

## 板内造山作用与成矿\*

罗照华 梁涛 陈必河 辛后田 柯珊 张自力 程素华

LUO ZhaoHua, LIANG Tao, CHEN BiHe, XIN HouTian, KE Shan, ZHANG ZiLi and CHENG SuHua

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2007-03-21 收稿, 2007-05-07 改回.

Luo ZH, Liang T, Chen BH, Xin HT, Ke S, Zhang ZL and Cheng SH. 2007. Intraplate orogenesis and its implications in metallogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8):1945–1956

**Abstract** The broadly intensive intraplate deformation and orogenesis in the China continent are usually considered as the distant effects of the force from plate convergent boundaries in traditional plate tectonics. However, there are not expected geodynamic relations between the intraplate orogenesis in the China continent and any convergent boundary. The intraplate orogenesis can not be simply explained as the distant effects of continental collision or plate subduction. This paper proposed an alternative interpretation attributing the intraplate deformation to the local lithospheric heterogeneity or discontinuity. Since formation of an integrated plate by plate suture, the geological evolution in a region is in the intraplate stage. The lithospheric heterogeneity and gravitational instability induced by plate collisions may trigger intensive intraplate deformation and even orogenesis. The time interval between the plate integration and the orogenic reactivation is decided by the levels of the lithospheric instability and the thermal disturbance from the Earth's depths. Distinguished from the orogenesis at the plate boundaries, the intraplate orogenesis lacks the processes of plate subduction and collision. The intraplate orogen has relatively simple history commonly initiated by lithospheric delamination and characterized by vertical accretion of the orogenic crust. The intraplate orogenesis will be completed by the other delamination event or the formation of a new lithosphere with light gravitational instability. Therefore, the intraplate orogenesis develops commonly along a ancient orogen. The feature of lower matured lithospheric structure in an ancient orogenic belt is not only one of the primary factors causing the lithospheric gravitational instability. A lower matured lithosphere contains huge volatiles and ore-forming elements and hence has higher potential ability to form ore deposits. Metallogenesis in an intraplate orogen is dependent to if sudden releasing ore-bearing fluids from various depths of the lithosphere-asthenosphere system. Consequently, the metallogenesis occurs mainly in the initial stage and the post-orogenic extension stage.

**Key words** Intraplate orogenesis, Metallogenesis, Taihang Mountains, Tianshan Mountains, Lithospheric delamination

**摘要** 中国大陆广泛分布强烈的板内变形和造山作用, 传统的板块构造理论常常将其解释为板块边缘汇聚力的远程效应。然而, 中国大陆的板内造山作用与汇聚板块边界之间缺乏可预期的动力学联系, 不能简单地解释为大陆碰撞或板块俯冲的远程效应。本文提出另一种可供选择的解释, 认为板内变形主要取决于岩石圈不均一性。相邻的板块拼合在一起形成统一板块之后, 区域地质演化进入板内阶段。板块碰撞导致的岩石圈不均一性和重力不稳定性可以触发强烈的板内变形甚至造山作用, 其延迟时间的长短取决于岩石圈不稳定性的程度和地球深部的热扰动。与板缘造山带相比, 板内造山作用缺少板块俯冲-碰撞过程, 板内造山带的演化历史相对简单, 通常是以岩石圈拆沉作用开始, 以地壳的垂向增生为特征, 最后以岩石圈拆沉作用结束或形成重力不稳定岩石圈。因此, 板内造山作用一般沿着古造山带发育。古造山带岩石圈结构低成熟度的特点不仅是岩石圈不稳定性的主要原因之一, 而且由于挥发分和含矿元素的富集在活化过程中具有很强的成矿潜力。板内造山带的成矿作用依赖于深埋在岩石圈-软流圈系统不同深度水平上含矿流体的突然释放, 主要发生在造山作用初始阶段和造山后伸展阶段。

\* 国家自然科学基金项目(40472038, 40434010) 和河南省地质矿产重大科技攻关计划项目(26417)资助。

第一作者简介: 罗照华, 男, 1956年生, 教授, 博士生导师, 岩石、矿物、矿床学、火成岩岩石学、区域岩石大地构造研究方向,

E-mail: luozh@cugb.edu.cn

关键词 板内造山作用; 成矿作用; 太行山; 天山; 岩石圈拆沉作用  
中图分类号 P5542.2; P611

随着大陆动力学研究(Sandiford and Hand, 1998)的不断深入和对地质灾害预测(如 Bowman *et al.*, 1990)的要求,板内变形和造山作用近年来得到了重视(Sandiford and Hand, 1998; Standiford, 2002; Hand and Standiford, 1999; Smith, 2003; 邓晋福等, 1996; 罗照华等, 1997, 1999a; 张长厚, 1999; Luo *et al.*, 1999b; Chen *et al.*, 1998; Camacho *et al.*, 2002; Dickerson, 2003, 2004; 赵越等, 2004)。然而,受板块构造理论发展初期一些设想和传统造山带研究方法的影响,板内变形和造山作用的解释依然与板块边缘紧密联系在一起(如 Coblentz *et al.*, 1995)。例如,由于天山新生代板内造山带总体上与印度-亚洲大陆碰撞带边界平行,习惯上将板内造山作用归咎于印度-亚洲大陆碰撞的远程效应(Dickerson, 2003, 2004; 罗照华等, 2003; 舒良树等, 2004; Sobel *et al.*, 2006; De Grave *et al.*, 2007),甚至更远处的阿尔泰新生代板内造山作用也被认为与印度-亚洲大陆碰撞有关(Cunningham, 2005)。在中国东部,这种简单的联系也被用于解释太行山板内造山带(罗照华等, 1999a)、燕山造山带(邓晋福等, 1996)和鲁东造山带(孙丰月, 1994)的成因,认为它们的形成间接或直接与古太平洋板块的俯冲作用有关。这使我们不得不思考一个问题,大陆碰撞和板块俯冲的应力到底能够传递多远?如果承认板内变形或造山作用与板块边缘的汇聚有关,结果就应当是:1)板内变形带(造山带)的延伸方向大致与汇聚板块边界平行;2)从板块边缘到板块内部,变形(造山)时间由老到新。然而,有些板内造山带很难与汇聚板块边缘联系起来。例如,龙门山新生代造山带不平行于印度-亚洲大陆碰撞带,太行山造山带与燕山造山带同时代、同性质,但其展布方向截然不同。由此产生的另一个问题是,板内变形和造山作用是否还可以有其它的驱动机制。本文提出了另一种解释,认为板内造山作用与板块边缘没有直接联系,大陆板块的岩石圈不均一性和地幔汇聚是板内变形和造山作用的直接诱因。可见,板内造山作用与板缘造山作用的机制绝然不同。此外,传统上造山带被认为是地球内部物质与能量输出的窗口,大量内生金属矿床的形成都与造山过程有关。如果板内造山作用成立,也应当具有相应的成矿作用。

为了说明上述三个问题,本文以青藏高原的形成演化为例检验板缘构造力的远程效应,以托云火山岩的成因解释岩石圈不稳定性影响。在此基础上,阐述板内造山作用的机制,进而探讨板内造山作用与成矿作用的可能联系。

## 1 青藏高原形成演化及其对邻区的影响

青藏高原是世界上最大、最高、最新的高原,其形成演化被归咎为印度-亚洲大陆碰撞(如 Tapponnier *et al.*, 2001),并对邻区的构造演化具有决定性的控制作用(Molnar *et al.*,

1975; Yin *et al.*, 2000; 罗照华等, 2003, 2004, 2006a),甚至遥远的贝加尔裂谷系的成因也被归咎于印度-亚洲大陆碰撞(如 Molnar and Tapponnier, 1975; Ionov, 2002)。然而,印度-亚洲大陆碰撞的应力是否真的能够远传天山甚至导致阿尔泰山的新生代板内造山作用,至今仍然没有确切的证据。例如,根据现代 GPS 观测结果,Abdrakhmatov *et al.* (1996)认为天山现今地壳的总缩短速率大约为 20mm/a,近似于印度-欧亚大陆间汇聚速率( $\approx 50\text{mm/a}$ , Johnson, 2002)的一半。并据此推测,天山的变形大部分是在过去 10Ma 期间发生的,可能是对青藏高原突然隆升造成水平应力增加的响应。但是,同样是依据 GPS 测量结果,张培震等(2002)则认为平行于印度-亚洲碰撞方向上的地壳缩短量约为 38mm/a,而高原周边主要断裂带的滑动速率均在 10mm/a 以下,大约 90% 的印度-亚洲相对运动量被青藏高原的地壳缩短所吸收。可见,天山新生代岩石圈缩短是一个基本事实,但这种缩短未必与印度-亚洲大陆碰撞直接相关。为了澄清印度-亚洲大陆碰撞对天山的影响,必须理解青藏高原的形成演化。

为了说明印度-亚洲大陆碰撞对青藏高原形成演化的影响,Tapponnier *et al.* (2001)甚至提出了一个青藏高原从南向北阶段性生长的动力学模型。按照这个模型,印度亚洲大陆碰撞最初只影响到冈底斯带,然后扩展到藏北高原及其以北地区(从南到北依次形成始新世高原、渐新世—中新世高原和上新世—第四纪高原)。这似乎与前面推测的变形时间极性是一致的,理论上,青藏高原新生代岩浆活动也应当按照这样的顺序由南向北发展。然而,青藏高原新生代火成岩展现出三种分布类型:与碰撞带平行的火成岩带、与大型走滑断裂有关的火成岩带和弥散型火成岩分布区,这意味着直接控制岩浆活动的三种构造体制:碰撞体制、走滑体制和拆沉体制(罗照华等, 2006a)。藏北高原新生代岩浆活动随时间大致呈放射状迁移(罗照华等, 2004, 2006a)的最好解释是岩石圈分块拆沉作用, Tapponnier *et al.* (2001)的动力学模型显然不能解释这样的岩浆活动时空分布。此外,早在印度-亚洲大陆碰撞之前,阿尔金山(杨经绥等, 2001)、贺兰山(王锋等, 2005)、西准噶尔(朱永锋等, 2007, 个人通讯)等地就已经发生有构造岩浆活动。上述证据表明,大陆碰撞至少不是青藏高原及其周边地区所有构造岩浆活动的触发机制。这说明碰撞构造所能影响的范围十分有限,甚至藏北高原的新生代岩浆活动也主要受其自身岩石圈-软流圈动力学系统控制,更遑论更远的天山及其以北地区。实际上,藏北高原岩石圈拆沉作用发生以后岩石圈力学性质将被大大弱化(Thompson *et al.*, 2001),如果说岩石圈拆沉之前大陆碰撞的应力还能实现远距离传递的话,拆沉之后将主要被青藏高原的变形所吸收,就像喜马拉雅山的崛起一样(Bird, 1978)。为此,我们认为应当回归板块构造运动的基本驱动机制,即

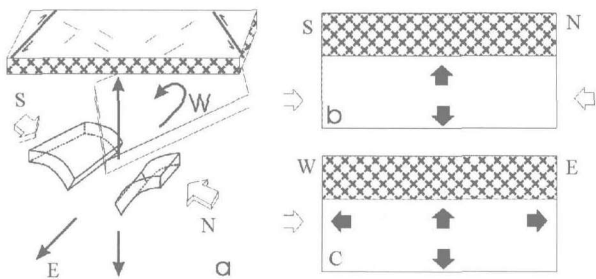


图1 青藏高原新生代岩石圈-软流圈动力学系统  
地幔汇聚导致软流圈向东挤出(a),因为帕米尔岩石圈根阻碍了软流圈向西流动,过渡带的矿物相变妨碍软流圈物质向下运动,软流圈上涌受到重力均衡的约束(b),因而向东流是汇聚软流圈的唯一选择(c)  
Fig.1 The Cenozoic lithosphere-asthenosphere geodynamic system of the Tibetan Plateau

地幔对流驱动岩石圈板块相对(汇聚边缘)或相背(离散边缘)运动是青藏高原形成演化及其以北地区板内变形的一种更好的解释。按照这种解释,大陆碰撞、岩石圈拆沉和大型走滑运动的驱动力都是源于地幔的汇聚(图1),三种运动形式之间不存在派生关系(罗照华等,2006a)。

同位素地球化学研究为这种解释提供了有力的证据。Flower *et al.* (1998,2001)发现 Izo-Bonin-Mariana 弧以东的火成岩具有太平洋域的同位素特征,以西的火成岩则表现为亲印度洋域的同位素特征,因而提出地幔挤出构造的观点。根据这种观点,青藏高原的地壳向东流动应当主要是地幔挤出的结果,而不是源于大陆碰撞。对于浅部构造来说,这种解释与 Tapponnier *et al.* (1982)的挤出构造没有明显的区别,但是揭示了青藏高原形成演化的深层原因,并可以更有效地解

释龙门山、哀牢山和南中国海的动力学背景(罗照华等,2006a)。地球化学证据也显示发生了岩石圈和软流圈之间的拆耦,软流圈具有比岩石圈更大的运动速度,这通常会造成界面附近的剪切变形。这样,软流圈的运动就有可能单独造成远离碰撞带的岩石圈的挤压或伸展,而不需要连续的岩石圈传递介质。当大陆板块内部不同变形域之间具有不同的应力场特征时,这样的解释应当更适用。

将这种解释应用于更广泛区域的构造演化,可以设想大陆是由许多不同性质的块体拼合而成的不均一板块(图2),这些块体的结合带都还有进一步接受变形改造的潜力。在地幔汇聚过程中,不仅板块边缘发生强烈的构造变形,不同块体之间也可以发生相互作用,如走滑、旋转、逆冲、褶皱等等。由此可以得出结论,天山及其以北地区的新生代板内变形可能主要受控于地幔对流和自身的岩石圈不稳定性,而与印度-亚洲大陆碰撞构造没有直接关系。

2 托云火山群锆石年代学及其构造意义

西南天山发育有新生代幔源岩浆活动,其中托云盆地被作为是天山地区最有代表性的火山活动发育区,近年来引起了国内外的广泛注意(韩宝福等,1998; Sobel *et al.* , 2000; 王彦斌等,2000; 郑建平等,2001; 徐学义等,2003; 梁涛等,2005; 季建清等,2006)。但是,长期以来,对托云盆地火山岩的形成时代存在巨大的争议(梁涛等,2005)。早期关于托云火山岩的形成时代主要是从地层学的角度进行了论证,将位于介壳灰岩(含瓣鳃: *Gryphaea* sp. ,等)岩层之上的火山岩划归渐新世,含化石层位下部的火山岩则被认为形成于古新世(新疆维吾尔自治区地层表编写组,1981)。近年来,对托

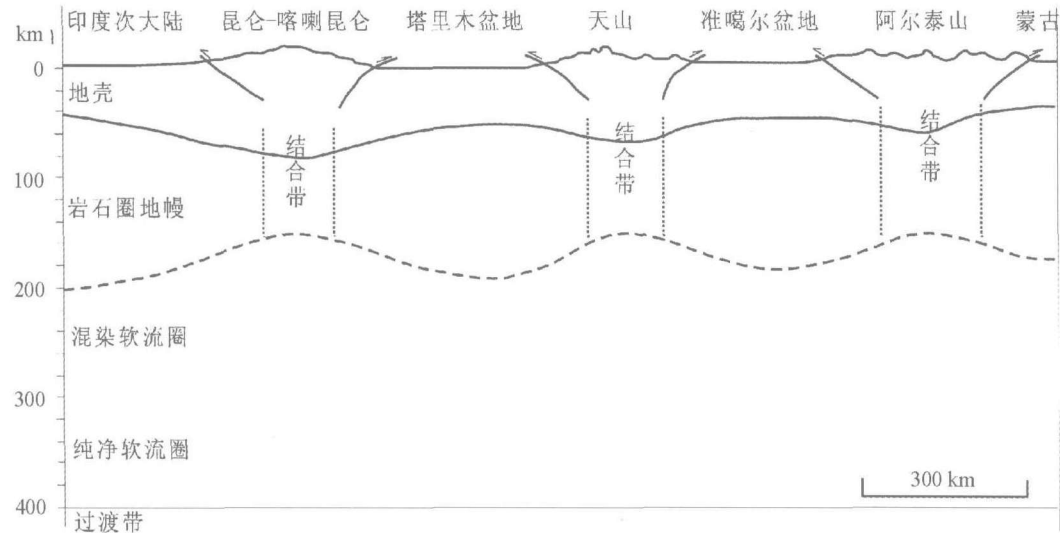


图2 印度-蒙古之间大陆拼装示意图  
据 De Grave *et al.* (2007)资料绘制  
Fig.2 A model showing the continental assembly of the terranes between India and Mongolia

云火山岩的同位素年代学研究取得了一系列 K-Ar 法和 Ar-Ar 法测年结果(韩宝福等, 1998; Sobel *et al.*, 2000; 王彦斌等, 2000; 季建清等, 2006), 这些年龄相对集中在 120 ~ 110Ma 和 67 ~ 36Ma 两个年龄段内。据此, 托云火山岩被分别归属为早白垩世和古近纪, 习惯上分别称为下玄武岩和上玄武岩(Sobel *et al.*, 2000; 王彦斌等, 2000)。详细的野外观察表明, 所谓的下玄武岩实际上是侵入于中、下侏罗统的岩席(梁涛等, 2005), 因而上述 120 ~ 110Ma 的测年结果具有不确定的地质含义。对火山岩形成时代的争议削弱了岩浆活动在区域地球动力学研究中的地位。因此, 查明托云盆地火山岩的形成时代具有重要的地质意义。为此, 对托云盆地代表性火山岩进行了高精度锆石 U-Pb 年代学工作, 获得了  $\approx 48$ Ma 的火山岩成岩年龄(梁涛等, 2007)。

有意义的是, 除了约 48Ma 的锆石巨晶形成年龄(玄武岩形成年龄)外, 测试过程中还获得了大量锆石捕虏晶年龄(图 3)。多数锆石颗粒的 SHRIMP 测试结果相对集中分布在 2.5Ga、2.2Ga、2.1Ga 和 440Ma 四个年龄值附近, 其余则零散分布。这些测年数据反映出天山经历过的几乎所有构造岩浆事件, 如 380 ~ 490Ma 的天山早古生代花岗质岩浆活动(韩宝福等, 2004; 朱永峰等, 2006), 也反映了塔里木地块经历过的前寒武纪多期变质改造事件(胡霁琴等, 1999; 2001; 2006; 郭召杰等 2003), 以及晚古生代的一系列地质事件(肖序常等, 1992; 熊小林等, 2001; Zhu *et al.*, 2006; 赵振华等, 2003; 郑建平, 2005; 张传恒等, 2006)。测年结果不仅反映了天山造山带的多旋回演化历史, 而且暗示塔里木地块卷入了天山古生代造山作用(梁涛等, 2007)。这表明造山带岩石圈具有复杂的结构, 与稳定克拉通地区明显不同。例如, 昌(乐)-沂(水)火山群玄武岩中的锆石 U-Pb 年龄谱比较集中, SHRIMP 测年结果只有在 2.5Ga 左右(罗照华等, 待发表资料)。

通常, 非寄主岩浆结晶的锆石称为继承锆石(源区岩石部分熔融的锆石残留)或锆石捕虏晶(岩浆上升过程中或定

位后从围岩捕获的锆石)。由于玄武质岩浆被公认为起源于上地幔, 锆石年龄谱又可以较好地与区域地质事件相对应, 上述锆石宽年龄谱应当反映了天山造山带的复杂地壳演化历史。但是, 这并不意味着锆石是玄武质岩浆上升过程中从地壳捕获的, 而是暗示了一次重要的岩石圈拆沉作用事件。托云玄武岩中含有大量幔源橄榄岩包体和高压巨晶(韩宝福等, 1998; 罗照华等, 2003), 表明岩浆具有快速定位的特点。一般而言, 岩浆中晶体生长速率为  $\approx 10^{-10} \sim 10^{-11}$  cm/s, 而分异作用的速率要慢得多, 在高硅岩浆中甚至需要  $10^5$  年(Hawkesworth *et al.*, 2004)。在这么长的时间范围内, 岩浆有可能同化围岩从而捕获通道两侧岩石中的锆石。但是, 一方面岩石中锆石的含量很低, 另一方面发生同化作用时低熔组分将优先进入熔浆, 玄武质岩浆在上升过程中必须同化大量围岩才能获得这些锆石。然而, 这将大大改变岩浆的成分, 并导致岩浆温度快速下降和大规模结晶(分离), 大部分幔源岩浆将在地壳内固结而不会喷出地表。托云火山岩以低  $\text{SiO}_2$  为特征, 成分变化范围不大(Sobel *et al.*, 2000; 王彦斌等, 2003; 徐学义等, 2003; 罗照华等, 2003; 季建清等, 2006), 没有同化大量地壳组分和分离结晶作用的证据(罗照华等, 2003)。此外, 根据吕勇军等(2006), 单斜辉石巨晶和斑晶的结晶路线大致与玄武岩的液相线一致, 岩石中未见橄榄石巨晶, 表明玄武质岩浆在上升的过程中不大可能作长时间的停留, 因而不具有同化大量围岩的能力。

作为一种可供选择的解释, 岩石圈拆沉作用可能是重要的。当拆沉进入软流圈中的下地壳发生分解时, 有几个有利于产生岩浆的位置(罗照华等, 2006b), 取决于拆沉作用的规模。在这种构造体制下, 更有可能使岩浆中捕获大量壳源锆石。但是, 拆沉下地壳的分解有可能产生中酸性岩浆, 太行山南段含幔源橄榄岩包体的闪长质岩石可能就是这样形成的(罗照华等, 1999a)。然而, 如果岩石圈与软流圈拆耦, 或者说软流圈发生了较大距离的水平运动, 这部分中酸性岩浆也许会偏移发生拆沉作用的位置(软流圈窗), 但会对软流圈

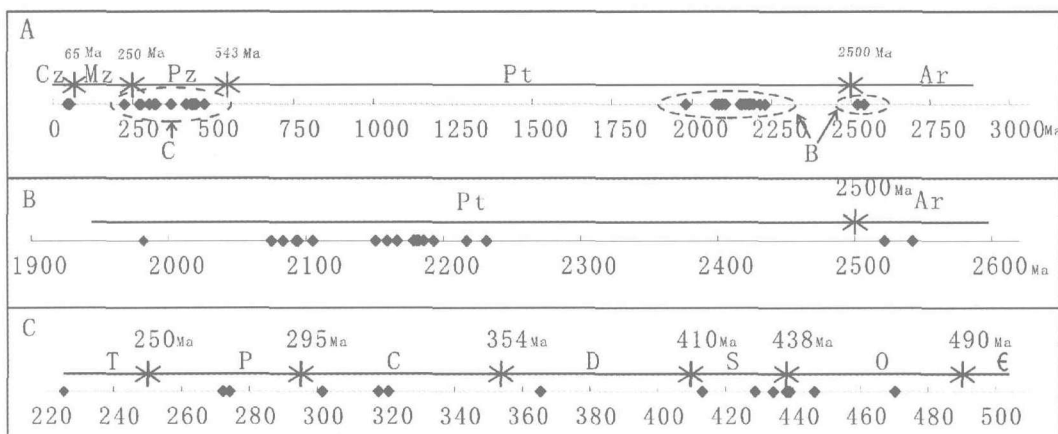


图 3 托云火山岩 SHRIMP 年龄在地质时间轴上的分布

Fig. 3 SHRIMP dating distribution of Tuyon volcanic rocks in geologic time scale

造成混染。这大概就是所谓的大陆 OIB 型火山岩地球化学特征(Sobel *et al.*, 2000; 王彦斌等, 2000)的深层原因。这就是说,天山造山带的活化主要取决于其自身的岩石圈不稳定性,而不是印度-亚洲大陆碰撞,也不是软流圈主动上涌(Sobel *et al.*, 2000; 王彦斌等, 2000),属于板内造山作用。

### 3 岩石圈不均一性与板内造山作用

板内造山作用是大地构造学和大陆动力学面临的一个新课题,自从宋鸿林(1990, 未发表资料)提出板内造山作用的概念以来,与板内造山作用有关的地质现象不断得到揭示(罗照华等, 1996, 2006b, c; 张长厚, 1999),并已开始反演整个造山过程(罗照华等, 1997, 1999a, b)。但是,板内造山作用的机制至今没有得到系统的阐述,有些学者至今反对这一科学命题。因此,有关板内造山作用的问题首先需要阐明确实发生了造山作用,并揭示与板缘构造力没有直接关系的造山机制和构造样式。

造山作用本质上就是正常厚度地壳向造山型增厚地壳转变的过程,造山带的论证就转换成了是否可以识别出有别于稳定区的增厚地壳及其形成时间。以西南天山为例,其地壳厚度可达 $\approx 70\text{km}$ (Vinnik *et al.*, 2004),比相邻塔里木盆地的地壳厚度( $\approx 45\text{km}$ , 刘训等, 2006)增厚约 25km,上面已经论证天山的新生代构造变形与印度-亚洲大陆碰撞没有直接关系,因而应当归属为板内造山带。地壳增厚的可能机制有挤压缩短(张长厚, 1999)、地壳叠置(Ding *et al.*, 2003)、下地壳流动(Yin *et al.*, 2000)、幔源岩浆注入(Mo *et al.*, 2006; 罗照华等, 2003, 2004, 2006a)等,或者是这些过程的联合。

中国大陆是全球板内造山作用最显著的地区之一,如燕山-阴山造山带、五台山-太行山-中条山造山带、龙门山造山带、天山造山带、阿尔泰造山带等,几乎包括所有复活了的古造山带。这样的分布特征让我们想起了黄汲清(1952)创立的多旋回构造学说和 Fyfe *et al.* (1973)对大西洋打开的解释,以及关于开合构造的研究(姜春发, 1994)。结合西南天山托云火山岩中复杂的年龄谱特征(梁涛等, 2007)及其与克拉通地区火山岩中简单锆石年龄谱特征(罗照华等, 未发表资料)对比,古造山带的复活可能与其岩石圈结构由造山带型向克拉通型的转化有关。因此,如果说板缘造山作用的地壳增厚机制是地幔汇聚驱动的岩石圈板块相互作用,涉及到大陆的侧向增生、垂向增生和/或大陆碰撞,那么板内造山作用则主要涉及岩石圈不稳定性及岩石圈-软流圈相互作用。

大陆岩石圈是地球长期演化的结果,由不同时代、不同性质的块体拼合而成(图 2),这是大陆岩石圈与大洋岩石圈的根本区别。大陆岩石圈结构的研究表明,古造山带一般具有四层结构而不是像稳定区那样的三层结构(邓晋福等, 1995; Gao *et al.*, 1998),意味着地质历史时期各种块体反复拼合而成的大陆板块具有复杂的岩石圈不均一性。在统一的地幔对流体制作用下,这种不均一性将导致大陆板块各组

成单元具有不同的响应。例如,一种被称为边际驱动对流(Edge-driven convection)的机制认为,岩石圈厚度不连续可能导致小尺度的边际地幔对流,产生 20mm/a 量级的地幔流动速度(King *et al.*, 1998)。这种小尺度对流必然导致岩石圈块体结合带的热结构有别于块体内部,使得岩石圈力学性质弱化。在区域构造应力场中,岩石圈块体结合带将更容易发生变形。

另一方面,造山带广泛出露的岩浆混合成因花岗岩揭示了巨量幔源基性岩浆的底侵作用。例如,在太行山和燕山板内造山带,大量花岗质岩石的成因被认为与底侵幔源岩浆和壳源岩浆的混合作用有关(罗照华等, 1999; Su *et al.*, 2007; 覃锋等, 2006),岩浆活动的峰期介于 140 ~ 120Ma 之间(罗照华等, 1996)。汉诺坝玄武岩中基性麻粒岩包体的形成年龄也介于同样的变化范围(樊祺诚等, 2001a, b),形成深度约 40km,被认为是幔源岩浆底侵作用的有力证据。来自这两方面的证据一方面说明 140 ~ 120Ma 间确实发生了幔源岩浆底侵作用,另一方面说明底侵的幔源岩浆导致了大规模的花岗质岩浆活动。基性岩浆的一个重要性质是固结后可以转变成密度高于地幔橄榄岩的榴辉岩。如果底侵岩浆和造山带地壳流动过程中向下地壳聚集的基性岩块的体积足够大,它们转变成榴辉岩后就有可能导致明显的重力不稳定性,从而引发岩石圈拆沉作用和软流圈地幔的被动上涌(罗照华等, 2007a),从而触发新的构造岩浆热事件。假如软流圈上涌的规模足够大,有可能导致新的大规模幔源岩浆底侵作用事件和壳源岩浆活动,因而使地壳体积增大,岩石圈厚度增加,并因地壳的浮力而发生区域隆升。来自三方面的证据显示太行山-燕山地区中生代时期的确发生过板内造山作用:(1)根据同位素冷却年龄的估算,太行山曾经发生过巨大的隆升(罗照华等, 1996);(2)华北东部下地壳组成以英云闪长质为主,很少镁铁质组分(Gao *et al.*, 1998),后者的厚度不能满足触发大规模壳源岩浆活动所需要的热能,必然有相当一部分榴辉岩相镁铁质岩石因岩石圈拆沉作用而消失;(3)造山后脉岩组合的形成要求发生过岩石圈拆沉作用(罗照华等, 2006b)。这种完全由于软流圈上涌触发的造山作用有别于板缘造山作用的机制,因而被命名为太行山式造山作用(罗照华等, 1999a, b; 2006c)。可见,板内造山作用的特征是以岩石圈拆沉作用开始,以地壳的垂向增生为特征,最后以岩石圈拆沉作用结束或形成重力不稳定岩石圈。

这大概就是为什么新的造山过程受古造山带控制的原因,由此可以加深对板内构造变形的理解。值得指出的是,一部分学者坚信岩石圈拆沉→软流圈上涌→幔源岩浆底侵→区域伸展的构造模式(Bird, 1979),忽略岩石圈拆沉作用可以导致更强烈的挤压变形(Bird, 1978)。正如 King *et al.* (1998)指出的那样,小尺度的对流强烈依赖于大尺度的地幔热结构。如果岩石圈拆沉作用发生在地幔汇聚体制下(图 4a),将迎来更强烈的构造挤压(Bird, 1978),因为热而软的岩石圈更有利于变形增厚(Thompson *et al.*, 2001);

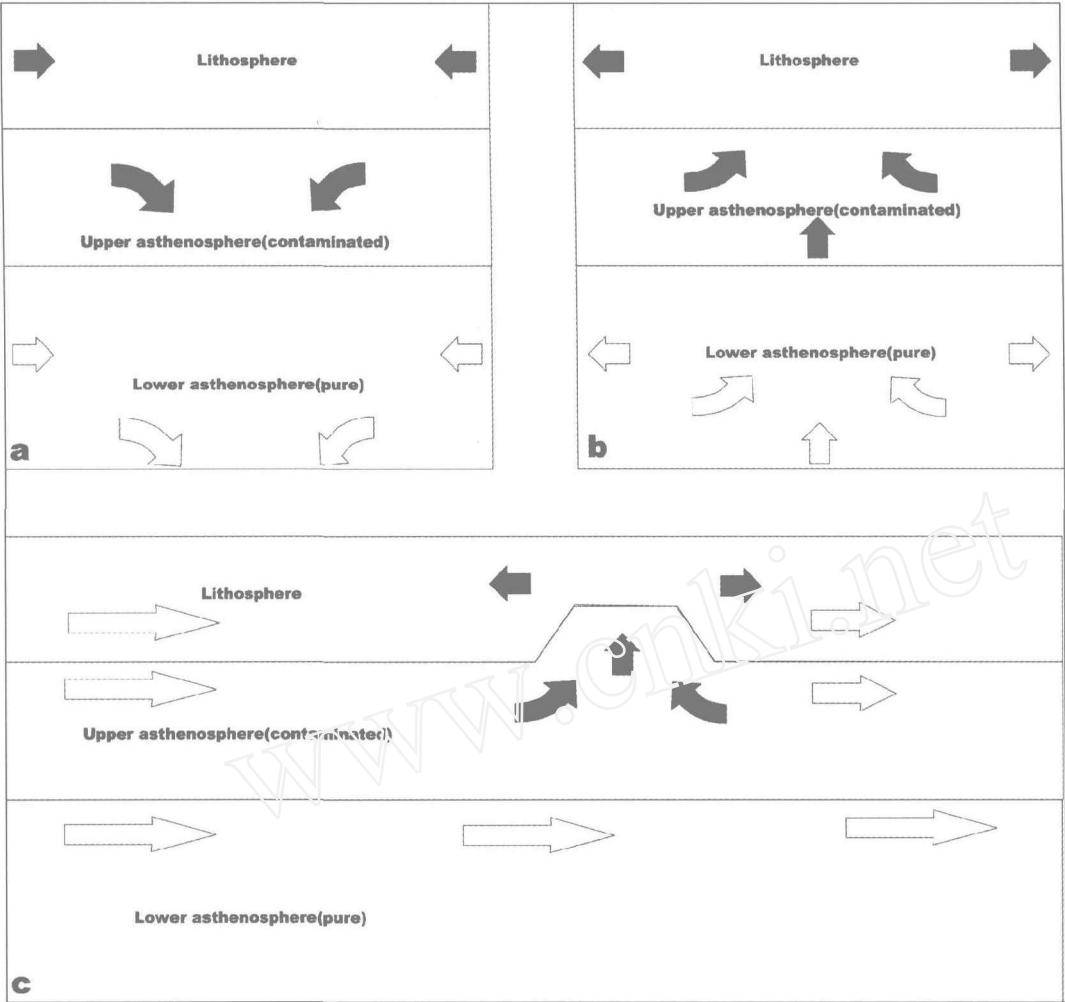


图4 深部与浅部动力学系统的三种关系  
Fig.4 The three relationships of deeper-and shallower geodynamic system

如果大尺度地幔对流体制是伸展,岩石圈拆沉以后紧接着区域伸展(图4b);如果区域内地幔是单向流动的,则岩石圈拆沉之后可能发生较弱的构造挤压,形成断块造山(图4c)。因此,从地球动力学的角度来说,可以将岩石圈-软流圈构造体制划分为深部体制和浅部体制,两个体制的耦合或拆耦决定了岩石圈的运动状态(罗照华等,2006c)。岩石圈的拆沉还会导致软流圈浅部被混染,这时,起源于软流圈的岩浆也可以带有岩石圈的地球化学印记,直到落入软流圈中的岩石圈混染物消耗干净为止。从这个角度来说,地球化学示踪结果的解释应当小心谨慎。

另一个问题是这样的机制似乎应当像永动机那样反复不停地进行。的确,深部过程→幔源岩浆活动→壳源岩浆活动→地壳增厚→区域隆升(构造变形)→风化剥蚀→沉积物堆积这样一个地球动力学事件链(罗照华等,2006d)应当会反复进行,这可能正是多旋回构造学说的深层原因。但是,地质事件发生的频率取决于深部过程的规模和速率。如果规模较大,这样的—个事件链大致相当于造山旋回的一个阶

段;如果规模较小,造成的岩石圈不稳定性有可能维持相当长的时间。例如,太行山的中生代造山作用可能是元古代造山带活化的结果,其间隔时间相当长,天山的新生代造山作用与古生代造山作用的时间间隔要小得多。因此,大陆岩石圈的克拉通化应当是一个循序渐进的过程,岩石圈通过一系列反复进行的地质过程之后逐渐走向稳定。

因此,所谓的板内造山作用实际上是先存不成熟岩石圈对新的深部过程的相应。当古造山带的延展方向与现今区域构造应力场的主压应力方向垂直时,这类板内造山作用容易误解为板缘汇聚力的远程效应。但是,地幔汇聚也会导致软流圈的横向流动,这不会触发岩石圈挤出构造,而且导致与主压应力平行或斜交的板内造山作用(如太行山和龙门山)。

4 板内造山作用与成矿

要阐明板内造山作用与成矿作用的关系,进而服务于区域找矿预测,还必须清楚理解成矿作用的基本控制要素。

#### 4.1 透岩浆流体成矿作用

大量的地质观察表明,成矿作用的基本前提之一是大规模流体活动,因为几乎所有内生金属矿床的形成都伴随着广泛而强烈的围岩蚀变。因此,成矿流体的来源、迁移方式和成矿元素堆积的场所与原因便成了成矿作用研究的焦点。

理论上说,成矿流体有可能来自地球深部,也可能来自浅部和围岩,甚至可能是对流循环的盆地流体。但是,实际工作中似乎很难识别流体的来源。由于流体系统的开放性和元素丰度随温度、压力的巨大变化,一些在研究硅酸盐系统时认为有效的示踪方法常常不能给出令人满意的结果。为此,我们不得不从其它视角来探讨成矿流体的来源问题。矿床学家通常倾向于成矿流体来自于岩浆和围岩,因而了解硅酸盐熔浆中流体的溶解度、从围岩中萃取流体的机制以及流体中成矿元素的浓度是非常重要的。遗憾的是,地质观察和实验均表明,岩浆中流体的溶解度非常有限。例如,在 100 MPa 条件下,花岗质岩浆中可能只溶解有 3.5% ~ 4wt%  $H_2O$  (Johannes *et al.*, 1996)。增加压力可以使岩浆中流体的含量升高,却是以降低岩浆的上升能力为代价,形成原地、半原地大型岩基。此外,造山带成矿作用通常发生在巨量花岗质岩浆活动之后,大型内生矿床却常常与小岩体有关,后者常以快速侵位为特征(如斑岩铜矿)。因此,大规模成矿作用所要求的流体数量远远大于岩浆体本身所能提供的流体数量。一部分学者坚信位于小岩体之下的岩基曾经是含矿流体的补给源,这种似乎有理的见解却得不到岩相学支持。例如,豫西泰山庙岩体的主体岩性为中粗粒黑云母花岗岩,按其结构特征应当是共结岩浆结晶形成的,属于相对低温岩浆固结的产物。其北侧与成矿有关的东沟岩体为花岗斑岩,含有高温石英,属于相对高温岩浆快速定位固结的产物。因此,来自泰山庙岩体的含矿流体不能成为对东沟岩体的有效含矿流体供给。

从围岩中萃取流体的机制同样是有争议的,流体的最可能来源还是地球深部(罗照华等,2007b)。这就是说,地质观察中认为来自岩浆的那些成矿流体实际上主要是来自深部的流体系统,而不是岩浆本身,岩浆仅仅是含矿流体上升的通道。换句话说,透岩浆流体就是岩浆尚未固结前透过岩浆上升的深部流体,当这种流体大规模活动且含有较多成矿物质时,将导致大规模成矿作用。这就是透岩浆流体成矿作用的实质。在这种成矿体制中,岩浆成为成矿流体上升通道的开拓者和避免流体与通道周围岩石反应的保护者,反过来,流体又是岩浆快速侵位的推动者(罗照华等,2007b)。因此,与成矿作用有关的岩浆一般都具有快速侵位的特点。

根据透岩浆流体成矿理论,成矿作用的规模取决于流体系统的大小、流体系统/岩浆系统体积比和成矿流体上升的速度。当岩浆快速侵位并冷却时,深部流体不能或很少进入岩浆(图 5 中 a),有可能在岩浆体冷却收缩形成的接触带构造裂隙中堆积成矿。如果岩浆上升速度与流体同步,含矿流

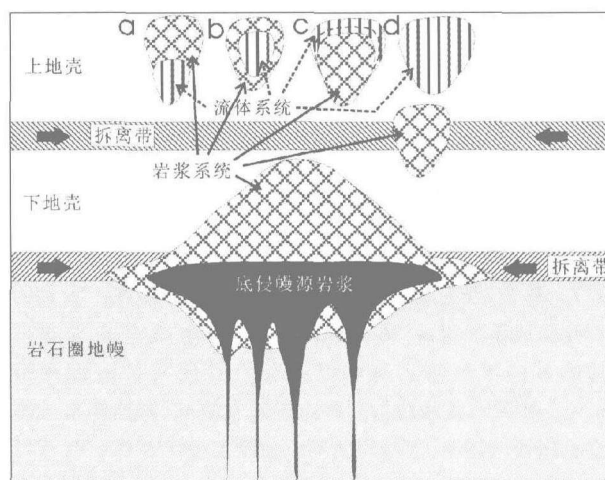


图 5 深部流体成矿系统示例

a-热液脉状成矿亚系统; b-斑岩型成矿亚系统; c-接触型成矿亚系统; d-远程热液成矿亚系统

Fig. 5 A sketch showing the metallogenic systems from deep fluids

体就有可能进入岩浆体内(图 5 中 b),既降低岩浆的密度使其得以快速上升,又可以寻求岩浆的保护,使其成矿元素的浓度不会因为流体与围岩接触而降低。岩浆到达地壳浅部后,成矿流体与硅酸盐熔体发生分离,分别形成贫矿的熔体和富矿的流体。随着温度的下降,在寄主熔体固结成岩之后或固结过程中,成矿流体开始析出有用组分(成矿作用)。因此,所有的矿化作用都限于岩体内部,如形成斑岩型矿床。如果成矿流体上升的速度稍快,他们就有可能从岩浆体中逃逸或逃逸一部分,在岩体顶部和围岩中成矿(图 5 中 c)。成矿流体上升速度足够快时,它们可以完全穿透岩浆进入围岩或流体通道中,这时岩浆体仅仅是含矿流体继续上升的驱动热源(图 5 中 d)。这样,就形成了不同的成矿作用亚系统(图 5)。如果进一步追踪成矿物质堆积后搬运介质的去向,透岩浆流体成矿系统中可能还可以增加一个可燃性矿产成矿亚系统(图 5 中未表示)。

图 5 大致表述了透岩浆流体成矿理论的基本思想,底侵的幔源岩浆及位于壳幔边界的流体被设想成是成矿流体的补给源,这与我们描述的冈底斯岩基带中含铜暗色微粒包体的成矿作用极为类似(罗照华等,2007b)。因此,在这个实例中壳源花岗质岩浆仅仅是成矿流体的通道,而不是它们的来源。

#### 4.2 岩石圈灾变与成矿作用

实验表明,地质流体中成矿元素的浓度强烈依赖于压力,随压力急剧升高(Loucks *et al.*, 1999)。这表明,(1)深部流体中成矿元素的浓度的确可以达到成矿的要求,(2)深部含矿流体必须以足够快的速度上升才能导致浅部成矿。为此,地球深部是否存在大量流体、成矿流体赋存在什么地方以及它们上升参与成矿作用的条件成为问题的关键。



由沉积岩向高级变质岩转变,涉及到一系列脱水反应。这使我们相信,随着深度的增加,地球内部的流体丰度逐渐减小,火山岩中深源包体的研究和实验岩石学研究都可以证明这一点。然而最新研究却表明,地幔的总含水量可以达到现今水圈的10%,甚至数倍于水圈(Richard *et al.*, 2002)。对于深部地幔岩来说,除了含水矿物之外,名义无水矿物(如橄榄石)也被证明可以作为流体的寄主矿物(Richard *et al.*, 2002)。那么,岩石圈是否也可以含有大量流体呢?大量的地震测深成果表明,岩石圈-软流圈系统存在低速层,其物理性质的各向异性暗示这些低速层也是层间构造拆离带(图5)。如果承认板块构造理论的基本假设,即地幔对流驱动岩石圈板块运动,当相邻的圈层运动速度不一致时就有可能产生层间构造拆离带。与其它部位相比,层间拆离带具有更好的流体可渗透性,因而可能也是深部流体汇聚带。电性结构分析可以证实这一推论,因为这些低速层也是高导层,是富含深部流体的表征(Wei *et al.*, 2003; Unsworth *et al.*, 2005)。这表明,岩石圈-软流圈系统也含有大量的流体,它们主要赋存在不同深度水平的拆离带中。对于板内造山带来说,由于其岩石圈的不成熟特点,在后续演化过程中将可以释放更多的流体。当这些富流体层与地壳浅部连通时,富含成矿组分的流体就有可能会上升富集成矿。

因此,唯一的问题就是深部流体是如何快速上升侵位的,因为流体中含矿组分的溶解度会随压力急剧降低。可以预见,深部流体向浅部运移的过程伴随着成矿物质的丢失,或者丢失一部分从深部携带的组分,获取另一些组分。特别是当流体渗滤通过某种化学边界层时,其成矿组分有可能大量丢失。由此,流体成矿作用主要依赖于深部流体的快速释放。这在一般情况下难于达到,最有效的方式是发生了岩石圈拆沉作用和/或岩浆的产生。

岩石圈拆沉作用触发的软流圈上涌可以导致短暂的岩石圈伸展构造,有利于深部流体的上升;拆沉作用也可以导致低固相线不成熟岩石圈物质突然沉入软流圈高温环境中,有利于含水矿物的分解和部分熔融;拆沉作用还可以导致软流圈被动上涌并触发地幔减压熔融和地壳受热熔融。由于含水体系比干体系具有更低的固相线温度,拆沉作用发生时拆离带将更容易发生部分熔融。一旦岩浆形成并向上运移,被封存在拆离带的深部含矿流体将随之向上运移,并推动岩浆快速侵位。同时,岩浆也可以“护送”成矿流体到地壳浅部(图5)。由于拆沉作用是岩石圈不稳定性由量变到质变的过程,岩石圈拆沉作用表现为地质时间尺度上的突变,或者称为岩石圈灾变,因而有可能使深部流体快速上升成矿。华北东部中生代岩石圈拆沉作用与成矿作用大爆发的同时性的内在原因正在于此,因而有岩石圈灾变伴随着成矿大爆发的规律(邓晋福等,1999)。

此外,板内造山阶段地幔和地壳挤出构造也可以导致含矿流体横向迁移,在应力释放的部位或有合适混沌边界层的部位聚集成矿,类似于藏东的新生代成矿作用。如果这种设

想是正确的,与板内造山作用有关的矿床应当发生在板内造山带的两端。例如,与太行山板内造山作用有关的成矿作用主要位于北段的来源一带和南端的武安一带。对于天山来说,东天山东段和西天山西段也应当是有利的成矿部位。由于我们掌握的成矿实例很少,在此不多作讨论。

总之,板内造山作用应当伴随着成矿作用,特别是对于岩石圈结构不成熟的结合带来说,将具有很好的成矿远景。结合带的成矿优势不仅仅是因为含有较多的地质流体和成矿物质,甚至可能包含有块体拼合过程中俯冲到深部的老矿床和流体上升过程中堆积在较深处的成矿物质。这些老矿床和富含成矿物质的部分在块体拼合过程中因地温较低而没有遭到破坏,在以岩石圈拆沉作用为触发机制的板内造山过程中有可能迅速解体,为新的成矿作用提供巨量金属或金属化合物。

因此,板内造山带金属成矿作用主要在于两个阶段,造山旋回启动阶段和造山带崩塌(岩石圈拆沉作用)阶段。造山带大规模岩浆活动阶段一般不太可能形成大型金属矿床(有先存矿床的地区例外),而造山末期或造山后伸展阶段反而是有利的成矿时期(de Boorder *et al.*, 1998)。太行山造山带的成矿作用似乎证明了这一点,发生了大规模造山后拆沉作用(罗照华等,2006b)的太行山北段发育多种金属的成矿作用,而没有或较弱岩石圈拆沉作用的太行山南段则以同造山的铁矿为主。天山及其它板内造山带是否也有类似的成矿作用,值得进一步仔细研究。

## 5 讨论与结论

传统的板块构造理论并没有考虑大陆岩石圈板块的结构复杂性,当用板块构造理论来解释大陆构造时,学者们自然地 will 将板内变形与板缘构造力的远程传递联系起来。然而,这种解释并不是必须的。板缘构造力作远程传递的基本条件是岩石圈板块的刚性特点,对于发生了强烈岩浆活动和构造变形的板块边缘来说,其基本涵义是岩石圈力学性质的弱化和构造力被吸收,因而板缘构造力作远程传递还只是一个未经证实的解释。另一方面,大陆板块之下也存在地幔对流,特别是由于岩石圈板块底面以凹凸不平为特征,这种地幔对流将导致岩石圈-软流圈相互作用的特点因地而异。因此,大陆板块内部广泛的离散性构造现象与其说是板缘构造力远程传递的效应,还不如说取决于其自身的岩石圈不稳定性和层圈相互作用。例如,天山及其以北地区的新生代变形未必与印度-亚洲大陆碰撞有关,尽管它们在形成时间和空间展布上是密切联系在一起的。由于印度-亚洲大陆碰撞本身也是地幔对流驱动的结果,用地幔汇聚过程而不是大陆碰撞来解释这些构造现象之间的联系似乎更为合理。

综上所述,板内造山作用和板内变形可能是一类非常重要的地质过程,可以解释许多传统板块构造理论所不能解释的现象。在这种造山机制中,岩石圈的不均一性具有决定性



的意义。将板内变形和造山作用与岩石圈不均一性联系起来,其理论基础是地质过程的能量驱动机制。由于古造山带或块体结合带的岩石圈结构相对不成熟,在其克拉通化的过程中必然导致物质组成的重组,触发区域性构造变动。这个过程可能反复进行(多旋回),直到形成稳定的克拉通型岩石圈。同时,不成熟的岩石圈具有相对多的流体和成矿元素,它们的迁移和聚集有赖于造山过程的驱动。因此,板内造山作用也是大规模成矿作用的有利条件。在古亚洲洋构造域,大量具有正  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的花岗岩类的发现揭示了新生陆壳的形成过程,表明古亚洲洋构造域具有相对不成熟的岩石圈结构。据此可以推论,该区与板内造山过程有关的成矿作用应当广泛发育,希望引起矿床学家的高度重视。

**致谢** 西北大学赖绍聪教授、北京大学朱永峰教授和中国地质大学(北京)张长厚教授提出了十分有益的建设性意见,在此向他们表达诚挚的谢意。

## References

- Abdrakhmatov KY, Aldazhanov SA, Hager BH *et al.* 1996. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 384: 450–453
- Bird P. 1978. Initiation of intracontinental subduction in the Himalaya. *Journal of Geophysical Research*, 83(B10): 4975–4987
- Bird P. 1979. Continental delamination and the Colorado Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 84(B13): 7561–7571
- Bowman JR, Collins JA, Bostock MC *et al.* 1990. The Ayers Rock, Australia, earthquake of 28 May 1989: A temporally isolated Mb 5.8 intraplate event. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(2): 313–324
- Camacho A, Hensen BJ and Armstrong R. 2002. Isotopic test of a thermally driven intraplate orogenic model, Australia. *Geology*, 30(10): 887–890
- Chen A. 1998. Geometric and kinematic evolution of basement-cored structures: intraplate orogenesis within the Yanshan Orogen, northern China. *Tectonophysics*, 292: 17–42
- Coblentz DD, Sandiford M, Richardson RM *et al.* 1995. The origins of the intraplate stress field in continental Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 133: 299–309
- Cunningham D. 2005. Active intracontinental transpressional mountain building in the Mongolian Altai: Defining a new class of orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 240: 436–444
- de Boorder H, Spakman W, White SH *et al.* 1998. Late Cenozoic mineralization, orogenic collapse and slab detachment in the European Alpine Belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 164: 569–575
- De Grave J, Buslov MM and Van den haute P. 2007. Distant effects of India-Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: Constraints from apatite fission-track thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 188–204
- Deng JF, Liu HX, Zhao HL *et al.* 1996. Yanshanian igneous rocks and orogeny model in Yanshan Liaoning area. *Geoscience*, 10(2): 137–148 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Mo XX, Zhao HL *et al.* 1999. The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic Environment in East China. *Mineral Deposits*, 18(4): 309–315 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Wu ZX, Yang JJ *et al.* 1995. Crust-mantle petrological structure and deep processes along the Golmud-Ejin Qi Geoscience section. *Acta Geophysica Sinica*, 38 (Suppl. 2): 130–144 (in Chinese with English abstract)
- Dickerson PW. 2003. Intraplate mountain building in response to continent-continent collision: The Ancestral Rocky Mountains (North America) and inferences drawn from the Tian Shan (Central Asia). *Tectonophysics*, 365: 129–142
- Dickerson PW. 2004. Pampean Orogen: An intraplate component of early Paleozoic deformation? *Gondwana Research*, 7(1): 115–124
- Ding L, Kapp P, Zhong DL *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44(10): 1833–1865
- Fan QC and Sui JL. 2001b. The granulite-eclogite facies cumulate xenoliths in Hannuoba area: The evidence of the Crust Mantle transitional zone. *NSFC*, (1): 23–27 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Sui JL, Liu RX *et al.* 2001a. Eclogite facies garnet-pyroxenolite xenolith in Hannuoba area: New evidence of magma underplating. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 1–6 (in Chinese with English abstract)
- Flower MFJ, Russo RM, Tamaki K *et al.* 2001. Mantle contamination and the Izu Bonin Mariana (IBM) high-tide mark: Evidence for mantle extrusion caused by Tethyan closure. *Tectonophysics*, 333: 9–34
- Flower MFJ, Tamaki K and Hoang N. 1998. Mantle extrusion: model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific. In: Flower MFJ *et al.* (eds). *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*. *Geodynamics Series*, Vol. 27. American Geophysical Union, Washington DC, 67–88
- Fyfe WS and Leonardos OH. 1973. Ancient metamorphic-migmatite belts of the Brazilian African coasts. *Nature*, 244: 501–502
- Gao S, Luo TC, Zhang BR *et al.* 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959–1975
- Guo ZJ, Zhang ZC, Liu SW *et al.* 2003. U-Pb geochronological evidence for the early Precambrian complex of the Tarim Craton, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 537–542 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, He GQ, Wu TR *et al.* 2004. Zircon U-Pb dating and geochemical features of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: implications for tectonic evolution. *Xinjiang Geology*, 22(1): 4–11 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Wang XC, He GQ *et al.* 1998. Discovery of mantle and lower crustal xenoliths from early Cretaceous volcanic rocks of southwest Tianshan. *Xinjiang. Chinese Science Bulletin*, 43(23): 2544–2547 (in Chinese)
- Hand M and Sandiford M. 1999. Intraplate deformation in central Australia, the link between subsidence and fault reactivation. *Tectonophysics*, 305: 121–140
- Hawkesworth C, George R, Turner S and Zellmer G. 2004. Time scales of magmatic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 218: 1–16
- Hu AQ and Wei GJ. 2006. On the Age of the Neo-Archean Qinghai Gray Gneisses from the Northern Tarim Basin, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 126–134 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Zhang GX, Chen YB *et al.* 2001. A model of division of the continental crust basement and the time scales of the major geological events in the Xinjiang-based on studies of isotopic geochronology and geochemistry. *Xinjiang Geology*, 19(1): 12–19 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Zhang GX, Zhang QF *et al.* 1999. The basement age of Tianshan orogenic belt and crust growth: Evidences from Nd

- isotopes. *Science in China (Series D)*, 29(2): 104 – 112 (in Chinese)
- Huang TK. 1945. On major tectonic forms of China. *Geological Memoirs*, Ser. A, (20): 165
- Ionov D. 2002. Mantle structure and rifting processes in the Baikal Mongolia region: geophysical data and evidence from xenoliths in volcanic rocks. *Tectonophysics*, 351: 41 – 60
- Ji JQ, Han BF, Zhu MF *et al.* 2006. Cretaceous-Paleogene alkaline magmatism in Tuyon basin, southwest Tianshan mountains: geochronology, petrology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1324 – 1340 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CF. 1994. From the polycyclic theory to open-and-close tectonics. *Acta Geoscientia Sinica*, (3~4): 103 – 112 (in Chinese with English abstract)
- Johannes W and Holtz F. 1996. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Springer-Verlag, pp335
- Johnson MRW. 2002. Shortening budgets and the role of continental subduction during the India-Asia collision. *Earth-Science Reviews*, 59: 101 – 123
- King SD and Anderson DL. 1998. Edge-driven convection. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 289 – 296
- Liang T, Luo ZH, Ke S, Wei Y, Li DD, Huang JX and Huang F. 2007. SHRIMP zircon dating of the Tuyon volcanoes group, Xinjiang, and its geodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1381 – 1391 (in Chinese with English abstract)
- Liang T, Luo ZH, Li WT *et al.* 2005. Geologic feature and tectonic implications of the Tuyon volcanic group. *Xinjiang Geology*, 23(2): 105 – 110 (in Chinese with English abstract)
- Liu X and Xiao XC. 2006. Evolution of basin-mountain tectonic framework in southern Xinjiang, China (northern margin of Qinghai-Tibet Plateau). Beijing: Geological Publishing House, pp338 (in Chinese)
- Loucks RR and Mavrogenes JA. 1999. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions. *Science*, 284: 2159 – 2163
- Lü YJ, Luo ZH, Ren ZB *et al.* 2007. Megacrysts in the Cenozoic basalt of Tuoyun basin, southwest Tianshan. *Science in China (Series D)*, 50(1): 55 – 66
- Luo ZH, Bai ZD, Zhao ZD *et al.* 2003. Cenozoic magmatism in the south and north rims of Tarim basin: petrogenesis and tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 179 – 189 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Deng JF and Han XQ. 1999. On characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen. Beijing: Geological Publishing House: 124 (in Chinese)
- Luo ZH, Deng JF, Cao YQ *et al.* 1999b. Magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen. *Journal of China University of Geosciences*, 10(1): 76 – 79
- Luo ZH, Deng JF, Li YW *et al.* 1996. Interpretation of K-Ar ages of Taihang tectonomagmatic belt. *Geoscience*, 10(3): 344 – 349 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Deng JF, Zhao GC *et al.* 1997. Characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen. *Earth Science*, 22(3): 279 – 284 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Mo XX, Hou ZQ *et al.* 2006a. An integrated model for the Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau: Constraints from igneous rocks. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 196 – 211 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Mo XX, Lu XX *et al.* 2007b. Metallogeny by transmagmatic fluids: Theoretical analysis and field evidences. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 165 – 183 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Mo XX, Wan YS *et al.* 2006d. Geological implications of the youngest SHRIMP U-Pb age of the alkaline basalt in the Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 578 – 584 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Mo XX, Wang JH *et al.* 2004. The mantle-crust interactions during continental collision process of the Plateau and their effects on the formation of mineral resources and oil-gas pools. In: Zheng D and Yao TD (eds). *Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects*. Beijing: Science Press, 117 – 163 (in Chinese)
- Luo ZH, Wei Y, Xin HT *et al.* 2006b. Petrogenesis of the post-orogenic dike complex-Constraints to lithosphere delamination. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1672 – 1684 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Wei Y, Xin HT *et al.* 2006c. The Mesozoic intraplate orogeny of the Taihang Mountains and great thinning of the continental lithosphere in the Northern China. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 52 – 63 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Xin HT, Chen BH *et al.* 2007a. On the crust mantle transition layer and its implications in continental geodynamics. *Geoscience*, 21(2): 421 – 425 (in Chinese with English abstract)
- Ma WP, Li JY, Li JH *et al.* 2002. Evolution of the concept "orogen": Its background and the problems in current continental tectonic researches. *Geological Review*, 48(2): 153 – 157 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF *et al.* 2006. Petrology and geochemistry of postcollisional volcanic rocks from the Tibetan plateau: Implications for lithosphere heterogeneity and collision-induced asthenospheric mantle flow. In: Dilek Y and Pavlides S (eds). *Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia*. Geological Society of America Special Paper, 409: 507 – 530
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189: 419 – 426
- Qin F, Xu XX and Luo ZH. 2006. Mixing and mingling in petrogenesis of the Fangshan intrusion, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2957 – 2970 (in Chinese with English abstract)
- Richard G, Monnereau M and Ingrin J. 2002. Is the transition zone an empty water reservoir? Inferences from numerical model of mantle dynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 205: 37 – 51
- Sandiford M and Hand M. 1998. Controls on the locus of intraplate deformation in central Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 162: 97 – 110
- Sandiford M. 2002. Low thermal Peclet number intraplate orogeny in central Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 201: 309 – 320
- Shu LS, Guo ZJ, Zhu WB *et al.* 2004. Post-Collision Tectonism and Basin-Range Evolution in the Tianshan Belt. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 393 – 404 (in Chinese with English abstract)
- Smith AD. 2003. Critical evaluation of Re-Os and Pt-Os isotopic evidence on the origin of intraplate volcanism. *Journal of Geodynamics*, 36: 469 – 484
- Sobel ER and Arnaud N. 2000. Cretaceous-Paleogene basaltic rocks of the Tuyon basin, NW China and Kyrgyz Tian Shan: The trace of a small plume. *Lithos*, 50: 191 – 215
- Sobel ER, Chen J and Heermance RV. 2006. Late Oligocene-Early Miocene initiation of shortening in the Southwestern Chinese Tian Shan: Implications for Neogene shortening rate variations. *Earth and Planetary Science Letters*, 247: 70 – 81
- Su SG, Niu YL, Deng JF *et al.* 2007. Petrology and geochronology of Xuejiashiliang igneous complex and their genetic link to the lithospheric thinning during the Yanshanian orogenesis in eastern China. *Lithos*, doi:10.1016/j.lithos.2006.09.020
- Sun FY. 1994. Mesozoic-Cenozoic regional tectonic evolution and gold mineralization in Jiaodong area, Shandong Province. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(4): 378 – 384, 422 (in Chinese)

Chinese with English abstract)

- Tapponnier P, Peltzer G, Le-Dain AY *et al.* 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12): 611–616
- Tapponnier P, Xu ZQ, Roger F *et al.* 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(23): 1671–1677
- Thompson AB, Schulmann K, Jezek J *et al.* 2001. Thermally softened continental extensional zones (arcs and rifts) as precursors to thickened orogenic belts. *Tectonophysics*, 332: 115–141
- Unsworth M, Jones A, Wei WB *et al.* 2005. Crustal rheology of the Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data. *Nature*, 438: 78–81
- Vinnik LP, Reigber C, Aleshin IM *et al.* 2004. Receiver function tomography of the central Tien Shan. *Earth and Planetary Science Letters*, 225: 131–146
- Wang F, Liu CY, Yang XK *et al.* 2005. Geologic geochemical features of basalt in Ruqi Clough of Helan Mountain and its structural environmental significance. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 24(4): 25–27 (in Chinese)
- Wang YB, Wang Y, Liu X *et al.* 2000. Geochemical Characteristics and Genesis of Late Cretaceous to Paleogene Basalts in Tuyun Basin, South Tianshan Mountain. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(2): 131–139, 173 (in Chinese with English abstract)
- Wei WB, Unsworth M, Jones A *et al.* 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 292: 716–718
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM *et al.* 1992. Tectonic evolution of the northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House, 12–47 and 104–124 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH *et al.* 2001. Adakite type sodium-rich rocks in Awulake Mountain of West Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust. *Chinese Science Bulletin*, 46(4): 281–287 (in Chinese)
- Xu XY, Xia LQ, Xia ZC *et al.* 2003. Geochemistry and genesis of Cretaceous-Paleogene basalts from the Tuoyun Basin, Southwest Tianshan Mountains. *Geochimica*, 32(6): 551–560 (in Chinese with English abstract)
- Xue YX and Zhu YF. 2007. Genesis of the siderite in Jurassic olivine basalt, Karamay, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1108–1122 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Meng FC, Zhang JX *et al.* 2001. The shoshonitic volcanic rocks at Hongliuxia: Pulses of Altyn Tagh fault in Cretaceous. *Science in China (Series D)*, 44(Suppl): 94–102
- Yin A and Harrison M. 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211–80
- Zhang CH. 1999. A primary discussion on the intraplate orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 295–308 (in Chinese with English abstract)
- Zhang PZ, Wang Q and Ma ZJ. 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 442–450 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Zhang SH, Xu G *et al.* 2004. The Jurassic major tectonic events of the Yanshanian intraplate deformation belt. *Geological Bulletin of China*, 23(9–10): 854–863
- Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL *et al.* 2003.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronological study of Late Paleozoic volcanic hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang. *Geochimica*, 32(4): 317–327 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Lu FX, O'Reilly SY *et al.* 2001. Trace-elements in Tuoyun clinopyroxene: Implications for the deep processes of lithospheric mantle beneath the southwest Tianshan, West China. *Chinese Science Bulletin*, 46(14): 1206–1211
- Zheng JP, Luo ZH, Yu CM *et al.* 2005. Geochemistry and zircon U-Pb ages of granulite xenolith from Tuoyun basalts, Xinjiang: Implications for the petrogenesis and the lower crustal nature beneath the southwestern Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 1242–1251
- Zhu YF, Sun SH, Gu LB *et al.* 2001. Permian volcanism in the Mongolian orogenic zone, northeast China: Geochemistry, magma sources and petrogenesis. *Geological Magazine* 138(2): 101–115
- Zhu YF and Ogasawara Y. 2002. Carbon recycled into the deep Earth: Evidenced by dolomite dissociation in subduction-zone rocks. *Geology*, 30: 947–950
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB *et al.* 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2201–2212
- Zhu YF and Song B. 2006. Petrology and SHRIMP chronology of mylonitized Tianger granite, Xinjiang: Also about the dating on zircon hydrothermal zircon rims in granite. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 135–144 (in Chinese with English Abstract)
- Zhu YF and Xu X. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite mlang in Taerbatatai Mts., Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2833–2842 (in Chinese with English Abstract)
- Zhu YF, Guo X, Zheng LF and Song B. 2006. Geochemistry and zircon SHRIMP dating on the Late Paleozoic volcanic rocks in west Tianshan Mountains (Central Asia, Xinjiang). *Goldschmidt Conference Abstracts*, doi: 10.1016/j.gca.2006.06.1361, *Geochim Cosmochim Acta*, Suppl., A755
- Zhu YF, Zeng YS and Gu LB. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite no. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay mountains, northwest China. *J. Asian Earth Sciences* 27, 61–77
- Zhu YF, Zhou J and Zeng YS. 2007. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, west Tianshan, NW China: petrographic and geochemical characteristics. *Ore Geology Review*, doi: 10.1016/j.oregeorev.2006.10.006: 1–29

#### 附中文参考文献

- 邓晋福, 吴宗絮, 杨建军等. 1995. 格尔木-额济纳旗地学断面走廊带地壳-上地幔岩石学结构与深部过程. *地球物理学报*, 38(增刊2): 130–144
- 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲等. 1996. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型. *现代地质*, 10(2): 137–148
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲等. 1999. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境. *矿床地质*, 18(4): 309–315
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新等. 2001a. 汉诺坝榴辉岩相石榴石辉石岩: 岩浆底侵作用新证据. *岩石学报*, 17(1): 1–6
- 樊祺诚, 隋建立. 2001b. 汉诺坝麻粒岩相-榴辉岩相堆晶岩捕虏体: 壳-幔过渡带的证据. *中国科学基金*, (1): 23–27
- 郭召杰, 张志诚, 刘树文等. 2003. 塔里木克拉通早前寒武纪基底层序与组合: 颗粒锆石 U-Pb 年龄新证据. *岩石学报*, 19(3): 537–542
- 韩宝福, 王学潮, 何国琦等. 1998. 西南天山早白垩世火山岩中发现地幔和下地壳捕虏体. *科学通报*, 43(23): 2544–2547
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然等. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义. *新疆地质*, 22(1): 4–11
- 胡霭琴, 韦刚健. 2006. 塔里木盆地北缘新太古代辛格尔灰色片麻岩形成时代问题. *地质学报*, 80(1): 126–134
- 胡霭琴, 张国新, 陈义兵等. 2001. 新疆大陆基底分区模式和主要地

- 质事件划分. 新疆地质, 19(1): 12-19
- 胡霭琴, 张国新, 张前锋等. 1999. 天山造山带基底时代和地壳增生  
的 Nd 同位素制约. 中国科学(D 辑), 29(2): 104-112
- 黄汲清. 1952. 中国主要地质构造单位. 北京: 地质出版社, 162
- 季建清, 韩宝福, 朱美妃等. 2006. 西天山托云盆地及周边中生代  
岩浆活动的岩石学、地球化学与年代学研究. 岩石学报, 22(5):  
1324-1340
- 姜春发. 1994. 从多旋回说到开合构造. 地球学报, (3-4): 103-  
112
- 梁涛, 罗照华, 李文韬等. 2005. 托云火山群的火山地质特征及其构  
造意义. 新疆地质, 23(2): 105-110
- 梁涛, 罗照华, 柯珊等. 2007. 新疆托云火山群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年  
代学及其动力学意义. 岩石学报, 23(6): 1381-1391
- 刘训, 肖序常. 2006. 中国新疆南部(青藏高原北缘)盆地构造格局的  
演化. 北京: 地质出版社, 338
- 吕勇军, 罗照华, 任忠宝等. 2006. 西南天山托云盆地新生代玄武岩  
中巨晶的研究. 中国科学(D), 36(2): 154-166
- 罗照华, 白志达, 赵志丹等. 2003. 塔里木盆地南北缘新生代火山岩  
成因及其地质意义. 地学前缘, 10(3): 179-189
- 罗照华, 魏阳, 辛后田等. 2006b. 造山后脉岩组合的岩石成  
因?——对岩石圈拆沉作用的约束. 岩石学报, 22(5): 1672-  
1684.
- 罗照华, 邓晋福, 韩秀卿. 1999a. 太行山造山带岩浆活动及其造山过  
程反演. 北京: 地质出版社, 124
- 罗照华, 邓晋福, 赵国春等. 1997. 太行山造山带岩浆活动特征及其  
造山过程反演. 地球科学, 22(3): 279-284.
- 罗照华, 莫宣学, 侯增谦等. 2006a. 青藏高原新生代形成演化的整合  
模型: 来自火成岩的约束. 地学前缘, 13(4): 196-211
- 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥等. 2007b. 透岩浆流体成矿作用: 理论分析  
与野外证据. 地学前缘, 14(3): 165-183
- 罗照华, 莫宣学, 万渝生等. 2006d. 青藏高原最年轻碱性玄武岩  
SHRIMP 年龄的地质意义. 岩石学报, 22(3): 578-584
- 罗照华, 莫宣学, 王江海等. 2004. 板块碰撞过程中壳幔相互作用及  
其成矿成藏效应. 见郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应. 北  
京: 科学出版社, 117-163
- 罗照华, 魏阳, 辛后田等. 2006c. 太行山中生代板内造山作用与华北  
大陆岩石圈厚大减薄. 地学前缘, 13(6): 52-63
- 罗照华, 邓晋福, 李玉文等. 1996. 太行山构造岩浆带 K-Ar 法同位素  
年龄分析. 现代地质, 10(3): 344-349
- 罗照华, 辛后田, 陈必河等. 2007a. 壳幔过渡层及其大陆动力学意  
义. 现代地质, 21(2): 421-425
- 马文璞, 李锦轶, 李江海等. 2002. 造山带概念的演变及它在现今大  
陆构造研究中面临的问题. 地质评论, 48(2): 153-157
- 舒良树, 郭召杰, 朱文斌等. 2004. 天山地区碰撞后构造与盆山演化.  
高校地质学报, 10(3): 393-404
- 孙丰月. 1994. 胶东地区中生代区域构造演化与成矿. 长春地质学  
院学报, 24(4): 378-384, 422
- 覃锋, 徐晓霞, 罗照华. 2006. 北京房山岩体形成过程中的岩浆混合  
作用证据. 岩石学报, 22(12): 2957-2970
- 王锋, 刘池阳, 杨兴科等. 2005. 贺兰山汝箕沟玄武岩地质地球化学  
特征及其构造环境意义. 大庆石油地质与开发, 24(4): 25-27
- 王彦斌, 王永, 刘训等. 2000. 南天山托云盆地晚白垩世—早第三  
纪玄武岩的地球化学特征及成因初探. 岩石矿物学杂志, 19(2):  
131-139, 173
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民等. 1992. 新疆北部及邻区大地构造. 北京:  
地质出版社, 12-47, 108-127
- 新疆维吾尔自治区地层表编写组. 1981. 西北地区区域地层表. 新疆  
维吾尔自治区分册. 北京: 地质出版社, 252-255
- 熊小林, 赵振华, 白正华等. 2001. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中  
酸性岩及地壳垂向增生. 科学通报, 46(4): 281-287
- 徐学义, 夏林圻, 夏祖春等. 2003. 西南天山托云地区白垩纪—早第三  
纪玄武岩地球化学及其成因机制. 地球化学, 32(6): 551-560
- 薛云兴, 朱永峰. 2007. 克拉玛依侏罗纪橄榄玄武岩中菱铁矿的成  
因. 岩石学报, 23(5): 1108-1122
- 杨经绥, 孟繁聪, 张建新等. 2001. 重新认识阿尔金断裂东段红柳峡  
火山岩的时代及构造意义. 中国科学(D), 31(增刊): 84-89.
- 张长厚. 1999. 初论板内造山带. 地学前缘, 6(4): 295-308
- 张传恒, 杜维良, 刘典波等. 2006. 塔里木北部周缘前陆盆地早二叠  
世快速迁移与沉积相突变: 俯冲板片拆沉的响应. 地质学报, 80  
(6): 785-791
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速  
度场. 地学前缘, 9(2): 442-450
- 赵越, 张拴宏, 徐刚等. 2004. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件.  
地质通报, 23(9-10): 854-863
- 赵振华, 白正华, 熊小林等. 2003. 西天山北部晚古生代火山—浅位  
岩浆岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素定年. 地球化学, 32(4): 317-327
- 郑建平, 路凤香, O'Reilly SY 等. 2001. 新疆托云地幔单斜辉石微量  
元素与西南天山岩石圈深部过程. 科学通报, 46(6): 497-502
- 郑建平, 罗照华, 余淳梅等. 2005. 新疆托云麻粒岩捕虏体地球化学  
和锆石年代学: 岩石成因及西南天山下地壳性质. 科学通报, 50  
(8): 793-801
- 朱永峰, 宋彪. 2006. 新疆天格尔(冰达坂)糜棱岩化花岗岩的岩石学  
及其 SHRIMP 年代学研究: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年. 岩  
石学报, 22: 135-144
- 朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩.  
岩石学报, 22: 2833-2842