈(色谱纯)均购于天津市富宇精细化工有限公司;甲酸(色谱纯)购于天津市科密欧化学试剂有限公司。

2 方法与结果

2.1 丹参“发汗”处理

取直径 1 cm 左右,个体均匀无损缺、病虫害及霉变的新鲜丹参 25 kg,剪去芦头和细尾,去掉须根,50 °C 烘至半干后,收拢堆集后,用塑料膜覆盖并置于 25 °C 室内阴凉处进行“发汗”,期间每 2 天将丹参摊晾防止霉变,再倒堆使整个参堆“发汗”均匀,“发汗”至丹参横断面变为紫褐色时即“发汗”结束。

2.2 丹参“发汗”过程中水分迁移特征分析

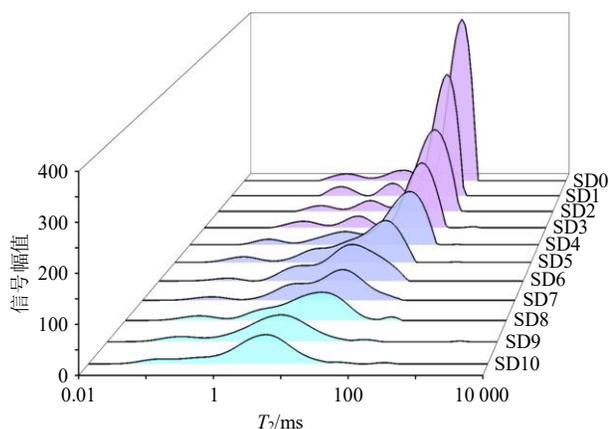
2.2.1 样品取样 参照刘沁荣等^[14]的方法进行取样。选取丹参根条,切成约 8 mm 的小段,放入内径 25 mm 玻璃管,置于核磁共振成像分析仪的永久磁场中心,用于横向弛豫时间(transverse relaxation time, T_2)及 MRI 测定,剩余部分放回丹参堆中继续“发汗”,间隔 24 h 取样,设置 3 个平行实验。所取样品按照“发汗”时间(天数)编号为 SD0~SD10。

2.2.2 丹参“发汗”过程中 T_2 变化规律分析 通过硬脉冲自由感应衰减序列(free induction decay, FID)获得样品中心频率,再利用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)脉冲序列测定 T_2 ,累计采集 3 次,取平均值。主要参数:主频(SF) 20 MHz,偏移频率(O1) 992 595.44 Hz,90°脉冲(P1) 7 μs,180°脉冲(P2) 14 μs,等待时间(T_w) 1 500 ms,回波时间(T_E) 0.15 ms,回波个数(NECH) 18 000,累加采样次数(NS) 8,前置放大增益(PRG) 1。利用 SIRT 算法,迭代次数为 10 万次进行反演得到 T_2 谱图。

根据水分子在细胞内的分布和流动性,丹参组

织中的水可分为 3 类:结合水 T_{21} (0.01~10 ms)、不易流动水 T_{22} (10~100 ms)和自由水 T_{23} (100~1 000 ms)。结合水主要存在于细胞壁中,其质子能与细胞壁的多糖结构(如果胶、纤维素和半纤维素)的羟基快速交换,流动性较差;不易流动水为细胞质水,与细胞骨架蛋白、酶或者黏度较高的胞质溶胶结合,流动性中等;自由水则以游离态存在于液泡和细胞间隙中,是物质运输与代谢反应的主要介质,占比最大^[15]。峰面积 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 分别代表 3 种状态水的相对含量, $A_{\text{总}}$ 代表总峰面积,峰面积越大,含水量越高。 T_2 可以反映水分的自由度, T_2 越短,说明水分与底物结合越紧密,自由度越低,在 T_2 谱上峰位置越靠左^[16]。

丹参“发汗”过程中 T_2 谱曲线见图 1。从 SD0 到 SD10,样品中自由水信号幅值呈现明显的下降趋势,峰向左偏移, T_2 缩短,说明丹参“发汗”过程中以自由水散失为主,且水分的流动性逐渐降低。“发汗”初期(SD0~SD3),自由水含量高且下降最为显著, A_{23} 由 3 113.63 下降至 1 481.41;而不易流动水与结合水,因流动性较差,变化幅度较小,呈小幅度降低后上升。“发汗”中期(SD4~SD7),部分液泡中的自由水向细胞质迁移,并转化为不易流动水,水分流动性降低,同时,部分自由水蒸发,自由水含量持续降低,但降幅趋于平缓;结合水含量在 SD7 时下降至最低。在“发汗”后期(SD8~SD10),当自由水下降至一定程度后,水分以不易流动水为主;结合水先略有回升,到 SD10 时又再



横坐标为 T_2 ,反映水分自由度;纵坐标为信号幅值,值越高,水分含量越高。

Abscissa is T_2 , reflecting water molecular mobility; Ordinate is signal amplitude, proportional to relative moisture content.

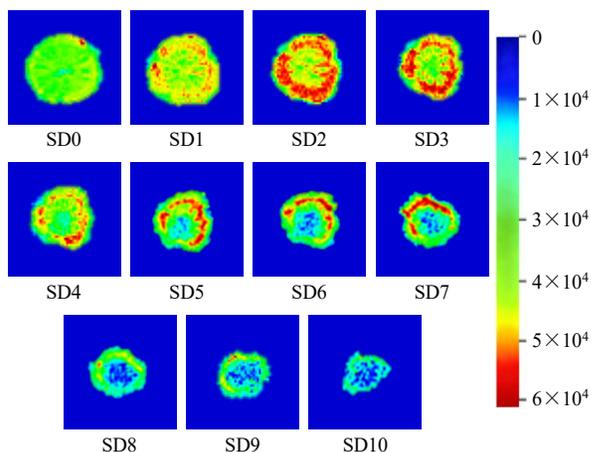
图 1 丹参“发汗”过程中的 T_2 反演谱图

Fig. 1 T_2 relaxation spectra of *Salviae Miltiorrhizae Radix et Rhizoma* (SMRR) during “sweating” process

次降低,这可能是由于细胞壁内外复杂的物质交换从而导致氢质子频繁转移,使结合水含量呈现不规则变化^[17]。

2.2.3 丹参“发汗”过程中MRI分析 通过调整自旋回波序列 (spin echo, SE) 中的选层梯度、相位编码梯度和频率编码梯度采集丹参横断面的 ¹H 质子密度图像。参数设置:层宽 (slice width) 2 mm, 层数 (slices) 1, 重复等待时间 (T_R) 1 000 ms, $T_E=13.4$ ms, 频率编码方向视野 80 mm, 相位编码 80 mm, 采集次数 (average) 8, 频率编码步数 (read size) 256, 相位编码步数 (phase size) 192。

MRI 通过检测 ¹H 质子密度,进而实现对丹参“发汗”过程中的水分分布与迁移情况的实时表征,具体的水分迁移情况如图 2 所示。SD0 时丹参内部水分分布较均匀,图像呈现均匀的黄、绿色;堆积至 SD1 时,丹参内部水分开始向外迁移,样品外部出现较明显的红色、黄色区域;SD2 时,内部水分大量向外聚集,致使外部红色区域面积进一步扩大;随着“发汗”时间的延长 (SD3~SD7),样品逐渐失水皱缩,体积不断减小,外部红色区域逐渐减小,内部由绿色变为蓝色且范围逐渐扩大,内外部水分信号强度减弱;继续“发汗”至 SD8~SD10,样品持续皱缩,外部水分含量随着堆积时间的延长而持续下降,红色区域基本消失,中心蓝色区域占据较大部分,水分最先散失,之后外部水分也随着“发汗”时间延长而逐渐散失。综上,MRI 图像显



颜色不同代表含水量不同,颜色越红水分含量越高,越蓝水分含量越低。

Different colors indicate different moisture contents, the redder the color, the higher the moisture content; the bluer the color, the lower the moisture content.

图 2 丹参“发汗”过程中MRI图像

Fig. 2 MRI images of SMRR during “sweating” process

示,丹参在“发汗”过程中,其水分呈现梯度分布特征,内部水分信号强度始终低于外部,且水分最先散失,说明水分由内部向外部迁移富集并散失。

2.3 丹参“发汗”过程中色泽观察

2.3.1 横断面颜色变化规律 在丹参“发汗”过程中,每间隔 24 h 对 SD0~SD10 的丹参样品断面进行拍照记录,对比不同时间点的色泽差异,明确丹参断面色泽的动态演变规律。丹参“发汗”过程中横断面颜色变化情况见图 3,颜色呈现由外向内,由黄白色逐渐变为褐色,最终转为紫褐色的变化规律。丹参烘至半干 SD0 时,断面整体呈黄白色;在堆积“发汗”至 SD1 时,少部分皮部区域率先变为浅褐色至褐色;SD2 时,皮部变色范围进一步扩大;到 SD3 时,皮部整体变为褐色,而木部仍保持黄白色;SD4 时,木部色泽开始发生变化,且随着“发汗”时间的增加,药材逐渐失水皱缩;至 SD7 时,丹参皮部颜色加深变为紫褐色,木部区域颜色逐渐加深,继续堆放至木部区域颜色也变为紫褐色 (SD10) 时即为“发汗”结束。



图 3 丹参“发汗”过程横断面颜色变化

Fig. 3 Color changes of SMRR cross-section during “sweating” process

2.3.2 不同“发汗”程度丹参粉末色度值测定 根据横断面色泽观察结果,将丹参“发汗”过程划分为 4 个阶段:未“发汗”(SD0)、轻度“发汗”(SD3)、中度“发汗”(SD7)及完全“发汗”(SD10)。具体描述见表 1。分别取 SD0、SD3、SD7 和 SD10 丹参样品,冷冻干燥后粉碎过 60 目筛,取粉末适量,置于色差仪下测定色度值,每组设置 3 个平行实验。记录明暗度 (L^*)、红绿值 (a^*) 和黄蓝值 (b^*)。每组测定 3 次,取平均值,按公式 (1) 进行计算,其中 ΔE 为总色差值, L^* 、 a^* 、 b^* 为“发汗”丹参的色

表 1 不同“发汗”程度丹参样品选择及处理

Table 1 Sample selection and treatment of SMRR samples at different “sweating” degrees

样品名称	“发汗”程度	方法描述
SD0	未“发汗”丹参	鲜丹参50℃烘至半干后取样、冷冻干燥
SD3	轻度“发汗”丹参	“发汗”至皮部颜色变为褐色时取样，冷冻干燥
SD7	中度“发汗”丹参	“发汗”至整个皮部颜色加深为紫褐色，木部内部区域颜色加深时取样，冷冻干燥
SD10	完全“发汗”丹参	“发汗”至木部区域颜色变为紫褐色时取样，冷冻干燥

度值； L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为SD0丹参的色度值。

$$\Delta E = [(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

采用 ΔE 对样品颜色进行量化，以检验不同“发汗”程度丹参的颜色差异，其值越大，差异越显著。丹参粉末色度值测定结果（表2）表明，不同“发汗”程度丹参 ΔE 均具有显著差异（ $P < 0.05$ ），随着“发汗”的进行，丹参粉末 L^* 持续降低， a^* 和 b^* 持续升高， ΔE 逐渐升高，即颜色越暗且越偏红和黄，这与丹参横断面颜色逐渐加深的变化规律相符。

表 2 不同“发汗”程度丹参样品的色度值（ $\bar{x} \pm s, n = 3$ ）
Table 2 Chromaticity values changes of SMRR samples at different “sweating” degrees（ $\bar{x} \pm s, n = 3$ ）

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
SD0	64.98 ± 0.60 ^a	22.78 ± 0.55 ^c	43.64 ± 0.72 ^d	-
SD3	63.67 ± 0.18 ^b	23.00 ± 0.08 ^c	45.99 ± 0.13 ^c	2.70 ± 0.21 ^c
SD7	57.03 ± 0.56 ^c	26.88 ± 0.81 ^b	60.78 ± 1.16 ^b	19.34 ± 1.24 ^b
SD10	54.89 ± 0.24 ^d	29.01 ± 0.59 ^a	65.08 ± 0.63 ^a	24.50 ± 0.82 ^a

不同字母表示在同一指标内，不同“发汗”程度丹参样品间差异显著（ $P < 0.05$ ）；表3同。

Different letters indicate significant differences among different “sweating” degrees SMRR samples within the same index（ $P < 0.05$ ）；Same as table 3.

2.4 丹参“发汗”过程中指标性成分含量测定

2.4.1 供试品溶液的制备

精密称定不同“发汗”程度SD0、SD3、SD7、SD10丹参样品粉末0.10g，于50mL离心管中，加入20mL甲醇-水混合溶液（3:1），称定质量，超声处理（功率250W、频率40kHz）30min后取出放冷，再称定质量并补足缺失的质量，摇匀，过0.22μm滤膜，取续滤液，即得供试品溶液。

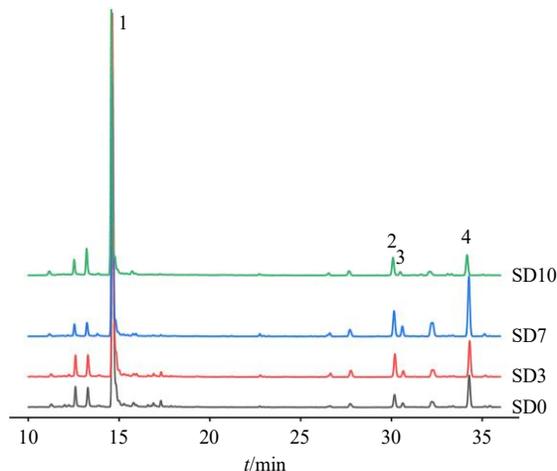
2.4.2 对照品溶液的制备

分别精密称取丹酚酸B、隐丹参酮、丹参酮II_A、丹参酮I对照品适量，溶于甲醇中，配制成质量浓度分别为丹酚酸B 0.992mg/mL、隐丹参酮 0.986mg/mL、丹参酮II_A 0.984mg/mL、丹参酮I 0.495mg/mL的单一对照品母液。用移液枪精密吸取上述各单一对照品母液，配制成含丹酚酸B 793.60μg/mL、隐丹参酮 9.86μg/mL、

丹参酮II_A 14.76μg/mL、丹参酮I 9.90μg/mL的混合对照品溶液，备用。

2.4.3 色谱条件

色谱柱为Waters Symmetry-C₁₈柱（250mm×4.6mm，5μm）；流动相为乙腈-0.1%甲酸水溶液，梯度洗脱：0~6.00min，22%乙腈；6.00~20.00min，22%~60%乙腈；20.00~35.00min，60%~90%乙腈；35.00~36.00min，90%乙腈；36.00~36.01min，90%~22%乙腈；36.01~43.00min，22%乙腈；检测波长270nm；体积流量1.0mL/min；进样量10μL；柱温25℃。供试品溶液的HPLC图见图4。



1-丹酚酸B；2-隐丹参酮；3-丹参酮I；4-丹参酮II_A。
1-salvianolic acid B；2-cryptotanshinone；3-tanshinone I；4-tanshinone II_A。

图 4 丹参供试品溶液的 HPLC 图

Fig. 4 HPLC of SMRR test solution

2.4.4 线性关系考察

取混合对照品母液，用甲醇按照1.25、1.50、2.50、5.00、10.00倍依次稀释成系列不同质量浓度的对照品溶液，以质量浓度为横坐标（X），峰面积为纵坐标（Y），进行线性回归，得到回归方程分别为丹酚酸B $Y = 8472.6X + 31959.0$ ， $R^2 = 0.9994$ ，线性范围79.360~793.600μg/mL；隐丹参酮 $Y = 36539.0X + 3743.7$ ， $R^2 = 0.9996$ ，线性范围0.986~9.860μg/mL；丹参酮I $Y = 21209.0X + 6198.8$ ， $R^2 = 0.9992$ ，线性范围0.990~9.900μg/mL；丹参酮II_A $Y = 30572.0X + 7052.7$ ， $R^2 = 0.9996$ ，线

性范围 1.476~14.760 μg/mL; 结果表明 4 种指标性成分于线性范围内均呈现良好的线性关系。

2.4.5 精密度试验 称取样品粉末, 按照“2.4.1”项下方法制得供试品溶液, 在“2.4.3”项下色谱条件连续进样测定 6 次, 计算得到丹酚酸 B、隐丹参酮、丹参酮 I、丹参酮 II_A 色谱峰面积的 RSD 分别为 0.22%、0.18%、2.76%、0.17%。

2.4.6 稳定性试验 精密称取样品粉末, 按照“2.4.1”项下方法制备供试品溶液, 在“2.4.3”项下色谱条件测定, 分别在 0、2、4、6、8、24 h 进样, 计算得到丹酚酸 B、隐丹参酮、丹参酮 I、丹参酮 II_A 色谱峰面积的 RSD 分别为 0.86%、0.62%、1.70%、0.31%。

2.4.7 重复性试验 平行称取 6 份样品粉末, 按照“2.4.1”项下方法制备供试品溶液, 在“2.4.3”项下色谱条件进样测定, 计算得到丹酚酸 B、隐丹参酮、丹参酮 I、丹参酮 II_A 质量分数的 RSD 分别为 1.35%、0.05%、0.02%、0.08%。

2.4.8 加样回收率试验 精密称定已测知指标性成分含量的样品粉末 50 mg, 取 9 份, 按对照品量与样品中待测成分量分别为 1.2:1、1:1、0.8:1 的比例精密加入对照品溶液, 每个比例平行 3 份, 按照“2.4.1”项下方法制备供试品溶液, 在“2.4.3”项下色谱条件进行检测, 计算得到丹酚酸 B、隐丹参酮、丹参酮 I、丹参酮 II_A 的平均加样回收率分别为 95.40%、94.95%、96.15%、95.28%, RSD 分别为 0.73%、0.44%、0.34%、0.27%。

2.4.9 指标性成分含量测定 丹参“发汗”过程中指标性成分含量变化见表 3。不同“发汗”程度丹参的丹酚酸 B 含量均高于 3.0%, 隐丹参酮、丹参酮 I 和丹参酮 II_A 的总量均高于 0.25%, 符合《中国药典》2025 年版规定的质量标准。其中, 不同“发汗”程度丹参样品中的丹参酮整体呈现先上升后下降的趋

势, 由 SD0 “发汗”至 SD3 时, 丹参酮含量变化较小; 至 SD7 时, 3 种丹参酮类成分总量达到峰值, 为 4.62 mg/g; 但当完全“发汗”到 SD10 时, 丹参酮类成分又显著下降到“发汗”前的水平。具体而言, 隐丹参酮、丹参酮 I 和丹参酮 II_A 的含量均在 SD7 达到峰值, 分别为 1.26、0.67、2.69 mg/g, 且丹参酮 I 和丹参酮 II_A 的含量显著高于其他“发汗”阶段; “发汗”到 SD10 时, 3 种丹参酮类成分含量均显著低于 SD7, 分别下降了 27.78%、32.84%、35.32%。不同“发汗”程度丹参样品中的丹酚酸 B 含量同样呈现先上升后下降的趋势, SD3 含量 (47.38 mg/g) 显著高于其他阶段; 但到 SD7 时, 其含量又显著下降为 38.27 mg/g; 到“发汗”完成时 (SD10), 丹酚酸 B 含量没有显著性变化, 但较 SD7 有轻微下降。

2.5 色度值和指标性成分相关性分析

将丹参中 4 种指标性成分丹酚酸 B、隐丹参酮、丹参酮 I、丹参酮 II_A 与色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 进行相关性分析, 结果见表 4。发现丹酚酸 B 含量与 L^* 呈现极显著正相关, 与 a^* 、 b^* 、 ΔE 呈现极显著负相关, 这一结果表明, 丹参“发汗”过程中颜色变化与丹酚酸 B 含量有关。

表 4 不同“发汗”程度丹参色度值与指标性成分含量相关性分析

Table 4 Correlation analysis between chromaticity values and contents of index components of SMRR at different “sweating” degrees

色度值	丹酚酸B	隐丹参酮	丹参酮I	丹参酮II _A	丹参酮类总和
L^*	0.814**	0.307	-0.571	-0.309	-0.238
a^*	-0.845**	-0.415	0.474	0.211	0.128
b^*	-0.830**	-0.392	0.507	0.221	0.147
ΔE	-0.845**	-0.326	0.570	0.313	0.235

** $P < 0.01$: 色度值与指标性成分具有极显著相关性。

** $P < 0.01$: Extremely significant correlation between chromaticity values and index components.

表 3 不同“发汗”程度丹参样品中指标性成分含量分析 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 3 Analysis of index components of SMRR samples at different “sweating” degrees ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

样品	质量分数(mg·g ⁻¹)				
	隐丹参酮	丹参酮I	丹参酮II _A	丹参酮总和	丹酚酸B
SD0	1.05 ± 0.06 ^{ab}	0.36 ± 0.06 ^b	1.85 ± 0.09 ^b	3.26 ± 0.20 ^{bc}	42.12 ± 0.82 ^b
SD3	1.24 ± 0.01 ^a	0.41 ± 0.06 ^b	1.84 ± 0.01 ^b	3.49 ± 0.08 ^b	47.38 ± 0.95 ^a
SD7	1.26 ± 0.02 ^a	0.67 ± 0.07 ^a	2.69 ± 0.03 ^a	4.62 ± 0.12 ^a	38.27 ± 1.73 ^c
SD10	0.91 ± 0.02 ^b	0.45 ± 0.05 ^b	1.74 ± 0.03 ^b	3.10 ± 0.05 ^c	36.86 ± 0.61 ^c

3 讨论

本研究采用 LF-NMR 和 MRI 技术对丹参“发汗”过程中水分变化特征进行分析, 结果表明, 该过程以自由水散失为主, 并促进水分由内向外迁移, 加速内部水分的优先散失, 为“发汗”促进药材内部水分外溢这一传统观点提供了科学可视化表征。在茯苓“发汗”过程同样观察到其菌核内部水分迁移至表面并聚集成液滴的现象^[18], 这一共性特征可能与堆体内外形成的水汽分压差及空气对

流作用有关,细胞和微生物呼吸代谢产热使堆体内温度升高,驱动水分沿细胞间隙、孔隙等通道向表层迁移蒸发,同时堆体内部热空气携带水汽上升,在外部低温处凝结,外部冷空气则不断下沉,形成持续的对流循环,将药材内部水分不断“抽出”并凝结于表面形成“汗珠”进而使药材失水^[19]。

色泽常作为判断“发汗”程度与药材质量的直观经验指标,与有效成分含量变化密切相关。如秦艽由浅黄色渐变为红黄色的过程中马钱苷酸等有效成分含量随之升高^[20]。本研究发现丹参“发汗”过程中横断面颜色呈现由外向内、从黄白色渐变为褐色,最终转为紫褐色的动态变化特征。而丹酚酸 B 和丹参酮类成分均呈现先上升后下降的趋势,并分别在轻度“发汗”SD3 和中度“发汗”SD7 时达到峰值,但当完全“发汗”至 SD10 时,各指标性成分含量均下降,这表明仅依据指标性成分评价,完全“发汗”丹参并不符合“断面棕褐色或紫褐色时,质量上乘”这一性状描述^[21]。

丹酚酸 B 与 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 均呈显著相关性,提示丹参“发汗”过程中色泽的加深与酚酸类成分变化有关。“发汗”过程中水分“外高内低”的分布特征及含量变化则是驱动丹参色泽“由外至内”加深及丹酚酸 B 含量变化的关键因素,在“发汗”初期(SD0~SD3),丹参内部水分向外部迁移,形成“外高内低”的分布特征,此时高温高湿与相对富氧环境使得外周皮部细胞膜通透性增加,多酚氧化酶等酶活性增强,催化丹酚酸 B 等酚酸类底物发生酶促褐变^[22],皮部色泽率先加深。同时,高温高湿胁迫通过激活苯丙烷生物合成通路,上调苯丙氨酸解氨酶的基因表达与活性,从而促进该阶段丹酚酸 B 等酚酸类成分的合成与积累,以抵御胁迫带来的伤害^[23];“发汗”中期阶段(SD4~SD7),持续的水分流失,导致细胞结构完整性受到破坏,酶与底物的区域分布被打乱^[24],进一步加剧了酚酸类的酶促降解过程,使得色泽进一步加深,且随着“发汗”时间延长,外源营养供应中断使得合成前体不足,酚酸类成分的生物合成受到抑制,丹酚酸 B 含量显著下降;至“发汗”后期(SD8~SD10),丹参整体水分含量下降,酶促褐变反应逐渐减弱,这可能是该阶段丹酚酸 B 含量未出现显著下降的原因。

然而,水分的持续减少使得氨基化合物和羰基化合物等美拉德反应底物浓度相对上升,同时堆体温度持续升高,共同加剧了美拉德反应的进行^[25],

从而促使丹参色泽进一步加深。此外,有研究表明丹参酮类与色度值 a^* 呈显著正相关^[26],本研究发现在“发汗”初期和中期(SD0~SD7),丹参酮含量呈上升趋势,表明在该阶段丹参酮类的积累可能促进了丹参色泽的加深,然而丹参“发汗”前后丹参酮类含量并未有显著差异,这也使得整个“发汗”过程中的色度值与丹参酮类并未呈现相关性。

综上所述,本研究通过解析丹参在“发汗”过程水分迁移、色泽演变与成分变化的动态规律,初步探究了丹参“发汗”过程水分迁移-色泽演变-指标性成分变化的关联性。色泽变化不仅可作为“发汗”程度的直观判断指标,也与丹酚酸 B 含量具有显著相关性,为丹参“发汗”工艺的优化与质量控制提供了理论依据。后续可以结合代谢组学、质谱成像技术、蛋白组学等现代技术手段,系统阐释丹参“发汗”全阶段整体代谢过程,深入解析“发汗”过程中色泽变化的分子机制,进而系统揭示“发汗”过程中丹参品质形成的科学内涵。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 80.
- [2] 母伟林, 邵欣欣, 弭志成, 等. 丹参及其药对的药理研究进展 [J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(11): 158-163.
- [3] Lei W, Li X, Li L, *et al.* Compound Danshen Dripping Pill ameliorates post ischemic myocardial inflammation through synergistically regulating MAPK, PI3K/AKT and PPAR signaling pathways [J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 281: 114438.
- [4] Lan T T, Yu D X, Zhao Q R, *et al.* Ethnomedicine, phytochemistry, pharmacology, pharmacokinetics, and clinical application of *Salvia miltiorrhiza* Bunge (Lamiaceae): A comprehensive review [J]. *J Ethnopharmacol*, 2025, 350: 120032.
- [5] Fan D L, Zhong H L, Hu B, *et al.* Agro-ecological suitability assessment of Chinese Medicinal Yam under future climate change [J]. *Environ Geochem Health*, 2020, 42(3): 987-1000.
- [6] 李峰. 中药鉴定学 [M]. 第 4 版. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 28.
- [7] 山东道地药材丹参: T/SDCMIA DD02—2020 [S]. 2020: 4.
- [8] 丹参栽培技术规程: DB4112/T178—2020 [S]. 2020: 3.
- [9] 陶珊, 吴宇, 彭芳, 等. 四川道地药材丹参适宜干燥加工方式优选研究 [J]. 现代农业科技, 2024(6): 133-136.
- [10] 陈茹, 陈成, 杨兴鑫, 等. 中药“发汗”炮制法的现代研

- 究进展 [J]. 中草药, 2018, 49(2): 489-493.
- [11] 喻芬, 万娜, 李远辉, 等. 中药材干燥过程中的理化性质变化规律与机制分析 [J]. 中草药, 2021, 52(7): 2144-2153.
- [12] 王婷, 于凡, 李国转, 等. “发汗”与非“发汗”丹参中10种活性成分含量测定及其质量的主成分分析 [J]. 安徽中医药大学学报, 2019, 38(1): 75-79.
- [13] 王晓宇, 李青苗, 吴萍, 等. 不同加工方法对川产道地药材中江丹参药效成分的影响 [J]. 中药材, 2017, 40(4): 831-833.
- [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] Sun Y N, Zhang M, Mujumdar A S, *et al.* Pulse-spouted microwave freeze drying of raspberry: Control of moisture using ANN model aided by LF-NMR [J]. *J Food Eng*, 2021, 292: 110354.
- [16] Gu Y, Chen Y, Yue X, *et al.* LF-NMR/MRI determination of different 6-benzylaminopurine concentrations and their effects on soybean moisture [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 885804.
- [17] Zhu D S, Liang J Y, Liu H, *et al.* Sweet cherry softening accompanied with moisture migration and loss during low-temperature storage [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(10): 3651-3658.
- [18] 张平, 郑志安, 江庆伍. 茯苓采后不同预处理方式对其品质及干燥特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 294-304.
- [19] 秦文, 王明力. 园艺产品贮藏运销学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 194-195.
- [20] 李晶晶, 王博, 王玲玲, 等. 不同“发汗”处理对麻花芫药材有效成分的影响 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(4): 1809-1814.
- [21] 王晓宇, 张松林, 王颖, 等. 基于高通量测序中江丹参“发汗”过程中优势微生物群落与主要药效成分相关性研究 [J]. 中草药, 2024, 55(2): 420-433.
- [22] Zhang L W, Zhang X M, Begum N, *et al.* Effects of different processing methods based on different drying conditions on the active ingredients of *Salvia miltiorrhiza* Bunge [J]. *Molecules*, 2022, 27(15): 4860.
- [23] 邵振甲, 王欣卉, 宋雪健, 等. 植物多酚的生物合成、非生物胁迫调控与生理功能研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 425-434.
- [24] 郑万财, 白羽嘉, 冯作山, 等. 采后失水对葡萄皮中酚类物质及细胞超微结构的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8): 72-77.
- [25] 宫瑞泽, 霍晓慧, 张磊, 等. 美拉德反应对中药品质的影响及调控研究进展 [J]. 中草药, 2019, 50(1): 243-251.
- [26] 刘伟, 周冰谦, 王晓, 等. 丹参药材粉末色泽与有效成分含量的相关性 [J]. 中华中医药杂志, 2019, 34(4): 1466-1470.

[责任编辑 郑礼胜]