

第四章 合浦汉墓出土石质珠饰的科学研究

二、各种质地宝玉石珠饰的科技分析

合浦汉墓出土了众多石质珠饰，色彩斑斓，有白色、黄色、紫色、蓝色、绿色及红色等，深浅不一，透明、半透明及不透明皆有，一般被笼统地称为各色水晶。为探明这些宝玉石质珠饰的材质种类及来源，研究人员采用多种现代科技分析技术对不同质地的宝玉石进行科技分析。

(一) 绿柱石和石榴子石珠饰的科技分析

1. 样品简介

所测试宝玉石珠饰主要包括无色透明、浅绿色或浅蓝色透明、紫红色半透明等颜色的各类串饰，其中一串为系领形珠，还包括1件紫红色鱼龙饰，样品具体信息见表4-1，部分典型样品照片见图4-1。

表4-1 合浦汉墓出土绿柱石、石榴子石质珠饰样品简况

样品编号	藏品编号	名称	颜色	时代	出土地点	数量
GXHP-1	000879	串饰	无色、淡蓝色、紫色	东汉早期	黄泥岗 M1	8
GXHP-2	000879	串饰	白色、黄色、淡蓝色、无色	东汉早期	黄泥岗 M1	23
GXHP-7	000145	串饰	黄色、无色、淡蓝色、白色、紫色、淡黄色	西汉晚期	廉州镇北插江盐堆 M1	17
GXHP-10	000265	串饰	深红、蓝色、浅绿色	东汉早期	机械厂 M1	6
GXHP-11	000600	串饰	深红色、深紫色	西汉晚期	凸鬼岭饲料厂 M202	5
GXHP-12	000907	串饰	紫色、浅蓝色、无色	汉	凸鬼岭汽齿厂 M17	13
HP-2	000929	狮形饰	紫红色	汉	环城镇凸鬼岭汽齿厂 M6	1
HP-3	000880	小圆珠	紫红色	新莽	环城镇黄泥岗 M1	1
HP-12	000205	系领形珠串饰	紫红色	汉	1997年氮肥厂 M1	20
HP-14		小珠	褐色	汉	九只岭 M5	1
000598	000598	串饰	多色	新莽	1988年8月29日环城镇红岭头 M3	10
000455	000455	串饰	无色、浅绿色透明	东汉晚期	1986年风门岭 M10	24
000456-3	000456-3	鱼龙饰	紫红色	东汉晚期		1

仅供阅读



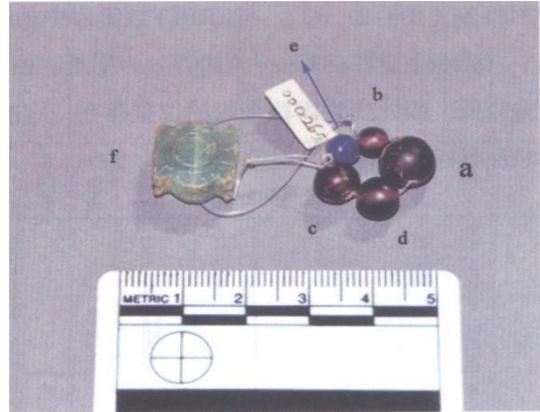
GXHP-1



GXHP-2



GXHP-7



XHP-10



GXHP-11



GXHP-12

图 4-1 合浦汉墓出土的典型宝玉石珠饰

2. 分析结果与讨论

表 4-2 和表 4-3 分别为绿柱石、石榴子石质珠饰的拉曼特征峰，化学成分分析结果见表 4-4。综合物相结构与化学成分分析结果，确定本节所分析的宝玉石质珠饰材质主要为绿柱石 [beryl, $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$]、铁铝榴石 [almandine, $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$]、石英 (quartz, SiO_2) 以及玻璃。此处重点介绍绿柱石和石榴子石质珠饰，石英质珠饰分析详见下文，玻璃珠饰分析详见第五章。

(1) 绿柱石族珠饰

绿柱石族珠饰的拉曼特征峰在 $327\text{ cm}^{-1}\sim 317\text{ cm}^{-1}$ 、 $396\text{ cm}^{-1}\sim 392\text{ cm}^{-1}$ 、 $529\text{ cm}^{-1}\sim 523\text{ cm}^{-1}$ 、 $687\text{ cm}^{-1}\sim 683\text{ cm}^{-1}$ 、 $772\text{ cm}^{-1}\sim 766\text{ cm}^{-1}$ 、 $1014\text{ cm}^{-1}\sim 1006\text{ cm}^{-1}$ 和 $1067\text{ cm}^{-1}\sim 1064\text{ cm}^{-1}$ 。图 4-2 所示的无色透明珠饰 GXHP-2r (图 4-2:a)、浅蓝色珠饰 GXHP-2a (图 4-2:h) 和淡黄色珠饰 GXHP-2e (图 4-2:c)，与 RRUFF 数据库中的绿柱石标样的拉曼图谱 (图 4-2:d) 非常相似。其中，强峰主要在 683 cm^{-1} 或 1067 cm^{-1} 附近。由于该便携式拉曼光谱仪的光谱分辨率为 10 cm^{-1} ，相对较低，因此所测得拉曼峰的位置存在一定的波动。实验所测得的拉曼峰与 RRUFF 数据库中的绿柱石标样的拉曼峰误差在 $5\text{ cm}^{-1}\sim 3\text{ cm}^{-1}$ 。

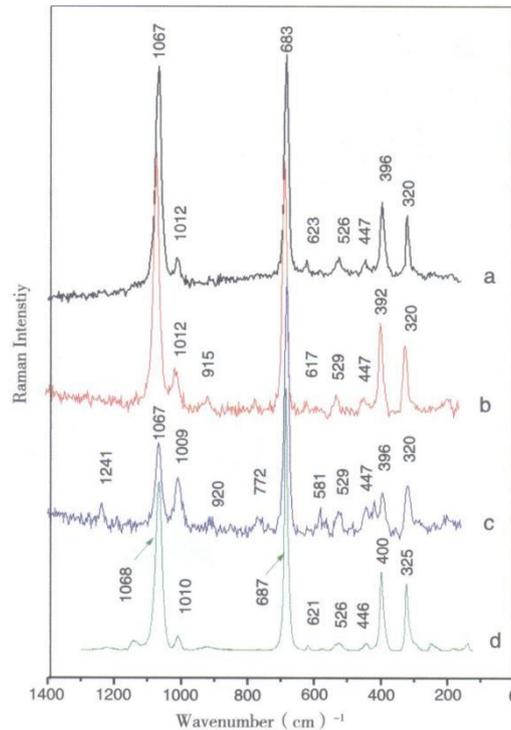


图 4-2 绿柱石族宝石珠饰的拉曼图谱

A. 无色透明的透绿宝石珠饰 GXHP-2r b. 浅蓝色的海蓝宝石珠饰 GXHP-2a
c. 淡黄色的金绿宝石珠饰 GXHP-2e d. RRUFF 数据库中绿柱石标样, ID=R050065, 中国四川, $\lambda=532\text{ nm}$
b 和 c 仅标出与 a 的拉曼波数不同者, 略去相同者

表 4-2 绿柱石族宝石珠饰的主要拉曼特征峰及 RRUFF 数据库中绿柱石标样的参考拉曼峰及其归属

样品编号	色泽	拉曼峰 (cm ⁻¹)											种类	检测仪器			
GXHP-1e	浅蓝色		320m	396s					683vs			1014w	1067vs		海蓝宝石	BTR111	
GXHP-1f	浅蓝色		320m	392s		453vw	523vw		683vs			1014w	1067vs				
GXHP-1g	浅黄色		320m	396s		443vw	523vw		683vs			1009w	1067vs	1238vw	HeLi-odor	BTR111	
GXHP-2a	淡蓝色		320m	392s		447vw	529w		623vw	683vs		915vw	1009w	1067vs		海蓝宝石	BTR111
GXHP-2b	淡蓝色		320s	392s		447vw	529w		623vw	683vs		915vw	1009w	1067vs			
GXHP-2c	淡蓝色		320s	392s		447vw	529w		623vw	683vs			1009w	1067vs			
GXHP-2d	淡蓝色		320s	392s					623vw	683vs			1009w	1067vs			
GXHP-2e	淡黄色		320s	396s		447vw	529w	581vw		683vs	772vw		1009w	1067vs	1241vw	金绿宝石	BTR111
GXHP-2e (第二次)	淡黄色		327s	396w		447vw	529vw		623vw	683vs			1009m	1067s			
GXHP-2f	无色		327s	396w			529w			683vs			1009m	1067vs	1237vw	透绿宝石	BTR111
GXHP-2q	无色		320s	396w				578w		686vs			1006m	1067vs			
GXHP-2q (第二次)	无色		320s	396w				584w		683vs			1013w	1067m	1240w		
GXHP-2r	无色		320s	396s		447vw	526w		623vw	683vs			1012w	1067m			
GXHP-2r (第二次)	无色		320m	396s			529w			683vs			1014w	1067m			
GXHP-2s	无色		320s	396w		443vw	526w			683vs			1014m	1067vs			
GXHP-2t	无色		320s	396vw		447vw	526vw			683vs			1012m	1067s			
GXHP-2u	浅蓝色		320s	392s			523w		623vw	683vs			1009m	1067vs		海蓝宝石	BTR111
GXHP-2v	浅黄色		320m	396s		447vw	526w		623vw	683vs			1009m	1067vs		金绿宝石	BTR111
GXHP-7c	浅蓝色		320m	396s				581w		683vs	766vw		1006m	1067m	1241m	海蓝宝石	BTR111
GXHP-2w	浅蓝色		320s	396s		447vw				683vs			1006m	1067vs			

样品编号	色泽	拉曼峰 (cm ⁻¹)													种类	检测仪器	
GXHP-7a	浅蓝绿色		320m	396m			527vw	581vw		683vs			1012w	1070s		海蓝宝石	BTR111
GXHP-7a (第二次)	浅蓝绿色		320s	392s		443vw	526 w		620 vw	683vs	769vw			1067vs			
GXHP-7b	浅蓝绿色		320m	396s			526w			683vs	769vw		1009m	1064m	1238w		
GXHP-7b (第二次)	浅蓝绿色		317m	396s				581vw		683vs	769vw		1006m	1067m	1241w	Aqu-amarine	BTR111
GXHP-7d	浅蓝色		320s	396s		447vw		581w	617vw	683vs			1012m	1070vs		海蓝宝石	BTR111
GXHP-7f	无色		320s	392w		447vw		581vw		683vs	766vw		1012m	1067vs	1241vw		
GXHP-7g	无色		320m	396s			533vw	581vw		683vs	769vw		1006W	1067s	1243w		
GXHP-7h	无色		320m	396m			526vw	581vw		683vs	766vw		1009m	1064s	1238vw		
GXHP-7i	无色		320s	396s		447 vw	529w	581vw		683vs			1014m	1067vs		透绿宝	BTR111
GXHP-7j	无色		320s	396s			523vw	581vw		683vs			1009m	1067vs			
GXHP-7n	浅蓝色		320s	392s			526vw		623 vw	683vs			1014w	1067vs			
GXHP-7o	浅蓝绿色		320s	392s			526vw			683vs			1009m	1067vs		金绿宝石	BTR111
GXHP-7p	浅黄色		327m	392m			529vw			683vs			1012m	1067s		透绿宝石	BTR111
GXHP-7q	浅蓝绿色		327m	392m		447vw	526vw			683vs	769vw		1006m	1067s		金绿宝石	BTR111
GXHP-12f	浅蓝色		320m	392s			526vw			683vs			1006w	1067vs		海蓝宝石	BTR111
GXHP-12g	浅蓝色		320m	396s				581vw		683vs			1006w	1067vs			
GXHP-12g (第二次)	浅蓝色		320m	392s				584vw		683vs	769vw		995w	1064w	1238w		
GXHP-12g (第三次)	浅蓝色		320m	396s				581vw		683vs			1003w	1067w	1241vw		
GXHP-12h	无色		320s	396m		447vw	526w		623vw	683vs	769vw		1009s	1067vs	241vw	透绿宝石	BTR111
GXHP-12i	无色		320s	396m		443vw	529w			683vs			1012s	1067vs			
GXHP-12j	无色		320m	392s		447vw	529w		620vw	683vs			1009w	1067vs			

样品编号	色泽	拉曼峰 (cm ⁻¹)														种类	检测仪器
		140vw	318s	394s	416w	439vw	526vw			683vs			1007w	1067m			
00598-2-1	无色	140vw	318s	394s	416w	439vw	526vw			683vs			1007w	1067m		透绿柱石	BTR111
000598-3	无色	140vw	318s	394m	421vw		524w			683vs			1009w	1065s		透绿柱石	BTR111
000598-4	无色	138vw	321s	394s	421vw		528w			683vs			1009w	1065s		透绿柱石	BTR111
000598-5	无色	133vw	318s	394s	419vw	439vw				683vs			1003w	1063w	1243vw	透绿柱石	BTR111
000598-6	无色	138w	318s	394s		439vw	526w		623vw	683vs			1007w	1065s		透绿柱石	BTR111
000598-8	无色	140w	318s	394m		446vw	526w			683vs			1011w	1065s		透绿柱石	BTR111
000598-9	无色	136w	321s	392m		446vw	526w			683vs			1011w	1065s		透绿柱石	BTR111
000455-1a	无色		320w	395w						684vs			1010w	1067s	1232w	透绿柱石	SSR-100
000455-1b	无色		320w	395w						684vs			1007w	1064s	1238vw	透绿柱石	SSR-100
000455-2	无色		316w	395m						684vs	896vw			1070s	1238vw	透绿柱石	SSR-100
000455-3	浅蓝色		320m	395m						684vs			1010m	1064w		海蓝宝石	SSR-100
000455-4	无色		320m	392w			527w			684vs			1010m	1064vs	1241vw	透绿柱石	SSR-100
000455-5	无色		323vw	395m						684vs			1006m	1064w	1235vw	透绿柱石	SSR-100
000455-6	无色		323m	395w			530w			684vs			1010m	1064vs		透绿柱石	SSR-100
000455-7	无色		320w	402w						684vs			1004m	1064m		透绿柱石	SSR-100
000455-8	无色		320m	399m			527w			684vs			1010m	1064vs	1241vw	透绿柱石	SSR-100
000455-9	无色		320m	399m			527vw			684vs			1013m	1064vs		透绿柱石	SSR-100
000455-10	无色		320w	399w						684vs			1007vw	1067vs		透绿柱石	SSR-100
000455-11	无色		320w	395m			527vw			684vs			1010vw	1064vs		透绿柱石	SSR-100
000455-12	无色		320w	392m			527vw			684vs			1010m	1067vs		透绿柱石	SSR-100
000455-13	无色		320w	395m			527vw			684vs			1013w	1067vs		透绿柱石	SSR-100
000455-14	无色		323m	395m			527w			684vs			1010m	1067vs		透绿柱石	SSR-100
000455-15a	无色		320m	399m						684vs			1010m	1064s		透绿柱石	SSR-100
000455-15b	无色		320m	395m						684vs			1004m	1064m		透绿柱石	SSR-100
000455-16	无色		320m	395m			523vw			684vs			1013vw	1064vs		透绿柱石	SSR-100
000455-17	无色		320m	395m			523vw			684vs			1010m	1067vs		透绿柱石	SSR-100
000455-18	无色		323m	395w			527vw			684vs			1013m	1064vs		透绿柱石	SSR-100

样品编号	色泽	拉曼峰 (cm ⁻¹)														种类	检测仪器
000455-19	无色		323m	395m			527vw			684vs			1013m	1067vs		透绿柱石	SSR-100
000455-20	浅蓝色		320m	395m			523vw			684vs			1010m	1064vs		海蓝宝石	SSR-100
000455-21	无色		320m	395m			530vw			684vs			1007m	1067vs		透绿柱石	SSR-100
000455-22	无色		320m	395m			523vw			684vs			1010m	1064vs		透绿柱石	SSR-100
000455-23	无色		320m	395m			530vw			684vs			1013w	1067vs		透绿柱石	SSR-100
000455-24	无色		316w	395m			520vw			684vs			1013w	1064w		透绿柱石	SSR-100
Bery1, R-RUFFID =R050065		325m	400m		446vw	526vw		621vw	687vs			1010w	1068s			绿柱石	
Bery1, R-RUFFID =R050121		325s	398m		451vw	531vw		625vw	687vs			1017w	1071vs				
Bery1, R-RUFFID = R050120		326m	401m		447vw	537vw			687vs		921vw	1009w	1068s				
见参考文献 [21, 22]	v satellitering/ E _{2g} +Ag overlap	v satellite ring/ Ag +E _{2g} overlap	v (AL-0), sym. Ring def./E _{1g}	E _{2g}	Ag	v (Be-0), sym. ringdef./E _{1g}	v (Be-0)/ E _{1g} + E _{2g} overlap	E _{2g} +E _{1g}	v (Si-0) ring/ E _{1g}	v (Si-0) ring/Ag	CO ₂ Fermi doublet						

注: S(strong), 强: m(medium), 中等: w(weak), 弱: v(very), 非常

表 4-3 石榴子石族宝石珠饰的主要拉曼特征峰及 RRUFF 数据库中绿柱石标样的参考拉曼峰及其归属

样品编号	色泽	拉曼峰 (cm ⁻¹)											检测仪器	
GXHP-10a	深红色			344s	369w		500w			861vw	915vs	1037vw		BTR111
GXHP-10b	深红色			344s	368m		496w	552w		862vw	915vs	1037vw		BTR111
GXHP-10c	深红色			344s	372w		496w	549vw			915vs	1037vw		BTR111
GXHP-10d	深红色			34s	372w		496w	552w			915vs	1034vw		BTR111
GXHP-11d	深红色			344vw							920s			BTR111
0205-1	深红色	164m	211w	341s	369m	473vw	495w	553w	629vw	862vw	914vs	1037w		BTR111
0205-2	深红色	164m	211w	341s	369m	473vw	495w	553w	629vw	862vw	914vs	1037w	1271vw	BTR111
0205-6	深红色	164m	211w	341s	369m	473vw	495w	553w	629vw	862vw	914vs	1037w	1271vw	BTR111
0205-8	深红色	164m	209w	341s	367m	475vw	495w	553w	629vw	862vw	914vs	1037vw		BTR111
0205-10	深红色	164m	211w	341s	367w	473vw	495m	553m	629w	860vw	914vs	1037w		BTR111
0205-14	深红色	164m	211w	341s	367m	473vw	495w	553w	629vw	862vw	914vs	1035w	1271vw	BTR111
000456-3	紫色			344s		466vs	503w				915vs	1037w		SSR-100
Almandine, RUFFID=100046		169w	213w	347s	371vw		501w	556w	632vw	862vw	916vs	1041w		
见参考文献[30, 33]		T (M)		R(SiO ₄)		v2	v4	v2	v4	v3	v3	v3		

注: s(strong), 强: m(medium), 中等: w(weak), 弱: v(very), 非常

表 4-4 合浦汉墓出土珠饰化学成分半定量和定量分析结果

类别	样品	颜色	主量元素(wt%)													微量元素(μg/g)								测试方法	
			Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	Cr ₂ O ₃	NiO	CuO	Cu	Cr	Ni	Zn	Rb	sr	Ba	Pb		
绿柱石	GXHP-1e	浅蓝色	0.72	1.39	18.96	62.58	n.d.	0.05	n.d.	n.d.	n.d.	1.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	23	666	115	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
	GXHP-1f	浅蓝色	0.86	0.83	19.73	64.11	n.d.	3.16	n.d.	n.d.	n.d.	1.34	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	297	120	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
	GXHP-1g	淡黄色	1.09	0.52	18.93	60.91	0.67	n.d.	n.d.	n.d.	0.03	0.90	n.d.	n.d.	n.d.	435	n.d.	5	344	199	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
	GXHP-2a	浅蓝色	0.66	0.85	19.58	65.22	0.31	n.d.	0.61	n.d.	0.03	1.60	n.d.	n.d.	n.d.	70	n.d.	n.d.	420	127	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
	GXHP-2e	淡黄色	1.01	0.83	19.48	62.68	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	0.86	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	279	127	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
	GXHP-2v	淡黄色	0.78	0.81	21.38	67.63	0.66	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.78	n.d.	n.d.	n.d.	38	n.d.	20	193	226	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
	GXHP-7a	淡蓝绿色	0.38	0.87	21.29	67.67	0.41	0.13	n.d.	n.d.	n.d.	0.86	n.d.	n.d.	n.d.	277	308	n.d.	2951	152	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
	GXHP-7b	淡蓝绿色	0.88	0.69	20.50	65.82	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	0.14	0.72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	552	186	295	210	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
	GXHP-7d	浅蓝色	0.79	0.89	21.55	67.65	0.25	0.04	n.d.	n.d.	0.10	0.56	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	186	552	210	n.d.	n.d.	n.d.	PXRF	
		理论组分		Be014.10	19	66.9																			
铁铝榴石	GXHP-10-a	深红色	0.84	2.76	15.45	39.93	n.d.	0.05	0.59	n.d.	0.88	39.49	n.d.	n.d.	n.d.	191	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	40	67	PXRF	
	GXHP-10-c	深红色	0.78	3.13	14.87	40.31	n.d.	n.d.	0.39	n.d.	0.84	39.68	n.d.	n.d.	n.d.	150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	34	96	PXRF	
	HP-2		n.d.	n.d.	23.32	36.4	n.d.	0.12	128	0.49	1.07	36.62	0.13	n.d.	0.09	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	PIXE
	HP-3		n.d.	n.d.	22.52	34.86	n.d.	0.05	039	0.53	1.06	39.41	0.04	n.d.	0.08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	PIXE
	HP-12		n.d.	n.d.	20.41	32.44	n.d.	0.05	0.65	0.03	1.64	44.34	0.03	n.d.	0.02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	PIXE
	HP-14		n.d.	n.d.	24.54	41.39	0.02	0.04	0.57	0.03	0.80	32.21	0.02	n.d.	0.02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	PIXE
	HP-12 大		n.d.	5.84	18.78	35.06	0.32	n.d.	n.d.	n.d.	1.06	37.71	n.d.	n.d.	0.05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	HXRF
		理论组分			20.48	36.21						43.3													

注：“n.d.”即未检出(not determined)：表中的氧化铁为金铁(FeO+Fe₂O₃)，以FeO的形式列出

低频区 ($1200\text{ cm}^{-1}\sim 100\text{ cm}^{-1}$) 的拉曼峰归属于 M-O 的振动 (M: metal, 指金属元素), 如与 Be-O 和 Al-O 振动, 有部分重叠的 Si-O 键的振动。Charoy 等人 and Kloprogge 等人将 $1014\text{ cm}^{-1}\sim 1006\text{ cm}^{-1}$ 和 $1067\text{ cm}^{-1}\sim 1064\text{ cm}^{-1}$ 区域的振动峰归属于 Si-O 键的振动, 将 617 cm^{-1} 与 623 cm^{-1} 之间的拉曼峰及其在 $327\text{ cm}^{-1}\sim 317\text{ cm}^{-1}$ 和 $396\text{ cm}^{-1}\sim 392\text{ cm}^{-1}$ 之间的拉曼附属峰归因于 Si-O 键的对称环变形振动; 将 $529\text{ cm}^{-1}\sim 523\text{ cm}^{-1}$ 的拉曼峰归因于 ν (Al-O) 键的伸缩振动; 将 686 cm^{-1} 和 $772\text{ cm}^{-1}\sim 766\text{ cm}^{-1}$ 区域的拉曼峰归属于 ν (Be-O) 键的伸缩振动。^[18,19]

绿柱石是一种六方晶系的环状铍-铝硅酸盐矿物, 其化学式为 $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ 。纯净的绿柱石, 也叫透绿柱石 (goshenite), 无色透明。杂质能够给绿柱石带来鲜艳的颜色, 如绿色的祖母绿 (emerald)、蓝色的海蓝宝石 (aquamarine)、黄色的金绿柱石 (heliodor)、红色的互绿柱石和粉红色的铯绿柱石 (Morganite)。^[20] 据 Mihalyuk 和 Lett 研究, 绿柱石族矿物中的铁 (Fe)、铬 (Cr)、钒 (V) 和锰 (Mn) 等的离子会产生多种色彩。^[21] 祖母绿的绿色是由于含有铬离子而不含钒离子, 锰离子使得铯绿柱石呈粉红色, 而黄色的金绿柱石和蓝色的海蓝宝石都是由铁离子造成的, 因所含铁离子的价态及不同比例而呈现出红色或蓝色。^[22]

图 4-3 为合浦汉墓出土的不同类型绿柱石族质珠饰。

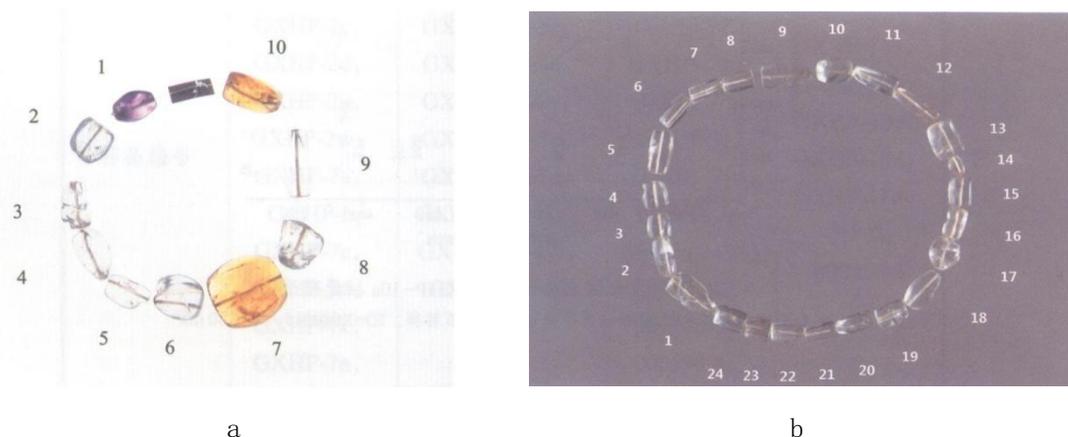


图 4-3 合浦汉墓出土绿柱石族珠饰样品照片

a. 000598, 其中 2~6、8、9 为透绿柱石 b. 000455, 其中 3、20 为海蓝宝石, 其余为透绿柱石

所分析的蓝色、浅蓝色和浅黄色的珠饰主要化学成分含量范围比较接近。除主要元素硅 (Si) 和铝 (Al) 外, 所有样品都含有少量的铁 (Fe), FeO 含量为 $0.56\%\sim 1.60\%$ (表 4-4)。由于 PXRf 只能检测到 Na 及原子序号大于 Na 的元素, 因此绿柱石类珠饰中的铍 (Be) 的含量未能检测出。浅蓝-绿色珠饰 GXHP-7a 和 GXHP-7b 中含有微量元素铬 (Cr) ($308\sim 552\text{ }\mu\text{g/g}$)。

(2) 石榴子石质珠饰

石榴子石质珠饰拉曼特征峰主要位于 164 cm^{-1} 、 211 cm^{-1} 、 $367\text{ cm}^{-1}\sim 341\text{ cm}^{-1}$ 、 $475\text{ cm}^{-1}\sim 466\text{ cm}^{-1}$ 、 $503\text{ cm}^{-1}\sim 495\text{ cm}^{-1}$ 、 553 cm^{-1} 、 629 cm^{-1} 、 $920\text{ cm}^{-1}\sim 915\text{ cm}^{-1}$ 、 $1037\text{ cm}^{-1}\sim 1035\text{ cm}^{-1}$ 等位置附近 (表 4-3)。图 4-4 为样品 GXHP-10a 和 RRUFF 数据库中铁铝榴石标样的拉曼图谱, 图 4-5 为系领形和鱼龙饰石榴子石的拉曼特征图谱。据 Hofmeister 等人 and Kolesov 等人研究,

在 915cm^{-1} 与 920cm^{-1} 之间的最强拉曼峰归因于 $\nu_3(\text{Si-O})$ 的对称伸缩振动, 在 164cm^{-1} 和 211cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于 $T(\text{M})$ 振动, 在 341cm^{-1} 、 344cm^{-1} 和 367cm^{-1} 附近的次强峰归属于 $R(\text{SiO}_4)$ 四面体的旋转振动, 466cm^{-1} 、 475cm^{-1} 和 553cm^{-1} 附近中等强度的拉曼峰是由 $\nu_2(\text{O-Si-O})$ 的对称弯曲振动引起的, 在 495cm^{-1} 、 503cm^{-1} 和 629cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于 $\nu_4(\text{O-Si-O})$ 反对称弯曲振动, 而 1035cm^{-1} 和 1037cm^{-1} 附近弱的拉曼峰归因于 $\nu_3(\text{O-Si-O})$ 的反对称伸绵振动。 [23, 24]

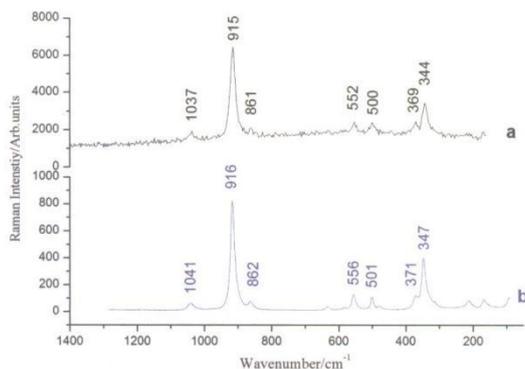


图 4-4 铁铝榴石珠饰 GXHP-10a 拉曼图谱

a. GXHP-10a b. RRUFF 数据库中铁铝榴石标样. ID=X080015. $\lambda=780\text{nm}$

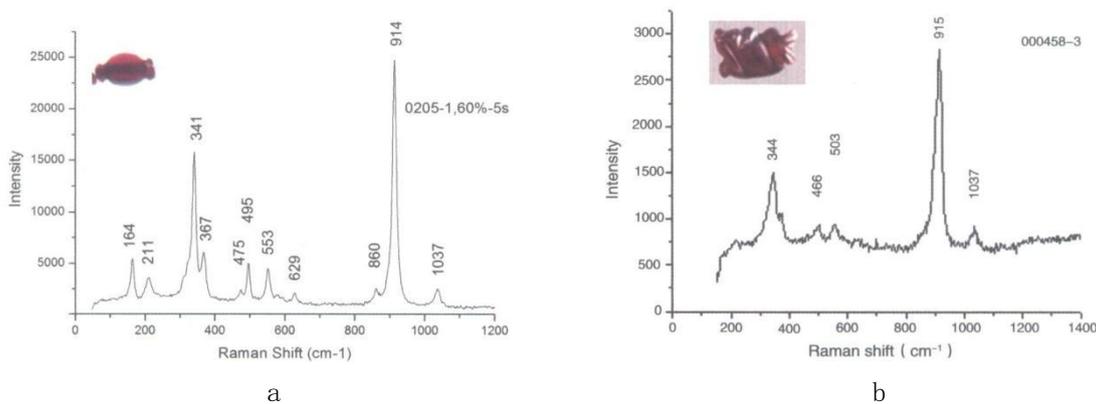


图 4-5 系领形和鱼龙饰石榴子石珠饰拉曼图谱

a. 系领形石榴子石(000205) b. 鱼龙饰石榴子石(000456-3)

化学成分分析结果表明, 所分析的石榴子石主要组分为 Al_2O_3 、 SiO_2 和 FeO , 其含量与铁铝榴石 $[\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3]$ 的理论化学成分比较接近(表 4-4)。铁铝榴石以紫色为主要特征, 颜色由深褐色到深紫色变化。 Fe^{2+} 是铁铝榴石呈现与众不同的紫色的主要原因。

综上所述, 所分析的绿柱石、石榴子石质珠饰中, 74 颗属于绿柱石族矿物, 7 颗属于铁铝榴石族矿物。依照宝石学的命名习惯, 结合这些珠饰的颜色, 又可细分为 16 颗海蓝宝石(aquamarine)、8 颗金绿柱石(heliodor)、43 颗透绿柱石(goshenite) (表 4-5)。

表 4-5 所分析的绿柱石、石榴子石质珠饰数量统计

材质	绿柱石族			铁铝榴石族
	海蓝宝石	金绿柱石	透绿柱石	
数量 (颗)	16	8	43	7
样品编号	GXHP-1e, GXHP-1f, GXHP-2a, GXHP-2b, GXHP-2c, GXHP-2d, GXHP-2u, GXHP-2w, GXHP-7a, GXHP-b, GXHP-7c, GXHP-7d, GXHP-7k, GXHP-7n, GXHP-12f, GXHP-12	GXHP-1g, GXHP-2e, GXHP-2v, GXHP-70, GXHP-7q, GXHP-12h, GXHP-12i, GXHP-121	GXHP-1h, GXHP-2f, GXHP-2q, GXHP-2r, GXHP-2s, GXHP- 2t, GXHP-7f, GXHP-7g, GXHP-7h, GXHP-7i, GXHP-7j, GXHP-7p; 000455 (24 颗); 000598-2, 000598-3, 000598-4, 000598-5, 000598-6, 000598-8, 000598-9	GXHP-10a, GXHP-10b, GXHP-10c, GXHP-10d, GXHP-11d; HP-2, 000456-3

(二) 九只岭汉墓出土的石榴子石质珠饰的综合分析

石榴子石质珠饰是海上丝绸之路贸易的一类重要半宝石珠饰。目前，在合浦考古发掘的西汉晚期至东汉的多个墓葬中发现了球形、系领状、狮形、鱼龙等形状的石榴子石珠饰。^[25]石榴子石有铝榴石和钙榴石两个系列，铝系石榴子石有铁铝榴石、镁铝榴石、锰铝榴石等，中国两广地区出土的汉代石榴子石珠饰经测试分析均为铁铝榴石质地。

以合浦九只岭汉墓出土的 8 颗石榴子石珠为例，采用便携式能量色散型 X 射线荧光分析仪 (PXRF)、可移动式 LabRAMXploRA 型共焦激光显微拉曼光谱仪以及基恩士 VHX-5000 型超景深三维显微系统三种方法对紫色珠饰进行综合科学分析，从矿物学特征、包裹体组合、痕迹信息及加工技法等方面，结合近年考古学和科技研究进展，探讨其制作技术和原料来源问题，阐述其对海上丝绸之路贸易的历史意义。

1. 合浦九只岭 M5 出土的石榴子石珠

所分析的 8 颗石榴子石珠 (图 4-6) 均出土于广西合浦县九只岭 M5。合浦汉墓已发掘

近千座墓，其中出土的金银、琉璃、水晶和玛瑙等饰品的总数超过1万枚。^[26]九只岭汉墓是一批典型的汉代墓葬，仅M5一座就出土串珠1380枚，还有3座墓出土的均超过千枚。M5为东汉前期砖木合构墓，是这批墓葬中保存最好的一座墓。^[27]这批墓葬随葬器物有陶器、青铜器、漆器以及一大批黄金、琉璃水晶和玛瑙等饰品，饰品材质和种类繁多，质地上乘，在长江以南地区亦属罕见。选用的样品信息见表4-6。

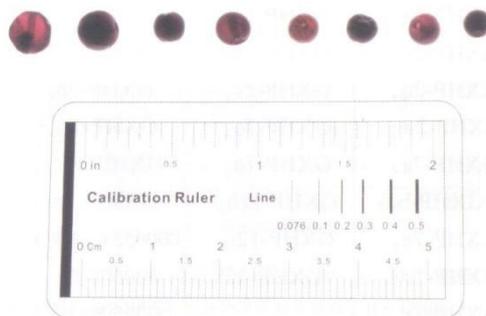


图4-6 合浦九只岭M5出土的石榴子石珠照片
自左至右依次为G1、G2、G3、G4A、G4B、G4C、G4D、G4E

表4-6 合浦九只岭M5出土东汉紫色宝石珠饰样品的基本情况

样品编号	器物	外观描述
G1	紫红色椭圆形珠	透明，宽 6265 μm，高 6474 μm，孔 1 直径 954 μm，孔 2 直径 1292 μm
G2	紫红色圆形珠	半透明，内含物多，直径 6011 μm，孔 1 直径 1131 μm，孔 2 直径 1025 μm
G3	紫红色圆形珠	半透明，内含物多，直径 4772 μm，孔 1 直径 1212 μm，孔 2 直径 1293 μm
G4A	紫红色扁圆形珠	透明，直径 4976 μm，孔 1 直径 1006 μm，孔 2 直径 1009 μm
G4B	紫红色圆形珠	半透明，内含物多，直径 4423 μm，孔 1 直径 1054 μm，孔 2 直径 1088 μm
G4C	紫红色圆形珠	半透明，直径 4663 μm，孔 1 直径 1450 μm，孔 2 直径 1120 μm
G4D	紫红色扁圆形珠（东汉）	透明，直径 4556 μm，孔 1 直径 1028 μm，孔 2 直径 965 μm
G4E	紫红色圆形珠	半透明，有深裂纹，直径 4196 μm，孔 1 直径 928 μm，孔 2 直径 1017 μm

注：珠饰尺寸、孔径在基恩士 VHX-5000 型显微系统下测得

2. 主要化学成分和物相

(1) 化学成分分析结果

化学成分分析是鉴别和研究宝石的重要手段之一，分析结果有助于鉴定宝石的材质和分析矿料来源。实验采用PXRF对样品进行化学成分定量分析（见表4-7）。天然的石榴子石的化学分子式为 $A_3B_2(SiO_4)_3$ ，其中A为 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ca^{2+} 等二价阳离子，B为 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 等三价阳离子。石榴石族宝石存在广泛的类质同象替代现象，因此化学成分和含量变化范围很宽，常见六大类石榴子石的理论化学元素含量参见表4-8。从表4-7可以看出，这批石榴子石样品 Al_2O_3 的含量为13.93%~16.64%， SiO_2 的含量为36.26%~44.55%， FeO 的含量为30.61%~38.40%， MgO 的含量为2.33%~7.41%， MnO 的含量为0.86%~2.20%，其主

量成分与铁铝榴石的 $[\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3]$ 的理论化学成分含量相近。此外，还检测到 Cr、Ni、Cu、Zn 等微量元素。

编号	主量元素(%)										微量元素(ppm)						
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	sr	Ba	Pb
G1	0.37	3.30	16.64	36.26	38.40	2.74	0.00	0.10	2.20	219	76	363	15	n. d.	n. d.	26	98
G2	1.03	3.27	16.36	40.02	37.84	0.00	0.55	0.07	0.86	104	16	342	20	n. d.	n. d.	34	58
G3	0.93	2.64	15.99	41.96	36.98	0.00	0.17	0.44	0.88	367	32	345	59	2.00	n. d.	31	51
G4A	1.44	2.80	13.93	44.55	36.25	0.00	0.07	0.01	0.95	233	101	298	47	n. d.	n. d.	28	39
G4B	0.96	7.41	15.86	42.11	30.61	0.00	0.97	0.56	1.52	1964	128	194	n. d.	n. d.	n. d.	28	67
G4C	1.20	2.73	14.50	42.39	36.49	0.00	0.12	0.94	1.62	81	46	335	77	n. d.	n. d.	27	57
G4D	1.29	2.50	15.59	41.61	37.10	0.00	0.82	0.00	1.10	190	37	262	n. d.	2	n. d.	20	63
G4E	1.24	2.33	14.25	43.58	37.30	0.00	0.20	0.01	1.09	64	n. d.	204	63	n. d.	n. d.	17	74

表 4-7 九只岭汉墓出土的石榴子石样品化学成分分析结果

注：“n. d.”表示此种组分含量低于检出限，未检出

表 4-8 六大类石榴子石的理论化学元素含量

种类	氧化物含量(%)							
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	Fe ₃ O ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO
Pyr	29.99	25.29	44.71	—	—	—	—	—
Alm	—	20.49	36.21	43.30	—	—	—	—
Spe	—	20.49	36.21	—	—	—	—	42.99
Gro	—	22.64	40.02	—	—	37.35	—	—
And	—	—	35.47	—	31.42	33.11	—	—
Uva	—	—	36.02	—	—	33.62	30.37	—

注：Pyr=镁铝榴石，Alm=铁铝榴石，Spe=锰铝榴石，Gro=钙铝榴石，And=钙铁榴石，Uva=钙铬榴石，“—”表示不存在

纯净端元组分石榴子石矿物在自然界分布很少。就铝系石榴石来说，半径较小的二价阳离子如 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等之间易发生完全的同象替代，即不同端元组分能以任意比例混合，混合比例主要与地质环境中的压力条件有关，石榴子石在形成过程中 Mg^{2+} 进入品格时需要很大的压力条件， Fe^{2+} 次之， Mn^{2+} 所需的压力较小， Ca^{2+} 需要的压力条件最小。^[28]

样品 G4B 的 MgO 含量为 7.41%，属 8 件样品中含量最高者；FeO 含量为 30.61%，属 8 件样品中含量最低者，说明此件样品中 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 发生了一定程度的完全同象替代，即含有较多的镁铝榴石组分。这批石榴子石样品的 FeO 含量很高，都含有少量的 MgO 和 MnO，

除样品 G4B 外，其他样品的 MgO 的含量都在 2.80% 左右，MnO 的含量很低，平均值 1.28%，最大值为 2.20%；每个样品的 MgO 的含量均高于 MnO 的含量，且 CaO 的含量低于 1%，反映出它们的成分体系和成矿条件具有较高一致性。

综合样品的 MgO、FeO、MnO 和 CaO 的含量，初步判断除样品 G4B 属于铁铝-镁铝榴石型石榴子石外，其他样品均属于富铁铝榴石型石榴子石。

(2) 拉曼光谱物相分析结果

PXRF 定量分析只是获取了所测区域内的平均化学成分特征，无法确定珠饰的物相和矿物种类，检测结果需要拉曼光谱定性分析来补充和印证。拉曼光谱不仅能定性分析石榴子石的种属，而且还能辅助判别石榴子石中的金属离子含量比例。^[29] 铝系榴石是等轴晶系的单晶体宝石，理论上随单一端元组分不同，特征拉曼位移有显著区别。铝系榴石中， $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体的 Si-O 伸缩振动和 Si-O 弯曲振动所产生的拉曼位移，会因各端元组分的金属阳离子种类的不同发生规律性偏移，天然产出的石榴子石多是几个端元组分的混合物，因此峰值的强度取决于所含端元组分的摩尔质量。^[30]

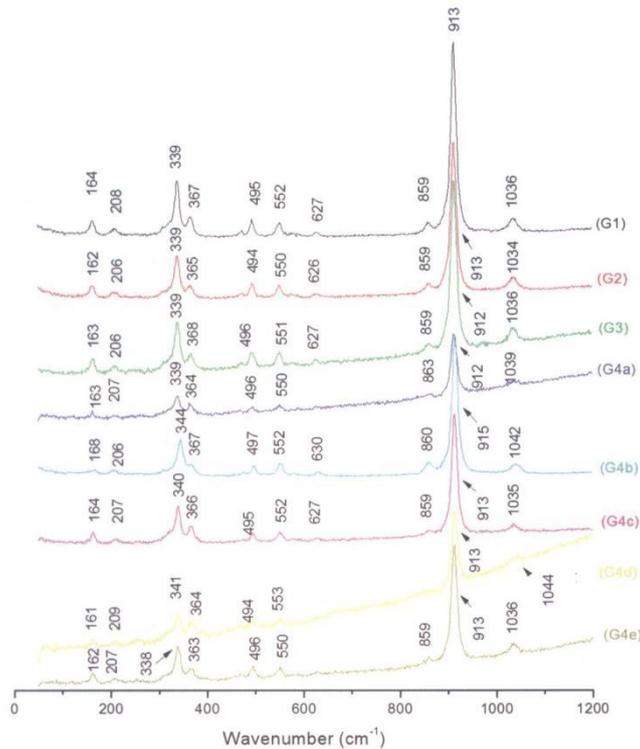


图 4-7 合浦九只岭 M5 出土的石榴子石珠样品的拉曼图谱

本实验利用 LabRAMXploRA 型共焦激光显微拉曼光谱仪，选用 532 nm 的激发光源进行拉曼光谱分析，分析结果见图 4-7。上述拉曼光谱分析结果中，在 912 cm^{-1} 与 915 cm^{-1} 的最强拉曼峰归属于 Si-O 对称伸缩振动产生的拉曼位移。 553 cm^{-1} ~ 550 cm^{-1} 中等强度的拉曼峰是由 (O-Si-O) 的对称弯曲振动引起的。在 368 cm^{-1} ，和 339 cm^{-1} 的次强峰归属于 $[\text{SiO}_4]^{4-}$

四面体的旋转振动。在 $1044\text{ cm}^{-1}\sim 1034\text{ cm}^{-1}$ 和 $497\text{ cm}^{-1}\sim 494\text{ cm}^{-1}$ 范围内弱的拉曼峰分别归因于 (O-Si-O) 的反对称伸缩振动和 (O-Si-O) 反对称弯曲振动。

从拉曼位移与晶格常数关系可知，随着晶格常数变小，分别归属于 (Si-O) 对称伸缩振动和 (O-Si-O) 弯曲振动的拉曼位移明显向长波方向偏移。^[31] 在样品 G4B 的拉曼光谱中，(Si-O) 对称伸缩振动产生的拉曼特征峰位于 915 cm^{-1} 处，发生了明显的右移，但 (O-Si-O) 弯曲振动产生的拉曼特征峰 552 cm^{-1} 未见明显偏移，说明样品 CAB 中 Mg^{2+} 替代了部分 Fe^{2+} ，应与镁铝榴石组分存在有关，与前文所获得的化学成分结果一致。 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 。旋转振动和 (O-Si-O) 对称伸缩振动产生的拉曼特征峰发生的偏移原因尚不明确，但样品 CAD 可能受到样品表面状态的影响，导致某些弱吸收未能完全显示。根据比较纯净端元铁铝榴石的拉曼特征峰，认为石榴子石在 1036 cm^{-1} 、 912 cm^{-1} 、 860 cm^{-1} 、 552 cm^{-1} 、 339 cm^{-1} 附近处出现强吸收峰。^[32] 结合此次 PXRF 分析结果，判定九只岭 M5 出土的这 8 颗紫红色石榴子石样品属于铁铝榴石亚种。

3. 包裹体分析

九只岭 M5 出土的这 8 颗石榴子石珠饰中均检测出了包裹体，但由于包裹体分布不均，表层分布有限，为获取更确切和丰富的包裹体信息，选取了 G1、G2、G3、G4A 和 G4B 等 5 件样品，先进行了局部的磨抛处理，然后在处理后的光滑表面上进行共焦显微拉曼光谱分析。通过与仪器数据中相关标准拉曼图谱比对，对样品中的包裹体进行了识别，典型拉曼图谱见图 4-8 至图 4-11，详细分析结果见表 4-9。

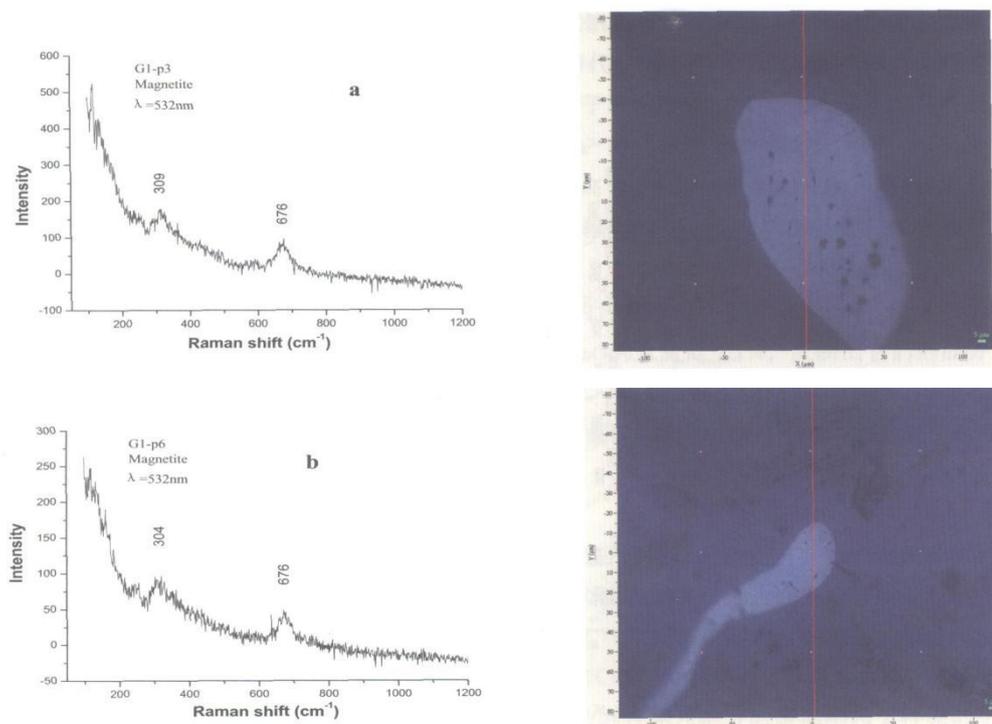


图 4-8 样品 G1 中磁铁矿包裹体的拉曼图谱和显微图像

仅供阅读

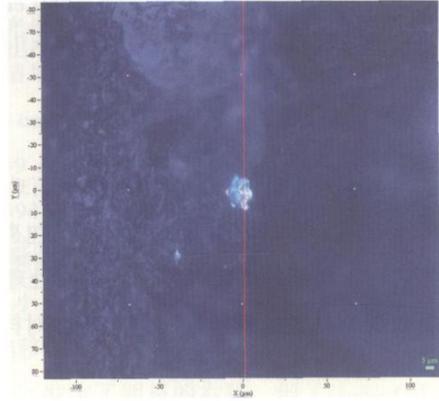
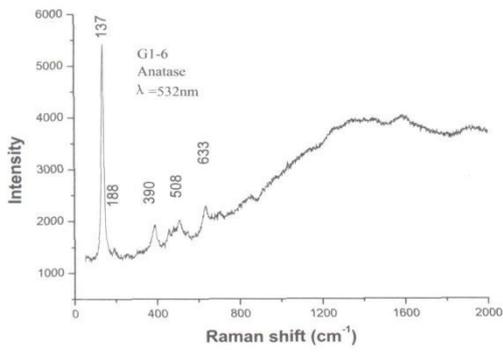


图 4-9 样品 G1 中锐钛矿包裹体的拉曼图谱和显微图像

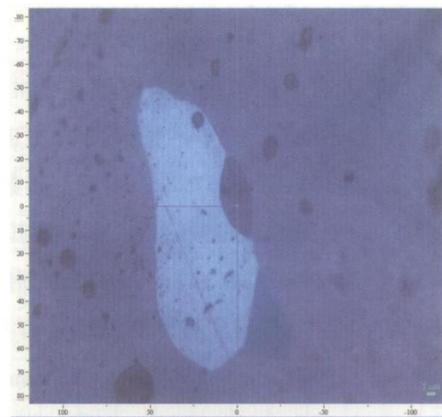
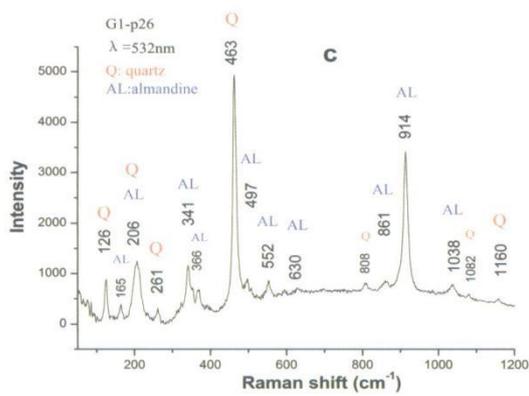
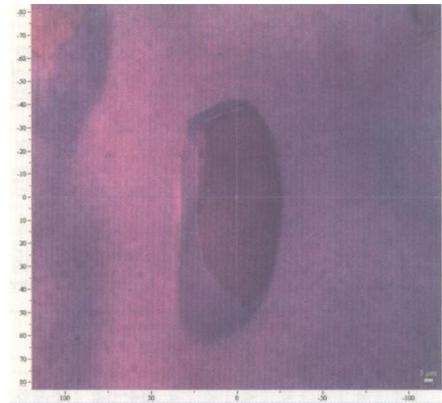
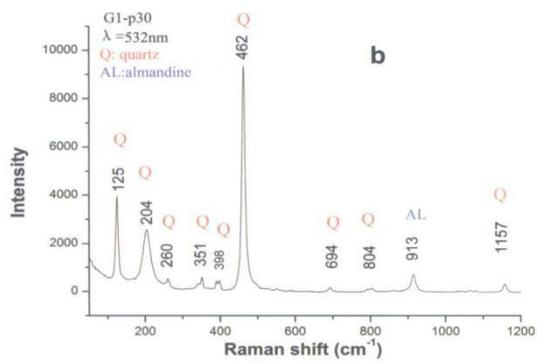
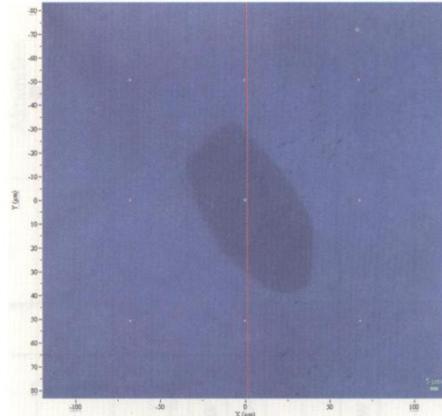
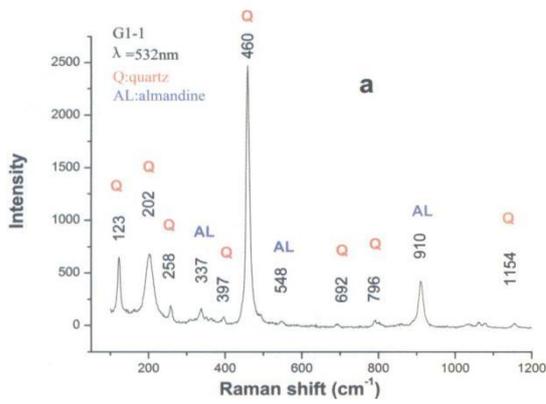


图 4-10 样品 G1 中石英包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

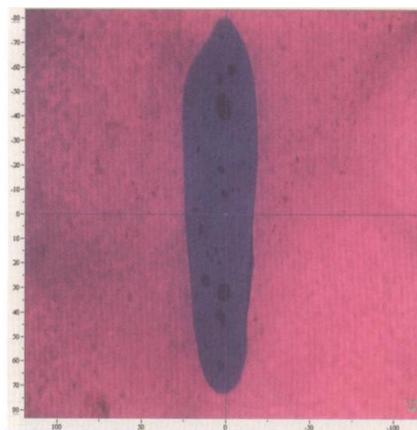
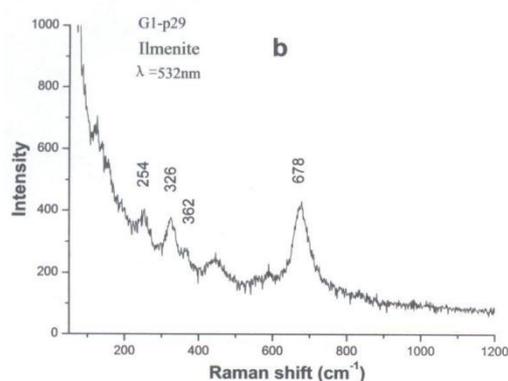
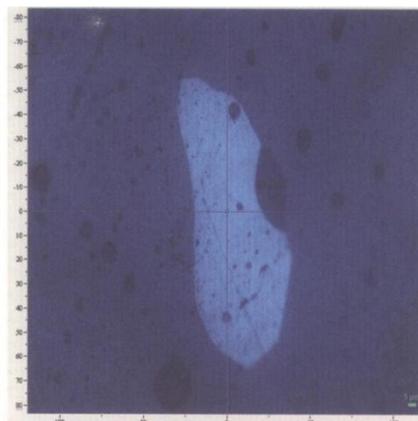
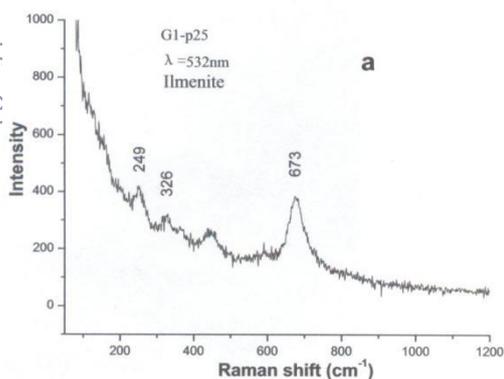


图 4-11 样品 G1 中钛铁矿包裹体的拉曼图谱及显微图像

(1) 样品 G1 中的包裹体组合

样品 G1 中的包裹体有磁铁矿 (Magnetite)、锐钛矿 (Anatase)、石英 (Quartz) 和钛铁矿 (Ilmenite)。图 4-8 展示了 G1 中磁铁矿包裹体的拉曼图谱和显微照片，其主要拉曼峰在 309cm^{-1} ~ 304cm^{-1} 和 676cm^{-1} 附近，与数据库中的磁铁矿特征峰吻合。图 4-9 展示了 G1 中锐钛矿包裹体的拉曼图谱和显微照片，其主要拉曼峰在 137cm^{-1} ~ 136cm^{-1} 、 190cm^{-1} ~ 136cm^{-1} 、 390cm^{-1} 、 517cm^{-1} ~ 508cm^{-1} 和 633cm^{-1} ~ 631cm^{-1} 附近，与数据库中的锐钛矿特征峰吻合。图 4-10 展示了石榴子石样品 G1 中石英包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像，其中 126cm^{-1} 、 206cm^{-1} ~ 202cm^{-1} 、 261cm^{-1} ~ 258cm^{-1} 、 351cm^{-1} 、 398cm^{-1} 、 463cm^{-1} ~ 460cm^{-1} 、 694cm^{-1} ~ 692cm^{-1} 、 808cm^{-1} ~ 796cm^{-1} 、 1082cm^{-1} 和 1160cm^{-1} ~ 1154cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于石英的特征峰，而 165cm^{-1} 、 206cm^{-1} 、 341cm^{-1} ~ 337cm^{-1} 、 366cm^{-1} 、 497cm^{-1} 、 552cm^{-1} ~ 548cm^{-1} 、 630cm^{-1} 、 861cm^{-1} 、 914cm^{-1} ~ 910cm^{-1} 和 1038cm^{-1} 附近的拉曼峰为铁铝榴石基体的特征峰。图 14-11 展示了石榴子石样品 G1 中钛铁矿包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像，其特征峰在 254cm^{-1} ~ 249cm^{-1} 、 326cm^{-1} 、 362cm^{-1} 和 678cm^{-1} ~ 673cm^{-1} 附近。

表 4-9 九只岭 M5 出土石榴子石包裹体的拉曼峰

样品编号	拉曼峰 (cm ⁻¹)													物相
G1-p2	219w	311w			675s									Ilmenite
G1-p25	249w	326w		436vw	673s									Ilmenite
G1-p28	253w	326s	369vw	445vw	672s									Ilmenite
G1-p29	254w	326m	362vw	446vw	678s									Ilmenite
G1-1					671s									Magnetite
G1-2					671s									Magnetite
G1-p3		309w			676s									Magnetite
G1-p6		304w			676s									Magnetite
G1-p8		312w			673s									Magnetite
G1-6	137vs		188vw	390m	508w	633m								Anatase
G1-6s	136vs		190vw	390w	517w	631w								Anatase
G1-3		161w	207vw	337s	367w	494w	551w		860w	912vs	1037m			Almandine
G1-4		162w	206vw	338s	365m	495w	550w	626vw	862w	912vs	1037w			Almandine
G1-5		162w	208vw	338s	366m	493w	549w	626vw	863w	912vs	1037w			Almandine
G1-p4		162w	208vw	340s	368m	495w	550w	628vw	861w	913vs	1035w			Almandine
G1-p9		163w	211vw	340s	369w	495w	554w		860w	913vs	1037m			Almandine
G1-p1	123s		202s	258w	337w	397vw	460vs	548vw	796vw	910m	1154vw			Quartz+Almandine
G1-pls	123s		202s	258w	337w	397vw	460vs		790vw	910m	1156vw			Quartz+Almandine
G1-p1t	123s		202s	258w	337vw	398vw	460vs		791vw	912m	1156vw			Quartz+Almandine
G1-p5	124s		202s	259w	350vw	398vw	460vs		804vw	912m	1078vw	1156vw		Quartz+Almandine
G1-p7	126m		202w	258w	340s	367w	461vs	493w	552w	858vw	912vs	1038w	1159vw	Quartz+Almandine
G1-p26	126m		206m	261w	341m	366vw	463vs	497vw	552w	861vw	914vs	1038vw	1160vw	Quartz+Almandine
G1-p30	125s		204w	260w	351w	398w	462vs		694vw	804vw	913w		1157vw	Quartz+Almandine
G1-p31	124s		202w		339vw	400w	462vs				913m		1158w	Quartz+Almandine
G1-p32	124 m		207s	262w	352m	400vw	462vs	507w		806w	913w	1079w		Quartz+Almandine
G1-p34	126s		202s	260w	350w	398w	462vs			805vw	914s		1158vw	Quartz+Almandine

样品编号	拉曼峰 (cm ⁻¹)													物相	
G2-p13		163w	206vw	338s	364m		494w	550w	626vw	856w	911vs	1035m			Almandine
G2-p15		163w	206vw	338 s	365m	462m	494m	550w	627vw	860vw	911vs	1035m			Almandine
G2-p49	139vw	231w	308m	419vw	452w	592w							1128vw		Ssillmenite
		162w	206w	366m	473vw	496w	551w	861w	914m						Almandine
G3-p1		319w		667w											Magnetite
G3-p2		313w		671w											Magnetite
G3-p4		310w		662w											Magnetite
G3-p5		311w		676w											Magnetite
G3-p7		321w		676w											Magnetite
G3-p9		321w		676w											Magnetite
G3-p10		309w		673w											Magnetite
G3-p3		338m	494vw	549vw	667 m	912s	1035vw								Magnetite+ Almandine
G3-p8		163w	209vw		339s	365w	493m	550w	627vw	860w	912vs	1035m			Almandine
G3-p11		161w	210vw	310vw	337s	367w	493m	551w	629vw	862w	912vs	1037m			Almandine
G3-p12		162w	204vw		337s	364w	493m	551w	628vw	864w	913vs	1035m			Almandine
G4A-4		1341s	1600s												Graphite
G4A-5	141vw			368m	503vw	553vw	915vs	1360s	1599s						Almandine+Graphite
G4A-1		160w	209vw	338s	366w	491m	550w	589vw	862w	912vs	1041vw				Almandine
G4A-2		161w	208vw	338s	365w	493m	549w	627vw	858w	912vs	1032w				Almandine
G4A-3		163w	206vw	341s	368w	497m	551w	629vw	863w	914vs	1037w				Almandine
G4A-6		163w	207vw	338s	364w	493m	550w	628vw	861w	912vs	1037w				Almandine
G4A-7		163w	209vw	340s	365w	493m	551w	628vw	862w	914vs	1037w				Almandine
G4B-1		155vw	206vw	344s	476vw	497w	553m	632vw	861w	915vs	1043w				Almandine
G4B-2				343m	476vw	497w	552m	859w	913vs	1041w					Almandine
G4B-7		200vw	344m		495vw	550w	629vw	856w	913vs	1041w					Almandine
G4B-12		201vw	343m	365vw	497vw	550w	629vw	856w	913vs	1041w					Almandine
G4B-13		199vw	343m	365vw	496vw	552w	628vw	859w	914vs	1041w					Almandine
G4B-14		201vw	342m	367vw	497vw	551w	629 w	858w	914vs	1043w					Almandine

样品编号	拉曼峰 (cm ⁻¹)														物相
G4C-2		311w		677w											Magnetite
G4C-7		310w		671w											Magnetite
G4C-3		216w	310w	673w											Magnetite+Hematite
G4C-6		220s	312w	669w											Magnetite+Hematite
G4C-8		163w	210vw	339s	366m	494w	550w	627vw	864w	913vs	1037w				Almandine
G4C-4	140s		164vs	267vw	309m	333w	353w	416m	526w	576w	636w	913w			Almandine+Brookite
G4C-5	140s		163vs	267vw	307m	333w	353w	418m	526w	575w	636vw	913w	1358s	1582s	Almandine+Brookite
G4D-2		311w	462s	673w											Magnetite+Quartz
G4D-1		162w	210vw	340s	368m	496w	551w	626vw	863w	914vs	1037w				Almandine
G4D-3		163w	205vw	339s	368m	494w	552w		861w	912vs	1038w				Almandine
G4D-4		165w	209vw	339s	367m	495w	551w	630vw	862w	913vs	1035w				Almandine
G4D-5		162w	207vw	339s	366m	493w	550w	628vw	861w	913vs	1036w				Almandine
G4D-6		161w	205vw		339m	493w	550w		853vw	914vs	1035w	1363s	1593m		Almandine+Graphite
G4D-7	135s			339m	364w	496vw		637vw		914vs	1034w				Almandine+Anatase
G4E-2		310w	659w												Magnetite
G4E-1	144s		326vw					678w	835vw			1341s	1570s	1925vw	Anatase+ Magnetite+graphite

注: s(strong), 强: m(medium), 中等: w(weak), 弱: v(very), 非常

(2) 样品 G2 中的包裹体组合

样品 G2 中的包裹体种类较多, 有赤铁矿(Hematite)、钛铁矿(Ilmenite)、磁铁矿(Magnetite)、锐钛矿(Anatase)、磷灰石(Apatite)、石英(Quartz)、石墨(Graphite)和硅线石(Sillimanite)。图 4-12 展示了样品 G2 中赤铁矿包裹体的拉曼图谱和显微图像, 其主要拉曼峰在 215cm^{-1} ~ 209cm^{-1} 、 280cm^{-1} ~ 264cm^{-1} 、 394cm^{-1} ~ 372cm^{-1} 、 488cm^{-1} 、 598cm^{-1} 、 1298cm^{-1} ~ 1273cm^{-1} 附近, 与数据库中的赤铁矿特征峰吻合。图 4-13 展示了样品 G2 中钛铁矿包裹体的拉曼图谱和显微图像, 其主要拉曼峰在 221cm^{-1} ~ 216cm^{-1} 、 327cm^{-1} ~ 311cm^{-1} 和 676cm^{-1} ~ 675cm^{-1} 处, 与数据库中的钛铁矿特征峰吻合。图 4-14 展示了 G2 中磁铁矿包裹体的拉曼图谱和显微图像, 其主要拉曼峰在 310cm^{-1} 和 676cm^{-1} 附近。图 4-15 展示了样品 G2 中钛铁矿和石英包裹体的拉曼图谱及其显微图像, 其中 327cm^{-1} 和 677cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于磁铁矿, 454cm^{-1} 附近的拉曼峰为石英的特征峰。图 4-16 展示了样品 G2 中石英包裹体及铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像, 其主要拉曼峰在 123cm^{-1} 、 201cm^{-1} 、 258cm^{-1} 、 349cm^{-1} 、 396cm^{-1} 、 459cm^{-1} 、 512cm^{-1} 、 692cm^{-1} 、 803cm^{-1} 和 1154cm^{-1} 附近, 908cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石的拉曼特征峰。图 4-17 展示了样品 G2 中石英包裹体、石墨包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像, 其中 124cm^{-1} ~ 122cm^{-1} 、 202cm^{-1} 、 461cm^{-1} ~ 459cm^{-1} 、 805cm^{-1} ~ 803cm^{-1} 和 1157cm^{-1} ~ 1154cm^{-1} 附近的振动峰为石英的特征峰, 1581cm^{-1} ~ 1580cm^{-1} 附近的振动峰为石墨的特征峰, 与数据库中石墨的拉曼峰吻合, 而 341cm^{-1} ~ 339cm^{-1} 、 493cm^{-1} 、 551cm^{-1} ~ 550cm^{-1} 、 853cm^{-1} 、 912cm^{-1} 和 1037cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。图 4-18 展示了样品 G2 中磷灰石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像, 其中 425cm^{-1} 、 586cm^{-1} 、 960cm^{-1} 、 1049cm^{-1} ~ 1035cm^{-1} 附近的拉曼峰与数据库中磷灰石的特征峰吻合, 167cm^{-1} 、 340cm^{-1} ~ 337cm^{-1} 、 369cm^{-1} 、 492cm^{-1} 、 554cm^{-1} ~ 546cm^{-1} 、 914cm^{-1} ~ 910cm^{-1} 和 1049cm^{-1} ~ 1035cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。图 4-19 展示了样品 G2 中硅线石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像, 其中 139cm^{-1} 、 231cm^{-1} 、 308cm^{-1} 、 419cm^{-1} 、 452cm^{-1} 、 592cm^{-1} 、 861cm^{-1} 、 964cm^{-1} 和 1128cm^{-1} 附近的振动峰为硅线石的特征峰, 与数据库中硅线石的拉曼特征峰吻合, 而 162cm^{-1} 、 206cm^{-1} 、 340cm^{-1} 、 368cm^{-1} 、 473cm^{-1} 、 496cm^{-1} 、 551cm^{-1} 、 630cm^{-1} 、 861cm^{-1} 、 913cm^{-1} 和 1035cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。

仅供阅读

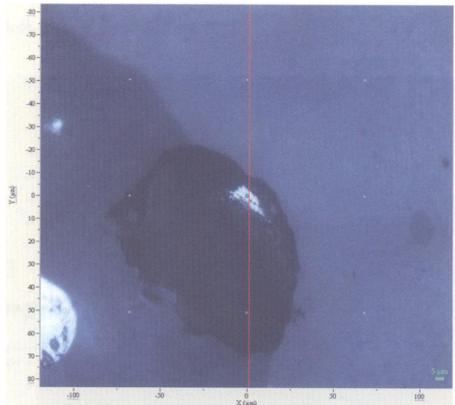
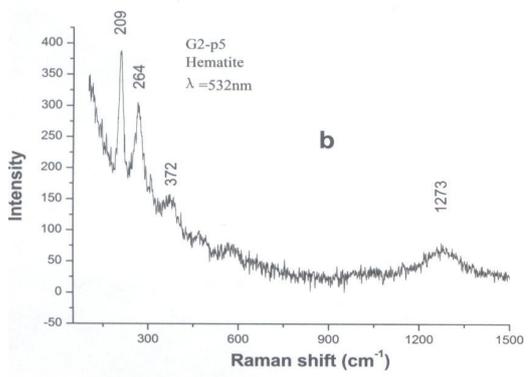
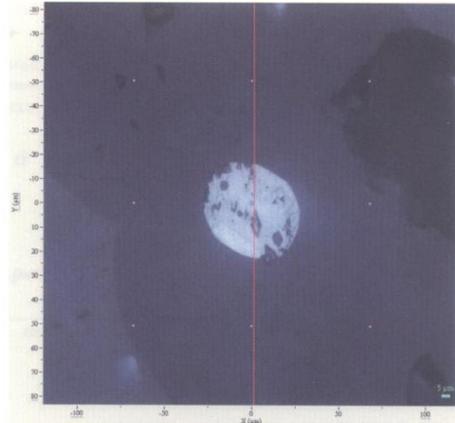
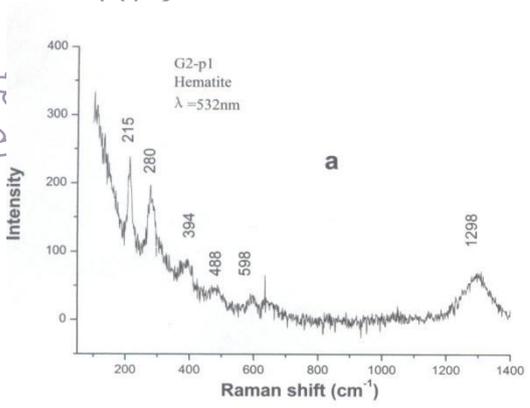


图 4-12 样品 G2 中赤铁矿包裹体的拉曼图谱和显微图像

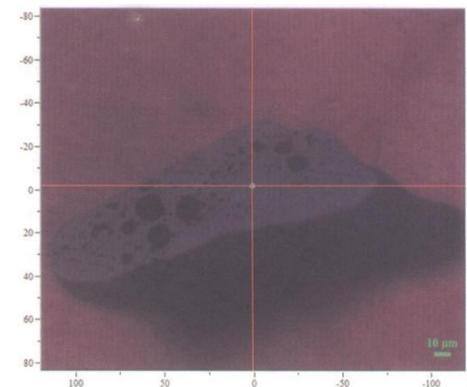
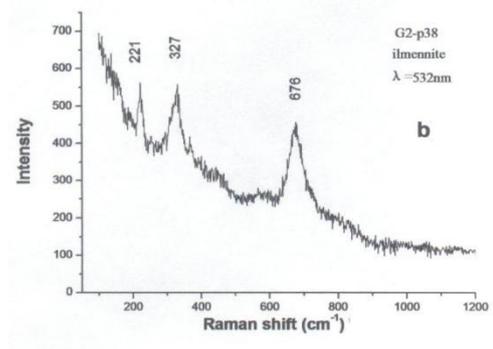
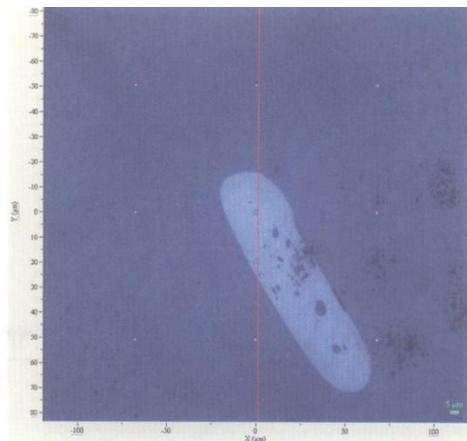
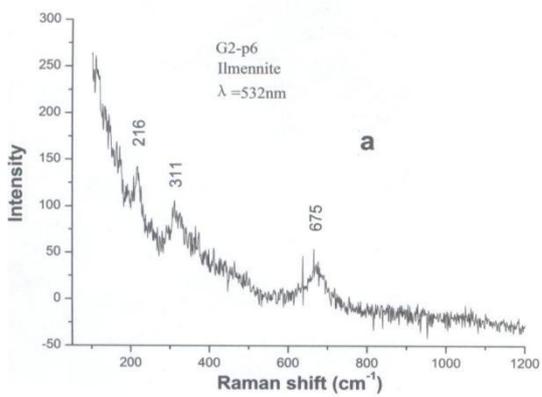


图 4-13 样品 G2 中钛铁矿包裹体的拉曼图谱及显微图像

仅供阅读

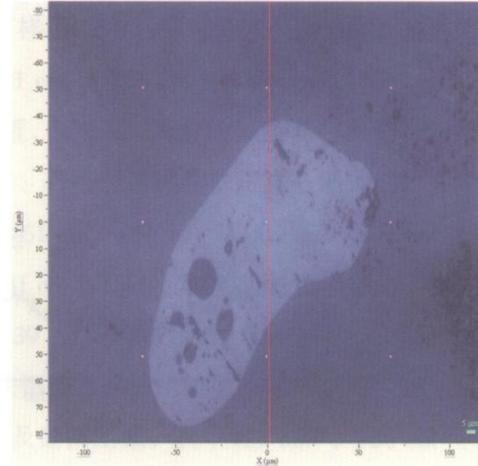
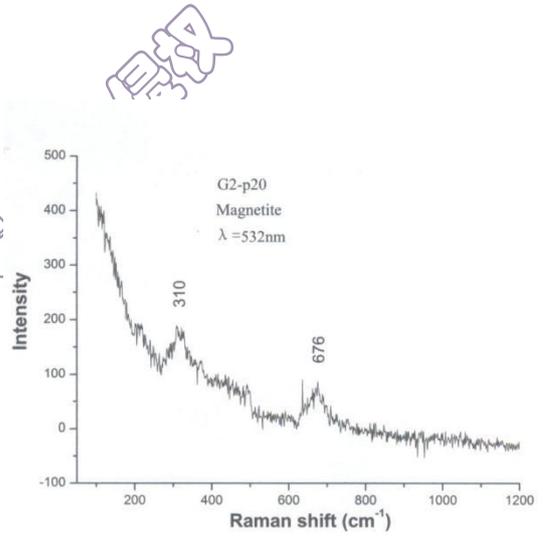


图 4-14 样品 G2 中磁铁矿包裹体的拉曼图谱和显微图像

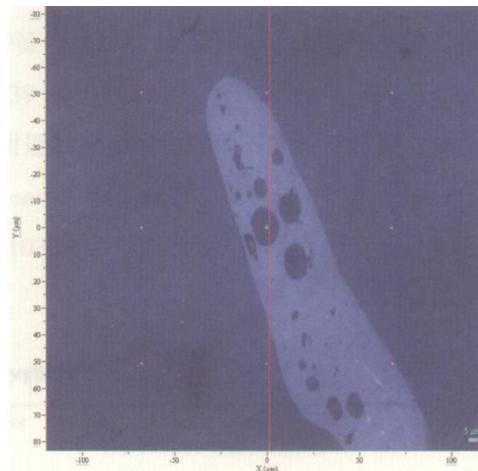
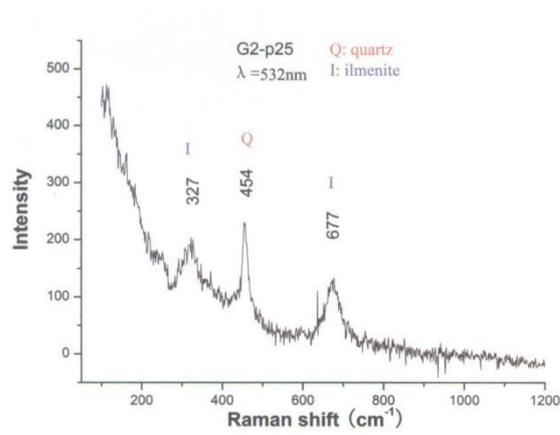


图 4-15 样品 G2 中钛铁矿和石英包裹体的拉曼图谱及显微图像

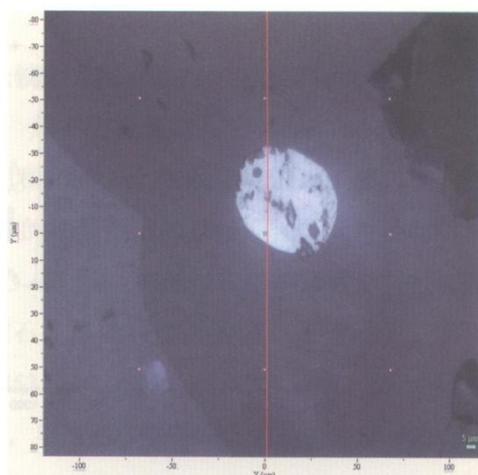
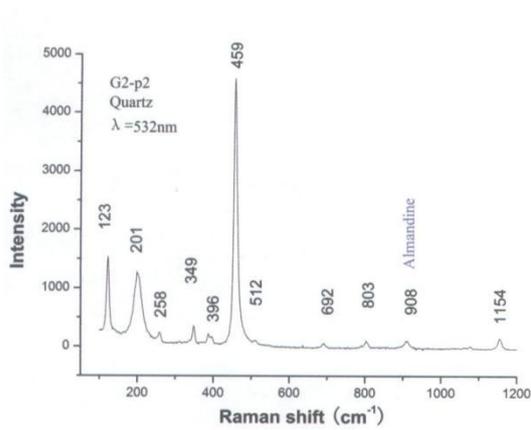


图 4-16 样品 G2 中石英包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

仅供阅读

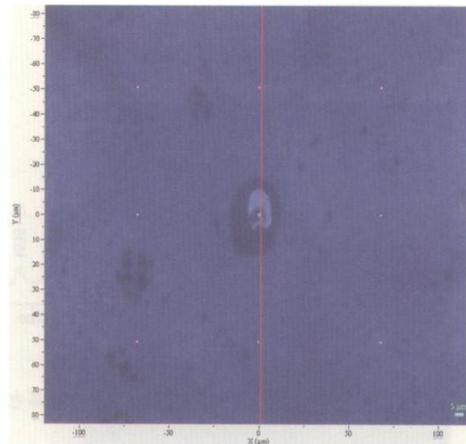
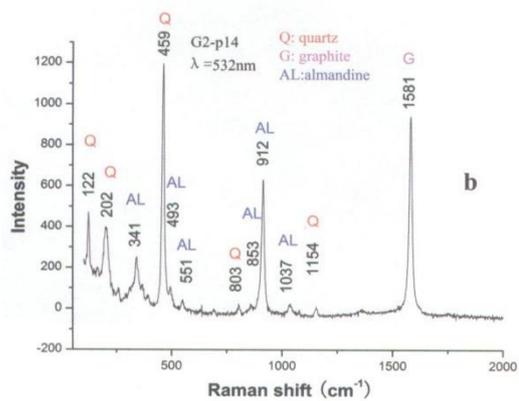
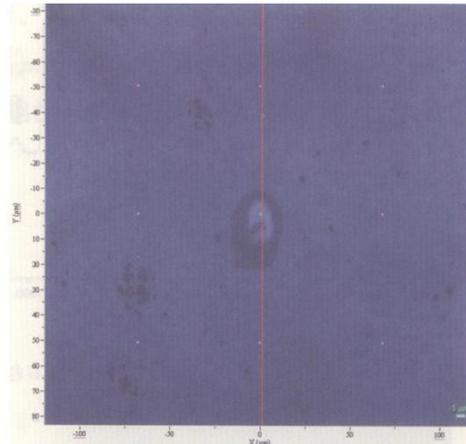
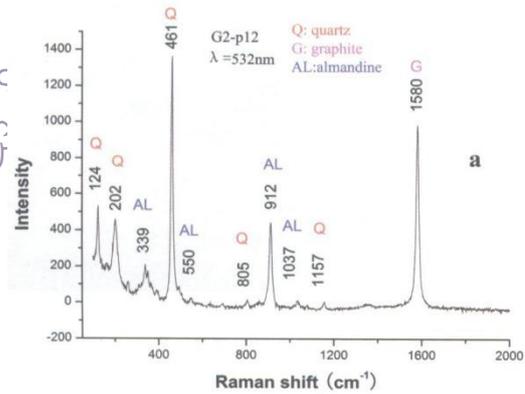


图 4-17 样品 G2 中石英、石墨包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

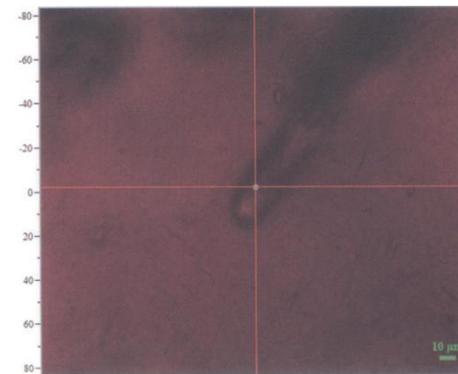
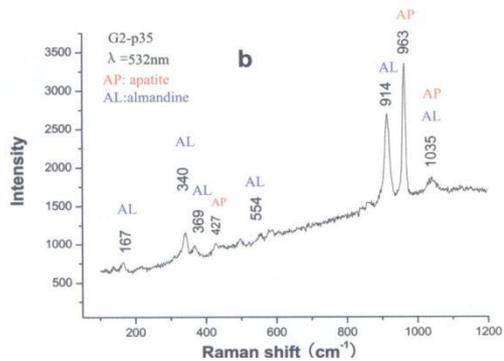
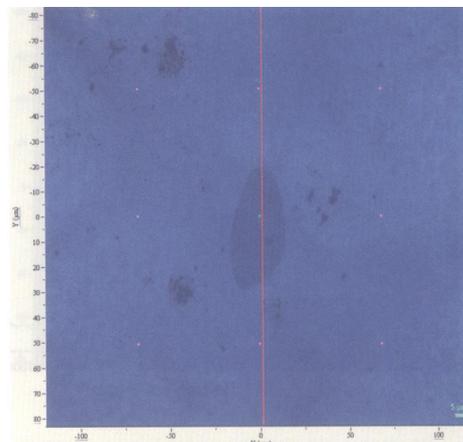
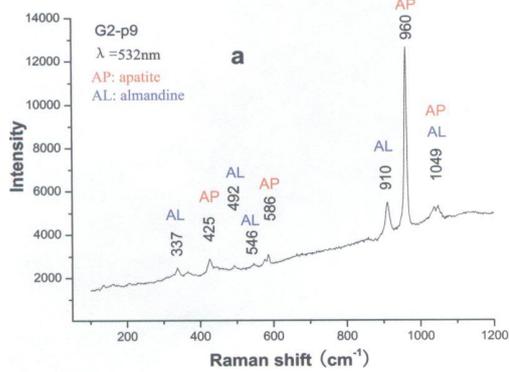


图 4-18 样品 G2 中磷灰石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

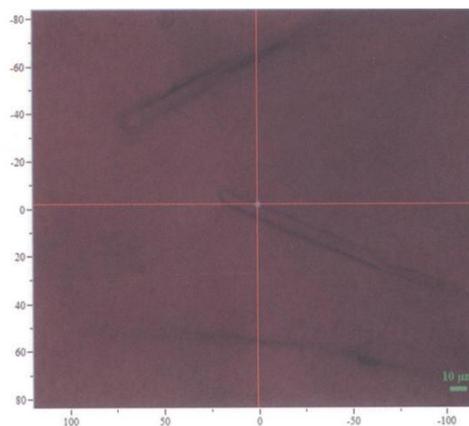
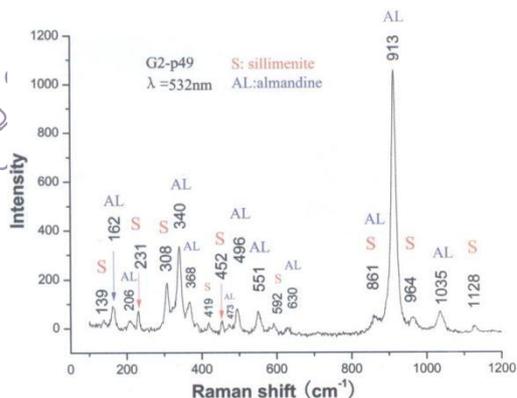


图 4-19 样品 G2 中硅线石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

(3) 样品 G3 中的包裹体组合

在样品 G3 中主要检测到磁铁矿 (Magnetite)、钛铁矿 (Ilmenite)、硅线石 (Sillimanite) 和石英 (Quartz) 包裹体。磁铁矿包裹体见图 4-20, 其主要拉曼峰在 319cm^{-1} 、 549cm^{-1} 、 667cm^{-1} 附近, 样品中 338cm^{-1} 、 494cm^{-1} 、 912cm^{-1} 和 1035cm^{-1} 的拉曼峰归属于铁铝榴石基体 (图 4-20:b)。图 4-21 展示了 G3 中钛铁矿包裹体的拉曼图谱和显微图像, 其主要拉曼特征峰在 162cm^{-1} 、 218cm^{-1} 、 322cm^{-1} 、 366cm^{-1} 和 673cm^{-1} 处, 与数据库中的钛铁矿特征峰吻合。图 4-22 展示了样品 G3 中硅线石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像, 其中 139cm^{-1} 、 202cm^{-1} 、 231cm^{-1} 、 308cm^{-1} 、 419cm^{-1} 、 453cm^{-1} 、 593cm^{-1} 、 709cm^{-1} 、 874cm^{-1} 、 962cm^{-1} 和 1128cm^{-1} 附近的振动峰为硅线石的特征峰, 与数据库中硅线石的拉曼特征峰吻合, 而 163cm^{-1} 、 208cm^{-1} 、 339cm^{-1} 、 365cm^{-1} 、 496cm^{-1} 、 554cm^{-1} 、 630cm^{-1} 、 862cm^{-1} 、 914cm^{-1} 和 1036cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。图 4-23 展示了样品 G3 中石英包裹体及铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像, 其主要拉曼峰在 125cm^{-1} 、 204cm^{-1} 、 261cm^{-1} 、 350cm^{-1} 、 398cm^{-1} 、 462cm^{-1} 、 512cm^{-1} 、 695cm^{-1} 、 807cm^{-1} 和 1157cm^{-1} 附近, 164cm^{-1} 、 551cm^{-1} 、 913cm^{-1} 和 1034cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。

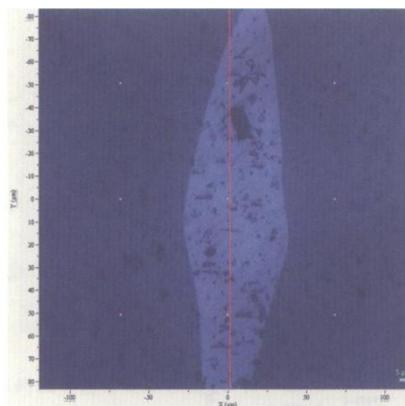
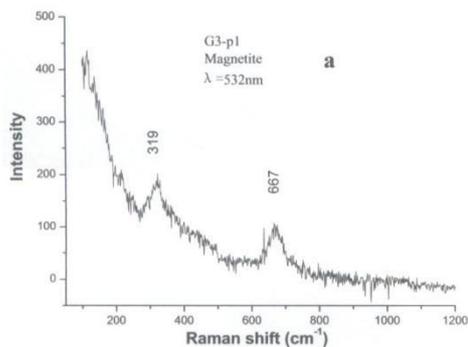


图 4-20 样品 G3 中磁铁矿包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

仅供阅读

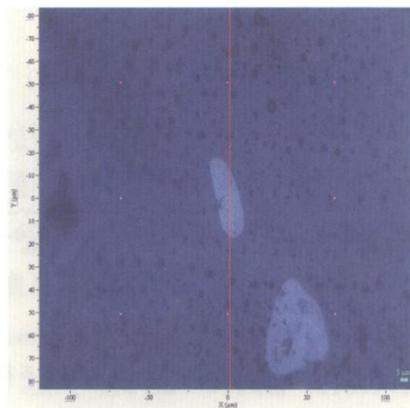
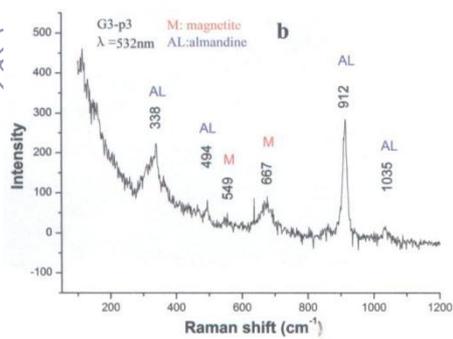


图 4-20 续图

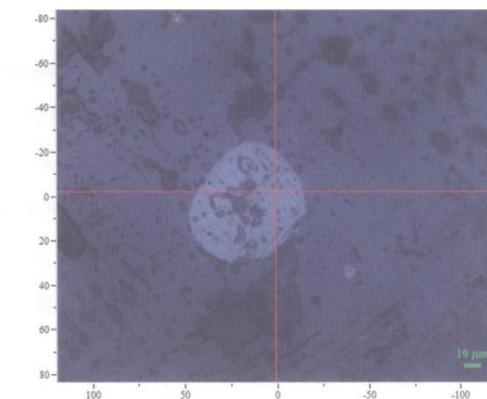
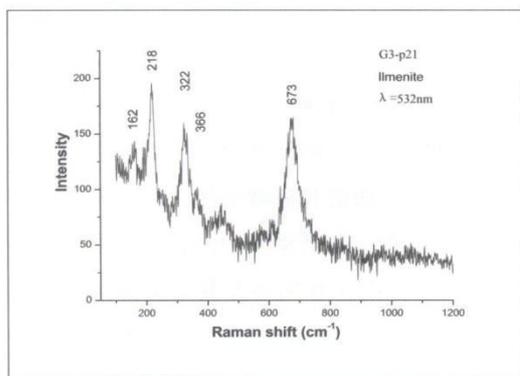


图 4-21 样品 G3 中钛铁矿包裹体的拉曼图谱及显微图像

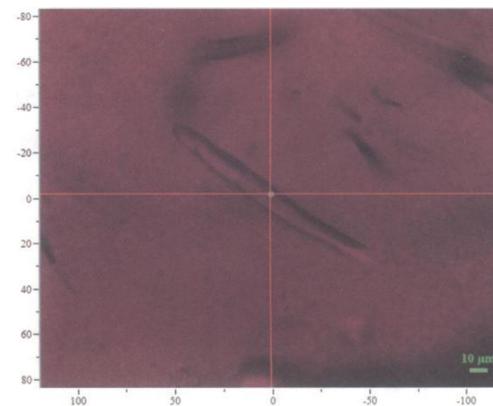
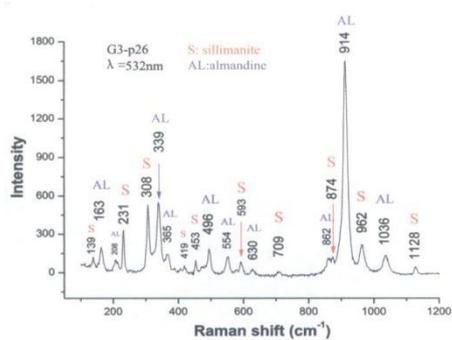


图 4-22 样品 G3 中硅线石包裹体及铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

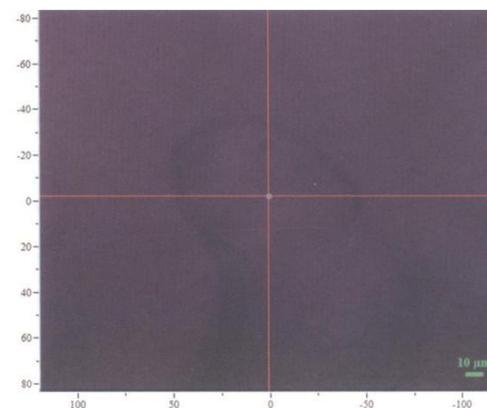
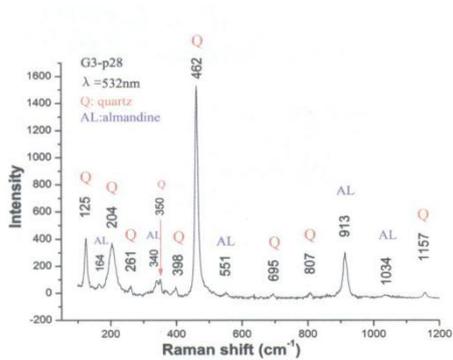


图 4-23 样品 G3 中石英包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

(4) 样品 G4A 中的包裹体

在样品 G4A 的表面主要检测到石墨(Graphite)包裹体, 见图 4-24, 有两个主要拉曼峰, 分别在 $1360\text{cm}^{-1}\sim 1341\text{cm}^{-1}$ 和 $1600\text{cm}^{-1}\sim 1599\text{cm}^{-1}$ 附近, 归属于碳的 D 峰和 G 峰, 在 368cm^{-1} 、 503cm^{-1} 、 553cm^{-1} 、 915cm^{-1} 和 1060cm^{-1} 的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰(图 4-24:b)。

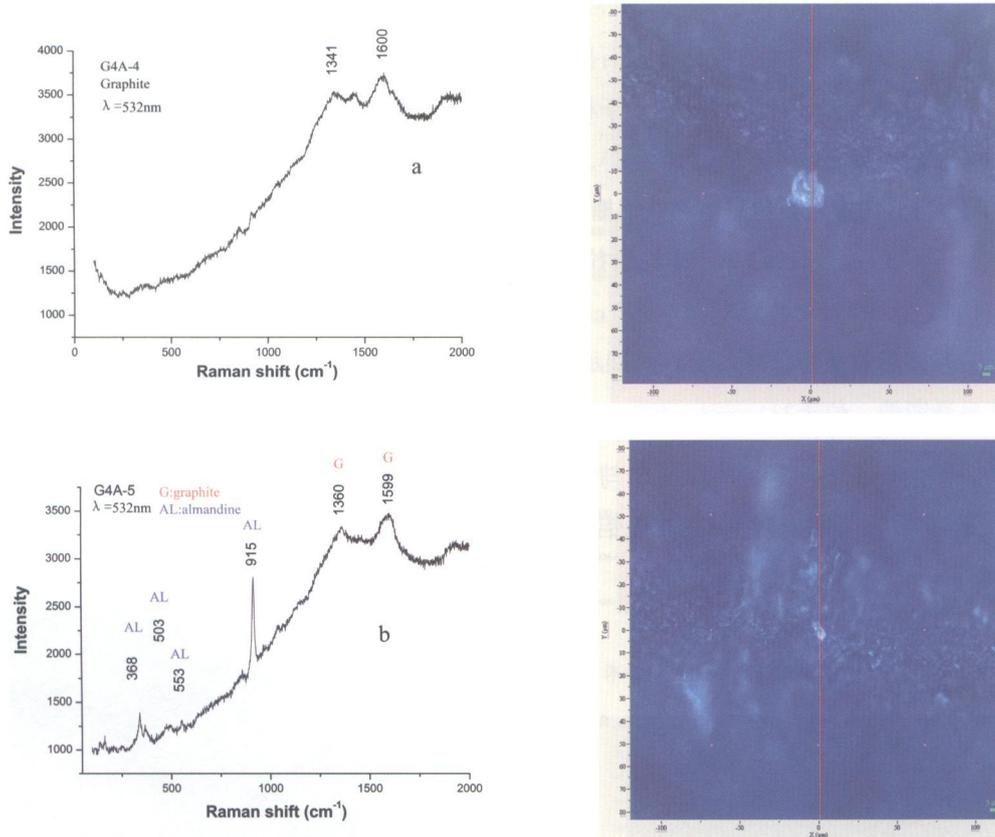


图 4-24 样品 G4A 中石墨碳包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

(5) 样品 G4B 中的包裹体组合

样品 G4B 中的包裹体种类有金红石(Rutile)、钛铁矿(Ilmenite)、板钛矿(Brookite)、石英(Quartz)、石墨(Graphite)、磁铁矿(Magnetite)、锆石(Zircon)和独居石(Monazite)。图 4-25 展示了样品 G4B 中金红石包裹体的拉曼图谱和显微图像, 其主要拉曼峰在 113cm^{-1} 、 $233\text{cm}^{-1}\sim 231\text{cm}^{-1}$ 、 435cm^{-1} 、 $608\text{cm}^{-1}\sim 607\text{cm}^{-1}$ 和 677cm^{-1} 附近。图 4-26 展示了样品 G4B 中金红石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像, 其中在 237cm^{-1} 、 $344\text{cm}^{-1}\sim 342\text{cm}^{-1}$ 、 $445\text{cm}^{-1}\sim 436\text{cm}^{-1}$ 和 $611\text{cm}^{-1}\sim 607\text{cm}^{-1}$ 附近的拉曼峰归属于金红石的拉曼特征峰, 而 $201\text{cm}^{-1}\sim 200\text{cm}^{-1}$ 、 497cm^{-1} 、 554cm^{-1} 、 857cm^{-1} 、 $914\text{cm}^{-1}\sim 911\text{cm}^{-1}$ 和 1039cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。图 4-27 展示了样品 G4B 中金红石包裹体和钛铁矿包裹体的拉曼图谱及其显微图像, 其中在 $237\text{cm}^{-1}\sim 230\text{cm}^{-1}$ 、 $440\text{cm}^{-1}\sim 437\text{cm}^{-1}$ 和 $606\text{cm}^{-1}\sim 604\text{cm}^{-1}$ 附近的拉曼峰归属于金红石的拉曼特征峰, 而 $688\text{cm}^{-1}\sim 683\text{cm}^{-1}$ 附近的拉曼峰归属于钛铁矿

的拉曼特征峰。图 4-28 展示了样品 G4B 中石英包裹体的拉曼图谱及其显微图像，其主要拉曼峰在 126cm^{-1} 、 204cm^{-1} 、 260cm^{-1} 、 349cm^{-1} 、 391cm^{-1} 、 462cm^{-1} 、 552cm^{-1} 、 692cm^{-1} 、 796cm^{-1} 、 911cm^{-1} 、 1061cm^{-1} 和 1156cm^{-1} 附近，位于 497cm^{-1} 、 860cm^{-1} 和 915cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。图 4-29 展示了样品 G4B 中板钛矿包裹体、石墨包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像，其中 140cm^{-1} 、 245cm^{-1} 和 631cm^{-1} 归属于板钛矿，与数据库中板钛矿的拉曼特征峰吻合； 1346cm^{-1} 和 1598cm^{-1} 归属于石墨；而 344cm^{-1} 、 857cm^{-1} 、 914cm^{-1} 为铁铝榴石基体的拉曼特征峰。图 4-30 展示了 CAB 中锆石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像，其中在 $345\sim 343\text{cm}^{-1}$ 、 $445\text{cm}^{-1}\sim 443\text{cm}^{-1}$ 和 1043cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于锆石，与数据库中锆石的特征峰基本吻合，而 201cm^{-1} 、 497cm^{-1} 、 $555\text{cm}^{-1}\sim 551\text{cm}^{-1}$ 、 859cm^{-1} 和 $916\text{cm}^{-1}\sim 915\text{cm}^{-1}$ 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。图 4-31 展示了样品 G4B 中独居石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像，位于 231cm^{-1} 、 400cm^{-1} 、 417cm^{-1} 、 466cm^{-1} 、 535cm^{-1} 、 589cm^{-1} 、 620cm^{-1} 、 976cm^{-1} 和 1063cm^{-1} 附近的拉曼峰与数据库中独居石的非常吻合，而 344cm^{-1} 、 555cm^{-1} 、 863cm^{-1} 和 915cm^{-1} 拉曼峰归属于铁铝榴石基体的拉曼特征峰。

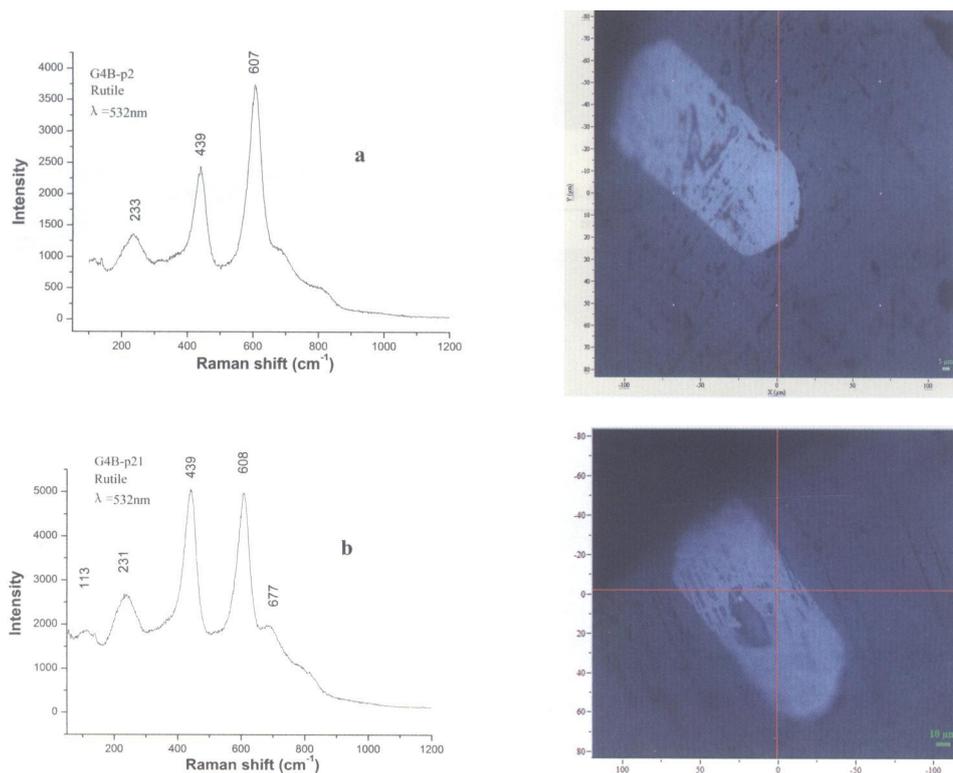


图 4-25 样品 G4B 中金红石包裹体的拉曼图谱及显微图像

仅供阅读

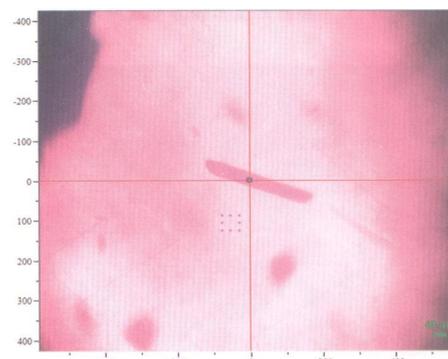
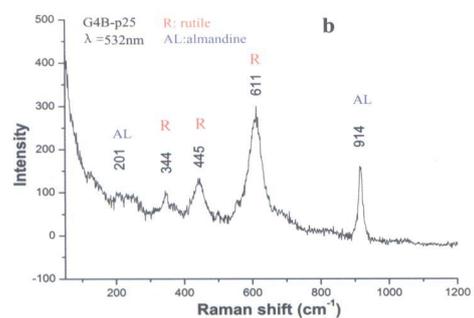
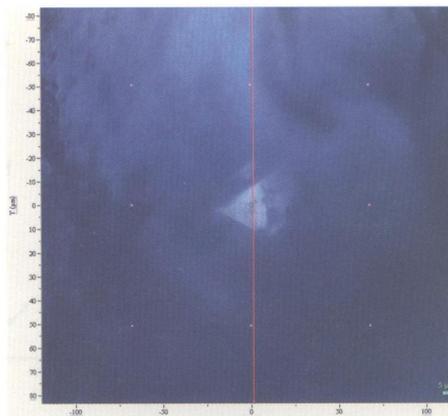
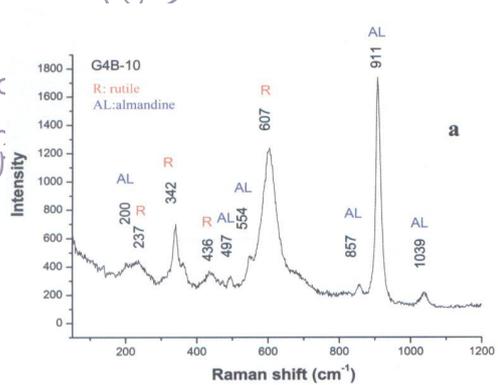


图 4-26 样品 G4B 中金红石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

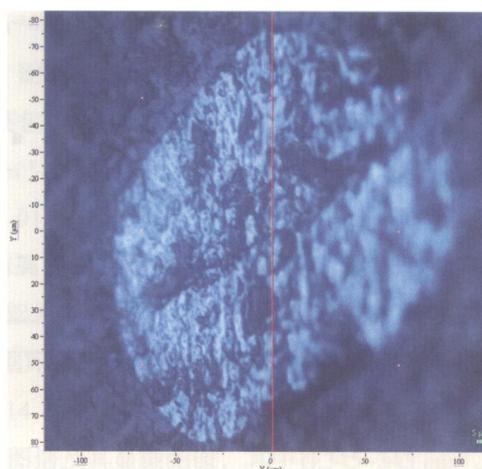
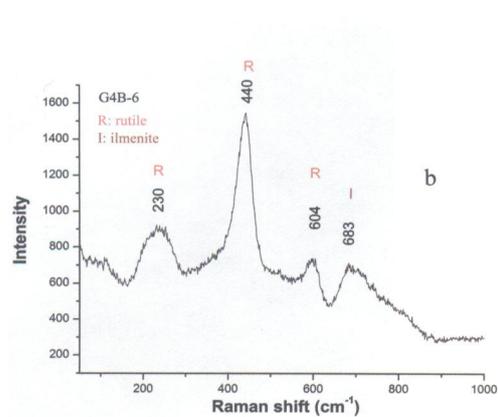
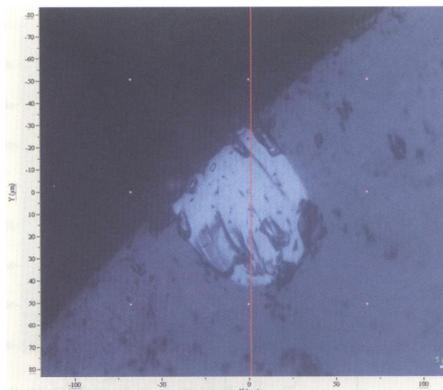
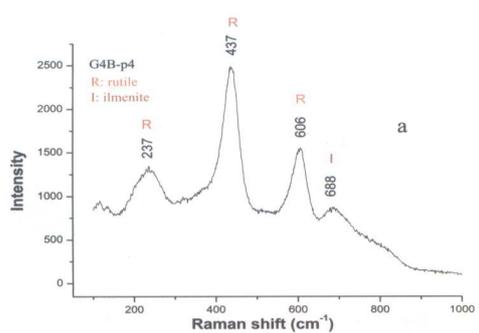


图 4-27 样品 G4B 中金红石包裹体和钛铁矿包裹体的拉曼图谱及显微图像

仅供阅读

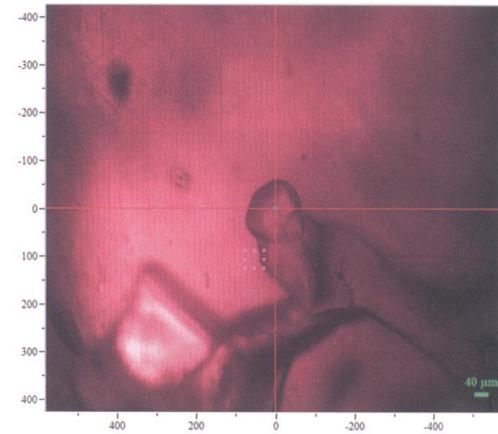
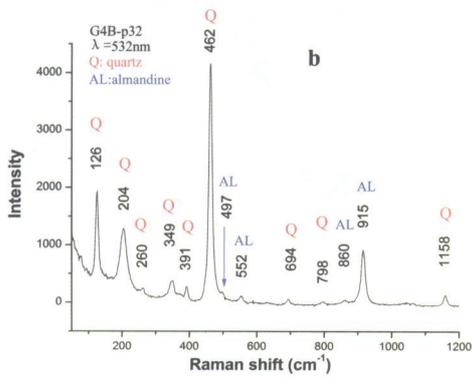
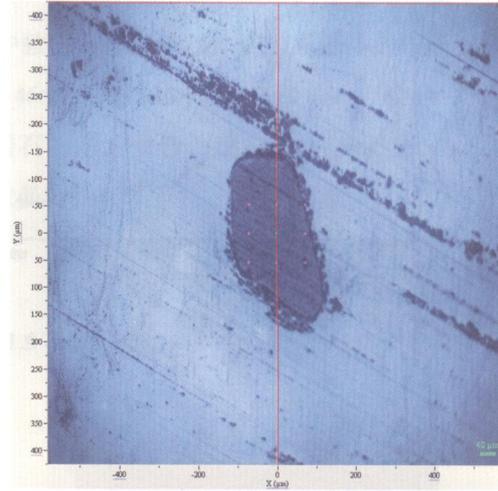
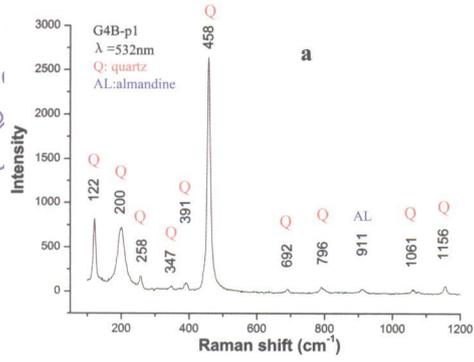


图 4-28 样品 G4B 中石英包裹体及铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

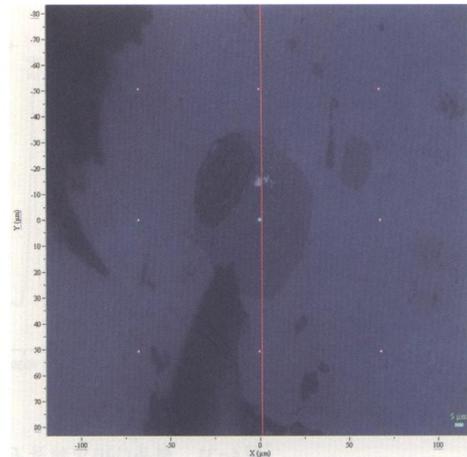
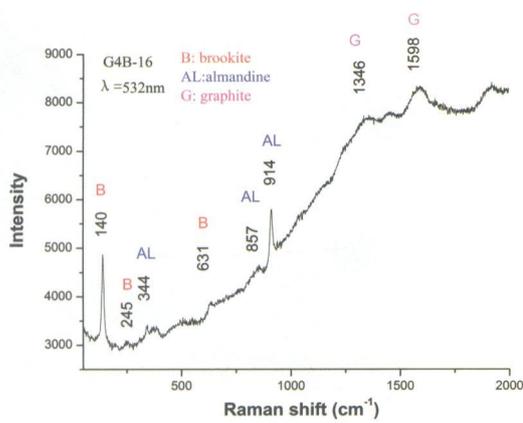


图 4-29 样品 G4B 中板钛矿包裹体、石墨包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

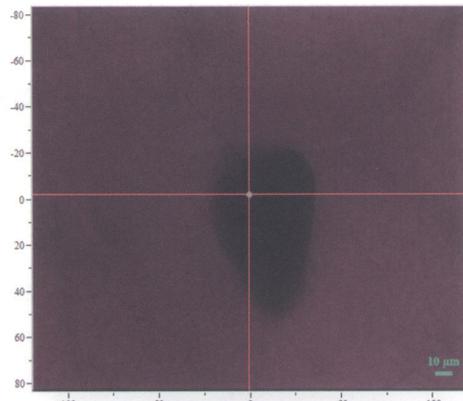
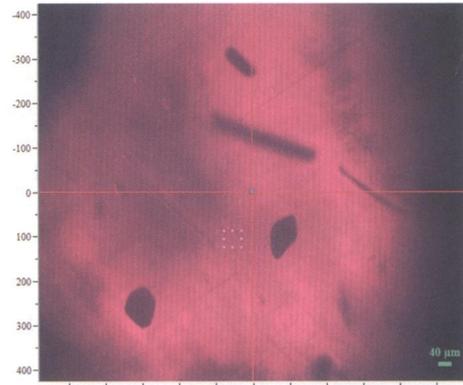
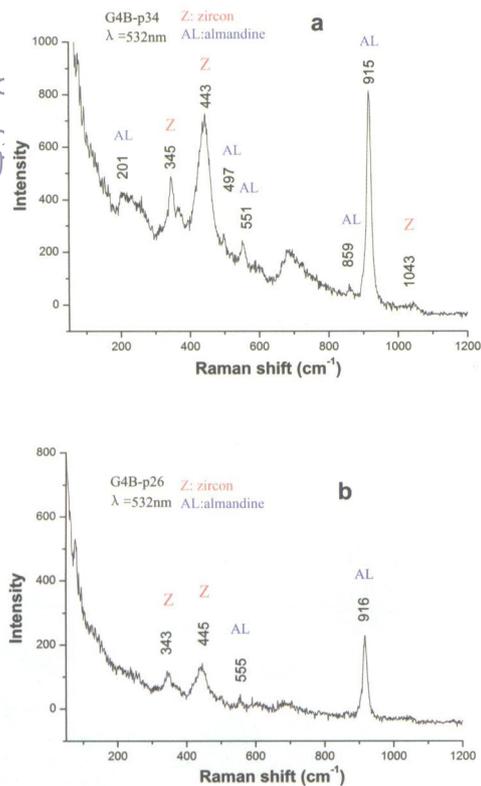


图 4-30 样品 G4B 中锆石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

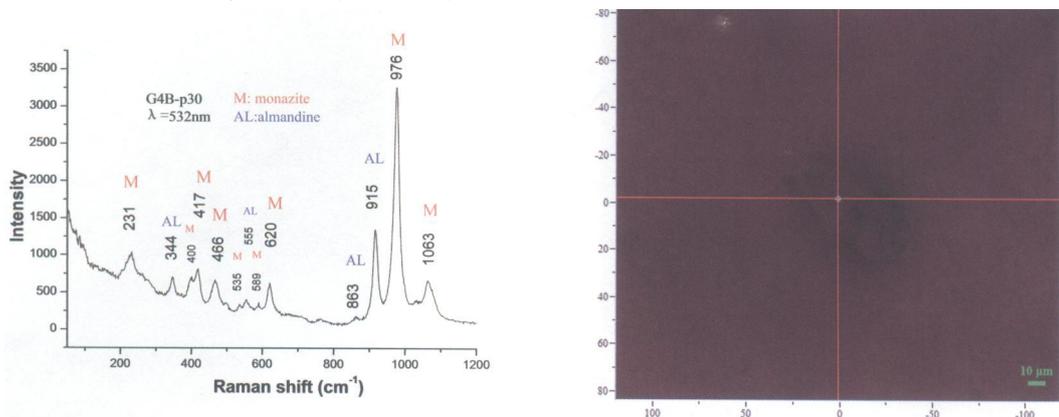


图 4-31 样品 G4B 中独居石包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

(6) 样品 G4C 中的包裹体组合

样品 G4C 中的包裹体种类有磁铁矿 (magnetite)、赤铁矿 (hematite) 和板钛矿 (brookite)。图 4-32 展示了样品 G4C 中磁铁矿包裹体的拉曼图谱和显微图像，其主要拉曼峰在 $311\text{cm}^{-1} \sim 310\text{cm}^{-1}$ 和 $677\text{cm}^{-1} \sim 671\text{cm}^{-1}$ 。图 4-33 展示了样品 G4C 中磁铁矿和赤铁矿包裹体的拉曼图谱及其显微图像，其中在 $312\text{cm}^{-1} \sim 310\text{cm}^{-1}$ ，和 $673\text{cm}^{-1} \sim 669\text{cm}^{-1}$ ，附近的拉曼峰归属于磁铁矿，而 $220\text{cm}^{-1} \sim 216\text{cm}^{-1}$ 附近的拉曼峰归属于赤铁矿。图 4-34 展示了样品 G4C 中板钛矿包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像，其中 140cm^{-1} 、 164cm^{-1} 、 267cm^{-1} 、 333cm^{-1} 、 416cm^{-1} 、 576cm^{-1} 和 636cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于板钛矿；而 353cm^{-1} 、 636cm^{-1} 和

913 cm^{-1} 附近的拉曼峰为铁铝榴石基体的特征峰。图 4-35 展示了样品 G4C 中板钛矿包裹体、石墨包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱,其中在 140 cm^{-1} 、163 cm^{-1} 、267 cm^{-1} 、333 cm^{-1} 、418 cm^{-1} 、575 cm^{-1} 和 637 cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于板钛矿;在 1358 cm^{-1} 和 1582 cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于石墨;而 353 cm^{-1} 、637 cm^{-1} 和 913 cm^{-1} 附近的拉曼峰为铁铝榴石基体的特征峰。

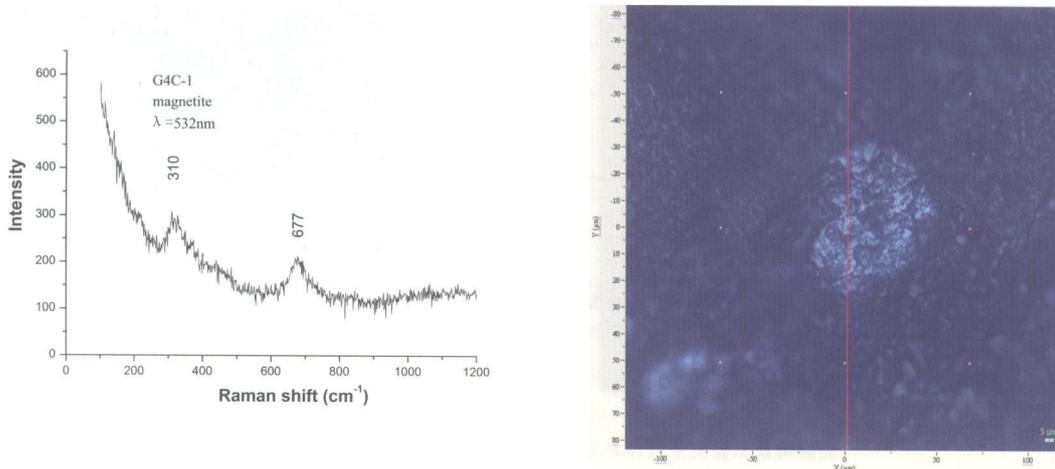


图 4-32 样品 G4C 中磁铁矿包裹体的拉曼图谱及显微图像

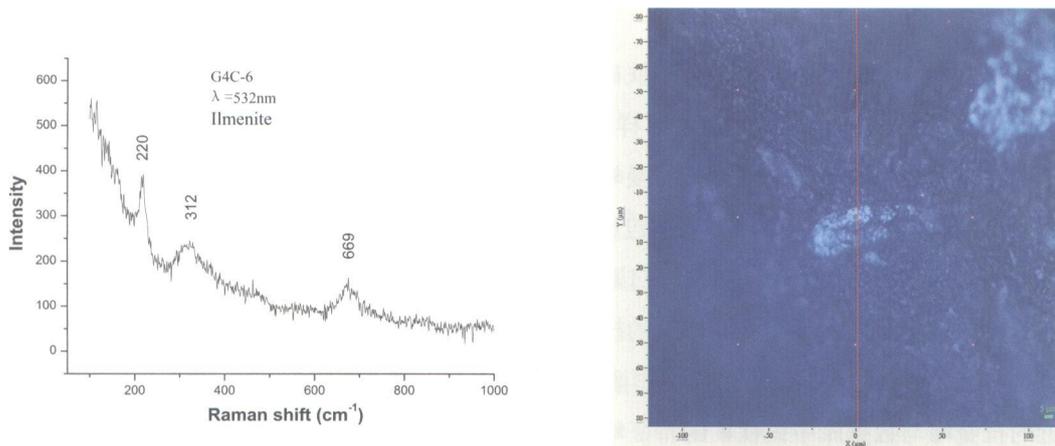


图 4-33 样品 G4C 中磁铁矿和赤铁矿包裹体的拉曼图谱及显微图像

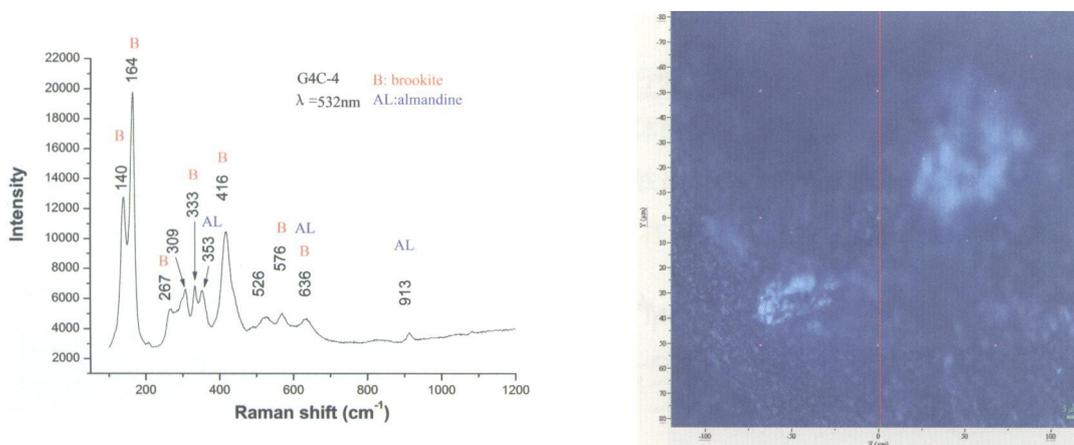


图 4-34 样品 G4C 中板钛矿包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

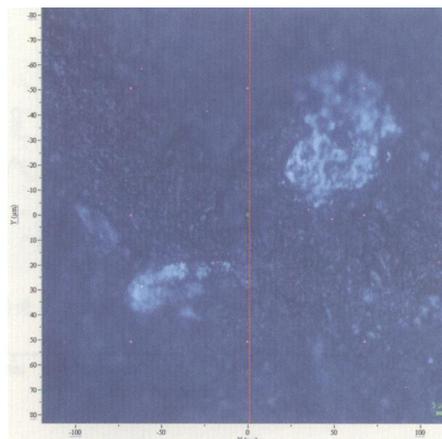
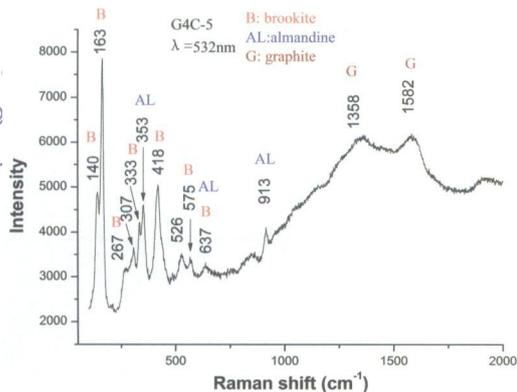
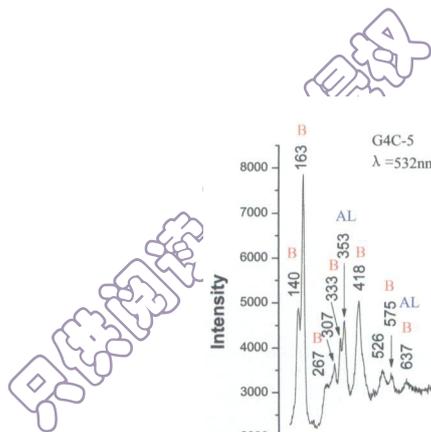


图 4-35 样品 G4C 中板钛矿包裹体、石墨包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱

(7) 样品 G4D 中的包裹体组合

样品 G4D 中的包裹体种类有磁铁矿 (Magnetite)、石英 (Quartz)、石墨 (Graphite) 和锐钛矿 (Anatase)。图 4-36 展示了样品 G4D 中磁铁矿和石英包裹体的拉曼图谱和显微图像，其中在 311cm^{-1} 和 673cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于磁铁矿，在 461cm^{-1} 附近的拉曼峰为石英的特征峰。图 4-37 展示了样品 G4D 中石墨包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像，其中在 1363cm^{-1} 和 1593cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于石墨，而在 205cm^{-1} 、 339cm^{-1} 、 493cm^{-1} 、 551cm^{-1} 、 853cm^{-1} 、 914cm^{-1} 和 1035cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于铁铝榴石基体。图 4-38 展示了样品 G4D 中锐钛矿包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及其显微图像，其中在 135cm^{-1} 、 364cm^{-1} 和 637cm^{-1} 附近的拉曼峰与数据库中锐钛矿的特征峰相符，而在 339cm^{-1} 、 364cm^{-1} 、 496cm^{-1} 、 637cm^{-1} 和 914cm^{-1} 附近的拉曼峰为铁铝榴石基体的特征峰。

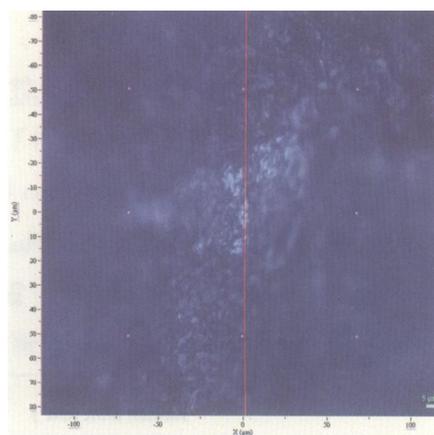
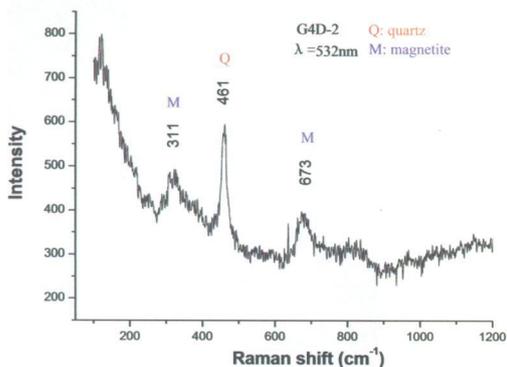


图 4-36 样品 G4D 中磁铁矿和石英包裹体的拉曼图谱及显微图像

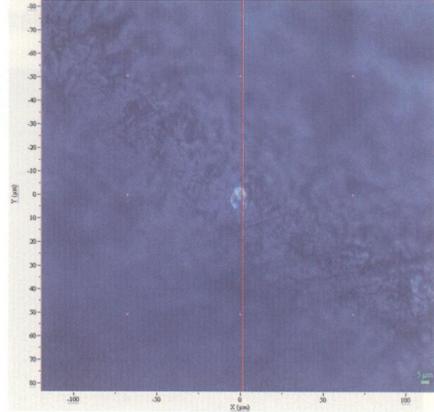
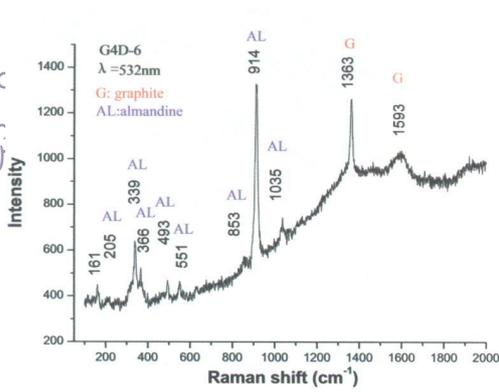


图 4-37 样品 G4D 中石墨包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

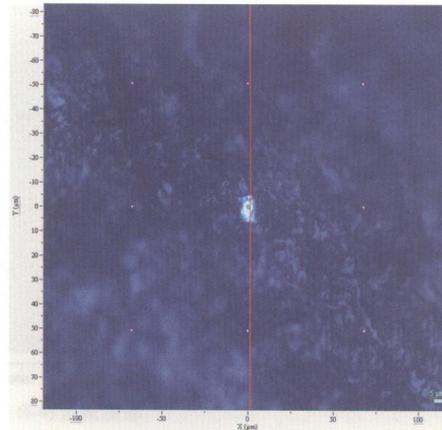
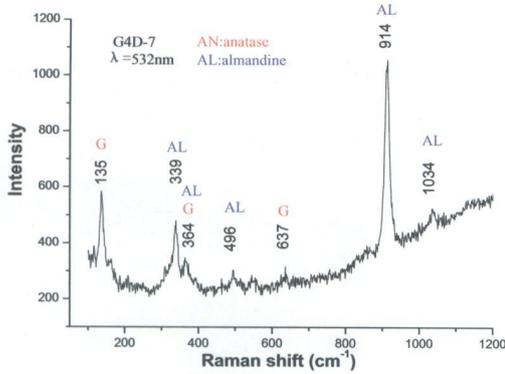


图 4-38 样品 G4D 中锐钛矿包裹体和铁铝榴石基体的拉曼图谱及显微图像

(8) 样品 G4E 中的包裹体组合

样品 G4E 中的包裹体种类有磁铁矿 (Magnetite)、石英 (Quartz)、石墨 (Graphite) 和锐钛矿 (Anatase)。图 4-39 展示了样品 G4E 中磁铁矿包裹体的拉曼图谱及显微图像，主要拉曼峰在 310cm^{-1} 和 659cm^{-1} 附近。图 4-40 展示了样品 G4E 中磁铁矿、锐钛矿和石墨包裹体的拉曼图谱和显微图像，其中在 309cm^{-1} 和 678cm^{-1} 归属于磁铁矿，在 141cm^{-1} 处的拉曼峰为锐钛矿的特征峰，在 1341cm^{-1} 和 1570cm^{-1} 附近的拉曼峰归属于石墨。

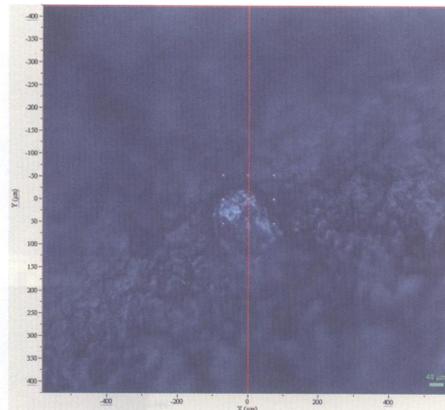
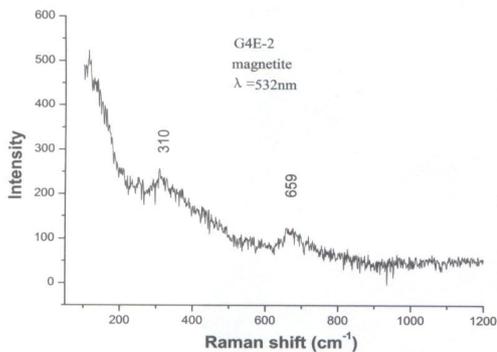


图 4-39 样品 G4E 中磁铁矿的拉曼图谱及显微图像

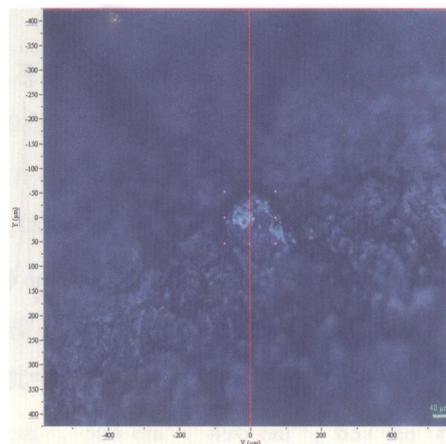
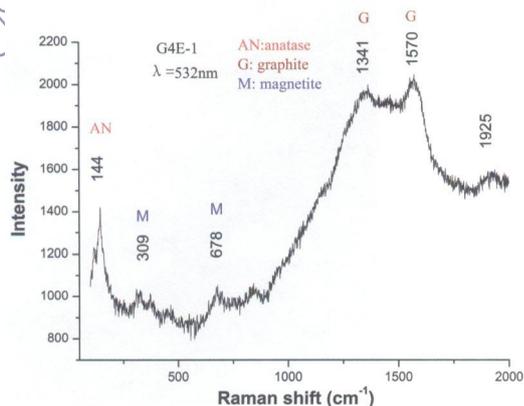
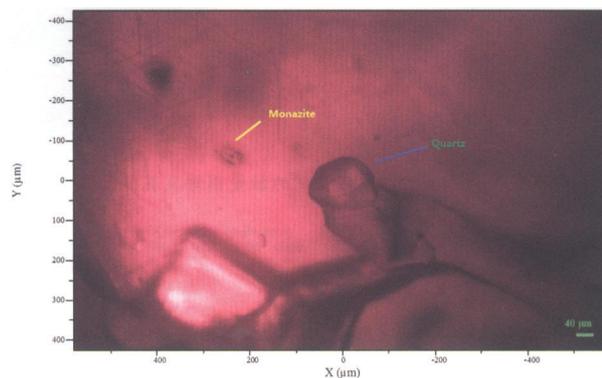
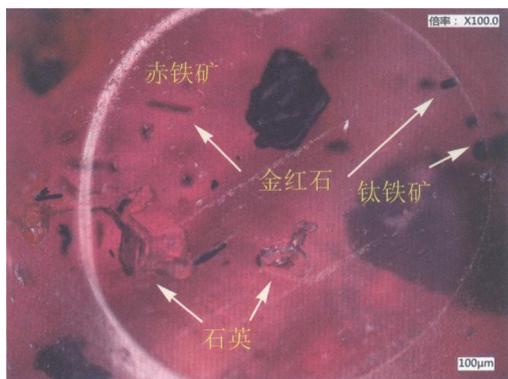


图 4-40 样品 G4E 中锐钛矿、石墨和磁铁矿包裹体的拉曼图谱及显微图像

通过以上分析可以看出，在合浦九只岭 M5 出土的石榴子石珠饰中，包裹体种类有石英、金红石、锐钛矿、板钛矿、赤铁矿、晶体石墨、石墨碳、磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、硅线石、独居石和锆石等包裹体，图 4-41 展示了样品 G4B 中部分包裹体（赤铁矿、金红石、钛铁矿、独居石、石英）的分布情况；图 4-42 展示了样品 G1 中钛铁矿和石英包裹体的显微图像；图 4-43 展示了样品 G3 中硅线石包裹体的显微图像。每件样品检测到的包裹体组合见表 4-10。



a

b

图 4-41 样品 G4B 中部分包裹体（赤铁矿、金红石、钛铁矿、独居石、石英）的显微图像

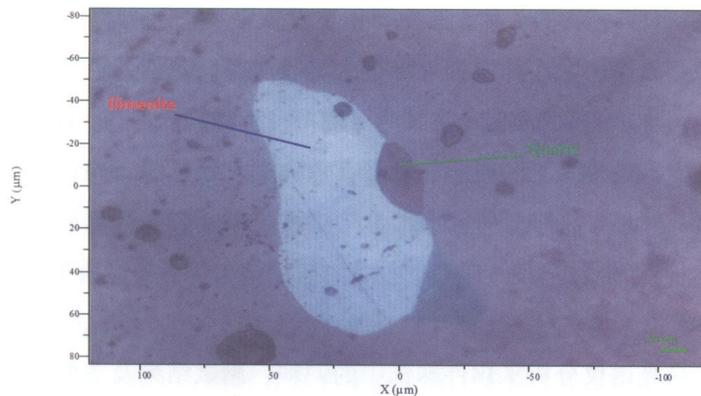


图 4-42 样品 G1 中钛铁矿和石英包裹体的显微图像

仅供阅读 请勿侵权

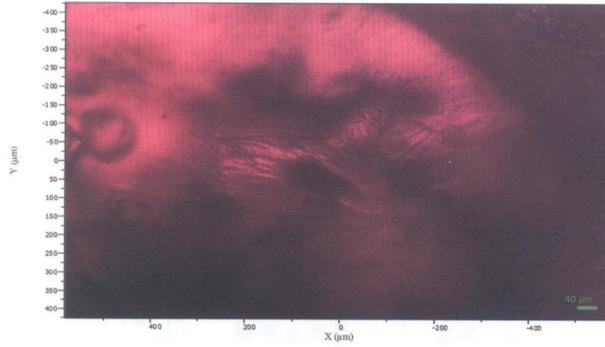


图 4-43 样品 G3 中硅线石包裹体的显微图像

表 4-10 九只岭 M5 石榴子石包裹体拉曼物相统计表

样品编号	包裹体物相组合
G1	磁铁矿+锐钛矿+石英+钛铁矿
G2	磁铁矿+赤铁矿+锐钛矿+钛铁矿+磷灰石+石墨+石英+硅线石
G3	钛铁矿+磁铁矿+硅线石+石英
G4A	石墨
G4B	金红石+钛铁矿+锆石+独居石+石墨+石英+磁铁矿
G4C	磁铁矿+赤铁矿+板钛矿
G4D	磁铁矿+石英+锐钛矿+石墨
G4E	磁铁矿+石英+锐钛矿+石墨