

造山后脉岩组合与内生成矿作用

罗照华¹, 卢欣祥², 王秉璋¹, 陈必河¹, 黄凡¹, 杨宗锋¹, 汪洋¹

1. 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

2. 河南省国土资源科学研究院, 河南 郑州 450053

Luo Zhaohua¹, Lu Xinxiang², Wang Bingzhang¹, Chen Bihe¹, Huang Fan¹, Yang Zongfeng¹
Wang Yang¹

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

2. Scientific Academy of Land and Resources of Henan, Zhengzhou 450003, China

Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Wang Bingzhang, et al. Post-orogenic dike complexes and implications for metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 001-012

Abstract: Large scale granitic magmatism is commonly followed by emplacement of post-orogenic dike swarms. These dikes swarms are characterized by a wide compositional spectrum and are volumetrically minor with respect to the associated granitic intrusions. Observations in the Taihangshan, Yanshan, Eastern Kunlun and Tianshan orogenic belts, show that dikes can be divided into five groups: lamprophyric, basaltic, dioritic (andesitic), granodioritic (dacitic) and granitic (rhyolitic). Most researchers have paid attention only on the basaltic or lamprophyric dikes and often confused them with the dike swarms related to the continental break-up. Combined with recent works on studies of magmatic processes, it can be inferred that these dikes are the products of primary or near-primary magmas. Based on the analysis of thermal regimes and regional lithospheric petrological structures, the authors suggest that conditions for the production of these magmas require lithospheric delamination of an orogen with a thickened mafic lower crust. Therefore, the dikes should be formed at the stage of transition of the regional structural stress field from compressional to extensional and can be used to mark the ending of an orogenic cycle. In this case, the dike swarm can be considered as a post-orogenic dike complexes. Furthermore, we suggest that such dike complexes are widespread worldwide. Thus, there are three types of dike swarms: 1) dikes related to continental break up, 2) dikes related to batholiths and 3) dikes associated with large igneous provinces. The emplacement of a post-orogenic dike complex should be also accompanied by the large scale hydrothermal activity, when the rate of the heat transfer is considered. As the concentration of the ore-forming elements in the deep fluids depends on pressure, a new petrogenetic model implies that metallogenesis accompanies the post-orogenic dike swarm. Field examinations suggest that the observations of outcrops can be used to recognize the paths of the ore-forming fluids and the locations where the ore-forming elements accumulate. Therefore, we conclude that a post-orogenic dike complex not only indicates the

收稿日期: 2008-01-20; 修回日期: 2008-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40434010); 国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08); 河南省地质矿产重大科技攻关计划项目(26417)

作者简介: 罗照华(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 矿物学、岩石学矿床学专业, 火成岩岩石学、岩浆活动与成矿作用、区域岩石大地构造研究方向。E-mail: luozh@cugb.edu.cn

ending of an orogenic process, but is also an effective vector for mineralisation allowing a degree of predictability that can assist in exploration targeting.

Key words: orogen; dike swarm; thermal regime; lithosphere delamination; metallogenesis; transmagmatic fluid

摘要:造山带大规模花岗质岩浆活动之后往往有一期区域性脉岩产出,被称为岩基后岩墙群。这类脉岩具有近同时形成、宽成分谱系和小体积的特点。根据太行山、燕山、东昆仑山、天山等造山带的观察,这类脉岩可以划分成煌斑岩质、玄武质、闪长质(安山质)、花岗闪长质(英安质)和花岗质(流纹质)等5组。前人大多偏重于研究其中基性部分,因而常常将其与大陆裂解相关基性岩墙群混为一谈。岩石地球化学分析表明,虽然同组脉岩不同样品之间可能存在演化关系,不同脉岩组之间很难相互演化。结合近年来有关岩浆过程速率的研究成果,推测这些脉岩是原生或近原生岩浆固结的产物。这意味着区域地温曲线在不同深度同时穿过所有相应原岩的固相线。基于岩浆起源热体制和区域岩石圈岩石学结构分析,笔者曾经指出,这样的岩浆产生条件要求造山带岩石圈拆沉作用。因此,这类岩墙群的形成是区域构造应力场由挤压向伸展转换阶段的产物,可以用来标定造山过程的结束,因而称其为造山后脉岩组合。进一步对比分析表明,这类脉岩组合分布非常普遍,是地球上业已发现的三类区域性岩墙群之一。尽管如此,基于热传递速率的分析,造山后脉岩组合的形成还应当伴随大规模流体活动。由于深部流体中成矿元素的浓度强烈依赖于压力,新的岩石成因模型意味着造山后脉岩组合与成矿作用相伴生。野外检验表明,可以基于露头观察识别成矿流体的通道和成矿元素大规模堆积的场所。因此,造山后脉岩组合不仅可以用来标定区域造山过程结束的时间,也是区域找矿预测的有效标志。

关键词:造山带;岩墙群;热体制;岩石圈拆沉作用;成矿作用;透岩浆流体

中图分类号:P588.13;P611.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2008)04-0001-12

岩墙是以高角度切割围岩层理或叶理的板状或席状岩浆侵入体^[1],常常成群产出。传统上,这是一些极不引人注目的地质体,除非其规模达到相当的程度,区域地质调查时一般也不会以夸大的形式表达在地质图上。然而,岩墙的地质意义是十分重要的,被认为是岩浆上升侵位的最可能通道^[2]。最引人注目的是与大陆裂解有关的岩墙群,其侵位被认为标志着大规模伸展作用,是威尔逊旋回开始的岩浆记录^[3]。近年来,造山带大规模花岗质岩浆活动发生之后产生的岩墙群也逐渐引起地质学家的关注^[4-5],被称为岩基后岩墙群^[6]、造山后脉岩组合^[7]或造山后双峰式岩墙群^[8],被认为是区域应力场由挤压向伸展转换过程中的产物^[7-8]。罗照华等(2006)对太行山和东昆仑造山带花岗质岩基中的岩脉进行了分析对比,提出这类岩脉的成因与造山带岩石圈拆沉作用有关,是造山过程结束的标志^[7]。这种认识在中国受到强烈质疑,本文试图利用更广泛范围的资料来进行检验,进一步限定造山后脉岩组合的构造意义。

另一方面,岩墙也常常与内生成矿作用相伴生,可能是揭开内生成矿之谜的关键所在。内生金属成

矿作用是地球上最复杂的地质过程之一,如何理解岩浆过程与成矿作用的关系、建立成矿作用标型特征并将其应用于找矿预测是矿床学家长期梦寐以求的理想。大量的观察事实表明,成矿作用必不可少的要素之一是大规模流体活动,而地质流体的活动性决定了它是一种很难再造其活动历史的研究对象,这在很大程度上决定了成矿作用研究的难度。为此,我们引入了科尔任斯基提出的透岩浆流体假说^[9],拓展了佐托夫有关透岩浆流体成矿作用的研究成果^[10],基于野外地质观察和理论分析,试图将透岩浆流体的成矿作用意义扩展到整个内生金属矿床研究领域^[11]。根据发展了的透岩浆流体成矿作用理论,大的流体/岩浆体积比是成矿作用的有利因素,这与汤中立等^[12]的论述一致。但是,如何建立区域成矿预测的宏观标志依然是新理论面临的重大挑战。由于岩墙群也属于小体积火成岩体,但分布范围很广,如果能够证明造山后脉岩组合的产生需要大规模流体参与,造山后脉岩组合就应当是有利的宏观找矿标志。

因此,造山后脉岩组合不仅有明确的构造含义,而且可能有助于区域找矿预测。

1 造山后脉岩组合问题

地球上出露有三类极为重要的区域性岩墙群: 与大陆裂解有关的岩墙群^[13-16]、与溢流玄武岩有关的岩墙群^[17-19]和与岩基带有关的岩墙群^[6-8]。早在20世纪50年代末, 已故池际尚教授带领原北京地质学院(现中国地质大学)师生在八达岭地区进行地质调查时, 就注意到这类脉岩的特殊性, 并填出了据我们所知的中国第一幅区域性脉岩分布图。但是, 对脉岩组合的成因没有给出合理的解释。目前, 多数研究者仍然认为其与大陆裂解有关的岩墙群具有同样的意义^[20], 认为是区域岩石圈伸展过程的产物。

罗照华等^[7]和 M. M. El-Sayed^[8]首先注意到这类岩墙群可能是区域构造应力场从挤压向伸展转换的产物, 因而可以用来标定造山过程的结束^①。但是, M. M. El-Sayed 将这类脉岩划分成镁铁质(包括玄武质、玄武安山质和安山质)和长英质(包括英安质、流纹英安质和流纹质)脉岩^[8], 认为它们分别是两种不同的原生岩浆经分离结晶的产物。我们注意到, 这类脉岩组合具有近同时形成、宽成分谱系和小体积的特点^[7]。例如, Colorado 高原上的 San Rafael 地区 2 000 多条岩墙(形成于 3.7~4.6 Ma)的统计表明, 其宽度的对数正态分布平均值为 0.85 m, 大多数小于 2 m, 最宽可达 6 m^[21]。NW Sinai 岩墙群的 SiO₂ 质量分数变化范围为 48%~75%, 西准噶尔为 51%~71%, S. Israel 为 49%~78%, 东昆仑为 42%~73%, 太行山—燕山地区为 40%~77%。由此, 可以导出三个重要的议题: (1) 岩浆冷却将相当快, 因而几乎不太可能发生我们通常认为已经熟悉的岩浆作用过程, 岩石成分可能接近于原生岩浆; (2) 岩浆需要以极快的速度上升, 这表明岩墙侵位时处于区域伸展环境; (3) 岩石圈-软流圈系统至少有两个深度位置(地幔和地壳)近同时发生了部分熔融。这种特点决定了其成因研究的难度, 因而长期以来仅有其中的某些岩石类型得到了较详细的研究, 如煌斑岩^[22-23]、辉绿岩^[24-25]。由这些研究针对单个岩石类型提出的成因模型似乎都是合理的, 但同时考虑所有脉岩类型的形成机制时则存在重大的缺陷。

如图 1 所示, 昆仑山和太行山的造山后脉岩组合可以划分成煌斑岩质、玄武质、闪长质、花岗闪长

质和花岗质脉岩等 5 组^[7], 每一组脉岩都有自己独特的成分变异趋势(投点较密集的方向)。作为对比, 将西准噶尔、南以色列、西北西奈等地的这类岩墙成分投在图 1 上, 它们也具有类似的特征。这表明, 尽管同组脉岩岩浆之间可能存在演化关系, 但组与组之间不能识别出任何合理的演化路径。这暗示区域中同时存在几种毫不相关的原生岩浆, 是多源区同时发生部分熔融的重要证据^[7]。某些研究者对这种观点提出强烈质疑, 认为岩浆在深部或上升过程中有可能遭受重大改造。这实际上涉及两个范畴的问题: 成分交换速率和热交换速率, 后者将在下一节详细讨论, 本节主要讨论成分交换速率的问题。

传统岩石学一般认为源区岩石的部分熔融发生在地下某一深度范围, 熔浆与熔融残留保持化学平衡, 这样的岩浆称为原生岩浆。如果将该深度范围缩小为一个点, 通常我们会说岩浆起源于某一具体的深度, 因而可以将原生岩浆视作为“点岩浆”。然而, 在岩浆形成过程中, 受热的源区岩石将会因体积膨胀而获得浮力, 因而部分熔融过程实际上是在源区上升过程中发生的, 直至岩浆分凝^[31]。从源区岩石开始部分熔融到熔浆与源区最后分凝这个柱形区域被称为熔融柱^[32], 可以将熔融柱中形成的岩浆称为熔融柱岩浆。显然, 按照熔融柱假说, 由于固体/液体分配系数随压力的改变, 同样化学组成的原岩在不同深度范围内形成的熔浆将具有不同的化学性质, 熔融柱穿过相变界面时尤其如此。因此, 分凝岩浆的均一性将取决于其上升之前的均一化过程, 与熔浆中组分的扩散速率和机械混合效率有关。如果岩浆在均一化之前就快速上升并固结成岩, 出露在地表的岩石将记录其原始的不均一性^[33], 因而可以据其识别部分熔融过程。反之, 如果岩浆的均一化在深部已经完成, 地表样品只是源区岩石部分熔融的最终记录。由于岩浆在源区的结晶作用可以看作部分熔融的逆过程, 不会改变残余岩浆与源区岩石的平衡关系, 这样形成的残余岩浆仍可视为原生岩浆。

原生岩浆在上升的过程中有可能因通道两侧围岩的混染而改变其组成, 同时发生分离结晶作用

① Luo Z H, Zhang M. How to mark the ending of an orogenic cycle. In: Collection of abstracts of "International symposium on crustal evolution and geoenvironment in Northeast Asia", Beijing, China, 2007.

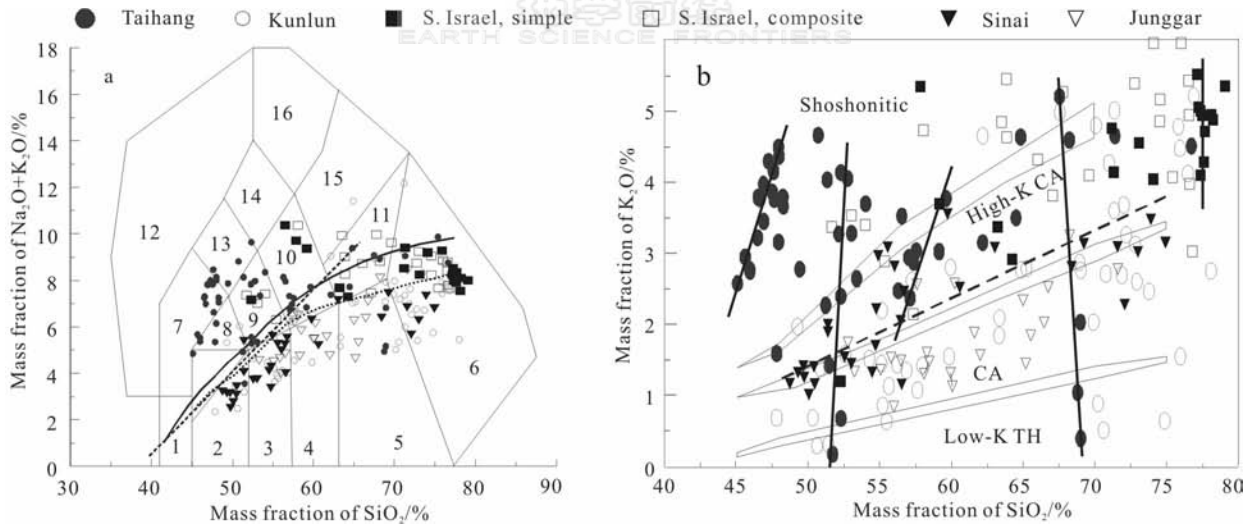


图1 造山后脉岩组合的岩石类型和演化系列
(据文献[7]修改)

Fig. 1 The rock types and series of the post-orogenic dike complexes

a: 1—橄辉长岩; 2—辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—副长石辉长岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—副长石岩; 13—副长石二长闪长岩; 14—副长石二长正长岩; 15—正长岩; 16—副长石正长岩 (原图据[26])。b: Low-K TH—低钾拉斑玄武系列; CA—钙碱性系列; High-K CA—高钾钙碱性系列; Shoshonitic—钾玄岩系列 (原图据[27])。数据来源: 东昆仑和太行山据[7]; S. Israel 据[28]; NW Sinai 据[8]; 西准噶尔据[20, 29-30]

(AFC 过程)。然而, 如果岩浆的上升侵位是一个连续的过程, 岩浆演化趋势应当指向同一个原始岩浆。由图 2 可见, 在以 SiO_2 为横坐标的哈克型图解中, CaO 、 MgO 、 TFeO 含量随 SiO_2 下降, 在中基性岩部分似乎意味着橄榄石和辉石的分离结晶作用, 在中酸性岩部分则可能受控于角闪石和黑云母。但是, 这种假想的分离结晶过程并没有导致相应的 Al_2O_3 、 Na_2O 、 TiO_2 含量变化。例如, 在中基性岩部分, 由于 MgO 的变化梯度明显大于 CaO 和 TFeO , 很容易联想到富钙辉石+镁质橄榄石+贫钙辉石的分离结晶。这样的过程必然导致残余熔浆中 Al_2O_3 的快速增加, 图 2 中西奈脉岩的 Al_2O_3 含量无明显变化趋势, 南以色列和西准噶尔脉岩的 Al_2O_3 随 SiO_2 增加而下降, 显然不符合这样的猜想。在以 $\text{Mg}^\#$ 为横坐标的变异图解(图 3)上, 也没有显示 AFC 过程的重要意义。例如, NW Sinai 岩墙群按 TiO_2 含量可以分成三群, 没有证据表明它们之间为演化关系。特别需要注意的是 K_2O (图 1) 和 Na_2O (图 2、3) 的含量变化, 似乎主要受流体的作用有关, 没有哪一种造岩矿物或矿物组合可以造成这样的成分变异趋势。可见, 当考虑矿物学约束时, 无论是东昆仑和太行山—燕山地区还是世界其他地区, 造山后脉岩组合的成分变异特征都不能由 AFC 模型得到解释。

实际上, 即使同组脉岩之间也未必具有派生关

系。传统岩石学一般假设火成岩的多样性仅仅是岩浆形成以后成分变异的结果, 包括岩浆分异、岩浆混合和同化混染^[34]。特别是 AFC 模型发表以后, 分离结晶作用和同化混染作用被广泛应用于对火成岩套成分变异的解释。然而, 这种解释并不是唯一的, 因为源区成分、部分熔融程度和熔融条件也同样对熔浆成分具有重要的控制^[35]。值得注意的是, AFC 模型的支持者大多利用微量元素和同位素作为主要证据, 这在缺乏流体活动的条件下可能是成立的。当区域存在大规模流体活动时, 由于不相容元素的大量额外加入或流失, 基于 AFC 模型的结论未必可靠。

2 造山后脉岩组合成因的热体制

基于成分变化的成因研究的一个严重不足是对物理过程的忽视。自从鲍文《火成岩演化》一书问世以来, 岩石成因研究大多限于分离结晶作用的理论框架。虽然分离结晶作用本身也涉及物理过程, 但实际研究中大多数还是偏重岩石成因的化学过程。对物理过程的忽视导致一些物理学上不可能的地质过程频繁地出现在地质文献中。例如, 目前世界范围内文献中广泛出现有关岩石圈地幔部分熔融的论述。然而, 岩石圈与软流圈的分界是基于热学和/或

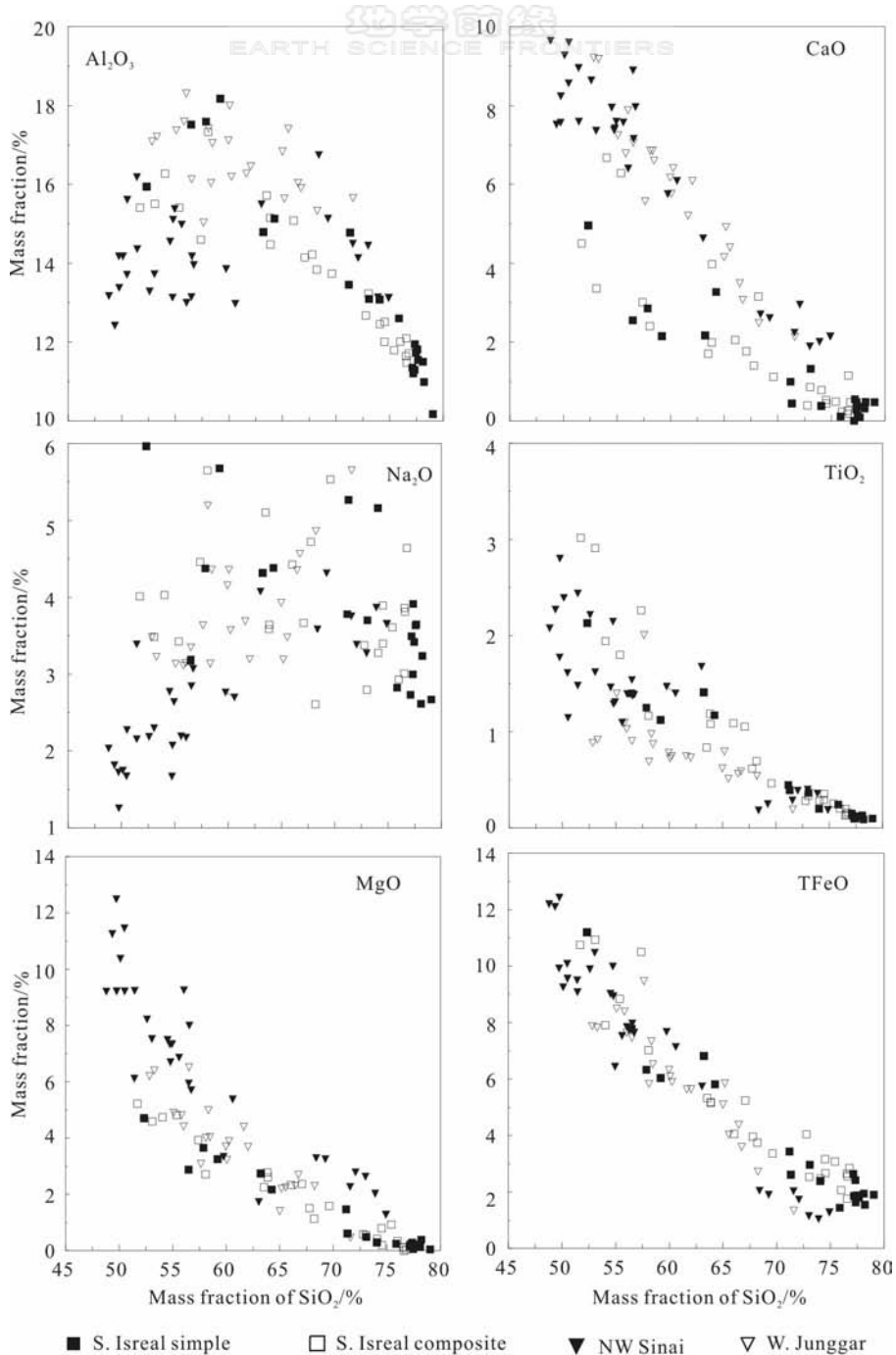


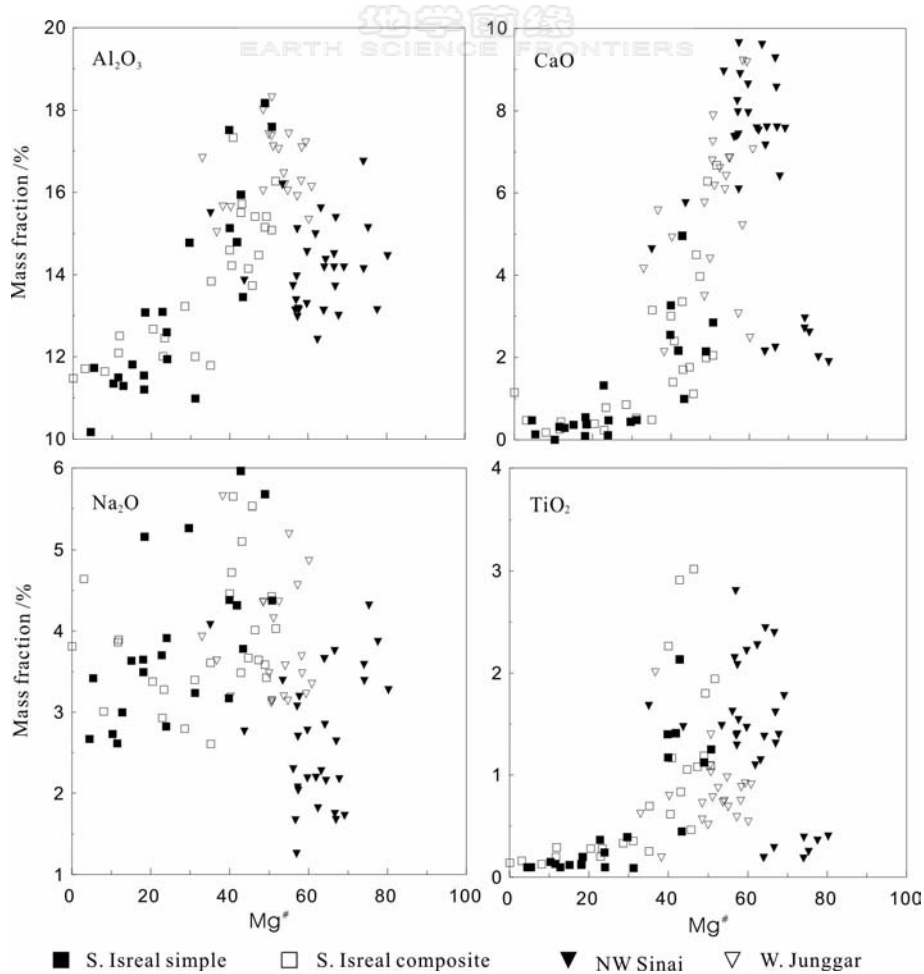
图2 氧化物-SiO₂ 变异图解
(数据来源见图1)

Fig. 2 Variation of oxides versus SiO₂

力学的基本原理, 岩石圈底部被加热远未达到固相线温度之前就已经变成为软流圈的一部分。因此, 即使这部分被转换成软流圈的岩石圈地幔物质发生了部分熔融, 也不应当理解为真正岩石圈地幔的部分熔融。又如, 尽管 AFC 模型是基于镁铁质岩石提出来的, 在花岗质岩石研究中却同样得到了广泛的应用。然而, 花岗质岩浆的结晶温度区间和液相线

矿物与熔浆的密度差很小, 与镁铁质岩浆形成鲜明对照。这暗示花岗质岩浆中晶出的矿物很难从熔浆中分离出去, 大多数情况下花岗质岩浆可能不会发生分离结晶作用^[35-37]。这表明, 岩石成因研究中是不能忽视物理过程的。

20 世纪 90 年代以来, 对岩浆活动的物理过程给予了极大的重视。结果, 传统岩石学假说遭受到

图3 氧化物-Mg[#] 变异图解

(数据来源见图1)

Fig. 3 Variation of oxides versus Mg[#]

$$\text{Mg}^{\#} = 100 \times \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{TFe}^{2+})$$

严峻的挑战。例如,传统岩石学和地球化学认为花岗质岩浆活动是一种缓慢的平衡过程,要求数百万年时间才能完成。近年来,数月至数百年时间尺度的动力学模型正在取代曾经流行的花岗质岩浆成因观点^[2]。此外,熔融柱假说也正在逐步取代传统的“点岩浆”概念^[31]。这意味着,岩浆活动可能在多数情况下是不平衡过程,许多传统的解释必须重新审视。

将这些火成岩成因研究新进展用于解释造山后脉岩组合的成因,得出所有脉岩都是原生岩浆或近原生岩浆固结产物的结论^[7]。因为:(1)岩脉的宽度很小,岩浆侵位以后的快速冷却将使成分变异过程难以发生^[2]; (2)小体积的岩脉所含热量有限,上升过程中不可能与围岩发生显著的热交换,否则就会在深部固结成岩; (3)许多脉岩中可见基本上没有溶蚀或溶蚀程度不大的捕虏体,是同化混染作用不显

著的直接证据^[19]; (4)大多数复合脉岩不同岩石类型之间界面清晰,表明岩浆混合作用也不显著(图4); (5)许多脉岩中可见气孔状构造,表明岩浆侵位之前流体损失不大,而侵位后流体可以从岩浆中逸出则说明岩浆粘度较小,因而岩浆没有在上升过程中大量丧失热量。扩散模拟表明,岩浆从地幔迁移到地壳浅部的时间只需要数小时到约100年,远小于岩浆分异、同化混染、部分熔融等过程的时间^[38]。暗示岩浆在上升过程中改变成分的几率很小。另一方面,如果岩浆在深部(如边缘岩浆房)停留时间较长,就有可能与围岩取得化学平衡,因而其成分将与形成于该深度水平上的岩浆趋于相同。这时,就不应当再将它看作另一种岩浆演化的产物。复式岩脉的研究表明,即使成分反差很大的玄武质岩浆与花岗质岩浆组合在一起,也很少导致成分交换^[28](图3)或非常有限,表明这类脉岩的确是非常快速

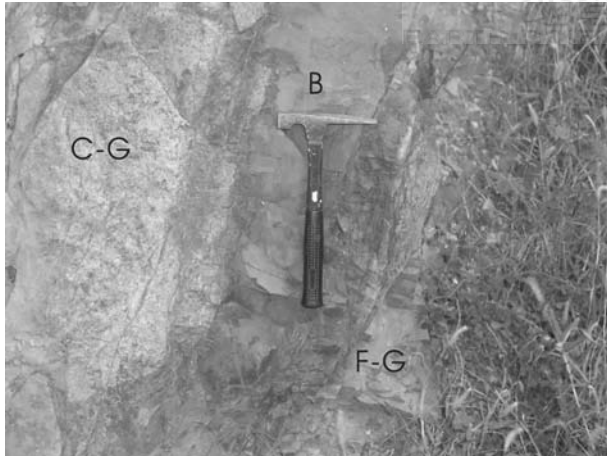


图4 北京南口岩体中的复合脉岩

Fig. 4 An example of the composite dike from the Nankou intrusion, Beijing

C—G—粗粒花岗岩; 复合岩墙中的: F—G—细粒花岗岩; B—玄武质岩石

形成的。因此,图 1~3 表现的脉岩组之间的成分不相关,充分证明脉岩成分多样性主要取决于岩浆起源而不是岩浆演化。有鉴于此,我们仍然坚持造山后脉岩组合是原生或近原生岩浆固结的产物。

如果是这样,就需要多个源区近同时发生部分

熔融形成少量岩浆^[7],这意味着区域地温曲线近同时跨过了位于相应圈层的源区岩石固相线(图 5)。但是,相应深度水平上的地温不能比源区岩石固相线温度高出太多,否则就意味着较大规模的熔融事件,岩浆产物将不再是脉岩。这种设想可以用东昆仑造山带的详细岩石圈结构进行检验。简单一维线性热模拟表明,只有在具有增厚镁铁质下地壳的岩石圈发生拆沉作用时才能达到这样严格的熔融条件^[7]。如图 5 所示,在发生岩石圈拆沉作用的条件下,如果岩石圈-软流圈系统立即达到热平衡,将有 8 个部位可能产生岩浆,岩浆成分分别对应于相应的原岩成分和熔融条件。可见,该模型的确可以解释造山后脉岩组合的成分复杂性,至少是一种较好的选择。观察表明,许多造山后脉岩组合都具有埃达克质岩石的地球化学特征,说明源区有榴辉岩相镁铁质岩石的存在^[39]。也就是说,造山后脉岩组合中存在由不同深度相镁铁质源区岩石部分熔融形成的长英质岩石。同样,镁铁质岩石也可以有不同的来源。例如, J. H. Scarrow 等对南极大陆边缘岩基中的镁铁质岩墙做了详细研究,识别出至少 5 种明

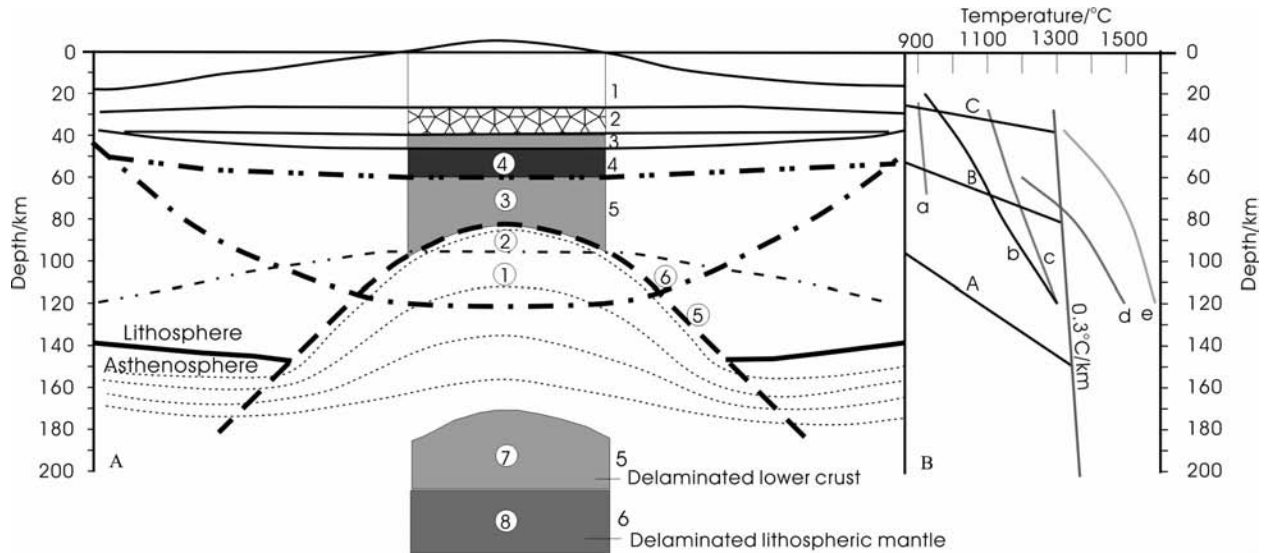


图5 造山带岩石圈拆沉作用示意图(示造山后脉岩组合成因)

Fig. 5 A model for delamination of orogenic lithosphere (Showing petrogenesis of the post-orogenic complex)

A 图: 岩石圈结构剖面(以东昆仑为例,据邓晋福等(1995)修改^[43]),虚线为可能的拆沉作用范围;点划线为岩石圈冷却之前的莫霍面;双点划线为岩石圈冷却之后的莫霍面;点线为拆沉作用之后软流圈窗等温线;双点划线为推测的 Sp/Gt 橄榄岩相变界线。1—沉积盖层,绿片岩相变粒岩、片岩、花岗闪长岩;2—角闪岩相花岗质片麻岩与糜棱岩;3—中性含黑云母中压麻粒岩;4—中性高压麻粒岩;5—辉长岩—基性麻粒岩—基性榴辉岩;6—岩石圈地幔橄辉岩;①—减压熔融形成辉绿岩质岩浆;②—减压熔融形成煌斑岩质岩浆;③—由于地温升高形成埃达克质岩浆;④—由于地温升高形成花岗质岩浆;⑤—接触加热形成辉绿岩质岩浆;⑥—接触加热形成埃达克质岩浆;⑦—受热熔融形成埃达克质岩浆;⑧—受热熔融形成玄武质岩浆。B 图: A—岩石圈厚度为 150 km 时地温曲线; B—岩石圈厚度为 82 km 时地温曲线; C—岩石圈厚度为 42 km 时地温曲线; a—英云闪长岩脱水熔融曲线(据 Patino-Douce, 2005)^[44]; b—饱和水橄辉岩固相线(据 Asimow 等, 2004)^[45]; c—干玄武岩固相线(据 Thompson, 1975, 转引自 Leeman 和 Harry, 1993)^[46]; d—含 $300 \times 10^{-6} \text{H}_2\text{O}$ 橄辉岩固相线(据 Asimow 等, 2004)^[45]; e—干橄辉岩固相线(据 Asimow 等, 2004)^[45]

显不同的地幔源区^[24]。看来,我们提出的造山后脉岩组合成因模型是可以得到检验的。

进一步,镁铁质加厚下地壳的形成要求有造山环境,幔源岩浆的底侵作用势必造成大规模花岗质岩浆活动。以太行山为例,含暗色微粒包体的花岗质岩石广泛分布、壳源岩浆起源深度随时间加深以及矿物冷却年龄的系统变化^[40],暗示太行山曾经发生板内造山作用^[22, 41]。房山岩体的成因研究证明了这种观点,并指出太行山的隆升是同岩基的^[42]。造山后脉岩组合侵位于这些岩基中,且此后区域不再有大规模岩浆活动和挤压构造变形,因而脉岩组合可以用来标定区域造山过程的结束和伸展过程的开始^[47]。

3 成矿作用与脉岩组合的关系

上述岩石成因模型似乎较好地解释了造山后脉岩组合的成因。但是,传热速率的问题依然是接受该成因模型的障碍。研究表明,原岩递进加热至部分熔融所需要的时间尺度比岩浆迁移和侵位大得多^[48],因而岩石圈拆沉作用及由此导致的软流圈顶界上升触发相应深度水平的部分熔融并不是必然的结果。必须有比热传导更有效的传热方式才能解释

不同原岩类型的部分熔融。

众所周知,在固体地球的三种热传递形式中,物流(advection^①)是最有效的。当深部流体而不是熔浆或固体参与传热时,高效的热量传递是有可能的。野外观察表明,许多脉岩中保留了气孔状构造(图6a),脉岩的侵位可以导致比其出露宽度大得多的围岩蚀变(图6b)。这表明,脉岩岩浆是携带有大量流体的。由于硅酸盐熔浆中流体的溶解度一般非常有限^[49-50],必然要求有一个独立的流体系统伴随着岩浆活动^[11]。然而,流体中成矿元素的浓度强烈依赖于压力的变化,深部流体的快速上升有可能导致地壳浅部的成矿作用。如果这种推论是正确的,那么造山后脉岩组合就应当是一种对区域找矿非常有益的宏观指示标志。反过来说,脉岩组合是否伴随着成矿作用也是检验上述岩石成因模型的重要依据。

野外观察证实了我们的推论。在新疆阿拉套山,由于区域地质调查过程中准确表达了脉岩的空间分布以及可以直接观察流体运动的轨迹,陈必河等对成矿作用发生的位置作了有效的预测,已为矿产勘查工作所证明(另文发表)。新疆西准噶尔克拉玛依西南的包古图斑岩铜矿床也是这样。包古图斑岩铜矿是近几年发现的一个中型矿床,其中V号岩体出露面积约0.84 km²,被认为是主要赋矿岩

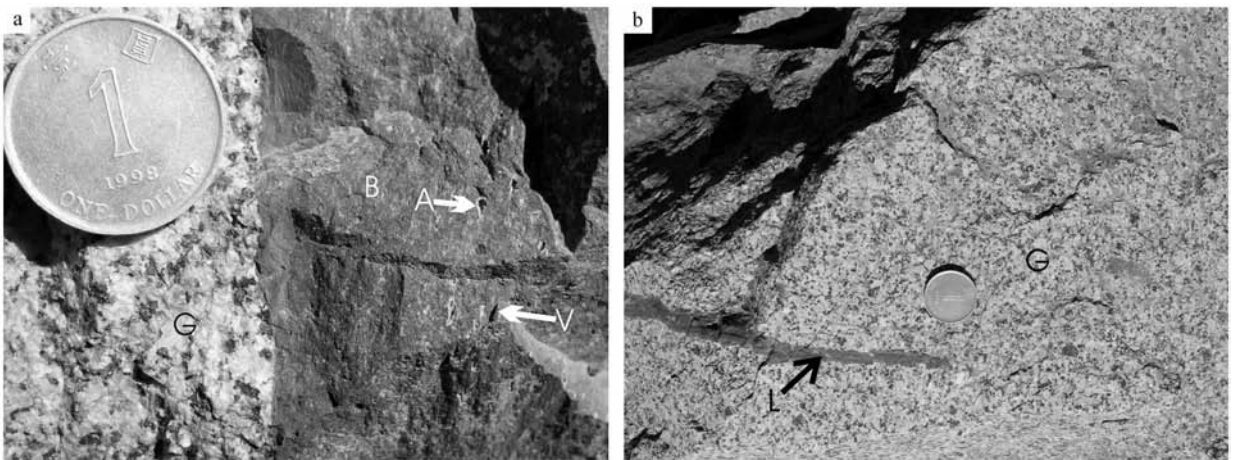


图6 新疆阿拉套山岩墙群中流体活动的证据

Fig. 6 The field evidences of the fluid flow in the dikes of the Alatao range, Xinjiang
a—玄武质岩墙中的气孔状构造; B—玄武质岩墙, A—杏仁体, V—气孔, G—寄主花岗岩;
b—微型煌斑岩脉导致的围岩蚀变; L—煌斑岩细脉。硬币直径 2.5 cm

① 中文文献中一般沿用大气用语译作平流,我们认为在传热学中这样翻译不妥。在传热学中,其实际含义是由于物质运动导致的热量传递方式,与对流(convection)的概念有某些类似之处,但 advection 更强调因物质运动而将热量由体系传递给环境。由于地球内动力系统中物质运动的形式多种多样,且常常是垂直方向的,我们建议将这种传热方式译成物流,以避免将 advection 歧义为热能的水平传递。

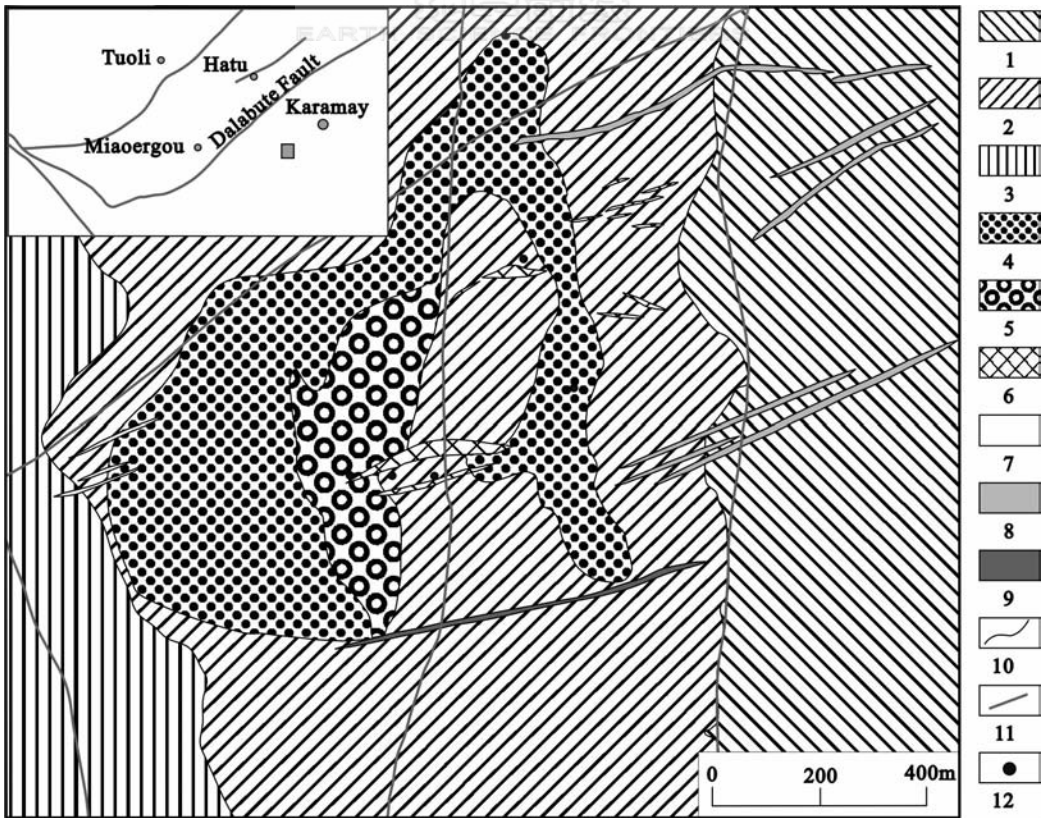


图7 包古图斑岩铜矿V号岩体矿床地质略图
(据宋会侠等, 2007, 修改)

Fig. 7 The sketch map of the Baogutu porphyry copper deposit

1—包古图上亚组; 2—包古图下亚组; 3—希贝库拉斯上亚组; 4—花岗闪长岩; 5—花岗闪长斑岩; 6—金矿体; 7—铜/金矿体; 8—闪长玢岩; 9—花岗斑岩; 10—地质界线; 11—断层; 12—钻孔

体^[51]。实际情况并非完全如此, 矿化也常常与脉岩有关(图7)。早在1993年, 齐进英等就对该区岩墙群进行了系统研究, 92个样品统计分析区分出闪长玢岩、石英闪长玢岩、二长闪长玢岩、石英二长闪长玢岩、花岗闪长斑岩和二长斑岩等6种岩石类型^[29]。在包古图以北, 李辛子等报道了中基性岩墙群的地球化学特征, 相当于造山后脉岩组合的中基性部分^[20]。2007年野外工作期间, 我们也观察到了辉绿岩脉。此外, 斑岩体本身也可以归属为体积较大、岩浆较粘稠、形态不规则的“脉岩”, 张连昌等报道了其化学特征^[30]。将前人数据投在图1上, 西准噶尔的岩墙群包括玄武质、玄武安山质、安山质、英安质和流纹质等岩石类型。因此, 西准噶尔地区出露的脉岩类成分上也相当于我们定义的造山后脉岩组合, 是该区晚古生代造山过程结束的标志, 因而也应当伴随成矿作用。

由图7可见, V号岩体内部及其附近至少有花岗斑岩和闪长玢岩等两种脉岩。除了斑岩体本身的

全岩铜金矿化之外, 附近的脉岩也具有矿化的特点, 矿化类型为细脉浸染状。根据钻孔资料, 岩体矿化向下逐渐增强^[51]。这种特征表明斑岩、岩脉和矿化都是近同时发生的。因此, 造山后脉岩组合的确与该区的成矿作用有关, 是区域找矿预测的有效标志。成矿物质主要赋存在斑岩体内的主要原因可能是因为其体积略大于岩墙, 有利于成矿物质的聚集。但是, 斑岩体又有别于岩基, 其表层冷却较快, 有助于将成矿流体封存在岩体之内。而岩墙则不同, 由于冷却较快, 推动岩浆上升侵位的成矿流体很难大规模进入脉岩中, 或者在脉岩岩浆固结过程中逸出了。如果这种推论是正确的, 根据透岩浆流体成矿理论^[11], 区内其他斑岩可能也是有利的赋矿岩体, 在矿产勘查过程中应当引起重视。

值得注意的是, 无论是包古图斑岩^[30]还是岩墙群^[20], 相当一部分岩石都具有埃达克岩的特征。基于区域地质发展史分析, 这类岩石应当是榴辉岩相镁铁质加厚下地壳部分熔融的产物, 这与我们此前

得出的结论是一致的^[7]。由此可见,岩墙群的形成确实需要有一个造山型岩石圈,特别是高密度的镁铁质加厚下地壳。看来,有关造山后脉岩组合的成因模型(图5)具有普遍意义。

4 结论

综上所述,造山后脉岩组合与大陆裂解相关的岩墙群具有完全不同的特点。其近同时形成、宽广的成分变化范围和明显小的岩浆体积不能由简单的岩石成因模型得到解释,而要求有特殊的地球动力学过程,这就是造山型岩石圈及其拆沉作用和大规模流体活动。基于热体制分析和透岩浆流体成矿理论,造山后脉岩组合不仅可以用来标定区域造山过程的结束,而且可以作为有效的宏观找矿标志。

References:

- [1] Suppe J. Principles of structural geology[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1985: 1-537.
- [2] Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust[J]. Nature, 2000, 408(7): 669-673.
- [3] Condie K C. Plate tectonics and crustal evolution[M]. Butterworth; Heinemann, 1997: 1-282.
- [4] Jiang Y H, Jiang S Y, Zhao K D. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dykes, Southeast China; implications for a back-arc extension setting[J]. Geol Mag, 2006, 143: 457-474.
- [5] Dini A, Innocenti F, Rocchi S, et al. The magmatic evolution of the late Miocene laccolith-pluton-dyke granitic complex of Elba Island, Italy[J]. Geol Mag, 2002, 139(3): 257-279.
- [6] Allen C M. Evolution of a post-batholith dike swarm in central coastal Queensland, Australia: arc-front to backarc[J]? Lithos, 2000, 51: 331-349.
- [7] Luo Z H, Wei Y, Xin H T, et al. Petrogenesis of the post-orogenic dike complex—constraints to lithosphere delamination [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (6): 1672-1684 (in Chinese).
- [8] El-Sayed M M. Geochemistry and petrogenesis of the post-orogenic bimodal dyke swarms in NW Sinai, Egypt; constraints on the magmatic-tectonic processes during the late Precambrian[J]. Chemie der Erde, 2006, 66: 129-141.
- [9] Коржинский Д. С. Гранитизация как магматическое замещение [J]. Москва: Изв АН СССР, Сер Геол, 1952, (4): 56-69.
- [10] Зотов И. А. Трансмагматические флюиды в магматизме и рудообразовании[M]. Москва: Наука, 1989: 1-214.
- [11] Luo Z H, Mo X X, Lu X X, et al. Metallogeny by transmagmatic fluids—theoretical analysis and field evidence[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 165-183(in Chinese).
- [12] Tang Z L, Li X H. Small intrusions forming large deposits in two types of magma[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(Suppl): 35-38(in Chinese).
- [13] Lu S N, Jiang M M. Mantle plumes and giant radiating dyke swarms[J]. Geological Survey and Research, 2003, 26(3): 136-144(in Chinese).
- [14] Condie K C. Sources of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios[J]. Precambrian Research, 1997, 81: 3-14.
- [15] Hou G T, Wang C C, Li J H, et al. Late Paleoproterozoic extension and a paleostress field reconstruction of the North China Craton[J]. Tectonophysics, 2006, 422: 89-98.
- [16] Hou G T, Li J H, Yang M H, et al. Geochemical constraints on the tectonic environment of the Late Paleoproterozoic mafic dyke swarms in the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2008, 13: 103-116.
- [17] Chandrasekharam D, Vaselli O, Sheth H C, et al. Petrogenetic significance of ferro-enstatite orthopyroxene in basaltic dikes from the Tapi rift, Deccan flood basalt province, India [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 179: 469-476.
- [18] Momme P, Wilson J R. The Kraemer Island macrodyke, East Greenland: solidification of a flood basalt conduit[J]. Geol Mag, 2002, 139(2): 171-190.
- [19] Mege D, Korme T. Dyke swarm emplacement in the Ethiopian Large Igneous Province: not only a matter of stress[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 132: 283-310.
- [20] Li X Z, Han B F, Ji J Q, et al. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarm from Xinjiang, China[J]. Geochimica, 2004, 33(6): 574-584 (in Chinese).
- [21] Delaney P T, Gartner A E. Physical processes of shallow mafic dike emplacement near the San Rafael Swell, Utah[J]. GSA Bulletin, 1997, 109(9): 1177-1192.
- [22] Luo Z H, Deng J F, Han X Q. On characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-124(in Chinese).
- [23] Chen B, Zhai M G. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle[J]. Geol Mag, 2003, 140(1): 87-93.
- [24] Scarrow J H, Leat P T, Wareham C D, et al. Geochemistry of mafic dykes in the Antarctic Peninsula continental-margin batholith: a record of arc evolution[J]. Contrib Mineral Petrol, 1998, 131: 289-305.
- [25] Yang J H, Chung S L, Zhai M G, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong

- Peninsula, China: evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle[J]. *Lithos*, 2004, 73: 145-160.
- [26] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3-4): 215-224.
- [27] Rollinson H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[M]. New York: Longman Scientific & Technical Limited, 1993: 1-352.
- [28] Katzir Y, Litvinovsky B A, Jahn M B, et al. Interrelations between coeval mafic and A-type silicic magmas from composite dykes in a bimodal suite of southern Israel, northernmost Arabian-Nubian Shield: Geochemical and isotope constraints [J]. *Lithos*, 2007, 97: 336-364.
- [29] Qi J Y. Geology and genesis of vein rock group in western Zhunggar, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9 (3): 288-299(in Chinese).
- [30] Zhang L C, Wan B, Jiao X J, et al. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 626-631(in Chinese).
- [31] Niu Y L. Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(12): 2423-2458.
- [32] Langmuir C H, Klein E M, Plank T. Petrological systematics of mid-ocean ridge basalts: constraints on melt generation beneath ocean ridges[M]//Morgan J P, Blackman D K, Sinton J M. Mantle flow and melt generation at mid-ocean ridges. AGU Geophys Monogr, 1992, 71: 183-280.
- [33] Xue Y X, Zhu Y F. Genesis of the siderite in Jurassic olivine basalt, Karamay, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 1108-1122.
- [34] Wilson M. Magmatic differentiation[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1993, 150: 611-624.
- [35] Luo Z H, Huang Z M, Ke S. An overview of granitoid[J]. *Geological Review*, 2007, 53(Suppl): 180-226(in Chinese).
- [36] Zhang Q, Pan G Q, Li C D, et al. Does fractional crystallization occur in granitic magma? Some crucial questions on granite study (2) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (6): 1239-1251(in Chinese).
- [37] Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217-1238(in Chinese).
- [38] Turner S, Costa F. Measuring timescales of magmatic evolution[J]. *Elements*, 2007, 3: 267-272.
- [39] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144-146.
- [40] Luo Z H, Deng J F, Li Y W, et al. Interpretation of K-Ar ages of Taihang tectonomagmatic belt[J]. *Geoscience*, 1996, 10(3): 344-349(in Chinese).
- [41] Luo Z H, Deng J F, Zhao G C, et al. Characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(3): 279-284(in Chinese).
- [42] Qin F, Xu X X, Luo Z H. Mixing and mingling in petrogenesis of the Fangshan intrusion, Beijing [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(12): 2957-2970(in Chinese).
- [43] Deng J F, Wu Z X, Yang J J, et al. Crust-mantle petrological structure and deep processes along the Golmud-EjinaQi geoscience section [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1995, 38 (Suppl 2): 130-144(in Chinese).
- [44] Patino-Douce A E. Vapor-absent melting of tonalite at 15-32 kbar[J]. *J Petrology*, 2005, 46(2): 275-290.
- [45] Asimow P D, Dixon J E, Langmuir C H. A hydrous melting and fractionation model for mid-ocean ridge basalts: application to the Mid-Atlantic Ridge near the Azores[J]. *Geochemistry, Geophysics & Geosystems*, 2004, 5 (1): 1-24, Q01E16, doi: 10. 1029/2003GC000568.
- [46] Leeman W P, Harry D L. A binary source model for extension related magmatism in the Great Basin, Western North America[J]. *Science*, 1993, 262: 1550-1554.
- [47] Luo Z H, Wei Y, Xin H T, et al. The Mesozoic intraplate orogeny of the Taihang Mountains and the thinning of the continental lithosphere in North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 52-63(in Chinese).
- [48] Harris N, Vance D, Ayres M. From sediment to granite: timescales of anatexis in the upper crust[J]. *Chemical Geology*, 2000, 162: 155-167.
- [49] Johannes W, Holtz F. Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks[M]. New York: Springer-Verlag, 1996: 1-335.
- [50] Botcharnikov R E, Behrens H, Holtz F. Solubility and speciation of C-O-H fluids in andesitic melt at $T=1100\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $p=200$ and 500 MPa [J]. *Chemical Geology*, 2006, 229: 125-143.
- [51] Song H X, Liu Y L, Qu W J, et al. Geological characters of Baogutu porphyry copper deposit in Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (8): 1981-1988 (in Chinese).

参考文献:

- [7] 罗照华, 魏阳, 辛后田, 等. 造山后脉岩组合的岩石成因——对岩石圈拆沉作用的约束[J]. *岩石学报*, 2006, 22 (6): 1672-1684.
- [11] 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 等. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据[J]. *地学前缘*, 2007, 14(3): 165-183.
- [12] 汤中立, 李小虎. 两类岩浆的小岩体成大矿[J]. *矿床地质*, 2006, 25(增刊): 35-38.
- [13] 陆松年, 蒋明媚. 地幔柱与巨型放射状岩墙群[J]. *地质调查与研究*, 2003, 26(3): 136-14.

- [20] 李辛子,韩宝福,李建清,等. 新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和 K-Ar 年代学[J]. 地球化学,2004, 33(6): 574-584.
- [22] 罗照华,邓晋福,韩秀卿. 太行山造山带岩浆活动及其造山过程反演[M]. 北京:地质出版社,1999: 1-124.
- [29] 齐进英. 新疆准噶尔脉岩群地质及成因[J]. 岩石学报,1993, 9(3): 288-299.
- [30] 张连昌,万博,焦学军,等. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义[J]. 中国地质,2006, 33(3): 626-631.
- [35] 罗照华,黄忠敏,柯珊. 花岗质岩石的基本问题[J]. 地质论评,2007,53(增刊):180-226.
- [36] 张旗,潘国强,李承东,等. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二[J]. 岩石学报,2007,23(6): 1239-1251.
- [37] 吴福元,李献华,杨进辉,等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报,2007,23(6):1217-1238.
- [40] 罗照华,邓晋福,李玉文,等. 太行山构造岩浆带 K-Ar 法同位素年龄分析[J]. 现代地质,1996,10(3): 344-349.
- [41] 罗照华,邓晋福,赵国春,等. 太行山造山带岩浆活动特征及其造山过程反演[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1997, 22(3): 279-284.
- [42] 覃锋,徐晓霞,罗照华. 北京房山岩体形成过程中的岩浆混合作用证据[J]. 岩石学报,2006, 22(12): 2957-2970.
- [43] 邓晋福,吴宗絮,杨建军,等. 格尔木—额济纳旗地质断面走廊地壳-上地幔岩石学结构与深部过程[J]. 地球物理学报,1995,38(增刊2):130-144.
- [47] 罗照华,魏阳,辛后田,等. 太行山中生代板内造山作用与华北大陆岩石圈巨大减薄[J]. 地学前缘,2006,13(6): 52-63.
- [51] 宋会侠,刘玉琳,屈文俊,等. 新疆包古图斑岩铜矿矿床地质特征[J]. 岩石学报,2007, 23(8): 1981-1988.

《地学前缘》荣获“第六届百种中国杰出学术期刊”称号

《地学前缘》两篇文章荣获“第一届中国百篇最具影响优秀国内学术论文”称号:

(1)中国地质大学(北京)莫宣学教授文章《印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应》(发表于《地学前缘》2003,10(3):135-147)

(2)中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师梁狄刚文章《从塔里木盆地看中国海相生油问题》(发表于《地学前缘》2000,7(4):534-547)

《地学前缘》国际版已由爱思唯尔(Elsevier)公司出版,可在其在线平台上(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/18725791>)浏览、查阅、下载。