

# 滇西澜沧县黑河地区榴辉岩岩石学、地球化学特征:洋内初始俯冲作用的岩浆活动

王巍<sup>1</sup>, 张星培<sup>1,2\*</sup>, 孙载波<sup>3,4</sup>, 田应贵<sup>1</sup>, 周坤<sup>3</sup>, 李旭俊<sup>1,2</sup>, 周昕全<sup>1,2</sup>, 崔子良<sup>1</sup>, 李国昌<sup>1</sup>  
WANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Xingpei<sup>1,2\*</sup>, SUN Zaibo<sup>3,4</sup>, TIAN Yinggui<sup>1</sup>, ZHOU Kun<sup>1</sup>, LI Xujun<sup>1,2</sup>,  
ZHOU Tingquan<sup>1,2</sup>, CUI Ziliang<sup>1</sup>, LI Guochang<sup>1</sup>

1. 云南省地质矿产勘查院, 云南 昆明 650051;
  2. 云南黄金矿业集团股份有限公司, 云南 昆明 650051;
  3. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216;
  4. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051
1. Yunnan Exploration Institute of Geology & Mineral Resources, Kunming 650051, Yunnan, China;  
2. Yunnan Gold Mining Group Limited by Share Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China;  
3. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China;  
4. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, MNR, Kunming 650051, Yunnan, China

**摘要:**滇西澜沧黑河地区厘定的奥陶纪谦迈蛇绿混杂岩是区域上勐库地区湾河蛇绿混杂岩的南延部分,是原特提斯洋盆关闭后的遗迹;其中发育规模不等的榴辉岩构造岩片。榴辉岩经历了多期不同程度的退变质作用,可见丰富的退变质结构,主要榴辉岩相的变质矿物有石榴子石、绿辉石、多硅白云母、金红石等。岩石的SiO<sub>2</sub>含量为49.76%~52.71%,TiO<sub>2</sub>为1.12%~1.96%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为14.18%~16.92%,CaO为7.91%~10.04%,MgO为5.93%~9.14%,Na<sub>2</sub>O为2.81%~4.77%,K<sub>2</sub>O为0.09%~1.15%,Mg<sup>#</sup>=56~69,表明岩浆的分异演化程度较低,接近原始岩浆,总体特点类似前弧玄武岩。稀土元素配分曲线向右缓倾,轻稀土元素轻度富集,(La/Sm)<sub>N</sub>=1.13~2.05,(Gd/Yb)<sub>N</sub>=1.18~1.56,与E-MORB(富集型洋中脊玄武岩)类似。微量元素特征表明,其原岩为一套富Nb玄武岩,来自富集地幔源区。总之,黑河地区榴辉岩的原岩属前弧玄武岩,是洋壳初始俯冲阶段的产物,代表了原特提斯洋盆由扩张向俯冲消减转换的岩石学记录。

**关键词:**岩石学;地球化学;榴辉岩;原特提斯洋盆;前弧玄武岩;滇西澜沧县

**中图分类号:**P534.42;P597 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)07-1057-11

**Wang W, Zhang X P, Sun Z B, Tian Y G, Zhou K, Li X J, Zhou T Q, Cui Z L, Li G C. Petrology and geochemistry of the eclogite in Heihe area of Lancang County, western Yunnan: the magmatism of the initial subduction of the oceanic crust. Geological Bulletin of China, 2021, 40(7): 1057-1067**

**Abstract:** The Ordovician Qianmai ophiolitic melange in the Heihe area of Lancang, western Yunnan, is the southern extension of the Wanhe ophiolitic melange in Mengku region, which is the remnant of the closure of the original Tethyan oceanic basin, where some eclogite tectonic slices of different scales are also developed. The eclogite experienced many stages of retrograde metamorphism in

收稿日期:2019-08-20;修订日期:2020-04-13

资助项目:中国地质调查局项目《全国陆域及海区地质图件更新与共享》子项目《云南省系列地质图件数据处理与洋板块地质研究》(编号:DD20190370)、云南省自然资源厅地质勘查基金项目《云南省1:5万下景张、新营盘、东岗、南北归4幅区域地质调查》(编号:D2017002)、《云南省澜沧黑河地区谦迈蛇绿混杂岩综合调查》(编号:Y201908)、《云南1:5万曼各、小街、曼班、大勐龙、万纳兰、勐宋坝六幅区域地质调查》(编号:D2017014)

作者简介:王巍(1983-),男,硕士,高级工程师,从事区域地质调查工作。E-mail: oneweblues@126.com

\*通信作者:张星培(1976-),男,高级工程师,从事区域地质调查工作。E-mail: 695825987@qq.com

different degrees, with abundant retrograde metamorphic structures. The metamorphic minerals of eclogite facies are garnet, omphacite, polysilicate muscovite and rutile, etc. It is chemically characterized by  $\text{SiO}_2$  content of 49.76% ~ 52.71%,  $\text{TiO}_2$  content of 1.12% ~ 1.96%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content of 14.18% ~ 16.92%, CaO content of 7.91% ~ 10.04%, MgO content of 5.93% ~ 9.14%,  $\text{Na}_2\text{O}$  content of 2.81% ~ 4.77%,  $\text{K}_2\text{O}$  content of 0.09% ~ 1.15% and  $\text{Mg}^\#$  values of 56 ~ 69, indicating that the magma has a low degree of differentiation and evolution, close to the primitive magma and similar to front arc basalt (FAB). The distribution curve of rare earth elements inclines gently to the right, and LREE is slightly enriched. The  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  content ranges from 1.13 to 2.05, and  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  content ranges from 1.18 to 1.56, similar to that of enriched mid-ocean ridge basalt (E-MORB). The trace elements indicate that the protolith is a set of Nb-enriched basalts from the source area of enriched mantle. In a word, the protolith of retrograde eclogite in the Heihe area belongs to FAB, which is the product of the initial subduction of the oceanic crust, and represents the petrological records of the transformation from expansion to subduction of the original Tethyan oceanic basin.

**Key words:** petrology; geochemistry; eclogite; Proto-Tethys Ocean; front arc basalt; Lancang County of western Yunnan

滇西昌宁—孟连地区位于全球性的特提斯造山带东段,许多专家学者对该地区进行了较深入的研究;普遍认为昌宁—孟连构造带是古特提斯洋盆最终关闭的场所<sup>[1-14]</sup>。近年的研究进一步表明,传统意义上的昌宁—孟连结合带是由石炭纪铜厂街蛇绿混杂岩与奥陶纪湾河蛇绿混杂岩构成的复杂结合带,原—古特提斯的继承性演化是在同一个大洋盆地中进行的,不存在多次的开合作用<sup>[9-14]</sup>;在湾河蛇绿混杂岩带中还发现许多规模不等的榴辉岩岩片<sup>[9-14]</sup>。2017年以来,笔者在开展“云南省1:5万下景张、新营盘、东岗、南北归4幅区域地质调查”时,在澜沧黑河地区发现了一套早古生代蛇绿混杂岩,命名为“谦迈蛇绿混杂岩”,并在其中发现多个规模不等的榴辉岩构造岩片。从区域地质资料分析,谦迈蛇绿混杂岩应属双江县勐库地区的湾河蛇绿混杂岩的南延部分。目前对谦迈蛇绿混杂岩及其中赋存的榴辉岩的研究程度较低。孙载波等<sup>[15]</sup>通过对榴辉岩的矿物学研究,得出峰期变质条件为  $p=2.5\text{ GPa}$ ,  $T=600^\circ\text{C}$ 。

榴辉岩作为高压—超高压环境下形成的特征性标型岩石,是研究碰撞造山带演化过程及地球深部变质作用的物质基础,主要记录了洋壳物质从俯冲到折返的动力学过程,对于研究大洋板块俯冲过程具有重要意义<sup>[16]</sup>。榴辉岩原岩性质十分复杂,由于变质程度深,原岩结构、构造很难被保留下来,从目前的研究看,可能包含基性岩—超基性岩、大洋拉斑玄武岩或成分类似的辉长岩、海相基性岩、洋脊玄武岩及镁铁岩、形成于岛弧环境的镁铁—超镁铁质侵入体、来源于富集型地幔的大陆裂谷型基性火成岩,原岩形成环境可能为局部封闭的大陆边缘沉积盆地、大陆玄武质岩石等。确定榴辉岩的原岩性质是榴辉岩各项研究工作的基础,系统的野外产状

调查、岩石学、岩石地球化学工作是识别榴辉岩原岩性质的有效途径<sup>[17]</sup>。本文主要对黑河地区榴辉岩的野外地质产状、岩石学及岩石地球化学特征进行初步研究,并对澜沧黑河地区榴辉岩原岩类型及其形成的构造背景进行约束。

## 1 区域地质背景

澜沧县黑河地区属昌宁—孟连构造带中南段,位于保山地块与临沧岩浆弧之间(图1-a)。谦迈蛇绿混杂岩出露于早古生代澜沧岩群增生杂岩与三叠纪临沧花岗岩之间(图1-b),呈近南北向延伸,北起北西向木戛断裂带,向南于惠民一带被中侏罗统花开左组角度不整合掩盖,南北延伸大于50 km,宽度为1~5 km。谦迈蛇绿混杂岩主要岩石类型为斜长花岗岩—花岗闪长岩、纹层状英云闪长岩—斜长角闪岩—堆晶辉长岩、石榴多硅白云母(石英)片岩、榴辉岩—榴闪岩、大理岩等,从成因类型看,可能包括高压—超高压地幔岩、镁铁质堆晶杂岩、浅色岩系、洋内弧火山—沉积等单元,且各单元之间均为断层接触。在谦迈蛇绿混杂岩内的斜长花岗岩中获得463 Ma、478 Ma、489 Ma的锆石年龄,与北部双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的年代相近,加之二者的物质组成十分相似,表明二者实际上是同一条蛇绿混杂岩带,只是被后期构造肢解了。

## 2 榴辉岩野外产状和岩石学特征

澜沧黑河地区榴辉岩主要出露于黑河、景张河、松山林、芒片、糯扎渡线等地,呈构造透镜体产于谦迈蛇绿混杂岩内,规模不等,大者可达数百米,小者仅几厘米,以黑河河谷出露的榴辉岩透镜体规模最大,沿黑河沿岸连续出露逾300 m(图2-a)。榴辉





图2 黑河地区榴辉岩野外露头

Fig. 2 Field outcrop of retrograde eclogite in the Heihe area

a—连续出露近 300 m 的榴辉岩露头;b—榴辉岩呈透镜状分布于石榴白云石英片岩中

岩主要围岩为石榴白云(石英)片岩,呈构造透镜体产出,与围岩呈脆韧性剪切带接触,榴辉岩长轴方向与片理走向基本一致,呈串珠状断续分布(图2-b)。

榴辉岩呈深灰绿色、灰黑色、黑绿色,粒柱状变晶结构,块状、条带状构造,粒度多小于 1 mm,主要造岩矿物为石榴子石、绿辉石、多硅白云母、金红石等(图版 I -a),局部见少量角闪石类退变质矿物(图版 I -b)。石榴子石呈淡红色,等轴六边形—浑圆粒状,浅绿色—无色次棱角状绿辉石碎斑与浅绿色次生细微晶角闪石在石榴子石间形成网纹碎基,含少量的鳞片状白云母变晶及浅绿色—无色柱状角闪石变斑,矿物之间彼此以简单近平直边界互相紧密镶嵌,金红石呈粒状分布于粒间或呈包裹体分布于石榴子石(图版 I -e)、多硅白云母、绿帘石、角闪石内。经电子探针分析,绿辉石硬玉分子(Jd)含量在 40.89%~53.91%之间;石榴子石以铁铝榴石为主,铁铝榴石(alm)含量为 58.23%~68.64%,镁铝榴石(py)含量为 9.01%~19.64%;白云母主要为多硅白云母,少数为钠云母,多硅白云母 SiO<sub>2</sub> 含量为 51.20%~52.77%,每单位晶胞(p.f.u.) Si 原子数为 3.46~3.57(以 11 个氧原子计算),钠云母相比多硅白云母, SiO<sub>2</sub> 含量显著降低, Na<sub>2</sub>O 含量为 6.62%~7.22%, K<sub>2</sub>O 含量为 0.54%~1.14%;角闪石类型较复杂,以阳起石(Na<sub>2</sub>O 含量为 0.58%~1.03%, Na<sub>B</sub> 含量为 0.05~0.25)、镁角闪石(Na<sub>2</sub>O 含量为 1.19%~1.66%, Na<sub>B</sub> 含量为 0.11~0.23)为主,少量为蓝透闪石、冻蓝闪石(Na<sub>2</sub>O 含量为 2.43%~3.47%, Na<sub>B</sub> 为

0.55~0.76)和蓝闪石(Na<sub>2</sub>O 含量为 6.33%~6.42%, Na<sub>B</sub> 为 1.65~1.68)。阳起石呈中—细晶半自形柱状聚斑与斜长石聚斑一同产出;镁角闪石呈纤维状、细粒状与斜长石构成指纹状、细粒状后成合晶;蓝透闪石与冻蓝闪石呈自形半自形柱状叠加于蓝闪石之上构成其退变反应边。

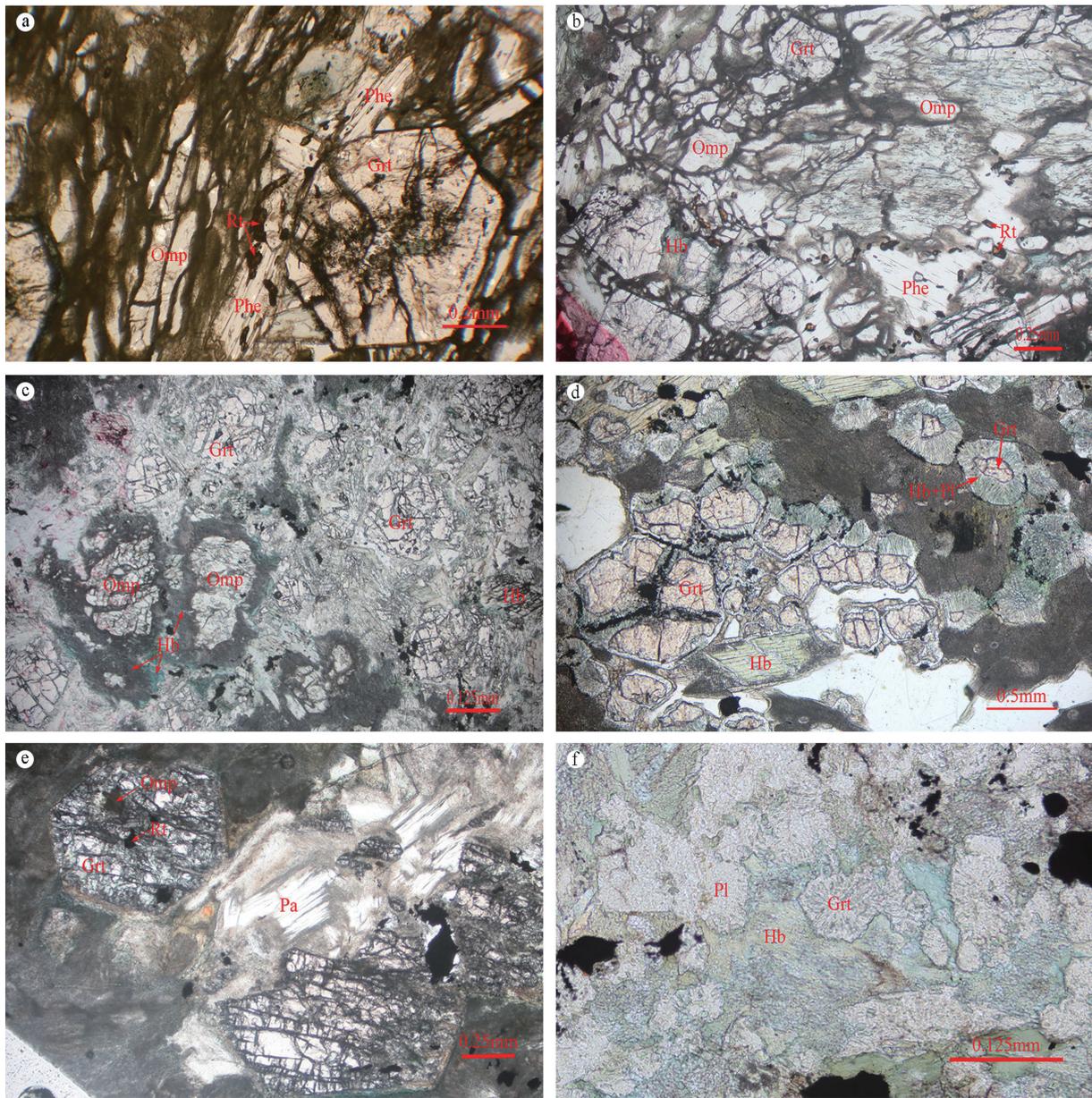
黑河地区榴辉岩经历了多期不同程度的退变质作用,可见丰富的退变质结构,如绿辉石具蠕虫状、纤维状隐微晶角闪石与斜长石次变边(图版 I -c);斜长石与角闪石组成环带状或帚状后成合晶,围绕石榴子石发育的“白眼圈”结构(图版 I -d),石榴子石退变强烈者完全分解成角闪石、斜长石后成合晶,仅保留石榴子石假象(图版 I -f);无色蓝闪石在退变质过程中形成蓝绿色蓝透闪石、冻蓝闪石退变反应边;金红石在退变质过程中形成榍石、钛铁矿退变反应边等。岩石中主要榴辉岩相变质矿物为石榴子石、绿辉石、多硅白云母、金红石等,退变质矿物主要为角闪石、斜长石、钠云母、绿帘石、黝帘石、斜黝帘石等。孙载波等<sup>[15]</sup>确定的峰期矿物组合为石榴子石+绿辉石+多硅白云母+硬柱石+蓝闪石+金红石+石英。

### 3 地球化学特征

#### 3.1 样品采集与分析

本次地球化学分析测试的榴辉岩样品主要采自黑河剖面,样品新鲜致密,脉体不发育。样品的全岩主量和微量元素分析在武汉上谱分析科技有限

图版 I Plate I



a, b. 多硅白云母(Phe)-石榴子石(Grt)-绿辉石(Omp)的平衡共生关系(-); c. 指纹状微晶角闪石(Hb)中残留细粒状绿辉石(Omp)(-); d. 石榴子石(Grt)具角闪石(Hb)、斜长石(Pl)后成合晶退变反应边(-); e. 石榴子石(Grt)中残留的绿辉石(Omp)、金红石(Rt)包裹体(-); f. 指纹状微晶角闪石(Hb)、斜长石(Pl)后成合晶中残留石榴子石(Grt)假象(-)

责任公司完成,全岩主量元素分析利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成。全岩微量元素分析利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成,对国际标准参考物质 BHVO-2、BCR-2、RGM-2 和 AGV-2 的同步分析及重复样分析结果表明,稀土、微量元素分析的精确度和标准度优于 10%。黑河地区榴辉岩主量、稀土和微量元素分析结果见表 1。

### 3.2 主量元素

榴辉岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 49.76%~52.71%,平均为 50.85%,成分上属于玄武质岩石; $\text{TiO}_2$  为 1.12%~1.96%,平均为 1.52%,与 MORB 的  $\text{TiO}_2$  含量(约 1.5%)相当; $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 14.18%~16.92%,平均为 15.09%,接近俯冲带上常见的高铝玄武岩( $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 17\%$ ); $\text{CaO}$  为 7.89%~10.04%,平均 8.88%; $\text{Na}_2\text{O}$  为 2.81%~4.77%,平均为 3.69%; $\text{K}_2\text{O}$  为 0.09%~

表1 黑河地区榴辉岩主量、微量和稀土元素分析成果

Table 1 Major, trace element and REE contents of the eclogite in the Heihe area

编号	D2540-1	PM008 -2-1	PM008 -37-1	PM008 -50-1	PM008 -31-2	PM00 8-47-2	PM008 -48-1	PM008 -51-3	PM008 -53-1	PM008 83-2	PM021 -13-1	PM021 -21-2
SiO <sub>2</sub>	49.94	52.27	51.04	52.71	49.76	51.87	51.10	50.01	51.23	50.33	49.77	50.23
TiO <sub>2</sub>	1.16	1.67	1.72	1.23	1.56	1.47	1.12	1.63	1.64	1.56	1.55	1.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.92	14.62	14.46	14.91	14.71	15.17	15.15	15.11	14.18	14.97	15.88	15.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10	3.57	3.41	2.75	3.69	3.40	3.35	3.47	3.71	3.22	3.77	3.92
FeO	6.97	7.55	7.37	6.02	8.11	7.12	6.50	7.93	8.42	7.43	8.04	8.48
MnO	0.23	0.21	0.23	0.21	0.19	0.21	0.19	0.25	0.23	0.21	0.21	0.22
MgO	8.47	6.59	6.71	7.29	6.90	5.93	7.60	8.19	6.04	9.14	7.39	6.67
CaO	8.30	8.12	9.76	10.04	9.74	9.37	8.99	8.41	9.56	8.37	7.91	8.01
Na <sub>2</sub> O	3.25	3.20	4.12	3.57	3.84	4.26	4.77	3.78	3.36	2.81	3.57	3.75
K <sub>2</sub> O	0.75	1.15	0.14	0.47	0.36	0.20	0.34	0.09	0.49	0.96	0.87	0.54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.21	0.22	0.14	0.23	0.21	0.17	0.25	0.20	0.17	0.15	0.23
Mg <sup>#</sup>	69	61	62	69	60	60	68	65	56	69	62	59
Zr	76.01	102.17	97.17	80.32	114.43	154.15	88.57	108.34	112.70	109.02	86.75	121.92
Zn	126.98	101.34	105.73	126.37	98.03	113.53	99.22	89.26	112.93	76.16	93.54	108.09
V	258.90	338.88	316.15	241.96	316.11	296.79	240.20	337.85	340.66	221.21	291.94	298.96
Th	1.76	2.44	1.13	1.48	1.76	2.10	1.10	1.43	1.92	2.66	1.20	1.83
Sc	39.62	43.18	38.39	33.68	37.38	35.55	35.03	36.39	38.88	32.16	38.10	37.95
Sr	236.97	116.74	95.07	176.55	79.16	172.81	106.41	105.08	96.96	187.61	99.69	81.94
Rb	43.26	74.01	4.05	13.03	12.18	8.51	10.68	4.99	14.17	43.94	40.26	28.47
Ni	64.94	58.37	88.87	108.33	92.99	59.29	130.10	97.63	29.11	205.33	55.36	90.37
Nb	6.79	7.41	10.51	6.32	10.25	11.61	7.80	9.48	10.34	5.43	6.56	7.45
Cu	48.55	55.38	60.10	50.86	44.03	52.96	59.25	197.07	38.84	45.34	39.45	48.00
Cr	189.90	191.79	187.20	262.60	230.04	146.07	305.86	247.55	30.70	547.44	75.94	231.75
Co	41.34	40.63	42.96	38.45	36.62	35.03	32.00	46.25	36.82	47.90	42.19	40.77
Ba	129.66	326.74	66.27	148.90	118.98	49.51	109.58	10.87	167.09	305.14	447.97	101.62
Hf	1.98	3.21	2.80	2.33	2.98	4.04	2.23	2.93	3.14	2.84	2.45	3.42
Ta	0.43	0.54	0.69	0.51	0.62	0.70	0.43	0.60	0.64	0.37	0.40	0.46
U	0.44	0.59	0.32	0.29	0.55	0.86	0.22	0.36	0.52	0.60	0.34	0.41
Pb	34.95	7.73	5.59	18.33	3.67	3.10	2.48	3.95	12.71	7.37	17.68	4.99
Be	3.49	1.08	1.20	1.04	0.91	1.05	1.01	1.17	1.06	1.66	0.87	0.76
La	8.62	11.36	9.62	9.56	11.38	13.56	8.89	8.47	10.38	11.63	6.36	8.32
Ce	17.45	25.50	22.19	21.37	25.68	30.84	20.34	19.65	23.22	25.28	15.50	20.35
Pr	2.12	3.55	3.05	2.79	3.53	4.10	2.73	2.71	3.23	3.41	2.22	2.97
Nd	9.65	16.24	14.36	12.88	16.11	18.49	13.05	12.69	15.24	15.27	11.24	15.10
Sm	2.64	4.62	4.19	3.66	4.38	5.09	3.34	3.93	4.23	3.73	3.53	4.40
Eu	1.36	1.46	1.40	1.32	1.54	1.61	1.23	1.35	1.55	1.41	1.32	1.72
Gd	3.53	5.61	5.37	4.32	5.81	6.08	4.11	4.82	5.54	4.48	4.92	6.01

续表 1

编号	D2540-1	PM008 -2-1	PM008 -37-1	PM008 -50-1	PM008 -31-2	PM00 8-47-2	PM008 -48-1	PM008 -51-3	PM008 -53-1	PM008 83-2	PM021 -13-1	PM021 -21-2
Tb	0.61	0.95	0.90	0.71	0.98	1.08	0.75	0.86	0.95	0.76	0.84	1.04
Dy	3.80	6.53	6.26	4.60	6.45	6.76	4.94	5.66	6.50	4.63	5.78	7.09
Ho	0.80	1.32	1.24	0.95	1.34	1.36	0.92	1.17	1.30	0.92	1.17	1.42
Er	2.43	3.94	3.65	2.68	3.98	4.10	2.96	3.50	4.00	2.66	3.33	4.07
Tm	0.38	0.60	0.55	0.41	0.55	0.60	0.43	0.49	0.57	0.41	0.53	0.64
Yb	2.42	3.81	3.45	2.55	3.77	3.87	2.70	3.10	3.70	2.32	2.92	3.98
Lu	0.35	0.56	0.52	0.37	0.56	0.59	0.43	0.48	0.58	0.39	0.53	0.63
Y	24.18	38.22	36.23	26.58	38.14	39.24	28.04	32.95	37.86	28.22	33.24	40.31
ΣREE	56.17	86.04	76.76	68.17	86.07	98.12	66.83	68.88	80.97	77.29	60.17	77.74
δEu	1.36	0.88	0.91	1.01	0.93	0.88	1.02	0.95	0.98	1.06	0.97	1.02
δCe	0.97	0.98	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	0.98	0.97	1.01	1.00
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.55	2.14	2.00	2.69	2.16	2.51	2.36	1.96	2.01	3.60	1.56	1.50
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.10	1.59	1.48	1.69	1.68	1.72	1.72	1.39	1.58	2.01	1.16	1.22
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.20	1.22	1.29	1.40	1.27	1.30	1.26	1.29	1.24	1.60	1.39	1.25

注:原始分析数据按 11 项氧化物进行标准化,然后按里特曼法进行全铁调整;主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

1.15%,平均为 0.53%,类似大洋低钾拉斑玄武岩; MgO 为 5.93%~9.14%,平均为 7.24%; FeO\*/MgO 值为 0.81~1.39,平均为 1.05; 12 件样品的 Mg<sup>#</sup> = 56~69,平均为 63,略低于玄武岩原始岩浆(65~72),可看作是原始岩浆结晶的产物。

据肖庆辉等<sup>[16]</sup>的总结资料,前弧玄武岩(FAB)的全岩主量元素成分变化范围较窄, SiO<sub>2</sub> 含量为

49%~51%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 14%~17%, CaO 含量为 10%~13%, MgO = 4%~8%, FeO\*/MgO = 0.9~3.0, TiO<sub>2</sub> 含量接近 MORB 的平均值(1.50%)。澜沧县黑河地区榴辉岩的原岩与前弧玄武岩(FAB)十分相似,仅 CaO 含量略低,而 MgO 含量略高。

在 SiO<sub>2</sub>-alk 图解上, 12 件样品全部落入亚碱性岩区(图略); 在 A-F-M 图解中,也落入钙碱性岩区

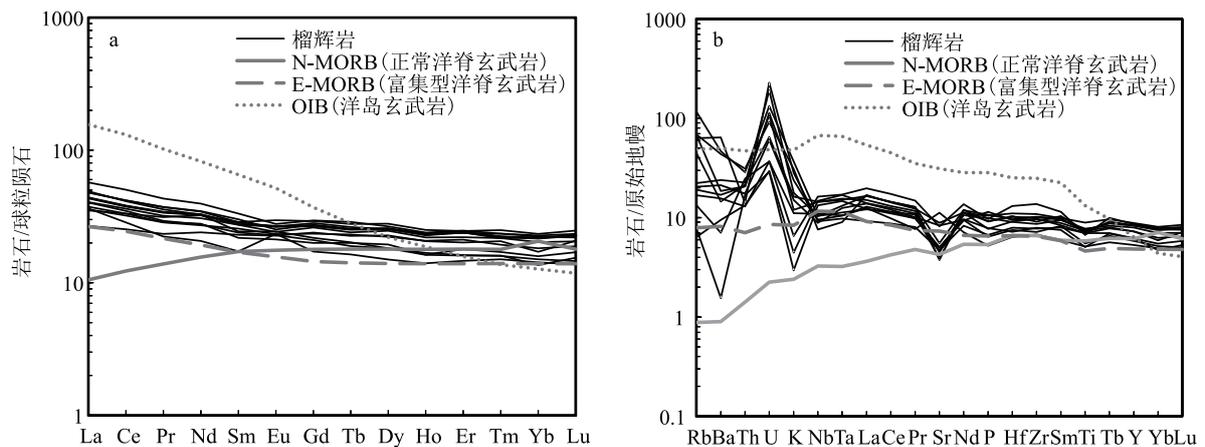


图 3 黑河地区榴辉岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (N-MORB、E-MORB、OIB 数据及标准化值均据参考文献[18])

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns(a) and primitive mantle normalized spider-grams(b) of eclogite in the Heihe area

(图略)。因此,澜沧县黑河地区榴辉岩的原岩属亚碱性岩系之钙碱性系列。各类图解上,12件样品均呈小范围集聚,进一步表明岩浆的分异、演化程度较低。

### 3.3 稀土元素

榴辉岩的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )较低,为 $56.17 \times 10^{-6} \sim 98.12 \times 10^{-6}$ ,平均为 $75.27 \times 10^{-6}$ ;在La-La/Sm协变图解上显示明显的部分熔融趋势(图略),进一步表明岩浆的分异、演化程度较低。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线向右缓倾(图4-a),轻稀土元素略分馏, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.16 \sim 2.10$ ,平均为1.61,重稀土元素分馏程度较低, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.20 \sim 1.60$ ,平均为1.31。 $\delta\text{Eu} = 0.88 \sim 1.36$ ,平均为1.00,少数样品明显的正Eu异常暗示斜长石发生堆晶作用。总体特征与E-MORB相似(图4-a)。

### 3.4 微量元素

榴辉岩的Cr、Ni、Co、Sc等强相容元素含量较低,暗示岩浆可能经历了橄榄石等镁铁矿物的分离结晶作用。其 $\text{Nb} = 5.43 \times 10^{-6} \sim 11.61 \times 10^{-6}$ ,平均为 $8.33 \times 10^{-6}$ ; $\text{La}/\text{Nb} = 0.89 \sim 1.53$ ,平均1.23;原始地幔标准化值 $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}} = 0.92 \sim 2.22$ ,平均1.28,除1件样品(PM008-83-2)外,其他均小于2。在Nb-Nb/La图解中,除1件样品(PM008-83-2)外,其余落入“富Nb岛弧玄武岩”区(图略),表明榴辉岩的原岩为一套富Nb玄武岩。原始地幔标准化微量元素蛛网图总体上显示与E-MORB类似的特点,但部分样品中Rb、Ba、Th、U、K等大离子亲石元素元素(LILE)的含量较高,类似岛弧火山岩(图3-b)。

洋中脊标准化微量元素蛛网图也具有类似的特点(图略),多数样品还显示出不同程度的负Nb异常,暗示了俯冲板片中的远洋沉积物或地壳物质对岩浆岩源区的影响。

## 4 讨论

已有研究表明,变质作用过程中Cs、Rb、Ba、K、U、Pb等为活泼元素,可能会发生迁移,导致与之相关的地球化学判别图解失效,而一些高场强元素(Ti、Zr、Y、Nb、Ta、Hf等)与稀土元素相对稳定<sup>[17]</sup>,仍然能反映原岩的原始成分,它们的弱活动特征也能更好地代表原岩的组成。考虑到榴辉岩经历了较强的多期变质作用,本文主要采用高场强元素与稀土元素对榴辉岩岩石地球化学特征进行探讨。

### 4.1 榴辉岩原岩类型

由于Na、K等元素的活性,用主量元素地球化学图解对原岩进行判别可能会失真,但是对一些不活动元素而言则相对稳定,将样品投入抗蚀变元素Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub>图解(图4-a)中<sup>[19]</sup>,所有样品点均落入亚碱性玄武岩区。为了避免镁铁质岩受Fe、Ti氧化物堆晶作用的影响,不能真实反映源区特征,利用Th-Co分类图解<sup>[20]</sup>(图4-b)进行判断,样品点全部投入钙碱性玄武岩区。上述结果与SiO<sub>2</sub>-alk图解、AFM图解得到的结果一致,即黑河地区榴辉岩的原岩属亚碱性系中的钙碱性系列玄武岩,也表明黑河地区的榴辉岩在变质作用过程中并不存在显著的元素带出、带入现象。无论是早期的进变质或是后期的退变质都大致为等化学过程。

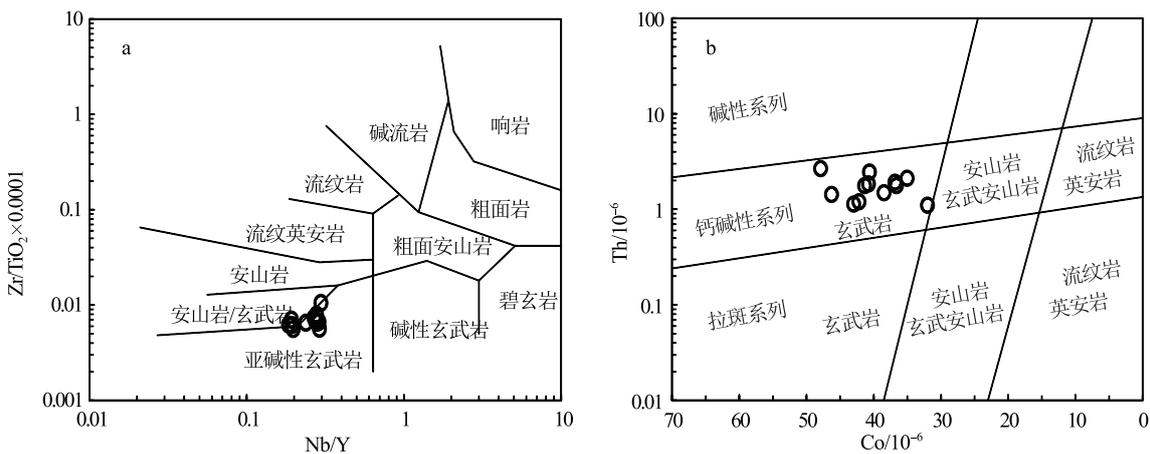


图4 黑河地区榴辉岩 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub>图解(a)及 Co-Th 图解(b)

Fig. 4 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub>(a) and Co-Th(b) diagrams of the eclogite in the Heihe area

### 4.2 构造环境

研究表明, Zr 与 Hf 的价态相同、离子半径大小相似、分配系数在各矿物中相近, 因此在大多数地质过程中 Zr/Hf 值近于常数, 变化范围窄, 黑河地区榴辉岩 Zr/Hf 值为 31.87~39.69, 平均为 36.51, 与 N-MORB (36.6±2.9) 基本一致, 榴辉岩具有中等的 TiO<sub>2</sub> 含量 (1.16%~1.96%, 平均 1.52%), 与 MORB (1.5%) 相当。Zr/Y-Zr 图解能很好地识别出板内玄武岩、洋中脊玄武岩及火山弧玄武岩<sup>[21]</sup>, 上述 12 件样品在 Zr/Y-Zr 图解中均落入洋中脊玄武岩区或洋中脊玄武岩与岛弧火山岩重叠区 (图略); 在 Th-Hf-Ta 图解、Th-Hf-Nb 图解<sup>[22]</sup> 中, 大多数样品落入岛弧钙碱性玄武岩区 (D<sub>2</sub> 区), 少数向富集型洋脊玄武岩区 (B 区) 过渡。在其他主量、微量元素地球化学图解中也显示类似的特点。总之, 黑河地区退变榴辉岩的地球化学特点普遍表现出

富集洋中脊型玄武岩及弧火山岩的双重特性; 看似矛盾的 2 类构造背景存在于同一套岩石中, 暗示其构造背景的特殊性。作为谦迈蛇绿混杂岩中的构造岩片, 尽管缺乏较完整的岩浆活动记录, 但从主量元素特征及微量元素蛛网图分析, 黑河地区榴辉岩的原岩属前弧玄武岩 (FAB) 的认识并不存在太多的疑问。

在 Nb/Yb-Th/Yb 图解<sup>[23]</sup> 中, 黑河地区的榴辉岩围绕 E-MORB 分布, 部分样品的 Th 含量较高, 明显偏离地幔阵列趋势 (图 5-a), 表明俯冲作用带入的远洋沉积物或地壳物质对岩浆源区产生了影响。在 La/Yb-Th/Ta 图解<sup>[24]</sup> 和 Zr/Y-Nb/Y 图解<sup>[25]</sup> 中, 黑河地区榴辉岩的 12 件样品的投影点均位于原始地幔与上地壳之间 (图 5-b、c), 大多数样品更靠近原始地幔一侧, 有向富集地幔演化的趋势, 进一步表明岩浆源区受到了俯冲作用带入的远

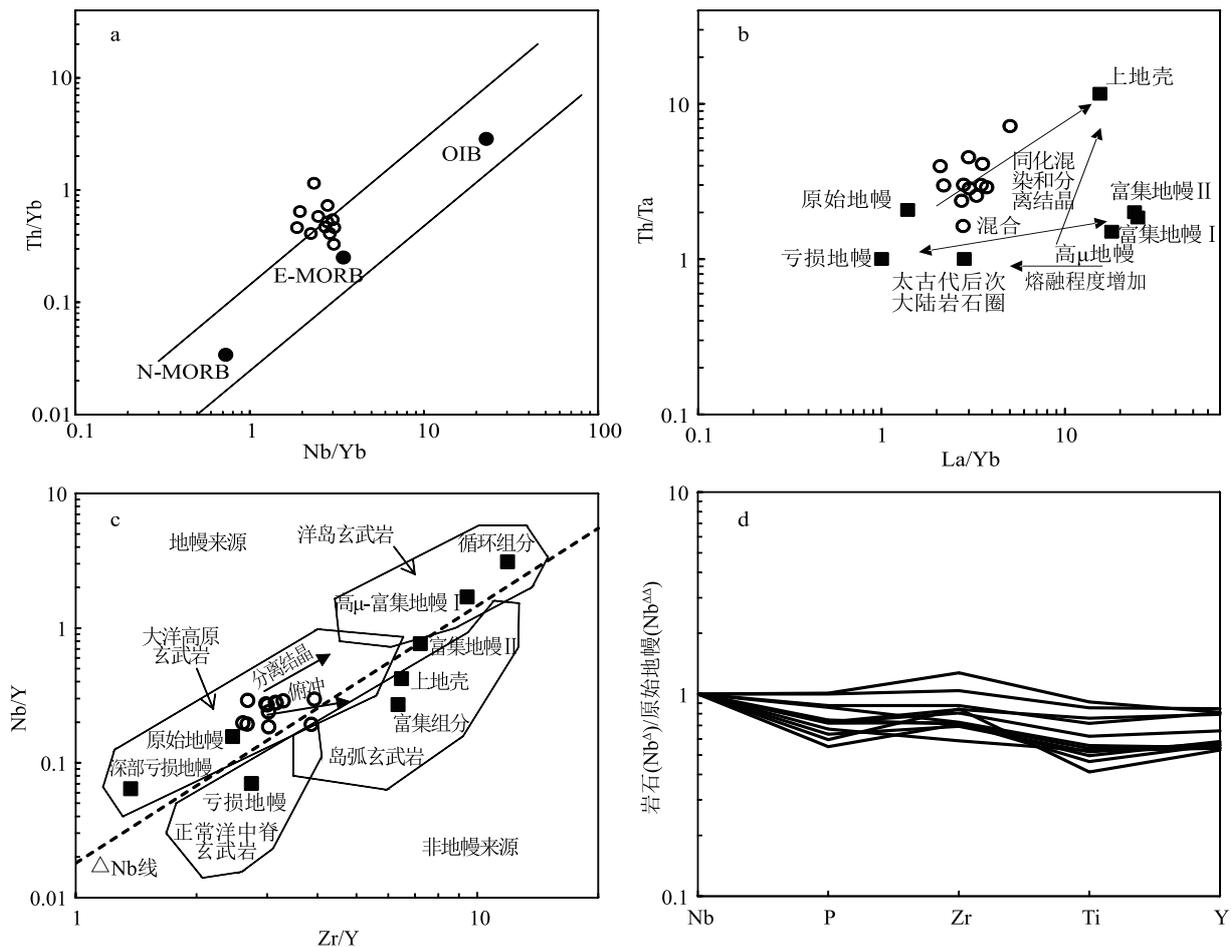


图 5 黑河地区榴辉岩 Nb/Yb-Th/Yb(a)、La/Yb-Th/Ta(b)、Zr/Y-Nb/Y(c) 和 Nb 标准化(d) 图解

Fig. 5 Nb/Yb-Th/Yb(a), La/Yb-Th/Ta(b), Zr/Y-Nb/Y(c) and Nb normalized(d) diagrams of the eclogite in the Heihe area  
N-MORB—正常洋中脊玄武岩; E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

洋沉积物或地壳物质的影响。微量元素以 Nb 为标准进行标准化作图也是判断地幔类型的方法之一,其中 Nb 的分配系数最小,是地幔不均一性的指标<sup>[26]</sup>。本次参考 Breikopf<sup>[27]</sup> 在研究纳米比亚变质玄武岩时采用的方法,选取 Nb、P、Zr、Ti、Y 元素进行 Nb 标准化作图(将岩石和原始地幔各自用 Nb 标准化后求二者比值),岩石样品 Nb 标准化曲线图中,曲线总体呈负斜率倾斜,且分布在较小范围内,表明黑河地区榴辉岩原岩来自均一的富集地幔。

一般认为,富 Nb 玄武岩是由受板片部分熔融形成的埃达克质熔体交代过的地幔楔橄榄岩发生部分熔融形成的<sup>[16]</sup>。昌宁-孟连结合带牛井山地区也有大致同时代的埃达克岩出露,这些埃达克岩是由俯冲洋壳与大洋沉积物部分熔融交代地幔橄榄岩形成的<sup>[12]</sup>。因此,黑河地区榴辉岩原岩可能是俯冲板片熔融形成的埃达克质岩浆上升穿过地幔楔过程中交代地幔橄榄岩形成的。

前弧(Forearc)是位于海沟和火山-岩浆弧之间的岩石圈,是板块刚开始发生俯冲作用的地方,也是洋盆俯冲、转化形成大陆的地方,保存了俯冲作用刚开始的岩浆活动记录;西太平洋伊豆-小笠原-马里亚纳前弧是前弧玄武岩研究程度较高的地区。刘桂春等<sup>[11]</sup>在双江县勐库一带的湾河蛇绿混杂岩中也厘定了前弧玄武岩(FAB)的存在,并在其中获得了  $470.8 \pm 5.3$  Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,本次在榴辉岩中获得了 480 Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,表明昌宁-孟连洋在早奥陶世就开始了俯冲消减。俯冲作用的开始可能开启了滇西地区早古生代岩浆活动的一个高潮,形成牛井山地区 468 Ma 的埃达克岩<sup>[12]</sup>、临沧花岗岩中的 465~476 Ma 的片麻状花岗岩<sup>[28]</sup>、勐库地区 470 Ma 斜长花岗岩<sup>[29]</sup>、黑河地区大量的 463~489 Ma 斜长花岗岩,在栗义和惠民地区 454~462 Ma 的变质火山岩<sup>[30]</sup>等。

本次获得的黑河地区榴辉岩峰期变质温压条件为  $T=547 \sim 623^{\circ}\text{C}$ ,  $p=2.82 \sim 3.31$  GPa;榴辉岩的主要围岩——石榴白云石英片岩是一套砂泥质沉积岩,其峰期变质温压条件为  $T=517 \sim 664^{\circ}\text{C}$ ,  $p=2.59 \sim 3.10$  GPa,与榴辉岩基本一致,表明二者可能共同经历了相似的高压-超高压变质作用及折返过程。

## 5 结论

滇西特提斯构造域榴辉岩的发现是近年云南

基础地质研究的重大进展之一,其空间分布由云县蚂蚁堆向南经双江县勐库、澜沧县黑河,至景洪勐宋坝以南延入缅甸境内,表明滇西原特提斯洋盆关闭过程中普遍存在冷洋壳的深俯冲作用。经本次研究,获得以下结论。

(1)澜沧县黑河地区的榴辉岩呈透镜状岩片产于谦迈蛇绿混杂岩内,主要榴辉岩相变质矿物组合为石榴子石、绿辉石、多硅白云母、金红石等。

(2)黑河地区榴辉岩的原岩为亚碱性岩系中的钙碱性系列玄武岩;岩石地球化学特征具有富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)及弧火山岩双重特性,属前弧玄武岩(FAB),来自富集地幔源区,是原特提斯洋盆由扩张向俯冲消减转化阶段的岩浆作用记录。

**致谢:**野外工作期间云南省地质调查院李静高级工程师、云南省地质勘查基金管理中心段文婷高级工程师多次亲临项目组进行指导,张伟民高级工程师在岩矿鉴定方面提供了较大帮助,岩石地球化学分析得到武汉上谱分析科技有限责任公司的大力支持,在此一并致谢。

## 参考文献

- [1] 刘本培,冯庆来,方念乔.滇西昌宁-孟连带和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J].地球科学,1993,18(5):529-539.
- [2] 莫宣学,路凤香,沈上越,等.三江特提斯火山作用与成矿[M].北京:地质出版社,1993:1-67.
- [3] 潘桂棠,陈智,李兴振,等.东特提斯地质构造形成演化[M].北京:地质出版社,1997:1-179.
- [4] 钟大赉.川滇西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998:1-231.
- [5] 崔春龙,曾允孚,段丽兰,等.滇西昌宁-孟连带存在一个古生代大洋吗?[J].沉积学报,1999,17(2):176-181.
- [6] 朱勤文,张双全.滇西南曼信天折堆积岩的确认及其意义[J].地质科技情报,1999,18(2):1-3.
- [7] 李静.云南省双江县石炭纪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,2003.
- [8] 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,2008.
- [9] 李静,孙载波,黄亮,等.滇西勐库退变质榴辉岩  $P-T-t$  轨迹及地质意义[J].岩石学报,2017,33(7):2285-2291.
- [10] 王保弟,王立全,王冬兵,等.三江昌宁-孟连带原-古特提斯构造演化[J].地球科学,2018,43(8):5-28.
- [11] 刘桂春,孙载波,曾文涛,等.滇西双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的厘定、地球化学特征及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,2017,36(2):163-174.
- [12] 王冬兵,罗亮,唐渊,等.昌宁-孟连结合带牛井山早古生代埃达克岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及其地质意义[J].岩石学报,

- 2016, 32(8): 2317-2329.
- [13] 孙载波, 李静, 周坤, 等. 滇西勐库地区退变质榴辉岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2018, 37(11): 2032-2043.
- [14] 孙载波, 李静, 周坤, 等. 滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩的岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2017, 31(4): 746-756.
- [15] 孙载波, 胡绍斌, 周坤, 等. 滇西南澜沧谦迈地区榴辉岩岩石学、矿物学特征及变质演化  $P-T$  轨迹[J]. 地质通报, 2019, 38(7): 1105-1115.
- [16] 肖庆辉, 李廷栋, 潘桂棠, 等. 识别洋-陆转换的岩石学思路——洋内弧与初始俯冲的识别[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 721-737.
- [17] Shatsky V S, Kozmenko O A, Soblev N V. Behaviour of rare earth elements during high pressure metamorphism[J]. Lithos, 1990, 25: 219-226.
- [18] Sun S, MacDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [19] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20(4): 325-343.
- [20] Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, et al. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram[J]. Journal of Petrology, 2007, 48(12): 2341-2357.
- [21] Pearce J A. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1979, 69(1): 33-47.
- [22] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1980, 50(1): 11-30.
- [23] Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. Lithos, 2008, 100(1): 14-48.
- [24] Pearce J A, Stern R J, Bloomer S H, et al. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2013, 6(7): 1-27.
- [25] Condie K C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? [J]. Lithos, 2005, 79(3): 491-504.
- [26] Myers R E, Breitkopf J H. Basalt geochemistry and tectonic settings: A new approach to relate tectonic and magmatic processes[J]. Lithos, 1989, 23(1/2): 53-62.
- [27] Breitkopf J H. Geochemical evidence for magma source heterogeneity and activity of a mantle plume during advanced rifting in the southern Damara Orogen, Namibia[J]. Lithos, 1989, 23(1/2): 115-122.
- [28] 彭智敏, 张辑, 关俊雷, 等. 滇西“三江”地区临沧花岗岩基早—中奥陶世花岗质片麻岩的发现及其意义[J]. 地球科学, 2018, 43(8): 49-63.
- [29] 刘桂春, 孙载波, 曾文涛, 等. 滇西双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的厘定、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2017, 36(2): 163-174.
- [30] Xing X, Wang Y, Cawood P A, et al. Early Paleozoic accretionary orogenesis along northern margin of Gondwana constrained by high-Mg metagneous rocks, SW Yunnan[J]. International Journal of Earth Sciences, 2017, 106(5): 1469-1486.