

薛君治 白学让 陈武

# 成固矿务学

武汉地质学院出版社

高等学校教材

# 成因矿物学

薛君治 白学让 陈武 编著

武汉地质学院出版社

## 内 容 提 要

成因矿物学是现代矿物学的一个新兴分支学科。该书是根据国内外近期发展及教学、科研的体会编著而成。

全书以矿物结晶化学、物理化学和地壳作用理论相结合为核心进行撰写。重点介绍矿物的时空分布、矿物的标型性、矿物地质温度计和压力计、矿物共生分析、矿物的成因分类研究以及成因矿物的研究方法等内容。书后附有习题集供练习使用。全书近二十三万字、插图九十二幅、表格二十九个。该书结构紧凑，叙述流畅，图文并茂，便于学习。

本书适合于岩矿、矿产、地质和地球化学等专业高年级和研究生使用，也可供地质工作者参考。

\* \* \*

本书由北京大学曹正民、河北地质学院陆慕孙二位同志审阅。

高等学校教材

## 成 因 矿 物 学

薛君治 白学让 陈武 编著

责任编辑 耿小云

\*  
武汉地质学院出版社出版

武汉地质学院印刷厂印刷 湖北省新华书店发行

\*  
开本787×1092 1/16 印张9.375 字数230千字

1986年10月第1版 1986年10月第1次印刷

印数：1—2500册

统一书号：13414·020 定价：1.65元

## 前 言

成因矿物学是一门新兴学科。近年来不少高等院校开设了这门新课程。为了更好地适应教学的需要，我们根据几年来的教学体会，并结合该学科的发展现状，合作编著了这本教材。本书力求内容简明、重点突出，并尽可能反映国内外的最新成就。此教材适合于地学高年级大学生使用，也可供有关的地学研究生和地质工作者参考。

在本书的编写过程中，我们得到了潘兆橹、季寿元、王永华、王文魁、张振儒、林文通、曹正民、陆慕孙、匡瑞亭、杨洪钧、李鸿超、阿不都拉·阿东别克、沈今川、孙岱生、叶振寰、朱而勤、王丽华、李省芬、毛兴莉以及王根元、罗谷风、刘文荣等老师的热忱关心和具体帮助。特别是主审人曹正民和陆慕孙二位老师详细审阅了书稿全文，提出了许多宝贵意见。与此同时，我们得到了编者所在学校矿物教研室的大力支持。本书蒙武汉地质学院出版社和武汉地质学院印刷厂的悉心印刷出版；耿小云同志为本书作了编辑，朱立老师在百忙中热情地为本书题写了书名；王润斋同志为封面作了设计。谨此一并致以衷心感谢。

本书系由三位作者共同讨论定稿。第一、四、六章及附录一、二由薛君治（武汉地质学院）执笔；第二、三章由白学让（西北大学）执笔；第五章及附录二（部分）由陈武（南京大学）执笔。图件分别由王润斋、唐核之、林露西、王月华、郭旗、郑意春等同志绘制，最后由王润斋同志作技术审定。

由于编者水平所限，国内外又无成熟的成因矿物学教科书可资借鉴，本书缺点与错误在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

一九八五年十一月廿九日于南京

## 序

成因矿物学是现代矿物学中一个重要的分支，它在矿物晶体化学、物理化学和地质作用理论紧密结合的理论基础上得到了迅速的发展。它研究矿物的成因，探讨矿物及其组合的形成和发展的历史，以及形成这一过程的条件和矿物学标志。成因矿物学不仅在现代矿物学理论研究中是一个重要的发展方向，而且它所提供的矿物成因信息，在解决地质实际问题中更获得了广泛的应用。因此，它受到了国内外地学工作者普遍的重视。

近年来，成因矿物学的研究在国际上进展很快，在国内也获得了蓬勃的发展，生产、科研和教学单位都广泛地开展了这方面的研究工作。各地质院校和有关大学的地质系相继开出了成因矿物学课程，并举办了各种形式的成因矿物学讲习班，还各自编写出版了不同类型的教材和专著。地质矿产部矿物学教材编审委员会十分重视这一学科的发展和教材建设。从一九八〇年第一次编委会议开始，在历届年会上都组织成因矿物学的教学讨论和经验交流。

薛君治同志于一九八二年在武汉地质学院编出了“成因矿物学简明教程”（铅印本）；白学让同志于一九八二年在西北大学编出了“成因矿物学基础”（打印本）。在此基础上，武汉地院薛君治、西北大学白学让和南京大学陈武三位同志于一九八五年联合编著了本书。并在地质矿产部矿物学教材编审委员会一九八五年年会上听取了编委会对本书初稿的意见后修改定稿。

本书的编写着眼于教学，强调基础知识和基本理论，并力求使矿物晶体化学与矿物物理化学的结合贯穿全书。本书将内容概括为绪论、矿物的时空分布、矿物的标型性、矿物地质温度计和压力计、矿物共生分析和矿物成因分类研究等六章。其中的第二章矿物的时空分布，是编著者初次总结成章的。某些矿物的成因矿物学资料分别纳入有关章节，不另列各论。

本书的选材方面，除较成熟的经典内容外，并引用了国内外一些新资料，还适当地纳入了一些如矿物成因标志的回归统计分析等编著者所做的科研成果。

本书内容简明，叙述流畅，并附有习题，这些对教学都是有利的。

本书的出版将对成因矿物学的教学和研究有所促进。随着教学、科研的进展，希望有更多的不同风格的成因矿物学教材、教学参考书和专著出版。

潘兆禧

一九八六年元月

# 目 录

## 前言

## 序

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| <b>第一章 章论</b> .....      | ( 1 )  |
| 第一节 成因矿物学概念和主要内容.....    | ( 1 )  |
| 第二节 成因矿物学的理论基础.....      | ( 1 )  |
| 第三节 成因矿物学的研究方法.....      | ( 2 )  |
| 第四节 成因矿物学的发展简况.....      | ( 3 )  |
| 第五节 成因矿物学研究的主要意义.....    | ( 5 )  |
| <b>第二章 矿物的时空分布</b> ..... | ( 7 )  |
| 第一节 地球矿物的空间分布.....       | ( 7 )  |
| 一、地球矿物学模式.....           | ( 7 )  |
| 二、地壳中的矿物分布.....          | ( 11 ) |
| 三、上地幔中的矿物分布.....         | ( 14 ) |
| 第二节 地球矿物的时间分布.....       | ( 15 ) |
| 一、含氧盐类矿物的时间分布.....       | ( 15 ) |
| 二、非含氧盐类矿物的时间分布.....      | ( 16 ) |
| 第三节 宇宙矿物的分布.....         | ( 17 ) |
| 一、月岩矿物的空间分布.....         | ( 17 ) |
| 二、陨石矿物的空间分布.....         | ( 19 ) |
| 三、宇宙尘矿物的时空分布.....        | ( 21 ) |
| <b>第三章 矿物的标型性</b> .....  | ( 23 ) |
| 第一节 矿物标型学说的有关概念.....     | ( 23 ) |
| 一、标型和标型性.....            | ( 23 ) |
| 二、标型矿物和矿物的标型特征.....      | ( 23 ) |
| 第二节 矿物化学成分标型.....        | ( 25 ) |
| 一、矿物成分变化与温压条件的关系.....    | ( 25 ) |
| 二、主要组份标型.....            | ( 28 ) |
| 三、微量元素标型.....            | ( 33 ) |
| 四、元素对比值标型.....           | ( 35 ) |
| 五、稳定同位素标型.....           | ( 35 ) |
| 第三节 矿物晶体结构标型.....        | ( 37 ) |
| 一、晶胞参数标型.....            | ( 37 ) |
| 二、离子占位标型.....            | ( 39 ) |
| 三、有序—无序标型.....           | ( 41 ) |
| 四、多型标型.....              | ( 41 ) |
| 第四节 矿物晶体形态标型.....        | ( 42 ) |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 一、结晶习性标型               | (43)  |
| 二、晶面微形貌标型              | (46)  |
| 三、双晶标型                 | (48)  |
| 四、矿物集合体标型              | (48)  |
| 第五节 矿物物理性质标型           | (49)  |
| 一、颜色标型                 | (49)  |
| 二、折光率及光轴角标型            | (50)  |
| 三、发光性标型                | (51)  |
| 四、比重标型                 | (51)  |
| 五、显微硬度标型               | (52)  |
| 六、热电系数标型               | (52)  |
| 七、磁性标型                 | (52)  |
| 第六节 矿物标型的实际应用          | (54)  |
| <b>第四章 矿物地质温压计和压力计</b> | (58)  |
| 第一节 有关符号及其涵义           | (58)  |
| 第二节 矿物地质温压计的种类         | (59)  |
| 第三节 矿物离子交换地质温压计        | (62)  |
| 一、基本原理与应用条件            | (62)  |
| 二、一般推导                 | (63)  |
| 三、典型矿物温压计介绍            | (69)  |
| (一) 硫化物矿物              | (69)  |
| (二) 氧化物矿物              | (74)  |
| (三) 硅酸盐矿物              | (76)  |
| (四) 碳酸盐矿物              | (93)  |
| (五) 磷酸盐矿物              | (95)  |
| <b>第五章 矿物共生分析</b>      | (97)  |
| 第一节 矿物共生分析的理论基础        | (97)  |
| 第二节 矿物共生分析的基本程序        | (99)  |
| 第三节 硅酸盐矿物共生分析          | (102) |
| 一、封闭体系矿物共生分析           | (102) |
| 二、开放体系矿物共生分析           | (104) |
| 第四节 金属矿物共生分析           | (110) |
| <b>第六章 矿物的成因分类研究</b>   | (114) |
| 第一节 成因矿物族              | (114) |
| 第二节 矿物的成因分类            | (125) |
| <b>参考文献</b>            | (127) |
| <b>附录一 矿物成因分类纲要</b>    | (130) |
| <b>附录二 习题</b>          | (142) |

# 第一章 绪 论

本章简要说明成因矿物学的内容、主要理论基础和研究方法。并概略介绍它的发展简史和主要意义。

## 第一节 成因矿物学概念和主要内容

成因矿物学是现代矿物学的重要组成部分。它是研究矿物和矿物共生组合的形成、稳定和变化的条件，以及研究反映这些条件的矿物学特征的学科。

迄今，现代矿物学至少包括四个主要方向，它们是系统矿物学、理论矿物学、成因矿物学和应用矿物学。这四个方向之间，既有联系，又有区别。系统矿物学是以矿物结晶化学分类为体系的描述矿物学。理论矿物学是研究矿物的化学成分与原子构造的关系，研究矿物化学成分、原子构造与矿物性质之间的关系；以及研究矿物的自然分类和矿物形成的理论基础（Белов, Н. В. 等, 1982）。至于近两年逐渐成为一个独立方向的应用矿物学，则是与其它学科（矿产勘查、冶金、陶瓷、化学、农业、土壤和医学等）相结合的矿物学。其任务是在广泛的领域里，向其它学科提供矿物学信息（ИСАМ81, ИСАМ84）。成因矿物学是理论矿物学的主要来源之一，也是应用矿物学的基础之一。

成因矿物学是一门较年轻的学科。至今国内外学者对于它的内容，有着不同的意见：譬如，有的学者十分强调矿物个体发生学和系统发生学的内容（Григорьев, Д. П., 1975; Жабин, А. Г., 1979, 1983）；有人则把系统矿物学和理论矿物学的许多内容——列入成因矿物学。

作为独立方向的成因矿物学，它的研究内容究竟包括哪些方面呢？归纳起来，有以下五个主要方面。（1）矿物的时空分布；（2）矿物的标型性；（3）矿物地质温度计和压力计；（4）矿物共生分析；（5）矿物的成因分类。它们的具体内容详见第二章至第六章。

## 第二节 成因矿物学的理论基础

成因矿物学的建立和发展所依靠的最主要理论基础，有三个方面：（1）矿物结晶化学理论，（2）地质作用和宇宙作用理论，（3）物理化学理论。

矿物结晶化学的知识，是矿物标型尤其是矿物化学成分标型和晶体结构标型研究的前提；同时也是矿物地质温度计和压力计以及矿物共生分析所不可缺少的基础。例如，在讨论磁铁矿的成分标型时，首先要了解它的反尖晶石型晶体结构中，不同的非等效结构位置上，究竟能被哪些离子所占据。然后才能总结出较可靠的标型特征。同样，在讨论辉石  $\text{Fe}^{2+}$ — $\text{Mg}^{2+}$  离子交换反应的平衡温度时，如果不了解辉石具有  $M_1$  和  $M_2$  结构位置的特点，那么就无法进行离子占位的地质计温法的深入研究。

研究矿物的成因特征，必然要联系地质作用和宇宙作用，也就是联系地壳、地幔、大小

行星、陨石、宇宙尘和慧星的自然作用。因此,地质作用和宇宙作用的理论知识,对于成因矿物学是十分重要的。否则,将陷入纯粹实验条件的讨论,失去地质意义。

作为现代矿物学的标志之一,是物理化学理论与矿物学的紧密结合。探索矿物形成、稳定和变化的条件,归根结蒂是研究物理化学条件,即温度、压力、介质组份、化学位、酸碱度、氧化还原电位、逸度、活度、作用的时间等等参数的具体范围。成因矿物学中的矿物地质温压计和矿物共生分析,就是运用物理化学的基本原理,从矿物的特征和矿物共生组合的特征中,求得有关的参数;总结矿物及其组合变化与物理化学参数之间的关系。同时,运用物理化学理论,可以较深刻地揭示矿物标型性的规律;以及揭示矿物时空分布的规律。

由此可见,物理化学是成因矿物学十分重要的理论基础之一。可以这样认为,假若忽视与物理化学理论的结合,那么就不是真正的成因矿物学。

除了上述三个最主要的理论基础之外,成因矿物学还需要地球化学、结晶学、系统矿物学和固体物理学等有关的理论知识作为基础。

### 第三节 成因矿物学的研究方法

成因矿物学最主要的研究方法是统计归纳的方法。是对矿物和矿物共生组合的特征,以及它们同天然的物理化学条件之间的关系,进行统计、对比和归纳。

统计归纳的基本根据是:(1)天然矿物不是理想化学纯的物质,也不是理想晶体结构的物质,从而也不是物理性质和化学性质不变的物质。换句话讲,天然矿物的化学成分、晶体结构、物理性质和化学性质在一定范围内是变化的。这是对矿物成因作统计归纳的根本基础。(2)自然界的矿物和矿物共生组合,是天然的物理化学体系的产物。它们的存在、变化和特点,必然受自然界物理化学规律的制约。因此,对矿物及其组合的特点作统计归纳,就能获得一定的成因信息。

统计归纳方法对于成因矿物学研究的重要性,可用天然矿物化学标型为例加以说明。经过统计发现,不同成因角闪石的化学成分有一定的区别。其中有一个化学标型,是反映在离子比值 $M$ 和 $A$ 的相关性上。 $M$ 是角闪石中 $Mg^{2+}/(Fe^{2+}+Fe^{3+}+Al^{3+}_M)$ 的离子比值, $A$ 为 $Al^{3+}/Si^{4+}$ 离子比值。回归统计表明,角闪石的成因与 $M-A$ 相关性有联系(薛君治,1965)。

超基性岩浆结晶的角闪石,其 $M-A$ 相关方程是:

$$M=7.247-16.774A+39.607(A-0.227)^2-6.019(A-0.227)^3$$

基性岩浆结晶的角闪石为:

$$M=1.935-1.719A+0.851(A-0.369)^2+2.000(A-0.369)^3$$

或 
$$M=1.847-1.227A-1.033(A-0.361)^2+10.926(A-0.361)^3$$

后者是包括基性岩浆岩变质角闪石在内的统计结果(见图6-3所示)。

中性岩浆结晶者则为:

$$M=1.895-2.622A+1.787(A-0.303)^2+54.839(A-0.303)^3$$

如果用图解表示,则得到三条不同的相关曲线(图1-1)。角闪石标型特征的表达就更加醒目。

在矿物地质温压计和矿物成因分类的研究中,统计分析方法的重要性是不言而喻的。许多地质温压计的公式都是运用统计方法总结出来的。矿物成因分类的研究,如果不作统计,就无从入手。至于矿物共生分析的结果,能否合理和切合实际,其中一个关键就在于矩阵中

矿物组份摩尔数的确定。组份摩尔数的正确判定，就需要一定的统计。

对于一个地区或一个矿床作成因矿物学研究时，一般的工作步骤是：

- (1)调查和了解工作区的地质背景。
- (2)收集工作区前人的岩石、矿石和矿物资料。
- (3)采集系统的和有代表性的标本，进行鉴定和测试分析。
- (4)广泛收集有关矿物的文献资料，作统计分析，找出成因标志。
- (5)推断工作区矿物的成因，追溯矿物平衡的条件，探索矿物及其共生组合演变的规律。
- (6)利用成因矿物学研究结果，结合地质背景，对工作地区或矿床进行地质分析。

如果我们能够敏锐地抓住一个地区的关键性矿物，进行成因矿物学的研究，那么结合其他学科的研究，便能解决一些重要的地质问题。但是，对于矿物的成因信息，还需要作客观的分析，区分哪些是有普遍意义的，哪些只有局部意义的。只有对比的前提明确，才能得出合理的结论。

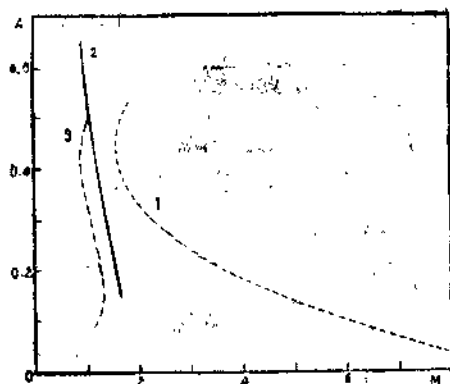


图1-1 不同成因角闪石的 $M-A$ 相关曲线  
1.超基性岩浆成因 2.基性岩浆成因  
3.中性岩浆成因

## 第四节 成因矿物学的发展简况

成因矿物学作为现代矿物学独立分支的时间是很短的，仅有二十多年的历史。但是，与它有关的学术思想，则可以追溯到一千多年以前。我国古代的“金丹家”，早已注意到矿物的稳定条件，以及矿物之间的变化关系（夏湘蓉等，1980）。例如，我国古代“金丹家”土宿真君写的《造化指南》中就提到：铜（指自然铜）得紫阳之气而生绿（指附在自然铜表面的绿色氧化物），绿二百年而生石绿（指孔雀石）；曾、空二青（普青和空青指蓝铜矿）乃石绿之得道者，均谓之矿。又二百年得青阳之气，化为输石（指黄铜矿）。这个叙述是炼丹时，在“丹炉”中观察到的化学反应；同时也注意到金属矿物在自然界中的成因转化关系。只要把上述变化顺序倒置，便是现在人们所共知的矿物演变关系：黄铜矿（输石）→蓝铜矿（曾、空二青）→孔雀石（石绿）→绿色氧化物（绿）→自然铜（铜）。我国古代“金丹家”还曾注意到铅矿物的变化，约在公元732年左右，就已提到密陀僧的形成条件。

在我国古代矿业开发史中，很早就有所谓的“管子六条”（公元前475—公元前221年战国时期），即：“山上有赭，其下有铁；山上有磁石，其下有铜、金；山上有陵石，其下有铅、锡、赤铜；山上有铅，其下有银；山上有银，其下有丹；山上有丹砂，其下有黄金。”这要比俄国的M.B.罗蒙诺索夫（1711—1765年）所谓的《标志》学说早得多，而且内容上也远比《标志》丰富和深刻。后者只提到铋矿常与银、金、锡矿相关。而“管子六条”不仅涉及金、银、铜、铁、锡、铅、汞等矿，并且还揭示了自然界中某种有用矿产的指示矿物，揭示了矿物共生的客观规律。这种“指示”和“共生”思想，就是成因矿物学的萌芽思想之一。欧洲直到1849年才总结采矿业中得到的实际矿物共生的知识，出现《矿物的共生》（Брейггаунт, А.）等著作。

成因矿物学的一个主要内容是矿物的标型学说。它是从1903年贝克（Becke, F.）和1904

年格鲁宾曼(Grubenmann, U.)提出“标型矿物”的概念之后,逐渐发展而成的。人们最早研究的矿物标型是晶体形态标型。紧接着开始的是对矿物物理性质标型的注意。与此同时,也逐渐注意到矿物化学成分上的标型性。到五十年代,深入到矿物晶体结构标型性的研究,揭开了标型学说新的篇章。使矿物标型的研究提高到全面运用结晶化学、固体物理学和物理化学理论的新水平上。

矿物标型的研究,必然导致矿物地质温度计和压力计的研究。五十年代开始,明确讨论矿物的地质测温方法。稍后,矿物的地质测压方法相继提出。为人们认识和分析地质作用以至宇宙作用,提供了半定量的研究途径。使成因矿物学的研究深入一步。

差不多与矿物标型学说逐渐发展的同时,从本世纪初开始应用热力学相平衡的理论,使矿物共生分析的理论得以产生和渐趋完善。特别是五十年代又有重要的发展。其中较著名的有别捷赫琴(Бегежин, А. Г.)等人的金属矿物共生分析理论与方法,以及柯尔任斯基(Коржинский, Д. С.)的多组份开放体系矿物共生分析的理论和方法。

矿物成因分类的研究可以说是发展较晚的。比较明确的矿物成因分类的研究,开始于六十年代初期(陈光远等, 1962)。直至七十年代末,才提出一个较为全面的矿物成因分类的提纲(Лазаренко, Е. К., 1979)。

与此同时,在总结系统矿物学、岩石学、矿床学以及其他地学学科的基础上,提出了一个矿物空间分布规律的模式,即地球的矿物学模式(Лазаренко, Е. К., 1979)。

现在简要回顾一下,从1912年“成因矿物学(Генетическая Минералогия)”这个术语提出(Ферсман, А. Е.)以来,一直到今天,成因矿物学论著、教材以及教学方面的有关发展情况。最早开设“成因矿物学”课程的时间,远远早于它的建立的时间:在1920年曾出现过这门课程(Федоровский, Н. М.),但当时的内容与现在的成因矿物学完全不同。主要是把维尔纳茨基(Вернадский, В. И.)化学矿物学的学术思想加以论述。维尔纳茨基认为矿物学的基本任务是,研究天然化学作用的产物(矿物)以及它的化学作用过程。1936年第一次在教科书《矿物学教程》(Болдырев, А. К. 主编)中,论及成因矿物学的有关内容,即不同的矿物形成作用与矿物组合的关系问题。

1963年,苏联里沃夫大学正式出版了第一本成因矿物学的专著《成因矿物学基础》(Лазаренко, Е. К.)。它是建立独立学科的起点。从内容上讲,很多方面实际上仍然是矿床的系统矿物学研究内容。在很大程度上把成因矿物学与矿床矿物学混为一谈。1969年和1977年分别出版的《成因矿物学讲义》和《成因矿物学》(Барабанов, В. Ф.),基本上是名不符实的专著。内容上与成因矿物学相差甚远,主要是矿床矿物学,甚至是矿床学的内容。所以,从1978年以来,一直受到学术界的批评。特别是前几年,苏联有声望的矿物学家,相继对巴拉巴诺夫(Барабанов, В. Ф.)的《成因矿物学》进行了严肃的批评(Белов, Н. В. 等, 1981; Гинзбург, А. И., 1983)。

1979年出版拉扎连科(Лазаренко, Е. К.)最后的专著《矿物成因分类尝试》,是一部颇有特色的成因矿物学专著。它从论述地球的矿物学模式开始,直至涉及宇宙的矿物形成作用,着重总结了矿物的标型学说;最后以矿物标型为基础,结合矿物形成作用,提出了矿物成因分类的提纲。这部专著在苏联得到了高度的评价。

我国成因矿物学的研究开始于1960年。当时以北京地质学院为主,吸收了成都地质学院和长春地质学院教师和外国进修学者。在陈光远的领导下,开展了北京密云沙厂铁矿、钨矿和鞍山樱桃园铁矿等矿床的成因矿物学研究。对上述各矿床的成因和远景进行探讨的同时,

分别提出了角闪石、绿泥石、黑云母、石榴石和铬尖晶石的成因分类。受到了1963年全国第一届矿物、岩石、地球化学学术会议的重视。1974年之后,相继对冀东迁安铁矿和鞍山弓岭铁矿,进行了成因矿物学的研究工作。1975年提出了磁铁矿的成因分类。七十年代后半期,国内地质、冶金系统的生产单位,有关系统的研究所、地质院校和综合性大学,纷纷开展了成因矿物学方向的研究,总结出了课题广泛、内容丰富的成果。这一时期,是我国成因矿物学迅速发展的活跃时期。1980年全国第一届矿床矿物学及成因矿物学学术会议的召开,是对七十年代成因矿物学研究的一次全面总结。由此开始,我国成因矿物学进入了全面发展的新阶段。

七十年代末和八十年代初开始,我国许多高等院校先后为本科大学生和研究生,开设了成因矿物学课程。同时,在各种形式的讲习班上,广泛介绍了成因矿物学的有关内容。

从欧美国家来看,至今尚无成因矿物学的系统论著,也没有相应的教材。但是,却有成因矿物学某些部分的大量研究成果。尤其是矿物物理化学方面(温压计和共生分析)的研究比较深入和比较丰富。

综上所述,可以清楚看到成因矿物学成为一门独立的学科,只有二十几年的时间。而作为一门完整的课程来说,其时间则更短。八十年代的成因矿物学,处于新的发展阶段。其特点是进一步结合现代固体物理学、物理化学和结晶化学理论,进入以物理化学参数和化学成分—晶体结构参数为主的半定量和定量研究的新阶段。同时,可以预期,成因矿物学将逐渐更多地涉及地幔和宇宙天体物质的研究。

## 第五节 成因矿物学研究的主要意义

成因矿物学研究的主要意义,有以下三个方面。

第一,具有找矿和评价地质体含矿性的意义。例如,原生金刚石矿床的探查中,不容忽视的是镁铝榴石的标型特征研究(详见第三章)。通过镁铝榴石的化学成分特点和物理性质特征,可以大体判定超镁铁岩是否含有金刚石,以及含矿性的优劣。又如,通过矽卡岩型磁铁矿的晶胞参数 $a_0$ 值的统计研究,能够估计某些矽卡岩型铁矿床的储量规模。这类矿床的铁矿石储量是与同一矿床中磁铁矿 $a_0$ 的离散值 $\delta a_0$ 成负相关关系。一个矽卡岩型铁矿床中,磁铁矿 $a_0$ 的最大值与最小值之差如果越小,那么矿石储量就可能越大。

第二,成因矿物学的研究,有利于岩石成因、矿床成因和地质构造变动条件的分析。通过主要造岩矿物标型特征和矿物物理化学的研究,能为诸如花岗岩、角闪岩成因一类问题,提供矿物学依据;有助于区分究竟是岩浆成因还是交代成因。同样,也能为某些成因有争议的矿床,提供矿物学的判断。例如,岩浆矿床、热液矿床、接触交代矿床和沉积变质矿床的同一种矿物(如辉石、石榴石等等),在化学成分上是有一定的区别;同一种共生矿物的元素分配系数值也有差异。因此,当宏观分析矿床成因发生疑问时,采用成因矿物学的研究方法,往往能获得比较明确的矿床成因结论。对于地质构造应变条件的分析来说,查明应变矿物的标型特点、温压范围以及矿物反应的物理化学条件,无疑是有益的。

第三,具有理论意义。成因矿物学的研究,反过来对于矿物结晶化学理论的深化,有着不可忽视的意义。例如,结晶化学中矿物有序—无序结构的规律,不仅仅涉及矿物化学成分、结晶温度和压力等因素,而且还与矿物的结晶速度、成岩成矿介质的化学组成、冷却的速度以及矿物形成作用的时间长短等各种因素都有一定的关系。这些控制因素或影响因素,正

是成因矿物学所要研究的内容之一。所以，随着研究的不断深入，揭示的现象逐渐增多，将使有序—无序规律越趋完善。

鉴于上述意义，1984年第27届国际地质大会以及前两届的国际地质大会上，成因矿物学方向的研究，在矿物学领域里占有较显著的位置。这三次会议上，均宣读了不少有关矿物标型、指示矿物（标型矿物）和矿物物理化学方面的重要论文。

## 第二章 矿物的时空分布

在自然界里,有一些矿物可以在不同的物理化学环境中稳定地存在,在不同成因类型的地质体中广泛分布。但是,有一些矿物却只形成于特定的地质作用条件下,稳定于特殊的地质体中。以地球而论,在横向上,不同区域的大地构造背景、地球化学特征和成矿条件不尽完全相同,那么反映在矿物的分布上必然存在着区域性差别;在纵向上,从地核→地幔→地壳,由于不同深度部位的物理化学条件相差悬殊,必然反映在所形成的矿物种类和数量当有一定的差异。

此外,矿物是在地球运动过程中不同阶段的产物。它的生成与演化在时间上有着前后相继的历史。在地球演化的各个地质历史时期中,由于成矿条件的不同,因而所发育的矿物类型尚有一定的差别。

因此,研究矿物在空间和时间上的分布规律,是成因矿物学的重要课题之一。它对于查明地质成矿规律和进行区域性找矿工作具有一定的实际意义。

近年来,宇宙航行技术的迅速发展,为人们研究宇宙矿物的分布创造了有利的条件。通过宇宙飞船的观测和登月的直接考察,目前已对月球矿物的分布有了初步的了解。

本章内容将以地球矿物学模式为主线,首先分别论述地球矿物在空间和时间上的分布规律,然后简要说明宇宙矿物的空间分布特点。

### 第一节 地球矿物的空间分布

地球矿物的空间分布与地球内部各层圈的物质成分和物理状态有密切的关系。现代实验矿物学、实验岩石学和理论岩石学的成就,以及高温高压条件下研究地球各层圈物质物理状态的成果,使人们对地球各层圈中矿物分布的种类和数量获得了一定的认识。

#### 一、地球矿物学模式

众所周知,地球内部温度和压力的总体变化是深度的函数。据此我们可以把地球的各个层圈,视为随着深度的增加而温度和压力亦相应增加的不同地球物理带。在各个不同的带内由于物质成分和物理状态存在着明显的差异,因而导致所形成的矿物种类及数量的差别必然是很悬殊的。长期来,人们在总结所积累资料的基础上,概括地建立了地球矿物学模式,如图 2-1 所示。

#### (一) 地核的物质成分

对于地核物质成分和物理状态的认识,目前还不完全一致。有的研究者认为占地球质量三分之一的地核是由密度为 $10\sim 11\text{g/cm}^3$ 的物质组成的。要达到如此高的密度,只有Fe并含少量轻元素如Si及S等(因纯Fe密度太高)在高压条件下才有可能实现。因此推断地核的物质组成是Fe、S或Fe、Si的合金。或称之为铁硫地核和铁硅地核(Murthy, V. R. 和 Hall, H. T., 1970)。然而,谢明年科(Семченко, Н. П., 1975)却认为原始宇宙成因的内核是由金属氢化物和碳化物所组成的,主要为 $(\text{FeNi})\text{H}$ 、 $(\text{FeNi})\text{H}_2$ 、 $(\text{FeNi})_2\text{C}$ 和 $(\text{FeNi})_3\text{C}$ 。

外地核则是由内地核的金属氢化物和碳化物分解而成的金属、氢与金属氢化物和碳化物的混合物所组成。这种观点目前为较多的人所接受。总之，地球核部可能是由游离的金属及其混合物（合金）所组成的。

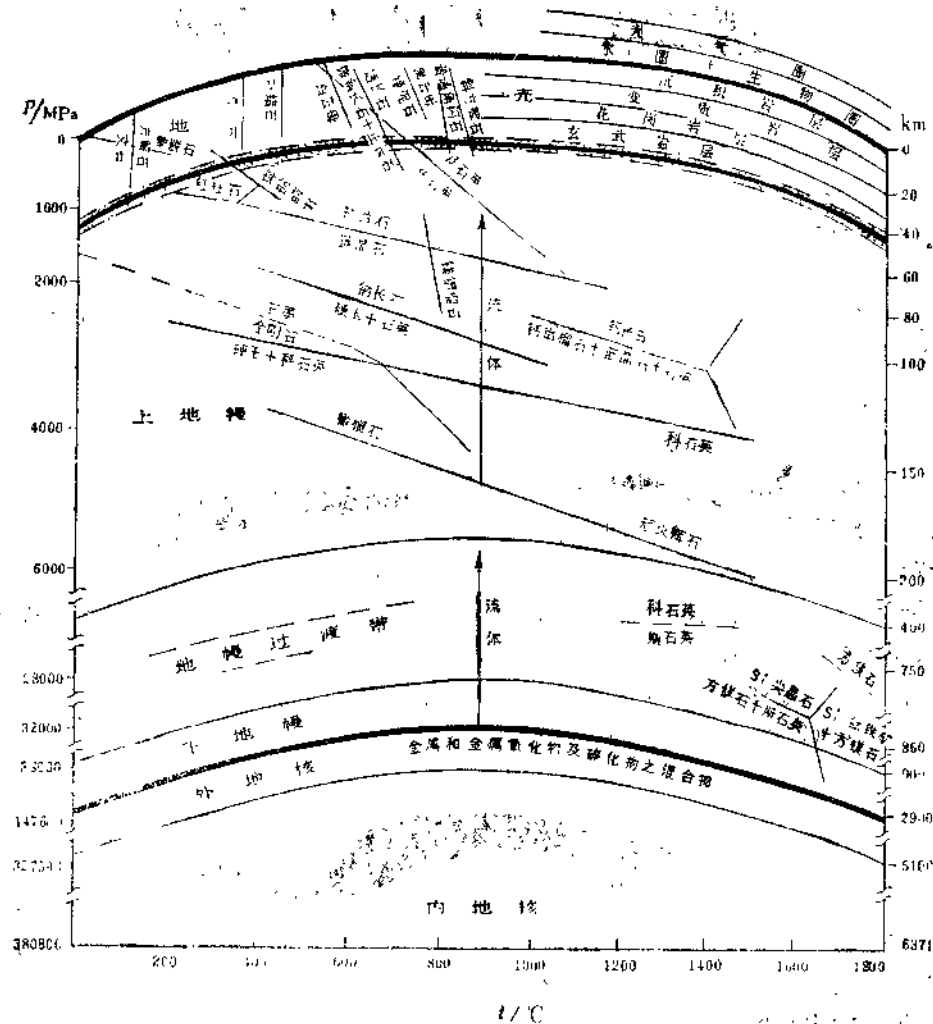


图2-1 地球矿物学模式

(据Лазаренко, Е.К., 1979)

注: 矿物稳定域由矿物平衡线限制, 矿物名称写在它们稳定的一侧。

Si尖晶石即尖晶石型 $Mg_2SiO_4$ ; Si铁铁矿即铁铁矿型 $MgSiO_3$ 。

## (二) 地幔的矿物组成

伯奇 (Birch, F., 1939, 1952) 在研究地幔弹性的基础上, 提出了在地幔深达300~1000 km范围内发生较大相变作用的一系列假设。他认为在相当于400~1000 km深度的温度和压力条件下, 上地幔的主要矿物如镁橄榄石、辉石及石榴石等可能不稳定, 将转变为新的呈紧密结构的氧化物矿物组合。而在1000~2900 km深度的下地幔范围内, 却没有相变作用产生。在这个区域内物质是呈均质状态的。

六十年代以来, 一些研究者先后通过直接的静高压实验、间接的锆酸盐模式<sup>\*</sup>和冲击波

\* 所谓锆酸盐模式是指锆酸盐-硅酸盐的同型结构比拟法。由于硅和锆都易于形成四价离子, 具有相似的外部电子构型和离子半径, 所以相应的硅酸盐和锆酸盐往往是同结构同型的, 并能形成连续的同溶体。一般说来, 如果一种新结构的锆酸盐合成出来, 据此可以认为在某种适合的温压条件下, 同样的结构同型的硅酸盐应当是稳定的。基于这个理论基础, 从而把锆酸盐作为硅酸盐的高压模式来研究。当然, 这种关系只能说是定性的。

技术等实验研究, 以及对来自金伯利岩中深源包体和玄武岩中深源捕虏体的研究, 证明了伯奇关于地幔内矿物相变规律的假设。

实验表明, 在地幔过渡带内, 有下列主要矿物相的转变:

具橄榄石型结构的镁橄榄石, 即成分在  $(\text{Mg}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})_2\text{SiO}_4$  和纯的  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  之间的  $\alpha\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$ , 在压力大于  $(108+0.035^\circ\text{C}) \times 10^8\text{Pa}$  时, 转变为似尖晶石 (Spinel-like) 结构或畸变尖晶石 (Modified Spinel) 结构的  $\beta\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$ , 其密度比之  $\alpha\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$  约大 8%; 当压力大于  $(115+0.055^\circ\text{C}) \times 10^8\text{Pa}$  时,  $\beta\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$  就转变成尖晶石型结构的  $\gamma\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$ , 其密度比  $\alpha\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$  高 10.9%。它们在高压下的同质多象转变如图 2-2 所示。

具正辉石型结构的顽火辉石  $\text{MgSiO}_3$  在  $1000^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$  和  $175 \sim 275 \times 10^8\text{Pa}$  条件下, 转变成钛铁矿型 (刚玉型) 结构 (Liu Lin-gun, 1976)。后者的密度比前者高 20.32%。

根据上述的温压条件,  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  和  $\text{MgSiO}_3$  高压同质多象变体被认为是地幔过渡带的主要组成矿物。

当压力增加到相当于 600km 以下深度时, 则具尖晶石型结构的  $\gamma\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$  分解为呈氯化钠型结构的方镁石, 即  $\gamma\text{-Mg}_2\text{SiO}_4 \rightarrow 2\text{MgO} + \text{SiO}_2$  (Birch, F., 1952)。对于  $\text{SiO}_2$  同质多象变体来说, 通过高压实验表明, 斯石英主要存在于地幔过渡带, 形成于压力为  $125 \times 10^8\text{Pa}$ , 温度为  $1200^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$  的条件下 (Стишов, С.М., Попова, С.М., 1962)。

科石英存在于上地幔的下部, 形成于压力在  $35 \times 10^8\text{Pa}$ , 温度在  $500^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$  的条件下 (Coes, L., 1953)。但它随着压力和温度的增高又不稳定, 最终转变为斯石英。

根据在地表的火山岩中能够见到的来自上地幔的超基性岩中的包体, 以及近年来通过高温高压实验, 用橄榄石 55% + 辉石 35% + 石榴石 10% 的混合物模拟地幔岩石的性质, 证明了上地幔的化学组成为超镁铁质的。主要成分有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  及  $\text{NiO}$ 。这样的化学成分所组成的岩石相当于三份橄榄岩和一份玄武岩所组成的混合物, 称之为地幔岩 (Pyrolite)。组成地幔岩的主要造岩矿物为镁橄榄石、顽火辉石、透辉石和镁铝榴石。这些矿物约占上地幔矿物的 95—99%。据统计 (Ringwood, A.E., 1966, 1968; O'Hara, M.J., 1968; Соболев, Н.В., 1974; 等) 在  $150 \sim 350\text{km}$  深度范围内, 这些稳定矿物的质量百分比为:

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 橄榄石 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$                                                 | 57% |
| 斜方辉石 $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$                                                  | 17% |
| 透辉石—硬玉 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ — $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$                           | 12% |
| 镁铝榴石 $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca})_3(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{Si}_5\text{O}_{12}$ | 14% |

$\alpha$ -石英与  $\beta$ -石英的转变仅限于上地幔的上部, 从常压下的  $573^\circ\text{C}$  增至  $20 \times 10^8\text{Pa}$  的  $1100^\circ\text{C}$

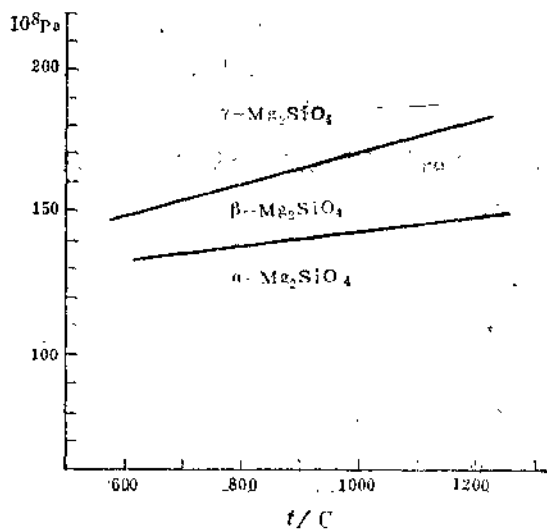


图 2-2  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$  转变相图  
(据 Suite, K., 1977)

(Островский, И. А., 1965)。

### (三) 地壳的矿物数量

近代地质学把地壳的结构在横向上分为陆壳和洋壳。陆壳在纵向上具有层次结构,自下而上大致可分为玄武岩层、花岗岩层、变质岩层和沉积岩层。洋壳在其顶部除有微薄(厚约0.5km以内)的松散沉积物之外,主要为玄武岩层。

迄今为止,已知的矿物种约有3000种左右,其中绝大多数是分布在地壳中。

从地壳中已知矿物种的数目来看,与地壳中化学元素的丰度有密切的关系,大致与元素的原子克拉克值成正比(表2-1)。据统计氧的化合物(包括氧化物、氢氧化物和各种含氧酸盐)矿物占地壳已知矿物种总数的四分之三以上,而其中硅酸盐矿物约占总数的四分之一。此外,矿物形成的数目除了与元素的相对数量有关外,还取决于元素的地球化学性质。特别是对于一些分散元素来说,后一种因素是很重要的。

表2-1 元素的原子克拉克值与矿物种数的对比\*

| 元素 | 原子克拉克值(%) | 矿物种数 | 元素 | 原子克拉克值(%) | 矿物种数 |
|----|-----------|------|----|-----------|------|
| O  | 53.39     | 1221 | Fe | 1.31      | 170  |
| H  | 17.25     | 798  | K  | 1.05      | 43   |
| Si | 18.11     | 377  | C  | 0.51      | 194  |
| Al | 4.80      | 268  | Ti | 0.22      | 30   |
| Na | 1.82      | 100  | Cl | 0.10      | 67   |
| Mg | 1.74      | 105  | F  | 0.07      | 50   |
| Ca | 1.41      | 194  |    |           |      |

\* 引自武汉地院矿物教研室编,结晶学及矿物学,1978,地质出版社。

根据对地壳主要岩石中矿物成分的研究(详见后述),表明从玄武岩层→花岗岩层→变质岩层→沉积岩层,矿物的种属和数量不断趋向增多。

综上所述,显而易见,地球矿物从地核→地幔→地壳,其种属及数量不断的趋向增多;地壳部分从深部→表部,矿物种属及数量亦不断的趋向增多。这就是地球矿物在空间分布的一般规律。这种规律从另一个方面说明了一个问题,即矿物种的最少数量是分布于高温和高压条件下形成的地质体中,而

其最多数量则分布于低温低压条件下形成的地质体中。基于同样的道理,在内生成矿作用中,矿物种的最少数量是分布于岩浆岩中,而岩浆期后所形成的地质体中,矿物种的数量显然是增多了。总之,这些都反映了地表外生成矿作用所形成的矿物数量,显著多于地壳内部成矿作用形成的矿物数量的实际情况。

那么,对于地球这样一个复杂的体系,上述的此种规律是怎样形成的呢?

这是因为地球内部的许多特性与深度有很大关系。如地球的密度和重力即随着深度的加深而增加,尤其是随着深度的增加,温度和压力将有所增高。这说明了在地球内部不同深度范围内热力学条件的差异是很悬殊的。从而导致在不同的空间部位上矿物组合和物相转变等方面出现明显的变化。

以压力作用为例。大量的模拟实验资料表明,压力对矿物的稳定性有很大的影响,这可从地表到地球深部的矿物及其组合特征反映出来。例如,在地表最上部常温常压下的表生矿物多为含水矿物,象粘土矿物、褐铁矿及沸石类矿物等等;地表以下岩石圈的矿物及其组合中,常见的为石英族、长石族、云母族、辉石族和角闪石族等。形成的条件是压力不太大,中温至较高的温度。水在矿物组成中的作用相对减小;向下当压力在 $12\sim 15\times 10^8\text{ Pa}$ 范围时,则为榴辉岩矿物组合。此时钠长石转变为硬玉,钙长石转变为石榴石,因而长石消失。其矿物组合主要是辉石和石榴石;当压力大于 $30\times 10^8\text{ Pa}$ 时,即为石榴石二辉橄榄岩组合。较早的是斜石英代替石英,且随着深度的增加,云母族和角闪石族相继消失;当压力在 $40\sim 80\times 10^8\text{ Pa}$ 时,出现金刚石和锆铝榴石等矿物;当压力更大时,石榴石被尖晶石所取代, $\text{SiO}_2$