

丹东绿玉石的宝玉石学特征研究

丛 众¹, 吴瑞华¹, 王时麒², 师 伟³

(1. 中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;
3. 北京地大宝玉石检验中心, 北京 100083)

摘要: 通过偏光显微镜、电子探针、X射线粉末衍射、傅里叶变换红外光谱、X射线荧光光谱、微量元素测试等对丹东绿玉石样品进行了常规矿物学、谱学特征研究。结果表明, 丹东绿玉石是以蛇纹石为主要矿物, 镁橄榄石、白云石、水镁石、绿泥石、伊利石为次要矿物的蛇纹石化镁橄榄石砂卡岩。

关键词: 丹东绿, 宝玉石学特征, 矿物学特征

中图分类号: P575

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)S0-0126-07

A preliminary study of gemmological characteristics of Dandong green jade

CONG Zhong¹, WU Rui-hua¹, WANG Shi-qi² and SHI Wei³

(1. School of Gemmology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Beijing Dida Gem Testing Center, Beijing 100083, China)

Abstract: Mineralogical and spectral characteristics of Dandong green jade samples were studied by using polarizing microscope, electron microprobe (EMP), X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), X-ray fluorescence spectrometer and HR-ICP-MS (Element I). The results show that the main mineral of Dandong green jade samples is serpentine and the minor minerals include forsterite, dolomite, brucite, chlorite and illite. Dandong green jade is a kind of serpentinized forsterite skarn.

Key words: Dandong green jade; gemmological characteristics; mineralogical features

丹东绿具有鲜艳的绿色和美丽多变的花纹, 因其产于丹东地区, 故得名丹东绿。丹东绿外表色调鲜艳美观, 以其独有的装饰特点及物理技术性能常作大理石用。但从地质学角度来看, 丹东绿应属一类蛇纹石化的镁质砂卡岩(即蛇纹石化镁橄榄石砂卡岩), 而非大理岩。

丹东绿过去一度作为一种优良美观的室内装饰建筑板材, 在国际贸易市场上享有极高的声誉, 颇受欢迎(朱继存 2000)。不过近年来, 丹东绿逐渐引起广大玉石爱好者的关注, 对于丹东绿的开发方向也不再仅限于建筑板材, 而是更多的从宝玉石方向对其进行开发, 如: 将块度较大的丹东绿做大型雕件;

将块度不是很大的做成手把件, 还可直接将花纹独特的丹东绿原石稍加抛光琢磨后, 直接作为观赏石。本文则侧重于对丹东绿的宝玉石学特征进行较系统的研究和分析。

1 矿区地质特征

丹东地区属辽东山地丘陵的一部分, 地势地貌属长白山脉向西南延伸的支脉或余脉(吴振, 2009)。丹东绿的主要矿区——东二道沟矿区, 位于丹东市东沟县合隆、长安交界地带的齐家大队和王家大队, 地理坐标为东经 124°02', 北纬 40°05'。矿区

及附近地区的最高气温为 35℃, 最低气温 -25℃。矿区属农业区, 附近为低山丘陵区, 海拔 200 多米, 比高 100 余米, 山脉呈北西-南东走向, 地势较缓, 地形坡度一般为 15°~30°(刘国海等, 1994)。

矿区外围广泛出露元古宇辽河群地层, 辽河群中各组层均为连续沉积, 渐变过渡, 呈整合接触关系。辽河群地层整体呈东西向展布, 为一套中-浅变质岩系, 原岩建造基本可分为上下两部分, 下部属火山沉积建造, 上部属陆源沉积建造。依据变质岩石组合、原岩建造、含矿性等方面的特点, 将辽河群自下而上划分为里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组(李三忠等, 2001)。里尔峪组主要岩性为磁铁浅粒岩、电气钠长浅粒岩及透闪透辉二长变粒岩; 高家峪组主要岩性为黑云斜长变粒岩、含石墨透闪二长变粒岩及斜长角闪岩; 大石桥组主要岩性为方解石大理岩、白云石大理岩及二云片岩; 盖县组主要岩性为绢云石英片岩、黑云片岩、二云片岩夹片麻岩及黑云变粒岩(吴春林等, 1995)。

本矿区出露的地层为辽河群大石桥组。矿区地层总体走向北西-南东, 地层产状倾向北东 20°~70°, 倾角 30°~80°, 局部亦有向南西倾斜的。

丹东绿矿体呈南东-北西向(135°~315°)带状展布, 矿带长 1 800 余米, 宽约 200 m, 由十余个形态多

变、规模不一的矿体组成, 矿体一般长 90~120 m, 最长为 290 余米, 短的仅 40 余米, 各矿体出露宽度和延伸深度相差较大, 多呈透镜体、扁豆体或不规则的囊状体产出(涂德俭, 1977)。

矿体赋存于广泛出露的混合岩中, 各矿体互不相连。矿体各部位产状均不一样, 主要受制于原岩分布状态和成矿作用的强度等因素。北东倾向和南西倾向居多, 走向北西-南东向(280°~360°不等), 倾角一般为 45°~80°, 基本构成断面为锅底形或盆形。一般情况下, 无论矿体的长度、厚度和质量如何, 矿体沿走向较沿倾向稳定。

2 丹东绿玉石的分类

关于丹东绿的分类, 国内目前尚无统一标准。本文根据在矿区所采样品的实际情况, 参考外贸销售中的惯例, 根据玉石的颜色将丹东绿分为 4 类(图 1): ①浅绿色丹东绿: 浅绿色, 偶尔可见由小白斑花和细的白云石细脉组成的美丽图案; ②绿色丹东绿: 主要为纯绿色, 偶尔可见小的白色斑花和细的白花脉; ③深绿色丹东绿: 深绿至暗绿色, 偶尔可见浅绿色花纹; ④黑色丹东绿: 黑绿至墨绿色, 偶尔带黑色的杂色或云雾状黑绿相间的美丽图案。

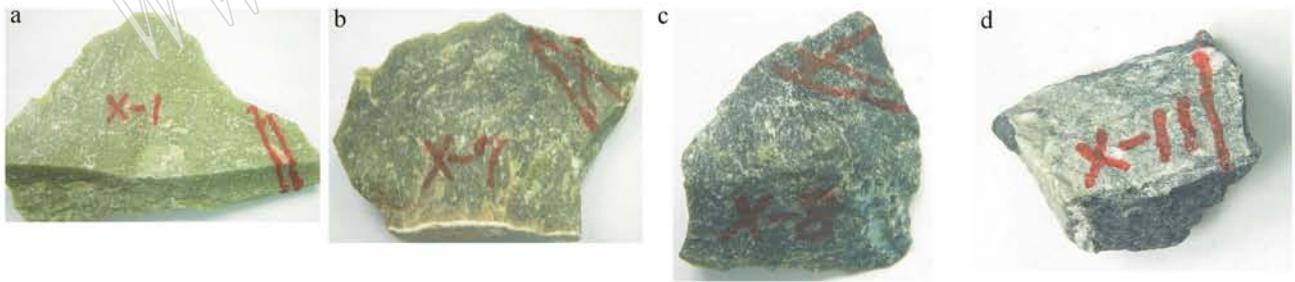


图 1 颜色由浅至深的 4 种样品

Fig. 1 Appearances of four samples from light green to black

3 丹东绿玉石的宝石矿物学特征

3.1 丹东绿玉石的矿物组成

3.1.1 偏光镜下观察

在偏光显微镜下对丹东绿样品进行观察可知, 丹东绿的矿物成分主要是蛇纹石, 有一定的镁橄榄石、白云石、水镁石等, 其镜下结构特征总体为: 可

见蛇纹石脉体, 纤维鳞片变晶结构, 具有一定定向性, 部分样品蛇纹石化强烈, 有独特的交替波状结构, 多呈叶片状集合体, 部分保持着镁橄榄石假像, 镜下无色, 正低突起, 干涉色一级灰白, 一轴晶正光性; 镁橄榄石正高突起, 裂隙发育, 干涉色为二级红, 二轴晶正光性, 呈粒状集合体或成孤岛状残留, 他形/半自形粒状结构, 多已发生蛇纹石化; 水镁石在单偏光镜下无色、片状, 正交偏光镜下纤维状明显, 平

行消光,干涉色不高,一般为一级灰到一级灰白;白云石呈他形粒状集合体,正突起极高,干涉色高级白。

对样品镜下特征进行详细分析,每种颜色样品的观测结果为:①浅绿色丹东绿:单偏光下较高凸起的粒状物,低凸起的为蛇纹石化橄榄石,可见网状结构,有多块丝状体平行消光;明显感觉蛇纹石化交代逐渐强烈,蛇纹石脉体有定向性,一级灰干涉色,目测蛇纹石的含量由35%增加至60%左右,橄榄石含量由60%降低至40%,其他杂质约占5%;②绿色丹东绿:肉眼观察可见蛇纹石脉定向分布,蛇纹石化更强,残留更少,蛇纹石占70%左右,橄榄石呈孤岛状残留;③深绿色丹东绿:镜下观察样品成分以蛇纹石为主,约占80%,橄榄石呈残留状,表面有呈高级白干涉色的粒状物,高凸起,应为碳酸盐;④黑色丹东绿:该种颜色的样品基本都已蛇纹石化了,偶尔可见典型的碳酸盐双晶,颗粒较大。

3.1.2 X射线粉晶衍射分析

在中国地质大学(北京)X射线衍射实验室采用日本理学D/Max-RC X射线粉末衍射仪对丹东绿样品进行测试,测试人高翔。测试条件:Cu靶($\text{Cu K}\alpha$ = 1.5406)靶电压为30 kV,靶电流为110 mA,起始角度为 15° ,终止角度为 70° ,连续扫描模式,室温为 $16\sim 18^\circ\text{C}$,湿度为36%~38%。从由浅至深4种颜色的样品中选出4张代表图谱(图2),与2000JCPDS-国际衍射数据中心(ICDD)中的标准谱线进行比较,得出的结果见表1。对X射线粉晶衍射的结果进行综合分析,可知丹东绿样品的主要矿物成分为镁橄榄石和蛇纹石,其他的矿物成分还有白云石、水镁石、少量伊利石和极少量的绿泥石。

3.1.3 电子探针分析

用电子探针仪对丹东绿样品进行分析,测试在北京核工业地质研究所实验室的JEOL JXA-8100电子探针显微分析仪上进行,测试人葛祥坤。分析条件为:加速电压15 kV;束流 $1\times 10^{-8}\text{A}$,具体测试结果见表2。

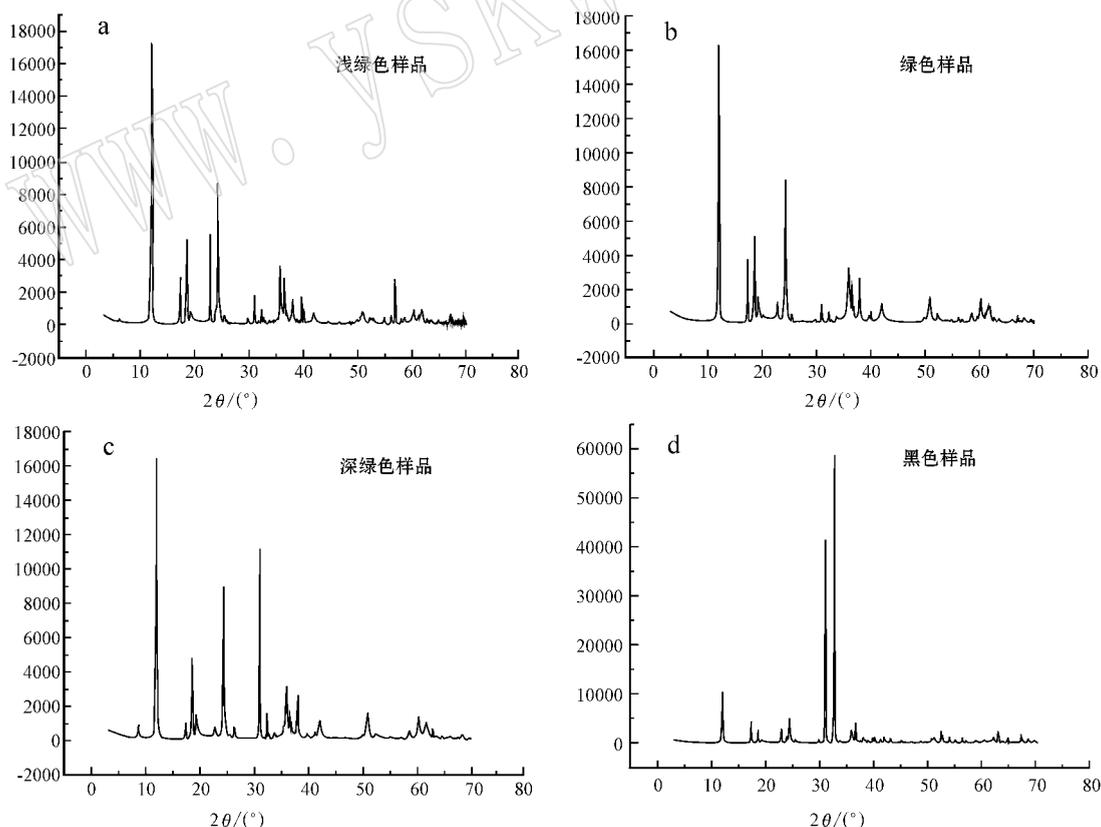


图2 不同颜色代表性样品的X射线粉晶衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of samples of different colors

表 1 不同颜色代表性样品的 X 射线粉晶衍射图谱分析结果

Table 1 Results of X-ray powder diffraction of samples of different colors

样品	特征谱线	检出物相
浅绿色	$d=7.33\text{\AA} (I/I_0=100)$ $d=4.60\text{\AA} (I/I_0=5)$, $d=3.66\text{\AA} (I/I_0=53)$	蛇纹石
	$d=5.11\text{\AA} (I/I_0=17)$ $d=3.88\text{\AA} (I/I_0=35)$, $d=3.48\text{\AA} (I/I_0=4)$ $d=3.00\text{\AA} (I/I_0=3)$, $d=2.77\text{\AA} (I/I_0=7)$ $d=2.51\text{\AA} (I/I_0=25)$, $d=2.46\text{\AA} (I/I_0=19)$ $d=2.27\text{\AA} (I/I_0=11)$, $d=2.25\text{\AA} (I/I_0=7)$	镁橄榄石
	$d=4.77\text{\AA} (I/I_0=32)$ $d=2.74\text{\AA} (I/I_0=4)$, $d=2.37\text{\AA} (I/I_0=10)$ $d=1.79\text{\AA} (I/I_0=6)$	水镁石
	$d=14.38\text{\AA} (I/I_0=3)$	绿泥石
绿色	$d=2.88\text{\AA} (I/I_0=12)$	白云石
	$d=7.35\text{\AA} (I/I_0=100)$ $d=4.61\text{\AA} (I/I_0=10)$, $d=3.90\text{\AA} (I/I_0=9)$ $d=3.66\text{\AA} (I/I_0=55)$, $d=2.50\text{\AA} (I/I_0=22)$	蛇纹石
	$d=5.12\text{\AA} (I/I_0=21)$ $d=3.01\text{\AA} (I/I_0=2)$, $d=2.77\text{\AA} (I/I_0=4)$ $d=2.27\text{\AA} (I/I_0=4)$, $d=2.25\text{\AA} (I/I_0=5)$ $d=2.15\text{\AA} (I/I_0=8)$, $d=2.37\text{\AA} (I/I_0=18)$ $d=1.79\text{\AA} (I/I_0=11)$, $d=1.75\text{\AA} (I/I_0=5)$	镁橄榄石
	$d=4.78\text{\AA} (I/I_0=33)$ $d=2.37\text{\AA} (I/I_0=18)$ $d=2.89\text{\AA} (I/I_0=8)$	水镁石 白云石
深绿色	$d=7.34\text{\AA} (I/I_0=100)$ $d=4.60\text{\AA} (I/I_0=9)$, $d=3.90\text{\AA} (I/I_0=5)$ $d=3.66\text{\AA} (I/I_0=57)$ $d=2.50\text{\AA} (I/I_0=20)$	蛇纹石
	$d=5.11\text{\AA} (I/I_0=7)$ $d=2.77\text{\AA} (I/I_0=11)$, $d=2.46\text{\AA} (I/I_0=9)$ $d=2.37\text{\AA} (I/I_0=17)$, $d=1.79\text{\AA} (I/I_0=11)$ $d=1.75\text{\AA} (I/I_0=3)$	镁橄榄石
	$d=4.77\text{\AA} (I/I_0=30)$ $d=2.37\text{\AA} (I/I_0=17)$ $d=2.89\text{\AA} (I/I_0=81)$ $d=2.19\text{\AA} (I/I_0=4)$	水镁石 白云石
	$d=10.20\text{\AA} (I/I_0=5)$ $d=3.38\text{\AA} (I/I_0=5)$	伊利石
黑色	$d=7.33\text{\AA} (I/I_0=15)$ $d=4.60\text{\AA} (I/I_0=1)$, $d=3.89\text{\AA} (I/I_0=5)$ $d=3.73\text{\AA} (I/I_0=2)$, $d=3.66\text{\AA} (I/I_0=8)$	蛇纹石
	$d=5.12\text{\AA} (I/I_0=7)$ $d=2.74\text{\AA} (I/I_0=100)$ $d=4.78\text{\AA} (I/I_0=4)$ $d=2.37\text{\AA} (I/I_0=2)$	镁橄榄石 水镁石
	$d=2.88\text{\AA} (I/I_0=71)$	白云石

由表 2 可知,该玉石中的主要化学成分为 SiO_2 和 MgO ,其次为 FeO 、 Al_2O_3 和 K_2O 在个别样品中含量较大,对照之前 X 射线粉晶衍射的结果可知,第 3 件浅绿色样品中 Al_2O_3 含量为 14.081% 应为含绿泥石所致;第 1 件深绿色样品中不仅 Al_2O_3 为 11.085% 异于常值, K_2O 为 9.713% 也与常值不符,对照之前 X 射线粉晶衍射的结果,应是样品中含伊利石所致。其他成分的质量分数都比较低。

3.1.4 红外光谱分析

采用反射法对丹东绿样品在中国地质大学(北京)地大宝石鉴定中心进行了红外光谱分析。测试条件:Bruker vector33 型傅里叶变换红外光谱仪,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描范围为 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$,扫描时间为 40 s,电压为 220~240 V,频率为 50~60 Hz,功率为 250 W,室温为 16~18℃,湿度为 36%~38%。因样品的特征红外光谱基本相同,故以丹东绿样品 X1 为代表,对样品的红外光谱进行详细分析。从图 3 可以看出,样品 X1 的红外光谱特征谱带 3415 、 1206 、 987 、 617 、 553 、 447 、 390 cm^{-1} 峰值与蛇纹石的标准红外光谱峰值 3420 、 1195 、 980 、 610 、 560 、 445 、 400 cm^{-1} (彭文世等,1982)相近或相同;其 987 、 961 、 889 、 842 、 610 、 501 、 390 cm^{-1} 峰值与镁橄榄石的标准红外光谱峰值 983 、 958 、 890 、 840 、 610 、 506 、 380 cm^{-1} (彭文世等,1982)相近或相同;其 3698 、 3647 、 3415 、 553 、 445 cm^{-1} 峰值与水镁石的标准峰值 3700 、 3645 、 3420 、 560 、 450 cm^{-1} (彭文世等,1982)相近或相同;其 1438 、 889 、 730 cm^{-1} 峰值与白云石的标准峰值 1430 、 883 、 732 cm^{-1} (彭文世等,1982)相近。因此,可推断样品 X1 中含有蛇纹石、镁橄榄石、水镁石、白云石。

3.2 丹东绿玉石的化学成分

3.2.1 主要化学成分

表 2 丹东绿的电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Electron microprobe analyses of samples

样品	SiO_2	MgO	FeO	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	Cr_2O_3	总计
浅绿色	42.029	44.810	1.839	0.010	0.010	0.056	0.021	0.072	0.000	0.000	88.847
浅绿色	40.994	40.287	0.793	0.006	0.007	0.040	0.015	0.011	0.000	0.004	82.157
浅绿色	34.244	34.636	0.558	14.081	0.010	0.073	0.082	0.020	0.009	0.037	83.750
绿色	41.274	37.814	1.542	0.000	0.000	0.000	0.003	0.048	0.023	0.000	80.704
绿色	39.656	39.125	0.516	0.029	0.019	0.000	0.002	0.040	0.003	0.018	79.408
深绿色	42.398	27.835	0.443	11.085	0.000	0.000	9.713	0.021	0.103	0.000	91.598
深绿色	39.736	40.914	1.421	1.548	0.023	0.083	0.259	0.000	0.002	0.116	84.102
黑色	41.576	39.551	0.759	1.919	0.005	0.004	0.002	0.035	0.000	0.009	83.860

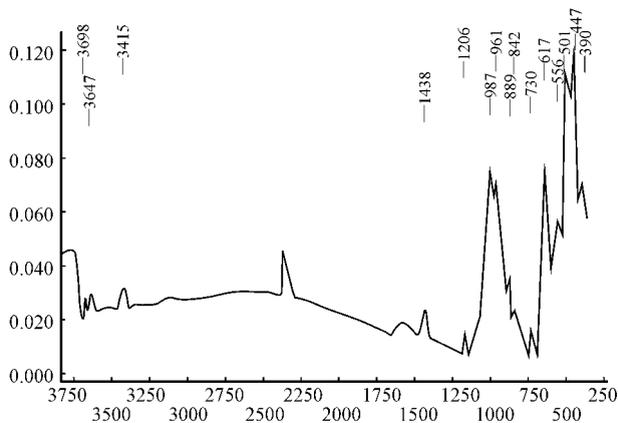


图3 丹东绿样品X1的红外光谱图

Fig. 3 IR spectra of sample X1

在核工业北京地质研究院分析测试研究中心采用飞利浦PW2404 X射线荧光光谱仪,对丹东绿的代表性样品进行了主要元素化学成分分析,测试人夏晨光,结果见表3。从表3中可知,丹东绿的主要成分为 SiO_2 、 MgO 和 H_2O (烧失量中主要是 H_2O)。其中 SiO_2 为30.34%~37.57%、 MgO 为44.66%~48.32%、 H_2O 为9.35%~16.67%,均较为稳定,变化范围不大。 SiO_2 平均值为35.24%, MgO 平均值为46.49%, H_2O 平均值为13.01%。次要成分中 FeO 和 Fe_2O_3 的变化范围也不大, FeO 为0.8%~1.4%、 Fe_2O_3 为1.53%~2.86%, TFeO 是引起颜色的主要原因, Al_2O_3 为0.25%~0.40%, CaO 为0.25%~4.23%。其他成分 Na_2O 、 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5

表3 丹东绿部分代表性样品的主要化学成分含量

 $w_B/\%$

Table 3 Main chemical composition of some representative samples

样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	LOI	Total
浅绿色	37.57	0.38	1.53	1.40	48.32	0.89	0.20	0.023	0.091	0.007	0.51	9.68	100.30
浅绿色	36.77	0.39	1.75	0.80	47.21	0.49	0.18	0.028	0.060	0.011	0.29	12.25	100.2
绿色	36.5	0.36	2.48	1.1	45.79	0.74	0.18	0.031	0.084	0.008	0.035	12.78	100.18
绿色	37.28	0.40	2.60	1.25	48.30	0.54	0.18	0.027	0.075	0.008	0.045	9.35	100.05
深绿色	35.35	0.25	2.86	1.05	46.11	0.25	0.17	0.022	0.090	0.007	0.029	13.94	100.12
深绿色	32.89	0.37	2.75	0.95	44.66	1.98	0.17	0.059	0.082	0.009	0.11	16.39	100.42
黑色	30.34	0.32	2.20	1.2	45.06	4.23	0.17	0.025	0.069	0.011	0.037	16.67	100.332
均值	35.24	0.35	2.31	1.11	46.49	1.3	0.18	0.03	0.08	0.01	0.15	13.01	100.23

等的含量都很低。

可见,随着颜色加深, SiO_2 含量逐渐降低, MgO 的含量也逐渐降低,烧失量明显升高; SiO_2 、 MgO 、 TFeO 、 CaO 、 Al_2O_3 及烧失量已经占了百分比的极大部分,除个别样品外,次要组分中大部分的 $\text{FeO}<1.5\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3>2.5\%$,这也表明次要组分在不同颜色的丹东绿玉石样品中的质量分数很低,而其他杂质元素则更低,从而进一步说明不同颜色丹东绿玉石中的主要矿物组成是蛇纹石、镁橄榄,其他杂质矿物很少。

3.2.2 微量化学成分

在核工业北京地质研究院分析测试研究中心采用Finnigan MAT制造的HR-ICP-MS(Element I)对丹东绿的代表性样品进行了微量元素化学成分分析,测试人张良圣,结果见表4。从表4可知,微量元素的含量都相对较低,含量最高的微量元素为Zn,为 $62.9 \times 10^{-6} \sim 87.4 \times 10^{-6}$,平均值为 76.12×10^{-6} ;元素Be、Ga、Nb、Mo、Cd、In、Sb、Cs、Pr、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Ta、Re、Tl、Bi、Th、Hf的含量则相对较低,平均值都在 1×10^{-6} 以

下,其中Re最低,为 0.0026×10^{-6} 。说明热液交代作用形成的矿区,被交代的原岩不是超基性岩而是大理岩。

3.3 丹东绿玉石的结构和构造

丹东绿玉石的结构主要有①粒状变晶结构:主要由镁橄榄石矿物组成,呈粒状镶嵌,是玉石的主要结构之一;②网格、网环状结构:蛇纹石沿橄榄石的裂理进行交代,橄榄石呈残留状存在于蛇纹石的网脉中,是玉石的主要结构之一;③叶片变晶结构:由蛇纹石和水镁石等组成,是玉石中的常见结构;④叶片柱状变晶结构:主要由柱粒状镁橄榄石和叶片状蛇纹石组成。

丹东绿玉石的构造主要有①均质块状构造:由单一颜色蛇纹石化镁橄榄石砂卡岩组成,基本无其他杂色的块体,色调有绿色、墨绿色和黑色,黑色者颜色欠美观,光泽暗;②斑花、斑点构造:大理岩呈残留体组成大小不同斑花或斑点分布于基地色调中;③纹带状构造:深浅不同绿色呈细纹带状相间排列,组成树枝状或不规则网状;④角砾状构造:玉石因后

表 4 丹东绿部分代表性样品的微量元素含量 $w_B/10^{-6}$

Table 4 Trace element content of some representative samples

样号	X1	X2	X3	X7	X9	X12
Li	8.62	3.49	3.27	0.952	0.56	3.25
Be	0.391	0.335	0.678	0.418	0.52	0.656
Sc	1.55	1.4	1.47	1.48	1.72	1.69
V	14.6	21.9	18.8	18.2	14.6	9.95
Cr	5.52	11	9.77	10.6	9.03	8.45
Co	1.22	0.603	0.688	1.3	1.5	0.924
Ni	1.03	0.488	0.552	0.477	1.65	1.73
Cu	3.99	0.94	0.361	0.786	0.935	0.917
Zn	85.7	62	87.4	82.1	76.6	62.9
Ga	0.582	0.371	0.373	0.193	0.122	0.703
Rb	0.839	0.703	1.04	0.079	7.68	0.408
Sr	7.67	6.72	4.5	2.31	15	28.9
Y	3.46	1.42	0.435	0.264	1.33	1.26
Nb	0.254	0.831	0.42	0.323	0.378	0.466
Mo	0.137	1.06	0.517	0.18	0.385	0.234
Cd	0.004	0.038	0.011	0.01	0.034	0.032
In	0.009	0.005	0.007	0.005	0.008	0.004
Sb	0.062	0.078	0.049	0.048	0.043	0.054
Cs	0.068	0.144	0.088	0.014	0.377	0.123
Ba	3.05	6.94	4.42	1.35	5.59	3.11
La	4.2	3.5	3.4	0.904	2.29	1.43
Ce	8.62	6.26	5.34	1.65	4.43	2.37
Pr	0.919	0.596	0.499	0.154	0.455	0.222
Nd	3.22	1.66	0.736	0.307	1.3	0.646
Sm	0.56	0.266	0.066	0.047	0.197	0.108
Eu	0.071	0.06	0.015	0.008	0.031	0.035
Gd	0.505	0.238	0.084	0.039	0.2	0.105
Tb	0.085	0.033	0.007	0.006	0.032	0.017
Dy	0.506	0.184	0.074	0.018	0.178	0.108
Ho	0.109	0.045	0.013	0.008	0.042	0.035
Er	0.311	0.14	0.045	0.019	0.137	0.13
Tm	0.036	0.022	0.009	0.004	0.02	0.019
Yb	0.24	0.128	0.057	0.039	0.124	0.139
Lu	0.004	0.021	0.014	0.009	0.024	0.024
Ta	0.082	0.142	0.136	0.057	0.057	0.043
W	0.679	2.55	1.62	2.8	2.29	2.19
Re	0.001	0.003	0.004	0.002	0.003	未检出
Tl	0.012	0.018	0.014	0.006	0.04	0.18
Pb	1.23	2.59	0.849	1.23	1.97	11.3
Bi	0.036	0.047	0.032	0.021	0.035	0.184
Th	0.221	0.04	0.052	0.154	0.174	0.255
U	1.13	0.199	0.326	1.24	1	2.2
Zr	28.6	29.1	12.9	26.3	16.6	14.4
Hf	0.892	0.861	0.324	0.653	0.455	0.375

期构造引起破碎呈不规则角砾又重新胶结形成。

3.4 丹东绿玉石的物理性质

①透明度：主要属于微透明，即当样品厚度为几厘米时，将其放于灯上，可透过光，但是隔着玉石样

品已无法看见其背后的物体。当丹东绿样品颜色变深时，透明度逐渐变差。②光泽：主要呈玻璃光泽至蜡状光泽。③密度：在实验室里用静水力学法对样品的密度进行测定，得出样品的密度值如表 5 所示为 2.54~2.74 g/cm³。④折射率：在实验室利用折射仪对丹东绿样品进行折射率的测试，结果见表 6。⑤摩氏硬度：镁橄榄石的摩氏硬度为 6~7(汪建明等 2002)，蛇纹石的摩氏硬度为 4.7~5.5(王时麒等 2007)，因橄榄石部分蚀变为蛇纹石，故丹东绿的摩氏硬度应界于橄榄石和蛇纹石之间。

表 5 丹东绿样品的密度值 g/cm³

Table 5 Density of samples

样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	均值
密度	2.63	2.65	2.54	2.56	2.60	2.61	2.67	2.67	2.74	2.63

表 6 丹东绿样品的折射率

Table 6 Refractive indices of samples

样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	均值
折射率	1.56	1.58	1.57	1.56	1.59	1.57	1.57	1.59	1.58	1.57

4 结论

在偏光显微镜下观察，可见丹东绿玉石样品蛇纹石化强烈，部分保持着镁橄榄石假像，蛇纹石、镁橄榄石、水镁石、白云石的镜下特征明显；通过对丹东绿玉石样品进行 X 射线粉晶衍射、红外光谱等大型仪器的测试，可知丹东绿样品的主要矿物成分为蛇纹石和镁橄榄石，其他的次要矿物成分还有白云石、水镁石，少量伊利石和极少量的绿泥石；丹东绿玉石的密度为 2.63 g/cm³，折射率为 1.57，摩氏硬度应界于橄榄石和蛇纹石之间。

References

Li Sanzhong, Han Zongzhu, Liu Yongjiang, et al. 2001. Paleoproterozoic deep processes and geochemical restriction in Jiao-Liao Massif [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 184~196(in Chinese).

Liu Guohai and Zhuang Dehou. 1994. Investigation of the relationship between placer gold mineralization and evolution of Donggou Plain in Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 3: 53~58(in Chinese with English abstract).

Peng Wenshi and Liu Gaokui. 1982. IR Spectrum Atlas of Minerals[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

Tu Dejian. 1977. Ore-search Report of Dandong Green Mining Area in

- Donggou County, Liaoning Province[M]. Beijing: National Geological Archives of China, 5~6(in Chinese).
- Wang Jianming and Shen Zhaolong. 2002. A unique jade material of serpentized pure peridotite[J]. Journal of Geology, 33: 400(in Chinese with English abstract).
- Wang Shiqi, Zhao Chaohong, Yu Guang, *et al.* 2007. Xiuyan Jades in China[M]. Beijing: Science Press, 20(in Chinese).
- Wu Chunlin and Sun Houjiang. 1995. Geological characteristics of jade reserves in Beiwagou of Xiuyan County[J]. China Non-metallic Mining Industry, 77: 26(in Chinese).
- Wu Zhen. 2009. Lithology and Genesis of Magnesium-rich Rocks in Boron Deposit of Eastern Liaoning and Southern Jilin[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Zhu Jicun. 2000. Component feature and the use of serpentine[J]. Stone, 12: 33(in Chinese).
- 深部过程的地质与地球化学制约[J]. 地质科学, 36(2): 184~196.
- 刘国海, 庄德厚. 1994. 辽宁省东沟平原的演化与砂金成矿关系探讨[J]. 贵金属地质, 3(1): 53~58.
- 彭文世, 刘高魁. 1982. 矿物红外光谱图集[M]. 北京: 科学出版社, 332.
- 涂德俭. 1977. 辽宁省东沟县东二道沟丹东绿矿区找矿报告[M]. 北京: 全国地质资料馆, 5~6.
- 汪建明, 沈兆龙. 2002. 一种特殊的玉器材料蛇纹石化纯橄榄岩[J]. 地质学刊, 33(4): 400.
- 王时麒, 赵朝洪, 于洗, 等. 2007. 中国岫岩玉[M]. 北京: 科学出版社, 20.
- 吴春林, 孙厚江. 1995. 岫岩县北瓦沟玉石矿床地质特征[J]. 建材地质, 77: 26.
- 吴振. 2009. 辽东-吉南硼矿中镁质岩石的岩石学及成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 朱继存. 2000. 蛇纹石的物质成分特征和利用[J]. 石材, 12: 33.

附中文参考文献

李三忠, 韩宗珠, 刘永江, 等. 2001. 胶辽东地块古元古代前造山期