

滇西昌宁-孟连结合带石炭纪火山-沉积地层时代与构造环境

王恩泽^{1,2}, 罗亮^{1*}, 徐争启², 谢韬¹, 黄晓明¹

WANG Enze^{1,2}, LUO Liang^{1*}, XU Zhengqi², XIE Tao¹, HUANG Xiaoming¹

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要:昌宁-孟连结合带内大面积出露石炭纪火山-沉积地层,对其时代的精确厘定及古构造环境的识别,有助于认识和恢复昌宁-孟连结合带乃至东古特提斯洋演化。通过详细的野外地质调查与剖面测制,查明玄武岩与碳酸盐岩之间为整合接触关系。对碳酸盐岩开展了详细的微相分析,识别出4种微相类型,分别为颗粒生屑灰岩(MF1)、似球粒泥粒生屑灰岩(MF2)、鲕粒灰岩(MF3)和含珊瑚碎屑礁灰岩(MF4),主体形成于热带-亚热带较温暖的古气候背景,代表了浅水高能环境。对碳酸盐岩与玄武岩之间的凝灰岩夹层开展锆石 U-Pb 定年研究,获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 351.7 ± 2.5 Ma,表明玄武岩的喷发时代为早石炭世。该套火山-沉积地层岩石组合包括具有 OIB 型地球化学特征的玄武岩、礁灰岩、塌积砾岩、凝灰岩等,将其构造环境厘定为洋岛-海山。该洋岛-海山是三江造山带洋壳残片的重要组成部分,记录了古特提斯洋盆构造演化及造山带形成过程的重要信息。

关键词:碳酸盐岩微相;锆石 U-Pb 定年;地球化学;洋岛-海山;滇西

中图分类号:P534.45;P597⁺.3;P587 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)11-1920-13

Wang E Z, Luo L, Xu Z Q, Xie T, Huang X M. The age and tectonic environment of Carboniferous volcanic-sedimentary strata in Changning-Menglian zone, Western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1920-1932

Abstract: A large area of Carboniferous volcanic-sedimentary strata is exposed in the Changning-Menglian junction. The precise determination of its age and the identification of the paleo-tectonic environment are of great significance for understanding and restoration of Changning-Menglian zone and evolution of the Eastern Paleotethys Ocean. The detailed field geological survey and profile surveying indicate that the contact between basalt and carbonate rock is conformity. A detailed microfacies analysis was carried out on carbonate rocks, and four types of microfacies were identified, granular bioclastic limestone (MF1), spherulitic mud particles bioclastic limestone (MF2), oolitic limestone (MF3) and coral clastic reef limestone (MF4), indicating that the main carbonate rock was formed in a shallow-water high-energy environment under a warmer tropical-subtropical palaeoclimate background. Zircon U-Pb dating of the tuff interbedded between carbonate rock and basalt yields the average age of 351.7 ± 2.5 Ma, indicating that the eruption of basalt was in the Early Carboniferous. This set of volcanic-sedimentary rocks include basalt, reef limestone, tuff, etc. with OIB-type geochemical characteristics, and its tectonic environment is defined as ocean island-seamount, which is an important part of oceanic crust fragments in

收稿日期:2021-05-06;修订日期:2021-07-24

资助项目:国家自然科学基金项目《基于古生物与锆石年代学综合研究限定南澜沧江带中—晚三叠世火山地层时代》(批准号:41802031)、中国地质调查局项目《三江造山带昌都—澜沧地区区域地质调查》(编号:DD20190053)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目《典型地区岩石圈组成、演化与深部过程》(编号:2019QZKK0702)

作者简介:王恩泽(1994-),男,在读硕士生,从事地层学、岩石地球化学研究。E-mail:948848497@qq.com

* 通信作者:罗亮(1987-),男,硕士,高级工程师,从事地层学、沉积学与微体古生物学研究。E-mail:lianglcs@126.com

the Sanjiang orogen and records important information about the tectonic evolution of the Paleo-Tethys oceanic basin and the formation process of the orogenic belt.

Key words: carbonate rock microfacies; zircon U-Pb dating; geochemistry; ocean island-seamounts; Western Yunnan

西南三江构造带位于青藏高原东南缘,是东特提斯构造域的重要组成部分,也是由特提斯洋俯冲削减、冈瓦纳和欧亚板块碰撞拼合形成的复杂构造带^[1-7]。昌宁-孟连结合带位于三江构造带南段,保山-耿马和思茅-临沧地块之间,因记录了原-古特提斯演化的成岩和成矿事件得到地质学家的广泛关注^[8-12]。前人对昌宁-孟连带研究主要是从蛇绿岩^[8, 13-14]、高压变质岩^[15-20]、构造古地理^[9, 21-23]等方面探讨原-古特提斯洋演化,而对该带内大面积分布的平掌组玄武岩和鱼塘寨组碳酸盐岩的研究较少,其时代和构造属性的厘定,对认识和恢复昌宁-孟连结合带乃至东古特提斯演化具有重要意义。

昌宁-孟连带内石炭纪火山-沉积地层可分为平掌组玄武岩和鱼塘寨组碳酸盐岩,对二者之间的接触关系历来有整合接触、假整合与构造接触之争。对该套火山-沉积地层构造属性尚存保山地块东缘的一套稳定的浅海碳酸盐岩台地相沉积^[24]、源自东侧的飞来峰或与下伏的平掌组共同构成飞来峰^[25-26]、洋岛海山组合^[27-29]等不同认识。关于玄武岩的时代,前人没有精确的同位素年龄约束,仅从其灰岩夹层中获得了间接的证据。笔者对玄武岩与碳酸盐岩之间的凝灰岩开展了锆石 U-Pb 定年,旨在精确限定玄武岩的喷发时限。同时对鱼塘寨组碳酸盐岩开展了详细微相分析,判断灰岩的沉积环境,最后结合玄武岩主量、微量元素特征,探讨玄武岩与碳酸盐岩形成的古构造环境,为昌宁-孟连结合带构造演化提供证据。

1 区域地质背景及采样

西南三江造山带南段主要由金沙江结合带、南澜沧江结合带、昌宁-孟连对接带、潞西-瑞丽结合带(?)和兰坪-思茅地块、临沧-勐海增生地块、保山-镇康地块和腾冲-梁河岩浆弧构成^[30-31](图 1-a)。

昌宁-孟连对接带东侧澜沧岩群的构造属性被厘定为是一套与原-古特提斯洋演化相关的俯冲增生杂岩,其内发育大量高压变质岩^[15-20, 32-34]。同时,前人报道了昌宁-孟连对接带西部保存较好的早一晚古生代岩浆记录,包括牛井山英云闪长岩^[10]、南汀

河堆晶辉长岩^[8]、奥陶纪花岗岩^[35]、牛井山斜长角闪岩^[13]等,认为其代表了原-古特提斯洋演化残迹。研究区所在的昌宁-孟连对接带可进一步细分为双江-澜沧俯冲杂岩带和昌宁-孟连结合带^[36](图 1-a)。

昌宁-孟连带中部团结地区广泛出露较好的石炭纪火山-沉积地层,为观察其岩石组合、接触关系、古生物化石特征等提供了基础保障。研究区还出露昌宁-孟连带东部的早古生界澜沧岩群,主要为白云母石英片岩、二云母石英片岩夹少量蓝闪石片岩、榴辉岩等。上古生界主要为一套浅变质碎屑岩,自下而上分为泥盆系-石炭系南段组(DCn)、二叠系拉巴组(Pl)。研究区西部主要出露泥盆系温泉组(Dw)、曼信组(Dm),下石炭统平掌组(C_{1p}z)、石炭系-二叠系鱼塘寨组(CP_Y)、二叠系大明山组(P₂d)(图 1-b),其中温泉组岩性主体为一套细碎屑岩,曼信组以硅质岩为主。平掌组主体为一套基性火山熔岩夹凝灰岩,上部含火山碎屑岩、灰岩夹层或透镜体。鱼塘寨组为一套块状亮晶生物碎屑灰岩。大名山组为浅水台地相碳酸盐岩。

本次研究对沧源县团结乡坝令剖面平掌组玄武岩上部和鱼塘寨组开展了详细的剖面实测工作(图 1-c)。剖面下部出露平掌组玄武岩,镜下呈少斑结构-基质似交织结构,主要由斑晶和基质组成。斑晶主要由斜长石组成,粒径一般为 0.3~0.5 mm,星散状分布。斜长石呈半自形板状,强绢云母化、帘石化发育,个别见较模糊的聚片双晶残留。基质主要由斜长石和暗色矿物假象组成,粒径一般小于 0.1 mm,杂乱分布。斜长石呈半自形板条状,定向-半定向、似交织状分布,蚀变特征与斑晶一致。暗色矿物呈他形粒状,填隙状分布在斜长石粒间,暗色矿物强蚀变呈假象产出。上覆鱼塘寨组碳酸盐岩,主要为亮晶含生屑鲕粒灰岩、含生屑粉泥晶灰岩、重结晶生屑灰岩等。

本次研究在坝令剖面针对平掌组玄武岩采集了 8 个主量、微量分析样品,并对鱼塘寨组碳酸盐岩采集了薄片样品,用于开展微相分析。另在贺南以西平掌组与鱼塘寨组新发现一层凝灰岩夹层,采集了 1 个锆石 U-Pb 同位素定年样品(D0004),并对其下玄武岩按一定间距采集了 8 个主量、微量元素

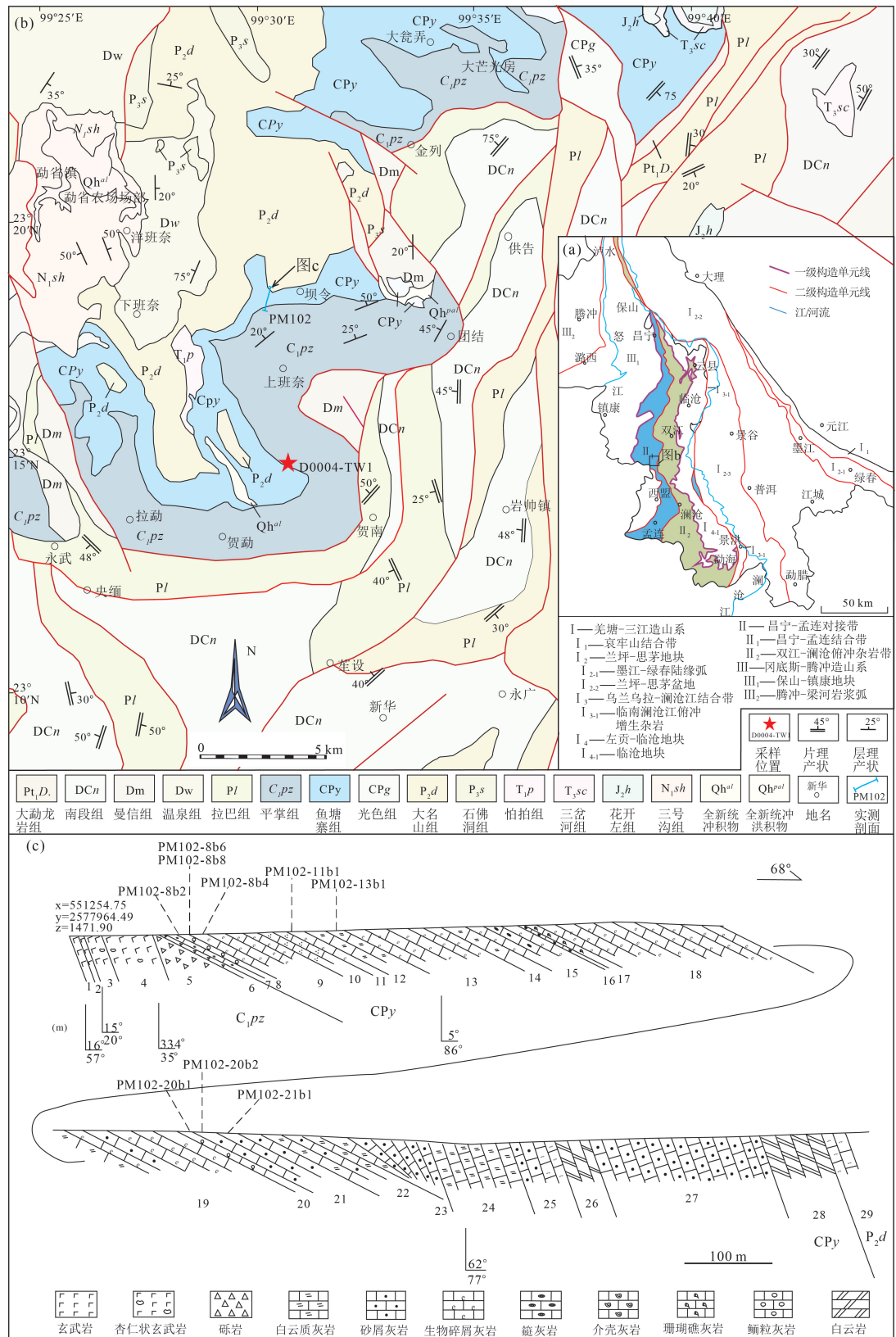
图1 西南三江南段构造简图^[30] (a)、团结地区地质图^① (b)和鱼塘寨组剖面图(c)

Fig. 1 Tectonic map of the south part of the southwestern Sanjiang (a), geological map of the Tuanjie area (b) and section of Yutangzhai Formation (c)

分析样品(图 1-b)。

2 锆石 U-Pb 定年

锆石挑选在廊坊市诚信地质服务公司完成。选择晶形较好、无裂隙的锆石颗粒粘贴在环氧树脂表面制成锆石样品靶,打磨样品靶,使锆石的中心部位暴露出来,然后进行抛光。在武汉上谱分析科技有限责任公司对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)图像分析,最后选择代表性的锆石颗粒和区域进行 U-Pb 测年。

锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质调查局成都地质调查中心实验室完成,激光剥蚀系统为 GeoLasPro 193 nm 激光系统,质谱为高分辨电感耦合等离子体质谱仪 ELEMENT2。实验采用高纯氦为剥蚀物质的载气,激光波长 193 nm,束斑直径 32 μm ,脉冲频率 5 Hz,激光能量 70 mJ。测试前先采用 NIST610 标准调谐仪器至最佳状态,使得 ^{139}La 、 ^{232}Th 信号达到最强,并使氧化物产率小于

0.3%。实验采用锆石标样 GJ-1 为外标进行 U-Pb 同位素分馏效应和质量歧视的校正计算,Plčsovice 锆石标样为监控盲样监视测试过程的稳定性;测试时每 5 个样品点插一组标样^[37]。数据处理采用软件 ICPMSDataCal^[38]。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均值计算均采用 Isoplot/Ex_ver3^[39]完成。

凝灰岩样品(D0004)锆石多为浅黄色短柱状,长度一般为 50~120 μm 。锆石阴极发光(CL)图像显示,大多数锆石具有明显的振荡环带,无继承性核和变质边(图 2),总体上显示岩浆锆石特征,属岩浆结晶的产物。本次对 104 颗锆石开展了 U-Pb 同位素测定,其中 17 颗的谐和度低于 90%,其余的年龄谐和度都在 90% 以上,且大部分高于 95%。从图 3 可以看出,平掌组玄武岩锆石的年龄谐和度较集中。87 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值在 330~390 Ma 之间,从年龄频率分布直方图(图 3-b)可以看出,只存在一个明显的年龄谱峰且极谐和,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年

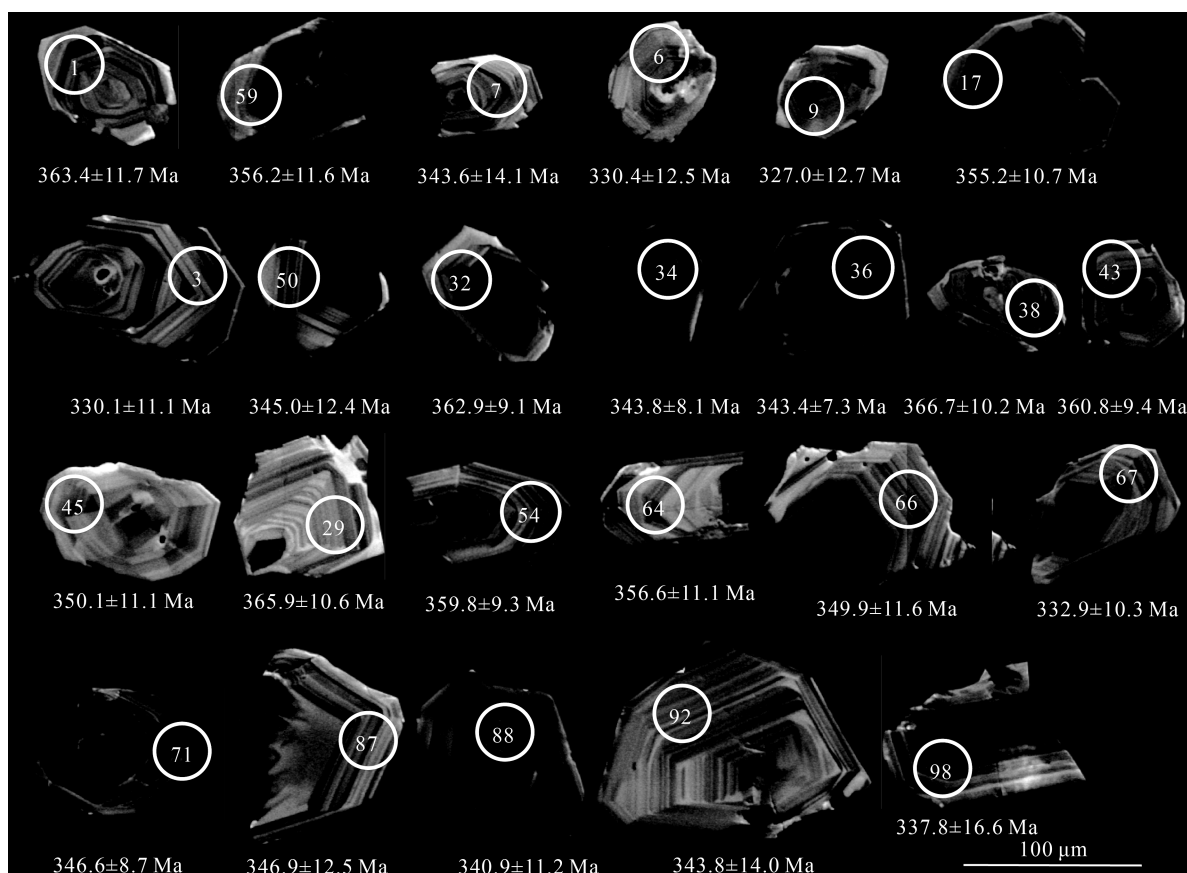


图 2 平掌组顶部凝灰岩代表性锆石阴极发光(CL)图像和分析点位

Fig. 2 The representative CL images of zircons with analyzed spots of crystal tuff from the top of the Pingzhang Formation

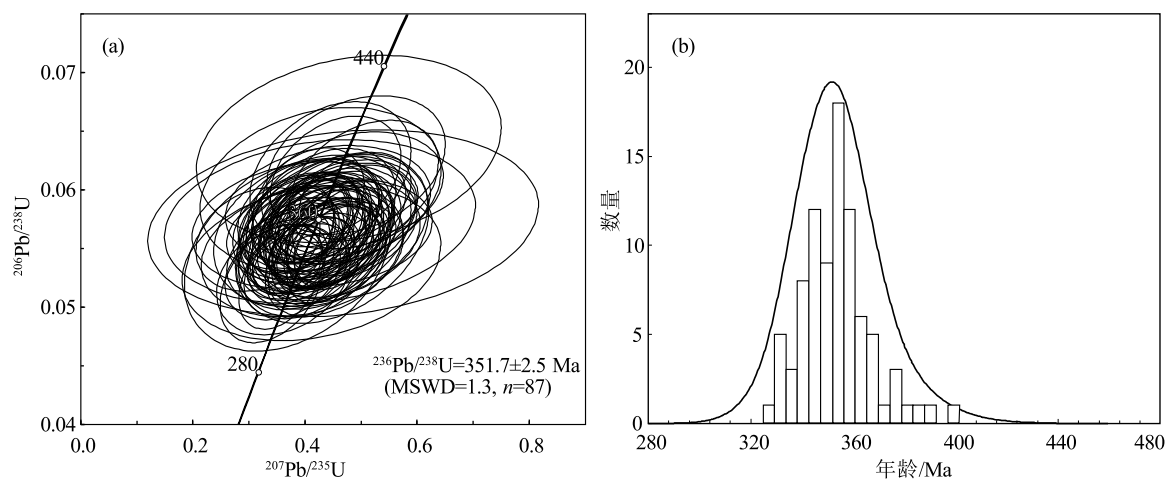


图3 平掌组顶部凝灰岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及频率分布直方图(b)

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and histogram (b) of tuff from the top of the Pingzhang Formation

龄加权平均值为 351.7 ± 2.5 Ma (MSWD = 1.3, $n = 87$) (图3-a), 表明平掌组玄武岩形成时代主体为早石炭世。

3 平掌组和鱼塘寨组的接触关系

研究区构造作用强烈, 断层发育, 岩性不同的地层接触关系往往被破坏, 为地层学研究带来一些假象。因此, 这些地区的地层学研究既需要深入的野外调查, 尽量找出那些没有被破坏的接触关系, 也需要古生物学、构造地质学、岩石学等学科的配合, 通过综合分析, 达到正确认识地层接触关系的目的^[40]。鱼塘寨组与下伏平掌组之间历来有整合接触、假整合^[40-43]与构造接触^[25-26]之争。

彭寿增^[44]因为没有看到二者之间的实际接触面, 对它们的正常叠置关系提出了疑问。吴根耀^[25]明确主张构造接触的观点, 认为鱼塘寨组碳酸盐岩是由东向西推覆而来的飞来峰。吴根耀^[26]认为, 鱼塘寨组与平掌组共同构成飞来峰, 所谓的依柳组、平掌组是一些逆冲岩片的叠置。方宗杰等^[45]认为, 平掌组与鱼塘寨组之间为沉积接触, 并进一步分为突变接触(假整合)、存在古岩溶面或玄武岩“红顶”标志的小间断接触及整合接触3种接触关系。

本次研究对石炭纪火山-沉积地层开展了翔实的野外地质调查和剖面实测。平掌组(C_{1pz})主体为一套基性火山熔岩夹凝灰岩, 上部含火山碎屑岩、灰岩夹层或透镜体。上覆鱼塘寨组为一套浅水高能块状亮晶生物碎屑灰岩, 两者之间主体为整合接触关系(图4-a), 部分地区受后期构造破坏。在

沧源县团结乡坝令剖面上于二者接触界线附近见含钙质凝灰岩与灰岩韵律互层沉积(图4-e), 并在之下玄武岩中见大量灰岩角砾(图4-c)。因永村玄武岩与白云岩之间自下而上由含碳酸盐岩凝灰岩渐变为条带状灰岩和白云质灰岩, 其间可见凝灰质灰岩与含钙质凝灰岩的韵律层。综上认为, 平掌组玄武岩与鱼塘寨组碳酸盐岩之间原始应为整合接触关系, 但是多数地区后期在玄武岩与碳酸盐岩不同界面上常发生构造作用而表现为断层接触。

4 碳酸盐岩微相分析

在本次研究中, 岩石切片样品按照野外分层逐层采集样品, 8~28层, 对于分层厚度较大且岩性有明显差异的层分别取样, 共采集27件样品。经过室内磨制垂直薄片, 得到岩石薄片27片。镜下微相观察的重点是区分岩石中生物类型、磨蚀程度、岩石组成、颗粒粒度及其他沉积组构^[46], 结合野外观察的岩石宏观标志, 参照标准微相类型及其沉积环境解释模式^[47], 对该剖面碳酸盐岩进行微相分析。笔者在鱼塘寨组中识别出4种微相类型: MF1 颗粒生屑灰岩、MF2 似球粒泥粒生屑灰岩、MF3 鲕粒灰岩和 MF4 含珊瑚碎屑礁灰岩。在野外肉眼识别出部分古生物类型, 主要以有孔虫、珊瑚居多。

MF1 颗粒生屑灰岩: 还包括砾屑灰岩, 新鲜面呈土黄色、浅灰色, 中厚层块状, 岩石外部多出现孔洞, 内部可见许多碳酸盐岩脉, 在岩石表面可明显地观察到直径数毫米的海百合及数厘米的有孔虫化石。颗粒含量大于60%, 一般为0.1~2 mm, 零

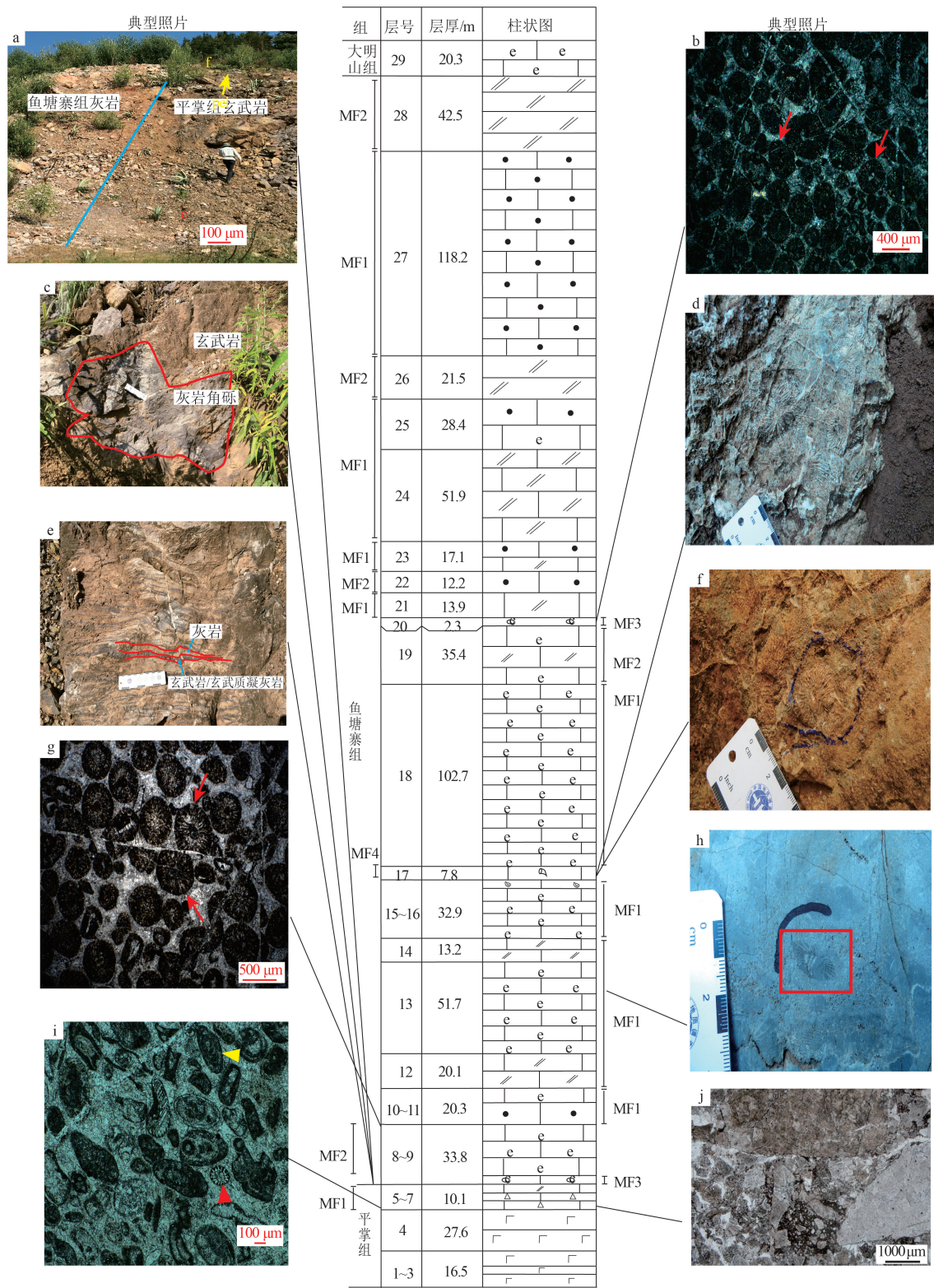


图 4 滇西沧源县鱼塘寨地区石炭纪火山-沉积地层柱状图及野外、镜下照片

Fig. 4 Column of Carboniferous volcanic-sedimentary strata, field and microphotographs in the Yutangzhai area, Cangyuan County, western Yunnan

a—整合接触界线; b—鲕粒灰岩; c—灰岩角砾; d—礁灰岩; e—韵律互层沉积; f—礁灰岩; g—似球粒泥粒灰岩; h—生物碎屑灰岩; i—颗粒生屑灰岩; j—塌积砾岩

散分布,镜下观察到的颗粒主要为似球粒、双壳类、苔藓虫、海百合等正常海相底栖生物化石组合,部分生物碎屑颗粒保存完整。填隙物类型主要为亮晶方解石和泥晶方解石,占比为 15%~25%。通过对颗粒类型及填隙物类型分辨,将颗粒生屑灰岩细分为亮晶生屑似球粒灰岩和重结晶亮晶生屑灰岩 2 种岩石类型。其中亮晶生屑似球粒灰岩(图 4-h,i)颗粒类型以似球粒为主,似球粒含量为 20%~30%;生屑含量 75%~80%,颗粒粒径 0.2~1.2 mm,类型主要为有孔虫、腕足类、珊瑚类、腹足类等,珊瑚类生屑含量较少,内部仍可见清晰的有孔虫、珊瑚结构。似球粒颗粒分选性一般、磨圆度较好,颗粒经过泥晶化改造,原始结构较模糊;填隙物主要由泥晶方解石和亮晶方解石组成,粒度一般小于 0.01 mm,极少部分为粒径 0.01~0.05 mm 的粉晶,部分具晶粒结构,粒度 0.05~0.15 mm,呈填隙状分布在生物碎屑之间,而且还可见多条岩裂隙充填的碳酸盐脉。

重结晶亮晶生屑灰岩:在镜下可以观察到明显的重结晶现象,颗粒类型以残余生物碎屑和方解石晶粒为主,生屑类型主要为不完整的海百合、有孔虫、珊瑚等,零散分布,粒度一般为 0.3~2.5 mm,组成矿物为方解石,部分生物碎屑边部被方解石交代,仅见少量残留。颗粒生屑灰岩中的古生物类型较丰富,可见生活于浅水环境的珊瑚及海百合化石,泥质成分较少,相当于 Flügel^[47]总结的标准微相类型 SMF8、SMF12,其形成环境为在浪基面附近或浪基面之上受波浪作用影响的深水陆棚环境及斜坡环境。

MF2 似球粒泥粒生屑灰岩:主要由生屑、内碎屑、填隙物组成(图 4-g)。镜下的生屑主要包含有孔虫、棘皮类、珊瑚类、苔藓虫、海百合等,零散分布,粒度一般为 0.1~2 mm,组成矿物为方解石。内碎屑呈次圆状,磨圆度中等,星散分布,粒度一般为 0.2~1.5 mm,为砂级内碎屑,成分主要为泥晶灰岩、粉泥晶灰岩等。填隙物主要由泥晶基质和亮晶胶结物组成,主要组成矿物为方解石,呈他形粒状,具晶粒结构,粒度一般为 0.01~0.05 mm,少部分为小于 0.01 mm 的泥晶。岩石后期经历白云石化作用,白云石呈自形一半自形菱形,粒径一般为 0.01~0.1 mm,星散状分布。岩内可见多条沿裂隙充填的碳酸盐岩脉呈网脉状分布。上述似球粒泥粒生屑灰岩在

镜下可以观察到分选性较好,具定向性,古生物化石保存较完整,反映当时的沉积环境较稳定,与 Flügel^[47]总结的标准微相类型 SMF10 可对比,推测其形成环境为开放水循环的陆棚潟湖。

MF3 鲕粒生屑灰岩:呈浅灰色,岩内可见多条沿裂隙充填的碳酸盐岩脉呈网脉状分布,岩石主要由鲕粒、生屑以及填隙物组成(图 4-b)。鲕粒的平均含量多在 75%以上,多为放射状,部分具同心状纹层,大小为 0.1~0.8 mm,组成矿物为方解石,部分可见核部包裹生屑、内碎屑等。生物碎屑的平均含量在 5%~10%之间,零散分布,镜下可明显地观察到完整鲕粒的不同结构类型。鲕粒灰岩中也可见有孔虫、海百合、筳类等生物碎屑,因受到后期挤压作用较小,其生物碎屑的完整度较高。镜下还可见少量白云石,整体含量为 2%~5%。填隙物主要由亮晶方解石组成,方解石呈他形粒状,具晶粒结构,粒度一般为 0.05~0.2 mm,粒间镶嵌状填隙于上述颗粒间,部分重结晶为菱形白云石,伴有褐铁矿物发育。鲕粒生屑灰岩的主要类型为含放射状鲕粒的鲕粒灰岩。

鲕粒灰岩地区中古生物种类繁多,但是各种类型的古生物总体含量不高。鲕粒灰岩主要由大量分选性良好、充填密实的鲕粒岩组成。放射状鲕粒灰岩主要由放射状排列的晶体共同构成的包壳形成,这种类型的包壳形成环境主要为浅水高能环境。通过镜下观察可以发现,鲕粒灰岩之间的填隙物多为亮晶方解石,没有泥质成分,可与 Flügel 总结的标准微相类型 SMF15-R 对比,形成于动荡的浅水沉积环境。

MF4 含珊瑚碎屑礁灰岩:肉眼可见珊瑚作为骨架将碳酸盐岩颗粒粘结在一起(图 4-d、f)。珊瑚表现形态不一,有的表现为横切面,有的表现为纵切面,珊瑚大小为 2~5 mm。横切面显示,珊瑚个体呈多角状生长形,相互接触。这些珊瑚可以形成格架灰岩和障积灰岩,珊瑚化石对古环境和地质年代是良好的指示物。造礁珊瑚对水温、盐度、水深、光照等条件都有较严格的要求,一般发育于赤道附近的低纬度地区,指示鱼塘寨组碳酸盐岩主体应沉积于热带-亚热带较温暖的古气候背景。

5 玄武岩岩石地球化学特征

平掌组玄武岩绝大多数投于碱性玄武岩和玄

武岩的区域(图略), SiO_2 含量变化范围较小, 而 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量变化范围较宽, 为 2.12% ~ 6.1%。玄武岩根据其主量元素成分, 大致可分为 2 类: 高钛型玄武岩与低钛型玄武岩。平掌组玄武岩的微量元素分析结果见表 1。其中, 稀土元素总量为 $186.04 \times 10^{-6} \sim 535.04 \times 10^{-6}$, 平均值为 296.46×10^{-6} , 无明显 Eu 异常, $\delta\text{Eu} = 0.95 \sim 1.05$ 。样品 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 11.99 ~ 14.66, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{PM}}$ 值为 1.5 ~ 1.92, 可以看出重稀土元素分馏程度较高, 轻稀土元素分馏较低。

在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图上, 所有的岩石样品均具有相似的配分模式, 轻稀土元素 (LREE) 相对富集, 重稀土元素 (HREE) 相对亏损, 呈右倾型 (图 5-a)。微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 5-b) 显示, 玄武岩高度富集轻稀土元素, 无明显的 Nb、Ta、Ti 亏损。另外, 微量元素 La/Nb 及 Ba/Th 值较相近, 并与典型 OIB 的比值 (0.78 ~ 1.32, 80 ~ 204)^[50] 一致。这种稀土元素配分模式与典型洋岛玄武岩 (OIB) 相似^[51]。高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Zr 未见亏损, 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上基本显示平滑曲线, 轻稀土元素 Pr、Nd 较富集, 从图 5 可知, 玄武岩的微量元素分布曲线和 OIB 的分布型式总体相似。

研究区玄武岩遭受过一定的蚀变, 这与野外和镜下薄片观察结果一致。这种蚀变作用可能影响

部分活性元素, 所以选取对蚀变作用相对稳定的不相容元素 Ti、Rb、Y、Nb、Hf 等进行构造环境判别分析。平掌组玄武岩样品在 $\text{Zr}-\text{Zr}/\text{Y}$ (图 6-a)、 $\text{Nb} \times 2 - \text{Zr}/4 - \text{Y}$ (图 6-b) 和 $\text{Hf}-\text{Th}-\text{Ta}$ (图 6-c) 图解中均显示形成于板内环境。Nb/Yb-Th/Yb 图解 (图 6-d) 显示, 所测样品的数据点落在洋岛玄武岩附近。Nb 在进行蚀变作用时为较稳定的元素, 但容易受到地壳混染作用的影响, 所以 Nb 元素可以指示地壳的混染。地壳中的 Nb 含量分为上、中、下 3 个部分, 含量分别为 12×10^{-6} 、 10×10^{-6} 、 5×10^{-6} ^[56]。平掌组玄武岩 Nb 含量为 $68.6 \times 10^{-6} \sim 168.9 \times 10^{-6}$, 明显高于地壳混染中的 Nb 含量, 且平掌组碱性玄武岩不具有 Nb、Ta 亏损, 所以平掌组玄武岩遭受地壳混染的可能性较小。综上所述, 平掌组玄武岩形成于板内环境, 具有 OIB 型玄武岩的地球化学特征。

6 构造环境

对于昌宁-孟连带内大面积分布的石炭纪火山-沉积地层的构造环境一直存在较大争议。部分学者认为, 平掌组玄武岩代表被动大陆边缘裂谷作用的产物^[24, 57-58], 而上覆鱼塘寨组碳酸盐岩为一套稳定的浅海碳酸盐岩台地相沉积, 化石丰富, 层序清楚^[24]。吴根耀等^[25-26]则认为, 鱼塘寨组碳酸盐岩为源自东侧的飞来峰或与下伏的平掌组共同构成飞

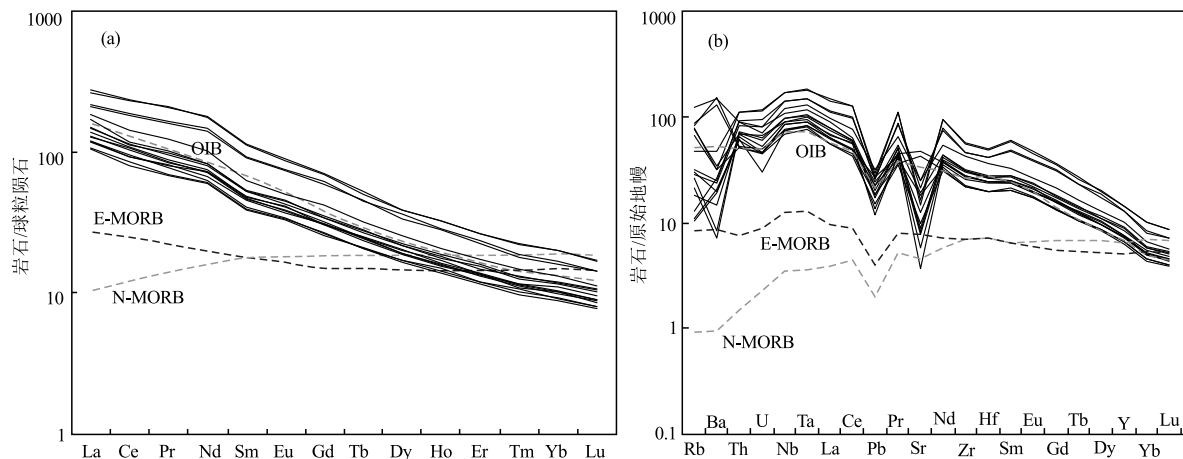


图 5 平掌组玄武岩球粒陨石标准化稀土元素配分图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)
(球粒陨石和原始地幔标准化值据参考文献[48]; OIB、E-MORB 和 N-MORB 数据据参考文献[49])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagrams (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) of the Pingzhang Formation basalt

OIB—洋岛玄武岩; E-MORB—富集型洋脊玄武岩; N-MORB—亏损型洋脊玄武岩

表 1 平掌组玄武岩主量、微量和稀土元素组成

Table 1 Major, trace element and REE compositions of the basalts from Pingzhang Formation

样品名	D0004- H1	D0004- H2	D0005- H1	D0005- H2	D0005- H3	D0005- H4	D0005- H5	D0005- H6	PM101- 1H1	PM101- 3H1	PM101- 4H1	PM101- 4H2	PM102- 1H1	PM102- 2H2
SiO ₂	42.92	45.7	45.61	45.67	43.54	41.42	43.67	42.55	42.88	43.25	43.28	43.59	45.57	45.8
Al ₂ O ₃	15.45	15.33	13.13	13.17	10.8	11.66	12.88	12.42	13.39	11.46	12.89	13.06	16.23	16.36
CaO	8.24	9.29	6.29	6.45	10.29	9.2	7.58	8.71	7.72	8.92	10.05	8.5	7.19	7.54
MgO	3.65	5.58	6.46	5.4	10.85	13.04	8.56	9.89	7.24	9.01	9.66	7.86	4.04	3.64
K ₂ O	1.36	0.6	0.32	0.36	0.18	0.28	1.73	0.67	2.42	1.19	1.67	1.72	1.77	1.36
Na ₂ O	4.08	4.51	4.44	4.13	3.2	1.7	3.49	3.96	2.32	1.85	2.12	1.68	3.95	4.54
TiO ₂	3.8	3.74	3.5	3.62	2.73	3.12	3.39	3.11	4.08	4.06	3.51	3.26	3.02	3
P ₂ O ₅	1.77	1.66	0.56	0.61	0.51	0.56	0.59	0.55	0.86	0.59	0.46	0.45	1.74	1.73
MnO	0.2	0.23	0.1	0.099	0.19	0.21	0.15	0.18	0.12	0.11	0.15	0.13	0.22	0.23
烧失量	3.72	3.94	5.5	6.76	5.02	5.14	4.37	5.25	5.36	7	3.85	7.69	4.3	3.88
TFe ₂ O ₃	14.65	9.27	14.01	13.63	12.57	13.52	13.48	12.62	13.42	12.45	12.12	11.94	11.85	11.81
Li	11.9	19.1	5.24	5.65	7.60	8.65	10.9	12.8	9.04	10.6	8.75	11.9	7.69	6.99
Be	2.63	2.73	1.49	1.94	1.55	1.10	1.47	1.75	1.81	1.32	1.32	1.36	3.35	4.02
Sc	16.7	16.0	28.0	28.7	26.7	27.8	27.8	26.0	26.8	32.1	33.1	33.5	11.2	11.3
V	225	177	281	311	176	295	150	150	234	311	328	325	123	132
Cr	8.12	6.58	427	437	637	535	445	413	251	630	466	470	5.43	3.63
Co	26.0	28.8	47.2	45.8	54.7	59.8	56.1	58.0	44.8	54.7	52.1	51.9	16.7	16.8
Ni	15.4	15.1	280	256	321	320	287	274	148	322	227	247	6.72	5.90
Cu	12.0	12.9	76.7	89.5	20.0	144	16.2	21.4	48.6	61.3	42.1	38.0	4.70	5.46
Zn	138	156	115	114	101	109	110	114	127	111	95.0	98.5	148	141
Ga	29.0	26.0	20.8	21.8	17.0	19.9	20.8	21.0	22.2	20.2	19.3	20.1	28.1	27.4
Rb	19.0	7.82	12.7	15.6	6.29	10.9	45.9	18.1	73.1	46.3	49.2	52.1	39.5	28.5
Sr	429	504	177	163	362	937	156	249	501	117	850	196	296	327
Y	55.9	54.6	36.1	39.2	27.1	31.0	32.3	31.4	43.2	32.8	28.7	28.7	61.9	61.9
Zr	488	485	324	335	233	289	317	293	451	286	229	227	591	588
Nb	93.4	92.0	63.2	64.0	49.0	58.5	59.4	55.4	78.0	49.5	49.2	45.1	111	111
Sn	3.40	3.26	1.93	2.62	1.79	2.22	2.08	1.69	2.41	2.07	1.85	1.66	3.94	3.93
Cs	0.66	0.37	0.67	0.42	0.33	0.36	1.88	1.30	1.53	1.06	0.86	2.17	0.53	0.43
Ba	163	176	47.2	55.3	127	96.3	227	129	969	208	994	852	212	315
La	74.2	71.9	50.4	51.0	40.6	43.7	47.6	44.2	63.0	40.0	36.2	35.8	95.3	91.5
Ce	168	163	101	99.5	84.1	95.0	96.6	91.7	128	82.0	74.8	71.0	212	209
Pr	22.3	21.5	12.7	13.1	10.2	11.4	11.8	11.2	16.5	10.7	9.16	8.99	27.8	28.2
Nd	97.0	92.9	52.3	53.8	41.3	47.1	48.8	47.5	66.9	47.1	39.7	39.0	119	117
Sm	19.7	19.3	11.1	11.3	8.58	9.69	10.1	9.86	13.4	10.3	8.29	8.14	24.3	23.9
Eu	6.01	5.92	3.39	3.62	2.70	3.05	3.27	3.01	4.02	3.22	2.66	2.63	7.23	6.93
Gd	17.3	16.6	9.46	9.56	7.25	8.65	8.42	8.45	11.7	8.85	7.43	7.12	20.0	19.4
Tb	2.27	2.31	1.34	1.39	1.04	1.22	1.26	1.19	1.61	1.25	1.04	1.05	2.66	2.55
Dy	12.6	11.6	7.47	7.70	5.69	6.53	6.95	6.47	8.74	6.92	5.80	5.86	13.4	13.5
Ho	2.18	2.17	1.34	1.44	1.05	1.20	1.23	1.18	1.59	1.30	1.08	1.14	2.50	2.49
Er	5.27	5.06	3.47	3.56	2.57	3.03	3.08	3.00	3.86	3.03	2.67	2.67	5.90	5.96
Tm	0.65	0.62	0.43	0.44	0.33	0.37	0.39	0.40	0.51	0.39	0.37	0.35	0.77	0.77
Yb	3.73	3.56	2.54	2.65	1.94	2.23	2.42	2.28	2.92	2.23	2.00	2.03	4.48	4.44
Lu	0.49	0.49	0.35	0.36	0.26	0.31	0.32	0.30	0.38	0.29	0.27	0.27	0.58	0.58

续表 1

样品名	D0004- H1	D0004- H2	D0005- H1	D0005- H2	D0005- H3	D0005- H4	D0005- H5	D0005- H6	PM101- 1H1	PM101- 3H1	PM101- 4H1	PM101- 4H2	PM102- 1H1	PM102- 2H2
Hf	11.7	11.6	7.62	7.93	5.63	6.88	7.45	6.97	10.2	6.96	5.62	5.62	14.0	13.9
Ta	5.53	5.46	3.81	3.84	3.04	3.45	3.65	3.31	4.83	3.07	2.94	2.79	6.60	6.79
Tl	0.036	0.013	0.021	0.016	0.016	0.020	0.067	0.037	0.045	0.036	0.039	0.051	0.049	0.027
Pb	3.82	3.97	3.06	2.70	3.38	3.67	2.60	1.80	4.78	2.05	2.82	2.26	4.07	4.34
Th	7.27	7.13	5.63	5.74	4.89	5.45	5.41	5.12	7.16	4.04	4.18	4.06	8.82	8.79
U	1.92	1.64	1.21	1.30	0.61	1.08	1.34	0.93	1.45	0.93	1.02	0.90	2.28	2.34
ΣREE	431.29	416.54	257.44	259.51	207.63	233.49	242.21	230.76	322.64	217.45	191.48	186.04	535.04	526.19
(La/Yb) _N	13.52	13.71	13.49	13.06	14.26	13.30	13.37	13.16	14.66	12.19	12.29	11.99	14.44	14.00
δEu	1.03	1.02	1.01	0.97	0.99	1.01	0.95	1.02	1.05	1.00	0.99	0.97	1.03	1.05

注:主量元素含量单位为%,微量、稀土元素含量单位为 10^{-6}

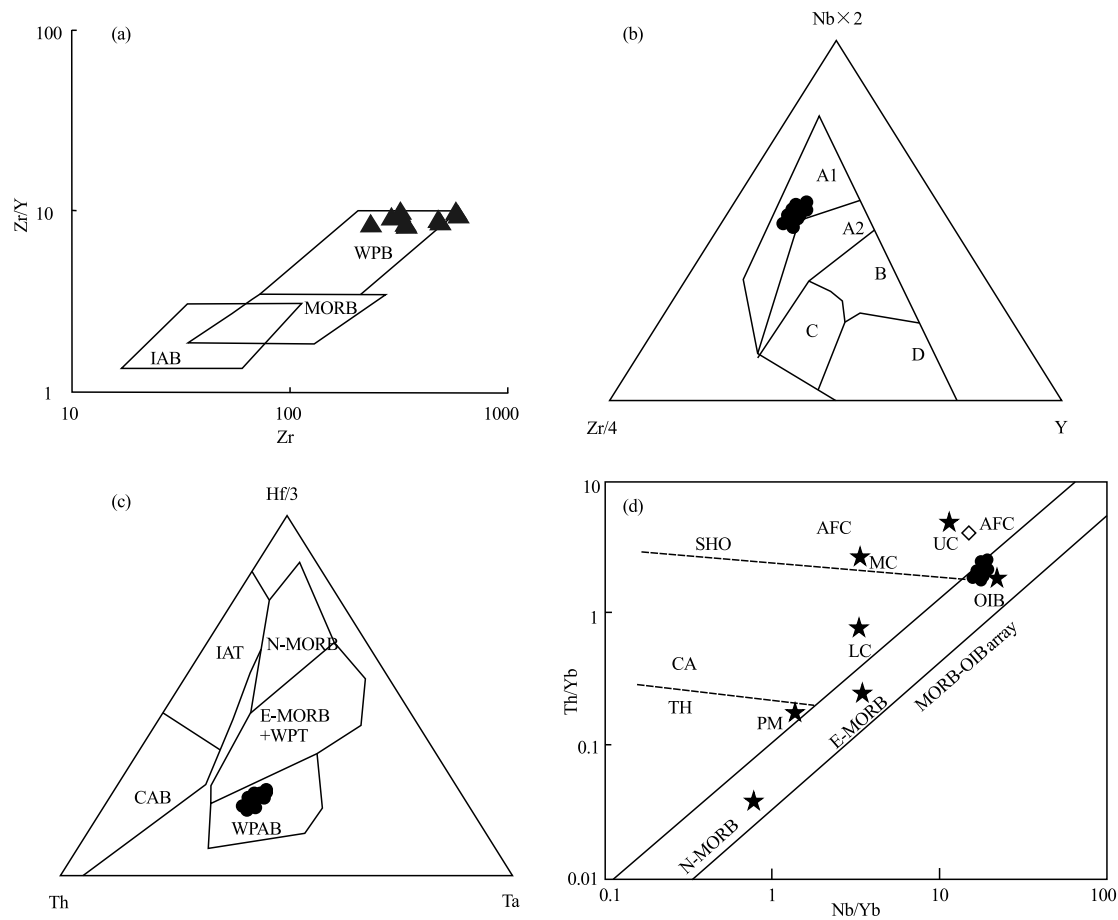


图 6 平掌组玄武岩构造环境判别图解

Fig. 6 Tectonic setting discrimination of the basalts from Pingzhang Formation

a—Zr—Zr/Y 图解^[52]; b—Nb×2—Zr/4—Y 图解^[53]; c—Hf/3—Th—Ta 图解^[54]; d—Nb/Yb—Th/Yb 图解^[55]; WPB—板内玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; A1+A2—板内碱性玄武岩; A2+C—板内拉斑玄武岩; B—P 型 MORB; D—N-MORB; C+D—火山弧玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; WPAB—板内碱性玄武岩; N-MORB—亏损型洋中脊玄武岩; E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; Th—拉斑质; CA—钙碱质; SHO—钾玄质; PM—原始地幔; LC—平均下地壳; UC—上地壳; MC—中地壳

来峰。另有大量学者从岩石地球化学的角度开展研究,认为平掌组玄武岩为洋岛玄武岩^[50, 59-60],并与上覆鱼塘寨组碳酸盐岩组成洋岛海山组合^[27-29]。事实上,大陆裂谷与洋岛玄武岩仅从岩石学及岩石地球化学特征上很难区别,所以该火山岩形成的构造环境尚需进一步研究。大洋俯冲消亡过程中,完整的岩石组合会发生肢解形成断块或碎片,因此在增生杂岩中准确认识和恢复各岩石单元构造属性十分困难。笔者认为,该套石炭纪火山-沉积地层构造属性的厘定应该将其作为一个整体考虑,单独从玄武岩岩石地球化学特征或者碳酸盐岩沉积环境出发,均不能对其构造环境得出准确的认识。

本次研究以该套火山-沉积地层为研究对象,查明了玄武岩与碳酸盐岩之间为整合接触关系,可见玄武岩(凝灰岩)与灰岩在界线附近呈互层沉积,可与弗得角型板内洋岛-海山对比^[61],同时发现玄武岩与灰岩之间发育塌积砾岩。该火山-沉积地层岩石组合包括具有 OIB 型地球化学特征的玄武岩、礁灰岩、塌积砾岩、凝灰岩等,与区域上报道的典型洋岛-海山岩石组合相似^[61-63]。因此,本次研究认为,石炭系平掌组和鱼塘寨组构造环境为洋岛海山。由于其受到“负浮力”的影响,且规模较大,现今变形程度较周围地质体弱,且对俯冲带形成了一定程度的阻塞。虽然洋岛海山的总体积相比洋壳小得多,但在俯冲过程中洋壳大多俯冲殆尽,而洋岛海山往往能较好地保存于增生杂岩中,识别增生杂岩中洋岛-海山残片对认识造山带演化历史具有重要意义。板内洋岛-海山是古洋盆存在的直接证据,记录了古大洋岩石圈运移速率、岩石圈厚度等重要信息,可为解决造山带及周缘局部复杂沉积和岩浆时间成因提供重要线索^[60],因而本次洋岛海山的厘定对昌宁-孟连洋乃至古特提斯洋演化研究具有重要意义。

7 结 论

(1) 玄武岩与灰岩之间的凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为 351.7 ± 2.5 Ma,表明玄武岩的喷发时间为早石炭世。

(2) 通过翔实的野外路线地质调查和剖面测制工作,查明了石炭系平掌组玄武岩和鱼塘寨组碳酸盐岩之间为整合接触关系。鱼塘寨组总体为碳酸盐岩台地和台地边缘沉积,形成于浅水高能环境。珊瑚礁灰岩的发现,指示鱼塘寨组碳酸盐岩主体应

沉积于热带-亚热带较温暖的古气候背景。

(3) 昌宁-孟连带内大面积分布的石炭纪火山-沉积地层岩石组合包括具有 OIB 型地球化学特征的玄武岩、礁灰岩、塌积砾岩、凝灰岩等,与区域上报道的典型洋岛-海山岩石组合相似,综合考虑其野外出露和变形特征,将其厘定为洋岛-海山构造环境。

致谢:笔者在中国地质调查局成都地质调查中心学习期间多次受到潘桂棠先生悉心指导,有幸见识到老一辈地质工作者艰苦奋斗、不屈不挠、求真务实的科学精神。潘老师 80 岁高龄仍继续为祖国的地质事业发光发热,给年轻一辈树立了崇高榜样,祝愿潘老师健康长寿。参与野外工作的还有中国地质调查局成都地质调查中心李建忠研究员、彭智敏高级工程师、成都理工大学在读硕士研究生尤廷海和裴洋;锆石 U-Pb 定年在中国地质调查局成都地质调查中心胡志中高级工程师帮助下完成,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Sengör A M C. The Cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia[M]. Geological Society of America Special Papers, 1984: 1-74.
- [2] Sengör A M C, Natal' I B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364(6435): 299-307.
- [3] Dewey J F, Sun Y Y. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1988, 327: 379-413.
- [4] 从柏林, 吴根耀, 张旗. 中国滇西地区古特提斯演化的岩石记录[C]//IGCP 第 321 项中国工作组编. 亚洲的增生. 北京: 地震出版社, 1993: 65-68.
- [5] 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-150.
- [6] Metcalfe I. Late Palaeozoic and Mesozoic tectonic and palaeogeographical evolution of SE Asia[M]. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 315: 7-23.
- [7] 许志琴, 王勤, 李忠海, 等. 印度-亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换[J]. 地质学报, 2016, 90(1): 1-23.
- [8] Wang B D, Wang L Q, Pan G T, et al. U-Pb zircon dating of Early Paleozoic gabbro from the Nantinghe ophiolite in the Changning-Menglian Suture Zone and its geological implication[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 920-930.
- [9] 聂小妹. 滇西南及泰国北部古生代早中期特提斯演化研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2015.
- [10] 王冬兵, 罗亮, 唐渊, 等. 昌宁-孟连结合带牛井山早古生代达克岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及其地质意义[J]. 岩石学报, 2016, 32

- (8): 2317-2329.
- [11] 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 等. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1544-1561.
- [12] 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等. 三江昌宁-孟连带原-古特提斯构造演化[J]. 地球科学, 2018, 43(8): 2527-2550.
- [13] 王冬兵, 罗亮, 唐渊, 等. 昌宁-孟连结合带斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(4): 17-28.
- [14] 李静. 云南省双江县石炭纪牛井山蛇绿混杂岩的岩石学研究[D]. 昆明理工大学硕士学位论文, 2003.
- [15] Fan W M, Wang Y J, Zhang Y H, et al. Paleotethyan subduction process revealed from Triassic blueschists in the Lancang tectonic belt of Southwest China[J]. Tectonophysics, 2015, 662: 95-108.
- [16] 李静, 孙载波, 徐桂香, 等. 滇西双江县勐库地区榴闪岩的发现与厘定[J]. 矿物学报, 2015, 35(4): 421-424.
- [17] 王舫, 刘福来, 冀磊, 等. 澜沧江杂岩带小黑江—上允地区蓝片岩的成因及变质演化[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(5): 804-820.
- [18] Wang F, Liu F L, Schertl, et al. Paleo-Tethyan tectonic evolution of Lancangjiang Metamorphic Complex: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotope geochronology of blueschists in Xiaohiejing-Xiayun area, Southeastern Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 2019, 65: 142-155.
- [19] Wang H N, Liu F L, Santosh M, et al. Subduction Eosion Associated with Paleo-Tethys Closure: Deep Subduction of Sediments and High Pressure Metamorphism in the SE Tibetan Plateau [J]. Gondwana Research, 2020: 82: 171-192.
- [20] 彭智敏, 王国之, 王保弟, 等. 云南邦丙澜沧岩群中发现蓝闪石榴辉岩[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 639-640.
- [21] Zhao T Y, Feng Q L, Metcalfe I, et al. Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes and provenance of Late Neoproterozoic and Early Paleozoic sediments of the Simao and Baoshan blocks, SW China: Implications for Proto-Tethys and Paleo-Tethys evolution and Gondwana reconstruction[J]. Gondwana Research, 2017, 51: 193-208.
- [22] 赵林涛, 李三忠, 吕勇, 等. 滇西允沟岩组碎屑锆石年龄谱对相关地块亲缘性的约束[J]. 岩石学报, 2019, 35(9): 2911-2925.
- [23] 周美玲, 夏小平, 彭头平, 等. 滇西保山地块早古生代碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素研究及其对冈瓦纳大陆重建的制约[J]. 岩石学报, 2020, 36(2): 469-483.
- [24] 方宗杰, 周志澄, 林敏基. 从地层学的角度探讨昌宁-孟连缝合带的若干问题[J]. 地层学杂志, 1992, 16(4): 292-303.
- [25] 吴根耀. 云南澜沧老厂-拉巴的互冲推覆构造[J]. 科学通报, 1991, 1: 44-46.
- [26] 吴根耀. 滇西昌宁-孟连地区依柳组、平掌组地层初议[J]. 地层学杂志, 1993, 17(4): 302-309.
- [27] 张海清, 刘本培, 方念乔. 滇西南古特提斯石炭纪海山碳酸盐台地的层序地层学研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 18-23.
- [28] 张海清, 孙晓猛, 陈先兵. 洋岛、海山碳酸盐岩的沉积特征及其古地理意义[J]. 地质科技情报, 1997, 16(1): 29-33.
- [29] 刘本培, 冯庆来, 方念乔, 等. 滇西南昌宁-孟连带和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(5): 529-539.
- [30] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.
- [31] 王冬兵, 罗亮, 王保弟, 等. 滇西澜沧江构造带景谷地区团梁子岩组的时代与构造属性[J]. 地球科学, 2018, 43(8): 2551-2570.
- [32] 赵靖, 钟大赉, 王毅. 滇西澜沧变质带的变形序列与变质作用初步研究[J]. 地质科学, 1994, 29(4): 366-372.
- [33] 赵靖, 钟大赉, 王毅. 滇西澜沧变质带变质作用和变形作用的关系[J]. 岩石学报, 1994, 10(1): 27-40.
- [34] 宋仁奎, 应育浦, 叶大年. 滇西南澜沧群多硅白云母的多型和化学成分特征及其意义[J]. 岩石学报, 1997, 13(2): 152-161.
- [35] 彭智敏, 张缉, 关俊雷, 等. 滇西“三江”地区临沧花岗岩基早—中奥陶世花岗岩质片麻岩的发现及其意义[J]. 地球科学, 2018, 43(8): 2571-2585.
- [36] 罗亮, 谢韬, 王冬兵, 等. 昌宁-孟连结合带中三叠世含放射虫硅质岩地层的古特提斯意义[J]. 地球科学, 2020, 45(8): 3014-3027.
- [37] Yang F, Sun J G, Wang Y, et al. Geology, geochronology and Geochemistry of Weilasituo Sn-Polymetallic deposit in Inner Mongolia, China[J]. Minerals, 2019, 9(2): 104.
- [38] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51: 537-571.
- [39] Ludwig K. R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley, California: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [40] 冯庆来, 刘本培. 滇西南昌宁-孟连构造带火山岩地层学研究[J]. 现代地质, 1993, 7(4): 402-409.
- [41] 张远志, 张定辉, 刘世荣, 等. 云南省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 1-367.
- [42] 王义昭. 滇西昌宁-孟连带地质构造特征及构造环境分析[J]. 特提斯地质, 1997, 21: 31-55.
- [43] 刘本培. 被动大陆边缘沉积[C]//钟大赉等. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1998: 76-91.
- [44] 彭寿增. 试论澜沧含银铅锌矿带的成矿地质条件[J]. 云南地质, 1984, 3(2): 124-130.
- [45] 方宗杰, 周志澄, 郭震宇, 等. 滇西南石炭纪平掌组火山岩与鱼塘寨组的接触关系[J]. 地层学杂志, 1999, 23(4): 257-262.
- [46] 田力, 童金南, 孙冬英, 等. 江西乐平沿沟二叠纪-三叠纪过渡期沉积微相演变及其对灭绝事件的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2247-2261.
- [47] Flügel E. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application[M]. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2004: 1-976.
- [48] McDonough W F, Sun S S. The Composition of the Earth [J]. Chemical Geology, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [49] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [50] 赖绍聪, 秦江锋, 李学军, 等. 昌宁-孟连缝合带乌木龙-铜厂街洋岛型火山岩地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地学前缘,

- 2010, 17(3): 44-52.
- [51] 杜晓飞, 程文斌, 李葆华, 等. 藏南柯月玄武岩地球化学特征及构造环境判别[J]. 新疆有色金属, 2020, 43(6): 84-90.
- [52] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1979, 69: 33-47.
- [53] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 1986, (56): 207-218.
- [54] Wood D A. A variably veined suboceanic uppermantle - genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence[J]. Geology, 1979, 7: 499-503.
- [55] Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. Lithos, 2008, 100: 14-48.
- [56] 冯庆来, 崔新省, 刘本培. 滇西澜沧老厂晚二叠世双壳动物群的发现及其生物区系特征[J]. 地球科学, 1992, (5): 512-520, 627-628.
- [57] 胡祥昭, 陈惜华, 匡立新. 昌宁-孟连火山岩带玄武岩的岩石学及地球化学[J]. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(5): 560-564.
- [58] 杨开辉, 莫宣学. 滇西南晚古生代火山岩与裂谷作用及区域构造演化[J]. 岩石矿物学杂志, 1993, 12(4): 297-311.
- [59] 张旗, 李达周, 张魁武. 云南省云县铜厂街蛇绿混杂岩的初步研究[J]. 岩石学报, 1985, 1(3): 1-14.
- [60] 李达周, 张旗, 张魁武. 青藏高原研究, 横断山考察专辑(二)[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1986: 137-145.
- [61] 范建军, 李才, 牛耀龄, 等. 造山带板内洋岛-海山残片的识别及地质意义[J]. 地球科学, 2021, 46(2): 381-404.
- [62] 付长磊, 闫臻, 王秉璋, 等. 造山带中古海山残片的识别——以拉脊山缝合带青沙山和东沟地质填图为例[J]. 地质通报, 2021, 40(1): 31-40.
- [63] 袁四化, 潘桂棠, 任飞, 等. 洋岛-海山研究进展及其对于重建洋板块的意义[J]. 地球科学, 2020, 45(8): 2826-2845.
- ① 云南省地质矿产局. 1: 25 万临沧、滚龙幅(国内部分)区域地质调查报告. 2003.