

# 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\*

朱弟成<sup>1</sup> 潘桂棠<sup>1</sup> 莫宣学<sup>2</sup> 王立全<sup>1</sup> 廖忠礼<sup>1</sup> 赵志丹<sup>2</sup> 董国臣<sup>2</sup> 周长勇<sup>1</sup>

ZHU DiCheng<sup>1</sup>, PAN GuiTang<sup>1</sup>, MO XuanXue, WANG LiQuan, LIAO ZhongLi, ZHAO ZhiDan, DONG GuoChen and ZHOU ChangYong

1. 成都地质矿产研究所, 成都 610082

2. 中国地质大学, 北京 100083

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

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2005-12-01 收稿, 2006-01-24 改回.

Zhu DC, Pan GT, Mo XX, Wang LQ, Liao ZL, Zhao ZD, Dong GC and Zhou CY. 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 534–546

**Abstract** Distribution, volcanism-age constrained by stratigraphy, paleontology and isotopic dating for the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks on Gangdese, and their tectonic setting, petrogenesis and subducted polarity have been preliminarily studied based on regional geological survey (1:250000) and our data. Our study shows that the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks are not only distributed on southern Gangdese, but also widely exposed on middle, northern Gangdese and southern margin of Bangong Co-Nujiang suture zone. They started to erupt at about 120 ~ 130 Ma and likely lasted to the Late Cretaceous. However, the maximum volcanic activity occurred in middle-northern rather than southern Gangdese. Present geochemical data indicate that the Zenong Group volcanic rocks on middle Gangdese, which are mainly composed of partly intermediate-basic rocks of medium-K calc-alkaline series and dominant intermediate-acid rocks of high-K calc-alkaline series, are not consistent with traditional island-arc volcanic rocks but similar to volcanic rocks erupted in a thick crust from Central Andes, whereas the Duoni Formation volcanic rocks on northern Gangdese consist of mainly medium-K calc-alkaline series, resembling traditional island-arc volcanic rocks. It should be noted that all of these volcanic rocks have affinities with island-arc volcanic rocks. The Zenong Group intermediate-basic volcanic rocks on middle Gangdese are most likely derived from the partial melting of mantle wedge materials induced by fluid from subducted sediments and/or subducted basaltic crust and then experienced assimilation-fractional crystallization (AFC process) during ascending. The Zenong Group felsic rocks are dominantly related to crustal remelting, however, fractional crystallization of mafic magma cannot be entirely ruled out. The compositional variation, crustal thickness, distance from subducted zone revealed by present geochemical data of the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks on middle-northern Gangdese, together with the distributions of contemporaneous volcanic rocks on Gangdese, indicating that the Late Jurassic Early Cretaceous volcanic rocks on middle-northern Gangdese are most likely related to southward subduction of Bangong Co-Nujiang oceanic crust.

**Key words** Subducted polarity, Island-arc volcanic rocks, Late Jurassic Early-Cretaceous, Middle-northern Gangdese, Tibet

**摘 要** 利用新近完成的1:25万区域地质调查资料和笔者分析数据,初步研究了西藏冈底斯带晚侏罗世—早白垩世火山岩的分布特点及地层古生物、同位素年代学约束的火山活动时代以及冈底斯中北部火山岩的性质、构造环境、岩石成因和俯冲极性。冈底斯带晚侏罗世—早白垩世火山岩主要分布于南冈底斯、中冈底斯、北冈底斯和班公湖-怒江缝合带南缘,基本同期开始于早白垩世(大约120~130 Ma)并可能延续到晚白垩世,以冈底斯中北部地区规模最大为特征。已有数据显示中冈底斯则弄群火山岩包括部分中钾钙碱性系列的中基性岩石和占优势的高钾钙碱性系列的中酸性火山岩,不同于

\* 国家973项目(No. 2002CB412609)、国家自然科学基金项目(No. 40503005, 40473020)、国土资源部百名优秀青年科技人才计划、中国地质调查局“青藏高原南部空白区基础地质综合研究”项目(No. 200313000025)共同资助。

第一作者简介:朱弟成,1972年生,男,博士,副研究员,从事岩浆作用与地球动力学、特提斯地质研究, E-mail: cdzdc@cgs.gov.cn

传统岛弧火山岩,但与中安第斯厚地壳背景下的岛弧火山岩相似,北冈底斯主要为与传统岛弧火山岩相似的中钾钙碱性系列火山岩。中冈底斯则群中基性火山岩很可能与来自消减沉积物和/或蚀变玄武质洋壳的含水流体引起上覆地幔楔物质的部分熔融有关,并在岩浆上升过程中经历了明显的分离结晶作用和中上部地壳物质的同化混染(即 AFC 过程),长英质火山岩很可能主要与地壳重熔有关,但并不能完全排除镁铁质岩浆的分离结晶作用。目前冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩地球化学数据揭示的成分变化、地壳厚度、与俯冲带的距离以及冈底斯带同期火山岩的分布特点暗示冈底斯中北部火山岩很可能与班公湖-怒江特提斯洋壳向南的俯冲作用有关。

**关键词** 俯冲极性;岛弧火山岩;晚侏罗世—早白垩世;冈底斯中北部;西藏

**中图法分类号** P588.14

冈底斯带的地理概念是指西藏中部西自狮泉河、冈仁波齐,向东经念青唐古拉山,与伯舒拉岭相连的自然地理单元。在地质上,冈底斯带一般指南侧的印度河-雅鲁藏布缝合带(IYZS)与北部的班公湖-怒江缝合带(BNS)之间的近东西向的狭长地域,长约 2500 km,南北宽 150~300 km,面积达 45 万 km<sup>2</sup> 的巨型构造-岩浆带(图 1)。冈底斯带上广泛分布着中生代岩浆岩,前人的研究主要集中在冈底斯带中南部地区(常承法和郑锡澜, 1973; 周云生等, 1981; Coulon *et al.*, 1986; Pearce and Mei, 1988; 李才等, 2003; 翟庆国等, 2005; 和钟铨等, 2005), 对该带中北部地区火山岩浆活动的分布特点、性质和构造环境关注较少, 对该地区中生代火山岩浆活动的地球动力学环境也存在不同认识, 例如一些学者将其归因于新特提斯洋壳北向俯冲(Coulon *et al.*, 1986; Kapp *et al.*, 2003; Ding *et al.*, 2003; Ding and Lai, 2003), 而部分学者认为除了与新特提斯洋壳北向俯冲有关外, 还很可能与班公湖-怒江特提斯洋壳向南的俯冲作用有关(Hsü *et al.*, 1995; 潘桂棠等, 1997, 2004)。因此, 要全面分析冈底斯中生代岩浆岩的地球动力学环境, 还需要更好地了解冈底斯中北部火山岩浆活动蕴涵的信息。

本文在新近完成的 1:25 万区域地质调查资料基础上, 结合新的分析数据, 首次展示冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩的分布及地层古生物、同位素年代学约束的火山活动时代, 初步分析拉萨地块中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩的分布特点、性质、构造环境和相关的地球动力学环境。

## 1 地质背景

众所周知, 青藏高原中南部有两条规模宏大的近东西向展布的蛇绿混杂岩带, 即著名的印度河-雅鲁藏布缝合带(IYZS)和班公湖-怒江缝合带(BNS, 图 1)。印度河-雅鲁藏布缝合带位于青藏高原南部, 被普遍认为是新特提斯洋的演化记录, 早期研究一直认为该带蛇绿岩主要形成于晚侏罗世—早白垩世, 但近年来在该带发现的中晚三叠世—早白垩世放射虫硅质岩和相关岩浆活动记录(潘桂棠等, 2004; 王立全等, 2004), 暗示新特提斯洋盆可能具有更早的发育历史。班公湖-怒江缝合带位于青藏高原中部, 很多学者认为该带是中生代特提斯洋的演化记录, 然而近几年在该带发现

的古特提斯洋壳残余(王建平等, 2003; 陈玉禄等, 2005; 1:25 万那曲县幅<sup>①</sup>), 暗示该特提斯洋盆可能在古生代就开始了活动。

本文涉及的冈底斯带, 即夹持于南部的印度河-雅鲁藏布缝合带和北部的班公湖-怒江缝合带之间。该带出露有元古宙—新生代地层, 前寒武纪及早古生代地层分布较少, 晚古生代地层分布较广, 晚石炭—早二叠世为具冈瓦纳相特征的海相含冰碛杂砾岩。侏罗纪—古近纪地层大面积分布, 其中侏罗—白垩纪为海相与海陆交互地层, 除著名的冈底斯南缘侏罗纪—新生代火山岩和冈底斯复合岩基外, 该带中北部还出露有大规模的侏罗—白垩纪火山岩(图 1)和侵入体(莫宣学等, 2005)。冈底斯带中南部古近纪地层分布广泛, 发育大量火山岩, 以广为人知的林子宗火山岩为代表。除此之外, 冈底斯带还大量出露有白垩纪—新生代中酸性侵入岩, 近年也有晚三叠世中酸性岛弧花岗岩的报道(李才等, 2003; 和钟铨等, 2005)。

以沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂(SMLMF)、噶尔-隆格尔-扎日南木错-措麦断裂带(GLZCF)、达瓦错-马尔下-德庆断裂(DMDF)和狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎断裂(SYNJF)为界, 由南向北将冈底斯带划分为南冈底斯带(即传统的冈底斯带)、隆格尔-念青唐古拉带(即冈底斯弧背断隆带)、措勤-多瓦后陆拗陷带、中冈底斯带和北冈底斯带(图 1)。本文主要研究中冈底斯带和北冈底斯带出露的晚侏罗世—早白垩世火山岩。

## 2 分布及时代约束

通过综合分析冈底斯带完成的 1:25 万区域地质调查资料, 发现冈底斯带晚侏罗世—早白垩世火山岩不但分布于南冈底斯, 而且在中冈底斯和北冈底斯还呈面状大面积出露。另外, 在班公湖-怒江缝合带南缘也发现有厚达数百米的早白垩世火山岩。

<sup>①</sup> 尼玛次仁, 谢尧武, 沙昭礼, 西洛朗杰, 强巴扎西, 彭道平, 格桑索朗, 洛松占堆. 2004. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告那曲县幅

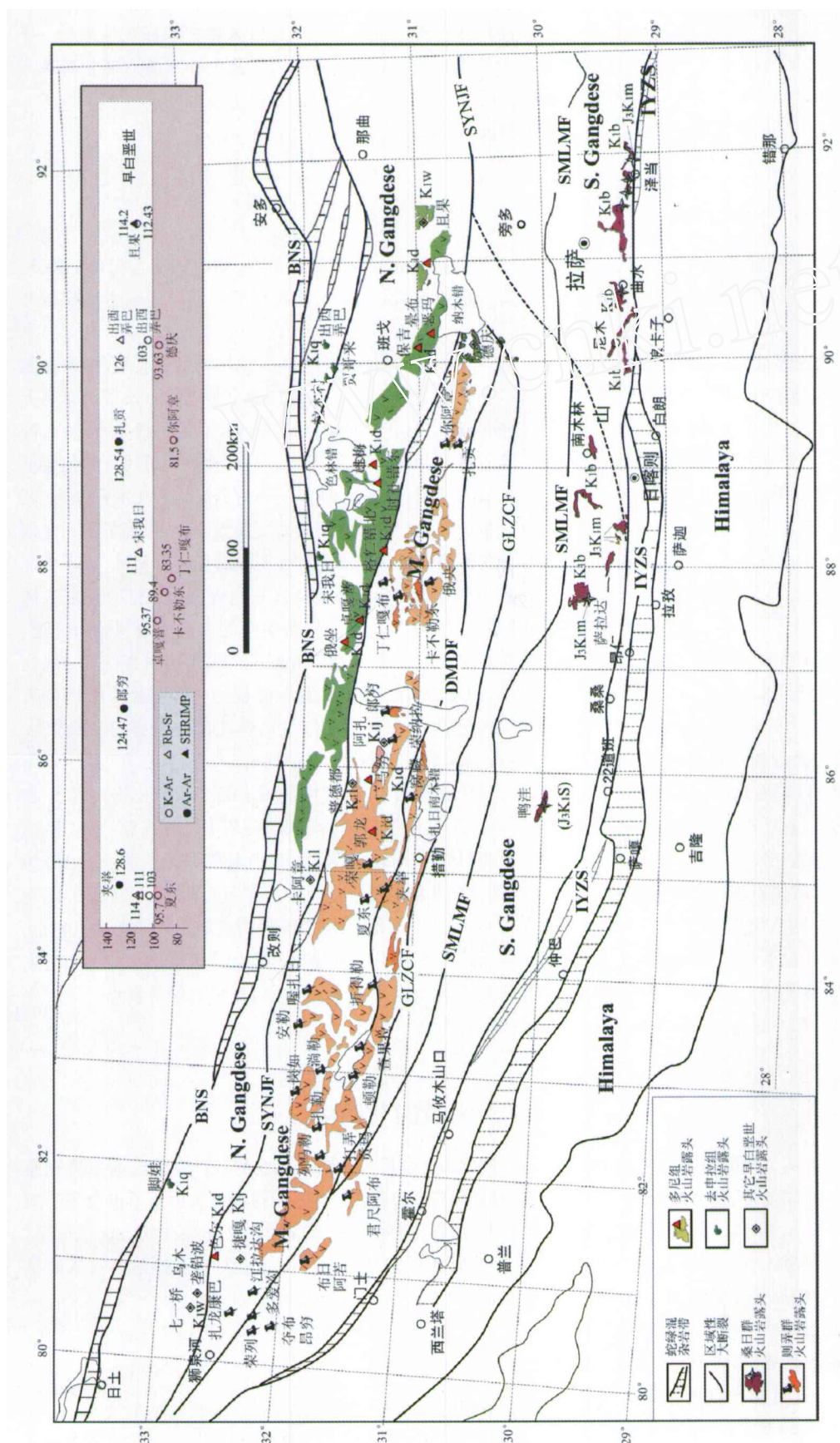


图1 西藏南部冈底斯带晚侏罗世—早白垩世火山岩分布图

笔者根据冈底斯带最近完成的1:25万区域地质调查资料编制,构造单元划分(Pan *et al.*, 2004). SMLMF为沙莫勒-麦拉-洛巴-堆米-拉山断裂;GLZCF为噶尔-隆格-札日南木错-措麦断裂带;DMDF为达瓦错-马尔下-德庆断裂;SYNJF为狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎断裂;N. Gangdese为北冈底斯;M. Gangdese为中冈底斯;S. Gangdese为南冈底斯;BNS为班公湖-怒江缝合带;IVZS为印度河-雅鲁藏布缝合带;内插图显示了冈底斯中北部地区火山岩已有的同位素年龄数据(Ma)

Fig. 1 Distributions of the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks on Gangdese, south Tibet

Compiled from regional geological survey reports (1:250,000) on Gangdese. Tectonic subdivisions (Pan *et al.*, 2004). SMLMF = Shamolei-Maila-Luobadui-Milashan Fault; GLZCF = Ga'er-Longge'r-Zari'namco-Comai Fault; DMDF = Dawaco-Ma'erxia-Deqing Fault; SYNJF = Shiquan River-Yongzhu-Namco-Jiali Fault. BNS = Bangong Lake - Nujiang Suture zone; IVZS = Indus-Yarlung Zangbo Suture zone; inset showing current isotopic age-variation (Ma) for the volcanic rocks on middle-northern Gangdese

## 2.1 南冈底斯火山岩

南冈底斯 $J_3$ — $K_1$ 火山岩的赋存地层被称为桑日群( $J_3K_1S$ ),由下部的麻木下组和上部的比马组构成。麻木下组( $J_3K_1m$ )火山岩零星出露于泽当马门、昂仁亚模萨拉达和措勤鸭洼等地(图1)。马门地区的麻木下组火山岩为安山岩,上覆砾状透辉石绿帘石夕卡岩,厚度大于180m。措勤鸭洼麻木下组火山岩为深绿色角闪安山岩,上覆含砾砂屑生物碎屑灰岩、石英质细砾岩,下伏泥晶粒屑灰岩、砂质微晶灰岩,厚274.68m(1:25万措麦区幅<sup>①</sup>)。在萨拉达,麻木下组火山岩为一套夹于砂岩、粉砂岩中的沉基性凝灰岩(1:25万拉孜幅<sup>②</sup>)。比马组( $K_1b$ )火山岩断续分布于雅鲁藏布江北岸的桑日、曲水、尼木、南木林、昂仁亚模萨拉达和措勤鸭洼等地(图1),岩性主要为玄武安山岩、安山岩、英安岩和凝灰岩(李海平等,1995;1:25万措麦区幅<sup>①</sup>、1:25万拉孜幅<sup>②</sup>),产于岩屑砂岩、粉砂岩、板岩及生物碎屑结晶灰岩夹石榴斜长透辉砂卡岩地层中,厚度大于1500m(李海平等,1995)。

这些火山岩的时代主要由地层中的化石约束,如麻木下组地层产晚侏罗世—早白垩世珊瑚*Thecosmilia* sp., *Discocyathus* sp., *Hexacoralla* sp., *Cladophyllia* sp., *Monilivaltia* sp., *Cyathophora* sp., *Actinaraea* sp., *Bavneiacapra*; 双壳类*Meucurithium* sp., *Plagiostoma* cf. *Muddoensis*, *Trigoia* sp., *Astarte* sp.; 腹足类*Nerinea* sp., *Maliptyx* sp., *Atryxella* off. *Andoesid*, *Xizangstormotopora* sp.; 海百合茎*Pentacrinus* sp. 及层孔虫*Cladocarpis* sp., *Cmirabilis Felix*, *Parastromtopora Pieana* sp. 等化石。比马组地层产早白垩世阿尔布期—赛诺曼期圆笠虫*Orbitolinids*, *Mesorbilina* sp., *Orbitolina* sp., 双壳类*Caprinidae*, *Praeacprina* sp., *Rudist* sp., 腹足类*Diozoptyx* sp., *Nerinea* sp. 及六射珊瑚*Hexacoralla* sp. 等化石。另外,在曲水西侧比马组安山岩中获最老年龄为125.23 ± 21.5 Ma的Rb-Sr全岩等时线年龄(李海平等,1995)。

## 2.2 中冈底斯火山岩

中冈底斯 $J_3$ — $K_1$ 火山岩的赋存地层被称为则弄群( $K_1z$ ),从东到西呈面状大面积分布于隆格尔—措麦断裂带和狮泉河—永珠—纳木错—嘉黎断裂带之间(图1),东西延伸达1000 km,南北宽数公里到数十公里,平均厚度超过1000 m。除了在噶尔荣列夹硅化灰岩、大理岩化灰岩以及生物碎屑灰岩,在措勤达瓦错西、措勤窝藏、尼玛荣纳拉、当惹雍错西岸出露有石英砂岩、岩屑砂岩、杂砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、及薄层砾岩外,该带岩性主要为安山岩、英安岩、流纹岩等中酸性火山熔岩以及英安质、流纹质凝灰岩、熔结凝灰岩等火山碎屑岩和火山角砾岩。垂向上,则弄群下部主要为火山熔岩夹火山碎屑岩,上部主要为沉积火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩、正常火山岩质砂、砾岩夹火山熔岩和火山碎屑岩。空间上(图1),该带安山岩规模从西到东呈现出由大(狮泉河地区则弄群中下部)→小(措勤夏东、郭龙、窝藏)→大(当惹雍

错西岸荣纳拉)→小(尼玛丁仁嘎布、申扎俄央)→大(申扎你阿章)的变化格局(表1)。需要指出的是,在西部狮泉河地区则弄群上部出现了厚度巨大的粗面岩和碱性流纹岩(表1),在措勤窝藏也出现了厚度超过100m的粗面岩。

在尼玛荣纳拉、当惹雍错西岸则弄群底部砂岩中产早白垩世植物化石*Cladophlebis* cf. *browniana*,在灰岩中产早白垩世圆笠虫化石*Orbitoliniides*, *Mesorbilina* cf. *parva*,在该群火山岩上覆地层中产早白垩世植物*Ptilophyllum* sp. *Pityoladus* sp., 腹足类*Nerinea* sp. 和双壳类*Anisocardia* (*Autiguicypprina*) sp. 化石等;在申扎你阿章,该群下部地层中产侏罗—白垩纪腹足类*Nerinea* sp. 及早白垩世腹足类*Pseudamaura subfourneti*, *Adiaoptyx affinis*, *A. coquandiana*, *Mesoglaucania bagoinensis*, *Nerinea schicki* 等化石。则弄群火山岩的时代除得到上述化石约束外,在措勤夏东英安岩中获得Rb-Sr年龄为111~114 Ma,措勤达瓦错西夹举则弄群下部之顶的安山玄武岩中获得128.64 Ma的Ar-Ar年龄(1:25万措勤县幅<sup>③</sup>);在当惹雍错西岸则弄群下部之顶的角闪英安岩中获得124.47 Ma的Ar-Ar年龄(1:25万邦多区幅<sup>④</sup>);在申扎你阿章该群下部安山岩中获得128.54 Ma的Ar-Ar年龄(1:25万申扎县幅<sup>⑤</sup>)。结合其它同位素年代学方法(图1),已有年龄数据给出了81.5~128.6 Ma的年龄,表明中冈底斯火山活动主要发生于早白垩世,晚期可能跨越到晚白垩世。

## 2.3 北冈底斯火山岩

北冈底斯 $J_3$ — $K_1$ 火山岩的赋存地层从东到西被称为卧荣沟组( $K_1wr$ )、多尼组( $K_1d$ )和乌木垄铅波岩组( $K_1wm$ ,图1)。卧荣沟组和乌木垄铅波岩组主要分布该带东西两端(如班戈且果村、噶尔七一桥),岩石类型特殊,如在噶尔七一桥出露了碱长流纹岩(515m)、粗面岩(268m)和斑状流纹岩(233m),在班戈德庆出露了粒玄岩(262m)、粗安岩(125m)以及安山岩(331m)和流纹岩(492m),在班戈且果村为厚度巨大的流纹岩(1658m)等。多尼组火山岩从东部纳木错北岸到西部革吉色尔均有出露,东西延伸约900km。除东部班戈布布恶玛一带出露有玄武岩外,该带主体岩性均为安山岩、英安岩、流纹岩分布较为局限,规模较小(表1),流纹质、

① 谢国刚,邹爱建,袁建芽,廖思平,李晓勇,唐峰林,徐祖丰,陈振华,罗小川,徐银保,肖业斌,曹圣华,黄传冠. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告措麦区幅

② 朱杰,刘早学,张汉金,田望学,李雄伟,谭满堂,李振华,龚志恩. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告拉孜幅

③ 刘登忠,陶晓风,马润则,石和,朱利东,胡新伟. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告措勤县幅

④ 谢国刚,邹爱建,袁建芽,廖思平,李晓勇,唐峰林,徐祖丰,陈振华,罗小川,徐银保,肖业斌,曹圣华,黄传冠. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告邦多区幅

⑤ 王天武,程立人,李才,武世忠,赵俊才,和钟铨,张子杰,朱志勇,杨德明. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告申扎县幅

表 1 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩岩性分布

Table 1 Lithological distributions for the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks on middle-northern Gangdese

层位	产地	玄武岩	安山岩	粗面岩	英安岩	流纹岩	安山岩比例 (%)	资料来源
中冈底斯 (则弄群)	狮泉河扎龙康巴上部则弄群	192m		2526m		2348m (碱性)	0%	狮泉河幅 <sup>①</sup>
	狮泉河扎龙康巴中下部则弄群		1437m		81m	91m	89%	狮泉河幅 <sup>①</sup>
	狮泉河荣列	603m	243m		90.9m		26%	狮泉河幅 <sup>①</sup>
	狮泉河多爱沟	> 26m					0%	狮泉河幅 <sup>①</sup>
	狮泉河江拉达沟	9.3m	1558m				99%	狮泉河幅 <sup>①</sup>
	措勤夏东				824.4m	135.1m	0%	措勤县幅 <sup>②</sup>
	措勤郭龙				厚度不明		0%	措勤县幅 <sup>②</sup>
	措勤窝藏	155.9m	28.1m	128.41m		249.8m	5%	邦多区幅 <sup>③</sup>
	当惹雍错西岸荣纳拉	29.7m	733.7m				96%	邦多区幅 <sup>③</sup>
	当惹雍错西岸郎穷		352.5m		180.2m	1303.5m	19%	邦多区幅 <sup>③</sup>
	尼玛丁仁嘎布				97.1m		0%	尼玛幅 <sup>④</sup>
	申扎俄央				637.7m	634.3m	0%	热布喀幅 <sup>⑤</sup>
	申扎你阿章		1065.1m		> 166.6m		86%	申扎县幅 <sup>⑥</sup>
	革吉色尔		28.0m			18.6m	60%	革吉幅 <sup>⑦</sup>
北冈底斯 (多尼组)	尼玛俄坐		425.6m		76.8m		85%	尼玛幅 <sup>④</sup>
	尼玛卓嘎普		> 736m				100%	尼玛幅 <sup>④</sup>
	申扎格仁错北				29.6m	16.2m	0%	尼玛幅 <sup>④</sup>
	申扎时补错东		211m			144m	59%	多巴区幅 <sup>⑧</sup>
	申扎达过		1023m				100%	多巴区幅 <sup>⑧</sup>
	申扎雄梅		449.0m				100%	多巴区幅 <sup>⑧</sup>
	班戈晕布恶玛	290.6m					0%	当雄幅 <sup>⑨</sup>

注:表中统计数据来自相关图幅实测剖面中的熔岩厚度,不包括凝灰岩、凝灰熔岩等火山碎屑岩类

① 许荣科, 茨邛, 庞振甲, 齐建宏, 雷裕红, 郑有业, 杨书正, 邱庆伦. 2004. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告狮泉河幅; ②和③ 见上页脚注③和④; ④ 卢书伟, 杜凤军, 任建德, 张彦启, 刘品德, 裴中朝, 贾共祥, 谢朝永, 李香资. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告尼玛幅; ⑤ 卢书伟, 杜凤军, 任建德, 张彦启, 刘品德, 裴中朝, 贾共祥, 谢朝永, 李香资. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告热布喀幅; ⑥ 见上页脚注⑤; ⑦ 汪友明, 尹显科, 徐韬, 游丽君, 李宗凡, 刘啸虎, 彭培好. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告革吉幅; ⑧ 曲永贵, 王永胜, 段建祥, 张树岐, 王忠恒, 吕鹏, 刘贵忠, 李学彬, 冯德臣, 谢元和, 于喜文, 姜雪飞, 孙中纲, 李庆武, 梁世福, 王洪双, 郭双山. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告多巴幅; ⑨ 吴珍汉, 孟宪刚, 胡道功, 江万, 叶培盛, 朱大岗, 刘琦胜, 杨欣德, 邵兆刚, 吴中海, 赵希涛, 王建平, 冯向阳, 纪占胜. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告当雄幅

英安质和安山质凝灰岩等火山碎屑岩分布广泛。除火山岩外,该带还出露大量石英砂岩、粉砂岩、砂质泥岩和生物碎屑灰岩等。

该带火山岩时代主要由地层古生物约束。如尼玛俄坐地层中产早白垩世中期圆笠虫 *Mesorbitolina birmanica* (Sahni), *M. sp.*, 双壳类 *Radiolitinae gen. et sp. ind.*, *Rudists gen. et sp. ind.* 等化石; 申扎雄梅、时补错地层中产早白垩世 Berriasian-Barremian 期双壳 *Isodomella choinbaensis* Wen, *Eriphyla sp.*, *Noetia (Incanopsis) sp.*, *Myopholas sp.*, *Lithophaga sp.*, *Exogyra sp.*, *Amphidonte ostracina* (Lamarck), *Isognomon sp.*, *Neitheia (Neitheia) aequicostata* (Lamarck), *Freiastarte sp.*, *Lopha sp.*, 有孔虫 *Mesorbitolina*

*sp.*, *Daxia sp.*, *Quingueloculina sp.*, 菊石 *Euphyloceras sp.*, *Phylloceras sp.* 和珊瑚 *Stylophora sp.*, *Enallhelia sp.*, *Astreopora sp.*, *Montlivaltia sp.* 等化石; 革吉色尔地层中产早白垩世珊瑚 *Calamophylloipsis elegans*, *Cladophylloipsis pachyseptatus*, *Donacosmilia sp.*, *Protethmos sp.*, 刺毛类 *Acanthochaetetes sp.*, 固着蛤 *Caprina sp.* 及圆笠虫 *Orbitolina sp.* 等化石; 噶尔七一桥地层中产早白垩世植物 *Chadophlhis sp.*, *Sphenopteris sp.*, *Pseudocycas sp.*, *Zamiophyllum buchianum (Ett.)*, *Zamites sp.*, *Brachyllum sp.*, *Cupressinocladus cf. elegans*, *Elatocladus sp.*, *Problematicum sp.* 及圆笠虫 *Orbitolina sp.* 等化石。该带目前积累的同位素年代学数据非常有限,仅1:25万当雄幅<sup>①</sup>在班戈且果村底部

流纹质晶屑熔岩中获得了 112.43 Ma 的 K-Ar 年龄和 114.2 Ma 的锆石 SHRIMP 年龄。

## 2.4 班公湖-怒江缝合带南缘火山岩

班公湖-怒江缝合带南缘  $J_3$ — $K_1$  火山岩的赋存地层被称为去申拉组( $K_1q$ ),断续分布于班戈出西弄巴、双湖南宋我日和日土脚娃等地(图 1),均以安山岩为主(厚度大于 500m),玄武质安山岩主要分布于西部日土脚娃,见玄武质、安山质凝灰岩及火山角砾岩。火山岩中夹细粒石英砂岩、凝灰质砂岩板岩和灰岩。

日土脚娃下部灰岩产早白垩世珊瑚 *Adiozptyxis cf. coguandiana* d'Ordigny, *Protehmios discus* Liao et Li, *Pleurocora crassa*, *Eugyra digitata* Koby, *Eugyra Tibetana* Liao, *Dermosmia* sp., *Stylina cf. Qiebulaensis* Liao, *Echynophora bangoghensis* He et Xiao, *Microsolera Quillai* Koby 等化石(1:25 万革吉幅<sup>②</sup>)。宋我日火山岩 Rb-Sr 等时线年龄为 111 Ma(西藏自治区地质矿产局,1986),出西弄巴下部安山岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $126 \pm 2$  Ma,切里湖上部安山岩 K-Ar 年龄为 103 Ma(1:25 万班戈县幅<sup>③</sup>)。

由上可见,冈底斯中北部地区的地层古生物资料虽然给出了范围较宽的相对年龄,但却限定了晚侏罗世—早白垩世的火山岩浆活动历史。中冈底斯不同地区(措勤夹举、当惹雍错郎穷、申扎扎贡)则弄群下部 3 件火山岩样品中获得的 124.47 ~ 128.64 Ma 的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄,与北冈底斯此时期最老的火山岩浆活动年龄(Rb-Sr 等时线年龄 126 Ma)相当,也与南冈底斯开始于早白垩世的岛弧岩浆作用同期(Maluski et al., 1982; Chung et al., 2005),表明早白垩世(大约 120 ~ 130 Ma)时,冈底斯不同地区均发生了火山岩浆活动,但最大规模的火山岩浆活动很可能发生在冈底斯中北部,而不是传统认为的南冈底斯地区。

## 3 地球化学

由于冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩研究程度很低,多数地区虽然发现了火山岩,但却缺乏比较可靠的年代学和地球化学数据,所以本文下面的讨论主要针对遍布于冈底斯中北部地区、数据相对较多、相对可靠的中冈底斯则弄群、北冈底斯多尼组火山岩。除北冈底斯纳木错北岸多尼组两个火山岩样品为笔者未刊数据外,其它数据均来自新近完成的 1:25 万区域地质调查资料。在数据选择上,主要选取区域地质调查报告中的熔岩类数据,不涉及火山角砾岩、含角砾火山岩、凝灰岩、凝灰质熔岩等火山碎屑岩和杏仁状火山岩。

### 3.1 中冈底斯火山岩

目前该带已有的分析数据主要集中于著名的则弄群火山岩。40 件火山岩样品的烧矢量介于 0.12% ~ 6.0%,平均

2.36%,表明样品相对新鲜。40 件样品  $\text{SiO}_2$  含量为 47.41% ~ 77.17%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  含量介于 3.53% ~ 9.97%,在成分上包括玄武岩、玄武质安山岩、安山岩、英安岩、流纹岩及粗面玄武岩、玄武质粗面安山岩、粗面安山岩和粗面岩等亚碱性和碱性岩石(图 2a)。以  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解为基础(Rollinson, 1993),可将这些火山岩划分为中钾钙碱性火山岩、高钾钙碱性火山岩和钾玄岩三种类型(图 2b)。

中钾钙碱性火山岩分布较少,主要出露于该带西段噶尔多爱沟、中段当惹雍错西岸郎穷和中东段申扎县你阿章-雄欠地区。7 件样品的  $\text{SiO}_2$  含量变化于 48.33% ~ 58.76%,主要为中基性火山岩。这些火山岩亏损 Nb、Ti 等高场强元素特征指示它们具有岛弧火山岩的亲缘性。与典型岛弧火山岩相比,这些火山岩还显示 U 负异常和 Sr 正异常(图 3a)。U 的负异常可能与后期蚀变作用有关,而 Sr 正异常与其无 Eu 异常特征不相符( $\text{Eu} = 0.88 \sim 1.04$ ,平均 0.96),很可能暗示它们具有不同于典型岛弧火山岩的重要成因信息,但目前缺乏同位素资料的进一步约束。

该带主体为高钾钙碱性火山岩(图 2b),从东到西均有出露。除措勤 1 件样品偏基性( $\text{SiO}_2$  为 53.23%)外,其它 22 件样品  $\text{SiO}_2$  含量变化于 60.6% ~ 77.17%,其中 5 件样品为安山岩( $\text{SiO}_2 < 63\%$ ),另外 17 件样品为长英质火山岩。除噶尔多爱沟则弄群上部火山岩具有更低的 HREE 和 Y 丰度外,其它长英质火山岩具有非常相似的微量元素蛛网图(图 3b):相对于高场强元素,Rb、Ba、Th、U、K 等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(La/Yb 平均为 12.82)明显富集,而 Nb、Ta、Ti 等高场强元素显著负异常,表明这些火山岩具有岛弧的亲缘性。早期研究发现,随着岛弧成熟度的增加,火山弧花岗岩将富集 Rb、Th、U、Ta、Nb、Hf 和 Y,而亏损 Ba、Sr、P、Zr 和 Ti(Brown et al., 1984)。有意义的是,该带长英质高钾钙碱性火山岩的 Ba、Sr、P 负异常和 Hf 正异常与此趋势一致,同时还具有与上部地壳相似的微量元素蛛网图,可能暗示这些长英质火山岩形成于成熟度较高的火山弧环境,并可能与上部地壳有关。

在该带西部噶尔多爱沟中上部和措勤夏东、扎布耶茶卡等地,还有 10 件样品以高碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  为 5.45% ~ 9.97%)、高  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值(0.39 ~ 3.57)和低  $\text{TiO}_2$  (0.6% ~ 1.21%)为特征,其  $\text{SiO}_2$  含量变化于 47.41% ~ 67.34% (平均 57.89%),主元素特征与钾玄岩相似(Morrison, 1980)。但在微量元素组成上,不同地点存在明显差异:西部噶尔多爱沟上部钾玄岩强烈富集 Rb、Ba、Th、U、K 等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(La/Yb 为 87.06 ~ 92.28),Eu 负异常( $\delta\text{Eu}$  为 0.63 ~ 0.74),地球化学特征与冈底斯西段雄巴超钾质火山岩

① 见上页脚注⑥

② 见上页脚注⑦

③ 陈国荣,陈玉禄,张宽忠,赵守仁,刘保民. 2003. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告班戈县幅

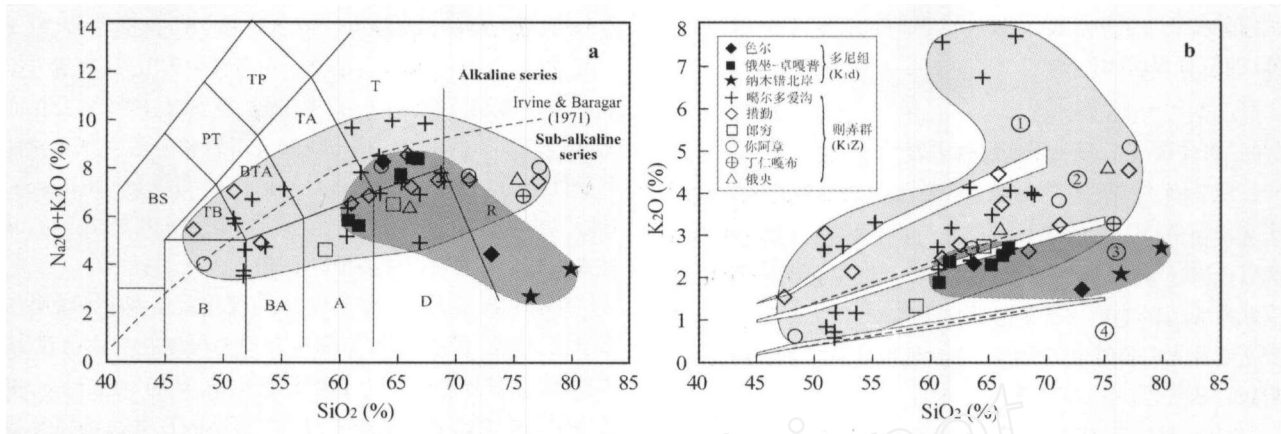


图2 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩的 TAS 图解(a)和  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解(b)

TAS 图解(a)据 Le Maitre (2002), 其中: TP-碱玄岩; PT-响岩质碱玄岩; BS-碧玄岩; B-玄武岩; TB-粗面玄武岩; BTA-玄武质粗面安山岩; TA-粗面安山岩; T-粗面岩; BA-玄武质安山岩; A-安山岩; D-英安岩; R-流纹岩; 虚线据 Irvine and Baragar (1971). 符号与图 b 同  
 $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解(b)据 Rollinson (1993), 其中: ①-钾玄岩系列; ②-高钾钙碱性系列; ③-中钾钙碱性系列; ④-低钾拉斑玄武岩系列. 数据来源: 除北冈底斯纳木错北岸多尼组样品为笔者未刊数据外, 其它数据均来自新近完成的 1:25 万区域地质调查资料 (表 1)

Fig. 2 Plots of total alkalis vs. silica (a) (TAS) and  $\text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$  (b) for representative samples from the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks on middle-northern Gangdese

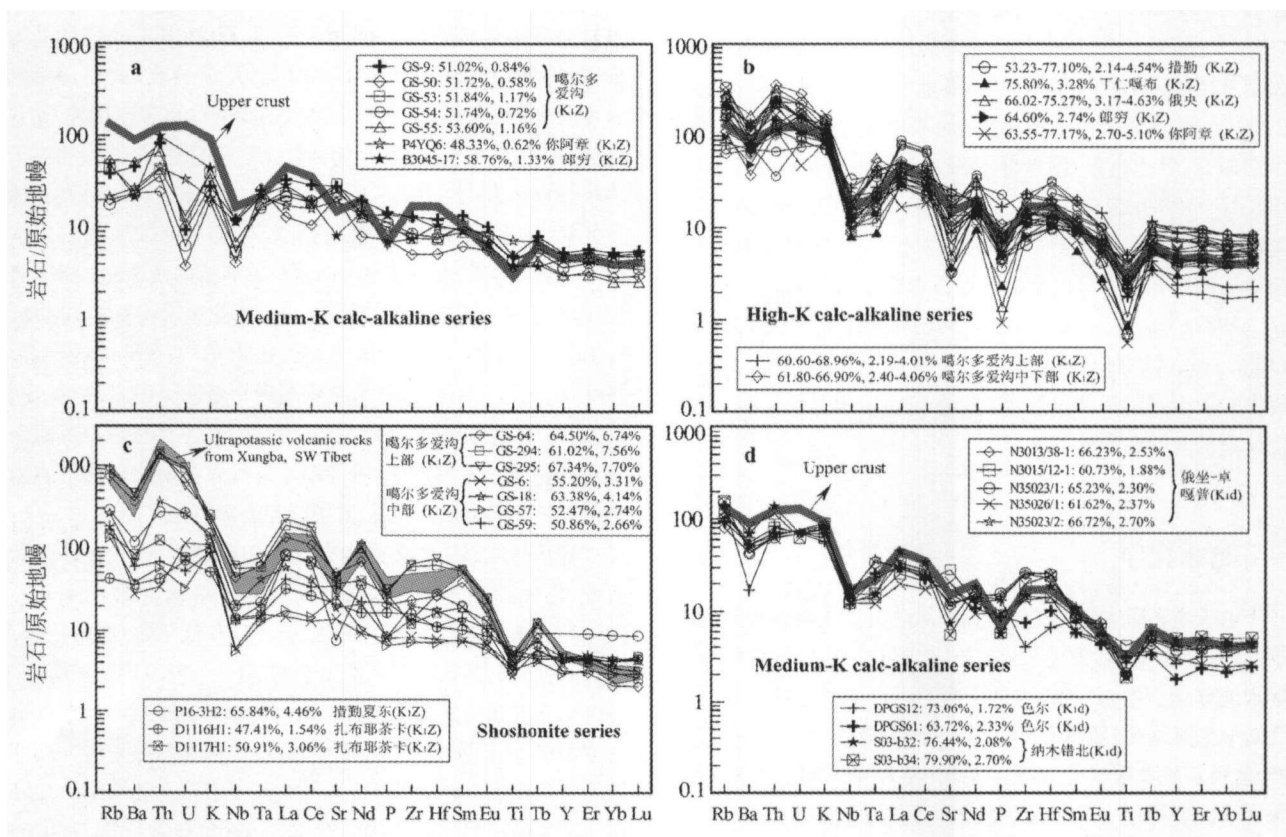


图3 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩代表性样品的微量元素蛛网图

a-中冈底斯则弄群中钾钙碱性火山岩; b-中冈底斯则弄群高钾钙碱性火山岩; c-中冈底斯则弄群钾玄岩; d-北冈底斯多尼组中钾钙碱性火山岩. 数据来源同图 2. 原始地幔值和元素顺序据 Sun and McDonough (1989); 上部地壳据 Rudnick and Gao (2003); 西藏西南部雄巴超钾质火山岩据 Miller *et al.* (1999). 图例中的数值分别代表样品  $\text{SiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量 (%)

Fig. 3 Primitive mantle-normalized incompatible trace-element spidergrams for representative samples from the Late Jurassic-Early Cretaceous Zenong Group medium-K calc-alkaline volcanic rocks (a), Zenong Group high-K calc-alkaline volcanic rocks (b), Zenong Group shoshonites (c) and Duoni Formation medium-K calc-alkaline volcanic rocks (d) on middle-northern Gangdese

(Miller *et al.*, 1999)一致(图 3c),暗示它们可能具有相似的源区和构造环境;而多爱沟中部和措勤地区火山岩与典型钾玄岩差别较大,如大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(La/Yb 为 5.07 ~ 27.66)富集程度要比钾玄岩低得多(图 3c),可能暗示其源区与典型钾玄岩存在差异。由于缺乏同位素和高精度年代学数据,目前还很难对此进行深入讨论。

### 3.2 北冈底斯火山岩

目前该带火山岩已有的分析数据较少,且主要对象是多尼组火山岩。9 件多尼组火山岩样品的烧矢量介于 0.44% ~ 2.59%,平均 1.34%,表明样品新鲜。9 件样品的 SiO<sub>2</sub> 含量为 60.73% ~ 79.9%,Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 含量介于 2.69% ~ 8.44%,在成分上包括安山岩、粗面英安岩和流纹岩等亚碱性中酸性岩石(图 2a),属中钾钙碱性火山岩(图 2b)。

这些火山岩明显富集 Rb、Ba、Th、U、K 等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(La/Yb 为 8.78 ~ 19.85),亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素(图 3d),表明它们与俯冲作用有关。同时这些火山岩在高场强元素段还具有与上部地壳相似的微量元素蛛网图(图 3d),明显不同于南部则弄群中基本同期的中钾钙碱性岩石(图 3a),暗示这些火山岩在成因上可能与上部地壳有关,并很可能与则弄群中钾钙碱性岩石有差异。

## 4 讨论

### 4.1 构造环境

应用 Wood (1980)提出的 Hf-Th-Ta 图解判别火山岩的构造环境,中冈底斯则弄群和北冈底斯多尼组火山岩均位于钙碱性岛弧火山岩区。为了判断其可靠性和进一步约束火山岩的构造环境,下文分别用适合于玄武岩、安山岩、酸性火山岩的图解进行检验。

Yb 为不活动元素,其行为类似于不相容元素,因此,在部分熔融和分离结晶作用过程中,Th/Yb 比值将保持不变,Nb/Yb 比值与此类似(Pearce, 1983; Rollinson, 1993)。在 Th/Yb-Nb/Yb 构造判别图解上(图 4b),玄武岩类样品均位于大陆岛弧范围内,表明这些样品可能形成于大陆岛弧环境。

Bailey (1981)认为,La/Yb 比值可以作为度量岛弧安山质岩浆生成过程中大陆地壳参与的程度,并利用 La/Yb-Sc/Ni 图解识别出低钾大洋岛弧安山岩、其它大洋岛弧安山岩、大陆岛弧安山岩和安第斯型(活动大陆边缘)安山岩等四种类型,Rollinson (1993)进一步确认了这种方法的可行性。在该图解上(图 4c),北冈底斯多尼组安山岩投点接近或位于大陆岛弧安山岩区,中冈底斯西段噶尔多爱沟、中段当惹雍错西岸郎穷、申扎你阿章则弄群火山岩投点也位于大陆岛弧安山岩区,表明冈底斯中北部安山岩主要形成于大陆岛弧环境。另外,部分噶尔多爱沟则弄群上部火山岩(GS-18、GS-81)还显示了安第斯型(活动大陆边缘)安山岩亲缘性,可能暗

示岩浆活动晚期中冈底斯部分地段已演化为安第斯型陆壳。

Pearce *et al.* (1984)发现,利用 Rb-Yb + Ta 图解可以有效地将火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩区分开来,Rollinson (1993)认为使用该图解的前提是样品比较新鲜。在剔除烧矢量大于 5% 的样品后使用该图解(图 4d)进行判断,北冈底斯多尼组 5 件长英质火山岩样品投点位于火山弧区,中冈底斯则弄群长英质火山岩样品也主要位于火山弧区,暗示了弧火山岩的亲缘性。值得指出的是,在冈底斯西段噶尔多爱沟则弄群上部(GS-219)、措勤(D1675H1)和申扎你阿章(P4YQ7)地区部分长英质火山岩位于同碰撞区(图 4d)。

区域地质调查(1:25 万狮泉河幅、革吉幅、措勤县幅、邦多区幅、热布喀幅、尼玛幅、多巴区幅、申扎县幅)表明,冈底斯带中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩岩浆活动主要发生于滨浅海、浅海、陆相、河流三角洲等海陆交互环境,含大量爆发相火山碎屑岩,在措勤地区则弄群上部凝灰岩中还发现了乔木硅化木(1:25 万措勤县幅),这些都是岛弧带的重要地质特征。结合上述地球化学判别图解得到的信息,有理由相信冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩岩浆活动发生于岛弧环境。当然,不排除岩浆活动晚期时,部分地区可能已演化为厚的安第斯型地壳,并显示同碰撞型火山岩特点,这种同碰撞火山作用很可能与冈底斯和羌塘地块的碰撞有关(Murphy *et al.*, 1997)。

需要指出的是,目前已有数据和野外观察均表明,中冈底斯晚侏罗世—早白垩世火山岩岩浆活动是以高钾钙碱性的中酸性火山岩为主,晚期还出现了很多粗面岩、碱性流纹岩等(表 1,图 2),这明显与传统上以低钾、中钾钙碱性系列火山岩和安山岩为主的岛弧火山岩特征不符,但却与秘鲁南部和智利北部的中安第斯火山岩(16°S ~ 26°S)具有很强的相似性(Ramos, 1999),如果中冈底斯晚侏罗世—早白垩世火山岩的相关资料是可靠的,那么这种相似性很可能意味着中冈底斯 J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub> 岩浆活动主要发生于厚地壳背景下与板片俯冲有关的岛弧环境,但是否如中安第斯那样暗示俯冲板片的角度变陡了(Coira *et al.*, 1994; Ramos, 1999),还需要更多资料来约束。

### 4.2 岩石成因

由于中冈底斯则弄群可能的钾玄质火山岩没有年龄数据约束,北冈底斯多尼组目前已有数据较少且分散,所以,这里仅利用已有数据初步分析中冈底斯则弄群中钾和高钾钙碱性系列火山岩的岩石成因。

则弄群 9 件玄武岩的 Mg<sup>#</sup>变化于 34.64 ~ 61.17 (平均 48.87),12 件安山岩(不包括钾玄质火山岩)的 Mg<sup>#</sup> = 28.93 ~ 60.9 (平均 44.35),表明它们由下地壳镁铁质岩石部分熔融产生的可能性很小,因为与下地壳部分熔融有关的岩浆产物 Mg<sup>#</sup>一般小于 40 (Atherton and Petford, 1993)。另一方面,则弄群中基性岩石偏离原生岩浆成分的较低 MgO 含量、Mg<sup>#</sup>

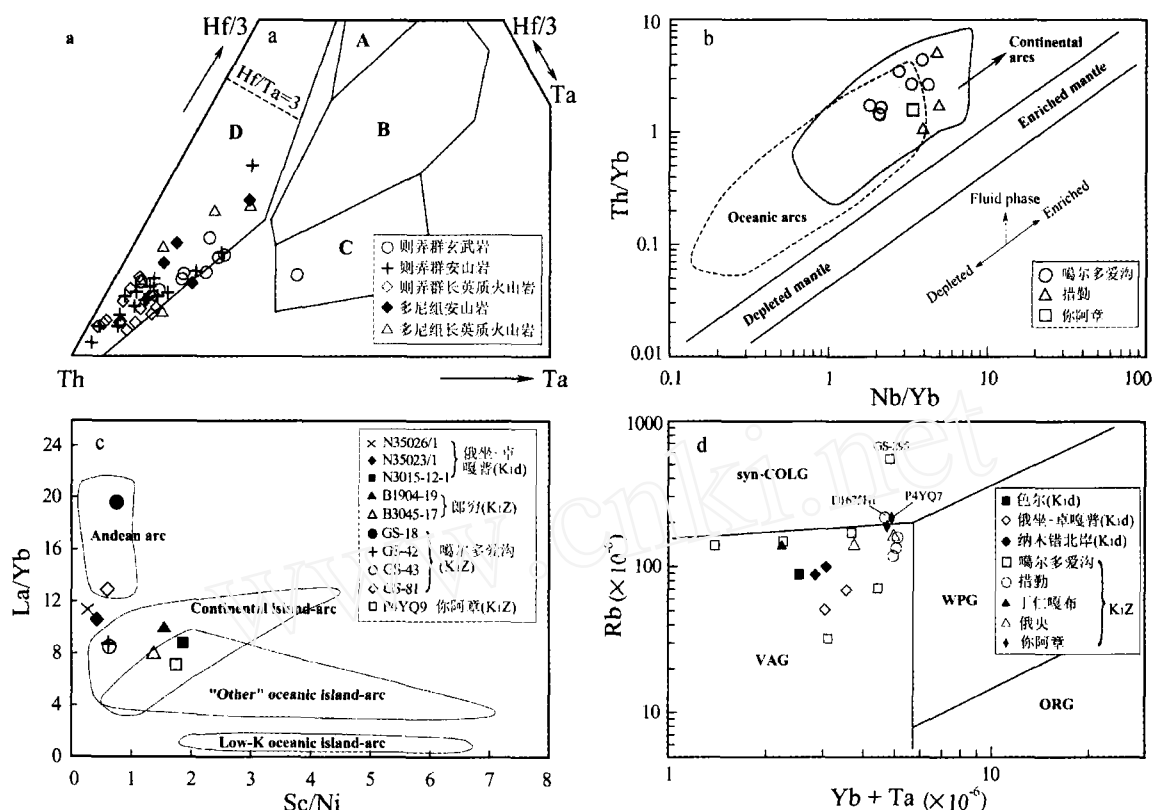


图4 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩构造环境判别图解

火山岩 Hf/3-Th-Ta 图解(a)据 Wood(1980),其中 A 为 N-MORB, B 为 E-MORB + 板内拉斑玄武岩, C 为板内碱性玄武岩, D 为钙碱性弧火山岩;玄武岩 Th/Yb-Nb/Yb 图解(b)据 Pearce and Peate(1995);安山岩 La/Yb-Sc/Ni 图解(c)据 Bailey(1981);酸性火山岩 Rb-Yb + Ta 图解(d)据 Pearce *et al.* (1984),其中 VAG 为火山弧花岗岩, syn-COLG 为同碰撞花岗岩, WPG 为板内花岗岩, ORG 为洋脊花岗岩

Fig. 4 Tectonic discrimination diagrams for representative samples from the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks on middle-northern Gangdese

表明它们属演化岩浆,  $\text{SiO}_2$  与  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  相关关系也显示(图略)它们发生了明显的橄榄石、单斜辉石和斜长石的分离结晶作用。则弄群玄武岩和安山岩具有较高 Th 丰度,分别为  $2.1 \times 10^{-6} \sim 10.6 \times 10^{-6}$  (平均  $5.0 \times 10^{-6}$ )、 $3.1 \times 10^{-6} \sim 12.7 \times 10^{-6}$  (平均  $9.1 \times 10^{-6}$ ),暗示它们很可能与中上地壳物质(Th 分别为  $6.5 \times 10^{-6}$ ,  $10.5 \times 10^{-6}$ , Rudnick and Gao, 2003)的同化混染有关。实验研究表明, Ba 在消减沉积物和蚀变玄武岩脱水产生的流体相中是非常活动的元素(Brenan *et al.*, 1995; You *et al.*, 1996; Kogiso *et al.*, 1997),所以高 Ba/La 比值被认为是代表流体来源于消减沉积物和玄武质洋壳的良好指标(Castillo and Newhall, 2004), La/Yb 比值也被认为是熔体来源于消减板片的重要参数(Defant and Drummond, 1990)。则弄群玄武岩、安山岩的 Ba/La 比值较低(分别介于 10.58 ~ 21.99、7.65 ~ 31.19),在 Ba/La-La/Yb 图解上(图 5a),多数样品点靠近亏损地幔而远离沉积物和板片熔体成分区,可能暗示它们与消减沉积物和俯冲板片组分加入的关系不大。这些火山岩不具备明显 Ce 负异常( $\delta\text{Ce}$  为 0.92 ~ 1.08)也支持这一认识,因为岛弧火山岩的 Ce 负异常与其岩浆源区存在消减沉积物组分有关(Elliott *et al.*, 1997)。这些观察表明,中冈底斯则弄群中

基性火山岩很可能与来自消减沉积物和/或蚀变玄武质洋壳的含水流体引起上覆地幔楔物质的部分熔融有关,并在岩浆上升过程中经历了明显的分离结晶作用和浅部地壳物质的同化混染(即 AFC 过程)。

一般认为,长英质火山岩有两种可能的成因:一是幔源基性岩浆经历广泛结晶分异和同化混染作用的产物(Bacon and Druitt, 1988; Ingle *et al.*, 2002),二是来自幔源基性岩浆的热量促使地壳物质脱水发生重熔的产物(Roberts and Clemens, 1993; Tepper *et al.*, 1993; Guffanti *et al.*, 1996),其特征是 Al、Th、LREE 富集,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为大的负值。从目前已有资料看,中冈底斯则弄群长英质火山岩(英安岩、流纹岩)很可能主要与地壳重熔有关,证据包括:(1)长英质火山熔岩在则弄群火山岩中规模很大,并几乎遍布全区(表 1),除此之外,还有大量的英安质、流纹质凝灰岩,这样大规模的炽热岩浆和火山灰流在相对较短的时间内喷发,很难用基性岩浆的分异残余来解释;(2)长英质火山熔岩明显富集 Th 和 LREE,并具有与上部陆壳非常相似的蛛网图曲线(图 3c),显示部分熔融趋势(图 5b)。另外,虽然目前缺乏长英质火山岩的 Nd 同位素资料,但基本同期的冈底斯中北部花岗岩类具有大的负  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值( $-5.3 \sim -17.3$ , 莫宣学等, 2005),

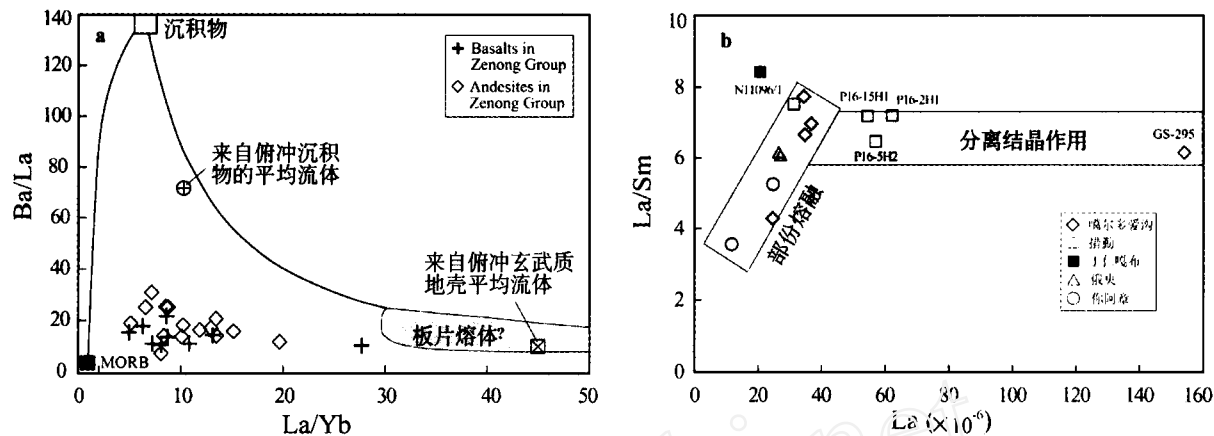


图5 中冈底斯则弄群中基性火山岩的 Ba/La-La/Yb 图解和长英质火山岩的 La/Sm-La 图解

则弄群中基性火山岩 Ba/La-La/Yb 图解(a)中沉积物和板片熔体成分区据 Yegorovskii *et al.* (1995); 消减沉积物流体平均成分据 Aizawa *et al.* (1999); 消减玄武质地壳流体平均成分据 Kagiso *et al.* (1997); N-MORB 值据 Sun and McDonough (1989). 则弄群长英质火山岩 La/Sm-La 图解(b)

Fig. 5 Ba/La vs. La/Yb diagram for intermediate-basic volcanic rocks, La/Sm vs. La diagram for felsic volcanic rocks in Zenong Group, middle Gangdese

也支持中冈底斯长英质火山岩浆活动与地壳重熔有关。当然,由于部分长英质火山熔岩具有明显的 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu}$  为 0.35 ~ 0.88), 不能完全排除基性岩浆经过分离结晶作用形成部分长英质火山熔岩的可能性(图 5b)。

#### 4.3 俯冲极性

有证据表明印度河-雅鲁藏布缝合带(IYZS)代表的新特提斯洋盆中晚三叠世就开始了其扩张活动历史,并且该洋壳随后的俯冲消减是向北进行的。对班公湖-怒江缝合带(BNS),既有认为它是向北俯冲的(Murphy *et al.*, 1997; Kapp *et al.*, 2003; Ding *et al.*, 2003; Ding and Lai, 2003; Zhang *et al.*, 2004),也有认为其俯冲极性是向南的(Hsü *et al.*, 1995; 潘桂棠等, 1997, 2004; 莫宣学等, 2005)。在这种情况下,冈底斯中北部地区显示岛弧火山岩特征的晚侏罗世—早白垩世火山岩就具有两种可能的动力学解释:一是与新特提斯洋壳北向俯冲有关,二是与班公湖-怒江特提斯洋壳南向俯冲有关。

已有数据显示北冈底斯主要为中钾钙碱性火山岩,而中冈底斯主体为高钾钙碱性火山岩,晚期出现了钾玄岩(图 2),这种晚侏罗世—早白垩世火山岩岩石系列从北向南由中钾钙碱系列→高钾钙碱性系列的分布特点表明,形成冈底斯中北部地区岛弧火山岩的洋壳俯冲事件,其俯冲极性很可能是向南的,这一认识还可以得到下列观察的支持:

(1)中冈底斯火山岩与俯冲带的距离大于北冈底斯火山岩:研究表明,俯冲极性可以通过岛弧火山岩浆与消减带的距离来判断,而这种距离可以由岛弧火山岩的 Rb、SiO<sub>2</sub> 含量估算出来(Ninkovich and Donn, 1976)。Rb-SiO<sub>2</sub> 图解显示(图 6a),北冈底斯多尼组火山岩与消减带的距离为 130 ~ 150km,而中冈底斯则弄群火山岩与消减带的距离变化范围

较大,主要集中于 130 ~ 240km,很多大于 150km,这种从北向南与俯冲带距离增大的现象同样可能暗示相关的俯冲极性是向南的。

(2)中冈底斯具有大于北冈底斯的地壳厚度。地壳厚度是地壳生长的直接反映,与岛弧的成熟度密切相关,它可以通过不同的地球化学参数估计出来(Condie, 1973; Windley, 1977)。研究表明,岛弧火山岩 Rb、Sr 丰度可用来估算地壳厚度(Condie, 1973; Mazumder *et al.*, 2000)。Rb-Sr 相关图显示(图 6b),北冈底斯多尼组火山岩反映的地壳厚度为 24 ~ 30km,很少大于 30km,而中冈底斯则弄群火山岩反映的地壳厚度大于 23km,并有很多样品显示了成熟地壳的厚度(大于 30km),这种从北向南由过渡性陆壳向成熟陆壳的变化可能暗示冈底斯中北部地区晚侏罗世—早白垩世火山岛弧岩浆活动的俯冲极性是向南的。

(3)晚侏罗世—早白垩世岛弧火山岩的分布:冈底斯带已经全面完成的 1:25 万区域地质调查表明,在冈底斯中部东西长达 800km,南北宽达数十到上百公里的隆格尔-念青唐古拉带(即冈底斯弧背断隆带)和措勤-多瓦后陆拗陷带内,并没有晚侏罗世—早白垩世岛弧火山岩出露(图 1)。如果冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世岛弧火山岩与南部的新特提斯北向俯冲有关,那么就似乎不应该出现这种基本同期火山岩浆活动的分布间断。另外,现今冈底斯中北部火山岩与南部雅鲁藏布缝合带的空间距离在仲巴-萨嘎-桑桑-日喀则段大约有 200 ~ 300km,如果考虑到现今的冈底斯带由于相关碰撞造山事件缩短了大约 180km(Murphy *et al.*, 1997)或 200km(潘桂棠等, 2004),那么冈底斯中北部火山岩与南部雅鲁藏布缝合带的空间距离至少有 380km 或更远。这种情况下,冈底斯中北部的火山岩浆活动:①将要求新特提斯俯冲板片以非常平缓的角度进行,而平板俯冲(flat subduction)

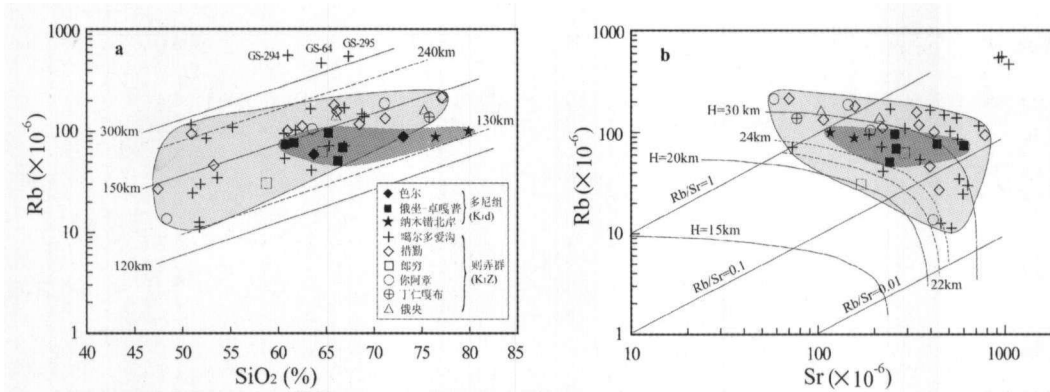


图6 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世火山岩计算的距俯冲带距离和地壳厚度

Rb-SiO<sub>2</sub>图解(a)据 Ninkovich and Donn(1976),显示了距俯冲带距离; Rb-Sr 图解(b)据 Condie(1973),显示了地壳厚度; 详见正文

Fig. 6 Distance from subducted zone and crustal thickness computed from Rb-SiO<sub>2</sub>, Rb-Sr distribution in the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks on middle-northern Gangdese

要么形成隔热层不产生岩浆作用,要么形成埃达克质岩浆岩(Gutscher *et al.*, 2000),但目前已有数据显示冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世时期发生了大面积的不具备埃达克质特征的火山岩浆活动;②似乎与岛弧岩浆距海沟轴约150~300km的现代观察不符。因此,作为选择地,如果我们考虑冈底斯中北部火山岩与来自北部班公湖-怒江特提斯洋壳的俯冲作用有关,这些问题就迎刃而解了。

基于以上火山岩地球化学分析及相关的地质观察,我们倾向性地认为冈底斯中北部火山岩很可能与班公湖-怒江特提斯洋壳向南的俯冲作用有关。考虑到南冈底斯带的岛弧岩浆岩与新特提斯洋壳向北的俯冲作用有关,我们提出晚侏罗世—早白垩世时冈底斯带很可能受到了班公湖-怒江特提斯洋壳向南、新特提斯洋壳向北的双向俯冲的影响。

## 5 初步结论

① 冈底斯带的晚侏罗世—早白垩世火山岩主要分布于南冈底斯、中冈底斯、北冈底斯和班公湖-怒江缝合带南缘,基本同期开始于早白垩世(大约120~130Ma)并可能延续到晚白垩世,以冈底斯中北部地区规模最大为特征。

② 中冈底斯则群火山岩包括部分中钾钙碱性系列的中基性岩石和占优势的高钾钙碱性系列的中酸性火山岩,不同于传统岛弧火山岩,但与中安第斯厚地壳背景下的岛弧火山岩相似,北冈底斯主要为与传统岛弧火山岩相似的中钾钙碱性系列火山岩。

③ 中冈底斯则群中基性火山岩很可能与来自消减沉积物和/或蚀变玄武质洋壳的含水流体引起上覆地幔楔物质的部分熔融有关,并在岩浆上升过程中经历了AFC过程,长英质火山岩很可能主要与地壳重熔有关。

④ 冈底斯中北部火山岩很可能与班公湖-怒江特提斯洋壳向南的俯冲作用有关。

致谢 特别感谢中科院广州地球化学研究所许继峰研究员对第一作者在学术上给予的宝贵指导。

## References

- Aizawa Y, Tatsumi Y and Yamada H. 1999. Element transport by dehydration of subducted sediments: Implication for arc and ocean island magmatism. *Island Arc*, 8: 38–46
- Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144–146
- Bacon CR and Druitt TH. 1988. Compositional evolution of the zoned calcalkaline magma chamber of mount Mazama, crater Lake, Oregon. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 98: 224–256
- Bailey JC. 1981. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites. *Chemical Geology*, 32: 139–154
- Brenan JM, Shaw HF, Ryerson FJ and Phinney DL. 1995. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900°C and 2.0 GPa: constraints on the trace element chemistry of mantle and deep crustal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3331–3350
- Brown GC, Thorpe RS and Webb PC. 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources *Journal of the Geological Society*, 141: 411–426
- Castillo PR and Newhall CG. 2004. Geochemical Constraints on Possible Subduction Components in Lavas of Mayon and Taal Volcanoes, Southern Luzon, Philippines. *Journal of Petrology*, 45: 1089–1108
- Chang CF and Zheng XL. 1973. Geological structure of Qomolangma region in southern Tibet and discussions on the origin of EW-trending Mountains in Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 2: 190–210 (in Chinese)
- Chen YL, Zhang KZ, Li GQ, Nimaciren, Zhao SR and Chen GR. Discovery of an uniformity between the Upper Triassic Quehala Group and its underlying rock series in the central segment of the Bangong Co-Nujiang junction zone, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 24(7): 621–624 (in Chinese with English abstract)
- Chung SL, Chu MF, Zhang YQ, Xie YW, Lo CH, Lee TY, Lan CY, Li XH, Zhang Q and Wang YZ. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68: 173–196
- Coira B, Mahlborg Kay S and Viramonte J. 1994. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna: A model for changing subduction geometry. *International Geology Review*, 35: 677–720
- Condie KC. 1973. Archaean magmatism and crustal thickening. *Geological Society America Bulletin*, 84: 2981–2992

- Coulon C, Maluski H, Bollinger C and Wang S. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet:  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 79: 281–302
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Ding L, Kapp P, Yin A, Deng WM and Zhong DL. 2003. Early Tertiary volcanism in the Qiangtang terrane of central Tibet: evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44: 1833–1865
- Ding L and Lai QZ. 2003. New geological evidence of crustal thickening in the Gangdese block prior to the Indo-Asian collision, *Chinese Science Bulletin*, 48(15): 1604–1610
- Elliott T, Plank T, Zindler A, White W and Bourdon B. 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research*, 102: 14991–15019
- Guffanti M, Clynne MA and Muffler LJP. 1996. Thermal and mass implications of magmatic evolution in the Lassen volcanic region, California, and constraints on basalt influx to the lower crust. *Journal of Geophysical Research*, 101: 3001–3013
- Gutscher MA, Maury R and Eissen J P. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28 (6): 535–538
- He ZH, Yang DM, Zheng CQ and Huang Y C. 2005. Geochemistry of the Indosinian granitoids in the Mamba area, Gangdise belt, Tibet and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 24: 354–359 (in Chinese with English abstract)
- Hsü KJ, Pan GT and Sengör AMC. 1995. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: A working hypothesis based on the archipelago model of orogenesis. *International Geology Review*, 37: 473–508
- Ingle S, Weis D and Frey FA. 2002. Indian Continental Crust Recovered from Elan Bank, Kerguelen Plateau (ODP Leg 183, Site 1137). *Journal of Petrology*, 43: 1241–1257
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523–548
- Kapp P, Murphy MA, Yin A, Harrison TM, Ding L and Guo JR. 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet. *Tectonics*, 22 (4): 1029, doi: 10.1029/2001TC001332
- Kogiso T, Tatsumi Y and Nakano S. 1997. Trace element transport during dehydration processes in the subduction oceanic crust: 1. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 193–205
- Le Maitre RW. (eds). 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*, 2nd ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 236
- Li C, Wang TW, Li HM and Zeng QG. 2003. Discovery of Indosinian megaporphyritic granodiorite in the Gangdise area: Evidence for the existence of Paleo-Gangdise. *Geological Bulletin of China*, 24: 354–359 (in Chinese with English abstract)
- Li HP and Zhang MS. 1995. Lithogeochemical features of Sangri Group volcanic rocks in Sangri area, Tibet. *Geology of Tibet*, 1: 84–92 (in Chinese with English abstract)
- Maluski H, Proust F and Xiao XC. 1982.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the trans-Himalayan calc-alkaline magmatism of southern Tibet. *Nature*, 298: 152–154
- Mazumder R, Bose PK and Sarkar S. 2000. A commentary on the tectono-sedimentary record of the pre-2.0 Ga continental growth of India vis-a-vis a possible pre-Gondwana Afro-Indian supercontinent. *Journal of African Earth Sciences*, 30: 201–217
- Miller C, Schuster R, Kötzi US, Frank W and Purtscheller F. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40: 1399–1424
- Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, Zhou S, Wang LL, Qiu RZ and Zhang FQ. 2005. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11 (3): 281–290 (in Chinese with English abstract)
- Morrison GW. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13: 97–108
- Murphy MA, Harrison TM, Durr SB, Chen Z, Ryerson FJ, Kidd WSF, Wang X and Zhou X. 1997. Significant crustal shortening in south-central Tibet prior to the Indo-Asian collision. *Geology*, 25: 719–722
- Ninkovich D and Donn WL. 1976. Explosive Cenozoic volcanism and climatic implications. *Science*, 194: 899–906
- Pan GT, Chen ZL, Li XZ, Yang YJ, Xu XS, Xu Q, Jiang XS, Wu YL, Luo JN, Zhu TX and Peng YM. 1997. Geological-tectonic evolution in the eastern Tethys. Beijing: Geological Publishing House, 1–218 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Ding J, Yao DS, Wang LQ, Luo JN, Yan YJ, Yong YY, Zheng JK, Liang XZ, Qin DH, Jiang XS, Wang QH, Li RS, Geng QR, Luo ZL, Zhu DC and Yu RL. 2004. Geological map of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and adjacent areas (1:1500000). Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House (in Chinese)
- Pan GT, Wang LQ and Zhu DC. 2004b. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23: 12–19 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956–983
- Pearce JA and Mei H. 1988. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse Lhasa to Golmud. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A327: 203–213
- Pearce JA and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251–285
- Pearce JA. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva, Nantwich, 230–249
- Ramos VA. 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes*, 22(3): 183–190
- Roberts MP and Clemens JD. 1993. Origin of high-potassium, calcalkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21: 825–828
- Rollinson HR. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group UK Ltd, New York, 352
- Rudnick RL and Gao S. 2003. The Composition of the Continental Crust. In: Rudnick RL (ed). *The Crust Vol. 3, Treatise on Geochemistry* (eds. Holland HD and Turekian KK), Elsevier, Oxford, 1–64
- Sun SS and McDougall WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD (eds). *Magmatism in ocean Basins*. Geological Society Publication, 42: 313–345
- Tepper JH, Nelson BK, Bergantz GW and Irving AJ. 1993. Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: Generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 113: 333–351
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. 1986. Regional Geological Report (1:1,000,000) for Gaize, P. R. C. Beijing: Geological Publishing House, 116–151 (in Chinese)
- Wang JP, Li QS, Liu YM and Pei F. 2003. Tethyan geology of eastern Tibet (Xizang). Beijing: Science Press, 1–330 (in Chinese with English abstract)
- Wang LQ, Zhu DC and Pan GT. 2004. Primary results and progress of regional geological survey (1:250000): The south of Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23: 413–420 (in Chinese with English abstract)
- Windley BF. 1977. Timing of continental growth and emergence. *Nature*, 270: 426–427

- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planetary Science Letters*, 50: 11-30
- Yogodzinski GM, Kay RW, Volynets ON, Koloskov AV and Kay SM. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region; Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geological Society of America Bulletin*, 107: 505-519
- You CF, Castillo PR, Gieskes JM, Chan LH and Spivack AJ. 1996. Trace element behaviour in hydrothermal experiments; Implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 140: 41-52
- Zhai QG, Li C, Li HM and Wang TW. 2005. U-Pb zircon age of Leucogranite in the central Gangdise, Tibet, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 24: 349-353 (in Chinese with English abstract)
- Zhang KJ, Xia BD, Wang GM, Li YT and Ye HF. 2004. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China. *GSA Bulletin*, 116 (9-10): 1202-1222
- Zhou YS, Zhang Q and Mei HJ. 1981. *Magmatic activity and metamorphism in Tibet*. Beijing: Science Press, 1-146 (in Chinese)
- 附中文参考文献**
- 常承法, 郑锡澜. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛地区地质构造特征及其青藏高原东西向诸山系形成的探讨. *中国科学 (D 辑)*, 2: 190-201
- 陈玉禄, 张宽忠, 李关清, 尼玛次仁, 赵守仁, 陈国荣. 2005. 班公湖-怒江结合带中段上三叠统确哈拉群与下伏岩系角度不整合关系的发现及意义. *地质通报*, 24(7): 621-624
- 和钟铤, 杨德明, 郑常青, 黄映聪. 2005. 西藏冈底斯带门巴地区印支期花岗岩地球化学特征及其构造意义. *地质通报*, 24: 354-359
- 李才, 王天武, 李惠民, 曾庆高. 2003. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗岩闪长岩——古冈底斯造山的存在证据. *地质通报*, 22: 364-366
- 李海平, 张满社. 1995. 西藏桑日地区桑日群火山岩岩石地球化学特征. *西藏地质*, 1, 84-92
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张凤琴. 2005. 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. *高校地质学报*, 11(3): 281-290
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 颜仰基, 许效松, 徐强, 江新胜, 吴应林, 罗建宁, 朱同兴, 彭勇民. 1987. *东特提斯地质构造形成演化*. 北京: 地质出版社, 1-218
- 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 2004. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考. *地质通报*, 23: 12-19
- 王建平, 李秋生, 刘彦明, 裴放. 2003. *西藏东部特提斯地质*. 北京: 科学出版社, 1-330
- 王立全, 朱弟成, 潘桂棠. 2004. 青藏高原 1:25 万区域地质调查主要成果和进展综述(南区). *地质通报*, 23: 413-420
- 西藏自治区地质矿产局. 1986. *中华人民共和国区域地质调查报告 1:100 万改则幅*. 北京: 地质出版社, 116-151
- 翟庆国, 李才, 李惠民, 王天武. 2005. 西藏冈底斯中部淡色花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 24: 349-353
- 周云生, 张旗, 梅厚均. 1981. *西藏岩浆活动和变质作用*. 北京: 科学出版社, 1-146