

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.093>



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

罗亮, 谢韬, 王冬兵, 黄晓明, 姜丽莉, 李建忠, 彭智敏

中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

摘要: 昌宁—孟连结合带中三叠世地层记录了古特提斯洋晚期演化信息, 为正确认识古特提斯构造古地理格局提供了重要的解剖窗口。云南省沧源县团结地区原划泥盆系曼信组岩性为硅质岩与泥岩互层夹砂岩层(透镜体), 对其中长石砂岩和硅质岩分别开展锆石U-Pb测年和地球化学分析, 在限定该地层时代的基础上探讨其古特提斯演化意义。长石砂岩夹层和透镜体碎屑锆石定年显示其时代分别不早于 237.8 ± 1.3 Ma和 237.7 ± 1.4 Ma, 赋存地层区域上可与牡音河组对比。本次中三叠世放射虫硅质岩地层的发现, 填补了本区残余盆地沉积记录。该地层中硅质岩的地球化学特征反映其形成于大陆边缘环境, 结合其中陆源碎屑岩碎屑组分和副矿物特征, 表明古特提斯残余洋盆规模有限。研究区三岔河组磨拉石沉积角度不整合于早期地层之上标志着残余洋盆最终闭合。

关键词: 锆石U-Pb年龄; 地球化学; 含放射虫硅质岩; 牡音河组; 残留盆地; 地质年代学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)08-3014-14

收稿日期: 2020-02-19

Radiolarian Chert Strata in Middle Triassic from Changning-Menglian Suture Zone and Implications for Paleo-Tethys

Luo Liang, Xie Tao, Wang Dongbing, Huang Xiaoming, Jiang Lili, Li Jianzhong, Peng Zhimin

Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

Abstract: The Middle Triassic strata in the Changning-Menglian suture zone record the evolution of the Paleo-Tethys Ocean in the late stage, providing an important window for the better understanding of the structure and geography of the Paleo-Tethys. The original Devonian Manxin Formation composed of siliceous, mudstone and sandstone interlayer (lens bodies) in Tuanjie area, Cangyuan County, Yunnan Province. The zircon U-Pb dating of arkose and geochemical analysis of siliceous rocks were carried out, respectively, and the significance of the Paleo-Tethys evolution was explored on the basis of limiting the formation age. Zircon U-Pb dating of arkose lens bodies and interlayers shows that their ages are not earlier than 237.8 ± 1.3 Ma and 237.7 ± 1.4 Ma, respectively, the stratum can be compared with the Muyinhe Formation. The discovery of the Middle Triassic stratum fills the blank of the sedimentary records in this area. Geochemical analysis of the siliceous rock in this stratum indicates that it was formed in the continental marginal environment. Combining with composition of granule in sedimentary rock and para-mineral characteristics, it shows that the scale of the residual oceanic basin of Paleo-Tethys is limited. The angular inconsistency of the molassic-type deposition of the Sanchahe Formation above the early stratum indicates the final closure of the residual ocean basin.

Key words: zircon U-Pb dating; geochemistry; radiolarian chert; Muyinhe Formation; residual basin; geochronology.

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos. DD20190053, DD20160016); 国家自然科学基金项目(No. 41802031); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(No. 2019QZKK0702).

作者简介: 罗亮(1987—), 男, 工程师, 主要从事地层学、沉积学与微体古生物学研究。ORCID: 0000-0002-4963-1482. E-mail: lianglcgs@126.com

引用格式: 罗亮, 谢韬, 王冬兵, 等, 2020. 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. 地球科学, 45(8):3014—3027.

造山带放射虫硅质岩对于恢复古洋盆构造演化具有非常重要的地质意义(张克信等,2003)。然而,放射虫硅质岩可以沉积于古洋盆演化的不同阶段、不同构造位置(丁林和钟大赉,1995),给研究带来复杂性。昌宁—孟连结合带是东特提斯构造域内一条重要的结合带,其内保存有早泥盆世—中三叠世深水硅质岩沉积组合(Liu et al., 1991; 丁林和钟大赉,1995; 冯庆来等,1997; 张振芳等,2001);早期研究者根据中三叠世放射虫硅质岩推断此时昌宁—孟连带古特提斯洋为远离大陆的残余洋盆(方念乔等,1996)或陆间海盆(从柏林等,1993; 丁林和钟大赉,1995)或前陆盆地(方宗杰等,1992)等。以

昌宁—孟连带为代表的昌宁—孟连洋是滇西古特提斯的主支洋盆,由于遭受洋—陆俯冲、陆陆碰撞挤压造山、新生代走滑剪切等过程影响,来自不同陆块大陆边缘不同时代的地质单元和时间跨度极长的深水沉积均受到强烈挤压、剪切改造呈近南北向分布于狭长带内,形成了现今复杂的地质关系,给正确认识各地质实体时代和构造环境带来极大困难。区域上报道和发现的中三叠世放射虫硅质岩地层极少,称作牡音河组,大多被断层切割,尚未能建立完整的地层层序(Liu et al., 1991; 冯庆来和刘本培,1993; 方念乔等,1996)。毫无疑问,昌宁—孟连带中三叠世放射虫硅质岩地层对于正确恢复古特

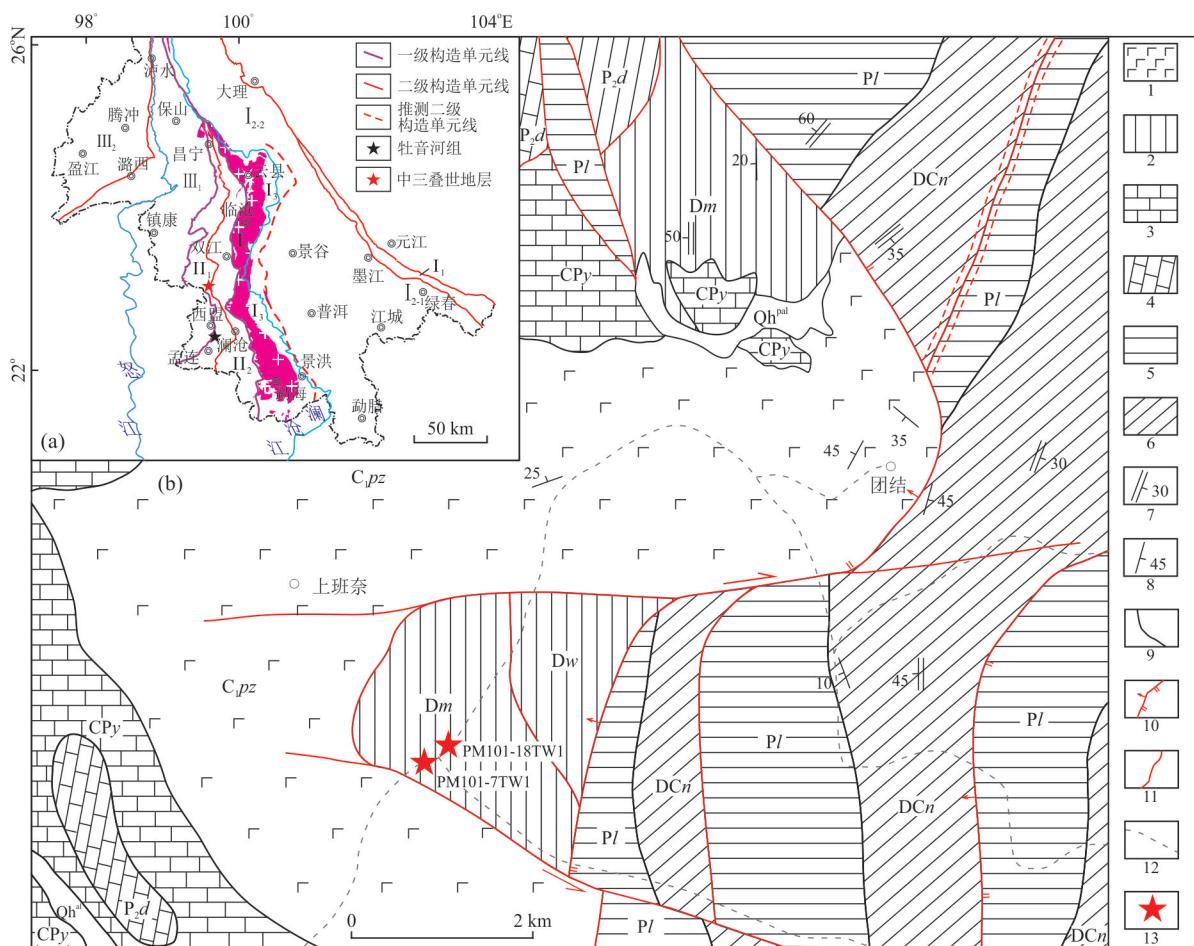


图1 西南三江南段构造简图(a)和团结地区地质图(b)

Fig.1 Tectonic map of southern Sanjiang in Southwest China (a) and geological map of the Tuanjie area (b)

图a据潘桂棠等(2013)修改;I. 羌塘—三江造山系,I₁. 哀牢山结合带,I₂. 兰坪—思茅地块,I₂₋₁. 墨江—绿春陆缘弧,I₂₋₂. 兰坪—思茅盆地,I₃. 乌兰乌拉—澜沧江结合带,I₃₋₁. 临南澜沧江俯冲增生杂岩,I₄. 左贡—临沧地块,I₄₋₁. 临沧地块,II. 昌宁—孟连对接带,II₁. 昌宁—孟连结合带,II₂. 双江—澜沧江俯冲杂岩带,III. 冈底斯—腾冲造山系,III₁. 保山—镇康地块,III₂. 腾冲—梁河岩浆弧。图b据云南省地质调查院,2003,1:25万临沧、滚龙幅(国内部分)区域地质报告。1.早石炭世基性岩(平掌组);2.“泥盆纪硅质岩与泥岩互层夹砂岩(温泉组和曼信组)”;3.石炭—二叠纪灰岩(鱼塘寨组);4.中二叠世灰岩(大名山组);5.二叠纪浅变质碎屑岩(拉巴组);6.泥盆—石炭纪浅变质碎屑岩(南段组);7.劈理产状;8.层理产状;9.整合接触接线;10.逆断层;11.不明性质断层;12.道路;13.锆石U-Pb采样点。

提斯构造演化具有重要意义,但是目前其地质意义还存在争议。本文对昌宁—孟连带团结地区放射虫硅质岩夹砂岩组合开展了硅质岩地球化学、碎屑锆石年代学研究,限定了地层时代,讨论了沉积环境,并结合前人资料探讨了中三叠世放射虫硅质岩的古特提斯洋演化意义。

1 地质背景与岩石特征

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,是由特提斯洋俯冲减、冈瓦纳和欧亚板块碰撞拼合形成的复杂构造带(Sengör, 1984; Sengör *et al.*, 1993; 从柏林等, 1993; Metcalfe *et al.*, 2009; 许志琴等, 2016)。昌宁—孟连结合带位于三江构造带南段,因记录了原—古特提斯演化的成岩和成矿事件而得到广泛关注(Wang *et al.*, 2013; 聂小妹, 2016; 王冬兵等, 2016; 王保弟等, 2018; 潘桂棠等, 2019),其西侧为保山地块古生代稳定台地型浅海陆棚碳酸盐岩沉积和滨海—浅海相砂泥质沉积,东侧为呈南北向展布的临沧—勐海复式花岗岩(图1a)。昌宁—孟连对接带又可进一步细分为双江—澜沧俯冲杂岩带和昌宁—孟连结合带(图1a),其中双江—澜沧俯冲杂岩带以

澜沧岩群为代表,为一套与原—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(赵靖等, 1994a, 1994b; 宋仁奎等, 1997; Fan *et al.*, 2015; 李静等, 2015; 王舫等, 2014; 彭智敏等, 2019; Wang *et al.*, 2019, 2020)。昌宁—孟连结合带保存有较好的早—晚古生代岩浆记录,包括牛井山英云闪长岩(王冬兵等, 2016)、南汀河堆晶辉长岩(Wang *et al.*, 2013)、牛井山斜长角闪岩(王冬兵等, 2017)等。

团结地区位于牛井山蛇绿混杂岩以南,以团结断裂为界,以东主要出露泥盆系—石炭系南段组(DCn)、二叠系拉巴组(Pl);其中南段组岩性为厚层状变质石英砂岩夹板岩,拉巴组为中—薄层状粉砂岩、泥岩夹中层状灰—灰白色岩屑石英(杂)砂岩,局部为硅质岩与极薄层状泥岩互层夹少量中层状紫红色泥岩。以西主要出露泥盆系温泉组(Dw)和曼信组(Dm)、下石炭统平掌组(C₁pz)、石炭—二叠系鱼塘寨组(CPy)、二叠系大明山组(P₂d)(图1b)。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;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,部分地区受后期构造破坏。对平掌组和鱼塘寨组的构造环境解释有不同观点,多

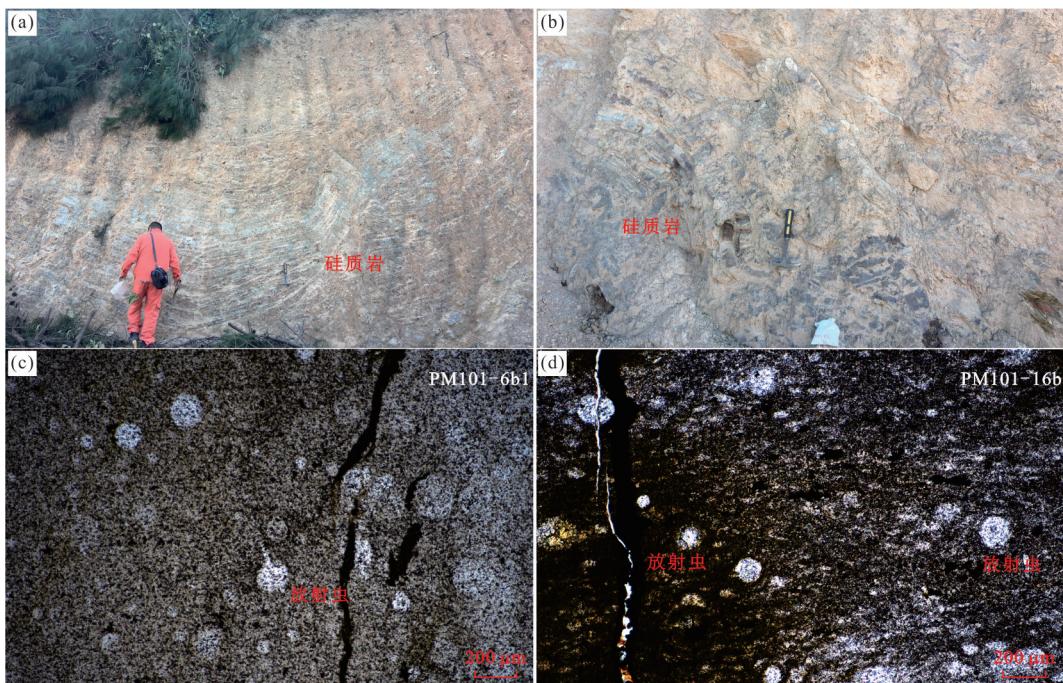


图2 昌宁—孟连结合带原泥盆系曼信组中放射虫硅质岩的野外(a,b)及显微结构照片(c,d)

Fig.2 Field (a, b) and microstructure (c, d) photos of the radiolarian cherts from the original Devonian Manxin Formation in the Changning-Menglian suture zone

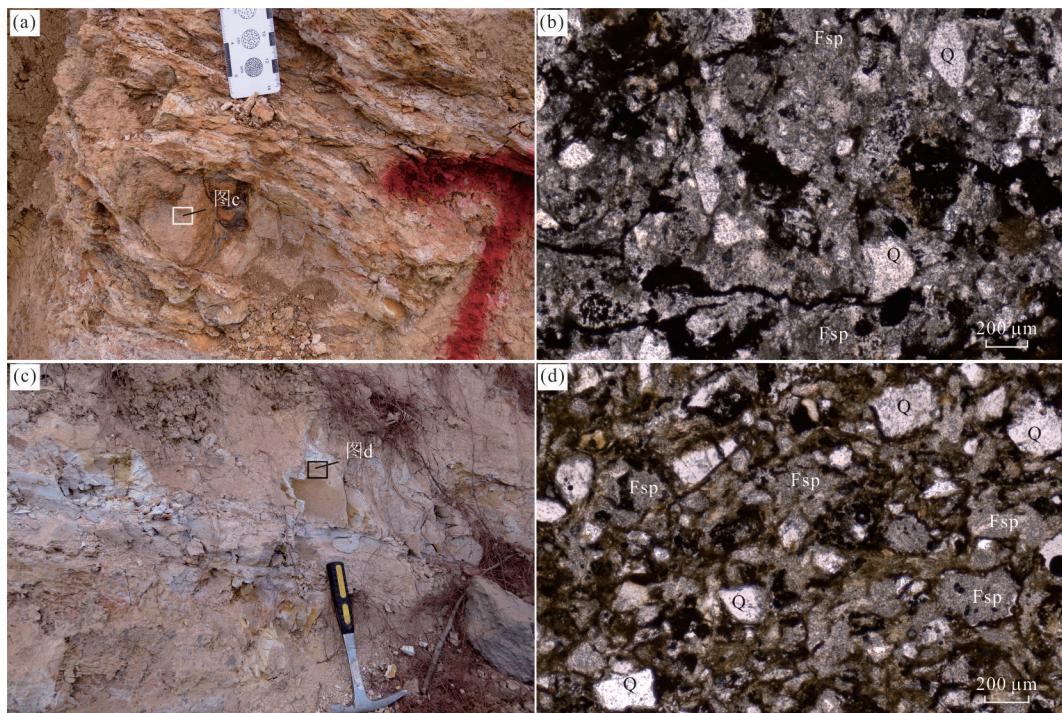


图3 昌宁—孟连结合带原划泥盆系曼信组中长石砂岩野外及显微结构照片

Fig.3 Field and microstructure photos of the arkose from the original Devonian Manxin Formation in the Changning-Menglian suture zone

a.PM101-7TW1野外照片;b.PM101-7TW1显微照片;c.PM101-18TW1野外照片;d.PM101-18TW1显微照片.Q.石英;Fsp.长石

数学者认为是洋岛海山组合(刘本培等,1993;张海清等,1997a,1997b;云南省地质调查院,2003,1:25万临沧、滚龙幅(国内部分)区域地质调查报告),少数学者认为是大陆边缘伸展环境玄武岩与台地相碳酸盐岩组合(方宗杰等,1992;金小赤等,2002).大名山组为浅水台地相碳酸盐岩.

沧源县团结乡永劣村一带出露一套深灰色薄层状硅质岩与泥岩互层夹薄层状(透镜体)砂岩,西南和东北方向分别与平掌组和温泉组呈断层接触,1:20万沧源幅(云南省地质矿产局,1986)将其归入D₂₋₃(未给组名),1:25万临沧幅(云南省地质调查院,2003)将该套岩石厘定为泥盆系曼信组.薄层状硅质岩变形较强,内部发育大量褶皱,无法获得地层真厚度(图2a、2b).镜下观察该套硅质岩主要由微晶石英和少量黑色有机质组成,含放射虫化石,且大多数放射虫化石内部多由玉髓和微晶石英充填,重结晶程度较高(图2c、2d).笔者对其中19件硅质岩样品开展放射虫化石研究,并对14件放射虫硅质岩进行全岩主量和微量元素地球化学分析.本文对砂岩透镜体和夹层采集了2件样品(PM101-7TW1和PM101-18TW1)开展锆石U-Pb测年研究.其中PM101-7TW1具细粒砂状结构,碎屑成分主要为石

英(约25%)、长石(约62%)和少量白云母(约1%);填隙物包括杂基与胶结物,杂基成分多为粘土矿物,含量约4%,胶结物为泥质胶结与铁质胶结,含量约8%(图3a、3b).PM101-18TW1呈细粒砂状结构,碎屑颗粒成分主要为石英(约29%)、长石(约61%)和少量云母碎屑(约1%).填隙物为泥质杂基与铁质胶结物,泥质杂基成分多为粘土矿物,含量约3%;铁质胶结为主,泥质杂基填隙次之,含量约5%(图3c、3d).

2 分析方法

锆石分选在廊坊市诚信地质服务公司完成.选择晶型较好、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.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,最后根据反射光、透射光及锆石CL图像选择代表性的锆石颗粒和区域进行U-Pb测年.反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)照相在武汉上谱分析科技有限责任公司完成.

锆石U-Pb同位素定年和微量元素测试在武汉

上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时完成。详细的仪器参数和分析流程见 Zong *et al.* (2017)。GeoLasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102ArF193nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合, 激光剥蚀系统配置有信号平滑装置(Hu *et al.*, 2015)。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5 Hz。采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行 U-Pb 同位素和微量元素分馏校正。每组数据点不超过 100 个(含标样), 首尾有 NIST610、91500、GJ-1、Ple 等标样控制, 中间每间隔 8 个样品点打 2 个锆石标准 91500 点, 间隔 16 个样品点打 1 个 GJ-1 锆石标样。每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010)完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003) 完成。本次实验锆石标样 91500 和 GJ-1 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 1 061~1 064 Ma 和 597~605 Ma, 均在误差范围内与锆石标样参考年龄一致。

全岩主量元素含量分析在自然资源部西南矿产资源监督检测中心采用 XRF 玻璃熔饼法完成, 仪器为 AXIOS-X-荧光光谱仪。岩石粉末样品在开展主量元素分析前进行烧失量分析, 然后将岩石粉末样品熔融制饼并标记样品名称。对中国标准参考物质 GSR-3 进行了分析, 结果表明主量元素分析精度和准确度均优于 4%。全岩微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理如下:(1) 将 200 目样品置于 105 °C 烘箱中烘干 12 h;(2) 准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;(3) 先后依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO₃ 和 1 mL 高纯 HF;(4) 将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 24 h 以上;(5) 待溶样弹冷却, 开盖后置于 140 °C 电热板上蒸干, 然后加入 1 mL HNO₃ 并再次蒸干;(6) 加入 1 mL 高纯 HNO₃、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In(浓度为 1×10^{-6}), 再次将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190 °C 烘箱中

加热 12 h 以上;(7) 将溶液转入聚乙烯料瓶中, 并用 2% HNO₃ 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。实验过程中, 对美国地质调查局(USGS)标准参考物质 BCR-2、BHVO-2 和 AGV-1 的分析结果表明, 微量元素分析精度和准确度一般优于 5%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

从长石砂岩透镜体样品 PM101-7TW1 和长石砂岩夹层样品 PM101-18TW1 中分选出较多锆石颗粒, 多呈棱角一次棱角状, 少量呈圆一次圆状, 大多数锆石为 50~100 μm , PM101-18TW1 中锆石颗粒较 PM101-7TW1 偏大。锆石阴极发光(CL)图像显示 2 个样品中锆石具有单一的内部结构, 有明显的岩浆结晶振荡环带, 无变质锆石特征; Th/U 比值主体位于 0.5~1.7 之间, 极少数为 0.1~0.5, 均大于 0.1, 指示其为岩浆成因锆石(吴元保和郑永飞, 2004)。锆石的外部形态具少量搬运磨蚀痕迹, 锆石 CL 结构特征和岩石镜下特征(含大量长石和石英, 石英呈次棱角—棱角状)揭示这些砂岩成分和结构成熟度均较低(图 3b、3d, 图 4c、4f)。

对样品 PM101-7TW1 的 104 颗锆石开展了 U-Pb LA-ICP-MS 定年研究, 其中 15 个分析点谐和度小于 90%, 不参加计算与作图, 全部的同位素比值和年龄结果列于附表 1。年龄结果大于 1 000 Ma 时采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 其余采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。89 个分析点的年龄具有很好的谐和度(绝大部分大于 95%), 均落在谐和曲线上或附近, 年龄在 234~2 576 Ma 之间(图 4a、4b)。对 89 个年龄值进行统计分析, 在频分布图上总体形成一个相对最集中的群组/峰, 其中 15 个前寒武纪年龄集中分布在 578~1 020 Ma($n=4$)、1 324~1 550 Ma($n=5$)、1 700~2 576($n=6$), 其余 74 个年龄分布在 233~472 Ma; 在频分布图上形成一个最大的群组/峰为 233~265 Ma($n=54$)和几个较小群组/峰为 266~288 Ma($n=9$)、304~395 Ma($n=7$)、406~472 Ma($n=4$) (图 4b)。最年轻的 14 颗锆石年龄集中在 233~240 Ma 之间, 明显构成一组, 加权平均年龄为 237.8 ± 1.3 Ma(MSWD=0.53, $n=14$)(图 4a)。

对样品 PM101-18TW1 的 104 颗锆石开展了 U-Pb LA-ICP-MS 定年研究, 其中 22 个分析点谐和度小于 90%, 不参加计算与作图, 全部的同位素比值和年龄结果列于附表 1。年龄结果大于 1 000 Ma

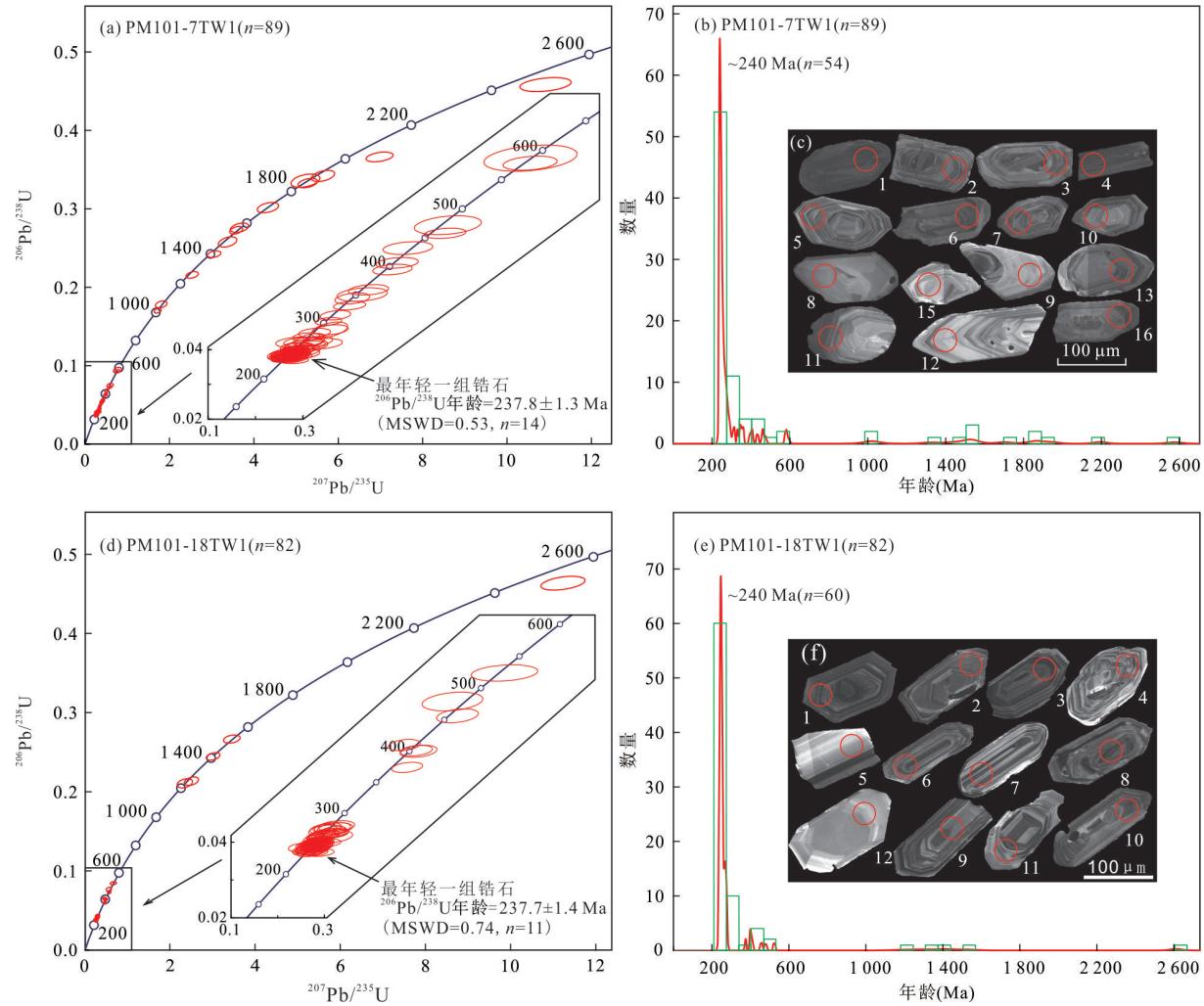


图4 昌宁—孟连结合带中三叠世长砂岩碎屑锆石U-Pb年龄

Fig.4 Detrital zircon U-Pb ages of arkose from Middle Triassic in the Changning-Menglian suture zone
a,d. 谱和图;b,e. 年龄相对频分布图;c,f. 部分锆石CL图像

时采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,其余采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。82个分析点的年龄具有很好的谐和度(绝大部分大于95%),均落在谐和曲线上或附近;Th/U比值为0.2~1.4,年龄在236~2 611 Ma之间(图4d、4e)。对82个年龄值进行统计分析,在频分布图上总体上形成一个相对最集中的群组/峰,其中5个前寒武纪年龄集中分布在1 209~1 522 Ma($n=4$)、2 611 Ma($n=1$),其余77个年龄分布在236~524 Ma之间;在频分布图上形成一个最大的群组/峰为236~265 Ma($n=60$)和几个较小群组/峰为265~286 Ma($n=10$)、375~456 Ma($n=5$)、479~524 Ma($n=2$)(图4e)。最年轻的11颗锆石年龄集中在236~241 Ma之间,明显构成一组,加权平均年龄为237.7±1.4 Ma(MSWD=0.74, $n=11$)(图4d)。

3.2 硅质岩主量元素和微量元素

硅质岩样品的主量元素和微量元素原始分析数据列于附表2。所有硅质岩均具有较高的 SiO_2 含量,为72.96%~96.61%,平均为88.04%;由于硅质岩成岩过程中 SiO_2 稀释剂作用的影响(Murray, 1994),硅质沉积物其他主量元素均具有较低的含量(附表2)。 TiO_2 含量主体小于0.2%,但样品具有相对较高的 Al_2O_3 和 K_2O 含量(分别为2.48%~13.61%、0.33%~2.14%),反映其含有较高的泥质组分。 MnO 和 Na_2O 的含量很低,分别为<0.01%、0.05%~0.40%。硅质岩中Fe、Mn的富集主要与热液的参与有关,而陆源物质的输入则造成Al、Ti的富集。海相沉积物中 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值是衡量沉积物组分含量的标志,随着远离洋脊扩张中心距离的增加而增大(Bostrom and Peterson, 1969; 黄虎

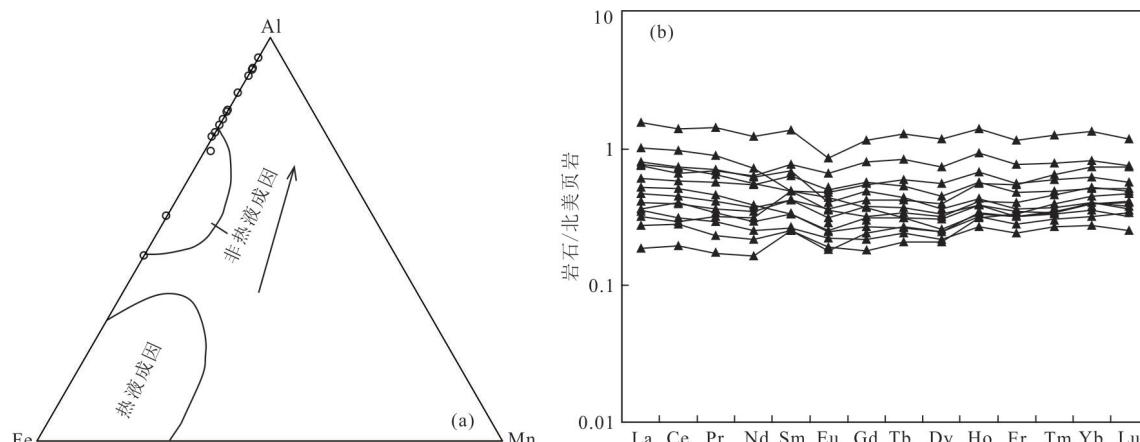


图5 昌宁—孟连结合带中三叠世硅质岩 Al-Fe-Mn 图解(a)和 NASC(北美页岩)标准化稀土元素配分曲线(b)
Fig.5 Al-Fe-Mn diagram (a) and NASC-normalized REE patterns (b) of the radiolarian cherts from Middle Triassic in the Changning-Menglian suture zone

图 a 据 Adachi *et al.*(1986); 图 b 标准化数据据 Gromet *et al.*(1984)

等, 2012). 有学者在系统研究热液成因与生物成因硅质岩后, 提出 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值在纯热液成因的 0.01 到纯生物成因的 0.60 之间变化, 并在此基础上拟定了判别热液成因与非热液成因硅质岩的 Al-Fe-Mn 三角判别图解 (Adachi *et al.*, 1986). 在该判别图解上, 非热液成因硅质岩的投点均落入富 Al 端, 而热液成因硅质岩则落入富 Fe 端. 本次研究的硅质岩相对贫 Fe、Mn 而富集 Al、Ti, 在 Al-Fe-Mn 三角判别图解中投点靠近富 Al 端元、远离热液区域 (图 5a), $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值主体在 0.45~0.85 之间, 极个别高达 0.90. 综上表明, 本次研究的硅质岩为未受热液活动影响的正常沉积硅质岩.

所有硅质岩样品的稀土元素均采用 NASC (北美平均页岩) 进行标准化处理 (Gromet *et al.*, 1984), 其中 Ce 和 Eu 异常表达式分别按 $Ce/Ce^* = 2 \times Ce_N / (La_N + Pr_N)$ 和 $Eu/Eu^* = 2 \times Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$ 测算. 大部分硅质岩样品在稀土元素北美页岩 NASC 标准化后的分布曲线图上均具有类似的配分模式 (图 5b). 大部分样品表现为平坦型曲线, 稀土元素含量变化范围较大, 为 $34.20 \times 10^{-6} \sim 237.62 \times 10^{-6}$, 大部分在 100×10^{-6} 以下, 主体偏低, 未见明显 Ce 负异常, Ce/Ce^* 值主体在 0.9~1.1 之间. Eu/Eu^* 值为 0.68~1.02, 其中极少部分样品具有 Eu 的负异常, 为 0.68~0.72. $(La/Yb)_N$ 为 0.52~1.96, Y/Ho 值为 24.90~27.74.

4 讨论

4.1 时代

锆石作为副矿物广泛分布于各类岩石中, 具有非常高的封闭温度和稳定性, 对锆石进行结构分析的基础上开展原位微区定年可以提供岩石形成时代与变质时代等重要信息 (Hanchar and Westrenen, 2007; Harley and Kelly, 2007). 本文利用碎屑沉积岩锆石 U-Pb 定年的基本原理, 对 2 件长石砂岩样品分别随机选取 104 颗锆石进行单颗粒锆石定年, 然后对结果进行统计分析, 利用最年轻一组年龄来限定最大沉积时间 (Dickinson and Gehrels, 2009).

长石砂岩透镜体 (PM101-7TW1) 和长石砂岩夹层 (PM101-18TW1) 锆石的外部形态显示它们受到不同程度的磨蚀, CL 内部结构图像和微量元素组成揭示它们是岩浆成因、未受到后期变质改造, 从同位素体系看单颗粒锆石年龄谐和度高; 这些特征共同表明研究的碎屑锆石 U-Pb 体系封闭, 未受后期变质事件影响, 可以用来限定寄主岩石的原始沉积时代. 对 2 件长石砂岩样品中 208 颗锆石进行锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年研究, 共获得有效数据点 171 个. PM101-7TW1 样品 89 个测点的年龄在 234~2 576 Ma 之间, 获得最年轻一组锆石加权平均年龄为 237.8 ± 1.3 Ma ($MSWD = 0.53, n = 14$) (图 4a). PM101-18TW1 样品 82 个测点的年龄在 236~2 611 Ma 之间, 获得最年轻一组锆石加权平均年龄为 237.7 ± 1.4 Ma ($MSWD = 0.74, n = 11$) (图

4d). 碎屑锆石年代学研究表明,长石砂岩最大沉积时限不早于 237 ± 1 Ma,其赋存地层并非前人认为的泥盆系曼信组。

由于昌宁—孟连结合带发育有世界上持续时间最长的深水硅质岩组合(早泥盆—中三叠世),涉及岩石地层单元有泥盆系曼信组、二叠系拉巴组、上二叠统—中三叠统牡音河组、二叠系中寨组、石炭系岔河组、上二叠统—下三叠统怕拍组以及冯庆来等(1997)和张凡等(2006)报道的早泥盆—中三叠世地层断片(未给组名). Liu *et al.* (1991)报道了云南澜沧地区一套晚二叠世—中三叠世的连续远洋沉积序列,建立牡音河组;冯庆来和刘本培(1993)将其中放射虫化石划分为4个组合,时代从晚二叠世最晚期至中三叠世. 综上所述,昌宁—孟连带中部团结地区原划泥盆系曼信组中长石砂岩最大沉积时限不早于 237 ± 1 Ma,其赋存地层可对比于牡音河组。

4.2 构造环境

放射虫硅质岩可以沉积在大陆边缘、深海平原和大洋中脊等不同构造环境,早二叠世至中三叠世的硅质岩未见明显的负异常,与日本海或大陆边缘型硅质岩的结果一致(丁林和钟大赉,1995). 刘本培等(1993)和方念乔等(1996)以中三叠统牡音河组中缺乏陆源成分认为其形成于远离陆源的深水盆地,而分子有机地球化学特征表明牡音河组沉积盆地明显受到陆地背景影响(张振芳等,2001),因此对于牡音河组硅质岩的构造环境仍然存在争议。

由于热水沉积物堆积较快,而水成或深海条件下沉积物堆积较慢,因此热水中相对富集U而深海环境下的Th含量较高(雷卞军等,2002). U和Th在沉积物中的含量取决于沉积环境的氧化还原电位(田洋等,2013), $U/Th > 1.25$ 反映厌氧环境, $U/Th < 0.75$ 指示富氧环境,比值介于之间则为贫氧环境(Jones and Manning, 1994). Wignall (1994)通过研究黑色页岩发现 $V/(V+Ni)$ 值 > 0.83 即为缺氧环境. 本区牡音河组硅质岩 U/Th 值均小于0.75, $V/(V+Ni)$ 值大部分大于0.83,表明研究区牡音河组硅质岩形成环境以富氧为主,局部贫氧,结合牡音河组碎屑岩组分(含大量长石)和副矿物组成推测可能是火山活动带来了大量的养分有利于硅质生物的繁殖,此时残余洋盆规模较小,相对局限. 将本文硅质岩与现代海洋硅质岩和古特提斯洋盆各不同构造环境中的硅质岩对比,笔者发现文中的硅质岩样品具有类似南极周缘洋盆和古特提斯洋大陆边缘硅质岩的地化特征(表1).

硅质岩的 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值是判别其形成于洋中脊、远洋或大陆边缘环境的一个重要指标(Murray, 1994; Sugitani *et al.*, 1996). 硅质岩样品的 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值在0.53~0.95之间,平均0.83,大于远洋盆地硅质岩(0.4~0.7)和洋中脊硅质岩(< 0.4),在大陆边缘硅质岩的 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值范围内(0.5~0.9; Murray, 1994). 将研究区硅质岩岩石化学换算后投入 $Fe_2O_3/TiO_2-Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ (图6a)和 $Fe_2O_3/(100-SiO_2)-Al_2O_3/(100-SiO_2)$ (图6b)图解中,投点均落入大陆边缘区或附近(除1个投点位于深海沉积与大陆边缘重叠区),反映硅质岩形成于大陆边缘的构造环境。

微量元素Y和Ho具有非常类似的物理和化学特征,同时它们的电负性和离子半径相近. 由于Y/Ho值相对稳定,且不受氧化环境条件控制,因此可以提供独立于Ce异常之外的重要信息(钱鑫等,2016). 其中平均上地壳组成和PAAS均具有与球粒陨石相似的Y/Ho值(26~28)(Taylor and

表1 昌宁—孟连结合带中三叠世硅质岩与典型硅质岩稀土元素特征对比

Table 1 Comparison of geochemical parameters of the rare earth elements between the Middle Triassic chert in the Changning-Menglian suture zone and other typical cherts

类型	环境	$\Sigma REE (10^{-6})$	Ce/Ce^*	Eu/Eu^*	$(La/Yb)_N$	文献来源
现代大洋硅质岩	太平洋洋盆	5~132	0.19~0.61	0.67~1.63	0.48~1.97	Murray <i>et al.</i> , 1992
	大西洋洋盆	9~189	0.47~1.12	0.91~1.18	0.76~1.86	
	南极周缘洋盆	35~160	0.98~1.17	0.78~0.88	1.27~1.56	
古特提斯洋	大洋中脊	7.21~21.85	0.31~0.44	0.37~1.47	0.63~1.81	丁林和钟大赉,1995
	大洋盆地	15.89~90.52	0.49~0.80	0.48~0.86	0.52~1.86	
	大陆边缘	8.46~63.32	0.72~0.98	0.57~0.84	0.59~2.27	
研究区硅质岩		34.20~237.62	0.92~1.11	0.68~1.02	0.52~1.96	

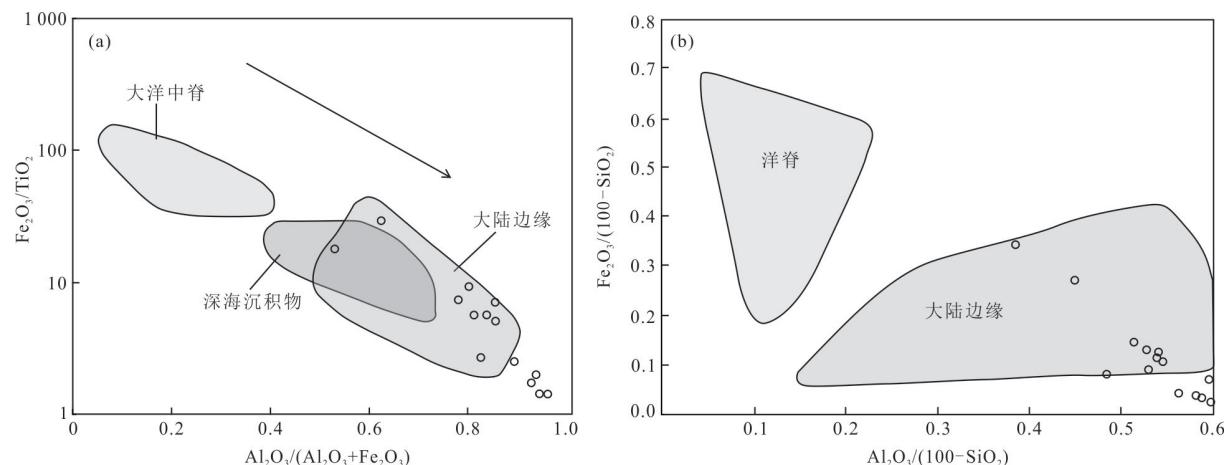


图 6 昌宁—孟连结合带中三叠世硅质岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (a) 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100-\text{SiO}_2)-\text{Al}_2\text{O}_3/(100-\text{SiO}_2)$ (b) 图解

Fig.6 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (a) and $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100-\text{SiO}_2)-\text{Al}_2\text{O}_3/(100-\text{SiO}_2)$ (b) diagrams of the radiolarian cherts from Middle Triassic in the Changning-Menglian suture zone

据 Murray (1994)

McLennan, 1985; Kamber *et al.*, 2005), 而现代河水的 Y/Ho 值也与 PAAS 相近或略高, 而低于正常海水的平均值(55)(Nozaki *et al.*, 1997; Lawrence *et al.*, 2006). 日本 Sasayama 地区中一晚二叠世地层中远洋环境硅质岩的 Ce/Ce* 值为 0.73 ± 0.25 , Y/Ho 值为 36.80 ± 4.58 ; 老挝西北部琅勃拉邦构造带远洋硅质岩的 Y/Ho 值为 $31.05 \sim 40.96$ (钱鑫等, 2016). 本文牡音河组硅质岩样品的 Y/Ho 值为 $24.90 \sim 27.74$, 与平均上地壳组成和 PAAS 的 Y/Ho 值相当, 显著低于日本 Sasayama 地区中一晚二叠世形成的远洋硅质岩和琅勃拉邦构造带远洋硅质岩. Ce/Ce* 值可用来大致判别硅质岩的构造环境, 洋中脊附近硅质岩的 Ce/Ce* 值为 0.30 ± 0.13 , 大洋盆地值为 0.60 ± 0.13 , 而大陆边缘为 1.09 ± 0.25 (Murray *et al.*, 1990, 1991, 1992; Murray, 1994). 本文硅质岩样品的 Ce/Ce* 值为 $0.92 \sim 1.11$, 与日本海或大陆边缘型硅质岩的结果一致. 大陆边缘硅质岩的 $\text{La}_{\text{N}}/\text{Ce}_{\text{N}}$ 值为 $0.5 \sim 1.5$, 大洋盆地为 $1.0 \sim 2.5$, 洋中脊大于 3.5 (杜远生等, 2007); 本文硅质岩的 $\text{La}_{\text{N}}/\text{Ce}_{\text{N}}$ 为 $0.97 \sim 1.14$, 与大陆边缘型硅质岩一致.

综上所述, 中三叠世放射虫硅质岩具有典型大陆边缘硅质岩所具有的地球化学特征, 显然受到陆地背景影响, 并非形成于远洋盆地.

4.3 构造意义

由于昌宁—孟连结合带内报道和发现的牡音河组沉积记录较少, 且出露面积小, 仅见于南部澜沧县拉巴乡 (Liu *et al.*, 1991; 冯庆来和刘本培,

1993; 方念乔等, 1996; 张振芳等, 2001), 致使对该构造带进入的演化阶段乃至古特提斯洋后期演化等地质问题缺乏深入了解. 刘本培等(1993)认为牡音河组代表了非补偿饥饿盆地沉积, 所处构造环境为大洋岛弧马里亚纳型远海盆地. 丁林和钟大赉(1995)通过硅质岩中微量元素特征结合区域演化, 认为中三叠世古特提斯洋两侧大陆已在靠近, 推测其进入一种陆间海盆演化阶段, 真正的残留海盆存在于晚三叠世. 方念乔等(1996)认为中三叠世古特提斯洋域的消减活动仍在继续, 以牡音河组为代表的残余盆地沉积缺乏陆源成分, 应形成于远离陆源、贴近大洋岛弧的马里亚纳型盆地, 意味着残余洋盆具有相当的规模, 仍未有闭合的迹象. 然而方宗杰等(1992)指出牡音河组放射虫硅质岩应形成于与碰撞相关的前陆盆地. 因此关于牡音河组所处沉积盆地的性质仍存在争议.

区域地质演化表明双江—澜沧高压变质带榴辉岩、蓝片岩变质年龄分别为 238~235 Ma 和 242~231 Ma(Fan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2020); 临沧花岗岩基后碰撞花岗岩时代为 220~233 Ma(Peng *et al.*, 2013; 王舫等, 2014); 晚三叠世三岔河组不整合覆盖在早期地质体之上; 这些变质、岩浆、沉积等记录均表明中三叠世昌宁—孟连带及邻区处于后碰撞伸展阶段(范蔚茗等, 2009; Peng *et al.*, 2013), 不存在古特提斯大洋. 牡音河组沉积期明显同步于碰撞造山活动, 代表了碰撞背景下持续演化的海相盆地, 为一套残余洋盆沉积, 并非陆间海盆.

沉积。本研究建立在翔实的1:5万野外调查基础之上,对牡音河组岩石组合和分布范围均进行了较好限定。研究区牡音河组分布于研究程度较高的牛井山蛇绿混杂岩之西南约15 km,从出露位置来看,其沿造山带分布,近南北向与蛇绿岩混杂岩带相连,并非位于造山带与克拉通之间;盆地构造边界不规则,侧向的构造边界为斜向逆冲或走滑断层,以调节碰撞陆块与洋盆的差异性缩短变形,均表现为典型残余盆地的构造特征(李江海等,2009)。前陆盆地沉积物以粗碎屑为主,岩石学特征上富含石英(早期来自克拉通的物源)、岩屑(后期来自造山带的物源),而本文中三叠世地层为硅质岩、泥岩夹少量长石砂岩,显著区别于前陆盆地沉积。综上表明牡音河组应代表残余盆地沉积,并非前陆盆地。

综上所述,古特提斯洋中三叠世进入残余洋盆演化阶段,牡音河组放射虫硅质岩形成于大陆边缘环境,结合其中陆源碎屑岩碎屑组分和副矿物特征,意味着古特提斯残余洋盆规模有限;研究区附近火山活动频发,推测洋盆随即最终闭合;区域上晚三叠世三岔河组磨拉石沉积建造与下伏地层之间的角度不整合关系表明晚三叠世起研究区陆块从松散聚合状态进入挤压隆升阶段。

5 结论

(1)昌宁—孟连结合带中部团结地区前人厘定的泥盆系曼信组中长石砂岩最大沉积时限不早于 237 ± 1 Ma,其赋存的地层可对比于牡音河组。

(2)牡音河组放射虫硅质岩为正常生物成因硅质岩,表现出类似的稀土配分模式,不具明显Ce负异常,Ce/Ce⁺值为0.92~1.11,Y/Ho值为24.90~27.74。主量元素和微量元素地球化学特征均表明其形成于大陆边缘,并非远洋硅质岩.U/Th值均小于0.75,V/(V+Ni)值大部分大于0.83,反映该硅质岩形成环境以富氧为主,局部贫氧;结合牡音河组碎屑岩组分(含大量长石)和副矿物组成推测研究区火山活动频发,带来了大量的养分有利于硅质生物的繁殖。

(3)变质、岩浆、沉积等记录均表明中三叠世昌宁—孟连带及邻区处于后碰撞伸展阶段,不存在古特提斯大洋。新厘定的牡音河组的时代、出露位置、构造边界等特征均指示其为残余盆地沉积。牡音河组的发现填补了本区残余盆地沉积记录的空白,残余盆地建造地层呈带状紧邻古特提斯缝合带分布。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

致谢:审稿人对论文的修改提出了宝贵意见,野外工作得到中国地质调查局成都地质调查中心潘桂棠研究员、耿全如研究员的指导和帮助,在此一并表示感谢!

References

- Adachi, M., Yamamoto, K., Sugisaki, R., 1986. Hydrothermal Chert and Associated Siliceous Rocks from the Northern Pacific: Their Geological Significance as Indication of Ocean Ridge Activity. *Sedimentary Geology*, 47(1–2): 125–148. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(86\)90075-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(86)90075-8)
- Bostrom, K., Peterson, M. N. A., 1969. The Origin of Aluminum-Poor Ferromanganese Sediments in Areas of High Heat Flow on the East Pacific Rise. *Marine Geology*, 7(5): 427–447. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(69\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(69)90016-4)
- Cong, B. L., Wu, G. Y., Zhang, Q., et al., 1993. Petrogenic Evolution of Paleo-Tethys in Western Yunnan, China. *Science in China (Series B)*, 23(11): 1201–1207 (in Chinese).
- Dickinson, W. R., Gehrels, G. E., 2009. U-Pb Ages of Detrital Zircons in Jurassic Eolian and Associated Sandstones of the Colorado Plateau: Evidence for Transcontinental Dispersal and Intraregional Recycling of Sediment. *Geological Society of America Bulletin*, 121(3–4): 408–433. <https://doi.org/10.1130/b26406.1>
- Ding, L., Zhong, D. L., 1995. Rare Earth Elements and Cerium Anomalies of the Paleo-Tethys Siliceous Rocks in Changning-Menglian Zone. *Science in China (Series B)*, 25(1): 93–100 (in Chinese).
- Du, Y. S., Zhu, J., Gu, S. Z., et al., 2007. Sedimentary Geochemistry of Cambrian-Ordovician Cherts in North Qilian Orogenic Belt and Implication for Archipelagic Ocean. *Scientia Sinica Terra*, 37(10): 1314–1329 (in Chinese).
- Fan, W. M., Peng, T. P., Wang, Y. J., 2009. Triassic Magmatism in the Southern Lancangjiang Zone, Southwestern China and Its Constraints on the Tectonic Evolution of Paleo-Tethys. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 291–302 (in Chinese with English abstract).
- Fan, W. M., Wang, Y. J., Zhang, Y. H., et al., 2015. Paleotethyan Subduction Process Revealed from Triassic Blueschists in the Lancang Tectonic Belt of Southwest China. *Tectonophysics*, 662: 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.12.021>

- Fang, N. Q., Liu, B. P., Feng, Q. L., 1996. Tectono-Sedimentary Features of the Muvinhe Formation and Stratigraphic Subjects Concerned in Southwestern Yunnan. *Earth Science*, 21(1): 11–18 (in Chinese with English abstract).
- Fang, Z. J., Zhou, Z. C., Lin, M. J., 1992. Discussion on Several Issues of Changning-Menglian Suture Zone from the Perspective of Stratigraphy. *Journal of Stratigraphy*, 14(4): 292–303 (in Chinese).
- Feng, Q. L., Liu, B. P., 1993. Radiolaria from Late Permian and Early-Middle Triassic in Southwest Yunnan. *Earth Science*, 18(5): 540–552 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Q. L., Liu, B. P., Fang, N. Q., 1997. An Example on Succession Reconstruction of Thrust Slice Type Stratigraphy in Orogenic Belt. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 318–326 (in Chinese with English abstract).
- Gromet, L. P., Haskin, L. A., Korotev, R. L., et al., 1984. The “North American Shale Composite”: Its Compilation, Major and Trace Element Characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12): 2469–2482. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9)
- Hanchar, J. M., van Westrenen, W., 2007. Rare Earth Element Behavior in Zircon-Melt Systems. *Elements*, 3(1): 37–42. <https://doi.org/10.2113/gselements.3.1.37>
- Harley, S. L., Kelly, N. M., 2007. Zircon Tiny but Timely. *Elements*, 3(1): 13–18. <https://doi.org/10.2113/gselements.3.1.13>
- Hu, Z. C., Zhang, W., Liu, Y. S., et al., 2015. “Wave” Signal-Smoothing and Mercury-Removing Device for Laser Ablation Quadrupole and Multiple Collector ICPMS Analysis: Application to Lead Isotope Analysis. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152–1157. <https://doi.org/10.1021/ac503749k>
- Huang, H., Du, Y. S., Yang, J. H., et al., 2012. Geochemical Features of Siliceous Sediments of the Shuicheng-Ziyun-Nandan Rift Basin in the Late Paleozoic and Their Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1994–2010 (in Chinese with English abstract).
- Jin, X. C., Wang, Y. Z., Xie, G. L., 2002. Stratigraphic Framework of the Changning-Menglian Belt in Western Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 315–321 (in Chinese with English abstract).
- Jones, B., Manning, D. A. C., 1994. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Chemical Geology*, 111(1–4): 111–129. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90085-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90085-x)
- Kamber, B. S., Greig, A., Collerson, K. D., 2005. A New Estimate for the Composition of Weathered Young Upper Continental Crust from Alluvial Sediments, Queensland, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(4): 1041–1058. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.08.020>
- Lawrence, M. G., Greig, A., Collerson, K. D., et al., 2006. Rare Earth Element and Yttrium Variability in South East Queensland Waterways. *Aquatic Geochemistry*, 12(1): 39–72. <https://doi.org/10.1007/s10498-005-4471-8>
- Lei, B. J., Que, H. P., Hu, N., et al., 2002. Geochemistry and Sedimentary Environments of the Palaeozoic Siliceous Rocks in Western Hubei. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 22(2): 70–79 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Sun, Z. B., Xu, G. X., et al., 2015. Firstly Discovered Garnet-Amphibolite from Mengku Area, Shuangjiang County, Western Yunnan Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(4): 421–424 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. H., Cheng, H. Y., Zhao, X., et al., 2009. Tectonic Evolution of Remnant Oceanic Basin and Its Implication for Hydrocarbon. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 40–51 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. P., Feng, Q. L., Fang, N. Q., 1991. Tectonic evolution of the Palaeo-Tethys in Changning-Menglian Belt and Adjacent Regions, Western Yunnan. *Journal of China University Geosciences*, 2: 18–23.
- Liu, B. P., Feng, Q. L., Fang, N. Q., et al., 1993. Tectonic Evolution of Palaeo-Tethys Poly-Island-Ocean in Changning-Menglian and Lancangjiang Belts, Southwestern Yunnan, China. *Earth Science*, 18(5): 529–539 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. 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. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.

- Metcalfe, I., Foster, C. B., Afonin, S. A., et al., 2009. Stratigraphy, Biostratigraphy and C-Isotopes of the Permian-Triassic Non-Marine Sequence at Dalongkou and Lucaogou, Xinjiang Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(6): 503–520. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.06.005>
- Murray, R. W., 1994. Chemical Criteria to Identify the Depositional Environment of Chert: General Principles and Applications. *Sedimentary Geology*, 90(3–4): 213–232. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90039-6)
- Murray, R. W., Buchholtz Ten Brink, M. R., Gerlach, D. C., et al., 1991. Rare Earth, Major, and Trace Elements in Chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: Assessing REE Sources to Fine-Grained Marine Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(7): 1875–1895. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90030-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90030-9)
- Murray, R. W., Buchholtz Ten Brink, M. R., Gerlach, D. C., et al., 1992. Rare Earth, Major, and Trace Element Composition of Monterey and DSDP Chert and Associated Host Sediment: Assessing the Influence of Chemical Fractionation during Diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(7): 2657–2671. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90351-I](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90351-I)
- Murray, R. W., Buchholtz Ten Brink, M. R., Jones, D. L., et al., 1990. Rare Earth Elements as Indicators of Different Marine Depositional Environments in Chert and Shale. *Geology*, 18(3): 268–271. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)0180268:reeao>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)0180268:reeao>2.3.co;2)
- Nie, X.M., 2016. Early-Middle Paleozoic Tethyan Evolution in SW Yunnan, China and Northern Thailand (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Nozaki, Y., Zhang, J., Amakawa, H., 1997. The Fractionation between Y and Ho in the Marine Environment. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 329–340. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(97\)00034-4](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00034-4)
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Zhang, W. P., et al., 2013. The Instructions of Tectonic Map in Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Areas (1: 1 500 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Pan, G.T., Xiao, Q.H., Zhang, K.X., et al., 2019. Recognition of the Oceanic Subduction-Accretion Zones from the Orogenic Belt in Continents and Its Important Scientific Significance. *Earth Science*, 44(5): 1544–1561 (in Chinese with English abstract).
- Peng, T. P., Wilde, S. A., Wang, Y. J., et al., 2013. Mid-Triassic Felsic Igneous Rocks from the Southern Lan-
- cangjiang Zone, SW China: Petrogenesis and Implications for the Evolution of Paleo-Tethys. *Lithos*, 168–169: 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.015>
- Peng, Z.M., Wang, G.Z., Wang, B.D., et al., 2019. Discovered Blue Flash Garnet Pyroxene in Lancang Group from Bangbing, Yannan. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 46(5): 639–640 (in Chinese).
- Qian, X., Feng, Q. L., Wang, Y. J., 2016. Radiolarian Cherts from the Luang Prabang Tectonic Zone in NW Laos and Their Tectonic Implications. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 287–298 (in Chinese with English abstract).
- Sengör, A. M. C., 1984. The Cimmeride Orogenic System and the Tectonics of Eurasia. *Special Paper of the Geological Society of America*, 195:1–74. <https://doi.org/10.1130/spe195-p1>
- Sengör, A. M. C., Natal' in, B.A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altai Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299–307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Song, R.K., Ying, Y.P., Ye, D.N., 1997. Characteristics and Significance of Polytypes and Chemical Compositions of Phengite in Lancang Group, Southwest Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 152–161 (in Chinese with English abstract).
- Sugitani, K., Horiuchi, Y., Adachi, M., 1996. Anomalously Low $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ Values for Archean Cherts from the Pilbara Block, Western Australia: Possible Evidence for Extensive Chemical Weathering on the Early Earth. *Precambrian Research*, 80(1–2): 49–76. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(96\)00005-8](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(96)00005-8)
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Tian, Y., Zhao, X.M., Niu, Z.J., et al., 2013. Petrogenesis and Sedimentary Environment of Permian Wujiaping Formation Siliceous Rocks in Lichuan, Southwestern Hubei. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(4): 590–599 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B. D., Wang, L. Q., Pan, G. T., et al., 2013. U-Pb Zircon Dating of Early Paleozoic Gabbro from the Nantinghe Ophiolite in the Changning-Menglian Suture Zone and Its Geological Implication. *Chinese Science Bulletin*, 58(8): 920–930. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5481-8>
- Wang, B.D., Wang, L.Q., Wang, D.B., et al., 2018. Tec-

- tectonic Evolution of the Changning-Menglian Proto-Paleo Tethys Ocean in the Sanjiang Area, Southwestern China. *Earth Science*, 43(8): 2527–2550 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.B., Luo, L., Tang, Y., et al., 2016. Zircon U-Pb Dating and Petrogenesis of Early Paleozoic Adakites from the Niuojingshan Ophiolitic Mélange in the Changning-Menglian Suture Zone and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2317–2329 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.B., Luo, L., Tang, Y., et al., 2017. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Geochemical Signatures of the Amphibolites in the Changning-Menglian Suture Zone and Its Geological Implications. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(4): 17–28 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Liu, F.L., Liu, P.H., et al., 2014. Petrogenesis of Lincang Granites in the South of Lancangjiang Area: Constrain from Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 3034–3050 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Liu, F. L., Schertl, H., et al., 2019. 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 Xiaoheijiang-Xiayun Area, Southeastern Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 65: 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.08.007>
- Wang, H. N., Liu, F. L., Santosh, M., et al., 2020. Subduction Erosion Associated with Paleo-Tethys Closure: Deep Subduction of Sediments and High Pressure Metamorphism in the SE Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 82: 171–192. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.01.001>
- Wignall, P. B., 1994. Black Shales. Clarendon Press, Oxford.
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Mineral-Genesis of Zircon and Its Constraint to the Explain of U-Pb Ages. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Xu, Z.Q., Wang, Q., Li, Z.H., et al., 2016. Indo-Asian Collision: Tectonic Transition from Compression to Strike Slip. *Acta Geologica Sinica*, 90(1): 1–23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Feng, Q.L., Duan, X.D., et al., 2006. Research on the Western Belt of Changning-Menglian Tectonic Belt: Exampled by the Nongba Section in Gengma, Southwest of Yunnan, China. *Geological Science and Technology Information*, 25(3): 13–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.Q., Liu, B.P., Fang, N.Q., 1997a. Studying on the Carboniferous Sequence Stratigraphy of the Seamount Carbonate Platform in Paleo-Tethys, Southwestern Yunnan, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(4): 18–23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.Q., Sun, X.M., Chen, X.B., 1997b. Oceanic Island-Seamount Carbonate Sedimentary Feature and Its Paleogeographic Significance. *Geological Science and Technology Information*, 16(1): 29–33 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. X., Yin, H. F., Zhu, Y. H., et al., 2003. Smith Strata and Non-Smith Strata. *Earth Science*, 24(4): 361–369 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.F., Feng, Q.L., Fang, N.Q., et al., 2001. Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of Triassic Siliceous Rocks from Muyinhe Formation in Changning-Menglian Belt, Southwest Yunnan. *Earth Science*, 26(5): 449–455 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Zhong, D.L., Wang, Y., 1994a. A Preliminary Study on Deformation Sequence and Metamorphism in Lancang Metamorphic Belt of West Yunnan. *Scientia Geologica Sinica*, 29(4): 366–372 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Zhong, D.L., Wang, Y., 1994b. Metamorphism of Lancang Metamorphic Belt, the Western Yunnan and Its Relation to Deformation. *Acta Petrologica Sinica*, 10(1): 27–40 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32–48. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.010>

附中文参考文献

- 从柏林, 吴根耀, 张旗, 等, 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化. 中国科学(B辑), 23(11): 1201–1207.
- 丁林, 钟大赉, 1995. 滇西昌宁—孟连带古特提斯洋硅质岩稀土元素和铈异常特征. 中国科学(B辑), 25(1): 93–100.
- 杜远生, 朱杰, 顾松竹, 等, 2007. 北祁连造山带寒武系—奥陶系硅质岩沉积地球化学特征及其对多岛洋的启示. 中国科学: 地球科学, 37(10): 1314–1329.
- 范蔚茗, 彭头平, 王岳军, 2009. 滇西古特提斯俯冲—碰撞

- 过程的岩浆作用记录. 地学前缘, 16(6): 291—302.
- 方念乔, 刘本培, 冯庆来, 1996. 滇西南牡音河组的沉积特征、环境意义及与之相关的若干地质问题. 地球科学, 21(1): 11—18.
- 方宗杰, 周志澄, 林敏基, 1992. 从地层学的角度探讨昌宁—孟连缝合带的若干问题. 地层学杂志, 14(4): 292—303.
- 冯庆来, 刘本培, 1993. 滇西南晚二叠世和早、中三叠世放射虫研究. 地球科学, 18(5): 540—552.
- 冯庆来, 刘本培, 方念乔, 1997. 造山带断片型地层层序恢复实例剖析. 地质科学, 32(3): 318—326.
- 黄虎, 杜远生, 杨江海, 等, 2012. 水城—紫云—南丹裂陷盆地晚古生代硅质沉积物地球化学特征及其地质意义. 地质学报, 86(12): 1994—2010.
- 金小赤, 王义昭, 谢广连, 2002. 滇西昌宁—孟连带的地层格架. 地质通报, 21(6): 315—321.
- 雷亚军, 阙洪培, 胡宁, 等, 2002. 鄂西古生代硅质岩的地球化学特征及沉积环境. 沉积与特提斯地质, 22(2): 70—79.
- 李静, 孙载波, 徐桂香, 等, 2015. 滇西双江县勐库地区榴闪岩的发现与厘定. 矿物学报, 35(4): 421—424.
- 李江海, 程海艳, 赵星, 等, 2009. 残余洋盆的大地构造演化及其油气意义. 地学前缘, 16(4): 40—51.
- 刘本培, 冯庆来, 方念乔, 等, 1993. 滇西南昌宁—孟连带和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化. 地球科学, 18(5): 529—539.
- 聂小妹, 2016. 滇西南及泰国北部古生代早中期特提斯演化研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 潘桂棠, 王立全, 张万平, 等, 2013. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1:1 500 000). 北京: 地质出版社.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 等, 2019. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义. 地球科学, 44(5): 1544—1561.
- 彭智敏, 王国芝, 王保弟, 等, 2019. 云南邦丙澜沧岩群中发现蓝闪石榴辉岩. 成都理工大学学报(自然科学版), 46(5): 639—640.
- 钱鑫, 冯庆来, 王岳军, 2016. 老挝西北部琅勃拉邦构造带放射虫硅质岩及其构造意义. 地学前缘, 23(6): 287—298.
- 宋仁奎, 应育浦, 叶大年, 1997. 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. 岩石学报, 13(2): 152—161.
- 田洋, 赵小明, 牛志军, 等, 2013. 鄂西南利川二叠纪吴家坪组硅质岩成因及沉积环境. 沉积学报, 31(4): 590—599.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等, 2018. 三江昌宁—孟连带原—古特提斯构造演化. 地球科学, 43(8): 2527—2550.
- 王冬兵, 罗亮, 唐渊, 等, 2016. 昌宁—孟连结合带牛井山早古生代埃达克岩锆石U-Pb年龄、岩石成因及其地质意义. 岩石学报, 32(8): 2317—2329.
- 王冬兵, 罗亮, 唐渊, 等, 2017. 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. 沉积与特提斯地质, 37(4): 17—28.
- 王舫, 刘福来, 刘平华, 等, 2014. 澜沧江南段临沧花岗岩的锆石U-Pb年龄及构造意义. 岩石学报, 30(10): 3034—3050.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589—1604.
- 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. 地质学报, 90(1): 1—23.
- 张凡, 冯庆来, 段向东, 等, 2006. 滇西南昌宁—孟连构造带西带研究初探: 以耿马弄巴剖面为例. 地质科技情报, 25(3): 13—20.
- 张海清, 刘本培, 方念乔, 1997a. 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. 沉积学报, 15(4): 18—23.
- 张海清, 孙晓猛, 陈先兵, 1997b. 洋岛、海山碳酸盐岩的沉积特征及其古地理意义. 地质科技情报, 16(1): 29—33.
- 张克信, 殷鸿福, 朱云海, 等, 2003. 史密斯地层与非史密斯地层. 地球科学, 28(4): 361—369.
- 张振芳, 冯庆来, 方念乔, 等, 2001. 滇西南昌宁—孟连带三叠纪牡音河组硅质岩地球化学特征及沉积环境. 地球科学, 26(5): 449—455.
- 赵靖, 钟大赉, 王毅, 1994a. 滇西澜沧变质带的变形序列与变质作用初步研究. 地质科学, 29(4): 366—372.
- 赵靖, 钟大赉, 王毅, 1994b. 滇西澜沧变质带变质作用和变形作用的关系. 岩石学报, 10(1): 27—40.