

辽西中生代软流圈底辟体的脉动式上涌

邵济安^{1,4}, 陈福坤², 路凤香³, 周新华²

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

4. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

摘要: 岩石学—地球化学数据揭示了辽西中生代火山岩组分存在的 3 个特征: (1) $Mg^\#$ 值和 Cr、Ni 含量比较高; (2) 多数火山岩源自受到地壳物质混染的富集的岩石圈地幔; (3) 相当部分火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值偏高。对辽西及其邻区中生代 (230~65 Ma) 火山岩年代学的研究发现: 火山活动具有平均间隔 20~30 Ma 的周期性, 火山岩活动的峰期为 230 Ma、190 Ma、160 Ma、130~120 Ma、110~100 Ma、80 Ma。同时火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在时间上显示了类似的周期性波动。在空间上, 中、新生代火山岩有呈环状分布的趋势, 从中心向外逐渐变新。根据上述特点, 提出辽西晚中生代的火山岩活动可能与软流圈底辟体脉动式上涌有关, 研究区被岩石圈断裂围限的特定构造背景为软流圈底辟体的上涌提供了天然通道。

关键词: 辽西; 中生代火山岩; 同位素年龄; $\epsilon_{Nd}(t)$; 软流圈底辟体。

中图分类号: P588.14

文章编号: 1000-2383(2006)06-0807-10

收稿日期: 2006-06-26

Mesozoic Pulsative Upwelling Diapirs of Asthenosphere in West Liaoning Province

SHAO Ji-an^{1,4}, CHEN Fu-kun², LU Feng-xiang³, ZHOU Xin-hua²

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

4. Key Laboratory of Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Petrologicos-geochemical data reveals the compositional features of Mesozoic volcanic rocks in West Liaoning: (1) Relatively high values of $Mg^\#$ and higher contents of Cr and Ni; (2) Most of volcanic magmas are derived from enriched lithospheric mantle hybridized by crust materials; (3) Considerable volcanic rocks have relatively high $\epsilon_{Nd}(t)$ values. Chronologic researches on the Mesozoic (230—65 Ma) volcanic rocks in West Liaoning and adjacent areas indicate that the volcanic activities were periodic with an average period of 20—30 Ma, and that the peak ages of the volcanic activities were determined at 230 Ma, 190 Ma, 160 Ma, 130—120 Ma, 110—100 Ma, and 80 Ma, respectively. Temporally, the $\epsilon_{Nd}(t)$ values of the volcanic rocks also show similar periodic variation responsible for the ages. Specifically, the Mesozoic-Cenozoic volcanic rocks are distributed in a ring-like shape with their ages ranging from old to young in an outward order from the center. These evidences lead to the conclusion that the Late Mesozoic volcanic activities in the study area are related to pulsative upwelling diapirs of asthenosphere, for which a natural passage is provided by the specific tectonic background confined by large-scale lithospheric faults in the study area.

Key words: West Liaoning; Mesozoic volcanic rocks; isotopic age; $\epsilon_{Nd}(t)$; diapir of asthenosphere.

根据幔源岩浆源区特征的研究可以判断中、新 深部动力学过程, 从古老克拉通的岩石圈地幔转化
中生代期间中国东部大陆岩石圈经历了强烈和复杂的 成中生代的富集的岩石圈地幔, 新生代再进一步转

变成亏损的软流圈地幔。有人将它们分别认定为大陆型、过渡型和大洋型岩石圈地幔,并将这一转变过程认定为“岩石圈转型”(周新华,2006)。在这一过程中岩石圈减薄是必经的历程。由于岩石圈组成的不均一性和构造背景的差异,致使不同地区地幔转型启动的时间和表现的方式有所不同。从目前研究看,辽西在中生代 100 Ma 左右完成全部转型过程(邵济安等,2004;路凤香等,2005b),而且是中国东部完成转型最早的地区,这里保留了十分完整的地壳—岩石圈—软流圈相互作用的岩石—地球化学记录,再加上辽西珍稀动物群化石的发现和油田的开发,促使该区累计了大量基础资料,是研究东部岩石圈演化的窗口性地区。本文重点讨论辽西中生代在岩石圈转型过程中软流圈底辟体脉动式上涌的构造模式。

1 中生代火山活动的时空分布

研究范围以辽西的北票—义县—阜新一彰武为中心区(图 1),外围地区包括与辽西接壤的内蒙古的宁城、平庄、开鲁;吉林的双辽、长春以及辽宁的沈阳、抚顺等地。

1.1 火山活动的构造背景和空间分布

辽西位于华北克拉通和滨太平洋构造带叠加的构造部位上,研究区四周均为岩石圈断裂所围限。北部是东西走向的赤峰—开原断裂,是古生代华北板

块的北缘断裂(即过去的槽台界线),东缘是北东走向的邻庐大断裂,西界是构成大兴安岭重力梯度带边界的白城—八里罕断裂(或称红山—八里罕断裂),它们都是岩石圈断裂,南界是锦西—要路沟断裂,这些断裂构成了本研究区的边界(图 1)。在辽西地块的内部还有一条重要的,与本文讨论的高镁火山岩分布密切相关的凌源—建平—北票—阜新一彰武—法库断裂。以上这些断裂在华北中生代的活化中起到了重要作用,包括岩浆喷发和盆地的形成。受到断裂活动控制,该区中生代经历了断陷盆地到拗陷盆地的演化过程,伴随活跃的地热作用。有些断裂至今还在活动。在华北克拉通活化的中生代,由于大量深切断裂或裂隙的存在,致使辽西以快速剧烈的火山喷发为主,相比之下,需要相对封闭和热能积累过程的岩浆房难以形成,因此辽西的深成岩类并不发育。

辽西三叠—侏罗纪火山岩分布在本区中心的建昌—北票地区,早白垩世火山岩分布在其西侧的建平—凌源和东侧的义县—阜新一彰武一带,晚白垩世(80~60 Ma)的火山岩呈环状分布在外围的开鲁、双辽、长春、沈阳等地,新生代火山活动中心继续向外迁移和扩展,西至赤峰—西拉木伦河—阿巴嘎,东至清源—宽甸,构成一近于对称分布的环状火山岩带(邵济安等,2004)。

1.2 中生代火山活动峰期

辽西火山活动断续贯穿于中生代始终,义县组(133~115 Ma)的火山活动最活跃,在 18 Ma 中喷发了 2 800 m 厚的火山岩。在阜新和平庄等地发现了 106~100 Ma 含地幔包体的、来自亏损软流圈地幔的碱性玄武岩(许文良等,1999; Zhang *et al.*, 2003; 邵济安等,2006a),在完成了岩石圈转型之后,辽西地区的火山活动基本停止,火山活动继续向外围邻区转移。

火山活动可以划分为若干峰期,陈文寄等(1999)曾经对辽西及邻区 24 个地区近 250 余件样品采用 K-Ar、Ar-Ar、Ru-Sr 和 U-Pb 单矿物年龄等 4 种不同的测量方法,划分了 4 次重要的火山喷发旋回,其时间段分别为:190~180 Ma、170~145 Ma (170~160 Ma 和 150~145 Ma)、135~120 Ma 和 120~110 Ma。本文讨论的火山岩时限是从晚三叠世至晚白垩世末,统计了 47 组中生代火山岩,可以划分出 230 Ma、190 Ma、160 Ma、130~120 Ma、110~100 Ma、80 Ma、60 Ma 七个主喷发期,与陈文寄等(1999)归纳的火山活动规律基本一致,每期火

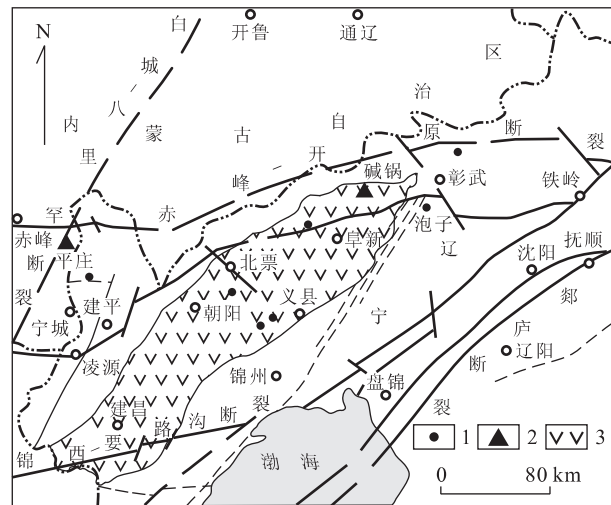


图 1 辽西主要断裂分布(辽宁省地质矿产局,1989)

Fig. 1 Schematic map showing the distribution of main faults in West Liaoning

1. 义县组“高镁”玄武岩采样点; 2. 阜新组亏损地幔玄武岩; 3. 中生代火山沉积盆地

表 1 辽西中生代火山岩的某些组分参数

Table 1 Some composition parameters of Mesozoic volcanic rocks in West Liaoning

时代	T ₃ (229 Ma)	T ₃ (230 Ma)	J ₁ (190 Ma)	J ₂ (165 Ma)	J ₃ (159 Ma)	K ₁ (130 Ma)	K ₁ (123 Ma)	K ₁ (115 Ma)	K ₁ (106 Ma)
岩性	堆晶辉石 岩—辉橄岩	辉石 安山岩	英安岩 粗面岩	玄武质粗 面安山岩	高镁 安山岩	高镁 玄武岩	高镁 安山岩	方辉 安山岩	碱性 玄武岩
特征矿物	ol, cpx, opx	cpx	opx, cpx		opx, cpx	ol, cpx	ol, cpx	opx, cpx	ol, cpx
样号(样数)	(4)	(2)	BP(9)	(1)	XL(17)	(4)	FH(2)	(5)	JG(14)
SiO ₂ (%)	45.8	58.68	63.26	53.24	62.25	50.25	53.17	59.0	45.03
MgO(%)	19.3	3.52	2.67	3.16	3.23	9.64	7.54	4.8	7.80
Na ₂ O(%)	1.12	5.43	3.88	3.99	3.91	2.54	3.57	3.23	3.23
K ₂ O(%)	0.56	1.68	3.14	1.74	2.19	2.47	2.02	1.87	2.30
Mg [#]	73	47	52	40	54	68	65	59	59
Cr(μg/g)	899	38	>119	2.35	196	700	390	223	462
Ni(μg/g)	627	26	>75	5.31	137	204	190	102	77
(La/Yb) _N	6	13	21	8	18	28	13	18	13
La/Nb	1.35	4.61	4.80	2.67	4.31	4.50	2.71	3.47	0.57
Nb/U	4.7	11.17	2.1	21	2.24	11.4	10.7	10.7	42.7
Sr/Y	11.2	38.95	43.6	31.40	53.8	37.9	47.4	33.8	35.5
Zr/Nb	12.4	23.27	27	18.7	26.7	0.6	12.2	13.4	6.9
Eu/Eu	0.85	1.03	0.83	0.92	0.89	0.93	0.92	0.95	1.01
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(<i>t</i>)	0.7038	0.7074	0.7072	0.7063	0.7058	0.7060	0.7059	0.7073	0.7038
ε _{Nd} (<i>t</i>)	0~-6.8	-13.65	-0.4~-2.1	-15	-2.8~-2.8	-1.7~-3.4	-6.3	-14	3.9
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb			18.4	16.5		17.4	17.0	16.6	18.3
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb			38.2	36.6		37.4	37.18		37.7
资料出处	本文	本文	李伍平	杨蔚	Gao <i>et al.</i> , 2004	本文	本文	本文	本文

165 Ma 玄武质粗面安山岩的数据是杨蔚提供的;130 Ma 高镁玄武岩的 Pb 同位素值引自王五力等(2004);106 Ma 碱性玄武岩的 Pb 同位素引自 Zhang *et al.* (2003).

山活动间隔约 20 Ma,早中生代间隔时间比较长。这种节律性的火山活动是辽西中生代的重要特征。

频繁的火山活动显然与该区特定的构造环境有关。多种地球物理资料的综合研究表明,现今的辽西以义县为中心仍然保留了软流圈隆起的迹象,软流圈顶界埋深 80~90 km,莫霍面也相对隆起,地壳厚 30~34 km。在中下地壳中有多个低阻层,这里的壳幔过渡带经历了强烈的破坏和改造的过程(邵济安等,2006c)。目前与辽西相邻的渤海湾盆地和松辽盆地都是中国东部现今岩石圈最薄的地区。

2 辽西中生代火山岩岩石—地球化学特征

辽西晚中生代(J₃-K₁)火山岩有以下 3 个特征,特别是与华北同期火山岩对比这些特征更为明显。

2.1 Mg[#]值和过渡族元素 Cr、Ni 含量比较高

在前人文献中对本区火山岩“高镁”的概念有所差别, Grawford *et al.* (1989) 明确将 MgO>8% 和 SiO₂>53% 的中性岩石定义为高镁安山岩。也有人将

Mg[#]>45 的火山岩统称为高镁火山岩(Gao *et al.*, 2004)。表 1 显示辽西晚中生代大多数代表性火山岩 Mg[#]>50。此外,各种火山岩的 Cr、Ni 含量相对较高,分别平均为 302 μg/g 和 112 μg/g。令人关注的是,火山岩存在相对高硅和高镁的不匹配现象,有的玄武岩 SiO₂ 含量达 51% 以上, MgO 可达 8%~9%,个别玄武岩 MgO 为 14%(张招崇等,1994)。与此相关,该区中酸性火山岩中常有含辉石(cpx, opx)和橄榄石斑晶或斑晶假象的报道(王五力等,2004)。这些特征与燕山地区同期火山岩不同,以京西髫髻山组中性火山岩为例,其 Cr、Ni 含量分别为 35 μg/g 和 34 μg/g, Mg[#] 为 42(大台幅区域地质调查报告,1990),东岭台组酸性火山岩 Cr、Ni 含量分别为 4.7 μg/g 和 6.6 μg/g, Mg[#] 为 29(李伍平等,2000)。辽西中生代这些异常现象和原因过去并没有引起足够的重视。

2.2 富集的岩石圈地幔和地壳混染的地球化学记录

辽西中生代 230~112 Ma 的火山岩 Sr-Nd 同位素和高 Mg[#] 值和富含过渡族元素 Cr、Ni 等特征表明岩浆来源于 EM I 型富集地幔(表 1, 图 2)。同时某些微量元素特征比还显示它们具有地壳混染的

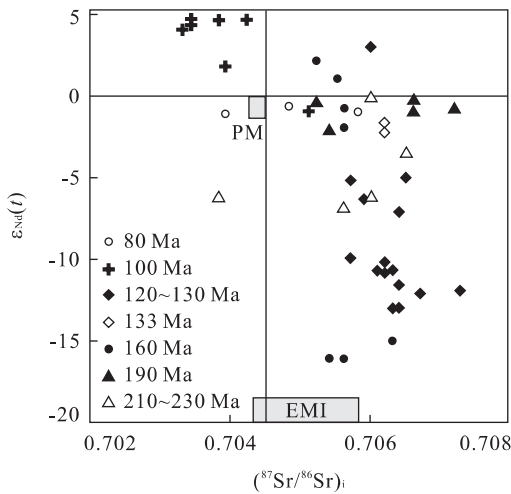


图 2 Sr-Nd 同位素组成

Fig. 2 Sr-Nd isotopic composition

特征. 辽西位于华北克拉通基底之上, 早中生代该区的底侵作用在壳幔过渡带或下地壳形成一套新生的基性麻粒岩、堆晶岩和闪长岩(Shao *et al.*, 1999, 2000a, 2000b), 构成部分新生的陆壳基底. 将本区中生代火山岩的岩石—地球化学组成与之(尤其与闪长岩)对比时, 可以发现某些反映壳源岩浆的继承性特征, 例如 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$, 轻稀土富集 $(\text{La}/\text{Yb})_N = 8 \sim 28$, 高场强元素在蛛网图中显示出负异常等. 根据 Rollinson(1993) 发表的资料, 地壳平均的 Sr/Y 值为 36, La/Nb 值为 1.2~4.4, Nb/U 值为 10. 辽西火山岩 Sr/Y 比值高(30~50), La/Nb 比值界于 2.3~4.8, Nb/U 值为 11.7. 反映本区中生代 106 Ma 之前的火山岩源区具有相当程度的地壳混染. 高场强元素 Nb、Ta 可以灵敏指示源区的性质, 大陆和岛弧火山岩均具有亏损高场强 Nb、Ta 元素的特征, 辽西以 106 Ma 为界, 火山岩从 Nb、Ta 亏损型转变为 Nb、Ta 富集型特征(邵济安等, 2006a). 由于本区从 190~106 Ma 期间不具有陆缘岛弧带的构造背景和演化历程, 因此辽西中生代亏损高场强 Nb、Ta 元素只能看作大陆内部火山岩特征. 从侏罗—白垩纪火山岩的 Ba/Nb-La/Nb 图解(图 3)看, 随时间变新, Nb 值逐渐增高. 其中 130 Ma 火山岩的 Nb 值高, 可能与高镁橄榄玄武岩的源区特征有关. 上地幔 Nb 丰度为 6×10^{-6} , 地壳丰度为 19×10^{-6} , 本区高镁橄榄玄武岩丰度为 9×10^{-6} , 显示玄武岩具有壳幔混熔的特征.

2.3 相当部分火山岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值偏高

华北中生代各类火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值绝大多数为负

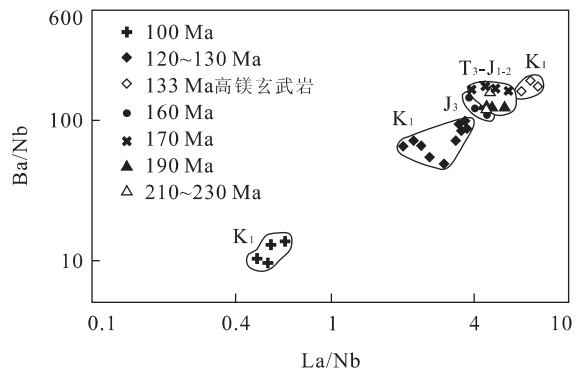


图 3 辽西火山岩 Ba/Nb-La/Nb 图解

Fig. 3 Ba/Nb-La/Nb diagram of volcanic rocks in West Liaoning Province

值, 通常小于 -10. 而表 1 却显示辽西中生代 100 Ma 之前, 存在一套 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高的火山岩, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 -6~+2, 这类 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 较高的火山岩分布在早晚中生代各个时段. 106 Ma 之后, 辽西及邻区的火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值明显提高, 大部分为正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值. 与变化范围比较大的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 相比, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 的变化范围相对比较小(0.7057~0.7073), 即岩浆源区相对比较年轻, 不富含放射成因 Sr. 辽西中生代火山岩高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 现象引起人们极大兴趣, 据此对该区岩浆来源和动力学机制衍生出各种不同的解释.

究竟如何将同时具有上述 3 个特点的火山岩统一在一个动力学模型中, 是本文关注的焦点.

3 关于岩石圈演化的不同模型

近年来, 中国东部岩石圈减薄问题成为地学界关注的焦点. 辽西自然也成为研究的热点之一, 正是由于该区的深入研究, 不断有新的发现, 围绕这些现象人们主要提出以下 3 种岩石圈减薄的理论模式:

(1)“加厚下地壳的拆沉和循环”观点. 根据北票地区发现的埃达克岩和安山岩(159 Ma)的高镁特征、接近原始岩浆的 Nd 同位素值, 以及演化地壳成分和榴辉岩的泊桑比一致的事实, Gao *et al.* (2004) 提出加厚榴辉岩组成的下地壳发生了拆沉作用, 进入软流圈, 随后榴辉岩部分熔融产生的熔体在上升过程中与地幔发生了不同程度的相互作用.

(2)古蒙古洋板块“俯冲—碰撞”观点. 有人认为早侏罗世兴隆沟组高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、高 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(>38)$ 的英安岩与古亚洲洋俯冲有关, 即早侏罗世由于蒙古—鄂霍茨克洋的俯冲作用使残留在华北陆块北缘

深部的古生代洋壳残片发生部分熔融,这些熔体在上升过程中与华北陆块北缘上覆的岩石圈地幔发生相互作用,形成兴隆沟组英安岩浆(李伍平,2006)。也有人根据阜新高镁安山岩(142 Ma)的发现,采用“碰撞—构造底垫”模式解释华北克拉通北缘古老的难熔的岩石圈地幔在中生代被古蒙古洋俯冲板片衍生出来的熔体所改造,导致岩石圈明显减薄和置换(Zhang *et al.*, 2003)。

(3)软流圈小规模的底辟上涌与“岩浆底侵”。路凤香等(2005b)认为辽西 K_1 早期由于软流圈的抬升引发岩浆底侵作用,导致不同深度层次的壳—幔相互作用。辽西近年来关于晚中生代火山岩中地幔捕虏体和捕虏晶的研究,支持了这种观点(邵济安等,2005, 2006b)。

此外还有其他一些观点,诸如与古太平洋板块的俯冲,或与俯冲有关的拆沉作用等,不一一列举。无论这些观点有何差别,都积累了大量实际资料,从不同角度探索岩石圈减薄的原因,对深化认识无疑都是有启发的。本文正是在前人研究基础上对构造背景进行某些尝试性讨论,希望增添一种思路。

上述观点尽管不同,但是共识的基础事实是:火山岩存在的高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、高镁,以及元素与同位素组成之间不匹配的岩石—地球化学特征(表1)。强调成岩过程中的壳—幔相互作用也是各种推论中共识的一点,只是对壳、幔物质的来源认识不同:(1)、(3)两种观点都认为是原下地壳物质。不过,前者认为榴辉岩组成的下地壳曾拆沉进入软流圈,壳—幔相互作用是发生在地壳熔体再次上升回到地壳中的过程中。后者认为的地壳物质是来自早中生代增生的下地壳或壳—幔过渡带,而不是古老的克拉通,与前者不同之处是,在底侵作用中它们与来自岩石圈地幔乃至软流圈地幔的上涌岩浆发生了相互作用。第2种观点认为与古老的华北岩石圈发生作用的地幔物质是来自大洋俯冲板块的部分熔融。

如果局限在一个时段看待任何一种说法都有其合理性,难以取舍。当把这些特征放到辽西火山岩演化的时空格架中,就会发现高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、高镁等岩石—地球化学特征反复多次出现在不同地质时期,单纯采用某一种机制去解释,可能会存在时间制约困难。因为不论拆沉还是板块俯冲都难以多次重复。

本文力图从辽西中生代火山岩 Sr-Nd 同位素时空分布的角度探讨地壳、岩石圈地幔和软流圈地幔三者的相互作用,并与不同观点切磋、探讨。

4 辽西中生代火山岩 Sr-Nd 同位素时空分布

为了说明辽西及毗邻地区火山岩的 Sr-Nd 同位素时空分布,表2收集了40组有年龄依据的中生代火山岩的 Sr-Nd 同位素数据(表2),此外,还有7组早中生代下地壳形成的闪长岩和它们裹胁的堆晶岩和麻粒岩捕虏体(邵济安等,2000b)的 Sr-Nd 同位素数据,它们是早中生代地壳增生的年青下地壳组成代表。为说明岩浆演化趋势,表中还列出6个新生代的数据。

4.1 Nd 同位素的时间分布特征

一般认为, $\epsilon_{Nd}(t) < -10$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 18$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 38$, 岩浆起源于古老地壳或岩石圈地幔,反之, $\epsilon_{Nd}(t)$ 接近 0, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 38$, 岩浆起源于年青地壳、未分异地幔及略亏损地幔(路凤香等,2005a)。从本区有限的几个 Pb 同位素值看,190 Ma 岩浆起源于年青地壳(李伍平,2006),之后岩浆起源于岩石圈地幔。如果抛开 Sr、Pb 同位素,仅从 Nd 同位素来看,本区存在高、低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值相间出现的情况。

表2、图4显示了 Nd 同位素随时间变化的趋势,尽管这些测试数据所反映的样本数量只反映人们关注情况而并不反映火山岩发育的程度,但是结合区域地质演化的其他证据,特别是20世纪90年代末期陈义贤等人围绕辽河油田开发对辽西及邻区中生代开展的大量系统的研究,可以确认表2中火山岩 Nd 同位素分布的时段和变化规律还是有代表性的。190 Ma、160 Ma、130~120 Ma 和 110~100 Ma,每隔30~20 Ma 出现一次高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 的峰值($\epsilon_{Nd}(t) > -5$),而在230 Ma、165 Ma、115 Ma 又相继出现几次低的峰值($\epsilon_{Nd}(t) < -10$)。 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值峰期变化与前述的火山活动年龄峰值基本一致(图4)。关于190 Ma、160~130 Ma 和 110~100 Ma±这3次高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 峰值的年龄依据是本文立论的重要基础,有必要对其年代学基础进一步确认。

第一阶段190 Ma 的 Ar-Ar 年龄是陈义贤等(1997)取自北票大黑山的,其中李伍平引用的陈义贤等(1997)的 Ar-Ar 坪年龄为189.6 Ma,其等时线年龄为(194.4±1.9) Ma,相关性较好,MSWD 为2.6,另一个(188.20±7.4) Ma 是综合 Ar-Ar 全熔年龄、坪年龄、等时线及其 Rb-Sr、K-Ar 等不同方法

表 2 辽西及邻区中生代 Sr-Nd 同位素的时空分布

Table 2 Space-time distribution of the Mesozoic-Cenozoic Sr-Nd isotope in West Liaoning and adjacent areas

	地点	编号	岩性	方法	年龄(Ma)	$I(Sr)$	$\epsilon_{Nd}(t)$	Sr-Nd 值出处	
晚第三纪	下辽河东部凹陷	红 8-10	玄武岩	K-Ar	35.9	0.703 1	5.9		
	下辽河东部凹陷	荣 7	玄武岩	K-Ar	37.7	0.704 1	2.1		
	下辽河东部凹陷	热 21A	玄武岩	K-Ar	39.5	0.703 1	6.7	陈文寄等, 1992	
	下辽河西部凹陷	曙古 3	玄武岩	K-Ar	48.5	0.704 1	3.1		
	沈阳大民屯凹陷	沈 111	玄武岩	K-Ar	56.4	0.704 8	0.7		
	双辽小哈拉巴山	SL50	拉斑玄武岩	K-Ar	61.0			刘嘉麒, 1987	
晚白垩世	长春范家屯	Y15	玄武岩	K-Ar	73.5			刘嘉麒, 1987	
	沈阳大民屯凹陷	沈 82	橄榄玄武岩	K-Ar	74.4±3.8	0.704 8	-0.6	陈文寄等, 1992	
	开鲁陆家堡保 1 井	K1-K6	玄武岩	Rb-Sr	80±8	0.703 9	1~-4		
	开鲁陆家堡清 3 井	KLQ	玄武岩	K-Ar	80.0			陈义贤等, 1997	
	张强白 8 井	B08	玄武粗安岩	Ar-Ar	80.4±2.9	0.705 8	-0.9		
	长春大屯富峰山	Y16	拉斑玄武岩	K-Ar	82.5			刘嘉麒, 1987	
	长春大屯富峰山	81-G-3	碱性玄武岩	K-Ar	83.5			王慧芬, 1988	
	通辽大吐尔基	S47	玄武岩	K-Ar	86.2±1.07			刘嘉麒, 1987	
阜新组	阜新碱锅	JG-01	玄武岩	K-Ar	100.4±1.6	0.703 4	4.8		
	阜新碱锅	JG-03	玄武岩	K-Ar	100.4±1.6	0.703 3	4.1	Zhang <i>et al.</i> , 2003	
	阜新碱锅	JG-05	玄武岩	K-Ar	100.4±1.6	0.703 4	4.5		
	阜新碱锅	JG1	玄武岩	Ar-Ar	105.5±0.5	0.703 8	4.7	邵济安等, 2006a	
	平庄牛头山	PN	玄武岩	Ar-Ar	106.4±0.8	0.703 9	1.9	本文	
	平庄牛头山	NTS-01	玄武岩	K-Ar	107.3	0.704 2	4.8	Zhang <i>et al.</i> , 2003	
早白垩世	张强白 5 井	B5	玄武安山岩	K-Ar	109.1±6.9	0.705 1	-0.9	陈义贤等, 1997	
	阜新碱锅	JG8	玄武粗面安山岩	Ar-Ar	116.8±3.0	0.706 2	-10.8		
	阜新碱锅	JG9	玄武粗面安山岩	Ar-Ar	116.8±3.0	0.706 3	-10.7	邵济安等, 2006a	
	阜新泡子	ZP4	玻基方辉安山岩	锆石 U-Pb	116.0	0.707 3	-11.9	本文	
	彰武叶参 1 井	YC-14	玄武质安山岩	Ar-Ar	117±2.8	0.706 5	-5	陈义贤等, 1997	
	中央凸起南部	台 10-A	橄榄玄武岩	K-Ar	119.6±3	0.704 4	0.3	陈文寄等, 1992	
	建平德奎素	JK	金云母橄榄玄武岩	K-Ar	119.0±2.7	0.705 7	-9.9	本文	
	朱家沟-枣茨山	Z1004	英安岩	Ar-Ar	122.0	0.706 4	-11.6	王五力等, 2004	
	阜新呼拉哈达	FH	橄榄玄武岩	Ar-Ar	122.7	0.705 9	-6.3	本文	
	彰武丁家房	Q2606	粗面质英安岩	Rb-Sr	123±12	0.705 7	-5.12		
	彰武惠德营子	H2506	粗安岩, 英安岩	Rb-Sr 综合	123.7±4.4	0.706 6	-11.9	陈义贤等, 1997	
	北票四合屯	XH	玄武岩	Ar-Ar	124.0	0.706 3	-13	本文	
	彰武叶茂台	D	英安岩	Rb-Sr 综合	124.8±6.9	0.706 2	-10.2		
	彰武牦牛海	M	安山岩	Rb-Sr 综合	125.5±0.7	0.706 1		陈义贤等, 1997	
	义县三百垅	Y2	安山岩	Ar-Ar 综合	125.5±0.1				
	义县组	义县砖城岭底下	P1-41	粗玄武岩	Ar-Ar 坪年	128.0	0.706 1	-10.7	
义县砖城岭底下		Gj134	粗玄武岩	Ar-Ar	129.2	0.706 4	-13.0	王五力等, 2004	
义县上底家沟		Y0	安山岩	U-Pb 等	133.0±5			陈义贤等, 1997	
北票新开岭		GP2	橄榄玄武岩	K-Ar	133.0	0.706 2	-1.7	本文	
北票新开岭		XK4	橄榄玄武岩	K-Ar	132.9	0.706 2	-2.0	本文	
中晚侏罗世		丁家杖子		安山玢岩	SHRIMP-U-Pb	153.5±1.2			杨蔚和李曙光, 2004
		蓝旗(蓝旗组顶)		凝灰岩	SHRIMP-U-Pb	157.2±3.8			
		北票	XL16	安山岩	锆石 U-Pb	159.0	0.705 2,	2.2,	
		北票	XL16	安山岩	锆石 U-Pb	159.0	0.705 5,	1.1,	Gao <i>et al.</i> , 2004
		北票	XL16	安山岩	锆石 U-Pb	159.0	0.705 6,	-1.9,	
	北票	XL16	安山岩	锆石 U-Pb	159.0	0.7056	-0.7		
宁城道虎沟		凝灰岩	SHRIMP-U-Pb	165.0±1.2			杨蔚和李曙光, 2004		
蓝旗(蓝旗组底)		玄武岩	Ar-Ar	166.1±0.9	0.706 3	-15			
海房沟组	建昌喀参 1 井下	KC16	粗安岩	Ar-Ar	165.6±3.8	0.705 6	-16	陈义贤等, 1997	
	朝阳松岭门	X	安山岩	Rb-Sr 等	166.5±0.8	0.705 4	-16		

续表 2

	地点	编号	岩性	方法	年龄(Ma)	$I(Sr)$	$\epsilon_{Nd}(t)$	Sr-Nd 值出处
	北票大黑山	XD	英安岩	Ar-Ar	188.2±7.4	0.7066	-0.15	陈义贤等, 1997
早侏罗世	兴隆沟组 北票兴隆沟四坑		英安岩(被早侏罗世煤系地层覆盖)	Ar-Ar 坪年龄	189.6	0.7072	-0.8	李伍平, 2006
		0.7052				-0.4		
		0.7051				-2.1		
		0.7051				-0.9		
中晚三叠世	水泉沟组* 凌源三皇庙村	NG2	辉石安山岩	SHRIMP	230.4±3	0.7073	-14.5	本文
		NG3		U-Pb		0.7075	-12.8	
	堆晶岩捕虏体 宁城河南营子	Hn4	闪长岩	K-Ar	218	0.7064	-7.0	本文
		W07	辉石岩-辉长岩	Rb-Sr	229	0.7038	-6.2	
		T0	辉石岩	Rb-Sr	229	0.7056	-6.8	
		H6	橄辉岩	堆晶岩捕虏	230	0.7065	-3.4	
		D3	橄辉岩	体的 Rb-Sr	230	0.7060	-6.1	
D12	尖晶石二辉橄辉岩	年龄	230	0.7060	0			
麻粒岩	宁城河南营子	Hn12	二辉麻粒岩	锆石 U-Pb	251	0.7097	-18.3	本文

* 水泉沟组年龄引自胡健民等, 2005; 杨蔚, 李曙光, 2004; 辽西中生代火山岩地层的年代学格架及其对中国东部中生代岩石圈减薄事件的意义; 2004 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 326.

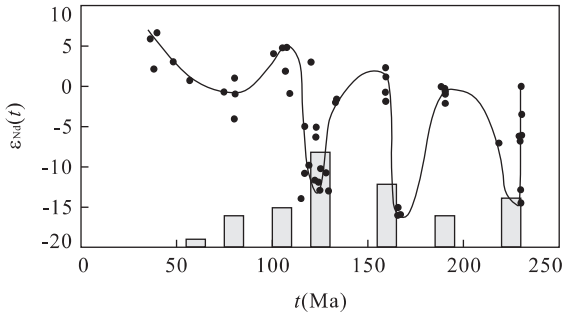


图 4 中生代火山活动峰期及 Nd 同位素随时间变化的趋势
Fig. 4 Peak of volcanic activity and variation trend of Nd isotope with time

测试的年龄选取值。更为重要的证据是: 具有这组年龄的火山岩是被有植物和孢粉化石的北票组(J₁b)煤系地层平行不整合覆盖, 同时又角度不整合于震旦系和中三叠统之上, 野外调查结果与辽宁省区域地质志(1989)的描述是一致的。

第二阶段(160~130 Ma), 其中 159 Ma 的锆石 U-Pb 法年龄具有比较坚实的同位素年代学基础, 其结果发表在 Nature 杂志(Gao *et al.*, 2004). 133 Ma 是取自北票新开岭义县组底部的橄辉玄武岩年龄, 该年龄有多组不同方法测定结果相佐, 也有上、下相邻层位年龄的制约。其中以彭艳东等(2003)结合区域 1:5 万地质调查进行的年龄测定结果最为系统和最有说服力。年龄测定的对象是义县组第一亚旋回直接覆盖在义县组底砾岩之上的玄武岩, 底砾岩之下的上侏罗统土城子组火山灰的 19 组透长石单晶的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄是 139.4 Ma(Swisher *et al.*, 2002), 玄武岩

的 K-Ar 年龄为(133.3±2.6)Ma、(133.6±2.6)Ma, 激光微区⁴⁰Ar/³⁹Ar 法给出的相关性很好的 Ar-Ar 等时线年龄是(132.9±4.5)Ma。玄武岩层上覆的第二亚旋回含珍稀动物化石的湖相沉积层年龄是 125~127 Ma。与以上这三阶段年龄对应的 Nd 同位素分别在中国科学院广州地球化学研究所、中国科学院地质与地球物理研究所测定。

第三阶段 110~100 Ma± 的年龄是由 4 组重复性较好的同位素年龄所佐证的(表 2), 其中(105.5±0.5)Ma 的 Ar-Ar 等时线年龄是在伯克利地质年代中心测试的(Zhu *et al.*, 2004)。这套玄武岩不整合在义县组之上, 并有生物地层学年代控制(陈文寄等, 1999)。

高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 火山岩的存在, 暗示着中生代曾经发生过亏损的软流圈与富集岩石圈地幔的熔体混合, 高、低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值相间出现则表明这种混合是阶段性的, 上涌的软流圈熔体也是间歇性的, 本文将这一特定过程概括为“软流圈底辟体的脉动式上涌”。106 Ma 之后, 尽管辽西还继续发生软流圈岩浆的脉动式上涌, 但是已结束了与岩石圈地幔熔体的混合历史, 标志着此时岩石圈的大规模的拉伸和软流圈上隆, 导致岩石圈的明显减薄过程已接近完成。

4.2 Sr-Nd 同位素的空间分布特征

与前述火山岩分布相关, 106~100 Ma 阜新组的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 火山岩分布在辽西朝阳—北票—义县组火山活动中心东、西两侧的阜新和平庄地区, 早白垩世末期 80 Ma 和新生代火山岩依次向外拓展, 构成一个以辽西为中心向四周扩散的环状构造(图 5)。

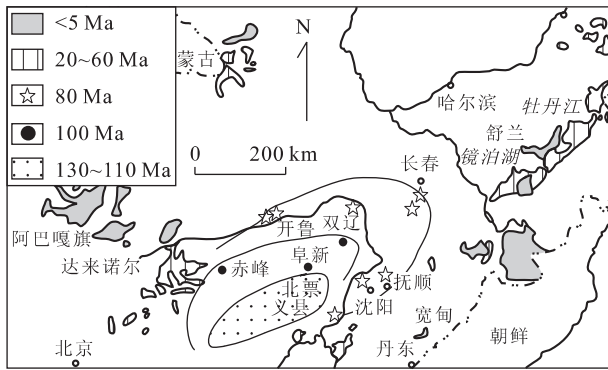


图 5 辽西及邻区中生代火山岩的环状分布

Fig. 5 Ring-like distribution of Mesozoic-Cenozoic volcanic rocks in Weste Liaoning and adjacent areas

如果将这些来自亏损软流圈地幔的正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 火山岩看作上涌的软流圈底辟体,那么,它们的时空分布将勾画出软流圈熔体不断上涌、并在平面上不断扩展的四维卡通。如此完整的环状构造应该看作中国东部中、新生代大陆动力学的典型构造。

5 软流圈热底辟体的脉动式上涌和地壳—岩石圈地幔—软流圈的相互作用

本文正是在参考前人关于辽西中生代火山岩研究成果和理论模式的基础上,从 Sr-Nd 同位素演变的角度对该区岩石圈演化模式提出新的思路。即在 190 Ma 以来,在 230 Ma 底侵作用形成的年轻陆壳基础上,曾多次发生软流圈热底辟体的脉动式上涌,并与富集岩石圈地幔的熔体混合,形成短暂的高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 火山岩喷发,之后很快又被地壳—岩石圈来源岩浆所代替,因此火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值随时间变化的曲线是非对称的曲线(图 4)。

近年来开展了辽西中生代火山岩的捕虏晶研究,在 160 Ma、130 Ma、120 Ma 的高镁的玄武岩、安山岩和玄武安山岩中发现橄榄石和单斜辉石的正环带结构,以及部分具有反环带结构的单斜辉石(所谓正环带是指从中心到边缘 MgO、NiO、FeO、SiO₂ 含量递减, MnO、Cr₂O₃ 递增,反环带反之),前者属于中生代地幔辉石岩或橄榄岩解体的矿物,它们作为捕虏晶与寄主玄武岩快速发生不平衡反应,形成环带结构,同时也表明本区特征的所谓“高镁火山岩”的镁是捕虏晶贡献的(邵济安等,2005);反环带结构的单斜辉石是壳、幔两种熔体相互作用的产物,核心相对低镁单斜辉石的稀土元素研究,证明其来源于

新增生的底侵麻粒岩,外环高镁辉石来源于岩石圈地幔熔体。令人关注的是,正、反两种环带的辉石均发现高镁与低镁环带呈韵律变化的现象,反映高镁岩浆的涌动式补给(邵济安等,2005)。此外在 115 Ma 高镁的玻基方辉安山岩中发现有富集 Cr、Ni、Co 元素并具有 N-MORB 配分型式的斜方辉石,推测除了壳—幔熔体之外,还可能来自亏损软流圈地幔的熔体参与岩浆的形成(邵济安等,2006b)。因此,辽西中生代火山岩浆形成过程是地壳—岩石圈地幔—软流圈三种端元相互作用的结果。随着圈层演化和热界面的抬升,这三者所起的作用有所变化,最后在 100 Ma 前后转化为以软流圈来源的岩浆为主。

上述这种软流圈热底辟体脉动式上涌的设想可以兼顾“地壳拆沉—循环”、“洋—陆或陆—陆俯冲”、“碰撞—构造底垫”等模式中强调的年轻陆壳与地幔相互作用的观点,也可以克服这些模式的某些局限性,例如拆沉机制、俯冲机制以及与区域地质背景之间的矛盾,可以解释反复出现的高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的现象。当然,这种模式还有待于进一步证实和完善。

感谢杨蔚和李伍平提供的未发表资料,感谢中国科学院地质与地球物理研究所 Sr-Nd-Pb 同位素室的大力支持。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province, 1989. Regional geology of Liaoning Province. Geological Publishing House, Beijing, 227—231 (in Chinese).
- Chen, W. J., Li, D. M., Li, Q., et al., 1992. Geochronology and geochemistry of basin basalt at Xialiaohu rift. In: Liu, R. X., ed., Geochronology and geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in China. Seismological Publishing House, Beijing, 44—80 (in Chinese).
- Chen, W. J., Li, Q., Li, D. M., et al., 1999. Some major problems in the dating of Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks. *Geological Review*, 45(Suppl.): 72—81 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. X., Chen, W. J., Zhou, X. H., et al., 1997. Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning Province and adjacent areas—Geochronology, geochemistry and tectonic environment. Seismological Publishing House, Beijing, 1—279 (in Chinese).
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yang, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892—897.
- Grawford, A. J., Falloon, T. J., Green, D. H., 1989. Classifi-

- cation, petrogenesis and tectonic setting of boninites. In: Crawford, A. J., ed., Boninites. Unwin Hyman, London, 1—49.
- Hu, J. M., Zhao, Y., Liu, X. W., et al., 2005. SHRIMP U-Pb dating for zircons from pyroxene andesite of Shuiquanguo Formation in western Liaoning Province and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 24(2): 104—109 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., 2006. Geochemistry characteristics of the Early Jurassic dacites of the Xinglonggou Formation in Beipiao area, West Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6) (in press, in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., Lu, F. X., Sun, S. P., et al., 2000. Discussion on the origin of volcanic rocks of Donglingtai Formation in Beijing Xishan Mountain and its geological setting. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 345—352 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Q., 1987. Study on geochronology of the Cenozoic volcanic rocks in northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, (4): 21—31 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. X., Wu, Q. F., Li, W. P., et al., 2005a. Composition, structure, and interaction between interior layers of lower lithosphere in typical area, eastern China. China University of Geosciences Press, Wuhan, 60—62 (in Chinese).
- Lu, F. X., Zheng, J. P., Zhang, R. S., et al., 2005b. Phanerozoic mantle secular evolution beneath the eastern North China craton. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 61—67 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Y. D., Zhang, L. D., Chen, W., et al., 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar dating of the Yixian Formation volcanic rocks, western Liaoning Province, China. *Geochimica*, 32(5): 427—435 (in Chinese with English abstract).
- Rollison, H. R., 1993. Using geochemical data: Evolution, presentation, interpretation. Longman Singapore Publishers (Pet) Ltd., Singapore.
- Shao, J. A., Han, Q. J., Zhang, L. Q., et al., 1999. Cumulate complex xenoliths in the Early Mesozoic in eastern Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 44(14): 1272—1279.
- Shao, J. A., Zhang, R. H., Han, Q. J., et al., 2000a. Geochronology of cumulate xenoliths and their host diorites from Harqin, eastern Nei Mongol. *Geochimica*, 29(4): 331—336 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Han, Q. J., Li, H. M., 2000b. Discovery of the Early Mesozoic granulite xenoliths in North China craton. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl.): 245—252.
- Shao, J. A., Li, Z. T., Zhang, L. Q., 2004. Symmetric spatio-temporal distribution of the Meso-Cenozoic volcanic rocks in west Liaoning and environs and its implications. *Chinese Journal of Geology*, 33(2): 98—106 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Lu, F. X., Zhang, L. Q., et al., 2005. Discovery of xenocrysts in basalts of Yixian Formation in western Liaoning Province and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1547—1558 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Lu, F. X., Zhang, L. Q., et al., 2006a. Temporal and spatial evidences for Early Cretaceous disturbance of the lithosphere beneath North China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 277—284 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Lu, F. X., Zhang, L. Q., 2006b. Origin of sanukite from Yixian Formation in western Liaoning Province and its tectonic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6) (in press, in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Lu, Z. X., Lu, F. X., et al., 2006c. Formation, destruction and deformation of the Mesozoic crust-mantle transition zone in west Liaoning Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12) (in press, in Chinese with English abstract).
- Swisher, C. C., Wang, X. L., Zhou, Z. H., et al., 2002. Further support for a Cretaceous age for the feathered-dinosaur beds of Liaoning, China; New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Yixian and Tuchengzi formations. *Chinese Sci. Bull.*, 47(2): 135—138.
- Wang, H. F., Yang, X. C., Zhu, B. Q., et al., 1988. K-Ar geochronology and evolution of Cenozoic volcanic rocks in eastern China. *Geochimica*, (1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. L., Zhang, H., Zhang, L. J., et al., 2004. Standard section of Tuchengzi Stage and Yixian Stage and their stratigraphy, palaeontology and tectonic-volcanic actions. Geological Publishing House, Beijing, 359—434 (in Chinese).
- Xu, W. L., Zheng, C. Q., Wang, D. Y., 1999. The discovery of middle mantle and lower crust-derived xenoliths in Mesozoic trachybasalts from West Liaoning and their geological implications. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 444—449 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China craton: Evidence from Mesozoic basalt and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373—4387.
- Zhang, Z. C., Li, Z. N., Wang, F. B., et al., 1994. Essential characteristics of volcanic rocks and discussion on their genesis in Yixian basin, western Liaoning. *Geoscience*, 8

- (4):441—451 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: Review and prospect. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 50—64 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Kenneth, A., Hoffman, S. N., et al., 2004. Geomagnetic paleointensity and direct age determination of the ISEA (M0r) chron. *EPSL*, 217: 285—295.
- 附中文参考文献**
- 陈文寄, 李大明, 李齐, 等, 1992. 下辽河裂谷盆地玄武岩的年代学与地球化学. 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, 44—80.
- 陈文寄, 李齐, 李大明, 等, 1999. 中、新生代火山岩年龄测定中的几个值得重视的问题. *地质论评*, 45 (增刊): 72—81.
- 陈义贤, 陈文寄, 周新华, 等, 1997. 辽西及邻区中生代火山岩——年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1—279.
- 胡健民, 赵越, 刘晓文, 等, 2005. 辽西凌源地区水泉沟组安山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. *地质通报*, 24 (2): 104—109.
- 辽宁省地质矿产局, 1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 227—231.
- 李伍平, 2006. 辽西北票早侏罗世兴隆沟组英安岩的地球化学特征. *岩石学报*, 22(6): 印刷中.
- 李伍平, 路凤香, 孙善平, 等, 2000. 北京西山东岭台组(J_3d)火山岩的成因及其构造环境探讨. *岩石学报*, 16(3): 345—352.
- 刘嘉麒, 1987. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究. *岩石学报*, (4): 21—31.
- 路凤香, 吴其反, 李伍平, 等, 2005a. 中国东部典型地区下部岩石圈组成、结构和层圈相互作用. 武汉: 中国地质大学出版社, 60—62.
- 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 等, 2005b. 华北克拉通东部显生宙地幔演化. *地学前缘*, 12(1): 61—67.
- 彭艳东, 张立东, 陈文, 等, 2003. 辽西义县组火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、K-Ar 法年龄测定. *地球化学*, 32(5): 427—435.
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等, 1999. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现. *科学通报*, 44(5): 478—485.
- 邵济安, 张任祜, 韩庆军, 等, 2000a. 内蒙古喀喇沁堆晶岩捕虏体和寄主闪长岩的同位素年龄. *地球化学*, 29(4): 331—336.
- 邵济安, 韩庆军, 李惠民, 2000b. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. *中国科学*, 30(增刊): 148—153.
- 邵济安, 李之彤, 张履桥, 2004. 辽西及邻区中—新生代火山岩的时空对称分布及其启示. *地质科学*, 33(2): 98—106.
- 邵济安, 路凤香, 张履桥, 等, 2005. 辽西义县组玄武岩捕虏晶的发现及其意义. *岩石学报*, 21(6): 1547—1558.
- 邵济安, 路凤香, 张履桥, 等, 2006a. 华北早白垩世末岩石圈局部被扰动的时空证据. *岩石学报*, 22(2): 277—284.
- 邵济安, 路凤香, 张履桥, 2006b. 辽西义县组基方辉安山岩成因及其构造背景. *岩石学报*, 22(6): 印刷中.
- 邵济安, 卢造勋, 路凤香, 等, 2006c. 辽西中生代的壳幔过渡带的形成、破坏与改造. *岩石学报*, 22(12): 已接受.
- 王慧芬, 杨学昌, 朱炳泉, 等, 1988. 中国东部新生代火山岩 K-Ar 年代学及其演化. *地球化学*, (1): 1—12.
- 王五力, 张宏, 张立君, 等, 2004. 土城子阶、义县阶标准地层剖面及其地层古生物、构造—火山作用. 北京: 地质出版社, 359—434.
- 许文良, 郑常青, 王冬艳, 1999. 辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及其地质意义. *地质论评*, 45 (增刊): 444—449.
- 张招崇, 李兆霖, 王富宝, 等, 1994. 辽西义县盆地火山岩的基本特征及其成因探讨. *现代地质*, 8(4): 441—451.
- 周新华, 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. *地学前缘*, 13(2): 50—64.