

西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化:新观点

朱弟成¹, 莫宣学¹, 赵志丹¹, 牛耀龄², 潘桂棠³, 王立全³, 廖忠礼³

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083

2. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

3. 成都地质矿产研究所, 四川成都 610082

Zhu Dicheng¹, Mo Xuanxue¹, Zhao Zhidan¹, Niu Yaoling², Pan Guitang³, Wang Liquan³, Liao Zhongli³

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

3. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China

Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, et al. Permian and Early Cretaceous tectonomagmatism in southern Tibet and Tethyan evolution: New perspective. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2):001-020

Abstract: The pre-Cenozoic evolution of the Tethys and the Cenozoic uplift of the Tibetan Plateau have long been considered as two important issues of fundamental geology of this plateau. However, our knowledge on the geological context and pre-Cenozoic history of the Tibetan Plateau remains limited so far, consequently raising uncertainties for further exploring the history of Tibetan uplift during the Cenozoic. New available geological and geochemical data of volcanic rocks indicate the coexistence of an island-arc system in the Gangdese and an extensional setting in the Himalayas during the Early to Middle Permian. Peraluminous S-type granites near Pikang (\sim 263 Ma), the Songdo eclogite of the same metamorphic age (\sim 262 Ma), and the regional angular unconformity between the Middle and the Upper Permian from the same geotectonic location suggest that the present-day Gangdese Retroarc Uplift Belt (GRUB) experienced a syncollisional orogeny at the latest Middle Permian (\sim 263 Ma). U-Pb age dates and Hf isotopic compositions of zircons from Mesozoic magmatic rocks reveal that the GRUB and Middle Gangdese are characterized by an ancient basement of Paleoproterozoic (as old as Archean) age, whereas the Northern and Southern Gangdese are dominated by Meso-Neoproterozoic and Phanerozoic juvenile crust, respectively. Available good quality age dates and zircon Hf isotopic data suggest that the northern parts of the Gangdese experienced a zonal magmatic flare-up with strong input of mantle-derived materials at \sim 110 Ma. New reliable U-Pb age dates of the extensive Cretaceous igneous rocks in the eastern Himalayas suggest that these rocks were emplaced at about 132 Ma, and may represent the erosional and/or deformational remnants of the newly identified Comei-Bunbury large igneous province. All these new

收稿日期:2009-02-15;修回日期:2009-02-24

基金项目:国土资源部百名优秀青年科技人才计划项目“西藏南西部二叠纪玄武岩的区域对比及意义”;国家重点基础研究发展计划“973”项目(2006CB701402, 2009CB421002);国家自然科学基金项目(40503005, 40572051, 40830317, 40873023);中国地质调查局青藏高原基础地质综合研究项目(1212010610101)

作者简介:朱弟成(1972—),男,博士,副研究员,主要从事青藏高原南部岩浆作用与特提斯地质研究。E-mail: dchengzhu@163.com

data formed a basis for discussing the tectonomagmatic and Tethyan evolution in present-day southern Tibet during the Late Paleozoic–Mesozoic.

Key words: Permian; Early Cretaceous; tectonomagmatism; Tethyan evolution; southern Tibet

摘要:西藏高原前新生代时期的特提斯演化和新生代时期的高原隆升历史是西藏高原基础地质研究中两个长期被关注的重要科学问题,但迄今对西藏高原自身的物质组成和前新生代演化历史的认知程度仍然较低,直接限制了对新生代时期西藏高原隆升历史的更深入研究。新的地质和地球化学资料显示早—中二叠世时俯冲背景和伸展背景共存于现今的冈底斯带和喜马拉雅带,中二叠世末期(大约 263 Ma)侵位的皮康过铝质 S 型花岗岩以及同期发生的松多榴辉岩的高压变质作用和区域性角度不整合指示现今的冈底斯弧背断隆带在那时经历了同碰撞造山事件。中生代岩浆岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素成分表明,冈底斯弧背断隆带和中冈底斯带存在以古元古代甚至太古宙物质为特征的古老基底物质,而北冈底斯带和南冈底斯则分别以中—新元古代新生地壳和显生宙新生地壳为特征。已有高质量年龄数据和锆石 Hf 同位素指示冈底斯带中北部地区在大约 110 Ma 发生了带状岩浆大爆发并伴随着幔源物质显著增加。新的可靠的锆石 U-Pb 年龄指示喜马拉雅带东部措美(Comei)地区大面积出露的白垩纪火成岩侵位于 132 Ma 左右,代表了新近在藏南和澳大利亚南部识别出的经历了强烈变形和深位侵蚀的 Comei-Bunbury 大火成岩省的残余。以这些新资料为基础,讨论了西藏南部的晚古生代—中生代构造岩浆演化历史和特提斯演化过程。

关键词:二叠纪;早白垩世;构造岩浆作用;特提斯演化;西藏南部

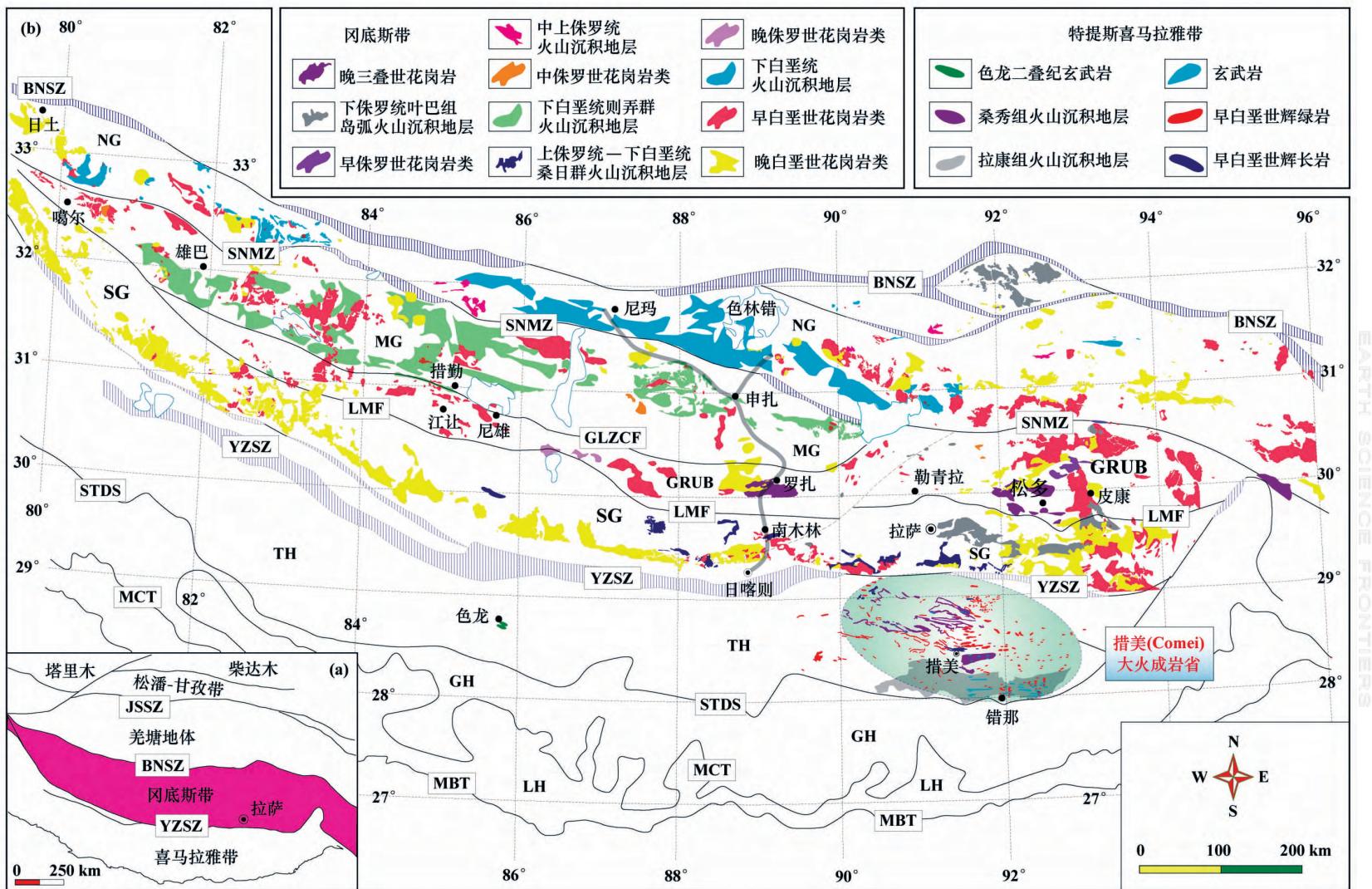
中图分类号:P54 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2009)02-0001-20

青藏高原前新生代时期的特提斯演化和新生代时期的高原隆升历史是青藏高原基础地质研究中两个长期被关注的重要科学问题。过去几十年来,人们投入了大量工作来研究青藏高原的隆升历史,提出了多种模型来解释青藏高原不同地区所经历的差异隆升历史^[1-5]。尽管越来越多的学者意识到青藏高原自身的物质组成和前新生代演化历史对假设上述模型边界条件的重要性^[6-11],但迄今人们对青藏高原自身的物质组成和前新生代演化历史的认知程度仍然较低。而这种知识性的缺乏,直接限制了对新生代时期青藏高原隆升历史的更深入研究。例如,位于青藏高原南部的拉萨地块,长期以来被看作是北与羌塘、南与喜马拉雅连在一起的古特提斯南部被动大陆边缘的一部分,在二叠纪、三叠纪时期,羌塘、拉萨地块分别从古特提斯南部被动大陆边缘裂离出来形成班公湖—怒江特提斯洋和雅鲁藏布新特提斯洋,在侏罗纪末期和白垩纪末期先后发生的羌塘—拉萨碰撞、印度—欧亚碰撞导致了班公湖—怒江特提斯洋和雅鲁藏布新特提斯洋的关闭^[12-13]。虽然这种概念性框架非常简单和直接,但其有效性和涉及的相关地质过程在时间和空间上的演化还需要进一步讨论。晚古生代—中生代岩浆岩作为这些过程的直接产物,必然记录了这些过程的相关信息,因而研究晚古生代—中生代岩浆岩不但有利于刻画特提斯洋的形成演化历史,而且还将为研究青藏高原南部的

起源和高原隆升模型提供重要的边界条件。本文主要目的是综合展示目前西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆活动的新的观察资料,讨论西藏南部的晚古生代—中生代构造岩浆演化历史和特提斯演化过程。

1 地质背景

地质上,一般以金沙江缝合带(JSSZ)、班公湖—怒江缝合带(BNSZ)和雅鲁藏布缝合带(YZSZ)将西藏高原由北向南分为松潘—甘孜带、羌塘带、冈底斯带和喜马拉雅带(图 1a)。本文主要涉及班公湖—怒江缝合带以南的喜马拉雅带和冈底斯带(图 1b)。喜马拉雅带以主中央逆冲断裂(MCT)和藏南拆离系(STDS)为界,由南向北可进一步分为低喜马拉雅、高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅带。本文涉及的特提斯喜马拉雅带(图 1b),主体为一套古生代以来的海相沉积序列,被认为是印度陆块北缘晚三叠世—早白垩世被动大陆边缘的典型代表^[16]。以狮泉河—拉果错—永珠—纳木错—嘉黎蛇绿混杂岩带(SNMZ)、噶尔—隆格尔—扎日南木错—措麦断裂带(GLZCF)和沙莫勒—麦拉—洛巴堆—米拉山断裂(LMF)为界,由北向南可将冈底斯带划分为北冈底斯、中冈底斯、冈底斯弧背断隆带和南冈底斯带(图 1b)^[14]。北冈底斯主要由侏罗系—白垩系火山沉积地层和相关侵入岩组成,在安多一带可能存在

图 1 西藏南部晚古生代—中生代岩浆岩分布图^[14-15]Fig. 1 Distribution of the Late Paleozoic-Mesozoic magmatic rocks in southern Tibet^[14-15]

JSSZ:金沙江缝合带; BNSZ:班公湖—怒江缝合带; YZSZ:雅鲁藏布缝合带; LMF:沙莫勒—麦拉—洛巴堆—米拉山断裂; GLZCF:噶尔—隆格尔—扎日南木错—措麦断裂带; SNMZ:狮泉河—拉果错—永珠—纳木错—嘉黎蛇绿混杂岩带; STDS:喜马拉雅带以藏南拆离系; MCT:主中央逆冲断裂带; NG:北冈底斯; MG:中冈底斯; GRUB:冈底斯弧背断隆带; SG:南冈底斯; LH:低喜马拉雅; GH:高喜马拉雅; TH:特提斯喜马拉雅。图中灰色粗虚线示意了横过冈底斯带中部地区的中生代岩浆岩大剖面

寒武纪或新元古代结晶基底^[17-18],其地壳在晚白垩世—古新世期间经历了明显的缩短(缩短量>50%)^[6,19]。中冈底斯东西延伸超过1 000 km,主要由下白垩统则弄群和少量中晚侏罗统接奴群、下白垩统捷嘎组火山沉积地层构成,发育大量酸性火山岩、火山碎屑岩和相关侵入岩(图1b),在申扎、措勤等地出露了少量古生界地层。冈底斯弧背断隆带主要由石炭—二叠系变沉积岩和少量三叠系沉积岩组成,在该带东部地区出露了大量中生代侵入岩(图1b),在念青唐古拉地区出露新元古代变质岩^[20]。南冈底斯主要由白垩纪—古近纪冈底斯岩基和古新世—始新世林子宗火山岩以及部分侏罗系—白垩系沉积地层构成,其地壳在晚白垩世—古近纪期间经历了强烈的缩短变形(缩短量>40%)^[21]。一般认为,冈底斯带不仅仅是与印度-欧亚大陆碰撞有关的新生代造山带,还是与雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈北向俯冲有关的中生代安第斯型活动大陆边缘^[10,17,22-26]。需要指出,本文所讨论的冈底斯带,通常又被称为拉萨地块。实际上,正如后文将要讨论的那样,真正的拉萨地块,可能仅仅限于以中冈底斯和冈底斯弧背断隆带为代表的南北宽约100 km的近东西向带状区域,北冈底斯和南冈底斯可能主要是中生代时期通过岩浆底侵和/或岛弧侧向加积作用增生到真正的拉萨地块之上的,也就是说,古生代时期可能并不存在北冈底斯和南冈底斯。因此,后文在讨论二叠纪时期的构造岩浆作用时,采用拉萨地块一词,在讨论中生代时期的构造岩浆作用时,采用冈底斯带一词。不同构造带的岩浆岩组合,读者可参阅文献[14]。

2 二叠纪构造岩浆作用

二叠纪是研究西藏南部特提斯演化的重要时期之一,因为它涉及古特提斯的关闭和新特提斯的开启^[12,27]。

2.1 喜马拉雅带

由于规模较小,早期对喜马拉雅带的二叠纪岩浆作用研究甚为薄弱。Garzanti等(1999)首次对吉隆县南部吉隆沟二叠纪玄武岩(即Bhote Kosi玄武岩)进行了详细研究^[28]。这里的玄武岩层厚42~30 m,呈夹层产于下二叠统基龙组碎屑沉积岩之间,其时代被限定在早二叠世Sakmarian期—Roadian期(大约284~271 Ma),与印度北西部的Panjal暗色

岩同期^[28]。吉隆沟玄武岩为亚碱性拉斑玄武岩,地球化学特征类似于MORB。通过主量元素地球化学对比,这些作者认为吉隆沟二叠纪玄武岩与喜马拉雅带西部的Panjal暗色岩、中西部的尼泊尔Nar Tsum细碧岩和东部的Abor相似,东西延伸达2 000 km。由此提出这些早二叠世火山作用是冈瓦纳大陆北缘大陆裂谷作用的产物,代表了雅鲁藏布新特提斯的初始开启。随后,朱同兴等(2002)在吉隆沟东侧约60 km的色龙地区下二叠统基龙组和中—上二叠统色龙群中分别发现了呈夹层产于石英砂岩中的蚀变玄武岩,其地球化学特征和构造环境与吉隆沟Bhote Kosi玄武岩相似^[29]。

笔者在实地调研色龙地区二叠纪玄武岩过程中,在基龙组石英砂岩中新发现一套规模较大的玄武岩(厚度>100 m,坐标:N28°38.394', E85°49.839')和两套规模较小的玄武岩夹层(厚度约15 m)。新的地球化学研究表明,色龙地区二叠纪玄武岩显示高镁玄武岩特征(图2a),明显不同于安第斯型岛弧玄武岩(图2b)。微量元素特征与印度北西部的Panjal暗色岩和吉隆沟Bhote Kosi玄武岩非常相似,但却不同于东喜马拉雅的Abor火山岩,色龙地区二叠纪玄武岩很可能代表了Panjal大陆溢流玄武岩省的最东部边缘^①。

2.2 冈底斯带

冈底斯带二叠纪火山岩零星分布于冈底斯弧背断隆带南缘,林周盆地北部的勒青拉中二叠统洛巴堆组火山岩(N30°01.985', E90°58.846')是其中的典型代表^[32-35]。除此之外,近年在冈底斯带西部措勤江让(N30°39.579', E85°04.760')、尼雄则打拉(N30°45.670', E85°35.134')、尼雄村北(N30°44.975', E85°40.252')(图1b)以及冈底斯东部然乌地区(N29°27.341', E96°47.730')^①也发现了二叠纪火山岩。除林周中二叠统洛巴堆组火山岩的规模较大外(厚约500 m)^[34],其他地区火山岩规模均不大,一般呈厚约几米到几十米的夹层产于下二叠统拉嘎组(江让、尼雄则打拉)、上石炭统一下二叠统来姑组(然乌火山岩)、上二叠统敌布错组(尼雄村北)变沉积地层中^①。火山活动时代由相关的地层和古生物约束^[34-35],^①。冈底斯带二叠纪火山岩以

^① Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, et al. Presence of Permian extension- and arc-type magmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications(submitted).

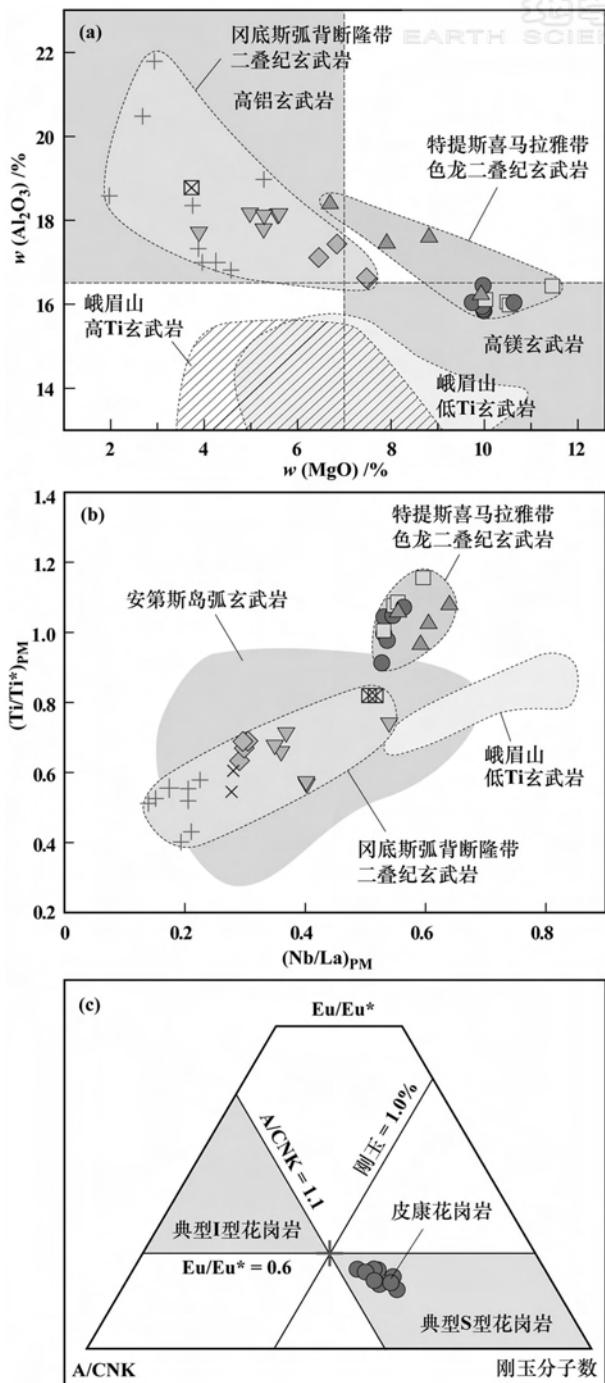


图2 西藏南部二叠纪岩浆岩的选择性地球化学判别图解

Fig. 2 Selective geochemical diagrams of the Permian magmatic rocks in southern Tibet

图a和图b为二叠纪火山岩^①,下标PM代表原始地幔标准化;图c为二叠纪花岗岩,A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)(摩尔分数);Eu/Eu^{*}=Eu_N/(Sm_N×Gd_N)^{1/2},数据依据文献[30]。下标N代表球粒陨石标准化值,原始地幔和球粒陨石数据依据文献[31]

玄武岩为主,也包括次要的安山岩和少量的英安岩和流纹岩。新获得的地球化学数据表明,冈底斯带

二叠纪玄武岩以高铝玄武岩为特征(图2a),具明显的Nb-Ta和Ti负异常,与安第斯岛弧型玄武岩相似而不同于喜马拉雅带二叠纪玄武岩(图2b),形成于岛弧背景^{[33-35],①}。

除上述二叠纪火山岩外,在冈底斯带工布江达北西约20 km皮康村附近(N29°58.381', E93°06.447')(图1b)的白垩纪花岗岩中,还发现了呈岩枝状产出的二叠纪花岗岩^[30,36]。锆石SHRIMP U-Pb和锆石LA-ICPMS U-Pb年代学和地球化学研究表明,皮康花岗岩大约侵位于263 Ma^[30],与其西侧约90 km松多榴辉岩(图1b)的高压变质作用(约262 Ma)^[37]同期。皮康花岗岩具有高的铝饱和指数(A/CNK=1.08~1.14),CIPW标准矿物中刚玉分子数较高(1.3%~2.0%),无透辉石,其特征与典型过铝质S型花岗岩^[38]相似(图2c)^[30]。近年工作还发现,在措勤江让^[39]、尼雄^②、热布卡里窝^③、林周勒青拉^④等地,上二叠统碎屑岩不整合地覆盖在中二叠统灰岩之上,在冈底斯带东部普遍缺乏上二叠统地层。这种同期发生的皮康过铝质S型花岗岩的侵位、区域性中上二叠统的角度不整合和松多榴辉岩的高压变质作用很可能是同一事件的不同响应,该事件最近被命名为冈底斯带二叠纪碰撞造山事件^[30]。

2.3 拉萨地块二叠纪构造重建

因涉及新特提斯的开启时间,二叠纪时期拉萨地块的位置一直是国内外地学界长期讨论的课题。目前有很多涉及拉萨地块位置的重建模型,其中代表性的有三类:(1)直到晚二叠世^[13,41-42]甚至晚三叠世^[43]拉萨地块还靠近大印度北缘,雅鲁藏布新特提斯直到晚二叠世甚至晚三叠世尚未开启;(2)在早中二叠世时拉萨地块靠近大印度北缘,在晚二叠世时才裂离出来位于古特提斯洋内^[27,44-46],雅鲁藏布新特提斯在晚二叠世自东向西呈喇叭状开启;(3)羌塘地块位于印度大陆北缘,而拉萨地块早二叠世时位于澳大利亚北缘,中晚二叠世时由于古特提斯的南向俯冲使拉萨地块从澳大利亚北缘裂离出来,雅鲁

- ① Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, et al. Presence of Permian extension- and arc-type magmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications(submitted).
- ② 谢国刚,邹爱建,袁建芽,等. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告邦多区幅,2003.
- ③ 卢书炜,杜凤军,任建德,等. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告热布喀幅,2003.
- ④ 吴珍汉,孟宪刚,胡道功,等. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告当雄县幅,2003.

藏布新特提斯开启^[47]。

喜马拉雅带吉隆沟 Bhote Kosi 玄武岩和色龙二叠纪玄武岩研究成果表明,位于印度大陆北缘的喜马拉雅带在二叠纪时期处于伸展背景^{[28],①}。已有研究显示,二叠纪时羌塘地区也处于伸展背景^[12,48-49]。而与此明显不同的是,拉萨地块二叠纪岛弧火山岩和松多榴辉岩的存在表明,目前位于羌塘和喜马拉雅带之间的拉萨地块在二叠纪时处于岛弧背景,而不是原来认为的伸展环境^[7,11-12]。因此,显然不能将二叠纪时期处于不同地球动力学背景的羌塘—拉萨—喜马拉雅连在一起,作为古特提斯的南部被动大陆边缘来考虑(即上述第一类模型不适用)。如果考虑上述第二类模型,那么拉萨地块的早—中二叠世岛弧火山岩就只能由古特提斯的南向俯冲产生,在这种背景下,喜马拉雅带就应该处于弧后盆地的伸展背景,色龙二叠纪玄武岩就应该显示弧后盆地玄武岩特征,然而色龙二叠纪玄武岩并不具备这种特征^①,并且这种模型也无法对皮康花岗岩反映出的中二叠世末期同碰撞背景做出合理解释。由于皮康花岗岩和松多榴辉岩均位于二叠纪时期拉萨地块的南缘,它们所反映出的同碰撞构造背景也无法用第三类模型来解释。

考虑到羌塘、拉萨、喜马拉雅带二叠纪时期所处的独特地球动力学背景,Zhu 等提出,应该将拉萨地块从羌塘—拉萨—喜马拉雅连续被动大陆边缘的重建模型中抽取出来,作为一个古特提斯洋内的独立地块来考虑^①。在该模式中,位于拉萨地块南缘的早—中二叠世岛弧火山岩可用古特提斯洋壳岩石圈的北向俯冲来解释。冈底斯带二叠纪碰撞造山事件的识别意味着在中二叠世末期(约 263 Ma),拉萨地块和某一未知陆块发生了碰撞。由于皮康花岗岩和松多榴辉岩二叠纪时期位于拉萨地块南缘,这就意味着该未知陆块应该位于拉萨地块南部。在所有二叠纪构造重建图中,与拉萨陆块碰撞的未知陆块不可能是古特提斯南部边缘的印度陆块,因为那时的印度陆块北缘处于伸展背景而不是碰撞背景。在这种情况下,同样位于古特提斯南部边缘的澳大利亚陆块就成了最有可能的选择,因为澳大利亚西北部 Carnarvon 和 Perth 盆地在中二叠世末期出现了强烈的沉积间断和下三叠统页岩不整合于上二叠统砂岩之上^[50]。因此,在中二叠世末期(约 263 Ma),拉萨地块很可能与澳大利亚陆块北部边缘发生了碰撞^[30]。由于碰撞是触发洋壳岩石圈初始俯冲的最

有可能机制^[51],所以拉萨地块南部发生的此次碰撞造山事件很有可能触发拉萨地块北部古特提斯洋壳岩石圈发生南向俯冲。

3 早白垩世构造岩浆作用

早白垩世是研究西藏南部特提斯演化的另外一个重要时期,因为它涉及冈底斯—羌塘碰撞^[7-8,11]、东冈瓦纳大陆的最后裂解^[15,52-53]等一系列地学界长期讨论的科学问题。

3.1 冈底斯带

3.1.1 冈底斯带早白垩世岩浆作用的地球动力学背景

定量估算表明,中冈底斯和北冈底斯早白垩世火山岩的覆盖面积分别为 2.00 万 km² 和 1.43 万 km²,早白垩世花岗岩类的出露面积分别为 0.61 和 0.66 万 km²,累计约 4.70 万 km²,约占冈底斯带整个中生代岩浆岩面积(10.24 万 km²)的一半,占整个冈底斯带面积(约 50 万 km²)的 10%。迄今为止,对冈底斯带中北部地区早白垩世大规模岩浆作用的地球动力学背景,存在两种截然不同的观点。一是由 Coulon 等(1986)^[22]首先提出并对后续研究产生重要影响的^[7-11,23]雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈向北低角度或平板俯冲观点。然而,近年在南冈底斯带先后发现的早白垩世(137~109 Ma)岛弧岩浆岩^[26,54-55]却意味着需要对该模式进行重新评价^[14,26]。另一种观点认为冈底斯带中北部地区的中生代岩浆岩与班公湖—怒江洋壳岩石圈的南向俯冲有关^[14,33,56-60]。尽管第二种观点已经提出十多年,但迄今尚未得到国内外学者的广泛接受,主要原因在于:(1)有哪些可靠的证据支持班公湖—怒江洋壳岩石圈是向南俯冲的?(2)班公湖—怒江洋壳岩石圈是什么时候开始向南俯冲的,它与雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈的北向俯冲是否具有时间差异?(3)如何解释班公湖—怒江缝合带北侧出露的一些早白垩世岩浆岩?探讨这些问题的关键,在于了解冈底斯带的中生代地壳结构和约束班公湖—怒江特提斯洋的发育时限。在早期研究中前者还是空白,而后者则存在古生代—早白垩世^[33,56-57]、晚三叠

^① Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, et al. Presence of Permian extension- and arc-type magmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications(submitted).

世—早白垩世^[12,58]等不同认识。需要指出,由于受中生代冈底斯—羌塘碰撞和新生代印度—欧亚碰撞的强烈改造,现今保存在班公湖—怒江缝合带中的洋盆演化记录,仅仅是遭受构造变形和剥蚀后的地表残余,由它们所恢复的洋盆演化历史可能是不完整的。

利用横过冈底斯带中部日喀则→南木林→罗扎→申扎→尼玛\色林错的南北向中生代岩浆岩大剖面(图 1b)的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素^①,发现在冈底斯弧背断隆带和中冈底斯带存在以古元古代甚至太古宙物质为特征的古老基底物质,而北冈底斯带和南冈底斯却分别以中—新元古代新生地壳和显生宙新生地壳为特征(图 3a 和图 3b),并且从尼玛→色林错南部→申扎地区,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值逐渐降低(或 Hf 同位素地壳模式年龄逐渐升高)(图 3c)。这一最新研究成果表明,冈底斯弧背断隆带和中冈底斯带代表了一个现今宽度约 100 km 的微陆块(即拉萨微陆块)。横过中冈底斯带申扎南部→申扎俄央→扎日南木错→措勤达雄→雄巴→噶尔东西向约 900 km 的早白垩世岩浆岩大剖面的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究表明(图 4a),在冈底斯带中部南北向岩浆岩大剖面中识别出的拉萨微陆块,东西向至少可以延伸 900 km(图 4b)^②。拉萨微陆块的存在和北冈底斯→中冈底斯带岩浆岩锆石 Hf 同位素向南的负梯度变化,意味着拉萨微陆块北侧必定存在向南的俯冲带才能导致班公湖—怒江洋盆的最终关闭。这与前文根据中二叠世末期(约 263 Ma)拉萨地块南部发生的碰撞造山事件将触发拉萨地块北部古特提斯洋壳岩石圈向南俯冲的分析是一致的。因此,尽管目前对班公湖—怒江缝合带及其所代表洋盆的演化历史仍然知之有限,但从宏观地球动力学框架分析,班公湖—怒江洋壳岩石圈在其演化过程中应该发生了向南的俯冲作用,并且这种南向俯冲作用很可能在中二叠世末期(约 263 Ma)就开始了。

在分析冈底斯带早白垩世岩浆作用的地球动力学背景时,需要涉及的另一个问题是新特提斯洋壳岩石圈开始俯冲的时间。冈底斯弧背断隆带门巴、罗扎地区和南冈底斯大竹卡北部地区发现的晚三叠世花岗岩类(约 215~205 Ma)曾解释为雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈北向俯冲的产物^[55,61-62]。但这种解释存在一个问题,就是这些晚三叠世花岗岩类的侵位时间仅仅比雅鲁藏布缝合带内迄今发现的最老

的放射虫硅质岩(中晚三叠世 Ladinian-Carnian 期,237~217 Ma)晚大约 20 Ma,并且这些硅质岩的地球化学特征显示大陆边缘深水沉积特征而不是像早白垩世放射虫硅质岩那样显示远洋沉积特征^[63]。因此,即使这些放射虫硅质岩的时代能够用来代表新特提斯洋盆的开启时间,在其后约 20 Ma 的短暂发育历史中,也不太可能形成足够宽的洋壳岩石圈并向北俯冲到拉萨微陆块之下 120~150 km 的深度,诱发产生现今在冈底斯弧背断隆带门巴、罗扎地区观察到的晚三叠世花岗岩类。众所周知,形成于碰撞后伸展背景的喜马拉雅带淡色花岗岩^[64-65]主要侵位于 28~10 Ma^[66],比印度—欧亚大陆之间的初始碰撞时代(大约 65 Ma)^[67]大约晚 40~30 Ma。如果以此类推,那么拉萨微陆块南缘在中晚三叠世时(大约 230 Ma 以来)也可能处于一种与冈底斯带二叠纪碰撞造山事件(大约 263 Ma)有关的后碰撞伸展背景。实际上,重新对门巴地区晚三叠世花岗闪长岩的地球化学数据分析后发现,这些花岗岩类虽然也显示岛弧花岗岩类的地球化学特征,但更可能是中下地壳物质部分熔融的产物,属于后碰撞花岗岩类^[68]。同样的情况可能对冈底斯弧背断隆带和南冈底斯带的早侏罗世岩浆岩也是适用的,尽管以前将其与雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈的北向俯冲联系起来^[10,25,55,62,69-70]。由于现今真正的拉萨微陆块仅宽约 100 km,即使考虑到晚白垩世和新生代期间冈底斯带发生了 50% 的缩短^[8,71],真正的拉萨微陆块在中生代早期也不超过 200 km 宽。在这种情况下,保存在现今冈底斯弧背断隆带的晚三叠世花岗岩类和早侏罗世岩浆岩,可容易地由班公湖—怒江洋壳岩石圈的南向俯冲所诱发的一系列壳幔作用过程来解释^{①-②},这将在后文进一步提及。

众所周知,在洋盆形成过程中必须存在一个能够激发其开启的地球动力学机制,除地幔柱活动可以导致洋盆开启外,弧后扩张一般被认为是洋盆开启的另外一种最有可能的地球动力学解释。由于中二叠世末期的地幔柱型岩浆作用(如峨眉山地幔柱)

^① Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. The lithospheric architecture of the Lhasa Terrane: Revelation and geodynamic significance(submitted).

^② Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet (submitted).

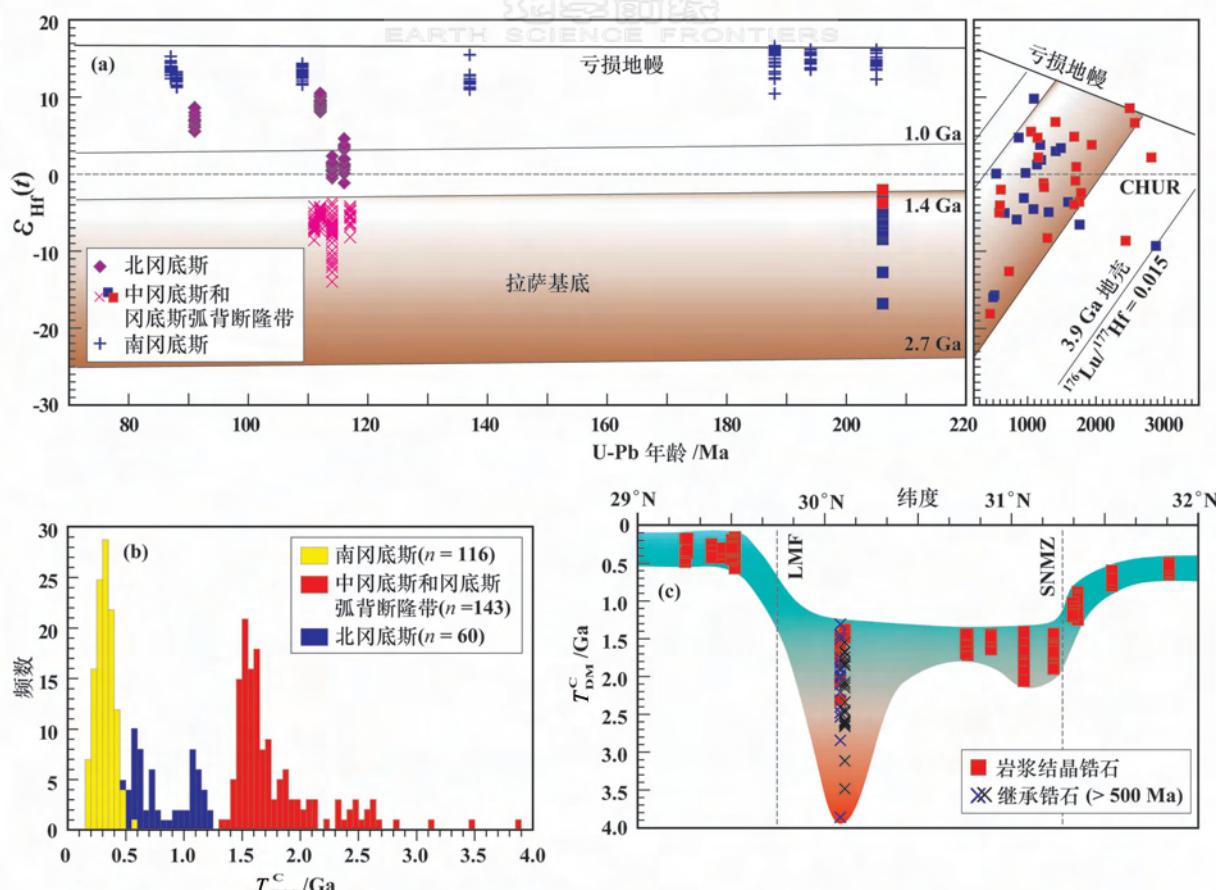


图3 横过冈底斯带南北向中生代岩浆岩大剖面的锆石Hf同位素组成和空间变化^①
Fig. 3 Zircon Hf isotopic compositions and spatial variations of the Mesozoic magmatic rocks sampled along the north-south traverse across the Gangdese^①

远离拉萨微陆块南缘,因此,我们倾向于将拉萨微陆块从澳大利亚北缘分离出来,并导致雅鲁藏布新特提斯开启的地球动力学机制归因于班公湖—怒江洋壳岩石圈在中二叠世末期开始南向俯冲所引起的弧后扩张。可以设想,在该弧后盆地进一步演化成雅鲁藏布新特提斯的过程中,其北部(即拉萨微陆块南缘)必须存在被动大陆边缘才能使拉萨微陆块一直向北漂移^[72]。在雅鲁藏布新特提斯洋脊扩张驱动拉萨微陆块北向漂移过程中,必定存在一个突发事件以触发雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈开始其北向俯冲的历史。由于弧-陆-陆碰撞是触发洋壳岩石圈俯冲的最有可能机制^[51],所以发生在侏罗纪晚期—白垩纪早期的冈底斯—羌塘碰撞^[7-8,11-12,73],就成为新特提斯洋壳岩石圈开始北向俯冲的最有可能的触发器。因此,雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈很可能在侏罗纪晚期—白垩纪早期冈底斯—羌塘初始碰撞时才开始了其北向俯冲历史,其结果是在俯冲早期产生与雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石

圈部分熔融直接相关的早白垩世桑日群下部麻木下组俯冲型埃达克质岩(137 Ma)^[26]。

有一些学者认为班公湖—怒江洋壳岩石圈在中生代时期是向北俯冲的,证据主要来自班公湖—怒江缝合带北侧出露的一些早白垩世岩浆岩、缝合带内的玻安岩和安多—聂荣岩体中的I型花岗岩类^[18,74-75]。由于目前积累的相关高质量数据尤其是同位素数据还很少,很难对该问题做进一步评价,但需要指出:(1)如果班公湖—怒江洋壳岩石圈是北向俯冲的,为什么在南羌塘没有发现与之紧密相关的东西向带状岛弧岩浆岩带?(2)目前已有的岩浆岩记录,主要是花岗岩类,其地球化学特征主要反映岩浆源区性质和岩浆作用过程,在构造环境的解释上存在多解性^[65,68],因而需要慎重使用它们来讨

^① Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. The lithospheric architecture of the Lhasa Terrane: Revelation and geodynamic significance(submitted).

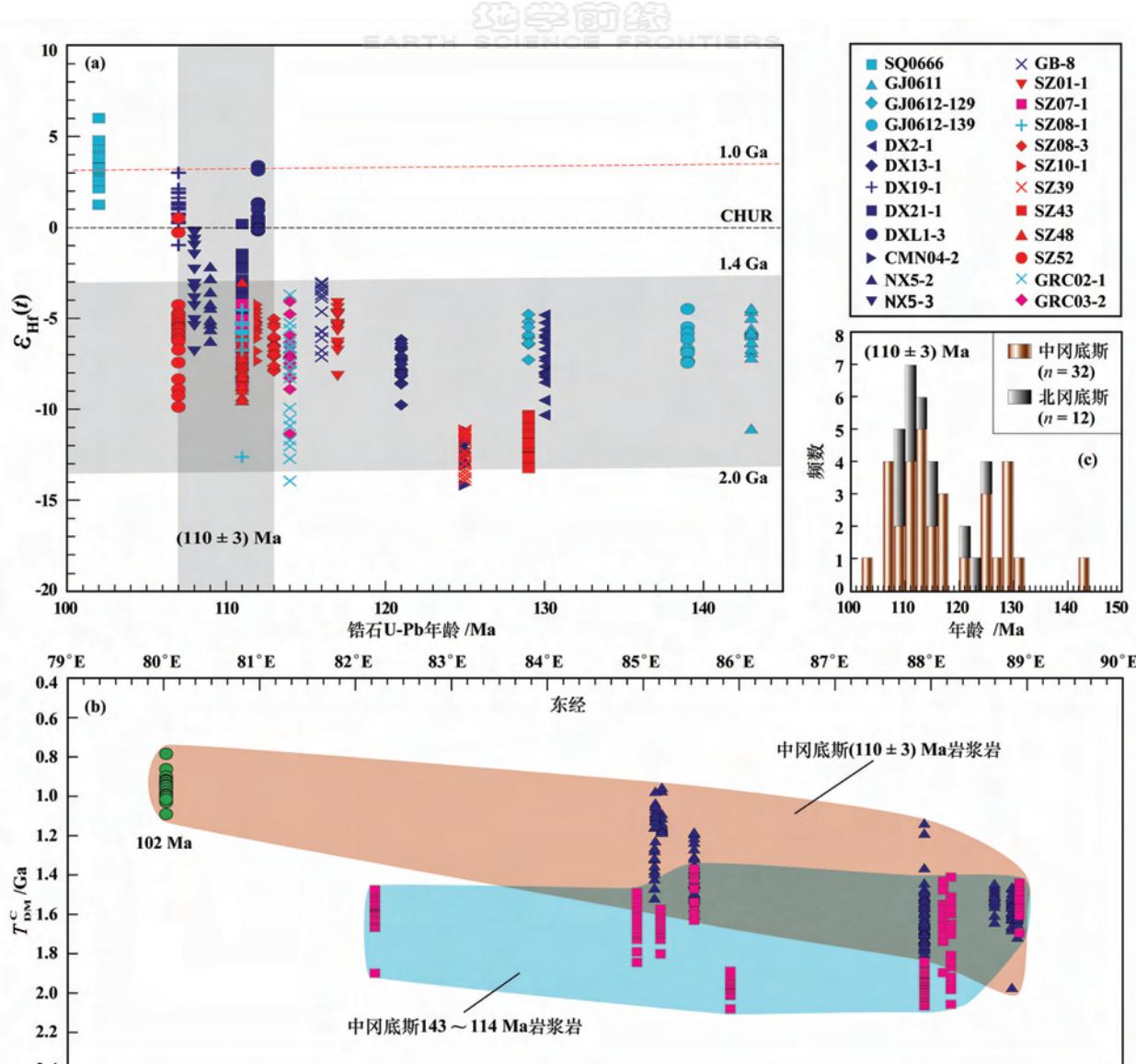


图 4 横过冈底斯带东西向早白垩世岩浆岩大剖面的锆石 Hf 同位素组成和空间变化^①
Fig. 4 Zircon Hf isotopic compositions and spatial variations of the Early Cretaceous magmatic rocks
sampled along the west-east traverse across the Gangdese^①

论构造环境。(3)从笔者所掌握的有限数据来看,不能排除班公湖—怒江缝合带北侧晚侏罗世—早白垩世岩浆岩来源于中下地壳(也有可能是上地壳)物质部分熔融的可能性。

根据上述分析,可将冈底斯带的地球动力学背景归纳为中生代时期,班公湖—怒江洋壳岩石圈继承了中二叠世末期开始的南向俯冲历史(前文),在侏罗纪晚期—白垩纪早期因冈底斯—羌塘碰撞而触发了雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈的北向俯冲,到早白垩世时可能同时受到班公湖—怒江洋壳岩石圈向南、雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈向北双向俯冲

体系的影响。

3.1.2 冈底斯带早白垩世岩浆作用的成因

南冈底斯最近被解释为二叠纪晚期增生到亚洲大陆南缘的洋内岛弧地体^[55],因为这里的大多数中生代和新生代岩浆岩显示正的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表明它们或来源于雅鲁藏布新特提斯洋壳和/或新生地壳的部分熔融,或与镁铁质岩浆

① Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet (submitted).

与长英质岩浆的混合有关^[10,25-26,55,67,70,76-77], ①。有意义的是, 最近在南木林南部的古新世早期闪长岩(约 62 Ma)中, 发现大量中—新元古代继承锆石(466~1 632 Ma), 其对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -9.9~+4.6, Hf 同位素地壳模式年龄为 1.46~2.53 Ga(笔者未刊数据), 可与冈底斯弧背断隆带中生代岩浆岩中的继承锆石对比。另外, 南冈底斯新生代岩浆锆石具有负或小的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在曲水东侧嘎拉山岩体(约 47 Ma)中也曾经发现^[55]。这种特征可容易地由南冈底斯带的幔源新生岩浆混合了冈底斯弧背断隆带的古老地壳物质来解释。在这种情况下, 全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素的变化可能与幔源岩浆中混入古老地壳物质的不同比例有关。因此, 考虑到南冈底斯保存的最老沉积地层为下—中侏罗统叶巴组, 可将南冈底斯带解释为, 中生代时期通过岩浆底侵或岛弧侧向加积等不同方式增生到拉萨微陆块南缘的岩浆杂岩带, 古生代时期该带可能并不存在。

早期曾将冈底斯带中北部地区的早白垩世岩浆岩看作一套由过铝质二云母花岗岩和偏铝质英云闪长岩—辉长岩—闪长岩组成的双峰式岩套, 并认为它们是在俯冲带之上的后碰撞背景中, 由上部地壳物质和更深部的地壳物质或上地幔物质部分熔融产生^[78]。而另外一些学者则将其中的 S 型花岗岩解释为拉萨—羌塘碰撞过程中增厚下地壳重熔的产物^[17]或拉萨—羌塘碰撞后增厚地壳重熔的产物^[48]。最近, Chiu 等^①也赞成后碰撞背景下增厚地壳重熔的解释, 但更强调雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈北向俯冲对其成因的影响。造成上述不同认识的原因, 在很大程度上与缺乏区域性同位素资料和未能可靠地约束岩浆源区随时间的变化趋势有关。

最近对中冈底斯带早白垩世岩浆岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究发现, 中冈底斯带早白垩世岩浆作用持续时间长(143~102 Ma), 在 110 Ma 左右发生了岩浆大爆发(图 4c), 并且长英质岩石的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值从 143~114 Ma 的 -14.2~-3.0 变化到 110 Ma 左右的 -9.9~+3.4, 对应的地壳模式年龄从 1.4~2.1 Ga 变化到 0.8~2.0 Ga^②。这些数据表明, 143~114 Ma 的长英质岩石很可能来源于古老陆壳的重熔, 而大约 110 Ma 的长英质岩石, 虽然也主要与古老陆壳物质的重熔有关, 但其中地幔物质的贡献却明显增加了。非常重要的是, 长英质岩石锆石 Hf 同位素记录到的地幔物质贡献在

110 Ma 左右明显增加的现象, 既与冈底斯带中北部地区的带状岩浆大爆发(约 110 Ma)同期, 也与中冈底斯带广泛发育的闪长质包体和寄主花岗岩^[79], ② 以及零星出露的镁铁质岩(角闪辉长岩)^③同期。这意味着冈底斯带中北部地区在 110 Ma 左右发生了非常重要的与幔源岩浆活动有关的构造岩浆事件。由于大陆地壳自身不会发生重熔, 除非大陆地壳自身存在过剩的放射性生热元素(如 K、U 和 Th)提供热源, 这种情况一般与后碰撞背景下的增厚地壳有关^[64]。已有研究认为, 冈底斯带中北部地区在印度—欧亚碰撞之前发生了明显的地壳缩短(缩短量 > 50%)^[7]。这种提出的地壳缩短(因而地壳增厚)正是一些作者将冈底斯带中北部地区早白垩世 S 型花岗岩类解释为后碰撞背景下增厚地壳重熔的重要证据。然而需要指出, 正如在喜马拉雅带观察到的那样, 后碰撞背景下单纯的增厚的古老地壳重熔是不可能有幔源岩浆活动的。因此, 中冈底斯带 110 Ma 左右的长英质岩石中显著增高的幔源组分和同期的镁铁质岩浆作用, 指示它们可能与后碰撞背景的关系不大, 而很可能处于一种与洋壳岩石圈俯冲相关的背景, 这是因为在俯冲背景下由洋壳岩石圈俯冲诱导的幔源岩浆, 可以提供大量引起地壳重熔所必需的热, 并伴随着同期的幔源岩浆活动。

考虑到冈底斯带中北部地区 110 Ma 左右的带状岩浆大爆发和镁铁质岩浆活动的特点, Zhu 等将触发 110 Ma 左右的岩浆大爆发和岩浆源区成分发生显著变化的动力学机制归因于向南俯冲的班公湖—怒江洋壳的断离(break-off)^②, 并认为在这种俯冲背景下, 拉萨微陆块自身的物质成分和幔源岩浆混入的比例控制了冈底斯带中北部地区早白垩世岩浆的成分特点, 即所谓的 S 型花岗岩类(过铝质岩浆)主要来源于拉萨微陆块自身古老基底物质的重熔(地壳增厚不一定是必须的), 而所谓的 I 型花岗岩类(偏铝质岩浆)则是由于岩浆源区混入了更高比

-
- ① Chiu H Y, Chung S L, Wu F Y, et al. Zircon Li-Pb and Hf isotopic constraints from eastern TransHimalayan batholiths on the precollisional magmatic and tectonic evolution in southern Tibet (Submitted).
 - ② Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet (submitted).
 - ③ 刘登忠, 陶晓风, 马润则, 等. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告措勤县幅, 2003.

例的幔源物质引起的,这种情况下 I 型花岗岩类地球化学特征不具有构造环境指示意义。由于板片断离一般出现在大洋俯冲的末期或大陆碰撞的早期阶段^[80-81],如果冈底斯带中北部地区的 110 Ma 的带状岩浆大爆发可与班公湖—怒江洋壳岩石圈的断离(break-off)联系起来,那么就可能意味着冈底斯—羌塘在 110 Ma 左右才开始陆—陆碰撞。在这种倾向性解释中,冈底斯带中北部地区在 140~110 Ma 可能一直处于与拉萨—羌塘碰撞有关的同碰撞背景,对应的早白垩世岩浆岩应属于与班公湖—怒江洋壳岩石圈南向俯冲有关的同碰撞岩浆岩。这种较长时间的同碰撞岩浆作用与南冈底斯带以林子宗火山岩和冈底斯岩基为代表的与印度—欧亚碰撞有关的同碰撞型岩浆作用(约 65~40 Ma)^[59,67,82]非常相似。

3.2 喜马拉雅带

在特提斯喜马拉雅带沉积序列中,很早就有学者注意到侵位于其中的白垩纪岩浆作用记录^[32]。近年来,一些学者先后对其开展了研究,并将它们的侵位与新特提斯洋的扩张联系起来^[83-85]。随后的研究发现^[15,52-53,86],这些白垩纪火成岩由玄武岩、镁铁质岩墙/岩床、辉长岩侵入体和少量层状超镁铁质岩和酸性火山岩组成,散布于三叠系、侏罗系和下白垩统沉积地层中,主要分布在特提斯喜马拉雅东部由浪卡子—拉康村—错那—隆子—琼结等围限的椭圆形区域(图 1b),现今覆盖面积约 40 000 km²。已经

发表的 4 件^[52,84,86]和新获得的 11 件可靠的锆石 U-Pb 年代学数据表明,这些大规模的白垩纪岩浆活动集中在 130~134 Ma,加权平均年龄为 (131.5 ± 0.8) Ma(图 5a)^[15]。由于喜马拉雅带在新生代印度—欧亚碰撞过程中发生了明显的缩短^[87]以及遭受了强烈的深位侵蚀,这些白垩纪火成岩的原始侵位面积应该更大,很可能超过严格意义上的大火成岩省(LIP)的最小面积(100 000 km²)^[88]。因措美县城大约位于现今这些白垩纪岩浆活动的中心部位,Zhu 等(2009)将其命名为藏南早白垩世措美大火成岩省(即 Comei LIP)(图 1b)^[15]。非常重要的事,在大约 132 Ma 的构造重建图上^[89-90],措美大火成岩省位于大印度北东缘,靠近现今澳大利亚南西部(图 5b)。在澳大利亚南西部出露的 Bunbury 玄武岩,也侵位于大约 132 Ma^[90-91]。考虑到这些 132 Ma 左右岩浆活动的地理分布,可将藏南措美大火成岩省和澳大利亚 Bunbury 玄武岩联系起来作为同一个大火成岩省,即 Comei-Bunbury 大火成岩省^[15]。与现今散布于非洲和南美的 Paraná-Etendeka 大火成岩省一样(图 5b),Comei-Bunbury 大火成岩省的原始记录也可能受随后东冈瓦纳大陆裂解的影响而散布在藏南(印度陆块)澳大利亚甚至南极洲和印度洋了。因此,现今在藏南和澳大利亚南西部识别出的 Comei 大火成岩省和 Bunbury 玄武岩,可能仅仅是原始 Comei-Bunbury 大火成岩省经历强烈变形、深位侵蚀和构造运动改

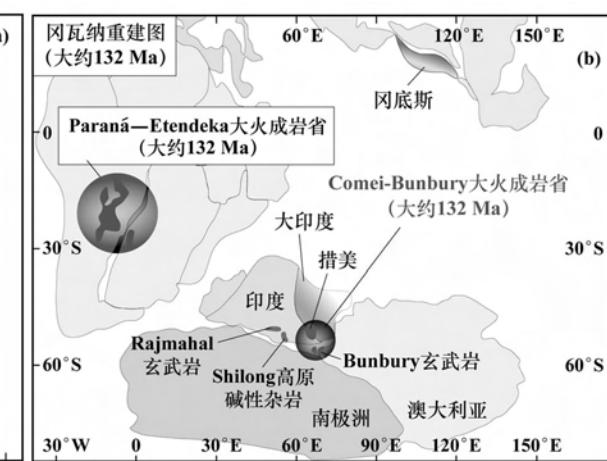
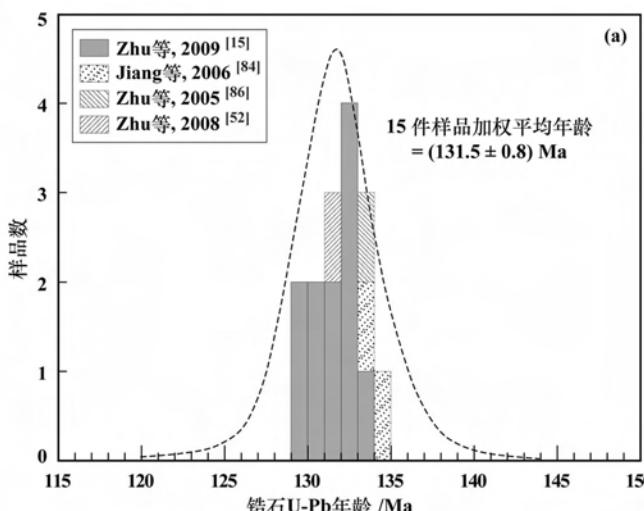


图 5 藏南喜马拉雅措美大火成岩省的锆石 U-Pb 年龄和冈瓦纳 132 Ma 构造重建图^[15,89-90]

Fig. 5 Zircon U-Pb ages of the Comei large igneous province and the generalized plate tectonic reconstruction (~132 Ma) of the Gondwana^[15,89-90]

造的残余。

措美大火成岩省中的镁铁质岩显示 OIB、N-MORB 及介于两者之间的过渡型等三种地球化学类型,微量元素和 Sr-Nd 同位素组成显示 OIB 型镁铁质岩可能与含石榴石的陆下岩石圈地幔与 OIB 型地幔源区物质的相互作用有关,而 N-MORB 型镁铁质岩可能来源于含尖晶石的岩石圈地幔与亏损软流圈地幔的相互作用,过渡型明显受到了地壳混染^[52-53]。措美大火成岩省中的长英质岩显示 A 型花岗岩类的地球化学特征,Sr-Nd 同位素组成明显不同于镁铁质岩,很可能是长英质大陆地壳重熔的产物^[53,86]。非常重要的是,未遭受蚀变和地壳混染影响的 OIB 型镁铁质岩,无论是微量元素还是 Sr-Nd 同位素^[52,92]以及锆石 Hf 同位素(笔者未刊数据),均与澳大利亚南西 Bunbury 玄武岩、印度北东部 Rajmahal 玄武岩和代表白垩纪印度洋 Kerguelen 地幔柱头部的玄武岩非常相似。

将印度北东部 Rajmahal 玄武岩(120~118 Ma)与印度洋 Kerguelen 地幔柱活动联系起来是没有争议的,因为通常认为该地幔柱的初始活动开始于 120 Ma 左右^[90]。但对澳大利亚南西部 Bunbury 玄武岩与 Kerguelen 地幔柱活动之间的关系,国际上存在两种不同看法。一种观点认为它们之间的地球化学相似性是偶然的^[91],而另外一种观点却认为 Bunbury 玄武岩是 Kerguelen 地幔柱早期活动的产物^[93-95]。产生争议的原因在于,Bunbury 玄武岩的规模较小,且在喷发时代上比南印度洋 Kerguelen 地幔柱的直接产物——最老的 Kerguelen 高原玄武岩(约 120 Ma)^[95]要老 10 Ma^[52]。可靠的锆石 U-Pb 年龄数据表明,Comei-Bunbury 大火成岩省的就位时代明显比 Rajmahal 玄武岩和 Kerguelen 高原玄武岩老。早期研究提出大约在 130 Ma 时,Kerguelen 地幔柱位于澳大利亚、南极洲和大印度三联点的下面^[93]。新的古地磁数据显示,大约 120 Ma 以来,Kerguelen 地幔柱向南移动了 3°~10°^[96]。根据缩短量和现今位置估计,早白垩世时措美大火成岩省与 Rajmahal 玄武岩之间的距离大概有 800~1 200 km,这种距离意味着 Comei-Bunbury 大火成岩省是有可能受到 Kerguelen 地幔柱活动影响的。如果接受 Comei-Bunbury 大火成岩省与 Kerguelen 地幔柱具有共同的岩浆源区的观点^[52-53,91-92,95],那么板块构造重建就暗示 Comei-Bunbury 大火成岩省很可能与 Kerguelen 地幔柱的初始活动有成因联

系。换句话说,Comei-Bunbury 大火成岩省的识别可能暗示 Kerguelen 地幔柱在 132 Ma 就开始了首次大规模岩浆活动^[15]。

由于可能与 Kerguelen 地幔柱活动有成因联系的 132 Ma 的 Bunbury 玄武岩规模较小,一些学者提出 Kerguelen 地幔柱的初始岩浆活动在东冈瓦纳大陆裂解过程中并未发挥作用。然而,Comei-Bunbury 大火成岩省的识别却暗示与 Kerguelen 地幔柱初始活动有关的岩浆作用规模比以前认识到的大很多。非常重要的是,大约 132 Ma 的 Comei-Bunbury 大火成岩省岩浆作用与大印度和南西澳大利亚之间最老的海底磁异常(大约 130.9 Ma)^[97]同期。这些构造岩浆事件表明,以 Comei-Bunbury 大火成岩省为代表的 Kerguelen 地幔柱活动可能在大印度从澳大利亚裂离出来并导致东印度洋开启过程中发挥了重要作用。另外需要指出的是,Comei-Bunbury 大火成岩省岩浆作用与发生在 132 Ma 左右的具有全球意义的 Weissert 大洋缺氧事件^[98]同期,后者被假定为代表了白垩纪温室气候的开始^[99]。早期一般将 Weissert 大洋缺氧事件与同期的 Paraná-Etendeka 大陆溢流玄武岩省的岩浆活动联系起来^[99]。现在看来,新识别出的 Comei-Bunbury 大火成岩省岩浆作用和随后与东冈瓦纳大陆裂解相关的一些构造作用也可能对该缺氧事件的形成发挥了作用。

4 藏南晚古生代—中生代构造岩浆演化

尽管对西藏南部晚古生代—中生代的构造岩浆演化历史可能存在不同解释,但任何相关模式的提出,都必须考虑到:(1)早—中二叠世拉萨地块处于俯冲背景,而同期的羌塘和喜马拉雅带处于伸展背景;(2)中二叠世末期(大约 263 Ma)同时发生的皮康过铝质花岗岩的侵位、松多榴辉岩的高压变质作用和区域上的角度不整合指示的冈底斯带中二叠世碰撞造山事件;(3)现今宽约 100 km、东西延伸至少 900 km 的拉萨微陆块和其南北两侧中生代岩浆岩锆石 Hf 同位素的梯度变化;(4)中冈底斯和北冈底斯大约 110 Ma 的带状岩浆大爆发和同期发生的南冈底斯岛弧岩浆作用;(5)冈底斯带中北部地区大约 110 Ma 岩浆活动中幔源物质显著增加的现象;(6)喜马拉雅带 132 Ma 左右大规模岩浆活动集中分布

在其东部地区。新的观察资料表明,在晚古生代—中生代时期,西藏南部很可能发生了两次大规模的导致洋盆闭合的碰撞造山事件,以此为标志,下文分三阶段来描述西藏南部的晚古生代—中生代构造岩浆演化历史和特提斯演化过程。

4.1 早二叠世—中二叠世末期(300~263 Ma)

在中二叠世末期以前,拉萨地块可能代表了一个存在于古特提斯洋内的微陆块,其北部为被动大陆边缘,南部遭受古特提斯洋壳岩石圈的北向俯冲,形成早二叠世江让、尼雄、然乌和中二叠世勒青拉岛弧火山岩(图 6a 和图 6b)。在中二叠世末期(大约 263 Ma),拉萨微陆块南缘可能与澳大利亚北部边缘发生碰撞导致以松多大洋型榴辉岩^[37]为代表的古特提斯洋关闭。在此碰撞过程中,晚期与俯冲有关的玄武岩浆不但提供了增厚地壳熔融所需的热,而且还与增厚地壳熔融产物发生岩浆混合形成皮康过铝质 S 型花岗岩^[30],并造成松多榴辉岩发生高压变质作用和形成区域性的角度不整合(图 6c 和图 6d)。

4.2 中二叠世末期—早白垩世早期(263~140 Ma)

中二叠世末期(大约 263 Ma),发生于拉萨微陆块南缘的冈底斯带二叠纪碰撞造山事件可能触发新的俯冲^[51],即在拉萨微陆块北部,由于古特提斯洋脊的持续扩张,将触发古特提斯洋壳岩石圈在大约 263 Ma 时开始向南俯冲于拉萨微陆块之下,形成新的俯冲带(图 6c 和图 6d)。随着俯冲作用的持续进行,很可能在拉萨微陆块南部早期碰撞带位置(也是构造软弱带)形成弧后盆地(图 6e 和图 6f),该弧后盆地继续发育,将导致拉萨微陆块从澳大利亚北缘分离出来形成新特提斯。在此过程中,与班公湖—怒江洋壳岩石圈南向俯冲有关的幔源岩浆可能底侵到拉萨微陆块南缘,提供热量促使地壳物质部分熔融,形成晚三叠世二云母花岗岩、花岗闪长岩^[61-62,68]、早侏罗世火山岩和相关侵入岩^[10,25,70]。此时期拉萨微陆块南缘仍为被动大陆边缘(图 7a)。

4.3 早白垩世早期—晚白垩世(140~65 Ma)

早白垩世早期,羌塘和冈底斯带之间的初始碰撞可能触发了拉萨微陆块南缘雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈向北的初始俯冲,并因此产生与俯冲洋壳熔融直接相关的早白垩世桑日群下部麻木下组埃达克质火山岩(137 Ma)^[26]。在冈底斯带中北部地区,由班公湖—怒江洋壳岩石圈南向俯冲诱导的幔源岩浆提供了足够的热促使拉萨微陆块自身古老基底物

质的重熔,形成 140~114 Ma 的 S 型长英质岩浆。随着班公湖—怒江洋壳岩石圈的持续南向俯冲,重力拖拉将引起洋壳岩石圈板片回转(图 7b)。俯冲洋壳岩石圈板片回转将加速软流圈物质上升引起古老基底物质重熔,同时还将引起上覆岩石圈板块发生裂谷作用^[100],沉积环境从非海相碎屑沉积(Berriasian-Aptian 期, 130~112 Ma)转变为浅海相碳酸盐沉积(Aptian-Albian 期, 125~100 Ma)^[9,11],形成狮泉河—拉果错—永珠—纳木错弧后盆地。连续的重力拖拉最终将导致班公湖—怒江洋壳岩石圈在其与羌塘大陆岩石圈的结合处发生断离。深部软流圈物质将从洋壳岩石圈断离处的“板片窗”进入地幔楔,导致地幔物质发生减压熔融和上覆拉萨微陆块自身的古老基底物质或增厚的地壳物质发生带状重熔,在 110 Ma 左右形成地幔物质显著增加的带状岩浆大爆发(图 7c)。随后,冈底斯带中北部地区可能进入陆内背景,而南部地区则因新特提斯洋壳岩石圈北向俯冲,继续发生以桑日群火山岩^[60]和冈底斯岩基(103~80 Ma)^[24]为代表的岛弧岩浆作用。

早白垩世时,在新特提斯北部活动大陆边缘冈底斯带发生强烈的与洋壳岩石圈俯冲和冈底斯—羌塘碰撞有关的岩浆作用同时,在雅鲁藏布新特提斯南部被动大陆边缘的大印度北东缘、澳大利亚和南极洲三联点之下,大约在 132 Ma 时,Kerguelen 地幔柱发生首次大规模岩浆作用,形成 Comei-Bunbury 大火成岩省(图 5b),导致大印度从澳大利亚裂离出来,东印度洋开启。大约在 120 Ma 时,Kerguelen 地幔柱再次发生大规模岩浆作用,形成印度东部的 Rajmahal 玄武岩和南印度洋 Kerguelen 高原玄武岩,导致印度陆块从南极洲裂离出来,南印度洋开启^[90,101]。伴随着南印度洋的扩张,印度陆块北向漂移并在白垩纪末期与冈底斯带发生碰撞,完成现今西藏南部的特提斯演化过程。

需要强调,本文讨论的西藏南部晚古生代—中生代构造岩浆演化历史和特提斯演化过程,仅仅是对当前已有新资料的初步思考,大部分观点的合理性还有待于后续工作的进一步检验。越来越多的新的观察事实表明,西藏南部的物质组成和经历的构造演化历史可能比早期认识到的要复杂得多。这就促使我们需要站在新的研究起点上,跳出已有模型或解释的框架性限制,重新思考西藏南部的晚古生代—中生代构造岩浆演化历史和特提斯演化过程。

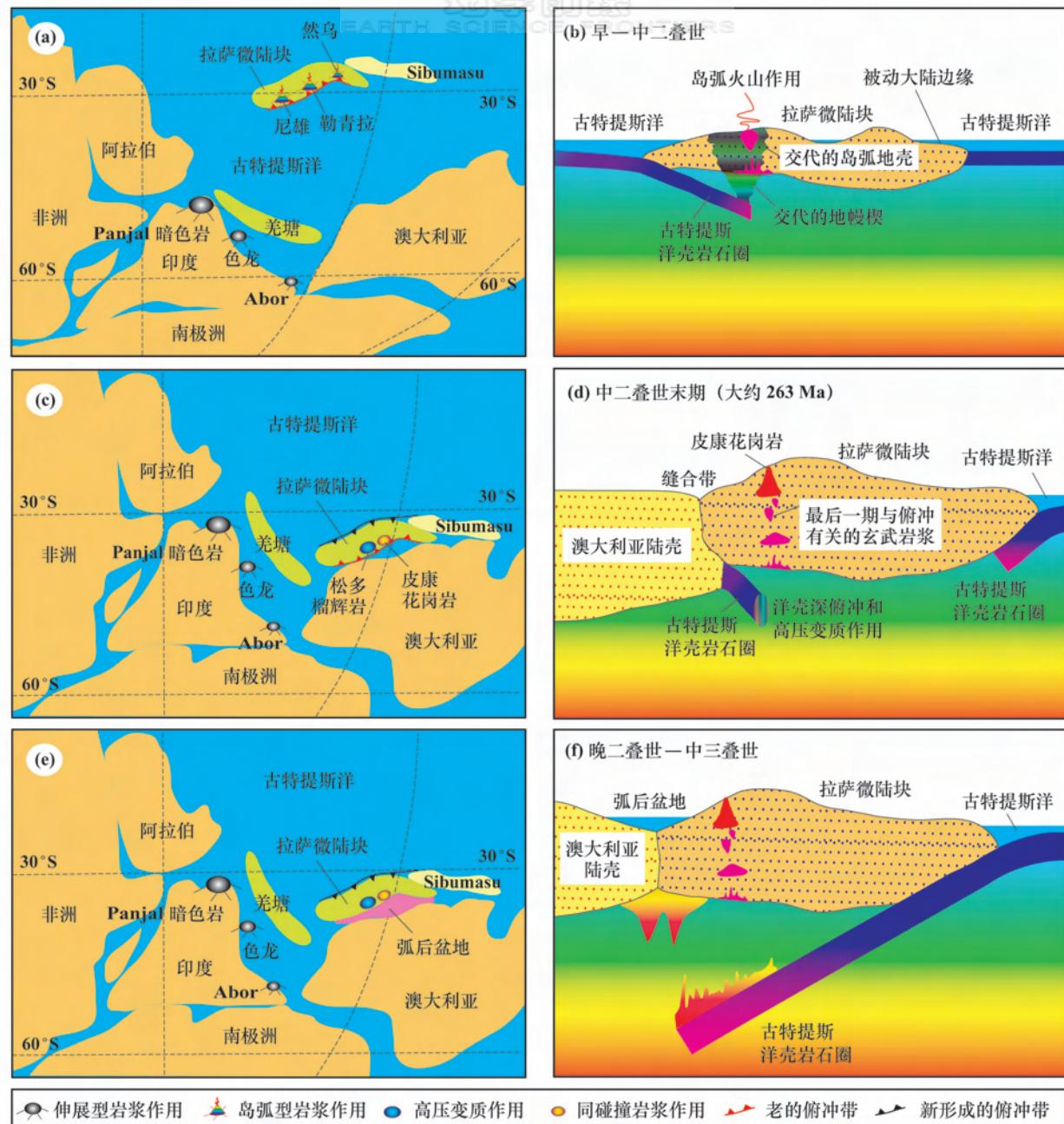


图 6 藏南晚古生代—中生代早期构造重建图

Fig. 6 Tectonic reconstruction of southern Tibet during the Late Paleozoic to early Mesozoic

图 a—b 据①修改

5 结语

(1) 早一中二叠世时拉萨地块处于俯冲背景,同期的羌塘和喜马拉雅带处于伸展背景,在中二叠世末期(大约 263 Ma)拉萨地块南部经历了碰撞造山事件。冈底斯弧背断隆带和中冈底斯带存在以古元古代甚至太古宙物质为特征的古老基底物质,代表

了现今宽约 100 km、东西延伸至少 900 km 的拉萨微陆块,而北冈底斯带和南冈底斯则分别以中新元古代新生地壳和显生宙新生地壳为特征,是在中生代时期通过与俯冲有关的地壳生长事件增生到拉

① Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, et al. Presence of Permian extension- and arc-type magmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications(submitted).

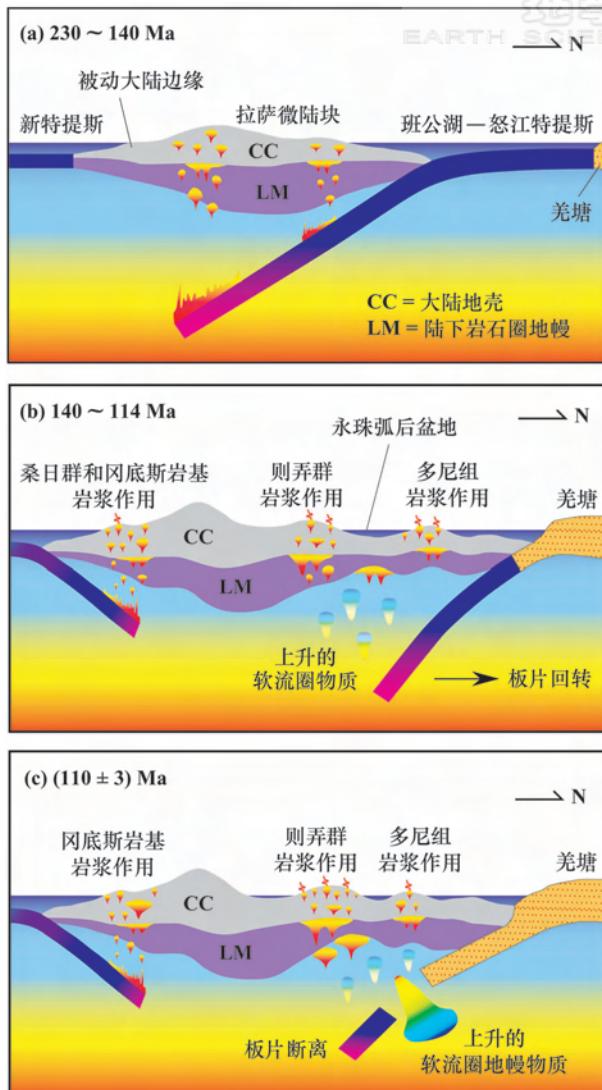
图 7 冈底斯带中生代构造岩浆演化概略图^①

Fig. 7 Schematic illustrations of the tectonomagmatic evolution of the Gangdese during the Mesozoic^①

萨微陆块北南两侧的,古生代时两者可能并不存在。中冈底斯早白垩世岩浆作用持续时间长(143~102 Ma),在大约 110 Ma 发生了带状岩浆大爆发,并伴随着幔源物质显著的增加。喜马拉雅带东部措美(Comei)地区大面积出露的白垩纪火成岩侵位于 132 Ma 左右,代表了藏南和澳大利亚南部经历强烈变形和深位侵蚀的 Comei-Bunbury 大火成岩省的一部分残余。

(2) 中二叠世末期以前拉萨地块可能代表了一个存在于古特提斯洋内的微陆块,其北部为被动大陆边缘,南部遭受古特提斯洋壳岩石圈的北向俯冲;在中二叠世末期(大约 263 Ma),拉萨微陆块可能与澳大利亚北部边缘发生碰撞导致以松多大洋型榴辉

岩为代表的古特提斯洋关闭,同时古特提斯洋壳岩石圈开始向南俯冲于拉萨微陆块之下;中生代时期班公湖—怒江洋壳岩石圈继承中二叠世末期以来的南向俯冲历史,在侏罗纪晚期—白垩纪早期因冈底斯—羌塘碰撞而触发了雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈的北向俯冲,自此冈底斯带同时受到班公湖—怒江洋壳岩石圈向南、雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈向北双向俯冲体系的影响。

(3) 拉萨微陆块从澳大利亚北缘分离出来导致了雅鲁藏布新特提斯的开启,其动力学机制可能来源于班公湖—怒江洋壳岩石圈开始于中二叠世末期的南向俯冲所引起的弧后扩张,冈底斯南部地区晚三叠世—早侏罗世岩浆岩可能形成于此弧后伸展背景下的岩浆底侵及其诱导的地壳熔融。

(4) 中冈底斯大约 110 Ma 的带状岩浆大爆发及其中幔源物质显著的增加可归因于向南俯冲的班公湖—怒江洋壳岩石圈的断离(break-off),冈底斯带中北部地区在 140~110 Ma 可能一直处于与冈底斯—羌塘碰撞有关的同碰撞背景,对应的早白垩世岩浆岩应属于与班公湖—怒江洋壳岩石圈南向俯冲有关的同碰撞岩浆岩。

(5) 喜马拉雅带 132 Ma 的大规模岩浆活动可能与 Kerguelen 地幔柱的初始岩浆活动有关,其结果是导致大印度从澳大利亚裂离出来,东印度洋开启。

第一作者在项目执行和研究工作中,先后得到成都地质矿产研究所所长勇硕士、袁四化博士、张万平博士以及中国地质大学(北京)刘敏、裘碧波和于枫等同学和冉波博士的帮助。特此感谢!

References:

- [1] Chung S L, Lo C H, Lee T Y, et al. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago[J]. Nature, 1998, 394: 769-773.
 - [2] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671-1677.
 - [3] Dupont-Nivet G, Hoorn C, Konert M. Tibetan uplift prior to
- ① Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet (submitted).

- the Eocene-Oligocene climate transition: Evidence from pollen analysis of the Xining Basin[J]. *Geology*, 2008, 36: 987-990.
- [4] Wang C S, Zhao X X, Liu Z F, et al. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau[J]. *National Academy of Sciences Proceedings*, 2008, 105: 4987-4992.
- [5] Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2008, 321: 1054-1058.
- [6] Kapp P, Murphy M A, Yin A, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. *Tectonics*, 2003, 22: 1029, doi:10.1029/2001TC001332.
- [7] Kapp P, Yin A, Harrison T M, et al. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117: 865-878.
- [8] Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, et al. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. *GSA Bulletin*, 2007, 119: 917-932.
- [9] Zhang K J, Xia B D, Wang G M, et al. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116: 1202-1222.
- [10] Chu M F, Chung S L, Song B, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. *Geology*, 2006, 34: 745-748.
- [11] Leier A L, Kapp P, Gehrels G E, et al. Detrital zircon geochronology of Carboniferous-Cretaceous strata in the Lhasa terrane, southern Tibet[J]. *Basin Research*, 2007, 19: 361-378.
- [12] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211-280.
- [13] Metcalfe I. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 551-566.
- [14] Zhu D C, Pan G T, Wang L Q, et al. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdese belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1535-1550(in Chinese).
- [15] Zhu D C, Chung S L, Mo X X, et al. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day SE Tibet and SW Australia[J]. *Geology*, 2009, doi: 10.1130/G30001A.1.
- [16] Yu G M, Wang C S. *Sedimentary Geology of the Xizang (Tibet) Tethys* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990; 10-49(in Chinese).
- [17] Xu R H, Schärer U, Allègre C J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): A geochronological study [J]. *Journal of Geology*, 1985, 93: 41-57.
- [18] Guynn J H, Kapp P, Pullen A, et al. Tibetan basement rocks near Amdo reveal “missing” Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet[J]. *Geology*, 2006, 34: 505-508.
- [19] Volkmer J E, Kapp P, Guynn J H, et al. Cretaceous-Tertiary structural evolution of the north central Lhasa terrane, Tibet[J]. *Tectonics*, 2007, 26: TC6007, doi: 6010.1029/2005TC001832.
- [20] Hu D G, Wu Z H, Jiang W, et al. SHRIMP zircon U-Pb age and Nd isotopic study on the Nyainqntanglha Group in Tibet [J]. *Science in China: Series D*, 2005, 48(9): 1377-1386.
- [21] He S D, Kapp P, DeCelles P G, et al. Cretaceous-Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 2007, 433: 15-37.
- [22] Coulon C, Maluski H, Bollinger C, et al. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79: 281-302.
- [23] Copeland P, Harrison T M, Pan Y S, et al. Thermal evolution of the Gangdese batholith, southern Tibet: A history of episodic unroofing[J]. *Tectonics*, 1995, 14: 223-236.
- [24] Wen D R, Liu D Y, Chung S L, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 2008, 252: 191-201.
- [25] Zhu D C, Pan G T, Chung S L, et al. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Early Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdese in south Tibet[J]. *International Geology Review*, 2008, 50 (5): 442-471.
- [26] Zhu D C, Pan G T, Zhao Z D, et al. Early Cretaceous subduction-related adakite-like rocks in the Gangdese, south Tibet: Products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction[J]? *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 298-309.
- [27] Stampfli G M, Borel G D. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196: 17-33.
- [28] Garzanti E, Le Fort P, Sciunnach D. First report of Lower Permian basalts in South Tibet: Tholeiitic magmatism during break-up and incipient opening of Neotethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1999, 17: 533-546.
- [29] Zhu T X, Pan G T, Feng X T, et al. Discovery and tectonic

- significance of Permian basic volcanic rocks in the Selong area on the northern slope of the Himalayas, southern Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(11): 717-722(in Chinese).
- [30] Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. Zircon U-Pb dating and in-situ Hf isotopic analysis of Permian peraluminous granite in the Lhasa Terrane, southern Tibet: Implications for Permian collisional orogeny and paleogeography[J]. Tectonophysics, 2009, doi: 10.1016/j.tecto.2009.01.017.
- [31] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]// Saunders A D. Magmatism in Ocean Basins. Geological Society Publication, 1989, 42: 313-345.
- [32] Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. Regional Geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 449-450(in Chinese).
- [33] Pan G T, Mo X X, Hou Z Q, et al. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 521-533(in Chinese).
- [34] Geng Q R, Wang L Q, Pan G T, et al. Volcanic rock geochemistry and tectonic implication of the Luobadui Formation on the Gangdese zone (Tibet)[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2699-2714(in Chinese).
- [35] Wang L Q, Pan G T, Zhu D C, et al. Carboniferous-Permian island arc orogenesis in the Gangdese belt, Tibet, China: Evidence from volcanic rocks and geochemistry[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(9): 1509-1534(in Chinese).
- [36] Booth A L, Zeitler P K, Kidd W S F, et al. U-Pb zircon constraints on the tectonic evolution of Southeastern Tibet, Namche Barwa area[J]. American Journal of Science, 2004, 304: 889-929.
- [37] Yang J S, Xu Z Q, Li Z L, et al. Discovery of an eclogite belt in the Lhasa block, Tibet: A new border for Paleo-Tethys[J]? Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34: 76-89.
- [38] Clemens J D. S-type granitic magmas: Petrogenetic issues, models and evidence[J]. Earth Science Reviews, 2003, 61: 11-18.
- [39] Zhou Y Y, Jiang Y S, Wang M G. Permian Dibucuo Formation in the Cogen-Shenza stratigraphic area, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(2): 79-82(in Chinese).
- [40] Wang L Q, Zhu D C, Pan G T. Primary results and progress of regional geological survey (1 : 250, 000): The south of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(5-6): 413-420(in Chinese).
- [41] Golonka J, Ford D. Pangean (Late Carboniferous-Middle Jurassic) Paleoenvironment and lithofacies[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 161: 1-34.
- [42] Scotese C R. A continental drift flipbook[J]. Journal of Geology, 2004, 112: 729-741.
- [43] Golonka J. Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 244: 297-307.
- [44] Enkin R J, Yang Z Y, Chen Y, et al. Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the Permian to the present[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(B10): 13953-13989.
- [45] Ziegler A M, Hulver M L, Roeley D B. Permian world topography and climate[J]// Martini I P. Late Glacial and Post-glacial Environmental Changes: Quaternary, Carboniferous-Permian and Proterozoic. New York: Oxford University Press, 1997: 111-146.
- [46] Scotese C R, Boucot A J, McKerrow W S. Gondwanan palaeogeography and palaeoclimatology[J]. Journal of African Earth Sciences, 1999, 28(1): 99-114.
- [47] Ferrari O M, Hochard C, Stampfli G M. An alternative plate tectonic model for the Palaeozoic-Early Mesozoic Palaeotethyan evolution of Southeast Asia (Northern Thailand-Burma)[J]. Tectonophysics, 2008, 451: 346-365.
- [48] Pearce J A, Mei H J. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1988, 327: 169-201.
- [49] Deng W M, Yin J X, Guo Z P. Basic-ultramafic and volcanic rocks in Chagbu-Shuanghu area of northern Xizang (Tibet), China[J]. Science in China: Series D, 1996, 39: 359-368.
- [50] Archbold N W. Permian Gondwanan correlations: The significance of the western Australian marine Permian[J]. Journal of African Earth Sciences, 1999, 29(1): 63-75.
- [51] Niu Y L, O'Hara M J, Pearce J A. Initiation of subduction zones as a consequence of lateral compositional buoyancy contrast within the lithosphere: A petrologic perspective[J]. Journal of Petrology, 2003, 44: 851-866.
- [52] Zhu D C, Mo X X, Pan G T, et al. Petrogenesis of the earliest Early Cretaceous basalts and associated diabases from Co-na area, eastern Tethyan Himalaya in south Tibet: Interaction between the incubating Kerguelen plume and eastern Greater India lithosphere[J]? Lithos, 2008, 100: 147-173.
- [53] Zhu D C, Pan G T, Mo X X, et al. Petrogenesis of volcanic rocks in the Sangxiu Formation, central segment of Tethyan Himalayas: A probable example of plume-lithosphere interaction[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29: 320-335.
- [54] Schwab M, Ratschbacher L, Siebel W, et al. Assembly of the Pamirs: Age and origin of magmatic belts from southern Tien Shan to the southern Pamirs and their relation to Tibet [J]. Tectonics, 2004, 23: TC4002.
- [55] Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, et al. Zircon U-Pb geochronol-

- ogy and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2009, doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.01.020.
- [56] Pan G T, Chen Z L, Li X Z, et al. Geological and Tectonic Evolution in the Eastern Tethys [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-218(in Chinese).
- [57] Pan G T, Wang L Q, Zhu D C. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23 (1): 12-19(in Chinese).
- [58] Qiu R Z, Zhou S, Deng J F, et al. Dating of gabbro in the Shemalagou ophiolite in the western segment of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt, Tibet—With a discussion of the age of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt[J]. *Geology in China*, 2004, 31(3): 262-268(in Chinese).
- [59] Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, et al. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(3): 281-290(in Chinese).
- [60] Zhu D C, Pan G T, Mo X X, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 534-546(in Chinese).
- [61] Li C, Wang T W, Li H M, et al. Discovery of Indosinian megaporphyritic granodiorite in the Gangdese area: Evidence for the existence of Paleo-Gangdese[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(5): 364-366(in Chinese).
- [62] He Z H, Yang D M, Zheng C Q, et al. Isotopic dating of the Mamba granitoid in the Gangdese tectonic belt and its constraint on the subduction time of the Neo-Tethys[J]. *Geological Review*, 2006, 52(1): 100-106(in Chinese).
- [63] Zhu J, Du Y S, Liu Z X, et al. Mesozoic radiolarian chert from the middle sector of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet and its tectonic implications[J]. *Science in China: Series D*, 2005, 49: 348-357.
- [64] Sylvester P J. Postcollisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 1998, 45: 29-44.
- [65] Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrological Sinica*, 2007, 23 (6): 1217-1238(in Chinese).
- [66] Zhang H F, Harris N, Parrish R, et al. Causes and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan antiform[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 228: 195-212.
- [67] Mo X X, Niu Y L, Dong G C, et al. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong Volcanic Succession in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2008, 250: 49-67.
- [68] Zhang H F, Xu W C, Guo J Q, et al. Indosinian orogenesis of the Gangdese terrane: Evidences from zircon U-Pb dating and petrogenesis of granitoids[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32(2): 155-166(in Chinese).
- [69] Dong Y H, Xu J F, Zeng Q G, et al. Is there any Neo-Tethys subduction record earlier than Sangri Group[J]? *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 661-668(in Chinese).
- [70] Zhang H F, Xu W C, Guo J Q, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic composition of deformed granite in the southern margin of the Gangdese belt, Tibet: Evidence for early Jurassic subduction of Neo-Tethyan oceanic slab[J]. *Acta Petrological Sinica*, 2007, 23(6): 1347-1353(in Chinese).
- [71] Burg J P, Proust F, Tapponnier P, et al. Deformation phases and tectonic evolution of the Lhasa block (southern Tibet, China)[J]. *Eclogae Geologica Helvetica*, 1983, 76: 643-665.
- [72] Li P W, Cui J W, Li L, et al. Estimation of shortening between the Siberian and Indian Plates since the Early Cretaceous[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 241-245.
- [73] Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, et al. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1988, 327: 379-413.
- [74] Shi R D, Yang J S, Xu Z Q, et al. Discovery of the boninite series volcanic rocks in the Bangong Lake ophiolite mélange, western Tibet, and its tectonic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(12): 1272-1278.
- [75] Li J X, Li G M, Qin K Z, et al. Geochemistry of porphyries and volcanic rocks and ore-forming geochronology of Duobuzha gold-rich porphyry copper deposit in Bangonghu belt, Tibet: Constraints on metallogenic tectonic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(3): 531-543(in Chinese).
- [76] Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, et al. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 2007, 96: 225-242.
- [77] Lee H Y, Chung S L, Wang Y B, et al. Age, petrogenesis and geological significance of the Linzizong volcanic successions in the Linzhou basin, southern Tibet: Evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 493-500(in Chinese).
- [78] Harris N B W, Xu R H, Lewis C L, et al. Plutonic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1988, 327, 1594, 145-168.
- [79] Zhou C Y, Zhu D C, Zhao Z D, et al. Petrogenesis of Daxiong pluton in western Gangdese, Tibet: Zircon U-Pb dating

- and Hf isotopic constraints [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(3): 348-358(in Chinese).
- [80] von Blanckenburg F, Davis J H. Slab breakoff: A model for syncollisional magmatism and tectonics in the Alps[J]. *Tectonics*, 1995, 14: 120-131.
- [81] Wong A, Ton S Y M, Wortel M J R. Slab detachment in continental collision zones: An analysis of controlling parameters[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24: 2095-2098.
- [82] Mo X X, Zhao Z D, Deng J F, et al. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 135-148(in Chinese).
- [83] Zhong H M, Tong J S, Xia J, et al. Characteristics and tectonic setting of volcanic rocks of the Sangxiu Formation in the southern part of Yamzho Yumco, southern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(1): 72-79(in Chinese).
- [84] Jiang S H, Nie F J, Hu P, et al. Important spreading event of the Neo-Tethys ocean during the Late Jurassic and Early Cretaceous: Evidence from Zircon U-Pb SHRIMP dating on diabase in Nagarze, southern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80: 522-527.
- [85] Tong J S, Liu J, Zhong H M, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of mafic dike swarms in the Lhazog area, southern Tibet, China, and their tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(12): 1654-1664(in Chinese).
- [86] Zhu D C, Pan G T, Mo X X, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating for the dacite of the Sangxiu Formation in the central segment of Tethyan Himalaya and its implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 563-568.
- [87] Hodges K V. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives[J]. *GSA Bulletin*, 2000, 112: 324-350.
- [88] Bryan S E, Ernst R E. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs)[J]. *Earth Science Reviews*, 2008, 86: 175-202.
- [89] Schettino A, Scotese C R. New internet software aids paleomagnetic analysis and plate tectonic reconstructions[J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2001, 82: 530-536.
- [90] Coffin M, Eldholm O. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions and external consequences [J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32: 1-36.
- [91] Frey F A, McNaughton N J, Nelson D R, et al. Petrogenesis of the Bunbury Basalt, Western Australia: Interaction between the Kerguelen plume and Gondwana lithosphere[J]? *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144: 163-183.
- [92] Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, et al. Whole-rock elemental and zircon Hf isotopic geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Early Cretaceous Comei Large Igneous Prov-
- ince in SE Tibet: Constraints on mantle source characteristics and petrogenesis (Extended abstract)[J]. *Himalayan Journal of Sciences*, 2008, 5: 178-180.
- [93] Davies H L, Sun S S, Frey F A, et al. Basalt basement from the Kerguelen Plateau and the trail of a Dupal plume[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1989, 103: 457-469.
- [94] Kent R W, Pringle M S, Müller R D, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Rajmahal basalts, India, and their relationship to the Kerguelen Plateau[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43: 1141-1153.
- [95] Ingle S, Scoates J S, Weis D, et al. Origin of Cretaceous continental tholeites in southwestern Australia and eastern India: Insights from Hf and Os isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209: 83-106.
- [96] Antretter M, Steinberger B, Heider F, et al. Paleolatitudes of the Kerguelen hotspot: New paleomagnetic results and dynamic modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 635-650.
- [97] Heine C, Müller R D. Late Jurassic rifting along the Australian northwest shelf: Margin geometry and spreading ridge configuration[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2005, 52: 27-39.
- [98] Erba E, Bartolini A, Larson R L. Valanginian Weissert oceanic anoxic event[J]. *Geology*, 2004, 32: 149-152.
- [99] Lini A, Weissert H, Erba E. The Valanginian carbon isotope event: A first episode of greenhouse climate conditions during the Cretaceous[J]. *Terra Nova*, 1992, 4: 374-384.
- [100] Royden L H. The tectonic expression of slab pull of continental convergent boundaries[J]. *Tectonics*, 1993, 12: 303-325.
- [101] Ingle S, Weis D, Scoates J, et al. Relationship between the early Kerguelen plume and continental flood basalts of the paleo-Eastern Gondwanan margins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 197: 35-50.

参考文献:

- [14] 朱弟成,潘桂棠,王立全,等. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1535-1550.
- [16] 余光明,王成善. 西藏特提斯沉积地质[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 10-49.
- [29] 朱同兴,潘桂棠,冯心涛,等. 藏南喜马拉雅北坡色龙地区二叠系基性火山岩的发现及其构造意义[J]. *地质通报*, 2002, 21(11): 717-722.
- [32] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 449-450.
- [33] 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等. 冈底斯造山带的时空结构及

- 演化[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 521-533.
- [34] 耿全如, 王立全, 潘桂棠, 等. 西藏冈底斯带洛巴堆组火山岩地球化学及构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2699-2714.
- [35] 王立全, 潘桂棠, 朱弟成, 等. 西藏冈底斯带石炭纪一二叠纪岛弧造山作用: 火山岩和地球化学证据[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1509-1534.
- [39] 周幼云, 江元生, 王明光. 西藏措勤—申扎地层分区二叠系敌布错组的建立及其特征[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 79-82.
- [40] 王立全, 朱弟成, 潘桂棠. 青藏高原 1: 25 万区域地质调查主要成果和进展综述(南区)[J]. 地质通报, 2004, 23(5-6): 413-420.
- [56] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-218.
- [57] 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考[J]. 地质通报, 2004, 23(1): 12-19.
- [58] 邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 等. 西藏班公湖—怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定——兼论班公湖—怒江蛇绿岩带形成时代[J]. 中国地质, 2004, 31(3): 262-268.
- [59] 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 281-290.
- [60] 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 534-546.
- [61] 李才, 王天武, 李惠民, 等. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗闪长岩——古冈底斯造山的存在证据[J]. 地质通报, 2003, 22(5): 364-366.
- [62] 和钟铧, 杨德明, 郑常青, 等. 冈底斯带门巴花岗岩同位素测年及其对新特提斯洋俯冲时代的约束[J]. 地质论评, 2006, 52(1): 100-106.
- [65] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [68] 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 冈底斯印支期造山事件: 花岗岩类锆石 U-Pb 年代学和岩石成因证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(2): 155-166.
- [69] 董彦辉, 许继峰, 曾庆高, 等. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 661-668.
- [70] 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1347-1353.
- [75] 李金祥, 李光明, 秦克章, 等. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩—火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 531-543.
- [77] 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 等. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 493-500.
- [79] 周长勇, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏冈底斯带西部达雄岩体的岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 348-358.
- [82] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 135-148.
- [83] 钟华明, 童劲松, 夏军, 等. 藏南羊卓雍错南部桑秀组火山岩的特征及构造环境[J]. 地质通报, 2005, 24(1): 72-79.
- [85] 童劲松, 刘俊, 钟华明, 等. 藏南洛扎地区基性岩墙群锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及构造意义[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1654-1664.