

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.240>



东喜马拉雅构造快速隆升时期： 来自缅甸中央盆地沉积学证据

鲁毅, 崔宇驰, Si Si Thu, Kyaw Kyaw Khing, Myo Min Aung, 朱伟林, 邵磊*

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 东喜马拉雅构造快速隆升时间以及雅鲁藏布江和伊洛瓦底江是否曾经相连已经争论了超过半个世纪。采用锆石U-Pb年代学等方法, 对缅甸中央盆地新生代地层的“源-汇”路径开展研究。缅甸中央盆地始新统发育大量铬尖晶石、各坳陷的锆石年龄谱各不相同, 表明该时期沉积物以盆地周边隆起为主要物源, 不存在统一的源区; 渐新世之后, 源自区域变质岩的重矿物组合比例逐渐增加, 盆地各坳陷碎屑锆石年龄谱特征趋于一致, 均以40~70 Ma的主峰以及80~110 Ma次峰为特征, 表明沉积物源区进入抹谷变质带, 伊洛瓦底江雏形已经形成; 由于缅甸中央盆地渐新统至下中新统完全没有喜马拉雅造山带信息, 认为该时期雅鲁藏布江-伊洛瓦底江并未相连。晚中新世-更新世, 喜马拉雅造山带特征组合十字石和蓝晶石以及110~130 Ma年龄峰的出现, 表明伊洛瓦底江已经侵蚀到东喜马拉雅构造结, 达到现今流域规模。因此, 东喜马拉雅构造结快速隆升的时间大约在晚中新世。

关键词: 青藏东南缘; 缅甸中央盆地; 河流演化; 锆石U-Pb定年; 重矿物; 物源分析; 地质年代学。

中图分类号: P534; P597.3

文章编号: 1000-2383(2022)07-2573-13

收稿日期: 2021-09-25

Rapid Uplift Period of Eastern Himalayan Syntaxis: Evidence from Sedimentology in Central Myanmar Basin

Lu Yi, Cui Yuchi, Si Si Thu, Kyaw Kyaw Khing, Myo Min Aung, Zhu Weilin, Shao Lei*

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Rapid uplift period of formation of the eastern Himalayan syntaxis and the hypothesis of Tsangpo-Irrawaddy River connection have been debated for over half a century. A combination of detrital zircon U-Pb chronology and heavy mineral assemblages was employed to investigate the “source to sink” pathways of Cenozoic strata in Central Myanmar Basin (CMB). The Eocene sediments indicate an intrabasinal provenance and no uniform source area with the presence of large amounts of Chromian spinel as well as the heterogeneity of zircon age spectra between all depressions. Since Oligocene, it is found that local-derived source was gradually replaced by Mogok Metamorphic Belt (MMB) and Irrawaddy River began to develop, which is revealed by zircon age spectra in all depressions tending to be identical (with 40–70 Ma at major peaks and 80–110 Ma at secondary peaks) and heavy mineral assemblages derived from regional metamorphic rock constantly increasing. In addition, due to lack of signal of Himalayan orogenic belt in Central Myanmar Basin, it is believed that there is no possibility of Tsangpo-

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 92055203); 国家自然科学基金面上项目(No. 42076066)。

作者简介: 鲁毅(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事构造-沉积学研究。ORCID: 0000-0002-8229-5062. E-mail: luyi962180@tongji.edu.cn

***通讯作者:** 邵磊, E-mail: lshao@tongji.edu.cn

引用格式: 鲁毅, 崔宇驰, Si Si Thu, Kyaw Kyaw Khing, Myo Min Aung, 朱伟林, 邵磊, 2022. 东喜马拉雅构造快速隆升时期: 来自缅甸中央盆地沉积学证据. 地球科学, 47(7): 2573–2585.

Citation: Lu Yi, Cui Yuchi, Si Si Thu, Kyaw Kyaw Khing, Myo Min Aung, Zhu Weilin, Shao Lei, 2022. Rapid Uplift Period of Eastern Himalayan Syntaxis: Evidence from Sedimentology in Central Myanmar Basin. *Earth Science*, 47(7): 2573–2585.

Irrawaddy connection during Oligocene and Early Miocene. In Late Miocene-Pleistocene, the occurrence of granatite and kyanite and 110–130 Ma age peaks representing Himalayan orogenic belt suggest that the Irrawaddy River had eroded to the eastern Himalayan syntaxis and attained a near-modern configuration of drainage networks. Consequently, rapid uplift of eastern Himalayan syntaxis should have occurred in the Late Miocene-Pleistocene.

Key words: southeast of Tibet Plateau; Central Myanmar Basin; river evolution; zircon U-Pb chronology; heavy mineral; provenance analysis; geochronology.

0 引言

东亚几条大河的流域呈狭长的不规则形状，在东喜马拉雅构造结(Eastern Himalayan Syntaxis)附近，它们的距离非常接近，这种现象通常被认为与青藏高原东南缘隆升相关；当东喜马拉雅构造结遭受快速抬升和侵蚀后，可能会导致一系列的流域扩展和捕获事件(Brookfield, 1998; Clark *et al.*, 2004)。因此，厘定东喜马拉雅构造结快速隆升剥蚀的时间至关重要。近年来，喜马拉雅造山带南缘前陆盆地锡瓦里克群、孟加拉扇、尼科巴扇的物源研究表明，东喜马拉雅构造结于晚中新世开始快速隆升剥蚀(Blum *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2020)。然而，缅甸中央盆地(Central Myanmar Basin)的物源研究仍然存在较多争议，有学者认为新生代早期东喜马拉雅构造结已经隆升剥蚀，雅鲁藏布江与伊洛瓦底江曾经建立连接(图 1; Brookfield, 1998; Clark *et al.*, 2004; Robinson *et al.*, 2014)，东喜马拉雅构造结及冈底斯弧(Gangdese Arc)的剥蚀记录可能保存在缅甸中央盆地。

Robinson *et al.*(2014)发现始新世-渐新世缅甸中央盆地与藏南冈底斯弧的锆石U-Pb年龄与Hf同位素是高度匹配的，锆石年龄主要为白垩纪-新生代， $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 大多数为正值；中新世后，

Hf同位素值主要为负值，与缅甸周缘的波密-察隅岩浆岩带(Bomi-Chayu Magmatic Belt)、滇缅岩浆岩带(Dianxi-Burma Magmatic Belt)、缅中花岗岩带(Central Granite Belt)相似。因此，Robinson *et al.*(2014)认为早在中-晚始新世，东喜马拉雅构造结就已经隆升，雅鲁藏布江与伊洛瓦底江贯通，将藏南冈底斯弧沉积物输送至中央盆地；到早中新世晚期，雅鲁藏布江-伊洛瓦底江河流体系发生分解，古雅鲁藏布江被布拉马普特拉河袭夺，伊洛瓦底江流域缩小至现今流域范围。然而基于相似的证据，Wang *et al.*(2014)认为晚白垩世-始新世，缅甸中央盆地物源可以来自盆内的西缅岛弧带(Western Myanmar Arc)，远源冈底斯弧的供给不是必要条件，中新世沉积物则可能来自周缘造山带。但是，当时(2014年)缅甸地体内潜在源区的碎屑锆石U-Pb定年数据较少，而且缺乏西缅岛弧带锆石Hf同位素的明确证据，难以得到准确的结论。最近，Zhang *et al.*(2017)和Gardiner *et al.*(2018)发现西缅岛弧带锆石U-Pb年龄和Hf同位素与冈底斯弧几乎一致，而且Sr-Nd同位素数据也与冈底斯弧有着很强的亲缘性，证明两者都是受印度板块向欧亚板块俯冲影响形成的大陆岛弧，岩浆岩主要来自初生地壳的部分熔融。因

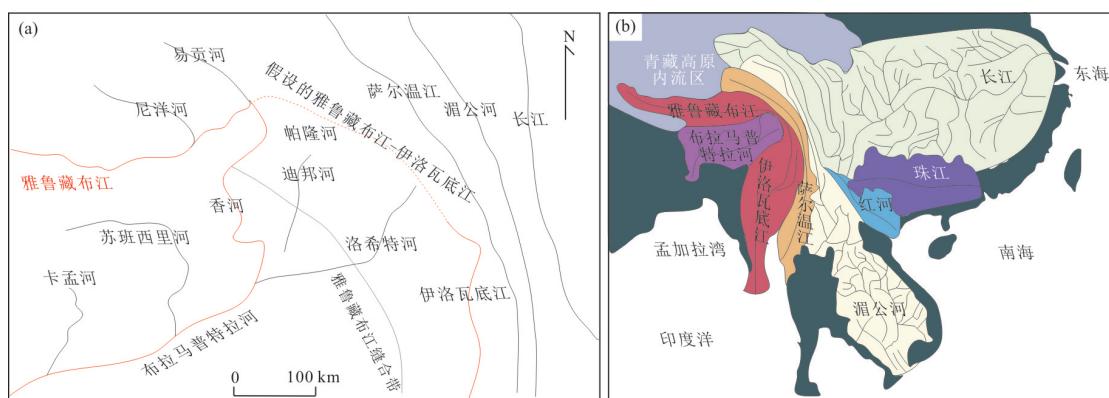


图 1 雅鲁藏布江-伊洛瓦底江假说(a)及顺次袭夺模型中雅鲁藏布江-伊洛瓦底江的连接(b)(Clark *et al.*, 2004)
Fig.1 Tsangpo-Irrawaddy hypothesis (a) and Tsangpo-Irrawaddy connection in successive capture model (b) (Clark *et al.*, 2004)

此,冈底斯弧的特征同时也是西缅岛弧带的特征,中央盆地内沉积物具有冈底斯弧的特征不足以证明雅鲁藏布江-伊洛瓦底江的连接,需要寻找其他物源特征来证明该假说。

多数学者基于缅甸中央盆地的沉积岩石学和全岩地球化学研究,更倾向于认为新生代不存在雅鲁藏布江-伊洛瓦底江的连接(Licht *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017, 2019)。但全岩地球化学及沉积岩石学等较为传统的物源判别手段容易受风化过程和成岩作用影响,使分析的多解性增强;相对而言,重矿物和碎屑锆石在母岩结晶形成以后受低级变质作用及沉积再循环过程的影响较小,能够较好地反映母岩信息,解决传统地化手段在物源判别上的不足(Zhao *et al.*, 2020; 李祥权等, 2021)。然而近年来,缅甸中央盆地没有已经发表的重矿物数据,已经发表的锆石定年数据也较为有限,尤其是缺乏西部沙林坳陷以及渐新统样品(Robinson *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2019),在解释中央盆地物源演化时常常遇到困难。本文对中央盆地沙林坳陷新生代沉积岩开展重矿物组合与碎屑锆石U-Pb定年研究,结合已经发表的锆石年龄数据进行物源分析,对新生代雅鲁藏布江-伊洛瓦底江连通可能性以及东喜马拉雅构造结的快速隆升剥蚀时间进行探讨。

1 区域地质背景

1.1 区域概况

缅甸位于欧亚大陆东南缘,北部经东喜马拉雅构造结与喜马拉雅造山带相连,南部为巽他沟-弧系统(图2a)。白垩纪以来,缅甸一直位于印度板块向欧亚板块俯冲的前缘地带,形成了典型的主动大陆边缘背景下的沟-弧-盆体系。缅甸自西向东可以分为4个主要地质单元,依次为印缅山脉(Indo-Burman Ranges)、缅甸中央盆地、抹谷变质带(Mogok Metamorphic Belt)以及掸邦高原(Shan Plateau)。

缅甸中央盆地保存了缅甸主动大陆边缘的沉积记录,亦有可能保存新生代东喜马拉雅构造结隆升剥蚀的记录。一般认为,中央盆地由中部的西缅岛弧带和两侧的新生代沉积盆地组成(Mitchell, 1993)。西缅岛弧带是一条南北走向的岩浆岩带,通常被认为是受印度板块俯冲影响形成的大陆岛弧,地震资料显示现今西缅岛弧带大部分埋藏于中新世沉积岩之下(Zhang *et al.*, 2017),仅北部出露约4 500 km²的文多(Wentho)岩浆侵入体。西缅岛弧带西侧为弧前盆地,主要包括北部的钦敦(Chindwin)坳陷和南部的沙林(Salin)坳陷;东侧为弧后盆地,包含北部的睡宝(Shwebo)坳陷和南部的勃固(Pegu)坳陷。中央盆地新生代地层是一套几乎连续的古新统到更新统的沉积岩序列,被认为蕴藏着丰富的油气资源。

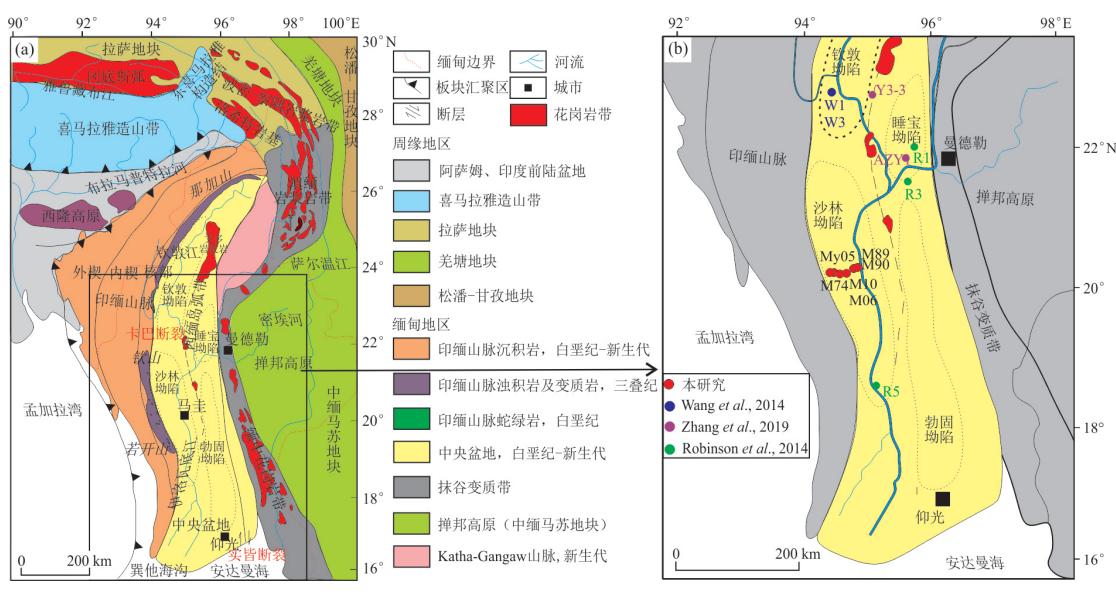


图2 缅甸周缘陆块及构造单元(a)及样品分布位置(b)

Fig.2 Continental blocks and tectonic units around Myanmar (a) and sample location (b)

据Licht *et al.*(2019)、Zhang *et al.*(2017)和Robinson *et al.*(2014)

中央盆地西侧为印缅山脉,与中央盆地以卡巴断裂相隔,印缅山脉在俯冲系统中位于弧前增生楔位置,根据构造-岩性特点通常被分为三部分(Rangin *et al.*, 2013),自西向东依次为外楔(outer wedge)、内楔(inner wedge)与核部(core)。外楔大部分区域并没有隆升成山,主要出露的是新近纪沉积岩,内楔主要发育始新统复理石沉积,核部由三叠纪Pane Chaung组浊积岩及对应的变质岩(主要为云母片岩和大理岩)以及早白垩世蛇绿岩组成(Liu *et al.*, 2016),该蛇绿岩年龄与雅鲁藏布江蛇绿岩年龄一致。印缅山脉的隆升时间仍然存在争议,目前被广泛认可的隆升时间是在晚始新世-中新世(37~15 Ma)之间。

掸邦高原位于缅甸最东部,属于中缅马苏地块(Sibumasu)的一部分,主要由前寒武纪-中生代沉积岩组成(Metcalfe, 2011)。二叠纪-中三叠世,中缅马苏地块裂离,冈瓦纳大陆进入漂移期;晚三叠世后拼贴至亚洲大陆边缘;中生代末,掸邦高原整体抬升,高原内部缺少大范围的新生代沉积,仅在一些山间盆地残存第四纪坡积物。

抹谷变质带是位于中央盆地和掸邦高原之间的南北走向的带状区域,与中央盆地以实皆断裂相隔,普遍经历区域变质作用,被大量的中、新生代酸性岩浆岩侵入。通常以曼德勒为界,将抹谷变质带分为南北两段(Gardiner *et al.*, 2018),南段的岩浆岩被称为缅中花岗岩带(Mitchell *et al.*, 2012),北段的岩浆岩被称为滇缅岩浆岩带。

抹谷变质带最北端终止于28°N附近,与之相邻的是波密-察隅岩浆岩带,同样为中、新生代酸性岩浆岩。东喜马拉雅构造结位于波密-察隅岩浆岩带西北,是印度板块与欧亚板块碰撞的产物,也是喜马拉雅造山带中构造作用最强烈、隆升剥露速率最快的地区。东喜马拉雅构造结西侧为冈底斯弧,冈底斯弧分布范围极广,东西横跨2 000 km、南北宽70~80 km,主要岩性是印度板块向欧亚板块俯冲相关的I型花岗岩。

伊洛瓦底江全长2 714 km,自北向南贯穿缅甸,其源头位于西藏察隅县伯舒拉山南麓,距东喜马拉雅构造结约280 km(Garzanti *et al.*, 2016),向南广泛流经波密-察隅岩浆岩带与抹谷变质带,于曼德勒南部流向转为西南-东北向,进入中央盆地。伊洛瓦底江第一大支流钦敦江(Chindwin River)起源于

中央盆地北部,曾是伊洛瓦底江干流的一部分,由于早-中新世中央盆地沿实皆断裂向北进行了300~400 km的右行走滑运动,钦敦江被分异成伊洛瓦底江支流(Tun and Watkinson, 2017),沿印缅山脉东侧山麓地带向南流动,在中央盆地中部与伊洛瓦底江合流,向南流入安达曼海。

1.2 潜在物源特征

根据缅甸中央盆地的地理位置及周缘构造单元的岩性、年龄特征,以及伊洛瓦底江的流域范围,本文将缅甸及周缘地区大致分为6个潜在物源区:印缅山脉核部、西缅岛弧带、抹谷变质带(包含侵入其中的缅中花岗岩带及滇缅岩浆岩带南部)、掸邦高原、滇缅岩浆岩带北部及波密-察隅岩浆岩带、西藏南部(包含冈底斯弧以及喜马拉雅造山带),6个潜在物源区的8张锆石年龄谱展示于图3。

印缅山脉核部主要出露三叠纪浊积岩及其对应的变质岩,以及与印度板块向欧亚板块俯冲有关的蛇绿岩,其特征重矿物为蛇绿岩中的铬尖晶石(Naing *et al.*, 2013)。三叠纪浊积岩锆石年龄谱通常显示450~750 Ma主峰(泛非期岩浆岩)、200~300 Ma次峰以及900~1 200 Ma(格林维尔期岩浆岩)的较小峰值,也存在部分样品显示出200~300 Ma主峰和450~750 Ma次峰(Sevastjanova *et al.*, 2016; Yao *et al.*, 2017)。

西缅岛弧带主要由花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩组成(Mitchell *et al.*, 2012; Gardiner *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017)。已发表的基岩锆石年龄显示,西缅岛弧带年龄集中于80~110 Ma,少量年龄为40~70 Ma,最老的锆石年龄不超过110 Ma。西缅岛弧带在延伸方向上(南北向)呈现明显的非均质特点,其锆石年龄、锆石Hf同位素以及Sr-Nd同位素均存在不同之处(Zhang *et al.*, 2017; Gardiner *et al.*, 2018)。

抹谷变质带主要发育一系列低高级变质岩,常见大理岩、片岩和角闪岩相片麻岩,最高可到麻粒岩级别(Searle *et al.*, 2007)。南段的缅中花岗岩带锆石年龄集中于40~70 Ma,存在120~170 Ma以及15~25 Ma的次要年龄群;北段的滇缅岩浆岩带南部主要年龄特征与缅中花岗岩带相似,锆石年龄集中于40~70 Ma,存在110~130 Ma次要年龄群。

掸邦高原锆石年龄谱以900~1 200 Ma为主峰、400~700 Ma为次峰,主要体现冈瓦纳大陆特征峰值(Cai *et al.*, 2017)。

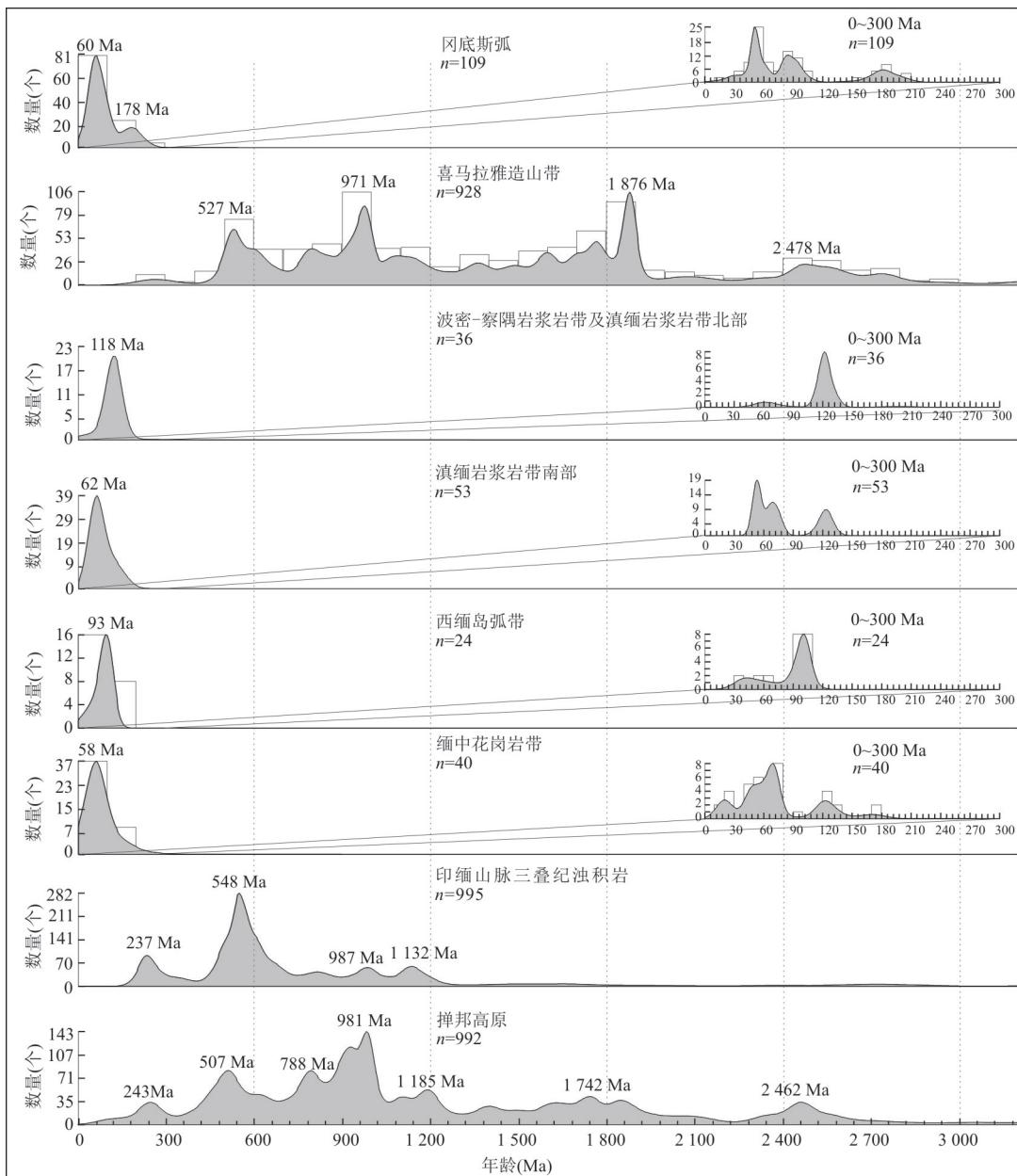


图3 缅甸周缘潜在源区锆石U-Pb年龄

Fig.3 Zircon U-Pb ages of potential sources around Myanmar

数据来源:印缅山脉三叠纪浊积岩(Sevastjanova *et al.*, 2016; Yao *et al.*, 2017);西缅岛弧带(Mitchell, 1993; Barley *et al.*, 2003; Mitchell *et al.*, 2012; Gardiner *et al.*, 2017, 2018; Zhang *et al.*, 2017);缅中花岗岩带(Barley *et al.*, 2003; Mitchell *et al.*, 2012; Gardiner *et al.*, 2017, 2018);掸邦高原(Cai *et al.*, 2017);滇缅岩浆岩带(Xie *et al.*, 2016);波密-察隅岩浆岩带(Chiu *et al.*, 2009; Xie *et al.*, 2016);冈底斯弧(Wen *et al.*, 2008; Ji *et al.*, 2009; Chu *et al.*, 2011);喜马拉雅造山带(DeCelles *et al.*, 2004)

波密-察隅岩浆岩带以及滇缅岩浆岩带北部位于缅甸西北部和中国境内,是现代伊洛瓦底江的源头,其基岩主要年龄集中于110~130 Ma。

本文的西藏南部源区包括冈底斯弧以及喜马拉雅造山带,冈底斯弧岩浆岩年龄跨度非常大,主要年龄为40~70 Ma,其次为80~110 Ma,也存在110~220 Ma年龄(Wen *et al.*, 2008; Ji *et al.*,

2009; Chu *et al.*, 2011; 曾庆高等, 2020)。喜马拉雅造山带特征重矿物为高级变质矿物十字石和蓝晶石(Ravikant *et al.*, 2011),大量发现于喜马拉雅造山带南部的孟加拉盆地中;喜马拉雅造山带的锆石年龄谱较为复杂,代表的主要印度大陆的古老沉积岩,其典型峰值为400~700 Ma、900~1200 Ma以及1800 Ma(DeCelles *et al.*, 2004),分别为特提

表 1 本文样品及相关研究样品信息

Table 1 Information of samples from this paper and related study

样号	位置	地层年龄	重矿物	锆石	参考文献
M75	沙林坳陷	中-晚始新世	✓	✓	本文
W3	钦敦坳陷	中-晚始新世		✓	Wang <i>et al.</i> , 2014
R1	睡宝坳陷	中-晚始新世		✓	Robinson <i>et al.</i> , 2014
MY5	沙林坳陷	早渐新世	✓	✓	本文
M10	沙林坳陷	晚渐新世	✓	✓	本文
AZY1	睡宝坳陷	晚渐新世		✓	Zhang <i>et al.</i> , 2019
M06	沙林坳陷	早中新世	✓	✓	本文
R3	睡宝坳陷	早中新世		✓	Robinson <i>et al.</i> , 2014
R5	睡宝坳陷	中中新世	✓	✓	Robinson <i>et al.</i> , 2014
W1	钦敦坳陷	中中新世		✓	Wang <i>et al.</i> , 2014
M90	沙林坳陷	晚中新世-更新世	✓	✓	本文
Y3-3	沙林坳陷	晚中新世-更新世		✓	Zhang <i>et al.</i> , 2019
M89	沙林坳陷	现代	✓	✓	本文

斯喜马拉雅、高喜马拉雅和低喜马拉雅的特征峰值。

可以看出缅甸中央盆地周缘不同物源区的锆石 U-Pb 年龄谱和重矿物组成差异明显, 可以此对中央盆地的物源演化过程进行研究。

2 材料与方法

本文共采集沙林坳陷的 6 个新生代样品, 包含 1 个伊洛瓦底江现代河流砂、5 个新生代沉积岩。收集前人锆石数据 7 个, 连同本文数据进行综合分析讨论, 样品位置及信息见图 2b 和表 1。

6 件样品的重矿物分析在廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成, 其主要流程包括分离和鉴定两部分。在分离步骤中, 先对样品烘干称重, 用水反复淘洗出重矿物部分, 晾干后用密度 2.89 g/cm³ 的三溴甲烷进行轻重矿物的分离, 将该部分倒入盛重液的漏斗中, 充分搅拌沉淀后分为两层, 对下方的重部分进行鉴定。为了鉴定准确, 需对重部分进行磁选处理: 用强磁铁选出强磁性矿物, 用电磁仪选出电磁性矿物, 剩余部分为无磁矿物, 分别包装待鉴定。在鉴定步骤中, 对每件样品中的 3 部分分别进行镜下分析, 对透明矿物借助偏光显微镜鉴定, 对不透明矿物借助微化分析鉴定, 定出准确的重矿物名称, 对鉴定出的重矿物进行统计, 样品在玻璃板上摊平, 划出均匀的行数, 如该种矿物含量少(100 粒以下), 则数出全部颗粒数; 如该种矿物含量多, 就按行数统计, 最少数出 3 行该种矿物的颗粒数, 加权平均数乘总行数, 为该种矿物的总颗粒数。如该种矿物磁性范围较大, 同时出

现在无磁和电磁两部分中, 则分别统计进行加和。

重矿物分选后, 挑选出 6 件样品的所有锆石, 在北京锆年领航科技有限公司进行制靶。在双目镜下随机选取 250 颗锆石粘在双面胶上, 用无色透明的环氧树脂固定, 待环氧树脂固化以后将锆石抛光, 使其内部结构剖面充分暴露。随后在同济大学海洋地质国家重点实验室使用扫描电子显微镜获取阴极发光(CL)照片, 用以观察锆石内部结构, 确定剥蚀位置。锆石 U-Pb 同位素测年同样在同济大学海洋地质国家重点实验室完成, 使用仪器为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)。激光剥蚀系统为 Resolution 193nm, ICP-MS 型号为 Agilent 7900。剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 激光斑束大小选择 18 或 26 μm(视锆石颗粒大小而定), 剥蚀频率选用 6 Hz。每个样品分析时间包括 40 s 的空白信号和 40 s 的样品信号。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500($1\ 065.4 \pm 0.3$ Ma)作外标进行同位素分馏校正, 每分析 7 个样品点分析 2 次 91500。同时, 采用锆石标准 Plešovice(337.1 ± 0.4 Ma)来监测分析结果的精确度。锆石微量元素含量的测定以 NIST610 参考玻璃作为外标, Si 元素作为内标。

测试完成后, 使用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2010)进行同位素比值及年龄计算, 同位素比值和年龄采用 Andersen(2002)的方法进行普通 Pb 校正。选取锆石最佳年龄时采用 Compston *et al.*(1992)的统计方法, 对于年轻锆石(小于 1 000 Ma), 选取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄作为最佳年龄; 对于古老锆石(大于

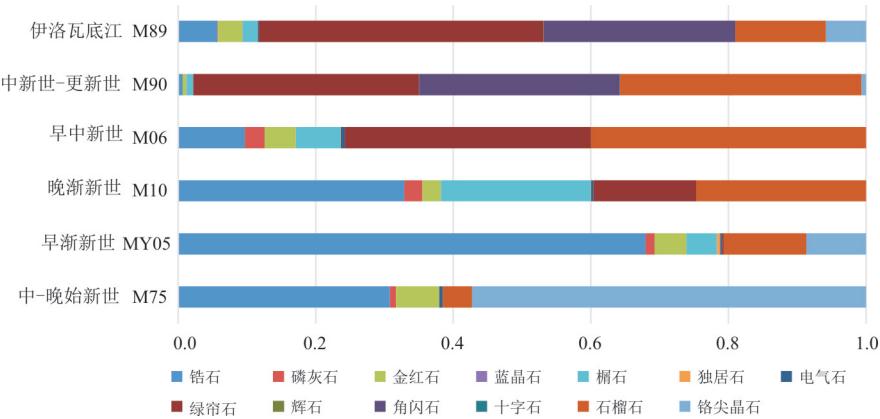


图4 中央盆地重矿物组合特征

Fig.4 Characteristics of heavy mineral assemblage in Central Myanmar Basin

1 000 Ma),选取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄作为最佳年龄.本研究选用不确定度(1σ)小于10%、谐和度大于80%的年龄,删除不符合要求的年龄,采用KDE(核密度估计)曲线和PDP(概率密度)曲线进行锆石年龄谱的展示,KDE和PDP图的频宽(bandwidth)为20 Ma,直方图宽度(bin width)为100 Ma;此外由于中央盆地内大多数样品年龄以中生代-新生代为主,选取0~300 Ma年龄谱放大展示,频宽(bandwidth)为5 Ma,每格直方图宽度(bin width)为10 Ma.

3 结果

3.1 重矿物组合

中央盆地重矿物组合随时代变化较大,总体而言其特征可以分为4个阶段(图4).(1)中-上始新统M75,重矿物组合以锆石(30.8%)+铬尖晶石(57.3%)+少量金红石(6.3%)为主,铬尖晶石一般来自蛇绿岩,大量铬尖晶石代表蛇绿岩源区对沙林坳陷古新统-始新统影响较大,锆石+金红石组合则代表酸性岩浆岩源区贡献.(2)下渐新统MY05,重矿物组合转变为大量锆石(67.9%)+少量铬尖晶石(8.7%),表明蛇绿岩源区贡献比例减小,酸性岩浆岩物源区相对增大.(3)上渐新统-下中新统(M10、M06),重矿物组合转变为以石榴子石(24.5%~40%)+绿帘石(14.9%~35.8%)的区域变质岩组合为主,酸性岩浆岩组合锆石(9.7%~33%)+榍石(6.5%~21.8%)变为次要组合,随着时间推移,区域变质岩组合比例上升,酸性岩浆岩组合比例逐渐降低,表明上渐新统-下中新统区域变质岩为主要物源,且其影响越来越大.(4)上中新统-更新统(M90),石榴子石+绿帘石+角闪石比例达到96.3%,与现代伊洛瓦底江重矿物组合(M89)基

本一致,表现出区域变质岩源区占绝对主导地位.

3.2 碎屑锆石定年

中央盆地锆石总体表现出白垩纪-新生代主峰(图5a、5b),主要记录着中-新生代印度板块向欧亚板块俯冲的岩浆作用.

中-上始新统,沙林坳陷M75和钦敦坳陷W3都表现出白垩纪单峰(约100 Ma)、以80~110 Ma为主峰,睡宝坳陷R1则以40~70 Ma为主峰,80~110 Ma为次峰.

渐新统以后,沙林坳陷、钦敦坳陷、睡宝坳陷普遍转变为以40~70 Ma为主峰、80~110 Ma为次峰,其中MY05、W1的80~110 Ma次峰稍高.上渐新统以来,沙林坳陷样品表现较为特别,除了新生代主峰外,可见200~300 Ma、450~750 Ma和900~1200 Ma的明显次峰.上中新统后,M90、M89出现较为明显的110~130 Ma年龄群.

4 讨论

值得注意的是,冈底斯弧与西缅岛弧带似乎具有不同的年龄谱(图3),前者以40~70 Ma为主要峰值,后者以80~110 Ma为主要峰值,本研究中沙林坳陷、钦敦坳陷中上始新统M75、W3以80~110 Ma为主峰,以此可以证明古新世-始新世不存在雅鲁藏布江与伊洛瓦底江的连通吗?事实上,古近纪冈底斯弧的年龄谱很有可能与现今冈底斯弧的基岩及现代雅鲁藏布江干流的年龄谱(Zhang et al., 2012)不同,而与西缅岛弧带的年龄谱相似.日喀则盆地是印度板块向欧亚板块俯冲形成的弧前盆地,其物源来自冈底斯岩浆弧,上白垩统-始新统中观测到的显著年龄峰值为80~100 Ma(Orme et

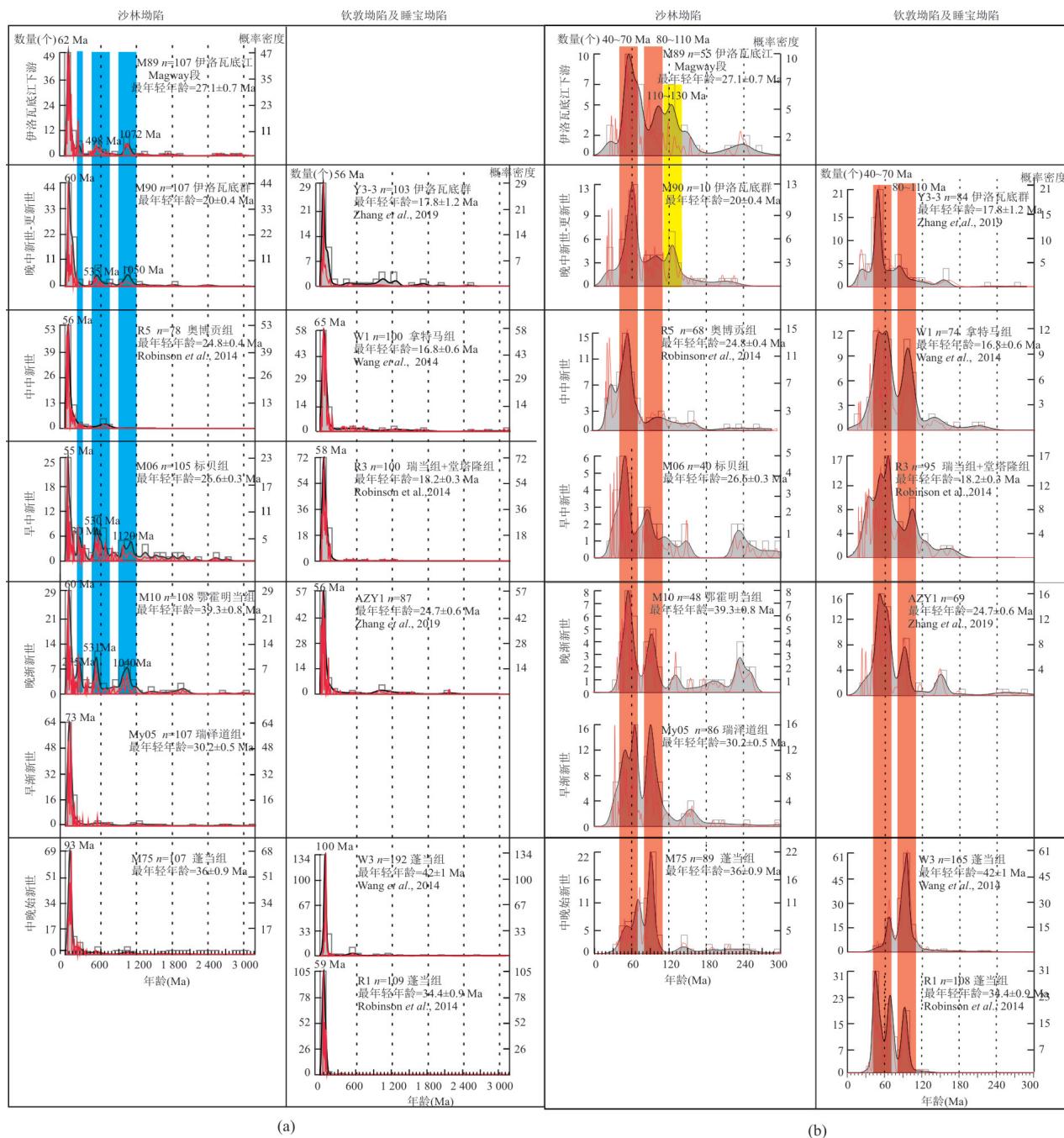


图 5 中央盆地锆石年龄谱

Fig.5 Zircon age spectrum of Central Myanmar Basin

a. 0~3 200 Ma; b. 0~300 Ma

al., 2015), 类似于西缅岛弧带, 这种情况一直持续到 51 Ma. 51 Ma 以后, 由于印度板块与欧亚板块持续的俯冲、碰撞, 日喀则盆地隆升并造成沉积间断, 无法得知现代观察到的冈底斯弧 40~70 Ma 的岩浆岩是何时剥露的, 因此直接比较现代冈底斯弧与西缅岛弧带的年龄谱是不可靠的。本研究通过综合分析中央盆地碎屑岩及河流

砂的重矿物组合以及锆石年龄谱特征, 认为新生代雅鲁藏布江-伊洛瓦底江不曾连通, 东喜马拉雅构造快速隆升剥蚀的时间为晚中新世-更新世。

4.1 始新世: 伊洛瓦底江尚未发育, 中央盆地由盆地周边隆起供给

中-上始新统, 中央盆地重矿物以锆石(30.8%)和铬尖晶石(57.3%)为主(图 4)。铬尖晶石通常来

源于蛇绿岩(超基性岩),而蛇绿岩在地球表层系统中较为稀有,缅甸周缘仅在印缅山脉核部广泛存在。始新世时期,如果中央盆地沉积物主要来源于雅鲁藏布江-伊洛瓦底江的搬运、输送,那么雅鲁藏布江-伊洛瓦底江将广泛流经冈底斯弧、东喜马拉雅构造结、抹谷变质带,可提供大量来自冈底斯弧的锆石,喜马拉雅造山带的十字石、蓝晶石以及来自抹谷变质带的角闪石、石榴石、绿帘石,这些重矿物会压制铬尖晶石的比例。研究表明,当沉积盆地由远距离大河物源和蛇绿岩供给时,铬尖晶石比例会被流域中分布更加广泛的其他重矿物压制,通常不会超过重矿物组分的6% (Najman *et al.*, 2008; Van Hattum *et al.*, 2013)。沙林坳陷铬尖晶石比例超过50%,缺乏石榴石、绿帘石等来自抹谷变质带的重矿物以及十字石、蓝晶石等来自喜马拉雅造山带的重矿物,类似的情况也存在于印缅山脉的始新世砂岩中(Naing *et al.*, 2013)。这表明始新世中央盆地以及外侧的增生楔盆地,都不存在远源大河供给,其锆石来源于盆内西缅岛弧带,铬尖晶石来源于盆缘印缅山脉核部蛇绿岩。

从碎屑锆石U-Pb定年的角度来看,如果始新世曾经存在雅鲁藏布江-伊洛瓦底江的连通,那么大型雅鲁藏布江-伊洛瓦底江的搬运-沉积作用将控制整个中央盆地,中央盆地各坳陷间的锆石年龄谱应该基本一致,显示的应该是其流域内冈底斯弧、东喜马拉雅构造结、波密-察隅岩浆岩带、滇缅岩浆岩带、缅中花岗岩带及西缅岛弧带的混合特征。即使添加了额外的近源物源,它们也不应该掩盖主要峰值特征。事实上,中-上始新统,沙林坳陷M75与钦敦坳陷W3相比,虽然都表现出80~110 Ma峰值高于40~70 Ma的特征,但钦敦坳陷40~70 Ma峰值非常弱,沙林坳陷40~70 Ma峰值较强,钦敦坳陷与沙林坳陷存在一定差异;睡宝坳陷始新统蓬当组R1,显示主要年龄群为40~70 Ma,其次为80~110 Ma,与弧前盆地的钦敦坳陷和沙林坳陷不同。此外,R1的40~70 Ma年龄群有存在若干颗锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为中等负值(Robinson *et al.*, 2014),类似于缅中花岗岩带的特征。相比之下,同时代钦敦坳陷蓬当组W3中,没有出现 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 负值(Wang *et al.*, 2014)。总的来看,古新世-始新世,中央盆地各坳陷之间存在锆石年龄的不均一性,表明并不存在大型均一的雅鲁藏布江-伊洛瓦底江;这种不均一性应当反映的是西缅岛弧带南北向不同位置的特征,沉积物

由多条发源于西缅岛弧带的横向短源小河流向各坳陷搬运,R1中占主导地位的40~70 Ma锆石可能还部分来自于东侧的缅中花岗岩带。

以上证据表明在始新世期间,中央盆地沉积物主要受控于中央盆地内的西缅岛弧带和印缅山脉核部,其剥蚀的沉积物由小型河流进行搬运,不存在雅鲁藏布江与伊洛瓦底江连接的可能性,东喜马拉雅构造尚未快速隆升剥蚀(图7)。

4.2 渐新世-中中新世:伊洛瓦底江向抹谷变质带北部逐渐扩展

前文已经证明了始新世不存在雅鲁藏布江-伊洛瓦底江连通的可能性,东喜马拉雅构造结并未快速隆升剥蚀。那么在渐新世以后是否存在东喜马拉雅构造结快速隆升,使得伊洛瓦底江水系迅速扩展进而与雅鲁藏布江贯通的现象?本研究认为渐新世-中中新世,东喜马拉雅构造结仍未快速隆升剥蚀,雅鲁藏布江与伊洛瓦底江并未连接。

重矿物组合显示(图4)下渐新统My05铬尖晶石比例大幅降低,锆石比例大幅增加,表明相比于始新世,此时伊洛瓦底江流域开始扩展,不再仅局限于中央盆地内部,但由于重矿物组合中未出现石榴石+绿帘石+角闪石区域变质岩组合以及喜马拉雅特征重矿物蓝晶石+十字石(图6),表明此时流域也仅延伸到抹谷变质带南段边缘的缅中花岗岩带;上渐新统-下中新统重矿物组合以石榴石+绿帘石+角闪石的区域变质岩组合为主,其比例随时代逐渐增大,表明伊洛瓦底江逐渐向抹谷变质带北段扩展,抹谷变质带影响越来越大,但此时蓝晶石+十字石仍未出现。如果渐新世以后存在伊洛瓦底江-雅鲁藏布江的贯通,那么代表抹谷变质带物源的石榴石+绿帘石+角闪石组合比例将先增大(说明伊洛瓦底江逐渐扩展至抹谷变质带),再

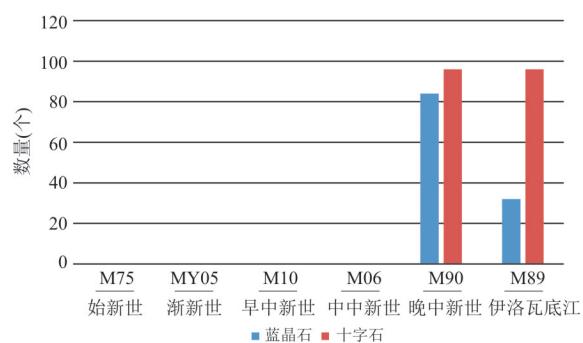


图6 中央盆地蓝晶石、十字石含量

Fig.6 Contents of kyanite and garnatite of Central Myanmar Basin

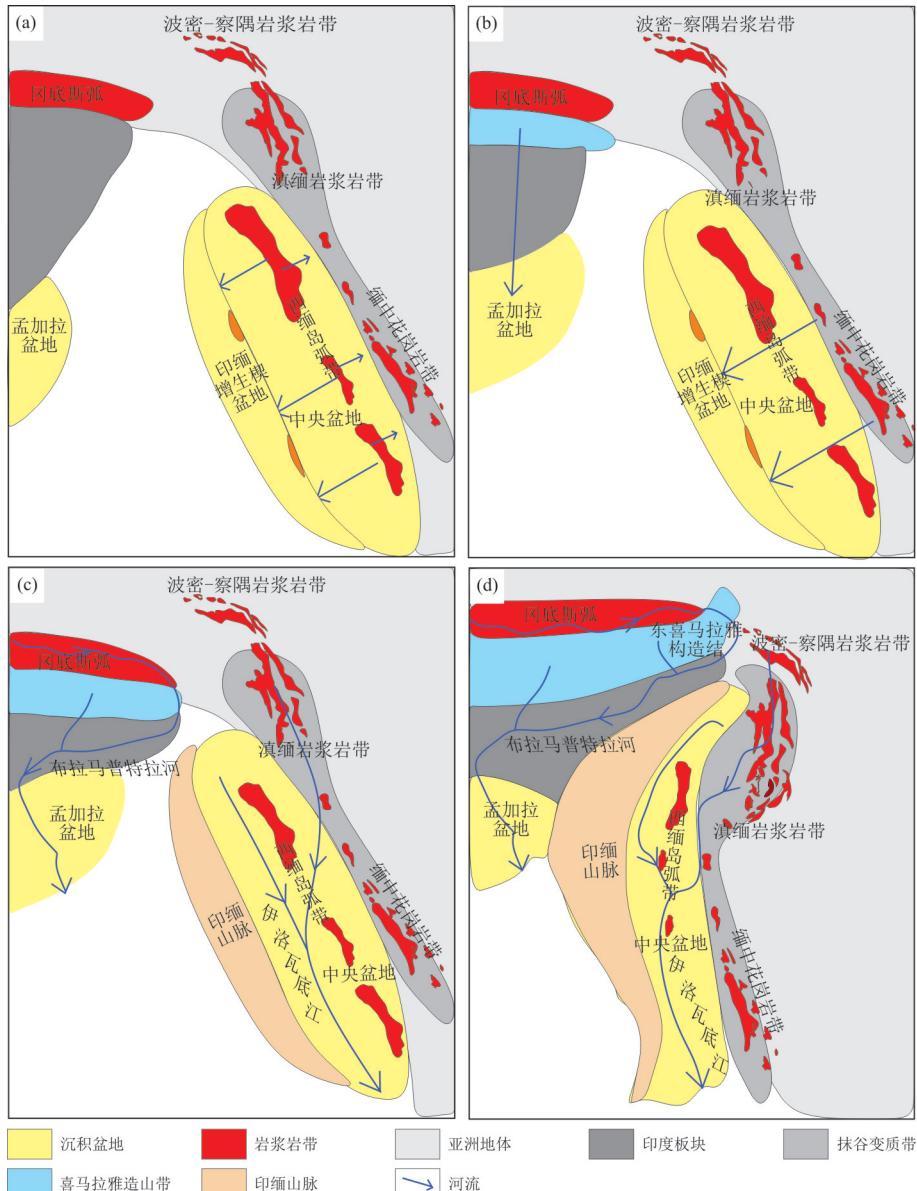


图 7 伊洛瓦底江发育演化过程
Fig.7 Schematic reconstructions for the drainage evolution of the Irrawaddy River

a. 古新世-始新世; b. 早渐新世; c. 晚渐新世-中中新世; d. 晚中新世至今

减小(代表伊洛瓦底江扩展至西藏南部,与雅鲁藏布江连通,冈底斯弧提供大量锆石,喜马拉雅造山带提供十字石+蓝晶石,压制石榴石+绿帘石+角闪石组合比例),再增大(指示雅鲁藏布江与布拉马普特拉河连接,伊洛瓦底江与雅鲁藏布江断开连接,失去冈底斯弧源区).本文中观察到的石榴石+绿帘石+角闪石组合逐渐增大的现象,与以上假设相矛盾,表明渐新世-早中新世不存在伊洛瓦底江-雅鲁藏布江的连接可能性.

锆石年龄谱显示渐新统后,钦敦坳陷、沙林坳陷以及睡宝坳陷谱系特征趋于一致,都以 40~

70 Ma 为主峰、以 80~110 Ma 为次峰,代表源区由中央盆地周缘隆起向抹谷变质带转变,稳定均匀的伊洛瓦底江开始形成.此外,本研究的和已发表的锆石数据都不存在明显的 1 800 Ma 的喜马拉雅特征峰值,晚渐新世后沙林坳陷出现的 200~300 Ma、450~750 Ma 和 900~1 200 Ma 次峰与印缅山脉三叠纪浊积岩特征一致,表明晚渐新世后印缅山脉隆起.

对布拉马普特拉河的研究已经证明,雅鲁藏布江-布拉马普特拉河体系于早中新世晚期(约 18 Ma)形成(Blum *et al.*, 2018),因此雅鲁藏布

江与伊洛瓦底江在早中新世晚期以后不可能相连。综合来看,古新世-中中新世东喜马拉雅构造结未曾快速隆升剥蚀,新生代雅鲁藏布江与伊洛瓦底江连接的模型并不成立。受控于印度大陆及东喜马拉雅构造结相对于中缅马苏地块向北的快速迁移,~30 Ma以后,抹谷变质带开始自南向北穿时冷却、隆升(Bertrand *et al.*, 2001),本研究认为伊洛瓦底盆地物源转换和贯穿伊洛瓦底盆地的古伊洛瓦底江的发育响应于抹谷变质带的抬升、剥蚀。伊洛瓦底江形成于早渐新世,晚渐新世后向抹谷变质带北段不断溯源侵蚀,中中新世到达抹谷变质带北部(图7)。

4.3 晚中新世以来:东喜马拉雅构造结快速隆升剥蚀,伊洛瓦底江扩展至现今规模

上中新统-更新统,中央盆地源自区域变质岩的石榴石+角闪石+绿帘石组合比例达到97%,与现代伊洛瓦底江重矿物组合无异,表现出抹谷变质带物源占绝对主导地位;喜马拉雅造山带起源的蓝晶石、十字石开始出现(图6),表明东喜马拉雅构造结碎屑物质开始影响中央盆地;锆石年龄谱出现较明显的110~130 Ma峰值,表明此时受到滇缅岩浆岩带北部和波密-察隅岩浆岩带影响。从以上证据来看,晚中新世-更新世,青藏东南缘快速抬升,东喜马拉雅构造结也开始加速隆升剥蚀;在此影响下,伊洛瓦底江继续向北/西北溯源侵蚀,扩展至波密-察隅岩浆岩带(东喜马拉雅构造结边缘),达到现今流域构型(图7)。

5 结论

采用重矿物组合分析与锆石U-Pb年代学相结合的方法,对缅甸中央盆地新生代地层的“源-汇”路径进行研究,发现新生代不存在雅鲁藏布江-伊洛瓦底江连接的可能性,东喜马拉雅构造结于晚中新世以后快速隆升剥蚀。始新世,中央盆地各坳陷之间锆石年龄谱显示出较为明显的差异,沙林坳陷铬尖晶石含量达到57%,指示中央盆地不存在统一物源,伊洛瓦底江尚未形成,中央盆地受西缅岛弧带以及印缅山脉核部的近源物源控制,由小型河流搬运。早渐新世-中中新世中央盆地源自区域变质岩重矿物组合比例逐渐增加,锆石年龄谱主峰转为40~70 Ma,指示早渐新世后伊洛瓦底江初具雏形,此后不断向抹谷变质带北段溯源侵蚀,沉积物中缺乏代表喜马拉雅造山带的特征重矿物十字

石和蓝晶石组合以及1800 Ma的特征锆石年龄峰值。晚中新世-更新世,东喜马拉雅构造结开始快速隆升剥蚀,伊洛瓦底江扩展至现今位置,达到现代流域构型,带来包括十字石和蓝晶石在内的特征重矿物组合以及1800 Ma的锆石颗粒。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Barley, M. E., Pickard, A. L., Zaw, K., et al., 2003. Jurassic to Miocene Magmatism and Metamorphism in the Mogok Metamorphic Belt and the India-Eurasia Collision in Myanmar. *Tectonics*, 22(3): 1–11. <https://doi.org/10.1029/2002TC001398>
- Bertrand, G., Rangin, C., Maluski, H., et al., 2001. Diachronous Cooling along the Mogok Metamorphic Belt (Shan Scarp, Myanmar): The Trace of the Northward Migration of the Indian Syntaxis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(5): 649–659. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(00\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00061-4)
- Blum, M., Rogers, K., Gleason, J., et al., 2018. Allogenic and Autogenic Signals in the Stratigraphic Record of the Deep-Sea Bengal Fan. *Scientific Reports*, 8(1): 1–13. <https://doi.org/10.1038/S41598-018-25819-5>
- Brookfield, M. E., 1998. The Evolution of the Great River Systems of Southern Asia during the Cenozoic India-Asia Collision: Rivers Draining Southwards. *Geomorphology*, 22(3–4): 285–312. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00082-2)
- Cai, F. L., Ding, L., Yao, W., et al., 2017. Provenance and Tectonic Evolution of Lower Paleozoic-Upper Mesozoic Strata from Sibumasu Terrane, Myanmar. *Gondwana Research*, 41: 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.03.005>
- Chen, W. H., Yan, Y., Clift, P. D., et al., 2020. Drainage Evolution and Exhumation History of the Eastern Himalaya: Insights from the Nicobar Fan, Northeastern Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 548: 116472. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116472>
- Chiu, H. Y., Chung, S. L., Wu, F. Y., et al., 2009. Zircon U-Pb and Hf Isotopic Constraints from Eastern Transhimalayan Batholiths on the Precollisional Magmatic and Tectonic Evolution in Southern Tibet. *Tectonophysics*, 477(1–2): 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.034>

- Chu, M. F., Chung, S. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2011. India's Hidden Inputs to Tibetan Orogeny Revealed by Hf Isotopes of Transhimalayan Zircons and Host Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(3–4): 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.05.020>
- Clark, M. K., Schoenbohm, L. M., Royden, L. H., et al., 2004. Surface Uplift, Tectonics, and Erosion of Eastern Tibet from Large-Scale Drainage Patterns. *Tectonics*, 23(1): TC1006. <https://doi.org/10.1029/2002TC001402>
- Compston, W., Williams, I. S., Kirschvink, J. L., et al., 1992. Zircon U-Pb Ages for the Early Cambrian Time-Scale. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171–184. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.149.2.0171>
- DeCelles, P. G., Gehrels, G. E., Najman, Y., et al., 2004. Detrital Geochronology and Geochemistry of Cretaceous-Early Miocene Strata of Nepal: Implications for Timing and Diachroneity of Initial Himalayan Orogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 227(3–4): 313–330. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.08.019>
- Gardiner, N. J., Robb, L. J., Searle, M. P., et al., 2017. The Bawdwin Mine, Myanmar: A Review of Its Geological Setting and Genesis. *Geological Society London Memoirs*, 48(1): 669–686. <https://doi.org/10.1144/M48.30>
- Gardiner, N. J., Searle, M. P., Morley, C. K., et al., 2018. The Crustal Architecture of Myanmar Imaged through Zircon U-Pb, Lu-Hf and O Isotopes: Tectonic and Metallogenic Implications. *Gondwana Research*, 62: 27–60. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.02.008>
- Garzanti, E., Wang, J. G., Vezzoli, G., et al., 2016. Tracing Provenance and Sediment Fluxes in the Irrawaddy River Basin (Myanmar). *Chemical Geology*, 440: 73–90. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.010>
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2009. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of the Gangdese Batholith, Southern Tibet. *Chemical Geology*, 262(3–4): 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.01.020>
- Li, X. Q., Ding, H. K., Peng, P., et al., 2021. Provenance of Silurian Kepingtage Formation in Tazhong Area, Tarim Basin: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Earth Science*, 46(8): 2819–2831 (in Chinese with English abstract).
- Licht, A., Dupont-Nivet, G., Win, Z., et al., 2019. Paleogene Evolution of the Burmese Forearc Basin and Implications for the History of India-Asia Convergence. *GSA Bulletin*, 131(5–6): 730–748. <https://doi.org/10.1130/B35002.1>
- Licht, A., Reisberg, L., France-Lanord, C., et al., 2016. Cenozoic Evolution of the Central Myanmar Drainage System: Insights from Sediment Provenance in the Minbu Sub-Basin. *Basin Research*, 28(2): 237–251. <https://doi.org/10.1111/bre.12108>
- Liu, C. Z., Chung, S. L., Wu, F. Y., et al., 2016. Tethyan Suturing in Southeast Asia: Zircon U-Pb and Hf-O Isotopic Constraints from Myanmar Ophiolites. *Geology*, 44(4): 311–314. <https://doi.org/10.1130/G37342.1>
- 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>
- Metcalfe, I., 2011. Tectonic Framework and Phanerozoic Evolution of Sundaland. *Gondwana Research*, 19(1): 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.02.016>
- Mitchell, A. H. G., 1993. Cretaceous-Cenozoic Tectonic Events in the Western Myanmar (Burma)-Assam Region. *Journal of the Geological Society*, 150(6): 1089–1102. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.6.1089>
- Mitchell, A. H. G., Chung, S. L., Oo, T., et al., 2012. Zircon U-Pb Ages in Myanmar: Magmatic-Metamorphic Events and the Closure of a Neo-Tethys Ocean? *Journal of Asian Earth Sciences*, 56: 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.04.019>
- Naing, T. T., Bussien, D. A., Winkler, W. H., et al., 2013. Provenance Study on Eocene-Miocene Sandstones of the Rakhine Coastal Belt, Indo-Burman Ranges of Myanmar: Geodynamic Implications. *Geological Society, London, Special Publications*, 386(1): 195–216. <https://doi.org/10.1144/SP386.10>
- Najman, Y., Bickle, M., BouDagher-Fadel, M., et al., 2008. The Paleogene Record of Himalayan Erosion: Bengal Basin, Bangladesh. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.04.028>
- Orme, D. A., Carrapa, B., Kapp, P., 2015. Sedimentology, Provenance and Geochronology of the Upper Cretaceous-Lower Eocene Western Xigaze Forearc Basin, Southern Tibet. *Basin Research*, 27(4): 387–411. <https://doi.org/10.1111/bre.12080>
- Rangin, C., Maurin, T., Masson, F., 2013. Combined Effects of Eurasia/Sunda Oblique Convergence and East-Tibetan Crustal Flow on the Active Tectonics of Burma. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.05.018>

- Ravikant, V., Wu, F. Y., Ji, W. Q., 2011. U-Pb Age and Hf Isotopic Constraints of Detrital Zircons from the Himalayan Foreland Subbasin on the Tertiary Palaeogeography of the Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 304(3–4): 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.009>
- Robinson, R. A. J., Brezina, C. A., Parrish, R. R., et al., 2014. Large Rivers and Orogenes: The Evolution of the Yarlung Tsangpo-Irrawaddy System and the Eastern Himalayan Syntaxis. *Gondwana Research*, 26(1): 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.002>
- Searle, M. P., Noble, S. R., Cottle, J. M., et al., 2007. Tectonic Evolution of the Mogok Metamorphic Belt, Burma (Myanmar) Constrained by U-Th-Pb Dating of Metamorphic and Magmatic Rocks. *Tectonics*, 26(3): TC3014. <https://doi.org/10.1029/2006TC002083>
- Sevastjanova, I., Hall, R., Rittner, M., et al., 2016. Myanmar and Asia United, Australia Left behind Long Ago. *Gondwana Research*, 32: 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.02.001>
- Tun, S. T., Watkinson, I. M., 2017. The Sagaing Fault, Myanmar. *Geological Society London Memoirs*, 48(1): 413–441. <https://doi.org/10.1144/M48.19>
- Van Hattum, M. W. A., Hall, R., Pickard, A. L., et al., 2013. Provenance and Geochronology of Cenozoic Sandstones of Northern Borneo. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 266–282. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.02.033>
- Wang, J. G., Wu, F. Y., Tan, X. C., et al., 2014. Magmatic Evolution of the Western Myanmar Arc Documented by U-Pb and Hf Isotopes in Detrital Zircon. *Tectonophysics*, 612–613: 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.039>
- Wen, D. R., Liu, D. Y., Chung, S. L., et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the Gangdese Batholith and Implications for Neotethyan Subduction in Southern Tibet. *Chemical Geology*, 252(3–4): 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.03.003>
- Xie, J. C., Zhu, D. C., Dong, G. C., et al., 2016. Linking the Tengchong Terrane in SW Yunnan with the Lhasa Terrane in Southern Tibet through Magmatic Correlation. *Gondwana Research*, 39: 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.02.007>
- Yao, W., Ding, L., Cai, F. L., et al., 2017. Origin and Tectonic Evolution of Upper Triassic Turbidites in the Indo-Burman Ranges, West Myanmar. *Tectonophysics*, 721: 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.09.016>
- Zeng, Q. G., Wang, B. D., Xiluo, L. J., et al., 2020. Suture Zones in Tibetan and Tethys Evolution. *Earth Science*, 45(8): 2735–2763 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Yin, A., Liu, W. C., et al., 2012. Coupled U-Pb Dating and Hf Isotopic Analysis of Detrital Zircon of Modern River Sand from the Yalu River (Yarlung Tsangpo) Drainage System in Southern Tibet: Constraints on the Transport Processes and Evolution of Himalayan Rivers. *Geological Society of America Bulletin*, 124(9–10): 1449–1473. <https://doi.org/10.1130/B30592.1>
- Zhang, P., Mei, L. F., Hu, X. L., et al., 2017. Structures, Uplift, and Magmatism of the Western Myanmar Arc: Constraints to Mid-Cretaceous-Paleogene Tectonic Evolution of the Western Myanmar Continental Margin. *Gondwana Research*, 52: 18–38. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.09.002>
- Zhang, P., Najman, Y., Mei, L. F., et al., 2019. Palaeodrainage Evolution of the Large Rivers of East Asia, and Himalayan-Tibet Tectonics. *Earth-Science Reviews*, 192: 601–630. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.003>
- Zhao, X. C., Liu, C. Y., Wang, J. Q., et al., 2020. Provenance Analyses of Lower Cretaceous Strata in the Liupanshan Basin: From Paleocurrents Indicators, Conglomerate Clast Compositions, and Zircon U-Pb Geochronology. *Journal of Earth Science*, 31(4): 757–771. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1324-8>

附中文参考文献

- 李祥权, 丁洪坤, 彭鹏, 等, 2021. 塔里木盆地塔中志留系柯坪塔格组物源示踪:碎屑锆石U-Pb年代学证据. 地球科学, 46(8): 2819–2831.
- 曾庆高, 王保弟, 西洛郎杰, 等, 2020. 西藏的缝合带与特提斯演化. 地球科学, 45(8): 2735–2763.