

地壳与弱化岩石圈地幔的相互作用： 以燕山造山带为例

路凤香¹, 郑建平¹, 张瑞生¹, 邵济安², 李伍平³, 余淳梅¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

3. 广州大学土木工程学院, 广东广州 510405

摘要: 燕山造山带中生代发育 4 期钙碱性火山活动, 它们的源区组成都是受壳幔相互作用的制约, 其中髻髻山组和义县组分布广泛, 具有代表性。髻髻山组岩性比较单一, 地球化学参数变化范围小, 岩浆的 AFC 作用不强烈, 源区成分不复杂。依据 Kay *et al.* (1991) 的方法, 估算了早—中侏罗世燕山地区的地壳厚度为 40~45 km。髻髻山组粗安岩是在加厚的地壳 (40~45 km) 条件下, 源区是含角闪石的石榴石麻粒岩+底侵的基性岩的壳幔过渡带熔融形成。义县组火山岩的源区为下地壳+岩石圈地幔, 地幔组分较髻髻山组增加。研究区中生代早期地壳开始加厚, 发生下地壳拆沉, 进入流变学性质改变了的“弱化的岩石圈地幔”, 二者发生作用。岩石圈地幔在中生代晚期受到流体、熔体、地幔矿物中活化的分子水、剪切构造作用, 以及温、压条件改变的影响, 导致岩石圈地幔发生不均一的局部弱化, 为容纳拆沉的下地壳提供了优化场所。推测弱化岩石圈地幔出现于 135 Ma 以后燕山地区发育的小型拉伸盆地之下, 以及对应的小型软流圈底辟体之上。上述模型可以与俯冲带的楔形地幔与俯冲洋壳的相互作用相对比。

关键词: 燕山造山带; 下地壳; 拆沉作用; 弱化的岩石圈地幔。

中图分类号: P58

文章编号: 1000-2383(2006)01-0001-07

收稿日期: 2005-09-22

Interaction between Crust and Weakening Lithospheric Mantle: Taking the Yanshan Orogenic Belt as an Example

LU Feng-xiang¹, ZHENG Jian-ping¹, ZHANG Rui-sheng¹, SHAO Ji-an², LI Wu-ping³, YU Chun-mei¹

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

3. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China

Abstract: Four-period calc-alkaline volcanic rocks are widespread in the Yanshan orogenic belt. The components of magma sources were controlled predominantly by the interaction between the continental crust and upper mantle near MOHO surface. The Tiaojishan and Yixian formations are the representative types of volcanic activity. The petrological features of Tiaojishan Formation volcanic rocks are relatively uniform, geochemical parameters varies at a narrow range and the AFC processes of magma are not strong enough, which indicates that the components of the magma source were not very complex. The estimated thickness of the crust was 40–45 km during the Early to Middle Jurassic. We infer that Tiaojishan trachyandesite magma was melted from amphibole-bearing garnet granulite + underplating basalts at thickening crust condition. A possible model, delaminating lower continental crust into the underlying weakening lithospheric mantle and interaction between them, has been proposed as one means to explain the genesis of basic-middle basic magma in the Yixian Formation. The inferred source of these magmas was lower crust + weakening lithosphere. Rheological behavior of the lithospheric mantle has been heterogeneously translated from rigid to ductile. This translation process was induced by the effects of fluid,

基金项目: 教育部博士点基金项目 (No. 20010491010); 国土资源部基础研究专项计划 (No. 20001010203); 国家自然科学基金项目 (No. 40372103)。

作者简介: 路凤香 (1935—), 女, 教授, 博士生导师, 从事岩石学研究。E-mail: lufx@263.net

melt, water released from mantle minerals, shear stress and increasing temperature in the lithospheric mantle beneath the small extension basin and above the uplifted asthenospheric diapir after approximately 135 Ma. These local areas were the preferable sets to hold the delaminated lower crust. The interaction between the foundering continental lower crust and the underlying weakening lithospheric mantle may be compared with the interaction between the subducting ocean crust and mantle wedge at a subduction zone.

Key words: Yanshan orogenic belt; lower crust; delamination; weakening lithospheric mantle.

0 引言

自 20 世纪 60 年代板块学说诞生以来,人们对大陆边缘及岛弧造山带的地质、地球物理及地球化学进行了全面研究,90 年代以后,碰撞造山带和碰撞造山作用成为研究的主流,这些成果对揭示和认识造山带构造、运动学及动力学都起了重大的作用。同时对这 2 类造山带的构造—岩石组合也提出了系统的模型和成因解释(Wilson, 1989),其中特别是对火山岩—构造组合的研究,已经成为恢复和判别火山岩形成古构造环境的有利手段。基于上述的基本理论与概念,人们普遍认为钙碱性火山岩分布于岛弧和活动大陆边缘,其形成与大洋板块俯冲有关,岩浆起源受控于俯冲的洋壳和上伏楔形地幔的相互作用,是壳—幔再循环的产物。反之,人们往往依据钙碱性火山岩的时空分布,来推测古俯冲带及古岛弧的存在。然而在应用上述原则判别构造环境时常常出现问题,其原因是钙碱性火山岩不仅发育在板块俯冲的造山带,在板内活动带也有分布。对北美 Laramide 陆内变形带和盆—岭地区的研究表明,并未发现与广泛发育的始新世—中新世钙碱性火山岩存在同时期的太平洋的俯冲作用(Best and Christiansen, 1991; Axen *et al.*, 1993; Hooper *et al.*, 1995),表明俯冲带的壳幔相互作用并不一定是钙碱性火山岩唯一的成因模型。

燕山地区自冀西北至辽西延伸约 600 km,宽 150 km。中生代该区构造变形明显,岩浆活动强烈,是中国东部中生代“构造活化”强烈的地带,是典型的陆内造山带(宋鸿林,1999;张长厚,1999;崔盛芹,2002)。区内钙碱性火山岩发育,喷发规模大。本文应用笔者最近几年的研究成果并收集了前人的资料,通过对比中生代 2 个主要火山活动阶段的壳幔相互作用特征,提出早白垩世陆内活动带拆沉的下地壳—弱化岩石圈地幔相互作用模型,用以说明该类岩石的成因及层圈相互作用。同时在研究工作中注意了“刚性板块”、“刚性岩石圈”的重新认识。

1 燕山中生代 2 个主要时期火山岩特征对比

燕山地区火山活动可以划分为 4 个主要时期: J_1 . 南大岭组, 兴隆沟组; J_{2-3} . 髫髻山组, 蓝旗组; K_1 . 东岭台组, 张家口组, 义县组; K_{1-2} . 东狼沟组, 吐呼噜组。其中规模大、活动强、分布广的为髫髻山组和义县组。由于部分中酸性火山岩受到过岩浆分异作用的影响,为了更好地反映源区的性质,本节将主要对这 2 个时期的中—基性火山岩特征进行对比,从而建立壳—幔相互作用模型。

这 2 个时期的火山岩都属于钙碱性系列,研究表明,辨别其中的中—基性岩浆源区包含大陆下地壳组分的岩石—地球化学标志是:(1)火山岩绝大多数为高钾钙碱性系列,并且可以出现钾玄岩(但不一定出现钾玄岩系列);(2)由于多数钙碱性系列火山岩出现于弱拉伸—挤压环境,岩浆房在地壳中的存留时间长,相比而言火山岩岩浆的 AFC 过程较软流层来源的、处于强拉伸环境的玄武岩要普遍、强烈;(3)亏损高场强元素,这是大陆下地壳最普遍的特征。这是由于当俯冲深度 < 150 km,下地壳发生熔融作用时,包含上述元素的金红石、钛铁矿、锆石、磷灰石等矿物没有参与熔融,这些元素表现出具有相容性特征。当俯冲板片继续向深部插入至 150 km 以下,实验证明,高压下上述元素的分配系数改变,表现为具有不相容的性质,它们可以进入熔体使其富含这些元素(Ringwood, 1990),这也说明为什么从深部来源的岩浆,尽管源区地幔可能遭受过先存俯冲板片释放的流体的交代作用但是导源的岩浆仍然不出现上述元素负异常的原因;(4)在 Sr-Nd 图中投点位于中等 Sr、高的负 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值区。总体上燕山地区钙碱性岩浆投点的分布趋势与 EM I 和大陆下地壳的范围接近。按照上述标志,可以确定出岩浆源区是否含有地壳的组分。

由于陆相火山岩浆喷发过程比较复杂,横向变化较大,本节选择发育较好的北京髫髻山组与辽西义县组进行 2 个时期的对比。髫髻山组与义县组火

表 1 燕山地区中—晚侏罗世与早白垩世火山岩特征对比
Table 1 Characteristic comparison between Early to Middle Jurassic and Early Cretaceous volcanic rocks in 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 4 900 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 3 000 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
SiO ₂	48%~68%;峰值:58%	46%~76%;峰值:64%
Mg [#]	50~12;峰值:40	76~20;峰值:55
(La/Yb) _N	2~42	10~31
(La/Nb) _N	平均值 4.44~12	平均值 4.06~6.06
Sr/Y	167.67~36.42	65.33~19.7
ε _{Nd} (t)	-14.8~-17.6	-5~-15.1

资料来源:鲍亦刚等(1995)、陈义贤等(1997)、李伍平(1999)、李伍平等(2001a, 2001b, 2002)、李伍平和李献华(2004)、崔盛芹(2002)和张瑞生(2005)。

山岩虽然都属于钙碱性系列,但在岩石组合、地球化学特征方面有区别(表 1)。

髫髻山组在北京地区厚度最大(4 900 m, 接近 5 km),分布很广(1 100 km²) (鲍亦刚等, 1995),但岩性比较单一,地球化学参数变化范围小,岩浆分异作用不强烈。暗示至少在北京地区岩浆源区成分并不十分复杂。

李伍平等(2001a, 2001b)提出,髫髻山组火山岩具有高 Sr 低 Y 及高 Sr/Y 比值的特征,暗示源区在熔融岩浆以后的残留物中含有石榴石/角闪石,缺失斜长石,相当于石榴石麻粒岩的组成,说明岩浆起源深度 > 35 km。张瑞生(2005)依据 Kay *et al.* (1991)的方法,应用 La/Yb 的资料估算了早—中侏罗世燕山地区的地壳厚度为 40~45 km。

实验岩石学研究表明, MORB 发生部分熔融时 Mg[#] 一般 < 45,如果源区有 10% 的地幔橄榄岩与之混染或反应,该值可增高到 55 (Rapp, 1997; Rapp *et al.*, 1999)。髫髻山组火山岩最高的 Mg[#] 为 50,峰值为 40,推测其源区不含或少含地幔物质,是以下地壳含角闪石的石榴石麻粒岩及底侵的基性岩作为主要组分。如果依据基性的下地壳熔出中性岩浆的熔融程度为 20%~40% (Rapp and Watson, 1995),在 J₂₋₃ 时期按北京地区现存的接近 5 km 厚度的粗安岩(暂不考虑剥蚀的数量)计算,至少要有

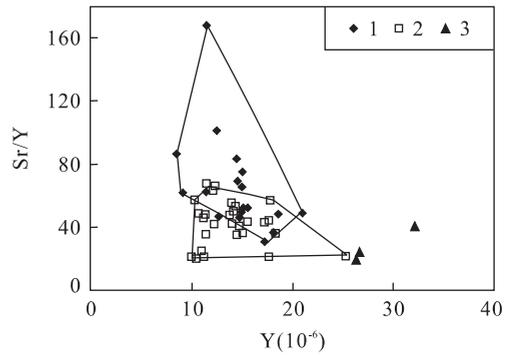


图 1 燕山造山带中生代火山岩 Sr/Y—Y 图解

Fig. 1 Sr/Y vs. Y diagram of Mesozoic volcanic rocks in Yanshan orogenic belt

1. 髫髻山组和蓝旗组; 2. 义县组; 3. 自右上方至左下方: 宽甸玄武岩(0.27 Ma)、碱钙玄武岩(106 Ma) 9 件平均和汉诺坝玄武岩(10~22 Ma)

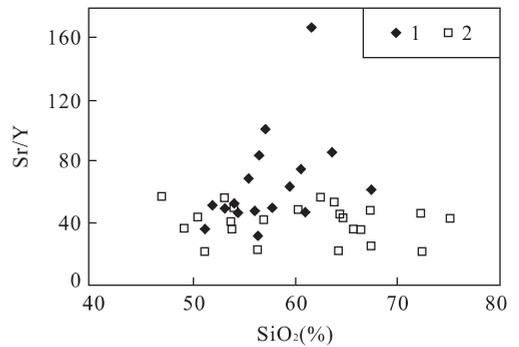


图 2 Sr/Y—SiO₂ 图解

Fig. 2 Sr/Y vs. SiO₂ diagram

1. 髫髻山组火山岩; 2. 义县组中基性火山岩

12~24 km 的原始下地壳下部源区进行提供。从这个角度也说明该时期存在加厚的地壳。

按照上述分析,本文基本上同意李伍平(1999)和李伍平等(2001a, 2001b)的意见,认为髫髻山组粗安岩是在加厚的地壳(40~45 km)条件下,源区成分主要为含角闪石的石榴石麻粒岩+底侵的基性+较少的地幔岩组成的壳幔过渡带熔融形成,所需的热量由底侵岩浆和构造运动的剪切摩擦热所提供。

K₁ 义县组与 J₂₋₃ 髫髻山组的特征有差别,前者岩性及主元素变化范围大,在义县马神庙鸟化石出露点附近发现的橄榄玄武岩, MgO 含量最高达到 14% (李伍平, 1999),属于高镁玄武岩。彰武县叶茂台的流纹岩 MgO 低至 0.37%,按出露的岩性统计,中酸性火山岩 MgO 低于中基性的。在微量元素方面,图 1、图 2 显示 2 个时期的 Sr/Y 比值的分布范围虽然有重叠,但平均值有差别。图 2 中髫髻山组火山岩的 Sr/Y 除 1 个投点外,其他都 > 40,义县组的

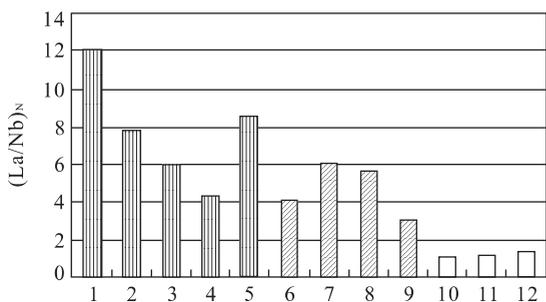


图 3 髫髻山组、义县组及中生代玄武岩中的 $(La/Nb)_N$ 分布频率

Fig. 3 $(La/Nb)_N$ distribution frequency of Middle Cenozoic basalts in Tiaojishan and Yixian formations

1. 辽西喀参 1 井蓝旗组(陈义贤等, 1997);
2. 大台及燕翅髫髻山组(李伍平等, 2001a, 2001b);
3. 辽西建昌蓝旗组(李伍平, 1999);
4. 辽西建昌蓝旗组(张瑞生, 2005);
5. 冀北下板城蓝旗组(李伍平和李献华, 2004);
6. 辽西义县组(李伍平, 1999);
7. 辽西惠德营子义县组(陈义贤等, 1997);
8. 彰武叶茂台义县组(陈义贤等, 1997);
9. 辽西建昌及凌源义县组(张瑞生, 2005);
10. 辽宁碱锅新生代玄武岩(张宏福和郑建平, 2003);
11. 辽宁宽甸新生代玄武岩(张宏福和郑建平, 2003);
12. 河北汉诺坝新生代玄武岩(支磊臣和冯家麟, 1992)

中基性火山岩都 < 60 , 在 $40 \sim 60$ 的区间, 二者有重叠, 暗示源区不仅有区别, 而且还存在某些共性, 即都含有下地壳下部的组成, 也暗示义县组喷发时的地壳厚度可能小于 J_2-3 时期. 在蛛网图中 La 与 Nb 是相邻的元素, 图 3 显示, 髫髻山组的 $(La/Nb)_N$ 平均值(7.76)大于义县组的平均值(4.72), 而中、新生代碱锅、大麻坪及宽甸等地软流圈地幔来源的玄武岩的 $(La/Nb)_N$ 很低(平均值 1.3), 表明 $(La/Nb)_N$ 可以定性地反映 Nb 的负异常强度并暗示地壳在源区贡献的程度. 从图 3 及以上数值可以看出, 义县组中一基性火山岩源区地壳的贡献少于髫髻山组源区, 而大麻坪等地的岩浆源区基本上没有地壳组分的参与. 前人根据 Sr、Nd、Pb 同位素特征提出源区为岩石圈地幔(李伍平, 2001a, 2001b)以及华北克拉通基底+古老岩石圈地幔(陈义贤等, 1997)等认识. 按照上述分析本文认为, 第二种看法更为合理, 即义县组的源区为下地壳+岩石圈地幔. 二者的相互作用见下节.

2 拆沉的下地壳—弱化岩石圈地幔的相互作用: 义县组火山岩成因模型

大陆边缘弧及岛弧的钙碱性火山岩的成因是大洋岩石圈在俯冲的过程中不断脱水, 并在一定的深

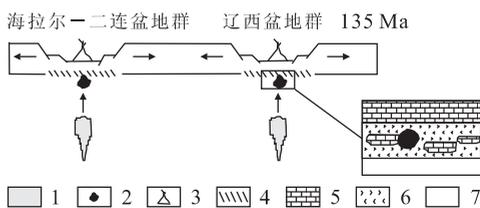


图 4 K_1 时期辽西及邻区火山—沉积盆地的壳—幔作用模型

Fig. 4 Crust-mantle interaction model of volcanic sedimentary basin during K_1 period in west Liaoning and its adjacent areas

1. 小规模软流层地幔热底辟体;
2. 岩浆源区;
3. 盆地内的火山活动;
4. 壳幔作用带;
5. 下地壳下部;
6. 弱化后的岩石圈;
7. 岩石圈

度发生熔融, 这些包含地壳组分的熔/流体与上覆楔形地幔相互作用, 从而诱发地幔/洋壳发生熔融形成岩浆, 这一壳幔再循环模型已经被广大学者所接受. 但是, 大陆内部的壳幔相互作用是以何种方式进行目前还未能达成共识. 目前所提出的模型中多数是将燕山期的火山活动与岩石圈的大规模拆沉减薄和软流圈上涌相联系, 上涌的软流圈在中生代已经与地壳直接接触(吴福元等, 2003). 该模型认为壳—幔相互作用实际上是发生在地壳与软流圈之间, 模型能够较好地解释中生代大规模岩浆活动的热来源, 但是较难解释燕山期的岩浆活动是以钙碱性岩浆为主体, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值很低(最低达到 -18), 而且也未见到由于软流圈上涌到地壳深度所必然出现的大量软流圈亏损源区来源的玄武岩(OIB 或 MORB)分布的事实. 我们曾提出过拆沉的下地壳与弱化岩石圈地幔的相互作用是导致中生代岩石圈地幔富集的原因(路凤香等, 2005), 本文进一步提供模型来参与讨论, 试图解释从 135 Ma 以后大陆内部的壳—幔相互作用, 模型见图 4.

模型的要点有以下 7 点:

- (1) 在构造和底侵的双重作用下, 中生代早期地壳开始加厚, 下地壳下部麻粒岩的密度随之增高. 测定和计算的被认为是底侵物质的大麻坪的新生代碱性玄武岩中的下地壳捕虏体密度为 $3.119 \sim 3.349 \text{ g/cm}^3$, 代表古老下地壳组成的怀安地体角闪石榴石麻粒岩密度为 3.318 g/cm^3 , 而下覆的地幔橄辉岩为 3.29 g/cm^3 (Gao *et al.*, 2000), 这表明无论是古老下地壳或底侵的下地壳与地幔之间都存在密度差, 在壳幔边界出现了轻微密度倒置, 在地壳加厚的情况下具有发生下地壳拆沉的条件.

- (2) 古生代时期的富集地幔是由软流圈或上、下

地幔过渡带来源的熔/流体交代形成(路凤香和郑建平, 1996), 基本不含地壳组分, 导源的岩浆没有 HFSE 的负异常, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值一般在 $0 \sim -5$ 附近。燕山期的岩石圈地幔是在古生代富集地幔的基础上发育的, 也具有富集的特征, 但导源的玄武岩/安山玄武岩具有 HFSE 的负异常, $\epsilon_{Nd}(t)$ 的峰值多数为 $-12 \sim -14$ 左右, 说明中生代地幔中加入了地壳组分, Nb 的负异常是判定源区包含地壳组成的有效的参数(Jahn *et al.*, 1999)。

(3) 拆沉的下地壳(下部)进入地幔的什么部位是一个重要和关键的问题。一种可能是: 拆沉的下地壳由于密度大直接压迫、裹挟古老岩石圈地幔一同拆沉进入软流圈, 引起软流圈上涌和岩石圈减薄。另一种可能是: 由于下地壳和岩石圈地幔之间的密度差不够大, 下地壳没有足够的动能携带巨厚的岩石圈地幔拆沉, 而是进入流变学性质改变了的岩石圈地幔, 二者发生作用。这样, 在这一时期华北的岩石圈还没有发展到大规模的减薄, 仅仅是地壳的不均匀拆沉与减薄。

(4) “刚性”的岩石圈地幔能否弱化? 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 年美国地质学会召开了以“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(Marshak *et al.*, 1999)。2002 年在美国丹佛召开的构造地质研讨会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^①。可见岩石圈地幔在条件适当的情况下可以发生弱化。

(5) 岩石圈地幔中水的来源: ①地幔中的橄榄石和辉石的水含量分别为 0.01% 和 $0.02\% \sim 0.065\%$ (谢鸿森等, 2005), 是以 $(OH)^-$ 呈结构缺陷的方式存在; 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 CO_2 、 H_2O 和 CO , 表明存在自由流体相, 是在小于 70 km 的地幔中捕获的(夏林圻等, 1996)。当地幔受到热或应力的扰动, 水被激活

逃逸进入地幔围岩, 就可以使得原先呈刚性的岩石圈发生弱化; ③古生代金伯利岩中的下地壳捕虏体含有金云母(路凤香和郑建平, 1996), 代表了古老下地壳有含水矿物, 新生代汉诺坝玄武岩中的代表底侵物质的下地壳捕虏体中大约有 10% 的样品含有黑云母(陈绍海等, 1998), 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。

(6) 燕山地区从早白垩世开始, NNE 向的小型盆岭构造发育, 伴随了弥散式的不均一弱拉伸(路凤香和郑建平, 1996), 小型的软流圈地幔底辟体在火山沉积盆地之下上涌, 为富集的岩石圈地幔发生熔融提供了热源。如前所述, 中生代的富集型岩石圈地幔已经与拆沉的下地壳发生了作用, 在某种意义上, 可以与俯冲带的楔形地幔与俯冲洋壳的作用相对比, 从中导源的岩浆同样也出现 HFSE 的负异常。义县组底部的橄榄玄武岩就是这种岩石圈地幔的熔融产物。义县组上部的粗安岩(安山岩)一英安岩一流纹岩, 其源区靠近 MOHO 面, 地壳组分增加, 与髫髻山组的源区呈过渡, 而且发生过比较显著的 AFC 过程。

(7) 软流圈的作用问题。目前的认识是: ①熔出了底侵的岩浆; ②提供了热源; ③可能存在从地幔软流圈底辟体中熔出了岩浆, 并与岩石圈地幔熔出的岩浆发生混合, 混合的证据尚需进一步寻找和证实, 但估计规模不会很大。

3 主要结论

(1) 燕山地区髫髻山组和义县组代表了中生代 2 种不同源区和不同岩石圈动力学背景的典型的火山岩成因类型, 前者以加厚地壳和较少的地幔组分为源区, 地壳以挤压占优势; 后者以拆沉的地壳与弱化的岩石圈地幔相互作用的地带为源区, 地壳以弥散式弱拉伸为背景, 其他则介于这 2 种成因类型之间。

(2) 壳幔过渡带内, 岩石圈地幔在中生代晚期受到流体、熔体、地幔矿物中活化的分子水以及剪切构造作用的影响, 原来的刚性岩石圈地幔流变学性质发生改变, 局部出现低强度的弱化地幔, 为容纳拆沉的下地壳提供了力学条件。

(3) 燕山地区下地壳的拆沉减薄与中国东部大规模的软流圈上涌和岩石圈减薄并不同步, 前者发生于早中生代, 后者发生于 100 Ma 之后, 其是以出

^①郭安林, 张国伟译, 2003 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。西北大学地质系。

现大范围分布的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为正值, $\epsilon_{Sr}(t)$ 为负值(OIB 或 MORB)的源区,并且不出现 HFSE(特别是 Nb)的玄武岩为主要标志,这是软流圈上涌和伴随的岩石圈减薄的最主要依据。

References

- Axen, G. T., Taylor, W. J., Bartley, J. M., 1993. Space-time patterns and tectonic controls of Tertiary extension and magmatism in the Great basin of the western United States. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 105: 56—76.
- Bao, Y. G., Bai, Z. M., Ge, S. W., et al., 1995. Volcanic geology and volcanic rocks for Yanshan period. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Best, M. G., Christiansen, E. H., 1991. Limited extension during peak Tertiary volcanism, Great basin of Nevada and Utah. *J. Geophys. Res.*, 96: 13509—13528.
- Chen, S. H., Zhang, G. H., Zhou, X. H., et al., 1998. Petrological investigation on the granulite xenoliths from Hannuoba basalts, northern Sino-Korean craton. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 366—380 (in Chinese).
- Chen, Y. X., Chen, W. J., Zhou, X. H., et al., 1997. Mesozoic volcanic rocks in West Liaoning and its adjacent areas. Seismological Publishing House, Beijing, 279 (in Chinese).
- Cui, S. Q., 2002. Mesozoic intracontinental orogenism in Yangshan area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Gao, S., Kem, H., Liu, Y. S., et al., 2000. 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. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B8): 18965—18976.
- Hooper, P. R., Bailey, D. G., McCarley, H. G. A., 1995. Tertiary calc-alkaline magmatism associated with lithospheric extension in the Pacific northwest. *J. Geophys. Res.*, 100(B7): 10303—10319.
- Jahn, B. M., Fuyuan, W., Lo, C. H., et al., 1999. 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. *Chemical Geology*, 157: 119—146.
- Kay, S. M., Mpodozis, C., Ramos, V. A., et al., 1991. Magma source variation from mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in central Andes (28—33S). In: Harmon, R. S., Rapela, C. W., eds., Andean magmatism and its tectonic setting, Boulder Colorado. *Geol. Soc. Am. Spec. Pub.*, 265: 113—137.
- Li, W. P., 1999. The study on characteristics and tectonic environment in Yanshan-Liaoxi: [Dissertation]. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Li, X. H., 2004. Petrogenesis and its implication for the Middle-Late Jurassic intermediate-acidic volcanic rocks in the middle section of Yanshan orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 501—510 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Li, X. H., Lu, F. X., 2001a. Genesis and geological significance for the Middle Jurassic high Sr and low Y type volcanic rocks in Fuxin area of west Liaoning, northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 523—532 (in Chinese).
- Li, W. P., Li, X. H., Lu, F. X., 2002. Geological characteristics and its setting for volcanic rocks of Early Cretaceous Yixian Formation, western Liaoning, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 193—204 (in Chinese).
- Li, W. P., Lu, F. X., Li, X. H., 2001b. Genesis of Late Jurassic trachyandesite in Western Hills of Beijing and its geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 247—254 (in Chinese).
- Lu, F. X., Zheng, J. P., 1996. Characteristics of Paleozoic lithosphere and deep-seat processes, North China plateform. In: Chi, J. S., Lu, F. X., eds., Kimberlites and characteristics of Paleozoic lithospheric mantle. Science Press, Beijing, 215—274 (in Chinese).
- Lu, F. X., Zheng, J. P., Zhang, R. S., et al., 2005. Phanerozoic mantle secular evolution beneath the eastern North China craton. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 61—67 (in Chinese).
- Marshak, S., Pluijm, B., Hamburger, M., 1999. Preface: The tectonics of continental interiors. *Tectonophysics*, 305(1—3): VII—X.
- Rapp, P. R., 1997. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. In: DeWit, M. J., Ashwal, L. D., eds., Greenstone belts. Oxford University Press, Oxford.
- Rapp, P. R., Shimizu, N., Norman, M. D., 1999. Applegate, reaction between slab-derived melts and peridotite in mantle wedge: Experimental constrains at 3.8 GPa. *Chem. Geol.*, 160: 335—356.
- Rapp, P. R., Watson, E. B., 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8—32 kbar: Implications for continental

- growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 36: 891—931.
- Ringwood, A. E., 1990. Slab-mantle interactions 3. Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle. *Chemical Geology*, 82(1/2): 187—207.
- Song, H. L., 1999. Characteristics of Yanshan type intraplate orogenic belts and a discussion on its dynamics. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 307—314 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, M., 1989. Igneous petrogenesis: A global tectonic approach. Chapman and Hall, London.
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 2003. Discussion on the lithospheric thinning, eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51—60 (in Chinese).
- Xia, L. X., Xia, Z. C., Xu, X. Y., 1996. Fluid inclusion, melt inclusion and glass in mantle peridotite xenolith. In: Du, L. T., ed., *Geochemistry of mantle fluid and asthenosphere*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xie, H. S., Hou, W., Zhou, W. G., 2005. Water content in the earth's mantle. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 55—60 (in Chinese).
- Zhang, C. H., 1999. A primary discussion on the intraplate orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 295—308 (in Chinese).
- Zhang, H. F., Zheng, J. P., 2003. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts. *Chinese Science Bulletin*, 48(6): 603—609 (in Chinese).
- Zhang, R. S., 2005. Characteristics of Lingyuan-Jianchang Mesozoic volcanic-sedimentary basin and its dynamic; [Dissertation]. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).
- Zhi, X. C., Feng, J. L., 1992. Geochemistry of basalts in Hannuoba. In: Liu, R. X., ed., *The age and geochemistry of Cenozoic volcanic rock in China*. Seismological Publishing House, Beijing, 114—148 (in Chinese).
- 年代学、地球化学和构造背景. 北京:地震出版社, 279.
- 崔盛芹, 2002. 燕山地区中生代陆内造山作用. 北京:地质出版社.
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 等, 2001. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩——岩浆底侵作用新证据. *岩石学报*, 17(1): 1—6.
- 李伍平, 1999. 燕山—辽西中生代火山岩特征及其构造背景研究. 武汉:中国地质大学博士论文.
- 李伍平, 李献华, 2004. 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. *岩石学报*, 20(3): 501—510.
- 李伍平, 李献华, 路凤香, 2001a. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. *岩石学报*, 17(4): 523—532.
- 李伍平, 李献华, 路凤香, 2002. 辽西早白垩世义县组火山岩的地质特征及其构造背景. *岩石学报*, 18(2): 193—204.
- 李伍平, 路凤香, 李献华, 等, 2001b. 北京西山晚侏罗世粗安岩的成因及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 247—254.
- 路凤香, 郑建平, 1996. 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程. 见:池际尚, 路凤香主编, 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京:科学出版社, 215—274.
- 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 等, 2005. 华北克拉通东部显生宙地幔演化. *地学前缘*, 12(1): 61—67.
- 宋鸿林, 1999. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨. *地学前缘*, 6(4): 307—314.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等, 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. *地学前缘*, 10(3): 51—60.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 1996. 地幔橄榄岩捕虏体中的流体包裹体、岩浆包裹体和玻璃. 见:杜乐天主编, 地幔流体与软流层(体)地球化学. 北京:地质出版社, 230—271.
- 谢鸿森, 侯渭, 周文戈, 2005. 地幔中水的存在形式和含水量. *地学前缘*, 12(1): 55—60.
- 张长厚, 1999. 初论板内造山带. *地学前缘*, 6(4): 295—308.
- 张宏福, 郑建平, 2003. 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. *科学通报*, 48(6): 603—609.
- 张瑞生, 2005. 凌源—建昌中生代火山沉积盆地特征及深部动力学背景. 武汉:中国地质大学博士论文.
- 支霞臣, 冯家麟, 1992. 汉诺坝玄武岩的地球化学. 见:刘若新主编, 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京:地震出版社, 114—148.

附中文参考文献

- 鲍亦刚, 白志民, 葛世伟, 等, 1995. 北京燕山期火山地质及火山岩. 北京:地质出版社, 164.
- 陈绍海, 张国辉, 周新华, 等, 1998. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类捕虏体的岩石特征. *岩石学报*, 14(3): 366—380.
- 陈义贤, 陈文寄, 周新华, 等, 1997. 辽西及邻区中生代火山岩