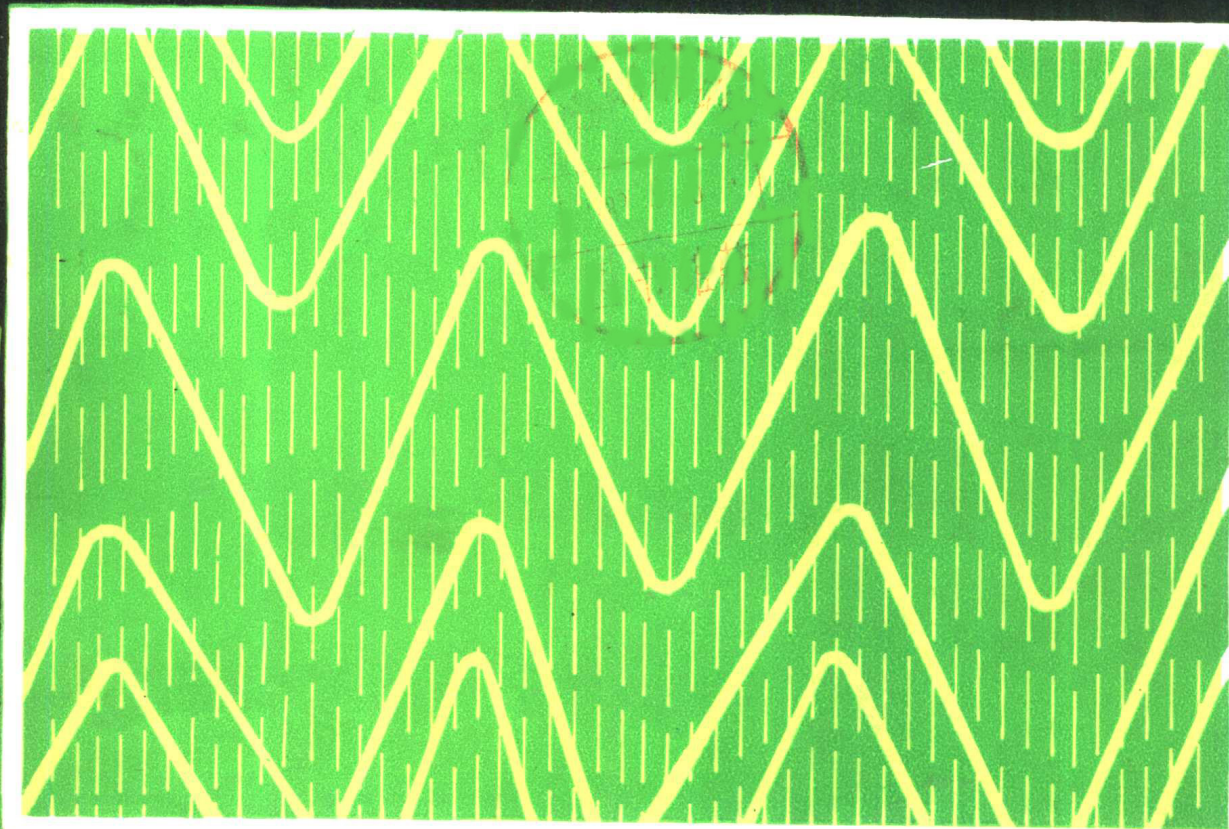


国外变质岩区 构造研究方法

专 辑

.763

401



国外变质岩区构造研究方法

(专 辑)

地质部情报研究所

萧庆辉等译 马万钧等校

地质出版社

内 容 提 要

本书是地质部情报所主编的一个译文集。它是继“变质岩层构造特征”，“国外变质岩地区地质构造资料选编”以后有关国外变质岩构造研究的另一个译文集。

本文针对我国变质岩区构造研究的薄弱环节，选译了当前国外变质岩区构造研究方面的一些较先进的方法和经验的论文。全书包括变质岩构造的特点、变质岩构造序列、叠加褶皱、填图方法以及变形和变质作用关系五个部分，着重介绍了变质岩区的构造特点，构造序列的建立、划分和应用的一些方法和实例，叠加褶皱的特点及其研究方法，变质岩区填图原则和方法的一些变化情况，以及岩石变形和变质作用的时空关系及其识别标志等。

读者对象：本书可供从事构造地质、矿产地质、变质岩、前寒武纪地质以及区域地质研究的科研、教学和生产人员参考。

国外变质岩区构造研究方法

(专辑)

地质部情报研究所
萧庆辉等译 马万钧等校
地质部书刊编辑室编辑
责任编辑：张义勋

*

地质出版社出版
(北京西四)

地质印刷厂印刷
(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：15⁷/₈ 字数：376,000
1981年11月北京第一版·1981年11月北京第一次印刷
印数1—2,680册·定价2.90元
统一书号：15038·新675

前言

变质岩区的构造研究是鉴定变质岩区古构造型式和各级构造型式对矿田、矿结和矿床控制作用的基础工作。近年来国外对变质岩构造的研究比较深入,并形成了一套以研究构造形迹为主的比较系统的理论和研究方法。我国变质岩区分布广泛,许多著名的大型矿床均与变质岩有关。为了使广大地质工作者熟悉和了解国外变质岩构造研究的进展和研究方法,我们继“变质岩层构造特征”、“国外变质岩地区地质构造资料选编”以后,又编了本专辑——“国外变质岩区构造研究方法”(专辑)。在此专辑中共收集了25篇文章,大部分文章选自七十年代以来发表在国外期刊和书籍中的论文。

专辑共分五个部分。第一部分共收集了2篇文章。着重介绍国外变质岩构造研究概况以及变质岩层的构造特点,使广大地质工作者熟悉和了解国外变质岩构造研究的背景,以及本专辑的选题依据。第二部分介绍变质岩构造序列及其研究方法。当前,构造序列正在成为变质岩区构造研究的基本内容之一,并得到了较广泛的应用,由于对构造序列的划分原则仍有异议,为了更全面地反映当前国外对构造序列的认识,我们也选译了两篇对构造序列持异议的文章。(即“有关变形序列问题的一次讨论会”以及“变质带中的构造对比”两篇)。第三部分重点介绍叠加褶皱及其研究方法。根据多次变形理论,变质岩区的构造是由不同样式、不同期次、不同级别的褶皱相互叠加的结果。因此,鉴别和研究叠加褶皱是变质岩构造研究最基本的内容之一。本专辑侧重于以印度变质岩区叠加褶皱研究成果为例,介绍了叠加褶皱的地质特点,叠加褶皱的干扰型式,识别标志以及基本的研究方法。第四部分概要介绍变质岩区的填图原则和方法。尽管当前国外对变质岩区的地质填图原则和方法仍有争论,但从国外发表的有关构造文献来看,变质岩区大、中比例尺地质填图的原则和方法正逐步发生变化,其变化的基本趋势是加强变质岩构造的研究工作,特别是在复杂错动变质岩区,许多人强调不能仅仅采用地层方法填图,要采用构造-地层方法填图。第五部分选译了四篇文章,重点介绍变形和变质作用的关系及其研究方法。近十年来,许多人认识到,区域变质作用实际上是变质作用和构造作用共同作用的结果,只有将这两个过程联系起来研究才能正确理解变质构造形成的全过程。当前,利用变形和变质作用关系重建区域构造演化历史正在成为变质岩构造研究的课题之一。本专辑选登的四篇译文主要从微观构造研究入手研究变形和变质作用的时空关系,并提出了一系列鉴别变形和变质作用关系的标志。

这里刊登的译文资料仅供同志们参考。由于我们水平较低,国外情况了解不全面,在编译中一定有许多错误的地方,欢迎读者批评指正。

本“专辑”由地质部情报所构造组萧庆辉、周玉泉、吴骏、关玉华编译。马万钧、罗永国、吴骏负责校对,在编译过程中曾得到马杏垣、王绍伟、于志鸿、王绍全、杨金华、刘瑞珊等同志的指导和帮助,专辑中的所有图件均由舒令泓、赵秀兰和张景华同志清绘,在此一并表示感谢。

地质部情报研究所基础室构造组

1981年7月

目 录

一、概 述

国外变质岩区构造研究概况	(1)
变质岩层的构造特点	(17)

二、构造序列及其研究方法

变形序列对区分前寒武系地区的意义	(22)
芬兰西南部斯卡尔多地区混合岩的构造演化	(30)
科拉群构造是多次变形作用的产物	(41)
苏格兰和芬兰的前寒武纪对比	(46)
苏格兰高地西南部达尔拉丁岩石的构造	(55)
萨斯喀彻温西北部埃尔多拉多费伊矿山塔津群结晶岩石的多次变形作用	(76)
有关变形序列问题的一次讨论会	(84)
变质带中的构造对比	(86)

三、叠加褶皱及其研究方法

印度奥里萨邦松达加尔地区塔姆拉周围的叠加褶皱	(98)
大型褶皱干扰形成的大型盆地-穹隆型式	(101)
印度马哈拉施特拉邦那格甫尔县北部索萨群中的褶皱干扰型式	(113)
印度拉贾斯坦中部前寒武纪叠加褶皱系统的构造型式和应变历史 ——拉贾斯坦中部“雷阿洛主向斜”的构造型式	(121)
印度拉贾斯坦邦阿杰米尔东南面前寒武纪岩石的多次变形	(145)
挪威阿克斯胡斯地区巴尼乔登一个双重褶皱片麻岩-角闪岩层序的构造解释	(154)

四、变质岩区的填图原则和方法

研究变质岩层的构造是建立地层层序依据的一种方法	(162)
阿尔丹地盾前寒武纪变质杂岩中比例尺和大比例尺地质测量的经验	(174)
造山带变质岩的构造分析	(183)

五、变形和变质作用的关系及其研究方法

密执安北部马克特山脉西部的佩诺肯变形作用及伴生的变质作用	(193)
苏格兰西部莫英统(前寒武纪)岩石的变形与石榴石增长之间的关系	(208)

变形变质岩中变斑晶与基质间的显微构造关系	(217)
间运动期的和同运动期的变斑晶的区别	(228)

六、其 它

用于分析中型褶皱和大褶皱的一些构造形态	(233)
香肠构造对评价构造变形强度的意义	(242)

国外变质岩区构造研究概况

肖 庆 辉

变质岩构造研究是当前前寒武纪地质的重大研究课题之一，也是研究前寒武纪古构造样式和各级构造对矿田、矿结、矿床控制作用的基础工作。近10余年来，国外对变质岩构造研究有很大进展。现仅就搜集到的资料，对变质岩构造研究中的一些基本问题作一概述。不足之处，请指正。

编写过程中，承吴骏、周玉泉和关玉华等同志提供一定数量的译文资料，马万钧，罗永国等同志校对了一些译文，在此表示谢意。

一、变质岩区的构造特点

当前，国际上对变质岩区构造特点的认识，主要有三派意见：一派认为，前寒武纪变质岩区的构造，由简单的平缓大型线状构造或单斜构造构成；第二派认为，变质岩区的主要构造格式，是花岗片麻岩穹隆和长垣，以及分隔它们的深而窄的洼地；第三派则认为，变质岩区的构造，是由非常复杂的、多次变形的一系列不对称的褶皱构造构成（见本专辑《变质岩层的构造特点》一文中的图1、2、3）。

前二派意见在60年代以前居主导地位。但是，近十余年来，第三派意见愈来愈占上风。很多国家和地区对变质岩区进行详细构造研究以后，都纷纷改变了以往认为变质岩构造简单的看法，得出了构造很复杂的结论。许多地区，发现了三期以上的褶皱。例如，按普尔^[21]意见，苏格兰刘伊斯群和莫英群经受过四期褶皱。托比什^[31]和罗伯茨^[27]认为，莫英群和达尔拉丁岩层至少发生过五次以上的变形。在许多地区还发现了不同期、不同格式的褶皱相互叠加构成形态奇特的复杂褶皱^[7,24,31,37]。在一些所谓典型的前寒武纪单斜岩区也发现了大量的紧密挤压褶皱或等斜褶皱^[61]，其中许多等斜褶皱由于受到挤压，褶皱转折端与两翼分开了，而且褶皱的不同部位错开很大的距离。

根据国外目前的研究，变质岩系的特点不仅表现在它已发生变质，岩石成分和结构构造已发生很大变化，而且在地质构造上也表现出与未变质岩层不同的独特构造型式，综合起来，变质岩构造的基本特点是：（1）褶皱的形态和空间位置极其多样；（2）褶皱极不和谐；（3）多级褶皱组合出现；（4）紧密挤压、等斜褶皱极其发育；（5）平卧褶皱以及枢纽陡倾的褶皱经常出现；（6）不同期次、不同型式的褶皱相互叠加；（7）平行褶皱轴面往往发育有新的面状构造（片理和变质条带）；（8）弧形的和韧性的断裂构造比较普遍；（9）规模不等的石香肠、构造透镜体等发育普遍。

根据多次变形理论的认识，目前出露地表的构造形态往往是多次变形中最后一期的形

态。由于最后一期构造变形一般比较微弱，构造形态表现得比较简单，以致容易给人造成变质岩构造简单的错觉。

近十年来，第三派观点，即多次变形理论逐渐为人所接受，因而在国际上出现了重新评价一些穹隆构造、单斜构造和大型平缓褶皱的潮流。以往的许多所谓单斜构造，实际上广泛发育有从几厘米到几公里规模的紧闭褶皱，而且常常是等斜褶皱，并且有许多不同期、不同格式的褶皱叠加。例如，波罗的地盾贝辰加地区的科拉群^[50]，以往认为它是标准的单斜构造，后根据多次变形理论，综合利用岩性-岩相和构造方法进行填图，发现了一个南东走向的向斜构造，是一个至少属于变形第二期的叠加构造，从而否定了原先的单斜构造的结论（见本专辑《研究变质岩层的构造是建立地层层序依据的一种方法》一文中的图10）。

对于穹隆构造，现在也有许多资料证实，以前有许多定为穹隆构造或花岗片麻岩穹隆的构造，实际上是相当复杂的多期褶皱的复合构造。例如，据伯塞尔森的研究^[2]，格陵兰托夫库萨普穹隆是三次褶皱叠加的产物（图1）。第一次褶皱作用形成了轴向北北西的小型平卧等斜褶皱，第二次变形作用形成了规模达10公里以上、轴向北北东的大型平卧等斜褶皱，第三次变形是深部岩浆上拱或岩浆底辟作用使整个褶皱形成穹形。又如，据托比什的研究^[31]，苏格兰高地北部坎尼奇谷地区的一系列类似扁平圆柱体的穹隆和盆地构造是由两期大型褶皱干扰产生的（见本专辑《大型褶皱干扰形成的大型盆地-穹隆型式》一文中的图版1和图3）。从目前研究成果来看，变质岩区外表上表现为穹隆的构造，其形成方式可能有四种：

1. 早期等斜褶皱上面叠加了穹隆构造的结果，如格陵兰托夫库萨普穹隆。

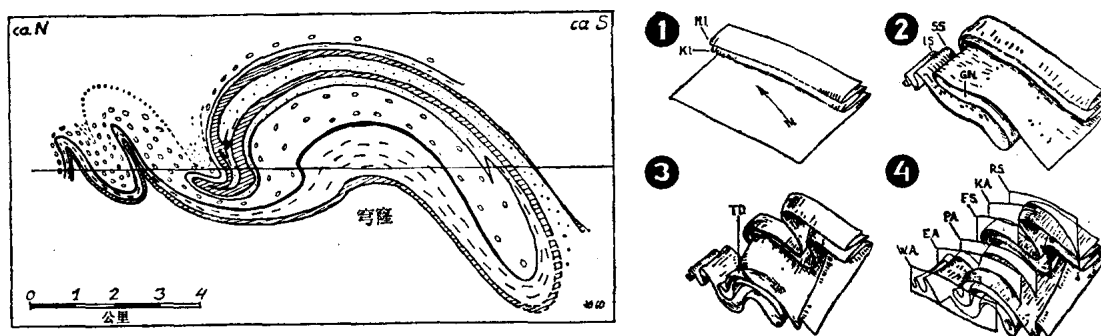


图1 格陵兰托夫库萨普穹隆的剖面图和演化示意图
(据伯塞尔森)^[2]

2. 两组轴面互相垂直、大小几乎相等的褶皱相互叠加的结果。据拉姆齐等人^[24]研究，当规模相等、轴面相互垂直的两期褶皱叠加在一起时，在第二期背形和第一期背形相互叠加的地方就会形成穹隆状构造，而在两期向形叠加的地方则形成盆地构造。在变质岩区，连续展布的穹隆、盆地往往属这种成因。

3. 真正的花岗片麻岩穹隆。

4. 从陡倾伏褶皱转折端里挤出的部分层状花岗片麻岩岩体。例如苏联中乌拉尔拉林斯克和米亚斯克穹形构造等。

二、构造序列

构造序列是指变质岩区的构造形迹按其形成的先后次序排成的体系。根据多次变形理论的认识，在变质构造带的发展中，变形和变质作用都经历了长期演化发展的过程，发育有多次变形幕，使变形和变质作用经历了多次由渐变到突变的发展。也就是说，变质造山带造山运动的变形作用在性质上是一幕一幕的，是由一定数量的、持续时间相对较短、而影响范围广大的构造事件构成的。每次构造变动都形成了具有一定特征的构造形迹，所以在一个完整的造山历史中包含着许多变形幕，而这些变形幕所产生的构造形迹，构成一个完整的演化序列，反映着区域变质岩的演化规律^[11、12、28]（图2）。

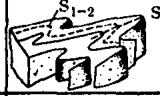
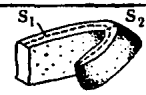
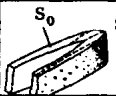
变形幕	典型褶皱的 立体型式	构造要素的特点	变质 作用	力的 主要 方向	构造- 变质 旋迴
$D_{10}(S_{10})$		膝折带，片理带， 绿片岩退化变质带	绿片 岩相	?	3
$D_9(F_9)$		仅仅是小型的，局 部发育的褶皱，轴 面和枢纽近水平	角 闪 岩 相	放射状 挤压	2
$D_{7-8}(F_{7-8})$		开褶皱，枢纽和轴 面近水平		切线 挤压	
$D_6(F_6)$		挤压褶皱，枢纽陡 倾，轴面近直立			
$D_5(F_5)$		等斜和挤压褶皱， 轴面近直立，枢纽 近水平			
$D_4(F_4)$		挤压和等斜褶皱， 枢纽和轴面近直立		放射状 挤压	
D_3		片理化带	麻 粒 岩 相	?	1
$D_2(F_2)$		等斜褶皱枢纽和 轴面陡倾			
$D_1(F_1)$					
?					

图2 苏联科拉群的构造序列和构造变质旋回（据多布尔日涅茨卡娅）^{〔38〕}

根据一些学者的研究^{〔11、12、37〕}，在同一个构造带上构造序列基本是相似的，但不同构

造带是不同的。因而,通过构造序列的研究不但可以了解每一个构造带的变形和变质的演化历史,而且还可以作为对比不同构造区的“化石”。这样,近十年来,国外在变质岩构造方面蓬勃开展了对构造序列的研究,并把它作为变质岩区构造研究的基本内容之一。例如,A.M.霍普古德等人^[11]在芬兰西部混合岩区中划分出7个连续褶皱幕和多次的基性和酸性火成岩活动;J.L.罗伯茨在苏格兰达尔拉丁岩石中划分出8个褶皱幕的构造事件^[27]。

近年来,在建立构造序列方面正在把建立变形构造序列的内容扩大为包括变质作用、岩浆作用、沉积作用、甚至成矿作用在内的综合构造序列。这种综合构造序列不仅可以认识变质岩区的变形历史,而且它是研究和认识变质岩区变形、变质、岩浆活动、沉积作用和成矿作用的演化历史,以及它们之间相互关系的重要途径。

构造序列只具有相对年代顺序的涵义,确定它们之间的相对年代,主要是在若干个相距一定距离的露头上进行详细构造调查,根据它们之间被变形的构造比那些使其变形的构造老;横切构造比被它们所切割的构造晚的原则来确立的。在每个露头区工作时大致包括两个步骤:首先,把认为属同一变形幕的构造归并到同一构造群中。然后,根据上述二个原则确定出不同构造群的相对年代顺序;最后,将若干个露头区观察到的相对年代顺序按新老关系排成系列。例如,如果在Ⅰ露头上发现A构造到处叠加到B构造之上,在Ⅱ露头上则看到B构造叠加在C构造之上,那么,这一地区构造序列从老到新依次为C、B、A。

除了对露头进行直接观察确定构造系列以外,还可以综合应用褶皱构造样式、褶皱构造面和轴的方位、褶皱对称性、构造面向、应变相、不整合、岩层变新方向以及与褶皱伴生的重结晶,岩脉贯入等等特点研究构造序列。

在变质岩区建立构造序列具有很大的实际意义和理论意义。它们主要可以解决以下一些问题:

1.可以了解一定地区内的地质作用演化历史,为进行矿产预测,指出找矿方向提供依据。建立构造序列的实质是把变质岩形成演化过程中的沉积作用、岩浆作用、变形作用、变质作用以及成矿作用等联系起来加以综合考虑,找出它们之间的相对演化阶段和相互联系,从而建立起一定地区内的地质发展的完整历史,这就为我们有可能找出与成矿有关的特定阶段,从而为进行矿产预测,指出找矿方向提供依据。

2.可以作为对比不同地区变质岩系的一种辅助方法。许多学者认为,构造序列可作为对比不同地区变质岩系的一种“化石”。利用这种“化石”进行对比主要是根据不同地区的构造序列的特点是否相同确立的。不同地区的变质岩系如果构造序列特点相同或相似,则说明它们可能是属同一构造带或属同一时代的产物。例如,据霍普古德的研究^[11],出露在苏格兰外赫布里底群岛200多公里长的前寒武纪片麻杂岩带,虽然现在它们以各种孤立的岛屿形式出现,但它们的构造序列非常相似,从而证明这个狭长地带的片麻岩区原先是连结成一个整体的。又如,据鲍斯研究^[3],苏格兰和芬兰整个前寒武系虽然岩性不同,并分属两个大陆,隔海相望,但它们的构造序列非常相似并可以对比,从而认为,英国-斯堪的纳维亚加里东造山带形成以前,波罗的地盾向西延伸并包括了英国西北部以及北大西洋东部的大陆架。这就进一步表明,欧洲西北部的地盾发育有可能受一个大型统一的前寒武纪地壳断块支配。(见本专辑《苏格兰-芬兰前寒武纪对比》,图6)

3.可以加深对一些岩类成因的认识。据一些人研究^[37-38],混合岩的形成不仅受变质作用和火成事件的控制,而且也是反复变形的结果。因而变形序列可作为划分混合岩成

因类型和形成时间的基础。例如,苏联科拉半岛古尔普-亚夫尔湖区太古宙^①科拉群已普遍混合岩化,以前根据一次变形的理论,认为这一地区混合岩属同一年龄和同一成因类型,经过构造序列的研究发现,它们之中至少可以划分出形成时间不同的两类混合岩^[38]:第一期混合岩平行 S_1 ,并且在第二阶段变形时发生了变形,与其它岩层一起构成了 F_2 褶皱,第二期混合岩条带平行 F_3 轴面和 S_3 片理,它们多半是薄的、迅速尖灭的石英-长石成分的岩脉,以及网状脉和多支脉(见本专辑《科拉群构造是多次变形作用的产物》,图2);又如芬兰南部斯卡尔多地区的混合岩,据A.M.霍普古德等人^[12]研究,它们至少可以划分出七个褶皱幕和多幕的基性和酸性火成岩活动,以及变质作用。混合岩之所以形成如此复杂的“混杂”面貌,是由于它们遭到强烈多次变形、变质和火成岩侵入之故。以前认为混合岩主要是变质分异作用和局部熔融作用造成的认识是不够全面的。

4.可以帮助了解变质造山带构造演化发展规律。一个完整的构造变形序列,实际上反映了一定地区变质岩的变形规律。通过这些变形规律的研究就可以确定整个造山带演化规律。从目前国外一系列造山带研究成果来看,变质造山带的一个完整的构造序列,大致是:早期的弯-滑褶皱变形到柔性流动,为变形的柔性递增阶段。褶皱类型平行式转为相似式,与之相伴的有从滑动擦痕转为矿物线理,从石香肠块段的初始断裂到各块段的柔性改造,主运动面则从层理面转为褶皱轴面方向等。随之为柔性递减阶段,产生共轭劈理和膝折带等构造,最后为岩石脆性变形阶段。

5.可以查明变形和变质作用之间的关系(详见本文第六部分)。

虽然构造序列得到了较广泛的应用,但国外也有不少人持反对意见。帕克^[20]认为,根据局部地方建立的构造序列只是在局部地段上是对的,但从几个局部地段上进行区域综合得出区域范围内的构造序列必然带有某种程度的主观性。1971年在津巴布韦召开的“花岗岩、片麻岩及其有关岩石”国际会议上,霍普古德的有关构造序列的论文受到了一些人的评击^[11],其中萨顿的意见最为尖锐,他认为不考虑大构造,甚至在大构造性质还未查明的情况下,仅仅根据小构造样式和方位等要素划分构造序列有一定片面性和局限。因此,他认为这种方法是错误的。

最后需要指出的是,当前比较流行的板块构造成因说,也与构造序列矛盾。构造序列的观点意味着,造山运动的变形作用是一幕一幕进行的。但地幔中的会聚对流引起的挤压作用往往导致了连续递进的变形作用。而岩浆的或塑性基底的底辟式侵入假说虽然能说明变质岩构造形成的持续时间是短暂的,而且只是局部地方才发育有不连续变形作用。但它不能解释整个区域的构造序列的演化特点。总之,当前国外对构造序列的研究仍没有统一的认识,仍需进一步加以探讨。

三、复杂错动变质岩区大比例尺 地质填图的原则和方法

五十年代以来,国外前寒武纪复杂错动变质岩区大比例尺地质填图的原则和方法发生

① 本专辑使用的太古宙和元古宙是根据国际地质科学联合会地层委员会前寒武纪地层分委会第四次正式会议的决定。以下同——编者

了很大变化，其大致情况如下：

1.在五十年代前后，比较普遍的认识是^[42]，前寒武纪的中、深变质杂岩，特别是地壳发育早期的产物，主要由变质岩浆杂岩构成。虽然，当时也有人认为，在变质岩中可能发育有一些沉积杂岩，但当时有关变质作用的理论一般都认为，在发生变质作用时，特别是在超变质作用时，物质的迁移范围几乎是无限的，因而变质岩的原岩一般不能恢复了。加之当时还普遍认为，变质岩区的矿产多半与变质作用有关。因而在这个阶段，对变质岩的研究多偏重于变质岩成分、变质作用和温度-压力条件的实验鉴定等。这样，在地质填图方面主要采用岩石学方法，在地图上表示的仅仅是一定时代和组份的变质岩浆杂岩体，而不是构成变质地层的成层岩石“组”的界线。结果，不仅岩石的地层关系，而且一、二、三级区域构造形态不清楚，这些图实际上不是地质图，而是岩性图。

2.大致在五十年代以后，国外通过变质作用的研究，愈来愈多的人认为，在变质作用时，岩石原始物质成分仅仅发生了部分的、主要是物理的变化，即本质上是等化学变化^[42]。甚至在一些变质较深的岩石中，岩石的许多原始特征，也能保存下来，这就为恢复变质岩原岩开辟了途径^[42]。随着对中、深变质岩原岩恢复的不断开展，发现许多前寒武纪中、深变质岩的原岩是沉积岩或火山-沉积岩，而不是岩浆杂岩。加之，矿产勘查不断发现，变质岩区的许多矿产分布不仅与变质作用有关，而且往往与变质岩层的原始的和大型的区域构造要素紧密相关。这些发现，对如何正确查明变质岩区构造特征提出了迫切的要求。由于要搞清构造，只有根据地层才能确定，所以，很自然，在变质岩区使用地层方法无疑是正确的，也是合乎客观事实的^[28]。当时，英国苏格兰高地学派对苏格兰高地莫英岩系和达尔拉丁岩系的研究^[28、32]，加拿大利思等人^[46]在苏必利尔一带的填图都证明采用地层方法填图是行之有效的。这样，在前寒武纪变质岩地区填图中就逐步出现了地层法或称岩性-地层法^[28、42、44、45]。这种填图的基本原则是把中、深变质杂岩多看作是沉积岩或沉积-火山岩。根据标准地层剖面，在查明沉积韵律性质和追索原始沉积地层的基础上，按岩性把变质岩层划分为一系列地层单位“组”或“段”，然后用路线穿插法或追索法进行面上填图，最后得出区域构造轮廓，这种填图程序有人称为先地层后构造程序^[40、50]。

3.随着岩性-地层方法的广泛使用，在七十年代，对变质杂岩构造特点的认识又进一步深化^[22]。在这期间，对变质岩构造的研究不断发现，变质岩系与沉积岩系不完全相同，具有许多与沉积岩区不同的独特特点。其中最大的特点是，变质岩往往经受了多幕变形的改造^[2、11、27、40]，形成了沉积岩区所没有的不同样式、不同期次、不同级别相互叠加的各种复杂叠加褶皱构造。在这种复杂构造中，原始地层层序也发生了多次变动。背斜、向斜已失去它们的直接含义，而仅仅具有几何学的意义了，而且沉积岩原始层位也已发生构造转换，变成了几乎总是平行褶皱轴面的各类片理。如果变质岩层只是受到一次变形，而且层理没有受到破坏的话，那末，应用地层方法无疑是正确的。然而，经过多次变动以后，一套依次排列的岩性单位顺序就不一定代表地层原有的层序了。而且，露头上看到的岩性分层也不一定代表原始的层理^[28、32、40]。变质岩的这种特殊性往往限制了地层方法在复杂变质岩区方面的广泛使用。另外，填图的实践表明，利用岩性-地层方法填图，往往使前寒武纪构造简单化，不是穹隆、单斜就是简单平缓的开阔褶皱^[37、46]。但只要对这些地区进行详细构造研究以后，往往又会发现，它们实际上是非常复杂的构造。这说明，在复杂错动地区，单纯使用岩性-地层方法是不够的。而且在采用岩性-地层方法填图时分出的

“组”或“段”的成分特征一般是不固定的，剖面沿走向的迅速变化常常表现得如此强烈，以致不但无法用当今的沉积岩和火山岩形成过程去解释这些变化，而且，采用沉积岩区公认的路线穿插法效果也不好，不管怎样加密路线往往也不能可靠地对比相邻路线上的观察结果，甚至地质界线追索法也往往不完全可靠，比较可靠的是面积测量法^[40、50]。

总之，变质岩区的构造由于经受过多次变形比沉积岩区复杂得多，这样，在变质不深，构造不复杂，而又能划分出原始层序的地区，采用地层方法填图无疑是正确的，但在复杂错动变质岩区，实际上不可能仅仅采用这种方法填图。相反，查明变质杂岩之间的空间相互关系往往成为确定变质岩层原始层序的主要方法，而且有时常常是唯一的方法^[40、44、46、50]。因此，最近不断有人^[28、40、41]提出，在复杂错动变质岩区要采用构造-地层方法填图。苏联在《变质岩发育区地质测量方法指南》一书中，也肯定了使用这个方法的现实意义，并指出：“在对老变质杂岩体进行填图时，在许多情况下不得不在研究工作中采取相反的方法程序，不象在研究古生代和中生代变质和构造变动相当轻微的岩层时通常采用的那种从地层到构造的这种方法程序，相反是从构造到地层的程序”。目前西方各国在变质岩区填图时除进行地层学研究以外，还普遍进行系统的详细构造制图^[2、16、18]。

按一般的传统做法，区域地质填图本身就是查明变质岩区构造的基本手段。也就是说，只有根据地层学原则编制的图件才能得出有关构造的完整概念。但是，复杂错动变质岩区的地层层序本身往往是在填图过程中才逐步查明的。因此，国外在采用构造-地层方法填图时先从岩性图开始，工作初期填绘出岩性-构造图，在图上填出各种岩性单位的分布及其界线和产状（一般是岩性层的产状或片理的产状）。然后依靠野外观察到的构造关系编制地层表。在工作区面积较大，全面的详细构造制图工作量太大时，则对重点地段进行详细构造研究，并以它为基准查明研究区的主要构造特征，以及变质变形历史，进而推广到全区^[38、41]。

总之，五十年代以来，前寒武纪复杂错动变质岩区大比例尺地质填图的原则和方法经历了几十年的摸索和总结，正逐步发生变化。其变化的基本趋势是加强变质岩构造的研究工作。

应当指出的是，尽管填图方法发生了很大变化，但变质杂岩的地质填图方法仍然没有定型^[41]，就苏联而言，七十年代以来，有关变质杂岩地质填图方法的问题争论是很激烈的，其中有二个问题是争论的中心，这就是：在编制变质杂岩地质图时，岩性-地层方法应当放在什么位置？在中比例尺和大比例尺地质图中，普遍划分群、组和其它地层单位是否必要和正确？

四、变质岩的构造分析方法

变质岩构造研究的主要任务是查明变质岩的褶皱构造样式和它们之间的空间关系和演化规律，以此鉴定地层和大、小构造在空间的展布格式。二十世纪初，人们就已开始利用叶理和层理之间的几何关系解决一些构造问题。1930年，桑德提出了变形岩石的组构及其几何分析方法和运动学解释的原则，统称构造分析法。其实质是在某一特定区域内，对岩石所有可测量要素（如层理、片理、线理、褶皱轴）的方位及其相互的几何关系进行统计

分析,并将其标绘在一个适宜的投影图上,然后根据标绘图上出现的规律性方位或分布趋势揭示变形岩石构造的几何性质,进而推断变形的运动学和动力学。

桑德的构造分析方法提出以后,一直到六十年代初,基本上限于西欧几国使用,其中应用最多的是英国。在五十年代,英国把这种方法比较广泛地应用于苏格兰高地小型和大型构造分析研究,里德和萨顿等人在苏格兰高地把详细构造填图和统计分析作了较为成功的结合,并取得了不同程度的效果。其中一个最成功的例子是关于苏格兰高地多次褶皱作用的性质和几何特征的研究^[32]。

1963年E. J. 特纳, L. E. 韦斯发表了《变质构造岩的分析》一书^[32],对构造分析的有关概念和方法以及组构分析的程序进行了充实和修改,还系统地检阅了构造分析方法的成败得失,是构造分析方法问世以来的一次阶段性总结,在变质岩区构造研究中影响较大,当前,基本上成了国外变质岩构造研究中最重要参考书之一。自此以后,特别是近几年,构造分析方法在国外已得到了相当广泛的应用,国外发表的许多有关变质岩构造方面的文章都列举了大量的构造分析数据作为佐证。因此构造分析方法,正在成为变质岩构造的常规野外调查和室内显微构造研究的重要补充手段。

构造分析的主要原则是,每个世代的褶皱构造虽然有不同的规模,但它们都具有相同的轴面劈理或叶理。这样,在进行区域构造研究或进行系统填图时,就可以按下述两个原理进行构造关系的分析:第一、如果同时代的各级褶皱(或不同规模的褶皱)都是圆柱状的话,那末,小褶皱轴以及层理与劈理的交线就代表了任何大褶皱的倾伏方向。反之,在一特定地区,凡是这些构造相互平行的地方,其褶皱必然是圆柱状的。第二、相同世代的褶皱具有相同的轴面劈理和叶理,这样就可以根据大褶皱两翼上的小褶皱的指向和层理与劈理的关系,确定大褶皱的构造性质。只要在野外对这些构造关系的性质进行观察,就能将这些大褶皱按背形或向形圈定出来。

变形岩石完整的构造分析应该包括几何的、运动学的和动力学的分析三个方面。前者是对变形岩石几何和物理特征的直接观察和测量,是试图鉴定应变和应力历史的第一步,运动学分析是在此基础上追索构成现有构造状态和位置以及相继的内部和外部运动;动力分析则是鉴定造成上述运动以及最终所造成的构造及其位置的相继的力的状态。

最近几年,构造分析方法有些发展,一方面它正在发展一些所谓定量填图的新方法和技术^[5],另方面它与其它方法配套使用揭示更复杂的构造问题。例如苏联Л. Ф. 多布尔日涅茨卡娅^[38],利用构造分析方法和变质相系分析法相结合,揭示了科拉群深变质杂岩构造-物质改造过程,以及变形作用和变质作用的时空关系和变形历史中的重要构造特性。目前,涉及到变形岩体完整的构造分析的文章愈来愈多^[17],也开始出现了应用电子计算机作构造解析的数据统计和分析的文章。此外,最近10年,构造分析方法采用了广泛发展的构造物理学、连续介质力学、岩石矿物变形实验领域的成就和物理冶金学方面的理论和方法,并运用电子扫描技术,对变质岩中固态流和结晶塑性的研究起了很大的推动作用^[13]。

尽管构造分析方法有了较大的发展,在构造研究中取得了一定成效,但它不能代替变质岩的地质学研究 and 广泛的构造研究;构造分析方法中也还有许多问题未解决,特别是在组构解释方面目前还是有争论的^[32]。有人认为^[50],这一方法实质上还处在深入研究的阶段。另外,构造分析只能确定构造事件的相对年代顺序,其本身并不能解决这些构造事件

的持续时间,以及两次构造事件之间的间断时距的长短范围,因而使构造分析方法带来一定局限性。

五、变质岩区的断裂构造

近年来的研究发现,变质岩区断裂构造不但是变质岩区重要的构造特征,而且非常发育^[10、16、40、43],对它的研究在国外已引起广泛的重视。

变质岩区的断裂,按其变质和变形作用的关系可分两类。一类是在变质岩形成以后发生的断裂,它与未变质岩区的断裂没有什么原则上的不同,根据一般断层的识别标志就可以识别它。另一类是指与变质岩层变形和变质作用同时发生的断裂,或叫同构造断裂。它是变质岩区特有的构造,主要特点有^[4、16、40]:

(1) 除线状和弧状断裂以外,常常发育有经受过多次褶皱的形态奇特的断裂;(2) 断裂面往往与褶皱轴面平行或以很小的角度相交,因此,在地质图上,断裂在很大距离内平行于未断开的地质界线;(3) 断裂位移通常只有在与褶皱转折端相交的地方才易于识别;(4) 构造角砾岩或岩石的其它破碎一般不发育。因为与这些断裂有关的压碎作用被后来的,或与其同时进行的再结晶作用“愈合”了;(5) 断裂的位移,在许多情况下是与沿断层两盘的片理面没有任何差别,并且是与其平行的面状构造体系发生的。

鉴于同构造期断裂的独特特点,这类断裂一般比较难识别,除地质界线错动是唯一的直接可靠标志以外,一般先从间接标志判断入手,然后再对这些断裂进行详细岩石学、地层学、岩组分析加以验证。据艾兹等人意见^[16、40、43],识别这类断裂的间接标志有:(1) 断层两侧小构造形态方位和样式、变质和变形特点的改变;(2) 狭窄的片理带,带内的片理平行于带的方向分布,但与带两侧的片理方向不一致;(3) 狭窄的高于正常程度的交代矿化带、混合岩带;(4) 不同岩脉的赋存带;(5) 狭窄的重结晶的角砾岩化(有时为角砾混合岩)、糜棱岩化以及压碎带;(6) 强烈的钾长石化等蚀变带;(7) 发育有香肠构造、岩层压薄、拉断或岩层重复出现的地带;(8) 强烈的应变中心地带;(9) 岩层可见厚度的急剧增加或减小的地带;(10) 侵入体露头的线状延伸地带等等。

除上述情况外,当前国外在变质岩区断裂构造研究方面,加强了从区域角度研究断裂的时空关系以及它们的区域构造型式。重视断层构造岩的研究,并不断有人提出断层带构造岩的分类方案。

六十年代以来,国外在一些变质岩区陆续发现了许多规模不等的韧性断层^[7、25、35]。在变质岩区,特别是在前寒武纪地盾区鉴别韧性断层具有很大的实际意义和理论意义。对它的识别,不但可以加深对变质岩区地层层序的认识,而且可以大大地改善我们对前寒武纪地质发展史及其构造型式的认识,同时它又是变质岩区重要的控矿和导矿构造。在前寒武纪地盾区,无论是垂直的还是倾斜的大型韧性断层带都具有大断层或冲断层带的深部构造表现型式,所以对它的研究,还可以了解变形的产物和作用过程随深度的变化,以及在整个断裂系垂直空间范围内的产物和它们之间的几何关系。许多韧性断层是基底形成以后,盖层的造山运动或错动在基底上的反映,因而它又是研究盖层和基底构造之间关系的一个重要线索。

目前对韧性断层的概念和识别标志仍然有许多争论。韧性断层在地质文献中, 又称韧性变形带或剪切带。它是指由剪切变形或岩石塑性流动造成的强烈变形的线状地带, 是出露在地表的、被侵蚀的古老断裂的深部构造形迹。与脆性断层不同的是, 韧性断层带内的应变是连续的, 并具有递进变形的一系列特点, 没有断层面, 但它又象断层那样发生过相对位移。主要特点是: 带内主要由一大片或巨厚的高度应变过的岩石构成, 断层带两侧为未变形或变形轻微的岩石; 规模大小不一, 小者长几厘米, 大者宽几十公里, 甚至延伸上千公里; 断层带内的岩石遭到剪切变形的强烈改造, 它们的岩石类型, 变形和变质程度, 以及构造格式均与断层外的岩石迥然不同; 发育有片理, 片理面与断层边界的夹角由边界向中心递减, 在断层中心夹角最小; 岩石和矿物的破碎程度和变形程度, 由边界向中心递增, 断层中心破碎和变形最强烈; 断层边界没有糜棱岩和碎裂岩, 也没有破裂面, 往往存在着牵引和拉伸变形的现象; 当韧性断层横切过任何早期构造形迹, 如岩墙、岩脉和早期片理等构造时, 尽管这些早期构造被韧性断层强烈改造, 但它们在断层两盘仍是相连的, 构成了所谓追踪构造; 大型韧性断层带往往是多期活动的长寿断裂。

六、变形和变质作用的关系

近十年来, 特别是费林等人证实了变质作用在变质岩层变形中的作用以后^[63]。许多人认识到, 区域变质作用实际上是变质作用和构造作用共同作用的结果。只有将这两个过程联系起来研究才能正确理解变质构造形成的全过程。因此, 最近国际上正在积极开展变形和变质作用关系的研究。1978年在澳大利亚召开过变形和变质作用的显微构造国际讨论会, 并出版了专著。不过目前的研究多从微观入手并往往辅以模拟实验。另外, 利用变形和变质作用关系重建区域构造演化历史也是当前研究的中心。目前取得主要的进展有:

1. 确立一定地区范围内的变形作用和变质作用的时空关系, 建立区域变质构造历史^[18-38]。

半个世纪以前, 人们在研究变质造山带内部的构造运动和变质作用关系时, 提出过变形和变质作用对比的三种情况: 变形前的结晶(即结晶后的变形), 变形同时的结晶(即同结晶的变形), 变形后的重结晶(即结晶前的变形)。近年来, 不断有人将变形构造序列与变质序列结合起来研究, 并以小型构造序列作为确定变质序列的记时标。其方法主要是通过一些典型区段的详细构造填图和室内岩石薄片的研究确定的。详细构造填图主要是通过研究小构造的构造要素, 褶皱的几何形态和样式的区域分布情况及其特点确定出变形序列和性质。而薄片研究主要是研究变质矿物成分、矿物组合、变斑晶和基质的内部结构特点以及与变形组构的关系, 以此建立起变质矿物生长和变形之间的相对时间关系。例如某区层理 S_0 褶皱, 发育了轴面片理 S_1 , S_1 进一步变形又发生 S_2 , 变形事件可以按照这个序列一步步加以研究, 然后查明伴随或紧跟上述变形而结晶的不同序列的矿物或矿物组合, 就可以确定出变形序列和变质序列之间的关系(图2)。

根据当前的研究, 变形和变质作用不但具有一定成生联系, 而且其时空关系十分复杂。在一个造山运动中, 变形和变质作用虽然都有其自身的发展序列, 但它们是紧密交织在一起发育的。当变形和变质作用同时进行, 变形作用的高峰和变质作用的高峰并不一

致。例如，据克拉斯纳研究^[18]，密执安北部马克特山脉一带的区域变质作用在 F_1 变形以前就开始了，在 F_3 变形期间达到高峰，最后终结于退化变质作用。

变形和变质作用的时间关系在空间分布上也很复杂。目前多数人认为它们一般表现为穿时关系。例如，据麦奎因的研究^[15]，在苏格兰，一条从加里东造山带边缘到其内部长25公里范围内的岩石变形与石榴石增长之间关系的研究表明，石榴石增长的相对年代与第二次变形作用的相对年代关系是有变化的：造山带边缘表现为同构造期生长，但在造山带内部则表现为构造期前的生长，而且愈往造山带内部，石榴石生长与第二次变形作用的相对时间愈来愈早。因此，变质作用的前沿和变形作用的前沿在时间上和空间上都不一致。

2. 利用变质作用发生时的P—T条件（矿物组合）鉴别构造事件。

在变质作用条件下，实际上每一个变形阶段相应地都会形成与变形方式相适应的构造和矿物组合。因此，在岩石变质构造重建过程中，一定变质相的变质矿物组合不仅反映了变质作用的物理化学条件，而且也可以作为鉴别构造事件的指示剂或标志^[38]。大家知道，与构造作用同时形成的一些矿物，其拉伸和压扁面平行褶皱轴面，也就是垂直最大挤压方向，而构造前或构造后的矿物生长就没有这种关系。因此，在变形和变质作用同时出现时，线状构造方向和面状构造方向就直接控制着矿物的生长方向，并影响到矿物的内部结构（如光性方位排列等）。利用这个关系就可以鉴别褶皱的形成阶段是属哪一期的。

据多布尔日涅茨卡娅等人研究^[38]，不同构造-变质旋回的矿物除具有不同矿物组合以外，一些标志性矿物的成分也往往不一样。这样，除了利用矿物组合鉴定变形序列及其性质以外，还可以利用一些标志性矿物的成分变化特点鉴定变形事件，例如太古宙科拉群每一个变形旋回均发育有黑云母和石榴石，但它们的成分和光性特点各不相同。就黑云母而言，第一构造-变质旋回的黑云母暗红色，红褐色，钛含量偏高，达4.3~4.8%（重量百分比），而第二构造-变质旋回的黑云母则呈褐绿色或浅褐色、浅绿色，钛含量偏低，只1.88~2.25%（重量百分比）。又如石榴石，第一构造-变质旋回的石榴石含 MgO 达4~9%（重量百分比），而第二构造-变质旋回 MgO 含量明显偏低，只达到2~4%（重量百分比）。

需要指出的是，变质作用的研究目前正在进入从宏观上解决构造问题的新阶段，对它的研究大致还可以解决以下一些构造问题：（1）测定大陆地壳的厚度和地热梯度；（2）计算上升速度和剥蚀速度；（3）判断板块边界的缝合带；（4）查明已剥蚀掉的冲冲地区；（5）判断断层等。

3. 兹瓦特关于确定变形和矿物生长的原则得到了进一步修正和补充。

1963年兹瓦特提出了变斑晶的生长和面理发育之间的相对时间关系的9种鉴别特征，其方法是研究外部组构(Se)的几何形态，并拿这种组构同变斑晶中含有的内部组构(Si)相比较。

随着变形和变质作用关系蓬勃开展，最近不断有人对兹瓦特的鉴别标志提出质疑^[10, 38, 39]，特别是同构造期鉴别准则争论更多。例如，M.J.De.威特认为^[38]，过去对变斑晶中的包体组构以及对导致形成S形包体型的同构造期生长机制的假设是不能成立的，因而是不能接受的（见本专辑第五部分文章）。