

变质作用分类的历史回顾和新的试行分类建议^{*}

沈其韩 耿元生

SHEN QiHan and GENG YuanSheng

中国地质科学院地质研究所,北京 100037

Institute of Geology, Chinese Academy of Geology Sciences, Beijing 100037, China

2009-03-01 收稿, 2009-05-01 改回.

Shen QH and Geng YS. 2009. Review on the classification of metamorphism types and suggestion of a new tentative classification. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):1737–1748

Abstract Based on a history review of the advancement in classification of the metamorphism types, this paper has proposed a tentative and systematic classification of types of metamorphism. Metamorphism can be divided into two great types: Local and regional metamorphism, each of which involves 4 or 5 types. Local metamorphism is divided into the following five types: (1) contact metamorphism which includes three subtypes, i. e. thermal metamorphism, contact metasomatic metamorphism and pyro-metamorphism; (2) low-medium-high temperature dynamic metamorphism involving two subtypes such as low-medium-high temperature ductile shear zone metamorphism and temperature- and pressure-increasing thrust metamorphism; (3) impact (or shock) metamorphism; (4) hydrothermal metamorphism; (5) burn metamorphism. Regional metamorphism is divided into the following four types; (6) Early Precambrian craton metamorphism or low-medium pressure to medium-high temperature regional metamorphism which include five subtypes: low-medium pressure amphibolite facies metamorphism, low-medium pressure granulite facies metamorphism, low-medium pressure amphibolite facies-granulite facies metamorphism, low-medium pressure greenschist to amphibolite facies progressive metamorphism and regional ultrahigh temperature granulite facies metamorphism; (7) orogenic metamorphism including three subtypes: i. e. low-temperature-low-pressure regional dynamic metamorphism, collision metamorphism and deep subduction zone high-ultrahigh pressure metamorphism; (8) burial metamorphism; and (9) ocean-floor metamorphism.

Key words Contact metamorphism; Dynamic metamorphism; Impact (or shock) metamorphism; Orogenic metamorphism; Early Precambrian craton metamorphism; Burial metamorphism; Ocean-floor metamorphism

摘 要 根据变质作用分类研究的历史回顾和最新进展,本文介绍了一个试行的、较系统的变质作用分类方案,可分为局部性的变质作用和区域性的变质作用两个大类9个类型。局部性的变质作用包括以下5个类型:(1)接触变质作用,包括热变质作用、接触交代变质作用和高热变质作用3个亚类;(2)低-中-高温动力变质作用,包括低-中-高温韧性剪切带变质作用和温压递进逆冲断层变质作用2个亚类;(3)冲击变质作用;(4)水热变质作用;(5)燃烧变质作用。区域性的变质作用可分为以下4个类型:(6)早前寒武纪克拉通基底变质作用-低中压-中高温区域变质作用,可分为5个亚类,分别是低-中压角闪岩相变质作用、低-中压麻粒岩相变质作用、低-中压角闪岩相-麻粒岩相变质作用、低-中压绿片岩相-角闪岩相递增收的变质作用和区域超高温麻粒岩相变质作用;(7)造山带变质作用,可分为3个亚类,分别是低温-低压区域动力变质作用、碰撞造山变质作用和深俯冲高压-超高压区域变质作用;(8)埋深变质作用;(9)洋底变质作用。

关键词 接触变质作用;动力变质作用;冲击变质作用;造山带变质作用;早前寒武纪克拉通变质作用;埋深变质作用;洋底变质作用

中图法分类号 P588.3

^{*} 本文受中国地质调查局工作项目“1:500万变质地质图的编制与研究”资助。

第一作者简介: 沈其韩,男,1922年生,研究员,中国科学院资深院士,主要从事早前寒武纪及变质地质研究

1 变质作用分类演变的历史回顾

1.1 二十世纪五十年代以前

1795 年赫顿(Hutton)在其《地球的原理及其证明》一书中对变质作用的概念作了系统的描述。根据他的见解,有些沉积岩被带到地球深部,由于高温和高压造成了它们的变质作用。例如,他认为苏格兰高地的片岩和片麻岩是变质的,不过他未曾引进这样一个专门的术语。“变质作用”这个术语是由 Boué 在 1820 年引入的(据都城秋穗,1972),而“变质岩”这个术语,莱伊尔(Lyell,1830)《地质学原理》出版,逐渐得到推广和流行。

十九世纪中叶,接触变质作用和区域变质作用的含义已经应用于地质文献。

霍尔(James Hall)、达纳(Dana)和豪格(Haug)在 1859 ~ 1914 年间系统地阐述了造山运动理论(据 Miyashiro,1972),造山带中区域变质岩石的广泛分布引起了许多学者的注意,认为地槽堆积中深部的高温高压和变形运动是变质作用的原因。但许多学者对温度和压力侧重点认识不一,形成了不同的学派。强调压力和变形运动的学派,使用了动力变质作用或错动变质作用的名称。1886 年罗森布什(Rosenbusch)提出了动力变质作用(dynamic metamorphism 或 dynamometamorphism)的概念(据 Miyashiro,1972),他的学生对这一术语广为宣传,对后来的地质学家产生了很大影响。以后一些学者开始用动力变质作用和错动变质的名称来代表碎裂变质作用。之后又增加了动热变质作用(dynamothermal metamorphism)。

格鲁宾曼(Grubenmann)在其巨著《结晶片岩》(1904 ~ 1906)一书中,把所有区域变质岩按照它们的化学成分分成 12 个组,每个组的岩石按照深度带的概念划分成三类,依照它们的变质作用深度大致增加的次序,依次命名为浅成带(epi-zone),低温、低压和强变形;中成带(meso-zone),温度和压力中等;和深成带(kato-zone),高温和强变形作用。1920 ~ 1930 年间,这一深度带概念受到哈克和爱斯科拉等的批判,以后逐渐被淘汰。

1924 年以后,变质作用类型的研究已有初步基础,分类方案不断出现,但大都比较简略,类型不够全。

1924 年格鲁宾曼和尼格里(Grubenmann and Niggli, 1924)最早提出变质作用分类,他们的分类方案是:

(A)阿尔卑斯带(盖层 Deckgebirge)变质作用,可分为自变质作用和他变质作用,后者又可以进一步分为 4 类,为重压变质作用(地热变质作用)、错位变质作用(大致与动力变质作用相当)、接触变质作用(包括正常的接触变质作用、气化变质作用以及贯入变质作用三种不同亚型)和阿尔卑斯带内的联合变质作用(以上各类变质作用的两种或所有三种结合在一起的变质作用,同时期按次序进行)。

(B)基底杂岩(基底层 Grundgebirge)的变质作用,区域

性的岩浆侵入是基底层变质区的特征。

1926 年台瑞尔(Tyrell,1926)的变质作用分类:(1)热力为主的变质作用(热变质作用),可分为高温变质作用(发生在岩浆紧密接触处,在非常高的温度下的一些剧烈的局部变化)、接触变质作用、气化变质作用和贯入变质作用(与接触变质作用相伴的贯入现象,规模不大,并与深熔作用之间有完整的转变)4 类;(2)定向压力为主的变质作用(压碎变质作用,相当于狭义的动力变质作用);(3)定向压力与热力相结合的变质作用,可分为动力-热变质作用和重压变质作用两个亚类;(4)均匀压力与热力相结合的变质作用(深成变质作用,在高温和高压下深处的剧烈变质作用,剪应力低或无)。

1932 年哈克(Harker,1932)在《变质作用》一书中曾提到热力变质作用,扭动力变质作用和区域变质作用等分类。

1939 年 P. 爱斯科拉(Eskola,1939)根据化学再造作用和变形作用进行的变质作用分类:(1)机械变质作用(纯动力变质作用,变形作用是唯一的,或者是最主要的变质过程);(2)重结晶变质作用(纯静力变质作用);(3)热变质作用或依上升温度引起的变质作用,可进一步分为高温变质作用、接触变质作用(伴有或未伴有交代作用)和部分深成变质作用 3 个亚类;(4)依随下降温度而发生的变质作用(伴有或未伴有交代作用);(5)重结晶作用和机械变质作用相结合的变质作用,该类型又可分为:区域变质作用(同时期发生的变形作用和矿物改造作用的结果,见于古老地槽深带内)、局部的错位变质作用和退变质作用(随下降温度所进行的适当调整)。

1948 年纳(Turner,1948)的分类:

(A)根据控制变质作用的物化条件和温度进行的变质作用分类:(1)纯机械(纯动力)变质作用:变形作用没有伴随化学再造作用;(2)纯热变质作用:伴有化学再造作用,受温度所控制,并受到封闭压力的少许影响,没有同时期的变形作用;(3)交代作用。

(B)按影响岩类野外组合的岩相学特征的变质作用分类:(1)动力(或压碎)变质作用;(2)热变质作用(伴有或不伴有交代作用),包括高温变质作用和接触变质作用两个亚类;(3)自变质作用(伴有或不伴有交代作用);(4)区域变质作用(包括其他学者所论述的大部分动力热变质作用、错位变质作用、重压变质作用以及地热变质作用,而所有这些的强度变化都很广);(5)局部错位变质作用;(6)深成变质作用:在高温、高压条件下的深埋区域变质作用,往往也伴有强力变形作用,伴随有交代作用、渗透作用及贯入现象(分异熔融作用即深熔作用)的岩基侵入是此种变质作用特有的;(7)退变质作用。

1.2 二十世纪六十年代至八十年代

这一时期变质岩和变质作用的研究都有很大的发展,如变质相系和双变质带的研究(Miyashiro,1961),变质反应热

力学问题的研究,变质作用多样性的认识(Zwart,1967),变质作用压力类型的提出(Winker,1965,1967,1976,1979)。变质作用新类型也不断被提出,如柯姆斯(Coombs,1961)提出了埋深变质作用,迪兹(Dietz,1961)提出了冲击变质作用这一新类型,都城秋穗(Miyashiro,1972)提出了洋底变质作用的新类型。Read(1957)虽然较早地把与地槽迴返过程中早期褶皱作用相伴随的变质作用称为造山变质作用,但地质界很长一段时间内很少响应。都城秋穗(Miyashiro,1972)正式提出造山变质作用与区域变质作用属同义语逐渐被推广使用并把一些变质作用类型与板块构造相联系,他认为所有板块结合处都可产生变质作用,聚敛板块产生区域变质,分散板块产生洋底变质。板块间转换断层与糜棱岩带有关,变质作用的类型取决于板块的厚度、移动的速度及聚敛结合处的剪切作用等方面的因素。恩斯特(Ernst,1975)还主编了一本变质作用与板块体制(metamorphism and plate regimes)的文集,其中重点论述了变质作用与板块的联系。

下面介绍这一时期变质作用分类的演变:

都城秋穗(Miyashiro,1961)认识到在环太平洋区域,尤其在日本,产生蓝闪石的变质作用的规模是区域性的,发现这个类型以及产生红柱石的区域变质作用类型在环太平洋区域分布非常广。这些发现显然扩大了区域变质作用的概念,从而产生了依据岩压划分的区域变质作用的三大类型,其中每个大类都有若干温度范围的变质相系(表1)。

程裕淇等(1963)在“变质岩的一些基本问题和工作方

法”一书中,曾论述了(1)热力变质(接触变质);(2)动力变质和(3)区域变质(形成于造山带)。

叶利谢夫(Блцсеев,1965)在《变质作用》一书(中文版)中将变质作用分为以下9类:(1)接触变质作用,可分为接触热变质作用和接触交代变质作用;(2)高热变质作用;(3)压碎变质作用(强烈变形、破碎、片理化);(4)热动力变质(定向压力和温度升高);(5)荷重变质作用(Daly称为静变质);(6)区域变质作用(很大空间的定向压力、静向压力和温度);(7)自变质作用;(8)多相变质作用;(9)退化变质作用。

都城秋穗(Miyashiro,1972)在《变质作用与变质带》(中文版1979年出版)一书中对变质作用分为7类:(1)区域变质作用或造山变质作用;(2)洋底变质作用;(3)埋藏变质作用;(4)接触变质作用;(5)高热变质作用;(6)水热变质作用;(7)碎裂变质作用。这一变质作用分类方案已基本建立了相对比较完整的分类框架。

同年,海德曼(Hyndman,1972)在《火成岩和变质岩岩石学》(Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks)一书中重点介绍了区域变质作用(或热动力变质作用)、接触变质作用和碎裂(动力)变质作用等三个主要类型。

温克勒(Winkler,1965,1967,1976,1979)根据变质岩的区域分布范围分为局部性的和区域性的两大类。局部性的变质作用分为碎裂变质作用、接触变质作用和水热变质作用;区域性的变质作用分为区域动热变质作用(严格意义上的区域变质作用)、埋深变质作用。区域变质作用按温度高低进一步划分为4个变质级:①极低温变质作用,②低温变质作用,③中温变质作用,④高温变质作用;按照温度和压力的组合情况可划分为①极低级变质作用,②低级变质作用,③中级变质作用,④高级变质作用;又进一步划分为①中级和高压变质作用,如变泥质岩中的石榴石-蓝晶石-角闪岩相,②极低级和高压变质作用,如硬柱石-硬玉-蓝闪片岩相,③极低级和低压变质作用,岩石中含浊沸石。

马松(Mason,1978)在他的《变质岩岩石学》教科书中介绍了接触变质作用、动力变质作用、冲击变质作用、区域变质作用和洋底变质作用等五个主要类型。

特纳(Turner,1981)在第二版《变质岩石学》一书中,根据矿物的结构和野外证据来划分变质作用类型,重要类型有区域变质作用;次重要类型有埋藏变质作用、Archi metamorphism(埋深变质作用的一个亚类,目前尚无正式译名)、洋底变质作用、水热变质作用、高热变质作用和错断(Dislocation)变质作用。

董申保(1983)对变质作用的分类:(1)区域变质作用(与造山运动有关),可分为板岩、千枚岩变质作用和绿片岩相变质作用两个亚类;(2)埋深变质作用(与造陆作用有关)可分为浊沸石相和葡萄石-绿纤石相变质作用及高压低温区域变质作用两个亚类;(3)中压区域变质作用(热流加变形);(4)低压区域变质作用(热流为主);(5)高温区域变质作用(高温类型);(6)接触变质作用(浅部岩浆接触),可进

表1 都城秋穗(1961)区域变质作用相系的三大分类
Table 1 Types of regional metamorphism (after Miyashiro, 1961)

压力类型	特征矿物	常见矿物	常见的变质相系	共生的岩浆作用
低压	红柱石	黑云母,堇青石,十字石,夕线石	绿片岩→角闪岩→麻粒岩	虽然有从基性到酸性的地槽火山岩,但通常稀少。花岗岩非常丰富。有些情况下伴有安山岩和流纹岩
中压	蓝晶石的存在和蓝闪石的缺失	黑云母,石榴石,十字石,夕线石	绿片岩→绿帘角闪岩→麻粒岩	蛇绿岩和花岗岩两者都有
高压	蓝闪石、硬玉、硬柱石	铁铝榴石,冻蓝闪石,黑硬绿泥石	蓝闪石片岩→绿帘角闪岩,蓝闪石片岩→绿片岩,葡萄石-绿纤石→蓝闪石片岩	从超基性到基性的蛇绿岩丰富,花岗岩通常不存在

一步分为高热变质作用、与安山岩岩浆作用有关的接触变质作用和与岩基花岗岩有关的接触变质作用三种情况;(7) 碎裂变质作用;(8) 洋底变质作用;(9) 冲击变质作用。

1986 年董申保和卢良兆在 1:400 万中国变质地质图中对变质作用分类时,首先区分了主要类型和附加类型。主要类型的变质作用有(1)埋深变质,可分为浊沸石和葡萄石-绿纤石相变质作用(浅-中深型)(例如准噶尔-北天山华力西变质带)和蓝闪石-硬柱石相变质作用(高压相系列型)(例如雅鲁藏布江-喜马拉雅蓝闪片岩带);(2)区域低温动力变质作用,可分为低绿片岩相变质作用(千枚岩相型)(例如扬子中晚元古代变质带)和绿片岩相变质作用(蓝闪石-绿片岩相型)(例如秦岭加里东变质带,印支期西康群变质带);(3)区域动力热流变质作用,例如武夷-云南加里东变质带和川西华力西变质带;(4)区域中高温变质作用,可分为麻粒岩相变质作用(如太古宙麻粒岩分布区)和角闪岩相变质作用(例如太行、五台、登封、鲁西太古代变质区)。

变质作用的附加类型有盖层变质作用和断陷变质作用两个类型。

1988 年贺同兴等在《变质岩石学》一书中提出对变质作用类型的划分为:(1)区域变质作用(包括埋深变质作用);(2)接触变质作用;(3)动力变质作用;(4)气-液变质作用;(5)冲击变质作用;(6)洋底变质作用;(7)叠加变质作用(多期变质);(8)退化变质作用。

卢良兆(1988)在“中国的区域变质作用类型及其与地壳演化的关系”的论文摘要中,将我国各时代的区域变质作用划分为以下四个主要类型:(1)早前寒武纪克拉通的变质作用,包括面型角闪岩相-麻粒岩相变质和面型绿片岩-角闪岩相递进变质两个类型;(2)陆壳活动带的变质作用,包括区域低绿片岩相变质作用(区域低温动力变质)、蓝闪-绿片岩相变质作用和中心式绿片岩相-角闪岩相递进变质三个类型;(3)中生代洋壳俯冲带的变质作用;(4)埋深变质作用,包括出现于地槽区的沉降阶段和地台深拗陷区盖层底部两个类型。

王仁民等(1989)在《变质岩石学》教科书中介绍的变质作用类型:(1)接触热变质作用;(2)动力变质作用;(3)气成水热变质作用;(4)区域变质作用,可分为大陆地盾区的区域变质、热穹隆核部的区域变质、造山带的区域变质和汇聚板块边缘的变质作用 4 种情况;(5);混合岩化作用-超变质作用(6)埋藏变质作用;(7)洋底变质作用;(8)冲击变质作用。这一分类已开始考虑变质作用与大地构造的联系。

雅德利(Yardley, 1989)在《变质岩石学介绍》(An introduction to metamorphic petrology)一书中,除考虑等化学变质作用、递进变质作用和退化变质作用外,根据变质作用的地质背景作了成因分类:(1)洋底变质作用;(2)区域变质作用;(3)埋深变质作用;(4)接触或热变质作用;(5)动力或碎裂变质作用;(6)水热变质作用;(7)冲击变质作用。

1.3 二十世纪九十年代以来的变质作用的分类

1993 年沈其韩在编写《大百科全书》第一版中对变质作用的分类,该分类仍以物化条件为主,按变质作用的局部性和区域性分为两大类(沈其韩,1993)。

(A)局部性的变质作用,有(1)接触变质作用,可分为热接触变质作用和接触交代变质作用两个亚类;(2)高热变质作用;(3)动力变质作用,可分为碎裂变质作用即狭义的动力变质作用、韧性剪切带变质作用和逆掩断层变质作用;(4)冲击变质作用;(5)气液变质作用;(6)燃烧变质作用。

(B)区域性的变质作用,可以分为以下 4 类:(1)区域中高温变质作用;(2)区域动力热流变质作用;(3)埋藏变质作用;(4)洋底变质作用。

这一分类虽然较详细,但尚未与大地构造接轨,考虑变质作用的物化条件和一般地质背景更多一些。

布赫和弗莱(Bucher and Frey, 1994)编制的《Winkler 变质岩成因》教科书的修订版(第 6 版)中将变质作用分类分为区域性的和局部性的两个部分。

区域性的变质作用有:(1)造山带变质作用;(2)洋底变质作用;(3)埋深变质作用。

局部性的变质作用有:(1)接触变质作用;(2)碎裂变质作用;(3)冲击变质作用;(4)水热变质作用。

巴克尔(Barker, 1998)在“Introduction to metamorphic texture and microstructure”一书中有关变质作用的分类中突出了俯冲带的变质作用,而将碎裂变质作用改称剪切带变质作用。对其它变质作用类型的划分与 Bucher and Frey (1994)的划分相同。作者还编制了一幅变质作用环境分类的示意图(详见图 1a, b)。

布赫和弗莱(Bucher and Frey, 2002)在 Petrogenesis of Metamorphic Rocks(第七版)一书中,以地质格架为基础,对 1994 年第六版和 1998 年 Barker 的分类作了一些修订,不同之处是将造山带变质作用进一步划分为俯冲带变质作用(subduction metamorphism)和碰撞变质作用(collision metamorphism),将 Barker 分类中的剪切带变质作用又改称碎裂变质作用(cataclastic metamorphism),其它变质作用类型均相同。他们还对几个重要变质作用类型的典型特征进行了比较(详见表 2)。

贝斯特(Best, 2003)根据变质作用形成条件,编制了一个四面体图解,将不同变质作用类型分别标于其上,该四面体如图 2 所示。

按地质背景(变质区)对变质作用的划分:(1)洋脊变质作用;(2)热变质作用;(3)区域变质作用(造山带变质作用);(4)交代变质作用;(5)接触变质作用;(6)水热变质作用;(7)动力变质作用;(8)热动力变质作用;(9)冲击变质作用。

这一分类方案与早年地质学家的分类相同并无新意。

由以上的历史回顾可以看出,变质地质学家从未把变质

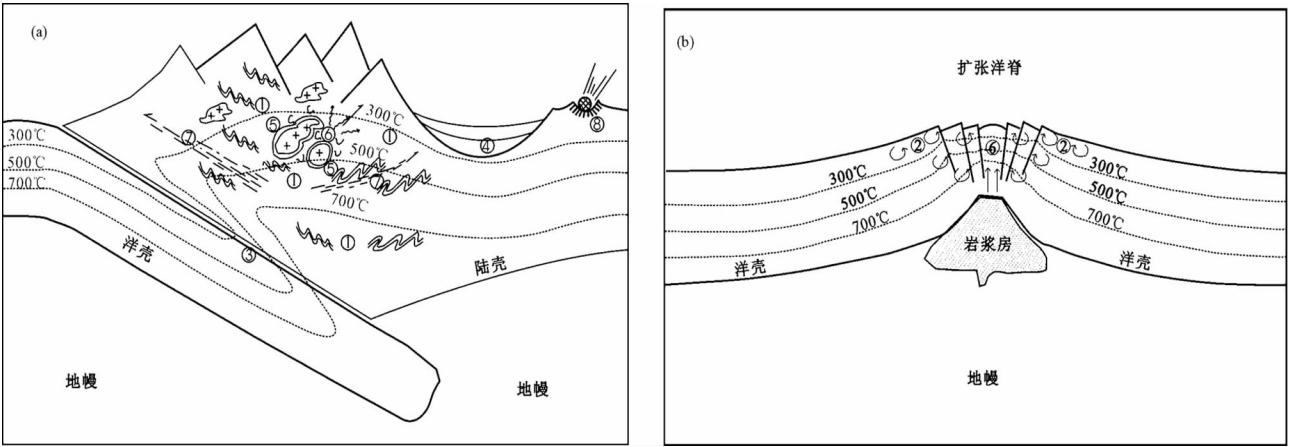


图 1 变质作用环境分类示意图(据 Barker,1998)

(a)-在汇聚板块边缘,洋壳俯冲于陆壳之下;(b)-大洋中脊扩张简图(板块边缘)。数字表示不同构造环境下变质作用类型:①造山带变质作用;②洋底变质作用;③俯冲带变质作用;④埋深变质作用;⑤接触带变质作用;⑥水热变质作用;⑦剪切带变质作用;⑧冲击变质作用

Fig. 1 Different environment of metamorphism (after Barker, 1998)

(a)-a schematic illustration of oceanic crust subducting beneath continental crust at a convergent plate margin; (b)-a schematic illustration of a mid-oceanic spreading ridge (divergent plate margin). Different metamorphic environment are numbered as follows: ①orogenic metamorphism; ②ocean-floor metamorphism; ③subduction zone metamorphism; ④burial metamorphism; ⑤contact metamorphism; ⑥hydrothermal metamorphism; ⑦shear-zone metamorphism; ⑧shock metamorphism

表 2 重要变质作用类型的典型特征(据 Bucher and Frey, 2002)

变质作用类型	造山带变质作用 (俯冲类型)	造山带变质作用 (碰撞类型)	洋底变质作用	接触变质作用
地质背景	在造山带延展达数千千米。 造山变质作用的早期相	在造山带延展达数千千米。 造山变质作用的晚期相	洋壳和上地幔延展数千千米	火成岩侵入于浅层附近至互相接触,接触带几米至几千米宽
静态/动态体制	动力的,一般伴生逆冲断层,滑动	动力的,一般伴生多相变形,叶理和褶皱	静态,伸展裂隙和脉,无叶理,伴生伸展和海底扩张	静态,无叶理
温度	150 ~ 700℃ (> 700℃见于深俯冲带中)	150 ~ 850℃ (最高可达 1050℃)	150 ~ 500℃ (> 500℃紧接岩浆)	150 ~ 600℃ (> 600℃与辉长岩接触处)
岩石的静压力	2 ~ 3kbar 地壳岩石	2 ~ 10kbar,在一些碰撞带达 14kbar,“双层壳”	< 3kbar	从几十巴到 3kbar
温度梯度	5 ~ 12℃/km (垂直),梯度依赖于俯冲速度	12 ~ 60℃/km (垂直),梯度依赖于伴生的火成岩活动	50 ~ 500℃/km (垂直或水平)	100℃/km 或更高(水平)
地质作用	伴生大洋岩石圈俯冲(蛇绿岩)和部分大陆岩石	陆-陆碰撞,岩石圈增厚、加压和加热	在大洋中脊,热由上升软流圈和基性岩浆岩侵入供给,在伸展体制,海水经过裂隙热岩循环	火成侵入体供热,由于水热循环,一般还伴生范围广大的交代作用
典型变质岩	蓝片岩、榴辉岩、蛇纹岩	板岩、千枚岩、片岩、片麻岩、混合岩、大理岩、石英岩、绿片岩、斜长角闪岩、麻粒岩	变玄武岩,绿岩,变辉长岩,原始构造常保存很好	角岩,大理岩,钙硅酸盐岩,麻粒岩,夕卡岩

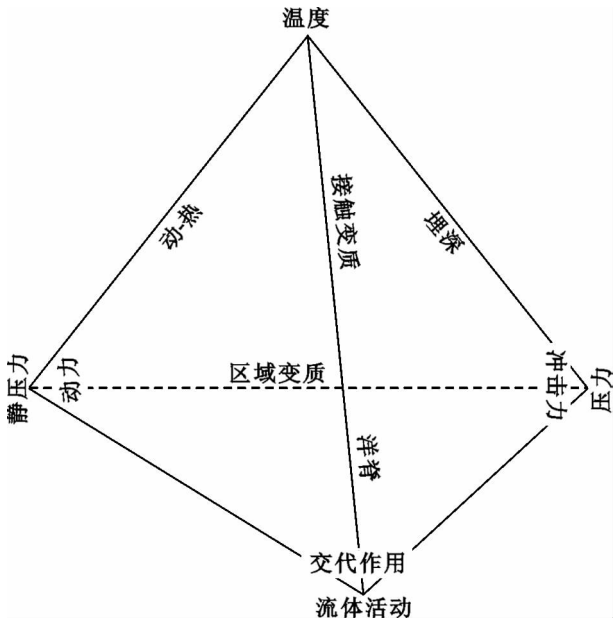


图2 变质作用分类四面体(据 Best, 2003)

Fig. 2 Representing the controlling factors of metamorphism (after Best, 2003)

作用看作一个孤立的事件,总是与相关事件相伴相随,只是早期的分类侧重于与局部的构造相联系,自上世纪60年代以后更侧重于与区域构造和全球构造相联系。

2 变质作用类型划分的建议方案

2.1 建议方案的出发点和基本原则

经过百余年的研究,变质作用的概念已十分清晰,变质作用类型的划分不断得到扩展,类型多样。截至目前,已有10种左右重要和比较重要的类型被提出。埋深变质作用、洋底变质作用和冲击变质作用都是在上世纪60年代初被初次命名;接触变质作用、水热变质作用、洋底变质作用和冲击变质作用等的地质含义和变质作用特征基本上已有清楚的界定;区域变质作用的内涵及形成环境的研究不断得到深化。早期变质作用类型的划分主要以物化条件为主要依据,区域变质作用早期曾与造山(造陆)运动联系,但不够紧密,60年代后板块构造引入大地构造研究后,变质作用的形成与演化与大陆汇聚、离散、俯冲等板块机制联系日益紧密,但仍有不少问题尚待深入探讨。埋深变质作用的构造背景也存在一些新的认识;高压-超高压变质作用研究是近年来发展和进展最快的一种类型;原有广义的动力变质作用定义和命名比较混乱,需要进一步规范。针对以上各种情况,需要提出一个更加合理和适用的变质作用分类方案。

我们建议的分类方案的思路是在综合分析研究前人分类的基础上,首先吸取前人分类方案的优点,有些已经比较完善的分类纳入新的方案,有些不够完善或分类不够合理的

加以补充和修订,有的则根据新的划分原则加以调整。划分分类方案的原则,董申保(1983,1986)曾有过详细的论述,我们基本同意,我们新分类方案的划分原则归纳为五条:

- (1) 初始变质作用时原岩建造的沉积、喷发和岩浆侵入特征;
- (2) 优先考虑变质作用形成和演化的地质环境;
- (3) 深入考虑变质作用演化的阶段性和每个阶段的主要综合特征;
- (4) 变质作用形成的物化条件或 $P-T-t$ 轨迹;
- (5) 在此分类中不过分强调变质作用的等化学性。

上述五项划分原则基本上包括了形成变质作用的各种因素。由于变质作用类型多样,划分时应各有侧重,突出其自身形成规律。总体来说,这五项划分原则更多地适用于区域性变质作用大类中的造山带变质作用、早前寒武纪克拉通变质作用和埋深变质作用等。优先考虑变质作用形成和演化的地质环境是指广义的地质背景,如局部的断陷、断裂、岩浆底侵和区域性板块汇聚、俯冲、碰撞等板块构造体制。造山带变质作用中的高压蓝片岩相、高压-超高压榴辉岩相、高压麻粒岩相的形成与特征板块构造有紧密联系, $P-T-t$ 轨迹也有规律可寻。洋底变质作用的形成与板块构造导致的大洋中脊扩张有关。早前寒武纪克拉通变质作用一般变质相如角闪岩相-绿片岩相的出现不限于特定变质作用类型和大地构造环境, $P-T-t$ 轨迹的意义也不尽相同,划分时需慎重研究。对于局部性的变质作用如接触变质作用、水热变质作用、动力变质作用,由于变质作用特征不同,划分原则也应有所侧重。冲击变质作用则是例外,它是天外来客引起的,与地表地质环境无关。总之,区别不同变质作用类型时,要充分突出固有特征,类型按主类型、亚类和小类三级划分。这次变质作用类型划分主要对第一次变质作用进行划分,叠加变质作用、退变质作用以及自变质作用均不在这次变质作用类型划分范围之内。关于混合岩化作用(或称为超变质作用),国内有的教科书将其作为一种变质作用类型单独列出(王仁民等,1989),本次分类考虑到这一变质作用主要与区域变质作用中的中高温区域变质作用紧密伴生,是区域变质作用派生的,以交代为主,属于一种衍生的开放体系,故未分出。

2.2 建议的变质作用分类

根据变质作用规模的不同,分为局部性的和区域性的两个范围进行讨论。

2.2.1 局部性变质作用

局部性变质作用可分为如下5类(见表3):

- (1) 接触变质作用 (metamorphism): 火成岩体侵入于地壳的中浅层次的岩石中,在其接触晕圈或其附近,因热传导或热流体的影响而形成的一种变质作用。受变质岩石一般很少显示叶理,接触带一般宽几米至几千米,温度一般在 $150 \sim 600^{\circ}\text{C}$,在辉长岩接触处,温度一般大于 600°C ,压力一般从数百巴到3千巴。按其形成的特征不同,可以分为以下三个

表 3 局部性的变质作用的典型特征

Table 3 Features of local metamorphism

主要类型	接触变质作用		动力变质作用		水热变质作用	冲击变质作用	燃烧变质作用
基本类型 (亚类)	热变质作用、接触交代变质作用、高热变质作用	极低温碎裂变质作用	韧性剪切带变质作用	逆冲断层变质作用	有的可形成各种蚀变矿物分带	形成冲击坑, 根据冲击变质强度具水平和垂直分带	根据烧变强度不同可形成分带
规模	接触带延长几千米至几十千米, 宽几米至几千米, 深数百米至数千米	线状分布, 长几千米至几百千米, 最长达数千千米或更长, 宽几十米至数千米			几千米至上百千米	数千米至几十千米甚至更大	规模不大
静态/ 动态体制	静态, 无叶理	动态体制, 脆性变形, 叶理弱	动态体制, 塑性变形, 叶理强	动态体制, 具叶理	静态, 不具叶理	动态体制, 冲击波产生巨大能量	静态
温度	30 ~ 900℃, 最高 > 1050℃	极低温-低温	中低温-中高温	低-中温	150 ~ 600℃	> 1000℃	> 700℃
压力	从 2 百巴到 2 千巴	侧压力较强	侧压力强	底部压力作用强	弱或无	超高压可达 10 ¹¹ ~ 10 ¹⁴ 巴	不计
地热梯度	100℃/km (水平) 或更高	低	中低	中高	100℃/km	极高	无数据
原岩性质	以灰岩、泥灰岩、炭质页岩、砂岩等沉积岩为主	岩石类型不限	岩石类型不限	岩石类型不限	岩石类型不定	地球表面陨石坑中岩石类型不限, 月球表面为玄武岩	限于煤层和含油页岩
地质背景	火成岩体侵入于地壳中部的地层中, 形成接触晕圈	产于地壳浅部的断裂带	产于地壳深部的韧性剪切带	产于地壳浅-深部的逆冲断层	水热流体主要为火成或变质成因, 其运移与裂隙和剪切带有关	陨石快速 (10 ~ 20m/s) 瞬时高温高压、撞击地球或月球表面岩石, 形成陨石坑	自燃或外来火种引燃
典型岩石类型	各种夕卡岩, 大理岩, 多种交代岩, 角岩	断层泥, 断层角砾岩	糜棱岩, 千糜岩等	各种变质岩石	各种蚀变岩石	冲击角砾岩, 冲击岩	各种烧变岩

亚类:

(i) 热变质作用 (thermal metamorphism): 受变质的岩石因受到岩浆体热流的影响发生重结晶、变质结晶作用而改变其结构和构造, 但变质前后岩石化学成分基本相同, 挥发组合仅起催化剂作用。如灰岩变质为大理岩, 页岩变为板岩和斑点板岩, 富铝岩石因距离接触带的远近不同而出现红柱石、堇青石、夕线石等矿物分带现象, 含有机物的岩石发生石墨化等。

(ii) 接触交代变质作用 (contact metasomatic metamorphism): 在火成岩与灰岩接触处, 除灰岩变为大理岩外, 还形成各种夕卡岩, 由于高温流体 (包括挥发组分) 的交代作用影响, 围岩除结构构造的改变外, 化学成分也有一定改变, 并形成不同的夕卡岩矿物, 如美国加利福尼亚 Custmore 地区石英二长斑岩侵入于灰岩而形成大理岩, 由侵入体向外依次见有石榴石带、钙镁橄榄石带等, 原有岩石中增加了硅, 减少了 CO₂, 也引入了一定量的铝, 故岩石成分由

于交代作用而有一定的改变。

(iii) 高热变质作用 (pyrometamorphism): 当某些火山岩与围岩或俘虏体相接触时, 由于火山岩温度较深部岩浆更高, 但冷凝速度较快, 可出现小规模的高温变质现象, 其特征是围岩被烘烤退色、脱水, 甚至局部熔化出现少量玻璃质, 并可出现一些特殊的鳞石英、透长石等低压高温矿物, 此种作用即称为高热变质作用, 是接触变质作用的一种特殊亚类, 前人曾单独列为一类, 考虑其与接触变质作用的高度相似性, 故作为其中的一个亚类, 不另行分出。

(2) 动力变质作用 (dynamo-metamorphism): 是在构造作用过程中所产生的强应力作用下, 岩石发生破碎、变形, 变形的同时伴有一定的变质结晶和重结晶作用的一类变质作用 (贺同兴等, 1988)。由于原岩受构造引起的动力变质作用极为复杂, 有时碎裂作用占主导, 其变质变形的特征差别较大, 有一些学者只用碎裂变质作用 (cataclastic metamorphism) 或错断变质作用 (dislocation) 来命名, 不能概括其全貌, 应根据

其变形程度(强度)、脆性和塑变性的特点以及温度条件区分为三种:

(i) 极低温碎裂变质作用:一般发生于断裂带的浅部,岩石在低温条件下,主要呈脆性碎裂化,变形弱,形成大小不一的角砾岩沿断裂带呈带状分布,岩石基本未受到变质结晶或重结晶,严格的说不能归入动力变质作用范围,按照习惯暂列于此,以供讨论。

(ii) 低-中-高温韧性剪切带变质作用:一般见于地壳的较深部位,以韧性剪切为主,岩石受变形后往往成为糜棱岩或千糜岩,一般形成于低温条件下,变质温度相当于绿片岩相,原有岩石出现退变质,有时也可有中-高温,岩石重结晶和变质结晶后形成相应的温度较高的变质矿物,因而划分为两个不同的组合:(a) 低温韧性剪切带变形作用(low temperature ductile shear zone metamorphism)和(b) 中-高温韧性剪切带变质作用(medium-high temperature ductile shear zone metamorphism)。

(iii) 温压递增逆冲断层变质作用:这一变质作用与一般剪切应变有一定差异,在逆冲断层中,主要影响其下盘和一部分上盘岩石,上盘岩石发生快速退化变质作用,而下盘被逆冲的岩石产生快速的增压变质作用,随后又发生热调整使地热梯度缓慢升高,整个岩层相应地发生缓慢的进化变质作用,最后岩层底部发生部分熔融并导致晚期侵入体的生成。

(3) 冲击变质作用(impact or shock metamorphism):这一变质作用最早由迪兹(Dietz, 1961)提出来的,是由陨石在极短的时间内($10^{-3} \sim 10^{-4}$ 秒)以极大的速度($10 \sim 20\text{km/s}$)冲击地表岩石或月球岩石时,在强大的冲击波影响下,温度、压力骤然增高,引起陨石坑内岩石产生各种冲击变质岩的一种特殊变质作用,它不属于内生作用的范畴,而属天体变质作用(cosmogenic metamorphism)之列。冲击产生的超高压可达 $10^{11} \sim 10^{14}$ 巴,温度超过 1000°C ,并释放出巨大能量,使冲击中心形成的陨石坑中及其周围生成各种冲击岩和冲击角砾岩,其矿物特征是出现冲击石英(冲击玻璃),新生成的柯石英和斯石英,有时还有少量金刚石。冲击坑及其周围还有震裂锥等构造标志。Bischoff and Stoffer(1992)曾做了比较详细的研究。

(4) 水热变质作用(hydrothermal metamorphism):指具有一定化学活动性的气体和热液与围体岩石进行交代反应,使岩石的矿物和化学成分及岩石的结构构造发生改变的变质作用,属于开放体系。气水热液可以是侵入体带来的挥发分,或者是受变质热流影响而变热的地下循环水以及两者的混合产物,在一定构造条件下,它们可改造岩石中的矿物,形成各种蚀变岩石,并使某些有用元素迁移、沉淀和富集。在气液变质强烈地段形成各种蚀变岩石,往往出现蚀变分带,可作为找矿的标志。

(5) 燃烧变质作用(burn metamorphism):煤层或天然易燃岩石由于氧化或外部原因,温度上升而引起燃烧(特别是煤层自燃),温度可达 1500°C ,影响范围可达 10km^2 ,可使周

围岩石产生重结晶、脱水或部分熔融,受变质的泥质或泥灰质沉积岩常裂成碎片或形成烧变岩,这是一种热源来源于煤层或含油气岩石自身的一种稀少的变质作用。中国新疆和山西的侏罗纪煤田,加拿大北部烟山的白垩系含油砂岩和页岩都发生过这类变质作用。

2.2.2 区域性的变质作用

其范围广大,面积达几千至上万平方千米,呈面状和带状分布。可分为以下四种主要类型(见表4)。

(1) 早前寒武纪克拉通变质作用或中-低压-中-高温区域变质作用(Early Precambrian craton metamorphism or low-medium pressure and medium-high temperature regional metamorphism):伴生深熔作用或区域混合岩化作用,前人也有称为超变质作用。王仁民等(1989)将区域混合岩化作用作为独立的一种变质作用类型分出。我们考虑到这种变质作用常与中-高温区域变质作用伴生,故未再单独分出。国外文献也未见有作为独立的一种变质作用类型。

本类变质作用根据变质相的不同,可进一步划分为以下五个亚类:

(i) 低-中压角闪岩相变质作用(low-medium pressure amphibolite facies metamorphism);

(ii) 低-中压麻粒岩相变质作用(low-medium pressure granulite facies metamorphism);

(iii) 低-中压角闪岩相-麻粒岩相变质作用(low-medium pressure amphibolite granulite facies metamorphism);

(iv) 低-中压绿片岩相-角闪岩相变质作用(low-pressure to amphibolite facies metamorphism);

(v) 区域超高温麻粒岩相变质作用(regional ultrahigh temperature granulite facies metamorphism):以出现假蓝宝石、富铈尖晶石-石英组合、大隅石-石英组合等为标志,意味着产生瞬时极高热流体的地球动力学发生了改变,布朗(Brown, 2007)认为可能发育与类似现代大陆弧后的构造背景中,有人认为可能与大陆碰撞作用有关,也有可能由于深熔作用伴生的超高温所致,与碰撞作用无关,其成因目前存在争议。

(2) 造山带区域变质作用(orogenic metamorphism):按照大地构造位置和温压条件的差别(参考图1),划分为以下三个亚类。

(i) 极低级区域动力变质作用(very low grade regional metamorphism):呈面形分布或呈宽带状分布于造山带上部 300°C 等温线以上区域(如图1a所示)。

(a) 千枚岩型(或低绿泥片岩型);

(b) 绿泥片岩相型。

(ii) 碰撞造山变质作用(collision metamorphism):根据大地构造位置的不同,可区分为陆-陆碰撞型和洋-陆碰撞型,按温压条件的差异又进一步划分为以下三个小类:

(a) 区域中温-中压变质作用(regional medium temperature and medium pressure metamorphism),可分为绿帘角闪岩相型-角闪岩相型(少数伴生麻粒岩相型)和绿帘角闪

表 4 区域性的变质作用的典型特征

Table 4 Features of regional metamorphism

主要类型	早前寒武纪克拉通（基底）变质作用（低压-中高温区域变质作用）	造山带变质作用			埋深变质作用	洋底变质作用（大洋中脊扩张）
		地槽阶段早期	碰撞造山变质作用	深俯冲变质作用	地槽区/地台拗陷区	
基本类型（亚类）	低-中压角闪岩相变质作用、低-中压麻粒岩相变质作用、低-中压角闪岩相-麻粒岩相变质作用、低-中压绿片岩相角闪岩相过渡变质作用，区域超高温麻粒岩相变质作用（其形成地质背景有争议）	低绿片岩相型、千枚岩相型和绿泥片岩相型	陆-陆碰撞型和洋-陆碰撞型，区域中低温-压变质作用，区域高压麻粒岩相变质作用	高压-中温蓝闪石-绿帘石相变质作用，高压-中低温硬柱石-蓝闪石相变质作用，高压-中温榴辉岩相变质作用，超高压-中高温柯石英榴辉岩相变质作用，超高压-高温变质作用	极低级浊沸石相和葡萄石-绿纤石相变质作用，绿片岩相变质作用（硬柱石-蓝闪片岩相变质作用改列入深俯冲变质作用，与以往文献有所不同）	葡萄石-阳起石相变质作用，绿泥片岩相变质作用
分布特征	面型为主，面积达几百至几千平方千米	造山带延展几百至几千千米	造山带延展达几千千米，造山带的晚期相	造山带延展达几千千米，造山带的早期相	在拗陷盆地或地槽可延展几千千米	在洋壳和上地幔延展几千千米甚至更广大
静态/动态体制	动态，具叶理	动态，具变和叶理	动态，变叶理和褶皱	动态，常伴生逆冲岩片	静态，不具叶理	伴随伸展和海底扩张
温度	400 ~ 750℃，最大可达 850℃	200 ~ 350℃	300 ~ 850℃，最高可达 1050℃	300 ~ 900℃，部分 > 900℃（> 700℃为深俯冲）	200 ~ 350℃	200 ~ 350℃
岩石静压力	4 ~ 8kbar	< 3kbar	2 ~ 10kbar，有些碰撞带可达 14kbar，“双壳”	地壳岩石 20 ~ 30kbar	< 3kbar	< 3kbar
温度梯度	25℃/km	60℃/km，个别高达 150℃/km	12 ~ 60℃/km（垂直），依赖于岩浆活动	5 ~ 12℃/km（垂直），依赖于俯冲速率	平均 75 ~ 175℃/km	50 ~ 500℃/km（垂直或水平）
作用	伴生区域混合岩化作用和 TTG 岩系， <i>P-T-t</i> 轨迹呈逆时针，岩浆底侵，陆壳增厚，部分 <i>P-T-t</i> 轨迹呈顺时针	区域低温低压下形成的低级变质作用	陆-陆碰撞或洋-陆碰撞，岩石圈增厚，加压和加热， <i>P-T-t</i> 轨迹呈顺时针	大洋岩石圈（蛇绿岩）深俯冲伴随部分大陆岩石， <i>P-T-t</i> 轨迹呈顺时针	温度与侵入体无关，温度梯度受深度控制	在洋中脊，热由上升软流圈和侵入的基性岩提供
典型变质岩石	片岩、片麻岩、混合岩、角闪岩、大理岩、麻粒岩	板岩、千枚岩、绿片岩	板岩、千枚岩、绿片岩、片麻岩、混合岩、大理岩、石英岩、角闪岩、麻粒岩	蓝片岩、榴辉岩、蛇纹岩	板岩、千枚岩、绿片岩、葡萄石-绿纤石片岩、浊沸石片岩	变玄武岩、绿岩、变辉长岩、蛇纹岩，仍保持原生构造

岩相-角闪岩相过渡型（递增变质作用），大多数显生宙造山带的变质作用特征是形成中压蓝晶石变质带；

(b) 区域高压麻粒岩相变质作用（regional high pressure granulite facies metamorphism）。

(iii) 深俯冲区域高压-超高压变质作用（deep subduction zone regional high-ultrahigh pressure metamorphism），由于俯冲深度的不同和温压条件的差异形成的变质作用，可分为以下五小类：

(a) 高压低温硬柱石-蓝闪石相变质作用（high pressure low temperature lawsonite-glaucophane facies metamorphism）， $T = 200 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ， $P = 0.6 \sim 2.0\text{GPa}$ ；

(b) 高压中温蓝闪石-绿帘石相变质作用（high pressure medium temperature glaucophane-epidote facies metamorphism）， $T = 450 \sim 550^{\circ}\text{C}$ ， $P = 0.8 \sim 2.0\text{GPa}$ ，温度比(a)稍高，属过渡类型；

(c) 高压中温榴辉岩相变质作用（high pressure medium temperature eclogite facies metamorphism），温度 $350 \sim 600^{\circ}\text{C}$ ，以出现蓝闪石榴辉岩为特征，地热梯度 $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，最低 $3 \sim 4^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，原岩建造属于洋壳组合；

(d) 超高压-中高温柯石英榴辉岩相变质作用（ultrahigh pressure medium-high temperature coesite eclogite facies metamorphism），常与金刚石和文石伴生，温度 $600 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ，

以出现蓝晶石榴辉岩和含柯石英为特征,与围岩片麻岩伴生,原岩建造属于陆壳类型,是典型的大陆深俯冲的产物,深度可达 200km;

(e)超高温-高压变质作用或称为地球深部(内部)变质作用,温度 >900℃,以含石榴是的地幔二辉橄榄岩为特征,其深度可达 300km(据张立飞,2007)。

(3)埋深变质作用(burial metamorphism):有人译为埋藏变质作用,我们认为统一译为“埋深变质作用”更好。这一变质作用首先由库姆斯(Coombs, 1961)引入,他研究了新西兰南部地区沉积火山岩系时发现,由于埋深提高了岩石的围岩压力和温度而产生了低温的区域变质作用,岩石变质级别很低,常看到变质反应不彻底,有不少原岩结构和矿物的残余,并缺乏显著片理。岩石没有受到造山作用和岩浆岩侵入的影响。

此种变质作用可出现于地槽区的深部和地台的拗陷盆地,巨厚的盖层底部也可能出现类似的变质作用。以往有些地区如西藏雅鲁藏布江-喜马拉雅变质带出现硬柱石-蓝闪石组合为代表的变质作用,第一代变质地质图总结时曾归入埋深变质作用类型,经近年来的研究认为是由造山带深俯冲作用所致根据变质相的不同,划分为两个亚类:

(i)浊沸石相和葡萄石-绿纤石相变质作用(laumontite and prehnite-pumpellyite facies type);

(ii)绿片岩相变质作用(schist facies metamorphism)。

(4)洋底变质作用(ocean-floor metamorphism):英文名有不同的用法,如 sea-floor metamorphism, mid-ocean ridge metamorphism,建议统一用 ocean-floor metamorphism,指大洋中脊附近产生的一种变质作用。大洋中脊下部的热流具有较高的速率,并随深度快速增加,使原有的基性岩、超基性岩(玄武岩、辉长岩和橄榄岩等)变质,以后由于洋底扩张,不断产生侧向移动,使这些变质岩石移至正常沉积的大洋盆地中。发生洋底变质的岩石主要是基性岩和超基性岩成分,这些岩石大部分无片理,基本保留原有结构,其变质相主要是沸石相和绿片岩相。根据对大西洋、太平洋和印度洋洋底样品的研究,变质岩中的矿物共生组合常随深度而变化,其顺序为→葡萄石+阳起石→绿片岩相,葡萄石-绿纤石相缺少,说明大洋中脊玄武岩变质时比许多大陆蛇绿岩的地热梯度高。洋底变质的岩石另一特点是,由于大量热海水的对流循环产生广泛发育的脉体,海水与岩石化学成分的相互作用而出现与热变质作用相似的洋底变质作用。

3 结论

以上变质作用分类中的主要类型的温度、压力条件可见图3和图4,图3除表示了区域性的变质作用之外,还表示了接触变质作用的温、压条件,而图4则把主要的区域变质作用与板块构造环境联系起来。由于不同作者引用的变质反应实验数据不同,同一相的温、压条件在图3和图4中稍有

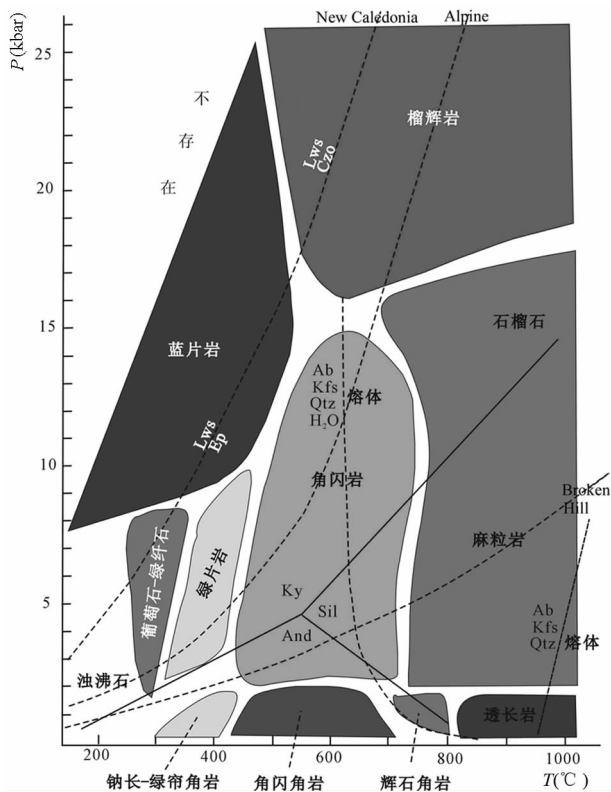


图3 主要变质相的 P - T 分布图(据 Barker, 1998)

在低压相中,红柱石常见而铁铝榴石少见,尽管低压相(特别是接触变质)和相当于中压相(区域变质)之间存在重叠,用同一颜色表示。在麻粒岩区域的石榴石低压限,为石榴石麻粒岩亚相,其对全岩成分是灵敏的,表示在阴影区。图中3条虚线分别表示 New Caledonia 北部始新世岩石的俯冲变质作用、汇聚大陆的变质作用如欧洲阿尔卑斯变质作用和澳大利亚 Broken Hill 异常高热流低压区域变质作用的代表性地热梯度。图中也表示了纯 Al_2SiO_5 体系转变线和含饱和水的简化花岗岩体系熔融线

Fig. 3 P - T diagram showing the generalized distribution of the main metamorphic facies (after Barker, 1998)

Andalusite is common and almandine garnet is rare in the low- P facies, though considerable overlap exists between the low- P (typically contact metamorphic) facies and equivalent intermediate- P (regional metamorphic) facies (shown in the same colours). The low- P limit of garnet in the granulite field, delineating the garnet granulite subfacies, is sensitive to whole-rock composition, and so is shown as a shaded zone. Representative geotherms are shown for: subduction metamorphism from Eocene rocks in northern New Caledonia; convergent continental metamorphism, such as is responsible for forming the European Alpine metamorphism; and exceptionally high heat flow in low-pressure regional metamorphism, evident at Broken Hill, Australia

差别,但无本质区别。

该变质作用分类方案仅是一个建议方案,目的是抛砖引玉,引起大家讨论,促其完善。敬请批评指正。

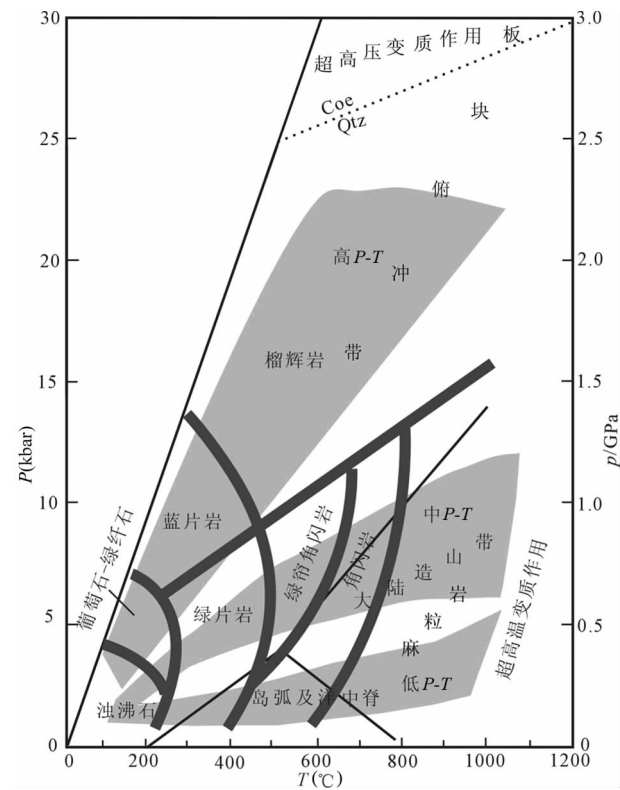


图4 变质作用 P - T 范围和地质背景示意图(转引自张立飞等, 2007, 稍加修改)

地壳变质作用的 P - T 区间表示了 8 个主要变质相系的大地构造背景, 相邻变质相之间的边界是具有适当宽度的 P - T 过渡带, 阴影带代表了三个主要相系, 细线代表蓝晶石(高压, 低-高温), 夕线石(高温, 高压)和红柱石(低压, 低温)的相界限

Fig.4 p - T diagram of metamorphism and geological setting (modified after Zhang *et al.*, 2007)

P - T diagram of crustal metamorphism showing the eight principle metamorphic facies. Boundaries between adjacent facies are transition zones with considerable width P - T conditions. The areas with shadows represent the three principle facies and the thin lines represent the phase boundaries between kyanite (with high P and low to high T), sillimanite (with high T and low to high P) and andalusite (with low P and intermediate T)

致谢 宋会侠同志对本文的文字和插图进行了录入和编辑, 并多次修改, 特此致谢!

谨以此文献给卢良兆教授八十华诞和从事地质工作六十周年, 祝他健康长寿, 阖家欢乐, 万事如意!

References

Barker AJ. 1998. Introduction to Metamorphic Textures and Microstructures. Lecturer in Geology University of Southampton, United Kingdom
Best MG. 2003. Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd edition.

Blackwall Publishing
Bischoff A and Stoffer D. 1992. Shock metamorphism as a fundamental process in the evolution of planetary bodies information from meliorites. *Eur. J. Mineral.*, 4: 707 - 755
Brown M. 2007. Metamorphism, plate tectonics and the supercontinent cycle. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 1 - 18
Bucher K and Frey M. 1994. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 6th edition. Springer Publishing
Bucher K and Frey M. 2002. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 7th edition. Springer Publishing
Cheng YQ, Shen QH, Liu GH and Wang ZJ. 1963. Some Basal Problems and Methods of Metamorphic Rocks. Beijing: Industry Pressing of China (in Chinese)
Coombs DS. 1961. Some recent work on the low grades of metamorphism. *Australia J. Science*, 24: 203 - 215
Dietz RS. 1961. Astroblems. *Scientific America*, 205: 50 - 58
Dong SB. 1983. A tentative classification of the types of metamorphism. *Regional Geology of China*, (3): 1 - 16 (in Chinese with English abstract)
Dong SB *et al.* 1986. Relationship between Metamorphism and Crust Evolution in China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
Ernst WG. 1975. Metamorphism and plate tectonic regions. Dowden, Hutchinson and Ross Inc Benchmark Papers in Geology, vol. 17
Eskola P. 1939. Die Entstehung der Geslince. Berlin: Springer
Grubenmann U and Niggli P. 1924. Die gesterins metamorphose. Berlin: Borntraeger
Harker A. 1932. Metamorphism; A Study of the Transformations of Rock-Masses. London: Metthuen
Hutton J. 1795. The Theory of the Earth; With Proofs and Illustrations. 2nd edition. London and Edinburgh Reprinted. 1959 HR Engelmann and wheldon & werly
Hyndman DW. 1972. Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks. Mc Grow-Hill Inc
He TX, Lu LZ, Li SX and Lan YQ. 1988. Metamorphic Petrology. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
Lu LZ. 1986. Types of Metamorphism: Concepts of and Some Criteria for the Metamorphic Map of China 1: 4000000 Explanatory Text, Commission for the Compilation of the Metamorphic Map of Chinese Ministry of Geology and Mineral Resource. Beijing: Geological Publishing House, 5 - 9 (in Chinese)
Lu LZ. 1988. The types of regional metamorphism in China and its relation to crust evolution. Abstract of the international symposium on metamorphism and crust evolution. Changchun, 110 - 112 (in Chinese)
Mason R. 1978. Petrology of the Metamorphic Rocks. George Allen and Unwin Marry, London
Lyell C. 1830. Principles of Geology. London: John Marry and Thomas
Miyashiro A. 1961. Evolution of metamorphic belts. *J. Petrol.*, 2: 277 - 311
Miyashiro A. 1972. Metamorphism and Metamorphic Belts. George Allen and onwin Ltd, London
Read HH. 1957. The Granite Controversy. Thomas Murby Company, London, 339 - 373
Shen QH. 1993. Metamorphism. Encyclopedia of China. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House (in Chinese)
Turner FJ. 1948. Mineralogical and structure evolution of the metamorphic rocks. The Geological society of America Memoir, 30
Turner FJ. 1981. Metamorphic Petrology (Mineralogical Field and Tectonic Aspects). 2nd edition. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, Lendes New York
Wang RM, You ZD and Fu GQ. 1989. Metamorphic Petrology. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
Winkler HGH. 1965. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. New York: Springer-verlag
Winkler HGH. 1967. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 2nd edition. New York: Springer-verlag
Winkler HGH. 1976. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 4th edition.

New York; Springer-verlag
Winkler HGH. 1979. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 5th edition. New York; Springer-verlag
Yardley BWD. 1989. An Introduction to Metamorphic Petrology. Longman Earth Science Series
Zhang LF. 2007. Extreme metamorphism; The frontier of metamorphic geology. Earth Science Frontiers, 14(1): 33–42 (in Chinese with English abstract)
Zwart HJ. 1967. The duality of orogenic belts. Geol. Mijnbouw, 46: 283–309

附中文参考文献

程裕淇, 沈其韩, 刘国惠, 王泽九. 1963. 变质岩的一些基本问题和工作方法. 北京: 中国工业出版社
董申保. 1983. 变质作用类型划分初议. 中国区域地质, (3): 1–16
董申保等. 1986. 中国变质作用与地壳演化的关系. 北京: 地质出版社
都城秋穗. 1972. 变质作用与变质带(周云生译, 1979). 北京: 地质出版社, 492
哈克. 1932. 变质作用: 岩石转变之研究(蒋荫昌译, 1981). 北京: 地

质出版社
贺同兴, 卢良兆, 李树勋, 兰玉琦. 1988. 变质岩岩石学. 北京: 地质出版社
卢良兆. 1986. 1:400 万中国变质地质图说明书之二: 变质作用类型的划分. 北京: 地质出版社, 5–9
卢良兆. 1988. 中国的区域变质作用类型及其与地壳演化的关系. 变质作用与地壳国际学术讨论会论文详细摘要, 长春, 110–112
沈其韩. 1993. 变质作用. 中国大百科全书地质卷 30–32(第一版). 北京: 中国大百科全书出版社
台尔纳. 1948. 变质岩矿物和构造演变(邵克忠译, 1963). 北京: 中国工业出版社, 320
王仁民, 游振东, 富公勤. 1989. 变质岩岩石学. 北京: 地质出版社
叶利谢夫(И.А. Блшцеев). 1965. 变质作用(种之昭译). 北京: 地质出版社
张立飞. 2007. 极端条件下的变质作用-变质地质学研究的前沿. 地学前缘, 14(1): 32–42