

·宝玉石矿物学·

## 黄色和红色石英质玉石的颜色成因研究

张 勇, 魏 然, 柯 捷, 陈 华, 陆太进

(国土资源部珠宝玉石首饰管理中心, 北京 100013)

**摘 要:** 石英质玉石是由隐晶质-微显晶质石英矿物集合体组成的一种玉石, 黄色和红色是石英质玉石最主要的颜色种类, 近年来在珠宝市场上备受关注。前人研究结果表明, 黄色石英质玉石的致色矿物颗粒非常细小, 赋存于石英颗粒之间, 通过一般的测试方法很难准确鉴定其种属。本文对云南龙陵、安徽霍山、广西贺州3个产地的石英质玉石进行了显微镜观察、拉曼光谱和紫外可见光吸收光谱测试, 通过紫外可见光吸收光谱的一阶导数图谱, 对石英质玉石的黄色和红色部位进行了研究。结果表明, 黄色石英质玉石紫外可见光吸收光谱一阶导数图谱的特征峰有545~535 nm和435 nm, 主要由针铁矿致色; 红色石英质玉石紫外可见光吸收光谱一阶导数图谱的特征峰介于555~595 nm之间, 主要由赤铁矿致色; 黄色和红色之间的过渡色可同时出现595~555 nm、545~535 nm和435 nm特征峰, 主要由针铁矿和赤铁矿共同致色。

**关键词:** 黄色; 石英质玉石; 针铁矿; 赤铁矿; 紫外可见光吸收光谱; 一阶导数图谱

**中图分类号:** P619.28<sup>+</sup>.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2016)01-0139-08

## Coloration of yellow and red colored quartzite jade

ZHANG Yong, WEI Ran, KE Jie, CHEN Hua and LU Tai-jin

(National Gems & Jewelry Technology Administrative Center, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Quartzite jade consists of tiny grained quartz crystallites, and the yellow color is the major color. However, due to lack of conclusive evidence and spectroscopic data, the coloration for the yellow color is unclear, although previous studies suggested that the yellow colored quartzite jade could be related to a very small quantity of nano-sized minerals. In this paper, yellow and red colored quartzite jades were collected from Longling of Yunnan Province, Huoshan of Anhui Province and Hezhou of Guangxi, and the coloration-related spectroscopic data were firstly obtained using the UV-Vis spectroscopic technique with first order derivative. It is found that the yellow colored quartzite jade is caused by goethite with characteristic absorption bands centered on 545~535, and 435 nm, and that the red colored quartzite jade is caused by hematite with absorption bands centered on 595~555 nm. For the mixed yellowish-red or reddish-yellow colouration, the first-order derivatives of the UV-Vis spectra show absorption bands centred on 595~555, 545~535, and 435 nm, indicating that the coloration results from a combination of hematite and goethite.

**Key words:** yellow; quartzite jade; goethite; hematite; UV-Vis spectrum; first order derivative spectrum

**Fund support:** Public Research Project of the Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China (201011005-2B)

收稿日期: 2015-03-25; 接受日期: 2015-09-06

基金项目: 国土资源部公益性科研项目(201011005-2B)

作者简介: 张 勇(1985-), 男, 硕士, 宝石学专业, 主要从事珠宝玉石首饰研究工作, E-mail: zyongbj@126.com。

石英质玉石的原生矿呈脉状产出在花岗岩及其它一些岩石岩体之中,次生矿一般发现于距离原生矿不远的河流山谷之中。石英质玉石(图1)的颜色丰富多彩,有黄色、红色、绿色、白色和黑色等颜色。从文献资料(张蓓莉,2006;王时麒等,2011;张勇等,2012,2014;田隆,2012)可知,黄色、红色石英质玉石的颜色成因与Fe元素相关,绿色石英质玉石与Fe、Cr、Ni元素有关,黑色石英质玉石与Mn元素有关。由于石英质玉石之中的致色矿物颗粒非常细小,使用常规的分析仪器和分析方法很难获得致色矿物的准确信息以及致色矿物与石英质玉石颜色的关系(杜谷等,2014;冯晓燕等,2014)。为此,本文借鉴翡翠以及土壤颜色研究中使用紫外可见光吸收光谱的方法(蔡元峰等,2008;闫薇薇等,2012;李响等,2014;Kosmas *et al.*, 1986; Ji *et al.*, 2002; Rossel *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2010; Li and Cai, 2013),对黄色和红色的石英质玉石的颜色成因进行了探讨,取得了比较好的结果。



图1 石英质玉石雕刻品

Fig. 1 A carved product of quartzite jade

## 1 样品及测试方法

### 1.1 测试样品

本文研究所用不同颜色的石英质玉石样品(图2)分别采自于云南龙陵(YN-31、HLY-XDX-13、HLY-XHS-17和HLY-XDX-7)、安徽霍山(HSY-29和HSY-60)和广西贺州(HZ-J-2和HZ-J-6)。所有样品分别磨制成0.03 mm厚的岩石薄片和厚度为1 mm两面抛光的薄片。除HZ-J-2和HZ-J-6两块样品因带颜色的区域难以分离故未研磨成粉末样品外,其他6块样品都磨制成粉末样品进行了测试分析。图2中的YN-31号样品为石英质玉石的次生矿,其最外层为黄色(YN-31-Y),中间为红色(YN-31-R),最里层为白色(YN-31-W)。样品YN-31-Y的颜色比样品HLY-XHS-17的颜色黄,但颜色相对偏暗一些,样品HLY-XHS-17的颜色比样品HSY-29的黄,颜色也更亮一些;样品HLY-XDX-13整体为红色,红色色调较YN-31-R要浅;HZ-J-2和HZ-J-6两块样品中都存在颜色鲜艳的黄色区域和红色区域;YN-31-W、HSY-60、HLY-XDX-7号样品为白色。

### 1.2 测试方法

本次研究过程中,使用偏光显微镜(Olympus BX51)和激光共聚焦显微镜(Olympus LEXT OLS4100)对样品的显微结构、颗粒大小和颗粒形态进行了观察。激光共聚焦显微镜的激光波长是405 nm,分辨率是10 nm,放大倍数108~17 280倍。

利用拉曼光谱仪(Renishaw inVia Raman)对岩石薄片中的矿物进行了分析,激光波长是532 nm,分辨率 $4\text{ cm}^{-1}$ ,扫描时间20 s,扫描3次,测试范围 $100\sim 2\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

紫外可见光吸收光谱测试使用的是Perkin-Elmer Lambda 950型号的紫外可见光吸收光谱仪,测量范围均为250~800 nm,分辨率0.5 nm,基线校准使用的是 $\text{BaSO}_4$ 。粉末法测试了8块样品(YN-31-Y、YN-31-R、YN-31-W、HLY-XDX-13、HLY-XHS-17、HLY-XDX-7、HSY-29和HSY-60),并使用小光栅附件利用反射法对10块1 mm厚两面抛光的岩石薄片进行了测试。经过数学计算,获得了紫外可见光吸收光谱一阶导数图谱(Balsam and Deaton *et al.*, 1991; Balsam *et al.*, 2014)。



图 2 研究样品照片

Fig. 2 Images of the investigated samples

## 2 实验结果

### 2.1 显微观察

石英质玉石主要由细粒状的石英组成, 大部分情况下石英颗粒度比较均一, 在有些样品中可以看到由不同尺寸大小的石英颗粒组成的条带(图 3a), 黄色和红色的副矿物赋存于石英颗粒之间(图 3b~3d)。

激光共聚焦图像(图 3e~3l)提供了丰富的信息, 其中图 3e、3g、3i、3k 是可见光图像, 通过这些图像, 可以清晰地看到黄色和红色的副矿物特征; 图 3f、3h、3j、3l 是激光图像, 分别与可见光图像(图 3e、3g、3i、3k)一一对应。激光图像的精细度要高于可见光图像, 但是无法提供矿物的颜色信息, 因此在同一位置使用两种光源分别进行了图像采集。图像(图 3)显示, 纳米尺寸的黄色和红色矿物赋存于大颗粒的石英颗粒( $5 \sim 100 \mu\text{m}$ )之间或者微裂隙之中。黄色和红色矿物由于太细小, 无法分辨矿物的晶体形态和准确的尺寸大小。从图像(图 3)可以清晰地观察到, 这些黄色和红色的致色矿物颗粒非常细小, 赋存于石英颗粒之间, 黄色石英质玉石是由纳米尺寸的黄色矿物致色, 红色石英质玉石是由纳米尺寸的红色矿物致色。

### 2.2 拉曼光谱

利用拉曼光谱很难检测到石英质玉石中的黄色和红色致色矿物, 仅在 HZ-J-6 号样品中检测到了红色的赤铁矿(图 4)。

### 2.3 紫外可见光吸收光谱

对所有研究样品的粉末进行了紫外可见光吸收光谱的测试, 结果(图 5、表 1)显示: 白色样品 YN-31-W 没有特征峰出现, HSY-60 和 HLY-XDX-7 在  $500 \text{ nm}$  处有较弱的特征峰; 黄色样品 YN-31-Y 的特征峰有  $480 \text{ nm}$  和  $365 \text{ nm}$ , HSY-29 和 HLY-XHS-17 的特征峰出现在  $475 \text{ nm}$  和  $365 \text{ nm}$  处; 红色样品 YN-31-R 出现了  $390 \text{ nm}$  的宽吸收带和  $520 \text{ nm}$  非常弱的宽吸收带, 而 HLY-XDX-13 的主要特征峰出现在  $481 \text{ nm}$  和  $365 \text{ nm}$  处。

为了准确分析紫外可见光吸收光谱数据, 将图 5 所示的紫外可见光吸收光谱进行了一阶导数求导。一阶导数图谱(图 6、表 1)所提供的信息明显要多于直接测量的光谱所显示的信息。由图 6 可知, 白色样品 YN-31-W 的主要特征峰有  $551 \text{ nm}$  弱吸收峰、 $503 \text{ nm}$  弱吸收峰、 $435 \text{ nm}$  弱吸收峰和  $380 \text{ nm}$  吸收峰, HSY-60 与 HLY-XDX-7 的主要特征峰有  $509$ 、 $470$ 、 $435$ 、 $391$  和  $366 \text{ nm}$ ; 黄色样品 YN-31-Y 的主要特征峰有  $559$ 、 $502$ 、 $435$  和  $393 \text{ nm}$ , HSY-29 与 HLY-XHS-17 的主要特征峰有  $525$ 、 $505$ 、 $433$  和  $387 \text{ nm}$ ; 红色样品 YN-31-R 的主要特征峰有  $570$ 、 $497$  和  $444 \text{ nm}$ , HLY-XDX-13 的主要特征峰有  $527$ 、 $503$ 、 $435$  和  $393 \text{ nm}$ 。

对 10 块两面抛光的厚度为  $1 \text{ mm}$  的样品进行了紫外可见光吸收光谱测试(图 7、表 1), 结果显示: 白色样品 YN-31-W 和 HSY-60 没有特征峰出现, HLY-XDX-7 在  $480 \text{ nm}$  处有较弱的特征峰; 黄色样品 YN-31-Y、HSY-29、HLY-XHS-17 以及 HZ-J-2、

表 1 石英质玉石紫外可见光吸收光谱数据分析  
Table 1 Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectroscopic data of quartz samples

| 样品编号       | 颜色                                 | 样品类型   | 紫外可见光特征吸收峰中心/nm | 一阶导数图谱特征峰中心/nm                              | 铁矿物指派                               |
|------------|------------------------------------|--------|-----------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| HSY-60     | 整体为白色,颜色分布均匀                       | 粉末     | 500             | 509, 470, 435, 391, 366                     | —                                   |
|            |                                    | 薄片     | —               | 716, 632, 380, 293                          | —                                   |
| HLY-XDX-7  | 整体为白色,颜色分布均匀                       | 粉末     | 500             | 509, 470, 435, 391, 366                     | —                                   |
|            |                                    | 薄片     | 480             | 718, 631, 580, 504, 430, 390, 309           | —                                   |
| YN-31-W    | 整体为白色,颜色分布均匀                       | 粉末     | —               | 551, 503, 435, 380                          | 赤铁矿 <sup>+</sup>                    |
|            |                                    | 薄片     | —               | 489, 379, 310, 297                          | —                                   |
| YN-31-R    | 整体为红色,颜色分布均匀                       | 粉末     | 390             | 570, 497, 444                               | 赤铁矿 <sup>+</sup>                    |
|            |                                    | 薄片     | —               | 690, 591, 491                               | 赤铁矿 <sup>+</sup>                    |
| HLY-XDX-13 | 整体为红色,但是颜色分布不均匀,团块状红颜色和团块状黄颜色混杂在一起 | 粉末     | 481, 365        | 527, 503, 435, 393                          | 针铁矿 <sup>+</sup> , 赤铁矿 <sup>+</sup> |
|            |                                    | 薄片(红色) | —               | 706, 582, 491, 446, 385                     | 赤铁矿 <sup>+</sup>                    |
|            |                                    | 薄片(黄色) | 687, 480        | 714, 556, 436, 385                          | 赤铁矿 <sup>+</sup> , 针铁矿 <sup>+</sup> |
| HZ-J-2     | 主要颜色为鲜艳的黄色,红色呈团块状分布在黄色之中           | 粉末     | ×               | ×                                           | —                                   |
|            |                                    | 薄片(红色) | 515             | 702, 677, 589, 474, 432, 304, 277           | 赤铁矿 <sup>+</sup> , 针铁矿 <sup>+</sup> |
|            |                                    | 薄片(黄色) | 512, 473        | 723, 653, 550, 535, 488, 435, 395, 318, 275 | 针铁矿 <sup>+</sup> , 赤铁矿 <sup>+</sup> |
| HZ-J-6     | 鲜艳的红色和黄色呈团块状分布在玉石之中                | 粉末     | ×               | ×                                           | —                                   |
|            |                                    | 薄片(红色) | 515             | 703, 673, 648, 584, 570, 485, 434, 313, 277 | 赤铁矿 <sup>+</sup> , 针铁矿 <sup>+</sup> |
|            |                                    | 薄片(黄色) | 512, 473        | 719, 654, 556, 536, 488, 433, 310, 279      | 针铁矿 <sup>+</sup> , 赤铁矿 <sup>+</sup> |
| YN-31-Y    | 整体为黄色,颜色分布均匀,黄色偏暗                  | 粉末     | 480, 365        | 559, 502, 435, 393                          | 针铁矿 <sup>+</sup> , 赤铁矿 <sup>+</sup> |
|            |                                    | 薄片     | 677, 480        | 714, 559, 435, 390                          | 针铁矿 <sup>+</sup> , 赤铁矿 <sup>+</sup> |
| HSY-29     | 整体为黄色,颜色分布均匀                       | 粉末     | 475, 365        | 525, 505, 433, 387                          | 针铁矿 <sup>+</sup>                    |
|            |                                    | 薄片     | 475, 365        | 530, 435, 390                               | 针铁矿 <sup>+</sup>                    |
| HLY-XHS-17 | 整体为黄色,颜色分部均匀,黄色明亮                  | 粉末     | 475, 365        | 525, 505, 433, 387                          | 针铁矿 <sup>+</sup>                    |
|            |                                    | 薄片     | 676, 475        | 716, 544, 435, 383                          | 针铁矿 <sup>+</sup>                    |

HZ-J-6 号样品的黄色区域都出现了 480 nm 的特征峰,另外,675、512 和 365 nm 的特征峰分别出现在了不同样品中;红色样品中,只有 HZ-J-2, HZ-J-6 号样品的红色区域检测到了 515 nm 的特征峰,其它样品未检测到明显的特征吸收峰。

将图 7 所示的紫外可见光吸收光谱进行了一阶导数求导,得到了一阶导数图谱(图 8、表 1)。由图 8 可知,白色样品 YN-31-W 的主要特征峰有 489、379、310、和 279 nm, HSY-60 的主要特征峰有 716、632、380 和 293 nm, HLY-XDX-7 的主要特征峰有 718、631、580、504、430、390 和 309 nm;所有黄色样品都出现了 435 nm 的特征峰,其他的特征峰主要集中在 600~500 nm 之间;红色样品的主峰主要介于 600~550 nm 之间,同时存在很多其他的弱峰。

3 讨论

光学显微镜观察结果表明,黄色石英质玉石主要由无色的细粒状石英组成,其颜色主要是由赋存于石英颗粒之间的黄色矿物致色,红色石英质玉石主要是由红色的矿物致色。这些黄色和红色致色矿

物颗粒度非常小,颗粒尺寸为纳米级别。利用拉曼光谱,只在颜色鲜艳的红色样品(HZ-J-6)中检测出了赤铁矿,很难检测出其他致色矿物的种属。

黄色和红色石英质玉石的紫外可见光吸收光谱虽然存在一些差异,但是差异太小,由于本身铁含量太少(张勇等,2014),导致特征峰不明显。根据前人研究成果(Torrent and Schwertmann, 1987; Balsam and Deaton, 1991; Deaton and Balsam, 1991; Balsam *et al.*, 2014),紫外可见光吸收光谱中,针铁矿的紫外可见光吸收光谱一阶导数图谱的特征峰是位于 545~535 nm 的主峰并伴有 435 nm 的次级峰,赤铁矿的一阶导数图谱只有位于 595~555 nm 之间的主峰。

粉末样品的紫外可见光吸收光谱一阶导数图谱见图 6,3 块白色样品作为背景样品进行了分析。由一阶导数图谱可知 YN-31-W 与 HSY-60、HLY-XDX-7 两块样品的数据稍有差异,YN-31-W 中含有少量的赤铁矿<sup>+</sup>; HSY-29, HLY-XHS-17 号黄色样品的致色矿物为针铁矿<sup>+</sup>; YN-31-Y 黄色样品中,与 Fe<sup>3+</sup> 有关的特征峰有 435 nm 特征峰和 559 nm 的宽峰,559 nm 特征峰的宽度非常大,针铁矿<sup>+</sup> 535 nm 的

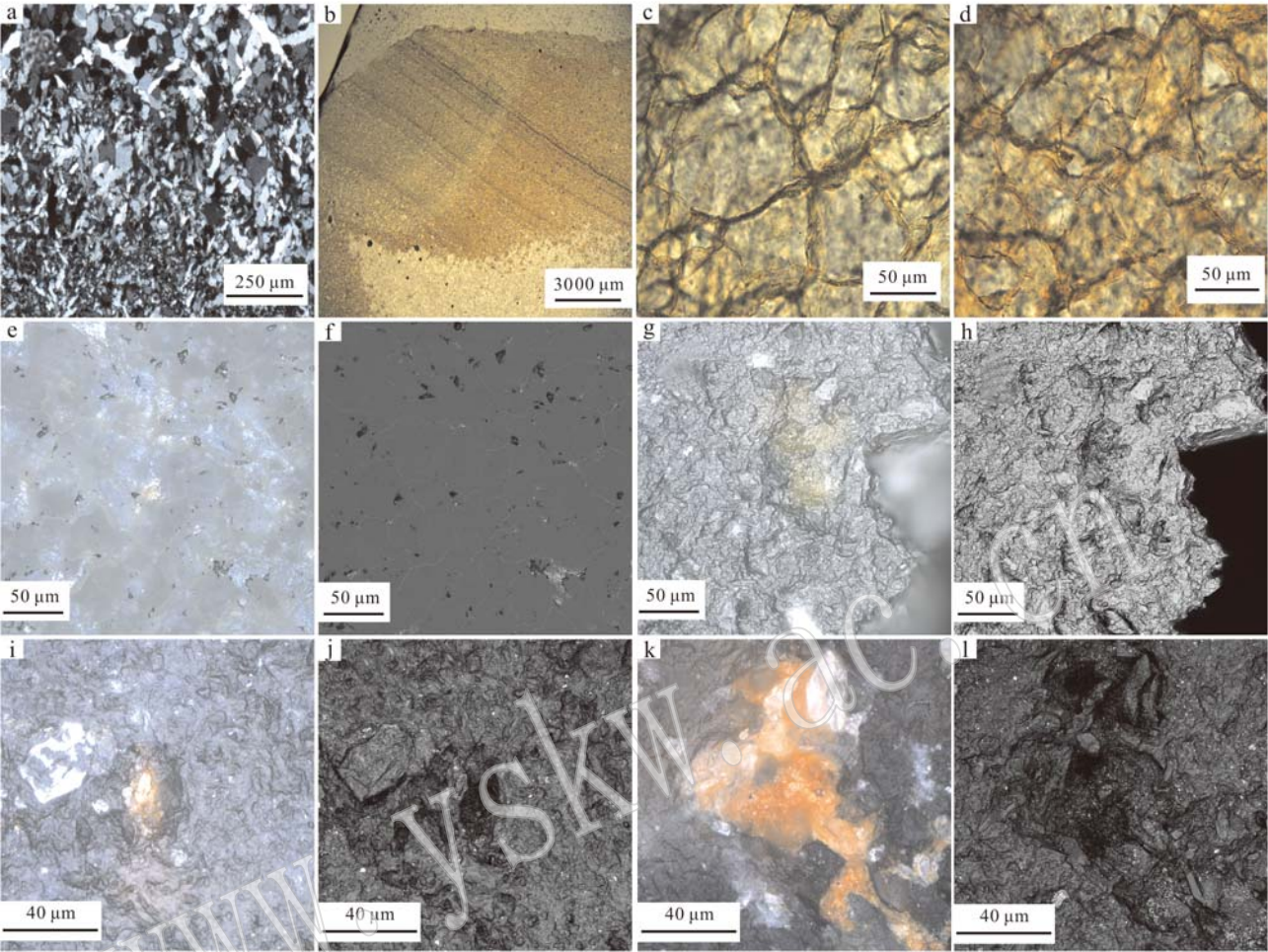


图 3 显微照片显示细小的黄色和红色矿物赋存于石英颗粒之间

Fig. 3 Photomicrographs showing abundant tiny red spots observed in the red-colored fine-grained quartz, and even smaller yellow spots observed in the yellow-colored fine-grained quartz

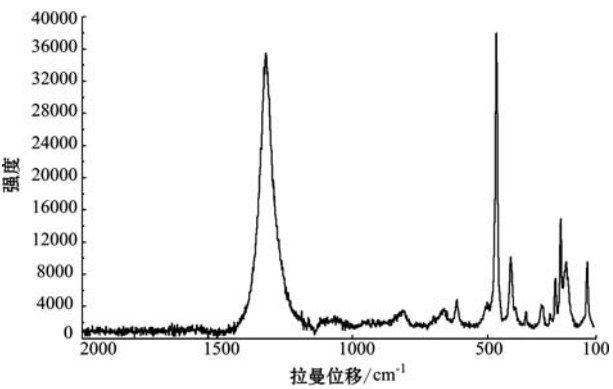


图 4 HZ-J-6 号样品中赤铁矿的拉曼光谱  
Fig. 4 Hematite peak in a Raman spectrum of HZ-J-6

特征峰有可能被掩盖,或者该峰由针铁矿的特征峰和赤铁矿的特征峰共同引起,据此判断黄色样品 YN-31-Y 的颜色主要由针铁矿致色,同时赤铁矿对

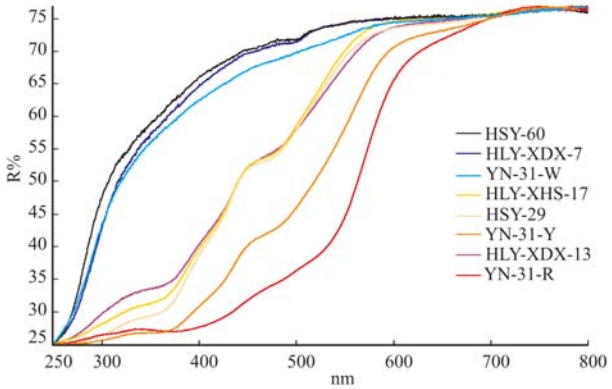


图 5 不同颜色样品粉末的紫外可见光吸收光谱  
Fig. 5 The UV-Vis spectra from powder samples with different colors

其颜色也有一定的影响;红色样品 YN-31-R 的致色矿物为赤铁矿,而在 HLY-XDX-13 号红色样品中,

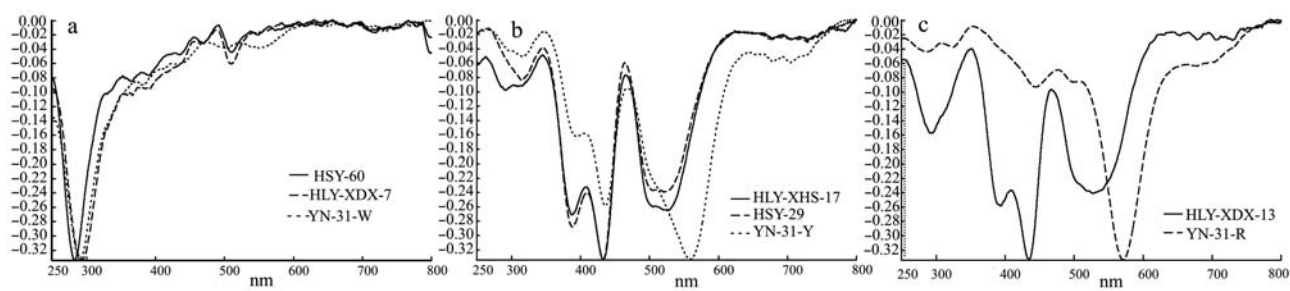


图 6 粉末样品紫外可见光吸收光谱一阶导数图谱

Fig. 6 First-order derivatives of the UV-Vis spectra obtained for powder samples

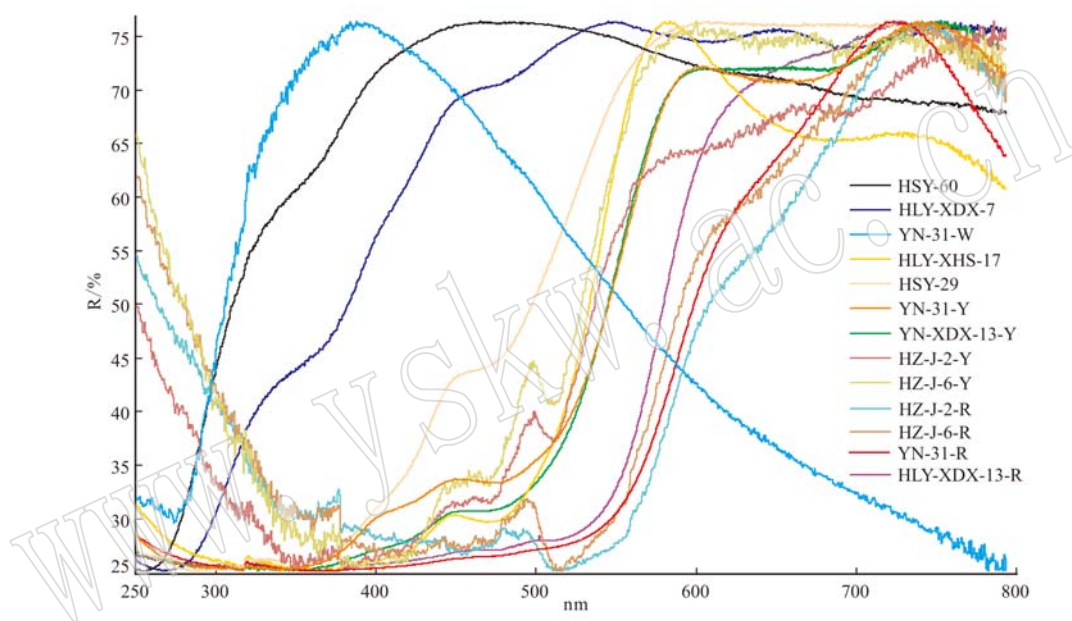


图 7 薄片样品的紫外可见光吸收光谱

Fig. 7 UV-Vis spectra of the slice samples

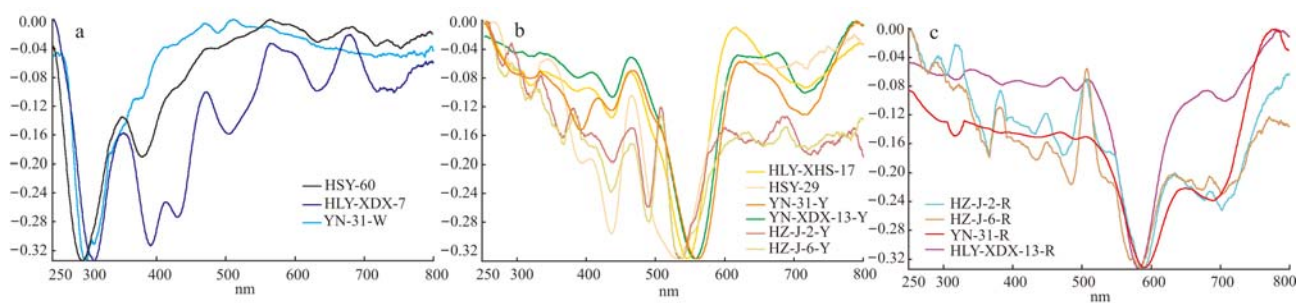


图 8 薄片样品紫外可见光吸收光谱一阶导数图谱

Fig. 8 First-order derivatives spectra obtained for the slice samples

与  $\text{Fe}^{3+}$  有关的特征峰有 435 nm 和 530 nm, 与其它样品相比较, 该样品 435 nm 的特征峰最弱, 其 530 nm 特征峰的宽度特别宽, 可以推断针铁矿的主峰

(535 nm) 和赤铁矿的特征峰(570 nm)有可能都被该峰掩盖, 该峰也很可能是由针铁矿 535 nm 特征峰和赤铁矿 570 nm 特征峰共同引起。Torrent 等

(1983)指出,在显色方面,含量很低的红色赤铁矿,很容易就可以掩盖住含量相对较高的黄色针铁矿,故认为该样品由赤铁矿和针铁矿共同致色。

1 mm 厚薄片样品的紫外可见光吸收光谱一阶导数图谱(图 8)中,所有的白色样品都没有出现铁矿物的特征峰; HSY-29 和 HLY-XHS-17 是由针铁矿致色, HZ-J-2 和 HZ-J-6 的黄色区域出现了典型的针铁矿特征峰,同时出现了较弱的赤铁矿的特征峰, YN-31-Y 的特征峰与粉末样品数据较为一致,认为主要由针铁矿致色,赤铁矿的存在对其色调有所影响, HLY-XDX-13 黄色区域与  $\text{Fe}^{3+}$  有关的吸收峰有 556 nm 和 436 nm, HLY-XDX-13 红色区域的主要吸收峰位于 582 nm, 根据 Zhou 等(2007)和 Balsam and Deaton(1991)、Balsam 等(2014)的研究成果,随着赤铁矿含量的增加,其主峰从 555 nm 向 595 nm 移动,所以认为 HLY-XDX-13 黄色区域的主要致色矿物为针铁矿,同时受少量赤铁矿影响,其红色区域的致色矿物为赤铁矿;红色样品 YN-31-R 的主峰位于 590 nm,显示其含有较高含量的赤铁矿, HZ-J-2 和 HZ-J-6 的红色区域的特征峰比较一致,主要峰位位于 580~590 nm,但是 HZ-J-6 在 570 nm 处还有一个特征峰出现, HZ-J-2 的红色区域,出现了较弱的 535 和 435 nm 特征峰,显示其含有少量的针铁矿。

Cornell 和 Schwertmann(2003)总结了针铁矿和赤铁矿颜色与矿物颗粒度大小之间的关系。当针铁矿的颗粒大小为 0.3~1.0  $\mu\text{m}$  时,颜色为黄色,当尺寸为 0.05~0.8  $\mu\text{m}$  时,颜色为深黄色;赤铁矿的颗粒小于 0.1  $\mu\text{m}$ ,那么颜色为橙色,尺寸为 0.1~1.0  $\mu\text{m}$  时,颜色为红色。根据这个理论,虽然不能准确测量石英质玉石中的针铁矿和赤铁矿的尺寸大小,但是可以推测其尺寸大小为纳米级别。

对于黄色和红色石英质玉石,通过紫外可见光吸收光谱的一阶导数图谱,可以对其粉末样品准确鉴定致色矿物为针铁矿和赤铁矿;对于颜色混杂的石英质玉石,使用小光栅附件,虽然没有粉末样品的精确度高,但是也能获得非常可靠的针铁矿和赤铁矿数据。

## 4 结论

根据上述测试结果及讨论,可得出以下结论:

(1) 黄色和红色石英质玉石,分别由赋存于石英颗粒之间的纳米尺寸级别的针铁矿和赤铁矿致

色;黄色和红色石英质玉石之间的过渡颜色,由针铁矿和赤铁矿共同致色。

(2) 对于石英质玉石中微量、细颗粒的针铁矿和赤铁矿的鉴定,紫外可见吸收光谱的一阶导数图谱是一种准确可靠的方法。黄色石英质玉石主要有 535 和 435 nm 的特征峰,435 nm 要比 535 nm 的特征峰稳定;红色石英质玉石特征峰的位置,与其赤铁矿的含量有关,随着赤铁矿含量的增加,其特征峰从 555 nm 向 595 nm 移动;黄色和红色之间过渡颜色的石英质玉石,可同时出现针铁矿和赤铁矿的特征峰。

## References

- Balsam W and Deaton B C. 1991. Sediment dispersal in the Atlantic Ocean: Evaluation by visible light spectra[J]. *Reviews in Aquatic Sciences*, 4: 411~417.
- Balsam W, Ji J F, Renock D, *et al.* 2014. Determining hematite content from NUV/Vis/NIR spectra: Limits of detection[J]. *American Mineralogist*, 99: 2 280~2 291.
- Cai Yuanfeng, Li Xiang, Pan Yuguan, *et al.* 2008. The color-causing mechanism of  $\text{Mn}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$ : Evidence from the Italian Cretaceous pelagic red limestones[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 133~138 (in Chinese).
- Cornell R M and Schwertmann U. 2003. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Use*(2nd ed.)[M]. Wiley-Vch, 130~137.
- Deaton B C and Balsam W L. 1991. Visible spectroscopy-A rapid method for determining haematite and goethite concentration in geological materials[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 61(4): 628~632.
- Du Gu, Wang Kunyang, Ran Jing, *et al.* 2014. Application of IR/SEM and other modern instruments for mineral identification[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 33(5): 625~633(in Chinese).
- Feng Xiaoyan, Shen Meidong, Zhang Yong, *et al.* 2014. The Green spots in nephrite-grossularite[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(4): 608~612(in Chinese).
- Ji J F, Balsam W, Chen J, *et al.* 2002. Rapid and quantitative measurement of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequence by diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Clays and Clay Minerals*, 50(2): 208~216.
- Kosmas C S, Franzmeier D P and Schulze D G. 1986. Relationship among derivative spectroscopy, color, crystallite dimensions, and Al

- substitution of synthetic goethites and hematites[J]. *Clays and Clay Minerals*, 34(6): 625~634.
- Li X and Cai Y. 2013. Constraining the colouration mechanisms of Cretaceous Oceanic Red Beds using diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Cretaceous Research*, 46: 257~266.
- Li Xiang and Cai Yuanfeng. 2014. The Coloration mechanism and genetic study of Cretaceous oceanic red beds[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(4): 451~460(in Chinese).
- Rossel R A V, Cattle S R, Ortega A, *et al.* 2009. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy[J]. *Geoderma*, 150(3~4): 253~266.
- Tian Long. 2012. Coloring mechanism of Huanglong Jade[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(2): 306~311(in Chinese).
- Torrent J and Schwertmann U. 1987. Influence of hematite on the color of red beds[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 57: 682~686.
- Torrent J, Schwertmann U, Fechter H, *et al.* 1983. Quantitative relationships between soil colour and hematite content[J]. *Soil Science*, 136: 354~358.
- Wang Shiqi and Zhou Weiwei. 2011. Discussion on Huanglong Jade[A]. *Gemology & Technology(2011)[C]*. Beijing: Geological Publishing House, 274~277(in Chinese).
- Yan Weiwei and Yuan Xinqiang. 2012. Study on the secondary colour of Myanmar jade by first order derivative UV spectrophotometry[J]. *J Mineral Petrol.*, 32(3): 1~5(in Chinese).
- Zhang Beili. 2006. *Systematic Gemmology[M]*. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zhang Yong, Ke Jie, Lu Taijin, *et al.* 2012. Study on ingredients of dendrite pattern in yellow quartzite jade[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 14(3): 1~5(in Chinese).
- Zhang Yong, Lu Taijin, Yang Tianchang, *et al.* 2014. Study on quartzite jade's color and trace elements[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(S1): 83~88(in Chinese).
- Zhou W, Chen L X, Zhou M, *et al.* 2010. Thermal identification of goethite in soils and sediments by diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Geoderma*, 155(3~4): 419~425.
- Zhou W, Ji J, Balsam W L, *et al.* 2007. Determination of goethite and hematite in red clay by diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(4): 730~736.

## 附中文参考文献

- 蔡元峰, 李响, 潘宇观, 等. 2008.  $Mn^{2+}$  和  $Fe^{3+}$  的致色作用: 来自意大利白垩纪远洋红色灰岩的启示[J]. *地质学报*, 82(1): 133~138.
- 杜谷, 王坤阳, 冉敬, 等. 2014. 红外光谱/扫描电镜等现代大型仪器岩石矿物鉴定技术及其应用[J]. *岩矿测试*, 33(5): 625~633.
- 冯晓燕, 沈美冬, 张勇, 等. 2014. 软玉中的一种绿色斑点——钙铝榴石[J]. *岩矿测试*, 32(4): 608~612.
- 李响, 蔡元峰. 2014. 白垩纪大洋红层的致色机制及成因研究[J]. *矿物学报*, 34(4): 451~460.
- 田隆. 2012. 五颜六色的黄龙玉及致色机理[J]. *岩矿测试*, 31(2): 306~311.
- 王时麒, 周维卫. 2011. 黄龙玉面面观[A]. *珠宝与科技——中国珠宝首饰学术交流会议论文集(2011)[C]*. 北京: 地质出版社, 274~277.
- 闫薇薇, 袁新强. 2012. 缅甸翡翠次生色的可见光吸收光谱的一阶导数谱研究[J]. *矿物岩石*, 32(3): 1~5.
- 张勇, 柯捷, 陆太进, 等. 2012. 黄色石英质玉石中“水草花”的物质组成研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 14(3): 1~5.
- 张勇, 陆太进, 杨天畅, 等. 2014. 石英质玉石的颜色分布及其微量元素分析[J]. *岩石矿物学杂志*, 33: 83~88.
- 张蓓莉. 2006. *系统宝石学(第二版)[M]*. 北京: 地质出版社.