

中国显生宙造山带麻粒岩相高级变质岩石的地质特征、变质时代、 $P-T$ 轨迹及其形成的大地构造背景*

沈其韩 耿元生 宋会侠

SHEN QiHan, GENG YuanSheng and SONG HuiXia

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

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

2014-01-16 收稿, 2014-02-28 改回.

Shen QH, Geng YS and Song HX. 2014. Geological characters, metamorphic ages, $P-T$ paths and their tectonic settings of the granulites in Phanerozoic orogens, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10):2777–2807

Abstract In this paper, geological characters, rock types, $P-T$ path, metamorphic ages and tectonic setting of the granulites in Phanerozoic orogens in China are chiefly introduced. Phanerozoic orogens in China mainly include western Kunlun Orogen, eastern Kunlun Orogen, Altun Tagh-North Qaidam orogen, Altay Orogen, northern Qinling Orogen, Mianlüe in southern Qinling Orogen, eastern Qinling-Tongbai-Dabie Orogen, southwestern Tianshan-southern Tianshan Orogen, Bangong Co-Nujiang Orogen in Tibet and mid-eastern segment of Himalaya Orogen. The country rocks of the granulites in Phanerozoic orogen are most of ophiolite suite or ophiolitic mélange belt partly of paragneiss, granitic gneisses, and they experienced granulite facies metamorphism together. There is usually one type of high pressure granulite in an orogen and some of them are coexistence of eclogite. But in one or two orogens, there are several types of high pressure granulites. Such as in Altay Orogen, there are not only low-high pressure pelitic granulites, high pressure mafic granulites and felsic granulites, mid-low pressure mafic granulites, but also high pressure-ultra high pressure pelitic granulites. A few of the metamorphic ages of the granulites are Late Neoproterozoic and others are Caledonian, Hercynian, Indo-China, Yanshan and Himalayan. As for the $P-T$ paths, most of them are clockwise paths and have isothermal decompressional characters that indicate an oceanic-continental subduction-collision tectonic setting except Muzart low pressure granulite in southwestern Tianshan orogen who has a counterclockwise path that indicate probably a continental arc collision tectonic setting. Further more, studies on granulites in Phanerozoic orogens are on their infancy at present and some of them have been detailly researched but most of them are not clear and waiting for deep study.

Key words Orogen; High-pressure granulite; Metamorphic age; $P-T$ path; Tectonic setting

摘要 本文重点介绍我国显生宙造山带中麻粒岩的地质特征、岩石类型、 $P-T$ 轨迹、变质时代及其形成的大地构造背景。我国显生宙造山带主要包括阿尔泰造山带、南天山-西南天山造山带、西昆仑造山带、东昆仑造山带、阿尔金-柴北缘造山带、北秦岭造山带、南秦岭勉略造山带、东秦岭-桐柏-大别造山带、班公湖-怒江造山带和喜马拉雅中东段造山带。这些造山带中麻粒岩的围岩有许多为蛇绿岩套或蛇绿混杂岩带,部分为副片麻岩和花岗质片麻岩,并一起经历了麻粒岩相变质改造,造山带中大多出现一种高压麻粒岩,有的与榴辉岩并存,但少数造山带中(例如阿尔泰造山带)多种压力类型麻粒岩并存,既有低-高压泥质麻粒岩、中低压基性麻粒岩、高压基性和长英质麻粒岩,又有高温-超高温泥质麻粒岩。变质时代除个别为新元古代晚期外,变质时间多为加里东、海西、印支、燕山、喜山期。麻粒岩的 $P-T$ 轨迹除西天山木札尔特河低压麻粒岩具逆时针轨迹,反映大陆弧构造环境外,其它都是具有等温降压(ITC)特点的顺时针轨迹,形成的大地构造环境大部分为洋陆俯冲碰撞环境,少部分为陆-陆碰撞环境。目前显生宙造山带中麻粒岩的研究大多数尚在起步阶段,少数研究较详细,不少造山带中麻粒岩的类型和变质时代以及形成的构造背景还不清楚,有待深入研究,新的麻粒岩产地有待发现。

关键词 造山带; 高压麻粒岩; 变质时代; $P-T$ 轨迹; 大地构造背景

中图法分类号 P541; P588.347

* 本文受中国地质调查局工作项目(1212010811048)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,主要从事前寒武纪及变质地质研究

以往一般认为麻粒岩主要见于前寒武纪克拉通基底,是下地壳岩石的代表。近年来在我国中西部地区的显生宙造山带中不断发现麻粒岩,麻粒岩的分布已突破早前寒武纪克拉通的范围,而且岩石类型和压力类型多样、变质期次多,从加里东期一直到喜山期都有出现。它们与造山带的形成紧密相关。所以研究显生宙造山带中的麻粒岩具有重要的地质意义。本文在前人工作的基础上,收集整理近20年来中部和西部显生宙造山带中麻粒岩的有关资料,重点对其地质特征、岩石性质和压力类型、变质演化、 $P-T$ 轨迹、变质时代以及形成的大地构造背景加以综合分析,并与早前寒武纪的麻粒岩做一简略对比,找出共性及其差异,对目前显生宙造山带麻粒岩研究中存在的问题也提出一些工作建议。

由于资料甚多,收集难免有遗漏,应用前人资料可能理解不够,应用不够恰当,甚至有错误的地方,敬请批评指正。

1 定义

本文所指的麻粒岩主要根据国内高校教科书和1986年国内首次编制的1:400万变质地质图对麻粒岩所下的定义,即“形成于麻粒岩相条件下的含有紫苏辉石等高温变质矿物组合的特定岩石”。其基本特征是以出现斜方辉石为标志,岩石主要由无水矿物组成,可出现少量黑云母和普通角闪石,并具有麻粒岩结构(粒状变晶结构)。麻粒岩相变质的岩石是指岩石经历的变质作用已达麻粒岩相,但其岩石的结构构造特征仍明显具有片状或片麻状特征,按变质岩石学分类与命名原则,应仍命名为片岩或片麻岩,不能称为麻粒岩。近年来,国内外不少研究者将经历了麻粒岩相变质的各种岩石,不论其结构构造如何,统称为麻粒岩。为此,翟明国和刘文军(2001)曾建议将麻粒岩定义为“形成于麻粒岩相条件下的具有高温矿物的各种变质岩”。作者等认为“麻粒岩”是一种特定的变质岩石学名词,含义不宜扩大化。命名应遵循变质矿物+结构构造的原则。但不少国内外学者的文章中,已突破了原有的变质岩石学的命名框架,采用了扩大的命名,我们在进行综合研究时尽可能尊重原作者的“高压泥质麻粒岩”、“超高温泥质麻粒岩”的提法,但尽可能注明其原有的岩石学名称,如石榴夕线蓝晶(条纹/反条纹长石)片麻岩或含假蓝宝石蓝晶夕线斜长片麻岩等。

显生宙造山带中的麻粒岩,不少为高压麻粒岩,个别石榴辉石岩也归入麻粒岩类。研究高压麻粒岩,首先要明确高压麻粒岩的概念和定义。目前,国内外对高压麻粒岩的概念和定义存在一些分歧,对此,翟明国(2009)和赵国春(2009)都曾进行过专门的讨论。翟明国(2009)在讨论中似乎更强调在含石英拉斑玄武岩成分的基性麻粒岩中石榴子石的出现与否来定义高压麻粒岩,将高压麻粒岩的 $P-T$ 界限定位在石榴子石出现在石英拉斑玄武岩成分的矿物反应线之上和斜长石消失在石英拉斑玄武岩成分的矿物反应线之下的温压范围。按照这一定义,高压基性麻粒岩基本上与石榴基性

麻粒岩同义。Carswell and O'Brien (1993)也曾提出将石榴麻粒岩来代替高压麻粒岩的用法。华北克拉通基底基性麻粒岩中大部分含有石榴子石,这样大部分基性麻粒岩将归为高压麻粒岩,这将扩大高压麻粒岩的范围,不利于把问题理清。所以,我们不主张采用这一定义。国外,Green and Ringwood (1967)很早提出了高压麻粒岩的定义:各种玄武质岩石的实验结果表明,在辉长岩或辉石麻粒岩与榴辉岩之间,存在以石榴子石+单斜辉石+斜长石+石英为特征的矿物组合,把这一组合定义为高压麻粒岩。O'Brien and Rötzler (2003)也明确地提出了高压麻粒岩的定义:基性岩具有典型石榴子石+单斜辉石+斜长石+石英的矿物组合,缺失斜方辉石为特征;变泥质岩石和长英质岩以具有典型蓝晶石+钾长石(高温三元长石-中条纹长石)为特征。赵国春(2009)更倾向于这个定义,我们也完全赞同这个定义。这也是国外一些教科书所采用的高压麻粒岩的定义。如目前国外很多大学地球科学系所使用的Yardley (1989)所编的变质岩石学教科书“An Introduction to Metamorphic Petrology”确定的低压基性麻粒岩、中压基性麻粒岩和高压基性麻粒岩主要的矿物组合是:

(1) 低压基性麻粒岩:斜方辉石+单斜辉石+斜长石+石英,以斜方辉石的出现和石榴子石不出现为特征;

(2) 中压基性麻粒岩:石榴子石+斜方辉石+单斜辉石+斜长石+石英;

(3) 高压基性麻粒岩:石榴子石+单斜辉石+斜长石+石英。

这与O'Brien and Rötzler (2003)的定义完全一致。因此,高压基性麻粒岩是以斜方辉石的消失为特征,而不是以石榴子石的出现为特征,后者是中压基性麻粒岩的标志。随着压力的升高,高压基性麻粒岩中斜长石将会最终消失而转变为榴辉岩。

关于超高温麻粒岩,主要采用Harley (1989)的定义。显生宙造山带只在阿尔泰造山带中出现超高温麻粒岩,以尖晶石+石英组合为主要的典型矿物组合。

显生宙造山带大部分分布于我国的中西部地区,时代差别较大。经近年来的研究,在这些造山带中不断发现有麻粒岩的出露,主要包括中、低压基性麻粒岩和泥质麻粒岩、高压基性麻粒岩,个别造山带中发现超高温泥质麻粒岩。不少造山带中多种麻粒岩类型并存或与榴辉岩并存,有的经榴辉岩相变质后退变为麻粒岩。总体上高压麻粒岩出露的比例更大。以下根据造山带的出露位置(图1),按由北向南,由西向东的顺序分别介绍各个造山带中麻粒岩产出的地质特征及其分布。中、西部显生宙造山带中赋存麻粒岩的位置见图1。

2 显生宙造山带麻粒岩的地质特征及其分布

2.1 新疆阿尔泰造山带麻粒岩

阿尔泰造山带是中亚巨型造山带中的一条,该造山带不仅构造活动、变质作用和岩浆活动非常复杂,而且是一条举

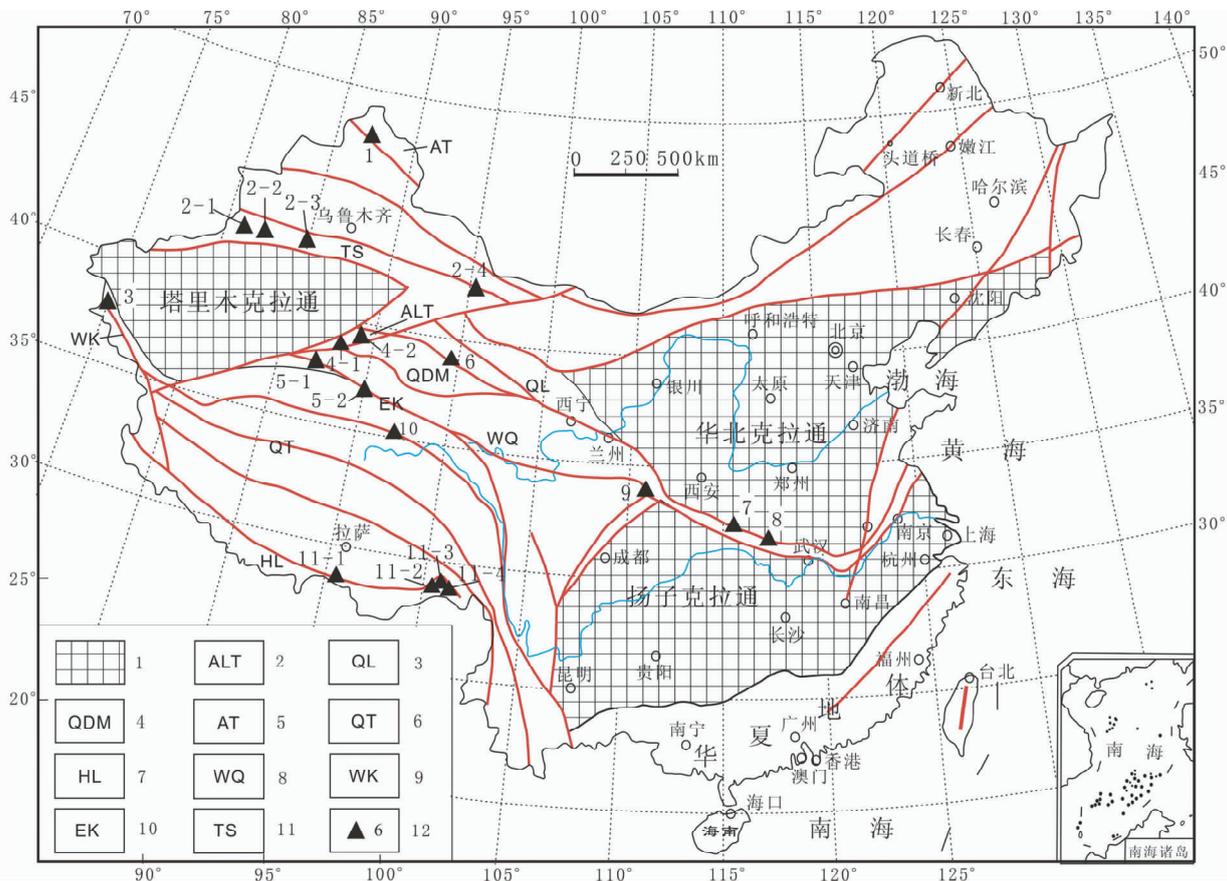


图1 中国显生宙造山带麻粒岩分布图

1-克拉通;2-阿尔金造山带;3-祁连山地体;4-柴达木地体;5-阿尔泰造山带;6-羌塘地体;7-喜马拉雅造山带;8-西秦岭造山带;9-西昆仑造山带;10-东昆仑造山带;11-天山造山带;12-造山带中麻粒岩出露位置及其编号;1: 新疆阿尔泰造山带麻粒岩,2-1: 西南天山造山带阿吾拉勒西段麻粒岩,2-2: 西南天山造山带木扎尔特河低压麻粒岩,2-3: 南天山造山带榆树沟高压基性麻粒岩,2-4: 东天山尾亚麻粒岩,3: 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩,4-1: 阿尔金造山带吐拉地区低压泥质麻粒岩,4-2: 阿尔金造山带淡水泉和巴什瓦克地区高压麻粒岩,5-1: 东昆仑造山带金水口地区麻粒岩,5-2: 东昆仑造山带清水泉地区麻粒岩,6: 柴北缘东端都兰地区高压麻粒岩,7: 北秦岭造山带松树沟高压麻粒岩,8: 秦岭桐柏-大别造山带麻粒岩,9: 南秦岭造山带勉略地区麻粒岩,10: 西藏班公湖-怒江造山带安多高压麻粒岩,11-1: 西藏喜马拉雅造山带中段则古拉地区,11-2: 西藏喜马拉雅造山带定结县一带和日屋地区的麻粒岩,11-3: 喜马拉雅造山带东构造结南迦巴瓦地区的高压麻粒岩,11-4: 西藏喜马拉雅造山带日玛那地区高压麻粒岩

Fig.1 The distribution diagram of granulites in Phanerozoic orogen, China

1-craton; 2-Altyntagh orogen; 3-Qilian terrane; 4-Qaidam terrane; 5-Altay orogen; 6-Qiangtang terrane; 7-Himalayan orogen; 8-western Qinling orogen; 9-western Kunlun orogen; 10-eastern Kunlun orogen; 11-Tianshan orogen; 12-the locations with numbers of granulite: 1: the granulite in the Altay orogen, 2-1: the granulite west part of Awulale area of west Tianshan orogen, 2-2: the HP mafic granulite in Yushugou area of southern Tianshan orogen, 2-3: the LP granulite in Muzhaerte River area of southern Tianshan orogen, 2-4: the granulite in Weiya area of east part of Tianshan orogen, 3: the HP granulite within Tazekurgan area of western Kunlun orogen, 4-1: the LP pelitic granulite in Tula area of Altyntagh orogen, 4-2: the HP pelitic granulite in Danshuiquan area of Altyntagh orogen, 5-1: the granulite in Jinshuiou area of eastern Kunlun orogen, 5-2: the granulite in Qingshuiquan area of eastern Kunlun orogen, 6: the HP granulite in south Dulan area of east part of Altyntagh orogen, 7: the HP granulite in the Songshugou area of northern Qinling orogen, 8: the granulite in Tongbai-Dabie area of eastern Qinling orogen, 9: the granulite in Mianlüe area of southern Qinling orogen, 10: the HP granulite in Anduo area of Bangong Co-Nujiang orogen, Tibet, 11-1: the HP granulite in Zherger-La area of central segment of Himalayan orogen, Tibet, 11-2: the HP granulite in some places closed to Dingjie County and Riwu area of Himalayan orogen, Tibet, 11-3: the HP granulite in east syntaxis and Namjagbarwa area of Himalayan orogen, Tibet, 11-4: the HP granulite at Rimana in the Central segment of Himalayan orogen, Tibet

世闻名的多金属矿带。麻粒岩作为造山带中一种重要岩石类型的发现,具有十分重要的构造指示意义。据陈汉林等(2006)、Chen *et al.* (2006)、魏春景等(2008)、王伟等(2009)、厉子龙等(2004, 2010)的研究,阿尔泰造山带中发现多种类型的麻粒岩,包括低压泥质麻粒岩、中低压和高压基性麻粒岩以及含尖晶石和石英组合为特征的超高温麻粒岩。低压泥质麻粒岩由各种片麻岩组成,是造山带南部的主

体。据陈汉林等(2006)研究,基性麻粒岩见于富蕴县城东乌恰沟一带,发育于早泥盆世康布铁组地层中。该处麻粒岩体从北东侧破碎带开始至西南侧花岗片麻岩为止长有117m左右,呈透镜状产出,其周围出露的岩石主要为早泥盆世康布铁组中低级变质地层,其产状为NW-SE走向,向北东倾斜,麻粒岩的出露面积大于35000m²,其北侧以断层破碎带与花岗片麻岩和角闪斜长片麻岩呈断层接触,而与东侧的花岗片

麻岩呈突变接触关系,典型的二辉麻粒岩出现在麻粒岩体的两侧,可分为粗粒和细粒两类,它们呈渐变过渡关系。高压基性麻粒岩分布于琼库尔-阿巴官地块中,呈透镜状产于中低压变质岩岩石中,长可达 119m 左右。在阿尔泰南缘,超高温麻粒岩——尖晶石夕线紫苏斜长片麻岩出露于富蕴乌恰沟的角闪岩相-麻粒岩相带中,该带由角闪斜长片麻岩、基性麻粒岩、变质辉长岩、花岗质片麻岩、变细晶岩和钙硅碳酸盐岩等组成,超高温麻粒岩呈透镜状产于围岩黑云斜长片麻岩、石榴黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩中。同时在超高温麻粒岩分布区还发育了后期细晶岩脉,它与麻粒岩一起遭受了后期的变形改造,岩石变形强烈,在石榴斜长片麻岩中可见有同斜小褶皱和构造透镜体。

2.2 天山造山带麻粒岩

天山是横亘中亚的世界最长的东西向山系,也是中亚造山带的重要组成部分。在西部主要由北天山缝合带、南天山缝合带和夹持于其中的伊犁-中天山板块组成,向东随着伊犁-中天山板块的消失,北天山缝合带和南天山缝合带逐渐合并。在西部,天山造山带中的麻粒岩主要出露伊犁地块东部的阿吾勒,南天山缝合带木扎尔特河、榆树沟等地区;在东部则出露在尾亚等地。

2.2.1 西天山阿吾勒西段麻粒岩

阿吾勒山位于西天山的北天山伊犁地区的东部,麻粒岩相地层仅出露于伊犁河北岸水汗巴斯陶附近,受东西断裂控制,出露面积约 2.0km²。低压麻粒岩相的片麻状黑云透闪紫苏斜长麻粒岩和片麻岩产于新元古代晚期的特克斯群中,与各种片麻岩和变粒岩呈互层状产出。麻粒岩相片麻岩的原岩为杂砂岩,具有近源、快速沉积的特点(Gao *et al.*, 1999; 张立飞等, 2000; 张立飞, 2007; 李继磊等, 2009)。

2.2.2 西南天山木扎尔特河一带低压麻粒岩

据李强和张立飞(2004)、苟龙龙和张立飞(2009)等人的研究,在西南天山高压-超高压变质带的北部,南起长阿吾子断裂,北至阿登布拉克断裂的西南天山木扎尔特河地区的高级变质岩大致可以分为三类:片麻岩类、斜长角闪岩类和麻粒岩类。麻粒岩类主要为二辉麻粒岩,以透镜状包体形式出现在堇青石榴夕线片麻岩中,后者已达低压麻粒岩相,这与高压-超高压变质带平行的低压高温变质带组成了一组双变质带(张立飞等, 2005)。

2.2.3 南天山榆树沟高压-中压麻粒岩

据周鼎武等(2004)、王焰等(1999)和王润三等(1998, 2003)的研究,榆树沟麻粒岩地体出露于新疆托克逊县的南天山榆树沟地区,它是南天山北缘众多镁铁质-超镁铁质杂岩体之一。地体长十余千米,宽 1~3 千米,呈北西-南东向展布的透镜状冲断构造岩片。榆树沟麻粒岩地体由 4 个岩石单元组成:

(1) 变质橄榄岩单元,出露最大宽度为 800m,主体由尖晶石二辉橄榄岩组成,其中夹有多层尖晶斜长二辉岩,单层

厚度 5~10cm 不等;

(2) 二辉麻粒岩单元,出露宽度 80m 左右,主要由尖晶斜长二辉麻粒岩组成,原岩为一套超镁铁质-镁铁质堆晶岩;

(3) 石榴辉石麻粒岩单元,最大宽度 252m,主要由(角闪)斜长石榴辉石岩和斜长角闪岩组成;

(4) 中基性麻粒岩互层单元,出露最大宽度 226m,主要组成岩石包括(角闪)斜长石榴辉石岩和斜长石榴二辉麻粒岩,原岩为拉斑玄武岩以及各种副片麻岩和大理岩。

以上单元中变质岩的原岩经历了麻粒岩相变质作用改造,后期强烈变形和后期多次叠加变质改造的蛇绿岩套(古洋壳残片)。

2.2.4 天山造山带东段尾亚地区麻粒岩

天山东段哈密东南约 140km 的尾亚地区,出露一套角闪岩相-麻粒岩相变质岩,称为星星峡群。其主要岩性组合为斜长片麻岩、角闪岩、云母片岩、长英质片麻岩、硅质大理岩等,岩石呈东西向展布,片理和片麻理向南倾斜,局部发生揉皱和挠曲。麻粒岩的主要岩性为黑云紫苏麻粒岩、石榴透辉麻粒岩、二辉麻粒岩等,具条带状构造;麻粒岩一般呈透镜状,断断续续出露在片麻岩和片岩中,宽 1~2m 到大于 10m,长约数十米到数百米,其长轴都平行于片理和片麻理,与围岩的关系为构造接触(陈义兵等, 1997)。在卡瓦布拉克-星星峡中间地体的彩霞山地区(新疆鄯善县境内),在黑云斜花岗岩和石英闪长岩中见有二辉石麻粒岩的捕虏体。温度压力计算表明,它们属于中压麻粒岩相岩石(梁婷等, 2006)。

2.3 西昆仑造山带塔什库尔干高压麻粒岩

据郭坤一等(2003)和杨坤光等(2003)的研究,西昆仑造山带北邻塔里木地块,南接喀喇昆仑-羌塘地块,位于古亚洲构造域与特提斯构造域的交界部位。一般认为西昆仑造山带包含北昆仑地体、南昆仑地体和甜水井地体,南、北昆仑地体之间为库地蛇绿岩,南昆仑地体与甜水井地体之间为康西瓦构造带(Xiao *et al.*, 2005; 张传林等, 2007; Yang *et al.*, 2010)。该造山带的麻粒岩主要出露在康西瓦构造带中。

董永观等(2001)首次在西昆仑艾德瓦地区发现退变麻粒岩相变质岩,随后郭坤一等(2003)和杨坤光等(2003)在西昆仑康西瓦发现石榴二辉麻粒岩。石榴石二辉麻粒岩呈团块状产于康西瓦北侧的夕线石榴片麻岩中(类似孔兹岩系),该套地层上部被泥盆纪砾岩不整合覆盖。岩石的主要矿物成分包括石榴子石、紫苏辉石、单斜辉石、斜长石、石英、黑云母等,石榴子石在岩石中分布不均。围岩为石榴夕线片麻岩,其主要变质矿物组合为石榴子石+夕线石+(透辉石)+石英+斜长石+(钾长石)+(蓝晶石)+黑云母,岩石经历了中、低压麻粒岩相变质作用。另据曲军锋等(2007)研究,在塔什库尔干北康西瓦构造线一侧发现高压麻粒岩,产于塔什库尔干县城以北 15km 旧水电站附近,呈透镜体(一般长 30~50cm,宽 20~40cm)分布于石榴斜长角闪岩中,与构造混杂岩为断层接触关系,高压麻粒岩中石榴子石具“白眼

圈”结构,目前仅在这一个点发现高压麻粒岩。

2.4 阿尔金造山带中的麻粒岩

阿尔金造山带主要是一个高压-超高压变质带,分布于阿尔金走滑断裂带以北。高压-超高压变质岩石(包括麻粒岩)主要呈透镜体状分布在西段的吐拉、江孜勒萨依,中段的淡水泉和清水泉北的英格利萨依-巴什瓦克地区的阿尔金岩群之中。南阿尔金木纳布拉克地区的高压泥质麻粒岩主要见于原划分的长城系(?)红柳泉地层中。车自成等(1995)最早在南阿尔金地区发现高压泥质麻粒岩。

2.4.1 吐拉地区中低压泥质麻粒岩

据张建新等(1999)的研究,在阿尔金造山带的西段,吐拉一带出露有中低压泥质麻粒岩-含石墨夕线石榴黑云片麻岩和基性麻粒岩,基性麻粒岩呈透镜状或薄层状产于夕线石榴黑云二长片麻岩中,后者相当于孔兹岩系。在吐拉西侧二十余千米范围内呈东西向分布,其南侧被 NEE-SWW 向的阿尔金主断层所切割。孔兹岩系已经历了麻粒岩相变质作用,原岩形成于大陆边缘环境。基性麻粒岩的原岩可能为大陆拉斑玄武岩。

2.4.2 淡水泉地区的高压泥质麻粒岩

据曹玉亭等(2009)的研究,在阿尔金造山带南缘淡水泉地区出露的石榴蓝晶石黑云母片麻岩是一套典型的高压泥质麻粒岩。该造山带由北向南依次划分为四个构造单元:阿北变质地体,红柳沟-拉配泉构造混杂岩带、米兰河-金雁山地块和阿帕-茫崖构造混杂岩带。“高压泥质麻粒岩”赋存于阿帕-茫崖构造混杂岩带,在穿过阿尔金群的淡水泉剖面中,主要有含石榴子石蓝晶石黑云母片麻岩、长英质片麻岩与大理岩,其中含蓝晶石的各种片麻岩比较发育。石榴辉石岩或石榴角闪岩(退变榴辉岩?)呈透镜状分布在这些片麻岩之中。

2.4.3 阿尔金中段清水泉北巴什瓦克高压麻粒岩

据张建新和孟繁聪(2005)、张建新等(2009)的研究,阿尔金高压麻粒岩出露在阿尔金中段的若羌南英格利萨依-巴什瓦克一带,相距榴辉岩出露的江孜勒萨依地区约 160km,与榴辉岩的关系还不清楚。高压麻粒岩包括高压长英质麻粒岩和高压基性麻粒岩,它们与超基性岩构成了一个大约 5km 宽的构造岩石单元,南北两侧分别为韧性剪切带与角闪岩相的片麻岩接触,而东西方向关系不清楚。含假蓝宝石的高压基性麻粒岩主要分布在南阿尔金 HP/UHP 变质带的巴什瓦克地区。在空间上与石榴橄榄岩伴生,并呈透镜状、条带状或似层状分布在长英质片麻岩中,构成南阿尔金 HP/UHP 变质带的组成部分。其透镜体长轴平行于长英质麻粒岩的片麻理,部分条带状基性麻粒岩表现为无根褶皱。基性麻粒岩可分为两种类型,一种含有石英,它直接分布在长英质麻粒岩中,另一种不含石英呈层状分布于石榴橄榄岩中。

2.4.4 南阿尔金木纳布拉克地区高压泥质麻粒岩

据曹玉亭等(2013)的研究,本区的高压泥质麻粒岩主要出露于南阿尔金俯冲碰撞杂岩带最南端的木纳布拉克地区

原划分为长城纪巴什库尔干岩群的红柳泉组(相当于该岩群的中部)。该岩群向北东方向被镁铁-超镁铁质杂岩带将其与阿尔金岩群所分割。露头上高压泥质麻粒岩与石英岩呈互层状产出,高压泥质麻粒岩一般厚 30cm 左右,石英岩相对较厚,最厚达 1m,地层变形较弱。高压泥质麻粒岩中可见浅色与暗色矿物定向排列构成的片麻理构造。

除上述四个地点的麻粒岩之外,在阿尔金杂岩中还有一些麻粒岩产地(车自成和孙勇,1996),如罗布泊南端的黑山地区,那里发育一套变质达麻粒岩相的岩石,由广泛发育无根褶皱并高度片理化的层状岩系和一些古老岩体组成的杂岩体,岩石主要由麻粒岩相变质的长英质麻粒岩、基性麻粒岩和斜长角闪岩组成。

2.5 东昆仑造山带麻粒岩

东昆仑造山带北侧为柴达木地块,南侧向南依次为青青山蛇绿混杂岩带和巴颜喀拉-松潘甘孜地体,是连接南部冈瓦纳大陆与北方劳亚大陆纽带。东昆仑造山带的麻粒岩主要见于东昆仑西部的金水口地区和中部的清水泉两个地区。

2.5.1 金水口地区麻粒岩

刘永成和叶占福(1998)、陈能松等(1999)、张建新等(2003)、王国灿等(2007)和刘永顺等(2009)等曾对该区的麻粒岩进行过研究。据龙晓平(2004)的研究,本区的麻粒岩出露于青海省境内诺木洪农场金水口电站附近,它们主要以椭圆状包体赋存于一套富铝花岗岩片麻岩中,主要岩性为紫苏斜长麻粒岩、二辉斜长麻粒岩、紫苏角闪斜长麻粒岩,有的具有条带状构造。据王国灿等(2007)研究,金水口地区出露的麻粒岩相岩石主要位于原金水口群下部的白沙河岩组(现在称为白沙河岩群),主要为一套麻粒岩相-高角闪岩相的片麻岩、混合岩、斜长角闪岩和大理岩等,变质时代主要为古生代。

2.5.2 清水泉地区麻粒岩

据李怀坤等(2006)的研究,东昆仑中部缝合带清水泉一带,发育有石榴斜长紫苏麻粒岩、紫苏黑云石榴麻粒岩、石榴二辉斜长麻粒岩和石榴辉石岩,它们与混合岩、黑云石榴变粒岩、黑云辉石变粒岩、石墨大理岩、含透辉石透闪大理岩、透辉石大理岩、黑云角闪斜长片麻岩等变质岩以及纯橄岩、辉橄岩、辉长岩、辉绿岩等共同构成蛇绿混杂岩。麻粒岩呈透镜状,赋存于其它变质岩中。据刘永成和叶占福(1998)的研究,各种麻粒岩呈大小不等的包体,不均匀地分布于洪木洪片麻岩套(大多为正片麻岩)的各种片麻岩层中,麻粒岩原属金水口杂岩天台山表壳岩组合。曹玉亭等(2008)确定了该区存在高压泥质麻粒岩,并对其变质时代进行了研究。

2.6 柴北缘东端都兰地区的高压麻粒岩

据 Song *et al.* (2003, 2004)、于胜尧等(2009)和张建新等(2009)的研究,都兰地区的高压麻粒岩分布于阿尔茨托山的西侧,都兰县南戈壁滩大约 5~6km 的范围内,其北以断层为界与滩涧山浅变质火山沉积岩相隔,南侧为闪长岩体,其东侧

至阿尔茨托西断层为大面积出露的花岗质片麻岩夹石榴角闪岩。该区高压麻粒岩单个露头宽达 100m, 长数百米, 以富含石榴子石和斜长石为特征, 其成分从基性、中性到酸性, 基性麻粒岩是其主体, 中、酸性麻粒岩主要表现为浅色脉体, 切穿暗色的基性麻粒岩或与之互层状产出。具有混合岩化特征。

柴北缘 HP/UHP 变质带分布在祁连地块与柴达木地块之间, 西起鱼卡地区, 东至沙柳河地区。这一变质带由西向东可分为 4 个变质单元(张建新等, 2007):

- (1) 鱼卡-落凤坡榴辉岩-高压泥质岩单元;
- (2) 绿梁山石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元;
- (3) 锡铁山榴辉岩-片麻岩单元;
- (4) 都兰榴辉岩-片麻岩单元。

绿梁山石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元分布在大柴旦南约 20km, 以含夕线石(蓝晶石)的副片麻岩和花岗质片麻岩为主, 并以含有石榴二辉橄榄岩、纯橄岩和石榴辉石岩等超基性岩为特征。高压麻粒岩呈透镜体分布在片麻岩中, 大小从 1m 到 10m 不等。此单元中没有发现榴辉岩, 此单元两侧被花岗岩侵入, 向东被戈壁滩所覆盖。

2.7 北秦岭造山带商南松树沟高压麻粒岩

北秦岭造山带是昆仑-祁连-秦岭造山带的主要组成部分。该造山带北侧以洛南-栾川断裂为界, 其北为华北克拉通; 南侧以商丹断裂为界, 其南为南秦岭。该造山带中的高压麻粒岩主要分布在商丹断裂带的北侧。本区的高压麻粒岩曾有刘良和周鼎武(1994)、刘良等(1995, 1996a, 2009, 2013a, b)、Liu *et al.* (2003)、陈丹玲(2004)和张建新等(2009, 2011)进行过研究。本区所见的高压麻粒岩包括基性和长英质岩类, 分布于超镁铁质杂岩的南侧和富水杂岩的北侧。岩石组合与阿尔金巴什瓦克麻粒岩单元非常相似, 但未发现伴生的石榴橄榄岩。

据陈丹玲(2004)的研究, 北秦岭高压基性麻粒岩呈透镜状分布在陕西商南县松树沟超镁铁质岩体(主岩体)南侧的秦岭群斜长角闪片麻岩中, 伴生有长英质高压麻粒岩, 距离超镁铁质岩体约 200m, 且与超镁铁质岩体之间夹有一套高压不纯大理岩, 向东可追索到河南寨根与西峡蛇尾以南的秦岭群片麻岩之中。在剖面上可见高压基性麻粒岩与单斜辉石岩和石榴角闪岩以及含榴斜长角闪岩共存于同一透镜体中。在高压长英质麻粒岩中曾发现指示超高压变质的各种出熔结构(Liu *et al.*, 2003), 指示南带高压-超高压变质带的存在。在北秦岭的北侧, 在河南卢氏朱阳关-夏馆断裂带南侧秦岭群片麻岩中呈透镜状的含金刚石和柯石英的榴辉岩组成, 其变质带的形成时代为 486 ~ 507Ma(杨经绥等, 2002; Cheng *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011a), 秦岭岩群南侧松树沟一带的高压基性麻粒岩的峰期变质时代为 485 ~ 506Ma(陈丹玲等, 2004; 张建新等, 2011), 该年龄值与北秦岭岩群北侧的超高压榴辉岩及其围岩片麻岩的变质年龄在误差范围内一致, 表明在北秦岭秦岭岩群南北两侧存在同时代的两

条早古生代高压-超高压变质带(张建新等, 2010)。

2.8 秦岭-桐柏-大别造山带麻粒岩

秦岭造山带向东延伸可以到桐柏、大别一带。据刘庆生和高山(1990)的研究, 在桐柏地区见有长英质低压麻粒岩透镜体产于具孔兹岩系特征的富铝片岩和片麻岩中, 向西渐过渡为高角闪岩相-角闪岩相岩石。据翟淳等(1995)的研究, 豫南高压麻粒岩分布于桐柏-大别造山带北带巨型糜棱岩带内的桐柏-信阳区段, 是桐柏-信阳麻粒岩相带的一部分。高压麻粒岩体多呈大小不等的透镜体状分布于长英质和碳酸盐质糜棱岩和变晶糜棱岩中, 透镜体的长轴延伸方向为北西西向, 与糜棱岩叶理方向一致。据张翠光等(2002)的研究, 河南桐柏麻粒岩区主要以长英质麻粒岩为主, 变质温压条件为 700 ~ 840°C 和 0.61 ~ 0.85 GPa, 属于典型的中压麻粒岩。

据向华等(2009)和 Xiang *et al.* (2012)的研究, 在桐柏北部出现的麻粒岩呈大小不一的包裹体或呈互层状产于片麻岩中, 与花岗岩类伴生。片麻岩具有强烈的面理, 大部分已强烈风化, 部分片麻岩相当于退变麻粒岩。该地麻粒岩峰期变质温度已达到超高温变质范围。

据游振东和陈能松(1995)的研究, 大别山惠兰山一带的麻粒岩是大别山区西北部具典型意义的露头, 代表秦岭-大别的结晶基底的一部分。惠兰山位于罗田与麻城交界处, 由强烈变形的花岗岩类杂岩和深变质岩石组成, 其中角闪二辉麻粒岩是典型的麻粒岩之一。

此外, 在麻城的木子店(张泽明等, 2000)、洗马畈、余寨的燕子河、罗田的梅花园等地也有麻粒岩相岩石的发现, 一般认为代表着大别杂岩中变质级别最高的岩石, 与大别造山带无直接关系。

2.9 南秦岭造山带勉略地区麻粒岩

南秦岭是华南大陆的北缘构造带, 但是对其构造单元划分和构造拼合时间始终存在较大分歧(张国伟等, 2001, 2003; 王宗起等, 2009)。本文所指的南秦岭造山带主要限于勉略带。据 Xu *et al.* (1994)、李三忠等(2000)的研究, 勉略地区的莱马河南部的马家沟、徐家坪、清家沟等地多次发现麻粒岩岩片。在清水沟沟头见有片理化异常强烈的石榴辉石麻粒岩岩块, 呈长透镜状夹于韧性剪切带内, 岩石坚硬。在徐家坪岩片中主要组成岩石为石榴透辉石岩, 变质达麻粒岩相, 被花岗闪长岩侵入, 其变形特征与整个勉略带协调一致。在徐家坪和回水庙向西的沟中及路边都可见到麻粒岩的良好露头。含紫苏辉石的中高压基性麻粒岩仅见于鞍子山地区, 主要产于蛇绿混杂岩的斜长角闪岩中。

2.10 西藏班公湖-怒江造山带安多高压麻粒岩

据张修政等(2010)和张晓冉等(2010)的研究, 安多高压麻粒岩产于班公湖-怒江缝合带所夹聂荣微陆块中。班公湖-怒江缝合带可划分为班公湖-改则西段、东巧-安多中段和

丁青-怒江东段,安多微陆块呈大的透镜状,呈东西向分布于班-怒缝合带的中段,组成岩石为二长片麻岩、斜长片麻岩为主,夹斜长角闪岩透镜体的安多(聂荣)片麻杂岩被中生代花岗岩侵入。在该套片麻杂岩中偶尔发现含 $\text{Sil} + \text{Grt} + \text{Kfs}$ 的副片麻岩和大理岩,变质程度已达角闪岩相。

安多高压麻粒岩呈透镜体状产于安多县约 20km 的安多片麻杂岩的斜长片麻岩中,附近可见有大小不一(从 80 厘米到数米)与片麻岩走向一致的斜长角闪岩透镜体,部分透镜体同围岩一起发生了变形,被压扁拉长甚至褶皱。

安多高压麻粒岩透镜体宽约 10m,长近 20m,近东西走向,与围岩片麻岩走向一致,透镜体从中心到边缘退变作用逐渐强烈,分带现象明显,核部为退变较轻的麻粒岩,淡红色石榴石含量较多,中部退变明显,出现典型的“白眼圈”构造,部分后成合晶呈石榴子石假晶出现,边部已彻底退变为细粒角闪岩,与围岩为突变接触关系。

花岗质片麻岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 492Ma(中国地质大学(北京),2004^①),认为是聂荣微陆块曾遭受泛非事件改造的记录。安多高压麻粒岩中的锆石分为两类,具有核边结构一类的核部残留锆石具有典型的岩浆结晶锆石特征,其 LA-ICPMS U-Pb 年龄在 $541 \pm 8\text{Ma}$ 到 $834 \pm 11\text{Ma}$ 之间,具有典型变质成因的锆石的 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 $179 \pm 2\text{Ma}$ 。179Ma 大体代表了高压麻粒岩相变质作用的时间(解超明等,2013)。

2.11 西藏喜马拉雅造山带中部和东部的麻粒岩

2.11.1 喜马拉雅造山带中段日玛那高压麻粒岩

据李德威等(2002,2003)的研究,日玛那位于喜马拉雅造山带中段结晶基底明显向北突出的构造部位,这是长轴近南北、具多层次伸展构造组合的片麻状穹窿,叠加在东西向的喜马拉雅造山带之上。该区基底变质岩系称聂拉木群,由马卡鲁杂岩和扎西惹嘎岩组组成。前者是沿高喜马拉雅主脊分布的灰色片麻岩和原地-半原地片麻状-眼球状花岗岩,片麻岩局部夹有透镜状、不规则状镁铁质-超镁铁质岩和变质表壳岩,它们是麻粒岩的主要赋存体。后者分布在高喜马拉雅山脊北侧,由黑云母石英片岩、石榴夕线石英片岩、黑云母片岩、石墨片岩、石英岩、大理岩组成,具孔兹岩建造特征,两套变质岩系之间以低角度正断层或韧性剪切带接触。片麻岩内部也发育韧性剪切带,麻粒岩明显受韧性剪切带控制,显示成带分布,分段集中的特点。基性麻粒岩大多数呈透镜状和团块状,少数呈脉状。围岩以片麻岩、眼球状糜棱岩为主,有的产于石英岩中。此外,在片麻岩状花岗岩和片麻状英云闪长岩中也含有基性麻粒岩包体。有的麻粒岩透镜体已强烈变形形成剪切透镜体,出现片理化和流变褶皱,麻粒岩后成合晶和冠状体反应边结构发育。

2.11.2 西藏定结县的麻粒岩

据廖群安等(2003)的研究,喜马拉雅造山带的高喜马拉雅中段的定结地区见有榴辉岩相的石榴辉石岩退变为基性

二辉麻粒岩,主要呈透镜状产于高喜马拉雅结晶岩系中,围岩为聂拉木群中的花岗质片麻岩、石英岩和石英片岩。透镜状的石榴辉石岩一般长 80~300cm,厚 30~100cm,保存在透镜体的核部,边部逐渐退变为二辉麻粒岩、榴闪岩和斜长角闪岩。据刘树文等(2005)研究定结铁镁质麻粒岩出露于藏南拆离系和申扎-定结伸展构造系交汇处的高喜马拉雅系糜棱岩化片麻岩内,以不同规模的透镜状包体沿着糜棱面理分布,主要岩石类型包括退变石榴石斜长辉石岩、石榴石二辉麻粒岩和辉石斜长角闪岩等。

2.11.3 东喜马拉雅构造结一带的高压麻粒岩

喜马拉雅山的最东端,雅鲁藏布江大拐弯的内侧,印度板块和欧亚板块碰撞以后,印度板块的东北角呈一突出体,楔入冈底斯岛弧内,使东喜马拉雅构造结和地质界线都围绕南迦巴瓦峰作马蹄形转弯,该区出露的大套变质岩原统称南迦巴瓦岩群,研究后剔除了若干构造岩片后,重新划分为直白岩组、多雄拉混合岩和派乡岩组,之间均为断层接触。据张泽明等(2008)对该区岩石进行的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,该区的原岩分别记录了 2500Ma、1800Ma、1650Ma 和 1000Ma 发生的多期热构造事件。这些年代可以和整个喜马拉雅造山带的高喜马拉雅的结晶岩以及印度克拉通中所获得的多期前寒武纪年龄相对比。

直白岩组主要为高压麻粒岩片麻岩组合,主要出露于直白-派乡一带,区域上呈现北东南西向分布,叠置厚度大于 1293m,分布面积约 379.1km²。该组合由一套富铝片麻岩、混合片麻岩、花岗质片麻岩和大理岩组成,并夹有石榴辉石岩、石榴角闪岩、蓝晶二长片岩等,岩石具高温流变特征(孙志明等,2004a)。

高压麻粒岩呈夹层或透镜状、扁豆体,其规模从数厘米到数十米不等,其长轴方向和地层片麻理走向一致。透镜体的核部变形较弱,向边部增强,高压麻粒岩透镜体主要由石榴单斜辉石岩、石榴角闪岩、蓝晶石榴长英麻粒岩等组成,石榴单斜辉石岩出现在透镜体核部,被石榴角闪岩包裹,两者之间为过渡关系,后者为前者的退变产物,其边部常被长英质细脉所穿插(孙志明等,2004b)。

据钟大赉和丁林(1995)、丁林和钟大赉(1999)的研究,喜马拉雅造山带东构造结南迦巴瓦峰的西侧,沿雅鲁藏布江右岸,特别是直白东沟,见有石榴蓝晶高压麻粒岩、基性二辉麻粒岩以及由石榴辉石岩退变形形成的麻粒岩,主要产于角闪黑云二长片麻岩、夕线黑云二长片麻岩、二长浅粒岩、石榴黑云变粒岩和花岗片麻岩中。呈糜棱岩化带与围岩接触,该带的西部紧邻雅鲁藏布江的绿片岩带,向东、西变为角闪岩相和绿片岩相岩石。

据 Liu and Zhong(1997)、刘焰和钟大赉(1998)研究,喜马拉雅构造单元属印度板块,主要由高级变质岩和强变形的

① 中国地质大学(北京). 2004. 1:25 万安多县幅区域地质调查报告

花岗岩组成,可将其分为北部的麻粒岩相变质岩组和南部的角闪岩相变质岩组,前者大致沿那木拉逆冲断层向南逆冲于后者之上。麻粒岩相变质岩包括麻粒岩相片麻岩和大理岩,两者呈互层产出,混合岩化发育。高压麻粒岩仅以残余体产出。在此麻粒岩相变质岩组中,包括石榴蓝晶石片麻岩和高钙石榴石透辉石岩,其围岩为混合岩、中低压麻粒岩。

另外,据尹光候等(2006)和王金丽等(2009)的研究,在喜马拉雅造山带东构造结拉萨地体黑龙扎西绕登一带出露有石榴二辉麻粒岩,这些麻粒岩分布于林芝岩群中,与石榴斜长角闪岩伴生,二者之间呈渐变过渡。董昕等(2009)测定了林芝群的形成时代。

在青藏地区除上述的喜马拉雅造山带中段和东构造结出露有麻粒岩相的高级变质岩石之外,在羌塘地块新生代火山岩中有厘米级的麻粒岩捕虏体出露(赖绍聪等,2006;赖绍聪和秦江锋,2008),但其规模较小,本文未予讨论。在拉萨地块的纳木错西也出露有麻粒岩(Zhang *et al.*, 2012a, b; 严溶等, 2013),初步研究表明其原岩为形成于~900Ma的辉长岩,高压变质作用的年代为650Ma。不属于本文介绍的显生宙麻粒岩范畴。

2.11.4 喜马拉雅中段则古拉地区高压麻粒岩

据季建清等(2004)的研究,高压麻粒岩发现于亚东以北约四十余千米的则古拉藏南拆离系主构造面下盘的高喜马拉雅结晶岩系中,相当于高喜马拉雅结晶岩系与亚东-羊八井南北向地堑交汇地段。高喜马拉雅结晶岩系被认为是藏南中部地壳沿着藏南拆离系和主断裂边界向南挤出地表的地质体。高压麻粒岩岩片的围岩是黑云母钾长花岗岩,局部已经变形成为片麻岩,高压麻粒岩呈包体包于其中。在花岗岩中还有规模较小但较多出露的电气石白云母花岗岩脉体或岩体发育,两者为侵入关系。

3 显生宙造山带麻粒岩的变质时代

形成于不同时代的显生宙造山带有其特定的大地构造环境和时代,而赋存其中的各种麻粒岩的变质时代与造山带的形成时代紧密相关。目前显生宙造山带中麻粒岩及其伴生岩石变质时代的研究程度差别较大,有的已获得较精确可靠的同位素年龄,有的虽做了一些同位素年龄的测试,由于方法的局限,数据的可靠性尚待进一步研究。本文力图列出各造山带显生宙麻粒岩的形成时代、峰期变质时间和退变质作用的年代,但由于各地区研究程度不同,有的地区较详细,有的地区则只有某一阶段的年龄数据。此外我们对有的数据进行了重新考虑,如康西瓦地区曾获得过420~460Ma的年龄数据,原作者解释为麻粒岩相的变质年龄(郭坤一等,2003),我们根据后来获得的数据(曲军锋等,2007; Yang *et al.*, 2010)将420~460Ma的年龄解释为麻粒岩原岩的形成时代。从表中可以看出,不同造山带中麻粒岩的年龄资料还不均衡,有待以后补充。为了便于对比,有些地区附列了一

些与麻粒岩同时代的超高压榴辉岩榴闪岩、片麻岩等的同位素年龄结果。本文仅将已获得的同位素年龄资料列出以供比较参考(表1)。

从表1可知,近年来在显生宙造山带出露的各种麻粒岩中获得了大量的年代学数据。有不少造山带中麻粒岩的变质时代已基本搞清,如东昆仑造山带、阿尔金造山带、柴达木北缘、北秦岭造山带及秦岭-大别造山带的桐柏地区的麻粒岩的峰期变质时代均属加里东期,且与其相伴的超高压变质岩的变质时代基本同时。天山造山带中的西南天山、南天山地区的麻粒岩的峰期变质属于海西期,也与伴生的超高压变质岩石的变质时代一致。南秦岭岭略造山带中麻粒岩的变质期为印支-燕山期,与秦岭-大别-苏鲁高压-超高压变质带的变质时代相当。近年来,在西藏喜马拉雅造山带的中部、东部构造结和南迦巴瓦岩群分布地区出露的各种麻粒岩和麻粒岩相变质岩石中获得大量测年数据,但数据结果差别较大,对高压麻粒岩峰期变质时代认识很不一致。这是多方面的原因所致。一方面是所采用的测年方法不同,所测得数据代表的地质意义不同,很容易产生认识上的分歧。另一方面由于学术观点不同导致对年龄数据的解释差生较大差别。早期,丁林和钟大赉(1999)测定的高压麻粒岩的变质时代为45~65Ma,孙志明等(2004a)赞同这一观点,并认为是麻粒岩相的峰期变质时间。Ding *et al.* (2001)认为高压麻粒岩形成时代为40Ma。同时认为东喜马拉雅构造结高压麻粒岩的变质作用发生时间略晚于西构造结。张进江等(2003)认为喜马拉雅东部南迦巴瓦岩群分布地区存在三个变形和变质作用峰期,分别为62~60Ma、23Ma和13Ma。龚俊峰等(2006)进行了麻粒岩中锆石的U-Pb定年获得了50Ma的谐和年龄,并认为可代表麻粒岩相变质作用的年代。张泽明等(2007)认为以往的定年结果(45~65Ma)没有考虑到榴辉岩相变质作用的存在,这些年龄实际上可能是榴辉岩相的变质时代。他们新近对南迦巴瓦岩群中花岗质麻粒岩进行了锆石SHRIMP U-Pb定年,获得了30Ma的年龄结果,这更可能是麻粒岩相的变质时代。东喜马拉雅构造结及其周边地区已发现榴辉岩相变质和高压麻粒岩相变质,但未发现真正的榴辉岩和超高压变质岩石。在喜马拉雅造山带的西部(包括西构造结)不仅发现了麻粒岩和高压变质岩(张泽明等,2007),而且还发现了含柯石英的榴辉岩和超高压变质的泥质岩石(Kaneko *et al.*, 2003; Sachan *et al.*, 2004)。年代学研究表明,超高压变质作用发生的年代为45~55Ma(Kaneko *et al.*, 2003; Leech *et al.*, 2005)。由此可见,东西构造带中的榴辉岩相变质和超高压变质的时间可能与东喜马拉雅构造带榴辉岩相变质基本同时,而高压麻粒岩相变质时代东喜马拉雅造山带可能要比西部略晚一些。

西昆仑造山带中麻粒岩相变质时代目前尚有争论,部分研究者(如郭坤一等,2003)认为其变质时代属加里东期,但多数研究者认为加里东期的年龄代表麻粒岩的原岩形成时代,而变质时代为海西期(Yang *et al.*, 2010)。

表 1 中国显生宙造山带麻粒岩及相关岩石的变质时代

Table 1 Metamorphic ages of granulites and relative rocks from the Phanerozoic orogens in China

地点/岩石类型	原岩年龄 (Ma)	峰期变质年龄 (Ma)	退变质年龄 (Ma)	测试方法	资料来源
新疆阿尔泰造山带富蕴地区					
低压泥质麻粒岩		293 ± 2		锆石 SHRIMP U-Pb	王伟等, 2009
高压基性麻粒岩	268 ~ 279	257		锆石 SHRIMP U-Pb	陈汉林等, 2006
超高温麻粒岩	499 ± 8	269 ± 2 ~ 292 ± 3		锆石 LA-ICPMS U-P	厉子龙等, 2011
西南天山木扎尔特河一带					
低压泥质麻粒岩	376 ± 8	280 ± 8		独居石 U-Th-Pb	苟龙龙和张立飞, 2009
二辉麻粒岩		271 ± 38		锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2007
南天山造山带榆树沟地区					
中高压基性麻粒岩		390 ± 11, 392 ± 7	328 ± 12	锆石 SHRIMP U-Pb	周鼎武等, 2004
石榴二辉麻粒岩		361 ± 10 ~ 368 ± 5		角闪石 Ar/Ar 法	王润三等, 2003
石榴二辉麻粒岩			310 ± 5 ~ 278 ± 28	Sm-Nd, Rb-Sr 内部等时线	王润三等, 2003
石榴二辉麻粒岩	1171 ~ 1528			Sm-Nd 全岩	王润三等, 2003
中压麻粒岩		396 ± 3		锆石 SHRIMP U-Pb	李天福等, 2011
西天山阿吾拉勒西段					
低压泥质麻粒岩	1609		764 ± 72	Cameca U-Pb	李继磊等, 2009
西昆仑造山带康西瓦地区					
石榴高压麻粒岩	456 ± 30	> 177	177 ± 6	锆石 SHRIMP U-Pb	曲军锋等, 2007
夕线石榴黑云片麻岩	253 ± 2	220 ± 2	194 ± 1	锆石 LA-ICPMS U-Pb	Yang <i>et al.</i> , 2010
石榴角闪片麻岩	480 ± 8	220 ± 3	181 ± 2	锆石 LA-ICPMS U-Pb	Yang <i>et al.</i> , 2010
石榴二辉麻粒岩	420 ~ 460			锆石 SHRIMP U-Pb	郭坤一等, 2003
西昆仑造山带班迪尔地区					
高压岩石组合	255 ± 4	243 ± 2			谢从瑞等, 2013
阿尔金造山带西段					
榴辉岩	752 ± 7	500 ± 2	455 ± 2	锆石 LA-ICPMS U-Pb	Liu <i>et al.</i> , 2012
富铝片麻岩	1027 (?)	447 ~ 462		单颗粒锆石 U-Pb	张建新等, 1999
石榴角闪二辉麻粒岩		450 ± 4		常规锆石 U-Pb	张建新等, 1999
超高压含石榴石泥质片岩	< 647	480 ± 5	450 ± 2	锆石 LA-ICPMS U-Pb	刘良等, 2013b
阿尔金造山带中段淡水泉地区					
高压泥质麻粒岩	< 719	486 ± 5		锆石 LA-ICPMS U-Pb	曹玉亭等, 2009
高压泥质麻粒岩	< 563	485 ± 5		锆石 LA-ICPMS U-Pb	张建新等, 2009
南阿尔金纳布拉克地区					
高压泥质麻粒岩	< 579	486 ± 5			曹玉亭等, 2013
阿尔金造山带东段巴什瓦克地区					
石榴辉石岩	821 ± 27	488 ± 8		锆石 LA-ICPMS U-Pb	Liu <i>et al.</i> , 2009
石榴基性麻粒岩	900 ~ 920	497 ± 11		锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2005a
石榴基性麻粒岩			474 ± 5	角闪石 Ar-Ar 坪年龄	Zhang <i>et al.</i> , 2005a
高压长英质麻粒岩		496 ± 9		锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2005a
含石榴花岗质片麻岩	809 ~ 885	487 ± 10		锆石 SHRIMP U-Pb	张安达等, 2004
东昆仑造山带金水口地区和清水泉地区					
中酸性麻粒岩		422 ~ 450		锆石 SHRIMP U-Pb	龙晓平等, 2004
中酸性麻粒岩		460 ± 8		锆石 SHRIMP U-Pb	张建新等, 2003
基性麻粒岩		502 ± 8		锆石 SHRIMP U-Pb	李怀坤等, 2006
柴北缘西段鱼卡河地区					
榴辉岩	748 ~ 759	436 ± 3	409 ± 4	锆石 LA-ICPMS U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2009
长英质片麻岩		431 ± 3		锆石 LA-ICPMS U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2009
泥质片麻岩		432 ± 19		锆石 LA-ICPMS U-Pb	陈丹玲等, 2007
柴北缘中段绿梁山地区					
高压基性麻粒岩		448 ± 3	421 ± 5	锆石 SHRIMP U-Pb	张建新等, 2007
含石榴蓝晶黑云片麻岩		454 ± 6	427 ± 10	锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2008
含石榴夕线黑云片麻岩		443 ± 4	425 ± 4	锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2008
含石榴片麻岩	891 ± 31	448 ± 13		锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2008
柴北缘中段锡铁山地区					
榴辉岩	725 ~ 803	480 ± 16	436 ± 49	锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2005b
含石榴夕线黑云片麻岩	< 890 ± 14	437 ± 16		锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2008
含石榴夕线黑云片麻岩		435 ± 7		锆石 SHRIMP U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2008

续表 1

Continued Table 1

地点/岩石类型	原岩年龄 (Ma)	峰期变质年龄 (Ma)	退变质年龄 (Ma)	测试方法	资料来源
正片麻岩	952 ± 13	478 ± 44		锆石 TIMS 上下交点年龄	张建新等, 2003
柴北缘东段都兰地区					
榴辉岩		457 ± 7	426 ± 24		Song <i>et al.</i> , 2006
含柯石英片麻岩		423 ± 6	403 ± 9		Song <i>et al.</i> , 2006
高压中酸性麻粒岩		447 ± 7		锆石 LA-ICPMS U-Pb	于胜尧等, 2010
高压基性麻粒岩		447 ± 7		锆石 SHRIMP U-Pb	龙晓平等, 2004
中低压麻粒岩			420	角闪石 Ar-Ar 坪年龄	于胜尧等, 2009
基性麻粒岩中浅色体		434 ± 2		锆石 LA-ICPMS U-P	于胜尧等, 2013
北秦岭造山带松树沟地区					
榴闪岩	787 ± 16	484 ± 4	418 ± 5	锆石 LA-ICPMS U-Pb	李晔等, 2012
高压基性麻粒岩	1030 ± 46	518 ± 12		锆石 SHRIMP U-Pb	刘良等, 2003
高压基性麻粒岩		485 ± 3		锆石 LA-ICPMS U-Pb	陈丹玲等, 2004
高压基性麻粒岩		504 ± 11		锆石 SHRIMP U-Pb	张建新等, 2011
高压基性麻粒岩		499 ± 2		锆石 LA-ICPMS U-Pb	刘良等, 2013a
高压基性麻粒岩		506 ± 7		锆石 SHRIMP U-Pb	张建新等, 2009
超高压长英质麻粒岩		486 ~ 511		锆石 LA-ICPMS U-Pb	刘良等, 2009
超高压长英质麻粒岩		506 ± 3		锆石 SHRIMP U-Pb	张建新等, 2011
超高压长英质麻粒岩	< 832 ± 25	497 ± 8	421 ± 2	锆石 LA-ICPMS U-Pb	刘良等, 2013a
北秦岭造山带官坡地区					
榴辉岩	791 ± 6	502 ± 11		锆石 LA-ICPMS U-Pb	陈丹玲和刘良, 2011
白云母石英片岩		507 ± 38		锆石 SHRIMP U-Pb	杨经绥等, 2002
北秦岭造山带西峡地区					
榴闪岩	843 ± 7	503 ± 5	452 ± 5, 400 ± 3	锆石 LA-ICPMS U-Pb	刘良等, 2013a
中低压麻粒岩		440 ± 2	426 ± 1	锆石 SHRIMP U-Pb	张建新等, 2011
桐柏-大别造山带北桐柏地区					
石榴二辉麻粒岩		430 ~ 445	419 ~ 400	锆石 LA-ICPMS U-Pb	向华等, 2009
基性及半泥质麻粒岩		432 ± 4	415 ~ 401	锆石 LA-ICPMS U-Pb	Xiang <i>et al.</i> , 2012
中压麻粒岩		436 ± 1 ~ 440 ± 2	426 ± 1	锆石 SHRIMP U-P	张建新等, 2011
麻粒岩	450 ± 5	424 ± 4		锆石 LA-ICPMS U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2011b
南秦岭造山带勉略地区					
中高压基性麻粒岩		221 ~ 241		Sm-Nd 矿物等时线	李曙光等, 1996
中高压基性麻粒岩			201 ± 3	黑云母 Ar/Ar	张宗清等, 2002
中高压基性麻粒岩			206 ± 55	Sm-Nd 矿物等时线	张宗清等, 2002
高压基性麻粒岩	477 ± 6		214 ± 11	锆石 LA-ICPMS U-Pb	梁莎等, 2013
基性麻粒岩中的浅色体			215 ± 5	锆石 LA-ICPMS U-Pb	梁莎等, 2013
西藏班公湖-怒江造山带安多地区					
高压麻粒岩	531 ± 14	169 ± 13		锆石 LA-ICPMS U-P	张晓冉等, 2010
高压麻粒岩	541 ~ 831	179 ± 2		锆石 LA-ICPMS U-P	解超明等, 2013
黑云二长片麻岩			167 ± 1	黑云母 Ar/Ar 坪年龄	解超明等, 2013
喜马拉雅造山带东构造结					
石榴蓝晶高压麻粒岩		45 ± 5		常规锆石 U-Pb	丁林和钟大赉, 1999
石榴蓝晶高压麻粒岩		65 ± 1		单斜辉石 Ar/Ar 坪年龄	丁林和钟大赉, 1999
石榴角闪花岗岩			17 ± 0.3	角闪石 Ar/Ar 坪年龄	丁林和钟大赉, 1999
高压基性麻粒岩		Ca. 40		锆石 U-Th-Pb	Ding <i>et al.</i> , 2001
麻粒岩相的斜角闪岩		89 ± 3		锆石 LA-ICPMS U-Pb	王金丽等, 2009
麻粒岩相变质的大理岩		85 ± 2		锆石 LA-ICPMS U-Pb	王金丽等, 2009
高温中压麻粒岩		90 ~ 80	55 ~ 50	锆石 LA-ICPMS U-Pb	董昕等, 2012
高压基性麻粒岩		24 ± 0.3	17 ± 0.4	锆石 LA-ICPMS U-Pb	徐旺春等, 2008
高压麻粒岩		30		锆石 SHRIMP U-Pb	张泽明等, 2007
北喜马拉雅穹窿					
高级变质岩		45 ~ 47		锆石 SHRIMP U-Pb	高利娥等, 2010
喜马拉雅造山带中段					
高压麻粒岩	1991 ± 3	30 ± 0.4	18 ± 0.3	锆石 SHRIMP U-Pb	李德威等, 2003
高压基性麻粒岩	98		17 ± 0.3	锆石 SHRIMP U-Pb	李建清等, 2004
高压基性麻粒岩		49 ± 0.5	32 ± 0.6	黑云母 Ar/Ar 坪年龄	龚俊峰等, 2006

表 2 太古宙华北克拉通高压麻粒岩与显生宙造山带高压麻粒岩的比较

Table 2 A comparison of HP granulites from Phanozoic orogens and North China Craton

序号	地质特征	华北克拉通基底麻粒岩地体中 高压基性麻粒岩	显生宙造山带中高压基性麻粒岩
1	地质产状、组成、规模	呈透镜状或大小不等的岩块产于中压麻粒岩地体或麻粒岩相-高角闪岩相的 TTG 岩系中, 规模不大, 有的呈条带分布, 有的不明显	呈透镜状或脉状产于角闪岩相-低温麻粒岩相的各种片岩、片麻岩或花岗质片麻岩中, 有的呈带状分布, 有的目前只是零星的点
2	原岩性质	相当于辉长质岩体或脉体	相当于辉长质或侵入的石榴辉石岩
3	伴生岩石	主要为麻粒岩相-角闪岩相 TTG 岩系和麻粒岩地体中低压麻粒岩, 有的呈构造接触, 与镁铁质超镁铁质岩紧密伴生	主要为花岗质片麻岩或变蛇绿岩套岩石, 有的与石榴辉石岩和榴辉岩共生或分别产于造山带的不同部位, 或与中低压麻粒岩相片麻岩伴生
4	形成高压麻粒岩相的峰期温压条件	温度为 800 ~ 850°C, 压力为 1.2 ~ 1.45GPa, 个别地区曾经历过榴辉岩相阶段	温度为 800 ~ 900°C, 压力为 1.2 ~ 1.5GPa, 部分高压 1.5GPa, 喜马拉雅造山带高压麻粒岩相变质之前曾经历榴辉岩相变质阶段
5	<i>P-T</i> 轨迹	顺时针 (ITC→IBC) 轨迹	顺时针 (ITC→IBC) 轨迹
6	变形程度	变形强烈, 有的产于韧性剪切带中	中等至强烈, 变化较大
7	变质时代	除个别为太古宙晚期外, 主要为古元古代晚期, 1950 ~ 1850Ma, 可能分两期	主要为加里东期, 其次为海西期、印支期、燕山期和喜山期, 个别为新元古代晚期
8	变质演化	个别地区高压基性麻粒岩由高压榴辉岩退变而来, 大部分高压麻粒岩经中-低压麻粒岩相而退变为角闪岩相至绿片岩相	部分高压基性麻粒岩直接由榴辉岩或石榴辉石岩经榴辉岩相变质, 后经热松弛退变而经历高、中、低压麻粒岩相阶段, 最后退变为角闪-绿片岩相阶段, 有的榴辉岩直接退变为角闪岩相岩石, 有的高压基性麻粒岩与榴辉岩在造山带不同部位组成双变质带
9	形成的大地构造背景	基本上属陆-陆俯冲碰撞模式, 先地壳增厚, 后减压折返抬升, 与克拉通的拼贴有紧密联系	有两种模式, 一种为洋-陆碰撞模式, 另一种为陆-陆碰撞俯冲模式, 经过地壳增厚, 折返减薄, 抬升等阶段, 形成机制与造山带的动力学过程高度一致

根据初步数据。新疆阿尔泰造山带中各种麻粒岩的变质时代可能属海西期, 但所测得数据存在一些差别, 不同类型麻粒岩的形成时代和变质时代尚需进一步研究。西藏班公湖-怒江造山带安多地区高压麻粒岩现有的测年数据为燕山期, 也需进一步验证。

4 显生宙造山带高压基性麻粒岩与华北克拉通基底中高压基性麻粒岩的对比

不少显生宙造山带中都见有高压基性麻粒岩的产出, 它们与太古宙华北克拉通基底麻粒岩地体中的高压基性麻粒岩有哪些共性又有哪些差别, 这是大家关注的问题。现在从地质产状、组成和规模; 原岩性质; 伴生岩石; 形成的峰期变质温压条件; *P-T* 轨迹; 变形强度; 变质时代; 变质演化和形成的大地构造背景等几个方面的地质特征加以比较, 列入表 2。

5 显生宙造山带麻粒岩的 *P-T* 轨迹

我国西部和中西部造山带的麻粒岩的原岩以长英质和基性岩为主的, 也有泥质麻粒岩; 按压力类型划分, 既有高压基性麻粒岩、高压泥质麻粒岩, 部分中、低压麻粒岩, 个别地区还出现超高温麻粒岩。目前, 有 11 个造山带 13 个地区已获得麻粒岩的变质演化 *P-T* 轨迹。部分造山带的麻粒岩已

发现, 但由于研究不够, 尚缺乏这方面的资料。现就 11 个造山带中 13 个地区麻粒岩的变质作用条件和变质演化的 *P-T* 轨迹作一概略的介绍并作一些分析和对比。

5.1 阿尔泰造山带超高温麻粒岩的 *P-T* 演化

据厉子龙等(2010)的研究, 超高温泥质麻粒岩出露于阿尔泰地区富蕴乌恰沟, 呈透镜状产于黑云斜长片麻岩、石榴黑云斜长片岩和斜长角闪岩中, 处于阿尔泰南缘角闪岩相-麻粒岩相带中。该泥质麻粒岩的矿物组合包括 Sp + Sil + Grt + Opx 等, Sp + Qtz 共生是超高温变质的标志。变质峰期或较早变质期代表性的矿物共生组合为 Grt + Opx₁ + Sp₁ + Sil + Bt₁ + Qtz, 形成的温压条件为温度 950 ~ 1000°C, 压力 0.9 ~ 1.0GPa。晚期阶段以 Opx + Crd + Grt₂ + Sil + Sp₂ + Ilm 组合为特征, 包括后期的后合成晶冠状集合体等, 特征矿物的降温分解。超高温岩石经历了峰期变质作用后, 变质条件由尖晶石 + 石英的稳定域或转变到堇青石的稳定域, 标志等温降压过程。以后的退变过程指示了从地壳深部抬升至地表的演化过程, 其 *P-T* 轨迹为顺时针型, 但原作者并未提供 *PT* 轨迹的演化图。

王伟等(2009)对阿勒泰市东南分布的泥质麻粒岩进行了岩相学工作和 *P-T* 视剖面图计算, 泥质麻粒岩的矿物组合为 Grt + Crd + Kfs + Bt + Sil + Pl + Qtz 等, 局部出现 Crd + Sp 组合。其峰期变质条件为: $P = 0.5 \sim 0.6\text{GPa}$, $T = 780 \sim 800^\circ\text{C}$, 为中低压麻粒岩。这一结果与厉子龙等(2010)得到

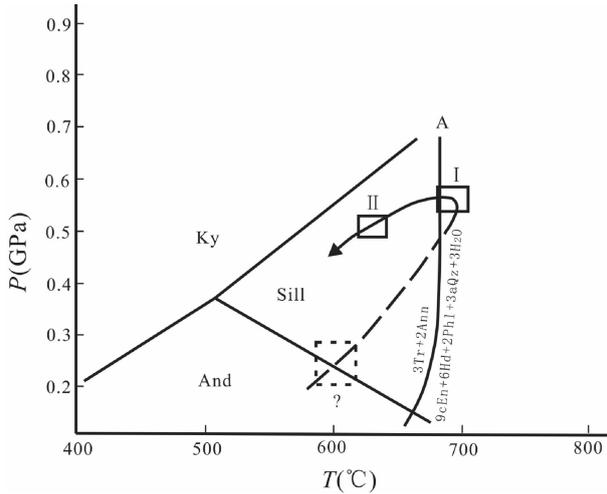


图2 西天山木扎尔特地区的低压麻粒岩相岩石 P - T 轨迹(据李强和张立飞,2004)

Fig. 2 P - T path of low pressure granulite-facies in Muzhaerte, western Tianshan (after Li and Zhang, 2004)

的早期变质压力条件有较大差别。这种差别是由于部分地区早期高压变质矿物组合没有保留,还是不同地区泥质麻粒岩经历的变质改造不同尚需进一步研究。

5.2 西南天山木扎尔特河地区低压麻粒岩的 P - T 轨迹

据李强和张立飞(2004)的研究,本区麻粒岩属低压麻粒岩相变质,显示了初期迅速增温增压至峰期麻粒岩变质后转为近等压降温(IBC)的逆时针轨迹(图2)。峰期麻粒岩相变质时的典型矿物组合为 $Cpx + Opx + Bt + Hbl + Pl + Qtz$ 和 $Crld + Sil + Grt + Bt + Pl + Qtz$,温度为 $680 \sim 705^\circ\text{C}$,压力为 $0.54 \sim 0.58\text{GPa}$,峰期后的角闪岩相变质温度为 $571 \sim 637^\circ\text{C}$,压力为 $0.47 \sim 0.52\text{GPa}$ 。该 P - T 轨迹反映的可能为在塔里木板块向伊犁-中天山板块俯冲过程中,在陆壳一侧所产生的岩浆弧区域,由于受下部岩浆热源的影响,在拉伸环境下,出现低压麻粒岩相变质。李强和张立飞(2004)认为该地区的低压麻粒岩相变质岩石与其南部的高压-超高压带组成了双变质带。张立飞等(2005)详细讨论了该区高压-超高压变质带的形成与演化。

5.3 南天山榆树沟高压基性麻粒岩的 P - T 轨迹

南天山榆树沟麻粒岩地体是经历了高压中压麻粒岩相变质作用改造的蛇绿岩套(王润三等,1999a, b, 2003)。高压变质岩的峰期矿物共生组合为 $Grt + Cpx + Pl + Qtz$,其温度为 $795 \sim 964^\circ\text{C}$,压力为 $0.97 \sim 1.42\text{GPa}$,推算其形成深度为 $40 \sim 50\text{km}$,蛇绿岩套的形成时代为 $440 \pm 18\text{Ma}$,高压麻粒岩的峰期年龄为 $368.2 \pm 4.8\text{Ma}$,中压麻粒岩变质作用时代为 $360 \pm 10\text{Ma}$ (王润三等,2003)。图3示麻粒岩相变质作用的 P - T 范围。

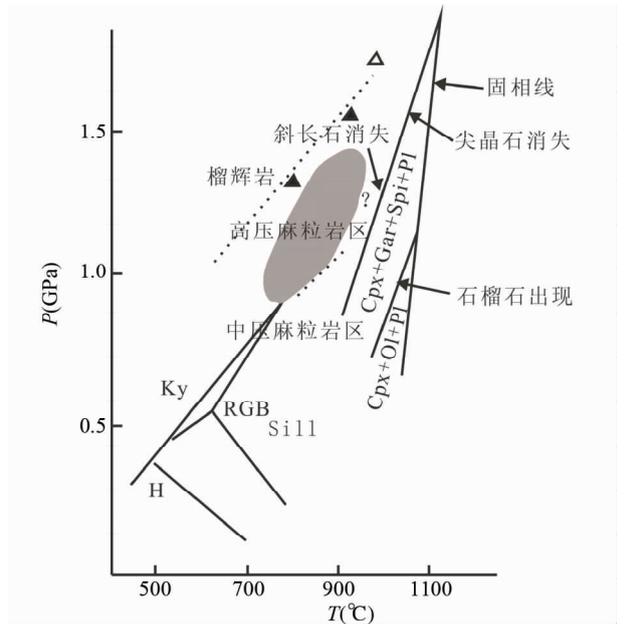


图3 新疆南天山榆树沟高压麻粒岩 P - T 轨迹(据王润三等,1999b)

Δ 和 \blacktriangle 示变质橄榄岩

Fig. 3 P - T path of HP granulite in Yushugou area, southern Tianshan (after Wang *et al.*, 1999b)

王润三等(2003)认为榆树沟地体可能经历了洋壳残片的俯冲-高压麻粒岩相变质-韧性剪切及中压麻粒岩相变质,伴随一定程度的抬升-后期构造折返等一系列复杂的地质作用过程。

5.4 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩的变质 P - T 轨迹

据曲军锋等(2007)的研究,该区的高压麻粒岩的变质 P - T 轨迹见于图4,峰期前的变质矿物共生组合缺失,从峰期变质阶段开始,其代表性的矿物组合为 Grt (核) + Cpx (核) + Pl ($An = 23$) + $Rut + Qtz$,温度为 $810 \sim 910^\circ\text{C}$,压力为 $1.2 \sim 1.6\text{GPa}$,推测其经历了榴辉岩相变质阶段,峰期变质之后经历了角闪岩相变质, $T = 620 \sim 720^\circ\text{C}$, $P = 0.7 \sim 0.8\text{GPa}$,组成了一条从峰期开始的顺时针轨迹,具有近等温降压的特点。代表了碰撞造山过程的下地壳折返地表的动力学过程。

西昆仑康西瓦北侧主体岩石为石榴夕线片麻岩,其中发现有石榴二辉石岩,按其矿物组合,这两种岩石的变质程度曾达低压麻粒岩相,但尚未见有 P - T 轨迹的报道。

5.5 南阿尔金淡水泉和木纳布拉克地区高压泥质麻粒岩的 P - T 轨迹

据曹玉亭等(2009)的研究,南阿尔金构造带淡水泉一带出露的含石榴子石蓝晶石黑云母片麻岩是一套典型的高压泥质麻粒岩,根据矿物一致性热力学数据,结合岩相学和 P - T 视剖面计算,识别出该岩石经历了四个阶段的变质演化,构

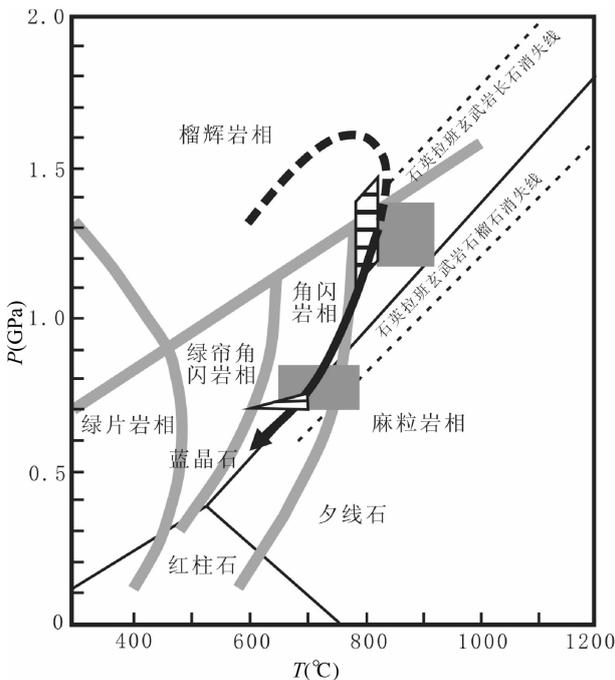


图4 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩的 *P-T* 轨迹 (据曲军锋等, 2007)

暗色阴影为 THERMOCALC 计算所得的温压条件范围, 格子为传统地质温压计计算所得的温度压力范围

Fig. 4 Metamorphic *P-T* path of HP granulite in Tazekurgan, western Kunlun (after Qu *et al.*, 2007)

成了一个早期快速等温降压、后期近等压降温的顺时针退变质演化轨迹 (图5)。峰期阶段的矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Kfs} + \text{Rut} + \text{Qtz}$, 其稳定的温压条件至少为温度大于 850°C , 压力大于 1.1GPa ; 第二期为夕线石稳定域, 矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Sil} + \text{Qtz}$, 应代表一个快速近等温减压的退变过程; 第三期矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Bt} + \text{Sil} + \text{Qtz}$, 变质温度为 $780 \sim 800^\circ\text{C}$, 压力为 $0.6 \sim 0.9\text{GPa}$ 之间, 从第二期到第三期为降温降压过程; 第四期退变阶段矿物组合为 $\text{Mus} + \text{Bt} + \text{Sil}$ 的稳定域, 趋近于近等压降温阶段。

据曹玉亭等(2013)的研究, 南阿尔金木纳布拉克地区高压泥质麻粒岩至少可以划分出三个期次的变质矿物共生组合:

麻粒岩相变质阶段(I)矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Kfs} + \text{Qtz} + \text{Ilm}$, 代表了泥质高压麻粒岩组合, 温压条件为 $T > 850^\circ\text{C}$, $P > 1.10\text{GPa}$;

第一期退变质阶段(II)的矿物共生组合为 $\text{Grt} + \text{Bt}_1 + \text{Sil}_1 + \text{Pl}_1 + \text{Qtz} \pm \text{Ilm}$, 温压条件为 $T = 750 \sim 780^\circ\text{C}$, $P = 0.7 \sim 0.8\text{GPa}$;

第二期退变质阶段(III)的矿物共生组合为 $\text{Bt}_2 + \text{Sil}_2 + \text{Mus} + \text{Pl}_2 + \text{Qtz} + \text{Ilm}$, 变质的温压条件为 $T = 600 \sim 650^\circ\text{C}$, $P = 0.4 \sim 0.6\text{GPa}$ 。

该区岩石在变质过程中达到高压麻粒岩相后又经历了

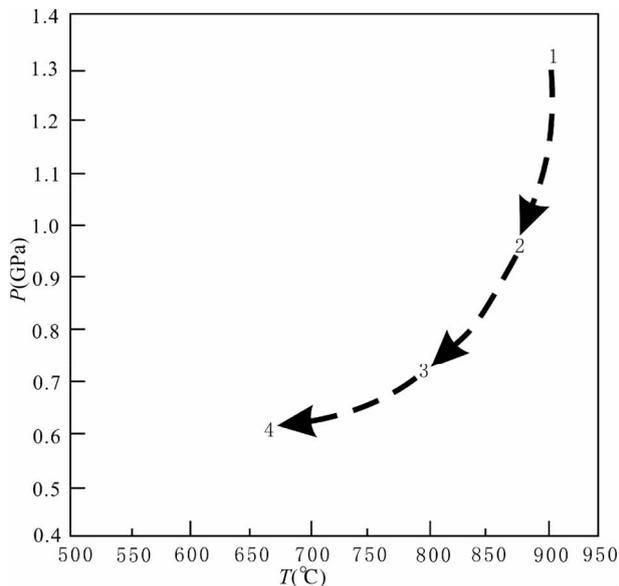


图5 阿尔金淡水泉地区高压泥质麻粒岩 *P-T* 轨迹 (据曹玉亭等, 2009)

Fig. 5 *P-T* path of HP pelitic granulite in Danshuiquan area, Altyn Tagh (after Cao *et al.*, 2009)

早期呈降温降压以及后期近等压降温的顺时针 *PT* 演化轨迹, 其形态与淡水泉地区的同类岩石基本一致。

5.6 南阿尔金榴辉岩和高压麻粒岩的 *P-T* 轨迹

据张建新等(2009)的研究, 本区基性麻粒岩的峰期矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Cpx}_1 + \text{Tf}$ (三元长石, 已转变为条纹长石) $\pm \text{Ky} + \text{Qtz} + \text{Rut}$, 而在退变组合中有假蓝宝石、尖晶石、刚玉、单斜辉石 (Cpx_2)、斜方辉石、钾长石和斜长石等矿物 (Zhang *et al.*, 2005a); 长英质麻粒岩的峰期矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Cpx}_1 + \text{Tf}$ (三元长石, 已转变为条纹长石) $+ \text{Qtz} + \text{Rut}$, 退变质组合有刚玉、尖晶石、斜长石、钾长石和黑云母。刘良等认为这些岩石可能经历了超高压变质作用 (刘良等, 2002, 2003), 甚至可能形成于 7.0GPa 以上压力条件 (刘良等, 2005; Liu *et al.*, 2007)。而张建新等认为这些岩石的显著特征是它们具有典型的高压/超高温特征 (张建新和孟繁聪, 2005; Zhang *et al.*, 2005a), 长英质麻粒岩的峰期矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Tf} + \text{Qtz}$, 给出的温度为 $930 \sim 995^\circ\text{C}$, 压力为 $2.0 \sim 2.45\text{GPa}$, 与基性麻粒岩峰期组合所获得的温压条件 (温度 $950 \sim 1020^\circ\text{C}$, 压力 $1.85 \sim 2.53\text{GPa}$) 和石榴橄榄岩峰期组合所获得的温压条件 (温度 $870 \sim 1050^\circ\text{C}$, 压力 $1.85 \sim 2.73\text{GPa}$) 近一致。张建新等(2009)认为南阿尔金巴什瓦克高压麻粒岩近于超高温条件, 应属于高压-超高温类型 (O' Brien and Rötzler, 2003), 长英质麻粒岩与基性麻粒岩与降压作用有关的矿物组合给出的 *P-T* 条件温度为 $780 \sim 850^\circ\text{C}$, 压力为 $0.95 \sim 1.2\text{GPa}$ (Zhang *et al.*, 2005a)。本区榴辉岩的峰期变质条件为 $P = 2.8 \sim 3.0\text{GPa}$, $T = 730 \sim 850^\circ\text{C}$, 这与在榴

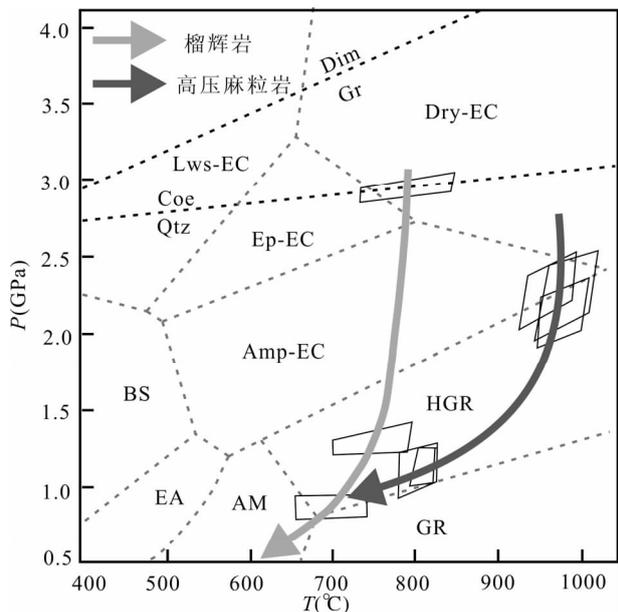


图6 南阿尔金榴辉岩和高压麻粒岩的 P - T 轨迹 (据张建新等, 2009)

Fig. 6 P - T paths of eclogite and high-pressure granulite in the South Altyn Tagh (after Zhang *et al.*, 2009)

辉岩中发现柯石英假象的特征一致 (Zhang *et al.*, 2002), 在折返过程中经历了角闪岩相-麻粒岩相的退变质改造, 但未经过超高温麻粒岩相的改造。所以榴辉岩与高压麻粒岩的 P - T 轨迹并不一致 (图6), 与都兰地区类似, 也反映二者产于同一大地构造环境的不同构造部位。

5.7 东昆仑造山带清水泉地区高级变质岩的 P - T 轨迹

清水泉地区高级变质岩为一套变质火山沉积岩系以及纯橄岩、橄长岩、辉长岩及玄武岩等构成蛇绿混杂岩, 形成于 520Ma (李怀坤等, 2006)。据陈能松等 (1999) 研究, 高级泥质岩石的典型矿物共生组合为 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Pl} + \text{Bt} + \text{Rut} + \text{Qtz}$ 和 $\text{Grt} + \text{Opx} + \text{Pl} + \text{Qtz}$, 其峰期温度为 750 ~ 850°C, 压力为 1.0 ± 0.15 GPa, 具有顺时针 P - T 轨迹 (图7), 相当于中压麻粒岩相, 形成于碰撞构造环境。李怀坤等 (2006) 认为麻粒岩相变质作用的温度为 760 ~ 880°C, 压力为 0.83 ~ 1.2 GPa, 为中高压麻粒岩变质作用。根据退变质的矿物有夕线石 + 白云母 + 斜长石等, 确定其退变条件范围在 750°C 和 0.6 GPa 左右 (陈能松等, 1999), 变质作用终止的条件为在 650°C 和 0.55 GPa 左右。构成了一条顺时针的 PT 轨迹。

5.8 柴北缘都兰地区的高压麻粒岩 P - T 轨迹

本区高压麻粒岩位于柴北缘-阿尔金高压/超高压变质带东端, 高压基性麻粒岩的主体还包括少量高、中压酸性麻粒岩。高压基性麻粒岩的主要平衡共生矿物为 $\text{Grt} + \text{Cpx} +$

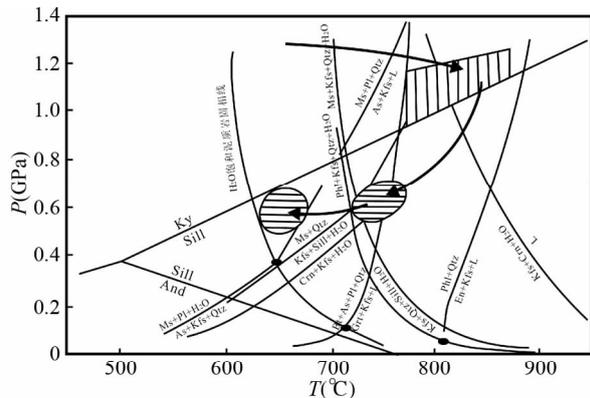


图7 东昆仑清水泉地区高级泥质岩石的变质作用 P - T 轨迹 (据陈能松等, 1999)

四边形框为麻粒岩相变质的温度压力范围, 椭圆形区为退变质的温度压力范围

Fig. 7 Metamorphic P - T path of high-grad metamorphic rocks in Qingshuiquan area, eastern Kunlun (after Chen *et al.*, 1999)

Pl, 还含有不等量的 Ky 、 Hbl_1 、 Qtz 、 Rut 、黝帘石/斜黝帘石、钛铁矿、方柱石等, 高压长英质麻粒岩的矿物组合主要包括 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Kf} + \text{Pl} + \text{Qtz}$ 等矿物并具有少量 Cpx 和 Hbl_1 。峰期高压麻粒岩相变质的温度为 800 ~ 925°C, 压力为 1.4 ~ 1.85 GPa, 退变质至高角闪岩相的温度为 580 ~ 695°C, 压力为 0.8 ~ 1.05 GPa, 最后达绿片岩相, 温度为 550°C, 压力小于 0.8 GPa, 共同组成一条顺时针轨迹 (图8a)。

在都兰地区, 高压麻粒岩单元与含榴辉岩岩石单元相邻, 它们之间可能为断层接触。为对比高压麻粒岩和榴辉岩所经历的变质作用演化, 张建新等 (2009) 把他们的 PT 轨迹投影到一张图上 (图8b), 从中可以看出: 都兰地区的高压麻粒岩的变质演化经历了从进变质角闪岩相 → 峰期麻粒岩相 → 退变质角闪岩相和绿片岩相的过程, 形成了一条平缓降压快速降温的顺时针轨迹。榴辉岩的石榴石中发现典型的柯石英, 榴辉岩的峰期变质温度为 670 ~ 730°C, 压力为 2.7 ~ 3.25 GPa, 退变质结构以绿辉石广泛被细粒 $\text{Cpx} + \text{Pl}$ 或 $\text{Hbl}_1 + \text{Pl}$ 后成合晶替代和大量 Hbl_1 形成特征, 退变质结构还包括多硅白云母被细粒 $\text{Bt} + \text{Pl}$ 后成合晶所替代, Ky 分解形成 Mus 和 Pl , 这些变质反应结构反映榴辉岩在降压过程中被角闪岩相组成所替代, 没有麻粒岩相变质作用的叠加, 形成的顺时针轨迹, 反映在折返过程中经历了近等温降压或降温降压过程, 应代表快速抬升, 而不存在热松弛演化过程, 与高压麻粒岩典型的 P - T 轨迹不同。两条轨迹都是顺时针轨迹, 说明其形成的构造环境相同, 但出于不同的构造部位。

5.9 北秦岭松树沟高压麻粒岩的 P - T 轨迹

据张建新等 (2009) 的研究, 本区高压基性麻粒岩的峰期矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Cpx}_1 + \text{Pl} + \text{Rut} \pm \text{Qtz}$, 控制的温压条件为温

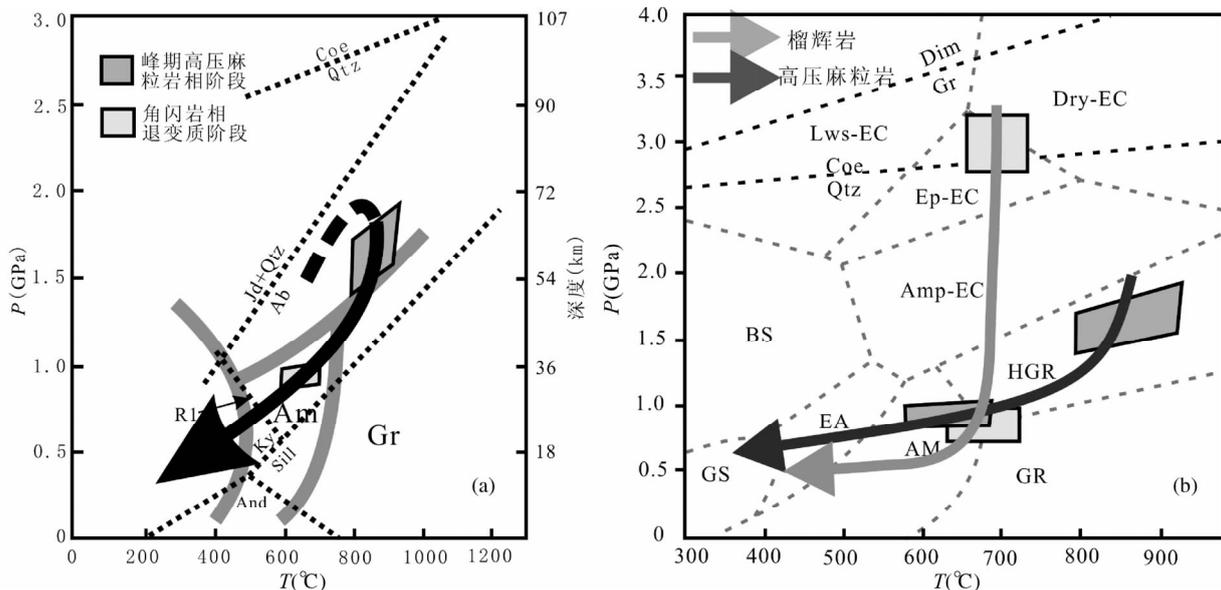


图 8 都兰地区高压麻粒岩(a, 据于胜尧等, 2009)和榴辉岩与高压麻粒岩(b) *P-T* 轨迹 (据张建新等, 2009)

Fig. 8 *P-T* path of high pressure granulite (a, after Yu *et al.*, 2009), eclogite and high pressure granulite (b, after Zhang *et al.*, 2009) in the Dulan area

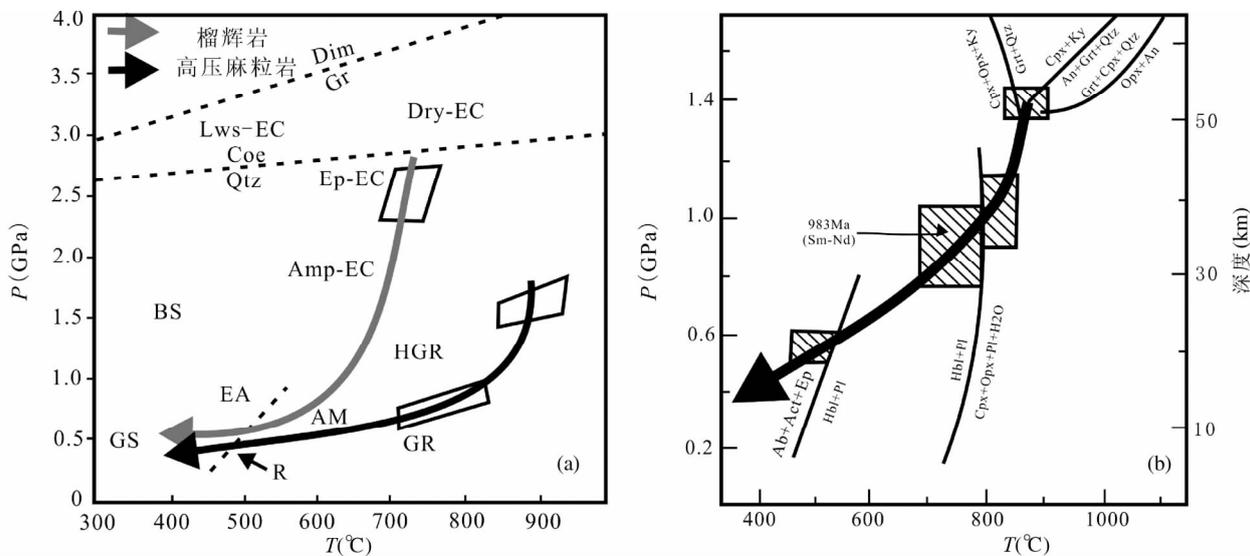


图 9 北秦岭松树沟榴辉岩和高压基性麻粒岩的 *P-T* 轨迹 (a, 据张建新等 2009; b, 据刘良等, 1995)

Fig. 9 *P-T* path of eclogite and HP granulite from Songshugou area, northern Qinling orogen (a, after Zhang *et al.*, 2009; b, after Liu *et al.*, 1995)

度 850 ~ 925°C, 压力 1.45 ~ 1.8 GPa。早期退变作用有 Opx、Cpx₂、Hbl₁ 的形成, 晚期退变作用的有绿色 Hbl₂、Bt、Ch 等矿物。长英质麻粒岩峰期矿物组合为 Grt + Kfs + Ky + Qtz; 退变 (降压) 组合包括 Sil、Bt + Mus, 珍珠云母和斜长石等。高压长英质麻粒岩的峰期压力为 1.7 GPa (假定温度为 900°C)。早期的退变组合获得的温压条件为温度 680 ~ 810°C, 压力 0.6 ~ 0.8 GPa, 与 Ky 被 Sil 所替代的变质反应结构一致。亚稳定的 Ky 分解成珍珠云母和石英, 说明退变阶段已进入角闪岩相-绿片岩相域 (图 9a)。本区榴辉岩的 *P-T* 轨迹特征

与柴北缘都兰和南阿尔金的特点一致。

张建新等 (2009) 所计算出的高压基性麻粒岩的峰期变质条件为温度 850 ~ 925°C, 压力 1.45 ~ 1.80 GPa, 与刘良等 (1995) 估算的结果基本相同。退变质作用先是近等温降压到中压麻粒岩相阶段, 然后近等压降温进入角闪岩相和绿片岩相域, 这与刘良等 (1996) 对该地区长英质麻粒岩研究得到的退变质轨迹有所区别, 但与刘良等 (1995) 对本区高级基性麻粒岩的研究结果 (图 9b) 基本相同。

刘良等 (1995) 将本区的高压基性麻粒岩的变质演化分

为4个阶段:

(1) 早期变质阶段(榴辉岩相或高压麻粒岩相): 变质矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Cpx}_1 + \text{Qtz}_1$, 其温压条件为温度 $828 \sim 887^\circ\text{C}$, 压力为 $1.4 \sim 1.58\text{GPa}$;

(2) 中压麻粒岩相阶段: $\text{Hy} + \text{Cpx}_2$ 组成的后合成晶, 温压条件温度为 $765 \sim 825^\circ\text{C}$, 压力为 $1.03 \sim 1.14\text{GPa}$;

(3) 角闪岩相阶段: 矿物组合为 $\text{Hbl}_1 + \text{Pl}$, 温压条件温度为 $650 \sim 750^\circ\text{C}$, 压力为 $0.75 \sim 1.06\text{GPa}$, 平均压力为 0.9GPa ;

(4) 绿帘角闪岩相阶段: 矿物组合为 $\text{Hbl}_2 + \text{Pl}$, 其中角闪石以镁角闪石和钙镁角闪石为主, 斜长石为钠更长石或更长石, 形成的温度为 $400 \sim 500^\circ\text{C}$, 压力为 $0.5 \sim 0.6\text{GPa}$ 。

形成一条早期近等温减压(ITD)后期降温降压的顺时针轨迹, 与板块的俯冲作用和大陆间的碰撞拉张等构造加厚模式有关, 随后发生快速抬升。

5.10 秦岭-桐柏造山带麻粒岩的 P - T - t 轨迹

据 Xiang *et al.* (2012) 对秦岭-桐柏造山带中产出的基性和半泥质麻粒岩的岩石学和矿物组合及温压条件等研究, 麻粒岩等经历了4个阶段的变质演化:

(1) 初始变质阶段(M_1): 半泥质麻粒岩的矿物组合为 $\text{Bt} + \text{Crld} + \text{Opx} + \text{Pl} + \text{Ilm}$, 呈包裹体包于石榴子石变斑晶中, 其温压条件 $T = 740 \sim 800^\circ\text{C}$, $P = 0.4 \sim 0.6\text{GPa}$ 。

(2) 峰期变质阶段(M_2): 基性麻粒岩的矿物共生组合为: $\text{Opx} + \text{Cpx} + \text{Pl} + \text{Ilm} + (\text{溶体})$, 其变质温压条件 $T = 880 \sim 920^\circ\text{C}$, $P = 0.8 \sim 1.0\text{GPa}$, 变质峰期年龄为 432Ma , 温度已达到超高温变质条件(Xiang *et al.*, 2012)。

(3) 后期减压退变阶段(M_3): 基性麻粒岩矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Hbl} + \text{Pl} + \text{Qtz} + \text{Ilm}$, 已达到 Rut 稳定区, 其温压条件为 $T = 650 \sim 750^\circ\text{C}$, $P = 0.60 \sim 0.66\text{GPa}$, 该阶段变质年龄为 415Ma 。

(4) 绿片岩相退变阶段(M_4): 矿物组合为 M_2 和 M_3 矿物的退变组合, $\text{Ch} + \text{Ep} + \text{Ilm}$, 温压条件为 $T = 500^\circ\text{C}$, $P = 0.58\text{GPa}$, 变质年龄为 404Ma 。

以上 M_1 - M_4 变质阶段的变质温压条件组成了一个逆时针的 P - T 轨迹(图10)。这一 P - T 轨迹中峰期变质温度达到 920°C , Xiang *et al.* (2012) 认为已达到超高温变质, 但缺乏典型的超高温变质矿物组合, 所以存在一定的不确定性。

另据翟淳等(1995)通过对该区高压麻粒岩矿物共生组合及一系列热事件的计算, 获得一个陡的近等温降压的(TTD)的顺时针轨迹。这些差异说明该区变质演化的复杂性, 今后应进一步系统研究。

5.11 南秦岭勉略地区麻粒岩的 P - T 轨迹

据 Xu *et al.* (1994) 的研究, 本区麻粒岩的麻粒岩相峰期的矿物共生组合为 $\text{Grt} + \text{Cpx} + \text{Pl} + \text{Rut} + \text{Qtz}$, 在鞍子山地区还见有紫苏辉石, 其它地区少见。峰期温压条件为温度 700°C , 压力 0.93GPa , 最高可达 $1.2 \sim 1.3\text{GPa}$, P - T 轨迹为顺

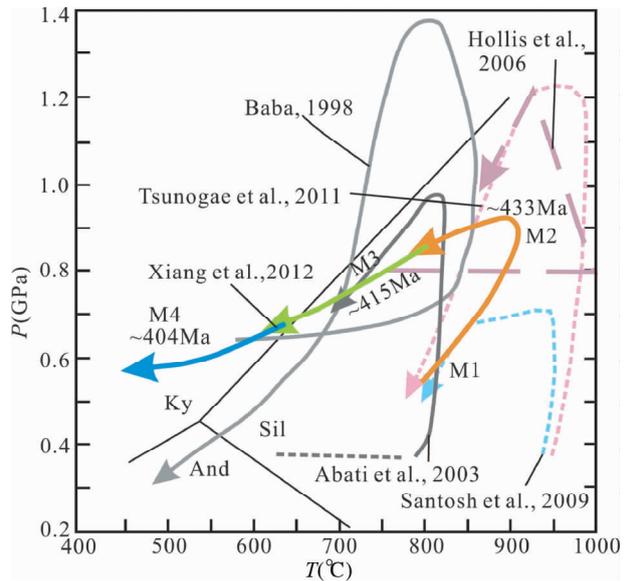


图10 秦岭-桐柏地区麻粒岩的 P - T 轨迹(据 Xiang *et al.*, 2012)

Fig. 10 P - T path of granulite from Qinling-Tongbai area (after Xiang *et al.*, 2012)

时针型, 先是快速增温增压到达峰值后, 又迅速减压降温, 峰前峰后的增温增压与减压降温速度相当(图11a), 此轨迹表明, 南秦岭勉略地区曾发生大陆碰撞作用。梁莎等(2013)利用 THERMOCALC 程序对勉略地区徐家坪的两个高压基性麻粒岩进行了 P - T 视剖面图计算。其中一个样品(11Q-28)的峰期矿物组合为 $\text{Grt}_1 + \text{Cpx} + \text{Pl}_1 + \text{Qtz}$, 对应温压条件为 $T = 800 \sim 860^\circ\text{C}$, $P = 1.24 \sim 1.46\text{GPa}$, 晚期退变质矿物组合为 $\text{Grt}_2 + \text{Hbl}_1 + \text{Pl}_2 + \text{Qtz}$, 变质温压条件为 $T = 630 \sim 690^\circ\text{C}$, $P = 0.61 \sim 0.74\text{GPa}$ 。另一个样品(12Q-15)由于石榴石“白眼圈”反应边中斜长石为富 Na 的钠-更长石, 推断其早期矿物组合中含绿辉石, 其变质峰期矿物组合可能为 $\text{Grt}_1 + \text{Omp} (?) + \text{Qtz}$ 或 $\text{Grt}_1 + \text{Cpx} (?) + \text{Pl} + \text{Qtz}$, 对应温压条件分别为 $T = 775 \sim 900^\circ\text{C}$, $P > 1.92\text{GPa}$ 或 $T = 750 \sim 850^\circ\text{C}$, $P = 1.65 \sim 1.98\text{GPa}$; 该样品经历的麻粒岩相退变质的矿物组合为 $\text{Grt}_2 + \text{Opx} + \text{Hbl}_1 + \text{Pl}_1 + \text{Qtz}$, 变质的温压条件为 $T = 650 \sim 760^\circ\text{C}$, $P = 0.71 \sim 0.92\text{GPa}$; 经历的角闪岩相退变质的矿物组合为 $\text{Grt}_3 + \text{Hbl}_2 + \text{Pl}_2 + \text{Qtz}$, 对应的变质条件为 $T = 580 \sim 640^\circ\text{C}$, $P = 0.59 \sim 0.64\text{GPa}$ 。这两件样品的变质演化的 PT 轨迹如图11b所示。从中可以看出二者都反映了顺时针的 PT 轨迹, 反映沿勉略构造带发生过俯冲-碰撞造山过程。但是二者记录的 PT 演化轨迹明显不同, 原作者认为在同一个地区两件样品峰期温压条件的不同以及在经历过相同或相似退变质后保存不同矿物组合的原因可能是这两类岩石原岩组分的差异所致。

Xu *et al.* (1994) 编制的麻粒岩 P - T 轨迹和梁莎等(2013)编制的高压麻粒岩的 P - T 轨迹都为顺时针轨迹, 但形态稍有不同。值得注意的是, 梁莎等(2013)计算的高压麻粒

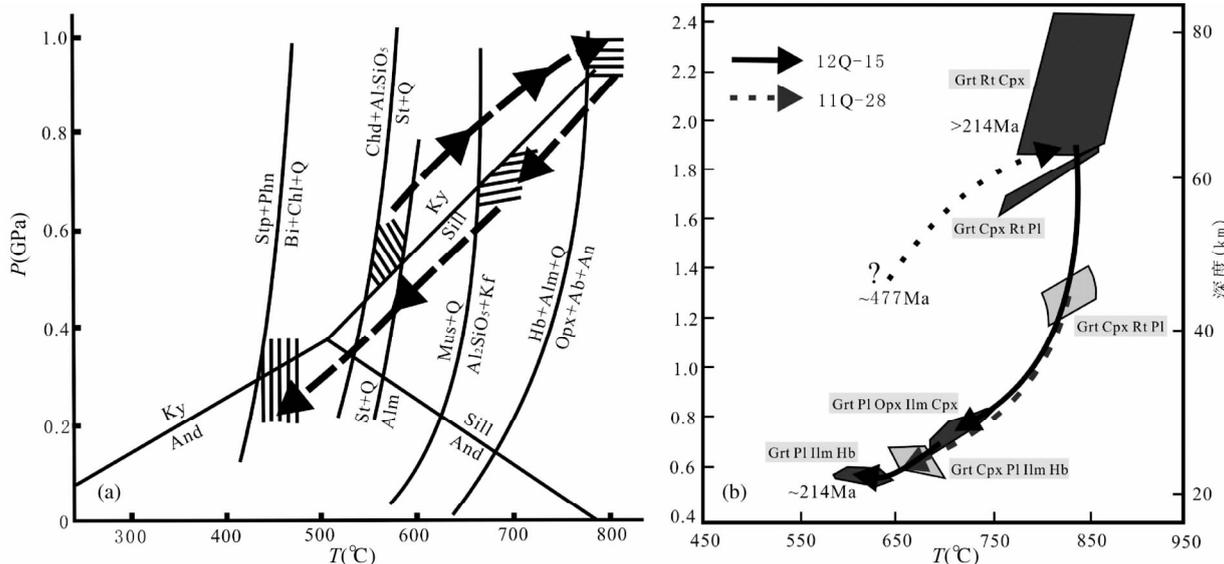


图 11 南秦岭勉略地区麻粒岩(a, 据 Xu *et al.*, 1994)和高压基性麻粒岩(b, 据梁莎等, 2013)的 *P-T* 演化轨迹

Fig. 11 *P-T* paths for granulite (a, after Xu *et al.*, 1994) and mafic HP granulites (b, after Liang *et al.*, 2013) in Mian-Lite suture zone, South Qinling orogen

岩峰期变质压力较高,其中一个麻粒岩样品的变质峰期压力达到 1.92GPa,推断该麻粒岩早期矿物组合中含有绿辉石,因此其峰期矿物组合可能为 $Grt_1 + Omp(?) + Qtz_1$,变质程度已经达到榴辉岩相,之后再经历高压麻粒岩相变质。因此本区早期可能存在榴辉岩,这是今后需要进一步研究的。

5.12 西藏班公湖-怒江造山带安多高压麻粒岩的 *P-T* 轨迹

班公湖-怒江造山带的高压麻粒岩主要出露在安多地区,张晓冉等(2010)和张修政等(2010)同时报道了该区存在高压基性麻粒岩。据张晓冉等(2010)的研究,本区的高压基性麻粒岩的变质演化分为 M_1 、 M_2 和 M_3 三个阶段:峰期高压变质阶段(M_1),峰期矿物组合为 $Grt + Cpx + Qtz + Rut$,其温压条件为温度 860 ~ 920°C,压力 1.46 ~ 1.56GPa;早期退变质阶段(M_2),代表性矿物组合为 $Opx + Pl \pm Sp$ 组成的后合成晶,形成的温压条件为温度 820 ~ 890°C,压力 0.88 ~ 1.15GPa;晚期退变质阶段(M_3):代表性矿物组合为 $Hbl + Pl$ 后合成晶, Hbl 冠状体等,温压条件为温度 530 ~ 670°C,压力 0.52 ~ 0.65GPa。以上变质演化组成一条近等温降压(ITD)的顺时针轨迹(图 12)。这一轨迹的形态与 Saxon 地区麻粒岩的轨迹十分相似,只是变质作用的温度压力有所不同。

5.13 西藏喜马拉雅中段高压麻粒岩 *P-T* 轨迹

喜马拉雅造山带中段的定结、则古拉、日玛那等地都有麻粒岩的出露。其中则古拉和定结地区的高压麻粒岩进行了较详细的变质作用演化研究。据季建清等(2004)的研究,则古拉地区高压麻粒岩出露于西藏亚东约 40km 的则古拉,产于藏南拆离系主构造下盘的高喜马拉雅结晶岩系中。麻

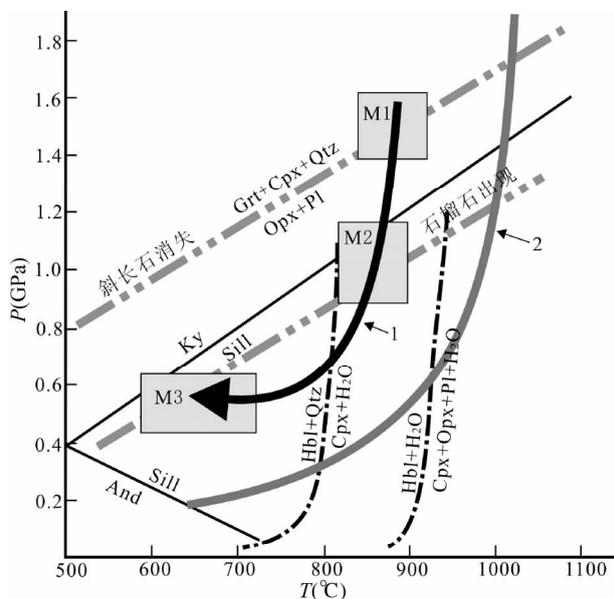


图 12 西藏安多高压麻粒岩 *P-T* 轨迹(据张晓冉等,2010)

1 为安多高压麻粒岩,2 为 Saxon 麻粒岩

Fig. 12 *P-T* path of Anduo HP granulite, Tibet (after Zhang *et al.*, 2010)

粒岩记录了峰期和晚期变质作用,峰期变质矿物组合为 $Grt + Cpx + Pl + Qtz$,其温压条件为温度 780 ~ 850°C,压力为 1.2 ~ 1.5GPa,相当的地温梯度为 16 ~ 18°C/km,晚期矿物组合为 $Hbl + Pl + Bt$ 或 $Opx + Pl$,指示了较高温度,但压力相对较低的麻粒岩相,温压条件为温度 730 ~ 760°C,压力为 0.4 ~ 0.6GPa,相当的地温梯度为 38 ~ 50°C/km,变质作用 *P-T* 轨

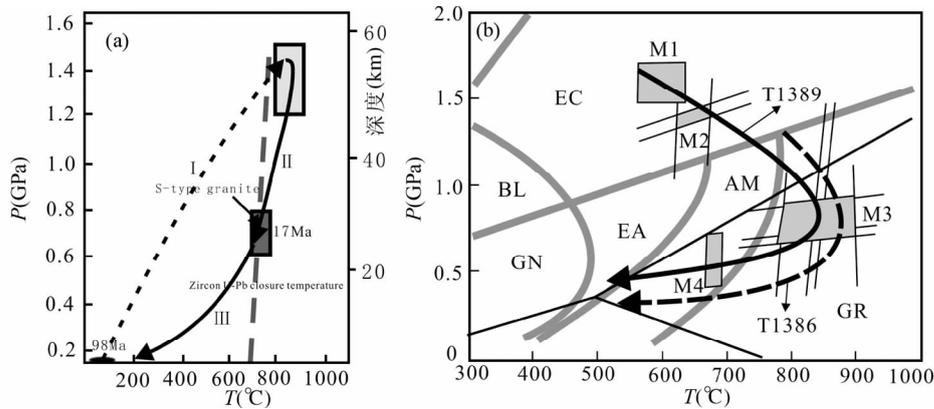


图 13 喜马拉雅造山带中段高压麻粒岩 P - T 轨迹 (a, 则古拉地区, 据季建清等, 2004; b, 日屋地区, 据刘树文等, 2005)

Fig. 13 P - T path of HP granulite in the central part of Himalayan Orogen, Tibet (a, Zherger-La area, after Ji *et al.*, 2004; b, Riwu area, after Liu *et al.*, 2005)

迹演化呈近等温降压的顺时针轨迹 (图 13a)。

刘树文等 (2005) 对定结南日屋附近的高压麻粒岩进行了岩相学研究和多种方法的温度压力计算, 认为该区的麻粒岩经历了四期变质演化。M1 阶段为榴辉岩相变质, 主要根据早期单斜辉石中出溶的钠质斜长石成分还原成单斜辉石中的硬玉和钙契尔马克分子, 原生单斜辉石分子应为绿辉石, 因此判断早期应为榴辉岩相变质。M2 阶段是极细粒的单斜辉石 + 较富钠质斜长石的后成合晶, 变质的温度压力条件为 1.35 ~ 1.48 GPa, 625 ~ 675°C (榴辉岩相-高压麻粒岩相变质阶段)。M3 阶段的矿物组合为钙质斜长石 + 单斜辉石 + 斜方辉石的后成合晶, 变质的温度压力条件为 0.7 ~ 0.95 GPa, 775 ~ 900°C (麻粒岩相变质阶段)。M4 阶段的矿物组合为角闪石 + 斜长石, 变质的温度压力条件为 0.4 ~ 0.75 GPa, 660 ~ 700°C (角闪岩相变质阶段)。这种演化过程构成了顺时针的 P - T 轨迹 (图 13b), 这种变质演化的 P - T 轨迹, 记录了早期低温高压, 到中期中压高温到晚期中低压中温变质作用的演化过程, 具有典型的俯冲增厚-构造剥蚀-伸展隆升构造热演化特征。

5.14 西藏喜马拉雅东构造结一带麻粒岩的 P - T 轨迹

在喜马拉雅东构造结的南迦巴瓦一带出露较多的麻粒岩, 有的产于南迦巴瓦岩群中, 有的产于林芝岩群中, 麻粒岩的岩石类型也比较多, 形成时代也不尽相同。许多研究者对它们的变质作用进行了研究 (丁林和钟大赉, 1999; 刘焰和钟大赉, 1998; 孙志明等, 2004b; 张泽明等, 2007; Zhang *et al.*, 2010, 2012b; Lin *et al.*, 2013)。本文仅就其中显生宙麻粒岩的一些成果进行介绍。

据丁林和钟大赉 (1999) 的研究, 本区石榴蓝晶石高压麻粒岩经历了 M1, M2 和 M3 三个变质演化阶段。M1 为峰前变质阶段, 代表性矿物组合为 Mus + Bt + Kf + Qtz, M2 为峰期变质阶段, 代表性的矿物共生组合为 Grt + Ky + Tf + Rut + Qtz, 温压条件为温度 750 ~ 850°C, 压力为 1.40 ~ 1.80 GPa, M3 为

退变质阶段, 代表性矿物组合为 Grt + Sil + Crd + Sp + Ilm + Opx, 温压条件为温度 621 ~ 726°C, 压力为 0.6 ~ 0.7 GPa, 所限定的 P - T 轨迹为一个顺时针轨迹, 具有等温降压 (ITD) 的特征 (图 14a)。由于构造加厚, 产生高峰变质组合的同位素年龄为 45 ~ 69 Ma, 在稍后期减压抬升过程中, 叠加产生退变质组合的同位素年龄为 18 ~ 23 Ma。

据孙志明等 (2004b) 对直白岩组中出露的石榴蓝晶石高压麻粒岩和石榴单斜辉石岩两种高压岩石进行了研究, 认为本区早期 (M₁) 变质作用阶段的温压条件为温度 614 ~ 800°C, 压力为 0.48 ~ 0.93 GPa, 早期的高压麻粒岩相变质阶段 (M₂ 或 A) 是由石榴子石变斑晶及其中包裹矿物 Cpx + Grt + Qtz, 在石榴子石变斑晶中可以看到混圆状的石英细小包裹体, 可见放射状的裂隙, 还显示有柯石英存在的可能, 温压条件为温度 850°C, 压力 1.65 ~ 1.8 GPa, 中压的麻粒岩相变质 (M₃ 或 B) 变质矿物组合以石榴子石变斑晶周围的白色冠状后生合晶为代表, 矿物共生组合是 Cpx + Opx + Pl ± Hbl (褐色), 温压条件为温度 621 ~ 726°C, 压力 0.6 ~ 0.7 GPa, 后期变质阶段的矿物组合是 Hbl (褐色) + Pl, 温压条件为温度 660 ~ 792°C, 压力大于 0.5 GPa。这一变质过程组成了一条近等温降压明显的顺时针轨迹 (图 14b)。

据张泽明等 (2007) 的研究, 该区石榴辉石岩典型的矿物组合为 Grt + Cpx + Rut, 其峰期变质 (图 14c 中 I) 的温压条件为温度 800 ~ 900°C, 压力 2.6 ~ 2.8 GPa, 相当于榴辉岩相的变质 (I), 对应的地温梯度为 80 ~ 100°C/km, 基于 Liu and Zhong (1997)、刘焰和钟大赉 (1998) (图 12c 中 II、III) 和丁林和钟大赉 (1999) (图 14c 中 IV 和 V) 所获得的高压麻粒岩、中压麻粒岩退变质温压条件, 可大致限定石榴辉石岩的退变作用和 P - T 轨迹, 这一轨迹先为等温减压, 后为降温减压的顺时针轨迹 (图 14c)。该结果的峰期变质压力条件比丁林和钟大赉 (1999) 及孙志明等 (2004b) 得出峰期压力条件更高, 但 P - T 轨迹总体特征基本一致, 是同一大地构造环境下的产物。

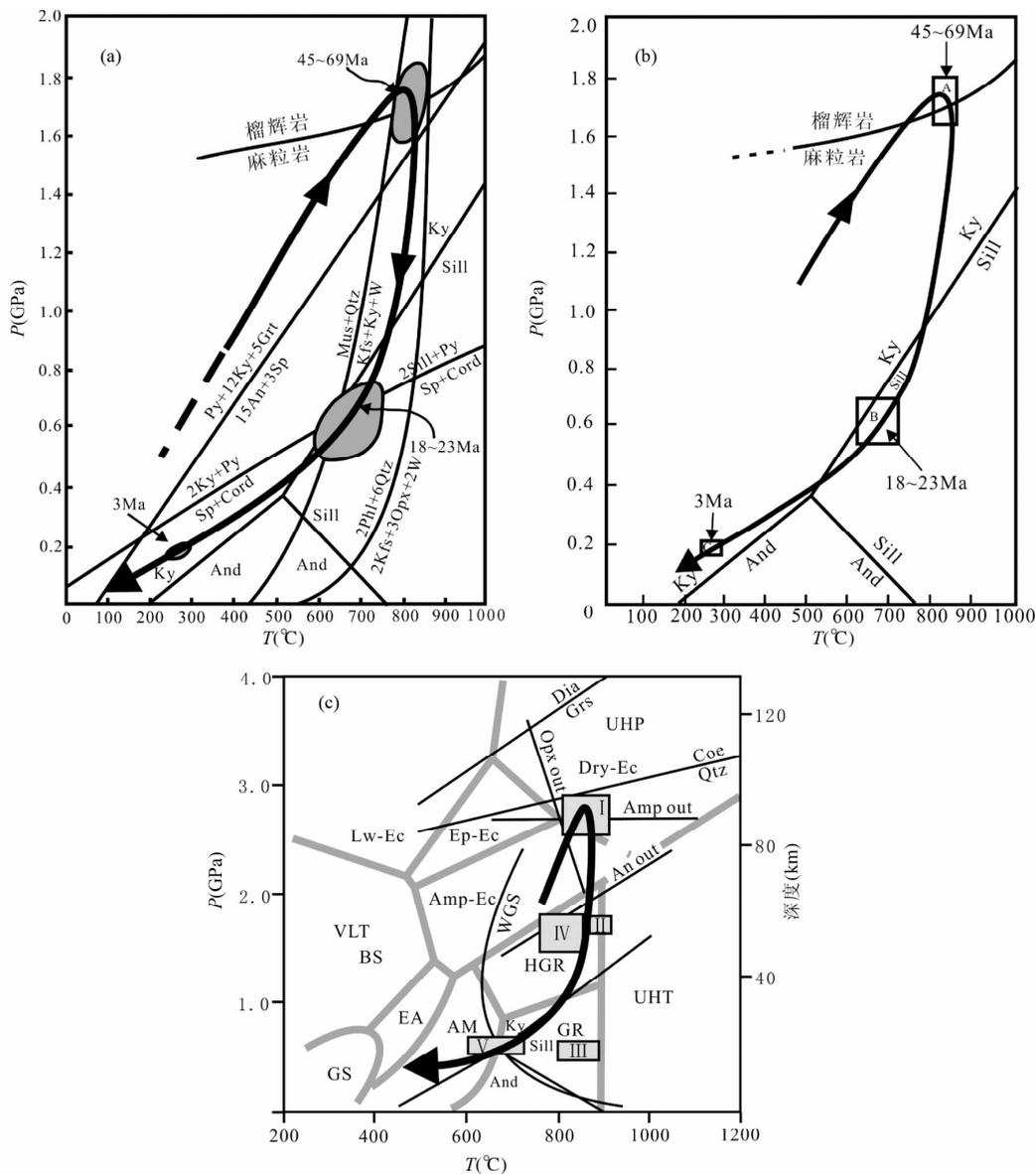


图 14 喜马拉雅东构造结南迦巴瓦一带高压麻粒岩的 *P-T* 轨迹 (a, 据丁林和钟大赉, 1999; b, 据孙志明等, 2004b; c, 据张泽明等, 2007)

Fig. 14 Metamorphic *P-T* paths of HP granulite in the Namjarbarwa area, Tibet (a, after Ding and Zhong, 1999; b, after Sun *et al.*, 2004b; c, after Zhang *et al.*, 2007)

6 一些显生宙造山带麻粒岩产出的大地构造背景

6.1 西南天山木札尔特河一带的低压麻粒岩形成的大地构造背景

苟龙龙和张立飞(2009)通过对该区岩石学和 *P-T* 轨迹的研究, 该区低压麻粒岩显示晚期近等压冷却 (IBC) 特点的逆时针轨迹, 从而认为西南天山洋闭合过程中, 由于俯冲产生的岛弧岩浆作用加热大陆地壳形成了一套低压高温泥质麻粒岩。在西南天山, 以长阿吾子断裂带为界其南侧发现了

高压-超高压变质带 (Gao *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2002a, b, 2003a, b), 其北侧发现了低压高温泥质麻粒岩 (李强和张立飞, 2004; 苟龙龙和张立飞, 2009), 它们共同组成了双变质带。一般认为双变质带在靠近大洋一侧为高压变质相系, 其中变质基性岩出现蓝片岩、榴辉岩等高压岩石; 而靠近大陆一侧为低压相系, 其中变质泥质岩石中出现红柱石-夕线石型的变质作用 (Miyashiro, 1961a, b)。Brown (1998) 认为, 在板块会聚斜俯冲作用过程中, 由于平行海沟方向的构造置换, 使得高压和低压变质体地叠置在一起形成了双变质带。尽管双变质带成因可能有不同的构造模式解释, 但作为形成时代相近、空间上平行分布的高一低压变质带是与板块俯冲

作用过程相关还是为人们所接受的。西南天山地区低压高温麻粒岩的形成与塔里木板块向伊犁-中天山板块俯冲的构造过程有关。

6.2 阿尔泰造山带各种麻粒岩形成的大地构造背景

阿尔泰造山带是中亚地区一条重要的造山带,该造山带不但构造运动、变质作用和岩浆活动非常复杂,而且是一条举世闻名的多金属矿带。到目前为止,该带已先后发现低压泥质麻粒岩、高压基性麻粒岩、低中压基性麻粒岩、高温-超高温泥质麻粒岩,它们与原先的递增变质带以及相互之间的关系都尚不十分清楚,对该带麻粒岩的变质演化历史和形成的大地构造背景的认识提出了不同的认识。

Wei *et al.* (2007) 认为蓝晶石带形成于早期 (365Ma), 红柱石带为晚期叠加, 而郑长青等 (2007) (转引自全来喜, 2011) 则认为二者形成于同一时代 (265Ma), 该浅变质带的构造背景有大陆碰撞、洋壳俯冲和板片窗以及地幔柱等说法。

蒋映聪等 (2009) 在本区夕线石带的高级变质岩石中采用 LA-ICPMS U-Pb 定年方法对变质锆石增生边进行了测定, 获得 ~390Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄, 认为代表一起重要的高温变质作用时代。

陈汉林等 (2006) 认为, 基性麻粒岩的原岩年龄为 268 ~ 279Ma, 变质年龄在 255Ma, 属晚二叠纪。在该时期, 阿尔泰造山带发生强烈构造事件, 引起了岛弧钙碱性玄武岩发生麻粒岩相变质作用, 形成富蕴乌恰沟基性麻粒岩。

据魏春景等 (2008) 研究, 阿尔泰造山带南缘存在大量二叠纪构造热事件的产物, 例如发育很多花岗岩 (290 ~ 270Ma)、基性超基性岩体 (287 ± 5Ma) 和基性岩脉体 (289Ma), 这些产物与低压变质带和泥质麻粒岩具有时间的一致性, 它们均发育于阿尔泰南缘额尔齐斯构造带附近, 低压变质带应该代表幔源基性岩浆底侵引起的高温变质产物, 显示伸展构造背景下构造热事件的组合特征。

房子龙等 (2010) 在本区发现尖晶石 + 石英组合为特征的超高温泥质麻粒岩, 其 *P-T* 轨迹为一种近等压降温的顺时针轨迹, 认为阿尔泰造山带形成过程中由于洋-陆俯冲碰撞作用后造山阶段来自深部异常热的提供, 从而在深部发生了高温-超高温变质作用。

全来喜 (2011) 通过野外工作, 在阿尔泰东喀拉苏附近发现含 Opx + Sil 高温泥质麻粒岩组合, 其峰期变质条件为温度 870°C, 压力 0.9GPa, 说明其没有达到超高温条件, 但高于王伟等报道的低压泥质麻粒岩的变质条件。他根据年代学资料提出该造山带在泥盆纪 (380 ~ 390Ma) 和二叠纪 (270 ~ 290Ma) 曾发生两期区域变质作用, 考虑到阿尔泰造山带附近变质岩也曾有 390Ma 的变质年龄, 他认为可能的解释是早期变质阶段发生于 390Ma, 反映了洋壳的消减, 而峰期变质阶段发生于 290Ma, 期间为深部伸展加热过程, 这可能与深部存在地幔柱活动有关。

房子龙等 (2011) 利用 LA-ICP-MS 方法测得超高温泥质麻粒岩锆石 U-Pb 年龄集中在 269 ± 2Ma ~ 292 ± 3Ma 范围内, 平均为 277Ma, 指示其峰期变质年龄, 很可能在早二叠世碰撞之前发生退变质作用, 推断高温超高温泥质麻粒岩的形成可能与晚古生代古亚洲洋的向北俯冲, 西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准格尔板块增生-碰撞以及随后降压过程中快速抬升有关。

上述资料表明对阿尔泰地区的麻粒岩的变质期次、形成的大地构造背景还存在较大分歧, 尚需进一步深入研究。

6.3 西昆仑山塔什库尔干高压麻粒岩的大地构造意义

西昆仑山位于青藏高原的西北缘, 它西与帕米尔东构造带相连, 东连东昆仑-阿尔金造山带, 是目前研究古亚洲洋构造域和古特提斯古构造域关系的关键地区。西昆仑康西瓦断裂带是塔里木盆地西南缘一条规模巨大的构造缝合带, 它西起哈萨克斯坦乌兹别里山口, 向东南延伸至麻扎、三十里, 东经康西瓦穆土山至琼木孜塔格, 西南被阿尔金断裂斜向截断, 在我国境内延伸近 1000km, 宽 3.5km, 构造带总体走向北西, 倾向东北, 整体呈反“S”形, 主弧向南突出。在西昆仑塔什库尔干北康西瓦构造带附近发现的高压麻粒岩以及在康西瓦断裂北侧发现的低压麻粒岩, 在探讨西昆仑大地构造演化方面具有重要地质意义。西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩峰期麻粒岩相变质温压条件为温度 760 ~ 820°C, 压力 1.0 ~ 1.2GPa, 角闪岩相退变质的温压条件为 620 ~ 720°C 和 0.7 ~ 0.8GPa, 峰期变质的温压条件应落入高压麻粒岩范围内, 结合其中的石榴子石具有明显的钠斜长石和单斜辉石组成的退变“白眼圈”结构或呈冠状体, 表明高压变质峰期之后经历了减压过程, 结合其具有明显的石榴子石冠状体特征 (曲军锋等, 2007), 推测其形成可能经历了榴辉岩相变质作用, 结合角闪岩相的退变质作用, 具有顺时针的 *P-T* 轨迹特征, 可能代表了碰撞造山过程增厚的下地壳抬升折返地表的动力学过程。康西瓦断裂带可能代表了古特提斯洋向北俯冲消减的界线。据郭坤一等 (2003) 研究, 康西瓦断裂带演化起始时代确定在二叠纪末至三叠纪初, 在三叠纪末最终形成, 古特提斯洋自二叠纪末分别向冈瓦纳大陆、劳亚大陆消减, 洋盆向北的俯冲消减带就位于塔什库尔干-康西瓦-木孜塔格北-玛沁断裂一线。康西瓦断裂东部木孜塔格北坡出露类似蛇绿岩的岩石组合代表了古特提斯洋洋壳的残留。西昆仑地区发育了与此构造运动对应的岩浆弧, 并受到俯冲消减带的明显控制。曲军锋等 (2007) 报道的 SHRIMP 定年结果表明高压麻粒岩的角闪岩相退变年龄为 177 ± 6Ma, 说明高压麻粒岩的形成要略早于这个年龄, 从岩相学来看, 该岩石退变比较强烈, 经历了较长时间的角闪岩相退变作用, 因此推断高压麻粒岩形成的时代可能在三叠纪末之前, 这与区域地质及前人在本区的工作基本吻合, 而对 456 ± 30Ma 的原岩性质尚需进一步研究。但据郭坤一等 (2003) 对石榴夕线片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年表明, 锆石 Th/U 比值低于 0.1,

均为变质形成,两组谐和年龄分别为 420 ~ 460Ma 和 230 ~ 280Ma,原作者认为这套片麻岩在加里东和印支期被强烈改造,推测主期中、低压麻粒岩相变质作用发生在加里东期。张传林等(2007)对该区的孔兹岩系中含夕线石榴黑云斜长片麻岩中的锆石进行了 LA-ICPMS U-Pb 年龄测定,获得 200Ma, 240 ~ 270Ma, 340Ma 和 400 ~ 600Ma 几组年龄峰值,并认为其沉积年龄大约在新元古代晚期到早古生代,并在加里东期和海西-印支期发生变质。并根据其它的年代学资料推断,南昆仑地体是加里东期增生到北昆仑地体南缘的造山带,并在此基础上叠加了晚古生代-早中生代的岩浆弧。Yang *et al.* (2010)对该区夕线石榴黑云片麻岩和石榴角闪片麻岩进行了锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年,分别获得了 220 ± 2 Ma 和 220 ± 3 Ma 的变质年龄,最年轻的碎屑锆石为 253Ma。由于所采集样品与基性高压麻粒岩和泥质高压麻粒岩产于同一位置或其附近,因此限定本区高压麻粒岩的峰期变质时代应介于 220 ~ 253Ma 之间,进而认为古特提斯洋在本区消减、俯冲碰撞形成康西瓦构造带的时代应为印支期。肖文交等(2000)通过大地构造相分析,认为西昆仑造山带存在复杂的多岛海-增生弧造山作用,这种复杂的多岛增生作用是欧亚大陆向南增生的重要特征。

6.4 南天山榆树沟高压麻粒岩形成的地质背景

据王润三等(1999a, b)和周鼎武等(2004)的研究,南天山榆树沟蛇绿岩地体出露于南天山东段的榆树沟-铜花山-硫磺山蛇绿混杂岩中,地体组成的岩石学、地球化学以及 *P-T* 轨迹变质演化特征揭示它是大洋岩石被俯冲至 40 ~ 50km,经深地壳高压麻粒岩相变质的蛇绿岩残片,并遭受中压麻粒岩相退变质及相应的深地壳固体流变、强变形改造,在抬升出露过程中,有角闪岩相-绿片岩相的叠加,具多期变质特征,天山造山带是全球和中国重要的造山带之一,南天山造山带是古生代重要的板块缝合带。周鼎武等(2004)在高压麻粒岩中获得了 392 ± 7 Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄,它不仅记录了该地体经历了高压麻粒岩相变质作用的峰期变质年龄,而且提供了南天山洋盆在泥盆纪早期已经开始俯冲的信息,也同样得到出露于榆树沟地体东侧铜花山一带蓝片岩形成年龄为 360 ± 2 Ma 的佐证。

6.5 秦岭-桐柏造山带麻粒岩及 HP-UHP 变质岩的大地构造背景

据 Xiang *et al.* (2012)的研究,桐柏造山带北部麻粒岩记录了 440 ~ 400Ma 期间具有逆时针 *P-T* 的变质演化过程。在 432Ma 时麻粒岩相峰期的变质温度为 880 ~ 920°C,压力为 0.8 ~ 1.0GPa,形成超高温麻粒岩,但缺乏典型的超高温矿物组合。随后在 415Ma 时减压冷却, $T = 650 \sim 750^\circ\text{C}$, $P = 0.6 \sim 0.66$ GPa,形成了退变质矿物组合。变质作用的演化过程可能与洋壳俯冲,伴随秦岭洋向北消减、汇聚和闭合有关。

从整体上看,桐柏造山带中古生代麻粒岩相变质作用只

是北秦岭造山带构造演化多个事件的组成部分之一。北秦岭造山带曾发生过多期俯冲碰撞事件和多期不同性质的变质演化。据 Wang *et al.* (2011)的研究,北秦岭造山带与华南陆块具有亲缘性,在碰撞前属于华南陆块。约在 485Ma 时,北秦岭造山带发生陆壳俯冲,发生超高压变质作用。Cheng *et al.* (2011)认为在 473 ~ 490Ma 发生榴辉岩相变质;在 480Ma 时地壳回返发生流体活动;在约 430Ma 是弧陆碰撞并发生麻粒岩相变质,形成各种麻粒岩;在 420 ~ 400Ma 期间古特提斯洋开启,地体伸展和隆起;400Ma 时发生角闪岩相变质;在 310Ma 时洋壳与伴生基底发生高压榴辉岩相变质;约在 393Ma 有花岗岩侵入;最后在 256 ~ 220Ma 期间大陆俯冲,并发生高压-超高压变质作用。我们认为,部分高压和中压麻粒岩相变质作用也发生在最后一个阶段。

6.6 南秦岭勉略造山带麻粒岩形成的大地构造背景

据 Xu *et al.* (1994)的研究,南秦岭造山带位于扬子克拉通北部大陆边缘,与秦岭造山带具有相同的大陆基底,但南秦岭勉略地区的北部存在蛇绿岩地体,伴生构造混杂岩,蛇绿岩形成于岛弧环境,它的存在表明在南秦岭板块和扬子克拉通之间存在有限洋盆或大洋壳,组成一个缝合带。本区出露的基性麻粒岩,变质程度达麻粒岩相,表示来自于中下地壳;*P-T* 轨迹为顺时针,表明在勉略地区曾发生洋-陆俯冲碰撞作用。勉略造山带变质压力北高南低正反映了勉略小洋盆向北俯冲,或扬子板块向北俯冲碰撞的极性(李三忠等, 2000)。勉略蛇绿岩带东部变质深达角闪岩相至麻粒岩相,西部仅为浅变质。后构造伸展时,东部抬升较高,故出露麻粒岩相岩石。

6.7 阿尔金造山带中高压泥质麻粒岩形成的大地构造背景

阿尔金造山带为青藏高原的北部边界,是中国西部主要大地构造单元的衔接地带。近年来,在阿尔金造山带西段江孜勒萨依地区榴辉岩及其围岩长英质片麻岩(片岩)中发现了超高压变质的证据。在阿尔金中段英格利萨依(巴什瓦克)也发现了超高压变质岩,进一步的岩石、地球化学和年代研究表明这两个地区不同类型的超高压岩石的原岩皆为陆壳岩石或就位于地壳的镁铁质-超镁铁质岩石,他们的峰期变质时代集中在 500Ma 左右。阿尔金清水泉地区的高压泥质麻粒岩-石榴蓝晶黑云母片麻岩的原岩为典型的陆缘沉积岩,其峰期变质的矿物共生组合为 $\text{Grt} + \text{Ky} + \text{Kfs} + \text{Rut} + \text{Qtz}$, 其温压条件为温度大于 800°C,压力大于 1.0GPa,已达到高压麻粒岩相,其 *P-T* 轨迹为顺时针,具有近等压冷却特点,其变质年龄为 486 ± 5 Ma,与阿尔金英格利萨依地区的石榴二辉橄榄岩、含石榴子石的花岗片麻岩和片麻状含钾长石榴辉岩的变质时代(487 ± 10 Ma ~ 509 ± 12 Ma)、阿尔金江孜勒萨依地区的榴辉岩(493 ± 4 Ma)及其直接围岩片麻岩(499 ± 27 Ma)的变质时代(刘良等, 2007)在误差范围内一致。南阿尔金木纳布拉克地区高压泥质麻粒岩的峰期变质时代为

485 ± 5Ma (曹玉亭等, 2013), 不仅与南阿尔金淡水泉的高压麻粒岩的变质时代一致, 而且与南阿尔金其他地区超高压岩石的峰期变质年龄一致, 表明 500Ma 左右的高压-超高压变质作用在阿尔金南缘造山带广泛分布, 阿尔金南缘造山带是一条早古生代陆壳深俯冲有关的高压-超高压变质带。

6.8 西藏班公湖-怒江造山带安多高压麻粒岩的大地构造背景

张晓冉等(2010)根据岩石学和变质演化 $P-T$ 轨迹的特点, 认为安多高压麻粒岩是班-怒造山带洋壳俯冲的产物。解超明等(2013)确定了安多高压麻粒岩的变质年龄为 479 ± 1.7Ma, 他们认为安多高压麻粒岩的形成不应该是班-怒洋壳俯冲的产物, 更应是聂荣微陆块内古老下地壳麻粒岩相的产物, 并提出了三个证据: 一是高压麻粒岩产于聂荣微陆块的内部, 而不是在班-怒构造带上; 第二是已有关于麻粒岩及榴辉岩的研究表明, 低压型榴辉岩的产出位置都集中在俯冲带或构造带之上, 而本次获得的高压麻粒岩具有等温降压的顺时针轨迹, 显示快速抬升的变质作用特征; 第三是从锆石的稀土微量元素组成分析, 轻稀土配分曲线表现明显的一致性, 核部岩浆锆石重稀土富集而变质锆石表现为重稀土平缓的趋势, 含量明显低于核部锆石, 核部锆石年龄最小为 541Ma, 指示麻粒岩的原岩形成于下地壳的古老基底。因此安多麻粒岩是形成于班公湖-怒江造山带还是形成于聂荣微陆块内部有待进一步研究。

6.9 西藏喜马拉雅造山带东段麻粒岩形成的大地构造背景

喜马拉雅造山带是青藏高原一个十分重要的造山带, 在该造山带西部的西构造结, 在巴基斯坦北部和印度西北部, 前人先后发现始新世榴辉岩、高压麻粒岩、超高温变质岩石, 并在榴辉岩中发现超高压矿物 (Kaneko *et al.*, 2003; 廖群安等, 2003; Wilke *et al.*, 2010; 张泽明等, 2007, 2013)。钟大赉和丁林(1995)、刘焰和钟大赉(1998)在东喜马拉雅构造结的大拐弯一带发现了高压麻粒岩, 在喜马拉雅带的中段, 前人曾根据马卡鲁附近的镁铁质岩中石榴子石和辉石(已消失)存在典型的降压反映记录, 推测该区可能存在过榴辉岩。据廖群安等(2003)在高喜马拉雅带的定日、曲当一扎乡出露的高喜马拉雅结晶岩中发现了高压变质的石榴辉石岩及其降压变质的镁铁质麻粒岩。丁林和钟大赉(1999)、孙志明等(2004b)曾对东构造结一带的高压麻粒岩进行过研究并编制了 $P-T$ 轨迹, 季建清等(2004)和刘树文等(2005)对喜马拉雅造山带中段的高压麻粒岩都做了 $P-T$ 轨迹的研究, 各地高压麻粒岩的 $P-T$ 轨迹十分相近或基本一致。截至目前, 喜马拉雅造山带中段和东构造结尚未发现榴辉岩和超高压变质岩, 但东构造结中出露的石榴辉石岩曾经历了明显的榴辉岩相变质。张泽明等(2007)认为东构造结由于强烈的高压麻粒岩相变质作用的叠加, 致使东构造结很难发现早期的超高压变质作用。东喜马拉雅造山带东构造结所见的石榴

辉石岩所经历的榴辉岩相变质作用, 退变质阶段经历了高压麻粒岩相和中、低压麻粒岩相变质作用, 所显示的早期明显近等温降压(ITC)特征的顺时针 $P-T$ 轨迹, 表明它们是同一大地构造环境下的产物。它们经历了洋壳俯冲、大陆碰撞, 然后折返抬升的模式。

据 Zhang *et al.* (2010, 2012b) 的研究表明, 冈底斯紫苏花岗岩的围岩即林芝岩群也经历了同时代的高温麻粒岩相的变质作用, 高温岩浆作用与高温变质作用同时存在是扩张洋脊俯冲和板片窗口形成的重要标志。研究证明紫苏花岗岩的侵入可能导致围岩发生麻粒岩相变质作用, 地幔上涌和岛弧岩浆作用为紫苏花岗岩和伴生的高温、超高温变质作用提供了理想的地球动力学环境。一般认为新特提斯洋向亚洲大陆之下俯冲开始于 130Ma, 新特提斯洋的俯冲发生在 90Ma, 亚洲板块与印度板块碰撞发生于 55Ma。

7 几点规律性的认识

7.1 显生宙造山带中产出的麻粒岩由单一的高压麻粒岩到多种麻粒岩并存

如南秦岭勉略造山带和西藏班-怒造山带中仅出现一种高压麻粒岩, 一般麻粒岩的岩石类型都在一种以上。阿尔泰造山带出露的麻粒岩类型较全, 有低压泥质麻粒岩, 高温泥质麻粒岩和超高温麻粒岩, 还有中低压基性麻粒岩和高压基性麻粒岩; 喜马拉雅造山带东段造山带中既见有泥质高压麻粒岩, 又有榴辉岩化的石榴辉石岩以及其退变形成的高压和中、低压麻粒岩。

7.2 变质期次多

显生宙造山带麻粒岩的变质期次由于研究程度不一, 少数麻粒岩的变质时代有争议而存在不确定性, 但从整体而言, 变质期次大部分已厘清, 除个别造山带的低压麻粒岩变质时代属晋宁期外, 加里东、海西、印支-燕山一直到喜山期都有所见, 而以加里东期和喜山期更加发育。中国西部造山带中麻粒岩的变质期次, 从北部的(原)古特提斯到南部的新特提斯造山带, 其变质期次与造山带的形成时代紧密吻合一致。

7.3 显生宙造山带麻粒岩的成因和大地构造背景有相似性

关于显生宙麻粒岩的成因, Windley (1991) 曾进行过详细的讨论, 他认为显生宙麻粒岩可能形成于威尔逊旋回的各个阶段和不同部位, (1) 板块聚合时; (2) 岛弧和安第斯型活动板块边缘; (3) 安第斯型岩基根部; (4) 边缘盆地封闭时; (5) 喜马拉雅型碰撞时; (6) 深部后构造侵入体侵入时。重要的是喜马拉雅造山带含有任何一种麻粒岩, 大多数麻粒岩沿活动板块边缘的岩浆弧生长, 它们是显生宙地壳生长的主要部位。

Bohlen (1991) 提出区域麻粒岩需要瞬时大于 $35^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的平均地热梯度, 包含超过 $100\text{mW}/\text{m}^2$ 的热流的 *P-T* 条件, 这样的高热流可能来源于岩浆热, 它存在于会聚板块边缘、大陆裂谷、热点和大的岩基边缘的大地构造位置。

O'Brien and Rötzler (2003) 认为大部分高压麻粒岩中斜方辉石是压力低于峰期的次要反应产物, 对应于低-中压麻粒岩, 它们产于正常大陆地壳的中低水平。高压麻粒岩 (不包括包体成因) 许多是导致地壳加厚或地壳俯冲到地幔条件下构造事件的结果。Harley (2008) 认为超高温麻粒岩相变质作用是在深达 $20 \sim 40\text{km}$ 、大陆地壳温度大于 900°C 下形成的, 它的降压 *P-T* 轨迹具有特征的 $\text{dpdT} \sim 25 \pm 10\text{bar}/^{\circ}\text{C}$ 。Santosh *et al.* (2009) 提出了超高温麻粒岩热折返模式 (hot exhumation), 假说在俯冲和折返过程中, 低热传导使得板块边界的岩石在高温条件下变质。赵国春 (2009) 以大青山集宁地区孔兹岩系中含假蓝宝石超高温泥质麻粒岩为例, 认为超高温麻粒岩是碰撞造山后拉伸引发的地幔岩浆底侵导致局部地带发生超高温麻粒岩相变质作用。

我国中西部显生宙造山带中出现的高压泥质麻粒岩、高压长英质麻粒岩以及高压基性麻粒岩, 数量最多, 通过详细的变质岩石学研究, 其代表性的 *P-T* 变质演化轨迹均显示为早期具等温降压特征 (ITC) 的顺时针轨迹, 原作者无一例外地将其大地构造背景与大陆碰撞模式相联系。西部显生宙造山带麻粒岩大都赋存于蛇绿岩套和蛇绿混杂岩中, 共同遭受麻粒岩相变质, 有的还与榴辉岩和高压超高温变质岩伴生。这些蛇绿岩或蛇绿混杂岩代表洋壳或洋壳残余物, 所以严格地说, 它们形成的大地构造环境应该是洋壳俯冲、洋-陆俯冲和洋-陆碰撞的产物, 只有少数属于陆-陆碰撞俯冲模式。

7.4 高压麻粒岩有的与榴辉岩和高压/超高压变质带组成双变质带

柴达木东南部都兰、北秦岭造山带和南阿尔金造山带中的高压麻粒岩和高压榴辉岩, 在同一造山带中并存, 赋存于造山带的不同构造部位, 各自具有独立的变质演化历史, 均显示顺时针的 *P-T* 轨迹, 但形态有一些差别。高压榴辉岩经峰期榴辉岩变质后直接退变为角闪岩相, 不经过高压、中低压麻粒岩阶段。高压麻粒岩的形成并不是由于榴辉岩在抬升过程中热松弛的结果。现有的同位素年代学资料显示上述三个地区榴辉岩的变质时代和相邻的高压麻粒岩的变质时代基本一致。榴辉岩的形成与洋壳或大陆的俯冲作用有关, 即形成于俯冲带环境, 其有相对低的地温梯度, 上述三地榴辉岩的地温梯度大致在 $6 \sim 10^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 符合俯冲带环境。高压麻粒岩可形成于俯冲带也可存在于增厚的造山带下地壳环境, 高压麻粒岩的最大压力一般在 $1.5 \sim 2.5\text{GPa}$, 所对应的深度大约在 $50 \sim 80\text{km}$, 这样的形成深度与增厚的造山带底部环境相当。由此, 张建新等 (2009) 认为其形成的构造环境可能是俯冲带增厚的地壳的根部, 这样的构造环境具有比俯冲带更热的构造环境, 即具有更高的地温梯度。一些高

压麻粒岩常常与超基性岩共生, 可能反映了其形成在壳幔过渡带或靠近俯冲带上部的地幔楔位置。高压榴辉岩与高压麻粒岩组成双变质带, 张建新等 (2009) 指出, 这似乎与洋壳俯冲所形成的双变质带类似, 但不同的是, 双变质带的榴辉岩是指高压/低温类型与低压/高温类型成对出现, 而这里所指的榴辉岩主要为高压-超高压/中温类型, 而成对出现的高压麻粒岩为高温-超高温/高压类型, 这种成对出现的榴辉岩和高压麻粒岩可能主要与大陆俯冲作用有关, 部分形成于洋壳向大陆地壳 (岩石圈) 俯冲的动力学环境下。

7.5 麻粒岩相变质作用形成于榴辉岩相变质演化过程的热松弛模式

这种现象比较普遍, 例如北秦岭造山带和大别造山带中麻粒岩的生成, 都适用于此模式。北秦岭造山带松树沟高压麻粒岩经退变为中低压麻粒岩 (刘良等, 1996)。大别造山带的北大别石榴辉石岩, 峰期变质达榴辉岩相或高压麻粒岩相, 然后退变到中压麻粒岩相 (张泽明等, 2000, 2007), 喜马拉雅造山带南迦巴瓦峰地区高压石榴蓝晶麻粒岩退变阶段也经历了中压麻粒岩阶段, 石榴辉石岩先经历了榴辉岩相变质阶段, 然后经历了高压和中压麻粒岩相阶段。

8 存在问题

我国显生宙造山带麻粒岩的研究程度差别很大, 有的整个造山带只发现一个麻粒岩产出点, 例如班-怒造山带, 有的造山带有多种麻粒岩类型, 它们之间的关系尚不清楚, 例如阿尔泰造山带。有些造山带的麻粒岩的变质时代虽然已经做过一种或几种同位素测年, 但尚未获得正确的数据, 需要进一步补充研究。有的造山带中各种麻粒岩的产出与大地构造的关系尚不清楚。有的造山带是否存在多种麻粒岩, 有没有榴辉岩等其它高压变质岩伴生也尚不清楚。桐柏造山带是否存在超高温麻粒岩尚待进一步证实。总之, 造山带麻粒岩的研究尚处在发现和初步总结阶段, 新的麻粒岩产地有待发现, 较普遍的规律性的认识也有待今后进一步开展工作而获得。

References

- Abati J, Arenas R, Catalan J and Garcia FD. 2003. Anticlockwise *P-T* path of granulites from the Monte Castelo Gabbro (Ordenes Complex, NW Spain). *Journal of Petrology*, 44: 305–327
- Baba S. 1998. Proterozoic anticlockwise *P-T* path of the Lewisian Complex of South Harris, Outer Hebrides, NW Scotland. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 819–841
- Bohlen SR. 1991. On the formation of granulites. *Journal of Metamorphic Geology*, 9(3): 223–229
- Brown M. 1998. Unpairing metamorphic belts: *P-T* paths and a tectonic model for the Ryoke belt, southwest Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(1): 3–22
- Cao YT, Liu L, Chen DL and Wang C. 2008. Confirmation of pelitic

- high-pressure granulite and its metamorphic age, from Qingshuiquan area in Altay Tagh. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(Suppl.): 354–355 (in Chinese)
- Cao YT, Liu L, Wang C, Chen DL and Zhang AD. 2009. *P-T* path of Early Paleozoic pelitic high-pressure granulite from Danshuiquan area in Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2260–2270 (in Chinese with English abstract)
- Cao YT, Liu L, Wang C, Kang L, Yang WQ, Liang S, Liao XY and Wang YW. 2013. Determination and implication of the HP pelitic granulite from the Munabulake area in the south Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1727–1739 (in Chinese with English abstract)
- Carswell DA and O'Brien PJ. 1993. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: Examples from the Moldanubian zone of the Bohemian massif in lower Austria. *Journal of Petrology*, 34: 447–459
- Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1995. Discovery and occurrence of high-pressure metapelitic rocks from Altun mountain areas, Xinjiang Autonomous Region. *Chinese Science Bulletin*, 40(23): 1988–1991
- Che ZC and Sun Y. 1996. The age of the Altun granulite facies complex and the basement of the Tarim basin. *Regional Geology of China*, (1): 51–57 (in Chinese with English abstract)
- Chen DL, Liu L, Sun Y, Zhang AD, Liu XM and Luo JH. 2004. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulite from North Qinling and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 49(21): 2296–2304
- Chen DL, Sun Y and Liu L. 2007. The metamorphic ages of the country rock of the Yukahe eclogites in the North Qaidam and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 108–116 (in Chinese with English abstract)
- Chen DL, Liu L, Sun Y and Liou JG. 2009. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukahe HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3–4): 259–272
- Chen DL and Liu L. 2011. New data on the chronology of eclogite and associated rock from Guanpo area, North Qinling orogeny and its constraint on nature of North Qinling HP-UHP eclogite terrane. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 158–169 (in Chinese with English abstract)
- Chen HL, Li ZL, Yang SF, Dong CW, Xiao WJ and Tainosho Y. 2006. Mineralogical and geochemical study of a newly discovered mafic granulite, Northwest China; Implications for tectonic evolution of the Altay orogenic belt. *Island Arc*, 15(1): 210–222
- Chen HL, Yang SF, Li ZL, Yu X, Xiao WJ, Yuan C, Lin XB and Li JL. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb chronology of Fuyun basic granulite and its tectonic significance in Altaid orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1351–1358 (in Chinese with English abstract)
- Chen NS, Zhu J, Wang GC, Hou GJ, Zhang KX, Zhu YH and Bai YS. 1999. Metamorphic petrological features of high-grade metamorphic microlithons in Qingshuiquan region, eastern section of eastern Kunlun orogenic zone. *Earth Science*, 24(2): 116–120 (in Chinese with English abstract)
- Chen YB, Hu AQ, Zhang GX and Zhang QF. 1997. REE and Sm-Nd isotopic characteristics of Weiyu granulites in eastern Tianshan, NW China. *Geochimica*, 26(4): 70–77 (in Chinese with English abstract)
- Cheng H, Zhang C, Vervoort JD, Li XH, Li QL, Zheng S and Cao DD. 2011. Geochronology of the transition of eclogite to amphibolite facies metamorphism in the North Qinling orogen of central China. *Lithos*, 125(3–4): 969–983
- Ding L and Zhong DL. 1999. Metamorphic characteristics and geotectonic implications of the high-pressure granulites from Namjagbarwa, eastern Tibet. *Science in China (Series D)*, 42(5): 491–505
- Ding L, Zhong DL, Yin A, Kapp P and Harrison TM. 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa). *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 423–438
- Dong X, Zhang ZM, Wang JL, Zhao GC, Liu F, Wang W and Yu F. 2009. Provenance and formation age of the Nyingchi Group in the southern Lhasa terrane, Tibetan Plateau; Petrology and zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1678–1694 (in Chinese with English abstract)
- Dong X, Zhang ZM, Liu F, Wang W, Yu F, Lin YH, Jiang HY and He ZY. 2012. Genesis of the metamorphic rock from southeastern Lhasa terrane and the Mesozoic-Cenozoic orogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1765–1784 (in Chinese with English abstract)
- Dong YG, Zhang CL and Zhao Y. 2001. Discovery of Precambrian granulite-facies metamorphic rocks in the eastern section of the West Kunlun. *Geological Review*, 47(4): 397 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Klemd R, Zhang L, Wang Z and Xiao X. 1999. *P-T* path of high pressure/low-temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains (NW China). *Journal of Metamorphic Geology*, 17(6): 621–636
- Gao LE, Zeng LS, Xie KJ and Hu GY. 2010. Eocene high-grade metamorphism in northern Himalayan and its significance. *Abstract of 2010's National Symposium on Petrology and Geodynamics*, 372 (in Chinese)
- Gong JF, Ji JQ, Sang HQ, Han BF, Li BL and Chen JJ. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of high-pressure granulite xenolith and its surrounding granite in central Himalaya. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2677–2686 (in Chinese with English abstract)
- Gou LL and Zhang LF. 2009. Petrology and U-Th-Pb chemical monazite dating of the low-P metapelitic granulites at the region of Muzhaerte river in southwestern Tianshan, NW China, and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2271–2280 (in Chinese with English abstract)
- Green DH and Ringwood AE. 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5): 767–833
- Guo KY, Zhang CL, Wang AG and Dong YG. 2003. Discovery of pyrgamite in western Kunlun. *Resources Survey and Environment*, 24(2): 79–81 (in Chinese with English abstract)
- Harley SL. 1989. The origins of granulites: A metamorphic perspective. *Geological Magazine*, 126(3): 215–247
- Harley SL. 2008. Refining the *P-T* records of UHT crustal metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(2): 125–154
- Hollis JA, Harley SL, White RW and Clarke GL. 2006. Preservation of evidence for prograde melamorphism in ultrahigh-temperature, high-pressure kyanite-bearing granulites, South Harris, Scotland. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 263–279
- Ji JQ, Zhong DL, Song B, Zhu MF and Wen DR. 2004. Metamorphism, geochemistry and U-Pb zircon SHRIMP geochronology of the high-pressure granulites in the central greater Himalayas. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1283–1300 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YC, Sun M, Zhao GC and Yuan C. 2009. Confirmation of 390Ma high-temperature metamorphism and its geological significance, in Altay area, Xinjiang, NW China. *Abstract of 2009's National Symposium on Petrology and Geodynamics*, 447 (in Chinese)
- Kaneko Y, Katayama I, Yamamoto H, Misawa K, Ishikawa M, Rehman HU, Kausar AB and Shiraishi K. 2003. Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism; Sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(6): 589–599
- Lai SC, Yi HS and Lin JH. 2006. Granulite xenoliths in Cenozoic volcanic rocks of North Qiangtang, Tibetan Plateau, and their geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(5): 423–432 (in Chinese with English abstract)
- Lai SC and Qin JF. 2008. Petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Cenozoic Qiangtang volcanic field; Implication for the nature of the lower crust in the northern Tibetan Plateau and the genesis of Cenozoic volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 325–336 (in Chinese with English abstract)
- Leech ML, Singh S, Jain AK, Klempere SL and Manickavasagam RM. 2005. The onset of India-Asia continental collision; Early, steep

- subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 234 (1 - 2): 83 - 97
- Li DW, Liao QA, Yuan YM and Yi SH. 2002. The discovery and structural implication of the basic granulite in the core in central Himalaya. *Earth Science*, 27(1): 80, 96 (in Chinese)
- Li DW, Liao QA, Yuan YM, Wan YS, Liu DM, Zhang XH, Yi SH, Cao SZ and Xie DF. 2003. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granulites at Rimana (Southern Tibet) in the central segment of Himalayan orogen. *Chinese Science Bulletin*, 48(23): 2647 - 2650
- Li HK, Lu SN, Xiang ZQ, Zhou HY, Guo H, Song B, Zheng JK and Gu Y. 2006. SHRIMP U-Pb zircon age of the granulite from the Qingshuiquan area, central eastern Kunlun suture zone. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 311 - 321 (in Chinese with English abstract)
- Li JL, Su W, Zhang X and Liu X. 2009. Zircon Cameca U-Pb dating and its significance for granulite-facies gneisses from the western Awulule Mountain, West Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1852 - 1862 (in Chinese with English abstract)
- Li Q and Zhang LF. 2004. The *P-T* path and geological significance of low-pressure granulite-facies metamorphism in Muzhaerte, Southwest Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 583 - 594 (in Chinese with English abstract)
- Li SG, Sun WD, Zhang GW, Chen JY and Yang YC. 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia valley in the Mian-Lue tectonic zone, South Qinling: Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time. *Science in China (Series D)*, 39(3): 300 - 310
- Li SZ, Zhang GW, Li YL and Yang YC. 2000. Discovery of granulite in the Mianxian-Lueyang suture zone, Mianxian area and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 220 - 226 (in Chinese with English abstract)
- Li TF, Yang JS, Ren YF, Chen SY and Xu XZ. 2011. Metamorphism process and SHRIMP dating of granulite at Yushugou, northern margin of South Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 147 - 165 (in Chinese with English abstract)
- Li Y, Zhou HW, Zhong ZQ, Xiang H, Zeng W, Qi DM and Zhang L. 2012. Two Neopaleozoic metamorphic events in North Qinling: Petrology and zircon U-Pb geochronology evidences from basic rocks in the Songshugou area. *Earth Science*, 37(Suppl.): 111 - 124 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL, Chen HL, Yang SF, Xiao WJ and Tainosho Y. 2004. Discovery of mafic granulites from the Altay orogenic belt; Evidence from mineralogical study. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1445 - 1455 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL, Wang HH, Chen HL, Xiao WJ, Yang SF and Hu YZ. 2010. Composition of spinels, spinel-quartz association and mineral reactions from ultrahigh-temperature granulites: An example from spinel-orthopyroxene-garnet granulite of the South Altay orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 74 - 85 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL, Li YQ, Wang HH *et al.* 2011. Zircon U-Pb chronology of ultrahigh temperature granulite and its metamorphic tectonic evolution in Altay orogen. Abstract of 2011's National Symposium on Petrology and Geodynamics, 209 (in Chinese)
- Liang S, Liu L, Zhang CL, Yang YC, Yang WQ, Kang L and Cao YT. 2013. Metamorphism and zircon U-Pb age of high-pressure mafic granulites in in Mian-Lüe suture zone, South Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1657 - 1674 (in Chinese with English abstract)
- Liang T, Peng MX, Wang L, Wang CL, Hu CA and Gao XL. 2006. Discovery and thermodynamics of granulite in the Caixia Mountain, Xinjiang, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 33(2): 141 - 148 (in Chinese with English abstract)
- Liao QA, Li DW, Yi SH and Lu L. 2003. Petrologic and geologic significance of garnet pyroxenite and mafic granulites from high himalayan region, Tibet. *Earth Science*, 28(6): 627 - 633 (in Chinese with English abstract)
- Lin YH, Zhang ZM, Dong X, Shen K and Lu X. 2013. Precambrian evolution of the Lhasa terrane, Tibet: Constraint from the zircon U-Pb geochronology of the gneisses. *Precambrian Research*, 237: 64 - 77
- Liu L and Zhou DW. 1994. The discovery and preliminary study of UHP granulites from Songshugou area, eastern Qinling Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 39(17): 1599 - 1601 (in Chinese)
- Liu L, Zhou DW, Dong YP, Zhang HF, Liu YJ and Zhang ZJ. 1995. High pressure metabasites and their retrograde metamorphic *P-T-t* path from Songshugou area, eastern Qinling Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 127 - 136 (in Chinese with English abstract)
- Liu L, Zhou DW, Wang Y, Chen DL and Liu Y. 1996a. Study and implication of the high-pressure felsic granulite in the Qinling complex of East Qinling. *Science in China (Series D)*, 39(Suppl. 1): 60 - 68
- Liu L, Che ZC, Luo JH, Wang Y and Gao ZJ. 1996b. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 42: 931 - 934
- Liu L, Che ZC, Wang Y, Luo JH and Chen DL. 1999. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 57 - 64 (in Chinese with English abstract)
- Liu L, Sun Y, Xiao PX, Che ZC, Luo JH, Chen DL, Wang Y, Zhang AD, Chen L and Wang YH. 2002. Discovery of ultra-high pressure magnesite-bearing garnet Iherzolite (>3.8Gpa) in the Altyn Tagh, Northwest China. *Chinese Science Bulletin*, 47(11): 881 - 886
- Liu L, Chen DL, Sun Y, Zhang AD and Luo JH. 2003. Discovery of relic majoritic garnet in felsic metamorphic rocks of Qinling complex, North Qinling orogenic belt, China. In: Alice Wain Memorial Western Norway Eclogite Field Symposium. Selje, Western Noway, Abstract, 82
- Liu L, Sun Y, Luo JH, Wang Y, Chen DL and Zhang AD. 2004. Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altun Mountains, NW China. *Science in China (Series D)*, 47(4): 338 - 346
- Liu L, Chen DL, Zhang AD, Sun Y, Wang Y, Yang JX and Luo JH. 2005. Ultrahigh pressure (>7GPa) gneissic K-feldspar (-bearing) garnet clinopyroxenite in the Altyn Tagh, NW China: Evidence from clinopyroxene exsolution in garnet. *Science in China (Series D)*, 48(7): 1000 - 1010
- Liu L, Zhang JF, Green HW, Jin ZM and Bozhilov KN. 2007. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments, implying subduction to >350km. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(3 - 4): 180 - 191
- Liu L, Zhang AD, Chen DL, Yang JX, Luo JH and Wang C. 2007. Implications based on LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 98 - 107 (in Chinese with English abstract)
- Liu L, Wang C, Chen DL, Zhang AD and Liou JG. 2009. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the south Altyn Tagh, northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3 - 4): 232 - 244
- Liu L, Chen DL, Wang C and Zhang CL. 2009. New progress on geochronology of high-pressure/ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the South Altyn Tagh, the North Qaidam and the North Qinling orogenic, NW China and their geological significance. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 472 - 479 (in Chinese with English abstract)
- Liu L, Wang C, Cao YT, Chen DL, Kang L, Yang WQ and Zhu XH. 2012. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China. *Lithos*, 136 - 139: 10 - 26
- Liu L, Liao XY, Zhang CL, Chen DL, Gong XK and Kang L. 2013a. Multi-metamorphic timings of HP-UHP rocks in the North Qinling and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1634 - 1656 (in Chinese with English abstract)

- Liu L, Cao YT, Chen DL, Zhang CL, Yang WQ, Kang L and Liao XY. 2013b. New progresses on the HP-UHP metamorphism in the South Altyn Tagh and the North Qinling. *Chinese Science Bulletin*, 58 (22): 2113–2123 (in Chinese)
- Liu QS and Gao S. 1990. Geochemistry and geophysical properties of the lower crust granulites from Qinling orogenic belt. *Earth Science*, 15 (4): 441–449 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Zhang JJ, Shu GM and Li QG. 2005. Mineral chemistry, *P-T* paths and exhumation processes of mafic granulites in Dinggye, southern Tibet. *Science in China (Series D)*, 48 (11): 1870–1881
- Liu Y and Zhong DL. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis. *Journal of Metamorphic Geology*, 15 (4): 451–466
- Liu Y and Zhong DL. 1998. Petrology of high-pressure granulites from eastern Himalaya; Implications to tectonic significance. *Scientia Geologica Sinica*, 33 (3): 267–281 (in Chinese with English abstract)
- Liu YC and Ye ZF. 1998. A new cognition on high-grade metamorphic rocks in Jinshuikou area, eastern Kunlun. *Qinghai Geology*, (1): 18–26 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Yu HF, Xin HT, Lu SN, Xiu QY and Li Q. 2009. Tectonic units division and precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China. *Geological Bulletin of China*, 28 (10): 1430–1438 (in Chinese with English abstract)
- Long XP, Jin W and Yu N. 2004. The geochemical characteristics of granulites xenoliths in Jinshuikou, East Kunlun. *Journal of Northwest University*, 2 (5): 1–8 (in Chinese with English abstract)
- Miyashiro A. 1961a. Evolution of metamorphic belts. *Journal of Petrology*, 2 (3): 277–311
- Miyashiro A. 1961b. *Metamorphic Rocks. Constitution of the Earth.* Tokyo, 243–268
- O'Brien PJ and Rötzler J. 2003. High-pressure granulites; Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *Journal of Metamorphic Geology*, 21 (1): 3–20
- Qu JF, Zhang LF, Ai YL, Lü Z, Wang JP, Zhou H and Wang SY. 2007. High-pressure granulite, *P-T* path and zircon U-Pb dating in Taxkargan area of West Kunlun Mts., NW China. *Science in China (Series D)*: 37 (4): 429–441 (in Chinese)
- Sachan HK, Mukherjee BK, Ogasawara Y *et al.* 2004. Discovery of coesite from Indus suture zone (ISZ), Ladakh, India: Evidence for deep subduction. *European Journal of Mineralogy*, 16 (12): 235–240
- Santosh M, Sajeew K, Li JH, Liu SJ and Itaya T. 2009. Counter clockwise exhumation of a hot orogen; The Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites in the North China Craton. *Lithos*, 110 (1–4): 140–152
- Song SG, Yang JS, Liou JG, Wu CL, Shi RD and Xu ZQ. 2003. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70 (3–4): 195–211
- Song SG, Zhang LF and Niu YL. 2004. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, northern Tibetan Plateau, NW China. *The American Mineralogist*, 89 (8–9): 1330–1336
- Song SG, Zhang LF, Niu YL *et al.* 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data. *Journal of Petrology*, 47 (3): 435–455
- Sun ZM, Geng QR, Lou XY, Zheng LL, Li S and Liao GY. 2004a. The subdivision of the Namjagbarwa Group complex within the eastern Himalayan syntaxis, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24 (2): 8–15 (in Chinese with English abstract)
- Sun ZM, Zheng LL, Geng QR, Li S, Liao GY, Shi WL and Zhang D. 2004b. Genetic mechanisms and exhumation processes of the high-pressure granulites within the eastern Himalayan syntaxis, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24 (3): 22–29 (in Chinese with English abstract)
- Tong LX. 2011. Occurrence of bearing Opx + Sil high-pressure pelitic granulite and its geological significance. Abstract of 2011's National Symposium on Petrology and Geodynamics, 214 (in Chinese)
- Tsunogae T, Liu SJ, Santosh M, Shimizu H and Li JH. 2011. Ultrahigh-temperature metamorphism in Daqingshan, Inner Mongolia Suture Zone, North China Craton. *Gondwana Research*, 20: 36–47
- Wang GC, Wei QR, Jia CX *et al.* 2007. Some ideas of Precambrian geology in the East Kunlun, China. *Geological Bulletin of China*, 26 (8): 929–937 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Wu YB, Gao S, Liu XC, Gong HJ, Li QL, Li XH and Yuan HL. 2011a. Eclogite origin and timings in the north Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China blocks. *Journal of metamorphic Geology*, 29 (9): 1019–1031
- Wang H, Wu YB, Gao S, Zhang HF, Liu XC, Gong HJ, Peng M, Wang J and Yuan HL. 2011b. Silurian granulite-facies metamorphism, and coeval magmatism and crustal growth in the Tongbai Orogen, central China. *Lithos*, 125 (1–2): 249–271
- Wang JL, Wang RS, Zhou DW, Wang Y and Liu YJ. 1999. A study of tectonites of granulite facies in Yushugou, South Tianshan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (4): 539–547 (in Chinese with English abstract)
- Wang JL, Zhang ZM, Dong X, Liu F, Yu F, Wang W, Xu FJ and Shen K. 2009. Discovery of Late Cretaceous garnet two-pyroxene granulite in the southern Lhasa terrane, Tibet and its tectonic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (7): 1695–1706 (in Chinese with English abstract)
- Wang RS, Wang Y, Liu YJ, Yan JC and Wang JL. 1997. The para-granulite in bedded complex from Yushugou, South Tianshan, Xinjiang Autonomous Region; Its petrological characteristics and geodynamic significance. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 27 (5): 411–416 (in Chinese with English abstract)
- Wang RS, Wang Y, Li HM, Zhou DW and Wang JL. 1998. Zircon U-Pb age and its geological significance of high-pressure terrane of granulite facies in Yushugou area, southern Tianshan Mountain. *Geochimica*, 27 (6): 517–522 (in Chinese with English abstract)
- Wang RS, Wang JL, Zhou DW *et al.* 1999a. Study on Yushugou ophiolite suite modified with the metamorphism of granulite facies in southern Tianshan. *Scientia Geologica Sinica*, 34 (2): 166–176 (in Chinese with English abstract)
- Wang RS, Zhou DW, Wang JL *et al.* 1999b. Variscan terrane of deep-crustal granulite facies in Yushugou area, southern Tianshan. *Science in China (Series D)*, 42 (5): 482–490
- Wang RS, Zhou DW, Wang Y, Wang JL, Sang HQ and Zhang RH. 2003. Geochronology for the multiple-stage metamorphism of high-pressure terrane of granulite facies from Yushugou area, South Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 19 (3): 452–460 (in Chinese with English abstract)
- Wang W, Wei CJ, Wang T, Lou YX and Chu H. 2009. Confirmation of pelitic granulite in the Altai orogen and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 54 (14): 2543–2548
- Wang Y, Wang RS, Zhou DW *et al.* 1999. The uplifting process of a high-pressure terrain of granulite facies in Yushugou area of southern Tianshan, Xinjiang. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 29 (6): 565–568 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZQ, Yan QR, Yan Z, Wang T, Jiang CF, Gao LD, Li QG, Chen JL, Zhang YL, Liu P, Xie CL and Xiang ZJ. 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 83 (11): 1527–1546 (in Chinese with English abstract)
- Wei CJ, Clarke G, Tian W and Qiu L. 2007. Transition of metamorphic series from the kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: Evidence from petrography and calculated KFMFMASH and KFMASH phase relations. *Lithos*, 96 (3–4): 353–374
- Wei CJ, Wang W, Zhang YH and Tian W. 2008. Low-pressure granulite

- and pelitic granulite in Altay orogen, Xinjiang. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27 (Suppl.): 384 - 385 (in Chinese)
- Wilke FDH, O'Brien PJ, Altenberger U, Konrad-Scholke M and Khan MA. 2010. Multi-stage reaction history in different eclogite types from the Pakistan Himalaya and implications for exhumation processes. *Lithos*, 114(1-2): 70 - 85
- Windley BF. 1991. Phanerozoic granulite. *Journal of the Geological Society, London*, 138: 745 - 751
- Xiang H, Zhang L, Zhong ZQ, Zhang HF, Zheng JP and Liu L. 2009. Zircon U-Pb geochronology and metamorphism of mafic granulite from North Tongbai, central China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 348 - 358 (in Chinese with English abstract)
- Xiang H, Zhang L, Zhong ZQ, Santosh M, Zhou HW, Zhang HF, Zheng JP and Zheng S. 2012. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise *P-T-t* path of Paleozoic granulites from North Qinling-Tongbai orogen, central China. *Gondwana Research*, 21(2-3): 559 - 576
- Xiao WJ, Hou QL, Li JL, Windley BF, Hao J, Fang AM, Zhou H, Wang ZH, Chen HL, Zhang GC and Yuan C. 2000. Tectonic facies and the archipelago-accretion process of the West Kunlun, China. *Science in China (Series D)*: 43(Suppl.1): 134 - 143
- Xiao WJ, Windley BF, Liu DY *et al.* 2005. Accretionary tectonics of the western Kunlun orogen, China: A Paleozoic-Early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia. *The Journal of Geology*, 113(6): 687 - 705
- Xie CM, Li C, Su L, Dong YS, Wu YW and Xie YW. 2013. Geochronology of high-pressure granulite in the Amdo, Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 912 - 922 (in Chinese with English abstract)
- Xie CR, Xiao PX, Gao XF, Kang L and Xi RG. 2013. Disintegration and redefinition of Bulunkuole Group complex in West Kunlun orogen. *Journal of Stratigraphy*, 37(4): 640 (in Chinese)
- Xu JF, Zhang BR and Han YW. 1994. Recognition of ophiolite belt and granulite in northern area of Mian-Lue, southern Qinling, China and their implications *Journal of China University of Geoscience*, 5(1): 25 - 27
- Xu WC, Zhang HF, Guo L and Yuan HL. 2008. Granulite-facies metamorphism and process in east Himalayan tectonic syntaxis. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27 (Suppl.): 340 (in Chinese)
- Yan R, Zhang ZM, Dong X, Lin YH and Liu F. 2013. Precambrian high-pressure metamorphism of the northern Lhasa Terrane, Tibet and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1949 - 1961 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Xu ZQ, Pei XZ, Shi RD, Wu CL, Zhang JX, Li HB, Meng FC and Rong H. 2002. Discovery of diamond in North Qinling: Evidence for a giant UHPM belt across central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze plates. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 484 - 495 (in Chinese with English abstract)
- Yang KG, Liu Q, Zhang CL, Dong YG, Wang AG and Guo KY. 2003. New discovery of granulite at Kangxiwa fault, western Kunlun. *Geological Science and Technology Information*, 22(1): 100, 104 (in Chinese)
- Yang WQ, Liu L, Cao YT, Wang C, He SP, Li RS and Zhu XH. 2010. Geochronological evidence of Indosinian (high-pressure) metamorphic event and its tectonic significance in Taxkorgan area of the western Kunlun Mountains, NW China. *Science China (Earth Science)*, 53(10): 1445 - 1459
- Yardley BWD. 1989. *An Introduction to Metamorphic Petrology*. London: Longman Scientific & Technical, 1 - 248
- Yin GH, Bao G, Yang SS and Hu QH. 2006. The granulites and ages of the Nyingchi Group complex in the Nyingchi region, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(3): 8 - 15 (in Chinese with English abstract)
- You ZD and Chen NS. 1995. The metamorphism of deeper crust in the Dabie Mountains: As evidenced by the study of granulites near Huilanshan, Luotian. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 137 - 147 (in Chinese with English abstract)
- Yu SY, Zhang JX and Li JP. 2009. Metamorphism history and dynamics of high-pressure granulites in the Dulan area of the North Qaidam Mountains, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2224 - 2234 (in Chinese with English abstract)
- Yu SY, Zhang JX, Li JP and Meng FC. 2010. Zircon U-Pb geochronology of high-pressure granulite and its tectonic implications in the Dulan area, north Qaidam Mountains, western China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(2): 139 - 150 (in Chinese with English abstract)
- Yu SY *et al.* 2011. Characteristics of geochronology and geochemistry of adakitic rocks: Inspiration from early Paleozoic collision orogen. Abstract of 2011's National Symposium on Petrology and Geodynamics, 223 (in Chinese)
- Yu SY, Zhang JX, Gong JH and Li YS. 2013. Research on HP granulite-facies metamorphism and anatexis: A case study of Dulan area in the North Qaidam Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2061 - 2072 (in Chinese with English abstract)
- Zhai C, Zhang QH, Wang JZ and Wang GZ. 1995. Preliminary study on the constituents of high-pressure granulite and its tectonic evolution, South Henan Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, (3): 166 - 168 (in Chinese)
- Zhai MG and Liu WJ. 2001. The formation of granulite and its contribution to evolution of the continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 28 - 38 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2009. Two kinds of granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton: Their genetic relation and geotectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1753 - 1771 (in Chinese with English abstract)
- Zhang AD, Liu L, Sun Y *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb zircon ages for the UHP metamorphosed granitoid gneiss in Altyn Tagh and their geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 49(23): 2527 - 2532
- Zhang CG, Wei CJ and Zhang AL. 2002. The *P-T* conditions of granulite-facies metamorphism in Tongbai area, Henan Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(3): 242 - 250 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Lu SN, Yu HF and Ye HM. 2007. Tectonic evolution of the western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Science in China (Series D)*, 50(6): 825 - 835
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1 - 855 (in Chinese)
- Zhang GW, Dong YP, Lai SC, Guo AL, Meng QR, Liu SF, Cheng SY, Yao AP, Zhang ZQ, Pei XZ and Li SZ. 2003. Mianlue tectonic zone and Mianlue suture zone on southern margin of Qinling Dabie orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1121 - 1135 (in Chinese)
- Zhang JJ, Ji JQ, Zhong DL, Ding L and He SD. 2003. Tectonic frame and formative processes discussion within the eastern Himalayan (Namjiagarbarwa) syntaxis. *Science in China (Series D)*, 33(4): 373 - 383 (in Chinese)
- Zhang JX, Zhang ZM, Xu ZQ, Yang JS and Cui JW. 2000. Discovery of khondalite series from the western segment of Altyn Tagh and their petrological and geochronological studies. *Science in China (Series D)*, 43(3): 308 - 316
- Zhang JX, Yang JS, Xu ZQ, Meng FC, Li HB and Shi RD. 2002. Evidence for UHP metamorphism of eclogites from the Altun Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 47(9): 751 - 755 (in Chinese)
- Zhang JX, Meng FC, Wan YS, Yang JS and Dong GA. 2003. Early Paleozoic tectono-thermal event of the Jinshuikou Group on the southern margin of Qaidam: Zircon U-Pb SHRIMP age evidence. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 397 - 404 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX and Meng FC. 2005. Sapphirine-bearing high pressure mafic

- granulite and its implications in the South Altyn Tagh. Chinese Science Bulletin, 50(3): 265–269
- Zhang JX, Mattinson CG, Meng FC and Wan YS. 2005a. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the South Altyn Tagh, NW China: *P-T* history and U-Pb geochronology. Journal of Metamorphic Geology, 23(7): 491–510
- Zhang JX, Yang JS, Mattinson CG *et al.* 2005b. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints. Lithos, 84(1–2): 51–76
- Zhang JX, Meng FC, Yu SY and Qi XX. 2007. Metamorphic history recorded in high pressure mafic granulites in the Luliangshan Mountains to the north of Qaidam basin, Northwest China: Evidence from petrology and zircon SHRIMP geochronology. Earth Science Frontiers, 14(1): 85–97 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Mattinson CG, Meng FC, Wan YS and Tung KA. 2008. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the North Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, western China: Evidence from zircon U-Pb geochronology. Geological Society of America Bulletin, 12(5–6): 732–749
- Zhang JX, Yu SY, Meng FC and Li JP. 2009. Paired high-pressure granulite and eclogite in collision orogens and their geodynamic implications. Acta Petrologica Sinica, 25(9): 2050–2066 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Meng FC and Yu SY. 2010. Two contrasting HP/LT and UHP metamorphic belts: Constraint on Early Paleozoic orogeny in Qilian-Altun orogen. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 1967–1992 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Yu SY and Meng FC. 2011. Polyphase Early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1179–1190 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LF, Gao J, Aikebeier and Wang ZX. 2000. Eclogite-facies metamorphism in South Tianshan, Xinjiang. Science in China (Series D), 30(4): 345–355 (in Chinese)
- Zhang LF, Ellis DJ and Jiang WB. 2002a. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China; Part I: Evidence from inclusions of coesite pseudomorphs in garnet and from quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites. American Mineralogist, 87(7): 853–860
- Zhang LF, Ellis DJ, Williams S *et al.* 2002b. Ultra-high pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part II: Evidence from magnesite in eclogite. American Mineralogist, 87(7): 861–866
- Zhang LF, Ellis DJ, Williams S *et al.* 2003a. Ultrahigh-pressure metamorphism in eclogites from the western Tianshan, China: Reply. American Mineralogist, 88(7): 1157–1160
- Zhang LF, Ellis DJ, Arculus RJ *et al.* 2003b. “Forbidden zone” subduction of sediments to 150km depth: The reaction of dolomite to magnesite + aragonite in the UHPM metapelites from western Tianshan, China. Journal of Metamorphic Geology, 21(6): 523–529
- Zhang LF, Ai YL, Li Q, Li XP, Song SG and Wei CJ. 2005. The formation and tectonic evolution of UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 21(4): 1029–1038 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LF. 2007. The study of UHP metamorphic ophiolitic rocks and its geological significance. Geological Bulletin of China, 26(9): 1079–1085 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LF, Ai YL, Li XP, Rubatto D, Song B, Williams S, Song SG, Ellis D and Liou JG. 2007. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks. Lithos, 96(1–2): 266–280
- Zhang XR, Shi RD, Huang QS, Liu DL, Cidan SL, Yang JS and Ding L. 2010. Finding of high-pressure mafic granulites in the Amdo basement, central Tibet. Chinese Science Bulletin, 55(32): 3694–3702
- Zhang XZ, Dong YS, Xie CM and Xie YW. 2010. Identification and significance of high-pressure granulite in Anduo area, Tibetan Plateau. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2106–2112 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Zhong ZQ, You ZD and Hu KM. 2000. Granulite-facies retrograde metamorphism of garnet pyroxenite in Muzidian, northern Dabie Mountains. Earth Science, 25(3): 295–301 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Zheng LL, Wang JL, Zhao XD and Shi C. 2007. Garnet pyroxenite in the Namjagbarwa Group-complex in the eastern Himalayan tectonic syntaxis, Tibet, China: Evidence for subduction of the Indian continent beneath the Eurasian plate at 80–100km depth. Geological Bulletin of China, 26(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Wang JL, Zhao GC and Shi C. 2008a. Geochronology and Precambrian tectonic evolution of the Namche Barwa complex from the eastern Himalayan syntaxis, Tibet. Acta Petrologica Sinica, 24(7): 1477–1487 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Wang JL, Zhao GC, Shen K and Shi C. 2008b. Geochronology and Premesozoic tectonic evolution of Namjagbarwa Group in east syntaxis of Himalayan orogen. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(Suppl.): 347 (in Chinese)
- Zhang ZM, Zhao GC, Santosh M, Wang JL, Dong X and Liou JG. 2010. Two stages of granulite facies metamorphism in the eastern Himalayan syntaxis, South Tibet: Petrology, zircon geochronology and implications for the subduction of Neo-Tethys and the Indian continent beneath Asia. Journal of Metamorphic Geology, 28(7): 719–733
- Zhang ZM, Dong X, Liu F, Lin YH, Yan R, He ZY and Santosh M. 2012a. The making of Gondwana; Discovery of 650Ma HP granulites from the North Lhasa, Tibet. Precambrian Research, 212–213: 107–116
- Zhang ZM, Dong X, Santosh M, Liu F, Wang W, Yiu F, He ZY and Shen K. 2012b. Petrology and geochronology of the Namche Barwa complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet: Constraints on the origin and evolution of the north-eastern margin of the Indian craton. Gondwana Research, 21(1): 123–137
- Zhang ZM, Dong X, He ZY and Xiang H. 2013. Indian and Asian continental collision viewed from HP and UHP metamorphism of the Himalayan orogen. Acta Petrologica Sinica, 29(5): 1713–1726 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Zhang GW, Tang SH, Xu JF, Yang YC and Wang JH. 2002. The age of Anzishan granulite in east Qinling Mian-Lue orogen. Chinese Science Bulletin, 47(22): 1751–1755 (in Chinese)
- Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 1772–1792 (in Chinese with English abstract)
- Zhong DL and Ding L. 1996. Discovery of high-pressure basic granulite in Namjagbarwa area, Tibet, China. Chinese Science Bulletin, 41(1): 87–88
- Zhou DW, Su L, Jian P, Wang RS, Liu XM, Lu GX and Wang JL. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb dating of HP granulites at Yushugou ophiolite terrane, South Tianshan and the tectonic importance. Science in China (Series D), 49(14): 1411–1415 (in Chinese)

附中文参考文献

- 曹玉亭, 刘良, 陈丹玲, 王超. 2008. 阿尔金清水泉地区泥质高压麻粒岩的确定及其变质时代. 矿物岩石地球化学通报, 27(增刊): 354–355
- 曹玉亭, 刘良, 王超, 陈丹玲, 张安达. 2009. 阿尔金淡水泉早古生代泥质高压麻粒岩及其 *P-T* 演化轨迹. 岩石学报, 25(9): 2260–2270
- 曹玉亭, 刘良, 王超, 康磊, 杨文强, 梁莎, 廖小莹, 王亚伟. 2013. 南阿尔金木纳布拉克地区高压泥质麻粒岩的确定及其地质意义. 岩石学报, 29(5): 1727–1739
- 车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1995. 阿尔金山地区高压变质泥质

- 岩石的发现及其产出环境. 科学通报, 40(14): 1298 - 1300
- 车自成, 孙勇. 1996. 阿尔金麻粒岩相杂岩的时代及塔里木盆地的基底. 中国区域地质, (1): 51 - 57
- 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 张安达, 柳小明, 罗金海. 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 49(18): 1901 - 1908
- 陈丹玲, 孙勇, 刘良. 2007. 柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其地质意义. 地学前缘, 14(1): 108 - 116
- 陈丹玲, 刘良. 2011. 北秦岭榴辉岩及相关岩石年代学的进一步确定及其对板块俯冲属性的约束. 地学前缘, 18(2): 158 - 169
- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 余星, 肖文交, 袁超, 林秀斌, 李继亮. 2006. 阿尔泰造山带富蕴基性麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其构造意义. 岩石学报, 22(5): 1351 - 1358
- 陈能松, 朱杰, 王国灿, 侯光久, 张克信, 朱云海, 拜永山. 1999. 东昆仑造山带东段清水泉高级变质岩片的变质岩石学研究. 地球科学, 24(2): 116 - 120
- 陈义兵, 胡霏琴, 张国新, 张前峰. 1997. 天山东段尾亚麻粒岩 REE 和 Sm-Nd 同位素特征. 地球化学, 26(4): 70 - 77
- 丁林, 钟大赉. 1999. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义. 中国科学(D 辑), 29(5): 385 - 397
- 董昕, 张泽明, 王金丽, 赵国春, 刘峰, 王伟, 于飞. 2009. 青藏高原拉萨地体南部林芝岩群的物质来源与形成年代: 岩石学与锆石 U-Pb 年代学. 岩石学报, 25(7): 1678 - 1694
- 董昕, 张泽明, 刘峰, 王伟, 于飞, 林彦嵩, 姜洪颖, 贺振宇. 2012. 拉萨地体东南部变质岩的成因与中-新生代造山作用. 岩石学报, 28(6): 1765 - 1784
- 董永观, 张传林, 赵宇. 2001. 西昆仑东段首次发现前寒武纪麻粒岩相变质岩. 地质论评, 47(4): 397
- 高利娥, 曾令森, 谢克家, 胡古月. 2010. 北喜马拉雅穹隆始新世高级变质作用及其意义. 2010 全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 372
- 龚俊峰, 季建清, 桑海清, 韩宝福, 李宝龙, 陈建军. 2006. 喜马拉雅中段哲古拉花岗岩中高压麻粒岩包体及其主岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究. 岩石学报, 22(11): 2677 - 2686
- 苟龙龙, 张立飞. 2009. 新疆西南天山木扎尔特河一带低压泥质麻粒岩岩石学特征、独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 25(9): 2271 - 2280
- 郭坤一, 张传林, 王爱国, 董永观. 2003. 西昆仑首次发现石榴二辉麻粒岩. 资源调查与环境, 24(2): 79 - 81
- 季建清, 钟大赉, 宋彪, 朱美妃, 温大任. 2004. 喜马拉雅中段高压麻粒岩变质作用、地球化学与年代学. 岩石学报, 20(5): 1283 - 1300
- 蒋映聪, 孙敏, 赵国春, 袁超. 2009. 中国新疆阿尔泰地区 390Ma 高温变质作用的确定及其地质意义. 2009 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 447 该文献在正文中未被引用!!! 补充引用
- 赖绍聪, 伊海生, 林金辉. 2006. 青藏高原北羌塘新生代火山岩中的麻粒岩捕虏体. 岩石矿物学杂志, 25(5): 423 - 432
- 赖绍聪, 秦江锋. 2008. 藏北羌塘地块新生代火山岩中麻粒岩捕虏体的岩石学和地球化学研究: 对青藏高原新生代火山岩成因及下地壳性质的约束. 岩石学报, 24(2): 325 - 336
- 李德威, 廖群安, 袁晏明, 易顺华. 2002. 喜马拉雅造山带中段核部杂岩中基性麻粒岩的发现及构造意义. 地球学报, 27(1): 80, 96
- 李德威, 廖群安, 袁晏明, 万渝生, 刘德民, 张雄华, 易顺华, 曹树钊, 谢德凡. 2003. 喜马拉雅造山带中段日玛那麻粒岩锆石 U-Pb 年代学. 科学通报, 48(20): 2176 - 2179
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 周红英, 郭虎, 宋彪, 郑健康, 顾璞. 2006. 东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. 地学前缘, 13(6): 311 - 321
- 李继磊, 苏文, 张喜, 刘新. 2009. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 28(12): 1852 - 1862
- 李强, 张立飞. 2004. 新疆西南天山木扎尔特一带低压麻粒岩相变质作用 *P-T* 轨迹及其地质意义. 岩石学报, 20(3): 583 - 594
- 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 陈家义, 杨永成. 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学: 古生代洋盆及其闭合时代的证据. 中国科学(D 辑), 26(3): 223 - 230
- 李三忠, 张国伟, 李亚林, 杨永成. 2000. 勉县地区勉略带内麻粒岩的发现及构造意义. 岩石学报, 16(2): 220 - 226
- 李天福, 杨经绥, 任玉峰, 陈松永, 徐向珍. 2011. 南天山北缘榆树沟麻粒岩的变质作用及其锆石 SHRIMP 年龄的研究. 岩石学报, 27(1): 147 - 165
- 李晔, 周汉文, 钟增球, 向华, 曾雯, 祁冬梅, 张利. 2012. 北秦岭早古生代两期变质作用: 来自松树沟基性岩岩石学及锆石 U-Pb 年代学的记录. 地球科学, 37(增刊): 111 - 124
- 厉子龙, 陈汉林, 杨树锋, 肖文交, Tainosho Y. 2004. 阿尔泰基性麻粒岩的发现: 来自矿物学的证据. 岩石学报, 20(6): 1445 - 1455
- 厉子龙, 汪惠惠, 陈汉林, 肖文交, 杨树锋, 胡逸州. 2010. 超高温麻粒岩中央尖晶石成分、结构特征和矿物反应的指示意义: 以阿尔泰造山带超高温尖晶石-斜方辉石-石榴石麻粒岩为例. 地学前缘, 17(1): 74 - 85
- 厉子龙, 励音骐, 汪惠惠等. 2011. 阿尔泰超高温麻粒岩的锆石 U-Pb 年代学及其变质构造演化. 2011 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要(上册), 209
- 梁莎, 刘良, 张成立, 杨永成, 杨文强, 康磊, 曹玉亭. 2013. 南秦岭勉略构造带高压基性麻粒岩变质作用及其锆石 U-Pb 年龄. 岩石学报, 29(5): 1657 - 1674
- 梁婷, 彭明兴, 王磊, 王崇礼, 胡长安, 高晓理. 2006. 中天山彩霞山一带麻粒岩的发现和热力学研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(2): 141 - 148
- 廖群安, 李德威, 易顺华, 卢练. 2003. 西藏定结高喜马拉雅石榴辉石岩-镁铁质麻粒岩的岩石特征及其地质意义. 地质科学, 28(6): 627 - 633
- 刘良, 周鼎武. 1994. 东秦岭商南松树沟高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 科学通报, 39(17): 1599 - 1601
- 刘良, 周鼎武, 董云鹏, 张宏发, 刘养杰, 张泽军. 1995. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的 *PTt* 演化轨迹. 岩石学报, 11(2): 127 - 136
- 刘良, 周鼎武, 王焰, 陈丹玲, 刘雁. 1996a. 东秦岭秦岭杂岩中的长英质高压麻粒岩及其地质意义初探. 中国科学(D 辑), 26(增

- 刊): 56-63
- 刘良, 车自成, 罗金海, 王焰, 高章鉴. 1996b. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. 科学通报, 41(16): 1485-1488
- 刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 陈丹玲. 1999. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报, 15(1): 57-64
- 刘良, 孙勇, 肖培喜, 车自成, 罗金海, 陈丹玲, 王焰, 张安达, 陈亮, 王永和. 2002. 阿尔金发现超高压 (>3.8GPa) 石榴二辉橄榄岩. 科学通报, 47(9): 657-662
- 刘良, 孙勇, 罗金海, 王焰, 陈丹玲, 张安达. 2003. 阿尔金英格利萨依花岗质片麻岩超高压变质. 中国科学(D辑), 33(12): 1184-1192
- 刘良, 陈丹玲, 张安达, 孙勇, 王焰, 杨家喜, 罗金海. 2005. 阿尔金超高压 (>7GPa) 片麻状(含) 钾长石榴辉石岩——石榴子石出溶单斜辉石的证据. 中国科学(D辑), 35(2): 105-114
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 杨家喜, 罗金海, 王超. 2007. 阿尔金江尕勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义. 地学前缘, 14(1): 98-107
- 刘良, 陈丹玲, 王超, 张成立. 2009. 阿尔金、柴北缘与北秦岭高压-超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 472-479
- 刘良, 廖小莹, 张成立, 陈丹玲, 宫相宽, 康磊. 2013a. 北秦岭高压-超高压岩石的多期变质时代及其地质意义. 岩石学报, 29(5): 1634-1656
- 刘良, 曹玉亭, 陈丹玲, 张成立, 杨文强, 康磊, 廖小莹. 2013b. 南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质作用研究新进展. 科学通报, 58(22): 2113-2123
- 刘庆生, 高山. 1990. 东秦岭地区下地壳麻粒岩的地球化学与地球物理性质. 地球科学, 15(4): 441-449
- 刘树文, 张进江, 舒桂明, 李秋根. 2005. 藏南定结铁镁质麻粒岩矿物化学、*PTt* 轨迹和折返过程. 中国科学(D辑), 35(9): 810-820
- 刘焰, 钟大赉. 1998. 东喜马拉雅地区高压麻粒岩岩石学研究及构造意义. 地质科学, 33(3): 267-281
- 刘永成, 叶占福. 1998. 对东昆仑金水口地区高级变质岩的新认识. 青海地质, (1): 18-26
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 陆松年, 修群业, 李铨. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件. 地质通报, 28(10): 1430-1438
- 龙晓平, 金巍, 余能. 2004. 东昆仑金水口地区麻粒岩包体地球化学特征. 西北大学学报(自然科学版), 2(5): 1-8
- 曲军锋, 张立飞, 艾永亮, 吕增, 王建平, 周辉, 王世炎. 2007. 西昆仑塔什库干高压麻粒岩 *PT* 轨迹、SHRIMP 锆石定年及其大地构造意义. 中国科学(D辑), 37(4): 429-441
- 孙志明, 耿全如, 楼雄英, 郑来林, 李生, 廖光宇. 2004a. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群的解体. 沉积与特提斯地质, 24(2): 8-15
- 孙志明, 郑来林, 耿全如, 李生, 廖光宇, 石文礼, 张东. 2004b. 东喜马拉雅构造结高压麻粒岩特征、形成机制及折返过程. 沉积与特提斯地质, 24(3): 22-29
- 全来喜. 2011. 阿尔泰造山带含 Opx + Sil 高温泥质麻粒岩的产出及其地质意义. 2011 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要(上册), 214
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴等. 2007. 关于东昆仑地区前寒武纪地质的几点认识. 地质通报, 26(8): 929-937
- 王金丽, 张泽明, 董昕, 刘峰, 于飞, 王伟, 徐方建, 沈昆. 2009. 西藏拉萨地体南部晚白垩纪石榴二辉麻粒岩的发现及其构造意义. 岩石学报, 25(7): 1695-1706
- 王润三, 王焰, 李惠民, 周鼎武, 王居里. 1998. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 地球化学, 27(6): 517-522
- 王润三, 王居里, 周鼎武等. 1999a. 南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究. 地质科学, 34(2): 166-176
- 王润三, 周鼎武, 王居里等. 1999b. 南天山榆树沟华力西期深地壳麻粒岩地体研究. 中国科学(D辑), 29(4): 306-313
- 王润三, 周鼎武, 王焰, 王居里, 桑海清, 张任祐. 2003. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体多期变质定年研究. 岩石学报, 19(3): 452-460
- 王伟, 魏春景, 王涛, 娄玉行, 初航. 2009. 中国阿尔泰造山带泥质麻粒岩的确定及地质意义. 科学通报, 54(7): 918-923
- 王焰, 王润三, 周鼎武等. 1999. 南天山榆树沟麻粒岩相高压地体的抬升过程. 西北大学学报(自然科学版), 29(6): 565-568
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83(11): 1527-1546
- 魏春景, 王伟, 张颖惠, 田伟. 2008. 新疆阿尔泰造山带低压变质带与泥质麻粒岩. 矿物岩石地球化学通报, 27(增刊): 284-285
- 向华, 张利, 钟增球, 张宏飞, 郑建平, 刘理. 2009. 北桐柏地区镁铁质麻粒岩锆石 U-Pb 年代学及变质作用. 岩石学报, 25(2): 348-358
- 肖文交, 侯泉林, 李继亮, Windley BF, 郝杰, 方爱民, 周辉, 王志洪, 陈汉林, 张国成, 袁超. 2000. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程. 中国科学(D辑), 30(增刊): 22-28
- 解超明, 李才, 苏犁, 董永胜, 吴彦旺, 谢尧武. 2013. 青藏高原安多高压麻粒岩同位素年代学研究. 岩石学报, 29(3): 912-922
- 谢从瑞, 校培喜, 高晓峰, 康磊, 奚仁刚. 2013. 西昆仑布伦阔勒岩群的解体 and 重新厘定. 地层学杂志, 37(4): 640
- 徐旺春, 张宏飞, 郭亮, 袁洪林. 2008. 东喜马拉雅构造结麻粒岩相变质作用时间和过程. 矿物岩石地球化学通报, 27(增刊): 340
- 严溶, 张泽明, 董昕, 林彦高, 刘峰. 2013. 西藏拉萨地体北部的前寒武纪高压变质作用及构造意义. 岩石学报, 29(6): 1949-1961
- 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 史仁灯, 吴才来, 张建新, 李海兵, 孟繁聪, 戎合. 2002. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 76(4): 484-495
- 杨坤光, 刘强, 张传林, 董永观, 王爱国, 郭坤一. 2003. 西昆仑康西瓦断裂带新发现的麻粒岩. 地质科技情报, 22(1): 100, 104
- 尹光候, 包钢, 杨淑胜, 胡清华. 2006. 西藏林芝地区林芝岩群麻粒岩及时代讨论. 沉积与特提斯地质, 26(3): 8-15
- 游振东, 陈能松. 1995. 大别山区深部地壳的变质岩石学证迹: 罗田惠兰山一带的麻粒岩研究. 岩石学报, 11(2): 137-147
- 于胜尧, 张建新, 李金平. 2009. 柴北缘都兰高压麻粒岩的变质演化

- 及形成的动力学背景. 岩石学报, 25(9): 2224 - 2234
- 于胜尧, 张建新, 李金平, 孟繁聪. 2010. 柴北缘都兰高压麻粒岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 29(2): 139 - 150
- 于胜尧, 张建新, 宫江华, 李云帅. 2013. 高压麻粒岩相变质作用及深熔作用: 以柴北缘都兰地区为例. 岩石学报, 29(6): 2061 - 2072
- 翟淳, 张清华, 王奖臻, 王国芝. 1995. 初论豫南高压麻粒岩的物质组成及其形成的构造环境. 矿物岩石地球化学通报, (3): 166 - 168
- 翟明国, 刘文军. 2001. 麻粒岩的形成及其对大陆地壳演化的贡献. 岩石学报, 17(1): 28 - 38
- 翟明国. 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩 (HT-HP 和 HT-UHT) 及其相关问题. 岩石学报, 25(8): 1753 - 1771
- 张安达, 刘良, 孙勇等. 2004. 阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 49(22): 2335 - 2341
- 张翠光, 魏春景, 张阿利. 2002. 河南桐柏麻粒岩相变质作用的 *P-T* 条件. 岩石矿物学杂志, 21(3): 242 - 250
- 张传林, 陆松年, 于海锋, 叶海敏. 2007. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据. 中国科学(D 辑), 37(2): 145 - 154
- 张国伟, 张本仁, 袁学城, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1 - 855
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少峰, 程顺友, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 2003. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学(D 辑), 33(12): 1121 - 1135
- 张进江, 季建清, 钟大赉, 丁林, 何顺东. 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨. 中国科学(D 辑), 33(4): 373 - 383
- 张建新, 张泽明, 许志琴, 杨经绥, 崔军文. 1999. 阿尔金西段孔兹岩系的发现及岩石学、同位素年代学初步研究. 中国科学(D 辑), 29(4): 298 - 305
- 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 杨经绥, 董国安. 2003. 柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石 U-Pb SHRIMP 年龄证据. 地质通报, 22(6): 397 - 404
- 张建新, 孟繁聪. 2005. 南阿尔金含假蓝宝石高压基性麻粒岩及其意义. 科学通报, 50(2): 167 - 171
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 戚学祥. 2007. 柴北缘绿梁山高压基性麻粒岩的变质演化历史: 岩石学及锆石 SHRIMP 年代学证据. 地学前缘, 14(1): 85 - 97
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪, 李金平. 2009. 造山带中成对出现的高压麻粒岩与榴辉岩及其地球动力学意义. 岩石学报, 25(9): 2050 - 2066
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧. 2010. 两条不同类型的 HP/LT 和 UHP 变质带对祁连-阿尔金早古生代造山作用的制约. 岩石学报, 26(7): 1967 - 1992
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 2011. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用. 岩石学报, 27(4): 1179 - 1190
- 张立飞, 高俊, 艾克拜尔, 王宗秀. 2000. 新疆西天山低温榴辉岩相变质作用. 中国科学(D 辑), 30(4): 345 - 355
- 张立飞, 艾永亮, 李强, 李旭平, 宋述光, 魏春景. 2005. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化. 岩石学报, 21(4): 1029 - 1038
- 张立飞. 2007. 洋壳深俯冲超高压变质作用研究及其地质意义. 地质通报, 26(9): 1079 - 1085
- 张晓冉, 史仁灯, 黄蔚师, 刘德亮, 次旦索朗, 杨经绥, 丁林. 2010. 青藏高原安多高压基性麻粒岩的发现及其地质意义. 科学通报, 55(27 - 28): 2702 - 2711
- 张修政, 董永胜, 解超明, 谢尧武. 2010. 安多地区高压麻粒岩的发现及其意义. 岩石学报, 26(7): 2106 - 2112
- 张泽明, 钟增球, 游振东, 胡开明. 2000. 北大别木子店石榴辉石岩的麻粒岩相退变质作用. 地球科学, 25(3): 295 - 301
- 张泽明, 郑来林, 王金丽, 赵旭东, 石超. 2007. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群中的石榴辉石岩-印度大陆向欧亚板块之下俯冲至 80 ~ 100km 深度的证据. 地质通报, 26(1): 1 - 12
- 张泽明, 王金丽, 赵国春, 石超. 2008a. 喜马拉雅造山带东构造结南迦巴瓦岩群地质年代学和前寒武纪构造演化. 岩石学报, 24(7): 1477 - 1487
- 张泽明, 王金丽, 赵国春, 沈昆, 石超. 2008b. 喜马拉雅造山带东构造结南迦巴瓦岩群地质年代学和前中生代构造演化. 矿物岩石地球化学通报, 27(S1): 347
- 张泽明, 董昕, 贺振宇, 向华. 2013. 喜马拉雅造山带的高压超高压变质作用与印度-亚洲大陆碰撞. 岩石学报, 29(5): 1713 - 1726
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 许继峰, 杨永成, 王进辉. 2002. 秦岭勉略带中安子山麻粒岩的年龄. 科学通报, 47(22): 1751 - 1755
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报, 25(8): 1772 - 1792
- 钟大赉, 丁林. 1995. 西藏南迦巴瓦峰地区发现高压麻粒岩. 科学通报, (14): 1343 - 1344
- 周鼎武, 苏犁, 简平, 王润三, 柳小明, 陆关祥, 王居里. 2004. 南天山榆树沟蛇绿岩体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义. 科学通报, 49(14): 1411 - 1415