

滇东南猛洞岩群变质—变形研究及构造意义

谭洪旗^{1,2)}, 刘玉平³⁾

1) 成都理工大学地球科学学院, 成都, 610059; 2) 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 成都, 610041;
3) 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳, 550002

内容提要: 猛洞岩群出露于中越边境滇东南老君山地区, 是一套前寒武系变质沉积—岩浆杂岩, 其所处大地构造位置特殊, 对滇东南地质演化, 乃至华南大陆西端以及特提斯构造域形成与演化具有重要的科学意义。在系统野外调研基础上, 本文利用光学显微镜、电子显微镜、电子探针等微观研究手段, 对猛洞岩群变质—变形进行了详细的研究。研究发现, 猛洞岩群地层宏观构造发育同构造分泌结晶脉、顺层褶皱、透镜体等, 微观构造发育云母鱼构造、膝折构造、石英矩形条带等现象。显微组构统计表明猛洞岩群经历过北东—南西、南东—北西向、近东西向、北东—南西(近南北向)挤压过程, 与上述宏观、微观现象基本一致。同时, 猛洞岩群片岩中黑云母—石榴石温压计分别为 429°C、0.5 GPa, 片麻岩中电气石—黑云母温度计平均温度为 546°C, 为绿片岩相—低角闪岩相。石英斜长角闪片麻岩中榍石和金红石 TIMS U-Pb 同位素年龄分别为 236 Ma 和 170 Ma。以上工作表明, 滇东南猛洞岩群记录了多期变质—变形作用, 其中主期变质—变形年龄为 236 Ma, 控制了变质杂岩系的宏观构造格架, 其应力(σ_1)为南东—北西向挤压, 近南北向、近东西向挤压可能为与上述主应变相匹配的次级应变方向; 但北东—南西向挤压可能为主变质—变形之后的另一次变质—变形产物, 时间限定为 170 Ma, 代表老君山穹窿燕山早期的伸展—剪切活动。因此, 本文认为老君山—Song Chay 穹窿先后经历了印支期南北向推覆挤压作用, 晚印支期—早燕山期伸展—剪切作用以及中晚燕山期接触变质作用; 且老君山穹窿开始隆升时限为 236 Ma 左右, 与周边的特提斯闭合、碰撞时间基本一致; 至 170 Ma 穹窿发生垮塌后的伸展剪切活动。文山—麻栗坡 NE 方向广泛发育印支期飞来峰及异地岩, 可能指示包括猛洞岩群在内的前印支期地层是一套从越南北部推覆而至的外来岩体。上述认识为华南西端的构造演化探讨提供了证据。

关键词: 变质—变形; 组构; 温压计; 年代学; 猛洞岩群; 老君山; 滇东南

变质—变形是变质地质学和构造地质学一个重要的交叉分支, 主要集中在变质—变形组构、变质年代学以及变质与变形关系等方面的研究。变质带内变质—变形作用是相当复杂的, 不同的变形幕在岩石中留下了不同的构造形迹, 而不同的变质阶段都使岩石矿物成分发生改变, 因此不同时期的变质—变形作用叠加和改造是造成研究区变质—变形作用关系复杂的根本原因。当前从事于变质构造的研究者, 除仍在继续加深一些典型地区的中小构造研究外(Hu Da et al., 2015; Yang Fan et al., 2015), 还特别注意全球构造的综合和微观—超微观构造的深入(Liu Ruixun et al., 2002), 甚至矿物岩石的纳米组构研究(Bakken et al., 1989; Taran et al., 2000;

Liu Junlai et al., 2004; Sun Yan et al., 2008; Yuan Renmao et al., 2014)。显微构造分析的目的则是揭示变形期次与变质事件序列的关系, 为构建 $P-T-t$ 轨迹提供依据。

滇东南地区位于华南褶皱系西端与扬子地块、印支地块的接合部位, 也为特提斯构造域与环太平洋构造域的交汇部位。前人研究认为麻栗坡八布蛇绿岩, 是异地逆冲侵位的洋脊型蛇绿岩片(Zhong Dalai et al., 1998; Ma Wenpu et al., 1998), 形成于弧后盆地环境, 其形成可能与古太平洋从 SE→NW 向华南大陆俯冲导致弧后盆地局部洋壳化有关(Xu Wei, 2008); 部分学者认为八布蛇绿岩代表了二叠纪早期右江洋盆剧烈扩张期的残留洋壳(Zhang

注: 本文为国家 973 项目(编号: G2007CB411408)、国家自然科学基金项目(编号: 40972129)和矿床地球化学国家重点实验室自主选题项目(编号: KCZX20090106)联合资助的成果。

收稿日期: 2016-02-19; 改回日期: 2016-09-01; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 谭洪旗, 男, 1984 年生。博士生, 工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: hongqitan@163.com。通讯作者: 刘玉平, 男, 1971 年生。博士, 研究员, 主要从事矿床学、地球化学及同位素年代学研究。Email: liuyuping@vip.gyig.ac.cn。

Binhui et al., 2013);部分学者认为八布超镁铁质岩并非蛇绿岩的组成部分,而是与峨眉山地幔柱有关的板内玄武岩(Faure et al., 2014)。Zhang Binhui et al. (2013)获得斜长角闪岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 272Ma, Feng Qinglai et al. (2002)在八布蛇绿混杂岩中发现早二叠世的放射性化石,结合 Wu Genyao et al. (2001)获得八布蛇绿岩 Sm-Nd 年龄为 328.7Ma。上述这些证据均指示研究区附近早石炭世至早二叠世存在具有一定规模的深水盆地。此外,滇东南建水地区发育岛弧型枕状熔岩(Dong Yunpeng et al., 1999)及形成于弧后盆地环境的二叠纪火山岩(Xie Jing et al., 2006),指示扬子与华夏板块之间在晚古生代可能存在板块俯冲,暗示古特提斯洋的东翼分支经滇东南向东延入华南。此外,滇桂交界处的逆冲推覆褶皱冲断带,也暗示印支期扬子地块与华南地块之间的陆陆汇聚(Wu Genyao et al., 2000, 2001)。因此,滇东南地区特殊的大地构造位置是研究华南大陆形成与演化及特提斯构造域时空发展的关键区域,历来受众多学者关注(Dong Yunpeng et al., 1999, 2002; Mei Mingxiang et al., 2005; Qin Jianhua et al., 1996; Wu Genyao et al., 2000; Wu Haoruo et al., 2000),对华南特提斯构造存在与否、性质及演化等系列科学问题争议较大。

滇东南老君山地区位于云南省文山州马关县一麻栗坡县,其与越南北部的 Song Chay 地区具有基本一致的地质特征,黄汲清(1946)称之为越北古陆。越北古陆是以斋江(Song Chay)隆起为核心的变质核杂岩,国内称为老君山变质核杂岩(Li Dongxu et al., 2000; Liu Yuping et al., 2006; Guo Ligu, 2006)或称南温河变质核杂岩(Zhang Shitao et al., 1998),或老君山-Song Chay 变质核杂岩(Liu Yuping et al., 2003),或者都龙-Song Chay 变质穹隆体(Yan Danping et al., 2005, 2006),本文采用老君山变质核杂岩这一称谓。猛洞岩群出露于中越边境的滇东南老君山“变质核杂岩”核部(Zhang Shitao et al., 1998; Li Dongxu et al., 2000; Liu Yuping et al., 2006),呈构造-变质岩片产出,经历了韧性变形、最高达低角闪岩相变质,同时也是老君山地区重要的含矿层位(Zhang Shitao et al., 1998; Zeng Zhigang et al., 1998; Liu Yuping et al., 2004),目前已发现了以南秧田大型钨锡矿床和我国罕见的大丫口钨锡钼(祖母绿)矿床为代表的矿集区。鉴于猛洞岩群所处特殊的大地构造位置及重要

的含矿层位,本文拟通过该岩群中岩石变质-变形几何学、温压计及年代学研究,构建该地区的演化历史,为华南褶皱系西端和特提斯构造演化及区内成矿规律讨论提供重要依据。

1 区域地质背景

老君山变质核杂岩位于文山—麻栗坡断裂、红河断裂带分支瑶山断裂、南盘江断裂及个旧断裂所围限区域的西南角,越北古陆的核心部位(图 1a 和图 1b);总体上呈不规则穹隆状产出,长轴为北北西向,向南延入越南境内,国内出露面积约 1000 平方千米。老君山变质核杂岩主要由变质内核和盖层两部分组成,二者间为剥离滑脱断层接触关系(Zhang Shitao et al., 1998)。其中盖层为寒武系、泥盆系及石炭系,其地层依次环绕内核向外倾斜。变质内核的构成较为复杂,主要由南温河花岗岩片麻岩、南捞片麻岩、猛洞岩群和燕山期老君山酸性侵入岩及花岗伟晶岩组成(图 1a)。

中国境内猛洞岩群主要出露于猛洞、南秧田、大丫口、下田房、下冲头等地,包括南秧田组和洒西岩组。南秧田组($Pt_{1-3}n$)主要出露在老卡—阿老、瓦渣、曼庄等地,面积约 8km²,岩石组合以片岩为主,包括二云片岩、二云石英片岩、石英片岩夹少量斜长角闪岩、斜长片麻岩及斜长变粒岩等;洒西岩组出露在猛洞乡洒西村北西一带,出露面积约 1km²,岩石组合以黑云变粒岩、条带状变粒岩与石英岩为主,次为浅粒岩、斜长角闪岩以及少量钙硅酸盐岩。其中,南秧田组($Pt_{1-3}n$)被加里东期片麻状花岗岩所侵入,原生沉积构造已完全被后生面理置换,岩石中“顺层”滑动构造特征明显;洒西岩组($Pt_{1-3}s$)与南秧田岩组为次生面理接触。

猛洞岩群上覆的新寨岩组与变质花岗岩非前人认定的剥离断层接触,而表现为沉积接触、侵入接触和过渡接触关系(Zhang Binhui et al., 2011),为本区存在新元古代岩浆岩和片麻岩穹隆构造提供了依据(Liu Yuping et al., 2006; Guo Ligu et al., 2009)。周缘分布的一套穹隆状变形-变质岩系锆石 U-Pb 定年结果限制在 402~416Ma,表明其经历早泥盆世的岩浆事件,为广西运动的产物(Guo Ligu et al., 2009; Tan Hongqi et al., 2011; Wang Dandan et al., 2015; Pan Jinbo et al., 2015)。本区老君山花岗岩,与邻区个旧、薄竹山地区均为晚白垩世岩浆事件的产物,是华南西部地区岩浆-成矿带的重要组成部分(Liu Yuping et al., 2006; Chen

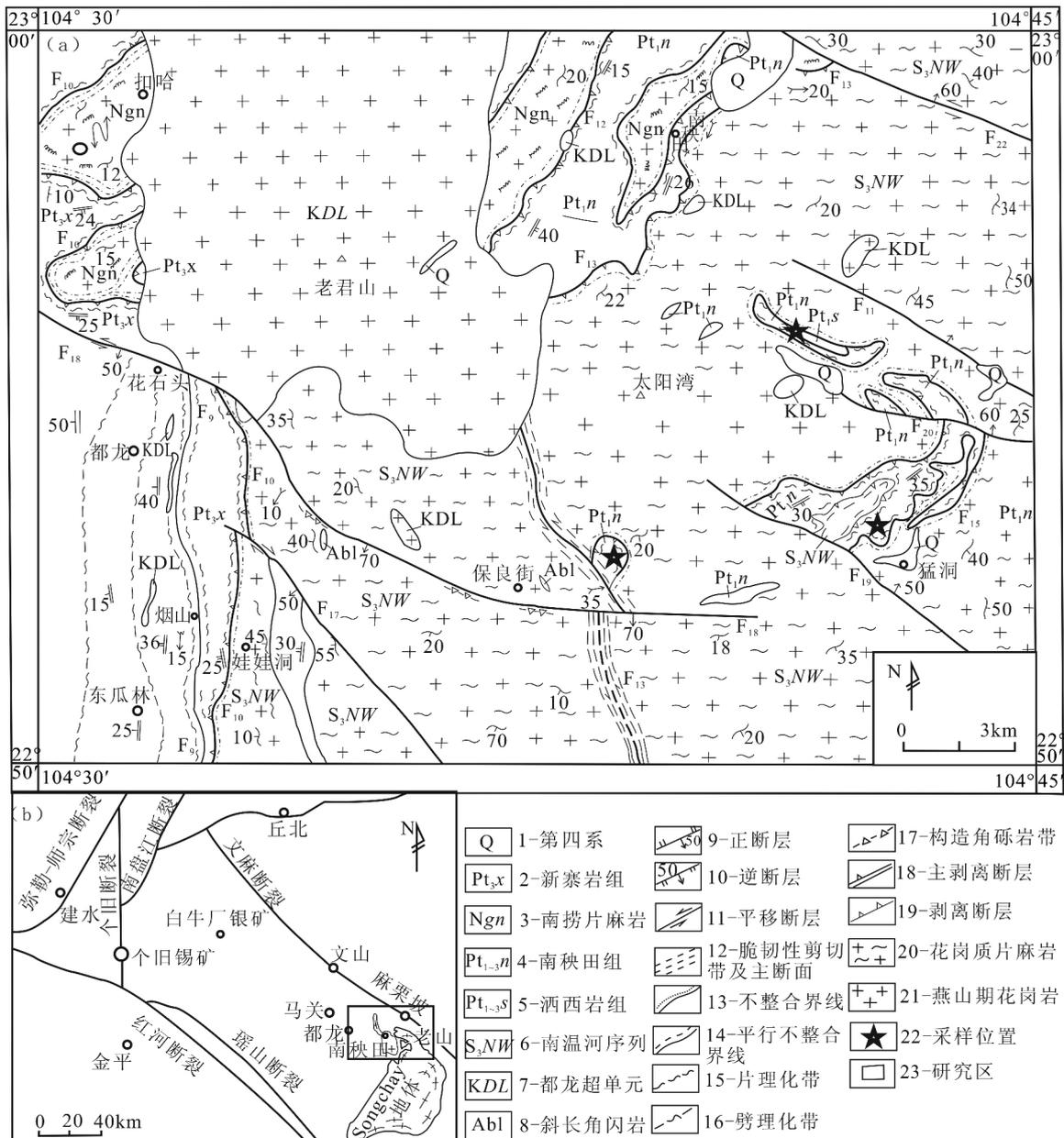


图 1 滇东南老君山地区区域地质略图及采样位置(据云南省地质矿产局①②,1976,1999;Chen Xueming et al.,1998 修改)

Fig 1 Sketch geological map and the sample location of the Laojunshan area regional,southeastern Yunnan province (modified after Bureau of geology and mineral resources in Yunnan province and Chen Xueming et al.,1998)

1—Quaternary;2—Xinzai Group;3—Nanlao gneiss;4—Nanyangtian Formation;5—Saxi Formation;6—Nanwenhe Sequence;7—Dulong Super-Unit;8—Amphibolite;9—Normal fault;10—Thrust fault;11—Strike-slip fault;12—Brittle-ductile shear zone and principal sections;13—Unconformable boundary;14—Disconformity boundary;15—Schistosity zone;16—Cleavage belt;17—Tectonic breccia belt;18—Primary denudational fault;19—Denudational fault;20—Granitic gneiss;21—Yanshanian granite;22—Sampling location and its number;23—Location map in study areas

Yanbo et al., 2009, 2010; Zhang Binhui et al., 2012; Li Jinwen et al., 2013)。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

区内出露所有变质岩石当中,以片岩、片麻岩的

变形程度较高,对环境(如温度、压力)变化最为敏感,能够记录该地区变质-变形事件及相互关系。相关的片岩、片麻岩和斜长角闪岩的岩石学基本情况和构造环境已进行了详细研究(另文发表),本次样品采集位置见图 1a。

石榴云母片岩来自于阿老一带,为斑状变晶结

构,基质具中细粒粒状鳞片变晶结构,局部呈筛状变晶结构、残缕结构。主要矿物有石榴石(含量约20%)、石英(含量约10%)、白云母(含量约20%)、黑云母(含量约45%)等。石榴石手标本上呈现褐红—粉褐红色,薄片上为浅红—浅褐色,呈变斑晶存在,其晶体内常含有石英和炭质包裹体,裂理较发育,粒径为 $200\mu\text{m}\sim 400\mu\text{m}$;这些包体矿物多呈定向排列并与晶体基质片理斜交(图2a),并有旋转的痕迹。主要包体矿物为石英,云母或绕包体,或穿插包体,反映石榴石经历过多期多阶段生长(图2a),主要与石英、斜长石、黑云母接触,其边缘也分布有不透明矿物。石英矿物至少存在三种形式:①石榴石变斑晶中的细粒包体状石英;②基质中的粒状石英;③其他矿物颗粒边部或周围的蛇状(港湾状)石英,如云母。黑云母多为片状,紧邻石榴石矿物,部分黑云母穿插石榴石,反映少量黑云母可能形成时间较晚,其至少有三种存在形式:①石榴石变斑晶中的小片状包体;②基质中的鳞片状晶体,呈不连续定向排列;③不规则状黑云母,附近析出有含铁的不透明矿物。

含电气黑云斜长片麻岩采自于大丫口一带,岩石总体结构为斑状变晶结构,基质中细粒鳞片粒状变晶结构。主要矿物为斜长石(含量约60%)、黑云母(含量约20%)、电气石(含量约8%)、石英(含量约6%)等,副矿物有榍石及磷灰石等。镜下观察表明,电气石呈长柱状,横切面近六边形(图2b),有时可见呈十字交叉状双晶,高突起,多色性明显,与黑

云母呈平直接触,局部可见电气石边缘分布细粒它形一半自形榍石,包裹有云母和石英的颗粒。黑云母有两种存在形式:一是与斜长石、石英、电气石呈平直接触;二是以包体形式存在于斜长石及电气石中。

石英角闪斜长片麻岩样品采自于老君山变质穹窿体的中心地带的猛洞乡老鹅山南($E104^{\circ}41.5'$, $N22^{\circ}53.6'$)。在该地带外围出露大面积的南温河片麻状花岗岩,南秧田组呈孤岛状残留体产出(图1),与南温河片麻状花岗岩具有一致的片麻理产状,反映两者经历了统一的后期变质—变形作用。本文选取DN4075(石英角闪斜长片麻岩)样品呈浅灰色透镜状—似层状产出,中—粗粒含斑结构、片麻状构造,矿物定向排列明显(图2c)。主要矿物组合为中长石—拉长石(含量约50%) + 角闪石(为富含钙质角闪石系列的浅闪石—韭闪石,含量约25%) + 石英(含量约20%),副矿物组合为锆石、金红石、榍石、褐帘石、矽线石、铁钛氧化物、磷灰石等。

2.2 分析方法

微量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,所用仪器为ELAN DRC-e型等离子质谱仪,分析精度优于5%,分析方法参见文献(Qi Liang et al., 2000)。本文主微量数据投图参考Geokit软件(Lu Yuanfa et al., 2004)。电子探针在国土资源部成矿作用及其动力学开放实验室完成,所采用仪器为日本电子JXA-8100型电子探针(EPMA)。测试条件为加速电压

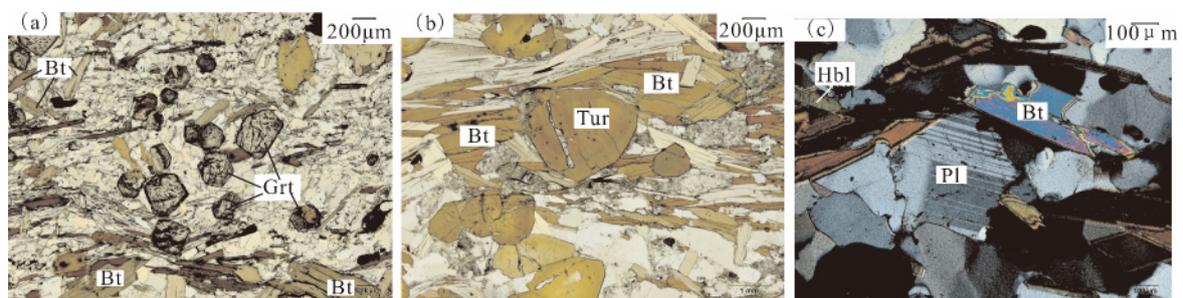


图2 滇东南猛洞岩群代表性岩石显微照片

Fig. 2 Microscopic photos of representative rocks in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province
(a)—garnet two-mica schist, the composition of porphyroblast (garnet) and substrate (biotite, muscovite and quartz), porphyritic-granular-blastic texture, schistose structure, plane-polarized light; (b)—Tourmaline biotite schist, the composition of porphyroblast (tourmaline) and substrate (biotite, plagioclase and quartz), porphyritic-granular-blastic texture, schistose structure, plane-polarized light; (c)—Hornblende-plagioclase gneiss, flake-columnar-granular texture by hornblende, plagioclase and biotite, biotite and plagioclase directionally formed weakly gneissic structure, orthogonal polarization

15kv,束流 1.0×10^{-8} A,硅酸盐矿物电子探针定量分析方法采用中华人民共和国国家标准 GB/T15617-1995,使用 ZAF 氧化物修正计算,其定量分析误差 $< \pm 2\%$ 。矿物标样贵橄榄石、刚玉、硅灰石、钾长石、钠长石、锰钛矿、磷灰石、赤铁矿、铬铁矿分别用于测定 Mg、Al、Si、Ca、K、Na、Ti、Mn、P、Fe 和 Cr 的含量。

金红石和榍石 U-Pb 同位素年代学在中国地质调查局天津地质调查中心分析测试室完成,所用仪器为 VG354 型热电质谱仪。榍石及金红石 U-Pb 法前处理流程参见文献 (Buick et al., 2001; Yuan Jihai et al., 2016; Zhou Hongying et al., 2008, 2013)。

3 构造变形特征

3.1 宏观变形样式及机制

猛洞岩群原生沉积构造已完全被后生面理所置换,岩石中“顺层”剪切滑动特征明显,常见云母鱼、顺层剪切褶皱等组构。洒西岩组 ($Pt_{1-3} s$),与南秧田组 ($Pt_{1-3} n$) 相伴出露,二者间为次生剪切面理相接触,顺层韧性剪切作用强烈,固态流变构造发育,沿不同岩性界面常发育顺层韧性剪切带,剪切带内发

育不同尺度的顺层掩卧褶皱、鞘褶皱 (图 3a)、片内无根褶皱、S-C 组构、布丁构造及石香肠构造等。猛洞岩群内各种变形组构表现出强烈的一致性,其最高变质相达低角闪岩相 (Tan Hongqi et al., 2010)。

3.1.1 同构造分泌结晶脉

猛洞岩群片麻岩中广泛发育同构造分泌结晶脉。同构造分泌结晶脉是伴随变质—变形,原岩易熔组分发生分解、迁移和重新聚集形成的集合体 (Liang Xiao et al., 2009)。其片麻岩主要发育受构造应力挤压而分泌的同构造结晶长英质脉,与 Wang Genhou (2006) 报道同构造脉体的矿物成分受围岩岩性控制基本一致。片麻岩中分布两种类型的同构造结晶脉,一种为变形变质过程中基体分泌不均匀性,如团块状、眼球状及“肿缩状”石英脉 (图 3b); 另一种为基体均匀性分泌,如平行片麻理或片理的同构造石英细脉 (图 3b)。两种同构造脉均为上层系相对下层系运动,为左旋方向,剪切方向为 $NE45^\circ-SW225^\circ$ 和 $SE135^\circ-NW315^\circ$ 。

3.1.2 顺层褶皱

猛洞岩群褶皱构造较发育。阿老地区的片岩广泛发育小型剪切揉流褶皱 (图 3c),证实其为深层次韧性变形的产物,且剪切面上发育两组剪切方向相

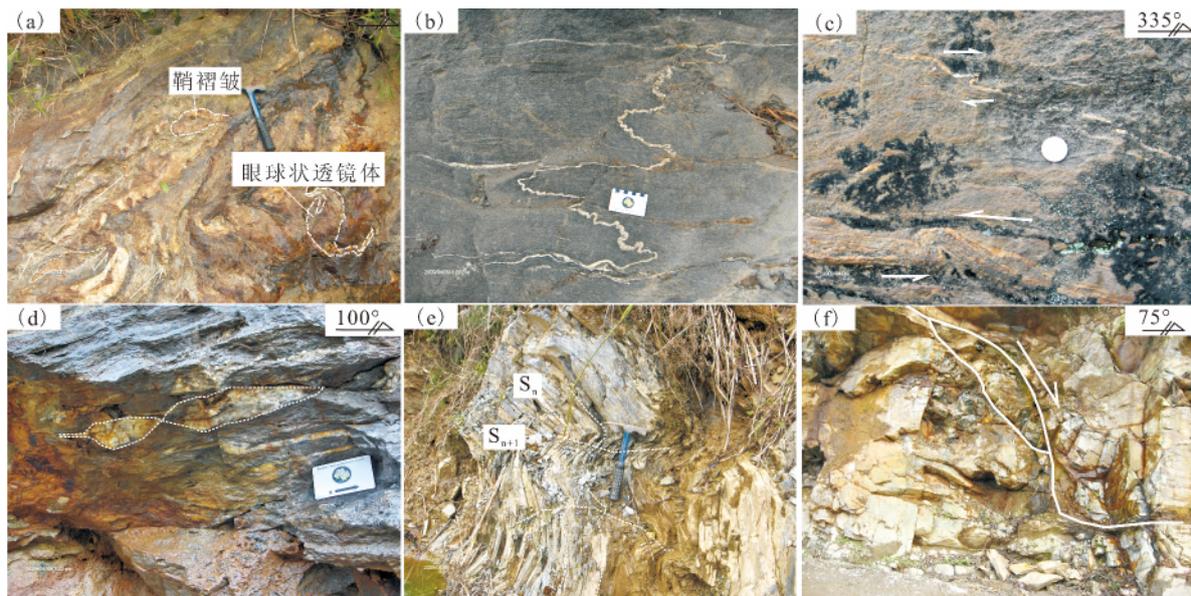


图 3 滇东南猛洞岩群岩石宏观变形样式

Fig 3 Deformation style of the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

(a)—构造透镜体、 σ 残斑系及鞘褶皱,保良街;(b)—斜长片麻岩内韧性剪切带不对称褶皱细脉,保良街;(c)—片岩中的不对称肠状脉,阿老;(d)—石英岩透镜体产于斜长片麻岩中,保良街;(e)—平卧褶皱,滑石板;(f)—片麻岩内的构造透镜体,南秧田
(a)—sheath fold and Tectonic lens, σ porphyroclast and sheath fold in Baoliangjie area;(b)—asymmetric fold fine veins in ductile shear zone of plagiogneiss in Baoliangjie area;(c)—asymmetric fold veins in Schist of Alao Area;(d)—quartzite lens in plagioclase gneiss of Baoliangjie area;(e)—recumbent fold in Huashiban Area;(f)—tectonic lens in gneiss of Nanyangtian area

反的揉流褶皱,反映相同构造环境下,构造样式与岩石能干性相关,细揉流褶皱易受其它因素影响。据揉流褶皱构造样式和拉伸线理分析,确定上层系相对下层系自SE135°向NW315°方向左旋剪切运动。滑石板地区黑云斜长片麻岩常发育平卧褶皱(图3e),反映其上层系相对下层系自SE175°向NW355°方向左旋剪切运动。

3.1.3 不对称剪切透镜体

“顺层”不对称透镜体是猛洞岩群重要的变质—变形组构样式之一。保良街地区发育形似“σ”型透镜体(图3d),石英岩为透镜体,片麻岩绕透镜体分布,两者构成不对称构造透镜体,为左行剪切特征,其上层系相对下层系SE145°-NW325°方向左旋剪切。另外^⑨,阿老、下冲头地区一带,南温河花岗岩中夹有南秧田组的云母片岩、石英片岩等大型构造透镜体,透镜体长约6km,宽0.4~0.9km²。

3.1.4 南秧田滑覆构造

该滑覆构造展布于南温河、南秧田一带,由三个滑覆体组成,其前锋位于格代、老凹寨一带;南西边缘在大湾子—那谢一带;北东边界被南温河断层所破坏^⑩。南秧田钨锡矿床附近发现该滑覆构造的次级韧性断层(图3f),其上盘相对下盘由NW315°-SE135°(右旋)方向滑动。

上述典型宏观现象均为该区韧性变质—变形的结果(表1),应力统计表明主应力 σ_1 分别对应于SE-NW、近E-W向及近S-N向的剪切挤压。其中,SE-NW为区域性变质—变形主应力方向,控制了该变质杂岩系的宏观构造格架,而近S-N向、近E-W向剪切可能与上述主应变相匹配的次级应变方向(图4)。部分变形可能与后期挤压活化有关,如南秧田滑覆构造的次级韧性构造。该地区还发现文山—麻栗坡断裂、都龙—保良街断裂为NW-SE左旋走滑,南温河断裂为NW-SE(近E-W)右旋走滑断裂,大

表1 滇东南猛洞岩群典型宏观变形及应力统计

Table 1 Statistics of typical macroscopic deformation and stress in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

地点	类型	应力方位(σ_1)	备注
滑石板	平卧褶皱	SE175°/NW355°(S-N)	左旋
保良街	“σ”型透镜体	SE145°/NW325°	左旋
保良街	“σ”型透镜体	SE100°/NW280°(E-W)	左旋
阿老	揉流褶皱	SE135°/NW315°	左旋
猛洞	肿胀状石英脉	SE135°/NW315°	左旋
猛洞	肿胀状石英脉	SE130°/NW310°	左旋
大丫口	石英细脉	SE135°/NW315°	左旋
南秧田	重力滑覆构造	SE135°/NW315°	右旋

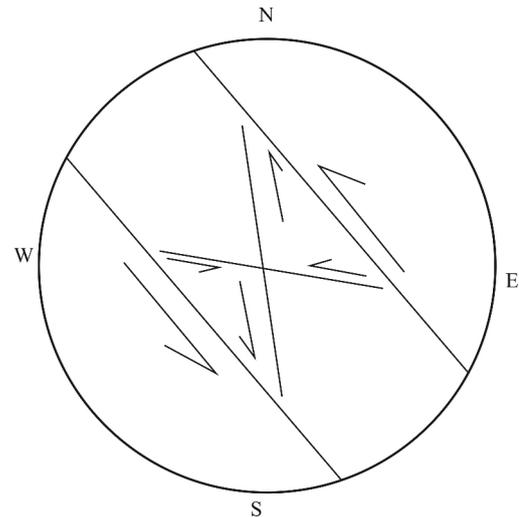


图4 滇东南猛洞岩群宏观变质—变形应力分析
Fig. 4 Stress analysis of metamorphism-deformation in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

坪街断裂为近南北向右旋走滑^⑪。这些断裂均具脆—韧性断裂特征,而猛洞岩群的宏观构造样式表现为韧性变质—变形特征,进一步表明这些脆—韧性断裂可能是韧性变质—变形事件之后的产物。

3.2 微观组构变形特征

微观组构包括显微组构和超显微组构,是在宏观组构研究的基础上,野外采取定向标本,利用显微镜观察并统计薄片中对变形影响明显的标志矿物优选方位,以此反演该地区变质—变形历史的过程。云母等片状矿物对温度、压力较为敏感,为组构优选方位的统计奠定基础。在上述宏观变形观察的基础上,本文针对定向薄片开展不同岩石类型中矿物组构优选方位统计工作,建立和反演不同岩组变质—变形样式及机制。作为对比,本文对其上覆地层新寨岩组下部的千枚岩显微组构也进行初步研究。

3.2.1 千枚岩变质—变形特征

千枚岩位于南捞—扣哈—阿老一带。手标本上呈灰色,千枚状构造,鳞片变晶结构,岩石结构细腻,主要由绢云母、绿泥石、石英等矿物定向排列构成,面理上分布强丝绢光泽,手摸有蜡状感。有限应变测量是研究物体变质—变形机制的有效方法(Zhen Yadong, 1985)。以原生层理(S₀)为变形面,薄片中间见绢云母受石英矿物颗粒强烈挤压。经统计,其定向薄片中石英颗粒 $K=0.0698$ (表2和图5),为压扁型椭球体,面理比线理发育,以挤压变形为主,主构造应力 σ_1 为NE16.5°-SW196.5°,代表b型应变(皱纹线理)方向,与猛洞岩群的主应力SE-NW方

向斜交。应力分析表明,新寨岩组与猛洞岩群主应力 SE-NW 方向相匹配的次级应力方向,反映新寨岩组与猛洞岩群经历了统一的变质—变形作用。

表 2 滇东南新寨岩群千枚岩有限应变测量结果
Table 2 Result of finite strain measurements in phyllite
of Xinzhai Group, southeastern Yunnan province

样品号	观测矿物	数量(点)	X/Z	Y/Z	$K=(X/Y-1)/(Y/Z-1)$
Md0921	石英	102	2.60	2.37	0.0698

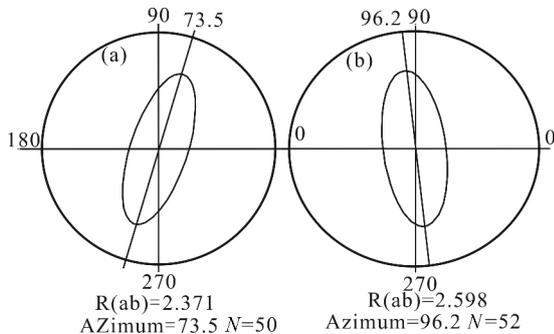


图 5 滇东南新寨岩组千枚岩中石英的有限应变测量 Y/Z(a) 及 X/Z(b)

Fig 5 Finite strain measurement of quartz in phyllite Y/Z (a) and X/Z (b) in Xinzhai Group, southeastern Yunnan province

3.2.2 片岩类组构变质—变形特征

猛洞岩群的片岩类型为石英片岩、二云片岩、石榴云母片岩、电气石二云片岩等。部分片岩组构受后期改造较为彻底,宏观上识别原生层理较为困难。基于片岩中云母等片状矿物含量较高(>50%),因而片岩类是进行显微变质—变形研究的理想对象。

片岩类岩石中发育石榴石、云母、长石等残斑系构造。尽管这些残斑系构造主要为主期变形构造痕迹,但是,详细镜下研究发现,与主期构造变形相关的石榴石变斑晶内部残留有早期变形痕迹(图 6a)。变斑晶内包体痕迹是由一系列细小矿物颗粒(如云母、石英等)定向排列构成,是从显微尺度上研究变质岩变形—变质历史有效方法之一(Gao Pingxian et al., 1997; Li Sanzhong et al., 1998; You Zhendong et al., 1996)。图 6b 是平行于线理,垂直于面理薄片的照片,可见石榴石变斑晶早期变形痕迹,至少发育三期面理, S3 为微观上沿基质分布的面理(云母片状), S1 与基质面理高角度相交,而 S2 与基质面理近平行。Bell et al. (1989) 认为变斑晶内部缓倾的面理与造山带伸展作用相关,而陡倾的面理与造山带收缩作用相关。据石榴石残斑痕迹及

矿物内部包体形迹,可初步推测本区至少经历了挤压和伸展两期构造变形。

薄片上可观察到云母变斑晶、云母鱼构造(图 6c)及云母膝折构造(图 6d)等显微变形组构。其中云母膝折构造中扭折带较少且较宽,与压缩方向呈低角度相交,反映了其形成于应变速率较低、温度较高(600~700℃)的环境中(Hu ling, 1998)。

片岩中明显可以见到与宏观透入性面理相关的石英矩形条带状变形构造。该构造在垂直面理和平行面理的定向切片上较为发育,每一个条带是由许多单晶组成,单晶矿物形态是矩形或近似矩形,颗粒边界平直,长边近于平行面理,短边与面理垂直或高角度相交。矩形条带呈组产出,其间被强变形的粒度细小的基质(主要为石英和云母)分割(6e)。前人认为矩形条带的形成与变质—变形的条件密切相关,许多学者对石英矩形条带构造成因和特征进行了深入剖析(An Linji, 1987; Wang Genhou, 2006),大致分为三种观点:① 矩形或多边形石英条带通过糜棱岩化阶段过程中的动态重结晶和后期静态恢复两个阶段形成(An Linji, 1987);② 矩形石英条带是复合成因结构,由晶体塑性变形和粒间滑移共同作用而成的结果;③ 石英矩形条带经历了强烈剪切变形后经静态恢复所致(Wang Genhou, 2006)。猛洞岩群中观察到的石英矩形条带是在剪应力作用下显示强应变特征,矩形条带石英与强烈变形的基质间隔排列(6e)。矩形石英条带构造并非呈单条产出,而是呈多条近平行分布。典型的组合方式为 S-C 组构,在垂直面理、平行拉伸线理切片上,长条状的矩形石英代表“S”面,而云母及细粒石英组成“C”面,明显反映出右旋剪切的特点(6f)。

3.2.3 片麻岩组构的变质—变形特征

片麻岩主要分布于大丫口、南秧田、猛洞及扣林等地区,主要有斜长片麻岩、二长片麻岩等岩石类型。薄片观察及背散射电子图像表明片麻岩中的云母至少经历三个期次变形作用(图 7a);第一期次为云母边缘泥石化,第二期次为片状云母矿物明显切穿早期变质—变形(图 7b),第三期次为细小片状且不连续排列的云母切穿第二期次变形构造,反映在后期变形过程中云母经历了物理上变形分解过程(图 7c)。云母、长石等矿物中还发现基质云母的定向排列,表明片状云母及长石在形成时间上早于基质云母(一般为白云母),推测为早期片状云母分解的产物。片麻岩中还观察到电气石变斑晶内部分布杂乱的包体形迹(成分为石英、云母),并形成十字筛

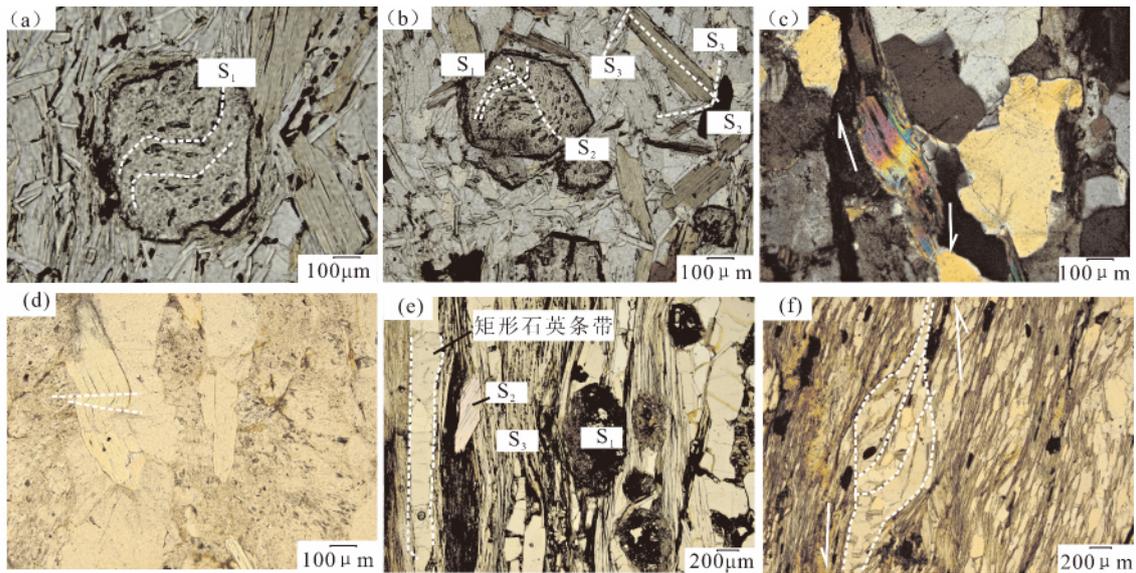


图6 滇东南猛洞岩群片岩显微变质-变形特征

Fig. 6 Microscopic metamorphic-deformation characteristics of schist in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

(a)、(b)一片岩中变质斑晶石榴石的内部包体痕迹,正交偏光,阿老地区;(c)一片岩内“云母鱼”,正交偏光,上扣林;

(d)一片岩内云母的膝折构造,单偏光,上扣林;(e)一矩形石英条带,正交偏光;(f)一片岩中长英质拖尾构造,正交偏光

(a)、(b)—Internal inclusions of garnet porphyroclast in Schist of Alao area, orthogonal polarization; (c)—Mica fish in schist of Shangkoulin area, orthogonal polarization; (d)—Schist kink structure In mica of Shangkoulin area, plane-polarized light; (e)—Rectangle quartz ribbons, orthogonal polarization; (f)—The tail structure in schist, orthogonal polarization

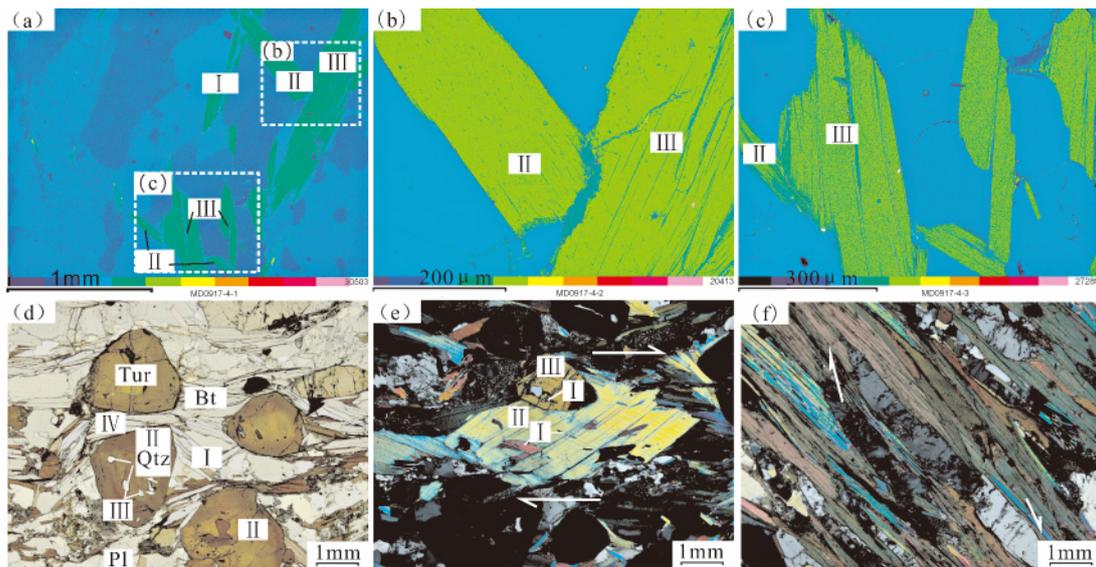


图7 滇东南猛洞岩群片麻岩显微变质-变形特征

Fig. 7 Microscopic metamorphic deformation characteristics of gneiss in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

(a)、(b)、(c)一云母矿物变质-变形期次,(a)、(b)一单偏光,(c)一正交偏光;(d)一电气石(Tur)的横切面及石英(Qtz)包裹体,单偏光;(e)一电气石、云母矿物变质-变形先后顺序,单偏光;(f)一长英质矿物的拔丝构造,单偏光

(a)、(b)、(c)—Metamorphic-deformation issue of Mica mineral, (a)、(b)—plane-polarized light, (c)—orthogonal polarization; (d)—Tourmaline in transverse section and quartz inclusions, plane-polarized light; (e)—metamorphic deformation sequence of Tourmaline and mica mineral, plane-polarized light; (f)—Trailing structure in felsic minerals, plane-polarized light

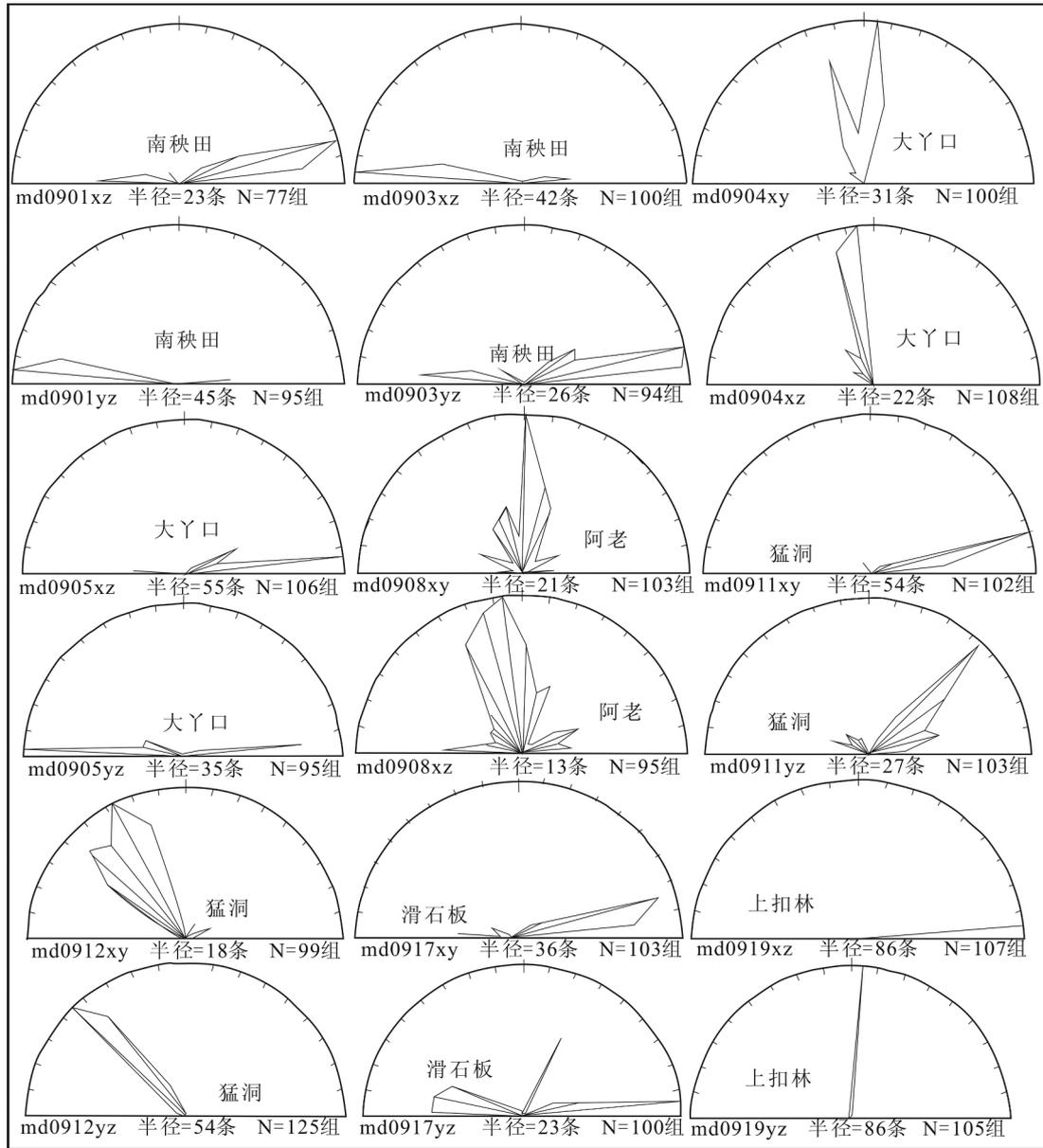


图 8 滇东南猛洞岩群不同岩组云母的走向玫瑰花图

Fig 8 Different petro-fabric rose figures of mica in thin section of the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

表 3 滇东南猛洞岩群显微构造应力分析参数

Table 3 Microscopic analysis of tectonic stress parameters in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

采样编号	原始产状	露头中云母组构优势方位	矿物	岩石类型	采样地点	定向切面及组构优势方位	备注
Md0901	35°∠90°	141°(321°)	云母	片麻岩	南秧田	XZ(74°)、YZ(275°)	
Md0903	35°∠90°	140°(320°)	云母	片麻岩	南秧田	YZ(75°)、XZ(285°)	
Md0904	175°∠70°	73(253°)	云母	片麻岩	大丫口	XZ(348°)、XY(5°)	
Md0905	62°∠35°	158°(338°)	云母	片岩	大丫口	XZ(84°)、YZ(272°)	
Md0906	170°∠60°	5°(185°)	角闪石	斜长角闪岩	大丫口	YZ(265°)、XY(285°)	
Md0908	75°∠35°	157°(337°)	云母	片岩	阿老	XZ(352°)、XY(1°)	
Md0911	300°∠35°	55°(235°)	云母	片麻岩	猛洞	XY(75°)、YZ(43°)	
Md0912	197°∠72°	79°(259°)	云母	片麻岩	猛洞	XY(332°)、YZ(315°)	
Md0917	90°∠32°	13°(193°)	云母	片麻岩	滑石板	XY(77°)、YZ(87°)	
Md0919	310°∠90°	45°(225°)	云母	片岩	上扣林	XZ(85°)、YZ(5°)	
Md0920	310°∠90°	40°(220°)	云母	片岩	上扣林	显微褶皱发育	

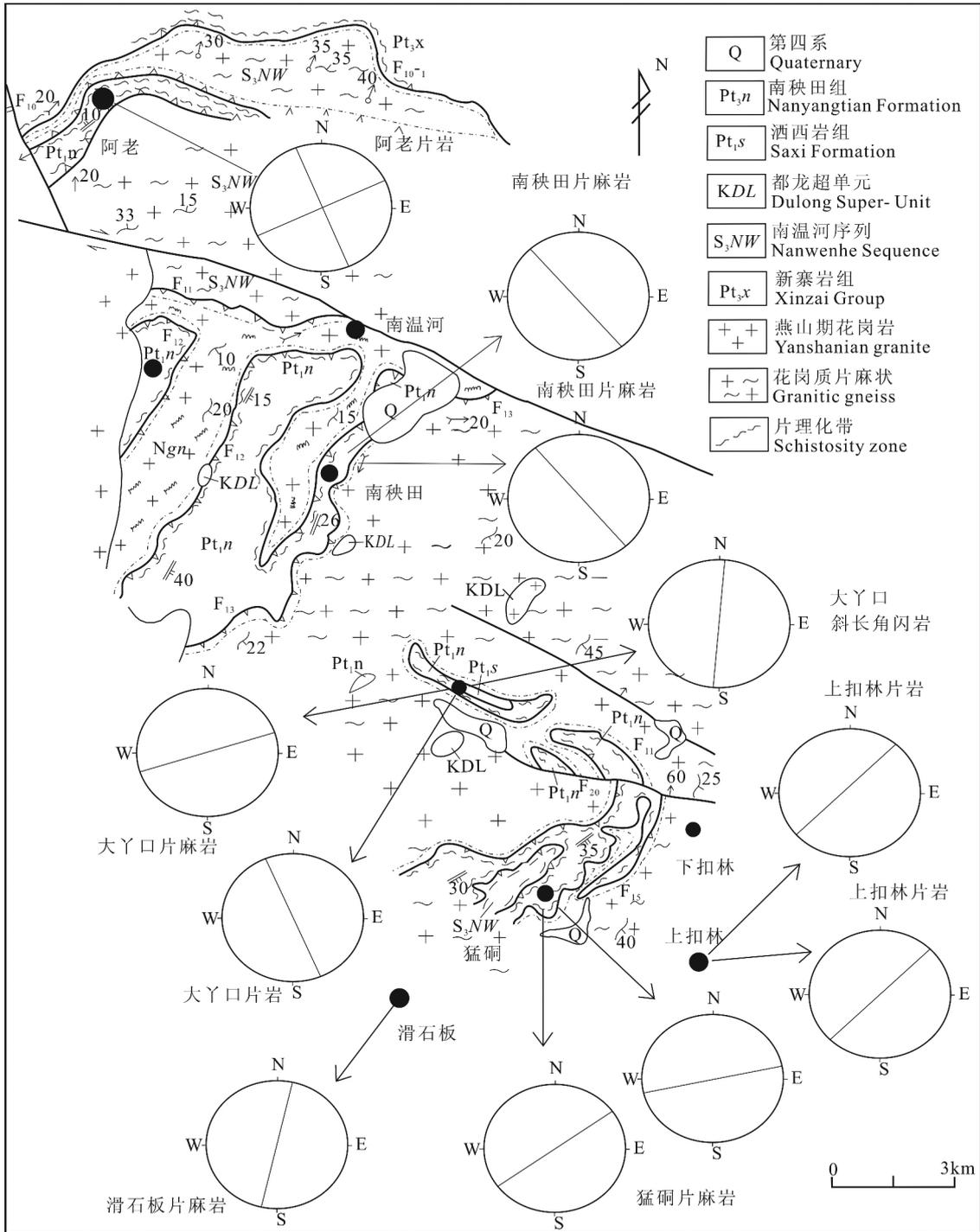


图9 滇东南猛洞岩群云母及角闪石组构的优势方位分布图

Fig 9 Preferred orientation diagram of the fabric of mica and hornblende in Group-Complex, southeastern Yunnan province

状变晶结构(图 7d)。

3.3 显微组构统计

猛洞岩群片状矿物(云母、角闪石等)的显微组构统计见表 3、图 8 及图 9。不同地区的片岩类云母组构优势方位存在一定的规律性:阿老地区发育两期优势方位,其中主优势方位为 NW-SE 向,另一优势方位为 NE-SW 向;大丫口地区优势方位为 NW-

SE;上扣林地区优势方位为 NE-SW。本区片岩组构中云母优势方位的差异性表明由北西至南东方向,应力表现为由伸展到挤压的特点。

片麻岩中云母组构优势方位与片岩类也存在相似性。南秧田地区片麻岩中云母组构优势方位为 NW-SE 向;与南秧田相反,滑石板、猛洞及大丫口等地区片麻岩中云母优势方位表现为近南北→北东

一南西→近东西向,即主应力由北向南依次增强,表明主应力来源于近南至北的挤压。大丫口斜长角闪岩中角闪石具强烈的定向排列,显示近南北向的优势方位,即其主应力为近东西向挤压。

猛洞岩群不同地点,不同岩类的同种矿物优势方位存在差别。片岩组构中云母的优势方位表明从北西至南东向,应力表现为伸展至挤压的过程;而片麻岩中云母的优势方位则表明从北西至南东向,应力也表现为挤压至伸展的复杂变化特点。片岩类与片麻岩类中云母优势方位的差异性一方面主要与岩石的能干性有关,因片岩的抗压能力小于片麻岩,因此片麻岩类可能记录的变质-变形温压条件相对高于片岩类。同一地点,不同岩性(层位)矿物之间也存在差别,从大丫口地区云母、角闪石组构优势方位的变化,表现为北西至南东→北东-南西(近东西向)→南北向变化的特点。野外观察到斜长角闪岩产出于最低地理位置,而片岩类产出最高地理位置,片麻岩类则居于斜长角闪岩类和片麻岩类中间,反映了片岩→片麻岩→斜长角闪岩对应的应力为南西-北东挤压→北东-南西伸展→东西向挤压的特

点;同时也表明片麻岩中云母、斜长角闪岩中角闪石及片岩中云母对应力挤压的敏感性依次增强,从而,在一定程度上反映片麻岩中云母可能记录主变质-变形特征,斜长角闪岩中角闪石与片岩中云母可能是主变质-变形之后的另一期变质-变形记录。

显微构造分析统计表明猛洞岩群矿物的优选方位可分为四组:北西-南东、北东-南西向、近南北向、北西-南东(近东西向),对应的应力表现为北东-南西、南东-北西向、近东西向、北东-南西(近南北向)挤压过程。与宏观应力分析类似,南东-北西向为区域性变质-变形主应力方向,近南北向、近东西向挤压可能为与上述主应变相匹配的次级应变方向;但北东-南西向挤压可能为主变质-变形之后的一次变质-变形产物。

4 矿物化学特征及温压计计算

4.1 石榴石-黑云母对矿物化学特征

4.1.1 石榴石矿物化学特征

石榴石的主量元素测试位置及结果分别见图 10 和表 4。电子探针成分分析结果为 SiO₂ 为 36.2%

表 4 滇东南猛洞岩群石榴石主量元素化学成分(%)

Table 4 Garnet chemical composition of major elements of Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province(%)

测点编号	边核边											
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
md0908												
Na ₂ O	0.13	0.10	0.91	0.02	0.08	0.09	0.08	0.10	0.17	0.07	0.13	0.06
FeO	28.6	25.4	23.4	23.5	23.4	28.6	29.9	28.8	28.4	28.2	29.3	30.1
MgO	1.19	0.77	0.71	0.68	0.61	1.70	1.80	2.21	1.47	1.41	1.55	1.71
TiO ₂	0.07	0.14	0.13	0.11	0.09	0.10	0.12	0.78	0.08	0.07	0.07	0.03
Al ₂ O ₃	21.4	21.1	20.4	20.5	21.0	20.8	21.0	20.8	21.1	21.2	21.3	20.9
CaO	8.88	9.35	9.81	9.87	10.2	6.69	6.04	6.83	8.69	9.42	8.87	7.08
MnO	1.73	4.04	4.22	5.37	5.10	3.02	2.55	1.97	1.51	1.38	0.50	1.18
SiO ₂	37.5	37.1	36.5	37.1	36.7	36.2	37.0	36.8	37.0	37.1	37.7	36.7
Total	99.6	98.0	96.1	97.1	97.1	97.2	98.6	98.4	98.6	98.9	99.5	97.8
阳离子以 12 个氧原子为基础进行计算 n _B												
Na	0.02	0.02	0.15	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01
Fe	1.91	1.73	1.62	1.61	1.60	1.97	2.03	1.95	1.92	1.90	1.96	2.06
Mg	0.14	0.09	0.09	0.08	0.07	0.21	0.22	0.27	0.18	0.17	0.18	0.21
Ti	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	2.02	2.02	1.99	1.98	2.02	2.02	2.01	1.99	2.01	2.01	2.01	2.01
Ca	0.76	0.81	0.87	0.87	0.90	0.59	0.52	0.59	0.75	0.81	0.76	0.62
Mn	0.12	0.28	0.30	0.37	0.35	0.21	0.18	0.14	0.10	0.09	0.03	0.08
Si	3.00	3.01	3.02	3.04	3.01	2.99	3.00	2.98	2.99	2.99	3.01	3.00
Total	7.98	7.97	8.06	7.96	7.98	8.01	7.99	7.98	8.01	8.00	7.99	7.99
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.91	1.73	1.62	1.61	1.60	1.97	2.03	1.95	1.89	1.90	1.96	2.06
X _{Mg}	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.07	0.07	0.09	0.06	0.06	0.06	0.07
X _{Fe}	0.65	0.59	0.56	0.55	0.55	0.66	0.69	0.66	0.65	0.64	0.67	0.69
X _{Ca}	0.26	0.28	0.30	0.30	0.31	0.20	0.18	0.20	0.25	0.27	0.26	0.21
X _{Mn}	0.04	0.10	0.10	0.13	0.12	0.07	0.06	0.05	0.03	0.03	0.01	0.03
Fe/(Fe+Mg)	0.93	0.95	0.95	0.95	0.96	0.90	0.90	0.88	0.91	0.92	0.92	0.91

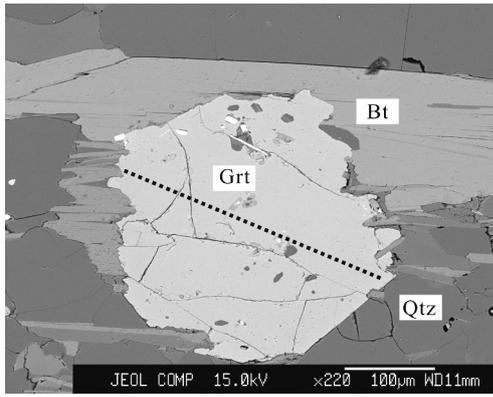


图10 石榴黑云片岩的矿物组成及电子探针测试位置 (Grt—石榴石; Bt—黑云母; Qtz—石英)

Fig. 10 Mineral composition of garnet biotite schist and test position of electronic probe in Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province (Grt—Garnet; Bt—Biotite; Qtz—Quartz)

~37.7%, Al_2O_3 为 20.4%~21.4%, FeO(全铁) 为 23.4%~30.1%, CaO 为 6.04%~10.2%, MnO 为 0.50%~5.10%。面分布图显示石榴石核部和幔部富 Mn, 边缘呈锯齿型, 表明石榴石成核和后期生长环境条件明显不同, 成核阶段可能对 Mn 元素具选择性富集, 生长阶段由于核部富 Mn 而使边部 Mn 浓度降低所致。化学成分环带记录了岩石的变质过程(Wu Chunming et al., 2001), 在穿越石榴石边部—核部—边部的成分剖面上, Fe/(Fe+Mg) 比值、Mn 含量呈现从低到高、再从高到低的类似“钟状”的特征, 与典型的生长环带类似(Kohn et al.,

2000)。大多数学者将石榴石边部化学成分的改变归因于后期降温期间元素的扩散作用, 忽视了退变质性质的纯转换反应(Kohn et al., 2000; Wu Chunming et al., 2001)。由于变泥质岩在后期降温事件中, 如果仅产生 Fe、Mg 的扩散, 则石榴石边部 Fe/Mg 比值会升高(图 11a), 相应的黑云母边部 Fe/Mg 比值则会降低。根据矿物组合中出现少量斜长石及白云母, 推测边部可能发生如下反应: 石榴石+白云母=黑云母+斜长石, 因而选择石榴石的核部或幔部进行电子探针配套测试较为可靠。

石榴石单矿物稀土元素分析结果见表 5。稀土元素 ΣREE 在 $209 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比为 0.88~0.90, $(La/Yb)_N$ 在 0.56~0.57, 说明轻重稀土分馏不明显, 重稀土富集; 轻稀土分馏 $(La/Sm)_N$ 为 3.79~3.86, 重稀土分馏 $(La/Sm)_N$ 为 0.13, 表明轻稀土分馏程度大于重稀土。与一般岩浆型或砂卡岩型石榴石明显不同, 其稀土元素球粒陨石标准化配分模式呈现“V”型(图 11b), LREE 向下接近直线倾斜, Eu 中等亏损, HREE 呈现向上弧形弯曲。

4.1.2 黑云母矿物化学特征

与石榴石共生的黑云母, 其电子探针测试结果见表 6。主要成分 SiO_2 为 35.07%~35.52%, Al_2O_3 为 17.68%~18.58%, Na_2O 为 0.21%~0.38%, FeO 为 16.45%~17.18%, MgO 为 9.87%~10.90%。与石榴石边部接触的黑云母 [Fe/(Fe+Mg)] 从边部—核部逐步升高, 表明石榴石与黑云

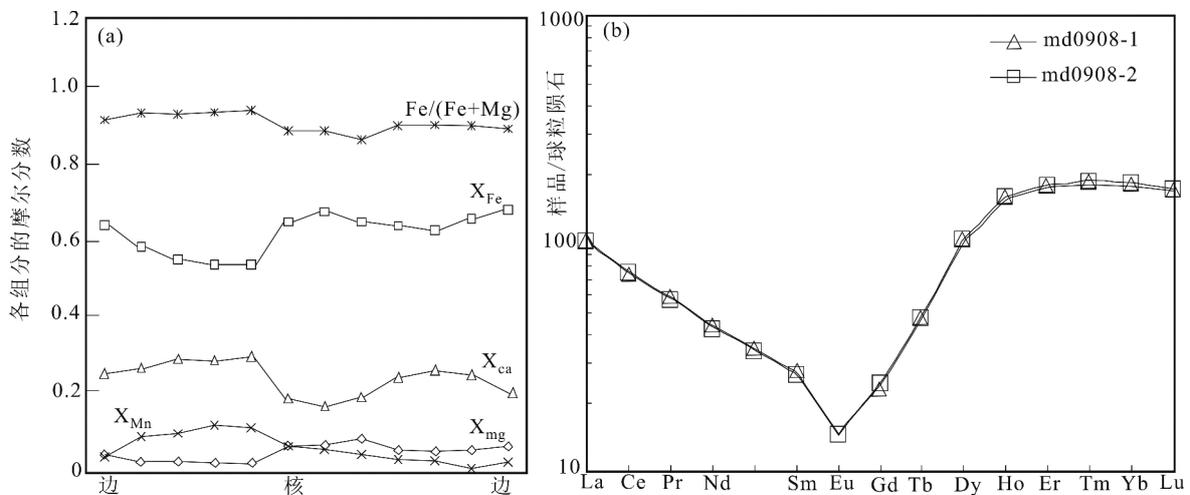


图 11 滇东南猛洞岩群石榴石成分环带特征(a)及球粒陨石标准化稀土配分图解(b) (球粒陨石标准值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 11 Garnet component band (a) and chondrite-normalized REE diagram (b) of the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

母发生了 Fe-Mg 交换。但核部与边缘成分差别极小,这是由于在较高温下, Mg 在黑云母中易于扩散,整个晶体成分近似保持均匀(Wang Wei, 2002)。

表 5 滇东南猛洞岩群电气石及石榴石稀土元素含量($\times 10^{-6}$)
Table 5 Rare earth element contents of tourmaline and garnet of the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province($\times 10^{-6}$)

样品编号	md0904-1	md0904-2	md0908-1	md0908-2
单矿物	电气石	电气石	石榴石	石榴石
La	79.3	65.2	24.2	24.4
Ce	170	140	44.3	45.3
Pr	18.4	15.2	5.53	5.39
Nd	67.3	55.5	20.1	19.7
Sm	13.2	10.6	4.12	4.08
Eu	2.37	2.01	0.78	0.85
Gd	10.3	8.32	4.79	5.02
Tb	1.77	1.4	1.76	1.76
Dy	8.74	7.13	25.4	26.3
Ho	1.73	1.35	8.79	9.08
Er	4.58	3.47	29.4	30
Tm	0.61	0.48	4.61	4.77
Yb	4.08	3.17	30.6	31.4
Lu	0.58	0.46	4.3	4.38
Y	45.6	35.2	277	270
ΣREE	383	314	209	212
LREE	351	289	99	99.7
HREE	32.4	25.8	110	113
LREE/HREE	10.8	11.2	0.9	0.88
La _N /Yb _N	13.9	14.8	0.57	0.56
δEu	0.62	0.65	0.54	0.57
δCe	1.09	1.09	0.94	0.97
(La/Sm) _N	3.88	3.97	3.79	3.86
(Gd/Yb) _N	2.09	2.17	0.13	0.13

4.2 电气石-黑云母矿物对化学特征

电气石的化学通式可表示为 $XY_3Z_6Si_6O_{18}(BO_3)_3W_4$, 其中 X 位由 Na、Ca、K 和空缺组成; Y 位由 Mg、Fe、Mn、Al 和 Li 组成; Z 位由 Al、Mg、Fe、Cr 和 V 组成; W 位由 O、OH、F 和 Cl 组成(Grice et al., 1993; Henry et al., 1996; Jiang Shaoyong, 1998; Jiang Shaoyong et al., 2000)。

单颗粒电气石的测试位置见图 12, 测试结果见表 7。所测样品主要成分为 SiO_2 为 37.1%~37.9%, Al_2O_3 为 32.5%~33.7%, Na_2O 为 1.61%~1.95%, FeO 为 5.87%~7.27%, MgO 为 5.99%~6.71%。由于电子探针分析无法区分铁的价态, 所以都以 FeO 的形式给出; 同时, 也无法测出 B_2O_3 和 H_2O 的含量, 计算时以铁、镁、锂电气石标准晶体化学式, 氧原子数为 24.5 为准计算其分子式。图 12 显示电气石周围被黑云母和白云母环绕, 接触界限明显, 内部分布一些石英及碳质包裹物。电气石

表 6 滇东南猛洞岩群片岩中黑云母的主量元素化学成分
Table 6 Chemical composition of main elements of biotite in Schist of the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

成分(%)	边		核	
	1	2	3	4
Na ₂ O	0.29	0.27	0.38	0.21
FeO	16.5	17.2	16.5	16.7
K ₂ O	8.7	8.79	8.28	8.8
MgO	10.9	10.8	9.87	10.9
NiO	0.03	0.02	—	0.04
TiO ₂	1.18	1.22	1.18	1.28
Al ₂ O ₃	18.6	18.4	17.7	18.3
CaO	—	—	—	—
MnO	0.13	—	—	0.14
SiO ₂	35.4	35.5	35.1	35.5
Cr ₂ O ₃	0.02	0.04	0.13	0.01
P ₂ O ₅	—	—	0.03	0.05
Total	91.7	92.3	89.1	91.9
阳离子以 11 个氧原子为基础进行计算 n _B				
Na	0.04	0.04	0.06	0.03
Fe	1.07	1.11	1.1	1.09
K	0.86	0.87	0.84	0.87
Mg	1.26	1.25	1.18	1.26
Ni	0	0	—	0
Ti	0.07	0.07	0.07	0.07
Al	1.7	1.68	1.67	1.68
Mn	0.01	—	—	0.01
Si	2.75	2.75	2.81	2.76
Cr	0	0	0.01	—
P	—	—	0	0
Fe/Mg	0.85	0.89	0.93	0.86
Total	7.78	7.78	7.73	7.78

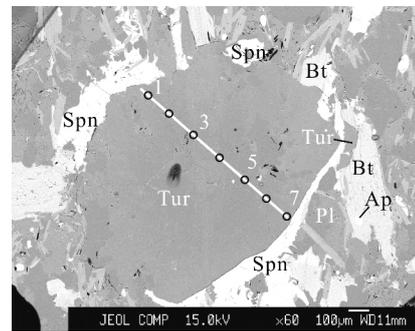


图 12 滇东南猛洞岩群电气石云母斜长片麻岩矿物共生关系
Fig 12 Mineral symbiosis of tourmaline mica plagioclase gneiss in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

Spn—榍石; Tur—电气石; Bt—黑云母; Ap—磷灰石; Pl—斜长石
Spn—Sphene; Tur—Tourmaline; Bt—Biotite;
Ap—Apatite; Pl—Plagioclase

主要富 Mg、Al、Fe, 属于镁电气石-铁电气石, 化学式为 $(Na_{0.50-0.61}, Ca_{0.06-0.14}, K_{0-0.01})(Fe_{0.27-0.33}Mg_{0.48-0.64})_3[Si_6O_{18}][BO_3]_3(OH)_4$ 。前人研究表

明,电气石的主化学成分可用来指示不同的成岩环境(Henry et al., 1985; Jiang Shaoyong et al., 2000)。Henry et al(1985)设计了两个化学成分三

表 7 滇东南猛洞岩群单颗粒电气石化学成分

Table 7 Chemical composition of single particle tourmalinization in Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

测试点	%						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Na ₂ O	1.89	1.92	1.61	1.88	1.95	1.77	1.89
FeO	7.08	6.28	6.00	7.27	5.90	5.87	5.85
SiO ₂	37.8	37.1	37.9	37.5	37.1	37.3	37.2
CaO	0.37	0.80	0.46	0.52	0.80	0.68	0.70
TiO ₂	0.31	0.37	0.22	0.28	0.28	0.29	0.33
Al ₂ O ₃	32.7	32.5	33.7	32.5	32.5	33.2	32.9
K ₂ O	0.05	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03
MgO	6.03	6.58	5.99	6.25	6.71	6.38	6.08
Total	86.2	85.6	86.0	86.3	85.3	85.6	85.1
阳离子以 24.5 个氧原子为基础进行计算 n _B							
Na	0.60	0.61	0.50	0.59	0.62	0.56	0.60
Fe	0.96	0.86	0.81	0.99	0.81	0.80	0.80
Si	6.13	6.06	6.12	6.10	6.07	6.07	6.09
Ca	0.06	0.14	0.08	0.09	0.14	0.12	0.12
Ti	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
Al	6.25	6.25	6.40	6.23	6.26	6.36	6.35
K	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Mg	1.46	1.60	1.44	1.52	1.63	1.55	1.48
Total	15.5	15.6	15.4	15.6	15.6	15.5	15.5

角图解,划分了 12 类不同的成岩环境,将电气石的化学成分 Ca-Fe-Mg-Al 投于这两个图解中(图 13),指示其原岩是贫 Ca 且含 Al 饱和矿物的泥质岩类。

电气石中稀土元素的含量与配分能较灵敏地指示成岩成矿环境,推断热液来源、成分和演化情况(Jiang Shaoyong et al., 2000)。猛洞岩群电气石稀土元素分析结果见表 5。ΣREE 在 314.28×10⁻⁶~382.99×10⁻⁶, LREE/HREE 比为 10.81~11.20, (La/Yb)_N 值为 13.94~14.75,表明轻重稀土分馏明显,轻稀土较为富集;轻稀土分馏 (La/Sm)_N 在 3.88~3.97,重稀土分馏 (La/Sm)_N 为 2.09~2.17,轻稀土分馏程度明显大于重稀土。稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图 14)明显向右倾斜,δEu 亏损,δCe 略富集,反映了其受矿物共生组合和围岩环境的强烈控制。

片麻岩中黑云母颗粒较小,利用电子探针无法准确测试从边—核—边的化学组成变化过程,但是该区中与黑云母接触的电气石为镁电气石—铁电气石,反映电气石与黑云母矿物之间也存在 Fe-Mg 交换。

4.3 温压计

4.3.1 石榴石—黑云母温度计

石榴石—黑云母是变质岩中最为常见的矿物对

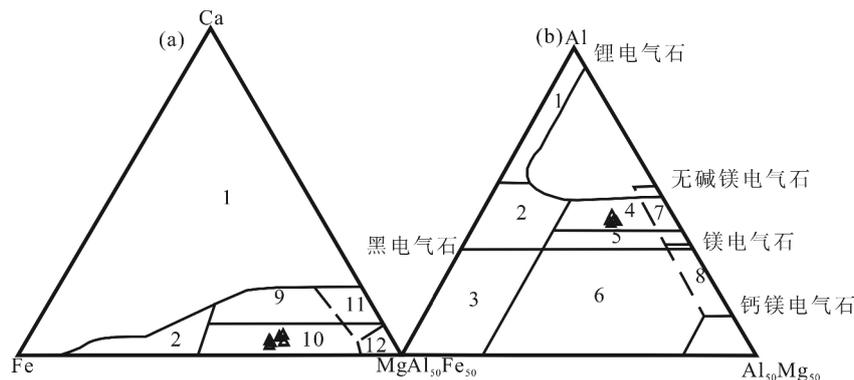


图 13 滇东南猛洞岩群电气石化学成分与成岩环境关系判别图(据 Henry et al., 1985)

Fig. 13 Diagenetic environment discrimination diagram of tourmaline chemical composition and relationship in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province(after Henry et al., 1985)

1—富 Li 花岗岩、细晶岩;2—贫 Li 的花岗岩、细晶岩;3—富 Fe³⁺ 的石英—电气石岩(热液蚀变花岗岩);4—含 Al 饱和矿物变质泥质岩;5—不含 Al 饱和矿物的变质泥质岩;6—Fe³⁺ 石英—电气石岩、钙硅质和变质沉积岩;7—贫 Ca 的变质超镁铁质岩和富 Cr、V 的变质沉积岩;8—变质碳酸盐岩和变质辉石岩;9—富 Ca 的变质泥岩、砂岩和钙硅酸盐;10—贫 Ca 的变质泥岩、砂岩和石英—电气石岩;11—变质碳酸盐岩;12—变质镁铁质岩

1—Li rich granitoid pegmatites and aplites;2—Li-poor granitoid and their associated pegmatites and aplites;3—Fe³⁺-rich quartz-tourmaline rocks(hydrothermally altered granites);4—Metapelites and metapsammites coexisting with an Al-saturating phase;5—Metapelites and metapsammlites not coexisting with an Al-saturating phase;6—Fe³⁺-rich quartz-tourmaline rocks, Calc-silicate rocks, and metapelites;7—Low-Ca metaultramafics and Cr, V-rich metasediments;8—Metacarbonates and meta-pyroxenites;9—Ca-rich metapelites, metapsammites, and calc-silicate rocks;10—Ca-poor metapelites, metapsammites, and quartz-tourmaline rocks;11—Metacarbonates;12—metaultramafics

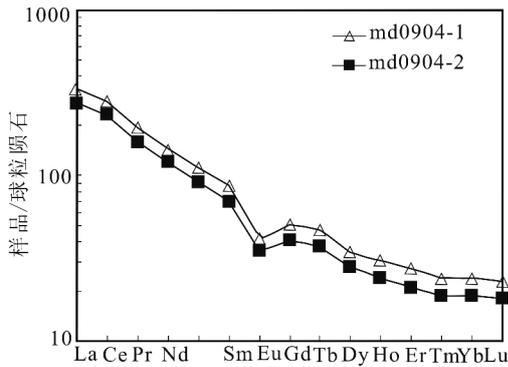


图 14 滇东南猛洞岩群电气石球粒陨石标准化稀土配分图解 (球粒陨石标准值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig 14 Tourmaline chondrite-normalized REE diagram of Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

之一,前人已发现这两种矿物之间的 Fe-Mg 交换与平衡温度有确定的函数关系,藉此标度了石榴石-黑云母温度计。其中 Holdaway(2000)开发的石榴石-黑云母温度计表达式,可使实验温度的误差小至±25℃,是目前应用较广及最为准确的石榴石-黑云母温度计表达式(Wu Chunming et al., 2007; He Defeng et al., 2008; Wu Chuming et al., 2006)。

石榴石-黑云母矿物对化学特征表明在区域变质作用过程中有 Fe-Mg 交换,因此可以采用石榴石

—黑云母地质温度计来限定片岩类的变质条件,结果见表 8。Lv Wei et al. (2001)估计本区片岩类压力为 0.5GPa,由于压力对温度的影响可忽略不计(每增高 0.1GPa,温度变化在 1℃内),结果获得石榴云母片岩类温度变化范围为 404~464℃(平均 429℃)。

4.3.2 黑云母-电气石温压计

黑云母和电气石温度计的基本原理在于两者之间存在 Fe-Mg 交换(Colopietro et al., 1987)。本文选取了黑云母-电气石矿物对颗粒进行配套电子探针测试,结果见表 9。将表中数据带入上述经验公式,获得电气斜长片麻岩温度变化范围为 515~582℃(平均 546℃)。

5 金红石和榍石 U-Pb 年代学研究

5.1 金红石 TIMS 法 U-Pb 年龄

猛洞岩群石英角闪斜长片麻岩中金红石的 U-Pb 年代学数据分析结果见表 10。所测金红石主要为橘红色透明柱状,U 含量为 $54 \times 10^{-6} \sim 92 \times 10^{-6}$,Pb 含量为 $1.8 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ 。普通铅含量变化范围为 $1.1 \times 10^{-6} - 1.4 \times 10^{-6}$,3 个测点的普通铅含量占总铅范围分别为 48.1%、61.1%、73.7%。三组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表

表 8 滇东南猛洞岩群石榴石-黑云母矿物对化学成分及对应温度

Table 8 Garnet-biotite minerals on chemical components and the corresponding temperature in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

测点	%															
	C13-Grt	C13-Bi	C14-Grt	C14-Bi	C15-Grt	C15-Bi	C16-Grt	C16-Bi	C17-Grt	C17-Bi	C18-Grt	C18-Bi	C19-Grt	C19-Bi	C20-Grt	C20-Bi
FeO	29.2	17.5	27.2	16.9	28.6	17.0	25.8	17.5	28.4	17.3	28.5	16.3	27.0	18.0	28.9	17.0
K ₂ O	0.02	8.84	0.01	8.83	0.03	8.65	0.00	8.83	0.02	8.83	0.00	8.67	0.00	8.56	0.00	8.92
MgO	1.26	10.6	1.09	10.5	1.18	10.4	1.24	10.6	1.24	9.26	1.15	8.69	0.91	9.46	1.46	9.59
TiO ₂	0.02	1.17	0.12	1.27	0.09	1.54	0.13	1.25	0.08	1.27	0.08	1.15	0.11	1.39	0.10	1.18
Al ₂ O ₃	21.3	18.3	21.3	18.0	21.1	18.2	21.1	18.5	21.1	18.1	21.1	19.5	21.3	17.9	21.2	18.6
CaO	9.31	0.00	9.81	0.00	9.42	0.00	9.38	0.00	9.74	0.00	9.83	0.00	9.15	0.00	9.68	0.00
MnO	1.66	0.10	3.50	0.00	1.85	0.03	4.07	0.08	1.43	0.10	1.52	0.08	3.41	0.06	0.57	0.02
SiO ₂	37.3	34.7	36.8	34.8	36.9	34.8	37.2	35.3	37.0	35.5	36.9	35.9	36.9	35.3	36.9	35.8
Total	100	91.0	99.8	90.6	99.4	91.0	98.9	92.3	99.1	90.5	99.2	90.9	98.9	90.9	98.8	91.3
石榴石以 12 个氧原子计算,黑云母以 11 个氧原子计算 n _B																
Fe	1.95	1.15	1.83	1.12	1.93	1.12	1.74	1.14	1.92	1.15	1.92	1.06	1.83	1.19	1.95	1.11
K	0.00	0.89	0.00	0.89	0.00	0.87	0.00	0.88	0.00	0.89	0.00	0.86	0.00	0.86	0.00	0.89
Mg	0.15	1.24	0.13	1.24	0.14	1.22	0.15	1.22	0.15	1.09	0.14	1.01	0.11	1.11	0.18	1.12
Ti	0.00	0.07	0.01	0.08	0.00	0.09	0.01	0.07	0.00	0.07	0.00	0.07	0.01	0.08	0.01	0.07
Al	2.01	1.69	2.02	1.67	2.00	1.69	2.00	1.69	2.01	1.68	2.01	1.80	2.03	1.67	2.01	1.71
Ca	0.80	0.00	0.84	0.00	0.81	0.00	0.81	0.00	0.84	0.00	0.85	0.00	0.79	0.00	0.84	0.00
Mn	0.11	0.01	0.24	0.00	0.13	0.00	0.28	0.01	0.10	0.01	0.10	0.01	0.23	0.00	0.04	0.00
Si	2.98	2.73	2.96	2.75	2.98	2.74	3.00	2.74	2.98	2.81	2.98	2.81	2.99	2.79	2.98	2.80
Total	8.01	7.81	8.03	7.80	8.02	7.78	7.99	7.80	8.01	7.73	8.01	7.68	8.00	7.73	8.01	7.73
t(℃)	417		405		407		453		448		432		404		464	
P	0.5GPa															

表9 滇东南猛洞岩群电气石和黑云母矿物对的化学成分及对应温度

Table 9 Garnet-biotite minerals on chemical compositions and corresponding temperatures in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

测试点	%											
	C8-Bi	C8-Tur	C9-Bi	C9-Tur	C10-Bi	C10-Tur	C11-Bi	C11-Tur	C12-Bi	C12-Tur	C13-Bi	C13-Tur
Na ₂ O	0.11	1.99	0.11	1.68	0.11	1.88	0.04	1.91	0.11	1.93	0.11	1.83
FeO	24.5	7.27	20.2	7.11	24.5	7.22	22.3	7.47	20.2	8.26	24.5	8.08
SiO ₂	36.3	36.2	36.8	36.4	34.7	36.2	36.3	36.5	36.8	36.7	34.7	36.4
CaO	0.00	0.89	0.01	0.92	0.03	0.85	0.00	0.85	0.00	0.82	0.03	0.85
TiO ₂	0.66	0.35	0.66	0.38	0.27	0.43	0.53	0.38	0.66	0.28	0.52	0.32
Al ₂ O ₃	17.9	32.3	17.9	32.4	18.0	32.3	17.4	31.7	17.9	32.3	18.0	31.8
K ₂ O	5.14	0.02	9.22	0.03	5.14	0.02	9.01	0.04	9.22	0.04	5.14	0.04
MgO	9.32	6.25	9.32	6.16	9.80	6.12	9.95	6.20	9.32	6.43	9.80	6.33
Total	94.3	85.5	94.4	85.0	92.7	85.1	95.8	85.4	94.4	86.8	93.0	85.7
电气石以 24.5 个阳离子数,黑云母以 11 个阳离子数进行计算 _{NB}												
Na	0.02	0.68	0.02	0.57	0.02	0.64	0.01	0.65	0.02	0.65	0.02	0.62
Fe	1.61	1.06	1.30	1.04	1.61	1.06	1.43	1.10	1.30	1.20	1.61	1.20
Si	2.78	6.33	2.82	6.37	2.72	6.36	2.78	6.40	2.82	6.34	2.72	6.37
Ca	0.00	0.17	0.00	0.17	0.00	0.16	0.00	0.16	0.00	0.15	0.00	0.16
Ti	0.04	0.05	0.04	0.05	0.02	0.06	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04
Al	1.62	6.66	1.62	6.69	1.66	6.68	1.57	6.56	1.62	6.60	1.66	6.58
K	0.52	0.01	0.90	0.01	0.52	0.01	0.88	0.01	0.90	0.01	0.52	0.01
Mg	1.07	1.63	1.07	1.61	1.14	1.60	1.13	1.62	1.07	1.66	1.14	1.66
Total	7.67	16.6	7.78	16.5	7.70	16.6	7.85	16.6	7.78	16.7	7.71	16.7
Mg/Fe	0.66	1.54	0.82	1.54	0.71	1.51	0.79	1.48	0.82	1.39	0.71	1.39
t(°C)	582		536		563		535		515		545	

面年龄相差不大,其中²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄变化范围为 169.5~169.8Ma,加权平均值为 170±0.5Ma (MSWD=0.16);²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 等时线谐和年龄为 169.4±0.3Ma (MSWD=3.3),与²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值在误差范围内基本一致(图 15a)。因此,金红石 TIMS 法 U-Pb 年龄为 170Ma 左右,对应时代为燕山早期。

5.2 榍石 TIMS 法 U-Pb 年龄

猛洞岩群石英角闪斜长片麻岩中榍石的 U-Pb 年代学数据分析结果见表 11。所测榍石为浅黄色透明浑圆状,U 含量为 55×10⁻⁶~54×10⁻⁶,Pb 含量为 6.7×10⁻⁶~17×10⁻⁶。普通铅含量变化范围为 1.1×10⁻⁶~1.4×10⁻⁶。榍石²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄变化范围为 208.5~238Ma(图 15b),其中 4 号点

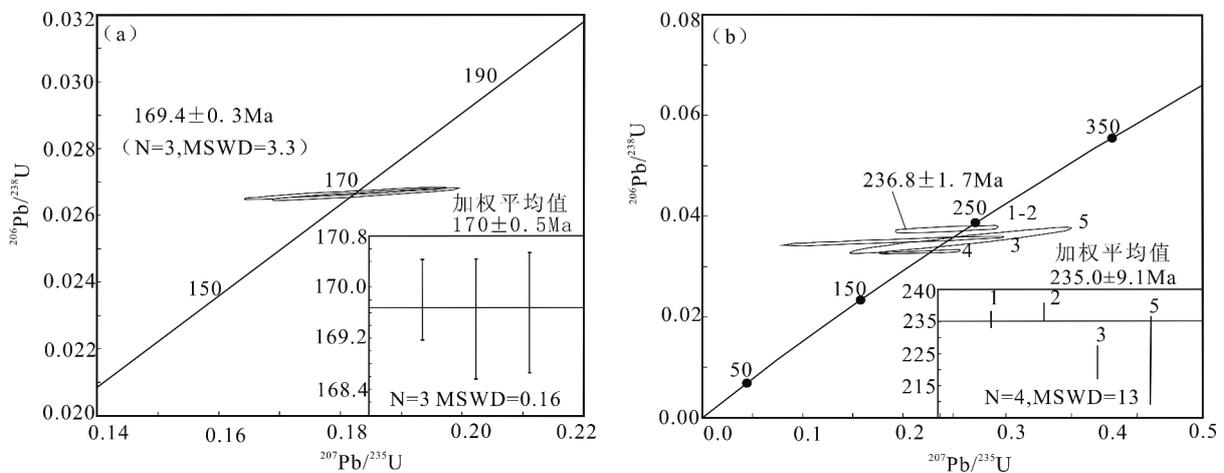


图 15 滇东南猛洞岩群斜长片麻岩金红石和榍石 TIMS 法 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 15 TIMS concordia plots for sphene and rutile U-Pb from plagioclase gneiss in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

表 10 滇东南猛洞岩群金红石 TIMS 法 U-Pb 定年结果

Table 10 Results of rutile TIMS U-Pb dating in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

点号	样品情况		质量分数		样品中 普通铅 含量(ng)	同位素原子比率*					表面年龄(Ma)		
	金红石特征 (Rho)	质量 (mg)	U (10 ⁻⁶)	Pb (10 ⁻⁶)		²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
1	橘红色透明柱状 (0.6105)	4.71	92	2.7	1.30	402	0.05927	0.02669 (10)	0.1886 (80)	0.05124 (206)	169.8	175.4	251.8
2	橘红色透明柱状 (0.6358)	5.16	54	1.8	1.10	285	0.1119	0.02664 (15)	0.1841 (126)	0.05013 (326)	169.5	171.6	200.9
3	橘红色透明柱状 (0.6806)	5.06	55	1.9	1.40	227	0.1006	0.02666 (15)	0.1806 (138)	0.04913 (356)	169.6	168.6	153.8

1-3 号点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值: 169.7 ± 0.5Ma

注: ²⁰⁶Pb / ²⁰⁴Pb 已对实验空白(Pb=0.80ng, U=0.55ng)及稀释剂作了校正。其它比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素。括号内的数字为 2σ 绝对误差,例如: 0.02669(10)表示 0.02669 ± 0.00010(2σ)。

表 11 滇东南猛洞岩群榍石 TIMS 法 U-Pb 定年结果

Table 11 Results of sphene TIMS U-Pb dating in the Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan province

点号	样品情况		质量分数		样品中 普通铅 含量(ng)	同位素原子比率*					表面年龄(Ma)		
	榍石特征 (Rho)	质量 (mg)	U (10 ⁻⁶)	Pb (10 ⁻⁶)		²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
1	浅黄色透明浑圆状 (0.7688)	4.10	139	11	13	80	0.2729	0.03726 (37)	0.2449 (421)	0.04767 (787)	235.8	222.4	83.0
2	浅黄色透明浑圆状 (0.7009)	5.90	145	12	20	80	0.2747	0.03761 (41)	0.2442 (425)	0.04709 (782)	238.0	221.9	53.7
3	浅黄色透明浑圆状 (0.8252)	2.20	55	6.7	7.3	45	0.2303	0.03508 (75)	0.1886 (935)	0.03899 (1868)	222.3	175.4	-417
4	浅黄色透明浑圆状 (0.7528)	3.89	154	10	12	88	0.2538	0.03288 (29)	0.2179 (327)	0.04806 (692)	208.5	200.2	102.4
5	浅黄色透明浑圆状 (0.7986)	1.93	60	17	12	28	0.5162	0.03519 (211)	0.0915 (2580)	0.01885 (5221)	223.0	88.9	-2904

1-2 号点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值 236.8 ± 1.7Ma; 1、2、3、5 号点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值 235.0 ± 9.1Ma

注: * ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 已对实验空白(Pb=0.80ng, U=0.55ng)及稀释剂作了校正。其它比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素。括号内的数字为 2σ 绝对误差,例如: 0.03726(37)表示 0.03726 ± 0.00037(2σ)。

榍石显微图像中观察到部分杂质, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄(208.5Ma)偏低; 1-2 号点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值 236.8 ± 1.7Ma(MSWD=1.7); 1、2、3、5 号点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值 235.0 ± 9.1Ma(MSWD=13)。因此, 榍石 TIMS 法 U-Pb 年龄大约为 236Ma, 与区域上前人报道的年龄基本一致, 反映猛洞岩群主变质-变形时代为印支期。

6 讨论

6.1 显微构造与温压计所代表的地质意义

石榴石-黑云母是中-高温变质泥质岩中最重要矿物对。Zhou Xiwen et al(2005)指出变质温度高达 720~770℃时, 石榴石和黑云母的幔部和核部仍保留了变质作用峰期的温度, 但边部影响较大。石榴石-黑云母片岩中石榴石-黑云母矿物对计算温度为 404~464℃(平均 429℃), 估算片岩压力为 0.5GPa(Lu wei et al., 2001)及矿物共生组合为铁铝石榴石+黑云母+白云母+石英, 显示片岩类最高变质

程度达高绿片岩相。电气黑云片麻岩中电气石-黑云母矿物对计算温度变化范围为 515~582℃(平均 546℃), 显示片麻岩变质程度高绿片岩相-低角闪岩相。斜长角闪岩中斜长石-角闪石-(石英)矿物对计算的平均温度为 633℃, 压力为 0.86GPa, 表明斜长角闪岩变质程度达低角闪岩相(另文发表)。该区片岩、片麻岩及斜长角闪岩类温压计记录了不同构造层次的温压条件, 构成不同的变质相: 低绿片岩相→高绿片岩相→低角闪岩相。

按照一般温压梯度的变化(压力 0.03GPa/km, 温度 30℃/km), 结合猛洞岩群变质-变形温压条件, 可进一步加深对老君山“变质穹窿体”或“变质核杂岩”的认识(Guo Ligu, 2006; Yan Danping et al., 2005; Li Dongxu et al., 2000; Liu Yuping et al., 2004, 2007):

(1)主构造期为印支期, 主应力(σ₁)为 SE-NW 向挤压, 而且剖面上发育小型平卧褶皱, 表明该区经历了由南东→北西强烈的推覆剪切作用。

(2) Zhang Xinyu et al. (2006) 认为在地下壳物质层流变作用机制的调节下, 地表剥蚀作用能打破地壳动力学和热力学平衡, 引起壳内物质和结构的重置, 造成山脉的加剧隆升。而斜长角闪岩变质埋藏深度接近 30km, 按照正常抬升出露地表可能性较小。因此, 伸展构造造成的构造剥蚀对造山带的夷平作用较为重要, 表明该区主期变质—变形之后长时间处于伸展阶段。

(3) 野外考察发现, 猛洞岩群地表出露类似于“飞来峰”, 呈孤岛状产出(图 1a)。该区三叠纪—第四纪地层严重缺失, 且文山—麻栗坡断裂北东方向广泛发育其他时代地层单元的飞来峰或外来岩体, 推测猛洞岩群为一套推覆的外来岩体。

(4) 阿老地区片岩埋藏深度差别小, 推测阿老地区片岩类岩石处于整个推覆体的前列, 呈现伸展—减薄过程; 而大丫口地区可能位于推覆体根部, 处于增厚阶段, 从而使温压匹配性较差。

结合南秧田、大丫口和阿老地区的地理位置和温度计估算的埋藏深度, 大丫口到南秧田直线距离为 6km 左右, 大丫口到阿老直线距离为 18km 左右, 从而也在一定程度上反映了主变质—变形期后从北西→南东(阿老—南秧田—大丫口)快速隆升或快速伸展—减薄过程, 其中大丫口可能更靠近隆升的中心位置。

6.2 年代学代表的含义

本文收集了老君山地区与变形—变质作用相关的年代学数据, 见表 12 和图 16。结合区域构造背景, 这些数据主要集中在七个年龄段内: ~800Ma、~420Ma、225~237Ma、190~214Ma、160~184Ma、79.8~92.9Ma、20~24Ma, 代表七个不同时间构造—岩浆事件。

225~237Ma 与区域上印支期变质—变形事件的年龄相吻合, 构造运动产生的形迹主要表现为近东西向褶皱—逆冲构造带和 NE-NNE 向韧性剪切走滑断裂带 (Xu Xianbing et al., 2009); 190~214Ma、160~184Ma 可能代表晚印支期—早燕山期区域上的两次构造热事件, 可能经历了向北的推覆—剪切作用及中心向周边的第一次伸展—剪切作用 (Xu Wei, 2007); 79.8~92.9Ma 代表了中生代末期岩浆侵入导致第二次 NNW-SSE 向伸展 (Yan Danping et al., 2005), 代表晚白垩世岩浆事件的产物, 是华南西部地区岩浆—成矿带的重要组成部分。

前人研究表明, 变质岩中的金红石 U-Pb 封闭温度约 400°C (Zhong Yufang and Ma Changqian,

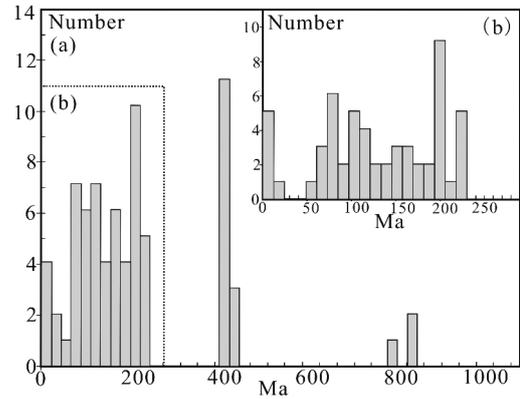


图 16 滇东南老君山地区同位素年代学分布

Fig. 16 Distribution of isotope chronology data in the Laojunshan area, southeastern Yunnan province

2006; Hirdes and Davis, 2002; Li Qiuli et al., 2003), 而榍石 U-Pb 体系封闭温度 (>650°C) 接近角闪岩相上限 (Xiang Hua et al., 2007), 是确定高级变质地体岩石的变形和变质作用年龄的理想对象。本文获得猛洞岩群 DN4075 样品榍石 TIMS U-Pb 年龄为 236Ma; 该地区变质程度最高达低角闪岩相 (Tan Hongqi et al., 2010), 处于榍石 U-Pb 体系封闭温度范围内; 因此, 236Ma 代表该地区构造—热事件的峰期年龄, 对应于该地区主期变质—变形年龄。金红石的 TIMS U-Pb 年龄为 170Ma, 因其封闭温度较低, 代表该地区在经历变质—变形峰期后的冷却年龄。

结合区域地质背景及变质—变形分析, 237~190Ma 记录了主期变质—变形构造形迹, 此时猛洞岩群处于 SE-NW 向推覆挤压, 其中 ~235Ma 达到变形—变质峰期 (Liu Yuping et al., 2007), 此时主期变质—变形为南东—北西方向挤压; 且在文山—麻栗坡 NE 方向广泛发育飞来峰及异地岩, 可能指示包括猛洞岩群在内的前印支期地层也是一套印支期从越南北部推覆而至的外来岩体。其后逐步缓慢冷却—退变质, 在 170~165 Ma, 发生第一次快速降温, 猛洞岩群冷却速率为 30°C/Ma (Liu Yuping et al., 2007), 地壳松弛, 发生中心向四周的伸展—剪切作用, 老君山变质核杂岩基本形成 (Guo Ligu, 2006), 与大丫口片岩类云母记录的应力北东—南西方向伸展相匹配; 160~120Ma 开始第二次缓慢冷却, 猛洞岩群冷却速率为 3.0°C/Ma (Liu Yuping et al., 2007); 约 85Ma, 研究区地壳再一次减薄, 在老君山核杂岩底部形成热垫托, 发生第二次快速冷却, 冷却速率为 19°C/Ma; 约 20~24Ma, 受区域上哀牢山—红河剪切带活动影响, 盖层中形成大量脆性断

表 12 滇东南老君山地区同位素年代学数据

Table 12 Isotope chronology data of the laojunshan area, southeastern Yunnan province

序号	样品位置	岩性	矿物	方法	年龄(Ma)		资料来源	备注	
1	南温河北	片麻岩	黑云母	K-Ar	204.4	2	1:5 万麻栗坡、都龙幅区调查报告(1999)		
2	南温河	片麻岩	黑云母	K-Ar	183.5				
3	南当厂	大理岩	方铅矿	普通 Pb	207.8				
4	南秧田	角闪片麻岩	白云母	K-Ar	224.8				
5	南秧田	砂卡岩型矿石	全岩	Rb-Sr	214	15	Zeng Zhigang et al., 1998		
6	Bac Quang	弱变形—	黑云母	Rb-Sr	176	5.3	Roger et al., 2000		
7			白云母	Rb-Sr	206	10			
8	北西约 12km	变质花岗岩	黑云母	Ar-Ar	190	8			
9			白云母	Ar-Ar	210	9			
10	E104°51'43";N22°29'41"	正片麻岩	白云母	Ar-Ar	236	0.5	Maluski et al., 2001		
11			磷灰石	裂变径迹	23	2			
12			黑云母	Ar-Ar	201	2			
13	E104°49'24";N22°32'26"	细粒片麻岩	磷灰石	裂变径迹	24	2			
14			磷灰石	裂变径迹	20	2			
15			黑云母	Ar-Ar	166	2			
16	E104°38'02";N22°44'39"	混合岩化片麻岩	磷灰石	裂变径迹	19	2			
17			黑云母	Ar-Ar	176	2			
18	Xin Man 东 5km	细粒正片麻岩	磷灰石	裂变径迹	19	2			
19			白云母	Ar-Ar	164	2			
20	Xin Man 东 5km	细粒正片麻岩	磷灰石	裂变径迹	19	2			
21	都龙	花岗质片麻岩	锆石	SHRIMP U-Pb	799	10	Yan Danping et al., 2005, 2006	上交点 下交点	
22			锆石	SHRIMP U-Pb	237	15			
23			锆石	SHRIMP U-Pb	412	12			
24		片麻质糜棱岩	黑云母	Ar-Ar	84	1			
25			白云母	Ar-Ar	144.3	1.7			
26			变余糜棱岩	锆石	SHRIMP U-Pb	408			9
27			白云母	Ar-Ar	140.1	1.7			
28			糜棱质角闪片岩	黑云母	Ar-Ar	115.9			2.5
29			斜长角闪岩质糜棱岩	角闪石	Ar-Ar	237.2			4.6
30	都龙锡多金属矿床	砂卡岩	锡石	TIMS U-Pb	80				
31	曼家寨	硫化物型矿石	锡石	TIMS U-Pb	79.8	3.2	Liu Yuping et al., 2007		
32	曼家寨	隐伏花岗斑岩	锆石	SHRIMP U-Pb	92.9	1.9			
33	铜街	花岗斑岩	锆石	SHRIMP U-Pb	86.9	1.4			
34	曼家寨	砂卡岩型矿石	黑云母	Ar-Ar	195.7	6.6	Liao Zhen, 2008		
35					179	5			
36	大丫口	石英脉	白云母	Ar-Ar	124.27	0.7	Xue et al., 2010		
37		伟晶岩	黑云母	Ar-Ar	123.78	0.78			
38		老城坡侵入体	黑云母	Ar-Ar	119.38	0.65			
39		扣哈侵入体	黑云母	Ar-Ar	64.4	0.45			
40		洒西花岗变晶岩	黑云母	Ar-Ar	103.2	0.54			
41	新寨锡矿床	新寨锡矿床	金云母	Ar-Ar	209.1	1.1	Feng Jiarui et al., 2010		
42	南秧田钨矿床	南秧田钨矿床	辉钼矿	Re-Os	209.1	3.3			
43				214.1	4.3				
44	瓦渣矿区	二云二长花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	83.3	1.5	Feng Jiarui et al., 2011		
45	花石头	石英脉	白云母	Ar-Ar	85		Liu Yuping et al., 2011; Tan Hongqi et al., 2011b		
46	洒西钨铍矿	砂卡岩	金云母	Ar-Ar	120				
47	南秧田	含矿金云透闪夕卡岩	金云母	Ar-Ar	118.14	0.69			
48	南温河	片麻质花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	442	6.3	Tan Hongqi et al., 2011a		
49				SHRIMP U-Pb	441.5	7.5			
50				TIMS U-Pb	410.3	3.5			
51				TIMS U-Pb	405.2	2.5			
52				推算	232	15			
53				推算	228	13			

续表 12

序号	样品位置	岩性	矿物	方法	年龄(Ma)		资料来源	备注
54	马关县箐脚矿区	花岗岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	96	2	Zhang Binhui et al., 2012	
55					843	9		
56					837	8		
57					415	5		
58					435	4		
59	南秧田	黑云二长岩	黑云母	Ar-Ar	111.5	0.7	Que Chaoyang et al., 2013	
60	南秧田	白云母钠长石伟晶岩 黑云闪长片麻岩 白云母钠长石伟晶岩 黑云斜长片麻岩	白钨矿	Sm-Nd	159	14	Li Jiankang et al., 2013	
61	保良街		白云母	Ar-Ar	141			
62	上阳坡		黑云母	Ar-Ar	112			
63			白云母	Ar-Ar	144			
64			黑云母	Ar-Ar	121			
65	老君山地区	花岗岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	93.9	2.0	Liu Yanbin et al., 2014	
66					88.9	1.1		
67	都龙锡锌曼家寨矿段	砂卡岩	锡石	LA-ICP-MS U-Pb	82.0		Wang Xiaojuan et al., 2014	
68					96.6			
69	自曼家寨矿区铜街尾矿库	眼球状花岗质片麻岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	409.5	2.1	Wang Dandan et al., 2015	
70	金竹山东北	条带状花岗质片麻岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	407.7	1.5		
71	新保寨附近东南	花岗质片麻岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	413	2.6		
72	方向冲沟	二云片岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	412.7	1.9		
73	为田坝心到堡良街桥边	花岗质片麻岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	416.8	3.5		
74	南汀河发电厂附近	条痕状花岗片麻岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	412.4	1.9		
75	老城坡	片麻状花岗岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	415.4	5.2	Pan Jinbo et al., 2015	
76	22°21.405'N, 104°29.245'E	含黑云石榴十字 云母片岩	独居石	U-Th-Pb	246	10	Faure et al., 2014	

层,开始第三次缓慢冷却直至出露地表,冷却速率为 $2.5^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 。因此,本文获得锆石 TIMS U-Pb 年龄 236Ma ,代表了老君山地区印支期变质-变形的峰期年龄,此时记录温度和压力为 633°C 、 0.8GPa ;猛洞岩群记录四期降温冷却过程,而本文获得金红石 TIMS U-Pb 年龄 170Ma ,代表了老君山地区伸展-剪切作用,变质核杂岩基本形成阶段。

6.3 对华南西段构造演化的指示作用

中晚三叠世($245\sim 225\text{Ma}$)华南印支构造事件,主要表现为近东西向褶皱和冲断-推覆构造以及 NE-NNE 向左旋走滑韧性剪切,其动力与华南-华北板块沿秦岭-大别造山带的陆陆碰撞和华南地块南缘古特提斯的俯冲增生作用有关(Xu Xianbing et al., 2009; Zhang Yueqiao et al., 2009)。Mao Jianren et al. (2014) 提出印支期多板块汇聚与伸展,包括 Sibumasu 地块与印支-华南陆块的碰撞($258\sim 243\text{Ma}$)太平洋板块向西运动($253\sim 239\text{Ma}$)、华北与华南陆块碰撞($236\sim 230\text{Ma}$)。此时,在 SongChay-老君山地区,大致沿南温河花岗岩与猛洞岩群之间岩性界面为主界面,发生由南而北的逆冲推覆,地壳快速增厚-岩石增温而发生变质-变形作用;猛洞岩群继加里东期之后又一次遭受变形-变质,最高变质程度达低角闪岩相($\sim 633^{\circ}\text{C}$,

0.8GPa),约 235Ma 达到变质-变形峰期阶段。区域收缩挤压之后,地壳松弛,南温河-都龙地区形成伸展环境,使地壳深部岩石上下盘互相拆离,形成糜棱岩化剪切带,发育环状剥离断层,相伴出现韧性剪切带、褶皱层、无根褶皱、石香肠、皱纹线理,变质核杂岩从剥离断层下拱露出来。上元古界、下元古界以 $D_{n+1}S_n$ 面理为变形面,形成顺层掩卧褶皱,出现 $D_{n+2}S_n$ 面理,并强烈置换 $D_{n+1}S_n$,糜棱岩中出现糜棱面理,剪切运动方向指向 NNE,表明在 NW-SE 向伸展构造体制下形成的。

中生代以来,华南地区存在大规模的岩石圈伸展作用(Hu Ruizhong et al., 2007)。Peng Jiantang et al. (2008)将华南中生代岩石圈伸展、地壳拉张事件划分为七期: $180\sim 170\text{Ma}$ 、 $160\sim 150\text{Ma}$ 、 $145\sim 135\text{Ma}$ 、 $125\sim 115\text{Ma}$ 、 $110\sim 100\text{Ma}$ 、 $95\sim 85\text{Ma}$ 、 $75\sim 70\text{Ma}$ 。一般认为与俯冲到大陆岩石圈之下的大洋岩石圈断离或密度增加的大陆下地壳拆沉有关(Zhang Qi et al., 2006; Li Zhengxiang et al., 2007)。华南地区中生代构造动力体制经历了从特提斯构造域向滨太平洋构造域的转换(Zhang Yueqiao et al., 2012),且中侏罗世岩浆活动($170\sim 175\text{Ma}$)可能预示了古太平洋洋壳开始向华南大陆俯冲的观点。Mao Jianren et al. (2014)认为, $175\sim$

150 Ma 是古太平洋板块斜向俯冲构造占主导的陆内造山体系。华南中生代处于挤压和伸展交替的构造背景下,以长期的伸展和短期的挤压为特色。Zhang Yueqiao et al. (2009)通过系统编图和叠加褶皱构造分析认识到近东西向褶皱是对印支早期华南地块南北缘碰撞造山事件和俯冲增生事件的远程效应,NE—NNE 向褶皱则起源于燕山早期(165~175Ma)古太平洋板块向华南大陆之下低角度俯冲作用。在这一宏观背景下,造山带发生坍塌,进入第一次伸展—减薄阶段,原主推覆断层转化为主剥离断层,并大致沿区域地层系中的若干个不整合面(如新寨岩组/猛洞岩群)发育次级剥离断层,发育快速减薄—降温,据 Liu Yuping et al. (2007)估算猛洞岩群减薄程度达 1Km 以上。本区呈现中心向周边的伸展—剪切作用(Xu Wei, 2007),暗示老君山穹窿已在这一时期开始隆升。160~120Ma,本区地壳总体上进入伸展之后的调整—收缩阶段,发生第二次慢速冷却。~120Ma,燕山晚期老君山花岗岩幕式侵位,本区地壳由于岩浆的热垫托而发生抬升,核杂岩大致沿原剥离断层系,在约 85Ma 之后发生第二次快速抬升—减薄—冷却(Liu Yuping et al., 2007; An Baohua, 1990; Feng Jiarui et al., 2010)。燕山晚期花岗岩幕式侵入,使浅变质的盖层形成了一系列的脆性正断层,并使印支期形成的一些剪切断裂发生活化,于 80Ma 左右都龙—SongChay 变质穹窿体发生 NNW—SSE 向伸展(Yan Danping et al., 2005)。

综上所述,本文中获得的斜长角闪片麻岩 TIMS U—Pb 年龄为 236Ma,记录了古特提斯多岛洋关闭或古太平洋消减有关的陆内造山作用在本区的响应,是地壳发生增厚增温所记录的变质—变形峰期时间;获得的斜长角闪片麻岩金红石 U—Pb 年龄 170Ma,代表老君山地区变质核杂岩的快速隆升期,是华南中生代岩石圈伸展作用在本区的响应。

7 结论

(1)猛洞岩群宏观构造发育同构造分泌结晶脉、顺层褶皱、透镜体等,微观构造发育云母鱼构造、云母膝折构造、石英矩形条带、云母多期交切等现象。定向标本中云母的显微组构统计方位为北西—南东、北东—南西向、近南北向、北西—南东(近东西向)。上述证据表明,猛洞岩群经历了多期变质—变形作用,其中主期变质—变形作用控制了变质杂岩系的宏观构造格架,主应力(σ_1)为南东—北西向挤

压,近南北向、近东西向挤压可能为与上述主应变相匹配的次级应变方向;此外,南北向挤压可能是由燕山期老君山岩体侵位引起的。

(2)石榴云母片岩矿物化学特征研究表明,石榴石核部和幔部富 Mn,边缘呈锯齿型,轻重稀土分馏不明显,重稀土富集,轻稀土分馏程度大于重稀土,与石榴石边部接触的黑云母[Fe/(Fe+Mg)]从边部—核部逐步升高,证实石榴石与黑云母发生 Fe—Mg 交换,利用石榴石—黑云母温度计计算温度变化范围为 404~464℃(平均 429℃),变质程度为低绿片岩相。

(3)电气云母片麻岩矿物化学特征研究表明,电气石主要富 Mg、Al、Fe,属于镁电气石—铁电气石,图解判别表明原岩是贫 Ca 的且含 Al 饱和矿物的泥质岩类。其稀土配分图解表明,重稀土分馏明显,轻稀土较为富集,轻稀土分馏程度明显大于重稀土,反映了其受矿物共生组合和围岩环境的强烈控制。电气石与黑云母之间也存在 Fe—Mg 交换,利用黑云母—电气石温度计计算的温度变化范围为 515~582℃(平均 546℃),变质程度为高绿片岩相。

(4)本文中片岩、片麻岩及斜长角闪岩类温压计记录了不同构造层次的峰期温压条件,构成不同的变质相:低绿片岩相→高绿片岩相→低角闪岩相→高角闪岩相。结合区域地质背景,认为该区印支期经历了由南向北的强烈的推覆剪切作用;印支期后伴随老君山的隆升,伸展剥蚀速率加快。

(5)斜长角闪片麻岩中的榍石与金红石 TIMS U—Pb 同位素年代学分别为 236.8Ma 和 169.4Ma,代表老君山地区印支期构造—热事件的峰期年龄和燕山早期的伸展—剪切活动年龄。印支期是猛洞岩群变质—变形的主构造期(236Ma),与古特提斯多岛洋关闭或古太平洋消减有关的陆内造山作用在华南西段响应的结果;约 170Ma 为岩石圈伸展—减薄过程的在华南西端的响应。结合区域上文山—麻栗坡 NE 方向广泛发育飞来峰及异地岩,可能指示包括猛洞岩群在内的前印支期地层也是一套印支期从越南北部推覆而至的外来岩体。

致谢:本文在硕士论文的基础上修改完成,野外采样工作得到中国科学院地球化学研究所何德峰博士的帮助,电子探针得到长安大学刘明武教授的指导,金红石和榍石的 U—Pb 由天津地质矿产研究所分析测试实验室完成。审稿专家提出的宝贵意见,对完善本文有至关重要的作用;同时得到编辑老师的热情帮助。对上述提供帮助的单位和个人一并表

示感谢!

注 释

- ① 云南省地矿局第二区域测量大队. 1976. 中华人民共和国区域地质报告(1:20万)马关幅.
- ② 云南省地质矿产勘查开发局区域地质调查大队. 1999. 中华人民共和国地质图及说明书(1:5万)老君山幅、麻栗坡县幅.

References

- An Baohua. 1990. Discussions on the characteristics, genesis and exploration significance of the Laojunshan granites. *Geology of Ore Deposits in Southwest China*, 4(1): 30~35 (in Chinese without English abstract).
- An Linji. 1987. The Genesis of Polycrystalline Quartz Ribbons in the Honghe Mylonite Zone. *Geological Review*, 33(1): 22~28 (in Chinese with English abstract).
- Bakken B M, Hochella M F, Marshall J F. 1989. High-resolution microscopy of gold in unoxidized ore from the Carlin mine, Nevada. *Economic Geology*, 84(1): 171~179.
- Bell T H, Johnson S E. 1989. Porphyroblast inclusion trails; the key to orogenesis. *Journal of Metamorphic Geology*, 9: 619~640.
- Buick I S, Roland M, Roger G. 2001. Precise U-Pb titanite age constrain on the emplacement of the Bushveld Complex, South Africa. *Geological Society London Special Publications*, 158: 3~6.
- Chen Xueming, Lin Zong, Xie Fuchang. 1998. Geological and geochemical characteristic of the Bainiuchang superlarge silver polymetallic deposit of superimposed. *Scientia Geologica Sinica*, 33(1): 115~124 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Xie Guiqing, Cheng Maohong, Yang Zongxi. 2009. Zircon U-Pb dating of granites in Gejiu superlarge tin polymetallic orefield and its significance. *Mineral Deposits*, 28(3): 297~312 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Chen Xiaolin, Li Wei. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Bozhushan granite in southeastern Yunnan Province and its significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 869~878 (in Chinese with English abstract).
- Colopietro M R, Friberg L M. 1987. Tourmaline-biotite as a potential geothermometer for metapelites, Black Hills, South Dakota. *Geol. Soc. America, Ann Mtg, Abstracts with programs*, 624.
- Dong Yunpeng, Zhu Binquan. 1999. Island-arc pillow lavas in Jianshui, Southeast Yunnan and constrain in South China paleotethy. *Chinese Science Bulletin*, 44(21): 2323~2328 (in Chinese without English abstract).
- Dong Yunpeng, Zhu Binquan, Chang Xiangyang, Zhang Guowei. 2002. Geochemistry of basalts from north of the Shizong-Mile belt, eastern Yunnan province: constraints on the tectonic framework of the south China continent. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 37~46 (in Chinese with English abstract).
- Faure M, Lepvrier C, Nguyen V V, Vu T V, Lin W, Chen Z C. 2014. The south china block-indochina collision: where, when, and how. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 260~274.
- Feng Jiarui, Mao Jingwen, Pei Rongfu, Zhou Zhenghua, Yang Zongxi. 2010. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Laojunshan granite intrusion from the Wazha tungsten deposit, Yunnan Province and their implications for petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 845~857 (in Chinese with English abstract).
- Feng Jiarui, Mao Jingwen, Pei Rongfu, Li Chao. 2011. A tentative discussion on Indosinian ore-forming events in Laojunshan area of southeastern Yunnan: A case study of Xinzhai tin deposit and Nanyangtian tungsten deposit. *Mineral Deposit*, 30(1): 57~73 (in Chinese with English abstract).
- Feng Qinglai, Liu Benpei. 2002. Early Permian Radiolarians from Babu Ophiolitic Melange in Southeastern Yunnan. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 27(1): 1~3 (in Chinese with English abstract).
- Gao Pingxian. 1997. Some Problems in the studies of porphyroblast inclusion trails. *Progress in Precambrian Research*, 20(4): 55~63 (in Chinese with English abstract).
- Grice J D, Ereit T S. 1993. Ordering of Fe and Mg in the tourmaline crystal structure; The correct formula. *Neues jahrbuch fur Mineralogy Abhandlung*, 165(3): 245~266.
- Guo Ligu. 2006. Primary research on geochemistry and geochronology of the Laojunshan metamorphic core complex, Southeastern Yunnan. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1~126 (in Chinese with English abstract).
- Guo Ligu, Liu Yuping, Li Chaoyang, Xu Wei, Ye Lin. 2009. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and lithochemistry of Caledonian Granites from the Laojunshan area, Southeastern Yunnan province, China: Implications for the collision between the Yangtze and Cathaysia blocks. *Geochemical Journal*, (43): 101~122.
- He Defeng, Zhong Hong, Zhu Weiguang. 2008. Application of the Garnet-Biotite Geothermometer in the LaLa Copper Deposit, Sichuan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(2): 127~134 (in Chinese with English abstract).
- Henry D J, Dutrow B L. 1996. Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. In: Grew E S, Anovitz L M, ed. *Boron: Mineralogy, Petrology, and Geochemistry. Review in Mineralogy*, 33: 503~557.
- Henry D J, Guidotti C V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: An example from the sauroliite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, 70(1~2): 1~15.
- Hirdes W, Davis D W. 2002. U-Pb Geochronology of Paleoproterozoic Rocks in the Southern Part of the Kedougou-Ke'nie'ba Inlier, Senegal, West Africa: Evidence for Diachronous Accretionary Development of the Eburnean Province. *Precambrian Research*, 118(1~2): 83~99.
- Holdaway M J. 2000. Application of new experimental and garnet

- mar gules data to the garnet-biotite geothermometer. *American Mineralogist*, 85, 881~892.
- Hu Da, Ren Shenglian, Song Chuazhong, Li Jiahao, Zhang Yan, Lin Shoufa, Li Longming, Huang Peng, Liu Guoting. 2015. Metamorphic-Deformation of Mengdong Group-Complex and Its Tectonic Implication, Southeastern Yunnan Province. *Geological Review*, 61(5): 1079~1088 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ling. 1998. An introduction to microstructural geology. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese without English abstract)
- Hui Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, Liu Shen, Zhong Hong, Zhao Junhong, Jiang Guohao. 2007. Some problems concerning relation between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China. *Mineral Deposits*, 26(2): 139~152 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong, Yu Jiming, Ni Pei, Ling Hongfei. 2000. Tourmaline—A Sensitive Tracer for Petrogenesis and Minerogenesis. *Geological Review*, 16(6): 594~604 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong. 1998. Stable and radiogenic isotope studies of tourmaline: An overview. *Journal of the Czech Geological Society*, 43(1-2): 75~90.
- Kohn M J, Spear F S. 2000. Retrograde net transfer reaction insurance for pressure-temperature estimates. *Geology*, 28: 1127~1130.
- Li Dongxu, Xu Shunshan. 2000. Rotation-shearing genesis of Metamorphic Core Complex - Structural analysis of Metamorphic Core Complex in Laojunshan, Southeastern Yunnan Province. *Geological Review*, 46(2): 113~119 (in Chinese with English abstract)
- Li Jiankang, Wang Denghong, Li Huaqin, Chen Zhenghui, Mei YuPing. 2013. Late Jurassic-Early Cretaceous mineralization in the Laojunshan ore concentration area, Yunnan province. *Earth Science*, 38(5): 1023~1036 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinwen, Pei Rongfu, Wang Yonglei, She Hongquan, Feng Chengyou, Guo Zhijun, Wang Haolin, Xu Ke. 2013. Isotopic chronological studies of Dulong tin-zinc deposit in Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 32(4): 767~782 (in Chinese with English abstract).
- Li Qiuli, Li Shuguang, Zheng Yongfei, Li Huimin, Massonne H J, Wang Qingchen. 2003. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central china; A new constrain on the cooling history. *Chemical geology*, 200(3~4): 255~265.
- Li Sanzhong, Yang Zhensheng. 1998. Advance of microstructural application about porphyroblast inclusion trails. *Advance in Earth Sciences*, 13(1): 51~57 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengxiang, Li Xianhua. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and post-orogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179~182.
- Liang Xiao, Wang Genhou, Yang Guangquan. 2009. Genesis and deformation of quartz veins in the Lower Paleozoic tectonic schists along the bank of Lancang River, Jinggu area, western Yunnan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1342~1349 (in Chinese with English abstract).
- Liao Zhen. 2008. Mineralogy and Geochronology of the Dulong Tin-Zinc Ploymetallic Deposit, Southeastern Yunnan Province, China. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1~85 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junlai. 2004. Microstructures of deformed rocks and rheology of the lithosphere. *Geological Bulletin of China*, 23(9~10): 980~985 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruixun. 2002. A Review of Microstructural Geology in China. *Geological Review*, 48(2): 178~181 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanbin, Mo Xuanxue, Zhang Da, Que Chaoyang, Di Yongjun, Pu Xingming, Cheng Guoshun, Ma Huihui. 2014. Petrogenesis of the Late Cretaceous granite discovered in the Laojunshan region, southeastern Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3271~3286 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Ye Lin, Li Chaoyang, Hu Ruizhong. 2003. Laojunshan-Song chay metamorphic core complex and its structure significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement*: A259.
- Liu Yuping, Li Chaoyang, Ye Lin, Pi Daohui, Guo Ligu. 2004. Metallogenic characteristics and prospecting direction of Laojunshan metamorphic core complex in Southeastern Yunnan province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25(S1): 130 (in Chinese without English abstract).
- Liu Yuping, Ye Lin, Li Chaoyang, Song Biao, Li Tiesheng, Guo Ligu, Pi Daohui. 2006. Discovery of the Neoproterozoic magmatics in southeastern Yunnan; Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and litho geochemistry. *Acta petrologica sinica*, 22(4): 916~926 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Xu Wei, Liao Zhen, Ye Lin, Guo Ligu, Li Chaoyang. 2007. Thermal history analytical and dynamics mechanism discussed of the Laojunshan metamorphic core complex uplift. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(S1): 87~88 (in Chinese without English abstract).
- Liu Yuping, Li Zhengxiang, Ye Lin, Tan Hongqi, Li Chaoyang. 2011. Ar-Ar Geochronology of Tungsten mineralization in the Laojunshan Ore concentration area, Yunnan province. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 617~618 (in Chinese without English abstract).
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit—A geochemical toolkit for Microsoft excel. *Geochimica*, 33(5): 459~464 (in Chinese with English abstract).
- Lv Wei, Feng Minggang, Hu Changshou. 2001. Metamorphism of Mengdong lithological Group in Nanwenhe area of southeast

- Yunnan. *Yunnan Geological*, 20(1): 25~33 (in Chinese with English abstract).
- Maluski H, Lepvrier C, Jolivet L, Carter A, Roques D, Beyssac O, Tang T T, Thang N D, Avigad D. 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in Northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19: 233~248.
- Ma Wenpu. 1998. Turkeic orogenic belt of ophiolite in Babu. *Chinese science bulletin*, 43(13): 1363~1365 (in Chinese without English abstract)
- Mao Jianren, Li Zilong, Ye Haimin. 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect. *Science China: Earth Sciences*, 57: 2853~2877.
- Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Deng Jun, Li Hao, Zheng Kuanbin. 2005. Tectonic palaeogeographic changes resulting from the Caledonian movement and the formation of the Dianqiangui Basin; Discussion on the deep exploration potential of oil and gas in the Dianqiangui Basin. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 227~236 (in Chinese with English abstract).
- Pan Jinbo, Zhang Da, Que Chaoyang, Di Yongjun, Huang Kongwen, Bi Mingfeng and Xu Jianzhen. 2015. Geochemistry and Zircon U-Pb Chronology of the Laochengpo Gneissic Granite in the Southeast Yunnan Area and their Implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 795~803 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Yuan Shunda, Bi Xianwu, Shen Nengping. 2008. The Time ranges of granitoid emplacement and related nonferrous metallic mineralization in Southern Hunan. *Geological Review*, 54(5): 617~625 (in Chinese with English summary).
- Qi Liang, Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards Newslett*, 24: 51~63.
- Qin Jianhua, Wu Yinglin, Yan Yangji, Zhu Zhongfa. 1996. Hercynian-Indosinian sedimentary-tectonic evolution of the Nanpanjiang Basin. *Acta Geological Sinica*, 70(2): 99~107 (in Chinese with English abstract).
- Que Chaoyang, Zhang Da, Di Yongjun, Xu Jianzhen, Wang seng, Bi Mingfeng, Huang Kongwen. 2013. Ar-Ar isotope dating of biotite from Nanwenhe tungsten deposit in the Malipo County, southeastern Yunnan, and its implication. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 607~608 (in Chinese without English abstract).
- Roger F, Leloup P H, Jolivet M., Lacassin R., Trinh P T, Brunel M, Seward D. 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics*, 321: 449~466.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts; implications for mantle composition and process. In: Saunders A. D. and Norry M. J. (eds), *Magmatism in ocean basins*. *Geol. Soc. London. Spec. Publ.*, 42: 313~345.
- Sun Yan, Lu Xiancai, Zhang Xihui, Liu Hao, Liu Aiming. 2008. Nano-texture of penetrative foliation in metamorphic rocks. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 51(12): 1750~1758.
- Tan Hongqi. 2010. *Metamorphism-Deformation and Geochemistry of the Mengdong Group-Complex, Southeastern Yunnan, China*. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1~86 (in Chinese with English summary).
- Tan Hongqi, Liu Yuping, Xu Wei, Guo Liguang, Ye Lin, Li Chaoyang. 2011a. A study on SHRIMP and TIMS Zircon Dating on Low to Medium Grade Ortho-metamorphic Rocks; example on the Nanwenhe Granites, Southeastern Yunnan Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(1): 62~69 (in Chinese with English abstract).
- Tan Hongqi, Liu Yuping, Xu Wei, Guo Liguang, Ye Lin, Li Chaoyang. 2011b. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Phlogopite from W-Sn deposits in the Nanyangtian, southeastern Yunnan, and its implication. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S): 639~640 (in Chinese without English abstract).
- Taran A, Bemard A, Gavilanes J, Africano F. 2000. Native gold in mineral precipitates from high-temperature volcanic gases of Colima volcano, Mexico. *Applied Geochemistry*, 15: 337~346.
- Wang Dandan, Li Baolong, Zhu Dequan, Zhang Chenggong, Zhang Xuecheng. 2015. Zircon U-Pb Geochronology of Metamorphic Complex in the Laojunshan District, Southeastern Yunnan Province and its tectonic implication. *Acta Geological Sinica*, 89(10): 1718~1734 (in Chinese with English abstract).
- Wang Genhou. 2006. *Structural characteristics and emplacement mechanism of tanitawen Mt. Range Metamorphic Complex in the Eastern Margin of Tibet plateau*. Doctor Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 1~115 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Yu Honglin. 2002. Study on Garnet ring EPMA. *J. Chin. Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 21(5): 769~770 (in Chinese without English abstract).
- Wang Xiaojuan, Liu Yuping, Miao Yingli, Bao Tan, Ye Lin, Zhang Qian. 2014. In-situ LA-MC-ICP-MS cassiterite U-Pb dating of Dulong Sn-Zn polymetallic deposit and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 867~876 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chunming, Geng Yuansheng. 2001. Some research advances on detailed metamorphic process in the last five years. *Advance in Earth Sciences*, 16(6): 785~794 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chunming, Cheng Benhe. 2006. Valid garnet-biotite (GB) geothermometry and garnet-aluminum silicate-plagioclase-quartz (GASP) geo-barometry in metapelitic rocks. *Lithos*, 89: 1~23.
- Wu Chunming, Xiao Lingling, Ni Shanqin. 2007. Main geothermometers and geobarometers in metapelites. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 144~150 (in Chinese with English abstract).

- Wu Genyao, Wu Haoruo, Zhong Dalai, Kuang Guodun, Ji Jianqing. 2000. Volcanic rocks of paleotethyan oceanic island and island-arc bordering Yunnan and Guangxi, China. *Geoscience*, 14(4): 393~400(in Chinese with English abstract).
- Wu Genyao. 2001. Indosinian foreland and fold—thrust belt bordering Yunnan and Guangxi, China. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 64~71(in Chinese with English abstract).
- Wu Haoruo. 2000. Reinterpretation Kwangsian Orogeny. *Chinese Science Bulletin*, 45(5): 555~558(in Chinese without English abstract).
- Xiang Hua, Zhang Li, Zhong Zhengqiu, Zhou Hanwen and Zeng Wen. 2007. Titanite; U-Pb dating and applications on defining P-T-t path of metamorphic rocks. *Advance in Earth Sciences*, 22(12): 58~66(in Chinese with English abstract).
- Xie Jing, Chang Xiangyang, Zhu Binqun. Geochemical Characteristics of Permian Volcanic Rocks from Jianshui, Southeast Yunnan and their Tectonic Implication. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 23(3): 349~356(in Chinese with English abstract).
- Xu Wei. 2007. Primary research on geochronology and geochemistry of Nanwenhe granite, Southeast Yunnan. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1~72(in Chinese with English abstract).
- Xu Wei, Liu Yuping, Guo Liguang, Ye Lin, Pi Daohui, Liao Zhen. 2008. Geochemistry and tectonic setting of the Babu ophiolite, southeast Yunnan. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(1): 6~14(in Chinese with English abstract).
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, Shu Liangshu, Wang Ruirui. 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China. *Geology in China*, 36(3): 573~593(in Chinese with English abstract).
- Xue G, Marshall D, Zhang S, Ullrich T D, Bishop T, Groat L A, Thorkelson D J, Giuliani G, Fallick A E. 2010. Conditions for early Cretaceous Emerald Formation at Dyakou, China; Fluid inclusion Ar-Ar, and stable isotope studies. *Economic Geology*, 105, 339~349.
- Yan Danping, Zhou Meifu, Wang Yan, Wang Changliang, Zhao Taiping. 2005. Structural styles and chronological evidences from Dulong-Song Chay tectonic dome: Earlier spreading of South China sea basin due to Late Mesozoic to Early Cenozoic extension of South China block. *Earth Science*, 30(4): 402~412(in Chinese with English abstract).
- Yan Danping, Zhou Meifu, Wang Yan. 2006. Structural and geochronological constraints on the Dulong-Song Chay tectonic dome in SE Yunnan (SW China) and northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4): 332~353.
- Yang Fan, Song Chuanzhong, Ren Shenglian, Li Jiahao, Liu Huan, Huang Peng, Wang Wei. 2015. Metamorphism and deformation of the Lushan Metamorphic Core Complex and their tectonic significance. *Geological Review*, 61(4): 752~766(in Chinese with English abstract).
- You Zhengdong. 1996. Prophyroblast inclusion microstructures: A new way to interpret metamorphic deformation history. *Geological Science and Technology Information*, 15(4): 45~50(in Chinese with English abstract).
- Yuan Jihai, Sun Dongyang, Zhao Linghao, Fan Chengzi, Hu Mingyue, Zhan Xiuchun. 2016. In-situ U-Pb dating of titanite by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS). *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 2059~2069. (in Chinese with English abstract).
- Yuan Renmao, Zhang Bingliang, Xu Xiwei, Lin Chuanyong, Shi Lanbin, Li Xiao. 2014. Features and genesis of micronanometer-sized grains on shear slip surface of the 2008 Wenchuan earthquake. *Science China: Earth Sciences*, 57: 1961~1971(in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhigang, Li Chaoyang, Liu Yuping, Tu Guangzhi. 1998. Reevaluation of Scheelite of two Genetic types from Nanyangtian, Southeastern Yunnan. *Geology-Geochemistry*, 26(2): 34~38(in Chinese with English abstract).
- Zhang Binhui, Ding Jun, Zhang Linkui, Chen Minhua, Wang Peng, Dai Jie. 2011. Contact relationships between “Xinzhai Formation-complex” and metamorphic granitic Rocks in southeastern Yunnan and their geological significances. *Geological Review*, 57(3): 316~326(in Chinese with English abstract).
- Zhang Binhui, Ding Jun, Reng Guangming, Zhang Linkui, Shi Hongzhao. 2012. Geochronology and geochemical characteristics of the Laojunshan granites in Maguan County, Yunnan Province, and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 86(4): 587~601(in Chinese with English abstract).
- Zhang Binhui, Ding Jun, Zhang Linkui, Zhang Bin, Chen Minghua. 2013. SHRIMP zircon U-Pb chronology of the Babu Ophiolite in Southeastern Yunnan province. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1~12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Wang Yuanlong, Li Chengdong, Wang Yan, Jia Xiuqin. 2006. A model of delamination of continental lower crust. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 265~276(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shitao, Feng Minggang, Lu Wei. 1998. Analysis of the Nanwenhe Metamorphic Core Complex in southeastern Yunnan. *Regional Geology of China*, 17(4): 390~397(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xinyu, Ji Jianqing, Han Baofu, Chen Jianjun, Yu Shaoli. 2006. Research advances in erosion, rheology of the lower crust and orogeny. *Advances in earth science*, 21(5): 521~531(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(3): 257~279(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yadong. 1985. Rock finite strain measurement and ductile shear zone. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese without English abstract).

- Zhong Dalai, Wu Genyao, Ji Jianqing, Zhang Qi, Ding Lin. 1998. Discovery of ophiolite in southeast Yunnan China. Chinese Science Bulletin, 43(13):1365~1370 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Yufang, Ma Changqian. 2006. A review of geochronology of U-bearing accessory mineral. Advance in earth science, 21(4): 372~382 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Hongying and Li Huiming. 2008. The improvement of the rutile isotope dilution U-Pb dating methodology. Acta Petrologica ET Mineralogica, 27(1): 77~80 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Hongying, Li Huaikun, Cui Yurong, Geng Jianzhen, Zhang Jian, Li Huimin. 2013. Rutile U-Pb isotopic dating methodology. Acta Geologica Sinica, 87(9): 1439~1446 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiwen, Wei Chunjing. 2005. Denotative significance of in-situ composition of garnet and biotite in the high-temperature metamorphic politic rocks. Progress in Natural Science, 15(11):1389~1395 (in Chinese without English abstract).
- ### 参 考 文 献
- 安保华. 1990. 老君山岩体特征、成因及其找矿意义探讨. 西南矿产地质, 4(1):30~35
- 安琳吉. 1987. 试论红河糜棱岩带中多晶石英条带的成因. 地质论评, 33(1):22~28.
- 陈学明, 林棕, 谢福昌. 1998. 云南白牛厂超大型银多金属矿床叠加成矿的地质地化特征. 地质科学, 33(1):115~124.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 陈懋弘, 杨宗喜. 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义. 矿床地质, 28(3): 297~312.
- 程彦博, 毛景文, 陈小林, 李伟. 2010. 滇东南薄竹山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 吉林大学学报(地球科学报), 40(4):869~878.
- 董云鹏, 朱炳泉. 1999. 滇东南建水岛弧型枕状熔岩及其华南古特提斯的制约. 科学通报, 44(21):2323~2328.
- 董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 张国伟. 2002. 滇东师宗—弥勒带北段基性火山岩地球化学及其对华南大陆构造格局的制约. 岩石学报, 18(1):37~46.
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 周振华, 杨宗喜. 2010. 云南瓦渣钨矿区老君山花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因探讨. 岩石学报, 26(3):845~857.
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 李超. 2011. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探. 矿床地质, 30(1):57~73.
- 冯庆来, 刘本培. 2002. 滇东南八布蛇绿混杂岩中的早二叠世放射虫化石. 地球科学——中国地质大学学报, 27(1):1~3.
- 高坪仙. 1997. 变斑晶包体形迹研究的几个问题. 前寒武纪研究进展, 20(4):55~63.
- 郭利果. 2006. 滇东南老君山变质核杂岩地球化学和年代学初步研究. 硕士学位论文. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 1~126.
- 何德峰, 钟宏, 朱维光. 2008. 石榴石—黑云母温度计在四川拉拉铜矿床的应用. 矿物学报, 26(2):127~134.
- 胡达, 任升莲, 宋传中, 李加好, 张妍, 林寿发, 李龙明, 黄鹏, 刘国厅. 2015. 东秦岭陶湾岩群碳酸盐质糜棱岩的变质—变形特征及形成环境分析. 地质论评, 61(5):1079~1088.
- 胡玲. 1998. 显微构造地质学概论. 北京:地质出版社.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘燊, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题. 矿床地质, 26(2):139~152.
- 蒋少涌, 于际民, 倪培, 凌洪飞. 2000. 电气石——成岩成矿作用的灵敏示踪剂. 地质论评, 16(6):594~604.
- 李东旭, 许顺山. 2000. 变质核杂岩的旋扭成因——滇东南老君山变质岩的构造解析. 地质论评, 46(2):113~119.
- 李健康, 王登红, 李华芹, 陈郑辉, 梅玉萍. 2013. 云南老君山矿集区的晚侏罗世—早白垩世成矿事件. 地球科学, 38(5):1023~1036.
- 李进文, 裴荣富, 王永磊, 余宏全, 丰成友, 郭志军, 王浩琳, 徐可. 2013. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究. 矿床地质, 32(4): 767~782.
- 李三忠, 杨振升. 1998. 变斑晶内显微构造应用研究进展. 地球科学进展, 13(1):51~57.
- 梁晓, 王根厚, 杨广全. 2009. 滇西景谷地区澜沧江沿岸早古生代构造片岩中石英脉的成因与变形. 地质通报, 2009, 28(9):1342~1349.
- 廖震. 2008. 滇东南都龙锡锌多金属矿床的矿物学及年代学. 硕士学位论文. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 1~85.
- 刘俊来. 2004. 变形岩石的显微构造与岩石圈流变学. 地质通报, 23(9~10):980~985.
- 刘瑞珣. 2002. 中国显微构造地质学的回顾. 地质论评, 48(2):178~181.
- 刘艳宾, 莫宣学, 张达, 阙朝阳, 狄永军, 蒲兴明, 程国顺, 马慧慧. 2014. 滇东南老君山地区晚白垩世花岗岩的成因. 岩石学报, 30(11):3271~3286.
- 刘玉平, 李朝阳, 叶霖, 皮道会, 郭立果. 2004. 滇东南老君山变质核杂岩成矿特征及找矿方向. 矿物岩石地球化学通报, 25(S1):130.
- 刘玉平, 叶霖, 李朝阳, 宋彪, 李铁胜, 郭立果, 皮道会. 2006. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据. 岩石学报, 22(4):916~926.
- 刘玉平, 徐伟, 廖震, 叶霖, 郭利果, 李朝阳. 2007. 老君山变质核杂岩隆升的热历史解析与动力学机制探讨. 矿物岩石地球化学通报, 26(Z1):87~88.
- 刘玉平, 李正祥, 叶霖, 谭洪旗, 李朝阳. 2011. 滇东南老君山矿集区钨成矿作用 Ar-Ar 年代学. 矿物学报, 33(S1):617~618.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33(5):459~464.
- 吕伟, 冯明刚, 胡长寿. 2001. 滇东南南温河地区猛洞岩群变质作用特征. 云南地质, 20(1):25~33.
- 马文璞. 1998. 八布蛇绿岩突厥型造山带. 科学通报, 43(13):1363~1365.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造—岩浆活动研究: 现状与背景. 中国科学:地球科学, 44(12):2593~2617.
- 梅冥相, 马永生, 邓军, 李浩, 郑宽兵. 2005. 加里东运动构造古地理及滇黔桂盆地的形成——兼论滇黔桂盆地深层油气勘探潜力. 地质前缘, 12(3):227~235.

- 潘锦波,张达,阙朝阳,狄永军,黄孔文,毕珉烽,徐建珍. 2015. 滇东南老城坡片麻状花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其意义. 矿物岩石地球化学通报, 34(4):795~803.
- 彭建堂,胡瑞忠,袁顺达,毕献武,沈能平. 2008. 湘南中生代花岗岩质岩成岩成矿的时限. 地质论评, 54(5):617~625.
- 秦建华,吴应林,颜仰基,朱忠发. 1996. 南盘江盆地海西-印支期沉积构造演化. 地质学报, 70(2):99~107.
- 阙朝阳,张达,狄永军,徐建珍,王森,毕珉烽,黄孔文. 2013. 云南麻栗坡南温河钨矿床黑云母 Ar-Ar 同位素年龄及地质意义. 矿物学报, 33(S2):607~608.
- 孙岩,陆现彩, Xihui Zhang, 刘浩, Aiming Lin. 2009. 变质岩透入性面理的纳米结构研究. 中国科学 D 辑:地球科学, 39(8):1140~1147.
- 谭洪旗. 2010. 滇东南猛洞岩群变质-变形与地球化学研究. 硕士学位论文. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 1~86.
- 谭洪旗,刘玉平,徐伟,郭利果,叶霖,李朝阳. 2011a. 中-浅正变质岩锆石 SHRIMP 法与 TIMS 法测年结果不一致处理-以滇东南南温河花岗岩为例. 矿物学报, 31(1):62~69.
- 谭洪旗,刘玉平,叶霖,李朝阳. 2011b. 滇东南南秧田钨锡矿床金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及意义. 矿物学报, 31(S1):639~640.
- 王丹丹,李宝龙,朱德全,张承功,张学成. 2015. 滇东南老君山地区变质岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. 地质学报, 89(10):1718~1734.
- 王根厚. 2006. 藏东他念他翁链变质杂岩系变形特征及表露机制. 博士学位论文. 北京:中国地质大学, 1~115.
- 王微,于洪林. 2002. 石榴石环带 EPMA 研究. 电子显微学报, 21(5):769~770.
- 王小娟,刘玉平,缪应理,鲍谈,叶霖,张乾. 2014. 都龙锡锌多金属矿 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 测年及其意义. 岩石学报, 30(3):867~876.
- 吴春明,耿元生. 2001. 变质作用精细过程研究进展. 地球科学进展, 16(6):785~794.
- 吴春明,肖玲玲,倪善琴. 2007. 泥质变质岩系主要的矿物温度计与压力计. 地学前缘, 14(1):144~150.
- 吴根耀,吴浩若,钟大赉,邝国敦,季建清. 2000. 滇桂交界处古特提斯的洋岛和岛弧火山岩. 现代地质, 14(4):393~400.
- 吴根耀. 2001. 滇桂交界区印支期前陆褶皱冲断带. 地质科学, 36(1):64~71.
- 吴浩若. 2000. 重新解释广西运动. 科学通报, 45(5):555~558.
- 向华,张利,钟增球,周汉文,曾雯. 2007. 桐石:U-Pb 定年及变质 P-T-t 轨迹的建立. 地球科学进展, 22(12):58~66.
- 谢静,常向阳,朱炳泉. 2006. 滇东南建水二叠纪火山岩地球化学特征及其构造意义. 中国科学院研究生院学报, 23(3):349~356.
- 徐伟. 2007. 滇东南南温河花岗岩年代学和地球化学初步研究. 硕士学位论文. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 1~72.
- 徐伟,刘玉平,郭利果,叶霖,皮道会,廖震. 2008. 滇东南八布蛇绿岩地球化学特征及构造背景. 矿物学报, 28(1):6~14.
- 徐先兵,张岳桥,贾东,舒良树,王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程. 中国地质, 36(3):573~593.
- 颜丹平,周美夫,王焰,汪昌亮,赵太平. 2005. 都龙-Song Chay 变质穹隆体变形与构造年代——南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据. 地球科学, 30(4):402~412.
- 杨帆,宋传中,任升莲,李加好,刘欢,黄鹏,王微. 2015. 庐山变质核杂岩的变质变形及构造意义. 地质论评, 61(4):752~766.
- 游振东. 1996. 利用变斑晶中包裹物结构型式研究变质变形史的新方法. 地质科技情报, 15(4):45~50.
- 袁继海,孙冬阳,赵令浩,范晨子,胡明月,詹秀春. 2016. 桐石 LA-ICP-MS U-Pb 定年技术研究. 地质学报, 90(8):2059~2069.
- 袁仁茂,张秉良,徐锡伟,林传勇,史兰斌,李萧. 2014. 汶川地震剪切滑动面微-纳米级颗粒的特征、形成机制及地震意义. 中国科学:地球科学, 44:1821~1832.
- 曾志刚,李朝阳,刘玉平,涂光焱. 1998. 滇东南南秧田两种不同成因类型白钨矿的稀土元素地球化学特征. 地质地球化学, 26(2):34~38.
- 张斌辉,丁俊,张林奎,陈敏华,王鹏,戴婕. 2011. 滇东南“新寨岩组”与变质花岗质岩的接触关系及其地质意义. 地质论评, 57(3):316~326.
- 张斌辉,丁俊,任光明,张林奎,石洪召. 2012. 云南马关老君山花岗岩的年代学、地球化学特征及地质意义. 地质学报, 86(4):587~601.
- 张斌辉,丁俊,张林奎,张彬,陈敏华. 2013. 滇东南八布蛇绿岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究. 地质学报, 87(10):1~12.
- 张旗,金惟俊,王元龙,李承东,王焰,贾秀勤. 2006. 大陆下地壳拆沉模式初探. 岩石学报, 22(2):265~276.
- 张世涛,冯明刚,吕伟. 1998. 滇东南南温河变质核杂岩解析. 中国区域地质, 17(4):390~397.
- 张新钰,季建清,韩宝福,陈建军,余绍立. 2006. 地表剥蚀、下地壳流变与造山作用研究进展. 地球科学进展, 21(5):521~531.
- 张岳桥,董树文,李建华,崔建军,施玮,苏金宝,李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3):257~279.
- 郑亚东. 1985. 岩石有限应变测量与韧性剪切带. 北京:地质出版社.
- 钟大赉,吴根耀,季建清,张旗,丁林. 1998. 滇东南发现蛇绿岩. 科学通报, 43(13):1365~1370.
- 钟玉芳,马昌前. 2006. 含 U 副矿物的地质年代学研究综述. 地球科学进展, 21(4):372~382.
- 周红英,李惠民. 2008. 金红石 U-Pb 同位素稀释法定年技术的改进. 岩石矿物学杂志, 27(1):77~80.
- 周红英,李怀坤,崔玉荣,耿建珍,张健,李惠民. 2013. 金红石 U-Pb 同位素定年技术研究. 地质学报, 87(9):1439~1446.
- 周喜文,魏春景. 2005. 高温变泥质岩岩石中石榴石、黑云母微区成分的指示意义. 自然科学进展, 15(11):1389~1395.

Metamorphism and Deformation of the Mengdong Group-Complex in Southeastern Yunnan Province and their Tectonic Implications

TAN Hongqi^{1,2)}, LIU Yuping³⁾

1) *College of Earth Science, Chengdu university of technology, Chengdu 610059, Sichuan;*

2) *Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu 610041, Sichuan;*

3) *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*

Abstract

The Mengdong Group-Complex is a series of Precambrian metamorphic sedimentary and magmatic complex cropped out in the Laojunshan area, southeastern Yunnan Province. For its peculiar location, the Mengdong Group-Complex has the important scientific significance to understand the tectonics of SE Yunnan, and even of South China and Tethys. In order to probe the metamorphism and deformation characteristics, by means of microscale observation such as optical microscope, electron microscope and electron probe, etc., the characteristics of metamorphic-deformation have been studied in details. The results show that the macro styles of the Mengdong Group-Complex contain fold bedding, syntectonic secrete crystal veins, asymmetric shear lens, decollement sub-ductile structures, and the micro structures consist of mica fish, kink, quartz rectangular bank. Microscopic structure statistics data indicate that the Mengdong Group-Complex experienced the squeezing and stressing process in the directions of NE-SW, SE-NW, E-W and S-N, of which the result is similar to macro and micro structure. Meanwhile, the temperature of garnet-biotite mineral pairs in schist is 429°C in average and the pressure of the schist is 0.5 GPa. The temperature of tourmaline-biotite temperature in gneiss is 546°C in average, corresponding to typical assemblages of the high green schist-low amphibolites facies. The U-Pb dating of titanite and rutile mineral suggests that the major metamorphism and deformation events occurred around ca. 236Ma and 170Ma. The above evidence shows that the Mengdong Group-Complex has experienced many metamorphic-deformation, and the principal stress of metamorphic-deformation (SE-NW) controls macrostructure framework of metamorphic Group-Complex(236Ca.), but S-N and E-W may be the directions of the sub-strain matched with the principal stress and NE-SW may be another direction after main metamorphic-deformation and age is confined to 170Ma. On behalf of the Laojunshan dome of early Yanshanian extensional-shear activity. Combined with other geochronological data, the Mengdong Group-Complex had undergone successively the large-scale thrust events in early Indosinian, the extension-shearing events in later Indosinian and early Yanshanian, and the contact metamorphism in later Yanshanian. Based on the study above, it can be outlined that the dynamic background of these metamorphic-deformation events is the Indosinian event, which is controlled the main features of the Mengdong Group-Complex. Laojunshan uplift of the dome began to activate in 236Ma, in consistent with the time of Tethys closure and collision, and stretched to 170Ma, after collapse of dome. NE directions widely developed klippe and offsite rock in Indosinian Wenshan-Malipo imply that pre-Indosinian formation belongs to the Mengdong Group-Complex and should be a set of foreigner rocky Nappe from Northern Vietnam. Therefore, the above results provide evidence for the study of tectonic evolution in the west of South China.

Key words: Metamorphic-Deformation; Fabric; Temperature gauge; Chronology; Mengdong Group-Complex; Laojunshan; Southeastern Yunnan