

新疆和田地区大理岩型和和田玉的形成及致色因素探讨

韩冬¹, 刘喜锋², 刘琰³, 张勇¹, 郑奋⁴, 买托乎提·阿不都瓦衣提⁵,
张红清⁴, 文苾葵⁶

(1. 自然资源部珠宝玉石首饰管理中心, 北京 100013; 2. 华南理工大学广州学院, 广东 广州 510800; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 中国地质大学(北京)珠宝学院, 北京 100037; 5. 新疆维吾尔自治区和田地区质检局, 新疆 和田 848000; 6. 北京大学地球科学与空间学院, 北京 100871)

摘要: 采集阿拉玛斯和田玉山料和喀拉喀什河(墨玉河)的和田玉样品, 利用显微镜和背散射图像、电子探针等研究手段, 结合以往全岩数据对和田玉的形成和致色因素进行了综合分析。研究发现, 除透闪石以外, 和田玉中还含有大量的绿帘石、透辉石、绿泥石、锆石、磷灰石、尖晶石、石榴石、重晶石、阳起石、闪锌矿、磁黄铁矿、石墨、方解石和氢氧化铁等多种副矿物; Cr、Ni 含量 ($< 100 \times 10^{-6}$) 及 $Mg/(Mg + Fe^{2+}) - Si$ 投点显示这些样品均属于大理岩型软玉(和田玉)。全岩及其微区成分分析结果显示, 从白玉 ($TFe_2O_3 = 0.33\% \sim 1.42\%$)、青白玉 ($TFe_2O_3 = 0.43\% \sim 0.96\%$) 至青玉 ($TFe_2O_3 = 0.77\% \sim 3.97\%$), TFe_2O_3 含量逐渐增加, 而且所有样品的 Cr 和 Ni 含量都分别低于 60×10^{-6} 和 20×10^{-6} , 说明从白玉、青白玉至青玉, 颜色的加深与透闪石中铁元素含量逐渐增加有关。墨玉的颜色主要与透闪石集合体中的石墨和 $Fe(OH)_3$ 等细脉大量出现有关。为深入研究和和田玉的致色因素, 同时采集了加拿大的碧玉样品进行对比, 发现同样主要为透闪石组成的加拿大碧玉, 除 Fe 外, 还含有大量的 Cr 元素 ($1400 \times 10^{-6} \sim 5100 \times 10^{-6}$), 碧玉的颜色鲜艳与透闪石 C 位中含有 $0.01 \sim 0.03$ a. p. f. u. 的 Cr 有关, 而和田玉中 Cr 含量较低, 在 C 位中几乎为 0。通过野外观察和岩相学分析认为, 含和田玉的镁质矽卡岩的形成经历了接触变质、接触交代变质和硫化物阶段, 主要通过交代镁质大理岩、透辉石、绿帘石等矿物形成, 而和田玉的主要形成机制是多期次的细粒透闪石交代粗粒透闪石。

关键词: 和田玉; 透闪石; 新疆; 致色因素; 和田地区

中图分类号: P619.28⁺3; P578.955

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)06-1011-16

Genesis of dolomite-related nephrite from Hetian and color-forming factors of typical nephrite in Hetian, Xinjiang

HAN Dong¹, LIU Xi-feng², LIU Yan³, ZHANG Yong¹, ZHENG Fen⁴, Maituohuti Abuduwaiyiti⁵,
ZHANG Hong-qing⁴ and WEN Zi-shen⁶

(1. National Gems & Jewelry Technology Administrative Center, Beijing 100013, China; 2. Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. School of Gemology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100037, China; 5. Hetian Bureau of Quality and Technical Supervision, Hetian 848000, China; 6. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

收稿日期: 2017-09-11; 接受日期: 2018-05-14

基金项目: 中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)项目(DD20160346); 中国地质调查局地质调查项目(1212011020151511-03)

作者简介: 韩冬(1983-), 男, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事宝石学方面的科研工作; 通讯作者: 刘喜锋(1982-), 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事宝石科研和教育, E-mail: liuxf@gcu.edu.cn。

Abstract: In this study, nephrite samples from Alamas and Karakash Rivers were collected. Also, serpentinite-related green nephrite samples were selected for comparison in colors. Methods such as electronic microprobe analysis and back-scattered electron images were employed to study the genesis and color-forming factors of nephrite. Based on whole-rock chemical analyses of nephrite obtained, the authors studied petrographic characteristics, mineral composition and color-forming factors. In this study, besides tremolite, associated minerals such as diopside, chlorite, actinolite, spinel, zircon, apatite, garnet, barite, pyrrhotine, graphite, calcite, and $\text{Fe}(\text{OH})_3$ were found in nephrite. All samples have low concentrations of Cr, Ni ($< 100 \times 10^{-6}$) and spots of $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) - \text{Si}$, suggesting all these samples are dolomite-related nephrite. According to the whole-rock analysis of nearly all data obtained, the data $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 0.33\% \sim 1.42\%$, $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 0.43\% \sim 0.96\%$ and $\text{TFe}_2\text{O}_3 = 0.77\% \sim 3.97\%$ were found in white, white-green and green nephrite, respectively. Also, values of Cr and Ni in these samples have low concentrations below 60×10^{-6} and 20×10^{-6} respectively. These chemical compositions suggest that the increasing content of TFe_2O_3 in crystal structures in tremolite leads to change of the colors in nephrite from white to green. Large amounts of graphite and veinlets of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ lead to the black color of nephrite. Although both serpentinite-related and dolomite-related nephrite samples have predominated tremolite, serpentinite-related nephrite might have emerald color. In order to further study the coloring factors of Hetian nephrite, the authors collected samples of serpentinite-related nephrite in Canada for comparison. With serpentine-related nephrite in Candia as an example, in addition to the amount of Fe, a large amount of Cr ($1\,400 \times 10^{-6} \sim 5\,100 \times 10^{-6}$) was found in them. The emerald color of serpentinite-related nephrite is related to $0.01 \sim 0.03$ a. p. f. u. of Cr in C site in tremolite. By contrast, there exists nearly no Cr in C site in tremolite in dolomite-related nephrite. Based on the geological field observation and petrographic characteristics, the authors hold that the formation of Mg-skarn has experienced metamorphism, metasomatism and sulfur stages and tremolite formed through the replacement at the expense of the dolomite marble, diopside and other minerals. Multiple replacement of coarse-grained tremolite by fine-grained tremolite leads to the formation of nephrite.

Key words: nephrite; tremolite; Xinjiang; color-forming factors; Hetian area

Fund support: The project of “Comprehensive integration and service of mineral geology and its metallogenic regularity in China” from China Geological Survey (DD20160346); Geological Survey Program of China Geological Survey (1212011020000150011-03)

和田玉(大理岩型软玉)是中国近五千年来主要使用的玉石品种,也是亚洲大中华文化圈主要热衷的玉石品种。和田玉主要由致密的细粒透闪石集合体组成,具有特殊的毛毡状结构。世界上最主要的软玉矿床主要包括中国新疆和田地区的于田县、且末、若羌、玉龙喀什河(白玉河)和喀拉喀什河(墨玉河)、青海格尔木、辽宁岫岩、江苏溧阳、四川石棉、河南栾川(Liu *et al.*, 2010, 2011a, 2011b; Siqin *et al.*, 2012; Ling *et al.*, 2013, 2015)和台湾花莲(Wan and Yeh, 1984; Siqin *et al.*, 2012),韩国春川(Yui and Kwon, 2002),加拿大的不列颠哥伦比亚(Simandl *et al.*, 2000; Makepeace and Simandl, 2001),美国的怀俄明、加利福尼亚和阿拉斯加(Sinkankas, 1959; Sherer, 1972; Middleton, 2006),俄罗斯西伯利亚(Harlow and Sorensen, 2001, 2005;

Lapot, 2004; Kostov *et al.*, 2012),澳大利亚南澳和新南威尔士(Aitchison *et al.*, 1992; Harlow and Sorensen, 2001, 2005),新西兰的南岛(Middleton, 2006; Adams *et al.*, 2007; Grapes and Yun, 2010)。近年来,随着亚洲范围内大量和田玉的开采及研究的深入(Liu *et al.*, 2010, 2011a, 2011b, 2015, 2016),欧洲也出现了大量有关和田玉的报道,如意大利 Sondrio (Adamo and Bocchio, 2013),瑞典的 Scortaseo (Dietrich and de Quervain, 1968; Adamo and Bocchio, 2013; Péterdi *et al.*, 2014),德国的 Thuringia、Bavaria (Lobos *et al.*, 2008; Péterdi *et al.*, 2014)和芬兰的 Usinmaki、Pakila (Gunia, 2000)。

根据产状,软玉可以分为大理岩型和蛇纹岩型两种(Harlow and Sorensen, 2005; Middleton, 2006)。蛇纹岩型软玉主要产出在蛇纹岩或橄榄岩与硅质岩

(例如花岗岩、斜长花岗岩和变质沉积物)的接触带中。大理岩型软玉主要产出在镁质大理岩和岩浆岩的接触带中(Harlow and Sorensen, 2001, 2005; Yui and Kwon, 2002)。为方便研究,本文将大理岩型软玉定义为和田玉,蛇纹岩型软玉定义为碧玉。和田玉中的透闪石和全岩中微量元素的 Cr、Ni、Co 和 Fe/Mg 值也可以鉴别它们的成因类型(Harlow and Sorensen, 2005; Middleton, 2006; Liu *et al.*, 2011a, 2011b)。碧玉含有较高含量的 Cr_2O_3 (0.02% ~ 0.43%) (Grapes and Yun, 2010; Liu *et al.*, 2011a), 高于和田玉中的角闪石和透辉石中的 Cr_2O_3 含量 (0.00% ~ 0.09%) (Liu *et al.*, 2011a; Ling *et al.*, 2013)。一般来讲,碧玉中的全岩 Cr (900×10^{-6} ~ $2\,812 \times 10^{-6}$)、Ni (959×10^{-6} ~ $1\,898 \times 10^{-6}$) 和 Co (42×10^{-6} ~ 207×10^{-6}) 含量高于和田玉中的 Cr (2×10^{-6} ~ 179×10^{-6})、Ni (0.05×10^{-6} ~ 471×10^{-6})、Co (0.5×10^{-6} ~ 10×10^{-6}) 含量 (Grapes and Yun, 2010; Liu *et al.*, 2011b; Kostov *et al.*, 2012; Siqin *et al.*, 2012)。

以往研究主要关注了和田玉的物理性质和光谱特征等方面,但是对其矿物组成、形成过程和致色因素的研究并不充分,多采用电子探针等微区微量成分分析和和田玉整体的致色因素。鉴于颜色的不均匀性,需要结合全岩数据和岩相学特征、微区分析综合探讨和田玉的致色因素。本文对于田阿拉玛斯和墨玉河等典型和田玉矿床样品进行了岩相学特征、全

岩数据、微区分析等方面的综合研究,以探讨其成因及致色因素。鉴于碧玉颜色与和田玉青玉颜色较为接近,研究还另选取加拿大产的典型翠绿色碧玉样品进行了有关致色因素的对比研究。

1 和田玉的成矿地质背景

部分原生和田玉矿床(山料矿床)如且末和若羌矿床位于东昆仑山-阿尔金山成矿带,其它大部分山料矿床位于西昆仑造山带的西部和南部。目前根据矿床规模将整个矿集区分为莎车-叶城、和田-于田和且末-若羌矿带3个主要分带(图1)。经过过去10年的野外地质勘查,发现这些山料软玉矿床的形成均与镁质大理岩有关,大多数位于前寒武纪镁质大理岩和海西期浅成的中酸性火成岩之间的接触带。

2 矿床地质特征

阿拉玛斯矿体(图2)位于于田县东南40 km处(东经 81.55° , 北纬 36.12°),海拔4 500 m。阿拉玛斯矿区位于昆仑前震旦隆起的北翼。矿区的主要构造线呈 NE-SW 方向,因地层已经倒转,南老北新,岩层一般倾向 $110^\circ \sim 170^\circ$, 倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$ 。在矿区东北角的局部地段可见岩层向北倾斜或近似直立,故在总体上是倒转的单斜构造。侵入岩体多数呈带状排列,主要走向为 $50^\circ \sim 230^\circ$, 分支岩脉一般走向

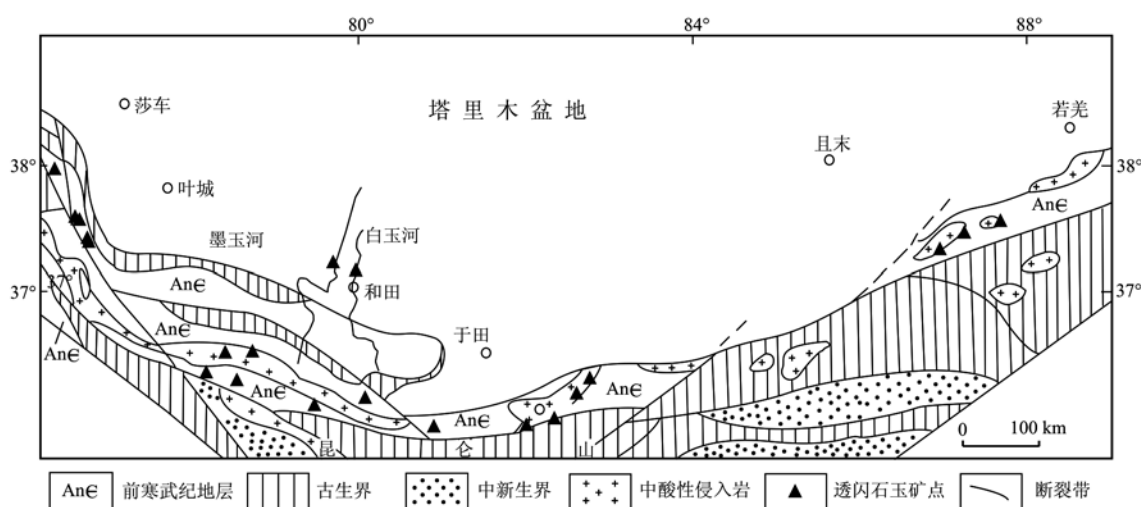


图1 新疆和田玉矿带地质构造图[据唐延龄等(1994)修改]

Fig. 1 Geological sketch map of the Hetian nephrite ore belt (modified after Tang Yanling *et al.*, 1994)

为 $20^{\circ} \sim 200^{\circ}$ 。蓟县系白云石大理岩受华力西中酸性侵入岩交代形成软玉矿化。花岗岩和花岗闪长岩在阿拉玛斯和田玉矿体内广泛分布。目前认为和成矿有关的花岗岩主要形成于 418.5 ± 2.5 Ma (Liu *et*

al., 2015)。矿化带长 200 余米, 宽数十米, 有和田玉矿脉 2 条, 各有矿体 2~3 个, 矿体长 10~50 m, 厚 0.1~0.5 m, 赋存在断裂上盘的剪切面中, 浅部以白玉、青白玉为主, 深部以青白玉、青玉为主。

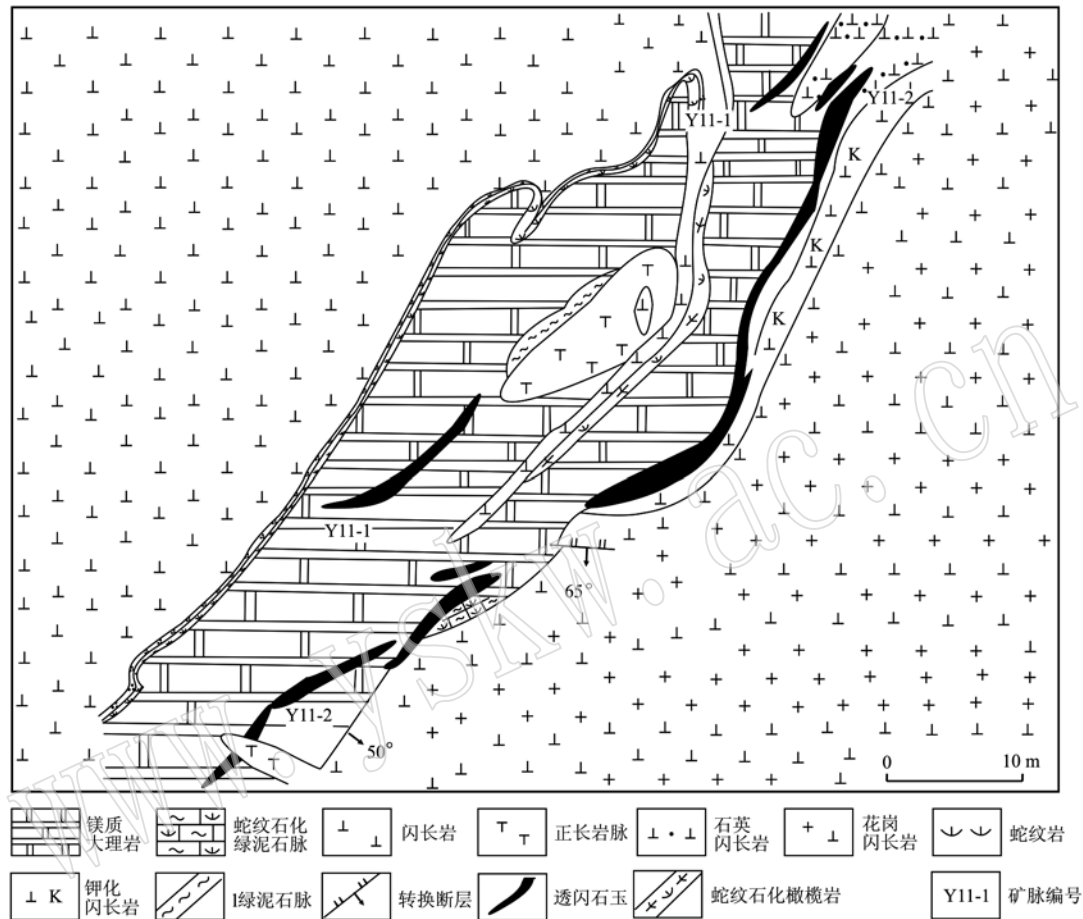


图 2 阿拉玛斯软玉矿脉平面图(据陈葆章, 1986)

Fig. 2 Plan view of Alamas nephrite veins (modified after Chen Baozhang, 1986)

子料矿床主要分布于和田市附近的白玉河和墨玉河及其周围的阶地中, 此次标本采集点位于墨玉河(北纬 $37^{\circ}30'8.6''$, 东经 $79^{\circ}39'2.8''$, 海拔 1.3 km), 样品主要为绿色和黑色软玉。

3 矿物组成及化学成分特征

阿拉玛斯和田玉矿床具有典型的和田玉原生矿床特征, 具有非常明显的玉石分带性, 青玉通常靠近侵入岩脉, 青白玉及白玉多在围岩附近分布, 侵入岩脉附近的青白玉颜色稍深, 远离侵入岩脉颜色逐渐变浅。本文所采用的原生和田玉标本均采自阿拉玛斯原生矿床, 是从图 2 中标注为 Y11-2 的矿脉(图 2)

横切面中选出的, 样品编号为 QYZr1、QYZr2、QYZr3、QYZr4(图 3a~3d), 均为青玉, 具块状构造, 纤维状交织结构。

本文所采用的和田玉子料标本为墨玉河周围两次收集的透闪石粒度、光泽和结构不同的各种青玉(MYH54)、墨玉(MYH25、MYH31、MYH33、MYH36、MYH51)样品, 通常长度超过 10 cm, 呈浑圆状, 具毛毡状结构(图 4)。其中有的样品黑色比较均一, 有的样品黑色呈宽条带状(MYH51)分布, 有的可以明显看到石墨颗粒。

用作对比的加拿大碧玉样品(Can-5、Can-6、Can-7、Can-8)采自加拿大典型的北极碧玉矿区(图 3e~3h)。

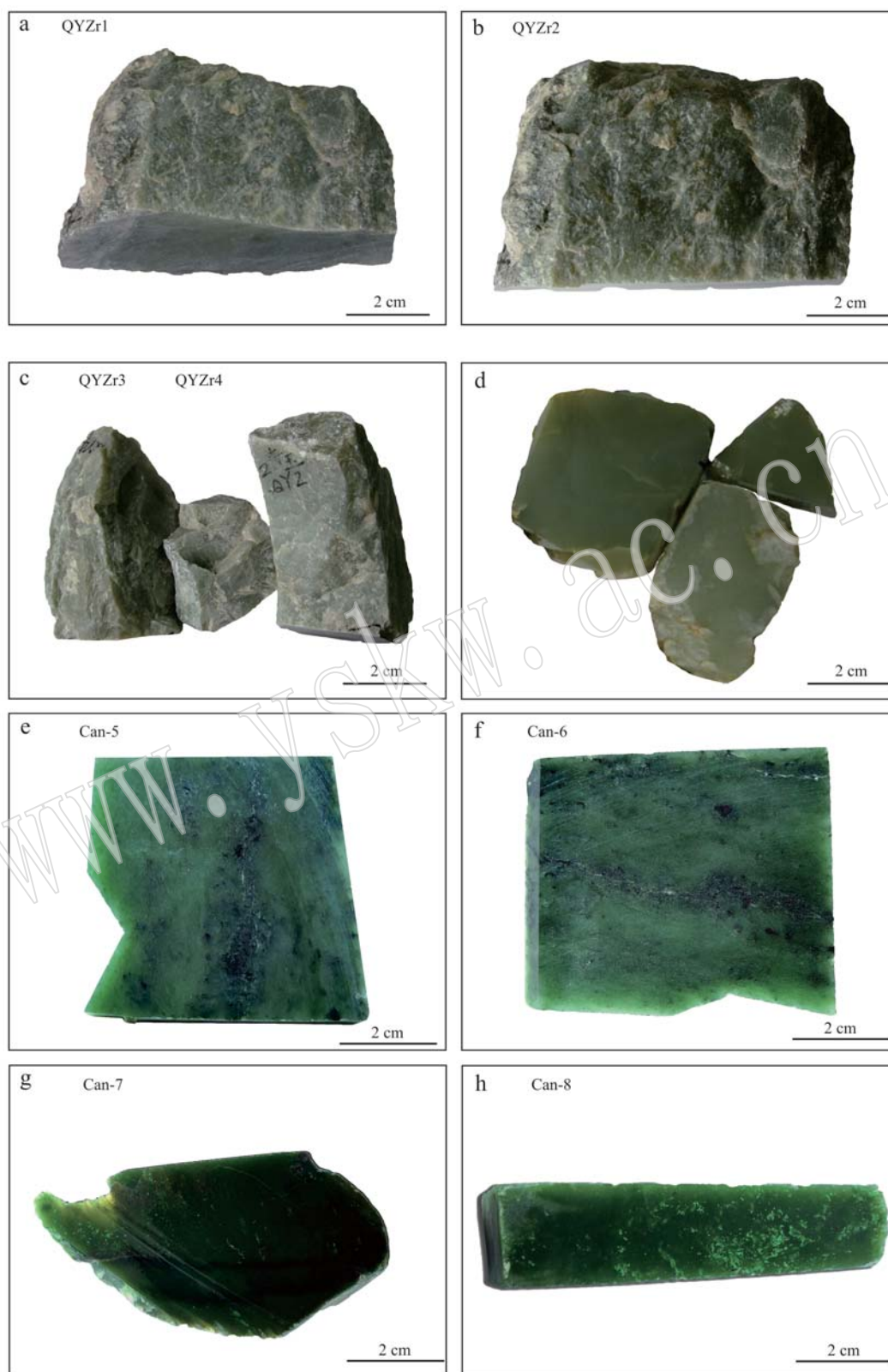


图3 原生矿床和田玉青玉样品(a~d)和加拿大碧玉样品(e~h)照片

Fig. 3 Representative green domolite-related nephrites (a~d) and serpentinite-related nephrites from Canada (e~h)



图4 墨玉河和田玉子料矿床的墨玉和青玉样品

Fig. 4 Representative green and black dolomite-related nephrites from the Karakash River

3.1 岩相学研究

背散射电子(BSE)图像和矿物组成在中国科学院地质与地球物理研究所分析测试。阿拉玛斯原生矿的4块青玉样品主要由透闪石构成,并含有少量透辉石、绿泥石、磷灰石、锆石、金云母和零星分布的榍石。和田玉子料样品的主要组成矿物除透闪石外,还有石英、白云石、透辉石、伊利石、绿泥石矿物,含量可达38%,另外还有微量($<5\%$)的锆石、磷灰石、绿帘石、石榴石、黄铁矿、石墨、金红石、榍石等(图5)。这些矿物共生组合中矿物的生成顺序、赋存状态为研究和和田玉的成因和玉化提供了详细的信息。

在阿拉玛斯青玉和墨玉河子料中均可见透闪石沿着解理面(图5a)在颗粒边界或者裂隙中取代透辉石(图5b),而绿泥石通常沿着裂隙或颗粒边界取代透闪石(图5b)。

磷灰石在青玉和墨玉子料样品中较为常见,主要以椭圆形晶体的形式出现,直径达 $200\ \mu\text{m}$ (图5c)。金红石和榍石颗粒较小,直径小于 $25\ \mu\text{m}$,不规则分布。在青玉和墨玉中发现了大量锆石,这些锆石主要呈椭圆形,直径可达 $200\ \mu\text{m}$,也有很多样品中的锆石受构造破坏呈碎裂状(图5d)。石墨主要出现在墨玉中,是墨玉黑色的主要致色因素之一(图5e、5f)。石墨的来源可能有两种:一种是镁质大理岩中的石墨,这种镁质大理岩在新藏公路和田玉矿床周围大量出现;另一种情况可能是和田玉矿床在形成过程中,由 CO_2 中的碳被还原生成的。图5e、5f中的样品下半部分为石墨颗粒,样品下半部分呈黑色,上半部分呈青色。透闪石晶体包括未变形的(Tr-I)、变形的(Tr-II)及细粒的晶体(Tr-III)(图5j)。Tr-I和Tr-II透闪石晶体主要以孤立晶体残存形

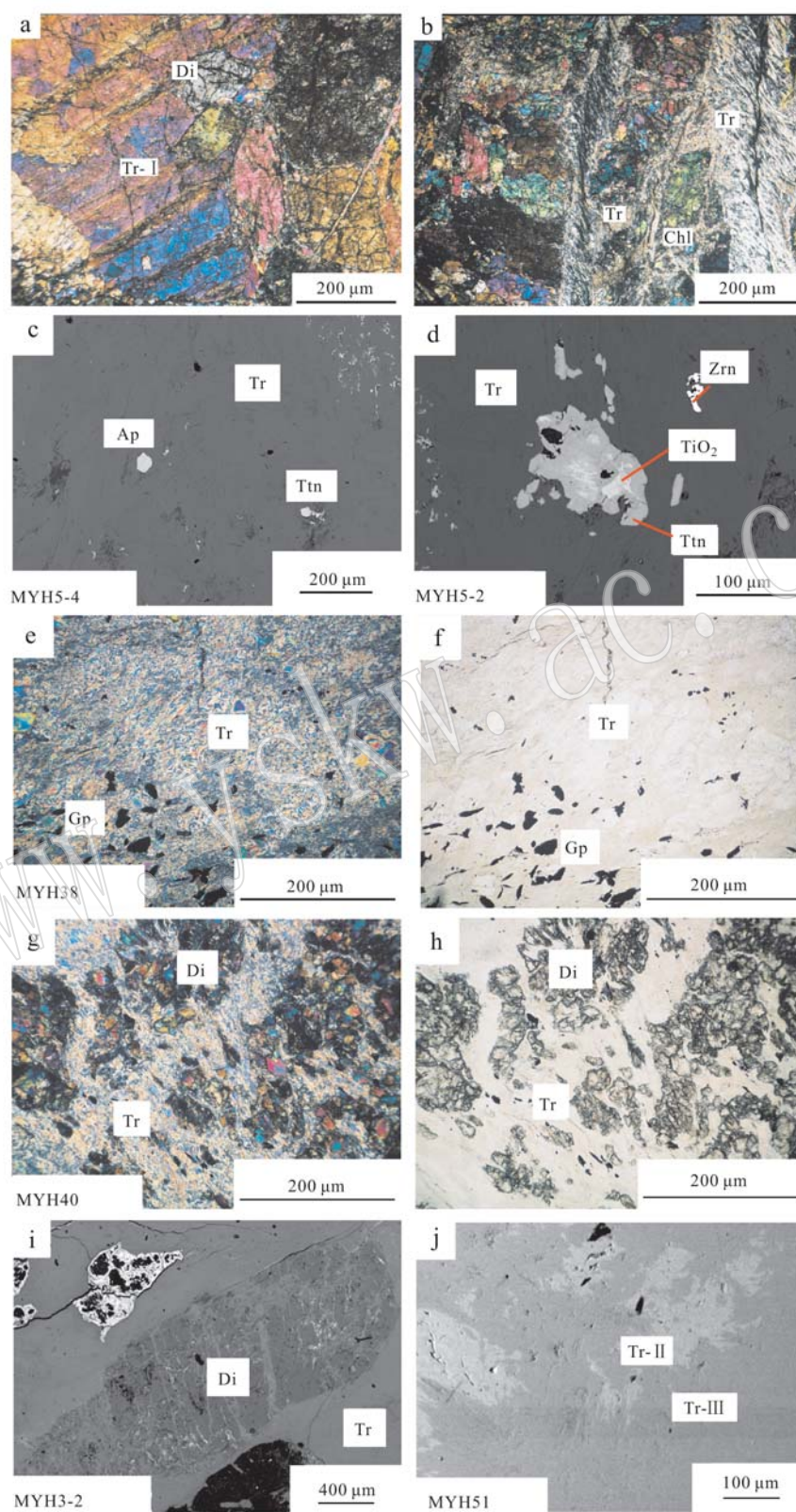


图5 阿拉玛斯和田玉样品(a、b)、墨玉河子料(c~j)的显微照片及背散射电子(BSE)图像

Fig. 5 Photomicrographs and backscattered electron (BSE) images of dolomite-related nephrite samples from the Alamas primary deposit (a, b) and the placer dolomite-related nephrite samples from Karakash River (c ~ j)

Di—透辉石; Tr—透闪石; Ap—磷灰石; Gp—石墨; Ttn—金红石; Chl—绿泥石
Di—diopside; Tr—tremilite; Ap—apatite; Gp—graphite; Ttn—titanite; Chl—chlorite

式存在,被 Tr-III 透闪石晶体大量交代。Tr-III 晶体主要由微晶至隐晶质透闪石组成。透辉石在结构较粗的样品中出现较多,大部分被透闪石沿解理和裂隙交代后成孤岛状(图 5g、5h),交代后的透辉石最大颗粒长 1 200 μm 、宽 400 μm (图 5i)。

3.2 矿物化学成分

样品的主量元素组成是在中国地质科学院矿产资源研究所利用 JXA-8230 型电子探针分析获得。硫化物测试在 20 kV 操作环境下进行,硅酸盐和氧化物在 15 kV 的操作环境下进行,电流为 20 mA,波长为 5 μm 。天然矿物和人造矿物被用作标准矿物。脉石矿物通过生产厂家提供的 ZAF 修正程序进行修正。使用电子探针测试矿物元素组成时,运用了以下标准矿物和晶体:硬玉, NaK α , TAP; 镁橄榄石, MgK α , TAP; 硬玉, AlK α , TAP; 黄玉, FK α , TAP; 钾长石, KK α , PETG; 硅灰石, CaK α , SiK, PETJ; 赤铁矿, FeK α , LIF; 金红石, TiK α , LIF; 磷灰石, PK α , PETJ; Cr₂O₃, CrK α , LIFH; MnO, MnK α , LIFH; NiO, NiK α , LIF; V₂O₅, VK α , LIFH; NaCl, ClK α , PETH。

矿物化学式计算采用 MINPET 2.0 软件(Richard, pers. comm., 1988 ~ 1994)通过电子平衡重新计算,根据分析数据,应用 MINPET 2.0 软件计算每个点的 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 值。

阿拉玛斯青玉中的透闪石在 T 位有 7.94 ~ 8.09 a. p. f. u. (化学式平均值)的 Si, C 位有 4.36 ~ 4.50 a. p. f. u. 的 Mg, B 位中有 1.76 ~ 1.86 a. p. f. u. 的 Ca(表 1)。墨玉河青玉中的透闪石在 T 位有 7.90 ~ 8.04 a. p. f. u. 的 Si, C 位有 3.79 ~ 4.89 a. p. f. u. 的 Mg, B 位中有 1.85 ~ 2.0 a. p. f. u. 的 Ca(表 2)。墨玉样品 MYH51 中的透闪石在 T 位有 8.00 ~ 8.08 a. p. f. u. 的 Si, C 位有 4.61 ~ 4.73 a. p. f. u. 的 Mg, B 位中有 1.88 ~ 2.0 a. p. f. u. 的 Ca(表 3)。其它墨玉样品中的透闪石在 T 位有 7.93 ~ 8.09 a. p. f. u. 的 Si, C 位有 4.42 ~ 4.89 a. p. f. u. 的 Mg, B 位中有 1.81 ~ 1.97 a. p. f. u. 的 Ca(表 3)。

按照国际矿物学协会对角闪石的命名规则, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) > 0.9$ 为透闪石, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) < 0.9$ 为阳起石。阿拉玛斯青玉的 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 值平均为 0.96, 高于其它碧玉矿床中的角闪石的值, 投图点落在透闪石区域(图 6)。墨玉河中青玉的 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 值为 0.81 ~ 0.99, 其中有 4 个值 < 0.9 , 投图点落在阳起石区域, 其余比值均 > 0.9 , 投图落在透闪石区域。墨玉样品 MYH51 的 $\text{Mg}/$

表 1 阿拉玛斯和田玉青玉中的透闪石化学成分分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Chemical component analyses of tremolite in dolomite-related nephrites from Alamas

样品	QYZR2-5-3	QYZR2-5-4	QYZR2-5-6
SiO ₂	57.03	58.46	57.91
TiO ₂	0.04	0.02	0.09
Al ₂ O ₃	1.74	0.49	1.71
FeO	1.54	1.41	1.83
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.00
MnO	0.07	0.09	0.16
MgO	21.49	21.81	21.17
CaO	13.26	13.54	13.19
Na ₂ O	0.29	0.10	0.25
K ₂ O	0.06	0.04	0.08
Total	95.50	96.00	96.40
TSi	7.94	8.09	7.99
TAI	0.06	0.00	0.01
Sum_T	8.00	8.09	8.00
CAI	0.23	0.08	0.27
CTi	0.00	0.00	0.01
CMg	4.46	4.50	4.36
CFe ₂	0.18	0.16	0.21
CMn	0.01	0.01	0.02
CCa	0.12	0.25	0.13
Sum_C	5.00	5.00	5.00
BCa	1.86	1.76	1.82
BNa	0.08	0.03	0.07
Sum_B	1.94	1.79	1.88
Sum_A	0.01	0.01	0.01
Sum_cat	14.95	14.89	14.90
Sum_oxy	23.00	23.00	23.00

($\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$) 平均值为 0.96, 所有投图点也落在透闪石区域内。

阿拉玛斯青玉的 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值为 0.03 ~ 0.06, 均小于 0.06, 多数在 0.04 ($n = 12$), 投图结果显示均属于和田玉(图 7)。墨玉河中青玉的 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值为 0.01 ~ 0.19, 多数为 0.04 ($n = 12$), 投图结果显示除少数几个样品接近碧玉外, 其余均属和田玉。墨玉样品 MYH51 的 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值在 0.006 ~ 0.04 之间, 均小于 0.06, 多数为 0.04 ($n = 8$), 投图点也均位于和田玉区内。

电子探针分析结果显示, 阿拉玛斯和田玉青玉的 Cr 含量为 0 ~ 500 $\times 10^{-6}$, Ni 含量为 13.1 $\times 10^{-6}$; 墨玉河中青玉的 Cr 含量为 0 ~ 266 $\times 10^{-6}$, Ni 含量为 10.1 ~ 200 $\times 10^{-6}$; 墨玉河中墨玉样品的 Cr 含量为 0 ~ 266 $\times 10^{-6}$, Ni 含量为 13.7 ~ 300 $\times 10^{-6}$ 。通过 Cr - Ni 投图, 这些样品大部分落在和田玉范围内, 极少部分落在和田玉与碧玉之间的区域(图 8)。

表 2 墨玉河矿床中和田玉青玉的透闪石化学成分分析

$w_B/\%$

Table 2 Chemical component analyses of tremolite in green placer dolomite-related nephrites in Karakash River

样品	MYH 50-1-1-1	MYH 50-1-1-2	MYH 50-1-2-1	MYH 50-1-2-2	MYH 50-1-3-1	MYH 50-1-3-2	MYH 2-2	MYH 2-3	MYH 2-4	MYH 2-6
SiO ₂	58.09	56.04	57.89	55.97	58.03	56.40	56.00	57.52	57.90	57.49
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.06	0.09	0.07	0.00	0.18	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.03	0.78	0.25	0.80	0.21	0.84	0.01	0.71	0.60	0.98
FeO	0.67	8.03	1.08	8.76	0.80	8.11	8.20	1.15	0.67	0.81
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
MnO	0.01	0.09	0.02	0.07	0.03	0.11	0.01	0.08	0.09	0.05
MgO	23.61	19.37	23.56	18.79	23.85	19.53	19.02	22.80	23.57	23.32
CaO	13.45	12.24	13.23	12.17	13.20	12.12	13.59	13.57	12.48	13.45
Na ₂ O	0.03	0.08	0.05	0.05	0.03	0.05	0.00	0.05	0.08	0.11
K ₂ O	0.00	0.04	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03
TSi	8.04	7.91	8.00	7.92	7.99	7.90	7.96	7.99	8.02	7.94
TAl	0.00	0.09	0.01	0.08	0.01	0.10	0.00	0.01	0.01	0.06
TFe ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00
Sum_T	8.04	8.00	8.01	8.00	8.00	8.00	7.99	8.00	8.03	8.00
CAI	0.00	0.04	0.03	0.06	0.02	0.04	0.00	0.11	0.09	0.10
CFe ₃	0.00	0.21	0.03	0.21	0.05	0.26	0.03	0.00	0.04	0.00
CTi	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
CMg	4.87	4.07	4.85	3.97	4.89	4.08	4.03	4.72	4.87	4.80
CFe ₂	0.08	0.67	0.08	0.76	0.02	0.61	0.91	0.13	0.01	0.09
CMn	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
CCa	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00
Sum_C	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
BFe ₂	0.00	0.07	0.01	0.07	0.02	0.08	0.01	0.00	0.03	0.00
BMn	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
BCa	1.95	1.85	1.96	1.85	1.95	1.82	1.99	2.00	1.85	1.99
BNa	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01
Sum_B	1.96	1.93	1.99	1.92	1.98	1.91	2.00	2.00	1.91	2.00
ACa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00
ANa	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03
AK	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Sum_A	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.05	0.03	0.00	0.03
Sum_cat	15.01	14.95	15.00	14.93	14.98	14.92	15.04	15.03	14.95	15.03
Sum_oxy	23.05	23.02	23.02	23.02	23.01	23.02	23.03	23.09	23.02	23.04

4 讨论

4.1 和田玉的矿物组成和致色因素

通过上述对和田玉山料和子料的研究,发现和和田玉的主要组成是透闪石集合体,并有少量的其它矿物。根据颜色来看,和田玉分为白玉、青白玉、青玉、糖玉、墨玉等。由于和田玉中结构和矿物分布不均,因此对和田玉颜色的研究需要采取全岩和微区元素组成相结合的办法。例如,根据糖玉中透闪石中 FeO(0.22% ~ 1.34%)的含量及全岩化学成分中 TFe₂O₃(0.66% ~ 1.27%)的含量分析,发现不同颜色软玉中透闪石的 Fe 含量基本一致,因此认为导致

糖玉颜色不均匀的这些褐色物质分布无规律,是以物理混入而非进入矿物晶格(刘喜锋等,2017)。

本次研究中对墨玉的岩相学进行了深入研究,其中墨玉致色因素可能有 3 种: ① 石墨的含量高,虽然样品中的 Fe₂O₃ 含量很低,但是仍然可以整体表现出黑色; ② 有些样品中出现很高含量的 TFe₂O₃(>17%),其中的 Fe 元素以 Fe(OH)₃ 的形式出现,以脉状形式出现在和田玉中,使样品整体密度更高,颜色更黑; ③ 另一种黑色是由于样品主要由颜色较深的青色透闪石组成,颜色的成因与 Fe 元素含量的多少有关。

根据对和田玉白玉、青玉、墨玉的全岩主量和微量元素统计结果,Fe、Cr和Mn一直被认为是和田

表 3 墨玉河矿床中的和田玉墨玉透闪石化学成分分析(EMPA)

Table 3 Chemical composition of tremolite in black placer dolomite-related nephrites in Karakash River

Table 3 Chemical composition of tremolite in black placer dolomite-related nephrites in Karakash River																				$w_B/\%$
样品	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	MYH	
	51-9	51-10	51-11	51-12	51-13	51-14	51-15	51-16	30-2-2	30-2-3	30-3-1	30-3-3	40-1-2	40-2-2	41-2-1	41-2-3	42-1-2	42-3-1		
SiO ₂	57.71	58.28	58.08	57.95	57.79	58.33	57.87	57.92	57.03	57.47	57.59	57.88	56.96	55.69	57.71	57.38	57.18	57.4		
TiO ₂	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.02	0.03	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01		0.00		
Al ₂ O ₃	0.69	0.70	0.53	0.58	0.69	0.70	0.64	0.74	0.82	0.75	0.77	0.83	0.74	0.56	0.43	0.46	0.57	0.44		
FeO	1.74	1.73	1.78	1.71	1.66	1.34	1.22	1.51	1.81	1.70	1.67	1.86	0.86	0.71	0.42	0.27	2.01	1.71		
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02		
MnO	0.08	0.08	0.12	0.08	0.04	0.09	0.05	0.03	0.11	0.08	0.09	0.10	0.10	0.09	0.00	0.00	0.04	0.00		
MgO	22.49	22.57	22.38	22.57	22.91	22.67	22.35	22.24	22.01	22.19	22.02	22.14	23.26	23.04	23.38	22.99	23.01	22.49		
CaO	13.56	12.78	13.10	13.33	12.79	13.44	13.54	14.07	13.06	13.07	13.01	12.99	13.07	12.88	12.89	12.85	12.11	12.62		
Na ₂ O	0.09	0.06	0.04	0.08	0.06	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.04	0.01	0.04	0.14	0.07		
K ₂ O	0.06	0.06	0.02	0.05	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.05	0.04	0.06	0.06	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07		
TSi	8.01	8.07	8.07	8.04	8.00	8.06	8.08	8.05	8.03	8.05	8.08	8.06	7.95	7.93	8.05	8.09	7.97	8.06		
Sum_T	8.01	8.07	8.07	8.04	8.02	8.06	8.08	8.05	8.03	8.05	8.08	8.06	8.00	8.00	8.05	8.09	8.01	8.06		
CaI	0.11	0.11	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14	0.12	0.13	0.14	0.07	0.03	0.07	0.08	0.05	0.07		
CMg	4.65	4.66	4.64	4.67	4.73	4.67	4.65	4.61	4.62	4.63	4.61	4.6	4.84	4.89	4.86	4.83	4.78	4.71		
CFe ₂	0.20	0.20	0.21	0.20	0.10	0.16	0.14	0.18	0.21	0.20	0.20	0.22	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.18		
CMn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
CCa	0.02	0.02	0.05	0.03	0.00	0.05	0.09	0.09	0.02	0.03	0.06	0.04	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.02		
Sum_C	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00		
BFe ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00		
BCa	2.00	1.88	1.90	1.95	1.90	1.94	1.93	1.99	1.96	1.93	1.90	1.90	1.95	1.97	1.91	1.88	1.81	1.88		
BNa	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02		
Sum_B	2.00	1.89	1.91	1.97	1.95	1.96	1.96	2.00	1.98	1.95	1.92	1.93	1.99	1.99	1.91	1.89	1.92	1.90		
ACa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
ANa	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00		
AK	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01		
Sum_A	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01		
Sum_cat	15.04	14.97	14.99	15.02	14.97	15.02	15.04	15.07	15.01	15.01	15.01	15.00	15.01	15.00	14.97	14.99	14.95	14.98		

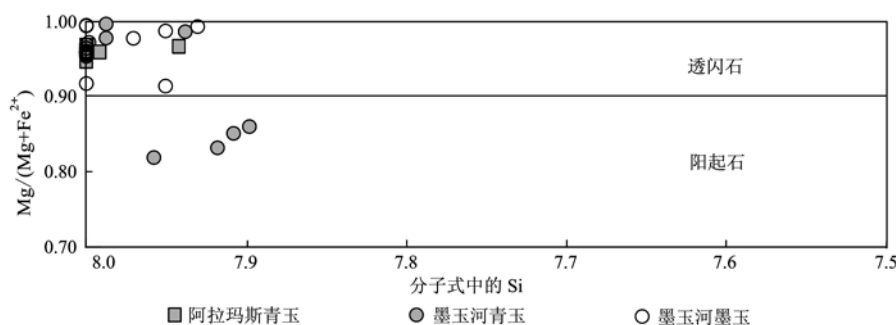
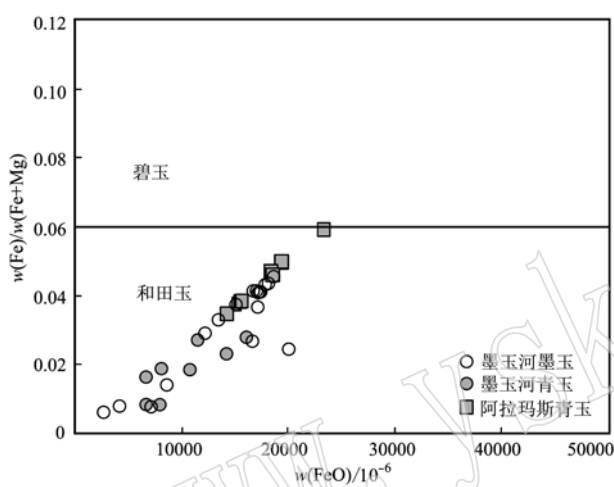
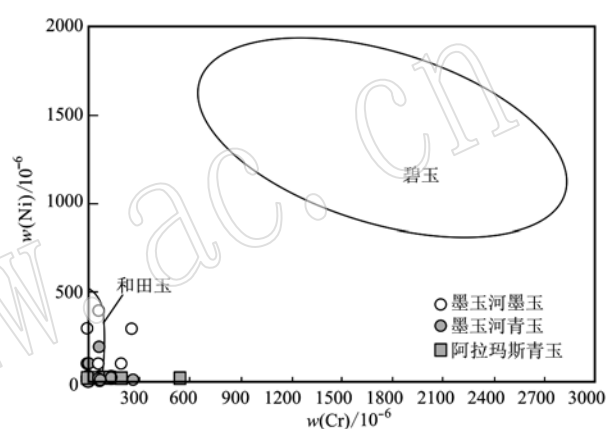
图6 不同软玉矿床中透闪石和阳起石的组成(引自 Leake *et al.*, 1997)Fig. 6 Tremolite and actinolite in various nephrite deposits in the world (after Leake *et al.*, 1997)图7 墨玉河中和田玉青玉、墨玉与阿拉玛斯的青玉全岩化学成分对比(底图来自 Siqin *et al.*, 2012)Fig. 7 The total rock chemical composition comparison of green nephrite and black nephrite from the Karakash River and green nephrite from Alamas (modified after Siqin *et al.*, 2012)

图8 墨玉河中和田玉青玉、墨玉与阿拉玛斯的青玉的矿床类型全岩 Cr、Ni 判别图(引自 Adamo and Bocchio, 2013)

Fig. 8 Cr and Ni discrimination plot of dolomite-related nephrite from the Karakash River and the Alamas deposit (modified after Adamo and Bocchio, 2013)

玉的致色元素。根据已有研究数据(Liu *et al.*, 2011a, 2011b, 2015, 2016),结合本次研究的 Cr、Ni 含量测试结果,做出了 Cr、Ni、Fe 含量折线图(图9、图10)。Cr 被认为与碧玉的颜色有关,由图9可见,在和田玉中,Cr、Ni 含量并无规律性,其含量与颜色并无关系。由图10可见,墨玉的 Fe_2O_3 和 FeO 含量明显高于其它颜色的软玉,青玉中的 Fe_2O_3 和 FeO 含量高于黄玉和白玉。所有样品的化学成分组成显示出和田玉成因的特征,这些特征与碧玉中的相应数据($\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.07\% \sim 0.43\%$, $\text{NiO} = 0.08\% \sim 0.36\%$)(Douglas, 1996, 2003; Wilkins *et al.*, 2003)差距较大。

碧玉出现浓艳的鲜绿色,与和田玉青玉颜色出

现的原因明显不同,而以往对这种颜色的差别尚未做出明确的结论。首先,两者在成因上不同,和田玉中存在于透闪石结构中的致色元素 Fe 主要来自于花岗岩,透闪石晶体结构中很少含有 Cr、Ni 元素。而碧玉中 Cr、Ni 元素来自于围岩中的镁铁质岩石,这些元素主要赋存于透闪石中的 C 位(表4、表5),碧玉透闪石中 C 位 Cr 的数量是 $0.01 \sim 0.03 \text{ a. p. f. u.}$,而青玉透闪石中 C 位不含 Cr。此外二者的透闪石 B 位和 C 位 Fe 的原子数量也有差别,碧玉中透闪石 B 位 Fe 的数量为 $0.24 \sim 0.78 \text{ a. p. f. u.}$ 高于青玉中 B 位 Fe 的数量($0.00 \sim 0.08 \text{ a. p. f. u.}$),碧玉中透闪石 C 位 Fe 的数量为 $0.00 \sim 0.32 \text{ a. p. f. u.}$ 低于青玉中 C 位 Fe 的数量($0.01 \sim 0.76 \text{ a. p. f. u.}$)。碧玉和青玉在透闪石晶体结构中不同的占位造成了

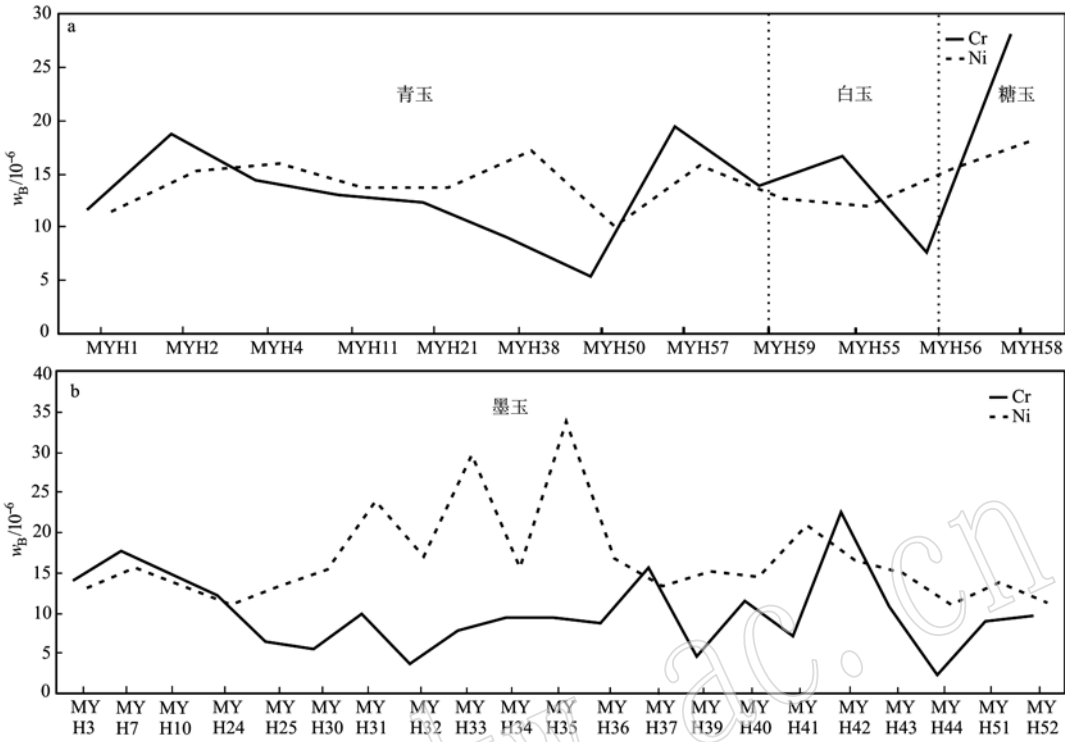


图 9 各类和田玉中 Cr、Ni 含量图
Fig. 9 Content of Cr, Ni in all kinds of nephrites

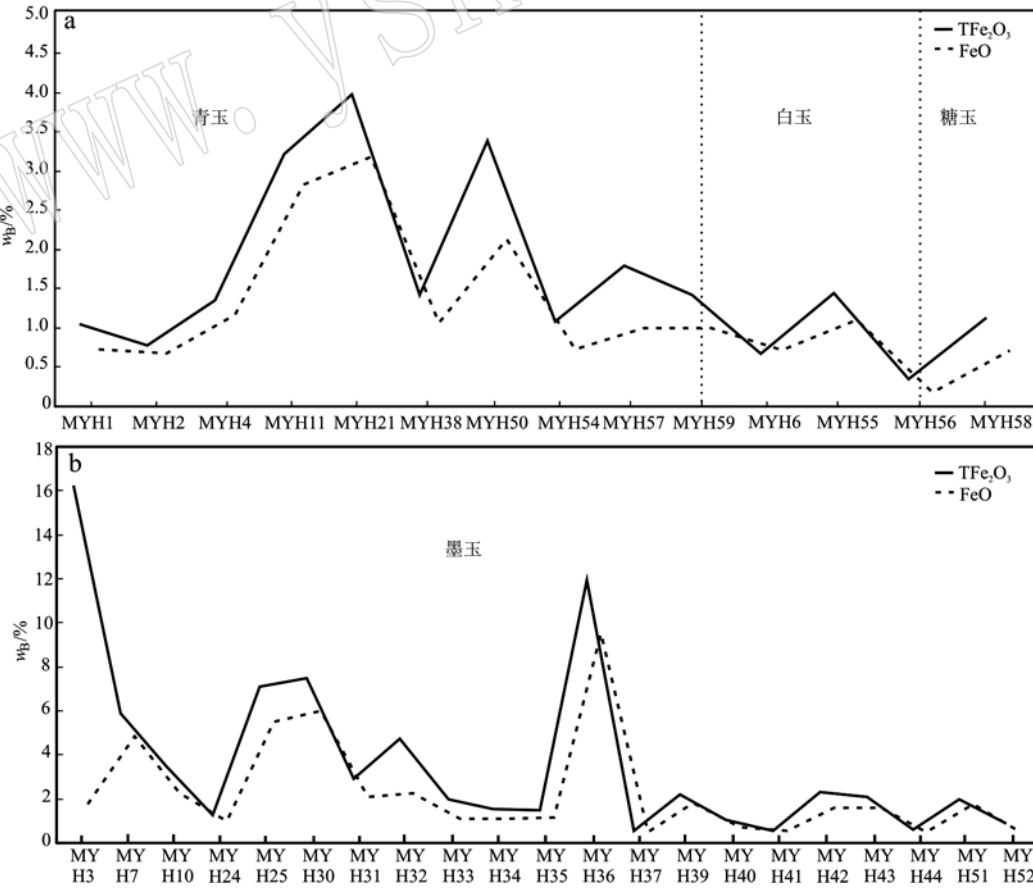


图 10 各类和田玉中 Fe 含量图
Fig. 10 Content of Fe in all kinds of nephrites

表4 加拿大碧玉全岩主量($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)数据
Table 4 The major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element composition of tremolite in serpentinite-related nephrite from Canadian deposits

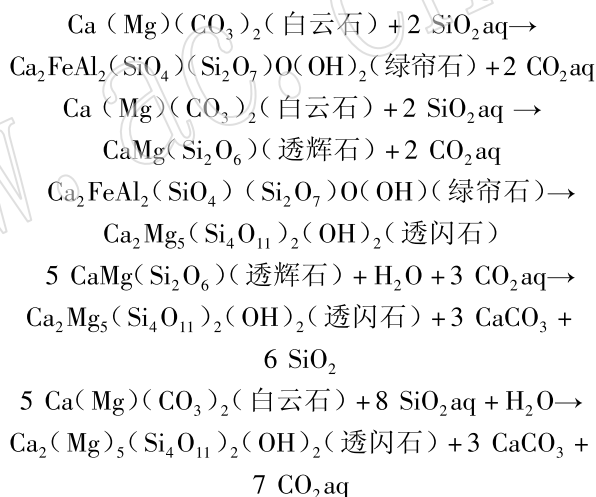
样品	Can-5	Can-6	Can-7	Can-8
SiO ₂	56.07	57.27	57.32	58.00
Al ₂ O ₃	0.34	1.06	1.15	0.82
CaO	13.27	13.95	13.02	13.25
Fe ₂ O ₃	0.74	0.09	0.57	0.33
FeO	3.40	5.17	6.32	3.45
K ₂ O	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
MgO	21.54	19.80	18.53	21.23
MnO	0.19	0.27	0.40	0.07
Na ₂ O	0.12	0.03	0.14	0.17
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	0.02	0.03
TiO ₂	0.01	0.03	0.02	0.02
CO ₂	1.56	1.31	1.38	1.45
H ₂ O ⁺	2.03	1.10	1.56	0.91
La	0.55	2.58	7.63	0.20
Ce	1.07	5.08	17.1	0.43
Pr	0.12	0.58	1.88	<0.05
Nd	0.46	2.15	6.23	0.19
Sm	0.09	0.44	0.76	<0.05
Eu	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Gd	0.06	0.45	0.45	0.05
Tb	<0.05	0.07	0.06	<0.05
Dy	0.06	0.51	0.33	0.11
Ho	<0.05	0.14	0.09	<0.05
Er	<0.05	0.59	0.37	0.12
Tm	<0.05	0.12	0.07	<0.05
Yb	0.06	1.04	0.55	0.12
Lu	<0.05	0.18	0.07	<0.05
Y	0.45	4.27	2.80	0.85
Cr	1 400	3 900	5 100	2 400
Ni	1 200	1 300	1 500	1 200
Rb	1.08	0.40	0.53	0.32
Sr	3.41	2.67	4.07	6.84
Ba	14.9	8.14	10.3	6.01
Th	0.12	0.11	<0.05	<0.05
U	<0.05	0.20	<0.05	<0.05
Pb	1.26	0.48	0.53	1.36
Nb	0.29	1.04	0.76	0.07
Ta	<0.05	0.05	<0.05	<0.05
Zr	1.00	7.57	1.30	0.31
Hf	<0.05	0.27	<0.05	<0.05
Be	0.66	0.50	0.84	0.40
Sc	5.20	12.8	6.85	5.19
V	20.6	39.2	42.6	20.6
Cu	2.09	0.21	0.81	0.89
Zn	76.1	90.0	190	36.3
Ga	0.13	0.31	0.57	0.94
Mo	0.11	0.13	0.15	0.10
Cd	0.12	<0.05	0.06	0.15
In	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Cs	0.42	0.28	0.61	0.08
W	0.18	0.12	0.16	0.06
Tl	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Bi	<0.05	<0.05	0.06	<0.05

两者颜色的差别。例如, Cr、Ni 只在碧玉透闪石中的 C 位含量高。

4.2 和田玉的形成过程及阶段

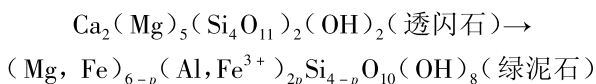
由于复杂的矿物组合及交代结构的存在, 子料具有比原生和田玉更复杂的形成过程。例如, 一些矿物的存在, 如锆石、尖晶石、绿帘石、闪锌矿、磁黄铁矿以及透闪石交代绿帘石, 这在原生和田玉的形成中很少被研究。在子料样品的岩相学和以往研究基础上, 本文重新总结并细化了和田玉的形成过程:

(1) 以往研究中认识到白云质大理岩被透辉石交代, 透辉石又被透闪石交代 (Liu *et al.*, 2016), 这一系列交代事件为: ① 白云质大理岩→透辉石矽卡岩→透闪石矽卡岩; ② 白云质大理岩→透闪石矽卡岩, 反应式表示如下:



(2) 以上的交代过程在很多矽卡岩中均可以出现, 但是仍然不能解释和田玉的成因, 因为和田玉的颗粒非常细小。研究发现, 经过多期次的透闪石交代, 形成期次较晚的细粒透闪石 (Tr- II) 取代了较早的粗粒透闪石 (Tr- I), 最后形成由细小透闪石颗粒组成的和田玉。这个过程是主要的玉化过程。

(3) 绿泥石在热液晚期继续交代透闪石:



由于和田玉主要是由透闪石组成的, 热液晚期的绿泥石逐渐出现并交代透闪石, 对和田玉具有破坏作用。

和田地区的和田玉矿床, 如喀拉喀什河的软玉具有相对完整的矿物组合, 包括透闪石、透辉石、锆石、磷灰石、尖晶石、绿帘石、重晶石、阳起石、闪锌矿、磁黄铁矿、石墨和方解石。类似的矿物组合已经在韩国春川软玉矿床中报道过, 这是一个与白云石

表 5 加拿大碧玉中透闪石的化学成分分析结果

 $w_B/\%$

Table 5 Chemical composition of tremolite in green serpentine-related nephrites from Canada

样品	Can2-q2-1	Can2-q2-2	Can5-1-q4-1	Can5-1-q4-2	Can6-q1-3	Can6-q1-4	Rus6-q1-3	Rus6-q1-4
SiO ₂	56.25	55.49	55.73	57.33	55.56	56.06	56.67	57.39
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.30	0.30	0.25	0.20	0.25	0.42	0.26	0.22
FeO	4.85	4.86	4.75	3.95	5.58	5.92	2.86	2.73
Cr ₂ O ₃	0.24	0.23	0.12	0.09	0.15	0.19	0.13	0.15
MnO	0.06	0.08	0.07	0.10	0.11	0.09	0.03	0.04
MgO	22.31	22.10	22.05	22.86	21.81	21.93	23.91	23.74
CaO	12.81	12.80	12.22	12.53	12.35	12.77	12.67	12.95
Na ₂ O	0.04	0.04	0.09	0.04	0.00	0.06	0.02	0.02
K ₂ O	0.01	0.03	0.04	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00
F	0.03	0.19	0.00	0.08	0.11	0.32	0.00	0.27
总量	96.66	95.89	95.20	97.11	95.79	97.61	96.42	97.36
O_F_Cl	0.01	0.08	0.00	0.03	0.05	0.13	0.00	0.11
O_F	0.01	0.08	0.00	0.03	0.05	0.13	0.00	0.11
TSi	7.95	8.41	7.91	8.16	8.19	8.81	7.87	8.71
TAl	0.05	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
Sum_T	8.00	8.41	7.95	8.16	8.19	8.81	7.91	8.71
CAl	0.00	0.05	0.00	0.03	0.04	0.08	0.00	0.04
CCr	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
CTi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CMg	4.70	4.92	4.66	4.85	4.79	4.90	4.95	4.94
CFe ₂	0.27	0.00	0.32	0.10	0.15	0.00	0.04	0.00
Sum_C	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
BMg	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.43
BFe ₂	0.30	0.62	0.24	0.37	0.54	0.78	0.30	0.35
BMn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
BCa	1.69	1.30	1.75	1.62	1.44	0.97	1.70	1.22
Sum_B	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
ACa	0.25	0.78	0.11	0.29	0.51	1.18	0.19	0.88
ANa	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01
AK	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum_A	0.26	0.79	0.14	0.31	0.51	1.20	0.19	0.89
Sum_cat	15.26	16.20	15.08	15.47	15.70	17.01	15.10	16.60
CF	0.01	0.09	0.00	0.04	0.05	0.16	0.00	0.13
Sum_oxy	23.24	24.64	23.00	23.65	23.92	25.86	23.00	25.33

相关的接触交代变质矿床(Jin *et al.*, 1993; Noh *et al.*, 1993)。

新疆和田玉矿化带已知有超过 30 个原生和田玉矿床,其成因与矽卡岩化和大规模热液蚀变有关。然而,子料的研究文献相对较少,并且原生和田玉矽卡岩矿床的矿物组合几乎没有人进行系统的研究,以往的研究通常只报道主要矿物,如透辉石和透闪石(唐延龄等, 1994; Liu *et al.*, 2011b)。

和田玉带中赋存软玉的矽卡岩与花岗岩、花岗闪长岩侵入镁质大理岩有关。根据以上的和田玉形成的岩相学研究和野外观察,和田玉的形成大概经历了两个阶段:接触变质和接触交代变质阶段。在

最初的接触变质阶段形成了少量尖晶石等矿物,在早期接触交代变质阶段形成的代表性矿物是钙铝榴石和透辉石等。在这个阶段形成的矿物并不含结构水,随构造的持续和大气降水的加入,逐渐有含结构水的矿物逐渐形成,例如绿帘石、粗粒透闪石(Tr-I)和绿泥石,这与典型的含金属矽卡岩矿床的矿物组合(Meinert *et al.*, 2005)类似。在不断的构造活动和大气降水的加入过程中,逐渐有更为细粒的透闪石(Tr-II 和 Tr-III)形成,并且不断地交代已经形成的粗粒的透闪石(Tr-I),这导致高品质软玉形成。形成和田玉最关键的过程是透闪石细粒化。根据阿拉玛斯、且末等和田玉矿床的观察发现,矿区周

围构造比较发育。同时,这种矿区周围较为频繁的构造活动不仅可以导致成矿流体的运移,也可以促进成矿系统中粗粒透闪石被细粒透闪石交代。例如,在已有研究中可以观察到3期透闪石之间互相交代的过程。虽然已经进行了多期次交代,很多岩浆岩阶段形成的副矿物,例如磷灰石、锆石等,仍然能够得以保存,也说明了花岗闪长岩可以被原位交代。同时,这种脆性变形也可以破坏已经形成的玉矿石,例如矿床中可以发现很多已经形成的和田玉常常被后期构造破坏,形成大量碎块。

5 结论

(1) 新疆和田区域的和田玉主要由透闪石组成,还含有少量的细粒透辉石、绿泥石、方解石、金红石、锆石、磷灰石、尖晶石、绿帘石、重晶石、阳起石、闪锌矿、磁黄铁矿、氢氧化铁和石墨。有的和田玉呈现黑色是由含有 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 充填的细脉或者石墨造成的;从白玉到青白玉到青玉, TFe_2O_3 和 FeO 的含量逐渐升高,Fe 是青玉主要的致色因素。加拿大碧玉翠绿绿色与和田玉青玉颜色的差别在于碧玉中透闪石里 Cr 和 Ni 的含量,碧玉中透闪石在 C 位含有 Cr 0.01 ~ 0.03 a. p. f. u. 是碧玉出现鲜艳的绿色的主要原因。

(2) 岩相学研究发现和和田玉的形成与镁质矽卡岩有关,并通过以下阶段形成:白云石→透辉石、白云石→绿帘石、透辉石→透闪石、透闪石(粗粒)→透闪石(细粒)。矽卡岩的形成是产生软玉的第一步,然后通过细粒透闪石(软玉)交代已经形成的镁质矽卡岩矿物(钙铝榴石、透辉石、绿帘石、粗粒透闪石)。另一个重要的过程是脆性变形,多期次的脆性变形和多期次的透闪石之间的互相交代导致高质量的细晶透闪石(软玉)的形成。

References

- Adams C J, Beck R J and Campbell H J. 2007. Characterisation and origin of New Zealand nephrite jade using its strontium isotopic signature[J]. *Lithos*, 97: 307 ~ 322.
- Aitchison J C, Ireland T R, Blake Jr, *et al.* 1992. 530 Ma zircon age for ophiolite from the New England orogen: Old est rocks known from eastern Australia[J]. *Geology*, 20: 125 ~ 128.
- Adamo I and Bocchio R. 2013. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and update[J]. *Gems and Gemology*, 49: 98 ~ 106.
- Chen Baozhang. 1986. Hetian Jade[J]. *Geology in China*, 2: 29(in Chinese).
- Dietrich V and de Quervain F. 1968. Die Nephrit-Talklagerstätte Scortaseo (Puschlav, Kanton Graubünden). Übersicht der Weiteren Nephritfunde der Schweizer Alpen Insbesondere der Vorkommen im Oberhalbstein (Graubünden) [J]. *Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie*, 46.
- Douglas J G. 1996. The study of Chinese archaic jades using non-destructive X-ray fluorescence spectroscopy[J]. *Acta Geologica Taiwanica*, 32: 43 ~ 54.
- Douglas J G. 2003. Exploring issues of geological source for jade worked by ancient Chinese cultures with the aid of X-ray fluorescence[A]. Jett P. *Scientific Study in the Field of Asian Art*[C]. London: Archetype Publications Ltd., 192 ~ 199.
- Grapes R H and Yun S T. 2010. Geochemistry of a New Zealand nephrite weathering rind[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 53: 413 ~ 426.
- Gumia P. 2000. Nephrite from South-Western Poland as potential raw material of the European Neolithic artefacts[J]. *Krystalinikum*, 26: 167 ~ 171.
- Harlow G E and Sorensen S S. 2001. Jade: Occurrence and metasomatic origin[A]. 31st International Geologic Congress 2000[C]. The Australian Gemmologist, 21: 7 ~ 10.
- Harlow G E and Sorensen S S. 2005. Jade (nephrite and jadeitite) and serpentinite: Metasomatic connections[J]. *International Geology Review*, 47: 113 ~ 146.
- James O B, Floss C and McGee J J. 2002. Rare earth element variations resulting from inversion of pigeonite and subsolidus reequilibration in lunar ferroan anorthosites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 1 269 ~ 1 284.
- Jin M S, Shin S C, Kim S J. *et al.* 1993. Geochronology and thermal history of the Chuncheon granite in the Gyeonggi massif, South Korea [J]. *J. Geol. Petrol. Soc. Korea*, 2: 122 ~ 129(in Korean).
- Kostov R I, Protochristov C, Stoyanov C, *et al.* 2012. Micro-PIXE geochemical fingerprinting of nephrite Neolithic artifacts from South west Bulgaria [J]. *Geoarchaeology: An International Journal*, 27: 457 ~ 469.
- Leake B E, Woolley A R and Arps 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]. *Am. Mineral.*, 82: 1 019 ~ 1 037.
- Ling X X, Schmädicke E, Li Q L, *et al.* 2015. Age determination of nephrite by in-situ SIMS U-Pb dating syngenetic titanite: A case

- study of the nephrite deposit from Luanchuan, Henan, China[J]. *Lithos*, 220 ~ 223: 289 ~ 299.
- Ling X X, Schmädicke E, Wu R H, *et al.* 2013. Composition and distinction of white nephrite from Asian deposits[J]. *N. Jb. Miner. Abh. (J. Min. Geochem.)*, 190/1: 49 ~ 65.
- Liu Xifeng, Liu Yan, Li Zijiang, *et al.* 2017. The genesis of Mg-skarn deposit (bearing brown nephrite) and its Ar-Ar dating of phlogopite and SHRIMP U-Pb dating of Zircon, Pishan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36 (2): 259 ~ 273 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2010. Chemical Zone of Nephrite in Almas, Xinjiang, China[J]. *Resource Geology*, 60: 249 ~ 259.
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2011a. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China[J]. *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[J]. *Ore Geology Reviews*, 41: 122 ~ 132.
- Liu Y, Zhang R Q, Abuduwayiti M, *et al.* 2016. SHRIMP U-Pb zircon ages, mineral compositions and geochemistry of placer nephrite in the Yurungkash and Karakash River deposits, West Kunlun, Xinjiang, Northwest China: Implication for a Magnesian Skarn[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 699 ~ 727.
- 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 granodiorite: Implications for the genesis of a magnesian skarn deposit[J]. *Lithos*, 212 ~ 215: 128 ~ 144.
- Lapot W. 2004. Peculiar nephrite from the East Saian Mts (Siberia)[J]. *Mineralogica Polonica*, 35: 49 ~ 58.
- Lobos K, Sachanbiński M and Pawlik T. 2008. Nephrite from Naszawice in Lower Silesia (SW Poland) (in Polish with English summary)[J]. *Przegląd Geologiczny*, 56: 991 ~ 999.
- Makepeace K and Simandl G J. 2001. Jade (nephrite) in British Columbia, Canada[A]. Program and Extended Abstracts for 37th Forum on the Geology of Industrial Minerals[C]. 37: 209 ~ 210.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits. *Economic Geology*, 100: 299 ~ 336.
- Middleton A. 2006. JADE – Geology and Mineralogy[A]. O'Donoghue M. Gems[C]. Oxford: Elsevier Ltd., 332 ~ 354.
- Noh J H, Yu J Y and Choi J B. 1993. Genesis of nephrite and associated calc-silicate minerals in Chuncheon area[J]. *J. Geol. Soc. Korea*, 29: 199 ~ 224 (in Korean).
- Péterdi B, Szakmány G, Judik K, *et al.* 2014. Petrographic and geochemical investigation of a stone adze made of nephrite from the Balatonöszöd-Temetői dűlő site (Hungary), with a review of the nephrite occurrences in Europe (especially in Switzerland and in the Bohemian Massif)[J]. *Geological Quarterly*, 58 (1): 181 ~ 192.
- Sherer R L. 1972. Geology of the Sage Creek nephrite deposit, Wyoming[J]. *Contributions to Geology*, 11: 83 ~ 86.
- Simandl G J, Riveros C P and Schiarizza P. 2000. Nephrite (jade) deposits, Mount Ogden area, Central British Columbia (NTS093N 13W)[J]. *Geological Field Work*, 1999: 339 ~ 347.
- Sinkankas J. 1959. Gemstones of North America[M]. Geoscience Press.
- Siqin B, Qian R, Zhuo S, *et al.* 2012. Glow discharge mass spectrometry studies on nephrite minerals formed by different metallogenic mechanisms and geological environments[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 309: 206 ~ 211.
- Tang Yanling, Chen Baozhang and Jiang Renhua. 1994. The Hetian Jade of China[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House (in Chinese).
- Wan H M and Yeh C L. 1984. Uvarovite and grossular from the Fengtien nephrite deposits, eastern Taiwan[J]. *Mineralogical Magazine*, 48: 31 ~ 37.
- Wilkins C J, Tennant W C, Williamson B E, *et al.* 2003. Spectroscopic and related evidence on the coloring and constitution of New Zealand jade[J]. *American Mineralogist*, 88: 1336 ~ 1344.
- Yui T F and Kwon S T. 2002. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea[J]. *Economic Geology*, 97: 593 ~ 601.

附中文参考文献

- 陈葆章. 1986. 和田玉[J]. *中国地质*, 2: 29.
- 刘喜锋, 刘琰, 李自静. 等 2017. 新疆皮山镁质矽卡岩矿床(含糖玉)成因及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *岩石矿物学杂志*, 36 (2): 259 ~ 273.
- 唐延龄, 陈葆章, 蒋壬华. 1994. 中国和阗玉[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.