

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05003

罗亮,王冬兵,尤廷海,谢韬,姜丽莉,黄晓明,2022. 昌宁-孟连结合带东部泥盆-石炭系南段组研究新进展及其对特提斯洋演化的启示. 沉积与特提斯地质,42(2):242-259. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05003.

LUO L, WANG D B, YOU T H, XIE T, JIANG L L, HUANG X M, 2022. New progress in the study of the Devon-Carboniferous Nanduan Formation in the eastern Changning-Menglian Belt and its implications for the evolution of the Tethys Ocean. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(2):242-259. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05003.

## 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

罗亮<sup>1</sup>, 王冬兵<sup>1</sup>, 尤廷海<sup>2</sup>, 谢韬<sup>1</sup>, 姜丽莉<sup>1</sup>, 黄晓明<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司七公司, 四川 成都 610066)

**摘要:**原-古特提斯洋之间的构造转换方式一直是国际国内研究的热点与难点。南段组是昌宁-孟连结合带东侧地层重要组成部分,其沉积时代、沉积环境和与特提斯演化的关系均存在争议,制约了对昌宁-孟连结合带乃至东特提斯洋演化特征的认识和理解。本文对南段组变质砂岩样品开展了岩石学、岩相学、元素地球化学以及碎屑锆石 U-Pb 年代学研究工作,结果表明其为泥盆纪-石炭纪被动大陆边缘的浅海沉积,物源来自成熟的大陆。南段组碎屑锆石年龄谱可识别出 560Ma、950Ma 和 1130Ma 三个明显的年龄峰值,与来自澳大利亚北缘的拉萨地体上古生界碎屑锆石年龄谱可以对比。南段组物源特征具有亲冈瓦纳大陆属性,但不能据此限定所在地体泥盆-石炭纪古地理位置。保山地块东缘泥盆系曼信组碎屑锆石年龄谱可识别出 440Ma 和 950Ma 两个年龄峰值,与南段组存在显著区别。本文新获得昌宁-孟连特提斯洋两侧泥盆纪碎屑锆石年龄谱特征,为原特提斯洋与古特提斯洋之间为连续演化提供了新的沉积学证据。

**关键词:**碎屑锆石年代学;沉积环境;地球化学;特提斯;冈瓦纳大陆

中图分类号:P534.4; P542; P597.3

文献标识码:A

### New progress in the study of the Devon-Carboniferous Nanduan Formation in the eastern Changning-Menglian Belt and its implications for the evolution of the Tethys Ocean

LUO Liang<sup>1</sup>, WANG Dongbing<sup>1</sup>, YOU Tinghai<sup>2</sup>, XIE Tao<sup>1</sup>, JIANG Lili<sup>1</sup>, HUANG Xiaoming<sup>1</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., The seventh branch, Chengdu 610066, China)

**Abstract:** The tectonic transformation from the Proto- to the Paleo-Tethys Ocean has always been a topic of heated debates amongst both domestic and international geological communities. The Nanduan Formation constitutes an important part of the sedimentary strata on the eastern side of the Changning-Menglian Belt. Its depositional age and environments as well as its relation to the evolution of the Tethys Ocean remain controversial, which inhibits the reconstruction the evolution of the Changning-Menglian Ocean and by extension of the East Tethys Ocean. In this

收稿日期: 2022-02-23; 改回日期: 2022-05-05; 责任编辑: 郭秀梅; 科学编辑: 曹华文

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

资助项目: 国家自然科学基金项目(41802031); 中国地质调查局项目(DD20190053, DD20221635); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0702)

contribution, petrological and petrographic characterizations, major and trace element geochemical analyses, and U-Pb dating of detrital zircons were carried out on the metamorphic sandstone samples of the Nanduan Formation in attempts to put the above-mentioned controversy to rest and to provide constraints on the evolution of the Tethys Ocean. The results show that the Nanduan Formation was deposited in a neritic setting on a passive continental margin during the Devonian-Carboniferous, and originated from a mature continental source. Three distinct age peaks, of 560 Ma, 950 Ma and 1130 Ma respectively, have been identified in the detrital zircon age spectrum of the Nanduan Formation, which can be correlated with the upper Paleozoic detrital zircon age spectrum of the Lhasa terrane from the northern margin of Australia. This in turn indicates an affinity of the Nanduan Formation to the Gondwanan continents. However, the paleo-geographical location of the terrane during the Devonian-Carboniferous transition remains to be constrained. The two age peaks of 440 Ma and 950 Ma identified from the Devonian Manxin Formation on the eastern margin of the Baoshan block differ significantly from those in the Nanduan Formation. The newly-obtained Devonian detrital zircon age spectrums on both sides of the Changning-Menglian Ocean in this study, therefore provide strong sedimentological evidences for the continuity of the Proto-and the Paleo-Tethys Oceans.

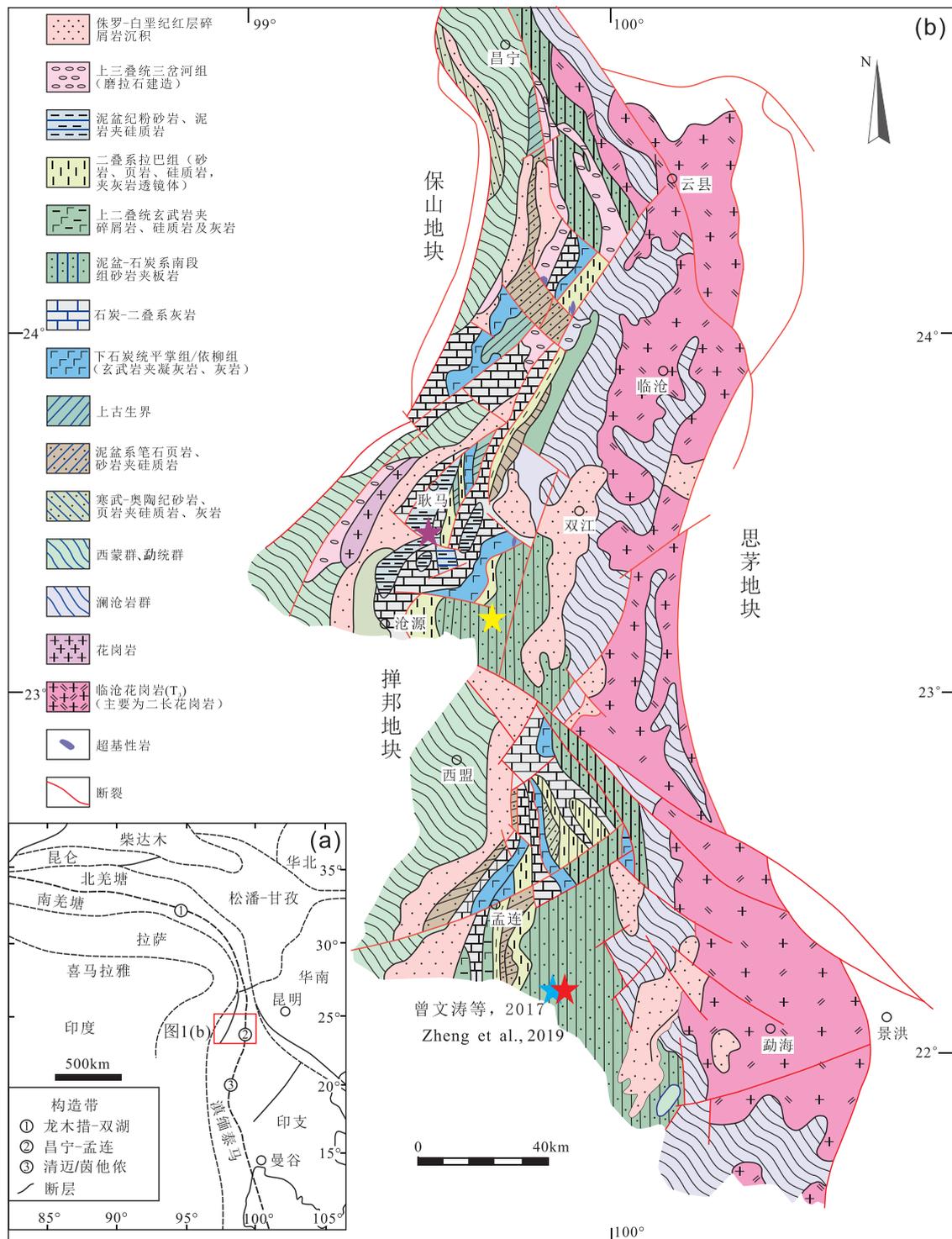
**Key words:** detrital zircon geochronology; sedimentary environment; geochemistry; Tethys; Gondwanaland

## 0 引言

随着特提斯构造域释义及其时空演变过程,特提斯构造域演化阶段划分亦相应发生变化。从特提斯演化阶段的时限来看,存在原、古、中、新特提斯四阶段划分的观点(邓军等,2016,2019; Metcalfe, 2021),而本文采用目前大家普遍接受的三阶段划分方案,即原特提斯阶段(晚元古代—志留纪)、古特提斯阶段(泥盆纪—早/中三叠世)、新特提斯阶段(晚三叠世—始新世)(潘桂棠等,2013; 王立全等,2021)。大量研究者根据昌宁-孟连结合带内发育的泥盆纪—中三叠世放射虫硅质岩和蛇绿岩认为其代表了晚古生代特提斯洋(丁林和钟大赉,1995;钟大赉,1998;杨文强等,2007; Metcalfe, 2013a)。近年来,在该带内发现了大量早古生代堆晶辉长岩(471~439Ma, Wang et al., 2013; 刘桂春等,2017)、具有洋壳型高镁埃达克岩地球化学特征的英云闪长岩(468Ma;王冬兵等,2016)、洋岛玄武岩(449Ma;孙载波等,2017)以及与俯冲有关的变岩浆岩(462~454Ma; Nie et al., 2015; Xing et al., 2017)等,因此,昌宁-孟连结合带演化可以追溯到早古生代,记录了原特提斯演化的重要信息。前人对原特提斯洋的位置和原—古特提斯洋之间的转换过程重大科学问题尚存较大争议。部分学者认为原特提斯洋位于古特提斯洋东侧,原特提斯洋闭合后,弧后拉张形成古特提斯洋(Nie et al., 2015; Liu et al., 2021; Wei et al., 2022)。另有大量学者

则认为昌宁-孟连结合带发育早古生代到中生代的连续演化的原—古特提斯大洋(Pan et al., 2012; Deng et al., 2014; 王保弟等,2013, 2018; 刘桂春等, 2017; 潘桂棠等,2019; Liu et al., 2019; 彭智敏等, 2020; 王立全等,2021)。广泛分布于昌宁-孟连结合带的南段组为泥盆纪—石炭纪沉积地层,对其开展深入的研究工作,有望为原—古特提斯洋之间的转换提供重要证据。

南段组位于昌宁-孟连结合带东部,是昌宁-孟连结合带晚古生代地层的重要组成部分,其碎屑岩序列中保存了独特的沉积环境以及物源信息记录,可以为区域古地理演化提供关键证据,因而是东特提斯演化研究不可或缺的研究对象。前人对南段组沉积环境尚存浅水沉积(罗君烈,1990; 崔春龙等,1998; Zheng et al., 2019a)和深海浊流(方宗杰,1990; 刘本培等,1993; 贾进华,1994)两种不同认识。南段组沉积时代具早石炭世维宪期<sup>②</sup>(Yang, 1999; Jin et al., 2003)、早纳缪尔期(冯庆来等, 1996)、谢尔普霍夫期(Zheng et al., 2019b)以及可能延伸到晚石炭世(方宗杰,1990)等多种观点。关于南段组构造属性存在是保山地块东侧被动大陆边缘沉积(Liu et al., 1991; 从柏林等,1993)抑或是“昌宁-孟连洋”洋盆东侧的陆坡沉积(刘本培等, 1993, 2002; 贾进华,1994; 冯庆来等,1996)两种不同认识。综上所述,关于南段组时代、沉积环境、构造属性等问题未取得一致认识,制约了对昌宁-孟连特提斯洋演化特征的理解和认识。



a 据 Wei et al., 2022; b 据 Jin et al., 2003, 云南地质矿产局, 1982<sup>②</sup>修改; 红色和蓝色五星代表前人开展工作的孟连县南部南段村, 黄色五星代表南段组碎屑岩采样位置, 紫色五星代表曼信组碎屑锆石样品采样位置

图 1 东南亚构造格架图(a)及昌宁-孟连带地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic outline of southeast Asia (a) and simplified geological map of the Changning-Menglian Belt (b)

碎屑岩的粒度特征是反映沉积介质能量、判别沉积水动力条件以及识别自然地理环境的重要指标(Zheng et al., 2019a)。碎屑锆石 U-Pb 定年是沉

积岩物源分析和约束地块构造演化的重要方法, 并取得了广泛应用(Zhu et al., 2011; Zhao et al., 2017; Liu et al., 2019; Wei et al., 2022)。本文报道

了南段组变质砂岩岩石学、岩相学、元素地球化学特征以及昌宁-孟连洋两侧泥盆-石炭系碎屑锆石 U-Pb 定年数据,旨在揭示南段组时代、沉积环境和物源特征,并进一步探讨昌宁-孟连特提斯洋的演化过程。

## 1 地质背景与样品

### 1.1 地质背景

西南三江(怒江、澜沧江、金沙江)地区位于东特提斯构造域,是衔接青藏高原与东南亚特提斯造山带的关键区域,自东向西分为羌塘-三江造山系、昌宁-孟连结合带和冈底斯-喜马拉雅造山系3个一级构造单元,并进一步细分为8个二级构造单元和若干个三级构造单元(王立全等,2013;潘桂棠等,2013,2015;尹福光等,2017;王冬兵等,2021;王保弟等,2021)。其中的昌宁-孟连结合带从综合格架、岩石地球化学和年代学数据等方面特征表明向北与龙木措-双湖构造带相连(钟大赉,1998;Feng,2002;Feng et al.,2004,2008;Yang et al.,2011;Wang et al.,2013;吴彦旺,2013;Fan et al.,2015;王冬兵等,2017;王恩泽等,2021),向南与东南亚的茵他依(因他暖)-文东-劳勿构造带相接(图1a)(Metcalf,2006,2011,2013a,2013b;Metcalf et al.,2017;Sone et al.,2008,2012;Wang et al.,2017;耿全如等,2021),代表了东特提斯主洋盆的残余,分隔了亲冈瓦纳大陆的滇缅马地块(保山地块)和亲华夏大陆的印度支那地块(思茅地块)(Wang et al.,2018),是当前国际地质学研究的重点和热点。

昌宁-孟连结合带内地质体主要呈南北向条带状分布,东侧紧邻临沧花岗岩基。临沧花岗岩基于晚三叠世(230~205Ma)(Peng et al.,2006,2013;Jian et al.,2009;Wang et al.,2010;孔会磊等,2012;Dong et al.,2013)侵入到澜沧岩群变质岩系中。昌宁-孟连结合带内下古生界澜沧岩群变质岩、上古生界南段组、拉巴组浅变质碎屑岩、蛇绿混杂岩、泥盆纪-中三叠世放射虫硅质岩、石炭-二叠纪洋岛-海山以及上古生界温泉组、曼信组细碎屑岩夹硅质岩等地质体大致呈南北向展布(图1b)。近年来,不同学者分别从澜沧岩群中识别出碎屑锆石最年轻年龄峰值 ca. 530Ma(王舫等,2017;Zhao et al.,2017)、变火山岩锆石 U-Pb 加权平均年龄 450~460Ma(Nie et al.,2015;Xing et al.,2017)、蛇

绿岩(刘桂春等,2017;彭智敏等,2020a,2021)、(超)高压变质岩(李静等,2015;Fan et al.,2015;王舫等,2016;Wang et al.,2019;彭智敏等,2019;Wang et al.,2020)等信息,将澜沧岩群原岩厘定为早古生代,构造性质为与原-古特提斯洋相关的俯冲增生杂岩(王保弟等,2018;潘桂棠等,2019;彭智敏等,2020b),并非前人认为的基底岩系。分布于昌宁-孟连结合带东部的泥盆-石炭系南段组,是本文的重点研究对象,前人在南部的阿里-南段地区开展了一定研究,而在北部露头较好的沧源县团结一岩帅一带却鲜有研究报道,沧源县岩帅地区南段组构造置换较弱,为一套厚度巨大的石英砂岩与泥岩(变质石英砂岩与板岩)组成的韵律沉积,露头尺度可见岩性成分层指示原始层理( $S_0$ ),内部发育较多的褶皱,岩石组合的变化主要表现为两者以不同厚度组合,依据野外出露情况分为三个岩段:a岩段岩性为厚层状变质石英砂岩夹板岩,b岩段为板岩夹变质石英砂岩或二者互层沉积,c岩段岩性为块状变质砂岩夹板岩,其上下关系不明。

### 1.2 样品特征

本次工作在沧源县岩帅地区采集了南段组9件变质砂岩样品开展粒度分析(PM103-3b1、PM103-8b1、PM103-10b1、PM103-10b2、PM103-19b1、PM103-19b2、PM103-24b1、PM103-28b1、PM103-51b1),7件样品开展元素地球化学分析(PM103-3H1、PM103-8H1、PM103-10H1、PM103-12H1、PM103-17H1、PM103-24H1、PM103-24H2),样品岩性以变质石英砂岩、变质岩屑石英砂岩为主(图2a,表1)。岩石主要由变余陆源砂(石英、岩屑)和变质新生矿物(绢云母、长英质)组成,呈颗粒支撑-基底式胶结类型(图2b)。石英含量为70%~95%,包括单晶石英、少量多晶石英及硅质岩岩屑,单晶石英粒内可见波状消光现象。岩屑含量为3%~15%,强绢云母化、硅化,成分无法准确判定,见少量云母星散状分布。新生变质矿物粒径一般为<0.05mm,集合体填隙状分布在陆源砂粒间。

长石石英砂岩样品(19HA01-1TW1)采自耿马县贺派乡回爱村泥盆系曼信组(Dm)(图2c,表1)。岩石胶结物为铁质胶结,局部发育有次生孔隙。石英呈次棱角状-一次圆状,粒径为0.1~0.22mm,晶内裂纹发育,局部少数石英颗粒发育波状消光。斜长石呈棱角状-一次棱角状,粒径为0.1~0.2mm,整体表面脏杂,个别聚片双晶发育,大部分斜长石表面

表 1 样品位置和地层学信息简表  
Table 1 Location and stratigraphic information of samples analyzed

样品编号	岩性	经纬度	所属地层	矿物成分及简要描述
PM103-3b1、 PM103-3H1	变质岩屑石英 砂岩	E99°34'01" N23°11'36"	南段组 (DCn)	变余陆源砂主要由石英(75%±),岩屑(10%±)组成,主呈次棱角状、次圆状外形,磨圆一般,分选性中等;新生变质矿物(10%±)主要由微鳞片状绢云母、隐微晶状长英质等组成,构成杂基支撑—基底式胶结类型
PM103-8b1、 PM103-8H1	变质岩屑石英 砂岩	E99°33'53" N23°11'37"	南段组 (DCn)	变余陆源砂主要由石英(75%±),岩屑(10%±)组成,主呈次棱角状、次圆状外形,磨圆一般,分选性中等;新生变质矿物(10%±)主要由微鳞片状绢云母、隐微晶状长英质等组成,构成杂基支撑-基底式胶结类型
PM103-10b1、 PM103-10H1	变质岩屑石英 砂岩	E99°33'50" N23°11'40"	南段组 (DCn)	变余陆源砂主要由石英(85%±),岩屑(10%±)组成,主呈次棱角状、次圆状外形,磨圆一般,分选性中等;少新生变质矿物(5%±)主要由微鳞片状绢云母、隐微晶状长英质等组成
PM103-10b2	变质石英砂岩	E99°33'50" N23°11'40"	南段组 (DCn)	变余陆源砂:石英(90%±),岩屑(5%±); 少新生变质矿物:绢云母+长英质(5%±)
PM103-12H1	变质石英砂岩	E99°33'45" N23°11'43"	南段组 (DCn)	
PM103-17H1	变质石英砂岩	E99°33'37" N23°11'47"	南段组 (DCn)	
PM103-19b1	变质石英砂岩	E99°33'33" N23°11'51"	南段组 (DCn)	变余陆源砂主要由石英(95%±),岩屑(<1%)组成,主呈次棱角状、次圆状外形,磨圆一般,分选性中等;少新生变质矿物(5%-)主要由微鳞片状绢云母、隐微晶状长英质等组成
PM103-19b2	变质石英砂岩	E99°33'33" N23°11'51"	南段组 (DCn)	变余陆源砂主要由石英(95%±),岩屑(<1%)组成,主呈次棱角状、次圆状外形,磨圆一般,分选性中等;少新生变质矿物(5%-)主要由微鳞片状绢云母、隐微晶状长英质等组成
PM103-24b1、 PM103-24H1、 PM103-24H2	变质岩屑石英 砂岩	E99°33'29" N23°11'54"	南段组 (DCn)	变余陆源砂主要由石英(70%±),岩屑(15%±)组成,主呈次圆状外形,磨圆一般,分选性中等;少新生变质矿物(15%±)主要由微鳞片状绢云母、隐微晶状长英质等组成
PM103-28b1	变质石英砂岩	E99°33'26" N23°11'56"	南段组 (DCn)	变余陆源砂主要由石英(95%±),岩屑(<1%)组成,主呈次棱角状、次圆状外形,磨圆一般,分选性中等;少新生变质矿物(5%-)主要由微鳞片状绢云母、隐微晶状长英质等组成
PM103-51b1	变质岩屑石英 砂岩	E99°32'43" N23°12'30"	南段组 (DCn)	变余陆源砂:石英(70%±),岩屑(15%±) 少新生变质矿物:绢云母+长英质(15%±)
19HA01-1TW1	细粒长石石英 砂岩	E99°22'27" N23°24'8"	曼信组 (Dm)	碎屑(68%):石英(45%),长石(22%),云母(1%) 填隙物(32%):杂基(24%)胶结物(8%) 岩石整体分选性差,磨圆度差,成分程度及结构成熟度低,支撑类型为颗粒支撑,胶结类型为孔隙式-接触式

发育强烈黏土化及绢云母化,部分斜长石已基本绢云母化完全。钾长石呈它形次棱角状,粒径为0.1~0.3mm,整体黏土化强烈。岩屑多为燧石,呈次棱角—次圆状,大部分向微晶石英过渡,粒径约0.20~0.32mm。

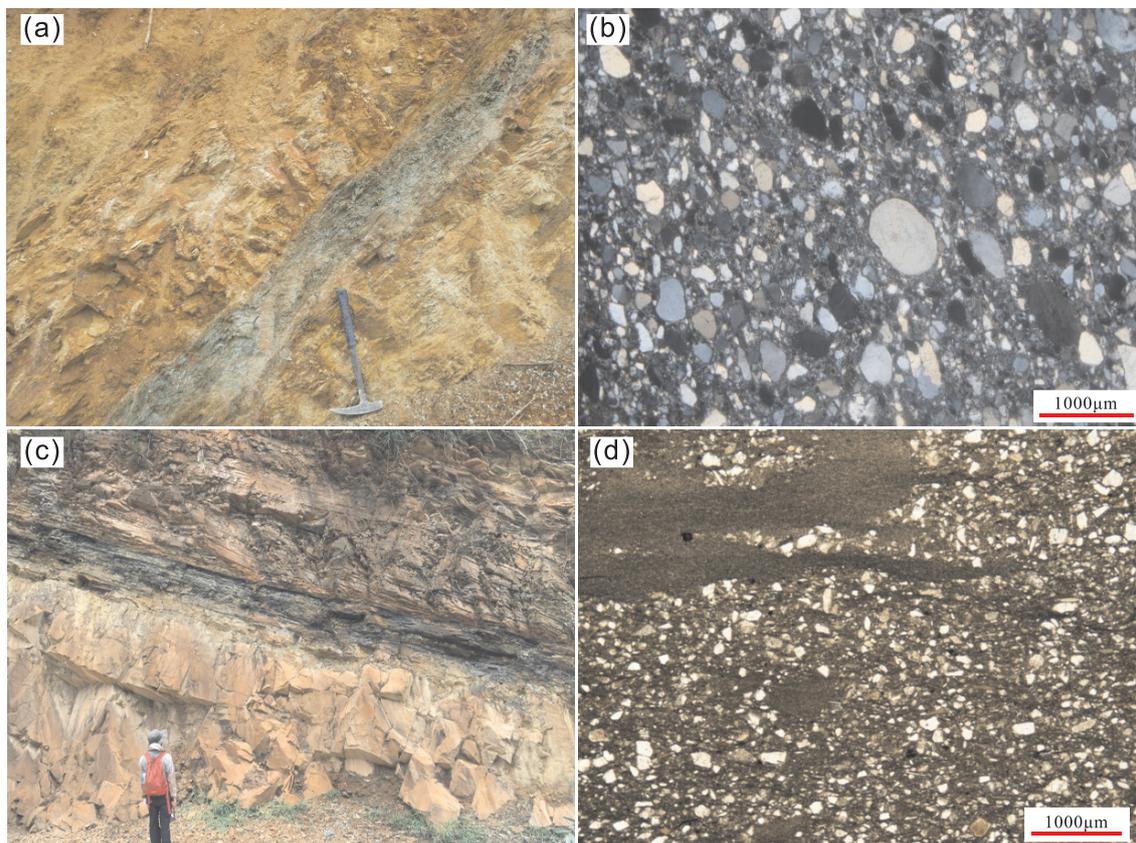
## 2 分析方法

通过线计法的方式在显微镜下对南段组砂岩颗粒粒径进行统计,通过旋转载物台上薄片固定装

置的齿轮,等距的平行移动矿物薄片,对移动中所有通过十字丝纵丝(或横丝)的颗粒粒径加以测量并计数,每张薄片测量300颗以上颗粒,片状矿物颗粒、无法清晰识别轮廓的矿物颗粒和重矿物颗粒不参与粒度统计,再生长的长石和石英按其原粒径进行测量并计数,杂基按照其百分含量归入 $5\Phi$ 粒级中,以此每张薄片便可获得一组粒径(d)分布数据,粒径统计以毫米为单位,利用公式( $\Phi = -\log_2 d$ , d为颗粒直径mm)将每张薄片所统计到的粒径值转

换为  $\Phi$  值,对数据进行分组,数据分组以  $1/4\Phi$  为间隔以便绘图,最后绘制频率分布曲线图、概率累

计曲线图(Folk et al., 1957; Visher, 1969),据此了解样品的粒度特征所反映的沉积环境特点。



a-b. 南段组变质砂岩野外及镜下照片(正交偏光); c-d. 曼信组长石石英砂岩野外及镜下照片(单偏光)

图2 南段组和曼信组野外及镜下照片

Fig. 2 Field and microscope photos of the Nanduan Formation and the Manxin Formation

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 图像选择具有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 COMPexPro102ArF 193nm 准分子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  $32\mu\text{m}$  和 5Hz,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/监控,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 ~ 30s 空白信号和 50s 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 年龄谱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 1061 ~ 1064 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-型荧光光谱仪。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 ICPMS 分析完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理过程如下:(1)将 74 $\mu\text{m}$ (200 目)样品置于 105 $^{\circ}\text{C}$  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  $\text{HNO}_3$  和 1 mL 高纯  $\text{HF}$ ;(4)将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190 $^{\circ}\text{C}$  烘箱中加热 24 h 以上;(5)待溶样弹冷却,开盖后置于 140 $^{\circ}\text{C}$  电热板上蒸干,然后加入 1 mL  $\text{HNO}_3$  并再次蒸干;(6)加入 1 mL 高纯  $\text{HNO}_3$ 、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In(浓度为  $1 \times 10^{-6}$ ),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190 $^{\circ}\text{C}$  烘箱中加热 12 h 以上;(7)将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用 2%  $\text{HNO}_3$  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 粒度分析

对南段组 9 件样品开展粒度分析结果显示,南段组平均粒径( $M_z$ )介于 1.88 ~ 2.84 $\Phi$ ,表现细一中粒为主,中等动能条件。总体上南段组粒度标准( $\sigma_1$ )差介于 0.5 ~ 1.0,以 0.7 左右为主,属于分选中等—分选较好(Folk et al., 1957)。偏度( $Sk_1$ )多小于 0,大多介于 -0.1 ~ 0.1 $\Phi$  之间,近于对称略有负偏,同样说明分选性较好,推测可能是浅海沉积由于潮汐、波浪高能作用的结果。峰度( $K_G$ )大多位于 0.8 ~ 1 $\Phi$ ,个别大于 1,锋态属于中等—尖锐,近于海滩砂特征。南段组砂岩粒度分布曲线多以单峰和双峰为主(图 3),深水浊流沉积搬运方式以悬浮搬运为主,而浅海环境水动力复杂多样,包括洋流、波浪、潮汐等,搬运方式包括推移、跃移和悬浮搬运(Shanmugam, 1996, 2013;朱筱敏,2009;陈建强等,2015)。因此,浅海的概率累积曲线表现出明显的三段式,牵引总体、跃移总体和悬移总体均有发育,而浊流的概率累积曲线仅显示较为发育的悬浮主体,呈直线不分段或两段式的概率累积曲线

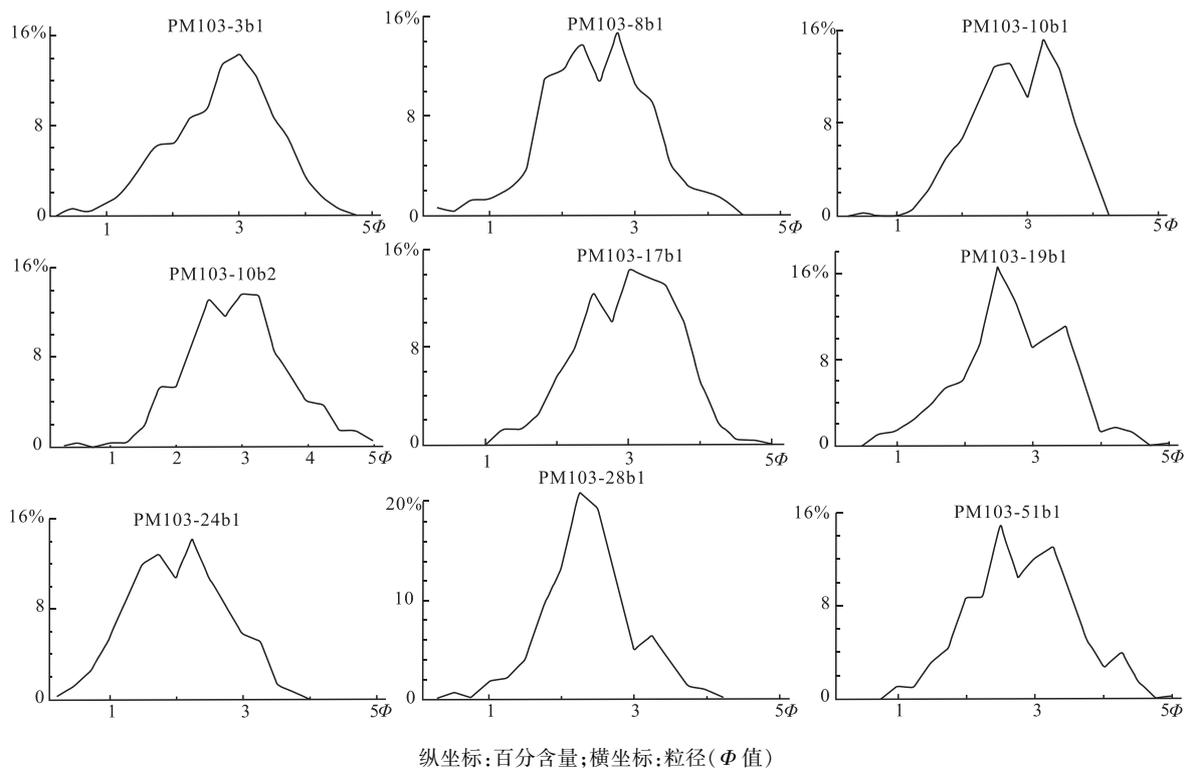
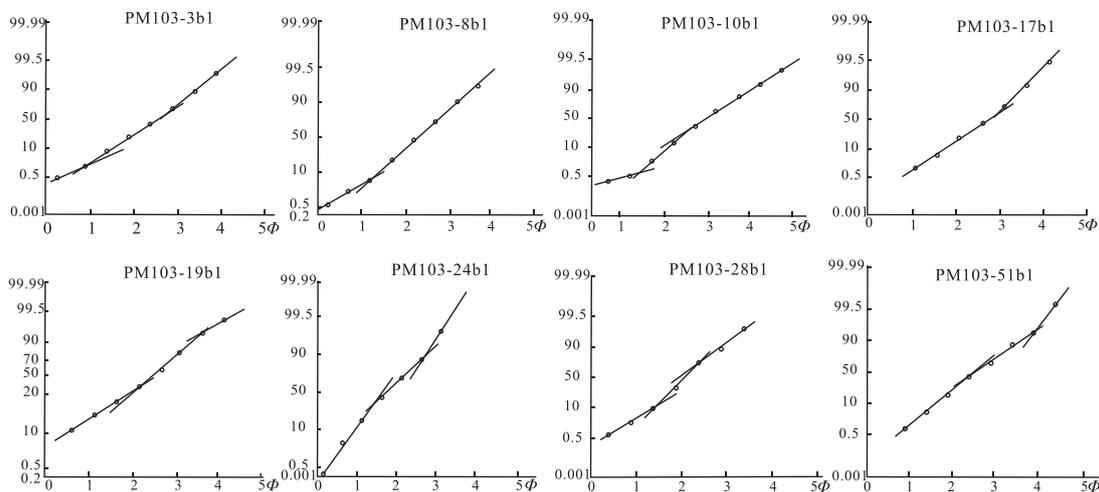


图 3 南段组砂岩粒度分布曲线特征

Fig. 3 Characteristics of grain frequency distribution curves of samples in Nanduan Formation



纵坐标: 概率百分比; 横坐标: 粒径 ( $\Phi$  值)

图4 南段组砂岩粒度累计曲线

Fig. 4 The cumulative curve of sandstone grain size in the Nanduan Formation

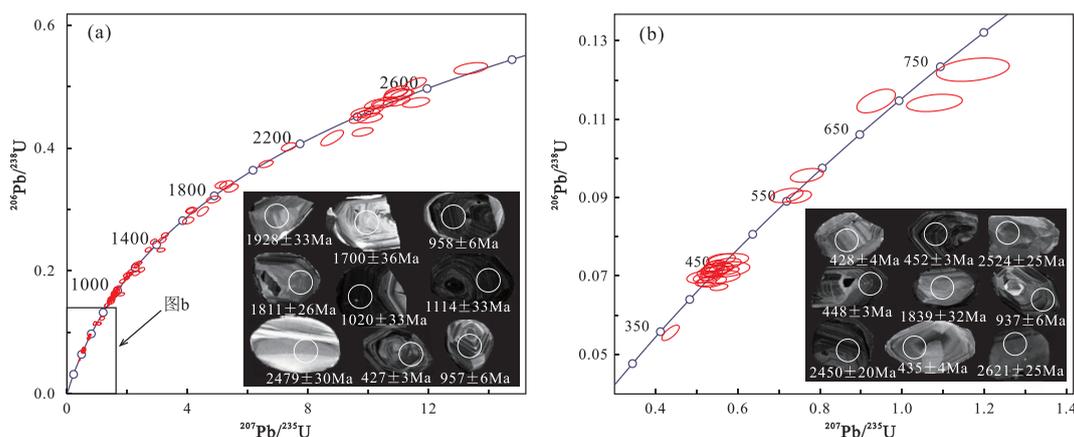


图5 曼信组(19HA02-TW1)碎屑锆石 U-Pb 谐和图和部分锆石 CL 图像

Fig. 5 Detrital zircon U-Pb concordance diagrams and partial cathodoluminescence (CL) images of the Manxin Formation (19HA02-TW1)

特征(Visher, 1969)。南段组砂岩概率累计曲线主要呈三段式, 各组分均有发育, 仅 PM103-8b1 和 PM103-17b1 为悬浮总体较发育的两段式(图4)。

### 3.2 锆石 U-Pb 测年

从长石石英砂岩(19HA02-TW1)分选出较多的锆石颗粒, 圆状一次棱角状, 大多数锆石 50 ~ 100  $\mu\text{m}$ , 少量达 150 ~ 200  $\mu\text{m}$ , 锆石阴极发光(CL)图像显示多数锆石具有单一的内部结构, 个别发育明显变质边(边部较窄, 不能测年), 开展测年的颗粒或部位有明显的岩浆结晶振荡环带; Th/U 比值主体位于 0.5 ~ 2.4 之间, 极少数为 0.15 ~ 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)。锆石的外部形态总体显示出圆状一次圆状, 并具明显搬运磨蚀痕迹, 显示出长距离搬运或

者再旋回特征(图5)。

对样品 19HA02-TW1 的 104 颗锆石开展了 U-Pb LA-ICP-MS 定年研究, 其中 6 个分析点谐和度小于 90% (不参与作图和统计)。年龄结果大于 1000 Ma 时采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 其余采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄。98 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 419 ~ 2681 Ma 之间(除一颗年龄为 348 Ma)(图5), 同位素比值和结果列于附表 1\*。在频分布图上 98 个年龄形成了 ca. 440 Ma 最主要群组和 ca. 950 Ma 的次级群组, 其余年龄组成更次一级群组(图 8a)。

\* 附表数据资料可联系编辑部获取或访问 <http://cjytzd.zjournals.cn> 下载

### 3.3 元素地球化学

本次工作对南段组变质砂岩开展了7件样品主微量元素测试,原始分析数据列于附表2<sup>①</sup>。南段组中颗粒较粗的碎屑岩 $w(\text{SiO}_2)$ 高,为88%~93%,平均为90%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 和 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 很低,可能与样品中较低的长石含量有关(Zheng et al., 2019a)。南段组样品 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 较高,为3.8%~6.8%,平均为5.1%。铁、锰的氧化物含量非常低, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为0.58%~1.47%,平均为0.91%, $w(\text{MnO})$ 为0.002%~0.012%,平均为0.007%。南段组微量元素分析表明,Ce元素显示轻微的异常值,Th/U比值为3.8~7.0,平均值为5.16。南段组砂岩La/Th为2.5~4.7,平均值为3.0, $w(\text{Hf})$ 平均为 $6.2 \times 10^{-6}$ 。

## 4 讨论

### 4.1 沉积环境

南段组是云南区调队在1:20万孟连幅区调报告(1982)中命名,剖面位于澜沧县南段村,孟连至南段的公路上。根据上下层序、岩石组合、所含古生物化石以及岩石中长石含量的变化等划分为三个岩性段。南段组的岩性极其单调,无特殊的标志层,化石稀少,且位于昌宁-孟连结合带内,受到古特提斯洋俯冲-陆陆碰撞造山等复杂过程的影响,地层内部褶皱、断层发育,劈理置换现象随处可见,其地层原始层序被破坏殆尽,给地层顶底的识别、原始厚度的恢复、沉积构造的观察等工作造成了巨大困难,进而制约了对沉积环境的准确判断。对南段组沉积环境的研究最早可以追溯到20世纪80年代,考虑到南段组中杂砂岩占有一定的比例,岩石中含黏土质较高,砂岩底面见沟模、槽模构造,认为南段组岩石具浊流沉积的特征<sup>②</sup>。随后有部分学者依据发现的槽模构造、撕裂碎屑、粒序层理等浊流沉积构造和少量的砂岩样品粒度分析结果,认为南段组主体为深水浊流沉积(方宗杰,1992;刘本培等,1993;吴浩若,1994;贾进华,1994;冯庆来等,1996)。然而,大量学者认为南段组为浅海沉积,主要证据包括:其成熟度高,与滨海海滩相可对比(罗君烈,1990);粒度参数和概率累积曲线特征<sup>③</sup>(Zheng et al., 2019a)、发育小型浪成波痕和浅水相遗迹化石(崔春龙等,1998)等。

浅海环境和深水浊流环境从流体状态、沉积物的搬运方式上有很大区别,碎屑岩粒度特征分析在

讨论沉积区水动力条件、沉积介质能量、识别古地理环境具有重要作用。南段组砂岩粒度分布曲线多以单峰和双峰为主(图3),样品平均粒径( $M_z$ )、偏度( $SK_1$ )、峰度( $K_C$ )、标准差( $\sigma_1$ )等特征值均与Zheng et al. (2019a)报道的数据接近。从流体的搬运方式上来看,南段组大部分样品具有牵引总体、跃移总体和悬浮总体,分选较好,与Zheng et al. (2019a)研究结果相同,南段组更接近于浅海环境的搬运沉积特征,而与仅具有发达悬浮总体的浊流沉积具有较大差别。

### 4.2 地层时代

南段组作为昌宁-孟连结合带晚古生代地层重要组成部分,受到特提斯洋俯冲消减和随后的陆-陆碰撞造山的强烈改造,形成大量褶皱,给地层顶底关系和原始厚度的识别均带来巨大困难。南段组现今表现出极大地层厚度,约3000~5000m(云南省区域地质调查院,2003;崔春龙等,1998),由于内部层序已部分被打乱,无法代表原生厚度,给地层的划分、对比研究带来困扰。

前人在南段组开展了生物地层学研究,获得了大量的、种类繁多的动植物化石。早期开展1:100万普洱幅区调工作时,在南段组这套变质砂岩为主夹板岩或互层的地层中未获得古生物化石,将其归属奥陶-志留系。1:20万孟连幅<sup>②</sup>在南段组中段发现大量维宪阶菊石,包括*Acrocantus* sp., *Epicanites* sp., *Kazakhoceras* sp., *Leptodesma* sp., *Streblichondria* sp., *Septimyalina* ? sp., *Palaeolima* sp., *Posisonia* sp.,将南段组时代划为早石炭世维宪期。南段组中部见*Praedaraelites*、*Kazakhoceras*等海相化石,时代为晚维宪期—早纳缪尔期(方宗杰,1990)。南段组上段采获菊石类,包括*Stenopronorites* sp., *Prolecanites* sp.等,将中、上段地层时代定为纳缪尔早期(冯庆来等,1996)。Yang (1999)报道了出露于阿里地区的南段组中上部的*Vallatisporites ciliaris*, *Diatomozonotriletes* sp., *Waltzisporea* sp.等孢粉,表明其时代为维宪期。Jin et al. (2003)亦报道了阿里附近板角村南段组中含有*Pronorites* sp., *Eocantus* sp., *Pseudoarietes* sp.菊石化石,认为南段组中至少包含早石炭世沉积,而对于整个南段组时代仍很难限定。Zheng et al. (2019b)在南段组上部发现了*Epicanites* sp., *Megapronorites* sp., *Somoholites* sp., *Syngastrioceras* sp., *Prolecanites*? sp., *Kardailites*? sp.和*Homoceras*? sp. *Fayettevillea* sp.等8个属菊石化

石,指示所属地层时代为谢尔普霍夫阶。显然,前人报道的南段组古生物化石均集中在中上部,而下部地层时代因缺乏化石而无法有效约束,推测延伸至泥盆纪<sup>②③</sup>(方宗杰等,1990)。本次研究在昌宁-孟连带中部沧源县岩帅地区南段组中发现了大量菊石化石,由于地层受到后期强烈挤压改造,化石均被压扁,只有轮廓可以清晰辨认,内部构造较模糊,无法鉴定(图6),推测与前人发现与南段组上部的菊石化石可以对比。

碎屑锆石年代学研究在限定地层沉积时代方面可以作为生物地层年代学研究的有效补充,尤其对南段组未发现有效古生物化石层段具有其他方法不可替代的作用。碎屑锆石年代学利用最年轻一组年龄限定地层最大沉积时间已经得到大量运用(Dickson et al., 2009;王冬兵等,2015,2020;罗亮等,2020),通过大量研究实例总结出该方法提供的

时代下限一般与地层底界时代相差在50Ma以内(余振兵,2007)。Zheng et al. (2019a)对南段组4件砂岩样品400颗锆石开展了U-Pb定年研究,获得<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄小于420Ma的仅有5颗,分别为392Ma、381Ma、372Ma、367Ma、362Ma。曾文涛等(2017)对南段组中3件样品锆石U-Pb定年测试,获得了162个谐和度大于90%的年龄,其中小于500Ma的仅一颗,年龄为335Ma。黄晓明等(2022,地质通报待刊)对南段组2件砂岩样品开展了锆石U-Pb定年,获得211颗谐和度大于90%的年龄,小于500Ma的仅一颗,年龄为493Ma。综上所述,对南段组9件碎屑锆石共计773颗锆石开展U-Pb定年,仅获得小于420Ma的年龄6个,且极为分散,其加权平均年龄不具有说服力。考虑挑样时的混样、处理年龄的人为误差,用最年轻的单颗粒年龄限定地层沉积时代下限显然不合适。

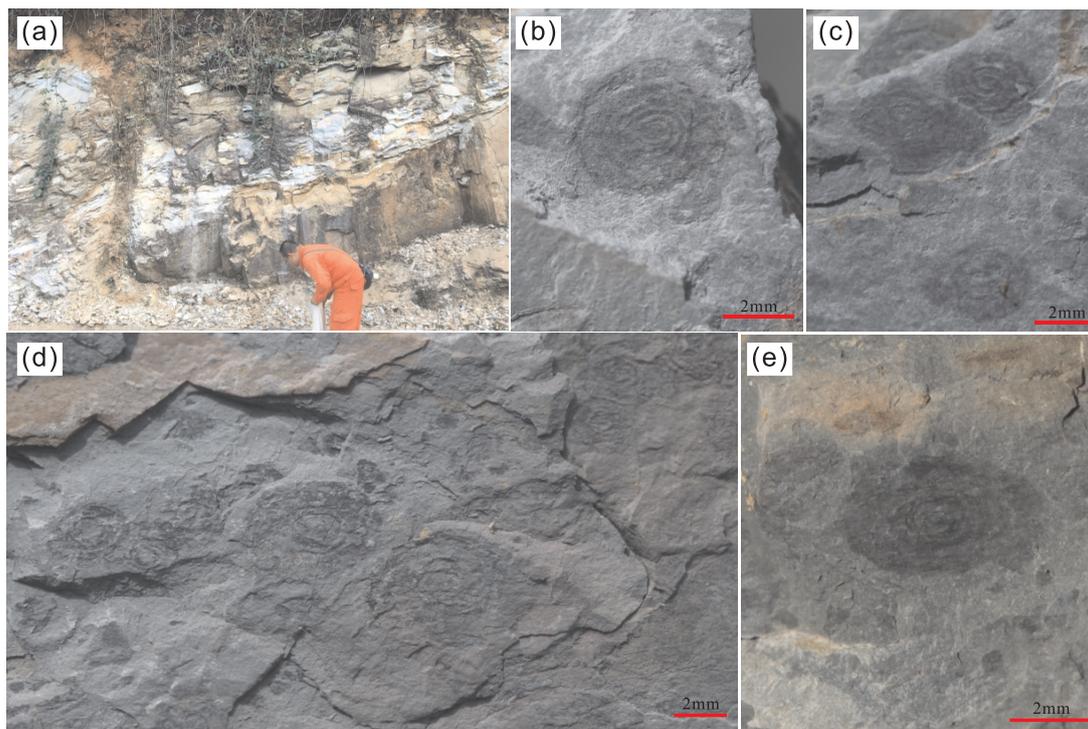


图6 沧源县岩帅地区南段组野外照片(a)和所产“菊石化石?”(b-e)

Fig. 6 The field photo (a) and ammonoids Fossils ? (b-e) from the Nanduan Formation of Yanshuai area, Cangyuan County, Changning-Menglian Belt

前人对南段组时代的限定主要通过生物地层学和碎屑锆石定年研究(方宗杰,1990;Yang et al., 1999;Jin et al., 2003;Zheng et al., 2019b;曾文涛等,2017),但是两种工作均具有局限性,未取得实质性突破。化石采集主要呈点状集中在上部,对南

段组中下部地层时代缺乏约束,加之化石是否为原地埋藏存疑,且受到后期变形变质的强烈改造,无疑都为生物地层学研究带来了巨大挑战。大量碎屑锆石的研究表明,南段组中最年轻组锆石年龄远远老于发现的化石时代,显然利用最年轻组碎屑锆

石年龄限定地层沉积时代下限效果不理想。考虑到南段组覆于下古生界澜沧岩群之上,变质和变形均较澜沧岩群弱,并且前人于上部发现了下石炭统化石,因此本文暂认为泥盆纪—石炭纪。

#### 4.3 地球化学特征与构造背景

南段组样品含较高  $Al_2O_3$ , 铁、锰的氧化物含量非常低,说明其化学成分成熟度高,与前人总结的不同构造环境的碎屑物的主量元素对比,发现南段组砂岩主量元素特征与被动大陆边缘沉积物类似 (Bhatia et al., 1986; 贾进华, 1994)。对南段组各样品化学组成的分析结果进行计算,将获取的参数分别投入  $TiO_2-(TFe_2O_3 + MgO)$ 、 $Al_2O_3/SiO_2-(TFe_2O_3 + MgO)$  源区构造环境判别图中,可见南段组变质砂岩碎屑源区构造背景主要落入被动大陆边缘区域 (图 7a-b)。

Bhatia et al. (1981) 认为当  $Th/U$  值为 2.5 ~ 3 时,其源岩主要为岛弧火山岩; $Th/U$  值约为 4.5 时,其物源主要以沉积岩为主,可能有岛弧火山岩碎屑混入;当  $Th/U$  值约为 6 时,可以肯定物源主要是再旋回沉积岩。南段组 9 件砂岩样品的  $Th/U$  值为 3.8 ~ 7.0, 平均值为 5.16, 表明南段组物源主要是再旋回沉积岩,极少受到岛弧火山碎屑的影响。本研究与郑建彬 (2019) 对南段组碎屑岩开展微量元素分析均发现,砂岩的  $Zr/Sc$  与  $Th/Sc$  的比值显示南段组碎屑岩经历了物质再旋回作用 (图 7c), 可能来源于沉积物的再旋回,  $La + Ce + Nd, Yb + Y$  与  $Sm + Gd + Dy$  图解显示其形成于近陆源区 (图 7d)。南段组碎屑岩微量元素中,  $Sc, Co$  等相容元素相对于大陆上地壳显示亏损,反映了碎屑岩物源区缺少基性物质的输入;  $Zr, Hf$  等活动性弱的稳定元素富集反映源区稳定性物质含量高。Ce 元素显示轻微的异常值,与大陆边缘区的 Ce 异常值接近 (0.90 ~ 1.30), 而与大洋盆地 Ce 的负异常 (0.55) 及扩张洋脊近源区的 Ce 的负异常值 (0.29) 相差甚远; 南段组的 Eu 显示负异常 (平均值为 0.63), 与大陆上地壳的 Eu 值接近 (0.65; Murray et al., 1990)。

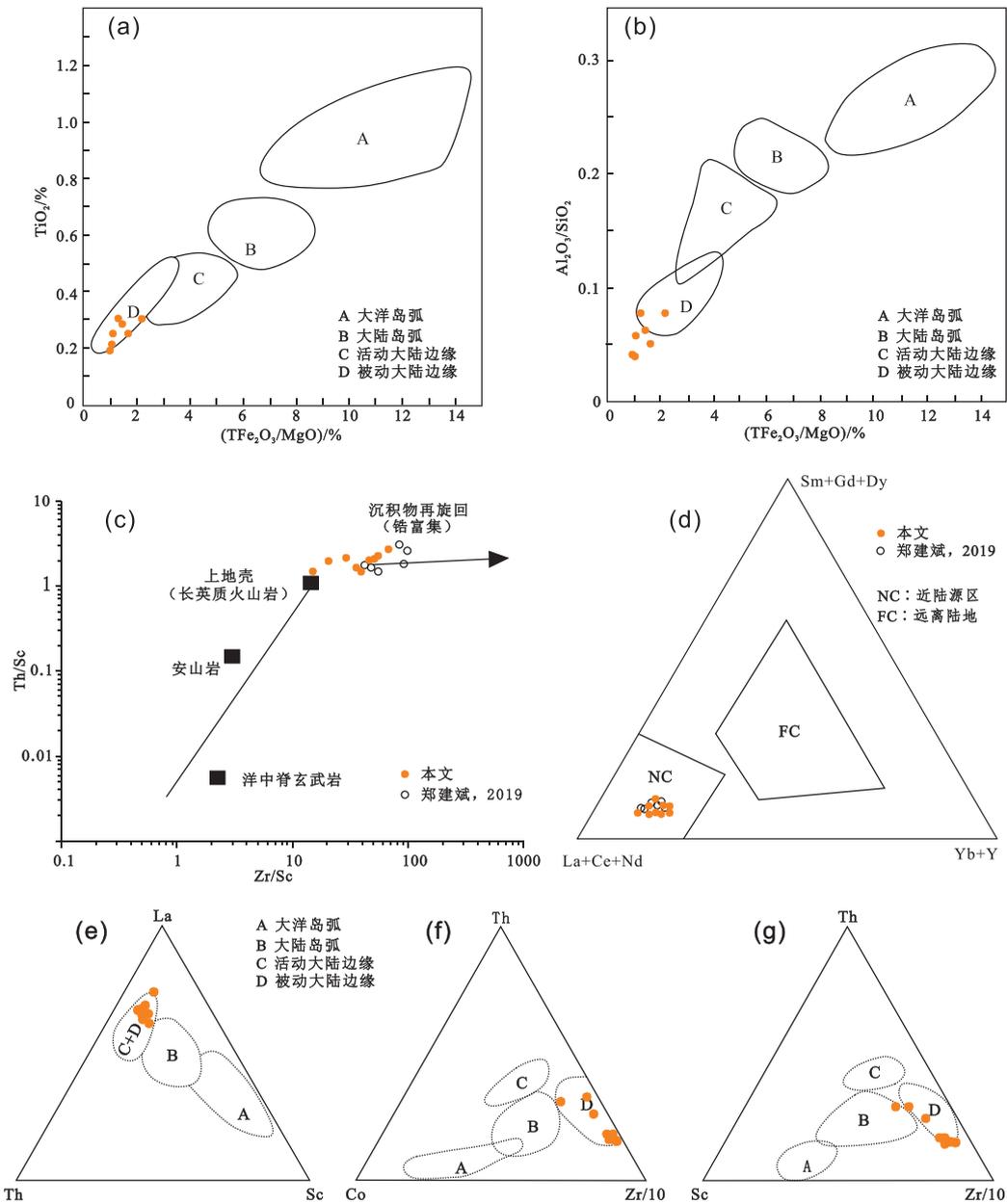
南段组整体上岩性变化不大,反映自下而上沉积构造背景差异不大。岩石学、岩石地球化学特征指示南段组碎屑成分成熟度高,不稳定成分含量低,因此,南段组更可能是稳定的构造背景下的沉积。由于部分微量元素在风化成岩过程中化学性质不活泼,能够有效的了解源区性质, Bhatia (1986) 提出了不同源区碎屑岩微量元素图解,南段组样品

均落入被动大陆边缘区域,反映其源区为构造环境稳定的地质单元,与主量元素反映的情况一致 (图 7e-g)。从南段组碎屑锆石 U-Pb 年龄组成看,几乎不含或含极少量小于 500Ma 的年龄,而南段组上部化石时代为晚石炭世,显然南段组碎屑锆石组成中缺乏年轻锆石信息,指示其沉积期及之前很长一段时间,未发生大规模岩浆作用,构造环境较稳定。南段组岩石学、碎屑锆石年龄组成以及地球化学特征反映其碎屑岩属于被动大陆边缘较为成熟的陆源沉积物。

#### 4.4 碎屑锆石源区与古地理意义

对于南段组大地构造环境还存在“昌宁—孟连洋”西侧保山—耿马地块东侧的被动大陆边缘沉积 (Liu et al., 1991; 从柏林等, 1993; 郑建彬, 2019) 和东侧陆坡沉积 (本培等, 1993; 贾进华, 1994; 冯庆来等, 1996) 两种不同认识。Zheng et al. (2019) 报道了南段组中存在早古生代年龄组 (600 ~ 500Ma) 和新元古代早期年龄组 (ca. 950Ma) 两个显著的年龄峰。其中早古生代年龄组被认为是早古生代冈瓦纳大陆造山事件的响应 (泛非造山带), 大量同期的岩浆时间记录存在于泛非造山带 (Acharyya, 2000; Santosh et al., 2001; Boger et al. 2001; 陆松年, 2004; Boger and Miller 2004; Cawood et al., 2013)。新元古代晚格林威尔期的年龄 (ca. 950Ma) 在印度 Eastern Ghats 山脉存在大量的同时期岩浆事件记录 (Zhu et al., 2011)。澳大利亚西南部 Albany-Fraser 造山带则主要发育了早格林威尔期的岩浆事件 (Cawood et al., 2007), 冈瓦纳大陆北缘 1.1Ga 峰值成为亲澳大利亚西缘的显著标志 (Zhu et al., 2011)。亲华夏的华南板块和思茅地块具有中—晚志留世 (430 ~ 410Ma) (陆松年, 2004; Xiang et al., 2010; Wang et al. 2014) 和新元古代早—中期年龄组 (850 ~ 750Ma) 两个显著峰值, 缺乏泛非期 (600 ~ 500Ma) 峰值 (Nie et al., 2015)。

南段组沉积岩物源特征与已被证实为起源于冈瓦纳大陆北缘的离散地块——保山—掸邦地块 (罗亮等, 2017, 2018)、腾冲地块以及拉萨地块等相似, 具有典型的亲冈瓦纳大陆特征, 而与亲华夏的思茅地块具有显著差异。本研究综合分析前人报道的南段组碎屑锆石年龄组成, 识别出了 560Ma、950Ma 和 1130Ma 三个明显的年龄峰值 (图 8c)。大量研究表明, 560Ma 和 950Ma 是来自冈瓦纳大陆北缘的南羌塘、特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅等地体共



TiO<sub>2</sub>-(TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO)图解, b. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>-(TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO)图解(据 Bhatia, 1983, 1985); c. Zr/Sc-Th/Sc 图解(据 McLennan et al., 1993); d. La + Ce + Nd-Yb + Y-Sm + Gd + Dy 三角图解(宋天锐等, 2005); e-g La-Th-Sc 图解, Th-Co-Zr 图解, Th-Sc-Zr 图解(Bhatia et al., 1986)

图7 南段组碎屑岩物源区性质判别图解

Fig. 7 Provenance discrimination diagrams of samples of the Nanduan Formation

有的两个重要的碎屑锆石年龄峰值(Pullen et al., 2008; Myrow et al., 2009, 2010; Zhu et al., 2011)。ca. 1170Ma 为中-南拉萨地体所特有的年龄峰值, 因而认为拉萨地体物源来自澳大利亚西南缘的 Albany-Fraser 造山带(Zhu et al., 2011)。综上所述, 本文认为南段组与拉萨地体类似, ca. 1.1Ga 物源可能来自冈瓦纳大陆的西澳大利亚地体。

近年来, 随着激光剥蚀等离子体质谱这种快速分析技术的发展进步和逐步普及, 碎屑锆石年代学

在沉积物源区分析、陆块亲缘性示踪、古地理重建等方面已经成为重要研究手段。本文认为在使用该方法进行特定时代古地理重建时, 应充分考虑地体内部早期沉积岩的再循环问题。南段组碎屑锆石组成具有冈瓦纳大陆亲缘性并不能简单得出南段组所在地体泥盆-石炭纪距离冈瓦纳大陆较近的结论。前人大量研究表明, 西盟群、勐统群、孟定街群和澜沧岩群最年轻组锆石加权平均年龄为新元古末期-寒武纪, 限定其沉积时代为早古生代早

期(刑晓婉,2016;Zhao et al., 2017),并非前人认为的元古代,同时他们的碎屑锆石年龄谱组成具有早古生代年龄组(500~600Ma)、新元古代晚期年龄组(ca. 950Ma)两个显著峰值(王舫等,2017)以及新元古代早期年龄组(ca. 1100Ma),具有亲冈瓦纳大陆澳大利亚边缘特征(Nie et al., 2015;Zhao et al., 2017)。野外接触关系、生物地层学以及变质变形特征等证据均表明南段组时代较上述地层较年轻,其碎屑锆石年龄谱分布与他们出奇的一致。澜沧岩群南段组野外紧密伴生,其碎屑锆石组成具有600~500Ma、1000~900Ma和1200~1100Ma三个显著峰值,与南段组碎屑锆石组成高度相似(图8c,d),因此澜沧岩群等地体内部地层可以作为南段组的物源供给。澜沧岩群沉积时(早古生代寒武纪—奥陶纪)接受了冈瓦纳大陆物源,后期特提斯洋裂离,无论洋盆规模多大,均不会影响南段组碎屑锆石组成具有亲冈瓦纳大陆属性。因此,仅依据南段组碎屑锆石年龄谱具有亲冈瓦纳大陆特征,就对所在地体泥盆—石炭纪位置、特提斯洋规模以及位置等作出简单判断显然欠妥,还应开展更进一步的工作。

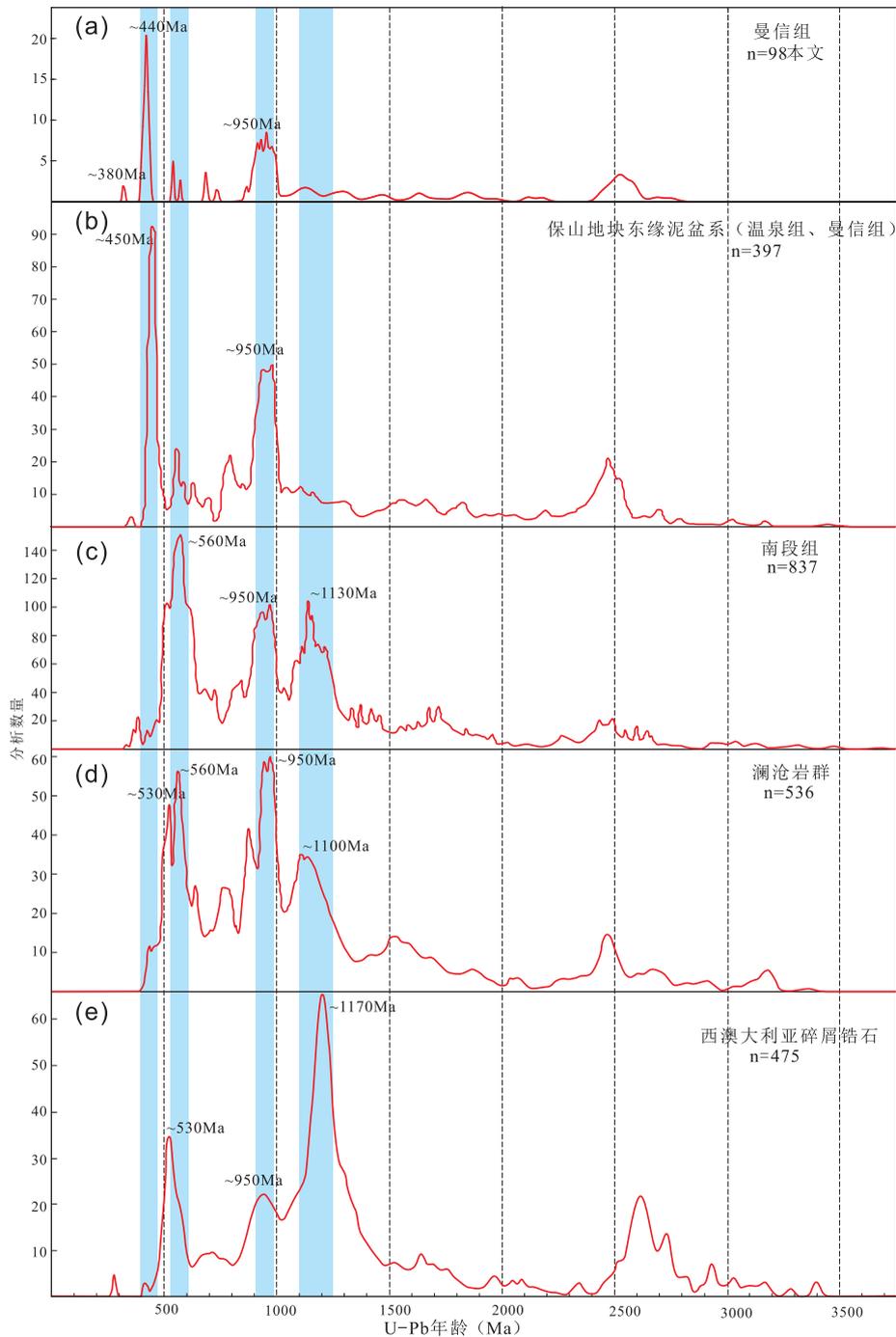
#### 4.5 原—古特提斯演化

从岩石圈结构、岩石学、地球化学和生物地层学方面,证实昌宁—孟连结合带向北与龙木措—双湖构造带相接(钟大赉,1998;李才等,2005;Feng, 2002;Feng et al., 2004, 2008;Wang et al., 2010, 2018;Yang et al., 2011;Wang et al., 2013;罗亮等, 2014;王冬兵等,2016, 2017;Deng et al., 2014;Fan et al., 2015;Nie et al., 2015),记录原特提斯洋和古特提斯洋演化的重要信息,是研究原—古特提斯转换过程的重要解剖窗口。部分学者依据岛弧火山作用和榴辉岩研究,认为原特提斯洋于早古生代末期闭合,原特提斯洋向南(现今向西)俯冲进而弧后扩张形成古特提洋(Zhang et al., 2014;Gehrels et al., 2011;聂小妹,2016;Metcalf, 2021),进一步提出原特提洋位于古特提斯洋以东,由于原特提斯洋向南(现今向西)俯冲消减,西侧发生弧后扩张形成古特提斯洋(Nie et al., 2016;Liu et al., 2021;Wei et al., 2022)。Zheng et al. (2019a)则认为保山地块和思茅地块的分界是澜沧江构造带,其代表了古特提斯洋的主支。另有大量学者认为早古生代—中生代发育连续演化的原—古特提斯大洋(Liu et al., 2019),向东俯冲消减,并于早—中三叠世闭合(Pan

et al., 2012;Deng et al., 2014;王保弟等,2013, 2018;刘桂春等,2017;潘桂棠等,2019;彭智敏等, 2020;王立全等,2021),昌宁—孟连结合带记录了原特提斯和古特提斯洋消亡的残迹。

综上所述,原特提斯洋与古特提斯洋的位置、原特提斯洋的俯冲极性以及原特提斯与古特提斯的转换方式等一直是国际国内特提斯洋演化研究的热点与难点。由于滇西地区泥盆系和下石炭统研究资料的匮乏,加之岩浆作用不甚发育,造成原、古特提斯洋盆之间的构造转换的研究一直无法获得实质性进展。笔者认为昌宁—孟连结合带两侧的泥盆纪沉积岩开展碎屑锆石物源分析可以为解决原—古特提斯洋之间的构造转换提供新的契机。

本文暂认为原特提斯洋与古特提斯洋之间为连续演化,证据有:(1)温泉组和曼信组为一套硅质岩、硅质泥岩、凝灰岩、粉砂质泥岩、细粒岩屑石英砂岩等。碎屑锆石、沉积环境以及硅质岩地球化学分析表明,温泉组和曼信组为形成于昌宁—孟连古特提斯西侧的大陆斜坡至盆地边缘环境(冯庆来等,1997;张凡等,2003;杨文强等,2007;王冬兵等, 2020)。综合分析本研究和前人获得的碎屑锆石年龄谱特征,发现温泉组和曼信组碎屑锆石具有明显的ca. 450~440Ma和ca. 950Ma的年龄峰值(聂小妹,2016;Li et al., 2015),不具有泛非期(600~500Ma)和早格林威尔期(1100Ma)峰值,与昌宁—孟连结合带东部的南段组、澜沧岩群形成显著区别(图8a-d)。古特提斯洋初始阶段即泥盆纪时期,两侧沉积物物源具有显著差异,表明此时特提斯洋已具有相当的宽度,足以阻隔两侧沉积物物源供给。(2)昌宁—孟连结合带代表原特提斯洋和古特提斯洋的残迹的蛇绿混杂岩时常混杂出现,其间并没有明显的界线,如双江县牛井山蛇绿混杂岩既有晚古生代二叠系N-MORB型蛇绿岩,又有早古生代洋壳俯冲相关的埃达克岩(王冬兵等,2016, 2017),预示了原特提斯洋与古特提斯洋在空间上的重叠。澜沧岩群中保存了大量具有岛弧/陆缘弧特征的岩浆岩,时代大致为460~270Ma(Nie et al., 2015;王冬兵等,2016;Xing et al., 2017)。近年来,澜沧岩群中识别出了代表低温高压变质带,其中包含了原岩时代为451~250Ma的榴辉岩和蓝片岩(Fan et al., 2015;Wang et al., 2019;Wang et al., 2020;王慧宁, 2020)。保山地块与思茅地块上未见泥盆系与奥陶—志留系之间的角度不整合(Liu et al., 2019)。



碎屑锆石数据来源:保山地块东缘泥盆系(Li et al., 2015; 聂小妹, 2016),南段组(曾文涛等, 2017; Liu et al., 2019; Zheng et al., 2019b; 黄晓明等, 2022 待刊),澜沧岩群(荆晓婉, 2016; Zhao et al., 2017; Wei et al., 2022)西澳大利亚(Zhu et al., 2011)

图8 泥盆系曼信组(a)与保山地块东缘泥盆系温泉组+曼信组(b)、南段组(c)、澜沧岩群(d)、西澳大利亚(e)碎屑锆石年龄谱特征对比图

Fig. 8 Comparison of detrital zircon age spectra of the Manxin Fm. with those of the Devonian Wenquan Fm. + Manxin Fm. on the Eastern Margin of Baoshan Block, Nanduan Fm., Lancang Group, Western Australia

以上特征反映了昌宁-孟连特提斯洋存在长时间的俯冲过程,揭示出原特提斯洋与古特提斯洋在时间上的连续性。(3)南段组碎屑岩岩石学特征表明其主要由稳定组分构成,岩石地球化学具有被

动大陆边缘特征(Zheng et al., 2019a),碎屑锆石年龄谱缺乏年轻锆石组成(Zheng et al., 2019a; 曾文涛等, 2017),表明其为稳定环境下沉积。原特提斯洋与古特提斯洋转换的关键时期为志留-泥盆纪

(Zhang et al., 2014; Nie et al., 2015; Liu et al., 2019; Metcalfe, 2021; Wei et al., 2022), 昌宁-孟连特提斯洋两侧志留-泥盆纪岩浆作用却鲜有发生, 表明原特提斯洋向古特提斯洋转换过渡期没有发生强烈构造-岩浆作用, 其间可能不存在原特提斯洋闭合后古特提斯洋重新打开的过程。

## 5 结论

(1) 南段组岩相学分析表明其沉积于浅海环境, 并非深水浊流沉积。地球化学资料表明, 南段组沉积于被动大陆边缘, 碎屑主要来自循环大陆地壳。

(2) 南段组时代大致限定于泥盆-石炭纪。前人对南段组整个时代延限缺乏有效约束, 化石采集主要集中于上部, 且大多遭受后期强烈改造, 碎屑锆石年龄中普遍缺乏年轻锆石信息。对南段组时代精确约束还需进一步地在更多层位发现化石或具有定年效果的火山岩夹层。

(3) 南段组碎屑锆石年龄谱与澜沧岩群极其相似, 其下伏澜沧岩群完全可以为南段组提供物源, 利用南段组物源信息来恢复所在地体泥盆-石炭纪古地理位置(冈瓦纳大陆西澳大利亚或印度北缘), 并进一步地限定古特提斯洋的宽度等明显欠妥。泥盆-石炭纪昌宁-孟连洋两侧碎屑锆石年龄谱的显著差异为原特提斯洋与古特提斯洋之间为连续演化提供了新的沉积学证据。

致谢: 成都地质调查中心 耿全如 研究员和胡世学研究员分别在野外工作和化石处理与照相过程中给予了大力支持和帮助, 审稿专家和编辑部老师提出了重要修改意见和建议, 在此一并致以衷心感谢!

## 参考文献 (References):

- Acharya S K, 2000. 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*, 3(4): 425-443.
- Bhatia M R, Taylor S R, 1981. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: a study from the Tasman Geosyncline, Australia [J]. *Chemical Geology*, 33:115-125.
- Bhatia M R, 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627.
- Bhatia M R, 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45:97-113.
- Bhatia M R, Crook K A W, 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181-193.
- Boger S D, Wilson C J L, Fanning C M, 2001. Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: The final suture between east and west Gondwana? [J]. *Geology*, 29(5): 463-466.
- Boger S D, Miller J M, 2004. 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 & Planetary Science Letters*, 219(1): 35-48.
- Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A, 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 70-84.
- Cawood P A, Wang Y J, Xu Y J, et al., 2013. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere? [J]. *Geology*, 41(8): 903-906.
- Deng J, Wang C, Santosh M, 2014. Orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethyan domain, China: Preface [J]. *Gondwana Research*, 26(2): 415-418.
- Dickson W R, Beard L S, Brakeneridge G R, et al., 2009. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 222-235.
- Dong G C, Mo X X, Zhao Z D, et al., 2013. Zircon U-Pb dating and the petrological and geochemical constraints on Lincang granite in Western Yunnan, China; implications for the closure of the Paleotethys Ocean [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62:282-294.
- 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 [J]. *Tectonophysics*, 662:95-108.
- Feng Q L, 2002. Stratigraphy of volcanic rocks in the Changning-Menglian belt in Southwestern Yunnan, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20:657-664.
- Feng Q L, Chongpan C, Dietrich H, et al., 2004. Long-lived Paleotethyan pelagic remnant inside Shan-Thai block: evidence from radiolarian biostratigraphy [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 47:1113-1119.
- Feng Q L, Yang W Q, Shen S Y, et al., 2008. The Permian seamount stratigraphic sequence in Chiang Mai, North Thailand and its tectogeographic significance [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 51:1768-1775.
- Folk R L, Ward W C, 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1): 3-26.
- Gehrels G, Kapp P, Decelles P, et al., 2011. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen [J]. *Tectonics*, 30(5): 1-27.
- 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 [J]. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152-1157.

- Jian P, Liu D, Kršner A, Zhang Q, et al., 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II), insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province [J]. *Lithos*, 113: 767–784.
- Jin X C, Wang Y Z, Xie G L, 2003. Devonian to Triassic Successions of the Changning-Menglian Belt, Western Yunnan, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 440–456.
- Li D P, Chen Y L, Hou K J, et al., 2015. 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*, 227:194–204.
- Liu B B, Peng T P, Fan W M, et al., 2019. Tectonic evolution and paleoposition of the Baoshan and Lincang Blocks of West Yunnan during the Paleozoic. *Tectonics*, 39:1–24.
- 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 [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2: 18–28.
- Liu G C, Sun Z B, Zi J W, et al., 2021. Proto-Tethys ophiolitic mélange in SW Yunnan: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry [J]. *Geoscience Frontiers*, 12: 1–17.
- 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.
- 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.
- Ludwig K R, 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley. 3024.
- McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, et al., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 284: 21–40.
- Metcalfe I, 2006. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: the Korean Peninsula in context [J]. *Gondwana Research*, 9:24–46.
- Metcalfe I, 2011. Paleozoic-Mesozoic history of SE Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 355:7–35.
- Metcalfe I, 2013a. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66:1–33.
- Metcalfe I, 2013b. Tectonic evolution of the Malay Peninsula [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76:195–213.
- Metcalfe I, Henderson C M, Wakita K, 2017. Lower Permian conodonts from Paleo-Tethys Ocean Plate Stratigraphy in the Chiang Mai-Chiang Rai Suture Zone, northern Thailand [J]. *Gondwana Research*, 44:54–66.
- Metcalfe I, 2021. Multiple Tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia [J]. *Gondwana Research*, 100:87–130.
- Murray R W, Brink M R B T, Jones D L, et al., 1990. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in cherts and shale [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(7): 2657–2671.
- Myrow P M, Hughes N C, Searle M P, et al., 2009. 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*, 120: 323–332.
- Myrow P M, Hughes N C, Goodge J W, et al., 2010. Extraordinary transport and mixing of sediment across Himalayan central Gondwana during the Cambrian-Ordovician. *Geological Society of America Bulletin*, 122:1660–1670.
- Nie X M, Feng Q L, Qian X, 2015. Magmatic record of Prototethyan evolution in SWYunnan, China: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic evidence from the Huimin metavolcanic rocks in the southern Lancangjiang zone [J]. *Gondwana Research*, 28: 757–768.
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14.
- Peng T P, Wang Y J, Fan W M, et al., 2006. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Early Mesozoic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang and its tectonic implications [J]. *Science in China (Series D:Earth Sciences)*, 49:1032–1042.
- Peng T P, Wilde S A, Wang Y J, et al., 2013. Mid-Triassic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang Zone, SW China: Petrogenesis and implications for the evolution of Paleo-Tethys [J]. *Lithos*, 168–169:15–32.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al., 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean [J]. *Geology*, 36: 351–354.
- Santosh M, Yoshida M, 2001. Pan-African extensional collapse along the Gondwana Suture [J]. *Gondwana Research*, 4(2): 188–191.
- Shanmugam G, 1996. High-density turbidity currents: are they sand debris flows? [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 2–10.
- Shanmugam G, 2013. New perspectives on deep-water sandstones: Implications [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 316–324.
- Sone M, Metcalfe I, 2008. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: new insights for Paleo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny. *Geoscience*, 340: 166–179.
- Sone M, Metcalfe I, Chaodumrong P, 2012. The Chanthaburi terrane of southeastern Thailand: stratigraphic confirmation as a disrupted segment of the Sukhothai Arc [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61:16–32.
- Visher G S, 1969. Grain size distributions and depositional processes [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39(3): 1074–1106.
- 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 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(8): 920–930.

- Wang F, Liu F L, Schertl H-P, 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-Xiyun area, Southeastern Tibetan Plateau [J]. *Gondwana Research*, 65: 142 - 155.
- Wang H N, Liu F L, Santoch M, et al., 2020. Subduction erosion associated with Paleo-Tethys closure: Deep subduction of sediments and high pressure metamorphism in the SE Tibetan Plateau [J]. *Gondwana Research*, 82: 171 - 192.
- Wang Q F, Deng J, Li C S, et al., 2014. The boundary between the Simao and Yangtze blocks and their locations in Gondwana and Rodinia: constrains from detrital and inherited zircons [J]. *Gondwana Research*, 26:438 - 448.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al., 2010. Petrogenesis of Late Triassic post-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern Paleotethys: geochronological and geochemical constraints [J]. *Lithos* 119:553 - 568.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al., 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block; key observations and controversies [J]. *Gondwana Research*, 23:1273 - 1305.
- Wang Y J, He H Y, Zhang Y Z, et al., 2017. Origin of Permian OIB-like basalts in NW Thailand and implication on the Paleotethyan Ocean [J]. *Lithos*, 274 - 275:93 - 105.
- Wang Y J, Qian Xin, Gawood P A, 2018. Closure of the East Paleotethyan Ocean and amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia continental fragments [J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 195 - 230.
- Wei Y H, Zi J W, Liu G C, 2022. Reconstructing the Lancang Terrane (SW Yunnan) and implications for early Paleozoic Proto-Tethys evolution at the northern margin of Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 101: 278 - 294.
- Xiang L, Shu L S, 2010. Pre-Devonian tectonic evolution of the eastern South China Block: geochronological evidence from detrital zircons. *Sci China Earth Sci*, 53:1427 - 1444.
- Xing X W, Wang Y J, Cawood P A, et al., 2017. Early Paleozoic accretionary orogenesis along northern margin of Gondwana constrained by high-Mg metagneous rocks, SW Yunnan [J]. *International Journal of Earth Science*, 106: 1469 - 1486.
- Yang T N, Zhang H R, Liu Y X, et al., 2011. Permo-Triassic arc magmatism in Central Tibet: evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry[J]. *Chemical Geology*, 284:270 - 282.
- Yang W P, 1999. Stratigraphic and phytogeographic palynology of late Paleozoic sediments in western Yunnan, China[J]. *Science Reports of Niigata University Series E(Geology)*, 14: 15 - 99.
- Zhang X Z, Dong Y S, Li C, et al., 2014. Silurian high-pressure granulites from Central Qiangtang, Tibet: Constraints on early Paleozoic collision along the northeastern margin of Gondwana [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 39 - 51.
- Zhao T Y, Feng Q L, Metcalfe I, et al., 2017. 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*, 51: 193 - 208.
- Zheng J B, Jin X C, Huang H, et al., 2019a. 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*, 108: 1029 - 1048.
- Zheng J B, Zong P, Huang H, et al., 2019b. Early Carboniferous ammonoids from the Nanduan Formation in the Changning-Menglian Belt, western Yunnan, China. *Palaeoworld*, <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2019.05.014>.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al., 2011. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia[J]. *Geology*, 39(8): 727 - 730.
- 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) [J]. *Precambrian Research*, 290: 32 - 48.
- 陈建强, 周洪瑞, 王训练, 2015. 沉积学及古地理学教程[M]. 第二版. 北京:地质出版社.
- 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[J]. *中国科学(B辑)*, 23(11): 1201 - 1207.
- 崔春龙, 曾允孚, 黄志勋, 等, 1998. 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*, 13(1): 34 - 38.
- 邓军, 李文昌, 莫宣学, 等, 2016. 三江特提斯复合造山与成矿作用[M]. 北京: 科学出版社.
- 邓军, 王长明, 李龚健, 等, 2019. 复合成矿系统理论: 揭开西南特提斯成矿之谜的关键[J]. *岩石学报*, 35(5): 1303 - 1323.
- 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铍异常特征[J]. *中国科学(B辑)*, 25(1): 93 - 100.
- 方宗杰, 周志澄, 林敏基, 1990. 关于滇西地质的若干新认识[J]. *科学通报*, 5: 363 - 365.
- 方宗杰, 周志澄, 林敏基, 1992. 从地层学的角度探讨昌宁—孟连带缝合带的若干问题[J]. *地层学杂志*, 16(4): 292 - 303.
- 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[J]. *地质科学*, 32(3): 318 - 326.
- 冯庆来, 刘本培, 叶玫, 等, 1996. 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*, 20(3): 183 - 189.
- 耿全如, 李文昌, 王立全, 等, 2021. 特提斯中西段古生代洋陆格局与构造演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(2): 297 - 315.
- 贾进华, 1994. 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*, 14(4): 42 - 48.
- 孔会磊, 董国臣, 莫宣学, 等, 2012. 滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因:地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 28(5): 1438 - 1452.
- 李才, 翟庆国, 徐锋, 等, 2005. 西藏查藏错—申扎南北向活动构造带运动学特征[J]. *地质论评*, 51(4): 353 - 359.
- 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[J]. *矿物学报*, 35(4): 421 - 424.
- 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[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 18(5): 529 - 539.
- 刘本培, 刘本培, 冯庆来, 等, 2002. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J]. *地学前缘*, 9(3): 161 - 171.

- 刘桂春,孙载波,曾文涛,等,2017.滇西双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的形成时代、岩石地球化学特征及地质意义[J].岩石矿物学杂志,36(2):163-174.
- 陆松年,2004.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,23(9-10):952-958.
- 罗君烈,1990.滇西特提斯造山带的演化及基本特征[J].云南地质,9(4):247-290.
- 罗亮,安显银,吴年文,等,2014.班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连新元古代-中生代沉积盆地演化[J].地球科学——中国地质大学学报,39(8):1169-1184.
- 罗亮,王冬兵,尹福光,等,2017.保山地块下二叠统丁家寨组碳同位素特征[J].沉积与特提斯地质,37(4):58-68.
- 罗亮,王冬兵,尹福光,等,2018.云南保山地块香山组和丁家寨组沉积序列与碳同位素研究[J].沉积学报,36(2):291-301.
- 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[J].地球科学,45(8):3014-3027.
- 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[D].中国地质大学(武汉),1-135.
- 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(1:1500000)[M].北京:地质出版社,1-159.
- 潘桂棠,肖庆辉,2015.中国大地构造图及说明书(1:2500000)[M].北京:地质出版社,1-160.
- 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[J].地球科学,44(5):1544-1561.
- 彭智敏,付于真,王国芝,等,2020a.昌宁-孟连结合带清平地区斜长角闪岩锆石年代学及Sr-Nd-Hf同位素研究[J].地质学报,94(2):511-526.
- 彭智敏,王保弟,胡金锋,等,2020.云南滇西地区早古生代增生杂岩的厘定及其意义——基于1:5万东幅地质调查的新认识[J/OL].中国地质,网络首发<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200408.1619.002.html>.
- 彭智敏,关俊雷,付于真,等,2021.滇西双江县清平地区斜长角闪岩年龄与地球化学特征及其对昌宁-孟连洋演化的制约[J].40(11):1905-1919.
- 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[J].成都理工大学学报(自然科学版),46(5):639-640.
- 余振兵,2007.中上扬子上元古界-中生界碎屑锆石年代学研究[D].中国地质大学(武汉),1-131.
- 宋天锐,万渝生,陈振宇,2005.关于华北元古宙富钾、富稀土沉积岩是白云鄂博大型稀土矿床矿源层的讨论[J].矿床地质,24(5):543-552.
- 孙载波,曾文涛,周坤,等,2017.昌宁-孟连结合带奥陶纪洋岛玄武岩的识别及其构造意义[J].地质通报,36(10):1760-1771.
- 王保弟,王立全,潘桂棠,等,2013.昌宁-孟连结合带南汀河早古生代辉长岩锆石年代学及地质意义[J].科学通报,58(4):344-354.
- 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[J].地球科学,43(8):2527-2550.
- 王保弟,王立全,王冬兵,等,2021.西南三江金沙江弧盆系时空结构及构造演化[J].沉积与特提斯地质,41(2):246-264.
- 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[J].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[J].沉积与特提斯地质,37(4):17-28.
- 王冬兵,唐渊,罗亮,等,2020.昌宁-孟连结合带弄巴地区泥盆系、石炭系的时代及沉积环境:放射虫、碎屑锆石U-Pb年龄和Hf同位素约束[J].地球科学,45(8):2989-3002.
- 王冬兵,王保弟,唐渊,等,2021.西南三江特提斯研究进展与展望[J].地质通报,40(11):1799-1813.
- 王冬兵,尹福光,罗亮,等,2015.昌宁-孟连构造带牛井山地区大勐龙岩群碎屑锆石U-Pb定年及其地质意义[J].矿物岩石,35(3):72-80.
- 王恩泽,罗亮,徐争启,等,2021.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[J].地质通报,40(11):1920-1932.
- 王飠,刘福来,冀磊,等,2016.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,35(5):804-820.
- 王飠,刘福来,冀磊,等,2017.澜沧江杂岩带澜沧群浅变质岩系碎屑锆石LA-ICP MS U-Pb年代学及其构造意义[J].岩石学报,33(9):2975-2985.
- 王慧宁,2020.昌宁-孟连造山带榴辉岩、蓝片岩和变沉积岩的岩石学、变质演化及其对古特提斯洋-陆俯冲造山的制约[D].中国地质科学院,1-253.
- 王立全,潘桂棠,丁俊,等,2013.青藏高原及邻区地质图及说明书(1:1500000)[M].北京:地质出版社,1-247.
- 王立全,王保弟,李光明,等,2021.东特提斯地质调查研究进展综述[J].沉积与特提斯地质,41(2):283-296.
- 吴浩若,杜越,1994.滇西昌宁-孟连带南部地层地质问题[J].地层学杂志,18(3):221-227.
- 吴彦旺,2013.龙木措-双湖-澜沧江洋历史记录——寒武纪一二叠纪的蛇绿岩[D].吉林大学,1-237.
- 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[J].科学通报,49(16):1598-1604.
- 荆晓婉,2017.滇西南早古生代构造属性:岩浆与沉积作用限定[D].中国科学院大学,1-172.
- 杨伟平,贾进华,1995.滇西耿马四排山地区地质新认识[J].地层学杂志,19(1):62-71.
- 杨文强,冯庆来,段向东,2007.滇西南昌宁-孟连构造带晚泥盆世枕状玄武岩和层状硅质岩的特征[J].地质通报,26(6):739-747.
- 尹福光,王冬兵,王保弟,等,2017.西南三江造山带地层区划[J].沉积与特提斯地质,37(4):1-8.
- 曾文涛,刘桂春,冯庆来,等,2017.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,36(7):1175-1187.
- 张凡,冯庆来,张志斌,等,2003.滇西南耿马地区弄巴剖面早石炭世硅质岩的地球化学特征及古地理意义[J].地质通报,22(5):335-340.
- 郑建彬,2019.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——对滇西古特提斯演化的指示意义[D].中国地质科学院,1-138.
- 钟大赉,1998.川滇西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1-231.
- 朱筱敏,2009.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社.