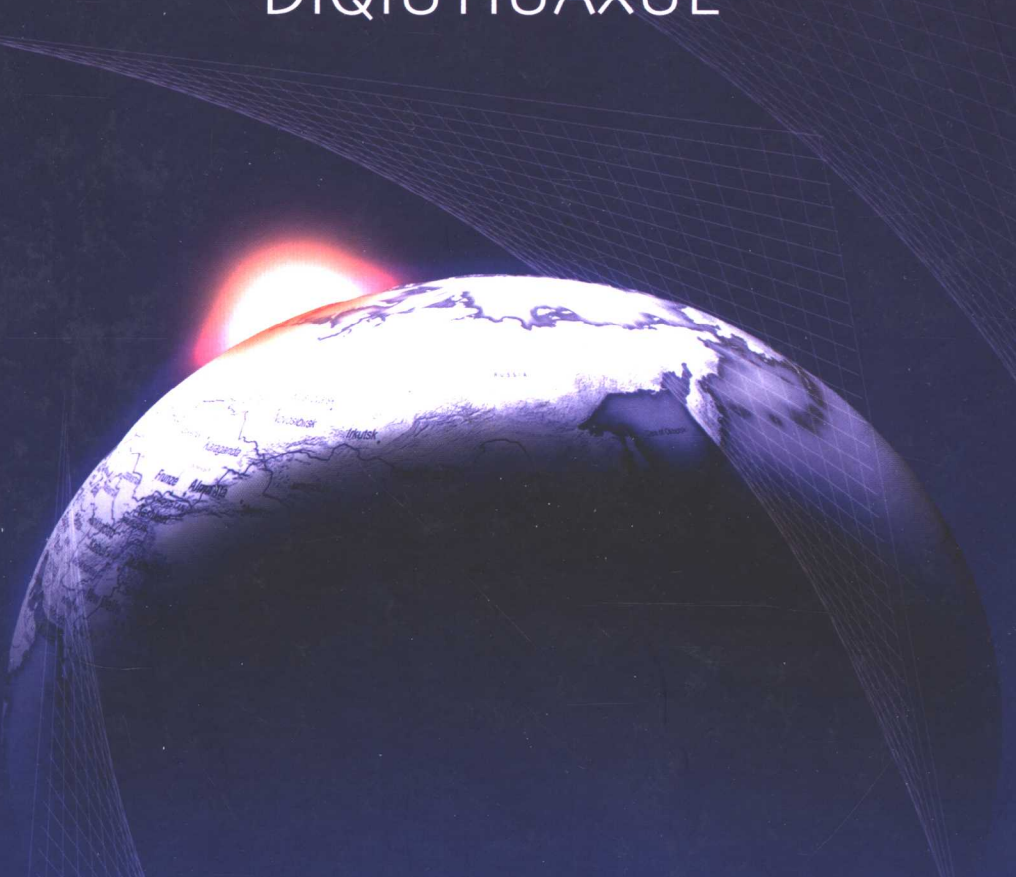


QINLING ZAOSHANDAI
DIQIU HUAXUE



秦岭造山带 地球化学

张本仁 高山 张宏飞 韩吟文 等 著



科学出版社
www.sciencep.com

QINLING ZAO SHAN DAI
DINLI HILLOCK

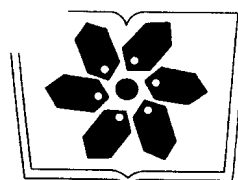
秦岭造山带

地球化学

王成汉 主编 地质出版社



地质出版社
Geological Publishing House



中国科学院科学出版基金资助出版

秦岭造山带地球化学

张本仁 高山 张宏飞 韩吟文 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是在国家自然科学基金“八五”课题的研究成果的基础上,经过进一步的扩充加工提炼而成。该课题研究以化学地球动力学的学术思想为指导,强调区域壳幔体系组成与状态的具体约束作用,在造山带常规地球化学研究的基础上,侧重开展壳幔深部组成、过程、演化及壳幔相互作用的研究,并强调和体现地球化学与地质地球物理研究的有机结合。本书尽可能从多个方面对秦岭造山带现今地球化学研究做一阶段性总结,从而为大家提供一个造山带地球化学系统综合研究的实例。

本书可供从事地球化学、地质构造、地球物理等专业的教学与科研人员,及地球化学和地质学等专业的研究生及高年级学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

秦岭造山带地球化学/张本仁等著. —北京:科学出版社,2002
ISBN 7-03-010490-0

I. 秦… II. 张… III. 秦岭-褶皱带-地球化学 IV. P542

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 036434 号

责任编辑:彭克里 / 责任校对:曹锐军
责任印制:刘秀平 / 封面设计:魏立航

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2002年9月第一次印刷 印张:12 1/4 插页:1

印数:1—1 200 字数:382 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

本书是国家自然科学基金“八五”重大项目“秦岭造山带岩石圈结构、演化及成矿背景”中地球化学二级课题“秦岭造山带岩石圈物质分异、状态及其同造山过程制约关系”的研究成果。项目编号 49290100, 课题编号 49290102。项目起讫日期为 1992 年 6 月至 1996 年 12 月。本书以本课题原结题报告反映的内容和成果为基础, 吸收了我们参加原地质矿产部“七五”期间“秦巴地区基础地质问题及主要矿产成矿规律研究”重点项目, 及“七五”和“八五”期间本课题成员承担的国家自然科学基金资助的研究秦岭造山带的几个面上项目所取得成果的有关部分, 并引用了近年来发表的有关秦岭地区的专题地球化学研究论文的成果与数据, 按照我们提出的对造山带进行系统地球化学研究的思路和方法(见绪论), 进一步综合、加工和提炼写成的。目的是尽可能对秦岭造山带已有的地球化学研究做一阶段性总结, 提供一个造山带地球化学系统综合研究的实例。本书未包括原属于本课题的秦岭造山带重大地质事件年表研究(由中国地质科学院地质研究所同位素室承担, 张宗清负责)的成果。

本书介绍的主要成果有:

一、有关大陆造山带系统综合地球化学研究的理论构想与技术路线

这一思路和方法的提出, 是为了适应造山带研究瞄向大陆动力学目标的形势, 并促使地球化学的专长和潜在在造山带多学科研究中能得到更好的发挥。

二、开拓了横穿秦岭造山带的伊川到宜昌的地球化学断面研究

研究内容包括研究区内基底岩石和花岗岩类(传导)地震波速(V_p)的高温高压实验测定, 南、北秦岭及相邻华北和扬子陆块缘区四个构造单元地壳结构-岩石组成模型的建立, 各构造单元地壳各结构层化学成分的计算及放射性热状态研究, 中、新生代玄武岩地幔源区化学特征的揭示等; 进而探讨和提出了造山带现今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导异常带提供了可能的解释。

三、秦岭造山带壳、幔演化与构造-地球化学分区

1. 地壳的增生历史 通过壳源岩石 Nd 模式年龄分布揭示出: 华北陆块地壳主体形成于太古宙, 其次为古元古代; 扬子陆块、南秦岭和北秦岭地壳主体均形成于 0.8Ga 或 1.0Ga 之前的元古宙, 其间的差别是在前两者地壳中存在太古宙基底, 而北秦岭却没有太古宙基底。

2. 早期上地幔性质与演化 玄武岩的形成年龄和初始 ϵ_{Nd} 值揭示出: 华北陆块上地幔(玄武岩源区)自太古宙到古元古代一直处于 ϵ_{Nd} 值接近 +3 的稳定亏损状态; 扬子和南秦岭上地幔由古至中元古代 ϵ_{Nd} 值基本沿亏损地幔(DM)演化线变化; 而北秦岭上地幔在整个元古宙 ϵ_{Nd} 值一直在 +7.3~+6.3 的范围内波动。

3. Pb 同位素填图 通过对中生代花岗岩中的长石、前寒武纪基底岩石和中、新生代玄武岩的 Pb 同位素组成数据的对比, 证明扬子陆块北缘、南秦岭和北秦岭的壳、幔一致具有较华北陆块南缘壳、幔明显富放射成因铅的 Pb 同位素组成。其中南秦岭和扬

子北缘西段较东段（以东经约 108°为界）的岩石更富放射成因铅。北秦岭各类基底岩石、蛇绿岩和新元古代和早古生代花岗岩长石一致显示较华北及扬子和南秦岭东段更富放射成因铅的特征。

4. 元古宙玄武岩地幔源区特征 通过对华北南缘、北秦岭、南秦岭和扬子北缘四个构造单元元古宙玄武岩地幔源区的研究，证明华北南缘地幔源区相对富 Fe、Mg、Mo 和具有高 Zr/Hf 比值，而扬子北缘、南秦岭和北秦岭地幔源区一致相对富 Cu、Nb、Sc、Li、Rb、Be 及具有高 Nb/Ta、Ba/Sr、Ba/La 和 Nb/La 比值，只是北秦岭地幔源区在全区中有最高的 Ca 和 Sc 含量及最高的 Sc/Th、Ba/La、Th/La 和 Yb/Hf 比值。这种源区地幔化学的主要特征和差异可以基本保持到近代。

5. 构造-地球化学分区 根据地壳增生历史、早期源区地幔性质和演化、壳幔 Pb 同位素组成、元古宙玄武岩源区的地幔化学组成以及现今地壳化学组成特征等研究，已证明和提出：扬子和华北应分属两个独立发展的构造-地球化学省，原分别为独立发展的陆块或不同大陆的裂解部分；南秦岭是在扬子太古宙陆壳基底上发展形成的，属于扬子板块的组成部分；而北秦岭是在扬子板块洋壳洋岛基础上形成的微陆块，缺少太古宙陆壳基底，由于元古宙洋下地幔柱源区和亏损地幔源区的岩浆活动，使北秦岭壳、幔显示出上述所指出的那种在同位素和化学组成方面的特殊性。因此，北秦岭在新元古代之前也应属于扬子板块的组成部分，在新元古代商-丹洋盆打开后才转变为华北板块的大陆边缘构造单元。

四、造山带构造背景与构造发展

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，对于秦岭造山带形成之前的构造背景及造山主期的构造演化现已取得了以下新认识：（1）造山带是在古、中元古代陆内和洋内裂谷构造体制的背景上孕育和发展的，并于中-新元古代之交开始转入板块构造体制，其标志为商-丹洋盆的打开。（2）中-新元古代之交形成的松树沟蛇绿岩在岩石组合及岩石化学特征上均类似洋壳残片型蛇绿岩，其变拉斑玄武岩的原岩主体为过渡型洋脊玄武岩（T-MORB），表现为E-MORB和N-MORB两种源区岩浆的混合产物；晚古生代勉-略蛇绿岩，除基本具有蛇绿岩的岩石组合外，还存在具有 N-MORB 化学特征的变拉斑玄武岩及具有岛弧火山岩化学特征的玄武岩和中、酸性火山岩。松树沟和勉-略蛇绿岩中的 N-MORB 显示出彼此可对比的 Pb、Nd 同位素组成及一系列特征微量元素对比值，并且在这两方面均近似于扬子省的特征，表明它们所代表的商-丹和勉-略洋盆均是扬子板块岩石圈内部破裂扩张形成的洋盆。（3）商-丹缝合带洋-陆相互作用的细节表现为：该带首先有新元古代洋内岛弧的发展，然后经历了新元古代晚期的弧-陆碰撞，至新元古代末-早古生代则有陆缘弧和弧后盆地的形成和发展，洋壳俯冲消减是多次的。（4）南秦岭震旦纪至泥盆纪被动陆缘发展阶段的地球化学特征表现为：所有的岩浆喷发和侵入活动均与板内裂谷和拉张裂隙构造有关，岩浆显示碱性和较富高场强元素；海相沉积作用基本上在扬子陆块边缘海中进行，陆源碎屑物质仅来自扬子陆块；花岗岩中长石的 Pb 同位素比值随时代发生正常的规律增长，反映被动陆缘地壳处于相对稳定状态。（5）陆-陆碰撞早阶段的作用表现为地壳增厚、地温升高和同碰撞型花岗岩浆活动，而晚阶段的作用则表现为被动陆缘基底向活动陆缘地壳下部的俯冲叠置及晚碰撞型花岗岩类的形成。（6）根据碎屑岩物源的变化及沉积海水成分的转化，提出商-丹

古洋盆于志留-泥盆纪之交已基本闭合,并对陆-陆碰撞的明显迹象始见于晚石炭世提出了可能的解释。

五、造山带发展的深部过程

以区域壳、幔同位素和化学组成约束为基础,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,取得以下重要成果:(1)丹凤群岛弧玄武岩具有相对低Ti和高Y/Tb比值与相对高Ti和低Y/Tb比值的两类源区,经证明前一源区为北秦岭岩石圈地幔楔,后一源区为俯冲洋壳加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自南向北的。(2)证明南、北秦岭约于1.1 Ga前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新元古代岛弧型花岗岩类和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、北秦岭晚海西-印支期晚碰撞型花岗岩类岩浆的主要源岩。(3)证明了北秦岭晚海西-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,而与南秦岭的同类花岗岩类的源岩一样,是南秦岭的元古宙基底岩层(底侵岩层),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。

六、碰撞后陆内构造与壳/幔调整的探索

(1)印支期花岗岩以底侵镁铁质岩为源岩,表明那时较厚的镁铁质岩层尚存在于地壳底部。然而,现今秦岭下地壳的地震波速较低($V_p=6.50\sim6.81$ km/s),地壳总体成分也显示出明显的铕亏损($Eu/Eu^*=0.75$),均排除了现今下地壳中存在厚层富铕的镁铁质岩石的可能。因此提出了早期镁铁质的下地壳和岩石圈地幔在印支期以后发生了向地幔的拆沉,指出造山带附近的晚白垩世和第三纪玄武岩的地幔源区已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(远离造山带的同期玄武岩仍来自单一亏损地幔),这可能是地壳拆沉在地幔中的响应,值得进一步研究。(2)由对燕山中期中酸性斑岩类及燕山晚期花岗岩类岩浆作用和岩浆源区的研究,探索性地论证了陆内俯冲构造的性质和方向。(3)由对印支期以来的花岗岩类侵位深度的研究,探索了造山带地壳隆升的过程,取得了有意义的初步成果。

七、蛇绿岩的地球化学对比

确定了秦岭松树沟和勉-略蛇绿岩中的洋脊型玄武岩均有高 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值及DUPAL型异常Pb同位素特征;证明它们不仅在Pb同位素组成方面完全可以与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的中、新生代蛇绿岩等同类岩石相对比,而且在一系列特征微量元素比值上也与三江蛇绿岩和印度新元古代蛇绿岩彼此接近。据此推断秦岭商-丹和勉-略洋幔均应属于特提斯构造域洋幔类型,而且很可能源自特提斯位于的区域。

八、地幔柱的动力学意义

通过洋岛玄武岩Nd和Sr同位素组成和微量元素比值的约束,结合松树沟蛇绿岩中N-MORB和E-MORB的化学成分的标定,鉴别了玄武岩浆与地幔柱活动的关系。鉴别结果揭示:北秦岭的地幔柱活动开始于古元古代,并持续到早古生代;南秦岭的地幔柱活动起步较晚,发生于中元古代晚期,并延续到晚古生代。这表明秦岭地区地幔柱活

动中心有随时间自北而南推移的趋势。考虑北秦岭原属于扬子板块,以及秦岭北面的商丹洋盆打开在前、南部的勉略洋盆打开在后等,提出“地幔柱活动中心制约着秦岭地区岩石圈裂开和洋盆形成的时空位置,秦岭复合造山带发展具有扬子板块裂解和华北板块增生动力学特征”的新见解。

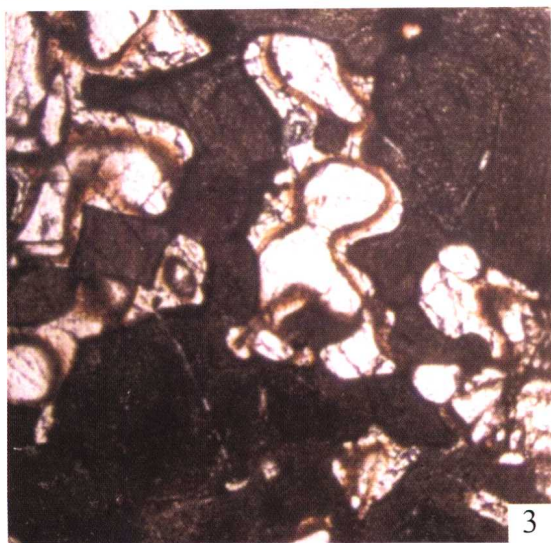
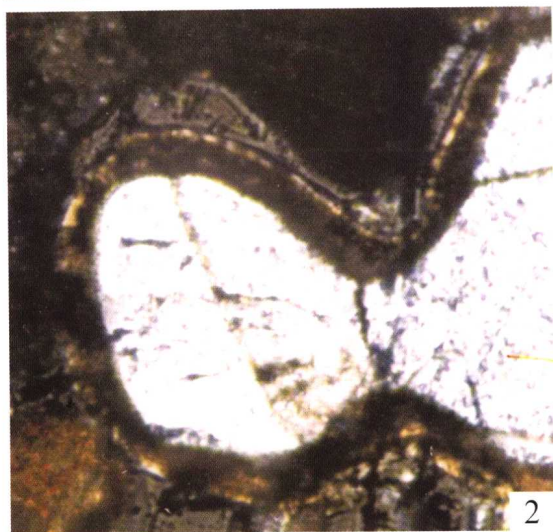
此外,本研究还编制了秦岭造山带地球化学图(1:100万)。该图反映了造山带的构造-地球化学分区、地壳的化学结构与热结构、地壳增生历史与地幔演化趋势等内容,实质是秦岭造山带岩石圈的四维地球化学填图。该图已于1996年由科学出版社另行出版。

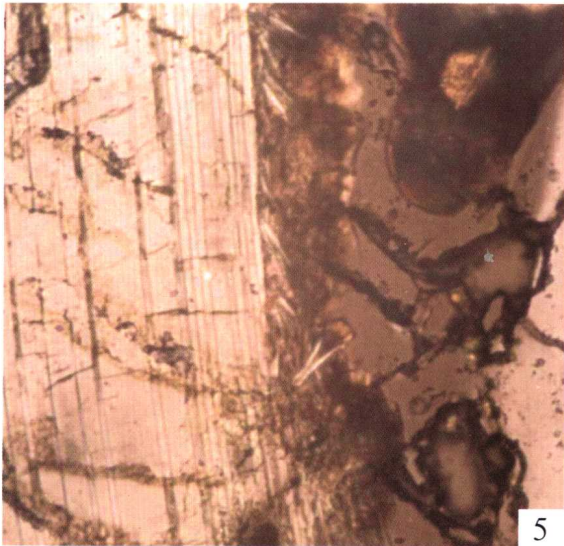
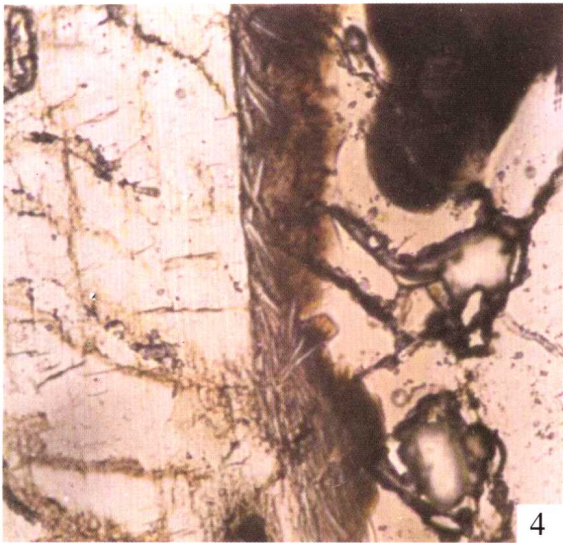
本课题主要研究人员有张本仁、高山、张宏飞、韩吟文、欧阳建平、骆庭川、赵志丹、许继锋、凌文黎、周文戈和匡耀求。张本仁为课题负责人,骆庭川协助组织管理工作。课题研究任务的分工是:张本仁负责课题总体思路和技术路线的设计及结题报告的编写;地球化学断面及岩石圈化学结构和热结构由高山、赵志丹和骆庭川完成;地壳增生、地幔演化、Pb同位素填图及构造-地球化学分区,由张本仁、韩吟文、赵志丹、许继锋、张宏飞和凌文黎共同完成;花岗岩的构造环境、源区特征及其对深部过程(陆壳俯冲、镁铁质岩浆底侵等)的约束,由张宏飞、张本仁、骆庭川进行研究;玄武岩的构造环境、源区特征及其对深部过程(壳/幔再循环、地幔柱活动等)的约束,由张本仁、欧阳建平、韩吟文实施研究;蛇绿岩及其地球化学对比,由许继锋、韩吟文、张本仁共同完成;碰撞后陆内构造及壳幔调整,由周文戈、张本仁、高山进行研究;地幔化学成分由韩吟文负责完成;南秦岭构造地球化学,由欧阳建平、匡耀求、张宏飞负责研究;扬子北部某些岩石的同位素年代研究由凌文黎完成。在课题研究成果及各成员已发表的论文和提交的专题报告的基础上,本书内容的扩充、综合、提炼与撰写由张本仁完成,韩吟文和张宏飞协助图件的编制,韩吟文和骆庭川校对了文稿,并作了文字处理,文中插图由何建华清绘。

在本课题研究和本书撰写过程中,曾先后同王鸿祯教授、任纪舜教授、张国伟教授、袁学诚教授、肖庆辉教授、游振东教授、刘福田教授等进行了有益的讨论,获得了许多宝贵的启示。张国伟教授及其科研集体,在野外地质工作与秦岭地质特征方面,给予本课题许多重要帮助和热诚的支持。鄢明才研究员为本课题的全部组合样进行了分析,提供了63种元素含量的精确数据。张宗清研究员、马大铨研究员和李志昌研究员为我们提供了一些珍贵的同位素数据。夏林圻和夏祖春研究员曾将他们刚发表的重要论文提供给我们参考。本书的出版得到中国科学院科学出版基金与中国地质大学(武汉)出版基金的联合资助。作者在此一并表示最诚挚的感谢。

张本仁

2000年12月12日





目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 造山带地球化学研究的现状	(1)
第二节 造山带地球化学综合研究的理论构想	(2)
第三节 造山带地球化学研究的技术路线	(4)
第二章 秦岭区域地质构造概况	(7)
第一节 秦岭现今的构造格架与主要构造单元	(7)
第二节 秦岭造山带主要构造岩石地层单元	(9)
第三章 秦岭岩石圈深部物质组成及区域构造-地球化学分区	(17)
第一节 地壳各结构层岩石与化学组成	(17)
第二节 地壳岩石的放射性及岩石圈热结构	(30)
第三节 秦岭及邻区的上地幔岩石和化学组成特征	(33)
第四节 秦岭及邻区构造-地球化学分区	(37)
第四章 造山带发展的壳幔演化基础及构造背景的地球化学约束	(47)
第一节 秦岭及邻区各构造单元地壳增生历史	(47)
第二节 秦岭及邻区各构造单元早期上地幔的性质与演化	(49)
第三节 北秦岭早期属于扬子板块的地球化学证据	(51)
第四节 古元古代和中元古代裂谷系的地球化学标志	(55)
第五节 元古宙扬子和华北板块“合”与“开”的信息	(70)
第五章 主造山期构造格局的地球化学约束	(73)
第一节 秦岭蛇绿岩的地球化学特征	(73)
第二节 北秦岭活动大陆边缘的地球化学特征	(86)
第三节 南秦岭被动大陆边缘的地球化学特征	(100)
第四节 南、北秦岭间古洋盆闭合时限的沉积地球化学约束	(106)
第六章 主造山期壳幔作用深部过程的地球化学论证	(110)
第一节 商丹古会聚带壳/幔再循环	(110)
第二节 陆-陆碰撞造山运动深部过程的特征	(114)
第三节 造山带元古宙幔源基性岩浆底侵作用	(125)
第七章 秦岭碰撞后陆内造山阶段壳-幔调整的初步地球化学研究	(133)
第一节 燕山期中酸性斑岩类和花岗岩类的地球化学特征及其构造意义 ..	(133)
第二节 岩石圈下部拆沉及碰撞后壳-幔调整	(138)
第三节 关于花岗岩侵位深度对造山带地壳隆升约束的初步探索	(142)
第八章 秦岭古洋幔与特提斯洋幔的地球化学对比	(145)
第一节 全球地幔化学不均一性及中国大陆岩石圈同位素填图	(145)

第二节	特提斯洋幔的 Pb 同位素组成特征	(146)
第三节	秦岭古洋幔与特提斯构造域地幔地球化学特征的对比	(148)
第九章	秦岭地幔柱源岩浆活动及其动力学意义的初步研究	(155)
第一节	地幔柱源岩浆的鉴别	(155)
第二节	秦岭地幔柱活动的规律及其动力学意义	(161)
总 结		(165)
参考文献		(173)

第一章 绪 论

大陆造山带是不同板块岩石圈与壳/幔相互作用剧烈进行的会聚带，是研究大陆构造的重要对象。20 世纪 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了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。

第一节 造山带地球化学研究的现状

同位素年代学研究已成为造山带重大地质事件，尤其俯冲和碰撞等定年的重要手段。通过蛇绿岩、火山岩、花岗岩类、沉积岩和高压-超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 20 世纪 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理论和方法技术的迅速发展，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地幔，甚至幔-核过渡带，旨在揭示和探讨大陆岩石圈板块的运动学与动力学。同时，在应用同位素研究地幔端元组分、化学不均一性及演化的基础上，已经提出了化学地球动力学（chemical geodynamics）的构想（Allegre, 1982; Zindler & Hart, 1986）。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对地球化学的要求，现代地球化学的潜力尚未得到充分发挥。这主要表现在：（1）造山带岩石圈三维结构地球化学研究仍属于薄弱环节，研究成果极为少见，甚至在地学断面研究中除岩石的同位素测年外，其他地球化学工作也少见及，在这方面基本未能发挥地球化学研究应该而且也是可能做到的沟通地表地质研究与地球物理测深的桥梁作用。（2）20 世纪 80 年代以来发展起来的壳幔组成、壳幔演化 and 壳幔相互作用的微量元素和同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，还很少被系统地应用于大陆造山带的研究。这限制了地球化学在探索和

揭示造山带发展的运动学和动力学方面发挥自己的作用。(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形成和发展研究方面的补充与启迪的作用。这并不有利于地质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鉴别, 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。因此, 在开始执行这次秦岭造山带多学科研究中的地球化学研究之前, 有必要对地球化学研究的思路与方法提出一个合理可行的框架。

第二节 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地球化学过程和元素行为的特征的基本认识(张本仁, 1992), 我们在 1986 年开始执行原地质矿产部“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(高山等, 1990; 韩吟文等, 1990; Gao et al., 1992; 高山和张本仁, 1993)。同时在区域岩石圈系统的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, 结果取得了很有意义的结果和经验, 肯定了将区域或造山带地球化学置于特定的区域壳-幔系统中进行研究的重要性(张本仁等, 1994)。

20 世纪 90 年代初, 国际岩石圈计划已经向大陆动力学目标转移, 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), 显然已经不足了。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, 而且还需注意追索壳/幔动态的运动过程与演化历史, 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等, 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。这里应强调的是特定区域壳/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特殊的岩石和化学组成及岩石圈长期的高热流所制约的(张本仁, 1994)。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,又是深化造山带及大陆构造和地质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,已经提出了意义重大的底侵和拆沉作用模型(Furlong & Fountain, 1986; Rudnick, 1990; Caress, 1995; Nelson, 1992; Kay & Kay, 1993)。深入探讨它们的发生与机制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(Duncan & Richards, 1991; Hawkesworth et al., 1992; Saunders et al., 1992; Stein & Hofmann, 1994),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。近年来,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,其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(Hart & Glin, 1989),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,而这阶段正是大陆造山带壳/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,架设沟通后两方面研究的桥梁,而且还能为大陆动力学的研究积累资料、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与配合,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,并积极地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简单地套用于板块构造体制出现以前的太古宙构造体制。

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(欧阳自远等, 1994, 1995),近年已构成重大的争论问题。20世纪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 50°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(Hart, 1984, 1988)。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大陆在壳幔同位素组成上的明显不同。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东冈瓦纳大陆的特征,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(朱炳泉,1990,1993;Zhu,1994)。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。鉴于上述进展,并考虑到有关全球地幔化学不均一性的原始或非原始成因的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,应对于地幔不均一性成因的两种观点尽量保持独立,注意以不断积累的实际资料进行检验的态度。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-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,以期从古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中的构造格局与归属问题。

第三节 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,增强它们的可信度和实证性等。

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缘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。这样就可将解决洋盆闭合的时限问题转变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(高山等,1991;张本仁等,1993)。

玄武岩一般在造山带中广泛分布,并且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（Bougault et al., 1980; Hofman et al., 1986）。经部分熔融模型的计算模拟证明，当部分熔融程度较高（>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（郑海飞等，1994）。当然，在进行研究之前还应检验和剔除明显受地壳物质污染的样品。在条件允许的情况下，尽量注意以研究区中可以代表源区岩石的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层组成特征及深部作用过程（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（大陆剥蚀区）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，要较全面的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，而应是研究区实际存在的岩层。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，只能通过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（传导）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。