

# 哀牢山西部晚古生代岛弧-弧后盆地系统

## ——来自基性岩地球化学和年代学的证据

徐文涛, 刘福来

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

**摘要:** 哀牢山缝合带是东南亚古特提斯构造域重要的缝合带之一, 带内广泛出露的晚古生代基性岩是研究其构造演化历史的关键, 但它们的岩石成因和形成环境存在较大的争议, 制约了人们对该地区古特提斯构造演化的理解。本文对哀牢山缝合带西部的基性侵入岩和基性火山岩进行了详细的野外地质调查、岩石学和地球化学研究, 并结合已有的年代学和地球化学数据结果综合分析, 目的在于查明它们的成因和形成环境, 为进一步探讨哀牢山缝合带构造演化提供制约。锆石 U-Pb 年龄数据显示, 五素和坝溜地区的基性火山岩形成于早二叠世(288~287 Ma), 而大龙凯和雅轩桥地区的基性侵入岩和火山岩则形成于中二叠世(272~265 Ma)。地球化学数据显示, 早期基性岩(早二叠世)稀土元素含量较高( $\Sigma\text{REE} = 59.75 \times 10^{-6} \sim 135.08 \times 10^{-6}$ ), 明显富集轻稀土元素(LREE/HREE = 2.64~3.32)和大离子亲石元素(Rb、Ba、Th等), 显著亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, 类似于岛弧岩浆岩, 高的 Ta/Yb(0.09~0.18)和 Ce/Yb(6.59~9.03)值表明其属于钙碱性系列; 晚期基性岩(中二叠世)具有较低的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE} = 28.77 \times 10^{-6} \sim 76.16 \times 10^{-6}$ ), 轻微富集轻稀土元素(LREE/HREE = 1.75~2.55), 相对早期基性岩更加富集 Rb、Ba, 亏损 Nb、Ta、Ti 等元素, 较低的 Ta/Yb(0.05~0.09)和 Ce/Yb(3.58~5.97)值表明其属于拉斑质系列。上述研究表明, 哀牢山缝合带西部的晚古生代基性岩具有由钙碱性系列向拉斑质系列演化的趋势, 结合相关区域地质资料, 认为哀牢山缝合带西部出露的基性侵入岩和火山岩记录了晚古生代与板片俯冲相关的多期演化过程: 早二叠世, 哀牢山支洋或弧后盆地向西发生洋-陆俯冲, 俯冲板片脱水并导致地幔楔岩石部分熔融, 在哀牢山西部五素-雅轩桥地区形成安第斯型陆缘弧; 中二叠世, 先存的大陆弧发生弧内伸展, 逐渐演变为新的弧后盆地, 形成类似于 MORB 和 IAT 的基性-超基性岩石组合。

**关键词:** 哀牢山西部; 晚古生代; 基性岩; 陆缘弧; 弧后盆地

**中图分类号:** P588.1; P581

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2020)04-0406-17

## The Late Paleozoic arc-back arc system in western Ailaoshan: Evidence from geochemistry and geochronology of basic rocks

XU Wen-tao and LIU Fu-lai

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The Ailaoshan suture (ALSS) is one of the important Paleo-Tethyan sutures in Southeast Asia, and the Late Paleozoic basic rocks in the ALSS are the key to reconstructing the Paleo-Tethyan evolution. However, the petrogenesis and tectonic environments of these basic rocks are controversial, and this controversy constrains researchers' understanding of the Paleo-Tethyan evolution. Based on field investigation, the authors studied petrological and geochemical characteristics and synthesized the geochronological and geochemical data of the Late Paleozoic basic rocks in the western part of the ALSS, with the purpose of investigating their petrogenesis and tectonic setting.

收稿日期: 2019-08-12; 接受日期: 2020-01-20; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91855206)

作者简介: 徐文涛(1990-), 男, 汉族, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: xuwentao@163.com。

and further providing insights into the ALSS evolution. Zircon U-Pb data suggest that the Wusu and Baliu basic rocks were formed in Early-Permian (288 ~ 287 Ma), and Dalongkai and Yaxuanqiao basic rocks were formed in Mid-Permian (272 ~ 265 Ma). The products of Early-Permian magmatism are calc-alkaline in composition, and they have island-arc basalt (IAB)-like geochemical features with high rare earth element (REE) content ( $\Sigma\text{REE} = 59.75 \times 10^{-6} \sim 135.08 \times 10^{-6}$ ), LREE/HREE ratios (2.64 ~ 3.32), Ta/Yb (0.09 ~ 0.18) and Ce/Yb (6.59 ~ 9.03) ratios, and slight enrichment in large ion lithophile elements (LILEs, e. g., Rb, Ba and Th) and depletion in high field strength elements (HFSEs, e. g., Nb, Ta and Ti), whereas the basic rocks from Mid-Permian magmatism are tholeiite, and are characterized by low REE content ( $\Sigma\text{REE} = 28.77 \times 10^{-6} \sim 76.16 \times 10^{-6}$ ), LREE/HREE ratios (1.75 ~ 2.55), Ta/Yb (0.05 ~ 0.09) and Ce/Yb (3.58 ~ 5.97) ratios, and strong enrichment in LILEs and depletion in HFSEs. Combined with regional geological data, this paper proposes a two-pulse model related to the Late Paleozoic subduction in the western part of ALSS. During the Early-Permian, the westward subduction of the Ailaoshan branch ocean/back-arc basin beneath the east margin of Simao terrane induced partial melting of mantle wedge to form the Andean-type continental margin arc along the western Ailaoshan; subsequently (Mid-Permian), the collapse of continental margin arc formed a back-arc basin, and further produced basic-ultra basic rocks with the geochemical features of both MORB and volcanic arcs.

**Key words:** western Ailaoshan; Late Paleozoic; basic rocks; continental margin arc; back-arc basin

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (91855206)

显生宙以来,冈瓦纳大陆裂解出的多个陆块不断向北与欧亚大陆汇聚拼贴,在东南亚和“三江”地区形成多条特提斯缝合带,包括古特提斯缝合带、中特提斯缝合带以及新特提斯缝合带(Metcalf, 1996a, 1996b, 1999, 2006; Trung *et al.*, 2006; Ferrari *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2016, 2017; Zhao *et al.*, 2018)。哀牢山缝合带作为古特提斯东缘重要的北西向构造带,分隔了扬子地块与思茅-印支地块,记录了青藏高原东南缘古特提斯洋晚古生代演化的重要信息(Metcalf, 2006, 2013; Jian *et al.*, 2008)。在该缝合带内广泛分布有古生代-中生代基性-超基性杂岩(图1b),这些岩石是研究哀牢山缝合带构造演化历史的关键,并且由于它们通常起源于地幔,是研究地幔物质组成和地球动力学过程的重要岩石类型(Naldrett, 2005; Polat *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2013; Thakurta *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2017b),因此受到越来越多的关注。

近年来,研究者在哀牢山西部的大龙凯、五素和雅轩桥等地区发现大量晚石炭世-早三叠世基性侵入岩和喷出岩(云南省地质矿产局, 1990; 周德进等, 1992; 韩松等, 1998; 莫宣学等, 1998; 钟大赉, 1998; Jian *et al.*, 2009a, 2009b; Fan *et al.*, 2010; Lai *et al.*, 2014b; Liu *et al.*, 2017b; Wang *et al.*, 2017)。尽管对这些基性岩石已经进行了大量的同位素年代学和岩石地球化学等的研究,但由于缺乏

对这些基性岩的年代学格架、空间展布、地球化学属性以及岩石组合等的综合分析,哀牢山西部晚古生代基性岩的形成环境仍存在较大争议。目前对其形成环境的主要观点包括:①洋-陆俯冲形成陆缘岛弧(Jian *et al.*, 2009a, 2009b; 刘翠等, 2011);②洋-陆俯冲导致弧后拉张,并形成弧后盆地(Fan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017);③洋-陆俯冲导致陆内裂解,再进一步形成弧后盆地(Lai *et al.*, 2014b)。已有证据表明,在哀牢山西部大龙凯-五素-雅轩桥一带同时出露两类分别具有岛弧和弧后盆地特征的中基性岩石,其锆石 U-Pb 定年结果也显示出明显阶段性(Jian *et al.*, 2009a, 2009b; Fan *et al.*, 2010; Lai *et al.*, 2014b; Liu *et al.*, 2017b; Wang *et al.*, 2017),因此,单一的岛弧或弧后盆地观点需要重新认识。此外,这一时期哀牢山西部出露的基性岩以亚碱性玄武岩为主(Fan *et al.*, 2010),明显不同于陆内裂谷中发育的大量碱性岩石,因此,陆内裂谷-弧后盆地模式也存在一定的问题。鉴于此,本文以哀牢山缝合带西部大龙凯、五素和雅轩桥地区的基性侵入岩和基性火山岩为研究对象,通过详细的野外地质调查、岩石学和地球化学研究,并结合区内已有的研究成果,欲查明相关岩浆活动的时限和期次,揭示其成因和形成环境,最终为进一步探讨该地区晚古生代的构造演化提供制约。

## 1 地质背景及样品

### 1.1 地质背景

哀牢山缝合带东西宽 20 ~ 100 km, 长约 500 km, 是青藏高原东南缘一条重要的古特提斯分界线, 它分隔了思茅-印支地块与华南地块, 保存了从早古生代到新生代长时间、多期次的构造变形、岩浆侵位、区域变质等地质记录(云南省地质矿产局, 1990; 钟大赉, 1998; 刘俊来等, 2011), 也是我国著名的蛇绿岩带(魏启荣等, 1999)。其北东侧为扬子地块, 北西侧与金沙江缝合带相连, 西侧紧邻思茅地块, 南东侧则延伸到越南北部的 Song Ma 缝合带和 Truong Son 褶皱带等地区(图 1a; Lai *et al.*, 2014b; Wang *et al.*, 2017)。

区域上, 哀牢山缝合带位于特提斯构造域的东段, 与古特提斯洋的演化存在密切联系, 保留了晚古生代的蛇绿岩碎片、硬砂岩、片岩、灰岩等增生楔杂岩(黄忠祥等, 1993; Metcalfe, 2002, 2013; Zhang *et al.*, 2008; 冀磊等, 2016; Wang *et al.*, 2017), 是研究古生代一早中生代古特提斯演化的热点地区之一。由于印度板块与欧亚板块在 55 Ma 左右发生碰撞拼合, 导致思茅-印支地块向东南方向大规模逃逸, 哀牢山-红河断裂带在逃逸过程中起着重要的调节作用(刘俊来等, 2011; 许志琴等, 2016)。思茅-印支地块沿哀牢山-红河断裂发生强烈的左行走滑运动, 其位移距离可能超过 600 km(Chung *et al.*, 1997), 因此造成哀牢山变质带内变质变形强烈, 线性构造极度发育, 地貌上呈现明显的北西-南东向展布(图 1b)。哀牢山缝合带内出露的蛇绿岩系列多不完整(如双沟蛇绿岩), 这些蛇绿岩以二辉橄榄岩、含尖晶石方辉橄榄岩、斜长花岗岩、辉长岩为特征岩石, 堆晶辉长岩、辉绿岩墙基本不发育(Jian *et al.*, 2009a, 2009b; Fan *et al.*, 2010), 与其相关的火山岩主要为北西西向的五素玄武岩和雅轩桥玄武-安山岩系列(Zhang *et al.*, 2008; Fan *et al.*, 2010)。

哀牢山蛇绿岩由类似于正常洋中脊玄武岩(N-MORB)和富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)的基性-超基性岩组成, 其中辉长岩、辉绿岩和斜长花岗岩中的锆石记录了 382 ~ 258 Ma 的原岩形成年龄, 代表哀牢山地区晚古生代可能为古特提斯洋的一条支洋/弧后盆地(Yumul *et al.*, 2008; Jian *et al.*, 2009a, 2009b; Deng *et al.*, 2014; Wang *et al.*,

2016, 2017)。Wang 等(2014)对比了哀牢山西部老王寨-墨江-绿春地区志留纪-泥盆纪沉积岩和扬子地块西缘建水地区早古生代地层中的碎屑锆石年龄, 认为老王寨-墨江-绿春地区在早古生代时期应属于思茅-印支地块。钟大赉(1998)和莫宣学等(1998)在五素以南的雅轩桥地区发现一系列北西西向火山岩, 前人研究后认为其与北侧江达-维西地区的火山岩共同组成晚石炭世-早三叠世(约 305 ~ 250 Ma)陆缘弧火山岩(Zi *et al.*, 2012; Lai *et al.*, 2014a, 2014b; Wang *et al.*, 2014, 2016)。近年来, 前人从大龙凯-五素-雅轩桥等地区获得 287 ~ 265 Ma 的基性岩锆石 U-Pb 年龄, 微量元素特征显示其受到地壳物质混染, 同时具有 MORB 和岛弧的地球化学特征, 认为其可能形成于陆内弧后盆地(Fan *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2017b)。

思茅地块又被称为兰坪-思茅褶皱带, 位于哀牢山缝合带西南侧, 是从印支陆块分离出来的一部分(Wang *et al.*, 2000; Jian *et al.*, 2009a), 分别以北侧的哀牢山蛇绿岩带、南东侧 Nan-Uttaradit 蛇绿岩带和西侧的澜沧江构造带为界(Wang *et al.*, 2017)。其元古宙变质基底为大勐龙杂岩和崇山杂岩, 主要由变质火山岩、硅质碎屑岩以及大理岩组成(钟大赉, 1998; Wang *et al.*, 2000, 2006)。早古生代变沉积岩以灰岩及硅质碎屑岩为特征, 表现出与扬子地块相似的岩石学特征, 并被中泥盆统不整合覆盖。前人认为中泥盆世以前, 扬子地块与思茅地块可能为统一的陆块(Fan *et al.*, 1994; Metcalfe, 1996a, 1999, 2002, 2006; Feng, 2002), 后续又沉积石炭纪-二叠纪浅海相到陆相岩层(钟大赉, 1998; Metcalfe, 2006)。通常认为该地区缺失晚三叠世地层。但最近在哀牢山和金沙江等地区分别发现了晚三叠世(249 ~ 244 Ma)高硅的高山寨和攀天阁火山岩系列(Wang *et al.*, 2011; Zi *et al.*, 2012), 上三叠统一碗水组磨拉石和下侏罗统陆相红层岩组不整合覆盖在高山寨/崧谷春火山岩和/或前三叠纪沉积系列之上(钟大赉, 1998; Metcalfe, 2006, 2013; Wang *et al.*, 2017)。

大龙凯-五素-雅轩桥基性岩浆杂岩位于思茅地块东缘, 由基性火山岩和基性侵入岩组成。其中, 基性火山岩沿北西走向延伸约 50 km, 厚度超过 745 m。该岩石系列主要为玄武岩, 并被二叠纪砂岩和页岩整合覆盖, 不整合覆盖于石炭纪复理石沉积之上。区域资料显示, 该玄武岩系列自下而上由 590 m 厚

的枕状玄武岩、165 m 厚的块状玄武岩组成, 上覆 50 m 厚的含斜长石斑晶流纹岩 (Fan *et al.*, 2010)。基性侵入岩主要为辉长岩、辉绿岩及斜长辉石岩, 沿北西走向侵入到二叠纪火山岩带内 (Liu *et al.*,

2017b)。前人将这套由二叠纪基性火山岩、英安岩、火山凝灰岩、流纹岩夹砂岩、粉砂岩组成的地层称为羊八寨组( $P_3y$ ) (云南省地质矿产局, 1990)。羊八寨组火山沉积岩广泛出露于阿墨江断裂西侧(图 1c)。

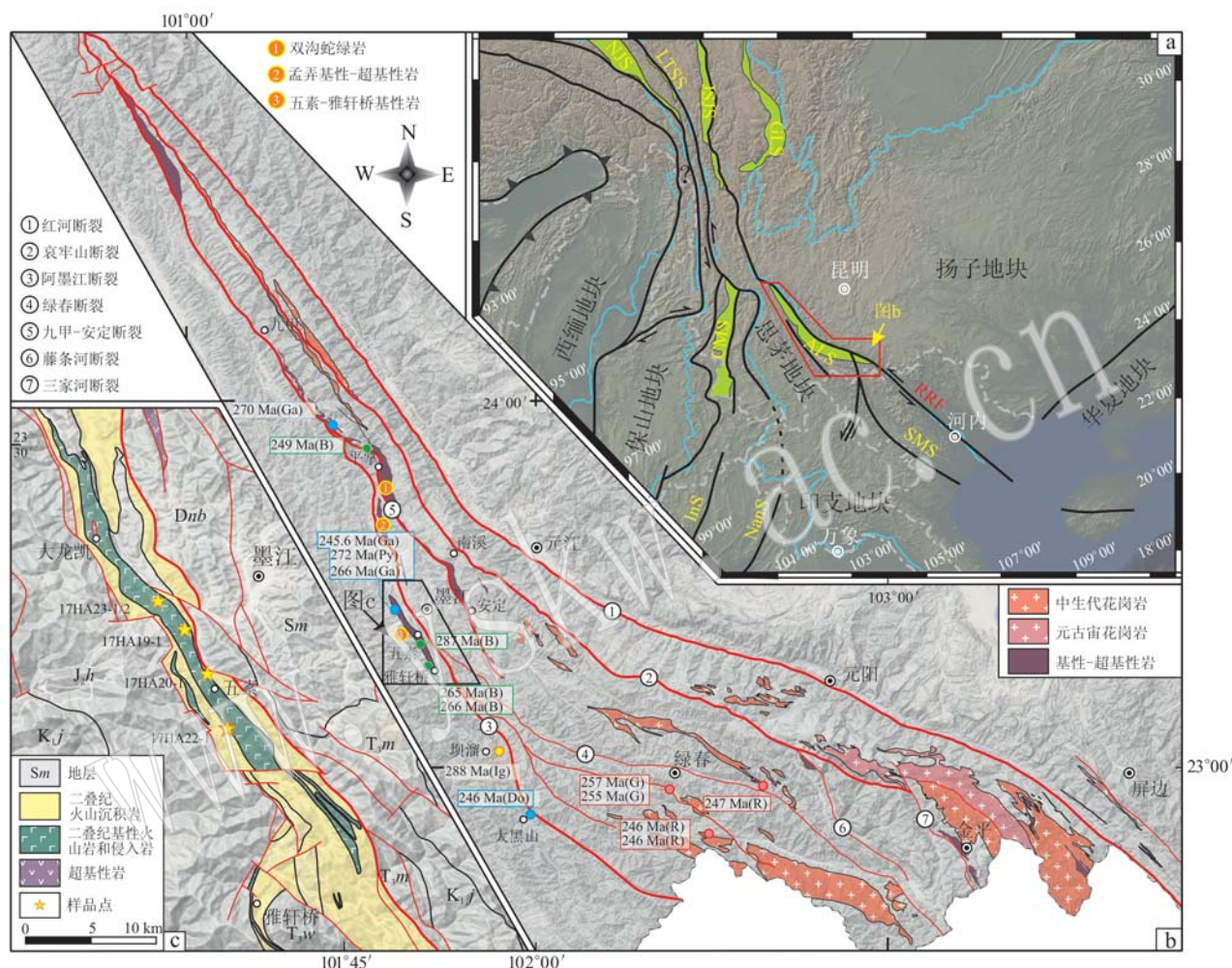


图1 西南“三江”大地构造纲要图[a, 据 Deng 等(2014)和 Wang 等(2017)修改]、哀牢山缝合带区域地质图(b)以及大龙凯-五素-雅轩桥地区区域地质图(c)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the “Sanjiang” region in Southwest China (a, modified after Deng *et al.*, 2014 and Wang *et al.*, 2017), regional geological map of Ailaoshan suture belt (b) and simplified geological map of Dalongkai-Wusu-Yaxuanqiao (c)  
ALS—哀牢山缝合带; CMS—昌宁-孟连缝合带; GLS—甘孜-理塘缝合带; InS—Inthanon 缝合带; JSJS—金沙江缝合带; LTSS—龙木错-双湖缝合带; NJS—怒江缝合带; NanS—Nan 缝合带; SMS—Song Ma 缝合带; RRF—红河断裂; B—玄武岩; Do—辉绿岩; G—花岗岩; Ga—辉长岩; Ig—火山凝灰岩; Py—辉石岩; R—流纹岩

ALS—Ailaoshan suture; CMS—Changning-Menglian suture; GLS—Ganzi-Litang suture; InS—Inthanon suture; JSJS—Jinshajiang suture; LTSS—Longmucuo-Shuanghu suture; NJS—Nuijiang suture; NanS—Nan suture; SMS—Song Ma Suture; RRF—Red River fault; B—basalt; Do—dolerite; G—granite; Ga—gabbro; Ig—ignimbrite; Py—pyroxenite; R—rhyolite

## 1.2 野外和岩石学特征

本文样品采自墨江以西的五素-雅轩桥基性杂岩。5 件岩石样品分别是中粗粒辉长岩(17HA19-1、17HA23-2)、蚀变辉绿岩(17HA20-1)和轻微蚀变玄武

岩(17HA22-1、17HA23-1)。具体采样位置见图 1c 所示。

辉长岩(17HA19-1、17HA23-2)采自墨江以西、五素以北约 4.5 ~ 7 km 处。岩体出露面积约为



0.01 km<sup>2</sup>,与下伏二叠纪火山岩地层呈断层接触,上部不整合覆盖晚三叠世砂砾岩。野外观察样品呈灰黑色,具块状构造(图2a、2b、2j、2k)。镜下观察这两件样品均具有典型的辉长结构,主要矿物组成为斜长石(40%~50%)、单斜辉石(40%~55%),副矿物为磁铁矿等(图2c、2l)。斜长石和单斜辉石均具有波状消

光的特征,表明岩石发生一定的塑性变形,但不发育明显的定向性构造。

蚀变辉绿岩(17HA20-1)出露于五素以北约1 km处。出露面积约为50 m<sup>2</sup>,由于植被覆盖严重,与围岩的接触关系不清,周围可见大量玄武岩转石(图2d)。野外手标本观察呈墨绿色(图2e),镜下可见样品具有

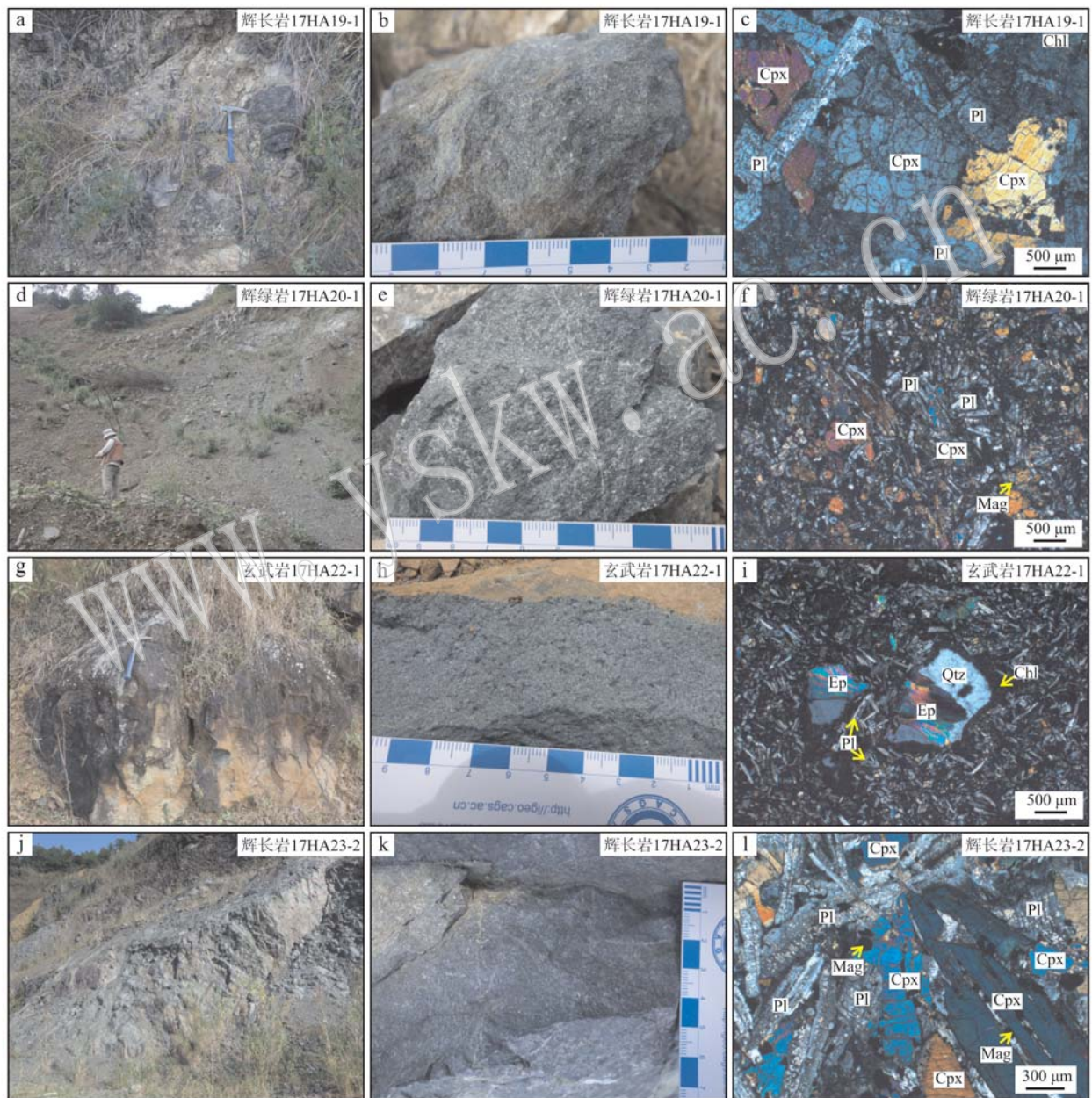


图2 五素地区不同类型基性岩野外(a、d、g、j)、手标本(b、e、h、k)及显微镜下照片(c、f、i、l,正交偏光)

Fig. 2 Outcrop (a, d, g, j), hand specimen (b, e, h, k) photographs and microphotographs (c, f, i, l) of different types of basic rocks in Wusu area

Chl—绿泥石; Cpx—单斜辉石; Mag—磁铁矿; Pl—斜长石; Qtz—石英; Ep—绿帘石  
Chl—chlorite; Cpx—clinopyroxene; Mag—magnetite; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Ep—epidote

辉长辉绿结构, 主要由单斜辉石(35%)和斜长石(35%)和绿泥石(25%)组成。其中较大颗粒的辉石通常呈半自形柱状, 与斜长石组成辉长结构。较小颗粒的辉石呈它形充填于斜长石的晶体格架中, 组成辉绿结构。辉石普遍发生绿泥石化作用, 形成辉石假像和反应边结构(图2f)。

蚀变玄武岩(17HA22-1和17HA23-1)分别采自五素以南约3 km和五素以北约7 km处。块状玄武岩(17HA22-1)野外出露面积约为200 m<sup>2</sup>, 节理较为发育, 与围岩的接触关系不清(图2g)。样品17HA23-1与周围辉长岩(17HA23-2)呈断层接触关系。野外新鲜的玄武岩呈灰黑色, 具块状构造和杏仁状构造, 斑状结构(图2h)。镜下观察发现, 斑晶(10%)通常为短柱状的辉石假像, 辉石已完全绿泥石化; 基质(90%)为典型的间粒结构, 由自形-半自形长柱状的斜长石(65%~70%)、它形粒状的单斜辉石(5%~10%)以及由辉石蚀变形成的绿泥石(10%~15%)组成(图2i)。样品17HA23-1中辉石含量较少, 同时含少量云母类矿物。

岩相学特征表明, 哀牢山西部五素-雅轩桥等地区出露的基性岩未遭受强烈的构造变形, 后期蚀变较弱, 仅发生绿片岩相变质, 部分斜长石和辉石转变成绿泥石、绿帘石、绢云母等低级变质矿物, 大多数矿物仍保留原岩的结构、构造特征, 原岩矿物化学属性未发生明显的改变。

## 2 测试方法与结果

### 2.1 测试方法

全岩样品粉末(200目)制备在河北省区域地质调查研究所完成, 全岩主量和微量元素化学成分测试在广州澳实分析检测实验室完成。主量元素采用X射线荧光光谱仪(XRF, 仪器型号: PANalytical PW2424)测定, 依据GB/T 14506.28-2010标准, 检测项目包括Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、MgO、MnO、Na<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>等10项, 测试精度优于2%~5%。FeO采用酸消解重铬酸钾滴定法(Fe-VOL05)测定, 依据GB/T 14506.14-2010标准, 检出下限为0.01%。微量及稀土元素采用ICP-AES(仪器型号: Agilent VISTA)和ICP-MS(仪器型号: Agilent 7700x)组合测试完成, 依据GB/T 14506.30-2010标准, 测试精度优于10%。

### 2.2 测试结果

5件基性岩样品全岩地球化学分析结果(表1)

表1 五素基性岩主量( $w_B/\%$ )和微量( $w_B/10^{-6}$ )元素含量  
Table 1 Major elements ( $w_B/\%$ ) and trace elements ( $w_B/10^{-6}$ ) compositions of Wusu basic rocks

岩性	辉长岩		辉绿岩	玄武岩	
样品号	17HA19-1	17HA23-2	17HA20-1	17HA22-1	17HA23-1
SiO <sub>2</sub>	49.29	48.17	46.36	49.51	45.82
TiO <sub>2</sub>	1.45	1.97	1.59	1.61	1.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.76	16.11	15.38	15.54	16.56
FeO	5.33	6.14	6.88	5.15	5.08
FeO <sup>T</sup>	7.65	9.73	9.36	9.35	8.86
MnO	0.16	0.18	0.16	0.17	0.18
MgO	5.90	6.71	9.62	6.44	6.33
CaO	10.40	9.20	8.45	8.00	11.15
Na <sub>2</sub> O	3.75	2.66	2.24	5.06	3.19
K <sub>2</sub> O	0.66	1.30	0.69	0.04	0.78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	0.23	0.23	0.21	0.17
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.04	0.05	0.02	0.02
SrO	0.05	0.03	0.02	0.02	0.04
BaO	0.02	0.06	0.03	0.01	0.01
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	8.63	3.11	4.93	192.20	6.21
Mg <sup>#</sup>	57.9	55.1	64.7	55.1	56.0
A/CNK	0.65	0.71	0.78	0.68	0.63
烧失量	2.62	2.04	4.51	2.67	4.25
总量	99.77	99.51	99.73	99.69	99.60
La	8.8	7.2	10.0	10.2	7.5
Ce	20.9	19.7	25.3	24.5	17.9
Pr	2.93	3.06	3.62	3.48	2.48
Nd	13.8	15.9	17.0	16.3	11.8
Sm	3.85	5.18	4.66	4.35	3.29
Eu	1.39	1.78	1.66	1.51	1.29
Gd	4.75	6.65	5.77	5.45	4.12
Tb	0.80	1.12	0.97	0.87	0.67
Dy	5.00	7.37	5.95	5.50	4.23
Ho	1.09	1.59	1.30	1.13	0.94
Er	3.07	4.41	3.65	3.15	2.52
Tm	0.45	0.66	0.53	0.45	0.36
Yb	2.84	4.25	3.41	2.92	2.31
Lu	0.43	0.64	0.53	0.45	0.34
Y	29.1	41.0	34.1	30.2	24.0
Rb	11.7	40.3	22.5	0.6	9.7
Ba	158.0	459.0	217.0	19.9	76.9
Th	1.01	0.69	1.10	1.27	0.76
U	0.27	0.21	0.46	0.48	0.20
K	5 500	11 300	6 100	300	6 300
Ta	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30
Nb	4.60	4.35	5.10	3.90	3.10
Pb	1.10	1.00	0.80	1.00	1.90
Sr	378.0	189.5	168.5	96.5	337.0
P	770	1 130	1 120	980	760
Zr	110	137	137	108	87
Hf	2.80	3.70	3.40	2.80	2.30

续表 1  
Continued Table 1

岩性	辉长岩		辉绿岩	玄武岩	
样品号	17HA19-1	17HA23-2	17HA20-1	17HA22-1	17HA23-1
Ti	8 570	12 400	9 760	10 100	7 490
Cr	417	417	418	200	208
Ni	54.8	194.0	186.5	59.4	61.9
V	285	336	274	280	315
ΣREE	70.10	79.51	84.35	80.26	59.75
LREE	51.67	52.82	62.24	60.34	44.26
HREE	18.43	26.69	22.11	19.92	15.49
LREE/HREE	2.80	1.98	2.82	3.03	2.86
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.22	1.22	2.10	2.51	2.33
δEu	0.99	0.93	0.98	0.95	1.07
δCe	1.00	1.03	1.03	1.00	1.01
Ce/Yb	7.36	4.64	7.42	8.39	7.75
Nb/La	0.52	0.60	0.51	0.38	0.41
La/Sm	2.29	1.39	2.15	2.34	2.28
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.48	0.90	1.39	1.52	1.47
La/Yb	3.10	1.69	2.93	3.49	3.25
Rb/Sr	0.03	0.21	0.13	0.01	0.03
Sm/Nd	0.28	0.33	0.27	0.27	0.28
Sm/Yb	1.36	1.22	1.37	1.49	1.42
Th/Yb	0.36	0.16	0.32	0.43	0.33
Ta/Yb	0.11	0.07	0.12	0.10	0.13
Zr/Y	3.78	3.34	4.02	3.58	3.63

显示,这些基性岩整体具有较高的烧失量(LOI = 2.04% ~4.51%),SiO<sub>2</sub> 含量变化范围较窄(45.82% ~49.51%),属于基性岩成分范围;以高 Na<sub>2</sub>O(Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O = 3.11 ~ 192.20)含量、低 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.17% ~ 0.23%)、TiO<sub>2</sub>(1.25% ~ 1.97%)、FeO<sup>T</sup>(7.65% ~

9.73%)含量以及 A/CNK 值(0.63 ~ 0.78)为特征。Mg<sup>#</sup>值较为集中(55.1 ~ 64.7),表明其后期的结晶分异作用不明显。将数据投入 Zr/TiO<sub>2</sub> - Nb/Y 图解与 Ce/Yb - Ta/Yb 图解中,发现样品具有典型的钙碱性系列岩石特征(图 3a、3b)。同时,该基性岩具有较高的稀土元素总量(ΣREE = 59.75 × 10<sup>-6</sup> ~ 84.35 × 10<sup>-6</sup>),无显著的 Eu(δEu = 0.95 ~ 1.07)及 Ce(δCe = 1.00 ~ 1.03)异常(图 4),表明在岩浆结晶分异过程中,斜长石没有发生明显的分离结晶。亏损 Nb、Ta、Th、U 等高场强元素并富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素,表明岩石在形成过程中可能受到地壳物质的混染或板片流体的交代。大部分辉长岩、辉绿岩和玄武岩明显富集轻稀土元素[(La/Sm)<sub>N</sub> = 1.39 ~ 1.52],类似于富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)。值得注意的是,样品 17HA23-2(辉长岩)轻微亏损轻稀土元素[(La/Sm)<sub>N</sub> = 0.90],类似于 N-MORB。与其他基性岩相比,该样品的 Hf、Ti 等微量元素含量最高,几乎没有 Eu(δEu = 0.93)和 Ce(δCe = 1.03)异常,在 Ce/Yb - Ta/Yb 图解中落于拉斑质系列与钙碱性系列分界线附近(图 3b)。

3 讨论

3.1 哀牢山西部晚古生代基性岩的时空分布

沿哀牢山西部阿墨江断裂断续分布多个基性岩体,由北向南分别为大龙凯、五素、雅轩桥、大黑山基性岩体,这些基性岩体侵入东西两侧的二叠系羊八寨

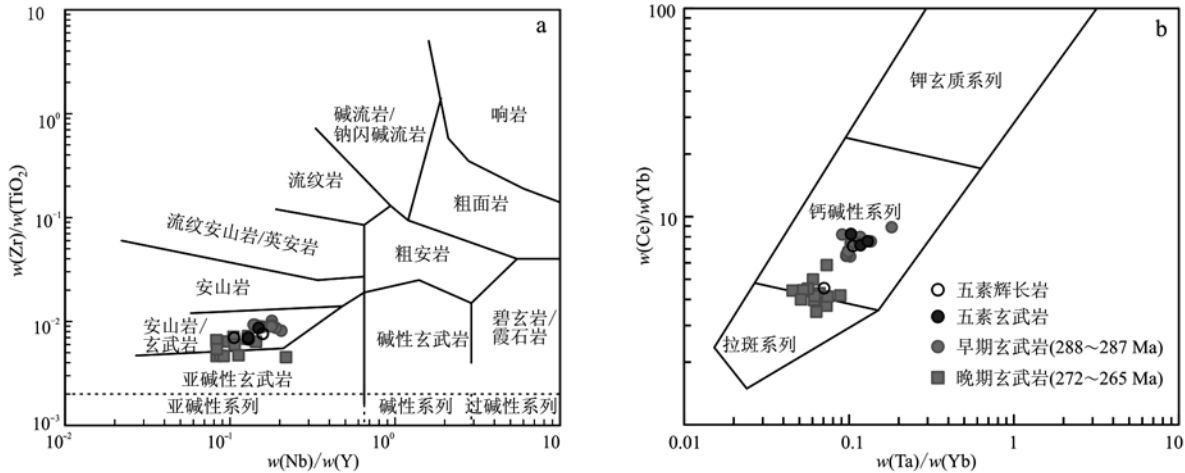


图 3 五素-雅轩桥基性侵入岩和火山岩的 Zr/TiO<sub>2</sub> - Nb/Y 图解(a, 据 Winchester and Floyd, 1977)和 Ce/Yb - Ta/Yb 图解(b, 据 Pearce, 1982)(早期玄武岩和晚期玄武岩数据来源于 Fan 等, 2010)  
Fig. 3 Zr/TiO<sub>2</sub> - Nb/Y diagram (a, after Winchester and Floyd, 1977) and Ce/Yb - Ta/Yb diagram (b, after Pearce *et al.*, 1982) of Wusu-Yaxuanqiao basic rocks (data of early basalts and late basalts after Fan *et al.*, 2010)

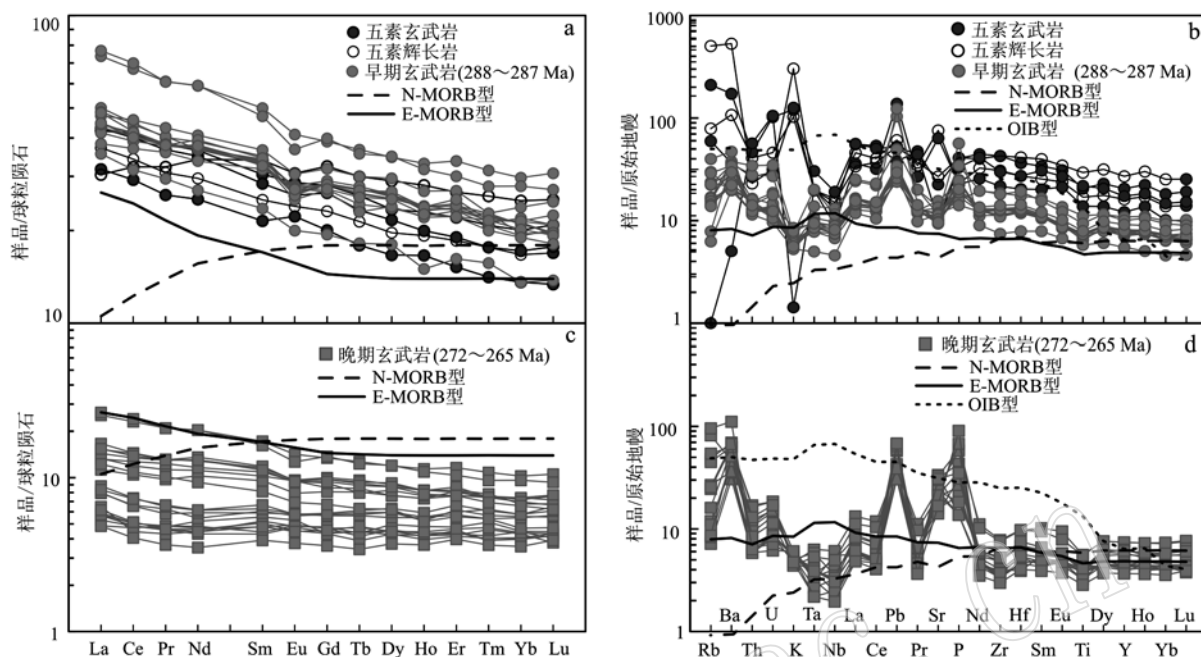


图4 五素基性岩稀土(a,c)和微量元素(b,d)标准化图解

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, c) and primitive mantle normalized trace element patterns (b, d) for the Wusu-Yaxuanqiao basic rocks

球粒陨石、原始地幔、OIB、N-MORB、E-MORB 数据来源于 Sun 和 McDonough (1989); 早期玄武岩和晚期玄武岩数据来源于 Fan 等(2010)  
data of chondrite, primitive mantle, OIB, N-MORB and E-MORB after Sun and McDonough (1989); data of early and late basalts from Fan *et al.*, 2010

组(P<sub>3</sub>y)火山沉积岩中(图1c)。近年来的研究表明,羊八寨组中的火山岩可能形成于多期岩浆活动。

Lai 等(2014b)测得哀牢山南西侧坝溜地区二叠系羊八寨组火山凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为  $288.5 \pm 3.3$  Ma, 与 Fan 等(2010)获得的五素玄武岩( $287 \pm 5$  Ma)年龄在误差范围内一致(表2),表明哀牢山西部羊八寨组中部分基性火山岩和火山沉积岩实际形成于早二叠世。区域上,哀牢山西部早二叠世(约 288~287 Ma)火山岩与越南北西侧晚石炭世-早二叠世北西向 Truong Son 岛弧火山岩近于同期形成(约 304~272 Ma, Hoa *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012),并且早二叠世 Truong Son 岛弧英安岩-流纹岩与哀牢山西部同期的长英质火山岩具有相似的化学组成,表明它们具有相似的岛弧亲缘性(Lai *et al.*, 2014b)。Liu 等(2017b)测得大龙凯层状斜长辉石岩和辉长岩锆石 U-Pb 年龄分别为  $272.1 \pm 1.7$  Ma 和  $266.4 \pm 5.8$  Ma, 该年龄与雅轩桥玄武岩( $265 \pm 7$  Ma,  $266.2 \pm 2.2$  Ma)的年龄基本一致(表2; Jian *et al.*, 2009b; Fan *et al.*, 2010)。区域调查显示,上述层状基性岩侵入到早期五素玄武岩中,指示中二叠世哀牢山西部发生了一次较大规模的岩浆侵位事件(Liu *et al.*, 2017b),该时期以大量基性-超基性侵入岩和喷出岩

的出现为特征。Jian 等(2009b)通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得大龙凯斜长辉石岩年龄为  $245.6 \pm 1.4$  Ma, 与绿春及大黑山等地发现的 247~246 Ma 的流纹岩和辉绿岩具有一致的年龄(表2),具有明显的碰撞后岩浆特征,表明早三叠世以前,哀牢山西部已完成碰撞造山过程,进入造山后的伸展阶段(Jian *et al.*, 2009b; 刘翠等, 2011; Lai *et al.*, 2014b)。

上述岩石学和年代学证据表明,哀牢山西部晚古生代至少存在两期基性岩浆活动: ① 早期基性岩形成于 288~287 Ma。韩松等(1998)认为早二叠世时期哀牢山西部发育双峰式火山岩,整体处于陆内裂谷环境。然而该时期哀牢山西部出露有大量的火山凝灰岩、流纹岩、英安岩、玄武岩等(周德进等, 1992; 钟大赉, 1998),并不具有明显的双峰式火山岩的特征,玄武岩、英安岩、流纹岩的岩石组合是火山弧环境中典型岩石组合类型(Mccarron and Smellie, 1998; 李伍平等, 1999)。② 晚期基性岩形成于 272~265 Ma。该时期已发现的基性岩主要分布于大龙凯、五素、雅轩桥等地,岩石类型主要为斜长辉石岩、辉长岩、辉绿岩、枕状玄武岩、块状玄武岩,以基性-超基性岩为主,明显不同于早期酸性-基性岩石组合,表明晚期地幔岩浆活动加剧。因此,两期



表2 哀牢山西部岩浆岩年龄

Table 2 Summary of geochronological data from magmatic rocks in western Ailaoshan

序号	样品号	岩石类型	年龄/Ma	测年方法	样品位置	数据来源
1	ML18A	斜长辉石岩	272.1 ± 1.7	LA-ICP-MS	大龙凯	Liu <i>et al.</i> , 2017b
2	ML19A	辉长岩	266.4 ± 5.8	LA-ICP-MS	大龙凯	Liu <i>et al.</i> , 2017b
3	20SM-97	基性岩	287 ± 5	SHRIMP	五素	Fan <i>et al.</i> , 2010
4	20SM-47	玄武安山岩	265 ± 7	SHRIMP	雅轩桥	Fan <i>et al.</i> , 2010
5	YXQ01	玄武岩	266.2 ± 2.2	SHRIMP	雅轩桥	Jian <i>et al.</i> , 2009b
6	DLK01	斜长辉石岩	245.6 ± 1.4	SHRIMP	大龙凯	Jian <i>et al.</i> , 2009b
7	K10-56	凝灰岩	288.5 ± 3.3	LA-ICP-MS	坝溜	Lai <i>et al.</i> , 2014b
8	K09-80	辉绿岩	246.1 ± 3.7	LA-ICP-MS	大黑山	Lai <i>et al.</i> , 2014b
9	K09-25	辉长岩	270.4 ± 8.5	LA-ICP-MS	和平乡	Lai <i>et al.</i> , 2014b
10	K10-25	花岗岩	257.2 ± 1.6	LA-ICP-MS	坪河乡	Lai <i>et al.</i> , 2014b
11	K10-29	花岗岩	255.1 ± 2.2	LA-ICP-MS	坪河乡	Lai <i>et al.</i> , 2014b
12	K09-83	流纹岩	246.2 ± 4.0	LA-ICP-MS	绿春	Lai <i>et al.</i> , 2014b
13	K09-87	流纹岩	246.0 ± 6.0	LA-ICP-MS	绿春	Lai <i>et al.</i> , 2014b

基性岩可能形成于不同的构造环境(邓晋福等, 1999)。

值得注意的是,两期基性岩均位于哀牢山西部北西向构造线上,空间上并不能将两期基性岩严格区分开。岩相学观察表明,岩石并不具有明显的定向构造,表明其并未受到后期构造作用的强烈改造,从而排除后期构造运动导致两期基性岩现今的接触关系。因此,本文认为两期岩浆活动应该发生于同一位置,是不同岩浆演化阶段的产物,早期岩浆岩作为晚期岩浆岩中的捕虏体或者被其侵入。

### 3.2 岩石成因与岩浆源区

本文研究的哀牢山西部基性岩整体蚀变较弱,遭受轻微的绿片岩相变质作用(图2)。基性岩中,大离子亲石元素(LILEs,例如 Rb、Ba、Sr 等)通常更容易受到后期蚀变与变质作用的改造,而过渡族元素(例如 V、Cr 等)和高场强元素(HFSEs,例如 Nd、Ta、Zr、Hf、Ti、Th 等)在这些过程中相对稳定,但 Sr 等元素在绿片岩相变质作用过程中通常非常稳定(Pearce and Cann, 1973),因此下文仅使用这些相对不活动的元素来探讨这些基性岩的岩石成因和岩浆源区。本小节中所讨论的地球化学数据来源于本文和 Fan 等(2010)。

#### 3.2.1 岩石成因

本次采集的基性岩样品具有较高的挥发分含量(LOI = 2.04% ~ 4.51%),但岩相学特征表明其并未受到后期严重的热液蚀变作用,说明挥发分主要来源于岩浆形成阶段,表明其可能为地幔源区在含水的条件下高程度部分熔融的产物(Hickey and Frey, 1982)。尽管本次研究未能获得精确的锆石 U-Pb 年

龄,但本文样品与 Fan 等(2010)获得的早期玄武岩(287 Ma)样品采自同一地区的二叠系羊八寨组中(图1c)。地球化学特征表明,除样品 17HA23-2(辉长岩)以外,其余样品的稀土和微量元素图解显示与早期基性岩(288 ~ 287 Ma)具有相似的高稀土元素总量和轻稀土元素含量特征(图4),相似的Ta/Yb、Ce/Yb 值表明这些样品与早期基性岩可能形成于同一时期。样品 17HA23-2(辉长岩)的采样位置靠近大龙凯地区(图1c),野外调查显示,该基性岩体侵入到早期的五素玄武岩中(图2j),地球化学特征表明,样品轻微亏损 LREE[(La/Sm)<sub>N</sub> = 0.90],较低的Ta/Yb、Ce/Yb 值显示其具有与晚期基性岩(272 ~ 265 Ma)相似的特征(图3b)。

#### (1) 早期基性岩(288 ~ 287 Ma)

韩松等(1998)认为哀牢山西部早二叠世岩浆序列具有双峰式火山岩的特点并受到地壳物质的同化混染,可能形成于大陆裂谷环境。Fan 等(2010)则认为该期基性岩与西太平洋 Okinawa Trough 弧后盆地岩石具有相似的地球化学属性,可能形成于弧后盆地环境。本文研究发现,早期基性岩具有较高的稀土元素含量( $\Sigma\text{REE} = 59.75 \times 10^{-6} \sim 135.08 \times 10^{-6}$ ),明显富集轻稀土元素(LREE/HREE = 2.64 ~ 3.32),其稀土和微量元素配分模式类似于E-MORB,而E-MORB 则通常被认为形成于受OIB型岩浆影响的洋中脊或弧后盆地环境(张旗等, 2001)。然而,这些早期基性岩相对原始地幔更亏损Ti,并且明显富集Pb和K等元素,表明其形成与OIB岩浆没有直接联系。此外,轻微富集Rb、Ba、Th等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素,表明岩石可能受

地壳物质的混染或板片流体的交代,但其 Nb/La 值与 La/Sm、Sm/Nd 值之间几乎没有相关性(图 5a、5b),同时具有正的  $\varepsilon\text{Nd}(t)$  值(+3.52 ~ +5.54)(Fan *et al.*, 2010),表明岩石受地壳物质混染的影响较小(Xu *et al.*, 2016),因此,上述 Nb、Ta、Ti 元素的亏损可能与板片俯冲作用相关。俯冲至深部的板片脱水导致地幔楔部分熔融,高场强元素 Nb、Ta、Ti 等在板片脱水过程中不易活动,而大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba、Cs 等不相容性和活动性较强,使得来源于地幔楔部分熔融的岛弧或弧后盆地岩浆亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素而富集 Rb、Sr、Ba、Cs 等大离子亲石元素(Tatsumi, 1989; McCulloch and Gamble, 1991; Class *et al.*, 2013)。由于强不相容元素 Zr 通

常富集于地壳,而 Y 作为相容元素更容易富集于地幔中,因此,早期基性岩所具有的类似 WPB 的高 Zr 含量和 Zr/Y 值(图 6b)表明它们可能形成于板内环境。已有研究表明,不相容微量元素的比值(如 La/Yb、Th/Yb、Ta/Yb、Sm/Yb、Zr/Yb 等)通常反映地幔源区特征(Liu *et al.*, 2016)。早期基性岩较高的 Ta/Yb(0.09 ~ 0.18)和 Ce/Yb(6.59 ~ 9.03)值显示其属于钙碱性系列(图 3b),因此,这些钙碱性岩浆岩很可能起源于与板块俯冲相关的岛弧或陆缘弧环境(Hawkesworth *et al.*, 1995; 李伍平等, 1999)。这也与它们具有相对较高的 Ta/Yb(0.09 ~ 0.18)和 Th/Yb(0.32 ~ 0.65)值一致(图 6a)。

## (2) 晚期基性岩(272 ~ 265 Ma)

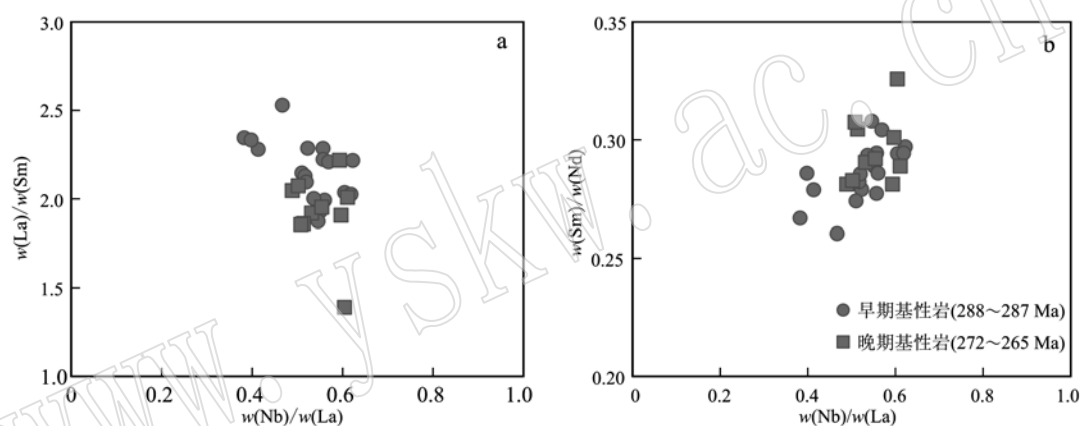


图 5 五素基性岩 La/Sm - Nb/La 图解(a)和 Sm/Nd - Nb/La 图解(b)[数据来源于本文和 Fan 等(2010)]

Fig. 5 La/Sm - Nb/La diagram (a) and Sm/Nd - Nb/La diagram (b) of Wusu basic rocks (data after this study and Fan *et al.*, 2010)

Fan 等(2010)基于地球化学和年代学证据认为该期岩石形成于岛弧环境。然而, Liu 等(2017b)在同一构造位置发现了同期的斜长辉石岩和辉长岩,认为它们应该形成于弧后盆地环境。整体而言,晚期基性岩具有较低的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE} = 28.77 \times 10^{-6} \sim 76.16 \times 10^{-6}$ ),轻微富集轻稀土元素(LREE/HREE = 1.75 ~ 2.55),明显富集 Rb 和 Ba, 亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, Nb/La 值与 La/Sm、Sm/Nd 值几乎没有相关性(图 5a、5b),同样表明其形成过程可能与板片俯冲相关(McCulloch and Gamble, 1991; Class *et al.*, 2013)。较低的 Ta/Yb(0.05 ~ 0.09)和 Ce/Yb(3.58 ~ 5.97)值(图 3b)显示其属于拉斑质系列。此外,晚期基性岩具有相对较低的 Ta/Yb(0.05 ~ 0.09)和 Th/Yb(0.16 ~ 0.41)值(图 6a),显示岛弧岩浆属性。在 Hf - Th - Ta 图解中,早

期和晚期基性岩均落于与火山弧相关的区域(图 6d)。而在 Zr - Y - Ti 图解中,晚期基性岩主要落入 B + C 区域,类似于低钾拉斑玄武岩。这种低  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  和不相容元素的岩石可以形成于大洋岛弧、弧后盆地或洋中脊环境中(桑隆康等, 2012),但其明显亏损 Nb、Ta 元素,表明该基性岩的形成与俯冲作用有关。碎屑锆石研究表明,晚古生代时期,哀牢山西部墨江-绿春地区属于思茅地块东缘(Wang *et al.*, 2014; Xia *et al.*, 2016),该地区属于活动大陆边缘,活动大陆边缘之上形成的陆缘弧玄武岩通常具有较高  $\text{K}_2\text{O}$  含量(Gill, 2010),显然与该期基性岩低钾的特征不同,因此,本文推测晚期基性岩可能形成于弧后盆地环境。

上述地球化学研究表明,早期和晚期基性岩均具有部分岛弧岩浆岩的特征。然而,明显不同的稀

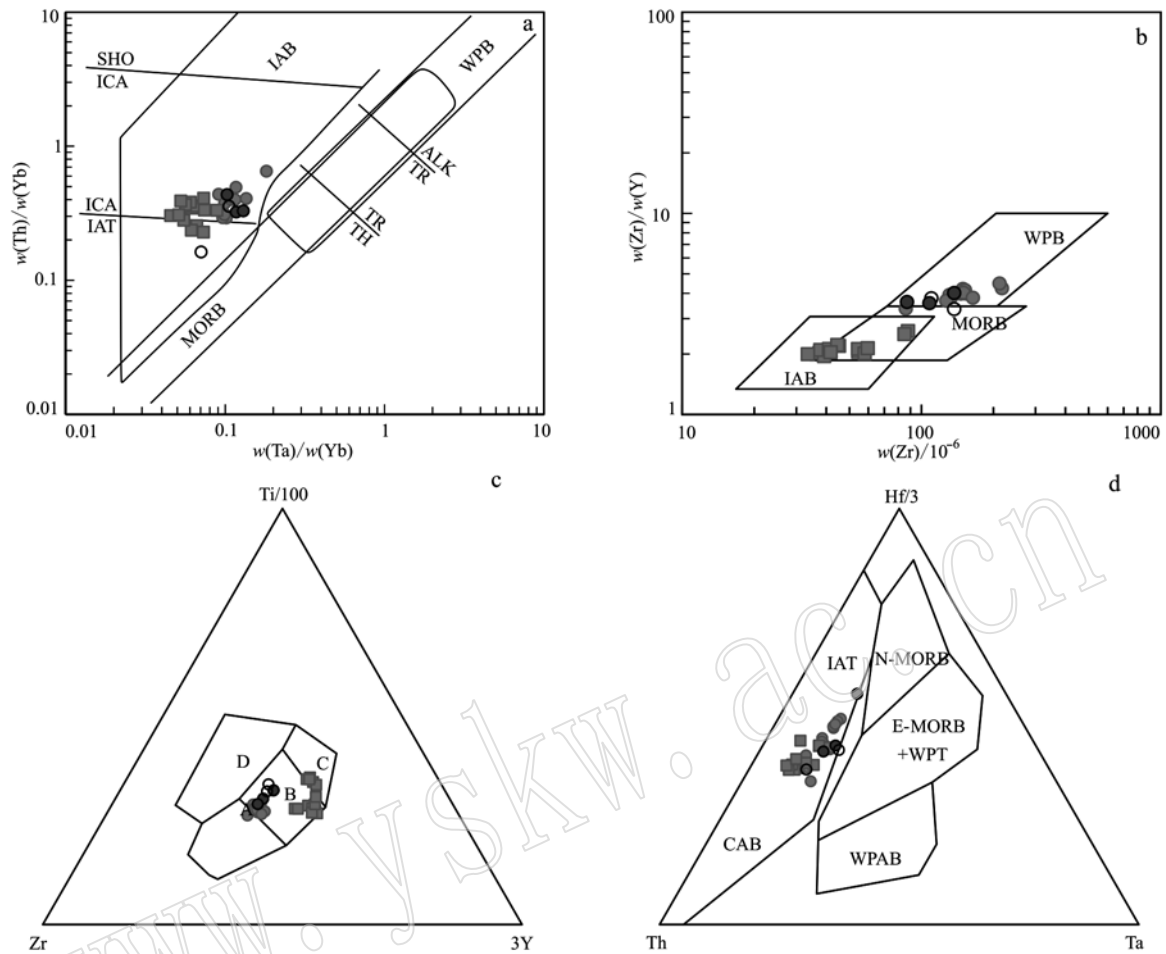


图6 五素-雅轩桥基性岩构造判别图解(图例同图3)

Fig. 6 Tectonic discrimination diagrams for Wusu-Yaxuanqiao basic rocks(legends as for Fig. 3)

a—Th/Yb—Ta/Yb 图解(据 Pearce, 1982); b—Zr/Y—Zr 图解(据 Pearce and Norry, 1979); c—Ti—Zr—Y 图解(据 Pearce and Cann, 1973); d—Hf—Th—Ta 图解(据 Wood, 1980); ALK—碱性玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; CFB—大陆溢流玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; ICA—岛弧钙碱性岩石; OIB—洋岛玄武岩; SHO—岛弧橄榄粗玄岩系列; TH—拉斑玄武岩; TR—过渡玄武岩; WPAB—板内碱性玄武岩; WPB—板内玄武岩; A+B—钙碱性玄武岩(CAB); B+C—低钾拉斑玄武岩(LKT); B—洋底玄武岩(OFB); D—板内玄武岩(WPB); 数据来源于本文和 Fan 等(2010)

a—Th/Yb—Ta/Yb diagram (after Pearce, 1982); b—Zr/Y—Zr diagram (after Pearce and Norry, 1979); c—Ti—Zr—Y diagram (after Pearce and Cann, 1973); d—Hf—Th—Ta diagram (after Wood, 1980); ALK—alkali basalt; CAB—calc-alkaline basalt; CFB—continental flood basalt; IAB—island arc basalt; IAT— island arc tholeiite; ICA— island arc calc-alkaline basalt; OIB—ocean island basalt; SHO— island arc olivine trachybasalt; TH—tholeiite; TR—transitional basalt; WPAB—within plate alkali basalt; WPB—within plate basalt; A+B—calc-alkali basalt (CAB); B+C—low K tholeiite (LKT); B—ocean floor basalt (OFB); D—within plate basalt (WPB); data after this study and Fan *et al.*, 2010

土、微量元素含量和岩石组合表明它们应该形成于不同的构造环境。在哀牢山西部,早期岩浆活动的产物主要为基性-酸性岩石,岩石类型包括玄武岩、英安岩、流纹岩和火山凝灰岩等,且其中的玄武岩主要为钙碱性玄武岩;而晚期岩浆活动的产物则以玄武岩、辉长岩、斜长辉石岩等基性-超基性岩石组合为特征,且其中的玄武岩主要为低钾拉斑玄武岩。相关岩浆活动从早期演化至晚期,基性岩石具有逐

渐从钙碱性向拉斑玄武岩过渡的趋势。因此,本文认为早期岩浆岩可能形成于岛弧环境,而晚期基性岩可能形成于早期岛弧发生弧内伸展后的弧后盆地,从而导致两期基性岩同时具有部分弧岩浆岩的地球化学特征。

### 3.2.2 岩浆源区

由于 Yb 在石榴石中是相容元素,而 La 和 Sm 是不相容元素,在石榴石稳定域中,当部分熔融程度较

低时,  $\text{La}/\text{Yb}$  和  $\text{Sm}/\text{Yb}$  值将会发生明显的分异,而在尖晶石稳定域,  $\text{La}/\text{Yb}$  值变化的范围很小,  $\text{Sm}/\text{Yb}$  值几乎没有变化 (Aldanmaz *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2016), 因此,  $\text{Sm}/\text{Yb} - \text{La}/\text{Yb}$  图解可用于判断岩浆源区来源于尖晶石稳定域还是石榴石稳定域 (Zi *et al.*, 2010)。哀牢山西部晚古生代两期基性岩浆岩具有非常低的  $\text{La}/\text{Yb}$  (1.53 ~ 3.84) 和  $\text{Sm}/\text{Yb}$  (0.97 ~ 1.56) 值, 早期和晚期基性岩均落于石榴橄榄岩部分熔融曲线 (批式部分熔融) 上, 部分熔融程度大于 20% (图 7a)。石榴石的出现指示地幔橄榄岩部分熔融的深度大于 70 km (Xu *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2017a), 同时也表明早期和晚期基性岩浆形成于相似深度的地幔岩中。实验岩石学证明, 如此高的部分熔融程度通常需要流体的参与, 而在俯冲带区域, 流体通常来源于板片俯冲到深部之后的脱水, 流体向上迁移造成地幔楔地幔岩的部分熔融 (桑隆康等, 2012)。大离子亲石元素 Rb、Sr 作为不相容元素, 在

地壳中含量明显高于地幔。Rb/Sr - Rb 图解中, 早期基性岩相比晚期基性岩 Rb 的含量没有明显变化, 但晚期基性岩 Sr 含量的明显升高, 导致其具有更低的 Rb/Sr 值 (图 7b)。通常俯冲带板片流体中同时富含 Rb、Sr、K 等元素, Rb、Sr 元素的解耦表明 Sr 含量的增加并不是由板片流体导致的。Sr 在低压条件下, 易与斜长石中的 Ca 发生类质同像替换, 而在高压条件下, 斜长石不稳定, 显示不相容元素特征, 而稀土元素标准化图解显示 (图 4), 早期基性岩具有适度的 Eu 负异常, 而晚期基性岩中 Eu 无明显异常, 表明早期岩浆中斜长石发生明显的结晶分异, 因此认为早期基性岩中 Sr 含量较低, 可能是由于斜长石的结晶分异所导致。由于快速的岩浆供给和上升不利于斜长石的结晶 (Zellmer *et al.*, 2011), 所以晚期基性岩的岩浆供给速率和上升速率高于早期基性岩岩浆, 这与该地区从岛弧到弧后盆地的演化趋势是一致的。

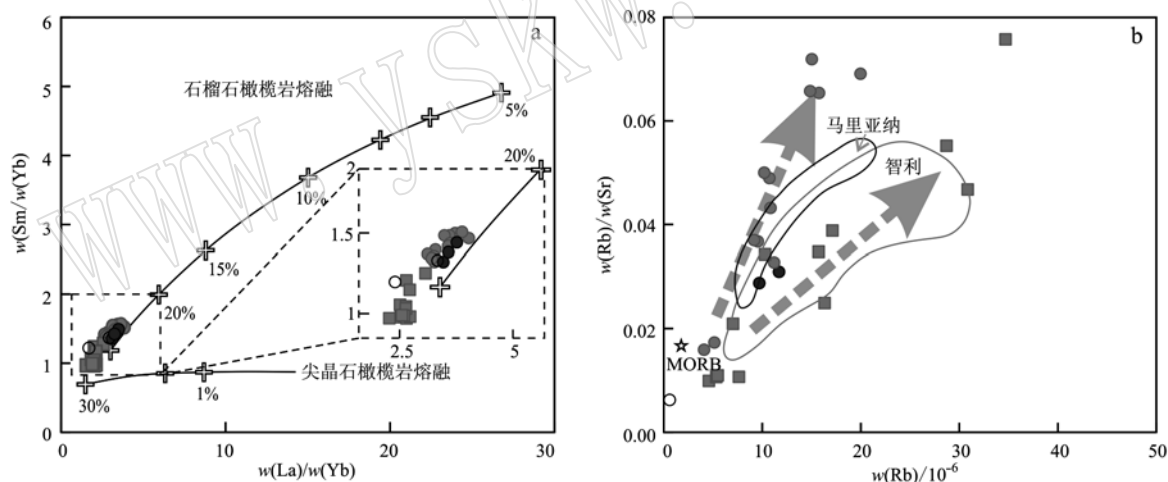


图 7  $\text{Sm}/\text{Yb} - \text{La}/\text{Yb}$  图解 (a, 据 Zi *et al.*, 2010) 和  $\text{Rb}/\text{Sr} - \text{Rb}$  图解 (b, 据 Ellam and Hawkesworth, 1988)

Fig. 7  $\text{Sm}/\text{Yb} - \text{La}/\text{Yb}$  diagram (a, after Zi *et al.*, 2010) and  $\text{Rb}/\text{Sr} - \text{Rb}$  diagram (b, after Ellam and Hawkesworth, 1988)

MORB 数据来源于 Pearce 等 (1981); 数据来源于本文和 Fan 等 (2010); 图例与图 3 相同

MORB values after Pearce *et al.*, 1981; data after this study and Fan *et al.*, 2010; legends as for Fig. 3

综上所述, 哀牢山西部晚古生代基性岩是在流体参与下、地幔楔岩石高度部分熔融的产物。流体来源于俯冲板片向深部俯冲的过程脱水形成, 流体将地壳中富集的大离子亲石元素 (LILE) 带入地幔楔中, 导致地幔楔橄榄岩的部分熔融, 形成同时具有地壳和地幔属性的岛弧和弧后盆地岩石 (Gill, 2010)。早期和晚期基性岩近乎一致的部分熔融程度表明二者形成于同一地幔源区的不同演化阶段。Dilek 和

Flower (2003) 在研究新特提斯蛇绿岩时指出, 俯冲作用可以导致先存岛弧再次裂开, 在俯冲带上出现弧后盆地、弧前盆地等小洋盆 (Dilek and Flower, 2003)。因此, 哀牢山西部早期和晚期基性岩均显示岛弧岩石的微量元素地球化学特征, 但部分晚期基性岩的 REE 和微量元素地球化学特征同时表现出 N-MORB 和岛弧的属性, 可能代表晚期基性岩形成于早期岛弧发生弧内伸展后的弧后盆地环境。



### 3.3 构造意义

众所周知,单一地依赖微量元素判别图解来识别古构造环境有时可能会出现偏差,应结合岩相学、岩石组合特征等多元因素方能正确判断其构造背景(邓晋福等,1999)。因此,本文根据上述岩石学、岩石地球化学及年代学证据,推测哀牢山西部晚古生代具有从岛弧向弧后盆地演化的趋势,该模式与Bédard等(1998)、Dilek和Polat(2008)提出的俯冲带上盘弧内伸展模式类似。Bédard(1998)认为由于大洋板片的俯冲,早期在俯冲带上盘形成岛弧。随着板片后撤,俯冲带上盘岛弧地区发生弧内伸展,从而逐渐从岛弧环境转变为弧后盆地环境。典型的例子如纽芬兰地区的Betts Cove蛇绿岩,该地区同时出露钙碱性和拉斑质系列的岩浆岩(Bédard *et al.*, 1996),晚期蛇绿岩中出现大量早期玻安质的岛弧火山岩(Bédard *et al.*, 1998),该特征与哀牢山西部的岩石、地层分布情况十分相似。大龙凯-五素-雅轩桥岛弧-弧后盆地东侧为双沟蛇绿岩,代表哀牢山古特提斯支洋/弧后盆地的残余(Jian *et al.*, 2009a, 2009b; Lai *et al.*, 2014b),西侧为昌宁-孟连缝合带所代表的古特提斯主洋(钟大赉,1998; Feng, 2002; Wang *et al.*, 2017)。考虑到西侧古特提斯主洋与大龙凯-五素-雅轩桥岛弧-弧后盆地之间隔着临沧岛弧、景洪弧后盆地以及思茅地块(Wang *et al.*, 2017),而东侧哀牢山古特提斯支洋/弧后盆地更为靠近大龙凯-五素-雅轩桥地区,本文认为,哀牢山古特提斯支洋/弧后盆地向西俯冲导致哀牢山西部大龙凯-五素-雅轩桥岛弧-弧后盆地的形成。该过程与前人认为的金沙江-哀牢山-马江古特提斯支洋/弧后盆地向西俯冲的观点(Hoa *et al.*, 2008; Jian *et al.*, 2009a, 2009b; Liu *et al.*, 2012; Roger *et al.*, 2012; Kamvong *et al.*, 2014)一致。

综合以上的研究,本文提出哀牢山西部晚古生代多阶段演化模式(图8): ① 早二叠世(288~287 Ma),碎屑锆石年龄特征表明,晚古生代老王寨-墨江-绿春一带仍属于思茅-印支地块(Wang *et al.*, 2014; Xia *et al.*, 2016),哀牢山西部晚古生代岛弧/弧后盆地形成于洋-陆俯冲作用。由于哀牢山支洋/弧后盆地向西发生洋-陆俯冲,导致思茅地块东缘形成陆缘弧(图8a); ② 中二叠世(272~265 Ma),随着板片持续向西俯冲,俯冲板片向东发生后撤作用,导致俯冲带上盘岛弧发生弧内伸展,并向两侧不断扩张,最终形成弧后盆地环境(图8b);

③ 晚二叠世(257~255 Ma),区域上与三叠系的沉积角度不整合以及坪河乡等地区发现的257~255 Ma同碰撞花岗岩等证据,表明该时期哀牢山西部逐渐进入碰撞造山阶段(Lai *et al.*, 2014b)(图8c)。

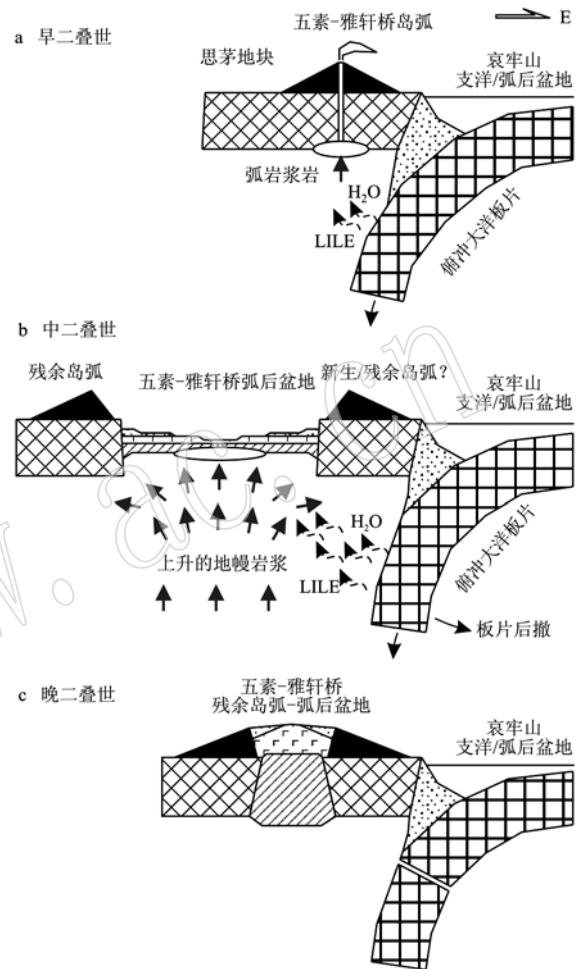


图8 哀牢山西部晚古生代构造演化图

Fig. 8 Conceptual diagram illustrating the tectonic evolution of western Ailaoshan in Late Paleozoic

a—Early Permian, westward subduction of the Ailaoshan branch ocean/back-arc basin formed the continental marginal arc in the east margin of Simao terrane; b—Middle Permian, slab rollback led to the continental marginal arc extension to a back-arc basin; c—Late Permian, closure of the back-arc basin

## 4 结论

(1) 哀牢山西部晚古生代存在两个时期的基性岩,早期(288~287 Ma)形成玄武岩、玄武安山岩、火山凝灰岩等酸性-基性岩石组合,而晚期(272~

265 Ma)则以斜长辉石岩、辉长岩和玄武岩等基性-超基性岩石组合为特征,两者可能形成于不同的构造背景。

(2) 地球化学研究表明,早期基性岩主要为钙碱性岩石系列,晚期基性岩则主要为拉斑质系列。两期基性岩均具有岛弧岩石的部分特征,但不尽相同。晚期基性岩可能形成于早期岛弧进一步伸展后的弧后盆地环境,从而证明哀牢山西部在晚古生代时期经历了从岛弧到弧后盆地环境的演化过程。

**致谢** 本文在实验和撰文过程中得到了中国地质科学院地质研究所许王博士的悉心指导和帮助,匿名审稿专家提出了非常宝贵的修改意见,为文章的形成和理论提升提供了极大的帮助,在此深表感谢。

## References

- Aldanmaz E, Pearce J A, Thirlwall M F, *et al.* 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 102(1): 67 ~ 95.
- Bédard J H, Lauzière K, Sangster A, *et al.* 1996. Geological map of the Betts Cove ophiolitic massif and its cover rocks[J]. *Geophysics Research*, 101: 25 105 ~ 25 124.
- Bédard J H, Lauzière K, Tremblay A, *et al.* 1998. Evidence for forearc seafloor-spreading from the Betts cove ophiolite, Newfoundland: Oceanic crust of boninitic affinity[J]. *Tectonophysics*, 284(3 ~ 4): 233 ~ 245.
- Chung S, Lee T, Lo C, *et al.* 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan-Red River shear zone[J]. *Geology*, 4: 311 ~ 314.
- Class C, Miller D M, Goldstein S L, *et al.* 2013. Distinguishing melt and fluid subduction components in Umnak Volcanics, Aleutian Arc[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 1(6): 1 ~ 28.
- Deng J, Wang Q, Li G, *et al.* 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 138: 268 ~ 299.
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 1999. Igneous petro-tectonic assemblage and crust-mantle metallogenic system[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 66 ~ 77 (in Chinese with English abstract).
- Dilek Y and Flower M F J. 2003. Arc-trench rollback and forearc accretion: 2. A model template for ophiolites in Albania, Cyprus, and Oman[J]. *Geological Society London Special Publication*, 218(1): 43 ~ 68.
- Dilek Y and Polat A. 2008. Suprasubduction zone ophiolites and Archean tectonics[J]. *Geology*, 5: 431 ~ 432.
- Ellam R M and Hawkesworth C J. 1988. Elemental and isotopic variations in subduction related basalts: Evidence for a three component model[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 98(1): 72 ~ 80.
- Fan W M, Wang Y J, Zhang A, *et al.* 2010. Permian arc-back-arc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: Geochemical, isotopic and geochronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China[J]. *Lithos*, 119(3): 553 ~ 568.
- Fang N Q, Liu B P, Feng Q L, *et al.* 1994. Late Palaeozoic and Triassic deep-water deposits and tectonic evolution of the Palaeotethys in the Changning-Menglian and Lancangjiang belts, southwestern Yunnan[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 363 ~ 374.
- Feng Q L. 2002. Stratigraphy of volcanic rocks in the Changning-Menglian Belt in southwestern Yunnan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(6): 657 ~ 664.
- Ferrari O M, Hochard C and Stampfli G M. 2008. An alternative plate tectonic model for the Palaeozoic-Early Mesozoic Palaeotethyan evolution of Southeast Asia (Northern Thailand-Burma)[J]. *Tectonophysics*, 451(1): 346 ~ 365.
- Gill R. 2010. *Igneous Rocks and Processes: A practical Guide*[M]. Wiley-Blackwell.
- Han Song, Qian Qing, Xu Ping, *et al.* 1998. Geochemistry of the early carboniferous Wusu volcanic, Mojiang county, Yunnan, and its tectonic significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 4(3): 78 ~ 85 (in Chinese with English abstract).
- Hawkesworth C, Turner S, Gallagher K, *et al.* 1995. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Range[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 100(B6): 10 271 ~ 10 286.
- Hickey R L and Frey F A. 1982. Geochemical characteristics of boninite series volcanics: Implications for their source[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(11): 2 099 ~ 2 115.
- Hoa T T, Anh T T, Phuong N T, *et al.* 2008. Permo-Triassic intermediate felsic magmatism of the Truong Son belt, eastern margin of Indochina[J]. *Comptes rendus-Géoscience*, 340(2): 112 ~ 126.
- Huang Zhongxiang, Han Song, Dong Jinquan, *et al.* 1993. Rare earth element geochemistry of Shuanggou ophiolites from Xinping county, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(3): 205

- ~212(in Chinese with English abstract).
- Ji Lei, Liu Fulai, Wang Fang, *et al.* 2016. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of metasedimentary rocks in Gasa area, middle-north segment of Ailao Mountain metamorphic complex belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(6): 1 003 ~ 1 024(in Chinese with English abstract).
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, *et al.* 2009a. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (I): Geochemistry of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks[J]. *Lithos*, 113(3): 748 ~ 766.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, *et al.* 2009b. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province[J]. *Lithos*, 113(3): 767 ~ 784.
- Jian P, Liu D Y and Sun X M. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5): 371 ~ 384.
- Kamvong T, Zaw K, Meffre S, *et al.* 2014. Adakites in the Truong Son and Loei fold belts, Thailand and Laos: Genesis and implications for geodynamics and metallogeny[J]. *Gondwana Res.*, 26(1): 165 ~ 184.
- Lai C K, Meffre S, Crawford A J, *et al.* 2014a. The Central Ailaoshan ophiolite and modern analogs[J]. *Gondwana Research*, 26(1): 75 ~ 88.
- Lai C K, Meffre S, Crawford A J, *et al.* 2014b. The western Ailaoshan volcanic belts and their SE Asia connection: A new tectonic model for the eastern Indochina Block[J]. *Gondwana Research*, 26(1): 52 ~ 74.
- Li Wuping and Lu Fengxiang. 1999. New progress of the study of geologic setting for calc-alkaline volcanic rocks[J]. *Geological Science and Technology Information*, 18(2): 16 ~ 19(in Chinese with English abstract).
- Liu Cui, Deng Jinfu, Liu Junlai, *et al.* 2011. Characteristics of volcanic rocks from Late Permian to Early Triassic in Ailaoshan tectono-magmatic belt and implications for tectonic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3 590 ~ 3 602(in Chinese with English abstract).
- Liu H C, Wang Y J, Cawood P A, *et al.* 2017a. Episodic slab rollback and back-arc extension in the Yunnan-Burma region: Insights from Cretaceous Nb-enriched and oceanic-island basalt-like mafic rocks[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 129(5): 698 ~ 714.
- Liu H C, Wang Y J, Guo X F, *et al.* 2016. Late Triassic post-collisional slab break-off along the Ailaoshan suture: Insights from OIB-like amphibolites and associated felsic rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106: 1 359 ~ 1 373.
- Liu H C, Wang Y J and Zi J W. 2017b. Petrogenesis of the Dalongkai ultramafic-mafic intrusion and its tectonic implication for the Paleotethyan evolution along the Ailaoshan tectonic zone (SW China) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 141: 112 ~ 124.
- Liu Junlai, Tang Yuan, Song Zhijin, *et al.* 2011. The Ailaoshan Belt in Western Yunnan: Tectonic framework and tectonic evolution[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1 285 ~ 1 303(in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Tran M D, Tang Y, *et al.* 2012. Permo-Triassic granitoids in the northern part of the Truong Son belt, NW Vietnam: Geochronology, geochemistry and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 628 ~ 644.
- Mccarron J J and Smellie J L. 1998. Tectonic implications of fore-arc magmatism and generation of high-magnesian andesites: Alexander Island, Antarctica[J]. *Journal of the Geological Society*, 155(2): 269 ~ 280.
- McCulloch M T and Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3): 358 ~ 374.
- Metcalfe I. 1996a. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 43(6): 605 ~ 623.
- Metcalfe I. 1996b. Pre-Cretaceous evolution of SE Asian terranes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 106(1): 97 ~ 122.
- Metcalfe I. 1999. The Tethys : How many? how old? how deep? how wide? [C]. *International Symposium Shallow Tethys*, 1 ~ 15.
- Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(6): 551 ~ 566.
- Metcalfe I. 2006. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context[J]. *Gondwana Research*, 9(1): 24 ~ 46.
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1 ~ 33.
- Mo Xuanxue, Shen Shangyue and Zhu Qinwen. 1998. *Volcanics-Ophiolites and Related Mineralization in the Middle Southern Segment of Sanjiang Region*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 128(in Chinese).
- Naldrett A J. 2005. A history of our understanding of magmatic Ni-Cu sul-

- fide deposits[J]. *The Canadian Mineralogist*, 43(6): 2 069 ~ 2 098.
- Pearce J A, Alabaster T, Shelton A W, *et al.* 1981. The Oman Ophiolite as a Cretaceous arc-basin complex: Evidence and implications[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 300(1 454): 299 ~ 317.
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and planetary science letters*, 19: 290 ~ 300.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti-Zr-Y and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 69: 33 ~ 47.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[A]. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*[C]. 525 ~ 548.
- Polat A, Appel P W U and Fryer B J. 2011. An overview of the geochemistry of Eoarchean to Mesarchean ultramafic to mafic volcanic rocks, SW Greenland: Implications for mantle depletion and petrogenetic processes at subduction zones in the early Earth[J]. *Gondwana Research*, 20(2): 255 ~ 283.
- Roger F, Maluski H, Lepvrier C, *et al.* 2012. LA-ICPMS zircon U/Pb dating of Permo-Triassic and Cretaceous magmatism in Northern Vietnam: Geodynamical implications[J]. *Asian Earth Science*, 48: 72 ~ 82.
- Sang Longkang and Ma Changqian. 2012. *Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 620(in Chinese).
- Su B X, Qin K Z, Santosh M, *et al.* 2013. The Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan Terrane, NW China: Alaskan-type intrusives or rift cumulates? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 175 ~ 187.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, (1): 313 ~ 345.
- Tatsumi Y. 1989. Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 94(B4): 4 697 ~ 4 707.
- Thakurta J, Ripley E M and Li C. 2013. Geochemical constraints on the origin of sulfide mineralization in the Duke Island Complex, southeastern Alaska[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(7): .
- Trung N M, Tsujimori T and Itaya T. 2006. Honvong serpentinite body of the Song Ma fault zone, Northern Vietnam: A remnant of oceanic lithosphere within the Indochina-South China suture[J]. *Gondwana Research*, 9(1): 225 ~ 230.
- Wang B Q, Zhou M F, Li J W, *et al.* 2011. Late Triassic porphyritic intrusions and associated volcanic rocks from the Shangri-La region, Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic magmatism and porphyry copper mineralization[J]. *Lithos*, 127(1): 24 ~ 38.
- Wang C M, Bagas L, Lu Y J, *et al.* 2016. Terrane boundary and spatio-temporal distribution of ore deposits in the Sanjiang Tethyan Orogen: Insights from zircon Hf-isotopic mapping[J]. *Earth-Science Reviews*, 156: 39 ~ 65.
- Wang Q F, Deng J, Li C, *et al.* 2014. The boundary between the Simao and Yangtze blocks and their locations in Gondwana and Rodinia: Constraints from detrital and inherited zircons[J]. *Gondwana Research*, 26(2): 438 ~ 448.
- Wang X F, Metcalfe I, Jian P, *et al.* 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, (6): 675 ~ 690.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, *et al.* 2006. Kinematics and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Gaoligong and Chongshan shear systems, western Yunnan, China: Implications for early Oligocene tectonic extrusion of SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 418(3): 235 ~ 254.
- Wang Y J, Qian X, Cawood P A, *et al.* 2017. Closure of the East Paleotethyan Ocean and amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia continental fragments[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 195 ~ 230.
- Wei Qirong, Shen Shangyue and Yu Huazhen. 1999. The genesis of pyroxene basalts and plagioclase basalts in the Ailaoshan Ophiolite Zone, Yunnan[J]. *Tethyan Geology*, (23): 43 ~ 49(in Chinese with English abstract).
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325 ~ 343.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establish the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 50: 11 ~ 30.
- Xia X P, Nie X S, Lai C K, *et al.* 2016. Where was the Ailaoshan Ocean and when did it open: A perspective based on detrital zircon U-Pb age and Hf isotope evidence[J]. *Gondwana Research*, 36: 488 ~ 502.
- Xu W, Dong Y S, Zhang X Z, *et al.* 2016. Petrogenesis of high-Ti mafic dykes from Southern Qiangtang, Tibet: Implications for a ca. 290Ma large igneous province related to the early Permian rifting of Gondwana[J]. *Gondwana Research*, 36: 410 ~ 422.
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, *et al.* 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood ba-



- salts in southwestern China[J]. *Lithos*, 58(3): 145 ~ 168.
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Li Zhonghai, *et al.* 2016. Indo-Asian collision: Tectonic transition from compression to strike slip[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(1): 1 ~ 23(in Chinese with English abstract).
- Yumul G P, Zhou M F, Wang C Y, *et al.* 2008. Geology and geochemistry of the Shuanggou ophiolite(Ailao Shan ophiolitic belt), Yunnan Province, SW China: Evidence for a slow-spreading oceanic basin origin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5): 385 ~ 395.
- Yunnan Bureau Geological Mineral Resource. 1990. Regional Geology of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 728(in Chinese).
- Zellmer G F, Rubin K H, Dulski P, *et al.* 2011. Crystal growth during dike injection of MOR basaltic melts: Evidence from preservation of local Sr disequilibria in plagioclase[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(1): 153 ~ 173.
- Zhang Q, Wang C Y, Liu D, *et al.* 2008. A brief review of ophiolites in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5): 308 ~ 324.
- Zhang Qi and Zhou Guoqing. 2001. Ophiolites of China[M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 182(in Chinese).
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, *et al.* 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 262 ~ 286.
- Zhong Dalai. 1998. Paleotethysides in Western Yunnan and Sichuan, China[M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 231(in Chinese).
- Zhou Dejin, Zhou Yunsheng and Xu Ping. 1992. Carboniferous and Late Permian volcanic rocks of western Mojiang, Yunnan[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 249 ~ 259(in Chinese with English abstract).
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, *et al.* 2012. Contrasting rift and subduction-related plagiogranites in the Jinshajiang ophiolitic mélange, southwest China, and implications for the Paleo-Tethys[J]. *Tectonics*, 31(2): 1 ~ 18.
- Zi J W, Fan W M, Wang Y J, *et al.* 2010. U-Pb geochronology and geochemistry of the Dashibao Basalts in the Songpan-Ganzi Terrane, SW China, with implications for the age of Emeishan volcanism[J]. *American Journal of Science*, 310(9): 1 054 ~ 1 080.
- 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等. 1999. 火成岩构造组合与壳-幔成矿系统[J]. *地学前缘*, 6(2): 66 ~ 77.
- 韩 松, 钱 青, 徐 平, 等. 1998. 云南墨江县早石炭世五素火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *地质力学学报*, 4(3): 78 ~ 85.
- 黄忠祥, 韩 松, 董金泉, 等. 1993. 云南新平县双沟蛇绿岩稀土元素地球化学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 12(3): 205 ~ 212.
- 冀 磊, 刘福来, 王 舫, 等. 2016. 点苍山-哀牢山杂岩带中北段嘎洒地区变沉积岩的成因矿物学与变质演化特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(6): 1 003 ~ 1 024.
- 李伍平, 路凤香. 1999. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展[J]. *地质科技情报*, 18(2): 16 ~ 19.
- 刘 翠, 邓晋福, 刘俊来, 等. 2011. 哀牢山构造岩浆带晚二叠世-早三叠世火山岩特征及其构造环境[J]. *岩石学报*, 27(12): 3 590 ~ 3 602.
- 刘俊来, 唐 渊, 宋志杰, 等. 2011. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(5): 1 285 ~ 1 303.
- 莫宣学, 沈上越, 朱勤文. 1998. 三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 128.
- 桑隆康, 马昌前. 2012. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 620.
- 魏启荣, 沈上越, 禹华珍. 1999. 哀牢山蛇绿岩带两种玄武岩的成因探讨[J]. *特提斯地质*, (23): 43 ~ 49.
- 许志琴, 王 勤, 李忠海, 等. 2016. 印度-亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换[J]. *地质学报*, 90(1): 1 ~ 23.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 728.
- 张 旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 182.
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 231.
- 周德进, 周云生, 徐 平. 1992. 滇西墨江西部石炭、二叠纪火山岩[J]. *地质科学*, (3): 249 ~ 259.