

近红外光谱技术在中药质量监控中的研究进展

胡杨¹, 李先芝^{1,2*}, 刘洋¹, 林露¹, 杨峰¹

(1. 劲牌有限公司, 湖北大冶 435100; 2. 中药保健食品质量与安全湖北省重点实验室, 湖北大冶 435100)

摘要 我国是中药用药大国, 但我国的中药市场混乱, 劣质、掺假事件时有发生。建立一种快速、高效的中药质量鉴别方法是改善中药市场混乱现状的有效方法。近红外光谱技术以快速、高效、便捷、无污染等优势受到中药行业研究者的青睐, 目前已广泛运用于中药材的鉴别、定量分析以及在线监控等多个领域。综述了近年来近红外光谱技术在中药质量控制中的研究进展, 以期为后续研究奠定基础。

关键词 中药材; 近红外光谱技术; 质量监控

中图分类号 R288 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)01-0008-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress of Near Infrared Spectroscopy in Quality Control of Traditional Chinese Medicine

HU Yang¹, LI Xian-zhi^{1,2}, LIU Yang¹ et al (1. Jing Brand Co., Ltd., Daye, Hubei 435100; 2. Hubei Provincial Key Lab for Quality and Safety of Traditional Chinese Medicine Health Food, Daye, Hubei 435100)

Abstract China is a big country in the use of traditional Chinese medicines, but China traditional Chinese medicine market is chaotic, and incidents of inferior quality and adulteration occur from time to time. Establishing a fast and efficient method for identifying the quality of Chinese medicine is an effective way to improve the current chaotic situation of the Chinese medicine market. Near-infrared spectroscopy technology is favored by researchers in the traditional Chinese medicine industry due to its advantages of speed, efficiency, convenience, and pollution free. It has been widely used in many fields such as identification, quantitative analysis, and online monitoring of traditional Chinese medicines. The research progress of near-infrared spectroscopy in the quality control of traditional Chinese medicine in recent years is reviewed in order to lay the foundation for follow-up research.

Key words Chinese medicinal materials; Near-infrared spectroscopy technology; Quality monitoring

我国是中药种植生产消费大国, 具有悠久的中药用药历史。中药是我国的传统药物, 在防病治病中扮演着重要角色, 而中药质量的控制是保证中药安全和发挥疗效作用的前提。随着科技的快速发展, 各种新技术、新手段不断应用于传统中药生产与质量控制。中药质量控制的方法有液相色谱法、气相色谱法、紫外分光光度法、薄层色谱法等, 但这些方法通常需要花费大量时间用于样品处理, 不能同步于中药的生产过程, 具有一定的滞后性。近年来, 以近红外光谱技术(near infrared reflectance spectroscopy, NIRS)为代表的中药检测分析技术被广泛运用于中药质量控制。近红外光谱技术是一种把化学计量学算法与近红外光谱检测技术融合到一起, 利用有机化学物质在近红外谱区内的光学特性快速判定物质化学组分及测定含量的光谱技术^[1-2]。该技术具有操作简单、快速分析、无污染以及在线控制等优势, 最重要的是可以直接对样品进行测定, 基本不需对样品进行处理或仅需简单的处理, 对于解决中药质量控制的滞后问题具有明显的优势。因此, 近红外光谱技术在中药的定性、定量分析以及在线控制方面得到广泛应用, 在筛查假冒伪劣药材中发挥着越来越重要的作用。笔者就近红外光谱技术在中药定性分析、定量分析、在线监控 3 个方面进行综述, 以期为后续研究奠定基础。

1 近红外光谱技术在中药定性分析方面的研究与应用

对中药材的定性鉴别是保障中药材质量的主要手段之

一, 如何快速有效地鉴别出中药材的产地、真伪等信息是中药材质量控制过程中急需解决的问题。传统的鉴别方法存在耗时长、时效慢等缺陷, 而近红外光谱分析技术在中药材定性鉴别方面因具有操作简单、快速、实时监测鉴别等优点而逐渐成为中药材定性鉴别的重要手段。

1.1 产地鉴别 我国中药材产地分布广泛, 大多数中药材具有多个产地, 同种药材在不同的产地会因气候及生长环境等因素影响呈现出不同的药用价值和疗效, 因此中药材产地的鉴别是以确保中药疗效及用药安全为前提。对中药材产地的鉴别是近红外光谱技术的一大亮点, 同传统鉴别技术相比, 近红外光谱技术能够准确鉴别出中药材是否来源于地道药材产区。

高鸿彬等^[3]采用近红外光谱技术对不同产地的覆盆子药材进行检测, 通过结合聚类分析、相似度计算和主成分分析多种模式识别技术对样品进行定性分析, 实现了不同产地覆盆子药材的快速无损鉴别。马天翔等^[4]利用近红外漫反射光谱技术并结合二阶导数光谱、化学计量学技术, 快速鉴别 5 个不同产地的锁阳, 结果表明该方法可以准确鉴别出不同产地的锁阳, 同时也研究出了区分不同产地锁阳的差异波数。姜亦南等^[5]采用傅里叶变换近红外光谱法结合 SIMCA 模式识别技术对 10 个不同产地共 50 批次的三七样品进行了产地鉴别, 建立的模型对样品的识别率高达 100%, 能够很好地鉴别出三七药材的产地。同时, 郑洁等^[6]以不同产地的苦杏仁和桃仁药材为研究对象, 基于高光谱成像技术采集苦杏仁、桃仁药材的光谱信息, 利用偏最小二乘法判别分析(PLS-DA)、支持向量机(SVM)和随机森林(RF)方法分别建

基金项目 湖北省科技计划项目(2018ACA125)。

作者简介 胡杨(1993—), 男, 湖北大冶人, 硕士研究生, 研究方向: 产品质量控制。* 通信作者, 硕士, 从事产品质量控制研究。

收稿日期 2021-04-20

立分类模型,建立的模型能准确鉴别不同产地苦杏仁、桃仁药材。此外,王磊等^[7]采用近红外高光谱图像系统采集了多批不同产地的宁夏枸杞的检测数据,利用 ZCA 白化、支持向量机、Fisher 线性判别分析及 Softmax 分类等处理方法建立模型,试验结果表明该模式可以有效鉴别宁夏枸杞的产地。

1.2 真伪鉴别 随着中药材市场的蓬勃发展,对中药材的需求量日渐增大,甚至出现供不应求的现象。一些不法商人为了谋取利益在中药材中掺假的现象时有发生。目前,我国中药材质量参差不齐、难以控制的一个重要原因是中药材真伪难以鉴别。传统的中药材鉴别方法主要有经验鉴别、理化鉴别、显微鉴别、色谱法等手段,然而这些鉴别手段需要耗费较长的时间,且过程烦琐复杂。因此,建立一种快捷有效的鉴别方法迫在眉睫。近红外光谱技术以其快捷、高效、无污染等优势,逐渐成为中药材真伪鉴别的重要手段。

李春美等^[8]利用近红外光谱以及 TQ Analyst 软件建模相结合的方式,建立三七药材的样品模型,实现了中药三七的真伪识别与产地分析的预测,建立的模型对三七药材的识别率高于 80%,能有效实现中药三七的真伪识别。李庆等^[9]利用云端-互联便携式近红外技术结合化学计量学对名贵药材西红花与其常见伪品(红花、玉米须、莲须、菊花、纸浆)和掺伪品进行现场快速真伪鉴别及掺伪量的定量预测,采用偏最小二乘判别分析分步建立西红花与其伪品、西红花与其掺伪品鉴别模型,试验结果表明:建立的模型能较好地预测西红花掺伪品的掺伪量。同时,韩莹等^[10]采集多份不同地区的何首乌和制首乌样品以及其伪品白首乌、冀蓼、毛脉蓼的近红外光谱图,利用近红外光谱技术结合化学计量学方法,建立一致性检验模型,并对不同产地何首乌进行聚类分析。结果表明,所建模型能够准确快速识别何首乌的伪品,且鉴别的准确率较高。Sun 等^[11]通过使用近红外(NIR)光谱结合化学计量学方法,探索了鉴定功能食品山楂果实粉(HFP)中的 2 种廉价掺杂物(麦芽糖糊精和淀粉)的可行性。通过建立的偏最小二乘判别分析(PLS-DA)模型,可将掺假的 HFP 与真实的 HFP 区别开来,同时使用偏最小二乘回归(PLSR)模型来确定掺假物的含量。与此同时,刘征辉等^[12]利用近红外光谱方法识别了金银花和山银花的差异性,在主成分分析的基础上利用 SIMCA 模式识别原理对金银花和山银花分别建立了类模型,模型基本能正确识别金银花和山银花,结论充分表明了近红外光谱结合 SIMCA 模式识别方法在金银花和山银花分类识别中的可行性。

1.3 炮制品鉴别 中药炮制是中医临床用药必备的一道工序,是根据临床用药要求和中药自身差异性的特点而发展起来的一种制药技术。中药经炮制后,可使其化学成分、含量发生变化,例如降低毒性^[13]、增强疗效^[14]、改变药性^[15]等,从而改变其药理作用。但经炮制后的药材其炮制程度、炮制后的药效如何,无法用肉眼观察,近红外光谱技术可快速鉴别出炮制药材的真伪、炮制后含量的变化。

钟永翠等^[16]以 96 批栀子不同炮制品为研究对象,高效液相色谱测定栀子苷含量为参考值,利用近红外光谱仪积分

球漫反射测定其光谱图,采用偏最小二乘法对 83 批栀子样品建立栀子苷的定量校正模型,以 13 批栀子不同炮制品对模型进行验证,试验结果表明模型预测性较好。邓芳等^[17]通过近红外光谱法与 HPLC 技术结合,采用偏最小二乘法建立了快速测定附子中双酯型生物碱含量的分析模型,结果表明该方法可实现大批量样品的快速分析,为毒性药材附子双酯型生物碱的在线检测与快速筛查提供了新思路和新方法。张晓冬等^[18]利用主成分判别分析和聚类分析建立炉甘石生品、伪品和炮制品的近红外光谱鉴别模型,结果显示所建立的近红外主成分判别分析模型和聚类分析模型均可用于炉甘石生品、伪品和炮制品的鉴别。此外,张佳欢等^[19]建立了薏苡仁主要成分甘油三油酸酯的近红外定量模型和薏苡仁生品与麸炒炮制品的近红外定性鉴别模型。结果表明,建立的近红外定量定性模型可用于薏苡仁甘油三油酸酯含量的快速测定和薏苡仁不同炮制品的快速鉴定。马丹等^[20]采用近红外光谱分析技术采集了多批唐古特大黄及其不同炮制品图谱数据,并建立正交偏最小二乘-判别分析(OPLS-DA)模型对样品光谱进行模式识别,结果显示所建的 OPLS-DA 模型能够较为准确地对唐古特大黄及其炮制品进行鉴别。

1.4 品种鉴别 同属中药材之间亲缘关系较近,其化学成分也非常接近,但是彼此之间化学成分的种类及其含量存在一定的差异性。然而采用传统手段对这些差异性的鉴别耗时长、效率低,利用近红外光谱技术与化学计量学方法相结合的方法可快速准确应用于药用植物近缘种之间的分类鉴定。

Chen 等^[21]以 3 个品种的 139 批菊花为研究对象,利用近红外光谱技术,采用偏最小二乘法建立了菊花种类鉴别模型,其中大白菊、胡菊和小白菊 3 个品种校正集的准确率均高于 94%,预测集的准确率均在 86% 以上。结果表明,近红外光谱技术可有效鉴别菊花种类。刘珈羽等^[22]运用近红外光谱技术采集不同品种白及粉样品的近红外光谱图,采用聚类分析方法建立白及粉末鉴别模型,并进行模型的外部验证和内部验证,结果显示白及粉与其同属黄花白及、小白及能够分别聚为一类,内部验证准确率达到 100%,外部验证准确率达到 90%。结果表明,该方法可有效鉴别白及同属药材。邢琳等^[23]利用傅里叶变换近红外光谱技术与化学计量学相结合,建立了 4 种不同类别人参样品的定性聚类模型,建立的定性聚类模型对 4 种样品的识别率均在 97% 以上,可以有效地对不同类别的人参进行鉴别。黄芳等^[24]利用近红外光谱技术采集了黔产金钱草及 4 种同属伪品样品光谱图,利用光谱信息及相似度进行对比分析,金钱草及同属植物样品中每个品种之间总体上具有较高的相似度,但 5 个品种彼此之间相似度总体比较小,可以以此区别开每个品种,从而实现这 5 个品种的定性鉴别。此外,杨吉等^[25]利用近红外漫反射光谱法对 9 种 540 个灵芝样品进行近红外漫反射光谱指纹图谱采集,运用主成分分析方法和基于明氏距离度量的聚类分析进行判别分析,并通过聚类分析获得了不同灵芝品种间相似性和差异性的分类界限特征,从而达到对不同类别灵芝

的鉴别。

2 近红外光谱技术在中药定量分析方面的研究与应用

只通过定性鉴别并不能全面地反映出药材的质量,因此还需要对中药材进行定量鉴别。传统的定量分析检测技术(如液相色谱法等),样品的前处理过程烦琐,对操作的要求比较高。近红外光谱技术因具有操作简单、分析速度快、对样品无污染等特点逐渐成为中药材定量分析的重要手段。

2.1 近红外光谱技术对中药材中水分含量的测定

水分是影响中药材质量的重要因素,水分过多则会导致药材霉变,因此药典中对中药材中的水分有着严格的要求。对中药材中水分的检测主要采用药典中的甲苯法、烘干法及减压干燥法,然而这些方法耗时长,操作步骤烦琐,不适合大批量样品的检测。近红外光谱技术具有操作简便、检测速度快等优点,适用于大规模、常规性的中药检测。

李智勇等^[26]基于声光可调滤光器-近红外技术建立了一种麸炒白术水分和浸出物含量检测模型,通过该模型可以准确预测麸炒白术的水分和浸出物含量。杨天鸣等^[27]用近红外光谱仪采集中药金银花粉末的近红外漫反射光谱,运用偏最小二乘回归(PLSR)分析建立了金银花中水分含量定量模型,对金银花中的水分含量进行快速测定。张会梅等^[28]利用近红外漫反射光谱法结合化学计量法建立一种快速测定麦门冬药材中水分含量的方法,与传统的烘干法相比,该方法分析效率较高、不破坏样品。曾海松等^[29]利用近红外(NIR)光谱技术采集不同批次香橼药材的近红外光谱图,以高效液相色谱法测定香橼中柚皮苷含量、甲苯法测定香橼药材含水量,结合偏最小二乘法(PLS),建立香橼中柚皮苷和含水量的近红外定量分析模型,可用于香橼药材柚皮苷含量和水分定量分析,该方法大幅缩短了药材的检验周期。

2.2 近红外光谱技术对中药材中有效成分含量的测定

药典中对中药材的质量评价通常以中药材中的有效成分作为评价指标。对这些有效成分的传统检测方法有液相色谱法^[30-31]、紫外分光光度法^[32]等,然而这些传统的检测手段需要对样品做复杂的前处理,操作要求高,且对药材的损耗较大。采用近红外光谱分析技术对药材中有效成分进行定量分析时,正好可以改善传统检测方法的缺陷。

张江山等^[33]以109份白芍饮片作为研究对象,采用近红外漫反射光谱技术采集样本光谱信息,以HPLC测定的含量作为参考值,运用偏最小二乘法建立了白芍总苷成分(芍药苷、芍药内酯苷、苯甲酰芍药苷)、没食子酸和 β -PG 3个定量分析模型。结果显示,该定量分析模型能够快速检测出上述5种化学成分的含量,结果准确可靠。卢泳等^[34]采用HPLC测定防风药材中2种色原酮的质量分数,并采用NIRS结合偏最小二乘法(PLS),建立2种色原酮成分质量分数间的定量校正模型,该方法可快速、准确地对防风中2种色原酮成分进行定量分析。此外,雷晓晴等^[35]采用近红外光谱(NIRS)技术结合偏最小二乘法(PLS)建立当归中多指标成分的快速无损检测方法。解育静等^[36]收集86批不同产地的肉桂,采用HPLC法测定不同批次肉桂饮片中香豆素、肉桂

醇、肉桂酸、肉桂醛的含量,同时采集不同批次肉桂的NIR光谱,采用偏最小二乘法建立肉桂中4种成分的定量分析模型,该试验所建立的近红外定量分析模型具有较好的准确性,可用于这4种成分的快速同步测定。

3 近红外光谱技术在中药生产过程中的研究与应用

随着市场对中药材需求量的逐渐增大,中药材流通的速度也愈发加快,对于中药材的质量把控也越来越严格,逐渐趋向于在生产线上的监控。近红外光谱检测技术已经应用于中药材的生产过程中。

匡艳辉等^[37]探索一种近红外光谱用于判定复方丹参片生产过程中微量冰片混合均匀性的方法,所建立的方法能快速有效判定复方丹参片生产过程中冰片混合的均匀性。周雨枫等^[38]利用近红外光谱分析技术(NIRS),建立一种可用于三七提取过程的在线检测方法,以UPLC作为参比分析方法测定皂苷含量,利用偏最小二乘法(PLS)建立皂苷定量模型。结果表明,NIRS可以反映三七提取过程中皂苷含量的变化,预测结果的相对偏差满足中药活性成分在线检测的要求。杨越等^[39]建立了金银花提取过程多变量统计过程控制(MSPC)模型,对金银花提取过程进行在线监控。采用近红外光谱(NIRS)仪在线采集多批次金银花提取过程光谱数据,结合MSPC技术建立统计模型来监测投料及过程操作参数等异常波动,并建立了金银花提取过程轨迹及提取过程随时间变化的趋势,结果应用建立的MSPC模型可观测到金银花提取过程的质量变化,对正常批次的监控未出现误报,稳定性和重复性良好。此外,吕尚等^[40]将近红外光谱技术与高效液相色谱法结合,采用偏最小二乘法建立银杏叶提取过程中鞣质素、山柰素、异鼠李素指标的定量校正模型,近红外光谱透射技术可以有效反映银杏叶提取过程总黄酮醇苷含量变化信息,可用于银杏叶提取浓缩过程的快速检测。

4 近红外光谱技术在中药材的品质与功能评价方面的应用

中药品质是中药产业的生命线,是发挥临床用药疗效的依据。近年来在中药材监管方面取得了一定的效果,但仍不能满足中药材品质监控的要求。因此,建立一种快速鉴别中药材质量的评价体系具有重要的现实意义。有研究者以中药质量标志物为核心,利用近红外光谱技术建立了中药材品质和功能性评价的体系,为中药材质量监控提供了新的思路。

白钢等^[41]以中药质量标志物为切入点,围绕从化学标志物到质量标志物的研究路径,通过深入挖掘特定药材质量标志物的近红外光谱特征,探讨了建立以质量标志物为核心的近红外光谱检测方法的可行性。同时,白钢等^[42]首次提出质量综合评价指数(Fq)的概念,并以当归药材为例,通过多项检测指标的整合分析,利用近红外光谱技术构建多项检测指标与光谱之间的拟合模型,建立一种药材品质综合评价与等级划分的方法。闫孟琳等^[43-44]通过筛选当归中对NF- κ B具有抑制活性的质量标志物以及当归Ca²⁺拮抗作用的质量标志物,建立一种利用近红外光谱快速评价当归抗炎功效以及扩血管功效的方法,为中药材品质的快速分析提供了新

的研究范式和解决方案。

5 小结

近红外光谱分析技术以其检测速度快、准确度高、样品处理简单、对样品无污染等优势越来越受到中药制药行业的青睐,已广泛运用于中药的真伪鉴别、产地鉴别、含量测定以及在线监控等方面。虽然近红外光谱技术有较大优势,但仍存在一定的局限性。首先,近红外光谱技术应用于中药质量监控时,需要收集大量具有代表性的样品检测数据,建立样品的定性定量分析模型,且建立的模型必须有足够的准确性,该过程需要投入大量的人力、物力、财力。其次,由于近红外自身的原理,被测样品的有效成分含量要高于 0.1%,然而有些药材中的有效成分含量往往达不到近红外光谱分析的检测浓度下限,从而大大限制了近红外光谱技术在中药材分析上的应用。综上所述,近红外光谱分析技术改善了中药材质量控制检测速度慢、检测时间长、提高中药材产品质量等现状,但是目前整体研究水平限制了其在中药质量监控的全面推广使用,因此完善中药材的光谱模型系统并提高模型的稳定性和准确率,将是未来研究的重点。

参考文献

[1] 汪方舟. 近红外光谱建模法在中药质检中的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 787-790.

[2] 何月云, 梁华伦, 苏青豪, 等. 近红外技术在柴胡颗粒中黄芩苷快速检测的应用研究[J]. 今日药学, 2019, 29(7): 461-463, 467.

[3] 高鸿彬, 瞿敏, 刘浩, 等. 不同产地覆盆子的近红外漫反射快速无损鉴别[J]. 世界中医药, 2020, 15(10): 1386-1390.

[4] 马天翔, 顾志荣, 马转霞, 等. 不同产地锁阳近红外光谱鉴别分析[J]. 中国中医药信息杂志, 2020, 27(4): 66-69.

[5] 姜亦南, 蔺明煊, 何帅, 等. 基于红外光谱法结合 SIMCA 模式识别不同产地三七[J]. 中医药学报, 2019, 47(1): 54-57.

[6] 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.

[7] 王磊, 覃鸿, 李静, 等. 近红外高光谱图像的宁夏枸杞产地鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(4): 1270-1275.

[8] 李春美, 陈娜, 谭超, 等. 基于光谱技术实现中药三七的真伪识别及产地分析[J]. 当代化工, 2020, 49(5): 834-837.

[9] 李庆, 闫晓剑, 赵魁, 等. 基于云端-互联便携式近红外技术现场快检西红花真伪[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(10): 3029-3037.

[10] 韩莹, 毕福钧, 侯惠婵, 等. 近红外光谱法鉴别何首乌真伪的应用研究[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(22): 4394-4398.

[11] SUN X F, LI H L, YI Y, et al. Rapid detection and quantification of adulteration in Chinese hawthorn fruits powder by near-infrared spectroscopy combined with chemometrics [J/OL]. Spectrochimica acta part A: Molecular and biomolecular spectroscopy, 2020, 250 [2020-11-17]. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119346>.

[12] 刘正辉, 魏静娜, 赵琳琳, 等. 近红外光谱技术在金银花和山银花鉴别中的应用研究[J]. 中国现代中药, 2020, 22(1): 58-64.

[13] 王雪, 王丽, 廖秀, 等. 苗药铁筷子不同炮制品中 4 种成分含量及毒性的比较研究[J]. 中国药房, 2020, 31(12): 1475-1480.

[14] 李娟, 李姗姗, 庞金龙, 等. 碱制法炮制可显著增强斑蝥的抗肿瘤作用[J]. 南方医科大学学报, 2020, 40(9): 1332-1339.

[15] 黄鑫, 王妮, 张娜, 等. 基于神经化学分析研究炮制对人和西洋参药性的影响[J]. 分析化学, 2019, 47(6): 957-963.

[16] 钟永翠, 杨立伟, 邱蕴琦, 等. NIRS 法对梔子不同炮制品梔子苷含量的快速检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(6): 1771-1777.

[17] 邓芳, 杨学军, 罗准. 近红外光谱技术快速测定附子及其炮制品中双酯型生物碱含量[J]. 中国药业, 2018, 27(14): 12-15.

[18] 张晓冬, 陈龙, 白玉, 等. 近红外光谱结合主成分分析和聚类分析鉴别炉甘石生品、伪品和炮制品[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(12): 1-8.

[19] 张佳欢, 罗云云, 杜伟峰, 等. 薏苡仁近红外光谱快速定量模型的建立[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(6): 1325-1327.

[20] 马丹, 顾志荣, 张玉伟, 等. 唐古特大黄及其不同炮制品的近红外光谱分析[J]. 中药材, 2015, 38(9): 1842-1845.

[21] CHEN C W, YAN H, HAN B X. Rapid identification of three varieties of *Chrysanthemum* with near infrared spectroscopy [J]. Revista brasileira de farmacosia, 2014, 24(1): 33-37.

[22] 刘珈羽, 李峰庆, 郭焕, 等. 白及粉品种近红外快速定性鉴别模型的建立[J]. 成都中医药大学学报, 2018, 41(1): 34-37.

[23] 邢琳, 汪树理, 任晋明, 等. 傅里叶变换近红外光谱结合化学计量学对不同类别人参的快速无损鉴别研究[J]. 上海中医药杂志, 2019, 53(7): 75-82.

[24] 黄芳, 张彪, 周汉华. 基于近红外光谱法快速鉴别黔产金钱草及同属易混品的研究[J]. 江西化工, 2018(5): 81-85.

[25] 杨吉, 洗玲, 钟天圣, 等. 近红外光谱指纹图谱的灵芝品种快速鉴别方法[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(6): 1359-1361.

[26] 李智勇, 王洛临, 卢泳, 等. 麸炒白术水分和浸出物含量近红外检测模型建立[J]. 辽宁中医药大学学报, 2020, 22(2): 22-25.

[27] 杨天鸣, 和顺芳, 孙丽英, 等. 近红外漫反射光谱法快速测定金银花中水分含量[J]. 化学与生物工程, 2020, 37(6): 66-68.

[28] 张会梅, 刘雪, 李德坤, 等. 近红外光谱技术快速测定麦门冬药材中水分的含量[J]. 天津中医药大学学报, 2018, 37(5): 416-419.

[29] 曾海松, 李伟, 顾东华. 香橼药材水分和柚皮苷近红外快速定量分析模型的建立[J]. 中国药师, 2019, 22(9): 1753-1756.

[30] 高天阳, 蒋亚奇, 李启艳, 等. 高效液相色谱法测定红参中 12 种人参皂苷的含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(1): 175-181.

[31] 杜俊潮, 浦香兰, 范恺磊, 等. 基于 UPLC 指纹图谱及一测多评法的天麻标准汤剂质量评价研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(20): 4909-4917.

[32] 吴银双, 张美, 黎勇坤, 等. 尖子木不同部位 5 种有效成分及总黄酮、总皂苷的含量测定[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(9): 2057-2061.

[33] 张江山, 张振凌, 闫梦真, 等. 基于 NIR 技术建立同时测定白芍饮片 5 种成分的定量分析模型[J]. 中华中医药学刊, 2020, 38(8): 133-138, 273.

[34] 卢泳, 孙冬梅, 王洛临, 等. 基于近红外光谱法对防风中色原酮含量快速测定的研究[J]. 广东药科大学学报, 2019, 35(4): 517-522.

[35] 雷晓晴, 王秀丽, 李耿, 等. 近红外光谱法快速测定当归中 7 种成分的含量[J]. 中草药, 2019, 50(16): 3947-3954.

[36] 解育静, 张家楠, 朱冬宁, 等. 肉桂中 4 种成分近红外定量分析模型的建立[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(2): 119-123.

[37] 匡艳辉, 唐海蛟, 王德勤, 等. 基于近红外光谱判定复方丹参片生产过程中冰片的混合均匀性[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(6): 7-11.

[38] 周雨枫, 周立红, 张凤莲, 等. 近红外光谱技术在三七提取过程中的在线控制[J]. 中药材, 2019, 42(10): 2367-2370.

[39] 杨越, 王磊, 刘雪松, 等. 近红外光谱结合多变量统计过程控制 (MSPC) 技术在金银花提取过程在线实时监控中的应用研究[J]. 中草药, 2017, 48(17): 3497-3504.

[40] 吕尚, 周海滨, 汪俊, 等. 基于近红外光谱的银杏叶提取液总黄酮醇苷快速检测研究[J]. 药物分析杂志, 2017, 37(5): 927-933.

[41] 白钢, 侯媛媛, 丁国钰, 等. 基于中药质量标志物构建中药材品质的近红外智能评价体系[J]. 药学报, 2019, 54(2): 197-203.

[42] 白钢, 刘昌孝, 张铁军, 等. 基于质量综合评价指数的药材品质快速评价[J]. 中草药, 2021, 52(2): 313-320.

[43] 闫孟琳, 从龙飞, 张子玥, 等. 基于质量标志物的当归抗炎功效近红外快速评价[J]. 分析测试学报, 2020, 39(11): 1320-1326.

[44] 闫孟琳, 丁国钰, 从龙飞, 等. 基于质量标志物的当归血管舒张功效的近红外快速评价[J]. 中草药, 2019, 50(19): 4538-4546.