

地质科技资料选编 (五十八)

国外变质岩研究的 若干问题

地质部情报研究所编

1980年5月

前 言

近年来，国外在变质岩研究方面作了大量工作，在归纳整理各种实际观测和实验研究的结果方面普遍采用相图取得了良好的效果。近年来又发展了P—T相图，为了使我国岩石学工作者系统了解这方面情况，注意研究和利用这方面的成果，我们编印了这份资料。在这份资料的前面，还根据我们所掌握的情况，就变质理论的发展情况编写了两份材料，以便同志们对变质岩研究的全貌有个概括的了解，在整理和编写这份资料的过程中，得到董申葆、苏良赫、高兴国、林盛中等同志的帮助，在此表示谢意。

由于我们水平的限制，错误之处在所难免望读者指正。

地质部情报研究所

基础室 岩矿组

1979年10月

目 录

一、变质理论的发展与现状.....	(1)
附编译资料(一)	
矿物反应——变质条件的指示计.....	(15)
附编译资料(二)	
高温高压下相平衡的实验研究.....	(27)
二、前寒武纪沉积岩石学的兴起和国外变质岩原岩恢复工作的基本现状.....	(31)
三、变质岩研究中相图的绘制、应用与发展.....	(39)
三角形变异图解.....	(46)
碳酸盐类岩石变质矿物共生组合图解.....	(49)
描述变质矿物共生关系的 ACF 图解.....	(52)
描述变质矿物共生关系的 A'KF 图解.....	(60)
表示变质矿物共生关系的 AFM 图解.....	(66)
四、多组份系统学说的发展现状和多相平衡的 P—T 图解.....	(70)
(一) 根据施赖纳玛克斯法—几何图形法—作多组份体系温度压力图.....	(72)
(二) 绘制多相平衡图解的基本原理及方法	(103)
(三) 用于变质作用的 P—T 图解	(105)
(四) 系统的 P—T 图解——施赖纳玛克斯分析法	(106)

一、变质理论的发展与现状

1. 古典变质岩理论的确立

变质岩术语是1833年查尔斯和莱伊尔创立的。到了十九世纪中叶，F. 贝克和U. 格鲁宾曼把变质作用开始区分为广阔的区域变质作用和局部变质作用两种类型。1911—1921年，由于挪威的戈尔德施密特和芬兰的艾斯科拉的工作，变质岩作为一门独立学科确立下来了。

1911年，戈尔德施密特在研究奥斯陆地区接触变质角闪岩过程中，揭示了热力学的多相平衡规律。他指出，该地区的矿物组合服从于W. 吉布斯相律，这一发现奠定了变质岩矿物共生分析的基础。戈尔德施密特的观点后来被艾斯科拉继承并予以发展。1914—1915年，他通过对芬兰奥里扬地区变质岩的研究，提出了化学成分和矿物成分之间关系的规律性。鉴于奥斯陆和奥里扬两地区的岩石矿物组合情况不同，从而认为这两个地区的变质岩是在不同的物理条件下再结晶的结果。他分析了控制变质作用的物理因素（温度和压力）与化学成分之间的关系，于是提出了作为表示一定范围物理条件的变质相的概念。

研究变质岩的另一重要问题是物质迁移和交代作用。戈尔德施密特和艾斯科拉两人在这方面问题同样作出了重要的贡献。戈尔德施密特于1921年对挪威斯塔万格变质地区进行了物质迁移和碱质交代的研究，特别是还阐述了交代作用的机理，并进行了分类。这样，就确立了变质岩石学的基本轮廓。此后，据文献报道，戈尔德施密特离开了从事变质岩的工作，而转向从事结晶化学和地球化学的研究。从此，其它岩石学工作者们便仅限于从内容上作些补充。这时，变质岩研究开始减弱，甚至呈现出守旧和停滞不前的现象。在这一段时间，虽然新的描述性实例年年均有增加，但从理论意义上看，则无明显的进展。直到30年代，世界上发表的有关变质岩论文仍然显得千篇一律。这或许是与当时各国学术领域未能理解或者未能充分理解戈尔德施密特与艾斯科拉理论的意义所致吧^[2]。

1939年，艾斯科拉、巴尔特和科林斯合著的“岩石成因”问世，其中系统地阐述了变质岩理论。从此，原来与艾斯科拉观点背道而驰的如格鲁宾曼、尼格里及剑桥大学的哈克等人开始倾向于艾斯科拉的观点了。

直至第二次世界大战以后，才真正打破了变质岩研究的停滞不前状态，特别是，1950年以后变质岩理论进入了新的变革时期，其发展是显著的。

2. 在变质过程中水的作用和开放系统的理论

普通的变质矿物都含有水份。在一般变质反应中有水的带出和带入。因此，在考虑变质岩的化学平衡问题时，水的作用是极其重要的特点，戈尔德施密特和艾斯科拉等人当时忽略了这一点。所以，吉布斯相律或化学平衡理论只适用于封闭系统，而不适用于开放系统这一

传统的陈旧观点在地质—岩石学领域曾经统治了较长的一段时期。这一问题直至 50 年代随着矿物热水合成实验的推进，人们才强烈意识到了的。

1952年秋季，约德和华盛顿发表了关于 $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 系列的平衡实验结果，并强调了水的作用。该岩石系列中的水含量大约在 600°C 和 1500 巴条件下产生变化，结果表现出绿泥石、滑石的低温趋向，而斜方辉石和堇青石显示出高温的趋向。因而暗示了不同的矿物相的矿物集合体不仅是由于温度、压力不同，而且还由于 H_2O 含量的不同才形成的。而过去的变质岩理论只表示了物理条件，因而关于矿物相的概念是不全面的。约德的实验针对这一点明确地提出了这一问题。因此，约德的论文惊动了岩石学界，并在他们当中引起了巨大的反响。著名岩石学家巴尔特指出，约德的论文是对岩石学界的巨大冲击。

但是，通过后来的实验工作同样证明了约德观点的不全面性。约德所强调的水过剩和水不足两种情况，实际上，在从前艾斯科拉文章中也已经提到过了，他曾说过，在变质过程中，水是一种特殊的孔隙溶液，如同石英岩石中的二氧化硅一样，属于过剩组份，只不过是它没有对固相压和水压予以区分。而在约德的实验中同样也是把二者同等对待的。这种变质理论后来遭到美国哈佛大学麦克多纳得和汤普森的否定。实际上，连约德自己不久后也在一些方面改变了原来的看法。也就是说，在变质过程中水易于迁移，在岩石中带出带入，所以，不得不认为变质岩就水来说是个开放系统。该开放系统不但会随温度和压力的改变而变化，而且还要依据 H_2O 的含量和 H_2O 的化学势而变化。汤普森从这一观点出发，出色的阐述了变质作用的热力学，而且区别了固相压和水压的不同意义，论述了地壳内水的平衡问题。区别固相压和水压十分重要，在一般的变质反应中，随着温度的上升，水会被释放出来，而伴随这一情况的出现，固体的体积将会减小。但是，如若把反应后的固相和水再加在一起，其体积会比反应前变大。因此，在固相压和水压相等的情况下，加大水压力反应温度上升，如果水压是固定的，仅仅是固相压力的加大，则反应温度下降。下图示出，变质反应的一般形式。

T 是温度， P 是固相压力， P_f 是流体压力。本图具有实际意义的是 $P_f = 0$ 的面和 $P_f = P$ 的面之间的空间。对于含水矿物的脱水平衡，通常可采用下述公式确定：

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V_s + \Delta V_f \frac{dP_f}{dP_s}}$$

这里， ΔS 是随脱水而来的熵变化，
 ΔV_s 和 ΔV_f 是随脱水而来的固相和流体相的体积变化

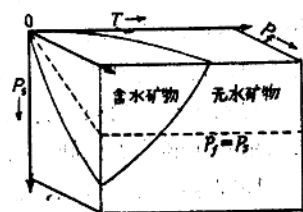


图 1 含水矿物（或含水矿物集合体）失去水份就成为无水矿物（或其集合体），本图是固体相体积减小时，稳定区域的一般形式。

可见，在变质过程中，岩石属于开放系统的观点很早就有，但是，一直没有形成一种理论。完整地建立开放系统理论的先驱是苏联的柯尔任斯基。他引进了开放系统的矿物学相律，这一相律有别于戈尔德施密特的封闭系统的矿物学相律。即是说，封闭系统的矿物学相律 $P = c$ ， P 代表共生矿物的最大数目， C 代表独立组份数；而开放系统的矿物学相律是 $P = c - m$ ， m 代表系统中带出带入的组分数。柯尔任斯基关于完全活动组分的建立明显地扩大了共生分析的应用可能性。

CO_2 和 H_2O 一样,它也是变质过程中能够带出和带入的物质。据文献记载,戈尔德施密特1921年根据湿尔斯特的实验论证了方解石+石英产生硅灰石的反应。在当时也是个很出色的创造。然而,他同样没有把固相压与 CO_2 的压力加以区别。直到1950年丹尼尔森才把这一问题正确地论述了。他的论文把有关 H_2O 的争论引入正确轨道起了不小的作用。六十年代以后,各国有越来越多的文献探讨了 H_2O 和 CO_2 作用,其中弗朗西斯的论文大家认为是最有概括性的。

3. 变质矿物合成和稳定关系的确定

第二次世界大战以前,对变质岩的矿物合成实验大都失败了,没有成功。五十年代以后,由于研制成功适合高压下从事研究的仪器和热水合成实验的开展,迅速实现了一万巴以上的高压合成实验,随之,一般的变质矿物都能合成,并且通过脚踏实地的实验,获得了许多有关这些矿物稳定关系的资料,成为近二十年来变质理论发展的重要基础之一。因为这些实验不仅提供了定量的数据,而且对后来岩石学家们考虑问题也具有根本性的影响。例如有关在开放系统中 H_2O 的作用问题,约德和汤普森的先见便与当时哈佛大学物理实验室工作有关。以后,汤普森通过实验还弄清楚了硬玉的稳定关系。硬玉是在兰闪石变质作用中特有的高压矿物之一,所以,该实验对理解兰闪石变质作用产生巨大的影响。

根据哈克的理论,像绿泥石、铁铝榴石和石榴石及兰晶石等结晶片岩特有的矿物只有在强的剪切应力下才是稳定的,故把这些矿物称作应力矿物,这种观点在很长一段时期里被广为传播。后来,经过实验证明,这些矿物在没有剪切应力的条件下也能合成出来,从而证明了哈克的观点是不全面的。认识到有些矿物在应力下更容易形成而已。进而认识到矿物在一定压力下稳定性可能产生变化这一现象的重要性。

都城秋穗于1947年,从批判哈克的观点出发,对含 Al_2SiO_5 化学成分的矿物,如兰晶石、硅线石、红柱石的稳定关系进行过推断。他的这种推断实验后来曾受到汤普森支持。五十年代以后,克拉克、罗什等人又补充了新的实验数据。从都城秋穗推断算起,直至引起其它一些人的兴趣而开展大量实验,仅仅用了8年时光,这是一个显著的进步^[3]。

本世纪五十年代以后,由于O.F.塔特尔设计的简单加压器被普遍使用,随之研究了在地壳压力和温度下有挥发组份存在时的反应和地壳作用中易挥发组份被封闭在其中的作用。1953年曾发现柯石英高压矿物,比重为3.01。继之,发现在10公里以下的深处,像长石、石英等造岩矿物是不稳定的,也能变成高压矿物,据此,重新提出了造岩矿物的压力效应问题。在近年来的实验工作中,发现了许多普通矿物的高压相,首先是超石英(стишовит)(一种具金红石结构的二氧化硅),对岩石学工作者观点的形成起了特别重要的作用。这使他们确信,压力在矿物形成中的意义比过去认为的更大^[20]。

4. 区域变质作用的各种类型

区域变质作用是造山运动的一部分,所以都城秋穗认为,造山变质作用这个名称对它来说可能较为恰当。然而,从历史上来看,绝大多数岩石学家都把它看作是在各种物理-化学

变质因素综合影响下发生的一种变质作用,不仅面积广阔,在同一变质相中可以出现各种复杂的岩石,而且岩石遭受强烈的变质改造。

在五十年代以前,变质作用分类的主要依据是热力、动力和化学组分的变化等物理-化学因素,同时也考虑了某些地质条件方面的因素,如侵入体接触关系、断层带的破裂、与热液有关的自变质等。本世纪六十年代以后,随着变质相理论和确定变质相图式的不断发展,区域变质作用的研究正经历着一个深刻的变化,这一变化的基本特点是在研究变质作用的物化条件基础上,进一步研究产生这些物化条件因素的原因,重点放在了起主导作用的地球物理和地球化学因素上,一部分工作还采用了区域地球物理方面的数据,如热流的测量和计算等。

有关区域变质作用的分类方案争论很多,看来似乎有两种截然不同的见解。作为区域变质作用的动力,国外一个学派注重地球深部高温的重要性和深成岩的效应,而另一学派,则强调压力(流体静力的和非流体静力的)和变形运动的效应。前一学派包括许多英国和法国的地质学家,其中有些人对区域变质作用使用了“深成变质作用”(Plutonic metamorphism)这个名称,法国的学者特别强调从共生的深成岩体中散发出的水和其它物质的作用。强调压力和变形运动的后一个学派包括许多德国和瑞士的地质学家。他们对区域变质作用使用“动力变质作用”或“断错变质作用”的名称。“动力变质作用”(dynamic metamorphism或 dynamometamorphism)这个术语最初是由描述岩石学大师H.罗森布什在1886年提出的。他的学生们宣传了这个术语及其有关的思想,并在全世界几代地质学家中发生了很大的影响。而且,一些后来的作者开始用动力变质作用和断错变质作用的名称表示碎裂变质作用(即岩石的强烈机械变形作用)。为了表示如热变质作用和动力变质作用结果引入了许多其它的名称,增加了术语的混乱性。

根据目前的认识趋势和我国著名变质岩石学家董申葆教授的意见,国外区域变质作用分类主要考虑下列一些特点:

(1) 变质作用前的原始状态和它们的原岩建造。这里面包括原岩建造属于那些沉积或火山沉积建造,原岩建造是在什么大地构造环境下形成的,变质前的起始状态(如地核、深海地槽、岛弧带、大陆间地槽或盆地等),它们与变质作用的发展有着重要的内在联系^[32]。

(2) 变质相的分布。可分为单相变质作用和多相变质作用两种,单相变质地区内通常只有一个变质相存在,这种变质作用经常出现有绿片岩相变质、板岩-千枚岩带变质,有时麻粒岩相也可以形成单相的麻粒岩区。单相变质反映当时热流或动力是均匀分布的(均匀变质)。多相指变质地区可以有两个以上的相(或数个变质带)同时存在。这一类型称为递进变质作用,在多相变质地区可以圈出一些变质带来,这些变质带实际上是当时地下热流变化的反映,有时称为热构造。在多相变质区还应按照地热增温率的不同,分出变质相系。

(3) 热流的性质及其来源,在变质作用时热流的性质及其来源可以有多种形式,如放射性热能、深部重力分异产生的热能、深部化学反应所释放的热能、由深部流体上升时带来的热能、构造形变产生的热能以及其它等等。根据近代热流方面的研究,随着变质作用时不同的地质背景,其中只有一种或两种热流起着主要作用。在一般情况下,放射性热能和深部重力分异作用产生的热能是影响变质作用的最主要的热源,前者来自于岩石本身,随时间而减弱,后者来自于深部,当较大熔体发生时,由重力分异作用产生热能,一旦这一热能超

过某一临界值,即可引起变质。这一热能在地壳变化具有旋回性。

(4) 构造变形作用。过去认为变质作用中,构造变形往往和热流同时进行,现在看来,构造变形和热流之间没有一定的直接关系,有些是以构造变形为主,有些则以热流变化为主。在整个变质时期中,变形可早于结晶作用,与结晶作用同时,或晚于结晶,其关系估计可能依变质作用类型而定。

在构造变形作用研究上,国外目前至少有两种趋势值得注意:一是把区域变质作用与大地构造环境(如板块、地槽造山带)联系起来,从而产生了相系、相组和双变质带概念,使区域变质作用研究出现了全新的面貌;二是把局部地区的变质作用与具体的构造联系起来,从而划分出了具体地区的变质作用期次。

从区域变质作用原因来看,目前基本上可以分作三派^[5],以H.Г.苏多维科夫为代表的一部分人认为,构造运动是区域变质作用的主要原因,由于活动带的发育,构造动力使堆积的和变动的地槽沉积岩和火山岩沉降到不同的深度。在这些岩石循序地向温度和压力值升高的带过渡的过程中,其变质作用与构造运动同时进行。

另一些研究者们则认为,区域变质作用与褶皱带上升构造运动阶段,物质和通透岩浆溶液的上升有关。П.С.科尔任斯基(1957)、B.C.索勃列夫(1957)、H.П.谢缅年科(1963)即属于这一派观点。

第三派人物,如特纳、弗尔霍根(1967)则强调,区域变质作用不可能是简单的向深部沉降或大量岩浆侵入的结果,而是大量热流通过岩石的结果。

总之,目前还没有得出一个具体的区域变质作用的分类方案,但在一些极端类型中大致有一些统一的认识^[32]。这些极端类型,一个是埋深变质作用,另一个是区域热流动力变质作用。这两种类型被里德称为造山变质作用(Orogenic meta.)和深成变质作用(Plutonic meta.),兹瓦尔则将其称之为构造深埋变质作用(Tectonic burial meta.)和动力—热流变质作用(Dynamo—hydrotel. meta.);温克尔称为埋深变质作用(Burial. meta.)和区域动力热变质作用(Regional dynamo—thermal meta.);霍列娃称为区域动力—地热变质作用和区域深成变质作用,下面将其特点分别加以介绍。

(1) 埋深变质:

主要由巨厚的沉积岩系和火山沉积岩系所组成,沉积环境大致相当于所谓的冒地槽,浅海盆地或大陆与岛弧之间的地槽。热源来自于岩层本身,以放射性热能为主,没有从深部或上地幔上升的热流,热流的分布与深度有关,一般属低温范围,温度能维持一个较长时间(50亿年),通常不易达到平衡,原岩结构保留较多,然而改变了矿物成分。变质岩系大都属单相变质,如一些地区的绿片岩相变质或区域动力变质出现的千枚岩带,高压相系如兰闪石片岩也属于这一类型。它们主要发生于下沉阶段和开始回返的构造变质阶段。认为高压相系的产生与海洋地壳底部有关或者伴随某些深大断裂的特殊下沉有关。一般无混合岩,有时可出现同构造期的花岗质岩石,蛇绿岩及超基性岩往往与高压相系有关。

(2) 区域动力—热变质

这种变质作用发生在以巨厚的火山沉积岩为主的地区,这里往往有相当数量的基性火山岩及一些酸性火山岩,原岩大致相当于优地槽或深海槽附近。热流来自于深部或上地幔,上升的热流不均匀,温克尔将其称之为热点或热中心的上移。温度升高的幅度较大,不同地区

有不同的地热增温率，一般明显地大于埋深变质。加热速度快，易趋近于平衡状态。变质地区属多相变质，一般称为递增变质带，进一步可分为各种不同变质相系类型。在变质作用的高潮可以出现不同类型的混合岩。常常伴随有褶皱和应力变形，但是没有必然的联系。动力一词在定义中只是一种沿用的习惯^[5]。

可以看出，这两种类型只是代表了两个极端，实际上在自然界中更多的是中间过渡类型，在这方面还有大量的工作要做。不久前，在苏联，根据地盾和褶皱区各种变质岩生成的地质条件的研究和模拟实验，将区域变质作用还分出了第三类型。即区域超变质作用，并指出，区域超变质作用主要发生在地槽区形成褶皱构造的结束阶段，波及地壳相当小的地区，主要出现在区域热流动力变质的角闪岩相和麻粒岩相岩石中。由于物质被溶液带出与带入，岩石超变质作用可能发生在开放系统或封闭系统中。目前，有关超变质作用基本上划分为两类，第一类是在封闭系统中发生的变质作用或再生-深熔型超变质作用，依靠熔融变质岩导致生成岩浆；第二类称为再生-交代型超变质作用，这是在地壳下部产生的溶液影响下而发生在开放系统中（Д.С.柯尔任斯基称之为透岩浆型）的变质作用^[2,8]。

在变质地区中有一些特殊的岩石组合，这些特殊的岩石组合可以是变质期前的，变质期间的或变质期后的只要这些岩石组合与变质作用有直接或间接关系，能在一定程度上说明变质作用的形成环境或条件，即可作为特殊的岩石组合考虑。例如，某些太古代的绿岩带、一些高压相系中的蛇绿岩、与变质幕同时的中酸性花岗岩或混合岩以及一些钙碱性火山岩系等都可以从不同角度说明变质作用发生前后的环境。特别是有关斜长岩问题取得了一系列的最新资料。

5. 物质的迁移和交代作用

近年来，对于由变质作用而造成的物质迁移和交代作用的讨论十分热烈，新的实例不断出现。一些人认为，即使把地壳内稀有元素大量聚集而形成矿床的情况除外，在岩石学上有意义的大部分物质也可以说都是从外界带入的。而物质是从外界带入的还是在地壳内原来就有的，这两种截然不同的意见直至五十年代都没有足够充分的证据。最初认为，在遭受变质作用的岩石中含有微量的水溶液，变质反应和变质迁移就是用这种水溶液作媒介进行的。不久，提出了另一种看法，认为对变质作用来说，水溶液的媒介作用不是主要的，而应当看成是固体内原子、离子或简单分子的扩散结果。这种固体扩散说后来得到一些花岗变质论者们的强烈支持。

另一些人从岩石和矿物中物质的扩散常数提出，由于晶体内原子位置的置换和结晶构造中孔隙造成的扩散常数是很大的。即使考虑到地质时代的漫长，也恐怕不会引起那么大规模的迁移。例如，在500℃条件下，在石英的主轴方向，经过100万年之后，Na离子移动的平均距离为2米，K离子才不过1米左右。因此，兰伯特曾经指出，结晶颗粒之间或镶嵌块体之间的界面扩散作用是可能造成大量物质迁移的，但是界面扩散常数究竟多大到现在还不清楚。有人主张扩散作用是按几何学原理进行的，这样，离子半径最小的原子是可以经常移

动的, 然而, 这种看法也仍然遭到反对。

林格伦强调认为, 岩石发生交代作用时体积不变。这种看法曾被许多岩石学家接受(见特纳1968), 但兰伯特等人持有不同观点, 他们认为, 虽然体积有时不变, 但通常还是略有变化的。

至于引起物质迁移的原因, 兰伯特于1948年就曾发表过独创性见解, 他把引起大规模花岗岩化作用的物质迁移原因归结为地球重力场作用的结果, 在他的观点中, 重物质必然在下, 轻物质必然在上, 不论在力学上, 还是在热力学上这种分布都是稳定的。按照这种分布, 在地壳内可以引起物质大规模的上下方向扩散。具有独创性的和简单明了的兰伯特见解在变质理论再次兴起的五十年代打破了过去固有的观念。这种结论是否正确, 还有不同看法, 但在当时, 对进一步发展变质理论起了不小的推动作用。

就变质过程交代作用的意义来看, 目前国外基本上有两派观点。其中一派坚持认为, 区域变质作用和接触变质作用的许多过程是等化学的, 即岩石的原始成分没有实质性的变化。诸如, 变质岩之间互层的事实屡见不鲜, 岩石延伸距离很远和岩石重结晶, 但保留了原始的化学成分。以角闪岩为例, 几乎完全类同于基性成分的火成岩; 况且石榴石-硅线石片麻岩与高铝泥质沉积岩相当; 遭受了重结晶作用但不改变成分的石英岩和碳酸盐类岩石等的出现均可证明等化学变质作用类型。基于这种理论, 提出变质岩层剖面总的化学成分发生的变化并非交代作用引起的, 而是变质分异作用的结果, 在这种情况下, 把变质分异作用理解为从交代岩石中熔出最浅色的分异物, 并部分地迁移到上部层位。因此, 变质岩层剖面的底部可能是浅色组分变贫, 从而成为不完全是与原岩等化学的。

另一派观点则认为, 变质转化几乎经常伴有广泛的变质交代作用。在区域地质图上甚至规定了一套经验顺序。例如, A. A. 玛拉库舍夫依据区域变质作用的地球化学特点划分了三个变质建造系列。

在六十年代, 苏联地质学家Д. С. 柯尔任斯基发现, 自变质和接触变质阶段的交代作用从属于一系列物理-化学规律性, 这一理论很快地为许多岩石学家们所接受。

6. 当前正在研究的几个变质作用问题

六十年代以后, 随着区域性的大规模编图和总结工作的进展, 实验室工作的速度发展, 以及变质地区找矿工作的大量展开, 对变质岩和变质作用的研究, 相对于岩浆作用的研究有了更快的发展, 归纳起来有以下几个方面。

(1) 从广阔的地质领域逐渐向使用P和T的资料方面发展

在最近十年左右, 在变质岩石学研究方面, 普遍强调了对特定地区变质作用P和T的精确界线的确定, 并且已发表的实验数据正在不断的增加, 这些数据提供了成分上类似于稳定的天然矿物组合的P—T范围。

鉴于天然矿物成分的变化, 往往在实验室内得不出来, 所以采用了热力学模式把实验室获得的相线与实际观察的相成分进行校对。在这方面, 经常使用电子探针准确、快速地测定了矿物成分。

大量资料证明, 在地壳深部至少有一个从高到低的似地热梯度的变化趋势: 太古代变质

岩石独特地含有低压, 高温矿物组合, 而显生宙变质岩则往往含有以较高压为特征的矿物组合。因此, 人们实际上注意到, 兰闪石片岩在前寒武纪地区没有出现, 它说明这种岩石的形成是由于平均地热梯度随时间而下降造成的。总之, 变质岩石学家目前正从测定 $P-T$ 的方法学领域向着把这个方法用于解决广泛的地质问题的方向发展。

(2) 变质相、相组、相系的研究

最初, 艾斯科拉认为, 地壳内正规的矿物相系列是绿片岩相-绿帘石角闪岩相-角闪岩相-辉石角闪岩相。第二次世界大战以后, 把麻粒岩相纳入了该系列而取代了辉石角闪岩相, 也被认为是区域变质相的一个系列。在这一时期, 变质矿物相系理论主要是以北欧、英国和美国东部的变质岩研究为基础的^[30]。变质带和变质相主要是研究变质作用的物化条件, 传统概念是以苏格兰高地的变质地区研究为依据来定义变质带的, 认为所有变质地区的变质带都和苏格兰高地一样, 同属一个类型, 可用标志矿物如绿泥石、黑云母、石榴石、十字石、兰晶石、硅线石带来代表, 称作巴罗型, 简称为兰晶石-硅线石带, 与此不同的就被认为是一种例外^{[31][34]}。这样一来, 就产生了哈克(1932)和艾斯科拉(1939)的标准区域变质作用的概念了。这一概念表明, 各地区的变质作用中的 T 和 P 的关系(这一关系可用 $\Delta P/\Delta X$ 表示温度梯度, 或 $\Delta T/\Delta X$ 表示地热梯度)只能是一个数值, 或者说, 各变质地区在变质时, 它的地热增温率是固定的, 反映出来的 $T-P$ 变化相当于兰晶石-硅线石组合, 在 $P-T$ 图上相当于一条固定的曲线^[3]。

但是, 后来对环太平洋地区的研究产生了重大的变化。艾斯科拉注意到兰闪石片岩具有特殊的矿物成分, 因而把它作为一个独立的矿物相。但是, 由于当时他对兰闪石片岩地区也没能详细调查, 所以这种出色的见解也没得到及时的发展。后来荷兰人罗弗(1949)以印尼的西里伯斯岛为基础支持了艾斯科拉的观点, 强调了兰闪石片岩相的区域变质作用成因。近年来, 各国岩石学家和构造学家很注意研究兰闪石片岩的变质作用, 正如许多人所指出, 兰闪石片岩的成因是综合性的构造-岩石学问题。他们显然是强调了高压在兰闪石片岩变质作用中起作用的理论, 并以此彻底取代了钠交代作用理论, 结果又复活了艾斯科拉有关特殊的高压低温兰闪石片岩的思想, 在1939年他曾提出兰闪石片岩相和榴辉岩相作为相对高的压力代表。国外当前报道的绝大多数资料认为, 兰闪石片岩带包含了构成特殊变质相系的岩石, 其范围可以从低级的含浊沸石和方沸石的沸石岩石, 经过葡萄石-绿帘石岩石, 之后为兰闪石片岩±绿片岩相岩石, 直到钠长石斜长角闪岩和榴辉岩, 其形成环境属深海沟-消失带的底部。无疑, 兰闪石变质作用是重要的区域变质作用之一^{[1][35]}。

将变质作用与地质作用联系起来, 在变质带的实际资料和变质相理论分析基础上提出了相组和相系的新概念, 从而打破了将变质岩作为孤立现象予以研究的状况。变质相组是根据温度确定的, 在填图过程, 根据岩石中有效的指示矿物的开始出现和最终消失的等变线概念划分变质相组, 目前被认为是行之有效的方法。不过, 由于相组概念主要是建立在实验基础之上, 其依据又主要是温度, 因此, 在世界范围应用它还存在一些问题, 至今推广是缓慢的^{[1][32][35]}。

在相组概念发展的同时, 都城秋穗1961年在总结日本诸岛变质地区时, 提出了变质相系的概念, 力求将变质作用与复杂具体的地质环境联系起来。根据日本诸岛的情况, 这里的变质带(相)不是兰晶石-硅线石带, 而分别是由红柱石-硅线石带和兰闪石-硬玉带所代表。

都城秋穗认为,每一变质地区大都由几个变质带(相)所组成,这些变质带(相)所代表的P和T之间的关系不是一个数值,而是出现了一系列数值,每一变质地区都有着自己的数值和与其相应的变质矿物组合。所有这些地区的不同变质带(相)形成一系列的变质相组合即称为变质相系(按董申保提法),它们实际上反映了变质时地热增温率的不同变化。根据有些变质反应曲线在P—T图上的斜率,他进一步把变质相系分成三个基本类型和两个过渡类型[1][2][32][36]。

1. 低压型 红柱石-硅线石带。发育堇青石,很少有铝榴石。该型区域变质相系为绿片岩相→角闪岩相→麻粒岩相。

地热梯度 $>25^{\circ}\text{C}/\text{公里}$

2. 中压型 兰晶石-硅线石带。一般无堇青石、兰闪石和硬玉。铁铝榴石普遍。该型区域变质相系为绿片岩相→绿帘石-角闪岩相→麻粒岩相。

地热梯度大约在 $20^{\circ}\text{C}/\text{公里}$

3. 高压型 兰闪石-硬玉带。一般将发育有硬玉+石英的区域变质作用称为典型的高压型,只有硬柱石或堇闪石的称为非典型的高压型。

地热梯度大约为 $<10^{\circ}\text{C}/\text{公里}$

1与2和2与3之间各存在一个过渡型。

变质相系的研究方向发展较快,在24届国际地质会议期间曾专门设立了变质相系专题讨论会。在1967年,世界变质带编图小组规定填图应以划分相系为准。变质相系的出现标志着变质作用的物化条件的研究进入一个新的阶段。据认为,以前对变质作用的研究曾经有过两种倾向,一种认为,变质作用的P—T条件受深度控制,每一个深度的温度只有一个固定不变的数值,这是传统的变质带概念;另一种认为,变质作用的变化主要是温度的变化,压力不起主要作用,这是等变质带也就是等温带的概念。这两种观点都没有反映出正确的T和P

的相互关系,不是把P与T看成是一种不变的固定关系,就是把P看成与T毫无牵连。变质相系的出现则表明在变质作用中压力是一个积极的因素。它和温度的关系也就是地热梯度的变化是随着各个变质地区、大地构造环境以及时间和空间的不同而变化的,这样,就打破了长期以来对待P与T的形而上学观点了。变质相系的意义不仅解决了变质作用中P和T的关系,另一方面,同样重要的是开始把变质作用中热力学变化与地壳的发展变化联系起来了。

(3) 双变质带的研究

随着对变质相系研究的开展,区域变质作用的多样性受到了重视。都城秋穗(1961)首先注意到这一事实,即许多地槽带不仅在日本诸岛,主体部分,还有在环太平洋地区存在着成对的变质带,一带以高压-低温变质作用为特征,经常包括有蓝闪石片岩和大量的基性

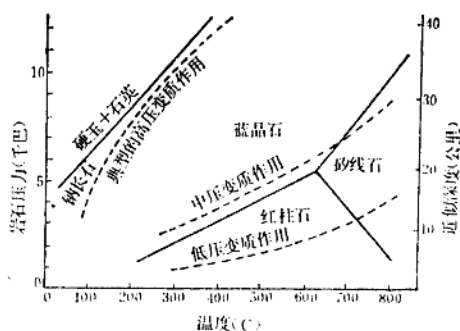


图2 变质相系分类,根据 Al_2SiO_5 矿物和硬玉稳定区的关系(都城秋穗1973)

和超基性岩石；另一带则相对地以低压-高温变质作用为特征，并伴有大量的同构造期的和构造期后的花岗岩侵入体。这两种类型有时互相迭加，但经常并排在一起。在一地区，它们的组合往往是一个高压相系或高压过渡相系与一个低压相系或一个低压过渡相系。这种情况在环太平洋地区很明显，并被称之为双变质带（都城秋惠），而在西欧一带出现的这种现象则被称之为造山带的二元性（兹瓦尔特）^{[1][30][32][35]}。指出在造山带内存在成对的变质带乃是近二十年来在变质岩石学方面最重要的进展。双变质带环绕于太平洋两岸，属于中生代以后的变质带，其主要特点如下：

（1）由不同的两个变质带组成。多数则由大陆一侧（即内侧）低压变质带和大洋一侧（即外侧）高压变质带所组成。在另外一些双变质带中，内带属低压和中压型，而外带可以是高压—中压型。高压带产在大陆一侧的情况很少。通常靠大陆一侧的内带由红柱石-硅线石或低压过渡型构成，原岩以沉积岩为主，可能是在奠基于前寒武纪硅铝层基底上的地槽盆地中生成的，在变质期或稍后一些时间，往往有大量混合岩及花岗岩出现。靠大洋一侧的外带，以蓝闪石—硬玉或高压过渡型为代表，原岩以次基性火山岩为主，但同时也有沉积岩出现，是在大陆以外，以洋底作为基底的地槽中生成的，往往伴有大量的辉长岩和超基性岩（蛇纹岩），未见到花岗质岩石。

（2）双变质带的时代差异不大，同属于一个造山旋回。只在有些双变质带中，高压带的原岩沉积时代要比低压带更加年青。

（3）在许多双变质带分布区，岩石的最早期分布已被后期断裂改造。有时两个带直接接触，而有时在两带之间夹有基本上未变质的岩带。

关于双变质带的成因，都城秋穗等人认为，似乎是大洋板块在岛弧和大陆边缘之下俯冲（underthrusting）的结果。高压类型处于大洋深海槽附近，其中一部分是蛇绿岩套，是大洋壳的产物，另一部分则是上地幔的岩石在变质作用期稍后被卷入的。低压类型处于大陆边缘的岛弧部分，与之伴生的钙碱性火山岩系和花岗质岩石与大陆硅铝层的重熔有关。这两个带变质作用物理条件的差异，它们之间的空间排列以及各带中所出现的岩石组合的不同均与近代板块构造有关。1973年都城进一步明确地用板块构造理论解释了双变质带。他认为，大洋板块的俯冲会把海沟带中的沉积物堆积带到巨大深度。这种构造沉降（tectonic descent）应造成一个异常低的地热梯度，导致了高压变质作用。当俯冲的速度没有快到足以造成高压变质作用时，中压变质作用会代之以发生。两条平行带如果存在绝然不同的性质，就会变得模糊不清，或者其中一条带可以完全不发育。低压型的变质带以伴有丰富的花岗质深成岩为特征。如果剥蚀较浅，重结晶完全的变质地体就可能不出露。在岛弧和大陆边缘的安山质火山链可能是低压变质杂岩和共生花岗质岩石的一种地表呈现。从这种意义来看，低压变质带可以看作是一条花岗质深成作用和安山岩质火山作用的带。

环太平洋地区发育着良好的双变质带，因而把双变质带看作为这个地区的特点。世界上大多数典型的蓝闪石片岩都是在中生代和新生代形成的。可以想像，自中生代以来，特别在环太平洋区域，岩石圈板块或变得较厚了，或运动变得快了。板块较快的俯冲应产生较低的地热梯度，应有利于形成较典型的高压变质带和较典型的双变质带。当然，在世界的其它地区同样具有出现双变质带的可能性。在北美西北部不列颠哥伦比亚—华盛顿—俄勒冈—加利福尼亚一带包括有数条蓝闪石片岩带，而欧州的苏格兰高地可能是古生代双变质带的初始类

型。兹瓦尔特(1967)对西欧的一些变质地区做了某些总结,提出了造山带二元性的设想。对双变质带的认识是世界一些地区记录的温压资料积累的自然结果。

(4) 变质反应的研究

近年来,变质作用的研究在实验岩石学和野外详细观察二者的结合方面取得了显著的进展,因而,出现了两个根本性的变化。

第一,通常根据变质相和亚相的概念认为,某一变质相的不同矿物组合相当于特定的温度与压力区间内所具有的各种岩石组分。后来,温克尔指出(1976),对岩石观测表明,将相与亚相统归到一个体系是件难办的事情,但是,代表等变质级的变质反应带的概念还是有用的。在野外查明这种等反应级具有岩石成因上的重要意义。现代变质反应研究的发展已经可以用各种岩石特定反应中出现的标志矿物来代替旧的变质带的标志矿物组合,只要在一个变质地区有与特定反应的组分相一致的岩石存在,即这些岩石有那些特定反应中的矿物组合出现,那么就可以确定出具体的P—T条件。

第二,通过实验岩石学研究,对不同组分岩石变质作用所产生的反应提供了大量数据,这些发展大大地推动了变质矿物组合的研究,目前已经查明了许多特征矿物组合可以作为一定变质反应的代表。实际上,据国外报道,由于实验资料已经提示了一些矿物共生组合可能在自然界产生,从而又发现了一些新的矿物共生组合。同样,由于实验资料的提示,而可以区分具有成因意义的特定反应和不具有成因意义的特定反应。这些对确立变质地区的温度—压力条件,从而达到变质岩石学研究的基本目的同样是十分重要的^{[7][8]}。

(1) 变质反应研究的一般情况

近三十年来,变质岩石学的重大进展之一是对许多变质反应进行了实验室验证。在许多情况下,简单的反应能够提供重要的信息,例如,100/公里或更低的兰片岩相岩石的梯度需要有方解石→文石,钠长石→硬玉+石英的反应。六十年代以后,从推断反应(研究矿物共生组合的P—T关系)到实际反应,从室内推断到野外实际出现,沿着这个方向研究变质反应进展很大,这是值得注意的一个方向^[9]。

1976年温克尔指出了变质反应的研究目前已经脱离传统的岩浆作用实验岩石学范畴而建立了一套比较系统的变质作用实验岩石学的工作原则与方法。它们是以密切结合野外观察来解决实际出现的变质作用为目的,并进一步扩大到一些复杂的热力学领域中去。此外,有关变质反应的近代研究还明确指出,仅仅以热力学为基础的变质反应的实验室方法已无法满足需要,有关变质反应的动力学和机理研究已经提到日程上来了,这一点亦是值得注意的一个方向。当前有关变质反应研究的一般特点是:

(i) 密切结合野外观察,从研究一般性的变质反应转而研究自然界存在的真实反应,并且在这些真实反应中抓住一些在成因上具有特殊意义的特定反应,用以研究自然界存在的变质作用或通过这研究来发现尚未注意到的自然界新的变质矿物组合。

(ii) 进行专题性的和特定地区的变质反应的详细研究,特别是那些有挥发组份(CO₂和H₂O)参加的变质反应和Fe、Mg组份形成的类质同像变质矿物,如堇青石、石榴石、黑云母等成为当前的重点研究对象之一。

(iii) 探讨有关变质反应动力学和变质反应的机理方面的问题。主要研究变质反应过程中,矿物组合及其结构构造的细微变化,包括不完全反应、退化反应、交代反应等。在进

行这些工作过程中,除了必要的实验以外,还要对野外观察的岩石做较详细的显微构造分析,特别要对那些残留构造、斑晶、条带和各种交代结构更应注意。研究岩石标本上某一微区中的矿物及其结构的变化往往可以提供有关反应过程的新认识。通过这一观察可以发现,矿物组合的出现不是像我们直观那样用某一变质反应来代表,而是由通过更复杂的一些中间反应来达到这一变化的。因此,在研究变质反应机理方面,不仅要有必要的实验手段,更重要的是要有野外观察的实际材料。目前,电子探针已成为研究这一方面的重要手段之一。

(2) 研究变质反应的基本方法

在变质作用的研究中,从一开始到现在矿物共生组合始终是一个研究的主要对象。以后经过有关变质相、变质带认识的发展,直至今天又向着变质反应的研究方向发展着。近年来,变质相系的突破首先是变质矿物组合的研究有了突破,而变质矿物组合的突破又是由变质反应的物化平衡概念有了突破所决定的。研究变质反应的工作原则上仍以相律为基础。但是,在具体应用中主要考虑的是针对不同的变质反应类型和有活动组份出现时相律如何应用的问题,此外还对强度因素、流体压力 P_f 的地位以及流体压力中不同挥发组分的比例对变质反应的影响,做了较多的工作,局部平衡方面的研究还处于开始阶段。

变质反应类型扩大了。过去在室内工作时,往往考虑的是无水反应这一类型,实际上这种反应只能说明温度的变化,对于压力变化却很不灵敏。自从变质相系研究以来,压力因素的重要性显著提高,同时类质同像变质矿物,特别是几个标志矿物如石榴石、堇青石、黑云母等的形成也成为重要课题,从而使变质反应类型相应地得到了发展。目前提出的主要类型如下^[32]:

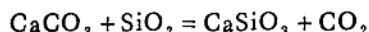
(i) 脱水反应或脱挥发份反应。这是变质反应中的重要类型,几乎主要变质级的划分界线均由它们所决定。

温度上升释放 H_2O 的反应,大多数变质反应属于这种类型。 P_5 和 P_{H_2O} 的关系。泥质沉积物含有大量的 H_2O , 部分为矿物粒间的间隙水,部分作为矿物的一种组分。变质作用使这种岩石明显脱水。



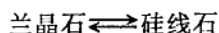
叶腊石 蓝晶石 石英

脱碳反应,如钙质岩石的变质作用释放 CO_2 的例子。



方解石 石英 硅灰石

(ii) 固体—固体反应。一种矿物反应后变为另外两种或三种矿物。在确定压力和温度的变化方面,这种类型起着主要的作用。变质相系亦是主要依靠这种反应而划分的。这种反应进一步还可以分为多相转换;



有序无序(微斜长石 $\rightleftharpoons$ 正长石); 钾钠长石的固溶体反应,以及不同固体矿物之间的反应($NaAlSi_3O_8 + SiO_2 \rightleftharpoons NaAlSi_2O_6$)。

(iii) 连续和不连续反应。这种类型主要用于确定有类质同像关系的矿物出现,如云母、黑硬绿泥石、绿泥石、白云母、石榴石、堇青石等的共生关系。虽然有许多这种矿物是

变质带的标志矿物，但是，由于它们都有类质同像特点，在一些地方，这些矿物组合出现了所谓的反常现象，如黑云母带出现了白云母与黑硬绿泥石的共生现象等。近代研究指出，这种类质同像矿物的共生关系的变化与它们的反应是连续，还是不连续类型有关，连续反应的自由度要比不连续的自由度大，因此，在同样的泥质岩中和同样的变质条件下，可以出现不同的矿物组合。

在进行数据处理方面，相图仍然是一个有力的工具，并被总称之为岩石成因纲图。其中包括：

(A) 多组分相图， P 、 T 变量不变，主要说明矿物共生组合与化学成分间的变化关系，如 ACF, AKF, AFM 等图。

(B) 多相平衡 $P-T$ 图，现在最常用的是施赖纳玛克斯方法的进一步发展图，其应用有着广泛的远景。

(C) $T-X$ 相图，一些温度—浓度图。通常用于解释有各种挥发份 ($CO_2 + H_2O$) 参与的反应。

有关这方面的具体资料在后面将要叙述。

在讨论与温度和压力有关的矿物共生变化的图解时，经常会援引施赖纳玛克斯束的概念，在这里略加说明。如果一个由 C 组份组成的系统含有 $C+2$ 个固定成分的相，那么相律表明，自由度 (F) 为 0。具有 $C+2$ 个相的组合以一个一定的点（单变点）表示。如果其中任何一相被迁移，该系统就成为有 $C+1$ 个相，因此， $F=1$ ，且在相图中的一曲线（单变曲线）上应是稳定的。一个相的迁移有 $C+2$ 种不同方式。因此，一般有 $C+2$ 条曲线，这些曲线应从代表 $C+2$ 个相共存的不变点向四方散射出去。在一个不变点周围的这样一组曲线命名为“施赖纳玛克斯束”。每一条单变曲线被不变点分成二部分。一部分代表稳定平衡，另一部分代表准稳定平衡。每条曲线可以看作是相当于在该曲线上共存相之间的一个化学方程。

这些曲线把温度—压力相图分成 $C+2$ 个域（双变域）。每个域都能有 C 个相或少于 C 个相平衡共存。在每个域里，矿物组合随其化学成分按照该域特有的相律而变化。例如，取一组分 Al_2SiO_5 系统作为一个简单的例子，在系统中一个三相点被固定在一个温度—压力相图中。此点放射出代表二相平衡的三条曲线。在以这些曲线为界的每个域中，只有一个相是稳定的。

各单变曲线的形状和位置可以通过合成实验，或者如果有足够的热力学资料可以利用的情况下均可以计算出来。如果知道了焓和体积变化，则可以用克劳修斯—克拉珀龙方程计算出曲线的斜率。甚至当不了解各曲线的形状、位置和斜率的时候，也有一个控制不变点周围单变曲线次序的一般相律。它是由施赖纳玛克斯在 1910 年前后发现，。这种次序仅仅取决于有关相的化学分子式。关于这方面的详细说明可参考任一安 1966 年的著作。

(5) 变质作用研究范围不断扩大。

关于在古老的太古界存在原始地壳残余物这一概念近年来又重新引起了广泛的讨论。一些人认为，波罗的地盾和世界其它地区最古老的太古代岩石，其年龄在 35—40 亿年以上，为基性变火山岩类，然而这种岩石的性质尚未完全弄清楚。对于恢复地壳在地球地质历史早期阶段发展的特征，很多研究人员都做了尝试。这个问题所以重要，是因为原始的地质作用（包括地球早期的岩浆作用），在很大程度上能决定地球后来的地质演变。可惜的是，在这个问题上，出露于较小地段的前寒武纪深变质岩，暂时还是唯一的资料来源。

据报道,我们星球存在的总的延续时间为50—55亿年,地壳年龄估计大约有45—47亿年。从这一概念出发,地球上最古老岩石的成分具有巨大的意义。正如1973年对南极洲和东西伯利亚岩石进行的铅同位素等时年龄测定研究所表明的那样,地壳已知最古老岩石的年龄为 $42-37 \pm 2$ 亿年,它们是安山—玄武熔岩的喷发产物,后来由于经历了最古老的变质作用,而变成了基性片岩和紫苏花岗岩(Эндербит)。最古老的,年龄已可靠确定的较酸性岩石为35亿年。B.E.哈因1973年甚至指出,35亿年这个界线是第一次的,同时又是最普遍的花岗岩化的界线,而这次花岗岩化对所有的更古老的岩石都进行了彻底改造^[20]。

B.E.哈因1973年将岩石圈的发展过程划分为以下几个阶段。

(1) 前地史阶段(50—45亿年)。在这个阶段,地球作为一个星球已告形成。

(2) 早期地史阶段(45—40亿年)开始形成原始岩石圈。在这一阶段,据推测,由于发生了大量的玄武岩喷发活动而形成了地球的原始玄武岩层。

(3) 远太古代阶段(40—35亿年)形成原始岩石圈。古老的安山片麻岩和花岗片麻岩的形成可能与这个阶段有关。

(4) 太古代、早元古代早期地槽阶段(35—20亿年),原始岩石圈形成完毕。

近年的大量资料证明,地壳的平均成分接近于安山岩(T.巴特等人1956)。这种见解得到冰川粘土平均成分的证实,冰川粘土的平均成分相当于古老地质的平均成分。前寒武纪麻粒岩的平均成分与这些数据接近(S.德鲁里1973)。现在估计,地壳在早期阶段是从玄武岩演变到安山岩的。研究地球最古老岩石的岩石学和岩石化学目的在于回答地球原始地壳的成分、原始地壳的演化、地球原始物质的分异方向、组成原始地壳岩石的含金属性之类的问题,而这些问题和预测找矿有关。

过去,对变质作用的观察只局限于大陆内,现在,由于近代技术的发展,已经向着研究洋底变质作用发展。自1966年以来,许多资料报道了由大洋中脊玄武岩和辉长岩等可以形成变质岩的事实。大多数这种变质玄武岩无片理或片理微弱,保存原始结构,变质程度属沸石相和绿片岩相。洋底变质岩的另一重要类型是变质辉长岩,保存原始结构,属绿片岩相和角闪岩相。

近年来,冲击变质现象引起了岩石学家们的重视^[20]。例如对月球表面上由陨石撞击出现的冲击变质作用的研究,对“震荡”岩的冲击矿物和结构以及经过侵蚀的由宇宙物质冲击地表而留下的古老的痕迹构造的研究。在苏联,看来目前把主要注意力放在了对波皮盖陨石坑的研究上。所有这些研究虽然还刚刚开始,但是,它们将从地壳变化的另一侧面,包括地壳与上地幔联系,早太古代地壳的演化揭示变质作用的一些重要因素。

紫苏花岗岩和其它实际上“不含水的”深变质岩的成因问题引起了许多岩石学与物理化学家们重视。因为,越来越多的资料提到这个问题对于理解岩石成因,对于理解地壳深部和地幔下部的性质具有头等重要的意义。紫苏花岗岩产于麻粒岩变质相岩系内,看来现在已不再引起怀疑了,但其形成机制还不清楚。紫苏花岗岩和与之相似的岩石有很大的均质性,一般认为它是一种十分固定的岩石类型,并在形成深度很深的岩石的露头区广泛分布,可以推断存在着能形成紫苏花岗岩的有规律的作用,然而目前尚没有令人满意的,合理的成因假说。因此,近年来,国外对进一步全面研究紫苏花岗岩的工作逐渐提到了日程上来了^[21]。

[23]。

情报所基础室 岩矿组编写