

DOI 10.19656/j.cnki.1002-2406.20240202

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

王宏贤¹, 史可², 王春燕², 李元红¹, 康冰亚¹, 陈天朝^{1,2}✉

(1. 河南中医药大学第一附属医院, 河南 郑州 450000; 2. 河南中医药大学, 河南 郑州 450008)

【摘要】目的:研究白术清炒过程中颜色变化与5-羟甲基糠醛(5-HMF)的相关性,并通过其炮制过程中各指标的动态变化分析炮制拐点。方法:清炒法炮制白术,运用薄层扫描仪、MATLAB软件评估白术生品及炮制品的颜色值,测定氧化值,HPLC法测定5-HMF含量,SPSS21.0软件分析颜色与5-HMF含量的相关性并建立回归模型。结果:相关性分析显示,色调H与亮度I呈极显著正相关,与氧化值、5-HMF含量均呈极显著负相关;饱和度S与亮度I呈显著负相关,与氧化值呈极显著正相关;亮度I与氧化值、5-HMF含量均呈极显著负相关;氧化值与5-HMF含量呈极显著正相关。5-HMF含量与颜色值的回归模型为 $Y_{(5-HMF)} = 24.928 - 43.398X_{(H)}$, $R^2 = 0.908$,拟合度高,模型有效。结论:白术清炒过程中其颜色与5-HMF含量显著相关,依据其颜色变化预测炮制过程中5-HMF的含量具有可行性,并且依据各指标动态变化可分析炮制拐点,为白术清炒过程中炮制程度的判断提供参考依据。

【关键词】白术;清炒法;颜色;5-羟甲基糠醛;相关性

【引用格式】

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.

WANG H X, SHI K, WANG C Y, et al. Correlation analysis between color change and 5-HMF and study on processing inflection point in the plain stir-frying process of white atractylodes [J]. Information on TCM, 2024, 41(2):9-15.

白术为菊科植物白术(*Atractylodes macrocephala* Koidz.)的干燥根茎,南北朝前无白术、苍术之分,统称为“术”,《神农本草经》记载了“术”,列为上品,宋代本草开始区分白术、苍术,自此二者明确分用^[1-2]。白术主要含有挥发油类、内酯类、多糖等化学成分,具有健脾益气、燥湿利水、止汗、安胎的功效,可发挥调节胃肠运动、保肝、抗炎、抗肿瘤等药理作用^[3-4]。历代文献对白术炒法记载最多,可见炒法为白术最主要的炮制方法,主要分为清炒和加辅料炒两类^[5],炒制后燥性减弱,健脾作用增强^[6]。炮制品外观颜色是判断其炮制程度及品质最直

观的指标,与其内在化学成分变化密切相关,可以有效反映其质量优劣。本实验分析清炒过程中白术颜色、氧化值、5-羟甲基糠醛(5-HMF)含量的动态变化及相关性,并通过其炮制过程中各指标的动态变化情况分析炮制拐点,以期对白术清炒过程中颜色变化及炮制程度的判断及中药炮制品质量控制的数据化提供参考。

1 仪器与材料

1.1 仪器

炒药机(型号:CY-25,温州顶历医疗器械有限公司);电子天平(型号:DT-300,上海医用激光仪器厂

基金项目:河南省重点研发与推广专项科技发展计划项目(212102311101);国家中医药管理局中医药部门公共卫生服务补助资金项目(国中医规财发[2015]21号)

第一作者简介:王宏贤(1971-),男,副主任药师,主要研究方向:中药饮片炮制和质量研究。

✉通信作者简介:陈天朝(1962-),男,主任药师,主要研究方向:中药炮制与中药学。

常熟分厂);高速万能粉碎机(型号:FW-600,科伟永兴仪器有限公司);高效液相色谱仪(型号:1260,美国Agilent公司);薄层成像仪(型号:TLC VISUALIZER2型,瑞士卡玛公司)。

1.2 饮片与试剂

白术(安徽人民中药饮片有限公司,批号:201202)经河南中医药大学第一附属医院陈天朝主任药师鉴定符合2020版《中华人民共和国药典》一部饮片项下规定的质量标准。

5-羟甲基糠醛(5-HMF,上海源叶生物技术有限公司,批号:B21832,纯度 $\geq 98\%$);甲醇(Sigma试剂有限公司,色谱纯);甲醇(天津市永大化学有限公司,分析纯);95%乙醇(天津市永大化学有限公司,分析纯);硫代硫酸钠(郑州派尼化学试剂厂,分析纯);碘化钾(汕头市西陇化工厂有限公司,分析纯);高锰酸钾(深圳市南山区锦久辰化工品商行,分析纯);浓硫酸(天津市永大化学有限公司,分析纯);纯化水(河南中医药大学第一附属医院制剂车间)。

2 方法

2.1 实验因素及因素水平的确定

本研究基于白术单味药材的清炒,由“火候”出发确定炮制过程中起决定因素的主要是炒制时的温度和时间,因此选择炮制时间与炮制温度两个影响因素作为研究目标。炮制过程使用滚筒式炒药机进行药材的炒制,CY-25炒药机温控变化刻度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{次}$,且经过前期预实验测得白术药材在 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下炒制20 min已呈现炭化状态,故而选取终点温度为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,每2 min为一

变化梯度,设置11个变化水平,炮制时间共22 min。

2.2 样品的制备

将生白术饮片按大小均匀分类,分成11份,每份 $(50 \pm 5)\text{g}$,另取1份生品饮片备用,共12份样品。打开滚筒式炒药机,功率7 kW,滚筒转速20 r/min,固定炮制温度为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,待炒药机稳定在 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后放入药材,并开始计时,炮制时间范围为0~22 min,具体见表1,待到达炒制时间后,关闭炒药机,取出药材,放置至常温,制得清炒白术的不同炮制样品。

表1 白术不同样品的制备参数

样品编号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min
白术-0	0	0
白术-1	180	2
白术-2	180	4
白术-3	180	6
白术-4	180	8
白术-5	180	10
白术-6	180	12
白术-7	180	14
白术-8	180	16
白术-9	180	18
白术-10	180	20
白术-11	180	22

2.3 颜色值测定

2.3.1 图像采集

将炒制后的白术饮片按编号依次排列,分别置于干净透明的培养皿上,然后放入薄层扫描仪中,选择反射光照射,采集图像,图像信息见图1。

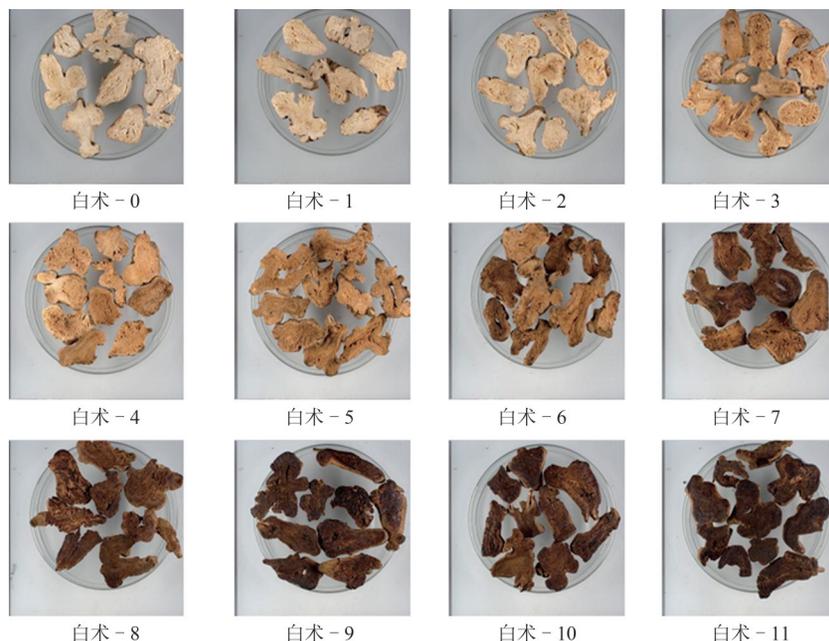


图1 白术不同样品薄层扫描图

2.3.2 RGB数据采集及HSI数值转换

使用MATLAB R2016软件将采集好的图像依次通过程序代码分析,生成各自的RGB(红绿蓝)图像,从每个样品RGB图像中均匀选取30个点,取平均值,然后将平均值进行HSI转换,得到(色调H,饱和度S,亮度I)数据。HSI与RGB转换公式如下。

$$H = \theta(B \leq G) \text{ 或 } 2\pi - \theta(B > G)$$

$$\theta = \arccos \{ 1/2 [(R - G) + (R - B)] / [(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2} \}$$

$$S = 1 - 3[\min(R, G, B)] / (R + G + B)$$

$$I = 1/3(R + G + B)$$

2.4 氧化值测定

精密称取白术不同样品饮片细粉2.0 g,置于500 mL圆底烧瓶中,加水200 mL,混匀后接蒸馏装置,精确收集前50 mL蒸馏液,备用。精密称取KMnO₄ 0.158 g,纯水溶解并定容于500 mL容量瓶内,配制成浓度为0.002 mol/L的KMnO₄溶液,转移至棕色试剂瓶内保存备用。精密称取Na₂S₂O₃ 3.16 g,纯水溶解并定容于1 000 mL容量瓶中,配制成浓度为0.02 mol/L的Na₂S₂O₃溶液,转移至棕色试剂瓶内,缓缓煮沸10 min,冷却,放置两周后滤过备用。根据文献[7-8]分别用移液管准确量取5 mL上述蒸馏液于滴定瓶内,加入5 mL H₂SO₄水溶液(硫酸:水 = 1:4)和10 mL 0.002 mol/L KMnO₄溶液,振荡均匀,室温下静置30 min,然后加入5 mL 0.15g/mL KI溶液,用Na₂S₂O₃溶液进行滴定,当溶液由深黄色变成浅黄色时,加入淀粉指示剂1 mL,继续滴定,当颜色变为无色时,记录消耗的Na₂S₂O₃溶液体积为A(mL)。另外进行空白试验,用等量的水重复以上操作,记录消耗Na₂S₂O₃溶液体积为B(mL)。平行测定3次,取平均值。

$$O_x = (B - A) \times C \times 200 / (5 \times 0.002 \times V \times M)$$

其中: O_x 为氧化值,即蒸馏液所消耗的KMnO₄的毫升数(mL/g); B 为空白实验消耗的Na₂S₂O₃溶液的体积(mL); A 为样品消耗的Na₂S₂O₃溶液的体积(mL); C 为Na₂S₂O₃溶液的浓度(mol/L); V 为馏分的取样量(mL);5为硫代硫酸钠与高锰酸钾的反应摩尔当量比;0.002为KMnO₄溶液的浓度(mol/L);200为样品体积(mL); M 为称取样品的质量。

2.5 5-HMF含量测定

2.5.1 对照品溶液的制备

精密称取5-HMF对照品20 mg于100 mL容量瓶内,加50%甲醇溶解并定容至刻度线,摇匀,即得对照品溶液。

2.5.2 供试品溶液的制备

精密称取白术不同样品细粉0.5 g,分别置于具塞锥形瓶中,加入80%甲醇20 mL,称重,超声处理50 min,冷却至室温,称重,用甲醇补足失去的重量,过滤,收集滤液于50 mL容量瓶,并定容于刻度,取上清液2 mL,离心5 min(12 000 r/min),用0.45 μm微孔滤膜过滤,即得供试品溶液。

2.5.3 色谱条件

色谱柱:Agilent反向色谱柱HC-C18(5 μm, 4.6 mm×250 mm);流动相:甲醇-水(5:95);检测波长:284 nm;体积流量:1.0 mL/min;柱温:30℃;进样量:10 μL。色谱图见图2。

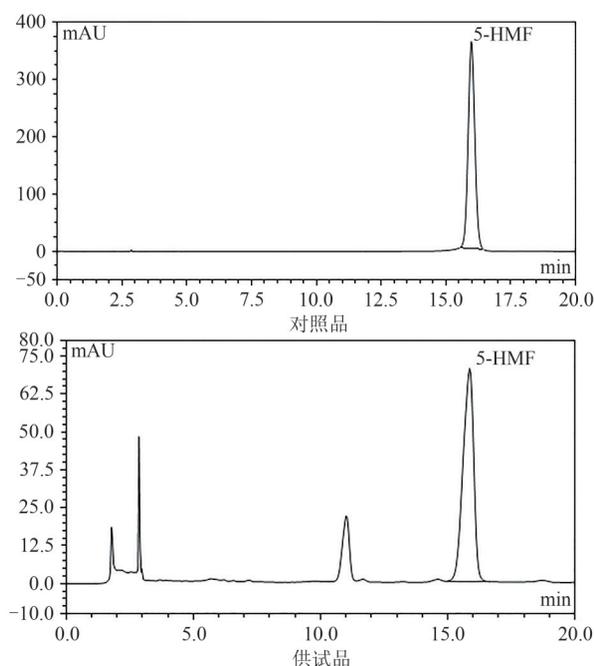


图2 对照品和供试品HPLC色谱图

2.5.4 线性关系考察

分别精密吸取1、2、4、6、8、10 mL对照品溶液于25 mL容量瓶中,加甲醇定容至刻度,制成不同浓度的对照品溶液,按“2.5.3”项下色谱条件分别进样测定,以峰面积为纵坐标,对照品浓度为横坐标,绘制标准曲线,得方程 $Y = 2\,296.9X + 0.299\,1$, $R^2 = 0.999\,1$ 。表明5-HMF在0.008~0.080 μg/μL范围内线性关系良好。

2.5.5 精密度考察

精密吸取5-HMF对照品溶液,按“2.5.3”项下色谱条件测定,连续测定6次,记录峰面积,计算RSD值,经计算RSD值为0.003 9%,说明此仪器精密度良好。

2.5.6 重复性考察

精密称取白术-5号样品细粉6份,按“2.4.2”项下方法制备供试品溶液,按“2.5.3”项下色谱条件进样,记

录峰面积,计算RSD值,经计算RSD值为0.0776%,说明该测定方法重复性良好。

2.5.7 稳定性考察

精密吸取白术-5号供试品溶液,分别于0、10、20、30、40、50、60 min不同时间点,按“2.5.3”项下色谱条件进样测定,记录峰面积,计算RSD值,经计算RSD值为0.0855%,说明该供试品溶液在60 min内稳定性良好。

2.5.8 加样回收率考察

精密称取白术-5号样品细粉6份,每份1.0 g,精密加入1 mL对照品溶液,按“2.5.2”项下方法制备供试品溶液,按“2.5.3”项下色谱条件进样,记录峰面积,

计算回收率及RSD值,经计算5-HMF的RSD值为0.99%,平均加样回收率为98.86%,加样回收率均在95%~105%范围内,说明此方法具有可行性。

2.5.9 含量测定

按照“2.5.2”项下制备供试品溶液,再按照“2.5.3”项下色谱条件进样测定,记录峰面积,计算5-HMF含量。

3 结果

3.1 白术不同样品颜色值、氧化值、5-HMF含量测定结果

对12批白术样品进行测定,测定结果见表2。

表2 白术不同样品颜色值、氧化值、5-HMF含量测定结果

样品编号	色调H	饱和度S	亮度I	氧化值/(mL/g)	5-HMF/(mg/g)
白术-0	0.6229	0.1641	189.2889	7.9800	0.0333
白术-1	0.6192	0.2228	181.5556	20.1200	0.0324
白术-2	0.6055	0.2655	173.9889	23.3300	0.0289
白术-3	0.5489	0.3705	146.9333	27.7600	0.0471
白术-4	0.5351	0.3932	145.7444	30.3400	0.0604
白术-5	0.5142	0.4408	126.9778	34.5400	0.2641
白术-6	0.4915	0.4734	99.9556	36.5700	2.4283
白术-7	0.4325	0.4833	86.0667	38.4100	4.5129
白术-8	0.3219	0.4287	63.7111	39.2900	8.7119
白术-9	0.3117	0.4110	54.3333	41.3300	11.8262
白术-10	0.2860	0.4022	52.1889	41.7800	15.4169
白术-11	0.2532	0.3374	38.6333	43.1500	15.2409

3.2 白术清炒过程中颜色值、氧化值、5-HMF含量的动态变化

白术不同样品在180℃炮制温度下,其色调H、亮度I均会随着炮制时间的增加而降低,而饱和度S则随炮制时间先增大再减小,在第14 min时达到最大值,而后逐渐降低,而14 min正是白术由炒黄进入炒焦的一个时间点,因此可用饱和度S来指征白术清炒的炒黄阶段。白术炮制品随着炮制时间的增加,其氧化程度不断加深,且随着变化程度的不断加深,氧化值的增加速率不断减小。其中0~2 min时氧化程度变化最为迅速,2~10 min为白术的炒黄阶段;10~18 min为白术的炒焦阶段;18~22 min为白术的炒炭阶段。随着炮制时间的增加,5-HMF含量整体呈增加趋势,在0~10 min白术的炒黄阶段,5-HMF含量差别不大,从10 min开始,白术进入炒焦阶段,此时5-HMF含量骤然增加,20 min后进入炒炭阶段,5-HMF含量基本保持稳定。变化趋势见图3~6。

3.3 相关性分析

采用SPSS21.0软件对白术不同样品的颜色值、氧化值、5-HMF含量进行Pearson相关性分析,结果见表3。结果显示色调H与亮度I呈极显著正相关,色调H与氧化值、5-HMF含量均呈极显著负相关;饱和度

S与亮度I呈显著负相关,饱和度S与氧化值呈极显著正相关;亮度I与氧化值、5-HMF含量均呈极显著负相关;氧化值与5-HMF含量呈极显著正相关。

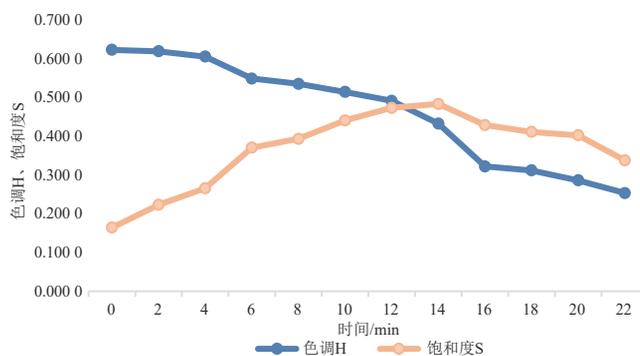


图3 色调H和饱和度S随炮制时间动态变化图

3.4 颜色值与5-HMF含量的回归分析

以5-HMF含量为因变量,以色调H、亮度I为自变量,进行线性回归分析时, $VIF > 5$,存在共线性,因此选择逐步stepwise法,进行逐步回归分析,经过模型自动识别,最终余下色调H一项显著自变量在模型中,得出回归模型为 $Y_{(5-HMF)} = 24.928 - 43.398X_{(H)}$, $R^2 = 0.908$,而且模型通过F检验($F = 98.826, P = 0.000 < 0.05$),说明模型有效。

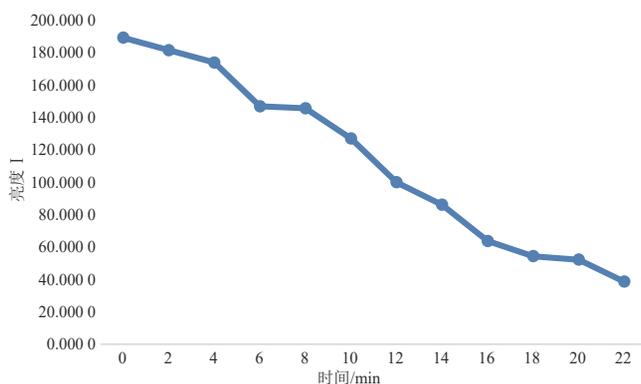


图4 亮度 I 随炮制时间动态变化图

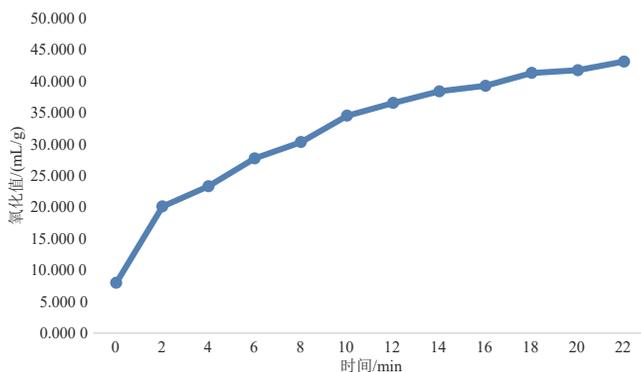


图5 氧化值随炮制时间动态变化图

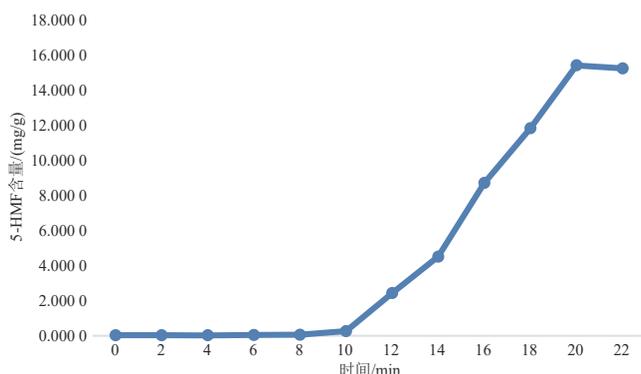


图6 5-HMF 含量随炮制时间动态变化图

3.5 颜色值与氧化值的回归分析

以氧化值为因变量,以色调H、饱和度S、亮度I为自变量,选择逐步 stepwise 法,进行逐步回归分析,经

过模型自动识别,最终余下饱和度S、亮度I两项显著自变量在模型中,得出回归模型为 $Y_{(\text{氧化值})} = 32.219 + 40.323X_{(S)} - 0.132X_{(I)}$, $R^2 = 0.941$,而且模型通过F检验 ($F = 71.563, P = 0.000 < 0.05$),说明模型有效。

3.6 炮制拐点分析

以饱和度S为因变量,以炮制时间为自变量,进行回归分析,得出回归模型为 $Y_{(S)} = 0.143 + 0.046X_{(\text{时间})} - 0.002X_{(\text{时间})}^2$, $R^2 = 0.966$,而且模型通过F检验 ($F = 126.531, P = 0.000 < 0.05$),说明模型有效。由动态变化分析可知,当炮制时间 ≥ 14 min时,白术由炒黄进入炒焦阶段,代入模型,即满足饱和度 $S \geq 0.395$ 时,可认为白术进入炒焦阶段,即白术-5号样品开始,才达到炒焦状态。以氧化值为因变量,以炮制时间为自变量,进行回归分析,得出回归模型为 $Y_{(\text{氧化值})} = 16.825 + 1.384X_{(\text{时间})}$, $R^2 = 0.882$,而且模型通过F检验 ($F = 74.660, P = 0.000 < 0.05$),说明模型有效。由动态变化分析可知,当炮制时间 ≥ 10 min时,白术由炒黄进入炒焦阶段,代入模型,即满足氧化值 ≥ 30.665 时,可认为白术进入炒焦阶段;当炮制时间 ≥ 18 min时,白术由炒焦进入炒炭阶段,代入模型,即满足氧化值 ≥ 41.737 时,可认为白术进入炒炭阶段;即白术-5号样品~白术-9号样品才达到炒焦状态,白术-10号样品~白术-11号样品才达到炒炭状态。以5-HMF含量为因变量,以炮制时间为自变量,进行回归分析,得出回归模型为 $Y_{(5\text{-HMF})} = -3.716 + 0.782X_{(\text{时间})}$, $R^2 = 0.821$,而且模型通过F检验 ($F = 45.826, P = 0.000 < 0.05$),说明模型有效。由动态变化分析可知,当炮制时间 ≥ 10 min时,白术由炒黄进入炒焦阶段,代入模型,即满足5-HMF含量 ≥ 4.104 时,可认为白术进入炒焦阶段;当炮制时间 ≥ 20 min时,白术由炒焦进入炒炭阶段,代入模型,即满足5-HMF含量 ≥ 11.924 时,可认为白术进入炒炭阶段;即白术-7号样品~白术-9号样品才达到炒焦状态,白术-10号样品~白术-11号样品才达到炒炭状态。

表3 相关性分析表

指标	色调H	饱和度S	亮度I	氧化值	5-HMF
色调H	1	-0.525	0.980**	-0.868**	-0.953**
饱和度S	-0.525	1	-0.658*	0.826**	0.290
亮度I	0.980**	-0.658*	1	-0.926**	-0.898**
氧化值	-0.868**	0.826**	-0.926**	1	0.729**
5-HMF	-0.953**	0.290	-0.898**	0.729**	1

注:*为在0.05水平(双侧)上显著相关;**为在0.01水平(双侧)上显著相关。

4 讨论

4.1 中药的加热炮制

中药炮制是一项我国独有的、具有传统特色的制

药技术,也是中医临床用药最显著的特色之一^[9]。中药经过加工炮制后发生了多种复杂的化学反应,如水解反应、分解反应、氧化反应等,随着这些化学反应的

发生而变化的物质基础,正是中药炮制前后外观、性味归经、功效主治发生改变的重要原因^[10]。将中药饮片置于室温环境中,饮片将在室温条件下发生缓慢的氧化过程,该氧化过程主要表现为饮片外部的物性指标发生缓慢改变,而内部的化学成分变化甚微,基本维持原有的状态。将中药饮片置于加热的炮制环境中,饮片将会发生快速的氧化过程,该氧化过程可以让饮片内部和外部的性质都发生改变,外部表现为饮片外观的“形、色、气、味、质”改变,内部表现为原有化学成分增加或减少或产生新的成分等。其实加热炮制的过程就是中药饮片不断吸收外部能量的过程,当所吸收的能量达到其内部各分子发生反应所需要的活化能时,饮片便会发生内部与外部的一系列变化,形成不同的中药炮制品。

4.2 白术炮制方法的选择

炒制为白术的主流炮制方法,生白术因含大量挥发油而燥性显著,炒制品可缓和其燥性,常见有焦白术、白术炭、麸炒白术、土炒白术等,其中仅麸炒白术被收录在《中华人民共和国药典》(2020年版)中,是临床常用且疗效明确的白术炮制品,而清炒白术只在华南地区使用较多^[11-13]。白术炒焦后醒脾作用增强,可用于脾湿有寒,炒炭后收敛止血作用增加,可用于慢性腹泻、久痢出血等^[14]。现代文献也多集中于麸炒白术,对清炒炮制过程中的炒黄、炒焦、炒炭品研究较少,本研究测定白术清炒过程中颜色值、氧化值、5-HMF含量的动态变化,可为白术清炒炮制品的研究提供参考。

4.3 颜色与5-HMF的相关性分析

颜色是中药质量评价的重要指标,也是最直观的外在特征,与中药内在成分密切相关^[15-16]。本实验选用HSI颜色模型,此模型用色调H、饱和度S、亮度I三参数描述颜色特征。由动态变化可知,随着炮制程度的加深,色调H与亮度I均呈现出下降的趋势,表明白术饮片在炮制过程中颜色逐渐变得暗淡与偏暖色调,饱和度S呈现出先升高再降低的变化趋势,并且当白术开始进入炒炭阶段时饱和度S开始降低,即当白术炮制品在进入炒炭的临界点时饱和度最大。5-羟甲基糠醛(5-HMF)是多数中药及其炮制品中存在的一个共有成分,具有抗炎、抗氧化、免疫调节等多种现代药理作用^[17],在中药应用过程中作为质量控制指标物具有重要意义^[18]。5-HMF主要来源于两个方面,一是由糖类成分在一定的温度、湿度、pH值等条件下发生脱水反应形成,二是由氨基化合物(蛋白质和氨基酸)和羰基化合物(还原糖类)发生Maillard反应生成^[19]。含多糖的中药在加热炮制过程中,可能发生

Maillard反应生成类黑精大分子、还原酮、还原醛等化合物^[20],其中包括5-HMF,但炮制须达到一定程度才能产生5-HMF,而且饮片的炮制程度越深,所测得的5-HMF含量越高。潘欢欢等^[21-22]研究发现,白术炒制过程中挥发性成分发生明显改变,炮制过程中增加的成分有14种,相对含量大于6.0%的成分有反式-2,4-庚二烯醛、5-HMF、石竹素等。因此探究颜色与5-HMF的相关性极具意义,分析发现5-HMF含量与色调H、亮度I均呈极显著负相关,进行逐步回归得到模型 $Y_{(5-HMF)} = 24.928 - 43.398X_{(H)}$, $R^2 = 0.908$,意味着H可以解释5-HMF含量的90.8%变化原因,即随着炮制程度的加深,白术饮片的外观颜色越偏向暖红或暖棕色调,越暗,而5-HMF含量越来越多,这与白术炮制品传统外观色泽判别标准和含量测定结果相符,但动态变化分析显示炮制达到一定程度,5-HMF含量也会出现略下降的趋势。

本实验立足于白术清炒法,研究其炮制过程中其颜色值、氧化值、5-HMF含量的动态变化,分析白术炮制过程中颜色、氧化值、5-HMF含量的相关性及其拐点,可为白术清炒过程中颜色变化及炮制程度的判断提供参考依据。

【参考文献】

- [1] 张建遂,窦德强,王冰,等. 白术的本草考证[J]. 时珍国医国药, 2013,24(9):2222-2224.
- [2] 邵志愿,李露,吴德玲,等. 白术本草考证[J]. 现代中药研究与实践,2019,33(2):81-86.
- [3] 顾思浩,孔维崧,张彤,等. 白术的化学成分与药理作用及复方临床应用进展[J]. 中华中医药学刊,2020,38(1):69-73.
- [4] 左军,张金龙,胡晓阳. 白术化学成分及现代药理作用研究进展[J]. 辽宁中医药大学学报,2021,23(10):6-9.
- [5] 鲁放,翟昌明,屈会化,等. 白术古今炮制法小考[J]. 中华中医药杂志,2022,37(2):963-967.
- [6] 周爱珍,程斌,王和平. 炮制对白术的化学成分及药理作用的影响[J]. 中医药导报,2010,16(2):79-80.
- [7] 周娜,李卫林. 食品中油脂提取及过氧化值测定影响因素的探讨[J]. 海峡预防医学杂志,2016,22(1):55-58.
- [8] 聂荣荣. 油脂过氧化值测定方法优化研究[J]. 广东化工,2017,44(2):113-117,138.
- [9] 马彦江,位玉蝶,刘瑞霞,等. 浅析中药临方炮制在健康中国建设中的作用[J]. 中国中医药现代远程教育,2022,20(23):195-197.
- [10] 蔡宝昌,秦昆明,吴皓,等. 中药炮制过程化学机理研究[J]. 化学进展,2012,24(4):637-649.
- [11] 陈天朝,王娇,马彦江,等. 基于清炒法对白术物性及主成分含量变化的研究[J]. 中医研究,2019,32(6):58-63.
- [12] 张维霞,苏萍,赵爱军. 白术的炮制方法及其药理作用研究进展[J]. 中医药导报,2022,28(5):110-115.
- [13] 黄艳萍,袁萍. 焦白术RP-HPLC指纹图谱研究[J]. 中药材,

- 2010,33(10):1554-1556.
- [14] 王梦伟,王梦珂,李蒙恩,等. 基于AHP-CRITIC法的清炒白术物性参数与有效成分相关性研究[J/OL]. 中华中医药学刊:1-28 (2023-03-13) [2023-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.r.20230310.1734.018.html>.
- [15] 徐曼菲,吴志生,刘晓娜,等. 从辨色论质谈中药质量评价方法[J]. 中国中药杂志,2016,41(2):177-181.
- [16] 张桂梅,岳珠珠,王慧楠,等. 基于AHP-熵权法结合色差原理评价不同辅料大米对米炒党参饮片的影响[J]. 中草药,2021,52(24):7447-7454.
- [17] 姜哲轶,吴婷月,沈传斌,等. 5-羟甲基糠醛的药理作用研究进展[J]. 新乡医学院学报,2022,39(1):92-95.
- [18] 徐芳辉,胡志成,易欣宜,等. 5-羟甲基糠醛在中药质量标准中的应用现状[J]. 中国医药导报,2017,14(15):47-50.
- [19] 赵颖,张璐欣,李越. 5-羟甲基糠醛的研究概况[J]. 医学综述,2016,22(17):3431-3434.
- [20] 王凡一,高如汐,郑威,等. HS-GC-MS结合保留指数法探讨白术麸炒过程中挥发性化学成分的变化规律[J]. 中南药学,2022,20(12):2877-2886.
- [21] 陈婷,蔡志荔,程颖,等. 不同炮制方法对白术化学成分影响的研究[J]. 广东化工,2022,49(14):148-149,160.
- [22] 潘欢欢,刘飞,陈鸿平,等. 白术麸炒过程中辅料蜜麸的挥发性成分动态变化研究[J]. 药物分析杂志,2017,37(3):386-392.
- (收稿日期:2023-06-02)

Correlation Analysis between Color Change and 5-HMF and Study on Processing Inflection Point in the Plain Stir-Frying Process of White Atractylodes

WANG Hongxian¹, SHI Ke², WANG Chunyan², LI Yuanhong¹, KANG Bingya¹, CHEN Tianchao^{1,2✉}

(1. The First Affiliated Hospital of Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450000, China;

2. Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450008, China)

【Abstract】 Objective: To explore correlation analysis between color change and 5-HMF and study on processing inflection point in the plain stir-frying process of white atractylodes. Methods: Plain stir-frying method was used to process white atractylodes, and thin-layer scanner and MATLAB software were used to evaluate the color values of raw and processed white atractylodes. 5-HMF content was determined by HPLC, SPSS21.0 software was applied to analyze the correlation between color and 5-HMF content, and regression model was established. Results: Correlation analysis showed that hue H was positively correlated with brightness I, while negatively correlated with oxidation value and 5-HMF content. There was a significant negative correlation between saturation S and brightness I, while significant positive correlation between saturation S and oxidation number. The brightness I was negatively correlated with oxidation value and 5-HMF content. The oxidation number was positively correlated with the content of 5-HMF. The regression model of 5-HMF content and color value was $Y_{(5-HMF)} = 24.928 - 43.398X(H)$, $R^2 = 0.908$, with high fit degree, and the model is effective. Conclusion: The color of white atractylodes was significantly correlated with the content of 5-HMF in the plain stir-frying process, the content of 5-HMF can be predicted according to its color change during the processing, and the processing inflection point can be analyzed according to the dynamic changes of each index. Therefore, this study provides some reference basis for judging the processing degree of white atractylodes in the process of plain stir-frying.

【Key words】 White atractylodes; Plain stir-frying method; Color; 5-HMF; Correlation