

DOI: 10.12086/oe.2021.210075

基于高光谱成像技术的绿松石 在线鉴别系统研发

吴金泉^{1*}, 王戩¹, 熊伟¹,
黄昆鹏¹, 林兆祥¹, 冯欣²

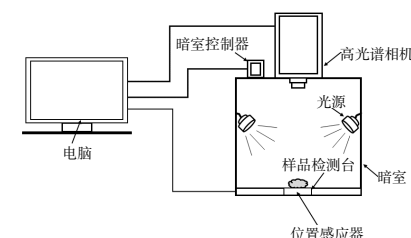
¹中南民族大学, 湖北 武汉 430074;

²中国藏学研究中心, 北京 100101

摘要: 为了避免常见的绿松石处理品及伪品入药, 本文针对药用绿松石原矿样品, 利用高光谱成像技术开展了绿松石在线鉴别系统的研发。依据全国各地有代表性的天然绿松石原矿样品的高分辨光谱数据, 获取了标准谱线, 并验证了其普适性。针对市面上常见的绿松石伪品和处理品, 分析了在 400 nm~1000 nm 和 400 nm~600 nm 范围内的相关性系数的差异, 探索出了实现绿松石真伪鉴别的新方法, 并在此基础上构建了实验样机系统。为藏医药的矿物原材料筛选提供技术支持, 促进藏医药的现代化发展。

关键词: 高光谱成像技术; 绿松石; 近红外光谱; 双尺度; 相关系数

中图分类号: TS933.21; O657.3



文献标志码: A

吴金泉, 王戩, 熊伟, 等. 基于高光谱成像技术的绿松石在线鉴别系统研发[J]. 光电工程, 2021, 48(7): 210075

Wu J Q, Wang J, Xiong W, et al. Development of online identification system for turquoise based on hyperspectral imaging technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(7): 210075

Development of online identification system for turquoise based on hyperspectral imaging technology

Wu Jinqun^{1*}, Wang Jian¹, Xiong Wei¹, Huang Kunpeng¹, Lin Zhaoxiang¹, Feng Xin²

¹Central South University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China;

²China Tibetology Research Center, Beijing 100101, China

Abstract: To prevent people from using the processed turquoise and counterfeit turquoise in medicine, this paper focuses on identifying the raw materials of medicinal turquoise. A turquoise identification system was developed using hyper-spectral imaging technology. The sample standard spectral line was obtained while the applicability was analyzed by the present sample, based on the high-resolution spectral data of ore samples from 6 representative producing areas of natural turquoise in China. A new method was summarized by the differences in correlation coefficients in the range of 400 nm~1000 nm and 400 nm~600 nm of the fake turquoise on the market and an experimental prototype system to identify the true or false of turquoise was developed. Further research will provide technical support to select raw materials in mineral medicine, which will greatly promote the modernization of Tibetan

收稿日期: 2021-03-17; 收到修改稿日期: 2021-06-28

基金项目: 国家重大研发专项(重大新药创制 2014zx09301308)

作者简介: 吴金泉(1976-), 女, 高级实验师, 主要从事高光谱检测技术及仪器的研究。E-mail: 470461530@qq.com

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

medicine.

Keywords: hyperspectral imaging technology; turquoise; near-infrared spectroscopy; dual-scale; correlation coefficient

1 引言

绿松石是一种富含多种微量元素的铜铝磷酸盐矿物,在中国具有丰富的矿藏储量^[1-2]。绿松石除了能够加工成念珠、摆件等饰物外,在藏区还是一种经典的矿物药材,对于治疗风寒、降低血压、调节呼吸系统及治疗肝脏疾病等有着极佳的功效^[3],具备较高的药用价值。

由于绿松石的经济价值较高,市场上充斥着各种仿制品和处理品。当前,对绿松石的鉴别是一个巨大的挑战,国内外科研团队已经在此领域进行过许多探索:曲雁等^[4]人利用宝石显微镜、紫外-可见光谱仪、傅里叶红外光谱仪对“微沁”处理绿松石样品进行了测试分析;陈全莉等^[5]人利用红外反射光谱技术,鉴别了市面上所流通的经过充填或者压制处理过的绿松石、仿绿松石以及天然绿松石;左锐等^[6]人运用傅里叶变换红外光谱仪技术,鉴别出了不同种经过丙烯酸酯类聚合物来处理过的绿松石样品;徐娅芬等^[7]人通过电子显微镜、激光拉曼光谱仪以及紫外可见光谱仪,对湖北天然绿松石、浸胶绿松石以及注蜡绿松石开展了研究,发现了其红外、拉曼以及紫外的光谱吸收特征峰; Bettina 等^[8]人利用分析热解和红外光谱法很好地区分了天然绿松石和合成绿松石。上述的研究结果表明,通过红外吸收光谱等方法可以对绿松石及其处理品进行区分,但是这些方法或多或少都有着一些缺陷:利用宝石的折射率、色散和密度的传统宝石鉴定方法,不能测定非透明的绿松石矿石;使用电子显微镜检测需要对样品进行切片处理,会对样品造成破坏;尽管使用紫外光谱和拉曼光谱技术也能够同时分辨天然绿松石、沁胶绿松石和注蜡绿松石,但是这些方法对于检测环境的要求比较苛刻,只能在专业实验室中开展,无法满足工业现场环境下快速分拣的应用需求。

高光谱成像技术是一种新兴、先进、非破坏性的光学检测手段,它具有获取光谱及成像的双重功能,其结合了传统成像技术和光谱技术的优点,可以快速高效地同时获得被测物体的空间信息和光谱信息,实现样品的图谱合一^[9]。同时,高光谱成像技术具有上百个波段、光谱检测范围广和光谱分辨率高的优点,采集到的光谱图像信息数据丰富且识别度较高。与传

统的成像技术相比,高光谱成像技术可以分辨出更细微的、图像难以识别的物体外部差异;而与其它光谱技术相比,高光谱技术又能完成多点或整个面的光谱检测。

因此,高光谱成像技术在样品无损检测等方面具有巨大的优势和广阔的应用前景。目前,高光谱分辨技术可以实现空间的遥感遥测,在地质检测、海洋遥感、植被覆盖分析以及军事勘测等方面都有着非常广泛的应用^[10-14];其又能够进行实验室的定性和定量分析,完成农产品和果蔬的无损检测^[15-17]。本文受中国藏学研究中心的委托,将高光谱成像技术应用于绿松石的鉴别分析中,开发了一套可以满足工业现场快速分拣需求的绿松石鉴别系统。

2 系统软件的关键算法

本文针对市场上常见的天然绿松石、绿松石处理品(过蜡绿松石、沁胶过蜡绿松石)和伪品绿松石开展真伪鉴别研究,通过天然绿松石、绿松石处理品、伪品与天然绿松石标准谱线之间的相关性系数差异,利用双尺度鉴别法实现了绿松石的真伪鉴别,相应的分析鉴别算法的具体描述如下。

2.1 相关性系数

样品的高光谱成像信息具有丰富的空间和光谱信息,每一个像元都可以提取出连续的光谱曲线,能够反映该像元处样品的物质成分信息。在同一条件下,由于同一物质的光谱曲线形状相同,因此可将采集到的光谱曲线与已知的参考光谱的曲线形状进行比对分析,以某种相似性测度表征它们之间的相似性或相关程度,根据相似性或相关程度区分物质种类,实现光谱匹配^[18-20]。

在国内外定性鉴别实验中,常将相关性系数作为相似性测度的标准。相关性系数是反映不同特征之间相似度的有效指标,可以用来客观地分析不同变量之间相关性程度的强弱,通常用字母 ρ 来表示。根据 ρ 值的范围,即可实现对样品的分类区分^[19]。对于光谱匹配来说,样品间光谱曲线形状的差异程度,可通过样品光谱间的皮尔森(Pearson)相关系数大小判断。对 Pearson 相关系数有:

$$\rho = \frac{C_{Cov}(X,Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \quad (1)$$

其中: $D(X)$ 、 $D(Y)$ 为 X 、 Y 的方差, $C_{Cov}(X,Y)$ 为变量 X 、 Y 的协方差, 其协方差具体如下:

$$C_{Cov}(X,Y) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\} \quad (2)$$

式中: $E(X)$ 为 X 的期望, $E(Y)$ 为 Y 的期望^[18]。如果两条光谱曲线完全相同, 物质成分一样, 则它们的 Pearson 相关系数 ρ 为 1; 否则其相关系数 ρ 小于 1。

2.2 标准光谱的确定

进行 Pearson 相关系数计算前, 首先需要确定天然绿松石的标准谱线。而国内的绿松石产区主要集中在湖北竹山县、郧西县、陕西白河等地^[21], 因此本文利用双利合谱科技有限公司的 Gaia Sorter 高光谱分选仪(N25E-SWIR), 分别检测了来自湖北的云盖寺、秦古 808 矿、丫角山、洞子沟、七宝寨及陕西的月儿潭等 6 个不同产区的天然绿松石原矿样品, 获取了可见-近红外光谱区的高光谱数据。

本文的仪器参数均设置为: 波段范围为 400 nm~1000 nm, 光谱分辨率为 3 nm, 波段数为 520 个, 空间像素为 960 pixels, 采用的测量方式为漫反射, 扫描方式为面扫描, 采集到的图像像面尺寸为 6.15 mm×14.2 mm。实验前, 先利用标准反射率板进行空白测试, 样品放置在标准反射率板的有效扫描范围内, 镜头焦距设置为 25 mm。

利用 ENVI5.1 软件提取上述 6 种产地天然绿松石

的光谱如图 1 所示, a(云盖寺)、b(秦古 808 矿)、c(丫角山)、d(洞子沟)、e(七宝寨)、f(月儿潭)分别表示这 6 种天然绿松石原矿样品的原始谱线。在图 1 中, 6 种天然绿松石原矿样品的光谱曲线, 虽然绿松石表面及形状的不均匀性致使谱线存在一定的差异, 但其趋势仍呈现出相似性。对这 6 条谱线去本底、取平均后, 得到了代表天然绿松石原矿样品的标准特征谱线, 如图 1(a)中的 STD 所示。

为了验证该标准谱线的普适性, 本文还分别计算了来自上述 6 个产区的其它矿口的 48 份天然绿松石原矿样品的高光谱数据和该标准谱线之间的 Pearson 相关性系数, 结果如图 1(b)所示, 相关性系数均大于 0.97, 均值为 0.9939, 标准差为 0.0038, 方差为 0.000014。其结果说明这 48 份天然绿松石原矿样品的光谱和该标准谱线之间的差异程度小、相似度高, 反映出了该标准谱线具有较高的普适性, 能够作为本文中的国内天然绿松石原矿样品的标准谱线。

本文基于 Pearson 相关性系数, 进一步开展了针对市面上常见绿松石的真伪鉴别研究, 所用样品是随机采购市场上流通的、常见的绿松石样品, 分别标记为天然绿松石样品(TR)、过蜡绿松石样品(GL)、沁胶过蜡绿松石样品(QJGL)以及伪品绿松石(WP), 共计 4 种, 每种绿松石样品的总质量约为 50 g, 其中各样品的直径大小约为 10 mm, 各绿松石样品的外观及命名如表 1 所示。

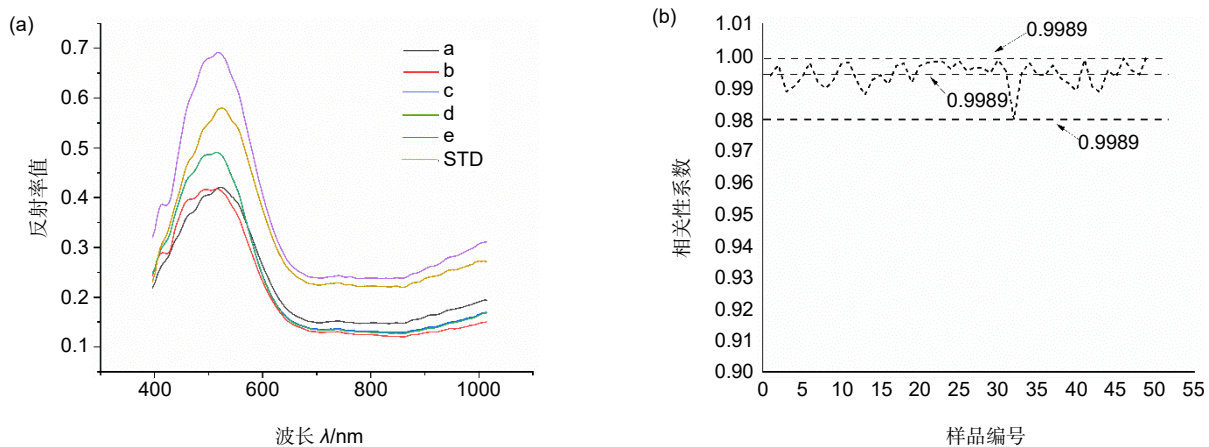


图 1 标准光谱的提取。(a) 天然绿松石样品的光谱图; (b) 各样品光谱与标准光谱之间的相关系数

Fig. 1 Extraction of standard spectra. (a) Spectra of a natural turquoise sample; (b) Correlation coefficient between each sample spectrum and the standard spectrum

表 1 绿松石样品
Table 1 Turquoise samples

样品名	图像	命名	样品名	图像	命名
天然绿松石	图 2(a)	TR	沁胶过蜡绿松石	图 2(b)	QJGL
过蜡绿松石	图 2(c)	GL	伪品矿石	图 2(d)	WP

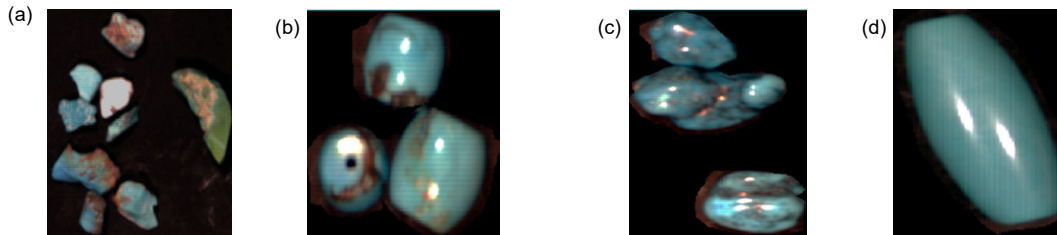


图 2 绿松石样品图
Fig. 2 Pictures of turquoise samples

为了了解各样品的物质结构和元素成分, 对上述 4 种样品还开展了 XRD 和 ICP_MS 检测^[22], 其实验结果表明这 4 种样品中, 每种样品的物质成分的比例和物质结构基本一致, 因此利用高光谱的数据信息可实现对 4 种样品分类鉴别。

在利用高光谱相机采集图像的过程中, 由于存在不均匀的光源强度分布、相机的暗电流噪声以及不规则的绿松石形状等各种环境因素, 会影响到绿松石数据的准确性, 因此在进行数据分析前需要经过归一化、

去本底、多点取均值等预处理过程以消除设备和环境噪声的干扰。本文对上述的 4 种样品均在相同条件下, 获取高光谱图像数据, 对每一张高光谱图像均读取 6 个有代表性区域内的高光谱数据, 将这些光谱数据进行归一化、去本底、多点取均值等操作, 其结果作为该样品的最终光谱数据, 如图 3 所示。

从图 3 可看出, 如果利用全谱(400 nm~1000 nm)范围作为依据, 由于伪品绿松石中含有的主要是 Mg 元素, 与其他绿松石样品所含的物质成分存在较大的

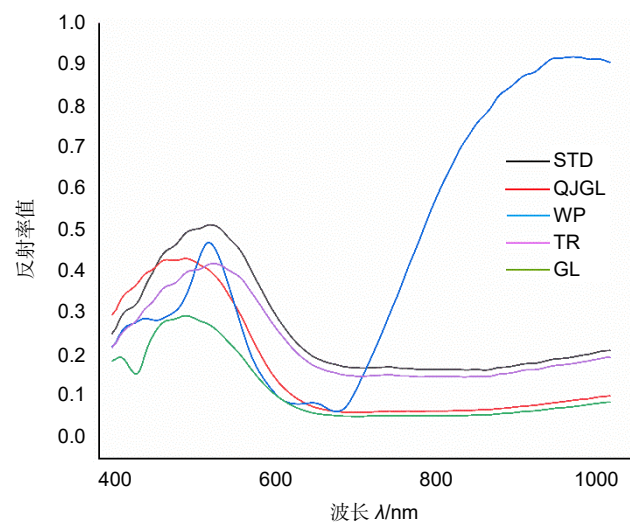


图 3 光谱对比
Fig. 3 Spectral comparison

差异, 伪品绿松石(图 3 中的 WP)的曲线趋势与其它样品谱线存在明显差异, 并在 452.89 nm 附近存在一个吸收峰, 利用标准谱线能够很好区分出伪品绿松石; 而在全谱范围内, 绿松石的处理品中含有的主要元素成分与天然绿松石样品相同, 因此绿松石的处理品(沁胶、过蜡)与标准谱线的趋势相似, 区分度较小。利用式(1)在全谱范围内, 计算天然绿松石(图 3 中的 TR)、伪品绿松石(图 3 中的 WP)、过蜡绿松石(图 3 中的 GL)、沁胶过蜡绿松石(图 3 中的 QJGL)的谱线与标准特征谱线之间的 Pearson 相关性系数 ρ , 分别为 0.99752、-0.2999、0.9636 和 0.9345。

由 ρ 的计算结果可知, 在 400 nm~1000 nm 的波段范围内, 伪品绿松石与天然绿松石标准谱线之间的相关性系数小于 0, 两者间的相关性低。而天然绿松石、过蜡绿松石、沁胶过蜡绿松石的谱线与标准特征谱线之间的相关性系数, 其数值均大于 0.9, 差异较小, 针对绿松石的处理品利用全谱无法区分, 借鉴方圣辉等人^[23]的工作经验, 本文采用双尺度鉴别法鉴别绿松石的处理品。

2.3 双尺度鉴别

相比于其它的光谱技术而言, 虽然利用高光谱技术能够获得样品更多的光谱信息, 但在这些信息中也由于其包含了许多冗余光谱波段的信息, 影响了数据的分析传输和样品的光谱分析。因此在进行光谱分析时, 选择合适尺度的分析波段是一种有效减少冗余、增加光谱信息有效性的方法^[19]。

通过分析图 3 的数据, 可以发现在 400 nm~600 nm 范围内, 过蜡绿松石(GL)、沁胶过蜡绿松石(QJGL)与标准特征谱线(STD)相比, 在谱线的峰值、趋势上均存在一定的差异: 过蜡绿松石(GL)在 425.29 nm 附近存在一个明显的吸收峰, 且其光谱峰值位置在 490 nm 附近; 而沁胶过蜡绿松石(QJGL)的光谱峰值位置虽在 490 nm 附近, 但在 425.29 nm 附近没有明显的吸收峰。利用式(1)计算在 400 nm~600 nm 范围内, 天然绿松石、过蜡绿松石、沁胶过蜡绿松石的谱线与标准谱线之间的 Pearson 相关性系数 ρ 值分别为 0.9791、0.3096、-0.3750, 其中过蜡绿松石、沁胶过蜡绿松石样品的相关系数均小于 0.4, 表明上述两种绿松石处理品的谱线与标准谱线之间的光谱曲线相关性较低。因此基于该光谱范围下的 Pearson 相关性系数, 可以有效区分出上述两种绿松石处理品。

3 绿松石在线鉴别系统

基于双尺度下的相关性系数计算的鉴别算法, 本文开发了一套专用的绿松石分类鉴别系统, 系统的硬件构成及工作原理如下。

3.1 硬件构成

绿松石分类鉴别系统如图 4 所示, 主要由控制系统、光学成像采集系统(高光谱相机、光源和暗室)、分析鉴别系统(专业检测分析软件)以及分拣系统(机械拣拾臂)组成。工作时, 由光学成像采集系统采集图像, 分析鉴别系统实现绿松石的分类鉴别, 分拣系统

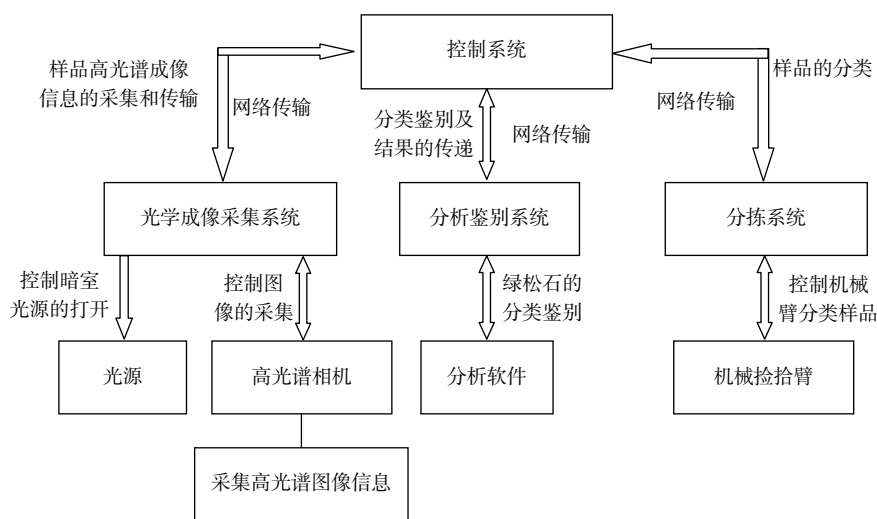


图 4 系统原理图

Fig. 4 System schematic

实现样品的在线分类, 控制系统通过网络实时控制各子系统的工作。

3.2 成像采集系统

图 5 所示为成像采集系统的原理图, 其参数如下: 波长范围为 400 nm~1000 nm, 光谱分辨率为 3 nm, 波段数为 520 个, 像面尺寸为 6.15×14.2, 镜头焦距为 25 mm。

成像采集系统工作时, 待检测样品由综合控制系统精确定位于样品检测台上的固定位置(位置由位置感应器监测确定)后, 由综合控制系统通过暗室控制器打开暗室内的标准光源, 并使之照射到待检测样品上。

由于绿松石原矿的外形体积都会有所不同, 为获得高质量的图像, 由综合控制系统利用成像采集系统中的相机控制软件, 实现相机的自动聚焦及高光谱图

像的采集。

图 6(a)为成像采集系统获取的, 来自于 6 个绿松石产区的天然绿松石原矿样品的高光谱图像。此外绿松石的表面一般都是粗糙不平的, 部分还存在着少量杂质(如图 6(a)中的黑褐色裂纹所示), 为了提取到有代表性的绿松石样品的光谱, 在考虑到绿松石的元素组成和含量前提下, 由专业人员利用相机控制软件并结合人工筛选的方式, 获取样品中颜色为均匀蓝色或蓝绿色^[7]的有代表性区域内的光谱。图 6(b)为选取的感兴趣区域(a、b、c、d、e、f), 感兴趣区域内的光谱则如图 1(a)所示。

综合控制系统通过互联网实时控制成像采集系统的各种操作, 采集到的高光谱数据信息通过互联网实时传输回综合控制系统的网络数据库。

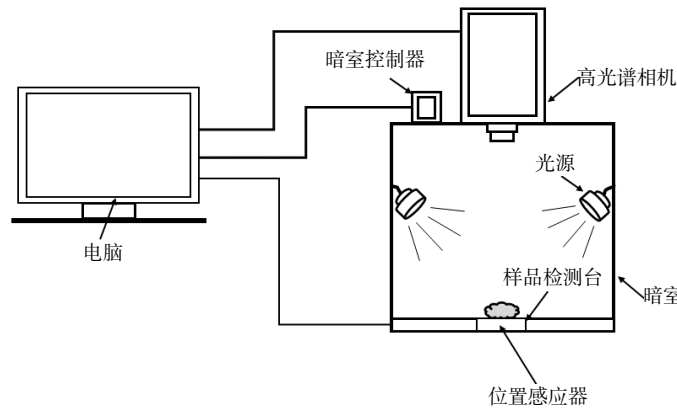


图 5 成像采集原理图
Fig. 5 Software flow chart

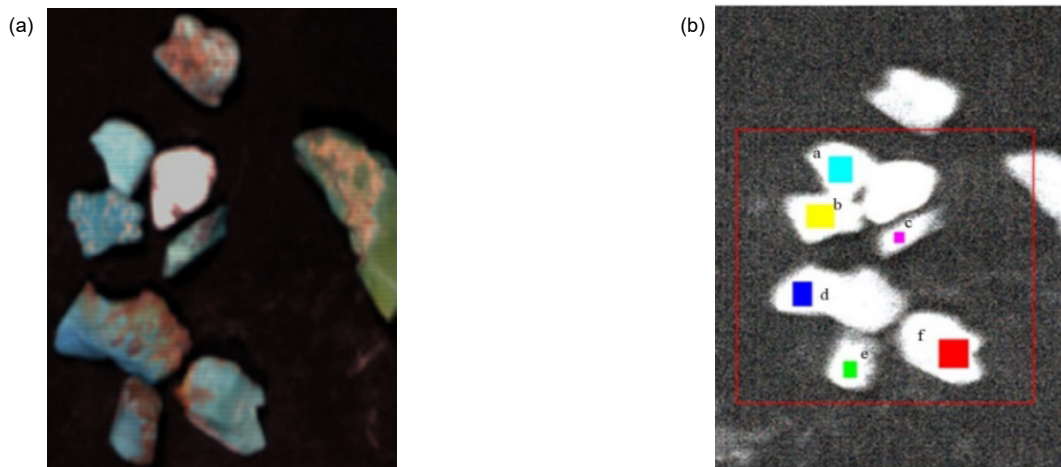


图 6 天然绿松石光谱区域的选取。(a) 天然绿松石样品; (b) 感兴趣区域的选取
Fig. 6 Selection of natural turquoise spectral region. (a) Natural turquoise sample; (b) Selection of the region of interest

3.3 分析鉴别系统

分析鉴别系统依据图 7 所示的流程图, 对采集到的数据进行分析处理。首先, 综合控制系统通过网络控制分析鉴别系统, 在 400 nm~1000 nm 范围内, 计算待测样品的光谱与天然绿松石标准谱线之间的相关性系数 ρ_1 , 若 $\rho_1 < 0.9$, 则判断为伪品, 并结束软件流程, 否则进行下一步: 在 400 nm~600 nm 范围内, 计算该样品与天然绿松石标准谱线之间的相关系数 ρ_2 , 若 $\rho_2 > 0.9$, 则判断为天然绿松石; 若 $\rho_2 < 0.4$, 则判断为绿松石处理品。待上述分析过程完成后, 分析鉴别系统将结束软件流程, 并将分析结果传输给综合控制系统。

本文利用上述分析鉴别系统对实验室现有的 305 个市面上常见的绿松石样品进行了鉴别实验, 实验结果如表 2 所示。实验结果表明: 根据高光谱数据在双尺度(400 nm~600 nm 和 400 nm~1000 nm)下的 Pearson 相关性系数差异, 能够实现对天然绿松石和伪品绿松石的准确鉴别, 而在鉴别两种绿松石处理品时, 只有 1 个沁胶过蜡绿松石鉴别失误。若根据此结果调整相关参数, 其鉴别结果的准确率有望达到 100%, 目前受限于样品的数量, 尚未对样品开展基于大数据的分类研究, 下一步我们将继续收集更多的绿松石样品, 进行高光谱探测, 完善数据集, 开展神经网络研究, 搭建适合的训练网络, 提高鉴别准确率。

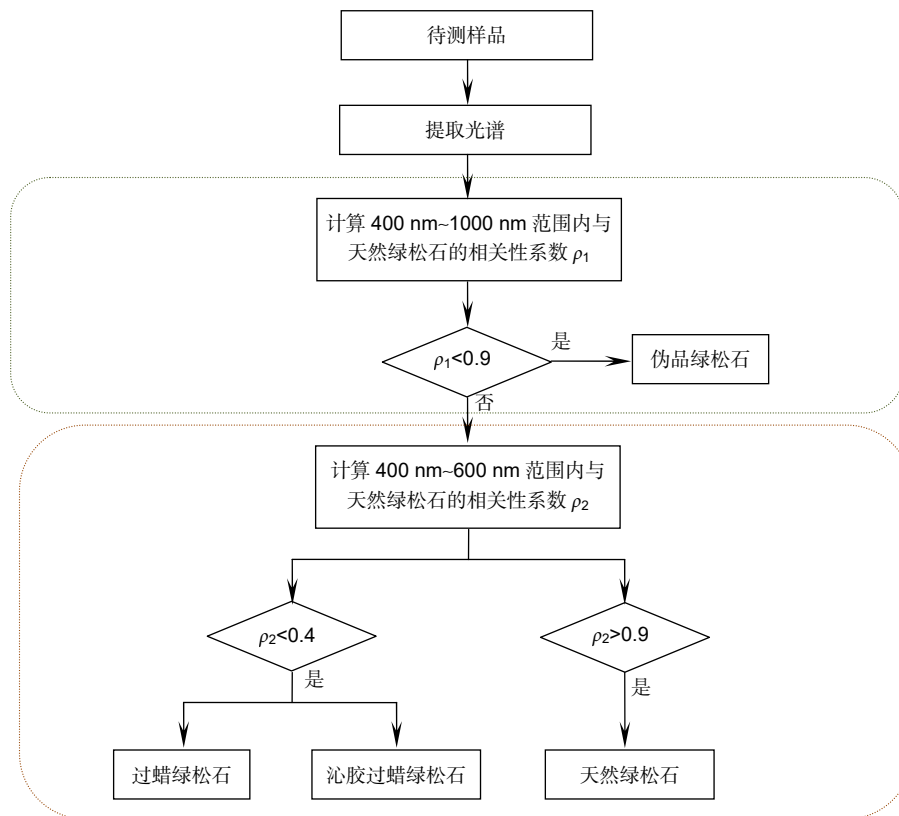


图 7 软件流程图

Fig. 7 Software flow chart

表 2 鉴别实验结果

Table 2 Identification test results

样品类别	样品数量	鉴别正确数量	鉴别错误数量
天然绿松石	100	100	0
伪品绿松石	100	100	0
沁胶过蜡绿松石	53	52	1
过蜡绿松石	52	52	0

3.4 分拣系统

分拣系统原理图如图 8 所示。分拣系统根据综合控制系统通过网络传输的分析结果, 控制机械臂将绿松石处理品(过蜡绿松石和沁胶过蜡绿松石)以及伪品绿松石分别分拣到绿松石处理品分拣盒与伪品绿松石分拣盒中, 而天然绿松石则被传送带送入到下一设备中, 进行进一步的处理。工作时, 综合控制系统将通过探测器监控传送带速度, 并控制样品的传输与分拣系统的分拣。利用图 8 所示的绿松石鉴别系统, 可实现对绿松石的大批量、实时和在线检测。

4 总结

本文利用高光谱成像技术, 依据天然绿松石原矿样品在 400 nm~1000 nm 波段的高分辨光谱图像数据, 获取天然绿松石样品的标准光谱谱线, 其具有较高的普适性。本文利用双尺度下(400 nm~1000 nm 和 400 nm~600 nm)的相关性分析鉴别算法, 开发了一套针对天然绿松石、过蜡绿松石、沁胶过蜡绿松石及伪品绿松石的在线鉴别系统, 开展了对实验室现有的 305 个市面上常见的绿松石原矿、伪品及处理品样品的分析鉴别实验。目前, 该样机系统的光谱区域选择还需要人工设定, 样本的数据量还不够丰富, 下阶段将结合人工智能、图像处理技术和机器学习等技术, 开发快速、无损、在线的绿松石专用检测系统, 并应用到藏

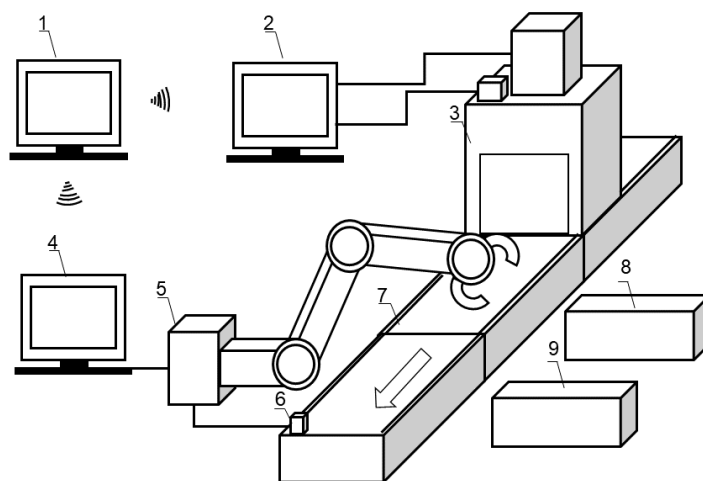
药企业的矿物原材料选择流水线中, 为进一步促进藏医药矿物原材料选材的规范化和现代化发展提供技术支持。

致谢

感谢北京中国藏学研究中心提供的样品-四川双利合谱科技有限公司提供的检测设备。

参考文献

- [1] Dai Z Z. Discussion on the identification and maintenance of turquoise[J]. *Qual Stand*, 2019(7): 30-33.
戴正之. 浅谈绿松石的鉴别与保养[J]. 质量与标准化, 2019(7): 30-33.
- [2] Hang D. Discussion on the culture of turquoise[J]. *Superh Mater Eng*, 2013, 25(6): 57-58.
杭东. 浅谈绿松石文化[J]. 超硬材料工程, 2013, 25(6): 57-58.
- [3] Cai K. The treatment of liver and gall diseases with 25 kinds of songshi pills[J]. *China's Naturop*, 2008, 16(9): 38.
才科. 二十五味松石丸治疗肝胆疾病[J]. 中国民间疗法, 2008, 16(9): 38.
- [4] Qu Y. Identification of "insignificant-filled" turquoise[J]. *J Gems Gemmol*, 2018, 20(5): 44-50.
曲雁. “微沁”绿松石的检验[J]. 宝石和宝石学杂志, 2018, 20(5): 44-50.
- [5] Chen Q L, Qi L J, Zhang Y. IR Absorption spectrum representation of turquoise, treated turquoise and imitation[J]. *J Gems Gemmol*, 2006, 8(1): 9-12.
陈全莉, 齐利剑, 张琰. 绿松石及其处理品与仿制品的红外吸收光谱表征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2006, 8(1): 9-12.
- [6] Zuo R, Dai H, Jiang X P, et al. Infrared spectral features of turquoise filled with acrylic polymer[J]. *Geol Anhui*, 2017, 27(3):



1. 控制系统; 2. 分析鉴别系统; 3. 光学成像采集系统; 4. 分拣系统; 5. 机械拣拾臂;
6. 传送带监控器; 7. 传送带; 8. 伪品绿松石分拣盒; 9. 绿松石处理品分拣盒

图 8 绿松石在线鉴别系统

Fig. 8 Online identification system of the turquoise

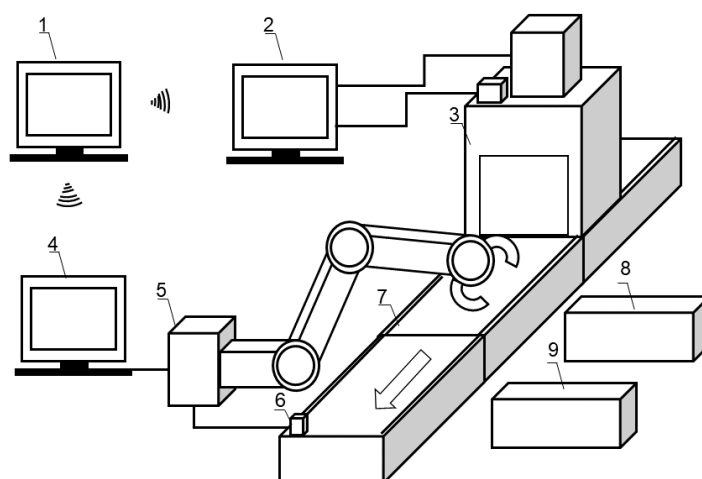
- 222–224, 236.
左锐, 戴慧, 蒋小平, 等. 丙烯酸酯类聚合物充填绿松石的红外光谱特征[J]. 安徽地质, 2017, 27(3): 222–224, 236.
- [7] Xu Y F, Di J R. Gemological identification of natural turquoise and treatment turquoise in Hubei[J]. *Acta Petrol Mineral*, 2018, 37(4): 646–654.
徐娅芬, 狄敬如. 湖北天然绿松石与优化处理绿松石的宝石学鉴别特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(4): 646–654.
- [8] Schwarzing B, Schwarzing C. Investigation of turquoise imitations and treatment with analytical pyrolysis and infrared spectroscopy[J]. *J Anal Appl Pyroly*, 2017, 125: 24–31.
- [9] Yan J W, Chen H D, Liu L. Overview of hyperspectral image classification[J]. *Opt Precis Eng*, 2019, 27(3): 680–693.
闫敬文, 陈宏达, 刘蕾. 高光谱图像分类的研究进展[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 680–693.
- [10] Zhu X Y, Li Y, Zhang Q, et al. Oil film classification using deep learning-based hyperspectral remote sensing technology[J]. *ISPRS Int J Geo-Inf*, 2019, 8(4): 181.
- [11] Zhang W L, Zeng C S, Gao D Z, et al. Estimating the soil total phosphorus content based on hyper-spectral remote sensing data in the Min River estuarine wetland[J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(24): 8085–8093.
章文龙, 曾从盛, 高灯州, 等. 闽江河口湿地土壤全磷高光谱遥感估算[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8085–8093.
- [12] Ren Z L, Sun L, Zhai Q P. Improved k-means and spectral matching for hyperspectral mineral mapping[J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 2020, 91:102154.
- [13] Guo W C, Dong J L. Nondestructive detection on firmness of peaches based on hyperspectral imaging and artificial neural networks[J]. *Opt Precis Eng*, 2015, 23(6): 1530–1537.
郭文川, 董金磊. 高光谱成像结合人工神经网络无损检测桃的硬度[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1530–1537.
- [14] Zhang C Y, Qin Q M, Chen L, et al. Research and development of mineral identification utilizing hyperspectral remote sensing[J]. *Opt Precis Eng*, 2015, 23(8): 2407–2418.
张成业, 秦其明, 陈理, 等. 高光谱遥感岩矿识别的研究进展[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2407–2418.
- [15] He J, Liu B F, Li J. Monitoring model of leaf area index of winter wheat based on hyperspectral reflectance at different growth stages[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, 30(24): 141–150.
贺佳, 刘冰锋, 李军. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 141–150.
- [16] Zhang L L, Li Y Y, Peng Y K, et al. Determination of pork freshness attributes by hyperspectral imaging technique[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2012, 28(7): 254–259.
张雷蕾, 李永玉, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 254–259.
- [17] Shan J J, Peng Y K, Wang W, et al. Simultaneous detection of external and internal quality parameters of apples using hyperspectral technology[J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2011, 42(3): 140–144.
单佳佳, 彭彦昆, 王伟, 等. 基于高光谱成像技术的苹果内外品质同时检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 140–144.
- [18] Fan R, Meng D Z, Xu D S. Survey of research process on statistical correlation analysis[J]. *Math Model Appl*, 2014, 3(1): 1–12.
樊嵘, 孟大志, 徐大舜. 统计相关性分析方法研究进展[J]. 数学建模及其应用, 2014, 3(1): 1–12.
- [19] Wen B G, Feng W F, Liu W, et al. Matching and classification based on the whole comparability measure of spectral curve[J]. *J Geomat Sci Technol*, 2009, 26(2): 128–131.
闻兵工, 冯伍法, 刘伟, 等. 基于光谱曲线整体相似性测度的匹配分类[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(2): 128–131.
- [20] Yang J S. Research on correlation knowledge discovery method of spacecraft telemetry data[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences), 2019.
杨甲森. 卫星遥测数据相关性知识发现方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019.
- [21] Zhao H X, Fu X F, Gan F X, et al. Study on mineralogical characteristics of turquoise samples from different provenances by non-destructive analysis[J]. *Rock Mineral Anal*, 2007, 26(2): 141–144.
赵虹霞, 伏修锋, 干福熹, 等. 不同产地绿松石无损检测及岩相结构特征研究[J]. 岩矿测试, 2007, 26(2): 141–144.
- [22] Wang J. Detection of the authenticity of turquoise raw ore based on ICP-MS and XRD[D]. Wuhan: South-Central Minzu University, 2019.
王戡. 基于 ICP-MS 和 XRD 的绿松石原矿真伪检测[D]. 武汉: 中南民族大学, 2019.
- [23] Fang S H, Gong H. Spectral similarity scale based on dynamic weighting adjustment method[J]. *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2006, 31(12): 1044–1046.
方圣辉, 龚浩. 动态调整权重的高光谱匹配测度法分类的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(12): 1044–1046.

Development of online identification system for turquoise based on hyperspectral imaging technology

Wu Jinquan^{1*}, Wang Jian¹, Xiong Wei¹, Huang Kunpeng¹, Lin Zhaoxiang¹, Feng Xin²

¹Central South University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China;

²China Tibetology Research Center, Beijing 100101, China



Turquoise online identification system. 1. Integrated control system; 2. Analysis and identification system; 3. Imaging acquisition system; 4. Sorting system; 5. Robotic-arm controller and robotic arm; 6. Conveyor belt monitor; 7. Conveyor belt; 8. Fake turquoise Sorting box; 9. Turquoise processing product sorting box.

Overview: Turquoise is a kind of copper-aluminum-phosphate minerals with abundant mineral reserves in China and a classic mineral medicinal material in Tibetan areas, which has excellent effects on treating wind-cold, lowering blood pressure, regulating the respiratory system and curing liver diseases. This paper focuses on identifying the raw materials of medicinal turquoise to prevent people from using the processed turquoise and counterfeit turquoise in medicine. The experimental prototype system, which can quickly and accurately pick up the true turquoise raw ore from the large amounts of fake turquoise on the market, was developed using hyper-spectral imaging technology. With the Pearson correlation between the data observed and the standard spectral line, the system was mainly composed of a control system, an optical imaging acquisition system (including the hyperspectral camera, a light source, and a darkroom), an analysis and identification system (the professional detection and analysis software) and a sorting system (the mechanical picking arm). The sample standard spectral line was obtained while the applicability was analyzed by the present sample, based on the high-resolution spectral data of ore samples from 6 representative producing areas of natural turquoise in China. A new method was summarized by the differences in correlation coefficients in the range of 400 nm~1000 nm and 400 nm~600 nm of the fake turquoise on the market. The system is going to be used to select raw materials in mineral medicine in some Tibetan medicine companies in the near future. These works will provide technical support for other research on mineral-identification, or Jewelry-identification. Further research will greatly promote the modernization of Tibetan medicine.

Wu J Q, Wang J, Xiong W, *et al.* Development of online identification system for turquoise based on hyperspectral imaging technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(7): 210075; DOI: 10.12086/oe.2021.210075

Foundation item: National Major Research and Development Project: Major New Drug Creation and Development (2014zx09301308)

* E-mail: 470461530@qq.com