

文章编号: 1000-6524(2004)03-0268-05

## 四川软玉(透闪石玉)猫眼的矿物学研究

卢保奇<sup>1</sup>, 亓利剑<sup>2</sup>, 夏义本<sup>1</sup>, 周开灿<sup>3</sup>

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 201800; 2. 中国地质大学珠宝学院, 湖北 武汉 430074;  
3. 西南科技大学矿物材料研究所, 四川 绵阳 621002)

**摘要:** 采用电子探针(EPMA) X射线粉晶衍射(XRD) Raman光谱、扫描电镜(SEM)和偏光显微镜等方法对四川软玉(透闪石玉)猫眼进行了研究。结果表明, 四川软玉猫眼主要由微晶-隐晶质透闪石矿物集合体组成; 透闪石主要呈近于平行定向排列的显微纤维状, 显微纤维变晶结构是软玉猫眼的主要结构, 具有此结构的软玉能表现出良好的猫眼效应; 透闪石纤维较粗、相互聚集形成束状或捆状结构时, 猫眼的眼线比较分散, 猫眼效应较差; 透闪石纤维局部相互穿插绞合是软玉猫眼表现出高韧性和较强抗断裂性能的主要因素。

**关键词:** 矿物学; 软玉猫眼; 透闪石; 扫描电镜; 猫眼效应

**中图分类号:** P578.955

**文献标识码:** A

### Mineralogy of nephrite (tremolite) cat's eye from Sichuan Province

LU Bao\_qi<sup>1</sup>, QI Li\_jian<sup>2</sup>, XIA Yi\_ben<sup>1</sup> and ZHOU Kai\_can<sup>3</sup>

(1. School of Materials and Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800, China; 2. Gemological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Mineral Material Institute, Southwest Technological University, Mianyang 621002, China)

**Abstract:** Electronic microprobe analysis (EMPA), X-ray diffraction (XRD), Raman spectrum, scan electronic microscope (SEM) and polarized optical microscope were used to study nephrite cat's eyes from Sichuan Province, Southwest China. The results indicate that the nephrite cat's eye mainly consists of aggregates of microcrystalline-cryptocrystalline tremolites. Fiber-shaped tremolites are parallel to each other in a certain direction. Fibroblastic texture is dominant, with which the nephrite can show good cat's eye effect, while tremolites with relatively thick fibers or bunchy and bundle fibers do not show satisfactory cat's eye effect. Fiber-shaped tremolites gear with each other tightly, which seems to be the major reason why the nephrite cat's eye displays high tenacity and break-resistant capability.

**Key words:** mineralogy; nephrite cat's eye; tremolite; SEM; cat's eye effect

软玉是指以透闪石-阳起石系列矿物为主要组成的隐晶致密的矿物集合体, 在世界范围内产地较多。而软玉中的珍品——软玉猫眼, 文献报道则甚少, 除我国台湾省花莲县所产的台湾玉、加拿大安大略省所产的淡绿色软玉以及缅甸所产的绿色透闪石

具有猫眼效应外(林嵩山, 1999), 尚未见其他相关资料。最近在我国四川省石棉矿中发现了软玉猫眼(翁臻培等, 2001), 质地温润, 猫眼鲜活。本文利用EPMA XRD Raman光谱、SEM和偏光显微镜对软玉猫眼的矿物学特征进行了较为详细的研究, 为其

收稿日期: 2004-05-18; 修订日期: 2004-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49772096); 上海市教育委员会发展基金资助项目(03AK23)

作者简介: 卢保奇(1967-), 男, 博士生, 从事矿物学和宝石学的教学与科研工作。

质量评价和资源的开发利用提供了依据。

### 1 地质背景

软玉猫眼矿体呈透镜状、团块状赋存于四川石棉矿区中元古代峨边群超基性岩体——蛇纹石化橄榄岩内。峨边群为前震旦系的沉积岩系,主要为一

套炭泥质碎屑岩及碳酸盐岩,被矿区基性、超基性岩及早震旦世苏雄组火山岩所包裹。矿区构造以南垭河断裂为主,走向 NW320~ 330°,倾向不定。超基性岩体呈北东向延伸,长 7.5 km,被南垭河断分割成相距 8 km 的南、北两个岩体(图 1)。区内次级断裂发育,控制了软玉矿体的形成和分布。

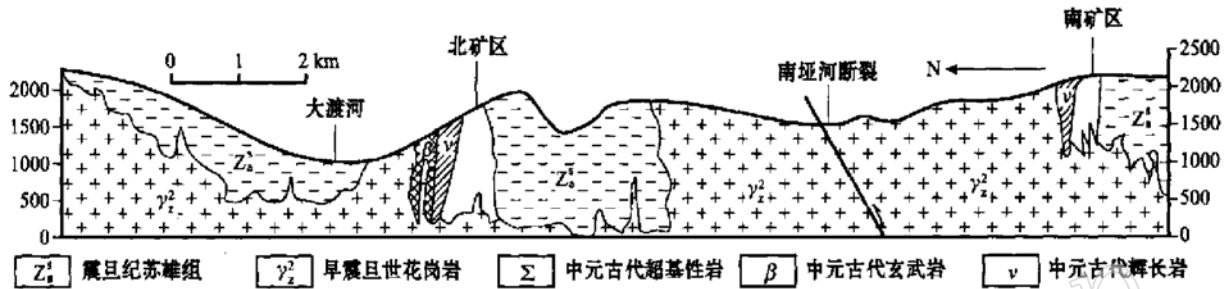


图 1 四川省石棉矿区横剖面地质图(据四川省区测队, 1984)

Fig. 1 Geological map showing transverse section of asbestos diggings in Sichuan Province (after Sichuan Geological Surveying Party, 1984)

### 2 矿物学特征

#### 2.1 电子探针能谱分析

由中国科学院上海硅酸盐研究所电子探针室对四川软玉猫眼进行了测试,仪器型号 JXA\_8000,加

速电压 15 kV,束流  $2 \times 10^{-8}$  A。图 2 为四川软玉猫眼的组分能谱图。图 2 显示,两个样品的主要成分为 SiO<sub>2</sub>、MgO 和 CaO,且含量基本相同;次要成分为 (FeO+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、K<sub>2</sub>O、MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;其中样品 St-41 中所含的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MnO 较 St-56 多。

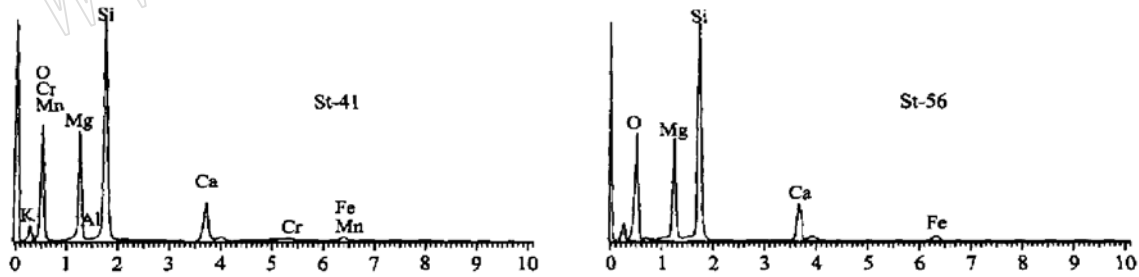


图 2 四川软玉猫眼的组分能谱图

Fig. 2 Energy dispersion spectra of nephrite cat's eyes from Sichuan Province

#### 2.2 电子探针波谱成分分析

本文选取 4 个有代表性的样品进行了电子探针波谱成分测试。结果(表 1)显示,四川软玉猫眼的主要成分为 SiO<sub>2</sub>、MgO 和 CaO。其中, SiO<sub>2</sub> 含量为 56.85%~ 57.27%,平均为 57.11%; MgO 含量为 21.61%~ 22.99%,平均为 22.23%; CaO 含量为 12.29%~ 13.13%,平均为 12.76%。其中,样品 ST-93 的 MgO 含量最高,而 FeO 最低;样品 ST-41

的 MgO 含量最低,而 FeO 最高。从表 1 可看出,随着样品 FeO 含量的增加, MgO 的含量逐渐减少,表明软玉结构中 Fe 类质同像替代 Mg 的量有所增加。 $Mg/(Mg+Fe^{2+}) = 0.88 \sim 0.90$ ,如仅由这一比值来判断,四川软玉猫眼应属透闪石-低铁阳起石系列(Leak et al., 1997),但其 X 射线粉晶衍射图谱及晶胞参数更近似于透闪石(王立本等, 2002),因此笔者仍称之为透闪石。

表1 四川软玉猫眼的电子探针分析结果

w<sub>B</sub>/%

Table 1 Electron microprobe analyses of nephrite cat's eyes from Sichuan Province

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
St <sub>41</sub>	56.85	0.03	0.27	0.03	5.05	0.24	21.61	13.13	0.00	0.04	0.08	0.00	97.33
St <sub>56</sub>	57.16	0.02	0.20	0.00	5.60	0.21	21.76	12.78	0.01	0.03	0.10	0.00	97.86
St <sub>74</sub>	57.27	0.03	0.05	0.00	4.68	0.20	22.57	12.84	0.00	0.02	0.22	0.00	97.68
St <sub>93</sub>	57.14	0.01	0.07	0.00	4.48	0.15	22.99	12.29	0.01	0.03	0.03	0.00	97.19

样号	阳离子数(以23个氧原子数计)												
	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Mn	Mg	Ca	Ni	K	Na	P	Mg/(Mg+Fe <sup>2+</sup> )
St <sub>41</sub>	7.92	0.00	0.04	0.03	0.59	0.03	4.49	1.96	0.00	0.01	0.02	0.00	0.884
St <sub>56</sub>	7.93	0.00	0.03	0.00	0.65	0.03	4.50	1.90	0.00	0.01	0.03	0.00	0.874
St <sub>74</sub>	7.93	0.00	0.01	0.00	0.54	0.02	4.76	1.90	0.00	0.01	0.01	0.00	0.898
St <sub>93</sub>	7.93	0.00	0.01	0.00	0.52	0.02	4.66	1.82	0.00	0.00	0.01	0.00	0.900

由中国地质科学院矿产资源所电子探针室采用 JXA\_8800R 测试, 加速电压 20 kV, 束流  $2 \times 10^{-8}$  A, 测试结果取 3 点平均值。

### 2.3 X射线粉晶衍射分析

在上述分析基础上, 由中国地质大学(武汉)分析中心对 4 个样品进行了 X 射线粉晶衍射分析, 仪器型号为日本 RIGAKU Dmax/3B, 测试条件: Cu 靶, Ni 滤片, 管压 30 V, 管流 30 A, 扫描速度  $4^\circ/\text{min}$ , 结果如图 3 所示。图 3 显示, 4 个样品的粉晶衍射图谱非常相似, 其主要的特征谱线为:  $3.1307 \sim 3.1361(310)$ 、 $8.4410 \sim 8.4571(110)$ 、 $3.2796 \sim 3.2856(240)$ 、 $2.7112 \sim 2.7131(151)$  和  $1.8946 \sim 1.8994(510)$ , 与标准透闪石的衍射谱线基本一致(中科院贵阳地化所, 1978)。同时计算出样品的晶胞参数并与透闪石理论值相对比, 结果显示计算值与理论值吻合较好(表 2)。结合电子探针分析结果, 表明四川软玉猫眼主要由透闪石组成。

表 2 软玉猫眼的晶胞参数与透闪石理论值对比表

Table 2 A comparison between lattice parameters of nephrite cat's eyes and theoretical data of tremolite

样品	$a_0/\text{nm}$	$b_0/\text{nm}$	$c_0/\text{nm}$	$\beta^\circ$
St <sub>74</sub>	$0.985 \pm 0.003$	$1.782 \pm 0.004$	$0.528 \pm 0.001$	$106.35 \pm 0.07$
St <sub>56</sub>	$0.984 \pm 0.010$	$1.780 \pm 0.010$	$0.527 \pm 0.002$	$106.13 \pm 0.02$
透闪石理论值*	0.984~0.987	1.800~1.805	0.527~0.530	104.07

\* 引自中国科学院贵阳地球化学研究所(1978)。

### 2.4 拉曼光谱分析

由上海大学分析中心采用美国 Jobin\_Y'vorn 公司的 LabRam 型拉曼光谱仪进行了拉曼光谱分析, 测试条件: 半导体脉冲激光器和 ICCD 探测器, 激光波长 532 nm, 采样时积分时间 10 s, 累计 100 次, 脉冲频率 5 000 Hz, 光谱扫描范围:  $100 \sim 3\,800\text{cm}^{-1}$ 。

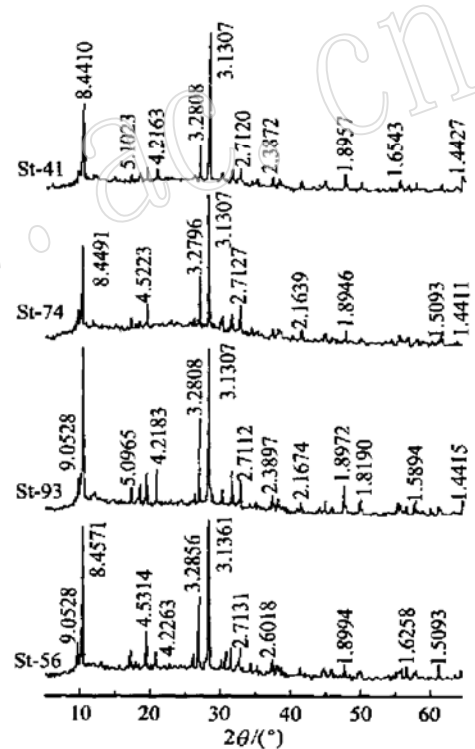


图 3 软玉猫眼的 X 粉晶衍射图谱

Fig. 3 XRD patterns of nephrite cat's eye

结果(图 4)显示, 软玉猫眼具有闪石类矿物的共同特征拉曼谱峰:  $675\text{cm}^{-1}$  附近的最强谱峰,  $1\,062\text{cm}^{-1}$  和  $224\text{cm}^{-1}$  的强谱峰, 表明其均由闪石类矿物组成。链状结构硅酸盐的拉曼光谱, 其位移在  $600 \sim 1\,200\text{cm}^{-1}$  段, 属  $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{4-}$  的伸缩振动(徐培苍等, 1998);  $400 \sim 600\text{cm}^{-1}$  段属 Si—O 的弯曲振动; 低于  $400\text{cm}^{-1}$  的振动则是由阳离子参与及其长程有序的大骨架振动引起的(Shurvell *et al.*, 2001)。因此, 高频区

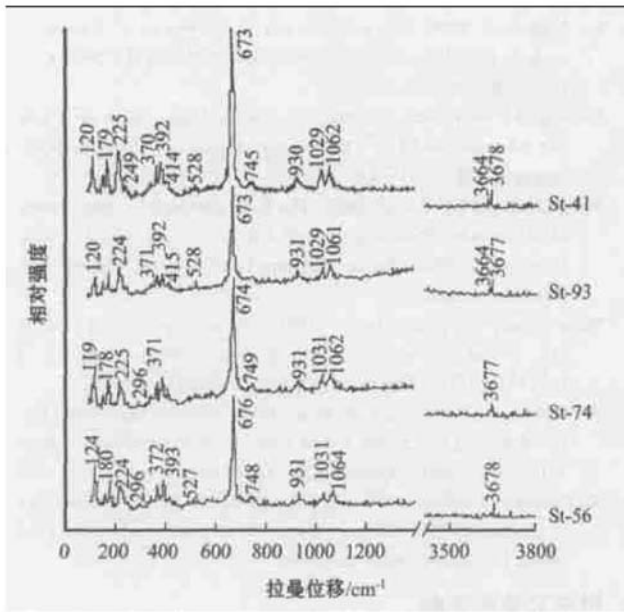


图 4 不同软玉猫眼的拉曼光谱

Fig. 4 Raman spectra of different nephrite cat's eyes

1 062、1 030 和 930  $\text{cm}^{-1}$ 附近谱峰归属为 Si—O 伸缩振动, 673  $\text{cm}^{-1}$  和 748  $\text{cm}^{-1}$ 附近谱峰归属为 Si—O—Si 伸缩振动, 528  $\text{cm}^{-1}$ 峰归属为 Si—O 的弯曲振动; 371、392、224、180 和 124  $\text{cm}^{-1}$ 峰归属为 M—O 的弯曲振动和晶格振动模式。3 660~ 3 680  $\text{cm}^{-1}$ 间的谱带归属为 OH 的伸缩振动。

### 3 结构特征

偏光显微镜下观察表明, 四川软玉猫眼的成分较纯净, 主要组成矿物为微晶-隐晶质透闪石, 含有少量绿泥石和磁铁矿。其显微结构主要为显微纤维变晶结构, 是软玉猫眼最典型、最普遍的一种结构。由显微纤维状透闪石组成, 细而密的纤维沿长轴方向近于平行排列(图 5a)。具有此结构的软玉能表现出良好的猫眼效应。也可见到透闪石纤维较粗、相互聚集成束状或捆状, 呈现规则良好的定向排列(图

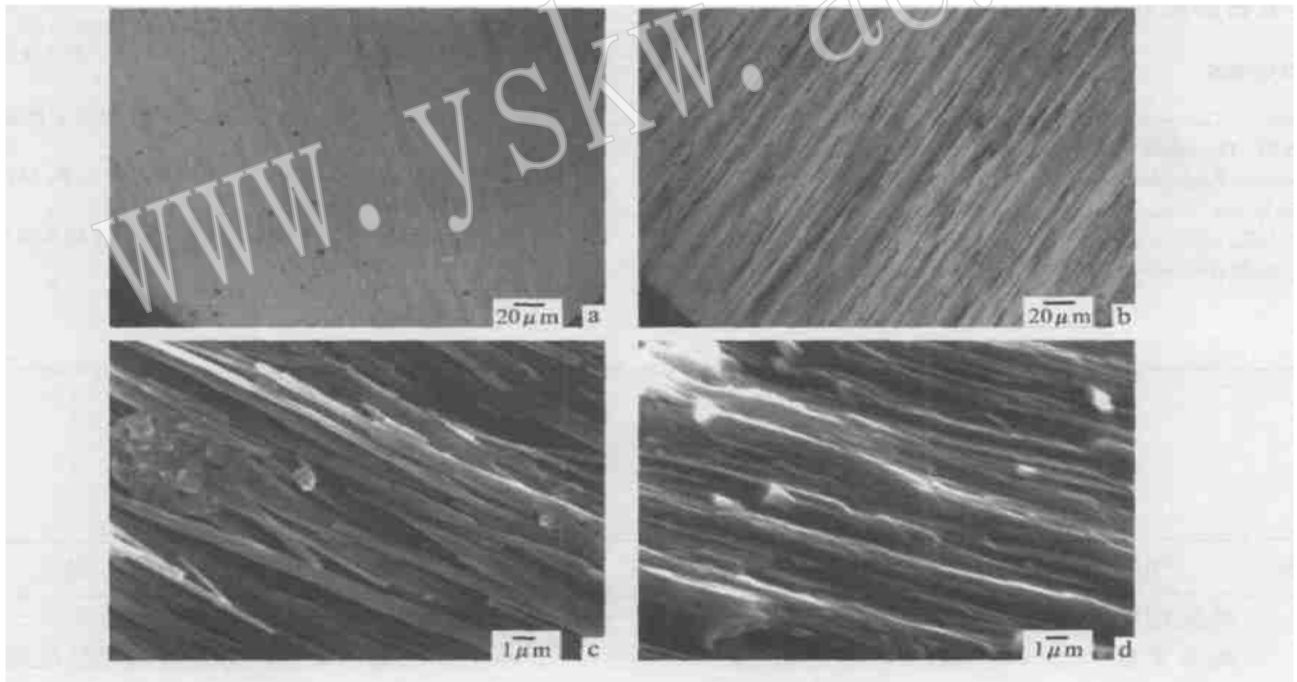


图 5 四川软玉猫眼不同样品的显微结构和扫描电镜照片

Fig. 5 Microstructures and SEM photographs of different nephrite cat's eyes from Sichuan Province

a—显微纤维变晶结构, + ; b—显微束状、捆状变晶结构, + ; c—平行纤维方向, SEM; d—平行纤维方向, SEM

a—fibroblastic texture, + ; b—acicular and bundle blastic texture, + ; c—parallel to fiber, SEM; d—parallel to fiber, SEM

5b)。该结构表明透闪石变晶作用比较强烈, 重结晶程度较高, 但由于纤维较粗, 因此猫眼的眼线比较分散, 猫眼效应较差。图 5c、5d 为四川软玉猫眼平行纤维方向的扫描电镜照片(测试单位: 中国地质大学

分析中心, 武汉), 显示透闪石几乎全部纤维化, 纤维直径 < 1  $\mu\text{m}$ , 大致沿长轴方向平行定向排列。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(吴瑞华等, 1999)。当受外力作用时, 互相穿插绞合着的透闪石组成的软玉猫眼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。

#### 4 结论

(1) 电子探针 X 射线粉晶衍射和拉曼光谱研究表明, 四川软玉猫眼主要矿物组成为透闪石。

(2) 偏光显微镜观察表明, 四川软玉猫眼的结构主要为显微纤维变晶结构, 凡是具有此结构的软玉均能表现出良好的猫眼效应。在少数地区可见到透闪石纤维较粗、相互聚集形成束状或捆状, 猫眼的眼线比较分散, 猫眼效应较差。

(3) 扫描电镜研究表明, 四川软玉猫眼中大多数透闪石纤维的直径 < 1  $\mu\text{m}$ , 彼此平行定向排列。纤维局部相互穿插交错所产生的纤维间的绞合力增强了玉石的韧性和抗断裂性能。

#### References

Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science (Guiyang). 1978. Handbook of Mineral XRD Power Identity [M]. Beijing: Science Publishing House, 139~ 143(in Chinese).

Leak B E and Woolley A R. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of LBE subcommission on amphiboles of LBE international mineralogical association[J]. American Mineralogist, 82: 1 019~ 1 037.

Lin Songshan. 1999. The varieties and characteristics of Taiwan's nephrite [J]. Journal of Gem and Gemology, 1(3): 18~ 20(in Chinese with English abstract).

Shurvell H F and Rintoul L. 2001. Infrared and Raman spectrum of jade and jade minerals [J]. The Internet Journal of Vibration Spectroscopy, 5(5): 441~ 445.

Wang Liben and Liu Yaling. 2002. The X-ray powder diffraction feature of Hetian jade, Manasi green jade and Xiuyan old jade [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(Supp): 62~ 67(in Chinese with English abstract).

Wong Zhenpei and Zhang Qinglin. 2001. The new discovery of nephrite [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 7(2): 137~ 141(in Chinese with English abstract).

Wu Ruihua, Li Wenwen and Bai Feng. 1999. Study on petrological feature and SEM of Xinjiang Hetian jade [J]. Acta Petrologica Sinica, 15(4): 638~ 644(in Chinese with English abstract).

Xu Peicang, Li Rubi and Wang Yongqiang. 1998. Raman Spectroscopy in Geosciences [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 20~ 36(in Chinese).

#### 附中文参考文献

林嵩山. 1999. 台湾软玉的种属及特征 [J]. 宝石和宝石学杂志, 1(3): 18~ 20.

王立本, 刘亚玲. 2002. 和田玉、玛纳斯碧玉和岫岩玉的 X 射线粉晶衍射特征 [J]. 岩石矿物学杂志, 21(增刊): 62~ 67.

翁臻培, 张庆麟. 2001. 软玉猫眼的新发现 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 7(2): 137~ 141.

吴瑞华, 李雯雯, 白峰. 1999. 新疆和田玉岩石学特征及扫描电镜研究 [J]. 岩石学报, 15(4): 638~ 644.

徐培苍, 李如璧, 王永强. 1998. 地学中的拉曼光谱 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 20~ 36.

中国科学院贵阳地球化学研究所. 1978. X 射线粉晶衍射手册 [M]. 北京: 科学出版社, 139~ 143

### 最新地质学类核心期刊表

序号	刊名	序号	刊名	序号	刊名
1	地质论评	11	地球学报	20	高校地质学报
2	地质学报	12	矿物学报	21	长春科技大学学报(改名为: 吉林大学学报. 地球科学版)
3	地球科学	13	地质地球化学	22	地层学杂志
4	地学前缘	14	地质科技情报	23	古生物学报
5	岩石学报	15	地质与勘探	24	矿物岩石
6	沉积学报	16	现代地质	25	大地构造与成矿学
7	地球化学	17	成都理工学院学报(改名为: 成都理工大学学报. 自然科学版)	26	岩石矿物学杂志
8	矿床地质	18	地球科学进展	27	水文地质工程地质
9	地质科学	19	中国区域地质(并入: 中国地质)	28	中国岩溶
10	第四纪研究				

摘自 2004 年 7 月出版的《中文核心期刊要目总览》(2004 版) 第 45 页。