

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80271

二维相关红外光谱和高光谱成像技术 检测黄精干燥过程中多糖的变化

付淑亚¹ 谢安国² 刘云宏^{1,3}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000; 2. 南阳理工学院张仲景国医国药学院, 河南 南阳 473004; 3. 食品绿色加工与质量安全控制河南省国际联合实验室, 河南 洛阳 471000)

摘要: [目的] 研究黄精“一蒸一制”炮制工艺中干燥过程多糖的变化。[方法] 采用常压隔水蒸对黄精切片进行蒸制, 然后在 60 °C 条件下进行热泵干燥, 利用近红外光谱(NIR)、高光谱成像(HSI)和中远红外光谱技术对黄精干燥过程中的特征光谱进行解析, 并结合二维相关红外光谱(2D-IR)分析方法研究黄精干燥过程中的多糖变化。[结果] 蒸汽加热 11 h 后黄精多糖含量为 3.39%, 干燥 11 h 后多糖含量为 6.67%, 整体来看, 黄精在干燥过程中多糖含量呈逐渐增多的趋势。通过二维相关分析可知, 多糖的特征官能团在不断发生变化, 在 1 016 cm⁻¹ 处, 其官能团变化顺序均为—CH₂的 C—H 伸展→O—H 基团在水中拉伸和变形→N—H 基团的伸缩振动→O—H 拉伸和 C—O 拉伸组合→C—H 拉伸和 C—C 拉伸组合→吡喃糖苷; HSI 技术结合化学计量学, 利用 PLSR 建立多糖的光谱预测模型, 模型的 R_p^2 为 0.903。[结论] 红外光谱、HSI 技术结合 2D-IR 技术能很好地监测黄精在干燥过程中的多糖变化规律。

关键词: 黄精; 多糖; 近红外; 中远红外; 二维相关分析; 高光谱成像

Two-dimensional correlation infrared spectroscopy and hyperspectral imaging to detect the changes of polysaccharide during the drying process of *Polygonatum sibiricum*

FU Shuya¹ XIE Anguo² LIU Yunhong^{1,3}

(1. Henan University of Science and Technology, School of Food and Bioengineering, Luoyang, Henan 471000, China; 2. Nanyang Institute of Technology, Zhangzhongjing School of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, Nanyang, Henan 473004, China; 3. Food Microbiology Engineering and Technology Research Center of Henan Province, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: [Objective] To study the changes of polysaccharide in the drying process of "one steam and one preparation" of *Polygonatum sibiricum*. [Methods] The slices were steamed by atmospheric pressure water isolation steaming, and then dried by heat pump at 60 °C. Near infrared spectroscopy (NIR), hyperspectral imaging (HSI) and middle and far infrared spectroscopy were used to analyze the characteristic spectra of the drying process of *Polygonatum sibiricum*, and the changes of polysaccharide during the drying process were studied by combining two-dimensional correlation infrared spectroscopy (2D-IR) analysis method. [Results] The content of polysaccharide was 3.39% after steam heating for 11 h, and 6.67% after drying for 11 h. The content of polysaccharide showed a gradual increase during the drying process. Through two-dimensional correlation analysis, it was showed that the characteristic functional groups of polysaccharides were constantly changing. And at 1 016 cm⁻¹, the sequence of functional group changes was C—H stretching of —CH₂ → stretching and deformation of O—H group in water → stretching vibration of N—H group → combination of O—H stretching and C—O stretching → combination of C—H stretching and C—C stretching → glucopyranoside. HSI technology combined with chemometrics, PLSR was used to establish the spectral prediction model of polysaccharide, and the R_p^2 of the model was 0.903.

基金项目: 河南省自然科学基金(编号:202300410131); 河南省科技攻关项目(编号:232102321122)

通信作者: 刘云宏(1975—), 男, 河南科技大学教授, 博士。E-mail: beckybin@haust.edu.cn

收稿日期: 2024-03-23 **改回日期:** 2024-05-09

[**Conclusion**] Infrared spectroscopy, HSI technology combined with 2D-IR technology can well monitor the changes of polysaccharide in the drying process of *Polygonatum sibiricum*.

Keywords: *Polygonatum sibiricum*; polysaccharide; NIR; mid-far infrared; 2D correlation analysis; hyperspectral imaging

黄精(*Polygonatum sibiricum*)是一种药食同源中草药,富含多糖、黄酮、皂苷、木脂素、生物碱等生物活性物质^[1],营养价值极高,具有补气养阴、健脾润肺、调节血糖血脂等功效^[2]。在食品、营养、保健、医疗等多个行业,黄精都展现出巨大的开发价值及广阔的应用前景。但生黄精口感较差,食用前需进行炮制加工。

活性成分含量决定着黄精食用价值和药用品质。传统的黄精品质检测技术,例如紫外分光光度计测定多糖含量,费时费力,检测效率低,线下品控还存在一定的滞后性,达不到快速、准确、实时、无损检测等要求。无损检测技术是近年来兴起来的新技术,主要包括红外光谱分析技术、高光谱成像(HSI)技术和荧光光谱法等方法^[3]。其中,红外光谱分析技术包括近红外光谱(NIR)和中远红外光谱,已被广泛应用于农业、食品、医药等领域。红外光谱技术融合了电子科学技术、光谱分析、计算机及化学计量技术^[4],红外光谱技术具有检测速度快、操作简便、灵敏度高等优点,在食品、中药材真伪鉴别、产地鉴别以及质量定量分析方面展现出了巨大的应用潜力^[5]。近年来,国内外学者应用红外光谱技术对药食同源类产品中的功能性成分和水分进行研究。Zhuang等^[6]成功利用NIR技术,对不同区域的山药样品进行了有效鉴别,并精确测定了其中的总糖、多糖及黄酮类化合物的含量。She等^[7]通过将红外光谱技术与化学检测手段相结合,深入分析了不同产地枸杞样品的特点,并成功构建了用于预测类黄酮含量的模型。

HSI融合了成像与光谱技术,能够同步捕获目标物的光谱和空间信息^[8-9],从而全面揭示其内外质量特征。凭借其快速、准确的检测优势,HSI技术已被广泛应用于可食用物质的鉴定与检测中^[10-11]。赵建贵等^[12]采用HSI技术实现了对番茄叶片的色素进行无损检测及可视化表达,为设施农业植物叶片色素分布、养分亏缺和施肥决策等提供了数据支撑和理论依据。许多研究已经成功运用HSI技术,有效评估了食品的多种定性参数,包括可溶性固形物含量、硬度、色泽以及水果和蔬菜的水分含量,还有肉类的嫩度、脂肪、颜色、pH值和感官特征^[13-14];除此之外,还有研究利用高光谱可视化紫甘薯^[15]、荔枝果皮^[16]和葡萄^[17]的花青素含量。上述文献表明,HSI技术可成功应用于品质鉴定和成分含量的可视化。

研究拟将NIR、中远红外、HSI与二维相关红外光谱(2D-IR)技术相结合,探索黄精干燥过程的多糖变化,并通过Matlab的伪颜色命令结合特殊算法对黄精多糖进行HSI可视化,以期为黄精的加工和质量控制提供依据。

1 材料与仪器

1.1 材料与试剂

黄精:鸡头黄精,市售;

蒽酮、溴化钾:标准品,天津市科密欧化学试剂有限公司;

硫酸:分析纯,洛阳昊华化学试剂有限公司;

无水葡萄糖:标准品,江苏强盛功能化学股份有限公司。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:JA5003B型,上海精科仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:V-LS-30型,尤尼柯上海仪器有限公司;

高速离心机:H1650型,长沙湘仪离心机仪器有限公司;

热泵干燥机:GHRH-20型,广东农业机械研究院干燥设备制造厂;

低场核磁共振成像分析仪:MINI20-015V-I型,上海纽迈电子科技有限公司;

傅立叶变换红外光谱仪:Brucker Vector 33型,德国BruckerR公司;

傅立叶变换中远红外光谱仪:Brucker Vetex 70型,德国Brucker公司;

色差计:XriteColori5型;美国Xrite公司;

物性分析仪:Instron Universal 5544型,美国Instron公司;

真空冷冻干燥机:FD-1A-50型,北京博医康实验仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 取黄精生药材,洗净,剔除表面须根痕及结节上的小圆盘状突起,切成厚度0.5 cm的片,均匀摆放在蒸锅屉上,蒸制11 h取出,然后在60℃条件下,进行热泵干燥。设置干燥过程中的不同取样测定时间(0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420, 450, 480, 510, 540, 570, 600, 630, 660 min),梯度取样后,放入冰箱预冻24 h,然后放入真空冷冻干燥机干燥24 h,测定NIR以及HSI后,打粉过筛,测定中远红外光谱。

1.3.2 多糖提取及含量测定

(1) 多糖提取:采用超声波辅助提取法。称取冻干的黄精样品粉末1 g,将其放入烧杯中,按料液比1:

10 (g/mL)加入蒸馏水,放置在超声波(120 W)清洗器中,50℃下超声处理70 min,10 000 r/min离心10 min,取上清液作为多糖提取液备用。

(2) 多糖含量测定:采用蒽酮—硫酸法^[18]。将1 mL的黄精多糖提取液稀释100倍,以制备多糖待测液。精确量取1 mL的待测液放入10 mL的离心管中。向离心管中加入5 mL质量分数为0.5%的蒽酮—硫酸溶液。将离心管置于90℃水浴15 min。待加热完成后,在620 nm下测定溶液的吸光度。此外,为了确保结果的准确性,同时准备一个空白对照,即不加入多糖提取液的溶液。以无水葡萄糖为标准品制备标准曲线,结合葡萄糖标准曲线,每个样品重复测定3次,取平均值,计算多糖含量。

1.3.3 NIR光谱采集 使用傅立叶变换近红外光谱仪,针对黄精干燥过程中的样品采集了光谱数据。采集参数包括:光谱范围为10 000~4 000 cm^{-1} (即780~2 500 nm),扫描次数设定为64次,分辨率为8 cm^{-1} 。为确保数据准确性,每个样品进行3次光谱采集,取其平均值作为最终光谱数据。

1.3.4 中远红外光谱采集 精确称取1 mg冻干后的黄精粉末,与100 mg干燥好的KBr混匀。在玛瑙研钵中将混合物研磨成细小粉末,随后使用压片机在15~20 MPa下压制成透明薄片。以生黄精为对照,利用中远红外光谱仪在4 000~400 cm^{-1} 的光谱范围内扫描黄精样品薄片,确保扫描信号累积达64次。通过OPUS数据处理软件对扫描结果进行分析,并将数据导入Origin 2021软件进行图形绘制。

1.3.5 二维相关分析 采用2D shige软件进行光谱分析。在二维相关光谱中,同步相关光谱关于主对角线对称,包含了自相关峰和交叉峰两种类型。自相关峰位于对角线上,且始终为正峰,反映了吸收峰对微扰因素的敏感程度;而交叉峰则出现在对角线外,其正负性取决于不同波长处吸收强度变化方向的一致性。若两波长处出现交叉峰,可能意味着这些波长对应的官能团之间存在分子间或分子内作用力。此外,结合异步交叉峰和同步谱中相同位置的交叉峰,可以进一步揭示分子内官能团的变化顺序,为研究者提供更深入的分析依据。

1.3.6 高光谱采集及多糖含量可视化 将HSI仪器固定,使样品与镜头之间的距离始终保持在50 cm,确保每个图像的拍摄距离一致,曝光时间设定为50 ms,拍摄出来的图片保存原始格式备用。正式拍摄样品之前,要对HSI仪器进行校准,先使用具有99%反射率的标准白板捕获全白图像,然后通过关闭相机快门获得全黑图像,光谱图像矫正如式(1),以此提高最终光谱数据的可靠性。最后利用ENVI 5.1软件包对高光谱图像进行分割。

$$R = \frac{I - B}{W - B}, \quad (1)$$

式中:

R ——标定后的高光谱图像;

I ——原始高光谱图像;

B ——全黑标定图像;

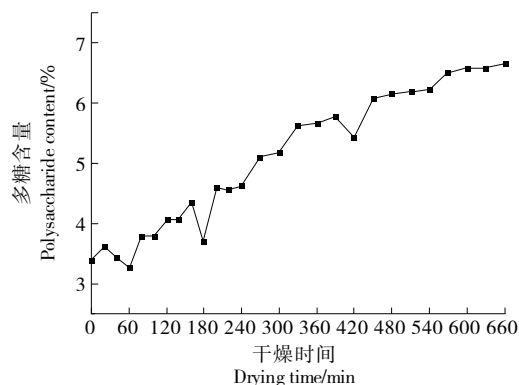
W ——全白标定图像。

运用光谱对目标物质进行可视化预测,需要进行光谱建模。食品中关于此类的预测回归模型较多,比如偏最小二乘法、支持向量机和神经网络等。选用经典且性能稳定的PLSR算法,在Matlab中编写并运算。将样品高光谱图像中每个像素点的光谱值输入到光谱模型中,得到每个点的质量指标值。然后使用Matlab的伪颜色命令对多糖的分布进行可视化,以便直观和图形化地描述其分布^[19]。

2 结果与分析

2.1 黄精干燥过程中多糖含量变化

从图1可以看出,在干燥过程中,黄精多糖含量整体呈逐渐增多的趋势。方差分析结果表明,不同干燥时间对黄精多糖含量的影响有显著性差异($P < 0.05$)。未经过干燥处理时,黄精多糖含量为3.39%,随着干燥时间的增加,多糖含量逐渐增加,干燥160 min时,多糖含量为4.35%,干燥时间为390 min时,多糖含量增加到5.79%,当干燥时间达到11 h时,多糖含量为6.67%。



字母不同代表差异显著($P < 0.05$)

图1 不同干燥时间中黄精多糖含量的变化

Figure 1 Changes of polysaccharide content in different drying time of *Polygonatum sibiricum*

2.2 黄精干燥过程中的NIR原始光谱分析

从图2可以看出,在干燥过程中,黄精光谱发生显著变化的波段主要在950,1 000,1 200~1 400,1 500,1 680,1 850,1 900,2 000,2 270,2 400 nm处,这些显著峰主要表征了C—H、N—H、O—H、C—O、C=O等基团的振动特征,但是干燥过程中各波段变化趋势很大程度上趋于一致,没有再随着时间变化出现其他明显的峰,说明在干燥过程中,黄精内部的糖类成分种类未发生太大的变化。

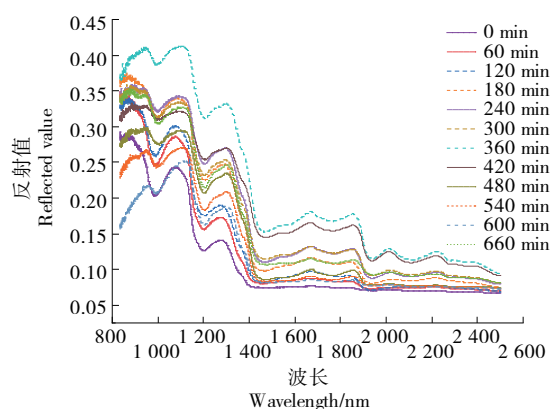


图2 黄精干燥过程中的NIR原始光谱图

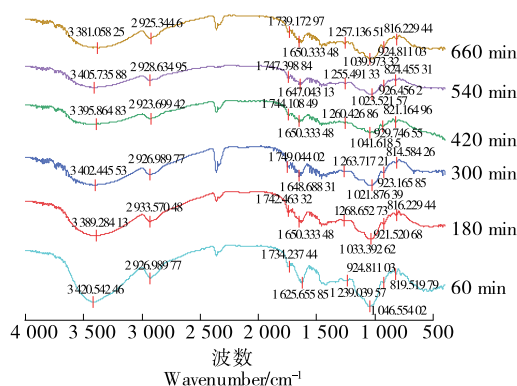
Figure 2 Raw NIR spectra of *Polygonatum sibiricum* drying process

2.3 黄精干燥过程中的中远红外及其二维相关光谱分析

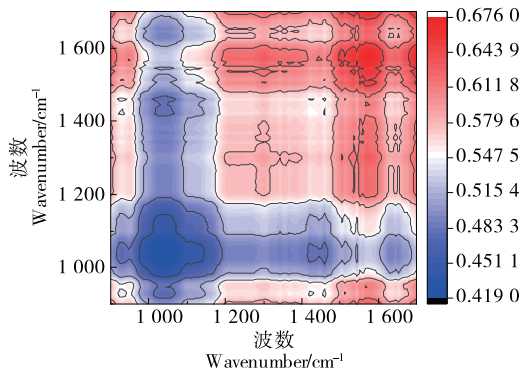
从图3(a)可以看出,在中远红外光谱的 3402.16 cm^{-1} 附近,出现了一个宽而强的一OH伸缩振动吸收峰。这一特征峰不仅反映了多糖分子上的一OH基团,还可能包括分子内或分子间的氢键作用。而在

2914.91 cm^{-1} 左右,则出现了一 CH_2 或一 CH_3 的C—H伸缩振动吸收峰,这是多糖分子中常见的烃基振动模式。此外, 1740.35 cm^{-1} 处的明显吸收峰对应着醛基,这通常表明糖分子上可能存在乙酰基。在 1630.07 , 1586.04 cm^{-1} 的位置,观察到了—COOH的C=O伸缩振动吸收峰,这进一步证实了多糖的酸性特性。 1365.25 cm^{-1} 处的吸收峰则是由C—H的变形振动产生的,它与C—H的伸缩振动一同成为糖类物质的特征吸收峰^[20-21]。而在 1140.35 cm^{-1} 处,C—O—C醚键的C—O伸缩振动吸收峰表明了醚键的存在。特别值得注意的是,在 1016.42 cm^{-1} 处出现的吸收峰,是吡喃糖苷的特征峰^[22]。而在 $930\sim 820\text{ cm}^{-1}$ 范围内,出现的弱吸收峰可能暗示了多糖中 α -糖苷键和 β -糖苷键的存在^[23]。由此可以推断,黄精中还含有 β -吡喃型的酸性多糖。

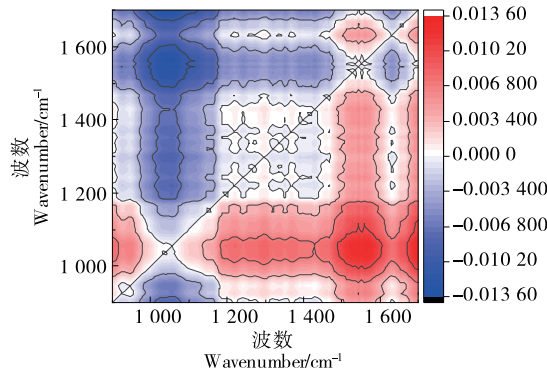
从图3(b)可以看出,在同步谱中出现了 $1642/1642$, $1566/1566$, $1300/1300$, $1031/1031$, $927/927\text{ cm}^{-1}$ 5个自动峰,与黄精蒸制过程中一样, $1642/1642$, $1566/1566$, $1300/1300\text{ cm}^{-1}$ 处特征峰代表了C=O伸缩振动、N—H弯曲振动和C—H—O的弯曲振动,这些都是糖类的特征峰,在 $950\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 范围内为多糖的特征吸收峰。



(a) 不同干燥时间黄精的中远红外光谱



(b) 中远红外二维相关分析同步谱图



(c) 中远红外二维相关分析异步谱图

图3 黄精干燥过程中二维中远红外相关光谱图

Figure 3 2D Mid-far infrared correlation spectra in the drying process of *Polygonatum sibiricum*

在图3(c)中有1 545/1 630, 900/1 047, 1 540/1 050, 1 700/1 050 cm^{-1} 4个正交叉峰, 1 630/1 545, 1 047/900, 1 050/1 540, 1 050/1 700 cm^{-1} 4个负交叉峰, 说明黄精在干燥过程中糖类官能团间的分子间或分子内作用力变化比较剧烈。

2.4 黄精干燥过程中NIR-中远红外二维异质相关光谱分析

通过扫描干燥后的黄精切片样品得到的NIR光谱与中红外光谱, 对两种光谱进行相关分析, 得到NIR与中远红外光谱之间的二维异质相关光谱图。在图4(a)可以观察到, 在1 728 nm/1 586 cm^{-1} , 1 939 nm/1 586 cm^{-1} 处存在2个很明显的强相关峰, 表明 $-\text{CH}_2$ 的C—H伸展和多糖的 $-\text{COOH}$ 的C=O键对称与非对称伸缩振动有极大的相似来源, O—H基团在水中拉伸和变形与多糖的 $-\text{COOH}$ 的C=O键对称与非对称伸缩振动也有很大的相似来源。同时在1 728 nm/1 365 cm^{-1} , 1 939 nm/1 365 cm^{-1} 还存在2个较强相关峰, 说明 $-\text{CH}_2$ 的C—H伸展以及O—H基团在水中拉伸和变形与C—H的变形

振动和伸缩振动存在一定程度的相似来源。从图中还可以看到在2 487 nm/1 016 cm^{-1} , 2 270 nm/1 016 cm^{-1} , 2 050 nm/1 016 cm^{-1} 处存在3个很明显的负相关峰, 说明C—H拉伸和C—C拉伸组合、O—H拉伸和C—O拉伸组合以及N—H基团的伸缩振动与吡喃糖苷无相似来源。

从图4(b)可以看出, 在1 728, 1 939, 2 050, 2 270, 2 487 nm与1 016 cm^{-1} 附近存在5个正相关峰, 说明 $-\text{CH}_2$ 的C—H伸展、O—H基团在水中拉伸和变形、N—H基团的伸缩振动、O—H拉伸和C—O拉伸组合以及C—H拉伸和C—C拉伸组合优先于吡喃糖苷的变化。同时在1 728, 1 939, 2 050 nm与1 630 cm^{-1} 附近还存在3个弱正相关峰, 表明 $-\text{CH}_2$ 的C—H伸展、O—H基团在水中拉伸和变形以及N—H基团的伸缩振动也稍先于多糖的 $-\text{COOH}$ 的C=O键对称与非对称伸缩振动变化。从图中还能看出在1 586, 1 260 cm^{-1} 与2 199 nm处存在2个负相关峰, 表明多糖的 $-\text{COOH}$ 的C=O键对称与非对称伸缩振动慢于O—H和C—O的拉伸组合变化。

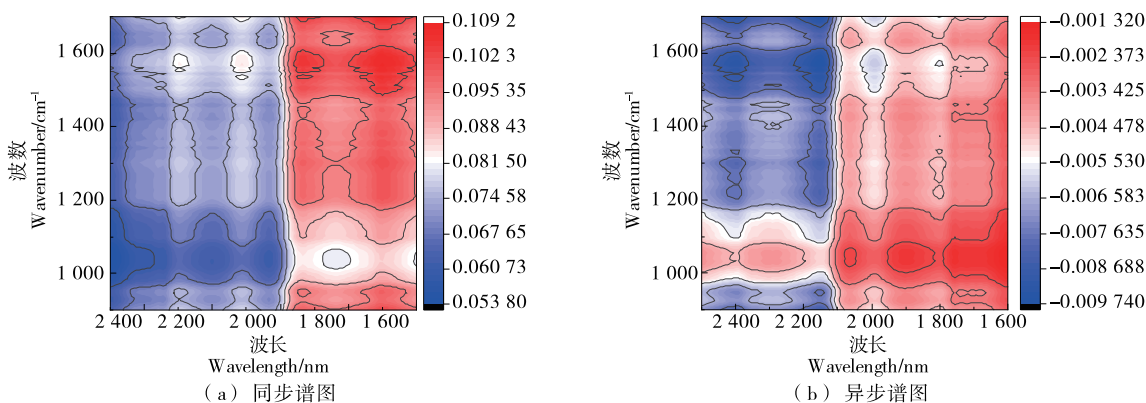


图4 黄精干燥过程中NIR-中远红外二维相关光谱图

Figure 4 2D correlation spectra of NIR-Mid-far infrared during the drying process of *Polygonatum sibiricum*

2.5 黄精干燥过程HSI对多糖含量的预测及分布可视化

针对黄精切片干燥过程取27个时间梯度的样品, 每个样品做3个平行试验, 最终获得了81个黄精的多糖含量数值和与其对应的HSI光谱值。其中60个随机分配到训练集, 剩余的21个被分配到测试集。通过PLSR算法建立多糖的光谱预测模型, 结果如表1所示。

最终的 R_c^2 和 R_p^2 分别为0.988和0.903, 表明拟合精度较高, 可以用此模型预测黄精干燥过程的多糖含量变化。

表1 HSI对黄精多糖的预测效果

Table 1 Prediction effects of HSI on *Polygonatum sibiricum* polysaccharide

预测指标	建模方法	训练集		测试集	
		R_c^2	RMSEC	R_p^2	RMSEP
黄精多糖	PLSR	0.988	0.120	0.903	0.338

针对干燥过程多糖含量的分布, 将每个像素点的光谱值输入到预测模型中, 然后对样品多糖含量进行可视化^[24]。如图5所示, 随着干燥时间的增加, 多糖含量呈缓慢增加的趋势。根据颜色深浅可以看出, 干燥前期, 黄精切片边缘部分的多糖先溢出表面, 然后逐步向中心部分蔓延, 内部多糖的变化明显慢于表面的变化趋势。

3 结论

黄精在干燥过程中, 整体反射值明显比蒸汽加热过程中要偏低, 光谱发生显著变化的波段主要在950, 1 000, 1 200~1 400, 1 500, 1 680, 1 850, 1 900, 2 000, 2 270, 2 400 nm处, 这些显著峰主要表征了C—H、N—H、O—H、C—O、C=O等基团的振动特征, 但是干燥过程中各波段变化趋势很大程度上趋于一致, 没有再随着时间变化出现其他明显的峰。通过使用近红外光谱和中远红

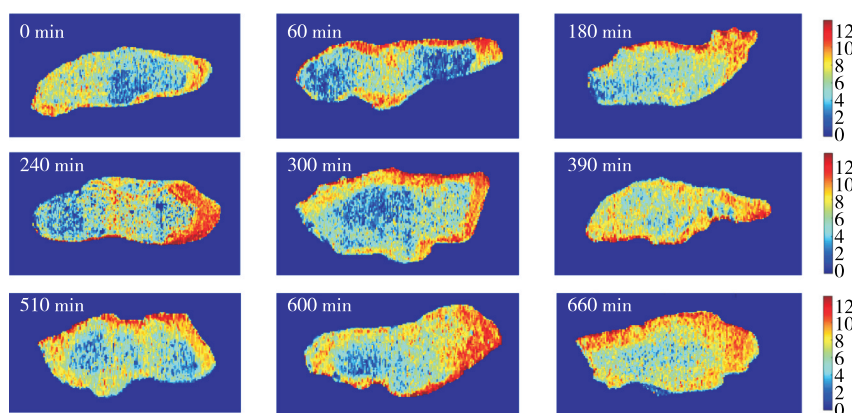


图5 黄精多糖含量变化的HSI可视化

Figure 5 Visualization of polysaccharide content change in *Polygonatum sibiricum*

外并结合二维相关光谱进行分析,结果表明,黄精干燥过程中,在 $1\ 016\text{ cm}^{-1}$ 处,其官能团变化顺序均为 $-\text{CH}_2$ 的 $\text{C}-\text{H}$ 伸展 $>\text{O}-\text{H}$ 基团在水中拉伸和变形 $>\text{N}-\text{H}$ 基团的伸缩振动 $>\text{O}-\text{H}$ 拉伸和 $\text{C}-\text{O}$ 拉伸组合 $>\text{C}-\text{H}$ 拉伸和 $\text{C}-\text{C}$ 拉伸组合 $>$ 吡喃糖苷;在 $1\ 630\text{ cm}^{-1}$ 处,官能团变化时序为 $-\text{CH}_2$ 的 $\text{C}-\text{H}$ 伸展 $>\text{O}-\text{H}$ 基团在水中拉伸和变形 $>\text{N}-\text{H}$ 基团的伸缩振动 $>$ 多糖的 $-\text{COOH}$ 的 $\text{C}=\text{O}$ 键对称与非对称伸缩振动;在 $2\ 199\text{ nm}$ 处多糖的 $-\text{COOH}$ 的 $\text{C}=\text{O}$ 键对称与非对称伸缩振动慢于 $\text{O}-\text{H}$ 和 $\text{C}-\text{O}$ 的拉伸组合。

对黄精在干燥过程中的多糖含量进行模型预测与可视化处理,利用PLSR建立光谱预测模型,其模型的校准相关系数的平方值和预测相关系数的平方值分别为0.988和0.903,校准均方根误差为0.120,预测均方根误差为0.338,可以看出其多糖含量整体呈逐渐增多的趋势。未经过干燥处理时,黄精多糖含量为3.39%,随着干燥时间的增加,多糖含量逐渐增加,当干燥时间达到11 h时,多糖含量为6.67%。研究并未针对干燥过程中可能发生的多糖种类变化作出深入研究,在未来的研究工作中可以对此进行更深入的探索,并建立更为精确的光谱模型预测干燥过程中多糖的变化。

参考文献

- [1] 夏从龙. 云南道地药材——滇黄精[J]. 大理大学学报, 2022, 7(2): 102.
- [2] 叶红翠, 张小平, 余红, 等. 多花黄精粗多糖抗肿瘤活性研究[J]. 中国实验方剂学杂志, 2008, 14(6): 34-36.
- [3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 10版. 北

京: 中国医药科技出版社, 2015: 306-307.

National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: part 1[S]. 10th ed. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2015: 306-307.

- [4] 潘振朝. 食品安全检测中的近红外光谱技术分析[J]. 食品安全导刊, 2017(15): 124-125.
- [5] 王建伟, 叶升. 近红外光谱技术在食品成分检测中的研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(9): 171-175.
- [6] ZHUANG H, NI Y N, KOKOT S. A comparison of near- and mid-infrared spectroscopic methods for the analysis of several nutritionally important chemical substances in the Chinese yam (*Dioscorea opposita*): total sugar, polysaccharides, and flavonoids[J]. Applied Spectroscopy, 2015, 69(4): 488-499.
- [7] SHE T T, ZOU X B, SHI J Y, et al. Determination geographical origin and flavonoids content of goji berry using near-infrared spectroscopy and chemometrics[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(1): 68-79.
- [8] 孙炳新, 赵宏侠, 冯叙桥. 基于低场核磁和成像技术的鲜枣贮藏过程水分状态的变化研究[J]. 中国食品学报, 2016, 16(5): 253-257.
- [9] IQBAL A, SUN D W, SLEEN P. An overview on principle, techniques and application of hyperspectral imaging with special reference to ham quality evaluation and control[J]. Food Control, 2014, 46: 242-254.
- [10] CHENG W W, SUN D W, PU H B, et al. Chemical spoilage extent traceability of two kinds of processed pork meats using

- one multispectral system developed by hyperspectral imaging combined with effective variable selection methods[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1 989-1 996.
- [11] LIU Y H, SUN Y, XIE A G, et al. Potential of hyperspectral imaging for rapid prediction of anthocyanin content of purplefleshed sweet potato slices during drying process[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(12): 3 836-3 846.
- [12] 赵建贵, 王国梁, 张宇, 等. 番茄苗期叶位色素含量高光谱检测及可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(2): 386-391.
- ZHAO J G, WANG G L, ZHANG Y, et al. Hyperspectral detection and visualization of pigment content in tomato seedling stage[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44 (2): 386-391.
- [13] SUN M, WANG R, CHEN X H, et al. Application of hyperspectral imaging technique for cordyceps powder content and true/false identification[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2017, 34(8): 1 114-1 117.
- [14] LIU Y W, PU H B, SUN D W. Hyperspectral imaging technique for evaluating food quality and safety during various processes: a review of recent applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 69: 25-35.
- [15] LIU Y H, SUN Y, XIE A G, et al. Potential of hyperspectral imaging for rapid prediction of anthocyanin content of purplefleshed sweet potato slices during drying process[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10: 3 836-3 846.
- [16] YANG Y C, SUN D W, PU H, et al. Rapid detection of anthocyanin content in lychee pericarp during storage using hyperspectral imaging coupled with model fusion[J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 103: 55-65.
- [17] CHEN S S, ZHANG F F, NING J F, et al. Predicting the anthocyanin content of wine grapes by NIR hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2015, 172: 788-793.
- [18] 孙红梅, 李振, 彭喜春, 等. 不同产地枸杞子中多糖含量的比较研究[J]. 中国食物与营养, 2021, 27(3): 58-61.
- SUN H M, LI Z, PENG X C, et al. Comparative study on polysaccharide content in Lycium fructans of different origin [J]. Chinese Food and Nutrition, 2021, 27(3): 58-61.
- [19] CHENG J H, JIN H L, LIU Z W. Developing a NIR multispectral imaging for prediction and visualization of peanut protein content using variable selection algorithms[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 88: 92-96.
- [20] LIU C Y, MENG J, QIU J Y, et al. Structural characterization and prebiotic potential of an acidic polysaccharide from Imperial Chrysanthemum[J]. Natural Product Research, 2022, 36(2): 586-594.
- [21] XU D, XIAO J, JIANG D Z, et al. Inhibitory effects of a water-soluble jujube polysaccharide against biofilm-forming oral pathogenic bacteria[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 208: 1 046-1 062.
- [22] PENG X B, LI Q, OU L N, et al. GC-MS, FT-IR analysis of black fungus polysaccharides and its inhibition against skin aging in mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 47(2): 304-307.
- [23] JIANG H, YANG S Q, CHAKKA V P, et al. Purification and biological activities of enzymatically degraded Sargassum fusiforme polysaccharides[J]. Chemistry & Biodiversity, 2021, 18(3): e2000930.
- [24] PU H, SUN D W, MA J, et al. Hierarchical variable selection for predicting chemical constituents in lamb meats using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 143: 44-52.
- (上接第 22 页)
- [24] WANI A A, SINGH P, SHAH M A, et al. Rice starch diversity: effects on structural, morphological, thermal, and physicochemical properties: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2012, 11(5): 417-436.
- [25] ZHAN Q, YE X, ZHANG Y, et al. Starch granule-associated proteins affect the physicochemical properties of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105504.
- [26] PANG Z, BOUROUIS I, SUN M, et al. Physicochemical properties and microstructural behaviors of rice starch/soy proteins mixtures at different proportions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 2 061-2 069.
- [27] TESTER R F. Properties of damaged starch granules: composition and swelling properties of maize, rice, pea and potato starch fractions in water at various temperatures[J]. Food Hydrocolloids, 1997, 11(3): 293-301.
- [28] DING Y, CHENG J, LIN Q, et al. Effects of endogenous proteins and lipids on structural, thermal, rheological, and pasting properties and digestibility of adlay seed (*Coix lacryma-jobi* L.) starch[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106254.
- [29] BAXTER G, ZHAO J, BLANCHARD C. Albumin significantly affects pasting and textural characteristics of rice flour[J]. Cereal Chemistry Journal, 2010, 87(3): 250-255.
- [30] CHI C, LI X, ZHANG Y, et al. Understanding the mechanism of starch digestion mitigation by rice protein and its enzymatic hydrolysates[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 473-480.
- [31] XIE L, CHEN N, DUAN B, et al. Impact of proteins on pasting and cooking properties of waxy and non-waxy rice[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(2): 372-379.
- [32] 陈凤莲, 孙贵尧, 安然, 等. 不同品种和粒度对米粉糊化特性及米蛋糕品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 75-82.
- CHEN F L, SUN G Y, AN R, et al. Gelatinization characteristics of rice flour with different varieties and particle sizes and their effects on the quality of rice cakes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 75-82.