

# 中国大理岩型和和田玉矿床的成矿时代、形成过程及找矿方向

景云涛<sup>1</sup>, 刘 琰<sup>2</sup>, 张 勇<sup>3</sup>, 买托乎提·阿不都瓦衣提<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学(北京)珠宝学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 自然资源部珠宝玉石首饰管理中心, 北京 100013; 4. 新疆维吾尔自治区和田地区质监局, 新疆 和田 848000)

**摘要:** 和田玉在中国有着悠久的开采和使用历史, 在中国的玉石文化中占有重要地位。根据产状, 大理岩型和和田玉的成因类型可分为接触交代型(矽卡岩型/岩浆热液型)、区域变质和变质热液型, 其中接触交代型最重要也是优质和田玉的主要成因类型。根据围岩的年龄、和田玉中锆石或云母测年得到的矿带形成年龄以及区域地理位置, 可将中国大理岩型和和田玉划分为西昆仑矿带的新疆(形成年龄上限为450~350 Ma)、东昆仑矿带的青海省格尔木(形成年龄为300~240 Ma)、东北地区(河磨玉约250~150 Ma, 老玉约1700 Ma)、西南地区、中南地区(火山岩约682±62 Ma, 辉绿岩约260 Ma)和华东地区等6个矿带, 本文主要总结了这6个矿带大理岩型和和田玉矿床的地质产状、矿物组成、全岩主微量元素特征、成矿流体组成、锆石/云母年龄及空间分布和成矿规律。和田玉的主要矿物为透闪石。接触交代型和和田玉的成矿流体主要由岩浆水、大气降水和围岩白云石大理岩脱碳产生的CO<sub>2</sub>以不同比例混合组成, 成矿物质Mg和Ca来自白云石大理岩, Si和H<sub>2</sub>O来自岩浆热液(如新疆和田矿带)。和田玉的形成主要经历了接触变质和变质交代阶段、早期进变质阶段和晚期退变质阶段, 交代过程为白云石大理岩→透辉石矽卡岩或绿帘石矽卡岩→透闪石矽卡岩(粗粒透闪石)和粗粒透闪石→细粒透闪石, 透闪石主要形成于进变质阶段; 区域变质型和和田玉的成矿作用与区域变质作用密切相关, 而不依赖岩浆活动, 成矿流体主要为大气降水(如韩国春川); 变质热液型和和田玉成矿流体主要为变质水, 成矿物质Mg和Ca来自大理岩, Si和H<sub>2</sub>O可能来自区域变质作用和混合岩浆作用而形成富硅质的热水溶液(如辽宁岫岩)。和田玉主要产于构造活动强烈的地区、侵入岩与碳酸盐岩接触蚀变带较强烈的地段, 可根据矿化标志、构造标志、围岩蚀变标志、子料和山流水溯源、古矿洞标志等探寻原生大理岩型和和田玉矿床。

**关键词:** 和田玉; 成矿流体; 锆石U-Pb定年; 成因类型; 成矿模式

中图分类号: P611.3; P619.28<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)03-0651-17

## Metallogenic age, formation process and prospecting direction of marble-related nephrite deposit in China

JING Yun-tao<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup> and Maituohuti Abuduwayiti<sup>4</sup>

(1. School of Gemmology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. National Gems & Jewelry Technology Administrative Center, Beijing 100013, China; 4. Hetian Bureau of Quality and Technical Supervision, Hetian 848000, China)

**Abstract:** Nephrite has a long history of mining and use in China, and occupies an important position in China's jade culture. According to the occurrence, the genetic types of marble-related nephrite can be divided into contact

收稿日期: 2021-10-08; 接受日期: 2022-03-28; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221649); 国家自然科学基金项目(41802073); 新疆维吾尔自治区科技厅自然科学基金项目(2016D01A012)

作者简介: 景云涛(1996-), 女, 汉族, 研究生, 宝石学专业, E-mail: 15501096099@163.com; 通讯作者: 刘琰(1982-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事稀土稀有金属矿床研究, E-mail: ly@cags.ac.cn。

网络首发时间: 2022-04-08; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20220407.1749.002.html>

metasomatism type (skarn-type/magmatic hydrothermal type), regional metamorphism and metamorphic hydrothermal type, in which contact metasomatidm type is the most important and the main genetic type of high-quality nephrite. According to the age of the surrounding rock, the age of the ore belt formed by zircon or mica dating in nephrite and the regional geographical location, Chinese marble-related nephrite can be divided into six ore belts: Xinjiang (the upper limit of the formation age is 450~350 Ma) of the West Kunlun ore belt, Golmud of Qinghai Province (the formation age is 300~240 Ma) of the East Kunlun ore belt, Northeast China (hematite about 250~150 Ma, Laoyu about 1 700 Ma), Southwest China, Central South (volcanic rock about  $682 \pm 62$  Ma, diabase about 260 Ma) and East China. This paper mainly summarizes the geological occurrence, mineral composition, main and trace element characteristics of the whole rock, ore-forming fluid composition, zircon/mica age, spatial distribution and metallogenic regularity of nephrite deposit from the six ore belts in China. The main mineral composition of nephrite is tremolite. The ore-forming fluid composition of contact metasomatism type nephrite deposit is mainly composed of magmatic water, meteoric water and  $\text{CO}_2$  derived from decarbonation of the surrounding dolomite marble in different proportions. The ore-forming materials of Mg and Ca come from dolomite marble, while Si and  $\text{H}_2\text{O}$  come from magmatic hydrothermal fluids (such as Hetan ore belt in Xinjiang). The formation of nephrite mainly experienced contact metamorphism and metamorphic metasomatism stage, prograde metamorphism stage and retrograde metamorphism stage. The metasomatism process was dolomite marble  $\rightarrow$  diopside skarn or epidote skarn  $\rightarrow$  tremolite skarn (coarse-grained tremolite) and coarse-grained tremolite  $\rightarrow$  fine-grained tremolite. Tremolite was mainly formed in prograde metamorphism stage. The mineralization of regional metamorphic nephrite is closely related to regional metamorphism rather than magmatic activity, the ore-forming fluid is mainly meteoric water (such as Chunchuan, South Korea). The ore forming fluid of metamorphic hydrothermal nephrite is mainly metamorphic water, and the ore-forming materials Mg and Ca come from marble, Si and  $\text{H}_2\text{O}$  may come from the siliceous hydrothermal solution formed by regional metamorphism and mixed magmatism (such as Xiuyan in Liaoning Province). Nephrite mainly occurs in the areas with strong tectonic activity and sections with strong contact alteration zone between intrusive rocks and carbonate rocks. The primary marble-related nephrite deposit can be explored according to mineralization mark, tectonic mark, wall rock alteration mark, secondary deposit mark, ancient mines mark, etc.

**Key words:** nephrite; ore forming fluid; zircon U-Pb dating; genetic type; metallogenic model

**Fund support:** Geological Survey Project of China Geological Survey (DD20221649); National Natural Science Foundation of China (41802073); Natural Science Foundation Project of Science and Technology Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2016D01A012)

和田玉在中国有着悠久的开采和使用历史, 早在新石器时期就发现有和田玉的挖掘和使用, 其后的历朝历代直至今日, 和田玉在国内都被广泛地使用。和田玉质地细腻, 色泽温润, 在中国玉石文化中占有重要地位, 被称为我国的“四大名玉”之一, 是一种受大众喜爱的玉石品种。在最新的国家标准 GB/T 16553-2017《珠宝玉石鉴定》中, 和田玉被定义为主要由透闪石、阳起石组成的矿物集合体, 不受地域限制。根据产状和围岩组成, 和田玉可以分为大理岩型和蛇纹岩型两种 (Harlow and Sorensen, 2005)。蛇纹岩型(S型)和田玉主要产在蛇纹岩(或橄榄岩)与花岗岩(斜长花岗岩或变质沉积物)的接触带中,

大理岩型(D型)和田玉主要产在镁质大理岩和岩浆岩的接触带中(Leaming, 1978; Harlow and Sorensen, 2001, 2005; Yui and Kwon, 2002)。除野外地质产状外, 和田玉的全岩主量元素  $\text{Fe}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  值, 微量元素 Cr、Ni、Co 含量以及氢氧同位素特征等也可鉴别它们的成因类型(Harlow and Sorensen, 2005; Liu *et al.*, 2011a, 2011b)。除特殊说明外, 本文的研究对象均为大理岩型和和田玉。和田玉的形成与交代或变质作用有关(Leaming, 1978; Harlow and Sorensen, 2001, 2005), 传统和田玉矿床主要为接触交代型和和田玉矿床(矽卡岩型/岩浆热液型), 如中国新疆西昆仑地区的和田玉矿床主要产出于沿西昆仑造山带

延伸约 1 300 km 的花岗岩/花岗闪长岩侵入体与镁质大理岩接触交代区域 (Liu *et al.*, 2011b, 2016)。近年来还发现有区域变质和变质热液型和田玉矿床产出 (于庆文等, 2017, 表 1)。矿物学、岩石学、地球化学和同位素等已大量应用于和田玉矿床的研究, 但除新疆、青海和岫岩等地的和田玉已进行了锆石/云母定年外, 其余产地的和田玉还很少有形成年龄报道。基于已有的研究结果, 本文主要总结了不同产地的和田玉的矿物组成、全岩主微量元素、氢氧同位素、锆石/云母年龄特征, 对国内主要玉石矿带进行划分, 探讨了和田玉的区域成矿规律和找矿方向。

## 1 和田玉矿床的成因类型

于庆文等 (2017) 按玉石矿区的地质背景和成玉过程的复杂性和成矿规律, 将和田玉的成因类型划分为接触交代型 (矽卡岩型)、区域变质和变质热液型和热液交代型。大理岩型和和田玉的成因类型主要为接触交代型 (矽卡岩型)、区域变质和变质热液型。

### 1.1 接触交代型 (矽卡岩型)

接触交代型和田玉主要产于侵入岩体 (花岗岩/花岗闪长岩, 少数为石英闪长岩/辉绿岩/辉长岩等) 与围岩 (镁质大理岩/灰岩) 的接触带及其附近, 如新疆西昆仑-阿尔金山地区矽卡岩大理岩建造接触变质矿床。矿区内的岩浆活动提供了成矿热液, 构造活动提供了热液流通通道和成矿空间。矿物组合主要为接触交代的蚀变矿物, 从侵入岩体至和田玉矿体再至围岩, 蚀变矿物从高温到中温逐渐变化, 包括透辉石、透闪石、绿泥石等, 和田玉中还含有磷灰石、锆石、榍石等矿物 (唐延龄等, 1994; Harlow and Sorensen, 2001, 2005; 于庆文等, 2017)。

### 1.2 区域变质和变质热液型

区域变质和变质热液型和田玉的成因以动力变形作用为主, 重结晶作用居次要地位, 如四川龙溪绿片岩相-角闪岩相片岩变粒岩镁质碳酸盐岩建造变质矿床。由于温度较低, 该变质带变质程度较低, 均为低级变质岩。变质反应主要形成绢云母 (白云母) 和绿泥石的组合, 属于低温范围。一般形成绿片岩相单相变质岩系, 不出现渐变变质带和混合岩。形成的岩石常显示面理、线理, 因而又称为区域动力热变质作用。它是区域变质最常见的类

型, 因而常常称为区域变质作用、造山变质作用、区域低温动力变质作用、区域动力变质作用 (于庆文等, 2017)。

## 2 不同类型和田玉矿床的特征对比

中国新疆西昆仑地区、青海省格尔木、吉林省磐石市、黑龙江省铁力市、贵州省罗甸县、湖南省临武县、广西壮族自治区大化县、江苏省溧阳市、辽宁省岫岩县 (河磨玉)、四川省石棉县等地的和田玉矿床均属于接触交代型 (矽卡岩型/岩浆热液型) 矿床, 而辽宁省岫岩县 (老玉)、河南省栾川县、福建省南平市、四川省龙溪乡、韩国春川等地的和田玉矿床属于区域变质和变质热液型和田玉矿床。前者是最重要的和田玉矿床类型。通过对已有不同成因类型和田玉矿床中和和田玉的矿物组成、全岩主微量元素、H-O 同位素和锆石 U-Pb 年龄/云母 Ar-Ar 年龄总结对比, 可以探讨不同成因和田玉矿床的矿物组成、成矿流体来源、形成时代和形成过程。

### 2.1 矿物组成

和田玉的主要矿物透闪石-阳起石为角闪石族钙角闪石组的类质同像系列, 当  $Si = 7.5 \sim 8$  时, 透闪石和阳起石的种属划分主要看  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  值: 当  $Mg/(Mg+Fe^{2+}) = 0.9 \sim 1.0$  时为透闪石; 当  $Mg/(Mg+Fe^{2+}) = 0.5 \sim 0.9$  时为阳起石; 当  $Mg/(Mg+Fe^{2+}) = 0 \sim 0.5$  时为铁阳起石。根据电子探针测得的  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  值投图, 发现不同产地和田玉的主要矿物为透闪石, 少数为阳起石, 广西大化县黑色和田玉的主要成分为阳起石-铁阳起石 (图 1)。此外, 和田玉中还含有少量的透辉石、绿泥石、锆石、榍石、磷灰石、石榴石、绿泥石、绿帘石、硅灰石、云母等矿物。透闪石常呈显微纤维状或毛毡状沿解理面或裂隙交代透辉石, 晚期形成的细粒透闪石 (Tr-II) 交代早期形成的粗粒透闪石 (Tr-I), 绿泥石沿颗粒边界或裂隙交代透闪石 (Liu *et al.*, 2011b), 硅灰石常形成于富 Ca、贫 Mg 的环境中, 如青海省三岔口和田玉等 (周征宇等, 2006)。

和田玉的全岩主量元素一般使用 XRF 进行测试, 微量元素一般采用 ICP-MS 进行测试分析。前人研究表明, 和田玉的全岩  $Fe/(Mg+Fe)$  值通常小于 0.06, 如中国新疆阿拉玛斯和田玉的  $Fe/(Mg+Fe) = 0.02 \sim 0.06$  (Liu *et al.*, 2011b), 而碧玉则通常大于 0.06。在  $Fe/(Mg+Fe) - FeO$  图解 (图 2) 中, 多数



表 1 不同产地的和田玉特征一览表

Table 1 Characteristics of nephrites from different deposits

产地	成因类型	围岩类型	玉石种类	矿物组成	成矿温度	铀石 U-Pb 和云母 Ar-Ar 年龄	资料来源
新疆	接触交代型 (砂卡岩型)	矿带以中元古界长城系为主, 局部有古生代地层出露, 华力西期褶皱隆起有大量岩体侵入。玉矿产于白云石大理岩与石英闪长岩的接触带	青玉、白玉、糖玉等	透闪石为主, 透辉石、软榴石、磁铁矿等		和田玉中铀石 U-Pb 年龄为 $456 \pm 7$ Ma	唐延龄等, 1994; 刘喜峰等, 2017
	接触交代型 (砂卡岩型)	华力西期中酸性侵入岩侵入中元古界尉犁系的碎屑岩-碳酸盐岩 (由片岩、条带状大理岩及镁质大理岩组成) 中, 玉矿产于其接触带上	青白玉、青玉、白玉等	透闪石为主, 透辉石、阳起石、方解石等	280-425°C, 平均 293°C	花岗岩中铀石 U-Pb 年龄为 $418.5 \pm 2.8$ Ma; 和田玉中铀石 U-Pb 年龄为 $425.7 \pm 5.8$ Ma、 $420.0 \pm 9.9$ Ma	唐延龄等, 1994; Liu <i>et al.</i> , 2011b; Zhang <i>et al.</i> , 2016
	接触交代型 (砂卡岩型)	无围岩	白玉、青玉、墨玉等	透闪石为主, 磷灰石、金红石、榍石、钙铝榴石、透辉石、绿帘石、绿泥石、斜石、氢氧化铁、石墨、方解石、重晶石等		和田玉中铀石 U-Pb 年龄为 $389 \pm 4$ Ma、 $397.1 \pm 3.5$ Ma、 $440.7 \pm 4.4$ Ma、 $377.8 \pm 6.2$ Ma	Liu <i>et al.</i> , 2016
	接触交代型 (砂卡岩型)	加里东期岩浆活动为主, 主要为酸性岩和基性岩 (闪长岩、石英闪长岩、钾长花岗岩), 侵入于下元古界塔吉达坂群中段 (岩性为结晶片岩、花岗岩质混合片麻岩、结晶灰岩、镁质大理岩)	白玉、青玉、糖玉等	透闪石为主, 透辉石、方解石、蛇纹石、磷灰石、云母、黄铁矿、榍石、重晶石等		和田玉中铀石 U-Pb 年龄为 $916 \pm 10$ Ma、 $438 \pm 9$ Ma、 $431.1 \pm 2.5$ Ma; 和田玉中云母 Ar-Ar 年龄为 $417.7 \pm 5.9$ Ma、 $357 \pm 57$ Ma	Liu <i>et al.</i> , 2021
若羌县	接触交代型 (砂卡岩型)	戈壁滩	白玉、黄玉、青玉、糖玉等	透闪石为主, 透辉石、绿帘石、磷灰石、榍石、长石、钙铝榴石等		和田玉中铀石 U-Pb 年龄为 60-40 Ma、480 Ma、785 Ma、 $2460 \pm 1450$ Ma	刘喜峰等, 2019
青海省	接触交代型 (砂卡岩型)	中新元古界万宝沟群镁质大理岩与华力西期辉绿岩脉的接触部位	青玉、糖玉、黄玉等			和田玉中云母 Ar-Ar 年龄为 $271.32 \pm 2.24$ Ma	郭亮璞等, 2006; 陈有炬等, 2013; Yu <i>et al.</i> , 2016; 于海燕等, 2018
	接触交代型 (砂卡岩型)	上元古界万宝沟群碳酸盐岩与华力西期斑状二长花岗岩和花岗岩的接触部位	白玉、青玉、糖玉等	透闪石为主, 透辉石、方解石、蛇纹石、绿帘石、单斜辉石、绿泥石、绿帘石、斜磷帘石、榍石、钙长石、菱铁矿、磁铁矿等		东昆仑拉陵火地区的二长花岗岩中铀石 U-Pb 年龄为 $396.2 \pm 2$ Ma; 大灶火和田玉中云母 Ar-Ar 年龄为 $236.38 \pm 1.25$ Ma、 $301.25 \pm 1.6$ Ma; 小灶火和田玉中铀石 U-Pb 年龄为 $416.4 \pm 1.5$ Ma	陈静等, 2013; 晋成, 2016; Yu <i>et al.</i> , 2016; 于海燕等, 2018
	主要有两种类型, 一是呈渐变接触产于火成岩体与碳酸盐岩之间的接触交代型, 二是呈突变接触产于碳酸盐岩层中的热液充填型	中新元古界万宝沟群碳酸盐岩与基性辉长岩体接触部位	白玉、青玉、烟青玉、翠青玉等			纳赤台群基性火山岩的地质年代为奥陶纪 ( $500 \sim 440$ Ma); 和田玉中云母 Ar-Ar 年龄为 $240.59 \pm 1.7$ Ma、 $247.86 \pm 0.64$ Ma	Yu <i>et al.</i> , 2016; 于海燕等, 2018



续表 1  
Continued Table 1

产地	成因类型	围岩类型	玉石种类	矿物组成	成矿温度	锆石 U-Pb 和 云母 Ar-Ar 年龄	资料来源
吉林省磐石市	接触交代型 (砂卡岩型)	华力西晚期—印支早期的中酸性杂岩体与石英系石嘴子组大理岩、镁质大理岩接触带	青玉、黄玉、白玉等	透闪石为主, 方解石、白云石、绿帘石、透辉石、磷灰石等			Bai <i>et al.</i> , 2019
黑龙江省铁力市	接触交代型 (砂卡岩型)	下二叠统交界屯组与华力西期—印支期花岗岩长岩接触带	白玉、青玉、墨玉等	透闪石为主, 方解石、透辉石、磷灰石、蛇纹石、长石、石英等	300°C左右		Gao <i>et al.</i> , 2019
贵州省罗甸县	接触交代型 (砂卡岩型)	晚二叠世辉绿岩脉顺层侵入下二叠统四大寨组薄层碳酸盐岩中	白玉等	透闪石为主, 透辉石、方解石、石英、硅灰石、铁锰氧化物等			杨林, 2013
湖南省临武县	接触交代型 (砂卡岩型)	中侏罗世花岗岩侵入泥盆系与石炭系白云质灰岩接触带中	青玉等	透闪石为主, 透辉石、萤石、磁黄铁矿、白云石、硅酸盐等			杜绍华等, 1989; 柏道远等, 2016; 张勇等, 2017; 王柏宇, 2018
广西壮族自治区大化县	接触交代型 (砂卡岩型)	矿体赋存于辉绿岩接触带外带由灰岩或白云岩重结晶而形成的大理岩化蚀变带中	白玉、黄玉、青玉、墨玉等	透闪石或阳起石为主, 透辉石、绿帘石、钙铁榴石、榍石、方解石、石英、绿帘石、黑硬绿泥石、磁黄铁矿、黄铁矿等	250°C-327°C	辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为 260.5 ±3 Ma	徐立国等, 2016; Zhong <i>et al.</i> , 2019; Bai <i>et al.</i> , 2020
江苏省溧阳市	接触交代型 (砂卡岩型)	矿体产于燕山期西花岗岩与古生代二叠纪铁质碳酸盐岩接触带的透闪石岩体或砂卡岩之中	白玉、青玉等	透闪石为主, 透辉石、云母、磷灰石、褐铁矿等			李宏博, 2003
四川省石棉县	接触交代型 (砂卡岩型)	矿体产于内长岩与大理岩的接触带	白玉、青玉等	透闪石为主, 石英等			卢保奇, 2005; 杨世震等, 2016
辽宁省岫岩县 (河磨玉)	接触交代型 (砂卡岩型)	砂矿, 位于细玉沟河谷两侧凹地和白沙河河谷及两岸阶地中	青玉、白玉、黄白玉等	以透闪石为主, 少数为阳起石、透辉石、磷灰石、绿泥石、榍石、石英、榴石、铅石、磁铁矿、菱铁矿等		和田玉中锆石 U-Pb 年龄为 220.8 ±7.6 Ma, 岫岩广泛分布中生代花岗岩, 成矿时代为中生代 (约 250-150 Ma)	郑奋, 2019
辽宁省岫岩县 (老玉)	层控交代式中温型变质热液矿床	原生矿(老玉)位于细玉沟沟头的山坡和山顶上, 元古宙、三叠纪和侏罗纪 3 期岩体侵入白云石大理岩	青玉、青白玉等	透闪石、阳起石为主, 方解石、白云石、磷灰石、绿泥石、绿帘石、黄铁矿、蛇纹石、磁铁矿、滑石、石墨、褐铁矿等	223°C-392°C	因为老玉仅出现在辽河群中, 透闪石玉的 Ar-Ar 和 Pb-Pb 等时线年龄约为 17 亿年, 成矿时代为元古宙	王时麒等, 2007; 王时麒等, 2011
河南省栾川县	变质热液交代型 (区域角闪岩带或低压中高温区域变质作用的产物)	中基性岩脉或中酸性花岗岩类侵入含硅质条带或凝结核白云质大理岩	白玉、青白玉等	透闪石、阳起石为主, 绿泥石、榍石、金红石、方解石、白云石、滑石、磷灰石、蛇纹石等	129°C-286°C	火山岩 Rb-Sr 年龄 660 ±27 Ma, Sm-Nd 年龄 682 ±62 Ma	凌潇潇, 2012; 于庆文等, 2017
福建省南平市	区域变质岩的蚀变-退变质作用	产于龙北溪组的大理岩和透辉石大理岩中	白玉等	透闪石为主, 透辉石、磷灰石等			汤德平等, 1997
四川省龙溪乡	区域变质型	矿体赋存于志留系茂县群第 3 组第 2 段结晶灰岩或透闪片岩、变质火山岩、变质岩和砾质千枚岩的顶部, 与下伏深灰色结晶灰岩平行不整合, 同时被变质火山岩覆盖	青玉、碧玉等	透闪石为主, 白云石、榍石、蛇纹石、滑石、伊利石、石榴石、绿泥石和金属矿物等	660°C, 0.4 Gpa		王春云, 1993
韩国春川	区域变质型	产于黑云母片岩上部白云石大理岩与角闪石片岩接触带	白玉、青白玉等	透闪石为主, 磁黄铁矿、磷灰石等	低温、中低压; 330-420°C, 100-200 MPa	花岗岩中 K-Ar 年龄: 闪石 (210.5 ±5.0 Ma), 白云母 (179.1 ±3.7 Ma), 黑云母 (166-170 Ma)	Jin <i>et al.</i> , 1993; Noh <i>et al.</i> , 1993; Sekerin <i>et al.</i> , 1997; Yui and Kwon, 2002

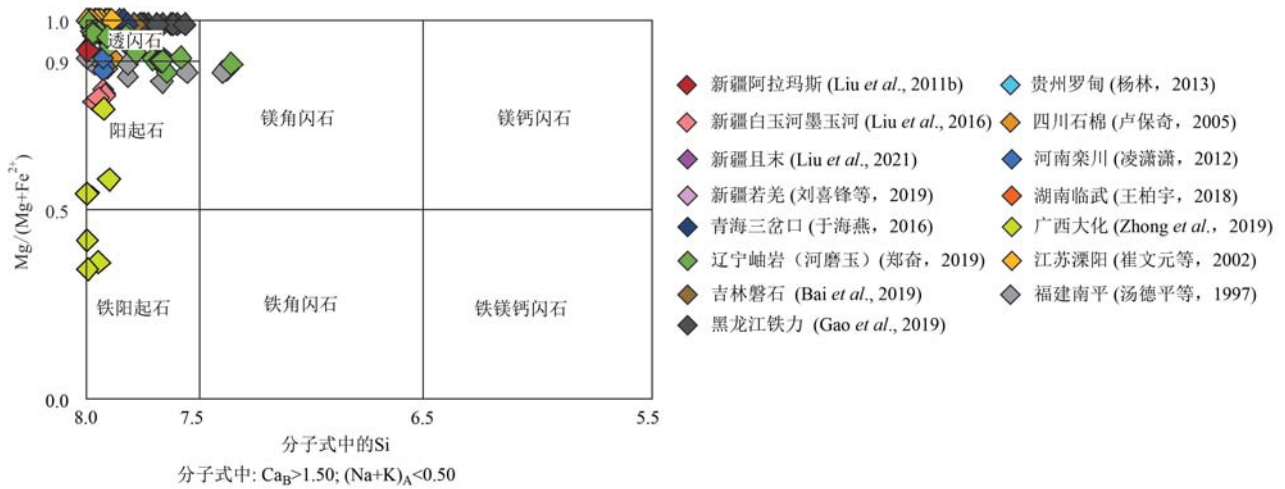


图1 不同产地和田玉的主要矿物钙角闪石分类图(王立本, 2001)

Fig. 1 Classification of calcium amphibole of nephrites from different deposits

产地和田玉主要落在与大理岩有关的和田玉区域,少数产地的部分和田玉样品落在与蛇纹岩有关的和田玉区域内,如白玉河墨玉河的墨玉,这种和田玉的Fe含量很高,与其颜色密切相关。因为和田玉中的Fe含量受地质环境的影响较大,常出现和田玉的 $Fe/(Mg+Fe) > 0.06$ 的特殊情况,因此还需要结合野外地质调查、区域地质和围岩特征、全岩Cr和Ni元素含量、氢氧同位素等特征来综合判断和田玉的成因类型。此外,通常情况下,大理岩型和田玉的全岩Cr( $2 \times 10^{-6} \sim 179 \times 10^{-6}$ )、Ni( $0.05 \times 10^{-6} \sim 471 \times 10^{-6}$ )含量低于蛇纹岩型和田玉中的Cr( $900 \times 10^{-6} \sim 2812 \times 10^{-6}$ )、Ni( $959 \times 10^{-6} \sim 1898 \times 10^{-6}$ )含量 (Grapes and Yun, 2010; Liu *et al.*, 2011b; Kostov *et*

*al.*, 2012; Siqin *et al.*, 2012),多数产地和田玉在Cr-Ni图解(图3)中主要落在与大理岩有关的和田玉区域。除了全岩微量元素分析外,LA-ICP-MS原位分析得到的大化和和田玉的Cr( $31.6 \times 10^{-6} \sim 62.8 \times 10^{-6}$ )、Ni含量( $648 \times 10^{-6} \sim 1692 \times 10^{-6}$ )与围岩辉绿岩脉的Cr( $58.8 \times 10^{-6}$ 、 $167 \times 10^{-6}$ )、Ni( $569 \times 10^{-6}$ 、 $700 \times 10^{-6}$ )有部分重叠(Bai *et al.*, 2020),说明该产地和田玉的形成可能与辉绿岩脉的侵入有关。

## 2.2 成矿温度和压力

为了探讨和田玉的成矿温度、压力,前人对和田玉中的流体包裹体采用爆破或均一测温法进行了成矿温压测试,结果发现透闪石通常在低温( $330 \sim 450^\circ\text{C}$ )、中低压( $100 \sim 200 \text{ MPa}$ )的条件下形成(Yui

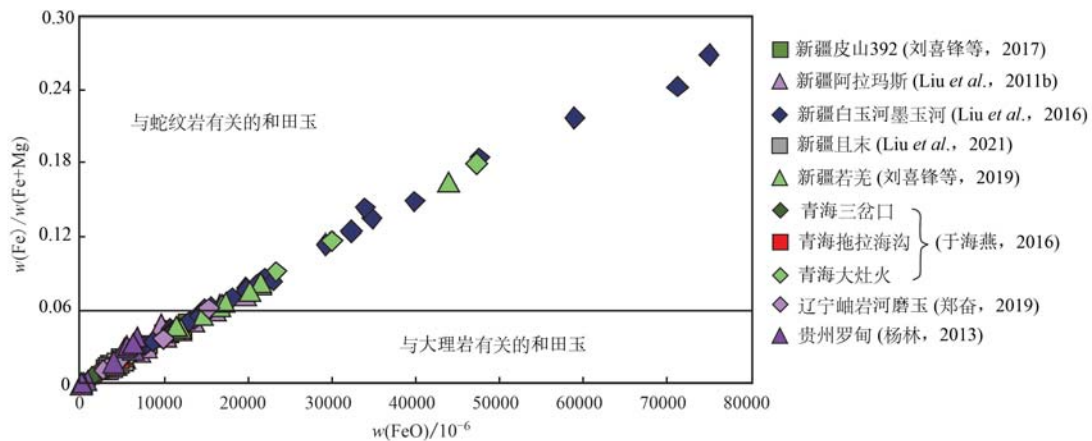


图2 不同产地和田玉的全岩 $Fe/(Mg+Fe)-FeO$ 成因判别图

Fig. 2 Genetic discrimination diagram of  $Fe/(Mg+Fe)-FeO$  in whole rocks of nephrites from different deposits

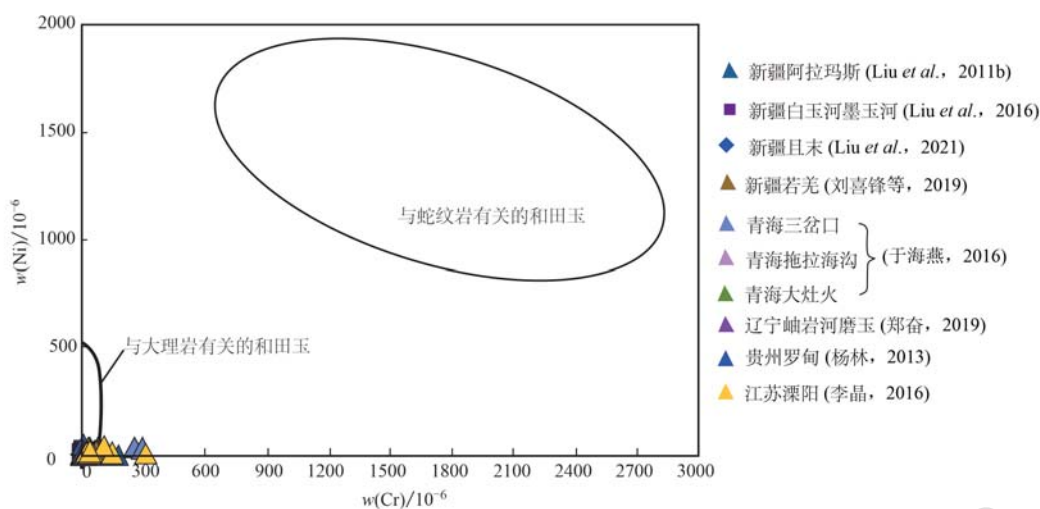


图3 不同产地和田玉的全岩 Ni-Cr 元素成因判别图

Fig. 3 Genetic discrimination diagram of Ni-Cr in whole rocks of nephrites from different deposits

*et al.*, 1988; Noh *et al.*, 1993; Sekerin *et al.*, 1997; Liu *et al.*, 2011a)。根据透闪石-透辉石矿物组合中的流体包裹体数据, 新疆阿拉玛斯和田玉的形成温度为 280~425℃, 平均 293℃ (Liu *et al.*, 2011b); 对与和田玉矿石中共生的黄铁矿包裹体采用爆破法和方解石包裹体均一法进行温度测定, 得到辽宁省岫岩县和田玉(老玉)的成矿温度为 223~392℃ (王时麒等, 2007), 广西大化县和田玉的成矿温度为 250~327℃ (徐立国等, 2014), 河南省栾川县和田玉的成矿晚期温度为 129~286℃ (凌潇潇, 2012), 贵州省罗甸县和田玉的成矿温度在 300℃ 左右 (杨林, 2013)。

### 2.3 成矿流体来源

前人通过研究和和田玉(透闪石)中的氢氧同位素特征来确定和田玉形成过程中的热液来源即成矿流体来源, 从而划分岩浆热液型和和田玉矿床和变质热液型和和田玉矿床。和田玉矿床的成矿流体在运移过程中可能因水岩反应、沸腾去气或流体混合等复杂过程而改变其初始同位素组成。假设与和田玉形成有关的热液在 330~450℃ 的温度下与透闪石平衡, 则可以通过透闪石和水之间的氧同位素分馏方程式  $10^3 \ln \alpha = 3.95 \times 10^6 / T^2 - 8.28 \times 10^3 / T + 2.38$  ( $\alpha$  为分馏系数,  $T$  为绝对温度) 计算出成矿溶液在 330、390 和 450℃ 的温度下与透闪石处于平衡状态的氧同位素 (Zheng, 1993a, 1993b)。Graham 等 (1984) 认为透闪石的  $\delta D$  值在 350~650℃ 的温度范围内变化不大, 通过透闪石-水之间的氢同位素分馏关系  $\delta D_{\text{透闪石-水}}$

$= -21.7\text{‰}$  可以计算出透闪石在 350~650℃ 处于平衡状态的成矿溶液的氢同位素  $\delta D$  值。不同产地和田玉矿床中成矿流体在 330、390 和 450℃ 的氧同位素组成和 350~650℃ 的氢同位素组成计算结果见表 2 和图 4 (图 4 中除广西大化样品的流体氧同位素值温度为 250℃ 外, 其它产地样品的流体氧同位素值温度均为 330℃)。新疆西昆仑-阿尔金山矿带和田玉的成矿流体主要为岩浆水和大气降水以不同比例混合而成, 随着温度升高, 向岩浆水区域演化, 温度降低则向大气降水演化。当围岩是大理岩时, 大理岩脱碳产生的  $\text{CO}_2$  也参与成矿流体组成 (Liu *et al.*, 2011b, 2016; Gil *et al.*, 2015; 刘喜锋等, 2017); 青海省小灶火和田玉的成矿流体很可能是岩浆水和变质水组成的混合热液, 晚期有大气降水的加入 (雷成, 2016); 广西大化县和田玉的成矿流体主要为岩浆热液, 晚期有大气降水加入 (徐立国等, 2014); 辽宁省岫岩县河磨玉的成矿流体大部分落在原生岩浆水域内, 部分落在变质水区域内, 随温度升高向变质水区域迁移, 但大部分仍在岩浆水附近。而辽宁省岫岩县老玉的成矿流体主要为变质水, 部分来自混合岩浆水, 综合 Si 同位素和 S 同位素特征, 老玉的矿物组成应主要来源于变质岩, 少部分来源于混合花岗岩浆 (王时麒等, 2007; 郑奋, 2019); 河南省栾川县和田玉的成矿流体主要为变质水 (凌潇潇, 2012); 韩国春川和田玉的成矿流体主要为大气降水 (Yui and Kwon, 2002), 这些矿床和田玉的成矿流体明显不同于主要由岩浆水组成的



表2 不同产地和田玉中透闪石的氢氧同位素分析结果

‰

Table 2 H-O isotope values of tremolite in nephrites from different deposits

产地	样号	$\delta D$	$\delta^{18}O$	$\delta D_{H_2O}$	$\delta^{18}O_{H_2O}$			数据来源
					330℃	390℃	450℃	
新疆皮山县 392	392-1	-81.9	4.99	-60.2	5.48	6.11	6.51	刘喜锋等, 2017
	392-2	-81.8	4.27	-60.1	4.76	5.39	5.79	
	392-3	-84	2.67	-62.3	3.16	3.79	4.19	
	392-4	-82.4	3.63	-60.7	4.12	4.75	5.15	
	392-5	-82.4	3.89	-60.7	4.38	5.01	5.41	
	392-6	-83	3.92	-61.3	4.41	5.04	5.44	
	392-7	-81.6	4.24	-59.9	4.73	5.36	5.76	
	392-8	-81	3.5	-59.3	3.99	4.62	5.02	
新疆阿拉玛斯	ABY-1	-86.7	3.8	-65	4.29	4.92	5.32	Liu <i>et al.</i> , 2011b
	ABY-2	-83	3.2	-61.3	3.69	4.32	4.72	
	AQB-1	-93.1	6.1	-71.4	6.59	7.22	7.62	
	AQB-2	-89	4.6	-67.3	5.09	5.72	6.12	
	AQB-3	-85.1	3.5	-63.4	3.99	4.62	5.02	
	AQB-4	-85.9	3.6	-64.2	4.09	4.72	5.12	
	AQB-6	-94.7	6.2	-73	6.69	7.32	7.72	
	AQY-1	-90.2	4.1	-68.5	4.59	5.22	5.62	
	AQY-2	-85	3.6	-63.3	4.09	4.72	5.12	
	AQY-3	-91.6	4.9	-69.9	5.39	6.02	6.42	
	AQY-4	-90.4	4.8	-68.7	5.29	5.92	6.32	
AQY-5	-86.2	3.8	-64.5	4.29	4.92	5.32		
新疆白玉河 墨玉河	MYH1	-97.1	0.8	-75.4	1.29	1.92	2.32	Liu <i>et al.</i> , 2016
	MYH2	-92.5	7	-70.8	7.49	8.12	8.52	
	MYH3	-107	4.6	-85.3	5.09	5.72	6.12	
	MYH4	-79.6	2.7	-57.9	3.19	3.82	4.22	
	MYH6	-62.6	5	-40.9	5.49	6.12	6.52	
	MYH7	-67	7.3	-45.3	7.79	8.42	8.82	
	MYH10	-46.3	4.9	-24.6	5.39	6.02	6.42	
	MYH11	-27.5	3.6	-5.8	4.09	4.72	5.12	
	MYH21	-39.4	5.4	-17.7	5.89	6.52	6.92	
	MYH24	-106	3.5	-84.3	3.99	4.62	5.02	
	MYH25	-41.1	3.7	-19.4	4.19	4.82	5.22	
	MYH30	-80.1	2.7	-58.4	3.19	3.82	4.22	
	MYH31	-85	7.6	-63.3	8.09	8.72	9.12	
	MYH32	-84.8	1.5	-63.1	1.99	2.62	3.02	
	MYH33	-86	1.1	-64.3	1.59	2.22	2.62	
	MYH34	-77	6.6	-55.3	7.09	7.72	8.12	
	MYH35	-90.9	2	-69.2	2.49	3.12	3.52	
	MYH36	-107	2.1	-85.3	2.59	3.22	3.62	
	MYH37	-91.3	3.4	-69.6	3.89	4.52	4.92	
	MYH38	-86.5	3.6	-64.8	4.09	4.72	5.12	
	MYH39	-58.3	6.7	-36.6	7.19	7.82	8.22	
	MYH40	-76.5	3.9	-54.8	4.39	5.02	5.42	
	MYH41	-77.5	3.8	-55.8	4.29	4.92	5.32	
	MYH42	-57.4	4.3	-35.7	4.79	5.42	5.82	
	MYH43	-108	2.9	-86.3	3.39	4.02	4.42	
MYH44	-86.2	3	-64.5	3.49	4.12	4.52		
MYH50	-85.2	4.9	-63.5	5.39	6.02	6.42		
MYH51	-99.6	2.2	-77.9	2.69	3.32	3.72		
MYH52	-78.5	7.9	-56.8	8.39	9.02	9.42		
MYH54	-87.7	2.5	-66	2.99	3.62	4.02		
MYH55	-103	6	-81.3	6.49	7.12	7.52		

续表 2  
Continued Table 2

产地	样号	$\delta D$	$\delta^{18}O$	$\delta D_{H_2O}$	$\delta^{18}O_{H_2O}$			数据来源
					330℃	390℃	450℃	
新疆白玉河 墨玉河	MYH56	-95	3.5	-73.3	3.99	4.62	5.02	Liu <i>et al.</i> , 2016
	MYH57	-109	4.3	-87.3	4.79	5.42	5.82	
	MYH58	-71.8	4	-50.1	4.49	5.12	5.52	
	MYH59	-92.6	1.6	-70.9	2.09	2.72	3.12	
新疆且末县	QB-1-03-4	-87	4.1	-65.3	4.59	5.22	5.62	Gil <i>et al.</i> , 2015
	QB-3-03-1	-73.4	3.6	-51.7	4.09	4.72	5.12	
	QB-3-03-2	-49.8	3.6	-28.1	4.09	4.72	5.12	
	QJ-1-02	-79.3	2.9	-57.6	3.39	4.02	4.42	
	QB-1-03-5	-77.2	3.5	-55.5	3.99	4.62	5.02	
	QB-1-03-6	-77.7	3.5	-56	3.99	4.62	5.02	
辽宁省岫岩县 (河磨玉)	LHM15-1	-88.23	8.4	-66.53	8.89	9.52	9.92	郑奋, 2019
	LHM15-2	-75.2	8.5	-53.5	8.99	9.62	10.02	
	LHM15-3	-93.29	8.8	-71.59	9.29	9.92	10.32	
	LHM15-4	-94.95	9.3	-73.25	9.79	10.42	10.82	
	LHM15-5	-78.51	10.6	-56.81	11.09	11.72	12.12	
	LHM15-6	-93.78	8.2	-72.08	8.69	9.32	9.72	
	LHM15-7	-86.58	8	-64.88	8.49	9.12	9.52	
河南省栾川县	R3	-57	14.1	-35.3	14.59	15.22	15.62	凌潇潇, 2012
	R5	-77	14.3	-55.3	14.79	15.42	15.82	
韩国春川	NE-1	-108	-8.7	-86.3	-8.21	-7.58	-7.18	Yui and Kwon, 2002
	NE-2	-114	-8.4	-92.3	-7.91	-7.28	-6.88	
	NE-3	-105	-9.9	-83.3	-9.41	-8.78	-8.38	
	NE-4	-107	-9.0	-85.3	-8.51	-7.88	-7.48	
	NE-5	-108	-8.2	-86.3	-7.71	-7.08	-6.68	
	NE-6	-112	-8.6	-90.3	-8.11	-7.48	-7.08	
	NE-7	-109	-8.9	-87.3	-8.41	-7.78	-7.38	
	NE-8	-110	-9.3	-88.3	-8.81	-8.18	-7.78	
	NE-9	-109	-9.2	-87.3	-8.71	-8.08	-7.68	
广西壮族自治区 大化县	D-4	-76.9	12.3	-72.0 (250~327℃)	8.62 (250℃)	6.34 (288℃)	4.35 (327℃)	徐立国等, 2014
	D-8	-79.8	10.5	-74.0 (250~327℃)	8.02 (250℃)	5.74 (288℃)	3.98 (327℃)	

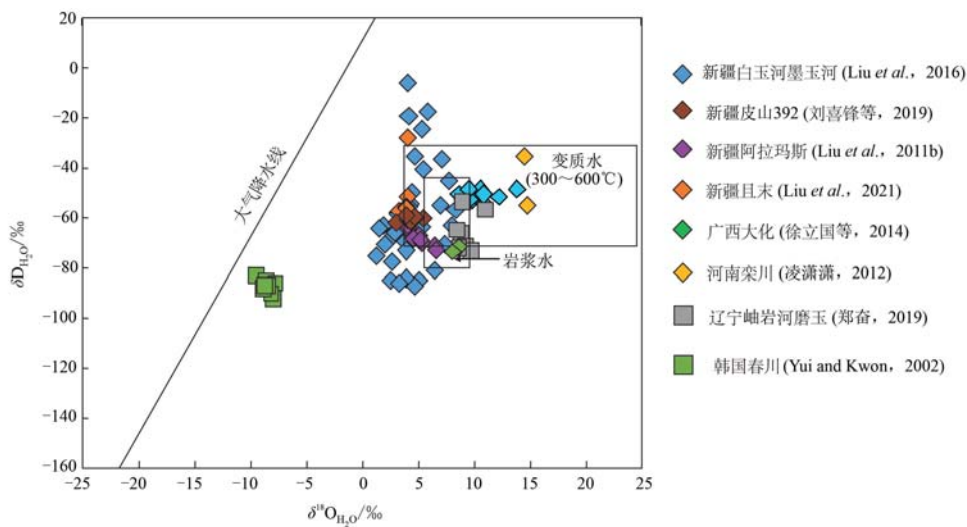


图 4 不同产地和田玉的成矿流体 H-O 同位素组成

Fig. 4 H-O isotope characteristics of ore-forming fluid of nephrites from different deposits

矽卡岩型和和田玉。

#### 2.4 和田玉中锆石 U-Pb 年龄和其它年龄特征

以往和田玉中的云母发现较少, 鉴于云母较易受后期热液改造的影响, 在某些矿床中未发现(如阿拉玛斯和皮山县 392 矿床等), 仅在少部分地区发现云母(如且末、青海矿床), 因此使用云母 Ar-Ar 定年的和田玉矿床较少。近年来, 在和田玉中发现有大量残留的岩浆岩副矿物如锆石等(Liu *et al.*, 2015, 2016; 雷成, 2016; 刘喜锋等, 2017, 2019; Liu *et al.*, 2021)。和田玉中的锆石常见于青玉、墨玉中, 而白玉中极为少见, 这与空间上矽卡岩型和和田玉的矿物分带一致, 青玉和墨玉更接近接触带区的花岗岩/花岗闪长岩, 而白玉更接近大理岩。和田玉中的锆石常呈半自形或他形产出, 部分呈自形, 锆石 CL 图像大部分具有补丁状或模糊的震荡环带, 显示流体交代的特征, 少数具有清晰的震荡环带, 与岩浆锆石特征相似; 部分锆石 BSE 图像伴有树枝状或不规则状的裂隙, 表明经历了多期的构造活动和流体活动, 且这些锆石沿裂隙还充填有绿泥石、透闪石等矿物包裹体, 表明锆石的形成早于和田玉的形成。此外锆石中还含有透辉石、磷灰石、方解石、斜锆石等矿物包裹体(Liu *et al.*, 2015, 2016; 雷成, 2016)。新疆阿拉玛斯和田玉中锆石的稀土元素配分曲线与阿拉玛斯花岗岩中锆石的稀土元素配分曲线相似, 据此推测和田玉中的锆石主要来自花岗岩/花岗闪长岩, 和田玉中锆石在  $La - (Sm/La)_N$  和  $(Sm/La)_N - Ce/Ce^*$  投图中主要落在岩浆锆石范围内, 部分向热液锆石转变但非热液锆石(Liu *et al.*, 2015)。因此, 和田玉的形成时代可以通过综合区域地质背景、围岩或成矿花岗岩的年龄及与和田玉共生的云母 Ar-Ar 年龄来约束(表 1)。

在中国新疆西昆仑-阿尔金山矿带的和田玉中发现有大量锆石, 而在韩国春川和田玉中几乎没有发现锆石产出, 这可能与韩国春川和田玉在区域地质上产于黑云母片岩上部白云石大理岩与角闪石片岩接触带, 距花岗岩岩体较远(Yui and Kwon, 2002)、具区域变质成因有关。新疆西昆仑-阿尔金山矿带和田玉中锆石的 U-Pb 年龄为 450~350 Ma(刘喜锋等, 2017, 2019; Liu *et al.*, 2015, 2016; Liu *et al.*, 2021), 阿拉玛斯花岗岩中锆石的年龄为  $418.5 \pm 2.8$  Ma, 约束了和田玉的形成年龄上限。青海省 3 个矿区和田玉中云母的 Ar-Ar 年龄跨度约为 70 Ma, 三岔口玉矿为  $240.59 \pm 1.74$  Ma、 $247.86 \pm$

$0.64$  Ma, 拖拉海沟玉矿为  $271.32 \pm 2.24$  Ma, 大灶火玉矿为  $237.28 \pm 1.14$  Ma、 $301.38 \pm 1.54$  Ma, 表明青海省和田玉的成矿过程与多期岩浆作用有关(Yu *et al.*, 2016; 于海燕等, 2018), 和田玉的形成年龄为 300~240 Ma。小灶火和田玉中锆石的年龄为  $416.4 \pm 1.5$  Ma(雷成, 2016), 结合东昆仑拉陵灶火地区二长花岗岩中锆石的 U-Pb 年龄( $396.2 \pm 2$  Ma; 陈静等, 2013)以及三岔口和拖拉海沟玉矿的侵入岩——纳赤台群基性火山岩的年龄(500~440 Ma; 郭宪璞等, 2006; 陈有炘等, 2013), 青海省和田玉与新疆和田玉处于昆仑山脉同一条成矿带上, 认为和田玉的形成与西昆仑造山带原特斯构造演化的后碰撞阶段形成的花岗岩(450~400 Ma)有关。辽宁省岫岩县和田玉的成矿时代为中生代(河磨玉, 约 250~150 Ma)或元古宙(老玉, 约 1700 Ma)(王时麒等, 2007; 郑奋, 2019)。此外, 还可以通过围岩的年龄约束和田玉的形成时代, 如河南省栾川县火山岩 Rb-Sr 年龄为  $660 \pm 27$  Ma, Sm-Nd 年龄为  $682 \pm 62$  Ma(凌潇潇, 2012); 广西大化县辉绿岩的锆石年龄为 260 Ma(徐立国等, 2016); 韩国春川花岗岩 K-Ar 年龄为角闪石( $210.5 \pm 5.0$  Ma)、白云母( $179.1 \pm 3.7$  Ma)、黑云母(166~170 Ma)(Yui and Kwon, 2002)。其它矿区和田玉的具体形成年龄有待于结合区域地质以及更精准的测试定年来确定。同一矿区不同年龄的单个锆石可以反映锆石在形成过程中经历的事件, 一些锆石不谐和的差异较大的且较老的锆石年龄可能继承自岩浆通过地壳上升时所接触的围岩。

### 3 和田玉的形成过程

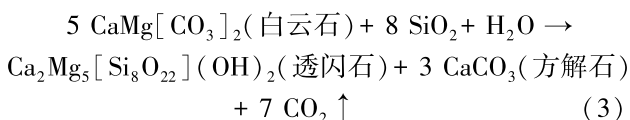
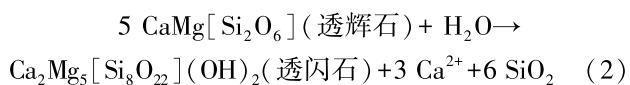
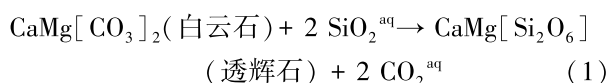
#### 3.1 接触交代型(矽卡岩型)

接触交代型和田玉矿床通常具有以下几个特征: ① 主要赋存于太古界、元古界中, 少数为早古生界, 古老的镁质碳酸盐岩可以为透闪石的形成提供必不可少的物质来源; ② 空间分布主要位于地壳缝合带处, 如阿尔金山-祁连山地缝合带、昆仑山秦岭大别山缝合带等, 这些巨型的构造带都经历了长期强烈复杂的构造变动, 褶皱断裂发育, 并控制着岩浆岩带和变质岩带的发育和展布, 为透闪石的形成提供了有利的空间条件; ③ 侵入岩一般都为中酸性的大岩体(花岗岩/花岗闪长岩), 少数为中基性岩(辉绿岩等), 为和田玉的形成提供丰富的  $SiO_2$ (于庆文等, 2017); ④ 多期的热液流体活动促进了



透闪石的细粒化过程,即晚期形成的细粒透闪石交代早期形成的粗粒透闪石(Tr I → Tr II → Tr III),从而形成优质的和田玉。

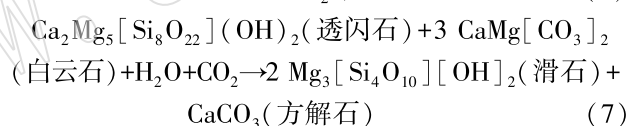
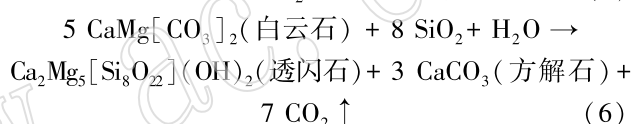
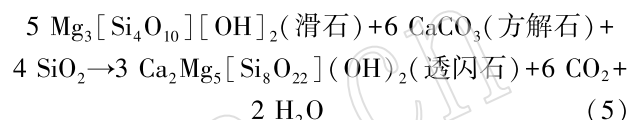
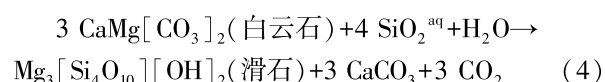
以阿拉玛斯和田玉的形成过程为例(Liu *et al.*, 2015),和田玉的形成经历了岩浆作用阶段、接触变质和变质交代阶段、早期进变质阶段和晚期退变质阶段。岩浆阶段的矿物主要包括锆石、磷灰石和尖晶石等;接触变质和变质交代阶段与花岗岩岩浆的初始侵位是同时发生的,富含活性SiO<sub>2</sub>的高温硅质热液与富镁大理岩反应,在高温时可形成透辉石,当Mg含量较低而Ca含量较高则形成硅灰石;进变质阶段,随着大气水的加入,温度和压力开始降低,透辉石、方解石、石英等被早期粗粒的透闪石交代而保留矿物假像,之后粗粒透闪石又被细粒透闪石交代,形成和田玉;退变质阶段通常存在低温热液活动(Calagari, 2004),与侵入体距离越远,温度越低,花岗岩及白云岩的围岩相关演化增强,氧逸度下降,这有利于硫化物和碳酸盐发生退变质。随着温度的降低,Fe、Pb、Zn、H<sub>2</sub>S和CO<sub>2</sub>以及其它挥发分从岩浆中分离,形成一系列的硫化物和碳酸盐矿物(Liu *et al.*, 2015, 2016)。和田玉形成的交代过程为白云石大理岩→透辉石砂卡岩或绿帘石砂卡岩→透闪石砂卡岩。粗粒透闪石(Tr-I)→细粒透闪石(Tr-II)、绿泥石→透闪石。成矿物质中的Mg和Ca主要来自白云石大理岩,而Si和H<sub>2</sub>O来自岩浆热液,成矿流体主要为岩浆水、大气降水和大理岩脱CO<sub>2</sub>以不同比例混合组成。反应式如下:



### 3.2 区域变质和变质热液型

区域变质型和和田玉矿床以四川龙溪和田玉(王春云, 1993)为例。和田玉矿体位于古老变质的富镁碳酸盐岩系中,成矿作用与区域变质作用密切相关,而不依赖岩浆活动,矿床分布于绿片岩相-角闪岩相的变质带中。和田玉的形成经历了早期变质结晶、构造期变形、重结晶和热液蚀变作用,其交代过程为白云石→滑石→透闪石。白云石大理岩与硅质溶液相互作用,在流体CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O值小的情况下先形

成滑石,随着温度的升高,再形成透闪石;当流体CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O值非常高时可直接形成透闪石,如果温度继续升高,透闪石将形成透辉石和镁橄榄石(陶维屏, 1994)。但和田玉形成是发生在温度较低的情况下,因此和田玉中极少见橄榄石。透闪石片岩形成的温度压力条件为500~600℃、4 000×10<sup>5</sup>~5 000×10<sup>5</sup> Pa,明显高于变形作用所需的温压条件。热液蚀变过程可通过退变质反应(7)进行,退变质阶段强烈的变形作用及伴随的热液蚀变作用共同产生。反应方程式可表示为:



变质热液型和和田玉矿床以辽宁省岫岩县老玉(王时麒等, 2007)为例。和田玉的形成经历了沉积作用、变质作用和混合岩化作用、热液交代作用以及之后的风化作用。白云岩沉积阶段发生在早元古代中期(20亿年左右),为浅海相沉积,形成了分布广泛、巨厚的大石桥组白云岩,为岫岩玉的形成奠定了丰富的物质基础;白云岩变质阶段发生在早元古代晚期(18亿年左右),区域变质作用使原岩发生变质和变形作用,白云岩重结晶形成白云大理岩,黏土质和硅质等杂质成分重组合形成橄榄石、透辉石、硅镁石、长柱状透闪石等;热液交代成玉阶段发生在早元古代末期(17亿年左右),伴随强烈的变质作用和混合岩浆作用,形成了富硅的热热水溶液,当热液沿裂隙进入大理岩中,发生交代作用,热液中的Si和H<sub>2</sub>O与大理岩中的Ca和Mg结合形成了蛇纹石玉和透闪石玉的原生矿床;风化作用阶段,发生在新生代(6千万年至今),为近代地质作用,裸露地表的玉石受到Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>溶液的浸染,部分透闪石玉变成糖玉,部分玉石矿体因地壳运动抬升较高,经过风化、破碎、搬运和沉积,则形成了坡积、洪积和冲积矿床(王时麒等, 2007)。

前人通过产出的位置判断河磨玉是由出露地表

的老玉经历风化破碎和搬运沉积而形成的(王时麒等, 2007), 丘志力等(2010)通过河磨玉与老玉中石墨包裹体的形态、结晶度和结晶条件研究发现, 河磨玉中的石墨包体在麻粒岩-高角闪岩相的条件下结晶, 而老玉中的石墨包体在角闪岩相-绿片岩相的条件下结晶。此外, 河磨玉与老玉的稀土元素配分曲线、成矿流体来源、年龄等方面也存在较大差异, 因此河磨玉与老玉的成因机制应该是不同的, 河磨玉的形成应该与大理岩和花岗岩的接触交代变质作用有关(郑奋, 2019)。

## 4 和田玉的空间分布特征和找矿方向

本文将中国和田玉矿床分为6个矿带和矿区, 包括西昆仑-阿尔金山矿带的新疆(莎车-叶城、和田-于田、且末-若羌矿带)、东昆仑矿带的青海格尔木(大小灶火、三岔口、拖拉海沟)、东北地区(辽宁岫岩、吉林磐石、黑龙江铁力)、西南地区(贵州罗甸、四川石棉和龙溪)、中南地区(河南栾川、湖南临武、广西大化)和华东地区(江苏溧阳、福建南平)。

### 4.1 西昆仑-阿尔金山和田玉矿带(新疆地区)

和田玉矿床在构造上呈北西-东西-北东向线状分布, 西起塔什库尔干, 经莎车县、叶城县、和田县、于田县, 东至罗布泊西南的若羌县, 在长达1300多千米的山脉里均有和田玉原生矿的产出, 由西向东可划分为莎车-叶城、和田-于田、且末-若羌3个矿带(唐延龄等, 1994)。与成矿有关的地层为中元古界的蓟县系和长城系, 这些地层中广泛发育镁质大理岩, 和田玉矿的形成主要是华力西期的花岗岩及闪长岩后期侵入, 沿着围岩的接触面及破碎带交代镁质大理岩的结果(于庆文等, 2017)。

#### 4.1.1 莎车-叶城地区

指东经 $76^{\circ}\sim 78^{\circ}$ 之间的地区, 塔什库尔干河及提孜那浦河二河上游之间的前震旦纪隆起区, 区内构造线的走向一般为北西向。和田玉矿点位于前震旦纪隆起中次级断裂之旁侧, 矿化带断续出露长约70 km。玉矿点主要包括大同玉矿、皮勒玉矿、密尔岱玉矿等。单个和田玉矿床矿化带一般宽3~5 m, 矿脉厚0.1~0.6 m, 矿化带最长约100 m多, 单矿脉长1.4~1.8 m, 玉石以青玉、青白玉为主, 少量为白玉(周兵等, 2011)。

#### 4.1.2 和田-于田地区

指东经 $78^{\circ}\sim 82^{\circ}$ 之间的地区, 昆仑山北部之前

震旦纪隆起的两侧, 和田玉矿点一般也与次级断裂有关。玉矿点主要包括皮山县玉矿、赛图拉玉矿、康西瓦玉矿、阿格居改(黑山)玉矿、阿拉玛斯玉矿等。矿化带断续出露长约450 km, 矿脉一般长10~200 m, 厚0.3~1.5 m, 玉石以白玉、青白玉、青玉为主, 子料主要分布在玉龙喀什河(白玉河)和喀拉喀什河(墨玉河)及其古老河床阶地上(周兵等, 2011)。

#### 4.1.3 且末-若羌地区

指东经 $82^{\circ}\sim 84^{\circ}$ 之间的区域, 和田玉矿点分布在阿尔金山西段北坡, 成玉地段所处的构造位置是塔里木地台的阿尔金断块的北部。构造线走向为北东东-南西西。玉矿点主要包括塔特勒克苏玉矿、塔什萨依玉矿、金山-天泰玉矿、若羌戈壁玉矿等。原生矿床矿脉一般长10~40 m, 厚0.1~2.6 m, 以青白玉、糖玉、黄玉为主(周兵等, 2011)。

### 4.2 东昆仑和田玉矿带(青海格尔木地区)

和田玉矿带位于柴达木地台(一级构造单元)东昆仑北坡断裂隆起带(二级构造单元)中段, 为塔里木-柴达木板块柴达木板段东昆仑火山岩浆弧带(汤红云等, 2012), 与新疆和田玉矿位于同一成矿带上。根据地质调查, 青海省和田玉矿床包括纳赤台(三岔口)、大(小)灶火和拖拉海沟3个主要矿带, 由30多个不同地质背景的和田玉矿体组成(汤红云等, 2012)。青海省和田玉矿体是昆仑造山带形成和演化过程中岩浆岩和碳酸盐岩的交代产物(冯晓燕等, 2004; Siqin *et al.*, 2012)。大(小)灶火和田玉产于上元古界万宝沟群碳酸盐岩与华力西期斑状二长花岗岩和花岗闪长岩接触部位, 主要为白玉、青白玉、糖玉; 三岔口和田玉产于中新元古界万宝沟群碳酸盐岩组与基性辉长岩体接触部位, 主要有两种类型, 一是呈渐变接触产于火成岩体与碳酸盐岩之间的接触交代型, 二是呈突变接触产于碳酸盐岩层中的热液充填型, 主要为白玉、青白玉、青玉、烟青玉和翠青玉; 拖拉海沟和田玉产于中新元古界万宝沟群镁质大理岩与华力西期辉绿岩脉的接触部位, 主要为青玉、糖玉和黄玉, 岩石具滑石化、透闪石化、蛇纹石化等(董必谦, 1996; 周征宇等, 2006; 汤红云等, 2012; 于庆文等, 2017)。

### 4.3 东北地区

东北地区和田玉矿床主要位于辽宁省岫岩县、吉林省磐石市和黑龙江省铁力市, 以辽宁省岫岩县和田玉矿床为例。

辽宁省岫岩县和田玉矿床位于华北地台东北

部,辽东台隆营口-宽甸古隆起的西端。原生矿位于岫岩县细玉沟沟头的山顶上,当地人称之为“老玉”。和田玉产于元古宙辽河群大石桥组三段的透闪石白云质大理岩中的构造破碎带间,严格受地层层位和构造的控制,为层控型交代式中温型变质热液矿床。矿体一般呈比较规则的脉状或板状,矿脉长约120 m,深约100 m,总厚2~3 m。围岩蚀变为透闪石化、蛇纹石化、滑石化、绿泥石化和碳酸盐岩化,其中透闪石化比较普遍。部分和田玉具有厚度不等的白色皮层,与其内部的“玉肉”有明显的界线,当地称之为“石包玉”,被认为是由于玉体接近地表风化褪色所致。次生和田玉矿位于细玉沟东侧白沙河河谷底部及两岸的一级阶地泥砂砾石层中,沿细玉沟山麓沟谷和凹地呈东西向分布,长约7 km,当地人称之为“河磨玉”。此外,细玉沟流出沟口至瓦房店村与北西向的白沙河(也称洋河)交汇,至王家堡子一带的河床、河漫滩和两岸阶地中也有次生矿分布,长约5 km。“河磨玉”普遍风化,形成厚度不一的带色外皮,皮的颜色为褐红、褐黄、灰褐、黑色等(王时麒等,2007)。

#### 4.4 西南地区

西南地区和田玉矿主要位于贵州省罗甸县、四川省石棉县和龙溪乡,以贵州省罗甸县和田玉矿床为例。

贵州省罗甸县和田玉矿床位于右江褶皱带东端,北邻扬子准地台。和田玉呈层状、似层状、透镜状、不规则团块状产于中晚二叠世辉绿岩与碳酸盐岩的接触变质带中,玉石与围岩呈渐变过渡关系,单层厚10~35 cm,薄者仅3~8 cm(于庆文等,2017),品种为白玉、青玉、青白玉和花斑玉(张亚东等,2015)。

#### 4.5 中南地区

中南地区和田玉矿主要位于河南省栾川县、湖南省临武县和广西壮族自治区大化县,以河南省栾川县和田玉矿床为例。

河南省栾川县和田玉矿床位于华北板块南缘,东秦岭中央造山带的北部,矿体大部分产于蛇纹石玉内,呈灰白、青色,部分产于蚀变辉绿岩脉附近的小型挤压带内,与蛇纹石玉呈层状或脉状相间分布。矿体一般长1.5~4 m,厚约0.1~0.3 m,约有8条和田玉脉呈串珠状排列,少量呈团块状产出。和田玉颜色偏灰,灰白色、青白色(阴江宁,2006;凌潇

潇,2012)。

#### 4.6 华东地区

华东地区的和田玉矿床主要位于江苏省溧阳市和福建省南平市,以江苏省溧阳市和田玉矿床为例。

江苏省溧阳市和田玉矿床位于溧阳县小梅岭村的东南部,又被称为“梅岭玉”,矿体呈脉状、网状或不规则状产于燕山期庙西花岗岩与古生代镁质碳酸盐岩的接触带中。和田玉以灰白色-灰青色为主,均带有一定程度的灰色调(钟华邦,2000;李红军等,2008)。

### 5 和田玉的找矿方向

和田玉是中国重要的非金属矿产,其找矿线索和方向包括:

(1) 矿化标志:指矿体露头或矿化现象,为直接找矿标志;

(2) 构造标志:和田玉主要产于构造活动强烈的地区,深大断裂或与之有关的次级断裂及褶皱构造既是多期次成矿热液的迁移通道(透闪石的细粒化),又是容矿的有利场所;

(3) 围岩标志:和田玉矿体主要产于侵入岩与白云石大理岩的接触蚀变带,与和田玉形成有关的侵入岩主要为中酸性岩及其派生脉岩(如花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩等),少数为基性岩(如辉绿岩等);

(4) 围岩蚀变标志:和田玉矿体主要产于矿化带内蚀变较强烈的地段,主要包括透辉石化、透闪石化、绿泥石化、蛇纹石化等;和田玉形成于低温中低压条件下,因此低压环境的构造薄弱地带,中低温蚀变交代发育的地带具有和田玉的找矿远景;

(5) 子料和山流水溯源原生矿床:和田地区玉龙喀什河、喀拉喀什河、策勒河和克里雅河这4条主要河流含有次生沉积砂矿,原生和田玉矿床次生沉积形成砂矿的两个主要因素是高海拔和冰川活动/物理风化,冰川活动是将原生和田玉搬运到低海拔地区最重要方式;此外,原生和田玉矿床经历物理风化后破碎,之后受重力作用沿斜坡搬运,在搬运过程中可借助水流搬运;

(6) 其他标志:古矿洞标志、地名标志等(如喀拉喀什河又名墨玉河)(Liu *et al.*, 2016)。



## References

- Bai Daoyuan, Wu Nengjie, Zhong Xiang, *et al.* 2016. Petrogenesis and tectonic setting of Indosinian Wawutang granites, southwestern Hunan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(5): 1 075 ~ 1 091 (in Chinese with English abstract).
- Bai F, Du J M, Li J J, *et al.* 2020. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of green nephrite from Dahua, Guangxi, Southern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 118: 103362.
- Bai F, Li G, Lei J, *et al.* 2019. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of nephrite from Panshi, Jilin, Northeast China[J]. *Ore Geology Reviews*, 115: 103171.
- Calagari A A. 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23 (2): 179~189.
- Chen Jing, Xie Zhiyong, Li Bin, *et al.* 2013. Petrogenesis of devonian intrusive rocks in Lalingzaohuo area, Eastern Kunlun, and its geological [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 33(2): 26~34 (in Chinese).
- Chen Youxin, Pei Xianzhi, Li Ruibao, *et al.* 2013. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and tectonic significance of metavolcanic rocks from Najj Tal Group, east section of East Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 1 215~1 216 (in Chinese).
- Cui Wenyuan, Wu Weijuan and Liu Yan. 2002. Study on Liyang tremolite jade[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(z1): 91~98 (in Chinese).
- Dong Biqian. 1996. Geological profile and jade characteristics of Golmud nephrite in Qinghai Province[J]. *Building Materials Geology*, (5): 23~28 (in Chinese).
- Du Shaohua and Qiu Ruizhao. 1989. A preliminary study on the REE evolution characteristics and their formation mechanism of the granitoids in Xianghualing district[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, (1): 131~142 (in Chinese).
- Feng Xiaoyan and Zhang Beili. 2004. Study on compositions and texture characteristics of nephrite from Qinghai Province[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 6(4): 7~9 (in Chinese).
- Gao S J, Bai F and Heide G. 2019. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of nephrite from Tieli, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 155~171.
- Gil G, Barnes J D, Boschi C, *et al.* 2015. Nephrite from Złoty Stok (Sudetes, SW Poland): Petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin [J]. *The Canadian Mineralogist*, 53 (3): 533~556.
- Graham C H, Harmon R S and Sheppard S M F. 1984. Experimental hydrogen isotope studies: Hydrogen isotope exchange between amphibole and water[J]. *American Mineralogist*, 69: 128~138.
- 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.
- Guo Xianpu, Wang Naiwen, Ding Xiaozhong, *et al.* 2006. Palaeontological proof of the Najj Tal Group-Complex as Mélange aggregation in the eastern Kunlun orogenic belt and its geologic significance[J]. *Geological Review*, 52(3): 289~294 (in Chinese).
- Harlow G E and Sorensen A S S. 2001. Jade: Occurrence and metasomatic origin [J]. *The Australian Gemmologist*, 21: 7~10.
- Harlow G E and Sorensen A S S. 2005. Jade (nephrite and jadeitite) and serpentinite: Metasomatic connections [J]. *International Geology Review*, 47(2): 113~146.
- Jin M S, Shin S C, Kim S J, *et al.* 1993. Geochronology and thermal history of the Chuncheon granite in the Gyeonggi massif, South Korea [J]. *Journal of Petrological Society of Korea*, 2: 122 ~ 129 (in Korean).
- Kostov R I, Protochristov C, Stoyanov C, *et al.* 2012. Micro-PIXE geochemical fingerprinting of nephrite Neolithic artifacts from South west Bulgaria [J]. *Geoarchaeology*, 27: 457~469.
- Leaming S F. 1978. Jade in Canada [M]. Ottawa: Geological Survey of Canada Papers Press, 1~59.
- Lei Cheng. 2016. Genesis of Xiaozhaohuo Nephrite Deposit in East Kunlun [D]. China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese).
- Li Hongbo. 2003. Geological Characteristics of Nonmetallic Deposits and Gemmology of Nephrite in Xiaomeiling, Liyang County, Jiangsu Province [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Li Hongjun and Cai Yitao. 2008. Study on Characteristics of nephrite from Liyang, Jiangsu Province [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, (3): 16~19, 48, 53 (in Chinese).
- Li Jing. 2016. Mineralogical and Gemological Characteristics of Typical Nephrites in China for the Origin Identification on Liangzhu ancient Jades [D]. China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese).
- Ling Xiaoxiao. 2012. The Geology and Genesis of Nephrite Deposit of Luanchuan, Henan, China [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Liu X F, Grzegorz G, Liu Y, *et al.* 2021. Timing of formation and cause of coloration of brown nephrite from the Tiantai Deposit, South Altyn Tagh, northwestern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 131: 103972.

- Liu Xifeng, Jia Yuheng and Liu Yan. 2019. Geochemical characteristics and genetic types of Gobi nephrite in Ruoqiang-Qiemo, Xinjiang[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(3): 316~325 (in Chinese).
- Liu Xifeng, Liu Yan, Li Zijiang, *et al.* 2017. The genesis and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pishan brown nephrite-bearing Mg-skarn deposit in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 259~273 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2011a. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 41(1): 122~132.
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2011b. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 440~451.
- 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 magnesium skarn deposit[J]. *Lithos*, 212~215: 128~144.
- Lu Baoqi. 2005. The Gemological Mineralogy and Spectroscopy of Nephrite Cat's Eye and Serpentine Cat's Eye from Shimian, Sichuan Province, Southwest of China [D]. Shanghai University (in Chinese).
- Noh J H, Yu J Y and Choi J B. 1993. Genesis of nephrite and associated calc-silicate minerals in Chuncheon area [J]. *Journal of Geological Society of Korea*, 29: 199~224 (in Korean).
- Qiu Zhili, Jiang Qiyun, Luo Han, *et al.* 2010. Raman spectra and its application of graphite enclaves in nephrite-jades in Xiuyan, Liaoning [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(11): 2 985~2 988 (in Chinese).
- Sekerin A P, Sekerina N V, Men-shagin Y V, *et al.* 1997. Principles for prediction of nephrite deposits[J]. *Otechestvennaya Geologiya*. 5: 42~46 (in Russian).
- Siqin B, Qian R, Zhuo S J, *et al.* 2012. Glow discharge mass spectrometry studies on nephrite minerals formed by different metallogenic mechanisms and geological environments[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 309: 206~211.
- Tang Deping, Lin Guoxin, Jiang A G, *et al.* 1997. The nephrite first found in Fujian, China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(4): 396~399 (in Chinese).
- Tang Hongyun, Qian Weiji, Lu Xiaoying, *et al.* 2012. Geological and composition features of nephrite from Qinghai Province [J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 14(1): 24~31 (in Chinese).
- Tang Yanling, Chen Baozhang and Jiang Renhua. 1994. China Nephrite [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House (in Chinese).
- Tao Weiping. 1994. Minerogenetic Series of Nonmetallic Mineral Deposits of China (Deposit, Ore-bearing Construction, Metallogenic Series, Formation Mode) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Baiyu. 2018. Gems Mineralogy Characteristics and Variety Determination of Green Nephrite in Linwu, Hunan [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Wang Chunyun. 1993. Geological and physicochemical characteristics of Longxi nephrite deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 7(3): 201~205 (in Chinese).
- Wang Liben. 2001. Hornblende nomenclature—Report of the International Mineralogical Association on New Minerals and Mineral Nomenclature [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(1): 84~100 (in Chinese).
- Wang Shiqi and Dong Peixin. 2011. Classification, Geologic Characteristics and Origin of the Jade From Xiuyan, Liaoning Province, China [J]. *Geology and Resources*, 20(5): 321~331 (in Chinese).
- Wang Shiqi, Zhao Chaohong, Yu Guang, *et al.* 2007. Chinese Xiuyan Jade [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Xu Ligu and Wang Shiqi. 2016. Gemological characteristics and genesis of Dahua nephrite [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(S1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ligu, Yu Xiaojin and Wang Shiqi. 2014. The gemological characteristics and origin of Donggang Village tremolite jade in Dahua, Guangxi [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(S1): 55~60 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lin. 2013. Study on Petro-mineral Features and Genetic Mechanism of Luodian Jade, Guizhou Province [D]. Sichuan: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Yang Shixia, Xiang Jingde, Du Shiwei, *et al.* 2016. Jade-searching potential in the Baishui River Basin, Shimian, Sichuan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 36(3): 381~385 (in Chinese).
- Yin Jiangning. 2006. Study on Petrology and Mineralogy of Luanchuan Nephrite [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Yu H Y, Wang R C, Guo J C, *et al.* 2016. Study of the minerogenetic mechanism and origin of Qinghai nephrite from Golmud, Qinghai, Northwest China [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 59(8): 1 597~1 611.

- Yu Haiyan, Ruan Qingfeng, Liao Baoli, *et al.* 2018. Geochemical characteristics and Ar-Ar dating of different deposits in Qinghai Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(4): 655~668 (in Chinese with English abstract).
- Yu Qingwen and Li Shucai. 2017. Chinese Tremolite Jade and Serpentine Jade [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- 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 and Lee C W. 1988. Stable isotope studies of nephrite deposits from Fengtian, Taiwan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 593~602.
- 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.
- Zhang Yadong, Yang Ruidong, Gao Junbo, *et al.* 2015. Geochemical characteristics of nephrite from Luodian County, Guizhou Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(1): 56~64 (in Chinese).
- Zhang Yong, Chen Hua and Wang Baiyu. 2017. Entering Linwu, the "hometown of nonferrous metals"-tremolite jade (green nephrite) [J]. *Chinese gem*, (4): 198~203 (in Chinese).
- Zheng Fen. 2019. The Genesis and Zircon U-Pb Age of Nephrite Placer Deposit, Xiuyan, Liaoning [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Zheng Y F. 1993a. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicates [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 1 079~1 091.
- Zheng Y F. 1993b. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 120(3~4): 247~263.
- Zhong Huabang. 2000. Study on the geological characteristics and genesis of Meiling Jade [J]. *Journal of Gems & Gemmology*, (1): 39~44 (in Chinese).
- Zhong Q, Liao Z, Qi L, *et al.* 2019. Black nephrite jade from Guangxi, Southern China [J]. *Gems and Gemology*, 55(2): 198~215.
- Zhou Bing, Kong Deyi, Li Weijian, *et al.* 2011. Geological features and resources prediction of the Hotan Jade in Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 31(2): 196~197, 203 (in Chinese).
- Zhou Zhengyu, Liao Zongting, Ma Tingting, *et al.* 2006. Study on the genetic mechanism and material source of sanchakou nephrite deposit in east Kunlun [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(3): 195~198, 202 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 柏道远, 吴能杰, 钟响, 等. 2016. 湘西南印支期瓦屋塘岩体年代学、成因与构造环境 [J]. *大地构造与成矿学*, 40(5): 1 075~1 091.
- 陈静, 谢智勇, 李彬, 等. 2013. 东昆仑拉陵灶火地区泥盆纪侵入岩成因及其地质意义 [J]. *矿物岩石*, 33(2): 26~34.
- 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等. 2013. 东昆仑东段纳赤台岩群变火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义 [J]. *地学前缘*, 20(6): 1 215~1 216.
- 崔文元, 吴伟娟, 刘岩. 2002. 江苏溧阳透闪石玉的研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 21(z1): 91~98.
- 董必谦. 1996. 青海省格尔木玉地质简况及玉石特征 [J]. *建材地质*, (5): 23~28.
- 杜绍华, 邱瑞照. 1989. 香花岭地区花岗岩类岩石稀土元素演化特点及其形成机理的探讨 [J]. *地球学报*, (1): 131~142.
- 冯晓燕, 张蓓莉. 2004. 青海软玉的成分及结构特征 [J]. *宝石和宝石学杂志*, 6(4): 7~9.
- 郭宪璞, 王乃文, 丁孝忠, 等. 2006. 东昆仑纳赤台岩群混杂堆积的古生物学证据及其地质意义 [J]. *地质论评*, 52(3): 289~294.
- 雷成. 2016. 东昆仑小灶火软玉矿床成因研究 [D]. 中国地质大学(武汉).
- 李宏博. 2003. 江苏省溧阳县小梅岭地区非金属矿地质特征及软玉的宝石学研究 [D]. 中国地质大学(北京).
- 李红军, 蔡逸涛. 2008. 江苏溧阳软玉特征研究 [J]. *宝石和宝石学杂志*, (3): 16~19, 48, 53.
- 李晶. 2016. 中国典型产地软玉的宝石学矿物学特征及对良渚古玉器产地的指示 [D]. 中国地质大学(武汉).
- 凌潇潇. 2012. 河南栾川透闪石玉矿的特征和成因研究 [D]. 中国地质大学(北京).
- 刘喜锋, 贾玉衡, 刘琰. 2019. 新疆若羌-且末戈壁料软玉的地球化学特征及成因类型研究 [J]. *岩矿测试*, 38(3): 316~325.
- 刘喜锋, 刘琰, 李自静, 等. 2017. 新疆皮山镁质闪石岩矿床(含糖玉)成因及锆石 SHRIMP U-Pb 定年 [J]. *岩石矿物学杂志*, 36(2): 259~273.
- 卢保奇. 2005. 四川石棉软玉猫眼和蛇纹石猫眼的宝石矿物学及其谱学研究 [D]. 上海大学.
- 丘志力, 江启云, 落汗, 等. 2010. 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*, 30(11): 2 985~2 988.
- 汤德平, 林国新. 1997. 福建首次发现软玉 [J]. *高校地质学报*,



- 3(4): 396~399.
- 汤红云, 钱伟吉, 陆晓颖, 等. 2012. 青海软玉产出的地质特征及物质成分特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 14(1): 24~31.
- 唐延龄, 陈葆章, 蒋壬华. 1994. 中国和阆玉[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.
- 陶维屏. 1994. 中国非金属矿床成矿系列(矿床, 含矿建造、成矿系列、形成模式)[M], 北京: 地质出版社.
- 王柏宇. 2018. 湖南临武绿色软玉宝石矿物学特征及品种判定[D]. 中国地质大学(北京).
- 王春云. 1993. 龙溪软玉矿床地质及物化特征[J]. 矿产与地质, 7(3): 201~205.
- 王立本. 2001. 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告[J]. 岩石矿物学杂志, (1): 84~100.
- 王时麒, 董佩信. 2011. 岫岩玉的种类、矿床地质特征及成因[J]. 地质与资源, 20(5): 321~331.
- 王时麒, 赵朝洪, 于 洸, 等. 2007. 中国岫岩玉[M]. 北京: 科学出版社.
- 徐立国, 王时麒. 2016. 广西大化玉的宝玉石学特征和矿床成因[J]. 岩石矿物学杂志, 35(S1): 1~11.
- 徐立国, 於晓晋, 王时麒. 2014. 广西大化东扛村透闪石玉的宝石学特征及成因[J]. 岩石矿物学杂志, (S1): 55~60.
- 杨 林. 2013. 贵州罗甸玉矿物岩石学特征及成因机理研究[D]. 四川: 成都理工大学.
- 杨世霞, 向竞德, 杜诗薇, 等. 2016. 四川石棉县白水河地区玉石矿远景调查[J]. 四川地质学报, 36(3): 381~385.
- 阴江宁. 2006. 栾川玉石的岩石学和矿床学研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 于海燕, 阮青锋, 廖宝丽, 等. 2018. 青海不同矿区软玉地球化学特征及 Ar-Ar 定年研究[J]. 岩石矿物学杂志, 37(4): 655~668.
- 于庆文, 李树才. 2017. 中国透闪石玉和蛇纹石玉[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张亚东, 杨瑞东, 高军波, 等. 2015. 贵州罗甸软玉矿的元素地球化学特征研究[J]. 矿物学报, 35(1): 56~64.
- 张 勇, 陈 华, 王柏宇. 2017. 走进“有色金属之乡”临武——透闪石质玉石(青玉)[J]. 中国宝石, (4): 198~203.
- 郑 奋. 2019. 辽宁岫岩“河磨玉”成因及锆石 U-Pb 年龄[D]. 中国地质大学(北京).
- 钟华邦. 2000. 梅岭玉地质特征及成因探讨[J]. 宝石和宝石学杂志, (1): 39~44.
- 周 兵, 孔德懿, 李维建, 等. 2011. 新疆和田玉成矿地质特征及远景资源量预测[J]. 四川地质学报, 31(2): 196~197, 203.
- 周征宇, 廖宗廷, 马婷婷, 等. 2006. 东昆仑三岔口软玉成矿机制及成矿物源分析[J]. 地质找矿论丛, 21(3): 195~198, 202.