

西藏南部印度—亚洲碰撞带岩石圈： 岩石学—地球化学约束

莫宣学^{1,2}, 赵志丹^{1,2}, 朱弟成^{1,2}, 喻学惠¹, 董国臣^{1,2}, 周 肃¹

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

摘要: 拟以岩石学和地球化学的研究为基础, 结合地球物理与构造地质学的研究成果, 从一个侧面探讨青藏高原岩石圈、特别是印度—亚洲主碰撞带岩石圈结构、组成及今后进一步的研究方向。印度—亚洲主碰撞带具有青藏高原最厚的地壳, 由初生地壳及再循环地壳两类不同性质的地壳构成; 青藏巨厚地壳是由于构造增厚及地幔物质注入(通过岩浆作用)增厚两种机制形成的。碰撞以来藏南地壳加厚主要发生在约 50~25 Ma 期间。青藏岩石圈地幔在地球化学和岩石学上是不均一的, 至少存在 3 种地球化学端元: (1) 新特提斯大洋岩石圈端元; (2) 印度陆下岩石圈端元; (3) 新特提斯闭合前青藏原有的岩石圈端元。在青藏高原还发现了一批壳幔深源岩石包体及高压—超高压矿物, 对于认识青藏深部有重要的意义。可以识别出青藏高原现今存在 3 种岩石圈结构类型: 第 1 种, 增厚的岩石圈(帕米尔型); 第 2 种, 减薄的岩石圈(冈底斯型); 第 3 种, 加厚—减薄—再加厚的岩石圈(羌塘型)。这 3 类岩石圈是否在时间上具有先后顺序, 尚无明确的证据, 需要在今后加以注意。研究表明, 沿冈底斯带后碰撞钾质—超钾质火山活动, 可能与新特提斯洋俯冲板片在后碰撞阶段的断离及印度大陆岩石圈向青藏的持续俯冲作用有关, 但西段、中段与东段的动力学机制不相同。在青藏高原北部地区(羌塘、可可西里等地区), 后碰撞钾质—超钾质火山活动, 可能与波状外向扩展式的软流圈上隆引起的减压熔融有关。在高原北缘西昆仑、玉门等地区, 其形成机制可能为大规模走滑断层引起的减压熔融。青藏高原后碰撞火成活动具有明显而有规律的时空迁移。同碰撞的林子宗火山活动在 65 Ma 左右始于冈底斯南部, 标志印度—亚洲大陆碰撞的开始。于 45 Ma 左右火山活动向北迁移到羌塘—“三江”北段, 开始了后碰撞火山活动; 然后自内向外迁移, 即北向可可西里、南向冈底斯(在冈底斯内部又自西向东)、东向西秦岭迁移; 最后(6 Ma 以来), 再分别向高原的西北、东北、东南三隅迁移。结合已有地球物理资料, 一种可能的解释是它可能暗示由印度和亚洲大陆板块碰撞所诱发的深部物质(如中—下地壳、软流圈地幔物质)流动。

关键词: 岩石学; 地球化学; 印度—亚洲碰撞带; 青藏南部。

中图分类号: P583; P591

文章编号: 1000-2383(2009)01-0017-11

收稿日期: 2008-12-16

On the Lithosphere of Indo-Asia Collision Zone in Southern Tibet: Petrological and Geochemical Constraints

MO Xuan-xue^{1,2}, ZHAO Zhi-dan^{1,2}, ZHU Di-cheng^{1,2}, YU Xue-hui¹, DONG Guo-chen^{1,2}, ZHOU Su¹

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

Abstract: This paper discusses the composition and structure of the lithosphere of the Tibetan Plateau, especially of the main collision zone in southern Tibet upon the basis of petrological and geochemical studies, combining with geological and geophysical researches. The Indo-Asia main collision zone possess the thickest crust of the Tibetan Plateau, which consists of two different types of the crust, juvenile crust and recycled crust. The thickened crust formed by two mechanism, both structural thickening and the inputs of the mantle materials into the crust via magmatism. The lithospheric mantle underneath the Tibetan Plateau is inhomogeneous in petrology and geochemistry. At least three mantle isotopic reservoirs may be distinguished from

the heterogeneity of Tibetan magmatic sources: (1) a Neo-Tethyan, Indian Ocean (DUPAL-like) component, (2) an EM2-rich Indian subcontinental lithospheric mantle component, and (3) a primordial Tibetan lithospheric mantle component generated prior to the India-Asia collision, which can also be considered the pre- (India-Asia) collisional Asian lithospheric mantle component. Also, some mantle-and lower crust-derived xenoliths carried by volcanics, and the outcrops of high pressure-ultrahigh pressure mineral assemblages have been found on the Tibetan Plateau. Three structural types of the lithosphere of the Tibetan Plateau can be distinguished, i. e., thickened lithosphere (Pamirs-type), thinned lithosphere (Gangdese-type) and thickened-thinned-rethickened lithosphere (Qiangtang-type). The temporal relations among these three structural types of the lithosphere, however, is unclear so far. The post-collisional potassic-ultrapotassic volcanism along the Gangdese was presumably related to slab break-off of the subducting Neo-Tethyan plate and the subduction of Indian continental lithosphere beneath the Lhasa Block, with different mechanism in western, middle and eastern segments, respectively. In the northern part of the plateau (the Qiangtang, the Hoh Xil, etc.), however, volcanism could be related to a wavelike outward propagation of upwelling asthenosphere. In the northern margin of the plateau (western Kunlun, Yumen, etc.), volcanism might be as a result of decompressive melting induced by large-scale strike-slip faulting. Migration of collisional and postcollisional volcanism with time shows a highly distinctive pattern. Initially, as an initial response to the India-Asia collision, igneous activity migrated northward between ca. 65 and 45 Ma, away from the Tsangpo collision suture. Between ca. 45 and 6 Ma, volcanic activity migrated outward from the plateau interior, implying wavelike outward propagation of upwelling asthenosphere. A third stage, still in progress, is marked by the migration of activity to northwestern, northeast-eastern, and southeastern peripheral regions of the plateau between 6 Ma and the present. Overall, such a highly distinctive pattern of activity can be interpreted to reflect lateral asthenospheric mantle flow or lower crust flow induced by the approach, and ensuing collision, of relatively thick (India and Eurasia) continental plates.

Key words: petrology; geochemistry; Indo-Asia collision zone; southern Tibet.

对青藏高原岩石圈的结构与组成的认识,是理解高原形成演化过程运动学与动力学的基础,因而受到国内外学者的广泛关注.然而这样一个复杂的科学问题,仅靠单一学科是不可能弄清楚的.只有遵循“地球科学应该是地质学、地球物理学和地球化学的高层次综合或集成”的思想理念,“使它们相互渗透、相互补充,才能使片面认识上升到比较全面、更加深刻的认识”(刘光鼎,2005).本文拟以岩石学和地球化学的研究为基础,结合地球物理与构造地质学的研究成果,从一个侧面探讨青藏高原岩石圈、特别是印度—亚洲主碰撞带岩石圈结构、组成及今后进一步的研究方向.

青藏高原是新特提斯洋闭合、印度—亚洲大陆碰撞及高原隆升的产物.新特提斯洋在青藏由两个分支构成.北支班公湖—怒江洋可能于晚三叠世开始打开,在侏罗纪达到最大规模,大致于早白垩世初期(约 140 Ma)—早白垩世末期(约 100 Ma)关闭,完成拉萨地块与羌塘地块的碰撞拼合(莫宣学和潘桂棠,2006; Zhu *et al.*, submitted to *Chemical Geology*).南支雅鲁藏布洋可能大致与班公湖—怒江洋同时打开,但闭合较晚,到白垩纪/古近纪之交(70/65 Ma 左右)印度大陆才开始与拉萨地块(即欧亚大陆南缘)碰撞对接(Yin and Harrison, 2000; Mo *et al.*, 2002; Wan *et al.*, 2002; 莫宣学等,

2003; Ding *et al.*, 2005),经历 20 Ma 时间,于 40 Ma 左右完成了两个大陆的碰撞,新特提斯洋完全消失,此后青藏高原进入后碰撞期(李国彪,2004; Mo *et al.*, 2006; 莫宣学等,2007c).

在上述过程中,青藏高原发生广泛而强烈的岩浆活动,形成了遍布高原各地种类繁多的火成岩(图 1),其中有些还携带有地幔和地壳岩石包体.火成岩的分布面积,仅在西藏境内就近 $3 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占西藏全区面积的 25%.这些火成岩和深源岩石包体,蕴含着丰富的关于青藏岩石圈的结构、组成及运动学、动力学信息,是探测高原深部理想的“探针”、“窗口”,以及青藏构造运动过程的记录.

印度—亚洲碰撞在西藏南部地区、特别是冈底斯带形成了主碰撞带,这里也是火成岩分布最集中、高原地壳最厚、碰撞过程记录较完全的地区.因此,本文在讨论高原岩石圈时将以藏南、特别是冈底斯地区作为解剖重点,必要时再联系到高原的其他地区.

1 青藏高原巨厚地壳的形成和演化

双倍于正常厚度的巨厚地壳是青藏高原最显著的特点之一.印度—亚洲主碰撞带的西藏南部,是青藏高原地壳最厚、增厚记录较完全的地区.本节拟以藏南地区为重点,分析青藏地壳增厚的过程与机制.

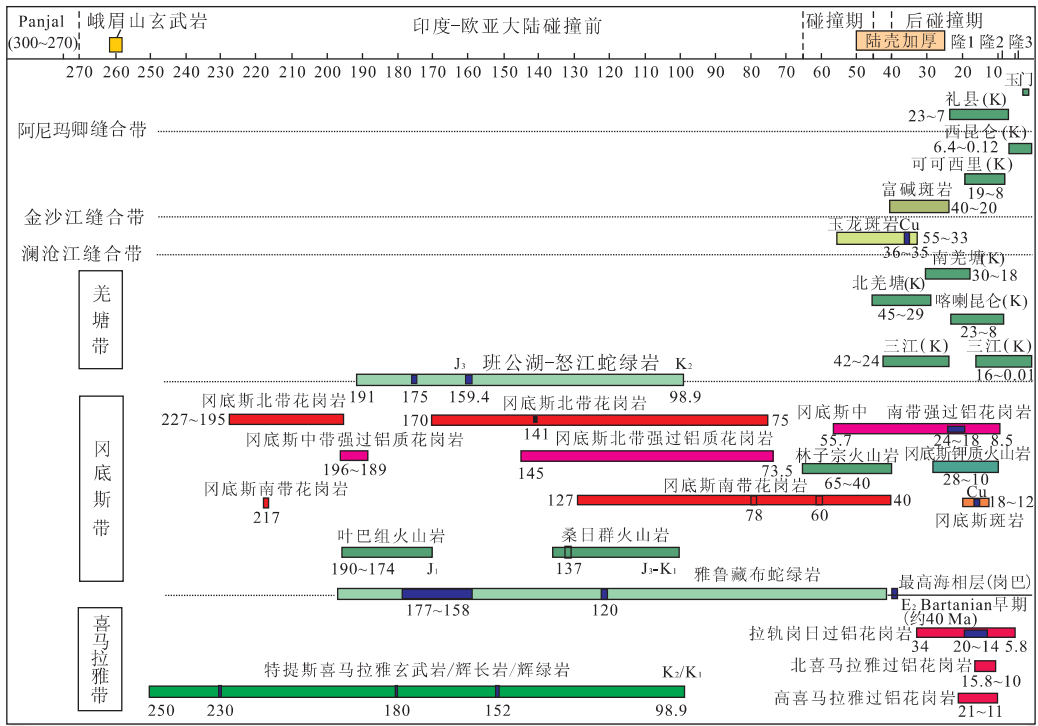


图 1 青藏高原岩浆岩时空分布简图

Fig. 1 Sketch map showing temporal and spatial distribution of igneous rocks in the Tibetan Plateau

纵坐标表示空间位置, 上下南; 横坐标表示时间, 数字单位为 Ma

1.1 巨厚地壳的地球物理证据

地震学资料(Kind *et al.*, 1996; Zhao *et al.*, 1997; Molnar *et al.*, 1998)表明, 西藏南部的地壳厚度为 65~75 km, 平均 70 km 左右, 在拉萨地体最大可达 80 km, 加厚的地壳具有低的地震波速($V_P = 6 \text{ km/s}$, $V_S = 3.45 \text{ km/s}$). 在西藏南部的厚地壳中还发现了一层约 20 km 厚的低速带($V_S = 3 \sim 3.1 \text{ km/s}$)和一层约 14~20 km 厚的高速下地壳($V_P = 7.2 \sim 7.5 \text{ km/s}$)(Kind *et al.*, 1996; Owens and Zandt, 1997). 上述低速层被解释为中地壳内的熔融层(Nelson *et al.*, 1996), 而高速层则被解释为深度大于 60 km、密度大于 3.0 g/cm^3 的高压含石榴石的镁铁质岩石(Owens and Zandt, 1997). 此外, 地球物理资料还表明, 拉萨地体沿东—西方向地壳厚度变化于 60~80 km 之间.

1.2 两类地壳的地球化学证据

根据冈底斯带花岗岩的 Nd-Sr 同位素组成(图 2), 可以识别出拉萨地体存在两类地壳(莫宣学等, 2005): (1) 初生地壳(juvenile crust): 主要分布在冈底斯带的南带. 这里的花岗岩具有正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(1.64~5.21), 年青的 Nd 模式年龄($T_{DM} < 500 \text{ Ma}$), 花岗岩的成分点在 Nd-Sr 同位素相关图

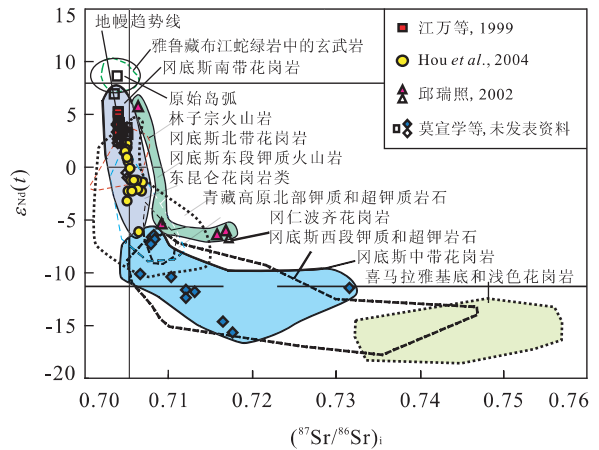


图 2 西藏冈底斯带花岗岩类岩石的 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 关系(引自莫宣学等, 2005, 图例见原图中的说明)

Fig. 2 Plots of $\epsilon_{Nd}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ from granitoids in the Gangdese, Tibet

图中实线代表不同地段花岗岩类岩石的同位素成分范围, 不同颜色的虚线代表不同火山岩的同位素成分范围

解中靠近地幔趋势线及 MORB 端元, 说明地幔物质在花岗岩形成中有重要的贡献. (2) 经过多次再循环形成的成熟的古元古代—中元古代地壳, 主要分布在冈底斯中带与部分北带. 这里的花岗岩类以 $\epsilon_{Nd}(t)$ 负值为特征(-5.3~-17.3), Nd 模式年龄 T_{DM} 有

两组值:1.2 Ga 及 2.0~2.5 Ga, 这表明, 这些地区具有古元古代—中元古代基底; 在花岗岩成因中, 地壳组分具有主要贡献. Chu *et al.* (2006) 最近报道了上述两类地区部分侏罗纪花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 冈底斯南带为 10.4~16.8, 中带与北带在 -3.9~-13.7 之间, Hf 模式年龄为 1.4~2.1 Ga, 与上述吻合. 笔者的研究已可勾画出两类地壳的分布概况: 再循环的古元古代—中元古代地壳, 大致分布在冈底斯带的中部, 可能代表拉萨地块的基底; 而初生地壳则主要分布在冈底斯带南、北两侧, 是由于俯冲和碰撞事件而增生在原拉萨地块之上的 (Zhu *et al.*, submitted to Nature).

1.3 初生陆壳的产生

研究表明, 林子宗火山岩下部的典中组(安山岩为主), 在常量元素和微量元素方面都与地壳的平均成分相似 (Mo *et al.*, 2008). 所以, 可以通过解剖林子宗火山岩, 特别是典中组的成因来了解藏南初生地壳的形成机制.

应用 Depaolo (1985)、Depaolo *et al.* (1992) 提出的 Nd 地壳指数 (NCI), 可以估算壳/幔对林子宗火山岩 (LVS) 的相对贡献. 计算结果表明, 整个林子宗火山岩系的 NCI 值为 0.16~0.47 (平均 0.30). 换言之, 从 Nd 同位素的角度来看, 林子宗火山岩及伴生的镁铁质岩墙是以地幔的贡献为主的, 可高达 70%~84% (Mo *et al.*, 2007a). 那么, 地幔物质是怎样作贡献的呢? Mo *et al.* (2008) 认为, 最可能的机制就是俯冲的新特提斯玄武质洋壳的部分熔融, 由此产生的熔体比幔源玄武质岩石偏酸性, 但仍然具有地幔同位素标志. 新特提斯洋板片的部分熔融产生了相当于典中组成分的安山质地壳; 而安山质地壳的部分熔融又产生了相当于林子宗火山岩系上部英安质—流纹质成分的地壳.

1.4 地壳加厚的时间

印度—亚洲碰撞以来高原地壳加厚的时间, 可以从很多方面加以限定, 碰撞—后碰撞岩浆岩是很有效的方法之一. 林子宗火山岩的典中组和年波组中缺少埃达克质岩石, 暗示西藏南部的地壳厚度在 50 Ma 之前没有超过 40 km (Rapp *et al.*, 1999). 根据火山岩中 K_2O 含量和 Rb/Sr 比值与地壳厚度之间的相关性 (Dickinson, 1971; Condie, 1982), 估算藏南地壳厚度在典中组火山岩喷发时 (64~60 Ma) 约为 35 km, 而年波组火山岩喷发时 (~54 Ma) 约为 37 km. 帕那组 (50~40 Ma) 中少量埃达克质岩石的出现, 则暗示岩浆源区中石榴石残留相的存在和地

壳加厚的开始. 应用 Condie (1982) 公式 $C/\text{km} = 18.2K60 + 0.45$ 也可以计算同碰撞期间林子宗火山活动不同阶段对应的地壳厚度. 计算结果, 在典中组 (65~60 Ma)、年波组 (60~50 Ma)、帕那组 (50~40 Ma) 火山活动期间 (Zhou *et al.*, 2004), 估算的地壳厚度分别为 35 km、37 km 和 78 km. 这一结果暗示, 在林子宗火山活动的早—中期, 藏南的平均地壳厚度还是正常的, 到 50 Ma 以后, 才有显著的加厚.

藏南中新世的后碰撞火成岩 (25~8 Ma 产生的埃达克质岩石、钾质—超钾质火山岩等), 也可以为地壳加厚时间提供约束. Chung *et al.* (2003) 和 Hou *et al.* (2004) 指出, 藏南中新世钾质埃达克质岩石来源于加厚地壳的下部, 因此可以推测, 在这些岩石开始形成 (约 25 Ma) 前, 地壳就已加厚到足以产生这种岩浆的厚度, 即 > 40 km (Rapp *et al.*, 1999). 根据 Wyllie (1977) 的实验结果, 同时期的藏南后碰撞安粗岩—钾质粗面岩岩浆也应起源于加厚地壳的下部 (约 50 km), 这也表明在 25 Ma 前, 藏南冈底斯的地壳已经显著增厚.

由上述多方面的限定, 碰撞以来藏南地壳加厚应主要发生在约 50~25 Ma 期间 (Mo *et al.*, 2007a).

1.5 地壳加厚的两种机制

什么机制造成了青藏高原的巨厚地壳? 这是国际上争论的重大问题. 多数涉及青藏高原演化的构造模型都认为, 新生代印度—欧亚大陆碰撞是造成陆壳增厚的主要动力, 而且认为构造作用在地壳加厚中起主导作用, 例如双层地壳叠置模型 (Argand, 1924; Powell, 1986); 碰撞挤压缩短增厚模型 (Dewey and Bird, 1970; Zhao and Morgen, 1987; England and Houseman, 1989) 等. 然而, 一系列证据证明, 地幔物质对青藏高原地壳增厚的贡献也是非常重要、不能忽视的 (Mo *et al.*, 2007a). 冈底斯带花岗岩中有大量暗色镁铁质微粒包体 (MME), 并且断续分布着一条镁铁质小岩体带. 暗色镁铁质微粒包体 (MME)、花岗质寄主岩与镁铁质岩的年龄基本相同, 为 50 ± 2 Ma. 南冈底斯带花岗岩类具有 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 正值 (1.64~5.21), 以及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值 (数据即将发表). 证明在此时期发生了大规模的幔源基性岩浆的底侵作用及其与壳源酸性岩浆的混合作用, 地幔物质以这样的方式进入地壳. 另外, 藏南后碰撞期埃达克岩也证明碰撞期地幔物质加入对下地壳的贡献 (Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004). 因此可以说, 青藏巨厚地壳是由于构造增厚及地幔物质注

入(通过岩浆作用)增厚两种机制形成的。

至于这两种增厚机制的贡献率,可作如下估计。如前所述,地球物理资料显示拉萨地块的平均厚度为 70 km,假设碰撞前的地壳为~35 km 厚,则碰撞以来地壳增厚了~35 km。又据前述地震学资料,在拉萨地块下存在一个厚约 14~20 km, $V_p=7.2$ km/s 的高速层(Owens and Zandt, 1997),可以认为是下地壳的表现。因此可以推断,碰撞以来地幔物质注入增厚约为 15 km,而构造增厚则应为 20 km 左右。

2 青藏岩石圈地幔的不均一性及演化机制的多样性

2.1 青藏岩石圈地幔的 3 种地球化学端元

青藏高原后碰撞幔源岩浆揭示,高原地幔在地球化学和岩石学上是不均一的。在其 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解中,青藏高原碰撞—后碰撞火山岩构成一条混合曲线,其一端是新特提斯洋中脊玄武岩(MORB),以雅鲁藏布蛇绿岩中的洋脊玄武岩为代表,另一端为以喜马拉雅地壳(HHC)为代表的近似的印度陆下岩石圈同位素成分。这些火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t)=5.95 \sim -17.42$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i=0.702\ 059 \sim 0.746\ 320$ 。在此图解中,同碰撞林子宗火山岩,及冈底斯东段、西秦岭、“三江”、高原北部各地的后碰撞火山岩,均局限在混合线左上部(主要在第一象限)较狭窄的范围内,具较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和较低的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值。相反,冈底斯西段的后碰撞火山岩则分布在非常宽的范围内, $\epsilon_{Nd}(t)=-5.97 \sim -17.42$, $^{87}Sr/^{86}Sr_i=0.705\ 858 \sim 0.746\ 320$,表明冈底斯西段后碰撞火山岩的岩浆源区存在大量 EM2、UC 端元(暗示大陆岩石圈地幔及地壳物质的卷入)。

由此可见,高原岩石圈地幔至少存在 3 种地球化学端元(Mo *et al.*, 2006): (1) 新特提斯大洋岩石圈端元,以雅鲁藏布蛇绿岩及其中的 MORB 为代表,以具有低 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 的 DUPAL 异常为特点,与现今印度洋地幔域相似(Zhang *et al.*, 2005); (2) 印度陆下岩石圈端元,以高的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值和低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为特征; (3) 新特提斯闭合前青藏原有的岩石圈端元,以高原北部后碰撞幔源火山岩为代表,它在 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解中位于第一象限、混合曲线的中上部,其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值处于新特提斯端元与印度陆下岩石圈端元之间。这 3 种地球化学端元以不同比例存在于高原的不同地

域,并发生着相互作用。

青藏高原岩石圈的不均一性,首先因为青藏高原是由许多地体拼合而成的,这些地体本来就有不同的岩石圈结构与组成;其次,还归因于高原演化过程中所经历的各种事件。因此,应当从历史发展的角度来认识现今青藏高原岩石圈的不均一性。

2.2 壳幔深源岩石包体及高压—超高压矿物对青藏壳幔组成的约束

由火成岩携带到地表的深源岩石包体,是下地壳及地幔的直接标本,对于认识青藏深部有非常重要的意义。尽管与中国东部相比,在青藏高原已发现的深源岩石样品仍然很少,但可喜的是这些发现在逐年增多。迄今为止,已经发现的上地幔岩石包体,在高原西隅西昆仑有碱玄岩中的尖晶石二辉橄榄岩包体(Luo *et al.*, 2001; 罗照华等, 2003),在高原北东隅的甘肃礼县有钾霞橄黄长岩中的石榴石二辉橄榄岩与石榴石二辉岩包体(Yu *et al.*, 2001),在西藏冈底斯带中南段超钾质火山岩中有含金云母的尖晶石二辉橄榄岩与二辉岩包体(赵志丹等, 2008),在羌塘有后碰撞火山岩中所含的幔源岩石捕虏体(Ding *et al.*, 2007),它们提供了关于青藏高原上地幔组成、热状态、交代作用等信息。在西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿体中,发现了越来越多的来自上/下地幔过渡带的标志矿物(杨经绥等, 2008)。在西藏羌塘钾玄质火山岩中发现的下地壳麻粒岩包体,表明该地区具有热而干的下地壳(Hacker *et al.*, 2000)。关于超高压带岩石,过去在国境线外的喜马拉雅地区曾有多处发现,最近在冈底斯弧背断隆带东段也发现了晚二叠世松多榴辉岩,有重要的构造意义(杨经绥等, 2006, 2007)。现在重要的是,对这些宝贵的信息进行综合的深入的研究。

2.3 青藏 3 种岩石圈结构类型的识别

根据大量地质及地球物理资料,可以识别出青藏高原现今存在 3 种岩石圈结构类型: 第 1 种,增厚的岩石圈; 第 2 种,减薄的岩石圈; 第 3 种,加厚—减薄—再加厚的岩石圈(邓晋福等, 1996; Mo and Deng, 1999; Deng *et al.*, 2001, 2004)。帕米尔构造结的岩石圈是现今青藏高原最厚的岩石圈。这里地震密集,震源剖面成 V 字形,最深的地震震源可达 300 km,显示一个巨厚的岩石圈根(滕吉文等, 1984; 宋仲和等, 1993)。东构造结的岩石圈结构也与此相似,但厚度小于西构造结。这类岩石圈是在强烈挤压条件下形成的。相反,地球物理探测资料表明(肖序常等, 1988; 吴功建等, 1991; 肖序常和李廷栋,

2000), 冈底斯—念青唐古拉的岩石圈厚度只有 120 km 左右, 其中有约 70 km 为地壳, 清楚地表明了软流圈的上隆. 相应地, 该地区只有浅源地震, 岩石圈 Q 值低, 在 20~100 km 深度内存在高电导体 (Wei *et al.*, 2001), 中—新生代以来岩浆活动及地热活动一直非常强烈. 羌塘地区的岩石圈又是另一种样子. 大地电磁测深资料表明其岩石圈厚度约 200 km 左右, 但该地区同样只有浅源地震, 电导率、地表热流值也比较高, 而 Q 值较低, 说明该地区岩石圈仍然处于较热的塑性状态 (Nelson *et al.*, 1996; Wei *et al.*, 2001). 这种情况很像由于软流圈上隆而减薄的岩石圈后来再因软流圈的下降而增厚, 厚度虽然增加了, 但热状态尚未来得及调整. 这 3 类岩石圈是否在时间上具有先后顺序, 尚无明确的证据, 需要在今后加以注意.

2.4 岩浆岩“探针”所启示的青藏高原演化动力学机制的多样性

地球动力学背景和机制是控制岩浆岩的岩石组合及其岩石学和地球化学特征的重要因素. 因此, 岩浆岩“探针”可以提供关于构造—岩浆演化的地球动力学背景和机制的重要信息. 在印度—亚洲碰撞以来产生的众多类型的岩浆岩中, 后碰撞钾质—超钾质火山岩类(由一套钾质—超钾质的超基性—基性—中性—酸性岩石构成), 是蕴含信息最广泛、对地球动力学背景和机制多样性反映最敏感的岩浆岩“探针”之一 (Zhao *et al.*, in press). 研究表明, 沿冈底斯带后碰撞钾质—超钾质火山活动, 可能与新特提斯洋俯冲板片在后碰撞时阶段脱离 (slab break-off) 及印度大陆岩石圈向青藏的持续俯冲作用有关, 在它的岩浆源区中可能存在着前述 3 种地球化学端元的相互作用, 同位素交换远未达到平衡. 冈底斯带西段、中段与东段的动力学机制也不相同. 西段 (87°E 以西) 后碰撞钾质—超钾质火山岩含有大量印度陆下岩石圈端元成分, 暗示印度大陆岩石圈俯冲到拉萨地块岩石圈之下; 中段 (87°E ~ 92°E) 则主要显示新特提斯端元与青藏原有岩石圈端元的混合, 暗示印度大陆岩石圈没有俯冲到拉萨地块岩石圈之下, 但可能发生了俯冲板片的脱离作用; 东段 (92°E 以东) 迄今尚未发现后碰撞钾质火山岩, 无法用火山岩来反演深部的情况. 但根据 Zhou and Murphy (2005) 提供的地震层析资料, 在 92°E 以东, 印度大陆岩石圈呈缓倾角俯冲于拉萨地块之下, 类似于 87°E 以西的情况. 因此, 侯增谦等 (2006) 认为, 由于印度大陆岩石圈俯冲角在走向上的改变, 很可

能在 87°E 和 92°E 附近形成板片撕裂窗 (broken slab window). 在青藏高原北部地区 (羌塘、可可西里等地区), 后碰撞钾质—超钾质火山活动, 可能与波状外向扩展式的软流圈上隆引起的减压熔融有关 (这种软流圈上隆, 可能导源于岩石圈拆沉作用, 也可能导源于侧向软流圈地幔流), 其岩浆源区可能是古特提斯闭合以前早已形成的羌塘地块陆下富集岩石圈, 同位素交换可能已经达到或接近平衡, 因而该地区各处火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成比较均一, 在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 图解中限制在一个较狭窄的范围内. 在高原北缘西昆仑、玉门等地区, 后碰撞钾质—超钾质火山岩的岩浆源区可能与高原腹地相似, 但其形成机制应与大规模走滑断层引起的减压熔融有关 (罗照华等, 2003). 高原东北角西秦岭地区新生代钾霞橄黄长岩—碳酸岩组合具有类似地幔柱岩浆岩的信息, 其源区和形成机制与高原其他地区可能均不相同 (喻学惠等, 2004).

3 青藏高原后碰撞火成岩的时空迁移及其可能的地球动力学含义

青藏高原后碰撞火成活动的一个引人注目的特点, 是具有明显而有规律的时空迁移 (Chung *et al.*, 1998, 2005; Wang *et al.*, 2001; Mo *et al.*, 2006). 同碰撞的林子宗火山活动在 65 Ma 左右始于冈底斯南部, 标志印度—亚洲大陆碰撞的开始. 于 45 Ma 左右火山活动向北迁移到羌塘—“三江”北段, 在那里开始了后碰撞火山活动; 然后自内向外迁移, 即, 北向可可西里, 南向冈底斯 (在冈底斯内部又自西向东), 东向西秦岭迁移; 最后 (6 Ma 以来), 再分别向高原的西北角 (西昆仑)、东北角 (礼县、玉门)、东南角 (腾冲、三江东南部) 方向迁移 (图 3).

第 1 阶段后碰撞火山岩 (45~25 Ma), 分布在羌塘和“三江”北—中段, 以高钾钙碱性系列的安粗岩—粗面岩组合为主, 在“三江”还伴有钾质高镁煌斑岩. 接着 (30 Ma 以后), 在羌塘鱼鳞山—火车头山一带产生了含白榴石的碱玄武岩、碱玄武质响岩和响岩.

第 2 阶段 (25~6 Ma), 钾质火山活动离开羌塘—“三江”北—中段沿着 3 个方向迁移, 向北产生了可可西里的安粗岩—粗面岩组合 (19~8 Ma), 向东产生了西秦岭的钾霞橄黄长岩—碳酸岩组合 (23~7 Ma), 向南和南东产生了冈底斯的多种火山岩组合 (25~10 Ma). 冈底斯带火山活动由西向东逐渐

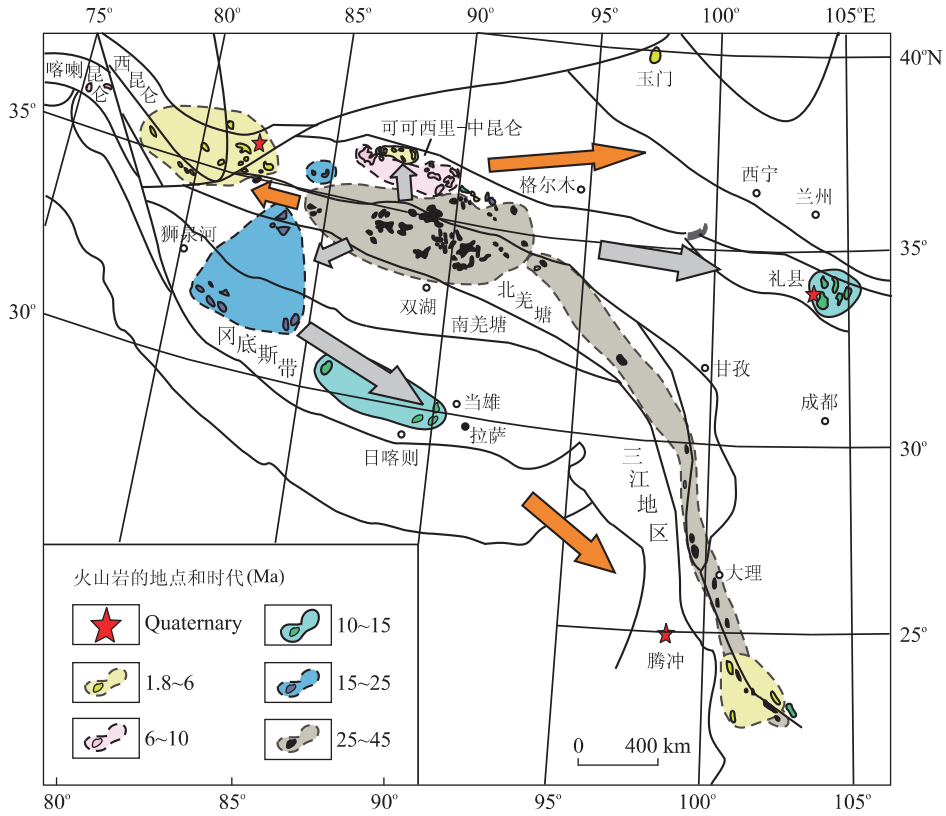


图 3 青藏高原新生代火山岩的时空迁移(引自 Mo *et al.*, 2006, 图例见原图中的说明, 图中的英文地名已译成中文)

Fig. 3 Sketch map showing migration paths of the Cenozoic volcanism with time in the Tibetan Plateau (after Mo *et al.*, 2006)
图中灰色箭头表示第二阶段(25~6 Ma)后碰撞火山活动随时间的迁移趋势; 橙色箭头表示第三阶段(6 Ma—近代)后碰撞火山活动的迁移趋势

年青, 自西段(狮泉河、邦巴、雄巴)的超钾质火山岩(25~20 Ma)与高钾钙碱性长英质火山岩(18~17 Ma)开始, 向东依次变为扎布耶茶卡、当日雍错、贡木淌、许如错等地的超钾质白榴石响岩、碱玄岩、安粗岩(18~14 Ma), 以及更东部(乌郁、麻江、羊应等)的高钾钙碱性粗面岩和钾质长英质火山岩。与钾质—超钾质火山活动大致同时, 在冈底斯带还发育了埃达克质斑岩侵入活动(25~12 Ma), 在冈底斯带及喜马拉雅带发育了强过铝质花岗岩侵入活动(24~18 Ma、20~10 Ma)。而在此阶段羌塘地区与“三江”北—中段火山活动稀少。

到第 3 阶段(<6 Ma), 钾质火山活动分别向高原的三隅迁移, 强度也明显减弱。向北西在西昆仑发育安粗岩—钾玄岩—响岩质碱玄岩组合(6.4~0.12 Ma, 以 3 Ma 为主); 向北东在礼县—宕昌和玉门产生少量钾质基性火山岩; 向南东在腾冲则发育高钾钙碱性系列的粗面玄武岩、钾玄岩、安粗岩、粗面岩、英安岩等(3.3~0.01 Ma)。

要弄清这种时空迁移的动力学含义, 还有许多研究工作要做。结合已有地球物理资料(Hirn *et*

al., 1995; Kind *et al.*, 2002; Liu and Cui, 2004; Unsworth *et al.*, 2005), 一种可能的解释是, 这种醒目的火山活动时空迁移, 可能暗示由印度和亚洲大陆板块的靠近和碰撞所诱发的深部物质(如中—下地壳、软流圈地幔物质)流动(Royden *et al.*, 1997; Flower *et al.*, 1998; Niu, 2005; Mo *et al.*, 2006; Searle, 2006; 许志琴等, 2007; 莫宣学等, 2007b)。

4 结语

综上所述, 根据岩石学和地球化学的研究, 结合其他学科的资料与成果, 可以看出青藏高原岩石圈具有以下显著特点: (1) 具有两类地壳、两种增厚机制。印度—亚洲主碰撞带具有青藏高原最厚的地壳, 由初生地壳及再循环地壳两类不同性质的地壳构成; 青藏巨厚地壳是由于构造增厚及地幔物质注入(通过岩浆作用)增厚两种机制形成的。碰撞以来藏南地壳加厚主要发生在约 50~25 Ma 期间; (2) 青藏岩石圈地幔具有 3 种地球化学端元。研究表明, 青藏岩石圈地幔在地球化学和岩石学上是不均一的,

至少存在 3 种地球化学端元:①新特提斯大洋岩石圈端元;②印度陆下岩石圈端元;③新特提斯闭合前青藏原有的岩石圈端元.这 3 种地球化学端元以不同比例存在于高原的不同地域,并发生着相互作用.在青藏高原还发现了一批壳幔深源岩石包体及高压—超高压矿物,对于认识青藏深部有重要的意义;(3)可以识别出青藏高原现今存在 3 种岩石圈结构类型:第 1 种,增厚的岩石圈(帕米尔型);第 2 种,减薄的岩石圈(冈底斯型);第 3 种,加厚—减薄—再加厚的岩石圈(羌塘型).这 3 类岩石圈是否在时间上具有先后顺序,尚无明确的证据,需要在今后加以注意;(4)岩浆岩“探针”启示,青藏高原演化动力学机制具多样性.岩浆岩“探针”可以提供关于构造—岩浆演化的地球动力学背景和机制的重要信息.研究表明,沿冈底斯带后碰撞钾质—超钾质火山活动,可能与新特提斯洋俯冲板片在后碰撞阶段的脱离及印度大陆岩石圈向青藏的持续俯冲作用有关,但西段、中段与东段的动力学机制不相同.在青藏高原北部地区(羌塘、可可西里等地区),后碰撞钾质—超钾质火山活动,可能与波状外向扩展式的软流圈上隆引起的减压熔融有关.在高原北缘西昆仑、玉门等地区,后碰撞钾质—超钾质火山岩的岩浆源区可能与高原腹地相似,但其形成机制可能为大规模走滑断层引起的减压熔融;(5)青藏高原后碰撞火成岩的时空迁移及其意义.青藏高原后碰撞火成活动的一个引人注目的特点,是具有明显而有规律的时空迁移.同碰撞的林子宗火山活动在 65 Ma 左右始于冈底斯南部,标志印度—亚洲大陆碰撞的开始.于 45 Ma 左右火山活动向北迁移到羌塘—“三江”北段,在那里开始了后碰撞火山活动;然后自内向外迁移,即北向可可西里,南向冈底斯(在冈底斯内部又自西向东),东向西秦岭迁移;最后(6 Ma 以来),再分别向高原的西北角(西昆仑)、东北角(礼县、玉门)、东南角(腾冲、三江东南部)方向迁移.结合已有地球物理资料,一种可能的解释是,它可能暗示由印度和亚洲大陆板块的靠近和碰撞所诱发的深部物质(如深部地壳、软流圈地幔物质)流动.笔者过去关于青藏岩石圈的研究,在时间上主要集中于新生代以来,在空间上主要集中于冈底斯带.今后要注意研究中生代和古生代,空间上要扩大研究范围.要更加注重将岩石学—地球化学的研究,与地质学、地球物理学更有效地结合.要加强岩石成因与构造条件之间内在联系的理论研究.

致谢:本文作者感谢周新华特约主编邀请我们为《地球科学——中国地质大学学报》岩石地球化学

专辑撰稿,并感谢所有在研究工作中给予过我们帮助的朋友们!

References

- Argand, E., 1924. La tectonique de l'Asie. 13th International Geology Congress, 7: 171.
- Chu, M. F., Chung, S. L., Song, B., et al., 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 34(9): 745—748.
- Chung, S. L., Chu, M. F., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68(3—4): 173—196.
- Chung, S. L., Liu, D. Y., Ji, J. Q., et al., 2003. Adakites from continental collision zone: Melting of thickened lower-crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021—1024.
- Chung, S. L., Lo, C. H., Lee, T. Y., et al., 1998. Disynchronous uplift of the Tibetan Plateau starting from 40 Ma ago. *Nature*, 349: 769—773.
- Condie, K. C., 1982. Plate tectonics and crustal evolution. Pergamon, New York, 1—310.
- Deng, J. F., Mo, X. X., Luo, Z. H., et al., 2001. Inhomogeneity of the lithosphere of Tibetan Plateau and implications for geodynamics. *Science in China (Series D)*, 44: 56—63.
- Deng, J. F., Mo, X. X., Zhao, H. L., et al., 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'Continental roots-plume tectonics'. *Earth Science Reviews*, 65(3—4): 223—275.
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1996. Continental roots-plume tectonics: A key to continental dynamics. Geological Publishing House, Beijing, 1—110 (in Chinese).
- Depaolo, D. J., 1985. Isotope studies of processes in mafic magma chambers: I. Kiglapait intrusion, Labrador. *Journal of Petrology*, 26(4): 925—951.
- Depaolo, D. J., Perry, F. V., Baldrige, W. S., 1992. Crustal versus mantle sources of granitic magmas: A two-parameter model based on Nd isotopic studies. *Earth Sciences*, 83: 439—446.
- Dewey, J. F., Bird, J. M., 1970. Mountain belts and new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 74(14): 2625—2467.
- Dickinson, W. R., 1971. Plate tectonics in geologic history. *Science*, 174: 107—113.
- Ding, L., Kapp, P., Wan, X., 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, South-Central Tibet. *Tectonics*, 24(3): 1—18.
- Ding, L., Kapp, P., Yue, Y., et al., 2007. Postcollisional

- calc-alkaline lavas and xenoliths from the southern Qiangtang Terrane, Central Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 254:28—38.
- England, P. C., Houseman, G. A., 1989. Extension during continental convergence with application to the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 94 (B12): 17561—17579.
- Flower, M. F. J., Tamaki, K., Hoang, N., 1998. Mantle extrusion; A model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific. In: Flower, M. F. J., et al., eds., Mantle plume and plate interactions in East Asia. Geodyn. Series 27. AGU. Washington, 67—88.
- Hacker, B. R., Gnos, E., Ratschbacher, L., et al., 2000. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet. *Science*, 287 (5462):2463—2466.
- Hirn, A., Jiang, M., Sapin, M., et al., 1995. Seismic anisotropy as an indicator of mantle flow beneath the Himalayas and Tibet. *Nature*, 375:571—574.
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Qu, X. M., et al., 2004. Origin of adakitic intrusives generated during Mid-Miocene east-west extension in South Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 220(1—2):139—155.
- Hou, Z. Q., Zhao, Z. D., Gao, Y. F., et al., 2006. Tearing and dischronal subduction of the Indian continental slab; Evidence from Cenozoic Gangdese volcano-magmatic rocks in South Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4):761—774 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W., Mo, X., Zhao, C. et al., 1999. Geochemical characteristics of granites and their micromafic enclaves in central Gangdese in Qinghai-Xizang (Tibet) plateau. *Acta Petrologica*, 15(1):89—97 (in Chinese with English abstract).
- Kind, R., Ni, J., Zhao, W., et al., 1996. Evidence from earthquake data for partially molten crustal layer in southern Tibet. *Science*, 274:1692—1694.
- Li, G. B., 2004. The Paleogene Microfossils and the evolution of basins in southern Tibet: [Dissertation]. China University of Geosciences, Beijing, 1—171 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. D., 2005. An introduction to geophysics. Shanghai Press of Science and Technology, Shanghai, 1—154 (in Chinese).
- Liu, M., Cui, X. J., Li, F. T., 2004. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China; A mantle dynamic link to the Indo-Asia collision? *Tectonophysics*, 393(1—4):29—42.
- Luo, Z. H., Bai, Z. D., Zhao, Z. D., et al., 2003. The origin and geological significance of the Cenozoic volcanic rocks on both southern and northern margins of the Tarim basin. *Earth Science Frontiers*, 10(3):179—189 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. H., Xiao, X. C., Cao, Y. Q., et al., 2001. The Cenozoic mantle magmatism and motion of lithosphere on the north margin of the Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 44:10—17.
- Mo, X. X., Deng, J. F., 1999. Three types of lithospheric structure in the Tibetan Plateau. *Terra Nostra*, 2:99—100.
- Mo, X. X., Dong, G. C., Zhao, Z. D., et al., 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).
- Mo, X. X., Hou, Z. Q., Niu, Y. L., et al., 2007a. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision; Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96(1—2):225—242.
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2007b. Migration of the Tibetan Cenozoic potassic volcanism and its transition to eastern basaltic province; Implications for crustal and mantle flow. *Geoscience*, 21(2):255—264 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Zhou, S., et al., 2007c. On the timing of India-Asian continental collision. *Geological Bulletin of China*, 26(10):1240—1245 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Niu, Y. L., Dong, G. C., et al., 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth; A case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet. *Chemical Geology*, 250(1—4):49—67.
- Mo, X. X., Pan, G. T., 2006. From the Tethys to the formation of the Tibetan Plateau; Constrained by tectono-magmatic events. *Earth Science Frontiers*, 13(6):43—51 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3):135—148 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2006. Petrology and geochemistry of postcollisional volcanic rocks from the Tibetan Plateau; Implications for lithosphere heterogeneity and collision-induced asthenospheric mantle flow. In: Dilek, Y., Pavlides, S., eds. Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia. *Geological Society of America Special Paper*, 409:507—530.
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Zhou, S., et al., 2002. Evidence for timing of the initiation of India-Asia collision from igneous rocks in Tibet. *Eos Trans. AGU*, 83(47), F1003.
- Molnar, P., Houseman, G., Clinton, C., 1998. Rayleigh-Tay-

- lor instability and convective thinning of mechanically thickened lithosphere; Effects of non-linear viscosity decreasing exponentially with depth and of horizontal shortening of the layer. *Geophysical Journal International*, 133(3): 568—584.
- Nelson, K. D., Zhao, W. J., Brown, L. D., et al., 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet; Synthesis of project INDEPTH results. *Science*, 274: 1684—1688.
- Owens, T. J., Zandt, G., 1997. Implications of crustal property variations for models of Tibetan Plateau evolution. *Nature*, 387: 37—43.
- Powell, C. M., 1986. Continental underplating model for the rise of the Tibetan Plateau. *Earth Planetary Science Letter*, 81(1): 79—94.
- Qiu, R. Z., 2002. Igneous rocks in the western Tibetan plateau and Tectonic evolution of the Neo-Tethys [Dissertation]. China University of Geosciences, Beijing, 1—99 (in Chinese).
- Rapp, P. R., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge; Experimental constraints at 3. 8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335—356.
- Royden, L. H., Burchfiel, B. C., King, R. W., et al., 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276: 788—790.
- Searle, M. P., 2006. Crustal flow in Tibet; Geophysical evidence for the physical state of Tibetan lithosphere, and inferred patterns of active flow. In: Law, R. D., Searle, M. P., Godin, L., eds., Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones. Geological Society of London Spec. Publ., London, 39—70.
- Song, Z. H., Chen, G. Y., An, C. Q., et al., 1993. Three dimensional velocity structure of the crust and upper mantle of Chinese continent and adjacent submarine areas. *Science in China (Series B)*, 23(2): 180—188 (in Chinese).
- Teng, J. W., Sun, K. Z., Wei, S. Y., et al., 1984. Characteristics of earthquake activities in the Tibetan Plateau and peripheral regions. *Himalayan Geology II*, 311—329 (in Chinese with English abstract).
- Unsworth, M. J., Jones, A. G., Wei, W., et al., 2005. Crustal rheology of the Himalaya and southern Tibet inferred from magnetotelluric data. *Nature*, 438: 78—81.
- Wan, X. Q., Jansa, L. F., Sarti, M., 2002. Cretaceous and Paleogene boundary strata in southern Tibet and their implication for India-Asia collision. *Lethaia*, 35(2): 131—146.
- Wang, J. H., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(1—2): 123—133.
- Wei, W. B., Unsworth, M., Jones, A., et al., 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 292: 716—718.
- Wu, G. J., Gao, R., Yu, Q. F., et al., 1991. Integrated investigations of the Qinghai-Tibet Plateau along the Yardong-Golmud geotranssect. *Acta Geophysica Sinica*, 34: 555—562 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie, P. J., 1977. Crustal anatexis; An experimental review. *Tectonophysics*, 43(1—2): 41—71.
- Xiao, X. C., Li, T. D., 2000. Mechanism of tectonic evolution and uplift of the Tibetan Plateau. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou, 1—313 (in Chinese).
- Xiao, X. C., Li, T. D., Li, G. C., et al., 1988. Tectonic evolution of the Himalayan lithosphere general review. Geological Publishing House, Beijing, 1—194 (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2007. An orogenic plateau; Mechanism for collage of terranes, collisional orogeny and uplift of the Tibetan Plateau. Geological Publishing House, Beijing, 1—458 (in Chinese).
- Yang, J. S., Bai, W. J., Fang, Q. S., et al., 2008. Ultrahigh-pressure minerals and new minerals from the Luobusa ophiolitic chromitites in Tibet; A review. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(3): 263—274 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Geng, Q. R., et al., 2006. A possible new HP-UHP metamorphic belt in China; A discovery of eclogite in Lhasa terrane of the Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 3—12 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Li, T. F., et al., 2007. Oceanic-plate-subduction-type of eclogites in Lhasa terrane of the Tibetan Plateau; The remains of Paleo-Tethyan oceanic basin? *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1277—1287 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibet. *Orogen Annu. Rev. Earth Planet Sci*, 28: 211—280.
- Yu, X., Mo, X., Liao, Z., et al., 2001. The temperature and pressure condition of garnet-lherzolite and garnet-websterite from west Qinling, China. *Science in China (Ser. D)*, 44(Suppl.): 155—161.
- Yu, X. H., Zhao, Z. D., Mo, X. X., et al., 2004. Trace elements, REE and Sr, Nd, Pb isotopic geochemistry of Cenozoic kamafugite and carbonatite from West Qinling, Gansu Province; Implication of plume-lithosphere interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 483—494 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Mahoney, J. J., Mo, X. X., et al., 2005. Evidence

for a widespread Tethyan upper mantle with Indian-Ocean-type isotopic characteristics. *Journal of Petrology*, 46(4): 829—858.

Zhao, W. L., Morgen, W., 1987. Injection of Indian crust into Tibetan lower crust: A two-dimensional finite element model study. *Tectonics*, 6(4): 489—504.

Zhao, W. J., Nelson, K. D., Meissner, R., 1997. Advances of INDEPTH-A deep profiling study in Tibet and the Himalayas. *Episodes* 20(4): 266—272.

Zhao, Z. D., Mo, X. X., Dilek, Y., et al., Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the postcollisional ultra-potassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction underneath southern Tibet. *Lithos* (in press).

Zhao, Z. D., Mo, X. X., Sun, C. G., et al., 2008. Mantle xenoliths in southern Tibet: Geochemistry and constraints for the nature of the mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 193—202 (in Chinese with English abstract).

Zhou, H. W., Murphy, M. A., 2005. Tomographic evidence for whole scale underthrusting of India beneath the entire Tibetan Plateau. *J. Asian Earth Sci.*, 25(3): 445—457.

Zhou, S., Mo, X. X., Dong, G. C., et al., 2004. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou basin, Tibet, China, and their geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1970—1979.

Zhu, D. C., Mo, X. X., Niu, Y. L., Zhao, Z. D. et al., Zircon U-Pb dating and Hf isotopic investigation on the Early Cretaceous igneous rocks along a west-east traverse across the central Lhasa Terrane, Tibet (submitted to *Chemical Geology*).

Zhu, D. C., Mo, X. X., Niu, Y. L., Zhao, Z. D. et al., The lithospheric architecture of the Lhasa Terrane: Revelation and geodynamic significance (submitted to *Nature*).

附中文参考文献

邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等, 1996. 大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1—110.

侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 等, 2006. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山—岩浆作用证据. *岩石学报*, 22(4): 761—774.

江万, 莫宣学, 赵崇贺, 等, 1999. 青藏高原冈底斯带中段花岗岩及其中铁镁质微粒包体地球化学特征. *岩石学报*, 15(1): 89—97.

李国彪, 2004. 西藏南部古近纪微体古生物及盆地演化特征 [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 1—171.

刘光鼎, 2005. 地球物理引论. 上海: 上海科学技术出版社, 1—154.

罗照华, 白志达, 赵志丹, 等, 2003. 塔里木盆地南北缘新生代火山岩成因及其地质意义. *地学前缘*, 10(3): 179—189.

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(3): 135—148.

莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等, 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.

莫宣学, 潘桂棠, 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造—岩浆事件的约束. *地学前缘*, 13(6): 43—51.

莫宣学, 赵志丹, 周肃, 等, 2007c. 印度—亚洲大陆碰撞的时限. *地质通报*, 26(10): 1240—1245.

莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2007b. 青藏新生代钾质火山活动的时空迁移及向东部玄武岩省的过渡: 壳幔深部物质流的暗示. *现代地质*, 21(2): 255—264.

邱瑞照, 2002. 青藏高原西部火成岩与新特提斯构造演化 [博士学位论文]. 中国地质大学(北京), 1—99.

宋仲和, 陈国英, 安昌强, 等, 1993. 中国大陆及其海域地壳—上地幔三维速度结构. *中国科学(B辑)*, 3(2): 180—188.

滕吉文, 孙克忠, 魏斯禹, 等, 1984. 中国青藏高原及其边缘地带的地震活动特征. *喜马拉雅地质 II*, 311—329.

吴功建, 高锐, 余钦范, 等, 1991. 青藏高原亚东—格尔木断面综合地球物理调查研究. *地球物理学报*, 34(5): 552—562.

肖序常, 李廷栋, 2000. 青藏高原的构造演化与隆升机制总论. 广州: 广东科学技术出版社, 1—313.

肖序常, 李廷栋, 李光岑, 等, 1988. 喜马拉雅岩石圈构造演化. 北京: 地质出版社, 1—194.

许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2007. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制. 北京: 地质出版社, 1—458.

杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等, 2006. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带. *地质学报*, 80(12): 3—12.

杨经绥, 许志琴, 李天福, 等, 2007. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩: 古特提斯洋盆的残留? *地质通报*, 26(10): 1277—1287.

杨经绥, 白文吉, 方青松, 等, 2008. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述). *地球学报*, 29(3): 263—274.

喻学惠, 赵志丹, 莫宣学, 等, 2004. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩和碳酸岩的微量、稀土和 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学: 地幔柱—岩石圈交换的证据. *岩石学报*, 20(3): 483—494.

赵志丹, 莫宣学, 孙晨光, 等, 2008. 青藏高原南部地幔包体的发现及其意义. *岩石学报*, 24(2): 193—202.