

# 翡翠皮壳的矿物学特征及其对玉石质量的指示

吴贤城

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月14日; 发布日期: 2026年4月24日

## 摘要

文章以缅甸中低品质翡翠为研究对象, 通过偏光显微镜、拉曼光谱及X射线衍射等技术, 系统分析皮壳的矿物学特征及其对内部玉质的指示作用。研究发现, 皮壳与玉肉虽在矿物颗粒尺寸上具有继承性, 但结构差异显著: 皮壳多呈碎裂结构, 颗粒疏松、解理发育; 玉肉则以变晶结构为主, 颗粒结合紧密。结构退化程度直接反映风化强度, 可有效指示内部玉质保存状况。成分上, 皮壳除主要矿物硬玉外, 富含绿泥石、赤铁矿、钠长石等次生矿物。拉曼光谱显示皮壳硬玉结晶度低于玉肉。次生矿物组合具环境指示意义: 乌砂皮中绿泥石、赤铁矿指示还原环境; 黄砂皮中利蛇纹石、水铝矿反映氧化条件。本研究明确了皮壳的矿物学特征可作为评估内部玉质的重要依据, 为翡翠原石无损鉴定提供了科学支持, 对市场交易实践具有指导价值。

## 关键词

翡翠, 矿物组成, 质量评估

# Mineralogical Characteristics of Jadeite Crust and Its Implications for Jade Quality

Xiancheng Wu

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: March 10, 2026; accepted: April 14, 2026; published: April 24, 2026

## Abstract

This study focuses on medium to low-quality jadeite from Myanmar. Using techniques such as polarizing microscopy, Raman spectroscopy, and X-ray diffraction, it systematically analyzes the mineralogical characteristics of the crust and their indicative significance for the internal jade quality. The research finds that although the crust and the internal jadeite matrix inherit similar

mineral grain sizes, they exhibit significant structural differences: the crust often displays a cataclastic texture with loose grains and developed cleavage, while the internal matrix is primarily composed of a blastic texture with tightly intergrown particles. The degree of structural degradation directly reflects the intensity of weathering, effectively indicating the preservation state of the internal jade quality. Compositionally, besides the primary mineral jadeite, the crust is enriched with secondary minerals such as chlorite, hematite, and albite. Raman spectroscopy reveals that the crystallinity of jadeite in the crust is lower than that in the internal matrix. The assemblage of secondary minerals holds environmental significance: chlorite and hematite in black sand crust indicate a reducing environment, while lizardite and gibbsite in yellow sand crust reflect oxidizing conditions. This study clarifies that the mineralogical characteristics of the crust can serve as an important basis for evaluating the internal jade quality, providing scientific support for the non-destructive assessment of jadeite rough and offering guidance for market trading practices.

## Keywords

Jadeite, Mineral Composition, Quality Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

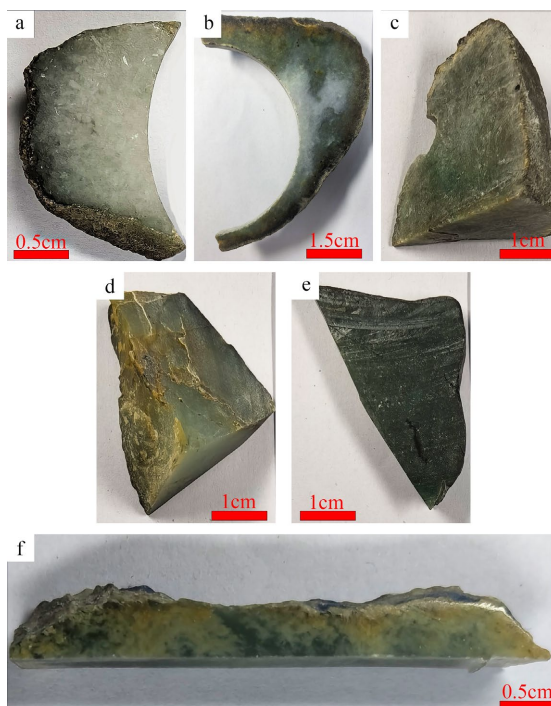
## 1. 引言

近年来,翡翠市场持续火爆,市场销售额高达 1500 亿元。当前已有很多科技手段可以检测翡翠的真假和质量,但还没有哪一种仪器能透视翡翠原石来查验内部的质量。因此,通过科学的研究总结翡翠皮壳特征与内部玉石品质的联系对翡翠交易市场尤为重要。国内对于翡翠品质的划分主要依据为 2009 年国家颁布的翡翠分级的国标,然而国标中尚未涵盖种的定义和分级,后续欧阳柳章[1]等研究者通过结合国标从材料学角度的“六面体结构”提出了种的评价多因素论,以及采用表面粗糙度这一指标作为种的分级标准,依此对种划分了四个等级进一步完善和发展了翡翠分级。而对于翡翠皮壳特征方面的研究主要集中在对翡翠不同类型皮壳种类进行总结,并通过翡翠皮壳矿物组成以及结构特征指出不同类型翡翠皮壳的成因[2]-[5]。但这些关于翡翠品质分级以及皮壳特征的研究未能有效结合为关注皮壳特征对内部质量的指示性,针对翡翠皮壳的矿物学特征与玉石质量的具体关联机制探讨较少。因此本文旨在通过综合矿物学观察、激光拉曼光谱和 X 射线粉晶衍射分析技术,探究翡翠皮壳的矿物学特征与内部玉石质量指标的对应关系。

## 2. 样品及测试

### 2.1. 样品分类

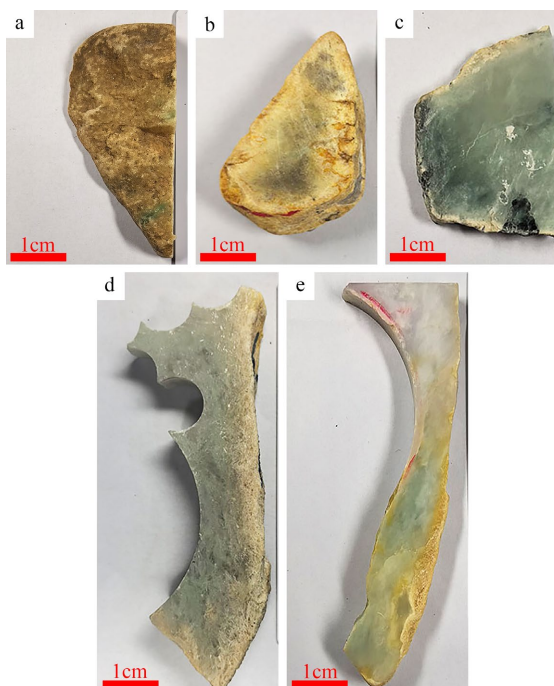
样品来源于广州肇庆以及四会市场带有皮壳的翡翠原石切割共 11 件。通过皮壳颜色首先将其分为乌砂皮系列和黄砂皮系列,玉肉以国标《GB/T 23885-2009 翡翠分级》和欧阳柳章所提出的种的划分依据,结合样品玉石的透明度、质地、种的角度划分为品质由低到高的三档 W-1、W-2、W-3、W-4、W-5、W-6(图 1)和 H-1、H-2、H-3、H-4、H-5(图 2)。其中 W-1、W-2、W-3; H-1、H-2 样品为第三档品质差异大多呈干白地到冬瓜地,W-4、W-5; H-3、H-4、H-5 样品为第二档品质较差呈糯化地,W-6 样品为第一档品质较好接近冰地。



注：(a) 样品 W-1；(b) 样品 W-2；(c) 样品 W-3；(d) 样品 W-4；(e) 样品 W-5；(f) 样品 W-6。

Figure 1. Sample diagram of black sand skin

图 1. 乌砂皮样品图



注：(a) 样品 H-2；(b) 样品 H-4；(c) 样品 H-5；(d) 样品 H-1；(e) 样品 H-3。

Figure 2. Sample diagram of yellow sand skin

图 2. 黄砂皮样品图

## 2.2. 测试仪器与方法

本文拉曼光谱测试采用桂林理工大学有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心的 Renishaw in Via 型显微共聚焦激光拉曼光谱仪进行测试, 氩离子激光器波长 514 nm, 功率 20 mW, 光栅 1800, 光谱分辨率  $1\text{ cm}^{-1}$ , 最低波数  $10\text{ cm}^{-1}$ , 光谱重复性  $\leq 0.15\text{ cm}^{-1}$ , 透光效率大于 30%。扫描范围  $100\sim 1400\text{ cm}^{-1}$ , 扫描时间 30 s, 扫描次数 3 次。本文将样品双面抛光处理为光薄片, 为消除表面杂质对实验结果的干扰, 采用 95%浓度的酒精对光薄片进行擦拭清洁后展开测试。数据采集区域选择主要是完整的矿物晶体, 矿物共生边界以及开放裂隙。X 射线粉晶衍射测试采用桂林理工大学化学与生物工程学院的 X'Pert3 Powder-DY5103 型 X 射线衍射仪进行测试, 测试条件为: Cu 靶, 工作电压 40 kV, 扫描方式: 慢扫描, 扫描速度:  $2\theta = 10^\circ/\text{min}$ , 电流 100 mA; 扫描范围:  $2\theta = 5^\circ\sim 70^\circ$ 。测试选取了黄砂皮和乌砂皮系列不同档次的样品 6 件, 切割出其表面“皮壳”部分在超声波清洗机中用 95%浓度的酒精进行清洗并在  $60^\circ\text{C}$  低温烘干, 防止其中黏土矿物受到破坏。烘干后用玛瑙研磨钵研磨至 200 目粉末进行粉晶衍射测试。

## 3. 测试结果

### 3.1. 样品的宏观特征

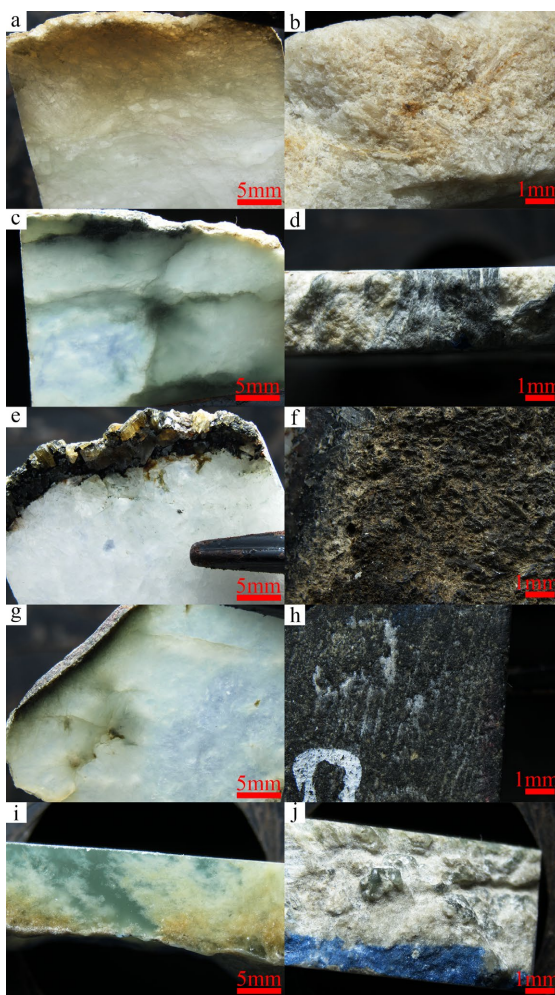
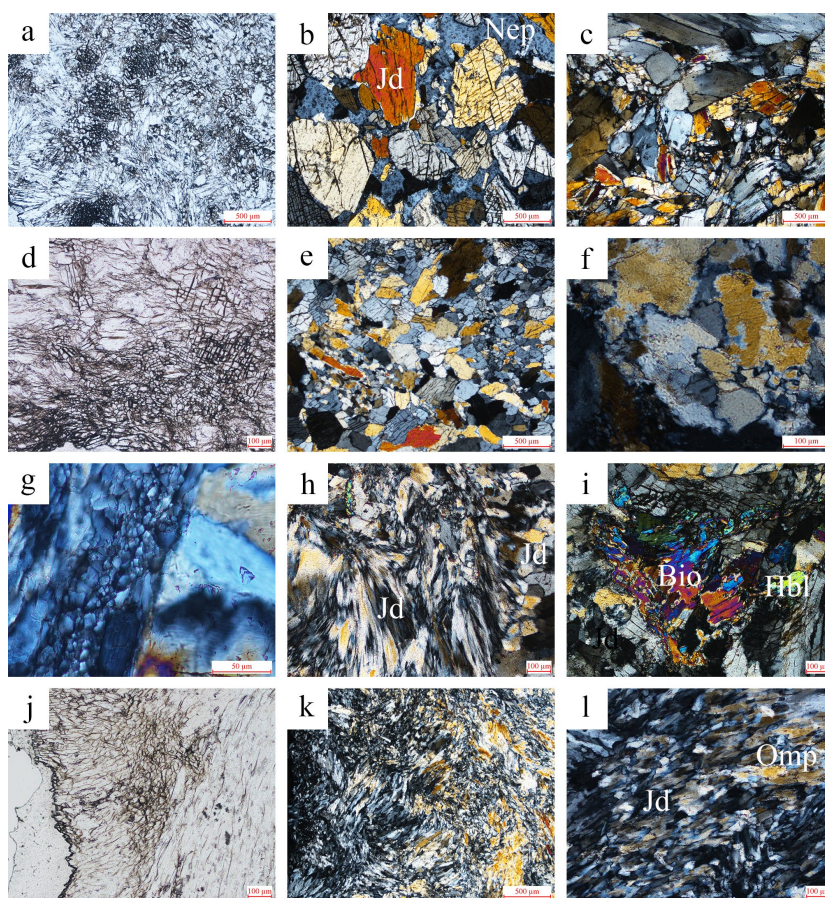


Figure 3. Partial enlargement of sample skin and jade meat  
图 3. 样品皮壳和玉肉局部放大图

乌砂皮样品皮壳(图 3(f)、图 3(h)、图 3(j))的颜色主要为黑色、褐黑色以及灰黑色, 黄砂皮样品皮壳(图 3(b)、图 3(d))的颜色主要为黄白色、黄色以及土黄色皮壳整体不透明, 所有样品的皮壳厚度范围在 0.1 cm 到 1 cm 之间, 第二档和第一档品质较好的样品皮壳厚度较薄, 反之第三档品质较差的样品皮壳较厚。第二档和第三档品质较好样品的颗粒大小较为细腻, 而第三档品质较差样品的颗粒大小则明显较为粗大, 部分甚至可见柱状晶体。

乌砂皮样品的玉肉(图 3(e)、图 3(g)、图 3(i))颜色主要为白色以及暗绿色, 黄砂皮样品的玉肉(图 3(a)、图 3(c))颜色则主要为白色以及局部出现的灰绿色。两个系列的透明度都在不透明至半透明这一区间, 品质较好的第二档和第三档样品颗粒细腻呈半透明, 未见有“翠性”闪光, 而第一档品质差的样品则呈不透明, 可见明显的矿物颗粒边界以及矿物颗粒解理导致的“翠性”闪光。

### 3.2. 样品的结构特征

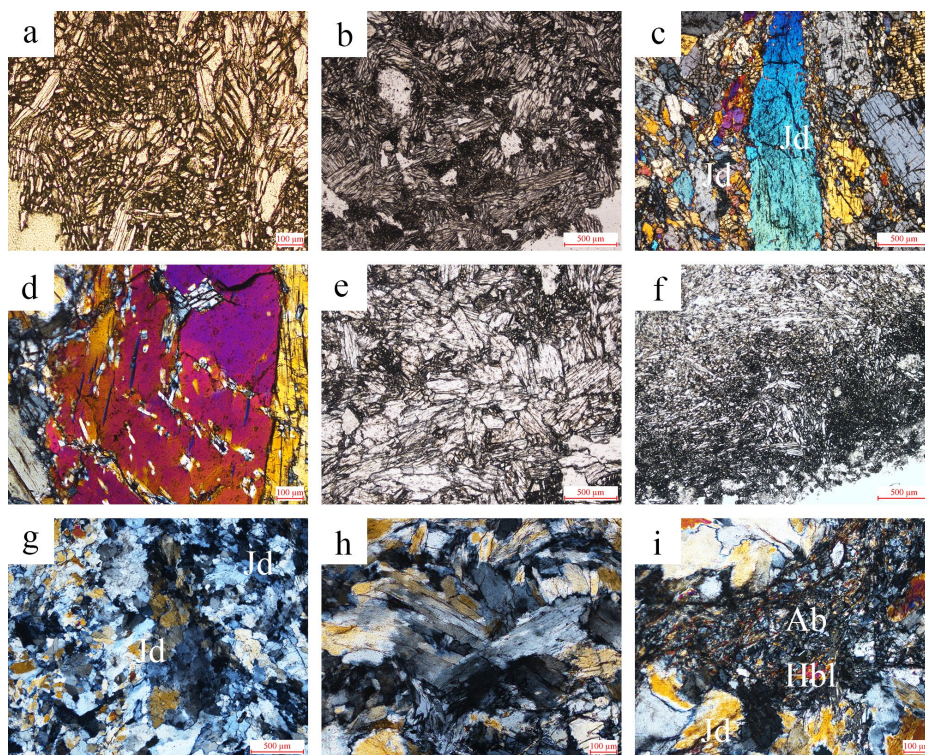


注: (a) W-2 皮壳中粒变晶结构叠加碎裂结构(-); (b) W-1 玉肉中粒变晶结构以及硬玉被霞石交代(+); (c) W-3 玉肉的塑性变形和碎裂结构(+); (d) W-4 皮壳的细粒变晶结构叠加碎裂结构(-); (e) W-5 玉肉的细粒变晶结构(+); (f) W-4 玉肉颗粒的齿状高角度缝合边(+); (g) W-4 玉肉颗粒细晶化(+); (h) W-4 玉肉颗粒呈放射状变晶(+); (i) W-4 玉肉裂隙中的黑云母和角闪石(+); (j) W-6 皮壳的显微变晶结构已经颗粒呈部分定向排列(-); (k) W-6 玉肉颗粒的显微变晶结构和糜棱结构以及呈现出一定的定向排列(+); (l) W-6 玉肉硬玉颗粒与绿辉石形成固溶体以及出现亚颗粒化(+). Jd-硬玉; Nep-霞石; Hbl-角闪石; Bio-黑云母; Omp-绿辉石。

Figure 4. Structural characteristics of black sand skin samples

图 4. 乌砂皮样品结构特征

乌砂皮样品中第三档的 W-1、W-2、W-3 皮壳部分主要为中粒变晶结构叠加碎裂结构(图 4(a)), 主要矿物组成为硬玉呈自形 - 半自形粒状或短柱状, 颗粒粒径 0.2~1.5 mm, 矿物颗粒间边界清晰, 结构疏松, 解理普遍发育, 单偏光下碎裂结构产生的裂隙中充填有许多暗色风化物。玉肉部分呈中粒变晶结构, 主要矿物为硬玉呈自形 - 半自形粒状或短柱状变晶, 颗粒粒径 0.2~1.5 mm。其中 W-1 样品的硬玉颗粒被后期霞石(~30%)矿物所交代(图 4(b)), W-3 样品则可见明显的后期应力作用产生的塑性变形和碎裂结构(图 4(c))。第二档的 W-4 和 W-5 样品皮壳部分为细粒变晶结构叠加碎裂结构(图 4(d)), 主要矿物为硬玉(~95%), 呈自形 - 半自形粒状或短柱状变晶, 颗粒粒径 0.1~0.5 mm, 其中碎裂结构产生的裂隙中有明显的暗色风化物充填。玉肉部分呈细粒变晶结构(图 4(e)), W-5 主要矿物为硬玉, 未见明显的次要矿物, 而 W-4 主要矿物为硬玉(~95%), 次要矿物为角闪石、黑云母(~5%), 硬玉呈半自形短柱状/粒状(粒径 0.1~0.5 mm), 颗粒边界模糊, 结合紧密, 可见颗粒间齿状高角度缝合边(图 4(f)), 样品中部分较大硬玉颗粒边缘出现细晶化(图 4(g)), 局部见放射状变晶结构(图 4(h)), W-4 内部有裂隙发育, 角闪石和黑云母主要呈它形分布在裂隙中(图 4(i))。第一档的 W-6 样品皮壳部分呈显微变晶结构(图 4(j)), 主要矿物为硬玉(~85%), 次要矿物为绿辉石(~15%), 呈半自形 - 它形短柱状, 颗粒粒径 0.05~0.1 mm, 可见一定的定向排列, 颗粒间边界模糊, 结构致密, 暗色风化物富集于解理及粒间缝。玉肉部分呈显微变晶结构和糜棱结构, 主要矿物为硬玉(~85%), 次要矿物为绿辉石(~15%), 呈短柱状或糜棱状, 可见塑性变形导致矿物定向排列(图 4(k)), 硬玉颗粒与绿辉石形成固溶体矿物颗粒边缘模糊并出现亚颗粒化现象(图 4(l))。



注: (a) H-1 皮壳不等粒变晶结构叠加碎裂结构(-); (b) H-2 皮壳中粒变晶结构叠加碎裂结构(-); (c) H-1 玉肉不等粒变晶结构(+); (d) H-1 玉肉大颗粒边缘细晶化(+); (e) H-2 玉肉颗粒呈松散的中粒变晶结构(-); (f) H-3 皮壳细粒变晶结构叠加碎裂结构(-); (g) H-4 玉肉呈细粒变晶结构(+); (h) H-5 玉肉颗粒齿状高角度缝合边(+); (i) H-5 玉肉裂隙充填有重结晶的钠长石和角闪石(+). Jd-硬玉; Hbl-角闪石; Ab-钠长石。

**Figure 5.** Structural characteristics of yellow sand skin samples

**图 5.** 黄砂皮样品结构特征

黄砂皮样品中第三档的 H-1 皮壳部分呈不等粒变晶结构叠加碎裂结构(图 5(a)), 主要矿物为硬玉, 呈自形 - 半自形柱状或短柱状, 颗粒粒径 0.01~1 mm, 矿物边界清晰, 结构疏松, 暗色风化物均匀分布于粒间及解理缝。H-2 皮壳部分呈中粒变晶结构叠加碎裂结构(图 5(b)), 主要矿物为硬玉, 呈自形 - 半自形短柱状, 颗粒粒径 0.5~1 mm, 矿物边界清晰, 结构十分疏松。玉肉部分 H-1 呈不等粒变晶结构(图 5(c)), 矿物以硬玉为主, 呈自形 - 半自形短柱状, 颗粒粒径 0.01~2 mm, 颗粒解理发育, 排列无序, 结构疏松, 可见大颗粒边缘的细晶化(图 5(d))。H-2 玉肉部分成中粒变晶结构, 主要矿物为硬玉, 颗粒粒径 0.5~1mm, 颗粒间边界清晰, 结构十分松散(图 5(e))。第二档的 H-3、H-4、H-5 皮壳部分呈细粒变晶结构叠加局部的碎裂结构(图 5(f)), H-3、H-4、H-5 主要矿物皆为硬玉, 其中 H-5 含有次要矿物为绿辉石(~10%), 颗粒呈自形 - 半自形短柱状或粒状, 颗粒粒径 0.1~0.5 mm, 碎裂结构处可见明显暗色风化物充填。玉肉部分 H-3、H-4、H-5 全部呈细粒变晶结构(图 5(g)), 主要矿物为硬玉, 其中 H-5 含有次要矿物角闪石和钠长石(~5%), 呈自形 - 半自形短柱状或粒状, 颗粒粒径 0.05~0.5 mm, 颗粒边界较模糊, 可见颗粒间齿状嵌合(图 5(h)), 结构较致密, H-5 的开放裂隙充填细粒重结晶钠长石, 角闪石沿裂隙分布(图 5(i))并对周围硬玉产生交代。

### 3.3. 样品矿物组成特征

#### 3.3.1. 拉曼光谱分析

硬玉在 1037, 985, 775, 697, 573, 521, 430, 373, 327 和 200  $\text{cm}^{-1}$  处附近有明显的拉曼位移峰, 其中主要峰位有 1037, 985, 697, 373 和 200  $\text{cm}^{-1}$ , 为硬玉的特征拉曼光谱峰。其中 1037 和 985  $\text{cm}^{-1}$  是由  $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$  基团的 Si-O 对称伸缩振动引起的, 697  $\text{cm}^{-1}$  是由于 Si-O-Si 的对称弯曲振动引起的, 373  $\text{cm}^{-1}$  则是由于 Si-O-Si 的不对称弯曲振动引起的。较弱的峰位于 573, 521 和 430  $\text{cm}^{-1}$  的位置。归属于离子键性质的 M-O 伸缩振动, 及其与 Si-O-Si 弯曲振动的耦合振动引起的[6]。

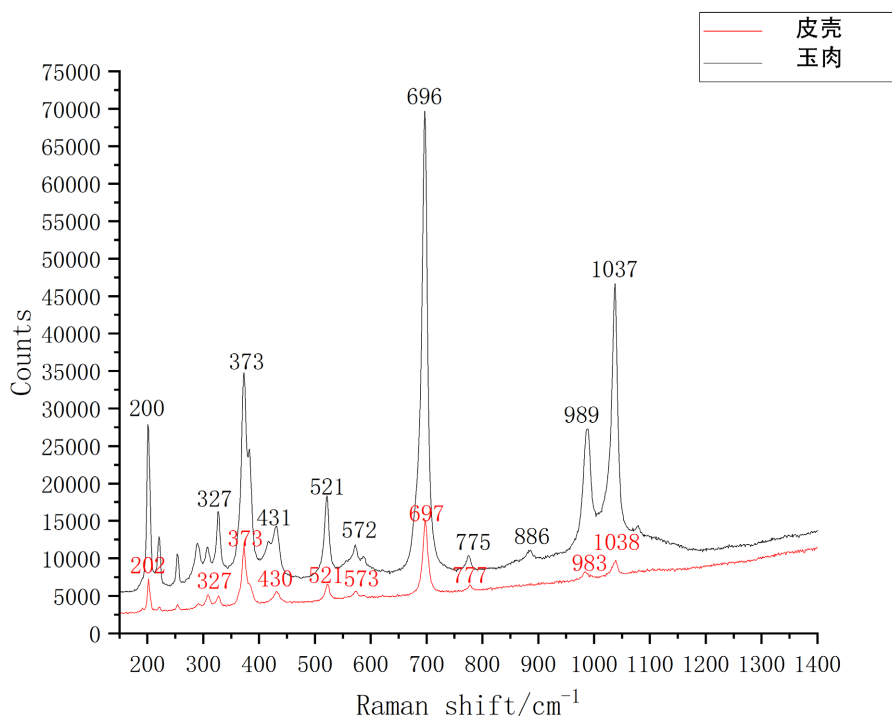
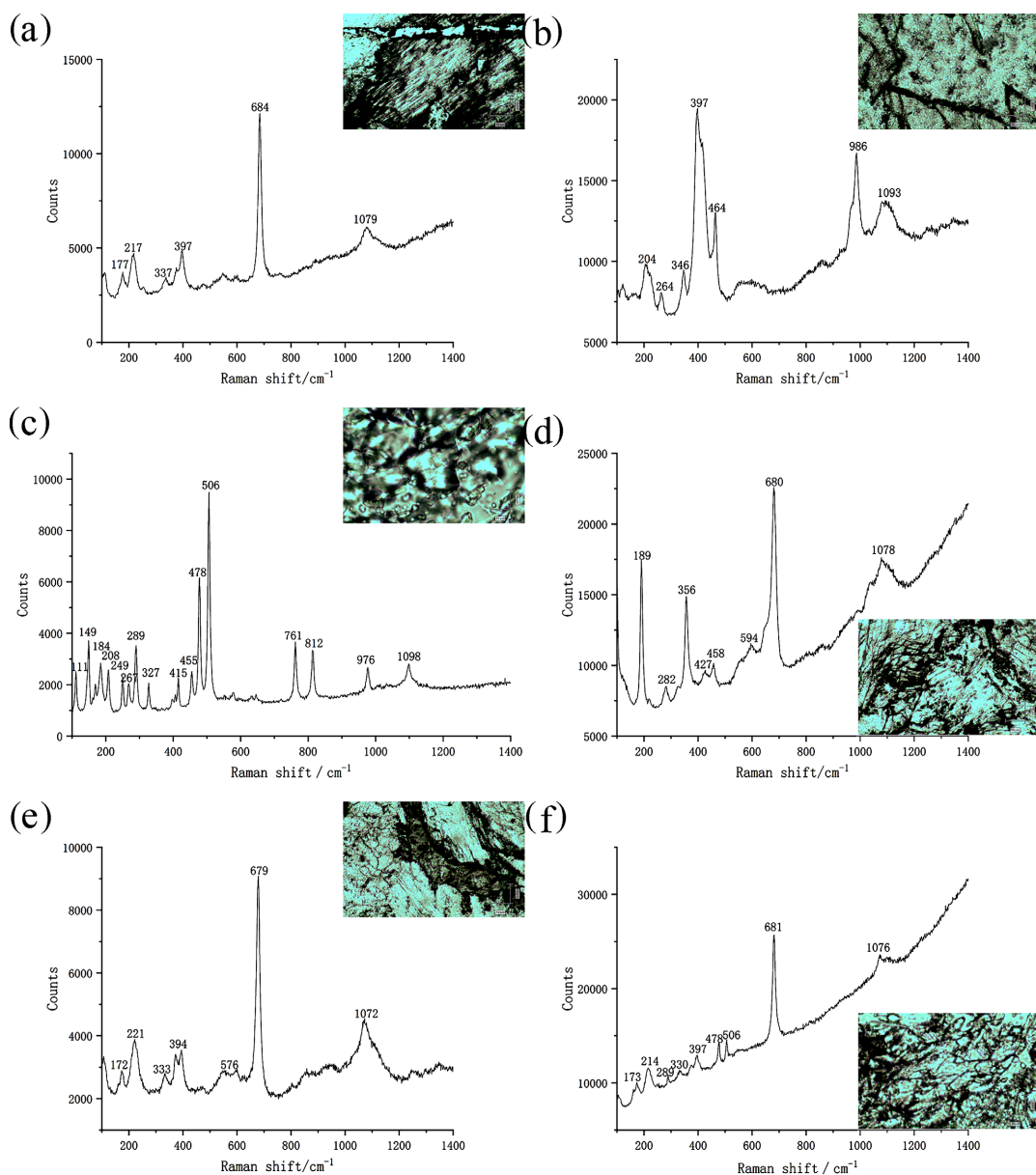


Figure 6. Comparison of raman characteristics between shell jadeite and jadeite  
图 6. 皮壳硬玉和玉肉硬玉的拉曼特征对比

翡翠皮壳矿物与内部玉肉矿物的拉曼光谱特征对比(图 6)主要在于玉肉部分硬玉的光谱特征表现为峰形尖锐,半高宽小,表明高结晶度[7],主峰尖锐且无杂峰,符合翡翠的拉曼指纹。而皮壳部分的硬玉因受风化作用明显、杂质混入,在  $700\sim 1040\text{ cm}^{-1}$  的主峰强度显著降低,峰高明显低于玉肉部分,半高宽增大,导致峰形宽化、峰形低缓,提示结晶度低或含非晶成分,会出现细小杂峰及背景升高。

同时翡翠大多具有次要矿物存在,如钠长石,角闪石族矿物等。这些次要矿物的存在和分布特点会对翡翠的品质产生影响。选取翡翠样品中有别于基体颜色的矿物质以及裂隙充填区域为基点打点测试,根据其拉曼光谱特征可得出样品中所含有的次要矿物。



注: (a) 绿辉石拉曼光谱图; (b) 霞石拉曼光谱图; (c) 钠长石拉曼光谱图; (d) 黑云母拉曼光谱图; (e) 浅闪石拉曼光谱图; (f) 透闪石拉曼光谱图。

**Figure 7.** Raman spectra of secondary minerals in samples  
**图 7.** 样品次要矿物拉曼光谱图

绿辉石(图 7(a))主要特征峰位于 1079, 684, 397 和 217  $\text{cm}^{-1}$ 。1079, 684 和 217  $\text{cm}^{-1}$  为典型绿辉石矿物拉曼特征峰。绿辉石化学式  $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , 绿辉石、硬玉同属于辉石族矿物, 与硬玉  $(\text{NaAlSi}_2\text{O}_6)$  形成完全类质同象系列[6] [8]。

霞石(图 7(b))在 1093, 986, 464, 397, 346, 264 和 204  $\text{cm}^{-1}$  附近有明显的拉曼位移峰, 其中主要峰位有 1093, 986, 464 和 397  $\text{cm}^{-1}$ 。霞石的主要特征峰包括: 主峰 986  $\text{cm}^{-1}$ , 低频峰 397  $\text{cm}^{-1}$  及余下的弱峰 204, 346, 464  $\text{cm}^{-1}$  与霞石特征光谱一致[9]。

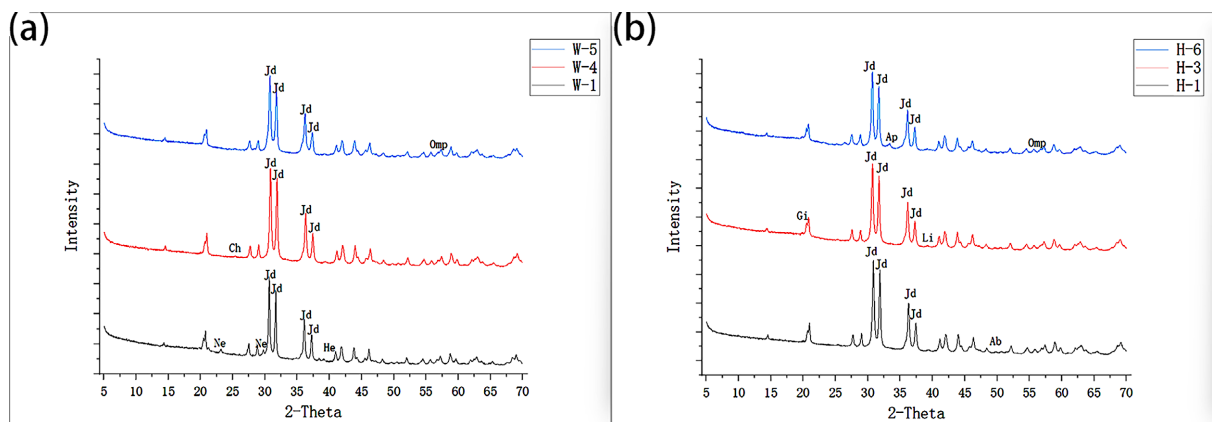
钠长石(图 7(c))在 1098, 976, 812, 761, 506, 478, 415, 289 和 149  $\text{cm}^{-1}$  处附近有明显的拉曼位移峰, 其中主要峰位有 478, 506, 761, 812, 976 和 1098  $\text{cm}^{-1}$ 。主要特征峰包括: 478  $\text{cm}^{-1}$ 、506  $\text{cm}^{-1}$ 、1098  $\text{cm}^{-1}$  的位移峰, 249 和 289  $\text{cm}^{-1}$  的弱峰[10] [11]。

黑云母(图 7(d))在 1078, 680, 594, 458, 356 和 189  $\text{cm}^{-1}$  附近有明显的拉曼位移峰, 其中主要峰位有 680, 356 和 189  $\text{cm}^{-1}$ 。主要特征峰包括: 189  $\text{cm}^{-1}$  存在的高强度峰, 458  $\text{cm}^{-1}$  弱峰以及 680  $\text{cm}^{-1}$  附近存在的强度峰作为黑云母的典型诊断峰[11]。

两类角闪石族矿物(图 7(e)-(f))在 1075, 680, 506, 478, 397, 214 和 173  $\text{cm}^{-1}$  附近有明显的拉曼位移峰, 其中主要峰位有 1076 和 681  $\text{cm}^{-1}$ 。角闪石的主要特征峰包括: 1076  $\text{cm}^{-1}$  的位移峰和 681  $\text{cm}^{-1}$  的位移峰[6]。

### 3.3.2. X 射线粉晶衍射分析

对 6 件样品的“皮壳”进行了 X 射线粉晶衍射的物相分析, 结果为下图所示(图 8)。6 件样品的“皮壳”的 XRD 衍射结果显示其中的主要矿物皆为硬玉, 硬玉的最强特征衍射峰如下: 对应晶面间距  $d$  值为 2.91 的强衍射峰(对应衍射角  $2\theta = 30.6$ ),  $d$  值为 2.82 的较强衍射峰(对应衍射角  $2\theta = 31.6$ )以及  $d$  值为 2.48 和 2.41 (对应衍射角  $2\theta = 36.1$ 、 $2\theta = 37.2$ )的衍射峰, 衍射峰值与标准 PDF 卡片对比相差不大, 观察谱线, 峰值尖锐, 证明硬玉矿物颗粒结晶度较高, 但部分样品硬玉最强峰与标准硬玉的硬玉衍射峰略有偏移, 存在硬玉颗粒晶格类质同象替代[12]。



注: (a) 乌砂皮系列样品 XRD 谱图; (b) 黄砂皮系列样品 XRD 谱图; Jd-硬玉; Omp-绿辉石; Ne-霞石; Ch-绿泥石; Ab-钠长石; Gi-水铝矿; He-赤铁矿; Li-利蛇纹石; Ap-磷灰石。

Figure 8. X-ray diffraction pattern of the sample

图 8. 样品 XRD 衍射谱图

不同颜色系列样品中次要矿物的类别则有所不同, 根据测得的数据利用 Jade9 软件进行次要矿物以及微量矿物的物相分析比对后得出乌砂皮系列“皮壳”中 W-1 含有少量绿泥石、霞石和赤铁矿, W-4 含有少量绿泥石, W-5 则含有绿辉石; 黄砂皮系列“皮壳”中 H-1 含有少量钠长石, H-3 含有少量利蛇纹

石和水铝矿，H-6 则含有绿辉石和磷灰石。样品谱图中次要矿物的衍射峰强度弱，反映“皮壳”中存在的次要矿物结晶度较差。样品中具体的矿物组成总结于下表(表 1)。

**Table 1.** XRD phase analysis results of the “Crust” from black sand skin and yellow sand skin samples

**表 1.** 乌砂皮和黄沙皮样品“皮壳”X 射线粉晶衍射物相分析结果

编号	主要矿物	次要矿物
W-1	硬玉	绿泥石、霞石、赤铁矿
W-4	硬玉	绿泥石
W-5	硬玉	绿辉石
H-1	硬玉	钠长石
H-3	硬玉	利蛇纹石、水铝矿
H-6	硬玉	绿辉石、磷灰石

## 4. 皮壳矿物学特征与内部玉石质量关系探讨

### 4.1. 皮壳结构特征与玉石质量的关系

整体上所有样品多呈现变晶结构，颗粒大小在 0.1~2 mm 之间不等，部分样品存在着亚颗粒现象、齿状高角度缝合边结构、颗粒细晶化等变形重结晶方式。基于前人的研究，翡翠的质量与其结构存在一定的关系，颗粒的大小、形态、颗粒之间的结合方式、晶体定向性等特征都是影响翡翠“玉肉”透明度的重要因素[13]-[15]。翡翠质量与硬玉矿物颗粒大小有关，硬玉矿物颗粒晶体越细小，大小越均匀，排列越整齐，翡翠“玉肉”的质地细腻，透明度高，韧性强。除此之外翡翠的质量还与晶体颗粒间的结合方式有关，矿物颗粒之间结合得越紧密，翡翠质量就越好，具有齿状高角度缝合边结构的翡翠往往透明度较好。硬玉矿物晶体的形态也影响着翡翠的外观，晶体形态影响着矿物颗粒结合的方式，总体而言具有糜棱结构的翡翠质量优于粒状变晶结构的翡翠，具有粒状变晶结构的翡翠优于柱状变晶结构的翡翠。

翡翠从“皮壳”到“玉肉”在矿物颗粒大小上有一定的继承性，大小差别不大，矿物颗粒大小往往与原生环境有关，受到表生作用的影响很小[16][17]。相比“玉肉”部分，“皮壳”部分的矿物颗粒边界更为明显，结构疏松常见碎裂结构，颗粒间隙较大。从两者对比的显微图像中可见，“皮壳”处易见开放裂隙且含有暗色物质或铁质浸染，从“皮壳”到“玉肉”这些暗色物质和浸染物呈递减趋势。“玉肉”部分出现变质重结晶作用现象更加明显，部分样品颗粒间模糊部分呈齿状紧密连接。由裂隙中、矿物颗粒间隙中、解理缝中的暗色物质充填和铁质浸染现象可知，翡翠的表生作用会优先作用于翡翠原石结构薄弱的部分，沿着开放性裂隙、矿物颗粒边界、解理缝进行，表生作用破坏了翡翠原石表面的矿物颗粒并沿着裂隙和矿物颗粒边界进行风化，溶解了这些结构中的物质，并在这个过程中产生了新的次生物质，原本粗大的晶界充填了透光性差的次生矿物，暗色物质分布呈渐变过渡说明了该物质的形成是由外及内的。

### 4.2. 皮壳矿物组成特征与玉石质量的关系

运用激光拉曼光谱与 X 射线粉晶衍射两种测试技术，系统地研究了中低品质黄沙皮与乌砂皮翡翠系列样品“皮壳”及“玉肉”的矿物组成特征，揭示其矿物学差异及其对玉石品质的潜在指示意义。拉曼光谱与 XRD 分析结果一致表明，所有研究样品(包括不同档次的乌砂皮与黄沙皮翡翠)的“皮壳”和“玉肉”部分，其主要矿物成分均为硬玉。拉曼光谱在 1037、985、697、373 和 200  $\text{cm}^{-1}$  等处显示出硬玉的典型特征峰，证实了硬玉作为翡翠主要矿物的普遍性。XRD 图谱中清晰的硬玉特征衍射峰进一步印证了

这一结论。同时鉴定出多种次要矿物，其种类与分布与翡翠的品质和皮壳类型表现出一定的相关性。拉曼光谱分析得出绿辉石、霞石、钠长石、黑云母及角闪石族矿物等次要矿物。这些矿物通常分布于裂隙、矿物共生边界或作为后期交代产物存在。XRD物相分析进一步证实了不同皮壳类型中次要矿物的差异(表1)。例如，乌砂皮系列样品的“皮壳”中普遍检测到绿泥石，且在低品质样品W-1中还发现霞石和赤铁矿；较高品质乌砂皮样品W-5的“皮壳”中则含有绿辉石。黄砂皮系列样品的“皮壳”中含有钠长石以及利蛇纹石和水铝矿等表生风化矿物。且拉曼光谱显示，“玉肉”部分硬玉的拉曼峰形尖锐、半高宽小，表明其结晶度高、结构致密。相比之下，“皮壳”部分硬玉的拉曼主峰强度显著降低、半高宽增大、峰形宽化，暗示其因风化作用导致结晶度降低或含有非晶质成分。XRD结果中次要矿物的衍射峰强度普遍较弱，也反映了“皮壳”中次生矿物结晶较差的特点，这是表生风化作用的直接证据。

因此，次要矿物的类型和存在形式对翡翠品质有重要影响。如钠长石的存在可能在一定程度上改善透明度，但其易风化的特性也可能导致结构疏松[18][19]；而角闪石、黑云母等暗色矿物沿裂隙充填[20]，则会形成杂质包裹体，显著劣化玉石的通透度和美观度。不同皮壳类型中特征次生矿物的组合，如乌砂皮中的绿泥石、赤铁矿与黄砂皮中的利蛇纹石、水铝矿，为通过皮壳矿物成分推断内部玉肉品质及所受风化作用类型提供了矿物学依据。

## 5. 结论

(1) 翡翠皮壳的结构是内部玉肉原生结构与表生风化作用叠加的产物。研究表明，皮壳与玉肉在矿物颗粒尺寸上具有显著继承性，但皮壳普遍发育碎裂结构、颗粒边界清晰、解理发育，结构疏松多孔；而玉肉部分则以变晶结构为主，颗粒结合紧密，可见齿状缝合线、亚颗粒化等优化结构。结构退化程度与风化强度正相关，皮壳结构的致密性可直接指示内部玉肉结构的保存完好度。糜棱结构或细粒变晶结构的残留是高品质玉肉的重要标志，而粗粒变晶结构与开放性裂隙发育则预示玉肉品质较差。

(2) 样品的主要矿物均为硬玉，但在皮壳中可以检测到绿泥石、赤铁矿、水铝矿、利蛇纹石、钠长石、霞石等次生矿物。拉曼光谱与XRD分析表明，次生矿物组合与皮壳类型及风化环境密切相关：黄砂皮中利蛇纹石、水铝矿等出现，指示酸性氧化环境下的铝硅酸盐分解；乌砂皮中含有绿泥石次生矿物，反映还原性环境下的铁质次生富集，同时皮壳中的赤铁矿又指示出了皮壳受过氧化环境的影响，可见乌砂皮所受的风化过程更为复杂多变。次生矿物的类型与分布是推断翡翠所受风化作用性质与强度的直接矿物学证据。

(3) 研究意义与展望：本文揭示了翡翠皮壳特征与内部玉质的联系，为翡翠原石的品质评估提供了理论支撑和实践指导。未来研究可扩大样品范围，结合同位素年代学与流体包裹体分析，进一步量化风化速率与流体活动历史，深化翡翠表生作用过程对玉肉品质影响的理解。

## 参考文献

- [1] 欧阳柳章, 张威, 彭永扬, 等. 结合国标对翡翠的种进行分级[J]. 材料导报, 2024, 38(11): 82-91.
- [2] 刘子燕. 翡翠矿床类型、成因及翡翠皮壳特征分析[J]. 四川有色金属, 2016(4): 10-13.
- [3] 闫薇薇, 王建华. 缅甸翡翠砾石中蓝雾和黑皮的成因探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(6): 107-113.
- [4] 卢雯婷, 张磊, 段庆芬, 等. 翡翠原石黑色蜡皮壳矿物学特征研究[C]//国家珠宝玉石首饰检验集团有限公司, 中国珠宝玉石首饰行业协会. 珠宝与科技——2023 国际珠宝首饰学术交流会论文集. 珠宝国检集团云南实验室; 昆明: 昆明理工大学, 2023: 225-229.
- [5] 胡楚雁, 陈树惠. 缅甸翡翠阶地矿床表生还原性水岩反应的宝石学意义[J]. 宝石和宝石学杂志, 2002(2): 1-6.
- [6] 马平, 沈锡田, 罗恒, 等. 常见翡翠产地的激光拉曼光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(11): 3441-3447.

- [7] 陈全莉, 尹作为, 卜玥文, 等. 拉曼光谱在危地马拉翡翠矿物组成中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(9): 2447-2451.
- [8] 林晨露. 危地马拉不同色调绿色翡翠宝石矿物学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [9] 韩辰婧, 王雅玫. 含霞石翡翠的成因研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(3): 581-590.
- [10] 宁珮莹, 蒙彩珍, 潘涵, 等. 具晕彩效应长石的宝石学特征研究[J]. 超硬材料工程, 2020, 32(3): 41-45.
- [11] Xi, J., Yang, Y., Xu, H., Xian, H., Pan, F., Li, S., *et al.* (2024) Reconstruction of Magma Plumbing System and Regional Magmatic Processes via Chemical and Structural Zoning of Biotite in Rhyolite from Long Valley, CA. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **129**, e2024JB029205. <https://doi.org/10.1029/2024jb029205>
- [12] Morimoto, N., 黄婉康. 辉石命名法[J]. 矿物学报, 1988(4): 289-305.
- [13] 吴晓, 王礼胜. 偏光显微镜下翡翠结构与品质的关系初析[C]//国家珠宝玉石质量监督检验中心, 中国珠宝玉石首饰行业协会. 中国国际珠宝首饰学术交流会论文集(2017). 上海建桥学院珠宝学院, 河北地质大学, 2017: 405-409.
- [14] 陈志强. 翡翠的结构和赌石预测[J]. 中国宝玉石, 1997(2): 32-33.
- [15] 谢星, 王崇礼, 梁婷. 翡翠的结构特征及其对翡翠质量的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2005(3): 15-18.
- [16] 李斌, 沈海, 高云, 等. 翡翠的结构及成分分析[J]. 岩矿测试, 2000(1): 51-54.
- [17] 施光海, 崔文元. 缅甸硬玉岩的结构与显微构造: 硬玉质翡翠的成因意义[J]. 宝石和宝石学杂志, 2004(3): 8-11, 28-50.
- [18] 陈炳辉, 罗劬侃, 郝望姣. 翡翠的皮壳组成及其与内部玉石质量关系初步研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2009, 11(1): 16-19.
- [19] 陈志强, 袁奎荣. 翡翠中的长石及其宝石学意义[J]. 矿物学报, 1997(3): 352-356.
- [20] 蔡诗诗, 张恩. 缅甸翡翠原石中角闪石族矿物的形成[J]. 矿物学报, 2018, 38(1): 50-57.