

滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩中 闪石类矿物的成因研究

陈光艳, 徐桂香, 孙载波, 田素梅, 张 虎, 黄 亮, 周 坤

(云南省地质调查院, 云南 昆明 650216)

摘 要: 勐库地区新近发现的退变质榴辉岩中晚期退变质作用形成的闪石类矿物十分丰富, 其携带了大量晚期退变质过程中的岩石成因信息。本文通过系统的矿物学研究, 鉴定出了 3 期 10 种闪石类矿物, 其中以镁钙闪石、镁角闪石、铁镁钙闪石、铁韭闪石、透闪石、阳起石等钙质闪石类为主, 有少量冻蓝闪石、蓝透闪石等钠-钙闪石类。研究发现, 随着退变质过程中时间的推移, 角闪石的形成环境逐渐由还原环境向弱氧化环境、氧化环境演变。根据角闪石电子探针成分测试结果计算了相应的温度、压力条件。结合岩相学的资料, 将退变质过程分为 3 期: ① 第 1 期早阶段为近等温降压过程($p=0.56\sim0.75$ GPa, $t=642\sim709^{\circ}\text{C}$), 主要形成铁韭闪石、铁镁钙闪石、镁钙闪石; 晚阶段为等温降压过程($p=0.39\sim0.56$ GPa, $t=619\sim642^{\circ}\text{C}$), 主要形成镁钙闪石及少量镁绿钙闪石、铁韭闪石; ② 第 2 期为降温降压过程($p=0.23\sim0.42$ GPa, $t=460\sim610^{\circ}\text{C}$), 主要形成镁角闪石、冻蓝闪石及铁角闪石; ③ 第 3 期为近等温降压过程($p=0.09\sim0.31$ GPa, $t=350\sim420^{\circ}\text{C}$), 主要形成透闪石、阳起石、蓝透闪石等。闪石类的成分变化反映了退变质榴辉岩从地壳底部的角闪石榴辉岩-高压麻粒岩相温压环境向中上地壳角闪岩相、绿片岩相温压环境的渐次退变质作用过程。这与昌宁-孟连构造带上印支期的碰撞造山作用、燕山期的区域性地壳伸展、喜马拉雅期的陆内造山运动具有较好的对应关系。

关键词: 闪石类矿物; 退变质榴辉岩; 温压条件; 勐库地区

中图分类号: P578.955

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)01-0036-12

Genetic study of amphiboles in retrograded eclogites from Mengku area, Shuangjiang County, western Yunnan Province

CHEN Guang-yan, XU Gui-xiang, SUN Zai-bo, TIAN Su-mei, ZHANG Hu, HUANG Liang and ZHOU Kun
(Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, China)

Abstract: Retrograded eclogites from Mengku area contains massive amphiboles, which formed in late period of the remetamorphic process. It could keep a record of petrogenetic information in the late remetamorphic period. Based on a study of systematic mineralogy, the authors identified three periods of amphiboles and furthermore divided them into ten types. They mostly belong to calcium amphiboles such as tschermakite, ferrotschermakite, magnesiohornblende, ferrohornblende, magnesiohastingsite, ferropargasite, tremolite and actinolite, with some sodic-calcium amphiboles such as barrosite and winchite. Studies show that the formation environment of amphiboles gradually changed from reduction through weak oxidation to oxidation in the remetamorphic process. The numerical values of temperatures and pressures were computed on the basis of electron microprobe data in this paper. Combined with petrographic data, three periods of retrograde metamorphism were recognized. The first period could be divided into two stages: the early was approximately isothermal and decompression

收稿日期: 2016-06-13; 接受日期: 2016-11-21

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(121201010000150007); 云南区域地质调查片区总结与服务产品开发(DD20160345-02); 云南省科技领军人才培养计划项目(2013HA001)

作者简介: 陈光艳(1987-), 女, 测试工程师, 从事岩矿鉴定工作, E-mail: chenguangyan1987@163.com。

process, $p = 0.56 \sim 0.75$ GPa and $t = 642 \sim 709^\circ\text{C}$, forming ferropargasite and ferrotschermakite; the latter was an isothermal and decompression process, $p = 0.39 \sim 0.56$ GPa and $t = 619 \sim 642^\circ\text{C}$, forming tschermakite. The second period was a cooling and decompression process, $p = 0.23 \sim 0.42$ GPa and $t = 460 \sim 610^\circ\text{C}$, forming magnesiohornblende. The third period was a isothermal and decompression process, $p = 0.09 \sim 0.31$ GPa and $t = 350 \sim 420^\circ\text{C}$, forming tremolite and actinolite. The composition variation of amphiboles indicates a gradual cooling and decompression process, in which retrograded eclogites moved from crust bottom (amphibole-eclogite facies-high pressure-granulite facies) to mid-upper crust (hornblende facies, green-schist facies). The process corresponded to Indosinian collision orogenesis, Yanshanian regional crustal extension and Himalayan intracontinental orogenesis in Changning-Menglian belt.

Key words: amphiboles; retrograded eclogites; temperature-pressure conditions; Mengku area

Fund support: China Geological Survey Project (121201010000150007); District Summary and Service Product Develop of Yunnan Region Geologic Survey (DD20160345-02); Yunnan Science and Technology Leader Training Program (2013HA001)

昌宁-孟连结合带是研究滇西地区古特提斯洋形成及发展演化的关键地区,普遍认为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(CTo ϕ m)代表了古特提斯洋盆闭合后的残迹(刘本培等,1993,2002;钟大赉,1998;潘桂棠等,2004;李静,2004;莫宣学等,2006;段向东,2013);同时认为古特提斯洋的演化经历了较为完整的威尔逊旋回,而且是对原特提斯的继承性演化。但是对于原特提斯洋在昌宁-孟连构造带上的表现形式以及原-古特提斯洋如何继承发展演化等诸多基础性地质问题却鲜有研究者涉及。

云南省地质调查院(2003)^①在铜厂街蛇绿混杂岩(CTo ϕ m)东侧的临沧花岗岩基中的湾河一带发现并命名了一套出露长度约25 km的湾河蛇绿混杂岩,并认为其是铜厂街蛇绿混杂岩经后期岩浆顶托、构造改造而成。2014年以来,云南省地质调查院在承担“云南省1:5万香竹林幅、勐库幅等7幅区域地质矿产调查”项目工作中,发现湾河蛇绿混杂岩可以向北至少延伸至云县头道水等地,其出露长度超过100 km,在变质堆晶英云闪长岩(角闪斜长岩)中获得了470.8 Ma的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(图1),表明湾河蛇绿混杂岩不可能是铜厂街蛇绿混杂岩经后期改造的产物,而是一条独立的早古生代蛇绿混杂岩,应该代表了昌宁-孟连构造带上原特提斯

洋的残迹(刘桂春等,2017,待刊)。

在勐库地区,于该蛇绿混杂岩带中还发现了数个退变质榴辉岩的透镜体,其南北向的延伸长度超过3 km,单个构造透镜体厚0.3~4 m,走向延伸数米至大于20 m,以糯扎附近河沟中出露的构造透镜体规模最大,岩石最为新鲜(李静等,2015)。详细的岩石学及矿物学研究表明,该退变质榴辉岩经历了进变质阶段硬柱石蓝片岩相、峰期硬柱石榴辉岩相,早期硬柱石-蓝闪石榴辉岩相及中期普通角闪石榴辉岩相-高压麻粒岩相的退变质作用(李静等,未发表)^②,并在其中获得了801 Ma、227 Ma的榴辉岩原岩年龄及晚期(主期)退变质年龄(孙载波等,未发表)^③。

闪石类矿物是晚期退变质阶段形成的最主要造岩矿物,其粒度、形态、结构、成分变化都十分明显,携带了大量晚期退变质过程中的岩石成因信息。本文旨在系统的闪石类矿物岩石学、矿物学研究的基础上,通过对其化学成分的系统研究,反演退变质过程中温压条件的变化,为滇西地区的特提斯构造演化过程提供变质地质学方面的支撑。

1 闪石类矿物的岩相学特征

根据主要造岩矿物种类及结构、构造特征,勐库地区的退变质榴辉岩可划分为以下4种类型:退变

① 云南省地质调查院. 2003. 1:25万临沧幅、滚龙幅区域地质调查报告.

② 李 静, 黄 亮, 孙载波. 等. 滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩的 p - T 轨迹及地质意义. 未发表.

③ 孙载波, 李 静, 周 坤. 等. 滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩年代学、地球化学及其地质意义. 未发表.

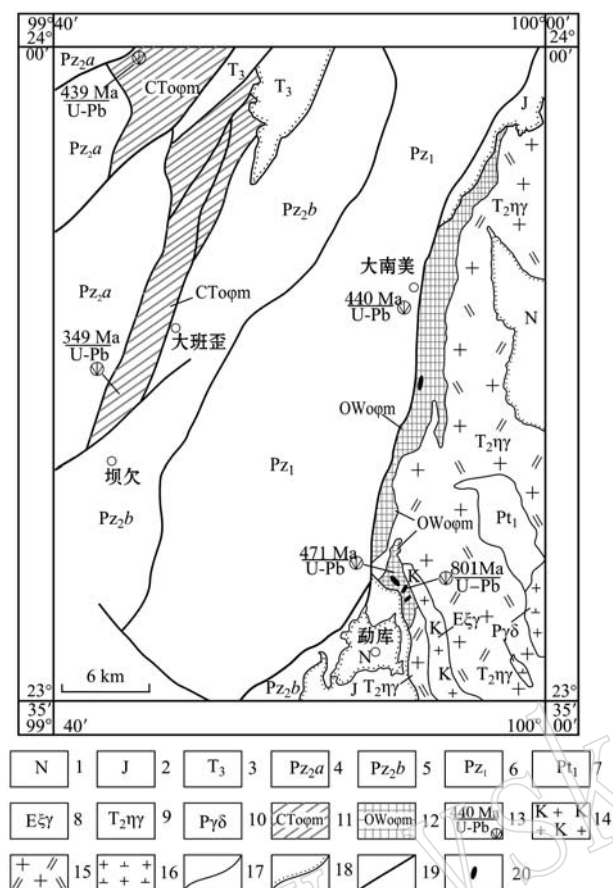


图1 研究区地质简图及退变质榴辉岩的出露位置
(据徐桂香等, 2016)

Fig. 1 Geological map of the study area and outcrop location of retrograded eclogite (after Xu Guixiang *et al.*, 2016)

1—新近系; 2—侏罗系; 3—上三叠统; 4—西部上古生界被动陆缘沉积; 5—东部上古生界被动-主动陆缘沉积; 6—下古生界澜沧岩群; 7—古元古界崇山岩群; 8—古近纪正长花岗岩; 9—中三叠世二长花岗岩; 10—二叠纪花岗闪长岩; 11—石炭纪铜厂街蛇绿混杂岩; 12—奥陶纪湾河蛇绿混杂岩; 13—同位素采样位置及年龄值; 14—正长花岗岩; 15—二长花岗岩; 16—花岗闪长岩; 17—地质界线; 18—角度不整合界线; 19—断层; 20—退变质榴辉岩出露位置

1—Neogene; 2—Jurassic; 3—Upper Triassic; 4—Upper Paleozoic passive margin sediments in the west; 5—Upper Paleozoic passive-active margin sediments in the east; 6—Lower Paleozoic Langcang Group; 7—Paleo-Proterozoic Chongshan Group; 8—Paleogene syenogranite; 9—Middle Triassic monzogranite; 10—Permian granodiorite; 11—Carboniferous Tongchangjie ophiolite melange; 12—Ordovician Wanhe ophiolite melange; 13—sampling position and isotopic dating; 14—syenogranite; 15—monzogranite; 16—granodiorite; 17—geological boundary; 18—unconformity; 19—fault; 20—outcrop location of retrograded eclogite

榴辉岩、榴闪岩、条纹-条带状榴闪岩、含石榴斜长角闪岩(徐桂香等, 2016), 代表了不同退变质程度的榴辉岩。角闪石类矿物是各种岩石中最主要的造岩矿物之一, 其含量为 20%~60%, 一般与退变质程度呈

正相关关系。通过详细的镜下观察, 可将角闪石划分为 4 个时代:

第 1 期角闪石 (Am_1)^①: 在退变质榴辉岩、榴闪岩、含石榴斜长角闪岩中均可见及, 伴生矿物有淡粉红色石榴子石、灰绿色透辉石、绿辉石、金红石, 共生矿物有帘石、斜长石等。呈淡棕色-淡棕褐色-淡棕黄色-无色, 突起较一般角闪石高, 为正高突起, 干涉色为二级蓝至蓝绿, 斜消光形, 多呈隐晶状-微细粒状 (粒径 < 0.02 mm), 常与斜长石构成指纹状后成合晶, 成分上以较高的钠质含量为特征, 内部见细小的绿辉石残余包体及大量金红石包裹体 (图 2a、2b), 表明这类角闪石可能是直接由绿辉石退变而成, 可能的退变质反应为: $Omp + Grt + Q + H_2O \rightarrow Am_1 + Pl$, $Omp + Grt_1 + Q + H_2O \rightarrow Am_1 + Pl + Grt_2$; 部分地段呈残斑状分布于微细粒状的其它角闪石中, 或呈蠕虫状与 Pl_1 组成短柱状辉石假像后成合晶, 可能为单斜辉石退变形成。有关的变质反应可能为: $Cpx + Gr + Q + H_2O \rightarrow Am_1 + Pl$, 表现为有水参与的连续减压降温过程。经电子探针分析, 本期闪石主要属铁韭闪石 (Fe_2-Prg), 有少量镁绿钙闪石 ($Mg-Hs$)、铁镁钙闪石 (Fe_2-Ts)。

第 2 期角闪石 (Am_2): 呈淡绿色-淡黄绿色-无色, 正中突起, 具闪石式解理, 干涉色为二级蓝至蓝绿, 斜消光, 消光角多在 20°左右, 它形柱状、纤柱状、纤状, 多呈放射状集合体产出, 部分与斜长石构成指纹状、细粒状后成合晶 (图 2a), 有关的变质反应可能与产生第 1 期角闪石的类似, 只是发生在更低的温压条件下, 或二者本身就是同一期退变质作用的两个阶段。也见部分蓝绿色角闪石 (Am_2) 围绕早期淡棕褐色角闪石 (Am_1) 分布, 形成退变质反应边 (图 2c); 部分构成石榴石退变反应边 (图 2d), 为降压退变质的特征结构。电子探针分析结果显示本期闪石主要属镁钙闪石 (Ts)、铁镁钙闪石 (Fe_2-Ts)。

第 3 期角闪石 (Am_3): 呈鲜艳的蓝绿色, 具明显多色性: Ng —深蓝绿, Np —浅绿色, 为低温普通角闪石, 叠加在第 2 期角闪石 (Am_2) 之上或穿切它 (图 2e), 部分沿石榴子石裂隙充填 (图 2f)。这是勐库地区退变质榴辉岩中最主要的闪石类矿物, 电子探针分析显示本期闪石主要属镁角闪石 ($Mg-Hbl$)、铁角闪石 (Fe_2-Hbl), 少量的冻蓝闪石 (Brs) 也可能形成于这一阶段。

① 矿物缩写据沈其韩等 (2009), 下文同。

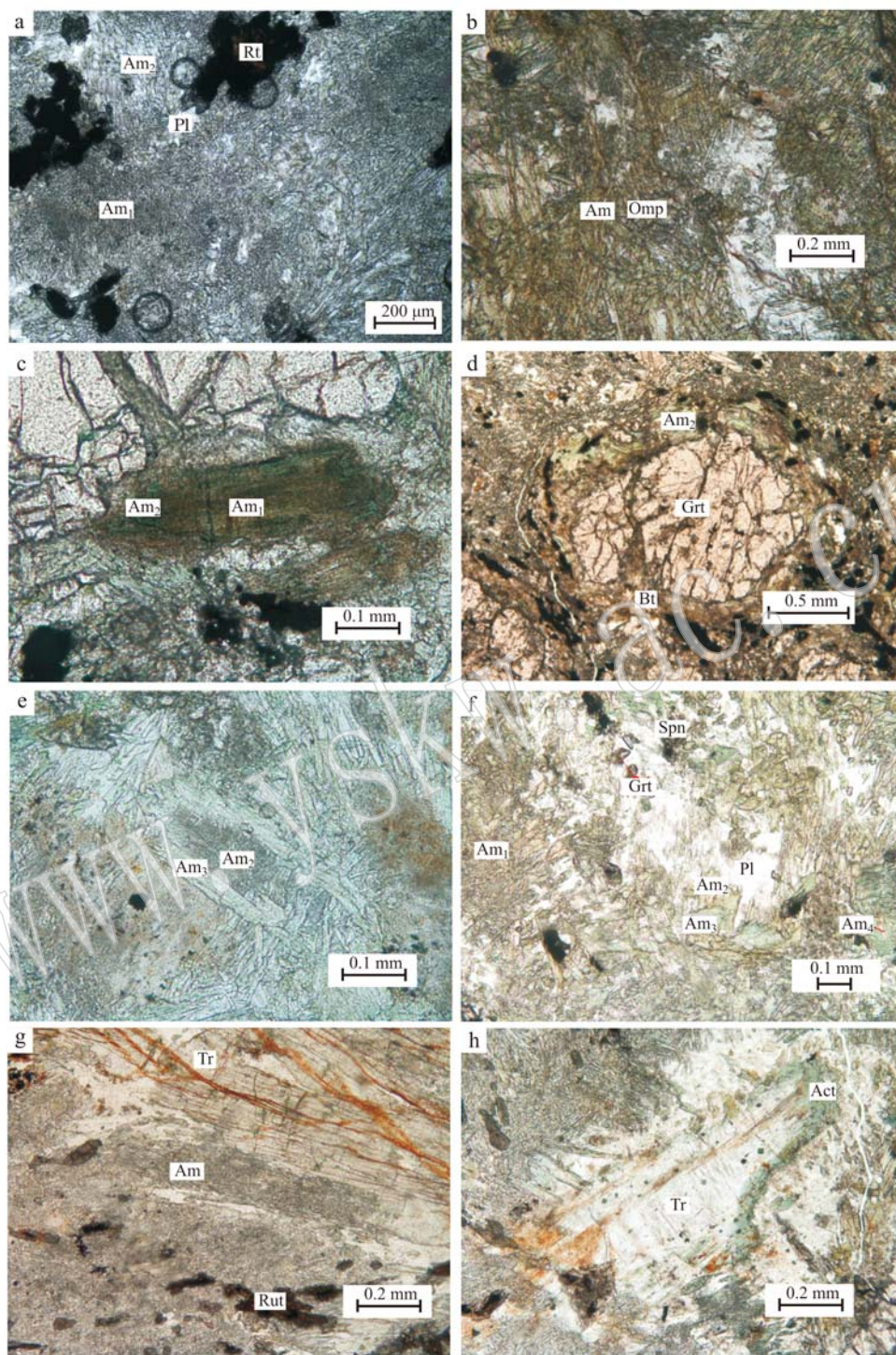


图 2 闪石类矿物典型结构显微照片

Fig. 2 Photomicrographs showing typical textures of amphiboles

a—退变榴辉岩中微细粒状-隐晶状斜长石(Pl)和角闪石(Am_1 、 Am_2)形成的指纹状后合成晶及金红石包体; b—角闪石(Am_1)中的绿辉石(Omp)包体; c—褐色角闪石(Am_1)退变形成蓝绿色角闪石(Am_2)退变反应边; d—榴闪岩中石榴子石(Grt)具角闪石(Am_2)反应边; e—榴闪岩中第 3 期角闪石(Am_3)穿切第 2 期角闪石(Am_2); f—榴闪岩中第 3 期角闪石(Am_3)沿石榴子石(Grt)裂隙充填; g—榴闪岩中晚期形成结晶粗大的透闪石; h—榴闪岩中透闪石(Tr)具阳起石(Act)反应边

a—symplectite of Am + Pl from omphacite in retrograded eclogites; b—residual omphacite enclave in amphibole; c—brown amphibole retrograded to blue-green amphibole; d—amphibole reaction rim of garnet in garnet-amphibolite; e—second stage amphibole cut by third stage amphibole in garnet-amphibolite; f—third stage amphibole filling the garnet fractures in garnet-amphibolite; g—coarse tremolite formed at late stage in garnet-amphibolite; h—actinolite reaction rim of tremolite in garnet-amphibolite

第4期角闪石(Am_4): 主要为透闪石(Tr)、阳起石(Act)。透闪石(Tr): 呈无色, 正中突起, 具闪石式解理, 干涉色二级蓝-蓝绿, 斜消光, 消光角为 20° , 结晶粗大、晶形完整, 杂乱分布或沿裂隙呈脉状分布(图2g), 部分透闪石具阳起石反应边(图2h)。阳起石(Act): 浅绿色, 具有良好的晶形, 弱的多色性, N_g —浅绿色, N_p —浅黄色。电子探针分析结果也进一步证明了本期闪石为透闪石、阳起石, 少量的蓝透闪石(Win)也可能形成于这一时期。

2 闪石类矿物的化学成分及分类

勐库地区退变质榴辉岩的矿物成分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 15 kV, 测试电流 2.50×10^{-8} A, 电子束直径为 5 μ m。分析结果(表1)显示勐库退变质榴辉岩中闪石类矿物的氧化物含量变化较大, 并表现出随形成时间的规律性变化, 其中 SiO_2 含量由早期的不足 40% 增加至晚期接近 60%, MgO 的含量也由早期的不足 10% 增加至晚期接近 20%; 而 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Na_2O 含量的变化趋势正好相反, 表现为含量由早到晚逐渐降低的特点; CaO 的含量由早到晚变化不大。

角闪石分类以 23 个氧原子为基础进行计算, 其中 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 采用 Leake 等(1997)和 Schumacher (2001)的方法计算, 借助改变 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的值将 $(Si + Al + Cr + Ti + Fe + Mg + Mn)$ 的总数调整为 13, 从而得到 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的合理值。根据 Leake 等(1997)、王立本(2001)角闪石分类命名方案, 将由电子探针测试数据计算的角闪石晶体结构式中的阳离子数值 Si 、 Al^{IV} 、 Al^{VI} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Ti 和特征值 $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ 、 $(Na + K)_A$ 以及 Ca_B 、 Ca_A 投影到角闪石分类图(图3)中, 发现勐库退变质榴辉岩中闪石类矿物多属钙质角闪石类, $[Ca + Na]_B \geq 1.00$, $Ca_B \geq 1.50$, $Na_B < 0.50$, 少量为钠-钙闪石类, 包含冻蓝闪石及蓝透闪石。钠-钙闪石类与钙质角闪石类的成分变化是连续的, 冻蓝闪石中的 Si 为 6.74~7.27, $Na_B = 1.04 \sim 1.46$, $(Na + K)$ 都小于 0.5, $Mg/(Mg + Fe^{2+}) = 0.88 \sim 1.00$, Ca 均在 1.04~1.47 之间, Fe^{3+} 在 1.32~2.00 之间, 比钙质角闪石 Fe^{3+} 量高, 反映了冻蓝闪石与普通钙质角闪石的成分及形成时的温压条件有一定差异。

按岩石类型计, 退变质榴辉岩中包含了镁钙闪

石(Ts)—铁镁钙闪石(Fe_2-Ts)、镁角闪石($Mg-Hbl$)—铁角闪石(Fe_2-Hbl)、透闪石(Tr)—阳起石(Act)及少量冻蓝闪石(Brs), 分属 3 个退变质时期。榴辉岩中包含了镁钙闪石(Ts)—铁镁钙闪石(Fe_2-Ts)、镁绿钙闪石($Mg-Hs$)—铁韭闪石(Fe_2-Prg)、镁角闪石($Mg-Hbl$)—铁角闪石(Fe_2-Hbl)、透闪石(Tr)—阳起石(Act)及少量的蓝透闪石(Win), 也分属 3 个退变质时期。含石榴斜长角闪岩中的闪石类矿物分属镁钙闪石(Ts)—铁镁钙闪石(Fe_2-Ts)、铁韭闪石(Fe_2-Prg)、镁角闪石($Mg-Hbl$)、透闪石(Tr), 也分属 3 个变质时期。这表明几类退变质榴辉岩中闪石类矿物的种类尽管存在一定程度差异, 但它们都经历了 3 期退变质作用的改造。

3 闪石类矿物的成因

闪石类矿物是自然界分布最为广泛的链状结构硅酸盐矿物, 主要可分为岩浆成因、变质成因两类。不同成因的闪石类矿物在结构、构造、化学成分、微量元素等诸多方面都存在一定程度的差异。通过测定其中的结构、成分及其变化能够反推其形成时的物理化学条件。

从勐库地区退变质榴辉岩的岩石共生组合、自身的结构、构造等资料分析, 其应为蛇绿混杂岩中的辉长质堆晶岩改造而成, 其中的闪石类矿物无疑应为辉石、石榴石等镁铁矿物经后期的退变质作用而成, 即属变质成因。

当角闪石晶体中 A 位被 Na、K 都占满(即 $A = 1.0$)时, 反映其处于最强的还原状态; 而 Na、K 都进入 B 位时(即 $A = 0$), 反映其处于最强的氧化状态(王濮等, 1982)。勐库地区退变质榴辉岩中的闪石类 A 位的阳离子数为 0.01~0.68, 但在不同种类的闪石中变化很大。在铁韭闪石—镁绿钙闪石中为 0.51~0.68, 平均为 0.59; 在镁钙闪石—铁镁钙闪石中介于 0.17~0.49 之间, 平均为 0.35; 在镁角闪石—冻蓝闪石—铁角闪石中介于 0.01~0.39 之间, 平均为 0.12; 在透闪石—阳起石—蓝透闪石中介于 0.01~0.04 之间, 平均为 0.02。A 位阳离子数由早到晚逐渐降低的现象, 反映了退变质过程中氧化程度逐渐升高的趋势。在 $(Na + K)_A - Si$ 的散点图解(图4)中, Si 与 $(Na + K)_A$ 总体上呈负相关关系, 但 75 件样品明显可分为 3 组。I 组, $(Na + K)_A \geq 0.40$, $(Na + K)_A$ 与 Si 呈弱正相关关系, 主要为铁韭闪石—镁绿钙

表 1 勐库退变质榴辉岩中角闪石电子探针成分
Table 1 Microprobe analyses of amphiboles from retrograded eclogites in Mengku

矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe ³⁺	Ti	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total	Mg/(Mg+Fe ²⁺)	t/°C	p/10 ⁵ Pa	
退变质榴辉岩D0502-9-1																									
Fe ₂ -Ts	38.98	0.12	14.34	19.66	0.28	6.46	10.20	1.85	0.59	92.49	6.16	1.84	0.83	0.84	0.01	1.75	0.04	1.52	1.73	0.57	0.12	15.41	0.46	645	5 709
Mg-Hbl	49.34	0.08	6.99	11.78	0.27	14.65	11.30	1.20	0.16	95.76	7.16	0.84	0.36	0.58	0.01	0.85	0.03	3.17	1.76	0.34	0.03	15.12	0.79	522	2 908
Mg-Hbl	49.32	0.07	6.48	13.64	0.24	13.30	11.06	1.16	0.15	95.41	7.25	0.75	0.37	0.52	0.01	1.16	0.03	2.91	1.74	0.33	0.03	15.10	0.72	489	4 500
Mg-Hbl	45.97	0.18	10.18	16.85	0.17	10.78	10.45	1.59	0.25	96.43	6.76	1.24	0.52	0.88	0.02	1.19	0.02	2.36	1.65	0.45	0.05	15.15	0.67	572	4 035
Ts	42.41	0.03	11.35	19.16	0.38	9.02	10.39	2.02	0.26	95.02	6.44	1.56	0.47	1.05	0.00	1.38	0.05	2.04	1.69	0.60	0.05	15.34	0.60	616	4 205
Mg-Hbl	47.61	0.03	7.07	14.10	0.25	12.61	10.62	1.26	0.15	93.70	7.13	0.87	0.38	0.67	0.00	1.09	0.03	2.82	1.70	0.37	0.03	15.10	0.72	523	3 038
Act	53.93	0.13	3.52	9.51	0.13	16.89	10.97	0.85	0.05	95.98	7.67	0.33	0.26	0.46	0.01	0.67	0.02	3.58	1.67	0.23	0.01	14.92	0.84	420	2 424
Act	54.58	0.02	2.69	11.60	0.18	16.03	11.40	0.46	0.07	97.03	7.75	0.25	0.20	0.43	0.00	0.94	0.02	3.40	1.73	0.13	0.01	14.87	0.78	403	2 097
Act	56.73	0.07	3.49	8.57	0.25	17.28	10.26	0.88	0.19	97.72	7.84	0.16	0.41	0.43	0.01	0.57	0.03	3.56	1.52	0.24	0.03	14.79	0.86	366	3 542
Act	55.27	0.07	1.86	10.00	0.11	17.68	11.06	0.54	0.05	96.63	7.78	0.22	0.09	0.62	0.01	0.56	0.01	3.71	1.67	0.15	0.01	14.82	0.87	390	1 786
Tr	56.57	0.02	1.27	8.36	0.00	18.88	10.61	0.53	0.08	96.31	7.89	0.11	0.10	0.68	0.00	0.29	0.00	3.93	1.59	0.14	0.01	14.74	0.93	363	1 978
Act	54.30	0.07	3.41	8.95	0.10	17.72	11.25	0.75	0.05	96.61	7.64	0.36	0.21	0.53	0.01	0.53	0.01	3.72	1.70	0.20	0.01	14.91	0.88	428	2 105
Act	54.92	0.03	2.69	9.66	0.11	16.51	10.43	0.49	0.10	94.93	7.86	0.14	0.31	0.48	0.00	0.68	0.01	3.52	1.60	0.14	0.02	14.75	0.84	364	3 053
Brs	48.62	0.07	6.64	12.58	0.18	16.59	6.84	0.71	0.11	92.32	6.88	1.11	0.00	1.49	0.01	0.00	0.02	3.50	1.04	0.19	0.02	14.25	1.00	508	3 056
Tr	54.72	0.02	1.63	9.08	0.06	17.78	10.28	0.54	0.07	94.17	7.83	0.17	0.11	0.74	0.00	0.35	0.01	3.79	1.58	0.15	0.01	14.74	0.92	370	2 130
退变质榴辉岩D1502-9-1																									
Mg-Hbl	51.18	0.35	6.92	18.16	0.98	10.11	10.89	0.42	0.25	99.25	7.34	0.66	0.51	0.57	0.04	1.60	0.12	2.16	1.67	0.12	0.05	14.83	0.57	479	3 372
Act	53.71	0.19	3.31	16.50	0.82	12.24	11.19	0.23	0.09	98.27	7.72	0.28	0.28	0.44	0.02	1.54	0.10	2.62	1.72	0.06	0.02	14.80	0.63	408	2 341
Mg-Hbl	49.77	0.31	8.09	16.66	0.89	10.53	10.34	0.58	0.17	97.33	7.20	0.80	0.57	0.77	0.03	1.25	0.11	2.27	1.60	0.16	0.03	14.79	0.65	497	3 892
Mg-Hbl	50.45	0.39	9.40	17.36	1.02	11.82	10.59	0.68	0.37	102.08	6.92	1.08	0.43	1.21	0.04	0.78	0.12	2.42	1.55	0.18	0.06	14.80	0.76	541	3 724
Mg-Hbl	51.52	0.28	6.92	15.43	0.91	11.65	10.15	0.52	0.26	97.63	7.37	0.63	0.53	0.74	0.03	1.10	0.11	2.48	1.55	0.14	0.05	14.75	0.69	463	3 762
Mg-Hbl	51.56	0.29	5.96	14.99	0.80	12.28	10.58	0.43	0.11	97.01	7.42	0.58	0.43	0.68	0.03	1.12	0.10	2.63	1.63	0.12	0.02	14.77	0.70	460	3 231
Act	52.11	0.40	4.07	21.43	1.04	8.99	10.22	0.32	0.21	98.79	7.58	0.42	0.27	0.75	0.04	1.86	0.13	1.95	1.59	0.09	0.04	14.72	0.51	425	2 406
Mg-Hbl	51.98	0.29	5.53	16.42	1.09	12.48	10.19	0.52	0.17	98.68	7.35	0.65	0.27	1.06	0.03	0.88	0.13	2.63	1.54	0.14	0.03	14.72	0.75	470	2 680
Fe ₂ -Hbl	49.65	0.48	5.64	22.91	1.02	7.95	10.02	0.62	0.45	98.72	7.29	0.71	0.27	0.92	0.05	1.89	0.13	1.74	1.58	0.18	0.08	14.84	0.48	483	2 406
榴辉岩 5-4																									
Mg-Hbl	47.03	0.00	7.25	19.49	0.48	10.31	10.80	1.63	0.22	97.21	6.98	1.02	0.24	0.84	0.00	1.58	0.06	2.28	1.72	0.47	0.04	15.23	0.59	550	2 454
Ts	42.83	0.16	12.39	19.94	0.51	9.03	9.94	2.53	0.36	97.69	6.32	1.68	0.47	1.24	0.02	1.22	0.06	1.99	1.57	0.72	0.07	15.36	0.62	628	4 461
Mg-Hbl	53.09	0.03	3.05	13.38	0.22	16.50	10.29	0.87	0.07	97.50	7.45	0.50	0.00	1.25	0.00	0.32	0.03	3.45	1.55	0.24	0.01	14.80	0.92	458	1 150

续表 1-1
Continued Table 1-1

矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	合计	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe ³⁺	Ti	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total	Mg/(Mg+Fe ²⁺)	t/°C	p/10 ⁵ Pa
榴闪岩 5-4																									
Mg-Hbl	45.61	0.07	9.96	16.96	0.32	11.32	10.16	1.96	0.25	96.62	6.68	1.32	0.40	1.11	0.01	0.97	0.04	2.47	1.60	0.56	0.05	15.20	0.72	584	3 726
Fe ₂ -Prg	37.23	1.00	19.58	22.74	0.08	3.35	9.97	2.99	0.09	97.02	5.63	2.32	1.21	0.71	0.12	2.19	0.01	0.76	1.63	0.88	0.02	15.53	0.26	686	7 417
Mg-Hbl	43.68	0.15	10.81	19.16	0.10	9.50	11.43	1.55	0.55	96.93	6.54	1.46	0.45	0.75	0.02	1.65	0.01	2.12	1.83	0.45	0.10	15.39	0.56	608	3 867
Ts	40.56	0.31	13.00	17.96	0.27	9.13	10.57	2.10	0.32	94.21	6.21	1.79	0.55	1.02	0.04	1.28	0.03	2.08	1.73	0.62	0.06	15.42	0.62	645	4 853
榴闪岩 6-4																									
Ts	42.44	0.16	13.04	14.23	0.15	11.50	10.01	2.06	0.34	93.94	6.33	1.67	0.63	1.14	0.02	0.64	0.02	2.56	1.60	0.60	0.06	15.26	0.80	625	5 148
Ts	42.73	0.16	12.56	14.24	0.14	11.52	9.97	1.84	0.34	93.49	6.40	1.60	0.61	1.16	0.02	0.62	0.02	2.57	1.60	0.53	0.06	15.20	0.80	618	4 997
Act	50.95	0.06	5.68	10.71	0.09	14.15	10.40	0.77	0.08	92.89	7.53	0.46	0.53	0.38	0.01	0.95	0.01	3.12	1.65	0.22	0.01	14.88	0.77	438	3 671
Mg-Hbl	47.36	0.32	6.21	14.59	0.20	12.09	11.58	1.14	0.21	93.70	7.22	0.78	0.33	0.22	0.04	1.64	0.03	2.75	1.89	0.34	0.04	15.27	0.63	518	2 489
Mg-Hbl	45.87	0.21	8.79	15.47	0.20	12.17	10.98	1.45	0.28	95.42	6.80	1.20	0.34	0.85	0.02	1.07	0.03	2.69	1.74	0.42	0.05	15.21	0.72	573	3 241
Brs	45.16	0.02	9.46	15.36	0.17	11.96	8.94	1.48	0.18	92.75	6.74	1.26	0.40	1.54	0.00	0.38	0.02	2.66	1.43	0.43	0.03	14.89	0.88	565	3 940
Mg-Hbl	49.97	0.03	6.94	13.88	0.17	14.48	9.99	1.18	0.12	96.76	7.10	0.90	0.26	1.25	0.00	0.40	0.02	3.07	1.52	0.32	0.02	14.87	0.88	516	2 908
Tr	54.32	0.02	1.35	8.64	0.04	19.04	11.10	0.39	0.05	94.94	7.71	0.23	0.00	0.85	0.00	0.17	0.00	4.03	1.69	0.11	0.01	14.81	0.96	410	904
榴闪岩 8-3																									
Ts	39.23	0.07	14.98	19.28	0.18	7.77	10.10	2.18	0.55	94.34	6.01	1.99	0.72	1.17	0.01	1.30	0.02	1.78	1.66	0.65	0.11	15.42	0.58	662	5 717
Mg-Hbl	44.23	0.43	9.40	15.83	0.07	11.60	11.24	1.59	0.27	94.66	6.67	1.33	0.34	0.75	0.05	1.25	0.01	2.61	1.82	0.46	0.05	15.33	0.68	593	3 370
Fe ₂ -Prg	37.38	0.75	16.16	20.20	0.15	5.54	10.81	1.85	0.69	93.53	5.91	2.09	0.92	0.63	0.09	2.04	0.02	1.31	1.83	0.57	0.14	15.54	0.39	674	6 256
榴闪岩 KJH-1-2																									
Mg-Hbl	46.70	0.04	9.35	13.15	0.15	13.77	10.75	1.57	0.17	95.64	6.79	1.21	0.39	0.98	0.00	0.62	0.02	2.98	1.68	0.44	0.03	15.15	0.83	572	3 617
Mg-Hbl	47.44	0.06	9.01	13.82	0.12	13.65	9.78	1.70	0.18	95.75	6.84	1.16	0.38	1.24	0.01	0.43	0.02	2.94	1.51	0.47	0.03	15.02	0.87	558	3 604
Mg-Hbl	45.82	0.12	10.34	15.96	0.22	11.65	10.80	1.62	0.28	96.81	6.69	1.31	0.47	0.92	0.01	1.03	0.03	2.54	1.69	0.46	0.05	15.20	0.71	584	3 946
Ts	40.64	0.42	15.59	17.25	0.15	9.45	10.74	2.41	0.53	97.18	6.01	1.99	0.72	0.99	0.05	1.14	0.02	2.08	1.70	0.69	0.10	15.49	0.65	665	5 777
Mg-Hbl	49.03	0.02	7.85	13.25	0.15	13.96	10.72	1.33	0.15	96.46	7.06	0.94	0.39	0.84	0.00	0.75	0.02	3.00	1.65	0.37	0.03	15.05	0.80	532	3 255
Act	54.31	0.05	1.68	12.14	0.15	16.55	11.59	0.28	0.05	96.78	7.74	0.26	0.02	0.62	0.00	0.83	0.02	3.51	1.77	0.08	0.01	14.85	0.81	412	1 047
Mg-Hbl	46.36	0.18	10.21	15.15	0.22	12.13	11.19	1.55	0.27	97.25	6.74	1.26	0.49	0.77	0.02	1.07	0.03	2.63	1.74	0.44	0.05	15.23	0.71	580	3 904
Mg-Hbl	43.78	0.18	11.57	15.56	0.14	10.92	10.07	1.70	0.29	94.20	6.55	1.45	0.58	1.06	0.02	0.89	0.02	2.43	1.61	0.49	0.06	15.16	0.73	599	4 622
Brs	53.21	0.04	4.51	11.43	0.10	18.09	9.00	0.88	0.08	97.33	7.27	0.73	0.00	1.31	0.00	0.00	0.01	3.68	1.32	0.23	0.01	14.56	1.00	466	2 151
榴闪岩 MNH1-1																									
Mg-Hbl	44.43	0.33	11.07	17.79	0.23	10.08	10.98	1.36	0.10	96.38	6.58	1.42	0.51	0.95	0.04	1.25	0.03	2.22	1.74	0.39	0.02	15.15	0.64	600	4 152
Mg-Hbl	47.54	0.01	8.78	16.12	0.18	12.36	10.41	1.22	0.08	96.70	6.87	1.13	0.37	1.18	0.00	0.77	0.02	2.66	1.61	0.34	0.02	14.97	0.78	557	3 400

续表 1-2
Continued Table 1-2

矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	合计	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe ³⁺	Ti	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total	Mg/(Mg+Fe ²⁺)	t/°C	p/10 ⁵ Pa
榴闪岩 MNH1-1																									
Brs	49.54	0.21	5.34	18.02	0.42	13.67	9.67	0.35	0.04	97.25	7.02	0.89	0.00	2.00	0.02	0.14	0.05	2.89	1.47	0.09	0.01	14.57	0.95	522	1 595
榴闪岩 MNH1-3																									
Fe ₂ -Ts	38.02	0.33	16.32	22.80	0.33	5.42	9.84	2.34	0.48	95.88	5.82	2.18	0.76	1.33	0.04	1.59	0.04	1.24	1.61	0.69	0.09	15.40	0.44	679	6 071
Ts	42.66	0.09	11.41	19.19	0.25	10.17	10.45	1.58	0.29	96.08	6.33	1.67	0.33	1.49	0.01	0.89	0.03	2.25	1.66	0.46	0.05	15.17	0.72	632	3 949
Mg-Hbl	43.29	0.28	9.97	19.63	0.29	8.91	10.34	1.87	0.30	94.88	6.61	1.39	0.40	0.94	0.03	1.57	0.04	2.03	1.69	0.55	0.06	15.30	0.56	596	3 644
Ts	42.90	0.14	11.36	19.31	0.29	9.21	10.00	2.11	0.33	95.65	6.45	1.55	0.46	1.17	0.02	1.26	0.04	2.06	1.61	0.61	0.06	15.29	0.62	613	4 204
Mg-Hbl	45.76	0.07	8.26	18.36	0.28	10.42	11.09	1.50	0.22	95.95	6.86	1.14	0.32	0.75	0.01	1.55	0.04	2.33	1.78	0.44	0.04	15.26	0.60	566	2 948
Ts	40.74	0.23	12.42	21.90	0.44	7.42	9.37	2.12	0.35	94.99	6.21	1.79	0.44	1.54	0.03	1.25	0.06	1.69	1.53	0.63	0.07	15.23	0.57	640	4 491
榴闪岩 KJH-1-1																									
Mg-Hbl	48.89	0.03	9.58	16.64	0.11	11.12	10.08	1.57	0.38	98.39	7.00	1.00	0.62	0.78	0.00	1.21	0.01	2.37	1.55	0.44	0.07	15.05	0.66	531	4 184
Tr	57.02	0.07	2.73	8.25	0.00	18.81	10.30	0.89	0.12	98.20	7.78	0.22	0.22	0.71	0.01	0.23	0.00	3.83	1.51	0.23	0.02	14.76	0.94	375	2 799
Act	57.08	0.02	2.08	10.13	0.06	17.81	11.28	0.41	0.12	98.99	7.84	0.16	0.18	0.52	0.00	0.64	0.01	3.65	1.66	0.11	0.02	14.79	0.85	370	2 370
Act	59.23	0.04	1.70	8.64	0.05	18.81	11.07	0.58	0.10	100.20	7.97	0.03	0.24	0.41	0.00	0.56	0.01	3.77	1.60	0.15	0.02	14.76	0.87	350	2 602
Act	58.71	0.00	1.51	8.81	0.05	18.85	11.06	0.56	0.09	99.64	7.95	0.05	0.19	0.48	0.00	0.51	0.01	3.80	1.61	0.15	0.02	14.77	0.88	355	2 334
Win	58.32	0.03	2.23	8.44	0.06	19.08	10.36	0.57	0.11	99.20	7.85	0.15	0.21	0.77	0.00	0.18	0.01	3.83	1.50	0.15	0.02	14.66	0.96	359	2 791
榴闪岩 MNH1-6																									
Ts	42.85	0.36	12.73	18.68	0.16	9.37	11.75	1.81	0.35	98.05	6.34	1.66	0.56	0.71	0.04	1.61	0.02	2.07	1.86	0.52	0.07	15.45	0.56	632	4 573
榴闪岩 MNH1-7																									
Mg-Hs	42.78	0.36	13.05	18.32	0.25	9.99	12.01	2.31	0.49	99.55	6.26	1.74	0.51	0.64	0.04	1.60	0.03	2.18	1.88	0.65	0.09	15.63	0.58	644	4 515
榴闪岩 Pm029-30-1																									
Fe ₂ -Prg	35.41	1.31	17.43	18.12	0.19	6.70	10.82	2.55	0.29	92.82	5.60	2.40	0.84	0.74	0.16	1.65	0.03	1.58	1.83	0.78	0.06	15.67	0.49	709	6 631
Fe ₂ -Prg	39.92	0.83	12.12	18.69	0.27	7.06	11.39	1.75	0.89	92.92	6.39	1.61	0.68	0.10	0.10	2.40	0.04	1.68	1.95	0.54	0.18	15.68	0.41	626	4 704
含石榴斜长角闪岩 D0302-1-1																									
Fe ₂ -Ts	38.17	1.24	16.20	19.18	0.38	6.31	10.38	2.18	0.22	94.25	5.91	2.09	0.87	0.79	0.14	1.69	0.05	1.46	1.72	0.65	0.04	15.42	0.46	673	6 197
Tr	55.52	0.05	1.47	9.12	0.04	19.12	10.58	0.52	0.07	96.48	7.72	0.24	0.00	1.00	0.01	0.07	0.00	3.96	1.58	0.14	0.01	14.73	0.98	393	1 385
Fe ₂ -Prg	40.63	0.10	14.89	19.59	0.25	7.51	10.89	2.22	0.49	96.57	6.14	1.86	0.79	0.78	0.01	1.70	0.03	1.69	1.76	0.65	0.10	15.51	0.50	649	5 637
Ts	38.23	0.15	16.86	19.90	0.31	7.20	9.92	2.58	0.35	95.49	5.79	2.21	0.80	1.34	0.02	1.18	0.04	1.62	1.61	0.76	0.07	15.43	0.58	683	6 350
Mg-Hbl	44.22	0.31	10.03	17.26	0.21	11.64	10.37	1.73	0.19	95.96	6.51	1.49	0.26	1.36	0.03	0.77	0.03	2.56	1.64	0.49	0.04	15.17	0.77	610	3 428

Mg-Hs—镁绿闪石; Fe₂-Prg—铁韭闪石; Ts—铁钙闪石; Fe₂-Ts—铁镁钙闪石; Mg-Hbl—镁角闪石; Fe₂-Hbl—铁角闪石; Brs—冻蓝闪石; Tr—透闪石; Act—阳起石; Win—蓝透闪石; 温度、压力按照 Gerya 等(1997)、Holland 和 Blundy(1994)的方法计算。

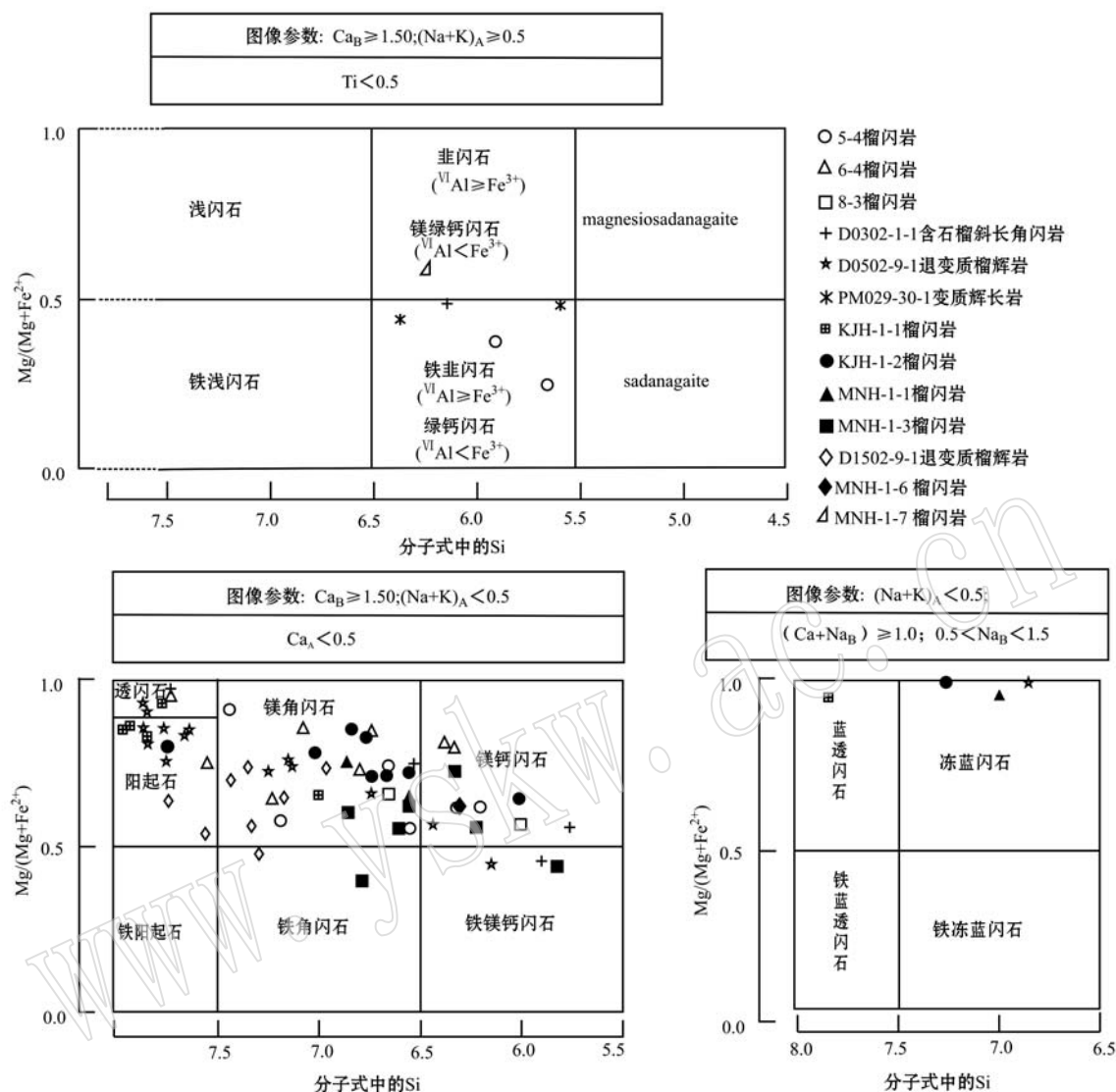


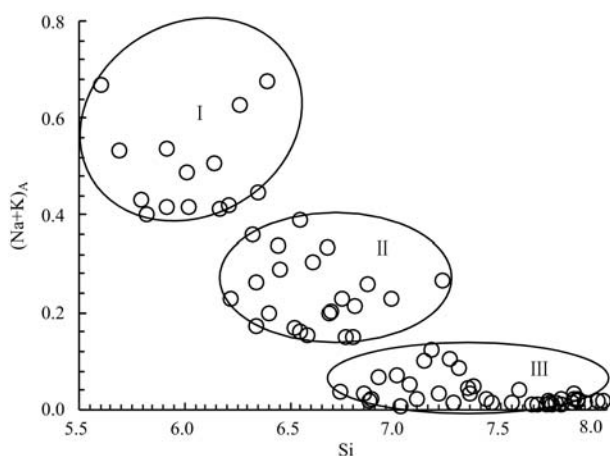
图 3 勐库退变质榴辉岩中角闪石分类图解 (据 Leake 等, 1997)

Fig. 3 Classification of amphiboles in the retrograded eclogites from Mengku (after Leake *et al.*, 1997)

闪石及大部分的镁钙闪石-铁镁钙闪石; II 组, $(Na+K)_A = 0.15 \sim 0.39$, 且 $(Na+K)_A$ 与 Si 基本上无相关性, 主要为镁钙闪石、镁角闪石; III 组, $A = 0.01 \sim 0.12$, $(Na+K)_A$ 与 Si 值也没有明显的相关性, 主要为透闪石-阳起石-蓝透闪石-冻蓝闪石及少量镁角闪石。

在其它的一些主要氧化物、晶体化学参数的散点图中, 勐库地区退变质榴辉岩中的闪石类矿物同样表现出上述三分组的特点, 各组的组成也与图 4 类似, 暗示了铁韭闪石-镁绿钙闪石与镁钙闪石-铁镁钙闪石应该是形成于同一过程的不同阶段, 受同一地质作用的制约。

闪石类矿物中 Ti 的含量受温度的控制明显, 一般温度越高, 其中 Ti 的含量也越高。从本次电子探针分析数据看, 组成第 1 期闪石主体部分的镁绿钙闪石-铁韭闪石的 TiO_2 含量为 $0.10\% \sim 1.31\%$, 平均为 0.73% ; 组成第 2 期闪石主体部分的镁钙闪石-铁镁钙闪石的 TiO_2 含量为 $0.03\% \sim 1.24\%$, 平均为 0.26% ; 组成第 3 期闪石主体部分的镁角闪石-冻蓝闪石-铁角闪石的 TiO_2 含量为 $0.00 \sim 0.48\%$, 平均为 0.17% ; 组成第 4 期闪石主体的透闪石-阳起石-蓝透闪石的 TiO_2 含量为 $0.00 \sim 0.40\%$, 平均为 0.07% 。 TiO_2 含量具有明显的递减特点, 表明由早到晚变质温度是逐渐降低的。

图4 闪石类矿物 $(\text{Na}+\text{K})_{\text{A}}$ -Si散点图Fig. 4 $(\text{Na}+\text{K})_{\text{A}}$ -Si scatter plot of amphiboles

本次研究按照 Gerya 等 (1997)、Holland 和 Blundy (1994) 的方法逐个对每个测试结果计算了相应的温度计算, 结果(表 1)显示了勐库地区退变质榴辉岩中闪石类矿物的形成温度为 $350\sim 710^{\circ}\text{C}$, 压力为 $0.15\sim 0.75\text{ GPa}$, 并表现出与相对应的矿物之间良好的对应关系。在 p - T 图解(图 5)中, 75 件样品的投影点同样表现出了明显的三分组特点:

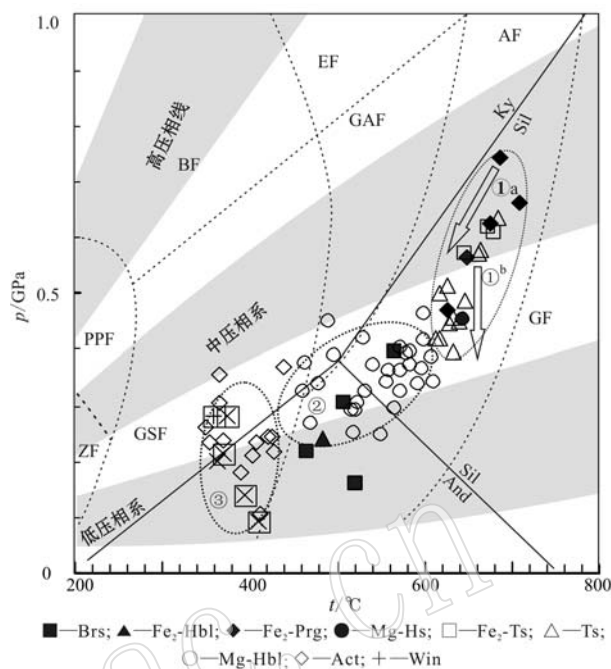
铁韭闪石-镁绿钙闪石、镁钙闪石-铁镁钙闪石为第 1 组, 为第 1 期退变质作用的产物, 可进一步细分为早阶段的近等温降压过程(①^a)(压力为 $0.56\sim 0.75\text{ GPa}$, 温度为 $642\sim 709^{\circ}\text{C}$)和晚阶段的等温降压过程(①^b)(压力为 $0.39\sim 0.56\text{ GPa}$, 温度为 $619\sim 642^{\circ}\text{C}$), 二者均相当于高角闪岩相的温压环境。这也是勐库地区退变质榴辉岩的主期退变质作用, 奠定了其基本的面貌和特征。

镁角闪石-铁角闪石-冻蓝闪石为第 2 组, 为第 2 期(②)降温降压退变质作用的产物, 相应的压力为 $0.23\sim 0.42\text{ GPa}$, 温度为 $460\sim 610^{\circ}\text{C}$, 相当于低角闪岩相的温压环境。

透闪石-阳起石-蓝透闪石为第 3 组, 为第 3 期(③)近等温降压退变质作用的产物, 相应的压力为 $0.09\sim 0.31\text{ GPa}$, 温度为 $350\sim 420^{\circ}\text{C}$, 相当于绿片岩相的温压环境。

4 讨论与结论

洋壳通过深俯冲作用在地幔中转化成榴辉岩, 但其形成后向地壳折返的过程和动力学机制是令地

图5 闪石类矿物 p - T 轨迹(据 Spear, 1995)Fig. 5 p - T path for amphiboles (after Spear, 1995)

ZF—浊沸石相; PPF—葡萄石-绿纤石相; GSF—绿片岩相; GAF—绿帘角闪岩相; AF—角闪岩相; GF—麻粒岩相; BF—蓝片岩相; EF—榴辉岩相

ZF—zeolite facies; PPF—prehnite-pumpellyite facies; GSF—green-schist facies; GAF—epidote amphibolite facies; AF—amphibolite facies; GF—granulite facies; BF—blueschist facies; EF—eclogite facies

质学家们百思不得其解的前沿地质问题, 尽管提出了许多假设, 但目前都尚未获得公认。在进入地壳之后, 榴辉岩主要通过断裂作用、区域性地壳抬升、岩浆顶托等多种地质作用逐渐暴露到地表。勐库地区的退变质榴辉岩通过冷洋壳俯冲到冷地幔中, 在约 $100\sim 150\text{ km}$ 的地幔深处形成, 然后通过各种地质作用可能于 $260\sim 290\text{ Ma}$ 折返到壳-幔过渡区域(李静等, 未发表)。

根据本文对勐库地区退变质榴辉岩中闪石类矿物的成因研究, 结合对区域地壳发展演化的认识, 推测勐库地区退变质榴辉岩晚期角闪岩相-绿片岩相的退变质过程可能如下:

(1) 约 260 Ma 之后, 沿昌宁-孟连一线的古特提斯洋盆俯冲消减完毕, 在约 $230\sim 240\text{ Ma}$ 发生了弧-陆碰撞造山作用, 区域性地壳发生大规模的逆冲推覆作用, 角闪石榴辉岩相-高压麻粒岩相的退变质榴辉岩通过构造作用由 $32\sim 40\text{ km}$ 的壳-幔过渡区域被快速抬升到 $15\sim 24\text{ km}$ 的中下地壳, 并发生了

高角闪岩相的退变质作用,在这一过程中温度的降低并不强烈,但压力显著降低,大量的低温高压变质矿物再次由于降压而分解。本次退变质作用奠定了勐库地区退变质榴辉岩的基本面貌及特征。勐库退变质榴辉岩中的锆石有 227 ± 12 Ma 的年龄值,应该是这一事件的表现。

(2) 约 170~190 Ma 之后,由于造山带山根的坍塌及地表的剥蚀作用,区域性地壳发生大规模的整体性抬升及缓慢冷却,上述退变质榴辉岩再次被抬升到 7~10 km 的中部地壳,发生了缓慢的、低角闪岩相的退变质作用。大量的镁角闪石-铁角闪石类矿物主要形成于这一阶段。

(3) 进入新生代地史时期以来,由于境外新特提斯洋盆的关闭,区域地壳发生大规模的整体间歇性快速抬升,上述的退变质榴辉岩再次被抬升到 3~5 km 的中上地壳,并发生了绿片岩相的退变质作用,大量的阳起石、透闪石就主要形成于这一时期;晚近地质时期,由于区域地壳的整体间歇性抬升及剥蚀,使得这些退变质榴辉岩最终出露到地表。

致谢 感谢云南省地质调查院李静教授级高级工程师对全文提出了宝贵的修改意见;感谢中国地质调查局天津地质调查中心电子探针测试中心对角闪石电子探针测试工作的支持。

References

- Duan Xiangdong. 2013. The Basin Evolvement Studies of the Changning-Menglian Zone in the Gengma Area, Southwestern Yunnan (Ph. D. Thesis) [D]. China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Gerya T V, Perchuk L L, Triboulet C, *et al.* 1997. Petrology of the tumanshet zonal metamorphic complex[J]. *Eastern Sayan Petrology*, 5(6): 503~533.
- Holland T and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 443~447.
- Li Jing. 2004. Petrologic Study to Carboniferous Niujingshan Ophiolite Melange from Shuangjiang County, Yunnan Province, China (Master's Degree Thesis)[D]. Kunming University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Jing, Sun Zaibo, Xu Guixiang, *et al.* 2015. Firstly discovered garnet-amphibolite from Mengku Area, Shuangjiang County, Western Yunnan province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(4): 421~424(in Chinese with English abstract).
- Liu Benpei, Feng Qinglai, Chonglakman C, *et al.* 2002. Framework of paleotethyan archipelago ocean of western Yunnan and its elongation towards north and south[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(3): 161~171(in Chinese with English abstract).
- Liu Benpei, Feng Qinglai, Fang Nianqiao. *et al.* 1993. Tectonic evolution of palaeo-tethys poly-island-ocean in Changning-Menglian and Lancangjiang Belts, Southwestern Yunnan, China[J]. *Earth Science*, 18(5): 529~539(in Chinese with English abstract).
- Liu Guichun, Sun Zaibo, Li Jing, *et al.* 2017. The U-Pb zircon age and petrogeochemistry of Wanhe ophiolitic melange from Shuangjiang area of western Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, in press (in Chinese with English abstract).
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Mo Xuanxue and Pan Guitang. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 432~451(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Zhu Dicheng, Wang Liquan, *et al.* 2004. Bangong Lake-Nu River suture zone—the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 371~382(in Chinese with English abstract).
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Spear F S. 1995. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths* (Second Printing) [M]. Chelsea, Michigan, USA: Book Crafters Inc., 17.
- Wang Liben. 2001. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(1): 84~100(in Chinese).
- Wang Pu, Pan Zhaolu, Weng Lingbao, *et al.* 1982. *Systematic Mineralogy* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 188~491(in Chinese).
- Xu Guixiang, Zeng Wentao, Sun Zaibo, *et al.* 2016. The petrology and

mineralogy of retrograded eclogites from Mengku area, Shuangjiang county of Western Yunnan province[J]. Geological Bulletin of China, 35(7): 1 035~1 045(in Chinese with English abstract).

Zhong Dalai. 1998. Pale-Tethy Orogenic Belt in the West Sichuan and Yunnan[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

附中文参考文献

段向东. 2013. 滇西南耿马地区昌宁-孟连带盆地演化(博士论文)[D]. 中国地质大学(武汉).

李 静. 2004. 云南省双江县牛井山蛇绿混杂岩的岩石学研究(硕士论文)[D]. 昆明理工大学.

李 静, 孙载波, 徐桂香. 等. 2015. 滇西双江县勐库地区榴闪岩的发现与厘定[J]. 矿物学报, 35(4): 421~424.

刘本培, 冯庆来, 方念乔. 等. 1993. 滇西昌宁-孟连和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J]. 地球科学, 18(5): 529~539.

刘本培, 冯庆来, Chonglakman C. 等. 2002. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J]. 地学前缘, 9(3): 161~171.

刘桂春, 孙载波, 曾文涛. 等. 2017. 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(待刊).

莫宣学, 潘桂棠. 2006. 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, 13(6): 43~51.

潘桂棠, 朱弟成, 王立全. 等. 2004. 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, 11(4): 371~382.

Schumacher J C. 王立本 编译. 2001. 角闪石电子探针分析数据中三价铁比值的估算[J]. 岩石矿物学杂志, 20(2): 189~207.

沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.

王立本. 2001. 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告[J]. 岩石矿物学杂志, 20(1): 84~100.

王 濮, 潘兆槽, 翁玲宝. 等. 1982. 系统矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 188~491.

徐桂香, 曾文涛, 孙载波. 等. 2016. 滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩的岩石学、矿物学特征[J]. 地质通报, 35(7): 1 035~1 045.

钟大赉. 1998. 川滇西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社.