

滇西保山地块早古生代碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素研究及其对冈瓦纳大陆重建的制约*

周美玲^{1,2} 夏小平^{1**} 彭头平^{1,3} 徐健^{1,2} 马鹏飞^{1,2}

ZHOU MeiLing^{1,2}, XIA XiaoPing^{1**}, PENG TouPing^{1,3}, Xu Jian^{1,2} and MA PengFei^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2019-06-01 收稿, 2019-11-29 改回.

Zhou ML, Xia XP, Peng TP, Xu Jian and Ma PF. 2020. Detrital zircon U-Pb-Hf isotope studies for the Paleozoic sandstones from the Baoshan Block, western Yunnan, and their constraints on the Gondwana continental reconstruction. *Acta Petrologica Sinica*, 36(2):469–483, doi:10.18654/1000-0569/2020.02.09

Abstract The Paleozoic Gongyanghe and Mengdingjie groups, outcropped in the west and east of the Baoshan Block, respectively, in the western Yunnan, are the key for understanding the paleogeography of the Early Paleozoic Gondwana. In this study, we conducted U-Pb dating and Lu-Hf isotope analysis for detrital zircon grains from sandstone and metasandstone samples from the Gongyanghe and Mengdingjie groups. The ages of detrital zircons from the Gongyanghe Group in western Baoshan Block range from 3862Ma to 533Ma with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values from -37.8 to $+11.0$. The minimum age peak is at 549~533Ma, indicating that the maximum sedimentary age of this group is no early than the early Early Cambrian. So, we infer that the Gongyanghe Group is of the Cambrian in depositional age. The ages of detrital zircons from the Mengdingjie Group in the eastern part of Baoshan Block range from 3097Ma to 542Ma with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value from -39.5 to $+10.5$. The minimum age peak period (at 576~458 Ma) constraints the sedimentary age of the Mengdingjie Group to no early than the Late Ordovician. In combination with the detrital zircon data from other Paleozoic strata in the Baoshan Block, we suggest that the block was located in the northern margin of Gondwana in the Paleozoic and the sedimentary detritus mainly came from India. However, the presence of a minor age peak of $\sim 1.17\text{Ga}$ for those detrital zircons from the Mengdingjie Group suggests that the eastern part of the Baoshan Block may have received a certain percentage of sediment detritus from Western Australia. These results indicate that the location of the Baoshan Block in the reconstruction of the Gondwana should be close to the Indian mainland, while its eastern margin is possibly adjacent to Australia.

Key words Baoshan Block; Gongyanghe Group; Mengdingjie Group; Detrital zircon U-Pb-Hf isotope; Gondwana reconstruction

摘要 滇西地区出露的古生界公养河群和孟定街群分别位于保山地块的西部和东部,其沉积时代、构造归属、碎屑物质来源及在早古生代冈瓦纳大陆重建中的古地理位置具有重要研究意义。本文对公养河群2个砂岩样品和孟定街群的4个变质砂岩样品的碎屑锆石进行U-Pb定年和Lu-Hf同位素分析。其中,公养河群的碎屑锆石年龄谱范围是3862~533Ma, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的范围是 $-37.8 \sim +11.0$,最小年龄峰期为549~533Ma,表明该群的最大沉积年龄为早寒武世早期,该群可能为寒武系地层。孟定街群的碎屑锆石年龄谱范围是3097~542Ma, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的范围是 $-39.5 \sim +10.5$,其最小年龄峰期(576~458Ma)将该群的沉积下限时代限制在晚奥陶世。结合保山地块的其他古生代地层的碎屑锆石研究,我们认为保山地块在早古生代位

* 本研究受国家重点研发计划专项(2016YFC 0600407)资助。

第一作者简介:周美玲,女,1993年生,硕士生,地球化学专业,E-mail:zhouml1727@163.com

** 通讯作者:夏小平,男,1977年生,博士,研究员,主要从事同位素地球化学研究,E-mail:xpxia@gig.ac.cn

于冈瓦纳大陆北缘,物源主要来自印度大陆,但~1.17Ga年龄峰的出现说明其东部可能接受了一定比例来自西澳大利亚的沉积物质。这一结果表明保山地块在冈瓦纳大陆北缘重建中的位置应该靠近印度大陆,而其东缘接近澳大利亚大陆。

关键词 保山地块;公养河群;孟定街群;碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素;冈瓦纳大陆重建

中图法分类号 P542; P597.3

滇西地区由多个微陆块和多条构造带组成,从东到西包括思茅地块、昌宁-孟连构造带、保山地块、高黎贡韧性剪切带、龙陵-瑞丽断裂带和腾冲地块等(图1),是青藏高原构造带的东南延伸,是东特提斯构造域的重要组成部分(陈福坤等, 2006; 储著银等, 2009; Dong *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2014; 李三忠等, 2016; Xing *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2018)。以昌宁-孟连构造带为界,向西一侧的腾冲、保山地块的早二叠统地层底部均发现了与冰川作用有关的杂砾岩和冷水-冷温水动物群,而冈瓦纳大陆早二叠世早期位于南半球的高纬度地区且被大陆冰川覆盖,表明腾冲、保山地块具有冈瓦纳大陆亲缘性;而向东一侧的思茅地块二叠系地层呈带状的强烈活动沉积与稳定沉积相间展布,前者主要是类复理石或复理石建造,并发育火山岩,后者以碳酸盐岩和砂岩、泥岩为主,这些地层内保存的生物化石类型为具有扬子地块特征的温水动物群(李兴振等, 1990; 云南省地质矿产局, 1990; 邢晓婉和张玉芝, 2016),被认为具有扬子地块的亲缘性。

保山地块被普遍认为是滇缅泰马(Sibumasu)陆块的向北延伸部分(钟大赉, 1998; 姜朝松等, 2000; Metcalfe, 2013),而滇缅泰陆块寒武纪-下二叠统地层中含有的冈瓦纳特征古动物群化石与西澳大利亚发现的化石类型具有十分显著的相似性,说明滇缅泰马陆块早古生代可能起源于澳大利亚大陆(Metcalfe, 2013),因此保山地块作为滇缅泰陆块的一部分,在早古生代冈瓦纳大陆恢复中一直被认为位于澳大利亚大陆的北缘,陆块呈东西向延伸,经喜山期印度与欧亚大陆碰撞挤压,形成现在的南北走向(Metcalfe, 2013; Zhao *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018)。

沉积岩或变质沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年代学分析是限定地层沉积时代和追溯地体亲缘性的重要手段(Fedo *et al.*, 2003; Andersen, 2005; Leier *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007; Gehrels *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2011; Cawood *et al.*, 2012)。最新的碎屑锆石物源示踪研究表明保山地块早古生代地层如西盟群、勐统群和澜沧群的沉积盆地主要接受了具有印度大陆,而非澳大利亚大陆物源特征的碎屑沉积物(Li *et al.*, 2015; 邢晓婉和张玉芝, 2016; 王舫等, 2017)。邢晓婉和张玉芝(2016)、王舫等(2017)分别对西盟群和澜沧群的变质砂岩和石英岩样品进行碎屑锆石 U-Pb 年代学分析,这些样品的年龄谱中既没有显示扬子地体特有的 870~730Ma 峰期(Duan *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2016, 2018),也没有澳大利亚大陆的~1170Ma 碎屑锆石年龄峰(Veevers *et al.*, 2005),而均显示了 980~910Ma 年龄峰,证明西盟群和澜沧群的物源更有可能是印度大陆。Zhao *et al.* (2017)对

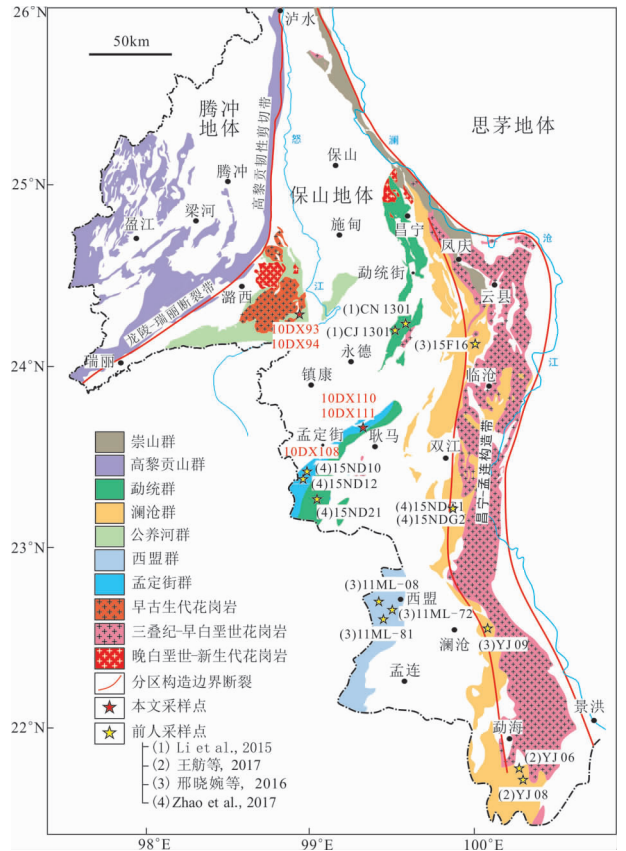


图1 滇西保山地块构造地质简图

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Baoshan Block in western Yunnan Province

勐统群、孟定街群和澜沧群的(变质)沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年代学研究发现,除了~960Ma的主特征峰之外,保山地块早古生代地层还显示了一期 1200~1060Ma 的明显峰期年龄,由此推测保山地块沉积盆地的沉积物同时具有印度和西澳大利亚的物源特征。因此保山地块在早古生代冈瓦纳大陆中的位置仍未有定论,且相关的碎屑锆石的研究工作集中于东部地层(如澜沧群、西盟群、勐统群等),对位于西部的公养河群的研究较少,其沉积时代仍存在较多争论。耿马地区出露的孟定街群于 2003 年首次从勐统群中解体出来成为新的地层单元(云南省地质调查院, 2003^①),其研究程度较浅,仍需更多的工作对其沉积时代、物源特征等问题进行深入研究。

① 云南省地质调查院. 2003. 1:25万临沧县幅、滚龙幅区域地质调查报告

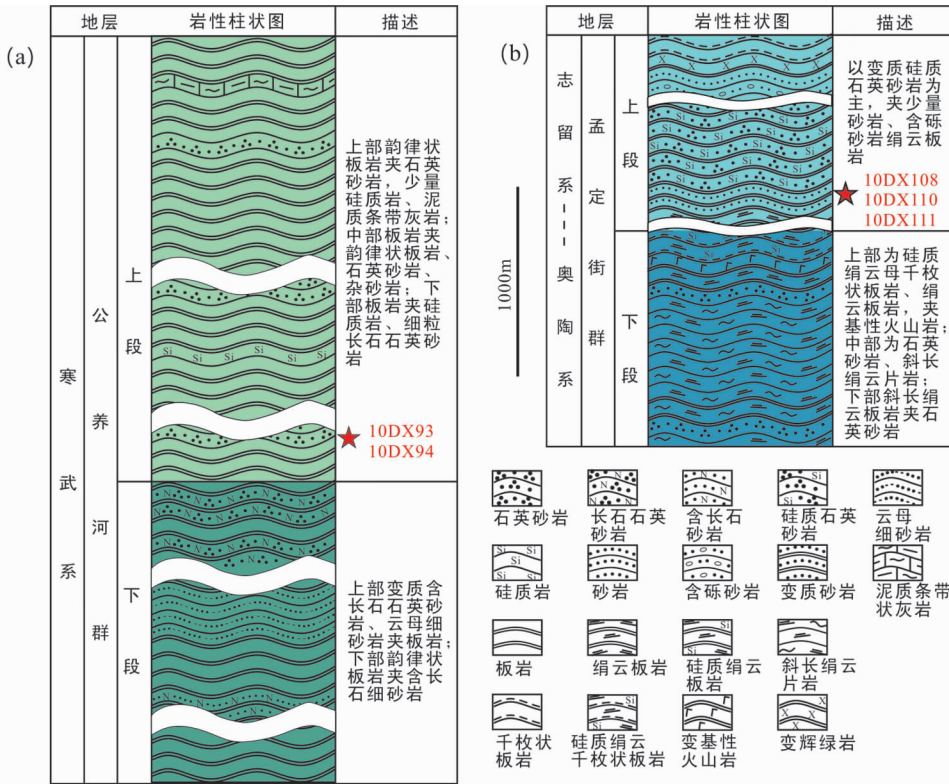


图2 公养河群(a)及孟定街群(b)地层柱状图

Fig. 2 The stratigraphic columns of the Gongyanghe Group (a) and the Mengdingjie Group (b)

本文以保山孟定街群和公养河群的砂岩样品为研究对象进行碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究, 公养河群可以提供西部的早古生代物源信息, 为保山地块的整体认识提供重要证据。我们的研究表明, 保山地块早古生代地层来自印度大陆的碎屑物质占有统治地位, 因此我们认为保山地块在冈瓦纳大陆重建中的位置应该是在印度大陆的北缘, 但是其东侧孟定街群可能也接受了部分来自澳大利亚大陆的碎屑物质, 因此其东侧应该靠近澳大利亚大陆。

1 地质背景和样品

保山地块位于滇西地区昌宁-孟连构造带和龙陵-瑞丽断裂带之间(图1)。保山地块的沉积地层连续性较好, 最古老的地层是出露于该地块西部的龙陵县桃子寨、公养河一带的震旦系-寒武系公养河群, 变质程度普遍较低, 是一套巨厚的、具类复理石韵律的浊流至半深海相沉积, 由浅变质的砂岩和泥板岩组成, 夹少量灰岩和硅质岩, 少见生物化石。该群可分为上段和下段, 其上段分为三部分(图2a), 上部含有韵律状板岩夹石英砂岩, 具有少量硅质岩和泥质条带灰岩; 中部为板岩夹韵律状板岩、石英砂岩及杂砂岩; 下部是板岩夹硅质岩和细粒的长石石英砂岩。其下段分为两部分, 上部为变质含长石石英砂岩、云母细砂岩夹板岩; 下部为韵律状板岩夹含长石细砂岩。公养河群顶部含化石, 在平达街剖

面可见含海绵骨针 *Protospongia* sp., 在酒房街一带可获得微古生物 *Asperatopsophosphaera bawlensis*、*Baltisphaeridium* 和 *Lophosphaeridium* 等, 与其上覆的含晚寒武世三叶虫的上寒武统核桃坪组为整合接触关系。

前寒武纪-早古生代变质地层还包括澜沧群、西盟群、勐统群和孟定街群, 其中澜沧群位于云县-勐海一带, 紧邻二叠纪澜沧花岗岩基, 呈南北向展布, 其主体为一套中元古界-奥陶系低绿片岩相变质沉积岩和基性火山岩, 其原岩是一套浅海陆缘环境下沉积的粉砂质泥岩和长石石英砂岩等, 并伴有火山活动(云南省地质矿产局, 1990; 翟民国等, 1990; 钟大赉, 1998; 王舫等, 2017; 毕丽莎等, 2018)。西盟群位于澜沧江深断裂、柯街断裂及南汀河断裂之间, 是一套连续的火山碎屑、陆源碎屑和碳酸盐岩, 厚度 > 1200m, 与周围古生代浅变质岩系之间呈断层接触, 其变质程度较高, 古生物化石较少(云南省地质矿产局, 1990; 邢晓婉和张玉芝, 2016)。勐统群出露于昌宁、耿马一带, 为一套轻变质的类复理石建造, 厚度大于 3000m, 其岩石组成为千枚岩、板岩、结晶灰岩和绢云母石英片岩, 并含有变质长英质-镁铁质火山岩(云南省地质矿产局, 1990)。

2003年1:250000 滚龙幅和临沧幅区域地质调查(云南省地质调查院, 2003)首次将孟定街群从原来的“勐统群”中解体出来, 成为新的地层单位。该群以变质程度较低的变质砂岩、杂砂岩和千枚状板岩及板岩为主, 夹硅质岩、碳酸盐岩

及基性火山岩(毛晓长, 2016)。按其岩石组合可以划分为两段: 上段以变质石英砂岩为主, 夹少量砂岩、含砾砂岩和绢云母板岩; 下段的上部为硅质绢云母千枚状板岩和绢云母板岩, 并夹基性火山岩, 中部以斜长绢云片岩和石英砂岩为主, 下部为斜长绢云母板岩, 夹石英砂岩(图 2b)。毛晓长(2016)根据南望河剖面的古生物化石资料将孟定街群划分为奥陶-志留系地层。其上部砂岩碎屑锆石中的最小谐和年龄 482Ma, 暗示孟定街群的最大沉积年龄可能是早奥陶世(Zhao *et al.*, 2017)。

保山地块晚寒武世-中侏罗世逐渐转变为以浅海碎屑岩和碳酸盐岩沉积为主, 晚寒武世-中奥陶世发生了明显的差异抬升, 西部隆起较早, 龙陵一带缺失晚寒武世-早奥陶世沉积, 而东部施甸区仅缺失早奥陶世沉积。奥陶纪至泥盆纪, 保山地块西部发育粗碎屑和镁质碳酸盐岩, 东部发育潮坪-浅海相泥岩、粉砂岩、砂岩和石英砂岩等, 含丰富的生物化石, 由西向东水体逐渐变深(毛晓长, 2016)。缺失中石炭统、上二叠统和下三叠统, 在石炭系的顶部出现含冰川漂砾的碎屑岩, 并有玄武岩、安山玄武岩的喷溢。中生界地层超覆不整合于不同时代的老地层之上, 以碎屑岩沉积为主, 夹中基性和中酸性火山岩, 东、西两侧的顶部发育红色磨拉石。新生界地层为上新统砂砾岩和含煤碎屑岩。

本文样品采自保山地块西部的公养河群的上段和东部的孟定街群的上段, 共 6 件沉积岩样品。其中, 公养河群的 10DX93A 和 10DX94 样品为石英砂岩, 呈灰色块状构造, 主要矿物为次棱角状石英, 含少量黑云母, 局部矿物颗粒间隙内填充黏土矿物(图 3)。孟定街群的 4 个变质石英砂岩样品(10DX108、10DX110B、10DX111B 和 10DX111F)的主要矿物为次棱角状石英、少量黑云母和黏土矿物, 层理清晰, 并有与层理平行的暗色条带。采样位置见图 1 和图 2。

2 分析方法

野外采集的新鲜岩石样品在河北廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司进行碎屑锆石分选, 每个样品分选出的锆石均多于 2000 粒, 然后在北京锆年领航科技有限公司进行制靶并拍摄 CL 图像。在双目镜下随机挑选 200 粒晶形完好、透明干净、裂隙少的锆石颗粒, 用双面胶将锆石固定在玻璃板上, 用环氧树脂填充固结制成锆石靶, 并进行抛光、镀膜。随后使用扫描电镜进行锆石阴极发光图像(CL)分析, 揭示锆石的内部形态结构, 并以此为选择分析点的依据, 选点时避开破裂或者含有包裹体等可能影响测试结果的位置。碎屑锆石的 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的激光剥蚀-多接收电感耦合离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)仪器上完成。该仪器配备了美国 Resonetics 公司生产的 RESOLUTION M-50 193nm 激光剥蚀系统和 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪。激光剥蚀以 He 作为载气, 束斑

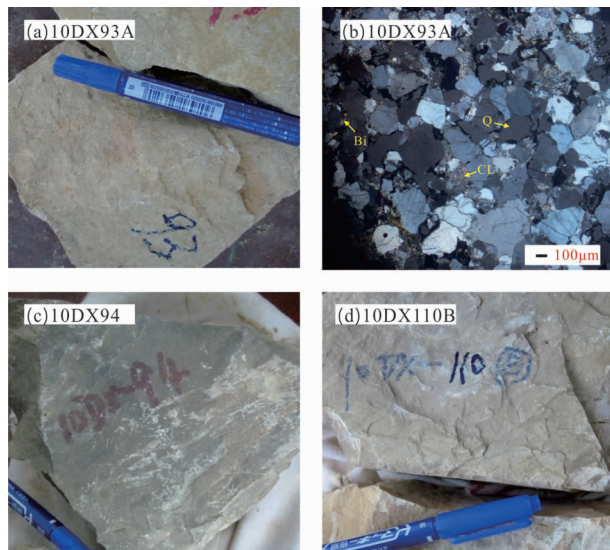


图 3 滇西保山地块部分公养河群和孟定街群样品

Q-石英; Bi-黑云母; CL-黏土矿物

Fig. 3 Samples from the Gongyanghe and Mengdingjie groups in the Baoshan Block

Q-quartz; Bi-biotite; CL-clay mineral

为 24 μm 或 44 μm , 脉冲频率为 4 ~ 5Hz, 脉冲能量为 80mJ/cm², 每个分析点的气体背景采集时间为 30s, 信号采集时间为 30s。

锆石 U-Pb 定年采用国际标样 91500 (Wiedenbeck *et al.*, 1995) 进行 U-Th-Pb 比值和 U 含量分馏校正, 每隔 10 个样品点测定两次标样, 保证样品和标样的测试条件一致。锆石 Plesovice (Sláma *et al.*, 2008) 被用作监控标样, 所有标样测定的年龄值均在其推荐的 3% 以内, 分析及计算的误差均为 1 σ 。

锆石 Lu-Hf 同位素分析采用 ¹⁷⁵Lu/¹⁷⁶Lu = 0.02655 和 ¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb = 0.7963 (Vervoort *et al.*, 2004) 进行干扰校正, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 的比值用 ¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf = 0.7325 进行校正。用标准锆石 Penglai (Li *et al.*, 2010) 与样品交叉分析, 每隔 8 个样品测试点测定两次 Penglai, 以监控分析流程的可靠性, 标样的测试结果在其推荐的 $\pm 1.5\epsilon_{\text{Hf}}$ 之内。计算初始 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 采用 ¹⁷⁶Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Scherer *et al.*, 2001), 计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值所使用的球粒陨石标准值为 Bouvier *et al.* (2008) 报道的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282785 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0336。锆石单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 采用现今亏损地幔值 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf (0.0384) 和 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf (0.28325) (Griffin *et al.*, 2000) 进行计算, 两阶段模式年龄 (t_{DM2}) 使用平均大陆地壳的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.015 (Griffin *et al.*, 2000)。

3 分析结果

本文样品的 U-Pb 和 Hf 同位素测试结果分别见电子版

表 1 滇西保山地块碎屑锆石研究的数据汇总

Table 1 Summary of data on detrital zircons of the Baoshan Block

样品号	GPS	岩性	地层	年龄 (Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	参考文献
10DX93A	N24°18. 18', E98°56. 42'	砂岩	公养河群	3522 ~ 541	-22. 6 ~ +11. 0	本文
10DX94	N24°18. 18', E98°56. 42'	砂岩	公养河群	3863 ~ 533	-37. 8 ~ +6. 1	本文
15NDG1		变质砂岩	澜沧群	2543 ~ 494	-22. 97 ~ +9. 35	Zhao <i>et al.</i> (2017)
15NDG2		变质砂岩	澜沧群	2809 ~ 504		Zhao <i>et al.</i> (2017)
15F16		石英岩	澜沧群	2794 ~ 475		王舫等(2017)
YJ06		石英岩	澜沧群	3446 ~ 418		王舫等(2017)
YJ08		石英岩	澜沧群	3433 ~ 509		王舫等(2017)
YJ09		石英砂岩	澜沧群	3401 ~ 508		王舫等(2017)
11ML-72	N22°40. 56', E99°29. 01'	变质砂岩	西盟群	2755 ~ 529	-21. 28 ~ +7. 57	邢晓婉和张玉芝(2016)
11ML-80	N22°43. 79', E99°24. 96'	变质砂岩	西盟群	2440 ~ 531	-19. 85 ~ +7. 21	邢晓婉和张玉芝(2016)
11ML-81	N22°37. 28', E99°26. 48'	变质砂岩	西盟群	3311 ~ 514		邢晓婉和张玉芝(2016)
CJ1301		粉砂岩	勐统群	3134 ~ 563	-37. 21 ~ +3. 51	Li <i>et al.</i> (2015)
CN1301		粉砂岩	勐统群	3517 ~ 568	-15. 0 ~ +5. 1	Li <i>et al.</i> (2015)
15NDG21		石英片岩	勐统群	3744 ~ 487	-13. 07 ~ +8. 56	Zhao <i>et al.</i> (2017)
10DX108	N23°30. 90', E99°07. 97'	变质砂岩	孟定街群	2800 ~ 468	-13. 2 ~ +9. 3	本文
10DX110B	N23°39. 02', E99°19. 26'	变质砂岩	孟定街群	3097 ~ 547	-39. 5 ~ +10. 5	本文
10DX111B	N23°39. 18', E99°19. 88'	变质砂岩	孟定街群	2519 ~ 458	-34. 0 ~ +8. 2	本文
10DX111F	N23°39. 18', E99°19. 89'	变质砂岩	孟定街群	2848 ~ 543	-28. 5 ~ +10. 5	本文
15NDG10		砂岩	孟定街群	3058 ~ 482		Zhao <i>et al.</i> (2017)
15NDG12		砂岩	孟定街群	2870 ~ 528		Zhao <i>et al.</i> (2017)

附表 1 和附表 2。因为 ^{207}Pb 和 ^{206}Pb 化学性质极相似,丢失率较一致,因此对于放射成因 Pb 积累较多的古老锆石(多存在不同程度的 Pb 丢失) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄更为可靠。在实际分析测试中 ^{207}Pb 的分析精度较差,而年轻矿物颗粒中 ^{206}Pb 含量远远多于 ^{207}Pb 含量会造成 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 相当大的分析误差,且年轻锆石遭受 Pb 丢失的可能性比较小,故而年轻锆石使用更加可靠的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。Spencer *et al.* (2016)收集了~38000个 LA-ICP-MS (Voice *et al.*, 2011)和约 5000个 SIMS (Wingate *et al.*, 2015)锆石 U-Pb 年龄分析结果,表明使用 1500Ma 作为选择 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄或 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的交叉值更为合适。因此,本文中对于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大于 1500Ma 的老锆石颗粒以 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为准,对于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄小于 1500Ma 的年轻锆石颗粒以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为准。

在碎屑锆石 U-Pb 年龄研究中,通常以谐和年龄数据作为讨论的依据,但对于“谐和”的定义,不同学者往往有不同的标准。通常以 U-Pb 年龄谐和度 70%~95%作为最低谐和度,其中谐和度大于 90%是最常见的标准,这取决于不同的数据的处理技术和对数据可靠度的要求。如使用精度较差的定年仪器,如四级杆等电感耦合离子体质谱(Quadrupole ICP-MS),更容易获得谐和度高的数据 (Spencer *et al.*, 2016),这种对谐和度选择的任意性将会对数据的解释造成显著的不确定性。本文采用 Spencer *et al.* (2016)推荐的一个更为严苛的方法,其原则是较大限度的减少 Pb 丢失造成的误差对碎屑锆石 U-Pb 年龄数据解释的影响。该方法是

以 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为横坐标,以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为纵坐标,做碎屑锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图解。在该图解中,1:1线表示 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄完全吻合,样品不存在 Pb 丢失。当测试点的误差椭圆与 1:1线相交,表示其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在误差范围内吻合,样品 Pb 丢失程度较小,该结果视为“谐和年龄”,否则视为“不谐和年龄”,不谐和年龄不在本文讨论范围之内。本文的样品数据中所有按此规则认定的“谐和年龄”的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄接近程度(即一般所谓的谐和度)均大于 93%。所有颗粒的 Th/U 值均大于 0.1,阴极发光图像均显示其具有明显的环带状,可以确认它们均为岩浆成因锆石 (Hoskin and Schaltegger, 2003)。样品中也可见无岩浆环带的疑似变质锆石,但本文的物源分析中未有采用,一是因为变质锆石数量少,不足以进行统计分析和构筑年龄频谱图,二是因为一般源区的岩浆事件更具有容易区别的年龄谱。

本文中使用了 Isoplot R 软件 (Vermeesch, 2018)绘制碎屑锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图解和年龄分布 KD 频谱图 (Vermeesch, 2012; Spencer *et al.*, 2016)。KD 频谱图是指在概率频谱图的基础上,用核密度估计值 (Kernel density estimates, KDE)平滑处理反映密度的曲线。其基本原则是在样品分布的峰值附近使用较窄的频带,并在样品分布稀疏的波谷中使用较宽的频带 (Vermeesch, 2012, 2018),对数据的有效性进行优化。本节参考的所有标准均适用于本文实验所得的数据和本文所引用的文献数据。

3.1 公养河群样品

样品 10DX93A:碎屑锆石颗粒直径范围是 60~130 μm ,

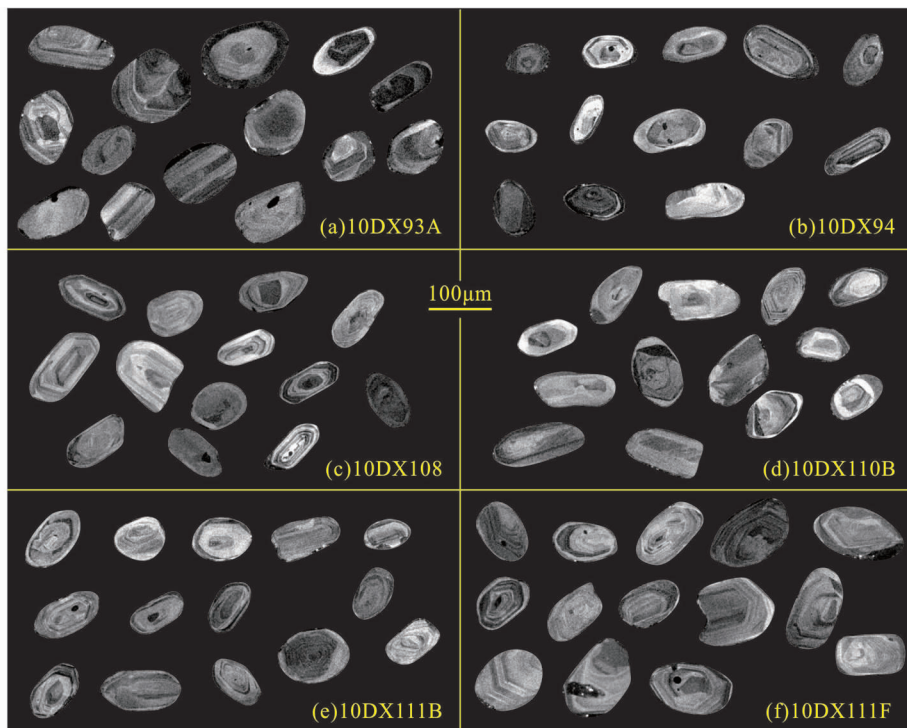


图4 保山地块公养河群和孟定街群碎屑锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images of detrital zircons from the Gongyanghe and Mengdingjie groups in Baoshan Block

颗粒形态呈圆状至次棱角状(图4a),其中古老锆石颗粒的磨圆度较好,可能经历了长距离搬运。该样品共获取了62个碎屑锆石分析点,Th/U值为0.13~1.58,在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图解上共获得56个谐和年龄(图5a),年龄范围为3522~541Ma,KD频谱图显示该样品的主年龄特征峰期为1050~900Ma(峰值为~990Ma),次级峰期年龄有2550~2400Ma(峰值为~2470Ma)和1650~1550Ma(峰值为~1580Ma)(图5b)。该样品年龄谐和锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于-22.6~+11.0之间,单阶段模式年龄(t_{DM1})为4.03~1.13Ga,二阶段模式年龄(t_{DM2})为4.62~1.20Ga。

样品10DX94:碎屑锆石颗粒大小在50~120 μm 之间,其形态呈次圆状至圆状(图4b)。该样品共64个碎屑锆石分析点,Th/U值的范围是0.13~1.45,在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图解上获得61个年龄范围在3863~533Ma的谐和年龄(图5c)。在KD频谱图中,以~990Ma为主年龄特征峰(1050~950Ma峰期),~1860Ma和~2600Ma为次级年龄峰(图5d)。该样品年龄谐和锆石颗粒的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-37.8~+6.1,单阶段模式年龄(t_{DM1})为3.04~0.98Ga,二阶段模式年龄(t_{DM2})为4.26~1.20Ga。

3.2 孟定街群样品

样品10DX108:碎屑锆石颗粒大小为60~150 μm ,呈球状、短柱状或长柱状,磨圆度较好(图4c)。碎屑锆石分析点共计44个,在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图解上仅获得19个

谐和年龄(图6a),其他碎屑锆石可能为经历了Pb丢失事件的变质锆石。谐和年龄的范围在2800~468Ma,Th/U值为0.24~1.48。其中,~520Ma为主年龄特征峰,~960Ma和~2530Ma为次级年龄峰(图6b)。样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-13.2~+9.3,单阶段模式年龄(t_{DM1})为3.14~0.71Ga,二阶段模式年龄(t_{DM2})为3.37~0.86Ga。

样品10DX110B:碎屑锆石颗粒直径范围是60~120 μm ,磨圆度较好(图4d)。在62个碎屑锆石分析点中,有41个年龄值为谐和年龄(图6c),其范围是547~3097Ma,Th/U值为0.11~3.07。大部分锆石U-Pb谐和年龄集中在1150~800Ma范围内,以~1000Ma为主年龄特征峰,少量古老锆石显示为~2430Ma的次级年龄峰(图6d)。样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-39.5~+10.5,单阶段模式年龄(t_{DM1})为3.51~0.92Ga,二阶段模式年龄(t_{DM2})为4.42~1.04Ga。

样品10DX111B:该样品的锆石颗粒大小为70~110 μm ,颗粒形态呈圆状至次棱角状(图4e)。65个碎屑锆石分析点在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图解上共有56个为谐和年龄(图6e),其范围是2519~458Ma,Th/U值在0.11至2.89之间。在年龄分布KD频谱图中显示了~970Ma的主年龄特征峰和~1120Ma的次级年龄峰(图6f)。谐和锆石颗粒的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围是-34.0~+8.2,单阶段模式年龄(t_{DM1})为1.04~3.04Ga,二阶段模式年龄(t_{DM2})为1.19~3.64Ga。

样品10DX111F:碎屑锆石颗粒直径是50~150 μm ,其形态呈半圆状至次棱角状,部分颗粒为长柱状(图4f)。该样品的碎屑锆石分析点共计61个,其中有50个谐和年龄值(图

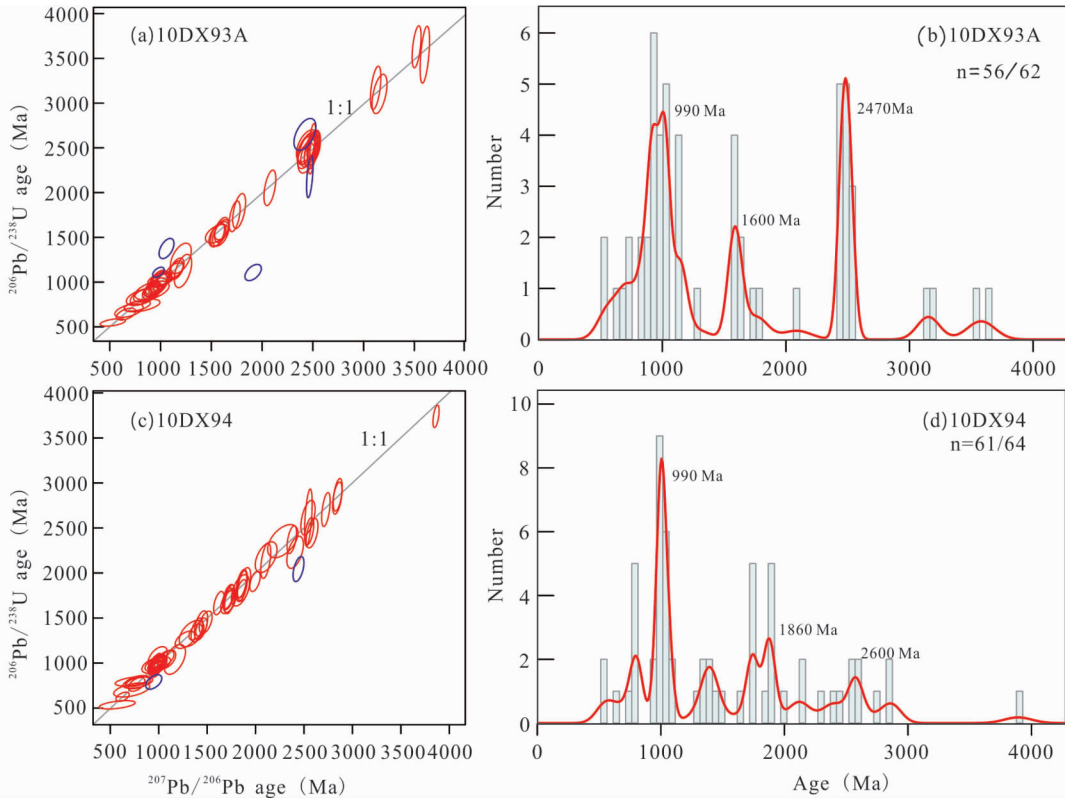


图5 公养河群碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图解(a、c)及年龄频谱图(b、d)

红线:谐和年龄;蓝线:不谐和年龄;n = 谐和年龄个数/总测试点个数

Fig.5 Diagrams of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (a, c) and age spectrum distributions (b, d) of detrital zircons from the Gongyanghe Group

Red line: concordant ages; blue line: discordant ages; n = concordant age number/total analyses number

6g), 范围是 2848 ~ 543Ma, Th/U 值在 0.11 ~ 1.57 之间。在 KD 频谱图中, 该样品的谐和年龄主要分布在 2800 ~ 2550Ma 和 1200 ~ 850Ma 两个峰期, 峰值分别为 ~ 2500Ma 和 ~ 980Ma。部分样品分布在 1700 ~ 1550Ma 峰期内, 对应的次级年龄峰值为 ~ 1660Ma (图 6h)。该样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值是 -28.5 ~ +10.5, 单阶段模式年龄(t_{DM1})为 1.04 ~ 3.44Ga, 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1.14 ~ 4.04Ga。

4 讨论

4.1 地层的沉积时代

4.1.1 公养河群沉积时代限定

公养河群于 1965 年由云南省地质局第一区域地质调查大队首次命名, 最初被认为是一套巨厚的细粒类复理石建造, 与上覆的上寒武统地层为整合接触关系。该群的上段含有丰富的寒武系海绵骨针和三叶虫化石, 但其下段部分藻类化石可与缅甸境内的晚元古代-寒武纪 Chaung Magyi 群对比, 该群不整合于 Mogok 系之上, 并与上覆上寒武统地层呈不整合接触关系, 因而推测滇西公养河群下段属震旦系(云南省地质矿产局, 1990)。曹仁关和陆瑞芳(1991)在公养河

群下段的石英砂岩中发现遗迹化石 *Paracruziana longlingensis* Cao et Lu, 为寒武纪硬壳节肢动物的抓痕, 而震旦纪一般出现软体动物形成的蠕虫痕迹, 所以认为其时代应属早寒武世。但这一结果受到后来的古生物地层研究结果的质疑, 贵州省地质调查院在公养河群的板岩中获得早奥陶世的腕足化石 *Sinorthis cf. typical* Wang 和寒武纪以后的海百合茎化石 *Cyclocyclicus* sp. (黄柏鑫, 2014)。公养河群由于岩性种类较少, 化石稀少, 通过生物层序法目前还未能准确限定其沉积时代。

邦迈地区的蒲满哨群是公养河群的上伏地层, 二者为整合接触关系, 杨学俊等(2012)在蒲满哨群剖面的变质基性火山岩夹层中获得 499.2Ma 的锆石 U-Pb 年龄。而本次研究结果表明, 公养河群样品 10DX93A 和 10DX94 的碎屑锆石年龄谱中, 最小的峰期年龄为 549 ~ 533Ma, 属晚元古代与寒武纪之交。因此, 公养河群的最大沉积年龄为早寒武世早期, 其沉积时代不可能是震旦纪, 而应该在早寒武纪早期至晚寒武世早期之间, 为早古生代寒武系地层。

4.1.2 孟定街群沉积时代限定

毛晓长(2016)在孟定街群南禄河剖面的变质硅质灰岩中发现了中-上志留世的牙形刺 (*Belode-lla cf. resima*、

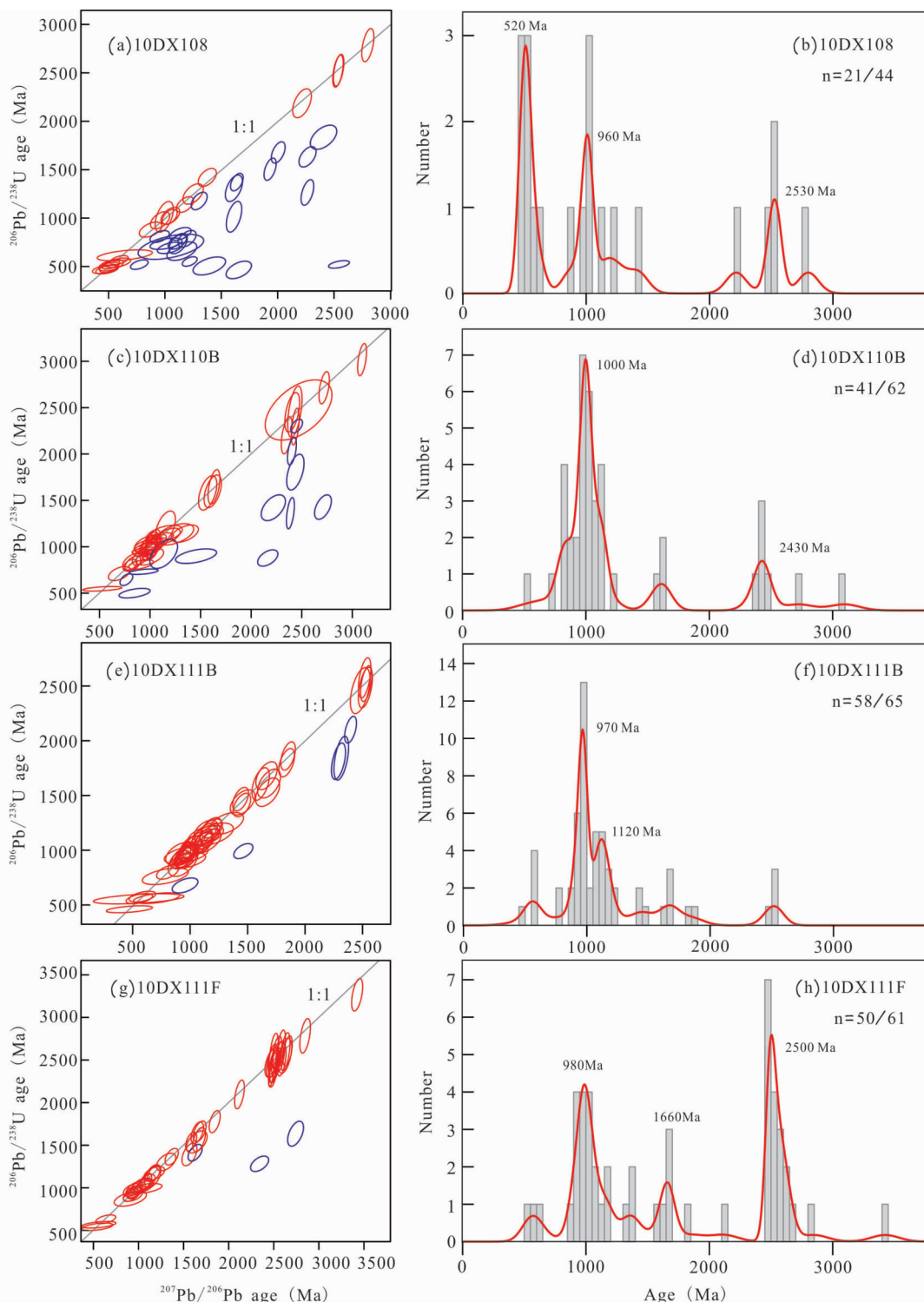


图6 孟定街群碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图解(a、c、e、g)及年龄频谱图(b、d、f、h)

红线: 谐和年龄; 蓝线: 不谐和年龄; n = 谐和年龄个数/总测试点个数

Fig. 6 Diagrams of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (a, c, e, g) and age spectrum distributions (b, d, f, h) of detrital zircons from the Mengdingjie Group

Red line: concordant ages; blue line: discordant ages; n = concordant age number/total analyses number

Panderodus striatus striatus 以及 *Hindeodella equidentata* 等), 并在南望河剖面中获得牙形刺 *Hindeodella* sp. (?), *Gnathodus*

sp. (?) 和 *Ozatkodina* sp. (?), 将孟定街群的沉积时代定为奥陶纪-志留纪。本次研究采集的4个孟定街群变质砂岩样品

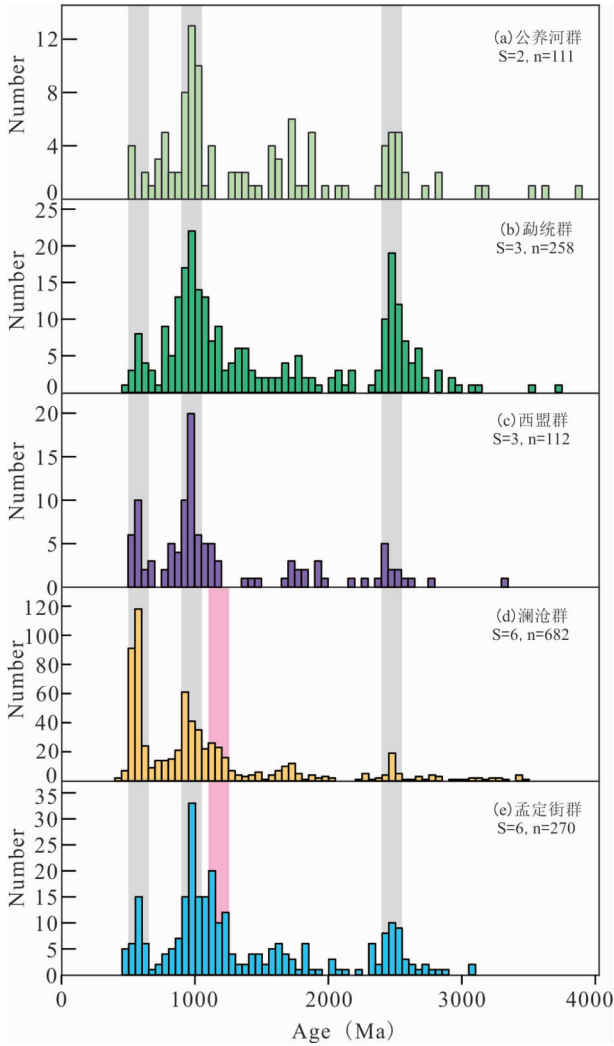


图7 保山地块公养河群(a)、勐统群(b)、西盟群(c)、澜沧群(d)和孟定街群(e)碎屑锆石年龄谱系图

Fig. 7 Relative U-Pb age probability for detrital zircons of the Gongyanghe Group (a), Mengtong Group (b), Ximeng Group (c), Lancang Group (d) and Mengdingjie Group (e) of the Baoshan Block

中碎屑锆石谱和年龄的最小峰期为 576 ~ 458Ma, 表明孟定街群最下限沉积年龄为晚奥陶世。由于该群与二叠系地层断层接触, 与侏罗系地层为不整合接触, 且后期被三叠纪岩浆侵入, 因此孟定街群沉积年龄的上限未能很好限制。孟定街群从勐统群中解体成为新的地层单位时间不过十几年, 截止目前仍缺乏关于该群的岩相学、构造学等各个方面的研究资料, 其沉积时代和构造环境等问题仍有待进一步研究。

4.2 物源分析

保山地块与缅泰马陆块没有明显的构造分界线, 前者一般被认为是后者的向北延伸部分(钟大赉, 1998; 姜朝松等, 2000; Metcalfe, 2013)。缅泰马陆块的寒武纪-早二叠世动物

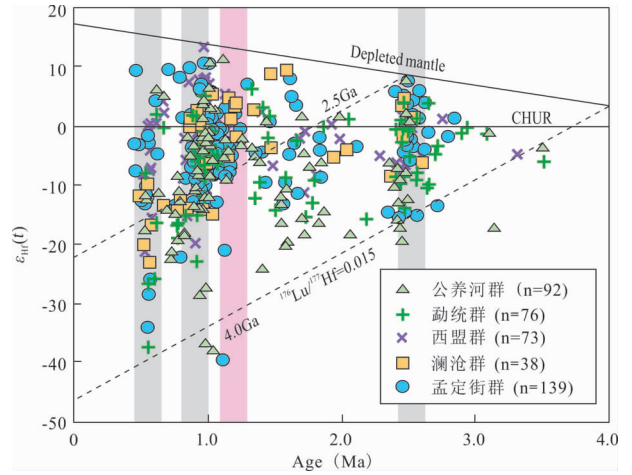


图8 保山地块公养河群、勐统群、西盟群、澜沧群和孟定街群碎屑锆石 Age- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图

Fig. 8 U-Pb age (Ma) vs. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of detrital zircons of the Gongyanghe, Mengtong, Ximeng, Lancang and Mengdingjie groups of the Baoshan Block

群化石和碎屑锆石研究也表明该地块与澳大利亚大陆有一定的亲缘性, 澳大利亚一直被认为是缅甸陆块古生代主要的碎屑物质来源 (Fang, 1994; Ueno, 2003; Hall and Sevastjanova, 2012; Metcalfe, 2013; Zhang *et al.*, 2018)。保山地块古生代地层从西到东包括公养河群、勐统群、孟定街群、澜沧群和西盟群均展开了碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素的研究 (表 1)。这些古生代的地层具有大致相似的碎屑锆石年龄分布频谱和 Hf 同位素特征 (图 7、图 8), 表明各地层具有相似的沉积物源, 整体以 ~970Ma 为主要峰期年龄, ~560Ma 和 ~2470Ma 为两个次级年龄峰。年龄在 2400 ~ 2550Ma 之间的碎屑锆石其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄分别为 +7.3 ~ -19.7 和 4.28 ~ 2.55Ga, 表明其源区既有来自新生地壳的组分, 也有来自早太古代地壳的组分; 年龄在 1000 ~ 850Ma 之间的碎屑锆石其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄的范围更宽, 分别为 +13.4 ~ -36.8 和 4.15 ~ 0.97Ga; 年龄在 600 ~ 500Ma 之间的碎屑锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄范围分别是 +9.3 ~ -37.2 和 3.83 ~ 0.86Ga。~970Ma 和 ~560Ma 两个主要年龄峰的碎屑锆石中有超过 60% 的颗粒其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值, 表明早元古代时期的新生物质在晚元古代-早古生代时期发生改造和地壳再循环作用。

保山地块最年轻的一期碎屑锆石的峰值为 ~560Ma, 其物质来源有两种可能, 一种是环冈瓦纳的周缘地体经历的与原特提斯洋俯冲闭合有关的岩浆作用, 另一种是在冈瓦纳大陆北缘广泛发育泛非构造热事件 (570 ~ 520Ma)。在原特提斯洋俯冲闭合的过程中, 东冈瓦纳大陆北缘 (如特提斯喜马拉雅、西羌塘、拉萨、保山和腾冲等地块) 广泛发育的岩浆作用, 如保山地块平河岩体 502 ~ 466Ma (Dong *et al.*, 2013), 腾冲高黎贡韧性剪切花岗片麻岩 500 ~ 484Ma (Eroglu *et al.*,

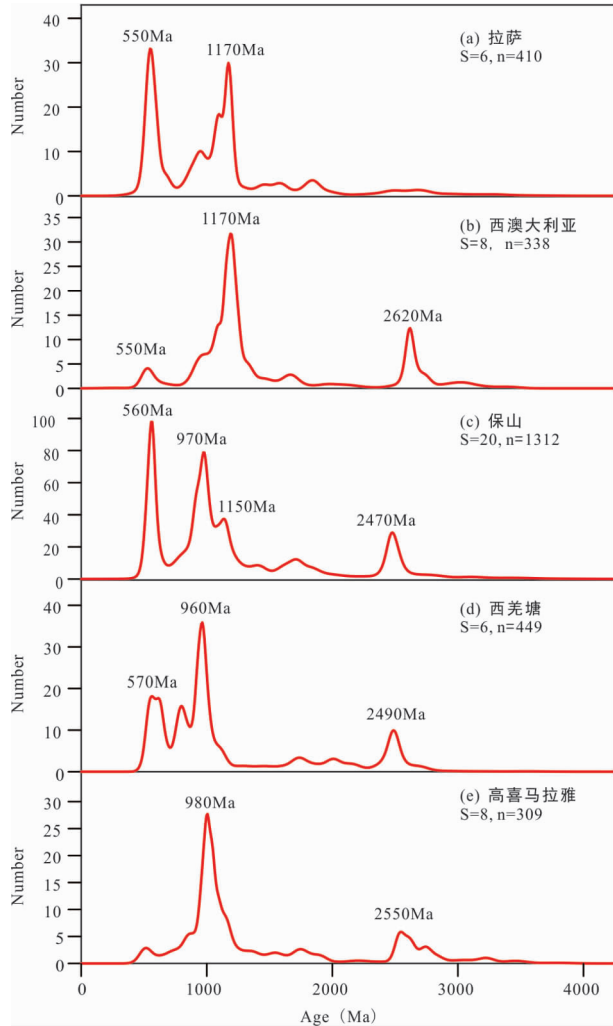


图9 拉萨(a)、西澳大利亚(b)、保山地块(c)、西羌塘(d)和高喜马拉雅(e)碎屑锆石年龄谱系图

Fig. 9 Relative U-Pb age probability for detrital zircons of the Lhasa (a), West Australia (b), Baoshan Block (c), West Qiangtang (d) and Higher Himalaya (e)

2013; Wang *et al.*, 2013) 以及其他相邻地体(如拉萨、西羌塘、滇缅泰马、特提斯喜马拉雅地块等)的早生代岩浆活动集中在 520 ~ 460Ma (Zhao *et al.*, 2017), 明显滞后于保山地块最年轻的 ~ 560Ma 碎屑锆石峰期。冈瓦纳超大陆北缘的 Cadomian 及 Bhimpedian 造山带的岩浆弧形成于约 570Ma, 并在在 570 ~ 521Ma 随着弧-陆碰撞的发生, 弧后盆地闭合 (Cawood *et al.*, 2007; Linnemann *et al.*, 2014)。这些岩浆活动时间与碎屑锆石年龄峰值吻合, 可能是潜在的源区。冈瓦纳大陆的泛非热事件也可能为保山地块提供同期的沉积物源, 如在 Kuunga 造山带发现大量 560 ~ 530Ma 的岩浆岩, Pinjarra 造山带具有 560 ~ 520Ma 的岩浆活动记录 (Cawood and Buchan, 2007)。因此, 我们认为泛非构造热事件和原特提斯洋俯冲闭合事件产生的相关岩体均可能是保山地块最年轻的 ~ 560Ma 碎屑锆石的源区。

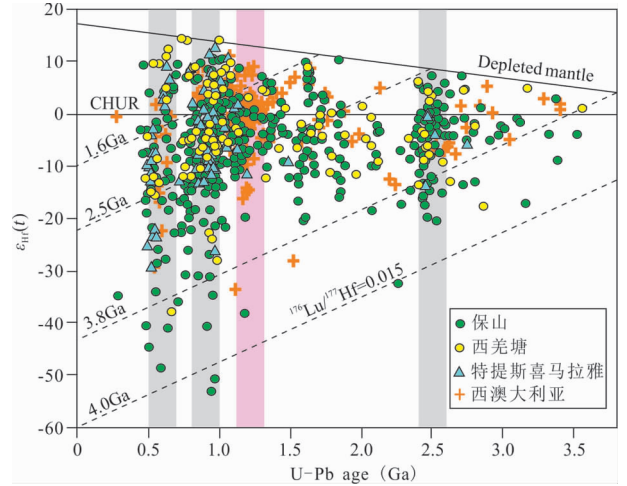


图10 保山、西羌塘、特提斯喜马拉雅和西澳大利亚各地块或大陆的碎屑锆石 Age- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解

Fig. 10 Detrital zircon U-Pb Age vs. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of the Baoshan, West Qiangtang and Tethys Himalaya and West Australia blocks

在印度大陆东缘的东高止 (Eastern Ghats) 造山带报道了 990 ~ 900Ma 的岩浆岩体 (Dasgupta *et al.*, 2013), 与保山地块早古生代地层的碎屑锆石主年龄特征峰相当, 因此我们的数据再次证实了前人关于保山地块古生界地层主要接受了来自印度大陆的碎屑沉积物的结论。此外, 西羌塘 (Pullen *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2011; 董春艳等, 2011) 和高喜马拉雅 (Gehrels *et al.*, 2006) 的碎屑锆石主年龄特征峰也在 980 ~ 960Ma 之间 (图 9), 与保山地块的年龄特征峰契合, 且它们碎屑锆石年龄-Hf 同位素分布模式基本 (图 10) 一致, 而之前的研究者一般也都认为这些地块起源于东冈瓦纳的印度大陆。

值得注意的是, 本文的数据表明保山地块东侧的孟定街群还有一个较为明显的 ~ 1150Ma 的次级年龄峰。这一结果与 Zhao *et al.* (2017) 关于澜沧群和孟定街群的碎屑锆石数据一致, 证明了 1.15 ~ 1.17Ga 的碎屑锆石年龄峰期出现在保山陆块的早古生代地层中。印度大陆东北部的西隆高原经历了 ~ 1600Ma、~ 1100Ma 和 ~ 500Ma 三期岩浆事件, 这与南迦巴瓦地区的岩浆构造活动期次一致, 可能是喜马拉雅造山带中 ~ 1100Ma 碎屑锆石的源区 (Yin and Harrison, 2000; 王誉桦等, 2014)。然而, 西羌塘与保山地块具有可对比的前寒武基底和古生代-中生代岩浆活动, 以及基本相似的碎屑锆石年龄谱可以证明二者相连。但是西羌塘地块和保山地块西部均缺少 ~ 1150Ma 的年龄峰记录, 如果来自印度西隆高原的 ~ 1100Ma 碎屑锆石可以大量进入保山地块东缘, 则无法解释该期碎屑锆石在保山地块西部和西羌塘地块的缺失。~ 1170Ma 年龄峰值被认为是澳大利亚物源的诊断性标志 (Zhu *et al.*, 2011)。因此我们认为西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带大量出露的 ~ 1170Ma 的岩浆岩 (Clark *et al.*,

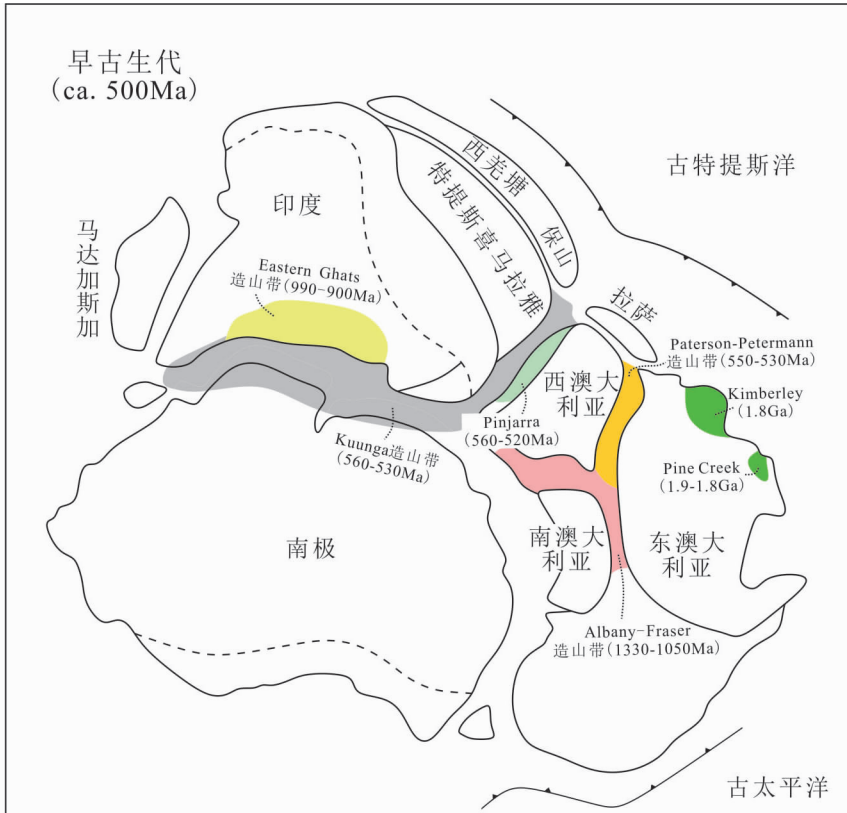


图 11 早古生代东冈瓦纳大陆重建图(据 Meert and Lieberman, 2008; Zhang *et al.*, 2018 修改)

Fig. 11 Reconstruction of East Gondwana continent in the Early Paleozoic (modified after Meert and Lieberman, 2008; Zhang *et al.*, 2018)

2000) (图 11) 最有可能是这期碎屑锆石的物质来源。西澳大利亚(Cawood and Nemchin, 2000; Veevers *et al.*, 2005)、拉萨地体(Leier *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2011)的碎屑锆石研究中也发现了相近的年龄峰值以及 U-Pb 年龄 Hf 同位素分布模式(图 9、图 10)。总的来说,保山地块早古生代地层的沉积物源主要来自印度大陆,但东部地层显示可能有一定比例的西澳大利亚物源特征。

4.3 保山地块在冈瓦纳重建中的位置及其构造属性

碎屑锆石的年代学和同位素分析及物源示踪是目前恢复陆块古地理位置的重要方法。前人对保山地块早寒武世-中奥陶世西盟群帕可组的碎屑锆石研究中,碎屑锆石年龄频谱图显示了~570Ma 和~960Ma 两个主特征峰,推测该地层的沉积来源于特提斯喜马拉雅构造带(邢晓婉和张玉芝, 2016)。Li *et al.* (2015)对凤庆地区新元古界勐统群的碎屑锆石研究,认为保山地块在早古生代起源于印度大陆北缘。然而,在东部澜沧群和孟定街群的碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素分析中,Zhao *et al.* (2017)报道了 1200~1060Ma、~960Ma 和 650~500Ma 三个特征年龄峰,表明保山地块东部的沉积盆地可能同时接受了来自印度和西澳大利亚的物源,在早古生代冈瓦纳大陆重建中位于印度大陆和澳大利亚

大陆之间。同样是对澜沧群的碎屑锆石研究,王舫等(2017)的数据没有显示澳大利亚物源特征的年龄峰,并认为该群的物源复杂,可与西羌塘、特提斯喜马拉雅和拉萨地体进行对比。本文结果表明包括西侧公养河群在内的整个保山地块的早古生代地层碎屑锆石均以 980~960Ma 为主要年龄峰期,与印度大陆北缘衍生地体的碎屑锆石主特征峰相似,沉积物源为印度大陆 Eastern Ghats 带内的同期岩浆岩体,因此保山地块起源于印度大陆北缘,而不是澳大利亚的北缘。另外,本文中孟定街群分析结果证实了保山地块东部(包括澜沧群在内)可能接受了一定比例的来自西澳大利亚 Albany-Fraser 造山带的~1170Ma 的岩浆岩体的沉积物,因此保山地块的东侧在早古生代可能处于靠近西澳大利亚的一端(图 11)。

保山地块东侧的昌宁-孟连构造带保存了古特提斯洋的岩浆活动记录(张旗等, 1996; 范蔚茗等, 2009; Peng *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2014),被认为是青藏高原中部的龙木错-双湖古特提斯缝合带的东南延伸。吉塘岩群出露于安多-类乌齐和北澜沧江一带,被认为是羌北地块的前寒武基底。其原岩的形成时代为中元古代末-新元古代早期,可与保山地块的崇山群和澜沧群进行对比(刘一鸣, 2017)。位于昌宁-孟连构造带西侧的保山地块和位于龙木错-双湖缝合带南侧

的西羌塘地块在岩浆活动时空分布上具有相似性。如保山地块平河岩体的主要结晶时代为 486 ~ 448Ma (董美玲等, 2012; Dong *et al.*, 2013; 李再会等, 2013; Shi *et al.*, 2016), 西羌塘地块的奥陶纪岩浆记录为 476 ~ 471Ma (Zhao *et al.*, 2014); 保山地块东部的晚三叠世二长花岗岩 (231Ma) 具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-26.8 ~ -8.2) (聂飞等, 2012), 西羌塘北缘的晚三叠世花岗岩 (212 ~ 208Ma) 同样具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-7.0 ~ -0.6) (Liu *et al.*, 2016)。因此, 保山地块被认为是西羌塘地块经东构造挤压逃逸的东南延伸部分。本次研究中, 保山与西羌塘地块具有十分相似的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱以及 Hf 同位素特征 (图 9、图 10), 可推测二者在早古生代可能是同一块体, 位于印度大陆的北缘, 具有相似的沉积物源。

总的来说, 在早古生代冈瓦纳大陆重建中, 西羌塘与保山地块同为一体, 位于印度大陆的北缘 (图 11), 共同经历了原特提斯洋、古特提斯洋等构造旋回, 在新生代印度-亚洲大陆碰撞中经历了挤压变形和逃逸, 形成今天的构造格局。

5 结论

(1) 公养河群砂岩样品的碎屑锆石 U-Pb 谐和年龄在 3862 ~ 533Ma 之间, 其中, 最小峰期年龄为 549 ~ 533Ma, 由此可以推测公养河群的沉积上限为早寒武世早期。在前人研究中, 整合于公养河群之上的蒲满哨群含有岩浆锆石年龄为 499Ma 的火山岩夹层, 因此公养河群应属寒武系地层。

(2) 孟定街群的变质砂岩碎屑锆石谐和年龄范围是 3097 ~ 542Ma, 其最小峰期年龄为 576 ~ 458Ma, 因此孟定街群的最大沉积年龄为晚奥陶世。由于孟定街群的研究程度尚浅, 上部与晚古生代地层为不整合接触关系, 其沉积上限仍有待进一步研究。

(3) 保山地块早古生代沉积物源主要来自印度大陆, 其东部可能还接受了部分来自西澳大利亚的沉积物质。

(4) 保山与西羌塘地块具有相似碎屑锆石年龄分布频谱, 并发育同期岩浆活动, 可能经历了相似的构造运动。二者在早古生代冈瓦纳大陆重建中均位于印度大陆北缘, 保山地块较靠近西澳大利亚一侧。

致谢 本研究在实验测试过程中得到了中国科学院广州地球化学研究所杨晴工程师、张万峰工程师、张彦强工程师和张乐工程师的热心帮助, 并且在文章撰写的过程中获得了澳大利亚科廷大学 Christopher Spencer 高级研究员的宝贵建议, 在此表示最诚挚的感谢!

References

Andersen T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation.

- Chemical Geology, 216(3-4): 249-270
- Bi LS, Liang X, Wang GH, Zhang HD, Wang Q and Wu CJ. 2018. Metamorphism-deformation phases and Ar-Ar chronological constraints of the Lancang Group in the middle and southern sections of the Lancangjiang Tectonic Belt, western Yunnan. *Earth Science*, 43(9): 3252-3266 (in Chinese with English abstract)
- Bouvier A, Vervoort JD and Patchett PJ. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2): 48-57
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. 1990. Regional Geology of Yunnan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-728 (in Chinese)
- Cao RG and Lu RF. 1991. The discovery of the trace fossils in the Gongyang River Group, western Yunnan. *Journal of Stratigraphy*, 15(1): 65, 61 (in Chinese)
- Cawood PA and Nemchin AA. 2000. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia. *Sedimentary Geology*, 134(3-4): 209-234
- Cawood PA and Buchan C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. *Earth-Science Reviews*, 82(3-4): 217-256
- Cawood PA, Johnson MRW and Nemchin AA. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1-2): 70-84
- Cawood PA, Hawkesworth CJ and Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40(10): 875-878
- Chen FK, Li QL, Wang XL and Li XH. 2006. Zircon age and Sr-Nd-Hf isotopic composition of migmatite in the eastern Tengchong block, western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 439-448 (in Chinese with English abstract)
- Chen Q, Sun M, Long XP, Zhao GC and Yuan C. 2016. U-Pb ages and Hf isotopic record of zircons from the Late Neoproterozoic and Silurian-Devonian sedimentary rocks of the western Yangtze Block: Implications for its tectonic evolution and continental affinity. *Gondwana Research*, 31: 184-199
- Chen Q, Sun M, Long XP, Zhao GC, Wang J, Yu Y and Yuan C. 2018. Provenance study for the Paleozoic sedimentary rocks from the West Yangtze Block: Constraint on possible link of South China to the Gondwana supercontinent reconstruction. *Precambrian Research*, 309: 271-289
- Chu ZY, Wang W, Chen FK, Wang XL, Li XH and Ji JQ. 2009. Os-Nd-Pb-Sr isotopic compositions of the Santaishan ultramafic rock in western Yunnan and its geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3221-3228 (in Chinese with English abstract)
- Clark DJ, Hensen BJ and Kinny PD. 2000. Geochronological constraints for a two-stage history of the Albany-Fraser Orogen, Western Australia. *Precambrian Research*, 102(3-4): 155-183
- Dasgupta S, Bose S and Das K. 2013. Tectonic evolution of the Eastern Ghats Belt, India. *Precambrian Research*, 227: 247-258
- Deng J, Wang QF, Li GJ, Li C and Wang CM. 2014. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 419-437
- Dong CY, Li C, Wang YS, Wang W, Wu YW, Xie HQ and Liu DY. 2011. 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. *Science China (Earth Sciences)*, 54(7): 1034-1042
- Dong ML, Dong GC, Mo XX, Zhu DC, Nie F, Xie XF, Wang X and Hu ZC. 2012. Geochronology and geochemistry of the Early Palaeozoic granitoids in Baoshan block, western Yunnan and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1453-1464 (in Chinese with English abstract)
- Dong ML, Dong GC, Mo XX, Santosh M, Zhu DC, Yu JC, Nie F and Hu ZC. 2013. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of granites in the Baoshan Block, western Yunnan;

- Implications for Early Paleozoic evolution along the Gondwana margin. *Lithos*, 179: 36–47
- Duan L, Meng QR, Zhang CL and Liu XM. 2011. Tracing the position of the South China block in Gondwana; U-Pb ages and Hf isotopes of Devonian detrital zircons. *Gondwana Research*, 19(1): 141–149
- Eroğlu S, Siebel W, Danišić M, Pfänder JA and Chen FK. 2013. Multi-system geochronological and isotopic constraints on age and evolution of the Gaoligongshan metamorphic belt and shear zone system in western Yunnan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 218–239
- Fan WM, Peng TP and Wang YJ. 2009. Triassic magmatism in the southern Lancangjiang zone, southwestern China and its constraints on the tectonic evolution of Paleo-Tethys. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 291–302 (in Chinese with English abstract)
- Fang ZJ. 1994. Biogeographic constraints on the rift-drift-accretion history of the Sibumasu block. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 375–385
- Fedo CM, Sircombe KN and Rainbird RH. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277–303
- Gehrels G, Kapp P, DeCelles P, Pullen A, Blakey R, Weislogel A, Ding L, Guynn J, Martin A, McQuarrie N and Yin A. 2011. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen. *Tectonics*, 30(5): TC5016
- Gehrels GE, DeCelles PG, Ojha TP and Upreti BN. 2006. Geologic and U-Pb geochronologic evidence for Early Paleozoic tectonism in the Dadeldhura thrust sheet, far-west Nepal Himalaya. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4–6): 385–408
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle; LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Hall R and Sevastjanova I. 2012. Australian crust in Indonesia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 59(6): 827–844
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62
- Huang BX. 2014. Discussion of sedimentary environment and age of the Gongyanghe Group in Longling area, Yunnan Province. Master Degree Thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–65 (in Chinese with English summary)
- Jiang CS, Zhou RQ, Zhou ZH and Wang Y. 2000. Division of tectonic elements in West Yunnan and its neighboring regions and their features. *Journal of Seismological Research*, 23(1): 21–29 (in Chinese with English abstract)
- Leier AL, Kapp P, Gehrels GE and DeCelles PG. 2007. Detrital zircon geochronology of Carboniferous-Cretaceous strata in the Lhasa terrane, southern Tibet. *Basin Research*, 19(3): 361–378
- Li DP, Chen YL, Hou KJ, Lu Z and Cui D. 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. *Lithos*, 227: 194–204
- Li SZ, Zhao SJ, Yu S, Cao HH, Li XY, Liu X, Guo XY, Xiao WJ, Lai SC, Yan Z, Li ZH, Yu SY and Lan HY. 2016. Proto-Tethys Ocean in East Asia (II): Affinity and assembly of Early Paleozoic micro-continental blocks. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2628–2644 (in Chinese with abstract)
- Li XH, Long WG, Li QL, Li Y, Zheng YF, Yang YH, Chamberlain KR, Wan DF, Guo CH, Wang XC and Tao H. 2010. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(2): 117–134
- Li XZ, Pan GT and Luo JN. 1990. A boundary between Gondwanaland and Laurasia continents in Sanjiang Region. *Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau*, (20): 217–233 (in Chinese)
- Li ZH, Lin SL, Cong F, Xie T and Zou GF. 2013. Magmatism and geochemistry of the Early Paleozoic of the Tengchong-Baoshan Block, western Yunnan, China: Implications for petrogenesis and tectonics. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(6): 689–703 (in Chinese with English abstract)
- Linnemann U, Gerdes A, Hofmann M and Marko L. 2014. The Cadomian Orogen; Neoproterozoic to Early Cambrian crustal growth and orogenic zoning along the northwestern periphery of the West African Craton. In: Rocha R, Pais J, Kullberg JC and Finney S (eds.). *STRATI 2013: First International Congress on Stratigraphy at the Cutting Edge of Stratigraphy*. Cham; Springer, 729–732
- Liu H, Wang BD, Ma L, Gao R, Chen L, Li XB and Wang LQ. 2016. Late Triassic syn-exhumation magmatism in central Qiangtang, Tibet: Evidence from the Sangehu adakitic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 132: 9–24
- Liu YM. 2017. Magmatism at 550–450Ma within the South Qiangtang-Baoshan Plate of the Tibetan Plateau; Constraints on the tectonic evolution of the basement of the northern Gondwana margin. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1–197 (in Chinese with English summary)
- Mao XC. 2016. Early Paleozoic geological characteristics and Tethys tectonic evolution of Baoshan-Zhenkang terrane and adjacent areas. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–162 (in Chinese with English summary)
- Meert JG and Lieberman BS. 2008. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian radiation. *Gondwana Research*, 14(1–2): 5–21
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion; Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1–33
- Nie F, Dong GC, Mo XX, Zhu DC, Dong ML and Wang X. 2012. Geochemistry, zircon U-Pb chronology of the Triassic granites in the Changning-Menglian suture zone and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1465–1476 (in Chinese with English abstract)
- Peng TP, Wilde SA, Wang YJ, Fan MW and Peng BX. 2013. Mid-Triassic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang Zone, SW China; Petrogenesis and implications for the evolution of Paleo-Tethys. *Lithos*, 168–169: 15–32
- Pullen A, Kapp P, Gehrels GE, Vervoort JD and Ding L. 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Geology*, 36(5): 351–354
- Scherer E, Münker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293(5530): 683–687
- Shi YR, Anderson JL, Wu ZH, Yang ZY, Li LL and Ding J. 2016. Age and origin of Early Paleozoic and Mesozoic granitoids in western Yunnan Province, China; Geochemistry, SHRIMP zircon ages, and Hf-in-zircon isotopic compositions. *The Journal of Geology*, 124(5): 617–630
- Sláma J, Košler J, Condon DJ, Crowley JL, Gerdes A, Hanchar JM, Horstwood MSA, Morris GA, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett MN and Whitehouse MJ. 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35
- Spencer CJ, Kirkland CL and Taylor RJM. 2016. Strategies towards statistically robust interpretations of in situ U-Pb zircon geochronology. *Geoscience Frontiers*, 7(4): 581–589
- Ueno K. 2003. The Permian fusulinoid faunas of the Sibumasu and Baoshan blocks; Their implications for the paleogeographic and paleoclimatologic reconstruction of the Cimmerian Continent. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193(1): 1–24
- Veivers JJ, Saeed A, Belousova EA and Griffin WL. 2005. 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. *Earth-Science Reviews*, 68(3–4): 245–279
- Vermeesch P. 2012. On the visualisation of detrital age distributions.

- Chemical Geology, 312–313: 190–194
- Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1479–1493
- Vervoort JD, Patchett PJ, Söderlund U and Baker M. 2004. Isotopic composition of Yb and the determination of Lu concentrations and Lu/Hf ratios by isotope dilution using MC-ICPMS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(11): Q11002
- Voice PJ, Kowalewski M and Eriksson KA. 2011. Quantifying the timing and rate of crustal evolution: Global compilation of radiometrically dated detrital zircon grains. *The Journal of Geology*, 119(2): 109–126
- Wang F, Liu FL, Ji L and Liu LS. 2017. LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircon from low-grade metamorphic rocks of the Lancang Group in the Lancangjiang Complex and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2975–2985 (in Chinese with English abstract)
- Wang XL, Zhou JC, Griffin WL, Wang RC, Qiu JS, O'reilly SY, Xu XS, Liu XM and Zhang GL. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks. *Precambrian Research*, 159(1–2): 117–131
- Wang YH, Zeng LS, Gao LE, Zhang LF and Hou KJ. 2014. Labradonian and Grenvillian orogenic events in the Namche Barwa Massif of the Himalayan orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2241–2252 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Xing XW, Cawood PA, Lai SC, Xia XP, Fan WM, Liu HC and Zhang FF. 2013. Petrogenesis of Early Paleozoic peraluminous granite in the Sibumasu Block of SW Yunnan and diachronous accretionary orogenesis along the northern margin of Gondwana. *Lithos*, 182–183: 67–85
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1–23
- Wingate MTD, Kirkland CL, Hartley GJ, Hitchings BL and White SR. 2015. *Compilation of Geochronology Information, 2015*. East Perth, Western Australia: Geological Survey of Western Australia
- Xing XW and Zhang YZ. 2016. Depositional age of the Pake Formation of Ximeng Group and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(5): 936–948 (in Chinese with English abstract)
- Xing XW, Wang YJ, Cawood PA and Zhang YZ. 2017. Early Paleozoic accretionary orogenesis along northern margin of Gondwana constrained by high-Mg metagneous rocks, SW Yunnan. *International Journal of Earth Sciences*, 106(5): 1469–1486
- Yang XJ, Jia XC, Xiong CL, Bai XZ, Huang BX, Luo G and Yang CB. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of metamorphic basic volcanic rock in Gongyanghe Group of southern Gaoligong Mountain, western Yunnan Province, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3): 264–276 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 28: 211–280
- Zhai MG, Cong BL and Zhang RY. 1990. Identification and geological significance of two types of volcanic rocks from the Lancang Group in the western Yunnan. *Science in China (Series B)*, (1): 77–85 (in Chinese)
- Zhang Q, Zhou DJ, Zhao DS, Peng XJ, Luo WL and Liu XP. 1996. Wilson cycle of the Paleo-Tethyan orogenic belt in western Yunnan: Record of magmatism and discussion on mantle processes. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 17–28 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XR, Chung SL, Lai YM, Ghani AA, Murtadha S, Lee HY and Hsu CC. 2018. Detrital zircons dismember Sibumasu in East Gondwana. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(7): 6098–6110
- Zhao TY, Feng QL, Metcalfe I, Milan LA, Liu GC and Zhang ZB. 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. *Gondwana Research*, 51: 193–208
- Zhao ZB, Bons PD, Wang GH, Liu Y and Zheng YL. 2014. Origin and pre-Cenozoic evolution of the South Qiangtang basement, Central Tibet. *Tectonophysics*, 623: 52–66
- Zhong DL. 1998. Paleo-Tethyan Orogenic Belt in the Western Part of the Sichuan and Yunnan Provinces. Beijing: Science Press, 1–231 (in Chinese)
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Dilek Y and Mo XX. 2011. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia. *Geology*, 39(8): 727–730
- Zhu RZ, Lai SC, Qin JF, Zhao SW and Santosh M. 2018. Strongly peraluminous fractionated S-type granites in the Baoshan Block, SW China; Implications for two-stage melting of fertile continental materials following the closure of Bangong-Nujiang Tethys. *Lithos*, 316–317: 178–198

附中文参考文献

- 毕丽莎, 梁晓, 王根厚, 张海迪, 王泉, 吴春娇. 2018. 滇西澜沧江构造带中-南段澜沧群变质变形期次及 Ar-Ar 年代学约束. *地球科学*, 43(9): 3252–3266
- 曹仁关, 陆瑞芳. 1991. 云南西部公养河群遗迹化石的发现. *地层学杂志*, 15(1): 65, 61
- 陈福坤, 李秋立, 王秀丽, 李向辉. 2006. 滇西地区腾冲地块东侧混合岩锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成. *岩石学报*, 22(2): 439–448
- 储著银, 王伟, 陈福坤, 王秀丽, 李向辉, 季建清. 2009. 云南路西三台山超镁铁岩体 Os-Nd-Pb-Sr 同位素特征及地质意义. *岩石学报*, 25(12): 3221–3228
- 董春艳, 李才, 王渝生, 王伟, 吴彦旺, 颜炳强, 刘敦一. 2011. 西藏羌塘龙木错-双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄分布模式: 构造归属及物源区制约. *中国科学(地球科学)*, 41(3): 299–308
- 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 朱弟成, 聂飞, 谢许峰, 王霞, 胡兆初. 2012. 滇西保山地块早古生代花岗岩类的年代学、地球化学及意义. *岩石学报*, 28(5): 1453–1464
- 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 2009. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录. *地学前缘*, 16(6): 291–302
- 黄柏鑫. 2014. 云南龙陵地区公养河群时代及沉积环境讨论. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学, 1–65
- 姜朝松, 周瑞琦, 周真恒, 王瑜. 2000. 滇西地区及邻区构造单元划分及其特征. *地震研究*, 23(1): 21–29
- 李三忠, 赵淑娟, 余珊, 曹花花, 李玺瑶, 刘鑫, 郭晓玉, 肖文交, 赖绍聪, 闫臻, 李宗会, 于胜尧, 张剑, 兰浩圆. 2016. 东亚原特提斯洋(II): 早古生代微陆块亲缘性与聚合. *岩石学报*, 32(9): 2628–2644
- 李兴振, 潘桂棠, 罗建宁. 1990. 论三江地区冈瓦纳和劳亚大陆的分界. *青藏高原地质文集*, (20): 217–233
- 李再会, 林仕良, 丛峰, 涛涛, 邹光富. 2013. 滇西腾冲-保山地块早古生代岩浆作用和地球化学: 岩石成因和构造背景. *矿物岩石地球化学通报*, 32(6): 689–703
- 刘一鸣. 2017. 青藏高原羌南-保山板块 550~450Ma 岩浆事件——兼论冈瓦纳大陆北缘基底构造演化. 博士学位论文. 长春: 吉

- 林大学, 1-197
- 毛晓长. 2016. 保山-镇康地块及邻区早古生代地质特征及特提斯构造演化. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 1-162
- 聂飞, 董国臣, 莫宣学, 朱弟成, 董美玲, 王霞. 2012. 滇西昌宁-孟连带三叠纪花岗岩地球化学、年代学及其意义. 岩石学报, 28(5): 1465-1476
- 王舫, 刘福来, 冀磊, 刘利双. 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. 岩石学报, 33(9): 2975-2985
- 王誉桦, 曾令森, 高利娥, 张立飞, 侯可军. 2014. 喜马拉雅造山带东构造结拉布拉多期和格林威尔期造山作用的记录. 岩石学报, 30(8): 2241-2252
- 邢晓婉, 张玉芝. 2016. 滇西南西盟群帕可组沉积时代厘定及构造意义: 锆石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素证据. 矿物岩石地球化学通报, 35(5): 936-948
- 杨学俊, 贾小川, 熊昌利, 白宪洲, 黄柏鑫, 罗改, 杨朝碧. 2012. 滇西高黎贡山南段公养河群变质基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 31(2-3): 264-276
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-728
- 翟明国, 从柏林, 张儒媛. 1990. 滇西澜沧群两类火山岩系的识别及其地质意义. 中国科学(B辑), (1): 77-85
- 张旗, 周德进, 赵大升, 彭兴阶, 罗万林, 刘祥品. 1996. 滇西古特提斯造山带的威尔逊旋回: 岩浆活动记录和深部过程讨论. 岩石学报, 12(1): 17-28
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1-231

附表 1 公养河群和孟定街群碎屑锆石 U-Pb 定年结果

Appendix Table 1 U-Pb data for detrital zircons from the Gongyanghe and Mengdingjie groups

测点号	Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)							
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1SD	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1SD	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1SD
公养河群样品 10DX93A													
-01	0.71	0.0662	3.0	1.26	5.7	0.138	4.9	812	61	826	32	832	38
-02	0.38	0.159	2.6	10.49	4.3	0.479	3.5	2443	43	2479	40	2523	73
-03	0.63	0.0649	2.6	1.08	4.3	0.121	3.5	770	53	743	23	734	24
-04	0.09	0.0742	1.5	1.73	3.8	0.169	3.5	1046	29	1019	24	1007	33
-05	0.98	0.0984	1.8	3.66	4.5	0.270	4.1	1593	33	1562	35	1539	56
-06	1.06	0.164	1.9	10.53	3.9	0.466	3.4	2495	32	2482	35	2467	69
-07	1.16	0.0678	2.6	1.33	5.0	0.143	4.2	863	53	861	28	860	34
-08	1.07	0.0583	4.3	0.70	6.0	0.088	4.1	539	91	541	25	541	21
-09	0.33	0.0698	1.4	1.51	3.9	0.157	3.7	922	28	935	24	940	32
-10	0.49	0.0735	1.8	1.76	4.0	0.173	3.6	1027	35	1029	26	1031	34
-11	0.60	0.240	1.4	21.01	4.2	0.635	4.0	3119	21	3139	40	3170	99
-12	0.41	0.0692	1.6	1.40	3.9	0.147	3.6	904	33	889	23	882	30
-13	0.43	0.0661	2.1	1.26	5.1	0.138	4.7	809	44	826	29	832	36
-14	0.84	0.0967	1.8	3.56	4.3	0.267	3.9	1561	34	1540	34	1524	53
-15	0.51	0.0717	1.5	1.60	3.9	0.162	3.6	978	31	972	24	969	32
-16	0.87	0.0782	1.5	2.09	4.2	0.194	3.9	1152	29	1144	28	1141	40
-17	0.52	0.0696	1.9	1.44	4.8	0.150	4.3	917	39	907	28	903	37
-18	1.58	0.159	2.4	10.15	5.2	0.462	4.6	2450	40	2449	47	2448	94
-19	0.13	0.0695	1.4	1.48	4.1	0.155	3.9	912	28	924	25	929	34
-20	0.71	0.0988	1.6	3.79	4.3	0.278	4.1	1601	29	1591	34	1583	57
-21	0.91	0.0737	1.4	1.76	3.5	0.173	3.2	1033	28	1030	22	1028	30
-22	0.33	0.0580	2.4	0.71	4.0	0.089	3.2	530	51	545	17	549	17
-23	1.03	0.0967	1.5	3.57	4.2	0.268	4.0	1561	28	1543	33	1530	54
-24	0.34	0.0726	2.2	1.73	3.7	0.173	3.0	1003	43	1019	23	1027	28
-25	1.14	0.159	2.2	10.29	4.0	0.471	3.3	2440	37	2461	36	2487	68
-26	0.69	0.0664	3.5	1.11	5.5	0.121	4.2	818	72	759	29	739	29
-27	1.22	0.165	1.3	10.94	3.4	0.481	3.1	2509	22	2518	31	2530	65
-27A	1.23	0.165	1.6	10.95	3.6	0.482	3.2	2505	26	2519	33	2535	67
-28	0.29	0.158	2.1	10.16	3.8	0.467	3.2	2431	35	2449	35	2471	65
-29	0.13	0.0696	1.4	1.48	4.7	0.154	4.5	917	29	922	28	924	39
-30	0.66	0.0990	1.6	3.80	3.7	0.279	3.3	1605	29	1594	29	1585	46
-31	0.63	0.0624	2.7	0.96	5.5	0.112	4.8	689	57	683	27	682	31
-32	0.61	0.310	1.2	32.34	3.7	0.756	3.5	3522	18	3561	36	3629	96
-33	0.53	0.327	1.2	33.00	5.0	0.732	4.8	3603	19	3581	48	3541	130
-34	0.60	0.0778	1.8	2.06	3.7	0.192	3.3	1141	35	1135	25	1131	34
-35	0.53	0.0699	1.8	1.47	4.0	0.152	3.5	926	37	918	24	914	30
-36	0.85	0.0785	1.5	2.11	4.9	0.195	4.6	1160	29	1153	33	1148	49
-37	0.93	0.0733	1.4	1.73	4.2	0.171	3.9	1023	29	1020	26	1019	37
-38	1.32	0.0616	1.8	0.89	4.8	0.105	4.5	660	39	646	23	642	27
-39	0.83	0.160	1.8	10.15	3.6	0.460	3.1	2455	30	2449	33	2442	63
-40	0.30	0.158	2.0	9.86	3.5	0.454	2.9	2431	34	2422	32	2411	58
-41	0.50	0.167	1.3	11.03	3.3	0.481	3.0	2523	21	2526	30	2530	62
-42	0.30	0.0724	1.4	1.66	4.6	0.166	4.3	998	27	993	28	990	40
-43	0.18	0.246	1.9	20.94	4.2	0.618	3.7	3157	30	3136	40	3102	90
-44	1.41	0.0696	3.4	1.45	6.1	0.151	5.1	916	69	909	36	906	43
-45	0.45	0.109	1.5	4.80	5.3	0.321	5.1	1774	26	1785	44	1794	80

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1SD	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1SD	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1SD
-46	0.14	0.0721	1.8	1.65	6.0	0.166	5.8	988	36	990	37	991	53
-47	1.22	0.161	1.2	10.34	3.7	0.465	3.5	2467	21	2465	34	2464	71
-48	0.32	0.0963	2.5	3.58	4.0	0.270	3.1	1554	46	1546	31	1540	42
-49	0.58	0.129	1.4	6.65	4.8	0.375	4.6	2077	24	2065	42	2053	81
-50	0.42	0.117	1.9	3.02	4.1	0.187	3.6	1912	33	1413	30	1107	37
-51	0.66	0.0718	1.1	1.86	2.5	0.188	2.2	979	23	1067	16	1110	23
-52	0.20	0.0801	2.1	2.40	6.4	0.217	6.0	1200	42	1242	45	1266	69
-53	0.43	0.0717	2.0	1.65	6.4	0.167	6.1	979	40	990	40	996	56
-54	0.48	0.157	2.6	10.99	4.3	0.508	3.4	2422	44	2523	39	2650	73
-55	0.17	0.161	0.8	8.96	5.3	0.403	5.3	2470	13	2334	48	2181	97
-56	1.04	0.164	1.2	10.49	4.1	0.464	3.9	2496	21	2479	37	2457	79
-57	0.39	0.0727	2.7	1.74	4.5	0.173	3.6	1006	54	1022	29	1030	34
-58	0.23	0.0747	1.5	2.45	4.0	0.238	3.7	1059	30	1257	28	1375	46
-59	0.17	0.0810	1.8	2.13	7.6	0.190	7.4	1221	35	1158	51	1124	76
-60	0.27	0.106	1.2	4.51	4.8	0.309	4.7	1730	22	1732	39	1734	70
-61	1.20	0.164	0.9	10.62	5.7	0.471	5.6	2492	16	2491	52	2489	115
公养河群样品 10DX94													
-01	0.79	0.123	1.2	5.82	3.0	0.344	2.8	1994	22	1949	26	1907	46
-01A	0.79	0.105	1.2	4.42	3.4	0.306	3.2	1714	22	1717	28	1719	47
-02	0.95	0.0929	1.4	3.24	4.2	0.253	3.9	1485	27	1466	32	1452	51
-03	0.49	0.0718	1.2	1.62	6.1	0.163	6.0	979	25	976	37	975	54
-04	0.67	0.0722	2.7	1.65	4.6	0.165	3.7	991	54	988	29	987	34
-05	0.40	0.0832	2.2	2.47	4.1	0.216	3.4	1273	42	1264	29	1258	39
-06	0.20	0.0712	1.5	1.60	3.2	0.163	2.8	963	31	970	20	973	25
-07	0.37	0.0718	1.3	1.69	3.8	0.171	3.6	979	27	1005	24	1016	34
-08	0.37	0.0718	1.3	1.69	3.8	0.171	3.6	979	27	1005	24	1016	34
-09	0.73	0.0907	1.2	3.04	3.5	0.243	3.3	1441	24	1416	26	1400	41
-10	0.62	0.105	1.3	4.48	4.0	0.308	3.8	1721	24	1728	33	1733	57
-11	0.75	0.0721	2.0	1.79	5.2	0.180	4.8	990	40	1042	33	1067	47
-12	0.61	0.0649	1.7	1.12	4.7	0.126	4.4	772	35	765	25	763	31
-13	0.26	0.0879	1.5	2.81	3.3	0.232	3.0	1381	28	1358	25	1344	36
-14	0.52	0.0594	2.3	0.71	5.7	0.086	5.2	583	48	543	24	533	27
-15	0.34	0.156	2.1	8.87	4.4	0.413	3.9	2408	35	2324	40	2230	73
-16	0.30	0.170	1.2	10.89	3.3	0.465	3.1	2554	19	2513	30	2463	62
-17	1.45	0.0653	3.1	1.16	4.7	0.129	3.5	785	63	784	25	783	26
-18	0.34	0.0705	2.4	1.59	4.6	0.163	3.9	944	48	965	28	974	35
-19	0.91	0.0721	1.9	1.65	3.9	0.166	3.3	990	39	990	24	991	31
-20	0.75	0.153	1.2	9.35	3.4	0.445	3.2	2374	20	2373	31	2371	63
-21	3.06	0.173	1.5	10.96	3.6	0.461	3.3	2583	25	2520	33	2442	67
-22	0.65	0.114	1.3	5.23	4.5	0.334	4.3	1858	24	1857	38	1856	69
-23	0.63	0.0714	1.5	1.60	4.3	0.162	4.1	968	30	970	27	971	37
-24	0.60	0.0728	1.4	1.71	3.8	0.170	3.5	1007	28	1012	24	1015	33
-25	0.67	0.0635	3.5	1.15	4.4	0.132	2.8	727	72	778	24	797	21
-26	0.84	0.0905	1.5	3.07	5.4	0.246	5.2	1437	28	1425	41	1418	66
-27	0.63	0.114	1.3	5.24	4.7	0.335	4.6	1856	23	1859	40	1861	73

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1SD	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1SD	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1SD
-28	0.54	0.115	1.6	5.35	5.0	0.337	4.7	1882	28	1878	42	1874	76
-29	0.42	0.131	1.2	7.07	4.6	0.393	4.4	2105	21	2120	40	2135	80
-30	0.22	0.0724	1.4	1.64	4.8	0.164	4.6	997	28	985	30	980	42
-31	0.35	0.0712	1.4	1.54	4.0	0.157	3.7	964	29	946	24	938	32
-32	0.75	0.131	2.7	7.24	4.6	0.401	3.8	2109	46	2141	41	2175	70
-33	0.53	0.0886	1.3	2.89	4.6	0.236	4.4	1395	25	1378	34	1367	54
-34	0.64	0.106	1.2	4.44	4.6	0.303	4.4	1734	22	1720	37	1708	65
-35	0.63	0.0757	1.8	1.83	4.7	0.175	4.3	1088	36	1056	30	1041	42
-36	0.53	0.168	1.8	11.60	4.1	0.500	3.7	2541	30	2573	38	2614	79
-37	0.25	0.0606	1.3	0.85	3.8	0.102	3.6	627	28	626	18	625	21
-38	0.26	0.0634	3.6	1.00	6.1	0.115	4.9	721	76	705	30	701	32
-39	0.19	0.0651	2.4	1.19	4.1	0.132	3.3	777	50	794	22	800	25
-40	1.37	0.0715	1.5	1.55	3.4	0.158	3.1	971	30	951	21	943	27
-41	0.56	0.106	1.5	4.39	4.0	0.300	3.7	1734	27	1711	32	1693	54
-42	0.27	0.0732	1.4	1.69	4.1	0.167	3.8	1020	27	1004	26	996	35
-43	0.48	0.113	1.2	5.28	4.0	0.338	3.8	1854	22	1866	34	1876	62
-44	1.29	0.0591	3.6	0.71	5.2	0.087	3.7	572	76	543	21	536	19
-45	0.42	0.0655	2.6	1.17	4.7	0.129	3.9	789	53	786	25	785	29
-46	0.84	0.0720	1.7	1.58	3.4	0.159	2.9	987	34	962	21	951	26
-47	0.49	0.159	1.4	8.17	3.6	0.373	3.3	2443	23	2250	32	2044	57
-48	0.80	0.0751	1.8	1.83	4.1	0.177	3.7	1070	36	1057	27	1051	36
-49	0.68	0.188	1.1	13.52	3.7	0.521	3.5	2726	18	2717	34	2705	77
-50	1.01	0.105	1.7	4.30	3.9	0.297	3.6	1716	31	1694	32	1676	52
-51	0.81	0.114	1.1	5.13	2.8	0.327	2.6	1858	19	1840	24	1825	41
-52	0.10	0.0917	2.5	2.51	4.4	0.198	3.7	1461	46	1275	32	1167	39
-53	0.33	0.113	2.1	5.03	5.0	0.324	4.5	1843	38	1824	42	1807	71
-54	0.37	0.169	1.0	11.63	6.2	0.500	6.1	2545	16	2575	56	2615	130
-55	0.45	0.0718	1.2	1.67	3.7	0.169	3.5	981	24	998	23	1005	33
-56	0.33	0.388	0.8	41.95	2.0	0.784	1.8	3863	13	3818	19	3732	51
-57	0.22	0.0860	2.7	2.71	5.7	0.229	5.0	1339	52	1331	41	1327	60
-58	0.23	0.0788	2.3	1.90	7.5	0.175	7.1	1166	45	1082	48	1041	68
-59	0.47	0.0999	1.2	4.06	3.8	0.295	3.6	1621	22	1646	30	1666	53
-60	0.24	0.145	3.8	8.78	5.4	0.441	3.8	2281	64	2316	48	2354	75
-61	0.13	0.0707	1.7	1.27	4.8	0.130	4.5	949	34	833	27	790	33
-62	0.39	0.202	1.2	15.38	3.4	0.552	3.2	2844	20	2839	32	2832	73
-63	0.35	0.203	1.2	15.65	3.4	0.560	3.2	2848	19	2856	32	2868	74
孟定街群样品 10DX108													
-04	0.68	0.119	1.2	4.29	3.7	0.263	3.5	1933	22	1692	30	1505	47
-06	0.99	0.164	1.3	10.89	3.6	0.481	3.4	2497	22	2513	33	2533	70
-07	0.92	0.156	2.9	7.06	4.3	0.329	3.2	2407	48	2119	37	1835	51
-08	0.55	0.123	1.4	5.06	3.3	0.297	3.0	2005	25	1829	28	1678	45
-09	0.48	0.143	1.3	4.28	4.9	0.217	4.8	2264	23	1689	40	1265	54
-10	0.53	0.0822	1.9	2.42	4.2	0.214	3.8	1250	37	1249	30	1249	43
-11	0.62	0.0578	2.1	0.66	5.2	0.083	4.8	522	45	515	21	513	24
-12	0.66	0.0611	4.8	0.85	6.2	0.100	4.0	644	100	622	29	616	23

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1SD	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1SD	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1SD
-13	0.73	0.0729	2.9	1.22	4.5	0.121	3.5	1010	58	808	25	736	24
-14	0.72	0.0569	1.9	0.59	4.4	0.075	3.9	487	41	471	16	468	18
-15	0.61	0.101	1.2	3.30	3.2	0.237	3.0	1638	23	1480	25	1372	37
-16	0.95	0.0994	1.5	2.33	7.2	0.170	7.0	1613	28	1223	50	1014	65
-17	0.19	0.0776	2.0	1.48	4.0	0.139	3.5	1137	39	924	24	837	27
-18	1.84	0.0792	1.6	2.11	3.6	0.193	3.2	1178	31	1153	24	1140	33
-19	1.39	0.168	1.1	11.14	3.4	0.480	3.2	2541	19	2535	31	2528	67
-20	0.76	0.0800	1.7	1.43	5.1	0.130	4.8	1196	33	902	30	787	35
-21	0.27	0.168	1.1	11.05	3.5	0.478	3.3	2535	19	2528	32	2518	68
-22	0.39	0.0740	2.2	1.16	4.3	0.113	3.7	1043	45	781	23	693	24
-23	0.39	0.143	1.8	5.69	3.5	0.288	3.0	2265	31	1929	30	1633	43
-24	0.59	0.139	2.0	7.74	3.9	0.404	3.3	2216	34	2201	34	2186	61
-25	1.01	0.0845	1.5	2.33	3.8	0.200	3.5	1304	29	1223	27	1177	37
-26	0.59	0.0710	1.7	1.60	4.3	0.164	4.0	957	35	972	27	978	36
-27	0.49	0.0595	2.2	0.71	4.5	0.087	3.9	584	46	547	19	539	20
-27a	0.48	0.0577	1.5	0.67	3.9	0.084	3.6	518	33	519	16	519	18
-28	0.57	0.0877	1.7	2.98	3.5	0.246	3.0	1376	33	1402	26	1420	38
-29	0.35	0.0650	1.5	0.75	4.3	0.084	4.0	773	32	569	19	520	20
-30	0.59	0.102	2.5	1.05	8.7	0.075	8.3	1655	46	729	44	465	37
-31	0.47	0.197	1.3	14.68	3.4	0.541	3.1	2800	22	2794	32	2786	70
-32	0.58	0.169	2.3	1.96	3.9	0.084	3.2	2544	38	1102	26	522	16
-33	0.75	0.0781	2.8	1.16	6.8	0.108	6.2	1150	54	781	36	659	39
-34	0.31	0.0769	1.7	1.28	6.4	0.121	6.2	1118	33	839	36	737	43
-35	0.24	0.0740	1.3	1.74	3.6	0.170	3.4	1043	27	1023	23	1013	32
-36	0.54	0.0597	1.5	0.76	3.8	0.092	3.5	594	33	572	17	567	19
-37	0.59	0.0574	1.6	0.63	5.0	0.079	4.7	506	35	495	19	492	22
-38	0.50	0.0563	2.0	0.59	4.5	0.076	4.0	465	44	471	17	472	18
-39	1.24	0.0993	1.7	3.08	5.0	0.225	4.7	1612	31	1428	38	1308	56
-40	1.29	0.0810	1.4	1.00	4.0	0.089	3.7	1220	27	702	20	552	20
-41	0.56	0.0885	3.1	1.00	8.5	0.082	7.9	1394	59	702	42	506	38
-42	0.30	0.0766	1.7	1.31	4.6	0.124	4.2	1110	33	849	26	753	30
-43	0.49	0.0709	1.7	1.31	3.8	0.134	3.3	953	35	850	21	810	25
-44	1.25	0.0681	2.0	1.38	4.4	0.146	3.9	873	41	879	26	881	32
-45	0.27	0.0744	6.1	1.18	10.1	0.115	8.0	1053	119	793	54	704	53
-46	0.78	0.0723	1.7	1.70	7.2	0.170	7.0	994	33	1007	45	1013	65
-47	0.91	0.0742	1.7	1.76	4.2	0.172	3.9	1048	34	1031	27	1023	36
孟定街群样品 10DX110B													
-01	0.75	0.0723	2.1	1.69	4.9	0.169	4.4	996	43	1003	31	1007	41
-02	0.38	0.0733	1.2	1.77	5.2	0.176	5.0	1021	25	1036	33	1043	48
-03	0.66	0.2366	1.1	19.48	3.2	0.597	2.9	3097	18	3066	30	3018	71
-04	2.67	0.0794	2.4	2.08	4.0	0.190	3.2	1183	47	1142	27	1120	33
-05	0.03	0.0782	2.3	2.00	5.6	0.186	5.1	1151	45	1117	37	1099	51
-06	0.44	0.0729	1.3	1.67	4.0	0.166	3.8	1010	27	996	25	990	35
-07	0.22	0.0762	1.3	1.90	2.9	0.181	2.6	1099	25	1081	19	1072	25
-08	2.29	0.0667	2.0	1.28	5.1	0.139	4.7	830	41	838	29	841	37

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1SD	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1SD	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1SD
-09	1.02	0.158	1.7	10.09	5.9	0.464	5.6	2432	29	2443	53	2457	113
-10	0.34	0.151	1.3	8.45	4.6	0.407	4.4	2352	22	2281	41	2202	82
-11	0.87	0.0720	1.3	1.59	4.7	0.160	4.5	986	27	967	29	959	40
-12	0.25	0.0724	2.8	1.48	5.2	0.149	4.4	997	56	924	31	893	37
-13	1.23	0.0720	1.7	1.57	4.8	0.158	4.4	987	35	957	29	944	39
-14	0.51	0.188	1.3	13.55	3.4	0.524	3.2	2722	21	2719	32	2715	71
-15	1.16	0.0719	1.5	1.67	5.2	0.169	5.0	982	31	998	32	1004	46
-16	0.31	0.0673	3.1	0.75	5.3	0.081	4.3	847	63	568	23	500	21
-17	3.07	0.0724	1.7	1.64	3.2	0.164	2.7	997	34	985	20	979	24
-18	1.64	0.0659	1.3	1.20	3.7	0.133	3.5	802	28	802	20	802	26
-19	0.81	0.0668	1.6	1.24	4.7	0.135	4.4	830	32	821	26	817	34
-20	1.01	0.0733	1.6	1.69	5.1	0.167	4.9	1022	33	1004	32	995	45
-21	0.64	0.0735	1.4	1.70	5.5	0.168	5.3	1029	28	1008	34	998	49
-22	0.66	0.0692	1.6	1.41	4.5	0.148	4.2	905	33	892	26	887	35
-23	0.97	0.0626	2.1	1.01	5.0	0.117	4.6	696	44	708	25	711	31
-24	0.34	0.0726	1.5	1.57	4.3	0.157	4.1	1003	30	960	27	941	36
-25	0.76	0.0647	1.2	0.94	4.4	0.105	4.2	766	26	674	21	646	26
-26	0.08	0.0694	2.0	1.47	5.6	0.154	5.2	911	40	919	33	922	45
-27	0.68	0.0863	2.9	2.31	4.7	0.194	3.7	1344	55	1214	33	1142	38
-28	0.61	0.0998	1.9	3.87	5.4	0.281	5.1	1620	35	1607	43	1598	72
-29	0.65	0.155	1.8	9.90	4.7	0.462	4.3	2406	30	2426	42	2450	87
-30	0.59	0.186	2.1	6.37	4.7	0.248	4.2	2710	34	2028	40	1428	54
-31	0.07	0.139	2.6	2.55	6.1	0.133	5.5	2220	44	1286	43	802	41
-32	0.37	0.139	2.8	4.74	5.3	0.247	4.5	2219	49	1774	44	1421	57
-33	0.59	0.0735	1.5	1.80	5.8	0.177	5.6	1028	31	1045	37	1053	54
-34	0.07	0.0592	2.7	0.70	4.4	0.086	3.5	574	57	538	18	530	18
-35	0.21	0.0717	2.8	1.71	5.0	0.173	4.2	978	55	1012	32	1028	40
-36	0.06	0.0728	2.3	1.72	4.9	0.172	4.3	1008	47	1017	31	1022	41
-37	1.64	0.135	2.4	2.72	5.0	0.146	4.4	2164	41	1334	36	879	36
-39	0.94	0.100	1.3	4.03	5.4	0.291	5.3	1632	24	1640	43	1646	76
-40	0.03	0.0741	1.8	1.69	5.4	0.165	5.1	1043	35	1005	34	987	46
-41	0.05	0.0654	2.8	1.08	5.6	0.120	4.9	788	57	744	29	730	34
-51	0.75	0.0702	2.9	1.16	3.4	0.120	1.7	936	59	783	19	731	12
-52	0.11	0.0709	2.7	1.57	3.2	0.160	1.6	954	54	958	19	959	15
-53	0.19	0.155	1.1	7.92	3.7	0.370	3.5	2403	18	2222	33	2031	61
-54	0.66	0.158	2.1	7.05	5.4	0.323	5.0	2437	35	2118	47	1805	79
-55	0.44	0.159	1.4	9.43	2.1	0.429	1.6	2449	24	2381	19	2302	30
-56	0.60	0.0778	3.8	2.07	5.2	0.193	3.7	1141	73	1140	35	1139	38
-57	0.48	0.158	0.9	9.33	4.3	0.428	4.2	2436	16	2371	39	2296	81
-58	0.28	0.0743	2.5	1.78	3.7	0.174	2.7	1049	50	1038	24	1033	26
-59	0.33	0.0820	4.0	2.18	6.0	0.192	4.5	1246	76	1173	41	1134	47
-60	0.02	0.0700	3.5	1.49	5.7	0.154	4.5	929	71	927	34	925	39
-61	0.27	0.0759	2.9	1.94	3.6	0.185	2.2	1092	57	1095	24	1097	22
-62	0.95	0.0783	2.0	2.23	6.8	0.207	6.5	1153	40	1191	47	1212	71
-63	0.97	0.0722	3.1	1.70	4.3	0.171	3.1	993	61	1009	27	1017	29

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1SD	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1SD	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1SD
-64	0.13	0.0579	3.7	0.71	4.1	0.088	1.8	528	79	543	17	547	10
-65	0.22	0.161	8.4	10.41	10.6	0.468	6.5	2469	135	2472	94	2475	133
-66	0.29	0.0716	3.0	1.62	4.5	0.164	3.4	974	59	976	28	977	31
-67	0.32	0.0775	2.9	1.65	8.0	0.154	7.4	1135	56	988	49	923	64
-68	2.46	0.0914	4.5	1.89	5.9	0.150	3.8	1455	83	1076	39	899	32
-69	0.46	0.0694	2.4	1.28	3.7	0.134	2.8	911	50	837	21	810	21
-70	0.19	0.154	0.9	4.99	5.7	0.235	5.6	2388	16	1818	47	1362	69
-71	0.31	0.0972	2.0	3.72	5.8	0.278	5.4	1570	37	1576	45	1581	76
孟定街群样品 10DX111B													
-01	0.50	0.0710	1.6	1.59	4.2	0.162	3.8	958	32	965	26	968	34
-02	0.57	0.113	1.5	5.23	3.6	0.335	3.3	1852	26	1857	30	1861	53
-03	2.89	0.0586	7.7	0.73	8.5	0.090	3.5	552	161	556	36	556	19
-04	1.23	0.0797	1.4	2.11	2.8	0.192	2.5	1190	27	1153	19	1133	26
-05	1.75	0.0595	2.2	0.77	4.2	0.093	3.6	585	47	578	18	576	20
-06	0.22	0.0714	1.6	1.59	3.6	0.162	3.2	970	32	968	22	967	28
-07	0.20	0.0716	1.3	1.62	3.3	0.164	3.0	975	27	977	20	978	27
-08	0.17	0.0700	1.4	1.49	3.5	0.155	3.2	927	29	928	21	929	28
-09	0.13	0.0915	2.4	3.15	4.4	0.250	3.7	1457	44	1445	33	1437	47
-10	0.55	0.0767	3.2	1.93	5.7	0.182	4.7	1113	64	1090	38	1078	47
-11	1.17	0.103	2.4	3.79	4.6	0.268	3.9	1674	43	1591	36	1530	53
-11A	0.34	0.103	2.2	4.04	4.4	0.284	3.8	1687	41	1643	35	1609	54
-12	0.34	0.0720	1.5	1.60	3.9	0.161	3.6	987	31	971	24	964	32
-13	0.69	0.0721	1.8	1.63	3.8	0.164	3.4	988	36	982	24	979	31
-14	0.20	0.0768	1.9	1.92	4.2	0.182	3.7	1116	38	1089	28	1075	37
-15	0.39	0.0587	2.2	0.73	4.1	0.090	3.5	558	47	558	18	558	19
-15A	0.51	0.145	1.5	6.51	4.5	0.325	4.3	2291	25	2047	39	1813	68
-16	1.24	0.0708	1.5	1.56	5.4	0.160	5.2	953	31	956	33	957	46
-17	0.87	0.0794	2.0	2.21	4.3	0.202	3.8	1183	40	1184	30	1185	41
-18	0.28	0.0704	2.6	1.45	7.3	0.150	6.8	939	53	911	43	900	57
-19	0.91	0.0786	1.6	2.09	3.6	0.193	3.2	1162	32	1147	24	1139	33
-20	0.60	0.0713	1.9	1.59	4.0	0.162	3.5	967	38	966	24	965	31
-21	2.50	0.162	2.1	10.39	4.7	0.464	4.3	2480	35	2470	43	2458	86
-22	0.53	0.0906	1.5	3.19	3.7	0.256	3.3	1439	28	1456	28	1467	44
-23	0.18	0.0772	1.3	1.97	3.5	0.185	3.2	1127	25	1106	23	1095	33
-24	0.27	0.0702	1.8	1.42	3.2	0.147	2.7	935	36	897	19	882	22
-25	0.37	0.0718	1.6	1.63	3.0	0.165	2.5	980	31	981	19	982	23
-25A	0.31	0.0717	1.8	1.56	5.3	0.158	5.0	977	37	953	32	943	43
-26	0.46	0.0795	1.8	2.25	3.9	0.205	3.5	1186	35	1198	27	1205	38
-27	0.20	0.0769	1.6	1.94	4.7	0.183	4.4	1119	32	1095	31	1082	44
-28	0.76	0.167	1.5	10.81	4.0	0.470	3.7	2525	25	2507	36	2486	76
-29	0.65	0.167	1.2	11.05	3.4	0.479	3.2	2532	20	2528	32	2522	67
-30	0.92	0.102	2.1	4.20	4.1	0.298	3.5	1665	38	1674	33	1681	52
-31	1.51	0.0780	2.3	2.10	4.4	0.195	3.8	1148	45	1150	30	1151	40
-32	0.55	0.0653	4.0	1.13	5.9	0.125	4.3	784	82	767	31	762	31
-33	1.02	0.0995	1.7	3.88	4.6	0.283	4.3	1614	31	1609	36	1605	61

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1SD	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1SD	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1SD
-34	0.94	0.0725	1.9	1.71	5.4	0.171	5.0	1000	39	1012	34	1017	47
-35	1.61	0.0776	3.2	2.06	4.8	0.193	3.6	1136	63	1136	32	1136	37
-36	0.46	0.113	1.6	4.99	3.7	0.322	3.4	1840	28	1818	31	1800	53
-37	1.04	0.0800	3.8	2.14	5.5	0.194	4.0	1197	73	1163	38	1146	42
-38	0.38	0.0764	2.3	1.92	4.1	0.182	3.4	1104	45	1088	27	1079	34
-39	0.48	0.0912	1.7	3.08	3.8	0.245	3.5	1451	31	1428	29	1413	44
-40	0.58	0.155	1.2	8.21	3.0	0.385	2.8	2396	21	2254	27	2101	50
-41	0.17	0.0706	1.5	1.47	3.7	0.151	3.4	946	31	919	22	908	29
-42	2.38	0.166	1.3	11.25	3.8	0.491	3.6	2519	22	2544	35	2575	75
-43	1.00	0.0717	3.2	1.49	4.7	0.151	3.5	979	64	927	28	906	29
-44	0.37	0.0918	1.8	2.11	3.6	0.166	3.1	1463	34	1151	24	992	28
-45	0.28	0.0709	2.3	1.09	4.9	0.111	4.3	956	46	746	26	678	28
-46	0.59	0.147	1.5	6.71	5.4	0.330	5.2	2315	26	2074	46	1841	82
-47	0.13	0.0706	1.6	1.53	3.9	0.158	3.6	945	32	944	24	944	31
-48	0.80	0.0564	3.8	0.57	4.8	0.074	3.0	468	82	460	18	458	13
-49	0.40	0.0659	1.9	1.20	4.0	0.132	3.5	803	39	800	22	799	26
-50	0.22	0.0706	2.1	1.53	4.3	0.158	3.8	945	42	944	26	944	33
-51	0.07	0.0769	6.0	2.00	7.0	0.189	3.6	1117	116	1116	47	1115	37
-52	0.25	0.0713	3.9	1.58	5.4	0.160	3.7	965	78	961	33	959	33
-53	0.30	0.0715	1.4	1.63	3.9	0.166	3.6	970	29	983	24	989	33
-54	0.19	0.0779	0.9	2.02	2.0	0.188	1.8	1145	18	1121	14	1108	18
-55	0.42	0.0776	2.2	2.14	4.3	0.200	3.7	1136	42	1163	29	1177	40
-56	0.75	0.0727	1.4	1.67	3.1	0.166	2.8	1006	28	997	20	993	26
-57	0.26	0.0711	1.0	1.61	4.8	0.164	4.7	959	20	973	30	979	43
-58	0.11	0.0694	2.5	1.55	5.3	0.162	4.7	910	50	951	32	969	42
-59	0.03	0.0705	2.0	1.51	4.1	0.155	3.6	943	40	934	25	930	31
-60	0.15	0.0630	3.9	0.79	5.5	0.091	3.8	708	82	592	24	562	20
-61	0.38	0.0850	3.2	2.50	4.8	0.213	3.6	1315	61	1271	34	1245	41
-62	1.15	0.0733	2.1	1.70	4.1	0.168	3.5	1022	42	1009	26	1003	32
孟定街群样品 10DX111F													
-01	0.45	0.0707	1.6	1.54	3.9	0.158	3.5	950	32	948	23	947	31
-02	1.07	0.0979	1.4	3.65	3.6	0.270	3.3	1584	25	1560	28	1543	45
-03	0.87	0.0760	1.9	1.89	4.1	0.181	3.6	1094	37	1079	27	1071	36
-04	1.36	0.164	1.2	9.94	2.7	0.440	2.4	2497	20	2430	24	2350	47
-05	0.30	0.177	1.8	11.84	4.4	0.485	4.0	2625	30	2592	40	2549	84
-06	0.78	0.163	1.2	10.71	3.7	0.476	3.5	2489	21	2498	34	2510	72
-07	0.60	0.167	1.3	10.77	3.6	0.468	3.4	2527	21	2503	33	2475	70
-08	0.27	0.150	2.4	4.54	4.0	0.220	3.2	2343	41	1739	33	1282	37
-09	0.19	0.0746	2.1	1.75	3.6	0.170	2.9	1058	42	1028	23	1014	27
-10	0.10	0.0625	2.1	0.96	3.7	0.112	3.1	690	44	685	18	683	20
-11	0.13	0.0709	1.4	1.53	3.4	0.156	3.1	956	28	941	21	935	27
-12	0.72	0.0873	1.6	2.84	3.7	0.236	3.3	1368	30	1366	27	1365	40
-13	0.01	0.218	1.2	17.21	3.6	0.573	3.4	2964	19	2947	34	2921	80
-14	0.97	0.162	1.5	10.44	3.8	0.466	3.5	2481	25	2474	35	2466	72
-15	0.06	0.112	7.3	5.17	8.0	0.335	3.3	1830	127	1848	66	1865	53

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1RSD%	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1SD	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1SD	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1SD
-16	0.73	0.163	2.0	10.47	4.0	0.467	3.5	2483	33	2477	37	2470	71
-17	0.59	0.0738	2.1	1.77	4.0	0.174	3.4	1036	41	1034	26	1034	33
-18	0.71	0.0789	1.4	2.16	3.8	0.199	3.6	1170	28	1168	26	1167	38
-19	0.79	0.0750	1.7	1.81	3.5	0.175	3.1	1069	34	1048	23	1038	30
-20	0.70	0.173	1.2	12.07	4.1	0.507	3.9	2584	19	2610	38	2644	85
-21	0.71	0.171	1.3	11.42	3.8	0.484	3.6	2570	21	2558	35	2543	75
-22	0.90	0.173	1.2	11.29	3.9	0.473	3.7	2588	20	2548	36	2498	76
-23	0.55	0.0696	1.7	1.46	3.9	0.152	3.5	917	35	914	23	913	30
-24	1.44	0.0701	2.0	1.58	4.0	0.163	3.4	932	41	962	24	975	31
-26	0.71	0.0709	1.9	1.60	4.7	0.163	4.2	955	39	969	29	976	38
-27	0.96	0.0584	3.3	0.71	4.8	0.088	3.5	544	70	543	20	543	18
-28	1.04	0.113	1.4	4.94	3.7	0.317	3.4	1845	25	1808	30	1777	53
-29	0.88	0.168	1.6	11.28	3.5	0.486	3.1	2540	26	2546	32	2554	65
-30	1.57	0.0609	2.1	0.86	4.1	0.103	3.5	637	45	632	19	631	21
-31	0.23	0.164	1.1	10.27	3.8	0.453	3.6	2501	19	2459	35	2409	72
-32	0.28	0.164	1.3	10.87	5.8	0.480	5.7	2499	22	2512	53	2528	117
-33	0.32	0.180	1.3	12.38	3.6	0.498	3.4	2654	21	2634	33	2607	72
-34	0.86	0.0702	2.1	1.45	3.5	0.150	2.8	935	42	911	21	901	24
-35	0.26	0.0969	1.8	3.22	4.7	0.241	4.3	1565	34	1462	36	1392	54
-36	0.03	0.0707	1.6	1.53	3.7	0.157	3.4	949	32	942	23	940	29
-37	1.06	0.177	1.3	12.14	4.5	0.496	4.3	2629	21	2615	41	2598	91
-38	0.14	0.168	1.3	11.41	4.0	0.493	3.8	2537	22	2557	37	2583	80
-39	0.96	0.190	2.2	7.56	4.7	0.289	4.2	2742	36	2180	42	1635	60
-40	0.55	0.164	1.3	10.17	4.6	0.451	4.4	2494	21	2450	41	2398	88
-41	0.10	0.273	1.9	23.93	4.9	0.636	4.5	3323	30	3265	47	3172	112
-42	0.44	0.291	1.6	26.49	3.5	0.660	3.1	3425	25	3365	33	3266	78
-43	0.52	0.102	1.5	4.07	3.9	0.291	3.6	1652	28	1649	31	1646	52
-44	0.70	0.132	1.3	6.97	4.1	0.384	3.9	2120	22	2108	36	2096	69
-45	1.10	0.103	1.6	4.18	3.7	0.295	3.4	1679	29	1671	30	1664	49
-46	0.11	0.0755	1.3	1.90	4.0	0.182	3.8	1083	26	1080	26	1079	38
-47	0.87	0.101	2.6	3.76	4.7	0.270	3.9	1647	47	1585	37	1538	53
-48	0.85	0.103	1.6	3.89	4.5	0.275	4.2	1672	29	1612	36	1567	58
-49	0.55	0.203	1.5	15.09	4.0	0.540	3.7	2848	24	2821	37	2784	83
-52	1.53	0.0791	2.4	2.17	3.9	0.199	3.1	1175	47	1171	27	1169	33
-53	0.18	0.0733	2.2	1.73	4.0	0.171	3.4	1022	43	1019	26	1018	32
-54	0.06	0.220	2.9	17.86	4.5	0.589	3.4	2981	47	2982	42	2984	81
-55	0.90	0.100	1.7	3.38	3.6	0.245	3.2	1628	32	1501	28	1412	40
-56	0.46	0.0846	2.3	2.61	4.3	0.224	3.6	1306	44	1304	31	1303	42
-57	0.47	0.0694	3.7	1.38	5.7	0.145	4.4	909	73	882	33	872	36
-58	0.56	0.162	0.7	9.80	3.5	0.440	3.4	2471	12	2416	32	2350	67
-59	0.02	0.0757	7.6	1.85	8.2	0.178	3.2	1087	145	1065	53	1054	31
-60	0.27	0.0784	1.9	2.09	5.6	0.193	5.3	1158	37	1145	38	1138	55
-61	0.49	0.0588	3.7	0.75	4.7	0.092	3.0	559	78	566	20	567	16
-62	0.31	0.0718	1.9	1.61	3.1	0.162	2.5	981	38	973	19	970	22
-63	0.50	0.0750	4.0	1.72	4.8	0.166	2.6	1068	79	1016	30	992	24

注:U 含量没有进行元素分馏校正,只是估计值

附表 2 公养河群和孟定街群碎屑锆石 Lu-Hf 同位素测试结果

Appendix Table 2 Lu-Hf isotope data for detrital zircons from the Gongyanghe and Mengdingjie groups

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	Age (Ma)	Hf_i	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ga)	t_{DM2} (Ga)
公养河群样品 10DX93A									
-01	0.281751	0.000039	0.000568	0.014525	832	0.281742	-18.1	2.1	2.9
-02	0.281032	0.000055	0.001774	0.041393	2443	0.280949	-9.8	3.2	3.6
-03	0.281689	0.000042	0.000922	0.023449	734	0.281676	-22.6	2.2	3.1
-05	0.281219	0.000034	0.00074	0.019578	1593	0.281197	-20.4	2.8	3.6
-06	0.281246	0.000031	0.00005	0.001427	2495	0.281243	1.9	2.7	2.9
-07	0.282192	0.00004	0.000577	0.012777	860	0.282183	-1.9	1.5	1.9
-08	0.282104	0.000039	0.000428	0.011005	541	0.2821	-11.9	1.6	2.3
-09	0.281972	0.000033	0.001428	0.035357	940	0.281947	-8.4	1.8	2.4
-10	0.282047	0.000039	0.000854	0.021566	1031	0.28203	-3.4	1.7	2.1
-11	0.280773	0.000046	0.000526	0.013346	3119	0.280741	-1.5	3.4	3.6
-12	0.282087	0.000033	0.000463	0.012254	882	0.28208	-5	1.6	2.1
-13	0.281747	0.000035	0.000608	0.015267	832	0.281738	-18.2	2.1	2.9
-14	0.281334	0.000036	0.000395	0.009907	1561	0.281323	-16.6	2.6	3.4
-15	0.28212	0.000037	0.000603	0.014436	969	0.282109	-2	1.6	2.0
-16	0.282003	0.00004	0.000697	0.017958	1141	0.281988	-2.5	1.8	2.1
-17	0.282132	0.000044	0.001038	0.024241	903	0.282115	-3.3	1.6	2.0
-18	0.280745	0.000036	0.00028	0.007054	2450	0.280732	-17.3	3.4	4.1
-19	0.281985	0.00003	0.000442	0.010781	929	0.281977	-7.6	1.8	2.3
-20	0.281474	0.000041	0.000363	0.00871	1601	0.281463	-10.8	2.5	3.0
-21	0.281903	0.000048	0.000658	0.016901	1028	0.28189	-8.5	1.9	2.4
-22	0.282079	0.000048	0.000451	0.011448	549	0.282074	-12.6	1.6	2.3
-23	0.28143	0.000043	0.000612	0.016441	1561	0.281412	-13.4	2.5	3.2
-24	0.28246	0.000043	0.00139	0.027486	1027	0.282433	10.7	1.1	1.2
-25	0.280924	0.000049	0.001435	0.03842	2440	0.280857	-13.1	3.3	3.8
-26	0.281716	0.000043	0.000576	0.014609	739	0.281708	-21.4	2.1	3.0
-27	0.280845	0.000037	0.000338	0.008333	2509	0.280829	-12.6	3.3	3.8
-28	0.280815	0.000042	0.000744	0.017935	2431	0.280781	-16.1	3.4	4.0
-29	0.281902	0.000038	0.000395	0.010623	924	0.281895	-10.6	1.9	2.5
-30	0.281224	0.000041	0.000586	0.015153	1605	0.281207	-19.8	2.8	3.6
-31	0.282492	0.000031	0.000797	0.041248	682	0.282482	4.8	1.1	1.3
-32	0.280489	0.000028	0.001175	0.052431	3522	0.280409	-3.9	3.8	4.1
-34	0.281923	0.000029	0.000484	0.020863	1131	0.281913	-5.4	1.8	2.3
-35	0.281897	0.000023	0.000328	0.014663	914	0.281891	-11	1.9	2.5
-36	0.281805	0.000029	0.000484	0.021344	1148	0.281795	-9.2	2.0	2.6
-37	0.282157	0.000035	0.003095	0.134988	1019	0.282097	-1.3	1.6	2.0
-38	0.282067	0.000032	0.001127	0.052458	642	0.282053	-11.3	1.7	2.3
-39	0.280982	0.000026	0.00043	0.019656	2455	0.280962	-9.1	3.1	3.6
-40	0.281027	0.000024	0.000025	0.001327	2431	0.281026	-7.3	3.0	3.4
-41	0.281213	0.000022	0.000548	0.023165	2523	0.281187	0.5	2.8	3.0
-42	0.28212	0.000029	0.000479	0.021461	990	0.282111	-1.5	1.6	2.0
-43	0.280371	0.000031	0.001552	0.065388	3157	0.280277	-17.2	4.0	4.6
-44	0.281824	0.000022	0.000077	0.00393	906	0.281823	-13.6	2.0	2.7
-45	0.281505	0.000028	0.001419	0.060842	1774	0.281457	-7	2.5	2.9
-46	0.282105	0.000022	0.00073	0.034886	991	0.282091	-2.2	1.6	2.0
-47	0.280663	0.00003	0.000167	0.009275	2467	0.280655	-19.7	3.5	4.2
-48	0.281467	0.000022	0.00032	0.013202	1554	0.281457	-12	2.5	3.1
-49	0.280963	0.000027	0.000554	0.025864	2077	0.280941	-18.5	3.2	3.9
-52	0.281924	0.000032	0.000588	0.026297	1266	0.28191	-2.4	1.9	2.2
-53	0.282085	0.000028	0.000902	0.042707	996	0.282068	-2.9	1.6	2.1

续附表 2

Continued Appendix Table 2

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	Age (Ma)	Hf_i	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ga)	t_{DM2} (Ga)
-56	0.281465	0.000039	0.001441	0.056215	2496	0.281396	7.3	2.5	2.6
-57	0.282215	0.000034	0.000626	0.02983	1030	0.282203	2.7	1.5	1.7
-59	0.282394	0.000033	0.000645	0.025007	1124	0.28238	11	1.2	1.3
-60	0.281564	0.000027	0.000537	0.026163	1730	0.281546	-4.9	2.3	2.7
-61	0.281022	0.000028	0.001207	0.058335	2492	0.280965	-8.1	3.1	3.5
公养河群样品 10DX94									
-01	0.281584	0.000011	0.000856	0.033504	1994	0.281552	1.3	2.3	2.6
-02	0.281746	0.000016	0.000571	0.019620	1714	0.281727	1.2	2.1	2.3
-03	0.281898	0.000010	0.000895	0.037422	1452	0.281873	0.5	1.9	2.2
-04	0.282265	0.000013	0.000405	0.016955	975	0.282258	3.4	1.4	1.6
-05	0.281844	0.000018	0.001552	0.053744	987	0.281815	-12.1	2.0	2.6
-06	0.281902	0.000026	0.000474	0.016190	1258	0.281891	-3.3	1.9	2.3
-07	0.281787	0.000017	0.001151	0.034862	973	0.281766	-14.1	2.1	2.7
-08	0.282331	0.000019	0.001190	0.035730	1016	0.282308	6.1	1.3	1.5
-09	0.281811	0.000010	0.000711	0.028550	1016	0.281798	-12.0	2.0	2.6
-10	0.281750	0.000015	0.001122	0.034556	1400	0.281721	-6.1	2.1	2.6
-12	0.282190	0.000018	0.000875	0.030068	1067	0.282173	2.4	1.5	1.8
-13	0.281897	0.000015	0.001847	0.060756	763	0.281871	-15.1	2.0	2.6
-14	0.281833	0.000014	0.000459	0.015798	1344	0.281821	-3.8	2.0	2.4
-16	0.281001	0.000021	0.001162	0.035690	2408	0.280948	-10.6	3.1	3.6
-18	0.281748	0.000012	0.000984	0.034757	783	0.281734	-19.5	2.1	2.9
-19	0.282228	0.000019	0.001953	0.059205	974	0.282192	1.0	1.5	1.8
-20	0.281126	0.000008	0.000610	0.024152	991	0.281115	-36.8	2.9	4.2
-21	0.281107	0.000010	0.000342	0.012632	2374	0.281091	-6.3	2.9	3.3
-24	0.282058	0.000015	0.000589	0.015786	971	0.282047	-4.2	1.7	2.1
-25	0.282091	0.000016	0.000738	0.028151	1015	0.282077	-2.2	1.6	2.0
-26	0.281992	0.000018	0.002123	0.070175	797	0.281960	-11.2	1.8	2.4
-27	0.281231	0.000023	0.001245	0.041778	1418	0.281197	-24.3	2.8	3.7
-28	0.281484	0.000016	0.001577	0.049377	1856	0.281428	-6.2	2.5	2.9
-29	0.281224	0.000012	0.001463	0.056163	1882	0.281172	-14.7	2.9	3.5
-31	0.282297	0.000015	0.001343	0.041287	980	0.282272	4.0	1.4	1.6
-34	0.281796	0.000013	0.001025	0.039771	1367	0.281769	-5.1	2.1	2.5
-35	0.281184	0.000011	0.000769	0.032600	1734	0.281158	-18.6	2.9	3.6
-37	0.282558	0.000015	0.000821	0.037856	625	0.282548	5.9	1.0	1.2
-38	0.281941	0.000009	0.000862	0.036432	701	0.281930	-14.4	1.8	2.5
-39	0.281922	0.000009	0.000402	0.017465	800	0.281916	-12.7	1.8	2.5
-40	0.281795	0.000010	0.000368	0.012973	943	0.281788	-14.0	2.0	2.7
-42	0.281382	0.000011	0.000451	0.020122	996	0.281374	-27.5	2.6	3.6
-44	0.281937	0.000011	0.000337	0.014330	536	0.281934	-17.9	1.8	2.6
-45	0.282054	0.000009	0.000681	0.030303	785	0.282044	-8.5	1.7	2.2
-46	0.281376	0.000013	0.000452	0.016946	951	0.281368	-28.7	2.6	3.6
-49	0.281068	0.000011	0.000927	0.041570	1051	0.281049	-37.8	3.0	4.3
-51	0.281268	0.000014	0.000584	0.017811	1716	0.281249	-15.7	2.7	3.4
-53	0.281934	0.000009	0.000948	0.036598	1167	0.281913	-4.5	1.9	2.3
-54	0.281182	0.000011	0.001051	0.034720	1843	0.281145	-16.5	2.9	3.6
-56	0.280155	0.000010	0.000742	0.031354	1005	0.280141	-71.0	4.2	6.2
-59	0.281981	0.000011	0.001244	0.042512	1041	0.281957	-5.8	1.8	2.3
孟定街群样品 10DX108									
-06	0.281323	0.000034	0.000633	0.027717	2497	0.281292	3.7	2.7	2.8
-10	0.282021	0.000025	0.001915	0.087008	1249	0.281976	-0.5	1.8	2.1

续附表 2

Continued Appendix Table 2

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	Age (Ma)	Hf_i	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ga)	t_{DM2} (Ga)
-11	0.282110	0.000033	0.001556	0.054501	513	0.282095	-12.7	1.6	2.3
-12	0.282517	0.000028	0.000756	0.032937	616	0.282509	4.3	1.0	1.3
-14	0.282284	0.000037	0.002045	0.076344	468	0.282266	-7.6	1.4	1.9
-19	0.281307	0.000026	0.000522	0.022867	2541	0.281281	4.3	2.7	2.8
-21	0.281245	0.000031	0.000542	0.017767	2535	0.281218	1.9	2.8	2.9
-26	0.281967	0.000025	0.000819	0.035515	978	0.281952	-7.4	1.8	2.3
-27	0.282082	0.000030	0.001793	0.063527	539	0.282064	-13.2	1.7	2.3
-28	0.282087	0.000027	0.001941	0.075448	1420	0.282035	5.5	1.7	1.8
-31	0.280987	0.000038	0.000845	0.032609	2800	0.280941	-1.8	3.1	3.4
-35	0.282208	0.000037	0.001359	0.047131	1013	0.282182	1.5	1.5	1.8
-36	0.282354	0.000038	0.001557	0.047029	567	0.282338	-2.9	1.3	1.7
-37	0.282389	0.000025	0.001536	0.056713	492	0.282374	-3.2	1.2	1.7
-38	0.282755	0.000045	0.001407	0.041686	472	0.282742	9.3	0.7	0.9
-44	0.282032	0.000027	0.000432	0.020846	881	0.282025	-7.0	1.7	2.2
孟定街群样品 10DX110B									
-02	0.282117	0.000039	0.000782	0.01929	1043	0.282102	-0.6	1.6	1.9
-04	0.280976	0.000035	0.00094	0.022463	1120	0.280956	-39.5	3.2	4.4
-06	0.281873	0.000032	0.000133	0.003669	990	0.28187	-10	1.9	2.5
-07	0.282192	0.000036	0.001585	0.039801	1072	0.28216	2.1	1.5	1.8
-08	0.282014	0.000041	0.001039	0.026789	841	0.281998	-8.8	1.8	2.3
-10	0.280904	0.000038	0.000673	0.018276	2352	0.280874	-14.6	3.2	3.8
-11	0.282346	0.00004	0.000549	0.012454	959	0.282336	5.8	1.3	1.5
-13	0.282113	0.000036	0.000496	0.012846	944	0.282105	-2.7	1.6	2.0
-14	0.280693	0.000035	0.000563	0.012961	2722	0.280664	-13.5	3.5	4.1
-15	0.282168	0.000039	0.000872	0.022109	1004	0.282151	0.3	1.5	1.9
-17	0.282008	0.000032	0.000514	0.013557	979	0.281998	-5.8	1.7	2.2
-18	0.281658	0.000038	0.000803	0.019312	802	0.281645	-22.2	2.2	3.1
-19	0.28231	0.000041	0.000634	0.015665	817	0.2823	1.4	1.3	1.6
-20	0.281797	0.000046	0.00067	0.015651	995	0.281784	-13	2.0	2.7
-21	0.282232	0.00004	0.0011	0.02774	998	0.282211	2.2	1.4	1.7
-22	0.282115	0.000033	0.00009	0.002694	887	0.282113	-3.7	1.6	2.0
-23	0.282623	0.00004	0.001994	0.050222	711	0.282596	9.5	0.9	1.0
-24	0.282059	0.000033	0.000356	0.009492	941	0.282053	-4.7	1.7	2.1
-28	0.282016	0.000036	0.001269	0.029837	1620	0.281978	7.9	1.8	1.8
-29	0.281462	0.000039	0.00113	0.025909	2406	0.28141	5.8	2.5	2.6
-33	0.281894	0.000028	0.000705	0.027937	1053	0.28188	-8.3	1.9	2.4
-39	0.28193	0.00003	0.001489	0.069888	1632	0.281884	4.9	1.9	2.0
-52	0.28201	0.000025	0.000801	0.038553	959	0.281995	-6.3	1.7	2.2
-56	0.282161	0.000025	0.000776	0.032272	1139	0.282145	3	1.5	1.8
-57	0.280824	0.000024	0.00067	0.026113	2436	0.280792	-15.5	3.3	4.0
-58	0.282313	0.000027	0.001214	0.053769	1033	0.282289	5.8	1.3	1.5
-59	0.282009	0.000025	0.001308	0.050522	1134	0.281981	-2.9	1.8	2.2
-61	0.2821	0.000024	0.001239	0.05631	1097	0.282074	-0.4	1.6	2.0
-62	0.2821	0.000024	0.001239	0.05631	1212	0.282071	2.1	1.6	1.9
-63	0.281959	0.000025	0.000351	0.015511	1017	0.281952	-6.5	1.8	2.3
-64	0.282145	0.000029	0.000119	0.005415	547	0.282144	-10.2	1.5	2.2
-65	0.281393	0.000032	0.000856	0.034141	2469	0.281352	5.1	2.6	2.7
-66	0.282499	0.000031	0.002213	0.104573	977	0.282458	10.5	1.1	1.2
-71	0.28143	0.000031	0.000546	0.022748	1570	0.281413	-13.2	2.5	3.1

续附表 2

Continued Appendix Table 2

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	Age (Ma)	Hf_i	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ga)	t_{DM2} (Ga)
孟定街群样品 10DX111B									
-01	0.281949	0.000042	0.001033	0.026805	968	0.28193	-8.4	1.8	2.4
-02	0.281379	0.000033	0.000526	0.014522	1852	0.28136	-8.7	2.6	3.1
-03	0.282089	0.000038	0.000405	0.010681	556	0.282084	-12.1	1.6	2.3
-04	0.281493	0.000031	0.001037	0.026713	1133	0.281471	-21	2.5	3.3
-05	0.281685	0.000044	0.000253	0.00669	576	0.281683	-25.9	2.2	3.2
-06	0.282101	0.000034	0.00098	0.025399	967	0.282083	-3	1.6	2.0
-07	0.281956	0.000029	0.000318	0.008779	978	0.28195	-7.5	1.8	2.3
-08	0.28208	0.000032	0.000316	0.007735	929	0.282075	-4.2	1.6	2.1
-09	0.281653	0.00004	0.001892	0.047397	1437	0.281602	-9.5	2.3	2.8
-10	0.282071	0.000032	0.000599	0.016126	1078	0.282059	-1.4	1.7	2.0
-12	0.282061	0.000032	0.000282	0.007983	964	0.282055	-4.1	1.7	2.1
-13	0.282002	0.000043	0.00089	0.022351	979	0.281985	-6.2	1.8	2.2
-14	0.28175	0.000041	0.000665	0.01497	1075	0.281736	-12.9	2.1	2.7
-15	0.28147	0.000041	0.000473	0.01101	558	0.281465	-34	2.5	3.6
-16	0.281879	0.000029	0.000395	0.010067	957	0.281872	-10.7	1.9	2.5
-17	0.281912	0.000033	0.000999	0.02658	1185	0.281889	-5	1.9	2.3
-18	0.281852	0.000048	0.000275	0.005906	900	0.281848	-12.9	1.9	2.6
-19	0.281898	0.000042	0.000583	0.014953	1139	0.281885	-6.2	1.9	2.4
-20	0.282116	0.000041	0.000712	0.018454	965	0.282103	-2.3	1.6	2.0
-21	0.281137	0.000037	0.000127	0.003226	2480	0.281131	-2.5	2.9	3.2
-22	0.281905	0.000039	0.001307	0.034242	1467	0.281869	0.6	1.9	2.2
-23	0.281883	0.000034	0.000851	0.022138	1095	0.281866	-7.8	1.9	2.4
-24	0.282283	0.00003	0.000471	0.010705	882	0.282275	1.9	1.4	1.7
-25	0.282009	0.000041	0.000446	0.01304	982	0.282	-5.6	1.7	2.2
-26	0.281946	0.000031	0.000398	0.010023	1205	0.281936	-2.9	1.8	2.2
-27	0.282055	0.000032	0.000686	0.018191	1082	0.282041	-1.9	1.7	2.1
-28	0.281132	0.000035	0.000528	0.011862	2525	0.281106	-2.3	2.9	3.2
-29	0.281233	0.000035	0.000562	0.013007	2532	0.281205	1.4	2.8	3.0
-30	0.281865	0.000044	0.001352	0.032633	1665	0.281823	3.5	2.0	2.2
-31	0.281979	0.000027	0.000555	0.025116	1151	0.281967	-3	1.8	2.2
-32	0.281925	0.000031	0.000507	0.020396	762	0.281918	-13.4	1.8	2.5
-33	0.281668	0.000028	0.001542	0.068708	1614	0.281621	-4.9	2.3	2.7
-34	0.282143	0.00003	0.001592	0.077415	1017	0.282112	-0.9	1.6	1.9
-35	0.281907	0.000031	0.000757	0.034329	1136	0.281891	-6	1.9	2.4
-36	0.281585	0.000025	0.000798	0.035149	1840	0.281557	-2	2.3	2.6
-37	0.281817	0.000024	0.000335	0.015868	1146	0.28181	-8.7	2.0	2.5
-38	0.28201	0.000029	0.00065	0.028653	1079	0.281997	-3.5	1.7	2.2
-39	0.281783	0.000024	0.000882	0.038589	1413	0.28176	-4.4	2.1	2.5
-41	0.281995	0.000027	0.000277	0.012179	908	0.28199	-7.6	1.7	2.3
-42	0.281026	0.00003	0.000344	0.015398	2519	0.28101	-5.9	3.0	3.4
-43	0.282059	0.00003	0.001561	0.07524	906	0.282032	-6.2	1.7	2.2
-48	0.282407	0.000029	0.000718	0.031268	458	0.282401	-3	1.2	1.6
-49	0.282522	0.000027	0.001161	0.056624	799	0.282504	8.2	1.0	1.2
-50	0.28208	0.000029	0.000804	0.039381	944	0.282065	-4.2	1.6	2.1
-52	0.282384	0.00003	0.000707	0.030311	959	0.282371	7	1.2	1.4
-53	0.282142	0.000022	0.000759	0.034879	989	0.282128	-0.9	1.6	1.9
-54	0.282084	0.000026	0.001093	0.05063	1108	0.282061	-0.6	1.7	2.0
-55	0.281865	0.000029	0.000727	0.031768	1177	0.281849	-6.6	1.9	2.4
-56	0.282101	0.000025	0.000783	0.03575	993	0.282086	-2.3	1.6	2.0

续附表 2

Continued Appendix Table 2

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	Age (Ma)	Hf_i	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
-57	0.281887	0.000021	0.0005	0.023104	979	0.281878	-10	1.9	2.5
-58	0.282273	0.000032	0.001368	0.064892	969	0.282248	2.9	1.4	1.7
-60	0.28238	0.000026	0.000297	0.014077	562	0.282377	-1.6	1.2	1.6
-61	0.281954	0.000032	0.001383	0.054935	1245	0.281922	-2.5	1.8	2.2
-62	0.282176	0.000034	0.00109	0.050459	1003	0.282155	0.3	1.5	1.9
孟定街群样品 10DX111F									
-01	0.282373	0.000039	0.000936	0.023393	947	0.282357	6.2	1.2	1.4
-02	0.281529	0.000036	0.00078	0.020803	1584	0.281506	-9.6	2.4	2.9
-03	0.281986	0.000038	0.000707	0.017014	1071	0.281972	-4.6	1.8	2.2
-04	0.281178	0.000035	0.000801	0.019273	2497	0.281139	-1.8	2.9	3.1
-05	0.281043	0.000042	0.000972	0.023774	2625	0.280995	-4	3.1	3.4
-06	0.281201	0.000039	0.000845	0.020733	2489	0.28116	-1.2	2.9	3.1
-07	0.281214	0.000043	0.000634	0.015964	2527	0.281183	0.5	2.8	3.0
-09	0.281939	0.000034	0.000125	0.003524	1014	0.281936	-7.2	1.8	2.3
-11	0.281925	0.000041	0.000798	0.019749	935	0.281911	-9.8	1.9	2.4
-12	0.281817	0.000034	0.00122	0.029978	1365	0.281785	-4.6	2.0	2.4
-14	0.280813	0.000039	0.000518	0.012775	2481	0.280789	-14.6	3.3	3.9
-16	0.281241	0.000039	0.000747	0.017071	2483	0.281205	0.3	2.8	3.0
-17	0.282311	0.00005	0.001407	0.027775	1034	0.282284	5.6	1.3	1.5
-18	0.281942	0.000032	0.00036	0.008939	1167	0.281934	-3.8	1.8	2.2
-19	0.282174	0.000039	0.000647	0.015535	1038	0.282161	1.3	1.5	1.8
-20	0.28123	0.000039	0.001246	0.029733	2584	0.281168	1.2	2.8	3.0
-21	0.280738	0.000036	0.000428	0.01115	2570	0.280717	-15.1	3.4	4.0
-22	0.281322	0.000037	0.000502	0.010869	2588	0.281297	5.9	2.7	2.7
-23	0.281951	0.000038	0.000127	0.003166	913	0.281949	-9	1.8	2.4
-24	0.281843	0.000043	0.000615	0.016033	975	0.281832	-11.7	2.0	2.6
-26	0.2821	0.000035	0.00135	0.034997	976	0.282075	-3.1	1.6	2.0
-27	0.28211	0.000037	0.000405	0.009967	543	0.282106	-11.6	1.6	2.2
-28	0.281545	0.00004	0.001506	0.036909	1845	0.281492	-4.2	2.4	2.8
-29	0.281103	0.000048	0.000821	0.021302	2540	0.281063	-3.5	3.0	3.3
-30	0.282255	0.000046	0.000947	0.025101	631	0.282244	-4.8	1.4	1.9
-31	0.281413	0.000028	0.00027	0.011271	2501	0.2814	7.6	2.5	2.5
-33	0.281075	0.00003	0.000388	0.01481	2654	0.281055	-1.1	3.0	3.2
-34	0.282257	0.000029	0.001105	0.046039	901	0.282238	1	1.4	1.7
-37	0.281234	0.000028	0.000416	0.016876	2629	0.281214	3.9	2.8	2.9
-40	0.281114	0.000026	0.000359	0.014991	2494	0.281097	-3.4	2.9	3.2
-43	0.28168	0.000029	0.000955	0.041656	1652	0.28165	-3	2.2	2.6
-44	0.281389	0.00004	0.001318	0.058617	2120	0.281336	-3.5	2.6	3.0
-45	0.281419	0.000029	0.000779	0.034184	1679	0.281394	-11.4	2.6	3.1
-49	0.281041	0.00003	0.000828	0.035659	2848	0.280996	1.3	3.1	3.2
-52	0.281847	0.000032	0.001184	0.053737	1169	0.281821	-7.8	2.0	2.5
-53	0.282463	0.000031	0.001598	0.076048	1018	0.282432	10.5	1.1	1.2
-56	0.282186	0.000026	0.001284	0.050949	1303	0.282154	7.1	1.5	1.7
-57	0.282532	0.000032	0.001654	0.068812	872	0.282504	9.8	1.0	1.1
-58	0.281113	0.000027	0.000685	0.02975	2471	0.281081	-4.4	3.0	3.3
-60	0.281839	0.000026	0.00086	0.034977	1138	0.28182	-8.5	2.0	2.5
-61	0.281618	0.000027	0.000304	0.012872	567	0.281615	-28.5	2.3	3.3
-62	0.281801	0.000026	0.000766	0.035387	970	0.281787	-13.4	2.0	2.7
-63	0.282184	0.000026	0.001364	0.061361	992	0.282159	0.2	1.5	1.9