

藏北岩石圈厚度与减薄机制分析

迟效国, 董春艳, 刘建峰, 黎广荣, 赵院东

吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061

CHI Xiao-guo, DONG Chun-yan, LIU Jian-feng, LI Guang-rong, ZHAO Yuan-dong

College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China

CHI Xiao-guo, DONG Chun-yan, LIU Jian-feng, et al. Analysis of the lithospheric thickness of the Northern Qinghai-Tibet plateau and its thinning mechanism. Earth Science Frontiers, 2006, 13(5): 374-381

Abstract: Two different models of lithospheric thickness of northern Qinghai-Tibet plateau are defined by seismic S-waves and magnetotelluric sounding (MT), respectively, and we have been unable to determine their relationship. Through analysis of the regressive relationship between elevation and crustal thickness we have calculated the lithospheric thickness of the northern plateau by adopting the equilibrium theory. In this calculation we take the slope and intercept of the regressive line as the constraints on the average density of crust and lithospheric mantle, and consider the effect of the phase change on the asthenospheric density. Our results indicate (1) that the average lithospheric thickness of the northern Qinghai-Tibet plateau is approximately 106-120 km under a reasonable range of asthenospheric temperature, and (2) that the average lithospheric thickness was approximately 80 km before the thickening of the crust. Our analyses of Cenozoic volcanism and magma segregation depth indicate that the lithospheric thickness of the present northern Qinghai-Tibet plateau is mainly constrained by the dehydration depth of phlogopite. The temperature at the bottom of the lithospheric mantle was higher than the wet solidus temperature of peridotite before the thickening of the lithosphere, and was affected by the thickening-related dehydration of amphibole and phlogopite. Because of the bottom being melted by slow degrees constantly, the thickened lithospheric mantle joined the small convection system of asthenosphere leading to a pulsed thinning of the bottom during the thickening process of the lithosphere.

Key words: lithospheric thickness; average density; equilibrium theory; thinning mechanism; northern Qinghai-Tibet plateau

摘 要:天然地震 S 波和大地电磁测深给出了两种不同的藏北岩石圈厚度模型,两种测量结果的地质含义至今还不十分清楚。通过对地表高程与地壳厚度回归关系的研究,以回归直线的斜率和截距作为地壳和岩石圈地幔平均密度取值的约束,并考虑相变因素对软流圈密度的影响,采用均衡理论对藏北岩石圈厚度进行了计算。计算结果表明,在可能的软流圈温度取值范围内藏北岩石圈的平均厚度约为 106~120 km,地壳增厚前的岩石圈平均厚度约 80 km。藏北新生代火山作用和岩浆起源-分凝深度分析表明,藏北现今岩石圈厚度主要受金云母脱水深度所控制。增厚前岩石圈地幔底部温度高于橄榄岩湿固相线温度,并受闪石和金云母高压脱水作用的影响。加厚岩石圈地幔因其底部不断发生脱水低程度熔融而进入软流圈小尺度对流体系,使岩石圈加厚过程中伴随有底部的脉动减薄作用。

关键词:岩石圈厚度;平均密度;均衡理论;减薄机制;青藏高原北部

中图分类号:P54 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2006)05-0374-08

收稿日期:2006-01-04;修回日期:2006-05-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40572034);国土资源部重点基础研究项目(9501101-4);吉林大学创新基金资助项目

作者简介:迟效国(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事岩石学、地球化学领域的研究。E-mail: xiaoguo1956@sina.com

大陆与海洋、高原与平原都是由地球深部各圈层的结构和物质的相互运动所决定的,地球表面形态是内部物质运动的直观记录。青藏高原隆升研究本质上就是阐明地表高程与深部物质组成、结构、温度、应力性质和应变速率等各种制约关系在时间和空间上的演化问题。什么样的深部物质组成、热结构、应力状态和边界条件能够实现和支撑现今高原的高地形,包括高原腹地的平坦地势和周边山系的深切割,是高原隆升机制研究中的基本问题。本文通过对藏北现今地表高程与岩石圈结构关系的研究,综合藏北新生代火山作用规律、上地幔的相变与岩浆起源分凝深度关系,对藏北岩石圈构造演化机制提出新的解释和认识。

1 地表高程与岩石圈的结构-密度关系

1.1 青藏高原布格重力异常与地形高度的关系

孟令顺^[1] (1996) 对亚东—格尔木地学断面域重力测量研究表明,断面域内不同地体地形高度与重力异常之间均存在一定的相关关系,根据相关关系的不同,将断面域划分出不同的地体和构造单元。南部喜马拉雅和雅鲁藏布江、北部西大滩及格尔木地区均伴有正、负均衡异常,重力异常与地形高度出现明显的负相关关系;其他地区均衡异常最大不超过 $\pm 20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,并与地形高度呈明显正相关。喜马拉雅地区正均衡异常高达 $69.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,表明山根补偿不足,有剩余质量存在,认为是印度板块构造挤压力大于均衡调整力的结果。西大滩附近出现的 $-34.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 均衡异常解释为由近 2 km 厚的沉积物产生的质量亏损引起的。柴达木盆地边缘出现的最低达 $-64.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 均衡异常则与板块挤压作用使盆地边缘下沉,造成该区质量亏损,出现均衡负异常。

高原内部不同地体是受地体边界断裂分割的,在图 1 中不同地体在边界断裂附近测绘点的布格异常与高程关系往往相差较大,地体内部测绘点或地体平均值则总体构成高原南部和高原北部两条斜率相近截距不同的相关直线。图 1 中未包含喜马拉雅地体与中央断裂过渡带强烈非均衡区的测绘点。从图中可以看出,冈底斯地体除拉萨—羊八井段高海拔点的投影偏离总趋势较大外,其他地段总体呈良好的线性关系,直线方程为 $g = -173.49 -$

79.22 H (H 为海拔高程)。羌塘地体的桑雄—唐古拉山口段与昆仑地体构成良好的线性关系,直线方程为 $g = -142.75 - 80.1 H$ 。其中唐古拉山口—二道沟兵站间的高海拔投影点显示出偏离总体线性趋势,布格异常的增长速率小于地形高度的增长,表明这里岩石圈的平均密度略大于周围地区,或平均厚度略小于周围地区。上述基本特征表明,地体边界断裂附近地壳集中有较大的应力,使布格异常与高程关系偏离总趋势。

1.2 地表高程与岩石圈和软流圈的密度-结构关系

重力异常反映的是地球物质在垂向上的平均密度的变化,由于密度场源效应,布格异常对地壳范围内的密度分布有较好的反映。孟令顺^[1] (1996) 根据地壳厚度与布格异常关系提出青藏高原莫霍面深度的统计公式:

$$H_M = 16.17306 - 0.10501 g_B$$

根据这一统计公式可将布格异常与地表海拔高程的相关直线方程转换成地壳厚度与高程的直线方程 (H_M 单位为 km)。其中羌塘—昆仑地体: $H = 0.1189 C - 3.705$; 冈底斯地体: $H = 0.1202 C_H - 4.136$; C 为地壳厚度, H 为地表海拔高程。Wool-lard^[2] 在对地形高度与地壳厚度的广泛统计分析基础上,给出地壳厚度与地表高程的线性回归方程: $C = 33.2 + 8.5 H$ ($H = 0.1176 C - 3.906$)。该方程的斜率与羌塘—昆仑地体的直线方程斜率是近似一致的,截距略大于冈底斯地体而略小于羌塘—昆仑地体,暗示青藏高原腹地的地壳厚度与海拔高程的关系并无明显异常之处。

在岩石学和地球物理学中,地壳的均衡补偿作用主要发生在软流圈内,软流圈上部的岩石圈地幔相对显示刚性特征,由于岩石圈地幔与软流圈之间存在密度差异,岩石圈地幔的厚度变化对地表高程有影响,而不能忽略。根据阿基米德原理,考虑岩石圈地幔的厚度和密度变化对地表高程的影响时,地表高程与地壳和岩石圈地幔的关系可用下式表示:

$$H = H_C + H_M + H_0 \\ = [(a - c)/a] C + [(a - m)/a] M + H_0$$

式中 H 为地表海拔高程; H_C 、 H_M 分别为地壳和岩石圈地幔对地表高程的贡献, C 、 M 分别为地壳和岩石圈地幔的厚度; a 、 c 、 m 分别代表软流圈、地壳和岩石圈地幔的平均密度; H_0 为岩石圈厚度为零时软流圈顶面对应的深度,本文称之为软流圈理想均衡顶面。为使上述方程与地壳厚度和海拔高程回归直

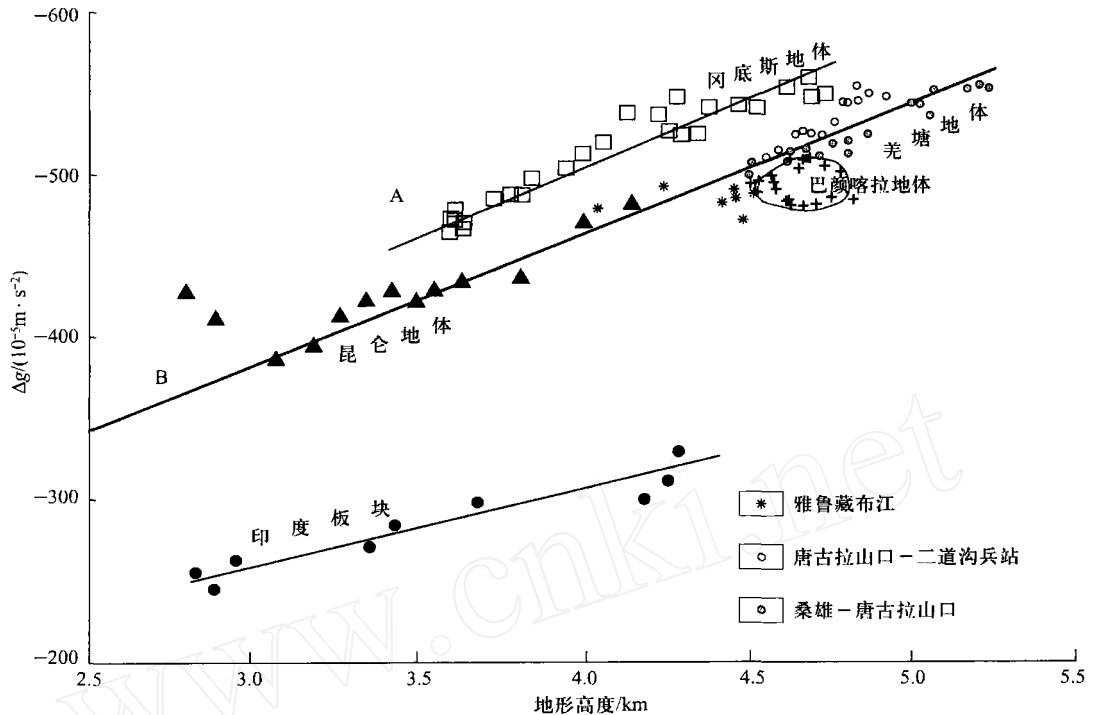


图1 亚东—格尔木地质断面布格重力异常与地形高度的相关关系
(据孟令顺^[1],1996,简化)

Fig.1 Relationship between Bouguer gravity anomalies and terrain altitude along Yadong-Golmud geoscience transect

线方程间的地球物理意义更为明确,将上式写成标准直线方程的表达形式:

$$H = A + [(\rho_a - \rho_c) / \rho_a] C$$

其中:

$$A = H_M + H_0$$

上式表明,地幔对高程的影响被记录在截距项中,截距 A 的大小受岩石圈地幔的密度、厚度和软流圈理想顶面 H_0 的影响。 H_0 存在两种可能情况: 全球范围内 H_0 近似恒定,即全球范围内软流圈的密度近于恒定; 不同构造背景下 H_0 不同,全球范围内软流圈的平均密度是变化的。两种不同选择对高原地壳厚度与高程关系的地质解释和数值模拟结果有较大影响。(1)全球软流圈 H_0 近于恒定:这是目前各种数值模型中普遍采用的处理方法。在这种情况下, H_0 为常数,在地壳厚度与高程回归直线方程中,截距 A 只随岩石圈地幔的厚度 (M) 和密度 (ρ_m) 不同而改变, A 越小, M 越大, ρ_m 越小。对同一回归直线上的不同投影点而言,岩石圈地幔的厚度和密度变化越大,投影点的离散度越大,回归方程的相关系数越小。反之,回归直线上的不同高程点则具有相似的岩石圈地幔厚度和密度。(2)全球软流圈 H_0 是变化的:在地幔柱上涌区,地幔柱体的平均密度小于周围地区,岩石圈之下的软流圈理想均衡顶面深度

随地幔柱的密度降低而升高,此时对应有较大的 H_0 值。这样的地区出现在大洋中脊和大陆裂谷区。此外,大洋中脊软流圈埋深小,自上而下由斜长石二辉橄榄岩、尖晶石二辉橄榄岩和石榴石二辉橄榄岩组成。大陆软流圈埋深较大,相变作用使大陆软流圈主要由石榴石二辉橄榄岩组成,其平均密度大于大洋中脊区。显然,软流圈的平均密度在不同构造背景下存在差异,软流圈理想均衡顶面深度 H_0 并不恒定。地表高程的变化除受地壳和岩石圈地幔的影响外,还取决于软流圈理想均衡顶面深度的大小。

1.3 青藏高原北部岩石圈厚度计算

根据实验岩石学资料,洋中脊为高热流地区,尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩的相转变深度约为 90~100 km,普通大陆地区上述相转变深度约为 70 km^[3]。当大陆岩石圈厚度大于 70 km 时,软流圈成分为石榴石二辉橄榄岩,其 0 的理论密度值为 3 372 kg/m³。深海洋隆区深度小于 90 km 的组成为尖晶石二辉橄榄岩,0 的理论密度值为 3 330 kg/m³,两者相差 42 kg/m³,由此产生的软流圈理想均衡顶面深度 H_0 的变化量为

$$H_0 = [(\rho_{\text{尖晶石相}} - \rho_{\text{石榴石相}}) / \rho_{\text{尖晶石相}}] \times M_{\text{尖晶石相}}$$

式中 $M_{\text{尖晶石相}}$ 为大洋软流圈尖晶石二辉橄榄岩的厚

度。取深海洋隆区尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩相转变深度为 90 km,洋壳厚 5 km,平均密度 2 800 kg/m³,水深 2 500 m,密度 1 030 kg/m³[4],其 H_0 为 - 2. 356 8 km(忽略斜长石二辉橄榄岩与尖晶石二辉橄榄岩的密度差异)。而岩石圈厚度大于 90 km 的大陆软流圈的 H_0 为 - 3. 397 km,比深海洋隆区下降了 1. 039 km。如果不进行 H_0 深度校正,引入的误差将使计算结果与实际情况产生较大偏差。

考虑相变因素对 H_0 的影响,将校正后的 H_0 和石榴石二辉橄榄岩 ρ_0 的理论平均密度代入地壳均衡关系式,分别计算软流圈顶界温度为 1 250、1 330 和 1 500 对应的平均地壳密度和岩石圈地幔的厚度。地壳平均密度由回归直线的斜率和软流圈密度取值(石榴石二辉橄榄岩)所限定;岩石圈地幔 ρ_0

密度在深度大于 70 km 时取石榴石二辉橄榄岩的理论密度值,深度小于 70 km 时取尖晶石二辉橄榄岩的理论密度值;温度梯度和温度对岩石密度的影响依据 England 等[4] (1989) 的模型进行计算。上述约束条件下的计算结果列入表 1。计算结果表明,在实际地形高度与地壳厚度回归直线约束下,不考虑相变对 H_0 的影响(取深海洋隆区 H_0),取软流圈顶界温度为 1 330 时,羌塘岩石圈厚度计算值为 158 km, H_0 校正后的计算结果为 106 km。需要指出的是目前对岩石圈地幔的密度取值是缺少约束的,对亏损岩石圈地幔和受流体交代形成的交代富集型石榴石二辉橄榄岩地幔来说,由于石榴石含量

的减少或含水矿物的存在,实际密度会有所降低,当石榴石含量减少 46 % 时,对应的岩石圈厚度计算值为 120 km(表 1)。如果取大地电磁测深确定的藏北平均岩石圈厚度(180 km)作为约束变量进行计算,则计算出的岩石圈地幔(ρ_0)的平均密度为 3 318 ~ 3 324 kg/m³,这比尖晶石二辉橄榄岩的理论密度值还低;地壳(ρ_c)的平均密度计算值为 2 825 ~ 2 839 kg/m³(表 1),这同样明显低于地壳(ρ_c)的平均密度值。

表 1 计算结果表明,在软流圈的顶界温度与岩石圈地幔和地壳平均密度的可能取值范围内,羌塘岩石圈的厚度与地震 S 波确定的藏北软流圈主体埋深(100 ~ 120 km)[5] 有较好的吻合,也与火山岩起源的最大深度相一致。如果取岩石圈增厚前的平均海拔为 250 m[4],根据上述计算结果限定的地壳和岩石圈地幔的平均密度计算出碰撞前地壳平均厚度为 35 km,岩石圈平均厚度约 80 km,37 km 厚的地壳对应海拔为 530 m。

2 羌塘新生代岩浆分凝深度随时间的演化规律

藏北羌塘地区 60 ~ 44 Ma 期间的火山活动以碱性钠质玄武岩为特征,44 ~ 32 Ma 岩浆性质转变为高 Mg[#] 高钾钙碱性系列和少量高 Mg[#] 钾玄岩系列,后者主要时间为 35 ~ 32 Ma;30 ~ 24 Ma 的火山活动被碱性钾质-超钾质系列所取代,之后的火山活

表 1 岩石圈结构与地表高程关系(经校正 H_0)

Table 1 Relation between lithospheric structure and altitude (After correction for H_0)							
岩石圈结构类型	温度/ ℃	$\rho_0(0)/$ (kg · m ⁻³)	$\rho_a(0)/$ (kg · m ⁻³)	$\rho_c(0)/$ (kg · m ⁻³)	C/km	$(C + M)/km$	平均海拔/km
羌塘($\rho_a - \rho_c$)/ $\rho_a = 0.1189$ $A = 3.705$	1 250	3 372	3 372	2 867	72	107	4. 856
	1 330	3 372	3 372	2 862	72	106	4. 856
	1 500	3 372	3 372	2 852	72	104	4. 856
	1 250	3 355	3 372	2 861	72	122	4. 856
	1 330	3 355	3 372	2 855	72	120	4. 856
	1 500	3 351 *	3 372	2 843	72	120	4. 856
	1 330	3 324	3 372	2 839	72	180	4. 856
	1 500	3 318	3 372	2 825	72	180	4. 856
	1 250	3 330、3 372	3 372	2 867	35	83	0. 25
	1 330	3 330、3 372	3 372	2 862	35	81	0. 25
羌塘地壳增厚前	1 500	3 330、3 372	3 372	2 852	35	77	0. 25
	1 330	3 330、3 372	3 372	2 862	36	81	0. 39
	1 330	3 330、3 372	3 372	2 862	37	81	0. 53
	1 330	3 334	3 372	2 860	40	200	0. 12

注: C—地壳厚度; M—岩石圈地幔厚度; 3 372 kg/m³ 为石榴石二辉橄榄岩 ρ_0 时的理论密度值; * 为石榴石二辉橄榄岩和尖晶石二辉橄榄岩理论密度的平均值。黑体字为可能的软流圈顶界温度和地壳 ρ_0 密度取值。地壳增厚前的岩石圈地幔密度取值: 深度 < 70 km 取 3 330 kg/m³; 深度 > 70 km 取 3 372 kg/m³。

动主体迁移至可可西里地区,只在东部枕头崖局部地区仍有少量钾玄岩系列分布,其地球化学特征可与可可西里岩带相类比。关于上述各系列岩浆的成因问题,迟效国等^[6]已作了系统论述,本文侧重讨论岩浆的分凝深度与岩石圈厚度的变化关系问题。

为获得岩浆起源-分凝深度的信息,本文采用 Yoder 依据实验资料提出的玄武岩起源压力判别图解对各系列基性端员岩石进行了压力估算(图 2)。从图 2 中可以看出,青藏高原北部不同岩石系列随

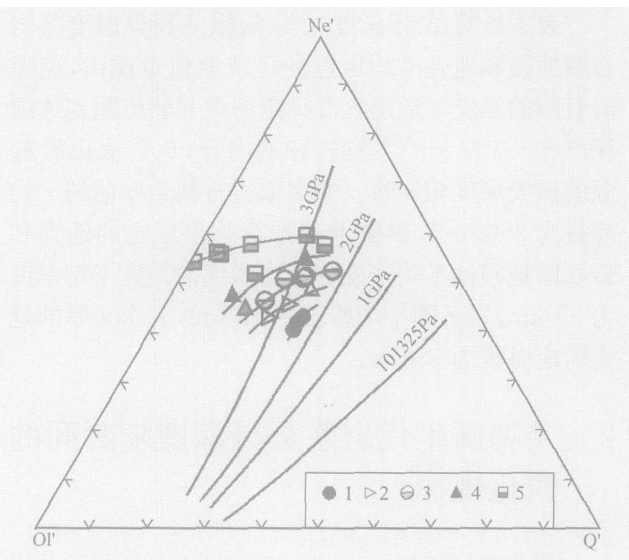


图 2 基性岩石端员 Ne-Ol-Q 压力判别图解

(据 Yoder, 1976; 转引自邱家骧等^[7], 1991)

Fig. 2 Basic end-member Ne-Ol-Q pressure discrimination diagram

1—拉嘎拉钠质玄武岩; 2—羌塘高 $Mg^{\#}$ 钾玄岩系列; 3—羌塘邦达错钠质玄武岩; 4—西昆仑钾玄岩系列; 5—火车头山碱性钾质-超钾质系列

岩浆生成时序表现出一定的变化规律,主要特征为:形成于 59 Ma 的羌塘拉嘎拉玄武岩具有最小的岩浆分凝压力(约 2.4 GPa),对应深度约 75 km,与初始岩石圈厚度的计算结果基本一致。但拉嘎拉玄武岩 REE 的球粒陨石标准化配分曲线显示 HREE 的近水平分布特征,指示源区可能有较高的温度,尖晶石与石榴石的相转变深度延伸到 75 km 以下。羌塘高 $Mg^{\#}$ 钾玄岩系列形成的 K-Ar 年龄为 35 ~ 32 Ma,所得岩浆的分凝压力约 3.0 GPa,深度达 100 km 左右。30 ~ 24 Ma 形成的碱性钾质-超钾质系列,其岩浆分凝压力已超出该图解的估算范围,根据 Ghiorso 等^[8] (1980) 对含白榴石的原生玄武质岩浆的热力学计算结果和金云母在上地幔中的分解深度,估计岩浆起源压力可能在 3.5 ~ 4.0 GPa,岩浆分凝深度约 110 ~ 120 km 左右。上述图解给出的

岩浆分凝深度与实际情况可能存在一定偏差,但岩浆起源分凝深度随时间增大的规律是清楚的。

Sm/Yb 比值的大小可以有效判别幔源岩浆是来自尖晶石橄榄岩区还是石榴石橄榄岩区。图 3 给出了青藏高原及其周边地区新生代火山岩的 $(Sm/Yb)_N$ 对 $(Yb)_N$ 的变化规律。不同岩石系列之间的 $(Sm/Yb)_N$ 和 $(Yb)_N$ 值总体随岩石系列的 $w(K_2O)$ 和 $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 比值的增大而增大,呈现出 4 个平行上移的投影区(图 3)。同一岩石系列除少量

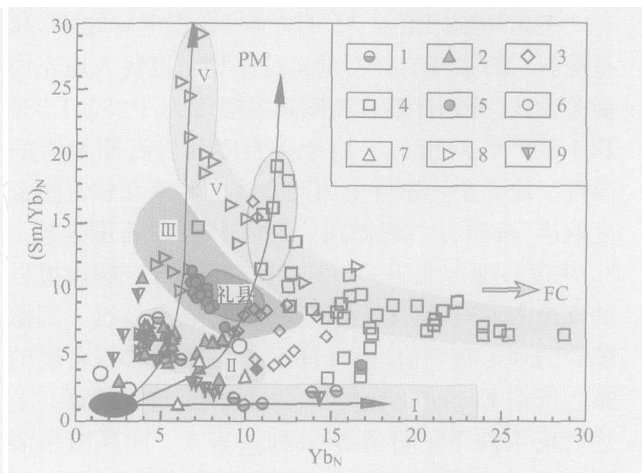


图 3 藏北火山岩 $(Sm/Yb)_N$ 对 $(Yb)_N$ 的变化关系

Fig. 3 $(Sm/Yb)_N$ - $(Yb)_N$ diagram of northern

Tibet volcanic rocks

1—拉嘎拉碱性玄武岩系列; 2—羌塘高 $Mg^{\#}$ 高钾钙碱性系列; 3—羌塘高 $Mg^{\#}$ 钾玄岩系列; 4—羌塘碱性钾质-超钾质系列; 5—枕头崖中新世英安岩; 6—可可西里钾玄岩系列流纹质岩石; 7—西昆仑钾玄岩系列流纹质岩石; 8—冈底斯-西段中新世钾质-超钾质火山岩; 9—冈底斯中段中新世酸性钾质火山岩; 灰色区: 西昆仑和可可西里中、基性火山岩投影区; 据文献^[6]简绘

流纹质岩石外,岩石的 $(Sm/Yb)_N$ 比值总体随 $(Yb)_N$ 的增大而减小,即随岩浆演化 $(Sm/Yb)_N$ 比值连续降低。稀土元素的这种变化特征要求岩浆演化过程中存在高 $(Sm/Yb)_N$ 比值的富矿物的分离结晶,或者岩浆演化过程中存在与地壳物质的混合。无论那种原因,只有偏基性岩石的 $(Sm/Yb)_N$ 比值才能反映原生岩浆的起源深度。在图 3 中,羌塘岩带 60 ~ 44 Ma 喷发的钠质玄武岩部分分布于岛弧钙碱性火山岩低 $(Sm/Yb)_N$ 演化区(区), $(Sm/Yb)_N$ 标准化值小于 3.0; 之后形成的高 $Mg^{\#}$ 高钾钙碱性系列和少量高 $Mg^{\#}$ 钾玄岩系列岩石位于上述低 $(Sm/Yb)_N$ 区的上方(区), $(Sm/Yb)_N$ 标准化值主要变化于 4 ~ 8 范围内; 羌塘高 $Mg^{\#}$ 钾玄岩系列和可可西里、昆仑岩带的主体钾质火山岩与羌塘碱性钾质-超钾质系列和冈底斯超钾质系列分别构成两个高 $(Sm/Yb)_N$

$(Yb)_N$ 比值成分区(Ⅰ、Ⅱ区), $(Sm/Yb)_N$ 标准化值分别为 6.5~15 和 6.5~29。各岩带流纹质岩石和藏南部分粗面英安质岩石的 $(Yb)_N$ 和 $(Sm/Yb)_N$ 比值明显不同于各系列主体岩石的演化趋势, 显示出中地壳起源的低 $(Sm/Yb)_N$ 值特征。在所有的岩石系列中藏北白榴石碧玄岩、碱玄岩和藏南冈底斯中西段的高 $Mg^\#$ 超钾质火山岩具有最大的 $(Sm/Yb)_N$ 比值和相同的 $(Sm/Yb)_N$ 投影区, 并都具有随岩石 $Mg^\#$ 值降低 $(Sm/Yb)_N$ 比值降低的演化趋势。极高的 $(Sm/Yb)_N$ 比值和极端富集的 REE 总量说明岩浆具有较大的起源深度和极低的熔融程度。

综合上述特征可以看出, 岩浆起源-分凝深度总体随时间演化呈增大趋势, 熔融程度随岩浆起源-分凝深度的增大而降低。上述岩浆源区温度的连续降低和 10 Ma 以来高原腹地火山活动的终止可能与岩石圈的总体增厚格局有关。

3 富集岩石圈地幔双倍增厚的相变约束

自 England 等^[4] (1989) 提出青藏高原隆升数值模型以来, 岩石圈双倍增厚-减薄学说得到了快速发展, 钾质火山活动成为确定岩石圈增厚结束和岩石圈开始减薄及快速隆升的重要标志。Turner 等^[9] (1996) 根据对青藏高原中新世钾质火山作用的研究, 提出青藏高原岩石圈减薄始于 20 Ma 前; Chung 等 (1998) 进一步提出哀牢山-红河断裂带 40~30 Ma 的钾质岩浆活动是高原东部 40 Ma 前岩石圈增厚结束并开始减薄的标志^[10]。目前积累的火山岩年代学资料表明, 藏北火山活动几乎脉动式贯穿于高原隆升的全过程, GPS 重复监测结果表明青藏高原至今仍存在岩石圈的缩短与增厚^[11]。如果 40 Ma 前岩石圈增厚没有结束, 那么火山作用与岩石圈缩短、增厚的关系就需要给予新的解释。

根据实验岩石学资料, 当含角闪石或金云母的交代岩石圈地幔被压缩增厚至角闪石和金云母的稳定下限深度后, 由于分解曲线向低温区的扩展, 角闪石和金云母将先后发生分解, 释放出游离水。如果增厚的岩石圈地幔底部温度高于橄榄岩湿固相线温度, 则角闪石和金云母的脱水将伴随增厚岩石圈地幔底部的低程度熔融, 这种脱水-熔融的结果使增厚的岩石圈地幔具有低速带或软流圈的物理性质。根据 England 等^[3] 提出的双倍增厚的岩石圈地幔的减

薄机理, 这种新生“软流圈”与下部软流圈存在的温度梯度将会导致软流圈小尺度对流使脱水-熔融的岩石圈地幔发生对流减薄。由此推论, 在地温梯度与橄榄岩湿固相线相交的地区, 交代富集岩石圈地幔的增厚必将伴随岩石圈地幔的减薄。只有当地温梯度低于橄榄岩湿固相线之后, 富集岩石圈地幔才可能发生双倍增厚。

岩石圈蠕变过程中存在动能向热能的转化, 目前对这一过程转化的热量能否产生具有一定规模的岩浆作用还不能定论。但对富集岩石圈地幔的脱水减薄作用来说, 它肯定是一个不容忽视的因素。岩石圈地幔与软流圈的接触边界是岩石圈垂向上应力和应变最集中的场所, 也是陆块滑移的重要界面, 因而也是能量转换最大的构造部位。对增厚的岩石圈地幔脱水-熔融体系来说, 脱水前后的剪切生热都意味着熔融程度的增大, 岩石圈增厚并不是完全的绝热体系。GPS 监测结果表明, 羌塘—横断山脉—红河断裂带是目前青藏高原侧向走滑分量最大的地区^[11], 后者也是岩石圈显著减薄和新生代岩浆广泛活动的地区。唐古拉山以北的巴颜喀拉地体表现出相同海拔对应相对高的重力场 (图 1), 这同样不能排除岩石圈减薄和软流圈底辟体的存在。因此, 对强滑移带来说, 软流圈与岩石圈之间剪切滑移过程中的热能转化对岩石圈的减薄, 甚至岩浆的产生可能都具有重要的贡献。

软流圈对流传热使脱水-熔融的岩石圈地幔会很快达到温度梯度平衡, 岩石圈地幔的脱水-熔融将导致岩石体积膨胀, 随着岩石圈地幔的增厚, 向“软流圈”转化的体积不断增大, 软流圈内压将持续增大, 如果软流圈物质不能有效流出高原, 其内压积累的结果只能通过上部岩石圈的破裂走滑而释放, 这可以解释为什么高原火山活动峰期与红河和阿尔金断裂带的活动峰期相耦合^[12]。

岩石圈增厚过程中由含水矿物脱水-熔融作用诱发的地幔小尺度对流总体使软流圈的平均温度不断降低。当岩石圈底界温度低于橄榄岩湿固相的温度时, 岩石圈增厚过程中的脱水-熔融减薄作用才会终止。羌塘地区新生代岩浆分凝深度随时间增大的演变规律可以用岩石圈增厚过程中内压的脉动式释放作出解释。图 4 展示了羌塘新生代岩浆分凝深度与地温梯度的变化关系。图中不同时期的地温梯度曲线是分别根据岩浆结晶温度与分凝压力和现今地表热流绘制的。其中藏北 59 Ma 形成的碱性钠质

玄武岩的稀土元素特征表明它们来自尖晶石二辉橄榄岩源区,这一时期羌塘部分地区的上地幔具有较高的地热梯度,岩浆分凝深度约为 75 km 左右。44 Ma 以来,伴随岩石圈的缩短、增厚,富集岩石圈地幔发生闪石的脱水-熔融,而不断转化为“软流圈”,岩石圈厚度主要受闪石的分解深度所控制。随着岩

涉及对不同地球物理测深资料的解释,也关系到岩石圈的应变和高原隆升关系等基础理论问题。在这个问题的讨论中有关岩石圈的厚度和岩石圈地幔的应变机制是认识分歧的两个焦点。青藏高原北部的岩石圈厚度存在大地电磁测深和天然地震 S 波两种不同的测深结果。本文依据高原地壳厚度与海拔高程关系的实测资料,从地壳均衡理论计算的藏北岩石圈的平均厚度(106~120 km)与天然地震 S 波的分析结果相一致,也与岩浆最大分凝深度相吻合。模拟计算还表明比石榴石橄榄岩理论密度更低的软流圈对应的地壳平均密度太低,这说明低密度的高热软流圈不可能支撑起平均近 5 000 m 高程的青藏高原。

关于青藏高原厚壳薄幔特征有两种不同的成因解释,Tapponnier^[16]等认为青藏高原北部岩石圈地幔并没有发生增厚,岩石圈地幔被陆内俯冲作用消减到了软流圈的深部,地壳则通过低角度逆冲断裂向北东叠置增厚,陆内俯冲作用是新生代岩浆产生的主要原因。岩石圈双倍增厚-减薄模型强调岩石圈地幔与地壳一样发生了双倍增厚,其变形遵循粘滞性蠕变,双倍增厚的岩石圈地幔因重力不稳定而诱发软流圈小尺度对流使岩石圈地幔发生快速减薄^[4]。岩石圈地幔的变形机制与所处温度、压力、应力性质、应力大小以及岩石圈缩短速率密切相关,这是一个仍处于探索性的领域。岩石圈在垂向上通常被划分为力学岩石圈地幔和热学岩石圈地幔,力学岩石圈地幔是岩石圈承载应力的主体,热学岩石圈地幔具有力学岩石圈地幔与软流圈的过渡属性,蠕变可能是热学岩石圈地幔的重要应变方式。岩石圈双倍增厚过程中,软流圈压力不断增大,熔点不断提高,软流圈不可能产生岩浆活动。陆内俯冲模型可较好地解释岩石圈增厚过程中软流圈内部的温度场扰动和岩浆产生的机理。但羌塘岩浆起源-分凝深度随时间的增大和区域上碱性钾质、超钾质岩浆活动自羌塘向南北两侧的迁移规律并未得到很好的解释。这些特征意味着岩石圈地幔在缩短过程中存在增厚,只不过它们在增厚过程中伴随闪石和金云母的脱水-熔融减薄,而未达到双倍增厚的程度。根据青藏高原的地震层析成像几何形态分析^[17],喜马拉雅-雅鲁藏布江之下岩石圈厚度巨大,它是印度大陆岩石圈向高原内部软流圈插入的结果。位于藏南和藏北俯冲板片前缘的冈底斯和羌塘地区,因俯冲板片向软流圈内的入和岩石圈的增厚下沉,软流

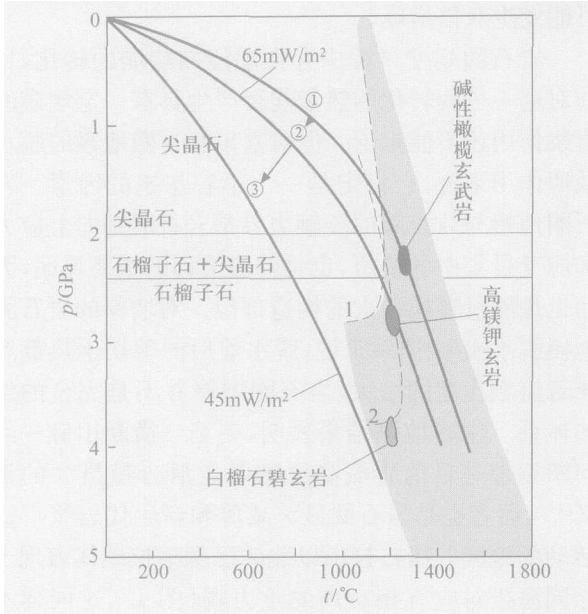


图4 羌塘新生代不同岩石系列岩浆起源-分凝深度关系

Fig. 4 Relationship between magma originating and segregating depth for different series of Cenozoic volcanic rocks in the Qiangtang area

—据玄武岩起源推测的早期地温梯度; —65 mW/m²地表热流对应的热传导地温(热传导地温据 Chapman 等, 1977)^[13]; —据藏北地表热流估算的热传导地温;虚线:1—角闪石的稳定范围(低温稳定);2—金云母+顽火辉石稳定范围(据 Allen 等, 1972;转引自林景仟, 1987)^[14];阴影部分为橄榄岩的干固熔线和湿固熔线确定的范围(Grenn, 1989)^[15];椭圆形分别表示碰撞前碱性钠质玄武岩系列到碰撞后的高 Mg[#] 钾玄武岩系列-碱性钾质-超钾质系列的形成条件

石圈的不断缩短增厚,软流圈顶部温度不断降低,当岩石圈厚度达到 100~120 km 时,金云母的分解使地幔发生极低程度熔融。当岩石圈厚度超过这一熔融-分凝的极限深度时,软流圈顶部温度将小于岩浆熔融-分凝的最低温度,青藏高原腹地 10 Ma 以来火山作用的终止可能就是岩石圈温度持续降低的结果。

4 讨论

关于青藏高原地壳双倍增厚过程中,岩石圈地幔如何变化一直存在较大的认识分歧。这个问题既

圈受到比地壳更大的体积压缩,从而产生极大的内膨胀应力和上涌动力。内应力的不断积累将使岩石圈增厚阻力持续增大,直至力学岩石圈地幔沿构造薄弱带破裂,软流圈内压通过岩石圈的破裂走滑和岩浆作用而快速释放,局部将伴随软流圈的底辟穿刺。软流圈内压的释放使岩石圈缩短增厚得以重新进行,岩石圈缩短增厚也随之进入一个新的发展阶段。当软流圈内压再度快速释放时,岩浆分凝深度也随岩石圈厚度的增大而增大,从而形成岩浆性质和分凝深度随时间脉动式不断增大的演变规律。

References :

- [1] MENG Lingshun. Gravitation structure of crust [M]. Lithospheric structure and evolution of Qinghai-Tibet plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 83-93 (in Chinese).
- [2] WOLLARD G P. New gravity system EM dash changes in international gravity base values and anomaly values [J]. Geophysics, 1979, 44(8): 1352-1366.
- [3] RINGWOOD A E. Composition and petrology of the Earth's mantle [M]. Translated by YANG Meie, HE Yongnian, XU Huaiji, et al. Beijing: Seismological Publishing House, 1981: 101-130.
- [4] ENGLAND P, HOUSEMAN P. Extension during continental convergence with application to the Tibetan plateau [J]. Geophys Res, 1989, 94: 17561-17579.
- [5] YUAN Xuecheng. Geophysical tectonic framework of lithosphere [M]. YUAN Xuecheng. Chinese geophysical album. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 87 (in Chinese).
- [6] CHI Xiaoguo, LI Cai, JIN Wei. Cenozoic volcanism and lithospheric tectonic evolution in Qiangtang area, northern Qinghai-Tibet plateau [J]. Science in China: Series D, 2005, 48(7): 1011-1024.
- [7] QIU Jiaxiang, LIN Jingqian. Petrochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 64-117 (in Chinese).
- [8] GHIORSO M S, CARMICHAEL I S E. A regular solution model for metaluminous silicate liquids: applications to geothermometry, immiscibility, and the source regions of basic magmas [J]. Contrib Mineral Petrol, 1980, 71: 323-342.
- [9] TURNER S, ARNAUD N, LIU J Q, et al. Post-collisional, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts [J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 45-71.
- [10] CHUNG S L, LO C H, LEE T Y, et al. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago [J]. Nature, 1998, 394: 769-773.
- [11] WANG Qi, ZHANG Peizhen, FREYMUELLER J T. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements [J]. Science, 2001, 294: 574-577.
- [12] CHI Xiaoguo, LI Cai, JIN Wei, et al. Spatial-temporal evolution of Cenozoic volcanism and uplifting in North Tibet [J]. Geological Review, 1999, 45 (Suppl): 978-986 (in Chinese).
- [13] CHAPMAN M D S, POLLACK H N. Regional geotherms and lithospheric thickness [J]. Geology, 1977, 5: 265-268.
- [14] LIN Jingqian. Introduction of magmatic rock genesis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 263-276 (in Chinese).
- [15] GREEN D H. Experimental petrology [M]. JOHNSON R W. Intraplate volcanism in Eastern Australia and New Zealand. Sydney, N. S. W.: Cambridge University Press, 1989: 321-324.
- [16] TAPPONNIER P, XU Zhiqin, FRANCOISE R, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau [J]. Science, 2001, 294(23): 1670-1677.
- [17] KIND R, YUAN X, SAUL J, et al. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: evidence for Eurasian plate subduction [J]. Science, 2002, 298: 1219-1221.

参考文献:

- [1] 孟令顺. 地壳的重力构造 [M]. 青藏高原岩石圈结构构造和形成演化. 北京:地质出版社, 1996: 83-93.
- [3] 林伍德 A E. 地幔的成分与岩石学 [M]. 杨美娥, 何永年, 胥怀济, 等译. 北京:地震出版社, 1981: 101-130.
- [5] 袁学诚. 岩石圈地球物理构造格架图 [M]. 袁学诚. 中国地球物理图集. 北京:地质出版社, 1996: 87.
- [6] 迟效国, 李才, 金巍. 藏北羌塘地区新生代火山作用与岩石圈构造演化 [J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(5): 399-410.
- [7] 邱家骥, 林景仟. 岩石化学 [M]. 北京:地质出版社, 1991: 64-117.
- [12] 迟效国, 李才, 金巍, 等. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原隆升 [J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 978-986.
- [14] 林景仟. 岩浆岩成因导论 [M]. 北京:地质出版社, 1987: 263-276.