

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

胶辽地块古元古代构造-热演化与深部过程

李三忠¹⁾ 郝德峰¹⁾ 韩宗珠¹⁾ 赵国春²⁾ 孙 敏²⁾

1) 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛, 266003; 2) 香港大学地球科学系

内容提要 近年来的研究表明, 华北克拉通由东部地块和西部地块于1.85 Ga 沿中部带碰撞形成, 且碰撞前东部地块的西缘为活动陆缘, 研究程度高。相比之下, 东部地块的东缘大面积分布的古元古代胶辽吉造山带研究薄弱。根据新近多学科研究成果, 综合揭示出胶辽吉造山带古元古代的构造-热演化和深部地质作用过程如下: 早期底侵可能与深部地幔柱相关, 发生于2.53~2.36 Ga 之间, 导致2.47~2.33 Ga 岩墙事件、胶辽吉裂谷带的形成和双峰式火山活动。该幕底侵不仅导致地壳上部沉积格架的不同, 也导致地壳内初始热结构的分异, 从而决定不同空间上变质作用类型和 PTt 轨迹的差异。晚期底侵导致地壳下部于2.17 Ga 左右产生 A 型辽吉花岗岩、2.2 Ga 与 2.0 Ga 的伟晶岩事件和顺层伸展变形。其主要的造山运动发生在1.911~1.883 Ga 之间, 裂谷封闭、收缩变形, 在该造山带南部出现高压变质。之后, 1.875~1.66 Ga 之间, 出现小断块的拆沉、环斑花岗岩、钾长花岗岩和正长岩的非造山岩浆事件、伟晶岩脉和基性岩墙群事件和榆树砬子群沉积。东部地块南缘大别-苏鲁一带1.7~1.6 Ga 期间应是一个重要的古元古代强烈活动陆缘带。中元古代1.6 Ga 以后大别-苏鲁一带经历了一系列再造事件而与东部地块主体形成显著差异。总之, 胶辽吉造山带的底侵样式、碰撞过程、拆沉方式都直接制约着浅部地壳的构造-热演化特征。

关键词 古元古代 构造-热演化 深部过程 底侵 拆沉

古元古代是地质历史中动力学与热力学格局转变的重要时期。在这一重大转变时期内, 发生了古元古代初超大陆裂解、大量基性岩墙(席)侵位(Heaman, 1997; Halls et al., 1998)、大量巨厚被动陆缘型沉积建造、大陆壳的快速生长、真正可与显生宙对比的蛇绿岩及碰撞造山作用的首次出现、广泛面型变质向线型变质的转变、大陆根的形成(Polet et al., 1995)、古元古代末超大陆的形成及古元古代末一中元古代初全球非造山型岩浆活动(Windley, 1995)等等。同时, 这一时期又继承了太古宙即已出现的增生造山带及岛弧作用(Windley, 1995), 构造过程既继承太古宙、又具某些显生宙构造特征, 水平与垂向构造并重(Etheridge et al., 1987; Oliver et al., 1991; Windley, 1995)。因此, 古元古代又是一个承前启后的地质历史时期。在2.4 Ga、2.3 Ga、2.2~2.1 Ga、2.0~1.9 Ga、1.8 Ga、1.7~1.6 Ga 相继发生了各具特色的一系列重大地质事件(Condie, 2001)。这一系列重大地质事件的发生及其独特性的深部地质动力学机制与过程的深入探索正成为古元

古代地质, 甚至早期地壳演化研究的下一个前沿目标。目前更为重要的深层次科学问题是有关上述深部过程的时空关系如何, 岩石圈内各层次的构造-热演化响应关系如何。本文针对古元古代深部地质构造、岩浆、变质的响应进行上述问题的探讨, 拟选择中国大陆上古元古代构造带保存相对完整、出露面积最大、物质组成及地质现象极其丰富的胶辽吉造山带(李三忠等, 2001b, 图1)重点论述。

胶辽吉造山带是胶辽地块的主体, 属于华北克拉通东部地块(Zhao et al., 1999, 2000a, 2000b, 2001a, 2001b, 2001c; 翟明国等, 2000)东缘的一条重要的古元古代造山带, 主体由(南、北)辽河群及对应地层和辽吉花岗岩组成, 主要分布于胶东、辽东和吉南地区。但最近在渤海湾和鲁西地区发现大面积古元古代花岗岩(曹国权等, 1990; 张云慧等, 2001), 表明该造山带可能包括鲁西和部分渤海湾地区(图1)。该造山带总体与华北克拉通的中部带平行。华北克拉通的中部带作为东部地块与西部地块在1.85 Ga 拼合的碰撞带, 其构造-热事件演化特点和年代

注: 本文为国家自然科学基金青年基金项目(编号 40002015)和香港 RGC 项目(编号 HKU7090/01P)资助成果。

收稿日期: 2002-06-12; 改回日期: 2003-02-28; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 李三忠, 男, 1968年生, 博士, 中国海洋大学教授, 博导, 从事构造地质学、岩石学及海洋地质学的教学和研究工作。通讯地址: 266003, 青岛市鱼山路5号, 中国海洋大学; 电话: 0532-2031971(办); Email: Sanzhong@mail.ouc.edu.cn。

格架研究已很清晰,但东部地块大面积出露的古元古界反映东部地块在拼合前后的状态或总体演化过程如何,目前还没有系统论述。

近12年来,笔者及合作者参加了东部地块的胶辽地区古元古代造山带的1:5万区域地质填图,并侧重对伸展与碰撞构造变形、岩性地层对比、变质动力学、垂向及侧向递进变质带时空关系、变斑晶晶内包体径迹几何学、同变质花岗岩侵位构造、底侵与裂解以及拆沉与伸展和收缩构造体制转换关系、大地构造环境等方面的研究和探讨(Liu et al., 1997;李三忠等, 1998a, 1998b, 2001a, 2001b; Cui et al., 2001)。结合前人对该区非造山型岩浆作用(如A型花岗岩)、同位素年代学(许保良等, 1998;孙敏等, 1996)、古元古代末—中元古代初蛇绿岩及大洋斜长

花岗岩(倪志耀等, 2001a, 2001b, 2001c)、少量同位素示踪(陆松年等, 1996, 1997;陆松年, 1998)、高压麻粒岩(翟明国等, 2000;李永刚等, 1997)、大型超大型矿床(白瑾, 1993;秦松贤等, 1994;卢良兆等, 1996)的探讨。本文将在现有这些最新成果基础上,按胶辽吉造山带中事件群(陆松年等, 2001)发生的时间顺序,系统论述该区造山前、同造山和造山后的一系列深部过程与浅部响应的关系和过程。

1 造山前:底侵及其壳内效应

通过对硼矿的研究表明,硼在大陆下地壳和地幔中含量极低,因而,认为硼的富集不应当出现在类似东非裂谷这样的陆内裂谷环境。但现代大量硼矿皆出现在会聚背景下的伸展盆地中,因为硼的富集

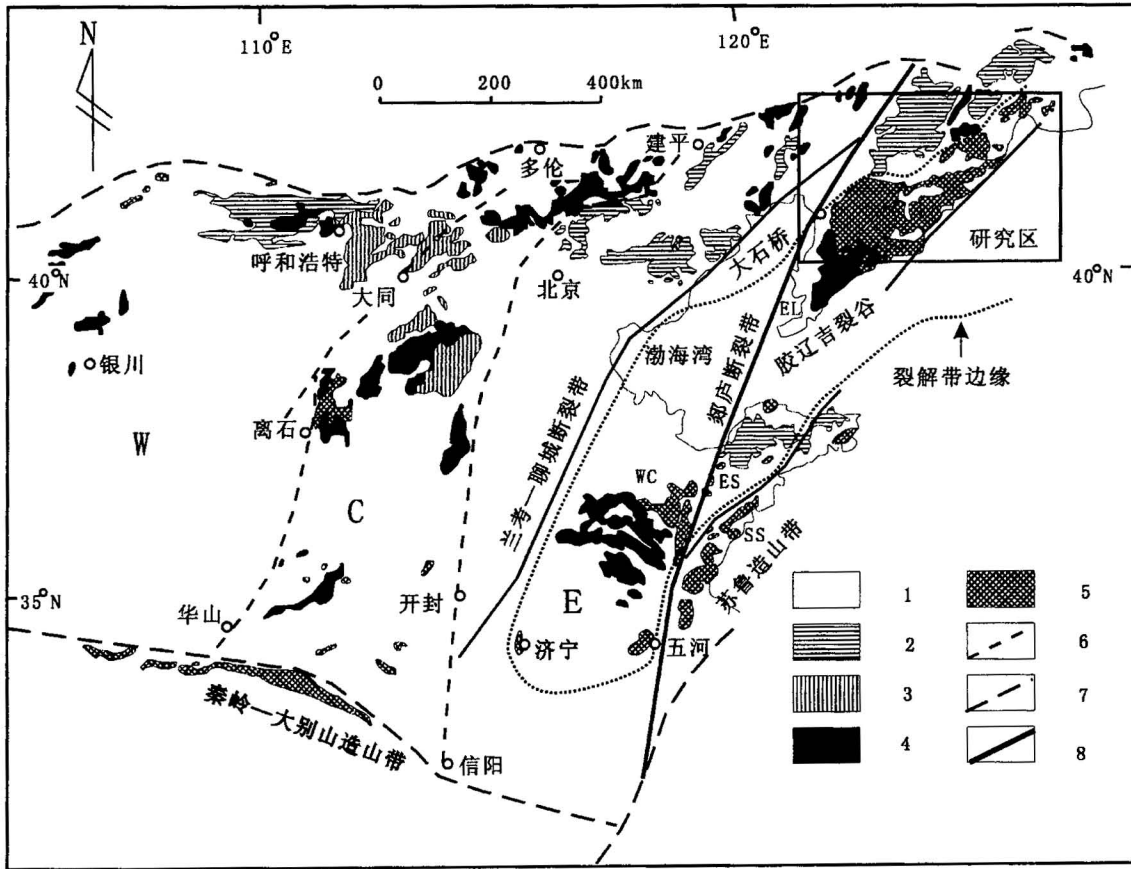


图 1 胶辽地块及邻区基底构造单元划分(据赵国春等, 1999, 2000a, 2000b, 2001a, 2001b)

Fig. 1 Tectonic division of Precambrian basement of Jiao-Liao massif and its neighbor

(after Zhao et al., 1999, 2000a, 2000b, 2001a, 2001b)

- 1—盖层; 2—含 A 型基性麻粒岩的太古宙基底; 3—含 B 型基性麻粒岩的太古宙基底; 4—不含麻粒岩的太古宙基底; 5—古元古界基底;
- 6—分界断裂; 7—克拉通边界; 8—主要断裂; W—西部地块; C—中部带; E—东部地块; EL—辽东地区; ES—胶东地区;
- SS—胶南地区; WC—鲁西地区

- 1—Cover; 2—Archean basement with A-type mafic granulites; 3—Archean basement with B-type mafic granulites; 4—granulite-free Archean basement; 5—Palaeoproterozoic basement; 6—zone boundary fault; 7—craton boundary fault; 8—main fault; W—western Block;
- C—central Zone; E—eastern Block; EL—eastern Liaoning; ES—eastern Shandong; SS—south Shandong; WC—western Shandong

要求富硼的洋壳俯冲并释放富硼流体交代地幔楔中的岩石圈地幔,最后以火山形式喷发到盆地中沉积。因此,胶辽吉造山带的前身——胶辽吉裂谷应当产生于一个新太古代活动大陆边缘基底上。该基底由2.55~2.52 Ga的花岗岩类组成(在辽北与辽南的新太古代之间略有差异),并于2.49 Ga经历了麻粒岩相变质,随后经历碰撞或俯冲型相关的新太古代造山后崩塌,出现2.47 Ga的造山后钾质花岗岩事件(张秋生等,1988;Peng et al., 2002)。相对古元古代造山事件来说,这些事件皆发生于造山前。这些造山前浅部地质作用的深部制约作用,对了解胶辽吉古裂谷的大地构造演化阶段尤为重要。

1.1 底侵与初始地壳生长及巨量花岗岩形成

根据陆松年等(1996)总结的判别准则和理论前提,李三忠等(2001b)对胶辽地块同位素参数 T_{DM} 和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值进行了统计分析(图2),表明据此可获得早期深部地质信息,并确定胶辽地块深部于古元古代早期发生了底侵。

宽甸地区辽河群中斜长角闪岩的钨亏损地幔模式年龄(T_{DM})为2.46~2.75 Ga,花岗岩的 T_{DM} 年龄为2.36~2.53 Ga,且 $T_{DM} \approx t_{Sm-Nd} > t_{U-Pb}$ 。按照陆松年等(1996)的判别标准,则斜长角闪岩的 T_{DM} 代表初始地壳形成年龄,孙大中等(1993)也认为 T_{DM} 代表基性岩底侵时代;但花岗岩的 T_{DM} 则代表活化再造地壳时间。据此判断,辽东地区古元古代早期约2.5~2.4 Ga 期间曾有一次重要的基性岩浆底侵事件,同时引起下部地壳活化再造,出现2.47~2.33 Ga的造山后钾质花岗岩(Peng et al., 2002; Li et al., 2003a, 2003b)。钾质花岗岩带从大石桥市虎庄开始,

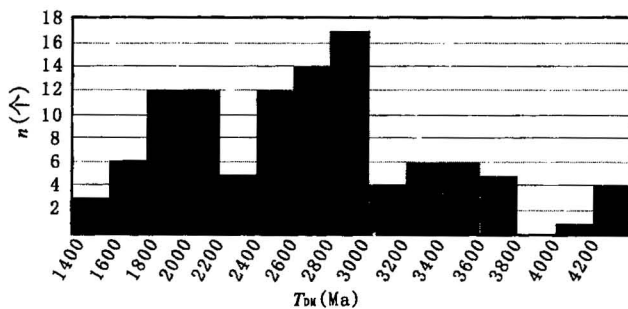


图2 胶辽(吉)地块早前寒武纪岩石的 Sm-Nd 同位素模式年龄直方图

Fig. 2 The T_{DM} histogram of the Early Precambrian rocks in the Jiao-Liao-Ji orogen

(数据来源于陆松年等,1996;陆松年,1998;孙敏等,1996;吴福元等,1997)

(Data from Lu et al., 1996; Lu, 1998; Sun et al., 1996; Wu et al., 1997)

沿胶辽吉造山带北部边缘展布。并经漫长积累,在新太古代末期在鞍山小寺和黑牛庄、吉林抚松、辽宁新宾等地的太古宙基底中逐步形成稍晚的、发育平均年龄为2.447 Ga 的一期伟晶岩脉事件(王集源,1984)。

胶北栖霞县城以东骂阵口花岗质片麻岩中锆石 U-Pb 同位素年龄为 1.960 ± 0.067 Ga,代表原花岗岩形成年龄,其 T_{DM} 为2.413 Ga;而胶北斜长角闪岩(如刁崖后) T_{DM} 为2.406 Ga(陆松年等,1997),表明胶北也存在2.5~2.4 Ga 左右的底侵事件(陆松年,1998),且胶北古元古代花岗岩的形成与辽东相似,属底侵引起的地壳活化再造的产物。

最新的 SHRIMP 数据表明,典型的辽吉花岗岩(条痕状二长花岗岩)中的继承锆石中很少有太古宙锆石。这些条痕状二长花岗岩的年龄几乎都介于2.17~1.15 Ga 之间,无论其位于裂谷中央还是裂谷边缘,几乎没有辽北具有的3.8~2.7 Ga 的太古宙锆石继承。这表明其岩浆源区不应当有辽北太古宙地壳熔融,而可能为伸展背景下的2.5 Ga 的地壳(辽南?)和少量2.47~2.36 Ga 底侵体源区熔融按一定比例混合而共同产生的岩浆。这样,条痕状二长花岗岩地球化学性质才能满足 S 型花岗岩和 A 型花岗岩的双重特性。而且,重要的是还应当存在2.17~1.15 Ga 且偏向辽南的一个重要热源。

胶北位于辽南南部。对胶北中生代花岗岩 T_{DM} 统计发现,高频区为2.1~1.9 Ga 左右,经陆松年等(1996,1998)详细判别分析,表明胶北地区底侵作用可能持续到2.0 Ga 左右,但从胶辽地区 T_{DM} 统计直方图中(图2)表明最可能在2.0 Ga 左右发生了另一次底侵事件(Condie, 2001)。底侵体成为中生代花岗岩的源区,表明它未被后期(中生代)深部过程拆沉,而从产生后便一直保存于壳下至中生代。因此,古元古代地壳垂向上底侵增生是地壳快速生长的重要方式。也正是由于本区该幕底侵作用提供热源,导致下部地壳中具产生 S 型辽吉花岗岩的源区物质于2.17~2.15 Ga 左右发生活化、再造、熔融,在一种大陆边缘裂谷伸展体制下,以时间上滞后于基性底侵作用的次一级底侵体,大规模侵位于太古宙基底与古元古界之间的接触面附近。而且,SHRIMP 资料表明,在辽南和胶北中生代花岗岩中大量2.17~2.10 Ga 的继承锆石,说明在胶北和辽南现今仍有大量古元古代侵入岩没有剥露。此外,2.2 Ga 与2.0 Ga 的伟晶岩也较发育,多分布于辽北太古宙基底中,与基底再造事件密切相关。同时,有许多2.2~

2.0 Ga 的顺层、同第一幕构造的伟晶岩脉广泛侵入到辽河群中。中性浮力理论有力证明了这种岩石圈内物质纵向上分异的过程。

底侵是指来自上地幔部分熔融产生的基性岩浆(玄武质熔体)侵入或添加到下地壳底部的过程或作用,也包括下地壳岩石部分熔融形成的岩浆(主要与基性岩浆侵入提供大量热和 CO₂ 流体诱发熔融有关)向中上地壳侵位和添加过程(金振民等,1996)。底侵可以发生在多种环境:大陆碰撞带、活动陆缘俯冲带、大陆裂谷带、热点区或热幔柱上方、被动陆缘及稳定地台等。地球化学研究结果表明,宽甸地区的斜长角闪岩高度富集 K, Rb, Ba, Sr, Cr, Ni 和 Th; 轻微富集 Nb 和 Ce; P, Zr, Hf, Sm, Ti, Y, Yb 和 Sc 接近 1。斜长角闪岩微量元素模式介于火山弧钙碱性和拉斑玄武岩之间, REE 模式相对平坦, LREE 略微富集, 无 Eu 异常。其高 K₂O, 低 Al₂O₃ 和总 FeO 含量高的特征, 与岛弧型低钾拉斑玄武岩明显不同(Sun et al., 1993; 孙敏等, 1996)。宽甸地区的早期花岗岩除了富含 Ba 和 V、低 Th 和 Zn 外, 地球化学特征上与 A 型花岗岩相似, REE 模式表现为 LREE 富集、HREE 平坦、负 Eu 异常, Rb-(Y+Nb) 图解上落入板内环境(Sun et al., 1993; 孙敏等, 1996)。所有这些特征表明, 底侵相关的裂解作用可能发生在热幔柱上方, 且时间上与具全球性的 2.45 Ga 和 2.0~1.9 Ga 的地幔柱活动接近(Condie, 2001)。

1.2 底侵与伸展构造及沉积格架

上述深部过程导致浅部胶辽吉裂谷的形成。胶辽地块古元古界的空间分布记录了初始裂解时的盆地样式。北辽河群及老岭群的沉积组合、成矿特征、变质特征、年龄等皆可与粉子山群对比, 但它们空间上却平行展布。经构造解析表明, 粉子山群绝对不是

北辽河群因褶皱作用弯转的产物(白瑾, 1993), 而是分别沉积于两条同沉积铲形断裂控制的两个半箕状断陷盆地中的类似沉积环境下的沉积组合(李三忠等, 2001a)。同样, 南辽河群及集安群的沉积组合、成矿特征、变质特征、年龄等也可与荆山群详细对比, 它们分别位于北辽河群、老岭群和粉子山群的南部, 从现今保存的沉积组合的特征及时空展布揭示了伸展盆地初始样式为一系北断南翘的箕状断陷盆地组合(李三忠等, 2001a)。

一般认为, 几何学、运动学的不对称性取决于动力学的不对称性。辽河群等伸展构造的几何学及运动学研究(秦松贤等, 1994; 李三忠等, 1998a), 表明胶辽地块古元古代早期的底侵样式或底侵过程是不对称的。此外, 更为直接的证据是, 辽东基性底侵体的不对称形态在东沟—东乌地学大断面上表现为下部地壳高密度体南厚北薄。辽东酸性底侵体的不对称形态表现在 1:20 万重力高精度的解释成果揭示的辽吉花岗岩南厚北薄的特征上。总体上, 基性与酸性岩的底侵时代与上部沉积组合的年龄相吻合, 进一步说明底侵与伸展盆地样式形成及沉积组合的产生是同时代同空间紧密相关的(李三忠等, 2001b)。不同形态(如对称和非对称)的底侵体会导致地壳上部产生不同几何样式的伸展盆地, 并决定盆地的沉积体系的时空格架。

1.3 底侵与变质作用及 PTt 轨迹

底侵不仅导致地壳上部沉积格架的不同, 也导致地壳内热结构的分异, 从而决定盆地内不同空间上变质作用类型的差异。从一系列 PTt 轨迹研究可揭示这种裂谷盆地初始热结构的时空变异过程。

胶辽地块中北辽河群、老岭群和粉子山群的变质作用及 PTt 轨迹(表 1, 图 3)研究表明, 早期为升温升压阶段(表 1), 变质作用属中温中压类型, 而南

表 1 辽河群及相应岩群变质作用各阶段的温压综合对比

Table 1 Comparison of temperatures and pressures at every stage of metamorphism in the Liaohu Group and the equivalents

变质阶段 ^④		M ₁		M ₂		M ₃		M ₄	
温度压力条件		t(°C)	p(GPa)	t(°C)	p(GPa)	t(°C)	p(GPa)	t(°C)	p(GPa)
北部	北辽河群 ^①	460~500	0.45~0.50	530~570	0.53~0.56	600~640	0.64~0.73	410~460	0.25~0.32
	老岭群 ^①	360~430	0.20~0.30	460~500	0.40~0.50	530~560	0.60~0.70	480	0.20
	粉子山群 ^②	420~510	0.50~0.60	720	0.55	850	0.90	870	0.60
南部	南辽河群 ^①	400~480	0.23~0.35	530~570	0.30~0.40	670~710	0.60~0.68	475~520	0.40~0.50
	集安群 ^①	450	0.37	560~600	0.42~0.45	700~750	0.52~0.65	550~600	0.50~0.59
	荆山群 ^③	500~600	0.40~0.50	630~650	0.40~0.50	700~750	0.50~0.60	570	0.43
构造背景 ^④		伸展背景				挤压背景			

注: 数据综合了①贺高品等(1998)、②陆松年等(1996)、③卢良兆等(1996)、④李三忠等(1998a)等成果。

辽河群、集安群及荆山群的变质作用及 PTt 轨迹研究表明,早期为近等压快速升温阶段(表1),变质作用属低压高温类型。南部和北部早期变质阶段的变质时代相同,且与酸性二长花岗岩的古元古界与太古宙基底间大规模底侵作用(2.2~1.9 Ga)时间一致,故其 PTt 轨迹最初 M_1 及 M_2 段的差异反映了盆地热结构的不同。当然,许多2.2~2.0 Ga的顺层伟晶岩脉在辽河群中也广泛分布,主要是呈顺层平行 S_1 片理分布,与2.2~2.0 Ga发生的广泛的伸展变形密切相关,与 M_1 及 M_2 变质阶段相应(李三忠

等,1998b)。这也进一步表明,变质热源与同时代的底侵作用密切相关,因而,变质作用空间上的不对称分布表明底侵样式的不对称性,即底侵体南厚北薄或底侵上部地壳南薄北厚,导致南部异常升温。

总之,不同环境、不同过程必将有不同的底侵样式,不同的底侵样式也必将对地壳不同层次、不同演化阶段产生不同的成分效应、温度效应和压力效应等。反之,根据地壳内记录的岩石、矿物、元素及同位素共生组合及其时空特点,可反推包括底侵在内的一系列深部地质作用过程,从而揭示多层圈相互作用

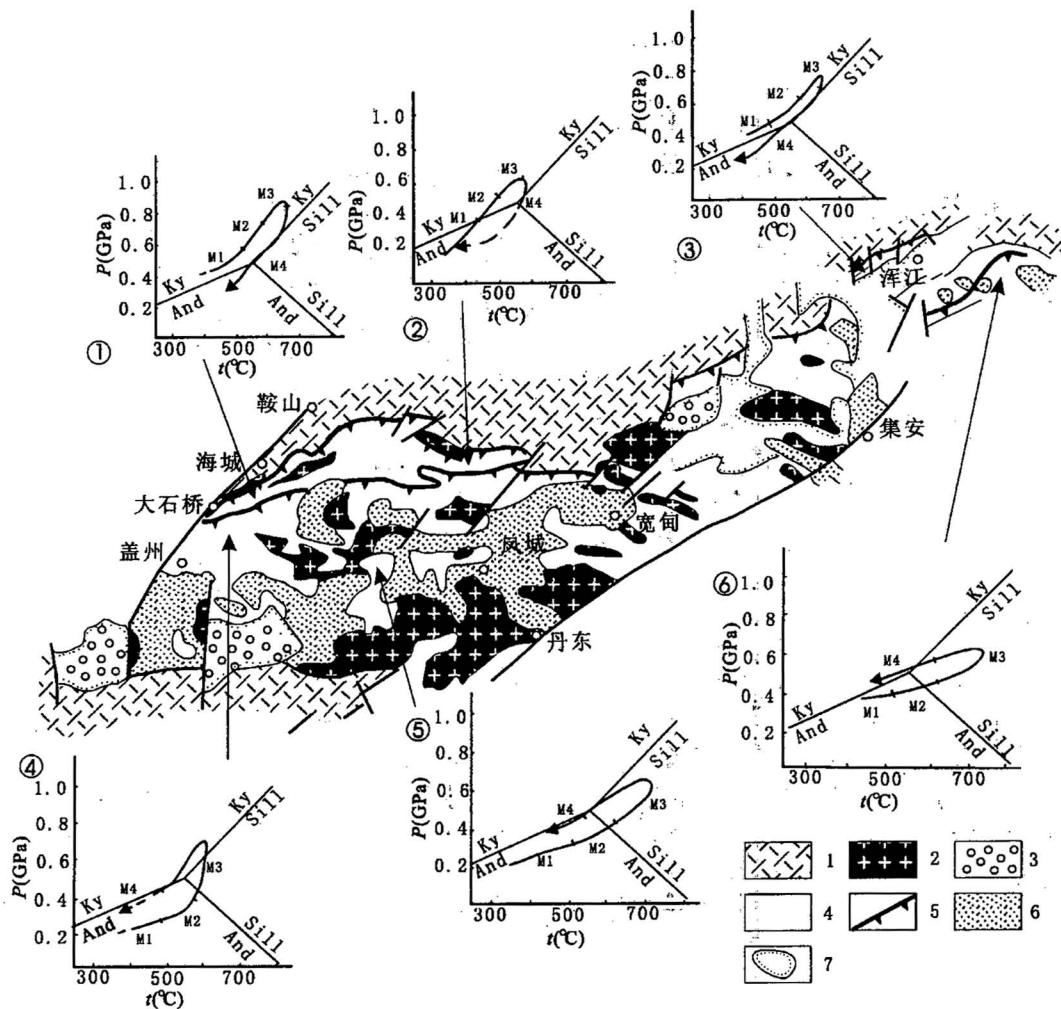


图3 辽河群及相应地层的变质作用 PTt 轨迹

(①, ④据李三忠等,2001a;②, ⑥据贺高品等,1998;③, ⑤据卢良兆等,1996,略改)

Fig. 3 PTt paths of the Liaohe Group and the equivalents

[①, ④ after Li et al. (2001a); ②, ⑥ after He et al. (1998); ③, ⑤ refined from Lu et al. (1996)]

1—太古宙基底;2—古元古代花岗岩;3—(中?)新元古界;4—辽河群及对应地层;5—主要断裂;6—中生代岩体;7—中生界

Ky—蓝晶石;And—红柱石;Sill—夕线石

1—Archean basement; 2—Paleoproterozoic granite; 3—(Meso?)Neoproterozoic strata; 4—Liaohe Group and equivalents;

5—major faults; 6—Mesozoic plutons; 7—Mesozoic strata; Ky—kynite; And—andalusite; Sill—sillimanite

用的本质。

2 同造山:碰撞造山及其壳内响应

对华北克拉通古元古代孔兹岩系的研究结果表明,其主要的造山事件时限为2.0~1.8 Ga。Lu等(2002)则认为主要的造山事件时限为2.0~1.85 Ga(或1.80 Ga)。卢良兆等(1996)也指出胶辽吉造山带中的南辽河群及其对应地层为“孔兹岩系”。然而,最新研究揭示,这些“孔兹岩系”的主要造山时限相对短暂,在2.0~1.9 Ga期间胶辽吉地区仍处于伸展背景,形成张裂型辽吉花岗岩(张秋生等,1988;Li et al., 2003a, 2003b),其主要的造山运动发生在1.911~1.883 Ga之间(Yin et al., 1996;贺高品等,1998;Li et al., 2003a)。胶辽地块古元古代末期经历了碰撞造山作用,在残存地壳内保存了许多这一过程的壳内物理和化学记录。

2.1 碰撞造山与碰撞型花岗岩及高压变质作用

桑隆康(1991)对华北克拉通东部地块东南缘大别山—连云港(苏鲁)地区古元古界的沉积岩石组合及其岩石化学研究揭示该区古元古界中上部原岩是钙碱性火山岩及少量成熟度较低的沉积岩,为一套钙碱性火山-沉积建造,其化学特征说明为活动陆缘(岛弧内侧)的建造;而辽吉地区此时处于火山型被动陆缘(Cui et al., 2001)。莱西—栖霞一带构造侵位于太古宙片麻岩中且NE向展布的古元古代(1.75 Ga, 偏小)高压基性麻粒岩—超铁镁质岩带(李永刚等,1997)、莱西—平度一带古元古代中低压麻粒岩(卢良兆等,1996)及胶东海阳所等地存在古元古代蛇绿岩残片(王仁民等,1995;倪志耀等,2001a, 2001b, 2001c)等发现,尽管还有争论,但综合整个胶辽地块古元古代的各种现象,表明其南部区发生了俯冲与碰撞作用无疑(李三忠等,2001b)。

与古元古代碰撞深俯冲事件相应,在吉南出现碰撞型斜长花岗岩,如集安山城子斜长花岗岩(1.883 Ga的Rb-Sr全岩等时线)等。野外关系表明,它们穿切片麻状二长花岗岩。斜长花岗岩的稀土元素总量与地幔稀土元素丰度值 10.18×10^{-6} 接近,Sm/Nd平均值0.28与地幔Sm/Nd比值0.31相近, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值0.704与幔源岩浆岩熔融形成的I型花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值小于0.708吻合,这些都说明斜长花岗岩的源岩是上地幔部分熔融的产物(白瑾,1993)。

2.2 碰撞造山与收缩挤压构造、盆地反转及PTt轨迹

胶辽地块古元古代早期以垂向增生及重力作用引起的与伸展型正向滑脱构造变形(秦松贤等,1994;李三忠等,1998a)为主。但在板片俯冲(A型?B型?)期间则发生了垂向伸展构造体制向水平收缩构造体制的转变,盆地可能沿一系列重要的铲形拆离构造带发生反转(图4下部),出现两幕褶皱作用(D₂及D₃)的叠加及一系列小型逆冲推覆构造带。D₂幕褶皱为紧闭同斜直立褶皱为主,轴迹为ENE向,而D₃幕褶皱以宽缓直立水平褶皱为主,轴迹为WNW向,它们叠加形成一系列穹盆构造格局,在这两幕褶皱作用期间早期二长花岗岩变形叠加于穹隆核部,局部出现与围岩的不协调现象。从平行D₂幕褶皱轴面折劈理定向排列的M₃黑云母(Bt₂)单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 1896 ± 7 Ma(Yin et al., 1996)表明收缩构造为辽河期产物。

碰撞作用一般常导致地壳的快速增厚作用,之后在碰撞后因重力均衡作用出现快速剥蚀。但从胶辽地块不同构造部位古元古代PTt轨迹(图3)研究表明(白瑾,1993;卢良兆等,1996;陆松年等,1996;Liu et al., 1997;李三忠,1998b;贺高品等,1998),事实并非如此简单。

从北辽河群、老岭群及粉子山群的PTt轨迹中与碰撞及碰撞后期相关的轨迹段(通过变斑晶生长序列确定)表明,它们于碰撞期间出现快速升温升压,温压同时达到峰值,之后又为快速降压、缓慢降温过程(图3)。因此,这些岩群分布地区先后经历了地壳的快速增厚和明显的构造抬升或剥蚀,而南辽河群、集安群及荆山群的PTt轨迹中相应轨迹段的共同特点是升压幅度很小,但温度仍保持不变或个别地段的有大幅升高,之后都为近等压快速降温过程。因此,这后三个岩群分布地区在碰撞期间并未出现区域性地壳的大幅增厚事件,碰撞后也未出现构造剥蚀或快速风化剥蚀。

笔者认为这种同一造山带内不同部位相反PTt轨迹的出现应从盆地的初始热结构及后期反转导致的热结构和地壳结构差异来分析。尤其是等压降温轨迹段对应的深部动力学过程至今国际上未得到合理解释,对其进行探讨显得尤为重要。一般认为逆时针PTt轨迹的等压降温段与底侵体正常缓慢冷却有关,但本区底侵发生于碰撞造山之前,底侵体上方地壳必定在收缩挤压的造山作用期间发生增厚,或底侵体下方可能出现A型深俯冲陆壳的垫托作用,导致不是出现等压降温轨迹而是在重力均衡下快速隆升的降压过程;若仅用拆沉模式来解释也不合理,

拆沉常导致地壳各层次岩石升温,密度降低而产生抬升。本区南辽河群分布区并没有出现升温而是出现降温,而且是榆树砬子群的沉积中心,故也未出现隆升、降压。因而碰撞后的深部圈层间有着更为复杂的过程尚待研究。

3 造山后:拆沉及其壳内效应

3.1 拆沉与非造山岩浆作用及盆地中心迁移

前文探讨可知,北辽河群、老岭群、粉子山群的碰撞后抬升较快,出现等温快速降压,因而推断其下部岩石圈地幔没有发生拆沉,这样软流圈供热不变,而逆冲褶皱增厚的地壳必然在重力均衡作用上发生均衡抬升。若以 Jamieson 等(1988)提出的侵蚀御载过程或侵蚀与伸展联合御载过程解释,其结果都可导致绝热快速降压过程,而仅有伸展的构造御载并不会导致快速抬升。

而此时南辽河群、荆山群、集安群分布区仅出现褶皱收缩,于碰撞后,其下部被一系列岩石圈韧性剪切带分割的岩石圈地幔也因收缩挤压伸入软流圈而易于发生拆沉,初始拆沉的下曳力导致上部沉降成为碰撞后榆树砬子群及永宁群(1.66 Ga,张秋生等,

1988)的沉积中心,并且同时出现拆沉引起的环斑花岗岩(1.875 Ga)、碱性正长岩(1.866 Ga)及钾长花岗岩(1.85 Ga±,与吴福元个人通讯,2003)的侵位。据非造山岩体和榆树砬子群沉积年代推断拆沉和非造山时期限介于1.875~1.66 Ga 之间,与东部地块其他地区的非造山岩浆活动时间(郁建华等,1996)或华北克拉通主体1.85~1.60 Ga 的裂解时限(Lu et al., 2001,2002)相比略早,并且,可能由于本区拆沉体规模不大,未出现大面积升温。而且,拆沉后引起造山后岩石圈进一步收缩,导致榆树砬子群褶皱变质变形及拆沉处软流圈下降(图4下部)。

拆沉过程中至少2.0 Ga 左右的底侵体没有被拆沉,因为它是胶北中生代花岗岩的源岩(陆松年等,1996)。这些2.0 Ga 左右的底侵体也可能是部分榴辉岩的原岩。

3.2 拆沉与造山带内差异隆升及伟晶岩脉事件

胶辽地块伟晶岩脉事件非常丰富,古元古代也有4期伟晶岩脉事件,王集源(1984)对其进行了系统的 K-Ar 法年代学资料整理,发现伟晶岩脉事件具有周期性,周期约为0.2 Ga,其时间序列平均为2.2 Ga、2.0 Ga、1.8 Ga 和1.6 Ga。从空间分布分析,其

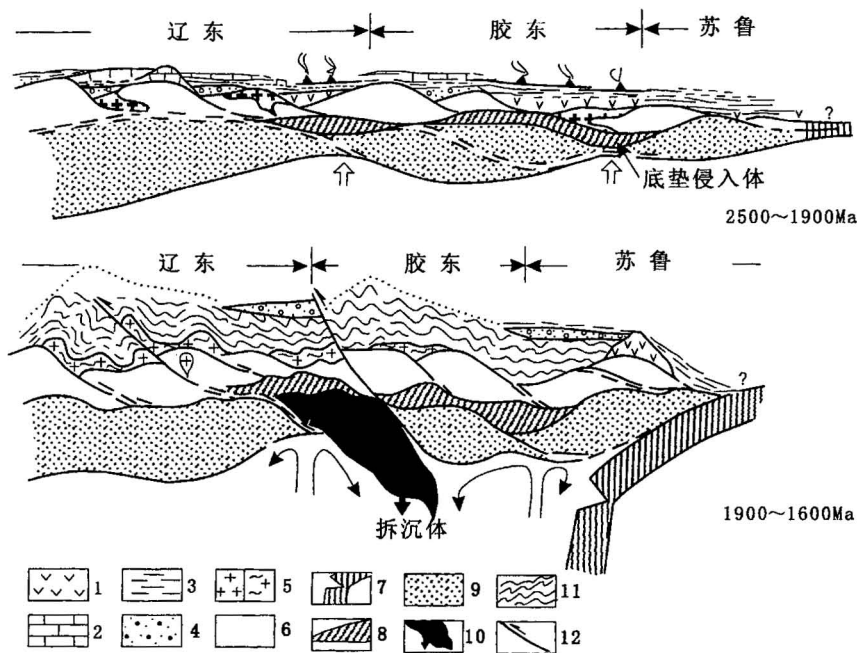


图 4 胶辽地块古元古代深部过程及壳内响应模式简图

Fig. 4 Schematic map showing the relation between intracrustal responses and deep processes in the Jiao-Liao massif during Paleoproterozoic

1—火山岩;2—碳酸盐岩;3—泥(质)岩;4—砂岩;5—古元古代花岗岩或片麻岩;6—太古宙基底;7—推测的洋壳;

8—底垫侵入体;9—岩石圈地幔;10—拆沉体;11—褶皱;12—逆冲断裂

1—Volcanic rock; 2—carbonate; 3—perlite; 4—sandstone; 5—Paleoproterozoic granite or gneiss; 6—Archean basement; 7—oceanic crust; 8—underplated intrusives; 9—lithospheric mantle; 10—delaminated slab; 11—folds; 12—thrust fault

中1.8 Ga及1.6 Ga的伟晶岩脉事件主要出露在辽河群及相应地层分布区;前者相对滞后于M₃变质阶段(1.911~1.896 Ga, Li et al., 2003b; Yin et al., 1996),可能与拆沉导致的热脉冲有关;后者切割辽河群所有构造形迹,与M₄区域整体退变相关,表明结晶基底的固结形成。结晶基底形成后因深部过程的差异导致地表不同空间部位发生程度不同或先后的隆升作用,辽河群K-Ar年龄等值线(申永治等, 1986)呈东西向展布,并由北向南渐低,进一步证明北部隆升冷却早于南部,但整个辽东胶东都无确切中元古代沉积表明该区整体在古元古代末基底已隆升、冷却、固结。但不排除后期(如晋宁期、印支期、燕山期)热事件对本区局部地带的K-Ar同位素系统造成扰动。

总之,拆沉泛指由于重力的不稳定性导致岩石圈地幔、大陆下地壳或大洋地壳沉入下伏软流圈或地幔的过程(高山等, 1997)。拆沉也有多种方式,如板片脆性断裂、岩石圈地幔对流减薄、底侵引起的岩石圈地幔拆沉、壳下地幔旋卷式拆沉、单剪型或纯剪型板片拆沉等等。不同的方式对拆沉上方的地壳也会产生不同的物理的和化学的效应。胶辽吉造山带拆沉的准确方式和过程尚存争论,目前有两种认识,即拆沉是以小规模板片断裂(李三忠等, 2001a)还是以增厚的岩石圈地幔循环减薄方式(卢良兆等, 1996)发生?从胶辽吉造山带北部隆升冷却快于南部的现象推断,该造山带下部的拆沉方式应为南、北不对称的小规模断块拆沉(图4下部)。

3.3 拆沉与造山后裂解背景

在胶辽吉造山带的西北部的东部地块中,古元古代末期造山后的裂解事件的记录保存较好,表现为拗拉槽和边缘裂陷带的形成,基性岩墙群(1769±2.5 Ma的单颗粒锆石U-Pb年龄)和斜长岩套(1683±193 Ma的Rb-Sr和1735±239 Ma的Sm-Nd年龄)、环斑花岗岩(1716±31 Ma的U-Pb年龄)的侵位,长城系上部发育的过碱性火山岩(1683±67 Ma和1625±6 Ma)等等。这些表明这部分东部地块造山后的裂解事件主要发生于1.72 Ga~1.62 Ga期间(Lu et al., 2002)。

胶辽吉造山带东南部的东部地块应包括大别—苏鲁造山带(陆松年, 1998; 简平等, 1998; Zhao et al., 1999, 2000, 2001a, 2001b), 因为大别—苏鲁出露的前寒武纪地层系统、变质变形年代、铍同位素模式年龄多方面对比(陆松年, 1998; 简平等, 1998)表明大别—苏鲁在古元古代应属于胶辽地块的一部

分。目前,同位素年代学获得大量古元古代末期的事件,珠边环河崖榴辉岩中获得1.559±0.003 Ga的K-Ar年龄(曹国权等, 1990)。简平等(1998)认为形成于幔源基性岩的熊店榴辉岩原岩的Sm-Nd年龄为1.523±0.261 Ga、Pb-Pb年龄为1.797±0.005 Ga及2.0 Ga的年龄代表榴辉岩的原岩形成年龄。而且,陈衍景等(1995)研究表明1.7 Ga左右的熊耳群的形成环境并非裂谷而是活动陆缘。

以上种种迹象表明,东部地块南缘和大别—苏鲁一带古元古代1.7 Ga左右应属一个活动大陆边缘(图4下部),出现了岛弧—大陆的碰撞事件。榴辉岩带已公认为碰撞带或俯冲边界的标志。尽管目前对榴辉岩变质时代存在争论,但上述证据表明1.7~1.6 Ga期间大别—苏鲁应是一个重要的古元古代强烈构造变动带。胶辽吉造山带下部的拆沉与上部的造山后裂解背景可能为不断后退的1.7~1.6 Ga岛弧的弧后伸展。而且,最近又发现沿大别—苏鲁一带威海烟墩山—乳山海阳出露有中元古代蛇绿岩套(Sm-Nd全岩年龄为1.472~1.282 Ga)(王仁民等, 1995),李曙光等(1994)获得该区的斜长角闪岩的锆石U-Pb年龄为1784 Ma,艾宪森等(1998)也报道了海阳所超基性等岩块中1.845 Ga的锆石U-Pb年龄,故也可能反映为古元古代蛇绿岩带。由于未排除这些基性岩中锆石是俘获锆石的可能,所以,此结论还需要进一步检验。胶南出露Pb-Pb年龄为1.370 Ga的大洋斜长花岗岩与中元古代1.3410 Ga的变辉长岩相伴生(宋明春等, 1998),表明中元古代1.6 Ga以后大别—苏鲁一带继承古构造薄弱带又发生了裂离,从而使得该区在晋宁期及以后出现一系列强大的再造事件而与胶辽地块主体形成显著差异。在这种构造和岩浆再造事件中,不能排除紧邻的胶辽吉造山带局部介入这些事件的可能性。

4 结论与讨论

综合同位素年代学、同位素及元素示踪、变质动力学、变质作用、岩浆演化、构造变形、沉积组合等多方面的研究新成果,结合现代大陆动力学探索的新认识,本文提出胶辽地块古元古代长达0.9 Ga的历史中经历了复杂的深部过程及壳内响应(见表2,部分SHRIMP年龄据Li et al., 2003a, 2003b)。这一过程充分展现了古元古代是地质历史中一个重大的动力学与热力学转折期,其构造变形受同等重要的垂向与水平构造体制制约,可能受深部底侵、拆沉及

表2 胶辽地块古元古代深部过程与壳内响应的年代格架

Table 2 Chronological framework of the deep processes and the intracrustal responses in the Jiao-Liao massif during Paleoproterozoic

时限	2.5~2.4Ga 及 2.0~1.911Ga	1.911~1.875Ga	1.875~1.6Ga
壳内响应	⑤拉张变质作用(2.2~1.911 Ga?) ④晚期底侵引发盆地快速扩张与堆积,随后盖层改造型滑脱变形(2.16~1.911 Ga) ③巨量早期二长花岗岩形成及侵位(主要为2.17 Ga±)和2.2Ga及2.0Ga顺层伟晶岩脉事件 ②早期底侵(2.53~2.36 Ga)引发双峰式火山活动和早期地层沉积(2.5~2.36 Ga?) ①早期底侵引发太古宙地壳裂解、基性岩墙侵位事件(2.462 Ga±)和钾质花岗岩事件(2.47 Ga±)	⑥1.8 Ga 伟晶岩脉事件 ⑤早期花岗岩再就位与穹盆核部 ④两幕收缩褶皱—逆冲作用,形成穹盆格局为主(1.911~1.875 Ga) ③侧向递增变质带形成(1.896~1.875 Ga) ②高压基性麻粒岩形成(1.75 Ga?) ①碰撞型斜长花岗岩侵位(1.885 Ga±)	⑤主体伟晶岩脉事件(1.6 Ga) ④退变质作用发生 ③碱性正长岩、钾长花岗岩侵位(1.866 Ga后) ②环斑花岗岩侵位(1.875~1.79 Ga) ①榆树砬子群及永宁群沉积(1.875~1.66 Ga)
深部过程	底侵作用(两幕?) ↑ 地幔柱(?)	重力均衡调整 ↑ 板片深俯冲	拆沉作用

壳-幔再循环机制控制,相应地变质作用类型也由早期拉张变质向与收缩挤压有关的变质类型转变,变质带也出现垂向递增向侧向递增的转变。酸性岩浆作用也经历了裂谷型二长花岗岩向碰撞型斜长花岗岩及非造山环斑花岗岩的演化,等等。目前该区深部过程与壳内响应尚无系统深入研究,因而不可避免地存在许多有待深化研究的大陆动力学前沿课题,如①胶辽地块的深部过程与壳内响应与华北克拉通中部带以外的古元古代演化有何差别,与其西部紧邻的中元古代厚达9193 m的长城系—蓟县系—青白口系(1.80~0.85 Ga, Lu et al., 2002)的形成有无联系;②在Columbia超大陆重建问题上,胶辽地块的位置、归属还存在不同意见,Wilde等(2002)认为华北克拉通与Baltica地块相接,Zhao等(2003)通过详细的地质与年代学对比,认为包括胶辽地块的东部地块应与印度克拉通的南部地块对应;③在利用 PTt 轨迹深入讨论大陆动力学意义过程中发现尚需要准确的年代学证据及精确的时限约束,等等。总之,在新世纪之初,加强对胶辽吉地区古元古代地质的研究,不仅可以作出许多创新性成果,而且也可推动我国前寒武纪地质研究与国际成果接轨。

致谢:成文过程中,杨振升、陆松年、吴福元、刘俊来、刘永江、王仁民、刘树文、刘正宏、吴根耀、金巍等教授提供了研究资料和信息,并与作者进行了有益探讨,特此致谢!

参 考 文 献

艾宪森,张成基,王世进. 1998. 山东省十年区域地质调查工作新

- 进展. 中国区域地质, 17(3): 228~235.
- 白瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用. 北京: 地质出版社, 1~123.
- 曹国权,王致本,张成基. 1990. 山东胶南地体及其边界断裂五莲—荣成断裂的构造意义. 山东地质, 6(1): 1~15.
- 陈衍景,富士谷. 1995. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 1~234.
- 高山,金振民. 1997. 拆沉作用(delamination)及其壳-幔演化动力学意义. 地质科技情报, 16(1): 1~9.
- 贺高品,叶慧文. 1998. 辽东—吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义. 岩石学报, 14(2): 152~162.
- 简平,杨巍然. 1998. 造山带构造年代学基本问题——论同位素体系与变质作用的关系. 地球科学进展, 13(5): 452~456.
- 金振民,高山. 1996. 底侵作用(underplating)及其壳-幔演化动力学意义. 地质科技情报, 15(2): 1~7.
- 李三忠,刘永江,杨振升. 1998a. 辽吉地区古元古代造山作用的大陆动力学过程及其壳内响应. 地球物理学报, 41(增刊): 142~152.
- 李三忠,刘永江,杨振升,马瑞. 1998b. 辽河群变质泥质岩中变质重结晶作用和变形作用的关系. 岩石学报, 14(3): 352~366.
- 李三忠,韩宗珠,刘永江,杨振升,马瑞. 2001a. 辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义. 地质论评, 47(1): 9~18.
- 李三忠,韩宗珠,刘永江,杨振升. 2001b. 胶辽地块古元古代前造山期深部过程的地质与地球化学制约. 地质科学, 36(2): 184~194.
- 李曙光,陈移之. 1994. 胶东海洋所斜长角闪岩的锆石 U-P 年龄. 地球学报, (1~2): 37~42.
- 李永刚,翟明国,刘文军,郭敬辉. 1997. 胶东莱西地区高压麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学. 地质科学, 32(3): 283~290.
- 卢良兆,徐学纯,刘福来. 1996. 中国北方前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 195~234.
- 陆松年,杨春亮,蒋明媚,李怀坤,李惠民. 1996. 前寒武纪大陆地质演化示踪. 北京: 地质出版社, 1~97.

- 陆松年,李怀坤,李惠民,杨春亮,胡正德,蒋明梅. 1997. 金矿密集区的基底特征与成矿作用研究. 北京:地质出版社,1~54.
- 陆松年. 1998. 鲁东前寒武纪结晶基底的年代学及 Sm-Nd 同位素地球化学. 地质前缘, 5(4): 275~283.
- 陆松年,李怀坤,于海峰. 2001. 地质事件序列和事件群. 地质论评, 47(5): 521~526.
- 倪志耀,王仁民,袁建平. 2001a. 胶东堆积辉长岩的变质反应结构、石榴石形成及 $P-T$ 演化. 高校地质学报, 7(3): 316~328.
- 倪志耀,王仁民,宋明春. 2001b. 胶南王台变质基性熔岩:元古宙洋壳残片. 矿物岩石地球化学通报, 20(2): 84~87.
- 倪志耀,王仁民. 2001c. 胶东元古宙变质硅质岩的地球化学及其成因. 矿物岩石, 21(1): 59~66.
- 秦松贤,李江风,吕盼峰. 1994. 辽南庄河地区辽河群正向滑脱构造变形特征及其找矿意义. 辽宁地质, (3): 226~235.
- 桑隆康. 1991. 华北地台东南缘大别山—连云港地区下元古界变质岩岩石化学. 地球科学, 16(6): 651~659.
- 申永治,胡嵩琴. 1986. 辽宁中部辽河群 K-Ar 年龄等值图及其地质意义. 地球化学, (1): 36~41.
- 宋明春,张京信,张希道. 1998. 山东省胶南地区斜长花岗岩的发现. 中国区域地质, 17(3): 228~235.
- 孙大中,胡维兴. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京:地质出版社,109~117.
- 孙敏,张立飞,吴家泓. 1996. 早元古代宽甸杂岩的成因:地球化学证据. 地质学报, 70(3): 207~222.
- 王集源. 1984. 花岗岩伟晶岩的放射性同位素年龄的地质意义. 辽宁地质, (4): 361~375.
- 王仁民,安家桐,赖兴运. 1995. 胶东蛇绿岩套的发现及其地质意义. 岩石学报, 11(增刊): 221~227.
- 吴福元,葛文春,孙德有,林强,周燕. 1997. 吉林南部太古代花岗岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素年龄测定. 岩石学报, 13(4): 499~506.
- 许保良,阎国翰,牟保磊,谭林坤,何中甫,乔广生,张任诒. 1998. 辽宁盖县梁屯—矿洞沟碱性正长岩 Rb-Sr 年龄及其意义. 科学通报, 43(17): 1885~1887.
- 郁建华,付会芹,哈巴拉 I, 拉莫 O T, 发斯乔基 M, 莫坦森 J K. 1996. 华北克拉通北部 1.70 Ga 非造山环斑花岗岩岩套. 华北地质矿产杂志, 11(3): 341~342.
- 翟明国,卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(增刊): 129~137.
- 张秋生,杨振升,王有爵,等. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京:地质出版社, 218~451.
- 张云慧,刘福平,金芳红. 2001. 沙垒田、庙西凸起前第三纪地层研究. 中国海上油气(地质), 15(6): 381~387.
- Publishing House, 1~123(in Chinese with English Abstract).
- Cao G Q, Wang Z B, Zhang C J. 1990. Jiaonan terrane in Shandong province and the tectonic significance of the Wulian-Rongcheng fracture. Shandong Geology, 6(1): 1~15 (in Chinese with English Abstract).
- Chen Y J, Fu S G. 1995. Mineralization of Gold Deposit in the Western Hebei Province. Beijing: Seismic Publishing House, 1~234(in Chinese with English Abstract).
- Condie K C. 2001. Mantle plumes and their record in earth history. Cambridge: Cambridge University Press, 170~272.
- Cui Y C, Liu J L, Ma L J, Guan H M. 2001. A simple shear model for the asymmetry in the Paleoproterozoic fold belt in Liaodong peninsula. Journal of Geoscience Research of NE Asia, 4(1): 26~33.
- Etheridge M A, Rutland R Q R, Wyborn L A I. 1987. Orogenesis and tectonic process in the Early to middle Proterozoic of Northern Australia. In: Kroner A, ed, Proterozoic Lithospheric Evolution, American Geophysical Union, Washington D. C., 131~147.
- Gao S, Jin Z M. 1997. Delamination and its geodynamical significance for the crust-mantle evolution. Geological Science and Technology Information, 16(1): 1~9(in Chinese with English Abstract).
- Halls H C, Zhang B X. 1998. Uplift structure of the southern Kapuskasing zone from 2.45 Ga dike swarm displacement. Geology, 26(1): 67~70.
- He G P, Ye H W. 1998. Two type of Early Proterozoic metamorphism in the eastern Liaoning to southern Jilin and their tectonic implication. Acta Petrologica Sinica, 14(2): 152~162 (in Chinese with English Abstract).
- Heaman L M. 1997. Global mafic magmatism at 2.45 Ga: Remnants of an ancient large igneous province? Geology, 25(4): 299~302.
- Jamieson R A, Beaumont C. 1988. Orogeny and metamorphism: a model for deformation and pressure-temperature-time paths with applications to the central and southern Appalachians. Tectonics, 7(3): 417~445.
- Jian P, Yang W R. 1998. The basic problems of tectono-chronology - relationship between isotopic system and metamorphism. Advances in Earth Sciences, 13(5): 452~456(in Chinese with English Abstract).
- Jin Z M, Gao S. 1996. Underplating and its geodynamical significances for the evolution of crust-mantle boundary. Geological Science and Technology Information, 15(2): 1~7(in Chinese with English Abstract).
- Li S Z, Liu Y J, Yang Z S. 1998a. Incrustal response to continental dynamic processes of the Palaeoproterozoic orogeny in Liao-Ji area. Acta Geophysica Sinica, 41(Supp.): 142~152(in Chinese with English Abstract).
- Li S Z, Liu Y J, Yang Z S, Ma R. 1998b. Relations between deformation and metamorphic recrystallization in metaperlite of Liaohe Group. Acta Petrologica Sinica, 14(3): 352~366 (in Chinese with English Abstract).
- Li S Z, Han Z Z, Liu Y J, Yang Z S, Ma R. 2001a. Continental dynamics and regional metamorphism of the Liaohe Group. Geological Review, 47(1): 9~18 (in Chinese with English Abstract).
- Li S Z, Han Z Z, Liu Y J, Yang Z S. 2001b. Constraints of geology and geochemistry on Palaeoproterozoic pre-orogenic deep processes

References

- Ai X S, Zhang C J, Wang S J. 1998. Progress in regional geological surveys in Shandong province over the past ten years. Regional Geology of China, 17(3): 228~235 (in Chinese with English Abstract).
- Bai J. 1993. The Precambrian geology and Pb-Zn mineralization in the northern margin of North China Platform. Beijing: Geological

- in Jiao-Liao massif. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2):184~194 (in Chinese with English Abstract).
- Li S Z, Zhao G C, Sun M, Wu F Y, Liu J Z, Hao D F, Han Z Z, Luo Y. 2003a. Not all the Liaoji granites are Paleoproterozoic: evidence of SHRIMP U-Pb zircon ages. *Episodes*, submitted.
- Li S Z, Zhao G C, Sun M, Hao D F, Han Z Z, Luo Y, Yang Z Z. 2003b. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic Liaoji granitoids: constraints on the tectonic evolution of the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Research*, submitted.
- Li Y G, Zhai M G, Liu W J, Guo J H. 1997. Sm-Nd geochronology of the high-pressure basic granulite, in Laixi, eastern Shandong. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 283~290 (in Chinese with English Abstract).
- Liu J L, Liu Y J, Chen H, Sha D M, Wang H C. 1997. The inner zone of the Liaoji Paleorift: its early structural styles and structural evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(1): 19~31.
- Lu L Z, Xu X C, Liu F L. 1996. Precambrian khondalite series in the northern China. Changchun: Changchun Publishing House, 195~234 (in Chinese with English Abstract).
- Lu S N, Yang C L, Jiang M M, Li H K, Li H M. 1996. Tracing constrains on the evolution of Precambrian continental crust. Beijing: Geological Publishing House, 1~97 (in Chinese with English Abstract).
- Lu S N, Li H K, Li H M, Yang C L, Hu Z D, Jiang M M. 1997. Basement feature and mineralization in the densest gold deposits. Beijing: Geological Publishing House, 1~54 (in Chinese with English Abstract).
- Lu S N. 1998. Geochronology and Sm-Nd isotopic geochemistry of precambrian crystalline basement in eastern Shandong province. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 275~283 (in Chinese with English Abstract).
- Lu S N, Li H K, Li H M, Yang C L. 2001. Proterozoic events in the North China Craton. *Gondwana Research*, 4(4): 693.
- Lu S N, Li H K, Yu H F. 2001. Geological events, event sequence and event group. *Geological Review*, 47(5): 521~526 (in Chinese with English Abstract).
- Lu S N, Yang C L, Li H K, Li H M. 2002. A group of rifting events in the terminal paleoproterozoic in the North China craton. *Gondwana Research*, 5(1): 123~131.
- Ni Z Y, Wang R M, Yuan J P. 2001a. Corona texture, garnet formation and *P-T* evolution of gabbroic cumulate from Haiyangsuo area, eastern Shandong province, China. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 316~328 (in Chinese with English Abstract).
- Ni Z Y, Wang R M, Song M C. 2001b. The metamorphic basic lava in Wangtai, Jiaonan area, Shandong peninsula: residual Proterozoic oceanic crust. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(2): 84~87 (in Chinese with English Abstract).
- Ni Z Y, Wang R M. 2001c. Geochemistry and genesis of the Proterozoic metamorphic siliceous rock in the Jiaodong peninsula, Shandong province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(1): 59~66 (in Chinese with English Abstract).
- Oliver N H S, Holcombe R J, Hill E J, Pearson P J. 1991. Tectono-metamorphic evolution of the Mary Kathleen fold belt, north-west Queensland: a reflection of mantle plume processes? *Australian Journal of Earth Sciences*, 38: 425~455.
- Peng Q M, Palmer M R. 2002. The Paleoproterozoic Mg and Mg-Fe borate deposits of Liaoning and Jilin Provinces, Northeast China. *Economic Geology*, 97: 93~108.
- Polet J, Anderson D L. 1995. The depth extent of cratons as inferred from tomographic studies. *Geology*, 23(3): 205~208.
- Qing S X, Li J F, Lu Y F. 1994. Normal sliding tectonic feature and its prospecting implication of Liaohe Group at the Zhuanghe area in the southern Liaoning. *Liaoning Geology*, (3): 226~235 (in Chinese with English Abstract).
- Sang L K. 1991. The petrochemistry of lower Proterozoic metamorphic rocks from the Dabieshan-Lianyungang area of the southeast margin of the North China Platform. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 16(6): 651~659 (in Chinese with English Abstract).
- Sheng Y Z, Hu A Q. 1986. K-Ar age contour map of Liaohe Group, central Liaoning, and its geological implications. *Geochimica*, (1): 36~41 (in Chinese with English Abstract).
- Song M C, Zhang J X, Zhang X D. 1998. The discovery of plagiogranite in the Jiaonan area, Shandong province. *Regional Geology of China*, 17(3): 228~235 (in Chinese with English Abstract).
- Sun D Z, Hu W X. 1993. Precambrian chrono-tectonic framework and Chronological crustal architecture of Zhongtiao Mountain. Beijing: Geological Publishing House, 109~117 (in Chinese with English Abstract).
- Sun M, Armstrong R L, Lambert R S, Jiang C C, Wu J H. 1993. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of Palaeoproterozoic Kuandian Complex, the eastern Liaoning Province, China. *Precambrian Research*, 62: 171~190.
- Sun M, Zhang L H, Wu J H. 1996. The origin of the Early Proterozoic Kuandian Complex: evidence from geochemistry. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 207~222 (in Chinese with English Abstract).
- Wang J Y. 1984. The radioisotope age of granite-pegmatite and its geological significance. *Liaoning Geology*, (4): 361~375 (in Chinese with English Abstract).
- Wang R M, An J T, Lai X Y. 1995. Discovery and its implication of ophiolite suite in the eastern Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 11(Supp.): 221~227 (in Chinese with English Abstract).
- Wilde S A, Zhao G C, Sun M. 2002. Development of the North China Craton during the late Archaean and its final amalgamation at 1.8 Ga: Some speculations on its position within a global Palaeoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 85~94.
- Windley B F. 1995. *The Evolving Continents* (third edition). John Wiley & Sons, 279~465.
- Wu F Y, Ge W C, Sun D Y, Lin Q, Zhou Y. 1997. The Sm-Nd, Rb-Sr isotopic ages of the Archean granites in southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13(4): 499~506 (in Chinese with English Abstract).
- Xu B L, Yan G H, Mu B L, Tan L K, He Z F, Qiao G S, Zhang R G. 1998. Rb-Sr age and its implication of alkali syenite from Liangtun to Kunagdonggou, Liaoning province. *Chinese Science Bulletin*, 43(17): 1885~1887 (in Chinese).
- Yin A, Nie S. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions. In: Yin A, Harrison T M,

- eds. The Tectonic Evolution of Asia. New York: Cambridge University Press, 442~285.
- Yu J H, Fu H Q, Haapala I, Ramo T O, Vaasjoki M, Mortense J K. 1996. A 1.70 Ga Anorogenic Rapakivi Granite Suite in the Northern Part of North China Craton. *Journal of Geology and Mineral Resource of North China*, 11(3): 341~342(in Chinese with English Abstract).
- Zhai M G, Bian A G. 2000. Late Archean supercontinental amalgamation and late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic rifting. *Science in China (D series)*, 30(Supp.): 129~137 (in Chinese).
- Zhang Q S, Yang Z S, Wang Y J, et al. 1988. Early crust and mineral deposits of Liaodong peninsula, China. Beijing: Geological Publishing House, 218~451(in Chinese with English Abstract).
- Zhang Y H, Liu F P, Jin F H. 2001. Pretertiary stratigraphy of Shaleitian and Miaoxi uplifts. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(6): 381~387 (in Chinese with English Abstract).
- Zhao G C, Simon A W, Cawood P A. 1998. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. *International Geological Review*, 40: 706~721.
- Zhao G C, Cawood P A. 1999. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia Block: new evidence for Neoproterozoic collisional-related assembly of the South China craton. *American Journal of Science*, 299: 309~339.
- Zhao G C, Simon A W, Cawood P A, Lu L Z. 1999. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 310: 37~53.
- Zhao G C, Cawood P A, Simon A W, Sun M, Lu L Z. 2000a. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China Craton: implication for Palaeoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103: 55~88.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Lu L Z. 2000b. Petrology and *P-T* path of the Fuping mafic granulites: Implications for tectonic evolution of the central zone of the North China Craton. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 375~391.
- Zhao G C. 2001. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton. *Geological Magazine*, 138: 89~91.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A. 2001a. High-pressure granulite (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: petrology and tectonic implications. *Journal of Petrology*, 42: 1141~1170.
- Zhao G C, Simon A W, Cawood P A, Sun M. 2001b. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and *P-T* path constrains and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107: 45~73.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, Sun M. 2001c. Polymetamorphism of Archean mafic granulites from the Trans-North China Orogen: textural and thermobarometric evidence and tectonic implications. In: Miller J, Buick I S, eds. *Continental Reworking and Reactivation*. Geological Society Special Publication 184, 323~342.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: implications for accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302: 196~221.
- Zhao G C, Sun M, Simon A W. 2003. Correlations between the Eastern Block of the North China Craton and the South Indian Block of the Indian Shield: a pre-Rodinia North China-India link. *Precambrian Research*, in press.

Paleoproterozoic Deep Processes and Tectono-thermal Evolution in Jiao-Liao Massif

LI Sanzhong¹⁾, HAO Defeng¹⁾, HAN Zongzhu¹⁾, ZHAO Guochun²⁾, SUN Min²⁾

1) College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266003

2) Department of Earth Sciences, the University of Hong Kong, Hong Kong

Abstract

New data obtained over the past few years indicate that the North China Craton consisted of the eastern and western blocks that collided along Trans-North China Orogen at 1.85 Ga. Before the collision, the western margin of the eastern block was active continental margin that has been studied in detail. However, the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic belt in the eastern margin of the eastern block has received little attention. New multi-disciplinary study indicates that the tectono-thermal evolution and deep processes in the Jiao-Liao-Ji orogenic belt are summarized as following. The early mantle-plume-related underplating at a range from 2.53 to 2.36 Ga led to the 2.47~2.33 Ga intrusion of alkaline granite and mafic dyke swarm, the rifting of the Jiao-Liao-Ji rift and the bi-modal volcanism. The early underplating also resulted in not only sedimentary environments in the rift but also the differentiation of the initial thermal architecture in the crust that controlled different metamorphism types and *P-T-t* paths in the different part of the rift. The later underplating resulted in the formations of the A-type Liaoji Granites of about 2.17 Ga in the lower crust and the pegmatite of 2.2 Ga and 2.0 Ga, and bedding-parallel deformation. However, the main orogenic deformations occurred at a range

from 1.911 to 1.883 Ga accompanying with the high-pressure metamorphism in the southern part of the orogen, the closing of the rift and the compressional deformations. Then, from 1.875 to 1.66 Ga, a little lithospheric blocks were delaminated, anorogenic plutons such as rapakivii granite and syenite intruded, the pegmatite veins and mafic dyke swarm developed and crosscut all the structural traces, the Yishulazi Group deposited. Meanwhile, the Dabie-Sulu orogen in the south of the eastern block was an intensive active continental margin at a range from 1.7 to 1.6 Ga. After 1.6 Ga, the Dabie-Sulu orogen underwent a series of crust reworking, evidently differentiating from the major eastern block. In summary, the tectono-thermal evolution in the crust is dominated by the underplating style, collisional processes and delamination types in the deep lithosphere.

Key words: Paleoproterozoic; tectono-thermal evolution; deep processes; underplating; delamination

攀西古裂谷内龙帚山玄武岩—碱玄响岩建造

梅厚钧¹⁾ 徐义刚¹⁾ 许继峰¹⁾ 黄小龙¹⁾ 何端臣²⁾

1) 中国科学院广州地球化学研究所, 510640; 2) 攀西地质大队, 四川西昌, 630000

内容提要 在川、滇、黔三省晚二叠世峨眉山玄武岩省的中部,产于攀西古裂谷内的龙帚山火山岩建造自下而上有4个喷发旋回:拉斑玄武岩、碱玄响岩、钾粗面玄武岩以及拉斑玄武岩。上下两个玄武岩旋回的岩性与该裂谷带以外大面积展布的高钛玄武岩岩性相同;而其碱玄响岩旋回主要由响碱玄岩—碱玄响岩—响岩岩系组成,夹粗安岩和安粗岩层,此旋回厚达千米,类似于非洲肯尼亚裂谷带的高原溢流响岩岩系。龙帚山晚二叠世火山岩建造的层序和岩石组合不同于古裂谷带外正常的大陆板内暗色岩喷出相的层序和岩浆演化规律,可能是地幔热柱和裂谷背景下岩石圈拉张复合作用的结果。

关键词 碱玄响岩 裂谷岩浆活动 峨眉山玄武岩建造 地幔热柱

展布于川、滇、黔三省以至越南北部,面积约30万 km²的晚二叠世峨眉山玄武岩主要由亚碱性及偏碱性的基性火山熔岩及火山碎屑岩组成(梅厚钧, 1973; Glotov et al., 2001)。对于峨眉山玄武岩的形成,主要有两种观点:①与扬子地块西缘被动大陆边缘地壳扩张有关(rift-based model)(Luo et al., 1990; Dmitriev et al., 1996);②与地幔柱活动有关(plume model),认为峨眉山玄武岩为一大火成岩省(Chung et al., 1995, 1998; 汪云亮等, 1999; Xu et al., 2001; 徐义刚等, 2001; 张鸿祥等, 2001; 宋谢炎等, 2001)。前一种观点认为地壳减薄和岩浆喷发中心位于以南北向展布的(志留纪至三叠纪末)攀枝花—西昌古裂谷带;而后者则认为热柱活动的中心在攀西古裂谷带的西侧(Chung et al., 1998; Xu et al., 2001; 徐义刚等, 2001)。裂谷岩浆作用与地幔柱有关的暗色岩系在岩石组合上存在明显的差异(Wilson, 1989)。例如,与大陆裂解和地幔柱活动有关的大火成岩省(如德干、卡鲁)的火山岩建造皆以亚碱性的拉斑玄武岩类为主,很少有碱性岩浆活动(Cox, 1988; Simonetti et al., 1998)。与此相反,碱性系列岩石是大陆裂谷系特征的岩浆活动产物(Hay et al., 1995; Rogers et al., 1998)。由此可见,细致地考察攀西古裂谷带内外的二叠纪岩浆建造,并结合现代裂谷系岩浆活动和典型大火成岩省的研究成果(Wilson, 1989; Mahooney et al., 1997),将

有助于剖析和鉴别上述两种模型或者两者的复合模型在解释整个峨眉山玄武岩省形成的合理性。本文报道了位于攀西古裂谷带内的四川会理和米易交界的龙帚山晚二叠世玄武岩的系统剖面岩石学特征,发现此剖面的中段为千余米厚的响碱玄岩—碱玄响岩—响岩系列的硅酸不饱和碱性熔岩,其上下为拉斑质高钛玄武岩所夹。如此大规模的碱性系列岩浆活动在以往的文献和区调报告中均没有提及。更为重要的是,这一岩石建造明显不同于裂谷带以外的峨眉山玄武岩建造的正常暗色岩层序和岩浆演化规律,可能是裂谷拉张活动与地幔柱活动叠加作用的结果。

1 攀西裂谷区域地质与龙帚山火山岩建造概况

攀西裂谷位于扬子地台西部康滇古陆块的北段。它是一条南北狭长的古裂谷(骆耀南, 1985; 从柏林, 1988),北起西昌地区的冕宁,南到攀枝花市以南的云南永仁(图1),北窄南宽。在裂谷带内,伴随峨眉山玄武岩的侵入岩体主要有含钒钛磁铁矿的攀枝花—红格超镁铁—镁铁质似层状岩体群(梅厚钧, 1973)和碱性正长岩岩体群。在渡口北边务本乡见正长岩体侵入上二叠统,但在另一些地点只见有碱性正长岩体侵入峨眉山玄武岩中;而下三叠统丙南组沉积物覆盖于角闪正长岩体上,丙南组砾岩的砾石

注:本文为国家“973”项目(编号 G1999043205)和中国科学院知识创新方向性项目(编号 KZCX2-101)资助的成果。

收稿日期:2002-01-23;改回日期:2002-10-16;责任编辑:刘淑春。

作者简介:梅厚钧,男,1935年生。1956年毕业于北京地质学院。现为中国科学院广州地球化学研究所研究员,主要从事火成岩石学研究。通讯地址:510640,广州五山,中国科学院广州地球化学研究所;电话:020—85290006。