



贵州罗甸玉矿物学及成分特征

朴庭贤¹, 尹京武¹, 闫星光¹, 侯凤娇¹, 陈浦浦¹, 聂 潇¹, 王 兵²

(1. 中国地质大学 科学研究院, 北京 100083; 2. 贵州省地质矿产中心实验室, 贵州 贵阳 550004)

摘 要: 本次研究对贵州省罗甸地区产出的玉石进行了矿物学及化学组成的研究。从外观上, 罗甸玉可分为白玉、灰白玉、青白玉、青玉及斑点玉。显微镜下观察罗甸玉的结构为纤维状-柱状变晶交织、纤维状-毡状变晶交织、纤维状变晶交织结构, 分带现象明显。利用电子探针对白玉、灰白玉、青白玉、青玉及斑点玉中主要矿物角闪石进行分析, 结果显示角闪石为钙质角闪石组的透闪石。根据钙质角闪石的 Si-Ti 变异及成因类型划分投图, 样品落入蚀变和交代角闪石区域内。根据单斜辉石中 Ca-Mg-Fe 组合分类与命名方法判断, 得出罗甸玉矿床中产出的辉石主要为透辉石, 并有少量次透辉石。

关键词: 贵州罗甸, 电子探针, 透闪石, 透辉石;

中图分类号: P578.955

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)S0-0007-12

Mineralogical characteristics of tremolite and diopside in Luodian, Guizhou Province

Park Jung Hyun¹, YIN Jing-wu¹, YAN Xing-guang¹, HOU Feng-jiao¹,
CHEN Pu-pu¹, NIE Xiao¹ and WANG Bing²

(1. Institute of Earth Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. MLR Guiyang Supervision and Testing Center of Mineral Resources, Guiyang 550004, China)

Abstract: Mineralogical and chemical compositions of jade from Luodian area of Guizhou Province were studied in this paper. According to the appearance, the jade can be divided into white jade, grayish white jade, light greenish white jade, sapphire and speckled jade. The structure of Luodian jade observed under the microscope is fibrous-columnar metacrystal intertexture, fibrous-pilotaxitic metacrystal intertexture, and fibrous metacrystal intertexture, with obvious zonation. The electron microprobe analysis of the major mineral amphibole in white jade, grayish white jade, light greenish white jade, sapphire and speckled jade shows that amphibole is the tremolite in calcic amphibole group. According to the Si-Ti variation and genetic type classification diagram of calcic amphibole, this mineral falls into the area of altered and metasomatic amphibole. According to the combination and genetic classification of Ca-Mg-Fe in clinopyroxene and the nomenclature, It can be known that the pyroxenes from the Luodian jade deposit are mainly diopside with a small amount of sahlite.

Key words: Luodian in Guizhou; EPMA; tremolite; diopside

罗甸玉矿床位于贵州省东南部冗里与广西省西北部红水河相邻地区, 2009 年该矿床首次被发现, 迄今为止研究工作极为有限。前人对罗甸辉绿岩区域

构造、罗甸玉特征、岩石化学特征及成因、矿床地质特征进行了研究(韩伟等, 2009; 杨林等, 2011, 2012; 范二川等, 2012), 但是, 对罗甸玉矿床中的主

要组成矿物透闪石、透辉石矿物学,研究工作略显不足。基于此点,本次研究利用显微镜观察及电子探针分析手段,对罗甸玉矿床中的透闪石、透辉石进行了系统的矿物学研究。

1 区域地质背景

罗甸地区出露的辉绿岩地处上扬子地块东南部黔中古隆起、黔南拗陷及紫云-罗甸构造带之间的过渡部位(韩伟等,2009)。范二川等(2012)指出本区构造包括冗里背斜、罗甸背斜、罗悃背斜、桑郎背斜、包树背斜等。区内褶皱较发育,且有辉绿岩岩床发育,其次发育断裂,方向以东北-南西向为主(图1)。本区除了辉绿岩之外,其它岩浆岩发育不明显。与罗甸玉有关的辉绿岩岩脉侵入于下二叠统茅口组中,而邻区二叠纪栖霞组中也可见辉绿岩的侵入。罗甸地区的辉绿岩体呈岩床状产出,大体顺层侵入,宽度为15~310 m。本区的主要赋矿地层是茅口组(P_2m)约70 m厚的主要玉石赋矿层的下层是含燧

石团块灰岩夹白云质灰岩,上层是厚约40 m的中至厚层状生物碎屑灰岩,底层部与辉绿岩为顺层侵入接触。冗里背斜是罗甸玉矿床的主要控矿构造,长约13 km,宽约5~10 km,北东翼倾角 $40^\circ\sim 55^\circ$,产状较陡,西翼及南翼稍缓,倾角 $35^\circ\sim 45^\circ$,为短轴斜歪弯曲背斜(图2)。冗里背斜翼部产出的辉绿岩呈环带状展布,长约20 km,厚度约60~80 m,含长结构、块状构造,交织状的自形板状斜长石和半自形-自形粒状辉石部分蚀变为绿泥石、黝帘石等。本区围岩蚀变带分布于岩体的上下两侧内外带,主要含矿体的透闪石化带分布于上侧外。矿体走向长约10~50 m,倾向宽约15~60 m(范二川等,2012)。岩体倾向倾角一般 $50^\circ\sim 60^\circ$,与岩层基本一致。辉绿岩呈灰绿、暗绿色,辉绿结构为主,矿物成分主要由斜

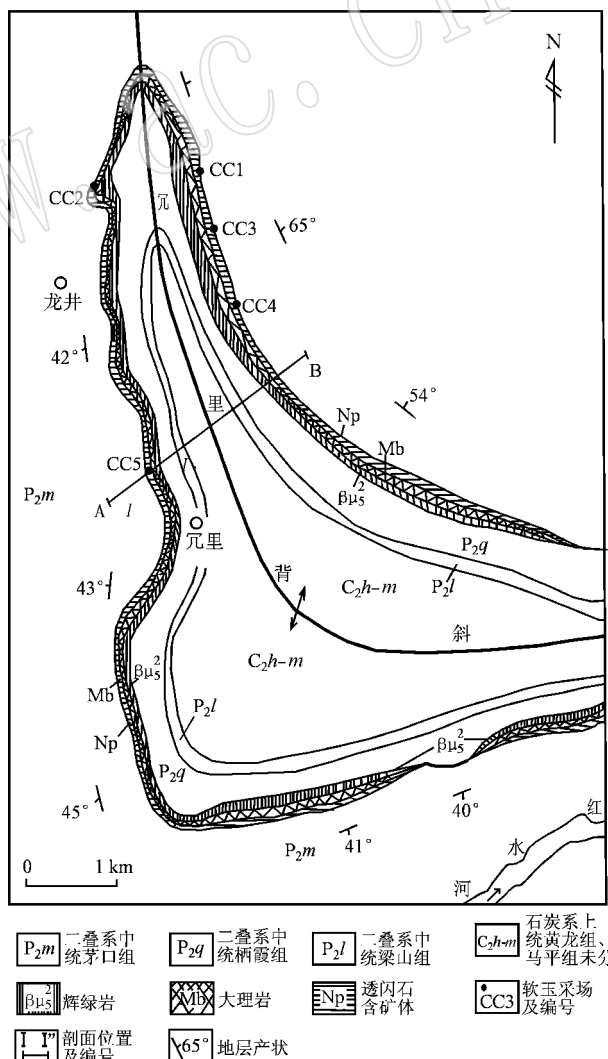
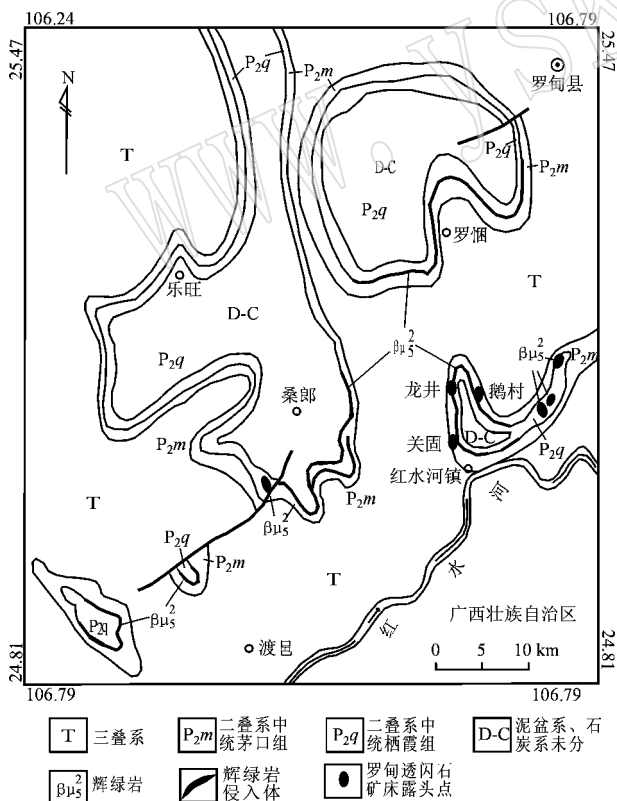


图1 罗甸透闪石矿床区域地质略图(据范二川等, 2012 修改)

Fig. 1 Regional geological sketch map of the Luodian nephrite deposit(modified from Fan Erchuan *et al.*, 2012)

图2 罗甸透闪石矿床地质略图(据范二川等 2012 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Luodian nephrite deposit(modified from Fan Erchuan *et al.*, 2012)

长石(30%~48%)、普通辉石(30%~55%)组成,含较多钛铁矿、钛磁铁矿或磁铁矿。岩石比较新鲜,基本没有发生蚀变(韩伟等, 2009)。

2 罗甸玉类型

肉眼观察,罗甸玉按颜色可分为白玉、灰白玉、青白玉、青玉及斑点玉。

(1) 白玉: 颜色较均匀,为白色带少量的褐色斑点,半透明,蜡状-油脂光泽,隐晶质结构,块状构造(图 3a)。

(2) 灰白玉: 样品表面可明显看出烟灰色-白色-灰白色的变化,并夹带少量的褐色斑点,颜色变化较明显。半透明,蜡状-油脂光泽,隐晶质结构,块状构造(图 3b)。

(3) 青白玉: 浅绿色,颜色较均匀,半透明,蜡状-油脂光泽,隐晶质结构,块状构造(图 3c)。

(4) 青玉: 烟灰色-浅绿色-乳白色,颜色变化明显,半透明,蜡状-油脂光泽,隐晶质结构,块状构造(图 3d)。

(5) 斑点玉: 主要颜色为浅绿色与灰白色,夹带大量褐色斑点,半透明,蜡状-油脂光泽,隐晶质结构,块状构造(图 3e)。

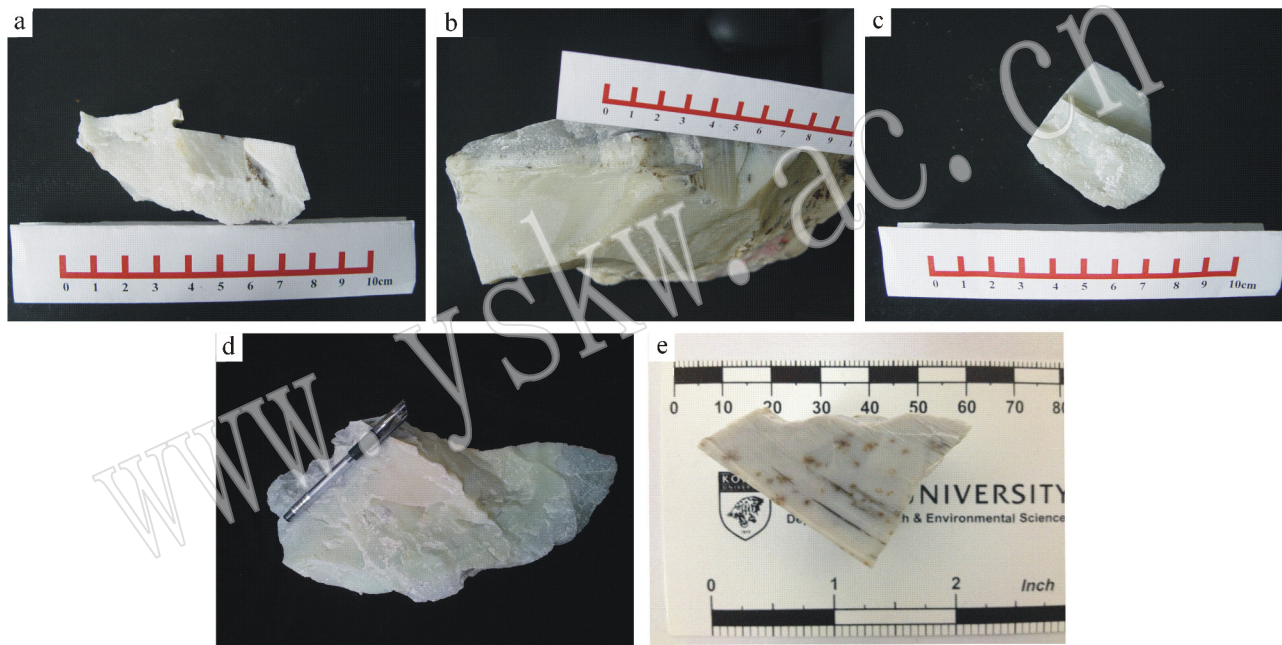


图 3 罗甸玉手标本照片

Fig. 3 Photos of Luodian nephrite sample

a—白玉; b—灰白玉; c—青白玉; d—青玉; e—斑点玉

a—white nephrite; b—greyish white nephrite; c—light green nephrite; d—green nephrite; e—spot nephrite

3 研究方法

利用中国地质大学(北京)电子探针实验室的 EPMA-1600 型电子探针仪,对罗甸玉组成矿物透闪石、透辉石进行了成分分析;同时,利用背散射电子图像(BSE)对罗甸玉矿床矿石结构研究进行了分析。电子探针测试条件:加速电压 15 kV,束流 1×10^{-8} A,束斑直径 1 μm ,ZAF 修正法,标准样品分别为:Si、Al、Na(钠长石)、Ti(金红石)、Fe(铁铝榴石)、Mn(蔷薇辉石)、Ca(方解石)、K(透长石)。

4 研究结果

4.1 偏光显微镜特征

根据不同颜色的罗甸玉显微镜观察,描述如下:

(1) 白玉: 在显微镜下可观察到纤维状变晶交织结构与纤维状毡-状变晶交织结构,纤维状、柱状,颗粒粒度 30~100 μm ,多数小于 50 μm ,粒度均一,集合体具放射状的束状、扇状交织(图 4a、4d),纤维状集合体及多数小于 20 μm ,颗粒杂乱无章地交织成毡状。

(2) 灰白玉: 在显微镜下可观察到纤维状-柱状变晶交织结构、纤维状-毡状变晶交织结构与纤维状变晶交织结构多数小于 $30\ \mu\text{m}$, 颗粒杂乱无章地交织成毡状(图 4b、4e), 存在颗粒粒度 $30\sim 120\ \mu\text{m}$ 的放射状、纤维状集合体。

(3) 青白玉: 在显微镜下可观察到纤维状-柱状变晶交织结构与纤维状变晶交织结构, 纤维状、柱状, 颗粒粒度 $50\sim 120\ \mu\text{m}$, 多数小于 $60\ \mu\text{m}$, 粒度均一, 集合体具放射状的束状、扇状交织及颗粒粒度 $50\sim 150\ \mu\text{m}$ 的放射状、纤维状集合体。

(4) 青玉: 在显微镜下可观察到纤维状变晶交织结构颗粒粒度 $30\sim 120\ \mu\text{m}$ 的放射状、纤维状集合体(图 4c、4f)。

(5) 斑点玉: 在显微镜下可观察到纤维状变晶交织结构颗粒粒度 $50\sim 150\ \mu\text{m}$ 的放射状、纤维状集合体。

4.2 背散射电子图像(BSE)观察

由于颗粒细小, 有些矿物显微镜下不易观察到, 描述如下:

(1) 白玉: 由于透辉石颗粒细小, 显微镜下不易

观察到颗粒大小的变化, 而在背散射电子图像下可清晰地观察到颗粒由大变小的变化趋势(图 5), 该变化在样品中反复出现(图 5f)。透闪石的变化不大。

(2) 灰白玉: 与白玉情况相同, 在背散射电子图像下可清晰地观察到颗粒由大变小的变化趋势(图 6), 未见反复出现的变化。透闪石的变化不大。与白玉不同的是可观察到钠长石局部富集的现象(图 6d)。

(3) 青白玉: 与上述两种不同的是可观察到方解石局部富集的现象(图 7a、7e)。

(4) 青玉: 与上述 3 种不同的是透辉石颗粒具有逐渐变大的趋势(图 8)。

(5) 斑点玉: 与白玉、灰白玉、青白玉有相同的特征(图 9)。

4.3 化学成分分析

(1) 透闪石

利用电子探针对白玉、灰白玉、青白玉、青玉、斑点玉的透闪石进行了成分分析, 结果(表 1)显示, 白玉中透闪石 SiO_2 含量为 $58.41\%\sim 58.86\%$, FeO^T 含量为 $0.09\%\sim 0.27\%$, MgO 含量为 $25.12\%\sim 25.58\%$,

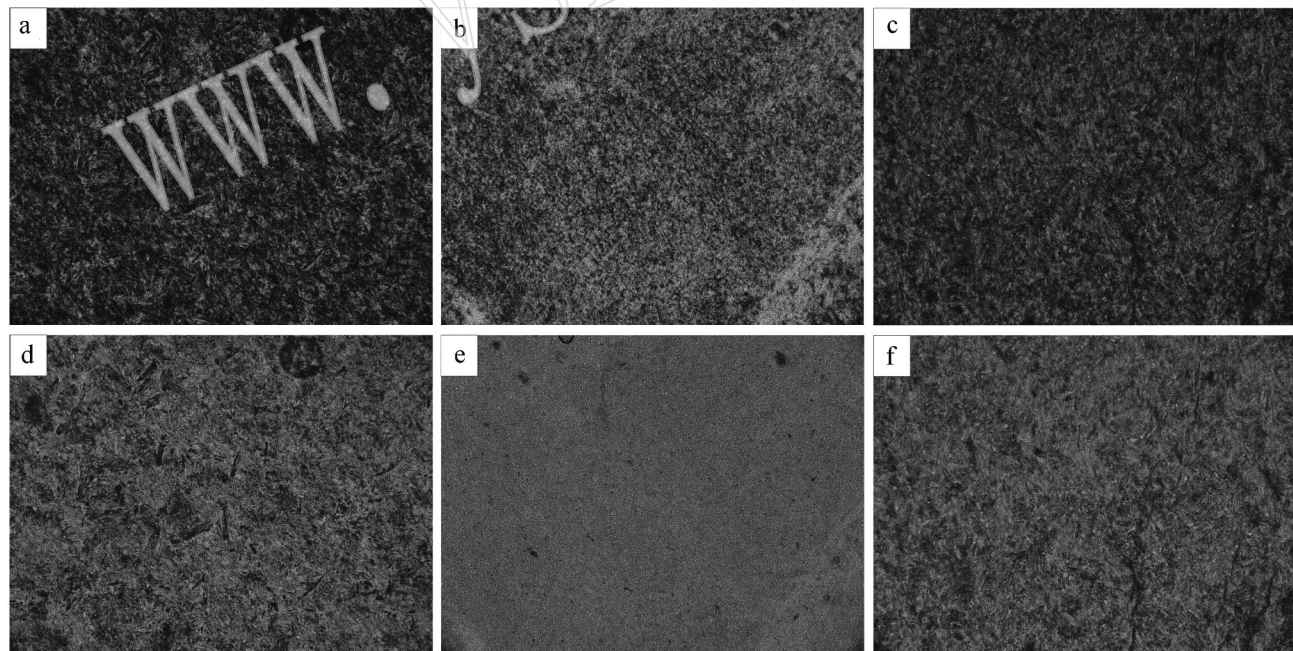


图 4 罗甸玉显微结构特征照片

Fig. 4 Photos of Microstructure characteristics of Luodian nephrite

a—纤维状-柱状变晶交织结构(+); b—纤维状-毡状变晶交织结构(+); c—纤维状变晶交织结构(+); d—纤维状-柱状变晶交织结构(-); e—纤维状-毡状变晶交织结构(-); f—纤维状变晶交织结构(-)

a—fibrous-columnar metacryst pilotaxitic texture(+); b—fibrous-felted metacryst pilotaxitic texture(+); c—fibrous metacryst pilotaxitic texture(+); d—fibrous-columnar metacryst pilotaxitic texture(-); e—fibrous-felted metacryst pilotaxitic texture(-); f—fibrous metacryst pilotaxitic texture(-)

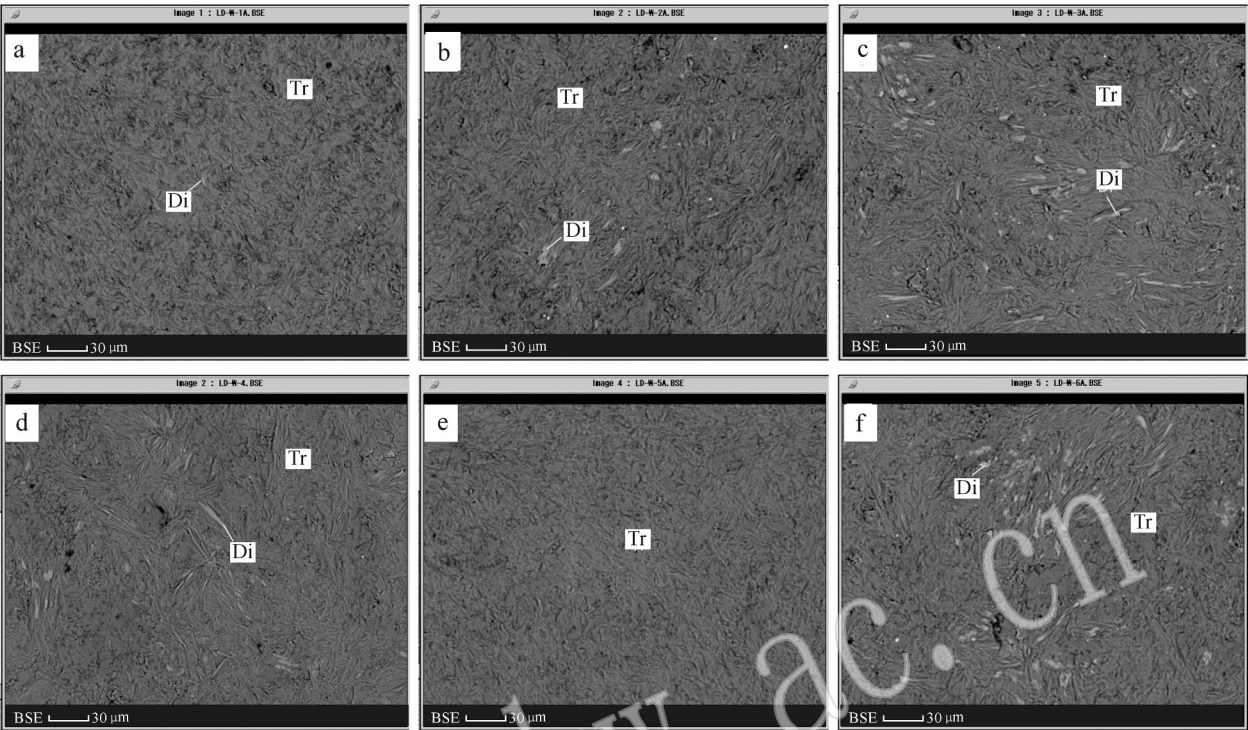


图 5 罗甸玉矿床白玉中透闪石、透辉石的背散射电子像

Fig. 5 BSE images of tremolite, diopside of white nephrite in Luodian nephrite deposite

a—第 1 分带; b—第 2 分带; c—第 3 分带; d—第 4 分带; e—第 5 分带; f—第 6 分带; Tr—透闪石; Di—透辉石

a—the first zone; b—the second zone; c—the third zone; d—the fourth zone; e—the fifth zone; f—the sixth zone; Tr—tremolite; Di—diopside

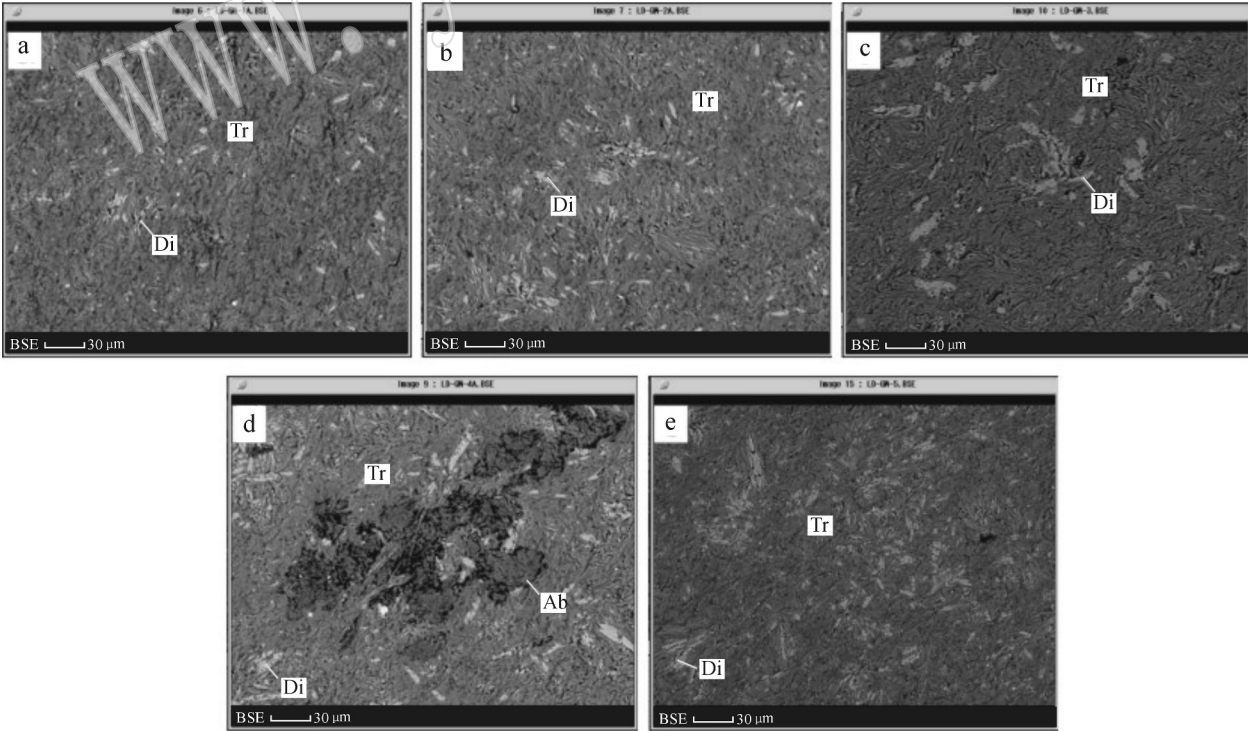


图 6 罗甸玉矿床灰白玉中透闪石、透辉石、长石的背散射电子像

Fig. 6 BSE images of tremolite, diopside, albite of greyish white nephrite in Luodian nephrite deposite

a—第 1 分带; b—第 2 分带; c—第 3 分带; d—第 4 分带; e—第 5 分带; Tr—透闪石; Di—透辉石; Ab—钠长石

a—the first zone; b—the second zone; c—the third zone; d—the fourth zone; e—the fifth zone; Tr—tremolite; Di—diopside; Ab—albite

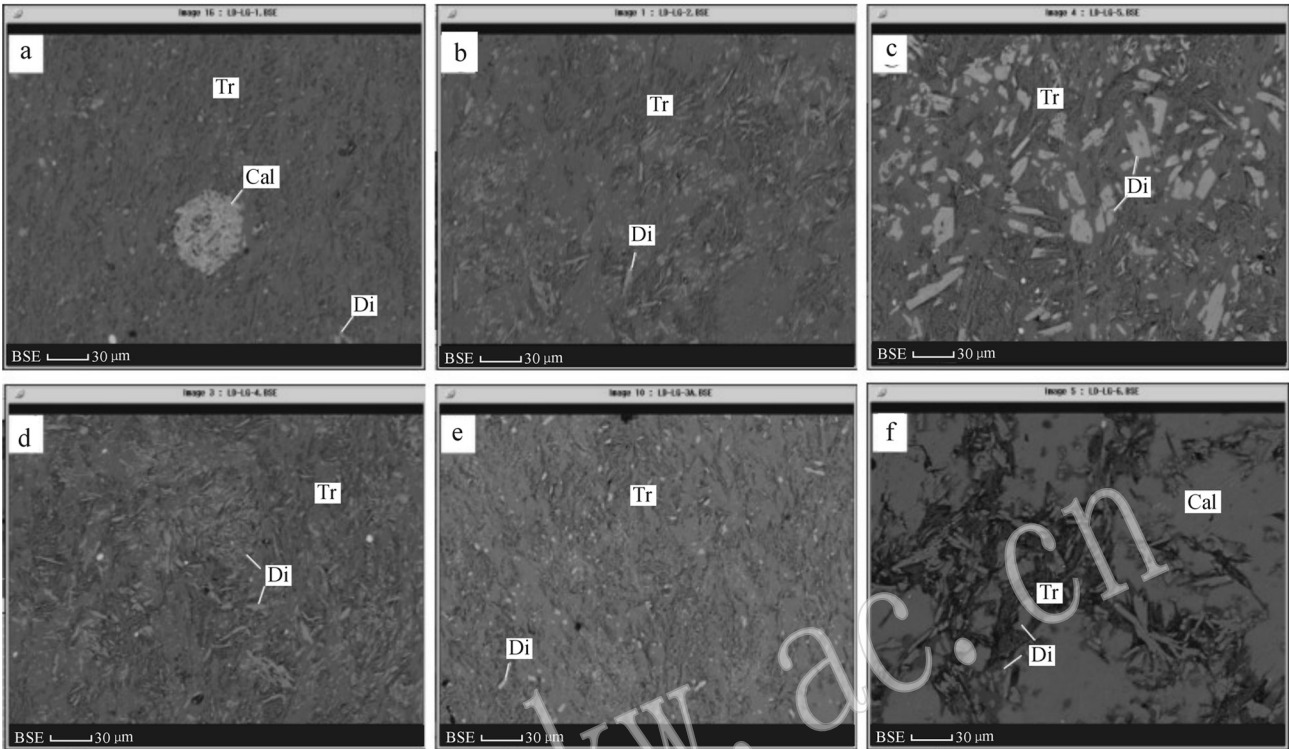


图 7 罗甸玉矿床青白玉中透闪石、透辉石、方解石的背散射电子像

Fig. 7 BSE images of tremolite, diopside, calcite of light green nephrite in Luodian nephrite deposit

a—第 1 分带; b—第 2 分带; c—第 3 分带; d—第 4 分带; e—第 5 分带; f—第 6 分带; Tr—透闪石; Di—透辉石; Cal—方解石
a—the first zone; b—the second zone; c—the third zone; d—the fourth zone; e—the fifth zone; f—the sixth zone; Tr—tremolite;
Di—diopside; Cal—calcite

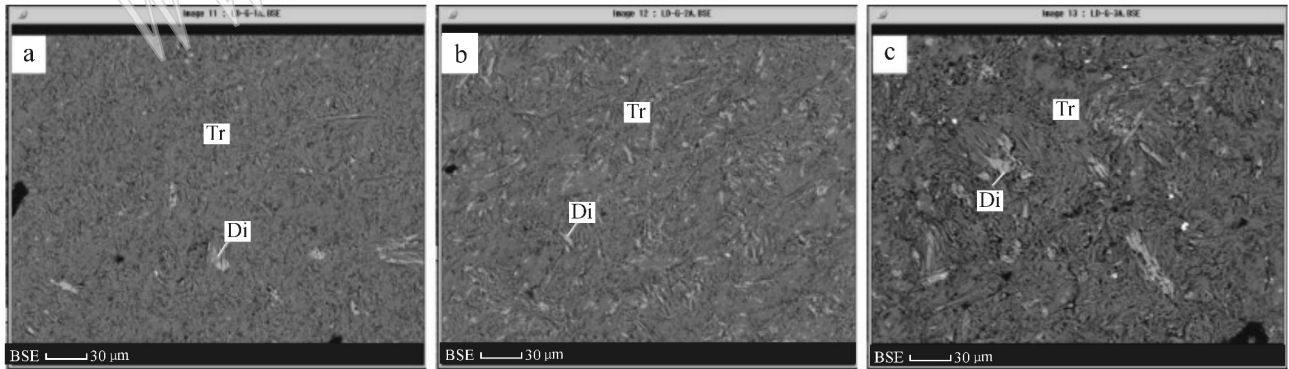


图 8 罗甸玉矿床青玉中透闪石、透辉石的背散射电子像

Fig. 8 BSE images of tremolite, diopside of green nephrite in Luodian nephrite deposit

a—第 1 分带; b—第 2 分带; c—第 3 分带; Tr—透闪石; Di—透辉石
a—the first zone; b—the second zone; c—the third zone; Tr—tremolite; Di—diopside

CaO 含量为 11.71%~11.98%; 灰白玉中透闪石 SiO₂ 含量为 58.32%~58.73%, FeO^T 含量为 0.31%~0.44%, MgO 含量为 24.77%~25.32%, CaO 含量为 11.66%~11.97%; 青白玉的透闪石 SiO₂ 含量为 58.48%~59.037%, FeO^T 含量为

0.20%~0.34%, MgO 含量为 24.93%~25.31%, CaO 含量为 11.89%~12.75%; 青玉中的透闪石 SiO₂ 含量为 59.09%~59.50%, FeO^T 含量为 0.06%~0.15%, MgO 含量为 25.33%~25.41%, CaO 含量为 11.79%~12.09%; 斑点玉中的

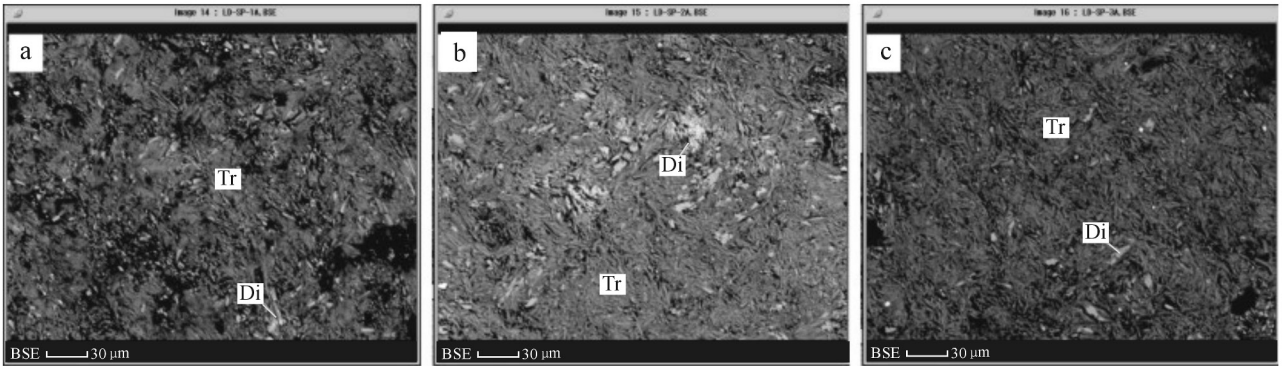


图 9 罗甸玉矿床斑点玉中透闪石、透辉石的背散射电子像
Fig. 9 BSE images of tremolite, diopside of spot nephrite in Luodian nephrite deposit
a—第 1 分带；b—第 2 分带；c—第 3 分带；Tr—透闪石；Di—透辉石
a—the first zone; b—the second zone; c—the third zone; Tr—tremolite; Di—diopside

表 1 罗甸玉中透闪石的电子探针分析结果($w_B/\%$)及氧离子数

样品编号	白玉						灰白玉					
	LD-W-D-1	LD-W-D-2	LD-W-D-3	LD-W-D-4	LD-W-D-5	LD-W-D-6	LD-GW-1	LD-GW-2	LD-GW-3	LD-GW-4	LD-GW-5	
SiO ₂	58.57	58.67	58.41	58.68	58.52	58.86	58.52	58.64	58.45	58.73	58.32	
TiO ₂	-	0.04	0.08	0.07	0.04	0.01	0.11	0.10	0.17	0.06	0.08	
Al ₂ O ₃	0.18	0.09	0.09	0.07	0.10	0.14	0.20	0.23	0.19	0.24	0.28	
Cr ₂ O ₃	1.12	1.06	1.14	0.94	2.06	1.3	0.70	0.38	0.51	0.69	0.61	
FeO ^T	0.26	0.22	0.27	0.09	0.14	0.22	0.34	0.37	0.44	0.31	0.40	
MnO	0.10	0.03	-	0.02	0.03	-	0.04	-	0.02	0.03	0.06	
MgO	25.54	25.42	25.58	25.54	25.38	25.12	25.07	25.17	25.32	24.77	25.06	
CaO	11.71	11.98	11.95	11.86	11.97	11.76	11.66	11.89	11.73	11.85	11.97	
Na ₂ O	0.44	0.33	0.35	0.40	0.36	0.38	0.34	0.38	0.35	0.35	0.28	
K ₂ O	0.05	0.08	0.06	0.14	0.10	0.11	0.11	0.08	0.08	0.08	0.06	
Total	97.98	97.91	97.94	97.82	98.71	97.90	97.10	97.25	97.25	97.11	97.13	
以 23 个氧为计算的氧离子数												
Si	7.978	7.991	7.966	7.988	7.988	8.027	8.004	7.988	7.975	8.028	7.977	
Al ^{IV}	0.022	0.005	0.015	0.006	0.007	-0.029	-0.004	0.012	0.021	-0.028	0.022	
Al ^{VI}	0.008	0.010	0.000	0.006	0.009	0.051	0.037	0.026	0.009	0.066	0.023	
Ti	0.000	0.004	0.008	0.007	0.004	0.001	0.011	0.010	0.018	0.006	0.009	
Fe ³⁺	0.030	0.025	0.031	0.010	0.016	0.025	0.039	0.042	0.051	0.035	0.046	
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.012	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.005	0.000	0.002	0.004	0.007	
Mg	5.187	5.161	5.202	5.184	5.165	5.107	5.112	5.111	5.150	5.047	5.110	
Ca	1.709	1.749	1.746	1.730	1.750	1.718	1.709	1.736	1.715	1.735	1.754	
Na	0.117	0.086	0.093	0.106	0.096	0.100	0.091	0.101	0.092	0.094	0.075	
K	0.009	0.013	0.011	0.025	0.017	0.019	0.019	0.014	0.013	0.013	0.011	
阳离子总量	15.071	15.048	15.071	15.064	15.056	15.020	15.023	15.041	15.045	15.000	15.034	
Si ^T	7.978	7.991	7.966	7.988	7.988	8.027	8.004	7.988	7.975	8.028	7.977	
Al _T	0.022	0.005	0.015	0.006	0.007	-0.029	-0.004	0.012	0.021	-0.028	0.022	
Al _C	0.008	0.010	0.000	0.006	0.009	0.051	0.037	0.026	0.009	0.066	0.023	
Fe _C ³⁺	0.030	0.025	0.031	0.010	0.016	0.025	0.039	0.042	0.051	0.035	0.046	
Ti _C	0.000	0.004	0.008	0.007	0.004	0.001	0.011	0.010	0.018	0.006	0.009	
Mg _C	4.962	4.961	4.961	4.977	4.971	4.923	4.913	4.922	4.922	4.892	4.922	
Fe _C ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn _C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Fe _B ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn _B	0.012	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.005	0.000	0.002	0.004	0.007	
Ca _B	1.709	1.749	1.746	1.730	1.750	1.718	1.709	1.736	1.715	1.735	1.754	
Na _B	0.117	0.086	0.093	0.106	0.096	0.100	0.091	0.101	0.092	0.094	0.075	
Ca _A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Na _A	0.117	0.086	0.093	0.106	0.096	0.100	0.091	0.101	0.092	0.094	0.075	
K _A	0.009	0.013	0.011	0.025	0.017	0.019	0.019	0.014	0.013	0.013	0.011	

注：FeO^T 为全铁氧化物，包含 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 的氧化物，“-”表示低于检测限；T 表示 Si、Al、Fe³⁺、Ti⁴⁺；C 表示 T 中多余的 Al、Fe³⁺、Ti⁴⁺ 和 Mg、Fe²⁺、Mn；B 表示 C 中多余的 Fe²⁺、Mn、Mg、Ca、Na；A 表示 B 中的多余的 Na 和全部的 K。

续表 1

Continued Table 1

样品编号	青白玉						青玉			斑点玉		
	LD-LG-1	LD-LG-2	LD-LG-3	LD-LG-4	LD-LG-5	LD-LG-6	LD-G-1	LD-G-2	LD-G-3	LD-SP-1	LD-SP-2	LD-SP-3
SiO ₂	58.89	58.48	58.87	58.63	58.70	59.03	59.42	59.50	59.09	58.71	58.36	58.58
TiO ₂	0.02	0.04	0.02	0.08	0.08	0.07	0.01	0.08	-	0.08	0.05	0.04
Al ₂ O ₃	0.09	0.09	0.12	0.14	0.15	0.20	0.07	0.03	0.14	0.22	0.27	0.27
Cr ₂ O ₃	0.21	0.11	0.07	0.06	0.10	0.15	0.04	0.07	0.11	0.32	0.39	0.40
FeO ^T	0.29	0.28	0.20	0.33	0.29	0.34	0.06	0.15	0.14	0.27	0.19	0.23
MnO	-	-	-	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	-	0.05	0.09
MgO	25.12	25.16	25.31	24.93	25.10	25.31	25.35	25.41	25.33	24.95	25.07	25.09
CaO	12.33	12.75	12.13	12.57	12.26	11.89	11.79	11.89	12.09	11.82	12.11	11.73
Na ₂ O	0.28	0.29	0.33	0.37	0.34	0.23	0.31	0.31	0.29	0.65	0.54	0.53
K ₂ O	0.08	0.08	0.09	0.07	0.13	0.10	0.09	0.07	0.10	0.23	0.23	0.19
Total	97.32	97.28	97.15	97.19	97.16	97.33	97.15	97.53	97.31	97.25	97.27	97.16
以 23 个氧为计算的氧离子数												
Si	8.006	7.963	7.999	7.982	7.988	8.007	8.047	8.036	8.013	8.000	7.966	7.993
Al ^{IV}	-0.006	0.014	0.001	0.014	0.012	-0.007	-0.047	-0.036	-0.013	0.000	0.029	0.007
Al ^{VI}	0.020	0.000	0.019	0.009	0.012	0.039	0.058	0.041	0.035	0.036	0.014	0.036
Ti	0.002	0.004	0.002	0.008	0.008	0.007	0.001	0.008	0.000	0.008	0.005	0.004
Fe ³⁺	0.033	0.032	0.022	0.038	0.033	0.039	0.006	0.017	0.015	0.031	0.022	0.026
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.000	0.006	0.010
Mg	5.090	5.108	5.128	5.060	5.093	5.117	5.119	5.117	5.120	5.067	5.101	5.104
Ca	1.796	1.860	1.766	1.834	1.788	1.728	1.711	1.721	1.757	1.726	1.771	1.715
Na	0.074	0.077	0.086	0.097	0.089	0.060	0.081	0.081	0.077	0.172	0.143	0.139
K	0.013	0.014	0.016	0.012	0.023	0.017	0.016	0.011	0.018	0.041	0.040	0.034
阳离子总量	15.029	15.072	15.040	15.053	15.048	15.008	14.995	15.000	15.024	15.080	15.098	15.068
Si _T [*]	8.006	7.963	7.999	7.982	7.988	8.007	8.047	8.036	8.013	8.000	7.966	7.993
Al _T	-0.006	0.014	0.001	0.014	0.012	-0.007	-0.047	-0.036	-0.013	0.000	0.029	0.007
Al _C	0.020	0.000	0.019	0.009	0.012	0.039	0.058	0.041	0.035	0.036	0.014	0.036
Fe _C ³⁺	0.033	0.032	0.022	0.038	0.033	0.039	0.006	0.017	0.015	0.031	0.022	0.026
Ti _C	0.002	0.004	0.002	0.008	0.008	0.007	0.001	0.008	0.000	0.008	0.005	0.004
Mg _C	4.944	4.965	4.956	4.945	4.947	4.915	4.935	4.934	4.950	4.925	4.958	4.933
Fe _C ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn _C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe _B ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn _B	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	Mn _B	0.000	0.006
Ca _B	1.796	1.860	1.766	1.834	1.788	1.728	1.711	1.721	1.757	1.726	1.771	1.715
Na _B	0.074	0.053	0.086	0.082	0.089	0.060	0.081	0.081	0.077	0.172	0.143	0.139
Ca _A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na _A	0.074	0.068	0.086	0.072	0.089	0.060	0.081	0.081	0.077	0.172	0.143	0.139
K _A	0.013	0.014	0.016	0.012	0.023	0.017	0.016	0.011	0.018	0.041	0.040	0.034

透闪石 SiO₂ 含量为 58.36% ~ 58.71% ,FeO^T 含量为 0.19% ~ 0.27% ,MgO 含量为 24.95% ~ 25.09% ,CaO 含量为 11.73% ~ 12.11%(表 2)。青白玉中透闪石的 CaO 含量比其他软玉中 CaO 含量高的原因可能是青白玉中透闪石与方解石共生的原因。这与崔文元等(2002)对和田玉研究中给出的透闪石理论值(分别为 SiO₂ 58.80%、MgO 24.60% 和 CaO 13.80%)中 SiO₂、MgO 含量基本吻合。CaO 含量略偏低是罗甸玉中透闪石的化学成分特点。致色元素 FeO^T 含量由高到低排列顺序为青玉、白玉、斑点玉、青白玉及灰白玉,MnO 含量由高到低排列顺

序为青白玉、青玉、白玉、斑点玉及灰白玉,TiO₂ 含量由高到低排列顺序为灰白玉、青玉、白玉、青白玉及斑点玉,Cr₂O₃ 含量由高到低排列顺序为青玉、青白玉、斑点玉、白玉及灰白玉。

(2)透辉石

罗甸玉矿石的电子探针成分分析结果揭示,其中白玉、灰白玉、青白玉、青玉及斑点玉中或多或少均含有透辉石(图 5~9)。白玉中透辉石 SiO₂ 含量为 54.57% ~ 55.15% ,FeO^T 含量为 0.93% ~ 2.69% ,MgO 含量 17.40% ~ 18.91% ,CaO 含量为 21.57% ~ 23.37%(表 2);灰白玉中的透辉石 SiO₂

含量为 53.71% ~ 54.34% , FeO^T 含量为 1.81% ~ 3.58% , MgO 含量为 16.58% ~ 17.62% , CaO 含量为 23.13% ~ 23.69%(表 2);青白玉中透辉石 SiO₂ 含量为 52.87% ~ 54.80% , FeO^T 含量为 1.18% ~ 6.86% , MgO 含量为 14.12% ~ 18.24% , CaO 含量为 23.18% ~ 24.46%(表 2);青玉中的透辉石 SiO₂ 含量为 54.44% ~ 55.10% , FeO^T 含量为 0.60% ~ 1.33% , MgO 含量为 17.95% ~ 18.80% , CaO 含量为 22.37% ~ 23.94%(表 2);斑点玉中的透辉石 SiO₂ 含量为 53.79% ~ 54.32% , FeO^T 含量为 2.29% ~ 3.66% , MgO 含量为 15.81% ~ 17.15% , CaO 含量为 23.22% ~ 23.26%(表 2)。致色元素 FeO^T 含量

由高到低顺序排列为青玉、白玉、灰白玉、青白玉及斑点玉 ;MnO 含量由高到低顺序排列为斑点玉、青玉、白玉、灰白玉及青白玉 ;TiO₂ 含量由高到低顺序排列为白玉、青玉、斑点玉、青白玉及灰白玉 ;Cr₂O₃ 含量由高到低顺序排列为青白玉、白玉、斑点玉、青玉及灰白玉。

透辉石主要特征为青玉明显比其它软玉的 FeO^T 含量高而 MgO 含量明显低的类质同像关系。与姬清海等(1998)对南召透闪石-透辉石给出的透辉石理论值 SiO₂ 55.60%、MgO 18.50%、CaO 25.90% 含量相比 SiO₂ 含量略偏低 ,CaO 含量偏低 ,而灰白玉、青白玉、斑点玉的 MgO 含量也偏低。

表 2 罗甸玉中透辉石的电子探针分析结果(w_B/%) 及氧离子数
Table 2 Electron microprobe analyses(w_B/%) , ion proportions of the representative diopside of Luodian nephrite

样品号	白玉					灰白玉				
	LD-W-1	LD-W-2	LD-W-3	LD-W-4	LD-W-6	LD-GW-1	LD-GW-2	LD-GW-3	LD-GW-4	LD-GW-5
SiO ₂	54.77	55.15	55.06	54.57	54.62	54.34	53.89	53.71	54.32	54.23
TiO ₂	0.04	0.07	0.01	0.08	0.03	0.04	0.05	0.11	0.07	0.07
Al ₂ O ₃	1.35	1.59	1.43	1.82	1.75	0.40	1.17	0.67	1.21	1.35
Cr ₂ O ₃	0.34	0.21	0.13	0.12	0.10	0.55	0.34	0.73	0.60	0.27
FeO ^T	2.16	1.28	2.11	0.93	2.69	3.01	2.87	3.58	2.18	1.81
MnO	0.04	0.04	0.04	0.11	0.08	0.07	0.09	0.16	0.07	0.12
MgO	18.47	18.91	18.51	18.34	17.40	17.18	16.94	16.58	17.36	17.62
CaO	21.57	21.57	22.42	23.37	22.56	23.69	23.60	23.40	23.13	23.36
Na ₂ O	0.64	0.85	0.45	0.56	0.70	0.39	0.51	0.43	0.47	0.57
K ₂ O	0.04	0.02	0.04	—	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01
Total	99.44	99.69	100.20	99.90	99.93	99.68	99.48	99.42	99.45	99.41
以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准计算										
Si	1.985	1.985	1.982	1.967	1.979	1.987	1.973	1.977	1.980	1.975
Al ^{IV}	0.015	0.015	0.018	0.033	0.021	0.011	0.027	0.011	0.020	0.024
Al ^{VI}	0.043	0.052	0.042	0.045	0.054	0.006	0.024	0.009	0.032	0.034
Ti	0.001	0.002	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002
Cr	0.010	0.006	0.004	0.003	0.003	0.016	0.010	0.021	0.017	0.008
Fe ³⁺	0.021	0.024	0.007	0.029	0.019	0.027	0.041	0.033	0.016	0.031
Fe ²⁺	0.045	0.023	0.056	0.002	0.062	0.065	0.047	0.077	0.050	0.024
Mn	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002	0.003	0.005	0.002	0.004
Mg	0.998	1.015	0.993	0.986	0.940	0.936	0.925	0.910	0.943	0.957
Ca	0.838	0.832	0.864	0.903	0.876	0.928	0.926	0.923	0.904	0.912
Na	0.045	0.060	0.032	0.039	0.049	0.028	0.036	0.031	0.033	0.040
K	0.002	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000
Wo	43.007	42.757	44.233	46.093	44.940	46.720	46.830	46.643	46.380	46.350
En	51.240	52.150	50.837	50.307	48.233	47.147	46.773	45.977	48.387	48.613
Fs	3.433	2.033	3.313	1.600	4.303	4.737	4.567	5.807	3.517	2.977
Ac	2.317	3.060	1.620	2.000	2.523	1.397	1.837	1.567	1.713	2.053
Di	93.721	95.480	93.882	96.653	91.810	90.863	91.103	88.780	93.241	94.240
Hd	6.154	4.409	6.013	3.033	7.960	8.915	8.620	10.722	6.543	5.377
Jo	0.142	0.117	0.118	0.338	0.256	0.222	0.276	0.497	0.216	0.383

注：FeO^T 为全铁氧化物，包含 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 的氧化物；— 表示低于检测限；Wo—硅灰石；En—顽火辉石；Fs—铁辉石；Ac—霞石；Di—透辉石；Hd—钙铁辉石；Jo—钙锰辉石。

续表 2
Continued Table 2

样品号	青白玉						青玉			斑点玉		
	LD-LG-1	LD-LG-2	LD-LG-3	LD-LG-4	LD-LG-5	LD-LG-6	LD-G-1	LD-G-2	LD-G-3	LD-SP-1	LD-SP-2	LD-SP-3
SiO ₂	54.11	54.50	54.64	54.80	52.87	54.08	55.10	54.55	54.44	54.27	54.32	53.79
TiO ₂	0.02	0.02	0.08	0.08	0.06	0.09	0.13	—	0.01	0.07	0.03	0.04
Al ₂ O ₃	1.85	1.33	1.01	1.15	1.71	0.95	1.07	1.68	1.66	2.01	1.35	2.26
Cr ₂ O ₃	0.05	0.08	0.12	0.08	0.04	0.06	0.62	0.10	0.44	0.12	0.19	0.23
FeO ^T	2.89	2.91	1.22	1.18	6.86	1.32	1.33	1.24	0.60	2.29	3.12	3.66
MnO	0.05	—	0.36	0.09	0.08	0.02	0.03	0.08	0.03	0.04	0.02	0.04
MgO	16.54	17.11	18.08	18.18	14.12	18.24	18.80	17.95	18.05	17.15	16.87	15.81
CaO	23.46	23.29	23.21	23.26	23.18	24.38	22.37	23.58	23.94	23.22	23.26	23.22
Na ₂ O	0.67	0.57	0.64	0.59	0.66	0.20	0.60	0.60	0.43	0.66	0.70	0.89
K ₂ O	0.03	0.01	0.01	0.02	—	0.04	—	0.01	0.02	—	0.02	—
Total	99.66	99.83	9.37	99.43	99.60	99.39	100.05	99.78	99.63	99.84	99.90	99.94
以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准计算												
Si	1.974	1.983	1.986	1.986	1.967	1.970	1.982 857	1.972 84	1.969 043	1.969	1.979	1.964
Al ^{IV}	0.026	0.017	0.014	0.014	0.033	0.028	0.017	0.027	0.031	0.031	0.021	0.036
Al ^{VI}	0.053	0.040	0.029	0.036	0.042	0.014	0.028	0.045	0.040	0.055	0.037	0.062
Ti	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
Cr	0.001	0.002	0.004	0.002	0.001	0.002	0.018	0.003	0.013	0.003	0.006	0.007
Fe ³⁺	0.029	0.024	0.034	0.021	0.051	0.043	0.012	0.033	0.019	0.023	0.042	0.043
Fe ²⁺	0.059	0.065	0.008	0.015	0.162	0.003	0.027	0.005	0.006	0.046	0.053	0.069
Mn	0.002	0.000	0.011	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
Mg	0.900	0.928	0.979	0.982	0.783	0.991	1.009	0.968	0.973	0.928	0.916	0.860
Ca	0.917	0.908	0.904	0.903	0.924	0.952	0.863	0.914	0.928	0.903	0.908	0.908
Na	0.047	0.040	0.045	0.042	0.048	0.014	0.042	0.042	0.030	0.047	0.050	0.063
K	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
Wo	46.950	46.213	45.743	45.943	46.903	47.647	44.133	46.553	47.557	46.347	46.110	46.713
En	46.053	47.233	49.557	49.983	39.753	49.593	51.627	49.297	49.897	47.640	46.490	44.250
Fs	4.583	4.497	2.423	1.957	10.910	2.047	2.083	2.020	0.977	3.620	4.870	5.787
Ac	2.413	2.057	2.270	2.123	2.427	0.707	2.157	2.130	1.567	2.397	2.527	3.253
Di	90.963	91.317	94.880	96.222	78.515	95.517	96.102	96.065	97.425	92.924	90.426	88.440
Hd	8.873	8.683	4.052	3.512	21.247	4.414	3.816	3.701	2.481	6.961	9.512	11.444
Jo	0.181	0.000	1.167	0.279	0.337	0.076	0.082	0.234	0.094	0.115	0.062	0.116

5 讨论

刘飞等(2009)研究表明,新疆和田、江苏溧阳、青海格尔木、辽宁岫岩、河南栾川、四川龙溪、福建南平等大多数的中国软玉矿床是与中酸性岩或者碳酸盐岩有关的软玉矿床,青海三岔口、四川石棉矿床是与基性-超基性岩有关的矿床,但贵州罗甸是产在基性侵入岩与灰岩接触带而比较特殊的软玉矿床(杨林等,2012;黄勇等,2012)。根据 Leake 等(1997)的 B 位置的氧离子(Na⁺、Li⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Mn²⁺)角闪石分类方法,可知本区角闪石属于钙质角闪石组[(Ca + Na)_B ≥ 1.00, Na_B < 0.50, 通常 Ca_B > 1.50] (图 10a),进一步分类投图,结果显示其属于

透闪石(图 10b),而在钙质角闪石的 Ti - Si 变异图及成因类型划分[Si ≥ 0.70 和 Mg/(Mg + Fe²⁺) ≥ 0.90]图解中,数据全部落在蚀变和交代角闪石区域(图 11)。这种结果与前人(杨林等,2012;黄勇等,2012)研究得出罗甸玉矿床成因一致,即罗甸玉矿床为基性辉绿岩与钙质碳酸盐岩接触变质带产出,在成矿过程中,基性岩体侵入时,灰岩提供的 Ca、Mg 与气液流体提供的 Si、K、Na、Al 等物质相互作用形成新类型软玉矿床。Kalkowsky(1906)和 BamBauer 等(1969)提出透辉石与软玉有密切的关系。Kim 等(1986)提出透辉石是不纯软玉的主要成分。根据电子探针分析、氧离子数及端员组分结果,将罗甸玉的主要元素对透闪石理论值(分别为 SiO₂ 58.80%、MgO 24.60%和 CaO 13.80%)相比,SiO₂、MgO 含量基

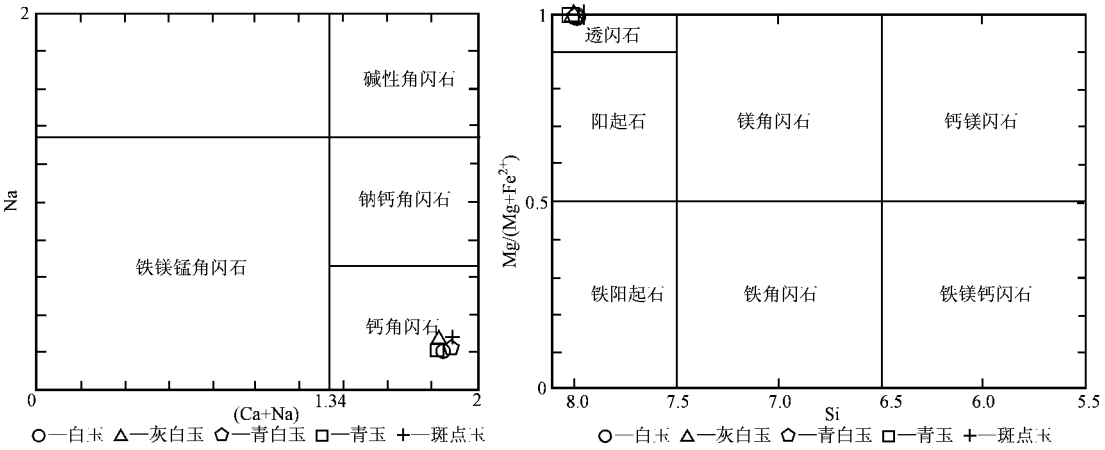
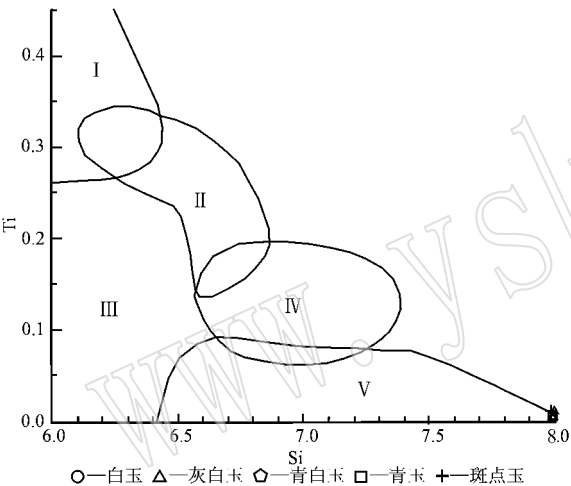


图 10 罗甸玉角闪石成分分类图(据 Leake 等 , 1997)

Fig. 10 Amphibole composition classification(Leake *et al.* , 1997)



○—白玉 △—灰白玉 ◇—青白玉 □—青玉 +—斑点玉
I. 基性超基性侵入岩中的角闪石; II. 中性火山岩中的角闪石; III. 各种变质岩中的角闪石; IV. 酸性侵入岩中的角闪石; V. 蚀变和交代角闪石(底图照马昌前等,1994)

图 11 钙质角闪石的 Ti - Si 变异图及成因类型划分

Fig. 11 Ti - Si diagram of calcic amphiboles and their genetic classification from Luodian nephrite

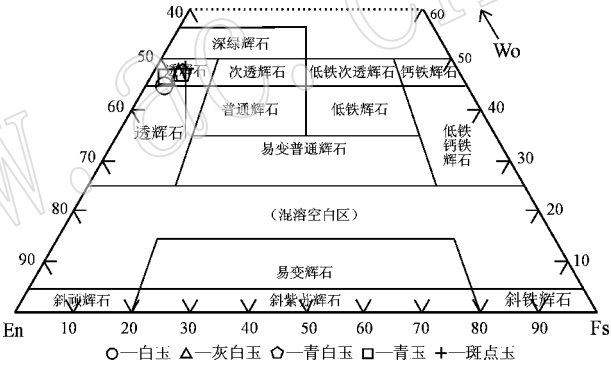


图 12 罗甸玉矿床辉石的 Wo - En - Fs 分类图解
(据 Troger , 1971)

Fig.12 Wo - En - Fs diagram of diopside classification from Luodian nephrite(Troger , 1971)

Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—铁辉石

Wo—wollastonite; En—enstatite; Fs—ferrosilite

本吻合 ,CaO 含量略偏低。罗甸玉的主要元素与透辉石理论值(分别为 SiO₂ 此 55.60%、MgO 18.50%、CaO 25.90%)相比 ,SiO₂ 含量略偏低 ,CaO 含量偏低 ,而灰白玉、青白玉、斑点玉的 MgO 含量也偏低。按 Tröger(1971)的单斜辉石中 Wd(硅灰石)-En(顽火辉石)-Fs(铁辉石)的端员组分的辉石分类(图 12),进一步确定罗甸玉中的辉石属于透辉石 (Di_{100~75}Hd_{0~25}),而在青白玉中还产出次透辉石 (Di_{75~50}Hd_{25~50})。

那宝成等(2008)、王永亚等(2012)、彭志勤等(2013)研究表明致色元素 Fe、Mn、Ti、Cr 是导致软玉颜色多样性的主要因素 ,随着致色元素含量

的增加 ,玉石的颜色逐渐加深 ,但是本文罗甸玉化学成分结果显示 ,青玉中的致色元素(Fe、Mn、Ti、Cr)含量比白玉中的含量低。Noh 和 Ch(1993)认为玉石的结晶度、结构与不纯矿物的种类及含量比致色元素对玉石颜色的影响更大 ,本文结果很可能验证了他们的认识。

6 结论

(1)偏光显微镜上观察到罗甸玉的结构为纤维状-柱状变晶交织、纤维状-毡状变晶交织、纤维状变晶交织 ;分带现象明显 ,从外部到内部 ,白玉、灰白玉、斑点玉中透闪石和透辉石颗粒由大变小 ,青白玉

中透闪石和透辉石颗粒由大变小再变大,青玉中透闪石的颗粒有变大的趋势。

(2) 本区产出的角闪石属于蚀变和交代中钙质角闪石组的透闪石,在成矿过程中,基性辉绿岩体侵入时,钙质碳酸盐岩提供的 Ca 、 Mg 与气液流体提供的 Si 、 K 、 Na 、 Al 等物质相互作用,因此软玉中普遍含有辉石,根据电子探针数据与 Ca-Mg-Fe 组合的分类与命名方法判断本区辉石是透辉石与少量次透辉石。

(3) 电子探针分析结果显示,青白玉中的透闪石 CaO 含量比其它软玉高的原因可能是其与方解石共生,与透闪石理论值相比, SiO_2 、 MgO 含量基本吻合, CaO 含量略偏低,这种现象很可能与透辉石有密切关系。青玉第 5 分带中透辉石的 FeO^{T} 含量明显比其它软玉中的 FeO^{T} 含量高,而 MgO 含量明显偏低,与透辉石理论值相比 SiO_2 含量略偏低, CaO 含量偏低,而灰白玉、青白玉、斑点玉的 MgO 含量也偏低。

(4) 青玉中的致色元素含量比白玉中的致色元素含量低,这可能与罗甸玉的结晶度、结构与不纯矿物的种类及含量有关。

References

Bambauer H U, Taborzky F and Trochum. H D. 1969. Optische Bestimmung der Gesteinsbildenden Minerale[M]. Schweizerbartsche Buchandlung.

Cui Wenyuan and Yang Fuxu. 2002. Study on Hetian jade(tremolite jade) [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(Supp.): 26 ~ 33 (in Chinese with English abstract).

Jin Hwan Noh and Hyun Goo Cho. 1993. Mineralogical Characterization of the Chuncheon Nephrite: Mineral Facies, Mineral Chemistry and Pyroble Structure[J]. J. Miner. Soc. Korea, 6(2): 57 ~ 79.

Huang Yong, Hao Jiaxu, Bai Long, et al. 2012. The discovery of the Rongli nephrite deposit in Guizhou Province and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(4): 612 ~ 620(in Chinese

with English abstract).

Kalkowsky E. 1906. Geologie des Nephrits im südlichen Ligurien[J]. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, (58): 307 ~ 379.

Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. The Canadian Mineralogist, (35): 219 ~ 246.

Soo Jin Kim, Dong Jin Lee and Sween Chang. 1986. A mineralogical and gemological characterization of the Korean Jade from Chuncheon, Korea[J]. The Journal of the Geological Society of Korea, 22(3): 278 ~ 288.

Tröger W E. 1971. Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale[M]. Schweizerbart.

附中文参考文献

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.

范二川, 兰永文, 戴朝辉, 等. 2012. 贵州省罗甸透闪石矿床地质特征及找矿预测[J]. 矿物学报, 32(2): 304 ~ 309.

韩伟, 罗金海, 樊俊雷, 2009. 等. 贵州罗甸晚二叠世辉绿岩及其区域构造意义[J]. 地质论评, 55(6): 795 ~ 803.

黄勇, 郝家栩, 白龙, 等. 2012. 贵州省冗里软玉矿的发现及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 612 ~ 620.

姬清海, 张良, 石文春, 等. 1998. 南召透闪石-透辉石在陶瓷中的应用研究[J]. 矿产保护与利用, (5): 14 ~ 16.

刘飞, 余晓艳. 2009. 中国软玉矿床类型及其矿物学特征[J]. 矿产与地质, 23(4): 375 ~ 380.

马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 中国地质大学出版社, 168 ~ 191.

那宝成, 冷莹莹, 李祥虎. 2008. 软玉致色元素的研究[J]. 超硬材料工程, 20(3): 55 ~ 58.

彭志勤, 胡智文. 2013. 浅谈过渡元素铬在名贵宝石中的致色作用[J]. 科协论坛, (1): 127 ~ 129.

王永亚, 干福熹. 2012. 中国岫岩玉的致色机理及色度学研究[J]. 光谱学与光谱分析, 32(9): 2 305 ~ 2 310.

杨林, 林金辉, 王雷, 等. 2012. 贵州罗甸玉石化学特征及成因意义[J]. 矿物岩石, 32(2): 12 ~ 19.

杨林, 王兵, 王雷, 等. 2011. 贵州罗甸玉特征初步研究[J]. 贵州地质, 28(4): 241 ~ 246.