中亚增生造山过程与成矿作用研究进展

肖文交^{1,2,3*}, 宋东方^{2,3}, Brian F. WINDLEY⁴, 李继亮², 韩春明^{2,3}, 万博^{2,3}, 张继恩^{2,3}, 敖松坚^{2,3}, 张志勇^{2,3}

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆矿产资源研究中心, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

4. Department of Geology, The University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK

* E-mail: wj-xiao@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2019-06-18; 收修改稿日期: 2019-09-12; 接受日期: 2019-09-18; 网络版发表日期: 2019-10-17

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0601201)、国家自然科学基金项目(批准号: 41888101、41730210、41672219)和IGCP662项目资助

摘要 中亚造山带作为全球最大的显生宙增生型造山带, 是大陆动力学和成矿作用研究的天然实验室. 文章简要概述新中国成立以来中亚造山带研究发展情况, 并对未来研究提出展望. 20世纪50~70年代是中亚造山带研究的奠基时期, 各地质研究学派理论相继运用于解释中亚地区的地质演化. 改革开放初期, 李春昱先生等开创性地运用板块构造理论解析北疆及兴蒙地区大地构造演化, 提出了西伯利亚、哈萨克斯坦、中朝-塔里木三大板块俯冲-碰撞的认识, 并提出了索伦山至延边缝合线的观点. 20世纪90年代, 中亚造山带研究进入快速发展期, 前苏联学者提出了多陆块碰撞模型; 土耳其学者提出了单一岛弧增生模型, 指出中亚造山带是一种特殊类型的碰撞造山带. 中国学者对中国北方地区的蛇绿岩、高压变质岩等进行了大量开拓性研究, 划分了主要缝合带. 1999年, “中亚成矿域”概念被提出, 并与环太平洋成矿域和特提斯成矿域并称全球三大成矿域. 进入21世纪, 鉴于中亚在大陆增生理论和成矿机制研究领域的重要性, 中亚造山带研究成为国际学术前沿. 中国在中亚地区布局了一系列科研项目, 催生了一大批重要科研成果, 包括微陆块属性、蛇绿岩时代和构造背景、岩浆弧性质、增生楔识别和解剖、区域变质-变形作用、俯冲带(超)高压变质作用、洋中脊俯冲、地幔柱与板块相互作用、多岛海构造古地理与复式增生造山时空格架、大陆增生、增生成矿、构造叠加改造等. 这些成果产生了重要的国际影响. 展望未来, 中亚造山带主要有以下几方面的内容需要进一步深入研究: (1) 古亚洲洋早期演化历史及起始俯冲机制; (2) 古亚洲洋外部造山带(Extroversion)的增生机制; (3) 古亚洲洋地幔属性及其时空分布; (4) 古亚洲洋与特提斯洋相互作用过程; (5) 显生宙大陆增生机制及其全球对比; (6) 中亚成矿域增生成矿机制; (7) 大陆改造机制.

关键词 中亚造山带, 增生造山过程, 成矿作用, 研究进展, 研究前沿

中文引用格式: 肖文交, 宋东方, Windley B F, 李继亮, 韩春明, 万博, 张继恩, 敖松坚, 张志勇. 2019. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展. 中国科学: 地球科学, 49: 1512–1545, doi: [10.1360/SSTe-2019-0133](https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0133)

英文引用格式: Xiao W, Song D, Windley B F, Li J, Han C, Wan B, Zhang J, Ao S, Zhang Z. 2019. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9524-6>

1 引言

中亚造山带是位于东欧(波罗地)克拉通、西伯利亚克拉通、塔里木克拉通和华北克拉通之间的巨型造山拼贴体(图1)。它西起里海,东临西太平洋北部,横跨俄罗斯、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、蒙古及中国北方,是全球最大的大陆造山带。中亚造山带曾被不同学者赋予不同的名字,如俄罗斯学者习惯称中亚褶皱带(Central Asian Fold Belt)(Khain等, 2002)或中亚活动带(Central Asian mobile belt)(Kovalenko等, 2004);土耳其学者建议用阿尔泰构造拼贴体(Altaid tectonic collage)(Şengör等, 1993)或阿尔泰造山带(Altaids)(Şengör和Natal'in, 1996; Şengör等, 2018)来描述中亚造山带的主体部分;北美学者倾向于使用中亚造山系(Central Asian Orogenic System)(Zuza和Yin, 2017)。其中,“中亚造山带”(Central Asian Orogenic Belt, CAOB)(Jahn等, 2000c)是被学术界使用最为广泛的名称。

中亚造山带被Şengör和Natal'in(1996)定义为碰撞造山带的一种特殊类型,即发育大量的俯冲-增生杂岩和弧岩浆岩,而相对缺失碰撞造山相关的周缘前陆盆

地。与特提斯碰撞型造山带形成演化方式不同,中亚造山带是由大量增生杂岩、岩浆弧、弧相关盆地、蛇绿岩、海山及大陆碎片等构成的复杂拼贴体,因而被认为是典型的增生型造山带(Windley等, 1990, 2007)。

中亚造山带的形成是古亚洲洋(Paleo-Asian Ocean)长期俯冲消减的产物,因而又称古亚洲构造域(Dobretsov等, 1995)。古亚洲洋的长期俯冲过程形成巨大的俯冲-增生杂岩和大量岛弧岩浆岩,该过程使亚洲大陆的面积在古生代期间增加了约 $530 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中约一半的大陆生长来自新生地壳的增生(Şengör等, 1993)。因而,中亚造山带被认为是全球最大的显生宙大陆增生区。研究表明,多洋盆、多俯冲带、多向汇聚复式增生造山过程中山弯圈闭洋盆及洋中脊俯冲是中亚造山带大陆增生的重要机制(Xiao等, 2018, 2015)。

中亚造山带内蕴藏着丰富的矿产资源和能源,被称为中亚成矿域(涂光炽, 1999),与环太平洋成矿域和特提斯成矿域并称全球三大成矿域。中亚成矿域内产出有世界级的金矿、铜矿等,成为资源勘查和成矿理论研究的重要基地。

中亚造山带是大陆动力学和成矿作用研究的天然实验室,受到各国地球科学家的长期重视,并成为地球

图1 中亚造山带大地构造位置图

据Şengör和Natal'in(1996)和Xiao等(2009b)修改

科学研究前沿与热点。中国科学家对中亚造山带的形成演化及成矿规律进行了长期研究,取得了一系列重要研究成果。本文就中亚增生造山过程与成矿作用研究的发展进行简要评述,包括新中国成立以来的总体研究概况,改革开放40年来的研究进展及21世纪以来的突出研究成果,旨在梳理该领域发展脉络,并对未来研究进行展望。

2 新中国成立以来发展的总体概况

中亚造山带在中国境内分布于新疆北部、甘肃北部、内蒙古及东三省地区。中国科学家对中亚造山带的研究由来已久,在新中国成立后,尤其是改革开放以后取得了大量研究成果,进入21世纪以来,由于一系列重要科研项目和国际地质计划项目的持续实施,中亚造山带的研究进入国际学术前沿。

从1949年新中国成立至20世纪70年代,中国地质工作可谓“百花齐放,百家争鸣”,出现了不同的地质研究学派。在不同地质学理论框架下,中国学者对中亚地区的大地构造问题进行了探讨,初步划分了大地构造单元,为后续工作打下了基础。何志超(1956)讨论了天山地槽与祁连山地槽的界线问题,袁复礼(1956)讨论了天山拗陷带和准噶尔盆地的地质特征,对它们的岩石地层系统进行了详细的描述,成为开拓新疆地质事业的奠基者。根据李四光(1962)的地质力学观点,新疆中部及南北两侧有天山、昆仑纬向构造带及其他旋扭构造。胡冰等(1964)把新疆划分为六个构造单元:阿尔泰地槽褶皱带、准噶尔拗陷区、天山地槽褶皱带、塔里木地台、昆仑地槽褶皱带和喀喇昆仑地槽褶皱带,并对每一个地槽褶皱带细分为若干背斜褶皱带、向斜褶皱带和拗陷,而塔里木地台则细分为若干断块和台隆。黄汲清等(1974)认为,阿尔泰、天山及昆仑为多旋回地槽褶皱系,准噶尔是阿尔泰地槽系中的准噶尔拗陷,而塔里木是地台。中国科学院地质研究所大地构造编图组(1974)则从地质力学结合地质历史分析的角度提出断块理论,把新疆划归西域断块区,并分为天山断褶、昆仑断褶、阿尔泰断褶及塔里木断块。而主张地洼学说的,如陈国达等(1975)把新疆分为北疆地洼区、南疆地洼区和昆仑地槽区。张伯声和吴文奎(1975)则运用地壳镶嵌构造及波浪运动的设想,认为新疆中部及其四周,有不同方向的构造带互相交

织,网眼之中也有一些地块,大地块套小地块,大构造带套小构造带。这一时期,由于国家建设对矿产资源的寻找提出了要求,西北地区的矿产资源普查与勘探工作也取得了重要成绩。张弛等(1975)总结了新疆超基性岩体的侵入时代、岩体特征及与构造的关系,划分了17个岩带,并把含铬岩体划分为五种类型:纯橄岩-单辉杂岩型、纯橄岩-斜辉辉橄岩型、斜辉辉橄岩型、斜辉辉橄岩-橄辉岩型、含长超基性杂岩型。1979年,新编新疆地区1:100万地质图(初稿)完成,该图对推动新疆地质工作、提高新疆地区地质研究程度起到了重要作用(徐新, 1979)。

兴安-蒙古及邻区的地质研究在该时期也得到发展。萧序常和刘湧泉(1962)指出内蒙华力西期造山运动可以分为三个亚旋回:早期为志留纪至早石炭世之间,中期为石炭纪至早二叠世之间,晚期为二叠纪之后、中生代之前。徐国相(1963)则对内蒙古地区的超基性岩分类和鉴定进行了简要总结。1963年,全国铬矿专业会议在内蒙古召开,总结交流了超基性岩与铬铁矿地质普查勘探工作的经验。关于东北地区构造演化的研究可以追溯到20世纪50年代。张文佑等(1959)将中国东北的大地构造分区划分为东北台块(前震旦纪褶皱带)、大兴安岭褶皱带(海西晚期)、内蒙褶皱带(海西晚期)、张广才岭褶皱带(海西晚期)、珲春褶皱带(海西晚期)及那丹哈达褶皱带(中生代)。黄汲清(1959)强调东北准地台是一个由一系列东北-西南向大型隆起和拗陷组成的多旋回造山区。

20世纪80年代,随着板块构造理论在中国的传播,中亚造山带的研究也进入了一个新时期,众多大地构造学家对原来的槽台理论进行了重新认识,尝试运用板块构造理论来解释中亚地区的地质演化。李春昱(1980)在《中国板块构造的轮廓》一文中指出,“中国板块以塔里木-中朝地块为核心,地块的北缘是天山-内蒙-兴安地槽,在这个地带发生了一系列古生代俯冲带及缝合线;黑龙江省最东部那丹哈达岭是一个南北向地槽带,东与苏联的锡霍特地槽相连”。李春昱(1980)认为塔里木-中朝地块和西伯利亚之间为古生代洋盆,推测其宽度在4000km以上;阿尔泰山南麓额尔齐斯深断裂为一早古生代晚期向北俯冲的板块消减带;内蒙北部索伦山-贺根山为晚古生代俯冲带,大洋向北或北北西俯冲消减。陶钧政等(1982)把新疆划分为4个古板块,即阿尔泰板块、准噶尔板块、天山-塔

里木板块和秦-祁-昆板块。王作勋等(1989)指出天山地区的板块活动可以追溯到中晚元古代,从震旦纪至二叠纪,天山的板块活动以手风琴式张、合为特征,经历了7次张、合旋回。刘雪亚(1984)指出北山为天山-内蒙古中生代地槽褶皱带的一部分,并讨论了北山地区的钙碱性岩浆活动及其与板块构造的关系。

中亚蛇绿岩的研究从20世纪80年代开始进入了一个快速发展的时期。张弛(1981)在新疆地区识别了11个蛇绿岩带:额尔齐斯蛇绿岩带、巴尔雷克-阿尔曼太蛇绿岩带、达拉布特-萨尔布依拉山蛇绿岩带、克拉美丽蛇绿岩带、玛依力山蛇绿岩带、北天山蛇绿岩带、中天山蛇绿岩带、南天山蛇绿岩带、西昆仑蛇绿岩带、阿帕-茫崖蛇绿岩带和红柳沟蛇绿岩带,并对蛇绿岩的岩石组成进行了简要描述。此后,不同学者对中亚造山带内的蛇绿岩进行了较为详细的岩石学、矿物学、铬铁矿成因及蛇绿岩形成背景研究(朱宝清等, 1987; 崔日武, 1988)。张杨和何国琦(1988)在北山造山带首次确定了早古生代蛇绿岩带,并对其发展演化进行了研究,认为其为陆上拉开的小洋盆残余。田昌烈和杨芳林(1983)初步将东北地区蛇绿岩划分为9条蛇绿岩带和4个时期,其中晚太古代主要包括建平、铁岭和和龙蛇绿岩,代表岛弧成因;晚元古代包括萝北和依兰蛇绿岩,其构造环境可能与边缘海或岛弧有关;早古生代包括西拉木伦、磐石和卧龙蛇绿岩,形成俯冲-消减带环境;晚古生代蛇绿岩为饶河蛇绿岩,可能与小型海盆洋壳残留有关。

1985年,国家计委(现改名为国家发展和改革委员会)、国家科委(现改名为科学技术部)正式批复国家305项目,该科技攻关项目旨在加速查明新疆矿产资源的地质、地球物理和地球化学特征。1987年开始实施的国家自然科学基金重大项目“中国兴蒙-北疆及邻区古生代岩石圈的形成及演化”,有力地推动了中亚造山带基础地质研究。

20世纪90年代后,中亚造山带研究更加深入和细化,多种不同的大地构造模型被用来解释中亚造山带的形成演化。前苏联学者基于中亚造山带内分布的微陆块,认为中亚在形成前存在由多陆块分隔的多个洋盆,这些洋盆在古生代闭合后,陆块之间发生碰撞形成了中亚造山带,即“多陆块碰撞”模型(Zonenshain等, 1990)。土耳其学者Şengör等(1993)则强调俯冲-增生杂岩和岩浆弧在构筑中亚造山带的重要作用,并提出中

亚造山带(Şengör称之为Altaids)是由Turkestan洋围绕西伯利亚克拉通形成单一的Kipchak弧,经后期走滑叠置形成,即“单一岛弧增生”模型。

中国学者对中亚造山带地质演化进行了大量研究,并取得了一系列新的研究成果。李锦轶等(1992)重建了北疆的大地构造演化,认为其演化历史可以追溯到元古代晚期,并把其演化历史划分为三个阶段:克拉通化阶段、洋陆分异转化阶段和新克拉通化阶段,在此基础上阐述了北疆地区金属矿产的形成、分布与产出规律。高俊(1993)和高俊等(1996, 1997)详细研究了西南天山板块构造及造山动力学演化,通过对西南天山构造地层学、蛇绿岩、构造变形及蓝片岩等方面的综合研究,总结出西南天山岩石圈板块构造演化历史和造山运动动力学特征。随着同位素测年技术的发展,胡霁琴等(1995)提出了一个初步的北疆地区主要地质事件同位素年表的划分方案。作为天山-兴蒙造山带的一部分,北山地区的地质研究同样得到了广泛重视。左国朝等(1990)、左国朝和何国琦(1990)初步建立了北山地区的大地构造模型,认为北山早古生代大地构造单元由南侧塔里木板块东段北缘和北侧贝加尔期分裂出来的早山微板块组成,其间被石板井-小黄山蛇绿混杂岩带所分隔,北山经历了大西洋型、安第斯型和西太平洋型大陆边缘的演化阶段;晚古生代北山进入板内活动时期。刘雪亚和王荃(1995)认为北山造山带的主体是哈萨克斯坦古板块的东延部分,由北山南、北两个优地斜带和马鬃山中间地块构成;北山最早的板块构造运动起始于中奥陶世,古洋盆于石炭纪闭合。华北地台北侧的构造研究也取得了重大进展,在原来的兴蒙华力西褶皱带内,相继确立了中晚元古代褶皱带和加里东褶皱带,初步查明了华北地台北侧自元古代至古生代拉张体制与挤压体制的多次“开”、“合”转化(牛树银等, 1993)。李双林和欧阳自远(1998)认为兴蒙造山带并非简单的西伯利亚板块和华北板块之间的缝合带,而是由一系列中、小地体组成的构造拼合带。唐克东等(1995)指出中国东北及其邻区大陆边缘包括两个构造带,内带由裂解的古陆碎块组成,其北部与古亚洲洋的演化有关,南部与古太平洋演化有关;外带有中生代增生地体组成。李锦轶(1998)首次提出了中国东北侏罗纪晚期可能发育与现今青藏高原类似的古高原的认识,对“古亚洲洋构造体制”和“环太平洋构造体制”等概念进行了讨论。“中、

小板块群”、“多岛洋格局”等用来解释东北地区古生代构造古地理格局(张梅生等, 1998)。

21世纪以来, 随着现代同位素分析技术的迅速发展, 一批高精度的同位素资料发表, 证明中亚造山带是显生宙大陆增生重要区域(Jahn等, 2000b, 2000c)。Khain等(2002)通过锆石U-Pb和Pb-Pb定年报道了中亚造山带最老的蛇绿岩形成于~1020Ma, 证明古亚洲洋至少在中元古代末期就已经存在。中亚造山带时空演化研究逐渐成为国际学术热点。中国加大了对中亚造山带基础地质理论和成矿机制研究的投入, 促进了一批具有国际领先水平的科研成果不断涌现。305项目一系列针对新疆矿产资源和地质演化的课题继续实施。同时, 国家重点基础研究发展计划项目(“973计划”)项目“中国西部中亚型造山与成矿”于2002年正式启动, 标志着中亚造山带研究进入了新的阶段。2007年, 中亚地区第二轮“973计划”项目“中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用”启动, 围绕着中亚造山带的增生造山过程及其成矿效应开展了系统的研究, 获得了大量重要研究成果。基于增生杂岩、蛇绿岩及岩浆弧的研究, Xiao等(2003)提出中亚造山带东段为增生楔-增生楔拼贴双向俯冲-增生造山模型; 中亚造山带西段为多洋盆、多俯冲带、多方向复式增生造山作用(Xiao等, 2008, 2009b)。多轮“973计划”和一系列国家科技计划项目的实施后, 中亚造山带研究进入了国际学术前沿。

2012年和2014年, 国家自然科学基金重大项目“Pangea的东亚重建”和“中亚成矿域斑岩大规模成矿”相继启动。2013年, “973”计划项目“兴蒙造山带构造叠合与大规模成矿作用”立项, 2014年, “973”计划项目“新疆北部古弧盆体系成矿机理研究”和“西天山石炭-二叠纪构造演化与浅成低温成矿系统”启动。这一系列面向中亚地质科学前沿基础理论问题的重大项目的实施, 使中国在中亚造山带地质演化及成矿作用研究领域进入国际前列。2017年深地资源勘察开采专项“北方增生成矿系统的深部结构和成矿过程”和“北方东部复合造山成矿系统深部结构与成矿过程”获批立项, 该项目是国家在中亚地区布局的专门针对中亚造山带深部结构的“深地项目”, 旨在利用综合地球物理探测与地质相结合的手段, 获取造山带深部三维结构, 实现矿集区3000m以浅“透明化”, 为增生造山成矿背景和拓展深部找矿空间提供制约。

概括而言, 新中国成立以来中亚造山带的研究经

历了20世纪50~70年代的奠基阶段、80~90年代的快速发展阶段, 以及21世纪以来逐步进入国际地球科学研究前沿。

3 改革开放40年来的研究进展

改革开放后, 被认为地学革命的“板块构造理论”传播到中国。以李春昱先生为代表的中国早期板块构造学者率先运用板块构造思想解释中亚造山带的大地构造演化。李春昱和汤耀庆(1983)以及李春昱等(1984)指出阿尔泰、天山、狼山至兴安岭一带是西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块及塔里木-中朝板块在古生代俯冲碰撞的产物, 明确中亚造山带是大洋俯冲闭合形成的。李春昱等(1984)根据蛇绿岩带、高压低温变质带、岛弧或钙碱性岩浆岩的分布以及混杂堆积等, 把亚洲划分为12个古板块。李春昱和汤耀庆(1983)率先指出西伯利亚板块与塔里木-中朝板块的缝合线位置在中国内蒙古北部的索伦山及延边一带, 向西延伸至哈密以东的公婆泉附近, 分作两支。一支沿着克拉美丽、阿尔泰山西南麓及额尔齐斯, 进入俄罗斯境内, 折而向北, 直达鄂毕湾, 为西伯利亚和哈萨克斯坦两大板块之间的缝合线; 另一支由天山向西沿克齐尔库姆沙漠南缘, 经咸海折向北, 平行于乌拉尔山脉东麓, 到鄂毕河下游, 为哈萨克斯坦板块和塔里木-中朝板块与东欧板块之间的缝合线。

1989年, 国际地质对比计划第283项(IGCP283)“古亚洲洋有关地区的构造演化及动力学研究”获批。该项目以中国地质学家肖序常先生为首, 包括前苏联地质学家N. L. Dobretsov教授、美国地质学家R. G. Coleman教授和北京大学何国琦教授组成领导小组。IGCP283项目涉及的地域是西伯利亚板块和华北、塔里木板块之间的广大地区, 研究内容包括该地域各主要造山带的沉积作用, 变形、变质作用, 岩浆活动, 深部构造以及构造演化, 目的在于阐明古亚洲巨型缝合带岩石圈及上地幔结构特征及地球动力学规律(汤耀庆, 1989, 1990)。1991年何国琦和李茂松总结了国家自然科学基金重大项目“中国兴蒙-北疆及邻区古生代岩石圈的形成和演化的研究”的研究成果, 认为内蒙东部造山带是华北北部陆缘区与南蒙微大陆在晚泥盆和早石炭世期间相互碰撞和对接的结果, 没有明显的前陆逆冲带和与之相伴的前陆磨拉石盆地的发育, 以及与

地壳大规模叠覆相关的变质作用和岩浆作用, 表明其构造特征和造山阶段岩石组合有别于一般的碰撞造山带, 并有可能建立一个新的碰撞造山类型(兴蒙-北疆研究组, 1991). 同时, 通过对古生物地理的研究, 初步将中亚地区划分为南方大区(即古特提斯、特提斯大区), 北方大区(含北美大区 and 西伯利亚大区)和混生-混杂大区. 这些成果为后续研究提供了重要的基础资料, 具有重大学术价值.

1990年, 前苏联学者Zonenshain提出“多陆块碰撞模型”来解释中亚造山带的形成演化(Zonenshain等, 1990). 该模型强调造山带中的微陆块随着其间的洋盆闭合而发生碰撞形成造山带, 是一种“拼盘”构造(mosaic-like)的思想. 随后的1993年, 土耳其地质学家A.M. C. Şengör认为中亚造山带内具有微陆块性质的地体是很有限的, 强调大洋俯冲过程形成的俯冲-增生杂岩及岩浆弧对形成中亚造山带的重要贡献, 并根据增生杂岩和岩浆弧的对比, 提出“单一岛弧增生模型”来解释中亚造山带的形成演化(Şengör等, 1993). 同时指出中亚为显生宙大陆增生最为显著的地区, 从而对地球大陆在前寒武纪就完成增生、显生宙没有显著大陆增生的传统大陆增生理论提出了挑战. Şengör和Natal'in (1996)在总结突厥型造山带(Turkic-type orogeny)及其对大陆生长的作用时, 进一步强调中亚存在大型的俯冲-增生杂岩, 缺失阿尔卑斯或喜马拉雅型的结晶推覆体和印度河型的缝合带, 从而认为中亚造山带是一种特殊类型的碰撞造山带; 同时提出中亚地区存在大量走滑作用及由此形成的山弯构造, 其中最重要的是哈萨克斯坦山弯构造和图瓦-蒙古山弯构造(Şengör等, 1993).

1993年, 高俊在南天山库米什地区发现了蓝片岩, 作为蛇绿混杂岩的基质产出(高俊等, 1993). 高俊和肖序常(1994)以及肖序常等(1994)较为系统的研究了南天山高 P/T 变质矿物组合、 $PTtD$ 轨迹及同位素年代, 讨论了南天山古生代的俯冲和闭合过程. 1995年, 高俊在西南天山首次发现榴辉岩, 并开展了系统开拓性基础研究(高俊, 1997; Gao等, 1999), 将其推向了高压-超高压变质作用和俯冲带流体领域的学术前沿. 蓝片岩和榴辉岩等高压变质岩的发现对探索西南天山的古板块构造体制、古洋盆的演化和造山带的动力学机制具有重要意义. Gao等(1998)探讨了天山的构造演化, 认为天山造山带包含两条晚古生代缝合带, 南天山缝合

带分隔了南边的塔里木被动陆缘和北边的伊犁-中天山南缘活动陆缘, 中天山北侧缝合带是伊犁-中天山北侧活动陆缘与另一个洋内弧在早石炭世碰撞的结果.

1997年, 国际地质对比计划IGCP420项目“显生宙大陆增生: 东-中亚地区的证据”正式获批, 中国东北、新疆和内蒙古等地区是该项目研究的主要地区之一(姚玉鹏, 1997). 其主要研究内容为: (1) 显生宙地壳增生; (2) 碱性、过碱性花岗岩类的成因; (3) 与花岗岩侵入体有关的成矿作用; (4) 构造分析和大地构造模式. 中亚造山带地质研究逐渐成为国际地球科学界关注的热点.

1999年, 涂光炽先生提出“中亚成矿域”的概念, 该成矿域西起欧亚两大洲交界的乌拉尔, 从其南部折向东, 经哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦, 部分吉尔吉斯斯坦、中国新疆塔里木以北地区、青海和甘肃北部、内蒙古西部、蒙古国西部, 至包括贝加尔湖东部地区在内的南西伯利亚. 中亚成矿域以发育中、晚元古代及古生代活动带与成矿作用为特点, 产出有黑色岩系矿床、块状硫化物矿床、斑岩型矿床、陆相火山岩金矿床、与富碱侵入岩有关的矿床、砂岩铜矿床等(涂光炽, 1999). 中亚成矿域与环太平洋成矿域及特提斯成矿域并称全球三大成矿域.

2000年以来的近20年, 中亚造山带研究不断走向国际地球科学研究热点和前沿. 中国在中亚地区布局了一系列重要科研项目, 2002年和2007年启动的针对中亚造山带构造演化及成矿作用研究的国家“973计划”项目, 总结了中亚造山带的基本特征: (1) 最大的大陆造山带; (2) 最强烈的壳幔相互作用; (3) 最显著的显生宙大陆增生; (4) 最强烈的新生代构造改造. 中亚造山带的这些特征使其成为研究大陆增生及成矿机制的天然实验室. 中国学者以中亚地质为主题发表了大量科研成果, 成为引领该领域研究的重要科研力量. 2011年美国地质学会彭罗斯会议(Penrose Conference)在中国新疆乌鲁木齐市召开, 会议主题是增生型造山带的构造演化. 会议着重比较了中亚造山带与现今环太平洋增生造山带的构造演化特征. 2013年, “中亚造山带构造演化研究”进入ESI全球地球科学研究前沿(排名第一), 其中大部分核心论文是中国科学家的贡献.

最近几年, 国家自然科学基金委员会在中亚地区布局了重大项目和重点项目, 科技部在中亚地区布局

了深地资源勘察开采重点专项等重要基础研究项目。这些项目瞄准造山带演化和大陆增生机制等国际学科前沿, 将催生更多重要研究成果。

4 21世纪以来的突出研究成果

在国家一系列科研项目, 特别是科技部“973计划”、基金委重大和重点项目、国家305项目的推动下, 中亚造山带构造演化和成矿作用研究取得了有重要国际影响力的研究成果。中亚造山带内的微陆块时代与属性、蛇绿岩时代及构造背景、岩浆弧性质、增生杂岩解剖、区域变质-变形作用、俯冲带(超)高压变质作用、洋中脊俯冲、地幔柱与板块相互作用、增生造山时空格架、大陆增生方式、增生成矿机制、构造叠加改造等方面均取得了突出研究成果。

4.1 微陆块时代与属性

中亚造山带内分布有大量以片岩-片麻岩为主要组成的变质地体, 它们往往经历了角闪岩相甚至麻粒岩相的高级变质作用, 同时经历了复杂的构造变形(Shu等, 2002), 传统上被当作造山带基底或微陆块。这些变质地体在吉尔吉斯斯坦天山、阿尔泰、伊犁-中天山、图瓦-蒙古地体、北山、兴蒙造山带等均有分布。

通过对阿尔泰、准噶尔和天山基底岩石及显生宙花岗岩的研究, Hu等(2000)提出阿尔泰和天山是由显生宙俯冲增生杂岩和元古代变质基底组成的复合地质体, 准噶尔盆地基底可能为残余洋盆, 而准噶尔地体主要由年轻的岛弧杂岩构成。

李会军等(2006)根据变质杂岩锆石U-Pb上交点年龄和Sm-Nd等时线年龄提出了阿尔泰-蒙古微大陆的概念。Kröner等(2013, 2017)在吉尔吉斯斯坦天山报道了古元古代至中元古代的锆石U-Pb年龄。孙新春等(2005)提出北山北部地区存在新太古代至早元古代的变质基底。北山南部地区最近发现了中元古代片麻岩(He等, 2018b), 与中天地体、锡林浩特地块及吉尔吉斯斯坦天山内的微陆块具有相似的Hf-O同位素组成。He等(2018a)提出中亚造山带南部存在中元古代的新生地壳。

Zhou等(2018)系统总结了中亚造山带内微陆块的性质及与超大陆旋回的关系, 指出中亚造山带东部的

微陆块包含太古代-古元古代结晶基底, 经历了中-新元古代构造事件卷入格林威尔造山带和罗迪尼亚超大陆的聚合过程, 中亚造山带西段的微陆块同样包含太古代至古元古代结晶基底以及中-新元古代花岗岩和变质杂岩, 中亚造山带中段的微陆块主要由新元古代花岗质片麻岩组成。

需要指出的是, 大量高精度同位素年代学研究表明, 中亚造山带内传统上被划为微陆块的地体很多实际上由古生代岩石组成, 是古亚洲洋俯冲-增生造山过程的产物。如详细的研究表明图瓦-蒙古微陆块变质杂岩最早的变质时代为(536±6)Ma, 角闪岩相区域变质作用时代为(497±4)~(489±3)Ma, 不存在基底-盖层关系, 图瓦-蒙古地体是由不同构造-变质历史的变质沉积岩在早古生代构造叠置的产物(Salnikova等, 2001)。阿尔泰片麻岩的高精度定年显示这些变质岩实际上形成于寒武纪至泥盆纪, 阿尔泰属于古亚洲洋向西伯利亚板块俯冲形成的古生代活动大陆边缘(Long等, 2007; Sun等, 2008)。根据高温变质作用时代和Hf同位素变异特征, 孙敏等(2009)和Jiang等(2010)进一步指出阿尔泰泥盆纪高级变质杂岩形成于洋中脊俯冲环境。

详细的野外地质解析和高精度年代学研究表明北山地区绝大部分高级变质杂岩(北山杂岩)的原岩形成于古生代(Song等, 2013, 2016), 并不是前寒武纪结晶基底。此外, 还有一些变质杂岩岩性组成非常复杂, 如北山中部勒巴泉变质杂岩, 不仅包括长英质片麻岩和云母石英片岩, 还存在变质硅质岩、变质基性岩、大理岩等原岩来自俯冲大洋板片的岩石。变质硅质岩和大理岩等以构造岩块的形式位于强烈剪切变形的云母石英片岩基质之中, 构成“岩块”-“基质”构造混杂关系(图2)。同时该变质杂岩发育多种形态的褶皱构造(包括紧闭褶皱、不对称褶皱、宽缓褶皱)及韧性剪切变形等多期次构造叠加, 这些变质杂岩与大洋俯冲形成的增生杂岩具有相似的岩石组成和构造变形样式, 其变形发生于约424~280Ma, 属于古生代弧前增生杂岩(Song等, 2014)。

在兴蒙造山带西段(内蒙古中西部), 存在以锡林浩特群为代表的锡林郭勒杂岩, 包括变质沉积岩、变质基性-超基性岩和长英质变质岩, 变质程度达到角闪岩相。该变质杂岩长期以来被认为是组成锡林郭勒微陆块的前寒武纪基底岩系(张臣和吴泰然, 2001)。然而, 后来的研究相继在这些变质杂岩中获得了古生代

图2 北山造山带中部勒巴泉变质杂岩组成及结构简图

(a) 东西长3.2km、南北长2.3km地质图; (b) 东西长0.75km、南北长2.58公里廊带地质图。比例尺均为1: 10000。据Song等(2014)修改

的锆石U-Pb年龄(施光海等, 2003; 薛怀民等, 2009), 证明锡林郭勒杂岩至少部分形成于古生代造山过程。详细的年代学研究表明锡林郭勒杂岩的原岩是新元古代沉积于西伯利亚南缘的活动大陆边缘组分, 其混合岩化和变质作用发生于 $(452 \pm 5) \text{Ma}$, 是古亚洲洋向北俯冲形成的岩浆弧的组成部分, 记录了中亚造山带长期增生过程(Li等, 2011)。在兴蒙造山带东段(中国东北地区)主要包括额尔古纳地块、兴安地块、松嫩-锡林浩特地块、佳木斯地块(图3)。兴安地块过去一直被认为是具有前寒武纪的古陆块(Zhou等, 2011), 但至今未见前寒武纪岩浆事件大量出露, 原定所谓前寒武纪的新开岭群、落马湖群、额尔古纳河组、倭勒根群和风水沟河组, 实际均为晚古生代-早中生代原岩建造(Xu等, 2012; Sun等, 2014; Cui等, 2015; Feng等, 2017)。另外大量早古生代碎屑锆石物源分析及岩浆锆石Hf同位素结果表明, 其熔融源区主要为新生年轻地壳(张丽等, 2013; Han等, 2015), 因此, 兴安地块可能不具有大量前寒武纪的古老基底, 而为显生宙增生地体。

由此可见, 中亚造山带内的变质地体具有多种成因。有些变质地体可能是古大陆裂解形成的微陆块条带(continental ribbon)或大陆碎片(continental fragment), 如吉尔吉斯天山和图瓦-蒙古构造带存在一些

中元古代甚至更老的变质杂岩(Levashova等, 2011; Kröner等, 2017), 它们往往作为更年轻的岛弧的基底, 并为增生楔和弧前盆地提供物源。有些变质地体属于弧前增生杂岩深部物质或岛弧根带的组成, 如北山造山带大部分变质杂岩属于古生代增生造山的产物(Song等, 2013, 2016)。

4.2 蛇绿岩时代及构造背景

蛇绿岩作为造山带曾经存在大洋及其俯冲作用的最重要证据之一, 历来是造山带研究的重点内容。中亚造山带内的蛇绿岩(图4)大多不具备彭罗斯会议所定义的从下至上包含地幔橄榄岩、堆晶辉长岩、席状岩墙群、玄武质熔岩、远洋硅质岩的完整层序, 而是被构造肢解的蛇绿混杂岩, 且大部分属于增生杂岩或岛弧基底的组成部分。2000年以来大量的蛇绿岩高精度同位素年龄被发表, 对古亚洲洋的时空演化提供了重要制约。

通过对比西伯利亚南缘和华北克拉通北缘裂解相关的岩浆作用时限及古地磁资料, Wan等(2018)指出古亚洲洋最初形成于 $\sim 1.35 \text{Ga}$ 的裂解作用。中亚造山带内目前为止发现的最老蛇绿岩为西伯利亚南缘萨彦(Banerjee和Matin, 2013)构造带的Dunzhugur杂岩, 其

图 3 东北地区构造单元划分及前寒武纪地质体分布简图

据Zhou等(2010)、Liu等(2017)和许文良等(2019)修改

形成时代为~1020Ma, 证明古亚洲洋至少在中元古代末期就已经存在(Khain等, 2002).

中亚造山带内的蛇绿岩大体上具有从北往南逐渐变年轻的趋势, 反映了中亚造山带自北往南逐渐增生的总体特征。西伯利亚南缘及蒙古境内存在新元古代的蛇绿混杂岩, 如Shaman蛇绿岩中斜长花岗岩、玄武岩和辉长岩锆石U-Pb年龄分别为(971 ± 14)、(939 ± 11)和(892 ± 16)Ma(Gordienko等, 2009); Dariv和Khantaishir蛇绿岩形成时代分别为(571 ± 4)和(568 ± 4)Ma(Jian等, 2014); 大兴安岭北段阿里河、吉峰、环二库等蛇绿岩形成时代为697~628Ma(Feng等, 2018; 冯志强等, 2019)。蒙古南部(Jian等, 2014)、中国西准噶尔(何国琦等, 2007; Lei和He, 2014; Ren等, 2014)、东准噶尔阿尔曼太(Xiao等, 2009b)、北山红柳河(张元元和郭召杰, 2008)及洗肠井(Ao等, 2012)等蛇绿岩形成于寒武纪。

中亚造山带西段大部分蛇绿岩主体形成时代为奥陶纪至泥盆纪, 如东准噶尔扎河坝蛇绿岩中辉长岩年龄为(485±3)Ma(Ye等, 2017), 阿尔泰库爾提蛇绿岩中斜长花岗岩年龄为~390Ma(Shen等, 2018), 西准噶尔达拉布特蛇绿岩年龄为(391±7)Ma(Gu等, 2009), 南天山色日克牙依拉克蛇绿岩和阿尔滕克斯蛇绿岩中辉长岩年龄为~423Ma(Jiang等, 2014), 榆树沟蛇绿岩中斜长花岗岩和斜长岩年龄分别为(435±3)和(439±2)Ma(杨经绥等, 2011), 并经历了麻粒岩相变质作用(Zhang和Jin, 2016). 南天山黑鹰山蛇绿岩中辉长岩年龄为(392±5)Ma(Wang等, 2011), 北山火山石-牛圈子蛇绿岩形成时代约为444~411Ma(Tian等, 2014).

石炭-二叠纪蛇绿岩在中亚造山带西段分布较少, 主要沿天山和北山分布, 如北天山巴音沟蛇绿岩年龄为(343±2)Ma(Xu等, 2006), 南天山古洛沟蛇绿岩中辉长岩年龄为(332±7)Ma(Jiang等, 2014), 北山中部小

图 4 中亚造山带蛇绿岩及其形成时代分布简图

据 Furnes 和 Safonova (2019) 修改

黄山蛇绿岩形成时代为 (336 ± 4) Ma (Zheng 等, 2013), 北山南部柳园蛇绿岩的形成年龄为 ~ 286 Ma (Mao 等, 2012b).

中亚造山带东段蛇绿岩主要形成于石炭纪-二叠纪, 如内蒙古西乌珠穆沁旗蛇绿岩形成时代约为 $356 \sim 331$ Ma (Song S 等, 2015), 二连浩特蛇绿岩形成时代为 $355 \sim 348$ Ma (Yang 等, 2017), 阿拉善恩格尔乌苏蛇绿岩中枕状玄武岩年龄为 (302 ± 14) Ma (Zheng 等, 2014), 贺根山蛇绿岩形成时代为 $298 \sim 295$ Ma (Miao 等, 2007), 索伦克尔蛇绿岩形成时代为 (279 ± 10) Ma (Miao 等, 2008), 索伦山蛇绿岩中辉长岩的年龄为 (259 ± 6) 和 (257 ± 3) Ma (Luo 等, 2016; 徐备等, 2018), 满都拉蛇绿岩形成时代为 $274 \sim 253$ Ma (Jian 等, 2010), 温都尔庙蛇绿岩的形成时代为 $260 \sim 250$ Ma (Miao 等, 2008).

Chu 等 (2013) 在温都尔庙群中获得具有 EMORB 或洋岛玄武岩 (OIB) 地球化学性质的变基性岩的原岩时代为晚二叠世至早三叠世, 说明洋盆可能延续到早三叠世. 中亚造山带东段仅有少数蛇绿岩形成于早古生

代, 如苏尼特左旗蛇绿岩形成时代为 (483 ± 2) Ma (Jian 等, 2008).

中亚造山带内蛇绿岩中的基性岩大多数具有俯冲带之上 (supra-subduction zone) 蛇绿岩的地球化学特征 (Khain 等, 2002; Ao 等, 2012; Song S 等, 2015), 也有一些显示与洋中脊玄武岩 (MORB) 或洋岛玄武岩类似的地球化学特征 (Furnes 和 Safonova, 2019; Safonova 和 Santosh, 2014; 冯志强等, 2019). 中亚造山带的蛇绿岩时代及其属性表明古亚洲洋俯冲作用从 ~ 1020 Ma 演化至早-中三叠世, 经历了约 800 Ma 的长期演化过程.

4.3 岩浆弧性质

岩浆弧及相关盆地是构成中亚造山带的重要地质单元. 基于现今环太平洋俯冲带的认识, 岩浆弧大体可以分为大陆边缘弧和洋内岛弧 (Ducea 等, 2015). 大陆边缘弧又称安第斯型弧或科迪勒拉型弧, 以俯冲带上盘为大陆地壳 (克拉通) 为特征, 南美安第斯岩浆弧是该类岩浆弧的典型代表. 马里亚纳弧是典型的洋内岛

弧. 日本型岛弧是一种特殊类型的洋内弧, 其前期为安第斯型岩浆弧, 后期由于弧后裂解作用从原来的大陆边缘裂离出来, 并在弧后地区形成具有大洋地壳的弧后盆地(Xiao等, 2010a). 近20年来详细的岩石学、同位素年代学及地球化学的研究在中亚造山带内识别出多种类型的岩浆弧.

中亚造山带内的安第斯型岩浆弧以北伊犁岩浆弧和内蒙古南部的白乃庙岩浆弧为代表. 北伊犁岩浆弧以古元古代至新元古代高级变质岩以及早古生代早期被动陆缘沉积为基底, 叠加晚奥陶世-志留纪花岗岩及泥盆纪至早二叠世火山-沉积岩. 晚古生代火山岩主要由玄武岩、粗面岩、粗面安山岩、安山岩及流纹岩组成, 构成了长达600km的大陆岩浆弧(Zhu等, 2009). 泥盆纪玄武岩中含有继承的老锆石及具有富集的Nd同位素组成, 表明弧岩浆有老的陆壳物质的贡献(Zhu等, 2009). 北伊犁弧是形成于前寒武纪微陆块之上的安第斯型岩浆弧(Xiao等, 2013).

白乃庙岩浆弧是古亚洲洋东段在古生代向华北克拉通北缘俯冲形成的(Xiao等, 2003). 大量的闪长岩、花岗闪长岩和英云闪长岩侵入到华北北缘太古代-古元古代高级变质基底岩石中, 构成了长度超过1000km、宽度达30~120km的岩浆岩带(Zhang和Zhao, 2013). 这些侵入体的侵位时代大多为晚石炭世至二叠纪(Zhang等, 2009b), 少量形成于奥陶纪至泥盆纪(Jian等, 2008; Miao等, 2007). 地球化学特征显示它们为钙碱性的I型花岗岩, 并通常具有富集的同位素组成, 被认为是古老下地壳熔融及来自富集岩石圈地幔物质共同作用的产物, 是古亚洲洋向南俯冲形成的安第斯型岩浆弧(Zhang S H等, 2007, 2009b).

近年来在中亚造山带内识别出众多日本型岛弧, 如阿尔泰岛弧、中天山岛弧、北山中部公婆泉岛弧等. 阿尔泰岩浆弧由大量的片麻岩及变质沉积岩构成, 传统上被认为是前寒武纪微陆块基底(李会军等, 2006). 详细的研究表明条带状负片麻岩及变质沉积岩的原岩主要为含大量火山岩岩屑的沉积岩, 具有低的成分成熟度(Long等, 2008). 碎屑锆石U-Pb年代学研究表明条带状负片麻岩锆石年龄主体为寒武纪至奥陶纪(Sun等, 2008); 变质沉积岩物源主要为寒武纪至奥陶纪的岩浆岩, 其次为新元古代图瓦-蒙古地体的物质, 少量古元古代-太古代地壳物质(Long等, 2007). 花岗质片麻岩的原岩主要为形成于俯冲环境的I型花岗

岩, 其原岩的侵位时代约为453~380Ma(Sun等, 2008). 变质沉积岩和花岗质片麻岩锆石Hf同位素表明古生代期间有大量新生地壳物质贡献(Sun等, 2008; Long等, 2010). 阿尔泰主体为古生代期间古亚洲洋俯冲-增生形成的以新生地壳物质为主的日本型岩浆弧. 中天山岛弧由大量的奥陶纪钙碱性玄武岩、安山岩、火山碎屑岩、硬砂岩及志留纪变质复理石构成. 此外, 中天山岛弧还分布有大量的与俯冲相关的花岗质岩石, 时代为奥陶纪至二叠纪(Dong等, 2011; Lei等, 2011). 早古生代花岗岩具有富集的同位素组成, 而晚古生代花岗岩具有较为亏损的同位素组成, 总体显示了新生地壳和古老地壳物质的混合作用(Ma等, 2014). 二叠纪与铜镍矿相关的基性-超基性杂岩体被认为是形成于俯冲环境的阿拉斯加型杂岩体, 其时代约为285~281Ma(毛启贵等, 2006; 吴华等, 2005). 中天山岛弧主体上为北天山和南天山洋在早古生代演化至二叠纪的日本型岛弧(Xiao等, 2013). 北山中部公婆泉岛弧由大量片麻岩、片岩等变质杂岩、火山岩及花岗质侵入体构成. 火山岩主要为玄武安山岩、安山岩、火山碎屑岩及闪长玢岩, 地球化学数据显示它们具有俯冲带火山岩的特征. 片麻岩及花岗质侵入岩年龄约为462~398Ma, 火山碎屑岩中碎屑锆石最年轻的年龄峰为441~446Ma, 且含有一定量的前寒武纪碎屑锆石(Song D等, 2015). 公婆泉岛弧被解释为牛圈子洋盆古生代向北俯冲形成日本型岛弧, 而芨芨台子-小黄山蛇绿岩则代表了石炭纪的弧后盆地(Song D等, 2015). 中亚造山带东部大兴安岭地区发育规模巨大的日本型岩浆弧, 从时代上划分为早古生代及晚古生代两条岩浆弧(Wu等, 2011; Liu等, 2017; 赵芝等, 2010).

中亚造山带内的日本型岩浆弧, 由于包含一些老的碎屑物质及较富集的同位素组成, 曾经长期被当成微陆块参与造山演化过程. 近20年来的详细研究识别出它们是古亚洲洋俯冲过程形成的特殊类型的洋内岛弧, 对理解中亚造山带的增生造山过程具有重要意义.

中亚造山带内存在大量的马里亚纳型洋内弧. Sa-fonova等(2017)在中亚造山带识别出21个洋内岛弧, 它们中大部分包含玻安岩. 中国西北地区典型的马里亚纳型洋内弧包括西准噶尔弧和北天山博格达弧. 西准噶尔是构成哈萨克斯坦山弯构造的一部分, 其主体为寒武纪至二叠纪发育的多重洋内俯冲系统, 包括大量增生杂岩、弧岩浆岩及蛇绿岩等洋内岛弧和弧后盆地

组分. 西准噶尔西南部发育巴尔雷克、马依勒、唐巴勒蛇绿混杂岩, 它们由大量的奥陶纪-志留纪枕状熔岩、硅质页岩、硅质岩、生物灰岩、砂岩及泥岩等组成, 呈逆冲叠瓦状或“岩块”-“基质”构造混杂的形态产出(Zhang等, 2018). 西准噶尔西北部发育大量奥陶纪至二叠纪枕状熔岩、生物灰岩、弧火山岩等, 构成了哈萨克斯坦山弯构造的北翼(Chen等, 2017). 西准噶尔东南部, 包括克拉玛依及白碱滩等地区, 发育泥盆纪至晚石炭世的增生杂岩、岛弧及弧后盆地, 构成了多重洋内俯冲体系(Zhang等, 2011a, 2011b). 西准噶尔地区还发育大量不同地球化学属性的花岗质岩石, 包括埃达克岩、紫苏花岗岩及碱性花岗岩, 均形成于~305Ma, 且均具有亏损的同位素组成(Geng等, 2009). 北天山博格达弧主要为泥盆纪至石炭纪发育的洋内弧(Xiao等, 2004a; Xie等, 2016), 由枕状熔岩、岛弧花岗岩及大量闪长质岩墙组成. 枕状熔岩具有高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (7.9~9.4)组成(Chen等, 2013). 博格达弧的形成是古亚洲洋向南俯冲的产物(Xiao等, 2004a).

程杨等(2019)报道中亚造山带东部迪彦庙地区发育一套洋内弧初始俯冲岩石组合, 其中角闪辉长岩(MORB-Like)的锆石U-Pb SHRIMP年龄为(286.1±6.1) Ma, 代表洋内初始俯冲岩浆作用的年代. 辉长岩(HMA)的锆石U-Pb SHRIMP年龄为(283.7±4.7) Ma, 代表在首次岩浆作用后晚于初始俯冲岩浆作用的年代. 岛弧拉斑玄武岩(IAT)锆石U-Pb SHRIMP年龄为(241±5) Ma, 代表逐渐向正常岛弧拉斑玄武岩转变的岩浆作用时代.

古亚洲洋内这些不同性质的岩浆弧还可发生侧向拼贴(弧-弧碰撞)形成复合岛弧, 大洋俯冲带也随着发生跃迁(Xiao等, 2010b).

4.4 增生杂岩

增生杂岩(又称俯冲-增生杂岩、增生楔)是大洋俯冲过程中来自俯冲洋壳的物质(主要为玄武岩、硅质岩、灰岩等)和俯冲带上盘剥蚀的物质在海沟和弧前位置构造堆叠形成的. 增生杂岩包括发育“岩块-基质”结构的混杂单元及浊积岩或复理石等连续沉积单元. 与经典碰撞造山带不同, 中亚造山带最显著的特征是发育大量增生杂岩, 记录了大洋俯冲和陆缘增生过程. Şengör和Natal'in(1996)强调了增生杂岩在构筑中亚造山带的重要作用, 但未对增生杂岩开展详细研究.

王荃等(1991)指出西伯利亚地台南缘与中新生代的亚洲东部陆缘甚为相似, 而华北地台北缘则与北美的科迪勒拉山系大体相似, 发育古陆缘增生构造. Xiao等(2003)详细研究了华北北缘索伦克缝合带温都尔庙增生杂岩、二道井增生杂岩、宝力道弧-增生杂岩的组成、结构及分布特征, 提出了增生楔-增生楔碰撞拼贴的造山模型. Xiao等(2009b)对阿尔泰和东准噶尔地区的增生杂岩进行了详细的物质组成和运动学分析, 建立了该地区古生代多重俯冲-增生造山过程.

Zhang等(2011a)对西准噶尔克拉玛依地区白碱滩晚石炭世增生楔进行了详细的大比例岩性-构造地质填图, 识别了增生楔中复杂的岩性组成, 区分了混杂单元和连续单元, 系统分析了增生楔中的逆冲叠瓦构造、双冲构造、剪切变形及褶皱变形, 指出增生楔总体具有上部指向北西的运动学特征(图5). 结合前人的研究成果, Zhang等(2011a)提出了晚石炭世西准噶尔地区双向俯冲模型.

Song等(2014)对北山中部勒巴泉地区进行1:10000地质填图, 识别出了变质碎屑岩、变质基性岩、变质硅质岩、大理岩等不同岩性以岩片的形式构造叠置在一起, 存在“岩块-基质”构造混杂关系, 经历了多期构造变形, 是形成于古生代的增生杂岩(图2).

在中亚造山带东部迪彦庙地区, 程杨等(2019)报道该区出露大量岩性、规模、形态各异的超镁铁质-镁铁质岩块, 以及灰岩、硅质岩、硅泥质岩和浊积岩等, 为典型的俯冲增生杂岩带.

在中国东北地区存在大量的中生代增生杂岩, 如黑龙江杂岩、饶河杂岩、跃进山杂岩等. 黑龙江杂岩经历了角闪岩相和蓝片岩相的变质作用(Wu等, 2007; Liu等, 2017; Zhou和Li, 2017), 是研究古亚洲洋与古太平洋两大构造域叠加转换过程的重要地质记录. 饶河杂岩和跃进山杂岩构成了那丹哈达(或称完达山造山带)的主体, 记录了古太平洋板块的俯冲历史(Zhou等, 2014).

增生楔研究已经逐步发展到研究俯冲大洋板块地层的解剖(Wakita和Metcalfe, 2005; Kusky等, 2013; Safonova等, 2016; 李廷栋等, 2019; 潘桂棠等, 2019). 在对中亚造山带典型增生楔的详细研究中, 逐渐形成了一套行之有效的工作方法, 即在大比例尺野外岩性-构造地质填图基础上, 进行构造几何学、运动学分析, 结合岩石物质成分分析和年代学分析, 综合厘定增生

图 5 西准噶尔克拉玛依地区白碱滩增生楔组成与结构
据Zhang等(2011a)修改 (a) 白碱滩蛇绿混杂带详细地质图; (b) 剖面图

杂岩的组成、构造变形及时代(肖文交等, 2019).

4.5 区域变质、变形作用

增生造山过程中往往形成区域性的变质和变形作用, 如大型韧性剪切带、逆冲推覆构造、褶皱变形等, 它们是反演古大洋俯冲方式和增生造山时空过程的重要地质记录.

中国阿尔泰地区保存有与造山过程相关的大量变质-变形构造. 系统的宏观和微观构造解析和变形年代学表明阿尔泰在泥盆纪经历了近东西向俯冲-增生过程, 在~380Ma后经历了近南北向的挤压缩短过程(Zhang等, 2015a). 额尔齐斯断层从哈萨克斯坦经过中国阿尔泰延伸至蒙古西南部, 总长约2500km, 对中亚造山带的构造演化起到了关键作用. 详细的野外填图和运动学分析结合年代学研究, 表明额尔齐斯断裂在二叠纪时是一个地壳规模的逆冲断层, 其上盘记录了~450和~280Ma两期岩浆活动, 并经历了峰期变质温压为560~670°C/6.2~7.7kPa的变质作用(Briggs等, 2009). Jiang等(2019)通过变质演化和构造变形分析, 在阿尔泰识别了四期构造变形: 第一期以发育中压型近水平变质组构为特征, 与造山作用早泥盆世大洋俯冲过程中地壳增厚相关; 第二期发育岩浆-混合岩化组构及高温低压变质矿物组合, 与中泥盆世(400~390Ma)地壳伸展-减薄过程有关; 第三期形成一系列近直立高温变质组构及花岗岩-混合岩穹窿, 与主造山期(390~380Ma)挤压背景下的挤出构造相关; 最后, 泥盆纪变质-变形产物整体在二叠纪(290~270Ma)经历了构造-变质的叠加改造(图6).

阿奇克库都克-尾亚断裂是天山造山带内大型韧性走滑剪切带, 经历了两期古生代韧性变形. 第一期为发生于~400Ma的上部向北的剪切变形, 蛇绿混杂岩发生麻粒岩相变质作用; 第二期为发生于晚石炭世至早二叠世的右行走滑剪切变形(Shu等, 2002). 北山二叠纪红岩井盆地发育公里级的大型叠加褶皱, 被解释为增生造山过程的板缘挤压构造(Tian等, 2013), 或陆内走滑断层活动相关的褶皱变形(Zhang和Cunningham, 2012).

4.6 高压-超高压变质作用

高压-超高压变质带是确定古俯冲带位置的重要岩石学标志. 中亚造山带内与古亚洲洋俯冲相关的高

压-超高压变质岩主要分布于哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦天山、中国西南天山、北山南部及兴蒙造山带(图7).

哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦北天山的Aktyuz和Makbal变质地体出露有奥陶纪(超)高压榴辉岩、蓝片岩及相关的(超)高压变质沉积岩; 北山古堡泉地区存在奥陶纪榴辉岩; 早石炭世洋壳(超)高压榴辉岩、蓝片岩出露于吉尔吉斯斯坦南天山的Atbashi及中国西南天山的阿克牙子变质地体(Klemm等, 2015). 兴蒙造山带中目前报道的与古亚洲洋演化相关的高压变质岩包括温都尔庙蓝片岩、头道桥蓝片岩等.

哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦北天山Aktyuz变质地体中榴辉岩、石榴角闪岩及角闪岩以构造透镜体位于变质沉积岩和花岗质片麻岩之中. Rojas-Agramonte等(2013)通过退变榴辉岩的相模拟计算得到了顺时针的 P - T 轨迹, 其峰期变质的压力为~1.6GPa, 温度为~610°C. Klemm等(2014)对榴辉岩进行相模拟计算获得了顺时针进变质 P - T 轨迹, 得到峰期变质压力为~2.1GPa, 温度为~670°C. 根据石榴子石Lu-Hf等时线定年, 榴辉岩相峰期变质时代为(474±2)Ma(Rojas-Agramonte等, 2013). Makbal变质地体包含呈透镜体及构造岩片产出的高压和超高压变质基性岩, 包括退变榴辉岩、石榴角闪岩和榴辉岩相变质的蓝闪岩(Meyer等, 2013). 石榴子石-硬绿泥石-滑石片岩中的石榴子石变斑晶内保存了少量的柯石英包体, 表明岩石曾经历了超高压变质作用(Konopelko等, 2012; Meyer等, 2014). Makbal高压变质基性岩的峰期变质压力约为2.2~2.5GPa, 对应的温度条件约为520~560°C(Klemm等, 2015). 石榴子石-硬绿泥石-滑石片岩表现为顺时针的 P - T 轨迹, 峰期变质压力为~2.85GPa(对应温度为525°C), 峰期变质温度为~580°C(对应压力为2.4GPa)(Klemm等, 2015). 石榴子石Lu-Hf等时线年龄显示峰期变质作用时代为(470±3)Ma(Meyer等, 2014). Aktyuz和Makbal变质杂岩是先存大洋和大陆地壳俯冲到不同深度, 经历不同的 P - T 演化轨迹, 折返后以构造透镜体的形式位于变质沉积岩之中.

吉尔吉斯斯坦南天山Atbashi高压变质地体的主要岩性为以基质产出的含多硅白云母的片岩和片麻岩, 以及以布丁和构造透镜体产出的高压榴辉岩、千枚岩、大理岩、及少量变质基性火山岩. 榴辉岩的稀土微量元素及全岩Nd同位素特征显示其原岩为正常

图6 准噶尔弧与阿尔泰增生楔二叠纪碰撞过程和构造演化示意图

(a) 构造要素赤平投影图; (d) 精细组成和结构示意图. 据Jiang等(2019)修改

洋中脊玄武岩(Hegner等, 2010). 榴辉岩的峰期变质 P - T 条件为2.3~2.5GPa, 温度为510~570℃(Simonov等, 2008). Hegner等(2010)获得榴辉岩峰期变质作用的年代为 (319 ± 4) Ma. 该年龄与榴辉岩中多硅白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 $((316 \pm 3)\text{Ma})$ 在误差范围内一致, 表明榴辉岩经历了快速的折返过程(Hegner等, 2010). 最近, Sang等(2017)获得该高压变质带中榴辉岩和蓝片岩的年龄为晚三叠世.

中国西南天山的阿克牙子变质地体包含蓝片岩、榴辉岩和绿片岩, 它们与基性岩和超基性岩一起构成了一个沿北东-南西走向延伸达200km的增生杂岩带(Gao和Klemd, 2003). 榴辉岩大多以豆荚、布丁或岩块的形式位于蓝片岩相变质岩之中(Gao和Klemd, 2000). 主量和微量元素组成显示榴辉岩和蓝片岩的原岩为洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)(Gao和Klemd, 2003; Ai等, 2006; van der Straaten等, 2008). 区域上, 榴辉岩峰期变质温压条件为480~580℃, 1.4~2.1GPa(Wei等, 2003). 石榴子石变斑晶中柯石英、绿辉石中石英出溶体以及菱镁矿的发现表明榴辉岩经历了超高压变质作用(Zhang等, 2002a, 2002b). 2008年以来, 柯石英陆续在不同岩石类型中被发现(Lü等, 2008, 2009, 2012). Lü和Zhang(2012)计算出超高压变质温压条

件为2.4~2.7GPa, 470~510℃. 蓝片岩的变质温压条件为480~540℃, 2.1GPa(Beinlich等, 2010), 499~519℃, 2.3~2.5GPa(Du等, 2011), 500~590℃, 1.7~2.2GPa(Tian和Wei, 2014). 高压和超高压变质岩石的 P - T 轨迹显示了不同的进变质演化, 但相似的等温降压过程(Klemd等, 2015). 关于(超)高压变质作用的年龄, 大部分研究显示了晚古生代的变质时代, 如Gao和Klemd(2003)获得了榴辉岩Sm-Nd等时线年龄为 (343 ± 44) Ma, 青铝闪石和多硅白云母Ar-Ar年龄分别为~344和331Ma, 榴辉岩Lu-Hf等时线年龄为 (315 ± 3) Ma(Klemd等, 2015), Su等(2010)获得了经历榴辉岩相变质的锆石边部U-Pb年龄为 (319 ± 3) Ma. 也有学者在超高压变质榴辉岩中获得锆石边部U-Pb年龄约为233~226Ma, 代表三叠纪的超高压变质事件(Zhang L等, 2007). 但de Jong等(2009)认为三叠纪的锆石年龄可能是后期流体作用的影响或锆石受后期构造热事件的影响而发生重结晶作用.

北山古堡泉榴辉岩断续分布长约5km, 宽1km, 以构造透镜体的形式被裹挟于片麻岩之中(Liu等, 2002). 榴辉岩的原岩被认为具有与洋中脊玄武岩相似的地球化学特征, 即为俯冲洋壳(Qu等, 2011). 但也有研究认为其原岩为侵入到陆壳的新元古代基性岩脉(Saktura

图7 中亚造山带(超)高压变质岩分布示意图

据Liu等(2012)、Xiao等(2015)和Gao等(2018)修改

等, 2017). 榴辉岩P-T视剖面给出了陡立的顺时针P-T轨迹, 峰期变质温压条件为 $>15.5\text{ kPa}$, $700\sim 800^\circ\text{C}$ (Qu等, 2011). 不同学者给出了比较一致的峰期变质作用时代: $(465\pm 10)\text{ Ma}$ (Liu等, 2012), $(467\pm 16)\text{ Ma}$ (Qu等, 2011), 或 $(466\pm 27)\text{ Ma}$ (Saktura等, 2017).

蓝片岩相变质岩出露于内蒙古温都尔庙增生杂岩. 蓝片岩以出现钠闪石、绿帘石、钠长石、绿泥石、钙质闪石为特征. 蓝片岩相变质温压条件估算为 $3.2\sim 4.2\text{ kPa}/355\sim 415^\circ\text{C}$, $8.2\sim 9.0\text{ kPa}/455\sim 495^\circ\text{C}$, $6.6\sim 8.1\text{ kPa}/420\sim 470^\circ\text{C}$, 表明蓝片岩相变质作用形成于较高的地温梯度(Zhang等, 2015b). de Jong等(2006)获得蓝片岩相变质的石英糜棱岩中多硅白云母Ar/Ar年龄为 (453 ± 2) 和 $(449\pm 2)\text{ Ma}$, 锆石U-Pb定年显示蓝片岩原岩时代为晚古生代至三叠纪(Zhang等, 2015b), 表明温都尔庙增生杂岩记录了不同时代洋壳的俯冲过程.

大兴安岭头道桥蓝片岩位于额尔古纳和兴安地体之间, 是二者之间缝合带的标志. 蓝片岩的原岩主要为碱性玄武岩(OIB), 少量为N-MORB至IAT过渡的拉斑玄武岩(Miao等, 2015). Zhou等(2015)认为其原岩与菲律宾洋内俯冲增生杂岩相似, 并获得了 $0.9\sim 1.1\text{ GPa}/320\sim 450^\circ\text{C}$ 的蓝片岩相峰期变质温压条件. Miao等(2015)获得蓝片岩相变质温压条件为 $\sim 7\text{ kPa}/450\sim 480^\circ\text{C}$, 原岩时代为 $\sim 516\text{ Ma}$, 蓝片岩相变质时代为 $\sim 436\text{ Ma}$.

此外, 近年来的研究在东准噶尔扎河坝-阿尔曼太蛇绿混杂带内也发现了超高压变质成因的二辉橄榄岩, 石榴辉石岩, 石英菱镁岩及退变榴辉岩(Niu等, 2007). 石英菱镁岩中多硅白云母的Ar/Ar年龄为 $(282\pm 3)\text{ Ma}$, 被解释为超高压变质岩的折返年龄(Niu等, 2007).

4.7 洋中脊俯冲作用

赵振华等(2006)提出用洋中脊俯冲导致的板片窗来解释阿尔泰地区埃达克岩、富Nb玄武岩和高Mg安山岩的成因。Windley等(2007)进一步指出中亚造山带内的埃达克岩、阿拉斯加型基性-超基性岩、近海沟侵入岩和高温变质作用的成因可以用洋中脊俯冲过程来解释。在阿尔泰、西准噶尔、东准噶尔、北山、阿拉善、内蒙古等地区已经逐步识别出古生代期间古亚洲洋中脊俯冲相关的地质记录(刘希军等, 2007; 孙敏等, 2009; Geng等, 2009; Jian等, 2010; Windley和Xiao, 2018)。

阿尔泰地区泥盆纪洋中脊俯冲相关的岩浆岩记录包括埃达克岩、玻安质枕状熔岩、高TiO₂和低TiO₂玄武岩(Niu等, 2006), 及大量含石榴子石的壳源花岗岩(Liu等, 2012)。洋中脊俯冲的高峰期发生在早泥盆世(400~390Ma)及晚泥盆世(380~365Ma)(孙敏等, 2009; Cai等, 2010; Shen等, 2011)。阿尔泰岩浆岩在400Ma存在锆石Hf同位素由富集到亏损的变异, 被认为是洋中脊俯冲开始的标志(孙敏等, 2009)。同时, 洋中脊俯冲导致的软流圈上涌形成了早泥盆世(~390Ma)的高温变质作用(Jiang等, 2010)。

西准噶尔地区发育大量洋中脊俯冲相关的埃达克岩, 从奥陶纪至早二叠世均有发育(Geng等, 2009; Zhang等, 2011b; Yin等, 2013; Shen等, 2014)。奥陶纪同时发育岛弧拉斑至钙碱性玄武岩、安山岩及富Nb玄武岩, 形成于洋中脊参与的洋内俯冲过程(Shen等, 2014)。晚石炭世洋中脊俯冲形成的板片窗导致了大量不同性质的岩浆集中爆发现象: 俯冲洋壳的部分熔融形成埃达克质岩石, 新生下地壳的部分熔融形成了紫苏花岗岩及钾长花岗岩, 地幔楔的部分熔融形成了基性岩浆岩(图8; Geng等, 2009; Tang等, 2012; Yin等, 2015)。Ma等(2012)根据晚石炭世埃达克质闪长岩脉的空间关系, 定性地恢复了洋中脊俯冲的几何结构。根据玢斑岩的地球化学特征, Yin等(2015)区分了早二叠世来自洋中脊俯冲不同深度的两类玢斑岩。东准噶尔克拉麦里蛇绿岩存在两类基性火山岩, 第一类兼具MORB和IAB的特征, 第二类为正常的岛弧玄武岩, 具有相对亏损的Nd同位素组成, 该蛇绿岩形成于受洋中脊俯冲影响的岛弧或弧前扩张环境(刘希军等, 2007; Liu等, 2017)。

在北山地区, 高镁闪长岩、埃达克岩、富Nb玄武岩、N-MORB及EMORB型玄武岩、岛弧拉斑玄武岩及高钾钙碱性花岗岩的存在表明晚奥陶世至早泥盆世可能经历了洋中脊俯冲及板片窗形成过程(Mao等, 2012a; Zheng等, 2018)。阿拉善地区晚石炭世-晚二叠世洋中脊俯冲作用形成了橄榄岩、辉石岩及高镁辉长岩(Feng等, 2013)。在内蒙古, 古亚洲洋双向俯冲在南造山带和北造山带均发生了洋中脊俯冲作用, 形成了高温变质作用和近海沟侵入岩。

内蒙古地区南造山带洋中脊俯冲及板片窗效应形成了451~436Ma的高温变质作用及448~438Ma的板片熔融成因的埃达克岩, 而北造山带洋中脊俯冲形成了440~434Ma的低P/T变质作用(Jian等, 2008)。二叠纪满都拉弧前混杂岩中侵入有具有N-MORB地球化学属性的辉绿岩脉, 被认为是洋中脊与海沟相互作用的产物(Jian等, 2010)。

4.8 地幔柱与板块相互作用

作为一个经历长期演化的大洋, 古亚洲洋内存在大量的由地幔柱形成的洋底高原(oceanic plateau)或海山(seamount)。随着大洋的俯冲消减, 它们将从大洋盆地(板内)迁移到海沟附近(板块汇聚边缘), 大部分洋底高原或海山将进入俯冲带, 参与俯冲带物质循环, 另外一些则就位到增生楔, 增生到俯冲带上盘。通过收集保存在增生楔内的玄武岩的野外地质特征和岩石地球化学资料, Safonova和Santosh(2014)在中亚造山带内识别了大量的OIB型玄武岩, 主要分布于蒙古西部、萨彦岭、图瓦-蒙古构造带、俄罗斯阿尔泰、西准噶尔等地区, 从新元古代至晚二叠世均有发育。这些增生楔中的OIB玄武岩被认为是古亚洲洋中的海山, 是地幔柱岩浆作用的产物(Safonova和Santosh, 2014)。

西准噶尔唐巴勒、玛依勒、达拉布特、克拉玛依等蛇绿岩中存在碱性玄武岩, 它们以构造岩块的形式位于远洋灰岩、硅质泥岩、放射虫硅质岩组成的混杂岩之中(Zhang等, 2011a, 2018)。这些碱性玄武岩显示轻稀土富集, 重稀土亏损, 无或具有弱的Eu异常, 没有明显的Nb、Ta、Ti负异常, 是来自地幔过渡带的板内玄武岩, 它们具有典型的OIB玄武岩的特征(Yang等, 2015)。这些玄武岩与周围的远洋灰岩等构成了典型的海山的结构特征, 这些海山就位到增生楔或进入俯冲隧道发生部分熔融形成OIB型火山岩(图9; Yang等,

图 8 西准噶尔古生代洋中脊俯冲作用示意图

据Zhang等(2011a)和Yin等(2015)修改

2015). 北天山炭纪山巴音沟蛇绿岩中存在两种类型的玄武岩, 一类显示MORB的地球化学特征, 另一类具有OIB的地球化学特征. 其中OIB型玄武岩来自石榴二辉橄榄岩低程度(2~3%)部分熔融, 被认为是海山的残余, 它们是准噶尔洋向伊犁-中天山地块俯冲过程中增生到北天山增生楔中的(Yang等, 2018). 海山在弧前的增生对大陆地壳的生长具有重要意义. 随着研究的深入, 相信在中亚造山带中能识别出更多的与古亚洲洋相关的海山/洋底高原.

此外, 在塔里木存在二叠纪大火成岩省, 其玄武岩和辉绿岩岩墙显示与OIB玄武岩相似的地球化学特征. 早二叠世地壳抬升、苦橄岩与大规模岩墙群发育和瓦基里塔格大型钒钛磁铁矿床暗示塔里木大火成岩省与地幔柱活动有关(杨树锋等, 2014). 塔里木地幔柱活动与中亚造山带内二叠纪岩浆活动之间是否存在动力学联系是争议很大的问题(Zhang等, 2010).

4.9 多岛海构造古地理与复式增生造山方式

中亚造山带为全球最大的显生宙增生型造山带已成为学术界的共识, 其增生造山时空格架成为造山带研究的重大基础理论问题. 然而, 在中亚造山带构造古地理格局方面, 存在多岛海-多块体(Zonenshain等, 1990)或单一岛弧-弧后盆地等不同认识(Şengör等,

1993); 在造山作用方式方面, 前人提出了多陆块碰撞模型(Zonenshain等, 1990)、弧后坍塌(Hsü等, 1991)或单一岛弧增生模型(Şengör等, 1993)等多种模型.

随着研究成果的积累, 古地理、古构造和沉积学以及大地构造相分析表明中亚增生造山带具有多岛海复杂古地理(Sun等, 1991; Hsü等, 1991; Xiao等, 2008; 潘桂棠等, 2009, 2016), 同时存在长条状岛链, 在增生造山过程中发生大规模山弯构造(Oroclinal bending)(Şengör等, 1993; van der Voo, 2004; Xiao等, 2015, 2018).

然而, 关于中亚造山带多岛海格局中究竟哪些洋盆代表古亚洲洋的主洋盆尚存在争议. 在解决这个争议中古生物地理区划研究发挥了重要作用. 其中志留纪图瓦贝化石仅广泛分布于西伯利亚克拉通南缘及其周边的蒙古、哈萨克斯坦东部和中国西部地区的事实(Rong等, 1995; Xiao等, 2015), 以及华北在二叠纪时期只含有华夏植物群、与北面的安加拉植物群大致沿南天山-索伦缝合带呈南北对峙格局(Guo, 2000), 均表明其与西伯利亚-哈萨克斯坦增生地体相距很远的距离. 因此, 古生物地理区划研究可以确定古亚洲洋的主洋盆很可能位于南天山-索伦缝合带, 并且该主洋盆俯冲过程结束时限不早于二叠纪(Xiao等, 2008, 2015).

图9 西准噶尔晚古生代海山俯冲-增生过程示意图

据Yang等(2015)修改

通过中亚造山带内蛇绿岩的Pb同位素研究, Liu等(2015)认为古亚洲洋地幔域与特提斯地幔域相比存在长期的低Th/U储集库, 并且两个构造域不同的岩浆-构造过程最终导致了Pb同位素组成的差异. 这些大洋岩石圈地幔同位素研究成果支持了南天山-索伦缝合带作为古亚洲洋的主洋盆的认识.

根据伊犁-中天山为活动大陆边缘、发育南天山增生杂岩等事实, 南天山洋被主体认为向北俯冲(Chen等, 1999; Xiao等, 2008, 2015). 当然, 目前学术界也还存在南天山洋向南俯冲的模型(Charvet等, 2011).

通过对华北北缘内蒙造山带增生楔、蛇绿岩、弧地质体的研究, Xiao等(2003)提出中亚造山带东部为古亚洲洋双向俯冲及增生楔-增生楔平行拼贴形成的. Xiao等(2004b, 2010b)通过对阿尔泰、东准噶尔和东天山的增生楔、岩浆弧、蛇绿岩等构造单元时空关系详细研究, 提出了中亚造山带西部以多洋盆、多俯冲带、多方向增生的复式增生造山长期演化为特征, 类似于中生代环太平洋造山带(Windley等, 2007). 该模型不同于前人提出的多陆块碰撞模型(Zonenshain等, 1990)或单一岛弧增生模型(Şengör等, 1993), 成为中亚增生造山方式的三种代表性模型之一(Schulmann和Paterson, 2011).

依据古生物地理分布特征、古地磁学资料(Rong和Zhang, 1982; Torsvik和Cocks, 2004; Cocks和Torsvik, 2007; Huang等, 2008), Xiao等(2015)提出整个中亚造山带由西部哈萨克斯坦拼贴体、北部图瓦-蒙古拼贴体及南部塔里木-华北拼贴体在中-晚三叠世最终拼合而成. 南天山缝合带、柳园缝合带和索伦缝合带被认

为是中亚造山带南缘最终缝合带(Xiao等, 2003, 2010b, 2013). 中亚造山带晚古生代至早三叠世以多重俯冲板片后撤及山弯构造(哈萨克斯坦和图瓦-蒙古山弯构造)形成为特征(图10; Xiao等, 2018).

当然, 对于中亚造山带的最终拼贴时限, 学术界尚存在晚泥盆世(Xu B等, 2013)、晚泥盆至早石炭世(Charvet等, 2007)、晚石炭世(高俊等, 2006; Gao等, 2009; Han等, 2011)、二叠纪(Li, 2006)、二叠纪末至中三叠世(Xiao等, 2009a, 2018)等大量争议. 提倡泥盆或石炭纪最终拼贴时限的学者主要基于泥盆纪区域性角度不整合(Xu B等, 2013), A型花岗岩的时代(Shi等, 2010), 蛇绿岩中最老“钉合岩体”的时代(韩宝福等, 2010; Han等, 2010), 高压变质岩的变质时代(高俊等, 2006; Gao等, 2011)等. 而提倡二叠纪至中三叠世最终拼贴时限的学者主要依据是增生楔中最年轻的放射虫硅质岩时代、卷入增生造山的最年轻角度不整合时代、最年轻的弧相关盆地(Eizenhöfer等, 2014; Song等, 2018)及弧相关盆地最年轻的区域构造变形的时代(Tian等, 2015; Xiao等, 2009a, 2015). 近年来, 中亚造山带二叠纪蛇绿岩的确认(Song S等, 2015)及原岩时代为三叠纪的蓝片岩的发现(初航等, 2013; Zhang等, 2015b), 二叠-三叠纪花岗质岩石年代学与地球化学成果(Pei等, 2018), 以及晚古生代沉积岩和火山岩研究成果(Li等, 2015; Eizenhöfer等, 2014)和放射虫硅质岩研究(谢力等, 2014)等, 均为中亚造山带三叠纪的最终拼合时限提供了重要证据. 显然, 增生造山时限问题是增生造山带研究的难点, 需要后续更加深入的研究.

图 10 中亚造山带石炭纪至三叠纪构造演化过程示意图
据Xiao等(2018)修改

4.10 大陆增生机制

中亚造山带内存在大量的古生代至中生代花岗岩, 成为研究中亚大陆增生的重要物质记录. 胡霭琴等(1995, 1999)根据天山花岗质岩石的Nd同位素研究, 指出天山造山带古生代存在广泛大陆地壳增生.

1996年10月, 法国Rennes大学的江博明教授和俄罗斯科学院西伯利亚分校的Dobretsov教授联名向UNESCO(联合国教科文组织)提交了“显生宙大陆增生: 东-中亚地区的证据”立项建议书, 被正式接受为IGCP420项目(姚玉鹏, 1997).

Jahn等(2000c)通过中亚造山带花岗岩的Sr-Nd同位素研究, 揭示其相对亏损的同位素组成, 显示出非常“新生”(juvenile)的特征. Jahn等(2000a, 2000c)因而认为中亚造山带是显生宙最重要的大陆地壳增生区. 系统的同位素地球化学资料表明准噶尔盆地比阿尔泰和天山具有更年轻的地壳物质组成(Hu等, 2000).

岩浆弧作为大洋俯冲过程的直接产物, 对大陆地壳生长具有重要意义. 中亚造山带存在大量岛弧岩浆岩, 同时也存在微陆块. 通过岩浆岩的Sr-Nd同位素及锆石Hf同位素研究, 可以揭示中亚造山带内不同属性的岩浆弧对中亚大陆地壳增生的贡献. 其中安第斯型岩浆弧, 如白乃庙弧和北伊犁弧, 其岩浆岩具有富集

的同位素组成, 主体表现为古老地壳物质的再循环及少量地幔物质的贡献(Zhang等, 2009a; Zhu等, 2009); 日本型岩浆弧通常经历了大陆边缘弧到洋内岛弧的转变, 弧岩浆作用形成新生地壳, 但也有少量古老地壳物质的贡献, 如阿尔泰弧(Sun等, 2008; Wang等, 2009); 西准噶尔洋内俯冲体系则以地幔来源的新生地壳为主, 对大陆增生具有显著的贡献(Tang等, 2012). 通过对西天山花岗岩类Sr-Nd同位素的研究, Long等(2011)提出两阶段大陆增生模式, 即大洋俯冲过程中岛弧岩浆岩的侧向增生及碰撞后地幔物质底垫的垂向增生. 吴福元等(2007)和马永非等(2018)基于东北地区花岗岩的锆石Hf同位素的研究, 认为水平增生和垂向增生是实现中亚造山带地壳增生的主要机制.

除了正常岛弧岩浆作用能造成大陆增生外, 洋中脊俯冲是实现大陆增生的另一重要途径. 洋中脊俯冲形成板片窗, 俯冲大洋板片边缘发生部分熔融形成埃达克岩, 同时软流圈减压熔融形成MORB型基性岩浆, 它们最终将形成新的大陆地壳, 实现大陆增生, 如中国阿尔泰、西准噶尔地区洋中脊俯冲形成大量具有正Nd-Hf同位素组成的岩浆岩(孙敏等, 2009; Tang等, 2010). 海山或洋底高原在大陆边缘的增生也是实现大陆增长的重要途径(Yang等, 2015). 在中亚增生过程中, 大规模岛弧弯曲、山弯构造与圈闭洋盆等可能都是大

陆增生的重要机制(Xiao等, 2015, 2018; 肖文交等, 2019).

4.11 增生成矿作用

中亚成矿域是全球三大成矿域之一, 产出有多种类型的重要矿产资源, 包括斑岩型矿床、块状硫化物(VMS)型矿床、岩浆铜镍硫化物矿床、造山型金矿等.

中亚造山带内存在许多大型或超大型斑岩型铜-(钼)-(金)矿床, 包括科翁腊德(Kounrad)、Kal'makyr、欧玉陶勒盖(Oyu Tolgoi)和岔路口矿床. 根据地质、成矿、年代学及构造环境特征, Gao等(2018)把中亚成矿域斑岩成矿系统划分为三个成矿省: (1) 哈萨克斯坦铜-金-钼成矿省; (2) 蒙古铜-金成矿省; (3) 中国东北钼-铜成矿省(图11; 高俊等, 2019). 哈萨克斯坦成矿省具有新太古代-古元古代陆壳基底, 广泛发育与Rodinia超大陆聚合-裂解相关的岩浆活动记录(Gao等, 2015). 以石炭纪-早二叠世(339~278Ma)集中爆发成矿为特色, 早古生代(489~440Ma)只发现有四个大型斑岩型矿床, 三叠纪(228~225Ma)斑岩钼矿仅在东天山-北山地区产出. 矿床形成的大地构造背景绝大多数为古亚洲洋俯冲相关的岩浆弧(申萍等, 2016). 成矿斑岩的岩石类型有石英闪长岩、闪长岩、花岗闪长岩、二长岩、斜长花岗岩、二长花岗岩及花岗岩. 蒙古成矿省仅在局部地段出露新太古代-古元古代及中-新元古代基底岩石. 斑岩成矿集中在泥盆纪(~370Ma)和三叠纪(~240Ma), 被认为分别与古亚洲洋和蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲过程有关(Seltnann等, 2014). 成矿斑岩的岩石类型主要有石英闪长岩、石英二长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩及粗面英安斑岩. 中国东北成矿省新太古代-古元古代变质岩零星出露, 但中-新元古代及泛非事件的岩浆记录较为广泛. 古亚洲洋俯冲过程形成了早古生代斑岩型矿床(482~440Ma), 三叠纪受蒙古-鄂霍茨克洋俯冲影响形成了少数中小型斑岩型矿床(248~204Ma), 中生代时期(240~106Ma), 受古太平洋板块俯冲的影响, 斑岩钼成矿集中爆发(Zeng等, 2015). 成矿斑岩类型较为单一, 主要有二长花岗岩、花岗闪长岩和花岗岩.

块状硫化物矿床在中国阿尔泰-东准噶尔和东天山成矿带有大量分布. 阿舍勒铜-锌矿床是中国阿尔泰地区最大的VMS型矿床. 矿床发育于岛弧玄武岩、英安岩和流纹岩的接触带, 其成矿源区存在海洋沉积物

的循环. 矿床地球化学和同位素研究表明阿舍勒VMS矿床形成于岛弧的裂解环境(Wan等, 2010). 东天山VMS型矿床包括小热泉子、红海、宏远、雅满苏等矿床. 红海VMS矿床位于卡拉塔格矿集区东南部, 矿体产于大柳沟组海相中酸性火山-沉积岩地层中.

位于东准噶尔最北部的喀拉通克铜镍矿床、东天山黄山-镜儿泉铜镍矿成矿带(包括黄山、黄山东、香山、图拉尔根、红岭铜镍矿床)是中亚造山带内重要的岩浆铜镍硫化物矿床. 喀拉通克铜镍矿形成于晚石炭世至早二叠世, 侵入于南明水组板岩和凝灰岩之中. 黄山-镜儿泉铜镍矿成矿带是新疆目前最大的成矿带, 沿康古尔塔格断裂延伸超过200km, 其中黄山东矿床是该成矿带上最大和最具代表性的矿床. 基性-超基性岩体及相关的岩脉呈透镜体状沿着东西向断续排列. 围岩为石炭纪浊积岩夹少量灰岩、玄武岩、安山岩、细碧岩、凝灰岩及砂砾岩等.

此外, 在白石泉地区和坡北地区也存在与基性-超基性岩相关的铜镍硫化物矿床(Mao等, 2008). 地球化学研究表明阿尔泰-东天山含矿基性岩浆类似于俯冲环境形成的阿拉斯加型岩体(Ao等, 2010; Han等, 2007); 但也有研究认为其可能源于交代地幔楔部分熔融, 构造背景为俯冲后(Mao等, 2015)或碰撞后环境(Song和Li, 2009).

中亚造山带内的造山型金矿床主要沿着大型韧性剪切带分布(Chen等, 2012; Zhang等, 2012), 如阿尔泰-东准噶尔之间的额尔齐斯剪切带分布有托库孜巴依、顿巴斯套等金矿; 北天山康古尔-黄山剪切带分布有康古尔金矿、红山金矿和金山金矿.

4.12 构造叠加与改造

从中生代开始, 中亚造山带受到周围构造域强烈的叠加改造影响(Yin和Nie, 1996; Wilde等, 2003; Zuza和Yin, 2017; Şengör等, 2018). 特提斯构造域一系列陆块向北漂移并拼贴到欧亚大陆南缘(Roger等, 2003; Ding等, 2005; Xu等, 2013), 其挤压应力通过塔里木克拉通传递到天山及以北的区域, 形成了众多高耸的山脉及相关的山间盆地(Yin等, 1998; 贾承造和魏国齐, 2002; Wang等, 2014). Yin(2010)认为印度-亚洲碰撞和阿拉伯-亚洲汇聚过程的相互作用控制了亚洲新生代变形, 形成了横跨扎格罗斯、天山、阿尔泰及蒙古的走滑断裂系统.

力来源是什么? 古亚洲洋的早期演化过程与其他大洋之间的联系是什么? 古亚洲洋从形成到发生初始俯冲经历了多长的演化时间? 如何发生初始俯冲?

5.2 古亚洲洋外部造山带的增生机制

关于超大陆形成与旋回的研究表明, 地球历史主体存在两种造山作用, 即内部造山作用(Introversion)与外部造山作用(Extroversion)。与特提斯型内部造山作用(Introversion)不同, 古亚洲洋经历了长时间的俯冲过程, 众多研究表明其是与环太平洋类似的外部大洋(Extroversion), 但是却可能存在两种机制的共同作用。如何理解古亚洲洋外部造山带的复杂增生机制?

5.3 古亚洲洋地幔属性及其时空分布格局

中亚造山带内存在大量的蛇绿混杂岩, 有些代表了残余的洋壳, 有些代表了岛弧的根带。蛇绿混杂岩具有不同的地球化学属性, 尤其是同位素组成存在差异, 指示了不同的大洋环境。那么这些蛇绿岩反映了怎么样的地幔深部信息? 古亚洲洋的地幔属性有哪些, 其时空分布格局怎样?

5.4 古亚洲洋与特提斯洋相互作用

古亚洲洋的俯冲闭合形成了北半球的劳亚大陆, 而特提斯的演化与冈瓦纳大陆的聚合和裂解作用密切相关。劳亚大陆和冈瓦纳大陆的汇聚形成了盘古超大陆。那么, 古亚洲洋与特提斯之间有着怎样的联系?

5.5 显生宙大陆增生机制及其全球对比

大陆地壳增生机制是地球科学的基本问题之一。众多学者认为地球陆壳的增生在前寒武纪就基本完成, 显生宙主要通过俯冲带发生壳幔物质的交换和循环。现今环太平洋俯冲带既存在地壳增生, 同时大量俯冲带上盘的地壳通过俯冲侵蚀过程进入地幔深部, 其总体效应是维持着地球大陆地壳的平衡。然而, 中亚造山带被认为在显生宙发生了显著的地壳增生, 对全球的陆壳增长具有重要意义。那么, 中亚大陆增生是如何实现的, 其具体的机制是什么? 全球同时代有没有类似的大陆增生事件?

此外, 中亚造山带内还有一些隐伏的地体, 如准噶尔盆地、塔城盆地, 松辽盆地由于缺乏直接的地质证据和可靠的同位素年龄资料, 其基底性质到底是前寒

武纪微陆块、显生宙造山带、抑或残余洋盆?

5.6 中亚成矿域增生生成矿机制

中亚成矿域与环太平洋成矿域和特提斯成矿域并称全球三大成矿域。与环太平洋的俯冲成矿和特提斯碰撞成矿不同, 中亚成矿域经历了长时间的增生造山过程, 发生了大洋俯冲、陆缘增生及陆内改造等复杂构造演化。其增生生成矿机制是什么? 与环太平洋和特提斯成矿域相比, 有没有特殊的成矿过程?

5.7 大陆改造机制

古亚洲洋闭合后, 中亚造山带受到了周围板块运动的强烈改造。那么大陆改造的机制是什么? 先存构造与后期构造之间怎么相互作用? 关于改造机制, 以往研究多归因于南部特提斯造山作用的远程效应。然而, 北边蒙古-鄂霍茨克洋的向南俯冲作用如何影响中亚造山带?

致谢 中亚造山带构造演化过程十分复杂, 本文仅为阶段性初步总结。限于水平, 难以对中亚造山过程与成矿作用的所有研究进展进行详细介绍。文中参考了大量国内外科研团队的研究成果, 但限于篇幅, 难免漏引。已故孙枢先生曾对中亚增生过程研究给予了精心指导。肖序常、李廷栋、张国伟、许志琴、金振民、王成善、郑永飞、吴福元、葛肖虹、许文良、许继峰、刘永江、张进江、周建波、刘伟、A. M. C. Şengör、K. Schulmann、T. Kusky、R. Seltmann等专家对作者开展增生大地构造等研究给予了悉心指导。成文过程得到了朱茂炎的鼎力支持。主编和二位评审人对文章给予了详细修改与指导意见。一并谨致谢忱。

参考文献

- 陈国达, 陈家超, 魏柏林, 薛佳谋, 刘以宣, 文善继, 魏洲龄, 胡火炎. 1975. 中国大地构造简述. 地质科学, 10: 205-219
- 程杨, 肖庆辉, 李廷栋, 郭灵俊, 李岩, 范玉须, 罗鹏跃, 庞进力. 2019. 中亚造山带东缘迪彦庙俯冲增生杂岩带早二叠世洋内弧岩浆作用及构造背景. 地球科学, doi: 10.3799/dqkx.2019.085
- 崔日武. 1988. 新疆克拉麦里蛇绿岩的岩石化学特征及其生成环境探讨. 新疆地质, 6: 70-82
- 初航, 张晋瑞, 魏春景, 王惠初, 任云伟. 2013. 内蒙古温都尔庙群变质基性火山岩构造环境及年代新解. 科学通报, 58: 2958-2965
- 冯志强, 刘永江, 金巍, 蒋立伟, 李伟民, 温泉波, 李小玉, 张铁安, 杜

- 兵盈, 马永非, 张丽. 2019. 东北大兴安岭北段蛇绿岩的时空分布及与区域构造演化关系的研究. 地学前缘, 26: 120–136
- 高俊. 1993. 西南天山板块构造及造山运动动力学. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院
- 高俊. 1997. 西南天山榴辉石的发现及其大地构造意义. 科学通报, 42: 737–740
- 高俊, 何国琦, 李茂松. 1997. 西天山造山带的古生代造山过程. 地球科学, (1): 27–32
- 高俊, 何国琦, 李茂松, 王学潮, 陆书宁. 1996. 新疆南天山大地构造研究新进展. 地质通报, (1): 58–63
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 黄德志, 苏文. 2006. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? 岩石学报, 22: 1049–1061
- 高俊, 肖序常. 1994. 新疆西南天山蓝片岩的变质作用 pT 轨迹及构造演化. 地质论评, 40: 544–553
- 高俊, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 王军, 吴汉泉. 1993. 南天山库米什蓝片岩的发现及其大地构造意义. 地质通报, 40: 344–347
- 高俊, 朱明田, 王信水, 洪涛, 李光明, 李继磊, 肖文交, 秦克章, 曾庆栋, 申萍, 徐兴旺, 张招崇, 周建波, 赖勇, 张晓晖, 孙景贵, 万博, 王博. 2019. 中亚成矿域斑岩大规模成矿特征: 大地构造背景、流体作用与成矿深部动力学机制. 地质学报, 93: 24–71
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “缝合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限. 岩石学报, 26: 2233–2246
- 何国琦, 刘建波, 张越迁, 徐新. 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定. 岩石学报, 23: 1573–1576
- 何志超. 1956. 天山地槽和祁连地槽的界线问题. 中国地质, (10): 21–23
- 胡霭琴, 张国新, 李启新, 张前锋, 胡树荣, 范嗣昆, 郭陀珠. 1995. 新疆北部主要地质事件同位素年表. 地球化学, (1): 20–31
- 胡霭琴, 张国新, 张前锋, 陈义兵. 1999. 天山造山带基底时代和地壳增生的Nd同位素制约. 中国科学D辑: 地球科学, 29: 104–112
- 胡冰, 王景斌, 高振家, 陆青, 方孝悌. 1964. 新疆大地构造的几个问题. 地质学报, (2): 28–42
- 黄汲清. 1959. 中国地质构造基本特征的初步探讨. 地质月刊, (7): 24–34
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 张之孟, 张正坤. 1974. 对中国大地构造若干特点的新认识. 地质学报, 48: 38–54
- 贾承造, 魏国齐. 2002. 塔里木盆地构造特征与含油气性. 科学通报, 47: 1–8
- 李春昱. 1980. 中国板块构造的轮廓. 中国地质科学院院报, 2: 11–19
- 李春昱, 汤耀庆. 1983. 亚洲古板块划分以及有关问题. 地质学报, (1): 3–12
- 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 汤耀庆. 1984. 亚洲大地构造的演化. 中国地质科学院院报, (3): 9–17
- 李会军, 何国琦, 吴泰然, 吴波. 2006. 阿尔泰-蒙古微大陆的确定及其意义. 岩石学报, 22: 803–809
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. 地质论评, 44: 339–347
- 李锦轶, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 冯益民, 朱宝清. 1992. 新疆北部金属矿产与板块构造. 新疆地质, (2): 138–146
- 李双林, 欧阳自远. 1998. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化. 海洋地质与第四纪地质, 18: 45–54
- 李四光. 1962. 地质力学概论. 北京: 科学出版社
- 李廷栋, 肖庆辉, 潘桂棠, 陆松年, 丁孝忠, 刘勇. 2019. 关于发展样板块地质学的思考. 地球科学, 44: 1441–1451
- 李忠, 彭守涛. 2013. 天山南北麓中-新生界碎屑锆石U-Pb年代学记录、物源体系分析与陆内盆山演化. 岩石学报, 29: 739–755
- 刘希军, 许继峰, 侯青叶, 白正华, 雷敏. 2007. 新疆东准噶尔克拉麦里蛇绿岩地球化学: 洋脊俯冲的产物. 岩石学报, 23: 1591–1602
- 刘雪亚. 1984. 甘肃北山区的钙碱系列岩浆活动及其与板块构造的关系. 地球学报, (3): 157–171
- 刘雪亚, 王荃. 1995. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化. 见: 中国地质科学院地质研究所文集(28)
- 马永非, 刘永江, 秦涛, 孙巍, 藏延庆. 2018. 大兴安岭中段扎赉特旗地区石炭纪花岗岩的岩石程英、构造背景及对增生造山作用的指示. 岩石学报, 34: 2931–2955
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 闫臻, 李继亮, 雍拥, 张继恩. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石U-Pb同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约. 岩石学报, 22: 153–162
- 牛树银, 胡晓, 孙爱群. 1993. 华北地台北侧的古板块构造演化. 地质科技情报, (1): 17–21
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 等. 2019. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义. 地球科学, 44: 1544–1561
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质, 36: 1–28
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 郝国杰. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化. 地学前缘, 23(6), 1–23
- 申萍, 潘鸿迪, Eleonora S. 2016. 中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所
- 施光海, 刘敦一, 张福勤, 简平, 苗来成, 石玉若, 陶华. 2003. 中国内蒙古锡林郭勒杂岩SHRIMP锆石U-Pb年代学及意义. 科学通报, 48: 2187–2192
- 孙敏, 龙晓平, 蔡克大, 蒋映德, 王步云, 袁超, 赵国春, 肖文交, 吴福元. 2009. 阿尔泰早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石Hf同位素组成突变的启示. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 935–948
- 孙新春, 张红军, 魏志军, 黄增保, 高柏年. 2005. 甘蒙北山地区小红山一带变质侵入岩体的时代厘定及其地质意义. 西北地质, 38: 61–67
- 唐克东, 王莹, 何国琦, 邵济安. 1995. 中国东北及邻区大陆边缘构造. 地质学报, 69: 16–30
- 田昌烈, 杨芳林. 1983. 东北地区蛇绿岩岩石学特征. 沈阳地质矿产

- 研究所文集, 6: 34–56
- 汤耀庆. 1989. IGCP第283项(古亚洲构造演化)简介. 中国地质, (11): 32
- 汤耀庆. 1990. 国际地质对比计划(IGCP)283项目及1989年度工作简介. 地球科学进展, (1): 89–90
- 陶钧政, 吕正, 朱诚顺. 1982. 新疆板块构造基本轮廓. 新疆大学学报(自然科学版), (1): 3–20
- 涂光炽. 1999. 初议中亚成矿域. 地质科学, 34: 397–404
- 王作勋, 郭继易, 吕喜朝, 刘成德, 张经国. 1989. 中国天山板块构造. 河北地质大学学报, (1): 54–58
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国内蒙古中部的古板块构造. 地球学报——中国地质科学院院报, (1): 1–12
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23: 1217–1238
- 吴华, 李华芹, 莫新华, 陈富文, 路远发, 梅玉萍, 邓岗. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义. 地质学报, 79: 498–502
- 肖文交, 李继亮, 宋东方, 韩春明, 万博, 张继恩, 敖松坚, 张志勇. 2019. 增生型造山带结构解析与时空制约. 地球科学, 44: 1661–1687
- 萧序常, 刘湧泉. 1962. 内蒙地质的几点新认识. 地质学报, (4): 29–96
- 肖序常, 汤耀庆, 王军, 高俊, 赵民. 1994. 中国南天山造山带蓝片岩及其构造意义. 地球学报, (22): 54–64
- 兴蒙-北疆研究组. 1991. 中国兴蒙-北疆及邻区古生代岩石圈的研究取得重要进展. 地球科学进展, (4): 89–90
- 谢力, 尹海权, 周洪瑞, 张维杰. 2014. 内蒙古阿拉善地区恩格尔乌苏缝合带二叠纪放射虫及其地质意义. 地质通报, (5): 691–697
- 徐备, 王志伟, 张立杨, 王智慧, 杨振宁, 贺跃. 2018. 兴蒙陆内造山带. 岩石学报, 34: 2819–284
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 栾金鹏, 王枫. 2019. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程. 地球科学, 44: 1620–1646
- 徐国相. 1963. 对内蒙超基性岩石分类和鉴定的初步意见. 中国地质, (5): 17–21
- 徐新. 1979. 新编新疆地区1:100万地质图(初稿)已胜利完成. 西北地质, (3): 72
- 薛怀民, 郭利军, 侯增谦, 周喜文, 童英, 潘晓菲. 2009. 中亚-蒙古造山带东段的锡林郭勒杂岩: 早华力西期造山作用的产物而非古老陆块?——锆石SHRIMP U-Pb年代学证据. 岩石学报, 25: 640–650
- 杨经绥, 徐向珍, 李天福, 陈松永, 任玉峰, 李金阳, 刘钊. 2011. 新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石U-Pb同位素定年: 早古生代洋盆的证据. 岩石学报, 27: 77–95
- 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 励因骐, 余星, 李东旭, 孟立峰. 2014. 塔里木早二叠世大火成岩省. 中国科学:地球科学, 44: 187–199
- 姚玉鹏. 1997. 国际地质对比计划IGCP420项目“显生宙大陆增生: 东-中亚地区的证据”简介. 科学通报, 42: 1119–1120
- 袁复礼. 1956. 新疆天山北部山前拗陷带及准噶尔盆地陆台地质初步报告. 地质学报, (2): 23–144
- 张伯声, 吴文奎. 1975. 新疆地壳的波状嵌嵌构造. 西北大学学报(自然科学版), (3): 80–91
- 张臣, 吴泰然. 2001. 内蒙古苏左旗南部华北板块北缘中新元古代-古生代裂解-汇聚事件的地质记录. 岩石学报, 17: 199–205
- 张弛. 1981. 新疆蛇绿岩某些地质特征. 地质论评, 27: 307–314
- 张弛, 乌统旦, 鲁友直, 王广瑞. 1975. 新疆含铬超基性岩成矿因素初步探讨. 地质学报, (2): 152–161
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 2001. 造山带与造山作用及其研究的新起点. 西北地质, 34: 1–9
- 张丽, 刘永江, 李伟明, 韩国卿, 张金带, 郭庆银, 李长华. 2013. 关于额尔古纳地块基底性质和东界的讨论. 地质科学, 48: 227–244
- 张梅生, 彭向东, 孙晓猛. 1998. 中国东北区古生代构造古地理格局. 国土资源, 2: 91–96
- 张文佑, 曹义纯, 姜春潮, 宁奇生, 孙枢, 王秀璋, 李廷栋, 高凤煜. 1959. 从中国大地构造单位的划分和命名原则谈东北北部地区大地构造单位的特征. 地质科学, 2: 99–103
- 张扬, 何国琦. 1988. 甘肃北山早古生代蛇绿岩带的特征及演化. 上海地质, 27: 10–23
- 张元元, 郭召杰. 2008. 甘新交界红柳河蛇绿岩形成和侵位年龄的准确限定及大地构造意义. 岩石学报, 24: 803–809
- 赵振华, 王强, 熊小林, 张海祥, 牛贺才, 许继峰, 白正华, 乔玉楼. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. 岩石学报, 22: 1249–1265
- 赵芝, 迟效国, 刘建峰, 王铁夫, 胡兆初. 2010. 内蒙古牙克石地区晚古生代弧岩浆岩: 年代学及地球化学证据. 岩石学报, 26: 3245–3258
- 中国科学院地质研究所大地构造编图组. 1974. 中国大地构造基本特征及其发展的初步探讨. 地质科学, 9: 1–17
- 朱宝清, 王来生, 王连晓. 1987. 西准噶尔西南地区古生代蛇绿岩, 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊. 3–64
- 左国朝, 何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律. 北京: 北京大学出版社. 226
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 张杨. 1990. 北山地区早古生代板块构造特征. 地质科学, 25: 305–314
- Ai Y, Zhang L, Li X, Qu J. 2006. Geochemical characteristics and tectonic implications of HP-UHP eclogites and blueschists in Southwestern Tianshan, China. *Prog Nat Sci*, 16: 624–632
- Ao S J, Xiao W J, Han C M, Li X H, Qu J F, Zhang J E, Guo Q Q, Tian Z H. 2012. Cambrian to early Silurian ophiolite and accretionary processes in the Beishan collage, NW China: Implications for the architecture of the Southern Altids. *Geol Mag*, 149: 606–625
- Ao S J, Xiao W J, Han C M, Mao Q G, Zhang J E. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: Implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altids. *Gondwana Res*, 18: 466–478

- Banerjee S, Matin A. 2013. Evolution of microstructures in Precambrian shear zones: An example from eastern India. *J Struct Geol*, 50: 199–208
- Beinlich A, Klemd R, John T, Gao J. 2010. Trace-element mobilization during Ca-metasomatism along a major fluid conduit: Eclogitization of blueschist as a consequence of fluid-rock interaction. *Geochim Cosmochim Acta*, 74: 1892–1922
- Briggs S M, Yin A, Manning C E, Chen Z L, Wang X F. 2009. Tectonic development of the southern Chinese Altai Range as determined by structural geology, thermobarometry, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology, and Th/Pb ion-microprobe monazite geochronology. *Geol Soc Am Bull*, 121: 1381–1393
- Cai K, Sun M, Yuan C, Zhao G, Xiao W, Long X, Wu F. 2010. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the northwest Chinese Altai: Implications for petrogenesis and tectonic evolution. *Gondwana Res*, 18: 638–652
- Cawood P A, Buchan C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. *Earth-Sci Rev*, 82: 217–256
- Charvet J, Shu L, Laurent-Charvet S. 2007. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): Welding of the Tarim and Junggar plates. *Episodes*, 30: 162–186
- Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S, Wang B, Faure M, Cluzel D, Chen Y, De Jong K. 2011. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China. *Sci China Earth Sci*, 54: 166–184
- Chen H Y, Chen Y J, Baker M. 2012. Isotopic geochemistry of the Sawayaerdun orogenic-type gold deposit, Tianshan, northwest China: Implications for ore genesis and mineral exploration. *Chem Geol*, 310–311: 1–11
- Chen C M, Lu H F, Jia D, Cai D S, Wu S M. 1999. Closing history of the southern Tianshan oceanic basin, western China: An oblique collisional orogeny. *Tectonophysics*, 302: 23–40
- Chen X, Shu L, Santosh M, Zhao X. 2013. Island arc-type bimodal magmatism in the eastern Tianshan Belt, Northwest China: Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and implications for the Paleozoic crustal evolution in Central Asia. *Lithos*, 168–169: 48–66
- Chen Y, Xiao W, Windley B F, Zhang J, Zhou K, Sang M. 2017. Structures and detrital zircon ages of the Devonian-Permian Tarbagatay accretionary complex in west Junggar, China: Imbricated ocean plate stratigraphy and implications for amalgamation of the CAO. *Int Geol Rev*, 59: 1097–1115
- Chu H, Zhang J R, Wei C J, Wang H C, Ren Y W. 2013. A new interpretation of the tectonic setting and age of meta-basic volcanics in the Ondor Sum Group, Inner Mongolia. *Chin Sci Bull*, 58: 3580–3587
- Cocks L R M, Torsvik T H. 2007. Siberia, the wandering northern terrane, and its changing geography through the Palaeozoic. *Earth-Sci Rev*, 82: 29–74
- Cui F H, Zheng C Q, Xu X C, Yao W G, Ding X, Shi L, Li J. 2015. Detrital zircon ages of the Jiageda and Woduhe formations: Constrains on the tectonic attribute of the Xing'an terrane in the central Great Xing'an Range, NE China. *J Asian Earth Sci*, 113: 427–442
- de Jong K, Wang B, Faure M, Shu L, Cluzel D, Charvet J, Ruffet G, Chen Y. 2009. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the Late Palaeozoic tectonic evolution of the western Tianshan (Xinjiang, northwestern China), with emphasis on Permian fluid ingress. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1239–1258
- de Jong K, Xiao W, Windley B F, Masago H, Lo C. 2006. Ordovician $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phengite ages from the blueschist-facies Ondor Sum subduction-accretion complex (Inner Mongolia) and implications for the early Paleozoic history of continental blocks in China and adjacent areas. *Am J Sci*, 306: 799–845
- Ding L, Kapp P, Wan X Q. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. *Tectonics*, 24: TC3001
- Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. 1995. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean. *Int Geol Rev*, 37: 335–360
- Dong Y, Zhang G, Neubauer F, Liu X, Hauenberger C, Zhou D, Li W. 2011. Syn- and post-collisional granitoids in the Central Tianshan orogen: Geochemistry, geochronology and implications for tectonic evolution. *Gondwana Res*, 20: 568–581
- Du J, Zhang L, Lü Z, Chu X. 2011. Lawsonite-bearing chloritoid-glaucophane schist from SW Tianshan, China: Phase equilibria and *P-T* path. *J Asian Earth Sci*, 42: 684–693
- Ducea M N, Saleeby J B, Bergantz G. 2015. The architecture, chemistry, and evolution of continental magmatic arcs. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 299–331
- Eizenhöfer P R, Zhao G, Zhang J, Sun M. 2014. Final closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker Suture Zone: Constraints from geochronological and geochemical data of Permian volcanic and sedimentary rocks. *Tectonics*, 33: 441–463
- Feng J, Xiao W, Windley B, Han C, Wan B, Zhang J, Ao S, Zhang Z, Lin L. 2013. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic-ultramafic rocks from Alxa, China: Implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altaids. *J Asian Earth Sci*, 78: 114–142
- Feng Z Q, Liu Y J, Li Y L, Li W M, Wen Q B, Liu B Q, Zhou J P, Zhao Y L. 2017. Ages, geochemistry and tectonic implications of the Cambrian igneous rocks in the northern Great Xing'an Range, NE China. *J Asian Earth Sci*, 144: 5–21

- Furnes H, Safonova I. 2019. Ophiolites of the Central Asian Orogenic Belt: Geochemical and petrological characterization and tectonic settings. *Geosci Front*, 10: 1255–1284
- Gao J, Klemd R, Zhang M, Wang Q, Xiao X. 1999. P-T path of high-pressure/low-temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains, NW China. *J Metamorph Geol*, 17: 621–636
- Gao J, Klemd R. 2000. Eclogite occurrences in the Southern Tianshan High-Pressure Belt, Xinjiang, Western China. *Gondwana Res*, 3: 33–38
- Gao J, Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints. *Lithos*, 66: 1–22
- Gao J, Klemd R, Qian Q, Zhang X, Li J, Jiang T, Yang Y. 2011. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen. *Tectonophysics*, 499: 118–131
- Gao J, Klemd R, Zhu M, Wang X, Li J, Wan B, Xiao W, Zeng Q, Shen P, Sun J, Qin K, Campos E. 2018. Large-scale porphyry-type mineralization in the Central Asian metallogenic domain: A review. *J Asian Earth Sci*, 165: 7–36
- Gao J, Li M, Xiao X, Tang Y, He G. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287: 213–231
- Gao J, Long L, Klemd R, Qian Q, Liu D, Xiong X, Su W, Liu W, Wang Y, Yang F. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1221–1238
- Gao J, Wang X S, Klemd R, Jiang T, Qian Q, Mu L X, Ma Y Z. 2015. Record of assembly and breakup of Rodinia in the Southwestern Altaids: Evidence from Neoproterozoic magmatism in the Chinese Western Tianshan Orogen. *J Asian Earth Sci*, 113: 173–193
- Geng H, Sun M, Yuan C, Xiao W, Xian W, Zhao G, Zhang L, Wong K, Wu F. 2009. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? *Chem Geol*, 266: 364–389
- Gordienko I V, Bulgatov A N, Lastochkin N I, Sitnikova V S. 2009. Composition and U-Pb isotopic age determinations (SHRIMP II) of the ophiolitic assemblage from the Shaman paleosubduction zone and the conditions of its formation (North Transbaikalia). *Dokl Earth Sci*, 429: 1420–1425
- Gu P, Li Y, Zhang B. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China. *Acta Petrol Sin*, 25: 1364–1372
- Guo F X. 2000. Affinity between Paleozoic blocks of Xinjiang and their suturing ages (in Chinese with English abstract). *Acta Geol Sin*, 74: 1–6
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, Zhang L, Chen J F, Song B. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *Geol Soc Am Bull*, 122: 627–640
- Han B F, He G Q, Wang X C, Guo Z J. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China. *Earth-Sci Rev*, 109: 74–93
- Han C, Xiao W, Zhao G, Qu W, Du A. 2007. Re-Os dating of the Kalatongke Cu-Ni deposit, Altay Shan, NW China, and resulting geodynamic implications. *Ore Geol Rev*, 32: 452–468
- Han G Q, Liu Y J, Neubauer F, Bartel E, Genser J, Feng Z Q, Zhang L, Yang M C. 2015. U-Pb age and Hf isotopic data of detrital zircons from the Devonian and Carboniferous sandstones in Yimin area, NE China: New evidences to the collision timing between the Xing'an and Erguna blocks in eastern segment of Central Asian Orogenic Belt. *J Asian Earth Sci*, 97: 211–228
- He Z Y, Klemd R, Yan L L, Lu T Y, Zhang Z M. 2018a. Mesoproterozoic juvenile crust in microcontinents of the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from oxygen and hafnium isotopes in zircon. *Sci Rep*, 8: 5054
- He Z Y, Klemd R, Yan L L, Zhang Z M. 2018b. The origin and crustal evolution of microcontinents in the Beishan orogen of the southern Central Asian Orogenic Belt. *Earth-Sci Rev*, 185: 1–14
- Hegner E, Klemd R, Kroner A, Corsini M, Alexeiev D V, Iaccheri L M, Zack T, Dulski P, Xia X, Windley B F. 2010. Mineral ages and P-T conditions of Late Paleozoic high-pressure eclogite and provenance of melange sediments from Atbashi in the south Tianshan orogen of Kyrgyzstan. *Am J Sci*, 310: 916–950
- Hsü K J, Wang Q C, Li J L, Hao J. 1991. Geologic evolution of the Neimontides: A working hypothesis. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 84: 1–35
- Hu A, Jahn B, Zhang G, Chen Y, Zhang Q. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328: 15–51
- Huang B C, Zhou Y X, Zhu R X. 2008. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies. *Earth Sci Front*, 15: 348–359
- Jahn B, Wu F, Chen B. 2000a. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82–92
- Jahn B M, Griffin W L, Windley B. 2000b. Continental growth in the

- Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328: vii–x
- Jahn B, Wu F, Chen B. 2000c. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Earth Environ Sci Trans R Soc Edinburgh*, 91: 181–193
- Jian P, Kröner A, Jahn B, Windley B F, Shi Y, Zhang W, Zhang F, Miao L, Tomurhuu D, Liu D. 2014. Zircon dating of Neoproterozoic and Cambrian ophiolites in West Mongolia and implications for the timing of orogenic processes in the central part of the Central Asian Orogenic Belt. *Earth-Sci Rev*, 133: 62–93
- Jian P, Liu D, Kröner A, Windley B F, Shi Y, Zhang F, Shi G, Miao L, Zhang W, Zhang Q, Zhang L, Ren J. 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth. *Lithos*, 101: 233–259
- Jian P, Liu D, Kröner A, Windley B F, Shi Y, Zhang W, Zhang F, Miao L, Zhang L, Tomurhuu D. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118: 169–190
- Jiang T, Gao J, Klemd R, Qian Q, Zhang X, Xiong X, Wang X, Tan Z, Chen B. 2014. Paleozoic ophiolitic mélanges from the South Tianshan Orogen, NW China: Geological, geochemical and geochronological implications for the geodynamic setting. *Tectonophysics*, 612–613: 106–127
- Jiang Y, Sun M, Zhao G, Yuan C, Xiao W, Xia X, Long X, Wu F. 2010. The 390 Ma high-*T* metamorphic event in the Chinese Altai: A consequence of ridge-subduction? *Am J Sci*, 310: 1421–1452
- Jiang Y D, Schulmann K, Sun M, Weinberg R F, Štípská P, Li P F, Zhang J, Chopin F, Wang S, Xia X P, Xiao W J. 2019. Structural and geochronological constraints on Devonian suprasubduction tectonic switching and Permian collisional dynamics in the Chinese Altai, Central Asia. *Tectonics*, 38: 253–280
- Khain E V, Bibikova E V, Kröner A, Zhuravlev D Z, Sklyarov E V, Fedotova A A, Kravchenko-Berezhnoy I R. 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 199: 311–325
- Klemd R, Gao J, Li J L, Meyer M. 2015. Metamorphic evolution of (ultra)-high-pressure subduction-related transient crust in the South Tianshan Orogen (Central Asian Orogenic Belt): Geodynamic implications. *Gondwana Res*, 28: 1–25
- Klemd R, Hegner E, Bergmann H, Pfänder J A, Li J L, Hentschel F. 2014. Eclogitization of transient crust of the Aktyuz Complex during Late Palaeozoic plate collisions in the Northern Tianshan of Kyrgyzstan. *Gondwana Res*, 26: 925–941
- Konopelko D, Kullerød K, Apayarov F, Sakiev K, Baruleva O, Ravna E, Lepekina E. 2012. SHRIMP zircon chronology of HP-UHP rocks of the Makbal metamorphic complex in the Northern Tien Shan, Kyrgyzstan. *Gondwana Res*, 22: 300–309
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, Kotov A B, Kozakov I K, Salnikova E B, Larin A M. 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: Geological and isotopic evidence. *J Asian Earth Sci*, 23: 605–627
- Kröner A, Alexeev D V, Kovach V P, Rojas-Agramonte Y, Tretyakov A A, Mikolaichuk A V, Xie H, Sobel E R. 2017. Zircon ages, geochemistry and Nd isotopic systematics for the Palaeoproterozoic 2.3–1.8 Ga Kuilyu Complex, East Kyrgyzstan—The oldest continental basement fragment in the Tianshan orogenic belt. *J Asian Earth Sci*, 135: 122–135
- Kröner A, Alexeev D V, Rojas-Agramonte Y, Hegner E, Wong J, Xia X, Belousova E, Mikolaichuk A V, Seltmann R, Liu D, Kiselev V V. 2013. Mesoproterozoic (Grenville-age) terranes in the Kyrgyz North Tianshan: Zircon ages and Nd-Hf isotopic constraints on the origin and evolution of basement blocks in the southern Central Asian Orogen. *Gondwana Res*, 23: 272–295
- Kusky T M, Windley B F, Safonova I, Wakita K, Wakabayashi J, Polat A, Santosh M. 2013. Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: A record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion. *Gondwana Res*, 24: 501–547
- Lei R X, Wu C Z, Gu L X, Zhang Z Z, Chi G X, Jiang Y H. 2011. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope of the Xingxingxia granodiorite from the Central Tianshan zone (NW China): Implications for the tectonic evolution of the southern Altaids. *Gondwana Res*, 20: 582–593
- Lei Z, He G. 2014. Geochronology and geochemistry of the Cambrian (~518 Ma) Chagantaolegai ophiolite in northern West Junggar (NW China): Constraints on spatiotemporal characteristics of the Chingiz-Tarbagatai megazone. *Int Geol Rev*, 56: 1181–1196
- Levashova N M, Meert J G, Gibsher A S, Grice W C, Bazhenov M L. 2011. The origin of microcontinents in the Central Asian Orogenic Belt: Constraints from paleomagnetism and geochronology. *Pre-cambrian Res*, 185: 37–54
- Li D P, Jin Y, Hou K J, Chen Y L, Lu Z. 2015. Late Paleozoic final closure of the Paleo-Asian Ocean in the eastern part of the Xing-Meng Orogenic Belt: Constrains from Carboniferous-Permian (meta-) sedimentary strata and (meta-) igneous rocks. *Tectonophysics*, 665: 251–262
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *J Asian Earth Sci*, 26: 207–224
- Li J, Zhang J, Zhao X, Jiang M, Li Y, Zhu Z, Feng Q, Wang L, Sun G,

- Liu J, Yang T. 2016. Mantle subduction and uplift of intracontinental mountains: A case study from the Chinese Tianshan Mountains within Eurasia. *Sci Rep*, 6: 28831
- Li Y, Xu W L, Tang J, Pei F P, Wang F, Sun C Y. 2018. Geochronology and geochemistry of Mesozoic intrusive rocks in the Xing'an Massif of NE China: Implications for the evolution and spatial extent of the Mongol-Okhotsk tectonic regime. *Lithos*, 304-307: 57-73
- Li Y, Zhou H, Brouwer F M, Wijbrans J R, Zhong Z, Liu H. 2011. Tectonic significance of the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China: Petrological, geochemical and U-Pb zircon age constraints. *J Asian Earth Sci*, 42: 1018-1029
- Liu W, Liu X J, Xiao W J. 2012. Massive granitoid production without massive continental-crust growth in the Chinese Altay: Insight into the source rock of granitoids using integrated zircon U-Pb age, Hf-Nd-Sr isotopes and geochemistry. *Am J Sci*, 312: 629-684
- Liu X, Chen B, Jahn B, Wu G, Liu Y. 2010. Early Paleozoic (ca. 465 Ma) eclogites from Beishan (NW China) and their bearing on the tectonic evolution of the southern Central Asian Orogenic Belt. *J Asian Earth Sci*, 42: 715-731
- Liu X, Wu G, Chen B, Shu B. 2002. Metamorphic history of eclogites from Beishan, Gansu Province. *Acta Geoscientia Sin*, 23: 25-29
- Liu X, Xiao W, Xu J, Castillo P R, Shi Y. 2017. Geochemical signature and rock associations of ocean ridge-subduction: Evidence from the Karamaili Paleo-Asian ophiolite in east Junggar, NW China. *Gondwana Res*, 48: 34-49
- Liu X, Xu J, Xiao W, Castillo P R, Shi Y, Wang S, Huo Q, Feng Z. 2015. The boundary between the Central Asian Orogenic belt and Tethyan tectonic domain deduced from Pb isotopic data. *J Asian Earth Sci*, 113: 7-15
- Liu Y, Li W, Feng Z, Wen Q, Neubauer F, Liang C. 2017. A review of the paleozoic tectonics in the eastern part of central asian orogenic belt. *Gondwana Res*, 43: 123-148
- Long L, Gao J, Klemm R, Beier C, Qian Q, Zhang X, Wang J, Jiang T. 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 126: 321-340
- Long X, Sun M, Yuan C, Xiao W, Cai K. 2008. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution. *Sediment Geol*, 208: 88-100
- Long X, Sun M, Yuan C, Xiao W, Lin S, Wu F, Xia X, Cai K. 2007. Detrital zircon age and Hf isotopic studies for metasedimentary rocks from the Chinese Altai: Implications for the Early Paleozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 26: TC5015
- Long X, Yuan C, Sun M, Xiao W, Zhao G, Wang Y, Cai K, Xia X, Xie L. 2010. Detrital zircon ages and Hf isotopes of the early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, NW China: New constraints on depositional age, provenance and tectonic evolution. *Tectonophysics*, 480: 213-231
- Luo Z W, Xu B, Shi G Z, Zhao P, Faure M, Chen Y. 2016. Solonker ophiolite in Inner Mongolia, China: A late Permian continental margin-type ophiolite. *Lithos*, 261: 72-91
- Lü Z, Zhang L F. 2012. Coesite in the eclogite and schist of the Atantayi Valley, southwestern Tianshan, China. *Chin Sci Bull*, 57: 1467-1472
- Lü Z, Zhang L, Du J, Bucher K. 2008. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China: Convincing proof of UHP metamorphism. *Am Miner*, 93: 1845-1850
- Lü Z, Zhang L, Du J, Bucher K. 2009. Petrology of coesite-bearing eclogite from Habutengsu Valley, western Tianshan, NW China and its tectonometamorphic implication. *J Metamorph Geol*, 27: 773-787
- Lü Z, Zhang L, Du J, Yang X, Tian Z, Xia B. 2012. Petrology of HP metamorphic veins in coesite-bearing eclogite from western Tianshan, China: Fluid processes and elemental mobility during exhumation in a cold subduction zone. *Lithos*, 136-139: 168-186
- Ma C, Xiao W, Windley B F, Zhao G, Han C, Zhang J, Luo J, Li C. 2012. Tracing a subducted ridge-transform system in a late Carboniferous accretionary prism of the southern Altaids: Orthogonal sanukitoid dyke swarms in Western Junggar, NW China. *Lithos*, 140-141: 152-165
- Ma X, Shu L, Meert J G, Li J. 2014. The Paleozoic evolution of Central Tianshan: Geochemical and geochronological evidence. *Gondwana Res*, 25: 797-819
- Ma X H, Zhu W P, Zhou Z H, Qiao S L. 2017. Transformation from Paleo-Asian Ocean closure to Paleo-Pacific subduction: New constraints from granitoids in the eastern Jilin-Heilongjiang Belt, NE China. *J Asian Earth Sci*, 144: 261-286
- Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, Chai F M, Wu H, Chen S P, Cheng L S, Yang J M, Zhang C Q. 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes. *J Asian Earth Sci*, 32: 184-203
- Mao Q, Xiao W, Fang T, Wang J, Han C, Sun M, Yuan C. 2012a. Late Ordovician to early Devonian adakites and Nb-enriched basalts in the Liuyuan area, Beishan, NW China: Implications for early Paleozoic slab-melting and crustal growth in the southern Altaids. *Gondwana Res*, 22: 534-553
- Mao Q, Xiao W, Windley B F, Han C, Qu J, Ao S, Zhang J E, Guo Q. 2012b. The Liuyuan complex in the Beishan, NW China: A Carboniferous-Permian ophiolitic fore-arc sliver in the southern

- Altaids. *Geol Mag*, 149: 483–506
- Mao Y J, Qin K Z, Li C, Tang D M. 2015. A modified genetic model for the Huangshandong magmatic sulfide deposit in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, western China. *Miner Depos*, 50: 65–82
- Meyer M, Klemm R, Hegner E, Konopelko D. 2014. Subduction and exhumation mechanisms of ultra-high and high-pressure oceanic and continental crust at Makbal (Tianshan, Kazakhstan and Kyrgyzstan). *J Meta Geol*, 32: 861–884
- Meyer M, Klemm R, Konopelko D. 2013. High-pressure mafic oceanic rocks from the Makbal Complex, Tianshan Mountains (Kazakhstan & Kyrgyzstan): Implications for the metamorphic evolution of a fossil subduction zone. *Lithos*, 177: 207–225
- Miao L, Fan W, Liu D, Zhang F, Shi Y, Guo F. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *J Asian Earth Sci*, 32: 348–370
- Miao L, Zhang F, Jiao S. 2015. Age, protoliths and tectonic implications of the Toudaoqiao blueschist, Inner Mongolia, China. *J Asian Earth Sci*, 105: 360–373
- Miao L, Zhang F, Fan W M, Liu D. 2007. Phanerozoic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt in North China: Constraints from geochronology of ophiolites and associated formations. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 280: 223–237
- Niu H, Sato H, Zhang H, Ito J, Yu X, Nagao T, Terada K, Zhang Q. 2006. Juxtaposition of adakite, boninite, high-TiO₂ and low-TiO₂ basalts in the Devonian southern Altay, Xinjiang, NW China. *J Asian Earth Sci*, 28: 439–456
- Niu H, Shan Q, Zhang H, Yu X. 2007. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the ultrahigh-pressure metamorphic quartz-magnetite in Zaheba, eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Petrol Sin*, 23: 1627–1634
- Pei Q M, Zhang S T, Hayashi K, Cao H W, Li D, Tang L, Hu X K, Li H X, Fang D R. 2018. Permo-Triassic granitoids of the Xing'an-Mongolia segment of the Central Asian Orogenic Belt, Northeast China: Age, composition, and tectonic implications. *Int Geol Rev*, 60: 1172–1194
- Qu J F, Xiao W J, Windley B F, Han C M, Mao Q G, Ao S J, Zhang J E. 2011. Ordovician eclogites from the Chinese Beishan: Implications for the tectonic evolution of the southern Altaids. *J Metamorph Geol*, 29: 803–820
- Ren R, Han B F, Xu Z, Zhou Y Z, Liu B, Zhang L, Chen J F, Su L, Li J, Li X H, Li Q L. 2014. When did the subduction first initiate in the southern Paleo-Asian Ocean: New constraints from a Cambrian intra-oceanic arc system in West Junggar, NW China. *Earth Planet Sci Lett*, 388: 222–236
- Roger F, Arnaud N, Gilder S, Tapponnier P, Jolivet M, Brunel M, Malavieille J, Xu Z, Yang J. 2003. Geochronological and geochemical constraints on Mesozoic suturing in east Central Tibet. *Tectonics*, 22: 1037
- Rojas-Agramonte Y, Herwartz D, García-Casco A, Kröner A, Alexeiev D V, Klemm R, Buhre S, Barth M. 2013. Early Palaeozoic deep subduction of continental crust in the Kyrgyz North Tianshan: Evidence from Lu-Hf garnet geochronology and petrology of mafic dikes. *Contrib Mineral Petrol*, 166: 525–543
- Rong J Y, Zhang Z X. 1982. A southward extension of the Silurian Tuvaella brachiopod fauna. *Lethaia*, 15: 133–147
- Rong J Y, Boucot A J, Su Y Z, Strusz D. 1995. Biogeographical analysis of Late Silurian brachiopod faunas, chiefly from Asia and Australia. *Lethaia*, 28: 39–60
- Safonova I, Biske G, Romer R L, Seltnmann R, Simonov V, Maruyama S. 2016. Middle Paleozoic mafic magmatism and ocean plate stratigraphy of the South Tianshan, Kyrgyzstan. *Gondwana Res*, 30: 236–256
- Safonova I, Kotlyarov A, Krivonogov S, Xiao W. 2017. Intra-oceanic arcs of the Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Res*, 50: 167–194
- Safonova I Y, Santosh M. 2014. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondwana Res*, 25: 126–158
- Saktura W M, Buckman S, Nutman A P, Belousova E A, Yan Z, Aitchison J C. 2017. Continental origin of the Gubaoquan eclogite and implications for evolution of the Beishan Orogen, Central Asian Orogenic Belt, NW China. *Lithos*, 294–295: 20–38
- Salnikova E B, Kozakov I K, Kotov A B, Kröner A, Todt W, Bibikova E V, Nutman A, Yakovleva S Z, Kovach V P. 2001. Age of Palaeozoic granites and metamorphism in the Tuvino-Mongolian Massif of the Central Asian Mobile Belt: Loss of a Precambrian microcontinent. *Precambrian Res*, 110: 143–164
- Sang M, Xiao W, Bakirov A, Orozbaev R, Sakiev K, Zhou K. 2017. Oblique wedge extrusion of UHP/HP complexes in the Late Triassic: Structural analysis and zircon ages of the Atbashi Complex, South Tianshan, Kyrgyzstan. *Int Geol Rev*, 59: 1369–1389
- Schulmann K, Paterson S. 2011. Asian continental growth. *Nat Geosci*, 4: 827–829
- Seltnmann R, Porter T M, Pirajno F. 2014. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review. *J Asian Earth Sci*, 79: 810–841
- Şengör A M C, Natal'in B A. 1996. Turkeic-type orogeny and its role in the making of the continental crust. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 24: 263–337
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307

- Şengör A M C, Natal'in B A, Sunal G, van der Voo R. 2018. The tectonics of the Altaids: Crustal growth during the construction of the continental lithosphere of Central Asia between ~750 and ~130 Ma ago. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 46: 439–494
- Shen P, Pan H, Xiao W, Shen Y. 2014. An Ordovician intra-oceanic subduction system influenced by ridge subduction in the West Junggar, Northwest China. *Int Geol Rev*, 56: 206–223
- Shen X, Zhang H, Wang Q, Wyman D A, Yang Y. 2011. Late Devonian-Early Permian A-type granites in the southern Altay Range, Northwest China: Petrogenesis and implications for tectonic setting of “A2-type” granites. *J Asian Earth Sci*, 42: 986–1007
- Shen X M, Zhang H X, Wang Q, Saha A, Ma L, Santosh M. 2018. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Devonian plagiogranites in the Kuerti area of southern Chinese Altay, northwest China: Petrogenesis and tectonic evolution of late Paleozoic ophiolites. *Geol J*, 53: 1886–1905
- Shi Y, Liu D, Miao L, Zhang F, Jian P, Zhang W, Hou K, Xu J. 2010. Devonian A-type granitic magmatism on the northern margin of the North China Craton: SHRIMP U-Pb zircon dating and Hf-isotopes of the Hongshan granite at Chifeng, Inner Mongolia, China. *Gondwana Res*, 17: 632–641
- Shu L, Charvet J, Lu H, Laurent S C. 2002. Paleozoic accretion-collision events and Kinematics of ductile deformation in the eastern part of the southern-central Tianshan belt, China. *Acta Geol Sin*, 76: 308–323
- Simonov V A, Sakiev K S, Volkova N I, Stupakov S I, Travina A V. 2008. Conditions of formation of the Atbashi Ridge eclogites (South Tien Shan). *Rus Geol Geophys*, 49: 803–815
- Song D, Xiao W, Collins A S, Glorie S, Han C, Li Y. 2018. Final subduction processes of the Paleo-Asian Ocean in the Alxa Tectonic Belt (NW China): Constraints from field and chronological data of Permian arc-related volcano-sedimentary rocks. *Tectonics*, 37: 1658–1687
- Song D, Xiao W, Han C, Li J, Qu J, Guo Q, Lin L, Wang Z. 2013. Progressive accretionary tectonics of the Beishan orogenic collage, southern Altaids: Insights from zircon U-Pb and Hf isotopic data of high-grade complexes. *Precambrian Res*, 227: 368–388
- Song D, Xiao W, Han C, Tian Z. 2014. Polyphase deformation of a Paleozoic forearc-arc complex in the Beishan orogen, NW China. *Tectonophysics*, 632: 224–243
- Song D, Xiao W, Windley B F, Han C, Tian Z. 2015. A Paleozoic Japan-type subduction-accretion system in the Beishan orogenic collage, southern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 224–225: 195–213
- Song D, Xiao W, Windley B F, Han C, Yang L. 2016. Metamorphic complexes in accretionary orogens: Insights from the Beishan collage, southern Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics*, 688: 135–147
- Song S, Wang M M, Xu X, Wang C, Niu Y, Allen M B, Su L. 2015. Ophiolites in the Xing'an-Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events. *Tectonics*, 34: 2221–2248
- Song X Y, Li X R. 2009. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in a postcollisional environment. *Miner Depos*, 44: 303–327
- Su W, Gao J, Klemd R, Li J L, Zhang X, Li X H, Chen N S, Zhang L. 2010. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: Implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids. *Eur J Mineral*, 22: 473–478
- Sun J, Zhang Z. 2009. Syntectonic growth strata and implications for late Cenozoic tectonic uplift in the northern Tian Shan, China. *Tectonophysics*, 463: 60–68
- Sun M, Yuan C, Xiao W, Long X, Xia X, Zhao G, Lin S, Wu F, Kröner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the early to middle Palaeozoic. *Chem Geol*, 247: 352–383
- Sun S, Li J L, Lin J L, Wang Q C, Chen H H. 1991. Indosinides in China and the consumption of Eastern Paleotethys. In: Muller D W, McKenzie J A, Weissert H, eds. *Controversies in Modern Geology*. London: Academic Press. 363–384
- Sun W, Chi X G, Zhao Z, Pan S Y, Liu J F, Zhang R, Quan J Y. 2014. Zircon geochronology constraints on the age and nature of ‘Precambrian metamorphic rocks’ in the Xing’an block of Northeast China. *Int Geol Rev*, 56: 672–694
- Tang G, Wang Q, Wyman D A, Li Z X, Zhao Z H, Jia X H, Jiang Z Q. 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China). *Chem Geol*, 277: 281–300
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, Li Z X, Zhao Z H, Yang Y H. 2012. Late Carboniferous high $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Hf}(t)$ granitoids, enclaves and dikes in western Junggar, NW China: Ridge-subduction-related magmatism and crustal growth. *Lithos*, 140–141: 86–102
- Tian Z, Xiao W, Shan Y, Windley B, Han C, Zhang J, Song D. 2013. Mega-fold interference patterns in the Beishan orogen (NW China) created by change in plate configuration during Permo-Triassic termination of the Altaids. *J Struct Geol*, 52: 119–135
- Tian Z, Xiao W, Sun J, Windley B F, Glen R, Han C, Zhang Z, Zhang J, Wan B, Ao S, Song D. 2015. Triassic deformation of Permian Early Triassic arc-related sediments in the Beishan (NW China): Last pulse of the accretionary orogenesis in the southernmost Altaids. *Tectonophysics*, 662: 363–384

- Tian Z, Xiao W, Windley B F, Lin L, Han C, Zhang J, Wan B, Ao S, Song D, Feng J. 2014. Structure, age, and tectonic development of the Huoshishan-Niujuanzi ophiolitic mélange, Beishan, southernmost Altai. *Gondwana Res*, 25: 820–841
- Tian Z L, Wei C J. 2014. Coexistence of garnet blueschist and eclogite in South Tianshan, NW China: Dependence of *P-T* evolution and bulk-rock composition. *J Meta Geol*, 32: 743–764
- Torsvik T H, Cocks L R M. 2004. Earth geography from 400 to 250 Ma: A palaeomagnetic, faunal and facies review. *J Geol Soc*, 161: 555–572
- van der Straaten F, Schenk V, John T, Gao J. 2008. Blueschist-facies rehydration of eclogites (Tian Shan, NW-China): Implications for fluid-rock interaction in the subduction channel. *Chem Geol*, 255: 195–219
- van der Voo R. 2004. Presidential address: Paleomagnetism, oroclinal, and growth of the continental crust. *GSA Today*, 14: 4–9
- Wakita K, Metcalfe I. 2005. Ocean plate stratigraphy in East and Southeast Asia. *J Asian Earth Sci*, 24: 679–702
- Wan B, Li S, Xiao W, Windley B F. 2018. Where and when did the Paleo-Asian ocean form? *Precambrian Res*, 317: 241–252
- Wan B, Zhang L, Xiang P. 2010. The Ashele VMS-type Cu-Zn deposit in Xinjiang, NW China formed in a rifted arc setting. *Resour Geol*, 60: 150–164
- Wang B, Shu L, Faure M, Jahn B, Cluzel D, Charvet J, Chung S, Meffre S. 2011. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan: Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélange (NW China). *Tectonophysics*, 497: 85–104
- Wang C S, Dai J G, Zhao X X, Li Y, Graham S A, He D, Ran B, Meng J. 2014. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. *Tectonophysics*, 621: 1–43
- Wang T, Guo L, Zhang L, Yang Q, Zhang J, Tong Y, Ye K. 2015. Timing and evolution of Jurassic-Cretaceous granitoid magmatism in the Mongol-Okhotsk belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic settings. *J Asian Earth Sci*, 97: 365–392
- Wang T, Jahn B M, Kovach V P, Tong Y, Hong D W, Han B F. 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 110: 359–372
- Wei C J, Powell R, Zhang L F. 2003. Eclogites from the south Tianshan, NW China: Petrological characteristic and calculated mineral equilibria in the $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ system. *J Metamorph Geol*, 21: 163–179
- Wilde S A, Wu F Y, Zhang X Z. 2003. Late Pan-African magmatism in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence from granitoids in the Jiamusi Massif. *Precambrian Res*, 122: 311–327
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y, Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan range, central Asia. *Geology*, 18: 128–131
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt. *J Geol Soc*, 164: 31–47
- Windley B F, Xiao W. 2018. Ridge subduction and slab windows in the Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications for the evolution of an accretionary orogen. *Gondwana Res*, 61: 73–87
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *J Asian Earth Sci*, 41: 1–30
- Wu F Y, Yang J H, Lo C H, Wilde S A, Sun D Y, Jahn B M. 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China. *Isl Arc*, 16: 156–172
- Xiao W, Han C, Yuan C, Sun M, Lin S, Chen H, Li Z, Li J, Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. *J Asian Earth Sci*, 32: 102–117
- Xiao W, Han C, Yuan C, Sun M, Zhao G, Shan Y. 2010a. Transitions among Mariana-, Japan-, Cordillera- and Alaska-type arc systems and their final juxtapositions leading to accretionary and collisional orogenesis. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 338: 35–53
- Xiao W, Windley B F, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K, Wang Z. 2004a. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: Implications for the growth of Central Asia. *J Geol Soc*, 161: 339–342
- Xiao W, Windley B F, Allen M B, Han C. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. *Gondwana Res*, 23: 1316–1341
- Xiao W, Windley B F, Han C, Liu W, Wan B, Zhang J, Ao S, Zhang Z, Song D. 2018. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia. *Earth-Sci Rev*, 186: 94–128
- Xiao W, Windley B F, Hao J, Zhai M. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069
- Xiao W, Windley B F, Sun S, Li J, Huang B, Han C, Yuan C, Sun M, Chen H. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 477–507
- Xiao W, Zhang L, Qin K, Sun S, Li J. 2004b. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for

- the continental growth of central Asia. *Am J Sci*, 304: 370–395
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, Han C M, Qu J F, Zhang J E, Ao S J, Guo Q Q, Cleven N R, Lin S F, Shan Y H, Li J L. 2010b. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage. *Am J Sci*, 310: 1553–1594
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Sun S, Li J L. 2009a. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1189–1217
- Xiao W J, Windley B F, Yuan C, Sun M, Han C M, Lin S F, Chen H L, Yan Q R, Liu D Y, Qin K Z, Li J L, Sun S. 2009b. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids. *Am J Sci*, 309: 221–270
- Xie W, Xu Y G, Chen Y B, Luo Z Y, Hong L B, Ma L, Liu H Q. 2016. High-alumina basalts from the Bogda Mountains suggest an arc setting for Chinese Northern Tianshan during the Late Carboniferous. *Lithos*, 256–257: 165–181
- Xu B, Charvet J, Chen Y, Zhao P, Shi G. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res*, 23: 1342–1364
- Xu M, Xu W, Wang F, Gao F. 2012. Age, association and provenance of the “Neoproterozoic” Fengshuigouhe Group in the Northwestern Lesser Xing’an Range, NE China: Constraints from zircon U-Pb geochronology. *J Earth Sci*, 23: 786–801
- Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B, Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *J Asian Earth Sci*, 74: 167–193
- Xu X, Li X, Zhongping M, Xia L, Xia Z. 2006. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of gabbro from the bayingou ophiolite in the Northern Tianshan Mountains. *Acta Geol Sin*, 80: 1168–1176
- Xu Z, Wang Q, Pêcher A, Liang F, Qi X, Cai Z, Li H, Zeng L, Cao H. 2013. Orogen-parallel ductile extension and extrusion of the greater himalaya in the late oligocene and miocene. *Tectonics*, 32: 191–215
- Yang G, Li Y, Kerr A C, Tong L. 2018. Accreted seamounts in North Tianshan, NW China: Implications for the evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *J Asian Earth Sci*, 153: 223–237
- Yang G, Li Y, Xiao W, Tong L. 2015. OIB-type rocks within West Junggar ophiolitic mélanges: Evidence for the accretion of seamounts. *Earth-Sci Rev*, 150: 477–496
- Yang J, Zhang Z, Chen Y, Yu H, Qian X. 2017. Ages and origin of felsic rocks from the Eastern Erenhot ophiolitic complex, south-eastern Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia China. *J Asian Earth Sci*, 144: 126–140
- Ye X T, Zhang C L, Zou H B, Yao C Y, Dong Y G. 2017. Age and geochemistry of the Zhaheba ophiolite complex in eastern Junggar of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB): Implications for the accretion process of the Junggar terrane. *Geol Mag*, 154: 419–440
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488: 293–325
- Yin A, Nie S. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press. 442–485
- Yin A, Nie S, Craig P, Harrison T M, Ryerson F J, Xianglin Q, Geng Y. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 17: 1–27
- Yin J, Chen W, Xiao W, Yuan C, Sun M, Tang G, Yu S, Long X, Cai K, Geng H, Zhang Y, Liu X. 2015. Petrogenesis of Early-Permian sanukitoids from West Junggar, Northwest China: Implications for Late Paleozoic crustal growth in Central Asia. *Tectonophysics*, 662: 385–397
- Yin J, Long X, Yuan C, Sun M, Zhao G, Geng H. 2013. A Late Carboniferous–Early Permian slab window in the West Junggar of NW China: Geochronological and geochemical evidence from mafic to intermediate dikes. *Lithos*, 175–176: 146–162
- Zeng Q, Qin K, Liu J, Li G, Zhai M, Chu S, Guo Y. 2015. Porphyry molybdenum deposits in the Tianshan-Xingmeng orogenic belt, northern China. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 104: 991–1023
- Zhang C L, Li Z X, Li X H, Xu Y G, Zhou G, Ye H M. 2010. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275 Ma mantle plume? *Geol Soc Am Bull*, 122: 2020–2040
- Zhang J, Cunningham D. 2012. Kilometer-scale refolded folds caused by strike-slip reversal and intraplate shortening in the Beishan region, China. *Tectonics*, 31: TC3009
- Zhang J, Sun M, Schulmann K, Zhao G, Wu Q, Jiang Y, Guy A, Wang Y. 2015a. Distinct deformational history of two contrasting tectonic domains in the Chinese Altai: Their significance in understanding accretionary orogenic process. *J Struct Geol*, 73: 64–82
- Zhang J, Wei C, Chu H. 2015b. Blueschist metamorphism and its tectonic implication of Late Paleozoic-Early Mesozoic metabasites in the mélange zones, central Inner Mongolia, China. *J Asian Earth Sci*, 97: 352–364
- Zhang J E, Xiao W J, Han C M, Ao S J, Yuan C, Sun M, Geng H Y, Zhao G C, Guo Q Q, Ma C. 2011a. Kinematics and age constraints of deformation in a Late Carboniferous accretionary complex in Western Junggar, NW China. *Gondwana Res*, 19: 958–974

- Zhang J E, Xiao W J, Han C M, Mao Q G, Ao S J, Guo Q Q, Ma C. 2011b. A Devonian to Carboniferous intra-oceanic subduction system in Western Junggar, NW China. *Lithos*, 125: 592–606
- Zhang J E, Xiao W J, Luo J, Chen Y C, Windley B F, Song D F, Han C M, Safonova I. 2018. Collision of the Tacheng block with the Mayile-Barleik-Tangbale accretionary complex in Western Junggar, NW China: Implication for Early-Middle Paleozoic architecture of the western Altai. *J Asian Earth Sci*, 159: 259–278
- Zhang L, Ai Y, Li X, Rubatto D, Song B, Williams S, Song S, Ellis D, Liou J G. 2007. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks. *Lithos*, 96: 266–280
- Zhang L, Chen H, Chen Y, Qin Y, Liu C, Zheng Y, Jansen N H. 2012. Geology and fluid evolution of the Wangfeng orogenic-type gold deposit, Western Tian Shan, China. *Ore Geol Rev*, 49: 85–95
- Zhang L, Jin Z. 2016. High-temperature metamorphism of the Yushugou ophiolitic slice: Late Devonian subduction of seamount and mid-oceanic ridge in the South Tianshan orogen. *J Asian Earth Sci*, 132: 75–93
- Zhang L, Ellis D J, Jiang W. 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. *Am Miner*, 87: 853–860
- Zhang L, Ellis D J, Williams S, Jiang W. 2002b. Ultra-high pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part II. Evidence from magnesite in eclogite. *Am Miner*, 87: 861–866
- Zhang S H, Zhao Y. 2013. Mid-crustal emplacement and deformation of plutons in an Andean-style continental arc along the northern margin of the North China Block and tectonic implications. *Tectonophysics*, 608: 176–195
- Zhang S H, Zhao Y, Kröner A, Liu X M, Xie L W, Chen F K. 2009a. Early Permian plutons from the northern North China Block: Constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1441–1467
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Hu J M, Liu S W, Yang Y H, Chen F K, Liu X M, Liu J. 2009b. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Geol Soc Am Bull*, preprint: 1
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Yang Z Y, Hu J M, Wu H. 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a late Palaeozoic active continental margin. *J Geol Soc*, 164: 451–463
- Zheng R, Wu T, Zhang W, Xu C, Meng Q. 2013. Late Paleozoic subduction system in the southern Central Asian Orogenic Belt: Evidences from geochronology and geochemistry of the Xiaohuangshan ophiolite in the Beishan orogenic belt. *J Asian Earth Sci*, 62: 463–475
- Zheng R, Wu T, Zhang W, Xu C, Meng Q, Zhang Z. 2014. Late Paleozoic subduction system in the northern margin of the Alxa block, Altai: Geochronological and geochemical evidences from ophiolites. *Gondwana Res*, 25: 842–858
- Zheng R, Xiao W, Li J, Wu T, Zhang W. 2018. A Silurian-early Devonian slab window in the southern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from high-Mg diorites, adakites and granitoids in the western Central Beishan region, NW China. *J Asian Earth Sci*, 153: 75–99
- Zhou J B, Cao J L, Wilde S A, Zhao G C, Zhang J J, Wang B. 2014. Paleo-Pacific subduction-accretion: Evidence from Geochemical and U-Pb zircon dating of the Nadanhada accretionary complex, NE China. *Tectonics*, 33: 2444–2466
- Zhou J B, Li L. 2017. The Mesozoic accretionary complex in Northeast China: Evidence for the accretion history of Paleo-Pacific subduction. *J Asian Earth Sci*, 145: 91–100
- Zhou J B, Wang B, Wilde S A, Zhao G C, Cao J L, Zheng C Q, Zeng W S. 2015. Geochemistry and U-Pb zircon dating of the Toudaoqiao blueschists in the Great Xing'an Range, northeast China, and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 97: 197–210
- Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, Zhao G C, Liu F L, Qiao D W, Ren S M, Liu J H. 2011. A >1300 km late Pan-African metamorphic belt in NE China: New evidence from the Xing'an block and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 509: 280–292
- Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, Zhao G C, Zheng C Q, Wang Y J, Zhang X H. 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt. *Tectonophysics*, 478: 230–246
- Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, Han J. 2018. Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo-Asian Ocean. *Earth-Sci Rev*, 186: 76–93
- Zhu Y, Guo X, Song B, Zhang L, Gu L. 2009. Petrology, Sr–Nd–Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. *J Geol Soc*, 166: 1085–1099
- Zonenshain L P, Kuz'min M I, Natapov L M, Page B M. 1990. Geology of the USSR: A plate-tectonic synthesis. Amer Geophysical Union
- Zuza A V, Yin A. 2017. Balkatach hypothesis: A new model for the evolution of the Pacific, Tethyan, and Paleo-Asian oceanic domains. *Geosphere*, 13: 1664–1712

(责任编辑: 朱茂炎)