

中国地质大学（北京）研究生教材基金资助（No.2004001）

# 岩石成因、构造环境 与成矿作用

邓晋福 罗照华 苏尚国 莫宣学  
于炳松 赖兴运 谌宏伟 编著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

《岩石成因、构造环境与成矿作用》一书,是中国地质大学(北京)系列研究生教学用书之一,主要从火成岩的角度论述了岩石成因及其与大地构造环境和成矿作用的关系。第一部分包括岩浆的起源、岩浆的演化、火成岩与构造环境、火成岩与大陆地壳生长、火成岩与成矿作用等,系统阐述了火成岩成因的基本理论及相关的地质问题,内容深入浅出,力图建立一个全方位思考岩石学基本科学问题的模型。第二部分是作者多年来从事与岩石学相关科研工作的实例,目的是方便读者对第一部分的理解和实际应用。

本书可作为高年级硕士研究生和博士研究生专业课教材,也可供从事地质研究和国土资源调查的地质工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩石成因、构造环境与成矿作用/邓晋福等编著.  
—北京:地质出版社,2004.12  
ISBN 7-116-04272-5

I. 岩... II. 邓... III. ①火成岩—成因—研究  
②火成岩—成因—关系—大地构造学③火成岩—成矿作用—研究 IV. P588.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第118807号

---

责任编辑:孙亚芸

责任校对:丁海云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324573(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张:24.5

字 数:595千字

印 数:1—1300册

版 次:2004年12月北京第一版·第一次印刷

定 价:62.00元

ISBN 7-116-04272-5/P·2528

---

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

# 序 一

21 世纪将是地球科学的世纪。20 世纪末，地球科学已初步发展成为地球系统科学，而“地球动力学”则是地球系统科学的核心问题之一。

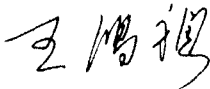
以邓晋福教授为首的科研集体长期坚持“地球动力学”的研究。在国内率先应用与总结探索地球深部的“岩石学探针”方法，并在热力学的基础上发展出一系列模拟进程，形成了了解造山带动力学演化的一种有效途径。近年来，他们在坚持对岩石成因与演化的精细过程进行剖析的同时，逐步将岩石学研究成果推向与区域大地构造和成矿作用过程的结合，深入探讨了区域岩石圈结构和演化的深部过程约束，取得了多项重要的成果，提出了中国东部岩石圈巨大减薄、滞后型弧岩浆作用和青藏高原三种岩石圈类型等重要概念。早在 1996 年出版的《中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙》一书中，他们就从岩石学与深部过程的角度探讨了中国大陆构造的框架模型；识别出中国东部燕山期陆内造山带存在两种不同的火成岩构造组合及相应的两种不同的岩石圈类型，从而提出了两种类型的造山过程的  $p$ - $T$ - $t$  轨迹，即以青藏高原为例的顺时针轨迹和以华北燕山陆内造山带为例的反时针轨迹。

这个学科群体在岩石成因理论、造山带岩石圈演化、区域岩石大地构造、壳幔相互作用、深部过程与成矿等各方面都取得了许多重要进展，部分成果已在各种专业刊物上发表。现在他们将这些成果和部分未发表成果系统编撰成《岩石成因、构造环境与成矿作用》一书。此书分为总论与各论两部分，总论是理论和概念通述，主要以当代火成岩岩石学发展现状为基础，从岩石成因的最根本物理化学条件入手，系统而深入浅出地论述了岩浆起源、岩浆演化、火成岩构造组合、大陆生长、火成岩与资源环境的关系，有不少新见和综述。各论主要是近年来的具体研究成果实例，包括构造岩浆分析、沉积岩物质成分、深部信息及其成矿作用、壳幔相互作用、紫苏花岗岩成因、岩石成因热力学数值模拟以及铜镍（铂）硫化物矿床成因等内容，是总论部分的延续和例证。全书可供读者较深入地学习领会岩石成因的理论基础和实际运用的范例，可供有关领域的工作者参考。

20 世纪 60 年代发生了以板块构造或全球构造学说为标志的地学革命。20 世纪 70 年代起，各地质学者均以其为依据，重新审视、论证和发展自己的学科。构造地质等历史性地质学科在这方面起步较早，岩石、矿床等物质性地质学科在大陆地质和深部地质方面的研究则更为详实和深入。“地球动力学”之所以可称为当代地球科学核心问题之一，是由于它可能通过大地构造这一综合学科分支，融合历史性和物质性两个方面的地质学科，导致固体地球科学的深入发展，并将把探讨地球发展演化史这一根本任务推向前进。

我感到高兴的是，此书已从地球动力学的方法研究扩展到中国区域岩石大地构造环境的研究，并已涉及了中国大地构造的一些重要问题，这是十分可贺的重要的一步。同时，此书的特色是其内容体现了当代岩石学的发展前缘，既有系统的基础理论综述，又有具体

研究的成果例证，章节编排具有很强的系统性和可读性，兼具学术专著和高级教材的性质，是有特色的精品著作的一个范例。我在这里为此书的出版向著作者们表示诚挚的祝贺和敬意。

中国科学院院士   
2003年10月于北京

## 序 二

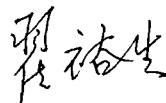
当今地球科学的两大前缘课题，一个是地球的早期历史，一个是深部作用过程，都是以地球物质研究为基础的。近二十年来，地球物质科学得到了快速发展。在地球系统科学的总框架下，矿物学、岩石学、矿床学、构造学、地球化学、地球物理学等分支学科相互融合与渗透，正在探索建立以地球深部过程为纽带的、紧密联系在一起的新的学科群体。

以邓晋福教授为首的科研集体长期以来注重成岩成矿物理化学机理的研究。多年来，他们在坚持岩石成因与演化过程剖析的同时，逐步将岩石学研究推向与区域大地构造和成矿作用过程的结合，并以“岩石学探针”技术为依托，综合运用多学科的理论与方法深入探讨了区域岩石圈结构和演化的深部过程约束，取得了不少重要的成果，提出了中国东部岩石圈巨大减薄、滞后型弧岩浆作用、青藏高原三种岩石圈类型等重要概念。1996年出版的《中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙》一书从岩石学与深部过程的角度阐述了中国大陆构造的框架模型，引起了相关领域学者的广泛注意，并获得了1997年国家新闻出版署颁发的第八届全国优秀科技图书奖二等奖。

近年来，该学科群体的成员带领研究生深入我国多个地区，在岩石成因理论、造山带岩石圈演化、区域岩石大地构造、壳幔相互作用、深部过程与成矿等方面取得了许多新的成果，部分已经发表在各种专业刊物上。为了使这些研究成果及未发表成果系统化，他们编撰了《岩石成因、构造环境与成矿作用》一书。该书分总论与各论两个部分，共十一章。总论部分以当代岩石学，主要是火成岩岩石学发展现状为基础，从岩石成因的基本物理化学条件入手，深入浅出地论述了岩浆起源与演化、火成岩构造组合、大陆生长、火成岩与矿产资源的关系等内容。各论部分是他们近年来的具体研究实例，包括构造岩浆分析、沉积岩物质成分和深部信息及成矿、壳幔相互作用、紫苏花岗岩成因、岩石成因热力学数值模拟以及铜镍（铂）硫化物矿床成因等章节。它们可以被看作是总论部分的延续，有助于读者较深入领会和研究岩石成因理论基础；也可以看作是独立的研究成果，可供相关领域的工作者参考。

作为中国地质大学“211工程”一期建设“岩石圈-软流圈系统物质及其深部过程”子项目的重要成果之一，本书专注于区域岩石大地构造环境及相关的基础地质和资源问题研究，并提出了创新的观点，开拓了岩石学研究的新领域。该书的特点是既有系统的基础理论探索，又有具体研究实例，兼具专著与教材性质，具有很强的可读性。其内容体现了当代岩石学前缘领域的多个方面，是一本不可多得的理论与实际相结合的著作，期望它在我国地球科学研究和地球科学教学中起到应有的作用。

中国科学院院士



2003年10月

# 前 言

作为地质作用的主要产物和作用过程的主要记录载体，岩石的研究历来受到地学界的关注。处在这样一个与固体地球各分支学科都要发生必然联系的位置，使我们感到责任重大，力求使自己的研究成果具有坚实的物理化学基础。长期以来，我们在科研与教学过程中，将热力学基本原理与岩石学紧密地结合在一起，力图将各种复杂的成岩成矿过程用相对简单而严格的物理化学语言来描述，从而达到识别真实自然过程的目的。在这一过程中，以邓晋福教授为首的科研集体坚持岩石成因与演化的精细过程剖析，逐渐形成了一套研究成岩成矿作用的理论体系与工作方法，并将研究方向引向地球动力学，来探求岩石学过程的深层原因。同时，逐步将岩石学研究成果推向与区域大地构造、地球物理学和成矿作用过程的结合，探讨了区域岩石圈结构和演化的深部过程约束，取得了一批重要的研究成果。这些成果涉及到岩石学及其相关领域的许多方面，使得我们萌发了编写一本专著兼教材性质的书，供研究生教学和科研参考之用。

本书包括两部分共十一章，前五章为总论，后六章为通过研究实例对某一专题进行论述。总论部分由邓晋福执笔。第一章的论述从岩浆起源的基本要素出发，对几种不同成分与源区的岩浆成因作了比较全面的阐述。第二章论述了四种主要的岩浆作用过程，对于理解火成岩的多样性具有重要意义，可以帮助读者比较全面地分析岩浆作用过程。第三章重点论述了火成岩系列及其与区域地质演化的关系，阐明了地质事件序列  $p$ - $T$ - $t$  轨迹与大地构造过程的关系，是我们依据火成岩岩石学研究判别构造环境的基础。第四章关注壳幔物质交换与深部作用过程，对岩石圈-软流圈地球物质系统的形成与演化作了阐述。第五章以深部作用过程和区域构造演化为基础，探讨了火成岩与成矿作用的关系，再次强调了岩石圈/软流圈系统大灾变与成矿作用大爆发之间的有机联系，为区域成矿预测提供了岩石学依据。第六章由莫宣学执笔，以三江地区火山岩研究成果为基础，提供了一个有关火成岩构造组合的研究实例。第七章由谌宏伟、罗照华执笔，详细阐述了昆仑造山带早中生代的岩浆底侵作用及其与岩浆混合作用的关系，对于认识造山带后碰撞阶段的岩浆作用特点有借鉴意义。第八章由赖兴运执笔，论述了热力学平衡在岩石学研究中的意义，并提供了岩石相平衡模拟的方法。第九章由于炳松执笔，通过对塔里木和扬子地区不同时代沉积岩中深部物源信息的识别，论述了深部作用过程在表生沉积作用中的响应及其与成矿作用的关系，是一个很有新意的研究实例。第十章由苏尚国执笔，从山东沂水紫苏花岗岩产出的地质背景出发，根据紫苏花岗岩中残晶相矿物的发现、流体包裹体特征和变质作用  $p$ - $T$  演化趋势，提出了紫苏花岗岩新的成因模型，并将其与区域地球动力学和早前寒武纪地壳演化紧密联系在一起。第十一章由苏尚国执笔，综合最新国内外铂族元素成矿作用的研究成果，阐述了铂族金属矿床与镁铁质-超镁铁质岩浆活动的关系及其富集机理。全书由罗照华编辑定稿。

我们非常感谢对本书的出版给予关注和帮助的个人与单位。在本书的编写出版过程中，得到了王鸿祯院士和翟裕生院士的亲切关怀并作序，聂轶苗完成了前五章的文字录入

工作，李莉、梁凤华、姜德波、李志红等完成了部分图件的清绘，出版经费由中国地质大学（北京）研究生院提供。

作 者  
2003 年 10 月于北京

# 目 录

序 一  
序 二  
前 言

## 第一部分 总 论

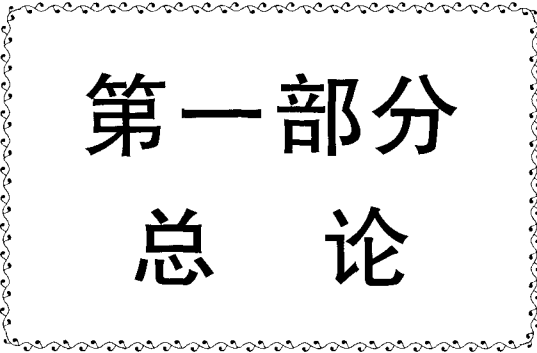
第一章 岩浆的起源 .....	(3)
第一节 概述 .....	(3)
第二节 玄武质岩浆的起源 .....	(5)
第三节 安山质岩浆的起源 .....	(21)
第四节 花岗质岩浆的起源 .....	(33)
第五节 小结 .....	(49)
第二章 岩浆的演化 .....	(50)
第一节 结晶(晶体)分离作用 .....	(50)
第二节 岩浆混合作用 .....	(71)
第三节 同化作用和 AFC 模型 .....	(77)
第四节 硅酸盐液体不混溶 .....	(80)
第三章 火成岩与构造环境 .....	(85)
第一节 火成岩的分类命名和相关术语、名词 .....	(85)
第二节 火成岩系列 .....	(94)
第三节 造山带火山岩系列, $K_{60}$ 和地壳厚度 .....	(99)
第四节 火成岩构造组合 .....	(102)
第五节 地质事件序列 $p$ - $T$ - $t$ 轨迹与构造过程 .....	(122)
第四章 火成岩与大陆地壳生长 .....	(130)
第一节 大陆地壳与地幔岩石圈: 地幔分异的互补产物 .....	(130)
第二节 壳幔物质与深部过程 .....	(130)
第三节 岩石圈-软流圈系统的形成与演化 .....	(132)
第四节 华北地台前寒武花岗岩类、陆壳演化与克拉通形成 .....	(137)
第五节 岩浆弧与大陆地壳生长 .....	(144)
第六节 古老陆壳的强烈改造 .....	(146)
第七节 关于地球物理场解释的讨论 .....	(147)
第八节 地壳的性质与壳幔交换 .....	(148)

<b>第五章 火成岩与成矿作用</b> .....	(150)
第一节 对流地幔输入大陆：大陆成矿作用的直接驱动力 .....	(150)
第二节 岩石圈/软流圈系统大灾变与成矿大爆发 .....	(151)
第三节 岩石圈尺度三维不连续与大尺度成矿带的运储矿空间 .....	(154)
第四节 岩浆-流体-成矿系统与巨型矿集区形成的基本过程 .....	(155)
第五节 中国大陆拼合形成阶段、岩石圈尺度不连续与成矿作用 .....	(158)
第六节 前寒武纪成矿作用 .....	(162)
第七节 古生代成矿作用 .....	(164)
第八节 中国古特提斯形成演化与资源效应 .....	(167)
第九节 印支期后的成矿作用 .....	(177)
第十节 火成岩构造组合、造山-深部过程与大规模成矿作用 ——以中国东部燕山期为例 .....	(180)
第十一节 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游 Cu-Fe 成矿带 .....	(187)
第十二节 铜陵 Cu-Au (Ag) 成矿区 ——岩浆-流体-成矿系统和亚系统的识别 .....	(190)
第十三节 岩浆分异作用与成矿 ——以华南某些含稀有元素花岗岩为例 .....	(194)
第十四节 岩浆期后溶液 ——以武山铜矿为例 .....	(199)

## 第二部分 各 论

<b>第六章 造山带火山岩岩石-构造组合分析</b> .....	(217)
第一节 火成岩岩石-构造组合的含义 .....	(217)
第二节 三江造山带火山岩的时空分布及岩石-构造组合 .....	(218)
第三节 造山带火山岩岩石-构造组合分析的若干问题 .....	(230)
<b>第七章 岩浆底侵作用：壳幔相互作用的重要机制</b> ——以昆仑造山带早中生代岩浆活动为例 .....	(242)
第一节 岩浆底侵作用的含义 .....	(242)
第二节 底侵作用的识别 .....	(242)
第三节 昆仑造山带早中生代岩浆活动 .....	(243)
第四节 岩浆底侵作用实例 .....	(246)
第五节 讨论与结论 .....	(271)
<b>第八章 岩石成因热力学数值模拟</b> .....	(277)
第一节 热力学模型 .....	(277)
第二节 岩石热力学相关关系 .....	(288)

第三节	岩石相平衡模拟的应用 .....	(290)
<b>第九章</b>	<b>沉积岩物质成分、深部信息及其成矿作用 .....</b>	<b>(313)</b>
第一节	塔里木地台下寒武统底部黑色岩系中的深部物源信息及其构造背景 .....	(314)
第二节	扬子地台西南缘沉积岩中的深部物源信息及其构造背景 .....	(325)
第三节	沉积岩中的深部物源与成矿作用 .....	(334)
<b>第十章</b>	<b>山东沂水紫苏花岗岩成因及早前寒武纪地壳演化 .....</b>	<b>(340)</b>
第一节	概述 .....	(340)
第二节	区域地质概况 .....	(341)
第三节	岩相学特征 .....	(341)
第四节	流体包裹体特征 .....	(347)
第五节	紫苏花岗岩成因 .....	(351)
第六节	紫苏花岗岩成因及地球动力学 .....	(360)
<b>第十一章</b>	<b>镁铁质-超镁铁质岩浆活动与铂族金属成矿作用 .....</b>	<b>(366)</b>
第一节	铂族金属特征 .....	(366)
第二节	全球主要铂族矿床分布、类型及特征 .....	(368)
第三节	铂族矿床富集机理及主要控制因素 .....	(376)

A decorative rectangular border with a repeating floral or scrollwork pattern surrounds the text.

# 第一部分

## 总 论

# 第一章 岩浆的起源 (Origin of magma)

## 第一节 概 述

地球上的岩浆大体上有三种组成 (composition): ①硅酸盐岩浆 (silicate magma); ②碳酸岩岩浆 (carbonatite magma); ③含矿岩浆 (ore magma)。下面我们主要讨论硅酸盐岩浆, 并简称为岩浆, 在涉及其他两种组成的岩浆时将写出它们的全名。

### 一、火成岩的地质分布及其可能的源区

从全球尺度来看, ①现今大洋地区, 包括洋中脊和洋岛, 主要是玄武岩类, 它是洋壳的主要组分 (component); ②现今大陆地区, 主要是花岗岩类, 它是陆壳的主要组分; ③现今岛弧和大陆边缘弧地区, 主要是安山岩类, 它是火山弧下面地壳的主要组分。

相应地, 这三个火成岩分布区的壳幔构成有较大的差异: ①大洋区没有陆壳, 使人们相信, 玄武岩类源于其下伏的地幔橄辉岩; ②大陆地区有巨厚的陆壳, 人们便推测, 巨量花岗岩类的形成主要源于陆壳内部; ③岛弧和大陆边缘地区是大洋地壳和岩石圈向大陆下面俯冲消减的地带, 使人们相信, 那里的安山岩类主要源于洋壳及其上面的楔形地幔区。

上述火成岩的地质分布及其可能的源区的相互对应, 可作为一个地质模型, 为岩浆起源的研究, 包括高温高压熔融实验, 提供了最重要的研究框架。不同的壳幔构成对应分布着不同的火成岩类, 人们便推测, 它们之间有着成因联系。高温高压相平衡的熔融实验提供了岩浆起源的  $p$ - $T$ - $x$  成因框架, 这样它可看作是天然岩石的模型 (models of natural rocks), 成为直接检验和发展地质模型的最有效的途径之一。

### 二、固相线的三种主要类型

在  $p$ - $T$ - $x$  (压力-温度-组分) 的空间内, 一个固相岩石发生熔融作用开始的  $p$ - $T$ - $x$  条件 (或位置) 叫固相线 (solidus)。有关固相线的实验成果, 常常用  $p$ - $T$  图解来表述, 这样, solidus 就表述为一条曲线, 因为熔融作用发生时, 增加了一个液体 (liquid) 或熔体 (浆) (melt) 相 (phase), 使双变平衡转变为单变平衡。

图 1-1a 展示了三种类型的固相线。曲线 1 ( $\widehat{1Q}$ ) 为干 (dry) 固相线, 呈正斜率, 即随着压力升高, 开始熔融的温度亦升高。这是因为, 发生熔融时要扩容 (扩大体积), 而压力升高妨碍扩容, 需要温度更大地升高, 才能达到固相线所需要的扩容要求, 这时形成的部分 (局部) 熔体 (partial melt) ( $L_1$ ) 是干的。曲线 3 (或  $\widehat{3RQ}$ ) 为过量水条件下的固相线 (solidus with excess water)。在低压时为负斜率, 因为熔体中含饱和水时, 使熔融温度降低, 随压力升高, 含饱和水越多, 所以熔融温度降低。然而, 当熔体中含水量达到最大饱和度后, 压力升高, 含水量不再增加, 因此, 表现为干系统那样的正斜率,  $L_3$  为

含饱和水的部分熔体。过量水指比饱和系统的水量还要多的水。因此，多余的水必呈一个独立的气相（V）出现，如图 1-1a 曲线 3 两侧所示。曲线 2（或  $\widehat{2RQ}$ ）为矿物脱水（dehydration）熔融的固相线，即固相系统（或岩石）中不含自由水（即无气相），水分布在含水矿物中，如角闪石、云母等。它的固相线可由曲线 3 和矿物脱水反应曲线（ $H = A + V$ ，图 1-1a 的  $\widehat{2R}$  及其虚线延长线所表示）的交会（交点 R）推导出来。低于交点 R 的压力条件下，随温度升高，首先发生含水矿物的脱水反应（图 1-1a 的虚线），放出自由水（V）；当温度升高达  $\widehat{RQ}$  曲线时，因为这时系统中有自由水（V）存在，起始熔融是在过量水条件下发生的，所以这一区段，脱水熔融固相线就沿  $\widehat{RQ}$  段过量水固相线延伸，这时部分熔体是饱和水的。高于交点 R 的压力条件下，随温度升高，首先遇到过量水固相线（图 1-1a，曲线  $\widehat{3Q}$ ），但此时系统中没有自由水（V），水只存在于含水矿物中，所以，不会发生熔融作用。只有当温度升高达矿物脱水反应曲线（ $\widehat{2R}$ ）时，才有水放出，可诱发熔融作用。此时放出的水被部分熔体全部吸收，形成水不饱和的熔体（ $L_2$ ）。因此，脱水熔融固相线就沿含水矿物的脱水反应曲线（ $\widehat{2R}$  段）延伸。由此，构成了脱水熔融固相线（ $\widehat{2RQ}$ ）。

图 1-1b 为向高压扩展的脱水熔融固相线的形态，它与低压下（图 1-1a）不同的是，可见到两个低温槽：一个在 R 处，另一个在高压的  $\widehat{MN}$  处。低压区段的推导同图 1-1a，高压下，含水矿物的脱水反应主要受压力控制。脱水反应由低压下的正斜率变为高压下的负斜率（虚线  $H = A + V$ ）。压力再升高时，形成高压致密的含水硅酸盐（dense hydrated magnesium silicates, DHMS）。这样，在  $\widehat{MN}$  及其左侧两条近水平的虚线所圈定的区段内（图 1-1b），有自由水（V）存在。因此，固相线  $\widehat{MN}$  段就沿着过量水固相线延伸，达 N 点后又沿 DHMS 形成的反应曲线延伸，这样，形成了 DHMS-N-M-H-R-Q。

地球内地壳与地幔是固态的，只有地幔低速层可能有少量隙间岩浆存在。因此，岩浆形成主要是固相岩石部分熔融（partial melting）的过程。这样，固相线的形态和位置就十分重要。关于这一点，将在后面的讨论中详细展开。

### 三、实验途径与主要参数

岩浆的形成主要依赖于：①源岩的化学与矿物学；②温度和压力；③挥发份条件，主要是水和  $CO_2$ ；④局部熔融程度。

实验组成的系统主要有：①简单系统相平衡，其优点是化学组分少，常可看作真正的二元系或三元系，可以确定各参数之间的真正定量关系，缺点是偏离天然岩石系统，因此，实验成果可看作模型（model），作为认识岩石系统的一个指导；②人工合成的岩石系统，例如 pyrolite，为 Ringwood 于 1966 年（Ringwood, 1975）提出，用 3 份阿尔卑斯型方辉橄榄岩（70% Ol + 20% Opx + 1% Sp）（指质量分数，文中出现此类情况均为质量分数）加 1 份夏威夷拉斑玄武岩的混合物作为原始上地幔组成（表 1-1）进行实验，pyrolite 名词是由辉石（pyroxene）和橄榄石（olivine）的词头联合构成的，其化学组成类似于天然的二辉橄榄岩；③天然的岩石系统。

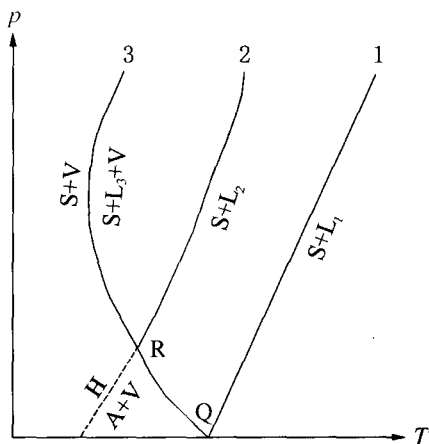


图 1-1a 固相线类型

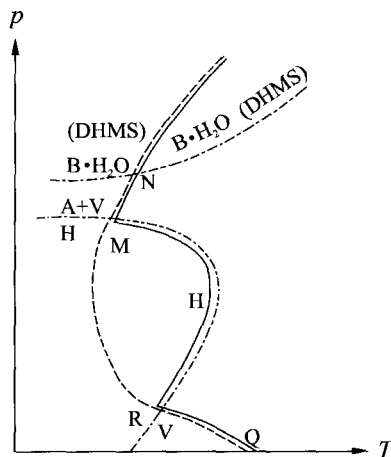


图 1-1b 向高压扩展的脱水熔融固相线

图 1-1a 1 (或  $\widehat{1Q}$ ): 干条件 (无  $H_2O$ ) 下固相线; 2 (或  $\widehat{2RQ}$ ): 矿物脱水熔融的固相线; 3 (或  $\widehat{3RQ}$ ): 过量水条件下的固相线; S—固相; L—液相;  $L_1$ —无水的;  $L_2$ —不饱和水的;  $L_3$ —饱和水的液相; V—气相; H—含水矿物; A—无水矿物图 1-1b 实线代表扩展到高压下的矿物脱水熔融的固相线形态, 虚线为过量水条件下的固相线, 点划线 (— · —) 为含水矿物脱水反应曲线, 其中  $B \cdot H_2O$  (DHMS) 指高压下形成的致密含水镁硅酸盐矿物, 其他符号同图 1-1a

表 1-1 Ringwood 的 pyrolite 模型化学组成

( $w_B/\%$ )

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	NiO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Σ
45.16	0.71	3.54	0.46	0.43	8.04	0.14	0.20	37.47	3.08	0.57	0.13	0.06	99.99

实验途径 (approach) 可分正演 (forward) 和反演 (inverse) 两种途径, 二者可互为补充。正演为采用可能的源岩进行熔融实验, 反演是选取可能的原生 (primary) 岩浆确定液相线矿物学 (liquidus mineralogy)。原生岩浆是指在源区形成之后, 在上升过程中没有发生过任何化学变异的岩浆。液相线是在熔融过程中岩石被全部熔融的  $p$ - $T$ - $x$  条件, 这时有无穷少量的矿物晶体, 这些与液相线熔体平衡的矿物叫液相线矿物。请注意, 液相线矿物是 liquidus mineral, 千万别译为液相矿物, 因为后者译为英文时是 liquid mineral, 在英文文献中是没有这个名词术语的, 而液相线矿物是有特定相平衡含义的一个术语。反演途径是要确定多元液相线矿物组合形成的  $p$ - $T$  ± 挥发份条件, 它应该与源岩在相同条件下熔出相应的原生岩浆后残余矿物组合相匹配 (match), 这样, 就可反演这种原生岩浆起源的源岩组成及其  $p$ - $T$  条件。

## 第二节 玄武质 (basaltic) 岩浆的起源

### 一、玄武岩四面体 (basalt tetrahedron) 与分类

实验岩石学和以玄武岩发育为主的大洋区和大陆裂谷地区, 常常用 Yoder 和 Tilley 的玄武岩四面体 (图 1-2) 进行分类和讨论各类玄武岩之间的演化关系。在这个

Ol-Cpx-Qz-Ne四面体中有两个重要的界面，一个是 Cpx-Pl-Opx，称为硅饱和临界面，一个是 Cpx-Pl-Ol，称为硅不饱和临界面，硅不饱和临界面把玄武岩分为两大类或岩套 (suite)，即图 1-2 中的 A + B 和 C + D，相应为拉斑玄武岩和碱性玄武岩，详见表 1-2。

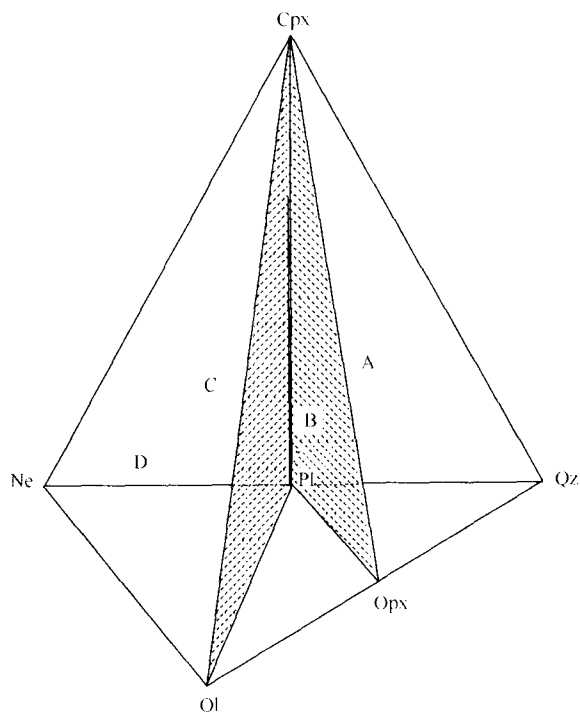


图 1-2 Yoder 和 Tilley 的玄武岩四面体 (按 CIPW 标准矿物分类)  
(据 Ringwood, 1975)

A—石英拉斑玄武岩区；B—橄榄玄武岩区；C—碱性橄榄玄武岩区；D—橄榄碧玄武岩区；Cpx—单斜辉石；  
Ne—霞石；Ol—橄榄石；Opx—斜方辉石；Qz—石英

表 1-2 玄武岩按 CIPW 标准矿物的分类

岩 套	组 成	
拉斑玄武岩岩套	石英拉斑玄武岩	Qz + Hy (图 1-2 中 A)
	橄榄拉斑玄武岩	Ol + Hy (图 1-2 中 B)
过渡岩套	橄榄玄武岩	硅临界不饱和面附近, $w(\text{Hy}) < 3\%$
碱性玄武岩岩套	碱性橄榄玄武岩	Ol, $w(\text{Ne})$ 为 0~5% (图 1-2 中 C)
	碧玄岩 (basanite)	Ol, $w(\text{Ne}) > 5\%$ (图 1-2 中 D)
	橄榄霞石岩 (olivine nephelinite)	Ol + Cpx + Ne, 无 Ab (同 1-2 中 Ne-Cpx-Ol 面)

(据 Ringwood, 1975)

## 二、 $p$ - $T$ - $x$ - $H_2O$ 与岩浆组成

### (一) 干 (无水) 条件下的玄武质岩浆

Fo-Mo-Qz 系统 (图 1-3) 中 Fo-Di-En 亚系统可看作地幔橄榄岩系统的一个简化模型, 相当于玄武岩四面体 (图 1-2) 中的 Ol-Cpx-Qz 面, 在三角形 GHFo 内部的点 1 代表简化的二辉橄榄岩 (Iherzolite)。连接矿物组成点可分为 A、B、C 三个区, A (三角形 Di-En-Qz) 为  $SiO_2$  过饱和区, B (三角形 Fo-Di-En) 为饱和—中等不饱和区, C (三角形 Mo-Di-Fo) 为  $SiO_2$  强烈不饱和区。简化的二辉橄榄岩 (图中点 1, Fo + En + Di 矿物组合) 的熔融作用均从不变点 (P) 开始, 不变点代表最低程度部分熔融产生的熔体 (浆) 的组成,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  分别为 1atm<sup>①</sup>、2GPa、3GPa 压力下的不变点, 或熔体的组成。这样, 低压下 ( $P_1$ ) 将形成石英拉斑玄武岩, 高压下 ( $P_2$ 、 $P_3$ ) 熔体组成已位于 Di-G (为 2GPa 下的  $Di_{ss}$ , 下脚标 ss 为固溶体) 与 Fo 连接的三角形内, 这个三角形代表 Fo- $Di_{ss}$  组成, 这里无  $En_{ss}$  (2GPa 下  $En_{ss}$  由 En-H 表示), 对比图 1-2 中相应面和表 1-2 可知, 落于这个区段内的熔体是  $SiO_2$  不饱和的, 应属于碱性玄武岩组成。由此, 可以合理地推定, 当二辉橄榄岩在干条件下由低压向高压转变时, 部分熔融产生的初始岩浆的成分将由石英拉斑玄武岩→橄榄拉斑玄武岩→橄榄玄武岩→碱性玄武岩转化。

Fo-Ne-Qz 系统 (图 1-4) 相当于玄武岩四面体 (图 1-2) 中的底面, 硬玉 (Jd) 是单斜辉石中的一个固溶体组分, 这样, 三角形 Fo-Jd-En 仍可看作简化的二辉橄榄岩。随着压力的升

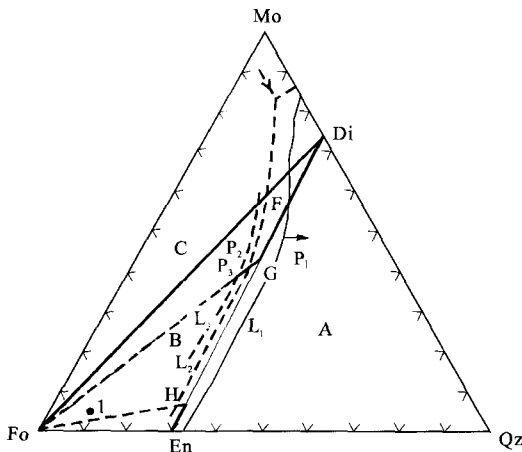


图 1-3 Fo-Mo-Qz 系统相图

(据 Kushiro, 1968, 转引自邓晋福, 1987, 稍加修改)  
 Mo—钙镁橄榄石; Fo—镁橄榄石; Qz—石英; Di—透辉石; En—顽火辉石;  $P_1$ 、 $L_1$  为 1atm 时的等压不变点和 En 首晶区与 Fo 首晶区的界线;  $P_2$ 、 $L_2$  为 2GPa 的等压不变点和 En-Fo 首晶区的界线;  $P_3$ 、 $L_3$  为 3GPa 的等压不变点和 En-Fo 首晶区的界线。En—H 为  $En_{ss}$ ;  $Di_6$ —G 为  $Di_{ss}$ ; H、G 为与  $P_2$  点液相平衡的辉石组成

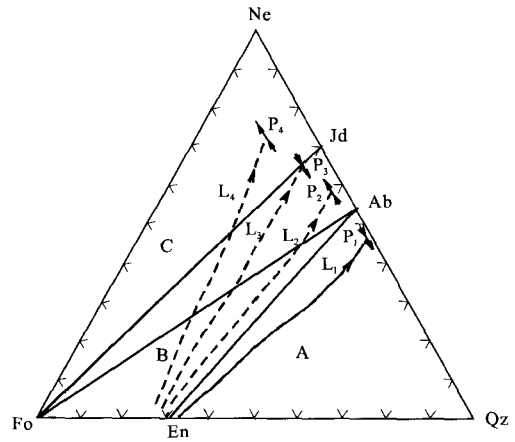


图 1-4 Fo-Ne-Qz 系统相图

(转引自邓晋福, 1987)  
 Ne—霞石; Fo—镁橄榄石; Jd—硬玉; Ab—钠长石; Qz—石英; En—顽火辉石;  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  分别为 1atm、1GPa、2GPa、3GPa 的等压不变点;  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  分别为 1atm、1GPa、2GPa、3GPa 的镁橄榄石首晶区与顽火辉石首晶区界线

① 1atm =  $1.013 \times 10^5$  Pa, ——编者注。

高，其初始熔体的组成如下：1atm ( $P_1$ ) 为石英拉斑玄武岩，1GPa ( $P_2$ )、2GPa ( $P_3$ ) 和 3GPa ( $P_4$ ) 均为碱性玄武岩，因为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点均有霞石标准矿物 (Ne-norm)。

图 1-5 展示了二辉橄榄岩熔融相图框架，当我们了解图 1-3 和图 1-4 之后，对图 1-5 的框架很容易理解。如图 1-5 所示，部分熔融产生的初始岩浆（位于固相线附近）的组成主要依赖于：①固相线矿物的稳定性；②矿物化学；③熔融程度。固相线下面 (subsolidus) (注意：不可译为亚固相线，因为是没有这条“线”的，它指温度压力比固相线低的那个区域，可译为“低于固相线的区域”) 的矿物组合 (Ol + Opx + Cpx + 含铝矿物) 中“含铝矿物”，随压力升高，由 Pl (斜长石) → Sp (尖晶石) → Ga (石榴子石) 转变，低于固相线矿物组合的不同，直接制约初始岩浆的化学组成，特别是痕量元素，包括稀土元素。

1) 由图 1-5 可以看出：当  $p < 0.5\text{GPa}$  时，顽火辉石 (En) 为不一致熔融习性，即  $\text{En} = \text{Fo} + \text{SiO}_2 (\text{L})$ ，放出的  $\text{SiO}_2$  进入熔浆，所以产生含石英标准矿物 (Qz-norm) 的拉斑玄武岩。 $p > 0.5\text{GPa}$  后，En 变为一致熔融习性，因此，产生无石英标准矿物的拉斑玄武岩。

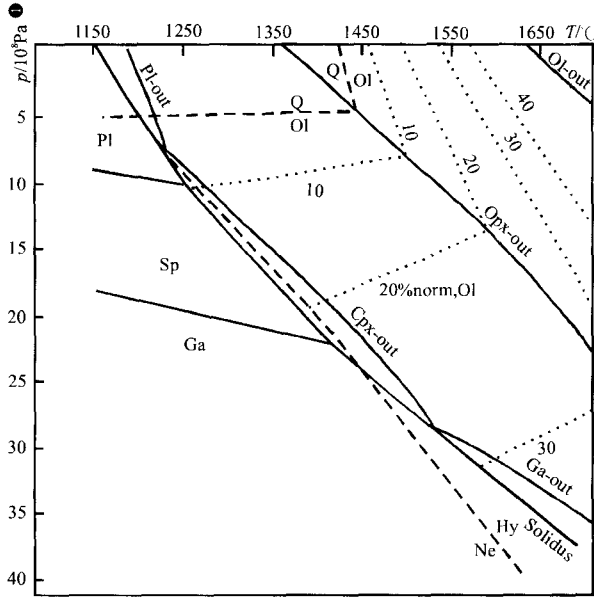


图 1-5 二辉橄榄岩熔融相图

(据 M. J. O'Hara, 1968, 转引自邓晋福, 1987)

Q—石英；Ol—橄榄石；Pl—斜长石；Sp—尖晶石；Ga—石榴子石；Ne—霞石；Hy—紫苏辉石；Cpx-out—单斜辉石全部消失的界线；Ol-out—橄榄石消失的曲线，亦为液相线；Ga-out—石榴子石消失的曲线；Pl-out—斜长石消失的曲线；Opx-out—斜方辉石消失的曲线；Q-norm—石英标准矿物，其他类似，详见文中叙述；图中虚线表示液相（熔浆）组成不同的界线，分别为 Q-norm 与 Ol-norm，Hy-norm 与 Ne-norm 的界线；点线为熔浆（液相线）中 Ol-norm 近似含量的等量线。 $p$ 、 $T$  坐标轴上的数值据 P. J. Wyllie (1970), Ito K., G. C. Kennedy (1967) 的资料补充标出 (转引自邓晋福等, 1987)

大陆地区莫霍面深度远远大于 15km ( $p \approx 0.5\text{GPa}$ )，但石英拉斑玄武岩广泛分布，看来，干条件下橄榄岩熔融的模式不可能用来解释大陆地区广泛发育的石英拉斑玄武岩的成因，石英拉斑玄武岩的形成需要有水的加入 (见后面的讨论)。

2)  $p = (0.5 \sim 1)\text{GPa}$  发生熔融时，斜长石首先消失，同时也进入橄榄石标准矿物 (Ol-norm) 区，初始岩浆将由高铝橄榄玄武岩组成，因为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  大部分赋存于 Pl 中，它相当于大洋下面地幔的条件。

请注意，这里涉及到了矿物-out 的概念。例如单斜辉石消失 (Cpx-out)，说是在熔融过程中 Cpx 消失的相平衡位置，但并不是说，熔融中只有 Cpx 被熔去了！参考图 1-3，例如不变点  $P_1$ ，平衡的相为  $\text{Fo} + \text{Di}_{ss} + \text{En}_{ss} + \text{L}$ ，Fo、En、Di 组分按  $P_1$  点的比例进入初始岩浆中，由于源岩 (图中点 1) 含  $\text{Di}_{ss}$  数量少，所以经过一段时间后，在  $P_1$  点上， $\text{Di}_{ss}$  用尽 (这叫 Cpx-out)。这时，平衡从不变性质 (自由度=0) 变为单变平衡 (自由度=1)，平衡相组合为  $\text{Fo} + \text{En}_{ss} + \text{L}$ ，所以

①  $1 \times 10^8 \text{Pa} \approx 1 \text{kbar}$ ，——编者注。