

辽宁省透闪石玉研究现状

程诗渤

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2022年7月22日; 录用日期: 2022年8月4日; 发布日期: 2022年8月12日

摘要

辽宁省透闪石玉资源质地优良, 开发历史可追溯至新石器时代中晚期, 是红山文化的主要玉料。前人对于辽宁省透闪石玉进行了大量研究, 研究内容主要集中在矿物学特征、矿床成因、河磨玉来源、产地溯源三个方面。辽宁省透闪石玉主要由透闪石部分由阳起石组成, 次要矿物众多。透闪石玉存在多种结构, 主要以毛毡状纤维交织结构为主。主要化学成分为 SiO_2 、 CaO 、 MgO 。 FeO 主要以类质同象形式取代 MgO 。前人主要利用全岩主微量元素分析、稳定同位素失踪和放射性同位素定年的地球化学手段对透闪石玉进行成因分析, 确定其矿床类型为变质热液型碳酸盐型矿床。本文基于辽宁省透闪石玉研究现状, 结合前人的研究成果, 分析了研究中存在的不足, 以期对辽宁省透闪石玉研究发展做出贡献。

关键词

透闪石玉, 辽宁省, 研究现状

Research Status of Tremolite Jade in Liaoning Province

Shibo Cheng

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

Received: Jul. 22nd, 2022; accepted: Aug. 4th, 2022; published: Aug. 12th, 2022

Abstract

Tremolite jade resources in Liaoning Province have excellent texture, and the development history can be traced back to the middle and late Neolithic ages. It is the main jade material of Hongshan culture. Predecessors have done a lot of research on tremolite jade in Liaoning Province, mainly focusing on mineralogical characteristics, the genesis of the deposit and origin traceability. Tremolite jade in Liaoning Province is mainly composed of tremolite and actinolite, with many

secondary minerals. Tremolite jade has a variety of structures, mainly with felt fiber interwoven structures. The main chemical components are SiO_2 , CaO and MgO . FeO mainly replaces MgO in the form of isomorphism. Predecessors mainly used the geochemical methods of whole rock major and trace element analysis, stable isotope disappearance and radioisotope dating to analyze the genesis of tremolite jade, and determined that its deposit type was metamorphic hydrothermal carbonate deposit. Based on the research status of tremolite jade in Liaoning Province, combined with the previous research results, this paper analyzes the shortcomings of the research, in order to make contributions to the research and development of tremolite jade in Liaoning Province.

Keywords

Tremolite Jade, Liaoning Province, Research Status

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

中国有着丰富的玉石资源，也是开发利用玉石资源最多的国家之一，有着丰富的玉文化。而辽宁省所产的透闪石质玉，因其质地优良、开发历史悠久，在中国玉器与玉文化发展史上占有十分重要的地位。辽宁省透闪石质玉的应用历史最早可追溯至新石器时代中晚期，被证实是红山文化的主要玉料[1]。

目前发现辽宁省透闪石质玉产地包括岫岩县细玉沟；哈达碑镇桑皮峪；海城市孤山镇、析木镇、马风镇；本溪市桓仁县。其中岫岩县透闪石质玉的产量最大。目前国内外学者对透闪石玉开展了大量研究，主要研究集中于矿物学特征、矿床类型及成因、软玉的检测技术、产地特征等多个方面，因此本文从矿物学特征、矿床成因、河磨玉来源、产地特征四个方面，总结前人的研究成果，分析辽宁省透闪石玉研究中存在的不足，并对未来的研究方向进行展望。

2. 矿物学特征

辽宁省透闪石玉最早发现于岫岩县细玉沟，随后在海城市、桓仁县、哈达碑镇桑皮峪等地也陆续发现透闪石玉，前人对各地发现的透闪石玉进行了矿物学特征方面的研究，主要利用薄片观察与电子探针、红外光谱分析、拉曼光谱分析、X 射线粉晶衍射分析等现代测试技术手段相结合的方式对透闪石玉的矿物组成、化学成分、结构构造等方面进行研究。

2.1. 矿物组成

辽宁省透闪石玉的主要矿物成分大致相同，不同产地的次要矿物成分有部分差别，前人对不同产地的透闪石玉矿物组成进行了详细研究。王时麒等人对产自辽宁岫岩细玉沟的透闪石质玉进行研究，确定其主要矿物成分为透闪石(偶为阳起石)，次要矿物主要为碳酸盐矿物、磷灰石、粒硅镁石、绿帘石、白云母、蛇纹石、滑石、黄铁矿、磁铁矿、褐铁矿、石墨等[2] [3] [4]。蒋天龙和邹好等人对产自桑皮峪的透闪石玉进行研究，确定其主要矿物组成为透闪石，次要矿物为方解石、透辉石、磷灰石、绿帘石、黄铁矿、绿泥石、石墨、褐铁矿、锆石、楣石等[5] [6]。刘溶等人对产自海城市析木县的透闪石玉河磨玉进行研究分析，确定其主要矿物成分为透闪石，不含其他杂质矿物，部分样品沿裂隙具白色脉状分布，认为是白色风化透闪石[7]。林维峰对产自桓仁的透闪石质玉河磨玉进行研究，确定其主要矿物组成为透闪石

和普通角闪石，其中普通角闪石大部分蚀变为黑云母，微量矿物为透辉石、磷灰石、碳酸盐矿物、蛇纹石[8]。

2.2. 化学成分

辽宁省透闪石玉主要化学成分 SiO_2 、 MgO 和 CaO ， FeO 主要以类质同象的形式取代 MgO ，不同产地的透闪石玉在 FeO 、微量元素和稀土元素含量有差别，这与它们形成时不同的地质环境有关。如：产自辽宁岫岩细玉沟的透闪石质玉 FeO 随着透闪石质玉颜色加深而加深，微量元素含量较高的是 Be 、 V 、 Cr 、 Co 等；稀土元素含量较低[2] [3] [4]。产自桑皮峪的透闪石玉 FeO 含量很低， $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ 的值为 0.964~0.971，碱金属元素含量很低[5] [6]。产自海城市析木县的河磨玉主要化学成分 SiO_2 、 MgO 、 CaO 和透闪石理论成分接近但总量偏低，次要化学成分为 Fe_2O_3 ，且随 Fe 含量降低样品颜色呈现变浅的趋势，表明其绿色与 Fe 有关[7]。产自桓仁的透闪石质玉河磨玉，由于普通角闪石的存在，使得铁的含量比岫岩透闪石质玉铁含量高[8]。

2.3. 结构构造

产自辽宁岫岩细玉沟的透闪石质玉主要结构为长柱状变晶结构、纤维状变晶结构、等粒变晶结构、不等粒变晶结构、斑状变晶结构、毛毡状纤维交织结构、纤维束状结构、花瓣状结构、帚状结构、放射状结构、似螃蟹状结构、以及多种交代残余结构[2] [3] [4]。产自桑皮峪的透闪石玉主要结构为毛毡状交织结构、显微纤维变晶结构以及显微纤维状隐晶质结构[5] [6]。产自海城市析木县的透闪石玉河磨玉结构致密，透闪石通常均匀无定向的密集排列，部分沿着透闪石长轴定向排列，主要结构为毛毡状纤维交织结构，束状结构[7]。桓仁透闪石玉河磨玉结构为不等粒变晶结构、叶片状变晶结构及交代结构，透闪石的形成分为三个期次，第一期次透闪石主要呈长柱状和叶片状，粒度较粗，分布无方向性，占比最少。第二期次透闪石部分交代或环绕第一期次透闪石，主要呈叶片状，粒度较小，集合体呈交织结构，占比最多。第三期次透闪石为纤维状，常交代早期透闪石，呈纤维交织结构，粒度通常小于 0.1 mm，占比较少[8]。

3. 矿床成因

辽宁省透闪石玉原生矿床主要分布在岫岩县细玉沟沟头的山顶和哈达碑镇桑皮峪，前人对于辽宁省透闪石玉的原生矿床成因方面进行了大量研究，主要包括成矿过程、成矿物质来源、成矿年代三个方面。

3.1. 成矿过程

产自岫岩县细玉沟和桑皮峪的透闪石玉原生矿床其成矿过程一致，均为由区域变质作用和混合岩化岩浆作用而形成的富含 Si 质的热水溶液，在有利的构造条件下沿大理岩构造裂隙流动，从而与围岩发生交代反应，热液萃取了大理岩中的 Mg 和 Ca ，形成透闪石玉。其成矿模式为：早元古代中期，浅海相白云岩沉积，构成了分布广泛巨大的大石桥组白云岩系。经后期的区域变质作用，原岩发生变质变形作用，白云岩重结晶形成白云大理岩。在超变质作用和混合岩化岩浆作用下，形成富 Si 的热水溶液，热液流体沿着裂隙进入大理岩，发生交代作用，形成透闪石玉[9] [10]。

3.2. 成矿物质来源

确定成矿物质来源主要利用稳定同位素示踪的方法，段体玉等人利用氢、氧、硅、硫同位素分析的手段对细玉沟透闪石玉进行研究，根据氢、氧同位素投图的结果显示，在 350℃ 时成矿溶液的氢、氧同位素组成位于变质水的区域，且随着温度的变化，细玉沟透闪石玉的 δD 值基本不变， $\delta^{18}\text{O}$ 值也没有大

幅度变化,说明其形成于变质热液之中。其硅同位素测试结果显示,细玉沟透闪石玉的硅主要来自于变质热液之中,同时一部分来自于大理岩中的硅质条带和燧石结核。又对透闪石玉的共生矿物黄铁矿、磁黄铁矿进行硫同位素测试,结果表明成矿溶液中的硫来自变质岩,而非地幔[11][12]。吴之瑛等人利用硅同位素分析和稀土元素分析的手段对桑皮峪透闪石玉进行研究,通过硅同位素投图,结果表明桑皮峪透闪石玉的硅质来源可能是混合花岗岩,也可能一部分来自变质岩,与细玉沟透闪石玉的硅质来源类似。稀土元素分析结果表明,重稀土元素变化小,轻稀土元素变化对稀土元素总量变化影响大,与细玉沟透闪石玉稀土元素分配模式进行对比发现两地稀土元素分配模式相似,说明两地透闪石玉有相似物质来源与成因[10]。综合硅同位素分析和稀土元素分析结果,并结合成矿地质背景表明辽宁岫岩桑皮峪透闪石玉矿床成因类型为变质热液矿床。

3.3. 成矿年代

成矿年代的确定有助于掌握其地质演变的历史,对于辽宁省透闪石玉原生矿床的成矿年代的确定,主要采用 Ar-Ar 法、Pb-Pb 等时线法测试、锆石的 U-Pb 定年和榍石 Pb-Pb 定年。王时麒等人利用 Ar-Ar 法对岫岩地区的透闪石玉进行年代测试,不同温度阶段的视年龄不同,出现一组复杂不一致的年龄谱,利用该组数据中视年龄相近的三个温度段数据测得坪年龄为 17.7 亿年,属于下元古代[13]。但由于得到结果的复杂性以及透闪石玉形成以来并未处于完全封闭体系,可能会导致 Ar 的增加与流失,因此该方法得到的成矿年龄可能不能很好的代表其真正的成矿年龄。王时麒等人又利用 Pb-Pb 等时线法测试,测得岫岩透闪石玉的成玉年龄在 1.62 ± 0.027 Ga,也证明该地区的透闪石玉成玉年龄是大约 17 亿年前的元古代[13]。锆石 U-Pb 定年是确定透闪石玉形成年代比较常用的定年方法,但由于锆石有多种来源,最常见的为继承锆石不能很好的代表透闪石玉的形成年龄,而且锆石定年还需考虑很多复杂因素,比如锆石的光学和电子图象,还需结合锆石的微量元素特点才能很好的解释所测年龄结果,而榍石是透闪石玉中常见的副矿物,且一般与透闪石玉同生,因此好等人采用透闪石玉中常见的副矿物榍石结合锆石一起进行定年,利用二次离子质谱仪测定了桑皮峪透闪石玉中锆石 U-Pb 年龄和榍石 Pb-Pb 年龄,结果显示,锆石的 U-Pb 谐和年龄为 1851 ± 7 Ma,榍石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1848 ± 17 Ma,证明辽宁岫岩桑皮峪透闪石玉矿形成于古元古代[6]。锆石 U-Pb 定年和榍石 Pb-Pb 定年的结果相近,说明透闪石玉中常见的副矿物榍石也可进行有效定年,这为有关透闪石玉形成年龄的问题提供了一种新的方法。

4. 河磨玉的来源

河磨玉主要在海城市的析木镇、马风镇、孤山镇等地和位于岫岩县偏岭镇的细玉沟附和白沙河附近产出,产自细玉沟的河磨玉主要沿细玉沟山麓沟谷和凹地呈东西向分布,长约 7 km,出沟口至瓦房店村与北西向的白沙河(也称洋河)交汇,自此处到王家堡子一带的河床、河漫滩和两岸阶地中也都有大量河磨玉分布,长约 5 km [9]。岫岩地区产出的河磨玉主要有冲积砂矿、冲洪积砂矿、重力堆积砂矿、坡水堆积砂矿、沟谷冲洪积砂矿五种类型。徐海鹏等人测试了岫岩地区产出的河磨玉皮壳和玉质层的矿物成分和矿物成分,结合第四纪沉积环境提出了河磨玉皮壳的成因为长期的表生风化作用下,透闪石玉质外层不断氧化、元素迁移与交换的结果[14]。最初根据岫岩地区发现的原生矿和次生矿位置关系,认为岫岩河磨玉是源于细玉沟沟头山顶的透闪石玉原生矿床[9],但丘志力等人发现河磨玉和老玉中的石墨包体类型和形态有很大差异,并且通过拉曼光谱技术对河磨玉和老玉中的石墨包裹体进行测试分析,结果显示河磨玉中接近完全有序结构的石墨 D:G 峰强度约为零,而大部分石墨 D:G 峰强度在 0.40~0.10 之间,且 G 峰半高宽小于 20,表明河磨玉中石墨包体结晶条件和麻粒岩-高角闪岩相的范围相当。而岫岩老玉中石墨的 D:G 峰强度比大于 0.50, G 峰半高宽大于 30,表明其形成于角闪岩相-绿片岩相的条件,说明两种

玉料形成于不同成矿阶段或不同成矿位置上,因此河磨玉可能并不是源于老玉原生矿[15]。随后郑奋等人通过电子探针成分分析、全岩主微量分析、氢氧同位素分析、锆石 SHRIMP U-Pb 定年等测试方法,对产自岫岩河磨玉的矿物组成、地球化学特征及形成年龄进行研究,发现河磨玉轻稀土含量低于老玉,并且普遍呈现 Eu 正异常,河磨玉的成矿流体中的水来自于岩浆水,与老玉成矿热液的区域变质水不同,并且河磨玉的成矿年龄上限为 220.8 ± 76 Ma,表示河磨玉的成矿与岫岩地区三叠纪的岩浆活动相关,而老玉的成矿年龄在 1.7 Ga 左右,与元古宙的岩浆活动有关[16]。二者的成矿年龄差异进一步证明了河磨玉和老玉的形成条件完全不同,因此河磨玉并不是来源于老玉。河磨玉与老玉成矿年龄的不同与岫岩透闪石玉原生矿是多期次、多阶段成因的推测相一致,说明岫岩地区可能存在其他未发现的透闪石玉矿床[15]。

海城地区河磨玉多以绿色系为主,主要产自海城市的孤山镇、马风镇和析木镇的海城河中。目前针对河磨玉的研究主要集中于偏岭镇产出的河磨玉上,而对海城河磨玉的研究较少,仅有对析木镇产出的析木玉的矿物学特征研究,而对于海城市河磨玉的其他方面研究还尚未有人进行,未来可针对海城河磨玉的形成年代、地球化学特征、成因等问题展开研究,填补海城地区河磨玉的研究空白。

5. 产地溯源

宝玉石产地溯源的研究是近年来地质学、宝石学、考古学的研究热点问题,辽宁省产出的透闪石玉在市场上占有一定的份额,并且岫岩县所产出的透闪石玉被认为是红山文化玉器的主要来源,因此对其产地溯源的研究对于珠宝首饰价值的判断和判断古玉器的来源有着重要意义,目前对于辽宁省透闪石玉的产地溯源主要利用矿物学特征、稀土元素特征和透闪石玉中的石墨的拉曼光谱特征。

5.1. 矿物学特征

根据透闪石玉的形成条件和形成时周围介质成分的不同,不同产地的透闪石玉的矿物组成和化学组成会有些许不同,因此可以尝试利用这些细微差别来进行产地溯源。如:邹天人等人利用电子探针分析了细玉沟透闪石玉的矿物成分,利用特征次要矿物、结构对细玉沟透闪石玉进行产地溯源[17]。索林娜等人利用 $w(\text{FeO})$ 与 $w(\text{FeO} + \text{MgO})$ 的数据(如图 1)和是否具有某些特征次要矿物的方法区分透闪石玉产地

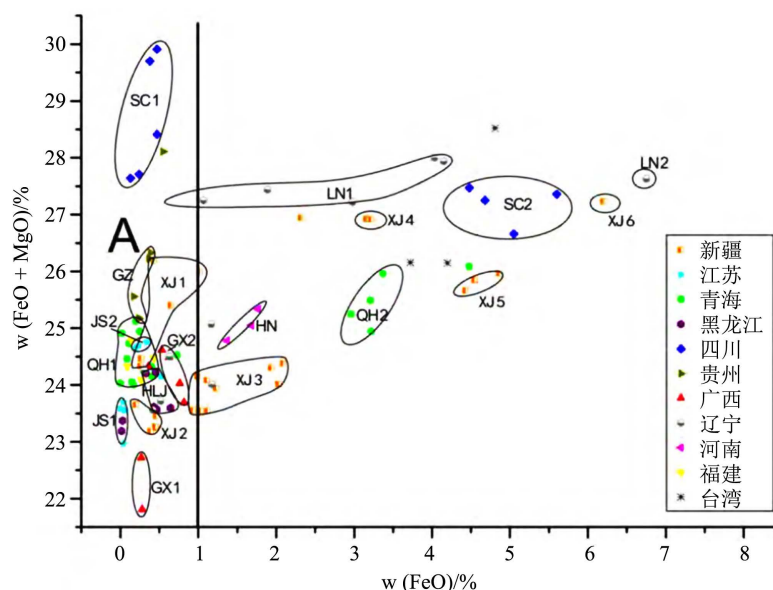


Figure 1. Project diagram of $w(\text{FeO})$ and $w(\text{FeO} + \text{MgO})$ components [18]

图 1. $w(\text{FeO})$ 与 $w(\text{FeO} + \text{MgO})$ 成分投影图 [18]

和品种[18]。廖任庆等人利用透闪石玉 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 的数值进行投图, 发现岫岩透闪石玉 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 中等偏低, 但 $w(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 有极宽的变化范围(如图 2), 可以与其他产地的透闪石玉相互区分[19]。这种方式所进行测试的样品数量有限, 需要扩大样品数量, 建立产地信息数据库才能更有效进行产地溯源。还存在一个问题在于, 该方法属于一种有损的测试方式, 因此对于古玉器以及透闪石玉珠宝首饰的产地溯源作用十分有限, 只能起到一定的辅助作用。

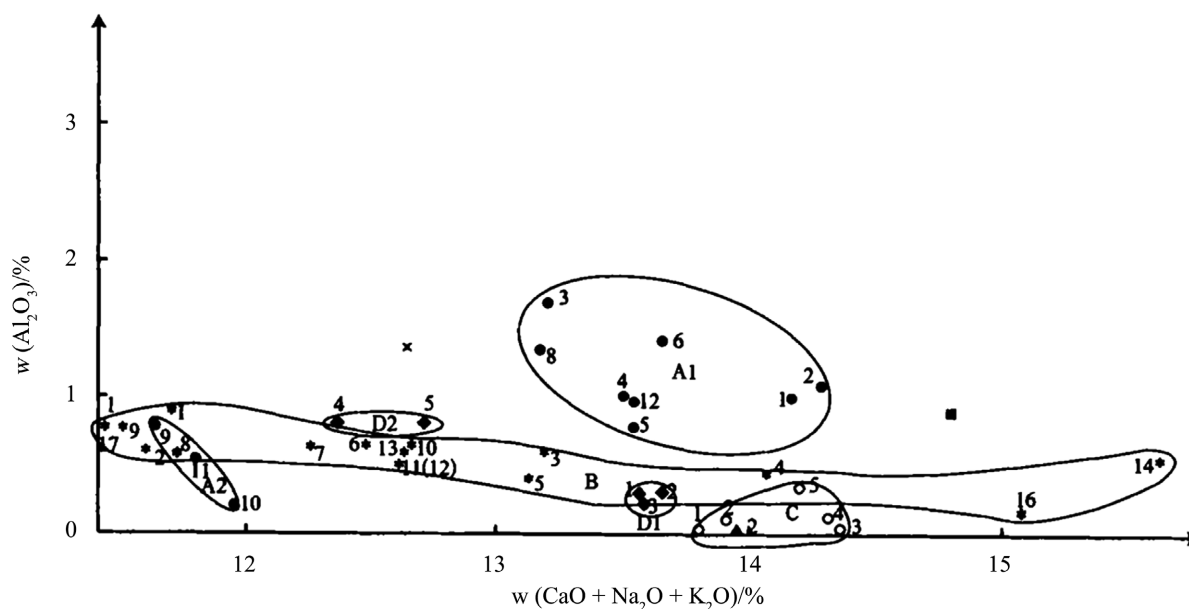


Figure 2. Project diagram of $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ and $w(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ components [19]

图 2. $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与 $w(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 成分投影图[19]

5.2. 稀土元素特征

不同产地透闪石玉形成时的物理化学条件和地质背景不同, 而稀土元素组成和稀土元素分配模式的差异可以反应透闪石玉形成时的地球化学背景和物理化学条件, 因此借助透闪石玉的稀土元素组成和分配模式可以对于其产地溯源提供一些帮助。

前人对透闪石玉的稀土元素特征进行了一系列研究, 通过对不同产地的透闪石玉稀土元素特征进行对比研究, 发现不同产地的透闪石玉稀土元素特征存在着一定差异, 可以作为产地特征(如图 3)。其中岫岩透闪石玉老玉的稀土元素特征表现为: 稀土元素总量明显高于其他产地, 轻、重稀土分异明显, 大多呈轻稀土富集。Eu 异常有正有负大多数呈负异常, 无明显 Ce 异常[20] [21] [22]。

后来郑奋等人在对河磨玉的研究中发现, 河磨玉的稀土元素特征和老玉的稀土元素特征存在差异, 河磨玉的稀土元素特征为: 轻、重稀土分异不明显, 普遍显示 Eu 正异常, 轻稀土含量明显低于老玉[16]。因此同一产地不同产状的透闪石玉之间稀土元素特征可能存在差异, 除此之外在利用稀土元素特征进行产地溯源时还存在测试的样本数据有限的, 结果可能存在一定误差的问题。

5.3. 石墨的拉曼光谱特征

在地质作用的过程中, 石墨不受退变质作用的影响, 碳的含量和结晶程度与变质作用程度呈正相关, 在不同级别类型的变质反应中会呈现出相应的成因矿物学特征, 其结晶温度代表了变质作用的峰期温度, 可以从一个侧面反映岩石的变质程度, 可被用作地质体变质程度和形成条件的指示矿物[23]-[28]。目前针

对透闪石玉中的石墨包体研究所运用的技术手段主要为拉曼光谱技术，石墨的拉曼光谱中的 D 峰和 G 峰对于判断岩石的变质类型和主岩石的形成温度有很好的指示作用，根据石墨拉曼光谱特征的差别可以对透闪石玉的产地提供一些指示作用。如：丘志力等人使用拉曼光谱技术对岫岩老玉和河磨玉中的石墨进行分析，老玉中的石墨包体 G 峰半高宽大于 30，而河磨玉中的石墨包体 G 峰小于 20，说明河磨玉中的石墨包体结晶程度要更好。河磨玉中的大部分石墨包体 D: G 峰的强度比在 0.40~0.10 之间，和麻粒岩~高角闪岩相的范围相符合。老玉中的石墨包体 D:G 峰的强度大于河磨玉中的石墨包体，符合角闪岩相~绿片岩相的范围，可以此对玉料产地来源提供一定的参考证据[15]。张存等人利用拉曼光谱技术对产自桑皮峪的透闪石玉内部石墨包体进行测试分析，不同种类样品 D 峰和 G 峰的强度和形状存在不同，表明不同种类的样品处于不同变质相当中，对于产地来源提供一定指示意义[29] [30]。

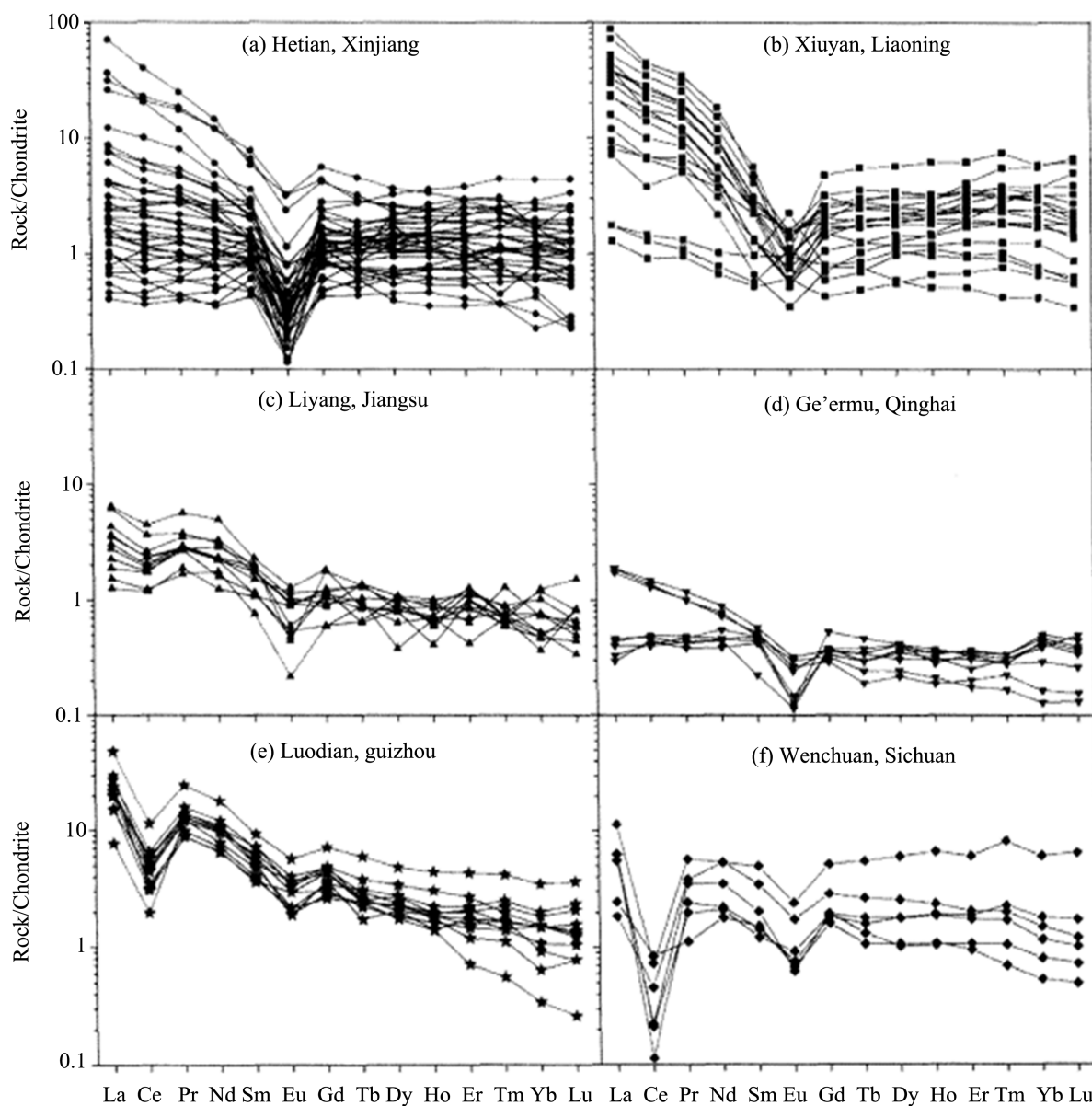


Figure 3. Chondrite-normalized REE patterns of nephrite jades from some mines in China [21]

图 3. 中国部分产地软玉的稀土元素球粒陨石标准化分布型式图[21]

利用透闪石玉中石墨的拉曼光谱特征, 根据其对岩石变质类型和主岩形成的指示作用可以为透闪石玉种类和产地判别提供指导意义, 这种无损的方法对于古玉器的产地溯源具有重要意义。

6. 展望

1) 产自偏岭的河磨玉已被证实并非来自于细玉沟沟头山顶的透闪石玉原生矿, 因此岫岩地区可能存在尚未发现的透闪石玉原生矿床, 未来可进一步加大对岫岩地区透闪石玉原生矿床的勘探工作, 以便发现更多透闪石玉资源。

2) 辽宁省河磨玉种类众多, 但针对海城地区产出的河磨玉的研究较少, 多集中在矿物学特征上, 未来应进一步加大对海城地区产出的河磨玉的研究工作, 开展岩相学、地球化学、年代学、成因等方面的研究。

3) 目前可以利用透闪石玉中的石墨可在一定程度上进行一定的产地溯源, 但对于利用其矿物学特征和稀土元素特征进行产地溯源的方法还存在着一定问题, 如没有建立起产地特征数据库、使用的方式主要为无损手段等问题, 未来可进一步加大对透闪石玉产地溯源的研究, 可尝试利用 LA-ICP-MS 等无损测试手段测试其微量元素特征进行产地溯源。

7. 结论

辽宁省透闪石玉的矿物组成主要为透闪石或阳起石, 次要矿物种类多样, 不同产地次要矿物略有不同, 主要化学成分为 SiO_2 、 CaO 、 MgO 并含有 FeO 。结构多样, 主要以毛毡状纤维交织结构为主。透闪石玉矿床成因为变质热液型碳酸盐型矿床, 通过对透闪石玉中石墨的拉曼光谱特征进行研究, 结果表明透闪石玉的形成经历了多期次/阶段, 并发现岫岩地区老玉和河磨玉的地球化学特征及成因存在差异, 二者并非母子关系, 岫岩地区可能存在尚未发现的原生矿床。利用矿物学特征、稀土元素的差别可以对产地鉴定提供参考, 通过对透闪石玉中石墨的拉曼光谱特征进行分析可以对其产地鉴定提供指示意义。

参考文献

- [1] 王时麒. 岫岩软玉与红山文化[J]. 鞍山师范学院学报, 2004, 6(3): 40-43.
- [2] 关子川, 王丹丽. 辽宁岫岩地区的玉石种类[J]. 宝石和宝石学杂志, 2001, 3(3): 35-38.
- [3] 王时麒, 段体玉, 闫欣. 岫岩软玉的初步研究[J]. 珠宝科技, 1998(2): 46-49.
- [4] 王时麒, 段体玉, 郑姿姿. 岫岩软玉(透闪石玉)的矿物岩石学特征及成矿模式[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(z1): 79-90.
- [5] 蒋天龙. 辽宁桑皮峪软玉宝石矿物学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [6] 邹好, 李鹏, 吴之瑛, 等. 辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉成矿年龄研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(4): 825-834.
- [7] 刘溶, 范桂珍, 王时麒, 等. 辽宁柞木玉的宝玉石学特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(S1): 19-24.
- [8] 林维峰. 辽宁桓仁软玉的宝玉石学特征研究[J]. 岩矿测试, 2012, 31(5): 794-797.
- [9] 王时麒, 董佩信. 岫岩玉的种类、矿床地质特征及成因[J]. 地质与资源, 2011, 20(5): 321-331.
- [10] 吴之瑛, 王时麒, 凌潇潇. 辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉的玉石学特征与成因研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(S2): 15-24.
- [11] 段体玉, 王时麒. 岫岩软玉(透闪石玉)的稳定同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(z1): 115-119.
- [12] Yui, T.F., Yeh, H.W. and Lee, C.W. (1988) Stable Isotope Studies of Nephrite Deposits from Fengtien, Taiwan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **52**, 593-602. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90321-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90321-3)
- [13] 王时麒. 中国岫岩玉[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 84-115.
- [14] 徐海鹏, 丰爱平, 王时麒, 等. 辽宁岫岩软玉砂矿的成因及资源保护[J]. 资源科学, 2000, 22(2): 24-29.
- [15] 丘志力, 江启云, 罗涵, 等. 辽宁岫岩河磨玉和老玉(闪石玉)中石墨包体的拉曼光谱及其应用[J]. 光谱学与光谱

- 分析, 2010, 30(11): 2985-2988.
- [16] 郑奋, 刘琰, 张红清. 辽宁岫岩河磨玉岩石地球化学组成及锆石 U-Pb 定年研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(4): 438-448.
- [17] 邹天人, 陈克樵. 和田玉、玛纳斯碧玉和岫岩老玉的产地特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(z1): 41-49.
- [18] 索林娜, 陶中一, 袁增翔. 中国各地软玉的矿物组成及化学成分特征[J]. 矿产与地质, 2019, 33(3): 484-488.
- [19] 廖任庆, 朱勤文. 中国各产地软玉的化学成分分析[J]. 宝石和宝石学杂志, 2005, 7(1): 25-30.
- [20] 尹作为, 王文薇, 周青超. 广西大化县透闪石玉的产地特征[J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 114-123.
- [21] 钟友萍, 丘志力, 李榴芬, 等. 利用稀土元素组成模式及其参数进行国内软玉产地来源辨识的探索[J]. 中国稀土学报, 2013, 31(6): 738-748.
- [22] 周振华, 冯佳睿. 新疆软玉、岫岩软玉的岩石矿物学对比研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(3): 331-340.
- [23] Pasteris, J.D. and Chou, I.-M. (1998) Fluid-Deposited Graphitic Inclusions in Quartz: Comparison Between KTB (German Continental Deep-Drilling) Core Samples and Artificially Reequilibrated Natural Inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **62**, 109-122. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00322-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00322-0)
- [24] Satish-Kumar, M. (2005) Graphite-Bearing CO₂-Fluid Inclusions in Granulites: Insights on Graphite Precipitation and Carbon Isotope Evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**, 3841-3856. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.02.007>
- [25] 陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 等. 中国北方石墨矿床及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论[J]. 岩石学报, 2000, 16(2): 233-244.
- [26] 稻垣道夫, 中沟实, 白石稔, 等. 石墨化度的评价[J]. 炭素技术, 1991, 51(5): 38-43.
- [27] 熊德信, 孙晓明, 翟伟, 等. 云南大坪金矿含金石英脉中高结晶度石墨包裹体: 下地壳麻粒岩相变质流体参与成矿的证据[J]. 地质学报, 2006, 80(9): 1448-1456 +1492.
- [28] 张跃峰, 丘志力, 彭淑仪, 等. 辽宁岫岩透闪石质河磨老玉中石墨的成因及其指示意义[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(2): 118-126.
- [29] 张存, 余晓艳. 辽宁桑皮峪透闪石玉的振动光谱学及产地鉴别标志[J]. 宝石和宝石学杂志, 2018, 20(S1): 41-53.
- [30] Zhang, C., Yu, X. and Jiang, T. (2019) Mineral Association and Graphite Inclusions in Nephrite Jade from Liaoning, Northeast China: Implications for Metamorphic Conditions and Ore Genesis. *Geoscience Frontiers*, **10**, 425-437. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.009>