

# 造山带 核部杂岩 变质过程与 构造解析 ——以东秦岭为例

地质矿产部秦巴重点攻关科研项目  
游振东 索书田 等著



# 造山带核部杂岩变质过程与构造解析

— 以东秦岭为例

地质矿产部秦巴重点攻关科研项目

游振东 索书田 韩郁菁 钟增球 陈能松 著

中国地质大学出版社

1991.6.

## 内 容 提 要

本书共分两篇：第Ⅰ篇为方法论，主要从物理学观点出发，介绍了大陆造山带核部杂岩变质过程与其构造解析的研究方法和基本原理；第Ⅱ篇论述了东秦岭造山带核部杂岩的基本组成、构造格局、构造变形序列、变质作用的 $PTt$ 轨迹，并分析了东秦岭造山带演化的地球动力学过程。

本书资料翔实、内容丰富，思路新颖、文图并茂，可供野外地质工作人员，科研工作者以及高等院校师生参考。

### 造山带核部杂岩变质过程与构造解析

——以东秦岭为例

游振东 索书田 韩征宇 钟增球 陈能松 著

责任编辑：赵颖弘

中国地质大学出版社出版

（武汉市 喻家山）

石首市第二印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

开本787×1092 1/16 印张 21.125 图版6页 插页3 字数 540千字

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数1—1050册

ISBN 7-5625-0537-3/P·180

定价：18.00元

## 前 言

典型大陆造山带，多半是在原有的硅铝壳基底上发育起来的。在山链演化和构造变动过程中，早期存在的结晶基底，必然通过构造的破坏、抬升、运移及揭顶作用而暴露于地表，呈“中间地块”或“结晶轴带”存在于造山带内，与上覆年轻的地层作构造接触。最著名的如，西阿尔卑斯造山带中的海西基底，比利牛斯、巴尔干，喀尔巴阡的前寒武纪结晶基底等均属之（Zoubek, 1988）。

这些前寒武纪地体，往往遭到造山运动的再造。以比利牛斯海西带的前寒武纪基底为例，经历了Cadomian（7—5亿年前），海西和阿尔卑斯等三期造山旋回，广泛区域变质为角闪岩相，有的可达麻粒岩相（Fonteilles与Guitard, 1988）；在东欧，罗马尼亚、匈牙利境内的喀尔巴阡，前寒武系呈断续岩块出现于达斯带（Dacide）的内带，隐伏于上第三纪磨拉石之下，它们卷入了阿尔卑斯和前阿尔卑斯期的推覆构造之中，连续地遭到阿尔卑斯期、海西期以及更老时期的同变质变形（Kräutner, 1988）。

秦岭造山带也不例外。秦岭造山带的核部杂岩，素称“秦岭群”，有多期变形叠加和构造置换，变质达高角闪岩相。它的沉积物可能形成于元古代，但受到晋宁期的变质变形、加里东期强烈的韧性再造作用和印支—燕山期的脆性改造。从地壳变形的观点，它的发展可分三大阶段，即硅铝壳形成阶段、硅铝壳韧性再造阶段和硅铝壳脆性改造阶段（游振东、索书田，1989）。不同阶段的变形变质事件都对核部杂岩打下了自己的烙印，因此，秦岭群的研究是秦岭造山带研究的关键之一，它对于查明秦岭造山带是在何种基底的基础上发展起来的，它的变质变形历史、变形物理环境、古构造模式以及后期的地壳运动对它有些甚么影响等，都是十分重要的。

1985—1989年，笔者等在地矿部“七五”重点攻关项目“秦巴地区重大基础地质问题和主要矿产成矿规律研究”的资助下，对东秦岭造山带核部杂岩进行了研究。研究对象的复杂性决定了我们的研究方法和工作方式的综合性。自1985年以来，本课题组采用了多学科共同研究和多尺度综合分析的方式，其中，包括变质岩石学和构造学密切结合，变质岩石学工作为构造学提供实际变质变形资料，而构造学则为变质作用和变质岩形成的构造背景提供依据。除外，在工作过程中，还不断吸收其他学科的新成就，如地球化学、流变学和地球物理等方面的成就，从而不断深化了认识。

本书共分两篇，第Ⅰ篇为方法论，介绍了大陆造山带构造解析及变质岩石学研究的基本方法和原理；第Ⅱ篇为研究成果，依据第Ⅰ篇所论证的思维和分析方法，结合秦岭造山带核部杂岩的实际，分别讨论了其组成、变形特征和变质变形的物理环境，勾绘了它的构造及变质历史、分析了它在整个东秦岭造山带演化历程中的地位和作用。

以构造为主导，是马杏垣教授倡导的原则，也是我们探索秦岭造山带演化规律所遵循的准则。从第Ⅰ篇第一章至第六章，索书田等系统地介绍了大陆造山带构造解析的基本方法和原理。构造解析的灵魂是具体问题具体分析，因此，在简单说明分解和组合的思维方法

之后,着重概括了大陆造山带核部杂岩的基本特点及相应的构造解析要点(第I篇第一章)。第I篇第二、三章,比较系统的讨论了造山带核部杂岩流变学和变形物理环境的分析方法,强调指出岩石变形过程中的温度、压力、应变速率、差异应力及流体等环境控制因素与岩石的流变行为控制因素的重要性。第I篇四、五、六章基于对造山带核部结构的不均一性和应变的不均一的认识,较详细地介绍了变形分解作用、剪切带阵列及鞘褶皱的理论和解析方法。显然,具有中下地壳构造环境及物质组成的秦岭造山带核部杂岩变形特征,与地壳上部层次岩石的变形行为很不相同,所以,在研究和分析方法上,也存在着较大的差异。

在第II篇中,索书田等在第一章里详细地对秦岭群分布区域的构造格架及变形特征进行了解析,依次讨论了其线状强应变带与透镜状弱应变域的结构特征、多期褶皱变形、剪切带阵列的几何学和运动学,进而总结了秦岭群变形的流变学演化规律。

在构造解析的基础上,进行了变质地层及其伴生的岩浆岩的研究,对秦岭群进行了岩性地层单位的划分。并在总结各典型剖面基础上,提出了秦岭群的基本组成是下部为片麻岩,向上钙硅酸盐岩、大理岩增多,上部以厚层大理岩为主,它们是相互联系又相互区别的两套变质岩系。从稀土元素配分、La-Th-Sc的相对丰度判断其时代属后太古,进一步从(1)单颗粒锆石Pb同位素,(2)Rb-Sr等时线法,(3)普通角闪石的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 坪年龄,(4)Sm-Nd等时线法等年龄测定资料,多方面论证了秦岭群的形成时代(第II篇第二章),说明秦岭群属元古代,但晋宁期区域变质和加里东期叠加热变质对它 有深刻影响。

在构造学、地层学、岩石学研究的基础上,对秦岭群各岩类的常量元素、微量元素的研究(第II篇第四、五章)表明秦岭群变质岩属于元古宙活动大陆边缘的火山碎屑沉积岩系,它应是华北地台南缘的一个增生的陆壳单元,主要沉积碎屑来源是华北地台。当然,不能排除扬子地台构造发展对它的影响。

在岩石学方面,变质岩石学近年来的主要进展在于将区域变质作用看作是动态过程,即变质作用过程中地温梯度是改变着的,造山带深部的岩浆作用、壳幔之间的相互作用和大陆碰撞导致的变质地体隆升作用都引起区域变质场温压的变化,这些变化将不同程度地反映在某些典型岩石的非平衡结构或矿物环带之中。借助于详细的变质岩石学工作,尤其是象石榴石等矿物微区成分变异的研究,有助于建立区域变质的压力、温度、时间( $PTt$ )轨迹,因而根据 $PTt$ 轨迹,可以重塑变质作用的构造热历史。在本书中,陈能松和游振东对 $PTt$ 轨迹重建作了详细介绍(第I篇第九章)。而且结合变质泥质岩的岩石学研究,提供了秦岭造山带核部杂岩形成和再造阶段的 $PTt$ 轨迹,阐明本区早期(印支期前)构造热历史(第II篇第六章)。

韧性剪切带、糜棱岩的发育是造山带普遍的地质现象,是地壳中应变软化及应变局部化的表现。同样,这也是秦岭造山带核部杂岩形成后经受强烈韧性再造的结果。如何研究韧性剪切带及糜棱岩类和有关塑性变形岩石及其微构造特征等,钟增球作了详细介绍(第I篇第七、八章);具体研究成果则列入第II篇第八章。

东秦岭造山带发育有多期的花岗岩浆活动和混合岩化。造山带的花岗岩类是成因最了解的岩类之一,存在着多种成因模式,例如:

(1)为地幔玄武岩岩浆结晶分异作用的残余溶液而形成花岗岩浆;

(2) 地槽 (造山带) 深部沉积物部分熔融而形成花岗质岩浆;

(3) 地槽 (造山带) 深部沉积物通过变质作用, 在固相线以下, 经变质交代所形成的花岗岩;

(4) 大陆地壳深部古老花岗岩重新熔融变为新花岗岩浆。

其中 (1)、(2)、(4) 是火成派; (3) 是变成派, 秦岭东段的花岗岩主要有晋宁期和加里东期, 经韩郁著从岩石化学、同位素年代学 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值、稀土元素配分形式等方面研究, 表明它们是地壳重熔型花岗岩 (详见第Ⅱ篇第三章)。

与这些重熔型花岗岩相伴生的混合岩, 成因亦较为复杂, 游振东、刘景波介绍了当前混合岩研究的新途径, 并结合东秦岭混合岩的发育, 划分了两期混合岩。采用稀土配分、痕量元素标准化值; 矿物空间分布特点和质量平衡计算等方法, 对晋宁期混合岩进行了成因分析, 指出变质分异和部分熔融同时存在的论点 (第Ⅱ篇第八章)。

最后, 根据现有实际资料, 论证了秦岭造山带核部变质杂岩的变质变形历史和秦岭陆内造山带的地壳演化基本框架 (第Ⅱ篇第九章), 从地壳流变学观点提出了形成、韧性再造和脆性改造等三阶段的发育模式。

本书是地矿部“七·五”重点攻关项目“秦巴地区重大基础地质问题和主要矿产成矿规律研究”所属四级子课题“秦岭群变质变形史及古构造模式”的研究成果。秦巴协调领导小组和地科院项礼文研究员在工作中给予大力协助。西北大学张国伟教授、西安地院安三元教授在合作过程中给予多方面的帮助。湖北省地质实验室、地科院测试所、地矿部宜昌所、地科院刘敦一教授, 北京铀矿研究所、中科院地质研究所胡世玲副研究员, 在加拿大Alberta大学工作的孙敏先生等单位和个人承担了全岩化学分析、光谱定量分析和同位素年龄测定; 中国地质大学 (北京) 探针室承担了全部矿物化学成分测定, 保证了项目的正常进行, 野外工作中得到河南省及陕西省地矿局有关单位的支持, 工作中还得到了王鸿楨、马杏垣、池际尚、张本仁教授的指导和帮助, 特此一并表示感谢。本书是集体劳动的成果, 参加工作的还有本校的81级—85级地质专业及岩矿专业部分大学生。书中全部图件由中国地质大学 (武汉) 绘图室负责清绘。本书定稿过程中蒙中国地质大学 (武汉) 岩石教研室主任王方正教授进行审读, 一并在表示谢忱。

应当承认, 由于造山带本身的复杂性, 我们的水平又有限, 现有的工作尚属初步的或探索性的工作, 有的结论还不很成熟, 我们期待着广大地质学者的批评指正。

# 目 录

## 第 I 篇

|      |                                  |             |       |
|------|----------------------------------|-------------|-------|
| 第一章  | 造山带核部构造解析                        | 索书田         | (1)   |
| 第二章  | 造山带核部地壳岩石的流变学                    | 索书田、钟增球     | (14)  |
| 第三章  | 造山带核部杂岩的变形物理环境                   | 索书田         | (29)  |
| 第四章  | 造山带的变形分解作用                       | 索书田         | (42)  |
| 第五章  | 造山带核部的韧性剪切带阵列解析                  | 索书田、钟增球、董月华 | (56)  |
| 第六章  | 鞘褶皱及其研究方法                        | 董月华、索书田、胡鱼华 | (81)  |
| 第七章  | 造山带中的显微构造分析                      | 钟增球、索书田     | (90)  |
| 第八章  | 造山带中的糜棱岩研究                       | 钟增球、游振东     | (101) |
| 第九章  | 中深变质岩变质作用 $P-T-t$ 轨迹的若干重建方法及成因分析 | 陈能松、游振东     | (113) |
| 第十章  | 混合岩成因研究的新方法                      | 游振东、刘景波     | (138) |
| 第十一章 | 斜长角闪岩质构造岩的研究方法和意义                | 韩郁菁、陈云兰     | (147) |

## 第 II 篇

|       |                                    |                     |       |
|-------|------------------------------------|---------------------|-------|
| 第一章   | 秦岭群区域构造基本格架及变形特征                   | 索书田、董月华、胡鱼华         | (166) |
| 第二章   | 东秦岭造山带核部杂岩的组成及其形成时代                | 游振东、韩郁菁、陈能松、索书田、钟增球 | (184) |
| 第三章   | 秦岭造山带核部两期同碰撞花岗岩的确定及其意义             | 韩郁菁、陈云兰             | (205) |
| 第四章   | 东秦岭造山带核部变质杂岩的岩石化学和地球化学             | 韩郁菁、陈云兰             | (217) |
| 第五章   | 马山口—蛇尾地区秦岭群斜长角闪岩和片麻岩类的地球化学特征与古构造环境 | 郝雅、钟增球              | (242) |
| 第六章   | 豫西蛇尾秦岭群变质作用 $P-T-t$ 轨迹特征及其地球动力学过程  | 陈能松、游振东             | (256) |
| 第七章   | 东秦岭造山带核部杂岩的混合岩化作用                  | 游振东、刘景波、韩郁菁         | (276) |
| 第八章   | 东秦岭造山带核部的韧性剪切带阵列                   | 钟增球、索书田、李兰荣         | (292) |
| 第九章   | 秦岭杂岩的变质变形史与大陆造山带的地壳演化              | 游振东、索书田、韩郁菁、钟增球、陈能松 | (300) |
| 结论    |                                    |                     | (311) |
| 英文摘要  |                                    |                     | (314) |
| 图版及说明 |                                    |                     | (324) |

# CONTENTS

## Preface

## Part I

|                                                                                                                              |                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Chapter 1. The structural analyses over the core part of an orogenic belt .....                                              | Suo Shutian ( )                             |
| Chapter 2. The crustal rock rheology in the core part of an orogenic belt .....                                              | Suo Shutian, Zhong Zengqiu ( )              |
| Chapter 3. The physical environment of deformation in the core complex of an orogenic belt .....                             | Suo Shutian ( )                             |
| Chapter 4. Deformational partitioning in the orogenic belt .....                                                             | Suo Shutian ( )                             |
| Chapter 5. The analyses of ductile shear zone array over the core part of the orogenic belt .....                            | Suo Shutian, Zhong Zengqiu, Dong Yuehua ( ) |
| Chapter 6. Sheath folds and methods of studying .....                                                                        | Dong Yuehua, Suo Shutian, Hu Yuhua ( )      |
| Chapter 7. The microstructural analyses in the orogenic belt .....                                                           | Zhong Zengqiu, Suo Shutian ( )              |
| Chapter 8. The mylonite study in the orogenic belt .....                                                                     | Zhong Zengqiu, You Zhendong ( )             |
| Chapter 9. The reconstruction and petrogenetic analyses of $P$ - $T$ - $t$ path in medium-high grade metamorphic rocks ..... | Chen Nengsong, You Zhendong ( )             |
| Chapter 10. New methods in studying the origin of migmatites .....                                                           | You Zhendong, Liu Jinbo ( )                 |
| Chapter 11. The methodology in studying amphibolitic tectonites and their geological significance .....                      | Han Yujing, Chen Yunlan ( )                 |

## Part I

|                                                                                                    |                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Chapter 1. The major tectonic framework and deformation characteristics of the Qinling Group ..... | Suo Shutian, Dong Yuehua, Hu Yuhua ( )                                  |
| Chapter 2. The composition and age of the core complex of the Eastern Qinling orogenic belt .....  | You Zhendong, Han Yujing, Chen Nengsong, Suo Shutian, Zhong Zengqiu ( ) |

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Chapter 3. The determination of two phase syn-collision granites in the core complex of the Eastern Qinling orogenic belt.....                                        |     |
| .....Han Yujing, Chen Yunlan ( )                                                                                                                                      |     |
| Chapter 4. The petrochemistry and geochemistry of the core complex in the Eastern Qinling orogenic belt.....                                                          |     |
| .....Han Yujing, Chen Yunlan ( )                                                                                                                                      |     |
| Chapter 5. The geochemical aspect of amphibolites and gneisses as a paleotectonic setting indicator of the Qinling Group in Mashankou—Shewei area, Western Henan..... |     |
| .....Hao Ya, Zhong Zengqiu ( )                                                                                                                                        |     |
| Chapter 6. The metamorphic $P$ - $T$ - $t$ path of the Qinling Group and geodynamic processes in Shewei area, Western Henan.....                                      |     |
| .....Chen Nengsong, You Zhendong ( )                                                                                                                                  |     |
| Chapter 7. The migmatization of the core complex in the Eastern Qinling orogenic belt.....                                                                            |     |
| .....You Zhendong, Liu Jinbo, Han Yujing ( )                                                                                                                          |     |
| Chapter 8. The ductile shear zone array of the core complex in the Eastern Qinling orogenic belt.....                                                                 |     |
| .....Zhong Zengqiu, Suo Shutian, Li Lanrong ( )                                                                                                                       |     |
| Chapter 9. The metamorphic and deformational history of the Qinling complex and the crustal evolution of continental orogenic belt.....                               |     |
| .....You Zhendong, Suo Shutian, Han Yujing, Zhong Zengqiu, Chen Nengsong ( )                                                                                          |     |
| Conclusions .....                                                                                                                                                     | ( ) |
| Abstract .....                                                                                                                                                        | ( ) |
| Plates and explanatory notes.....                                                                                                                                     | ( ) |

# 第一章 造山带核部构造解析

索 书 田

山链或造山带是地球表面最主要的构造形迹之一。从动力地球观出发,详细研究造山带的内部几何特征、演化过程中的运动学、流变学,对进一步理解地壳或岩石圈的组成、结构、变形和地球动力学是极为重要的。由于洋壳和陆壳的厚度、密度和流变学行为的差异(图 I-1-1),不仅不能完全用建立在大洋岩石圈研究基础上的经典板块构造理论来解析大陆岩石圈,而且也不能用它来解析大陆内部的古老山链或巨型造山带,尤其不能照搬板块构造的理论、思维及工作方法,来研究古老造山带核部或内带的变质杂岩的形成和改造的复杂过程,而是需要结合不同类型的造山带实际,研究和总结出一套行之有效的解析方法。

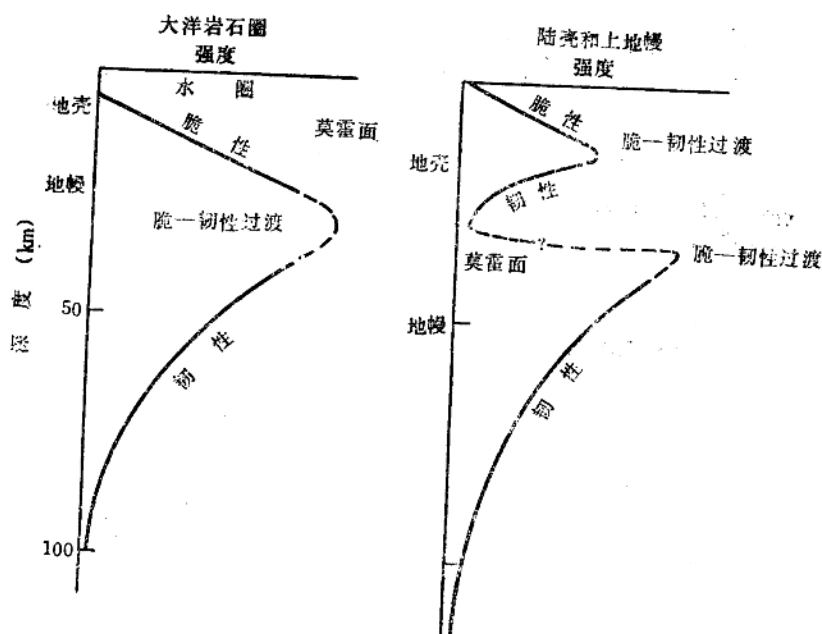


图 I-1-1 大洋和大陆岩石圈强度剖面图  
(据 Molnar, 1988)

## 一、构造解析的基本概念

构造解析 (tectonic analysis) 是在不同尺度上运用各种手段对地质体进行观察、分解、判别、比较和组合的思维和工作方法, 其目的在于建立构造热事件中岩石的运动学、动力学和流变学模式, 恢复岩层及变形序列, 重塑地壳或岩石圈演化历史, 帮助分析成矿规律, 指出找矿方向。

Roberts (1977) 曾详细阐述了造山带内带变质岩的构造分析 (structural analysis) 方法, 试图解释通常影响造山带内带的变形作用和变质作用的复杂历史。马杏垣教授在不同的著作中 (1978, 1981, 1983, 1987), 主要基于在变质杂岩及其他岩类地区构造研究的实践和理论探索, 对构造解析的一般原则和方法进行过深刻的讲解和论述, 尤其在他的《解析构造学刍议》(1983) 论文中提出的构造解析八项原则, 具有普遍的指导意义, 无疑, 在进行古老造山带核部变质杂岩构造分析时, 也是必须遵循和发展的。

据作者多年来的构造研究工作实践的体会, 构造解析的核心是分解和组合。其中居第一位的是分解。这是因为, 地质构造现象及地质作用, 都是在时间和空间上成对或成阵列 (array) 出现的。譬如, 一个地质体在受到外力作用后, 可以发生变位和变形, 前者可分解为直移和旋转, 而后者则可分解为体变和形 (畸) 变。同样, 线应变 ( $e$ ,  $e$ ) 和剪应变 ( $\gamma$ ), 挤压构造与伸展构造, 推覆构造与滑覆构造, 脆性变形与塑性变形 (图 I-2-8), 碎裂流动 (cataclastic flow) 与塑性流动 (plastic flow), 脆性剪切带 (断层) 与韧性 (即塑性) 剪切带, 工作硬化 (work hardening) 和应变软化 (strain softening) 等, 都是相互对立又彼此相关的。其实, 不同的地质作用和构造现象之间, 往往存在

着一系列相互过渡、转换和中间现象, 可以构成规律的序列或阵列。

Mattauer (1980) 据山脉形成的地质力学机制, 把山链分成俯冲型、仰冲型、碰撞型和陆块内部形变型4种 (图 I-1-2), 每一种山链都有其独特的几何特征、运动及动力学模式。地壳及岩石圈均由不均一的沉积岩、岩浆岩和变质岩组成, 它们的构造特征和形成环境虽有一些共性, 但差别是主要的, 故必须进行分解。即使对变质岩来讲, 由于变质程度和形成的构造背景不同, 也有组成和变形上的差异, 必须进行分解。作者 (1987) 曾将我国前寒武纪变质岩群构造类型分成5大类 (表 I-1-1), 总结了各种类型的变质环境、构造置换

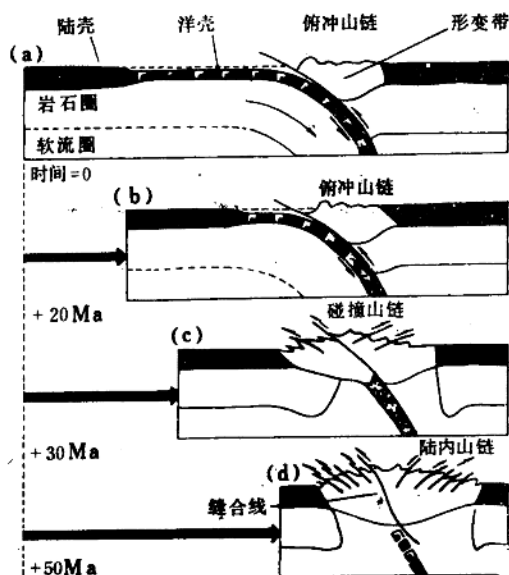


图 I-1-2 山链类型  
(据 Mattauer, 1980)

表 I-1-1 中国前寒武纪变质岩群构造类型

|    | 代表地层(例)            | 主要岩石类型                                                   | 变质作用及<br>$t, p$ 范围                                                                            | 混合<br>岩化<br>作用 | 原生结构<br>要素保存<br>完好程度 | 变形(次生)结构<br>要素发育程度                                     | 构造置换程度                                                  | 大型构造组合及样式群特征                                                                                      |
|----|--------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I  | 板溪群<br>昆阳群<br>花山群  | 板岩、变质砂岩、<br>油页岩、大理岩、<br>变质凝灰岩、少量<br>细碧角斑岩、枕状<br>熔岩       | 次绿片岩相<br>$t < 300^{\circ}\text{C}$<br>$p > 2 \times 10^8 \text{Pa}$                           | 无              | 保存很好                 | 局部发育                                                   | 未置换或基本未置<br>换, 层理为主要变<br>形面, 次生面理与<br>层理为切割关系           | 较开阔的复式褶皱, 板理呈扁状排列, 初<br>性一脆性剪切带发育, 局部有以层理为轴<br>面的开阔褶皱叠加                                           |
| I  | 津沱群<br>嵩山群<br>武当山群 | 千枚岩、片岩、石<br>英岩、变火山岩、<br>大理岩, 有红色岩<br>层及磷岩层、铁矿<br>夹层      | 绿片岩相<br>$t \sim 300 - 450^{\circ}\text{C}$<br>$p \sim 2 - 6 \times 10^8 \text{Pa}$            | 基<br>本<br>无    | 保存好                  | 比较发育, 不同岩<br>性和构造部位发育<br>程度不同, 剪理、<br>褶皱、香肠等线状<br>构造发育 | 局部发生置换, 层<br>理为主要变形面,<br>$S_1$ 也发生弯曲或<br>褶皱             | 紧闭线状复式褶皱, 分别构成槽沱式、嵩山<br>式及天台式等大型构造, 流理优选定向方<br>位清楚, 大型推覆构造及脆性一韧性剪切带<br>发育, 虽有多期变形现象, 但主期变形占主<br>导 |
| I  | 双山子群<br>胶东群<br>五台群 | 片岩、石英岩、变<br>基性火山岩夹大理<br>岩、磁铁矿石英岩,<br>局部为片麻岩, 主<br>要为绿色岩系 | 高绿片岩相—低<br>角闪岩相<br>$t \sim 450 - 550^{\circ}\text{C}$<br>$p \sim 5 - 7 \times 10^8 \text{Pa}$ | 局<br>部         | 大部<br>分<br>保<br>存    | 发育透入性剪理,<br>片麻理                                        | 部分置换, 层理和<br>次生面理均可作变<br>形面                             | 复式及平卧倒转褶皱, 多期变形, 有明显的<br>叠加褶皱干扰格式, 韧性推覆和剪切带发<br>育。总体建造类型和空间展布格式, 多反映<br>具有古构造特征                   |
| IV | 单塔子群<br>阜平群<br>登封群 | 各种片麻岩、斜长<br>角闪岩夹磁铁矿石<br>英岩、大理岩、灰色<br>片麻岩、少量麻粒<br>岩       | 角闪岩相—麻粒<br>岩相<br>$t \sim 550 - 775^{\circ}\text{C}$<br>$p \sim 7 - 10 \times 10^8 \text{Pa}$  | 强<br>烈         | 部分<br>保<br>存         | 很发育, 宏观上主<br>要面理为片麻理                                   | 大部置换, 片理和<br>片麻理为主要变面<br>面, 构造片麻岩和<br>强直片麻岩发育           | 复杂的紧闭褶皱推覆构造, 多期变形, 有各<br>种叠加褶皱干扰格式, 常出现假劈理、假单<br>斜, 多期韧性剪切带发育, 强应变带和弱应<br>变带呈规律组合型式               |
| V  | 迁西群<br>密云群<br>桑干群  | 角闪斜长片麻岩、<br>各种麻粒岩、灰色<br>片麻岩、孔兹岩、<br>磁铁矿石英岩               | 麻粒岩相<br>$t \sim 750 - 900^{\circ}\text{C}$<br>$p \sim 8 - 11 \times 10^8 \text{Pa}$           | 很<br>强<br>烈    | 很少<br>保<br>存         | 发育, 先期次生结<br>构要素部分消失, 动<br>态部分消失, 片麻<br>岩呈块状或片麻<br>状构造 | 置换比较彻底, 运<br>动面曾多次更替,<br>不同成分层的叠置<br>非原始层序, 构造<br>片麻岩发育 | 卵形及穹隆构造与紧闭线型褶皱相间列, 有复<br>杂的变形历史和构造序列, 韧性剪切带发<br>育, 大多数英云闪长岩等古老侵入体因强烈<br>应变呈层状或条带状产出, 有宽穹隆构造       |

程度、构造组合特征,并对各种类型的变质岩区的填图方法进行了讨论,其实质就是分解工作。分解工作无论在宏观尺度方面,还是在显微尺度方面,都是非常重要的。没有分解或不会分解,就不可能真正的观察和理解构造。

组合是一种比较和综合分析工作。它要求在全面的地质和地球物理的、野外的和室内的、宏观的和微观的观察分析和变形实验基础上,以现代构造学理论为指导,通过对比和总结,建立三维空间的构造样式和流变学模式,恢复其构造演化历史。组合是要从整体上更全面的认识和理解构造。Dewey等(1986)通过对安纳托利亚新构造的研究,认为一个年轻的碰撞造山带有5个要素组成,即高原、逆冲带、前陆岩石圈弯曲带、分布很宽的前陆或腹地变形带和造山型的坍塌或伸展带。这可以看成是研究年轻造山带的分解工作。下一步就是综合各个部分的材料进行组合,建立整个造山带的构造演化模型。由此可见,构造解析过程中分解是第一位的,组合是第二位的。分解必须客观,组合要尽力避免过多的主观因素带入构造分析中去,这就是全息或分形理论与系统工程中的辩证统一关系。

马杏垣教授多次指出构造研究中的方法论和构造观的重要性,认为先进的构造方法学和构造观能够提高地质工作者认识地质构造现象的能力,其中包括观察、分辨、分析和处理的能力。上述构造解析的基本概念,就体现了本书各位作者在秦岭古老造山带核部研究过程中采用的基本方法,也体现了具体问题具体分析这一辩证法的活的灵魂。自然,无论从研究的内容还是从研究的方法来说,它都还处于探索性阶段。

## 二、古老造山带核部的构造特征

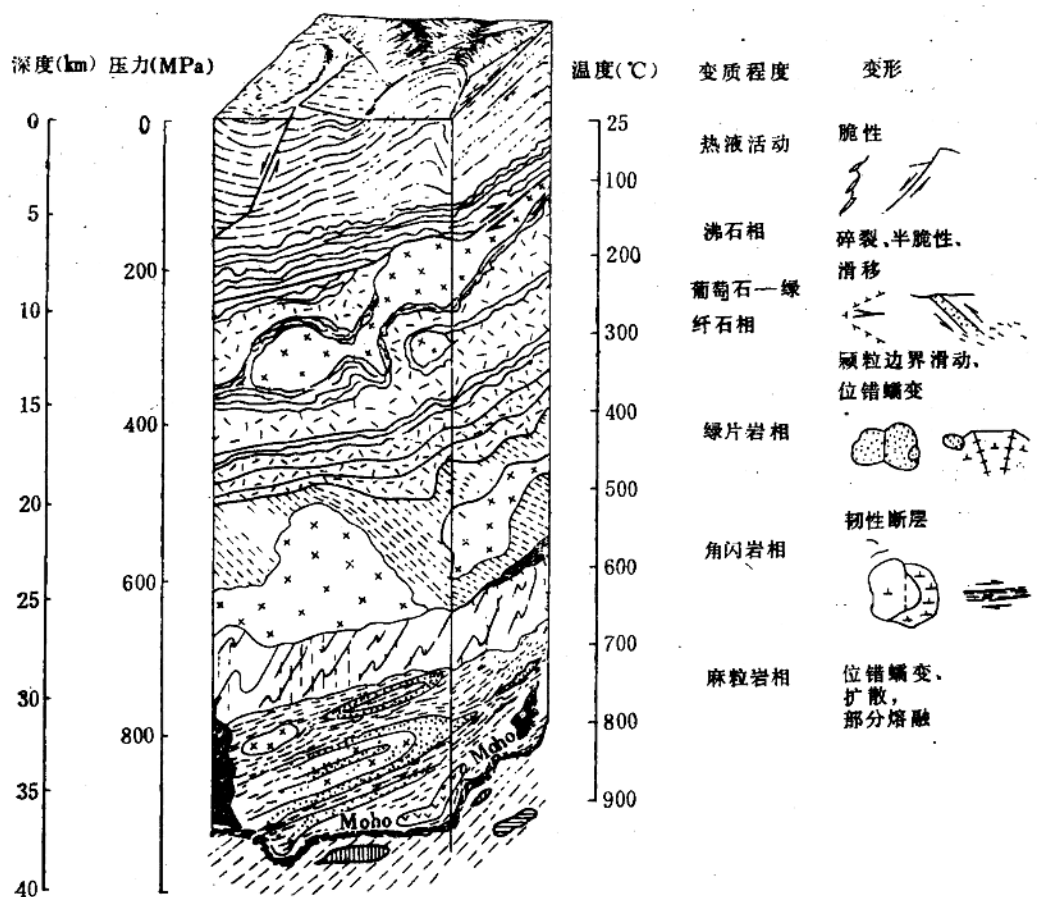
地球表面的巨型造山带核部或内带,大都出现一个“基底”隆起带或结晶轴带,组成这些隆起带或结晶轴带的岩石时代虽然很不相同,甚至同一造山带的“基底”岩石可以分属不同时代,但均具有变质杂岩或结晶杂岩的一些共同的构造特征。

1. 变质杂岩或结晶杂岩一般属绿片岩相和角闪岩相矿物及岩石组合,局部出现麻粒岩相

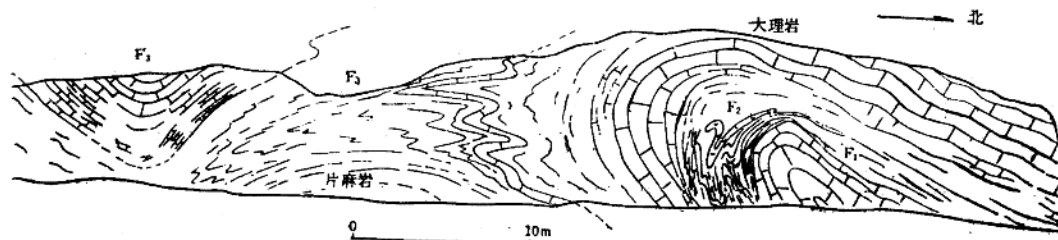
它们所反映的物理和化学环境,相当于大陆壳中下层次的构造和热状态(图I-1-3)。在这种条件下,岩石的流变性能与地壳浅层次的岩石相比,存在着显著的差异。摩擦滑动机制让位于准塑性或塑性变形机制。岩石一般具弹—纯塑性流变行为(elastic-perfectly plastic rheology)或粘弹性介质(viscoelastic medium)等特点,其变形分别服从塑性和粘性蠕变律。

2. 具有古老变质杂岩一般发育的构造变形特征

如多期面状和线状构造置换、多期褶皱叠加形成不同类型的干扰格式(图I-1-4)、多期基性和酸性的岩浆侵入和混合岩化作用等。因而,在通常情况下,在露头或陡崖上所看到的变质岩层叠置现象,不反映真正的沉积岩层和火山岩层序列,而代表构造堆垛或构造柱。有些年代老的变质杂岩,如大别群中的构造柱内,古老侵入体(如英云闪长岩),占的比例可达60—70%。需要强调指出的是,影响和改造变质杂岩的主要褶皱变形事件,常常只有2—3期(索书田等,1987)。同时,如果在熔融体高达30%的混合岩区看到了复杂的褶皱变形,不能用一般的叠加褶皱几何学和运动学方法进行分析,因为它们几何形态规律性很差,可能是在变质和混合岩化过程中形成的“粘性褶皱”(viscous fold)



图I-1-3 大陆地壳构造综合模式  
(据Carter, 1987)



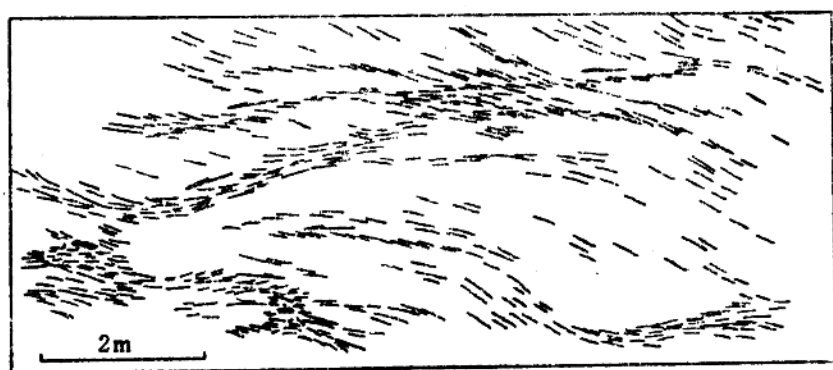
图I-1-4 河南省西峡县瓦房坪南秦岭群大理岩形成的叠加褶皱剖面格式

(McLellan, 1984), 形态和方位的变化, 不一定具有序列上的先后关系。多期褶皱叠加和构造置换的结果, 是造成地壳缩短和增厚。

### 3. 韧性剪切带和应变软化带发育

大型造山带核部的变质杂岩地体与相邻的地体之间, 往往以长期活动的线性构造相

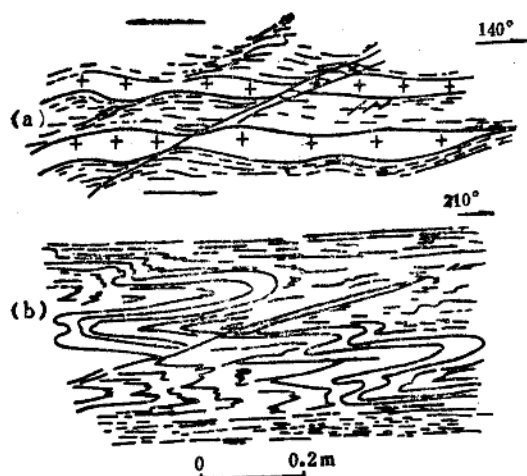
隔。这些长命线性构造大都有早期复杂的塑性变形历史。在核部变质岩体内部，也发育不同时代、不同几何产状各种尺度的韧性剪切带及糜棱岩带，构成各种各样的系统和阵列。剖面上的推覆型或剥离型近水平的韧性剪切作用，将变质地体分隔成一系列的叠片构造，其三维空间上的结构样式与浅层次发育的逆冲推覆构造和滑覆构造有许多类似之处，也出现断坪、断坡（前断坡、侧断坡和斜断坡）、叠瓦扇、被动顶盖双冲断层等几何形态和组合样式。尤其特征的是，平面上一组或两组共轭韧性剪切系统，把核部结晶杂岩体分割为透镜状及菱形块体，形成弱应变域和线状强应变带的规律组合格式。这种网结状剪切带阵列所围限的透镜状或菱形块体样式，在不同尺度上都可看到，区域上如加拿大Abitibi带、南非林波波带和东秦岭造山带核部结构样式，露头尺度如苏格兰高地 Scourie 附近(Coward, 1984) (图 I-1-5) 及大别变质地体内所见。显微尺度和超显微尺度就是光学显微镜和电镜下观察到的糜棱岩接合结构 (inosculating textures)。由此可见，造山带结晶轴带的组成和结构是很不均一的。大型的韧性剪切或应变软化系统，不仅是造山带核部的主要变形样式，而且对整个造山带的演化也起着重要的控制作用。一些大小不等的慢源镁铁质岩体或包体，往往沿着大型剪切带发生构造侵位。



图I-1-5 苏格兰高地Scourie北2km处两组剪切带交叉形成的构造格式  
(据Coward, 1984)

#### 4. 再造作用强烈

深刻影响造山带基底岩石的构造和变质改造作用称为再造作用 (reworking) 或再活化作用 (索书田等, 1988)。再造作用主要是沿着边缘和内部的大型剪切系统进行的，主要表现在：(1) 强烈的韧性剪切作用，发育各种伸展和挤压流动构造 (图 I-1-6)，出现不同形态、方位的非圆柱状褶皱，常常发育特征的 $\alpha$ 型褶皱及剑鞘褶皱；(2) SL组构型式的改变并发育新的面状和线状组构。当新生面、线组构非常发育时，往往掩盖、置换、甚至完全消灭了先期构造。据作者的经验，这种新生面、线构造对先期构造的改造作用，多是从边界剪切带开始的 (图 I-1-7)，因之，随着再造作用的递进发展，新生面、线组构发育的带逐渐加宽，而原始结晶轴带相应变窄，最终会使核部变质杂岩的面貌发生彻底的改变；(3) 先存的褶皱和区域性面理临近剪切带发生韧性牵引和方位偏转，形成规模和曲率不等的弧形或S型构造。根据变形和应变分解作用 (Bell, 1981, Bell et al., 1986) 原理，被网结状剪切系统所围限的弱应变块体，在剪切带发育过程中，一般不发生大



图I-1-6 大别山白羊山剪切带内伸展流动 (a) 和挤压流动构造 (b)



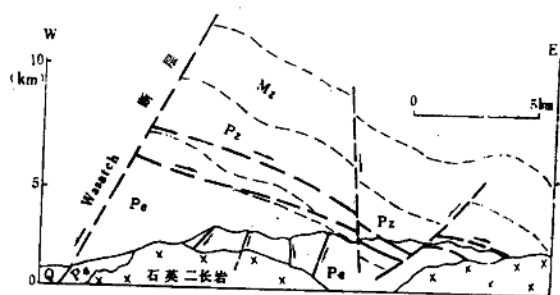
图I-1-7 再造作用对造山带轴带边缘构造的影响  
(据Roberts, 1982)

岩与花岗质、长英质岩石在塑性序列中的位置来看, 假如这些岩石处于同样的温度、压力、流应力及应变速率环境下遭到剪切应变, 碳酸盐岩糜棱岩化要比花岗质、长英质岩石容易得多; (5) 退变质作用明显。一般情况下, 伴随造山带基底的再造作用形成的矿物组合, 反映了温度和压力的降低。如果考虑到结晶轴带大型剪切带对变质作用的影响, 还会出现矿物颗粒的减小、矿物和化学成分的改变以及等变线 (isograd) 倒转等复杂情况 (Mitra, 1978; Mason, 1984); (6) 多期基性-酸性侵入体就位和新成体 (neosomes) 的发育。它们部分是造山带结晶基底本身部分熔融或变质分异的结果, 部分也可能来自下地壳和上地幔。与此相关的地球化学元素、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值、Pb 同位素比值以及矿物年龄型式, 都会有明显的变化 (Collerson 等, 1982; Hickman, 1978), 在解释同位素年龄数据的地质意义时, 应当特别注意到这一点; (7) 掩盖和破坏了不同时代构造层或构造-地层单元的原始接触关系。前已述及, 造山带的核部变质杂岩体与相邻的地质体多为断层接触。即使看不到明显的脆性断裂面, 也不太可能找到真正的地层或不整合接触面, 似乎给人们以“连续过渡”的印象。其实, 这正是造山带核部与上覆岩层由于再造作用造成的必然结果, 只有通过详细填图和详细的构造-热状态分析, 才能查明它们之间的空间和时间关系。

## 5. 抬升和脆性改造作用显著

的旋转变位, 应变和位移主要集中于剪切带内。换言之, 靠近剪切带的弧形构造不是由弱应变域转动而形成的, 而是由剪切带内部的塑性流动“韧性牵引”造成的; (4) 发育各种宏观和微观尺度上的糜棱岩、构造片麻岩和强直片麻岩 (straight gneiss) (Davidson, 1984) 等。一般说来, 识别花岗质、长英质糜棱岩没有太大困难, 而在鉴定碳酸盐岩糜棱岩时, 由于它固有的结晶塑性变形和恢复作用行为, 有时很少保留或不保留有糜棱岩结构或变晶糜棱岩结构, 需要结合野外和室内研究, 慎重判断。不过, 从流变学观点和碳酸盐

造山带核部杂岩乃至整个造山带发育过程中,虽然挤压缩短作用占主导地位,但正如马杏垣教授指出的(1983),伸、缩、升、降、旋、滑、剪、斜等变形场(deformation field)在地壳和岩石圈演化过程中,于不同阶段和不同区段,同时或交替作用。这里讨论的抬升和脆性改造作用,主要指造山带的晚期不同型式的剥蚀和各种性质的断裂对核部杂岩的切割破坏。不言而喻,大型造山带核部变质杂岩之所以能够出露在地表,主要是因为:(1)造山带由均衡调整作用造成的总体抬升剥蚀,(2)断块抬升或(3)核部变质杂岩体逆冲推覆于较年轻的构造地层单元之上。近年来,由于在北美阿巴拉契亚造山带发现由前寒武系组成的主脉蓝岭之下是一条巨大的近水平的断裂面,它使前寒武系变质杂岩向西推覆于未变质的古生代沉积岩系之上,逆冲推覆距离达260km,推动了对逆冲推覆构造的研究。人们纷纷对出露地表的古老结晶杂岩提出疑问,这些古老变质岩系究竟是“有根”还是“无根”?通过大量的地质和地球物理资料证明,有些老的变质岩系的确是外来系统,显然是在挤压体制下,沿着主滑面远距离位移形成的。但在更多情况下,古老岩系是在高角度正断层控制下的块断抬升出露地表的,与相邻下降的盆地共同组成“盆岭”构造格局,美国西部盆岭省、我国秦岭等地区,都是典型代表。无论上述那种情况,断裂都是在摩擦滑动机制下发育的脆性破裂面,伴生有大量的碎裂岩或超碎裂岩,只有在差异升降速度大的地段,如美国犹他州的Wasatch断层小Cottonwood区,才有局部的年轻糜棱岩出露在地表。在盐湖城附近的渐新世石英二长岩岩株,遭受近南北向的Wasatch正断层(向西倾斜,倾角 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ )影响发育糜棱岩和碎裂岩,Parry和Bruhn(1987)据Corner Creek区叠加在断层下盘糜棱岩组构上的碎裂岩中流体包裹体的温度压力测算,该处Wasatch断层的垂直断距最小为11km,平均移动速率为0.67mm/a。地球化学特点所反映的断层落差与地质上的估算结果(图I-1-8)是很接近的。



图I-1-8 犹他州Cottonwood区Wasatch断层剖面  
(据Parry和Bruhn, 1987)

下盘剥蚀掉部分的恢复是示意性的

全面的研究造山带核部变质杂岩的塑性和脆性变形全过程,建立完整的 $P-T-t-d$ 轨迹,才能认识它以及整个造山带的构造演化过程。

综上所述,造山带核部或结晶轴带的结构和演化历史是很复杂的,形成主要构造格局和特征的变形机制是塑性或脆性—塑性流变过渡体制,反映的是大陆地壳中深层次的构造-热状态。晚期的抬升、剥蚀和摩擦滑动机制形成的脆性断裂系统,无论是空间上与先期韧性剪切带复合的还是新生的,都属于对造山带核部主体构造的破坏和改造。只有全

### 三、古老造山带核部构造解析要点

作者曾在学习马杏垣教授提出的构造解析原则和提纲(1983)的基础上,结合构造研究的实际,进一步阐述了构造解析的基本思路,强调具体构造解析工作中的10个要点(朱志