

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.001



近70年中国变质岩石学—变质地质学的研究进展

沈其韩, 耿元生, 宋会侠

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要: 为总结我国变质地质学的历史经验, 回顾了我国从变质岩石学到变质地质学近70年的发展历程。依据大量文献, 分3个阶段和8个方面总结了变质岩石学和变质地质学取得的进展。我国在超高压变质地质学、早前寒武纪变质地质学、变质作用年代学、变质作用相平衡模拟等领域处于国际先进行列, 蓝片岩、变质流体和变质岩化学动力学方面与世界研究基本处于同步水平, 极低级变质作用研究等领域与国际先进水平尚有较大差距。通过历史的回顾, 表明变质岩的研究已经从变质岩石学转变为变质地质学, 已经从单一的岩石学研究转变为以变质岩为基础, 变质矿物、地球化学、同位素地质、构造地质等多学科的综合研究。在变质岩和变质地质领域我国有一些区位优势, 但是只有坚持自主创新才能把区位优势转变为学科优势。各种分析实验技术的发展促进了变质地质学的发展, 随着新技术的不断涌现和大数据时代的来临, 变质地质学会有更大的发展。

关键词: 变质岩石学; 变质地质学; 变质作用 $P-T-t$; 超高压变质岩; 麻粒岩; 矿物学; 地球化学。

中图分类号: P58

文章编号: 1000-2383(2018)01-0001-23

收稿日期: 2017-09-29

Progress on Metamorphic Petrology and Metamorphic Geology of China in the Last nearly 70 Years

Shen Qihan, Geng Yuansheng, Song Huixia

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

Abstract: For summarizing the historical experiences of the study of metamorphic rocks in China, this paper presents a review on the advances from metamorphic petrology to metamorphic geology in the past nearly 70 years. These advances are discussed in three stages and eight aspects. On the basis of reviewing a huge number of literatures, we propose that our researches on ultrahigh pressure metamorphism, Precambrian metamorphic geology, metamorphic chronology, and metamorphic phase modeling are internationally advanced, and researches on blueschist, metamorphic fluids and metamorphic chemical kinetics are synchronized with the world, but the researches on very low-grade metamorphism and some other fields have not attracted enough attention, having large gaps with the international advanced level. It is concluded that the study on metamorphic rocks in China has changed from metamorphic petrology to metamorphic geology, that is, from mono-disciplinary petrology study to multi-disciplinary researches of metamorphic rocks, including metamorphic minerals, geochemistry, isotopic geology, tectonic geology and some other disciplines. Although we have some location advantages in the study of metamorphic rocks, independent innovative researches are still required to turn the location advantages into academic advantages. In addition, as the development of various analytical experimental techniques has accelerated scientific researches, metamorphic geology will advance greatly with the advent of new technologies and the application of big data technology.

Key words: metamorphic petrology; metamorphic geology; $P-T-t$ path of metamorphism; ultrahigh-pressure metamorphic rock; granulite; mineralogy; geochemistry.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41203025); 中国地质调查局工作项目(No.1212010811048); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(No.J1615)。

作者简介: 沈其韩(1922—), 男, 研究员, 中国科学院资深院士, 主要从事变质岩和早前寒武纪地质研究。ORCID: 0000-0002-1872-0466.
E-mail: huixiasong@cags.ac.cn

引用格式: 沈其韩, 耿元生, 宋会侠, 2018. 近70年中国变质岩石学—变质地质学的研究进展. 地球科学, 43(1): 1-23.

0 引言

变质岩石学是岩石学中一个重要分支。变质地质学是在变质岩石学基础上发展起来的以研究变质地层、变质岩石、变质作用演化、变质成矿作用的综合学科。变质岩石学和变质地质学是研究地球的组成、演化和历史必不可少的方面。

我国现代地质学的自主研究始于 1922 年,之前虽有少量地质工作但绝大部分为国外学者所做。1922 年起,我国首次建立全国性的地质研究所,开始从事地质矿产调查、生物地层以及古生物等研究,但是变质岩石学的研究几乎空白。1940 年以后开始有这方面的研究报道。据宋叔和和沈其韩(1996)介绍:1940 年代期间程裕淇对西康道孚古生代晚期喷出岩及其变质作用,西康丹巴附近的渐进变质作用,德喀式角闪岩、西康阿许式混合岩进行了研究;彭琪瑞研究了西康田村附近的递进变质带;黄懿对陕南牟家坝、新集一带的前震旦系结晶岩进行了研究;宋叔和等对皋兰系的时代和变质特征,新疆项库互层状钙铝榴石、绿帘石和方解石互层岩系以及甘肃皋兰白银厂火山岩系及变质特征进行了研究。上述报道中,程裕淇对西康丹巴渐进变质作用的研究,首次提供了我国变质带划分的一个早期实例,有关混合岩的介绍开启了混合岩概念的引入。

总的来说,1940 年以前变质岩石学的学科在我国尚未建立,研究人员近于空白。1940 年到 1949 年期间,人们在四川西康、陕西、甘肃等少数地区对变质岩中的少数岩石类型、个别时代的变质岩石进行了变质岩石学研究,从业人员屈指可数。

新中国成立以来的近 70 年,变质岩石学经历了从奠定学科基础到学科不断发展的历程。从研究内容看,由早期单纯的矿物岩石组合、结构构造描述、变质相和一般的(化学成分)温压条件研究,逐步与地球化学、成因矿物学、岩浆岩石学、实验矿物学、同位素地质、变形构造等多学科相结合;逐步将变质岩形成的机理、变质作用演化与地球动力学和大地构造相结合,发展成为变质地质学研究的新方向。

1949 年至今的近 70 年是变质岩石学学科建立,并逐步迈向变质地质学研究的 70 年。本文根据变质岩石学到变质地质学的发展,将近 70 年的历史划分为 1949—1978 年、1978—2000 年、2000 至今 3 个阶段进行叙述。

1 1949—1978 年,地质行业大发展和变质岩石学科从初步奠定基础逐步大发展阶段

1.1 超常规积极培养地质人才(包括变质岩石学学科)

新中国建立初期百废待兴,国民经济大发展是其主流,而地质行业是国民经济发展的先行者。但是当时全国地质人员不足 200 人,人才奇缺。对于这一情况国家极为重视,大力培养地质人才,其中一项重要任务就是积极筹建北京地质学院和长春地质学院。随后又筹建了成都地质学院,为培养高级地质人才提供了保障。为培养中级地质人才又建立了一个专科和多个中等地质学校。经过十多年的努力,基本上初步满足了地质人才的需求。变质岩石学科也不例外。为了加强变质岩石学人才培养的力度,长春地质学院曾聘请前苏联专家别列夫采夫承担变质岩石学的课程,其在讲授变质矿床成因时强调原岩建造的重要性。同时鼓励高校和科研院所的老一辈变质岩石学家通过带研究生和年轻教师(研究人员),积极培养人才。在这方面程裕淇、董申保等起到了重要作用。

配合当时变质岩石学专业的教育和学习的急需,前人先后编写和翻译出版了专业急需的书籍。例如贺同兴等(1965)编写并出版了我国第一部“变质岩石学”教科书,得到广泛应用。谭荣森(1958)翻译出版了前苏联波洛文金娜 1955 年版的《岩石结构第三册:变质岩》。这些书籍的出版对变质岩石学学科人才的培养和我国变质岩石学总体水平的提高起到了重要的作用。

1.2 新中国建立初期以铁铜等战略性矿产资源重点勘查为依托的变质岩石学研究取得较大进展

中华人民共和国成立之后,国家急需国民经济大发展,铁、铜、磷等战略性资源的开发利用更是刻不容缓,从而国家投入大量资金进行这些矿产的勘查。以此为依托,前人对变质岩石学、变质地质学和变质成矿作用做了不同程度的研究,取得了一批重要成果。例如,通过对鞍山及附近变质沉积铁矿的变质地层、变质岩石和变质成矿作用的研究(李春昱等,1956;程裕淇,1957),程裕淇(1957)强调了区域变质对条带状铁矿的影响,富铁矿的形成可能与混合岩化作用的热液有关。在湖北大冶开展的铁山矽卡岩铁矿详查,涉及到变质岩石学和变质作用成矿

的有关问题(黄懿等,1957).通过对江苏海州磷铁矿的详查,张秋生(1958)强调了交代作用对成矿的影响.

在这一时期,前人不同程度地开展了变质岩石和变质地层的基础地质研究.如王曰伦领导的山西五台山队通过对五台系变质地层的研究,提出了与 Willis *et al.*(1907)不同的五台山区变质地层的新见解.同时运用变质岩石学方法探索前寒武纪地质构造发展,详细阐述了五台山地区地质构造的基本特征,开创了把变质岩石和变质构造紧密结合的先例(王曰伦等,1953).

这一阶段变质岩石的研究主要以一些矿产的调查为背景,同时对变质地层进行了新的划分,积累了在变质岩地区开展工作的经验,培养了变质岩研究人才.

1.3 系统开展区域地质调查中变质岩的研究

1950年代在地质部的统一组织下,开始进行系统的1:20万区域地质调查,其中不少地区属变质岩区.有关地质院校和科研院所与各省地质队配合,参与一些区域的区域地质调查.1958—1962年北京地质学院师生在池际尚教授领导下,由游振东具体负责与山东地矿厅合作在山东中西部开展1:20万区域地质调查,在中深变质的泰山群中初步建立了变质岩石地层单元,划分了变质岩石组合和类型、总结了变质作用特点,厘定了泰山群的构造格架,总结了填图经验.与此同时,长春地质学院师生在董申保教授率领下在华北和东北南部开展了1:20万区域地质调查和变质岩石学专题研究,在辽东测制和修测了若干1:20万图幅,内部出版了若干变质岩有关的报告.通过变质岩区的区域地质调查解决了一些变质岩出露的实际地质问题,同时培养了大批变质岩研究领域人才.

程裕淇先生带领的变质岩研究团队瞄准变质地区区域地质调查的急需,于1963年出版了《变质岩一些基本问题和工作方法》一书,该书针对性强,研究方法具体,区域变质岩的分类命名独具特色,因此该书一经出版随即受到在变质岩区工作的广大地质人员的欢迎,对规范变质岩的命名起到了推广作用.

1.4 1966—1978年,研究工作基本停滞

这一时期正常的地质研究和地质调查工作基本处于停滞状态.后期由于环境的改善,研究人员零星做了一些工作,如程裕淇等人在陕西潼关对变质铁矿做了一些调查,刘国惠和伍家善等对北京房山的接触变质带进行了调查和初步研究.董申保即使在

逆境中仍在学习国外的文献,总结文革前在变质岩区域地质调查的经验,先后撰写了“区域变质作用与成矿”(1973)、“区域变质作用的一些问题”(1973)、“辽东半岛前震旦纪混合岩化及成矿作用”(1976)等文章,通过内部交流得到较广泛的应用,也为变质岩石学及变质地质学的后续发展做了准备.

2 1978—2000年,研究工作逐步恢复,开放引进走向新的发展阶段

随着国家改革开放政策的实施,国外地质学先进的思想和理念不断冲击着国内学者的传统观念.1979年周云生翻译出版了都城秋穗的《变质作用与变质带》,钟元昭翻译出版了前苏联叶利谢夫的《变质作用》,1980年张旗、周云生翻译出版了 Winkler 1976年版的《变质岩成因》,他们让国内学者看到了国际地学研究的前沿.恢复高考和研究生培养为地质研究增添了具有朝气的新生力量,国际合作研究和新技术的引进让地质学研究插上了腾飞的翅膀.对于变质地质学来说,1982年国际前寒武纪地壳演化讨论会在北京的召开是新观念引进的标志,多国外对大别超高压的合作研究让国内学者从区位优势站到了超高压研究的前沿,中英合作在冀东开展的合作填图开创了前寒武纪变质岩地区进行填图的新纪元.这一阶段的开放引进促进了我国变质岩石学和变质地质学的发展.

2.1 变质地质学的研究和1:400万中国变质地质图的编制

国际上,自1967年在以 Zwart 为首的世界变质带编图委员会领导开展了世界范围的小比例尺变质地质图编制,先后完成了欧洲、亚洲、非洲和美洲部分地区以及一些国家(如前苏联、澳大利亚、加拿大、罗马尼亚、南斯拉夫、保加利亚、日本等)的小比例尺变质地质图.通过变质地质图的编制促进了变质地质学研究的飞速发展.

1981年我国1:400万变质地质图编制与研究开始筹备,1986年由董申保教授领导,由长春地质学院、中国地质科学院地质研究所、天津地质研究所人员组成的编图人员完成编图任务并正式出版,取得了一些重要创新性成果:

(1)研究了我国变质岩的变质相和相系,首次在我国新疆的准噶尔—北天山华力西变质带发现属于埋深变质作用类型的浊沸石相和葡萄石—绿帘石

相.在全国发现了自元古代以来的各时代的蓝片岩带并划分了与洋壳俯冲作用有关的蓝闪—硬柱石蓝片岩相和与陆陆俯冲碰撞有关的中高压过渡型蓝闪绿片岩相;总结了我国各时代变质相系特征,指出前寒武纪以中压相系为主,而中晚元古代和古生代,中压和低压两类变质相系占有同等重要地位,且不少情况下是在同一变质地带出现,中生代则以低压相系和高压相系并存为特征.

(2)变质作用成因类型及其演化.我国境内的区域变质作用可划分为 4 大类 8 个基本成因类型,即埋深变质,包括浊沸石相和葡萄石—绿纤石相型、蓝闪石—硬柱石片岩相型;区域低温动力变质作用,包括低绿片岩相型和绿片岩相(含蓝闪绿片岩相)型;区域动力热流变质作用,包括低压相系型和中压相系型;区域中高温变质作用,包括角闪岩相型和麻粒岩相型.它们反映出不同的 PT 时空变化特征和大地构造环境.

(3)我国变质作用类型的演化可分为 3 个不同阶段(卢良兆,1986):第 1 阶段为早前寒武纪陆壳通过垂向增生而形成并趋向稳定的阶段.第 2 阶段自中晚元古代至中生代初期,是我国大部分地区已克拉通化的陆壳又发生多起拉张、分裂再闭合的时期;不同时期在不同性质的活动中,发育多种不同变质作用类型.第 3 阶段是指中生代以来形成的以板块活动为特征的变质作用,主要形成西藏中南部和福建沿海及台湾等高压带(蓝闪石—硬柱石片岩相)和低压相系类型的区域动力热流变质作用.

通过全国变质图的编制不仅改变了过去对区域变质作用的认识,而且证明区域变质作用特征和成因类型对研究大地构造环境的意义,大大提高了变质地质学研究的水平.该图属首次编制,许多方面具有创新性,所以具有一定的里程碑意义.

该图是在各省 1:200 万~1:150 万变质地质图编制基础上综合提高而成.后来云南省和河北省编制的变质地质图另行公开发表,其他各省则纳入各省地质志中出版,这些综合总结性成果对于变质地质学研究的推广和提高具有重要的意义.

2.2 太古宙高级变质区片麻岩和麻粒岩的研究

我国华北克拉通高级变质区深变质岩(片麻岩和麻粒岩)在 20 世纪 70 年代之前基本被认为是古老地层,采用显生宙地层研究方法进行研究,因此造成地层扩大化.80 年代以后通过不断总结并吸取国外的经验,国内学者逐渐认识到一些花岗质片麻岩属侵入成因,在高级变质岩研究理念上发生了根本转变.在冀

东地区划分出多个古老的侵入体(李勤等,1992).

随着电子探针的引进,麻粒岩相变质岩石的研究在强调岩石组成、类型及原岩性质的基础上,加强了变质矿物的共生及转变关系、变形序列与变质结晶顺序关系、成因矿物学和矿物化学的研究,并采用矿物对温度压力计对高级变质作用温压条件及 $P-T$ 轨迹进行研究(伍家善等,1989;沈其韩等,1990;卢良兆等,1996).这一阶段晚期前人在恒山、冀西北地区发现了高压麻粒岩(王仁民等,1991;郭敬辉等,1993;Zhai *et al.*, 1993).在变质作用演化研究的基础上,提出前寒武纪麻粒岩一般可以分为 3 个主要类型:(1)面状高温区域变质作用麻粒岩相型,以中低压为主;(2)热点状中高温区域变质岩中局部麻粒岩相型;(3)线状区域动力热流变质作用麻粒岩相型(沈其韩等,1992).

随着 X 光衍射分析和同位素技术的广泛应用,地球化学方法更广泛地应用于变质岩石学的研究.一方面利用主量元素和微量元素有关图解或参数判断变质岩的原岩性质,推断深变质岩原岩形成的构造背景(从柏林等,1982;孙大中,1984;伍家善等,1989;Jahn, 1990);另一方面采用稀土元素、全岩 Sr 同位素及 Nd 同位素判断变质岩原岩的来源,以及母岩岩浆源区的性质(Jahn, 1990;张宗清等,1991;Jahn and Zhang, 1984).

这一阶段各种测年技术方法不断引进,采用全岩 Rb-Sr 法、全岩 Sm-Nd 法、单颗粒锆石蒸发法和微量锆石化学法前人对华北高级变质区主要变质岩系进行了大量的年代学研究(Liu *et al.*, 1985, 1990;吴福元等,1997;Huang *et al.*, 1986;Jahn *et al.*, 1988;沈其韩等,1997;王楫等,1995;孙大中等,1991;耿元生等,1997),后期一些学者通过国际合作研究,在一些地区获得了高精度的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(Liu *et al.*, 1992;王凯怡等,2000).

这一阶段变质岩的原岩性质也受到了重视,王仁民等(1987)编著的《变质岩原岩图解判别法》一书介绍了当时国外用于变质岩原岩恢复的主要方法,在实际工作中得到了较广泛的应用.大多数学者认为基性麻粒岩的原岩既有基性岩脉也有基性火山岩,但吴昌华和韩光(1989)、吴昌华(1992)认为基性麻粒岩绝大部分原岩为辉长岩,经逆变质作用而形成麻粒岩.

这一阶段麻粒岩中流体包裹体的研究尚属起步阶段,仅从内蒙古(徐学纯,1992)、冀东和山东沂水等少数麻粒岩和麻粒岩相片麻岩的研究看(沈其韩等,

1992),绝大部分均富含 CO_2 ,有的还含 N_2 , CH_4 等。

在变质地质学方面,采用岩浆甄别—事件地层—构造解析综合方法,研究人员合理划分了火山成因或沉积成因的片麻岩系,确定了古陆的存在,划分出多个花岗—绿岩带(沈保丰等,1994);并对华北克拉通的古老构造格局提出了不同的划分方案(白瑾等,1993;伍家善等,1998),基本属于小陆块拼贴的模式。

2.3 这一阶段我国高压—超高压变质岩的研究进展

据王清晨(2001)介绍,我国榴辉岩的研究最早始于 1963 年(王鹤年,1963),国际上对超高压变质岩石的研究始于 1984 年(Smith, 1984; Chopin, 1984)。我国真正注意到超高压变质岩是在 1987 年,许志琴在她的博士论文中指出,大别山菖蒲发育有含柯石英榴辉岩(Xu, 1987)。这一发现首先引起了国际同行的重视,法国、土耳其、美国和日本的科学家率先寻求与中国科学家合作,共同研究中国的超高压变质岩。1989 年分别由 Okay *et al.* (1989)、Wang *et al.* (1989)、Yang and Smith (1989) 及 Zhang *et al.* (1989) 报道了我国大别山—苏鲁地区许多以前不为人所知的超高压变质岩。

之后十年在国家自然科学基金委员会、科学技术部、国土资源部、中国科学院的大力资助下,我国超高压变质岩研究由小、单一学科逐步发展为大规模多学科的综合研究项目。同时,国际合作在我国大别—苏鲁地区研究取得的进展,引起了国际地学界的高度重视,国际岩石圈计划委员会先后设立了由中国科学家程裕淇和丛柏林担任主席的超高压变质作用任务组,第 30 届和 31 届国际地质大会均专门设立了超高压变质作用分会场,美国 AGU 的年会自 1996 年设立了超高压变质作用特别研讨会。中国的超高压变质岩已经成为国际固体地球科学最热门的研究对象之一。

根据王清晨(2001)的总结,这一阶段超高压研究的主要进展包括:

(1)发现了大批超高压变质岩。在岩石种类方面不仅发现了经历过超高压变质作用的榴辉岩,而且发现了超高压硬玉石英岩、大理岩、片岩、花岗质片麻岩、超镁铁质岩等。超高压变质岩露头西起河南新县东至山东荣成,分布范围长达 1 000 km,规模大,岩石种类多,地质现象丰富为世界之最。

(2)中国的大别—苏鲁地区发现了许多特征现象指示,低密度陆壳岩石可以被俯冲到地幔深处。在

青岛仰口榴辉岩中前人发现了粒间产出的柯石英(Xu *et al.*, 1992; Ye *et al.*, 1996; Liou and Zhang, 1996), Yang *et al.* (1993) 对苏北石榴橄榄岩的 P - T 计算表明该岩体最大变质压力可达 6 GPa (相当于俯冲到 200 km 深度),青岛仰口石榴子石中单斜辉石+金红石+磷灰石熔体的发现进一步表明,低密度的陆壳岩石曾被俯冲到至少 200 km 深处(Ye *et al.*, 2000),但也有人对 P - T 计算方法提出了质疑(吕古贤等,1998;吕古贤和刘瑞珣,1999)。

(3)中外科学家分别应用单颗粒锆石 U-Pb 法、SHRIMP 锆石 U-Pb 法、Sm-Nd 矿物等时线法等多种同位素测年方法,对大别—苏鲁超高压岩石进行了年代学研究,诸多方法表明,超高压变质作用是在中生代早期扬子板块俯冲到中朝板块之下时发生的。

(4)柯石英包体在一系列含水超高压变质矿物或矿物组合(绿帘石、黝帘石、滑石、镁十字石、斜硅镁石、蓝晶石+滑石)中出现。对这些岩石和矿物的研究表明,超高压变质作用过程中可能有流体参与;另一方面,对超高压变质岩的 O、C、H 同位素研究表明,大气水的 O 同位素成分可能被带到地幔深处而不改变(Zheng *et al.*, 1996; Baker *et al.*, 1997; Wang and Rumble, 1999; Rumble *et al.*, 2000)。进而表明,表壳岩在俯冲到地幔深处并经历超高压变质作用时并无大规模流体活动,且超高压变质岩是在无流体参与的情况下快速折返的。

(5)关于超高压变质岩的折返过程提出多种假说。仅就大别—苏鲁超高压变质岩而言,就有浮力、剥蚀、挤出楔和板块断离这 4 种假说。Wang and Cong (1996) 提出了多阶段折返模式,指出超高压变质地体是经过同碰撞挤出、浮力底辟、热隆起、剥蚀等阶段才出露地表的。

(6)据叶凯(2001)总结,超高压变质岩回返过程中会产生多硅白云母的脱水熔融及流体。实验表明,沿着冷俯冲带多硅白云母的稳定压力可高达 10 GPa,即约 300 km 的深度,在无流体的超高压条件下,多硅白云母+柯石英组合的脱水熔融温度超过 1 200 °C。大别—苏鲁地区超高压变质岩的峰期变质温度大多低于 800~850 °C,因此,笔者有理由相信该区的俯冲(升压)过程中多硅白云母是稳定的。

2.4 我国蓝片岩的初步研究进展

20 世纪 60~70 年代随着系统的 1:5 万和 1:20 万区域地质调查广泛开展,一些蓝片岩产地陆续被发现,但未被深入研究。1970 年稍后,板块构造理论被引入我国,作为板块构造重要标志之一的蓝

片岩最早受到李春昱及其团队的重视(李春昱, 1975; 王荃和刘雪亚, 1976)。这一阶段我国对于蓝片岩的研究主要体现在:

(1)自 20 世纪 80 年代开始,大地构造学家和岩石学家在北祁连、西藏雅鲁藏布江、藏北羌塘、内蒙古温都尔庙、秦岭地区、新疆唐巴勒地区、滇西澜沧江地区、桐柏一大别山地区、新疆阿克苏地区、新疆南天山和西南天山地区、黑龙江依兰、牡丹江地区先后发现了蓝片岩,并开展了变质岩石学、构造、矿物组合、变质作用等有关问题的研究。

(2)对蓝片岩的成因进行了探索。董申保(1989)根据蓝片岩平均温度—压力梯度和大地构造环境将蓝片岩分为元古代克拉通内蓝片岩带、加里东末期克拉通裂谷蓝片岩带、中生代中国陆台北缘蓝片岩带、中生代与俯冲作用有关的蓝片岩带等 5 大类。有的作者划分出克拉通边缘和增生褶皱带的蓝片岩(Liou *et al.*, 1990),有的作者提出蓝片岩可分为科迪勒拉型和大陆内部型两种类型(魏春景, 1994)。

(3)根据蓝片岩产出的大地构造背景、形成时代、对我国的蓝片岩带进行了不同的划分(沈其韩和耿元生, 2012)。

1988 年 3 月矿物岩石地球化学学会变质岩专业委员会在武汉组织召开了首次中国蓝片岩学术讨论会,对蓝片岩的变质作用条件、蓝闪石类矿物的划分和成因意义等进行了探讨,推动了我国蓝片岩的研究。

2.5 显生宙造山带变质岩研究

显生宙造山带中变质岩的研究起步较晚, 1980—1990 年开始逐步形成高潮,研究重点主要有两个方面,一是与碰撞造山带隆升或地壳拉张有关的递增变质作用,一是造山带中的麻粒岩。

2.5.1 造山带中与隆升有关的递增变质带的研究

这一阶段我国学者在秦巴、大别山—桐柏、祁连、三江、川西、浙闽以及新疆阿尔泰造山带做了很多研究。秦巴造山带经历了 2 期变质(第 1 期为区域变质作用,第 2 期为热动力变质作用)和 3 幕变形作用,区域变质作用发生于第 2 幕变形之前或同时,初期为低中角闪岩相,峰期为高角闪岩相。这套变质岩系变质作用发生在加里东期,稍后又叠加了新的地质事件,主要表现为大量岩浆侵入及热点或热轴式的低压角闪岩相热动力变质和混合岩化作用。此过程与下部地壳的部分重熔和回返有关,并引起逆掩推覆,继之为以韧性剪切带为特征的构造改造作用。据庄育勋(1994)研究,新疆阿尔泰海西期造山带的变

质带可分出红柱石型和蓝晶石型 2 个变质带类型和黑云母、石榴子石、十字石、红柱石、蓝晶石、夕线石和夕线石+堇青石这 7 个亚类型,并认为红柱石型和堇青石型及各变质带亚类的出现是构造演化条件及其热流上升条件差异所致。

据沈其韩等(1992)总结,造山带中与隆升有关的递增变质带主要有以下特点:(1)围绕某些热中心或热轴普遍有递增变质带分布,即中心为高温变质带,向外变质级别降低,可到低绿片岩相带;(2)变质作用类型以区域动力热流为主,随着时间的演化,可能出现不同的变质作用类型,变质变形可以是一次完成也可以是多期完成。即使是一次作用也可包括多幕变形和变质重结晶作用。例如新疆阿尔泰海西造山带和武夷山加里东造山带,虽只经历了一次主要变质事件,但其变质全过程仍包括多幕变形和变质重结晶作用。以上认识明显不同于过去对巴洛式变质带成因机制的理解,也对变质相系概念提出了挑战。

2.5.2 显生宙造山带麻粒岩的研究 这一阶段在中西部一些造山带中陆续发现有麻粒岩,如在西天山造山带阿吾阿勒西段发现具逆时针 $P-T-t$ 轨迹低压麻粒岩(Gao *et al.*, 1999),在南天山榆树沟发现高压—中压麻粒岩(王润三等, 1998; 王焰等, 1999),在天山造山带东部尾亚地区的卡瓦布拉克—星星峡中间地体的彩霞山黑云斜长花岗岩和石英闪长岩中发现二辉麻粒岩的捕虏体(陈义兵等, 1997),在南阿尔金地区发现高压泥质麻粒岩(Che *et al.*, 1995),在罗布泊南端黑山地区发现一套变质程度达麻粒岩相的岩区(车自成和孙勇, 1996),在东昆仑造山带金水口、淡水泉等地发现麻粒岩,并进行了初步研究(陈能松等, 1999),在北秦岭造山带松树沟发现了高压麻粒岩(刘良和周鼎武, 1994; 刘良等, 1995; Liu *et al.*, 1996),在桐柏地区见有长英质低压麻粒岩成透镜体产于具有孔兹岩系特征的富铝片麻岩和花岗岩中(刘庆生和高山, 1990)。豫南高压麻粒岩可能是桐柏—信阳麻粒岩带的一部分(翟淳等, 1995)。大别山惠兰山一带的麻粒岩是大别山西北部具典型意义的露头,属于秦岭大别造山带结晶基底的一部分(游振东等, 1995)。此外,在南秦岭勉略地区、在喜马拉雅东构造结的南迦巴瓦峰西侧也发现有麻粒岩出露(Xu *et al.*, 1994; 李三忠等, 2000; Zhong and Ding, 1996; Liu and Zhong, 1997)。

上述各造山带麻粒岩的研究一直持续到 2000 年以后,主要成果将在下文叙述。

3 2000 年至今,稳定快速发展阶段

经过 20 年的改革开放和人才培养,我国变质地质学的研究水平得到极大提高,技术手段更加先进,变质岩石学和变质地质学的研究进入了稳定快速发展阶段。这一阶段主要进展概述如下。

3.1 早前寒武纪高级变质区片麻岩和麻粒岩研究新进展

华北克拉通作为早前寒武纪高级变质区最主要地区之一,这一阶段的研究进展主要体现在以下几个方面:(1)根据变质作用演化轨迹的差异等对华北克拉通的构造单元进行了重新划分(Zhao *et al.*, 2000, 2005),从而掀起新一轮的研究热潮;(2)在更多地区发现有高压麻粒岩,既有基性高压麻粒岩也有高压泥质麻粒岩(Zhou *et al.*, 2004; Yin *et al.*, 2011; Jiao *et al.*, 2013);(3)在内蒙古土贵乌拉等地发现有超高温麻粒岩(Santosh *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2012);(4)确认了鞍山地区存在我国最古老的 3.8 Ga 的岩石(Liu *et al.*, 2008; 万渝生等, 2009),精确的锆石原位定年表明华北克拉通 BIF 铁建造主要形成于新太古代晚期 2.55 Ga 左右(万渝生等, 2012; Zhang *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2014a),发现了大量 2.7 Ga 的变质岩石(Wan *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2012; 董晓杰等, 2012; Zhu *et al.*, 2013),为构建华北克拉通演化提供了新的资料;(5)通过锆石原位定年精确确定了华北一些变质地区的变质作用时代(Guo *et al.*, 2012; Wan *et al.*, 2013);(6)通过综合研究提出华北克拉通基底主要由 5 套不同类型的高级变质岩系所组成,在其形成演化过程中经历了多期构造活动、多期岩浆活动和多期变质作用以及不同程度的混合岩化和深熔作用,具有复杂的演化历史(沈其韩等, 2016b)。在这一领域我国的研究已处于国际先进水平。

在扬子陆块,继上世纪在黄陵地区发现 3.0 Ga 左右的变质深成岩以后,最近十多年在黄陵地区发现有 3.4 Ga、3.2 Ga、2.9 Ga 和 2.6 Ga 的变质深成岩,为全面认识扬子陆块的早期演化提供了更多证据。在扬子北缘发现了 1.80~1.85 Ga 代表拉张环境的 A 型花岗岩、环斑花岗岩及基性岩脉,确定了从扬子到华夏北部八都群经历了 1.8 Ga 具有顺时针 $P-T-t$ 轨迹的变质作用,表明在元古代末它们经历了碰撞造山作用过程(耿元生等, 2016a)。

3.2 超高压变质岩深入研究的新进展

2001—2005 年,我国在江苏连云港东海毛北地

区实施了超高压变质带的“中国大陆科学钻探工程”,由王达和许志琴率领众多科研人员成功钻进了 5 155 m,成为亚洲第一、世界第三深的科研钻探井,开启了我国科学钻探事业的先河,具有里程碑意义。

通过这一项目的实施,建立了苏鲁超高压变质带重要部位的岩性、地球化学、氧同位素、构造变形、岩石物性等高精度系列剖面,揭示出板块汇聚边界连续的物质组成和超高压变质区的深部结构,证实了苏鲁地区 0.2 Ga 之前发生过板块汇聚,在板块缝合带有巨量的物质俯冲到地幔深处的地质构造事件。由于深部钻探的实施和专题研究的深入,涌现了不少超高压变质作用理论和研究方法创新。据刘福来等(2016)的总结,归纳起来主要有以下 4 方面:

(1)发现了大别山—苏鲁超高压变质带巨量陆壳物质深俯冲的确凿证据。采用激光拉曼和电子探针的综合分析方法,在大别—苏鲁超高压变质带各类强退变质岩石的锆石中普遍发现以柯石英为代表的超高压矿物包体及其矿物组合,借以证明大别—苏鲁地体曾发生巨量陆壳物质深俯冲—超高压变质,进一步确认大别—苏鲁地体是一条大于 2 000 km 的世界上规模最大的超高压变质带,并建立了大别—苏鲁地体穿时俯冲—折返的动力学演化模式。

(2)以全新的研究方法限定超高压变质带中强退变质岩石不同阶段的 $P-T$ 条件。大别—苏鲁变质带 90% 以上的岩石经历了后期强烈退变质作用的改造。早期超高压变质矿物组合和 $P-T$ 演化信息已完全被破坏,给超高压变质演化研究带来极大的困难。然而,研究人员仔细研究后发现:在强退变质岩石不同演化阶段,锆石微区中均保存不同阶段的矿物组合包体,采用电子探针分析、配合传统地质温压计和相平衡模拟的综合研究手段,率先限定强退变质岩石深俯冲进变质阶段、峰期超高压阶段和晚期退变质阶段的温压条件,准确建立了变质演化 $P-T$ 轨迹。该创新成果在国际上引起了强烈反响,不仅填补传统有关超高压变质作用研究深俯冲过程的空白,而且探索出一条强退变质岩石演化研究的新理论和新方法。

(3)采用激光拉曼技术,对锆石中包裹体矿物性质及其分布规律进行系统研究,判断锆石不同微区性质及属性后,采用 SHRIMP 或 LA-ICP-MS 定年技术在不同性质锆石微区进行原位 U-Pb 定年,准确限定大别—苏鲁超高压带深俯冲进变质时代(240~244 Ma)、峰期超高压变质时代(215~

225 Ma) 和晚期角闪岩相退变质时代 (215 ~ 208 Ma), 结合温压条件等研究成果, 建立大别—苏鲁超高压变质连续而完整的变质演化 P - T - t 轨迹。

(4) 北秦岭官坡地区榴辉岩及其周围片麻岩的锆石中发现超高压金刚石包体, 并厘定超高压时代为 527 ± 75 Ma, 对重新认识中央造山带的属性及其演化具有重要的科学意义。

在这一领域的研究我国已经位于国际研究的前列。此外, 青藏高原南部拉萨地块的松多地区发现 $T = 730 \sim 800$ °C、 $P \geq 2.7$ GPa 的高压榴辉岩, 该地区被认为可能存在一条呈东西向延伸的高压—超高压带, 从而在西藏地区识别出一系列的板块缝合线。

3.3 部分地区及全国变质地质图的编制

自 1986 年出版了 1 : 400 万中国变质图以来, 通过区域地质调查和专题研究, 填补了青藏高原一些地区无变质岩研究的空白, 在其他地区也积累了大量变质岩石学和变质地质学的新资料。从本世纪初开始我国学者通过编制变质地质图着手对这些新的资料进行总结。首先董永胜编制了青藏高原南部冈底斯和喜马拉雅地区 1 : 150 万变质地质图, 尽管这图件没有正式出版, 但为后续编制青藏高原变质地质图奠定了基础。此后, 成都地质矿产研究所委托成都理工大学毛晓冬等对整个青藏高原地区进行了 1 : 150 万变质地质图的编制 (毛晓冬等, 2014); 沈其韩和耿元生牵头, 由中国地质科学院地质研究所联合北京大学、天津地质调查中心和吉林大学有关人员进行了 1 : 500 万中国变质地质图的编制 (沈其韩等, 2016a; 耿元生等, 2016b); 陆松年和郝国杰主编了 1 : 250 万中国变质岩大地构造图, 并于 2015 年正式出版 (陆松年和郝国杰, 2015)。

这些不同作者编制的变质图既有共同点也有各自的特色。如“青藏高原及邻区 1 : 150 万变质地质图”全面总结了 1 : 25 万区域地质调查以来在青藏高原变质岩地质调查和研究的最新资料, 突出反映了从古特提斯洋到新特提斯洋演化过程中变质作用、变质带的时间空间变化。“1 : 500 万中国变质地质图”突出变质作用类型和变质相的时空变化以及与大地构造背景的联系。1 : 250 万中国变质岩大地构造图则提出变质岩大地构造相的概念, 突出反映了不同时代变质岩的大地构造相。其共同特点是突出反映了近 30 年来变质岩和变质地质学研究的最新进展, 把变质作用与板块构造作用联系更加紧密。据笔者了解, 最近 30 年国际上还没有新的变质地质图面世, 我国这些变质图在国际上独具特色。

3.4 显生宙造山带麻粒岩等变质岩的研究进展

进入 21 世纪以来, 显生宙造山带麻粒岩等变质岩的研究在以往工作基础上继续深入, 逐渐形成研究热潮。新疆阿尔泰造山带、天山造山带、阿尔金—北祁连造山带、东昆仑造山带、秦岭—桐柏—大别造山带、南秦岭勉略造山带、西藏班公湖—怒江造山带、西藏喜马拉雅造山带等都有专项进行研究, 研究重点仍是这些变质岩的变质岩石学、变质作用 P - T - t 轨迹与动力学、判别形成的大地构造背景。沈其韩等 (2014) 综合前人十多年来取得的主要研究进展, 结果如下。

(1) 显生宙造山带中麻粒岩的赋存状态不一。有的麻粒岩在造山带中单独产出, 如南秦岭勉略造山带和西藏班公湖—怒江造山带中只出现高压麻粒岩一种类型。西天山造山带木扎尔特地区只出现低压麻粒岩。大部分显生宙造山带麻粒岩的类型在一种以上, 如新疆阿尔泰造山带出露的麻粒岩类型较全, 有低压泥质麻粒岩、高压泥质麻粒岩、中低压—高压基性麻粒岩和超高温麻粒岩。西藏喜马拉雅造山带东段有泥质高压麻粒岩, 也有榴辉岩化的石榴辉石岩以及退变质形成的高压—中低压麻粒岩。

(2) 变质期次较多且有一定规律性。少数造山带的麻粒岩变质时代尚待精确测定, 但就整体而言, 变质期次已基本搞清。除个别造山带中的低压麻粒岩的变质时期属晋宁期外, 加里东、海西、印支—燕山, 一直到喜马拉雅期都有所见, 而以加里东期和喜马拉雅期更为发育。中国西部造山带中麻粒岩的变质期次从北部的古特提斯到南部的新特提斯造山带, 与造山带的形成演化吻合一致。

(3) 显生宙造山带麻粒岩的成因和大地构造背景。西天山造山带中出现低压麻粒岩, 显示了初期的迅速增压至峰期后转为近等温降压 (IBC) 的顺时针轨迹, 可能形成于板块俯冲过程的拉伸环境, 受下部岩浆热源影响所致。而大部分造山带 (主体) 中均出现高压泥质麻粒岩、高压长英质麻粒岩以及高压基性麻粒岩, 其变质的 P - T - t 轨迹均显示等温降压 (IBC) 的顺时针轨迹, 其形成的大地构造背景可能与大陆碰撞模式相联系。西部显生宙造山带高压麻粒岩大多赋存于蛇绿岩套或蛇绿混杂岩中, 这些蛇绿岩套或蛇绿混杂岩代表洋壳或洋壳残余物, 所以严格地说, 应该是洋壳俯冲、洋陆俯冲和洋—陆碰撞的产物。

(4) 高压麻粒岩有的与榴辉岩和高压/超高压带组成双变质带。柴达木东南部都兰、秦岭造山带和南

秦岭造山带中的高压麻粒岩和高压榴辉岩,在同一造山带的不同构造部位并存,各自具有独立的变质演化历史,均显示顺时针的 $P-T-t$ 轨迹,但其形态有一些差别,二者有的近于平行.榴辉岩形成于洋壳或大陆俯冲作用,高压麻粒岩可形成于俯冲带,也可能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1.5~2.0 GPa,所对应的深度大约50~80 km,与增厚的造山带底部环境相当.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,即具有高的地热梯度.高压麻粒岩与超基性岩共生,可能反映了其形成于壳幔过渡带或靠近俯冲带的地幔楔的位置.高压榴辉岩与高压麻粒岩组成双变质带.其形成主要与大陆俯冲作用有关,部分形成于洋壳与大陆地壳俯冲的动力学环境.

(5)部分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.北秦岭造山带、大别造山带和喜马拉雅造山带中麻粒岩的形成都适用于这一模式.北秦岭造山带松树沟高压麻粒岩经退变质转变为中、低压麻粒岩,大别造山带的北大别石榴辉石岩峰期变质为榴辉岩相或高压麻粒岩相,然后由于热松弛退变到中压麻粒岩.张泽明等(2000)认为,喜马拉雅造山带东构造结出露的石榴辉石岩,经历了高压麻粒岩相和中低压麻粒岩相变质作用.在喜马拉雅造山带东构造结南伽巴瓦一带高压麻粒岩的 $P-T-t$ 轨迹中有所反映(Ding and Zhong, 1999).

造山带麻粒岩的研究在国际上尚属于研究热点,我国在这方面的进展可以与国际同类研究媲美.

3.5 对蓝片岩的深入研究,取得了新的进展

这一阶段对蓝片岩的深入研究,取得的主要进展主要体现在:

(1)发现了一些新的高压矿物和矿物组合.如在大别山、木兰山蓝片岩及苏北蓝片岩中发现文石包裹体(赵文俞等,2001;邱海峻等,2002,2003),同时确定了蓝片岩中斜黝帘石—低铁绿帘石连生体(赵文俞等,2002),在阿尔金—北祁连地区蓝片岩带中的榴辉岩中发现了硬柱石(Zhang *et al.*, 2000, 2007; Zhang and Meng, 2006; Song *et al.*, 2006),在榴辉岩相的泥质岩中发现了高压矿物镁纤柱石(于孝宁等,2009),在蓝片岩相的变泥质岩石中发现了菱镁矿(Zhang *et al.*, 2009),在西南天山榴辉岩中的石榴子石晶体内部发现了柯石英假象和绿辉石中柯石英出熔体(Zhang *et al.*, 2002).新疆阿克苏蓝片岩和内蒙古温都尔庙蓝片岩中发现迪尔石.这些高压变质矿物及

组合的发现大大丰富了蓝片岩的研究内容.

(2)深入研究了蓝片岩变质演化的 $P-T-t$ 轨迹和高压超高压变质岩石形成和变质时代.通过锆石原位定年精确测定了榴辉岩和蓝片岩的变质年龄.通过矿物温度压力计以及相平衡模拟确定了高压蓝片岩及相伴榴辉岩的变质温压条件及 $P-T-t$ 轨迹(刘良等,2013a, 2013b;沈其韩和耿元生,2012).并在变质 $P-T-t$ 轨迹研究的基础上,探讨了蓝片岩的折返机制(Xu *et al.*, 2006).

(3)加强了以往一些研究薄弱地区蓝片岩的研究.如随着在青藏高原地质调查和专题研究的深入,加强了对西藏羌塘—双湖地区蓝片岩和榴辉岩的研究(李才等,2007;邓希光等,2007;Zhai *et al.*, 2009;沈其韩和耿元生,2012),对蓝片岩和榴辉岩的矿物学、岩石学、地球化学特征进行了研究,测定了变质年龄,重建了变质作用演化史和大地构造背景.加强了对黑龙江牡丹江—依兰—萝北蓝片岩带原岩的地球化学及其大地构造背景等方面的研究(黄映聪等,2008;赵亮亮和张兴洲,2011;周建波等,2009;Zhou *et al.*, 2009;王跃等,2009;赵英利等,2010).

沈其韩和耿元生(2012)对我国蓝片岩进行了初步总结,提出两点基本认识:一是中国蓝片岩可归属4个时代17个岩带;二是蓝片岩基本可以归属于两种成因类型,东秦岭、大别—苏鲁蓝片岩带基本属于陆陆俯冲—碰撞型(即西阿尔卑斯型),西部出露的大多数蓝片岩属于洋壳俯冲碰撞型,相当于科迪勒拉型.

3.6 我国首次发现冲击变质作用类型

近年来我国发现并证实了由陨石撞击所形成的极端变质作用——冲击变质作用的存在.岫岩陨石坑位于辽宁省岫岩满族自治县苏子沟镇罗圈里村,其碗状环形坑构造非常清楚,直径1.8 km、深150 m,并具有铂族元素的异常而引起关注(陈鸣,2007;游振东和刘嵘,2008).近年来前人对罗圈里环形坑构造、岩石及矿物微观结构的研究,发现了震裂锥、超高压矿物、石英颗粒内部击变面状页理(PDFs)、震击均质体以及冲击玻璃等现象,找到了判断该坑陨石撞击起源的诊断性标志,从而确立了岫岩罗圈里环形构造是中国第一个被证实的陨石冲击变质作用实例(陈鸣,2007;游振东和刘嵘,2008;Chen *et al.*, 2010, 2011;游振东,2011).岫岩陨石坑发育在古元古代变质杂岩中,主要的组成岩石有麻粒岩、斜长角闪岩、片麻岩、透闪石大理岩和大理岩等(Chen *et al.*, 2011).冲击变质的主要标志有:

石英中的击变面状页理(PDFs)、震裂锥、含熔体的冲击角砾岩、冲击熔融玻璃等。在岫岩罗圈里冲击变质岩中在一些熔融玻璃中可以见到变质重结晶的石英和柯石英。Chen *et al.* (2011) 根据石英和柯石英中的击变面状页理特征估计冲击压力分别为 >20 GPa 和 >30 GPa, 游振东(2011) 根据柯石英形成的反应, 估计冲击压力应在 $45\sim 60$ GPa。综合这些资料, 可以认为该区冲击变质的压力应大于 30 GPa。

3.7 南极地区深变质岩—麻粒岩及其伴生矿物的研究进展

在东南极普里兹湾首次识别出泛非期高级构造热事件(Zhao *et al.*, 1992, 1995), 确定格罗夫山是具有泛非期高温高压麻粒岩变质地体(Liu *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2001)。突破了传统的南极大陆形成模式, 引起了国际地学界的广泛重视和跟踪研究。研究并构建了东冈瓦纳泛非期普里兹造山作用的精细过程(Liu *et al.*, 2009), 研究成果在南极地学界产生了重要影响。

首次在兰伯特裂谷以东获得格林威尔期变质作用的精确年代和温压条件(Liu *et al.*, 2014c, 2016), 证明原属于印度克拉通的西福尔陆块参与了雷纳造山作用过程。对比印度东高止构造带的地质特征, 提出格林威尔期造山作用是由弧陆碰撞演化到陆陆碰撞的两阶段过程(Liu *et al.*, 2014b)。

在我国南极中山站所在南极拉斯曼丘陵麻粒岩分布区, Ren *et al.* (1992) 识别出大量硼硅酸盐矿物——硅镁铝石+硼柱晶石+电气石组合。其中硅硼镁铝矿是在南极地区的首次发现。硼柱晶石曾被外国学者(Stüwe *et al.*, 1989) 误认为电气石。该组合往往与典型的超高温麻粒岩相变质组合相伴随, 全来喜等(1996) 在南极地区亦发现假蓝宝石, 随后 Ren *et al.* (2003) 在南极同一地区发现了特殊的磷酸盐矿物氟磷镁石+磷灰石组合, 并确定了氟磷镁石的多型。这些硼硅酸盐和磷酸盐矿物组合对研究少水或无水条件下的高温麻粒岩相变质作用机制具有重要意义。该项研究成果的报道, 引发了国际上相关学科一系列新矿物的发现和研究(Grew *et al.*, 2013)。东南极中山站区的主期麻粒岩相变质作用在相当长一段时间内被认为发生在约 550 Ma 的泛非期, 而 Wang *et al.* (2008) 的研究表明, 约 1.0 Ga 前 Grenville(格林威尔) 期的变质作用非常重要, 甚至较泛非期更为重要。

3.8 极低级变质作用研究概况和进展

极低级变质作用(very low-grade metamorphism)

是当代变质岩石学—变质地质学的前沿课题之一, 国际上这一领域的研究始于 20 世纪 80 年代中期, 20 世纪 90 年代至 21 世纪初形成研究高潮。由于极低级变质作用研究对找矿、环境保护、油气和煤盆地历史的恢复、成烃机理、油气聚集规律的研究都能发挥重大作用而受到广泛的重视。

我国对极低级变质作用的研究总体来说处于起步阶段, 与国际研究水平差距较大。1980 年代, 少数人曾对成岩—变质界线矿物做过零星研究(赵宗溥, 1984; 任磊夫和陈芸菁, 1984)。此外, 石油部门也做过一些盆地岩石成岩与变质的研究, 但未公开发表。张立飞(1992)、张立飞等(1992) 对陕北鄂尔多斯盆地埋藏变质作用进行了研究, 索书田等(1995, 1996, 1998) 对右江中生代极低级变质作用进行了研究, 1994 年在我国西安召开了 IGCP-294 项目“极低级变质作用机理和地质应用”国际讨论会。索书田等(1995)、毕先梅等(1998) 著文介绍了极低级变质作用及研究现状。1994 年以来, 我国台湾学者运用云母的结晶度、碳质激光拉曼光谱、镜质体反射率、叶腊石稳定区的温度等方法对台湾中央山脉、雪山山脉、台北等地区进行了较深入的极低级变质作用研究(Shan and Yang, 1994; Yang *et al.*, 1994; Chen, 1994)。

由于东北地区晚古生代变质—未变质地层与油气资源关系紧密, 所以进入 21 世纪以来, 我国对极低级变质作用的研究主要集中在这一地区。董申保(1986) 总结东北地区古生代地层的变质作用时, 认为华力西变质作用比较轻微, 大部分岩石保持原来面貌, 在某些强烈褶皱带出现板岩和千枚岩, 矿物组合相当于绢云母—绿泥石级, 属于区域低温动力变质作用的低绿片岩相(千枚岩级)。根据以上资料, 以往多把这些地层岩石划为绿片岩相—低绿片岩相。通过近年来的研究, 有的学者提出这个区域广泛分布的晚古生代地层岩石中绿泥石仅局部分布。焦玉国等(2005)、任战利等(2006)、李景坤等(2007)、张兴洲等(2008) 和胡大千等(2010, 2011, 2012) 对该区晚古生代泥质岩和碎屑岩中有机质镜质体反射率、伊利石结晶度、伊利石/白云母多型和伊利石(白云母) b_0 值($b_0=9.011$ 左右) 等进行研究, 认为该区广泛分布的晚古生代地层经历的只是成岩—极低级变质作用, 即使是一些岩石中发现有绿泥石和伊利石也是碎屑成因。根据以往关于变质作用的分类, 将变质温度低于 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 的变质范围划分为亚绿片岩相, 并进一步划分为浊沸石相($T=180\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ 、

$P \leq 0.4$ GPa) 和 葡萄石—绿纤石相 ($T = 250 \sim 350$ °C、 $P = 0.2 \sim 0.5$ GPa)。这两个相的变质作用温压条件与毕先梅和莫宣学(2004)提出的极低级变质作用 A 带和极低级变质作用 B 带大致相当,加上绿泥石可能存在变质成因,因此笔者认为东北地区晚古生代地层岩石相当于极低级变质作用带。

3.9 变质作用 $P-T-t$ 轨迹和变质相平衡研究的新进展

变质作用 $P-T-t$ 轨迹是指变质岩在变质过程中温度和压力随时间和空间变化的过程,这一概念是 England and Recharadson(1977)在阐述造山带剥蚀作用对区域变质作用演化过程影响时提出的。后来 England and Thompson(1984)详细论述了地壳加厚区变质作用的演化规律,强调了变质作用发生于地壳从热扰动到热松弛的动态演化过程。 $P-T-t$ 轨迹的概念一经提出即受到人们的极大关注。从 1986—1993 短短数年时间,国外即有大量文献阐述变质作用 $P-T-t$ 轨迹的原理、方法和应用(Sandiford and Powell, 1986; Bohlen, 1987; Zen, 1988; Peacock, 1989; Spear, 1989, 1993)。1988 年在沈其韩和孙大中的倡议下,以矿物岩石地球化学学会变质岩专业委员会的名义,在天津召开了“ $P-T-t$ 轨迹及其在变质地质学中的应用”研讨会,卢良兆、贺高品等在会上介绍了 $P-T-t$ 轨迹的概念和研究方法,极大地推进和普及了我国 $P-T-t$ 轨迹的研究。随后,我国不少研究者通过变质矿物温度压力计进行了变质岩 $P-T-t$ 轨迹的研究,有关内容和进展可见董申保与魏春景(1997)、程裕淇等(1998)、魏春景(2012)的论述。

变质相平衡是变质岩石学的核心问题之一,也是研究 $P-T-t$ 轨迹的基础。变质相平衡的研究进展大大加深了人们对变质反应和相平衡关系的理解,开辟了定量研究变质作用的新阶段。变质相平衡研究即利用内恰性热力学数据库、Thermocalc 程序以及矿物相活度模型,定量计算模式体系中的岩石成因格子($P-T$ 投影图)、矿物共生图解、 $P-T$ 视剖面图和 $T-X$ 和 $P-X$ 视剖面图,表示特定全岩成分的相平衡关系。借助这些图解,可以确定天然矿物组合的 $P-T$ 条件,解释矿物包裹体、环带和反应关系等,从而确定岩石的 $P-T$ 轨迹。 $P-T$ 视剖面图上可以定量计算出各种矿物成分、矿物摩尔含量和岩石饱和水含量等值线,从而不仅可以更精确地限定岩石的 $P-T$ 条件和 $P-T$ 轨迹,而且可以讨论岩石变质演化过程中流体(或 CO_2)的影响。这种方法的优点是利用一个矿物成分就可以确定岩石的 $P-T$ 条件。这是因为

当包括质量平衡方程时,任何一个矿物组合的自由度都等于 2,因此只要确定两个成分变量就可以求解其他所有变化(包括 $P-T$ 和其他矿物相成分和其含量等),从而可以避免矿物组合之间是否平衡等问题。进入 21 世纪,我国变质岩石学家比较广泛地应用变质相平衡方法,对太古宙高级变质区、古元古代造山带、超高压变质带等不同变质地区的变质岩石进行了 $P-T-t$ 轨迹的研究,取得了重大进展,详见魏春景和周喜文(2003)、魏春景(2011, 2012)的有关论述。

4 几点体会

通过对近 70 年我国变质岩石学到变质地质学的发展历程的回顾,笔者有以下几点体会:

(1) 只有坚持自主研究才能把我国的一些区位优势转变为学科优势。大别—苏鲁超高压带的研究充分说明了这一点。最初对该地区的超高压岩石开展研究时,大多采用合作研究,国外学者发表了大量有关文章。但是只有当我国学者独立开展大陆科学钻探研究、独立进行激光拉曼+锆石原位定年分析、独立开展超高压变泥质岩石变质矿物研究后,才能把区位优势转变成学科优势,站在国际研究的前沿。

(2) 变质岩的研究已经从变质岩石学转变为变质地质学,已经从单一的岩石学研究转变为以变质岩为基础,变质矿物、地球化学、同位素地质、构造地质等多学科的综合研究。不论是在早前寒武纪的变质岩地区,还是对显生宙造山带中变质作用的研究都需要多种手段、多种方法的综合。多手段的综合应用是变质地质研究的趋势。

(3) 变质岩石学的发展离不开现代技术和大数据的支撑。回顾过去近 70 年的历程,岩石化学分析精度和地球化学测试方法的普及促进了变质岩石原岩性质和形成背景的研究,电子探针技术的发展促进了变质矿物和变质作用 $P-T-t$ 轨迹的研究,各种测年技术的发展推动了变质岩石形成年代和变质年代的研究,内恰性热力学数据库的建立和完善促进了变质岩相平衡模拟的发展。今后随着新技术的发展和大数据时代的到来,变质地质学定会有更大的发展。

变质岩石学,特别是变质地质学包含的内容非常广泛,这些年在各个领域都取得了长足进展,笔者只能概略地对我国 70 年来变质岩石学和变质地质学取得的进展进行初步总结,难免有所遗漏,敬请各位同行批评指正。70 年来变质岩石和变质地质学领

域的文献浩如烟海,笔者为写作本文阅读的文献远远超过文中所引用的文献,由于篇幅所限,一些重要的参考文献可能有所遗漏,敬请批评谅解。

致谢:感谢两位审稿人审稿。董申保先生是我国变质岩石学的开拓者和奠基人之一,2017年适逢董先生诞辰100周年,谨以此文纪念先生百年诞辰!

References

- Bai, J., Huang, X. G., Dai, F. Y., et al., 1993. The Precambrian Crustal Evolution of China. Geological Publishing House, Beijing, 223 (in Chinese with English abstract).
- Baker, J., Matthews, A., Matthey, D., et al., 1997. Fluid-Rock Interactions during Ultra-High Pressure Metamorphism, Dabie Shan, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61 (8): 1685 – 1696. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00005-7)
- Bi, X. M., Mo, X. X., 2004. Transition from Diagenesis to Low-Grade Metamorphism and Related Minerals and Energy Resources. *Earth Science Frontiers*, 11 (1): 287 – 294 (in Chinese with English abstract).
- Bi, X. M., Suo, S. T., Mo, X. X., et al., 1998. A Review of Very Low-Grade Metamorphism. *Earth Science Frontiers*, 5 (4): 302 – 306 (in Chinese with English abstract).
- Bohlen, S. R., 1987. Pressure-Temperature-Time Paths and a Tectonic Model for the Evolution of Granulites. *Journal of Geology*, 95 (5): 617 – 632. <https://doi.org/10.1086/629159>
- Che, Z. C., Liu, L., Liu, H. F., et al., 1995. Discovery and Occurrence of High-Pressure Metapelitic Rocks from Altun Mountain Areas, Xinjiang Autonomous Region. *Chinese Science Bulletin*, 40 (23): 1988 – 1999.
- Che, Z. C., 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, C. H., 1994. Application of K-Mica Crystallinity to the Study of very Low Grade Metamorphism in the Central Range of Taiwan. IGCP Project 294 International Symposium, Xi'an, 176 – 183.
- Chen, M., 2007. Xiuyan Crater, China: Impact Origin Confirmed. *Chinese Science Bulletin*, 52 (23): 2777 – 2780 (in Chinese).
- Chen, M., Koeberl, C., Xiao, W. S., et al., 2011. Planar Deformation Features in Quartz from Impact-Produced Polymict Breccia of the Xiuyan Crater, China. *Meteoritics and Planetary Science*, 46 (5): 729 – 736. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01186.x>
- Chen, M., Xiao, W. S., Xie, X. D., 2010. Coesite and Quartz Characteristic of Crystallization from Shock-Produced Silica Melt in the Xiuyan Crater. *Earth and Planetary Science Letters*, 297 (1–2): 306 – 314. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.06.032>
- Chen, N. S., Zhu, J., Wang, G. C., et al., 1999. Metamorphic Petrological Features of High-Grade Metamorphic Microolithons in Qingshuiquan Region, Eastern Section of Eastern Kunlun Orogenic Zone. *Earth Science*, 24 (2): 116 – 120 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.1999.02.002>
- Chen, Y. B., Hu, A. Q., Zhang, G. X., et al., 1997. REE and Sm-Nd Isotopic Characteristics of Weiya Granulites in Eastern Tianshan, NW China. *Geochimica*, 26 (4): 70 – 77 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y. Q., 1957. Problems on the Genesis of the High-Grade Ore in the Pre-Sinian (Pre-Cambrian) Banded Iron Ore Deposits of the Anshan-Type of Liaoning and Shandong Provinces. *Acta Geologica Sinica*, 37 (2): 153 – 180 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y. Q., Zhuang, Y. X., Shen, Q. H., 1998. Metamorphism: Review and Prospect. *Earth Science Frontiers*, 5 (4): 257 – 265 (in Chinese with English abstract).
- Chopin, C., 1984. Coesite and Pure Pyrope in High-Grade Blueschists of the Western Alps: A First Record and Some Consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86 (2): 107 – 118. <https://doi.org/10.1007/bf00381838>
- Cong, B. L., Li, J. L., Zhang, R. Y., 1982. On the Protolith Reconstruction and Geological Implications of Early Archaean Metamorphic Rocks in Eastern Hebei. *Scientia Geologica Sinica*, 17 (2): 125 – 133 (in Chinese with English abstract).
- Deng, X. G., Zhang, J. J., Zhang, Y. Q., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from Blueschist in the Central Part of the Qiangtang Block, Northern Tibet, China, and Its Implications. *Geological Bulletin of China*, 26 (6): 698 – 702 (in Chinese with English abstract).
- Ding, L., Zhong, D. L., 1999. Metamorphic Characteristics and Geotectonic Implications of the High-Pressure Granulites from Namjagbarwa, Eastern Tibet. *Science China Earth Sciences*, 42 (5): 491 – 505. <https://doi.org/10.1007/bf02875243>
- Dong, S. B., 1986. Metamorphism and Crustal Evolution in China. Geological Publishing House, Beijing, 233 (in Chinese).
- Dong, S. B., 1989. The General Features and Distributions of the Glaucofan Schist Belts of China. *Acta Geologica Sinica*, 63 (3): 273 – 284 (in Chinese with English abstract).

- Dong, S. B., Wei, C. J., 1997. Some Recent Advances in Metamorphic Geology. *Acta Petrologica Sinica*, 13 (3): 274—288 (in Chinese with English abstract).
- Dong, X. J., Xu, Z. Y., Liu, Z. H., et al., 2012. 2.7 Ga Granitic Gneiss in the Northern Foot of Daqingshan Mountain, Central Inner Mongolia, and Its Geological Implications. *Earth Science*, 37(Suppl.1): 20—27 (in Chinese with English abstract), <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.S1.003>
- England, P. C., Richardson, S. W., 1977. The Influence of Erosion Upon the Mineral Fades of Rocks from Different Metamorphic Environments. *Journal of the Geological Society*, 134(2): 201—213. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.134.2.0201>
- England, P. C., Thompson, A. B., 1984. Pressure-Temperature-Time Paths of Regional Metamorphism I. Heat Transfer during the Evolution of Regions of Thickened Continental Crust. *Journal of Petrology*, 25(4): 894—928. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.894>
- Gao, J., Klemd, R., Zhang, L. F., et al., 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. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.1999.00219.x>
- Geng, Y. S., Liu, D. Y., Song, B., 1997. Chronological Framework of the Early Precambrian Important Events of the Northwestern Hebei Granulite Terrain. *Acta Geologica Sinica*, 71(4): 316—327 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y. S., Shen, Q. H., Du, L. L., et al., 2016a. Regional Metamorphism and Continental Growth and Assembly in China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2579—2608 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y. S., Shen, Q. H., Liu, F. L., et al., 2016b. Regional Metamorphic Rocks and Metamorphism Evolution in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Grew, E. S., Carson, C. J., Christy, A. G., et al., 2013. Boron and Phosphate-Rich Rocks in the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica: Tectonic Implications. *Geological Society, London, Special Publications*, 383(1): 73—94. <https://doi.org/10.1144/sp383.8>
- Guo, J. H., Peng, P., Chen, Y., et al., 2012. UHT Sapphirine Granulite Metamorphism at 1.93—1.92 Ga Caused by Gabbonorite Intrusions: Implications for Tectonic Evolution of the Northern Margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222—223: 124—142. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.020>
- Guo, J. H., Zhai, M. G., Zhang, Y. G., et al., 1993. Early Precambrian Manjinggou High-Pressure Granulite Mélange Belt on the South Edge of the Huaian Complex, North China Craton: Geological Features, Petrology and Isotopic Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 329—341 (in Chinese with English abstract).
- Han, B. F., Xu, Z., Ren, R., et al., 2012. Crustal Growth and Intracrustal Recycling in the Middle Segment of the Trans-North China Orogen, North China Craton: A Case Study of the Fuping Complex. *Geological Magazine*, 149(4): 729—742. <https://doi.org/10.1017/s0016756811001014>
- He, T. X., Zhang, S. Y., Lu, L. Z., 1965. Metamorphic Petrology. China Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Hu, D. Q., Han, C. Y., Ma, R., et al., 2012. The very Low Grade Metamorphism in the Upper Paleozoic in Xinlingol Area of Inner Mongolia, NE China: Evidence from Studies of Illite and Vitrinite Reflectance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 3042—3050 (in Chinese with English abstract).
- Hu, D. Q., Hong, Y., Yu, J. J., 2010. Genetic Characteristics of Illite in the Carboniferous-Permian Pelitic Rocks in East Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(5): 1035—1040 (in Chinese with English abstract).
- Hu, D. Q., Liu, Y., Hong, Y., et al., 2011. Research on Coexisting Clay Minerals in the Upper Paleozoic Argillaceous Rocks in Northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1458—1465 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X., Bi, Z. W., DePaolo, D. J., 1986. Sm-Nd Isotope Study of Early Archean Rocks, Qianan, Hebei Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(4): 625—631. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(86\)90111-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(86)90111-0)
- Huang, Y., Pei, R. F., Ren, G. Z., et al., 1957. On Daye-Type Iron Ore. *Acta Geologica Sinica*, 37(2): 191—202 (in Chinese with Russian abstract).
- Huang, Y. C., Ren, D. H., Zhang, X. Z., et al., 2008. Zircon U-Pb Dating of the Meizuo Granite and Geological Significance in the Huanan Uplift, East Heilongjiang Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(4): 631—638 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M., 1990. Early Precambrian Basic Rocks of China. In: Hall, R. P., Hughes, D. J., eds., Early Precambrian Basic Magmatism. Blackie, Glasgow, 294—316.
- Jahn, B. M., Auvray, B., Shen, Q. H., et al., 1988. Archean Crustal Evolution in China: The Taishan Complex, and Evidence for Juvenile Crustal Addition from Long-Term Depleted Mantle. *Precambrian Research*, 38(4): 381—403. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90035-6](https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90035-6)
- Jahn, B. M., Zhang, Z. Q., 1984. Archean Granulite Gneisses

- from Eastern Hebei Province, China; Rare Earth Geochemistry and Tectonic Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 85(3): 224–243. <https://doi.org/10.1007/bf00378102>
- Jiao, S. J., Guo, J. H., Harley, S. L., et al., 2013. New Constraints from Garnetite on the *P-T* Path of the Khondalite Belt: Implications for the Tectonic Evolution of the North China Craton. *Journal of Petrology*, 54(9): 1725–1758. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egt029>
- Jiao, Y. G., Li, J. K., Qiao, J. H., et al., 2005. Application of the Crystallization Index of Illite in the Study on Rock Metamorphose Degree. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 24(1): 41–43 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Zhai, Q. G., Dong, Y. S., et al., 2007. Longmu Co-Shuanghu Plate Suture in the Qinghai-Tibet Plateau and Records of the Evolution of the Paleo-Tethyan Ocean in the Qiangtang Area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 13–21 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. Y., 1975. Tectonic Evolutions of Some Mountain Ranges in China, as Tentatively Interpreted on the Concept of Plate Tectonics. *Acta Geophysica Sinica*, 18(1): 52–76 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. Y., Shen, Q. H., Xing, F. A., 1956. Iron Ore Geology in Yingtaoyuan-Yanqianshan Area, Anshan. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, J. K., Song, L. B., Liu, W., 2007. Paleo-Vitrinite Reflectance Recovery in Permo-Carboniferous Formation in North Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 26(3): 32–34, 38 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Yang, Z. S., 1992. Mapping of the High-Grade Terrains: A Case with Tectono-Rock-Mass Unit Method in Eastern Hebei Province of China. Geological Publishing House, Beijing, 131 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Zhang, G. W., Li, Y. L., et al., 2000. Discovery of Granulite in the Mianxian-Lüeyang Suture Zone, Mianxian Area and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 220–226 (in Chinese with English abstract).
- Liou, J. G., Maruyama, S., Wang, X., et al., 1990. Precambrian Blueschist Terranes of the World. *Tectonophysics*, 181(1–4): 97–111. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90010-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90010-6)
- Liou, J. G., Zhang, R. Y., 1996. Occurrences of Intergranular Coesite in Ultrahigh-P Rocks from the Sulu Region, Eastern China, Implications for Lack of Fluid during Exhumation. *American Mineralogist*, 81(9–10): 1217–1221. <https://doi.org/10.2138/am-1996-9-1020>
- Liu, D., Wilde, S. A., Wan, Y. S., et al., 2008. New U-Pb and Hf Isotopic Data Confirm Anshan as the Oldest Preserved Segment of the North China Craton. *American Journal of Science*, 308(3): 200–231. <https://doi.org/10.2475/03.2008.02>
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0339:romcit>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0339:romcit>2.3.co;2)
- Liu, D. Y., Page, R. W., Compston, W., et al., 1985. U-Pb Zircon Geochronology of Late Archaean Metamorphic Rocks in the Taihangshan-Wutaishan Area, North China. *Precambrian Research*, 27(1–3): 85–109. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(85\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0301-9268(85)90007-5)
- Liu, D. Y., Shen, Q. H., Zhang, Z. Q., et al., 1990. Archean Crustal Evolution in China: U-Pb Geochronology of the Qianxi Complex. *Precambrian Research*, 48(3): 223–244. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(90\)90010-n](https://doi.org/10.1016/0301-9268(90)90010-n)
- Liu, F. L., Wang, H. C., Xing, G. F., et al., 2016. Study Report of Metamorphic Rocks in China. In: China Geological Survey, ed., Hundred Achievements of Geological Survey in China (Second Volume). Geological Publishing House, Beijing, 754–774 (in Chinese).
- Liu, L., Cao, Y. T., Chen, D. L., et al., 2013a. 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, L., Liao, X. Y., Zhang, C. L., et al., 2013b. 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., Zhang, L. C., Dai, Y. P., 2014a. Formation Age and Genesis of the Banded Iron Formations from the Guyang Greenstone Belt, Western North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 63: 388–404. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.10.011>
- Liu, X. C., Jahn, B. M., Zhao, Y., et al., 2014b. Geochemistry and Geochronology of Mesoproterozoic Basement Rocks from the Eastern Amery Ice Shelf and Southwestern Prydz Bay, East Antarctica: Implications for a Long-Lived Magmatic Accretion in a Continental Arc. *American Journal of Science*, 314(2): 508–547. <https://doi.org/10.2475/02.2014.03>
- Liu, X. C., Wang, W., Zhao, Y., et al., 2014c. Early Neoproterozoic Granulite Facies Metamorphism of Mafic Dykes from the Vestfold Block, East Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(9): 1041–1062. <https://doi.org/10.1111/jmg.12138>

org/10.1111/jmg.12106

- Liu, L., Zhou, D. W., 1994. Discovery of High-Pressure Mafic Granulite and the Preliminary Study in Songshugou, Eastern Qinling, China. *Chinese Science Bulletin*, 39 (17): 1599—1601 (in Chinese).
- Liu, L., Zhou, D. W., Dong, Y. P., et al., 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, D. W., Wang, Y., et al., 1996. Study and Implication of the High-Pressure Felsic Granulite in the Qinling Complex of East Qinling. *Science in China (Series D)*, 39(Suppl.): 60—68.
- Liu, Q. S., 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, S. J., Tsunogae, T., Li, W. S., et al., 2012. Paleoproterozoic Granulites from Heling'er: Implications for Regional Ultrahigh-Temperature Metamorphism in the North China Craton. *Lithos*, 148: 54—70. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.024>
- Liu, X. C., Hu, J., Zhao, Y., et al., 2009. Late Neoproterozoic/Cambrian High-Pressure Mafic Granulites from the Grove Mountains, East Antarctica; P - T - t Path, Collisional Orogeny and Implications for Assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 174 (1—2): 181—199. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.001>
- Liu, X. C., Wang, W., Zhao, Y., et al., 2016. Early Mesoproterozoic Arc Magmatism Followed by Early Neoproterozoic Granulite Facies Metamorphism with a Near-Isobaric Cooling Path at Mount Brown, Princess Elizabeth Land, East Antarctica. *Precambrian Research*, 284: 30—48. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.08.003>
- Liu, X. C., Zhao, Z., Zhao, Y., et al., 2003. Pyroxene Exsolution in Mafic Granulites from the Grove Mountains, East Antarctica: Constraints on the Pan-African Metamorphic Conditions. *European Journal of Mineralogy*, 15 (1): 55—65. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2003/0015-0055>
- Liu, Y., Zhong, D. L., 1997. Petrology of High-Pressure Granulite from the Eastern Himalayan Syntaxis. *Journal of Metamorphic Geology*, 15 (4): 451—466. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1997.00033.x>
- Lu, L. Z., 1986. The Metamorphic Rock Series of China and Its Relation to Crustal Evolution. *Journal of Changchun College of Geology*, (2): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Lu, L. Z., Xu, X. C., Liu, F. L., 1996. Early Precambrian Khondalite Series of North China. Changchun Publishing House, Changchun, 276 (in Chinese).
- Lu, S. N., Hao, G. J., 2015. Metamorphic Tectonic Map of China (1 : 2 500 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Lü, G. X., Chen, J., Li, X. B., et al., 1998. Study on Tectonic Additional Hydrostatic Pressure and Calculation of Diagenetic Depth of the Eclogite. *Chinese Science Bulletin*, 43(24): 2590—2602 (in Chinese).
- Lü, G. X., Liu, R. X., 1999. Discussion on the Measurement Principle of Diagenetic Depth. *Chinese Science Bulletin*, 44(21): 2350—2352 (in Chinese).
- Mao, X. D., Sun, Y. K., Lü, J., et al., 2014. Metamorphic Map of Tibet Plateau and Adjacent Region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Okay, A. I., Xu, S. T., Sengor, A. M. C., 1989. Coesite from the Dabie Shan Eclogites, Central China. *European Journal of Mineralogy*, (1): 595—598. <https://doi.org/10.1127/ejm/1/4/0595>
- Peacock, S. M., 1989. Thermal Modelling of Pressure-Temperature-Time Paths: A Forward Approach. *American Geophysical Union, Washington DC*, 7: 57—102.
- Qiu, H. J., Xu, Z. Q., Zhong, Z. M., et al., 2002. New Mineral Evidence of High-Pressure Metamorphism of the Subei High-Pressure Belt—Aragonite Inclusions in Garnet from Greenschist. *Geological Bulletin of China*, 21 (10): 617—624 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, H. J., Xu, Z. Q., Zhang, J. X., et al., 2003. The Discovery of Glaucofanite Greenschist Facies Rock Mass in Lianyungang, Northern Jiangsu. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 34—40 (in Chinese with English abstract).
- Ren, L. D., Grew, E. S., Xiong, M., et al., 2003. Wagnerite-Ma5bc, a New Polytype of $Mg_2(PO_4)(F, OH)$, from Granulite-Facies Paragneiss, Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica. *The Canadian Mineralogist*, 41 (2): 393—411. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.2.393>
- Ren, L. D., Zhao, Y., Liu, X. H., et al., 1992. Re-Examination of the Metamorphic Evolution of the Larsemann Hills, East Antarctica. In: Yoshida, Y., Kaminuma, K., Shiraishi, K., eds., Recent Progress in Antartic Earth Science. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 145—153.
- Ren, L. F., Chen, Y. J., 1984. On the Division of Diagenesis Stages according to the Transformation of Clay Minerals. *Oil & Gas Geology*, 5 (4): 325—334 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z. L., Xiao, D. M., Chi, Y. L., 2006. Research on the Gas-

- Generating Stage of the Source Rocks in the Carboniferous-Permian Basement, Songliao Basin, China. *Progress in Natural Science*, 16(8): 973–979 (in Chinese).
- Rumble, D., Wang, Q. C., Zhang, R. Y., 2000. Stable Isotope Geochemistry of Marbles from the Coesite UHP Terrains of Dabieshan and Sulu, China. *Lithos*, 52 (1–4): 79–95. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00085-7](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00085-7)
- Sandiford, M. A., Powell, R., 1986. Deep Crustal Metamorphism during Continental Extension: Modern and Ancient Examples. *Earth and Planetary Science Letters*, 79 (1–2): 151–158. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(86\)90048-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(86)90048-8)
- Santosh, M., Tsunogae, T., Li, J. H., et al., 2007. Discovery of Sapphirine-Bearing Mg-Al Granulites in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Ultrahigh Temperature Metamorphism. *Gondwana Research*, 11 (3): 263–285. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.009>
- Shan, Y. H., Yang, H. Y., 1994. Very Low Grade Metamorphism of Ultramafic Fragments in Basaltic Tuffs from Hsuehshan Range, Northern Taiwan. IGCP Project 294 International Symposium, Xi'an, 76–91.
- Shen, B. F., Luo, H., Li, S. B., et al., 1994. Geology and Mineralogenesis of Archean Greenstone Belt in North China Platform. Geological Publishing House, Beijing, 201 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Geng, Y. S., 2012. The Tempo-Spatial Distribution, Geological Characteristics and Genesis of Blueschist Belts in China. *Acta Geologica Sinica*, 86 (9): 1407–1446 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Geng, Y. S., Liu, F. L., 2016a. Metamorphic Geological Map of China (1 : 5 000 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Shen, Q. H., Geng, Y. S., Song, H. X., 2016b. Constituents and Evolution of the Metamorphic Basement of the North China Craton. *Acta Geoscientica Sinica*, 37 (4): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Geng, Y. S., Song, H. X., 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 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Xu, H. F., Shen, K., et al., 1997. Study on Chronology for Xueshan and Linjiaguanzhuang Bodies in Yishui, Shandong Province. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 291–298 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Xu, H. F., Zhang, Z. Q., et al., 1992. Early Precambrian Granulites in China. Geological Publishing House, Beijing, 237 (in Chinese).
- Shen, Q. H., Zhang, Y. F., Gao, J. F., et al., 1990. Study on Archean Metamorphic Rocks in Mid-Southern Nei Mongol of China. *Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 21 (1): 1–192 (in Chinese with English abstract).
- Smith, D. C., 1984. Coesite in Clinopyroxene in the Caledonides and Its Implications for Geodynamics. *Nature*, 310 (5979): 641–644. <https://doi.org/10.1038/310641a0>
- Song, S. G., Zhang, L. F., Niu, Y. L., et al., 2006. Evolution from Oceanic Subduction to Continental Collision: A Case Study from the Northern Tibetan Plateau Based on Geochemical and Geochronological Data. *Journal of Petrology*, 47(3): 435–455. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi080>
- Song, S. H., Shen, Q. H., 1996. On Mineral and Petrologic Studies of Pre-Geological Survey of China. In: Cheng, Y. Q., Chen, M. X., eds., The Historic Review of Pre-Geological Survey of China. Geological Publishing House, Beijing, 28–31 (in Chinese).
- Spear, F. S., 1989. Petrologic Determination of Metamorphic Pressure-Temperature-Time Paths. *Short Course in Geology, American Geophysical Union, Washington DC*, 7: 1–55.
- Spear, F. S., 1993. Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths. Mineralogical Society of America, Washington, D.C.
- Stüwe, K., Braun, H. M., Peer, H., 1989. Geology and Structure of the Larsemann Hills Area, Prydz Bay, East Antarctica. *Australian Journal of Earth Sciences*, 36 (2): 219–241. <https://doi.org/10.1080/08120098908729483>
- Sun, D. Z., 1984. The Early Precambrian Geology of the Eastern Hebei. Tianjin Science and Technology Press, Tianjin, 273 (in Chinese).
- Sun, D. Z., Li, H. M., Lin, Y. X., et al., 1991. Precambrian Geochronology, Chronotectonic Framework and Model of Chronocrustal Structure of the Zhongtiao Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 65 (3): 216–231 (in Chinese with English abstract).
- Suo, S. T., Bi, X. M., Zhao, W. X., et al., 1998. Very Low-Grade Metamorphism and Its Geodynamical Significance of Triassic Strata within the Youjiang River Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 33(4): 395–405 (in Chinese with English abstract).
- Suo, S. T., Qi, X. L., Bi, X. M., 1996. Metamorphic and Deformational Evolution of the Youjiang River Mesozoic Very-Low Grade Metamorphic Belt. *Geological Science and Technology Information*, 15 (4): 65–72 (in Chinese).

- nese with English abstract).
- Suo, S. T., You, Z. D., Zhou, H. W., 1995. Very-Low-Grade Metamorphism and Metamorphic Belt; A Review. *Geological Science and Technology Information*, 14(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Tan, R. S., 1958. Rock Structure (the Third Volumes); Metamorphic Rocks. Geological Publishing House, Beijing, (in Chinese).
- Tong, L. X., Liu, X. H., Xu, P., et al., 1996. Discovery of Sapphire-Bearing Hyperthene Quartzite in the Larsemann Hills, East Antarctica and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 41(13): 1205—1208 (in Chinese).
- Wan, Y. S., Dong, C. Y., Xie, H. Q., et al., 2012. Formation Ages of Early Precambrian BIFs in the North China Craton: SHRIMP Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1447—1478 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Dong, C. Y., et al., 2009. The Oldest Rocks and Zircons in China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1793—1807 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Wang, S. J., et al., 2011. ~2.7 Ga Juvenile Crust Formation in the North China Craton (Taishan-Xintai Area, Western Shandong Province): Further Evidence of an Understated Event from U-Pb Dating and Hf Isotopic Composition of Zircon. *Precambrian Research*, 186(1—4): 169—180. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.01.015>
- Wan, Y. S., Xu, Z. Y., Dong, C. Y., et al., 2013. Episodic Paleoproterozoic (~2.45, ~1.95 and ~1.85 Ga) Mafic Magmatism and Associated High Temperature Metamorphism in the Daqingshan Area, North China Craton: SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Whole-Rock Geochemistry. *Precambrian Research*, 224: 71—93. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.014>
- Wang, H. N., 1963. Characteristics and Origin of the Eclogite in Northern Jiangsu Province. *Journal of Nanjing University (Geology)*, (1): 109—122 (in Chinese).
- Wang, J., Lu, S. N., Li, H. M., et al., 1995. Geochronologic Framework of Metamorphic Rocks in the Middle Part of Inner Mongolia. *Bulletin of the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 29: 1—75 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K. Y., Hao, J., Wilde, S., et al., 2000. Reconsideration of Some Key Geological Problems of Late Archaean-Early Proterozoic in the Wutaishan-Hengshan Area: Constrains from SHRIMP U-Pb Zircon Data. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 175—184 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Cong, B., 1996. Tectonic Implication of UHP Rocks from the Dabie Mountains. *Science in China (Series D)*, 39(3): 311—318.
- Wang, Q., Liu, X. Y., 1976. Paleo-Oceanic Crust of the Chilianshan Region, Western China and Its Tectonic Significance. *Scientia Geologica Sinica*, (1): 42—55 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. C., 2001. Development of Studying Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks from China during the Past 15 Years. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 11—16 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. C., Rumble, D., 1999. Oxygen and Carbon Isotope Composition from the UHP Shuanghe Marbles, Dabie Mountains, China. *Science in China (Series D)*, 42(1): 88—96. <https://doi.org/10.1007/bf02878502>
- Wang, R. M., Chen, Z. Z., Chen, F., 1991. Grey Tonalitic Gneiss and High-Pressure Granulite Inclusions in Hengshan, Shanxi Province, and Their Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 7(4): 36—45 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. M., He, G. P., Chen, Z. Z., et al., 1987. A Geochemical Approach for Discrimination of Ortho- and Parameamorphic Rocks. Geological Publishing House, Beijing, 199 (in Chinese).
- Wang, R. S., Wang, Y., Li, H. M., et al., 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, X. M., Liou, J. G., Mao, H. K., 1989. Coesite-Bearing Eclogite from the Dabie Mountains in Central China. *Geology*, 17(12): 1085—1088. [https://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<1085:CBEFTD>2.3.CO;2](https://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<1085:CBEFTD>2.3.CO;2)
- Wang, Y., Wang, R. S., Zhou, D. W., 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, Y., Zhang, X. Z., Song, H. F., et al., 2009. The Metamorphic and Deformed Characteristics of the Heilongjiang Melange in Mudanjiang Area. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(6): 1066—1072 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Liu, D. Y., Chung, S. L., et al., 2008. SHRIMP Zircon Age Constraints from the Larsemann Hills Region, Prydz Bay, for a Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic Tectono-Thermal Event in East Antarctica. *American Journal of Science*, 308(4): 573—617. <https://doi.org/10.2475/04.2008.07>

- Wang, Y. L., Li, S. L., Liu, Y. R., et al., 1953. The New View of Wutai Mountain Wutai Formation. *Acta Geologica Sinica*, 22(4): 325–353 (in Chinese).
- Wei, C. J., 1994. Progress in the Study of Blueschists and Related High Pressure Metamorphic Belts. *Earth Science Frontiers*, 1(1–2): 140–144 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C. J., 2011. Approaches and Advancement of the Study of Metamorphic *P-T-t* Paths. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C. J., 2012. Advance of Metamorphic Petrology during the First Decade of the 21st Century. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(5): 415–427 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C. J., Zhou, X. W., 2003. Progress in the Study of Metamorphic Phase Equilibrium. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 341–351 (in Chinese with English abstract).
- Willis, B., Blackwelder, E., Sargent, R. H., 1907. Research in China. Vol. I, Part I. Carnegie Institution for Science, Washington DC.
- Wu, C. H., 1992. Ponderation over the Origin of Granulites. *Acta Petrologica Sinica*, 8(1): 74–86 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. H., Han, G., 1989. Intrusive Origin of Melanogranulite and Metamorphism of Norite-Gabbro from the Jining-Yanggao Area. *Geological Review*, 35(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 1997. The Sm-Nd, Rb-Sr Isotopic Ages of the Archean Granites in Southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13(4): 499–506 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. S., Geng, Y. S., Shen, Q. H., et al., 1998. Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of Sino-Korea Paleo-Continent. Geological Publishing House, Beijing, 212 (in Chinese).
- Wu, J. S., Geng, Y. S., Xu, H. F., et al., 1989. Metamorphic Geology of the Fuping Group. *Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 19: 1–213 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Zhang, B. R., Han, Y. W., 1994. Recognition of Ophiolite Belt and Granulite in Northern Area of Mian-Lüe, Southern Qinling, China, and Their Implication. *Journal of Earth Science*, 5(1): 25–27.
- Xu, S. T., Okay, A. I., Ji, S. Y., et al., 1992. Diamond from the Dabie Shan Metamorphic Rocks and Its Implication for Tectonic Setting. *Science*, 256(5053): 80–82. <https://doi.org/10.1126/science.256.5053.80>
- Xu, X. C., 1992. The Behavior and Evolution of Granulite Facies Metamorphic Fluids in the Wulashan Area, Inner Mongolia. *Geological Review*, 38(5): 398–406 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., 1987. Etude Tectonique et Microtectonique de la Chaîne Paleozoïque et Triasique des Qinling (Chine) (Dissertation). Academie de Montpellier Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier (in French).
- Xu, Z. Q., Zeng, L. S., Liu, F. L., et al., 2006. Polyphase Subduction and Exhumation of the Sulu High-Pressure-Ultrahigh-Pressure Metamorphic Terrane. *Geological Society of America, Special Paper*, 403: 93–113. [https://doi.org/10.1130/2006.2403\(05\)](https://doi.org/10.1130/2006.2403(05))
- Yang, C. H., Du, L. L., Ren, L. D., et al., 2013. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG Gneisses in the Zhanhuang Complex, North China Craton and Its Geological Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2012.09.031>
- Yang, H. Y., Lo, Y. M., Huang, T. M., 1994. The Pyrophyllite Isograds in the Metamorphic Terrane of Taiwan. IGCP Project 294 International Symposium, 168–175.
- Yang, J. J., Godard, G., Kienast, J. R., et al., 1993. Ultrahigh-Pressure (60 kbar) Magnesite-Bearing Garnet Peridotites from Northeastern Jiangsu, China. *The Journal of Geology*, 101(5): 541–554. <https://doi.org/10.1086/648248>
- Yang, J. J., Smith, D. C., 1989. Evidence for a Former Sanidine-Coesite-Eclogite at Lanshantou, East China, and the Recognition of the Chinese "Su-Lu Coesite-Eclogite Province". Third International Eclogite Conference, Oxford.
- Ye, K., 2001. Study Progress of Mineralogy and Petrology in Dabieshan-Sulu Ultrahigh-Pressure (UHP) Metamorphic Terrane. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(3): 141–148 (in Chinese with English abstract).
- Ye, K., Cong, B. L., Ye, D. N., 2000. The Possible Subduction of Continental Material to Depths Greater than 200 km. *Nature*, 407(6805): 734–736. <https://doi.org/10.1038/35037566>
- Ye, K., Hirajima, T., Ishiwatari, A., et al., 1996. Significance of Interstitial Coesite in Eclogite at Yangkou, Qingdao City, Eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 41(15): 1407–1408.
- Yin, C. Q., Zhao, G. C., Guo, J. H., et al., 2011. U-Pb and Hf Isotopic Study of Zircons of the Helanshan Complex: Constrains on the Evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. *Lithos*, 122(1–2): 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.11.010>
- You, Z. D., 2011. Impact Metamorphic Effects and Stages of Shock Metamorphism: A Special Reference to Identification of Xiuyan Impact Crater. *Chinese Journal of Na-*

- ture, 33(1):35—41 (in Chinese with English abstract).
- You, Z. D., Chen, N. S., Chalokwu, C. I., 1995. The Metamorphism of Deeper Crust in the Dabie Mountain: As Evidenced by the Study of Granulites near Huilanshan, Luotian. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2):137—147 (in Chinese with English abstract).
- You, Z. D., Liu, R., 2008. Research on Impact Tectonics and Impactites; Status and Prospects. *Journal of Geomechanics*, 14(1):22—36 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. N., Song, S. G., Wei, C. J., et al., 2009. Mg-Carpholite Metapelite and Its Implications for Ancient Oceanic Subduction in the North Qilian Suture Zone, NW China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(3):472—480 (in Chinese with English abstract).
- Zen, E. A., 1988. Thermal Modelling of Stepwise Anatexis in a Thrust-Thickened Sialic Crust. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 79(2—3):223—235. <https://doi.org/10.1017/s0263593300014231>
- Zhai, C., Zhang, Q. H., Wang, J. Z., et al., 1995. Preliminary Study on the Constituents of High-Pressure Granulite and Its Tectonic Evolution, South Henan Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 14(3):166—168 (in Chinese).
- Zhai, M. G., Guo, J. H., Yan, Y. H., et al., 1993. Discovery of High-Pressure Basic Granulite in the Archaean North China Craton and Preliminary Study. *Science in China (Series B)*, 36(11):1402—1408.
- Zhai, Q. G., Li, C., Wang, J., et al., 2009. SHRIMP U-Pb Dating and Hf Isotopic Analyses of Zircons from the Mafic Dyke Swarms in Central Qiangtang Area, Northern Tibet. *Science Bulletin*, 54(13):2279—2285. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0203-6>
- Zhang, J. X., Meng, F. C., 2006. Lawsonite-Bearing Eclogites in the North Qilian and North Altyn Tagh: Evidence for Cold Subduction of Oceanic Crust. *Chinese Science Bulletin*, 51(10):1238—1244. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-1238-6>
- Zhang, J. X., Meng, F. C., Wan, Y. S., 2007. A Cold Early Palaeozoic Subduction Zone in the North Qilian Mountains, NW China: Petrological and U-Pb Geochronological Constraints. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(3):285—304. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2006.00689.x>
- Zhang, J. X., Yu, S. Y., Meng, F. C., et al., 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, J. X., Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., et al., 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. <https://doi.org/10.1007/bf02906827>
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Zhang, X. J., et al., 2012. Formation Age and Tectonic Setting of the Shirengou Neoproterozoic Banded Iron Deposit in Eastern Hebei Province: Constraints from Geochemistry and SIMS Zircon U-Pb Dating. *Precambrian Research*, 222—223:325—338. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.007>
- Zhang, L. F., 1992. Burial Metamorphism of the Ordos Basin in Northern Shaanxi. *Acta Geologica Sinica*, 66(4):339—349 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. F., Du, J. X., Shen, X. J., 2009. The Timing of UHP-HP Eclogitic Rocks in Western Tianshan, NW China: The New SIMS U-Pb Zircon Dating, Lu/Hf and Sm/Nd Isochron Ages. Abstracts of 8th International Eclogite Conference, Xi'ning.
- Zhang, L. F., Ellis, D. J., Williams, S., et al., 2002. Ultra-High Pressure Metamorphism in Western Tianshan, China: Part II. Evidence from Magnesite in Eclogite. *American Mineralogist*, 87(7):861—866. <https://doi.org/10.2138/am-2002-0708>
- Zhang, L. F., Wang, Q. M., Ren, L. F., 1992. The Transformation of Clay Minerals during Burial Metamorphism Process of Triassic Mudstone in Ordos Basin, in the Northern of Shaanxi Province. *Science in China (Series B)*, (7):759—767 (in Chinese).
- Zhang, Q. S., 1958. Granitization of the Qushan Series in Haizhou Area, Jiangsu. *Acta Geologica Sinica*, 38(4):403—420 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Hirajima, T., Banno, S., et al., 1989. Coesite-Eclogite from Donghai Area, Jiangsu Province in China. The 15th General Meeting of the International Mineral, Kobe.
- Zhang, X. Z., Zhou, J. B., Chi, X. G., et al., 2008. Late Paleozoic Tectonic-Sedimentation and Petroleum Resources in Northeastern China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(5):719—725 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Zhong, Z. Q., You, Z. D., et al., 2000. Granulite-Facies Retrograde Metamorphism of Garnet Pyroxenite in Muzidian, Northern Dabie Mountains. *Earth Science*, 25(3):295—301 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2000.03.014>
- Zhang, Z. Q., Wu, J. S., Ye, X. J., 1991. Archaean Metamorphic Rocks from the Lower Fuping Group in the Mt. Taihang Region, North China: REE Geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd Ages and Implications. *Geochimica*, 20(2):

- 118—127 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of Basement Rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 103 (1—2): 55—88. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00076-0)
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177—202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- Zhao, L. L., Zhang, X. Z., 2011. Petrological and Geochronological Evidences of Tectonic Exhumation of Heilongjiang Complex in the Eastern Part of Heilongjiang Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1227—1234 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. Y., Liu, R., Wang, Q. Y., et al., 2001. Aragonite from Mulanshan Glaucophane Schist: Implications for Regional Evolution of Southwestern Dabie Mountains, Central China. *Earth Science*, 26(6): 568—573 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2001.06.003>
- Zhao, W. Y., Mou, S. B., Qin, L. Q., et al., 2002. Determination of Fine Intergrowth of Low-Fe Epidote and Clinoepidote in the Glaucophane Schist from Mulan Mountain by Electron Probe Microanalysis and Optical Microscopy. *Rock and Mineral Analysis*, 21(1): 29—32 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Liu, X. H., Liu, X. C. B., et al., 2001. Pan-African Events in Prydz Bay, East Antarctica and Its Inference on East Gondwana Tectonics. *Gondwana Research*, 4(4): 842—843. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70624-9](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70624-9)
- Zhao, Y., Liu, X. H., Song, B., et al., 1995. Constraints on the Stratigraphic Age of Metasedimentary Rocks from the Larsemann Hills, East Antarctica: Possible Implications for Neoproterozoic Tectonics. *Precambrian Research*, 75 (3—4): 175—188. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)80005-3](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)80005-3)
- Zhao, Y., Song, B., Wang, Y. B., et al., 1992. Geochronology of the Late Granite in the Larsemann Hills, East Antarctica. In: Yoshida, Y., Kaminuma, K., Shiraishi, K., eds., Recent Progress in Antarctic Earth Science. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 155—161.
- Zhao, Y. L., Liu, Y. J., Li, W. M., et al., 2010. High-Pressure Metamorphism in the Mudanjang Area, Southern Jiamusi Massif: Petrological and Geochronological Characteristics of the Heilongjiang Complex, China. *Geological Bulletin of China*, 29(2/3): 243—253 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. P., 1984. Diagenesis, Burial Metamorphism and Anchimetamorphism. *Geological Review*, 30(5): 501—509 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., et al., 1996. Extreme ¹⁸O Depletion in Eclogite from the Su-Lu Terrane in East China. *European Journal of Mineralogy*, 8(2): 317—324. <https://doi.org/10.1127/ejm/8/2/0317>
- Zhong, D. L., Ding, L., 1996. Discovery of High-Pressure Basic Granulite in Namjiagbarwa Area, Tibet, China. *Chinese Science Bulletin*, 41(1): 87—88.
- Zhou, J. B., Wilde, S. A., Zhang, X. Z., et al., 2009. The Onset of Pacific Margin Accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang High-Pressure Metamorphic Belt. *Tectonophysics*, 478(3—4): 230—246. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.009>
- Zhou, J. B., Zhang, X. Z., Wilde, S. A., et al., 2009. Detrital Zircon U-Pb Dating of Heilongjiang Complex and Its Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1924—1936 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. W., Wei, C. J., Geng, Y. S., et al., 2004. Discovery and Implications of the High Pressure Pelitic Granulite from the Jiaobei Massif. *Chinese Science Bulletin*, 49 (18): 1942—1948. <https://doi.org/10.1360/03wd0560>
- Zhu, X. Y., Zhai, M. G., Chen, F. K., et al., 2013. ~2.7 Ga Crustal Growth in the North China Craton: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes of the Sushui Complex in the Zhongtiao Terrane. *The Journal of Geology*, 121(3): 239—254. <https://doi.org/10.1086/669977>
- Zhuang, Y. X., 1994. Tectonothermal Evolution in Space and Time and Orogenic Process of Altaide, China. Jilin Science and Technology Press, Changchun, 402 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 等, 1993. 中国前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 223.
- 毕先梅, 莫宣学, 2004. 成岩—极低级变质—低级变质作用及有关矿产. 地学前缘, 11(1): 287—294.
- 毕先梅, 索书田, 莫宣学, 等, 1998. 极低级变质作用的研究现状. 地学前缘, 5(4): 302—306.
- 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.
- 陈鸣, 2007. 岫岩陨石坑: 撞击起源的证据. 科学通报, 52(23): 2777—2780.
- 陈能松, 朱杰, 王国灿, 等, 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,胡霁琴,张国新,等,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.
- 程裕淇,1957.中国辽宁山东等省前震旦纪鞍山式条带状铁矿中富矿的成因问题.地质学报,37(2): 153—180.
- 程裕淇,庄育勋,沈其韩,1998.变质作用的回顾与展望.地学前缘,5(4): 257—265.
- 从柏林,李继亮,张儒瑗,1982.冀东迁西—迁安地区早太古代变质岩系原岩恢复及其地质意义.地质科学,17(2): 125—133.
- 邓希光,张进江,张玉泉,等,2007.藏北羌塘地块中部蓝片岩中捕获锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义.地质通报,26(6): 698—702.
- 董申保,1986.中国变质作用及其与地壳演化的关系.北京:地质出版社,233.
- 董申保,1989.中国蓝闪石片岩带的一般特征及其分布.地质学报,63(3): 273—284.
- 董申保,魏春景,1997.变质地质学的某些进展.岩石学报,13(3): 274—288.
- 董晓杰,徐仲元,刘正宏,等,2012.内蒙古大青山北麓 2.7 Ga 花岗质片麻岩的发现及其地质意义.地球科学,37(增刊1): 20—27.
- 耿元生,刘敦一,宋彪,1997.冀西北麻粒岩区早前寒武纪主要地质事件的年代格架.地质学报,71(4): 316—327.
- 耿元生,沈其韩,杜利林,等,2016a.区域变质作用与中国大陆地壳的形成与演化.岩石学报,32(9): 2579—2608.
- 耿元生,沈其韩,刘福来,等,2016b.中国区域变质岩及变质作用演化.北京:地质出版社.
- 郭敬辉,翟明国,张毅刚,等,1993.怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学和同位素年代学.岩石学报,9(4): 329—341.
- 贺同兴,张树业,卢良兆,1965.变质岩岩石学.北京:中国工业出版社.
- 胡大千,韩春元,马瑞,等,2012.内蒙古锡林郭勒地区上古生界极低级变质作用:伊利石和镜质体反射率的证据.岩石学报,28(9): 3042—3050.
- 胡大千,洪艳,于介江,2010.吉林省东部石炭—二叠系伊利石的成因标志.吉林大学学报(地球科学版),40(5): 1035—1040.
- 胡大千,刘越,洪艳,等,2011.东北地区上古生界泥质岩石共存粘土矿物.吉林大学学报(地球科学版),41(5): 1458—1465.
- 黄懿,裴荣富,任冠政,等,1957.论大冶式铁矿.地质学报,37(2): 191—202.
- 黄映聪,任东辉,张兴洲,等,2008.黑龙江省东部桦南隆起美作花岗岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),38(4): 631—638.
- 焦玉国,李景坤,乔建华,等,2005.伊利石结晶度指数在岩石变质程度中的应用.大庆石油地质与开发,24(1): 41—43.
- 李才,翟庆国,董永胜,等,2007.青藏高原龙木错—双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录.地质通报,26(1): 13—21.
- 李春昱,1975.用板块构造学说对中国部分地区构造发展的初步分析.地球物理学报,18(1): 52—76.
- 李春昱,沈其韩,邢抚安,1956.鞍山樱桃园至眼前山铁矿地质.北京:地质出版社.
- 李景坤,宋兰斌,刘伟,2007.松辽盆地北部石炭—二叠系古镜质体反射率恢复.大庆石油地质与开发,26(3): 32—34, 38.
- 李勤,杨振升,1992.高级变质岩区填图方法——冀东地区构造—岩石法填图研究.北京:地质出版社,131.
- 李三忠,张国伟,李亚林,等,2000.勉略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.
- 刘福来,王惠初,邢光福,等,2016.中国变质岩研究报告.刊于“中国调查百项成果(下册)”,北京:地质出版社,754—774.
- 刘良,曹玉亭,陈丹玲,等,2013a.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.
- 刘良,廖小莹,张成立,等,2013b.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,周鼎武,1994.东秦岭商南高压基性麻粒岩的发现及其初步研究.科学通报,39(17): 1599—1601.
- 刘良,周鼎武,董云鹏,等,1995.东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的 $P-T-t$ 演化轨迹.岩石学报,11(2): 127—136.
- 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.
- 吕古贤,陈晶,李晓波,等,1998.构造附加静水压力研究与含柯石英榴辉岩成岩深度测算.科学通报,43(24): 2590—2602.
- 吕古贤,刘瑞珣,1999.成岩深度测算原理的探讨.科学通报,44(21): 2350—2352.
- 卢良兆,徐学纯,刘福来,1996.中国北方早前寒武纪孔兹岩系.长春:长春出版社,276.
- 卢良兆,1986.中国的变质岩系与地壳演化.长春地质学院学报,(2): 1—14.
- 陆松年,郝国杰,2015.中国变质岩大地构造图(1:2 500 000)及说明书.北京:地质出版社.
- 毛晓冬,孙云铠,吕杰,等,2014.青藏高原及邻区变质地质图及说明书(1:1 500 000).北京:地质出版社.
- 邱海峻,许志琴,张泽明,等,2002.苏北高压变质带绿片岩中石榴石内文石包裹体的发现.地质通报,21(10): 617—624.
- 邱海峻,许志琴,张建新,等,2003.苏北连云港地区蓝闪绿片

- 岩相岩块的发现.岩石矿物学杂志,22(1): 34-40.
- 任磊夫,陈芸菁,1984.从粘土矿物的转变讨论沉积成岩到变质过程中的阶段划分.石油与天然气地质,5(4): 325-334.
- 任战利,萧德铭,迟元林,2006.松辽盆地基底石炭—二叠系烃源岩生气期研究.自然科学进展,16(8): 973-979.
- 沈保丰,骆辉,李双保,等,1994.华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿.北京:地质出版社,201.
- 沈其韩,耿元生,2012.中国蓝片岩带的时空分布、地质特征和成因.地质学报,86(9): 1407-1446.
- 沈其韩,耿元生,刘福来,2016a.1: 500 万中国变质地质图及说明书.北京:地质出版社.
- 沈其韩,耿元生,宋会侠,2016b.华北克拉通的组成及其变质演化.地球学报,37(4): 1-20.
- 沈其韩,耿元生,宋会侠,2014.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.岩石学报,30(10): 2777-2807.
- 沈其韩,徐惠芬,沈昆,等,1997.山东沂水雪山岩体和林家官庄岩体的同位素年代学.地质科学,32(3): 291-298.
- 沈其韩,徐惠芬,张宗清,等,1992.中国早前寒武纪麻粒岩.北京:地质出版社,237.
- 沈其韩,张荫芳,高吉凤,等,1990.内蒙古中南部太古宙变质岩.中国地质科学院地质研究所文集,21(1): 1-192.
- 宋叔和,沈其韩,1996.前地质调查所关于矿物学和岩石学研究.见:程裕淇,陈梦熊主编,前地质调查所的历史回顾.北京:地质出版社,28-31.
- 孙大中,1984.冀东早前寒武纪地质.天津:天津科学技术出版社,273.
- 孙大中,李惠民,林源贤,等,1991.中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳模式的研究.地质学报,65(3): 216-231.
- 索书田,毕先梅,赵文霞,等,1998.右江盆地三叠纪岩层极低级变质作用及地球动力学意义.地质科学,33(4): 395-405.
- 索书田,祁向雷,毕先梅,1996.右江中生代极低级变质带的变质变形过程.地质科技情报,15(4): 65-72.
- 索书田,游振东,周汉文,1995.极低级变质作用和极低级变质带综述.地质科技情报,14(1): 1-8.
- 谭荣森,1958.岩石结构(第三册):变质岩.北京:地质出版社.
- 全来喜,刘小汉,徐平,等,1996.东南极拉斯曼丘陵含假蓝宝石紫苏辉石石英岩的发现及其地质意义.科学通报,41(13): 1205-1208.
- 万渝生,董春艳,颜炳强,等,2012.华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP 锆石 U-Pb 定年.地质学报,86(9): 1447-1478.
- 万渝生,刘敦一,董春艳,等,2009.中国最古老岩石和锆石.岩石学报,25(8): 1793-1807.
- 王鹤年,1963.苏北榴辉岩的特征及成因探讨.南京大学学报(地质学),1(1): 109-122.
- 王楫,陆松年,李惠民,等,1995.内蒙古中部变质岩同位素年代构造格架.中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊,29: 1-75.
- 王凯怡,郝杰,Wilde, S., et al., 2000.山西五台山—恒山地区晚太古—早元古代若干关键地质问题的再认识:单颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约.地质科学,35(2): 175-184.
- 王荃,刘雪亚,1976.我国西部祁连山区古海洋地壳及其大地构造意义.地质科学,1(1): 42-55.
- 王清晨,2001.中国超高压变质岩十五年研究进展.地球学报,22(1): 11-16.
- 王仁民,陈珍珍,陈飞,1991.恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义.岩石学报,7(4): 36-45.
- 王仁民,贺高品,陈珍珍,等,1987.变质岩原岩图解判别法.北京:地质出版社,199.
- 王润三,王焰,李惠民,等,1998.南天山榆树沟高压麻粒岩体锆石 U-Pb 定年及其地质意义.地球化学,27(6): 517-522.
- 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——角闪石提供的信息.西北大学学报(自然科学版),29(6): 565-568.
- 王跃,张兴洲,宋海峰,等,2009.牡丹江地区黑龙江杂岩的变质变形特征.吉林大学学报(地球科学版),39(6): 1066-1072.
- 王曰伦,李士林,刘俨然,等,1953.五台山五台纪地层的新见.地质学报,22(4): 325-353.
- 魏春景,1994.蓝片岩及其有关高压变质带研究的新进展.地学前缘,1(1-2): 140-144.
- 魏春景,2011.变质作用 *P-T-t* 轨迹的研究方法与进展.地学前缘,18(2): 1-16.
- 魏春景,2012.21 世纪最初十年变质岩石学研究进展.矿物岩石地球化学通报,31(5): 415-427.
- 魏春景,周喜文,2003.变质相平衡的研究进展.地学前缘,10(4): 341-351.
- 吴昌华,1992.麻粒岩成因的反思.岩石学报,8(1): 74-86.
- 吴昌华,韩光,1989.集宁—阳高地区侵入成因的暗色麻粒岩及苏长辉长岩的变质作用.地质论评,35(1): 1-12.
- 吴福元,葛文春,孙德有,等,1997.吉林南部太古代花岗岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素年龄测定.岩石学报,13(4): 499-506.
- 伍家善,耿元生,沈其韩,等,1998.中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化.北京:地质出版社,212.
- 伍家善,耿元生,徐惠芬,等,1989.阜平群变质地质.中国地质科学院地质研究所所刊,19: 1-213.
- 徐学纯,1992.内蒙古乌拉山地区麻粒岩相变质流体性状及其演化.地质论评,38(5): 398-406.

- 叶凯,2001.大别山—苏鲁超高压变质带的矿物学和岩石学研究进展.矿物岩石地球化学通报,20(3):141—148.
- 游振东,2011.冲击变质效应与冲击变质的阶段:兼论岫岩陨石坑的证实.自然杂志,33(1):35—41.
- 游振东,陈能松,Chalokwu, C. I., 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.
- 游振东,刘嵘,2008.陨石撞击构造作用的研究现状与前景.地质力学学报,14(1):22—36.
- 于孝宁,宋述光,魏春景,等,2009.北祁连山含镁纤柱石高压泥质岩及其对古大洋俯冲的意义.北京大学学报(自然科学版),45(3):472—480.
- 翟淳,张清华,王奖臻,等,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,14(3):166—168.
- 张建新,于胜尧,孟繁聪,等,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,25:2050—2066.
- 张立飞,1992.陕北鄂尔多斯盆地埋藏变质作用研究.地质学报,66(4):339—349.
- 张立飞,王启明,任磊夫,1992.陕北鄂尔多斯盆地三叠系泥岩中粘土矿物在埋藏变质过程中的转化.中国科学(B辑),(7):759—767.
- 张秋生,1958.江苏海州一带胸山系岩层的花岗岩化作用.地质学报,38(4):403—420.
- 张兴洲,周建波,迟效国,等,2008.东北地区晚古生代构造—沉积特征与油气资源.吉林大学学报(地球科学版),38(5):719—725.
- 张泽明,钟增球,游振东,等,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.
- 张宗清,伍家善,叶笑江,1991.阜平群下部太古代变质岩石的REE,Rb-Sr和Sm-Nd年龄及其意义.地球化学,20(2):118—127.
- 赵亮亮,张兴洲,2011.黑龙江杂岩构造折返的岩石学与年代学证据.岩石学报,27(4):1227—1234.
- 赵文俞,刘嵘,王勤燕,等,2001.木兰山蓝片岩中两种文石的产出特征及其动力学意义.地球科学,26(6):568—573.
- 赵文俞,牟善斌,秦麟卿,2002.木兰山蓝片岩中斜黝帘石—低铁绿帘石连生体的确定.岩矿测试,21(1):29—32.
- 赵英利,刘永江,李伟民,等,2010.佳木斯地块南缘牡丹江地区高压变质作用:黑龙江杂岩的岩石学和地质年代学.地质通报,29(2/3):243—253.
- 赵宗溥,1984.成岩作用埋藏变质作用与近变质作用.地质论评,30(5):501—509.
- 周建波,张兴洲,Wilde, S.A.,等,2009.黑龙江杂岩的碎屑锆石年代学及其大地构造意义.岩石学报,25(8):1924—1936.
- 庄育勋,1994.中国阿尔泰造山带热动力时空演化和造山过程.长春:吉林科学技术出版社,402.