

# 造山带地球化学研究的理论构想与实践<sup>\*</sup>

张本仁

(中国地质大学地球化学研究所, 武汉 430074)

**摘要** 简要地评述了现今造山带地球化学研究的状况. 为适应造山带研究与大陆动力学接轨的需要, 讨论和提出了对大陆造山带开展系统性地球化学研究的理论构想及在造山带多学科研究中发挥地球化学专长和优势的技术路线; 并以近5年秦岭造山带研究的主要成果为例, 说明实践的效果.

**关键词** 造山带, 地壳化学结构, 壳幔相互作用, 化学地球动力学.

**中图分类号** P59

**作者简介** 张本仁, 男, 1929年生, 教授, 博士生导师, 1952年毕业于南京大学地质系, 1956年研究生毕业于北京地质学院, 长期从事矿区和成矿带地球化学、区域地球化学、造山带地球化学等研究.

## 0 引言

大陆造山带是不同板块岩石圈与壳/幔相互作用剧烈进行和集中的会聚带, 是研究大陆构造的重要对象. 90年代以来, 由于国际固体地球科学的研究前沿发生了由全球岩石圈向大陆动力学的战略转移, 大陆造山带已经成为探讨大陆动力学的重要窗口. 大陆造山带的研究已不像以往那样仅仅要求揭示造山带岩石圈的结构和演化, 而扩宽到探索大陆造山运动的动力学模型. 现代地球化学研究已经渗入到地球科学的各个领域, 并且已经广泛参与了大陆造山带研究, 成为多学科研究的不可缺少的一个兵种.

同位素年代学研究已成为造山带重大地质事件定年的重要途径. 通过蛇绿岩、火山岩、花岗岩、沉积岩和高压变质岩等形成构造环境的地球化学鉴别, 进而探索区域构造格局和构造演化的研究, 自70年代中以来就逐渐在大陆造山带研究中普及. 这两方面的研究至今仍是造山带地球化学研究的主要内容. 近20多年来, 由于地幔岩石包体研究及微量元素和同位素示踪岩浆岩源区技术和方法的迅速发展, 促进和深化了地幔和地壳组成和演化的研究. 通过开展全球和区域(包括中国大陆)的同位素填图,

在揭示地幔化学不均一性、地幔源区组分端元、地球化学省等方面已经取得了很有意义的成果. 随板块构造学说兴起而形成的壳幔相互作用和再循环的概念, 通过国际岩石圈计划的执行与美国大陆动力学国家计划的启动, 其内容和意义也在不断发展. 由板块会聚带(洋壳消减带)壳幔再循环的研究, 扩宽到大陆地壳基性岩浆底侵(underplating)、下地壳和岩石圈地幔拆沉(delamination)、地幔热柱等的探索; 使壳幔相互作用概念拓展到下地幔, 甚至幔-核过渡带, 旨在揭示大陆岩石圈板块的运动学与动力学, 并据此提出了化学地球动力学(chemical geodynamics)的构想<sup>[1,2]</sup>. 新意义上的壳幔相互作用概念已经构成现今全球和大陆动力学理论框架的核心. 地球化学在壳幔相互作用研究方面取得的新的认识、经验与成果, 已为深化大陆造山带的研究奠定了很好的基础.

然而, 从现今大陆造山带地球化学研究的状况, 尤其我国的状况看, 地球化学工作还远未能满足造山带多学科研究的要求, 现代地球化学的潜力尚未能充分发挥. 这主要表现为: (1) 造山带岩石圈三维结构地球化学研究仍属于薄弱环节, 甚至在地学断面研究中除岩石的同位素测年外, 其他地球化学工作还很少见及, 在这方面基本未能发挥地球化学研究应该而且能够做到的沟通地表地质研究与地球物理测深的桥梁作用. (2) 80年代以来发展起来的壳幔组成、壳幔演化和壳幔相互作用的微量元素和同

1999年1月10日收稿.

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(No. 49290102)资助.

位素地球化学示踪理论和方法,以及地球化学探讨地球动力学的思想,还很少系统地应用于大陆造山带的研究.这限制了地球化学发挥在探索和揭示造山带发展运动学和动力学方面的作用.(3)迄今造山带地球化学研究仍然是以重大地质事件的同位素年代学研究,以及鉴别蛇绿岩、火山岩、花岗岩、沉积岩等的构造属性为主流,而且还多为单岩类的专题性研究,很少多岩类的综合研究.研究岩浆和沉积作用特征和源区的地球化学理论和方法,在造山带构造研究中也未得到应有的重视与普遍运用.这种状况必然使地球化学研究基本处于为地质构造学研究提供证据的局面,而很难发挥地球化学在造山带构造研究方面的补充与启迪的作用.这并不有利于地质构造学与地球化学研究的相互补充和相互检验,从而最终不利于多学科研究优势的发挥.此外,有些岩石地球化学特征的构造环境意义是多解的,仅依据单一类型岩石的化学特征进行构造环境的判别,难免出现误判的可能.

上述问题的存在,原因是多方面的,但是缺乏能适应现代地球科学和地球化学发展水平的、有关造山带地球化学综合研究的理论构想和技术路线,不能不说是重要原因之一.下面将根据我们“七五”和“八五”期间在秦岭造山带开展系统综合地球化学研究的实际体会,简要地介绍我们对造山带地球化学研究的思路与技术路线,并配合一些实例,用以说明实践的效果.

## 1 造山带地球化学综合研究的理论构想

基于地球化学研究地球系统的化学组成、化学作用与化学演化的学科实质,以及地球化学系统的组成与状态制约着地球化学过程和元素行为的特征的基本认识<sup>[3]</sup>,我们在 1986 年开始执行地质矿产部“七五”计划中秦巴地区(东秦岭造山带)的地球化学研究时,将区域岩石圈(尽可能地考虑软流圈)视为地球系统的一个子系统,开展了区域岩石圈化学组成与热状态的初步研究<sup>[4~6]</sup>.同时在区域岩石圈系统组成和热状态的约束下,进行了该区构造运动及岩石和矿产形成作用的地球化学研究,探索了在一个区域内将岩石圈系统的研究与各类地质运动和作用的研究有机联系起来的途径,取得了很有意义的

结果和经验,肯定了将区域地球化学问题置于特定的区域壳幔系统中进行研究的重要性<sup>[7]</sup>.

90 年代初,当我们开始执行国家自然科学基金重大项目——秦岭造山带岩石圈结构、演化及成矿背景时,国际岩石圈计划已经向大陆动力学计划转移,固体地球科学的战略构想已集中于通过地球内部层圈相互作用的探索来揭示大陆岩石圈的发展和演化及其动力学.这时如果有关地球系统及其子系统的概念仍然停留于上述的理解上(尽管重视它们的演化性),显然已经不够了.在吸收化学地球动力学将地球视为一个统一的动力学系统思想的基础上,我们认为现今应当将大陆造山带视为一个特定的区域壳幔动力学系统来研究,不仅要查明区域岩石圈静态的结构和组成,还需注意追索壳幔动态的运动和演化历史,并且应以区域壳幔组成、状态和其不均一性、壳幔相互作用的机制及演化,来约束造山带构造的分区、格局和演化,以及岩石和矿产形成作用的特征.这里仍应强调特定区域壳幔系统研究的重要性.例如,秦岭花岗岩类与成矿的特征明显不同于南岭,就主要是受秦岭地壳的特殊岩石和化学组成及岩石圈长期的高热流所制约的<sup>[7]</sup>.显然,全球壳幔系统的一般性是不能完全代替区域壳幔系统的特殊性的,只有在一般的指导下,深入剖析特殊性,才能将一般认识提升到更高的层次.

全球地幔物质组成不均一与热量不平衡导致了地幔物质对流,后者推动着深部地幔物质与岩石圈地幔和地壳的相互作用,表现为壳幔间物质和能量的交换及动量的传递.这种大规模不断进行的壳幔相互作用控制着大陆地壳的增生与消减、岩石圈结构和组成的发展与变化,以及地壳中各类地质作用的发生与演化.因此,壳幔相互作用及其深部过程的研究既是探索大陆动力学的必由之路,又是深化造山带和大陆构造及成矿作用研究的重要方向,应该作为大陆造山带地球化学研究的主线.为了阐明大陆岩石圈结构变化、地壳增生方式和厚度变化、造山带隆升、以及地壳组成变异等,已经提出底侵和拆沉作用模型<sup>[8,9]</sup>.深入探讨它们的发生与作用已经成为当前固体地球化学的前沿课题.近年,地幔柱活动与大陆岩石圈破裂和全球板块运动的关系再次受到关注<sup>[10,11]</sup>,这是将大陆岩石圈构造与深部地幔活动联系起来用以揭示前者发生动力的探索.近年有关超高压变质岩带的发现,提出了陆壳俯冲与折返的另一重要壳幔相互作用形式,它的研究已成为揭示

大陆碰撞机制的重要途径。近代板块会聚带(洋壳俯冲带)壳幔再循环的研究已经取得肯定性的丰硕成果,然而大陆造山带古板块会聚带是否会发生类似的洋壳俯冲和壳幔再循环,迄今仍很少研究。此外,造山带碰撞后的陆内造山过程迄今也属于研究的薄弱环节,而这阶段正是造山带壳幔发生剧烈再调整的时期。上述指出的有关壳幔相互作用及其深部过程的课题,应当列为现阶段大陆造山带地球化学研究的重点内容。它们的研究结果不仅能从深部过程及壳幔作用运动学的角度,补充地表地质学与地球物理的研究,而且还能为大陆动力学研究积累资料、提供依据及发现值得注意的问题。

地球物质的化学运动,与地球物质的力学(构造)运动和物理运动一样(严格说还应包括地球生物运动),均是寓于统一的地质运动之中,并且它们是相互依存、相互制约和相互转化的。循着每一种形式运动在地质体中遗留的痕迹与记录,均能从一个侧面揭示地球或地质运动的历史。因此,要全面地探索大陆和造山带的历史,必须开展多学科综合研究,以发挥各个学科专长的互补作用。上述认识是搞好造山带多学科研究的重要思想基础。据此造山带地球化学研究应重视在目标上与其他学科的协调配合,自觉地以其他学科获得的实际资料和客观规律来约束本学科的立论与思考,并积极发挥好本学科的专长和优势。

造山带地球化学研究应在历史地球化学理论和观点的指导下,坚持地球发展的非均变论和阶段论,注意造山带不同发展阶段的特殊性,不能将岩石指示不同板块构造环境的地球化学准则和标志直接套用于板块构造体制出现以前的太古宙。

地幔化学不均一性究竟是由原始均一地球以后通过分异演化产生的(现在地球化学界的统治思想),还是原始地球的固有特征<sup>[12]</sup>,近年已构成重大争论问题。80年代以来,通过全球洋脊和洋岛玄武岩 Pb, Nd, Sr 等同位素组成研究已经揭示出南半球(赤道至南纬 55°左右)长期(达几个十亿年)存在的大规模“地幔同位素异常带”,而同北半球地幔主体不同<sup>[13,14]</sup>。在收集整理全球大陆多类岩石 Pb, Nd, Sr 等同位素组成数据及开展中国大陆同位素填图的基础上,已经提出冈瓦纳和劳亚古陆在壳幔同位素组成上的不同。同时还揭示出中国主要陆块的壳幔同位素组成之间存在着规律的差异,并提出在同位素组成上华南具有冈瓦纳大陆的特征,华北可同

劳亚大陆对比,而扬子则属于华南和华北的过渡类型的见解<sup>[15,16]</sup>。上述研究成果表明,地幔化学不均一性在地理上与古陆块之间是有规律的和长期存在的。基于这些成果,并考虑到有关全球地幔化学不均一性的成因争论问题不是短期内所能解决的,我们认为在现阶段开展造山带地球化学研究时,应对地幔不均一性成因的两种观点尽量保持独立,并注意以不断积累的实际资料对之进行检验。同时,可以利用长期存在的地幔不均一性规律,通过不同构造块体的地球化学对比,划分构造-地球化学分区及判别陆块的构造归属。特别应该开展蛇绿岩中洋脊型玄武岩的地球化学对比,以期从洋下地幔的同位素和化学分区及构造归属方面,配合与检验中国大陆同位素填图的成果,综合探索中国主要陆块在全球范围内的构造格局与归属问题。

## 2 造山带地球化学研究的技术路线

技术路线的设定在于保证:造山带多学科研究目标的实现,较充分地发挥地球化学学科的专长与优势,开拓新领域(诸如,地球化学断面与岩石圈三维化学结构、壳幔相互作用深部过程、碰撞后陆内壳幔调整等)的探索,克服结果的多解性和推断成分,增强它们的可信性和实证性等。

根据地球化学运动寓于地质运动之中的认识,要发挥地球化学的专长和潜力,首先必须善于将地质课题剖析为地球化学性质的课题来研究,才能有利于发挥地球化学的优势。例如,要解决大陆造山带中古洋盆闭合的时代问题,可以设想在有较开阔洋盆的阻隔时两侧陆源碎屑是不能越洋到达彼岸的,同时两侧的边缘海水也是难以相互沟通的,如果一旦发生了一侧陆缘碎屑岩的物源由原先的本大陆一源转变为两个大陆碎屑物质的混合,或者一侧大陆边缘海水的成分由原来的特征转变为两侧边缘海水的混合特征,就表明古洋盆于该时期应基本闭合。这样就将解决洋盆闭合时限问题转化为研究碎屑岩的物源变化问题,或者边缘海水成分特征的变化问题,从而就可能发挥地球化学应用细粒碎屑岩的稳定特征微量元素判别陆源区,或者通过纯碳酸盐岩稀土元素指示沉积水体化学特征的特长。利用这两种方法,系统研究了南秦岭被动陆缘各时代碎屑岩的源区及各时代纯碳酸盐岩沉积海水的成分特征,发现两者均在泥盆纪前后发生了由单一类型向南北混合

特征的转化,一致证明古商-丹洋盆应大约于志留-泥盆纪之交基本闭合<sup>[17,18]</sup>。

玄武岩一般在造山带中广泛分布,并且在不同地质时期多有形成。这为应用同位素和微量元素指示地幔源区组成特征,探讨地幔化学不均一性和演化、揭示壳幔再循环与深部过程提供了良好的条件。为了减少研究结果的多解性或不确定性,应尽量发挥多同位素(Pb, Nd, Sr)系统和多微量元素参数联合示踪的作用,注意提取同位素与同位素之间、元素参数与元素参数之间,以及同位素与元素参数之间相互关系的有益信息。例如,当岛弧玄武岩地幔源区中有再循环沉积物卷入时,随着沉积物加入量的增加,玄武岩就会显示出Nd同位素比值降低的同时发生Pb和Sr同位素比值的规律增长,即Nd同位素比值与Pb和Sr同位素比值之间呈负相关关系;大洋玄武岩遭受海水蚀变时,在其Nd同位素比值变化微小的情况下,Sr同位素比值可发生明显增长。在玄武岩类幔源区微量元素示踪方面,特别注意选用两种强不相容元素的比值(如,Nb/La, Th/La, Ba/Nb, Pb/Ce等)及两种化学性质十分相似的不相容元素的比值(如,Nb/Ta, Zr/Hf, Y/Tb等)作为指示参数。因为,这两类元素对的比值已被证明在地幔岩石部分熔融形成玄武岩浆的过程中不随熔融程度而变化,所以玄武岩中它们的比值可以代表它们在地幔源区中的比值<sup>[19,20]</sup>。经部分熔融模型的计算模拟证明,当部分熔融程度较高(大于30%)时中等不相容元素对的比值也适用于玄武岩类地幔源区示踪<sup>[21]</sup>。当然,在进行研究之前还应检验和剔除受地壳物质明显污染的样品。在条件允许的情况下,尽量注意以研究区中可以代表源区的岩石成分对示踪结果进行约束,以提高结论的实证性。例如,可以用研究区蛇绿岩中的洋脊型玄武岩(MORB)来代表该区古洋壳成分,用研究区洋岛玄武岩(OIB)成分来限定该区深部地幔柱化学特征等,以期能获取更符合研究区实际的结果。

通过壳源岩浆岩(花岗岩类为主)源区同位素和微量元素示踪,可以揭示深部地壳岩石组成及深部作用过程(诸如,陆壳俯冲、基性岩浆底侵等)。同样,在条件允许的情况下,应采取对壳源岩浆岩与可能的基底源岩进行多同位素系统与微量元素双向拟合和约束的途径,以增强实证性、减少推断成分。沉积岩(含变沉积岩)Nd模式年龄可以指示其源区平均地壳居留时间,是探讨地壳增生历史的途径之一。然

而,从实践中我们体会到,未曾出露于地表的深部岩层(包括地壳底部的基性底侵岩层)在地壳中居留的时间是不会从沉积岩和变沉积岩的Nd模式年龄得到反映的。因此,要较全面揭示研究区地壳增生历史,还需同时考虑壳源岩浆岩(主要花岗岩类)的Nd模式年龄(最好是二阶段模式年龄)。

为了获取尽量符合造山带岩石圈实际的现今三维化学结构,关键在于构筑能反映造山带现今实际的地壳结构-岩石组成模型,并且组成各结构层的岩石不应是一般的岩石类型,而应是本区实际存在的岩层。这样才能在本区岩石成分测定的基础上,按照地壳结构-岩石组成模型计算得出现今各结构层的化学成分与元素丰度。当然,在本区能发现较多地幔岩石包体的情况下,也可按上述原则建立造山带现今岩石圈地幔的结构-岩石模型,不过往往这种条件很难满足。因此,只能以区域玄武岩揭示地幔源区化学特征的研究来弥补这方面的不足。要建立符合实际的地壳结构-岩石组成模型,就需以本区公认的主要构造单元划分及地球物理地震测深获得的岩石圈波速( $v_p$ )结构为基础,开展各构造单元各类主要基底岩石和花岗岩类地震波速( $v_p$ )的高温高压下的实验测定,要求尽可能按照造山带地壳各结构层的温压配置来确定实验的温压条件。建立模型时,以各结构层温压条件下的岩石波速实验测定值与地震测深剖面的波速观察值的对比拟合为主,结合岩石变质相、深源岩石包体、花岗岩类源区等研究结果,综合确定各结构层的岩石组成,进而计算各构造单元各结构层的化学成分和元素丰度,揭示造山带岩石圈的三维化学结构。

有了上述各方面的研究基础,我们就不仅能从造山带所在区域壳和幔静态的同位素和化学不均一性,而且还能从动态的地壳增生历史和地幔源区化学演化的差异,来约束造山带的构造分区、鉴别微陆块的构造归属。

岩石地球化学特征与形成构造环境并非总是一一对应的,即有时具有同样地球化学特征的岩石可以产出于两种或两种以上的构造环境。例如,显示洋脊玄武岩化学特征的玄武岩可以见于大洋中脊、弧后盆地,甚至边缘海槽等环境。如果仅依据玄武岩单类岩石的化学特征作出构造环境鉴别,就难免发生误判的可能。为了克服这方面的多解性,提高地球化学在研究区域构造方面的作用,我们曾提出:在进行造山带构造类型与构造演化研究时,应坚持岩套内

不同岩类配套及同构造阶段的岩套或岩石建造时空配套的综合地球化学研究原则或途径。实践证明这样的综合研究,不仅可以通过不同类型岩石特征的相互约束提高构造类型判别的确定性,而且还十分有助于构造发展细节的揭示<sup>[6]</sup>。

### 3 主要成果

按照上述构想与技术路线,我们于1992年—1997年开展了秦岭造山带的综合地球化学研究,通过5年的实践,取得了以下主要成果。

(1) 造山带岩石圈三维化学结构。首次完成了横穿秦岭造山带的伊川到宜昌的地球化学断面研究,建立了秦岭及相邻华北和扬子陆块缘区4个构造单元地壳的结构-岩石组成模型,计算得出了各构造单元地壳各结构层的化学成分和63种元素的丰度<sup>[22,23]</sup>;揭示了造山带岩石圈的三维化学结构和热结构,并据之对秦岭地壳和地幔中发现的低速高层带提供了可能的解释<sup>[24]</sup>。

(2) 秦岭造山带壳幔演化与构造-地球化学分区。在华北陆块南缘、北秦岭、南秦岭和扬子陆块北缘4个构造单元中,进行了以壳源岩石Nd模式年龄揭示地壳的增生历史、以前寒武纪玄武岩Nd同位素揭示早期地幔源区性质和演化,以及各时代玄武岩地幔源区化学组成特征等的研究,并开展了全区多类岩石和花岗岩长石的Pb同位素详细填图。在这些成果的基础上,综合探讨了造山带的构造-地球化学分区,论证和提出了:扬子和华北原先分别为具有不同壳幔演化历史及壳幔化学组成特征的独立发展的陆块;南秦岭属于扬子陆块,并具有新太古代陆壳基底;北秦岭于新元古代之前也属于扬子板块,但却是在扬子板块洋壳洋岛基础上发展形成的微陆块;以及商-丹和勉-略洋盆均是扬子板块内部岩石圈破裂扩张形成的类型等认识<sup>[25~29]</sup>。

(3) 造山带构造背景与构造演化。在以往研究的基础上,通过岩类配套和岩套配套的综合研究,进一步肯定了造山带是在古、中元古代裂谷构造体制背景上发展的,并于中-新元古代之交开始转入板块构造体制,随商-丹洋盆的打开,北秦岭转变为华北陆块的活动大陆边缘;补充揭示了商-丹缝合带经

历了新元古代洋内岛弧发展、新元古代晚期的弧-陆碰撞、新元古代末至早古生代陆缘弧和弧后盆地发展等阶段的细节,总结了南秦岭震旦至泥盆纪被动陆缘发展阶段的地球化学特征;论证了陆-陆碰撞早阶段的作用表现为造成地壳增厚、地温升高和同碰撞型花岗岩浆活动,晚阶段的作用表现为导致被动陆缘基底向活动陆缘下部的俯冲叠置;同时还进行了碰撞后陆内俯冲构造地球化学论证及通过花岗岩类侵位深度揭示造山带地壳隆升的探索。

(4) 造山带发展的深部过程。在区域壳、幔同位素和化学组成约束的基础上,通过玄武岩和花岗岩类源区的多同位素(Pb,Nd,Sr)及微量元素示踪,结合地质和地球物理资料分析,得出了以下重要成果。

丹凤群岛弧玄武岩具有相对低 $w(\text{Ti})$ 和高 $w(\text{Y})/w(\text{Tb})$ 比值及相对高 $w(\text{Ti})$ 和低 $w(\text{Y})/w(\text{Tb})$ 比值的两个源区,经证明前一源区应为北秦岭岩石圈地幔楔,后一源区应为俯冲洋壳加入少量深海泥质沉积物,从而肯定了古会聚带的壳幔再循环及古洋壳的俯冲消减。丹凤群岛弧型玄武岩及早古生代岛弧型花岗岩具有的自南向北的成分极性,指明古洋壳的俯冲是向北的<sup>[26,30]</sup>。证明了南、北秦岭约于1.1 Ga前均通过镁铁质岩浆的底侵发生了地壳的强烈增生,北秦岭的底侵岩层是大量早古生代岛弧型花岗岩类岩浆的主要源岩,而南秦岭的底侵岩层则为南、北秦岭印支期晚碰撞型花岗岩类岩浆的主要源岩<sup>[26,31]</sup>。证明了北秦岭印支期晚碰撞型花岗岩类的源岩不可能是北秦岭的基底岩层,而是与南秦岭的同类花岗岩类的源岩一样,同为南秦岭的元古宙基底岩层,从而为陆-陆碰撞晚期扬子陆块北缘(南秦岭)基底俯冲垫置于北秦岭上地壳之下的推断提供了有力的证据<sup>[26,32]</sup>。印支期花岗岩以底侵镁铁质岩为源,表明那时厚的镁铁质岩层尚存在于地壳底部。然而,现今下地壳的地震波速较低( $v_p = 6.50 \sim 6.81 \text{ km/s}$ ),地壳总体成分也显示出铕的亏损( $\text{Eu} = 0.75$ ),这些均排除了下地壳中存在厚层富集铕的镁铁质岩石的可能,表明镁铁质的下地壳在印支期以后发生了向地幔的拆沉。造山带附近的晚白垩世和第三纪玄武岩的地幔源区也由以往单一的亏损地幔端元(DM)转变为亏损地幔(DM)和富集地幔(EMI, EMII)端元并存的局面(远离造山带的同期玄武岩仍来自单一亏损地幔),显示出地壳拆沉在地幔中的响应<sup>[23,26]</sup>。

(5) 蛇绿岩的地球化学对比。秦岭新元古代松树

张本仁,高山,张宏飞. 秦岭造山带地球化学——国家自然科学基金“八五”秦岭重大项目地球化学课题研究报告. 中国地质大学, 1998

沟蛇绿岩及晚古生代勉-略蛇绿岩的洋脊型玄武岩均具有高的  $w(^{207}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$  比值及 DUPAL 型异常 Pb 同位素特征. 在这方面, 它们完全可同阿拉伯新元古代蛇绿岩、滇西三江古特提斯蛇绿岩及环地中海带的中、新生代蛇绿岩的同类岩石相对比, 并且在一系列特征微量元素比值上, 它们与三江蛇绿岩和印度新元古代蛇绿岩也是彼此接近的. 这些信息表明, 秦岭商-丹和勉-略洋幔均应属于特提斯构造域洋幔类型, 很可能源自特提斯所在区域<sup>[33]</sup>.

(6) 地幔柱的动力学意义. 通过 Nd 和 Sr 同位素组成的约束及利用松树沟蛇绿岩中 N-MORB 和 E-MORB 的化学成分标定两种途径, 鉴别了玄武岩浆是否来自地幔柱源区. 结果揭示出: 北秦岭的地幔柱活动开始于古元古代, 并至少持续到中-新元古代之交; 南秦岭的地幔柱活动起步较北秦岭晚, 由中-新元古代持续到新元古代晚期<sup>[28,34]</sup>. 这表明秦岭地区地幔柱活动有随时间自北而南推移的趋势. 联系秦岭北面商-丹洋盆打开在前、南部勉-略洋盆打开在后, 可以认为地幔柱活动是秦岭地区岩石圈破裂和洋盆形成的原动力, 地幔柱活动随时间自北而南的推移, 就造成扬子板块最北缘依次裂解, 并一一向北漂移和归并于华北板块. 这就构成了秦岭复合造山带的重要动力学特征<sup>[28]</sup>.

(7) 编制了秦岭造山带地球化学图(1:100 万). 该图反映了造山带的构造-地球化学分区、地壳的化学结构与热结构、地壳增生历史与地幔演化趋势等内容.

以上成果虽然是初步的, 但是它们已明显地深化了秦岭造山带的研究, 发掘了地球化学的专长与潜力, 促进了多学科研究优势的发扬, 架设了沟通地表地质与深部过程的桥梁. 当然所提出的思路和方法本身还是需要不断改进和发展的.

## 参 考 文 献

- Allegre C J. Chemical geodynamics. *Tectonophysics*, 1982, 81: 109 ~ 132
- Zindler A, Hart S R. Chemical geodynamics. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1986, 14: 493 ~ 571
- 张本仁. 地球化学的基本观念与方法论. *地球科学——中国地质大学学报*, 1992, 17(增刊): 18 ~ 25
- Gao S, Zhang B R, Luo T C, et al. Chemical composition of the continental crust in the Qinling orogenic belt and its adjacent North China and Yangtze cratons. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 3933 ~ 3950
- 高山, 张本仁. 秦岭造山带及其邻区岩石的放射性同位素与现代热结构和热状态. *地球化学*, 1993(3): 241 ~ 245
- 张本仁, 骆庭川, 高山等. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994
- 张本仁. 区域岩石圈组成和热状态对岩浆作用和成矿的制约——以秦巴地区为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 1994, 19(3): 345 ~ 352
- Furlong K P, Fountain M D. Continental underplating: thermal consideration and seismic-petrologic consequences. *J Geophys Res*, 1986, 91(B8): 8285 ~ 8294
- Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 1993, 219: 177 ~ 189
- Duncan R A, Richards M A. Hotspots, mantle plumes, flood basalts, and true polar wander. *Rev Geophys*, 1991, 29: 31 ~ 50
- Stein M, Hoffmann A W. Mantle plumes and episodic crustal growth. *Nature*, 1994, 372: 63 ~ 68
- 欧阳自远, 王世杰, 张福勤. 堆积的地球及其原始不均一性. *地球科学进展*, 1994(3): 1 ~ 6
- Hart S R. A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. *Nature*, 1984, 309: 753 ~ 757
- Hart S R. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90: 273 ~ 296
- 朱炳泉. 从壳幔同位素体系看不同地体的化学不均一性. *科学通报*, 1990, 21: 1653 ~ 1655
- Zhu B Q. Geochemical evidence for the southern China block being a part of Gondwana. *Journal of Southeast Asia Earth Science*, 1994, 9(4): 319 ~ 324
- 高山, 张本仁, 谷晓明等. 华北与扬子板块志留-泥盆纪对接的沉积地球化学证据. *中国科学(B 辑)*, 1991(6): 645 ~ 651
- 张本仁, 高山, 谷晓明等. 华北与扬子板块志留-泥盆纪对接的海水成分证据. 见: IGCP 第 321 项中国工作组编. 亚洲的增生. 北京: 地震出版社, 1993
- Bougault H, Joron J L, Treuil M. The primordial chondritic nature and large-scale heterogeneities in the mantle: evidence from high and low partition coefficient elements in oceanic basalts. *Philos Trans R Soc London (Ser A)*, 1980, 297: 203 ~ 213
- Hoffman A W, Jochum K P, Seufert M, et al. Nd and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 79: 33 ~ 45
- 郑海飞, 欧阳建平, 韩吟文等. 元素比值研究玄武岩源区

- 成分的若干问题讨论. 矿物学报, 1994, 14(1): 61 ~ 67
- 22 高山, 赵志丹, 骆庭川等. 东秦岭河南伊川—湖北宜昌地学断面地壳岩石组成、化学成分及形成机制. 岩石学报, 1995, 11(2): 213 ~ 226
- 23 Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62(11): 1959 ~ 1975
- 24 Gao S, Zhang B R, Zhao Z D. Radioactivity and thermal state of the lithosphere in the Qinling orogenic belt and adjacent margins of North China and Yangtze cratons: constraints on interpretations of geophysical profilings. *Continental Dynamics*, Institute of Geology, CAGS, 1996(1): 56 ~ 63
- 25 Zhang B R, Zhang H F, Zhao Z D, et al. Geochemical subdivision and evolution of the lithosphere in East Qinling and adjacent regions — implications for tectonics. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(3): 245 ~ 255
- 26 Zhang B R, Zhang H F, Ling W L, et al. On crustal accretion and mantle evolution in Qinling orogenic belt. *Proc 30th Intern Geol Congr*, 1997(1): 129 ~ 142
- 27 韩吟文, 柳建华, 许继锋. 秦岭造山带前寒武纪地幔化学成分及壳幔物质循环. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(5): 457 ~ 463
- 28 张本仁, 韩吟文, 许继锋等. 北秦岭新元古代前属于扬子板块的地球化学证据. 高校地质学报, 1998, 4(4): 369 ~ 382
- 29 欧阳建平, 张本仁. 北秦岭微古陆形成与演化的地球化学证据. 中国科学(D辑), 1996, 26(增刊): 42 ~ 48
- 30 张本仁, 欧阳建平, 韩吟文. 北秦岭古聚会带壳/幔再循环. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(5): 469 ~ 475
- 31 张宏飞, 欧阳建平, 凌文黎等. 南秦岭宁陕地区花岗岩类 Pb, Sr, Nd 同位素组成及其深部地质信息. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(1): 20 ~ 32
- 32 张宏飞, 张本仁, 赵志丹等. 东秦岭商丹构造带陆壳俯冲碰撞——花岗质岩浆源区同位素示踪证据. 中国科学(D辑), 1996, 26(3): 231 ~ 236
- 33 许继锋, 韩吟文. 秦岭古 MORB 型岩石的高放射性成因铅同位素组成特提斯型古洋幔存在的证据. 中国科学(D辑), 1996, 26(增刊): 34 ~ 41
- 34 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 南秦岭中—晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解. 中国科学(D辑), 1996, 26(3): 237 ~ 243

## IDEOLOGY AND PRACTICE FOR GEOCHEMICAL STUDY OF OROGENIC BELTS

Zhang Benren

(*Institute of Geochemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

**Abstract** In the 1990's, the multi-disciplinary study of orogenic belts has been oriented towards the continental dynamics. In order to meet this new situation for the combination of the research on orogenic belts with the continental dynamics, this paper presents the ideology for the systematic research on the geochemistry of continental orogenic belts. In addition, this paper deals with the approaches to promote the advantages of the geochemistry in the multi-disciplinary investigation into the orogenic belts. Furthermore, the major achievements obtained in our study of Qinling orogenic belt for the past five years are cited in this paper to illustrate the effectiveness of the ideology and approaches.

**Key words** orogenic belt, crustal chemical structure, crust-mantle interaction, chemical geodynamics.