

中国东部壳-幔、岩石圈-软流圈之间的 相互作用带:特征及转换时限

路凤香¹ 郑建平^{1,2} 侯青叶² 李方林¹

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:中国东部中—新生代, 下部岩石圈存在壳与幔、岩石圈与软流圈两个相互作用带, 它们是重要的岩浆源区, 在层圈相互作用中, 热和物质的交换及其动力学过程是引起中、新生代岩石圈内部层圈间的厚度调整、岩石圈不均匀减薄以及区域构造-岩浆-成矿作用的重要机理。大陆内部的壳-幔作用有 3 种类型: 地幔来源的底侵熔体与下地壳的作用; 下地壳拆沉进入弱化(weakening)了的岩石圈地幔二者发生的作用以及陆-陆碰撞深俯冲带的壳-幔相互作用。它们形成的火山岩组合有一定的差别, 但源区都含有地壳组分。岩石圈-软流圈的作用带也是重要的岩浆源区, 源区是以软流圈地幔为主, 基本不含地壳组分。东部岩石圈的减薄时间大体与出现大规模软流圈来源的玄武岩喷发的时间一致, 也与上述两类层圈作用转换的时间一致, 大约在 100 Ma 以后。

关键词:壳-幔相互作用; 岩石圈-软流圈相互作用; 下地壳与弱化岩石圈地幔的作用; 岩石圈减薄

中图分类号: P542 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-365(2006)04-0773-09

在研究岩石圈三维结构并进行层圈划分时, 一个值得重视的问题是, 在壳-幔之间及岩石圈-软流圈之间存在相互作用带(过渡带), 研究两个过渡带的意义在于: ①它们是重要的岩浆源区; ②能够进一步认识岩石圈的动力学过程; ③相互作用带与不少固体矿产和能源资源有着极为密切的联系。笔者认为在层圈相互作用中, 热和物质的交换及其动力学过程是引起中、新生代岩石圈内部层圈间的厚度调整、岩石圈不均匀减薄以及区域构造-岩浆-成矿作用的重要机理。笔者将通过对中国东部典型地区研究来讨论这两类层圈相互作用的特征, 以及二者转换的时限。

1 壳-幔相互作用带的特征

中国东部中生代是壳-幔相互作用最活跃的时期, 不同地区的活跃期限有差别, 在华北和秦岭造山带主要集中在 190~100 Ma, 珠江口盆地、三水盆地、合肥盆地可以延到古近纪。这一时期的构造总体上处于挤压-弱拉伸状态, 而且相当一段时期地壳与地幔在动力学特征方面处于解耦, 即地壳发生多次拉伸与挤压^[1], 但地幔岩石圈并没有同步的响应。

依据板块学说所建立的“构造-岩石组合”明确认为, 在大洋俯冲带(岛弧和陆缘弧)广泛分布的钙碱性火成岩是壳幔再循环相互作用的产物。中国东部中生代火山岩的分布范围广, 在东北地区从东到西跨越了 1 000 km 以上, 华南地区分布的宽度也在 300 km 以上, 面式分布的特征难以用统一的大洋俯冲机制作出解释。据已有资料, 在东北地区, 燕山活动带, 秦岭造山带及华北等地区, 参与壳-幔之间相互作用的三个端元是: 下地壳、岩石圈地幔和软流圈地幔^[2-4], 后者主要起了提供热源的作用, 在少数地区, 虽然也有软流圈来源的岩浆出现, 但它们的源区几乎都加入了地壳组分, 这是壳-幔相互作用最基本的标志。导源的岩浆以高钾钙碱性火成岩系列为主, 地球化学特征表现为: 适度富集 LREE, 亏损 HFSE (特别是 Nb), ϵ_{Nd} 为负值, 其中基性岩的该值为 0 ~ -10, 中基性-中性岩低于 -10。经研究辨认出了上述典型地区壳-幔相互作用的类型有以下 3 种:

(1) 地幔来源的底侵熔体与下地壳的作用

幔源岩浆侵位于地壳底部, 对下地壳提供了热源, 诱发下地壳及少量岩石圈地幔组分熔融。导源的岩浆为中性安山

收稿日期: 2005-12-27; 收回日期: 2006-06-12

基金项目: 国土资源部重点科技专项计划项目(20001010203)资助。

作者简介: 路凤香, 女, 1935 年生, 教授, 博士生导师, 岩石学专业。主要从事壳-幔组成及动力学研究; E-mail: lufx@263.net。

岩、粗安岩等,因处于地壳挤压的环境地壳缩短,加之岩浆底侵作用,造成了加厚的下地壳。北京西山中一晚侏罗世髻髻山组粗安岩属于这种类型^[6]。髻髻山组粗安岩岩性变化比较小, $(La/Yb)_N$ 变化范围为 2~42, $(La/Nb)_N$ 地区平均值 4.44~12, Sr/Y 变化范围为 167.67~36.42, HFSE 具有明显的负异常, $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化范围为 -14.8~-17.6。源区成分为下地壳+底侵玄武岩+岩石圈地幔组分(较少),可以用 MMSH(熔融、混合、储存、均一化)过程进行描述,即上述源区成分发生熔融后,在岩浆房中还经历过均一化的过程。代表性的壳幔过渡带(以南秦岭为例)组成见图 1。图中的变辉长岩为秦岭碰撞造山后底侵的基性岩^[6]。

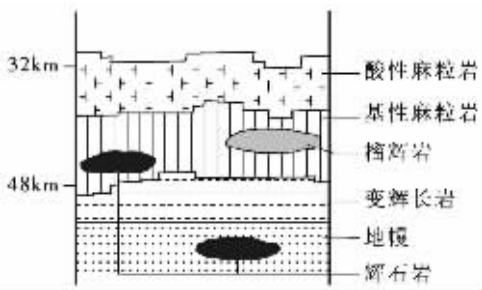


图 1 南秦岭下地壳-地幔过渡带剖面^[7]

Fig.1 Section of the transition zone between the lower crust and mantle under the South Qinling^[7]

(2) 地壳拆沉进入弱化(weakening)了的岩石圈地幔,二者发生作用

这是笔者最近提出的与大洋俯冲作用无直接关系的壳-幔相互作用的一种模型^[9]。经研究,松辽盆地周边中生代火山岩以及大兴安岭的中生代玄武岩的成因与伊佐奈歧大洋板片俯冲并没有直接关系^[9-12]。在非俯冲带广泛分布的中生代火山岩的形成机制问题,一直被同行所关注。

传统的板块理论认为,岩石圈具有刚性的特征,但是近 10 年来,随着大陆造山作用研究的逐步深入,对上述假设提出了挑战,1997 年召开的美国地质学会以“大陆板块内部构造”为主题的会议,“大陆板块内部各种因素导致的岩石圈强度弱化及先存构造薄弱带活化”问题成为了探讨板内变形和造山机制的重要思路^[14]。2002 年在美国丹佛召开的构造地质研讨会^①也强调了流变学与大陆造山作用的关系,并且提出岩石化学弱化(weakening)的条件及意义,认为微量元素可以改变矿物构造缺陷的数量和变形机制,对通常认为的不含水的矿物(如橄榄石、石英等),如果存在含水的缺陷和附着于矿物表面的含水络合物,则会导致矿物发生明显的弱化。可见岩石圈地幔在条件适当特别是在水存在的条件下可以发

生弱(软)化。当岩石圈发生弱化后,它逐渐由刚性转变为塑性,这样则加强了下地壳与弱化岩石圈的相互作用,并可以与俯冲带下插板片与上覆楔形地幔的作用相比拟。

已有资料表明,大多数中-基性火山岩的源区包含有下地壳+岩石圈地幔+软流圈地幔的组分,以辽西为例:

早白垩世时期岩石圈由挤压转变为弥散式的弱拉伸状态,同时软流圈地幔发生小规模多中心的底辟式上涌,进一步为壳幔过渡带提供了热源,形成了晚中生代的小型盆-岭构造及火山-沉积盆地。岩石圈地幔最上部受到热及流体的作用,流变学性质由刚性逐渐弱化向塑性转变。加厚了的下地壳因密度大于下伏的岩石圈地幔^[9],造成密度倒置,部分下地壳物质拆沉进入弱化的岩石圈地幔后,二者发生相互作用,形成下地壳+岩石圈地幔的富集源区。在盆-岭构造的盆地方,由于有小型的软流圈底辟体上涌,也可以出现少量的亏损地幔熔融的岩浆,这样则会形成下地壳+岩石圈地幔+软流圈地幔三者的相互作用,及弱富集的源区。重要的是,上述两种地幔源区都含有下地壳组分,岩浆仍然显示 HFSE 的负异常,但 $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化范围大。义县组(K₁)高 Mg 玄武岩及中基性火山岩属于该类型,岩浆房中还伴随有岩浆的 AFC 过程及岩浆混合,早白垩世的玄武岩-粗安岩-英安岩的火山岩组合为代表性的岩浆产物。与上述第(1)类壳-幔相互作用相比,构造背景及软流圈的活动有所差别,现将两种火山岩的岩石地球化学特征对比如下:

由表 1 可看出,髻髻山组具有高 Sr 低 Y 的特征,反映出源区地壳的加厚(45 km),而义县组的该值下降(图 2),相应的地壳厚度为 35~30 km^[9],为了对比,图中还表示了两件软流圈来源的玄武岩的投影点(图 2 中的 3),后者形成于岩石圈的强拉伸状态,整体岩石圈厚度薄, Sr/Y 值很低。

从图 3 髻髻山组、义县组以及新生代软流圈来源的玄武岩的 $(La/Nb)_N$ 变化可看出,该比值反映高场强元素亏损的程度,愈高则亏损愈强,暗示源区有地壳组分,特别是下地壳组分的加入^[20],新生代玄武岩 Nb 呈现富集状态,该值很低。

中生代壳幔过渡带处于高热状态,因而在地幔顶部出现弱化的可能性很大。此外地幔中水的释放进一步提高了刚性地幔弱化的可能性。地幔中水的来源有:①地幔中的橄榄石和辉石含有结构水,含量分别为 0.01%和 0.02%~0.065%^[21];②地幔橄榄石和辉石中分布有原生的流体包裹体,主要成分为 CO₂、H₂O 和 CO,表明存在自由流体相,是在小于 70 km 的地幔中捕获的^[24],当地幔受到热或应力的扰动,这些水被激活逃逸进入地幔围岩;③新生代汉诺坝玄武岩中代表底侵物质的下地壳捕虏体中约有 10%的样品含有黑云母^[23],它们拆沉进入地幔后,发生脱水,不仅与地幔发生相互作用,同时也起了弱化岩石圈的作用。如果在这个地带频繁地发生熔融,则更加速了原先的刚性岩石圈化学弱化的进程,为下地壳与地幔发生相互作用提供有利的环境,也为下地壳与岩石圈地

① 郭安林,张国伟译. 构造地质学和大地构造学的新航程. 构造地质研讨会,美国丹佛,2002,西北大学地质学系,2003年10月。

表 1 燕山地区中—晚侏罗世髫髻山组与早白垩世义县组火山岩岩石地球化学特征对比

Table 1 Comparison of the petrological and geochemical characteristics of volcanic rocks between the Mid-Late Jurassic Tiaojishan Formation and Early Cretaceous Yixian Formation in the Yanshan area

	髫髻山组(北京地区)	义县组(辽西地区)
野外特征	火山岩总体分布呈近EW向,具体的火山盆地呈近NE向,火山产物的最大厚度为4900 m,形成高山	火山岩主要充填于NNE向的火山—沉积盆地中,最大厚度小于3000 m
岩石组合	以粗安岩,及同成分的火山碎屑岩为主体	以橄榄玄武岩—粗安岩(安山岩)—英安岩—流纹岩为主体
地壳厚度	经估算为45 km [16]	30~35 km
SiO ₂	变化范围: 48%~68%, 峰值: 58%	变化范围: 46%~76%, 峰值: 64%
Mg#	变化范围: 50~12, 峰值: 40	变化范围: 76~20, 峰值: 55
(La/Yb) _N	变化范围: 2~42	变化范围: 10~31
(La/Nb) _N	地区平均值变化范围: 4.44 ~ 12	地区平均值变化范围: 4.06 ~ 6.06
Sr/Y	变化范围: 167.67 ~ 36.42	变化范围: 65.33 ~ 19.7
ε _{Nd(t)}	变化范围: -14.8 ~ -17.6	变化范围: -5~-15.1

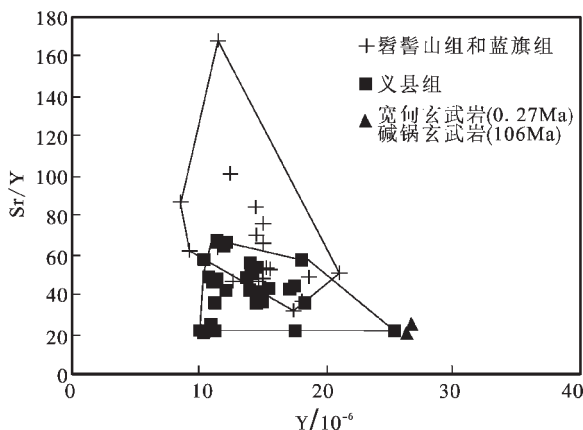


图 2 燕山造山带中生代火山岩 Sr/Y-Y 图解

Fig.2 Sr/Y-Y diagram of Mesozoic volcanic rocks in the Yanshan orogenic belt

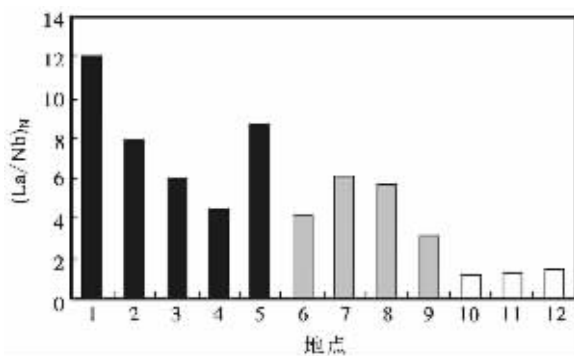


图 3 燕山地区髫髻山组、义县组火山岩及中生代玄武岩的(La/Nb)_N分布频率

1—辽西喀参 1 井蓝旗组^[17]; 2—大台及燕翅髫髻山组^[6]; 3—辽西建昌蓝旗组^[18]; 4—辽西建昌蓝旗组^[2]; 5—冀北下板城蓝旗组^[19]; 6—辽西义县组^[18]; 7—辽西惠德营子义县组^[17]; 8—彰武叶茂台义县组^[17]; 9—辽西建昌及凌源义县组^[2]; 10—辽宁碱锅新生代玄武岩^[20]; 11—辽宁宽甸新生代玄武岩^[20]; 12—河北汉诺坝新生代玄武岩^[21]

Fig.3 (La/Yb)_N distribution frequency of volcanic rocks of the

Tiaojishan and Yixian formations and

Meso-Cenozoic basalts in the Yanshan area

1—Lanqi Formation from the Kacan No. 1 hole^[17]; 2—Tiaojishan Formation from Datai and Yanchi^[6]; 3—Lanqi Formation from Jianchang, western Liaoning^[18]; 4—Lanqi Formation from Jianchang, western Liaoning^[2]; 5—Lanqi Formation from Xiabancheng, western Liaoning^[19]; 6—Yixian Formation from western Liaoning^[18]; 7—Yixian Formation from Huideyingzi, western Liaoning^[17]; 8—Yixian Formation from Yemaotai, Zhangu^[17]; 9—Yixian Formation from Jianchang and Lingyuan, western Liaoning^[2]; 10—Cenozoic basalts from Jianguo, Liaoning^[20]; 11—Cenozoic basalts from Kuandian, Liaoning^[20]; 12—Cenozoic basalts from Hannuoba, Hebei^[21]

幔的密度调整与小规模拆沉提供了有利场所。

上述模型大体上可以与俯冲洋壳和上覆楔形地幔的相互作用的特征与过程相对比。

需要强调的是,由于下地壳与地幔的密度差小,上涌的软流圈底辟体规模小,模型不支持在下地壳拆沉时,压迫整个巨厚的岩石圈地幔发生拆沉并引发软流圈大规模上涌。

(3) 陆-陆碰撞深俯冲带的壳幔相互作用

秦岭—大别造山带在三叠纪末发生了南秦岭(扬子地块)向北俯冲于北秦岭(华北块体)之下的深俯冲作用,178 Ma 在信阳明港地区出露的安山玄武角砾岩属于钙碱性系列,具有 HFSE 的负异常,Pb 同位素资料表明,源区为拆离俯

冲的南秦岭下地壳,上覆楔形地幔的滑石橄榄岩遭受了板片熔融释放的富 Si 熔体/流体改造,并与下地壳物质共同被捕获于上述钙碱性岩浆中^[24]。大别山磨子潭—晓天断裂带以南,沿近 EW 向分布有成群的辉长岩—辉石岩岩体群,它们形成于 120~130 Ma,对其成因及源区特征有不同的认识,根据已有的岩石与地球化学资料分析,比较同意李曙光^[27]提出的俯冲陆壳析出流体交代楔形地幔的成因模型,即岩体群是南秦岭俯冲陆壳与上覆属于华北块体的岩石圈地幔相互作用的产物。与信阳地区的火山岩相比,前者是以楔形地幔为主要的源区组分,而后者以俯冲陆壳为主要源区组分。非常有意义的是,继续沿秦岭—大别的北界向东延伸,在合肥盆地,出露的拉斑玄武岩是大陆深俯冲的上覆楔形地幔熔融产物,其喷发时代为 58.7~59.7 Ma^[28],可见深俯冲的影响从时间尺度,一直持续到古近纪;从空间上深俯冲作用一直延伸到鲁西地区^[29],与深俯冲带相距达 450 km 左右。因此对大陆深俯冲的影响不可低估,秦岭以北,华北南缘出露的 140 Ma 左右的小秦岭—熊耳山斑岩型钼—钨—金矿带,很可能与深俯冲作用存在成因联系,尚需进一步研究。

研究区在 190~100 Ma 期间,尚未发现大面积的以软流圈亏损地幔来源为主导的岩浆活动。

100 Ma 以后软流圈大规模上涌导致岩石圈减薄及以软流圈来源的岩浆广泛喷发,因此岩石圈减薄的时间在 100 Ma 以后,而地壳厚度变化的时间最早开始于中侏罗世,二者并不同步。

2 岩石圈—软流圈相互作用带的特征

岩石圈—软流圈相互作用带位于二者的过渡位置。地球物理资料表明,该界面形态复杂,出现水平互层与垂直并置的接触格局。例如中国东部不少地幔的电性结构图件及成果中报道了存在有两个甚至多个高导层^[30,31],在东乌珠—丹东,爱辉—四平—德州—随县—广州,平遥—曲阜—连云港及诸城地区,第一高导层在 50~120 km,第二高导层>200 km^[31],秦岭

造山带内部第一高导层在 80~100 km,第二高导层 220 km,在湖南平江(扬子块体内)第一、第二高导层十分接近,深度为 180~200 km。两高导薄层之间的电阻率高,或显示变化较大的特征。上述成果暗示中国东部下部岩石圈的电性结构表现出高导层的多次出现及互层特征。据三维地震层析资料,在地幔一定范围内高速和低速体形成陡接触并存的配置格局^[32],显示出软流圈呈“蘑菇云”状上涌的地幔置换样式^[34]。

根据徐佩芬^①所做的两地震层析剖面资料(表 2)综合后粗略估计,出现低速物质的最小深度为 50~60 km,在 60~100 km 的范围内,还保存有若干高速块体,在 100~150 km 处以低速为主,150~300 km 仍为高、低速共存。总的看来两个剖面显示了在深部低速体呈直立,而在 100~150 km 处大体呈水平的“蘑菇云”状。因此,如果三维层析分析的结果是可信的,是否可以以现今 60~100 km 的地带作为岩石圈和软流圈的相互作用带,特别是在这个范围内可以找到比较可信的岩石地球化学证据。

岩石地球化学的资料表明,中国东部(100 Ma 以后),在 60~120 km 上述的 L/A 过渡带的范围内,两层圈发生了相互作用,而且是这一时期拉斑—碱性玄武岩岩浆的主要源区。地球化学特征表现为: ϵ_{Nd} 为正值,未见 HFSE 负异常,表明源区基本不含地壳组分。

(1) 这一时期玄武岩的源区几乎都包含 DM 和 EMI 两个地幔端元,前者是软流圈的组分,后者代表大陆岩石圈的组分,但总体上以前者为主。

(2) 一些地区,随着玄武岩喷发时间由老到新,源区 DM 的组分逐渐增加,以女山地区为例,喷发时间由 36.2 Ma → 15.4 Ma → 10.9 Ma → 9.1 Ma → 5.9 Ma, ϵ_{Sr} 逐渐变小,由 -4.25 → -1.84 → -15 → -10 → -17.3, ϵ_{Nd} 逐渐变大由 3.16 → -0.35 → 5.7 → 4.9 → 6.8。显示出存在软流圈交代岩石圈的相互作用,并逐渐趋于完成。类似的地区还有下辽河盆地的大民屯。

可以看出岩石圈与软流圈的过渡带也就是二者的相互作用带,该带大体可以与 Mckenzie^[34]提出的热边界层类似,也与 D.L Anderson^[33]提出的 Perisphere 层圈相当,原作者们

表 2 黄石—蓬莱及信阳—黄骅两剖面的 P 波波速垂向分布

Table 2 Vertical distribution of P wave velocity at the Huangshi—Penglai and Xinyang—Huanghua sections

剖面	30~50 km	50~60 km	60~100 km	100~150 km	150~300 km
黄石-蓬莱	以高速为主	出现低速体	高、低速体共存	低速为主	高、低速体共存
信阳-黄骅	高、低速体共存	低速体薄层	高、低速体共存	低速为主	高、低速体共存

注:据徐佩芬^①2001 资料综合。

① 徐佩芬,中国科学院地质地球物理研究所博士后出站报告,2001.

表 3 中国东部代表性地区壳-幔作用导源的岩浆和软流圈来源岩浆活动时代

Table.3 Ages of activities of magmas derived from the crust-mantle interaction zone and lithosphere-asthenosphere interaction zone in the representative areas of eastern China

序号	地点	钙碱性岩浆最后活动的时间	软流圈来源玄武岩最早活	资料来源
		(Ma)	动时间(Ma)	
1	松辽盆地内		K ₂ 青山口组	[10]
2	义县-阜新*	117	100	[50,51]
3	山东蒙阴-临朐	115	23	[51, 53]
4	鲁东(即墨-大西庄)	120	73	[52,54]
5	华北平原北缘		64.52	[53]
6	安徽当涂-宁芜	105	53.18	[55,53]
7	大别山北部	90~124	81	[56,57]
8	合肥盆地**	58	28	[28]
9	珠江口盆地**	24	17	[58]

注: * 两种类型的火山岩出露于同一剖面; ** 两种类型火山岩出露于同一地区; 其他为出露于相邻地区; 1~2 为中生代沉积盆地; 3~4, 6~7 为中生代火山-沉积盆地; 8~9 为新生代火山沉积盆地。

都认为这个地带都是重要的岩浆源区。

岩石圈-软流圈的相互作用带(过渡带)的组成为岩石圈地幔+软流圈地幔,后者为主要组成。从中国东部地幔捕虏体的成分看,古老(太古代)岩石圈地幔与新生的软流圈地幔组分在矿物、岩石、地球化学特征方面有明显区别^[9],从而可以认识二者的作用,但是从目前对地幔捕虏体的定年结果,内蒙古阿巴嘎旗、河北汉诺坝和安徽女山等地的捕虏体都属于元古宙^[37~39],湖北大洪山属于古生代^[9]。它们的岩石地球化学特征很难与新生的软流圈地幔区分,这两者的作用目前还难以辨认。

3 两类层圈相互作用的转换及岩石圈减薄的时限

近年来国内同行对中国东部岩石圈减薄的时间问题进行了热烈的讨论,不少人认为岩石圈的拆沉减薄发生于中生代,是下地壳拆沉时裹挟了巨厚的岩石圈共同下沉的结果^[41,42],并认为与中生代华北地区的成矿作用有联系^[43]。另一种认识是,减薄开始发生于晚白垩世-新生代,在华北为 100 Ma 左右^[45,44]。之所以存在分歧是由于对深部过程发生的机理与标志有不同认识。目前多数人已经达到共识的是,中国东部岩石圈减薄是指该区的岩石圈厚度由古生代的 200 km 转变为中生代的 120~60 km 的深部地质事件^[46~49],同时伴随岩石圈-软流圈界面的抬升。尽管对减薄机制有不同认识,但是在岩石圈减薄时伴随软流圈上涌这一点已达到共识。

笔者认为岩浆活动类型、特征以及其中的深源捕虏体是认识深部作用最可靠、最直接的窗口,也是确定深部层圈相互作用类型的主要依据。中国东部晚白垩世-新生代软流圈来源的玄武岩分布广泛,从黑龙江到海南岛,从吉林到内蒙古、山西分别跨越了约 4 000 km 和 1 000 km 的范围,如前所述,这些玄武岩是软流圈活动大面积上涌的直接证据,也是

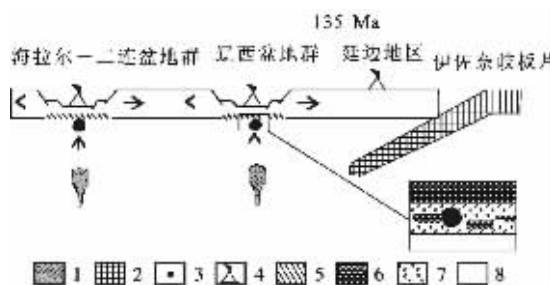


图 4 J₃-K₁ 时期辽西及邻区火山-沉积盆地形成时的壳-幔作用模型

- 1—小规模软流层地幔热底辟体; 2—俯冲的伊佐奈岐板片;
- 3—岩浆源区; 4—盆地内的火山活动; 5—壳幔作用带;
- 6—下地壳下部; 7—弱化后的岩石圈; 8—岩石圈

Fig.4 Model of crust-mantle interaction beneath western Liaoning and its adjacent areas during the formation of volcanic-sedimentary basins in the Late Jurassic and Early Cretaceous

- 1—Small-scale asthenospheric mantle thermal diapir; 2—Subducted Izunaqi slab; 3—Magma source; 4—Volcanic activity in basin;
- 5—Interaction zone between crust and mantle; 6—Lower part of the lower crust; 7—Weakening lithospheric mantle; 8—Lithosphere

岩石圈-软流圈相互作用诱发的岩浆结晶产物,因此这一事件发生的时间应该是岩石圈减薄的主要时期。在中生代 J₃-K₁ 时期也有小型的软流圈底辟体上涌(图 4),但它们不能反映岩石圈大规模的减薄,仍属于壳-幔相互作用的范畴,岩浆源区包含地壳组分,岩浆以钙碱性为主,并且与内生矿有密切关系。现选择一些代表性地区,将岩浆类型由壳-幔

作用导源的钙碱性转变为软流圈来源的碱性玄武岩的喷发的时间列于表 3。

从表 3 可以看出,在不同地区软流圈来源的火山岩喷发时代有差别,这与该区的构造背景、地幔地温及上涌通道不同有关,也从一个侧面说明“蘑菇云”状^[3]的软流圈上涌的不均一性。可以概略地认为东部岩石圈大规模减薄主要发生在 100 Ma 以后。

4 结 论

(1) 壳-幔及岩石圈-软流圈相互作用(过渡)带,是重要的岩浆源区,对它们的辨认和研究能够进一步认识岩石圈的动力学过程,而且与矿产资源有着密切的联系。因此,既具有理论意义,又具有实际意义。

(2) 大陆内部的壳-幔作用与大洋俯冲带不同,本文提出的下地壳与弱化岩石圈的相互作用可以概略地解释和描述与大洋俯冲作用无关的壳-幔再循环。

(3) 秦岭—大别等地与大陆深俯冲有关的壳-幔作用的影响不可低估,它们与斑岩型矿床的关系值得深入研究。

(4) 中国东部中生代下地壳的不均一小规模的拆沉属于岩石圈内部地壳厚度及密度的调整,与岩石圈大规模减薄并不同步。岩石圈减薄的时间,应该与两类层圈相互作用转换的时间及大面积软流圈来源的玄武岩喷发的时间基本一致,大体在 100 Ma 以后。

参考文献 (References):

- [1] 崔盛芹. 燕山地区中生代陆内造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
Cui Shengqin. Mesozoic Intracontinental Orogenism, Yangshan Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张瑞生. 凌源—建昌中生代火山沉积盆地特征及深部动力学背景[D]. 中国地质大学(武汉)博士论文, 2005.
Zhang Ruisheng. Characteristics of Lingyuan—Jianchang Mesozoic Volcanic—Sedimentary Basin and its Dynamic Significances of Deep Processes [D]. Ph.D. Thesis: China University of Geosciences (Wuhan) 2005(in Chinese with English abstract).
- [3] 匡少平. 大别造山带古—中生代镁铁—超镁铁岩石地球化学特征及其构造意义[D]. 中国地质大学(武汉)博士论文, 2000.
Kuang Shaoping. Geochemical Characteristics and Their Tectonic Significance of Paleozoic—Mesozoic Mafic—Ultramafic Rocks in Dabie Orogenic Belt, East Central China [D]. Ph.D. Thesis: China University of Geosciences (Wuhan) 2000 (in Chinese with English abstract).
- [4] 黄方, 李曙光, 周红英, 等. 大别山碰撞后镁铁—超镁铁岩的 U—Pb 同位素地球化学: 壳—幔相互作用及 LOMU 端元[J]. 中国科学(D 辑)2002, 32(8): 625~634.
Huang Fang, Li Shuguang, Zhou Hongying, et al. U—Pb isotope geochemistry of mafic—ultramafic rocks after collision in Dabie mountain: Interaction of crust—mantle and LOMU end member[J]. Science in China (Ser. D), 2002, 32 (8) 625~634(in Chinese).
- [5] 路凤香. 中国东部典型地区下部岩石圈的层圈相互作用[A]. 见: 路凤香, 吴其反, 郑建平, 等. 中国东部典型地区下部岩石圈组成、结构和层圈相互作用[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.
Lu Fengxiang. Interaction between interior layers of the lower lithosphere in typical areas, eastern China[A]. In: Lu Fengxiang, Wu Qifan, Zheng Jianping, et al. Composition, Structure, and Interaction Between Interior Layers of Lower Lithosphere in Typical Area, Eastern China [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2005.
- [6] 李伍平, 李献华, 路凤香. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 523~532.
Li Wuping, Li Xianhua, Lu Fengxiang. Genesis and geological significance for the middle Jurassic high Sr low Y type volcanic rocks in west Liaoning[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 523~532(in Chinese with English abstract).
- [7] 路凤香, 王春阳, 胡宝群, 等. 南秦岭下地壳组成及岩石圈的拆离俯冲作用[J]. 中国地质, 2003, 30(2): 113~119.
Lu Fengxiang, Wang Chunyang, Hu Baoqun, et al. Lower crust composition and lithosphere decoupling—subduction of South Qinling[J]. Geology in China, 2003, 30 (2): 113~119(in Chinese with English abstract).
- [8] 路凤香, 朱勤文, 李思田, 等. 岩浆岩—研究盆地深部过程的探针[A]. 见: 李思田, 路凤香, 林畅松主编. 中国东部及邻区中、新生代盆地演化及动力学背景 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. 169~186.
Lu Fengxiang, Zhu Qingwen, Li Sitian, et al. Igneous—probe of the study on deep—processes of basin [A]. In: Li Sitian, Lu Fengxiang, Lin Changson (eds.). Evolution of Mesozoic and Cenozoic Basin in Eastern China and Their Geodynamic Background [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996, 169~189(in Chinese with English abstract).
- [9] 张昱, 赵焕力, 李仰春, 等. 大兴安岭北段根河地区早白垩世火山杂岩特征及成因探讨[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 405~410.
Zhang Yu, Zhao Huanli, Li Yangchun, et al. Characteristics of Early Cretaceous volcanic complexes in the Genhe area in the northern segment of the Daxiangnanling Mountains: with a discussion of their genesis[J]. Geology in China, 2005, 32(3): 405~410 (in Chinese with English abstract).
- [10] Lu Fengxiang, Zhu Qingwen, Li Sitian, et al. Mesozoic volcanism surrounding Songliao basin, China: Implication for the relationship with evolution of basin [J]. Journal of China University of Geosciences, 1997, 8 (1): 72~77.
- [11] 朱勤文, 路凤香, 谢意红, 等. 大陆边缘扩张型活动带火山岩组合—松辽盆地周边中生代火山岩研究 [J]. 岩石学报, 1997, 13 (4): 551~562.
Zhu Qinwen, Lu Fengxiang, Xie Yihong, et al. Volcanic rock assemblage of extensive mobile belt in continental margin—study on Mesozoic volcanic rocks surrounding Songliao basin [J]. Acta

- Petrologica Sinica, 1997, 13(4): 551~562(in Chinese with English abstract).
- [12] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代玄武岩地球化学特征:壳幔相互作用证据[J]. 岩石学报, 1999,15(3):398~407.
Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Youde, et al. Geochemical characteristics of Mesozoic basalts in Daxinganling :Evidences for interaction between crust and mantle [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999,15(3):398~407(in Chinese with English abstract).
- [13] 邵济安, 赵国龙, 王龙, 等. 大兴安岭中生代火山活动的构造背景[J].地质论评, 1999,45(增刊)422~430.
Shao Jian, Zhao Guolong, Wang Long, et al. Tectonic background of Mesozoic volcanic activity in Daxinganling [J]. Geological Review, 1999,45(supp.)422~430(in Chinese).
- [14] Marshak S, Pluijm B, Hamburger M. Preface: The tectonics of continental interiors[J]. Tectonophysics.1997,305(1-3, Special Issue vii-x).
- [15] Gao Shan, Kem H, Liu Yongsheng, et al. Measured and calculated seismic velocities and densities for granulites from xenolith occurrences adjacent exposed lower crustal sections: A comparative study from the north China craton [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B8, 18):965~976.
- [16] Kay S M, Mpodozis C, Ramos V A, et al. Magma source variation from mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallow subduction zone and a thickening crust in central Andes (28-33S) [A]. In:Harmon R S, Rapela C W (eds.). Andean magmatism and its tectonic setting, Boulder Colorado[C]. Geol Sco Am. Spec.pap., 1991,265: 113~137.
- [17] 陈义贤, 陈文奇, 周新华, 等. 辽西及邻区中生代火山岩—年代学、地球化学和构造背景[M].北京:地震出版社,1997.279.
Chen Yixian, Chen Wenji, Zhou Xinhua, et al. Mesozoic volcanic rocks in west Liaoning province and its adjacent area—Chronology, geochemistry, and tectonic background[M]. Beijing: Seismological Press,1997.279(in Chinese with English abstract).
- [18] 李伍平.燕山-辽西中生代火山岩特征及其构造背景研究[D].中国地质大学(武汉)博士论文, 1999.
Li Wuping, Study on characteristics and tectonic background of Mesozoic volcanic rocks in Yanshan-western Liaoning Province [D]. Ph.D. Thesis: China University of Geosciences (Wuhan),1999 (in Chinese).
- [19] 李伍平, 李献华. 燕山造山带中段中晚侏罗世中酸性火山岩的成因及其意义[J].岩石学报, 2004,20(3)501~510.
Li Wuping, Li Xianhua. Petrogenesis and its implication for the middle-late Jurassic intermediate-acidic volcanic rocks in the middle section of Yanshan orogen [J]. Acta Petrologica Sinica 2004,20(3):501~510(in Chinese with English abstract).
- [20] 张宏福, 郑建平. 华北中生代玄武岩的地球化学特征与岩石成因:以辽宁阜新为例[J].科学通报, 2003,48(6)603~609.
Zhang Hongfu, Zheng Jianping. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6):603~609(in Chinese).
- [21] 支霞臣, 冯家麟. 汉诺坝玄武岩的地球化学[A].见:刘若新主编.中国新生代火山岩年代学与地球化学 [C].北京:地震出版社, 1992.114~148.
Zi Xiachen, Feng Jialin. Geochemistry of Basalts in Hannoba [A]. In: Liu Ruoxin (ed). The Age and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rock in China[C]. Beijing Seismological Press,1992.114~148(in China).
- [22] Jahn B M, Wu Fuyuan, Lo ChingHua, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of northern Dabie complex, central China[J]. Chemical Geology, 1999,157:119~146.
- [23] 谢鸿森, 侯渭, 周文戈. 地幔中水的存在形式和含水量[J].地学前沿, 2005, 12(1):55~60.
Xie Hongsen, Hou Wei, Zhou Wenge. Water content in the Earth's Mantle [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12 (1): 55~60(in Chinese with English abstract).
- [24] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 地幔橄榄岩捕虏体中的流体包裹体、岩浆包裹体和玻璃[A].见:杜乐天等主编.地幔流体与软流层(体)地球化学[C].北京:地质出版社, 1996. 230~271.
Xia Lingxi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Fluid Inclusion, Melt inclusion and Glass in Mantle Peridotite Xenolith [A]. In:Du Letian (eds). Geochemistry of Mantle Fluid and Asthenosphere[C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996(in Chinese).
- [25] 陈绍海, 张国辉, 周新华, 等. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类捕虏体的岩石特征[J].岩石学报, 1998,14(3):366~380.
Chen Shaohai, Zhang Guohui, Zhou Xinhua, et al. Petrological investigation on the granulite xenoliths from Hannoba basalts, northern Sino-Korean Craton [J]. Acta Petrologica Sinica,14(3): 366~380(in Chinese with English abstract).
- [26] 路凤香, 王春阳, 郑建平, 等. 秦岭北界岩石圈组成与结构——河南明港深源捕虏体研究[J].中国科学(D辑), 2003,3(1):1~9.
Lu Fengxiang, Wang Chunyang, Zheng Jianping.Lithospheric composition and structure beneath northern margin of the Qinling orogenic belt-on deep-seated xenoliths in Minggang region of Henan Province [J].Science in China (Series D), 2003,3 (1):1~9(in Chinese).
- [27] 李曙光, 聂永红, Hart S R, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——II 大别山同碰撞镁铁-超镁铁演的主要元素及微量元素地球化学[J].中国科学(D辑),1998,28(1):18~22.
Li Shuguang, Nie Yonghong, Hart S R, et al. Interaction between subducted continental crust and the mantle——II Major and trace element geochemistry of the syncollisional mafic-ultramafic intrusions in Dabie Mountains [J]. Science in China (ser.D). 1998, 28(1):18~22(in Chinese).
- [28] 从柏林, 王清晨, 张海政, 等. 中国合肥盆地新生代火山岩成因岩石学研究[J]. 岩石学报, 1996,12(3): 370~381.
Cong Bolin, Wang Qingchen, Zhang Haizheng, et al. Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in Hefei basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1996,12 (3): 370~381 (in Chinese with English abstract).

- [29] Zhang Hongfu, Min Sun. Geochemistry of Mesozoic basalts and mafic dikes, southeastern North China Craton, and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 2002,44:370~382.
- [30] 刘国栋. 大地电磁测深法在岩石圈研究中的应用及中国地壳上地幔电性结构的基本特征[A]. 岩石圈论文集[C]. 北京:地震出版社, 1986. 229~249.
- Liu Guodong. Magnetotelluric sounding application on lithospheric study and characteristics of electrical structure of crust and mantle, China [A]. In: Collected Papers of Lithosphere [C]. Beijing: Seismological Press, 1986. 229~249(in Chinese).
- [31] 徐常芳. 中国大陆地壳上地幔电性结构及地震分布规律 (一)[J]. *地震学报*, 1996,18(2):254~261.
- Xu Changfang. Electrical structure and distribution of earthquakes in continental crust - mantle, China (1) [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1996,18(2):254~261(in Chinese with English abstract).
- [32] 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云模型[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(3): 209~215.
- Yuan Xuecheng. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model[J]. *Science in China (ser. D)*, 1996,26(3): 209~215(in Chinese).
- [33] 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型[J]. *地学前缘*, 2000,7(1):97~107.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Li Wuping, et al. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in eastern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (1): 97~107 (in Chinese with English abstract).
- [34] McKenzie D, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of lithosphere[J]. *J. Petrol.*, 1988,29 : 625~679.
- [35] Anderson D L. Lithosphere, asthenosphere and perisphere [J]. *Review of Geophysics*, 1995.33(1): 125~149.
- [36] 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[J]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- Zheng Jianping. Mesozoic - Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning, East China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999 (in Chinese with English abstract).
- [37] Deng F L, Macdougall J D. Proterozoic depletion of the lithosphere recorded in mantle xenoliths from Inner Mongolia [J]. *Nature* 1992,360(26):333~336.
- [38] 支霞臣, 彭子成, 陈道公, 等. 苏皖地区幔源橄辉岩捕虏体的铷同位素组成、模式年龄及其意义[J]. *岩石学报*, 2001,17(1):11~18.
- Zhi Xiachen, Peng Zhicheng, Chen Daogong, et al. Re isotopic composition and model ages of mantle peridotite xenoliths from Jiangsu-Anhui area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001,17(1):11~18 (in Chinese with English abstract).
- [39] 高山, Roberta L, Rudnick, 等. 华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re-Os 同位素证据 [J]. *地学前缘*, 2003,10(3):61~67.
- Gao Shan, Rudnick R L, Carlson, R W et al. Removal of lithospheric mantle in the north China craton: Re-Os isotopic evidence for coupled crust - mantle growth [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003,10(3):61~67(in Chinese with English abstract).
- [40] Zhang Hongfu, Sun Min, Lu Fengxiang, et al. Geochemical significance of a garnet lherzolite from Dahongshan kimberlite, Yangze Craton, southern China [J]. *Geochemical Journal*, 2001,35: 315~331.
- [41] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. *地学前缘*, 2003,10(3):51~60.
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, et al. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3):51~60(in Chinese with English abstract).
- [42] Shan Gao, Roberta L. Rudnick, Hong-Ling Yuan, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature* ,2004,432:892~897.
- [43] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 2005,21(1):169~188.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2005,21(1):169~188 (in Chinese with English abstract).
- [44] 邵济安, 李之彤, 张履桥. 辽西及邻区中-新生代火山岩的时空对称分布及其启示[J]. *地质科学*, 2004,39(1):98~106.
- Shao Jian, Li Zhitong, Zhang Lvqiao. Symmetric spatial-temporal distribution of the Meso-Cenozoic volcanic rocks in west Liaoning and environs and its implications [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004,39(1):98~106(in Chinese with English abstract).
- [45] 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 等. 华北克拉通东部显生宙地幔演化[J]. *地学前缘*, 2005,12(1):61~67.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Zhang Ruisheng, et al. Phanerozoic mantle secular evolution beneath eastern north-China craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005,12(1):61~67(in Chinese with English abstract).

Zones of crust–mantle and lithosphere–asthenosphere interaction in eastern China: Characteristics and timing of transformation

LU Feng–xiang¹, ZHENG Jian–ping¹, HOU Qing–ye², LI Fang–ling¹

(1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

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

Abstract: There exist Meso–Cenozoic crust–mantle and lithosphere–asthenosphere interaction zones in the lower lithosphere beneath eastern China, which are also two important magma sources. The heat and material exchanges between crust and mantle and between lithosphere and asthenosphere in the interactions and their dynamic processes are the critical mechanisms for thickness readjustment in the interior of the Meso–Cenozoic lithosphere, lithospheric uneven thinning and tectono–magmatic mineralization. Three types of crust–mantle interaction can be recognized in the interior of the continent; they are the interactions between mantle–derived underplating melts and the lower crust, between the delaminated lower crust and weakening lithospheric mantle and between the deeply subducted crust and mantle wedge in the continental–continental collision zone. Although the volcanic rock associations formed by the three types of crust–mantle interaction are somewhat different, their magma sources all contain crustal components. The lithosphere–asthenosphere interaction zone is also a major component of the magma source, which consists predominantly of asthenospheric mantle and in the main contains no crustal component. Lithospheric thinning was largely coeval with large–scale asthenosphere–derived basalt eruption and also with transformation of the two types of interaction. It occurred about 100 Ma later.

Key words: crust–mantle interaction; lithosphere–asthenosphere interaction; interaction of delaminated lower crust and weakening lithospheric mantle; lithospheric thinning

About the first author: LU Feng–xiang, female, born in 1935, professor; mainly engages in the study of petrology; E–mail: lufx@263.net.