

· 宝石矿物学 ·

新疆软玉、岫岩软玉的岩石矿物学对比研究

周振华, 冯佳睿

(中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 对新疆、岫岩软玉的典型品种进行了偏光显微镜、LA-ICP-MS、SEM等测试分析, 证明两产地软玉的物理性质相似, 但岫岩软玉光泽和透明度不如新疆软玉, 其抛光的光洁度不如新疆软玉。黄白玉和绿玉在新疆软玉中基本上没有, 而新疆软玉中的黄玉在岫岩软玉中基本上没有, 这是两地软玉在颜色上的明显差别。微量元素均以青玉中的微量元素的总含量最高, Be、Ni、Cu元素对软玉中的绿色调有一定的影响。REE配分曲线显示了成矿流体的多来源和多期次叠加成矿的稀土元素特征。扫描电镜下观察, 新疆软玉以毡状纤维交织变晶结构最为典型和常见, 岫岩软玉以显微纤维结构和显微叶片状结构居多, 颗粒较新疆软玉粗大, 致密程度差, 这也是其质地不如新疆软玉的重要原因。

关键词: 软玉 岩石矿物学 透闪石 新疆 岫岩

中图分类号: P585

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)03-0331-10

A petrological and mineralogical comparison between Xinjiang nephrite and Xiuyan nephrite

ZHOU Zhen-hua and FENG Jia-rui

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Nephrite, widely distributed in nature, is one of the earliest natural jade resources developed and utilized in human history. The relatively well-known nephrite deposits in China include Hetian of Xinjiang, Xiuyan of Liaoning, Golmud of Qinghai and Hualien of Taiwan as well as some nephrite deposits discovered since the 1990's such as Xiaomeiling in Liyang of Jiangsu and Mianyang of Sichuan. Previous studies of nephrite were almost confined to the nephrite from a single producing area and were lacking in comparative work. There is also a lack of systematic research on the causes responsible for the differences in the texture of nephrites from different producing areas, which results in shoddy phenomena in the current market. Therefore, it is particularly important to seek for identifying symbols and quality appraising factors for nephrites from different producing areas. In this paper, the authors employed polarizing microscope, LA-ICP-MS and SEM analysis to study typical varieties of Xinjiang and Xiuyan nephrites. Test results show that physical properties of the nephrites from the two producing areas are similar to each other, but Xiuyan nephrite is not so good as Xinjiang nephrite in luster, transparency, and polished finish. There is almost no yellow-white jade and green jade in Xinjiang nephrite, and the yellow jade common seen in Xinjiang nephrite is on the whole not observed in Xiuyan nephrite, which accounts for the significant difference in color between the nephrites from the two areas. The content of the common coloring elements such as Be, V, Cr, Co, Ni and Cu in the two nephrite producing areas is not consistent,

收稿日期: 2009-10-16; 修订日期: 2010-03-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目(K0921)

作者简介: 周振华(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事矿床学研究, E-mail: bs9903@163.com

and there exists no corresponding relationship between the changing trend and the varieties. The total content of trace elements is the highest in green nephrite, and such elements as Be, Ni and Cu have a certain impact on the green color of nephrite. The ΣREE values of Xinjiang nephrite range from 1.4698×10^{-6} to 4.2217×10^{-6} , the values of $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ vary from 0.5663 to 10.8392 and δCe from 0.8115 to 0.9866; the ΣREE values of Xiuyan nephrite range from 5.1850×10^{-6} to 20.4230×10^{-6} , the values of δCe vary from 0.8386 to 0.9885, and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ from 2.1071 to 5.6884. The nephrites from the two producing areas generally have low rare earth elements and clear differentiation of LREE and HREE, suggesting the enrichment of HREE. In addition, δEu are characterized by both positive and negative anomalies. The REE partition curve shows the REE features of multi-sources of ore-forming fluids and multi-period mineralization. The difference in the ore-forming source and the environment is the basic factor causing the different REE compositions of the nephrites from the two nephrite producing areas. Photomicrographs show that Xinjiang nephrite is mainly composed of fibrous, columnar, needle-like and flaky tremolite, and its impure minerals are composed of occasional limonite, ferric oxide and chlorite, illite and other clay minerals, whose content does not exceed 1%. It is colorless under polarization microscope and assumes middle-positive relief, with the relief gradually increasing with the increase of Fe content in samples. Its interference color is yellow to purple in Grade I. Xiuyan nephrite is similar to Xinjiang nephrite in mineral composition and structure, but it has larger particle sizes, poor compactness and larger gaps between the particles. The tremolite mainly has radiate fibrous and columnar shape through SEM observation, which seems to be the common character of the nephrites from the two producing areas, but Xinjiang nephrite has the most typical felt-like fiber woven blastic texture, with the particle sizes generally less than $3 \mu\text{m}$ and the lengths of columnar and fibrous particles generally less than $10 \mu\text{m}$. Xiuyan nephrite commonly has micro-fiber and micro-leaf-shaped structure, and the tremolite grains assume leaf-shaped and fibrous distribution. The tremolite grains are thicker than those of Xinjiang nephrite, and the lengths are mostly in the range of $10 \sim 20 \mu\text{m}$, with rather bad density. In addition, there are often uneven fractures or faults developed in the cleavage direction of tremolite in Xiuyan nephrite, which affects the quality of nephrite to a certain extent and seems to be an important factor causing the fact that its quality is not so good as that of Xinjiang nephrite.

Key words: nephrite; petrological and mineralogical characteristics; tremolite; Xinjiang; Xiuyan

软玉在自然界分布较广,是人类历史上最早开发利用的天然玉石资源之一。自古以来,软玉一直以其色泽柔和、质地细腻、温润光洁而深受中外各阶层人士的喜爱。中国比较著名的软玉矿床有新疆和田(蒋壬华,1998;邹天人等,2002;崔文元等,2002;吴瑞华等,2002;陈克樵等,2002;伏修锋等,2007)、玛纳斯(王立本等,2002)、辽宁岫岩(段体玉等,2002;马婷婷等,2007)、青海格尔木(李玉加等,2002;李冉等,2004;冯晓燕等,2004;袁媛等,2005;周征宇等,2006)、台湾花莲(林篙山,1999)以及上个世纪90年代以后新发现的软玉矿床——江苏溧阳小梅岭(何明跃等,2002;周征宇等,2009)、四川绵阳(钱向丽等,2005)等。

以往对软玉的研究多局限于对单个产地软玉的研究,缺乏对比性研究,对于不同产地软玉质地差别的原因也缺乏系统研究,造成目前市场上不断有以

次充好的现象发生。因此,寻找不同产地软玉鉴别标志和质量评价因素显得尤为重要。本文选择新疆和辽宁岫岩两产地的最典型的软玉样品作为研究对象,结合矿床地质特征资料,系统地进行了岩石学、矿物学特征等方面的研究,重点对软玉的化学成分、矿物组成与结构特征进行研究,寻找两产地软玉的共同特征和差异性,试图为软玉的产地鉴别和质量评价提供科学依据和理论指导。

1 地质特征简介

1.1 新疆软玉矿床地质特征

新疆软玉主要产于昆仑山地区,西起塔什库尔干,东至且末,在长达1200多千米的昆仑山麓和各条河流的河床中,已发现新疆软玉矿床和矿点20多处,构成新疆软玉极其重要的成矿带。昆仑山地区

的软玉,古称“昆仑玉”,也称“昆山玉”,由于其中和田地区所产的透闪石玉(软玉)最为著名,习惯上将其称为“和田玉”。和田玉以青玉为主,也有青白玉和白玉,著名“羊脂玉”就产于该区。矿床分布与昆仑地槽褶皱带主要构造线方向是一致的,可划分两个成矿带,即公格尔-柳什塔格成矿带与肃拉穆宁成矿带(阿尔金山西段肃拉穆宁山)。软玉矿体主要产于中酸性侵入体与前寒武系白云质大理岩的外接触带中(刘晶等,2002),成矿带断续长1 100多千米,为海西期闪长岩与前寒武系结晶灰岩接触交代成矿。区内逆冲断层发育,和田玉矿体多赋存在逆断层的上盘,其矿体形态受次一级构造裂隙的控制,矿体呈囊状、透镜状,产于大理岩中。

1.2 岫岩软玉矿床地质特征

岫岩是中国的“玉石之乡”,岫岩软玉矿分为两类:原生软玉矿和次生软玉矿,前者当地称“老玉矿”,后者当地又称“河磨玉矿”。原生矿分布于辽宁岫岩县城西北 32 km 细玉沟西海拔 600 m 的褶皱轴

部低山区(徐海鹏等,2000),矿床产于细玉沟沟头的山顶上,矿体赋存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。矿体形态呈不规则似层状和透镜状产出,矿体与围岩的界限清楚。矿体周围岩石普遍遭受热液蚀变,围岩蚀变类型有蛇纹石化、滑石化、透闪石化、阳起石化、绿泥石化和碳酸盐化。蚀变带具有一定的宽度(0.5~2 m),无明显分带现象(王时麒等,2002)。

2 物理性质

笔者赴新疆、岫岩两地玉器加工厂,共采集两产地样品 24 件,其中新疆和田地区软玉样品 13 件,辽宁岫岩县细玉沟原生软玉样品 10 件,次生软玉样品 1 件。两地代表性样品照片见图 1,物理性质对比详见表 1。总体来说,两产地软玉的物理性质相似,但岫岩软玉的光泽和透明度不如优质的新疆软玉,其抛光的光



图 1 新疆软玉和岫岩软玉的代表性样品

Fig. 1 Representative samples of nephrites from Xinjiang and Xiuyan

表 1 新疆软玉、岫岩软玉物理性质一览表

Table 1 A list of physical properties of Xinjiang nephrite and Xiuyan nephrite

编号	产地	品种	颜色	光泽	透明度	折射率	相对密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	荧光及磷光
1	新疆	白玉	白色	油脂光泽	半透明-微透明	1.623	2.965~3.102	无
2		青玉	淡绿-浅绿色	蜡状光泽	不透明	1.615	2.891~2.976	无
3		黄玉	淡黄-深黄色	蜡状光泽	不透明	1.608	2.912~2.952	无
4		碧玉	深绿色	蜡状光泽	不透明	1.618	2.936~2.972	无
5	岫岩	青玉	浅绿-深绿色	蜡状光泽	不透明	1.60~1.61	2.923~3.020	弱蓝白色荧光
6		黄白玉	黄色、浅黄色、褐色	蜡状光泽	不透明-微透明	1.60~1.61	2.913~2.954	无

光洁度亦不如新疆软玉。黄白玉和绿玉在新疆软玉中基本上没有,而新疆软玉中的黄玉在岫岩软玉中基本上没有,这是两地软玉在颜色上的明显差别,这对于判断古玉器的玉料来源有重要的意义。综合岫岩软玉的颜色和一些主要的物理性质特征,可以初步认为岫岩软玉相当于新疆软玉的青玉(浅绿-灰绿色)、碧玉(深绿色)、黄玉(浅黄-褐黄色)3个品种。

3 矿物组成

软玉是含水的钙镁铁链状硅酸盐矿物集合体,属透闪石-阳起石系列,单斜晶系,化学分子式为 $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$,其中 Mg-Fe 之间可呈完全类质同像替代。当 $w(\text{Mg})/w(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) \geq 0.90$ 称为透闪石, $0.50 \leq w(\text{Mg})/w(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) < 0.90$ 时称为阳起石; $w(\text{Mg})/w(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) < 0.50$ 时称为铁阳起石。此外,还可有少量的 Al 替代 Mg 和 Fe,少量的 Na、K、Mn 替代 Ca 和 Mg。软玉的主要化学成分为 SiO_2 、MgO 和 CaO,此外还含有少量的 FeO、 K_2O 、 Na_2O 和 Al_2O_3 。

3.1 样品处理及分析方法

本次测试分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用的分析仪器为 Agilent 7500a 等离子质谱仪。分析所用试剂: HNO_3 和 HF 均为由优级纯酸经亚沸蒸馏装置制得的高纯试剂,水为 E-pure 制得的 18 mW 的高纯水。样品处理程序是:将样品置于烘箱中,于 105°C 烘干 12 h,然后从烘箱中取出样品,称取样品 50 mg 于高压密闭 Teflon 溶样器中,缓慢加入 1 mL HNO_3 和 1 mL HF,加盖并旋紧溶样器钢套。将装有样品的溶样器放入烘箱中,于 190°C 保温加热 48 h,将溶样器凉冷,开盖,在电热板上于 140°C 将溶液蒸至湿盐状,然后缓慢加入 2 mL HNO_3 并再次蒸干至湿盐状。再加入 2~3 mL 30% 的 HNO_3 ,加盖并悬紧溶样器钢套,然后置于烘箱中于 190°C 保温加热 12 h。最后,待溶样器凉冷,将提取液用 2% HNO_3 + 0.1% HF 稀释于清洗干净的 PET(聚酯)瓶中(稀释因子为 1:1 500)密闭保存,待上机测定。

此次分析共测定(从称样至测定全过程)2份国际标准物质,编号分别为 AGV-2 和 G-2。为保证实

表 2 软玉的微量元素

$w_B/10^{-6}$

Table 2 Trace elements in nephrites

产地 样品	新疆和田					辽宁岫岩			
	XJ-1 黄玉	XJ-1 黄玉	XJ-7 白玉	HT-12 青玉	HT-37 碧玉	XY-1 青玉	XY-2 黄白玉	XY-3 青玉	XY-4 黄白玉
Be	0.270 0	0.300 0	0.300 0	13.600 0	2.860 0	14.100 0	12.600 0	19.800 0	16.300 0
Sc	-	-	-	0.260 0	0.290 0	-	-	0.370 0	-
V	1.050 0	1.870 0	7.080 0	5.920 0	5.570 0	7.820 0	21.300 0	12.800 0	15.000 0
Cr	1.300 0	1.180 0	2.030 0	5.820 0	1.260 0	1.760 0	6.800 0	19.900 0	1.490 0
Co	3.270 0	3.210 0	0.510 0	4.850 0	13.100 0	2.990 0	1.590 0	4.230 0	1.300 0
Ni	120.000 0	115.000 0	2.520 0	91.900 0	3.570 0	24.500 0	3.930 0	17.600 0	1.960 0
Cu	-	-	0.060 0	14.000 0	10.800 0	-	-	6.800 0	-
Zn	34.800 0	35.600 0	406.000 0	324.000 0	220.000 0	37.300 0	58.700 0	83.700 0	29.500 0
Ga	0.110 0	0.110 0	0.380 0	0.710 0	1.060 0	0.900 0	1.080 0	0.910 0	0.920 0
Rb	0.260 0	0.250 0	0.280 0	12.400 0	3.190 0	1.350 0	1.570 0	0.980 0	1.110 0
Sr	6.830 0	6.980 0	8.810 0	11.100 0	11.100 0	15.400 0	12.700 0	19.900 0	11.300 0
Y	2.560 0	2.340 0	0.330 0	2.530 0	1.920 0	4.460 0	2.280 0	4.630 0	3.310 0
Zr	9.460 0	9.620 0	1.130 0	11.800 0	2.740 0	8.330 0	1.950 0	7.330 0	1.510 0
Nb	0.046 0	0.055 0	0.100 0	0.530 0	0.400 0	0.430 0	0.290 0	0.620 0	0.310 0
Sn	0.390 0	0.410 0	0.280 0	2.160 0	0.340 0	0.540 0	0.780 0	1.170 0	0.650 0
Cs	0.080 0	0.070 0	0.330 0	4.620 0	0.240 0	0.430 0	0.360 0	0.260 0	0.460 0
Ba	3.890 0	4.860 0	5.600 0	7.830 0	11.900 0	5.630 0	13.100 0	6.370 0	4.500 0
Hf	0.210 0	0.200 0	0.030 0	0.270 0	0.070 0	0.200 0	0.050 0	0.190 0	0.040 0
Ta	0.010 0	0.010 0	0.010 0	0.040 0	0.050 0	0.050 0	0.020 0	0.050 0	0.030 0
Tl	0.003 3	0.001 2	0.005 6	0.073 0	0.022 0	0.019 0	0.024 0	0.019 0	0.018 0
Pb	6.760 0	6.680 0	1.850 0	6.100 0	2.820 0	0.840 0	4.390 0	2.690 0	1.170 0
Th	0.008 9	0.009 8	0.049 0	0.320 0	0.210 0	0.140 0	0.100 0	0.650 0	0.038 0
U	0.380 0	0.380 0	0.310 0	0.670 0	1.000 0	1.510 0	0.860 0	2.420 0	1.720 0

验数据的可靠性，XJ-1 样品进行了重复测试和比对，计算时取其平均值。结果(表 2)表明重复测试结果在误差范围之内，实验数据是可靠的。

3.2 微量元素特征

软玉的颜色起因于取代 Mg^{2+} 而占据畸变八面体位置的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} ，因此它的颜色主要取决于结构中全铁含量及 Fe^{2+}/Fe^{3+} 比值，其他杂质元素对软玉的颜色也有一定的影响(Harlow and Sorensen, 2005)。从表 2 可以看出，新疆软玉中 Co、Sr、Ba 元素依白玉、青玉、碧玉的顺序增高，岫岩软玉中 Ni、Y、Zr 元素依黄白玉、青玉的顺序增高，V、Pb 依黄白玉、青玉的顺序减少。Be、V 元素在岫岩软玉中的含量普遍比在新疆软玉中的含量要高，Be 元素通常在青玉、黄白玉、碧玉中有一定量的存在，而在白玉和黄玉中则较少出现，这说明 Be 元素对软玉中的绿色有一定的影响。Cr、Co 元素在两产地的软玉中的含量都不高，Ni 元素在新疆黄玉、青玉、岫岩青玉中的含量都比较高，这说明 Ni 元素对软玉中的绿色有一定的联系。Cu 元素只在岫岩青玉、新疆青玉、碧玉中少量存在，这说明 Cu 元素的存在对软玉的绿色有一定的影响。通过以上的分析可以发现 Be、Ni、Cu 元素对软玉中的绿色调有一定的影响。

3.3 稀土元素特征

稀土元素测试结果见表 3。新疆软玉 ΣREE 范

围 $1.4698 \times 10^{-6} \sim 4.2217 \times 10^{-6}$ (La/Yb)_N 值范围 $0.5663 \sim 10.8392$ ， δCe 值范围 $0.8115 \sim 0.9866$ ；岫岩软玉 ΣREE 范围 $5.1850 \times 10^{-6} \sim 20.4230 \times 10^{-6}$ ， δCe 值范围 $0.8386 \sim 0.9885$ ，(La/Yb)_N 值范围 $2.1071 \sim 5.6884$ 。总体来说，两产地软玉的稀土元素的含量普遍都很低，LREE、HREE 分异明显，显示出 HREE 富集特征， δEu 具有正异常和负异常现象。REE 配分曲线(图 2)类型多样，变化较大，充分显示了成矿流体的多来源和多期次叠加成矿的稀土元素特征，成矿物质来源和矿石形成环境的不同是导致两地软玉稀土元素组成不同的根本原因(曾志刚等, 1998)。

4 显微结构特征

4.1 薄片观察特征

为了进一步了解两产地软玉的内部结构特征，笔者从收集到的样品中选择具有代表性的样品磨制成光学薄片共计 17 片。通过薄片观察发现，新疆软玉主要由纤维状、柱状、针状和片状透闪石组成，杂质矿物极少，偶见有少量的褐铁矿、氧化铁和绿泥石、伊利石等粘土矿物，含量不大于 1%(图 3a、3b)。单偏光镜下无色，中正突起，伴随着样品中 Fe 含量的增高，突起逐渐增高。干涉色 I 级黄-I 级紫红。

表 3 软玉的稀土元素

$\omega_B/10^{-6}$

Table 3 Rare earth elements in nephrites

产地	新疆和田				辽宁岫岩			
	XJ-1 黄玉	XJ-7 白玉	HT-12 青玉	HT-37 碧玉	XY-1 青玉	XY-2 黄白玉	XY-3 青玉	XY-4 黄白玉
La	0.0680	0.2400	0.2500	0.1500	0.6400	0.4700	3.4100	0.6400
Ce	0.1000	0.4200	0.5600	0.3300	1.3900	0.8600	6.3000	1.2400
Pr	0.0110	0.0510	0.0760	0.0520	0.1800	0.1300	0.7100	0.1500
Nd	0.0470	0.2000	0.3000	0.2300	0.7200	0.4700	2.6300	0.5500
Sm	0.0120	0.0550	0.0700	0.0680	0.2200	0.1200	0.5100	0.1300
Eu	0.0260	0.0120	0.0067	0.0091	0.0830	0.0530	0.0450	0.0960
Gd	0.0071	0.0390	0.0800	0.1100	0.2400	0.1300	0.4600	0.1800
Tb	0.0012	0.0062	0.0170	0.0250	0.0490	0.0280	0.0720	0.0400
Dy	0.0120	0.0540	0.1200	0.2100	0.4000	0.2100	0.5500	0.3700
Ho	0.0015	0.0084	0.0290	0.0600	0.0810	0.0560	0.1200	0.0940
Er	0.0053	0.0230	0.0740	0.1800	0.2300	0.1700	0.4200	0.2400
Tm	0.0002	0.0032	0.0140	0.0270	0.0320	0.0270	0.0650	0.0360
Yb	0.0045	0.0240	0.0820	0.1900	0.1800	0.1600	0.4300	0.1900
Lu	0.0006	0.0040	0.0130	0.0270	0.0240	0.0210	0.0710	0.0220
ΣREE	2.6364	1.4698	4.2217	3.5881	8.9290	5.1850	20.4230	7.2880
LREE/HREE	0.1113	1.9889	0.4267	0.3052	0.5676	0.6823	1.9955	0.6261
(La/Yb) _N	10.8392	7.1730	2.1869	0.5663	2.5504	2.1071	5.6884	2.4162
δEu	7.9354	0.7534	0.2728	0.3203	1.0983	1.2898	0.2785	1.9184
δCe	0.8115	0.8858	0.9866	0.9137	0.9885	0.8386	0.9417	0.9469

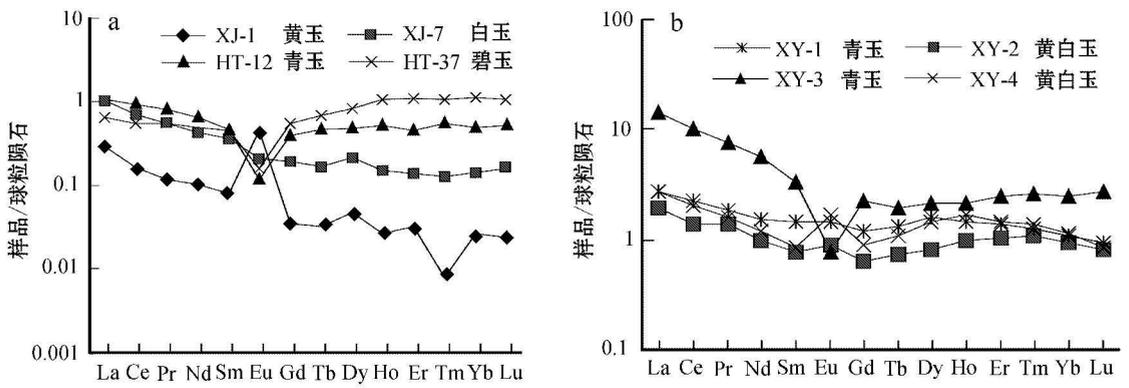


图 2 新疆软玉(a)和岫岩软玉(b)的稀土元素配分曲线

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of nephrites from Xinjiang(a) and Xiuyan(b)

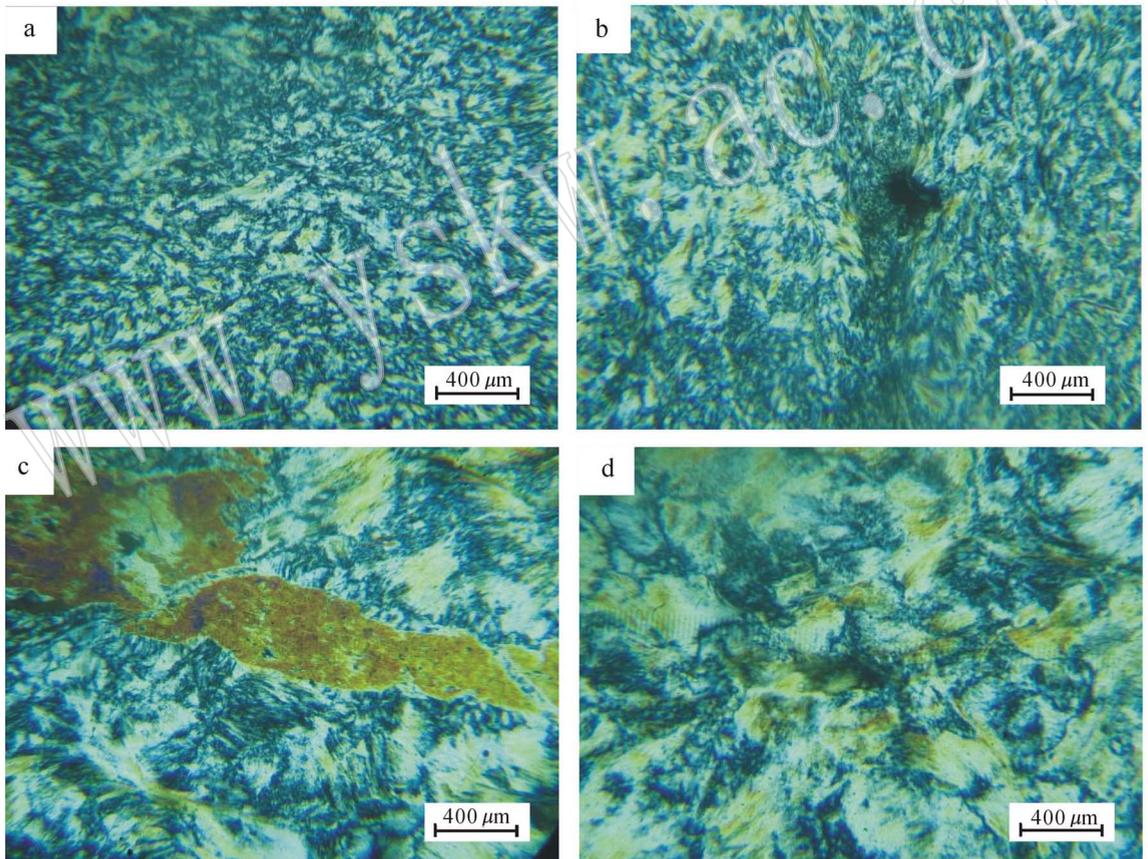


图 3 软玉的显微照片(正交偏光)

Fig. 3 Photomicrographs of nephrite (crossed nicols)

a—新疆软玉的毛毡状纤维交织结构; b—新疆软玉中的暗色杂质矿物氧化铁; c—岫岩软玉的斑状变晶结构和纤维交织结构;

d—岫岩软玉的不等粒变晶结构

a—woven felt-like fiber structure in Xinjiang nephrite; b—dark impurity mineral-ferric oxide in Xinjiang nephrite; c—porphyroblastic texture and fibrous interlocking texture in Xiuyan nephrite; d—inequigranular crystalloblastic texture in Xiuyan nephrite

岫岩软玉与新疆软玉的矿物组成和结构相似,但整体上看颗粒较大,致密性较差,颗粒之间的空隙较大(图3c、3d)。

4.2 实验方法及实验条件

利用扫描电镜(SEM)对8块软玉样品进行了显微结构特征分析,其中新疆软玉、岫岩软玉各4件。测试分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,实验仪器为JSM-35CF型扫描电子显微镜,实验条件:加速电压25 kV,实验方法:取样品横截面、纵截面的新鲜断面,观察其特征形貌,在不同的放大倍数下拍摄其特征图片。

4.3 新疆软玉的主要结构类型及其特征

根据新疆软玉矿物组分及其表现形式,可将新疆软玉的显微结构分为以下几种:

(1)纤维状-柱状交织变晶结构:属于这一类型的有黄玉,青玉等。如新疆黄玉样品(XJ-1)在扫描电镜下表现为透闪石成纤维状或柱状,颗粒宽度大都 $<1\ \mu\text{m}$,长度长短不等,一般都 $>10\ \mu\text{m}$,具有明显的定向排列组构,晶形虽不典型,但整体上相对较纯(图4a)。新疆青玉样品(HT-12)在扫描电镜下显示结晶较粗,粒度 $>10\ \mu\text{m}$,结构不均匀,部分透闪石呈纤维状定向排列,且含有少量杂质,如绿泥石、伊利石等矿物。

(2)毡状纤维交织变晶结构:这种结构为新疆软玉中的典型结构,扫描电镜下表现为短柱状、板状、纤维状的透闪石晶体组成,晶形完好,矿物成分较纯净,表现为透闪石颗粒非常细微,大小均一,颗粒宽度一般小于 $3\ \mu\text{m}$,柱状、纤维状颗粒长度大都小

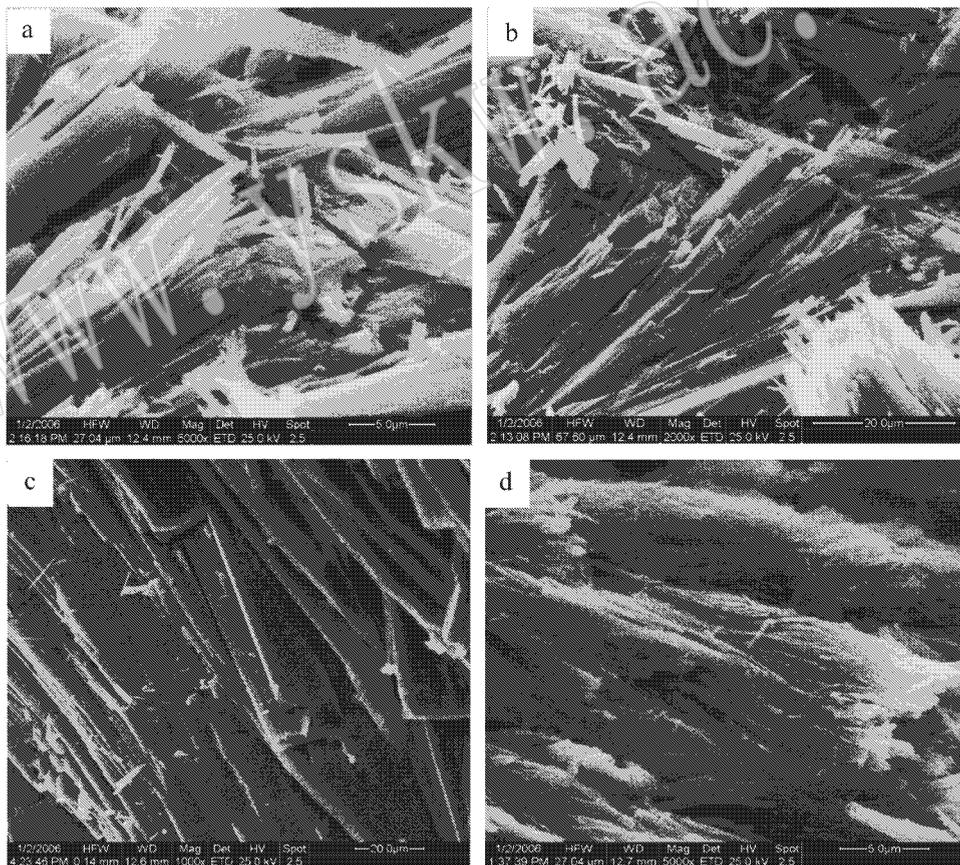


图4 软玉的扫描电镜照片

Fig. 4 SEM images of nephrite

a—新疆黄玉($\times 5000$), XJ-1; b—新疆白玉($\times 2000$), XJ-7; c—岫岩黄白玉($\times 1000$), XY-4; d—岫岩青玉($\times 5000$), XY-1
a—yellow jade in Xinjiang ($\times 5000$), XJ-1; b—white jade in Xinjiang ($\times 2000$), XJ-7; c—yellow-white jade in Xiuyan ($\times 1000$), XY-4; d—green jade in Xiuyan ($\times 5000$), XY-1

于 $10\ \mu\text{m}$, 颗粒杂乱无章地交织成毛毡状。局部可见透闪石纤维彼此相互穿插, 紧密结合。这种特殊的穿插交错结构使透闪石纤维之间产生了一种机械结合力或绞合力。当受外力作用时, 互相穿插绞合着的透闪石组成的软玉形成断裂面时需要破坏各种力而拔出, 这种纤维间的机械结合力的存在加大了每一个面断裂所需的能量, 也即增强了软玉的韧度 (Bradt *et al.*, 1973; Dorling and Zussman, 1985; 吴瑞华等 2002)。具有该结构的软玉细润致密, 是优质软玉所具备的特性。该结构在白玉、青白玉、青玉、墨玉中均可见到, 与新疆软玉的质地紧密相关 (卢保奇等, 2004)。如新疆白玉样品 (XJ-7), 见图 4b。

4.4 岫岩软玉的主要结构类型及其特征

(1) 显微叶片状结构: 透闪石颗粒呈叶片状 (图 4c) 和纤维状分布, 颗粒细腻, 但结构较松散, 颗粒间空隙较大, 具有该结构的玉石质地一般较粗, 甚至无经济价值。如岫岩黄白玉样品 (XY-4)。

(2) 显微纤维结构: 透闪石多呈纤维状, 颗粒粒径 $< 1\ \mu\text{m}$, 长度大都在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 不等, 不具有定向结构。局部沿透闪石解理方向发育有不平坦的断口 (图 4d), 具有此类结构的玉石质地较好或一般。如岫岩青玉样品 (XY-1)。

(3) 纤维状叶片状交织变晶结构: 在扫描电镜下表现为透闪石成纤维状或叶片状, 纤维状颗粒宽

度大都 $< 1\ \mu\text{m}$, 长度长短不等, 一般在 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 左右, 具有半定向排列组构。叶片状颗粒厚度 $< 1\ \mu\text{m}$, 长度一般 $> 80\ \mu\text{m}$ 。颗粒之间呈交织状结合在一起, 其中纤维状颗粒表现为弯曲状, 致密程度较新疆软玉要松散。如岫岩黄白玉样品 (XY-2)。

4.5 小结

通过对两产地软玉主要品种的扫描电镜分析, 对两产地软玉的扫描电镜下主要结构类型及其主要特征进行了归纳总结 (表 4)。扫描电镜下两产地软玉的共同点是透闪石大都呈纤维状、柱状形态, 但新疆软玉以毛毡状纤维交织变晶结构、纤维状-柱状交织变晶结构为主, 而岫岩软玉以纤维状-叶片状交织变晶结构、显微叶片状结构为主。将两者相近的品种进行比较发现, 新疆软玉的颗粒一般较细, 颗粒之间的空隙度较小, 致密程度好于岫岩软玉。另外在岫岩软玉中往往局部沿透闪石的解理方向发育有不平坦的断口或断层, 这也在一定程度上影响了软玉的质量。

5 结论

(1) 新疆软玉与岫岩软玉的微量元素表现出的规律性不是很明显, 个别元素随软玉品种颜色的不断加深呈现出一定的规律性。新疆软玉中 Co、Sr、Ba

表 4 新疆软玉、岫岩软玉扫描电镜下结构类型及其特征对比表

Table 4 Comparative table showing structure types and characteristics of Xinjiang and Xiuyan nephrites under scanning electron microscope

编号	品种	主要结构类型	扫描电镜下主要特征	编号	品种	主要结构类型	扫描电镜下主要特征
XJ-1	黄玉 (和田)	纤维状-柱状 交织变晶结构	颗粒宽度大都 $< 1\ \mu\text{m}$, 长度长短不等, 一般都 $> 10\ \mu\text{m}$, 具有明显的定向排列组构。	XY-2	黄白玉 (岫岩)	纤维状-叶片 状交织变晶 结构	透闪石成纤维状或叶片状, 纤维状颗粒宽度大都 $< 1\ \mu\text{m}$, 长度长短不等, 一般在 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 左右, 具有半定向排列组构。叶片状颗粒厚度 $< 1\ \mu\text{m}$, 长度一般 $> 80\ \mu\text{m}$ 。颗粒之间呈交织状结合在一起, 其中纤维状颗粒表现为弯曲状。
XJ-7	白玉 (和田)	毛毡状纤维 交织变晶结 构	颗粒宽度一般 $< 3\ \mu\text{m}$, 柱状、纤维状颗粒长度大都 $< 10\ \mu\text{m}$, 颗粒杂乱无章地交织成毛毡状。	XY-4	黄白玉 (岫岩)	显微叶片状 结构	透闪石呈叶片状和纤维状分布, 颗粒细腻, 但结构较松散, 颗粒间空隙较大。
HT-12	青玉 (和田)	纤维状-柱状 交织变晶结 构	结晶较粗, 粒度 $> 10\ \mu\text{m}$, 结构不均匀, 部分透闪石呈纤维状定向排列。	XY-1	青玉 (岫岩)	显微纤维结 构	透闪石多呈纤维状, 颗粒粒径 $< 1\ \mu\text{m}$, 长度大都在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 不等, 不具有定向结构。局部沿透闪石解理方向发育有不平坦的断口。
HT-37	碧玉 (和田)	粉砂状结构	少见晶形发育完好的透闪石晶体, 由不同形态的矿物颗粒镶嵌组成类似粉砂状的结构。	XY-3	青玉 (岫岩)	毛毡状结构	透闪石颗粒非常细小, 大小均一, 交织成毛毡状。局部发育有断层。

元素依白玉、青玉、碧玉的顺序增高,岫岩软玉中 Ni、Y、Zr 元素依黄白玉、青玉的顺序增高,V、Pb 依黄白玉、青玉的顺序减少。两产地软玉中均以青玉中的微量元素的总含量最高,Be、Ni、Cu 元素对软玉中的绿色调有一定的影响。

(2) REE 配分曲线类型多样、变化较大,充分显示了成矿流体的多来源和多期次叠加成矿的稀土元素特征,成矿物质来源和矿石形成环境的不同是导致两地软玉稀土元素组成不同的根本原因。

(3) 新疆软玉的结构类型主要有纤维状-柱状交织变晶结构、毡状纤维交织变晶结构等,其中以毡状纤维交织变晶结构最为典型和常见,岫岩软玉的结构类型主要有显微叶片状结构、显微纤维结构、纤维状-叶片状交织变晶结构等,其中以显微纤维结构和显微叶片状结构居多,颗粒较新疆软玉要粗大,致密程度差,这也是造成其质地不如新疆软玉的重要原因。

致谢 论文撰写期间与中国地质大学(武汉)李娅莉副教授和同济大学亓利剑教授进行了讨论,受益匪浅,中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室刘勇老师在实验过程中给予了大力帮助,审稿专家对论文提出了很多有建设性的意见,特致谢忱!

References

- Bradt R B, Newnham R E and Biggers J V. 1973. The toughness of jadde [J]. *American Mineralogist*, 58: 727~732.
- Chen Keqiao and Chen Zhenyu. 2002. Study on compositions and physical features of Hetian jadde [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (Suppl.): 34~40 (in Chinese with English abstract).
- Cui Wenyuan and Yang Fuxu. 2002. Study on Hetian jade (tremolite jade) [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (Suppl.): 26~33 (in Chinese with English abstract).
- Dorling M and Zussman J. 1985. An investigation of nephrite jade by electron microscope [J]. *Mineralogical Magazine*, 49(1): 31~36.
- Duan Tiyu and Wang Shiqi. 2002. Study on stable isotopes of Xiuyan nephrite (tremolite) [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (Suppl.): 115~119 (in Chinese with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Harlow G E and Sorensen S S. 2005. Jade (nephrite and jadeite) and serpentine: Metasomatic connections [J]. *International Geology Review*, 47 (2): 116~146.
- Fu Xiufeng, Gan Fuxi, Ma Bo, et al. 2007. Structural and nondestructive compositional analysis on several Nephrite from different provenances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1197~1202 (in Chinese with English abstract).
- He Mingyue, Zhu Younan and Li Hongbo. 2002. Gemmological characteristics of Meiling jade from Liyang, Jiangsu Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (Suppl.): 99~104 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Renhua. 1998. Hetian Nephrite [J]. *Shanghai Geology*, 2: 49~58 (in Chinese with English abstract).
- Li Ran, Liao Zongting, Li Yujia, et al. 2004. Wollastonite in Qinghai nephrite Jade and Its Significance [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 6(1): 17~19 (in Chinese with English abstract).
- Li Yujia, Liao Zongting and Shi Xiaming. 2002. The Comparison Study between Qinghai nephrite and Xinjiang nephrite [J]. *Shanghai Geology*, 3: 58~61 (in Chinese with English abstract).
- Lin Songshan. 1999. Varieties and characteristics of nephrite (Amphibole Jade) from Taiwan Province [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 1(3): 18~20 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jing and Cui Wenyuan. 2002. Study on Nephrite (Tremolite Jade) from Three Localities in China [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 4(2): 24~29 (in Chinese with English abstract).
- Lu Baoqi, Qi Lijian, Xia Yiben, et al. 2004. Mineralogy of nephrite (tremolite) cat's eye from Sichuan Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(3): 268~272 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tingting, Liao Zongting and Zhou Zhengyu. 2007. The current research of Xiuyan nephrite Ore Genesis [J]. *Shanghai Geology*, 4: 64~66 (in Chinese with English abstract).
- Qian Xiangli, Zhou Kaican and Qi Lijian. 2005. Classification and preliminary research on the color development mechanism of nephrite Cat's eyes in Sichuan Province [J]. *China Mining Magazine*, 15 (1): 73~75 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liben and Liu Yaling. 2002. The X-ray powder diffraction feature of Hetian jade, Manasi green jade and Xiuyan old jade (tremolite jade) [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (Suppl.): 62~67 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiqi, Duan Tiyu and Zheng Zizi. 2002. Mineralogical and petrological characteristics of Xiuyan nephrite and its mineralogical model [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21: 79~90 (in Chinese with English abstract).
- Wu Ruihua, Zhang Xiaohui and Li Wenwen. 2002. Petrological characteristics of Hetian jade in Xinjiang and nephrite from Baikal Lake area in Russia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (Suppl.): 50~56 (in Chinese with English abstract).
- Xu Haipeng, Feng Aiping, Wang Shiqi, et al. 2000. The origin of Liaoning xiuyan nephrite placer resources and their protection [J]. *Resources Science*, 2: 24~29 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Yuan, Liao Zongting and Zhou Zhengyu. 2005. Study on compositions and micro-textures of water-line in nephrite from Qinghai

- Province[J]. *Shanghai Geology*, 4: 68~70(in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhigang, Li Chaoyang, Liu Yuping, *et al.* 1998. REE geochemistry of scheelite of two genetic types from Nanyangtian, Southeastern Yunnan[J]. *Geology Geochemistry*, 26(2): 34~38(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhengyu, Chen Ying, Liao Zongting, *et al.* 2009. A petrological and mineralogical study of Liyang nephrite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 490~494(in Chinese with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Zou Tianren and Chen Keqiao. 2002. The locality feature of Hetian jade, Manasi green jade and Xiuyan old jade[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(Suppl.): 41~49(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈克樵, 陈振宇. 2002. 和田玉的物质组分和物理性质研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(增刊): 34~40.
- 崔文元, 杨富绪. 2002. 和田玉(透闪石玉)的研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(增刊): 26~33.
- 段体玉, 王时麒. 2002. 岫岩软玉(透闪石玉)的稳定同位素研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(增刊): 115~119.
- 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.
- 伏修锋, 干福熹, 马波, 等. 2007. 几种不同产地软玉的岩相结构和无破损成分分析[J]. *岩石学报*, 23(5): 1197~1202.
- 何明跃, 朱友楠, 李宏博. 2002. 江苏省溧阳梅岭玉(软玉)的宝石学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(增刊): 99~104.
- 蒋壬华. 1998. 和田玉[J]. *上海地质*, 2: 49~58.
- 李冉, 廖宗廷, 李玉加, 等. 2004. 青海软玉中硅灰石的确定及其意义[J]. *宝石和宝石学杂志*, 6(1): 17~19.
- 李玉加, 廖宗廷, 史霞明. 2002. 青海软玉与新疆软玉的对比研究[J]. *上海地质*, 3: 58~61.
- 林嵩山. 1999. 台湾软玉(闪玉)的种属及特征[J]. *宝石和宝石学杂志*, 1(3): 18~20.
- 刘晶, 崔文元. 2002. 中国三个产地的软玉(透闪石玉)研究[J]. *宝石与宝石学杂志*, 4(2): 24~29.
- 卢保奇, 元利剑, 夏义本, 等. 2004. 四川软玉(透闪石玉)猫眼的矿物学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(3): 268~272.
- 马婷婷, 廖宗廷, 周征宇. 2007. 岫岩软玉矿床成因研究现状分析[J]. *上海地质*, 4: 64~66.
- 钱向丽, 周开灿, 元利剑. 2005. 四川软玉猫眼颜色品种划分及呈色机理初步研究[J]. *中国矿业*, 15(1): 73~75.
- 王立本, 刘亚玲. 2002. 和田玉、玛纳斯碧玉和岫岩老玉(透闪石玉)的X射线线晶衍射特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(增刊): 62~67.
- 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.
- 吴瑞华, 张晓晖, 李雯雯. 2002. 新疆和田玉和俄罗斯贝加尔湖地区软玉的岩石学特征研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(增刊): 50~56.
- 徐海鹏, 丰爱平, 王时麒, 等. 2000. 岫岩软玉砂矿的成因及资源保护[J]. *资源科学*, 2: 24~29.
- 袁媛, 廖宗廷, 周征宇. 2005. 青海软玉水线的物相分析和微观形貌研究[J]. *上海地质*, 4: 68~70.
- 曾志刚, 李朝阳, 刘玉平, 等. 1998. 滇东南南秧田两种不同成因类型白钨矿的稀土元素地球化学特征[J]. *地质地球化学*, 26(2): 34~38.
- 周征宇, 陈盈, 廖宗廷, 等. 2009. 溧阳软玉的岩石矿物学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 490~494.
- 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.
- 邹天人, 陈克樵. 2002. 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*, 21(增刊): 41~49.