

# 辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉成矿年龄研究

邹 好<sup>1</sup>, 李 鹏<sup>2</sup>, 吴之瑛<sup>3</sup>, 康梦玲<sup>1</sup>, 王时麒<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学 城市学院, 云南 昆明 650051; 2. 北京城市学院, 北京 100083; 3. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

**摘要:** 运用偏光显微镜、电子探针对辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉的岩石学特征进行了研究,并运用二次离子质谱仪测定从桑皮峪透闪石玉中分离的锆石和榍石的年龄。结果表明:桑皮峪透闪石玉主要由透闪石组成,次要矿物包括磷灰石、方解石、绿泥石、石墨、褐铁矿、锆石、榍石等。偏光显微镜下桑皮峪透闪石玉的主要结构是毛毡状纤维交织结构、显微细晶质结构和纤维变晶结构;主要构造为块状构造。主要化学成分为SiO<sub>2</sub>、MgO和CaO, Mg<sup>2+</sup>/(Mg<sup>2+</sup>+Fe<sup>2+</sup>)值为0.964~0.971。桑皮峪透闪石玉的锆石U-Pb谐和年龄为1 851±7 Ma, 榍石的<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb年龄为1 848±17 Ma, 表明桑皮峪透闪石玉矿形成于古元古代白云岩的区域变质时期。

**关键词:** 岫岩桑皮峪; 透闪石玉; 锆石; 榍石; 成矿年龄

中图分类号: P597+.3; P578.955

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)04-0825-10

## A study of the mineralization age of nephrite from Sangpiyu, Xiuyan County, Liaoning Province

ZOU Yu<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, WU Zhi-ying<sup>3</sup>, KANG Meng-ling<sup>1</sup> and WANG Shi-qi<sup>3</sup>

(1. Faculty of City, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China; 2. Beijing City University, Beijing 100083, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The petrological characteristics of Sangpiyu tremolite jade from Xiuyan County of Liaoning Province were studied using polarizing microscope and electron probe microanalysis (EPMA). The zircon and titanite grains which are separated from Sangpiyu tremolite jade were dated by secondary ion mass spectrometry (SIMS). The results show that Sangpiyu tremolite jade is mainly composed of tremolite, and its secondary minerals mainly include apatite, calcite, chlorite, graphite, limonite, zircon and titanite. Under polarized light microscope, the main textures of Sangpiyu tremolite jade are felt-like fiber interweaving texture, micro-fine crystalline texture and fibrous metamorphic texture. The main structure is massive structure. The main chemical components of Sangpiyu tremolite jade are SiO<sub>2</sub>, MgO and CaO. The ratio of Mg<sup>2+</sup>/(Mg<sup>2+</sup>+Fe<sup>2+</sup>) ranges from 0.964 to 0.971. The zircon <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U age of Sangpiyu tremolite jade is 1 851±7 Ma, and the titanite <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb age is 1 848±17 Ma. The Sangpiyu tremolite jade was formed in the dolomite during the period of palao-Proterozoic regional metamorphism.

**Key words:** Xiuyan Sangpiyu Village; tremolite jade; zircon; titanite; mineralization age

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (41773047)

收稿日期: 2020-10-19; 接受日期: 2021-04-12; 编辑: 尹淑莘

基金项目: 国家自然科学基金项目(41773047)

作者简介: 邹 好(1978-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事宝石矿物材料及鉴定研究, E-mail: 0130zy@163.com。

辽宁省岫岩县因盛产质量好的蛇纹石玉而闻名于世,该地区也盛产透闪石玉(也称软玉或和田玉)(王时麒等,2002)。2012年,在辽宁省岫岩县哈达碑镇桑皮峪横山里的大理石矿中发现了新的透闪石玉矿床,具有一定地质科研意义和商业价值。该透闪石玉矿位于岫岩县哈达碑镇西北方约30 km、细玉沟村西南方4 km的大理石矿井中,矿体呈似层状及扁豆状产出,连续性较差,具有一定规模(吴之瑛,2014)。最新发现的桑皮峪透闪石玉矿点产量丰富,将是岫岩透闪石玉的重要矿点。以前发现的透闪石玉矿点主要分布在细玉沟,对桑皮峪透闪石玉矿的研究相对缺乏。国内学者对桑皮峪透闪石玉的成矿地质背景、矿床成因、矿物组成、化学成分、结构构造、石墨特征包裹体进行了研究,认为其矿床成因类型为变质热液矿床(张存等,2018),其矿物成分主要为透闪石,微量元素含量较低,颜色以青色为主,结构致密,质量较好,储量充裕(蒋天龙,2014)。郑奋等(2019)通过测定辽宁岫岩的河磨玉的锆石 U-Pb 年龄表明其成矿年龄的上限为  $220.8 \pm 7.6$  Ma,而老玉的形成年龄在 1.7 Ga 左右,因此岫岩地区可能存在未被发现的原生透闪石玉矿。

透闪石玉矿床一般都是在低温下形成的,但它缺少如云母等可定年的矿物,因此该类型矿床的定年工作一直是个难题。目前已有许多透闪石玉的年龄研究工作是基于其中的副矿物锆石来开展的,但是透闪石玉中的锆石可能有多种来源,其中最有可能的是继承锆石,并不一定代表透闪石玉的形成年龄。锆石的年龄研究需要综合考虑锆石的光学和电子图像,并结合其微量元素才能对所测年龄数据进行正确解译(杨亚楠等,2014)。而透闪石玉中的另一种副矿物榍石一般是和透闪石同生的(Ling *et al.*, 2015),这种含有微量 U-Pb 的副矿物在很多透闪石玉中都有出现(刘喜锋等,2019)。

为了深入了解桑皮峪透闪石玉矿床成矿时代及其地质演化历史,本文对采自桑皮峪的透闪石玉进行了详细的岩石学观察,采用离子探针(SIMS, secondary ion mass spectrometry)重点对比分析桑皮峪透闪石玉中的副矿物锆石的 U-Pb 年龄和榍石的 Pb-Pb 年龄,测定桑皮峪透闪石玉矿床的形成时间,采用和田玉中的榍石和锆石同时定年具有独特性和创新性,为揭示透闪石玉的形成过程提供了有价值的理论依据。

## 1 区域地质概况

辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉矿位于细玉沟透闪石玉矿与北瓦沟蛇纹石玉矿之间的桑皮峪沟沟头,出露于北沟-王家堡子-周家堡子复向斜西端-横山里倒转向斜的北翼。复式背斜隆起构造中的复向斜和向斜构造,保存蕴矿地层;玉石矿主要产于区内的复向斜褶曲之中,其产状及展布受复向斜构造的控制(图1)。

辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉矿出露地层主要为辽河群变质岩系,自下而上为里尔峪组、高家峪组、大石桥组二段、大石桥组三段。玉矿西北部及南部出露元古代片麻状黑云二长花岗岩,此外还有细粒蚀变辉长岩以及煌斑岩、伟晶岩、钠长石英斑岩等脉岩(王时麒等,2007;吴之瑛,2014)。

玉矿产于大石桥组二段,平行于近矿围岩的透闪石大理岩变余层理产出。大理岩围岩规模较小,长130 m,平均厚度4.57 m,似层状产出,走向长130 m,倾向 $20^\circ$ ,倾角 $70^\circ$ 。透闪石大理岩围岩呈白色,部分呈灰、浅绿相间斑杂色;主要矿物成分为白云石、透闪石,含少量蛇纹石;中细粒变晶结构,块状构造;结构致密,硬度较大,比较稳固。透闪石玉矿体产状与大理岩岩层产状基本相同,呈似层状及扁豆状产出,地层控制特点非常突出和明显(王时麒等,2007;吴之瑛,2014)。

## 2 样品及测试

### 2.1 测试样品

透闪石玉料采自岫岩满族自治县哈达碑镇第2大理石矿点,透闪石玉料大小不一,多为棱角状,表面为新鲜崩裂面,选取具有玉石价值的桑皮峪透闪石玉样品类型,颜色均为青色,包括青黄色、青绿色、深青色等(图2)。手标本特征为微透明至不透明,蜡状光泽至玻璃光泽,折射率平均值为1.60(点测),密度为 $2.94 \sim 2.96$  g/cm<sup>3</sup>,摩氏硬度为6.05~6.62。

### 2.2 测试方法和条件

将样品磨制成0.03 mm薄片后,利用偏光显微镜和电子探针对桑皮峪透闪石玉矿物成分进行分析。偏光显微镜分析在昆明理工大学国土资源学院偏光

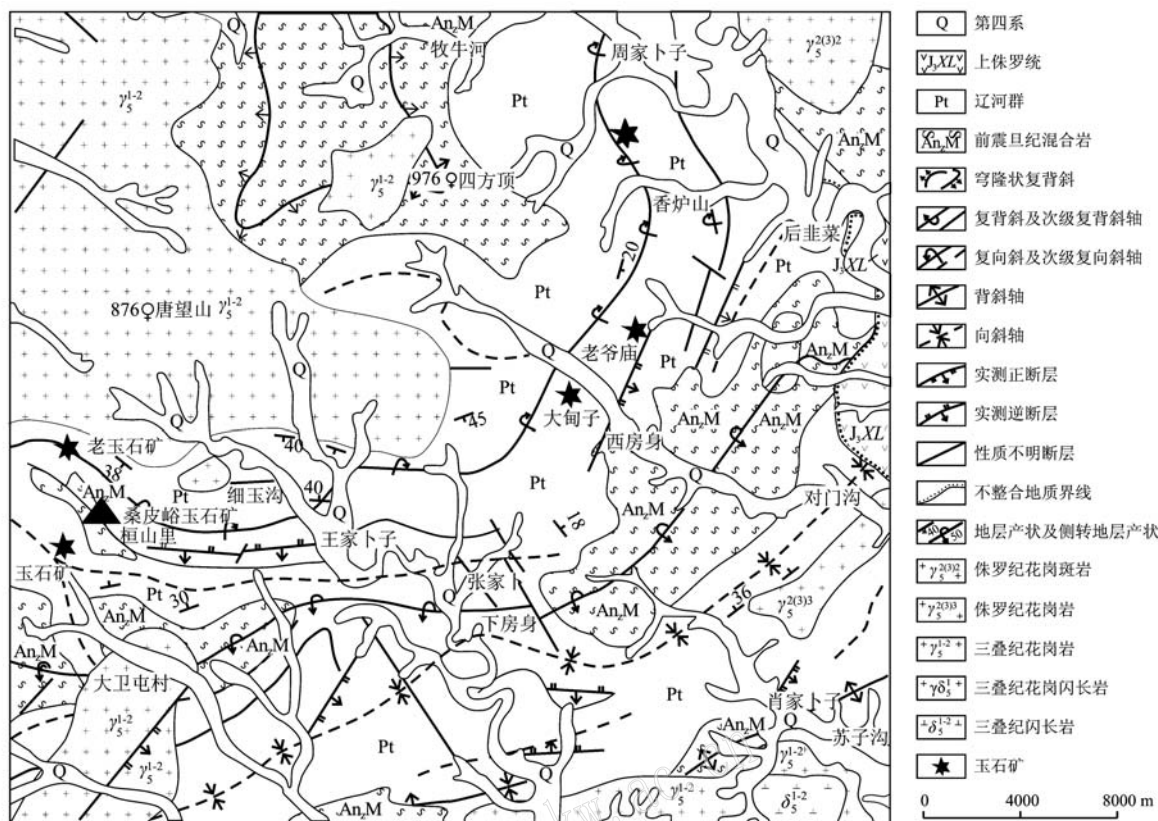


图1 岫岩玉矿床区域构造纲要图(据吴之瑛, 2014)

Fig. 1 Regional structural outline of the Xiuyan jade deposit (after Wu Zhiying, 2014)



图2 辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉样品照片

Fig. 2 The sample of Sangpiyu tremolite jade

实验室完成;电子探针分析在中国科学院地质与地球物理研究所的电子探针与扫描电镜实验室完成,使用的电子探针仪为日本电子 JXA-8100 型,加速电压 15 kV,加速电流 15 nA,束斑直径 5 μm。

通过人工重砂法,从桑皮峪透闪石玉样品中选出锆石和榍石,然后在双目显微镜下挑选出无裂隙、无包体、透明干净的锆石和榍石颗粒。将锆石样品颗粒和锆石标样,榍石样品颗粒和榍石标样分别粘贴在环氧树脂靶上,然后抛光使其露出一半晶面。对锆石

进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光图象分析;对榍石进行透射光和反射光显微照相以及背散射图象分析,以检查其内部结构、帮助选择适宜的测试点。样品靶可以在真空条件下镀金以备分析。

锆石的 U-Pb 年龄测试和榍石的 Pb-Pb 年龄测试都在中国科学院地质与地球物理研究所里通过 CAM-ECA IMS-1280 离子探针(二次离子质谱仪 SIMS)完成。详细分析方法见 Li 等(2009)和 Ling 等(2015)。标样与样品以 1:3 比例交替测定。锆石的 U-Th-Pb 同

位素比值用标准锆石 Plésovice (337 Ma, Sláma *et al.*, 2008) 校正获得。以长期监测标准样品获得的标准偏差  $1SD=1.5\%$  (Li *et al.*, 2010) 和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差, 以标准样品 GBW04705 作为未知样监测数据的精确度, 在本次研究中共分析了 10 个点。榍石的 Pb 同位素比值采用榍石标准 BLR-1 (Aleinikoff *et al.*, 2002, 2007) 来监控仪器稳定性, 普通 Pb 校正采用实测  $^{204}\text{Pb}$  值。由于测得的普通 Pb 含量非常低, 假定普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染, 以现代地壳的平均 Pb 同位素组成 (Stacey and Kramers, 1975) 作为普通 Pb 组成进行校正。同位素比值及年龄误差均为  $1\sigma$ 。数据结果处理采用 ISOPLOT 软件 (Ludwig, 2001)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 矿物组成

##### 3.1.1 偏光显微镜特征

桑皮峪透闪石玉的主要矿物组成为透闪石, 无色, 正中突起, 最高干涉色为 II 级蓝, 矿物颗粒可呈纤维状、粒状等, 纤维状透闪石一般小于 0.1 mm, 柱状透

闪石大小 0.5~2 mm 不等 (图 3a~3c)。次要矿物含量比较少, 主要有磷灰石、方解石、绿泥石、石墨、褐铁矿、锆石、榍石等。磷灰石干涉色为 I 级灰, 矿物颗粒主要呈他形粒状, 方解石无色, 闪突起, 干涉色为高级白。绿泥石为浅绿色, 低正突起, 最高干涉色为 I 级灰, 主要呈片状。石墨多出现在颜色为青黑色的样品中, 主要呈星点状和云雾状分布。褐铁矿往往填充在透闪石玉的裂隙中, 呈树枝状分布 (图 3d)。榍石矿物颗粒常呈特殊的菱形、楔形, 正极高突起, 高级白干涉色, 二轴正晶 (图 3e, 3f)。

##### 3.1.2 电子探针分析

对 3 件桑皮峪透闪石玉样品 (X2、X7、X19) 进行了电子探针测定, 每个样品选取 5 个主要的矿物点的数据进行分析, 分析结果和基于 23 个氧离子计算的阳离子结果见表 1。

根据表 1 可知, 桑皮峪透闪石玉主要成分是  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ , 含量范围分别为 57.79%~58.58%、22.41%~22.87%、12.55%~13.35%, 平均值分别为 58.21%、22.63%、12.86%, 比透闪石成分理论值 (59.17%、24.81%、13.80%) 稍低, 但差距不大。除此之外, 还含有少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$ , 微量的  $\text{TiO}_2$ 、

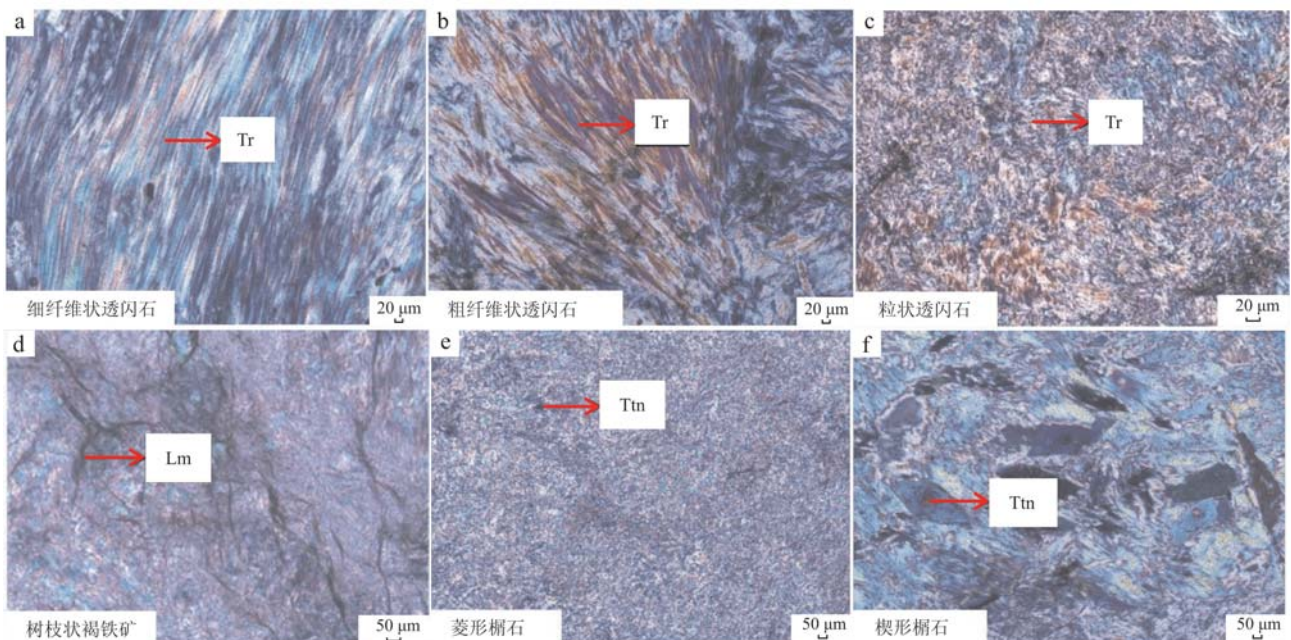


图 3 桑皮峪透闪石玉样品的正交偏光显微镜特征

Fig. 3 Photomicrographs of Sangpiyu tremolite jade (crossed nicols)

Tr—透闪石; Lm—褐铁矿; Ttn—榍石

Tr—tremolite; Lm—limonite; Ttn—titanite

表 1 桑皮峪透闪石玉样品电子探针分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 1 Electron microprobe analytical results of Sangpiyu tremolite jade samples

	X2-1	X2-2	X2-3	X2-4	X2-5	X7-1	X7-2	X-7-3	X7-4	X7-5	X19-1	X19-2	X19-3	X19-4	X19-5
SiO <sub>2</sub>	58.20	58.37	58.28	58.30	58.25	58.35	58.48	58.37	58.39	58.58	57.79	57.82	57.86	58.00	58.04
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47	0.38	0.48	0.53	0.54	0.32	0.43	0.36	0.41	0.32	0.69	0.79	0.59	0.73	0.84
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00
FeO	1.38	1.45	1.34	1.42	1.44	1.31	1.45	1.36	1.33	1.40	1.36	1.38	1.30	1.25	1.27
MgO	22.67	22.60	22.66	22.65	22.63	22.63	22.81	22.78	22.87	22.64	22.46	22.63	22.41	22.52	22.49
NiO	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.10	0.12	0.10	0.11	0.12	0.09	0.11	0.15	0.15	0.10	0.15	0.15	0.12	0.11	0.14
CaO	12.79	12.72	12.80	12.71	12.63	12.85	12.68	12.86	12.73	12.55	12.80	13.35	13.13	12.97	13.35
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.03	0.03	0.03	0.07	0.03	0.06	0.07	0.07	0.04	0.06	0.08	0.03	0.09	0.06
K <sub>2</sub> O	0.04	0.02	0.00	0.04	0.06	0.00	0.03	0.01	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01	0.04
Total	95.71	95.71	95.72	95.80	95.76	95.61	96.05	95.98	95.98	95.67	95.38	96.28	95.48	95.85	96.32
Si	8.06	8.08	8.07	8.06	8.06	8.08	8.07	8.06	8.06	8.10	8.04	7.99	8.04	8.03	8.01
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.08	0.06	0.08	0.09	0.09	0.05	0.07	0.06	0.07	0.05	0.11	0.13	0.10	0.12	0.14
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.16	0.17	0.16	0.16	0.17	0.15	0.17	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.14	0.15
Mg	4.68	4.66	4.68	4.67	4.67	4.67	4.69	4.69	4.71	4.67	4.66	4.66	4.64	4.65	4.63
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
Ca	1.90	1.89	1.90	1.88	1.87	1.91	1.87	1.90	1.88	1.86	1.91	1.98	1.95	1.92	1.97
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
K	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Sum	14.91	14.89	14.90	14.90	14.90	14.89	14.91	14.91	14.91	14.87	14.92	14.96	14.91	14.92	14.93
$\frac{Mg^{2+}}{Mg^{2+}+Fe^{2+}}$	0.967	0.964	0.967	0.967	0.965	0.969	0.965	0.967	0.969	0.967	0.967	0.967	0.969	0.971	0.969

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO、Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O。

根据国际矿物协会新矿物及矿物命名委员会批准角闪石族分会推荐的角闪石族命名方案,当  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+}) = 0.90 \sim 1.00$  时为透闪石,当  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+}) = 0.50 \sim 0.90$  时为阳起石,当  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+}) = 0.00 \sim 0.50$  时为铁阳起石(张蓓莉, 2006)。桑皮峪透闪石玉的  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$  值为 0.964~0.971,平均 0.967,符合国际矿物协会的角闪石族命名方案。

### 3.2 成矿年龄

#### 3.2.1 锆石 U-Pb 年龄

对从样品 X19 中挑选出来的 13 颗锆石(代号分别为 Z1~Z13)进行了 SIMS U-Pb 分析。本次测试同时分析了 10 个锆石标样点,得到的谐和年龄为  $160.0 \pm 1.6$  Ma,与推荐值  $159.5 \pm 0.2$  Ma (Li *et al.*, 2013)在误差范围内一致,表明仪器稳定可靠。本样品的年龄结果如表 2 和图 4,可见锆石的实验数据可分为 4 组,第 1 组为 Z-1~Z-7,  $U = 549 \times 10^{-6} \sim 1.322 \times 10^{-6}$ ,  $Th = 16 \times 10^{-6} \sim 94 \times 10^{-6}$ ,  $Th/U = 0.03 \sim 0.07$ ,锆石的内部结

构在 CL 图像中显得明亮(图 4a)。 $^{206}Pb/^{238}U$  年龄的加权平均值为  $1.840 \pm 0.18$  Ma ( $2\sigma$ ,  $n=7$ ),  $^{207}Pb/^{206}Pb$  年龄范围在  $1.853 \pm 0.08$  Ma ( $2\sigma$ ,  $n=7$ )之间,U-Pb 同位素组成在误差范围内一致,U-Pb 谐和年龄为  $1.851 \pm 0.17$  Ma ( $2\sigma$ ,  $n=7$ )。其他 3 组为 Z-8~Z-13,  $U = 142 \times 10^{-6} \sim 614 \times 10^{-6}$ ,  $Th = 74 \times 10^{-6} \sim 322 \times 10^{-6}$ ,  $Th/U = 0.32 \sim 0.83$ ,  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄范围在  $2.487 \sim 2.032$  Ma。这 3 组的锆石年龄比第 1 组的锆石年龄都老。这些锆石可能为继承锆石,来自原岩。锆石的内部结构在 CL 图像中较暗(图 4a)。桑皮峪透闪石玉中锆石的  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄最小的 1 组为  $1.851 \pm 0.17$  Ma(图 4c),认为这一组锆石的年龄最接近桑皮峪透闪石玉的形成年龄。

#### 3.2.2 榍石 Pb-Pb 年龄

对从样品 X19 中挑选出来的 17 颗榍石(代号分别为 Y1~Y17)进行了 SIMS Pb-Pb 年龄分析,结果见表 3。榍石的  $^{206}Pb/^{204}Pb = 321 \sim 1.881$ ,都大于 100,但只有分析点 Y-16 和 Y-17 的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  值大于 1000,表明这 2 个分析点的普通铅含量少,放射成因铅占优

表 2 桑皮哈透闪石玉锆石 U-Pb 年龄分析结果  
Table 2 Zircon U-Pb age analytical results of Sangpiyu tremolite jade

点号	$w_B/10^{-6}$				同位素比值						年龄/Ma					
	U	Th	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$		
Z-1	1 031	39	381	0.04	0.113	0.3	5.106	1.5	0.329	1.5	1 842	5	1 837	13	1 833	24
Z-2	710	34	263	0.05	0.114	0.4	5.175	1.5	0.329	1.5	1 863	6	1 849	13	1 835	24
Z-3	979	40	363	0.04	0.113	0.3	5.149	1.5	0.330	1.5	1 852	6	1 844	13	1 837	24
Z-4	549	16	203	0.03	0.112	0.5	5.114	1.6	0.330	1.5	1 839	9	1 838	14	1 838	24
Z-5	1 322	92	496	0.07	0.114	0.4	5.191	1.5	0.331	1.5	1 860	7	1 851	13	1 843	24
Z-6	1 313	94	493	0.07	0.113	0.3	5.177	1.5	0.332	1.5	1 852	5	1 849	13	1 846	24
Z-7	1 210	76	454	0.06	0.114	0.3	5.214	1.5	0.332	1.5	1 863	6	1 855	13	1 848	24
Z-8	234	74	102	0.32	0.125	0.6	6.215	1.6	0.362	1.5	2 022	11	2 006	14	1 992	26
Z-9	435	197	202	0.45	0.126	0.4	6.418	1.6	0.370	1.5	2 038	7	2 035	14	2 032	26
Z-10	573	219	263	0.38	0.125	0.4	6.417	1.6	0.373	1.5	2 024	7	2 035	14	2 045	27
Z-11	614	322	329	0.52	0.150	0.3	8.587	1.5	0.416	1.5	2 341	6	2 295	14	2 244	29
Z-12	198	96	107	0.48	0.155	0.6	9.081	1.6	0.424	1.5	2 404	10	2 346	15	2 280	29
Z-13	142	117	93	0.83	0.168	0.6	10.900	1.6	0.471	1.5	2 537	10	2 515	15	2 487	32

注:  $f_{206}$  为普通 $^{206}\text{Pb}$ 占总 $^{206}\text{Pb}$ 含量的百分比。

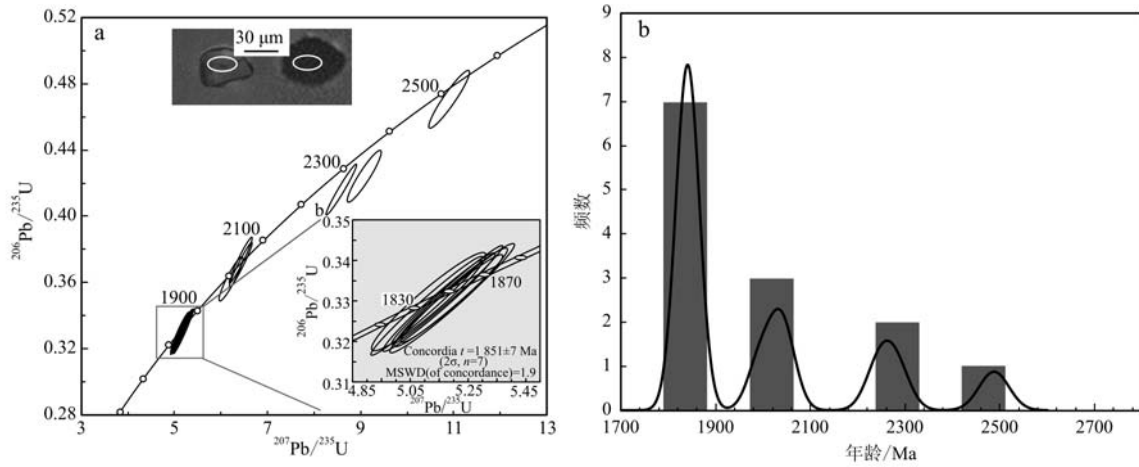


图 4 桑皮峪透闪石玉锆石 U-Pb 谐和年龄图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram for zircons from Sangpiyu tremolite jade

表 3 桑皮峪透闪石玉榍石 Pb-Pb 年龄分析结果

Table 3 Titanite Pb-Pb age analytical results of Sangpiyu tremolite jade

分析点	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$f_{206}/\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\sigma$	年龄/Ma	$\pm\sigma$
Y-1	503	3.72	0.136	0.8	1 780.8	34.8
Y-2	452	4.13	0.144	0.7	1 867.7	49.1
Y-3	540	3.47	0.138	0.9	1 841.0	33.2
Y-4	424	4.41	0.143	0.9	1 809.3	39.9
Y-5	802	2.33	0.135	1.1	1 923.4	33.9
Y-6	678	2.76	0.138	1.0	1 926.0	32.6
Y-7	604	3.10	0.136	0.8	1 865.5	30.5
Y-8	753	2.48	0.130	0.8	1 838.6	27.2
Y-9	579	3.23	0.140	1.2	1 912.6	44.9
Y-10	758	2.47	0.132	1.0	1 866.8	31.8
Y-11	799	2.34	0.131	0.7	1 864.8	23.1
Y-12	670	2.79	0.135	0.7	1 884.2	25.1
Y-13	775	2.41	0.130	0.6	1 849.0	21.7
Y-14	321	5.84	0.155	1.0	1 839.7	50.8
Y-15	582	3.21	0.134	0.8	1 818.4	39.0
Y-16	1 881	0.99	0.120	0.4	1 846.8	10.1
Y-17	1 017	1.84	0.124	0.5	1 804.1	15.4

注： $f_{206}$  为普通 $^{206}\text{Pb}$  占总 $^{206}\text{Pb}$  含量的百分比，年龄为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄。

势。 $f_{206}$  的大致范围为 0.99%~5.84%，只有分析点 Y-16 的  $f_{206}$  小于 1%，从而可知分析点 Y-16 的普通 $^{206}\text{Pb}$  占总 $^{206}\text{Pb}$  值最低，同时其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄误差也最小。最终得出榍石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1\ 848 \pm 17\ \text{Ma}$  ( $2\sigma$ ,  $n = 17$ ,  $\text{MSWD} = 1.9$ , 图 5)。

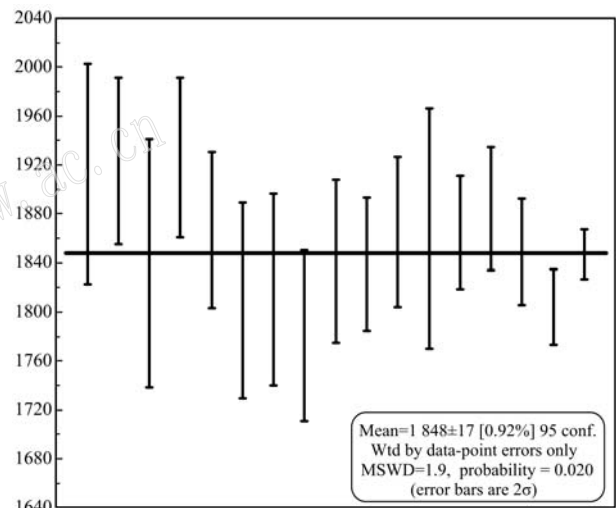


图 5 桑皮峪透闪石玉榍石 Pb-Pb 加权平均年龄图

Fig. 5 Weighted average Pb-Pb ages diagram for titanite from Sangpiyu tremolite jade

## 4 讨论

### 4.1 SIMS 锆石 U-Pb 定年对比榍石 Pb-Pb 定年

锆石广泛分布于酸性侵入岩、火山岩、变质岩等各种类型的岩石中，矿物非常稳定。在桑皮峪透闪石玉中，锆石基本呈他形，晶粒小，约为 60~80 μm。同时，锆石的 U 含量和放射成因 Pb 含量高，普通 Pb 含量较低。因此锆石的单点误差较小。但透闪石玉中的锆石矿物中含有继承锆石，因此需要仔细甄别才能判断哪一组年龄更接近透闪石玉的形成年龄。本研究共得到 4 组锆石年龄，其中只有最年轻的 1

组锆石具有较低的 Th/U 值,更符合变质锆石的特征。

榍石是一种普遍存在于各种中酸性和碱性侵入岩、变质岩及各类热液矿床中的含 U 副矿物。作为一种可定年的工具,它在地质研究中具有非常广泛的应用价值(Li *et al.*, 2010)。在桑皮峪透闪石玉中,榍石晶粒小,含量较少。本文采用榍石<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 定年法,只需准确测定 Pb 同位素组成,即可得到榍石<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄。本次测量获得的所有榍石颗粒均得到 1 组一致的年龄,但是榍石的普通铅含量较高,比锆石需要精准的校正(李志昌, 2004; 吴之瑛, 2014)。

锆石的物理化学性质极其稳定,形成后不易受外界及后期地质事件影响,通常难以用于确定中低温变质岩及热液成因岩石的地质年代(Liu *et al.*, 2011a, 2011b)。榍石是酸性、中性和碱性岩浆岩、低-中高级变质岩及少数沉积岩中常见的副矿物。同时,榍石为钙钛硅酸盐,易与其他矿物、流体、熔体发生反应,从而可记录多期变质事件的年龄信息,更有利于查明地质体的 *P-T-t* 轨迹(王世龙, 2016)。桑皮峪透闪石玉的矿床成因类型为变质热液矿床,与锆石相比,榍石更适合用于测定桑皮峪透闪石玉的地质年龄。

#### 4.2 成矿年龄分析

前人利用榍石测定了各种类型岩石的年龄, Ling 等(2015)通过证明栾川软玉与其中的榍石同源,并利用榍石测定了软玉年龄为 1 848±17 Ma,与其锆石 U-Pb 年龄 1 851±7 Ma 在误差范围内一致。从表 2 和表 3 中的数据可知,由于 SIMS 锆石定年的方法比榍石定年的方法更加成熟,锆石 U-Pb 年龄误差小于榍石 Pb-Pb 年龄误差。总体来说,通过与透闪石同源的榍石测定出的年龄更为接近透闪石玉的实际形成年龄,部分锆石年龄也可以反映透闪石玉年龄,代表透闪石玉的年龄上限。本文通过榍石测定出桑皮峪透闪石玉的年龄为 1 848±17 Ma,与其锆石 U-Pb 年龄 1 851±7 Ma 在误差范围内一致。

很多软玉的形成与交代或变质作用有关,如西部新疆昆仑、阿尔金、青海东昆仑的软玉矿床都处于白云质大理岩与花岗岩侵入体接触带(Liu *et al.*, 2010, 2015, 2016)。辽宁岫岩软玉矿床是华北克拉通西部板块(EB)辽宁省辽河群的一部分,而 EB 在古元古代(2.2~1.9 Ga)时期胶-辽-吉带发生了断裂-俯冲-碰撞(Zhao and Zhai, 2013)。该矿区大约

在 1.8 Ga 经历了区域变质作用,形成白云石大理岩。随后,白云石大理岩被硅质热液流体取代形成蛇纹石,如果钙含量较高,白云石大理岩会被硅质热液置换形成透闪石玉(Zhang *et al.*, 2019)。这一变质事件可能指示了桑皮峪透闪石玉的形成年龄。岫岩软玉矿床大致经历 4 个地质作用阶段,分别为白云岩沉积阶段、白云岩的区域变质阶段、热液交代阶段、风化作用阶段。桑皮峪透闪石玉中最年轻 1 组的锆石 U-Pb 年龄为 1 851±7 Ma,其中的榍石 Pb-Pb 年龄为 1 848±17 Ma,推测桑皮峪透闪石玉的形成在白云岩的区域变质时期。

## 5 结论

(1) 辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉的主要矿物成分为透闪石,次要矿物成分包括磷灰石、方解石、绿泥石、石墨、褐铁矿、锆石和榍石等。

(2) 电子探针分析显示辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉样品主要成分为 SiO<sub>2</sub>、MgO 和 CaO,并含有少量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO 和 MnO, Mg<sup>2+</sup>/(Mg<sup>2+</sup>+Fe<sup>2+</sup>) 值范围为 0.964~0.971。

(3) 离子探针分析,桑皮峪透闪石玉的锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 1 851±7 Ma,榍石<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄为 1 848±17 Ma,桑皮峪透闪石玉形成于古元古代的白云岩的区域变质时期。

**致谢** 矿区的彭涛先生、潘军俊先生在野外考察期间提供了热忱帮助。实验过程中得到中国科学院地质与地球物理研究所马红霞、毛骞等老师的帮助,本研究得到国家岩矿化石标本资源库支持,审稿人对本文提出了许多建设性意见和建议,在此一并致谢。

## References

- Aleinikoff J N, Wintsch R P, Fanning C M, *et al.* 2002. U-Pb geochronology of zircon and polygenetic titanite from the Glastonbury Complex, Connecticut, USA: An integrated SEM, EMPA, TIMS and SHRIMP study[J]. *Chemical Geology*, 188(1-2): 125~147.
- Aleinikoff J N, Wintsch R P, Tollo R P, *et al.* 2007. Ages and origins of rocks of the Killingworth dome, south-central Connecticut: Implications for the tectonic evolution of southern New England[J]. *American*



- can Journal of Science, 307(1): 63~118.
- Jiang Tianlong. 2014. The Study on Gemological and Mineralogical Characteristics of Nephrite in Sangpiyu, Liaoning Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Li Q L, Li X H, Liu Y, *et al.* 2010. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 25: 1 107~1 113.
- Li X H, Liu Y, Li Q L, *et al.* 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector SIMS without external standardization[J]. 10: Q04010, doi: 10. 1029/2009GC002400.
- Li X H, Tang G Q, Gong B, *et al.* 2013. Qinghu zircon: A working reference for microbeam analysis of U-Pb age and Hf and O isotopes[J]. Chinese Science Bulletin, 58(20): 1 954~1 961.
- Li Zhichang. 2004. Methods and Progress of Radioisotope Geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 145~151 (in Chinese with English abstract).
- Ling X X, Schmädicke E, Li Q L, *et al.* 2015. Age determination of nephrite by in-situ SIMS U-Pb dating syngenetic titanite: A case study of the nephrite deposit from Luanchuan, Henan, China[J]. Lithos, 220~223; 289~299.
- Liu 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 with English abstract).
- Liu Y, Deng J, Shi G, *et al.* 2011a. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 42(3): 440~451.
- Liu Y, Deng J, Shi G, *et al.* 2011b. 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, *et al.* 2010. Chemical zone of nephrite in Alamas, Xinjiang, China[J]. Resource Geology, 60(3): 249~259.
- 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, Zhang Z, *et al.* 2015. Mineral inclusions and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Alamas nephrite and granodiorite: Implications for the genesis of a magnesian skarn deposit[J]. Lithos, 212: 128~144.
- Ludwig K R. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex rev. 2.49[M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication. No. 1a.
- Sláma J, Košler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 249: 1~35.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 26: 207~221.
- Wang Shilong. 2016. Study on U-Pb age and geological significance of titanite[J]. Science & Technology Vision, 18: 119 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiqi, Zhao Chaohong, Yu Guang, *et al.* 2007. Xiuyan Jades in China[M]. Science Press Beijing (in Chinese).
- Wang Shiqi, Duan Tiyu and Zheng Zizi. 2002. Mineralogical and petrological characteristics of Xiuyan nephrite and its minerogenetic model [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(s): 79~90 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhiying. 2014. Characteristic and Origin of Nephrite from Sangpiyu, Xiuyan County, Liaoning Province[D]. Beijing: Peking University (in Chinese with English abstract).
- Yang Yanan, Li Qiuli, Liu Yu, *et al.* 2014. Zircon U-Pb dating by Secondary Ion Mass Spectrometry[J]. Earth Science Frontiers, 21(2): 81~92 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Beili. 2006. Systematic Gemology (Second Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 342 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Cun and Yu Xiaoyan. 2018. Spectral characteristic and origin identification of tremolite jade from Sangpiyu, Liaoning Province[J]. Journal of Gems and Gemmology, 20(s1): 41~53 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. Geoscience Frontiers, 10(2): 425~437.
- Zhao G and Zhai M. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications [J]. Gondwana Research, 23(4): 1 207~1 240.
- Zheng Fen, Liu Yan and Zhang Hongqing. 2019. The petrogeochemistry and zircon U-Pb age of nephrite placer deposit in Xiuyan, Liaoning [J]. Rock and Mineral Analysis, 38(4): 438~448 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 蒋天龙. 2014. 辽宁桑皮峪软玉宝石矿物学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李志昌. 2004. 放射性同位素地质学方法与进展[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 145~151.
- 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.
- 王时麒, 段体玉, 郑姿姿. 2002. 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, 21(增刊): 79~90.
- 王时麒, 赵朝洪, 于 洸, 等. 2007. 中国岫岩玉[M]. 北京: 科学出版社.
- 吴之瑛. 2014. 辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉的玉石学特征与成因研究[D]. 北京: 北京大学.
- 王世龙. 2016. 榴石 U-Pb 年龄及地质意义研究简述[J]. 科技视界, 18: 119.
- 杨亚楠, 李秋立, 刘 宇, 等. 2014. 离子探针锆石 U-Pb 定年[J]. 地学前缘, 21(2): 81~92.
- 张蓓莉. 2006. 系统宝石学(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 342.
- 张 存, 余晓艳. 2018. 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, 20(S1): 41~53.
- 郑 奋, 刘 琰, 张红清. 2019. 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, 38(4): 438~448.