

昌宁-孟连带南段组大地构造归属：来自变质砂岩的粒度分析、碎屑组分、锆石 U-Pb 年代学证据

陈宏生^{1,2}, 李文昌^{1,2}, 岑超^{1,3}, 江小均^{1,2*}, 严清高^{1,2}, 余海军²

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院地球科学系, 云南 昆明 650093; 2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051; 3. 江苏华东八一四地球物理勘查有限公司, 江苏 南京 210007)

摘要: 泥盆系-石炭系南段组 (D-Cn) 属昌宁-孟连构造带东侧地层的重要组成部分, 其形成时代、沉积环境及大地构造属性存在争议。本文对南段组变质碎屑岩开展了岩石学、粒度、碎屑组分及锆石 U-Pb 年代学分析。南段组岩石以变质石英砂岩和变质长石石英砂岩为主, 成熟度较高, 整体为次成熟-成熟阶段。碎屑组分分析结果表明, 沉积物源区为大陆内部至再旋回造山带。粒度分析显示, 粒度分布曲线多呈双峰特征, 概率累计曲线主要表现为三段式浅海沉积特征。3 件变质砂岩碎屑锆石的年龄峰谱值主要集中在泛非期 (575~525 Ma)、晚格林威尔期 (960~820 Ma) 及早格林威尔期 (1188~1065 Ma) 三个阶段。这些年龄谱分别对应冈瓦纳大陆东缘澳大利亚板块、印度-南极格林威尔期及泛非期两期造山带岩浆事件, 指示泛非期和晚格林威尔期的物源由 Albany-Fraser 造山带与冈瓦纳大陆北缘的南羌塘、特提斯喜马拉雅等地体共同提供, 而早格林威尔期的物源则主要来自西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带。冈瓦纳大陆北缘的南羌塘-保山地体与 Albany-Fraser 造山带。综合前人研究成果, 认为南段组形成于冈瓦纳大陆北缘保山地体被动大陆边缘的浅海相沉积环境, 后期受古特提斯昌宁-孟连洋闭合碰撞造山作用影响, 以千枚-弱片理化构造岩块形式产出出于昌宁-孟连蛇绿混杂带东侧。

关键词: 昌宁-孟连带; 南段组; 锆石 U-Pb 年代学; 碎屑组分和粒度分析; 被动大陆边缘

中图分类号: P584; P597 **文献标志码:** A

第一作者: 陈宏生, 男, 1998 生, 男, 硕士研究生, 构造地质学专业。E-mail: 984747841@qq.com。

Tectonic affinity of the Nanduan formation in the Changning-Menglian orogenic belt: evidences from the grain-size analysis, detrital composition, and zircon U-Pb geochronology of the metasandstones

CHEN Hongsheng^{1,2}, LI Wenchang^{1,2}, CEN Chao^{1,3}, JIANG Xiaojun^{1,2*}, YAN Qinggao^{1,2}, YU Haijun²

(1. Department of Earth Sciences, Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650093, China; 2. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Ministry of Natural Resources, Kunming Yunnan 650051, China; 3. Jiangsu Huadong 814 Geophysical Exploration Co., Ltd, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: The closure of the Changning-Menglian Ocean between Gondwana and Laurasia has long been a focal point in studies of Tethyan evolution. The Devonian-Carboniferous Nanduan Formation is an important part of strata in the eastern

收稿日期: 2026-01-21。

基金项目: 深地国家科技重大专项课题项目 (编号: 2025ZD1005802); 国家自然科学基金项目 (编号: 42462011); 云南省科技厅高层次科技人才及创新团队选拔专项 (编号: 202305AT350004)。

*通信作者, E-mail: cagsjiang@126.com。

part of the Changning-Menglian Suture Zone. However, its formation age, depositional environment, and tectonic affinity remain contentious. In this study, we carried out petrology of metasandstones, size and compositional analyses of detrital grains in metasandstones, and the U-Pb geochronology of zircons from the metasandstone of the Nanduan Formation. The Nanduan Formation consists predominantly of metamorphosed quartz sandstone and metamorphosed feldspathic quartz sandstone. These metamorphosed sandstones have relatively high maturities which are generally of the sub-mature to mature levels. Detrital composition analyses suggest that detrital sediments were sourced from both a stable continental margin basin and a recycled orogenic belt. The grain-size analyses show that distribution curves of detrital grain sizes are mostly characterized with bimodal feature, with the cumulative probability curves typically exhibiting characteristics of the three-segment shallow-marine sedimentation. Three major peaks of U-Pb ages of detrital zircons from three samples of metamorphosed sandstones are concentrated in the Pan-African (525~575 Ma), Late Grenvillian (820~960 Ma), and Early Grenvillian (1065~1188 Ma) periods. The ages are correlated well with those of magmatic events in the Grenvillian and Pan-African orogens in the eastern Gondwana margin (Australian block) and India-Antarctica, indicating that sediments of the Pan-African and Late Grenvillian periods were mainly sourced from both of the Southern Qiangtang and Tethys-Himalayan terranes in the northern Gondwana margin and the Albany-Fraser orogen, while sediments of the Early Grenvillian period were mainly sourced from the Albany-Fraser orogen in the Western Australia. Integrating achievements of previous researches, we propose that the Nanduan Formation was formed in a shallow-marine sedimentary environment on the passive continental margin of the Baoshan Block in the northern margin of Gondwana Continent. It occurred in forms of phyllitic to weakly foliated structural rocks in the east side of the Changning-Menglian ophiolitic mélange zone with the influence of caused by the closure of the Paleo-Tethyan Changning-Menglian Ocean in later stage.

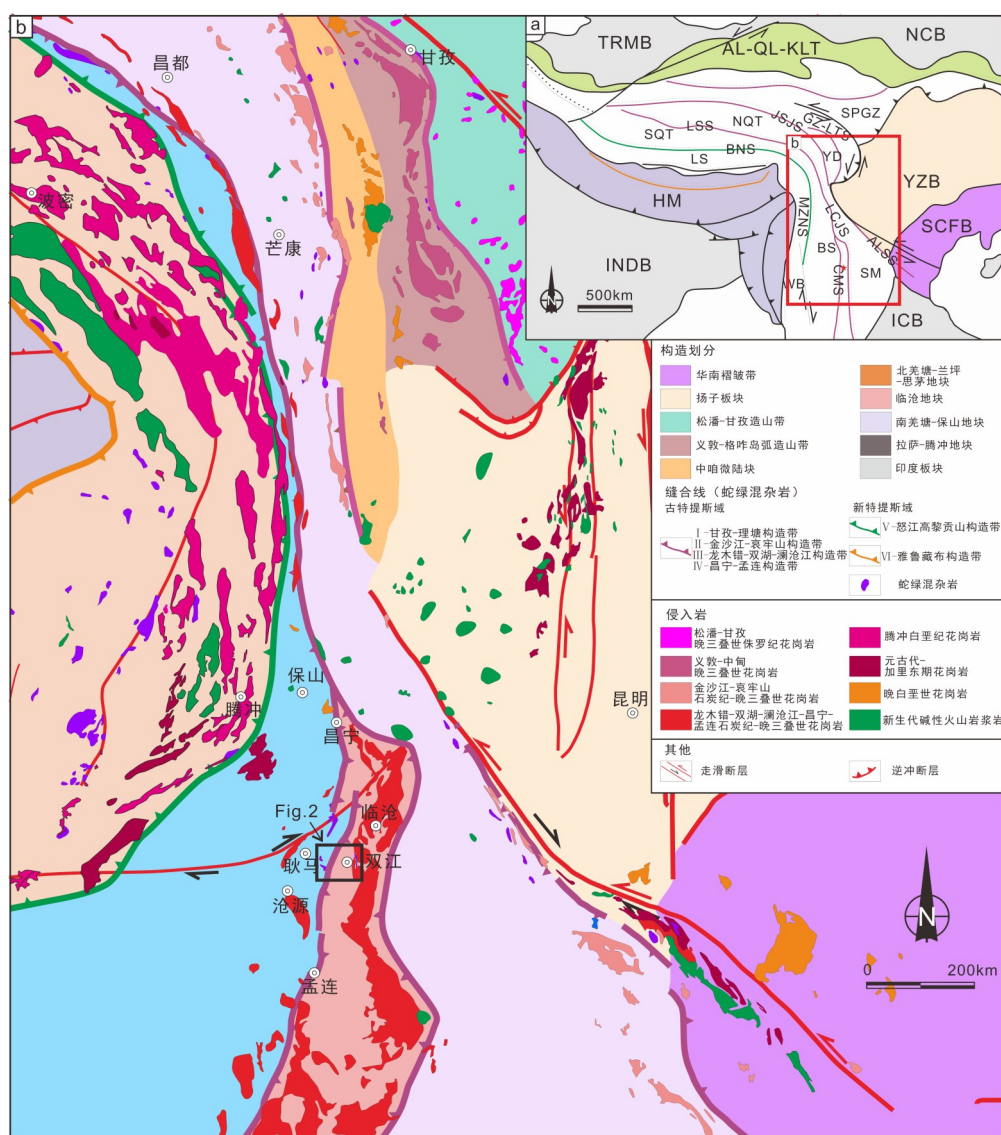
Keywords: Changning-Menglian suture zone; Nanduan formation; zircon U-Pb geochronology; compositional and size analyses of detrital grains; passive continental margin

中国西南“三江”地区是解析东特提斯构造域演化的关键区域,作为冈瓦纳大陆与劳亚大陆之间的古特提斯造山带核心地段,完整记录了冈瓦纳大陆北缘陆块裂解、向北漂移并最终拼贴于劳亚大陆南缘的复杂构造演化历史。区内发育昌宁-孟连、澜沧江-金沙江-哀牢山等重要缝合带^[1-3](图1a)。其中昌宁-孟连洋盆一直被视为古特提斯洋主洋盆,位于冈瓦纳大陆北缘保山地块与劳亚大陆南缘印支地块之间,其大地构造演化历史复杂,成为研究东特提斯构造演化的热点地区^[3-15]。

昌宁-孟连构造带北起昌宁、双江一带,经铜厂街、老厂延伸至孟连,向南进入缅甸东部,经泰国北部清迈地区,继续向南延伸至泰国南部庄他武里及马来西亚文冬-劳勿一带。(图1b)。该构造带出露完整的沉积地层、蛇绿岩套、洋底火山-沉积序列、高压变质杂岩和俯冲相关弧火山-岩浆岩,完整保留了古特提斯洋打开-发展-消亡的地质历史遗迹^[6,7,12-14,16]。昌宁-孟连构造带保存了较为完整的元古代-古生代-中生代火山-沉积-变质地层,包括元古代大勐龙群和澜沧群,以及古生代南段组、温泉组、鱼塘寨组、平掌组、拉巴组和大明山组等。这些不连续地层多以断层接触的构造岩片形式产出在昌宁-孟连构造带两侧,其角度不整合之上为代表碰撞造山期的中-晚三叠统三岔河组磨拉石沉积(图2)。

造山带原型沉积盆地分析、古生物分区、古地理位置及沉积物源区亲缘性研究,是沉积大地构造研究造山带演化的重要方向。前人在昌宁-孟连构造带耿马地区晚石炭世-早二叠世灰岩中发现了亲华夏新纺锤虫化石群等古生物组合^[17-22]。这一发现使得被认为与冈瓦纳大陆北缘具有亲缘性的耿马地块,其归属问题长期存在争议,进而有学者提出该区古地理为冈瓦纳周缘和华夏之间的过渡带洋岛海山^[21,23]。近年来,许多学者对昌宁-孟连构造带东侧南段组变质碎屑岩进行锆石U-Pb定年研究,认为其物源区为冈瓦纳大陆北缘^[24-27]。这些研究发现进一步使得昌宁-孟连蛇绿混杂岩带作为古特提斯构造域主缝合带的认知更为复杂。因此,对片理化南段组变沉积岩进行精细解剖,对重塑古特提斯洋演化过程具有重要意义。本文在精细厘定野外构造变形特征和接触关系的基础上,对南段组变沉积岩进

行粒度、碎屑组分以及锆石 U-Pb 年代学分析, 旨在明确南段组的沉积时代、沉积环境、沉积物源及板块亲缘性, 为重塑古特提斯演化过程提供进一步证据。



TRMB-塔里木盆地; NBC-华北板块; AL-QL-KLT-阿尔金-昆仑-祁连板块; YZB-扬子板块; SCFB-华南海块; SPGZ-松潘-甘孜板块; INDB-印度板块; ICB-印支板块; HM-喜马拉雅板块; SQT-羌南板块; NQT-羌北板块; WB-西缅甸块; BS-保山板块; SM-思茅板块; YD-义敦-格咱岛弧造山带; SNMZ-狮泉河-嘉黎结合带; LSS-JCLS-龙木错澜沧江构造带; GZ-LTS-甘孜-理塘构造带; JSJS-ALSS-金沙江-哀牢山构造带; CMS-昌宁-孟连构造带; 底图据 1:5 000 000 亚洲地质图修改。

图1 青藏高原及周缘地区大地构造划分简图 (a) 和三江造山带地质简图 (b) [28]

Fig. 1. Sketch map of tectonic divisions of the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas (a) and the geological sketch map of the Sanjiang orogenic belt (b) [28]

1 区域地质概况

昌宁-孟连构造带记录了完整的特提斯演化序列, 先后经历了早古生代原特提斯大洋扩张、早古生代中晚期-晚古生代古特提斯洋俯冲消减、晚二叠世末-早三叠世主碰撞汇聚, 以及晚三叠世晚碰撞造山等关键构造演化阶段^[15,29-33], 完成了从古生代特提斯大洋岩石圈向大陆岩石圈的转换, 奠定了该区现今的主要构造格局。

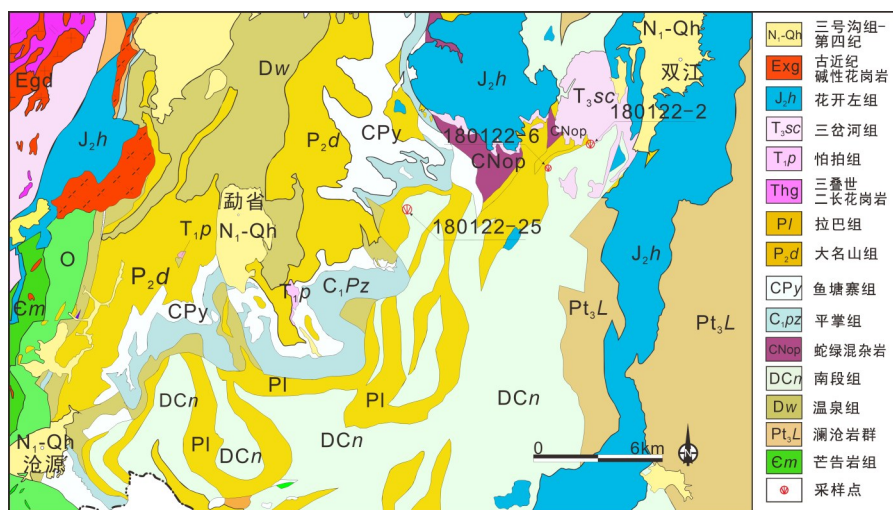


图2 昌宁-孟连构造带地质简图及南段组样品分布图

Fig. 2. Simplified geological map of the Changning-Menglian tectonic belt with the distribution of sampling sites of the Nanduan Formation

昌宁-孟连构造带整体呈南北向展布, 向北与澜沧江断裂带呈弧形相接, 西侧以柯街-南汀河断裂为界, 与保山地块相邻, 东侧以澜沧江断裂为界, 与思茅地块分隔。该构造带西侧出露地层单元较多且复杂, 主要出露地层以泥盆纪-三叠纪为主, 自下而上依次为早泥盆世温泉组、中-晚泥盆世曼信组、晚泥盆世-早石炭世南皮河群、晚石炭世-中二叠世拉巴群、二叠纪平掌组及晚二叠世末-早三叠世怕拍组; 东侧主要分布南段组及部分原“二叠系拉巴组”, 主体为一套灰白色石英砂岩夹灰白/灰绿色粉砂岩和泥岩以及澜沧群的片岩和片麻岩以及晚三叠世的花岗岩^[17,25]。

南段组分布于昌宁-孟连构造带东侧, 岩性以一套岩性相对单一的变质碎屑岩为主, 主体为变质石英砂岩, 可见块状变质长石石英砂岩, 夹少量石英片岩及泥质粉砂岩。变质石英砂岩的矿物成分主要以单晶石英为主, 含少量斜长石、钾长石、岩屑和重矿物, 基质主要为黑云母、绢云母和白云母, 重矿物为不透明金属矿物。区域上, 南段组与下伏澜沧岩群变质片岩系呈断层接触, 具明显构造的构造接触特征; 其上与二叠系拉巴组未变质沉积地层呈整合接触。

南段组在构造演化过程中, 主要经历了三期中-浅层次变形, 第一期构造变形受东西向挤压作用影响, 伴随区域变质作用发生, 形成了南段组浅变质岩系主体, 并生成大量石英、绢云母、黑云母等变质矿物; 区域内 S_1 面理密集发育, 对早期面理(原生层理 S_0)及其褶皱进行改造与置换, 致使原有褶皱构造被完全破坏; 总体上 S_1 与 S_0 近平行, 以 S_0 为变形面, 形成轴面近直立或向东陡倾的近南北向纵弯褶皱^[34]。第二期构造变形, 以对 S_1 褶曲的横向构造置换为主要特征, 形成大量近水平顺层剪切的逆掩褶皱及不连续剪切面理 S_2 , 伴随千糜棱岩化、多晶石英集合体条带等动态重结晶作用。第三期构造变形强度相对较弱, 总体展布方面与 S_2 面理一致, 形成纵弯宽缓波状褶皱及切层断层等构造行迹^[17,26,33]。

2 样品特征与测试方法

本次分析样品采自沧源县214国道, 其采集位置见图2。

昌宁-孟连构造带晚古生代南段组变质碎屑岩主要为强劈理化变质石英砂岩和变质长石石英砂岩(图3)。砂岩样品中石英含量平均为68%, 长石25%, 岩屑3%(表1); 胶结物以泥质和钙质为主。样品颗粒分选度和磨圆度中等, 主要呈次圆状-次棱角状, 平均粒径0.15~0.35 mm, 以变余砂状结构,

块状构造为主, 可见弱定向构造、水平层理构造等。通常情况下, 石英颗粒以多晶石英为主, 并发育明显的波状消光特征, 单晶石英与钾长石紧密相连, 岩石中泥质基质含量较高, 钾长石普遍发生蚀变, 多被交代为微细绢云母。

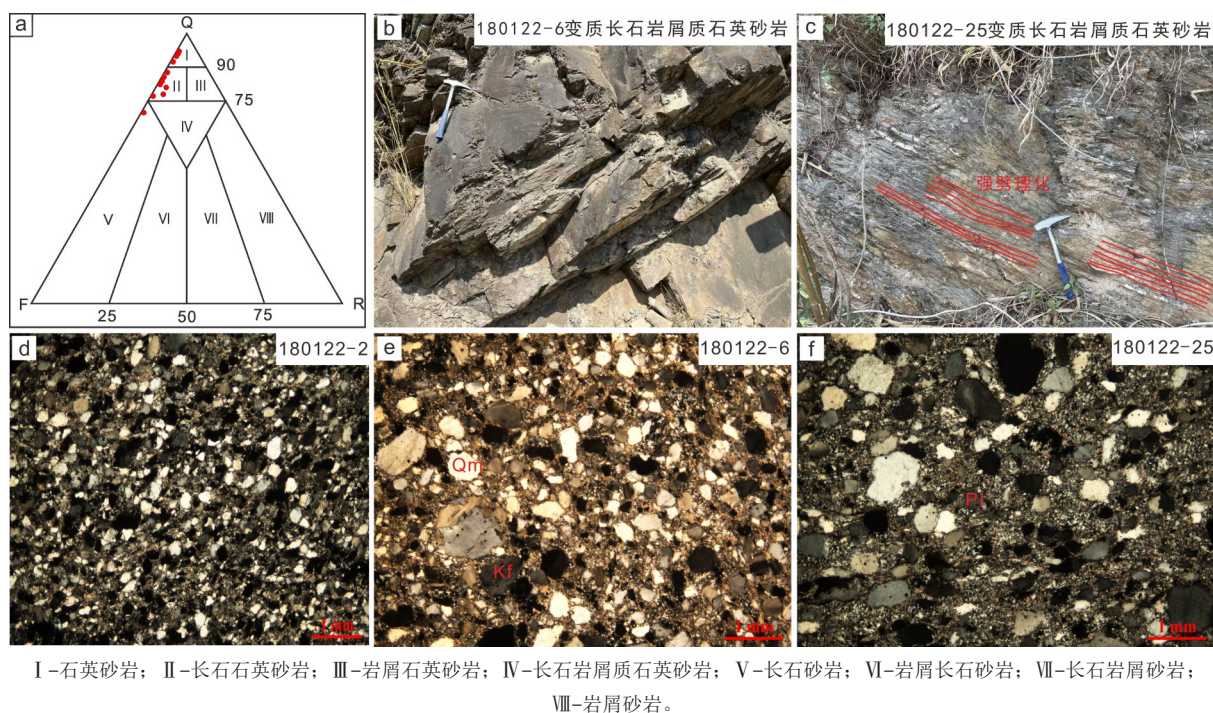


图3 南段组岩性三元相图 (a) 变质砂岩野外 (b, c) 及镜下正交偏光岩相学特征 (d~f)

Fig. 3. Lithologic ternary diagram (a), field photographs (b, c) and microscopic petrographic characteristics (d~f) of metasandstones in the Nanduan Formation

碎屑岩的粒度大小、粒度分布和分选性特征受控于不同沉积环境下的搬运方式及其动力条件, 因此通过确定碎屑岩粒度参数可以很好反映古沉积环境特征^[35]。本次研究采用岩石薄片分析法, 对 10 件变质砂岩样品开展了粒度分析工作, 碎屑统计在河北廊坊市宇弘岩矿科技有限公司完成。本次粒度分析在长江大学地球科学学院实验中心完成, 参照 SY/T 5434—2018 碎屑岩粒度分析方法标准, 采用蔡司 Axio imager M2m 科研偏光显微镜, 通过测量岩石薄片中的颗粒长轴直径 (d), 获取岩石的粒度分布。粒径数据经 Φ 值标准转换 ($\Phi = -\log_2 d$) 后开展粒度统计分析, 并绘制频率曲线图与概率累积曲线图 (图4、5)。采用图解法计算各样品的福克-沃德粒度参数, 包括中值 (M_d)、平均粒径 (M_z)、分选系数 [σ_i 、偏度 (Sk_i)]、峰值 (K_G) 等; 进一步利用萨胡 (Sahu) 沉积环境判别函数^[36]计算判别值 (Y), 并据此进行沉积相判别。

锆石分选工作在北京锆年科技有限公司完成: 首先将样品破碎至合适粒度, 经重选、磁选分离富集后, 手工挑出纯净锆石颗粒; 随后将锆石颗粒随机粘贴于环氧树脂靶中, 待树脂完全固化后, 对靶面进行精细抛光, 使约 1/3~1/2 的锆石内部结构充分暴露, 便于后续观察与测试。抛光完成后, 对样靶依次进行透射光、反射光及阴极发光 (CL) 照相, 全面获取锆石外部形态、内部振荡环带及包裹体分布特征; 结合影像特征, 严格圈定出自形程度高、无明显裂纹、包裹体稀少、成分均一且表面干净的锆石颗粒作为测试点位, 最大限度降低后期蚀变、包裹体等因素对年龄结果的干扰, 保证 U-Pb 同位素年龄测定的准确性。锆石 U-Pb 年龄测试工作在国家地质实验测试中心完成, 采用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱法 (LA-ICP-MS) 进行原位微区分析。测试所用激光束斑直径为 32 μm , 激光频率为 5 Hz; 样品经激光剥蚀产生的气溶胶, 以氦气为载气输送, 同时引入氩气作为补偿气体调节仪器分

析灵敏度，混合后送入ICP-MS进行离子检测。每个锆石测试点的信号采集流程为：30 s 气体空白信号采集+50 s 激光剥蚀与数据采集；为确保分析结果的精度与准确度，采用标样-样品交叉法进行质量监控，即每8个未知样品测试点后，分别插入1个 Plesovice 标样和2个 GJ-1 标样进行同步分析与校正。测试所得原始数据的处理、年龄计算及谐和图、年龄概率密度图的绘制等，均采用 ICPMSDataCal 与 Isoplot3.0 软件完成。

表1 样品位置和样品特征简表
Table 1. Summary of sampling locations and characteristics of samples

样品编号	岩性	经纬度	矿物成分及简要描述
180118-1	变质长石石英砂岩	N24°37′28.1″ E99°44′33.2″	主要由石英（约60%）、长石（约20%）组成，岩石具变余砂状结构，块状构造。可见绿帘石、锆石和不透明金属矿物等。碎屑矿物以石英为主，填隙物经低级变质作用发生重结晶，形成细小绢云母和绿泥石等矿物
180118-2	变质长石石英砂岩	N24°37′39.6″ E99°44′53.7″	主要由石英（约65%）、长石（约25%）组成，具变余砂状结构，块状构造。基质具显微变晶结构，由显微鳞片状绢云母及石英粉砂组成。重矿物见不透明金属矿物、锆石、电气石等。原岩胶结物以铁质为主，其次见少量泥质胶结物
180118-3	变质长石石英砂岩	N24°37′44.7″ E99°45′15.3″	主要由石英（约70%）、长石（约15%）组成，具变余砂状结构，块状构造。基质具变晶结构，由显微鳞片状黑云母、绢云母组成。重矿物见不透明金属矿物等。岩石整体呈弱定向构造
180122-1	变质石英砂岩	N23°24′54.4″ E99°45′39.7″	主要由石英（约60%）组成，具变余粉砂状结构，块状构造。原岩颗粒成分为斜长石和石英组成。基质具变晶结构，由显微鳞片状黑云母、绢云母组成。重矿物见不透明金属矿物及锆石等。岩石整体呈弱定向构造
180122-2	变质石英砂岩		主要由石英（约75%）、长石（约10%）组成，具变余砂状结构，块状构造。砂成分为斜长石和石英组成。基质具变晶结构，由显微鳞片状黑云母、绢云母组成。重矿物见不透明金属矿物及锆石等
180122-6	变质石英砂岩	N23°23′41.7″ E99°42′56.5″	主要由石英（约80%）、长石（约10%）组成，具鳞片状粒状变晶结构，片状构造。主要由石英、黑云母及少量钾长石、白云母组成；副矿物见不透明金属矿物
180122-25	变质长石石英砂岩	N23°21′20.9″ E99°35′33.1″	主要由石英（约70%）、长石（约15%），岩屑（约3%）组成，具变余粉砂结构，块状构造。粉砂主要以石英为主，其次见少量斜长石；基质具鳞片变晶结构，主要由绢云母、白云母及微晶石英组成；副矿物见不透明金属矿物
180123-2	变质长石石英砂岩	N23°08′01.4″ E99°17′57.7″	主要由石英（约70%）、长石（约15%）组成，具变余砂状结构，砂成分为斜长石和石英组成。基质具变晶结构，由显微鳞片状绢云母、黑云母、少量绿帘石及方解石组成。重矿物见不透明金属矿物等
180123-3	变质长石石英砂岩		主要由石英（约60%）、长石（约15%），岩屑（约3%）组成，具变余细砂状结构，弱定向构造。

3 分析结果

3.1 粒度分析

对南段组7件变质砂岩样品开展的粒度分析结果表明，其平均粒径（ M_z ）介于 $2.17\Phi\sim3.22\Phi$ ，颗粒以细-中粒为主，该粒径特征指示研究区沉积时期处于中等水动力条件的沉积环境。从分选性来看，南段组变质砂岩粒度标准差（ σ_i ）介于 $0.52\sim0.79$ ，均值约为0.68，整体属于分选中等-较好级别，反映沉积过程中颗粒分选作用较为充分^[37]。偏度（ Sk_i ）多数样品 <0 ，介于 $-0.12\Phi\sim0.07\Phi$ 之间，呈现近对称略负偏的特征，这一现象进一步印证其分选性较好，推测与浅海沉积环境中潮汐、波浪的高能反复改造作用密切相关。峰度（ K_G ）介于 $0.93\Phi\sim1.08\Phi$ ，锋态为中等-尖锐。从沉积搬运方式来看，深水浊流沉积以悬浮搬运为主，其概率累计曲线多表现为发育不全的悬浮主体，呈直线不分段或两段式特征^[38]，而浅海环境水动力条件复杂，受洋流、波浪、潮汐等共同作用，搬运方式涵盖推移、跃移及悬

浮三种类型, 对应概率累计曲线呈典型三段式, 牵引总体、跃移总体及悬移总体均较发育^[39-42]。南段组砂岩粒度分布曲线以双峰为主 (图4), 砂岩概率累计曲线主要呈现浅海环境的三段式特征, 各搬运组分均有明确发育, 进一步佐证其沉积环境为浅海 (图5)。

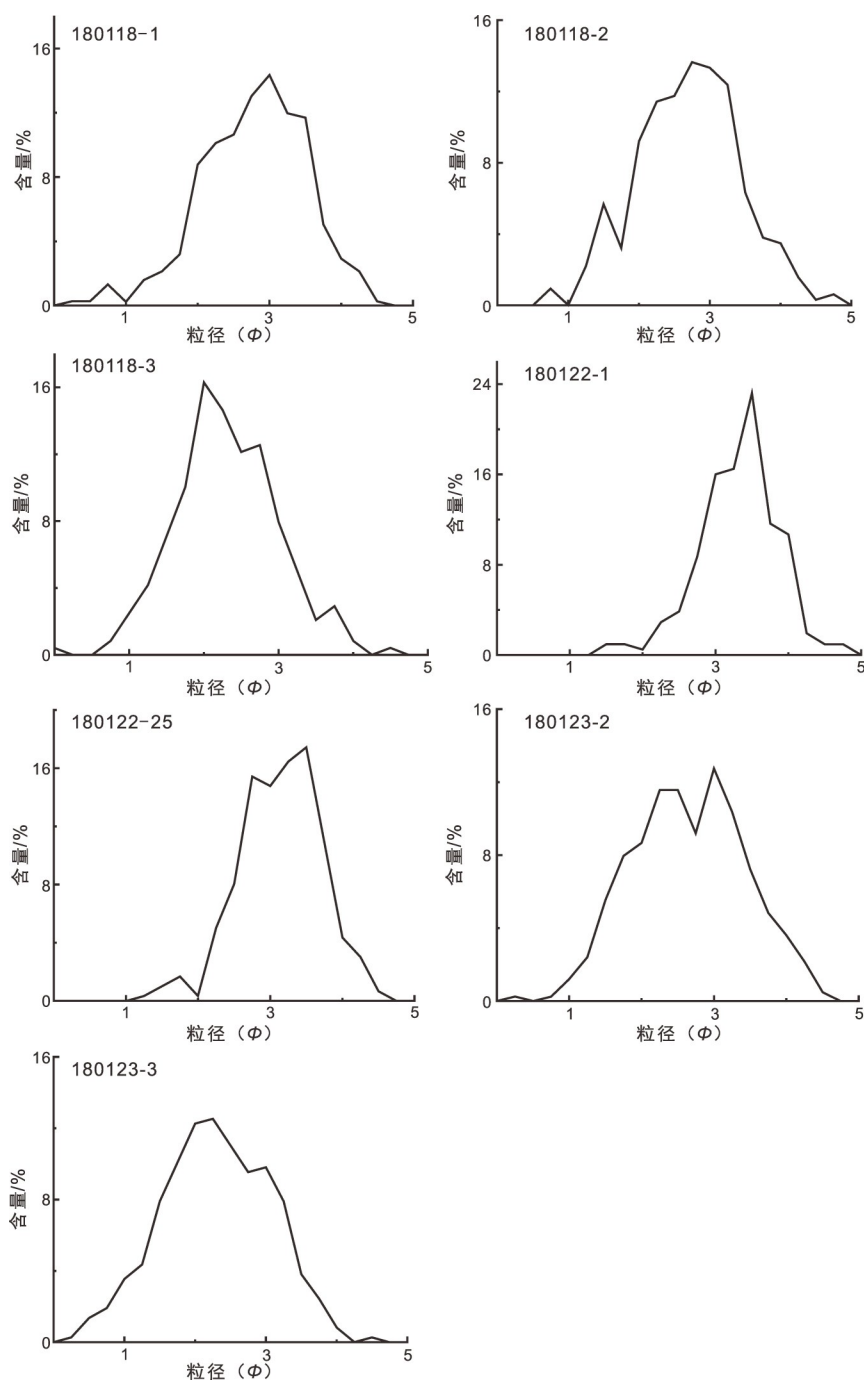


图4 南段组变质砂岩粒度分布曲线特征图

Fig. 4. Characteristics of distribution curves for grain sizes of metamorphosed sandstones from the Nanduan Formation

3.2 锆石 U-Pb 年龄

本次研究的3件变质砂岩样品 (180122-2、180122-6、180122-25) 岩性为变质长石石英砂岩, 经分选提纯后获得的锆石颗粒大小不均, 形态呈现圆状至次棱角状, 粒径集中在 50~150 μm 范围内, 整

体颗粒形态反映了其经历过一定的搬运磨蚀作用。锆石阴极发光 (CL) 图像 (图6) 显示, 锆石颗粒以浑圆状为主, 少数为长柱状, 二者岩相学特征与成因存在差异: 前者发育环带和无明显环带, 为碎屑锆石; 后者发育岩浆环带, 为岩浆锆石, 大部分锆石受到磨蚀, 经过一段距离搬运。

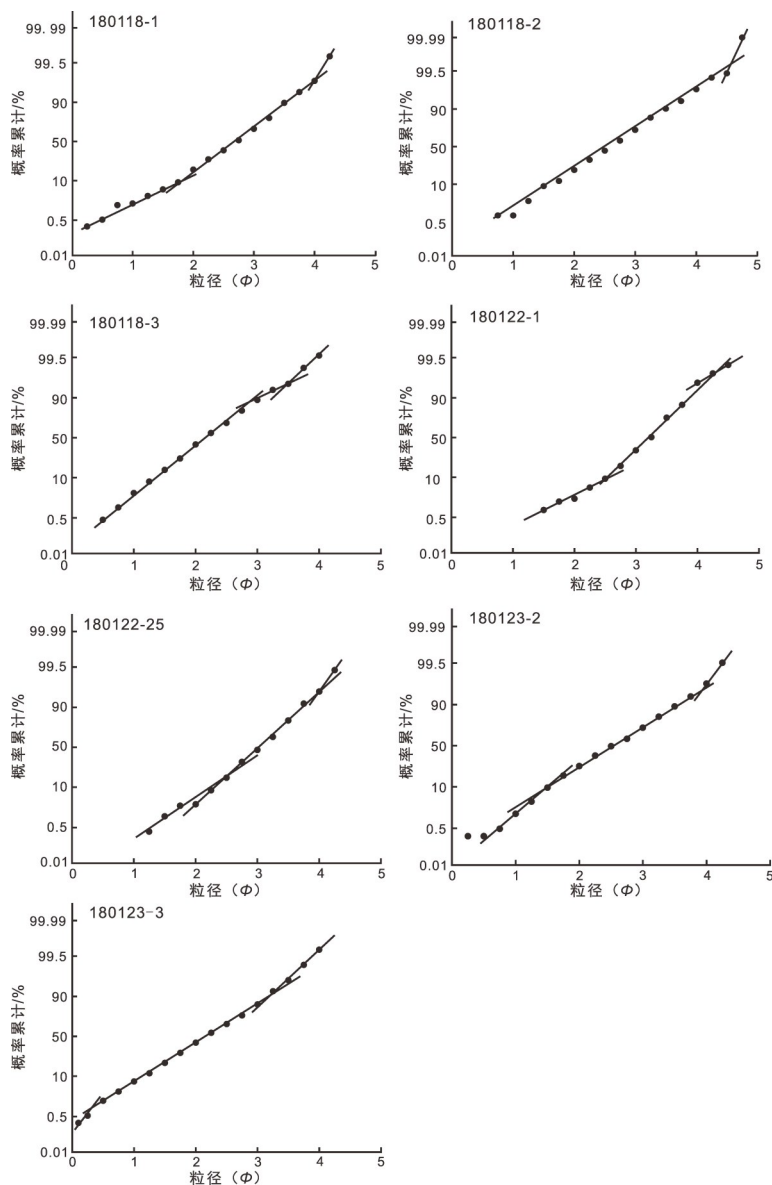


图5 南段组变质砂岩粒度概率累计曲线图

Fig. 5. Cumulative curves for probabilities of grain sizes of metamorphosed sandstones from the Nanduan Formation

样品 180122-2 锆石 (见附表1) U 和 Th 含量变化范围分别为 $66 \times 10^{-6} \sim 801 \times 10^{-6}$ 和 $25 \times 10^{-6} \sim 652 \times 10^{-6}$, 相应 Th/U 值为 0.29~13.81。结合锆石 CL 图像分析和同位素 Th/U 值特征显示部分锆石具有岩浆成因的特征, 发育清晰规则的韵律生长环带, 少量锆石出现破碎, 大部分锆石边部具有一定的磨圆。测试年龄介于 2488~512 Ma 之间, 对于 U-Pb 年龄小于 1000 Ma 的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, U-Pb 年龄大于 1000 Ma 的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$ 年龄。频谱图显示多个群组/峰 (图7c, d), 分别为 562、820、960、1065、1273、1526、2439 Ma。

样品 180122-6 锆石 U 和 Th 含量变化范围分别为 $17 \times 10^{-6} \sim 674 \times 10^{-6}$ 和 $15 \times 10^{-6} \sim 529 \times 10^{-6}$, 相应 Th/U 值为 0.15~7.48。结合锆石 CL 图像分析和同位素 Th/U 值特征显示部分锆石具有岩浆成因的

特征, 发育清晰规则的韵律生长环带, 少量锆石出现破碎, 大部分锆石边部具有一定的磨圆。测试年龄介于 499~2789 Ma 之间, 对于 U-Pb 年龄小于 1000 Ma 的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, U-Pb 年龄大于 1000 Ma 的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{236}\text{Pb}$ 年龄。频谱图显示多个群组/峰 (图 7c, d), 分别为 565、857、1188、1399、1571、2386 Ma。

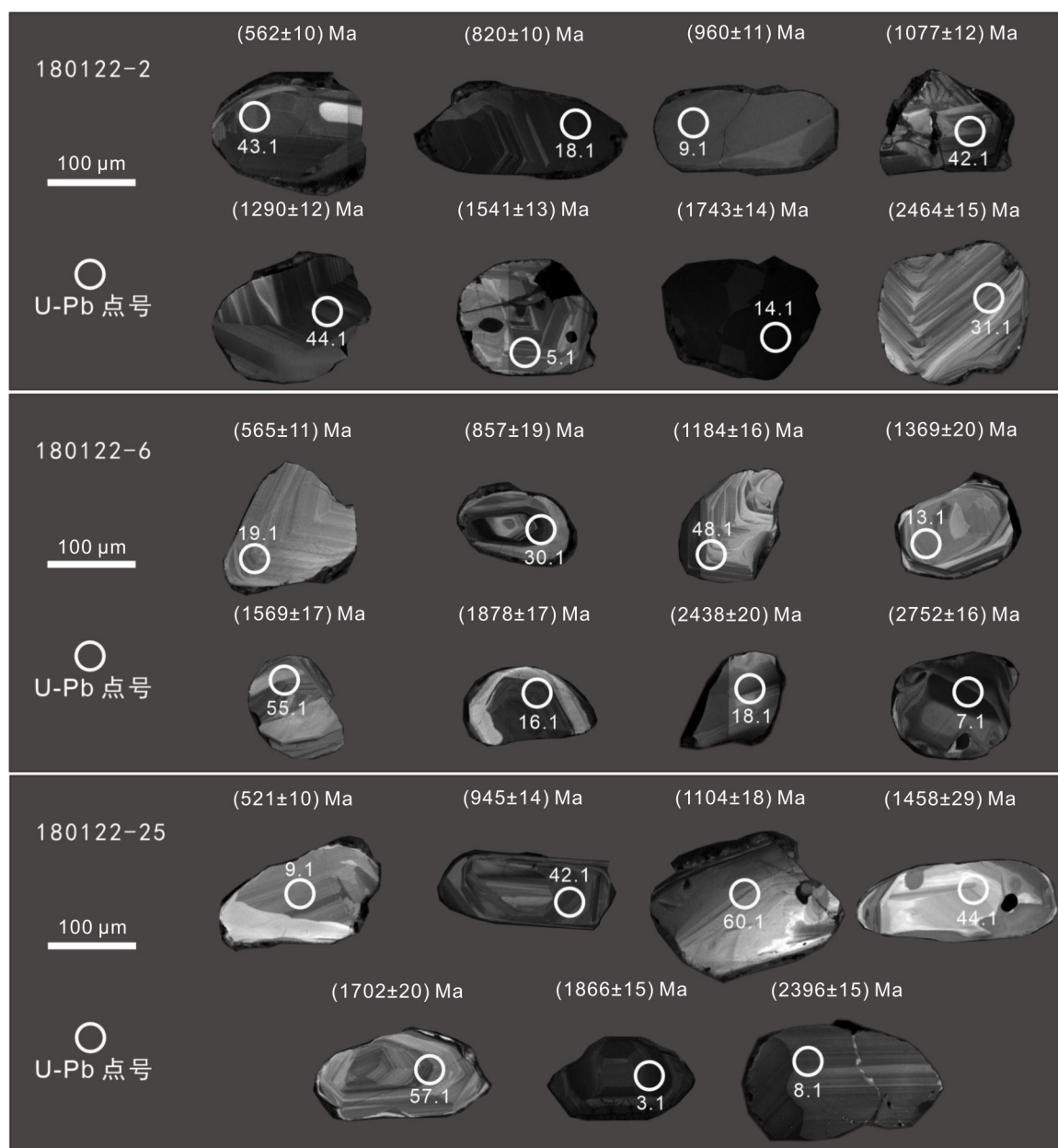


图6 南段组碎屑锆石阴极发光图像、测点编号及谐和年龄图

Fig. 6. Cathodoluminescence images, analyzing spot numbers and concordant ages of detrital zircons from metasediments in the Nanduan Formation

样品 180122-25 锆石 U 和 Th 含量变化范围分别为 $24 \times 10^{-6} \sim 633 \times 10^{-6}$ 和 $13 \times 10^{-6} \sim 747 \times 10^{-6}$, 相应 Th/U 值为 0.35~27.1。结合锆石 CL 图像分析和同位素 Th/U 值特征显示柱状锆石发育清晰规则的韵律生长环带, 浑圆状锆石少量发育生长环带, 个别锆石出现破碎, 大部分锆石边部具有一定的磨圆。测试年龄介于 3512~511 Ma 之间, 对于 U-Pb 年龄小于 1000 Ma 的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, U-Pb 年龄大

于 1000 Ma 的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄。频谱图显示多个群组/峰 (图 7e, f), 分别为 525、945、1093、1451、1728、2308 Ma。

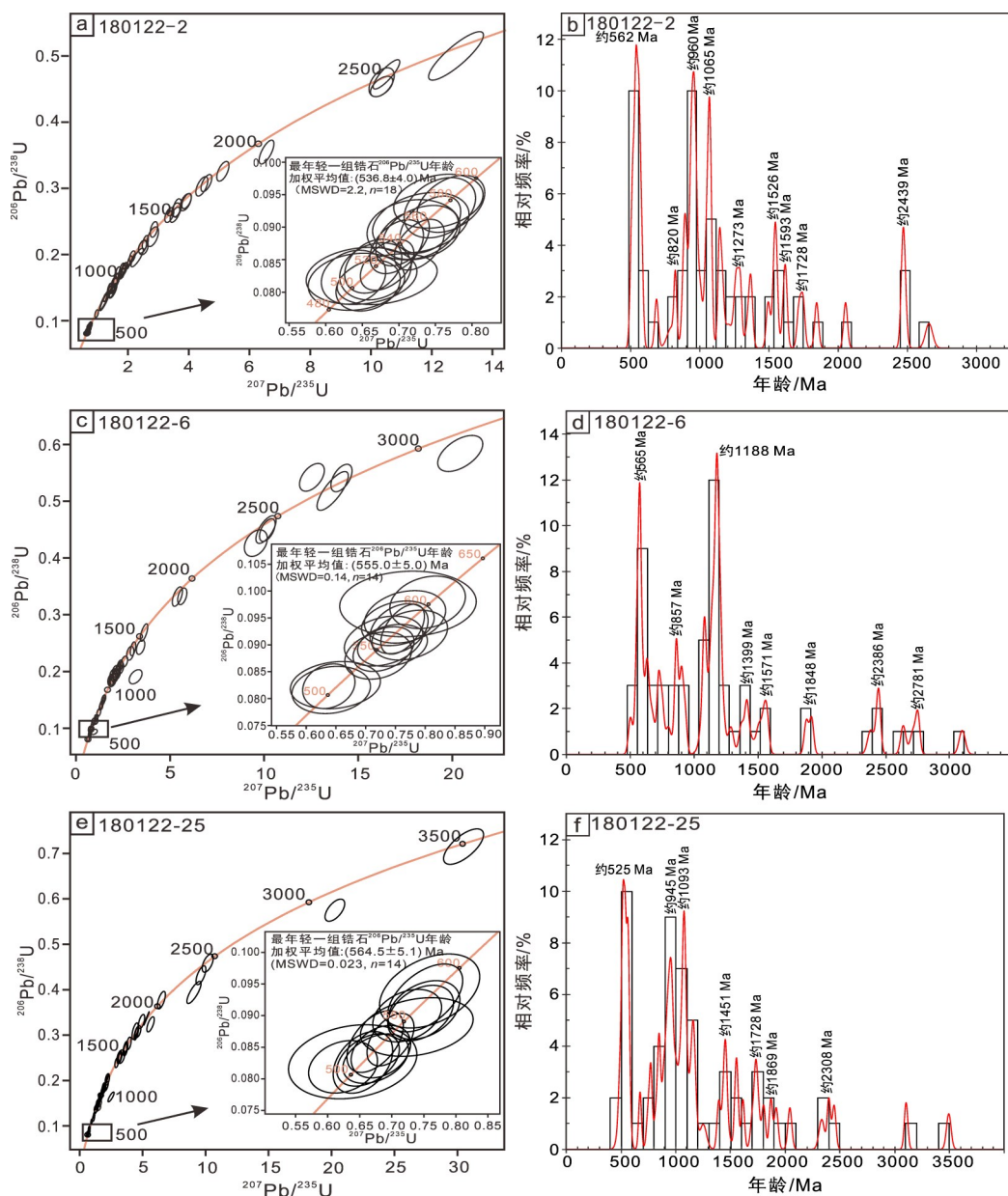


图7 南段组碎屑锆石 U-Pb 年龄协和图 (a, c, e) 和相对频率分布图 (b, d, f)

Fig. 7. The concordance diagrams of U-Pb ages (a, c, e) and relative frequency distribution diagrams (b, d, f) of detrital zircons from metasediments in the Nanduan Formation

4 讨论

4.1 南段组地层时代

南段组作为昌宁-孟连构造带东侧晚古生代地层的重要组成部分, 是解析区域地质演化历史的关键载体^[25,43]。受特提斯洋俯冲消减及后续陆-陆碰撞造山作用的强烈改造, 南段组内发育大量褶皱构造, 导致地层内部层序紊乱, 为其地质时代厘定与地层划分工作带来诸多困难。

前人对南段组地层时代的研究主要以菊石等古生物化石为核心依据: 早期开展 1:100 万普洱幅区域

地质调查工作时, 在南段组以变质砂岩为主和其互层的地层中未发现古生物化石, 前人将其时代归为奥陶系-志留系^[43]。1982年, 云南省区调队^[17]依据发现的一些早石炭世棱菊石, 将南段组的时代定为早石炭世维宪期。方宗杰等^[44]在南段组中部发现的海相化石, 认定其时代为晚维宪期-早纳缪尔期。冯庆来等^[45]在南段组上部层位中发现了菊石认为南段组时代为早纳缪尔期。Yang^[46]发现了出露于阿里地区的南段组中上部的维宪期孢粉。综合来看, 前人研究缺乏对该地层的系统性梳理及图版展示, 仅依靠生物层序难以精准限定其沉积时代。锆石 U-Pb 定年研究方面, 曾文涛等对南段组 3 件样品进行锆石 U-Pb 定年测试, 获得一颗年龄为 335 Ma, 其余年龄皆大于 500 Ma。Zheng 等^[25]对南段组砂岩样品开展了 U-Pb 定年研究, 获得最年轻 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 392、381、372、367、362 Ma。黄晓明等^[26]对南段组 2 件砂岩样品开展了锆石 U-Pb 定年, 获得具有统计意义的年龄为 512、509.6 Ma, 不同学者的定年数据存在一定差异。

本次研究对南段组 (180122-2、180122-6、180122-25) 样品开展碎屑锆石 U-Pb 定年研究, 3 件样品的年龄分布具相似性, 最年轻组年龄为 499、511 和 512 Ma。结合前人研究成果, 表明南段组最大沉积年龄下限为寒武纪, 年龄上限为石炭纪。

4.2 南段组沉积环境

南段组岩性相对单一, 主体为灰白色变质石英砂岩, 局部可见少量变质长石石英砂岩夹层。野外露头调查显示, 研究区内南段组可识别的沉积构造较为稀少, 缺乏明显的标志层; 受后期强烈构造-变质作用影响, 地层褶皱、断层极为发育, 强劈理现象普遍发育且贯穿整个岩系, 原始沉积层序已被强烈改造、破坏殆尽, 地层接触关系与层序归属难以准确厘定, 给南段组沉积环境的准确判别与沉积演化分析带来了极大困难。目前学界对南段组沉积环境存在两种不同观点: 一部分学者依据发现的槽模构造、粉砂岩中的滑动构造、粒序层理等浊流沉积构造, 认为南段组主体为深水浊流沉积环境^[7,45,47,48]; 另有部分学者则通过分析南段组岩石的成分成熟度、砂岩样品粒度频率曲线与概率累计曲线, 结合个别层位发现的浅海遗迹化石, 认为南段组应形成于浅海陆棚沉积环境^[25,49-52]。

浅海环境与深水浊流环境在流体动力学状态、沉积物搬运机制与方式等核心沉积动力学特征方面存在显著差异; 而碎屑岩粒度特征分析作为沉积学研究的经典定量方法, 在定量刻画研究区水动力强度、厘定沉积介质能量等级及精准识别古地理环境与沉积相类型中具有不可替代的核心作用。从本次粒度分析结果来看, 南段组大部分样品均完整发育牵引总体、跃移总体及悬浮总体, 且整体分选程度达中等-较好水平, 这一典型粒度组合特征, 与浅海环境中潮汐、波浪共同作用下的沉积响应高度吻合, 进一步佐证了南段组沉积环境更接近于浅海环境, 也为部分学者提出的浅海陆棚沉积观点提供了关键依据。综合前述分析可知, 南段组主体沉积环境并非深水浊流沉积。因此, 本文选取用于区分浅海、海滩以及三角洲相的萨胡环境判别公式^[35], 具体如下:

$$Y_{\text{beach:sh.mar}} = 15.6534M_z + 65.7091\sigma_i^2 + 18.1071Sk_i + 18.5043K_G$$

$$Y_{\text{sh.mar:fluv}} = 0.2852M_z - 8.7604\sigma_i^2 - 4.8932Sk_i + 0.0482K_G$$

从表 2 计算结果来看, 南段组 7 件样品的 $Y_{\text{beach:sh.mar}}$ 值均 > 65.3650, 指示其沉积环境为浅海相; $Y_{\text{sh.mar:fluv}}$ 值均 > -7.4190, 与郑建斌在文章中指出的南段组 $Y_{\text{beach:sh.mar}}$ 值 (范围 68.07~106.99) 和 $Y_{\text{sh.mar:fluv}}$ 值 (范围 -5.72~-0.20) 一致, 均指示了南段组的浅海沉积环境的判断^[53]。综上, 南段组属于浅海沉积, 并非深水浊流沉积。

4.3 南段组大地构造归属

长期以来, 关于昌宁-孟连构造带南段组的形成构造背景, 学界存在两种观点: 一种认为南段组

形成于构造环境稳定的被动大陆边缘；另一种认为其形成于被动大陆边缘向活动大陆边缘转换的构造演化过程^[7,26,43,51]。本文通过统计碎屑组分（表3），并绘制 Dickinson 碎屑图版，以此判别沉积物的源区构造背景（图8）。

表2 南段组变砂岩粒度分析环境判别数据

Table 2. Environmental discrimination data based on the grain-size analyses of metasandstones in the Nanduan Formation

样品号	$M_Z (\Phi)$	$\sigma_i (\Phi)$	$Sk_i (\Phi)$	$K_G (\Phi)$	$Y_{\text{beach:sh.mar}}$	$Y_{\text{sh.mar:fluv}}$
180118-1	2.68	0.72	-0.09	0.96	92.1491	-3.2903
180118-2	2.57	0.73	-0.04	1.03	93.5807	-3.6900
180118-3	2.17	0.69	0.07	1.07	86.3190	-3.8428
180122-1	3.22	0.52	-0.12	1.08	85.9834	-0.8112
180122-25	3.04	0.55	-0.04	0.97	84.6882	-1.5405
180123-2	2.52	0.79	0.02	0.93	98.0267	-4.8016
180123-3	2.18	0.79	0.00	0.94	92.5275	-4.8003

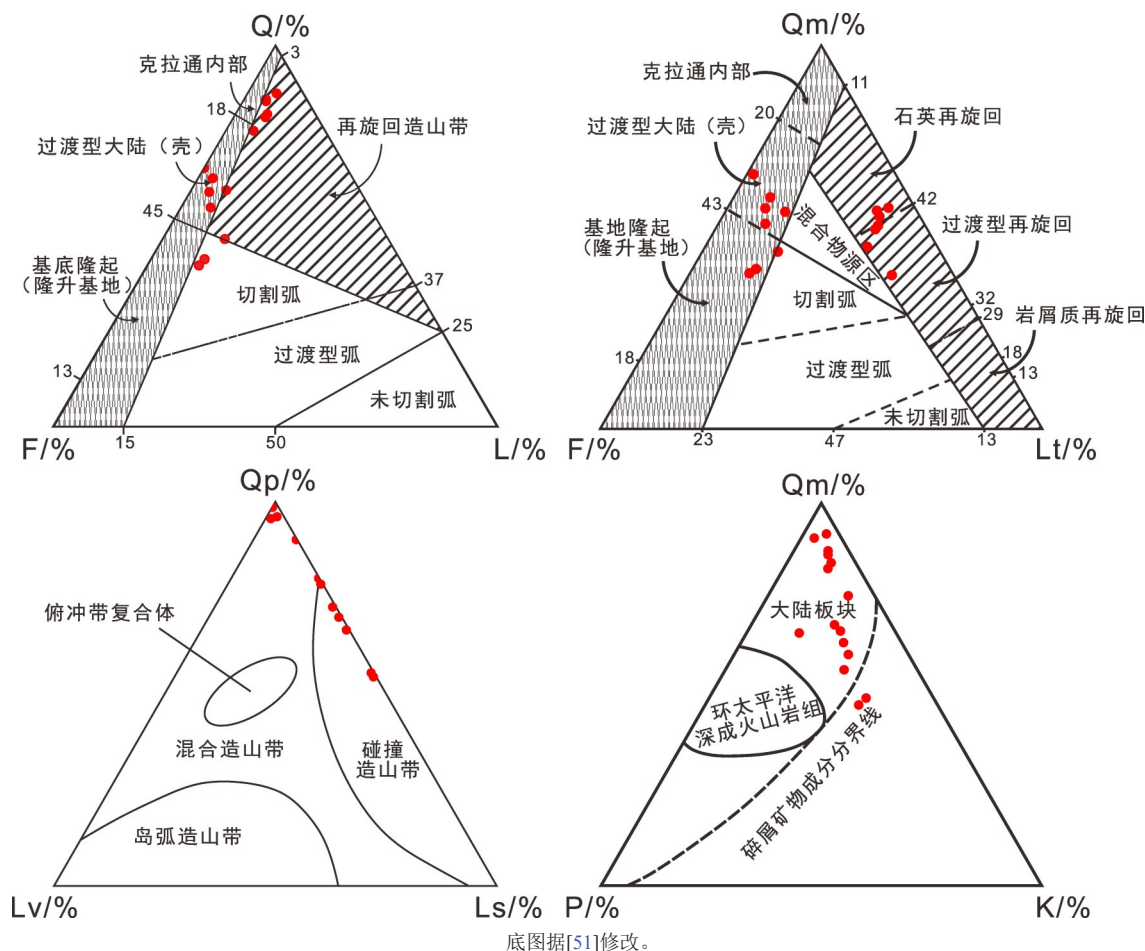
表3 南段组变砂岩碎屑组分统计表

Table 3. Statistics for compositional data of detrital grains in metsandstone of the Nanduan Formation

样品号	Q			F			L			
	Qp	Qm	合计	Pl	K	合计	Lv	Lm	Ls	合计
180118-1	5	102	107	39	78	117	0	26	4	30
180118-2	6	98	104	31	74	105	0	24	5	29
180118-3	7	100	107	30	50	80	0	28	3	31
180119-6	64	113	177	10	15	25	2	13	1	16
180119-7	71	110	181	9	28	37	1	12	2	15
180119-10	65	115	180	8	15	23	2	13	1	16
180122-1	63	120	183	7	12	19	1	10	0	11
180122-2	65	116	181	7	12	19	1	10	0	11
180122-3	11	103	114	35	20	55	0	12	3	15
180122-4	63	120	183	4	8	12	2	11	1	14
180122-7	52	118	170	4	5	9	2	9	1	12
180122-8	50	110	160	3	6	9	2	7	0	9
180122-25	8	101	109	23	45	68	0	10	3	13
180123-1	2	109	111	21	32	53	0	0	1	1
180123-2	8	104	112	22	40	62	0	6	2	8
180123-3	9	105	114	20	35	55	0	5	1	6

在砂岩源区构造背景判别图Q-F-L中，变质砂岩样品落入 Dickinson 等^[54]划分的大陆块区域，以再旋回造山带和过渡型大陆壳为主，指示碎屑物质源自陆块背景源区。在Qm-F-Lt图上，样品主要集中于过渡型大陆壳及石英再旋回区域，石英再旋回区域投点指示碎屑经长距离搬运与多期再旋回，不稳定岩屑低含量与过渡型大陆壳属性匹配，印证物源区物质经长期风化分选，与Q-F-L图解特征基本一致，反映物源区板块构造属性具有统一性。结合岩屑类型与石英成因分析可知，物源区以变质岩和沉积岩物质为主，变质岩屑与沉积岩屑为主的特征是再旋回造山带典型标志，此类造山带发育古生代—新元古代变质岩系与沉积岩系，经抬升剥蚀后提供物源，石英以单晶为主且具波状消光等改造特征，表明岩石碎屑经长距离搬运，这与再旋回造山带物源演化及大陆块的构造-地层组成特征相符。在Qm-

P-K 图上, 样品全部落入大陆板块物源区范围, 表现出较高的成熟度与稳定性特征。这一现象不仅说明南段组砂岩搬运距离较远, 还反映出物源区自身的陆源碎屑物便具备高成熟度、高稳定性的特点, 推测物源可能来源于稳定地台或古陆区, 此类区域地壳演化悠久、经多期稳定化改造, 岩石长期风化后不稳定组分别除; 结合区域背景, 冈瓦纳北缘南羌塘、特提斯喜马拉雅等地体的稳定地台基底, 与该物源属性契合。从 Qp-Lv-Ls 图可见, 样品主要落入碰撞造山带和混合造山带区域, 且火山碎屑 (Lv)、沉积岩屑 (Ls) 含量较低。结合 Qm-F-Lt 图特征综合分析, 研究区此时已开始由稳定的物源构造背景向活动物源构造背景转换, 该时期南段组正在进行构造运动, 但演化过程相对缓和。



底图据[51]修改。

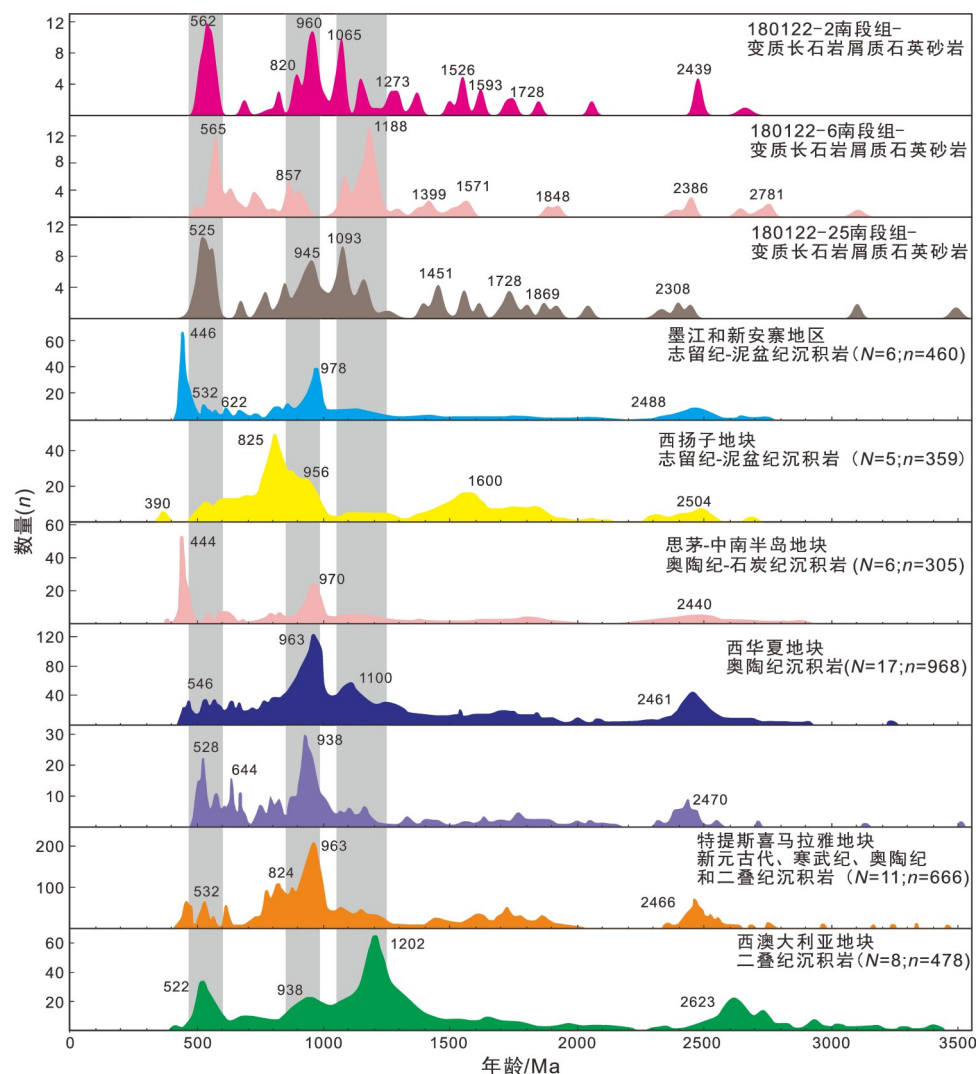
图8 南段组变质砂岩 Q-F-L (a), Qm-F-Lt (b), Qm-P-K (c), Qp-Lv-Ls (d) 形成环境判别图

Fig. 8. Diagrams of Q-F-L (a), Qm-F-Lt (b), Qm-P-K (c) and Qp-Lv-Ls (d) for discriminating the tectonic setting of metasediments from the Nanduan Formation

南段组碎屑锆石年龄峰值主要呈现3个主峰阶段(图9): 泛非期(575~525 Ma)、晚格林威尔期(960~820 Ma)及早格林威尔期(1188~1065 Ma), 并发育2个次级年龄峰(1869~1645 Ma和2499~2308 Ma)。在与各地块碎屑年龄谱值对比中发现: 南羌塘地块碎屑锆石年龄谱峰值为528、938、2470 Ma^[55,56], 具有泛非期和晚格林威尔期的年龄特征, 但缺少早格林威尔期年龄; 高喜马拉雅地块具有显著的晚格林威尔期年龄, 显示出印度 Eastern Ghats 造山带的物源属性^[55]; 西扬子地块碎屑锆石年龄谱峰值为390、825、956、1600、2504 Ma^[57-62]; 思茅地块年龄峰谱值为444、972和2440 Ma^[12-14,63]。上述地块的碎屑锆石年龄峰值虽然可以分别对应南段组某一阶段的年龄峰, 但均未同时具备与南段组一致的“泛非期-晚格林威尔期-早格林威尔期”三期主峰组合, 因此难以单独解释南段组碎屑锆石年龄

谱的整体特征。Zheng 在文中报道了南段组早古生代年龄组 (600~500 Ma)^[64], 该年龄被认为是对早古生代冈瓦纳大陆造山事件的响应 (泛非造山带), 而泛非造山带内广泛记录了同期的岩浆活动^[65-70]; 新元古代晚格林威尔期 (约 950 Ma) 的年龄组分, 被认为物源来自印度 Eastern Ghats 造山带, 该造山带内晚格林威尔期岩浆活动强烈, 发育大量 960~820 Ma 的花岗质岩浆岩, 其锆石年龄谱与南段组晚格林威尔期主峰年龄匹配^[55,56]。这表明冈瓦纳大陆北缘的南羌塘、特提斯喜马拉雅等地体可为南段组提供泛非期和晚格林威尔期年龄组分, 但仍不足以完整解释其早格林威尔期主峰。此外, 西澳大利亚板块碎屑锆石年龄谱峰值为 522、938、1202、2623 Ma^[71-75], 具泛非期、晚格林威尔期和早格林威尔期的年龄特征。澳大利亚西南部 Albany-Fraser 造山带则以发育早格林威尔期的岩浆事件为显著特征^[56,72,76], 该造山带内早格林威尔期 (1200~1050 Ma) 岩浆活动频繁, 形成了大量的基性-酸性侵入岩, 锆石年龄集中分布于 1180~1070 Ma, 与南段组早格林威尔期年龄峰值 (1188~1065 Ma) 高度重合, 是早格林威尔期物源的核心供给区, 而冈瓦纳大陆北缘 1.1 Ga 峰值是判别物源具有亲澳大利亚西缘的重要标志。因此, 南段组物源最可能来源于冈瓦纳大陆北缘与西澳大利亚相关物源区的共同供给, 其中冈瓦纳大陆北缘地体主要贡献泛非期和晚格林威尔期年龄组分, 而西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带不仅提供了关键的早格林威尔期年龄组分, 也与南段组三期主峰组合最为吻合。综上所述: 南段组物源并非由单一期次年龄峰单独限定, 而是依据“泛非期-晚格林威尔期-早格林威尔期”三期碎屑锆石年龄谱组合进行综合判定, 该组合特征表明泛非期和晚格林威尔期的物源由 Albany-Fraser 造山带与冈瓦纳大陆北缘的南羌塘、特提斯喜马拉雅等地体共同提供, 而早格林威尔期的物源则主要来自西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带。

昌宁-孟连构造带东侧南段组变质岩石成分以石英为主, 岩石地球化学特征显示其具有被动大陆边缘的化学属性^[52,88-90]。在 Q-F-L 图解中, 样品数据主要集中于陆块区域 (图 8a), 反映其源区具有古老稳定陆壳的特征; 南段组泛非期、格林威尔期的碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 既有较高正值也有较低负值, 指示物源区存在古老地壳再循环与新生地壳物质的加入^[63], 其中 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值样品对应新生地壳物质, 与 Albany-Fraser 造山带及印度 Eastern Ghats 造山带泛非期、格林威尔期岩浆活动形成的新生地壳物质特征相符, 负值样品则对应古老地壳再循环物质, 来源于冈瓦纳大陆北缘古老陆块的基底岩石^[65-70,72,76], 这一特征与 Qm-F-Lt 图解结果一致, 进而表明南段组的沉积环境由稳定的被动大陆边缘向远离大陆边缘的方向逐步过渡。随着新元古代南华纪裂谷事件的发生, 引发罗迪尼亚超大陆解体, 原特提斯洋开始初始扩张阶段, 区域内伴随南华纪裂谷事件发育了大量基性火山岩, 锆石 U-Pb 定年显示其形成年龄集中于 750~650 Ma, 为罗迪尼亚超大陆解体及原特提斯洋初始扩张提供了直接的岩浆记录^[76,90]。新元古代末至早古生代, 东、西冈瓦纳大陆经过泛非造山运动拼合形成统一的冈瓦纳超大陆, 这一演化过程以泛非期造山带 (约 870~550 Ma) 的发育为核心标志^[75,89]。此阶段南段组主要接收来自南羌塘、特提斯喜马拉雅等地体的物源, 其中早格林威尔期物源主要源自西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带。南段组次要年龄组显示较弱, 峰谱值为 1869~1645 和 2499~2308 Ma, 其中 1869~1645 Ma 年龄组, 推测可能与东澳大利亚 Kimberley 造山带 (1800 Ma)、Pine Creek 造山带 (1900~1800 Ma) 有关, 且区域构造演化显示, 该时期东澳大利亚地块与西澳大利亚地块处于相对靠近的构造位置, 为物源的迁移提供了有利的构造条件^[90,91]。前人研究表明, 1869~1645 Ma 期间未发生全球性造山事件, 哥伦比亚超大陆相关造山事件发生在 1850~1800 Ma, 且仅在超大陆边缘发生局部造山作用^[92]。综合上述特征表明, 南段组在形成过程中, 物源区从西澳大利亚地块往东澳大利亚地块逐步迁移, 其沉积构造环境也完成了从被动大陆边缘向活动大陆边缘的转换, 这一转换过程与区域构造演化及岩浆活动密切相关, 早古生代后期冈瓦纳大陆北缘的构造活动加剧, 伴随岩浆侵入及区域变质作用, 导致沉积环境由稳定被动大陆边缘向活动大陆边缘转变, 并以千枚状-弱片理化构造岩块产出于昌宁-孟连蛇绿混杂带东侧。



N 表示样品个数, n 表示数据量; 其他地块数据引自[29,55,56,77-87]文献。

图9 不同陆块锆石年龄分布对比图

Fig. 9. Comparison of age distributions of detrital zircons from various rocks in different continental blocks

5 结论

1) 结合3件变质砂岩的锆石 U-Pb 年龄及古生物特征, 确定南段组变质碎屑岩的沉积时代为泥盆纪-石炭纪。

2) 综合岩相学、粒度分析和碎屑组分特征表明, 南段组沉积物以成熟度较高的变质石英砂岩和变质长石石英砂岩为主, 沉积环境为被动大陆边缘浅海沉积, 并非深水浊流沉积; 物源区构造背景属于大陆内部或再旋回造山带。

3) 南段组碎屑锆石年龄峰值主要呈现3个主峰阶段: 泛非期 (575~525 Ma)、晚格林威尔期 (960~820 Ma) 及早格林威尔期 (1188~1065 Ma), 该年龄特征与冈瓦纳大陆东缘澳大利亚板块、印度-南极板块格林威尔期、泛非期两期造山带岩浆事件对应, 指示泛非期和晚格林威尔期的物源由 Albany-Fraser 造山带与冈瓦纳大陆北缘的南羌塘、特提斯喜马拉雅等地体共同提供, 而早格林威尔期的物源则主要来自西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带。

4) 综合前人研究成果认为, 南段组形成于冈瓦纳大陆北缘保山地块被动大陆边缘的浅海沉积环

境, 后期受古特提斯洋闭合引发的碰撞造山作用影响, 以千枚状-弱片理化构造岩块产出昌宁-孟连蛇绿混杂带东侧。

致谢: 野外地质调查过程中得到云南地质调查局余海军正高级工程师和北京离子探针中心孙会一助理研究员等大力帮助; 测试过程中还得到国家地质实验测试中心屈文俊研究员和赵鸿副研究员等帮助; 撰稿过程中得到昆明理工大学谢志鹏副教授等的热心指导; 两位匿名审稿人提出了中肯的修改意见; 在此一并表示衷心的感谢!

附录

附表1 南段组变质长石岩屑质石英砂岩岩体锆石 LA-ICP MS 锆石测试结果

附件信息参见“录用定稿”首发版附加材料

参考文献:

- [1] 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 85.
- [2] 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. 地质学报, 2001, 75(4): 484-497.
- [3] 李文昌, 尹光候, 卢映祥, 等. 西南“三江”格咱火山-岩浆弧中红山-属都蛇绿混杂岩带的厘定及其意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1661-1671.
- [4] 黄汲清, 陈国铭, 陈炳蔚. 特提斯-喜马拉雅构造域初步分析[J]. 地质学报, 1984, 58(1): 1-17.
- [5] 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.
- [6] 莫宣学. 三江特提斯火山作用与成矿. 地质出版社, 1993.
- [7] 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, 1993, 18(5): 529-539+671.
- [8] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] Liu B P, Feng Q L, Fang N Q, 1991. Tectonic evolution of the PalaeoTethys in Changning-Menglian Belt and adjacent regions, western Yunnan[J]. Journal of China University of Geosciences, 2: 18-28.
- [10] Jin X C. Sedimentary and paleogeographic significance of Permo-Carboniferous sequences in western Yunnan, China[J]. Geologisches Institut der Universität zu Köln Sonderveröffentlichungen, 1994, 99: 1-136.
- [11] Jin X C, Wang Y Z, Xie G L. Devonian to Triassic successions of the Changning-Menglian Belt, western Yunnan, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2003, 77(4): 440-456.
- [12] Metcalfe I. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1996, 43(6): 605-623.
- [13] Metcalfe I. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20(6): 551-566.
- [14] Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 1-33.
- [15] Deng J, Wang C M, Santosh M. Orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethyan domain, China: Preface[J]. Gondwana Research, 2014, 26(2): 415-418.
- [16] 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.
- [17] 云南省地质局区域地质调查队. 孟连幅(F-47-XVI)比例尺 1: 20 万[R]. 昆明: 云南省地质矿产局, 1982.
- [18] 云南省地质局区域地质调查队. 凤庆幅(G-47-XXXIV)比例尺 1: 20 万[R]. 昆明: 云南省地质矿产局, 1983.
- [19] 云南省地质局区域地质调查队. 耿马幅(F-47-IV)比例尺 1: 20 万[R]. 昆明: 云南省地质矿产局, 1986.
- [20] Zhou Z. C., 1995. Biostratigraphy and sedimentary environments of Carboniferous-Permian boundary section of Yutangzhai, Yongde County, western Yunnan. J. Stratigr. 19, 250 - 258 (in Chinese with English abstract).
- [21] Huang H, Jin X C, Shi Y K, et al. New fusulinid assemblages from the Changning-Menglian Belt in western Yunnan, China and their paleogeographic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2023, 256: 105807.
- [22] Huang H, Jin X C, Zheng J B, et al. Early to Middle Permian fusulinids from the northern Changning-Menglian Belt, western Yunnan, China: Taxonomic features and insights for Tethyan paleogeography[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2025, 676: 113153.
- [23] Feng Q L. Stratigraphy of volcanic rocks in the Changning - Menglian Belt in southwestern Yunnan, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20(6): 657-664.
- [24] 曾文涛, 刘桂春, 冯庆来, 等. 临沧地体亲缘性及南段组物源: 来自泥盆纪-石炭纪南段组碎屑锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质通报, 2017, 36(7): 1175-1187.
- [25] Zheng J B, Jin X C, Huang H, et al. Sedimentology and detrital zircon geochronology of the Nanduan Formation (Carboniferous) of the Changning-Menglian Belt: Indications for the evolution of Paleo-Tethys in western Yunnan, China[J]. International Journal of Earth Sciences, 2019, 108(3): 1029-1048.
- [26] 黄晓明, 牟传龙, 罗亮, 等. 滇西昌宁-孟连带南段组碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对沉积时代和构造环境的制约[J]. 地质通报, 2023, 42(7): 1069-1081+10001-10008.
- [27] Xie Z P, Xue C D, Yang T N, et al. Geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology of lower Carboniferous clastic sedimentary rocks in the

- Changning-Menglian Belt: Implications for the evolution of the paleo-Tethys ocean[J]. *Journal of Earth Science*, 2025, 36(3): 910-929.
- [28] 任纪舜, 牛宝贵, 王军, 等. 1: 500 万国际亚洲地质图[J]. *地球学报*, 2013, 34(1): 24-30+129.
- [29] Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 3-14.
- [30] Nie X M, Feng Q L, Qian X, et al. Magmatic record of Prototethyan evolution in SW Yunnan, China: Geochemical, zircon U - Pb geochronological and Lu - Hf isotopic evidence from the Huimin metavolcanic rocks in the southern Lancangjiang zone[J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(2): 757-768.
- [31] Liu B B, Peng T P, Fan W M, et al. Tectonic evolution and paleoposition of the Baoshan and Lincang blocks of west Yunnan during the Paleozoic[J]. *Tectonics*, 2020, 39(10): e2019TC006028.
- [32] Liu G C, Sun Z B, Zi J W, et al. Proto-Tethys ophiolitic mélange in SW Yunnan: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(5): 101200.
- [33] Wei Y H, Zi J W, Liu G C, et al. Reconstructing the Lancang Terrane (SW Yunnan) and implications for Early Paleozoic Proto-Tethys evolution at the northern margin of Gondwana[J]. *Gondwana Research*, 2022, 101: 278-294.
- [34] 于远山, 张斌辉, 陈敏华, 等. 滇西勐海西定地区南段组褶皱叠层构造及其研究意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2022, 42(4): 626-641.
- [35] Middleton G V. On sorting, sorting coefficients, and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones: A discussion[J]. *The Journal of Geology*, 1962, 70(6): 754-756.
- [36] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34(1): 73-83.
- [37] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27 (1): 3-26.
- [38] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1969, 39(3): 1074-1106.
- [39] Shanmugam G. High-density turbidity currents; are they sandy debris flows?[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 2-10.
- [40] Shanmugam G. New perspectives on deep-water sandstones: Implications[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 316-324.
- [41] 赵澄林. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [42] 陈建强, 周洪瑞, 王训练. 沉积学及古地理学教程[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 2015.
- [43] 罗亮, 王冬兵, 尤廷海, 等. 昌宁-孟连结合带东部泥盆系—石炭系南段组研究新进展及其对特提斯洋演化的启示[J]. *沉积与特提斯地质*, 2022, 42(2): 242-259.
- [44] 方宗杰, 周志澄, 林敏基. 关于滇西地质的若干新认识[J]. *科学通报*, 1990, 35(5): 363-365.
- [45] 冯庆来, 刘本培, 叶孜, 等. 滇西南南段组和拉巴群地质时代及构造背景[J]. *地层学杂志*, 1996, 20(3): 183-189.
- [46] Yang W P. Stratigraphic and phytogeographic palynology of late Paleozoic sediments in western Yunnan, China[J]. *Science Reports of Niigata University Series E(Geology)*, 1999, 14: 15-99.
- [47] 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.
- [48] 吴浩若, 杜越. 滇西昌宁—孟连带南部地层地质问题[J]. *地层学杂志*, 1994, 18(3): 221-227.
- [49] 罗君烈. 滇西特提斯造山带的演化及基本特征[J]. *云南地质*, 1990, 9(4): 247-290.
- [50] 云南省地质矿产局. 云南岩相古地理图集[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1995.
- [51] 崔春龙, 曾允孚, 黄志勋, 等. 滇西昌宁—孟连带南段组沉积环境及沉积机理[J]. *西南工学院学报*, 1998(1): 33-38.
- [52] 郑建彬. 昌宁-孟连带东部晚古生代碎屑岩沉积学与碎屑锆石年代学研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2019.
- [53] Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, et al. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94(2): 222.
- [54] Dong C Y, Li C, Wan Y S, et al. Detrital zircon age model of Ordovician Wenquan quartzite south of Lungmuco-Shuanghu Suture in the Qiangtang area, Tibet: Constraint on tectonic affinity and source regions[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(7): 1034-1042.
- [55] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, et al. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia[J]. *Geology*, 2011, 39(8): 727-730.
- [56] Zhang K J, Cai J X, Zhang Y X, et al. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245(3/4): 722-729.
- [57] Liu X, Gao S, Diwu C, et al. Precambrian crustal growth of Yangtze Craton as revealed by detrital zircon studies[J]. *American Journal of Science*, 2008, 308(4): 421-468.
- [58] Wang L J, Yu J H, Griffin W L, et al. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: Evidence from U - Pb and Lu - Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 368-385.
- [59] Wang L J, Griffin W L, Yu J H, et al. U-Pb and Lu-Hf isotopes in detrital zircon from Neoproterozoic sedimentary rocks in the northern Yangtze Block: Implications for Precambrian crustal evolution[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1261-1272.
- [60] Chen W T, Zhou M F, Zhao X F. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: Implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia[J]. *Precambrian Research*, 2013, 231: 61-77.
- [61] Yin C Q, Lin S F, Davis D W, et al. Tectonic evolution of the southeastern margin of the Yangtze Block: Constraints from SHRIMP U-Pb and LA-ICP-MS Hf isotopic studies of zircon from the eastern Jiangnan Orogenic Belt and implications for the tectonic interpretation of South China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 236: 145-156.
- [62] Metcalfe I. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context[J]. *Gondwana Research*, 2006, 9(1/2): 24-46.

- [63] Zheng J B, Zong P, Huang H, et al. Early Carboniferous ammonoids from the Nanduan Formation in the Changning-Menglian Belt, western Yunnan, China[J]. *Palaeoworld*, 2020, 29(1): 88-95.
- [64] Acharyya S K. Break up of Australia-India-Madagascar Block, opening of the Indian Ocean and continental accretion in Southeast Asia with special reference to the characteristics of the peri-Indian collision zones[J]. *Gondwana Research*, 2000, 3(4): 425-443.
- [65] Santosh M, Yoshida M. Pan-African extensional collapse along the Gondwana suture[J]. *Gondwana Research*, 2001, 4(2): 188-191.
- [66] Boger S D, Wilson C J L, Fanning C M. Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: The final suture between east and west Gondwana?[J]. *Geology*, 2001, 29(5): 463.
- [67] 陆松年. 初论“泛华夏造山作用”与加里东和泛非造山作用的对比[J]. *地质通报*, 2004, 23(9): 952-958.
- [68] Boger S D, Miller J M. Terminal suturing of Gondwana and the onset of the Ross – Delamerian Orogeny: The cause and effect of an Early Cambrian reconfiguration of plate motions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(1/2): 35-48.
- [69] Cawood P A, Wang Y J, Xu Y J, et al. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere?[J]. *Geology*, 2013, 41(8): 903-906.
- [70] Cawood P A, Nemchin A A. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 134(3/4): 209-234.
- [71] Clark D J, Hensen B J, Kinny P D. Geochronological constraints for a two-stage history of the Albany – Fraser Orogen, Western Australia[J]. *Precambrian Research*, 2000, 102(3/4): 155-183.
- [72] Veevers J J, Saeed A, Belousova E A, et al. U – Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68(3/4): 245-279.
- [73] Ksienzyk A K, Jacobs J, Boger S D, et al. U – Pb ages of metamorphic monazite and detrital zircon from the Northampton Complex: Evidence of two orogenic cycles in Western Australia[J]. *Precambrian Research*, 2012, 198: 37-50.
- [74] Downes P J, Dunkley D J, Fletcher I R, et al. Zirconolite, zircon and monazite-(Ce) U-Th-Pb age constraints on the emplacement, deformation and alteration history of the Cummins Range Carbonatite Complex, Halls Creek Orogen, Kimberley region, Western Australia[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2016, 110(2/3): 199-222.
- [75] Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255(1/2): 70-84.
- [76] Li D P, Chen Y L, Hou K J, et al. Detrital zircon record of Paleozoic and Mesozoic meta-sedimentary strata in the eastern part of the Baoshan block: Implications of their provenance and the tectonic evolution of the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 2015, 227: 194-204.
- [77] Xia X P, Nie X S, Lai C K, et al. 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*, 2016, 36: 488-502.
- [78] Wang Q F, Deng J, Li C S, et al. The boundary between the Simao and Yangtze blocks and their locations in Gondwana and Rodinia: Constraints from detrital and inherited zircons[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 438-448.
- [79] Xu Y J, Cawood P A, Du Y S, et al. Early Paleozoic orogenesis along Gondwana’s northern margin constrained by provenance data from South China[J]. *Tectonophysics*, 2014, 636: 40-51.
- [80] Yao J L, Shu L S, Santosh M. Detrital zircon U–Pb geochronology, Hf-isotopes and geochemistry—New clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(2/3): 553-567.
- [81] Wang Y J, Zhang F F, Fan W M, et al. Tectonic setting of the South China Block in the Early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon u-Pb geochronology: Early Paleozoic tectonic setting of scb[J]. *Tectonics*, 2010, 29(6): n/a.
- [82] Wu L, Jia D, Li H B, et al. Provenance of detrital zircons from the late Neoproterozoic to Ordovician sandstones of South China: Implications for its continental affinity[J]. *Geological Magazine*, 2010, 147(6): 974-980.
- [83] Long S A, McQuarrie N. Placing limits on channel flow: Insights from the Bhutan Himalaya[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290(3/4): 375-390.
- [84] Myrow P M, Hughes N C, Searle M P, et al. Stratigraphic correlation of Cambrian-Ordovician deposits along the Himalaya: Implications for the age and nature of rocks in the Mount Everest region[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(3/4): 323-332.
- [85] Myrow P M, Hughes N C, Goodge J W, et al. Extraordinary transport and mixing of sediment across Himalayan central Gondwana during the Cambrian-Ordovician[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122(9/10): 1660-1670.
- [86] McQuarrie N, Robinson D, Long S A, et al. Preliminary stratigraphic and structural architecture of Bhutan: Implications for the along strike architecture of the Himalayan system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(1/2): 105-117.
- [87] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [88] 贾进华. 滇西南昌宁-孟连带南段群沉积特征及其构造古地理意义: 兼论临沧地体的性质[J]. *岩相古地理*, 1994(4): 42-48.
- [89] Meert J G. A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana[J]. *Tectonophysics*, 2003, 362(1/2/3/4): 1-40.
- [90] 李三忠, 赵国春, 孙敏. 华北克拉通早元古代拼合与 Columbia 超大陆形成研究进展[J]. *科学通报*, 2016, 61(9): 919-925.
- [91] 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. *地学前缘*, 2016, 23(6): 1-23.
- [92] 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 等. 从哥伦比亚超大陆裂解事件论古/中元古代的界限[J]. *岩石学报*, 2019, 35(8): 2299-2324.