

基于颜色-多糖-抗氧化活性关联分析探究黄精九蒸九制质量变化

董 宁^{1,2}, 陈 酉^{1,2}, 李旭博^{1,2}, 杨林林^{1,2}, 初雷霞^{1,2}, 乔 璐^{1,2}, 董诚明^{1,2}, 郑晓珂^{1*}, 张飞宇^{3,4*}

1. 河南中医药大学药学院, 河南 郑州 450046

2. 河南省道地药材生态种植工程技术研究中心, 河南 郑州 450046

3. 河南中医药大学中医药科学院, 河南 郑州 450046

4. 西峡县人民医院博士后创新实践基地, 河南 西峡 474550

摘要: 目的 系统探究蒸制次数对黄精性状、多糖和 5-羟甲基糠醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF) 水平的影响, 关联黄精多糖抗氧化活性揭示黄精传统炮制过程的演变规律。方法 采用色差仪量化黄精样品的颜色参数, 测定黄精多糖和 5-HMF 的含量, 全面评价黄精多糖的抗氧化活性。运用多元统计分析对数据进行降维、分类解析和相关性分析, 构建综合评价体系对黄精各蒸制阶段的质量进行全面评估。结果 黄精的颜色特征随蒸制次数的不同而显著区分。“九蒸九制”过程中黄精多糖含量先降后升再趋于稳定, 而 5-HMF 含量先升后趋于稳定。黄精“九蒸九制”过程划分为初期、中期和后期 3 个阶段。黄精多糖的抗氧化能力随着蒸制次数增加呈现先上升后下降的趋势, 颜色与多糖、5-HMF 含量及抗氧化活性之间的相关性显著 ($P < 0.05$ 、 0.01)。综合评价体系显示, “六蒸六制”黄精在各项指标上综合得分最高。结论 颜色可作为判断黄精炮制程度的有效手段。“六蒸六制”后, 黄精色泽变黑、麻舌感消失、味甜而微苦, 结合抗氧化活性, 推测“六蒸六制”或为黄精炮制的理想终点。

关键词: 黄精; 九蒸九制; 色度值; 多糖; 5-羟甲基糠醛; 抗氧化活性; 多元统计分析

中图分类号: R283.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2025)02-0476-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.02.011

Exploring quality variations of *Polygonati Rhizoma* during nine-steaming and nine-drying process through color-polysaccharides-antioxidant activity linkages

DONG Ning^{1,2}, CHEN You^{1,2}, LI Xubo^{1,2}, YANG Linlin^{1,2}, CHU Leixia^{1,2}, Qiao Lu^{1,2}, DONG Chengming^{1,2}, ZHENG Xiaoke¹, ZHANG Feiyu^{3,4}

1. School of Pharmacy, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China

2. Henan Provincial Ecological Planting Engineering Technology Research Center of Authentic Medicinal Materials, Zhengzhou 450046, China

3. Academy of Chinese Medical Science, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China

4. Postdoctoral Innovation Practice Base of Xixia People's Hospital, Xixia 474550, China

Abstract: Objective The study aims to systematically explore the influence of steaming cycles on the morphological characteristics, polysaccharides content, and 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) levels of Huangjing (*Polygonati Rhizoma*, PR), and to elucidate the evolution patterns of its traditional processing through correlation analysis with antioxidant activity of polysaccharides. **Methods** Color parameters of PR samples were quantitatively analyzed using a colorimeter. The contents of polysaccharides and 5-HMF were determined, and a comprehensive assessment of the antioxidant activity of polysaccharides was conducted. Multivariate statistical analysis was employed to reduce data dimensionality, classify and analyze the data, and perform correlation analysis. A comprehensive evaluation system was established to assess the quality of PR at different steaming stages. **Results** The color characteristics were significantly differentiated based on the number of steaming times. During the nine-steaming and nine-drying process, the

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 河南省重点研发专项 (231111312700); 河南省国际科技合作项目 (242102521056); 河南省中医药科学研究专项 (2024ZY3094)

作者简介: 董 宁, 博士, 研究方向为中药活性物质及作用机制研究。E-mail: dongning@hactcm.edu.cn

*通信作者: 郑晓珂, 教授, 博士生导师, 研究方向为中药学。E-mail: zhengxk.2006@163.com

张飞宇, 博士, 研究方向中西医结合。E-mail: zhangfeiyu@hactcm.edu.cn

polysaccharides content exhibited a trend to initial decrease, subsequent increase, and eventual stabilization. Conversely, the 5-HMF content showed an initial increase followed by stabilization. The entire process was divided into three stages: early, middle and late. The antioxidant capacity of polysaccharides increased initially and then decreased with an increasing number of steaming cycles. Significant correlations were observed between color, contents, and antioxidant activity ($P < 0.05, 0.01$). According to the comprehensive evaluation system, PR processed through six-steaming and six-drying achieved the highest overall score across all indicators. **Conclusion** Color can serve as an effective indicator for assessing the degree of processing. After six-steaming and six-drying, PR exhibited a dark color, loss of tongue-numbing sensation, and a sweet with a slight bitterness taste. Combined with antioxidant activity, it is speculated that six-steaming and six-drying may represent the optimal endpoint for the processing of PR.

Key words: *Polygonati Rhizoma*; nine-steaming and nine-drying process; colorimetry; polysaccharides; 5-hydroxymethylfurfural; antioxidant activity; multivariate statistical analysis

黄精 (*Polygonati Rhizoma*, PR) 是百合科植物黄精 *Polygonatum sibiricum* Red.、滇黄精 *P. kingianum* Coll. et Hemsl. 或多花黄精 *P. cyrtoneura* Hua 的干燥根茎, 为广泛应用的药食同源植物, 被《神农本草经》列为上品。黄精性平味甘, 入脾、肺、肾经, 具有补气养阴、健脾益肺、滋肾填精的功效^[1]。其生品口服时会引发麻舌感和咽喉刺激, 经炮制不仅可消除刺激性, 还可积累有效成分, 增强补益之效, 实现减毒增效的目的。

黄精的炮制方法在历代文献中多有记载, 以九蒸九制最为常见^[2-3], 但当前行业内仍缺乏统一的炮制标准, 加工终点的判定存在不确定性, 影响了黄精产品的质量控制。研究表明, 黄精在延缓衰老、调节血糖血脂、抗菌抗炎、调节免疫方面的药用价值与其缓解氧化应激损伤的功效密切相关^[4-6]。

黄精化学成分复杂多样, 主要包括多糖、皂苷、黄酮和凝集素等, 其中多糖类成分含量尤为丰富^[7-8]。现代药理学研究揭示, 黄精多糖具有良好的抗氧化活性, 可以有效清除 2,2'-联苯基-1-苦基肼基 (2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS⁺], 羟基和超氧自由基, 并表现出显著的还原能力, 为黄精通过食补抗氧化应激、维护机体健康提供了坚实的科学依据^[8-9]。

然而, 当前关于九蒸九制过程中黄精质量变化规律的研究, 尤其是以抗氧化药效为评判标准的探索尚显不足, 在一定程度上限制了黄精在功能性食品和药品领域的深入开发与广泛应用。鉴于此, 本研究聚焦于黄精炮制过程中的外观变化、多糖及 5-羟甲基糠醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF) 水平的动态监测, 并结合黄精多糖抗氧化活性的差异分析, 全面揭示黄精炮制过程中颜色、化学组成及

药效的演变规律, 为优化黄精炮制工艺、提升产品质量提供科学依据和综合评价方法。

1 仪器与材料

1.1 仪器

Waters e2695 型高效液相色谱仪, 美国沃特世公司; MetaVue 型色差仪, 爱色丽 (上海) 色彩科技有限公司; cTongue-8 型电子舌, 上海保圣新能源科技有限公司; GZX-9070 MBE 型电热恒温鼓风干燥箱, 上海精宏试验设备有限公司; A590 型双光束紫外可见分光光度计, 翱艺仪器 (上海) 有限公司; Varioskan LUX 型多功能微孔板读数仪, 美国赛默飞公司; Centrifuge 5810R 型冷冻高速离心机, 德国艾本德公司。

1.2 试剂

黄酒, 批号 20240110, 湖北房珍鲜酿生态食品有限公司; 苯酚, 批号 20200908, 青岛海洋化工有限公司; 硫酸, 批号 20200908, 青岛海洋化工有限公司; 5-HMF, 批号 67-47-0, 北京索莱宝科技有限公司; 无水葡萄糖 (批号 50-99-7)、DPPH (批号 1898-66-4)、ABTS⁺ (批号 30931-67-0)、2,4,6-三(2-吡啶基)-1,3,5-三嗪 (2,4,6-tripyridin-2-yl-1,3,5-triazine, TPTZ, 批号 3682-35-7)、L-抗坏血酸 (维生素 C, VC, 批号 50-81-7) 购自上海麦克林生化科技有限公司; 醋酸钠, 批号 20191014, 郑州派尼化学试剂厂; 三氯化铁, 批号 2019062052, 天津市化学试剂三厂; 无水乙醇 (批号 13-011-14001)、甲醇 (批号 13-011-14015), 天津市富宇精细化工有限公司; 色谱级甲醇, 批号 67-56-1, 购自赛默飞世尔科技有限公司; 其余试剂为分析纯。

1.3 药材

黄精样品于 2023 年 11 月采集自河南省信阳市平桥区邢集镇罗楼村, 经河南中医药大学董诚明教授鉴定, 为百合科黄精属植物黄精 *P. sibiricum* Red.

的新鲜根茎；经检测，黄精样品中水分 9.20%，灰分 1.70%，浸出物 64.29%，多糖 8.21%，重金属及有害元素等检测项均符合《中国药典》2020 年版一部标准要求。

2 方法与结果

2.1 九蒸九制黄精样品的制备

选取无霉变、品质优良的黄精洗净晾干，剔除须根，标记为新鲜黄精对照样品 S0。将 S0 置于 90~95 ℃ 蒸箱内隔水蒸制 9 h，闷润 1 夜，60 ℃ 恒温烘干至表面干燥，加黄精用量 20% 的黄酒拌匀并再次闷润，干燥，制得一蒸一制样品。在此基础上，实施二蒸二制至九蒸九制炮制流程，每次取适量前一轮次样品，置于 90~95 ℃ 蒸箱中蒸制 4 h，随后 60 ℃ 烘干，切厚片，备用。每次蒸制后的样品分别取样并编号，即 S1~S9，外观如图 1 所示。



S0-新鲜黄精样品；S1~S9-一蒸一制~九蒸九制黄精样品。
S0-fresh PR sample; S1~S9-one—nine-steaming and drying process of PR samples.

图 1 黄精炮制过程中外观颜色变化

Fig. 1 Appearance color changes during *Polygonati Rhizoma* processed

2.2 感官性状评价

组建由 20 名经过专业培训的人员构成的评定小组，从色泽、质地、口感、气味 4 个维度出发，对 S0~S9 样品的外观特征及感官属性进行系统评估，结果汇总于表 1。生品（S0）表面呈现黄白色泽，气微，麻舌感强。随着蒸制次数的递增，黄精表观颜色逐渐发生变化，由最初的黄白色过渡为棕褐色（S1~S3）。四蒸四制后外观特征显著改变，视觉上呈现“光黑如漆”的色泽，肉眼逐渐无法分辨颜色差异；散发浓郁焦香味，麻舌感完全消失，嚼之甘甜微苦（S4~S6）。当蒸制次数进一步增加至七蒸七制及以上时，感官属性再次发生显著变化，甜味减弱乃至消失，苦味明显增强，且酸涩味逐渐出现（S7~S9）。

表 1 九蒸九制黄精外观及感官性状评价

Table 1 Descriptive and sensory evaluation of *Polygonati Rhizoma* during nine steaming-nine drying process

样品	色泽	质地	口感	气味
S0	黄白色	硬且脆	麻舌感强，涩	气微
S1	棕黄色	坚硬	麻舌感较强	微有焦香味
S2	棕色	稍硬	麻舌感较强	微有焦香味
S3	棕褐色	软糯且韧	麻舌感弱，微甜	有焦香味
S4	乌黑色	软糯且韧	无麻舌感，甘甜微苦	焦香味浓郁
S5	乌黑色	软糯且韧	无麻舌感，甘甜微苦	焦香味浓郁
S6	乌黑色	软糯且韧	无麻舌感，甘甜微苦	焦香味浓郁
S7	乌黑色	软而黏腻	无麻舌感，味苦	焦香味浓郁
S8	乌黑色	软而黏腻	无麻舌感，酸涩味苦	焦糊味
S9	乌黑色	软而黏腻	无麻舌感，酸涩味苦	焦糊味

2.3 样品色度值分析

2.3.1 色度值测定 基于实验室前期建立^[10]并适当优化的方法，采用数字图像分析技术表征样品粉末的颜色特征。将 S0~S9 样品粉碎后过 3 号筛，取粉末适量，置于色差仪下测定色度值，为确保测定结果的准确性和可重复性，S0~S9 各样品粉末平铺后均在色差仪下随机变换不同位置并平行拍摄 6 次图像，经标准比色板校正后依次记录 S0~S9 各样品亮度值（ L^* ）、红绿相（ a^* ）和黄蓝相（ b^* ）3 个色度参数值（表 2）。其中， L^* 代表亮度， L^* 越大，亮度越大； a^* 代表红绿相，值越大，颜色越红； b^* 代表黄蓝相，值越大，颜色越黄。依照公式 $E^*_{ab} = (a^{*2} + b^{*2} + L^{*2})^{1/2}$ 计算样品总色值 E^*_{ab} 。

表 2 黄精九蒸九制过程中色度值测定结果

Table 2 Measurement of color determination during the process of *Polygonati Rhizoma*

样品	L^*	a^*	b^*	E^*_{ab}	ΔE^*_{ab}
S0	83.44±0.11	3.74±0.03	23.19±0.34	86.68±0.10	—
S1	53.89±0.56	11.92±0.16	29.19±0.76	62.43±0.80	31.25±0.42
S2	44.48±1.06	13.43±0.37	24.56±0.94	52.57±0.52	40.17±1.13
S3	39.10±0.18	11.63±0.22	20.29±0.57	45.56±0.30	45.13±0.18
S4	31.73±1.15	10.87±0.57	12.49±0.84	35.81±0.65	53.29±1.03
S5	36.56±1.20	10.64±0.13	19.92±0.46	42.98±1.20	47.50±1.23
S6	30.73±0.41	10.06±0.42	15.11±0.88	35.70±0.80	53.70±0.48
S7	28.57±0.38	8.12±0.18	8.89±0.40	31.00±0.46	56.87±0.42
S8	27.29±1.08	8.46±0.76	8.94±0.83	29.96±0.85	58.13±1.01
S9	23.10±1.27	4.42±0.35	2.38±0.38	23.36±1.15	63.83±1.10

2.3.2 色度值动态变化 在色度参数中， L^* 随着蒸制次数的递增呈现明显的下降趋势，直观反映了样品亮度逐渐减弱，颜色逐渐加深。 a^* 和 b^* 均显示为正值，表明蒸制过程中黄精色泽经历由黄白色向红

色和黄色混合色调的转变。 a^* 呈现先上升后下降的趋势,揭示了在蒸制初期首先转为褐色调,随后随着蒸制次数的增加,红色成分逐渐褪去,颜色向黑色演变。 b^* 值逐渐下降也支持了上述结论,表明黄精生品的黄白色在蒸制过程中逐渐减弱,直至几乎完全消失。以 S0 为参照,依照公式 $\Delta E_{ab}^*=(\Delta a^{*2}+\Delta b^{*2}+\Delta L^*)^{1/2}$ 计算 S1~S9 的色差值 ΔE_{ab}^* 。结果见表 2。随着蒸制次数的增加, ΔE_{ab}^* 不断攀升。说明随着蒸制次数的增加,炮制品与生品之间的色泽差异越来越大,直至达到相对稳定的乌黑色状态。

2.3.3 基于色度值的多元统计分析 为探究九蒸九制过程中黄精色度值变化规律,将关键色度参数 L^* 、 a^* 、 b^* 和总色值 E_{ab}^* 导入 SIMCA 14.1 统计软件,进行层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)。如图 2-A 所示, HCA 将九蒸九制黄精样品划分为 3 个显著聚类:生品 S0 自成一类; S1~S6 聚为一类,代表炮制之初的色度变化特征; S7~S9 则聚为第 3 类,体现炮制后期的色度稳定性。这一分类结果与九蒸九制炮制过程中黄精颜色的主观观察结果基本一致。进一步采用主成分分析(principal components analysis, PCA)方法,模型参

数 $R^2=0.994$, $Q^2=0.781$, 表明该模型拟合效果优异^[11]。如图 2-B 所示, PCA 图直观展示了随着黄精蒸制次数的变化,炮制品的色度值在多维空间呈现出规律性的变化轨迹。生品(S0)独立于第 4 象限,处于轨迹起始点, S1~S6 色度值沿特定方向逐渐移动至第 1、2 象限, S7~S9 变化趋于平缓,在第 3 象限形成稳定的聚类区域。

2.4 电子舌测定

为了进一步克服传统经验鉴别的模糊性和个体差异性,采用电子舌技术对不同蒸制次数的黄精样品的味觉感受进行量化分析。参考刘奇付等^[12]的方法。取 S0~S9 黄精样品粉末各 1.5 g, 浸泡于 50 mL 去离子水中 30 min, 超声处理 1 h 后, 4 000 r/min 离心 10 min, 取上清液。沉淀加入 50 mL 去离子水重复上述操作, 合并 2 次上清液。在室温环境下进行电子舌分析实验, 电子舌检测条件: 自动进样, 每个样品检测 120 s, 每次测定后, 对传感器进行电化学洗涤和电位扫描洗涤, 每个样品重复测定 3 次, 取平均值进行分析。结果如图 3 所示。

图 3-A 中 sensor_1~6 为传感器所测得电信号, 代表样品味觉感受特征值。如图 3-B 所示, PCA 通过数据降维反映样品间的差异, PCA1 和 PCA2 的贡献率分别为 96.98% 和 1.81%, 总贡献率达到 98.79%, 研究表明总贡献率大于 80%, 可表明样品的整体滋味轮廓。S4~S6 聚为一类, S1~S3、S7~S9 聚为一类, S0 在二维空间内与其他样品区域距离相隔较远, 说明与炮制品滋味差异显著。仅以色度值为指标, 蒸制过程大致区分为 S1~S6、S7~S9 2 个时期, 结合电子舌分析结果, 其中 S4~S6 味觉感受聚为一类, 这与感官性状分析中四蒸四制到六蒸六制黄精口感最佳的评价一致。

2.5 成分含量测定

2.5.1 多糖含量测定 本实验采用苯酚-硫酸法^[13]测定 S0~S9 系列样品中多糖含量。

(1) 对照品溶液的制备与线性关系考察: 精密称取于 105 °C 下烘干至恒定质量的无水葡萄糖对照品 10.19 mg, 加蒸馏水溶解并定容至 100 mL 量瓶中, 配制成质量浓度为 101.9 $\mu\text{g/mL}$ 的葡萄糖对照品溶液。吸取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mL 葡萄糖对照品溶液置于具塞试管中, 定容至 1.0 mL。向各试管中依次加入 0.5 mL 50 mg/mL 苯酚溶液和 2.5 mL 浓硫酸, 摇匀, 迅速置于冰水浴中冷却至室温。使用分光光度计于 490 nm

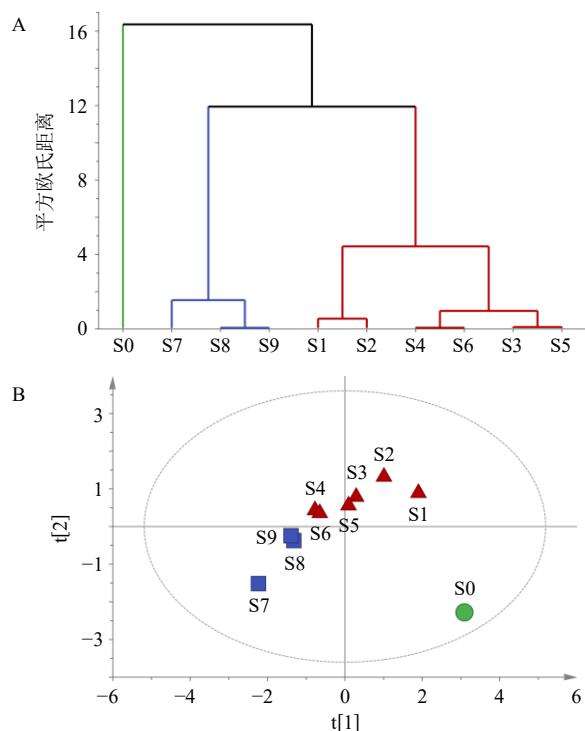


图 2 基于色度值的九蒸九制过程中样品 HCA 图 (A) 和 PCA 图 (B)

Fig. 2 Nine-steaming and nine-drying process HCA diagram (A) and PCA diagram (B) based on sample chroma values

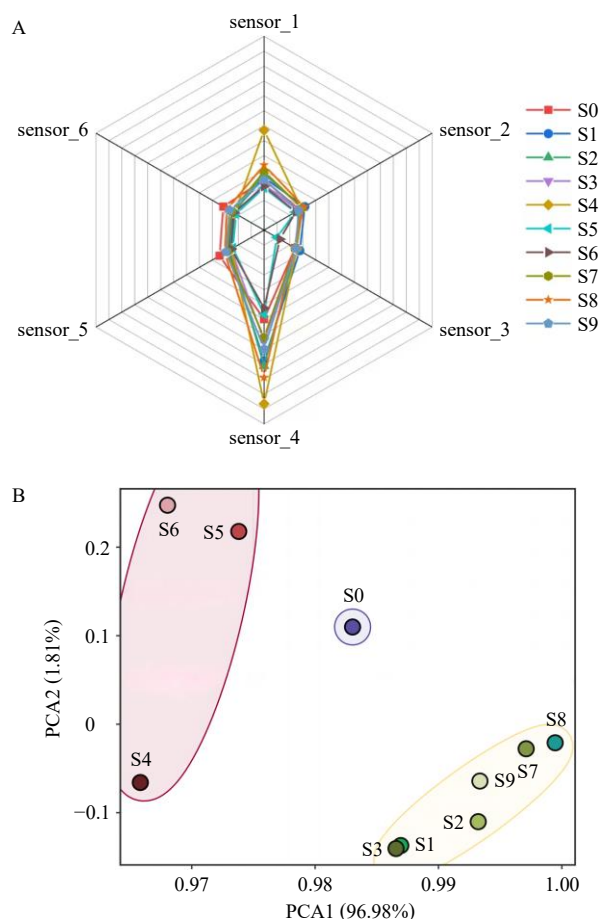


图 3 黄精九蒸九制过程中电子舌味觉相应值雷达图 (A) 和 PCA 图 (B)

Fig. 3 Radar diagram (A) and PCA diagram (B) of corresponding value of electronic tongue taste during nine-steaming and nine-drying process of *Polygonati Rhizoma*

处测定 A 值。以去离子水作为空白对照进行调零处理。基于葡萄糖质量浓度与 A 值之间的线性关系,求得线性回归方程为 $Y=9.176\ 5\ X-0.017\ 1$, $R^2=0.999\ 1$, 线性范围 $10.19\sim 101.90\ \mu\text{g/mL}$ 。

(2) 供试品溶液的制备与样品测定: 取 S0~S9 样品粉末各 0.25 g, 精密称定, 分别置于圆底烧瓶中, 加 150 mL 80%乙醇, 冷凝回流 1 h, 减压抽滤, 用热乙醇洗涤残渣 3 次, 弃滤液。将残渣及滤纸置于圆底烧瓶中, 加 150 mL 蒸馏水, 回流提取 1 h, 减压抽滤, 热水洗涤残渣与圆底烧瓶, 合并滤液及洗液, 冷却至室温后加蒸馏水定容至 250 mL, 制得供试品溶液。

取各供试品溶液 1.0 mL, 按照“2.5.1 (1)”项下所述方法测定 S0~S9 的 A 值, 实验重复 3 次, 计算各样品中的多糖含量, 结果见表 3。

(3) 方法学考察: 取 S6 样品粉末, 按照“2.5.1

表 3 九蒸九制黄精黄精多糖及 5-HMF 含量 ($\bar{x} \pm s$, $n=3$)

Table 3 Determination of polysaccharides and 5-HMF contents during nine steaming-nine drying process of *Polygonati Rhizoma* ($\bar{x} \pm s$, $n=3$)

样品	质量分数/(mg·g ⁻¹)		样品	质量分数/(mg·g ⁻¹)	
	多糖	5-HMF		多糖	5-HMF
S0	80.50±1.69	0	S5	41.70±1.66	1.20±0.10
S1	26.20±2.24	0.04±0.01	S6	40.70±2.51	2.15±0.05
S2	17.60±3.67	0.05±0.02	S7	45.30±0.84	3.44±0.06
S3	44.60±1.02	0.11±0.01	S8	47.30±1.04	5.69±0.11
S4	40.40±0.83	0.72±0.09	S9	39.60±1.74	6.05±0.11

(2)”项下方法制备供试品溶液, 并连续测定 6 次 A 值, 计算得到其 RSD 为 1.67%, 表明该仪器精密度高。

取 S6 样品粉末, 按照“2.5.1 (2)”项下方法制备供试品溶液, 分别在制备后 0、2、4、6、8、12、16、24 h 测定供试品溶液的 A 值, 计算得其 RSD 为 1.45%, 表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

取 S6 样品粉末, 按照“2.5.1 (2)”项下方法平行制备 6 份供试品溶液, 根据测定所得 A 值计算其质量分数的 RSD 值, 为 1.12%, 表明该方法重复性良好。

取 S6 样品粉末 6 份, 每份 0.125 g, 精密称定, 按照样品中多糖含量的 1:1 比例, 分别加入葡萄糖对照品溶液, 按照“2.5.1 (2)”项下方法制备供试品溶液, 采用苯酚-硫酸法测定其 A 值, 计算得到葡萄糖的平均加样回收率为 97.60%, RSD 为 1.51%, 表明此方法具有可行性。

2.5.2 5-HMF 含量测定 采用高效液相色谱法^[14]测定 S0~S9 系列样品中 5-HMF 含量。

(1) 色谱条件: 选用 Zorbax SB-C₁₈ 色谱柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm), 以甲醇-水 (8:92) 作为流动相, 体积流量设定为 1 mL/min, 检测波长选定 280 nm, 柱温为 35 $^{\circ}\text{C}$, 每次进样量为 10 μL 。色谱图见图 4。

(2) 对照品溶液的制备: 精密称定 5-HMF 对照品 15 mg, 采用甲醇作为溶剂配制系列质量浓度梯度 (100、50、25、12.5、6.25、3.125、1.562 5、0.781 25 $\mu\text{g/mL}$) 的对照品溶液, 通过 0.22 μm 微孔滤膜滤过。按“2.5.2 (1)”项下色谱条件进样分析, 记录各质量浓度下的峰面积。以峰面积为纵坐标 (Y), 对照品质量浓度为横坐标 (X), 绘制标准曲线, 进行线性回归, 求得线性回归方程 $Y=86.131\ X+6.772\ 5$,

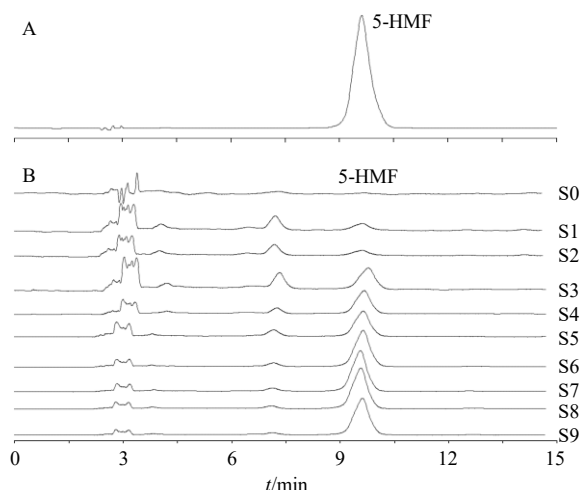


图 4 5-HMF 对照品 (A) 和黄精生品及不同蒸晒次数炮制品 (B) 的 HPLC 图

Fig. 4 HPLC of 5-HMF reference substance (A) and raw *Polygonati Rhizoma* and processed products (B)

$R^2=0.999\ 9$, 线性范围 $0.781\ 25\sim100\ \mu\text{g/mL}$ 。

(3) 供试品溶液的制备: 取 S0~S9 黄精样品粉末 $0.5\ \text{g}$, 精密称定, 置于 $100\ \text{mL}$ 具塞锥形瓶中, 加入甲醇 $25\ \text{mL}$ 。称定质量后, 于 $300\ \text{W}$ 功率下超声处理 $30\ \text{min}$, 用甲醇补足减失的质量, 滤过并收集续滤液作为供试品溶液。按“2.5.2 (1)”项下色谱条件进行进样分析, 计算各样品中 5-HMF 含量, 结果见表 3。

(4) 方法学考察: 精密吸取 5-HMF 对照品溶液, 按“2.5.2 (1)”项下色谱条件进样分析, 连续测定 6 次, 记录峰面积, 计算得其 RSD 为 2.95% , 表明此仪器精密性良好。

精密称取 S6 样品粉末, 按“2.5.2 (3)”项下方法制备供试品溶液, 分别于制备后 0、2、4、6、8、12、16、24 h, 按“2.5.2 (1)”项下色谱条件进样测定, 记录峰面积, 计算得其 RSD 为 2.59% , 表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

精密称取 S6 样品粉末 6 份, 按“2.5.2 (3)”项下方法制备供试品溶液, 按“2.5.2 (1)”项下色谱条件进样分析, 记录峰面积, 计算得其质量分数的 RSD 为 2.99% , 表明该测定方法重复性良好。

取 S6 样品粉末 6 份, 每份 $0.25\ \text{g}$, 按照样品中 5-HMF 含量的 $1:1$ 比例, 加入 5-HMF 对照品溶液, 按“2.5.2 (1)”项下色谱条件进样分析, 记录峰面积, 计算加样回收率, 结果 5-HMF 的平均加样回收率为 101.36% , RSD 为 0.98% , 表明该方法具有可行性。

2.5.3 多糖和 5-HMF 含量的动态变化 表 3 结果显示, 黄精生品 (S0) 中的多糖含量最高, 在首次和第二次蒸制后显著下降, 三蒸三制后有所回升, 但仍低于生品中的原始含量。5-HMF 则随着蒸制次数的增加而持续升高, 最终趋于稳定。

2.5.4 颜色与化学成分之间的多元统计分析 通过 SIMCA 14.1 软件, 对九蒸九制过程中黄精色度值 (L^* 、 a^* 、 b^* 、 E^*_{ab}) 与内在成分 (多糖、5-HMF) 测定结果进行数据整合和关联分析。HCA 结果 (图 5-A) 显示, 黄精在九蒸九制过程中经历阶段性变化。PCA 模型具有良好的数据解释能力和预测精度, 该模型 $R^2=0.972$, $Q^2=0.754$, 可用于统计分析。PCA 得分图 (图 5-B) 中, S0 样品独立位于第 4 象限, S1 和 S2 样品聚集于第 1 象限, S3~S6 样品逐渐向第 2 象限移动, 而 S7 至 S9 样品则分布于第 3 象限, 进一步验证了 HCA 的结果, 并指出炮制过程中的显著变化节点位于二蒸二制后与六蒸六制后, 从而形成 3 个明显的炮制时期。

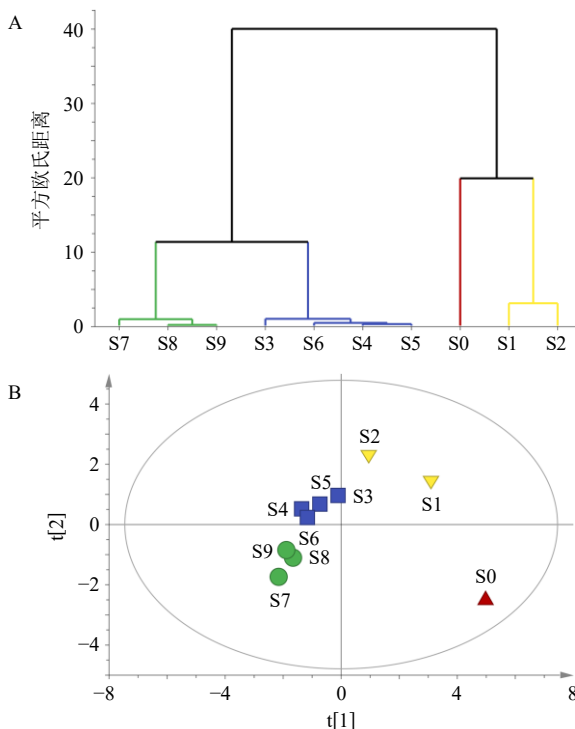


图 5 基于颜色和化学成分的九蒸九制过程中样品 HCA 图 (A) 和 PCA 得分图 (B)

Fig. 5 Nine-steaming and nine-drying process samples HCA diagram (A) and PCA score chart (B) based on external and internal indicators

为了识别对样品分类起决定作用的变量, 对数据进行 Logist 标准化处理后, 进一步应用正交偏最小二乘-判别分析 (orthogonal partial least squares-

discriminant analysis, OPLS-DA) 进行分析。由于 HCA 和 PCA 中生品 (S0) 与炮制品差异较大, 自成 1 组, 故进行 OPLS-DA 分析时不再考虑生品。结果表明该模型具有优异的拟合准确度和预测能力 ($R_x^2=0.920$, $R_y^2=0.832$, $Q^2=0.826$)。通过得分散点图 (图 6-A) 将样品明确区分为炮制初期 (S1~S2)、炮制中期 (S3~S6) 和炮制后期 (S7~S9) 3 大类, 与 HCA 和 PCA 结果高度一致。通过计算特征变量投影重要性 (variable importance in projection, VIP) 值, 对综合指标进行重要性排序。结果 (图 6-B) 显示, a^* 、多糖含量和 L^* 值在区分九蒸九制各阶段样品中扮演了至关重要的角色 (VIP 值 >1)。

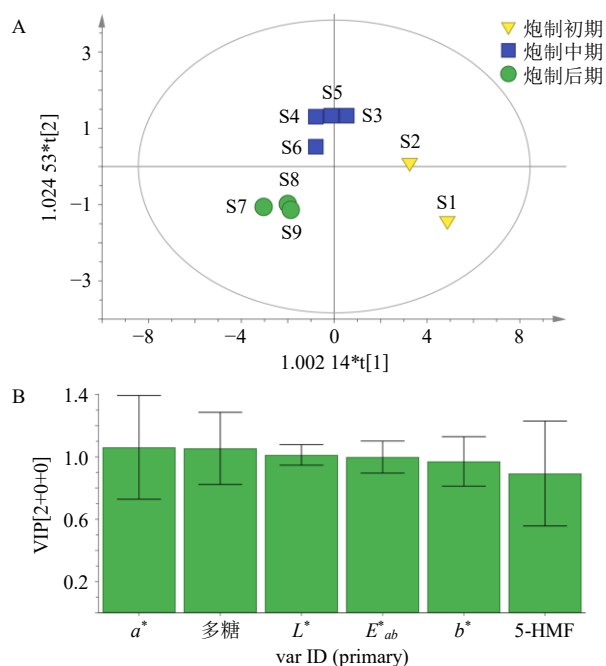


图 6 基于颜色和化学成分的九蒸九制过程中样品 OPLS-DA 图 (A) 和 VIP 图 (B)

Fig. 6 Nine-steaming and nine-drying process samples OPLS-DA analysis (A) and VIP diagram (B) based on external and internal indicators

2.6 黄精多糖的抗氧化活性评价

2.6.1 黄精多糖的提取 采用水提醇沉法^[15]对 S0~S9 系列样品中的多糖成分进行提取。样品切块, 各取 100 g 置于烧瓶中, 加入 10 倍量去离子水, 于沸水浴中提取 4 h, 抽滤收集滤液, 滤渣加 8 倍量去离子水重复上述提取过程, 合并滤液。滤液减压浓缩至原体积 1/3 后, 缓慢加入乙醇至乙醇体积分数达到 80%, 4 °C 静置过夜。次日, 离心 8 000 r/min, 10 min, 收集沉淀。所得固态物经溶解、透

析、冷冻干燥以及研磨后, 制得 S0~S9 多糖粉末。

2.6.2 体外抗氧化活性的量化分析 参考 Rumpf 等的实验方法^[16]并适当调整, 采用 DPPH、ABTS⁺自由基清除能力和铁还原能力 (ferric ion reducing antioxidant power, FRAP) 评价 S0~S9 黄精多糖的抗氧化能力。

(1) DPPH 自由基清除能力测定方法的建立:

DPPH 工作液的配制: 称取 7.89 mg DPPH 溶于 95%乙醇中, 配制成 DPPH 储备液, 摇匀后于暗处放置, 加入乙醇稀释, 使其在 517 nm 处的 A 值为 0.70 ± 0.02 , 即得 DPPH 工作液。

标准曲线的绘制: 精确称取 25 mg VC, 溶于 10 mL 95%乙醇中, 随后定容至 100 mL, 制得 1.42 mmol/L 的标准母液。准确移取 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 mL 标准母液至 8 个 5 mL 量瓶中, 每瓶均用 95%乙醇定容至刻度, 充分摇匀, 即得到质量浓度梯度为 0、142、284、426、568、710、852、994 $\mu\text{mol/L}$ 的稀释 VC 标准工作液。各取上述标准工作液 0.1 mL, 分别加入到 3.9 mL DPPH 工作液中, 混合均匀后, 室温下避光静置反应 30 min。在 517 nm 处测定各混合液的 A 值, 重复 3 次。基于 VC 浓度与 A 之间的线性关系, 求得线性回归方程为 $Y=0.0613X-0.0034$, $R^2=0.9974$, 线性范围 142~994 $\mu\text{mol/L}$ 。

样品 DPPH 自由基清除能力测定: 取 S0~S9 黄精多糖 25 mg, 精密称定, 溶解于 25 mL 水中配制样品待测液 (1 mg/mL)。取 0.1 mL 待测液与 3.9 mL DPPH 工作液混合, 避光振荡反应 30 min, 95%乙醇作为空白对照, 于 517 nm 处测定 A 值, 实验重复 3 次, 依照清除率公式计算各样品对 DPPH 自由基的清除能力。

$$\text{清除率} = (A_0 - A_1) / A_0$$

A_1 为样品 A , A_0 为空白对照 A

(2) ABTS⁺自由基清除能力测定方法的建立:

ABTS⁺工作液的配制: 将 25 mL ABTS⁺水溶液 (7 mmol/L) 与 0.44 mL 过硫酸铵水溶液 (140 mmol/L) 混合, 配制成 ABTS⁺储备液, 4 °C 避光保存过夜, 用乙醇稀释即得 ABTS⁺工作液 (在 734 nm 处的 A 值为 0.70 ± 0.02)。

标准曲线的绘制: 依照 “2.6.2 (1)” 项下方法配制系列稀释 VC 标准工作液。取系列稀释 VC 标准工作液各 0.1 mL, 与 ABTS⁺工作液混合均匀, 室温下避光静置反应 30 min。在 734 nm 处测定各混

合液的 A 值, 重复 3 次。基于 VC 浓度与 A 之间的线性关系, 求得线性回归方程为 $Y=0.097\ 5\ X-0.000\ 1$, $R^2=0.996\ 0$, 线性范围 $142\sim 994\ \mu\text{mol/L}$ 。

样品 ABTS⁺ 自由基清除能力测定: 取样品待测液各 0.1 mL, 与 3.9 mL ABTS⁺ 工作液充分混合, 避光振荡反应 30 min, 95% 乙醇作为空白对照, 于 734 nm 处测定 A 值, 实验重复 3 次。依照清除率公式计算各样品对 ABTS⁺ 自由基的清除能力。

(3) FRAP 测定:

FRAP 工作液的配制: 将 300 mmol/L 醋酸钠缓冲溶液(pH 3.6)、10 mmol/L TPTZ 溶液和 20 mmol/L 三氯化铁溶液按体积比 1:1:10 混合, 制备成 FRAP 工作液。

标准曲线的绘制: 依照“2.6.2 (1)”项下方法配制 VC 标准工作液。取系列稀释 VC 标准工作液各 0.1 mL, 与 FRAP 工作液混合均匀, 室温下避光静置反应 30 min。在 593 nm 处测定各混合液的 A 值, 重复 3 次。基于 VC 浓度与 A 之间的线性关系, 求得线性回归方程为 $Y=0.159\ 5\ X+0.100$, $R^2=0.997\ 2$, 线性范围 $142\sim 994\ \mu\text{mol/L}$ 。

样品 FRAP 测定: 取样品待测液各 0.1 mL, 与 3.9 mL FRAP 工作液充分混合, 避光振荡反应 30 min, 95% 乙醇作为空白对照, 于 593 nm 处测定 A 值, 实验重复 3 次。

(4) VC 当量抗氧化剂容量计算: 将 S0~S9 黄精多糖的 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率以及 FRAP 体系中的样品 A 值, 代入公式 $X=(A-b)/(a\times m)$ 计算 VC 当量抗氧化剂容量 (vitamin C equivalent antioxidant capacity, VCEAC), 其中 X 代表样品 VCEAC (mmol/L/mg), A 代表 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除能力测定结果中样品的自由基清除率或 FRAP 测定中样品的 A 值, b 代表各标准曲线截距, a 代表各标准曲线斜率, m 代表样品质量 (mg)。

2.6.3 黄精多糖抗氧化活性的动态变化 S0~S9 黄精多糖的抗氧化活性量化结果见表 4。分析结果表明, 黄精多糖在 DPPH 体系中的自由基清除能力于二蒸二制后显著增强, 四蒸四制达到顶峰随后出现波动, 六蒸六制后趋于稳定; 而在 ABTS⁺ 体系中, 其自由基清除能力自四蒸四制后达到峰值后逐渐下降; FRAP 总抗氧化活性则在三蒸三制后显著升高, 随后保持相对稳定。总体而言, 随着炮制次数增加, 黄精多糖在炮制前期 (S1~S2) 和中期 (S3~S6) 展现出显著的抗氧化能力提升趋势, 而进入炮

表 4 九蒸九制黄精多糖的 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除能力和 FRAP 总抗氧化能力

Table 4 DPPH, ABTS⁺ radical scavenging activities and FRAP antioxidant capacity of *Polygonati Rhizoma* polysaccharides during nine-steaming and nine-drying process

样品	VCEAC/($\mu\text{mol}\cdot\text{mg}^{-1}$)		
	DPPH	ABTS ⁺	FRAP
S0	0.5±30.1	1.6±2.7	63.0±16.8
S1	0.7±27.8	8.5±0.3	130.3±10.6
S2	45.5±18.3	29.7±0.7	231.2±4.1
S3	49.6±21.7	66.9±0.4	345.6±7.2
S4	49.9±31.4	126.4±1.5	334.0±7.1
S5	49.7±18.4	110.6±2.3	341.6±4.3
S6	41.7±37.8	109.4±1.7	334.6±3.1
S7	43.6±28.3	98.1±1.6	348.5±4.1
S8	43.7±25.7	77.5±2.3	330.0±2.3
S9	39.1±29.2	87.0±1.1	348.7±5.6

制后期 (S7~S9) 则趋于稳定或减弱。

2.7 Spearman 相关性分析

为了进一步解析黄精炮制过程中颜色、化学成分和抗氧化活性间的内在联系, 利用 SPSS 25.0 软件对不同蒸制次数下黄精样品色度参数 (L^* 、 a^* 、 b^* 、 E^*_{ab}) 与化学成分 (多糖、5-HMF 含量) 和抗氧化能力 (DPPH、ABTS⁺、FRAP) 进行 Spearman 相关性分析, 结果见表 5。分析结果显示, 多糖含量与色度参数 a^* ($P<0.01$) 及 b^* ($P<0.05$) 间存在显著负相关; 5-HMF 含量则与 L^* ($P<0.01$)、 a^* ($P<0.05$)、 b^* ($P<0.01$) 和 E^*_{ab} ($P<0.01$) 间均呈显著负相关; 另外, ABTS⁺ 自由基清除能力和 FRAP 总抗氧化能力与 L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 均表现出高度的负相关

表 5 黄精九蒸九制过程中样品颜色与多糖、5-HMF 含量和多糖抗氧化活性的 Spearman 相关性分析

Table 5 Spearman correlation analysis of chromaticity with polysaccharides, 5-HMF contents and antioxidant activity of *Polygonati Rhizoma* polysaccharides during nine-steaming and nine-drying process

色度	Spearman 秩相关系数				
	多糖	5-HMF	DPPH	ABTS ⁺	FRAP
L^*	-0.147	-0.944 ^{##}	-0.264	-0.716 ^{##}	-0.640 ^{##}
a^*	-0.718 ^{##}	-0.372 [#]	0.121	-0.071	-0.069
b^*	-0.405 [#]	-0.860 ^{##}	-0.271	-0.633 ^{##}	-0.581 ^{##}
E^*_{ab}	-0.156	-0.939 ^{##}	-0.278	-0.711 ^{##}	-0.644 ^{##}

-1 表示完全负相关, 1 表示完全正相关; [#] $P<0.05$ ^{##} $P<0.01$ 。

-1 means completely negative correlation, and 1 means perfect positive correlation; [#] $P<0.05$ ^{##} $P<0.01$ 。

性 ($P < 0.01$)。以上结果提示, 颜色变化可能作为预测黄精炮制过程中化学成分变化及抗氧化效能的有效指标。

2.8 权重系数及综合得分计算

为深入探究黄精炮制品中多项指标之间的潜在关系, 采用 SPSS 25.0 软件对原始数据进行降维和标准化处理, 而后进行 PCA。KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验系数为 0.621 (> 0.6), Bartlett 检验显著性 $P < 0.05$, 表明数据适合进行 PCA。对特征值大于 1 的数据进行提取, 共提取出 2 个主成分 (PC1、PC2), 累积方差贡献率为 81.195% (表 6), 表明提取的 2 个主成分能够有效地反映黄精炮制品特征中的大部分关键信息, 从而作为黄精炮制品综合评价的综合性指标。第 1 主成分 PC1 的特征值为 5.072, 方差贡献率为 56.357%, 在综合评价中占据主导地位。如表 7 所示, ABTS⁺ 自由基清除能力、FRAP 抗氧化能力和 5-HMF 含量的正向载荷值较高, 分别为 0.951、0.869 和 0.690, 说明这 3 个指标对 PC1 起决定性作用; 对于 PC2, 色度值 a^* 、 b^* 和 DPPH 自由基清除能力的正向载荷值较大, 分别为 0.971、0.529 和 0.187, 说明这 3 个指标对 PC2 起决定性作用。

表 6 特征值和方差贡献率

Table 6 Characteristic values and variance contribution rates

主成分	初始特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
PC1	5.072	56.357	56.357
PC2	2.235	24.838	81.195

表 7 各主成分载荷矩阵

Table 7 Load matrix of each component

评价指标	载荷矩阵		评价指标	载荷矩阵	
	PC1	PC2		PC1	PC2
L^* (X_1)	-0.965	-0.201	5-HMF 含量 (X_6)	0.690	-0.420
a^* (X_2)	0.023	0.971	DPPH (X_7)	0.529	0.187
b^* (X_3)	-0.820	0.529	ABTS ⁺ (X_8)	0.951	0.119
E^*_{ab} (X_4)	-0.984	-0.066	FRAP (X_9)	0.869	-0.024
多糖含量 (X_5)	-0.291	-0.861			

基于上述分析, 利用载荷矩阵和各主成分特征值, 计算各指标的权重系数, 代入公式 $Y_1 = -0.437 X_1 - 0.428 X_2 + 0.422 X_3 + 0.386 X_4 - 0.364 X_5 + 0.306 X_6 + 0.235 X_7 + 0.010 X_8 - 0.129 X_9$, $Y_2 = -0.044 X_1 - 0.134 X_2 + 0.080 X_3 - 0.016 X_4 + 0.354 X_5 - 0.281 X_6 + 0.125 X_7 + 0.650 X_8 - 0.576 X_9$, 其中 $X_1 \sim X_9$ 代表指标如表 7 所示。

为全面评估各样本的综合性能, 以 2 个主成分的方差贡献率作为各自权重系数构建综合评价模型 $Y = 0.563\ 57 Y_1 + 0.248\ 38 Y_2$, 计算 S0~S9 的综合得分 (Y) 并排序 (表 8)。排序结果显示, 综合得分排名依次为 S6>S4>S5>S3>S7>S8>S0>S9>S1>S2, 经过六蒸六制处理的样本 (S6) 在综合评价中表现最为优异。

表 8 不同蒸制次数黄精样品主成分得分、综合得分及排名

Table 8 Principal component score, comprehensive score and ranking of PR of different steaming-drying times

样品	Y_1	Y_2	Y	排名	样品	Y_1	Y_2	Y	排名
S0	-0.289	0.662	0.001	7	S5	0.297	-0.336	0.084	3
S1	-0.137	-0.213	-0.130	9	S6	0.419	-0.160	0.196	1
S2	-0.586	-0.310	-0.407	10	S7	0.042	0.127	0.055	5
S3	0.180	-0.071	-0.084	4	S8	-0.293	0.741	0.019	6
S4	0.343	-0.418	0.089	2	S9	-0.024	-0.013	-0.017	8

3 讨论

传统炮制中药品质评估多依赖于口尝、鼻嗅、眼观等直观感受。九蒸九制过程中黄精样品颜色变深、滋味更佳^[9], 近年来研究证实炮制过程中内在化学成分含量发生改变^[17], 药效也存在差异^[18-19]。然而, 目前外观性状、成分含量变化和黄精药理活性的关联性并不明确。中药经过加工炮制后发生了多种复杂的化学反应, 随之变化的物质基础是外观、性状、功效发生改变的重要原因。多糖是黄精的主要活性成分, 而 5-HMF 炮制过程中多糖的 1 个重要分解产物。

本研究基于表里兼顾的思想, 通过测定九蒸九制过程中黄精颜色等性状特征、多糖和 5-HMF 含量变化以及体外抗氧化活性, 对九蒸九制黄精内外在质量关联性进行深入分析。结果表明, 随着蒸制次数的增加, 黄精的口感由麻舌感逐渐转为甘甜微苦, 质地愈发柔韧软糯, 焦香味明显浓郁, 颜色逐渐加深至深褐乃至漆黑; 而七蒸七制后口感转为酸涩味苦, 并出现焦糊味。鉴于“色变则味变, 味变则质变”的古老智慧^[20], 老药工在实际生产过程中通过眼观口尝判断色黑如漆、味甜而微苦作为质优黄精, 但这种鉴别方式主观性极大。为克服传统经验鉴别的模糊性和个体差异, 本研究通过色差仪、电子舌和多元统计分析使性状特征得到量化验证。推测外观性状变化与美拉德反应密切相关, 该反应随蒸制时间与温度的累积, 促使药材色泽从黄色、褐色、红棕色直至黑色演变, 体现了非酶褐变在中

药炮制中的普遍性^[21-22]。《中国药典》2020 年版以多糖作为黄精质量的主要评价标准,但炮制过程作为一个动态变化体系,相关成分的动态转化规律尚待全面揭示^[23-24]。除了对黄精中标志性成分多糖进行动态分析外,还对其炮制过程中多糖分解产物 5-HMF 的含量进行分析,以探讨其变化规律以及与炮制次数的相关性。5-HMF 作为美拉德反应的产物之一,不仅可作为炮制内在质量变化的标志^[21,25],还具备抗肿瘤、护肝、抗氧化等药理活性,然其高浓度亦伴随潜在毒性风险^[21]。

本实验结果显示,九蒸九制过程中黄精多糖含量递减而 5-HMF 含量递增,这一趋势与先前针对不同基原黄精的研究结果相吻合^[25-27]。本研究进一步通过 PCA 和 OPLS-DA,揭示了黄精颜色变化与多糖、5-HMF 含量变化的紧密关联性,并将炮制过程细分为炮制初期(一蒸一制至二蒸二制)、炮制中期(三蒸三制至六蒸六制)与炮制后期(七蒸七制至九蒸九制),既反映了化学成分的重塑,也验证了颜色参数作为质量控制指标的有效性。

多糖作为黄精的重要活性成分,其抗氧化与抗衰老作用已获广泛认可,是药食同源黄精发挥抗氧化活性最主要的功能性成分,其抗氧化功效也是临床应用和产品开发的核心^[28-30]。本研究观察到黄精多糖抗氧化活性先升后降的现象,这可能与炮制过程中多糖分子结构优化与降解双重作用有关,炮制前期多糖分子结构的优化可能增强了其抗氧化性能,而过度炮制则可能导致活性位点破坏或结构降解,从而降低抗氧化能力。此外,抗氧化活性与颜色参数的负相关提示,颜色变化或可间接反映黄精多糖抗氧化活性的动态变化,为优化炮制工艺、提升黄精药用价值提供了新思路。

九蒸九制作为黄精传统炮制方法的典范^[31],其“九”字多含象征意义,遵古法炮制是否一定要反复蒸制 9 次?文献梳理发现黄精的蒸制次数明显影响其中多糖类成分的转化^[2,32],具体的炮制终点有待进一步探索。本研究通过 PCA 综合评价模型,综合考量颜色、成分及抗氧化活性等因素,为黄精炮制的质量控制建立了科学的量化体系,结果表明六蒸六制黄精得分最高。结合感官性状评价,六蒸六制后黄精色泽变黑、麻舌感消失、味甜而微苦,已达到药典和文献中对传统炮制优质黄精的要求;七蒸七制后,颜色无明显变化,口感逐渐转为酸涩味苦,抗氧化能力降低。综上,基于本研究的范围,以外

观性状、多糖和 5-HMF 含量以及多糖的抗氧化活性为指标,初步探明六蒸六制可能达到了炮制效果的最优状态,为实际生产中的工艺优化提供了科学依据。未来研究应聚焦于不同炮制条件下黄精药效成分及生物活性的深入变化机制探索,以及建立更加精准、高效的质量控制标准,以加速中药现代化的步伐。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Liu R L, Zhang X L, Cai Y H, et al. Research progress on medicinal components and pharmacological activities of *Polygonatum sibiricum* [J]. *J Ethnopharmacol*, 2024, 328: 118024.
- [2] 任洪民, 邓亚玲, 张金莲, 等. 药用黄精炮制的历史沿革、化学成分及药理作用研究进展 [J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(17): 4163-4182.
- [3] 东宝花, 蒋云秀, 强梦琴, 等. 黄精炮制沿革及现代研究进展 [J]. *中华中医药学刊*, 2022, 40(11): 213-217.
- [4] 陆佳岑, 薛畅, 姜程曦. 黄精及有效成分抗衰老作用机制的研究进展 [J]. *中草药*, 2023, 54(14): 4732-4739.
- [5] 陶梦婷, 李丽霞, 王怀莹, 等. 黄精、多花黄精、滇黄精的多糖组分及其抗炎、抗氧化作用比较 [J]. *中成药*, 2023, 45(4): 1367-1372.
- [6] 鲁文洁, 陈井太, 宋志前, 等. 黄精酒制前后多糖单糖组成及抗氧化活性对比研究 [J]. *中国中医基础医学杂志*, 2023, 29(2): 285-291.
- [7] 袁怡菁, 王秋红. 黄精化学成分、药理作用研究进展及质量标志物预测分析 [J]. *中医药信息*, 2024, 41(2): 72-80.
- [8] 杨迎, 侯婷婷, 王威, 等. 黄精多糖的药理作用研究进展 [J]. *现代药物与临床*, 2022, 37(3): 659-665.
- [9] 李旭鸿, 冯源源, 黄月, 等. 3 种黄精多糖含量及抗氧化活性的差异分析 [J]. *食品工业*, 2023, 44(4): 171-175.
- [10] 宋梦娇, 董诚明, 魏悦, 等. 怀地黄“菊花心”性状与化学成分的相关性研究 [J]. *时珍国医国药*, 2023, 34(5): 1133-1137.
- [11] Ali A M, Monaghan C, Muggeridge D J, et al. LC/MS-based discrimination between plasma and urine metabolomic changes following exposure to ultraviolet radiation by using data modelling [J]. *Metabolomics*, 2023, 19(2): 13.
- [12] 刘奇付, 邵换峥, 吴晓宗. 基于电子鼻和电子舌对不同烟熏方式培根中的香气成分分析比较 [J]. *中国调味品*, 2023, 48(9): 179-183.
- [13] 杨勤, 谷文超, 周浓, 等. 苯酚-硫酸法与蒽酮-硫酸法

- 测定地参多糖的比较研究 [J]. 食品科技, 2020, 45(1): 343-350.
- [14] 王宏贤, 史可, 王春燕, 等. 白术清炒过程中颜色变化与 5-羟甲基糠醛的相关性分析及拐点研究 [J]. 中医药信息, 2024, 41(2): 9-15.
- [15] Zhao P, Li X, Wang Y, *et al.* Characterisation and saccharide mapping of polysaccharides from four common *Polygonatum* spp. [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 233: 115836.
- [16] Rumpf J, Burger R, Schulze M. Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 233: 123470.
- [17] 吴丰鹏, 李芹英, 吴彦超, 等. 九蒸九制对黄精多糖单糖组成及其抗氧化性的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 42-46.
- [18] 蔡春燕, 陈鑫, 刘绍姜, 等. 不同炮制阶段多花黄精内在质量及体外抗氧化作用比较研究 [J]. 时珍国医国药, 2022, 33(11): 2665-2669.
- [19] 王俊楠, 卢琪, 薛淑静, 等. 九蒸九制对鸡头黄精理化性质及抗氧化性的影响 [J]. 现代食品科技, 2024, 40(2): 231-245.
- [20] Gong H, Gan X N, Li Y Z, *et al.* Review on the genus *Polygonatum* polysaccharides: Extraction, purification, structural characteristics and bioactivities [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 229: 909-930.
- [21] 曾林燕, 曾鸿莲, 谭淑仪, 等. 基于 5-HMF 的产生机理、代谢、生物活性及其在中药加工过程变化的研究概述 [J]. 中国中医基础医学杂志, 2023, 29(3): 507-514.
- [22] 曲珍妮, 吕畅, 毕钰, 等. 基于电子仿生感官技术的山楂不同炮制品颜色、味道变化研究 [J]. 中草药, 2024, 55(20): 6929-6939.
- [23] 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.
- [24] 郑晓倩, 金传山, 张亚中, 等. 黄精九蒸九晒炮制过程中糖类成分动态变化 [J]. 中成药, 2020, 42(7): 1837-1841.
- [25] 金鹏程, 吴丽华, 吴昕怡, 等. Box-Behnken 响应面法优化滇黄精产地加工炮制一体化工艺对黄精多糖的影响 [J]. 中国现代中药, 2021, 23(4): 674-678.
- [26] 雍晋, 王迎香, 唐爽, 等. 黄精酒蒸前后化学成分、炮制工艺及药理作用研究进展 [J]. 中药与临床, 2023, 14(6): 97-103.
- [27] 滕欢欢, 王仁中, 吴德玲, 等. 多花黄精炮制前后不同极性部位抗氧化与降血糖活性研究 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 70-75.
- [28] Fernandes P A R, Coimbra M A. The antioxidant activity of polysaccharides: A structure-function relationship overview [J]. *Carbohydr Polym*, 2023, 314: 120965.
- [29] Wang S Q, Li G, Zhang X F, *et al.* Structural characterization and antioxidant activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides [J]. *Carbohydr Polym*, 2022, 291: 119524.
- [30] Deng R, Wang F, Wang L F, *et al.* Advances in plant polysaccharides as antiaging agents: Effects and signaling mechanisms [J]. *J Agric Food Chem*, 2023, 71(19): 7175-7191.
- [31] 吴思俊, 王龙, 赵铭威, 等. 中药九蒸九晒炮制技术研究进展 [J]. 中南药学, 2022, 20(9): 2015-2022.
- [32] 秦宇雯, 张丽萍, 赵祺, 等. 九蒸九晒黄精炮制工艺的研究进展 [J]. 中草药, 2020, 51(21): 5631-5637.

[责任编辑 郑礼胜]