

## 冈底斯岩浆带中段岩浆混合作用： 来自花岗杂岩的证据\*

董国臣<sup>1,2</sup> 莫宣学<sup>1,2\*\*</sup> 赵志丹<sup>1,2</sup> 朱弟成<sup>3</sup> 王亮亮<sup>1,2</sup> 陈涛<sup>1</sup> 李冰<sup>1</sup>

DONG GuoChen<sup>1,2</sup>, MO XuanXue<sup>1,2</sup>, ZHAO ZhiDan<sup>1,2</sup>, ZHU DiCheng<sup>3</sup>, WANG LiangLiang<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup> and LI Bing<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 成都地质矿产研究所, 成都 610082

1. State Key laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

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

2005-12-20 收稿, 2006-03-10 改回.

Dong GC, Mo XX, Zhao ZD, Zhu DC, Wang LL, Chen T and Li B. 2006. Magma mixing in middle part of Gangdise magma belt: Evidences from granitoid complex. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 835–844

**Abstract** Gangdise giant magma belt lays down in southern Tibet, consisting mainly of granitoids with abundant mafic macrogranular enclaves. Gabbro as predominant mafic rock type concentrated along the southern magma belt and had transitional contact with the granitoid. Researches have found that some quartz crystals and andesine ( $An=45$ ) occurred in the gabbro and mafic bytownite ( $An>80$ ) in granodiorite, bytownite-anorthite ( $An=72\sim90$ ) associated with andesine ( $An=37$ ) and dark minerals distributed along plagioclase grains. All the inconsistent mineral assemblages proved to be characteristics of magma mixing during magma evolution. The relative high content of K, Al and Fe, Mg, a linear variation trend of lithological chemical composition among MME, granitoid and gabbros, and transitional variation between  $SiO_2$  and  $K_2O$ ,  $Na_2O$  in MME are all likely respondent to magma mixing. The similar REE pattern and trace element spider distribution for MME, granitoid and gabbro gave a image of magma mixing. The high  $^{143}Nd/^{144}Nd$  ratio and low  $^{87}Sr/^{86}Sr$  in gabbro and low  $^{143}Nd/^{144}Nd$  ratio and high  $^{87}Sr/^{86}Sr$  ratio fell in linear in mantle evolution range, representing magma mixing happening. The SHRIMP zircon U-Pb ages were quite similar for the REE, granitoid and gabbro, indicating that they were the products of magma mixing in same geothermal event. Much evidence indicates that the various lithologies in Gangdise magma belt were mixed by different proportional mafic end-member and acid end-member. As a result, the mafic end-member occupied 16%~90% between acid to mafic end-member. It was estimated base on the intrusions that mafic magma from mantle sources contributed over 5% to the Gangdise crust. It deduced that, with the underplating of mantle-derived magma during India-Eurasia continental collision, magma mixing from both mantle source and crust source took place during 50~45Ma. This magma mixing event post-dated the initiation of India-Eurasia continental collision by 15 million years. It is believed that magma mixing was one of the major mechanisms for mass and energy exchange between mantle-crust during the Indian-Eurasia collision, and also for key approaches of study on crust accretion, reconstruction, crust texture and composition in north to the collision zone.

**Key words** Granitoid, Gabbro, Magma mixing, Magma belt, Gangdise, Tibet

**摘要** 巨型冈底斯岩浆带横亘于青藏高原南部, 主要由花岗质岩石组成, 其中存在大量的镁铁质微粒包体, 以辉长岩为主的基性岩相对集中在岩浆岩带南部。辉长岩类与花岗质岩石呈渐变过渡关系。辉长岩中出现有石英, 暗色矿物沿着长石颗粒边部分布, 花岗质长岩中出现有基性倍长石 ( $An>80$ ), 辉长岩中有中长石 ( $An=45$ ) 出现, 镁铁质微粒包体 (MME) 包体

\* 国家重点基础研究发展规划项目 (编号: 2002CB412600)、国家自然科学基金 (40473020, 40103003, 40503005, 40572048)、国土资源部青藏专项计划 (200101020401) 和中国地调局综合研究项目联合资助。

第一作者简介: 董国臣, 男, 1962年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩石学及矿床学研究工作, E-mail: guochdong@263.net

\*\* 通讯作者: 莫宣学, E-mail: moxx@cugb.edu.cn

中倍长石-钙长石( $An=72\sim90$ )和中长石( $An=37$ )共存,这些矿物组合的不协调现象是岩浆演化过程中混合作用的表现形式;MME的化学成分相对高钾、铝和铁镁,MME、花岗岩类寄主岩及辉长岩类岩石化学成分呈直线变异趋势(相对 $MgO$ ),MME的 $SiO_2$ 和 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 成分的过渡性变化也都反映出混合作用特征;基性辉长岩类、酸性花岗质岩石和MME包体的稀土配分模式基本一致,其微量元素特征也具有明显的一致性,反映了岩浆混合作用的特征;辉长岩类的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值较高, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值较低,而偏酸性的花岗质岩石中 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值较低, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值较高,构成直线性分布趋势,并位于地幔演化线的延伸方向上,显示区域岩浆混合作用特征;辉长岩、花岗岩类和MME的同位素年龄值十分接近,也表明三者属于岩浆混合作用产物。研究证明,冈底斯岩浆岩带中不同岩性均由不同比例的基性端元和酸性端元成分混合而成,其中基性端元成分所占的比例变化在16%~90%不等,仅从侵入岩浆推算,幔源基性岩浆对冈底斯地壳垂向增厚的贡献率超过5%。可以推断,随着俯冲-碰撞过程中产生的基性岩浆底侵作用,冈底斯岩浆岩带发生壳幔岩浆混合作用,其时代为50~45Ma,属于印度-欧亚大陆碰撞开始15Ma后的主碰撞期内,岩浆混合作用是碰撞过程中壳幔物质与成分交换的主要形式之一,是研究主碰撞带北部青藏高原的陆壳增生与改造、地壳结构及成分变化重要途径之一。

**关键词** 花岗岩类;辉长岩类;岩浆混合作用;岩浆岩带;冈底斯;西藏

**中图法分类号** P588.115

近年来许多研究揭示,印度-欧亚大陆碰撞发生于65~45Ma,而后转入后碰撞阶段(Yin and Harrison, 2000, Flower *et al.*, 2001, 董国臣, 2002, 莫宣学等, 2003, Zhou *et al.*, 2004)。印度-欧亚大陆碰撞作为一个巨大的地质事件,直接引起了青藏高原的隆升、和相应的生态、环境、气候变化,因而成为国内外学者关注的热点。而对应于这样一个地质事件,在青藏高原之下进行着怎样的深部过程,这些过程发生的时间和构造阶段,有怎样的地球动力学意义,是地学家们所关注的重要科学问题。横亘于青藏高原南部巨大的冈底斯花岗岩带与印度-欧亚板块碰撞带并行产出,其成因与两大板块碰撞密切相关(Mc *et al.*, 2005),其中蕴含着丰富的地球动力学信息,提供了观测板块碰撞有关的壳幔深部过程的“探针”和“窗口”(莫宣学等, 2004)。底侵作用及岩浆混合作用,是壳-幔间物质与能量交换的重要形式,对于陆壳

生长与改造、岩石圈成分、结构与热状态的演化,都有重要的意义(金振明等, 1996)。本文在针对冈底斯中部拉萨至日喀则一带详细的野外地质调查的基础上,拟从岩石学及元素、同位素地球化学及年代学角度对这一科学问题进行探讨,提出点滴看法与同行进行交流。

## 1 地质背景

冈底斯花岗岩带平行于雅鲁藏布江缝合带呈近东西展布,长约2000km,宽约100km,出露面积达11万 $km^2$ ,构成一个巨大的构造-岩浆岩带,其南部紧邻雅鲁藏布江缝合带,向东绕过雅鲁藏布江大拐弯与察隅花岗岩相连。本文选择拉萨-日喀则一带冈底斯岩浆岩带中段(图1),冈底斯花岗岩带中主要岩石类型包括闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、

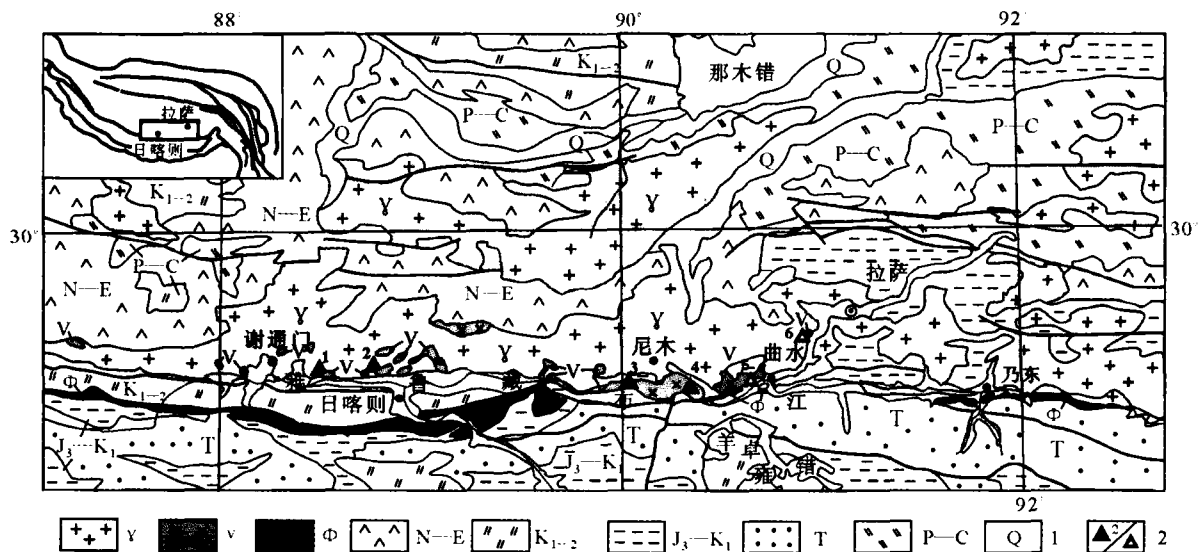


图1 拉萨-日喀则一带冈底斯岩浆岩带地质简图

$\gamma$ -花岗岩;  $\nu$ -辉长岩;  $\Phi$ -蛇绿岩套; N-E-古近一新近系;  $K_{1-2}$ -早-中白垩统;  $J_3-K_1$ -晚侏罗统-早白垩统; T-三叠系; P-C-石炭-二叠系; 1-第四系; 2-采样地点及编号

Fig. 1 The sketch map of Gangdese magmatic belt in Lhasa-Rigaze area, Tibet

二长花岗岩、石英二长岩、花岗岩、正长花岗岩及二云母花岗岩等(金成伟和周云生, 1978; 金成伟和许荣华, 1982)。在花岗岩带的南缘断续分布着一条铁镁质-超铁镁质岩带, 主要为辉长岩类, 局部有辉石岩、橄榄辉石岩和伟晶辉石岩, 与花岗岩带直接接触。在整个冈底斯带, 花岗质岩石中存在大量的铁镁质微粒包体(金成伟, 1986; 谭富文和刘朝基, 1992; 江万等, 1998, 1999), 包体的数量和大小随远离铁镁质-超铁镁质岩带而减少(Mo *et al.*, 2005), 以拉萨南部的曲水岩体最具代表性。铁镁质微粒包体具有岩浆岩结构、高温淬火矿物及流动构造, 在其与寄主岩接触处具淬火边或物质交换造成的浅色晕圈(Mo *et al.*, 2005)。岩浆活动时代从110~40 Ma, 以60~40 Ma为高峰(江万等, 1998)。曲水岩体同一露头中花岗闪长岩(寄主岩)、寄主岩中的铁镁质微粒包体和角闪辉长岩样品的 SHRIMP II 锆石 U-Pb 年龄分别为50.4~49.3 Ma, 51.2~48.9 Ma, 49.9~47.0 Ma, 年龄值十分接近, 属于同一构造-岩浆事件形成(Mo *et al.*, 2005)。花岗岩带的围岩多为中生界, 其次为上古生界, 多呈侵入接触关系, 局部受接触变质作用影响, 出现角岩及夕卡岩, 并常具有铜、铁等矿化现象。

## 2 冈底斯岩浆带混合作用的证据

不同成分岩浆之间的混合现象早已被人们所认识(Dider, 1991; 李昌年, 2002)。Harker (1904) 把“Hybrid”一词用于正常的火成岩, 包括两个端元液态岩浆的混合, 或者液态的岩浆与固态岩石的同化混染。广义的岩浆混合作用包括岩浆化学混合(Magma mixing)和岩浆机械混和(Magma mingling)的全部混合作用; 狭义的岩浆混合作用(Magma mixing)指两个端元岩浆的化学混合作用。混合岩浆作用既是再造新生岩浆又是开放体系下岩浆演化的重要岩浆作用(李昌年, 2002), 它是岩浆多元性和火成岩多样性的重要原因之一。

### 2.1 岩石学和矿物学标志

(1) 不同端元成分岩石接触关系的宏观证据: 冈底斯岩浆岩带中辉长岩类集中分布在岩浆岩带南部, 而花岗质岩石则向北部偏多, 花岗岩类与辉长岩类直接接触, 呈渐变过渡关系。在曲水至拉萨一带的曲水杂岩, 花岗岩类表现出越向北侧花岗岩岩性越偏酸性的趋势, 至北部的南木林一带花岗岩类岩石中出现钾长石斑晶, 斑晶粗大, 不均匀分布; 杂岩中的铁镁质微粒包体(Mafic Microgranular Enclave, 简称MME包体)也具有一定的变化规律(见后); 在花岗岩与MME接触边界附近常常集中, 甚至出现在MME包体中(图2a); 在棉将一带, 辉长岩与花岗岩类的“直接”接触并没有表现出截然的界线, 而是带状渐变接触, 其间的岩石类型由辉长岩→角闪辉长岩→辉长闪长岩→石英闪长岩→花岗闪长岩(图2b); 在日喀则地区谢通门一带, 黑云母辉长

岩与花岗岩接触带宽1 km。

(2) 岩浆混合作用的岩浆组构证据: 整个岩浆岩带岩石类型复杂, 从辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩到花岗岩均有出露, 但以花岗闪长岩、二长花岗岩为主。岩石粗粒结构, 局部发育钾长石斑晶呈现似斑状结构。岩浆混合作用主要体现在下列组构特征:

1) 岩石矿物不协调现象: 花岗闪长岩(SZ0343A)中出现基性倍长石, 其  $An > 80$ ; 辉长岩(NM0369)中出现中长石,  $An = 45$ ; MME包体(SZ0343D)中倍长石—钙长石( $An = 72 \sim 90$ )和中长石( $An = 37$ )共存。倍长石可能来源于参与混合的幔源基性岩浆, 而中长石可能来源于参与混合的壳源酸性岩浆。

2) 嵌晶结构的普遍出现: 粗大的斜长石颗粒包裹角闪石、斜长石(SZ0343D和NM0369)构成嵌晶结构(图2c), 这是由于偏基性岩浆或正在混合的岩浆体系骤冷, 产生很多小颗粒角闪石和斜长石(肖庆辉等, 2002), 而后缓慢冷却至外部环境温度, 平衡熔体冷却到接近液相线温度时斜长石晶核缓慢结晶成粗大晶体, 形成包裹着早期形成的角闪石和斜长石晶体的嵌晶结构。

3) 暗色边现象: 辉长岩(DG0360-2, SQ0345A)中出现有石英(图2d), 以角闪石为主的暗色矿物沿着长石颗粒边部分布(图2c), 这些矿物组合的不协调现象是岩浆演化过程中混合作用的一种表现形式(周询若, 1994)。

4) 矿物快速冷却现象: 斜长石(SZ0345B)中的针状磷灰石包裹体, 也见有短柱状磷灰石(图2e)。针状磷灰石是一种淬火结构, 是热的基性岩浆进入相对冷的酸性岩浆迅速冷却的结果, 被确认为一种岩浆混合结构(刘成东等, 2004)。

值得一提的是磷灰石在花岗岩及包体中的形态是完全不同的。在花岗岩中, 磷灰石通常呈短柱状晶体, 而在包体中则呈细针状, 且常常空心(Didier, 1964, 江万等, 1998; 刘成东等, 2004)。根据Wyllie *et al.* (1962)所进行的  $CaO-CaF_2-P_2O_5-CO_2$  系统的实验结果, 铁镁质微粒包体中的细针状磷灰石是在淬火状态下结晶形成的。

(3) MME包体提供的佐证, 冈底斯花岗岩中含有大量MME包体, 呈团块状、透镜状、条带状、火焰状和不规则状等形态产出(图2f), MME包体的成分及特征反映出岩浆混合作用特征(江万等, 1998; 刘成东等, 2004; Mo *et al.*, 2005)。野外填图表明, 其分布自南向北具有明显的规律, 表现出MME包体个体由大变小, 数量增多, 形态由团块状→似层状→透镜状, 包体含量变少。

1) MME包体具有塑性流动特征(图2g, h), 经历了与其寄主花岗岩质岩石共同的液态共存阶段, 从而发生液态物质交换-混合作用(Magma mixing)和混和作用(Magma mingling), 前者改变了MME的成分, 使得其成分相对高钾、铝和铁镁含量, 后者造成MME呈不同的大小和形态散布到寄主岩体中。这一点符合MME的空间分布规律。

2) 相对共存的寄主花岗岩而言, MME包体的成分呈现



高铁镁特征,相对辉长岩,呈现高钾、铝特征,整体成分则类似于玄武岩或安山岩(江万等,1998; Mo *et al.*, 2005)。

这正是从深部来源的基性岩浆成分与浅部岩浆成分混合的证据。

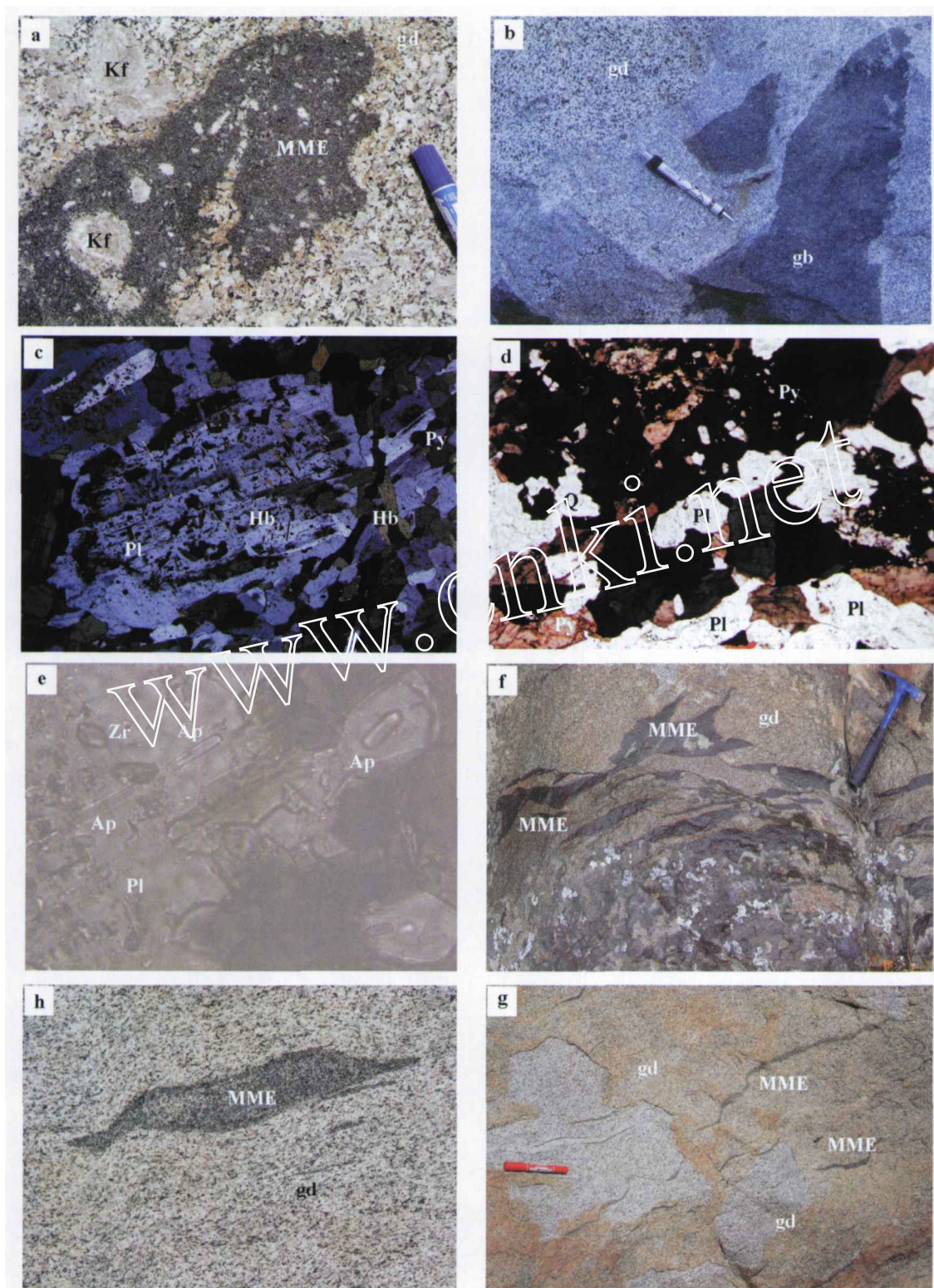


图2 冈底斯带辉长岩、花岗岩及其中镁铁质包体(MME)关系图

a-MME 中钾长石(Kf)斑晶; b-辉长岩(gb)与花岗闪长岩(gd)接触关系; c-斜长石的包裹晶体现象; d-辉长岩中的石英(Q); e-斜长石中针状磷灰石(Ap)晶体; f-花岗闪长岩中不规则的MME; g-MME 塑性流动特征; h-MME 流动构造. Pl-斜长石; Hb-角闪石, Py-辉石; Zr-锆石

Fig. 2 Picture showing relationship among gabbro, MME and the host rock (granitoid) in Gangdese

## 2.2 岩石化学和地球化学特征证据

1) MME 包体、花岗岩类寄主岩及辉长岩类岩石常量元素、微量元素和稀土元素成分(表1)显示 MME 包体具有亲辉长岩类, 而又向花岗质岩石过渡的特征, 也是深部基性辉长岩浆与浅部酸性花岗质岩浆混合作用的结果(江万等, 1998)。MME 包体  $\text{SiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  成分的变化以及诸如

辉石闪长岩和角闪闪长岩等过渡性岩石成分的出现也都反映出混合作用特征。

2) 在稀土元素配分模式图中(图3a)辉长岩类、花岗岩类和 MME 包体的稀土配分模式基本一致, 为右倾的轻稀土富集型, 总体上表现出由偏酸性岩—偏基性岩稀土总量逐渐减小的特征; 微量元素特征(图3b)三者也具有一定的相似性, 可能反映了岩浆混合作用的特征。

表1 冈底斯带辉长岩、MME 及其花岗岩类寄主岩石的常量(%)、微量元素和稀土元素( $\times 10^{-6}$ )分析数据Table 1 Major(wt%) and traces ( $\times 10^{-6}$ ) analyses for the gabbro, MME and its host rocks in Gangdese

样品号	SZ0343A	SZ0343B	SZ0343D	SQ0345A	SQ0345B	SQ0345C	PD0370-1	PD0370-2	NM0369	AG0364-2
采样地点	曲水县聂当村南			曲水县棉将村			日喀则帕当大桥		4768km	腌岗
岩性	花岗闪长岩	角闪辉长岩	MME	角闪辉长岩	MME	闪长岩	花岗闪长岩	辉长岩	角闪辉长岩	辉长辉绿岩
$\text{SiO}_2$	63.03	50.26	47.43	54.49	52.42	57.07	60.77	46.66	52.04	49.37
$\text{TiO}_2$	0.59	1.27	1.51	0.74	0.85	0.69	0.63	1.14	0.64	1.41
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16.13	17.43	19.05	18.59	18.43	18.13	16.75	15.98	17.78	15.28
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2.6	5.08	5.08	4.16	4.39	3.1	2.92	4.49	3.23	3.76
$\text{FeO}$	2.68	6.30	7.3	3.92	4.82	4.12	3.22	7.32	5.68	8.18
$\text{MnO}$	0.09	0.15	0.14	0.13	0.14	0.12	0.11	0.15	0.18	0.15
$\text{MgO}$	2.21	4.70	4.79	3.83	4.3	3.47	2.78	8.98	6.09	8.00
$\text{CaO}$	5.12	8.69	5.29	7.09	7.86	6.61	5.53	3.36	10.69	9.33
$\text{Na}_2\text{O}$	3.37	3.98	4	4.01	3.52	3.8	3.95	2.14	2.20	2.57
$\text{K}_2\text{O}$	3.64	0.90	3.71	1.22	1.39	1.5	2.32	2.53	0.56	0.46
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.16	0.30	0.6	0.34	0.29	0.24	0.18	0.16	0.11	0.12
灼量	0.39	0.59	0.68	1.06	1.15	0.59	0.55	1.80	0.48	1.03
总量	100.01	99.65	99.58	99.58	99.56	99.54	99.71	99.72	99.68	99.66
Cs	2.51	2.12	1.77	0.96	1.39	1.42	3.31	1.99	1.97	2.43
Rb	77.24	25.91	26.81	20.54	21.75	32.77	88.24	77.38	9.28	11.33
Ba	1044.36	139.19	314.26	342.12	431.16	362.85	327.20	335.66	137.70	71.07
Th	10.23	2.15	2.87	1.37	2.39	2.28	6.11	0.83	0.78	0.23
U	3.00	0.69	1.65	0.48	0.92	0.69	2.20	0.35	0.37	0.10
Ta	1.74	0.40	0.35	0.33	0.32	0.40	0.68	0.18	0.18	0.22
Nb	12.56	5.40	8.54	4.63	4.75	5.33	6.84	2.52	1.98	2.77
La	27.78	17.79	26.55	16.67	15.37	14.77	22.76	13.24	6.22	3.65
Ce	74.98	38.12	43.99	35.85	35.60	29.81	48.16	31.82	13.75	9.61
Sr	513.75	666.41	440.62	767.28	831.32	660.12	607.38	675.84	468.85	252.48
Nd	44.53	21.56	20.66	20.86	21.16	16.61	23.12	17.83	8.93	8.38
Hf	4.00	2.41	2.16	1.67	2.73	2.47	1.64	1.41	0.50	2.14
Zr	146.06	95.81	97.94	66.09	108.24	77.00	41.52	35.88	11.57	72.95
Sm	9.05	4.65	3.71	4.19	4.34	3.41	4.76	3.86	2.28	2.90
Tb	1.16	0.64	0.43	0.56	0.59	0.47	0.61	0.54	0.41	0.67
Y	41.29	20.78	12.57	19.70	20.28	16.52	20.75	17.32	16.16	25.16
La	27.78	17.79	26.55	16.67	15.37	14.77	22.76	13.24	6.22	3.65
Ce	74.98	38.12	43.99	35.85	35.60	29.81	48.16	31.82	13.75	9.61
Pr	10.04	4.71	4.63	4.48	4.53	3.63	5.27	3.82	1.77	1.43
Nd	44.53	21.56	20.66	20.86	21.16	16.61	23.12	17.83	8.93	8.38
Sm	9.05	4.65	3.71	4.19	4.34	3.41	4.76	3.86	2.28	2.90
Eu	1.73	1.52	0.51	1.29	1.30	1.11	1.08	1.30	0.74	1.12
Gd	7.61	4.19	3.39	3.70	3.82	3.16	4.06	3.42	2.29	3.42
Tb	1.16	0.64	0.43	0.56	0.59	0.47	0.61	0.54	0.41	0.67
Dy	6.55	3.42	2.12	3.11	3.20	2.60	3.20	2.84	2.41	4.02
Ho	1.37	0.69	0.42	0.65	0.69	0.55	0.68	0.60	0.55	0.90
Er	3.67	1.77	1.05	1.73	1.83	1.46	1.83	1.55	1.47	2.34
Tm	0.56	0.26	0.13	0.27	0.27	0.22	0.29	0.23	0.23	0.35
Yb	3.72	1.77	0.89	1.82	1.88	1.51	1.95	1.46	1.52	2.27
Lu	0.56	0.28	0.14	0.30	0.30	0.25	0.33	0.24	0.26	0.36
$\Sigma \text{REE}$	193.30	101.38	108.62	95.48	94.88	79.58	118.09	82.75	42.83	41.43

注: 样品分析由西北大学实验室完成。

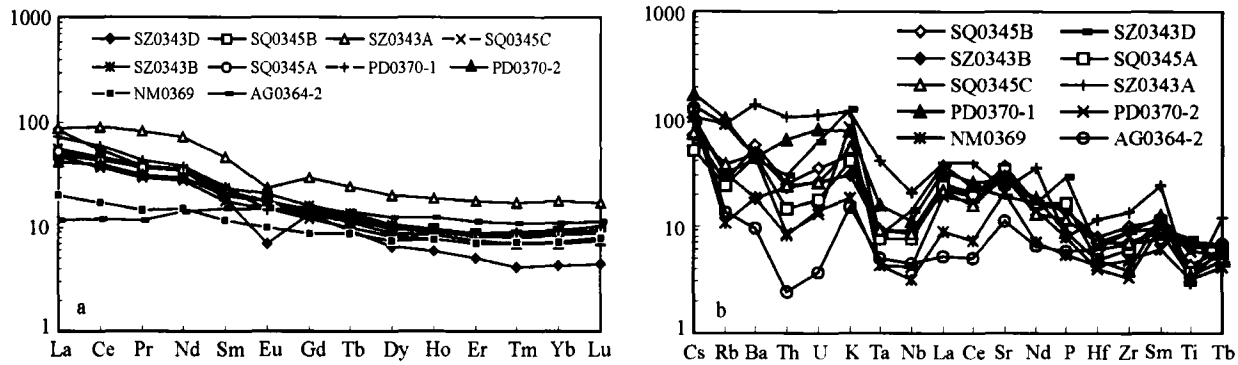
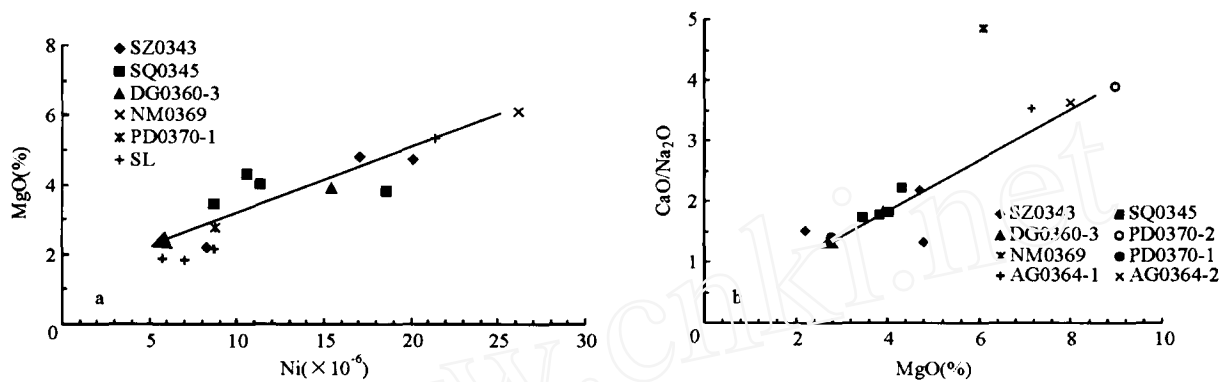
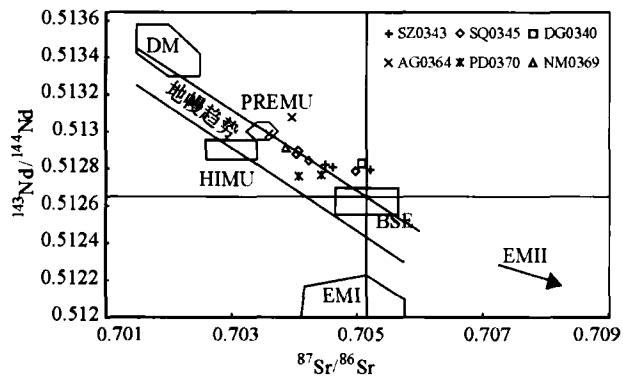


图3 冈底斯带侵入岩稀土元素配分(a)和微量元素蛛网图解(b)

Fig. 3 REE pattern (a) trace element spidergrams (b) for representative magmatic rocks samples in Gangdese

图4 冈底斯带 MgO-Ni(a) 和 CaO/Na<sub>2</sub>O-MgO(b) 图解Fig. 4 MgO vs. Ni (a) and CaO/Na<sub>2</sub>O vs. MgO (b) diagrams for representative magmatic rocks samples in Gangdese图5  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图解Fig. 5  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  diagram for representative magmatic rocks samples in Gangdese

3) 利用 Ni-MgO (图 4a) 和 MgO-CaO/Na<sub>2</sub>O (图 4b) 关系图可以看出, 两者均呈直线型展布, 说明属岩浆混合作用的结果, 而非岩浆分异产物 (与李曙光院士口头交流)。

4) 在  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图解 (图 5) 中, 辉长岩类的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值较高,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值较低, 而花岗岩类的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值较低,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值较高, 整体构成了一条趋势性直线, 并位于地幔演化线的延伸方向上, 显示区域岩浆

混合作用特征。

### 2.3 同位素年代学特征

莫宣学等 (2005) 对曲水一带棉将村附近 (N29°29.938', E90°56.311') 和曲水县聂当村南地段 (N. 29°21.703', E. 90°42.522') 的 MME 包体、花岗闪长岩 (寄主岩) 和辉长岩所组成的两套辉长岩、MME 和花岗岩的样品岩进行了同位素分析。两套样品均包括偏酸性混合端元的花岗闪长岩 (寄主岩)、偏基性混合端元的角闪辉长岩和镁铁质微粒包体, 其锆石 U-Pb 年龄分别为花岗岩类 49.3 ~ 50.4 Ma、MME 包体 48.9 ~ 51.2 Ma、辉长岩类 47.0 ~ 49.9 Ma, 属于同一时期的产物, 反映出曲水岩体岩浆作用过程的活动时限为 50 Ma 左右, 说明曲水岩体中基性岩浆与酸性岩浆在 50 Ma 左右的始新世时期基本同时形成, 表明 MME 包体属于存在于花岗岩类岩浆中的辉长岩类岩浆团块, 而非源岩的固态难熔残余或者在花岗岩岩浆固结后才侵入的结果 (Mo et al., 2005)。

## 3 混合过程中物质及能量的交换过程

前面分析可以看出, 冈底斯带中段侵入岩带中普遍存在岩浆混合现象, 岩浆混合作用主要为辉长岩类和花岗岩类混

合而成,前者是基性端元,后者为酸性端元,二者之间的温差和成分差异必然出现能量交换和物质混合。

### 3.1 岩浆混合过程中能量交换过程

岩浆混合作用中能量的交换主要表现为热量的传递。物质混合前的能量交换发生于壳幔之间,通过提供热源把铁镁质岩浆与花岗质岩浆的生成联系起来 (Takeshi Kuritani *et al.*, 1983), 这里的花岗质岩浆是炽热的镁铁质岩浆作用于地壳,而使地壳部分熔融的产物;混合后的能量交换使岩浆房中的花岗质岩浆被加热,导致岩浆密度不稳定,促使岩浆流动,同时原有的平衡状态和结晶顺序被打乱,发生晶体、熔体的混合作用 (周珣若, 1994)。

在印度-欧亚大陆碰撞作用过程中,俯冲至上地幔的特提斯洋壳发生脱水,导致上覆地幔楔发生部分熔融,形成玄武质岩浆 (Tatsumi, 1995), 辉长岩类作为一种镁铁质岩浆岩,其液相岩温度一般为  $1000^{\circ}\text{C} \sim 1225^{\circ}\text{C}$ ,而花岗质岩浆温度只需  $700^{\circ}\text{C} \sim 890^{\circ}\text{C}$ ,上涌的玄武质岩浆底侵于壳-幔边界,岩浆聚集的同时,带来高温热能 (约  $500^{\circ}\text{C}$  温差),通过能量交换使下地壳部分熔融,形成长英质岩浆 (Huppert, 1988)。当两者直接接触时,如此高温差必然会使得两种物质产生强烈的热交换,温度高的辉长岩岩浆出现急剧冷却,甚至淬火现象,形成未完全混合的镁铁质微粒包体群;温度低的花岗岩出现升温,原有的冷却结晶过程会因为温度的升高而中止,代之以熔融已结晶部分,待达到结晶温度时,继续结晶过程。

### 3.2 岩浆混合过程中物质交换过程

深部高温的铁镁质岩浆也可能沿着某种薄弱带上侵,进入上部的长英质岩浆房,与之发生直接的物质交换-混合作用,作为混合作用的结果,形成一系列介于基性和酸性两个端元之间的过渡性岩石类型 (Takeshi Kuritani *et al.*, 1983)。

MME 包体是岩浆混合作用过程中的产物,同其寄主岩石和辉长岩类在同一时空条件下形成。这就说明,寄主岩石确实作为靠近酸性混合端元成分和作为基性混合单元的辉长岩类发生了液态混合作用,寄主岩中的 MME 包体正是混合作用过程中辉长岩类岩浆在酸性岩浆中冷却的产物,是注入到酸性岩浆中未完全混合的基性岩浆团块 (Mo *et al.*, 2005)。

MME 包体及其寄主岩均具有岩浆岩成分,通过双扩散作用发生不同程度的物质交换,作为混合作用的产物,二者的  $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}$  成分图解 (图 6) 具有趋势性变化,并显示出区域侵入岩主要是一次岩浆混合作用的结果。

### 3.3 混合作用过程中物质交换量的估算

根据混合原理 (Fourcade *et al.*, 1981; 周珣若, 1994), 对于基性岩浆与酸性岩浆两个端元混合成因的混合岩中,任何一种氧化物或者微量元素在混合岩浆中的含量,以及基性端元在混合岩中所占的比例,可以通过下列混合方程予以定量计算:

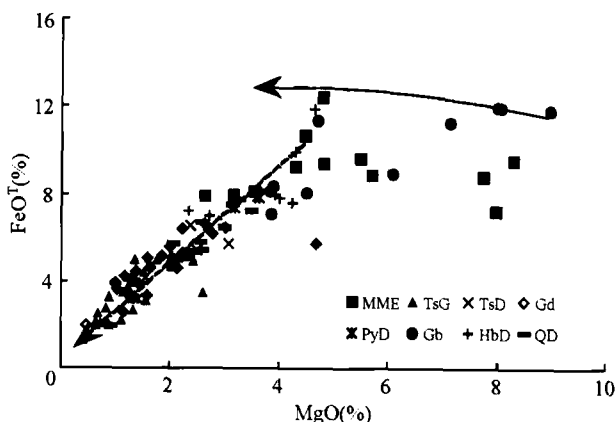


图 6 岩石  $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}$  成分图解

MME: 铁镁质微粒包体; TsG: 二长花岗岩; TsD: 二长闪长岩; Gd: 花岗闪长岩; PyD: 辉长闪长岩; Gb: 辉长岩; HbD: 角闪闪长岩; QD: 石英闪长岩

Fig. 6  $\text{MgO}$  vs.  $\text{FeO}^{\text{T}}$  diagram for representative magmatic rock samples in Gangdese

$$C_i^{\text{m}} = KC_i^{\text{a}} + (1-K)C_i^{\text{b}}$$

其中:  $C_i^{\text{m}}$  = 某元素在混合岩中的百分含量 (%) 或者丰度 ( $\times 10^{-6}$ );  $K$  = 混合岩浆中的基性端元的百分比例 (%);  $C_i^{\text{a}}$  = 基性端元岩浆中某元素的含量或者丰度;  $C_i^{\text{b}}$  = 酸性端元岩浆中某元素的含量或者丰度。

两个单元岩浆混合作用模拟过程中,确定参与岩浆混合作用的端元岩浆成分十分关键。鉴于冈底斯带中段广泛发育岩浆混合作用,目前所见到的岩石类型均存在不同程度的混合作用,故此确切寻找基性和酸性端元成分十分困难。鉴于此,本文从近年所采集的 11 个辉长岩类样品中,考虑因素包括 REE 分异程度较小 (图 3), LREE 无亏损, Sr-Nd 同位素更接近原始地幔特征 (图 5),  $\text{SiO}_2$  含量和  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量均最低,最后确定两个样品,取其平均值,作为基性端元成分;从所采集到的 27 个二长花岗岩样品中,选择因素包括其  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  为正值,表明其成生受地幔影响, REE 分异明显,  $\text{SiO}_2$  含量和  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量均最高等,最后确定两个样品,取其平均值,作为酸性端元成分,进行模拟计算。

端元岩浆的化学成分均为分析值折算成 100% 后的结果。

所选择的两个基性辉长岩类成分和两个酸性样品见表 2。

由此得出结论: 区内的不同岩性的混合比例如下: 二长花岗岩为基性端元 16%, 酸性端元 84%; 花岗闪长岩为基性端元 35%, 酸性端元 65%; 二长闪长岩为基性端元 40%, 酸性端元 60%; 石英闪长岩为基性端元 50%, 酸性端元 50%; 角闪闪长岩为基性端元 64%, 酸性端元 36%; 辉长闪长岩为基性端元 66%, 酸性端元 34%; 辉长岩为基性端元 90%, 酸性端元 10%; MME 包体为基性端元 85%, 酸性端元 15%。



表2 基性及酸性端元成分及平均值

Table 2 The chemical composition of mafic and acid end member

编号	岩性	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	灼量	总量
<b>酸性端元</b>														
0109-1 *	二长花岗岩	70.5	0.28	13.84	1.2	0.96	0.058	1.1	2.14	3.81	5.29	0.081	0.42	99.68
4083-1 *	二长花岗岩	75.96	0.24	12.44	1.02	0.28	0.02	0.4	0.44	4	4.82	0.02	0.37	100.0
	平均	73.23	0.26	13.14	1.11	0.62	0.04	0.75	1.29	3.91	5.06	0.05	0.40	99.84
	调整后的端元	73.34	0.26	13.16	1.11	0.62	0.04	0.75	1.29	3.91	5.06	0.05	0.40	100
<b>基性端元</b>														
AG0364-2	辉长岩	49.37	1.41	15.28	3.76	8.18	0.15	8.00	9.33	2.57	0.46	0.12	1.03	99.66
NM0369	辉长岩	46.66	1.40	15.98	4.49	7.32	0.16	8.98	8.36	2.14	2.53	0.16	1.80	99.98
	平均	48.02	1.41	15.63	4.13	7.75	0.16	8.49	8.85	2.36	1.50	0.14	1.42	99.82
	调整后的端元	48.10	1.41	15.66	4.13	7.76	0.16	8.51	8.86	2.36	1.50	0.14	1.42	100

注: \*: 据南木林幅 1:20 万区调报告; 基性端元样品为本课题组资料, 由西北大学实验室完成分析结果。

表3 岩浆岩类模拟计算结果

Table 3 Calculated chemical compositions based on the composition of two end members

K	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
10	70.82	0.38	13.41	1.41	1.34	0.05	1.53	2.05	3.76	4.71	0.06	0.50
20	68.30	0.49	13.66	1.72	2.05	0.06	2.30	2.81	3.60	4.35	0.07	0.60
30	65.77	0.60	13.91	2.02	2.76	0.07	3.08	3.56	3.45	3.99	0.08	0.70
40	63.25	0.72	14.16	2.32	3.48	0.09	3.85	4.32	3.29	3.64	0.09	0.80
50	60.72	0.83	14.41	2.62	4.19	0.10	4.63	5.08	3.14	3.28	0.10	0.91
60	58.20	0.95	14.66	2.92	4.91	0.11	5.40	5.83	2.98	2.92	0.10	1.01
70	55.67	1.06	14.91	3.23	5.62	0.12	6.18	6.59	2.82	2.57	0.11	1.11
80	53.15	1.18	15.16	3.53	6.34	0.13	6.95	7.35	2.67	2.21	0.12	1.21
90	50.63	1.29	15.41	3.83	7.05	0.14	7.73	8.10	2.51	1.85	0.13	1.32

注: K 为基性端元的混合比例。

值得注意的是, 两端元岩浆的混合模拟结果只是一个近似的模拟计算, 肯定与真实情况会有较大的出入。因为这里只是考虑了两个端元的差异, 没有考虑不同组分的活跃程度的不同, 以及不同组分的扩散速率是否有区别。

计算后, 获得下列各岩性单位平均值(表3)及其混合比例。

#### 4 混合作用中壳幔相互作用信息

岩浆混合作用发生于地壳深部, 通过热源及物质交换把作为幔源成因的铁镁质岩浆与壳源的花岗质岩浆联系起来, 从而体现出地壳、地幔及其相互作用信息。

##### 4.1 岩浆混合端元所体现的地幔、地壳信息

冈底斯岩浆岩带具有复杂的岩性组合, 从辉长岩到花岗岩呈过渡性连续变化, 它们由不同成分岩浆不同比例混合而

成, 混合作用的两个端元—辉长岩类及花岗岩类分别来自不同源区, 一般认为, 镁铁质岩浆由幔源物质部分熔融而成, 而长英质岩浆的源区则是地壳, 属地壳物质部分熔融而成。

冈底斯岩浆岩带中花岗闪长岩和辉长岩均出现有基性倍长石 ( $An > 80$ ) 和中长石 ( $An = 45$ )。倍长石来自参与混合的幔源基性岩浆, 而中长石来自参与混合的壳源酸性岩浆。根据岩石化学、微量元素和稀土元素分配规律及同位素分析, 岩浆混合作用强烈, 混合暗色花岗岩具有明显的壳幔过渡特征 (Rudnick *et al.*, 1993; Cole *et al.*, 2001; 刘永军等, 2003; 王强等, 2003; Flierdt *et al.*, 2003; Healy *et al.*, 2004); 辉长岩类的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值较高, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值较低 (图5), 位于地幔演化线的延伸方向上, 显示区域岩浆混合作用中幔源作用特征。因此, 冈底斯岩浆岩带复杂的岩性反映着不同的壳幔作用信息。



## 4.2 地幔物质进入地壳的数量的估算

岩浆底侵作用使幔源岩浆上升集聚到地壳下部,当岩浆集聚到有足够从物质和能量时,上侵进入地壳,对地壳增厚进行了贡献,其直接贡献在于物质成分的加入。根据前面的混合比例,对拉萨-日喀则一带曲水幅、谢通门幅和南木林幅3幅1:20万图幅(面积约21445km<sup>2</sup>)岩浆岩出露面积进行了统计(表4)。据此可以推算,地幔岩浆底侵作用对所统计杂岩区范围的地壳增厚贡献程度为4.86%±。这个结果仅仅是根据侵入岩地表出露面积进行的概算,而没有考虑岩体向下延深情况,尽管一般认为随着深度的增加基性成分也相应增加。

表4 曲水-谢通门一带岩浆岩面积统计结果

Table 4 Statistical ground covering for magmatic rocks in Quxu-Xietongmen area, Tibet

岩性	出露面积 (km <sup>2</sup> )	岩性	出露面积 (km <sup>2</sup> )	岩性	出露面积 (km <sup>2</sup> )
二长花岗岩	3421	英云闪长岩	324	辉长岩	166
花岗闪长岩	2245	角闪闪长岩	602	角闪石岩	2
石英闪长岩	818	辉长闪长岩	179.5	暗色微细粒包体	100

另外,还有能量和流体成分的加入,幔源流体的渗透和能量的传递,地壳的热结构发生改变,促使壳源成分调整,促进壳幔物质交换。总之,幔源岩浆上侵在高原地壳的增厚和高原隆升过程中,壳幔物质及能量的转换起着重要的主导作用。

## 4.3 岩浆混合作用形成的地球动力学背景机制

在后碰撞环境下,基性岩浆源于岩石圈地幔的部分熔融,与俯冲大洋板片脱水有关,而酸性岩浆则是受幔源岩浆影响地壳部分熔融或者基性岩浆分异的结果(Bonin, 2004)。据此可以推断,在大约55Ma,俯冲至上地幔的特提斯洋壳发生脱水,导致上覆地幔楔发生部分熔融,形成玄武质岩浆(Tatsumi, 1995),上涌的玄武质岩浆底侵于壳-幔边界,岩浆聚集的同时,带来高温热能(约500℃温差),通过能量交换和流体的注入使下地壳部分熔融,形成长英质岩浆(Huppert, 1988)。随着底侵岩浆聚集量的增大,铁镁质岩浆也沿着某种薄弱带上侵,进入上部的长英质岩浆房,与之发生直接的物质交换-混合作用,作为混合作用的结果,形成一系列介于基性和酸性两个端元之间的过渡性岩石类型(Takeshi Kuritani *et al.*, 1983),包括二长花岗岩、闪长岩至辉长岩及未完全混合的镁铁质微粒包体群,其中,约有32.4%的岩浆来自上地幔部分熔融源区。

深部铁镁质岩浆进入及参与地壳岩石结晶,使地壳急剧

加厚。从侵入岩区的统计结果概略分析,幔源铁镁物质的贡献地壳厚度增加三成以上。因此岩浆混合作用对地壳厚度的增加具有重要的贡献,是研究地壳结构及成分变化重要途径之一。

## 5 结论

(1)冈底斯岩浆岩带为岩浆混合作用的产物,其岩浆混合作用特征除其宏观渐变接触关系外,表现在岩石学、矿物学、岩石化学及地球化学等方面,同位素年代学特征表现为具有相近的成生时代。

(2)冈底斯岩浆岩带中不同类型的侵入岩体具有明显的岩性多样性,为基性端元和酸性端元以不同比例混合的结果。其中酸性的二长花岗岩由16%的基性端元和84%的酸性端元成分混合而成,而辉长岩是由90%的基性端元和10%的酸性端元混合而成。

(3)岩浆混合作用是冈底斯岩浆岩带地壳结构和成分变化的重要机制,对区域地壳增厚具有重要贡献,仅从侵入岩来分析,壳幔岩浆交换过程中幔源物质对地壳厚度的贡献至少应在5%左右。

**致谢** 本文中岩石化学和地球化学分析在西北大学实验室完成, Sr-Nd-Pb同位素在地质科学院地质研究所实验室完成。野外工作中得到了西藏地质矿产勘查开发局第二地质大队魏保军总工程师、巴登珠教授级高级工程师、李国彪副队长和李国梁高级工程师及中国地质科学院矿床资源研究所曲晓明研究员等的大力帮助;罗照华教授、毕先梅教授、柯珊及张风琴同志参加了部分野外工作,在此一并致以诚挚的谢意。

## References

- Cole JW, Gamble JA, Burt RM, *et al.*, 2001, Mixing and mingling in the evolution of andesite-dacite magmas; evidence from co-magmatic plutonic enclaves, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Lithos*, 59: 25-46
- Dong GC. 2002. Linzizong volcanic Rocks in Linzhou Basin, Tibet and implications for India-Asia Continental Collision. Ph. D. dissertation, China University of Geosciences, Beijing: 110-118
- Didier J and Barbarin B. 1991. Enclaves and Granite Petrology. Amsterdam: Elsevier: 431-444
- Flower M, Russo RM, Tamaki K and Nguyen Hoang. 2001. Mantle contamination and the Izu-Bonin-Mariana (IBM) high-tide mark: evidence for mantle extrusion caused by Tethyan closure. *Tectonophysics*, 333: 9-34
- Fourcade S, *et al.* 1981, Trace elements behaviors in granite gneiss: A case study, the calc-alkaline plutonic association from the Qurigut complex (Pyrenees, France). *Contr. Miner. Petro.*, 76: 177-195
- Fliedert TVD, Hoerners S, Jung S. *et al.* 2003. Lower crustal melting and the role of open-system process in the genesis of syn-orogenic quartz diorite-gneiss-leucogeanite associations: cpmsteaints from Sr-Nd-O isotopes from the Bandombaai Complex, Namibia. *Lithos*, 67: 205-226

- Healy B, Collins WJ and Richards SW. 2004. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: The Murrumbidgee batholith example. *Lithos*, 78: 197–216
- Huppert E H and Sparks R J S. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *J. Petrol.*, 29(3): 599–624
- Jin ZM and Gao S. 1996. Underplating and its significance for geodynamics in the evolution of the crust-mantle. *Information of Science and Technology in Geology*, 15(2): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- Jin CW and Zhou YS. 1978. Magmatic belt in the Himalaya and Gangdese arc range and its genetic model. *Acta Geologica Sinica*, 4: 297–312 (in Chinese with English abstract)
- Jin CW and Xu RH. 1982. Granitoids in Himalayas and middle Gangdese. *Petrological Research*, 1: 81–95 (in Chinese with English abstract)
- Jin CW. 1986. Enclaves in Qushui granite batholith, Lhasa, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 2(2): 23–32 (in Chinese with English abstract)
- Jiang W, Mo XX and Zhang SQ. 1996. Petrological studies on the Gangdese granites and mafic microgranular enclaves in Tibetan Plateau. *Tethyan Geology*, 22: 90–96 (in Chinese with English abstract)
- Jiang W, Mo XX, Zhao CH, Guo TY and Zhang SQ. 1999. Geochemical characteristics of granitoids and mafic microgranular enclaves in middle Gangdese of Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 89–97 (in Chinese with English abstract)
- Liu CD, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, *et al.* 2004. Mixing events between the crust- and mantle-derived magmas in Eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP II chronology. *Chinese Science Bulletin*, 49: 823–834
- Li YJ, Liu SH, Li ZC and Li Y. 2003. The geochemical information of the magma mixing from the Wenquan granite in the western Qinling. *Geology and Prospecting*, 39(6): 33–36 (in Chinese with English abstract)
- Li C. 2002. A review of magma mixing and its research. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 49–54 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Asian collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135–148 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, *et al.* 2004. The deep-seated probe of Mesozoic to Cenozoic volcanic rocks in Tibet: the new achievements and new thinking. Beijing: Earthquake Publishing House, 449–461 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, *et al.* 2005. Timing of magma mixing in Gangdise magmatic belt during the India-Asia collision: zircon SHRIMP U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 66–76
- Rudnick RL, McDonough WF and Cheppell BW. 1993. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: petrographic and geochemical characteristics. *Earth and Planetary Science Letter*, 114: 463–475
- Tatsumi Y and Eggins S. 1995. Subduction zone magmatism. Cambridge Massachusetts: Blackwell Sci. Inc., 211
- Tan FW and Liu CJ. 1992. Preliminary study of the enclaves in Gangdise batholith, Xizang. *Mineralogy and Petrology*, 12(2): 21–27 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZH, *et al.* 2003. Origin Yanshanian intrusions and its constraint to the geodynamic process in Tongling, Anhui province. *Science in China (series D)*, 33(4): 323–334
- Takeshi Kuritani *et al.* (年?) Shift and rotation of composition trends by magma mixing: 1983 eruption at Miyake-Jime volcano, Japan????
- Xiao QH, Dong JF, *et al.* 2002. The ways of Investigation on Granitoids. Beijing: Geological Publishing House, 53–70
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280
- Zhou S, Mo XX, Dong GC, *et al.* 2004. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1970–1979
- Zhou XR. 1994. Hybridization in the genesis of granitoids, *Earth Science Frontiers*, 1(1-2): 87–97 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 董国臣. 2002. 西藏林周盆地林子宗火山岩及其反演的印度-欧亚大陆碰撞过程. [博士论文], 北京, 中国地质大学: 110–118
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. *地学前缘* 10: 135–148
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福等. 2004. 青藏高原中新世火成岩的深部探针的意义: 若干新成果及新认识. 见陈运泰等编. 中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展. 北京: 地震出版社, 449–461
- 金振明, 高山. 1996. 底侵作用及其壳-幔演化动力学意义. *地质科技情报*, 15(2): 1–7
- 金成伟, 周云主. 1978. 喜马拉雅和冈底斯弧形山系中的岩浆岩带及其成因模式. *地质科学*, (4): 297–312
- 金成伟, 许荣华. 1982. 喜马拉雅和冈底斯中段的花岗岩类. *岩石学研究*, (1): 81–95
- 金成伟. 1986. 西藏拉萨曲水花岗岩基中的包体. *岩石学报*, 2(2): 23–32
- 谭富文, 刘朝基. 1992. 冈底斯岩基中的包体的初步研究. *矿物岩石*, 12(2): 21–27
- 江万, 莫宣学, 张双全等. 1998. 青藏高原冈底斯带花岗岩及其其中铁镁质微粒包体岩石研究. *特提斯地质*, (22): 90–95
- 江万, 莫宣学, 赵崇贺等. 1999. 青藏高原冈底斯带中段花岗岩类及其其中铁镁质微粒包体地球化学特征. *岩石学报*, 15(1): 89–97
- 李昌年. 2002. 岩浆混合作用及其研究综述. *地质科技情报*, 21(4): 49–54
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 地质出版社. 北京
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华. 2004. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. *科学通报*, 49(6): 596–602
- 周珣若. 1994. 花岗岩混合作用. *地学前缘*, 1(1–2): 87–97
- 刘永军, 刘社华, 李注苍等. 2003. 西秦岭花岗岩体岩浆混合作用的地球化学信息. *地质与勘探*, 39(6): 33–36
- 王强, 许继峰, 赵振华等. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约. *中国科学(D辑)*, 33(4): 323–334