

变质岩成因

〔西德〕H. G. F. 温克勒 著

BIAN
ZHI
YAN
CHENG
YIN

变质岩成因

〔西德〕H. G. F. 温克勒 著

张 旗 周云生 译

从 柏 林 校

科学出版社

内 容 简 介

本书采用了一种研究变质作用的新方法,提出了变质级和等反应度等新概念,并以此代替本书前几版和其他有关著作中一直使用的变质相和亚相的概念。这种新概念应用起来颇为方便,并已成功地用于野外工作。作者简要地讨论了岩石变质作用的原理,阐述了几类常见岩石在变质作用过程中的变质反应及其产生的矿物组合,并以此作为划分变质级和压力分区的基础。本书总结了国际上最近对变质作用的化学、矿物学和物理化学方面的研究成果,是一部变质岩野外和室内研究的基础理论读物,适合于大专院校地质系岩石专业高年级学生和研究生阅读,对于从事变质岩教学和研究的人员和野外工作者都有一定的参考价值。本书系据原书英文第四版翻译而成。

Helmut G. F. Winkler

PETROGENESIS OF METAMORPHIC ROCKS

Fourth Edition

Springer-Verlag, 1976

变 质 岩 成 因

〔西德〕H. G. F. 温克勒 著

张 旗 周云生 译

从 柏 林 校

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980 年 12 月 第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1980 年 12 月 第一次印刷 印张: 11

印数: 0001—3,760 字数: 287,000

统一书号: 13031·1381

本社书号: 1912·13—14

定 价: 2.05 元

译 者 的 话

自六十年代以来,变质岩的理论和实验研究都取得了显著的进展,发现并肯定了成岩作用和变质作用之间的浊沸石相和葡萄石-绿纤石相,提出了变质相系和等反应度等新的概念,使变质岩的室内和野外研究方面大大前进了一步。都城秋穗的《变质作用和变质带》(1973)以及 H. G. F. 温克勒的《变质岩成因》(1976,第四版)两部著作就集中地反映了这个领域的最新成就。

这本书即是根据德国格廷根大学 H. G. F. 温克勒教授所著的《变质岩成因》(Petrogenesis of Metamorphic Rocks) 第四版译出的。全书内容概括起来可分为下面几个部分:从第一章至第八章,作者扼要地阐述了变质作用的基本概念和原理。特别在第七章中详细讨论了他所提出的变质作用划分的基本标志及有关的矿物反应。第九章至第十四章分别讨论几种常见岩类(镁铁质岩、超镁铁质岩、泥质岩、泥灰岩和碳酸盐岩)的变质作用和随温度和压力变化的不同矿物反应,并在第十五章中对各岩类中的上述矿物反应作了概括的总结。随后的几章则分别讨论了麻粒岩和榴辉岩的变质作用,从深熔作用的观点讨论了混合岩和花岗质岩浆的成因,最后并以附录的形式介绍了常见变质岩的命名和定量矿物分类。

本书侧重于变质作用的化学、矿物学和物理化学方面的阐述。尽管对变质相系的阐述尚有不足之处,作者提出的变质作用划分的新的命名尚未被多数学者所采纳。但是,本书比较系统地反映了近二十年来在变质岩实验研究方面的重要成果,内容丰富,逻辑推理性强,有独到的见解,仍不失为研究变质作用的比较好的一部基础参考书,对野外工作也是有指导意义的。

由于我们水平有限,译文难免有错误和不当之处,请读者批评

指正。本书译稿承蒙从柏林同志校阅,并提出了有益的修改意见,
在此谨致以深切的感谢。

译 者

1979 年 5 月于北京

第三版序言

本书第一版在1965年出版,1966年译成法文,随后在1967年出版了修订的第二版,它的俄文译本在1969年问世。自此以后,又发表了许多阐明变质反应的新的岩相学观察和实验资料,这就有希望和可能提供一种研究变质转化作用的新途径。我们感到本书中尝试采用的这种新途径对岩石变质作用可以得到更好的了解。

变质相和亚相的概念认为,不同全岩成分所产生的矿物共生组合具有一定的压力-温度范围。随着新的岩相学观察资料的积累,要想把这些资料容纳在变质相和亚相的分类方案内,就日益变得困难起来。但是,已经了解到,由某种成分的常见岩石中的反应所产生的矿物组合可以提供变质条件的相应标志。根据矿物反应所确定的变质带,非常鲜明地展示了变质岩的演化过程。因而本书着重强调了变质岩中反应的重要意义。通过矿物反应的实验校准有可能把具有岩石成因意义的反应同那些没有岩石成因意义的反应区分开。在岩相学研究中,这种区分对于推断变质作用的物理条件是有指导意义的。

在一个变质地体*内,指示相同反应的点连接起来构成一条线或一条带,书中称为“等反应度”。沿着等反应度的各个点即代表相当于有关反应的变质条件(P 、 T 、 $P_{\text{挥发分}}$)。顾名思义,等反应度是由特定的反应所确定的,因此它比等变度更有意义,而等变度

* “terrain”这个词有时也拼作“terrane”,它是一个陈旧的术语,通常在一般意义上使用,意指一种岩石或一群岩石以及岩石的“露头”范围,而不一定指一个专门的岩石单位或一组岩石单位。metamorphic terrian 泛指一种或一组变质岩的“出露区域”范围。为了避免这个术语,与其他一些词如“region”,“area”和“belt”等在译义上的混淆,在本书中我们将“terrain”译为“地体”,将“metamorphic terrian”译为“变质地体”。——译者注

则是以一种矿物或矿物组合的出现或消失为依据的,与特定的反应无关。

因此本版叙述岩石变质作用的原则就与前几版中的表述方法不同了:分几章单独讨论了几种常见成分岩类(镁铁质岩、超镁铁质岩、泥质岩、泥灰岩和白云岩)中的矿物反应,还讨论了各种成分的岩类在变质作用过程中所发生的各种矿物反应,并根据常见岩石中的矿物反应确定了大的变质级分区,这样的分区便于概括变质条件,称为很低级、低级、中级和高级变质作用。

这个新概念应用起来是很简便的,作者的同事们和其他一些人在野外已成功地应用了这一概念。我们希望本书将对变质地体的岩相学研究起一点指导作用,也就是说,按照本书的观点,只有对具某种成分的岩石才需要进行周密详细的调查,为了推断变质作用的物理条件,需要选择针对专门目的的岩相学观察,而避免进行泛泛的研究。为了在已知的变质背景内选择恰当的目标,可查阅第十五章,因为这一章是提供测定常见岩石中变质级和主要等反应度或等变度的一把钥匙。

为节省篇幅起见,参考文献主要列出了新的文献,这并不是有意贬低老文献的价值,读者可以在新文献中查出老的文献目录。为方便起见,全部文献分别附在各章之后。

本书侧重于变质作用的化学、矿物学和物理化学方面的阐述,未涉及岩石的组构,有关这方面的论述,请读者注意查阅斯普赖的《变质结构》(*Metamorphic Textures*, Pergamon Press, Oxford; 1969)以及特纳和韦斯的《变质构造岩的构造分析》* (*Structural Analysis of Metamorphic Tectonics*, New York, 1963)两本书。有关具体的变质地区的野外关系,本书也未详细考虑,好在特纳的《变质岩石学》(*Metamorphic Petrology*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1963)和都城城的《变质作用和变质带》** (*Metamorphism and Metamorphic Belts*, George Allen & Unwin London, 1973)两本书已

* 中译本系周金城等译,地质出版社出版,1978.9。——译者注

** 中译本系周云生译,地质出版社出版,1979。——译者注

作了详细的介绍。但是,本书为获得岩石成因的有意义的资料的野外研究提供了依据。

H. G. F. 温克勒

1973 年 9 月于格廷根

第 四 版 序 言

我非常感谢出版了第三版并又在如此短暂的时间内发行了第四版的同事们。与前一版相比,第四版未作实质性的修改;但是文中增补了一些最新的研究成果,重绘了九幅图,增加了五幅图。本版改正了许多曾经忽略的排印错误。

H. G. F. 温克勒

1975 年 6 月于格廷根

目 录

第一章 变质作用的定义和类型.....	1
第二章 从成岩作用到变质作用.....	9
第三章 变质作用的因素.....	15
概述.....	15
流体相的成分.....	19
定向压力.....	25
第四章 矿物共生: 组成变质岩的单位.....	28
第五章 变质矿物共生的图解表示法.....	31
成分标绘.....	31
ACF 图解.....	35
A'FK 图解.....	42
怎样使用 ACF 和 A'FK 图解?.....	45
AFM 图解.....	48
第六章 分类原理: 变质相与变质级.....	56
第七章 变质级的四个分区.....	65
概述.....	65
等变度和等反应度.....	66
很低级变质作用分区.....	68
低级变质作用分区.....	75
从低级到中级变质作用的变化.....	75
从中级到高级变质作用的变化.....	83
麻粒岩-高级; 区域紫苏辉石带.....	89
变质级的压力分区.....	89
关于 Al_2SiO_5 矿物的问题.....	93
第八章 变质地体的一般特征.....	98
接触晕中的变质带.....	98

区域变质作用中的变质带	103
双变质带	110
第九章 碳酸盐岩的变质反应	113
概述	113
含硅白云质灰岩的变质作用	115
硅灰石的形成	132
在很高温和很低压下碳酸盐的变质作用	137
第十章 泥灰岩的变质作用	144
Ca-Al 云母——珍珠云母	150
斜长石 + 方解石组合	152
符山石	155
第十一章 超镁铁质岩的变质作用: $\text{MgO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系统	157
Al_2O_3 、CaO 和 FeO 的存在	166
第十二章 镁铁质岩的变质作用	172
除了低压时很低级变质作用的那些转变以外的转变	172
低压时的很低级变质作用	185
很低级变质变化的演化	193
很低级变质作用中 CO_2 的作用	204
第十三章 硬砂岩的很低级变质作用	208
第十四章 泥质岩的变质作用	210
概述	210
泥质岩的很低级和低级变质作用	210
泥质岩的中级和高级变质作用	224
第十五章 在常见岩石中确定变质级和主要等反应度或等变 度的标志	243
很低级变质作用	244
低级变质作用	246
中级和高级变质作用	249
地质温度计和地质压力计	256
等反应度或等变度的序列	257
第十六章 区域紫苏辉石带(苏粒岩高级)	262

“麻粒岩”的命名及其矿物学特征	262
苏粒岩和有关的粒变岩的变质作用	270
岩石成因的考虑	278
第十七章 榴辉岩	283
第十八章 深熔作用、混合岩的形成和花岗岩浆的成因	290
深熔作用: 概述	292
由碱性长石、斜长石和石英组成的岩石的深熔作用实验	314
由斜长石和石英组成但缺乏碱性长石的岩石的深熔作用实验	321
混合岩的形成	326
由深熔作用形成的花岗质岩浆	332
附 录 常见变质岩的命名	338
重要岩类的名称	338
前缀	340
分类	340

第一章 变质作用的定义和类型

火成岩大致形成在 650°C 到 1200°C 的较高温度下,而沉积岩则是在地表沉积的,它们代表岩石形成过程中两个极端的温度范围。在后来的地质过程中这些岩石可以变为中温占优势的地壳的一部分;于是岩石受到了与其形成时不同的温度。同样,新环境的压力一般也总是不同于它们形成时的压力。在新施加的温度和压力条件下,这些岩石中的许多矿物就不再稳定了;它们将发生反应,形成在新的条件下处于平衡或趋向于平衡的矿物组合。这样,一种岩石的化学成分就表现为一种新的矿物组合;岩石就转化了,例如粘土或页岩转化成云母片岩。

在少数单矿物沉积岩中,例如纯的石灰岩和砂岩中,矿物在高温下依然是稳定的。不过,由于矿物颗粒的重结晶作用而使岩石产生了新的构造,石灰岩变成大理岩,砂岩变为变质石英岩。

岩石的这种转化可以发生在一个很大的温度区间内。如果把岩石在地表的风化作用除外,这个温度区间就可分为(与沉积作用温度连续的)成岩转化(成岩作用)的低温区域和变质转化(变质作用)的高温区域。

定义 变质作用是岩石在固态下为适应物理化学条件的改变而发生的矿物和构造变化的过程,这些条件与岩石形成时占优势的条件不同;但是,一般不包括在风化作用和成岩作用范围内发生的变化。

虽然这个定义适用于全部岩石,但是本书不涉及盐类沉积物(蒸发岩),因为它们发生变质作用的温度和压力比硅酸盐和碳酸盐岩石要低得多。盐类沉积决不会在变质岩区域中存在。本书也不讨论主要由植物质组成的沉积物的变质作用,即煤化作用,因为煤化作用开始的温度比变质反应的温度要低得多。然而,对于

煤化作用的牌号和其他沉积岩中矿物变化之间的相互关系，最近也有所认识。正如基希 (Kisch, 1969) 所指出的，当煤化作用已经达到了气长焰煤或气煤的牌号时，浊沸石型岩石的很低温的变质作用似乎才开始；在这个阶段上，镜煤物质含有 40—30% 挥发物。随着变质程度增加，煤化作用的牌号提高得很快。

根据地质位置，可把变质作用分成两类：一类仅是局部范围的，另一类是区域规模的。局部范围的类型包括接触变质作用和性质完全不同的碎裂变质作用。

接触变质作用 发生在较大岩浆侵入体邻近的受热岩石中，它是局部范围的静热变质作用，在侵入体周围产生变质岩的晕圈。接触变质岩缺乏片理，极细粒的裂片状的岩石变种叫做角岩（见书后附录的“常见变质岩命名”一章）。温度梯度大，并从热的侵入体接触带向未蚀变的围岩减小，产生了矿物组成明显不同的变质岩带。

碎裂变质作用 限于断层和冲断层附近，机械的压碎作用和剪切作用使岩石的组构发生变化。由此产生的碎裂岩按粒度变小的次序称为擦碎角砾岩、糜棱岩或假玄武玻璃。假玄武玻璃受到了如此强烈的剪切，以至于看上去像黑色的玄武质玻璃（玄武玻璃）。在发生这些变化的时期中，岩石并未受热（或并未充分受热）；因此，矿物之间未发生变质的进化化学反应。但是，因为破裂带为流体提供了容易进入的机会，常见次生退化蚀变（碎裂变质作用在本书中不再予以考虑）。

岩石中的某些矿物变化也是局部范围的，但其性质与接触变质作用和碎裂变质作用都不同，库姆斯 (Coombs) 把它叫做水热变质作用。在此情况下，热的气体溶液渗过破裂带，导致邻近岩石的矿物变化（这种过程本书也不再作任何进一步的讨论）。

其他类型的变质岩出现的规模是区域性的，面积为几百到几千平方公里，它们是区域变质作用的产物。区域变质作用常常被分为两个类型：（1）区域动热变质作用（严格意义上的区域变质作用）和（2）区域埋藏变质作用。

区域动热变质作用 在地理上以及成因上与大的造山带有关,如同接触变质作用一样,区域变质作用也受到热能供给的影响,不过在此情况下形成十分广阔的变质带。一般认为各带之间矿物组合的变化指示温度的连续增加。温度可达 700°C 左右,甚至到 800°C 。热能供给了地壳的某一部分,也就是说,在变质作用期间,在某一深度上的温度比变质作用前后都要高。地热梯度(常以 $^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ 表示)比“正常”期间大。但是,与接触变质作用相反,区域动热变质作用同贯透活动一起发生。这从板状或杆状矿物的岩石(绿泥石片岩、云母云岩等)中片状构造如此普遍地发育来看是明显的。

多年来人们一直认为造山运动和动热区域变质作用之间存在着成因联系。但是,这种见解现在应重新加以检验。凡在造山带中都有大量变质岩出露,但有许多岩石可能已在一个或几个较早的造山旋迴期间形成了。特别在欧洲阿尔卑斯山脉的第三纪造山区充分地证明了这一点。在那里,第三纪的变质作用影响的范围很有限;中级和高级变质岩仅形成在瑞士中央阿尔卑斯的部分地区和奥地利阿尔卑斯的一小部分地区。而且,变质作用紧跟着大规模的构造变动。变质地区的供热晚于主构造变动,随后,发生次要的贯透变形作用,产生变质岩的片理。但是,这并非意味着所有变质矿物都一定要与变形作用同时形成。详细地研究已经证明,重结晶作用也可以出现在变形幕之间,甚至发生在造山后期。

区域动热变质作用和局部接触变质作用产生的岩石,其组构明显不同:前者是片状的,后者是非片状的。而且,只有当先前低级变质的或未变质的地壳部分受到岩浆体的侵入而发生热变质时,才出现接触变质作用的晕带。容易发觉的接触变质作用常常是由浅的岩浆侵入体引起的。这些侵入体距地表的深度可以从几百米到几公里。所以,当负荷压力相当低时,约在 100 巴到 1000 巴乃至 3000 巴之间(后面的数值大约相当于 11 到 12 公里深的荷重),接触变质带内的变质转化作用就发生了。因此“浅成”接触变质作用(以及水热变质作用)以相当低的压力为特征。另一方

面,区域动热变质作用则发生在较高的压力下,至少从 2000 巴到 10000 巴以上。压力的大小是局部的浅成接触变质作用和区域动热变质作用类型之间主要的成因差别;在这两种情况下变质反应发生的温度则常常是相同的——从较低的值到 800℃ 左右的最大值。

显然,根据占优势的壓力,不仅能够把接触变质作用和区域动热变质作用区分开,而且也能进一步把区域动热变质作用再划分成几个类型。这样看来,接触变质作用一般以低压为特征,区域动热变质作用则总是出现在相当大的压力范围内。自然界中存在着在中压、高压或极高压下形成的变质地体。如果一个深度相当浅的岩浆侵入体给邻近的围岩施加一个局部范围的很高的地热梯度(100℃/公里,或更高),就会产生浅成接触变质作用。另一方面,例如,在 15 公里和 25 公里的深度上,较大一段地壳的受热可以产生 750℃ 的温度,相应的地热梯度分别为 50℃/公里和 30℃/公里。温度和压力这样不同的结合将会反映在不同的矿物组合上,因而,存在着不同类型的区域动热变质作用,即低压、中压和高压变质作用的类型,并用虚线概略地表示在图 1-1 中。

区域埋藏变质作用 与造山运动或岩浆侵入作用毫无成因关系 (Coombs, 1961), 一个地槽的沉积物和互层的火山岩可以渐渐地被埋藏起来,甚至在很大的深度上,温度也比动热变质作用期间所遇到的温度要低得多;最大值可能约为 400℃—450℃。产生片状构造的贯透活动要是真有的话,也只发生在局部地方,但一般是缺乏的。因此当矿物成分变化时,岩石原来的组构大体上可以保存。变质变化在手标本上难以分辨,只有在薄片中能清楚地看到。

埋藏变质作用一方面解释了含有 CaAl-沸石(浊沸石)的那些变质岩(所谓沸石相岩石);另一方面解释了含硬柱石-蓝闪石的变质岩。这些岩石将在后面作详细描述。矿物学上很不相同的这两类岩石是在近似相同的低温下形成的。但是它们在压力上有相当大的差别。硬柱石-蓝闪石型的岩石当另外还含有硬玉质辉石时,

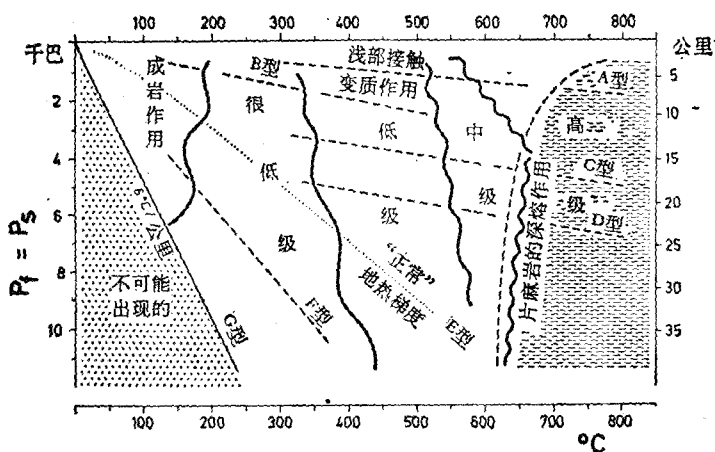


图 1-1 接触变质作用和不同类型区域变质作用的压力-温度概略图解

除了在图上表示了成岩作用的 P - T 区域外,还表示了在第七章中解释的不同变质级的 P - T 区域。在最低地热梯度以下的 P - T 区域在自然界中是不能实现的。与压力相当的深度是最大值,也可以比所表示的值稍低一点(见第三章)

形成于地壳中所能达到的最高压力下,即形成于地热梯度特别低的地壳区域中;而在沸石相岩石形成期间,则存在着大致“正常的”或较高的地热梯度。

尽管变质作用的温度很低,但是由于高压占优势,大多数硬柱石-蓝闪石型的岩石为适应其变质环境仍完全地重结晶了。可是有些在低压和低温下形成的含浊沸石的岩石,则可以显示在所处的条件下的不完全平衡。这些岩石的再造作用,特别是在较粗粒的岩石中,可以是完全的、广泛的,但仅仅是初步的。在接触变质作用和区域动热变质作用的较高温度下,即使压力很低,岩石也完全重结晶了。

变质级 在许多情况下,可以把很低温的埋藏变质作用 and 低到高温的动热变质作用区分开。这种区分已被广泛采用了。但是,埋藏变质作用的术语应该只适用于有充分理由确定为单一埋藏变质作用的情况,不应该把它当作很低级变质作用的同义词使

用。一般来说,这种见解是正确的,但实际上很难做到*,原因如下:

1. 埋藏变质作用和造山带中的很低级变质作用可以产生矿物学上相同的岩石。
2. 在单独的造山带内,已经证实:变质作用的温度可以从很低温(相当于埋藏变质作用)连续增加到所谓动热变质作用的高温。
3. “埋藏的”和“动热的”这两个术语分别有造陆运动和造山运动的含义。但是,运动的类型对矿物反应没有意义。就某一岩石成分而言,这些矿物反应只受压力和温度的控制,如将要在后面说明的那样,还受成分甚至气相数量的控制。

鉴于这些原因,有时要区分很低温动热变质作用和埋藏变质作用是不可能的,甚至是毫无意义的。“埋藏变质作用”这一术语原来指的是一种由于非造山地体下沉而造成的区域变质作用的类型,它发生在温度稍有升高而仍然是很低的沉积物中。但是在造山带的某些部分,同样很低的温度范围也能占优势。重要的是,相对低的温度造成埋藏变质作用,如在各类区域变质作用中一样,压力可以是低的、中等的或高的。

如果没有详细说明压力,则可以根据温度的范围,把区域变质作用概括地分成下列类型:

很低温变质作用

低温变质作用

中温变质作用

高温变质作用

很低温变质作用包括埋藏变质作用以及动热变质序列中的很低温岩石。

习惯上,特别是在讲英语的国家是讲变质级这个术语的。如果在特定的意义上使用“级”这个术语,例如,当它指十字石等变度时,就意味着是一个完全确定的压力-温度值。一个特定的压力-温度组合描述了该研究地区变质作用期间的物理条件(这一点在后面再谈)。如果在非特定的意义上使用“级”的术语,它就包括一

* 原文中无“一般来说,这种见解是正确的,但实际上很难做到”这一段话,使上下文意思脱节。现参照第三版及上下文原意作此改动。——译者注