https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.160



从岩浆岩看青藏高原地壳的生长演化

莫盲学

中国地质大学地球科学与资源学院,北京100083

摘 要:青藏巨厚陆壳的性质和形成机制,是重要的科学问题.通过对青藏岩浆岩,特别是其Nd、Hf同位素的研究,证明青藏高原并存着新生地壳和再循环地壳两类地壳.地壳的结构和属性对成矿矿种、矿床类型和分布有重要的控制作用.青藏巨厚地壳是由两种机制(构造加厚;地幔物质通过岩浆作用注入加厚)共同造成的,二者贡献比例约6:4.地壳增厚主要发生在50~25 Ma期间.大陆碰撞带是造成地壳净生长的重要构造部位.

关键词:青藏高原两类地壳;新生地壳;再循环地壳;青藏地壳增厚机制;地壳增厚的时间;岩石学.

中图分类号: P313.2 文章编号: 1000-2383(2020)07-2245-13

收稿日期:2020-05-10

Growth and Evolution of Crust of Tibetan Plateau from Perspective of Magmatic Rocks

Mo Xuanxue

School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The nature of the Tibetan extremely thick crust and its thickening mechanism are important scientific problems. According to the investigation of igneous rocks, especially Nd and Hf isotope studies, it proved the coexistence of two types of crust (juvenile and reworked) in the Tibetan Plateau, which controls the distribution of different types of ore deposits. The Tibetan crustal thickening was made by both tectonic compression and the input of mantle components carried by magmatism. The timing of the Tibetan crustal thickening was likely in the period of 50-25 Ma. Continental collision zones may be sites of net crustal growth through process of syncollisional magmatism.

Key words: two types of Tibetan crust; juvenile crust; reworked crust; thickening mechanism of crust; timing of Tibetan crustal thickening; petrology.

本文拟就青藏高原地壳构成与演化中的几个问题,进行一些讨论.在李廷栋院士九十华诞之际, 谨献此文表示衷心的祝贺.

青藏高原是世界上最高、最大的高原,具有双倍于正常陆壳厚度的巨厚地壳,是全球最典型的碰撞造山带,由印度大陆与亚洲大陆在65 Ma前后开始的碰撞形成(Yin and Harrison 2000; Mo et al.,

2002; 莫宣学等,2003,2009). 拉萨地块作为从冈瓦纳大陆裂离出来的微陆块,强烈地卷入中生代增生造山和新生代碰撞造山过程,成为青藏高原碰撞造山带的核心(潘桂棠等,2006; 侯增谦和王涛,2018). 青藏高原各类火山岩与侵入岩出露面积约为30万km²左右,拉萨地块(冈底斯带)是青藏高原岩浆岩最发育的地区,也是青藏高原地壳最厚、发

基金项目:国家自然科学基金委重点项目(No. 40830317);国家重大基础研究(973计划)项目(Nos. 2002CB4126, G1998040800);自然资源部重大项目(No. 9501101)

作者简介:真宣学(1938-),男,教授,中国科学院院士,主要研究方向为岩浆-构造-成矿. E-mail;moxx@cugb.edu.cn

引用格式: 莫宣学, 2020. 从岩浆岩看青藏高原地壳的生长演化. 地球科学, 45(7):2245-2257.

育最完全的地区,是研究青藏高原地壳最理想的地方(Mo et al., 2006).

特提斯是青藏高原的前身. 从特提斯到青藏高 原的形成演化这个漫长的地史时期中,各种重大地 质事件都留下了自己的记录.其中,有两个重大事 件对拉萨地块(冈底斯带)的影响最大.一是班公 湖一怒江洋的闭合和羌塘地块一拉萨地块碰撞事 件,大致发生在110~100 Ma,同时在冈底斯带中北 部于发生了岩浆大爆发和镁铁质岩浆活动, Zhu et al.(2009,2011)将其动力学机制归因于向南俯冲的 班公湖一怒江洋壳岩石圈的断离,它导致了俯冲终 止和羌塘地块一拉萨地块碰撞. 另一个是印度河一 雅鲁藏布洋的闭合和印度一亚洲大陆碰撞事件 (Mo et al., 2002; 莫宣学等, 2003). 产生了广泛分 布在冈底斯南部的同碰撞期岩浆岩:林子宗火山岩 系(约65~40 Ma)、冈底斯花岗岩类(约49~51 Ma, 高峰期在50 Ma),及后碰撞期岩浆岩(在青藏高原 为 40 Ma~全新世,在冈底斯带为 25~8 Ma),主要 有埃达克质斑岩、钾质一超钾质火山岩、淡色花岗 岩等, 岩浆活动在拉萨地块北部和南部分别出现了 113 Ma和52 Ma两个强度峰值.由于这两次大陆碰 撞事件,原来的洋一陆构造体制转化为大陆体制, 冈底斯带(拉萨地块)岩石圈转化为大陆岩石圈.上 述过程,对青藏高原地壳性质及生长演化,无疑起 到重要作用.

1 青藏高原的两类陆壳

青藏高原大陆地壳是什么性质的地壳?青藏高原双倍于正常陆壳厚度的巨厚地壳是怎样形成的? 是地学家们关注的重要科学问题.

首先,青藏高原大陆地壳是什么性质的地壳,是新生地壳还是再循环地壳,还是两类地壳并存?新生地壳/初生地壳(juvenile crust)是指从地幔分异出来不久的年青的不成熟的地壳,如在中亚造山带(Jahn et al., 2000)、美国西部中生代 Sierra Navada与半岛山脉岩基带(DePaolo,1981)、加拿大科迪勒拉造山带(Samson et al., 1989)所见. 再循环地壳(reworked crust)是指在地壳内多次循环改造形成的成熟的古老地壳,典型的如古老克拉通的地壳.

岩浆岩是探测和认识地球壳幔深部的"探针"和"窗口"(邓晋福等,1996,2004;Deng et al.,2004; 莫宣学,2011,2019). 莫宣学等(2005)、Zhu et al. (2009,2011)和 Hou(2015)等研究团队的先后工作,

证明青藏高原(特别是拉萨地块)并存着新生地壳和再循环地壳两类陆壳.

1.1 2005年及其以前的工作

莫宣学等(2005)将当时能够收集到的冈底斯 带各部分花岗岩类与火山岩加上东昆仑、羌塘岩浆 岩的Nd-Sr同位素数据综合在一起,研究显示(见图 1),南冈底斯带的花岗岩类、相伴的辉长岩一辉绿 岩一辉石岩小岩体带和林子宗火山岩系(特别是底 部典中组),主体具有正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值,它们的 ${}^{87}Sr/{}^{86}Sr(i)$ 初始值都在0.7040~0.7060之间,图中同位素成分 点靠近地幔趋势线及MORB端元,说明在这些岩石 成因中地幔物质有重要的贡献.它们的Nd模式年 龄 T_{DM} 也很年青(<500 Ma). 但中冈底斯带花岗岩 类与火山岩以负 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为特征($-5.3\sim-17.3$), Nd 模式年龄 T_{DM}^{C} 有两组值 1.0~2.0 Ga 及 2.0~2.5 Ga,表明该地区的地壳具有古元古代一中元古代基 底,在其花岗类岩石的成因中,地壳组分具有主要 贡献.这时,北冈底斯带花岗岩类岩石的Nd,Sr同 位素数据很少,还难以判断其地壳性质.但已看出, 拉萨地块(冈底斯带)存在着两类地壳,一类是年青 的新生(初生)地壳,分布在南带;另一类是经多次 循环改造的成熟的古元古代一中元古代地壳,分布 在中带.正是从这两类地壳的产生了拉萨地块的各 种岩浆岩,其中蕴含着两类地壳的信息.

这一发现,使我们受到鼓舞,产生了系统研究整个拉萨地块(冈底斯带)地壳的想法.

1.2 对冈底斯带(拉萨地块)地壳的进一步系统研究

在国家自然科学基金委重点项目(No. 40830317)的资助和支持下,对拉萨地块(冈底斯带)进行了进一步研究.研究团队在1100km×300km面积内,沿着4条贯穿整个拉萨地块(冈底斯带)的南北向剖面,采集了中生代一古近纪(210~40Ma)各时段的火山岩与花岗岩类岩石样品(图2),测试获得992个原位锆石U-Pb年龄和836个锆石Hf同位素数据.所研究的岩石主要为长英质岩浆岩,从亚铝质到过铝质,从中一高钾钙碱性到钾玄岩系列都有.可分为6个年龄组:

 $T_3 \sim J_1(210 \sim 175 \text{ Ma})$: T_3 火成岩的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 在南拉萨地块为正值到小的负值($-5.0 \sim +16.2$),而在中拉萨地块为负值($-17.3 \sim -2.5$); J_1 的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 在南拉萨地块为($-4.7 \sim +16.7$),在中拉萨地块为($-22.0 \sim +2.0$).

 J_3 (160~145 Ma):中拉萨地块锆石 ε_{Hf}(t)主要

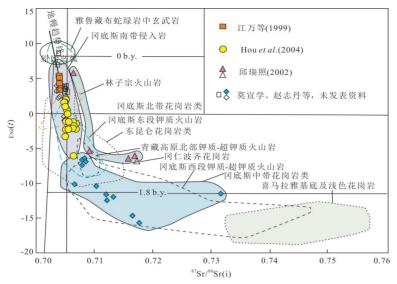


图 1 冈底斯带花岗岩及其他岩浆岩的 $\epsilon_{Nd}(t)^{-87}$ Sr/ 86 Sr(i)图

Fig.1 Plot of $\varepsilon_{Nd}(t)$ versus 87 Sr/ 86 Sr(i) of granitoid and other igneous rocks in the Gangdese, Tibet 摘引自莫宣学等(2005)

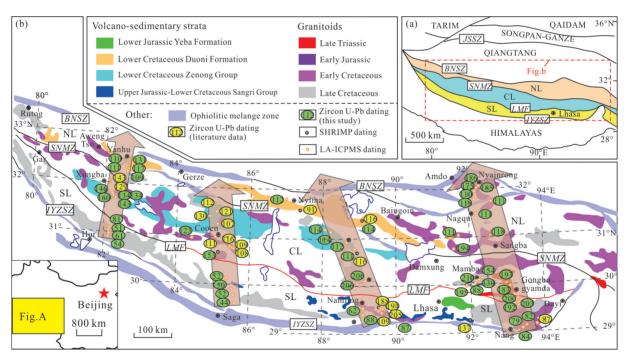


图 2 拉萨地块 4条南北向取样路线位置和中生代一古近纪岩浆岩锆石 U-Pb 年龄分布

Fig.2 Sketch map showing the location of four north-south sampling traverses and isotope ages by situ zircon U-Pb dating of Mesozoic-Early Tertiary magmatic rocks in the Lhasa block

摘引自 Zhu et al.(2011)

为负值 $(-16.7\sim+1.4)$,南拉萨地块锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为正值.

 $K_1(145\sim118 \text{ Ma})$:主要分布在拉萨地块的北带和中带,中拉萨地块锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为负值($-20.6\sim-1.6$),北拉萨地块主要为正值($-6.0\sim+18.8$);

K₁(113±5 Ma):主要分布在拉萨地块的北带和

中带,中拉萨地块锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为负值($-14.4\sim-4.1$), 北拉萨地块自西到东锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值变化:从($+4.7\sim+$ 18.4)到($-1.5\sim+10.1$)再到($-10.0\sim+0.9$);

 $K_2(90\sim80 \text{ Ma})$:南拉萨地块(主要为闪长岩和花岗闪长岩)锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为高的正值(+9.6~+14.9),但其东北霍尔强过铝流纹岩的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值

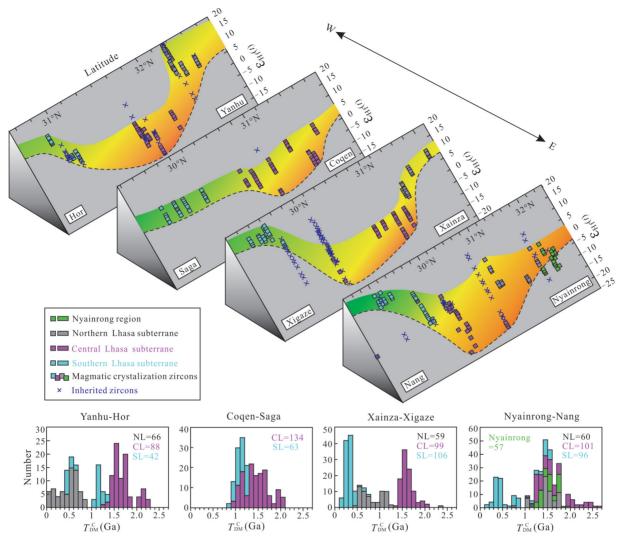


图 3 拉萨地块中生代一古近纪岩浆岩锆石 $\epsilon_{\rm H}(t)$ 值的范围与空间分布及 ${\rm Hf}$ 地壳模式年龄 $(T_{
m DM}{}^{
m C})$ 频率

Fig. 3 The range and spatial distribution of $\varepsilon_{HI}(t)$ values, and the histograms of Hf crustal model ages (T_{DM}^{C}) of zircons from the Mesozoic – Early Tertiary magmatic rocks in the Lhasa block

摘引自 Zhu et al.(2011)

为 $(-4.0\sim+0.5)$,与中拉萨地块的花岗岩类相似 $(-3.8\sim-1.7)$;

 $E_1 \sim E_2$ (65~44 Ma): 这个时期的岩浆岩只出现在南拉萨地块,岩石类型比较多样,其锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为高的正值到小的负值 ($-2.4 \sim +10.5$).

由此获得了一些重要认识(Mo et al., 2008; Zhu et al., 2008, 2009, 2011; Niu et al., 2013):(1)北拉萨地块和南拉萨地块岩浆岩的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 主要为正值, Hf模式年龄($T_{DM}{}^{C}$)北拉萨地块为显生宙一中元古代, 南拉萨地块为显生宙; 而中拉萨地块岩浆岩的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 主要为负值, Hf模式年龄($T_{DM}{}^{C}$)为古元古代一太古宙. 这说明北部和南部拉萨地块的地壳主要为年青的新生地壳, 而中拉萨地块的地壳为再循环的古老成熟地壳(图 3).(2)拉萨地块是否

有前寒武纪基底,是一个长期未能定论的问题.过去只在安多附近发现零星的可能代表基底的片麻岩(Guynn et al.,2006),广大地区只能靠地球物理或沉积碎屑岩全岩 Nd 同位素资料推测. 尽管面波层析成像显示在拉萨地块北纬 30° 中部地带岩石圈增厚,其岩石圈结构有些类似太古宙和元古宙克拉通(McKenzie and Priestley, 2008),但由于没有年代信息,所以还是难于对拉萨地块的岩石圈结构和地壳的性质和演化历史做出确切的判断. 锆石 Hf 同位素提供了解决此问题的强有力工具(Griffin et al., 2002; Kemp et al., 2006; Flowerdew et al., 2009). 图 3 显示,沿着 4 条南北向剖面从南、北拉萨地块向中拉萨地块,岩浆岩样品锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 都从很高的正值趋向于变为很大的负值;而且,中拉萨地块

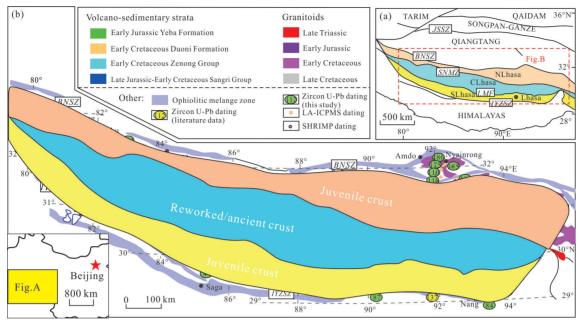


图 4 拉萨地块两类地壳(新生地壳与再循环地壳)分布简图

Fig.4 Sketch map showing the distribution of two types of crust (juvenile and reworked crust) of the Lhasa block 据 Zhu *et al.*(2011)

的岩浆岩有~2877 Ma的太古宙继承锆石及古元古 代-太古宙 Hf 地壳模式年龄. 这说明中拉萨地块 存在着古元古代到太古宙地壳基底. Zhu et al. (2011)推断,中拉萨地块是一个前中生代的继承性 古微陆块,在显生宙特提斯洋盆中漂移到最终碰撞 的过程中,以它为核心在南、北两侧增生了新生地 壳 .(3) Mo et al.(2008) 和 Niu et al.(2013) 通过对青 藏同碰撞的长英质岩浆岩包括西藏林子宗火山岩 系和冈底斯花岗岩基的研究发现,它们的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 均 为正值,表明具有强烈的地幔同位素信息,还发现 这些岩石在成份上与模式大陆壳 (Rudnick and Fountain, 1995; Rudnick and Gao, 2003) 非常相 似.同碰撞的长英质岩浆岩的岩石学和地球化学特 征,与洋壳在角闪岩相条件下部分熔融的产物高度 一致,说明在洋壳俯冲增生一大陆碰撞过程中,残 余俯冲洋壳的部分熔融产生了这些长英质岩石的 安山质母岩浆熔体,它带有继承的地幔同位素标 记. 由此可以认为,洋壳俯冲增生一大陆碰撞条件 下的构造岩浆作用产生和保存了新生地壳,维持了 大陆地壳的生长;大陆碰撞带可能是造成地壳净生 长(net crust growth)的重要构造部位.

1.3 Hf 同位素填图及岩石圈架构对矿产类型的控制

侯增谦及其科研群体(Hou et al., 2013, 2015; 侯增谦和王涛, 2018)利用采自拉萨地体的230套中新生代岩浆岩样品(215~12 Ma)及其4672套锆石

U-Pb年龄和Hf同位素数据,进行了拉萨地体Hf同位素填图.这些数据点来自花岗岩类、长英质火山岩和埃达克质含矿斑岩等3类岩石.根据这些岩浆岩的锆石Hf同位素数据及计算得到的地壳模式年龄 $(T_{\rm DM}{}^{\rm C})$,绘制了岩浆岩锆石 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 和 $T_{\rm DM}{}^{\rm C}$ 等值线图,直观地反映了岩浆岩不同类型地壳源岩的空间分布和模式年龄空间变化(图 5a,5b).

表明 3 个不同的锆石 $\varepsilon_{HI}(t)$ 和 Hf 地壳模式年龄 分区与拉萨地块的北、中、南 3 个地区在空间上吻合,它们分别具有不同的地壳类型(新生地壳与再循环地壳),进而控制了矿种和矿床类型的不同

Hf同位素填图显示,拉萨地块的 3个部分分别具有不同的岩浆岩锆石 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值和 $T_{\rm DM}{}^{\rm C}$ 值. 南拉萨和北拉萨地块绝大部分具有高的锆石 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 正值 $(0\sim+20)$ 和较年青的 $T_{\rm DM}{}^{\rm C}$ 值(北拉萨地块<1.2 Ga,南拉萨地块<500 Ma);中拉萨地块主体具有大的 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 负值($-22\sim+5$)和古老的 $T_{\rm DM}{}^{\rm C}(1.4\sim2.4$ Ga)值. 这证明,南北拉萨地块为新生地壳块体,中拉萨为古老的、局部被改造地壳块体.

Hou et al. (2015)还将 Hf 同位素填图结果与地球物理探测相结合推断,中拉萨地体地壳厚约 70 km,主体为锆石 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ <-10, $T_{\rm DM}{}^{\rm C}$ >1.3 Ga 的局部强烈改造古老地壳;南拉萨地体壳厚 75 km,北拉萨地体壳厚 65 km,主体为新生的下地壳,其锆石 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 为+5~+18, $T_{\rm DM}{}^{\rm C}$ 值为 0.2~0.8 Ga. 总之,基于

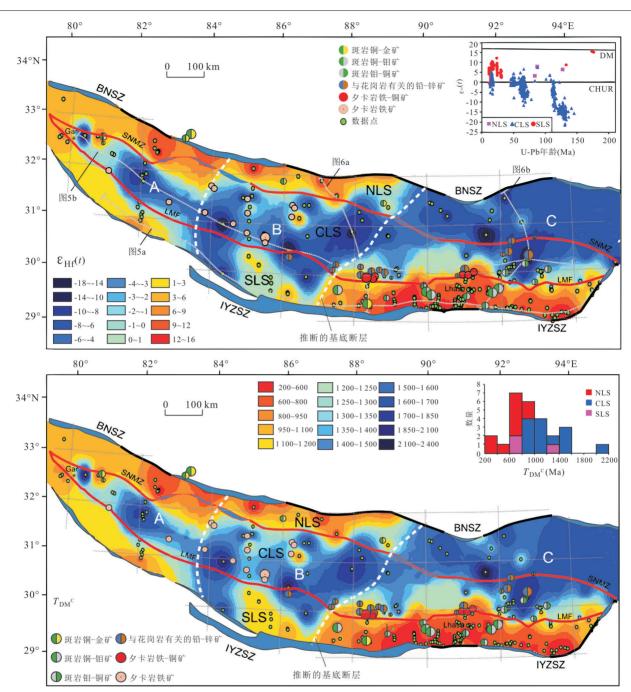


图 5 (a)拉萨地块中生代一新生代花岗岩类与长英质火山岩锆石 ε_H(t)等值线空间变化图; (b) Hf地壳模式年龄(T_{DM}^c)等值线图 Fig. 5 (a) Hf isotope contour map showing the spatial variation of zircon ε_H(t) values; (b) contour map of the zircon Hf crustal model ages (T_{DM}^c) for the Mesozoic-Cenozoic granitoid rocks and felsic volcanic rocks in the Lhasa block 摘引自 Hou et al. (2015)

锆石Hf同位素填图的三维岩石圈结构显示:拉萨地 块中部为局部被改造的古老地壳块体,两侧为大量 幔源物质卷入的新生地壳块体,它们分别被两条 NS向的岩石圈薄弱带和两条EW向的边界断裂切 割呈棋盘格状.

尤其值得提到的是,侯增谦及其科研群体(Hou et al.,2015;侯增谦和王涛,2018)创新性地把

通过Hf同位素填图探测地球深部物质三维架构,与 揭示区域成矿规律、成矿潜力的定量评价及区域成 矿预测紧密结合起来,作为今后区域成矿规律研究 研究的一个重要方向.

他们系统研究了拉萨地块的岩石圈和地壳结构与成矿的关系,发现拉萨地块的上部岩石圈结构及物质组成与冈底斯成矿带及主要矿床空间分布

显示清楚的对应性. 所有的斑岩铜矿严格地限制于南、北拉萨地块之内,与新生地壳分布区相对应,夕卡岩型 Fe(-Cu)和 Pb-Zn 矿床及其成矿带严格地限定在中拉萨地体及其边界带,与古老地壳和再造地壳相对应(见图 5).

保罗纪斑岩 Cu-Au 矿床(如雄村)和中新世斑岩 Cu-Mo 矿床(如驱龙、甲玛、厅宫等)全部位于南拉萨地块内的高 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 、低 $T_{DM}{}^{C}$ 区域.早白垩世斑岩 Cu 矿床(如多龙)和相关多金属矿床位于北拉萨地块内高 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 新生地壳区.迄今为止,尚未在中拉萨地块发现斑岩铜矿床.这些事实表明,新生下地壳对造山带斑岩 Cu 矿床的形成起到最主要的控制作用.

与花岗岩有关的 Pb-Zn矿和斑岩 Mo矿床的空间分布严格限制在古老的中拉萨地块范围内.已知的大型 Pb-Zn矿区(如蒙亚啊等)集中分布在具有最老 Hf模式年龄(T_{DM}^{C})的地壳块区,或者沿着古老地壳块体的 Hf同位素边界发育.已知的斑岩 Mo矿(如邦浦等)出现在被重新改造的老地壳边缘和/或最古老的地壳块区附近.这些特征表明, Pb-Zn-Mo矿空间分布与古老中部地壳块体的成分不均一性和重熔/改造作用相关.

Hou et al. (2015)、侯增谦和王涛(2018)指出,这些同位素结果证明地壳的属性与成分控制金属组合和矿床类型,地壳架构控制成矿系统的形成发育和矿床的空间就位.他们还从成矿元素的亲幔/亲壳性、不同类型矿床成矿的氧化一还原条件等多个方面论证了地壳属性与成矿之间的内在联系.他们还把这一研究扩展到不同类型造山带(如中亚增生造山带、秦岭复合造山带等)和不同克拉通地区,得出了相同的规律.

侯增谦等(2018)进一步指出,Hf-Nd同位素填图可以发展成一种有效地评价成矿潜力和圈定战略靶区的新手段,可以圈定不同成矿系统或成矿带所根植的地壳块体(新生/古老/再造地壳)的空间分布,揭示深部地壳组成架构对成矿系统发育空间的控制作用.地壳块体类型及空间分布对矿床类型及空间展布的控制作为一级控制因素,可以根据Hf-Nd同位素填图结果快速确定找矿战略靶区.这些研究不仅揭示了区域成矿规律,而且对成矿预测与成矿潜力评价有潜在的应用价值,有可能成为成矿规律研究特别是深部物质探测及成矿背景研究的新方向.

对以上3个阶段的回顾,展示了研究团队为揭示青藏地壳性质开展的研究工作及对其意义认识的不断深化.

2 青藏高原巨厚地壳形成的机制

2.1 青藏高原地壳增厚的两种机制

如前所述,青藏高原具有全球最厚的地壳,可 达正常地壳厚度的两倍.地震学资料表明,拉萨地 块的地壳厚度为65~75 km,最厚可达80 km,平均 厚度约70 km,这个加厚地壳以低的地震波速 $(V_p=6 \text{ km/s}, V_s=3.45 \text{ km/s})$ 为特征(Kind et al., 1996; Molnar et al., 1998). 过去流行的观点认为碰 撞造成的构造加厚是其主因,代表性的有:(1)双地 壳叠置模式 (Argand, 1924; Powell, 1986);(2) 挤 压缩短地壳增厚模式 (Dewey and Bird, 1970; Dewey and Burke, 1973; England and Mckenzie, 1982; England and Houseman, 1989);(3)大陆注入 模式:较强的印度地壳向较弱的西藏下地壳注入增 厚(Zhao and Morgen, 1987),还有一些其他模式 (马钦忠,2016). 尽管安第斯的研究表明,岩浆作用 对地壳加厚也很重要(Altherton and Perford, 1993; Schmitz, 1994; Petford and Atherton, 1996),但在 青藏高原地壳增厚机制的研究中一度并未引起足 够重视.我们认为,青藏高原巨厚地壳的形成有两 种机制,不仅有构造加厚机制,而且有地幔物质通 过岩浆作用注入加厚机制,是两种机制的共同作 用,形成了巨厚地壳.由于构造增厚机制前人已有 详细论述,这里着重讨论地幔物质通过岩浆作用注 入加厚机制.

如前所述,印度一亚洲大陆碰撞大致开始于65/70 Ma,经历了约25~30 Ma,于40 Ma左右转入后碰撞期至今(Yin and Harrison, 2000; Mo et al., 2002,2003; Zhou et al., 2004). 在此过程中,形成了东西延伸2000 km 的冈底斯岩浆岩带. 其中,60%集中在南冈底斯带(南部拉萨地块).

同碰撞期形成了以下岩浆岩:(1)林子宗火山岩系(65~40 Ma),厚度达5100 m,下部典中组(厚2400 m)以辉石安山岩为主,有较多辉绿玢岩脉侵入,中部年波组较薄(700 m)为沉积岩夹钾玄岩、玄武粗安岩,有钾玄岩脉及钾质辉绿玢岩脉侵入,上部帕那组为2000 m厚的流纹质强熔结凝灰岩与熔岩.林子宗火山岩系是同碰撞过程较完整的岩浆岩记录,其早期(碰撞开始)还带有陆缘弧的一些特

点,中期开始出现标志陆内岩浆活动的钾玄岩,晚期具有明显的加厚陆壳条件下火山岩的特点.该岩系 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为 $+5.43\sim-3.96$ (大多数为 $+5.43\sim-0.52$, Mo et al., 2007),根据 DePaolo (1981, 1985)和 DePaolo et al. (1992)提出的公式:地壳指数 NCI=[ε_{Nd} (样品) $-\varepsilon_{Nd}$ (幔)/ ε_{Nd} (壳) $-\varepsilon_{Nd}$ (幔)],计算得到林子宗火山岩系的 Nd 地壳指数为 $0.16\sim0.47$,平均 0.30,换言之,其中幔源组分平均占 70% (Mo et al., 2007).

(2)相伴的南冈底斯花岗岩基(49.6~51.2 Ma,峰值50 Ma),以花岗闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、二长花岗岩为主,其 є_{Nd}(t)值为+5.21~+1.64(莫宣学等,2005),其中含有大量标志岩浆混合作用的暗色微粒包体(MME);在冈底斯花岗岩带的最南缘,还断续出露着一条东西向辉长岩一辉绿岩一辉石岩小岩体带,与中国国土资源航空物探遥感中心报道的雅鲁藏布蛇绿岩带以北延伸1400 km航磁异常带(熊盛青等,2001)在空间上基本吻合,被认为岩浆底侵作用的产物.

进入后碰撞期(40 Ma以来),冈底斯带在经历 了 $40\sim26$ Ma 的岩浆活动间歇期后,在 $25\sim8$ Ma期 间,产生了钾质一超钾质火山岩(25~8 Ma),埃达 克质岩石(25~12 Ma, 峰值16 Ma),及过铝质含白 云母花岗岩类岩石(24~18 Ma). 特别值得注意的 是中新世埃达克质岩石,是延伸350 km的斑岩Cu 矿带的成矿母岩,并常与钾质一超钾质火成岩相 伴,在成分上富 K₂O,相对高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (0.705 0~ 0.7075) 和相对低 ε_{Nd} 值(+2.3~-6.2),与俯冲洋 壳部分熔融产生的埃达克岩(Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990)有明显的不同. Chung et al. (2003)和 Hou et al.(2004)认为这些富钾的埃达克 岩源于加厚的玄武质下地壳的部分熔融. Hou et al. (2004)根据埃达克质岩石中岩浆结晶锆石(25~12 Ma, 峰值 16 Ma) 中所含的继承锆石(65~45 Ma, 峰 值 55±10 Ma)与林子宗火山岩年龄相同,以及全岩 与林子宗火山岩系在Sr-Nd同位素上的相似性,提 出了其形成的两阶段模型:首先,在65~40 Ma源自 富不相容元素的含水地幔的镁铁质岩浆形成了新 生玄武质下地壳;然后,在25~12 Ma由于软流圈地 幔上隆和地壳伸展,在已加厚的下地壳的下部产生 了埃达克质岩浆.

由上可知,青藏高原南部、特别是拉萨地块南部的地壳中存在有大量幔源物质,诸如:(1)存在大

量 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为正值的岩浆岩:同碰撞火山岩(林子宗火山岩系), $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值主体为+5.43~-0.52,同碰撞花岗岩,+5.21~+1.64;(2)花岗岩中含有大量暗色微粒镁铁质包体(MME);(3)沿冈底斯花岗岩带有大量的镁铁质小侵入体,断续成带分布;(4)后碰撞的岩浆岩,如起源于加厚下地壳的埃达克质岩石(25~12 Ma,峰值16 Ma).

这些幔源物质是怎样进入地壳,成为地壳的组 成部分的?现在多数学者(如 Dong et al., 2005; Mo et al., 2005; Zhu et al., 2011; Hou et al., 2015, 2018)认为主要是两种作用:底侵作用(underplating)和相关的岩浆混合作用(magma mixing). 莫宣 学研究团队(江万等,1999; Dong et al., 2005; Mo et al., 2005;董国臣等, 2006, 2008)对冈底斯南带花岗 岩基及其所含的大量暗色镁铁质微粒包体(MME) 与伴生的镁铁质侵入体,以及冈底斯花岗岩带的最 南缘的辉长岩一辉绿岩一辉石岩小岩体带中的拉 萨一日喀则段(约300 km长),进行了详细的野外地 质、岩石学、岩石地球化学研究和锆石 SHRIMP U-Pb同位素测年(获得镁铁质小岩体年龄为47.0~ 52.5 Ma, 暗色镁铁质微粒包体 MEE 年龄为 49.9~ 51.1 Ma),提出了冈底斯存在底侵作用和岩浆混合 作用的证据,论证了底侵作用和岩浆混合作用的过 程和意义.推测大致过程如下:在新特提斯雅鲁藏 布洋板块俯冲末期一印度-亚洲大陆碰撞过程中, 源自地幔楔的基性岩浆上升并在陆壳底部聚集,当 岩浆和热量达到足够的量时(大约在碰撞开始15~ 20百万年之后,50 Ma左右),一方面使陆壳部分熔 融产生大规模花岗质岩浆,并发生了花岗岩浆与上 侵的基性岩浆的混合作用,另一方面造成下地壳的 增厚.可以说,如同世界上很多典型构造带一样 (Vernon 1984; Huppert and Sparks, 1988; Didier and Baibarin, 1991; Altherton and Perford, 1993; Petford and Atherton, 1996; 董申保, 1999; Liu et al., 2004),在印度-亚洲碰撞过程中底侵作用与岩 浆混合作用这两种重要的壳幔相互作用形式,可能 是青藏地壳生长和增厚的重要机制.

2.2 地壳增厚的过程及两种机制对增厚的相对贡献

前面曾经多次提到,林子宗火山岩系是印度一亚洲碰撞的响应,是由新特提斯俯冲消减末期过渡到印度一亚洲大陆碰撞全过程的记录(董国臣,2002; 莫宣学等,2003). Mo et al.(2007)用 Condie (1982)提出的公式 $C(km)=18.2K_{60}+0.45$ 计算了

林子宗火山岩系喷发时期地壳的厚度,在典中组 (65~60 Ma)、年波组(60~50 Ma)、帕那组(50~40 Ma)分别为35 km,37 km和73 km,表明在林子宗 火山岩系喷发早一中期(50 Ma之前)地壳厚度仍为 正常厚度,50 Ma以后地壳明显增厚. 从后碰撞火成 岩来看也是如此,埃达克质岩石(25~12 Ma)和安 粗岩/粗面岩(25~8 Ma)形成时地壳已经显著增厚 (Wyllie, 1977; Rapp et al., 1999). Altherton and Petford(1993)认为,除洋壳板片熔融产生的埃达克 岩之外,在加厚地壳的条件下,新底侵的玄武岩的 熔融也可产生埃达克岩,熔融残余为榴辉岩相矿物 组合,石榴石是关键残余矿物. Chung et al.(2003) 和 Hou et al. (2004)认为冈底斯富钾的埃达克岩源 于加厚的玄武质下地壳的部分熔融. Wyllie(1977, 1984)基于相平衡实验明确提出,在加厚陆壳底部, 陆壳岩石的部分熔融产生粗面岩/正长岩浆而不是 花岗岩浆.邓晋福等(1998,2004)进一步从相平衡 的角度进行了论证,并划分出高压型和低压型粗面 岩/正长岩,前者源区熔融残余为榴辉岩相矿物组 合. 这就表明,在25 Ma前地壳已经明显地增厚. 虽 然还很难准确判定具体时间,但可以合理地推断, 地壳的显著增厚发生在50~25 Ma之间.

地震探测 (Kind et al., 1996; Nelson et al., 1996; Owens and Zandt, 1997)确认,藏南加厚地壳中存在 $14\sim20~\mathrm{km}$ (平均 $15~\mathrm{km}$)厚的下地壳高速层 (V_p =7.2 \sim 7.5 km/s),解释为在>60 km深度下密度>3.0 g/cm³的高压含石榴石的镁铁质岩.后来又被进一步解释为在加厚地壳底部底侵幔源岩浆的镁铁质堆晶岩或榴辉岩层(Mo et al., 2007),代表了地幔物质通过岩浆作用注入增厚的贡献.如地球物理探测揭示,拉萨地块地壳现今平均厚度约 70 km.设增厚前正常厚度为 35 km,则碰撞以来地壳增厚了 35 km,如前所述其中地幔物质通过岩浆作用注入增厚 15 km,构造增厚 20 km,二者的比例约 4:6.

综合起来,自65~70 km印度—亚洲碰撞以来,青藏高原产生了新生地壳,但在50 Ma之前,地壳仍然保持正常厚度,大致在50~25 Ma期间增厚至现今厚度,其中既有构造加厚,又有地幔物质通过岩浆作用注入加厚,正是两种机制的共同作用,形成了现今青藏高原的巨厚地壳.这两种机制可能自碰撞开始一直都存在,但在不同时间显示度可能有所不同,50~40 Ma岩浆作用高潮期间岩浆加厚可能更显著,而40~25 Ma岩浆活动静止期构造加厚可

能更明显.

Zhu et al. (2017) 运用中性岩浆岩的全岩 La/Yb 比值作为地球化学指标(Profeta et al., 2015)估算青藏高原南部地壳厚度及其时空变化,认为在55~45 Ma 期间由于岩浆底侵作用使地壳增厚了20 km,达到(58~50)±10 km,相应地冈底斯山脉海拔高度超过4000 m;在约40~10 Ma(特别是20~10 Ma)由于构造作用使地壳增厚到68±12 km,冈底斯山脉海拔达到现今高度.虽然两项成果在地壳的具体增厚时间的估计稍有不同,但二者都肯定了青藏高原地壳增厚的两种机制(构造增厚与岩浆增厚). Zhu et al. (2017)将地壳增厚与高原隆升联系起来,是新的进展.

3 结语

本文讨论了青藏高原地壳的特点和生长演化, 论证了青藏高原存在两类大陆地壳(新生地壳和再循环地壳);通过两种机制(构造增厚和地幔物质通过岩浆作用注入增厚)形成了青藏巨厚地壳;大陆碰撞带可能是产生和保存新生地壳,造成地壳净生长非常重要的构造部位.

李廷栋院士是国内外著名的区域地质与构造学家和地质编图专家,对我国地质事业的发展作出了重要贡献.他在我国青藏高原研究、中国岩石圈三维结构研究、中国区域地质志编制、中国地质图类及亚洲地质图等的编制等方面做出了系统的卓越的成就.他多次参与我国地质工作和科技工作规划的制定和国家重大科技项目的立项,在推动我国地质、矿产工作与地质科技工作、青藏高原研究、岩石圈研究、南极科学与资源考察、海洋地质调查和矿产综合利用研究、环境地质及国际地学合作等多方面发挥了重要作用.

李廷栋院士是我非常敬重和爱戴的老师,他的高尚品德和深厚学术造诣是我学习的榜样,他几十年来对我的教育与培养,使我终生难忘.在先生九十华诞之际,谨向他致以衷心的祝贺和感谢.

致谢:感谢国家科学技术部、国家自然科学基 金委员会、自然资源部和前国土资源部、前地质矿 产部几十年来对我们研究工作的资助和支持,感谢 所有在研究工作中给我们指导与帮助的同志,使我 们对青藏高原地壳的生长和演化这一重大科学问 题有了一些认识.感谢《地球科学》主编和本期特约 主编邀请撰写本文,庆祝李廷栋院士90华诞.

References

- Altherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust.

 Nature, 362(6416): 144—146. https://doi.org/10.1038/362144a0
- Argand, E., 1924. La Tectonique de Asie. 13th International Geology Congress, 7:171.
- Chung, S. L., Liu, D. Y., Ji, J. Q., et al., 2003. Adakites from Continental Collision Zones: Melting of Thickened Lower Crust beneath Southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021. https://doi.org/10.1130/g19796.1
- Condie, K.C., 1982. Plate Tectonics and Crustal Evolution.

 Pergamon, New York.
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662—665. https://doi.org/10.1038/347662a0
- Deng, J.F., Luo, Z.H., Su, S.G., et al., 2004. Petrogenesis, Tectonic Environment and Metalogenesis. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Deng, J.F., Mo, X.X., Zhao, H.L., et al., 1998. Crust Mantle Materials and Deep Processes. *Earth Science Frontiers*, 5(3):67—75 (in Chinese with English abstract).
- 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. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2003.08.001
- Deng, J.F., Zhao, H.L., Mo, X., et al., 1996. Continental Roots - Plume Tectonics: A Key to Continental Geodynamics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- DePaolo, D. J., 1981. A Neodymium and Strontium Isotopic Study of the Mesozoic Calc-Alkaline Granitic Batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11): 10470—10488. https://doi.org/10.1029/jb086ib11p10470
- DePaolo, D. J., 1985. Isotopic Studies of Processes in Mafic Magma Chambers: I. The Kiglapait Intrusion, Labrador. *Journal of Petrology*, 26(4): 925—951. https://doi.org/ 10.1093/petrology/26.4.925
- DePaolo, D. J., Perry, F. V., Baldridge, W. S., 1992. Crustal versus Mantle Sources of Granitic Magmas: A Two-Parameter Model Based on Nd Isotopic Studies. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 83(1/2): 439—446. https://doi.org/ 10.1017/s0263593300008117
- Dewey, J. F., Bird, J. M., 1970. Mountain Belts and the New

- Global Tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 75 (14): 2625—2647. https://doi.org/10.1029/jb075i014p0 2625
- Dewey, J. F., Burke, K. C. A., 1973. Tibetan, Variscan, and Precambrian Basement Reactivation: Products of Continental Collision. *The Journal of Geology*, 81(6): 683—692. https://doi.org/10.1086/627920
- Didier, J., Baibarin, B., 1991. Enclaves and Granite Petrology. Elsevier, Amsterdam.
- Dong, G. C., 2002. Linzizong Volcanic Rocks in Linzhou Basin, Tibet and Implications for India-Asia Continental Collision (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Dong, G. C., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 2005. Geochronologic Constraints on the Magmatic Underplating of the Gangdisê Belt in the India-Eurasia Collision: Evidence of SHRIMP II Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 79(6):787—794. https://doi. org/10.1111/j.1755-6724.2005.tb00933.x
- Dong, G.C., Mo, X.X., Zhao, Z.D., et al., 2006. Magma Mixing in the Middle Part of the Gangdese Magmatic Belt: Evidences from Granitoid Complex. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):535—544 (in Chinese with English abstract).
- Dong, G.C., Mo, X.X., Zhao, Z.D., et al., 2008. Gabbros from Southern Gangdese: Implication for Mass Exchange between Mantle and Crust. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 203–210 (in Chinese with English abstract).
- Dong, S.B., 1999. Some Discussion on the Recent Development of Granite Petrogenesis. In: Dong, S.B., ed., Collected Works of Dong Shenbao. Peking University Press, Beijing, 246—325(in Chinese).
- England, P., McKenzie, D., 1982. A Thin Viscous Sheet Model for Continental Deformation. *Geophysical Journal International*, 70(2): 295—321. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1982.tb04969.x
- England, P., Houseman, G., 1989. Extension during Continental Convergence, with Application to the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 94(B12): 17561. https://doi.org/10.1029/jb094ib12p17561
- Flowerdew, M. J., Chew, D. M., Daly, J. S., et al., 2009. Hidden Archaean and Palaeoproterozoic Crust in NW Ireland? Evidence from Zircon Hf Isotopic Data from Granitoid Intrusions. *Geological Magazine*, 146(6): 903—916. https://doi.org/10.1017/s0016756809990227
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3/4): 237—269. https://doi.org/

- 10.1016/s0024-4937(02)00082-8
- Guynn, J. H., Kapp, P., Pullen, A., et al., 2006. Tibetan Basement Rocks near Amdo Reveal "Missing" Mesozoic Tectonism along the Bangong Suture, Central Tibet. Geology, 34(6): 505. https://doi.org/10.1130/g22453.1
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Qu, X. M., et al., 2004. Origin of Adakitic Intrusives Generated during Mid-Miocene Eastwest Extension in Southern Tibet. Earth and Planetary Science Letters, 220(1/2): 139-155. https://doi.org/ 10.1016/s0012-821x(04)00007-x
- Hou, Z. Q., Duan, L. F., Lu, Y. J., et al., 2015. Lithospheric Architecture of the Lhasa Terrane and Its Control on Ore Deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen. *Economic Geology*, 110(6): 1541—1575. https://doi.org/10.2113/econgeo.110.6.1541
- Hou, Z.Q., Wang, T., 2018. Isotopic Mapping and Deep Material Probing (II): Imaging Crustal Architecture and Its Control on Mineral Systems. *Earth Science Frontiers*, 25 (6):20-41 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Zheng, Y. C., Yang, Z. M., et al., 2013. Contribution of Mantle Components within Juvenile Lower-Crust to Collisional Zone Porphyry Cu Systems in Tibet. *Mineralium Deposita*, 48(2): 173—192. https://doi.org/10.1007/s00126-012-0415-6
- Huppert, H. E., Sparks, R. S. J., 1988. The Generation of Granitic Magmas by Intrusion of Basalt into Continental Crust. *Journal of Petrology*, 29(3): 599—624. https://doi.org/10.1093/petrology/29.3.599
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Chen, B., 2000. Massive Granitoid Generation in Central Asia: Nd Isotope Evidence and Implication for Continental Growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82—92. https://doi.org/10.18814/epiiugs/2000/v23i2/001
- Jiang, W., Mo, X., Zhao, C., et al., 1999. Geochemical Characteristics of Granites and Their Micromaficenclaves in Central Gangdese in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (1):89 97(in Chinese with English abstract).
- Kay, R. W., 1978. Aleutian Magnesian Andesites: Melts from Subducted Pacific Ocean Crust. *Journal of Volcanology* and Geothermal Research, 4(1/2): 117—132. https://doi. org/10.1016/0377-0273(78)90032-x
- Kemp, A. I. S., Hawkesworth, C. J., Paterson, B. A., et al., 2006. Episodic Growth of the Gondwana Supercontinent from Hafnium and Oxygen Isotopes in Zircon. *Nature*, 439 (7076): 580-583. https://doi.org/10.1038/nature04505
- Kind, R., Ni, J., Zhao, W., et al., 1996. Evidence from Earthquake Data for a Partially Molten Crustal Layer in

- Southern Tibet. *Science*, 274(5293): 1692—1694. https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1692
- Liu, C. D., Mo, X. X., Luo, Z. H., 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(8): 828-834. https://doi.org/10.1007/bf02889756
- Ma, Q.Z., 2016. Summary and Current Status of the Research Models for the Tibetan Plateau Uplift. *Open Journal of Nature Science*, 4(2):229 – 241 (in Chinese with English abstract).
- McKenzie, D., Priestley, K., 2008. The Influence of Lithospheric Thickness Variations on Continental Evolution.

 Lithos, 102(1/2): 1-11. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.05.005
- Mo, X., Zhao, Z., Zhou, S., et al., 2002. Evidence for Timing of the Initiation of India-Asia Collision from Igneous Rocks in Tibet. AGU Fall Meeting Abstracts. 83(47): F1003, S62B-1201.
- Mo, X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2003. Volcanism in Response to India-Asia collision. *Earth-Science Frontiers*, 10(3): 135 148 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Dong, G. C., Zhao, Z. D., et al., 2005. Timing of Magma Mixing in the Gangdisê Magmatic Belt during the India-Asia Collision: Zircon SHRIMP U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 79(1): 66—76. https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2005.tb00868.x
- Mo, X., Dong, G.C., Zhao, Z.D., et al., 2005. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implications for Crustal Growth and Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11(3):281–290 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X., Zhao, Z., Deng, J., 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, New York, 507—530.
- Mo, X. X., Hou, Z. Q., Niu, Y. L., et al., 2007. Mantle Contributions to Crustal Thickening during Continental Collision: Evidence from Cenozoic Igneous Rocks in Southern Tibet. *Lithos*, 96(1/2): 225-242. https://doi. org/10.1016/j.lithos.2006.10.005
- 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(1/2/3/4): 49-67. https://doi. org/10.1016/j. chemgeo.2008.02.003
- Mo, X.X., Zhao, Z., Yu, X., et al., 2009. Cenozoic Collision-Postcollisional Igneous Rocks in the Tibetan Plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Mo, X.X., 2011. Magmaand Magmatic Rocks: A Lithoprobe to the Deep Earth and Records of the Earth Evolution. *Chinese Journal of Nature*, 33(5):255 259 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X., 2019. Magmatism and Deep Geological Process. *Earth Science*, 44(5):1487 1493 (in Chinese with English abstract).
- Molnar, P., Houseman, G. A., Conrad, C. P., 1998.
 Rayleigh-Taylor 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. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00510.x
- Nelson, K. D., Zhao, W., Brown, L. D., et al., 1996. Partially Molten Middle Crust beneath Southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH Results. *Science*, 274(5293): 1684— 1688. https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1684
- Niu, Y. L., Zhao, Z. D., Zhu, D. C., et al., 2013. Continental Collision Zones are Primary Sites for Net Continental Crust Growth: A Testable Hypothesis. *Earth-Science Reviews*, 127: 96—110. https://doi.org/10.1016/j.earscirev. 2013. 09.004
- Owens, T. J., Zandt, G., 1997. Implications of Crustal Property Variations for Models of Tibetan Plateau Evolution. *Nature*, 387(6628): 37—43. https://doi.org/10.1038/387037a0
- Pan, G.T., Mo, X., Hou, Z.Q., et al., 2006. Spatio-Temporal Structure and Evolution of the Gangdise Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 521—533 (in Chinese with English abstract).
- Petford, N., Atherton, M., 1996. Na-Rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491—1521. https://doi.org/10.1093/petrology/37.6.1491
- Powell, C. M., 1986. Continental Underplating Model for the Rise of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 81(1): 79—94. https://doi.org/10.1016/0012-821x (86)90102-0
- Profeta, L., Ducea, M. N., Chapman, J. B., et al., 2015. Quantifying Crustal Thickness over Time in Magmatic Arcs. *Scientific Reports*, 5(1): 7786. https://doi.org/

- 10.1038/srep17786
- Rapp, R. P., 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. https://doi.org/10.1016/s0009-2541(99)00106-0
- Rudnick, R. L., Fountain, D. M., 1995. Nature and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267. https://doi.org/10.1029/95rg01302
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3:1–64.
- Samson, S. D., McClelland, W. C., Patchett, P. J., et al., 1989. Evidence from Neodymium Isotopes for Mantle Contributions to Phanerozoic Crustal Genesis in the Canadian Cordillera. *Nature*, 337(6209): 705—709. https://doi.org/10.1038/337705a0
- Schmitz, M., 1994. A Balanced Model of the Southern Central Andes. *Tectonics*, 13(2): 484—492. https://doi.org/10.1029/93tc02232
- Vernon, R. H., 1984. Microgranitoid Enclaves in Granites—Globules of Hybrid Magma Quenched in a Plutonic Environment. *Nature*, 309(5967): 438—439. https://doi.org/10.1038/309438a0
- Wyllie, P. J., 1977. Crustal Anatexis: An Experimental Review. *Tectonophysics*, 43(1/2): 41—71. https://doi.org/10.1016/ 0040-1951(77)90005-1
- Wyllie, P.J., 1984. Constraints Imposed by Experimental Petrology on Possible and Impossible Magma Sources and Products. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, *Mathematical and Physical Sciences*, 310(1514): 439—456. https://doi.org/10.1098/rsta.1984.0003
- Xiong, S.Q., Zhou, F.H., Yao, Z.X., et al., 2001. Aeromagnetic Survey of Central and Western Tibetan Plateau. Geological Publishing House, Beijing, 75—87 (in Chinese).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211
- Zhao, W. L., Morgan, W. J., 1987. Injection of Indian Crust into Tibetan Lower Crust: A Two-Dimensional Finite Element Model Study. *Tectonics*, 6(4): 489—504. https://doi.org/10.1029/tc006i004p00489
- Zhou, S., Mo, X. X., Dong, G. C., et al., 2004. ⁴⁰Ar-³⁹Ar Geochronology of Cenozoic Linzizong Volcanic Rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and Their Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1970—1979.

- https://doi.org/10.1007/bf03184291
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Niu, Y. L., et al., 2009. Geochemical Investigation of Early Cretaceous Igneous Rocks along an East-West Traverse Throughout the Central Lhasa Terrane, Tibet. *Chemical Geology*, 268(3/4): 298—312. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.008
- Zhu, D. C., Wang, Q., Cawood, P. A., et al., 2017. Raising the Gangdese Mountains in Southern Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1): 214-223. https://doi.org/10.1002/2016jb013508
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1/2): 241-255. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005

附中文参考文献

- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等, 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社.
- 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等,1998. 壳幔物质与深部过程. 地学前缘,5(3):67-75.
- 邓晋福,赵海玲,莫宣学,等,1996.中国大陆根一柱构造一大陆 动力学的钥匙.北京:地质出版社.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等, 2008. 西藏冈底斯南带辉长岩及 其所反映的壳幔作用信息. 岩石学报, 24(2): 203-210.
- 董国臣,2002.西藏林周盆地林子宗火山岩及其所含的印度—亚洲碰撞信息(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 董申保, 1999. Some Discussion on the Recent Development of

- Granite Petrogenesis. 见:董申保,著,董申保文集.北京: 北京大学出版社,246-325.
- 董国臣,莫宣学,赵志丹,等,2006. 冈底斯岩浆带中段岩浆混合作用:来自花岗杂岩的证据,岩石学报,22(5):535-544.
- 侯增谦,王涛,2018. 同位素填图与深部物质探测(II):揭示地壳 三维架构与区域成矿规律. 地学前缘,25(6):20-41.
- 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.
- 马钦忠,2016. 青藏高原隆生演化变形模式研究进展. 自然科学,4(2): 229-241.
- 莫宣学, 2011. 岩浆与岩浆岩:地球深部"探针"与演化记录. 自 然杂志, 33(5):255-259.
- 莫宣学,2019. 岩浆作用与地球深部过程. 地球科学,44(5):1487-1493.
- 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,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,赵志丹,喻学惠,等,2009. 青藏高原新生代碰撞一后碰 撞火成岩. 北京:地质出版社.
- 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等,2006.冈底斯造山带的时空结构及 演化.岩石学报,22(3):521-533.
- 熊盛青,周伏洪,姚正煦,等,2001.青藏高原中西部航磁调查. 北京:地质出版社,75-87.