

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240116001

基于高光谱成像的主成分分析和波谱角分类 技术的天麻粉质量标志物及相关成分 可视化快速检测

胡爽¹, 王海瑞¹, 赵春琦², 刘婧影², 张巍^{1*}, 白雪媛^{1*}

(1. 长春中医药大学东北亚中医药研究院, 长春 130021; 2. 长春中医药大学药学院, 长春 130021)

摘要: **目的** 利用高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)技术, 通过一种原位质量标志物评估方法, 与高效液相色谱含量测定相结合, 建立预测模型对不同来源的天麻粉进行可视化评价。**方法** 采用高效液相色谱法测定不同产地、不同晾干方式天麻粉中6种质量标志物含量并作为金标准; 苯酚-硫酸法测定天麻多糖含量、水分测定仪测定含水量, 两者作为辅助评价指标。HSI选用可见近红外(visible near-infrared, VNIR)和短波红外(short wave infrared, SWIR)双波段光谱进行分析比较。**结果** 以鲜品切块晾干方式制备的天麻粉的质量标志物对羟基苯甲醇、多糖和水分含量均增加, 同时天麻素和巴利森苷含量显著减少甚至消失。根据高光谱图像主成分分析(principal component analysis, PCA)预处理特征, 基于波谱角(spectral angle mapper, SAM)的监督分类算法对不同产地和加工方式制备的天麻粉进行了原位、无损分类, 其建立的线性回归模型实现了质量标志物含量的反演预测。**结论** 通过高效液相色谱含量测定的准确性和高光谱原位预测的无损性相结合的方式进行现场可视化评价和预测, 可以为不同产地、不同加工方式的天麻粉质量标志物快速检测提供技术参考。

关键词: 天麻粉; 产地; 加工; 高光谱; 质量标志物

Visual rapid detection of quality markers and related components of *Gastrodia elata* powder based on principal component analysis and spectral angle mapper classification technology with hyperspectral imaging

HU Shuang¹, WANG Hai-Rui¹, ZHAO Chun-Qi², LIU Jing-Ying²,
ZHANG Wei^{1*}, BAI Xue-Yuan^{1*}

(1. Northeast Asia Institute of Traditional Chinese Medicine, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun 130021, China; 2. School of Pharmacy, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun 130021, China)

ABSTRACT: Objective To establish a predictive model for visual evaluation of *Gastrodia elata* powder from

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600903-02)、国家级大学生创新创业训练计划项目(202210199015X、202210199018X)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1600903-02), and the National College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program (202210199015X, 202210199018X)

*通信作者: 张巍, 博士, 副研究员, 主要研究方向为中药分析新方法与新技术研究。E-mail: 545529755@qq.com

白雪媛, 硕士, 研究员, 主要研究方向为中药传统功效生物学机制研究及产品开发。E-mail: 23165956@qq.com

*Corresponding author: ZHANG Wei, Ph.D, Associate Professor, Northeast Asia Institute of Traditional Chinese Medicine, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun 130021, China. E-mail: 545529755@qq.com

BAI Xue-Yuan, Master, Professor, Northeast Asia Institute of Traditional Chinese Medicine, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun 130021, China. E-mail: 23165956@qq.com

different sources by an in-situ quality marker evaluation method utilizes hyperspectral imaging technology (HSI) combined with high performance liquid chromatography content determination. **Methods** High performance liquid chromatography was used to determine the content of 6 kinds of quality markers in Tianma powder from different regions and different drying methods, and used as the gold standard; the phenol sulfuric acid method was used to determine the content of polysaccharides in *Gastrodia elata*, and the moisture content was determined by a moisture meter, both of which were used as auxiliary evaluation indicators. HSI uses visible near infrared (VNIR) and short wave infrared (SWIR) dual band spectra for analysis and comparison. **Results** The quality markers of *Gastrodia elata* powder prepared by cutting fresh products and drying them increased the content of hydroxybenzyl alcohol, polysaccharides, and water, while the content of *Gastrodia elata* extract and Balisenside significantly decreased or even disappeared. Based on the preprocessed features of principal component analysis (PCA) in hyperspectral images, a supervised classification algorithm based on spectral angle mapper (SAM) was used to classify *Gastrodia elata* powder prepared from different regions and processing methods in situ and non-destructive manner. The linear regression model established by this algorithm achieved the inversion prediction of quality marker content. **Conclusion** By combining the accuracy of content determination by high performance liquid chromatography with the non-destructive in-situ prediction by hyperspectral analysis, on-site visualization evaluation and prediction can be carried out, providing technical reference for the rapid detection of quality markers of *Gastrodia elata* powder from different regions and processing methods.

KEY WORDS: *Gastrodia elata* powder; origin; processing; hyperspectral; quality markers

0 引言

天麻(*Gastrodia elata* Bl.)为兰科植物天麻的干燥块茎,又名赤箭、定风草、合离草以及神草等,是我国的滋补名药,具有两千多年的药用历史^[1]。我国已于 2020 年 1 月 8 日将天麻列为既是食品又是中药材的食药同源物质^[2]。天麻常在立冬后至次年清明前采挖,主产于云南、贵州、四川及河南等省,具有息风止痉、平抑肝阳、祛风通络、神经保护、降血压和抗惊厥等药效,含天麻素、对羟基苯甲醇、多糖以及微量元素等化学成分^[3]。天麻粉作为以天麻为原料配制而成的粉末,可以充当直接食用的保健品,目前已经出现在人们的日常生活中。随着天麻粉需求量的提升,有关天麻粉质量控制的问题需要解决,以此确保天麻粉流入市场的价值。近年来,LIU 等^[4]提出中药质量标志物的概念,它是依据中药及中药复方指标性成分的质量评价来定义,既可以作为反映中药安全和有效的标志物质进行质量控制,也可作为定性定量分析的指标性成分。目前,多指标综合质量评价模式正逐渐成为中药质量评价的新趋势^[5]。有关天麻质量标志物的确认及评价已有相关报道^[5-7],而与高光谱成像技术相结合的可视化质量评价却鲜有报道。因此,研究 HSI 应用于天麻质量标志物的可视化评价具有重要的意义。

HSI 作为一种新兴的原位检测方法,可以综合表征样品的图像和光谱信息,这些信息包含着被测物品的各种理化信息和所在空间的信息^[8]。传统意义上的化学检测技术都存在主观性强、破坏样品、操作复杂及成本高的不足,HSI 作为一种新型的检测和鉴定方法,已在中药鉴别、无损检测、含量测定等方面有了研究和应用^[9-10],该方法能够结合样品的光谱数据和图像纹理信息,提供化学和空间信息,有效地刻画天麻粉的目标特征^[11-12],并实现对天麻

粉质量的有效控制。HSI 同时记录天麻粉末的光谱和空间信息,这是天麻粉末检测的重要特征。与其他不能提供空间信息的光谱技术相比,它在天麻质量标志物的含量评价方面具有巨大的潜力。

本研究采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)所测的 6 种活性成分作为质量标志物,以水分和多糖作为辅助评价指标,具体量化不同产地、不同加工方式的天麻粉质量标志物及相关成分含量信息^[13],继而联合原位高光谱成像技术。在可见近红外(visible near-infrared, VNIR) (385~1009 nm)和短波红外(short wave infrared, SWIR) (896~1692 nm)两个不同的波段范围内,主成分分析(principal component analysis, PCA)可作为光谱特征增强方式进行初步评价,根据 PCA 评分特征建立基于光谱角制图波谱角(spectral angle mapper, SAM)的监督分类方法,依据监督分类结果建立线性回归拟合预测模型,最终绘制天麻粉质量标志物预测反演图像,原位、无损识别不同来源天麻粉产品。本研究方法不仅为天麻粉质量控制提供参考模式,而且也食药同源物质的现场快速检测提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

天麻样品采自云南昭通、贵州大方、湖北宜昌、甘肃陇南、四川广元、河南洛阳共计 6 个产地,经过长春中医药大学王哲副研究员鉴定均为兰科植物天麻的块茎。

乙腈(色谱纯,美国 Fisher Scientific International 公司);磷酸(色谱纯,上海麦克林生化科技股份有限公司);无水乙醇(分析纯,天津新通精细化工有限公司);浓硫酸(分析纯,烟台市双双化工有限公司);苯酚(分析纯,天津市天骅

制药有限公司); D-无水葡萄糖对照品(分析纯, 中国食品药品检定研究院); 天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 A (parishin A, PA)、巴利森苷 B (parishin B, PB)、巴利森苷 C (parishin C, PC)、巴利森苷 E (parishin E, PE)标准品(纯度 \geq 98%, 乐美天医药/德斯特生物)。

高光谱成像分析仪[该系统主要由光栅分光器、电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)、IMPERX 1920 \times 1080 可见近红外相机(镜头: Kowa 35 mm 焦距), 国惠 640 \times 512 短波红外相机(镜头: AZURE 50 mm 焦距)、卤钨灯光源、电动平台和计算机组成, 中科院长春光机所]; M5960-64000 高效液相色谱仪、ZORBAX Eclipse Plus C₁₈ 色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μ m)(美国 Agilent 公司); UV-3600i Plus 紫外可见近红外分光光度计(日本岛津制作所); PTY-523/623 电子天平(精度 0.001 g, 华志电子科技有限公司); SB25-12DTD 超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司); FSJ-A03D1 粉碎机(小熊电器股份有限公司); WP-UP-YJ-40 微量有机除热源型超纯水机(四川沃特水设备有限公司); SZ-GY70 冠亚水分检测仪(深圳市冠亚技术科技有限公司); C21-SX810 电磁炉(杭州九阳生活电器有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 天麻的处理加工方法

将 6 个产地的新鲜天麻洗净后分为两组, A 组将新鲜天麻切成大小均匀的块状; B 组保留完整新鲜天麻块茎, 放入烘箱中, 温度设置为 35 $^{\circ}$ C, 每隔 2 h 记录一次天麻的重量, 直至前后两次记录的重量相差小于 1 g 即为晾干。两组天麻晾干后分别进行粉碎处理, 制作天麻粉, 以此模拟新鲜天麻采收后制作天麻粉过程。天麻粉样品的编号信息见表 1。

表 1 天麻样品
Table 1 *Gastrodia elata* samples

产地	切块晾干(A组)	整块晾干(B组)
云南昭通	A1	B1
贵州大方	A2	B2
湖北宜昌	A3	B3
甘肃陇南	A4	B4
四川广元	A5	B5
河南洛阳	A6	B6

1.2.2 水分测定

将晾干后的天麻粉碎, 过 80 目筛, 精密称定 2 g 天麻粉末于水分测试仪, 温度设置为 105 $^{\circ}$ C, 记录含水量的数值, 每个样品重复测定 3 次, 取平均值。

1.2.3 多糖含量测定

(1)标准曲线的绘制

精确称取无水葡萄糖粉末 40 mg, 加纯净水溶解并定容至 100 mL 容量瓶中, 配制成 0.4 mg/mL 的对照品溶液。分别量取葡萄糖对照品溶液 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL 置于试管中, 随后加水至 2.0 mL, 再加 1 mL 5%的苯酚溶液及 5 mL 的浓硫酸, 静置 10 min, 沸水煮 15 min, 放冷后于 490 nm 波长处测吸光度值。

(2)天麻粉预处理

天麻粉过 60 目筛, 取过筛后的天麻粉定量, 按液料比 1:30 的比例加入 80%的乙醇, 超声提取 30 min, 除去天麻粉末中的单糖、低聚糖、脂类、色素等成分, 抽滤, 粉末自然

晾干, 用研钵再次粉碎, 过 60 目筛, 制成天麻粉末备用^[14]。

(3)样品溶液制备及吸光度测定

称取 1 g 预处理之后的天麻粉于广口锥形瓶中, 加入 25 mL 纯净水, 35 $^{\circ}$ C下超声提取 20 min, 随后定容至 100 mL 并过滤, 取滤液 10 mL, 加水定容至 100 mL 容量瓶中, 放入 4 $^{\circ}$ C的冰箱中备用。取样品溶液 2 mL 置于试管中, 按照 1.2.3 (1)同样的方法, 测吸光度值, 重复 3 次取平均值。

1.2.4 天麻粉质量标志物的 HPLC 含量测定

(1)色谱条件

色谱柱: ZORBAX Eclipse Plus C₁₈ (250 mm \times 4.6 mm, 5 μ m); 流动相: 乙腈(A相)-0.05%磷酸水溶液(B相); 流速为 0.8 mL/min; 柱温 30 $^{\circ}$ C; 进样体积 5 μ L; 检测波长: 220 nm。梯度洗脱: 0~10 min, 3%~10% A相; 10~15 min, 10%~12% A相; 15~25 min, 12%~18% A相; 25~40 min, 18% A相; 40~42 min, 18%~95% A相。

(2)标准品溶液配制

精密称取对照品, 将体积比为 3:97 的乙腈-水作为溶剂分别配制成 0.24 mg/mL 的天麻素、0.501 mg/mL 的对羟基苯甲醇、0.2 mg/mL 的 PA、0.2 mg/mL 的 PB、0.25 mg/mL 的 PC、0.21 mg/mL 的 PE 的对照品溶液。分别量取 3、2、4、3、3、3、3 mL 的对照品溶液置于 20 mL 容量瓶中, 用乙腈-水(3:97)定容至刻度, 摇匀, 配制成混合标准溶液。

(3)供试品溶液配制

天麻粉过三号筛, 精密称取 2 g 天麻粉放入锥形瓶中, 加入 50%乙醇 50 mL, 并称定重量, 超声提取 30 min (120 W, 40 kHz), 放冷后再次称定重量, 用 50%的乙醇补足减失的重量, 过滤^[15]。准确量取续滤液 10 mL 放入蒸发皿中, 浓缩至近干, 残渣加乙腈-水(3:97)的混合溶液溶解, 转移至 25 mL 容量瓶中定容, 0.45 μ m 微孔滤膜过滤, 备用。

(4)样品测定

根据上述色谱条件对天麻粉样品进行测定, 记录峰面积, 按内标法计算样品中各成分的含量。

(5)方法学考察

线性关系考察: 分别取混合对照品溶液 2 mL 加入 6 个试管中, 依次加入乙腈-水(3:97) 0、2、6、8、10、14 mL 制成不同稀释倍数的混合对照品溶液, 按照 1.2.4 (1)的色谱条件, 注入高效液相色谱仪中进行分析, 记录峰面积, 以 6 种对照品的浓度作为横坐标, 对应的峰面积作为纵坐标绘制标准曲线; 精密度实验: 精密吸取混合标准溶液, 按 1.2.4 (1)的条件注入色谱仪中, 连续进样 6 次, 分别计算天麻素等 6 种成分峰面积的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)值; 重复性实验: 取 B1 天麻粉末共 6 份, 按 1.2.4 (3)的方法, 制备 6 份供试品溶液进行测定, 记录天麻素等 6 种成分峰面积并且计算各成分的 RSD 值; 稳定性实验: 取编号为 B1 的天麻粉末 6 份, 制备成样品溶液后, 分别于 0、3、6、9、12、24 h 后按照 1.2.4 (1)的色谱条件注入液相中, 记录天麻素等 6 种成分的峰面积并计算各成分的 RSD 值; 加样回收率实验: 精密称取已知 6 种成分含量的 B1 样品粉末 0.5 g, 共 6 份, 置于具塞锥形瓶中, 精密加入已知质量的 6 种对照品, 制成加标样品。按 1.2.4 (3)的方法制备样品溶液, 再按 1.2.4 (1)的色谱条件注入色谱仪中, 记录天麻素等 6 种成分峰面积并计算 RSD 值。

1.2.5 高光谱成像分析

(1) 高光谱数据的采集

在光谱采集过程中,室内环境温度保持在 25°C 左右。取 A、B 两组天麻粉,过 80 目筛,分别取 10 g 天麻粉置于白纸上,压平,进行高光谱数据采集。光谱监视波段 675.87 nm,积分时间 5 ms,电机转速 20 mm/s,电机积分时间 3 ms,帧频 20 Hz,16 步采集一幅图像。一组 6 个样品,样品之间间隔 2.5 cm,测定速度 < 1 min。每个样品拍摄 3 次,计算其平均光谱作为原始光谱数据。

(2) 反射率校正

高光谱图像质量与光源、CCD 暗电流以及高光谱成像系统物理结构差异等因素相关^[16]。因此,在获取样品的高光谱数据后,需要进行校正才能得到样品的反射率^[17]。采用 ENVI5.3 软件进行波段运算,利用原始图像(R_{raw}) DN 值、白板校正图像(R_{white}) DN 值及黑板校正图像(R_{dark}) DN 值获得相对反射率(R_{ref})数据,校正公式如(1)所示。

$$R_{\text{ref}} = \frac{(R_{\text{raw}} - R_{\text{dark}})}{(R_{\text{white}} - R_{\text{dark}})} \times 100\% \quad (1)$$

(3) VNIR 和 SWIR 双波段高光谱数据采集及平滑处理

选择各天麻粉图像中心矩形区域作为高光谱的感兴趣区域(region of interest, ROI),提取 VNIR 和 SWIR 高光谱数据。因为在原始光谱中不仅包含有天麻粉的光谱信息,还涉及到背景和噪声的信息干扰,所以为消除背景、噪声以及天麻粉不同粒径大小所造成的影响,对原始光谱进行平滑处理操作以便后续分析^[11]。

(4) 主成分分析

利用 ENVI5.3 软件对双波段天麻粉高光谱图像进行 PCA,即以降维的方式对高光谱图像数据进行数据转换。PCA 利用原始数据协方差矩阵的特征值计算各个主成分的贡献率^[8],根据主要成分贡献率的大小在图像上用不同颜色标记并提取特征,PCA 可以用于样本的定性识别和聚类分析。本研究对天麻粉的高光谱图像进行了逐像素和逐对象的主成分分析^[18],显著减少了数据量,具有较高解释率的前几个主成分基本包含了大多数的原始变量信息,这将有助于原始高维矩阵的完整表示。

(5) 基于光谱角制图的监督分类

在 PCA 天麻粉特征提取的基础上,可以进行有监督的光谱分类^[19],更好地观察不同样品间的光谱差异。监督分类是遥感图像分类的一种,即用被确认类别的样本像元去识别其他未知类别像元的过程。在此分类中,分析者在图像上对每一类别选取一定数量的训练区,计算机计算每种训练样区的统计或其他信息,然后依次将每个像元去跟训练样本做比较,按照不同规则将其划分到和其最相似的样本类。SAM 属于监督分类方法中的分类器,它可以通过比较待分类像元与已知光谱的角度来确定像元所属的类别,区分出不同天麻粉末的细微差别。

(6) 分类性能的评估

分类结果可以直观反映模型的精度,但在分类样本不平衡的情况下,单以分类图像评价模型优劣是不全面的。因此,本研究建立分类模型并训练后,基于分类结果结合混淆矩阵(confusion matrix)对模型性能进行评价。在分类问题中,混淆矩阵是一种通过矩阵描述样本数据的真实

类别属性和预测结果关系的可视化评价标准。混淆矩阵的行为标签中,列为预测标签,行为真实标签,对角线单元格为分类的准确率,最右侧为模型对天麻粉判别的灵敏度,最下面一行为模型对每个天麻粉判别的特异性,灵敏度和特异性均是越大越优^[20]。

(7) 特征波段的选取

由于采集的大量光谱数据变量之间存在共线性、冗余性,甚至噪声等各种干扰,导致光谱数据回归建模的计算时间较长。因此,本研究采用最高相关系数(highest correlation coefficient, HCC)的方法来选择光谱数据的特征波段,它是一种常用的数据分析方法,用来评估两个变量之间的关系强度和方向。相关系数的取值范围是-1 到 1 之间,-1 表示完全负相关,1 表示完全正相关,0 表示不相关,通过计算两个变量之间的相关系数来权衡相关性,并利用特征变量建立回归模型。首先,基于高光谱数据构建图形的特征点,计算各波段比值与标志物总含量实测值之间的相关系数。其次,选择两者之间相关性最大的波段作为特征波段。最后,建立天麻粉末的关键特征带与含量实测值之间的回归模型。少量的变量可以减少冗余度和计算量,预计可以获得代表大部分有用信息的更少频带^[21]。

(8) 回归拟合模型及模型的精度验证

线性回归模型是一个最基本的传统机器学习算法,也是确定变量之间相关关系的一种数学回归模型。监督分类预测的是一个类别,而回归拟合预测的是一个数值,它们均属于有监督的学习。此模型通过 PCA 将收集到的训练数据简化到低维空间,然后在投影和输出变量之间构建线性回归,表示原始数据与输出变量之间的数据关系。根据监督分类的预测结果,建立天麻粉质量预测标志物的总含量及波段比值之间的线性关系,选取与含量实测值相关性最高的波段比值为自变量建立模型,计算实测值与估算值之间的预测系数(R^2)、均方根误差(root mean square error, RMSE)。这些都用来表示预测模型的效果, R^2 的值越高,说明模型的精度越高。相反, RMSE 的值越低,说明模型越可靠。

(9) 天麻粉质量标志物的含量反演

识别并提取天麻粉 ROI 的平均光谱后,将提取到的所有光谱数据排列在一个矩阵中,矩阵的行表示样本的数量,列表示变量的数量,使用伪彩色的图像处理方法生成一个分布图。在分布图中,具有相似光谱特征的像素表示相同的预测值,在图像中以相似的颜色显示,不同颜色则表示不同比例的化学成分^[22]。与传统的点检测光谱学和机器视觉相比,高光谱成像的巨大优势是可以结合额外的空间信息,建立对象级或像素级模型来可视化物理和化学特征的分布,最终以预测值形成预测图^[23]。根据质量标志物总含量预测值所生成的反演分布图像,可以更加直观地原位性描述天麻粉的质量标志物含量。

2 结果与分析

2.1 天麻粉含水量

经过水分测试仪测定的不同产地、不同加工方式的天麻粉含水量见表 2。结果表明:切块晾干天麻粉含水量明显高于整块晾干天麻粉($P < 0.05$),甘肃陇南地区的含水量

普遍较高,且两种加工方式相差不大,而河南洛阳地区两种加工方式的含水量相差最大。湖北宜昌地区的含水量相较于其他产地均比较低。鲜天麻经过切块的加工方式后,虽增大表面积,但含水量相较于整块晾干的更高,推测是因为天麻在增大暴露面积的同时,会吸收空气中的水分,所以导致含水量的增加。不同产地天麻因大小、吸水性存在的差异,所以最终导致含水量不同。

表 2 天麻粉含水量(%)
Table 2 Water content of *Gastrodia elata* powder (%)

序号	产地	切块晾干含量	整块晾干含量	含量差
1	云南昭通	11.3	7.3	4.0
2	贵州大方	12.8	7.4	5.4
3	湖北宜昌	10.9	5.6	5.3
4	甘肃陇南	12.2	9.9	2.3
5	四川广元	12.0	7.1	4.9
6	河南洛阳	12.4	6.2	6.2

2.2 天麻粉多糖含量

2.2.1 多糖含量标准曲线

取各葡萄糖对照品溶液于 490 nm 处检测其吸光度值,以浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标,绘制标准曲线,标准曲线方程 $Y=16.934X-0.0296$ ($r=0.9995$),表明在 0~0.06 mg/mL 的浓度范围内线性关系良好,此方程可以用于天麻多糖的含量测定。

2.2.2 多糖含量实测值

根据测量的吸光度值代入标准曲线,不同天麻粉的多糖平均含量见表 3。结果表明:所有产地的天麻经过切块加工后多糖含量明显增加($P<0.05$)。其中湖北宜昌产地的两种加工方式多糖含量相差最大,切块晾干为 36.5%,而整块晾干则为 15.5%。其次是四川广元,切块晾干的多糖含量高达 41.8%,而整块晾干的多糖含量则为 21.9%。云南昭通和贵州大方两种含量差异不大,其次是甘肃陇南,前后相差 6.1%。推测可能是因为天麻断面暴露在空气当中时,可以使多糖分解的有关酶被氧化失活导致多糖含量增加。

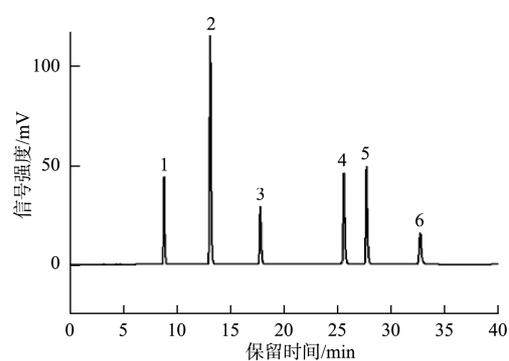
表 3 天麻粉多糖含量(%)
Table 3 Polysaccharide content of *Gastrodia elata* powder (%)

序号	产地	切块晾干含量	整块晾干含量	含量差
1	云南昭通	21.7	17.9	3.8
2	贵州大方	26.9	25.5	1.4
3	湖北宜昌	36.5	15.5	21.0
4	甘肃陇南	29.2	23.1	6.1
5	四川广元	41.8	21.9	19.9
6	河南洛阳	20.2	8.6	11.6

2.3 天麻粉质量标志物含量

2.3.1 混合对照品色谱及不同加工方式质量标志物 HPLC 含量比较

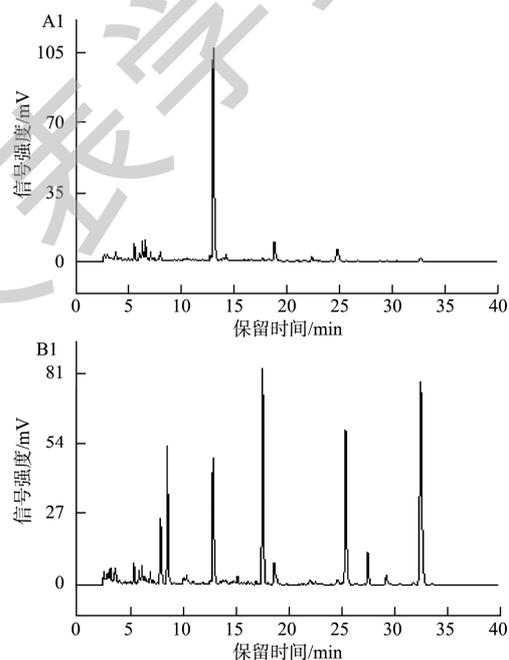
6 种质量标准物的混合对照品出峰顺序如图 1 所示。以云南昭通天麻粉 HPLC 色谱图为例,切块晾干(A1)中对羟基苯甲醇含量明显高于整块晾干(B1),其他 5 种质量标志物的含量很少,甚至降为 0(图 2)。其余 5 个产地的不同加工方式也表现出了相同的变化趋势,具体含量如表 4 所示。



注: 1: 天麻素; 2: 对羟基苯甲醇; 3: 巴利森苷 E; 4: 巴利森苷 B; 5: 巴利森苷 C; 6: 巴利森苷 A。

图 1 混合对照品色谱图

Fig.1 Chromatogram of mixed reference substance



注: A1 为切块晾干, B1 为整块晾干。

图 2 云南昭通不同加工方式质量标志物含量色谱图

Fig.2 Chromatogram of quality indicator content for different processing methods in Zhaotong, Yunnan

2.3.2 天麻粉质量标志物 HPLC 含量值测定结果

2020 年版《中国药典》规定,天麻中天麻素和对羟基苯甲醇总含量不得少于 0.25%, 本研究中天麻粉样品两种成分的总含量均符合药典规定^[6]。由表 4 可知,相较于整块晾干的加工方式,在所有产地的切块加工方式中,质量标志物总含量均较低,天麻素和 PC 含量均为 0,而对羟基苯甲醇的含量均较高。但在整块加工方式中,6 种质量标志物的含量分布比较完整,天麻素和巴利森苷(A、B、C、E)的含量均较高,而对羟基苯甲醇的含量则相对较低,这一现象与切块晾干的加工方式形成了鲜明的对比(图 3)。推测鲜天麻中可能含有降解天麻素和苷类成分的酶^[24],鲜品断面暴露在空气中,被空气氧化激活,催化天麻素以及巴利森苷转化为

对羟基苯甲醇, 导致对羟基苯甲醇的含量增加, 而其天麻素和 PC 含量减少甚至为 0。天麻素、巴利森苷及对羟基苯甲醇的转换关系如图 4 所示。可以发现, PA 在转化为巴利森苷 B/C/E 以及天麻素之后, 巴利森苷 B/C/E 会转化为柠檬酸以及天麻素, 天麻素最终转化为对羟基苯甲醇。

2.3.3 方法学考察结果

(1) 线性关系

以系列标准溶液的质量浓度作为横坐标(X, mg/mL), 峰面积作为纵坐标(Y)绘制标准曲线, 结果如表 5 所示。6 种质量标志物在相应范围内的线性关系良好($r \geq 0.9998$)。

(2) 精密度、重复性、稳定性及加样回收率实验

通过记录各组分峰面积, 计算 RSD 值及加样回收率, 结果见表 6。结果显示 RSD 值均小于 2%, 表明供试品溶液 24 h 内稳定, 且仪器精密度及该方法的重复性、准确度良好。

2.4 高光谱数据的图像识别和回归拟合

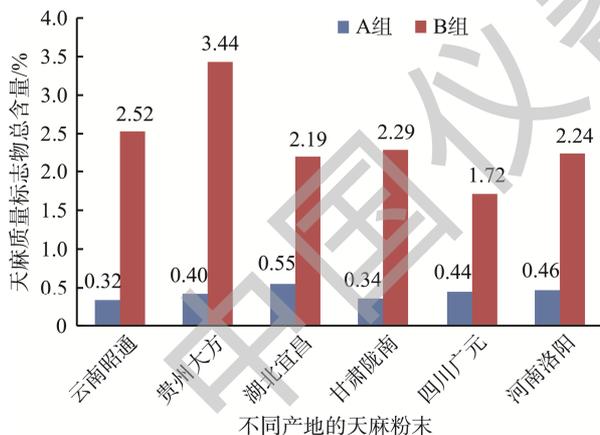
2.4.1 基础光谱数据

图 5 显示了在 VNIR 和 SWIR 范围内经平滑法预处理后的光谱。平滑后的光谱显示所有样品的曲线形状非常相似, 只是光谱区域的反射率强度不同^[25], 光谱曲线的噪声水平和形状干扰明显减弱, 消除了由于颗粒分布不均匀、颗粒大小不同而引起的散射以及光路变化对光谱数据的影响, 这样构建的光谱曲线相对准确。不同来源的天麻粉很难通过其外观特征来区分, 但比较反射率的强度显示出一定差异^[16]。如图 5a 所示, 同一产地在 600~700 nm 的范围内, 出现了明显的波峰, 切块晾干总比整块晾干的反射率低, 甘肃陇南产地切块晾干(A4)的反射率强度最低, 云南昭通产地整块晾干(B1)的反射率强度最高。通过与含量数据比较发现, 天麻粉质量标志物含量较高的整块样品具有较高的反射率强度, 而水分和天麻多糖含量高的切块样品均具有较低的反射率强度。

表 4 天麻粉中 6 种质量标志物 HPLC 含量测定结果(%)

Table 4 HPLC content determination results of 6 kinds of quality markers in *Gastrodia elata* powder (%)

序号	样品	天麻素	对羟基苯甲醇	PA	PB	PC	PE	总含量
1	云南昭通(切块)	0	0.29	0.03	0	0	0	0.32
2	贵州大方(切块)	0	0.35	0.03	0	0	0.01	0.39
3	湖北宜昌(切块)	0	0.44	0.07	0.01	0	0.03	0.55
4	甘肃陇南(切块)	0	0.32	0	0	0	0.02	0.34
5	四川广元(切块)	0	0.44	0	0	0	0	0.44
6	河南洛阳(切块)	0	0.39	0.05	0	0	0.02	0.46
7	云南昭通(整块)	0.27	0.14	1.25	0.25	0.06	0.56	2.53
8	贵州大方(整块)	0.56	0.06	1.90	0.31	0.12	0.49	3.44
9	湖北宜昌(整块)	0.26	0.04	1.05	0.21	0.06	0.56	2.18
10	甘肃陇南(整块)	0.22	0.05	1.19	0.27	0.07	0.48	2.28
11	四川广元(整块)	0.29	0.05	0.74	0.20	0.06	0.38	1.72
12	河南洛阳(整块)	0.18	0.05	1.21	0.25	0.06	0.50	2.25



注: A 组: 切块加工; B 组: 整块加工。

图 3 天麻粉质量标志物总含量不同加工方式对比

Fig.3 Comparison of total content of quality markers in *Gastrodia elata* powder using different processing methods

图 5b 中位于 1200 nm 和 1450 nm 左右有两个明显的波谷, 但 1200 nm 处的反射率差异显著($P < 0.05$), 可以将各样品区分开。同样, 在 1100~1150 之间和 1300 nm 左右有两个明显的波峰, 也可以进行区分, 波峰和波谷与构成分子中的 C-H、N-H 和 O-H 基团振动组合有关^[18]。1450 nm 的吸收可能与 O-H 在水中的第一泛音有关, 而 1300 nm 可能与天麻素、对羟基苯甲醇等碳水化合物化合物的 C-H 组合第一

泛音有关, 1200 nm 和 1100~1150 nm 的波峰可能与多糖和单糖的第二泛音有关^[26], 其他光谱范围内的波峰变化差异不明显。VNIR 和 SWIR 范围内的光谱多样性是由天麻粉样品中的化学物质含量(如水分、多糖以及 6 种质量标志物)和物理因素(如均匀性、密度)差异所致。

2.4.2 PCA 特征强化

不同来源天麻粉具有不同的化学组成, 根据 PCA 预处理后不同主成分合成的伪彩图可用于初步辨别天麻粉, 不同合成图像效果如图 6 所示。通过比较发现, 只有前 3 个主成分(PC1~PC3)的图像效果最好, 基本代表了天麻粉的全部信息, 其余主成分信噪比差, 干扰现象严重, 不具有解释数据的可行性。12 份天麻粉样品的 PCA 强化图像(图 6a 和 b)之间几乎没有重叠, 彼此可以进行颜色特征区分^[27]。图 6a 为在 VNIR 范围内不同来源天麻粉前 3 个主成分的特征差异, 第一排颜色较浅, 对应更少含量的质量标志物, 第二排的颜色较深, 对应含量更高的质量标志物, 不同产地之间的颜色也并不一致。在 SWIR 范围内(图 6d), 切块加工的天麻粉颜色变化相对平缓, 表明主成分特征比较一致, 通过对比表 4 质量标志物含量信息进行类比, 切块加工的 PCA 特征变化趋势可以对应于对羟基苯甲醇含量, 整块加工的 PCA 特征变化较剧烈, 对应于天麻粉中 6 种质量标志物间含量的剧烈变化。因此, 不同来源天麻粉可通过 PCA 特征颜色进行初步判断。尽管可以从两个维度观察到大致区别, 但本研究仍采用了 SAM 监督分类和线性回归拟合进行进一步的分类和含量预测。

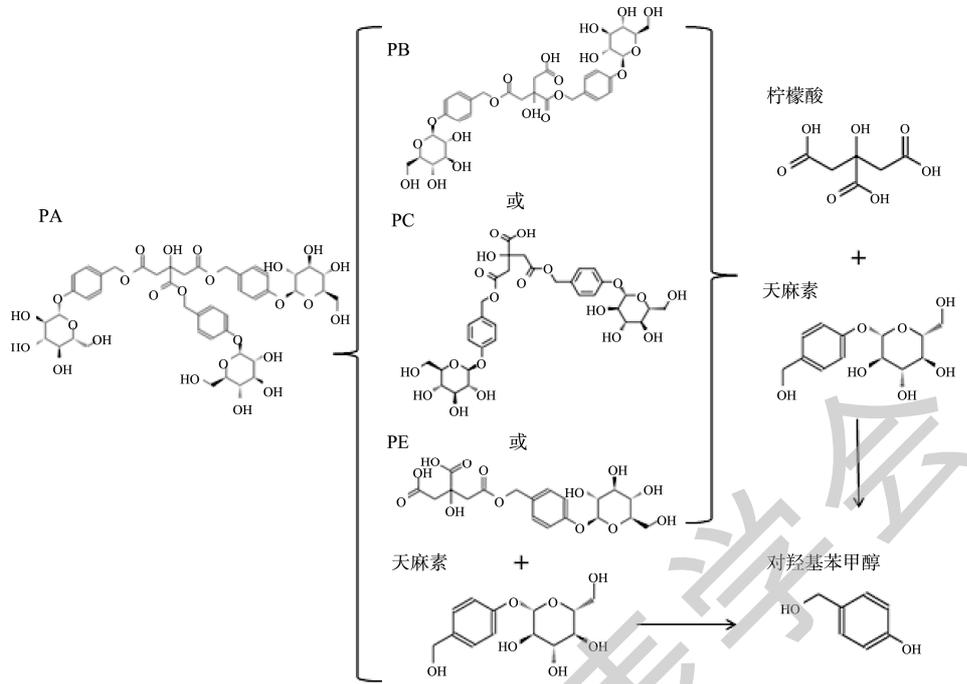


图 4 6 种质量标志物的结构及转化关系

Fig.4 Structure and transformation relationship of 6 kinds of quality indicators

表 5 天麻粉 6 种质量标志物成分线性关系标准曲线

Table 5 Linear relationship standard curves of 6 kinds of quality indicators in *Gastrodia elata* powder

序号	成分	回归方程	相关系数(r)	线性范围/(mg/mL)
1	天麻素	$Y=9240.5X-0.1377$	0.9998	0.0045~0.0360
2	对羟基苯甲醇	$Y=21637X-0.8113$	0.9999	0.0063~0.0501
3	PA	$Y=5603.5X-0.7119$	0.9999	0.0050~0.0400
4	PB	$Y=16281X-4.1473$	0.9999	0.0038~0.0300
5	PC	$Y=13017X-2.5253$	0.9998	0.0047~0.0375
6	PE	$Y=9364.8X-10.998$	0.9998	0.0039~0.0315

表 6 精密度、重复性、稳定性及加样回收率实验结果(% , n=6)

Table 6 Experimental results of precisions, repeatabilities, stabilities and sample recovery rates (% , n=6)

序号	成分名称	精密度	重复性	稳定性	加样回收率	
					平均回收率	RSD
1	天麻素	0.19	1.60	1.42	99.28	1.45
2	对羟基苯甲醇	0.85	1.50	1.15	96.77	1.21
3	PA	0.88	1.20	0.22	101.10	0.44
4	PB	0.94	1.40	0.41	99.55	0.32
5	PC	1.72	1.60	0.51	97.35	1.06
6	PE	1.41	1.90	0.27	102.03	0.58

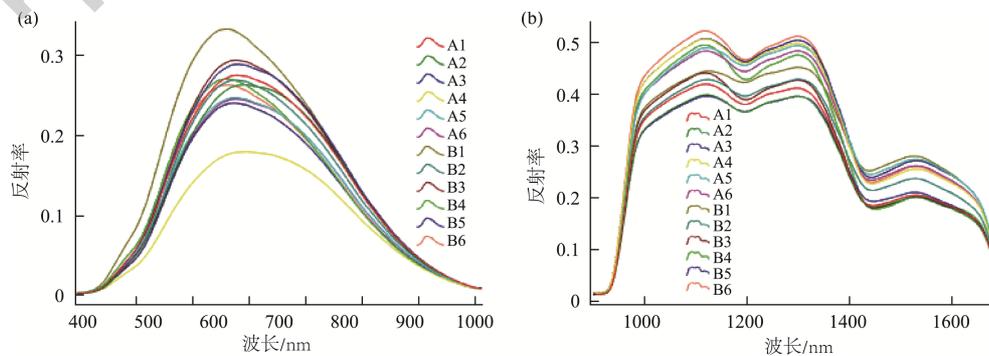
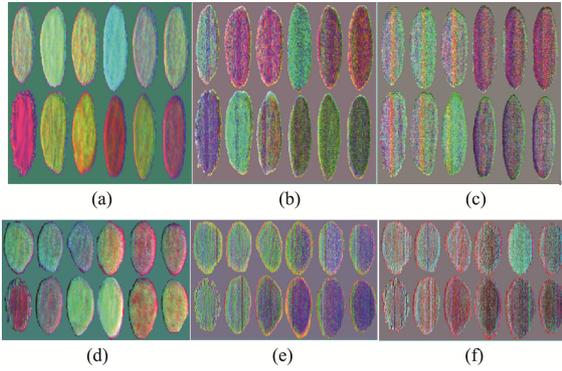


图 5 天麻粉在 VNIR (a)和 SWIR (b)范围内的光谱曲线

Fig.5 Spectral curves of *Gastrodia elata* powder in the VNIR (a) and SWIR (b) ranges

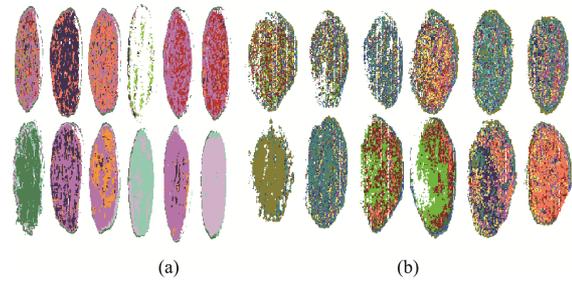


注：第一排为切块晾干，第二排为整块晾干，从左到右依次为云南昭通、贵州大方、湖北宜昌、甘肃陇南、四川广元、河南洛阳。
图 6 天麻粉 VNIR 范围 PC1~PC3 (a), PC4~PC6 (b), PC7~PC9 (c) 合成图像以及天麻粉 SWIR 范围 PC1~PC3 (d), PC4~PC6 (e), PC7~PC9 (f) 合成图像

Fig.6 Composite images of *Gastrodia elata* powder VNIR range PC1-PC3 (a), PC4-PC6 (b), PC7-PC9 (c), and *Gastrodia elata* powder SWIR range PC1-PC3 (d), PC4-PC6 (e), PC7-PC9 (f) synthetic images

2.4.3 SAM 监督分类预测

经天麻粉末高光谱图像上手动校准训练样本后，可以获得良好的结果。在 SAM 算法预测的像素分布图像中，具有相似光谱特征的像素通常显示相同的颜色，进而在图像上进行可视化分布(图 7)。



注：第一排为切块晾干，第二排为整块晾干，从左到右产地依次为云南昭通、贵州大方、湖北宜昌、甘肃陇南、四川广元、河南洛阳。
图 7 SAM 算法在 VNIR (a)和 SWIR (b)范围内的分类预测结果
Fig.7 Classification prediction results of SAM algorithm in the VNIR (a) and SWIR (b) ranges

2.4.4 分类预测结果的混淆矩阵评价

在 VNIR 范围内(图 8a)，贵州大方(B2)的天麻粉纯净像元分类结果不理想，预测准确率和特异性均为 75%，其余天麻粉的预测准确率均为 88%以上，总体准确率为 94.5946%，Kappa 系数为 0.9392，灵敏度在 90%以上，模型的整体预测效果较好。在 SWIR 范围内(图 8b)，各类样本预测的准确率均较高，都达到了 90%以上，总体准确率为 97.6226%，Kappa 系数为 0.9725，预测精度较高。混淆矩阵评价结果表明，SWIR 范围较 VNIR 范围的分类效果更佳，预测准确率更高。

(a)		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	灵敏
真实值	A1	88%	0	0	5%	0	6%	0	0	0	0	0	0	89%
	A2	0	100%	0	0	0	0	0	25%	0	0	0	0	80%
	A3	8%	0	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93%
	A4	0	0	0	90%	0	0	0	0	0	0	0	0	100%
	A5	0	0	0	0	100%	0	0	0	0	0	0	0	100%
	A6	4%	0	0	5%	0	94%	0	0	0	0	0	0	92%
	B1	0	0	0	0	0	0	95%	0	0	0	0	0	100%
	B2	0	0	0	0	0	0	0	75%	0	0	5%	0	94%
	B3	0	0	0	0	0	0	0	0	91%	0	1%	0	98%
	B4	0	0	0	0	0	0	1%	0	0	98%	0	4%	95%
	B5	0	0	0	0	0	0	0	0	9%	0	94%	0	91%
	B6	0	0	0	0	0	0	4%	0	0	2%	0	96%	94%
	特异性	88%	100%	100%	90%	100%	94%	95%	75%	91%	98%	94%	96%	94%

预测值

(b)		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	灵敏
真实值	A1	93%	7%	0	2%	0	0	0	0	0	0	0	0	91%
	A2	0	93%	2%	0	0	0	0	0	3%	0	0	0	94%
	A3	0	0	96%	0	0	0	0	0	0	0	0	2%	98%
	A4	0	0	0	98%	0	0	0	0	0	0	2%	2%	96%
	A5	0	0	0	0	97%	0	0	0	0	0	0	0	100%
	A6	0	0	0	0	0	100%	0	0	0	0	3%	0	97%
	B1	0	0	0	0	0	0	99%	0	0	0	0	0	100%
	B2	0	0	2%	0	0	0	1%	100%	0	1%	0	0	96%
	B3	0	0	0	0	0	0	0	0	97%	0	0	0	100%
	B4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99%	0	0	100%
	B5	0	0	0	0	3%	0	0	0	0	0	95%	0	97%
	B6	7%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96%	93%
	特异性	93%	93%	96%	98%	97%	100%	99%	100%	97%	99%	95%	96%	97%

预测值

图 8 VNIR (a)和 SWIR (b)范围分类预测的混淆矩阵评价

Fig.8 Confusion matrix evaluation for VNIR (a) and SWIR (b) range classification prediction

2.4.5 线性回归模型预测质量标志物含量

根据计算及选择, 在 VNIR 范围内, b_{125}/b_{120} (表示第 125 与第 120 波段处的反射率比值)与含量实测值的相关性最高, 相关系数为-0.7920, 在 SWIR 范围内, b_{252}/b_{198} 与实测值的相关性最高, 相关系数为 0.7823, 二者绝对值相差不大(表 7)。最后得出天麻粉质量标志物总含量在 VNIR 范围内的特征波长主要集中在 641、652 nm 左右(图 9), 在 SWIR 范围内的特征波长主要集中在 1196、1293 nm 左右(图 10)。基于所选的特征波段建立回归模型, 以波段比值为自变量 X、质

量标志物总含量的实测值为因变量 Y, 分别建立双波段范围的线性回归模型。模型在 VNIR 范围内的决定系数 R^2 为 0.6272, RMSE 为 0.6466, 相较于 SWIR 范围 R^2 略大、RMSE 略小, 质量标志物预测效果无明显差别(图 11)。

表 7 天麻总质量标志物的模型性能
Table 7 Model performance of total mass markers for *Gastrodia elata*

光谱范围	相关系数	R^2	RMSE
VNIR	-0.7920	0.6272	0.6466
SWIR	0.7823	0.6120	0.6597

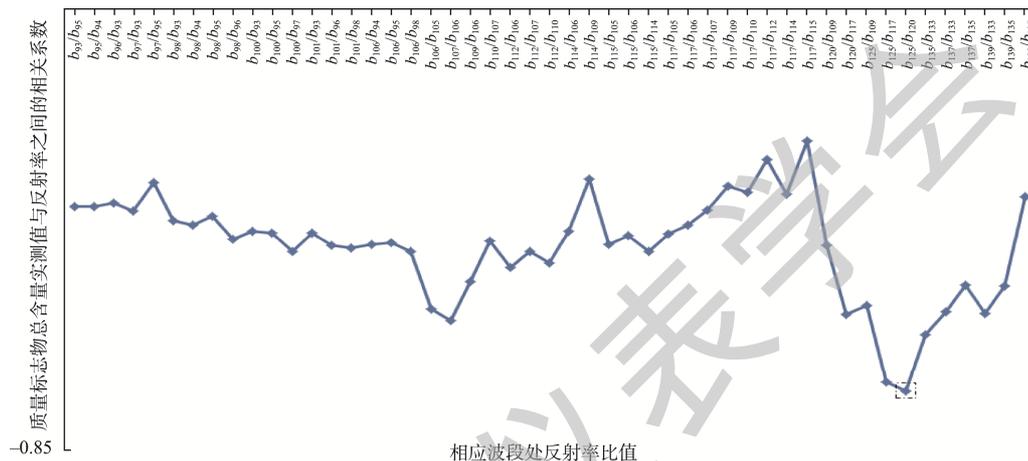


图 9 可见-近红外范围内各波段比值与质量标志物总含量实测值之间的相关系数

Fig.9 Correlation coefficient between the ratio of various bands in the visible near-infrared range and the measured total content of quality markers



图 10 短波红外范围内各波段比值与质量标志物总含量实测值之间的相关系数

Fig.10 Correlation coefficient between the ratio of each wavelength band in the shortwave infrared range and the measured total content of quality markers

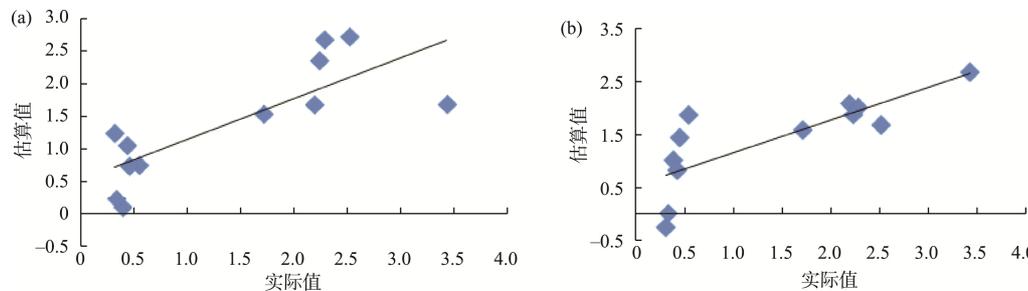
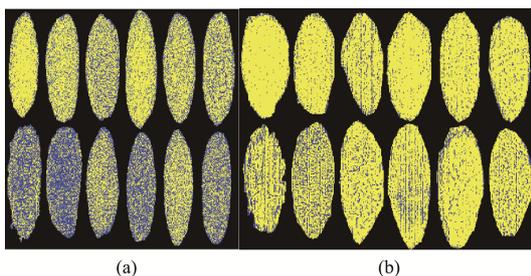


图 11 VNIR (a)和 SWIR (b)范围质量标志物预测结果

Fig.11 Prediction results of quality markers in the range of VNIR (a) and SWIR (b)

2.4.6 质量标志物的预测分布

如图 12 所示,天麻粉蓝色像素比例越高,表示所预测的质量标志物含量越高。在 VNIR 范围内,贵州大方(整块加工)质量标志物的总含量最高(表 4),因此蓝色最为显著(图 12a),而云南昭通(切块加工)的含量最少,黄色偏多,颜色比例区分很明显。在 SWIR 范围内,虽然蓝色所占的比例也与相应的质量标志物含量成正比,但是没有 VNIR 范围内的显著,不过也可以进行区分。结果表明,利用高光谱成像技术无损、原位预测不同产地、不同加工方式的天麻粉中药材质量标志物含量是可行的。



注:第一排为切块晾干,第二排为整块晾干,从左到右产地依次为云南昭通、贵州大方、湖北宜昌、甘肃陇南、四川广元、河南洛阳。

图 12 VNIR 范围内的含量反演图(a)以及 SWIR 范围内的含量反演图(b)

Fig.12 Content inversion map within the VNIR range (a) and content inversion map within the SWIR range (b)

3 讨论与结论

不同加工方式以及不同产地天麻粉的质量标志物含量差异是天麻药材发挥其功效的物质基础,本研究以 HPLC 所测 6 种物质的含量作为天麻粉的质量标志物,研究了由不同产地和加工方式导致的质量标志物含量差异^[28-29]。结果发现,新鲜天麻如果切块晾干,会导致含水量以及天麻多糖的含量增加,进而引起质量标志物总量的减少。这一现象除了与天麻吸收空气中的水分有关以外,也有可能是因为天麻素和巴利森苷转化为对羟基苯甲醇,同时产生水和多糖,因此暴露在非生物和生物胁迫下所引起的中药理化性质变化可以通过双波段高光谱图像信息进行检测^[30]。现有报道^[31]为近红外光谱点采样方式进行光谱快速检测,本研究高光谱技术采用推扫式面采集方式一次性同时获得天麻粉的空间维和光谱维信息,可以从整体层面进行快速、直观地可视化检测。

本研究所建分类模型的优点在由于其级联结构,即每一级联接收到前一个级联处理过的特征信息后,将其处理结果输出到下一个级联,以此类推,数据中的潜在特征信息都是这样通过分层学习来获得的^[32-34]。像素级的 PCA 图像特征能很好地说明不同质量标志物含量所导致的天麻粉多样性。基于 PCA 提取特征的监督分类效果更为直观,分类准确率基本在 90%以上,天麻粉质量标志物预测结果与 HPLC 实测结果基本吻合。因此,高光谱成像分类识别和回归拟合技术可以作为一种中药材现场识别和检测的技术进行推广应用。

参考文献

- [1] 上官晨虹, 赵博, 陈琛. 药食两用天麻的安全性评价研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5946-5954. SHANGGUAN CH, ZHAO B, CHEN C. Research progress on safety evaluation of medicinal and edible *Gastrodia elata* [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(18): 5946-5954.
- [2] 国家两部门发文: 对灵芝、天麻等 9 种物质试点既是食品又是中药材管理[J]. 食药两用, 2020, 28(1): 16. Two national departments issued a document: Pilot programs for the management of 9 substances, including *Ganoderma lucidum* and *Gastrodia elata*, which are both food and traditional Chinese medicine [J]. Edible Med Fung, 2020, 28(1): 16.
- [3] 范炜平, 陈妮妮, 伍贤进, 等. 不同加工方法对雪峰山天麻主要成分含量的影响研究[J]. 现代食品科技, 2022, 28(5): 135-137, 151. FAN WP, CHEN NN, WU XJ, et al. Study on the influence of different processing methods on the main component content of *Gastrodia elata* in Xuefeng mountain [J]. Mod Food Technol, 2022, 28(5): 135-137, 151.
- [4] LIU CX, GUO DA, LIU L. Quality transitivity and traceability system of herbal medicine products based on quality markers [J]. Phytomedicine, 2018, 44: 247-257.
- [5] 耿文洁, 汪聪聪, 刘劲松, 等. 大别山红天麻饮片多指标质量标志物研究[J]. 中国现代中药, 2021, 23(3): 524-528, 554. GENG WJ, WANG CC, LIU JS, et al. Study on multiple quality indicators of Dabie mountain red *Gastrodia elata* decoction pieces [J]. Mod Chin Med, 2021, 23(3): 524-528, 554.
- [6] 朱锦峰, 刘博, 徐倩, 等. 天麻不同发育阶段 7 种有效成分的动态变化规律及质量差异标志物确认[J/OL]. 中华中医药学刊: 1-21. [2023-11-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.r.20230714.1112.024.html> ZHU JF, LIU B, XU Q, et al. Identification of dynamic changes and quality difference biomarkers of seven active ingredients in *Gastrodia elata* at different developmental stages [J/OL]. Chin J Tradit Chin Med: 1-21. [2023-11-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.r.20230714.1112.024.html>
- [7] 徐男, 孙蓉, 朱晓明, 等. 基于多元统计方法和成分差异分析辨识半夏白术天麻汤的质量标志物(Q-marker)[J]. 中草药, 2019, 50(19): 4595-4602. XU N, SUN R, ZHU XM, et al. Identification of quality markers for Banxia Baizhu Tianma Tang based on multivariate statistical methods and component difference analysis (Q-marker) [J]. Chin Herb Med, 2019, 50(19): 4595-4602.
- [8] 王长旭, 王玉婷, 索玉婷, 等. 基于近红外高光谱成像技术的南疆红枣冠层叶片水分分布研究[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2022, 34(6): 65-69. WANG CX, WANG YT, SUO YT, et al. Study on water distribution of southern Xinjiang red jujube canopy leaves based on near infrared hyperspectral imaging technology [J]. China Agric Abstracts-Agric Eng, 2022, 34(6): 65-69.
- [9] 李梦, 李静, 张小波. 高光谱成像技术的发展现状及其在中药领域中的应用前景[J]. 西部中医药, 2021, 34(10): 149-153. LI M, LI J, ZHANG XB. Development status of hyperspectral imaging technology and its application prospects in the field of traditional Chinese medicine [J]. Western Chin Med, 2021, 34(10): 149-153.
- [10] 陶益, 陈林, 江恩赐, 等. 人工智能和工业 4.0 视域下高光谱成像技术融合深度学习方法在中药领域中的应用与展望[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(22): 5438-5442. TAO Y, CHEN L, JIANG ENC, et al. Application and prospect of deep learning methods for the fusion of artificial intelligence and industry 4.0 hyperspectral imaging technology in the field of traditional Chinese medicine [J]. China J Chin Mater Med, 2020, 45(22): 5438-5442.
- [11] REN G, WANG Y, NING J, et al. Evaluation of Dianhong black tea quality using near-infrared hyperspectral imaging technology [J]. J Sci Food Agric, 2021, 101(5): 2135-2142.
- [12] MAO Y, LI H, WANG Y, et al. Prediction of tea polyphenols, free amino

- acids and caffeine content in tea leaves during wilting and fermentation using hyperspectral imaging [J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2537.
- [13] 陈两绵, 高慧敏, 朱晶晶, 等. 不同采收及加工方式对穿心莲药材质量的影响[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(8): 1717-1725.
CHEN LM, GAO HM, ZHU JJ, *et al.* The effect of different harvesting and processing methods on the quality of Chuanxinlian medicinal herb [J]. *China J Chin Mater Med*, 2020, 45(8): 1717-1725.
- [14] 程立君, 彭佳华, 胡志芳, 等. 昭通天麻多糖含量测定及超声辅助提取条件优化[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(Z1): 28-29, 40.
CHENG LJ, PENG JH, HU ZF, *et al.* Determination of polysaccharide content in *Gastrodia elata* and optimization of ultrasound assisted extraction conditions in Zhaotong [J]. *Anhui Agric Bull*, 2019, 25(Z1): 28-29, 40.
- [15] 唐庆, 杨德泉, 余永红. 高效液相色谱法同时测定姜天麻饮片中天麻素和对羟基苯甲醇含量[J]. *药品评价*, 2021, 18(17): 1046-1049.
TANG Q, YANG DQ, SHE YH. Simultaneous determination of gastrodin and p-hydroxybenzyl alcohol content in ginger and *Gastrodia elata* decoction pieces by high performance liquid chromatography [J]. *Drug Eval*, 2021, 18(17): 1046-1049.
- [16] RU C, LI Z, TANG R. A hyperspectral imaging approach for classifying geographical origins of rhizoma atractylodis macrocephalae using the fusion of spectrum-image in VNIR and SWIR ranges (VNIR-SWIR-FuSI) [J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(9): 2045.
- [17] 孙梅, 王睿, 陈兴海, 等. 高光谱在冬虫夏草含量及真伪鉴别中的应用[J]. *中国现代应用药学*, 2017, 34(8): 1114-1117.
SUN M, WANG R, CHEN XH, *et al.* Application of hyperspectral analysis in the content and authenticity identification of *Cordyceps sinensis* [J]. *Chin Mod Appl Pharm*, 2017, 34(8): 1114-1117.
- [18] XIAO Q, BAI X, GAO P, *et al.* Application of convolutional neural network-based feature extraction and data fusion for geographical origin identification of radix astragali by visible/short-wave near-infrared and near infrared hyperspectral imaging [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(17): 4940.
- [19] 郑洁, 茹晨雷, 张璐, 等. 基于近红外高光谱成像技术对不同产地苦杏仁和桃仁药材的鉴别[J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(10): 2571-2577.
ZHENG J, RU CL, ZHANG L, *et al.* Identification of bitter almonds and peach kernels from different regions using near-infrared hyperspectral imaging technology [J]. *China J Chin Mater Med*, 2021, 46(10): 2571-2577.
- [20] 张悦, 王游游, 张婷, 等. 高光谱结合图分割算法快速鉴别不同尺度产地陈皮[J]. *化学试剂*, 2023, 45(1): 136-143.
ZHANG Y, WANG YY, ZHANG T, *et al.* Rapid identification of tangerine peel from different scales using hyperspectral combined image segmentation algorithm [J]. *Chem Agent*, 2023, 45(1): 136-143.
- [21] CUI H, CHENG Z, LI P, *et al.* Prediction of sweet corn seed germination based on hyperspectral image technology and multivariate data regression [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(17): 4744.
- [22] JIN H, MA Y, LI L, *et al.* Rapid and non-destructive determination of oil content of peanut (*Arachis hypogaea* L) using hyperspectral imaging analysis [J]. *Food Anal Method*, 2016, 9(7): 2060-2067.
- [23] FENG L, ZHU S, ZHANG C, *et al.* Variety identification of raisins using near-infrared hyperspectral imaging [J]. *Molecules*, 2018, 23(11): 2907.
- [24] 李佳阳, 吴国真, 王新茗, 等. 鲜天麻中酶对巴利森苷A的降解作用研究[J]. *中国现代中药*, 2022, 24(3): 459-465.
LI JY, WU GZ, WANG XM, *et al.* Study on the degradation effect of enzymes in fresh *Gastrodia elata* on parishin A [J]. *Mod Chin Med*, 2022, 24(3): 459-465.
- [25] BADARÓ AT, GARCIA-MARTIN JF, LÓPEZ-BARRERA MDC, *et al.* Determination of pectin content in orange peels by near infrared hyperspectral imaging [J]. *Food Chem*, 2020, 323: 126861.
- [26] LIU Y, LONG Y, LIU H, *et al.* Polysaccharide prediction in *Ganoderma lucidum* fruiting body by hyperspectral imaging [J]. *Food Chem X*, 2021, 13: 100199.
- [27] KABIR MH, GUINDO ML, CHEN R, *et al.* Deep learning combined with hyperspectral imaging technology for variety discrimination of *Fritillaria thumbergii* [J]. *Molecules*, 2022, 27(18): 6042.
- [28] 季德, 宁子琬, 张雪荣, 等. 不同干燥加工方法对天麻药材质量的影响[J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(14): 2587-2590.
JI D, NING ZW, ZHANG XR, *et al.* The effect of different drying and processing methods on the quality of *Gastrodia elata* medicinal materials [J]. *China J Chin Mater Med*, 2016, 41(14): 2587-2590.
- [29] 柳立新, 单锋, 季婷婷, 等. 大别山三个主产区野生及栽培天麻的8个主要成分含量比较[J]. *井冈山大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 21-26.
LIU LX, SHAN F, JI TT, *et al.* Comparison of the content of 8 main components of wild and cultivated *Gastrodia elata* in the three main production areas of the Dabie Mountains [J]. *J Jinggangshan Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, 43(3): 21-26.
- [30] PARK E, KIM YS, FAQEERZADA MA, *et al.* Hyperspectral reflectance imaging for nondestructive evaluation of root rot in Korean ginseng (*Panax ginseng meyer*) [J]. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1109060.
- [31] 李珊珊, 张付杰, 李丽霞, 等. 基于近红外光谱技术结合 ARO-LSSVR 的天麻中有效成分含量快速检测[J/OL]. *食品科学*: 1-11. [2023-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231123.1158.012.html>
LI SS, ZHANG FJ, LI LX, *et al.* Rapid detection of active ingredient content in *Gastrodia elata* based on near-infrared spectroscopy combined with ARO-LSSVR [J/OL]. *Food Sci*: 1-11. [2023-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231123.1158.012.html>
- [32] HUANG H, HU X, TIAN J, *et al.* Rapid and nondestructive prediction of amylose and amylopectin contents in sorghum based on hyperspectral imaging [J]. *Food Chem*, 2021, 359: 129954.
- [33] CHEN X, JIAO Y, LIU B, *et al.* Using hyperspectral imaging technology for assessing internal quality parameters of persimmon fruits during the drying process [J]. *Food Chem*, 2022, 386: 132774.
- [34] CAO Y, JIANG K, WU J, *et al.* Inversion modeling of japonica rice canopy chlorophyll content with UAV hyperspectral remote sensing [J]. *PLoS One*, 2020, 15(9): e0238530.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



胡爽, 硕士, 主要研究方向为中药分析与检验方法。

E-mail: 1787087561@qq.com



张巍, 博士, 副研究员, 主要研究方向为中药分析新方法与新技术研究。

E-mail: 545529755@qq.com



白雪媛, 硕士, 研究员, 主要研究方向为中药传统功效生物学机制研究及产品开发。

E-mail: 23165956@qq.com