

# 加拿大碧玉的矿物学研究

孙丽华, 王时麒

(北京大学宝石鉴定中心, 北京 100871)

**摘要:** 采用薄片观察、电子探针、红外光谱等测试手段, 对加拿大碧玉进行了矿物学、宝石学、谱学特征和化学成分的研究。结果显示, 加拿大碧玉的主要矿物组成为透闪石-阳起石, 以阳起石为主; 其中的绿色点状物为铬钙铝榴石, 黑点为铬铁矿, 水线为晚期透闪石。

**关键词:** 加拿大碧玉; 矿物学研究; 绿点; 黑点; 水线

中图分类号: P619.28+3; P578.955

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)S0-0028-09

## Mineralogy of green nephrite jade from Canada

SUN Li\_hua and WANG Shi\_qi

(Gem Appraisal Center of Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The mineralogical, gemological and spectral characteristics and chemical constituents of all kinds of green nephrite jade from Canada were studied by using slice observation, electron microprobe and infrared spectrum. The results indicate that the main mineral components are tremolite and actinolite, with actinolite being dominant. The green dots of green nephrite jade from Canada are chrome grossular, the black spots are chromite, and the waterlines are advanced tremolite.

**Key words:** green nephrite jade from Canada; mineralogical research; green dots; black dots; waterlines

目前,我国珠宝市场上的碧玉按产地分类主要有和田碧玉、玛纳斯碧玉、俄罗斯碧玉、新西兰碧玉、加拿大碧玉等。其中以和田碧玉、玛纳斯碧玉使用历史最为悠久;俄罗斯碧玉品质较好,最受欢迎。但随着市场对于碧玉需求的旺盛,加拿大碧玉因其产量大、价格较低等原因在市场上的占有率在不断地增加,极大地丰富了我国的玉石市场。

由于加拿大碧玉进入中国市场的时间相对较短,因此目前国内学术界对加拿大碧玉的研究报道还较少,而国外对加拿大碧玉的研究也不够系统,权威性著作少见。因此,本文对加拿大碧玉进行宝石学研究,力求从成分、结构等方面进行深入探索。

## 1 矿床概述

加拿大碧玉矿床主要分布在科迪勒拉山脉,其中最著名的矿床均位于不列颠哥伦比亚省(Province of British Columbia)境内。不列颠哥伦比亚省是加拿大最西面的省份,该省的省石即为加拿大碧玉。不列颠哥伦比亚省境内已知的碧玉矿床已经超过50个,矿床沿海岸山脉与洛杉矶山脉之间的中部大断裂和蛇纹岩带分布,由北至南的5个著名矿区分别为Cassiar、Polar、Cry and Dease Lake、Mount Ogden和Southern B. C. 矿区。

收稿日期: 2013-11-14; 修订日期: 2013-12-22

作者简介: 孙丽华(1978-),女,硕士,宝石学专业,主要从事宝石鉴定与研究工作, E-mail: slh2002@sina.com.cn.

加拿大软玉矿床属于气成热液矿床,它与超基性岩的蚀变交代有关,是在岩浆期后气-液活动过程中以交代为主导作用形成的(米玲丽,2003)。

## 2 宝玉石学特征

采自加拿大的碧玉样品 30 余块,呈绿色、翠绿色、墨绿色等不同颜色。整体特点为:颜色分布不均匀;大部分具绿色的斑点、黑色的斑点,且数量较多,部分直径较大(可达 2 mm);“水线”发育,且部分“水线”较宽。根据色调的不同,加拿大碧玉由浅至深大致可划分为绿色、墨绿色、黑色 3 个色系(如图 1)。其中,绿色系列有翠绿色、绿色、黄绿色、灰绿色;墨绿色系列为墨绿色、深墨绿色;黑色系列为黑色(仅边缘部分透光为绿色)。

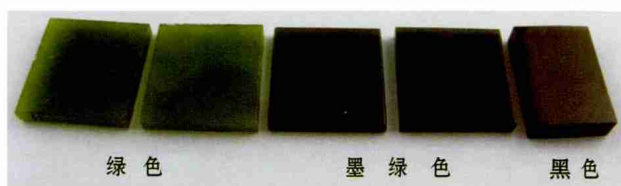


图 1 不同颜色的加拿大碧玉

Fig. 1 Different colors of green nephrite jade from Canada

### 2.1 透明度

加拿大碧玉为微透明-半透明。其中除黑色品种微透明外,总体上以半透明为主,且一般浅颜色的透明度高于深颜色的样品。

### 2.2 光泽

加拿大碧玉为玻璃光泽-油脂光泽,部分样品中的“水线”部分呈丝绢光泽。

### 2.3 硬度

在中国地质大学材料学院材料物理实验室用显微硬度仪测试样品的显微硬度,仪器型号: Leitz ORTHOLUX\_BK;观测条件: 50 W 反光,保持时间 10 s,放大倍数 500 倍,室温 22℃。为保证结果的准确度,每个样品采用多点测试,并将测出的显微硬度按公式换算为摩氏硬度值,结果如表 1。由表 1 可见,样品的摩氏硬度值变化范围为 4.96 ~ 6.58,平均值为 5.78。同一样品中的硬度值出现了较大的差异,且整体上硬度值偏低,有的点甚至低于 5,远低于碧玉硬度的理论值(6.0 ~ 6.5)。分析其原因,一方面可能是样品中存在硬度低的杂质成分;二是结构不均匀,存在水线等特殊结构;三是维氏硬度转换为莫氏

硬度的过程中产生误差。其原因有待于进一步研究。

表 1 加拿大碧玉的摩氏硬度

Table 1 Mons' hardness scale of green nephrite jade from Canada

样号	测试点					变化范围	平均值
	1	2	3	4	5		
C_1	5.73	5.09	5.73	5.32	5.49	5.09 ~ 5.73	5.48
C_4	5.77	5.2	5.3	5.71	5.49	5.2 ~ 5.77	5.49
C_5	5.68	6.03	5.91	5.63	5.84	5.63 ~ 6.03	5.81
C_7	6.16	6.15	6.24	5.98	6.04	5.98 ~ 6.24	6.11
C_8	5.74	6.08	5.83	6.06	5.91	5.74 ~ 6.08	5.92
C_10	6.41	6.24	6.03	6.27	6.22	6.03 ~ 6.41	6.23
C_11	6.2	6.01	6.39	5.94	6.03	5.94 ~ 6.39	6.11
C_12	5.95	5.97	6.25	6.13	6.14	5.95 ~ 6.25	6.09
C_13	5.78	6.01	4.69	5.81	5.96	4.69 ~ 6.01	5.65
C_14	6.3	6.09	6.05	5.71	5.82	5.82 ~ 6.3	5.99
C_15	5.29	5.58	5.45	5.33	5.51	5.29 ~ 5.58	5.43
C_16	5.82	6.26	6.2	5.85	5.9	5.82 ~ 6.26	6.01
C_17	5.35	4.76	6.33	5.34	5.86	4.76 ~ 6.33	5.53
C_18	5.82	6.58	5.98	6.03	5.96	5.82 ~ 6.58	6.08
C_19	5.41	5	5.73	5.61	5.19	5 ~ 5.73	5.39
C_21	5.64	6.26	5.79	5.7	6.08	5.64 ~ 6.26	5.89
C_23	5.29	5.1	5.36	5.19	5.39	5.1 ~ 5.39	5.27
C_27	4.4	5.42	4.96	5.44	5.7	4.96 ~ 5.7	5.38
C_29	5.97	5.82	6.12	6.2	6.05	5.82 ~ 6.2	6.03

### 2.4 密度

通过静水力学法测定 29 块样品的相对密度,变化范围为 2.98 ~ 3.05,总平均值为 3.01,结果如表 2。总体上,颜色较深的墨绿色、深墨绿色的加拿大碧玉相对密度稍高,颜色较浅的翠绿色、绿色等色系的加拿大碧玉相对密度稍低。

### 2.5 折射率

用折射仪实测加拿大碧玉的折射率,测定结果如表 2。总体上,不同颜色的加拿大碧玉的折射率没有明显的差异,折射率为 1.614 ~ 1.635。

## 3 矿物成分分析

采用偏光显微镜、电子探针仪、X 射线衍射仪等仪器对加拿大碧玉的矿物成分进行了分析。

### 3.1 薄片分析及电子探针分析

选取加拿大碧玉样品切磨了 38 个薄片,在 Nikon ECLIPSE LV100POL 偏光显微镜下对其进行了观察。由北京大学地球与空间科学学院电子探针

表2 加拿大碧玉样品的宝石学特征

Table 2 Gemological characteristics of green nephrite jade from Canada

样品号	颜色特点	折射率	相对密度
C_1	绿色,局部褐色	1.624 ~ 1.635	3.01
C_2	绿色,局部红色	/	2.98
C_3	墨绿色,局部水线	/	2.99
C_4	墨绿色,局部水线	1.620 ~ 1.628	3.02
C_5	翠绿色,局部褐色、水线	1.614 ~ 1.620	2.99
C_6	翠绿色,具较多绿点、黑点	/	3.02
C_7	翠绿色,具较多黑点	1.618 ~ 1.630	3.01
C_8	翠绿色,局部透明度较高	1.612 ~ 1.630	3.02
C_9	翠绿色,具较多绿点	/	2.98
C_10	绿色,具较多绿点	1.618 ~ 1.628	3.01
C_11	绿色,具较多绿点	1.617 ~ 1.620	3.01
C_12	绿色	1.617 ~ 1.630	3.02
C_13	绿色,具较多绿点、黑点	1.618 ~ 1.628	3.01
C_14	墨绿色,具较多绿点,局部褐色	1.619 ~ 1.632	3.04
C_15	墨绿色,具较多绿点	1.618 ~ 1.630	3.02
C_16	深墨绿色,具较多绿点	1.620 ~ 1.628	3.05
C_17	深墨绿色,具较多绿点	1.620 ~ 1.630	3.04
C_18	深墨绿色,具较多绿点	1.620 ~ 1.630	3.04
C_19	深墨绿色,具较多绿点	1.620 ~ 1.630	3.04
C_20	墨绿色,局部透明度较高	/	3.02
C_21	绿色,具灰色皮	1.616 ~ 1.628	2.99
C_22	深墨绿色	1.618 ~ 1.626	3.00
C_23	深墨绿色,具较多绿点	1.620 ~ 1.631	3.02
C_24	黄绿色	/	2.99
C_25	黑色	/	3.01
C_26	绿色,多条水线	/	3.00
C_27	灰绿色	1.618 ~ 1.626	3.00
C_28	绿色,多条水线	/	3.00
C_29	绿色,具较多绿点	1.618 ~ 1.626	3.01

实验室采用 JXA\_8100 电子探针对样品进行了分析。仪器型号 JXA\_8100,分析条件:加速电压为 15 kV,束流为  $1 \times 10^{-8}$  A,束斑为  $1 \mu\text{m}$ ,修正方法为 PRZ,标准样品为美国 SPI 公司的 53 种矿物。由薄片分析及电子探针分析得到的矿物组成(潘兆橧等,1984)特点如下:

### 3.1.1 主要矿物

观察薄片可知,加拿大碧玉的主要矿物成分为透闪石-阳起石,且含量高,一般可达 95% 以上,但也有少量薄片中含有较多的杂质矿物,其透闪石-阳起石含量可低至 80%。对透闪石-阳起石结构构造类型和特点进行了系统的总结。

(1) 根据晶体形态,加拿大碧玉中的闪石玉主要为纤维状变晶结构,闪石呈纤维状,粒度大小不一。

(2) 根据粒度相对大小,样品中的闪石的结构

主要为不等粒状变晶结构,闪石晶体大小差别较大,大小晶体混杂排列呈不等粒状结构。

(3) 根据矿物之间的相互关系和组合排列特点,可将闪石玉的结构分为 6 种类型:① 毛毡状纤维交织结构(图 2a),是样品中闪石最常见的结构。闪石呈纤维状,矿物颗粒非常细小,粒度比较均匀,在偏光显微镜下无法分清其边界,犹如毛毡状交织在一起,均匀无定向密集分布。② 束状结构(图 2b),是样品中闪石较常见的结构。闪石呈纤维状聚集,大致沿长轴定向排列,可见斜消光现象。③ 帚状结构(图 2c),是样品中闪石较少见的结构。纤维状闪石局部定向排列,一端收敛,一端发散,似扫帚状,常见跟踪消光现象。④ 长纤维状结构(图 2d),是样品中闪石较常见的结构。呈较长的纤维状平行排列,可长达 1 cm。一般与样品中透明度较高的“水线”相对应。⑤ 放射状结构(图 2e),是样品中闪石较少见的结构。由纤维状闪石以一个中心为基点,向四周呈放射状分布。转动载物台有跟踪消光现象。⑥ 似螃蟹状结构(图 2f),是样品中闪石极少见的结构。由纤维状透闪石围在残余矿物的两端,并且向外扩散而形成,整体形态似螃蟹。

采用薄片打点的方式对样品中的角闪石进行电子探针分析(表 2),并根据角闪石的种属划分标准 [ $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}) \geq 0.90$  (离子符号代表原子个数,下同)的为透闪石;  $0.50 \leq \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}) < 0.90$  的为阳起石],对样品中的角闪石进行分类,结果(表 2)显示,角闪石以透闪石为主。

### 3.1.2 次要矿物

次要矿物的电子探针成分分析结果如表 3。

#### (1) 钙铝榴石

薄片多见,呈粒状,粒度约为 0.5 ~ 5 mm,单偏光下呈绿色、褐色,正高-正极高突起,糙面明显,晶体中有不规则的裂纹(图 3d),正交偏光下为异常消光——假四明四暗现象,呈现一级灰至白的干涉色,具锥状双晶。

#### (2) 铬铁矿

在薄片多见,呈菱形、近方形等,粒度约为 0.1 ~ 1 mm,单偏光下呈黑色或褐红色(图 3e),反射光下带褐色色调,呈金属光泽。

#### (3) 辉石

在薄片偶见,晶体呈粒状,粒度约为 0.1 ~ 1 mm。单偏光下无色,高突起。正交偏光下为鲜艳的 II 级干涉色,斜消光。解理缝中被闪石充填。

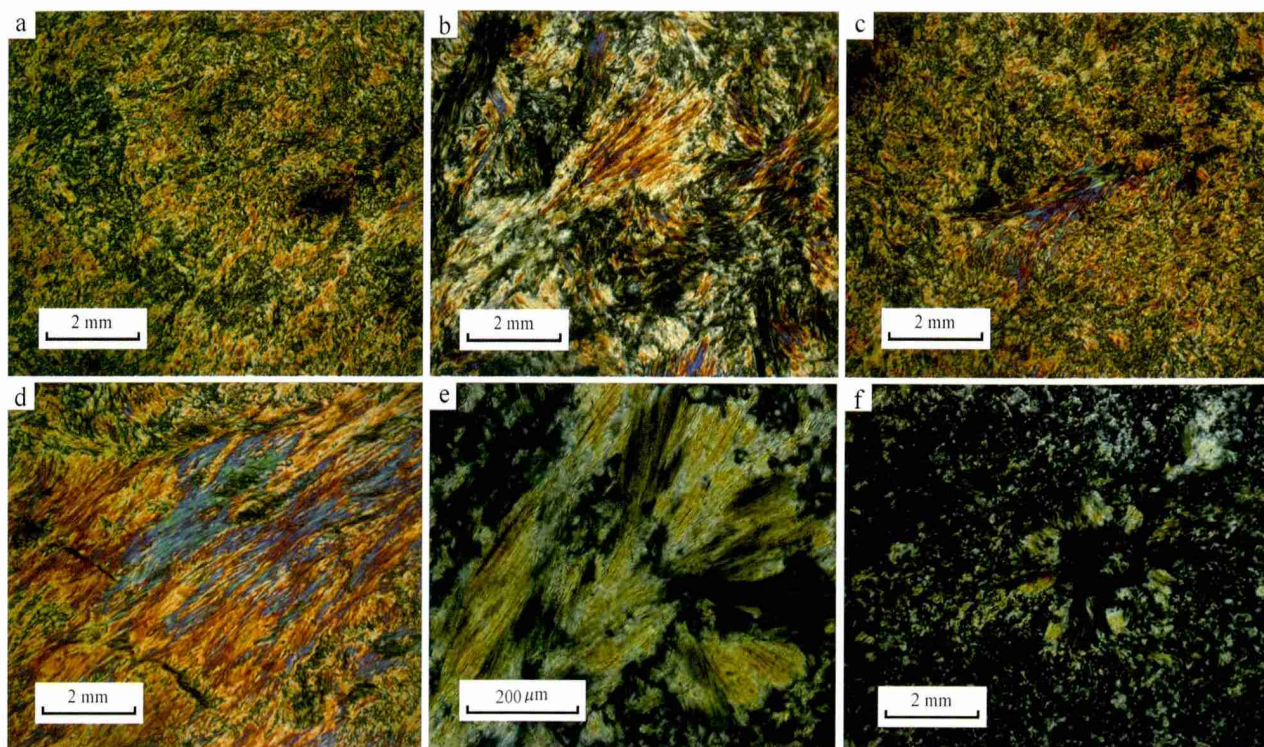


图 2 透闪石的显微结构(正交偏光)

Fig. 2 The structures of tremolite (crossed nicols)

a—毛毡状纤维交织结构; b—束状结构; c—帚状结构; d—长纤维状结构; e—放射状结构; f—似螃蟹状结构  
 a—felt-like fiber weaving structure of tremolite; b—bundle structure of tremolite; c—broom-like structure of tremolite; d—long fibrous structure of tremolite; e—radial structure of tremolite; f—crab-like structure of tremolite

表 3 样品中闪石类矿物的电子探针分析结果  
 Table 3 Results of tremolite in samples by electron microprobe

No.	样品号	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	FeO	NiO	Total	矿物名称
1	7_1	0.00	0.06	21.33	0.31	13.33	57.55	0.56	0.29	0.02	4.47	0.17	98.09	阳起石
2	7_3	0.03	0.05	20.79	0.23	13.46	57.59	0.52	0.32	0.00	4.77	0.26	98.02	阳起石
3	7_4	0.02	0.03	21.08	0.26	13.21	57.47	0.55	0.33	0.00	4.51	0.22	97.68	阳起石
4	13_2	0.00	0.03	21.11	0.13	13.30	57.32	0.11	0.24	0.03	4.47	0.09	96.83	阳起石
5	13_3	0.01	0.04	21.19	0.24	13.26	57.43	0.11	0.19	0.00	4.02	0.12	96.62	透闪石
6	13_4	0.02	0.01	20.82	0.19	13.05	57.54	0.16	0.20	0.00	4.42	0.15	96.56	阳起石
7	10_5	0.02	0.02	21.02	0.16	13.43	57.93	0.27	0.21	0.00	5.01	0.07	98.14	阳起石
8	9_3	0.07	0.06	21.48	0.16	13.59	57.54	0.08	0.24	0.00	4.01	0.15	97.37	透闪石
9	29_6	0.04	0.03	21.01	0.09	13.31	57.44	0.10	0.33	0.00	4.14	0.17	96.65	透闪石
10	8_2_1	0.014	0.015	21.971	0.026	13.16	57.599	0.066	0.133	0	2.158	0.12	95.262	透闪石
11	8_3_2	0.013	0.057	20.978	0.067	12.632	57.392	0.226	0.186	0.021	2.635	0.127	94.334	透闪石
12	14_2_1	0.009	0.069	19.268	0.122	12.898	55.871	0.463	0.443	0	7.356	0.025	96.524	阳起石
13	3_2_2_1	0.016	0.073	20.791	0.105	12.747	57.705	0.415	0.275	0.01	2.65	0.111	94.898	透闪石
14	3_2_3_1	0.015	0.075	20.197	0.048	12.951	57.465	0.665	0.398	0	5.74	0.094	97.648	阳起石
15	2_1_1	0.023	0.031	21.784	0.025	12.983	57.62	0.182	0.087	.021	2.36	0.043	95.159	透闪石
16	2_2_1	0.024	0.06	21.395	0.017	13.091	57.992	0.2	0.051	0.154	2.512	0.044	95.54	透闪石
17	27_1_1	0.025	0.087	21.25	0.034	12.873	57.711	0.155	0.071	0.041	2.41	0.108	94.765	透闪石
18	27_2_1	0.02	0.09	22.053	0.228	12.835	57.321	0.567	0.053	0	2.13	0.154	95.451	透闪石
19	5_2_1	0.042	0.034	21.848	0.017	12.909	58.971	0.064	0.016	0.072	1.816	0.063	95.852	透闪石
20	5_2_2	0.045	0.068	21.927	0.018	12.911	58.798	0.108	0.098	0	.76	0.099	95.832	透闪石
21	5_2_2	0.025	0.044	21.853	0.159	13.004	58.269	0.124	0.096	0	2.025	0.074	95.673	透闪石
22	20_1_1	.021	0.039	22.035	0.221	12.848	56.826	0.885	0.018	0	2.513	0.08	95.486	透闪石
23	20_2	0.002	0.065	20.957	0	12.634	59.356	0.158	0.057	0	4.718	0.028	97.975	阳起石
24	20_3	0.015	0.056	21.138	0.025	13.168	58.919	0.144	0.094	0.01	2.854	0.04	96.463	透闪石

表4 样品中次要矿物的电子探针分析结果

Table 4 Results of minor minerals in samples by electron microprobe

No.	样品号	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	FeO	NiO	Total	矿物名称
25	8_1	0.007	0	0.943	0	54.475	1.464	0.028	0.148	0.066	0.259	0.029	57.419	碳酸盐
26	8_3_1	0.015	0	0.122	7.591	31.542	38.549	15.504	3.21	0	1.284	0.057	97.874	铬钙铝榴石
27	14_2_2	0.02	0	0.136	11.136	31.81	38.085	12.361	2.946	0.438	1.158	0	98.09	铬钙铝榴石
28	27_2_2	0.026	0.039	28.383	2.845	0.006	30.389	16.915	0.159	0	7.349	0.308	86.419	蛇纹石
29	27_2_3	0.044	0.072	8.856	54.402	0.005	0.04	11.958	0.408	0.186	21.551	0.08	97.602	铬铁矿
30	27_2_4	0.007	0.055	9.072	53.721	0	0.059	12.469	0.37	0.051	21.846	0.046	97.696	铬铁矿
31	15_1	0		0.055	8.675	31.336	38.983	14.616	3.862	0.469	1.148	0.035	99.179	铬钙铝榴石
32	15_2	0	0.042	0.208	9.117	30.845	38.598	14.187	4.035	0.397	1.296	0.017	98.742	铬钙铝榴石
33	15_4	0.007	0.022	0.185	4.928	22.221	38.034	24.725	0.24	0.051	2.464	0.011	92.891	绿帘石
34	5_2_1	0	2.017	4.376	3.501	21.21	55.095	1.409	0.216	0.01	1.394	0.033	99.267	辉石
35	20_1_2	0.038	0.237	1.045	40.773	0.093	1.285	6.706	1.484	0.303	40.805	0.009	92.778	铬铁矿
36	20_1_3	0.057	0.153	1.51	38.888	0.08	1.887	5.655	1.548	0.228	42.417	0.034	92.457	铬铁矿

#### (4) 绿泥石

在薄片少见,晶形为片状,粒度约为20~100 μm,有时呈脉状分布。单偏光下为浅绿色,具淡绿-亮黄色多色性,低正突起。正交偏光下,为一级灰黑干涉色,有的具灰蓝异常干涉色。

#### (5) 碳酸盐

薄片少见,主要是晚期交代成因的碳酸盐,呈脉状穿插,细粒状集合体产出,粒度为0.01 mm左右。单偏光下无色,闪突起,正交偏光下高级白干涉色。

#### (6) 黄铁矿

在薄片多见,六边形、四边形等晶形,粒度约为0.2~0.5 mm,单偏光下为黑色不透明,反射光下为黄色。

#### (7) 绿帘石

在薄片少见,粒状,具解理,粒度约为0.5~3 mm,单偏光下,浅黄色-黄绿色,具多色性,正交偏光下,具灰蓝色的异常干涉色。

#### (8) 褐铁矿

在加拿大碧玉中普遍分布,几乎在每个薄片中都可见到,只是多少不同,呈非晶态,多以集合体的形态出现,呈星点状、团块状等形态分布,单偏光下为褐色,正交偏光下为全消光。

#### 3.1.3 特殊的组构类型分析

在加拿大碧玉中存在一些特殊的组构类型,如颜色特殊的绿点、黑点等以及特殊的结构如水线等。切磨尺寸为20 mm×20 mm×3 mm的抛光片,选取其中的特征部分(绿点、黑点、水线)直接进行打点测试,结合镜下薄片观察对其矿物组成进行分析。分析结果如下:

(1) 绿点(图3a、3d):即绿色点状物。加拿大碧玉中存在非常多的绿点,大小不一,约为0.5~2 mm。电子探针结果(表5)结果显示,绿点的矿物成分为铬钙铝榴石。

(2) 黑点(图3b、3e):即黑色的点状物,约为0.5~2 mm;黑点部分,有的硬度大,有的硬度小(小刀能划动),但电子探针结果(表5)显示都是铬铁矿。

(3) 水线(图3c、3f):即样品中呈细脉状分布,且透明度高于周围的软玉,光泽也有差异(王时麒等,2008)。水线部分透闪石颗粒呈近平行排列的纤维状,垂直脉壁生长。电子探针结果(表5)显示水线部分也为透闪石。

#### 3.2 红外光谱分析

采用德国布鲁克光谱仪器公司生产的Tensor 27型傅里叶变换红外光谱仪,选取矿物组成较单一的、不同颜色的5、11、27、18、23号样品进行红外光谱分析。将样品均切片加工成3 mm左右厚度的薄片,用酒精擦拭样品表面,确保样品无其它物质污染和外界影响。采用漫反射法分析方法,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>,测量范围分别为为4 000~400 cm<sup>-1</sup>,扫描信号累加为32次。恒温恒湿实验室条件:温度26℃,相对湿度60%。

分析结果显示5个样品的红外光谱图(图4)非常相似,且与闪石的标准谱数据基本一致。对红外光谱数据进行分析,并与俄罗斯、青海产地的碧玉的红外光谱(周征宇等,2007)进行了对比。在1 200~900 cm<sup>-1</sup>区间,1 150和1 090 cm<sup>-1</sup>为 $v_{as}$ (Si—O)特征峰,1 040和1 020 cm<sup>-1</sup>为 $v_{as}$ (O—Si—O)特征峰,1 995和965 cm<sup>-1</sup>为 $v_{as}$ (Si—O—Si)特征峰,918 cm<sup>-1</sup>为 $v_s$ (Si—O—Si)特征峰。其中1 090 cm<sup>-1</sup>在

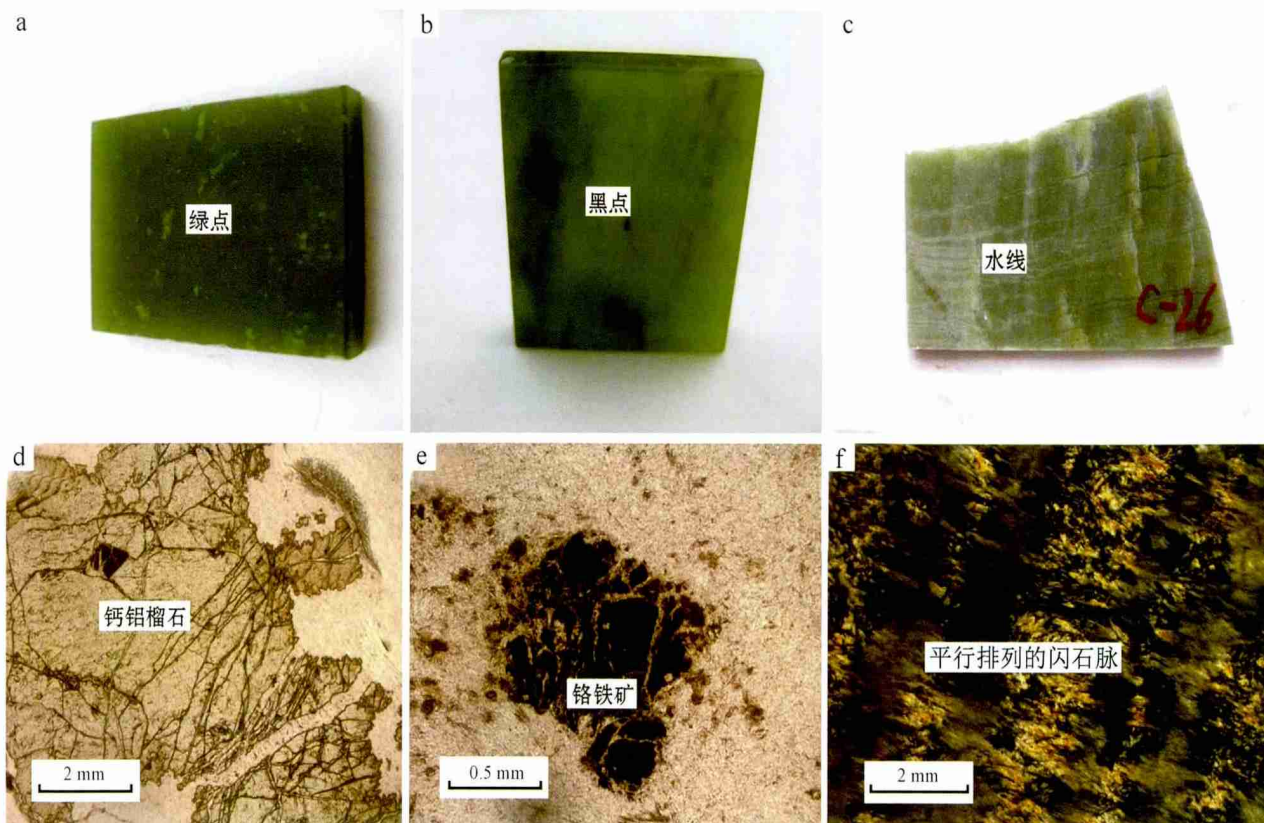


图 3 样品中的特殊结构

Fig. 3 The special structures of the sample

a—样品中的绿点; b—样品中的黑点; c—样品中的多条水线; d—钙铝榴石(-); e—铬铁矿(-); f—多条闪石脉(+)  
 a—The green dots in the sample; b—The black dots in the sample; c—Multiple waterline in the sample; d—Grossular(-); e—Chromite(-); f—Multiple amphibole veins(+)

表 5 样品中特征部分的电子探针分析结果

Table 5 Results of characteristics section in samples by electron microprobe

No.	样品号	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	FeO	NiO	Total	矿物名称	备注
37	7_2	0.01	0.08	1.29	39.20	0.09	0.26	2.96	3.35	0.60	48.19	0.12	96.15	铬铁矿	黑点(硬度小)
38	7_5	0.01	0.11	0.79	39.03	0.17	0.32	3.55	3.40	0.58	48.66	0.24	96.86	铬铁矿	黑点(硬度小)
39	13_1	0.00	0.14	0.17	43.07	0.34	0.07	0.59	4.82	0.08	45.99	0.01	95.27	铬铁矿	黑点(硬度大)
40	13_5	0.00	0.00	0.04	8.84	34.74	37.92	13.94	1.57	0.07	2.34	0.00	99.46	铬钙铝榴石	绿点
41	13_6	0.00	0.00	0.05	9.65	34.75	37.91	13.87	1.58	0.02	2.14	0.03	100.00	铬钙铝榴石	绿点
42	10_1	0.00	0.06	0.41	9.53	34.03	38.09	13.24	1.54	0.06	3.59	0.14	100.69	铬钙铝榴石	绿点
43	10_2	0.00	0.03	0.07	6.46	34.75	38.22	15.44	2.41	0.06	3.07	0.00	100.51	铬钙铝榴石	绿点
44	10_3	0.01	0.03	0.05	6.48	3.99	38.01	15.05	2.71	0.30	2.94	0.01	99.57	铬钙铝榴石	绿点
45	10_4	0.01	.00	0.33	10.05	34.45	38.09	13.36	1.85	0.10	2.37	0.01	100.61	铬钙铝榴石	绿点
46	29_1	0.00	0.03	21.82	0.05	13.63	57.63	0.08	0.18	0.00	3.66	0.16	97.25	闪石	水线
47	29_2	0.01	0.20	1.38	44.84	1.63	3.59	0.54	5.16	0.15	38.61	0.00	96.12	铬铁矿	黑点(硬度小)
48	29_4	0.00	0.07	0.43	3.88	0.62	0.05	0.12	0.90	0.03	94.40	0.00	100.50	磁铁矿	黑点(硬度小)
49	29_5	0.01	0.02	22.07	0.13	13.47	58.36	0.05	0.17	0.00	3.79	0.11	98.18	闪石	水线
50	29_7	0.00	0.08	0.56	7.47	34.10	38.24	14.63	2.34	0.03	2.70	0.00	100.14	铬钙铝榴石	绿点(硬度小)

所有加拿大碧玉样品中均出现,而在俄罗斯、青海产地的碧玉中只是部分出现。在  $800 \sim 600 \text{ cm}^{-1}$  区间,  $758$  和  $681 \text{ cm}^{-1}$  为中心对称的锐峰;该峰位在 3 个产地样品中基本比较稳定,未出现较大的差异,应归属于  $\nu_a(\text{Si-O})$  和  $\nu_s(\text{O-Si-O})$ ,而  $681 \text{ cm}^{-1}$  右侧的一系列弱的吸收带归属于  $\nu_s(\text{Si-O-Si})$ 。在  $600 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$  区间,  $540$  和  $511 \text{ cm}^{-1}$  两个并列的峰位明显小于  $460 \text{ cm}^{-1}$  峰位强度,与俄罗斯、青海产地的碧玉相似,应归属为  $\delta(\text{Si-O})$ 。

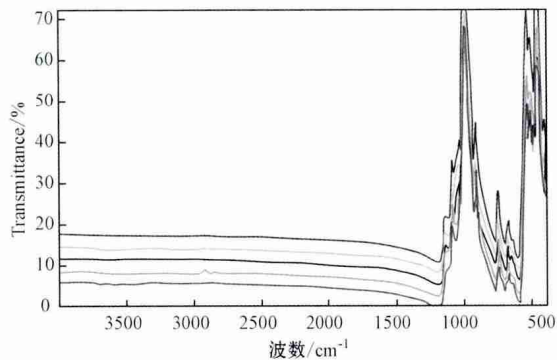


图4 样品的红外光谱图

Fig. 4 Infrared spectra of sample

### 3.3 X射线衍射分析

选取加拿大碧玉样品,采用北京大学孵化器微结构分析测试中心提供的 D/Max\_RA12 KW 旋转阳极 X 射线粉末衍射仪对其进行了分析。实验条件: Cu 靶 靶电压为  $40 \text{ kV}$ ,靶电流为  $100 \text{ mA}$ ,发散缝为  $1^\circ$ ,接受狭缝为  $0.3 \text{ mm}$ ,防散射狭缝为  $1^\circ$ ,连续扫描模式,扫描速度为  $8^\circ/\text{min}$ ,步宽为  $0.02^\circ$ 。对结果进行分析显示,样品的矿物组成(表 6)与薄片观察、电子探针和红外光谱的分析结果相一致。

表 6 加拿大碧玉样品的 X 射线粉末衍射成分分析数据

Table 6 X-ray powder diffraction data of green nephrite jade samples

原始编号	分析结果
C_1	闪石 84% 绿泥石 16%
C_2	闪石 83% 辉石 17%
C_6	闪石 91% 钙铝榴石 9%
C_7	闪石 100%
C_9	闪石 96% 钙铝榴石 4%
C_10	闪石 92% 钙铝榴石 8%
C_14	闪石 100%
C_16	闪石 100%
C_21	闪石 100%
C_25	闪石 100%

## 4 化学成分

选取加拿大碧玉样品中成分较单一的 6 个样品,进行了主要化学成分、微量元素成分和稀土元素成分的分析。

透闪石矿物的理论分子式为  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$ ,其中  $\text{SiO}_2$  占  $59.17\%$ ,  $\text{MgO}$  占  $24.81\%$ ,  $\text{CaO}$  占  $13.81\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  占  $2.21\%$ 。阳起石的理论分子式是  $\text{Ca}_2(\text{Mg}\text{Fe}_{22})_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$ ,其中:  $\text{FeO}$   $6\% \sim 13\%$ ,  $\text{CaO}$   $13.8\%$ ,  $\text{MgO}$   $24.6\%$ ,  $\text{SiO}_2$   $58.8\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}$   $2.8\%$ 。

### 4.1 主要化学成分

在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室采用美国产 ARL ADVANTXP+ 型扫描型波长色散 X 射线荧光光谱仪进行主要化学成分的分析,其结果见表 7。从结果可知,其主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$ ,其中  $\text{SiO}_2$  占  $53.66\% \sim 56.20\%$ ,  $\text{MgO}$  占  $21.56\% \sim 24.58\%$ ,  $\text{CaO}$  占  $12.43\% \sim 13.00\%$ ,  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  占  $4.49\% \sim 7.76\%$ ,符合一般钙质闪石类矿物的基本组成。与玛纳斯碧玉和田碧玉相比,加拿大碧玉中的 Fe 的质量分数普遍较高,比玛纳斯碧玉的  $\text{CaO}$  含量较高,而比玛纳斯碧玉的  $\text{MgO}$  含量相应较少。

### 4.2 微量元素成分

在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室采用英国 VG 公司产 VG AX10M 型高分辨多接收器等离子质谱仪测试了加拿大碧玉样品的微量元素成分,其结果见表 8。

从表中可知,样品中大多数微量元素的质量分数与和田白玉、青白玉和青玉样品的相近,但 Cr、Ni、Mn 和 Co 的质量分数则突出地高,具有明显的差异。与不同产地的碧玉相比,其 Mn 的质量分数远远高于和田碧玉和玛纳斯碧玉,可能与加拿大碧玉中普遍存在的次生作用有关;Cr 和 Ni 的质量分数和玛纳斯碧玉相近,都大大高于和田碧玉;Zn 的质量分数总体上高于玛纳斯碧玉和田碧玉。

在加拿大碧玉的绿色调的样品中,颜色较深的墨绿色样品与颜色较浅的绿色样品相比,Cr 和 Ni 的质量分数都较高,可见 Cr 和 Ni 为碧玉中绿色的致色元素,且可能过多的 Cr 和 Ni 使颜色变深,由绿色直至变为墨绿色。墨绿色样品中 Zr 的质量分数很高,其原因有待于进一步研究。C\_25 号样品为加拿大碧玉中的黑色品种,其中的 Cr、Ni 的质量分数远

表 7 加拿大碧玉的主要化学成分分析结果

 $w_B / \%$ 

Table 7 Results of main chemical compositions of green nephrite jade from Canada

编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
C_7	55.16	0.56	4.77	12.63	24.37	0.01	0.05	0.247	0.003	0.007	1.74	99.55
C_14	54.37	0.74	7.76	12.72	21.56	0.02	0.10	0.615	0.005	0.006	2.01	99.91
C_15	53.66	1.61	6.72	12.61	22.46	0.02	0.19	0.504	0.021	0.007	1.60	99.41
C_16	53.81	1.10	6.64	12.62	21.99	0.02	0.09	0.541	0.021	0.006	2.52	99.36
C_21	56.20	0.31	4.49	13.00	24.58	0.01	0.08	0.222	0.007	0.007	0.72	99.63
C_25	55.08	0.61	4.84	12.43	24.30	0.05	0.28	0.101	0.012	0.014	2.24	99.95
和田碧玉	54.67	1.00	4.23	13.14	22.43	0.29	0.77	0.08	0.019	0.08	3.28	99.99
玛纳斯碧玉	55.82	0.37	3.32	11.73	25.46	0.01	<0.01	0.007	<0.001	0.016	2.88	99.61

表 8 加拿大碧玉样品的微量元素分析结果

 $w_B / 10^{-6}$ 

Table 8 Results of trace elements in green nephrite jade samples

编号	C_7	C_14	C_15	C_16	C_21	C_25	和田碧玉	玛纳斯碧玉
颜色	绿色	浅绿色	绿色	墨绿色	绿色	黑色		
Li	3.01	3.75	6.41	6.71	2.15	1.58	/	3.39
Be	0.45	0.39	0.63	0.76	0.35	4.59	4.20	0.08
P	60.25	39.33	/	/	/	57.10	/	48.91
Sc	7.02	0.85	20.09	16.21	4.03	0.30	/	4.29
Ti	29.06	43.50	132.99	122.42	49.91	93.78	/	43.15
V	33.28	16.68	37.53	45.46	22.58	10.28	0.45	19.99
Cr	2046.46	52.16	2893.71	3006.41	1578.75	11.45	99.08	1430
Mn	1960.87	5062.02	4002.99	4414.61	1757.19	853.87	/	631
Co	70.02	49.15	58.21	65.02	55.36	11.11	23.78	48.03
Ni	1298.83	209.74	1259.56	1521.46	928.27	7.29	26.41	1008
Cu	3.55	0.72	2.85	3.87	1.52	1.73	4.52	4.16
Zn	167.23	103.22	114.14	131.32	89.80	34.91	34.13	19.14
Ga	0.37	0.53	0.68	0.57	0.23	1.20	3.07	0.55
Rb	0.56	0.65	0.38	0.52	0.17	4.05	4.02	0.59
Sr	3.88	3.23	5.97	.78	3.56	11.43	/	11.34
Y	0.50	0.25	5.79	34.46	0.52	3.16	/	0.36
Zr	1.68	0.75	15.67	173.73	0.47	2.73	/	2.85
Nb	0.10	0.06	0.58	0.28	0.12	0.52	1.04	0.14
Mo	0.36	0.22	0.41	0.38	0.08	0.18	0.28	0.59
Cd	0.06	0.04	0.07	0.28	0.07	0.04	0.56	0.03
Sn	0.25	/	0.22	0.59	0.02	0.59	0.66	0.13
Cs	0.52	0.23	.73	0.69	0.39	0.24	0.64	0.1
Ba	6.98	1.75	21.69	13.66	6.18	5.41	/	1.09
Hf	0.03	.01	0.43	3.72	0.01	0.06	/	0.06
Ta	/	/	0.02	/	/	0.02	0.01	0.01
W	/	/	/	/	/	/	0.05	0.03
Tl	/	0.02	/	/	0.02	/	/	0.01
Pb	0.99	0.44	0.73	2.33	0.87	0.84	/	5.36
Th	0.00	/	0.01	0.04	/	0.53	1.21	0.0
U	0.01	/	0.03	0.01	/	1.52	0.92	0.10

远低于其他样品,所以不呈现绿色,其 Mn 和 Zn 的质量分数略低于其他颜色的样品。其黑色的致色原因需要进一步研究。

#### 4.3 稀土元素成分

在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室采用英国 VG 公司产 VG AXIOM 型仪器测试了玛纳斯碧玉的稀土元素成分,其结果见表 9,其稀土元

素配分模式见图 5。从表 9 和图 5 可知,样品中的稀土元素含量较低,配分模式图基本为平坦型,有的大致呈“U 形”,有 Eu 负异常,表明透闪石的稀土元素来源于超基性岩,继承了超基性岩稀土元素配分特征。与玛纳斯碧玉样品及和田碧玉的稀土元素配分模式不同,显示其物质来源有所不同,原因有待于深入研究。



表9 加拿大碧玉样品的稀土元素分析结果  $w_B/10^{-6}$   
Table 9 Results of rare earth elements in green nephrite jade samples

	C_7	C_15	C_16	C_21	C_25
La	0.08	0.13	0.23	0.09	0.58
Ce	0.14	0.62	1.90	0.11	1.34
Pr	0.02	0.04	0.05	0.02	0.22
Nd	0.04	0.19	0.15	0.09	1.07
Sm	0.01	0.06	0.04	0.03	0.33
Eu	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04
Gd	0.01	0.12	0.04	0.03	0.35
Tb	0.00	0.04	0.01	0.01	0.06
Dy	0.02	0.36	0.06	0.06	0.34
Ho	0.00	0.11	0.02	0.02	0.08
Er	0.02	0.40	0.11	0.05	0.20
Tm	0.01	0.08	0.03	0.01	0.03
Yb	0.05	0.57	0.29	0.08	0.18
Lu	0.01	0.09	0.05	0.01	0.03

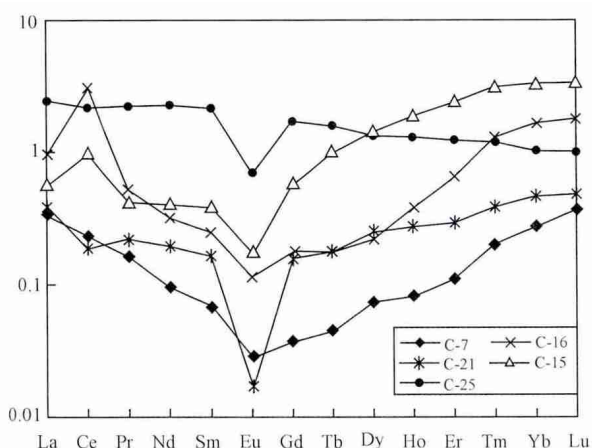


图5 样品的稀土元素配分模式图

Fig. 5 Rare earth element assemblage diagram of samples

## 5 结论

(1) 根据色调的不同,加拿大碧玉由浅至深大致可划分为绿色、墨绿色、黑色3个色系。微透明-半透明,玻璃光泽-油脂光泽,折射率为1.614~1.635,相对密度变化范围为2.99~3.05,且总体上颜色较深的墨绿色、深墨绿色的样品的密度高于颜色较浅的翠绿色、绿色等色系的样品。

(2) 采用偏光显微镜、电子探针仪、X射线衍射仪等仪器对加拿大碧玉的矿物成分进行分析,综合结果表明,加拿大碧玉的主要矿物成分为透闪石-阳起石,且以透闪石为主。透闪石含量高,一般可达95%以上。但也有少量中含有较多的杂质矿物,其透闪石-阳起石含量可低至80%。次要矿物有钙铝

榴石、铬铁矿、辉石、绿泥石、碳酸盐、黄铁矿、绿帘石、褐铁矿等。

(3) 加拿大碧玉与其它产地的碧玉相比,其特点为:颜色分布不均匀;大部分具绿色的斑点、黑色的斑点,且数量较多,部分直径较大(可达2 mm);“水线”发育,且部分“水线”较宽。电子探针分析结果表明“绿点”为铬钙铝榴石“黑点”部分,虽然有的硬度大,有的硬度小(小刀能划动),但都是铬铁矿;“水线”部分为透闪石。

(4) 加拿大碧玉由超基性岩蚀变而成,与和田碧玉、玛纳斯碧玉、新西兰碧玉、台湾花莲玉成因(王铎等,2009)相同。

(5) 加拿大碧玉的主要化学成分、微量元素和稀土元素分析结果表明,与玛纳斯碧玉和和田碧玉相比,加拿大碧玉中的Fe的含量普遍较高,CaO含量较高,而MgO含量相应减少;加拿大碧玉中Cr和Ni为碧玉中绿色的致色元素,且可能过多的Cr和Ni使颜色变深,由绿色直至变为墨绿色。黑色品种中的Cr、Ni的质量分数远远低于其他样品,所以不呈现绿色;样品中的稀土元素含量较低,稀土元素配分模式图基本为平坦型,有的大致呈“U形”,有Eu负异常。与玛纳斯碧玉样品及和田碧玉不同,显示其不同的物质来源,原因有待于深入研究。

致谢 汇玉堂张锦洪先生为本次研究提供了大量样品,在此表示感谢!

## References

- Pan Zhaolu, Wang Pu and Weng Lingbao. 1984. Systematic Mineralogy [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Shiqi and Yu Xuemei. 2008. Characteristics of Material Compositions and Geological Origin of Green Hetian Nephrite [J]. Journal of Gems and Gemmology, 10(3): 4~7 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 米玲丽. 2003. 加拿大碧玉[J]. 宝石和宝石学杂志, 5(1): 10~13.
- 潘兆麟,王 濮,翁玲宝. 1984. 系统矿物学(中册) [M]. 北京: 地质出版社.
- 王时麒,员雪梅. 2008. 和田碧玉的物质组成特征及其地质成因 [J]. 宝石和宝石学杂志, 10(3): 4~7.
- 周征宇,廖宗廷,等. 2007. 青海软玉的岩石矿物学特征 [J]. 岩矿测试, 27(1): 17~20.
- 王 铎,徐泽彬,孙 猛,等. 2009. 不同产地碧玉的红外光谱研究 [J]. 红外技术, 31(12): 698~707.