

## 滇西云龙漕涧地区高压片麻岩的发现及厘定

黄亮<sup>1,2</sup>, 田素梅<sup>1,2</sup>, 张虎<sup>1,2</sup>, 熊波<sup>2,3</sup>, 王晓林<sup>1</sup>, 浦涛<sup>1</sup>, 杨仕潘<sup>1</sup>, 方雄<sup>1</sup>

(1. 云南省地质调查院, 云南昆明 650216; 2. 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;  
3. 云南省国土资源规划设计研究院, 云南昆明 650216)

**摘要:** 笔者在滇西云龙县漕涧新发现了一套以黑云斜长片麻岩为主的变泥质岩石, 其呈构造透镜体状产出, 出露面积极小, 中高级变质矿物发育, 与围岩特征明显不同。岩相学研究表明, 片麻岩保留有明显的俯冲-折返的矿物学记录, 矿物世代具顺时针变质演化特征, 其中还残存有蓝晶石+铝直闪石的共生矿物组合, 对应的变质压力达 1.0 GPa 以上。通过 GBP 平均温压计法计算得到岩石的变质温压范围为 566~623℃ 和 0.36~0.53 GPa; 此外, 片麻岩中还有少量的多硅白云母矿物, 根据相平衡模拟  $p$ - $T$  视剖面图及其硅原子数最大值为 3.23 的特点, 推断其属蓝片岩类。综合研究认为, 黑云斜长片麻岩属于高压变质岩(峰期变质压力最小约为 1.60 GPa), 为昌宁-孟连结合带的北段寻找高压变质岩提供了新的信息, 并表明昌宁-孟连结合带为一条连续的高压-超高压变质带。

**关键词:** 黑云斜长片麻岩; 平均温压计;  $p$ - $T$  视剖面图; 蓝片岩; 高压; 漕涧地区; 滇西

中图分类号: P588.34<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)04-0747-10

## The discovery and determination of high-pressure gneiss in Caojian area of Yunlong, western Yunnan Province

HUANG Liang<sup>1,2</sup>, TIAN Su-mei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hu<sup>1,2</sup>, XIONG Bo<sup>2,3</sup>, WANG Xiao-lin<sup>1</sup>, PU Tao<sup>1</sup>,  
YANG Shi-pan<sup>1</sup> and FANG Xiong<sup>1</sup>

(1. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, China; 2. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Ministry of Natural Resources, Kunming 650051, China; 3. Department of Natural Resources of Yunnan Province, Kunming 650216, China)

**Abstract:** A set of meta-argillaceous rocks mainly composed of biotite plagioclase gneiss have been newly discovered in Caojian, Yunlong County, western Yunnan Province, which are existent in the form of structural lenses, with small outcrops and well-developed medium-high metamorphic minerals, which is obviously different from the feature of surrounding rocks. Petrographic study shows that gneiss has obvious mineralogical records of subduction-exhumation, and there is also a paragenetic mineral assemblage of kyanite+aluminum amphibole, and the corresponding metamorphic pressure should have reached 1.0 GPa or higher. The metamorphic temperature and pressure of rocks calculated by GBP average temperature and pressure meter method are 566~623℃ and 0.36~0.53 GPa respectively. In addition, there is a small amount of siliceous muscovite minerals in gneiss. According to the  $p$ - $T$  visual profile of phase equilibrium simulation and the characteristics of its maximum silicon atomic weight of 3.23, it is inferred that the rock belongs to blueschist. According to the comprehensive study, the biotite plagioclase gneiss

收稿日期: 2020-10-23; 接受日期: 2021-05-16; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金特提斯重大研究计划重点项目(92055207); 国家自然科学基金地区基金项目(420602005); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160345-02; 1212010000150007-26); 云南省地勘基金项目(D201901)

作者简介: 黄亮(1985-), 男, 学士, 高级工程师, 岩石学、构造学研究方向, E-mail: 409090169@qq.com; 通讯作者: 田素梅(1984-), 女, 研究生, 高级工程师, 矿物学、岩石学方向, E-mail: 313470364@qq.com。

网络首发时间: 2021-05-31; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20210529.1938.002.html>

belongs to high-pressure metamorphic rocks (the minimum metamorphic pressure in peak period is about 1.60 GPa), and these data provide new information in search for high-pressure metamorphic rocks in the northern part of Changning-Menglian junction zone, and also show that Changning-Menglian junction zone is a continuous high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone.

**Key words:** biotite plagioclase gneiss; average temperature and pressure meter;  $p$ - $T$  sectional view; blueschist; high pressure; Caojian area; western Yunnan

**Fund support:** Key Project of Tethys Major Research Program of National Natural Science Foundation of China (92055207); National Natural Science Foundation of China Regional Fund Project (420602005); Project of China Geological Survey (DD20160345-02, 1212010000150007-26); Geological Prospecting Fund Project of Yunnan Province (D201901)

昌宁-孟连结合带位于西南“三江”特提斯造山带南部,是古特提斯构造域的主缝合带,是研究特提斯洋盆形成和发展的重要地区。2015年,昌宁-孟连结合带南段的滇西双江勐库地区(图1a)退变质榴辉岩的发现引起了国内外学者的广泛关注,相关研究为滇西原-古特提斯的演化过程提供了大量新的信息(徐桂香等,2016;李静等,2017;孙载波等,2017;云南省地质调查院,2017<sup>①</sup>; Wang *et al.*, 2018; 王慧宁,2020),同时为昌宁-孟连结合带中高压-超高压带的存在提供了确凿的证据。随着近年地质调查工作的逐步进行,双江勐库地区以南的澜沧、勐腊等地不断有高压-超高压岩石发现(孙载波等,2019;王慧宁等,2019;王慧宁,2020;云南省地质调查院,2020<sup>②</sup>;王巍等,2021<sup>③</sup>),但在昌宁-孟连结合带北段却一直未发现经历过高压-超高压变质的岩石记录,以致昌宁-孟连结合带是否为一个连续的高压-超高压带存在较大的争议。

笔者在承担“云南省1:5万归州、宝丰、漕涧、功果街幅区域地质调查项目”期间,在调查区昌宁-孟连结合带北段新发现了一套以黑云斜长片麻岩为主的变泥质岩石(云南省地质调查院,2019)<sup>④</sup>,其呈构造透镜体状产出,出露面积小,但变质程度深,中高级变质矿物发育,与围岩特征明显不同。岩相学研究表明,黑云斜长片麻岩发育有丰富的富铝矿物组合,石英含量较高,原岩为变质泥质岩类(云南省地质调查院,2019)<sup>④</sup>。该片麻岩还发育多种矿物组合,具进-退变质共生关系特征,显示其应经历了俯

冲-折返过程(Tracy, 1997; O'Brien, 1997; 陈能松等,2003),对其深入研究具有重要的地质意义。

本文拟通过岩相学、平均温压计(GBP)和多硅白云母压力计等方法对黑云斜长片麻岩的变质压力进行研究,确定其属于高压变质岩,并进一步探讨其大地构造意义。

## 1 地质背景及野外产状

滇西云龙漕涧地区位于昌宁-孟连结合带北段(图1a),区内残留有少量原-古特提斯洋盆演化的物质记录(云南省地质调查局,2013<sup>⑤</sup>;云南省地质调查院,2019<sup>①</sup>)。云南省地质调查院(2019)<sup>①</sup>将研究区产出的昌宁-孟连结合带的岩石组分进行了重新划分,具体分为外来岩片、洋内火山-沉积建造和侵入岩浆杂岩,其中黑云斜长片麻岩归为洋内火山-沉积建造的远洋沉积残片。

黑云斜长片麻岩仅在漕涧地区铁厂村和其以南一带出露,呈3个小型构造透镜体岩片产出(图1b),总出露面积约为600 m<sup>2</sup>,其中在铁厂村出露有宽约30 m的露头,而以南的两处均为残坡积露头。黑云斜长片麻岩与东侧保山地块的奥陶纪花岗岩为韧性剪切接触关系(图1b、图2a),西侧与古生代蛇绿混杂岩中的大理岩为断层接触关系(图1b),直接围岩即为东侧的花岗岩和西侧的大理岩。岩石较新鲜,呈灰色、深灰色,坚硬致密,具块状、条带-条纹状构造,部分岩石发育有连续微褶皱(图2b),具抗风

① 云南省地质调查院. 2017. 云南省耿马县大兴勘查区1:5万香竹林、勐勇、勐撒、懂过、耿马、安雅、勐库七幅区域地质矿产调查.

② 云南省地质调查院. 2020. 云南省1:5万曼谷幅小街幅曼班幅大勐龙幅万纳兰幅勐宋坝幅区域地质调查报告.

③ 王巍, 张星培, 孙载波, 等. 2021. 滇西澜沧县黑河地区榴辉岩岩石学、岩石地球化学特征及区域构造意义. 地质通报(待刊).

④ 云南省地质调查院. 2019. 云南省1:5万归州、宝丰、漕涧、功果街幅区域地质调查报告.

⑤ 云南省地质调查局. 2013. 云南省成矿地质背景研究报告.

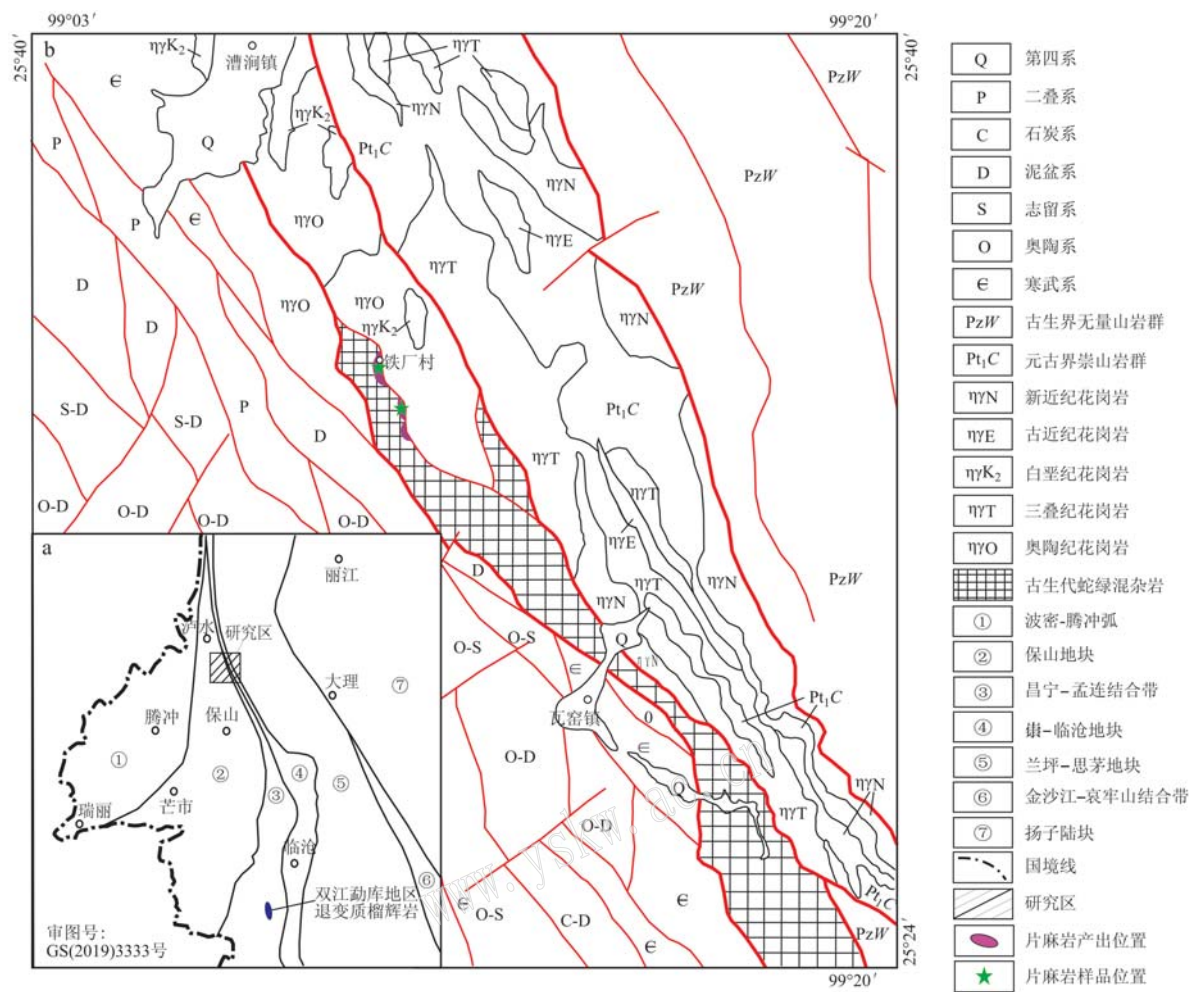


图 1 研究区位置图(a)和区域地质背景简图(b)  
Fig. 1 Location map (a) and schematic map of regional geological background (b) of the study area

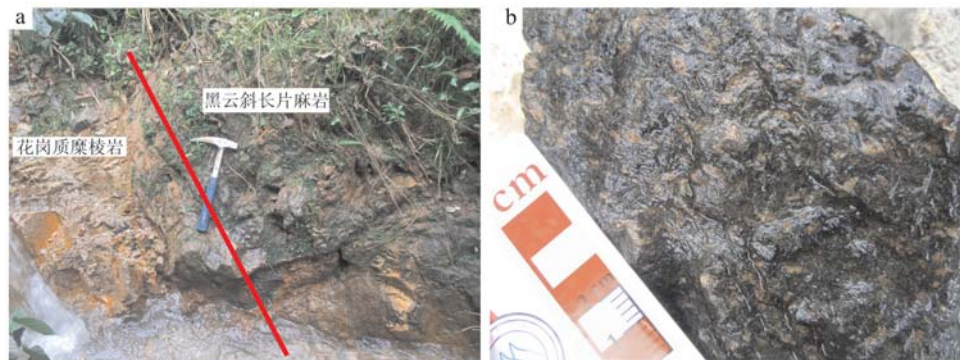


图 2 黑云斜长片麻岩的宏观特征  
Fig. 2 The macroscopic characteristics of biotite plagioclase gneiss

化能力强的特点。

2 样品采集、测试方法

本次研究的黑云斜长片麻岩样品主要采自于铁厂村及其以南的第一个残坡积露头,具体位置见图 1b。

矿物成分电子探针测试在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,电子探针显微分析仪(EPMA)为日本电子公司的 JXA-8100,加速电压 15 kV,电子流  $2\times 10^{-8}$  A,摄谱时间 10 s,用 2 μm 电子束斑测定,标准样品采用美国 SPI 公司 53 种标准矿物化学成分。能谱仪(EDS)由英国 OXFORD 公司



制造,加速电压 20 kV,束流  $1.52 \times 10^{-9}$  A。扫描电镜为日本电子公司 JSM-561LV 型,电子束电压为 20 kV,焦距 20 mm,束斑直径为 41 nm。

文中使用的矿物缩写代号为:石榴子石—Grt,蓝晶石—Ky,铝直角闪石—Ged,十字石—St,多硅白云母—Phg,夕线石—Sil,堇青石—Crd,斜长石—Pl,黑云母—Bi,石英—Q。

### 3 岩相学及矿物学特征

黑云斜长片麻岩(后简称为片麻岩)新鲜面呈灰黑色,具斑状变晶结构,片状矿物黑云母呈不连续定向排列构成片麻状构造。岩石矿物成分主要为石英(35%~40%)、斜长石(25%~30%)、黑云母(15%~20%)、石榴子石(5%~10%)、堇青石(2%~10%)、十字石(2%~8%)、铝直角闪石(0~6%)、蓝晶石(0~4%)、多硅白云母(0~2%)等,副矿物有磷灰石、钛铁矿等。岩石基质为片状粒状变晶结构,主要由定向排列的石英、斜长石、黑云母组成,其中变斑晶由粒径大小不一的石榴子石、十字石、堇青石、红柱石

和少量蓝晶石、铝直闪石、多硅白云母组成(图 3a),部分变斑晶矿物明显被晚期剪切作用改造而成透镜状、眼球状(图 3a~3d)。

石榴子石:褐色,粒度变化大,多在 0.5~10 mm 之间,含量在不同的岩石中有一定程度的差异。镜下无色,近等轴粒状、它形多边形,糙面明显,内常有石英、黑云母、磷灰石、钛铁矿等矿物包体。早期的石榴子石较粗(5~20 mm),自形程度差,裂纹发育,岩石中易熔组分石英沿裂纹、裂隙贯入,边部多呈港湾状(图 3e);该期石榴子石中核部-幔部的包体主体为石英(图 3e),没有斜长石,而斜长石主要产于岩石基质中,显示了此类石榴子石斑晶为构造残斑而非变斑,岩石经历了强烈的退变质作用,使得斜长石被完全溶蚀和分解消耗(曹玉亭等, 2009;刘平华等, 2017; Zhang *et al.*, 2018),同时也指示了岩石经历了进变质-退变质过程(俯冲-折返)。晚期石榴子石粒径小(0.5~2.0 mm),保存相对完好,表面基本无裂纹,包体矿物含量极少。

黑云母:  $N_g$ -棕红色,  $N_p$ -浅黄色,多色性明显,片状,粒径多为 0.2~1.0 mm,多绕碎斑定向分布

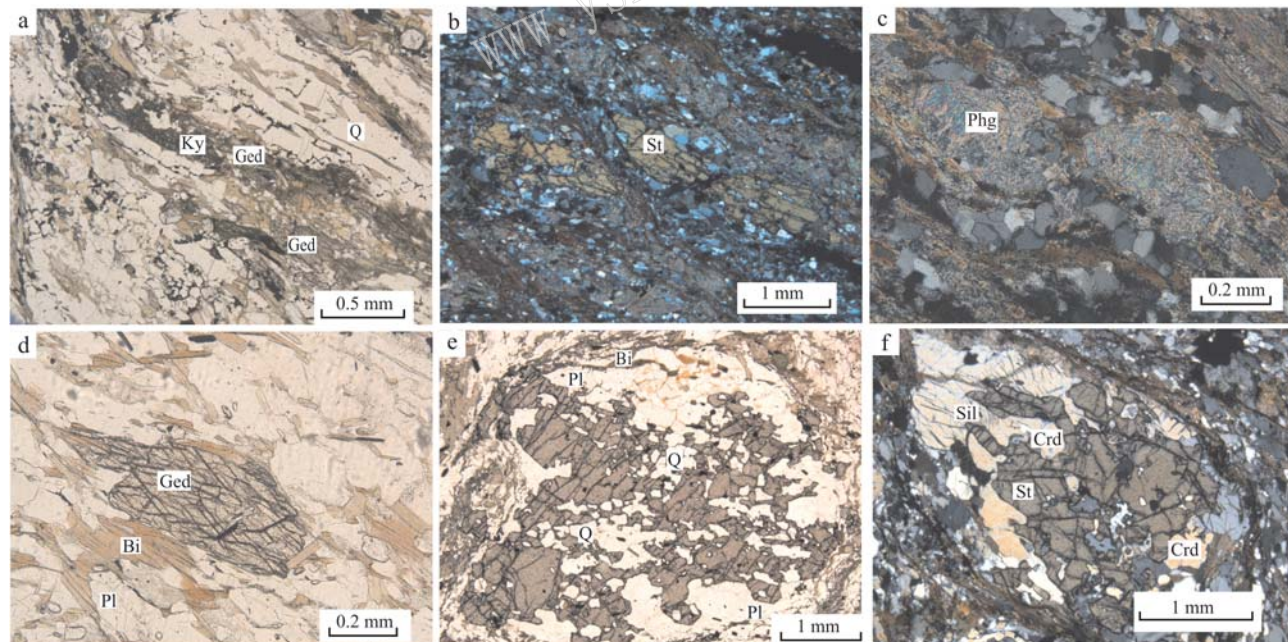


图 3 黑云斜长片麻岩的显微照片(正交偏光)

Fig. 3 The microphotographs of biotite plagioclase gneiss (crossed nicols)

a—蓝晶石+铝直角闪石的共生组合特征; b—十字石的韧性剪切面被石英充填; c—多硅白云母呈透镜状产出; d—铝直闪石边缘被黑云母化; e—石榴子石核部-幔部包体为石英质; f—堇青石与十字石交生

a—symbiotic combination characteristics of kyanite+aluminum orthoclase; b—the ductile shear plane of staurolite filled with quartz; c— polysilicate muscovite in lenticular form; d—biotitization of the edge of gedrite; e—garnet core-mantle inclusions composed of quartz; f—intergrowth between cordierite and staurolite

且构成岩石主期面理(图3d、3e)。

斜长石:粒状变晶状,粒径小于1.2 mm,为晚期折返阶段产物,广泛分布在岩石基质中(图3d、3e),并与黑云母和石英等构成了基质的主要矿物成分。

十字石:浅黄色,粒度大小不等,多数在0.7~3.0 mm之间,在各样品中广泛出露,多被晚期构造剪切作用改造,且剪切面多被石英等基质充填(图3b)。镜下具弱多色性,Ng-金黄,Np-无色,短柱状,正高突起,干涉色一级黄,纵切面平行消光,正延性,横切面对称消光。

蓝晶石:浅蓝色,粒状、柱状,粒径0.2~1.5 mm,薄片无色。岩石中含量少,被后期改造以残晶形式存在,内部包裹石英、钛铁矿等矿物,还可见少量残存的蓝晶石与铝直角闪石平衡共生(图3a)。

铝直角闪石:仅分布在少部分岩石中,呈长柱状、透镜状,粒径多在0.4~2.0 mm。镜下无色,部分具弱的多色性,均以残晶形式产出,其边缘多遭受黑云母化(图3d),同时可见少量与蓝晶石平衡共生(图3a)。

多硅白云母:为俯冲峰期阶段的典型矿物,在岩石中含量极不均匀,粒径多为0.1~0.5 mm,主要呈透镜片状产出,不同程度地发生了绢云母化(图3c),个别内见黑云母和石英包体。

堇青石:镜下无色,粒径多在0.4~0.8 mm,卵状或透镜状,正低突起,干涉色达一级黄,负延性。岩石中可见堇青石与十字石交生(图3f),为岩石初始组合蓝晶石和铝直角闪石在折返过程中形成的终态组合(游振东等,1990),同时也指示片麻岩经历了俯冲-折返的过程。

夕线石:在岩石中含量约3%~10%,有3种产状:①呈长柱状、针状、毛发状沿主期面理分布,内见棕红色黑云母残余;②呈毛发状、隐微晶状集合产出,沿蓝晶石边缘分布,为温度升高条件下由蓝晶石转变形成,属高温夕线石;③呈纤维状包裹于堇青石、红柱石等低压型矿物中(图3f),形成于中高温环境。

红柱石:浅红色,柱状,粒径0.3~1.5 mm,镜下无色,突起中等,负延性,柱状切面平行消光,最高干涉色一级黄白,不同程度地退变为绢云母。

根据岩石现存矿物组合、矿物相互转变关系及矿物化学等特征,可将黑云斜长片麻岩的矿物世代细分为6个阶段:早期的M<sub>1</sub>阶段(石英+黑云母+钾长石+斜长石)、M<sub>2</sub>变质阶段(多硅白云母+黑云母+

石英)、M<sub>3</sub>变质阶段(石榴子石+蓝晶石+铝直闪石+石英)、M<sub>4</sub>变质阶段[石榴子石+石英+黑云母+夕线石(由蓝晶石转变而来)]、M<sub>5</sub>变质阶段(石榴子石+十字石+黑云母+石英+斜长石、石榴子石+堇青石+夕线石+红柱石+黑云母+石英+斜长石)和晚期的热剪切阶段(绢云母+绿泥石+石英+斜长石),其中晚期的热剪切作用为叠加变质,与前5个变质阶段形成于不同的变质过程。

## 4 矿物化学特征

采用电子探针显微分析仪对黑云母、斜长石和石榴子石矿物组合以及多硅白云母进行了矿物微区成分分析,分析结果见表1和表2。其中斜长石和黑云母广泛分布于岩石基质中,与石英、石榴子石等构成岩石的主要矿物成分,而多硅白云母却出露较少。黑云母中SiO<sub>2</sub>含量为37.50%~40.06%,MgO含量为11.98%~14.09%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为16.21%~16.99%;斜长石中SiO<sub>2</sub>含量为57.98%~61.12%,CaO含量为7.05%~8.83%,Na<sub>2</sub>O含量为6.42%~7.35%;石榴子石中SiO<sub>2</sub>含量为37.28%~38.24%,CaO含量为1.71%~2.58%,MgO为3.85%~4.77%,MnO为0.20%~1.18%,FeO<sup>T</sup>为34.07%~35.92%,其主要端员成分较为相近,均属铁铝榴石类。此外,多硅白云母的SiO<sub>2</sub>含量为46.36%~48.99%,对应的硅原子数为3.14~3.23(11个氧原子)。

## 5 变质作用温度压力条件

### 5.1 矿物世代及演化

根据变质矿物世代温压转变关系(程素华等,2018),黑云斜长片麻岩M<sub>1</sub>阶段为增温增压过程;M<sub>2</sub>为压力变质峰期阶段,变质温度为低温;M<sub>3</sub>为早期退变质阶段,温度由低温到中温变化,其中该阶段保留有的蓝晶石+铝直角闪石的矿物组合,是典型的高压矿物组合,具有变质压力达1.0 GPa及以上的特点(Schreyer and Seifert, 1969; Schreyer and White, 1974);M<sub>4</sub>为降压增温的热折返阶段,该阶段的夕线石由蓝晶石转变而成,属高温夕线石,形成温度至少达到650℃;M<sub>5</sub>阶段为近等温-降温减压阶段,其中变质压力由中压过渡为低压;晚期的热剪切阶段为高温低压级变质阶段。结合M<sub>1</sub>至M<sub>5</sub>阶段

表 1 黑云母-斜长石-石榴子石的电子探针数据 ( $w_B/\%$ ) 及温压计运算结果  
Table 1 Electron microprobe analyses ( $w_B/\%$ ) of biotite-plagioclase-garnet and calculation results of temperature and pressure meter

矿物 项目	Bi					Pl					Grt					温压计算结果				
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO		CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
第1组	39.25	1.28	16.99	16.84	0.00	12.62	0.04	0.42	8.14	58.92	0.01	25.74	0.18	0.00	0.00	7.88	6.80	0.04	0.01	623℃, 0.53 GPa
第2组	38.91	1.19	16.99	16.99	0.01	12.57	0.00	0.48	8.35	57.98	0.02	26.24	0.08	0.00	0.00	8.41	6.46	0.05	0.01	612℃, 0.53 GPa
第3组	40.06	1.07	16.52	16.58	0.04	12.83	0.00	0.45	8.06	58.94	0.01	25.57	0.16	0.01	0.01	8.05	6.68	0.05	0.02	587℃, 0.49 GPa
第4组	38.85	1.24	16.71	16.29	0.01	13.56	0.00	0.47	8.05	58.13	0.05	25.91	0.03	0.00	0.00	8.46	6.42	0.07	0.01	577℃, 0.40 GPa
第5组	37.79	1.19	16.74	16.64	0.01	14.09	0.02	0.49	8.26	59.23	0.02	25.44	0.03	0.00	0.00	8.83	6.28	0.05	0.02	582℃, 0.47 GPa
第6组	40.06	1.07	16.91	15.97	0.00	11.98	0.00	0.55	8.56	59.14	0.00	25.24	0.13	0.00	0.00	7.59	6.91	0.05	0.03	584℃, 0.36 GPa
第7组	37.87	1.20	16.77	18.33	0.00	12.37	0.05	0.37	7.55	61.12	0.00	24.02	0.06	0.02	0.02	7.35	7.05	0.07	0.03	578℃, 0.36 GPa
第8组	39.31	0.86	16.21	16.75	0.01	13.77	0.02	0.52	7.92	59.86	0.00	24.67	0.09	0.00	0.00	7.05	7.32	0.06	0.05	579℃, 0.46 GPa
第9组	37.50	1.23	16.53	18.67	0.05	12.74	0.03	0.47	7.79	60.56	0.00	24.01	0.06	0.00	0.00	7.64	6.98	0.04	0.03	590℃, 0.36 GPa
第10组	38.25	0.97	16.56	17.05	0.01	13.30	0.02	0.51	7.95	60.90	0.00	23.46	0.08	0.00	0.00	7.27	7.35	0.04	0.02	566℃, 0.44 GPa

注：每一组的黑云母、斜长石、石榴子石为共生，其中石榴子石为小颗粒，电子探针测点为各矿物幔-边部。

表 2 多硅白云母电子探针分析结果  
Table 2 Electron microprobe analyses of phengite

测试点号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	total	Si	Ti	Al	Cr	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn	Mg	Ca	Na	K	total	$w_B/\%$
51	48.01	0.01	29.45	0.05	2.92	1.13	0.02	2.91	0.02	0.21	10.2	94.93	3.23	0.00	2.34	0.00	0.15	0.06	0.00	0.29	0.00	0.03	0.88	6.98	
52	48.45	0.04	30.16	0.04	3.13	1.21	0.07	2.56	0.03	0.24	9.47	95.40	3.23	0.00	2.37	0.00	0.16	0.07	0.00	0.25	0.00	0.03	0.81	6.92	
53	47.76	0.03	29.82	0.03	2.86	1.10	0.00	2.89	0.00	0.19	9.88	94.57	3.22	0.00	2.37	0.00	0.15	0.06	0.00	0.29	0.00	0.03	0.85	6.96	
118	48.99	0.03	30.08	0.03	3.91	1.51	0.00	3.22	0.07	0.22	7.65	95.72	3.23	0.00	2.34	0.00	0.19	0.08	0.00	0.32	0.01	0.03	0.64	6.84	
135	46.37	0.02	29.21	0.07	4.05	1.56	0.01	3.67	0.06	0.14	9.37	94.53	3.15	0.00	2.34	0.00	0.21	0.09	0.00	0.37	0.00	0.02	0.81	6.99	
136	46.89	0.00	29.14	0.04	3.81	1.47	0.02	3.64	0.08	0.15	9.47	94.72	3.17	0.00	2.32	0.00	0.19	0.08	0.00	0.37	0.01	0.02	0.82	6.99	
137	47.10	0.03	29.59	0.04	3.81	1.47	0.02	3.64	0.08	0.15	9.47	95.41	3.16	0.00	2.34	0.00	0.19	0.08	0.00	0.36	0.01	0.02	0.81	6.98	
141	48.16	0.00	29.01	0.09	3.45	1.33	0.02	3.81	0.04	0.10	9.67	95.68	3.22	0.00	2.28	0.01	0.17	0.07	0.00	0.38	0.00	0.01	0.82	6.97	
142	46.36	0.00	29.59	0.05	3.90	1.50	0.01	3.99	0.06	0.14	8.70	94.31	3.14	0.00	2.36	0.00	0.20	0.09	0.00	0.40	0.00	0.02	0.75	6.97	

注：以 11 个氧原子为基数，测点为多硅白云母矿物中的不同位置。



的变质温度压力过渡关系特征,发现该片麻岩变质作用明显具顺时针演化的特点。

## 5.2 地质温压计

采用石榴子石-黑云母-斜长石温压计(GBP)平均温压法(Holdaway, 2000)对片麻岩变质温压条件进行了初步估算,获得了岩石的变质温度和压力分别为566~623℃和0.36~0.53 GPa(表1)。由于其中石榴子石的数据采点均位于其边部一带,并且斜长石在晚期的折返阶段形成(云南省地质调查院, 2019)<sup>①</sup>,因此认为该温压估算结果仅代表岩石退变质-折返阶段( $M_4 \sim M_5$  阶段)的温压值。

## 5.3 相平衡模拟

本文相平衡模拟采用 MnO-Na<sub>2</sub>O-CaO-K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>-O (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (MnNCKFMA-SHTO) 体系,该体系为专门针对变质泥岩部分熔融过程所建立(White *et al.*, 2003),用于研究变质泥岩中矿物相平衡关系方面较为合理。相关矿物相的

活度-成分关系模型为:石榴子石-Grt(W)、十字石-St(W)、黑云母-Bi(W)、白云母-Mica(W)、绿泥石-Chl(W)、硬绿泥石-Ctd(W)、斜方辉石-Opx(W)、尖晶石-Sp(WPC)、堇青石-Crd(W)、长石-Fsp(C1)、角闪石-oAmph(DP)、钛铁矿-Ilm(W)、熔体-melt(W)。假设流体相为纯水,并设为饱和;全岩成分中MnO含量较低,但是它对石榴子石的稳定域有较大的影响,因此将其保留;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 主要形成磷灰石,含量很低,被忽略。模拟采用实测全岩成分:SiO<sub>2</sub>=64.51%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=15.46%, TiO<sub>2</sub>=0.80%, FeO=6.83%, MnO=0.07%, MgO=3.34%, CaO=2.04%, Na<sub>2</sub>O=2.77%, K<sub>2</sub>O=2.20%, H<sub>2</sub>O=1.87%。

本文计算的黑云斜长片麻岩的压力-温度视剖面图温压范围为400~650℃和0.8~1.8 GPa(图4),石榴子石稳定在整个视剖面图区域,硬玉仅出现在压力大于1.24 GPa 区域。根据白云母的硅原子数的等值线(范围为3.10~3.30)分布规律,硅原子数与

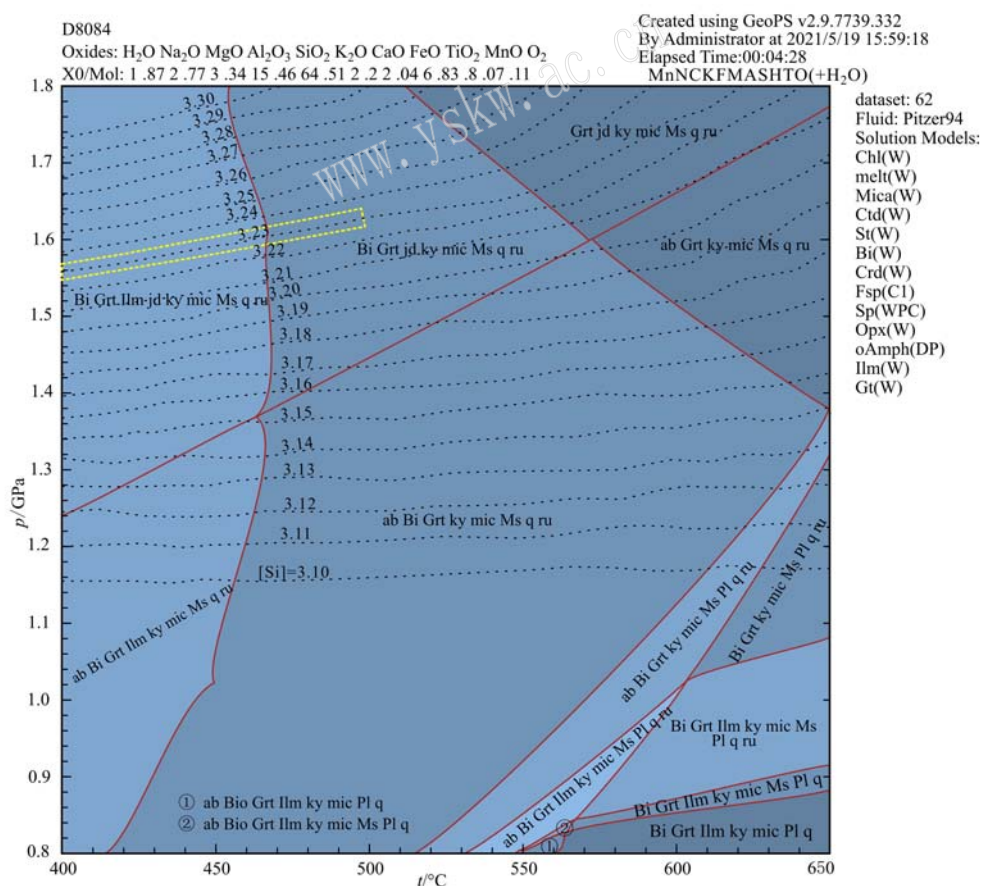


图4 黑云斜长片麻岩的压力-温度视剖面图

Fig. 4  $p$ - $T$  pseudosection calculated for biotite plagioclase gneiss

① 云南省地质调查院. 2019. 云南省1:5万归州、宝丰、漕涧、功果街幅区域地质调查报告.

变质压力具较好的正相关性,而与变质温度虽具一定的正相关性但影响相对较小(图4)。在压力峰期变质阶段( $M_2$ 阶段)选择低温变质区域(温度为400~500℃),多硅白云母中硅原子数最大为3.23,变质压力为1.55~1.64 GPa(图4中黄色虚线区域),属高压变质域,且与前述认识 $M_3$ 阶段的蓝晶石+铝直角闪石高压矿物组合相吻合,再结合 $M_2$ 阶段残留的矿物组合特征,综合认为黑云斜长片麻岩应属蓝片岩相变质(Winter *et al.*, 2001),且归属为低温高压型的蓝片岩类。

## 6 讨论及地质意义

造山带中高压-超高压变质岩是古俯冲带及古板块缝合带的重要标志,它记录了地壳(洋壳或陆壳)物质俯冲、折返的构造演化过程(王晓赛等, 2018; 申婷婷等, 2018)。调查区南侧的双江勐库地区退变质榴辉岩的峰期变质压力为2.0~2.5 GPa,属于基性变质岩类(李静等, 2017; 孙载波等, 2017; 云南省地质调查院, 2017<sup>①</sup>; Wang *et al.*, 2018; 王慧宁, 2020等),与本次厘定的同一构造带内的高压片麻岩(蓝片岩)具一定差异。二者虽为同一构造单元的物质组分,但片麻岩是变质泥质岩石,其中新生了富水相矿物,在经历了角闪岩相退变质后,高压矿物容易退变为中压矿物(Menold *et al.*, 2009; 申婷婷等, 2018),其实际峰期变质压力可能更大。

从大地构造位置来看(图1a),片麻岩产于昌宁-孟连结合带北段,位于构造挤压最为强烈地带,而昌宁-孟连结合带及相邻构造单元均具逐渐张开的构造样式,勐库地区也明显具备伸展抬升条件,以致漕涧地区蛇绿混杂岩下部-深部的更高压力变质级的物质组分难以抬升至地表。实际上,双江勐库地区向南延至澜沧、勐腊、缅甸乃至泰国一带均有榴辉岩等高压-超高压岩石的记录,且均为低温型榴辉岩类(Maruyama *et al.*, 1996; Liou *et al.*, 2009; 孙载波等, 2019; 王慧宁等, 2019; 王慧宁, 2020; 云南省地质调查院, 2020<sup>②</sup>; 王巍等, 2021<sup>③</sup>)。

此外,云南省地质调查院(2019)<sup>④</sup>在研究区铁厂村片麻岩西北侧0.5km的大理岩中获得了224.3 Ma的变质年龄,本研究黑云斜长片麻岩和大理岩虽为断层接触,但属同一构造单元,其亦应在晚三叠世遭受了强烈的变质作用。该变质年龄与李静等(2017)、孙载波等(2017)、云南省地质调查院(2017)<sup>①</sup>认定的勐库退变质榴辉岩的晚三叠世变质年龄(230 Ma)十分接近。结合勐库退变质榴辉岩与漕涧片麻岩的变质轨迹均具顺时针的特点(李静等, 2017; Wang *et al.*, 2018; 王慧宁, 2020),认为它们均形成于印支期造山作用的俯冲-折返过程。

综上所述,笔者认为漕涧高压片麻岩(蓝片岩)与勐库地区退变质榴辉岩为同一高压-超高压变质带的物质组分,二者只是俯冲深度和变质程度不同,并在晚期经历了不同的挤压-抬升作用。黑云斜长片麻岩的下部或深部应产有榴辉岩类岩石,并构成变质压力递增变质带,二者压力峰期变质温度为450~550℃左右(路凤香等, 2004),结合黑云斜长片麻岩的压力-温度视剖面图(图4),认为其记录的最低变质压力约为1.60 GPa。

漕涧高压片麻岩(蓝片岩)在研究区及昌宁-孟连结合带北段的首次发现,说明云南高压-超高压岩石的产出从双江、澜沧、勐腊等南面热点地区(云南省地质调查院, 2017<sup>①</sup>, 2020<sup>②</sup>; 李静等, 2017; 孙载波等, 2017, 2019; Wang *et al.*, 2018; 王慧宁等, 2019; 王慧宁, 2020; 王巍等, 2021<sup>③</sup>)向北延伸了约230 km,为昌宁-孟连结合带是一条连续性的高压-超高压变质带提供了新的信息,区域地质意义重大。

## 7 结论

(1) 漕涧黑云斜长片麻岩具顺时针变质轨迹特征,形成于印支期造山作用过程。

(2) 漕涧黑云斜长片麻岩为高压变质岩,属蓝片岩类,峰期变质压力最小约为1.60 GPa。

(3) 漕涧黑云斜长片麻岩为双江勐库地区高压-超高压岩石组分的北向延伸,昌宁-孟连结合带

① 云南省地质调查院. 2017. 云南省耿马县大兴勘查区1:5万香竹林、勐勇、勐撒、懂过、耿马、安雅、勐库七幅区域地质矿产调查.

② 云南省地质调查院. 2020. 云南省1:5万曼谷幅小街幅曼班幅大勐龙幅万纳兰幅勐宋坝幅区域地质调查报告.

③ 王巍, 张星培, 孙载波, 等. 2021. 滇西澜沧县黑河地区榴辉岩岩石学、岩石地球化学特征及区域构造意义. 地质通报(待刊).

④ 云南省地质调查院. 2019. 云南省1:5万归州、宝丰、漕涧、功果街幅区域地质调查报告.



为一条连续性的高压-超高压变质带。

**致谢** 项目组成员参加了野外调查和研究工作,样品的制备和分析得到了北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室的大力支持,成文过程中得到了李静教授级高工、刘福来研究员、张聪研究员的悉心指导,匿名审稿专家和责任编辑对文稿做了大量的文字修核工作,在此一并表示衷心的感谢。

## References

- Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, *et al.* 2009. *p-T* path of Early Paleozoic polydeformed high-pressure granulite from Danshuiquan area in Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 260~2 270 (in Chinese with English abstract).
- Chen Nengsong, Sun Min, Yang Yong, *et al.* 2003. Major and trace-element zoning in metamorphic garnets and their metamorphic process implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 315~320 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Suhua and You Zhendong. 2018. *Petrology of Metamorphic Rocks* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~300 (in Chinese).
- Holdway M J. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 85: 881~892.
- Li Jing, Sun Zaibo, Huang Liang, *et al.* 2017. *p-T-t* path and geological significance of retrograded eclogites from Mengku area in western Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 2 285~2 301 (in Chinese with English abstract).
- Liou G, Ernst W G, Zhang R Y, *et al.* 2009. Ultrahigh-pressure minerals and metamorphic terranes - The view from China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3/4): 199~231.
- Liu Pinghua, Cai Jia and Zou Lei. 2017. Metamorphic *p-T-t* path and its geological implication of the Sanjiazhi garnet amphibolites from the northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji belt: Constraints on phase equilibria and zircon U-Pb dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2 649~2 674 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Sang Longkang, Wu Jinhua, *et al.* 2004. *Petrology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 251~368 (in Chinese).
- Maruyama S, Liou J G and Terabayashi M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation[J]. *International Geology Review*, 38: 485~594.
- Menold C A, Manning C E, Yin A, *et al.* 2009. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of orthogneiss hosting ultrahigh-pressure eclogites in the North Qaidam metamorphic belt, Western China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 273~284.
- O'Brien P J. 1997. Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites, Bohemian Massif, European Variscides: A record of their thermal history during exhumation[J]. *Lithos*, 41(1): 119~133.
- Schreyer W and Seifert F. 1969. Compatibility relations of the aluminum silicates in the systems  $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  and  $K_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  at high pressure[J]. *American J. of Science*, 267: 371~388.
- Schreyer W and White S W. 1974. A new type of metamorphic rock formed at high pressures [J]. *Geologische Rundschau*, 63: 599~600.
- Shen Tingting, Zhang Cong, Tian Zuolin, *et al.* 2018. Petrological studies of Jilang eclogite in the Lhasa terrane and its constraint on the subduction and exhumation processes of the Paleo-Tethys oceanic crust [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(6): 917~932 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zaibo, Hu Shaobin, Zhou Kun, *et al.* 2019. Petrology, mineralogy and metamorphic *p-T* path of eclogites from the Qianmai area, Lancang County, western Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(7): 1 105~1 115 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zaibo, Li Jing, Zhou Kun, *et al.* 2017. Geochemical characteristics and geological significance of retrograde eclogite in Mengku area, Shuangjiang County, Western Yunnan Province[J]. *Geoscience*, 31(4): 746~756 (in Chinese with English abstract).
- Tracy R J. 1997. Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts [J]. *Amer. Mineral.*, 61: 730~737.
- Wang Huining, Liu Fulai, Ji Lei, *et al.* 2019. Petrology, geochemistry and metamorphic evolution of Lancang Group in the Changning-Menglian complex belt and its implications on the tectonic evolution of the Paleo-Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6): 1 773~1 799 (in Chinese with English abstract).
- Wang H N, Liu F L, Li J, *et al.* 2018. Petrology, geochemistry and *p-T-t* path of lawsonite-bearing retrograded eclogites in the Changning-Menglian orogenic belt, southeast Tibetan Plateau[J]. *Metamorphic Geology*, 37: 439~478.
- Wang Xiaosai, Du Jinxue and Tian Ye. 2018. Review on geothermobarometers for (ultra)high-pressure metapelites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(2): 325~341 (in Chinese with English abstract).
- White R W, Powell R, Clarke, *et al.* 2003. Prograde metamorphic assemblage evolution during partial melting of metasedimentary rocks

- at low pressures: Migmatites from Mt Stafford, Central Australia[J]. *Journal of Petrology*, 44: 1 937~1 960.
- Winter J D. 2001. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology [M]. Newjersey: Prentice-Hall Inc. , 410~635.
- Xu Guixiang, Zeng Wentao, Sun Zaibo, *et al.* 2016. Petrology and mineralogy of (retrograded) eclogites from Mengku area, Shuangjiang Country, western Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(7): 1 036~1 045(in Chinese with English abstract).
- You Zhendong, Zhou Hanwen and Lü Xuemiao. 1990. Corona textures in kyanite gedrite schist from Xishui, Hubei[J]. *Earth Science*, 15(4): 345~356(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹玉亭, 刘 良, 王 超, 等. 2009. 阿尔金淡水泉早古生代泥质高压麻粒岩及其  $p$ - $T$  演化轨迹[J]. *岩石学报*, 25(9): 2 260~2 270.
- 陈能松, 孙 敏, 杨 勇, 等. 2003. 变质石榴子石的成分环带与变质过程[J]. *地学前缘*, 10(3): 315~320.
- 程素华, 游振东. 2018. 变质岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1~300.
- 李 静, 孙载波, 黄 亮, 等. 2017. 滇西勐库退变质榴辉岩的  $p$ - $T$ - $t$  轨迹及地质意义[J]. *岩石学报*, 33(7): 2 285~2 301.
- 刘平华, 蔡 佳, 邹 雷. 2017. 辽东半岛北部三家子石榴斜长角闪岩变质演化  $p$ - $T$ - $t$  轨迹及其地质意义: 来自相平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束[J]. *岩石学报*, 33(9): 2 649~2 674.
- 路凤香, 桑隆康, 邬金华, 等. 2004. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 251~368.
- 申婷婷, 张 聪, 田作林, 等. 2018. 拉萨地块吉郎榴辉岩的岩石学研究及其对古特提斯洋壳俯冲折返过程的限定[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(6): 917~932.
- 孙载波, 胡绍斌, 周 坤, 等. 2019. 滇西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*, 38(7): 1 105~1 115.
- 孙载波, 李 静, 周 坤, 等. 2017. 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]. *现代地质*, 31(4): 746~756.
- 王慧宁. 2020. 昌宁-孟连造山带榴辉岩、蓝片岩和变沉积岩的岩石学、变质演化及其对古特提斯-陆俯冲造山的制约(博士论文)[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 王慧宁, 刘福来, 冀 磊, 等. 2019. 昌宁-孟连杂岩带澜沧岩群的岩石学、地球化学和变质演化及其对古特提斯构造演化的启示[J]. *岩石学报*, 35(6): 1 773~1 799.
- 王晓赛, 杜瑾雪, 田 野. 2018. 高压超高压变泥质岩适用的地质温压计评述[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(2): 325~341.
- 徐桂香, 曾文涛, 孙载波, 等. 2016. 滇西双江县勐库地区(退变)榴辉岩的岩石学、矿物学特征[J]. *地质通报*, 35(7): 1 036~1 045.
- 游振东, 周汉文, 吕学森. 1990. 湖北浠水蓝晶石铝直闪石片岩中的冠状体结构的研究[J]. *地球科学*, 15(4): 345~356.