

黑青和田玉宝石矿物学及地球化学特征研究

付玉蕾^{1,2}, 史淼^{1,3,4}, 曹沁元¹, 马世玉¹

(1. 河北地质大学, 河北石家庄 050031; 2. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北三河 065201;
3. 河北省岩石矿物材料绿色开发重点实验室, 河北石家庄 050031; 4. 硅酸盐固废资源化利用河北省工程研究中心,
河北石家庄 050031)

摘要: 近年国内市场出现了一种含有黄铁矿的黑青色玉石, 主要产自新疆, 属于和田玉中的稀少品种。本文利用常规宝石学仪器、偏光显微镜、红外光谱、拉曼光谱、X射线粉晶衍射(XRD)、电子探针(EPMA)、激光电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)以及同位素质谱仪(MC-ICP-MS)对7块黑青和田玉样品的宝石矿物学和地球化学特征进行了系统分析, 结果显示, 样品颜色为墨绿-黑色, 折射率点测 1.61, 相对密度 3.08~3.17, 摩氏硬度 6.0~6.5, 主要组成矿物为透闪石, 次要矿物以黄铁矿为主, 同时还含有少量绿帘石、绿帘石、榍石、锆石、石墨等, 具有典型的纤维交织状结构; 红外与拉曼光谱特征峰显示与和田玉标准谱峰一致; 样品中透闪石的主要化学成分为 SiO₂、MgO、CaO 和 FeO, Mg/(Mg+Fe²⁺) 值显示部分透闪石已过渡为阳起石; 根据微量元素 Cr-Ni 投图判别样品为白云石大理岩型成因, 稀土元素含量较少, 呈左倾模式; 推测成矿热液主要为岩浆水, 含少量变质水; 样品中黄铁矿 Co/Ni>1 且含少量 As、Se、Cu、Zn、Pb 等元素, $\delta^{34}\text{S}$ 介于 8.87‰~20.92‰ 之间, 推断为岩浆热液成因且硫来源于岩浆与地层硫的混合。

关键词: 黑青和田玉; 黄铁矿; 宝石矿物学; 氢-氧-硫同位素

中图分类号: P578.955

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)03-0630-13

Gem mineralogical and geochemical characteristics of the black cyan nephrite

FU Yu-lei^{1,2}, SHI Miao^{1,3,4}, CAO Qin-yuan¹ and MA Shi-yu¹

(1. Hebei Geology University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China; 3. Hebei Key Laboratory of Green Development of Rock Mineral Materials, Shijiazhuang 050031, China; 4. Engineering Research Center for Silicate Solid Waste Resource Utilization of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: In recent years, a kind of black cyan nephrite containing pyrite has appeared in the domestic market. It is mainly produced in Xinjiang and belongs to a relatively rare nephrite variety, which has mining and utilization value. This article systematically analyzed the mineralogical and geochemical characteristics of seven samples using conventional gemological instruments, polarized light microscopy, infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, X-ray powder diffraction (XRD), electron probe (EPMA) laser inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), and isotope mass spectrometer (MC-ICP-MS). The results show that the color of black cyan nephrite is dark green to black, the refractive index is 1.61, the relative density is 3.08~3.17, and the Mohs hardness is 6.0~6.5. The main component mineral is tremolite, the secondary mineral is mainly pyrite, and a small amount of chlorite, epidote, sphene, zircon, and graphite are also contained, with a typical fiber interlaced structure; The characteristic peaks of infrared and Raman spectra are consistent with the standard peaks of nephrite; The

收稿日期: 2023-12-03; 接受日期: 2024-04-02; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002156); 河北省自然科学基金项目(D2021403015); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2021027); 河北地质大学国家预研项目(KY2024YB01)

作者简介: 付玉蕾(1997-), 女, 硕士研究生, 宝石材料学专业, E-mail: 1562724262@qq.com; 通讯作者: 史淼(1987-), 女, 副教授, 从事宝石学、矿物学、沉积学研究, E-mail: miaoer727@126.com。

main chemical components of the sample are SiO_2 , MgO , CaO and FeO . The $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ value indicates that some tremolite has transitioned to actinolite. Based on the trace element Cr-Ni mapping, the sample is identified as a dolomite marble type genesis, while the content of rare earth elements is relatively low, in a left leaning mode. The ore-forming hydrothermal fluid is mainly magmatic water, containing a small amount of metamorphic water. The sample contains pyrite with $\text{Co}/\text{Ni}>1$ and small amounts of As, Se, Cu, Zn and Pb, $\delta^{34}\text{S}$ ranges from 8.87‰ to 20.92‰, suggesting that it is of magmatic-hydrothermal origin and the source of sulfur is a mixture of magma and formation sulfur.

Key words: black cyan nephrite; pyrite; gemology and mineralogy; hydrogen-oxygen-sulfur isotope

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42002156); Natural Science Foundation of Hebei Provincial (D2021403015); Science and Technology Project of Hebei Education Department (QN2021027); National Pre-research Project of Hebei Geology University (KY2024YB01)

和田玉是隐晶质集合体,主要由透闪石-阳起石类质同象系列矿物组成,其品种众多,以白色和绿色为代表(刘苏君,2016;索林娜等,2019)。近些年珠宝市场出现了一种商业名为“洒金黑青玉”的和田玉种,肉眼观察颜色呈墨绿-黑色,不透明,表面可见黄色金属矿物均匀分布,据前人研究可知此金属矿物为黄铁矿(石东东等,2011;孙秀凤等,2020;杨凌岳等,2020)。和田玉的产出以新疆最为著名,在长达1500 km的昆仑山和阿尔金山一带,目前有线索的和田玉矿点不下百处(周显川等,2012;韩冬等,2018;高孔,2018;姜颖,2020)。除此之外,在青海、四川、贵州、广西、台湾等地也都有产出。前人(石东东等,2011;杨凌岳等,2020)利用偏光显微镜观察与XRD对黑青玉种进行矿物学测试,结果表明产自新疆地区的样品主要组成矿物为透闪石,具典型毛毡状纤维交织变晶结构并将其定名为和田墨玉,而产自青海地区的样品主要组成矿物为阳起石和绿泥石,原岩属于基性-超基性岩;谱学测试结果显示新疆地区黑青色和田玉样品振动光谱与其他类型的和田玉基本一致,均由闪石矿物组成,其拉曼光谱中出现石墨的特征峰(杨晓丹等,2012;孙秀凤等,2020);氢-氧同位素测试结果显示新疆青玉的成矿流体主要以岩浆水为主,青海碧玉的成矿流体由大量变质水组成,俄罗斯 Vitim 地区的和田玉成矿流体主要由大气降水组成(文苾燊等,2014;Burtseva *et al.*, 2015;张红清,2019)。随着人们对和田玉的喜爱和追求不断增强,日益壮大的商业产业导致了和田玉矿床过度开采,含黄铁矿的黑青色和田玉作为国内新近发现的玉石品种,具有较高的开发利用价值。因此对其矿物组成、显微结构以及地球

化学特征等方面进行系统地研究分析贴合社会和市场需要,同时能够提高大众对此类矿物的科学认识,研究成果为完善新玉种的鉴别和进入市场提供了科学依据。

本文围绕收集于新疆地区的黑青和田玉开展研究工作,采用常规宝石学仪器(折射仪、紫外荧光灯、密度测量仪等)测定其基本物性;利用偏光显微镜、XRD、红外及拉曼光谱分析其矿物组成和结构构造;通过电子探针、LA-ICP-MS并结合氢-氧-硫同位素定量分析其化学成分,推测成矿物质来源,并对地球化学特征进行了系统分析。

1 样品与测试

1.1 样品及特征

于新疆珠宝市场采集黑青和田玉样品7件,将样品编号为HQ-01~HQ-07(图1),其中HQ-01、HQ-02为手镯配件,整体呈深绿色,微透明,质地光滑,表面大量黄色金属矿物分布均匀,颗粒较小;HQ-03、HQ-04、HQ-06为和田玉配饰挂件,颜色黑色,玻璃-油脂光泽,表面散有少量黄色金属矿物颗粒;HQ-05、HQ-07为抛光原石,颜色为黑绿色,不透明,油脂-蜡状光泽,无解理,肉眼可见参差状断口和晶型较为完整的黄铁矿颗粒镶嵌于样品中。

1.2 仪器及测试条件

宝石学研究采用河北地质大学珠宝检测中心折射仪、紫外荧光灯、密度测量仪、硬度笔等进行测试;将样品磨制光薄片,采用河北地质大学珠宝中心实验室德国徕卡DW27009型号偏光显微镜进行显微矿物学分析,观察矿物的结构组成;将样品置于玛瑙Lab9kw型号X射线粉末衍射仪,工作电压45 kV,电



图1 新疆黑青和田玉样品照片

Fig. 1 Sample photos of the black cyan nephrite in Xinjiang

流 200 mA, 扫描速度 30°/min, 分析样品的物相组成。

采用河北地质大学珠宝检测中心 Ther1110 Nicolet 傅里叶变换红外光谱仪进行红外光谱测试, 扫描次数 32, 测试波长为 400~4 000 cm^{-1} , 频率为 50~60 Hz; 采用英国 Renishaw-Invia 显微共焦激光拉曼光谱仪进行拉曼光谱测试, 激光束 532 nm, 波长范围 100~4 000 cm^{-1} 。

主量元素测试在河北地质大学电子探针实验室完成, 采用日本 JEOL 公司的 JXA-8230 型电子探针显微分析仪, 15 kV 电压和 20 nA 电流, 积分时间: 主量元素(含量大于 1%) 10 s, 背景 5 s; 原位微量元素测试在河北省岩石矿物材料绿色开发重点实验室完成, 仪器采用澳大利亚科学仪器公司 RESOLUTION-LR 型激光剥蚀系统配合美国赛默飞世尔 ICAP RQ 型电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS); 氢氧同位素测试采用稳定气体同位素质谱仪(235Plus)在北京科荟测试技术有限公司完成; 硫同位素测试采用多接收质谱(Neptune Plus)和相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统(GeoLas HD)在武汉上谱分析科技有限公司完成。

2 结果与分析

2.1 常规宝石学特征

样品折射率点测为 1.61, 与国家珠宝玉石标准和田玉折射率一致。将较大块样品用锤子击碎, 取小块碎片, 采用静水称重法测定其密度并取 3 次

测试结果平均值。结果显示平均相对密度在 3.08~3.17 之间, 高于标准和田玉的相对密度(2.95), 这可能是由于样品中含有大量金属矿物所造成。摩氏硬度 6.0~6.5, 吸收光谱不典型, 紫外荧光呈惰性(表 1)。

表 1 新疆黑青和田玉样品常规宝石学特征

Table 1 Gemological characteristics of black cyan nephrite in Xinjiang

样品编号	光泽	透明度	折射率 (点测)	相对 密度	摩氏 硬度	荧光
HQ-01	油脂光泽	微透明	1.61	3.12	6.0	惰性
HQ-02	油脂光泽	微透明	1.61	3.09	6.0	惰性
HQ-03	油脂光泽	不透明	1.61	3.10	6.5	惰性
HQ-04	油脂光泽	不透明	1.61	3.08	6.5	惰性
HQ-05	蜡状光泽	不透明	1.61	3.16	6.5	惰性
HQ-06	蜡状光泽	不透明	1.60	3.17	6.0	惰性
HQ-07	蜡状光泽	不透明	1.61	3.15	6.5	惰性

2.2 矿相学特征

偏光显微镜下观察, 透闪石有 3 种类型: 粗粒透闪石(Tr-I)、纤维状透闪石(Tr-II)以及细粒透闪石(Tr-III)。Tr-I 晶体具斑状变晶结构, 相比于透闪石基质形成较早, 单偏光下透明, 略带乳白色斑块, 正交偏光下可见 II 级绿-紫红干涉色, 边缘呈 II 级蓝, 已向阳起石过渡(图 2a); Tr-II 晶体呈长纤维状及束状产出, 具有明显的定向排列, 呈纤维束状变晶结构(图 2b); Tr-III 晶体由纤细的透闪石晶体交织在一起而形成, 颗粒细小(0.01 mm 以下), 粒度均匀, 为毛毡状纤维交织结构, 这种结构使和田玉具有较高的韧性(图 2b)。此外, 部分样品中还可见帚状结构

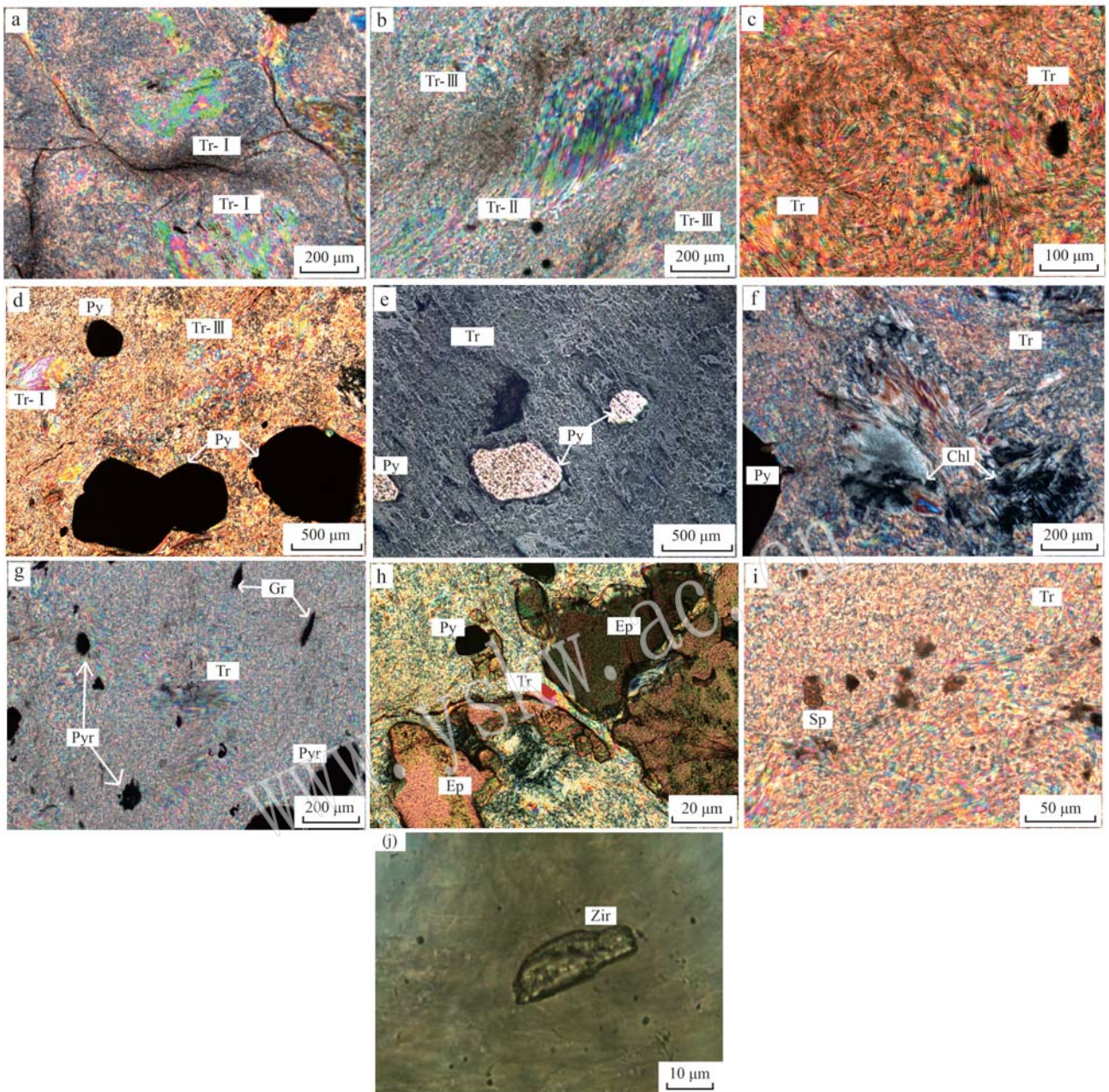


图 2 新疆黑青和田玉显微镜下特征

Fig. 2 Micrographs of black cyan nephrite in Xinjiang

a—透闪石斑状变晶结构(Tr- I) (正交偏光); b—透闪石纤维束状变晶结构(Tr- II)、透闪石毛毡状纤维交织变晶结构(Tr-III) (正交偏光); c—显微放射状的透闪石(正交偏光); d—大量黄铁矿呈黑色不透明状(正交偏光); e—黄铁矿具强金属光泽(反射光); f—绿泥石交代透闪石(正交偏光); g—石墨和磁黄铁矿少量分布(正交偏光); h—绿帘石被透闪石交代(正交偏光); i—榍石颗粒较小(正交偏光); j—锆石晶型完整(正交偏光); Tr—透闪石; Py—黄铁矿; Gr—石墨; Pyr—磁黄铁矿; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Sp—榍石; Zir—锆石
 a—tremolite porphyry meta-crystalline structure (Tr- I) (cross-polarized light); b—tremolite fiber interwoven metamorphic structure (Tr- II), tremolite felt-like fiber interwoven metamorphic structure (Tr-III) (cross-polarized light); c—microscopically radiating tremolite (cross-polarized light); d—large amounts of pyrite are distributed in a black opaque state (cross-polarized light); e—pyrite has a strong metallic luster (reflected light); f—chlorite alternating tremolite (cross-polarized light); g—graphite and pyrrhotite are distributed in small amounts in the sample (cross-polarized light); h—epidote is represented by tremolite (cross-polarized light); i—small particle size of sphene (cross-polarized light); j—complete crystal structure of zircon (cross-polarized light); Tr—tremolite; Py—pyrite; Gr—graphite; Pyr—pyrrhotite; Chl—chlorite; Ep—epidote; Sp—sphene; Zir—zircon

(图 2c),透闪石呈长柱状和针状聚集,推测是汽水热液变质作用导致透闪石放射状重结晶的结果。

次要矿物以黄铁矿为主,还含有少量石墨、绿泥石、绿帘石、锆石等。黄铁矿广泛分布在透闪石基质中,多呈自形-半自形晶形,可见立方体或五角十二面体晶形(图 2d)。反射光下具有强金属光泽和均质性(图 2e);绿泥石呈板状、鳞片状集合体交代透闪石,干涉色为 I 级灰,形成时期晚于透闪石(图 2f);石墨为鳞片状和长柱状的黑色包体,无消光;磁黄铁矿常与黄铁矿共生,呈不规则圆片状且粒径较小(图 2g);绿帘石多以不同形式分布于纤维束状透闪石中,呈自形柱状,颜色鲜艳明亮,正高突起,属于早期矽卡岩矿物,后期受热液影响被透闪石交代发生破碎,有明显的交代痕迹(图 2h 处 A);榍石、锆石晶体是和田玉中常见副矿物,颗粒较小,晶体结构较为完整,形成应早于其他矿物(图 2i、2j)。

XRD 测试结果与显微镜观察结果一致,HQ-01~HQ-06XRD 测试结果显示样品主体峰形基本一致(图 3),对比标准谱库分析,衍射峰 10.54° 、 27.24° 、 28.60° 、 33.12° 、 40.86° 处与透闪石标准峰谱吻合,对称性好且峰形尖锐,指示结晶程度完好。衍射峰强度略有差别,说明不同样品中的透闪石组成含量不同; 28.60° 、 40.82° 处有黄铁矿强衍射峰,强度仅次于透闪石,故次要矿物以黄铁矿为主。其中 HQ-01 样品在 26.63° 处检测出了石墨衍射峰,绿泥石的峰微弱可忽略不计;其余样品中,绿泥石在 12.60° 、 18.86° 、 25.19° 处有强衍射峰,此外还发现有金云母、石英、

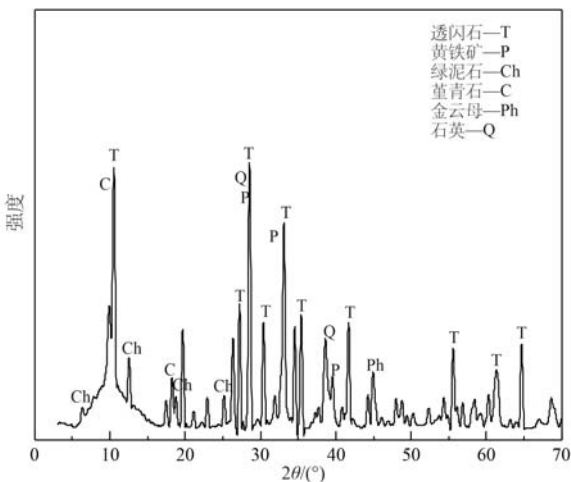


图 3 新疆黑青和田玉样品的 X 射线衍射图谱
Fig. 3 X-ray diffraction result of black cyan nephrite in Xinjiang

堇青石等矽卡岩矿物的弱峰。

2.3 红外光谱特征

红外光谱测试结果见图 4,可见,最强吸收谱峰集中于 $1\ 150 \sim 850\ \text{cm}^{-1}$ 范围,属于 O—Si—O、Si—O—Si 反对称伸缩振动和 O—Si 对称伸缩振动,其中 $996\ \text{cm}^{-1}$ 处最强,两边依次减弱。在 $800 \sim 650\ \text{cm}^{-1}$ 范围内出现 3 个峰,强度从中等到弱分别为 747 、 677 、 $650\ \text{cm}^{-1}$,这是 Si—O—Si 对称伸缩振动产生的吸收峰。 $54 \sim 420\ \text{cm}^{-1}$ 范围属于 M—O 伸缩振动和 Si 变形振动, 462 、 $528\ \text{cm}^{-1}$ 处峰值最强。 $3\ 661\ \text{cm}^{-1}$ 处出现弱峰是透闪石矿物中 M—OH 伸缩振动所导致的。所有样品红外光谱峰形和峰位一致,确定矿物种属为和田玉。

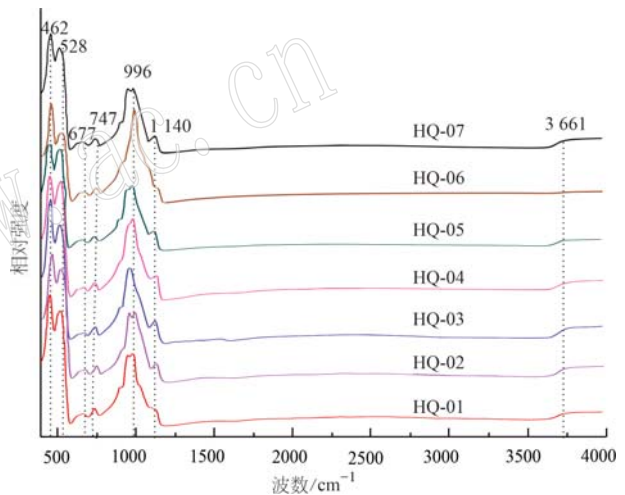


图 4 新疆黑青和田玉样品的红外光谱测试图谱
Fig. 4 Infrared spectroscopy test result of black cyan nephrite in Xinjiang

2.4 拉曼光谱特征

对 3 块样品 (HQ-02、HQ-05、HQ-07) 进行拉曼光谱测试分析,结果显示在低频区内透闪石的特征峰为 $1\ 060$ 、 930 、 675 、 391 、 $225\ \text{cm}^{-1}$ 。其中 $675\ \text{cm}^{-1}$ 最为明显,归属于 Si—O—Si 伸缩振动, $391\ \text{cm}^{-1}$ 和 $225\ \text{cm}^{-1}$ 归属于晶格振动(图 5a);在高频区内 $3\ 674\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 663\ \text{cm}^{-1}$ 处特征峰是由于 M—OH 伸缩振动所引起的(图 5b)。样品中黄铁矿晶体特征峰为 380 、 346 和 $438\ \text{cm}^{-1}$,其中样品 HQ-05 峰形尖锐,结晶程度完好(图 5c)。同时,还在 $1\ 358$ 、 357 、 439 、 542 、 549 、 $246\ \text{cm}^{-1}$ 等处测出次要矿物石墨、磁黄铁矿、绿帘石、绿泥石、榍石、锆石的峰值(图 5d~5i)。

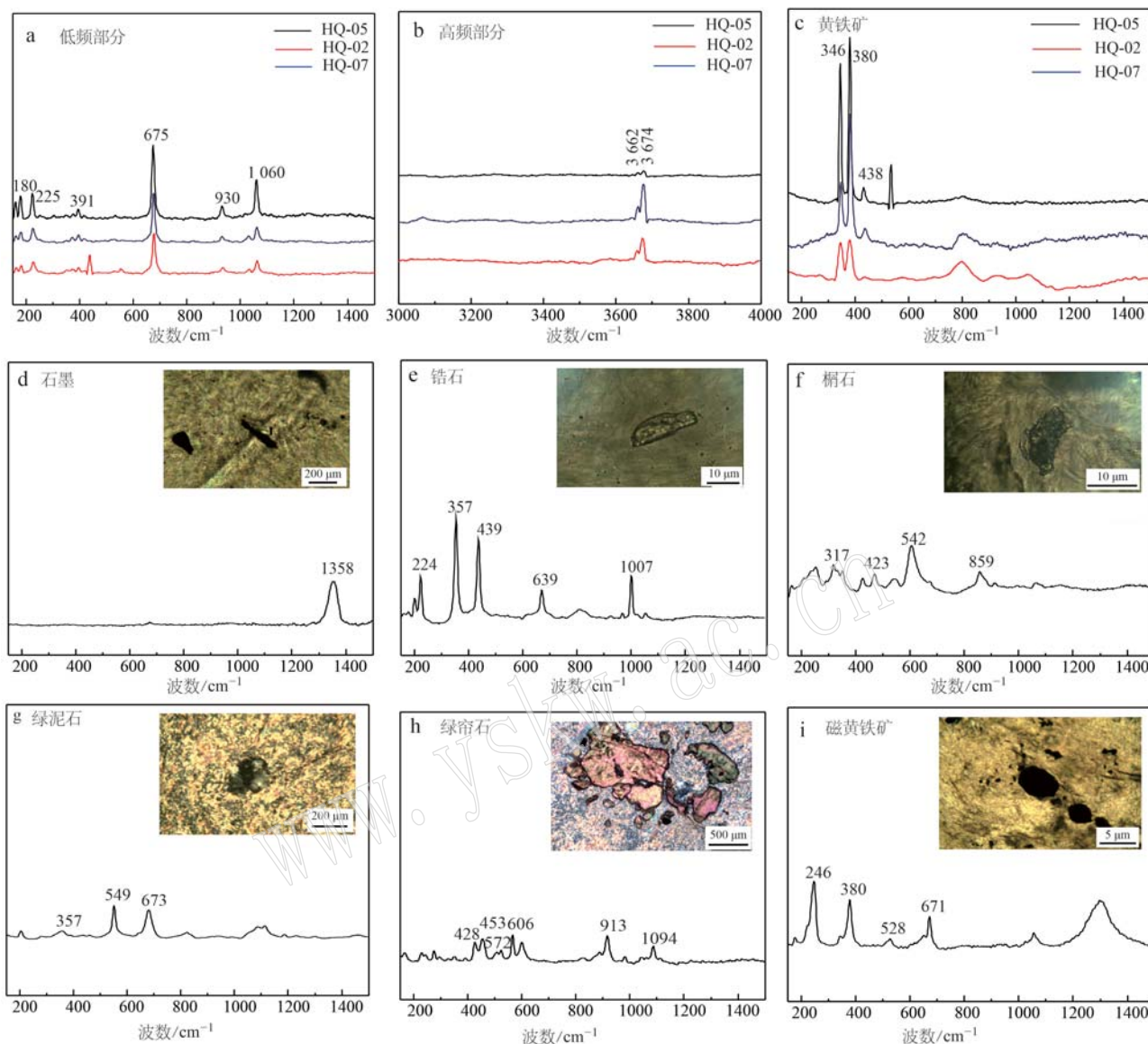


图5 新疆黑青和田玉样品的拉曼光谱测试图谱

Fig. 5 Raman spectroscopy of black cyan nephrite in Xinjiang

2.5 主量、微量元素特征

电子探针的测试结果见表2,样品中透闪石的主要成分为 SiO_2 ,含有少量的 CaO 、 MgO 和 FeO , SiO_2 含量在55.48%~56.87%之间,平均值为56.35%; CaO 含量在11.78%~12.55%之间,平均值为12.03%; MgO 含量在19.71%~21.44%之间,平均值为20.93%,略低于理论值。样品中的黄铁矿的S含量为48.27%~53.73%,平均值为52.04%;Fe含量为41.61%~45.41%,平均值为44.60%,与黄铁矿的标准理论值相近。

利用LA-ICP-MS分别对3个样品(HQ-02、HQ-04、HQ-06)中的透闪石和黄铁矿进行了10个点

位的测试(表3)。微量元素数值显示透闪石中Mn、Ti、Zn含量较高,尤其是Mn元素,范围在 826×10^{-6} ~ 1342×10^{-6} ;Cr、Co、Ni含量分别在 0.56×10^{-6} ~ 6.19×10^{-6} 、 4.14×10^{-6} ~ 22.00×10^{-6} 、 3.72×10^{-6} ~ 13.20×10^{-6} 范围内。黄铁矿中亲铁元素Co、Ni含量极高,其中部分 $\text{Co} > 1000 \times 10^{-6}$,Co/Ni值在2.46~25.2范围内。As、Se的含量依次为 1.92×10^{-6} ~ 12.70×10^{-6} 和 7.57×10^{-6} ~ 26.00×10^{-6} 。Cu、Zn、Pb、Bi、Te等亲硫元素含量相对较少,分别介于 0.15×10^{-6} ~ 5.44×10^{-6} 、 36.3×10^{-6} ~ 55.4×10^{-6} 、 1.08×10^{-6} ~ 7.86×10^{-6} 、 0.09×10^{-6} ~ 13.1×10^{-6} 、 0.13×10^{-6} ~ 4.91×10^{-6} 之间。

表2 新疆黑青和田玉的电子探针测试结果
Table 2 EPMA results of black cyan nephrite in Xinjiang

 $w_B/\%$

	HQ-02-1	HQ-02-2	HQ-03-1	HQ-03-2	HQ-05-1	HQ-05-2
透闪石						
SiO ₂	56.87	56.66	56.12	55.75	55.48	55.78
CaO	12.00	11.81	12.55	11.84	12.10	11.78
MgO	20.78	21.44	19.71	20.48	20.47	20.08
TiO ₂	0.04	0.03	—	0.12	—	0.09
Al ₂ O ₃	0.64	0.65	0.53	0.30	0.12	0.69
Cr ₂ O ₃	0.02	—	—	0.04	0.01	—
FeO	4.52	4.33	7.66	7.04	7.16	7.09
MnO	0.08	0.13	0.08	0.07	0.08	0.15
Na ₂ O	0.12	0.15	0.06	0.13	0.08	0.10
K ₂ O	0.04	0.06	0.02	0.02	0.15	0.09
NiO	—	—	0.02	—	—	0.01
Total	95.14	95.29	96.80	95.81	95.67	95.90
黄铁矿						
Fe	44.69	42.46	45.07	44.56	41.61	45.41
S	52.15	50.34	52.90	52.01	48.27	53.73
Co	0.04	0.05	0.02	0.01	0.11	0.08
Ni	0.05	0.05	0.01	0.02	0.04	0.00
S/Fe	2.04	2.06	2.06	2.06	2.02	2.07

表3 新疆黑青和田玉的LA-ICP-MS测试结果
Table 3 LA-ICP-MS results of black cyan nephrite in Xinjiang

 $w_B/10^{-6}$

	HQ-02-1	HQ-02-2	HQ-04-1	HQ-04-2	HQ-04-3	HQ-04-4	HQ-06-1	HQ-06-2	HQ-06-3	HQ-06-4
闪石基质										
Cr	2.30	0.56	6.19	4.92	5.21	3.79	3.56	2.93	1.56	2.43
Co	22.00	18.60	4.20	4.58	4.14	4.68	4.87	5.20	5.25	5.78
Ni	13.20	11.30	7.24	7.49	7.12	7.53	3.72	5.02	5.20	4.83
Mn	826	909	1 089	1 101	1 169	1 187	1 321	1 342	1 285	1 296
Ti	332	350	320	280	341	334	298	304	306	294
Zn	36.30	45.20	38.40	52.70	41.70	46.90	50.80	55.40	50.90	45.10
Rb	3.65	6.83	7.97	15.10	10.30	10.80	8.21	16.70	13.10	6.09
Sr	9.93	10.40	6.09	6.18	9.99	6.94	15.10	15.90	15.50	13.60
Y	0.80	0.83	0.84	0.86	1.26	1.03	0.91	0.86	0.77	0.64
Zr	3.60	4.08	2.57	2.70	3.99	3.05	3.09	4.97	3.56	3.19
Nb	0.34	0.33	0.67	0.62	0.73	0.66	0.63	0.54	0.60	0.65
Ba	4.21	5.23	2.14	4.17	4.27	3.10	4.89	6.43	5.03	3.43
La	<0.01	<0.01	0.02	0.04	0.06	0.07	0.03	0.02	0.02	0.03
Ce	<0.01	<0.01	0.07	0.11	0.17	0.08	0.04	0.07	0.07	0.04
Pr	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01
Nd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	<0.01	0.03	<0.01	0.03
Sm	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Eu	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Gd	0.05	0.04	0.07	0.08	0.04	0.08	0.07	0.04	0.04	<0.01
Tb	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02
Dy	0.12	0.14	0.13	0.11	0.18	0.20	0.09	0.20	0.13	0.13
Ho	0.04	0.01	0.04	0.03	0.08	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03
Er	0.46	0.33	0.31	0.46	0.66	0.44	0.62	0.48	0.45	0.54
Tm	0.08	0.06	0.06	0.09	0.12	0.13	0.07	0.06	0.06	0.09
Yb	0.24	0.30	0.13	0.13	0.24	0.15	0.14	0.23	0.28	0.12
Lu	0.08	0.06	0.06	0.09	0.12	0.13	0.07	0.06	0.06	0.09
Hf	0.24	0.30	0.13	0.13	0.24	0.15	0.14	0.23	0.28	0.12
黄铁矿										
Cu	0.15	0.72	0.39	0.26	0.24	0.90	5.44	3.10	0.20	0.06
Co	767	1 058	1 094	1 198	916	2 052	216	557	164	487
Ni	104.00	71.60	108.00	214.00	40.30	527.00	88.90	80.70	6.35	19.30
Se	13.40	14.70	15.50	8.54	23.70	18.70	7.57	26.00	8.55	14.00
As	4.43	9.92	11.40	7.32	2.37	1.92	10.10	12.70	3.30	6.00
Sn	0.10	0.08	0.06	0.08	0.07	0.10	0.08	0.09	0.08	0.07
Pb	1.12	1.18	1.08	3.60	1.09	7.86	6.38	4.12	1.30	1.11
Zn	0.29	1.18	0.42	1.12	2.49	13.30	0.08	1.79	1.11	1.22
Ti	3.36	3.46	3.97	3.90	3.55	12.20	15.30	18.30	18.30	19.40
Bi	2.32	1.44	1.71	0.65	0.15	0.09	0.78	0.09	0.41	13.10
Te	0.71	0.64	0.54	0.13	0.50	—	0.27	1.03	—	4.91
Co/Ni	7.32	14.70	10.80	5.55	22.70	3.97	2.46	6.93	25.80	25.20
Se/Te	18.88	22.96	28.70	65.69	47.40	—	28.03	25.24	—	2.85

2.6 氢-氧-硫同位素测试

透闪石-水之间的氢、氧同位素分馏公式分别为 $10^3 \ln \alpha = -21.7$ 和 $10^3 \ln \alpha = 3.95 \times 10^6 T^{-2} - 8.28 \times 10^3 T^{-1} + 2.38$ (α 为分馏系数, T 为绝对温度 K) (Zheng *et al.*, 2000)。许多学者 (Yui and Kwon, 2002; Liu *et al.*, 2011b; 徐立国等, 2014) 认为和田玉形成温度在 330~450℃ 之间, 且更接近 350℃, 因此利用公式计算了 330℃、350℃、450℃ 温度下透闪石处于均衡状态时成矿溶液的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值, 计算结果见表 4。

表 4 新疆黑青和田玉的氢氧同位素分析结果

Table 4 Hydrogen and oxygen isotope analysis results of black cyan nephrite in Xinjiang

样品编号	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	$\delta D_w/\text{‰}$	$\delta^{18}O_w/\text{‰}$		
				330℃	350℃	450℃
HQ-01	-82.3	2.49	-60.6	2.98	3.23	4.00
HQ-02	-79.9	2.31	-58.2	2.80	3.05	3.82
HQ-05	-81.9	2.86	-60.2	3.35	3.60	4.37
HQ-06	-89.5	3.55	-67.8	4.04	4.29	5.06
HQ-07	-96.1	4.78	-74.4	5.27	5.52	6.29

对样品中的黄铁矿进行原位硫同位素测试, 结果显示 HQ-02 号样品 $\delta^{34}S$ 值较高, 在 20.87‰~20.92‰ 内, 极差为 0.05‰, 较为稳定; HQ-05 和 HQ-07 号样品 $\delta^{34}S$ 值在 17.03‰~17.54‰ 之间, 极差为 0.51‰; HQ-03 号样品 $\delta^{34}S$ 为 8.87‰; $\delta^{34}S$ 值变化范围较大, 介于 8.87‰~20.92‰ 之间, 平均值为 17.28‰, 极差为 12.05‰。

3 讨论

3.1 矿物学特征

黑青和田玉的矿物组成较为复杂, 以透闪石为主, 杂质矿物含量较多。主要为纤维交织状结构, 透闪石的形成分为 3 期 (Tr-I → Tr-II → Tr-III), 早期形成的粗粒透闪石被后期的细粒透闪石穿插交代, 形成质地细腻和田玉。黄铁矿是岩浆热液的晚期产物, 在接触交代矿床中常与其他硫化物和氧化物共存, 或在温度下降硫化物析出、发生局部氧化还原反应时形成。绿泥石多是由透闪石蚀变所形成的, 常与绿帘石、云母等矿物共生, 它的存在也表明黑青和田玉的矿化与热液有关 (姜颖, 2020)。

红外光谱和拉曼光谱与和田玉标准峰谱基本一

致, 部分特征峰稍有偏移, 结合化学成分分析, 这是透闪石中 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 类质同象作用, 使晶格相互替代所产生的结果 (陈全莉等, 2014; 何琰等, 2022)。综合上述测试结果, 样品颜色较深因部分透闪石已经转变为阳起石, 950、512、480 cm^{-1} 等处略有位移, 考虑是受到了 Fe^{2+} 替代的影响。

3.2 地球化学特征

黑青和田玉样品中透闪石主要化学组分与白玉、青玉的 SiO_2 (43.59%~58.46%)、 MgO (18.89%~26.55%) 和 CaO (10.20%~23.21%) 略有差异, 但在其范围内 (刘喜峰等, 2019), 与戈壁料和田玉的 SiO_2 (56.69%~58.61%)、 MgO (21.46%~24.11%)、 CaO (12.16%~13.41%) 更为接近 (Liu *et al.*, 2015), FeO 含量较高, 与墨玉相近。黑青玉颜色较深的原因主要是与 Fe 元素含量有关, 同时由于部分矿物中存在少量的石墨, 也可导致颜色呈黑色 (韩东等, 2018; 景云涛等, 2022)。利用氧原子计算法进行阳离子数计算, 因青玉中 Fe^{2+} 偏高 (Liu *et al.*, 2011b; 韩东等, 2018; 景云涛等, 2022), 故将铁离子全部近似为 Fe^{2+} , 得出 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 值在 0.833~0.912 之间 (所得结果存在一定误差)。按照国际矿物学协会对角闪石的命名规则, $Mg/(Mg+Fe^{2+}) > 0.9$ 为透闪石, $Mg/(Mg+Fe^{2+}) < 0.9$ 为阳起石, 将计算结果进行投图, 发现 HQ-02 号样品属于透闪石范围, HQ-03 和 HQ-05 两个样品中 Fe^{2+} 含量较高, 已属于阳起石范围 (如图 6)。

黄铁矿的理想成分 (质量分数) 为 Fe 46.55%, S 53.2%, 一般 $S/Fe < 2$ 时为硫亏损, $S/Fe > 2$ 时为铁亏损 (周文雅, 2001; 严育通等, 2012; 张然等, 2022)。样品中黄铁矿 S/Fe 值为 2.02~2.07, 铁略有亏损, 这是由于 Co 元素类质同象代替了 Fe 元素所造成的, 说明黄铁矿是在中高温下形成, 这与和田玉的形成温度 (330~450℃) 相符 (Liu *et al.*, 2011a)。

和田玉矿床主要分为与蛇纹岩相关的接触变质矿床和与白云石大理岩相关的接触交代变质矿床, 一般地, 与蛇纹岩有关的和田玉 (碧玉矿床) 中 Fe 、 Ni 、 Cr 含量较高 (Adamo and Ilaria, 2013), 通过全岩微量元素 Cr - Ni 投图分析可知 (图 7), 样品 Cr 、 Ni 含量较少, 与大理岩型和和田玉中 Cr (2×10^{-6} ~ 79×10^{-6})、 Ni (0.05×10^{-6} ~ 471×10^{-6})、 Co (0.5×10^{-6} ~ 10×10^{-6}) 含量基本一致 (刘喜峰等, 2019), 故黑青和田玉属于与大理岩相关的接触交代变质矿床。样品中稀土元

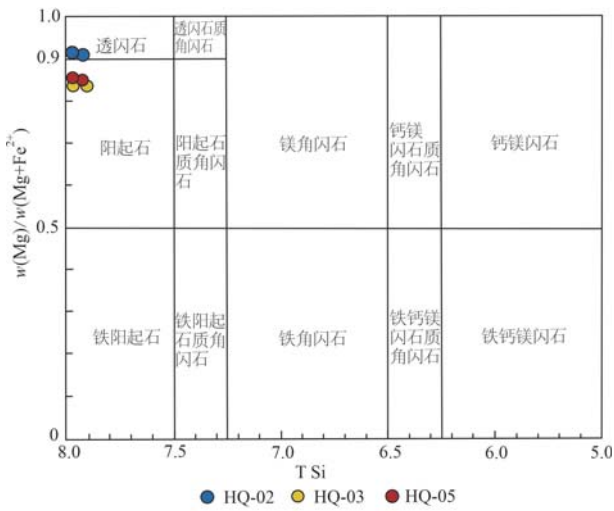


图6 闪石族矿物分类关系图(据 Leake *et al.*, 1997 修改)

Fig. 6 Classification relationship diagram of amphibole minerals (after Leake *et al.*, 1997)

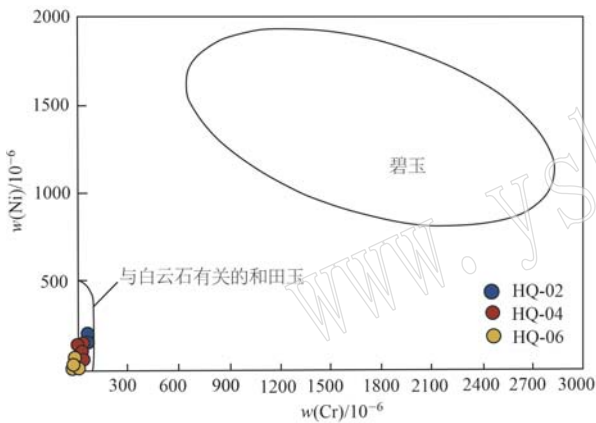


图7 黑青和田玉全岩 Ni-Cr 判别图(据 Adamo and Ilaria, 2013 修改)

Fig. 7 Genetic discrimination diagram of Ni-Cr in whole rocks of black cyan nephrite in Xinjiang (modified according to Adamo and Ilaria, 2013)

素含量较少,前人研究不同产地和类型的和田玉稀土配分模式发现墨玉河产出的青玉、墨玉样品与新疆阿拉玛斯和田玉均显示 δEu 呈负异常,总体走势较为平缓,中稀土元素富集,这与白云石大理岩有着相似的稀土元素模式(图8)(Liu *et al.*, 2011a; 杨晓丹, 2013; 于海燕, 2016);青海地区的青玉样品与橄榄岩模式基本相似,相对呈左倾,LREE 分异较弱,HREE 分异较强(姜颖,2020)。新疆地区黑青和田玉的配分模式与其他品种存在一定差异,样品中 Eu 值近为 0,重稀土元素含量明显较高,LREE/HREE 值为 0.24~0.01, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值在 0~0.11 之

间,轻、重稀土元素分馏较轻。

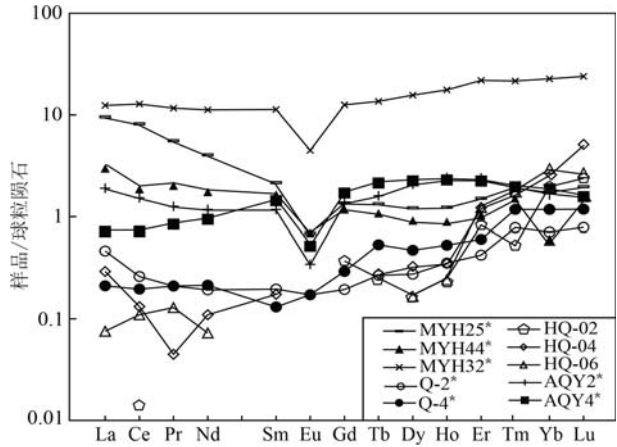


图8 新疆黑青和田玉样品中透闪石的稀土配分图(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of tremolite in black cyan nephrite from Xinjiang (the normalized data are from Sun and McDonough, 1989)

AQY2、AQY4 来源为 Liu (2011a); MYH25、MYH32、MYH44 来源为杨晓丹(2013); Q-2、Q-4 来源为于海燕(2016)
AQY2 and AQY4 are sourced from Liu (2011a); MYH25, MYH32, and MYH44 are sourced from Yang Xiaodan (2013); Q-2 and Q-4 are sourced from Yu Haiyan (2016)

黄铁矿中 As、Co、Ni、Cu、Sn、Zn、Pb、Bi、Te 等微量元素可有效判断其成因类型,其中 Co、Ni 质量含量和比值意义较为突出,Co/Ni 小于 1 为沉积成因,Co/Ni 大于 1 为热液成因,且 Co/Ni 值越高指示成矿温度越高(张然等, 2022)。黑青和田玉中黄铁矿晶体含 Co 量极高,Co/Ni (2.46~25.85) 变化范围极大,可能是由于后期岩浆温度迅速下降,前后温差变化较大所造成的,其形成是受到热液的影响(徐国风等, 1980)。在岩浆体系形成的黄铁矿通常富 Co、Se,低温元素 As、Sb、Te 含量相对较少,这与研究样品相符,亦说明黄铁矿形成于较高温度(艾昊等, 2023)。样品 Se 含量 ($7.57 \times 10^{-6} \sim 26.00 \times 10^{-6}$) 和 Se/Te 范围 (0~65.69) 均与矽卡岩热液矿床黄铁矿 (Se 含量 $10 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$, Se/Te 0~75) 一致(宋学信等, 1986)。Cu、Pb、Zn、Bi 元素难以类质同象的方式进入晶格,常以包裹体的形式存在,故在样品中含量微少。综上,黄铁矿符合岩浆热液成因的地球化学特征。

前人对不同产地和田玉的氢氧同位素数据进行了统计,可以观察到蛇纹岩型成因和田玉氢同位素 δD ($-96.5\text{‰} \sim -33\text{‰}$) 略高于白云石大理岩相关成因和田玉 ($-179\text{‰} \sim -56\text{‰}$); 氧同位素差异较为明显,蛇纹岩型成因和田玉 $\delta^{18}\text{O}$ ($4.5\text{‰} \sim 13.4\text{‰}$) 相比

于白云石大理岩成因和田玉 $\delta^{18}\text{O}$ (-17‰ ~ 7.9‰) 明显较高 (Yui and Kwon, 2002; 徐立国等, 2014; 刘喜锋等, 2018; 张雪梅, 2020)。样品中的氢、氧同位素值与新疆昆仑山、阿拉玛斯、英格里克以及墨玉河产出的和田玉数据较为相近, 明显低于蛇纹岩型和和田玉, 所以黑青和田玉的形成应与白云石大理岩相关。将测试样品的成矿溶液中氢、氧同位素值投影于 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图 (图 9a), 研究样品数据主要落于岩浆水与变质水的交界处, 说明成矿流体来源为多种热液的混合, 该矿物是由岩浆与白云石大理岩接触交代变质而形成的, 在变质过程中岩浆水为主要的流体来源。

样品中的硫化物均为黄铁矿, 未发现含有高氧逸度下形成的其他硫酸盐矿物, 因此在形成黄铁矿的热液流体中, S 主要是以 S^{2-} 、 H_2S 形式存在, 故黄

铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以近似反映成矿热液中全部 S 来源 (刘颖等, 2013)。岩石中的 S 同位素主要有 4 种来源, 分别是陨石硫 ($\approx 0\text{‰}$)、现代海水硫 ($\approx 20\text{‰}$)、混杂硫 (5‰ ~ 15‰) 和沉积岩中的硫 (变化范围极大) (Ohmoto, 1972; Raymond, 1996)。将黑青和田玉的硫同位素值投于分布图 (图 9b), 样品均落在变质岩 (-20‰ ~ 20‰) 和中酸性岩侵入岩 (-13.4‰ ~ $+26.7\text{‰}$) 范围内, 其中 HQ-03 与花岗岩的硫同位素特征 (-4‰ ~ 9‰) 范围接近, 造成 $\delta^{34}\text{S}$ 值高于典型地幔硫的原因可能是岩浆的去气作用 (刘应冬等, 2020), 或是与非岩浆流体 (变质流体) 的输入有关 (宋明伟等, 2023)。根据上述实验结果分析黄铁矿为热液成因, 推测成矿物质硫是多源的, 除部分来自岩浆以外, 很大程度上有地层硫的加入 (原垭斌等, 2014)。

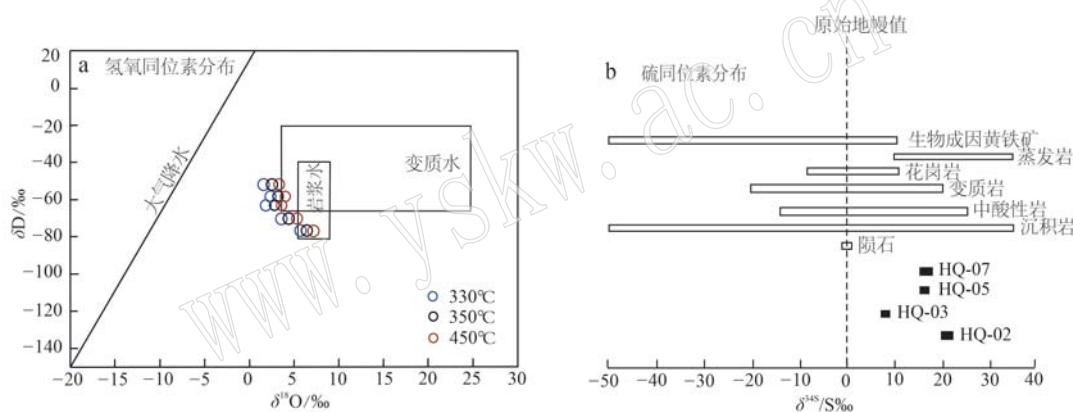


图 9 新疆黑青和田玉样品的氢-氧-硫同位素关系图 [a 图据 Taylor (1997) 修改; b 图据李杰 (2016) 修改]

Fig. 9 Hydrogen-oxygen-sulfur isotope relationship diagrams of black cyan nephrite in Xinjiang (a according to Taylor, 1997; b according to Li Jie, 2016)

4 结论

(1) 黑青和田玉呈墨绿-黑色, 油脂-蜡状光泽, 表面分布大量黄铁矿, 折射率 1.61 (点测), 摩氏硬度 6.0~6.5, 相对密度高于和田玉标准密度值, 为 3.08~3.17, 无荧光; 主要组成矿物为透闪石, 具典型纤维交织状结构, 矿物颗粒多呈斑晶状、毛毡状、束状及帚状, 次要矿物以黄铁矿为主, 另有绿泥石、绿帘石、石墨、磁黄铁矿、榍石、锆石等其他矿物。

(2) 黑青和田玉的谱学特征显示其红外和拉曼光谱的特征峰与和田玉的标准图谱基本一致, 由于

Fe^{2+} 的增加使部分谱带缺失或吸收峰出现向低频位移的现象。

(3) 黑青和田玉中透闪石主要化学成分为 SiO_2 、 MgO 、 CaO , 样品 FeO 含量相对较多, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 为 0.83~0.91, 部分样品已属于阳起石范围; 透闪石 Mn、Ti、Zn 含量较高, Cr、Co、Ni 含量较少, 据 Cr-Ni 图判断样品与白云石大理岩型和和田玉成因相符, 稀土配分模式与其他地区和田玉不同, 呈明显左倾模式, 结合氢氧同位素分析, 判断成矿流体主要为岩浆水, 有少量变质水参与; 黄铁矿 Co、Ni 含量较高, 且 Co/Ni 值均远大于 1, 属于热液成因, 硫同位素结果显示成矿物质硫来源于岩浆硫与地层硫混合。

References

- Adamo and Ilaria. 2013. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and update[J]. *Gems and Gemology*, 49(2): 98~106.
- Ai Hao, Xian Yiheng, Wang Ying, *et al.* 2023. Origin characteristics of Sr and Pb isotopes of turquoise from Guaiyu mining site in Lushi County, Henan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(2): 250~262 (in Chinese with English abstract).
- Burtseva M V, Ripp G S, Posokhov V F, *et al.* 2015. Nephrites of East Siberia: Geochemical features and problems of genesis[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 56(3): 402~410.
- Chen Quanli, Xu Yalan, Ai Sujie, *et al.* 2014. Vibrational spectral characteristics of Qinghai sapphire[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(8): 2 017~2 020 (in Chinese with English abstract).
- Gao Kong. 2018. Study on the Metallogenic Mechanism of Tashisayi Nephrite from Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Han Dong, Liu Xifeng, Liu Yan, *et al.* 2018. Discussion on the formation and color-causing factors of marble-type nephrite in Hetian area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(6): 1 011~1 026 (in Chinese with English abstract).
- He Yan, Su Yue and Yang Mingxing. 2022. Study on spectroscopy and locality characteristics of the nephrite in Yutian, Xinjiang[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 42(12): 3 851~3 857 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Ying. 2020. Study on Petro-mineral and Genetic Mechanism of Ruoqiang Nephrite, Xinjiang Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Jing Yuntao, Liu Yan, Zhang Yong, *et al.* 2022. Metallogenic age, formation process and prospecting direction of marble-related nephrite deposits in China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(3): 651~667 (in Chinese with English abstract).
- Leake B E, Woolley A R and Arpes C E S. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. *American Mineralogist*, 82: 1 019~1 037.
- Li Jie. 2016. The Research of Pyrite Typomorphic Characteristics and Deposit Genesis of the Gangcha-Kemo Gold Deposit, Gansu Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liu Sujun. 2016. On geological distribution feature of Hotan jade and resources situation in Xinjiang[J]. *Journal of Urumqi Vocational University*, 25(3): 49~51, 59 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xifeng, Jia Yuheng and Liu Yan. 2019. Geochemical characteristics and genetic types of Gobi nephrite in Ruoqiang-Qiemo, Xinjiang[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(3): 316~325 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xifeng, Zhang Hongqing, Liu Yan, *et al.* 2018. Study on the mineral characteristics and origin of representative jaspers around the world[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 37(5): 479~489 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2011a. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 440~451.
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2011b. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 41: 122~132.
- Liu Y, Zhang R Q, Zhang Z Y, *et al.* 2015. Mineral inclusions and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Alamas nephrite and granulite: Implications for the genesis of a magnesian skarn deposit[J]. *Lithos*, 212~215: 128~144.
- Liu Ying and Zhou Fa. 2013. A review of the sources of minerals for hydrothermal deposits traced by S isotope[J]. *Science and Technology Information*, (9): 428~434 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingdong, Xie Haifeng, Xu Li, *et al.* 2020. Sulfur isotope geochemical characteristics of the Zibanping lead-zinc deposit in Jiulong County, Sichuan[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(12): 2 029~2 036 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67(5): 1~578.
- Raymond O L. 1996. Pyrite composition and ore genesis in the Prince Lyell copper deposit, Mt Lyell mineral field, western Tasmania, Australia[J]. *Ore Geology Reviews*, 10(3~6): 231~250.
- Shi Dongdong and Wang Shuzhi. 2017. Mineralogical characteristics of Xinjiang dark jade[J]. *China Mining Magazine*, 26(S1): 273~274, 278 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingwei, Peng Yiwei, Chen Cuihua, *et al.* 2023. Ore-forming fluid characteristics and copper mineralization mechanism in the Hongnipo copper deposit, southwestern margin of Yangtze Block: Evidence from fluid in-situ S isotopes and fluid inclusions[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(5): 629~651 (in Chinese with English abstract).
- Song Xuexin and Zhang Jingkai. 1986. Minor elements in pyrites of various genetic types from China [C]// *Bulletin of The Institute of min-*

- eral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences. Beijing: Geological Publishing House, (18): 175~184 (in Chinese with English abstract).
- Sun and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implication for the mantle composition and process [J]. Geological Society of London Special Publication, 42(1): 313~345.
- Sun Xiufeng, Liu Mingyan, Zhang Mengxue, *et al.* 2020. Study on the gemological and mineralogical characteristics of "Mantianxing" nephrite in Hetian area, Xinjiang[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 43(6): 24~26(in Chinese).
- Suo Linna, Tao Zhongyi and Yuan Zengxiang. 2019. Mineral composition and chemical composition of Chinese nephrite[J]. Minerals and Geology, 33(3): 484~488 (in Chinese with English abstract).
- Taylor H P. 1997. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits[J]. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 229~302.
- Taylor H P. 1997. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits[J]. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 229~302.
- Wen Jishen, Maituohuti A and Lu Feng. 2014. Composition and genesis of green nephrites from the Karakax River in Hetian, Xinjiang [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(S1): 19~27 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guofeng and Shao Jieliang. 1980. Typical characteristics of pyrite and its practical significance [J]. Geological Review, (6): 541~546 (in Chinese).
- Xu Liguo, Yu Xiaojin and Wang Shiqi. 2014. Gemological characteristics and origin of tremolite jade in Dongpan Village, Dahua, Guangxi [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(S1): 55~60 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, *et al.* 2012. Composition typomorphic characteristics and statistics analysis of metallogenic pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. Earth Science Frontiers, 19(4): 214~226 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lingyue, Wang Yuyan, Wang Chaowen, *et al.* 2020. Gemological characteristics and genetic mineralogy on pyrite-chlorite-bearing actinolite jade[J]. Journal of Gem and Gemmology, 22(4): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaodan. 2013. Mineralization of Nephrite Metallogenic Belt in Hetian, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaodan, Shi Guanghai and Liu Yan. 2012. Vibrational spectral of black species of Hetian nephrite (tremolite jade) and its color genesis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 32(3): 681~685 (in Chinese with English abstract).
- Yu Haiyan. 2016. Coloring and Metallogenic Mechanism of Different Colors in Qinghai Nephrite [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Yuan Yabin, Yuan Shunda, Liu Xiaofei, *et al.* 2014. Sulfur isotopic characteristics of the Huangshaping granitoid and their geological significance in Southern Hunan Province[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2 437~2 442 (in Chinese with English abstract).
- Yui T F and Kwon S T. 2002. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea[J]. Economic Geology, 97: 93~601.
- Zhang Hongqing. 2019. Study on Gem Mineralogy and Trace Element Characteristics of Qinghai Jasper [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ran, Xiao Zhibin, Fu Chao, *et al.* 2022. Genetic mineralogy and geological significance of gold minerals and gold-bearing pyrites from the Xinli gold deposit in the Jiaodong area [J]. Rock and Mineral Analysis, 41(6): 997~1 006 (in Chinese).
- Zhang Xuemei. 2020. Mineralogy and Genesis of Green Nephrite in the Western Section of Manas region, Xinjiang [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Xu Baolong and Zhou Gentao. 2000. Geochemical studies of stable isotopes in minerals [J]. Earth Science Frontiers, 7(2): 1~303.
- Zhou Wenya. 2001. Typomorphic peculiarities and significance of the pyrite in the veinlet-disseminated gold deposits[J]. Rock and Mineral Analysis, (2): 100~104 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xianchuan, Chen Jianjun, Xie Xinbin, *et al.* 2012. Geological characteristics and resource overview of nephrite distribution range [J]. West-China Exploration Engineering, 24(12): 138, 141 (in Chinese).

附中文参考文献

- 艾昊, 先怡衡, 王英, 等. 2023. 河南卢氏县拐峪采矿遗址出产绿松石的 Sr, Pb 同位素产地特征探析[J]. 岩石矿物学杂志, 42(2): 250~262.
- 陈全莉, 徐亚兰, 艾苏洁, 等. 2014. 青海青玉的振动光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 34(8): 2 017~2 020.
- 高孔. 2018. 新疆且末塔什萨依和田玉矿的成矿机制研究[D]. 北

- 京:中国地质大学(北京).
- 韩冬,刘喜锋,刘琰,等. 2018. 新疆和田地区大理岩型和和田玉的形成及致色因素探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 37(6): 1 011~1 026.
- 何琰,苏越,杨明星. 2022. 新疆于田和田玉的谱学特征及产地特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 42(12): 3 851~3 857.
- 姜颖. 2020. 新疆若羌和田玉矿物岩石学特征及成因机理研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 景云涛,刘琰,张勇,等. 2022. 中国大理岩型和和田玉矿床的成矿时代、形成过程及找矿方向[J]. 岩石矿物学杂志, 41(3): 651~667.
- 李杰. 2016. 甘肃岗岔-克莫一带金矿黄铁矿标型特征及矿床成因研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 刘苏君. 2016. 新疆和田玉地质分布特征及资源量概况研究[J]. 乌鲁木齐职业大学学报, 25(3): 49~51, 59.
- 刘喜锋,贾玉衡,刘琰. 2019. 新疆若羌-且末戈壁料软玉的地球化学特征及成因类型研究[J]. 岩矿测试, 38(3): 316~325.
- 刘喜锋,张红清,刘琰,等. 2018. 世界范围内代表性碧玉的矿物特征和成因研究[J]. 岩矿测试, 37(5): 479~489.
- 刘颖,周发. 2013. S同位素示踪热液矿床成矿物质来源综述[J]. 科技信息, (9): 428~434.
- 刘应冬,谢海峰,徐力,等. 2020. 四川九龙县子杠坪铅锌矿床硫同位素地球化学特征[J]. 地质通报, 39(12): 2 029~2 036.
- 石东东,王树志. 2011. 新疆金星墨玉(软玉)的矿物学特征[J]. 中国矿业, 26(S1): 273~274, 278.
- 宋明伟,彭义伟,陈翠华,等. 2023. 扬子地块西南缘红泥坡铜矿床成矿流体特征与铜矿化机制——来自流体包裹体和原位S同位素的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 42(5): 629~651.
- 宋学信,张景凯. 1986. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征[C]//中国地质科学院矿床地质研究所文集(18). 北京:地质出版社, 175~184.
- 孙秀凤,刘铭艳,张梦雪,等. 2020. 新疆和田地区“满天星”软玉的宝石学及矿物学特征研究[J]. 新疆有色金属, 43(6): 4~26.
- 索林娜,陶中一,袁增翔. 2019. 中国各地软玉的矿物组成及化学成分特征[J]. 矿产与地质, 33(3): 484~488.
- 文苾桑,买托乎提·阿不都瓦衣提,鲁锋. 2014. 新疆和田喀拉喀什河青玉的组成及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 33(S1): 19~27.
- 徐国风,邵洁涟. 1980. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质论评, 26(6): 41~546.
- 徐立国,於晓晋,王时麒. 2014. 广西大化东杠村透闪石玉的宝石学特征及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 23(S1): 6.
- 严育通,李胜荣,贾宝剑,等. 2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 19(4): 214~226.
- 杨凌岳,王雨嫣,王朝文,等. 2020. “撒金花黑青玉”的宝石学特征与成因矿物学研究[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 22(4): 1~12.
- 杨晓丹. 2013. 新疆和田软玉成矿带的成矿作用探讨[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 杨晓丹,施光海,刘琰. 2012. 新疆和田黑色透闪石质软玉振动光谱特征及颜色成因[J]. 光谱学与光谱分析, 32(3): 681~685.
- 于海燕. 2016. 青海软玉致色机制及成矿机制研究[D]. 南京:南京大学.
- 原垭斌,袁顺达,刘晓菲,等. 2014. 湘南黄沙坪矿区花岗岩的硫同位素特征及其地质意义[J]. 地质学报, 88(12): 2 437~2 442.
- 张红清. 2019. 青海碧玉的宝石矿物学及微量元素特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 张然,肖志斌,付超,等. 2022. 胶东地区新立金矿中金矿物和载金黄铁矿成因矿物学特征及地质意义[J]. 岩矿测试, 41(6): 997~1 006.
- 张雪梅. 2020. 新疆玛纳斯地区西段碧玉的矿物学及矿床成因研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 周文雅. 2001. 细微浸染型金矿床中黄铁矿的标型特征及意义[J]. 岩矿测试, 20(2): 100~104.
- 周显川,陈建军,谢新斌,等. 2012. 和田玉分布范围地质特征及资源概况[J]. 西部探矿工程, (12): 138, 141.