

新疆且末碧玉矿的成因研究

贾玉衡¹, 刘喜锋², 刘 琰³, 张其超⁴, 张 勇⁵, 李自静⁴

(1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004; 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. 中国地质科学院, 北京 100037; 5. 自然资源部珠宝玉石首饰管理中心, 北京 100013)

摘要: 以往勘察和研究显示, 在新疆和田及其附近地区主要出现与大理岩相关的软玉(和田玉)矿床, 而与蛇纹岩有关的软玉(碧玉)矿床尚未有明确报道。笔者通过两年多的野外勘察和室内实验分析, 新近在且末县阿尔金断裂附近发现一定规模可开采的碧玉矿床, 对其中碧玉样品进行了主量元素、微量元素、电子探针、氧同位素和成矿年龄等方面的研究。岩相学研究显示其主要组成矿物是阳起石和透闪石, 全岩的 $Mg/(Mg + Fe^{2+}) = 0.83 \sim 0.89$, $Cr_2O_3 = 0.08\% \sim 1.65\%$, $NiO = 0.14\% \sim 0.22\%$, $\delta^{18}O = 15.2\text{‰} \sim 15.4\text{‰}$, 经与世界上已发现的碧玉矿床进行对比并结合野外观察, 确定该矿床是一种与蛇纹岩有关的碧玉矿床。蚀变闪长岩($\delta^{18}O = 14.3\text{‰} \sim 14.7\text{‰}$)、大理岩围岩($\delta^{18}O = 15.2\text{‰} \sim 15.9\text{‰}$)和透闪石($\delta^{18}O = 15.3\text{‰}$)具有相似的氧同位素组成, 表明它们很可能经历了同样的流体蚀变作用。根据蚀变闪长岩($Cr = 107 \times 10^{-6} \sim 155 \times 10^{-6}$, $Ni = 53.5 \times 10^{-6} \sim 85.8 \times 10^{-6}$)和大理岩($Cr = 2.036 \times 10^{-6} \sim 2.415 \times 10^{-6}$, $Ni = 1.403 \times 10^{-6} \sim 1.933 \times 10^{-6}$)中的 Cr、Ni 元素含量判断, 碧玉中大量的 Cr($867 \times 10^{-6} \sim 2.418 \times 10^{-6}$)和 Ni($960 \times 10^{-6} \sim 1.662 \times 10^{-6}$)很可能来自于蛇纹岩中的流体。对碧玉的主要围岩蚀变闪长岩进行的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测试结果分别为 $267 \pm 14 \text{ Ma}(n=5)$ 和 $272 \pm 14 \text{ Ma}(n=6)$, 与碧玉密切共生的黑云母的 Ar-Ar 坪年龄为 $260.6 \pm 1.5 \text{ Ma}$ 。鉴于蚀变闪长岩的形成时代与黑云母年龄数值在误差范围内一致, 花岗岩、大理岩和碧玉的氧同位素值接近, 同时碧玉的 Cr、Ni 元素含量较高, 因此推断碧玉的物质来源很可能是蚀变闪长岩和大理岩, 而成矿流体是由蚀变闪长岩中的岩浆水、蛇纹岩中活化的流体和大气降水组成。

关键词: 碧玉; 蛇纹岩; 和田玉; 且末; 新疆

中图分类号: P578.955; P619.28+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)05-0824-15

Petrogenesis of the serpentinite-related nephrite deposit in Qiemo County, Xinjiang

JIA Yu-heng¹, LIU Xi-feng², LIU Yan³, ZHANG Qi-chao⁴, ZHANG Yong⁵ and LI Zi-jing⁴

(1. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, 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. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. National Gems & Jewelry Technology Administrative Center, Beijing 100013, China)

Abstract: According to the modes of occurrence, nephrite can be divided into dolomite-related nephrite and serpentinite-related nephrite. In previous studies and exploration, serpentinite-related nephrite was hardly found in Hetian dolomite-related nephrite belt in Western Kunlun Mountains. During 2014~2015, lots of geological examination and collection of information concerning the location of serpentinite-related nephrite were carried out, and

收稿日期: 2017-01-20; 接受日期: 2018-06-14

基金项目: 中国地质调查局矿产地质志项目(DD20160346); 中国地质科学院基本科研业务费项目(YWF201601); 中国地质调查局地质调查项目(1212011020151511-03)

作者简介: 贾玉衡(1985-), 女, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, E-mail: bx2017004@glut.edu.cn; 通讯作者: 刘喜锋(1982-), 硕士研究生, 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。

then some information about the occurrence of serpentinite-related nephrite orebody near the Altun fault zone was found in Qiemo County. Based on EMPA (electron microprobe analysis), XRF (X-ray fluorescence), ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry) and oxygen isotopic analysis, $\delta^{18}\text{O}$ (15.2‰ ~ 15.4‰), $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 0.83 \sim 0.89$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.08\% \sim 1.65\%$, $\text{NiO} = 0.14\% \sim 0.22\%$ and other geochemical data were acquired, which suggest a serpentinite-related nephrite origin. Wall rock of diorite also indicates that they formed at 267 ± 14 Ma and 272 ± 14 Ma, as shown by the SHRIMP U-Pb dating on zircons, which suggests the upper limit of the formation time of the serpentinite-related nephrite. Inverse isochronal age of Ar-Ar dating on biotite associated with serpentinite-related nephrite is 260.6 ± 1.5 Ma. Both ages imply that they have relationship in genesis. Possibly due to the similar hydrothermal alteration of diorite, dolomite marble and tremolite, they have the close oxygen isotopic values ($\delta^{18}\text{O} = 14.3\text{‰} \sim 14.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 15.2\text{‰} \sim 15.9\text{‰}$ and $\delta^{18}\text{O} = 15.3\text{‰}$). According to the chemical composition from bulk analysis of diorite ($\text{Cr} = 107 \times 10^{-6} \sim 155 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 53.5 \times 10^{-6} \sim 85.8 \times 10^{-6}$), marble ($\text{Cr} = 2\,036 \times 10^{-6} \sim 2\,415 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 1\,403 \times 10^{-6} \sim 1\,933 \times 10^{-6}$) and nephrite ($\text{Cr} = 867 \times 10^{-6} \sim 2\,418 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 960 \times 10^{-6} \sim 1\,662 \times 10^{-6}$), together with the occurrence of chromite in nephrite, it is concluded that granodiorite and marble provided the ore materials for the formation of nephrite, and hydrothermal fluids were probably derived from both magmatic water and meteoric water in serpentine rock.

Key words: serpentinite-related nephrite; ophiolite; nephrite; Qiemo; Xinjiang

Fund support: Project of Mineral Geology from China Geological Survey (DD20160346); Research Funds for the Chinese Academy of Geological Sciences (YWF201601); Geological Survey Program of China Geological Survey (1212011020000150011-03)

蛇纹岩型软玉(碧玉)主要产于蛇纹岩或橄榄岩与硅质岩的接触带(例如花岗岩、斜长花岗岩和变质沉积物),而大理岩型软玉(和田玉)主要产于镁质大理岩与岩浆岩的接触带(Harlow and Sorensen, 2001, 2005; Yui and Kwon, 2002)。为了深入研究两种不同产状的软玉的成因特征,本文分别将这两种不同成因类型的软玉称为碧玉与和田玉以方便论述。除了地质产状和岩相学特征之外,碧玉与和田玉在微量元素、矿物组成以及 H-O 同位素等方面(Gil *et al.*, 2015a, 2015b)也有区别,它们的微量元素 Cr、Ni、Co 的含量和 Fe/Mg 值可以鉴别其成因类型(Harlow and Sorensen, 2005; Middleton, 2006; Liu *et al.*, 2011a, 2011b)。碧玉中全岩 Cr、Ni、Co 的含量一般会高于和田玉(Grapes and Yun, 2010; Liu *et al.*, 2011b; Kostov *et al.*, 2012; Siqin *et al.*, 2012);碧玉的 ^{18}O 值为 4.5‰ ~ 9.6‰, D 值为 -67‰ ~ -33‰(Yui *et al.*, 1988; Yui and Kwon, 2002),而和田玉的 ^{18}O 值为 -9.9‰ ~ 6.2‰, D 值为 -124‰ ~ -56‰(Yui and Kwon, 2002; Liu *et al.*, 2011a, 2011b; Adamo and Bocchio, 2013)。但这些参数可能会有重叠,因此在区别这两种软玉时需要多种测试方法和手段。已有文献(Harlow and Sorensen, 2005)表明,碧玉的出现与和田玉没有必

然的联系,只跟其产状和围岩有关。目前,碧玉的成因尚无统一认识。

传统意义上,和田玉主要产出于中国、俄罗斯、韩国、意大利的 Sondrio 矿床(Adamo and Bocchio, 2013)、瑞士的 Scortaseo 矿床(Dietrich and de Quervain, 1968; Adamo and Bocchio, 2013; Péterdi *et al.*, 2014)、德国的 Thuringia 和 Bavaria 矿床(Péterdi *et al.*, 2014)以及芬兰的 Usinmaki 和 Pakila 矿床(Gunia, 2000)。碧玉主要产出于俄罗斯、加拿大、新西兰、巴基斯坦等国(图1)。我国境内除了青海和新疆的玛纳斯外,其它区域目前尚未发现较大规模且具有开采价值的碧玉矿床。在和田玉矿床大量出现的西昆仑,一直没有碧玉矿床的相关报道。2012 ~ 2013 年期间,笔者对和田地区周边以及叶城、策勒、于田、且末、若羌等地进行了资料的查询和相关产出信息的追索,同时对和田地区地质志和地质资料进行了查阅,均未发现有碧玉矿化点的明确信息。直到 2014 年,据当地牧民报道,在且末县阿尔金山断裂附近发现一些疑似碧玉矿化点,但其到底是和田玉的青玉还是碧玉,并不清楚。2014 年底,笔者联合和田地质大队一起对该地区进行了实地勘察,初步确认该矿化点属于碧玉矿点。鉴于该处碧玉与和田玉青玉在手标本下无法明确区分,且野外地质



图1 世界上主要和田玉和碧玉矿床的分布(据 Harlow 和 Sorensen, 2005)

Fig. 1 Distribution of main nephrite deposits from dolomite and serpentinite in the world (after Harlow and Sorensen, 2005)

情况较为复杂,因此本次研究在该矿点详细地质调查的基础上进行了围岩和玉石样品采集,对该样品进行了详细的实验测试分析,针对玉石成矿时代、成矿流体组成、物质来源和成因进行了综合研究。本次研究不仅为碧玉成因提供了实例,而且为在西昆仑进行碧玉找矿提供了思路。

1 区域地质背景

研究区位于阿尔金山南缘深断裂的南侧(图2),由茫崖向西至克拉永古地段均有超镁铁岩断续出露(长约170 km)。已发现岩体43个,聚集成5个岩体群,由西向东分别为克拉永古(岩体12个,面积1.86 km²)、艾勒马拉克(岩体2个,面积5.3 km²)、苏巴里克(岩体14个,面积3.56 km²)、曼达里克(岩体10个,面积1.62 km²)、茫崖(岩体5个,面积8.47 km²)等岩体群,总面积20.8 km²。岩体均为较小的透镜状,赋存于凝灰岩、千枚岩、大理岩中。岩性为深度蛇纹石化的斜辉辉橄岩、斜辉橄橄岩,偶见辉长岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1982)。根据本

文3个样品的分析结果,岩体的主量元素($w_B/\%$)平均为: SiO₂ 44.33、TiO₂ 0.08、Al₂O₃ 1.20、Cr₂O₃ 0.31、Fe₂O₃ 4.74、FeO 4.71、MnO 0.10、CoO 0.017、MgO 42.93、NiO 0.27、CaO 0.79、Na₂O 0.20、K₂O 0.10、P₂O₅ 0.03、SO₃ 0.29、H₂O⁺ 13.60,总和100.00。斜辉辉橄岩的 $m/f=7.85$,属镁质,铝较低。本带超镁铁岩体以盛产温石棉著名,铬铁矿化极少,与新疆其它蛇绿岩带不同。这些超镁铁岩的出现为碧玉的形成提供了物质基础。

该区域主要发育4种岩石类型:碧玉岩、蚀变闪长岩、大理岩、黑云母阳起石片岩,其中碧玉岩主要呈交代残余结构、碎裂或碎斑结构。两种产出较广的岩石具有如下特征:

蚀变闪长岩,所含矿物种类为阳起石(约40%)、黑云母(3%~5%)、斜长石(35%~40%)、残余角闪石(约5%)、方解石(约10%)、不透明矿物(2%~5%)、榍石(3%~5%)。其中阳起石呈浅黄绿色,细长柱状、纤柱状、粒状等,直径一般<0.7 mm,呈堆状、条纹状聚集或束状聚集;黑云母呈棕色,鳞片-叶片状,片径多<1.0 mm,局部绿泥石化,与

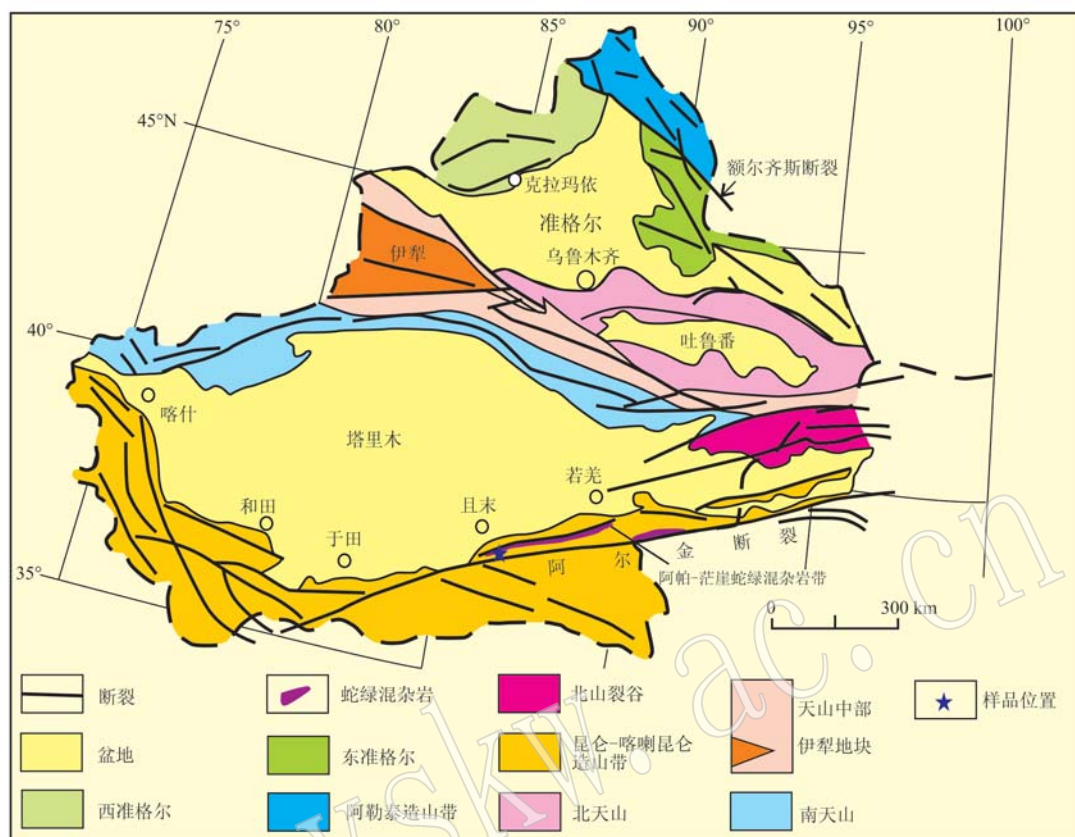


图2 新疆构造地质简图(改自 Pirajno 等, 2008)

Fig. 2 Simplified geological map of Xinjiang (modified after Pirajno *et al.*, 2008)

阳起石混杂在一起呈条带状聚集;斜长石呈它形粒状,被绢云母、绿帘石交代,显示明显的绢云母化、绿帘石化特征,随着后期构造破碎,再次被方解石、磁黄铁矿交代;榍石呈粒状、星散状定向分布,核部偶见有钛铁矿残留;方解石呈它形粒状,粒径为0.1~2.0 mm不等,集合体多呈条纹状、细脉状等,零散可见,常包含有角闪石、斜长石、榍石等。此外,还含有磁黄铁矿,呈星散状分布于其他矿物中。

黑云母阳起石片岩,其中黑云母呈棕色,鳞片-叶片状,片径多<1.0 mm,少数为1.0~1.5 mm,呈条带状聚集,部分黑云母中镶嵌有榍石、磷灰石,少量黑云母叶片显轻微弯曲状;阳起石呈浅黄绿色,纤柱状、细长柱状等,直径一般0.03~1.0 mm不等,集合体呈条带状、似透镜状等定向分布,偶见纤柱状阳起石呈束状集合体分布,且有少量黑云母混杂于阳起石条带内(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1982)。

野外工作发现,目前已有的碧玉露头 and 开采点

一共有两个,面积约为50 m²。矿区及其周围大量分布着黑云母阳起石片岩,覆盖在大理岩、碧玉岩和蚀变的花岗闪长岩顶部。野外观察发现,碧玉的产出与大理岩和蚀变的花岗闪长岩接触关系密切,常产于两者的接触带中(图3a)。大理岩由较为细粒的菱镁矿、白云石和滑石组成(图3b、3c)。碧玉纤维化强烈、透明度差、色调偏暗(图3c、3d),很难作为高档碧玉开采。

2 样品及测试分析

2.1 样品基本特征

与其它碧玉矿床相比,且末的碧玉矿点出产高品质碧玉数量极为有限,碧玉样品片理化严重,而且样品中含有大量的铬铁矿,因此样品整体颜色发黑。为了研究碧玉样品的成因,研究中选取同一个剖面(图3a)中的闪长岩、闪长岩和大理岩的接触带(图3c)、大理岩(图3b)和碧玉(图3d)多块样

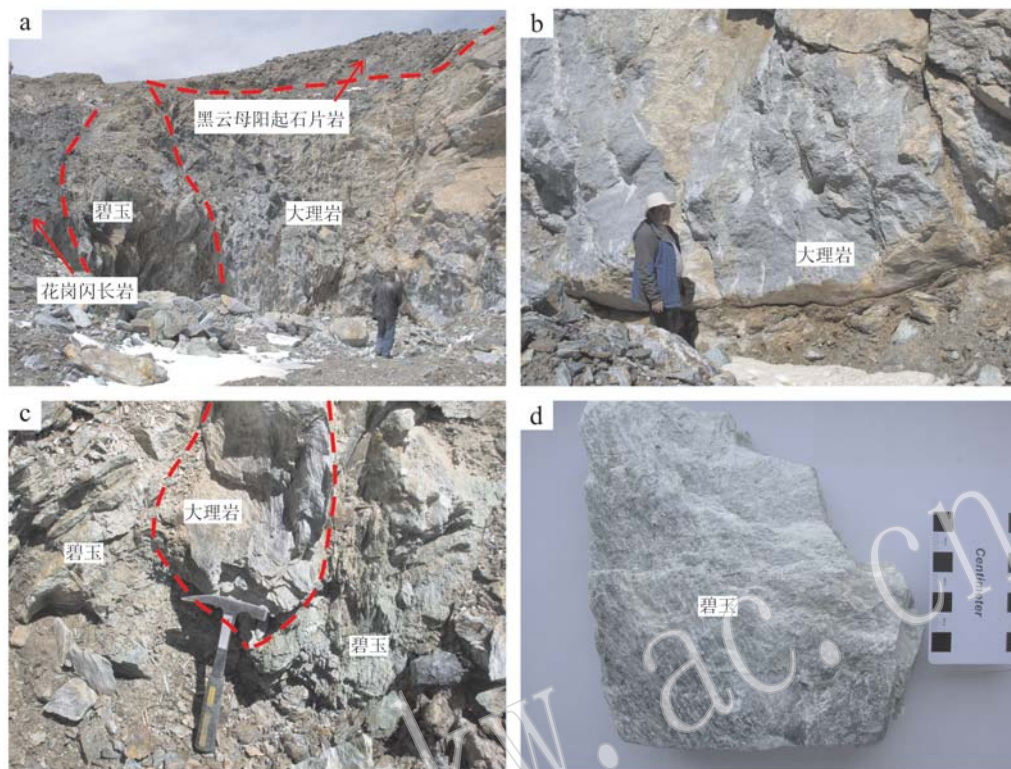


图3 且末碧玉矿产状

Fig. 3 The modes of occurrence of the serpentinite-related nephrite deposit

a—且末碧玉矿点; b—碧玉矿点中的大理岩; c—碧玉矿点中蚀变闪长岩与碧玉的接触带; d—碧玉样品
a—serpentinite-related nephrite pit in Qiemo; b—marble in the serpentinite-related nephrite pit; c—contact between altered granodiorite and serpentinite-related nephrite; d—sample of serpentinite-related nephrite

品进行分析。

2.2 X射线粉晶衍射(XRD)分析

采用X射线粉晶衍射对大理岩(QMDM-1、QMDM-2、QMDM-3)进行了矿物组成的分析。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CuK α 1辐射,持续扫描,电压40 kV,电流80 mA,扫描速度8°/min,光栅DS=SS=1°,环境温度18℃,湿度30%。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。

2.3 电子探针测试

在中国地质科学院矿产资源研究所用JXA-8230电子探针分析对碧玉岩中的透闪石进行了主量元素分析,电压15 kV,电流20 nA,束斑直径5 μ m。

2.4 全岩主微量元素分析

在中国地质科学院国家地质测试中心对碧玉岩(QMBY-1、QMBY-2、QMBY-3、QMBY-4、QMBY-5)、蚀

变闪长岩(QMHST-1、QMHST-2、QMHST-3)和大理岩(QMDM-1、QMDM-2、QMDM-3)的全岩主量和微量元素进行了分析。将全岩粉末样品(0.7 g)与5.3 g的Li₂B₄O₇、0.4 g的LiF、0.3 g的NH₄NO₃在25 mL的瓷坩埚中混合,混合后粉末转移到铂合金干坩埚中,把1 mL LiBr溶液加入到坩埚中,之后将样品干燥。在自动焰熔机内,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,FeO含量采用化学滴定法分析,分析误差在2%以下。微量元素分析步骤:将25 mg的全岩粉末溶解在1 mL纯净的HF和0.5 mLHNO₃中,并在15 mL的Saville Teflon螺旋盖胶囊和190℃环境中放置1 d,干燥,与0.5 mL的HNO₃混匀,再次干燥,确保完全混匀,之后将样品与5 mL的HNO₃混匀,密封在130℃的烤炉中3 h,待冷却下来后,将溶液转移到塑料瓶中,分析之前稀释到25 mL。运用电感耦合等离子体质谱仪分析样品溶液的微量元素,分析精度 $\leq 5\%$ 。

2.5 氧同位素分析

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对碧玉岩(QMBY-1、QMBY-3、QMBY-5)、蚀变闪长岩(QMHST-1、QMHST-2、QMHST-3)和大理岩(QMDM-1、QMDM-2、QMDM-3)采用 MAT-252 质谱进行了氧同位素分析。氧同位素通过与 BrF_5 进行反应释放出来(Clayton and Mayeda, 1963)并通过一个有铂金层的碳棒转化成 CO_2 。样品表面气体通过在 120°C 真空加热 3 h 去除。

2.6 SHRIMP U-Pb 锆石定年

对蚀变闪长岩(QMHST-1、QMHST-2)中的锆石进行 SHRIMP U-Pb 定年。锆石分离和 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,其中包括岩石粉碎、筛选、清洗、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。锆石样品和标样 TEMORA1 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $416.8 \pm 1.3 \text{ Ma}$)和 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)。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见文献(Compston *et al.*, 1992; Stern, 1998; Black *et al.*, 2003)。数据处理与修正基于 SQUID 1.0 (Ludwig, 2001)和 ISOPLOT/Ex 软件(Ludwig, 2003)。

2.7 Ar-Ar 定年

对矿床中接触带的黑云母样品进行 Ar-Ar 年龄分析。将新鲜样品磨碎,选出粒度介于 60 ~ 80 目的黑云母样品(图 3d)。在双目显微镜下手工挑选后,放入丙酮用超声波清洗直至干净。烘干后,将样品用铝箔包好,与白云母标样 Bern4M 以及用于 K、Ca 干扰校正的 CaF_2 和 K_2SO_4 一起抽真空密封于石英玻璃管中,送往中国原子能科学院 49-2 反应堆的 B4 孔道照射 31 h。照射过程中石英玻璃管外覆一层 0.5 mm 厚的镅片以屏蔽慢中子。样品照射后,冷却 3 个月。在中国科学院地质与地球物理研究所的古地磁与年代学实验室用 MM5400 质谱计进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温法定年。实验数据处理使用 ArArCALC 软件(张凡等, 2009)。数据经过本底校正,质量歧视校正, K、Ca 校正和 ^{39}Ar 、 ^{37}Ar 衰变校正后,经计算得到视年龄。其中,衰变常数采用 $\lambda =$

$(5.543 \pm 0.010) \times 10^{-10}/\text{a}$,白云母标样 Bern4M 的年龄为 $18.70 \pm 0.06 \text{ Ma}$,对 CaF_2 和 K_2SO_4 测定得到 K 和 Ca 干扰同位素的校正因子为: $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 3.3 \times 10^{-4}$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 8.52 \times 10^{-4}$, $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.69 \times 10^{-4}$ 。具体的实验流程和数据处理方式见 He 等(2006)。

3 测试结果

3.1 岩相学研究

通过手标本观察、显微和背散射图像(BSE)分析,发现碧玉主要是由透闪石(阳起石)组成,偶见铬铁矿(图 4)。这种矿物组成在和田玉中很少出现,主要原因是和田玉是由花岗岩或者花岗闪长岩侵入到大理岩中形成的,而这两种岩石中很少有铬铁矿出现。

3.2 X 射线粉晶衍射分析

根据 XRD 结果,且末大理岩围岩主要由菱镁矿、滑石、绿泥石、白云石和少量的软水铝石($<1.9\%$)组成(表 1),并不含有铬铁矿等矿物。花岗岩中一般较少出现铬铁矿,因此区域中碧玉中大量的铬铁矿很可能来自于蛇纹岩。

3.3 全岩化学成分分析

且末碧玉中 TFe_2O_3 含量($5.02\% \sim 6.50\%$)(表 2)远远高于阿拉玛斯和田玉矿床中的白玉、青玉中的 TFe_2O_3 含量($0.41\% \sim 1.96\%$)(Liu *et al.*, 2011a)和次生矿床中绿色和田玉的 TFe_2O_3 含量($0.77\% \sim 3.97\%$)(Liu *et al.*, 2016),但与次生矿床中黑色和田玉相比, TFe_2O_3 含量($0.56\% \sim 16.23\%$)有重叠范围(Liu *et al.*, 2016)。矿区范围内大量的镁质大理岩围岩,其中含有大量的 SiO_2 ($33.10\% \sim 44.80\%$)和 MgO ($31.90\% \sim 33.60\%$),但其 CaO 含量很低($1.22\% \sim 3.05\%$)。

与新疆阿拉玛斯和田玉相比,且末碧玉中 Cr ($867 \times 10^{-6} \sim 2418 \times 10^{-6}$)、Ni ($960.0 \times 10^{-6} \sim 1662.0 \times 10^{-6}$)含量远远高于阿拉玛斯矿床中和田玉的相关含量($\text{Cr} = 13.02 \times 10^{-6} \sim 178.70 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 0.05 \times 10^{-6} \sim 3.95 \times 10^{-6}$)(Liu *et al.*, 2011a)(表 3)。

3.4 电子探针测试分析

且末碧玉中透闪石的 Si 单个化学式中矿物的分

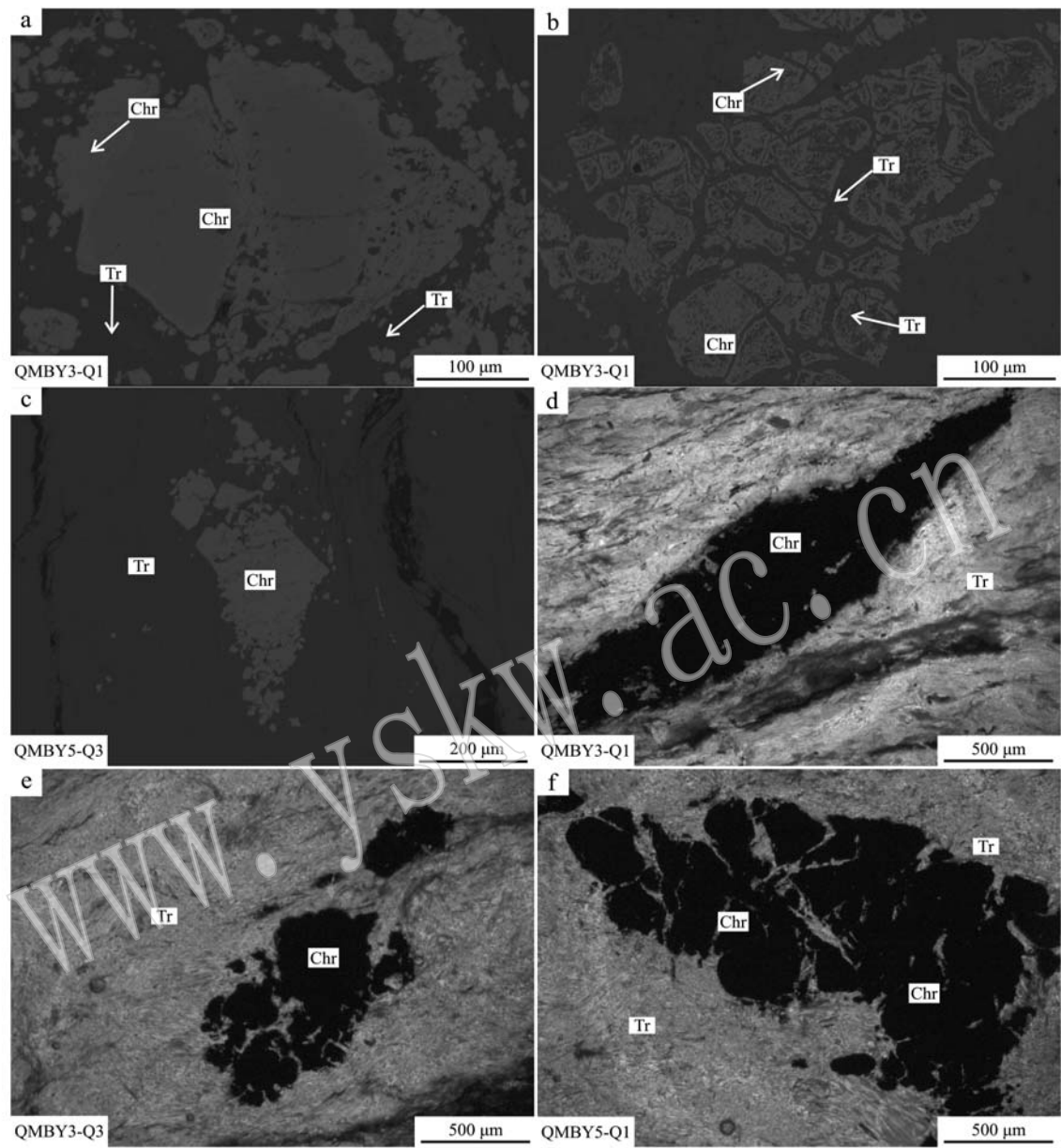


图 4 新疆且末碧玉的背散射和显微镜正交偏光下照片

Fig. 4 Backscattered electron images and microscope photograph of serpentinite-related nephrite
a、b—中间大颗粒灰色铬铁矿与透闪石(背散射图像); c—透闪石沿铬铁矿裂隙充填(背散射图像); d、e、f—显微镜下铬铁矿与透闪石(正交偏光); Chr—铬铁矿; Tr—透闪石
a, b—coarse-grained chromite and fine-grained tremolite (BSE images); c—tremolite filled in fissures of chromite grains;
d, e, f—chromite and tremolite under microscope(crossed nicols); Chr—chromite; Tr—tremolite

表 1 且末碧玉矿床赋围岩(灰色大理岩)的矿物组成及含量

Table 1 The mineral composition of marble in Qiemo deposit

样品编号	QMDM-1	QMDM-2	QMDM-3
菱镁矿	45.7	63.9	65.3
白云石	8.2	15.5	5.5
滑石	35.6	12.6	18.3
软水铝石	0.0	0.0	1.9
绿泥石	10.5	8.0	9.0
总计	100.0	100.0	100.0

子数(a. p. f. u.)为 7.53 ~ 7.97, $\text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 值为 0.11 ~ 0.17, Cr_2O_3 为 0.08% ~ 1.65%, NiO 为 0.18% ~ 0.23% (表 4)。测试结果显示碧玉主要由阳起石和透闪石组成。

3.5 氧同位素分析

且末碧玉矿床中阳起石的氧同位素比较稳定 ($\delta^{18}\text{O} = 15.2\text{‰} \sim 15.4\text{‰}$) (表 5), 显著高于阿拉玛斯和田玉矿床中透闪石的氧同位素 ($\delta^{18}\text{O} = 3.20\text{‰} \sim$

表2 且末碧玉、蚀变闪长岩和灰色大理岩主量元素分析结果

 $w_B/\%$

Table 2 The major element composition of serpentinite-related nephrite, altered diorite and marble examined by XRF from Qiemo

岩性	碧玉					蚀变闪长岩			灰色大理岩		
样品	QMBY-1	QMBY-2	QMBY-3	QMBY-4	QMBY-5	QMHST-1	QMHST-2	QMHST-3	QMDM-1	QMDM-2	QMDM-3
SiO ₂	56.80	56.90	56.60	56.40	56.10	38.00	40.90	38.70	44.80	33.80	33.10
Al ₂ O ₃	0.48	0.49	0.58	0.79	0.89	19.60	17.20	20.90	0.69	0.61	0.76
CaO	13.10	13.00	12.90	13.00	13.00	18.20	15.30	16.60	1.22	3.05	1.30
Fe ₂ O ₃	1.50	1.62	1.03	0.80	1.00	0.40	1.25	0.42	0.43	0.08	0.16
FeO	3.56	3.92	3.99	5.14	5.50	5.82	6.43	5.28	4.60	5.38	5.89
Fe ₂ O ₃ ^T	5.06	5.54	5.02	5.94	6.50	6.22	7.68	5.70	5.03	5.46	6.05
K ₂ O	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	1.31	2.12	1.85	0.04	0.04	0.04
MgO	21.50	21.40	21.70	20.50	20.30	2.87	5.70	2.29	31.90	32.90	33.60
MnO	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.17	0.19	0.16	0.03	0.06	0.04
Na ₂ O	<0.01	<0.01	<0.01	0.07	<0.01	0.92	0.57	1.08	<0.01	<0.01	<0.01
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.43	0.27	0.05	<0.01	0.01	<0.01
TiO ₂	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	1.21	0.93	0.94	0.03	0.02	0.02
CO ₂	0.19	0.24	0.19	0.22	0.26	5.31	4.62	5.99	14.00	21.70	20.20
H ₂ O ⁺	0.36	0.60	0.58	0.24	0.28	1.92	2.04	1.78	1.84	1.80	1.86
LOI	1.66	1.69	1.89	1.64	1.61	6.39	6.41	7.48	15.00	22.60	23.50
总量	97.66	98.34	97.75	97.34	97.52	96.16	97.52	96.04	99.58	99.45	96.97

表3 且末碧玉、蚀变闪长岩、大理岩微量元素数据表

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 The trace element composition of serpentinite-related nephrite, altered diorite and marble from the Qiemo deposit

岩性	碧玉					蚀变闪长岩			大理岩		
样品	QMBY-1	QMBY-2	QMBY-3	QMBY-4	QMBY-5	QMHST-1	QMHST-2	QMHST-3	QMDM-1	QMDM-2	QMDM-3
La	<0.05	0.37	0.13	<0.05	<0.05	65.00	50.30	50.70	0.08	0.06	0.07
Ce	0.05	0.47	0.21	0.08	0.08	118.00	95.40	98.40	0.11	0.09	0.09
Pr	<0.05	0.07	<0.05	<0.05	<0.05	13.50	10.40	10.80	<0.05	<0.05	<0.05
Nd	<0.05	0.32	0.15	<0.05	<0.05	52.10	39.80	41.90	0.06	<0.05	<0.05
Sm	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	10.20	8.27	7.96	<0.05	<0.05	<0.05
Eu	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	2.22	1.85	1.68	<0.05	<0.05	<0.05
Gd	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	10.10	7.95	7.46	<0.05	<0.05	<0.05
Tb	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	1.51	1.17	1.15	<0.05	<0.05	<0.05
Dy	<0.05	0.08	0.08	<0.05	<0.05	9.54	7.08	7.00	<0.05	<0.05	<0.05
Ho	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	1.96	1.47	1.44	<0.05	<0.05	<0.05
Er	<0.05	0.06	0.07	<0.05	<0.05	5.67	4.37	4.31	<0.05	<0.05	<0.05
Tm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.82	0.63	0.64	<0.05	<0.05	<0.05
Yb	0.05	0.09	0.09	<0.05	<0.05	5.28	4.28	4.13	<0.05	<0.05	<0.05
Lu	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.80	0.66	0.64	<0.05	<0.05	<0.05
Sc	7.30	5.49	4.01	4.70	4.65	25.40	21.40	18.70	7.87	7.83	8.08
Y	0.40	0.54	0.61	0.26	0.25	59.20	43.00	39.00	0.13	0.11	0.11
Cr	1 820	867	2 418	1 558	1 439	155	113	107	2 168	2 036	2 415
Ni	1 662.0	960.0	1 474.0	1 246.0	1 448.0	85.8	177.0	53.5	1 911.0	1 403.0	1 933.0
Rb	0.09	0.14	0.19	0.12	0.09	61.80	71.00	78.50	0.06	0.05	0.08
Sr	4.03	6.59	4.88	4.83	4.69	614.00	382.00	569.00	8.28	23.90	5.41
Ba	1.10	0.91	1.14	1.01	0.93	293.00	344.00	370.00	0.83	1.36	0.62
Th	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	21.4	16.5	16.6	<0.05	<0.05	<0.05
U	<0.05	0.15	0.06	0.10	0.11	7.33	5.14	3.92	<0.05	<0.05	<0.05
Pb	1.24	1.94	0.88	0.73	0.67	23.50	16.40	31.70	0.58	0.63	0.48
Nb	0.20	0.51	0.40	0.33	0.30	20.80	15.10	17.10	0.18	0.13	0.13
Ta	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	1.86	1.14	1.42	<0.05	<0.05	<0.05
Zr	0.34	0.61	0.72	0.65	0.84	267.00	193.00	219.00	0.15	0.10	0.16

续表 3

Continued Table 3

岩性	碧玉					蚀变闪长岩			大理岩		
样品	QMBY-1	QMBY-2	QMBY-3	QMBY-4	QMBY-5	QMHST-1	QMHST-2	QMHST-3	QMDM-1	QMDM-2	QMDM-3
Hf	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	7.61	5.61	6.10	<0.05	<0.05	<0.05
Be	0.20	0.47	0.64	0.24	0.26	2.18	1.89	1.98	0.07	0.16	0.10
V	22.5	21.1	22.3	23.1	24.2	313.0	289.0	2 270.0	30.2	27.0	36.3
Cu	0.43	0.21	0.81	0.59	0.22	157.00	48.70	173.00	7.55	4.28	6.15
Zn	79.8	92.0	96.6	91.2	93.9	52.1	78.7	38.4	28.3	26.9	24.8
Ga	0.63	0.63	0.61	1.12	1.26	29.90	27.60	29.50	1.36	0.50	0.75
Mo	0.27	0.17	0.26	0.25	0.24	3.08	2.92	1.47	0.34	0.25	0.33
Cd	0.29	0.31	0.26	0.31	0.30	0.52	0.54	0.51	<0.05	<0.05	<0.05
In	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.13	0.12	0.11	<0.05	<0.05	<0.05
Cs	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	8.12	5.56	10.1	<0.05	0.06	<0.05
W	0.15	0.62	0.27	0.13	0.09	0.47	0.37	0.38	0.56	0.17	0.21
Tl	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.14	0.19	0.15	<0.05	<0.05	<0.05
Bi	<0.05	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	0.20	0.13	0.26	0.18	<0.05	<0.05

表 4 且末碧玉的电子探针成分分析数据表

$w_B/10^{-6}$

Table 4 The data of electron microprobe analysis (EPMA) from Qiemo nephrite

样品	QMBY-1 -1-1	QMBY-1 -1-2	QMBY-1 -2-1	QMBY-1 -2-2	QMBY-3 -2-1	QMBY-3 -2-2	QMBY-5 -1-1	QMBY-5 -1-2	QMBY-5 -2-1	QMBY-5 -2-2	QMBY- 2-1	QMBY- 2-2
Na ₂ O	0.01	0.06	0.04	0.05	0.03	0.06	0.25	0.21	0.04	0.04	0.03	0.01
MgO	21.50	20.90	21.60	21.60	22.00	21.50	18.50	21.70	20.30	19.40	21.80	21.90
Al ₂ O ₃	0.17	0.30	0.40	0.39	0.20	0.74	3.47	3.59	0.86	0.77	0.34	0.36
K ₂ O	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05	0.00	0.03	0.01	0.01
SiO ₂	56.40	56.40	58.00	56.60	57.50	56.60	53.90	54.80	57.00	56.80	56.20	57.60
CaO	12.50	12.50	13.10	13.30	13.20	12.60	13.10	10.70	13.30	13.00	13.00	13.10
FeO	4.68	4.70	4.85	4.94	4.79	5.14	6.80	6.23	6.59	6.65	5.24	5.13
MnO	0.17	0.13	0.10	0.19	0.15	0.14	0.11	0.19	0.15	0.10	0.09	0.09
TiO ₂	0.07	0.00	0.04	0.02	0.00	0.01	0.07	0.13	0.00	0.00	0.08	0.08
NiO	0.19	0.25	0.19	0.22	0.18	0.20	0.14	0.20	0.22	0.23	0.20	0.14
Cr ₂ O ₃	0.15	0.11	0.20	0.30	0.09	0.26	1.65	1.45	0.22	0.22	0.15	0.08
V ₂ O ₃	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
Total	95.80	95.30	98.50	97.70	98.10	97.30	98.10	99.20	98.60	97.30	97.10	98.50
Fe/(Fe + Mg)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.17	0.14	0.15	0.16	0.12	0.12
Mg/(Mg + Fe ²⁺)	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88	0.83	0.86	0.85	0.84	0.88	0.88

6.10‰)(Liu *et al.*, 2011a)及墨玉河矿床中透闪石的氧同位素($\delta^{18}\text{O} = 0.80\text{‰} \sim 7.90\text{‰}$)(Liu *et al.*, 2016)。且末碧玉矿区中大理岩和黑色侵入岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为15.2‰~15.9‰和14.3‰~14.7‰(表5)。

3.6 侵入岩年龄及碧玉年龄

以往研究尚未对碧玉矿床进行过测年,随着测试技术的发展和和田玉研究的不断深入,和田玉矿床的形成年龄越来越受到关注(Liu *et al.*, 2015, 2016)。本次研究并未在碧玉中找到锆石,为了约束碧玉的形成年龄,在黑色蚀变闪长岩中挑选了大量的锆石进行年代学研究,结果表明,两个蚀变闪长岩样品中锆石的谐和年龄分别为 $267 \pm 15 \text{ Ma}$ ($n=5$)和 $272 \pm 13 \text{ Ma}$ ($n=6$)(图5、表6)。

表 5 且末碧玉透闪石氧同位素数据表

Table 5 The oxygen isotope composition of tremolite in nephrite from the Qiemo deposit

样品编号	样品名称	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
QMBY-1	阳起石	15.3
QMBY-3	阳起石	15.4
QMBY-5	阳起石	15.3
QMHST-1	蚀变闪长岩	14.7
QMHST-2	蚀变闪长岩	14.6
QMHST-3	蚀变闪长岩	14.3
QMDM-1	大理岩	15.2
QMDM-2	大理岩	15.9
QMDM-3	大理岩	15.5

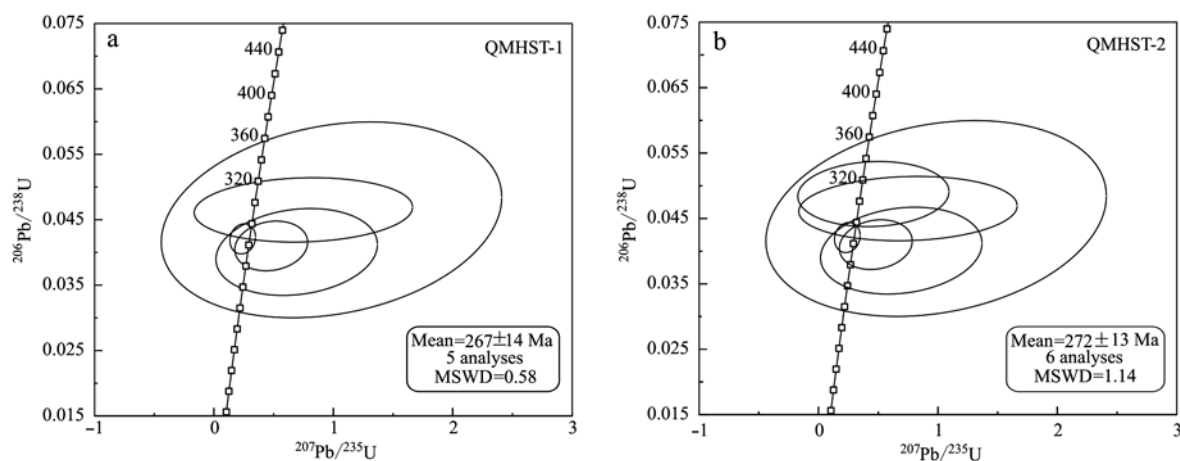


图5 且末碧玉矿床蚀变闪长岩的锆石 Shrimp U-Pb 年龄

Fig. 5 SHRIMP U-Pb zircon age diagram of altered diorite from the Qiemo deposit

表6 且末碧玉矿床中蚀变花岗岩中锆石 Shrimp U-Pb 年龄表

Table 6 SHRIMP U-Pb zircon age diagram of altered diorite from the Qiemo deposit

测点号	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$
1	0.18	340.0	97.0	41.8	0.29	0.07	1.2	1.39	1.8	0.14	1.3	861 ± 10.0
2	0.81	169.0	48.5	15.9	0.30	0.07	4.2	0.98	4.5	0.11	1.5	662 ± 9.7
3	15.40	583.0	109.0	30.7	0.19	0.05	34.0	0.38	34.0	0.05	2.3	326 ± 7.3
4	1.35	134.0	72.2	17.6	0.56	0.07	3.8	1.48	4.1	0.15	1.5	906 ± 13.0
5	0.00	853.0	111.0	42.8	0.13	0.05	1.3	0.43	1.8	0.06	1.2	366 ± 4.4
6	0.53	1701.0	27.9	94.5	0.02	0.06	1.5	0.50	1.9	0.06	1.2	402 ± 4.7
7	17.40	316.0	72.9	25.1	0.24	0.06	33.0	0.62	33.0	0.08	2.3	474 ± 11.0
8	18.80	869.0	127.0	141.0	0.15	0.07	23.0	1.55	23.0	0.15	2.2	917 ± 19.0
9	0.05	272.0	274.0	39.9	1.04	0.07	1.3	1.72	1.8	0.17	1.3	1015 ± 12.0
10	0.21	873.0	372.0	41.3	0.44	0.05	1.4	0.40	1.9	0.05	1.2	345 ± 4.1
11	0.88	102.0	14.8	10.6	0.15	0.06	4.7	1.04	5.0	0.12	1.6	728 ± 11.0
12	0.10	204.0	37.9	64.2	0.19	0.12	1.2	6.03	1.8	0.37	1.3	2014 ± 23.0
13	51.90	5.1	0.9	0.3	0.18	0.58	18.0	2.33	33.0	0.03	28.0	186 ± 51.0
14	0.03	804.0	222.0	93.6	0.28	0.07	0.7	1.22	1.4	0.14	1.2	819 ± 9.3
15	9.04	44.9	23.2	2.9	0.53	0.06	55.0	0.57	56.0	0.07	3.7	432 ± 15.0
16	0.44	44.1	16.3	4.1	0.38	0.06	5.7	0.87	6.1	0.11	2.2	656 ± 13.0
17	20.20	1.8	0.1	0.1	0.06	0.16	93.0	0.98	96.0	0.05	22.0	284 ± 61.0
18	41.30	145.0	15.8	9.8	0.11	0.12	80.0	0.75	81.0	0.05	7.0	293 ± 20.0
19	4.24	70.2	9.5	4.4	0.14	0.05	45.0	0.49	45.0	0.07	3.1	434 ± 13.0
20	59.70	0.7	0.0	0.1	0.04	0.35	83.0	4.20	97.0	0.09	51.0	541 ± 270.0
21	3.28	13.0	0.2	0.5	0.01	0.04	29.0	0.24	29.0	0.04	3.6	266 ± 9.4
22	9.52	59.0	9.0	6.0	0.16	0.06	48.0	0.81	48.0	0.11	2.8	652 ± 18.0
23	34.70	10.4	0.4	0.6	0.04	0.13	63.0	0.69	64.0	0.04	11.0	253 ± 27.0
24	35.70	32.3	2.8	2.6	0.09	0.17	48.0	1.42	49.0	0.06	6.2	383 ± 23.0
25	8.74	15.5	0.2	0.7	0.01	0.07	91.0	0.46	91.0	0.05	6.7	307 ± 20.0
26	8.51	6.1	0.1	0.2	0.01	0.09	42.0	0.48	42.0	0.04	6.1	259 ± 16.0
27	1.32	69.8	28.8	7.1	0.43	0.06	7.0	1.00	7.2	0.12	1.6	713 ± 11.0
28	35.20	0.7	0.0	0.1	0.04	0.26	77.0	3.10	83.0	0.09	32.0	549 ± 170.0

对且末碧玉和花岗闪长岩接触带的黑云母样品(QMYM-1)进行了 Ar-Ar 阶段加热分析,结果见表 7。在年龄谱图(图 6a)上,较低温度(<700℃)出现一些氩同位素的变化,说明载氩矿物外边缘有一定量的氩丢失,进而引起视年龄的波动(Faure, 1998)。中高温的视年龄具有平坦的坪年龄图谱,表明矿物内部的氩同位素组成稳定,同位素体系是封闭的,载氩矿物外部边缘氩的丢失并未影响矿物的内部。样品出现连续 11 释放过程产生 95% 以上的³⁹Ar 的坪年龄为 260.6 ± 1.5 Ma(MSWD = 0.64)(图 6)。该年龄与闪长岩的形成年龄 267 ± 15 Ma(*n* = 5)和 272 ± 13 Ma(*n* = 6)在误差范围内基本一致,因此碧玉的形成时代很可能在 260.6 Ma。

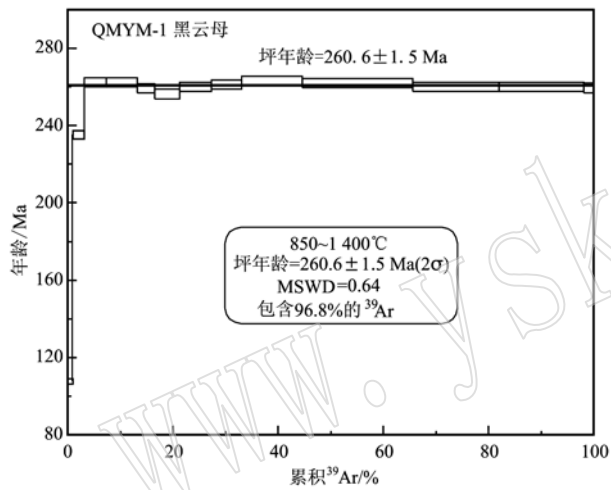


图 6 黑云母样品的⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄图
Fig. 6 ⁴⁰Ar-³⁹Ar plateau age diagram of biotite sample in Qiemu nephrite

4 讨论

4.1 且末软玉的类型

且末碧玉透闪石中 Si a. p. f. u (7.53 ~ 7.97) 与其他类似矿床中碧玉范围一致(图 7), Mg/(Mg + Fe²⁺) 的值(0.83 ~ 0.89)(表 4)接近于 0.9(图 7),也与其它碧玉矿床类似,如克鲁克斯山的碧玉(0.86 ~ 0.90)和新西兰碧玉(0.91 ~ 0.92)(Gil *et al.*, 2015b)(图 7)。与和田玉相比,如意大利 Val Malenco 和田玉中的阳起石[Mg/(Mg + Fe²⁺) ≈ 1.0](图 7),且末碧玉样品具有较低的 Si a. p. f. u 和 Mg/(Mg + Fe²⁺) 值。然而,有些数值在几个样品中是重叠的,例如 Si a. p. f. u 在 7.99 和 8.00 之间。Si 和 Mg/(Mg + Fe²⁺) 二元图解显示这类角闪石均为阳起石(图 7)。整体而言,且末碧玉组成主要是闪石类矿物。

Siqin 等(2012)在 Fe/(Fe + Mg) 和 FeO 图解中明确地划分出了碧玉和和田玉的范围。此前,波兰 Jordanów 矿床中的碧玉研究最为全面和详细,包括岩相学、矿物组成、成矿流体的 H-O 同位素方面,并与和田玉在地球化学方面进行了详细的比较(Gil *et al.*, 2015b)。本文将且末碧玉与 Jordanów 碧玉的 Fe/(Fe + Mg) 值和 FeO 含量做一比较(图 8)。且末碧玉全岩主量元素组分中 Fe/(Fe + Mg) 值在 0.11 ~ 0.17 之间,均大于 0.060(*n* = 5),该比值和 FeO 含量范围均比 Jordanów 碧玉的小,但数值都大于

表 7 黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 逐步加热阶段获得的年龄结果(样品 QMYM-1)
Table 7 ⁴⁰Ar-³⁹Ar step-heating results from biotite (sample QMYM-1)

<i>t</i> /℃	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	⁴⁰ Ar/%	F	³⁹ Ar/10 ⁻¹⁴ mol	³⁹ ArCum/%	<i>t</i> /Ma	± 1/Ma
680	772.075 2	2.519 5	0.000 0	0.460 9	3.57	27.543 6	0.03	0.04	155.0	50.0
770	48.016 2	0.098 7	0.000 0	0.030 2	39.26	18.849 9	0.54	0.95	107.7	1.4
820	57.895 6	0.051 5	0.000 0	0.021 9	73.70	42.667 6	1.33	3.18	235.1	2.2
850	56.807 8	0.029 9	0.000 0	0.017 9	84.44	47.970 8	2.50	7.38	262.3	2.4
880	51.674 8	0.012 6	0.000 0	0.014 4	92.80	47.956 7	3.45	13.16	262.3	2.4
910	52.131 3	0.016 1	0.000 0	0.015 7	90.88	47.377 7	2.03	16.56	259.3	2.4
940	50.190 7	0.011 5	0.000 0	0.015 4	93.21	46.782 1	2.82	21.29	256.3	2.4
970	48.727 7	0.004 0	0.000 0	0.013 1	97.57	47.541 3	3.62	27.36	260.2	2.4
1 020	48.630 1	0.003 0	0.000 0	0.013 1	98.18	47.745 5	3.45	33.15	261.2	2.4
1 070	48.678 5	0.001 8	0.000 0	0.012 8	98.87	48.130 0	6.85	44.63	263.2	2.5
1 120	48.270 6	0.001 2	0.000 0	0.012 8	99.28	47.924 3	12.50	65.59	262.1	2.4
1 170	48.028 6	0.001 6	0.000 0	0.012 8	98.98	47.540 8	9.82	82.05	260.2	2.4
1 230	47.994 5	0.001 7	0.000 0	0.012 6	98.97	47.501 0	9.60	98.16	260.0	2.4
1 400	56.106 5	0.029 4	0.000 0	0.016 7	84.52	47.422 4	1.10	100.00	259.5	2.4

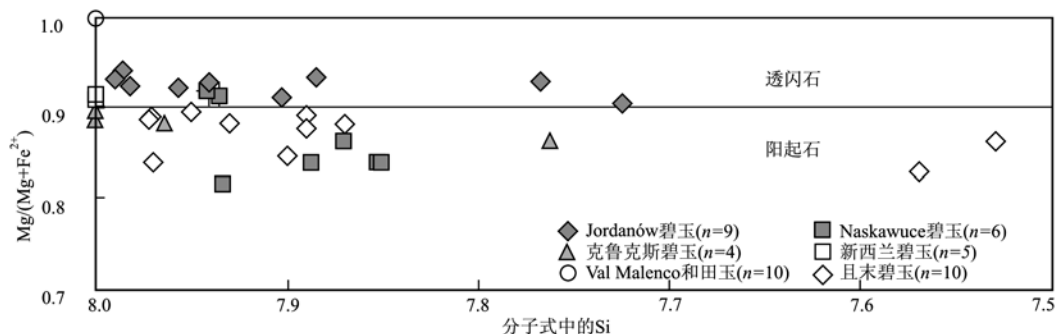


图7 世界主要软玉矿床中软玉的透闪石和阳起石分类(引自 Leake *et al.*, 1997)

Fig. 7 The classification of tremolite and actinolite in nephrite in the world(modified after Leake *et al.*, 1997)

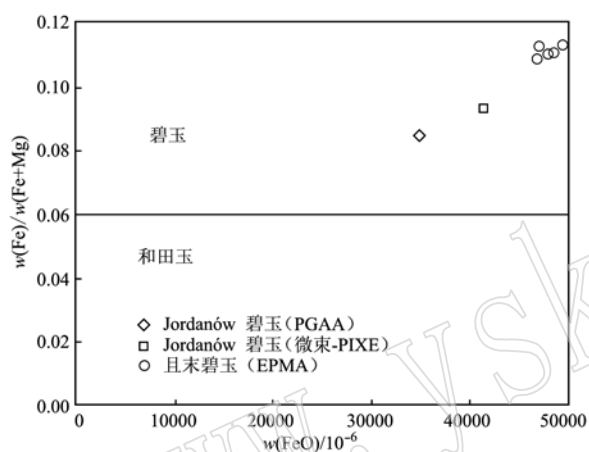


图8 且末碧玉与Jordanów碧玉全岩化学成分对比图
(引自 Siqin *et al.*, 2012)

Fig. 8 The comparison of bulk-rock chemical composition between Qiemu and Jordanów serpentinite-related nephrite
(modified after Siqin *et al.*, 2012)

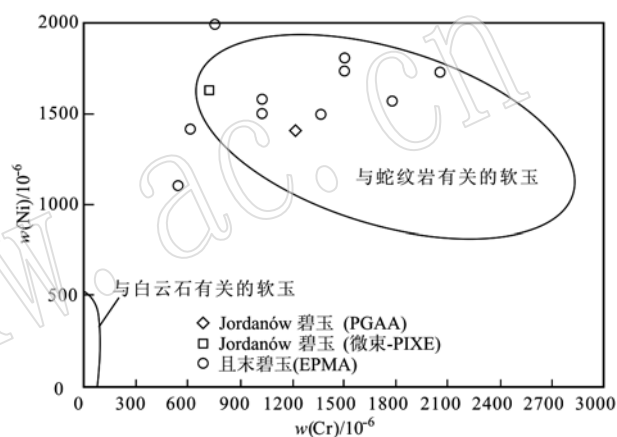


图9 Jordanów碧玉和且末碧玉矿床类型全岩
Cr、Ni 判别图(Adamo and Bocchio, 2013)

Fig. 9 Cr and Ni discrimination diagram from Jordanów and Qiemu nephrite bulk-rock (modified after Adamo and Bocchio, 2013)

Jordanów碧玉。Fe/(Fe + Mg) - FeO 图解显示且末碧玉和Jordanów碧玉组成相似,均属于碧玉(图8)。

另外,全岩微量元素中的Cr、Ni含量也表明且末软玉是碧玉(图9)。在且末碧玉样品中,Cr ($867 \times 10^{-6} \sim 2418 \times 10^{-6}$)和Ni ($960 \times 10^{-6} \sim 1662 \times 10^{-6}$)含量(表4)与其它碧玉中的含量是一致的,远远高于和田玉(Cr = $1.9 \times 10^{-6} \sim 178.7 \times 10^{-6}$)(表8)。全岩分析的Ni ($960 \times 10^{-6} \sim 1662 \times 10^{-6}$)(表4)含量与其它碧玉中的含量也一致(Ni = $958.7 \times 10^{-6} \sim 1898 \times 10^{-6}$),远远高于和田玉中的含量(Ni = $0.05 \times 10^{-6} \sim 470.7 \times 10^{-6}$)(表8)。与Jordanów软玉一样,在Cr - Ni判别图上,大多数且末软玉样品均落在了碧玉的范围内(图9),部分落在碧玉和和田玉之间的区域。

4.2 成矿时代约束

本文对在碧玉和闪长岩接触带中的部分黑云母进行了年龄厘定,结果显示黑云母的Ar-Ar年龄约为 260.2 ± 1.5 Ma,代表碧玉的形成年龄。闪长岩中的锆石年龄为 267 ± 14 Ma、 272 ± 14 Ma。碧玉的形成年龄和云母的形成年龄在误差范围内基本一致,表明它们形成于同一时间,并且闪长岩和碧玉的形成有直接关系。

4.3 碧玉物质来源及成矿过程

在且末碧玉矿床中,最大的特点是大理岩、蚀变闪长岩和碧玉均具有较高的氧同位素值。且末碧玉中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($15.2\text{‰} \sim 15.4\text{‰}$)(表5)与已经发表的碧玉氧同位素的值相比($+4.5\text{‰} \sim +9.6\text{‰}$)明显更高(表8),并且高于已经报道的其它和田玉的

表 8 碧玉和和田玉矿床的地球化学特征对比
Table 8 The comparison between serpentinite-related nephrites and dolomite-related nephrites in geochemistry

样品	特征	碧玉	和田玉
角闪石	w(Cr ₂ O ₃)/%	0.08~0.36 ^c ; 0.07~0.43 ^c ; 0.020~0.127 ^k 0.08~1.65 (本文)	0.39~1.14 ^d ; 0.00~0.07 ^e ; 0.03~1.18 ^f ; <0.05~0.09 ^j
	w(NiO)/%	0.08~0.25 ^c ; 0.08~0.36 ^c ; 0.14~0.22 (本文)	0.00~0.08 ^e ; <0.05~0.06 ^j
	δ ¹⁸ O/‰	4.5~5.3 ^a ; 6.9~9.6 ^b ; 15.2~15.4 (本文)	-9.9~-8.2 ^b ; 0.5~3.4 ^b ; 1.1~5.6 ^c ; 3.2~6.2 ^f
	δD/‰	-67~-33 ^a ; -54 ^l ~-39 ^b	-114~-105 ^b ; -124~-56 ^b ; -72.4~-55.7 ^c ; -94.7~-83.0 ^f ; -113±4.8 ⁱ
透辉石	w(Cr ₂ O ₃)/%	0.018~0.640 ^k	0.00~0.03 ^f
	w(Cr)/10 ⁻⁶	1 220~1 890 ^c ; 900~1 113 ^g ; 1 505.3~2 812.1 ^h	8.95~178.70 ^f ; 1.9~67.9 ^h
全岩	w(Ni)/10 ⁻⁶	1 199~1 484 ^c ; 1 887~1 898 ^g ; 958.7~1 304.4 ^h	0.05~3.95 ^f ; 22.2~470.7 ^h
	w(Co)/10 ⁻⁶	204~207 ^g ; 42.0~53.0 ^h	0.5~9.8 ^h
	Fe/(Mg+Fe ²⁺)值	>0.060 ^h ; 0.11~0.17 (本文)	<0.060 ^h

数据来源: a—Yui *et al.*, 1988; b—Yui and Kwon, 2002; c—Grapes and Yun, 2010; d—Liu *et al.*, 2010; e—Liu *et al.*, 2011a; f—Liu *et al.*, 2011b; g—Kostov *et al.*, 2012; h—Siqin *et al.*, 2012, Cr、Ni 和 Co 的质量分数重新计算; i—Adamo and Bocchio, 2013; j—Ling *et al.*, 2013; k—Gil *et al.*, 2015a, 2015b。

δ¹⁸O 值(-9.9‰ ~ 6.2‰; Yui *et al.*, 1988; Yui and Kwon *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2011a, 2011b) (表 8)。大理岩、闪长岩和碧玉具有相似的 δ¹⁸O 值表明很有可能它们在形成过程中都经历了同一种的流体蚀变。

以往研究认为蛇纹岩化晚期形成的碧玉所发生的交代作用是 SiO₂ 通过由绿泥石和绿泥石片岩组成的黑色围岩发生接触交代作用从异剥钙榴岩中迁移, 并且 Ca 也是通过黑色围岩的接触交代作用从异剥钙榴岩和/或蛇纹岩化的橄榄岩中迁移 (Harlow and Sorensen, 2005; Gil, 2013)。本次研究发现, 矿区中并不存在上述变质岩、围岩等接触带, 因此大理岩很可能为碧玉的形成提供了 Ca、Mg 物质来源。

另外一个特点, Cr、Ni 的含量在碧玉 (Cr = 867 × 10⁻⁶ ~ 1 820 × 10⁻⁶, Ni = 960 × 10⁻⁶ ~ 1 662 × 10⁻⁶)、镁质大理岩 (Cr = 2 036 × 10⁻⁶ ~ 2 418 × 10⁻⁶, Ni = 1 403 × 10⁻⁶ ~ 1 933 × 10⁻⁶) 和蚀变闪长岩中的数值 (Cr = 107 × 10⁻⁶ ~ 155 × 10⁻⁶, Ni = 53.5 × 10⁻⁶ ~ 85.8 × 10⁻⁶) 中都非常高。鉴于大理岩中没有铬铁矿、闪长岩中很少出现铬铁矿, 因此且末碧玉的形成与蛇纹岩、闪长岩和大理岩的接触变质有关。野外只有这 3 种岩石, 因此推测碧玉中高含量的 Cr 和 Ni 很可能都来自于蛇纹岩。

和田玉的形成与闪长岩或花岗闪长岩侵位大理岩有关, 能够形成不含铬铁矿、Cr 和 Ni 含量比较低的和田玉 (Harlow and Sorensen, 2005; Liu *et al.*, 2015, 2016)。在波兰境内相距约 50 km 的 Jordanów

和 Złoty Stok 软玉矿床中分别出现了两种类型的软玉, 而且具有相似的构造背景 (Gil, 2013; Gil *et al.*, 2015b)。根据已有研究, 碧玉和大理岩型软玉的成因明显不同, 在产状 (围岩) 上也明显不同, 因此碧玉的出现与和田玉的出现与否没有直接的关系。目前已经发现的碧玉和且末大理岩型金山软玉矿床存在约 50 km 的距离, 两者的类型完全不同, 很可能属于不同的矿带。野外考察发现, 蛇纹岩由茫崖向西至克拉永古地段均有断续出露, 长 170 km, 已发现岩体 43 个, 聚集成 5 个岩体群, 因此在此区域出现碧玉矿床并不罕见。

5 结论

(1) 对在且末县阿尔金断裂附近新发现的碧玉矿点进行了一系列分析测试, 发现且末碧玉中的 Cr、Ni 含量、氧同位素特征、Fe/(Fe + Mg) 值等地球化学特征与世界上其它典型碧玉样品一致。这些地球化学指标可以作为鉴定碧玉的主要特征之一。

(2) 为进一步研究碧玉的成因, 对围岩和碧玉样品的氧同位素和成矿时代进一步分析, 结果显示蚀变闪长岩、大理岩和碧玉的氧同位素特征基本一致, 闪长岩中锆石的形成年龄和与碧玉共生的黑云母年龄结果均为 260 Ma 左右, 说明碧玉的形成与蚀变闪长岩、镁质大理岩有关, 成矿流体与蛇纹岩有密切的关系。

(3) 且末碧玉的形成与蛇纹岩、闪长岩和大理

岩的接触变质有关,成矿流体主要由大理岩中的CO₂和蛇纹岩化橄榄岩中的蚀变流体组成,这些组分可能导致了碧玉具较高的氧同位素值。

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.
- Adamo I and Bocchio R. 2013. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and update[J]. *Gems and Gemology*, 49: 98 ~ 106.
- Aitchison J C, Ireland T R and Blake Jr. 1992. 530 Ma zircon age for ophiolite from the New England orogen: Oldest rocks known from eastern Australia[J]. *Geology*, 20: 125 ~ 128.
- Black L P, Kamob S L, Allenc C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200: 155 ~ 170.
- 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: 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*, 149: 171 ~ 184.
- 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.
- Faure G. 1998. Isotope geochronology and its applications to geology[J]. *Earth Science Frontiers*, 5 (1 ~ 2): 17 ~ 39.
- Geological and Mineral Resources Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1982. Regional Geological Records of Xinjiang Uygur Autonomous Region: Regional Geology [M]. Geology Publishing House, 32, 556 ~ 557 (in Chinese).
- Gil G. 2013. Petrographic and microprobe study of nephrites from Lower Silesia (SW Poland) [J]. *Geological Quarterly*, 57(3): 395 ~ 404.
- Gil G, Barnes J D, Boschi C, *et al.* 2015a. Nephrite from Złoty Stok (Sudetes, SW Poland): Petrological, geochemical and isotopic evidence for a dolomite-related origin[J]. *The Canadian Mineralogist*, 53: 533 ~ 556.
- Gil G, Baenes J D, Boschi C, *et al.* 2015b. Origin of serpentinite-related nephrite from Jordanów and adjacent areas (SW Poland) and its comparison with selected nephrite occurrences[J]. *Geological Quarterly*, 59(3): 457 ~ 472.
- 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.
- Gunia 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 jadeite) and serpentinite: Metasomatic connections [J]. *International Geology Review*, 47: 113 ~ 146.
- He H Y, Wang X L, Jin F, *et al.* 2006. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the early Jehol Biota from Fengning, Hebei Province, northern China[J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, doi: 10.1029/2005GC001083.
- Kostov R I, Prochev 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]. *American Mineralogist*, 82: 1 019 ~ 1 037.
- Ling X, Schmädicke E, Wu R, *et al.* 2013. Composition and distinction of white nephrite from Asian deposits[J]. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, 190/1: 49 ~ 65.
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2010. Chemical zone of nephrite in Alamas, Xinjiang, China[J]. *Resour. Geol.*, 60: 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: 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 Magnesium Skarn[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 699 ~ 727.

- Liu Y, Zhang R Q, Zhang Z Y, *et al.* 2015b. 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[J]. Berkeley Geochronology Center Special, 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.
- Middleton A. 2006. JADE-Geology and Mineralogy [A]. O'Donoghue M. Gems [C]. Oxford: Elsevier Ltd., 332 ~ 354.
- 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]. *Geostand Geoanal. Res.*, 32: 247 ~ 265.
- 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.
- Pirajno F, Mao J W and Zhang Z C. 2008. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tianshan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits [J]. *Asian Earth Sci.*, 32: 165 ~ 183.
- 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.
- 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]. 27: 241 ~ 268.
- Yui T F and Kwon S T. 2002. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea [J]. *Economic Geology*, 97: 593 ~ 601.
- Yui T F, Yeh H W, Lee C W, *et al.* 1988. Stable isotope studies of nephrite deposits from Fengtian, Taiwan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 593 ~ 602.
- Zhang Fan, Qiu Huaning, He Huanyu, *et al.* 2009. Brief introduction to ArArCALC-Software for data reduction $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology [J]. *Geochimica*, 38 (1): 53 ~ 56 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1982. 新疆维吾尔自治区区域地质志: 区域地质 [M]. 北京: 地质出版社, 32, 556 ~ 557.
- 张凡, 邱华宁, 贺怀宇, 等. 2009. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学数据处理软件 ArArCALC 简介 [J]. *地球化学*, 38 (1): 53 ~ 56.