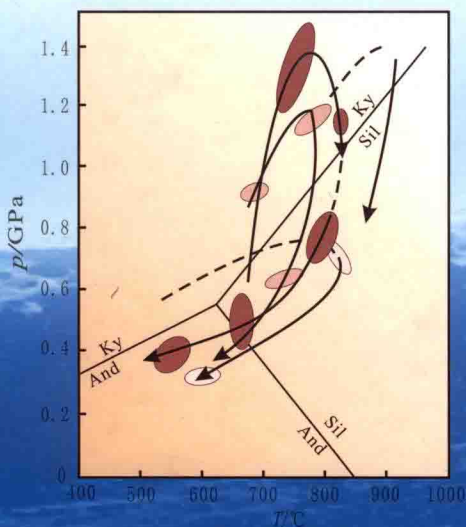


中国区域变质岩及变质作用演化

耿元生 沈其韩 刘福来 等著



地质出版社

中国区域变质岩及 变质作用演化



耿元生 沈其韩 刘福来 张立飞
董永胜 王惠初 杨崇辉 张建新 著
魏春景 薛怀民 周喜文 任留东

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以板块构造为背景,重新划分了变质作用类型和变质单元;首次在图面上将榴辉岩相的变质岩石进行了表达,对西昆仑-秦岭造山带中的高压和超高压变质岩系进行了详细表达;重新厘定了变质岩系的形成时代和变质时代;从古特提斯洋到新特提斯洋开启闭合的历史,探讨了青藏高原变质岩系的演化历史;充分反映了近二十年来我国变质地质学研究的主要进展,总结了我国蓝片岩带和造山带麻粒岩的最新研究进展。

本书可供从事变质岩石学研究的相关专业技术人员及高等院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国区域变质岩及变质作用演化/耿元生等著. —
北京:地质出版社,2016.5
ISBN 978-7-116-09601-1

I. ①中… II. ①耿… III. ①区域变质岩-变质作用
—中国 IV. ①P588.392

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第005343号

Zhongguo Quyu Bianzhiyan ji Bianzhi Zuoyong Yanhua

责任编辑:祁向雷 田野

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 66554528(发行部);(010) 66554631(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地太天成印务有限公司

开 本:787 mm×1092 mm^{1/16}

印 张:27.75

字 数:672千字

版 次:2016年5月北京第1版

印 次:2016年5月北京第1次印刷

定 价:98.00元

审图号:GS(2015)3300号

书 号:ISBN 978-7-116-09601-1

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

本专著是“1:500 万中国变质地质图的编制与研究”和“1:500 万中国变质地质图的编辑与完善”两个地质调查工作项目的研究报告的成果。这两个项目的主要目的是编制“1:500 万中国变质地质图”，变质地质图及说明书已经另行出版。在编制该图的过程中对我国不同的变质单元进行了系统总结，本专著就是在变质地质图编制基础上对我国变质地质学 20 余年研究成果的总结。

从 1986 年到 2008 年的 20 余年间变质地质学一个重要进展是从只考虑变质作用峰期条件的静态研究转向探讨变质作用过程中温度压力条件变化的动态研究。我国 20 多年间在变质地质学和前寒武纪地质学研究取得了重要进展，如在大别-苏鲁造山带中识别出普遍含有柯石英的早期榴辉岩相变质、一些变质地层的形成时代和变质时代得到了重新厘定、在华北克拉通发现了高压麻粒岩和超高温麻粒岩、在一些造山带中发现了高压麻粒岩等等。这些重要进展改变了以往的一些认识，使编制新一版的变质地质图和对已有成果进行系统总结已成必然。

“1:500 万中国变质地质图的编制与研究”工作项目是中国地质调查局下达的“综合基础地质图件编制与更新”计划项目的工作项目。实施单位为中国地质科学院地质研究所，承担单位为中国地质科学院地质研究所，协作单位有北京大学地球科学与空间学院、中国地质调查局天津地质调查中心和吉林大学地球科学学院。本次研究以 1986 年 1:400 万中国变质地质图为基础，充分吸收 20 多年来我国在变质地质学研究中的新成果，从动态的角度探讨不同时期和不同变质地区的演化规律及其与大地构造的关系。由于工作性质所限，本次编图工作以收集已有资料为主，特别是 1986 年以来的重要进展。因此，本次编图和本专著的总结是多年来我国广大变质地质学家和前寒武纪地质学家长期工作积累的综合表达。

根据编制变质地质图的任务和要求首先制定了编图原则和技术要求，之后根据专家的特长和研究基础，采用专家负责的原则进行片区变质地质图的编制，张立飞和魏春景教授负责新疆片区的编制、董永胜教授负责青藏高原

片区的编制、张建新研究员负责西昆仑-秦岭地区的编制、刘福来研究员负责大别-苏鲁地区的编制、王惠初研究员负责内蒙古-大兴安岭地区的编制、任留东研究员负责吉林-黑龙江地区的编制、杨崇辉研究员负责华北地区的编制、薛怀民研究员负责扬子地区的编制、周喜文研究员负责华夏地区的编制。在片区编制的基础上,各片区的负责人根据项目的总体要求编写了综合研究报告。项目评审后,根据专家意见对图面和报告进行了修改完善。

通过本次编图和综合研究,主要取得了以下进展:以板块构造为背景对变质作用类型进行了重新划分,根据新的资料对变质单元进行了重新划分;首次在图面上将榴辉岩相的变质岩进行了表达,对西昆仑-秦岭造山带中的高压和超高压变质岩系进行了详细表达;根据近 20 年来的详细年代学资料对一些变质岩系的形成时代和变质时代进行了重新厘定;从古特提斯洋到新特提斯洋开启闭合的历史探讨了青藏高原变质岩系的演化历史;在图面上反映了近 20 年来我国变质地质学研究的主要进展,如华北等地发现的超高压麻粒岩和超高温麻粒岩、古元古代的孔兹岩系、华夏地块古元古代的变质作用等都在图面上给予了充分反映;总结了我国蓝片岩带和造山带麻粒岩的最新研究进展。

本项工作始终得到中国地质调查局科技外事部刘凤山处长的大力支持,得到了中国地质科学院地质研究所、北京大学地球与空间学院、吉林大学地球科学学院、天津地质调查中心、河北省区域地质矿产调查研究所有关领导和科技管理部门的支持。特别需要指出的是,董申保院士在弥留之际,对本项目的工作提出了中肯建议,提供了国外变质地质图和有关文献。对此我们深切怀念董申保院士,对他的支持表示诚挚的感谢。新版变质地质图和本专著的出版也是对董先生的纪念。

自从 1986 年 1:400 万中国变质地质图出版以来,全国的变质地质工作取得了较大进展,但是不同地区的发展仍不平衡,有的地区变质岩系、变质作用的研究程度相对较低,新资料较少,而有的地区研究进展突出,资料丰富。由于地区研究程度的不平衡在图面表现为详略程度有差异。另外由于编图、综合报告和说明书编写的时间比较匆忙,加之编者水平有限,在不少方面还存在一些不足甚至问题,敬请读者批评指正。

本专著共分三篇,第一篇概述,其中第一章至第四章由沈其韩、耿元生执笔;第二篇各变质地质单元的基本特征,其中第五章由张立飞、魏春景执笔,第六章由王惠初执笔,第七章由任留东执笔,耿元生补充修改,第八章

由张立飞、魏春景执笔，耿元生修改，第九章由杨崇辉、耿元生执笔，第十章由张建新执笔，耿元生补充，第十一章由刘福来执笔，第十二章和第十三章由董永胜执笔，第十四章由薛怀民执笔，耿元生补充修改，第十五章由周喜文执笔；第三篇某些变质地质问题的讨论，其中第十六章由杨崇辉执笔，第十七、第十八章由沈其韩、耿元生执笔，第十九章、第二十章由耿元生执笔。最后由耿元生进行了统编。

近 30 年来我国变质地质学的研究取得了巨大成绩，新资料浩如烟海，我们在总结中难免有所遗漏，另外由于编著者的水平所限还有很多不尽人意之处，望读者批评指正。

目 录

前 言

第一篇 概 述

第一章 变质相和压力类型	(3)
第一节 变质相和压力类型的基本定义	(3)
第二节 各变质相和变质相型的基本特征	(5)
第二章 变质作用类型的划分	(9)
第一节 变质作用类型划分的出发点和基本原则	(9)
第二节 变质作用类型的划分	(10)
一、局部性变质作用	(10)
二、区域性的变质作用	(13)
第三章 变质作用期次的划分	(17)
第一节 变质作用期次划分的基本原则	(17)
第二节 锆石等矿物原位定年在变质作用期次划分中的应用	(19)
第四章 变质地质单元的划分	(24)
第一节 变质地质单元划分的基本原则	(24)
第二节 变质地质单元的划分	(26)

第二篇 各变质地质单元的基本特征

第五章 天山-兴蒙变质地区的阿尔泰-天山变质亚区 (阿尔泰-天山变质地块)	(33)
第一节 阿尔泰变质地带	(35)
第二节 准噶尔-北天山变质地带	(37)
第三节 中天山变质地带	(38)
第四节 伊犁变质地带	(39)
第五节 西南天山变质地带	(39)
第六节 南天山变质地带	(41)
第七节 北山-柳园变质地带	(43)
第六章 天山-兴蒙变质地区的内蒙古-大兴安岭变质亚区	(45)
第一节 额济纳-乌力吉变质地块 (弧盆系)	(46)
一、额济纳-哈日敖日布格变质地带 (岩浆弧) V (P_{Z_2})	(46)
二、恩格尔乌苏变质地带 (蛇绿杂岩带) V (C-P)	(47)

三、包尔乌拉-乌力吉变质地带(岩浆弧) V (Pz_2)	(48)
第二节 包尔汗图-白乃庙变质地块	(48)
一、宝音图变质地带 $P\epsilon_E$ (Pt_2)	(48)
二、包尔汗图变质地带 C (Pz_1)	(50)
三、白乃庙变质地带 C (Pz_1)+V (Pz_2)	(51)
四、镶黄旗-多伦变质地带(陆缘岩浆弧) V (Pz_2)	(52)
第三节 索伦山-西拉木伦变质地块(结合带)	(53)
一、二道井-迪彦庙变质地带(增生杂岩带、高压蓝片岩带)	(54)
二、林西变质地带(残余盆地)	(56)
三、温都尔庙变质地带(增生杂岩带、高压蓝片岩带)	(57)
第四节 大兴安岭变质地块(弧盆系)	(60)
一、新林-红花岗基变质地带(蛇绿混杂岩带、蓝闪片岩-绿片岩带)	(60)
二、东乌旗-多宝山变质地带	(62)
三、贺根山-黑河变质地带(蛇绿混杂岩带)	(67)
四、锡林浩特变质地带	(68)
第五节 额尔古纳变质地块 X (Pt_3)+V (Pz)	(74)
一、漠河兴凯期变质地带(古地块残块), X (Pt_3)	(74)
二、莫尔道嘎古生代变质地带 V (Pz)	(78)
第七章 天山-兴蒙变质地区的吉林-黑龙江变质亚区	(79)
第一节 吉林-黑龙江变质地块	(79)
一、通辽-佳木斯亚绿片岩相变质地带	(79)
二、四平-延吉变质地带	(80)
三、萝北-牡丹江变质地带	(82)
第二节 佳木斯-虎林变质地块	(84)
一、麻山-虎林变质地带	(84)
二、那丹哈达岭变质地带	(90)
第三节 变质作用、花岗岩岩浆作用和构造演化	(90)
一、早古生代变质作用和花岗岩	(90)
二、晚古生代晚期-中生代早期的花岗岩	(91)
三、地层特征	(93)
四、区域对比	(94)
五、与其他大陆的联系	(95)
第八章 塔里木-阿拉善变质地区	(96)
第一节 塔里木元古宙变质地块	(96)
一、阿克苏变质地带	(96)
二、库鲁克塔格-星星峡变质地带	(97)
三、西昆仑变质地带	(98)
第二节 敦煌-阿拉善变质地块	(100)

一、敦煌变质地带	(100)
二、阿拉善变质地带	(102)
第九章 华北变质地区	(106)
第一节 阴山变质地块	(107)
一、乌拉特中旗/白云鄂博-化德变质地带	(107)
二、色尔腾山-围场变质地带	(108)
第二节 集宁-鄂尔多斯变质地块	(111)
一、集宁-贺兰山变质地带	(111)
二、吕梁-延安变质地带	(120)
第三节 冀鲁变质地块	(124)
一、辽西-中条变质地带	(124)
二、冀东变质地带	(138)
三、鲁西-蚌埠变质地带	(144)
四、胶东变质地带	(150)
第四节 辽吉变质地块	(156)
一、辽北-吉南太古宙变质地带	(156)
二、辽河古元古代变质地带	(161)
第十章 西昆仑-柴达木-秦岭变质地区	(169)
第一节 西昆仑南变质地块	(169)
第二节 阿尔金-祁连-柴达木元古宙-早古生代变质地块	(170)
一、北阿尔金-北祁连早古生代变质地带	(170)
二、中阿尔金-祁连元古宙变质地带	(176)
三、欧龙布鲁克古元古代变质地带	(176)
四、南阿尔金-柴北缘早古生代变质地带	(177)
五、柴达木-昆(仑)北元古宙-早古生代变质地带	(187)
第三节 西秦岭变质地块	(187)
一、西秦岭北缘元古宙-早古生代变质地带	(188)
二、西秦岭南晚古生代-中生代(华力西-印支)变质地带	(188)
第四节 秦岭早古生代变质地块	(189)
一、北秦岭早古生代变质地带	(189)
二、南秦岭变质地带	(191)
第五节 变质作用与造山作用	(192)
第十一章 大别-苏鲁变质地区	(196)
第一节 大别山变质地块	(196)
一、南大别高压-超高压变质地带	(197)
二、北大别变质核杂岩变质地带	(200)
三、桐柏变质地带	(203)
第二节 苏鲁变质地块	(204)

一、苏鲁高压变质地带	(206)
二、苏鲁超高压变质地带	(206)
第十二章 喀喇昆仑-巴颜喀拉-昌都-思茅变质地区	(213)
第一节 喀喇昆仑-巴颜喀拉变质地块	(213)
一、巴彦喀拉-甘孜变质地带	(214)
二、玉树-中甸变质地带	(215)
第二节 羌北-昌都-兰坪变质地块	(216)
一、羊湖-金沙江-哀牢山变质地带	(216)
二、羌北-昌都-兰坪变质地带	(216)
第三节 变质作用与地壳演化	(218)
第十三章 羌南-冈底斯-喜马拉雅-滇西变质地区	(219)
第一节 羌南-保山变质地块	(219)
一、龙木错-双湖-澜沧江变质地带	(219)
二、羌南-保山变质地带	(220)
第二节 冈底斯-腾冲变质地块	(222)
一、班公湖-怒江变质地带	(222)
二、班戈-洛隆变质地带	(225)
三、冈底斯-察隅变质地带	(229)
四、腾冲变质地带	(233)
第三节 喜马拉雅变质地块	(234)
一、雅鲁藏布江变质地带(板块缝合带)	(234)
二、北喜马拉雅变质地带	(235)
三、高喜马拉雅变质地带	(237)
四、低喜马拉雅变质地带	(241)
第四节 变质作用与地壳演化	(241)
一、结晶基底的形成及变质作用	(242)
二、古特提斯洋闭合碰撞过程的变质作用	(242)
三、新特提斯洋闭合碰撞过程的变质作用	(242)
四、高原隆升阶段的变质作用	(243)
第十四章 扬子变质地区	(245)
第一节 扬子西-北缘变质地块	(246)
一、康滇变质地带	(247)
二、滇中变质地带	(251)
三、南盘江-右江变质地带	(252)
第二节 扬子变质地块	(253)
一、黄陵变质地带	(253)
二、江南隆起(造山带)变质地带	(256)
三、下扬子变质地带	(260)

第十五章 华夏变质地区	(263)
第一节 武夷山变质地块	(263)
一、古元古代变质地带	(264)
二、古生代加里东期变质地带	(291)
三、中生代印支期变质地带	(297)
第二节 南岭-云开变质地块	(298)
一、加里东期变质地带	(298)
二、华力西期变质地带	(301)
三、印支期变质地带	(301)
第三节 海南变质地块	(302)
一、加里东期变质地带	(302)
二、华力西-印支期变质地带	(306)
第四节 东南沿海与台湾变质地块	(307)
一、燕山期变质地带	(307)
二、喜马拉雅期变质地带	(315)
第五节 华夏地块地质事件序列及与变质作用的关系	(316)

第三篇 基岩变质地质问题的讨论

第十六章 冲击变质作用	(328)
第十七章 中国蓝片岩的基本特征	(333)
第十八章 中国主要造山带中麻粒岩的基本特征	(341)
第十九章 中国北方低级变质作用的讨论	(348)
一、变质作用与成岩作用的界线	(349)
二、绿泥石的成因	(350)
第二十章 中国变质作用的演化与中国大陆形成演化的关系	(352)
第一节 形成古老陆块的区域变质作用	(352)
一、古老变质作用的年代学记录	(352)
二、新太古代的变质作用与地壳增生和再造	(353)
三、与哥伦比亚超大陆聚会有关的古元古代晚期的变质作用	(355)
第二节 与扬子地块形成演化有关的变质作用	(360)
第三节 形成中国大陆基本格局的区域变质作用	(363)
第四节 与中国北方大陆地壳增生有关的变质作用	(365)
第五节 与青藏高原形成、隆升有关的变质作用	(367)
主要参考文献	(369)
附表 矿物名称和其缩写对应表	(429)

第一篇 概述

变质作用是一种与大陆地壳的演化密切相关的地质过程，自 Lyell (1833) 提出变质作用的概念到现在已经有 170 多年的历史。在相当长的一段时间内，变质作用的研究强调热和应力两个方面，如在研究局部变质作用时，提出热变质作用和动力变质作用。但涉及区域变质作用时，情况就比较复杂，区域变质作用中的温度既取决于热源又取决于热传递方式。应力虽然在大多数变质作用中起主导作用，但并不是所有区域变质作用的必要条件，如在埋藏变质作用和洋底变质作用中，就缺少应力作用。对某些变质地区的显微结构分析也表明变质结晶作用和变形作用常常是相互独立的事件，它们都受控于与区域构造环境相关的热扰动 (thermal perturbation)。Verhoogen (1980) 指出：“……由于构造变形和造山作用通常与区域变质作用相关，因此把造山作用看作热扰动比机械扰动 (mechanical disturbance) 更恰当。”

由各种变质作用形成的岩石称为变质岩，它们广泛分布于世界各地。变质岩、火成岩、沉积岩是组成地壳的三种基本岩石类型。但是变质地质学不仅研究变质岩石本身，因为变质作用的发生和发展具有较长的过程，包括变质作用的起始状态——主要是原岩建造的特征及形成时的大地构造背景；变质作用的进行状态——主要表现为变质相和相系以及变形特征；变质作用的终了及后续状态——主要是混合演化及相关的花岗质岩浆作用的特征 (董中保等, 1986)。

变质作用的研究经历了从静态到动态的思维发展过程，20 世纪 60 年代以前，人们把巴罗型作为定量评价野外变质梯度的唯一标准。Harker (1932) 把它与深度带的概念 (Grubenmann and Niggli, 1924) 并列，称为正常区域变质作用，这是当时最杰出工作，也是最权威理论。然而，这一概念表明区域变质作用发生在不随时间而变化的静态地热体制下，因此它代表研究变质作用的静态思维方法，是一种固定论 (fixism) 思想的反映。

从 20 世纪 60 年代开始，都城秋穗提出变质相系的概念 (Miyashiro, 1961)，把变质作用的研究与地质环境结合起来，奠定了变质地质学的基础，也标志着人们开始注意变质过程中热流的传递。变质相系指的是野外记录其温压梯度变化的一套矿物组合，在 $p-T$ 图上从高压到低压有不同的压力类型，因此，与纯由深度控制的认识不同。但是在这一概念中所提出的“地热梯度”代表一系列变质峰期条件的连线，相系之间的界线为一些单变反应曲线，而不代表变质条件的变化轨迹。因此，它对变质作用的认知还是属于静态思维的。自 70 年代以来，变质地质学得到了长足进展。主要体现在以下几个方面：①开展了世界范围内的小比例尺变质编图工作，以相组和相系为基础研究变质作用类型及其时空演化规律；②由于实验、测试技术的发展和热力学理论的完善，使得人们不仅可以很准确地估算变质作用的 $p-T$ 条件，而且可以在实验室中模拟任何天然变质反应；③以深入的显微结构分析为基础，探讨变质过程中结晶作用和变形作用之间的关系；④根据热传导理论和现代热力学的原理，正演和反演

变质作用的 $p-T-t$ 轨迹，研究变质作用的动力学过程及其与区域构造环境的联系（董中保和魏春景，1997）。特别需要指出的是，自 20 世纪 70 年代中期以来人们更多地注意到，在变质作用中一个变质地区并非是静态地热场，一系列变质带（相）并非是等时的（England and Richardson, 1977）。程裕淇（Cheng Y Q, 1986）还提出了同一变质旋回中多阶段变质作用的概念和实例。A. B. Thompson 和 P. C. England（1984）提出，一系列变质带是变质地带或构造单元在隆升过程中，上部岩层不断被剥蚀，地热梯度不断发生变化的动态下形成的，并提出了变质作用 $p-T-t$ 轨迹的概念。从而明确地把时间因素引入到不同时期变质作用的研究中来，使其主导思想发生由静态向动态的重大转变。变质作用 $p-T-t$ 轨迹是一个构造变质旋回中变质作用 $p-T$ 条件随时间演化的记录。通过该研究为阐明一个地区地球动力学过程提供了有效的途径。

变质地质图是反映地壳演化过程中变质作用特征及其时空变化规律的专门性图件。编制变质地质图的主要目的是了解各变质地区的变质作用特征和发展历史以及当时地壳中热流值的变化情况，并进一步从变质作用这一侧面阐述地壳演化和大地构造发展方面的某些规律。1986 年出版的 1:400 万中国变质地质图，系统总结了当时我国变质地质学研究的成果，探讨了我国不同地区、不同时代变质作用演化与地壳形成演化的规律，为我们奠定了良好的基础。本次研究以 1986 年 1:400 万中国变质地质图为基础，充分吸收 30 多年来我国在变质地质学研究中的新成果，以动态的角度探讨不同时期和不同变质地区的演化规律及其与大地构造的关系。

本次研究中变质相在 1986 年 1:400 万中国变质地质图划分的基础上，把蓝片岩相单独划分出来，并对麻粒岩相的类型进行了进一步划分，对不同变质相的典型矿物组合进行了补充。变质作用类型在原来的基础上根据区域变质作用类型与造山作用的关系进行了调整和改进，变质作用时代根据新的资料做了较大的调整，变质单元的划分则根据新的区域研究资料进行了新的划分。

第一章 变质相和压力类型

第一节 变质相和压力类型的基本定义

变质相和变质相的压力类型是变质作用研究和变质地质图表现的主要内容，通过它们可以反映变质作用的物理化学条件及变质作用发生的地质背景。

根据埃斯科拉的定义和近代研究的结果，一个变质相是自然界一系列不同成分的原岩在一定的 p - T 范围内，经变质作用形成的一套矿物共生组合。它们彼此紧密共生，基本处于平衡状态，矿物成分和原岩化学成分之间有着规律性的对应关系，并可在不同变质地区、不同地质时代重复出现，相互之间可以对比。每一变质相都有自己的特征矿物组合，与相邻变质相之间可以用特定的临界反应相区分（董申保等，1986）。如果说，变质相更多地反映的是变质作用的温度条件的话，那么变质作用的压力条件以往采用变质相组表示，为更直观地反映压力条件我们把温度条件和压力条件一起考虑，用相、型分别表示温度和压力类型，如低-中压麻粒岩相型表示变质温度达到麻粒岩相，压力条件为中低压的变质作用。在压力条件不确切的条件下，相型则代表温度高低的经典变质相，如麻粒岩相型。

关于变质相的划分及彼此区分的标志以及每一变质相的进一步划分以及压力类型的确定等问题，目前还存在不同的认识。本书的划分方案如表 1-1 所示。

表 1-1 变质相、变质相型特征简表

变质相	亚相/型/组合		特征矿物和共生矿物组合	变质的温度压力条件 ^①
亚绿片岩相	浊沸石相		浊沸石 $Lmt+Qtz$	$T=180\sim 250^{\circ}\text{C}$, $p<0.4\text{GPa}$
	葡萄石-绿帘石相		绿帘石, 葡萄石等 $B; Prh+Pmp+Chl+Ab+Qtz$	$T=250\sim 350^{\circ}\text{C}$, $p=0.2\sim 0.5\text{GPa}$
绿片岩相	中-低压型	绿帘石级 (绢云母-绿帘石组合)	绢云母, 绿帘石, 绿帘石, 雏晶黑云母+黑硬绿帘石, 阳起石, 钠长石, 黝帘石, 锰铝榴石等 $B^{\text{②}}: Ep+Act+Chl+Ab+Qtz$ $P^{\text{③}}: Chl+Ser+Ep+Qtz (\pm Ab)$ $P: Chl+Ms+Qtz (\pm Ab)$ $P: Bt (\text{初始晶})+Chl+Ser+Qtz$	$T=350\sim 450^{\circ}\text{C}$, $p=0.3\sim 0.8\text{GPa}$
		黑云母级	$B; Bt+Ms+Qtz+Ab+Act$ $P: Bt+Ser+Chl+Qtz (\pm Ab)$ $P: Ms+Ep+Pie+Ab+Qtz$ $P: Stp+Chl+Ms+Ep+Ab$	
		绿帘石-黑云母级	$P: Bt+Ser+Chl+Qtz (\pm Ab)$ $P: Ms+Ep+Pie+Ab+Qtz$ $P: Stp+Chl+Ms+Ep+Ab$	

续表

变质相	亚相/型/组合		特征矿物和共生矿物组合	变质的温度压力条件 ^①
绿帘角闪岩相	中-低压型		铁铝榴石, 普通角闪石, 绿帘石, 阳起石, 钠长石 B: Hbl+Ep+Ab ($\pm$ Bt, $\pm$ Qtz) P: Alm+Bt+Ms+Chl+Ser+Qtz P: Bt+Ep+Act+Ab+Qtz P: Cal+Dol+Tr+Di ($\pm$ Qtz)	$T=450\sim 560^{\circ}\text{C}$, $p=0.4\sim 1.0\text{GPa}$
角闪岩相	低压型	十字石-红柱石(堇青石)组合	十字石, 红柱石, 堇青石, 普通角闪石(黄绿色), 石榴子石, 斜长石 P: St+And+Bt+Ms+Qtz ($\pm$ Crd) B: Hbl+Pl (+Di) P: And+Bt+Ms+Qtz ($\pm$ Crd, $\pm$ Pl) P: St+Ath+Bt+Qtz ($\pm$ Pl) P: St+Crd+Bt+Ath+Pl	
	中压型	十字石-蓝晶石组合	十字石, 蓝晶石, 石榴子石, 普通角闪石(蓝绿色) B: Hbl+Pl+Di P: Alm+Sil+Bt+Ms+Qtz P: Ky+Grt+Bt+Qtz	高于泥质岩饱和水固相线开始深熔条件: A: $T=550\sim 650^{\circ}\text{C}$, $p=0.4\sim 1.0\text{GPa}$ B: $T=650\sim 700^{\circ}\text{C}$, $p=0.4\sim 1.0\text{GPa}$
	低-中压型(未分)		夕线石, 钾长石, 硅灰石, 普通角闪石(蓝绿色-棕黄色), 蓝晶石 B: Hbl+Di+Pl ($\pm$ Alm) B: Hbl+Alm $\pm$ Bt+Pl+Qtz P: Sil+Alm+Bt+Kfs+Qtz P: Crd+Alm+Bt+Qtz+Pl P: Cal+Dol+Di+Fo+Qtz P: Crd+Bt+Ky+Cum+Pl+Qtz	
麻粒岩相	中-低压型		斜方辉石, 单斜辉石, 夕线石, 钾长石, 斜长石, 富铁黑云母, 普通角闪石, 堇青石 B: Hy+Di+Pl ($\pm$ Bt $\pm$ Hbl) B: Hy+Di+Alm+Pl P: Sil+Alm $\pm$ Bt+Kfs (条纹)+Pl+Qtz P: Crd+Sil+Bt+Pl+Qtz P: Crd+Spl+Pth+Qtz (低压)	存在广泛的深熔脉体, $T=700\sim 900^{\circ}\text{C}$, $p=0.3\sim 1.0\text{GPa}$
	高压型		夕线石, 钾长石(条纹), 斜方辉石, 蓝晶石, 斜长石 B: Alm+Di (硬玉质)+Pl+Qtz P: Ky+Kfs (条纹)+Alm+Qtz P: Sil+Alm+Kfs (条纹)+Pl+Qtz	有深熔, $T=700\sim 900^{\circ}\text{C}$, $p=1.0\sim 2.0\text{GPa}$
	超高温型		夕线石, 钾长石, 富锌尖晶石, 假蓝宝石, 大隅石, 石英 P: Sil+Kfs+Zn-Spl+Qtz P: Spr+Sil+Kfs+Qtz P: Spr+Sil+Osu+Qtz	广泛深熔, $T>900^{\circ}\text{C}$
蓝片岩相	高压型	低温亚型(蓝闪石-绿帘石组合)	青铝闪石, 绿帘石, 阳起石, 钠长石, 冻蓝闪石, 黑硬绿泥石, 蓝闪石 B: Ep+Gln+Chl+Qtz+Ab+Di (硬玉质) B: Crs+Act+Chl+Ab $\pm$ Bt P: Crs+Ep+Ms+Qtz+Ab P: Crs+Ep+Stp+Ab (+Chl) P: Crs+Ms+Chl+Qtz (+Alm $\pm$ Bt) P: Crs+Brs+Ep+Phg+Stp+Chl+Ab+Qtz	$T=450\sim 550^{\circ}\text{C}$, $p=0.8\sim 2.0\text{GPa}$

续表

变质相	亚相/型/组合		特征矿物和共生矿物组合	变质的温度压力条件 ^①
蓝片岩相	高压型	中温亚型（硬柱石-蓝闪石组合）	蓝闪石，硬柱石，绿帘石，硬绿泥石，钠长石，多硅白云母 B: Gln+Cld+Ep+Ab (+Qtz) P: Gln+Cld+Ep+Qtz (+Ab) B: Lws+Gln+Cld+Qtz+Ab/Di (硬玉质) P: Phg+Cld+Pg+Qtz ($\pm$ Pmp) P: Lws+Cld+Qtz+Ab	$T=200\sim 450^{\circ}\text{C}$, $p=0.6\sim 2.0\text{GPa}$
榴辉岩相	高压-低温型		以出现蓝闪石榴辉岩为特征，绿辉石，蓝闪石，柯石英等。镁铝榴石，硬柱石，多硅白云母，石英，钠云母。 B: Prp+Omp+Lws+Gln+Phg+Qtz/Coe P: Prp+Cld+Pg+Phg+Qtz (+Chl)	$T<600^{\circ}\text{C}$, $p>1.5\text{GPa}$ 地温梯度约 $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 最小 $3^{\circ}\text{C}/\text{km}$
	超高压-中温型		以出现蓝晶石榴辉岩为特征，绿辉石，镁铝榴石，蓝晶石，多硅白云母，柯石英，文石	$T=600\sim 700^{\circ}\text{C}$, $p>1.5\text{GPa}$ 与周围的片麻岩伴生
	超高压-高温型		以含石榴子石的地幔二辉橄榄岩为特征；透辉石、镁铝榴石、橄榄石、柯石英、金刚石、菱镁矿	$T>900^{\circ}\text{C}$, 来源深度可达 300km

①表中中温压条件仅供参考；②B：基性岩；③P：泥质岩，本书中的矿物缩写和矿物名称见附表1。

第二节 各变质相和变质相型的基本特征

1. 亚绿片岩相

相当于温克勒（1976）分类中的极低级变质，其中包括浊沸石相和葡萄石-绿纤石相。浊沸石相属于变质作用的最初始阶段，常与成岩作用有过渡关系，葡萄石-绿纤石相温度稍高，两者经常伴生，彼此不易区分。我国极低级变质带（区）分布非常广泛，如年轻造山带、特提斯带、古老造山带前陆逆冲-褶皱带、大型沉积盆地等的内部，都有大面积的遭受过极低级变质作用的地带或地体（毕先梅等，1998）。有的学者根据伊利石结晶度将极低级变质作用进一步划分为：晚期成岩带（伊利石结晶度 $1.0\sim 0.42$ ，温度上限 200°C ）、低级近变质带（伊利石结晶度 $0.42\sim 0.30$ ，温度上限 300°C ）和高级近变质带（伊利石结晶度 $0.30\sim 0.25$ ，温度上限 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ ）（Frey and Robinson, 1999；毕先梅和莫宜学，2004；胡大千等，2009）。但是由于缺乏对极低级变质作用重要性的认识和缺乏对极低级变质标志的识别能力和研究手段，目前对极低级变质岩的研究程度还非常薄弱，因此本次研究并未对极低级变质相进行详细的划分。

2. 中低压型绿片岩相

绿片岩相属于低温变质相，相当于温克勒（1976）分类中的低级变质，以基性岩中出现钠长石+帘石+绿泥石 $\pm$ 阳起石为特征。绿片岩相的变质压力条件通常为中低压，因此称为中低压型绿片岩相。中低压型绿片岩相可以根据矿物组合进一步划分为三个带（级），绢云母-绿泥石带，以基性岩中出现 $\text{Ep}+\text{Act}+\text{Chl}+\text{Ab}\pm\text{Qtz}$ 组合、泥质岩石中出现 $\text{Chl}+\text{Ser}+\text{Ep}+\text{Qtz}$ ($\pm\text{Ab}$) 为标志；黑云母带，以基性岩中出现 $\text{Bt}+\text{Ms}+\text{Qtz}+\text{Ab}+\text{Act}$ 、泥质岩石中出现 $\text{Bt}+\text{Ser}+\text{Chl}+\text{Qtz}$ ($\pm\text{Ab}$) 为标志；绿泥石-黑云母级，以在泥质岩石中出现 $\text{Bt}+\text{Ser}+\text{Chl}+\text{Qtz}$ ($\pm\text{Ab}$) 和 $\text{Ms}+\text{Ep}+\text{Pie}+\text{Ab}+\text{Qtz}$ 组合为标志。由于中低压型绿片岩相中的不

同变质级出露分布有限,因此在1:500万变质地质图上难以表示,但在区域变质地质图上可以表示出来。

3. 绿帘角闪岩相

绿帘角闪岩相属于中-低温变质相,变质压力通常为中-低压。以基性岩中出现 $\text{Hbl} + \text{Ep} + \text{Ab} (\pm \text{Bt}, \pm \text{Qtz})$ 组合为特征,在变质泥质岩石中通常出现 $\text{Alm} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Chl} + \text{Ser} + \text{Qtz}$ 的组合。关于绿帘角闪岩相的地位目前仍存在不同认识,一般认为它处于角闪岩相与绿片岩相的过度地位,但是有的文献将其单独划分出来作为一个独立的变质相,但是有的文献则以据十字石的出现作为绿片岩相与角闪岩相的界线,而将其划分为高绿片岩相(董申保等,1986)。由于其变质的温度条件比通常的绿片岩相要高,所以我们仍将其单独划分出来。

4. 角闪岩相

角闪岩相属于中温到中高温变质相,相当于温克勒(1976)分类中的中级变质作用类型。角闪岩相的变质作用的压力条件可以是中低压的,也可以是中压的,所以划分为低压型角闪岩相和中压型角闪岩相两类。对于基性岩来说,低压型角闪岩相和中压型角闪岩相都以普通角闪石+斜长石为典型的组合。对于泥质岩来说,低压型角闪岩相以 $\text{St} + \text{And} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Qtz} (\pm \text{Crd})$ 和 $\text{And} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Qtz} (\pm \text{Crd}, \pm \text{Pl})$ 的组合为代表,中压型角闪岩相则以 $\text{Ky} + \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Qtz} (\pm \text{Sil})$ 和 $\text{Alm} + \text{Sil} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Qtz}$ 组合为代表。其中最主要的区别是在低压型角闪岩相条件下, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 多型体以出现压力较低的红柱石和夕线石为特点,而在中压型角闪岩相条件下, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 多型体则以形成压力较高的蓝晶石为代表。有的时候,变质的压力条件难以确定,则用中-低压型角闪岩相来表示。按照温度条件,角闪岩相还可以进一步划分为十字石-红柱石带、十字石-蓝晶石带和夕线石-钾长石带。前两个带可以称为低角闪岩相,后一个带可以称为高角闪岩相。由于夕线石的形成除了温度条件之外还有其他因素(Kerrick, 1990; 周喜文, 2001; McLelland et al., 2002; 任留东等, 2009),因此在划分高角闪岩相(夕线石-钾长石带)应格外小心。

5. 麻粒岩相

麻粒岩相属于高温变质相,相当于温克勒(1976)分类中的高级变质作用类型。以往主要以基性岩中出现紫苏辉石或二辉石组合为标志,但泥质岩石中缺少确切的标志。通常把麻粒岩相的变质岩石作为古老变质基底的高级变质岩组合,并没有进一步划分,同时对造山带中的麻粒岩相岩石也少有研究。近些年来先是在华北克拉通范围陆续发现了高压的麻粒岩(王仁民等, 1991; 翟明国等, 1992; 耿元生等, 1994; 刘树文等, 1996; 李江海等, 1998; 郭敬辉等, 1998; 刘文军等, 1998; 毛德宝等, 1999; 魏春景等, 2001; 钟长汀等, 2001; 周喜文等, 2004, 2010; O'Brien et al., 2005), 后又在华北克拉通的北缘发现有超高温的麻粒岩(郭敬辉等, 2006; 刘守偈和李江海, 2007; Santosh et al., 2007a, 2009a), 同时在一些造山带中也发现有高压麻粒岩出露(刘良和周鼎武, 1996; 丁林和钟大赉, 1999; 李德威等, 2002; 王润三等, 2003; 郭坤一等, 2003; 厉子龙等, 2004; 张建新等, 2007; 魏春景等, 2008; 曹玉亭等, 2009; Zhang Z M et al., 2010)。

根据以上进展本次研究将麻粒岩相分为以下三种类型。

中低压型麻粒岩相:即通常所说的麻粒岩相,它以基性岩中出现 $\text{Hy} + \text{Di} + \text{Pl} \pm \text{Hbl} \pm \text{Bt}$ 、 $\text{Hy} + \text{Di} + \text{Grt} + \text{Pl}$, 泥质岩中出现 $\text{Sil} + \text{Alm} \pm \text{Bt} + \text{Kfs}$ (条纹) $+ \text{Pl} + \text{Qtz}$ 、 $\text{Crd} + \text{Sil} + \text{Bt} + \text{Pl} + \text{Qtz}$ 为标