

# 新疆皮山镁质矽卡岩矿床(含糖玉)成因及 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

刘喜锋<sup>1</sup>, 刘 琰<sup>2</sup>, 李自静<sup>2</sup>, 买托乎提·阿不都瓦衣提<sup>3</sup>, 田广印<sup>4</sup>, 郭东旭<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学广州学院, 广东 广州 510800; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. 新疆维吾尔自治区和田地区质检局, 新疆 和田 848000; 4. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局  
第十地质大队, 新疆 和田 848000)

**摘 要:** 新疆和田透闪石集合体(软玉)矿带约1 300 km, 是世界上最大的软玉矿带。除传统上认识的白玉、青玉和墨玉外, 近年来在皮山县发现的一种软玉呈红棕色(糖玉), 较为少见。该糖玉矿体产于镁质大理岩与石英闪长岩之间的镁质矽卡岩中, 显示矿床为接触交代变质成因。通过镜下观察, 发现该地区的糖玉主要由纤维状透闪石和极少量的杂质矿物组成。糖色杂质呈浸染状、叶片状、细脉状或沿裂隙分布, 并形成于玉石成矿期或构造活动间歇。糖玉颜色与镁质大理岩中大量的红褐色氧化物有关。通过电子探针和 X 光粉晶衍射测试均表明糖玉主要由透闪石组成, 并含少量伊利石、镁橄榄石、透辉石、磁铁矿等杂质矿物。软玉(细粒透闪石集合体)主要通过透闪石交代大理岩和透辉石形成。样品全岩的化学成分与透闪石晶体化学组成类似, 全岩稀土配分模式显示 Eu 负异常( $\delta\text{Eu}=0.09\sim 0.28$ )、LREE 亏损、HREE 平坦、整体稀土含量( $1.94\times 10^{-6}\sim 26.52\times 10^{-6}$ )、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $0.00\sim 0.03\times 10^{-6}$ )和 Ni ( $0.00\sim 0.01\times 10^{-6}$ )含量低。成矿流体中氢同位素  $\delta\text{D}$  为  $-81.0\text{‰}\sim -84.0\text{‰}$ , 均值为  $-82.25\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  在  $330^\circ\text{C}$  时为  $3.16\text{‰}\sim 5.48\text{‰}$ 。这些氢和氧同位素的数值显示形成软玉的成矿流体主要由岩浆热液、大气降水和大理岩脱出的  $\text{CO}_2$  组成。这些糖玉的地球化学和成矿流体组成与已报道的典型的镁质矽卡岩矿床中软玉的组成类似。从透闪石集合体中选出的岩浆锆石年龄约  $456\pm 7\text{ Ma}$ , 这个年龄可以认为是形成该糖玉矿床年龄的上限。

**关键词:** 镁质矽卡岩矿床; 糖玉; 接触交代变质作用; 成矿流体; 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

中图分类号: P578.955; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)02-0259-15

## The genesis and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pishan brown nephrite-bearing Mg-skarn deposit in Xinjiang

LIU Xi-feng<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, LI Zi-jing<sup>2</sup>, Maituohuti Abuduwayiti<sup>3</sup>, TIAN Guang-yin<sup>4</sup> and GUO Dong-xu<sup>2</sup>

(1. Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Hetian Bureau of Quality and Technical Supervision, Hetian 848000, China; 4. No. 10 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Hetian 848000, China)

**Abstract:** The Hetian nephrite belt is the longest nephrite belt in the world with the length of 1 300 km. Besides traditional white, green and black nephrite, a type of brown nephrite was found recently in Pishan County, Hetian, Xinjiang. The nephrite orebody was found in the skarn between dolomitic marble of the Changchengian system and Late Hercynian granodiorite as a metasomatic contact. Under microscope, it is found that the type of brown nephrite is predominantly composed of fibrous tremolite mineral assemblage with minor associated

收稿日期: 2016-09-11; 接受日期: 2017-02-13

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费(YWF201601); 中国地质调查项目(1212011020000150011-03)

作者简介: 刘喜锋(1982-), 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事宝石学科研和教育; 通讯作者: 刘 琰(1982-), 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事稀土和稀有金属矿床研究, E-mail: ly@cags.ac.cn。

minerals. Brown colors in nephrite have disseminated structure, are distributed in fissures, and occur in forms of disseminations, veinlets or leaves. EMPA, XRD results suggest that the brown nephrite is composed of tremolite together with illite, Mg-olivine, diopside, chromite and some other associated minerals. Fine-grained tremolite crystals in nephrite formed through metasomatism with dolomitic marble and the replacement of diopside by tremolite. Whole-rock chemical analyses of nephrite indicate that chemical compositions of nephrite are similar to those of tremolite. Their bulk-rock REE patterns exhibit strong negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 0.09 \sim 0.28$ ) with declined LREE, flat HREE and low REE concentration, similar to features of host dolomitic marble samples with negative Eu anomalies, declined LREE, flat HREE and lower REE concentration, indicating a close genetic relationship between them. Test data of the stable isotopes of the ore-forming fluids acquired at  $330^\circ\text{C}$  show that the H and O isotopic values ( $-81.0\text{‰} \sim -84.0\text{‰}$  and  $3.16\text{‰} \sim 5.48\text{‰}$ , respectively) of brown nephrite from the brown nephrite deposit fall in the value ranges of existing marble-type nephrite, but are remarkably different from values of other serpentine-type nephrite deposits, as evidenced by a comparison with other types of nephrite deposits in the world. Also, the ore-forming fluids indicate that it is composed of magmatic water, meteoric water and  $\text{CO}_2$  decarbonated from dolomitic marble. Although inverse isochron of phlogopite by Ar-Ar dating suggests that the nephrite formed in  $285.23 \pm 1.57$  Ma, the SHRIMP U-Pb dating of zircons found in nephrite suggest that they formed in  $456 \pm 7$  Ma, which implies that nephrite formed later than this age.

**Key words:** Mg-skarn; brown nephrite; metasomatism; ore-forming fluids; zircon SHRIMP U-Pb dating

**Fund support:** Research Funds for the Chinese Academy of Geological Sciences(YWF201601); Geological Survey Program of China Geological Survey (1212011020000150011-03)

透闪石质软玉主要由透闪石 [ $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ] 组成, 次要矿物包括锆石、磷灰石、透辉石、绿帘石、石榴子石、黄铁矿、金红石、石英、重晶石、磁铁矿、金云母、氢氧化铁、绿泥石、方解石等(Liu *et al.*, 2016)。世界范围内与镁质矽卡岩有关的透闪石软玉矿床主要出现在中国新疆昆仑山(唐延龄等, 1994; Harlow and Sorensen, 2001, 2005)、俄罗斯西伯利亚的东萨彦岭山脉(Prokhor, 1991)、韩国春川(Kim *et al.*, 1986; Yui and Kwon, 2002)、波兰(Gil *et al.*, 2015)和南澳大利亚的科威尔(Flint and Dubowski, 1990)。其中中国新疆和田的西昆仑镁质大理岩型透闪石质软玉矿带是世界上最大的软玉矿带。

透闪石质软玉的形成与接触交代和接触变质过程密切相关(Leaming, 1978; Harlow and Sorensen, 2001, 2005)。和田透闪石质软玉矿带被认为是镁质矽卡岩沿着原位花岗岩侵入体的接触部位发生变质作用的结果(Liu *et al.*, 2010, 2011a, 2015)。花岗闪长岩或者石英闪长岩侵入体, 沿西昆仑山延伸约 1 300 km, 是透闪石质软玉矿床形成的主要驱动力(Liu *et al.*, 2015)。

近年来, 基于详细的岩相学和地球化学数据研

究, 论证了与白云质大理岩相关透闪石质软玉的形成, 是接触交代变质作用的结果(Yui and Kwon, 2002; Liu *et al.*, 2010, 2011a, 2011b, 2015, 2016)。越来越多的岩石中的锆石 U-Pb 定年被用于约束地质过程, 特别是在一些并不常见的岩石中, 如硬玉岩(Shi *et al.*, 2008; Yui *et al.*, 2010, 2013)和软玉(Liu *et al.*, 2015, 2016)。对白玉河和墨玉河中的次生透闪石质软玉、阿拉玛斯软玉矿床中原生软玉中的锆石和它的花岗闪长岩/花岗岩分别进行 SHRIMP 和 SIMS U-Pb 定年研究, 有助于约束区域构造事件的时序(Liu *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016)。

新疆和田玉成矿带主要分布在莎车-叶城、和田-玉田和且末-若羌 3 个地区。所有的软玉矿床类型形成具有相似的地质背景, 而且大多数都位于前寒武系白云质大理岩和中酸性岩浆岩接触带上。透闪石质玉石次生矿床被发现于和田玉龙喀什河(白玉河)和喀拉喀什河(墨玉河)两条河流中和河流两边的阶地上(Liu *et al.*, 2015, 2016)。

近年在青藏高路 379、392 处及且末、若羌等地陆续发现棕色或者棕黄色透闪石质玉石(糖玉)矿床, 这些矿床在构造位置上分别位于康西瓦和阿尔

金断裂附近(图1),与塔里木南缘出现的众多的透闪石玉石矿床在矿床形成机制、矿物组成、成矿时代是否一致有待进一步确定。本次研究针对和田皮山县

392 矿出现的糖色透闪石质玉石进行矿物学、岩相学、矿床形成机制和成矿时代的方面的探讨。

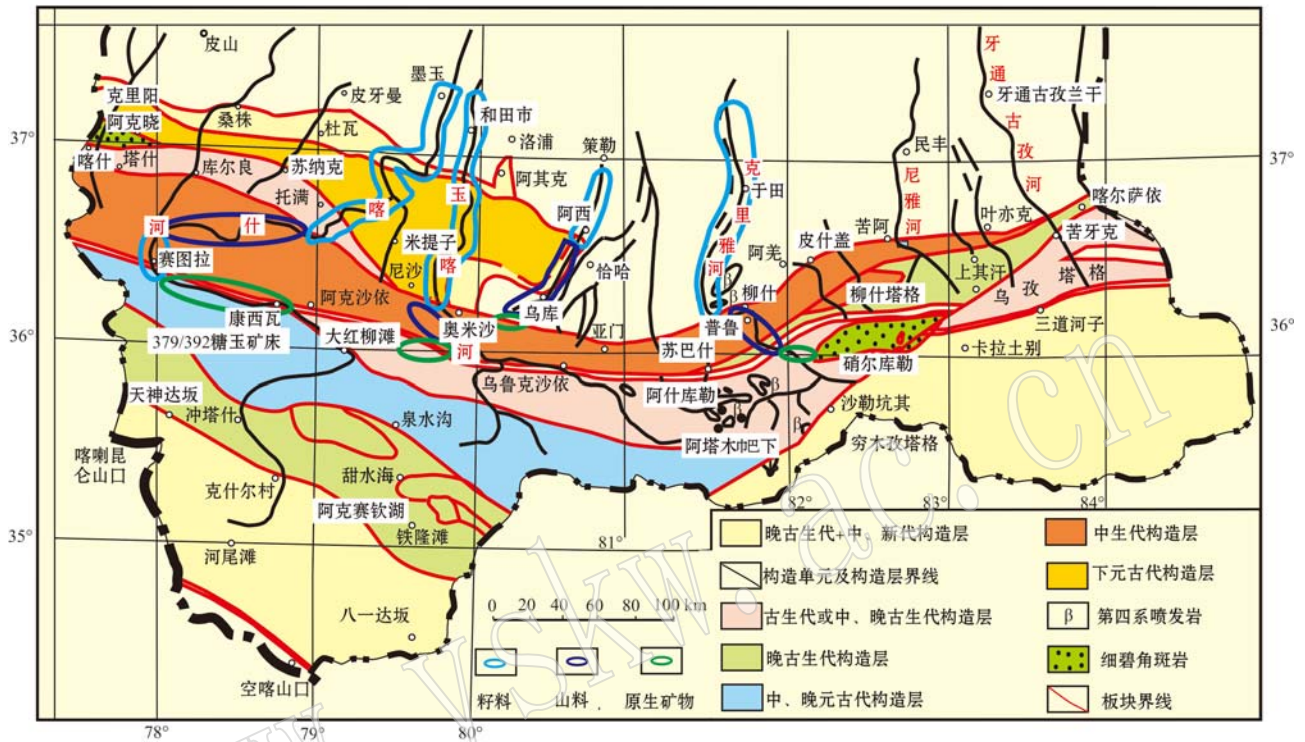


图1 新疆和田山料、籽料和山流水的分布(改自 Liu *et al.*, 2016)

Fig. 1 Distribution of placer, slope and primary nephrite in Hetian, Xinjiang (modified after Liu *et al.*, 2016)

## 1 区域地质背景

和田地区皮山县 379、392 含糖玉的镁质矽卡岩矿床位于新藏公路 379 km 和 392 km 处,位于塔里木盆地西南缘,昆仑陆缘桑株路格-柳什塔格中央隆起带的西段。在 379 和 392 矿中间也有不连续的矿体分布,产状基本一致。该带北以库尔良断裂为界,南以康西瓦断裂为界,隆起带以中元古界长城系地层为主,局部有古生代地层出露,华力西期褶皱隆起有大量岩浆侵入。

### 1.1 矿区地质特征

矿区周围大量分布白云质大理岩与黑云母斜长变粒岩的互层,地表的白云石大理岩多风化呈红褐色(图 2a, 2b),主要走向为北西西-南东东,向北倾斜,倾角小于 65°,局部受构造影响,产状变化较大。白云石大理岩呈厚层状、颗粒粗大,方解石占主要组

成部分,且重结晶程度良好,矿区周围蛇纹石化和透闪石化较普遍。糖玉就产在白云质大理岩与石英闪长岩的接触带上。

该区与糖玉的形成直接相关的是华力西晚期石英闪长岩,主要有 4 条岩脉。岩体周围分布着大量张性裂隙,为成玉提供了良好的成矿热液活动场所,并显示了构造活动的频繁,这两者是形成细粒透闪石质软玉的主要条件。矿区周围出露两条与成矿密切相关的岩脉,地表出露长约 150~270 m,宽 15~20 m。岩脉主要呈灰绿色,细粒结构,成分以角闪石(15%)、斜长石(70%)、石英(10%)为主,绿帘石化普遍。与地层接触产状: 15°/40°,基本顺层侵入。

矿点及附近构造发育,区内已有 6 条较大断裂发现,控矿断裂在矿区长约 400 m,破碎带宽约 2 m,为成矿前张性断裂,产状 20°/49°。后期的构造活动对矿体起破坏作用,形成断裂挤压面产状: 28°/53°。其它断裂或对成矿流体的运移和透闪石细

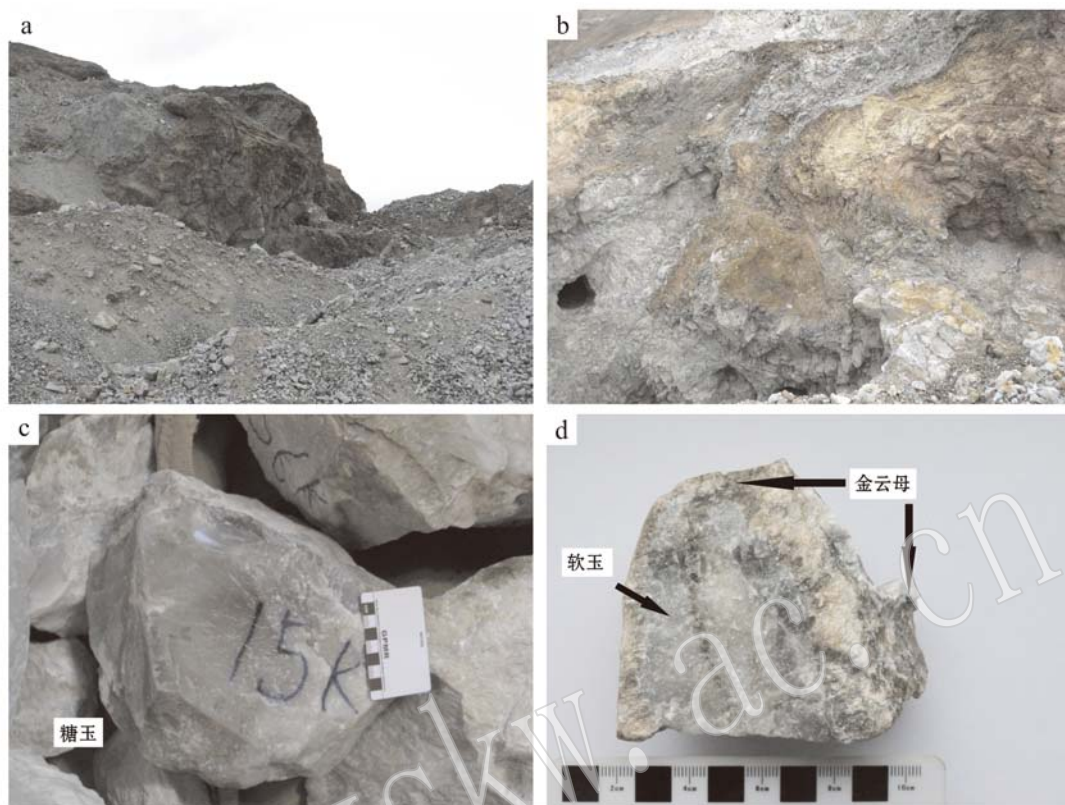


图 2 新疆皮山 392 镁质矽卡岩矿床矿区特征

Fig. 2 Overview of No. 392 Mg-skarn deposit in Pishan County, Xinjiang

a—含糖玉镁质矽卡岩矿床远景; b—糖玉矿体周围存在大量的红色氧化带; c—典型的 392 矿床糖玉样品(棕色细粒透闪石集合体); d—镁质矽卡岩矿床中金云母细脉切穿糖玉

a—overview of brown nephrite pit of brown nephrite deposit; b—red oxidation zones existing in the surrounding area of the brown nephrite orebody; c—typical brown nephrite; d—phlogopite veins cutting across brown nephrite in Mg-skarn

粒化过程中的多期次接触交代变质作用起关键作用。

## 1.2 矽卡岩的组成及矿物分带

在整个和田范围内,软玉矿体主要赋存在镁质矽卡岩中,因此两者的产状在每个矿床中基本一致,镁质矽卡岩的分布和产状与岩浆岩侵位情况有关(图 3)。从石英闪长岩到含橄榄石镁质大理岩依次分布着透辉石、黝帘石、青色透闪石集合体(青玉)、白色透闪石集合体(白玉)、蛇纹石等矿物分带。结合以往对和田玉分带特征、矿物生成顺序和糖玉显微镜下的岩相学特征(图 4)的研究和本次对糖玉研究的内容重新整理了矿物生成顺序(图 5)。与其它镁质矽卡岩矿床不同的是,这里的大理岩中出现了大量的橄榄石,这些橄榄石的出现可能与成矿温度较高有关。从石英闪长岩到镁质大理岩,矿物分带

中镁元素含量逐渐增加,反方向上二氧化硅含量逐渐增加,这种有规律的变化显示了石英闪长岩和镁质大理岩在接触过程中有物质的交换和带入带出并形成了镁质矽卡岩,这种特点也是接触交代变质作用的特点。

## 2 岩相学研究

### 2.1 构造特征

糖玉及糖白玉在这几个矿床中主要是块状构造(图 2c、2d),片理化不发育,结构致密。这种构造主要与大理岩性质均匀、接触交代变质作用均匀等因素有关。该矿区的软玉在形成后,由于受到了一定的剪切应力作用,发生变形,在脆性条件下发生碎裂;在塑性条件下形成片状构造,主要表现为纤维



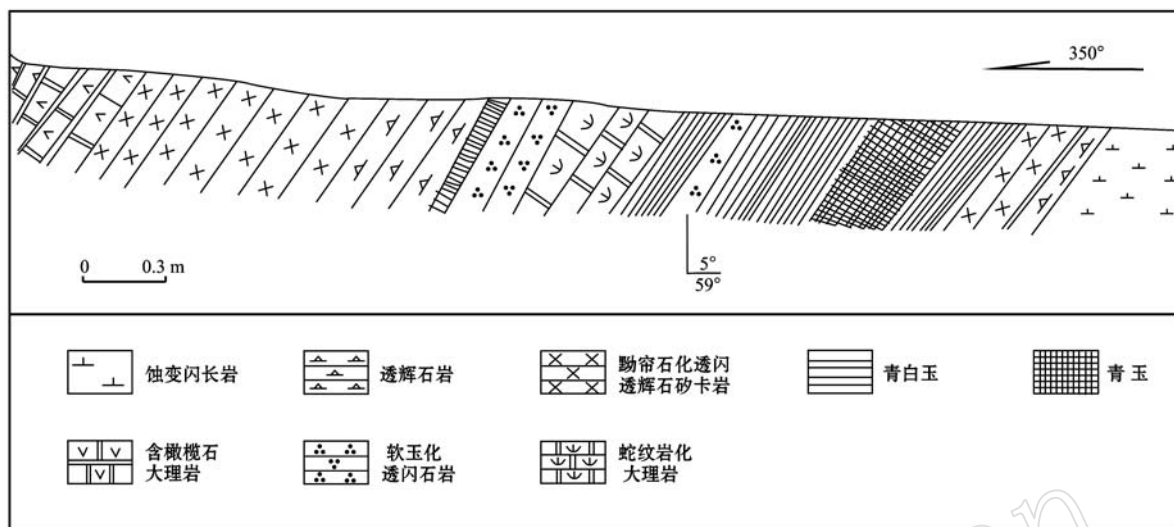


图3 石英闪长岩和镁质大理岩中的和田玉矿化蚀变分带(改自田广印, 2005)

Fig. 3 Minerals zoning caused by metasomatism distributed between dolomite marble and quartz-diorite (after Tian Guangyin, 2005)

状、长柱状透闪石的定向排列。

## 2.2 结构特征

通过显微镜和手标本观察,矿区的糖玉主要是由透闪石和少量的副矿物组成。根据透闪石颗粒的形态,大体可分为纤维状和叶片状透闪石,纤维状透闪石占绝大多数,含量一般在85%左右;叶片状透闪石占15%以下(图4a)。

成玉过程中由于矿体受到定向构造应力的作用,形成了类似于韧性流动构造的定向裂纹,显微纤维状透闪石也大致定向排列(图4b),在构造裂隙中还充填有暗色、棕褐色沉淀物(图4b、4c)。在成玉过后继续有构造的活动对已经形成的软玉起破坏作用,并形成碎裂结构。

同时,从图4中也可以看出,矿体中还存在着愈合裂隙,表明矿体至少受到3期构造活动的影响,后期的构造活动破坏了结构本身的致密性,影响了该地区软玉的品质。

## 2.3 糖色杂质分布及状态

糖玉是软玉种类中最具特色的品种,糖色的分布和特征是研究成玉和糖色杂质成因的重要的研究对象。糖色的分布状态主要有3种:浸染状分布,糖色无规律、无方向性分布在透闪石集合体表面如图4a;沿裂隙分布,糖色沿裂隙分布,暗色、棕褐色沉淀物填充裂隙(图4b);呈脉状、叶片状分布,糖色部位呈不规则的脉状、叶片状分布在软玉表面(图4c、

4d)。

通过观察发现糖色是一种原生色,由于区域构造活动的频繁,糖色的分布及状态也出现多种。因此既有与成玉阶段一致的浸染状和叶片状分布,也有成玉间歇过程中玉石内部出现裂隙填充的糖色。虽然这些糖色的分布和特征不同,软玉表面整体显示出糖色。

## 3 样品测试分析

矿石样品的粉晶衍射分析在中国地质调查局西安地质调查中心完成,用带有石墨单色仪的 Rigaku D/Mac-RC 和  $\text{CuK}\alpha_1$  辐射,并且在以下环境持续扫描:40 kV 的电压,80 mA 的电流,8°/min 的扫描速度,光栅  $\text{DS} = \text{SS} = 1^\circ$ , 18℃ 的环境温度,30% 的湿度。在内标下,刚玉作为参考矿物,主要矿物的质量组成用 XRD 分析。

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,用 JXA-8230 型电子探针分析获得。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。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  $\mu\text{m}$ 。天然矿物和人造矿物被用作标准矿物。脉石矿物是通过生产厂家提供的 ZAF 修正程序进行修正。

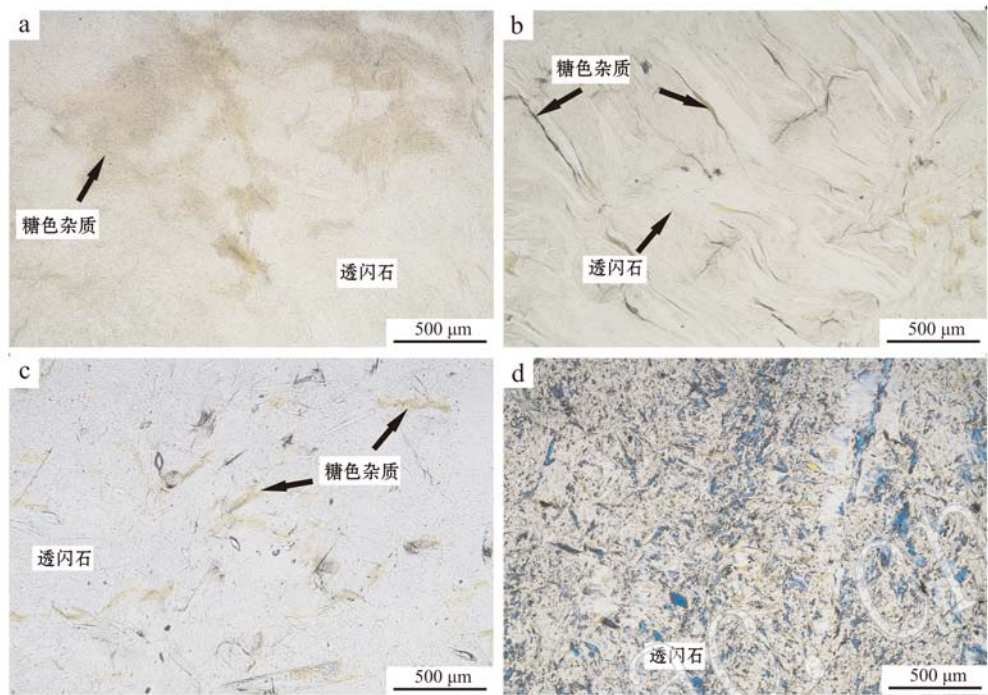


图 4 糖玉中糖色杂质的显微镜下分布形态

Fig. 4 Distribution of brown-color impurities in nephrite under microscope

a—浸染状分布(-); b—沿裂隙分布(-); c—不规则分布(-); d—毛毡状分布和叶片状分布(+)  
a—disseminated distribution of brown-color impurities (-); b—brown-color impurities distributed along cracks in brown nephrite (-);  
c—brown-color impurities with irregular shape distributed in brown nephrite (-); d—fine-grained foliated textures of nephrite(+)

| 矿物   |        | 岩浆阶段 | 进变质阶段  |        | 退变质阶段   |         |
|------|--------|------|--------|--------|---------|---------|
|      |        |      | 接触变质作用 | 变质交代作用 | 早期退变质阶段 | 晚期退变质阶段 |
| 硅酸盐  | 锆石     |      |        |        |         |         |
|      | 磷灰石    |      |        |        |         |         |
|      | 榍石     |      |        |        |         |         |
|      | 钙铝榴石   |      |        |        |         |         |
|      | 透辉石    |      |        |        |         |         |
|      | 绿帘石    |      |        |        |         |         |
|      | 角闪石    |      |        |        |         |         |
|      | 阳起石    |      |        |        |         |         |
|      | 透闪石    |      |        |        |         |         |
|      | 软玉     |      |        |        |         |         |
|      | 金云母    |      |        |        |         |         |
|      | 绿泥石    |      |        |        |         |         |
| 氧化物  | 磁铁矿    |      |        |        |         |         |
|      | 石英     |      |        |        |         |         |
|      | 铁的氢氧化物 |      |        |        |         |         |
| 硫化物  | 磁黄铁矿   |      |        |        |         |         |
|      | 闪锌矿    |      |        |        |         |         |
|      | 黄铁矿    |      |        |        |         |         |
|      | 重晶石    |      |        |        |         |         |
| 碳酸盐岩 | 方解石    |      |        |        |         |         |
|      | 白云岩    |      |        |        |         |         |

图 5 新疆和田镁质砂卡岩中矿物的共生组合及其形成顺序(据 Liu *et al.*, 2015,2016 修改)

Fig. 5 Formation sequence and mineral assemblages in Mg-skarn along Hetian, Xinjiang (modified after Liu *et al.*, 2015, 2016)

全岩粉末样品(0.7 g)与 5.3 g 的  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 、0.4 g 的  $\text{LiF}$ 、0.3 g 的  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  在 25 mL 的瓷坩埚中混合。混合的粉末被转移到铂合金坩埚中,把 1 mL  $\text{LiBr}$  溶液加入到坩埚中,之后把样品干燥。在自动焙熔机内,样品慢慢融化,最后在凉玻璃中进行 X 射线荧光主量元素分析(XRF)。分析误差在 2% 以下。为分析微量元素采取以下步骤:50 mg 的全岩粉末溶解在 1 mL 纯净的  $\text{HF}$  和 0.5 mL  $\text{HNO}_3$  中,并在 15 mL 的 Savillex Teflon 螺旋盖胶囊和 190℃ 环境中放置一天,干燥,与 0.5 mL 的  $\text{HNO}_3$  混匀,再次干燥,确保完全混匀。之后,样品与 5 mL 的  $\text{HNO}_3$  混匀,密封在 130℃ 的烤炉中 3 h。冷却下来后,溶液要转移到塑料瓶中,分析之前稀释到 50 mL。运用电感耦合等离子体放射性光谱分析样品溶液的微量元素。分析精度 5%。

对样品进行氧同位素和其结构水中的氢同位素进行测定,测试过程在中国科学院地质与物理研究所岩石圈演化国家重点实验室进行。氧同位素通过与  $\text{BrF}_5$  进行反应释放出来(Clinton and Mayeda, 1963)并通过一个有铂金层的碳棒转化成  $\text{CO}_2$ 。氧同位素通过 MAT-252 质谱进行测定。包裹体中的氢同位素通过在电热感应炉里对样品加热至 1000℃ 释放出来。样品表面气体通过在 120℃ 真空加热 3 h 去除。水通过加热至 410℃ 的锌粉转换成氢(Friedman, 1953),采用 MAT-252 质谱对样品进行氢同位素测试。

锆石分离、阴极发光(CL)、成像和 U-Th-Pb 同位素测试均在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成。利用常规操作程序从原岩样品中提取锆石晶粒,其中包括岩石破碎、筛分、水洗、烘干,然后通过磁、电和重液分离,最终双目显微镜下进行观察。锆石样品、标样 TEMORA 1 ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $416.8 \pm 1.3$  Ma)、M257( $\text{U} = 840 \times 10^{-6}$ )同时被安装在一个环氧树脂盘上(直径 2.5 cm)(Black *et al.*, 2003; Nasdala *et al.*, 2008)。锆石的阴极发光图像采用 HITACHIS3000-N 扫描电镜(SEM)获取。每测试 3 个样品测试 1 次标样来确定检测仪器的稳定性。仪器条件和操作步骤与之前的报道类似(Compston *et al.*, 1992; Stern, 1998; Black *et al.*, 2003)。数据处理与修正是基于 SQUID 1.0(Ludwig, 2001)和 ISOPLLOT/Ex 软件(Ludwig, 2003)。

## 4 测试结果

在中国地质调查局西安地质测试中心对该地区 392 矿样品进行了 X 射线粉晶衍射分析,结果显示其主要成分为透闪石,含量在 98%~99.7%,次要矿物伊利石,含量在 0.3%~2%。

### 4.1 电子探针

对 379 和 392 矿部分样品进行了电子探针测试,具体结果见表 1。 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{NiO}$  ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.00 \sim 0.03\%$ ,  $\text{NiO} = 0.00 \sim 0.01\%$ ) 含量与典型的镁质大理岩成因的透闪石软玉组成相似(Liu *et al.*, 2010, 2011a, 2011b, 2015, 2016),而远远低于与蛇纹石型透闪石质软玉中的相应组成( $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.07\% \sim 0.43\%$ ,  $\text{NiO} = 0.08\% \sim 0.36\%$ )(Douglas, 1996, 2003)。

对 392 矿糖色玉石样品进行了全岩主量元素(XRF)和微量元素测试分析(ICP-MS)。测试结果见表 2。由于和田玉中还存在其它矿物如透辉石、橄榄石等,因此采用全岩分析的结果与电子探针微区微量测试结果略有差异。全岩测试中  $\text{SiO}_2$  含量平均值达到了 58.92%,  $\text{CaO}$  为 12.14%,  $\text{MgO}$  为 24.33%(表 2),这些数据与透闪石的理论组成基本一致。其中铁元素的含量 0.66%~1.27%,平均含量 1.02%。

以往研究中,橄榄石在和田玉矿床中的出现已有报道(唐延龄等, 1994);但是在白玉河、墨玉河、于田阿拉玛斯矿床中还未出现(Liu *et al.*, 2010, 2015, 2016)。橄榄石的出现代表了一种温度较高的矽卡岩成矿环境。在 392 矿样品薄片发现了橄榄石,其中  $\text{MgO}$  含量达 37.01%,  $\text{FeO}$  含量 0.60% 左右,属于镁橄榄石。它的出现表明该地区糖玉的形成或者镁质矽卡岩的形成经历过较高温度(表 1)。

### 4.2 全岩主微量元素特征

所有的软玉样品表现出  $\text{Eu}$  的负异常( $\delta\text{Eu} = 0.09 \sim 0.28$ ), LREE 下降(LREE: La-Nd), MREE (MREE: Sm-Ho)和 HREE 平坦(HREE: Er-Lu)(图 6a)。 $\Sigma\text{REE}$  总量丰度低,范围从  $1.94 \times 10^{-6} \sim 26.52 \times 10^{-6}$ (平均  $\Sigma\text{REE} 13.51 \times 10^{-6}$ )(表 3)。强烈富集 U, 亏损 Ti、Nb、Ba 和 Th, 然而,高场强元素

表 1 透闪石质软玉中主要矿物和次要矿物电子探针组成  
Table 1 The result of EPMA of compositions of major and secondary minerals from tremolite nephrite

| 编号         | 矿物   | Na <sub>2</sub> O | F    | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SiO <sub>2</sub> | FeO   | TiO <sub>2</sub> | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | BaO  | MnO  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | NiO  | Total |
|------------|------|-------------------|------|-------|--------------------------------|------------------|-------|-------------------------------|------------------|-------|------------------|-------------------------------|------|------|--------------------------------|------|-------|
| 379-3-Q1-1 | 透辉石  | 0.03              | 0.17 | 16.04 | 0.42                           | 0.00             | 24.30 | 0.04                          | 53.96            | 0.85  | 0.00             | 0.00                          | 0.00 | 0.10 | 0.00                           | 0.01 | 95.91 |
| 379-3-Q1-2 | 透辉石  | 0.04              | 0.00 | 15.94 | 0.16                           | 0.00             | 24.67 | 0.02                          | 55.36            | 0.90  | 0.06             | 0.00                          | 0.00 | 0.04 | 0.01                           | 0.00 | 97.20 |
| 392-2-4-1  | 透闪石  | 0.05              | 0.10 | 21.93 | 0.64                           | 0.05             | 13.42 | 0.03                          | 58.84            | 0.29  | 0.00             | 0.00                          | 0.00 | 0.03 | 0.01                           | 0.00 | 95.38 |
| 392-2-4-2  | 透闪石  | 0.15              | 0.11 | 22.17 | 1.20                           | 0.03             | 13.18 | 0.00                          | 59.15            | 0.36  | 0.01             | 0.00                          | 0.00 | 0.02 | 0.00                           | 0.00 | 96.37 |
| 392-2-4-3  | 透闪石  | 0.12              | 0.12 | 22.21 | 0.38                           | 0.07             | 11.99 | 0.00                          | 61.19            | 0.22  | 0.00             | 0.05                          | 0.23 | 0.05 | 0.01                           | 0.00 | 96.62 |
| 392-2-4-4  | 透闪石  | 0.12              | 0.12 | 21.75 | 1.35                           | 0.05             | 13.28 | 0.00                          | 58.57            | 0.31  | 0.03             | 0.00                          | 0.20 | 0.04 | 0.00                           | 0.01 | 95.83 |
| 379-2-Q1-1 | 镁橄榄石 | 0.01              | 0.00 | 50.90 | 0.01                           | 0.00             | 0.00  | 0.01                          | 43.07            | 1.20  | 0.00             | 0.00                          | 0.22 | 0.17 | 0.03                           | 0.00 | 95.61 |
| 379-2-Q1-2 | 镁橄榄石 | 0.00              | 0.00 | 50.53 | 0.00                           | 0.00             | 0.02  | 0.01                          | 42.70            | 1.34  | 0.03             | 0.06                          | 0.13 | 0.15 | 0.00                           | 0.00 | 95.01 |
| 379-2-Q1-3 | 镁橄榄石 | 0.00              | 0.04 | 37.01 | 0.13                           | 0.00             | 0.00  | 0.00                          | 45.58            | 0.60  | 0.00             | 0.01                          | 0.00 | 0.01 | 0.02                           | 0.00 | 83.39 |
| 379-2-Q1-4 | 镁橄榄石 | 0.00              | 0.01 | 36.08 | 0.21                           | 0.00             | 0.00  | 0.01                          | 45.92            | 0.51  | 0.00             | 0.03                          | 0.16 | 0.00 | 0.00                           | 0.00 | 82.93 |
| 392-2-4-5  | 磁铁矿  | 0.00              | 0.00 | 0.18  | 0.05                           | 0.00             | 0.13  | 0.05                          | 0.98             | 83.19 | 0.08             | 0.17                          | 0.00 | 0.81 | 14.16                          | 0.10 | 99.91 |
| 392-2-4-6  | 磁铁矿  | 0.04              | 0.00 | 0.07  | 0.00                           | 0.00             | 0.15  | 0.07                          | 1.03             | 83.21 | 0.08             | 0.00                          | 0.08 | 0.70 | 13.80                          | 0.07 | 99.28 |

wt%/



表 2 新疆皮山 392 糖色透闪石质软玉主量元素(  $w_B/\%$  )及微量元素(  $w_B/10^{-6}$  )分析

Table 2 The analyses of major elements (  $w_B/\%$  ) and trace elements (  $w_B/10^{-6}$  ) from No. 392 brown tremolite nephrite deposit, Pishan County, Xinjiang

| 成分                              | 392-1 | 392-2 | 392-3  | 392-4 | 392-5  | 392-6  | 392-7  | 392-8  | 392-9  | 392-10 | 平均值    |
|---------------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO <sub>2</sub>                | 58.88 | 59.56 | 59.37  | 59.07 | 59.76  | 59.17  | 59.22  | 59.30  | 56.52  | 58.39  | 58.92  |
| TiO <sub>2</sub>                | 0.02  | 0.01  | 0.01   | 0.03  | 0.00   | 0.02   | 0.10   | 0.02   | 0.04   | 0.04   | 0.03   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0.62  | 0.56  | 0.57   | 0.41  | 0.56   | 0.62   | 0.47   | 0.50   | 2.51   | 2.34   | 0.92   |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.66  | 1.07  | 1.09   | 1.12  | 0.80   | 1.05   | 1.08   | 1.27   | 1.21   | 1.00   | 1.04   |
| FeO                             | 0.52  | 0.77  | 0.85   | 0.83  | 0.71   | 0.83   | 0.85   | 1.02   | 0.96   | 0.75   | 0.81   |
| MnO                             | 0.08  | 0.09  | 0.08   | 0.08  | 0.10   | 0.08   | 0.10   | 0.09   | 0.07   | 0.10   | 0.09   |
| MgO                             | 24.31 | 24.25 | 24.21  | 24.29 | 24.54  | 24.27  | 24.4   | 24.13  | 25.56  | 23.29  | 24.33  |
| CaO                             | 11.95 | 12.2  | 12.38  | 12.06 | 12.44  | 12.18  | 12.34  | 12.35  | 10.66  | 12.85  | 12.14  |
| Na <sub>2</sub> O               | 0.17  | 0.13  | 0.08   | 0.14  | 0.10   | 0.08   | 0.09   | 0.08   | 0.12   | 0.04   | 0.10   |
| K <sub>2</sub> O                | 0.06  | 0.06  | 0.05   | 0.06  | 0.04   | 0.07   | 0.06   | 0.05   | 0.06   | 0.12   | 0.06   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 0.01  | 0.03  | 0.00   | 0.02  | 0.00   | 0.01   | 0.09   | 0.01   | 0.05   | 0.04   | 0.03   |
| LOI                             | 2.62  | 1.90  | 2.40   | 2.48  | 1.92   | 2.50   | 2.28   | 2.26   | 3.48   | 2.04   | 2.39   |
| Total                           | 99.38 | 99.86 | 100.24 | 99.77 | 100.26 | 100.05 | 100.23 | 100.06 | 100.28 | 100.24 | 100.04 |
| Sc                              | 0.45  | 1.21  | 0.66   | 0.82  | 0.27   | 0.69   | 3.60   | 0.85   | 1.59   | 1.90   | 1.20   |
| Co                              | 0.87  | 2.14  | 2.48   | 1.88  | 0.95   | 1.61   | 4.98   | 2.14   | 2.93   | 3.63   | 2.36   |
| Ga                              | 0.75  | 0.96  | 0.84   | 0.74  | 0.82   | 1.00   | 0.81   | 0.71   | 2.18   | 2.73   | 1.15   |
| Sr                              | 8.90  | 8.04  | 7.10   | 6.09  | 7.65   | 10.9   | 4.77   | 5.62   | 5.18   | 19.3   | 8.35   |
| Y                               | 4.06  | 4.25  | 2.03   | 2.89  | 1.41   | 2.86   | 9.5    | 2.6    | 1.71   | 8.99   | 4.03   |
| Zr                              | 2.65  | 2.37  | 2.01   | 4.20  | 0.32   | 3.53   | 25.57  | 5.03   | 8.28   | 10.4   | 6.44   |
| Nb                              | 1.95  | 0.68  | 0.51   | 0.35  | 0.23   | 0.64   | 9.6    | 0.52   | 0.76   | 0.54   | 1.58   |
| Cs                              | 1.05  | 2.22  | 1.19   | 0.29  | 1.19   | 2.60   | 0.03   | 0.16   | 1.20   | 1.81   | 1.17   |
| La                              | 0.26  | 7.10  | 5.24   | 3.70  | 0.26   | 0.41   | 4.7    | 5.12   | 0.39   | 4.91   | 3.21   |
| Ce                              | 0.88  | 11.3  | 8.28   | 5.31  | 0.71   | 0.89   | 8.13   | 7.75   | 0.98   | 7.38   | 5.16   |
| Pr                              | 0.06  | 1.08  | 0.78   | 0.49  | 0.05   | 0.07   | 1.03   | 0.80   | 0.09   | 0.97   | 0.54   |
| Nd                              | 0.27  | 3.53  | 2.10   | 1.55  | 0.25   | 0.31   | 4.28   | 2.65   | 0.46   | 3.82   | 1.92   |
| Sm                              | 0.07  | 0.65  | 0.32   | 0.25  | 0.08   | 0.11   | 1.01   | 0.44   | 0.15   | 0.86   | 0.39   |
| Eu                              | 0.02  | 0.11  | 0.03   | 0.04  | 0.01   | 0.02   | 0.11   | 0.04   | 0.02   | 0.26   | 0.07   |
| Gd                              | 0.21  | 0.61  | 0.32   | 0.30  | 0.12   | 0.21   | 1.13   | 0.35   | 0.20   | 0.99   | 0.44   |
| Tb                              | 0.05  | 0.10  | 0.05   | 0.06  | 0.03   | 0.05   | 0.23   | 0.06   | 0.04   | 0.19   | 0.09   |
| Dy                              | 0.48  | 0.66  | 0.33   | 0.43  | 0.20   | 0.41   | 1.50   | 0.39   | 0.27   | 1.20   | 0.59   |
| Ho                              | 0.13  | 0.15  | 0.07   | 0.1   | 0.04   | 0.09   | 0.34   | 0.1    | 0.06   | 0.24   | 0.13   |
| Er                              | 0.43  | 0.45  | 0.22   | 0.27  | 0.10   | 0.25   | 1.02   | 0.34   | 0.18   | 0.67   | 0.39   |
| Tm                              | 0.08  | 0.08  | 0.03   | 0.04  | 0.01   | 0.03   | 0.17   | 0.06   | 0.03   | 0.09   | 0.06   |
| Yb                              | 0.58  | 0.63  | 0.23   | 0.23  | 0.07   | 0.21   | 1.20   | 0.47   | 0.20   | 0.58   | 0.44   |
| Lu                              | 0.09  | 0.12  | 0.04   | 0.03  | 0.01   | 0.03   | 0.20   | 0.08   | 0.03   | 0.09   | 0.07   |
| Hf                              | 0.09  | 0.08  | 0.06   | 0.12  | 0.01   | 0.09   | 0.99   | 0.15   | 0.24   | 0.31   | 0.21   |
| Pb                              | 4.51  | 2.96  | 5.01   | 0.65  | 1.57   | 0.94   | 2.11   | 0.97   | 0.97   | 1.25   | 2.09   |
| Th                              | 0.57  | 0.19  | 0.59   | 0.23  | 0.05   | 0.32   | 1.31   | 0.6    | 0.44   | 1.22   | 0.55   |
| U                               | 2.04  | 1.39  | 0.92   | 1.33  | 0.89   | 1.84   | 0.56   | 1.21   | 0.83   | 0.56   | 1.16   |
| Eu*                             | 0.16  | 0.17  | 0.09   | 0.15  | 0.10   | 0.13   | 0.10   | 0.10   | 0.12   | 0.28   | 0.14   |
| LREE                            | 1.47  | 22.9  | 16.4   | 11.1  | 1.27   | 1.68   | 18.1   | 16.3   | 1.92   | 17.1   | 10.8   |
| HREE                            | 1.18  | 1.28  | 0.52   | 0.57  | 0.19   | 0.52   | 2.59   | 0.95   | 0.44   | 1.43   | 0.97   |
| ΣREE                            | 3.61  | 26.52 | 18.0   | 12.8  | 1.94   | 3.09   | 25.1   | 18.7   | 3.1    | 22.3   | 13.5   |

(Zr、Hf 和 Nb)含量高或者几乎不亏损(图 6b)。与以往对镁质大理岩型透闪石质软玉及其次生矿床中稀土元素的含量类似,如阿拉玛斯矿床软玉稀土元素含量  $2.84 \times 10^{-6} \sim 84.81 \times 10^{-6}$  (Liu *et al.*, 2011a, 2015, 2016)。

4.3 锆石年龄

糖玉样品的锆石呈半自形,他形,大小为  $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  的椭圆形。这些锆石与阿拉玛斯矿床、墨玉河矿床的和田玉中的锆石特征类似。有些锆石颗粒没有呈现明显的振荡环带(图 7),这可能与这些锆

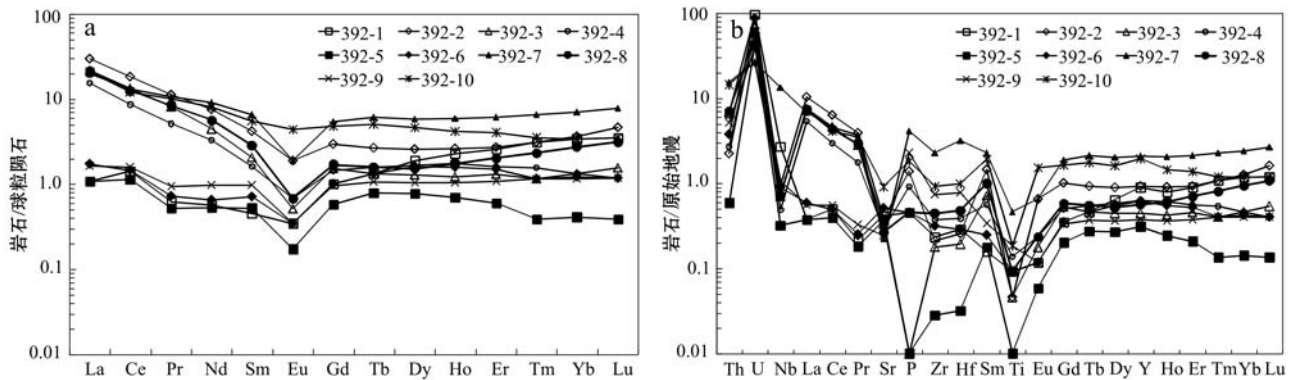


图 6 392 段软玉样品稀土配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) for No. 392 section nephrite samples (normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

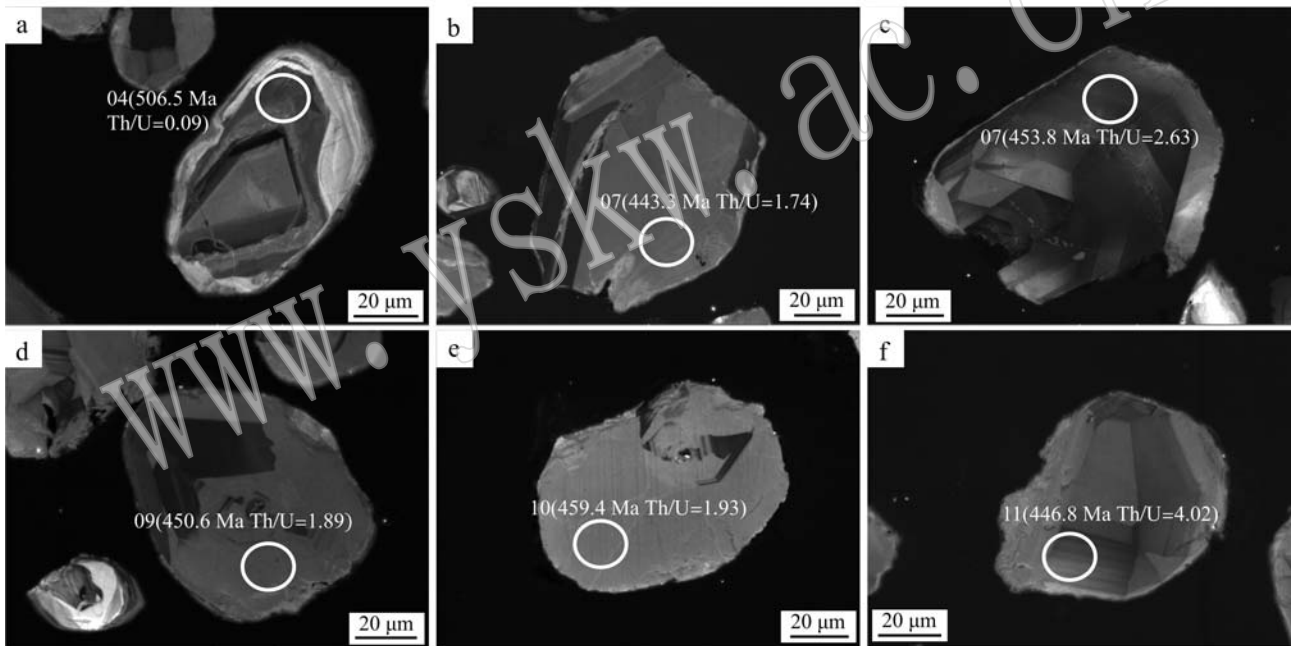


图 7 392 糖玉矿床中糖玉样品的锆石 CL 图像

Fig. 7 Cathodoluminescence images of zircon grains of sample from No. 392 nephrite deposit

石经历了高温重结晶和流体蚀变有关。经过研究发现这些锆石部分微量元素有变化,但是大部分微量元素组成和 U-Th-Pb 等同位素体系并没有受到改变(Liu *et al.*, 2015, 2016)。主要原因在于锆石的封闭温度比较高、承受热液蚀变能力强。

对 392 软玉样品中 18 个锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年。年龄差别较大的  $810 \pm 11$  Ma、 $218.8 \pm 3.5$  Ma 等几个数据可能是由于锆石混染出现的,表 3 中 18 个数据中的 13 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均

值为  $456 \pm 7$  Ma ( $n = 13$ ,  $\text{MSWD} = 2.0$ ) (图 8)。根据以往研究,软玉中的锆石主要来自形成镁质矽卡岩的岩浆岩,因此这个年龄是形成矽卡岩和糖玉矿体的年龄上限。

#### 4.4 成矿流体组成

为进一步分析成矿流体的组成,对糖玉样品的 H、O 同位素进行了研究。

依据郑永飞等(2000)计算出透闪石和水之间的氧同位素分馏方程式:  $10^3 \ln \alpha = 3.95 \times 10^6 / T^2 \times$

表 3 392 矿床软玉样品中锆石 SHRIMP 测试分析结果  
Table 3 SHRIMP zircon analyses of nephrites from No. 392 nephrite deposit

| 测点号    | $^{206}\text{Pb}_c/\%$ |      | $\tau_{\text{B}}/10^{-6}$ |                                       | Th/U  | 比值      |                                    |          |                                    | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ |     | 年龄/Ma           |
|--------|------------------------|------|---------------------------|---------------------------------------|-------|---------|------------------------------------|----------|------------------------------------|----------------------------------|-----|-----------------|
|        | U                      | Th   | $^{206}\text{Pb}^*$       | $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ |       | $\pm\%$ | $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ | $\pm\%$  | $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ | $\pm\%$                          |     |                 |
| 392-01 | 35                     | 60   | 2.14                      | 1.77                                  | 1.77  | 0.545   | 6.6                                | 0.056 1  | 7.0                                | 0.070 4                          | 2.4 | 439 $\pm$ 10    |
| 392-02 | 62                     | 85   | 3.79                      | 1.40                                  | 1.40  | 0.559   | 7.1                                | 0.057 4  | 7.4                                | 0.070 6                          | 2.0 | 439.7 $\pm$ 8.4 |
| 392-03 | 312                    | 4071 | 19.9                      | 13.48                                 | 13.48 | 0.572   | 2.2                                | 0.055 9  | 2.7                                | 0.074 2                          | 1.6 | 461.6 $\pm$ 7.2 |
| 392-04 | 230                    | 20   | 16.2                      | 0.09                                  | 0.09  | 0.676   | 3.5                                | 0.060 0  | 3.8                                | 0.081 7                          | 1.7 | 506.5 $\pm$ 8.2 |
| 392-05 | 44                     | 127  | 2.97                      | 2.98                                  | 2.98  | 0.58    | 22                                 | 0.057 0  | 23                                 | 0.074 1                          | 2.5 | 461 $\pm$ 11    |
| 392-06 | 176                    | 319  | 11.6                      | 1.87                                  | 1.87  | 0.574   | 3.8                                | 0.054 3  | 4.2                                | 0.076 6                          | 1.7 | 475.9 $\pm$ 7.6 |
| 392-07 | 76                     | 128  | 4.65                      | 1.74                                  | 1.74  | 0.563   | 4.5                                | 0.057 4  | 4.9                                | 0.071 2                          | 1.9 | 443.3 $\pm$ 8.1 |
| 392-08 | 282                    | 716  | 17.7                      | 2.63                                  | 2.63  | 0.563   | 2.5                                | 0.056 0  | 3.0                                | 0.072 9                          | 1.6 | 453.8 $\pm$ 7.0 |
| 392-09 | 83                     | 152  | 5.22                      | 1.89                                  | 1.89  | 0.559   | 11                                 | 0.056 0  | 11                                 | 0.072 4                          | 2.1 | 450.6 $\pm$ 9.0 |
| 392-10 | 59                     | 111  | 3.79                      | 1.93                                  | 1.93  | 0.564   | 5.9                                | 0.055 4  | 6.2                                | 0.073 9                          | 2.0 | 459.4 $\pm$ 8.8 |
| 392-11 | 272                    | 1058 | 16.8                      | 4.02                                  | 4.02  | 0.551   | 2.1                                | 0.055 7  | 2.6                                | 0.071 8                          | 1.6 | 446.8 $\pm$ 6.9 |
| 392-12 | 42                     | 169  | 2.71                      | 4.11                                  | 4.11  | 0.551   | 7.2                                | 0.054 1  | 8.0                                | 0.073 9                          | 3.4 | 460 $\pm$ 15    |
| 392-13 | 67                     | 189  | 4.29                      | 2.93                                  | 2.93  | 0.547   | 9.9                                | 0.053 4  | 10                                 | 0.074 3                          | 2.0 | 462.1 $\pm$ 8.8 |
| 392-14 | 439                    | 13   | 13.2                      | 0.03                                  | 0.03  | 0.267   | 5.0                                | 0.056 1  | 5.3                                | 0.034 53                         | 1.6 | 218.8 $\pm$ 3.5 |
| 392-15 | 114                    | 234  | 7.30                      | 2.12                                  | 2.12  | 0.558   | 3.2                                | 0.054 4  | 3.7                                | 0.074 3                          | 1.8 | 462.1 $\pm$ 7.8 |
| 392-16 | 144                    | 123  | 9.43                      | 0.88                                  | 0.88  | 0.564   | 4.3                                | 0.053 9  | 4.6                                | 0.075 9                          | 1.7 | 471.4 $\pm$ 7.7 |
| 392-17 | 1 859                  | 96   | 214                       | 0.05                                  | 0.05  | 1.216   | 0.52                               | 0.065 86 | 1.6                                | 0.133 9                          | 1.5 | 810 $\pm$ 11    |
| 392-18 | 38                     | 141  | 2.65                      | 3.87                                  | 3.87  | 0.64    | 26                                 | 0.059    | 26                                 | 0.078 6                          | 2.7 | 488 $\pm$ 13    |

注： $^{206}\text{Pb}_c$  和  $^{206}\text{Pb}^*$  分别表示普通铅和放射性成因的铅，普通铅根据实测  $^{204}\text{Pb}$  进行校正，误差为  $1\sigma$ 。

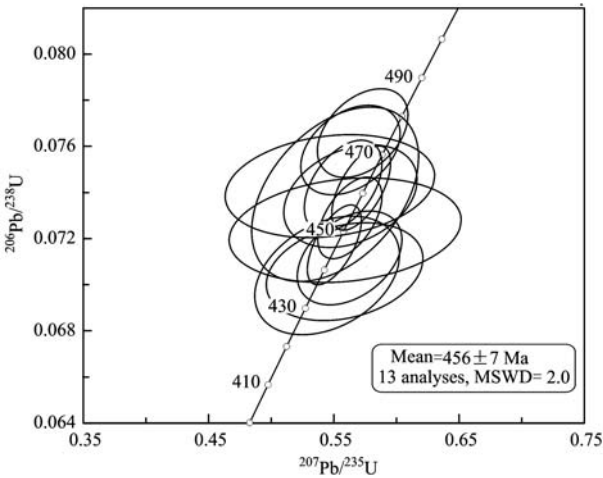


图 8 392 软玉样品中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谱和图  
Fig. 8 SHRIMP U-Pb zircon concordia age diagram  
of nephrites from No. 392 deposit

$8.28 \times 10^3 / T + 2.38$  ( $\alpha$  为分馏系数,  $T$  为绝对温度), 可以求出与透闪石在 330℃、390℃ 和 450℃ 时处于平衡状态的成矿溶液的氧同位素  $\delta^{18}\text{O}$  数值, 见表 4。把透闪石玉的成矿溶液的氢、氧同位素值投影到  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  关系图中, 可以得到图 9a。

表 4 透闪石样品氢氧同位素分析结果

‰

Table 4 The results of hydrogen and oxygen isotope analysis of tremolite

| 样品号   | $\delta\text{D}$ | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ |      |      |
|-------|------------------|-----------------------|--------------------------------------------|------|------|
|       |                  |                       | 330℃                                       | 390℃ | 450℃ |
| 392-1 | -81.9            | 4.99                  | 5.48                                       | 6.11 | 6.51 |
| 392-2 | -81.8            | 4.27                  | 4.76                                       | 5.39 | 5.79 |
| 392-3 | -84.0            | 2.67                  | 3.16                                       | 3.79 | 4.19 |
| 392-4 | -82.4            | 3.63                  | 4.12                                       | 4.75 | 5.15 |
| 392-5 | -82.4            | 3.89                  | 4.38                                       | 5.01 | 5.41 |
| 392-6 | -83.0            | 3.92                  | 4.41                                       | 5.04 | 5.44 |
| 392-7 | -81.6            | 4.24                  | 4.73                                       | 5.36 | 5.76 |
| 392-8 | -81.0            | 3.5                   | 3.99                                       | 4.62 | 5.02 |

5 讨论

5.1 矿物组成与颜色成因

根据 XRD 测试结果, 糖色透闪石质软玉中主要矿物组成是透闪石。糖玉透闪石中  $\text{FeO}$  的含量为 0.22%~1.34%, 全岩化学成分中  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  的含量为 0.66%~1.27%, 阿拉玛斯矿床中青玉  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  含

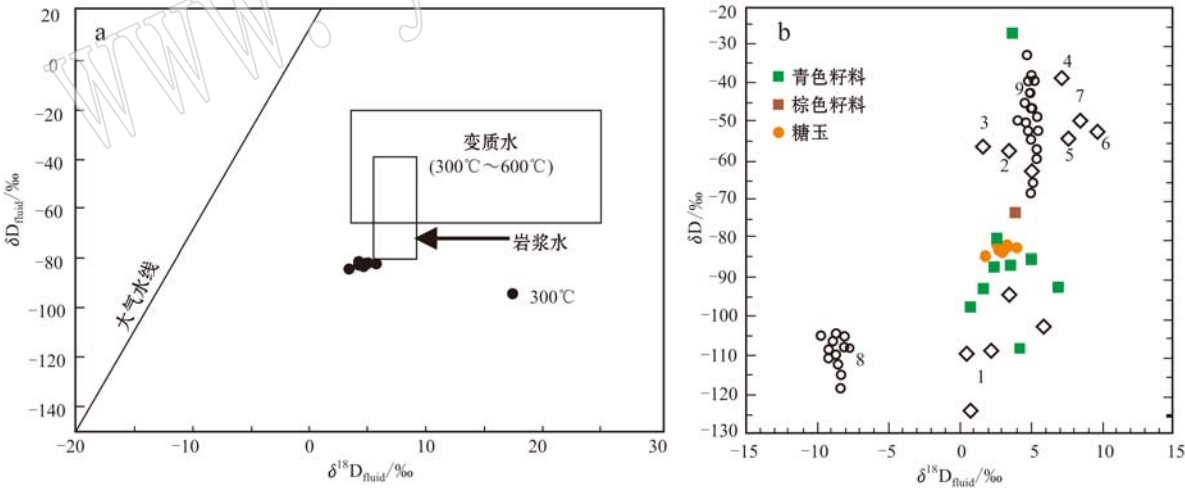


图 9 新疆 392 糖玉矿床中糖玉样品 O-H 同位素特征

Fig. 9 Characteristics of O-H isotopic values of nephrite samples in No. 392 brown nephrite deposit, Xinjiang  
a—糖玉样品中成矿流体的组成(图改自 Taylor, 1997), 显示出热液流体的演化; b—糖玉中透闪石的 O-H 同位素及其与其它原生软玉矿床中透闪石的 O-H 同位素组成对比; 世界其它地区原生大理岩型透闪石质软玉矿床: 1—突厥斯坦; 2—澳大利亚考厄尔; 3—美国怀俄明州; 蛇纹石质软玉矿床: 4—西伯利亚 Chara Jelgra 河; 5—红山; 6—加拿大奥格登山; 7—加拿大 Shulaps 山脉; 8—韩国春川; 9—台湾丰田(1~9 数据引自 Yui and Kwon, 2002)  
a—components of ore-forming fluids of No. 392 nephrite deposit, suggesting the evolution of ore-forming fluids (modified after Taylor, 1997); b—O-H isotopic values of tremolite in brown nephrite and other primary nephrite deposits in the world; the primary dolomite-related nephrite deposits in the world: 1—Turkestan; 2—Cowell; 3—Wyoming; serpentinous nephrite: 4—Chara Jelgra River; 5—Red Mountain; 6—Mount Ogdén; 7—Shulaps Range; 8—Chuncheon; 9—Fengtien (data 1~9 from Yui and Kwon, 2002)

量为 1.03%~1.69% (Liu *et al.*, 2011a), 白玉河及墨玉河中青玉  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  的含量为 0.77%~3.97% (Liu *et al.*, 2016), 因此不同颜色软玉的铁含量基本一致。糖玉颜色并不均匀显示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。由于风化物一般在矿体上部, 因此糖玉样品会出现白色、糖色明显的界限(图 3)。根据岩相学研究和矿区周围中镁质大理岩里面存在大量的红色、棕色氧化物, 因此, 很可能在形成透闪石集合体及其细粒化过程(成玉过程)时, 这些氧化物颗粒进入了透闪石集合体中。由此可见, 糖玉中颜色的成因和铁含量的多少没有直接关系, 软玉内部中不均匀、无规律的颜色分布导致了外部糖色的整体出现(图 4)。虽然经过大量电子探针成分测试、BSE 图像分析及以往通过拉曼、红外等各种光谱测试, 始终未见到导致糖色成因的直接矿物学、谱学证据(韩文等, 2013)。但是其中确实发现有导致糖色的各类铁氧化物包裹体, 这些包裹体的排列和存在方式导致了糖色的深浅(图 4)。本次研究采用全岩样品测试, 测试结果并未发现透闪石集合体出现 Fe、Cr、Ni 等元素及其氧化物与糖色之间有明显的关系。

## 5.2 矿床成因

软玉的成因模型包括接触交代变质作用和接触变质作用两种 (Leaming, 1978; Harlow and Sorensen, 2001, 2005; Yui and Kwon, 2002; Liu *et al.*, 2010, 2011a, 2015), 而与镁质大理岩有关的透闪石质软玉矿床的成因主要是接触交代变质成因。在 379、392 透闪石质糖玉矿床中, 石英闪长岩侵入到红褐色白云质大理岩中, 并在接触带中形成了糖玉矿床, 从野外产状和剖面图中可以发现这种透闪石质软玉矿床成因属于接触交代变质作用(图 3)。

矿床周围存在大理岩和闪长岩围岩, 尤其是在大理岩和岩浆岩的接触带中出现了透辉石、透闪石、黝帘石、青玉和软玉等矿物, 接触交代变质作用明显 (Liu *et al.*, 2010, 2011a, 2015), 这种矿床的类型很可能是大理岩型成因的镁质矽卡岩矿床(含糖玉)。软玉在此矿床中主要通过透闪石交代大理岩和透辉石而形成, 进一步验证了这个推断。根据以往研究情况, 细粒透闪石的成因可以解释为: 多期次构造活动导致的多期次流体活动中, 晚期生成细粒透闪石交代了早期粗粒透闪石。这种成因与和田大部分透闪石质软玉矿床的成因类似, 如于田阿拉马斯矿床 (Liu *et al.*, 2010)、和田白玉河和墨玉河次生透闪

石质软玉矿床 (Liu *et al.*, 2016)。已有研究表明的韩国春川矿床经过矿床地质学研究和同位素地球化学研究, 尤其是在接触带中形成的各类矿物蚀变分带的出现, 都证明了它是一个接触交代成因的镁质矽卡岩矿床。379/392 矿床类型也具有相似的特征。

糖玉样品全岩分析稀土配分曲线结果显示, Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu}=0.09\sim0.28$ ), LREE 下降和 HREE 平坦(图 6a), 这种稀土配分模式与大部分火成岩的特征类似。在所有的火成岩中, 仅仅一些钙长石的稀土配分模式显示强烈的 Eu 的正异常和富集 LREE (Bhattacharya *et al.*, 1998; James *et al.*, 2002; Charlier *et al.*, 2005)。糖玉中仅有非常少量的 REE ( $1.94\times10^{-6}\sim26.52\times10^{-6}$ )。该矿床与阿拉马斯矿床、白玉河矿床、墨玉河矿床中软玉的稀土配分模式、稀土元素含量特征类似。在镁质大理岩型矽卡岩软玉矿床中, 岩浆岩稀土含量较高、Eu 负异常、LREE 右倾和 HREE 稀土平坦的稀土配分模式, 镁质大理岩具有比较平稳的稀土配分模式和稀土含量低的特点 (Liu *et al.*, 2011a, 2015)。软玉稀土配分模式、稀土含量的特点主要继承了岩浆岩和大理岩围岩的地球化学特征。

## 5.3 成矿流体组成

成矿流体中  $\delta\text{D}$  值从  $-81.0\text{‰}\sim-84.0\text{‰}$ , 均值为  $-82.25\text{‰}$ , 通过计算 330℃ 条件下成矿流体  $\delta^{18}\text{O}$  从  $3.16\text{‰}\sim5.48\text{‰}$ , 均值  $4.38\text{‰}$ ; 390℃ 条件下成矿流体  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  从  $3.79\text{‰}\sim6.11\text{‰}$ , 均值  $5.01\text{‰}$ ; 450℃ 条件下成矿流体  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  从  $4.19\text{‰}\sim6.51\text{‰}$ , 均值  $5.41\text{‰}$ 。这些氢和氧同位素的数值在岩浆水值附近 ( $\delta\text{D}=-80\text{‰}\sim-40\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}=0.79\text{‰}\sim7.89\text{‰}$ ) (Ohmoto, 1986)。而且随着温度升高数据投点向岩浆水区域演化, 温度降低数据投点向大气降水演化, 可以看出成矿流体主要由岩浆热液和大气降水共同组成。围岩有大理岩参与成矿的情况下, 热液中存在大量的  $\text{CO}_2$  (Liu *et al.*, 2011a, 2015)。成矿流体由区域大气降水、岩浆水和大理岩中的  $\text{CO}_2$  以不同比例混合。与其它类型的软玉矿床相比(如美国的怀俄明州、加拿大奥格登山、加拿大 Shulaps 山脉), 和田区域镁质矽卡岩矿床软玉中的 O-H 同位素组成特征与大部分产地的 O-H 同位素组成不同; 与世界上其它镁质矽卡岩型软玉矿床(例如韩国的春川、澳大利亚的考厄尔等矿床)相比(图 9b), 和田区域软玉中的 O-H 组成特征也不同, 具有明显的产地特征。因此 O-H 同位素组成可以作为和田区域镁质矽卡岩



矿床产地鉴定的重要标志之一。

#### 5.4 成矿年龄

镁质矽卡岩定年一直是一个难题,主要是因为大量镁质矽卡岩矿床中较少出现云母等用于定年的矿物。个别矿床曾发现过金云母并采用 Ar-Ar 法定年,但由于金云母中含 K 量较低,并没有成功。本次对 392 矿床中出现的金云母尝试 Ar-Ar 定年,获得的 2 个加热阶段总气体年龄为  $285.23 \pm 1.57$  Ma。这个数据和前人采用 K-Ar 法测得的和田玉原生矿床金云母绝对年龄 249 Ma 及 258 Ma(陈葆章, 1985<sup>①</sup>)接近。而本次对云母 Ar-Ar 的测试结果发现,只有两个连续的 Ar 气体释放阶段,且这两个阶段释放 Ar 气体的总量低于整体的 20%。因此这个年龄很难作为比较理想的数据用来代表云母及其矿床形成的年龄。更为重要的是,本次金云母以脉状形式产出并切穿透闪石质软玉(图 4d),很有可能是这些金云母脉本来形成就晚于透闪石形成时期,因此这个年龄很难代表透闪石质软玉的形成年龄。

近年来,在透闪石质软玉中发现了大量的锆石(Liu *et al.*, 2015, 2016),并且进行了定年和约束矽卡岩的成岩年代以此来限定成岩成矿的年代。目前,采用矽卡岩中残留的岩浆岩的副矿物限定矽卡岩矿床的形成年龄已经得到了广泛的应用,例如有些矿物能够在岩浆岩中形成副矿物,而不能在矽卡岩条件下形成,如榍石,但是它的定年也能约束成矿的年龄(Ling *et al.*, 2015)。本次研究,也发现了这些锆石主要形成于  $456 \pm 7$  Ma,可以代表矽卡岩的成岩年龄上限。这一年龄与和田阿拉玛斯、和田白玉河和墨玉河中的软玉的成矿年龄基本一致。

## 6 结论

(1) 新疆皮山糖玉矿体产于长城系桑株塔格群镁质大理岩与华力西晚期石英闪长岩的接触带上,矿体紧靠大理岩一侧或位于大理岩中。在接触带上,发育各种蚀变矿物分带,矿体严格受地层及岩体的控制。矿床成因类型为层控接触交代型。

(2) 通过电子探针和 X 粉晶测试,本区糖玉均主要是由透闪石组成,含少量伊利石、镁橄榄石、磁铁矿等杂质矿物,镁橄榄石的发现表明该地区糖玉的形成温度可能比和田区域其它镁质矽卡岩成因温

度较高。糖色的出现与矿区周围出现的大量的红褐色风化有关。

(3) 软玉的稀土配分模式和微量元素的含量同时受花岗闪长岩和镁质大理岩两者的控制,不同的围岩组合方式可能获得同样的软玉稀土配分模式和微量元素特征,因此很难用作产地鉴定的特征。而软玉中的 O-H 同位素则可以作为主要产地鉴定特征。

(4) 不同温度的成矿流体稳定同位素测试分析数据显示,样品的 O-H 同位素数值与已有的大理岩型软玉的测试数据特征一致,进一步确定这些糖玉是通过岩浆岩与大理岩的接触交代形成的,成矿流体主要由岩浆热液和大气降水组成,并含有大理岩中的  $\text{CO}_2$ 。

(5) 通过对矽卡岩中透闪石集合体中的锆石的精确 SHRIMP U-Pb 定年,获得了谐和年龄  $456 \pm 7$  Ma,这个年龄可以认为是形成该糖玉矿床年龄的上限。

## References

- Bhattacharya A, Raith M, Hoernes S, *et al.* 1998. Geochemical evolution of the massif-type anorthosite complex at Bolangir in the Eastern Ghats belt of India[J]. *Journal of Petrology*, 39(6): 1169~1195.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200(1): 155~170.
- Charlier B, Auwera J V and Duchesne J C. 2005. Geochemistry of cumulates from the Bjerkreim-Sokndal layered intrusion(S. Norway): Part II. REE and the trapped liquid fraction[J]. *Lithos*, 83(3): 255~276.
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27(1): 43~52.
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 149: 171~184.
- 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.
- Flint D J and Dubowski E A. 1990. Cowell nephrite jade deposits[A]. Hughes F E. *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea*[C]. Melbourne: Australia Institute of Mineralogy and Metallurgy, 2: 1059~1062.
- Friedman I. 1953. Deuterium content of natural waters and other substances[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4(1~2): 89~103.

① 陈葆章. 1985. 新疆维吾尔自治区于田县阿拉玛斯和田玉成矿地质条件研究[M]. 新疆地矿局第十六队(未公开报告).

- Gil G, Barnes J D, Boschi C, *et al.* 2015. Nephrite from Zloty stok (Sudetes, SW Poland): Petrological, geochemical and isotopic evidence for a dolomite-related origin[J]. *The Canadian Mineralogist*, 53(3): 533~556.
- Han Wen, Hong Hanlie, Wu Yu, *et al.* 2013. Color genesis of brown jade from Hetian nephrite[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(6): 1446~1450(in Chinese with English abstract).
- Harlow G E and Sorensen S S. 2001. Jade: Occurrence and metasomatic origin[J]. *Australian Gemmologist*, 21(7): 10.
- Harlow G E and Sorensen S S. 2005. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: Metasomatic connections[J]. *International Geology Review*, 47(2): 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(7): 1269~1284.
- Kim S J, Lee D J and Chang S. 1986. A mineralogical and gemological characterization of the Korean jade from Chuncheon[J]. *Journal of the Geological Society of Korea*, 22: 278~288(in Korean).
- Leaming S F. 1978. Jade in Canada[M]. Geological Survey of Canada, 78: 19.
- 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.
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2010. Chemical Zone of Nephrite in Alamas, Xinjiang, China[J]. *Resource Geology*, 60(3): 249~259.
- 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(3): 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(1): 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 Magnesium 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.
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1.02: A User's Manual*[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2: 1~21.
- Ludwig K R. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247~265.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16(1): 491~559.
- Prokhor S A. 1991. The genesis of nephrite and emplacement of the nephrite-bearing ultramafic complexes of East Sayan[J]. *International Geology Review*, 33(3): 290~300.
- Shi G H, Cui W Y, Cao S M, *et al.* 2008. Ion microprobe zircon U-Pb age and geochemistry of the Myanmar jadeite[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 165(1): 221~234.
- Stern R A. 1998. High-resolution SIMS determination of radiogenic tracer-isotope ratios in minerals[A]. Cabri L J and Vaughan D J. *Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy*[C]. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 27: 241~268.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tang Yanling, Chen Baozhang and Jiang Renhua. 1994. The Hetian Jade of China[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House(in Chinese).
- Taylor Jr H P. 1997. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits[A]. Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (3rd ed.)[C]. Wiley-Interscience, New York, 229~302.
- Tian Guangyin. 2015. Geological features and prospecting direction of 379 Hetian Jade deposit in Pishan county, Xinjiang[J]. *Xinjiang Youse Jinshu*, 4: 10~13(in Chinese).
- Yui T F and Kwon S T. 2002. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea[J]. *Economic Geology*, 97(3): 593~601.
- Yui T F, Fukuyama M, Lizuka Y, *et al.* 2013. Is Myanmar jadeite of Jurassic age? A result from incompletely recrystallized inherited zircon[J]. *Lithos*, 160~161: 268~282.
- Yui T F, Maki K, Usuki T, *et al.* 2010. Genesis of Guatemala jadeite and related fluid characteristics: Insight from zircon[J]. *Chemical Geology*, 270: 45~55.
- Zhang Q C, Liu Y, Huang H, *et al.* 2016. Petrogenesis and tectonic implications of the high-K Alamas calc-alkaline granitoids at the northwestern margin of the Tibetan Plateau: Geochemical and Sr-Nd-Hf-O isotope constraints[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 127: 137~151.
- Zheng Yongfei, Xu Baolong and Zhou Gentao. 2000. Geochemical studies of stable isotopes in minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 299~320(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 韩文, 洪汉烈, 吴钰, 等. 2013. 和田玉糖玉的致色机理研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 33(6): 1446~1450.
- 唐延龄, 陈葆章, 蒋壬华. 1994. 中国和田玉[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.
- 田广印. 2005. 新疆皮山县 379 和田玉矿床地质特征及找矿方向[J]. *新疆有色金属*, 4: 10~13.
- 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 2000. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. *地学前缘*, 7(2): 299~320.