

滇西双江县勐库地区(退变)榴辉岩的岩石学、 矿物学特征

徐桂香, 曾文涛, 孙载波, 黄亮, 陈光艳, 田素梅, 周坤

XU Guixiang, ZENG Wentao, SUN Zaibo, HUANG Liang, CHEN Guangyan,
TIAN Sumei, ZHOU Kun

云南省地质调查院, 云南昆明 650216

Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China

摘要:滇西双江县勐库镇以北的那卡河、控角等地出露的(退变)榴辉岩以构造岩片的形式产于奥陶纪湾河蛇绿岩混杂岩带中。根据退变质程度差异依次划分为退变榴辉岩、榴闪岩、含石榴斜长角闪岩,主要矿物成分为角闪石、石榴子石、单斜辉石、斜长石,次要矿物成分为金红石、多硅白云母、硬玉、绿帘石、黑云母、磷灰石、石英等,特征的高压-超高压变质矿物绿辉石仅残余在少量的石榴子石、角闪石中,以包裹体形式产出。岩石学和矿物学研究表明,该榴辉岩峰期变质矿物组合为:绿辉石+石榴子石+金红石+石英+多硅白云母。石榴子石中的部分石英包裹体周围发育放射状的胀裂纹,暗示其可能由柯石英转化而成。由此推断,该榴辉岩可能经历了超高压变质作用。

关键词:勐库地区; (退变)榴辉岩; 岩石矿物学特征; 双江县; 滇西

中图分类号: P588.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2016)07-1035-11

Xu G X, Zeng W T, Sun Z B, Huang L, Chen G Y, Tian S M, Zhou K. Petrology and mineralogy of (retrograded) eclogites from Mengku area, Shuangjiang County, western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(7):1035-1045

Abstract: Retrograded eclogites are exposed in structural-sheet form in Naka River, Kongjiao and some other areas north of Mengku Town, Shuangjiang County of west Yunnan Province and occur in Ordovician Wanhe ophiolite mélange belt. According to different retrograde degrees, the eclogites can be divided into retrograded eclogites, garnet-amphibolite and garnet-bearing amphibolite. The main minerals include garnet, clinopyroxene, amphibole, and plagioclase together with minor rutile, phengite, jadeite, epidote, biotite, apatite, quartz etc. Omphacite, which is a typical HP-UHP metamorphic mineral, only exists as inclusions in a small amount of garnet and amphibole. Petrological and mineralogical characteristics show that the mineral assemblage at the metamorphic peak is $Omp+Gt+Ru+Q+Phen$. Due to the growth of radial bulging cracks around some quartz inclusions in garnet, it is held that some quartz inclusions belong to retrograded coesite. The retrograded eclogite therefore must have undergone UHP metamorphism.

Key words: Mengku area; (retrograded) eclogites; characteristics of petrology and mineralogy; Shuangjiang County; western Yunnan Province

云南省地质调查院在开展云南1:5万香竹林、勐勇、勐撒、懂过、耿马、安雅和勐库7幅区域地质矿产调查工作时,在滇西双江勐库地区的湾河蛇绿混杂岩中首次发现多个规模不等的(退变)榴辉岩构造透镜体。

这在云南省境内乃至整个扬子陆块边缘均属首次发现。通过对系列样品的岩相学及矿物学研究,确定其为(退变)榴辉岩,并且遭受了强烈退变质作用的改造,大部分样品已彻底转变为榴闪岩、斜长角闪岩。

收稿日期:2016-01-12;修订日期:2016-05-05

资助项目:云南省科技领军人才培养计划项目(编号:2013HA001)和中国地质调查局项目(编号:121201010000150007)

作者简介:徐桂香(1965-),女,高级工程师,从事岩矿鉴定工作。E-mail: ynxuguixiang@126.com

1 区域地质背景

滇西双江地区位于昌宁-孟连结合带中段,保留有完整的特提斯构造演化的物质记录,是研究特提斯洋形成及发展演化的关键地区。许多学者^[1-10]对该地区的地质背景进行过较为深入的研究。普遍认为,昌宁-孟连构造带是冈瓦纳大陆北缘的小陆块群与扬子陆块西南缘弧-盆系之间的古特提斯洋盆最终消亡的位置,其中的石炭纪铜厂街蛇绿混杂岩(*CToφm*)代表了古特提斯洋盆闭合后的遗迹,古特提斯洋盆是对原特提斯洋盆的继承性发展,古特提斯洋盆的发展演化经历了较为完整的威尔逊旋回。对于古特提斯洋盆对原特提斯洋盆如何继承发展,原特提斯洋盆的表现形式、发展演化等基础性地质问题一直鲜有提及。

云南省地质调查院及其他科研单位最近十余年来在昌宁-孟连构造带上开展的1:25万、1:5万区域地质调查及科研工作,对该地区的构造背景又有了一些新的发现和认识^{[11-13]①-⑤},为回答上述问题奠定了较为坚实的基础。主要包括以下3个方面:①在石炭纪铜厂街蛇绿混杂岩(*CToφm*)以东的头道水-邦海-大南美-勐库-湾河一带厘定出一条断续出露长度超过100km的奥陶纪湾河蛇绿混杂岩(*OWoφm*)^[14],表明昌宁-孟连结合带是由2条不同时期的蛇绿混杂岩构成的复杂的板块缝合带(图1);②在前人划分的中元古界澜沧岩群的绿片岩及变玄武岩、新元古界王雅岩组及允沟岩组的变质流纹岩中获得了一批可信度较高的早古生代LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(501~440Ma),表明铜厂街蛇绿混杂岩东、西两侧的澜沧岩群、王雅岩组、允沟岩组等浅变质岩系并非以往认为的元古宙基底岩系,而是与湾河蛇绿混杂岩对应的大陆边缘沉积;③在控角、那卡河等地的奥陶纪湾河蛇绿混杂岩中发现多处规模不等的(退变)榴辉岩构造岩片(图1),初步研究表明,其主要经历了4期退变质作用的改造^[14],并获得230Ma的榴辉岩主期变质年龄^[15]。

本文依据(退变)榴辉岩的镜下特征及主要造岩矿物的电子探针分析成果,对该地区(退变)榴辉岩的岩石学及矿物学特征作进一步的研究、讨论,为峰期变质、早期退变质、主期退变质的温-压环境及变质作用过程、折返机制研究提供坚实的基础,也

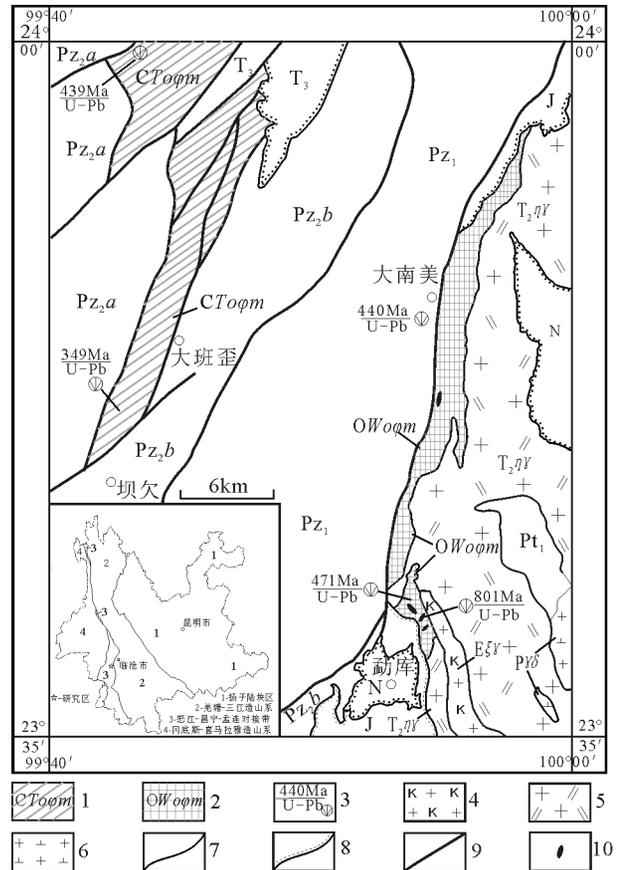


图1 研究区地质简图及退变质榴辉岩的出露位置

Fig. 1 Geological map of the study area and outcrop location of retrograded eclogite

N—新近系;J—侏罗系;T₃—上三叠统;Pz_{2a}—西部上古生界被动陆缘沉积;Pz_{2b}—东部上古生界被动-主动陆缘沉积;Pz₁—下古生界澜沧岩群;Pt₁—古元古界崇山岩群;Eξγ—古近纪正长花岗岩;T₂ηγ—中三叠世二长花岗岩;Pγδ—二叠纪花岗岩;1—石炭纪铜厂街蛇绿混杂岩;2—奥陶纪湾河蛇绿混杂岩;3—同位素采样位置及年龄值;4—正长花岗岩;5—二长花岗岩;6—花岗岩长岩;7—地质界线;8—角度不整合界线;9—断层;10—退变质榴辉岩出露位置

为整个滇西地区原特提斯-古特提斯的构造演化提供变质地质学方面的支撑。

2 (退变)榴辉岩的岩石学特征

根据显微镜下主要造岩矿物种类及结构、构造特征,本区的(退变)榴辉岩可划分为以下4种类型:退变榴辉岩、榴闪岩、条纹-条带状榴闪岩、含石榴斜长角闪岩(图版 I-a~c)。各自的特征简述如下。

(1) 退变榴辉岩

为退变质程度最低的榴辉岩类,以样品 D1502-9-1、D0302-1-1 最具代表性。岩石呈灰绿色,比重较大,具粗-中粒粒状变晶结构,块状构造,主要由粗中粒状(1~4mm)淡粉红色石榴子石及灰绿色单斜辉石(以透辉石为主,少部分为普通辉石,极少部分为绿辉石)和角闪石类矿物组成。主要造岩矿物为石榴子石(35%)、单斜辉石(35%)、角闪石(23%),次要矿物有斜长石(8%)、金红石、榍石、钛铁矿(4%)、绿帘石(2%)、磷灰石等。此外,有少量后期呈细脉状、浸染状产出的黄铁矿(3%)、产于石榴子石中的少量石英包裹体等。单斜辉石可分为 3 种类型:绿辉石(Omp),粒度较细小(0.08~0.20mm)、淡绿色,具弱多色性、辉石式解理,呈包裹体产于石榴子石中,电子探针分析结果见表 1,为典型的绿辉石;普通辉石(Cpx₁),呈浑圆状、自形较好的短柱状残留在透辉石(Cpx₂)中,其内可见蠕虫状斜长石(Pl₁)后成合晶,个别颗粒残余短柱状绿辉石假象(图版 I-d);透辉石(Cpx₂),呈半自形-他形柱状,与 Cpx₁ 界面截然,局部退变成角闪石与斜长石后成合晶,内见榍石、钛铁矿、石英包裹体,沿裂隙、边缘普遍见纤维状淡绿色角闪石-阳起石集合体呈团块状交代,部分颗粒被交代呈港湾状。石榴子石呈自形-半自形近等轴粒状,大部分保存较好,部分已完全退变成绿帘石+斜长石+角闪石后成合晶,退变强烈者仅保留其假象,内见榍石、钛铁矿包裹体。岩石中角闪石可分为多种类型:早期隐晶状淡棕黄色角闪石(Hb₁)呈残余状分布于细粒他形柱状黄绿色的角闪石中(Hb₂),最晚期淡绿色-无色的纤维状角闪石-阳起石集合体(Hb₃)沿辉石、石榴子石的边缘及裂隙呈团块状交代。

(2) 块状榴辉岩

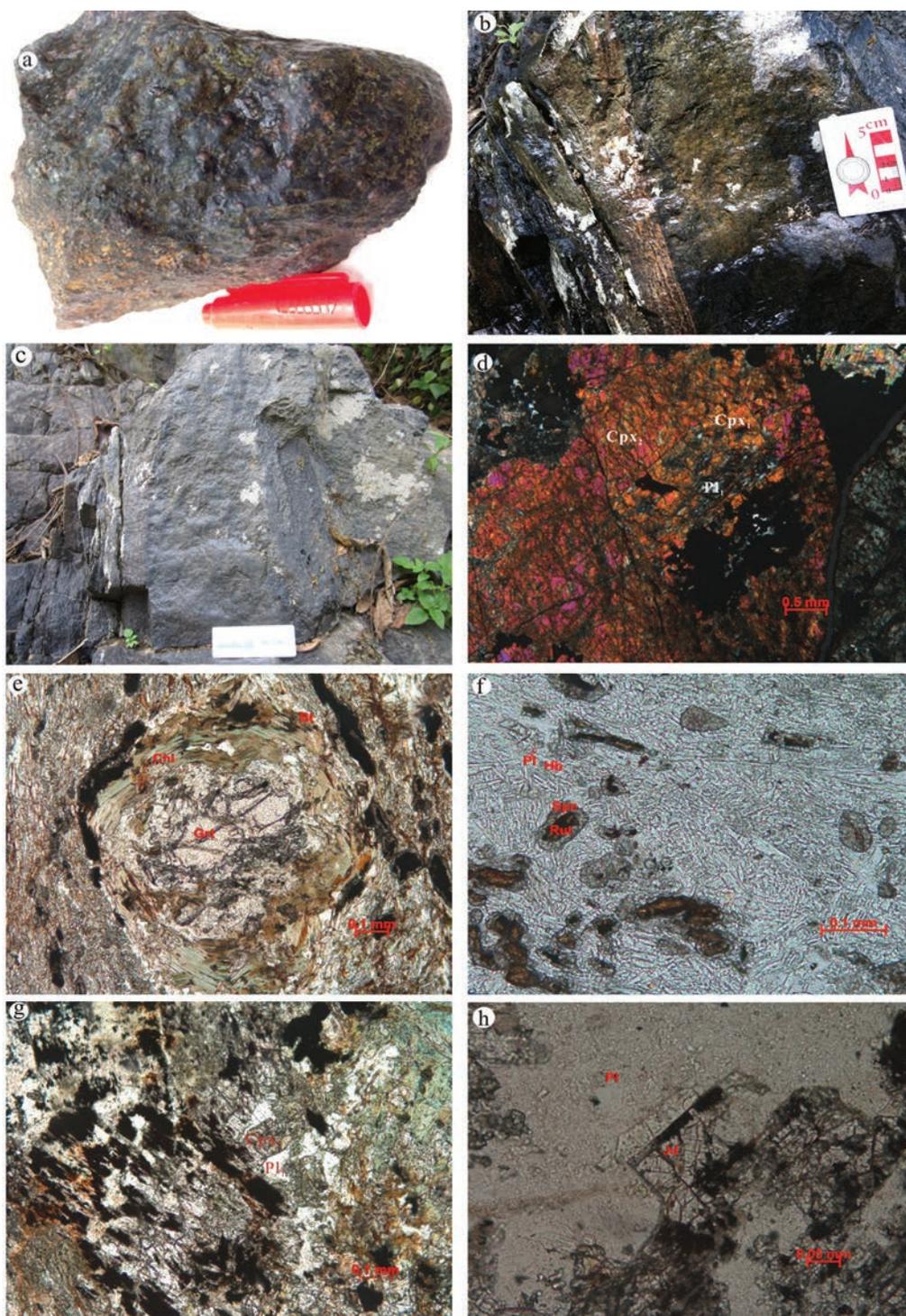
为退变质程度较强的榴辉岩,本次发现的(退变)榴辉岩绝大多数属这类;其中仅偶见辉石类矿物残余,以样品 KJH-1-2、MNH-1-6、MNH1-7 最具代表性。岩石具斑状、纤柱状变晶结构,局部发育反应边结构、后成合晶结构,微网结-网纹状定向构造。中-细粒状(1~3mm)粉红色石榴子石(40%)变斑晶不均匀散布于灰绿色角闪石基质中,呈半自形-他形近等轴粒状,内部普遍见金红石、钛铁矿、榍石及少量石英包裹体,普遍具黑云母、绿泥石、绿帘石退变反应边(图版 I-e),退变强烈者完全分解

成角闪石+斜长石、角闪石+斜长石+黑云母、绿帘石+斜长石+角闪石的后成合晶,其中斜长石具弱绢云母化,黑云母具绿泥石化。基质主要由柱状、纤柱状、纤维状角闪石(45%)组成,含少量斜长石(10%)及金红石、榍石、钛铁矿(5%)等。角闪石族矿物多与斜长石呈蠕虫状、指纹状、或细粒状交生集合体产出,构成蠕虫状、指纹状、细粒状后成合晶结构(图版 I-f);按产状可分为多种类型:淡棕黄色角闪石(Hb₁),多与斜长石构成隐晶状、蠕虫状后成合晶,呈残斑状分布于微细粒状的其他角闪石中,内见金红石包裹体及绿辉石残余(图版 II-c),可能主要由绿辉石退变分解形成;淡黄绿色、浅蓝绿色角闪石(Hb₂),多与斜长石构成指纹状、细粒状后成合晶,部分构成石榴子石退变反应边;蓝绿色角闪石(Hb₃),呈脉状穿切于淡黄绿色角闪石(Hb₂)中;浅绿色、无色角闪石(Hb₄),大部分结晶粗大、晶形完整、少部分呈纤维状集合体,杂乱分布或沿裂隙呈脉状分布,属阳起石、透闪石等低绿片岩相的变质矿物。岩石局部残余呈透镜-条痕状产出细中粒(0.2~2.0mm)普通辉石(Cpx₁)及斜长石变晶(Pl₁)集合体(图版 I-g),二者互相交生,呈帚状、细粒状后成合晶产出,其中普通辉石已不同程度角闪石化、褐铁矿化,斜长石具有绢云母化,个别斜长石颗粒中可见硬玉(图版 I-h),并发育交代现象,可能为峰期变质矿物的残余。

(3) 条纹-条带状榴辉岩

具条纹-条带状构造,以样品 MNH-1-5 为代表,岩石由粉红色细粒(0.5~1.0mm)石榴子石(石榴子石岩)、浅灰白色石英-石榴子石条纹-条带与灰黑色细粒榴辉岩条纹-条带呈互层状产出(图版 I-b)。榴辉岩条带由细粒($d=0.5\sim 2.0\text{mm}$)自形-半自形石榴子石变斑(30%)及呈交生状、后成合晶状定向分布的黑云母(25%)、斜长石(25%)、角闪石(3%)、绿泥石(5%)和呈条痕状聚集产出的榍石(7%)组成,局部见少量石英-黄铁矿(5%)团块,部分石榴子石变斑晶富含包裹体,包裹体成分较复杂,有石英、多硅白云母、自形较好的六边形磷灰石、绿帘石、阳起石及呈菱形分布的帘石、云母复合包裹体(由硬柱石退变形成?)(图版 II-b)。石榴子石条带主要由粒度较细(0.03~0.35mm)、自形较好的石榴子石(75%)及分布其间呈交生状、后成合晶状定向产出的微细($d<0.30\sim 0.02\text{mm}$)鳞片状绿泥石

图版 I Plate I



a.块状退质榴辉岩;b.块状与条纹-条带状榴闪岩野外露头;c.含石榴斜长角闪岩野外露头;d.残留在透辉石(Cpx_2)中的普通辉石(Cpx_1)与斜长石(Pl_1)后成合晶,保留自形较好的短柱状绿辉石假象;
e.石榴子石(Grt)具黑云母(Bt)、绿泥石(Chl)退变反应边;f.角闪石(Hb)与斜长石(Pl)指纹状后成合晶,其内金红石(Rut)包体普遍具榍石(Spn)退变反应边;g.斜长石(Pl_1)与普通辉石(Cpx_1)帚状、细粒状后成合晶;h.硬玉(Jd)被斜长石(Pl)交代呈蚕食状

表 1 单斜辉石电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of clinopyroxene

样品 矿物	D0302-1-1		KJH-1-2			MNH-1-7		MNH-1-6		D0502-9-1						
	Omp	Omp	Jd	Omp	Omp	Omp	Jd	Omp	Omp	Aug	Dio	Dio	Dio	Dio	Dio	Dio
SiO ₂	53.310	53.682	62.596	57.935	58.650	55.899	60.561	60.109	56.585	55.402	55.140	54.402	56.045	55.787	54.932	54.948
TiO ₂	0.060	0.064	0.047	0.011	0.000	0.141	0.013	1.311	0.049	0.079	0.048	0.107	0.127	0.013	0.068	0.087
Al ₂ O ₃	9.383	12.925	20.189	13.938	15.412	9.128	22.256	17.593	19.076	0.304	0.724	1.197	1.064	0.239	0.331	0.862
FeO	5.276	3.802	1.696	4.472	3.987	11.241	1.184	3.505	7.039	10.340	11.130	10.493	7.894	12.024	12.485	10.541
MnO	0.056	0.087	0.000	0.048	0.053	0.160	0.021	0.071	0.062	1.500	1.178	1.206	0.831	1.424	1.240	1.172
MgO	9.068	6.490	1.624	6.507	3.794	9.924	0.402	3.651	2.187	11.796	10.973	10.684	12.634	10.246	10.204	10.597
CaO	12.309	12.466	4.313	6.674	6.837	9.951	5.449	3.762	7.254	20.713	21.994	21.677	23.154	21.699	20.438	22.282
Na ₂ O	5.323	2.900	8.763	4.433	7.815	4.225	9.029	7.010	8.370	0.104	0.006	0.065	0.046	0.039	0.033	0.055
K ₂ O	0.029	0.037	0.083	0.045	0.081	0.110	0.168	0.121	0.326	0.011	0.003	0.016	0.006	0.015	0.000	0.000
合计	94.814	92.453	99.311	94.063	96.631	100.778	99.083	97.171	100.977	100.249	101.196	99.847	101.801	101.486	99.731	100.544
Wo	43.071	50.814	54.620	34.659	44.774	30.469	78.413	32.336	45.795	44.657	46.915	47.447	48.692	46.698	45.056	48.249
En	44.149	36.809	28.616	47.017	34.571	42.279	8.049	43.665	19.210	35.386	32.567	32.539	36.968	30.681	31.299	31.928
Fs	12.780	12.377	16.765	18.324	20.655	27.252	13.538	23.998	34.995	19.957	20.518	20.014	14.339	22.621	23.644	19.823
Quad	59.647	69.861	19.836	54.385	34.905	67.741	17.361	31.196	33.768	99.139	99.938	99.405	99.621	99.621	99.737	99.571
Jd	38.213	30.139	80.164	45.615	65.095	32.259	82.639	68.804	66.232	0.861	0.062	0.595	0.379	0.379	0.263	0.429
Ae	2.140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:Omp—绿辉石;Jd—硬玉;Dio—透辉石;Aug—普通辉石;Wo—硅灰石;En—顽火辉石;Fs—铁辉石;Quad—普通辉石;
Ae—霓石

(6%)、黑云母(2%)、纤柱状角闪石(2%)、他形微细粒状斜长石(5%)和石英(6%)、黄铁矿(2%)、磷灰石(1%)、榍石(1%)组成。石英-石榴子石条带由粒度较细(0.03~0.35mm)的自形粒状新鲜、干净、无包裹体的石榴子石(50%)及干净明亮的他形填隙状石英(50%)组成。石英-石榴子石-多硅白云母条带由半定向分布、粒度较细(0.05~0.25mm)、自形较好的近等轴多边形状石榴子石(40%)及他形微细鳞片状(0.1~0.3mm)多硅白云母(40%)和石英(20%)组成,矿物之间彼此以简单的近平直边界互相紧密镶嵌,属于平衡共生的矿物组合。

岩石中的条纹-条带状构造与其寄主的条纹-条带状斜长角闪岩-英云闪长岩(变质的堆晶辉长岩类)十分相似,这些条纹-条带状构造可能暗示了原始的火成堆积层理^[11]。不同条带-条痕中的石榴子石可能是多期退变质作用的产物。

(4) 含石榴斜长角闪岩

为退变质较彻底的榴辉岩类,岩石呈暗绿色,微细粒结构、块状构造,主要由绿色角闪石类矿物组成,含一定量的斜长石和少量石榴子石。岩石具微细粒状-纤柱状变晶结构(后成合晶结构),主要

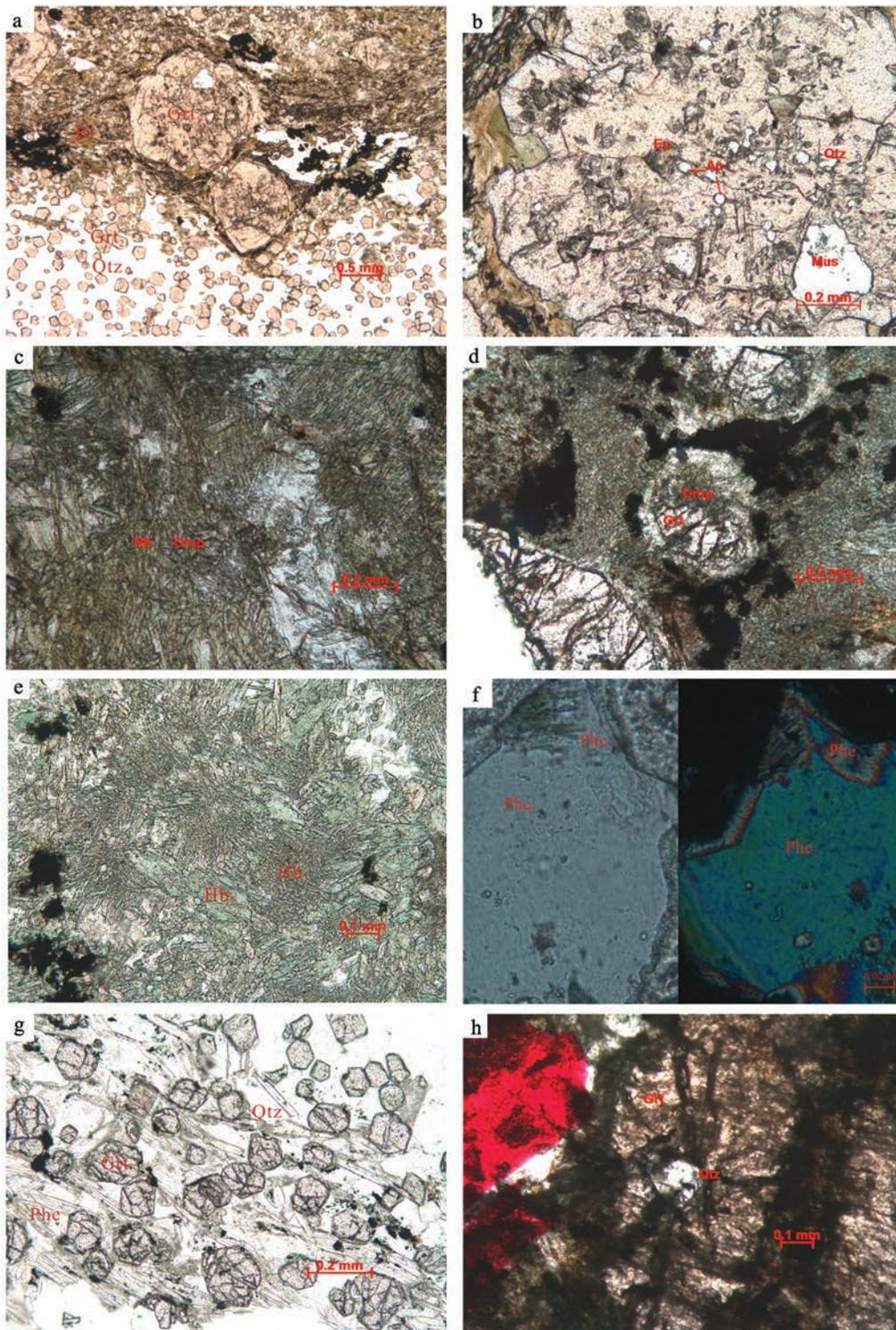
由呈交生状(后成合晶状)分布的他形微细粒纤柱状(0.05~0.30mm)角闪石(60%)及他形微细粒状(0.05~0.25mm)斜长石(32%)组成,含少量微细粒状(0.02~0.10mm)石榴子石(2%)及榍石、钛铁矿(6%)。角闪石也存在多种类型,与榴闪岩中的情况类似。

3 退变质榴辉岩的矿物学特征

区内各类退变质榴辉岩、榴闪岩的代表性矿物电子探针分析结果见表 1—表 4,结合显微镜下的观察、研究,本文重点讨论石榴子石、单斜辉石、角闪石、多硅白云母等变质矿物的特征。

石榴子石:镜下呈无色、淡粉红色,自形-半自形的近等轴多边形状、正极高突起、全消光,颗粒大小、颜色、含量、成分在不同的岩石类型中均有一定程度的差异。主要有 4 种产出状态:退变质榴辉岩中的石榴子石呈粗中粒状变晶产出,淡粉红色,自形-半自形状,粒径 1~4mm,包裹体含量较少,仅含少量榍石、石英包裹体,偶见绿辉石、镁铝榴石包裹体,其内不规则裂纹发育,沿裂纹见绿帘石、角闪石充填、交代,少部分颗粒见 Ep+Pl+Hb 冠状反应边,个

图版 II Plate II



a. 榴闪岩的条纹-条带状构造; b. 石榴子石(Grt)中富含白云母(Mus)、石英(Qtz)、磷灰石(Ap)、绿帘石(Ep)等包裹体; c. 角闪石(Hb)中的绿辉石(Omp)包裹体; d. 石榴子石(Grt)中的绿辉石(Omp)包裹体; e. 淡棕黄色角闪石(Hb₁)呈残余斑块状分布于浅蓝绿色角闪石(Hb₂)中; f. 石榴子石中多硅白云母(Phe₁、Phe₂)包裹体; g. 多硅白云母(Phe)与石英(Qtz)、石榴子石(Grt)平衡共生; h. 石榴子石(Grt)胀裂纹结构, 具柯石英假象多晶石英(Qtz)

别颗粒完全分解成 $Ep+Pl+Hb$ 后成合晶。榴辉岩中的石榴子石呈变斑晶产出,淡粉红色,自形-半自形状,粒度 $0.5\sim 30\text{mm}$,普遍含金红石、钛铁矿包裹体,少部分变斑晶富含多种包裹体,如石英、多硅白云母($d=0.3\text{mm}$)、黑云母、角闪石及呈菱形产出($d=0.1\sim 0.2\text{mm}$)的帘石-云母复合包裹体(可能是由硬柱石强烈退变质作用形成后成合晶);大部分石榴子石具角闪石、黑云母、绿泥石降压退变反应边结构,退变较彻底者,仅保留其假象。含石榴斜长角闪岩中的石榴子石呈包裹体形式产出,无色,他形粒状、不规则状、浑圆状,粒度极细($0.02\sim 0.05\text{mm}$),含量低(2%),分布在斜长石-角闪石的后成合晶中。与条纹-条带状榴辉岩伴生的石英-石榴子石条带中的石榴子石呈微细粒状变晶产出(图版 II-a),呈无色的自形粒状,粒度细($0.05\sim 0.35\text{mm}$),大多干净、无包裹体。

电子探针分析结果(表 1)进一步表明,不同岩石类型中的石榴子石化学成分也有一定变化;退变榴辉岩的石榴子石的镁铝榴石包裹体的 $Py=30.1\text{mol}\%$, $Alm=53.7\text{mol}\%$, $Gro=15.5\text{mol}\%$, $Sp=0.72\text{mol}\%$,这类镁铝榴石包裹体可能是峰期变质矿物的残余^[6]。作为退变榴辉岩、块状榴辉岩、条纹-条带状榴辉岩、石榴子石岩主要造岩矿物产出的石榴子石变斑晶的 $Py=3.3\text{mol}\%\sim 10.7\text{mol}\%$,平均 $7.5\text{mol}\%$, $Alm=56.7\text{mol}\%\sim 66.6\text{mol}\%$,平均为 $63.4\text{mol}\%$, $Gro=22.0\text{mol}\%\sim 29.3\text{mol}\%$,平均为 $26.9\text{mol}\%$,

$Sp=0.9\text{mol}\%\sim 4.9\text{mol}\%$,平均为 $2.1\text{mol}\%$ 。这类石榴子石的成分变化较为连续、且跨度较大,可能是早期榴辉岩相^[6]退变质作用的产物。石英-石榴子石条带中的无色石榴子石的 $Py=2.7\text{mol}\%\sim 6.8\text{mol}\%$,平均为 $3.9\text{mol}\%$, $Alm=68.8\text{mol}\%\sim 73.2\text{mol}\%$,平均为 $70.9\text{mol}\%$, $Gro=17.2\text{mol}\%\sim 24.6\text{mol}\%$,平均为 $22.1\text{mol}\%$, $Sp=2.7\text{mol}\%\sim 3.6\text{mol}\%$,平均为 $3.1\text{mol}\%$,这类石榴子石以较高的 Alm 分子、较低的 Py 分子为特征,其地质意义有待进一步研究。

单斜辉石:根据显微镜下观察、研究及电子探针分析结果,可分为硬玉、绿辉石、普通辉石、透辉石 4 类。

硬玉:零星分布于斜长石中,并被交代呈港湾状(图版 I-h),无色,细粒状($d=0.5\text{mm}$),横切面呈近四边形,正高突起,具辉石式解理,干涉色一级灰白,发育简单双晶、斜消光,消光角较一般辉石小($Ng\wedge c=28^\circ$);电子探针分析结果表明,硬玉分子 $Jd=80.2\text{mol}\%\sim 82.6\text{mol}\%$,在 $Quad-Jd-Ae$ 图解(图 2)中落入硬玉区域。

绿辉石:呈淡绿色,绝大多数颗粒的粒度较细($0.08\sim 0.20\text{mm}$),呈粒柱状;以包裹体形式存在于部分石榴子石及角闪石中(图版 II-c、d),电子探针分析结果显示其硬玉分子 $Jd=30.1\text{mol}\%\sim 68.8\text{mol}\%$,为典型的绿辉石,在 $Quad-Jd-Ae$ 图解(图 2)中均落入绿辉石区域。

普通辉石(Cpx_1):呈淡绿色,他形-半自形粒柱

表 2 石榴子石电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of garnet

样品	D0302-1-1		D1502-9-1		KJH-1-2			MNH-1-5			D0502-9-1			%			
SiO ₂	37.483	32.292	38.004	38.477	38.848	38.034	38.091	37.936	38.485	38.880	38.619	39.541	39.856	40.044	39.760	40.083	38.922
TiO ₂	0.097	0.071	0.110	0.088	0.129	0.134	0.261	0.202	0.152	0.139	0.112	0.280	0.159	0.102	0.191	0.041	0.203
Al ₂ O ₃	21.146	20.753	20.816	20.347	20.978	21.868	21.396	21.255	20.785	18.070	18.348	19.884	20.390	20.546	20.607	20.779	20.464
FeO	29.473	26.898	28.462	27.788	29.431	28.846	28.786	26.108	30.195	30.062	29.115	31.353	30.616	31.837	30.515	32.550	31.178
MnO	0.449	0.356	0.492	0.551	0.523	0.540	0.479	2.239	0.385	2.016	1.945	1.175	1.311	1.452	1.593	1.268	1.294
MgO	1.634	8.478	2.433	2.731	2.468	1.835	1.990	2.347	1.274	1.728	0.815	0.723	0.687	1.193	0.853	1.685	0.672
CaO	9.459	6.057	9.748	9.630	9.574	9.753	9.556	10.517	10.031	7.754	9.333	7.922	8.429	6.821	8.351	5.973	8.202
Na ₂ O	0.025	0.062	0.032	0.009	0.003	0.012	0.005	0.000	0.002	0.000	0.000	0.066	0.035	0.024	0.052	0.057	0.034
K ₂ O	0.007	0.019	0.000	0.007	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.009	0.014	0.007	0.018	0.000	0.012
合计	99.773	94.988	100.097	99.628	101.962	101.022	100.564	100.604	101.309	98.659	98.287	100.953	102.026	102.026	101.940	102.436	100.981
Py	6.480	30.146	9.474	10.689	9.437	7.244	7.873	9.090	4.969	6.828	3.266	2.931	2.786	4.815	3.429	6.752	2.711
Alm	65.554	53.655	62.161	61.001	63.120	63.875	63.880	56.714	66.061	66.628	65.434	71.286	69.633	72.072	68.807	73.161	70.546
Gro	26.955	15.479	27.277	27.085	26.307	27.670	27.170	29.270	28.117	22.018	26.873	23.077	24.562	19.783	24.126	17.200	23.777
Sp	1.011	0.719	1.088	1.225	1.136	1.211	1.077	4.926	0.853	4.525	4.427	2.706	3.020	3.329	3.638	2.887	2.965

注:Py—镁铝榴石;Alm—铁铝榴石;Gro—钙铝榴石;Sp—锰铝榴石

表3 角闪石电子探针分析结果
Table 3 Electron microprobe analyses of amphibole

样品 矿物	D0302-1-1				D1502-9-1					KJH-1-2							D0502-9-1					
	Fts	Tre	Fpar	Mhb	Ts	Mhb	Tre	Mhb	Tre	Act	Bar	Act	Mhb	Tre	Win	Mhb	Fts	Tre	Bar	Mhb	Act	Fhb
SiO ₂	38.167	55.517	40.629	50.223	42.412	49.343	53.925	45.973	56.566	54.005	53.212	56.079	51.531	54.462	55.186	50.374	40.642	55.41	47.439	51.518	53.622	52.111
TiO ₂	1.243	0.049	0.102	0.02	0.029	0.081	0.126	0.178	0.017	0.085	0.039	0.011	0.073	0.034	0.03	0.082	0.421	0.021	0.06	0.281	0.284	0.4
Al ₂ O ₃	16.198	1.468	14.889	3.857	11.351	6.986	3.524	10.183	1.269	2.753	4.514	1.253	3.341	1.504	3.288	5.254	15.593	1.589	9.005	6.92	5.115	4.065
FeO	19.177	9.121	19.589	14.171	19.156	11.783	9.512	16.853	8.356	11.699	11.425	9.425	11.906	9.228	8.067	15.163	17.249	10.576	13.822	15.428	15.295	21.431
MnO	0.377	0.038	0.245	0.28	0.377	0.265	0.13	0.171	0.003	0.145	0.101	0.133	0.125	0.066	0.064	0.214	0.149	0.124	0.123	0.905	1.329	1.037
MgO	6.311	19.117	7.512	14.887	9.015	14.65	16.886	10.777	18.879	16.207	18.089	17.888	16.501	18.93	19.232	13.456	9.45	18.234	13.648	11.651	12.238	8.988
CaO	10.381	10.584	10.894	10.085	10.393	11.3	10.974	10.451	10.612	11.635	8.996	11.718	11.695	10.629	10.173	11.339	10.74	10.774	9.775	10.149	10.394	10.224
Na ₂ O	2.175	0.517	2.217	0.79	2.023	1.195	0.848	1.591	0.529	0.318	0.878	0.397	0.6	0.602	0.907	0.807	2.405	0.483	1.697	0.518	0.454	0.323
K ₂ O	0.22	0.065	0.494	0.071	0.264	0.155	0.051	0.254	0.083	0.037	0.08	0.06	0.071	0.049	0.074	0.124	0.53	0.05	0.178	0.258	0.121	0.206
合计	94.249	96.476	96.571	94.384	95.02	95.75	95.976	96.431	96.314	96.884	97.334	96.964	95.843	95.504	97.021	96.813	97.179	97.261	95.747	97.628	98.852	98.785
Si	5.91	7.724	6.139	7.331	6.442	7.163	7.669	6.76	7.889	7.683	7.269	7.905	7.414	7.675	7.587	7.21	5.784	7.71	6.79	7.366	7.575	7.466
Al ^{IV}	2.09	0.241	1.861	0.663	1.558	0.837	0.331	1.24	0.111	0.317	0.727	0.095	0.566	0.25	0.413	0.79	2.216	0.261	1.21	0.634	0.425	0.534
Al ^{VI}	0.866	0	0.79	0	0.474	0.358	0.26	0.524	0.098	0.144	0	0.113	0	0.12	0.097	0.399	0	0.309	0.532	0.427	0.153	
Fe ³⁺	0.794	0.996	0.777	1.73	1.048	0.582	1.131	0.509	0.975	0.513	1.305	0.44	0	0.944	0.927	0	0	1.027	0	0.741	0.646	0
Ti	0.145	0.005	0.012	0.002	0.003	0.009	0.013	0.02	0.002	0.009	0.004	0.001	0.008	0.004	0.003	0.009	0.045	0.002	0.006	0.03	0.03	0.043
Fe ²⁺	1.689	0.065	1.698	0	1.385	0.848	0	1.563	0	0.878	0	0.671	1.432	0.143	0	1.815	2.053	0.203	1.654	1.103	1.161	2.568
Mn	0.049	0.004	0.031	0.035	0.048	0.033	0.016	0.021	0	0.017	0.012	0.016	0.015	0.008	0.007	0.026	0.018	0.015	0.015	0.11	0.159	0.126
Mg	1.457	3.965	1.692	3.239	2.041	3.17	3.58	2.362	3.925	3.437	3.684	3.759	3.539	3.977	3.942	2.871	2.005	3.782	2.912	2.484	2.577	1.92
Ca	1.722	1.577	1.763	1.577	1.691	1.757	1.672	1.646	1.586	1.773	1.317	1.77	1.803	1.605	1.498	1.739	1.638	1.606	1.499	1.555	1.573	1.569
Na	0.653	0.139	0.649	0.224	0.596	0.336	0.234	0.454	0.143	0.088	0.233	0.108	0.167	0.164	0.242	0.224	0.664	0.13	0.471	0.144	0.124	0.09
K	0.043	0.012	0.095	0.013	0.051	0.029	0.009	0.048	0.015	0.007	0.014	0.011	0.013	0.009	0.013	0.023	0.096	0.009	0.033	0.047	0.022	0.038
TOTAL	15.418	14.728	15.508	14.814	15.338	15.122	14.915	15.148	14.743	14.868	14.563	14.889	14.958	14.778	14.753	14.803	14.918	14.745	14.9	14.745	14.719	14.506
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.463	0.984	0.499	1	0.596	0.789	1	0.602	1	0.797	1	0.897	0.848	0.965	1	0.613	0.494	0.949	0.638	0.692	0.689	0.428

注：Fts—铁镁钙闪石；Tre—透闪石；Fpar—铁非闪石；Mhb—镁角闪石；Ts—镁钙闪石；Act—阳起石；Bar—冻蓝闪石；Win—蓝透闪石；Fhb—铁角闪石

状、浑圆状($d=0.2\sim 2.0\text{mm}$)，正高突起，干涉色二级蓝绿，斜消光($Ng\wedge c=51^\circ$)，多与斜长石构成帚状、细粒状、蠕虫状后合成晶(图版 I-g)，少部分在透辉石(Cpx_2)中呈残余状产出，电子探针分析结果表明， $Wo=44.7\text{mol}\%$ ， $En=35.4\text{mol}\%$ ， $Fs=20.5\text{mol}\%$ ，在辉石的 $Wo-En-Fs$ 分类图解(图略)中属普通辉石。

透辉石(Cpx_2)：呈淡绿色-无色，半自形-他形

粗中粒($d=1\sim 3\text{mm}$)变晶状，正高突起，具辉石式解理，干涉色二级蓝绿，斜消光($Ng\wedge c=42^\circ$)，部分颗粒内见普通辉石残余，沿边缘、裂隙见角闪石化，局部退变成斜长石与角闪石后合成晶。电子探针分析结果表明， $Wo=45.1\text{mol}\%\sim 48.7\text{mol}\%$ ， $En=30.7\text{mol}\%\sim 37.0\text{mol}\%$ ， $Fs=14.3\text{mol}\%\sim 23.6\text{mol}\%$ ，在辉石的 $Wo-En-Fs$ 分类图解(图略)中落入透辉石区域。

表4 多硅白云母电子探针分析结果
Table 4 Electron microprobe analyses of phengite

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	F	合计	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Fe(ii)	Mn	Mg	Ca	Na	K	F	TOTAL
KJH-1-5	54.168	0.253	24.388	2.52	0.066	4.063	0.084	0.123	6.518	0.353	92.535	3.763	1.76	0.237	0.013	0.146	0.004	0.421	0.006	0.016	0.577	0	6.943
KJH-1-5	56.142	0.268	23.329	2.723	0.013	4.601	0.017	0.115	6.737	0.106	94.051	3.846	1.73	0.154	0.014	0.156	0.001	0.47	0.001	0.015	0.589	0	6.976
PM029-26-2	55.034	0.212	23.871	4.006	0	3.744	0.013	0.138	7.243	0	94.307	3.807	1.746	0.183	0.011	0.231	0	0.385	0.001	0.018	0.638	0	7.020
PM029-26-2	54.33	0.221	24.083	3.295	0	3.667	0.015	0.187	7.918	0	93.716	3.786	1.763	0.214	0.011	0.192	0	0.386	0.001	0.025	0.704	0	7.082

注：以11个氧原子为基数，KJH-1-5—石榴子石中的包裹体，KJH-1-5—多硅白云母Phe₁、Phe₂，PM029-26-2—石榴白云母石英片岩中的多硅白云母(Phe₃)。勐库(退变)榴辉岩的矿物电子探针分析在中国地质调查局天津地质调查中心完成，加速电压为15kV，测试电流 $2.50\times 10^{-8}\text{A}$ ，电子束直径为 $5\mu\text{m}$

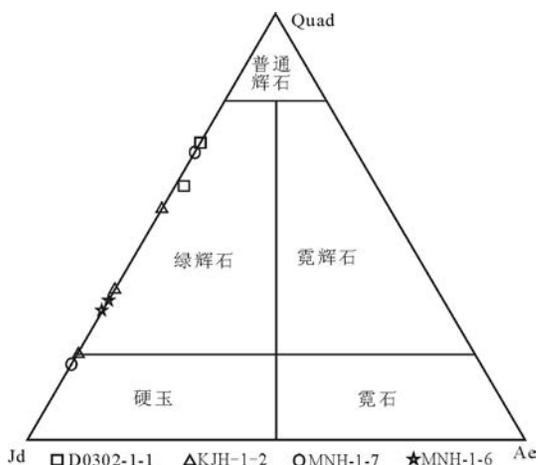


图2 单斜辉石 Quad-Jd-Ae 图解
Fig. 2 Quad-Jd-Ae compositional diagram of clinopyroxene

角闪石:为退变榴辉岩、榴闪岩、含石榴斜长角闪岩最主要的造岩矿物,其含量为20%~60%,一般与退变质程度呈正相关关系。电子探针分析结果

见表3、图3。根据 Leake 等^[7]的分类方案,绝大多数属钙质角闪石类,可进一步细分为镁钙闪石-铁镁钙闪石、镁绿钙闪石-铁韭闪石、镁角闪石-铁角闪石、透闪石-阳起石;少部分为钠-钙闪石类,包括冻蓝闪石及蓝透闪石。

钙质角闪石:可划分为4种类型。第一类角闪石(Hb₁)呈淡棕色、多呈隐晶状($d < 0.02\text{mm}$)产出,突起较一般闪石高,为正高突起,在无色或淡黄绿色的角闪石中呈残斑状分布(图版II-e),其钠质分子含量较高,内见绿辉石残余,富含金红石包裹体;电子探针分析结果为镁钙闪石、铁镁钙闪石。

第二类角闪石(Hb₂)呈柱状、纤柱状,细粒状、大部分为淡黄绿色,少部分为浅蓝绿色、无色,粒度 $d = 0.05 \sim 0.80\text{mm}$,多与斜长石构成指纹状、细粒状后成合晶,部分位于石榴子石颗粒边部与斜长石一起构成石榴子石退变边,电子探针分析结果为镁绿钙闪石、铁韭闪石、普通角闪石(镁角闪石-铁角闪石)。镁绿钙闪石:半自形-他形柱状、粒度

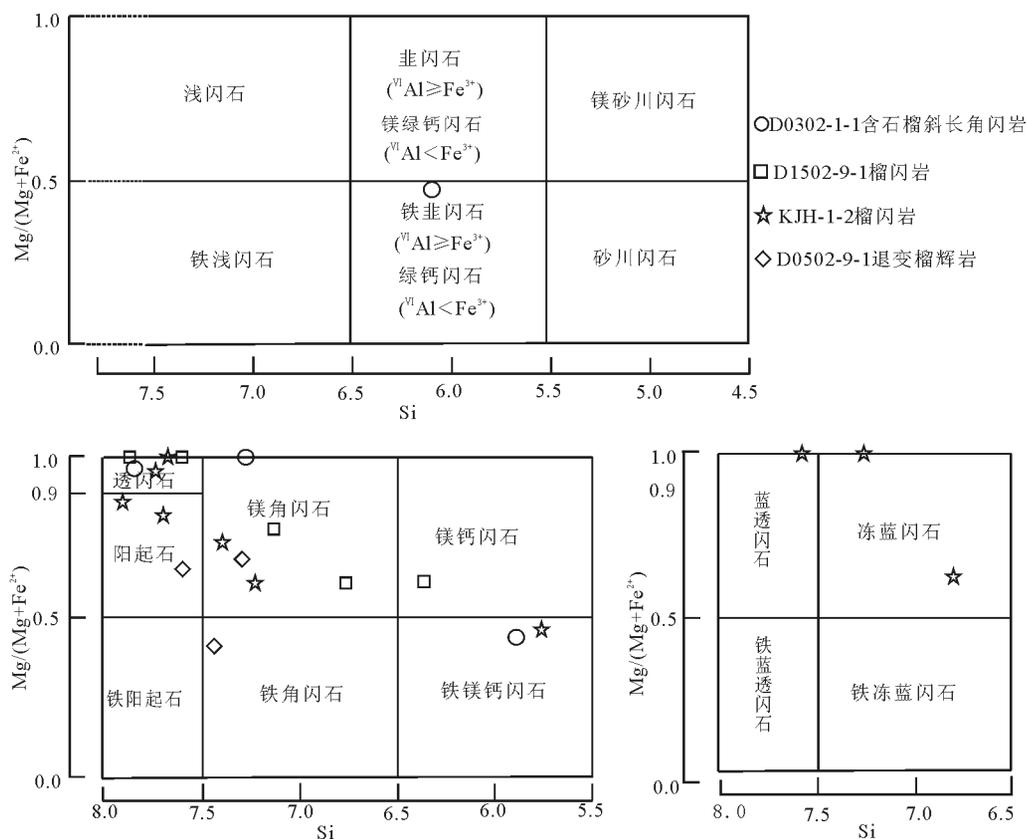


图3 角闪石分类图解
Fig. 3 Classification of amphiboles

$d=0.2\sim 0.5\text{mm}$,正高突起,Ng褐绿色、Np黄绿色,具明显的成分环带,从环带内部到边部Si降低,Na升高。铁韭闪石:半自形-他形柱状,结晶较好,粒度 $d=0.2\sim 1.0\text{mm}$,正中-正高突起,无色、浅蓝绿色,部分具无色→浅蓝绿色的颜色环带,消光角较一般闪石大($\text{Ng}\wedge\text{c}=25^\circ$),其多色性、吸收性较普通角闪石弱。

第三类角闪石(Hb₃)呈鲜艳的蓝绿色,粒度 $d=0.2\sim 0.5\text{mm}$,为低温普通角闪石,叠加在第二类角闪石(Hb₂)之上或穿切它,电子探针分析结果为镁角闪石。

第四类角闪石(Hb₄)呈淡绿色、无色,大部分晶型完整,结晶较粗大, $d=0.5\sim 2\text{mm}$,少部分呈纤维状,呈团块状杂乱分布或沿裂隙充填、交代其他矿物,电子探针分析结果为透闪石、阳起石,部分透闪石边部具阳起石反应边。

钠-钙闪石:冻蓝闪石仅以包裹体形式出现在极少数石榴子石中,由蓝闪石退变形成^[21],可能是早期蓝闪石榴辉岩相退变质作用的产物。蓝透闪石结晶较粗大, $d=0.7\text{mm}$,和阳起石、透闪石一起为绿片岩相叠加的产物。

多硅白云母:有3种产出状态,一种多硅白云母(Ph_{e2})在石榴子石中呈包裹体形式产出,呈无色、他形片状,粒度 0.35mm ,正低-正中突起、闪突起明显,三级鲜艳干涉色,见应力双晶。其内包裹更细小($d=0.06\text{mm}$)的另一种多硅白云母(Ph_{e1})及绿色黑云母包裹体($d=0.06\text{mm}$)(图版II-f);它们可能是峰期榴辉岩相的产物。晚期多硅白云母(Ph_{e3})与石榴子石、石英呈分异条带状产出,与石榴子石、石英平衡共生(图版II-g),其地质意义尚待进一步研究确定。电子探针分析结果表明,这3种类型多硅白云母的化学成分差异不大,每单位晶胞(p.f.u)Si原子数为 $3.763\sim 3.846$ (以11个O原子为基数计算)。

绿帘石:呈黄绿色,半自形-他形粒状、粒柱状($d=0.05\sim 0.50\text{mm}$),正高突起、三级鲜艳干涉色,多与斜长石、角闪石一起构成石榴子石退变反应边或与斜长石构成后成合晶。

黑云母:Ng褐色、Np淡黄色,半自形-他形片状($d=0.05\sim 0.10\text{mm}$),多与斜长石一起构成石榴子石退变反应边或与斜长石构成后成合晶,已不同程度地退变成绿泥石。

金红石:呈褐红-红褐色,具弱多色性、正极高突起,干涉色高级白(被自身颜色掩盖),多呈包裹体分布于石榴子石变斑晶及角闪石+斜长石后成合晶中,粒度多在 $0.05\sim 0.60\text{mm}$ 之间,为峰期变质作用的产物,大部分已转变成钛铁矿-榍石,普遍见钛铁矿、榍石镶边(退变反应边)。

石英:早期石英分布在石榴子石中,以包裹体形式产出,其中少部分石英颗粒自形较好,已转变为多晶石英集合体,周边具典型胀裂纹结构(图版II-h),可能由柯石英降压后形成;晚期石英多与石榴子石、多硅白云母呈条纹-条带状产出。

斜长石:分别与普通辉石、透辉石、角闪石、绿帘石、黑云母构成后成合晶,为多世代产物。不同世代的斜长石具有不同的化学成分,早期斜长石明显富Na₂O。

4 结 论

上述岩石学、矿物学研究表明,云南双江勐库地区湾河蛇绿混杂岩带内确实存在多个呈构造透镜体产出的(退变)榴辉岩岩片。这在云南省境内乃至整个扬子陆块边缘均属首次发现,其内残余的绿辉石+石榴子石+金红石+石英高压变质矿物组合,为典型的高压榴辉岩。石榴子石中可见类似柯石英假象石英多晶集合体,周边具典型胀裂纹结构,暗示其可能由柯石英转化而成。由此推断,该榴辉岩可能经历了超高压变质作用。

滇西双江勐库地区的榴辉岩经历了强烈的退变质作用改造,形成(退变)榴辉岩。退变矿物包括普通辉石、透辉石、硬玉、角闪石、多硅白云母、斜长石、黑云母、绿帘石、榍石、钛铁矿等。特征的高压-超高压变质矿物绿辉石仅残余在少量的石榴子石、角闪石中,以包裹体形式产出。岩石中普遍发育降压退变特征结构,变质反应边结构及后成合晶结构。上述矿物成分的变化和变质反应边结构及后成合晶结构都是榴辉岩经历了压力降低、温度降低的地质环境变化的信息。

滇西双江地区位于昌宁-孟连结合带中段,昌宁-孟连结合带是一个由2条不同时期的蛇绿混杂岩构成的复杂的板块缝合带,保留有完整的特提斯构造演化的物质记录,是研究特提斯洋形成及发展演化的关键地区。滇西双江县勐库一带湾河蛇绿混杂岩中(退变)榴辉岩的发现,为滇西地区特提斯

研究提供了新的素材,也为区域上特提斯构造演化研究提供了更多的约束条件,同时也弥补了全球特提斯造山带高压-超高压变质岩系在中-东段(中国境内)的空缺,具有重大的地质意义。

致谢:云南省地质调查院李静总工程师认真审阅本文并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

- [1]钟大赉,川滇西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998.
- [2]李兴振,刘文均,王义昭,等.西南三江地区特提斯构造演化与成矿(总论)[M].北京:地质出版社,1999.
- [3]莫宣学,沈上越,朱勤文,等.三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿[M].北京:地质出版社,1998.
- [4]刘本培,冯庆来,方念乔,等.滇西昌宁-孟连和澜沧江带带古特提斯多岛洋构造演化[J].地球科学,1993,18(5):529-539.
- [5]刘本培,冯庆来,Chonglakmani C,等.滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J].地学前缘,2002,9(3):67-76.
- [6]潘桂堂,朱弟成,王立全,等.班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J].地学前缘,2004,11(4):371-382.
- [7]潘桂堂,李兴振,王立全,等.青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J].地质通报,2002,21(11):701-707.
- [8]莫宣学,潘桂棠.从特提斯到青藏高原形成:构造-岩浆事件的约束[J].地学前缘,2006,13(6):43-51.
- [9]王保弟,王立全,潘桂棠,等.昌宁-孟连结合带南汀河早古生代辉长岩锆石年代学及地质意义[J].科学通报,2013,58(4):344-354.
- [10]沈上越,冯庆来,刘本培,等.昌宁-孟连带洋脊、洋岛型火山岩研究[J].地质科技情报,2002,21(3):13-17.
- [11]李静.云南省双江县牛井山蛇绿混杂岩的岩石学研究[D].昆明理工大学硕士学位论文,2004.
- [12]段向东.滇西南耿马地区昌宁-孟连带盆地演化[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文,2013.
- [13]张凡,冯庆来,段向东,等.滇西南昌宁-孟连构造带西带研究初探——以耿马弄巴剖面为例[J].地质科技情报,2006,25(3):13-20.
- [14]李静,孙载波,徐桂香,等.滇西双江县勐库地区榴辉岩的发现与厘定[J].矿物学报,2015,35(4):433-435.
- [15]孙载波,周坤,黄亮,等.滇西双江勐库地区榴辉岩(退变质榴辉岩)地球化学特征及其大地构造意义[J].岩石矿物学杂志,2016(待刊).
- [16]魏春景,苏香丽,娄义行,等.榴辉岩中传统地质温压计新解:来自PT视剖面图的证据[J].岩石学报,2009,25(9):2078-2088.
- [17]Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. 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, 1997, 35: 219-246.
- ①云南省地质调查院.1:25万临沧幅、滚龙幅区域地质调查报告.2003.
- ②云南省地质调查院.1:25万澜沧县幅、勐海县幅区域地质调查报告.2013.
- ③云南省地质调查院.1:25万景洪市幅、勐腊县幅区域地质调查报告.2013.
- ④云南省地质调查院.1:5万木戛幅、富永幅、老厂幅、募乃幅、勐梭幅、澜沧县幅区域地质调查报告.2013.
- ⑤云南省地质调查院.1:5万亚练幅、曼来幅、大南坝幅、勐赖坝幅区域地质调查报告.2009.