

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.003

# 西北地区基础地质调查回顾与展望(1962~2022)

王国强,陈隽璐,计文化,高晓峰,辜平阳

(中国地质调查局造山带地质研究中心,中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,陕西 西安 710054)

**摘要:**基础地质调查与研究是地质工作的根基,通过岩石、地层、古生物、构造等基本特征的调查及时空演化规律的分析研究,可持续深化对西北地区多圈层交互作用过程的认识,破解西北地区重大基础地质问题,提升对地球系统科学和资源环境国情的认知水平。笔者在回顾了中国地质调查局西安地质调查中心 60 年来在区域地质填图方法、板块构造及区域构造单元划分、海相火山岩与成矿、中国及邻区板内火山作用、新生代风成堆积与古气候、埃迪卡拉纪和奥陶纪—志留纪古生物、大陆边缘系统、区域综合编图等工作基础上,总结了基础地质支撑服务资源环境及国家重大工程建设领域取得的诸多创新性方法、理论成果和重大进展。60 年栉风沐雨,立足于西北地区亟待破解的关键地质问题,在区域地质调查及基础地质理论创新方面取得了丰硕成果;展望未来,在基础地质转型升级的形势下,紧抓区域大地构造演化过程及其资源环境效应主线,既要持续深化西北地区基础地质调查与研究,也要加强与生态文明建设相关的新生代地质调查研究,同时推进基础地质各专业数据融合能力的显著提升,将地球系统科学的思想贯穿至西北地区基础地质调查工作之中。

**关键词:**区域地质填图方法;基础地质理论创新;构造演化;区域地质数据体系;西北地区

**中图分类号:**P56

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-6248(2022)03-0028-16

## Regional Geological Survey and Research of Northwest China from 1962 to 2022: Review and Prospect

WANG Guoqiang, CHEN Junlu, JI Wenhua, GAO Xiaofeng, GU Pingyang

(Centre for Orogenic Belt Geology of CGS, Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center  
for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Regional geological survey and research plays an essential role in geological work. Through the investigation and research for basic characteristics of rocks, strata, paleontology, tectonics and temporal and spatial evolution, we can continuously deepen the understanding for the process of multi-layered interaction system of the earth, solve key geological issues about the northwest China, and improve the cognition for earth system science and resources and environmental conditions. The works of the past sixty years are reviewed for the Xi'an center, CGS,

**收稿日期:**2021-12-30;**修回日期:**2022-04-15;**网络发表日期:**2022-08-15;**责任编辑:**吕鹏瑞

**基金项目:**国家自然科学基金项目“甘肃北山泥盆纪高镁安山岩岩石成因及其地球动力学意义”(41703038)、中国地质调查局项目“北山图拉尔根-辉铜山地区区域地质调查”(DD20190812)联合资助。

**作者简介:**王国强(1984 年-),男,博士,高级工程师,从事区域地质调查与矿物学、岩石学、矿床学研究。E-mail:gqwangmint@gmail.com。

mainly including regional geological mapping methods, plate tectonics and tectonic unit division, marine volcanic rocks and mineralization, intraplate volcanism in China and adjacent areas, Cenozoic aeolian accumulation and paleoclimate, Ediacaran and Ordovician-Silurian paleontology, continental marginal system and regional comprehensive mapping. Furthermore, many innovative methods, theoretical achievements and significant progress are summarized based on the field of resources, environment and national major projects supported by regional geology. During the sixty years, we have been focusing on the key regional geological issues that need to be solved in the northwest China. In the future, under the situation of transformation and upgrading of regional geology, we will firmly focus on the main line of the tectonic evolution process and resource and environmental effects. Based on it, we will continue to strengthen the regional geological survey and research, and promote the Cenozoic geological survey and research. In addition, it is necessary to promote the significant improvement for the data fusion ability of various specialties, and integrate the ideas of earth system science into the regional geological survey in the northwest China.

**Keywords:** geological mapping method; innovation of geological theory; tectonic evolution; regional geology data system; Northwest China

西北地区幅员辽阔,造山带众多,不同地区的地层、岩石及地质构造均存在巨大差异,地质条件极为复杂。纵观西北地区地质演化历史,在古亚洲、特提斯及滨太平洋3大构造域相互作用下,经历了极其复杂的构造演化阶段,各阶段制约资源环境的基础地质问题各不相同。例如,西北地区古老陆块的属性及其聚散过程和资源效应、天山石炭纪火山岩成因及形成环境、古亚洲洋的最终闭合时限、古亚洲构造域与特提斯构造域边界、西北主要造山带结构、构造演化过程及区域成矿等关键地质问题的认识均存在诸多争议。因此,以上关键地质问题的存在,在客观上决定了自中国地质调查局西安地质调查中心(以下简称“西安地调中心”;前身为“西安地质矿产研究所”,以下简称“西安地矿所”)建立以来基础地质团队扎根大西北60载的坚守与坚持的必要性。经历了创业初期的艰辛、中期动荡中努力求生存和发展及国土大调查以来不懈奋斗、继续辉煌的蓬勃发展阶段,同时也经历了中国地质学从多旋回槽台学说、板块构造学说等向地球系统科学的逐步演变过程。地质工作者始终围绕西北地区地质构造演化与区域成矿过程中的关键科学问题,注重与高校、科研院所及地方地调单位的协作创新,通过区域尺度的国土大调查及关键地段的研究项目,持续进行60年的努力探索;总结区域地质特征及规律,破解关键区段关键地质问题,重建主要造山带地质构造演化

过程,厘定重要成矿带地质背景;取得了一系列的地质调查与科研成果,为西北地区地质事业的发展、繁荣和新时代推进西部大开发形成新格局做出了积极的贡献。

站在基础地质转型升级的新起点,有必要对以往60年来在西北地区造山带调查研究中取得的基础地质理论与成果进行梳理总结,并聚焦未来亟待破解的制约资源环境认知水平的基础地质问题。在地球系统科学理论的指导下,在继承前人研究成果的基础上,发展、创新,力求明确未来新的地质调查研究目标、科技创新及成果应用方向。因此,笔者回顾了60年来尤其是1999年国土大调查以来,西安地调中心在西北地区区域地质填图及编图技术方法、重大基础地质理论创新及服务国家重大战略等方面所取得的主要成果与进展,梳理了当前亟待破解的关键地质问题,并结合当今基础地质调查转型升级的新形势,展望了基础地质工作下一步的工作方向。

## 1 区域地质示范填图及编图技术创新成果

### 1.1 构建了蛇绿构造混杂岩带填图技术方法体系

蛇绿构造混杂岩带是现今厘定消失洋壳的重要窗口。该带中各类地质体混杂、无序的客观性决定了对其开展地质填图工作的复杂性,制约了造山带

地质填图工作。通过对西北地区造山带内蛇绿岩野外填图实践和典型蛇绿岩调查研究的总结梳理,明确了蛇绿构造混杂岩带是由不同时代、位态和相态的弱变形“岩块”与强变形“基质”组成,空间上呈“网结状”结构;丰富了蛇绿构造混杂岩带“基质”的内涵,明确提出由构造作用从各类岩块上挤压碾磨改造而来的细粒碎屑物或者糜棱质构造岩及原地地层物质组分等构成了基质的重要组成部分;确定了蛇绿构造混杂岩带中变形构造的基本组成,一般包括俯冲增生、碰撞和碰撞后叠加改造等构造形迹组合;首次提出蛇绿构造混杂岩带“岩块”和“基质”、“物质”与“变形”的双重填图方法,创立了对物质组成采用“三元(岩石类型、形成时代、构造属性)”表示“四要素(岩块、基质、形成时代及构造属性)”的图面表示方法,构建了蛇绿构造混杂岩带填图方法体系(李荣社等,2016)。该填图方法的建立,破解了造山带中最复杂地质单元的填图问题。

### 1.2 创新特殊景观区填图技术方法

针对西北地区高山峡谷区特定的地貌特征制约地质填图精度等问题,创新高分及多光谱遥感融合方法,提出遥感数据在岩性、构造解译及矿化蚀变信息提取等 10 种有效技术方法;总结地层、构造、岩石、矿化蚀变点(带)野外地质调查方法及其适用性,为填图从陆域可测地区向陆域特殊地质地貌区转移提供支撑。此外,在总结已实施项目经验的基础上,构建了高山峡谷区填图技术方法体系;出版了《高山峡谷区 1:50 000 填图技术方法指南》(辜平阳等,2017)。

中国西部和北部广大区域存在大量戈壁荒漠覆盖区,这类区域填图的主要目标是查明覆盖层之下基岩地质结构,解决一些与覆盖有关的重要基础地质矿产问题,揭示覆盖层中一些重要目标地质体,如含水层与隔水层的分布状况。通过西安地调中心主导实施的戈壁荒漠覆盖区填图工作,总结包括以各种物探方法与钻探验证为核心的填图技术方法组合(王国灿等,2018)。特殊景观区填图技术方法的建立,为进一步开展高山峡谷区、戈壁荒漠覆盖区地质填图工作提供了标准。

### 1.3 提出了造山带中高级变质地质体填图技术方法

造山带中中高级变质地质体可归纳为卷入造山带中地块、深俯冲-折返地质体及岛弧根带。这些地质体经历了多期次变质-变形过程,记录了丰富的地质演化信息,但传统的地质填图并未将其进一步精

细划分,制约了对其物质组成及结构构造的深入理解。中高级变质地质体成因多样,其中深俯冲-折返地质体大都位于古生代—中生代/新生代造山中,相对容易识别;卷入造山带中地块可能是古大陆裂解形成的微陆块、大陆碎片或直接卷入造山带中的陆块;岛弧根带则指岛弧的深部构造层因隆升-剥蚀、构造折返等原因出露地表的地质体,其形成可能是由于洋中脊俯冲导致的异常热形成高温变质作用的产物。对这些高级变质地质体的形成时代、构造变形和大地构造属性的正确厘定是解剖增生造山带结构和增生造山机制的基础。自 2019 年西北盆山区地质调查工程实施以来,通过在柴北缘、天山和北山地区开展构造-岩性填图探索,初步厘定了形成于不同成因、构造环境的中高级变质地质体的识别标志,结合遥感解译、地球物理及野外调查等手段,初步形成了造山带中高级变质地质体的填图方法。造山带中高级变质地质体填图技术方法的构建,为进一步解体和认识西北地区的疑难变质地质体提供了借鉴和参考。

### 1.4 国际合作造山带示范填图,支撑中国地质调查局区调改革

通过在造山带开展区域地质填图,形成了包括 1:25 万苏吾什杰幅和笔架山幅、1:5 万大黑山幅、牛圈子幅、打柴沟幅及白山幅为代表的一批优秀成果图件。尤其是在中国地质调查局推行区调改革以来,为了了解国外填图工作现状并借鉴相关经验,积极与国外地调机构进行合作,目的在于填绘更为客观、真实的通用型地质图件。西安地调中心填绘了一批优秀的 1:5 万地质图件。为进一步拓宽视野,先后参加了澳大利亚、加拿大等国地质机构的合作填图,吸收借鉴他国填图理念,完成了牛圈子幅等 1:5 万及白墩子 1:2.5 万地质图件,获评中国地质调查局特优图幅;树立了通用型地质图和目标导向的填图理念,设计了全新的地质图图面表达方式,有力支撑了中国区域地质调查改革。地质实体按岩性进行详细填图、地质现象引导地质路线的填图方法、已有成果的继承与充分利用、地调科研一体化、图面表达方式等为中国地质调查局地质调查技术标准——区域地质调查技术要求(1:50 000,DD2019-01)的修订提供了重要参考依据。编制并出版的 1:5 万牛圈子幅地质图(中、英文版),在中国西北乃至全境区域地质调查中起到示范引领作用。

## 1.5 创新编图技术方法,服务地调科研工作

利用自身专业和区位优势,西安地矿所建所初期即编制了西安幅、玉门幅、兰州幅、宝鸡幅 1:100 万地质图(西安地矿所作为参与单位完成的全国编图总成果荣获 1978 年全国科技大会奖)及说明书等一系列优秀图幅。随后,围绕火山岩-基性超基性岩等专题调查研究相继完成了一系列的专题图件。进入 21 世纪,尤其是国土大调查以来,中国西北各省(自治区)基于最新基础地质调查资料,编制了各省地质图及系列专题图件。西安地调中心依据西北地区最新资料,编制了不同比例尺的西北地区地质图、天山及邻区、秦岭、祁连山、昆仑、阿尔金及北山等重要造山带区域图件、青藏高原等系列专题性图件,反映了国土大调查以来区域地质调查取得的主要成果,在基础研究及地质找矿方面均得到了广泛的应用。在区域性图件编图过程中,除了进行区域地层清理等常规工作外,为了向读图者提供快捷了解区域地层组成及时空关系的途径,进一步提高图件可读性,弃用了传统地层图例,创新性提出地层组成及时空结构表的表达方式(王洪亮等,2007;中国西北 1:100 万地质图,待出版),使读图者能快速通过时空结构表了解蛇绿构造混杂带的组成、结构和区域地层的时空变化等特征,建立多维动态时空观;由于其更为直观且具有较强的实用性,在行业内区域性图件的编图工作中得到了广泛应用。同时,通过编图,发现区域存在重大基础地质问题,并对此开展进一步的深入调查研究,成功申报了诸多地调科研项目。近年来,在致力于区域图件编制效率方面持续创新,即在地质矿产数据库基础上的信息化成图,对基础地质图件中的地质单元重新分类,再重组整饰成图。成图时仅需要根据编图思想对基础地质单元进行分类,成图过程大部分由计算机处理,方便快捷,极大提升了地质编图的效率。西北地区区域性图件编图技术方法的不断创新,为充分展示地质编图思想及区域规律、区域性地质图件的快速形成提供了有力保证。

## 2 创新基础地质理论,引领西北地质调查研究

### 2.1 引进板块构造理论,引领中国板块构造研究

1972 年,西安地矿所李春昱先生及其团队意识

到板块构造学说对全球地质构造研究具有重要价值。作为引入板块构造理论的先驱者,李春昱先后提出在秦岭、台湾、雅鲁藏布江、金沙江、祁连山、北山等构造带存在板块缝合带,总结了中国大陆地壳形成的特点,概括了板块构造的成矿和控矿理论,并率先在西北地区开展板块构造专题研究,为中国板块构造理论的研究奠定了坚实的基础,提供了研究工作范例,为西北地区培养了板块构造领域的后继人才(中国地质调查局西安地质调查中心,2019)。

### 2.2 秉持海相火山岩学科特色,提出海相火山岩浆-热卤水对流循环成岩成矿理论

海相火山岩及成矿理论是西安地矿所的特色研究领域,20 世纪 60 年代,西安地矿所宋叔和先生及其团队对细碧角斑岩的成因、分类等提出了系统介绍并开展了诸多的研究,这为海相火山岩及成矿研究奠定了坚实的基础。90 年代以后,为了进一步揭示海相火山岩及其地球动力学过程,重塑祁连造山带构造-岩浆演化历史,进一步指导找矿实践,夏林圻等(1995,1996)提出了新的海相火山岩分类方案,建立了海相火山岩浆-热卤水对流循环成岩成矿理论模式和岩浆演化序列,形成了以成因岩浆学、岩浆动力学为特色的火山岩浆学新研究领域;尤其对火山岩浆包裹体进行了创新性研究,建立了岩浆包裹体演化程度分类方案及岩浆演化过程中系列物理化学参数的热力学方法,认为地幔柱上隆和在地幔流体诱发产生了地幔部分熔融和交代作用,形成了巨大的火山岩浆体,并由它作为“热引擎”或“热中心”,形成块状硫化物矿床所必需的“海底热卤水对流循环体系”(夏林圻等,1985,2001)。基于此,建立了成矿模式和找矿模式,把成矿、成矿作用有机地统一在火山岩浆形成、演化过程之中,具有重要的指导找矿实践意义。在该理论的指导下,通过在北祁连成矿带白银矿田开展大比例尺火山岩相填图,恢复了古火山机构,厘定了古火山喷口的识别标志,指明了白银矿田工业矿体在火山岩机构中的位置和下一步的找矿方向(李向民等,2000)。

### 2.3 中国及邻区大陆板内火山作用研究取得系列原创性成果

以国土大调查以来地质事业蓬勃发展为契机,火山岩研究团队聚焦中国大陆及邻区火山活动及其动力学过程、天山石炭纪一早二叠世火山岩成因及形成环境、如何判别弧玄武岩与大陆玄武岩、青藏高

原新生代火山岩时空演变规律及动力学过程等关键科学问题,持续深入对中国及邻区大陆板内火山岩调查研究,取得 6 个方面的创新性成果(Xia et al., 2004,2019,2020;夏林圻等,2007,2008,2016;Xia, 2014):①查明了亚洲地质演化过程中,自古元古代以来,在现今中国大陆及其相邻地区曾经发生过 7 次大规模大陆板内火山活动(图 1),详细建立了它们与全球超大陆裂谷化-裂解和会聚-碰撞的对应关系。②首次提出和查明中国西北部石炭纪一早二叠世火山岩系形成于裂谷环境而并非岛弧环境,并将其命名为天山(中亚)大火成岩省;建立了有效区分大陆玄武岩和弧(岛弧+大陆弧)玄武岩的地球化学准则,厘定了古亚洲洋在石炭纪前已经闭合,对重新认识中亚地区石炭纪一早二叠世构造演化和成油、成矿地质背景具有重要意义。③查明华北陆块(或克拉通)上的古元古代晚期(距今 1.84~1.62 Ga)裂谷岩浆作用是 Columbia 超大陆裂谷化过程中全

球性裂谷岩浆作用的组成部分。④进一步证明若干中国古陆块(和微陆块)上的新元古代中—晚期大规模裂谷火山活动是 Rodinia 超大陆裂谷化和裂解作用的响应,也是全球早古生代大洋开启的先兆。⑤通过天山(中亚)大火成岩省与世界三大火成岩省系统对比研究,提出鉴别“含矿”和“不含矿”大火成岩省的地球化学标志。⑥进一步系统研究并探讨了青藏高原新生代火山岩,认为新生代火山作用是印度-亚洲大陆碰撞的火山响应;随着印度-亚洲大陆碰撞从接触-碰撞(即“软碰撞”或“同碰撞”)转变到全面碰撞(即“硬碰撞”或“碰撞后”),火山岩作用逐渐从钠质+钾质变为钾质-超钾质+埃达克质,火山岩作用显示规律性的时、空迁移,该时、空变化对形成青藏高原的深部地球动力学过程提供了重要约束。以上成果的取得,解决了火山岩关键地球化学判别指标和构造环境问题,促进了中国及邻区大陆板内火山作用理论创新及发展。

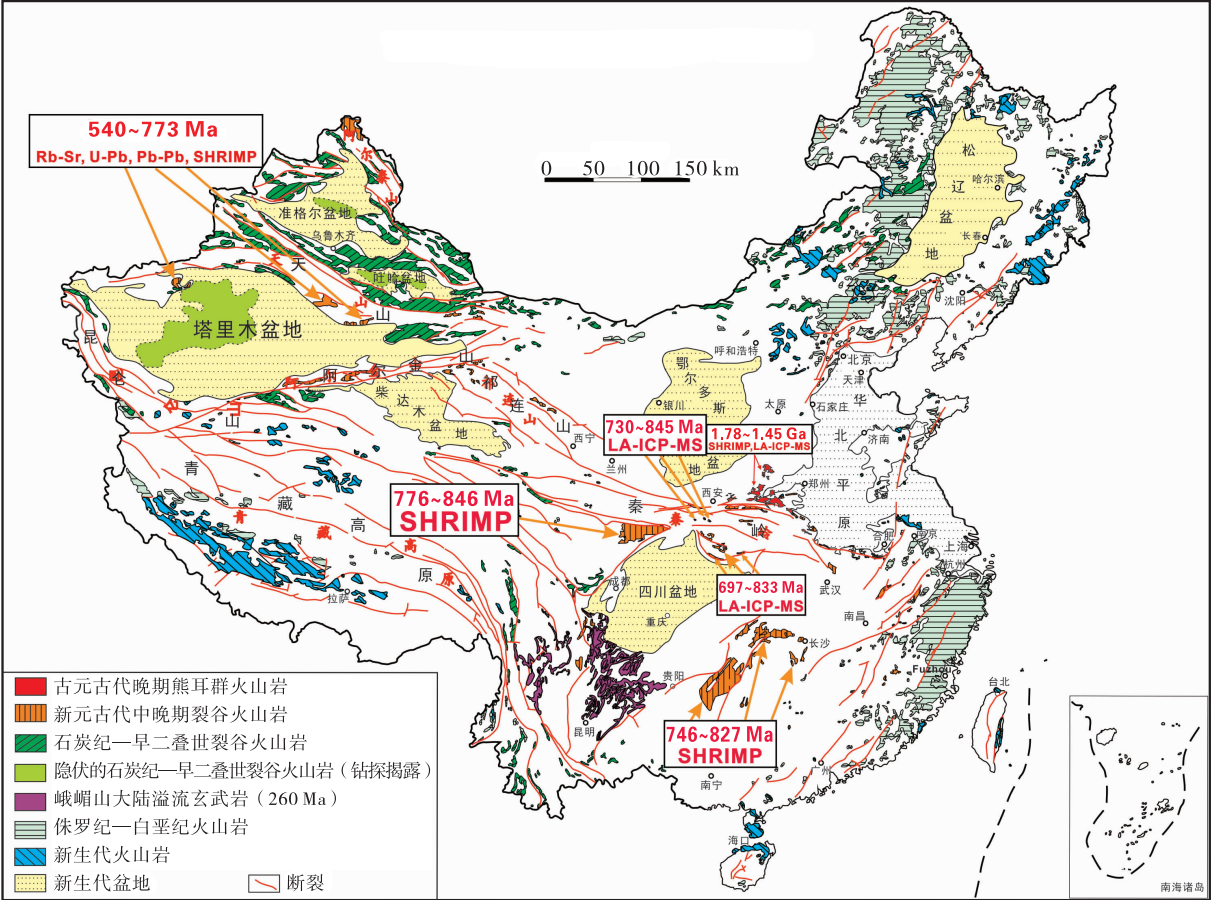


图 1 中国(大陆板内)火山岩分布图(Xia,2014)

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of continental intraplate volcanic rocks in China

## 2.4 发现阿尔金山风成堆积,开启新生代地质研究新篇章

基于中国地质调查局地质调查项目,发现了阿尔金山新生代风成堆积序列。以内陆干旱化直接产物风尘堆积为窗口,聚焦于青藏高原北缘阿尔金山地区新发现的始新世和新近纪风成红黏土,以磁性地层学为基础,采用磁化率、粒度、碳酸钙等多种古气候学代用指标,揭示始新世风尘堆积是目前为止最早的内陆干旱化记录,重建了中国西北地区的干旱化演化过程(Li et al., 2018)。自此之后,在黄土高原东部持续围绕新近纪风成红黏土开展精细研究,反演了吕梁山新近纪时期隆升剥蚀时限,认为吕梁山约 5.7 Ma 隆升的动力机制应源自青藏高原增生扩展的远程效应(Pan et al., 2018)。

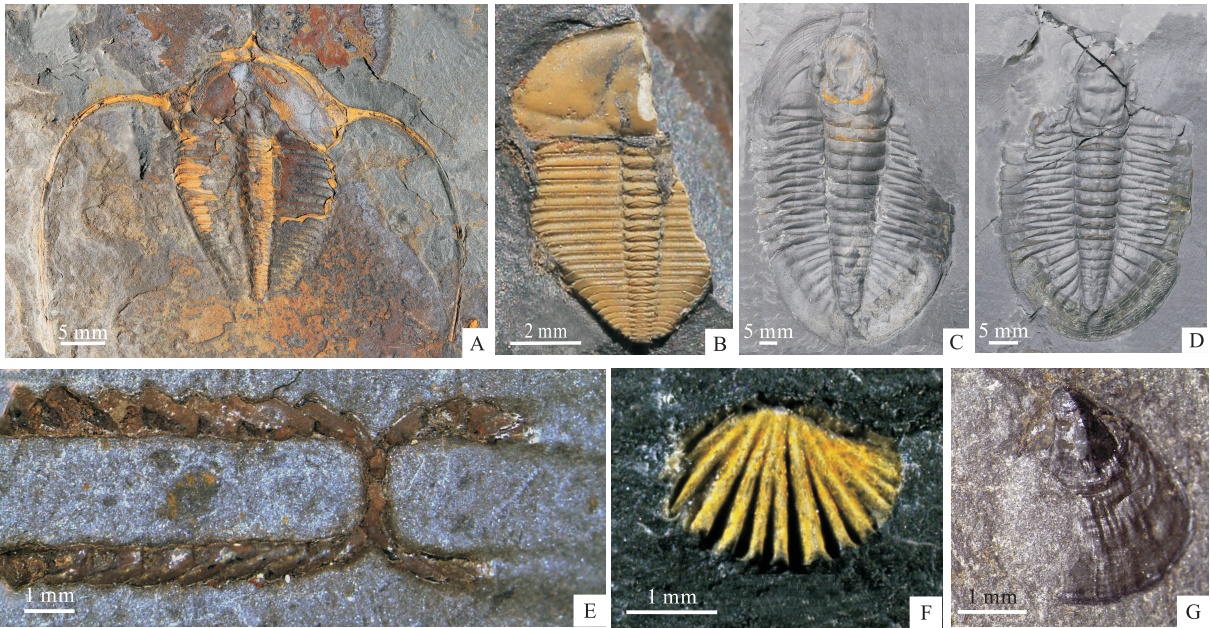
## 2.5 典型生物群古生物研究获重要成果

西安地矿所建立初期,古生物与地层的调查研究主要致力于西北地区地层区划和地层系统的建立及重要层位(震旦系、青白口系、泥盆系等)的详细研究。20 世纪 80 年代,西安地矿所在全面梳理建所以来成果资料的基础上,出版了西北地区地层古生物图册(陕甘宁分册,1~3 册),汇编形成了建所以来地层古生物领域具有影响力的重要成果(西安地质矿产研究所,1982)。陕西高家山生物群具有独特的多门类化石组合特征,对高家山生物群研究不仅丰富了晚震旦世晚期的生物群,同时也为不同地区生物群对比和寒武纪生物“大爆发”提供了重要依据,确立了高家山动物群在地球早期演化中的重要地位(张录易等, 2001)。后续对高家山动物群中的陕西迹(*Shaanxilithes*)化石进一步研究,构建了非矿化的 *Shaanxilithes* 与世界公认最早的埃迪卡拉纪矿化骨骼生物 *Cloudina* 的亲缘演化关系,为探索“寒武纪生命大爆发”的矿化骨骼起源之谜提供了更多的思路和参考(Wang et al., 2021)。聚焦疑难地层及古生物化石,致力于提供理想的奥陶纪、志留纪候选层型剖面,周志强等(1999)对上扬子地台北部及东部宝塔灰岩三叶虫开展古生物研究,进一步厘清了宝塔组的划分并提供了候选层型剖面位置。付力浦等(1986, 2006)最早对东秦岭紫阳芭蕉口志留系剖面进行了笔石带的详细划分,受到国际地质界极大重视。依托国土大调查以来的地调项目,对紫阳志留系笔石研究持续深入,新发现了芭蕉口任河东岸剖面,识别出 4 个重要笔石带,认为该剖面是中国最好的笔石相中志留统底界层型

剖面,且为国际上重要的文洛克统典型剖面之一,并在此基础上建立了陕西紫阳地区(扬子西北缘)志留系的笔石带序列,为志留系的高精度对比提供了可靠的生物地层依据(Wang et al., 2014, 2015)。随着对该区工作的持续深入,发现并命名了早奥陶世典型的斜坡相三叶虫动物群——“紫阳动物群”(以三叶虫化石为主,兼有笔石、腕足动物、节肢动物、遗迹化石等多个门类化石(图 2),该动物群的发现和研究将为奥陶纪生物多样性及扬子西北缘斜坡相生物多样性辐射研究提供重要化石证据(王健等, 2019)。

## 2.6 创新性地提出大陆边缘系统、西北两大构造域的分界新认识

针对西部古亚洲构造域和特提斯构造域的定义、时限、范围界线、相互关系及特提斯构造古地理格局等地质问题存在的争议,国土大调查以来,在梳理青藏高原北部造山带、天山-兴蒙造山带蛇绿构造混杂岩及青藏高原古生代构造古地理编图研究成果,创新性地提出中华古陆链(塔里木-敦煌-阿拉善)代表中国西部古亚洲构造域与古特提斯构造域的分界,提出大陆边缘系统新认识。两大构造域的观点认为古陆链北侧天山-兴蒙造山带是与古亚洲洋洋中脊扩张的动力学系统、演化过程与古亚洲洋裂解和拼合有关;古陆链南侧秦岭-祁连-昆仑造山带是与特提斯洋洋中脊扩张的动力学系统,演化过程与特提斯洋裂解、拼合有关。古陆链南、北侧同为早古生代山系,陆缘系统性质有明显差别,古陆链北侧属古亚洲洋南部被动陆缘系统,古陆链南侧属特提斯洋北部活动陆缘系统。地球内动力学系统分属 2 个洋中脊扩张系统(李荣社等, 2011; 徐学义等, 2014b)。青藏高原多条时代接近的蛇绿构造混杂岩带构造属性存在争议;通过青藏高原中小比例尺编图和地质调查研究新资料的综合集成研究,提出了陆缘系统的认识。该观点认为受同一洋中脊扩张作用的影响,随洋壳向陆壳板块的不断俯冲,在大陆边缘所产生的局部拉张伸展构造背景下,向洋一侧形成的多岛弧盆系和向陆一侧形成的裂陷盆地共同组成一个陆缘系统,板块汇聚边界-造山带中保存下来的蛇绿岩或蛇绿构造混杂岩带是多岛弧盆系的残留。该研究将多岛弧盆系纳入了大陆边缘,强调了多岛弧盆系是一个具有成因联系的整体,尤其指出了陆缘地质研究是站在陆上看洋,通过多岛弧盆系的恢复,研究洋演化历程和陆的生长过程(李荣社等, 2008b)。



A、B. *Seleccenceme ziyangensis*(三叶虫)；C、D. *Niobe* sp. (三叶虫)；E. *Tetragraptus approximatus*(笔石)；F. *Tritoechia* sp. (腕足)；  
G. *Lingulella* sp. (腕足)

图 2 紫阳动物群典型化石图

Fig. 2 Typical photos of Ziyang fauna

2.7 深化西北造山带构造演化研究,提出西北地区构造格架新认识

自 20 世纪 80 年代开始,西安地矿所围绕西北主要造山带区域性变质岩、地层及古生物研究存在的问题,取得以下成果:吴汉泉等(1990)在北祁连山确认了青海省祁连县清水沟-百经寺地区寒武系中存在高级蓝片岩带,该带北侧甘肃九个泉地区的奥陶系中存在低级蓝片岩带,认为北祁连山地区板块俯冲作用下形成的蓝片岩带为中国矿物组合最全、最典型的高压低温变质带;对贺兰山、北山、秦岭、大巴山等典型区关键地层、古生物及沉积作用的调查研究,形成了对地层区划和格架的重要认识,建立相关的造山作用模式(李晋僧等,1983;赵祥生等,1984,1992;丁培榛等,1985,1989;周志强,1989;张瑞林,1992;赵祥生,1992;曹宣铎等,1995,2001;周志强等,1999,2010);为系统总结秦岭及邻区区域综合研究成果,张二朋等(1992)编制《秦岭大巴山及邻区1:100万地质图及说明书》和《秦岭及邻区地质构造特征概论》,总结了区域地质及构造地质的基本特征。此外,依托造山带岩浆岩、变质岩、沉积岩及构造基础研究,西安所对西北地区主要构造单元进行

划分并重建了区域大地构造演化过程(Feng et al. , 1989;肖序常等,1992;冯益民等,1996;冯益民,1997;何世平等,2002)。以上这些工作均对西北地区造山带构造演化研究具有重要奠基立业作用。

造山带构造演化研究在很大程度上取决于区域地质调查程度的提升。1955 年,中国率先在新疆阿尔泰、西昆仑等区开始了 1:20 万区域地质调查试点;1960 年,率先在天山、准噶尔地区开始了 1:5 万区域地质调查;国土大调查之前已经基本完成了西北地区 1:20 万区域地质调查的全覆盖,这些工作极大提高了基础地质调查与研究的水平,为开展造山带研究奠定了坚实的基础;国土大调查以来,西安地调中心分阶段精心组织和实施了西北地区 1:25 万和 1:5 万区域地质调查工作,目前已全面完成了重要构造带 1:25 万区域地质调查及除极端条件地区(昆仑、西天山等区)外的各造山带、基岩区及部分盆山结合带的 1:5 万区域地质调查,形成了一系列第一手的调查研究资料,精细解剖了造山带的组成和结构。基于以上调查资料,对西北地区主要造山带开展了区域综合研究工作(王洪亮等,2007;李荣社等,2008a;徐学义等,2008a,2008b,2014a,2016;校

培喜等,2014;李向民等,2016;李文渊,2018;王永和等,2020;陈隽璐等,2021;余吉远等,2021),厘清了关键地层组成及归属、重要地质体形成时代、含矿建造及构造环境等问题,进一步深化了秦岭、祁连、昆仑、天山、北山、阿尔泰、阿尔金等主要造山带物质组成、结构、属性、构造演化及成矿地质背景的认识。

西北地区大地构造演化的最早系统论著是黄汲清先生于1945年所著的《中国主要地质构造单位》,系统叙述了中国西北地区的基本构造单位和各造山旋回的中国大地构造特色。随后至20世纪60年代,进一步论述了中国大地构造基本轮廓,将中国大陆构造单元划分为地台或准地台和地槽褶皱系。任纪瞬先生进一步发展了以上认识,主张多旋回学说与板块构造相结合的构造模型(潘桂棠等,2009),以上观点均认为西北地区属于古亚洲和特提斯两大构造域。20世纪80年代,王鸿祯先生、李春昱先生相继根据板块构造提出中国及邻区、亚洲大地构造划分方案(潘桂棠等,2009)。建国以来实施的两轮西北各省地质志、岩石地层清理等资料均对西北构造单元划分方案的形成起到重要支撑作用,尤其是随着近年来新一轮地质志项目的开展,以古生代构造格架为主,提出了新的包括西北地区在内的全国板块构造区划(刘训等,2015),尤其是关注西北地区主要造山带研究的学者,着眼于西北地区的重大地质问题,对其开展了长期的区域尺度的研究(张国伟等,1996;李锦轶等,2006;Song et al., 2009, 2013, 2017; Xiao et al., 2010; Dong et al., 2011, 2016, 2021; Zhao et al., 2018; 宋述光等, 2019; 肖文交等, 2019; 张国伟等, 2019; 吴福元等, 2020; 高俊等, 2022),解决了一批碰撞型和增生型造山带中古老地块构造属性、造山带结构、碰撞/增生过程及其地球动力学机制等关键问题,多角度归纳总结并建立了主要造山带的构造演化模式,为西北全区构造演化研究提供了强有力的支撑。西安地调中心立足西北大区中心的定位,充分利用基于大量基础地质调查的综合研究成果,编写了《中国区域地质志·祁连山志》(待出版);陆续从造山带尺度提出了系列构造演化模式,并开展了相关的西北地区构造单元区划(徐学义等,2008a, 2014b; 计文化等, 2020)及西北大地构造演化与成矿研究(王永和等, 2020)。尤其是近年来在洋板块及陆缘地质思想的指导下,对西北地区构造单元进行重新划分,即将西北地区一级构造

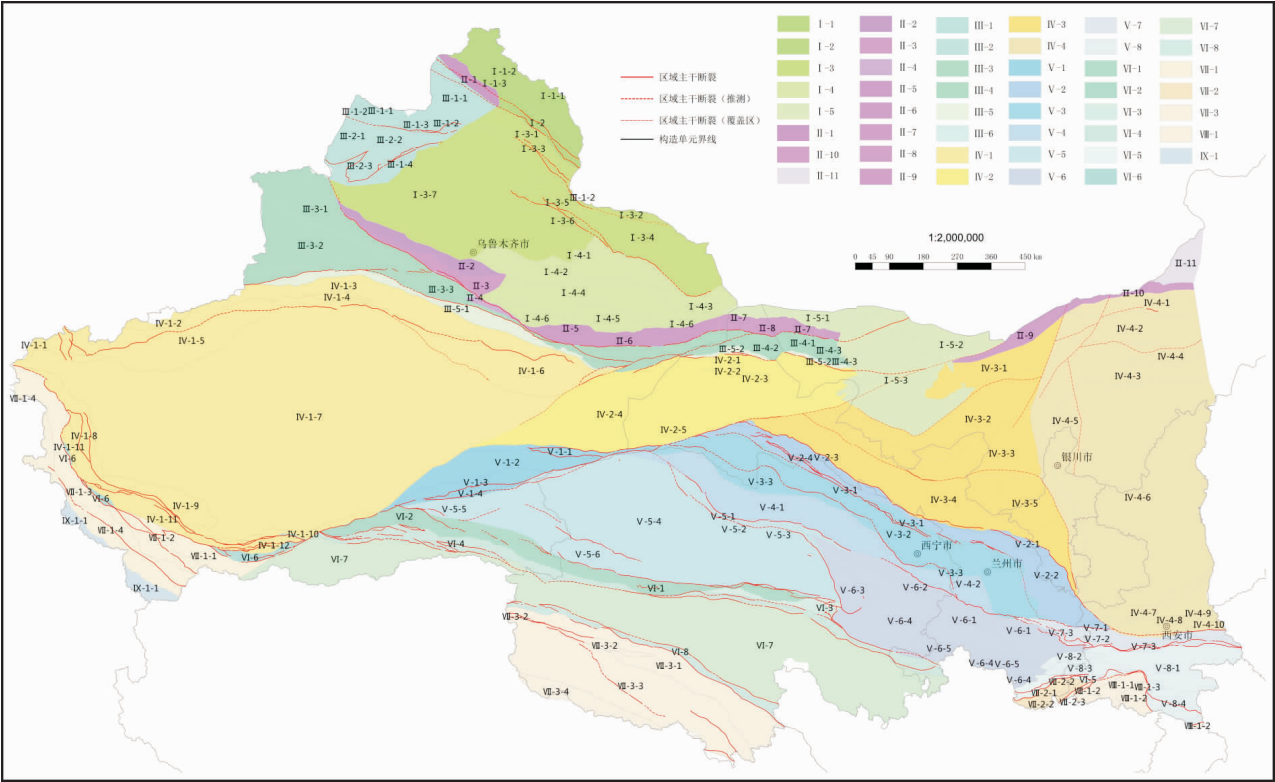
单元厘定为古亚洲和特提斯两大构造域(图3),在此基础上进一步划分为3个洋板块系统(北天山-西拉木伦洋板块、南昆仑-巴颜喀拉洋板块、双湖-班公湖洋板块)、4个弧盆系(阿尔泰-准噶尔-南蒙古多岛弧盆系、西准噶尔-中天山多岛弧-盆系、秦祁昆多岛弧盆系、北羌塘多岛弧盆系)和2个陆块(群)(塔里木-阿拉善-鄂尔多斯陆块区、扬子陆块区)等9个二级、46个三级及112个四级构造单元;提出斋桑-额尔齐斯-唐巴勒-达拉布特-北天山-康古尔塔格-红石山是古亚洲主洋盆的残迹,其北东侧为主洋盆与西伯利亚陆块相互作用的弧盆系,南侧为主洋盆与塔里木-阿拉善相互作用的弧盆系,并提出了秦祁昆早古生代弧盆系属于特提斯构造域的观点,理清了陆(地)块边缘的增生结构(计文化等, 2020)。

### 3 服务资源环境及国家重大工程建设

#### 3.1 依托基础地质研究,服务资源环境调查

西安地矿所成立伊始,宋叔和先生带领业务人员在西北地区开展与海相火山岩相关的块状硫化物矿床、铬、铁、磷等国家急需矿产的地质找矿工作。该项工作持续开展数十年,尤其是促进了海相火山岩有关块状硫化物矿床理论与实践相结合,总结了成矿条件和找矿标志,提交了找矿远景区和找矿靶区,引领了北祁连成矿带清水沟-白柳沟地区(郭介人等, 1995; 任有祥等, 2000)、白银矿田深部(彭礼贵等, 1995; 李向民等, 2000)及石居里沟铜多金属矿(李文渊等, 1999)找矿取得新突破。这些工作都聚焦于成矿地质背景和区域成矿规律的总结并将其服务于找矿实践。

国土大调查以来,西安地调中心总结梳理了大量地质填图和区域综合研究资料,根据地质演化过程中不同阶段具有不同动力学体制和地质作用的产物(岩石建造、构造),应用动态大地构造分析思想,在露头大地构造环境分析、编图基础上,提出将西北地区划分为前南华纪、南华纪一早古生代、晚古生代一中三叠世、晚三叠世—新生代4个构造阶段,分阶段进行大地构造环境分析;阐述了不同阶段各单元特征,分析了不同阶段大地构造格局、环境及演化过程,不同阶段、不同构造环境与主要矿产成矿的关系;建立了地质演化与成矿的耦合关系,为西北地区找矿突破提供详细基础地质资料的支撑(王永和等,



I-1. 阿尔泰山块及其南部边缘; I-2. 富蕴-清河弧-弧碰撞带(DC); I-3. 准噶尔地块及其边缘; I-4. 吐哈地块及其边缘; I-5. 杭乌拉地块及其边缘; II-1. 额尔齐斯-斋桑弧-弧碰撞带(DC); II-2. 巴音沟弧-陆碰撞带(D<sub>2</sub>, C); II-3. 依连哈比尔尕岛弧(D<sub>2</sub>); II-4. 冰大坂-米什沟弧-陆碰撞带; II-5. 康古尔塔格弧-弧碰撞带(C); II-6. 雅满苏增生弧(C); II-7. 红石山弧-弧碰撞带(C); II-8. 白山泉-黑鹰山增生弧(C); II-9. 恩格尔乌苏缝合带(O, C); II-10. 索伦山缝合带(O<sub>1-2</sub>, DP<sub>1</sub>); II-11. 查干诺尔岛弧(C<sub>2</sub>P)+残留海盆(P<sub>2-3</sub>)(扎兰屯-多宝山复合岛弧西端); III-1. 西准噶尔地块及其边缘; III-2. 塔城地块及其边缘; III-3. 伊犁-中天山地块及其边缘; III-4. 明水-旱山地块及其边缘; III-5. 南天山-洗肠井缝合带; IV-1. 塔里木陆块; IV-2. 敦煌陆块; IV-3. 阿拉善陆块; IV-4. 鄂尔多斯陆块; V-1. 阿中地块及其边缘; V-2. 北祁连结合带; V-3. 中祁连地块及其边缘; V-4. 南祁连地块; V-5. 柴达木陆块及其边缘; V-6. 西秦岭联合地块(包括吴家山地块、鄂拉山地块、西倾山隐伏地块); V-7. 秦岭地块及其南北两侧陆缘; V-8. 中南秦岭陆缘(上扬子北部陆缘); VI-1. 纳索台-布尔汗布达山弧-陆碰撞带(OS); VI-2. 东昆仑西段阿克塔格-落雁山弧后盆地(CP<sub>2</sub>); VI-3. 温泉水库-醉马滩弧后盆地(CP<sub>2</sub>)+弧背盆地(P<sub>3</sub>); VI-4. 木孜塔格-阿尼玛卿弧-陆碰撞带(CP); VI-5. 勉略弧-陆碰撞带(DC); VI-6. 康西瓦-苏巴什弧-陆碰撞带(CP); VI-7. 黄羊岭-巴颜喀拉残留洋盆(CTa)+前陆盆地(Tb); VI-8. 西金乌兰-玉树弧-陆碰撞带(D<sub>2</sub>T); VII-1. 甜水海地块; VII-2. 碧口地块; VII-3. 北羌塘地块; VIII-1. 上扬子陆块(汉南部分); IX-1. 日土地块

图3 西北地区构造单元划分图(计文化等, 2020)

Fig. 3 Division of tectonic units in Northwest China

2020)。同期开展的造山带地质矿产综合研究项目持续深化各个造山带成矿地质背景认识、总结区域成矿规律,强化基础地质成果集成与综合研究。在进一步创新西北地区构造格架认识、总结区域成矿背景及区域性图件编制的基础上,促进了天山铜、镍、金矿,柴北缘稀有金属矿、石墨矿,祁连山铜多金属、金矿,昆仑山-阿尔金山金、锑矿,东准噶尔石墨矿,阿尔泰山南缘稀有金属矿及秦岭华阳川铀矿等矿产取得重要找矿突破(计文化等, 2018)。

晚三叠世-新生代,除了喀喇昆仑山-可可西里中生代尚处于特提斯洋北缘活动陆缘外,西北地区基本上进入板内构造演化阶段,形成了不同级别造山带与盆地相间的构造格局。基于对青藏高原隆升以来形成的构造-沉积特征、水文地质条件、全球气候变化,尤其是亚洲季风等地质背景的分析,形成了中国三北地区荒漠化区域分类与发展趋势研究成果(李智佩等, 2002),探索了基础地质服务支撑环境领域的有效途径。在当今基础地质转型升级的一

个重要方面即为中新生代构造-气候-地表过程研究,尤其是新生代以来的地质活动与人类活动息息相关。例如,黄河流域生态保护和高质量发展战略提出,赋予了基础地质研究新的时代命题。西安地调中心立即响应,组织编制完成《黄河流域第四纪地质与地貌图》(待出版内部资料)。图件突出表现了整个黄河流域涉及的青藏高原、黄土高原及华北平原三级阶梯内的第四系不同成因类型及时代、构造地貌单元分区、断裂构造展布、重要地质遗迹分布和冰川范围等信息;可为进一步研究黄河形成、演化及其环境效应、动植物群落演替、人类活动及其影响因素等提供有效服务,为国家在黄河流域部署重大项目提供决策依据。未来,基础地质重点工作方向之一,继续支撑黄河流域生态保护与高质量发展战略,立足基础地质专业,致力于构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究及图件地质信息表达,精准服务于黄河流域上游水源涵养工程建设和中游水土保持、灾害与污染防治工作。

### 3.2 推进基础地质调查转型升级,精准服务国家重大工程建设

基础地质调查服务国家重大工程建设是新时代基础地质调查转型升级并服务国民经济发展的重要体现,亦是西安地调中心基础地质人应对转型的新领域。建设川藏铁路是贯彻落实新时代党的治藏方略的一项重大举措,西安地调中心以此为契机,在昌都-林芝段开展1:5万廊带地质填图,查明了铁路沿线岩石类型、空间展布特征,识别出铁路沿线制约铁路建设的关键构造要素,提出了重点隧道出口南移的建议;同时,西安地调中心相继编制完成“西宁至青海湖城际铁路”、“青藏铁路西宁至昌都段”、“伊阿铁路沿线”等廊带地质图(1:25万编图,内部资料),图件成果突出表达了活动断裂、混杂带、地质灾害易发地质体、地质体稳定性、高温热害等铁路规划建设中需特别关注的基础地质问题。以上工作切实发挥了地质工作在铁路建设中的基础、先行作用,进一步用实际行动推动基础地质调查转型升级,解决铁路规划建设聚焦的关键地质问题,精准服务国家重大工程建设。

### 3.3 地质调查传统与新兴并举,积极开展野外科学观测研究站及地质文化村(镇)建设

自从20世纪90年代,西安地矿所以陕西紫阳晚特里奇阶笔石带谱系的演化辐射为重点,建立该

地高分辨率地层区域数据库,使该区笔石相志留系的研究与国际最新研究同步发展。国土大调查以来,古生物研究人员持续对该区志留系开展工作,相继在关键笔石种类演化、几丁石、牙形石、斑脱岩等多个方面研究取得重要进展,努力推动将紫阳中志留统底界层型剖面建设成为GSSP(国际标准层型剖面 and 点位,俗称“金钉子”)或者GSSA(国际标准层型剖面辅助剖面)。2014年,西安地调中心以紫阳任河东岸仙中沟口中志留统底界层型剖面为中心,包括建立安康阶和紫阳阶的标准剖面共计约5 km<sup>2</sup>的范围,成功申报为以典型志留系生物地层剖面和沉积学研究的“自然资源部陕西紫阳中志留统底界层型剖面野外科学观测研究站”,该观测研究站内志留系剖面弓笔石非常稀有、演化连续且保存完整,具有很好的区域代表性,是秦岭古生物学、沉积学等科研野外观测研究的重要平台。

地质文化村(镇)是指依托地质资源禀赋,通过深度挖掘地质科学和文化,将其与乡村、乡镇建设相融合,发展特色产业和经济,提升乡村、乡镇生活品质与文化内涵,形成的宜居、宜业的特色村(镇)。它是在基础地质调查工作转型升级的形势下应运而生,是促进自然-人文-生态等多学科融合发展的一项新生事物,亦是服务国家乡村战略的重要手段。结合已有工作基础和针对性的调查研究工作,讲好地质故事,在凸显地质文化村地质特色的同时,注重结合历史、文化等要素,与当地政府合作,依托西北地区自然资源禀赋,拟率先在西北地区建2个地质文化村,目前已进入联合建设阶段。

## 4 未来展望

回首60年的发展,基础地质人矢志不渝地坚守在调查与研究的一线,取得了一系列具有重要影响力的调查研究成果。而今,基础地质已进入科技创新与信息化两大引擎驱动的新时代,在转型升级的形势下,机遇与挑战并存。基础地质发展的指导思想已进入地球系统科学的时代,既需要坚持传统的海相火山岩成因及岩浆动力学、造山带结构解剖及构造演化研究,持续不断地对重大地质问题进行深化研究,做实做强造山带地质研究中心,又需要围绕不同时期国家需求赋予的新使命,拓展新领域的调查研究。未来的地质调

查研究过程中要持续贯彻地球系统科学的思想,需要更多地依托于不同专业间的数据与数据产生联系、各专业交叉并深度融合,从而力求共同促进地球系统科学的落地。

#### 4.1 持续深化西北地区基础地质调查与研究

西北超大陆旋回及多陆块聚散过程研究是西北地区地质调查研究的主线,复杂多变的伸展、汇聚等不同动力学体制的演化特征决定了不同阶段时间和空间上地质作用及其产物的差异。西北地区基础地质调查与研究的推进是不断破解重大地质问题、细化和完善大地构造演化模式、查明资源环境效应的过程,有必要持续深化包括海相火山岩与成矿、基性-超基性岩与成矿、造山带结构解剖等特色领域在内的西北地区基础地质调查与研究工作,不断提升地球系统和资源环境国情的认知水平。

近年来,调查研究相继表明,原被认为早前寒武纪基底中的部分变质岩石组合可能形成于新元古代或古生代;战略性矿产多与中高级变质地质体相关,但其内在的成岩-成矿地质背景不甚清楚;重要含油气盆地、盆山过渡带结构,尤其是构造变形的调查程度较低,通过盆山过渡带基岩区取得的地质体分布规律认识如何延伸至能源盆地,严重制约了油气形成背景的认识;西北地区区域尺度的三维地质结构尚未建立,难以形成“成山、成盆、成矿”等系统性及规律性认识。以上存在问题均为西北区域地质调查研究中亟待破解的关键地质问题。因此,未来西北地区基础地质调查与研究将紧扣存在问题,聚焦各造山带中镶嵌的古老地块或中高级变质地质体的组成结构、形成时代的重新厘定、战略性矿产成矿地质背景、含油气盆地、盆山过渡带结构构造及区域尺度造山带三维地质结构等问题,开展重点地区廊带1:2.5~1:5万大比例区域地质填图,并结合区域地球物理工作揭示重点地质体物质组成、中高级变质地质体属性、地质演化与资源环境响应、造山带三维地质结构等基础地质背景,不断修正完善西北地质构造格架认识。

#### 4.2 加强新生代构造演化对自然资源及环境影响机制研究

党的十九大报告指出:必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,“加快生态文明体制改革、建设美丽中国”要求基础地质工作增强支撑服务生态文明建设的能力与水平。现今西北盆山系地貌形

成主要受控于新生代构造作用及地表过程,其不仅与不同区域的构造变形时间、变形样式及地壳隆升等复杂的大地构造作用有关,还与地表物质的侵蚀再分布和山间盆地沉积物聚集等地表过程有关。例如,新生代以来,受青藏高原地壳隆升、岩石圈加厚并向北推挤动力学系统的控制,形成了现今青藏高原“第一阶梯”的地貌特征,新生代的地貌及气候环境等条件发生了强烈的变化。然而,在以上新生代地质演化过程中的造山带隆升、剥蚀、沉积等地表过程与气候变化之间的耦合关系尚未形成系统性认识,新生代地质调查与研究支撑服务生态文明建设的重要性尚未完全体现。

因此,未来一段时期,拟以新生代表生地质过程与资源环境效应调查研究为主线,深化覆盖区地质填图,着力解决新生代岩石地层、年代地层格架、自然资源赋存条件及背景、构造地貌与气候环境变化及全新世以来的环境变化与人类文明变迁的耦合规律等关键问题;在黄河源水涵养区、河套平原区、晋陕豫金三角区和天山北坡等重要地貌转换区和生态问题集中区开展覆盖区和地表基质填图,推动区域地质调查从山区向盆地和覆盖区扩展;拟以黄河流域高质量发展战略为依托,重点以黄河流域为突破口,初步探索中国三级地貌单元构造-气候-环境协同演变机制,不断提升西北地区多圈层交互作用和资源环境效应认识。在地球多圈层认识不断提升的情况下,以期未来能从基础研究的角度更多的服务于国家“碳中和”目标。

#### 4.3 创建西北地区区域地质数据体系

随着新时期西北地区黄河流域生态保护和高质量发展、秦岭生态保护区经济高质量发展、南疆经济社会发展、构建“美丽中国中脊带”、服务“一带一路”等一系列战略布局的勾画,对基础地质工作提出了更为迫切的“数据支撑”的要求,信息化建设与支撑服务显得尤为重要。基础地质调查与研究是地球系统科学核心环节,基础地质领域的信息化建设可进一步盘活核心环节形成的“存量”基础地质数据,使得包括构造、岩浆、沉积等多元基础地质数据多维度联系;围绕西北地区构造演化过程及资源环境效应,促进包括岩石圈数据在内的多圈层数据深度融合,建立区域地质知识图谱,精准服务区域地质自身创新发展的需求,并促进多专业融合发展和地球系统科学落地。因此,基于以上定位,西安地调中心初

步创建了西北地区区域地质数据体系,即采用现代地质学、地层学、岩石学、构造及多元结构化数据库建设思路和方法,在按岩石地层单位、侵入岩、构造分类的基础上,叠加多元(坐标轴)信息,以结构化(即每一个地质体的数据项均能投影到定义的坐标系中)方式建立数据库;数据库中数据来源以已有存量数据、报告文献等增量数据和同期开展的地质调查项目成果等增量数据为主。区域地质数据体系呈现了点元数据和面元数据分区的特征,基于数据相关支撑关系,构建了点元数据对面元数据支撑、面元数据负责成果呈现的体系。通过空间数据持续不断地积累以及数据与数据之间的联系,实现海量数据的快速分析,让数据以区域地质信息产品的形式在无极比例尺的条件下得以充分表达,实现西北大区数据集成、现状掌握、区域规律分析、动态评价与预测及社会服务等目标。

## 5 结束语

本文回顾了西安地调中心一个甲子以来取得的主要成果与进展,强调了基础地质调查与研究对于基础理论创新、支撑服务资源环境和国家重大工程建设方面的诸多重要贡献与重大意义,初步提出了未来一段时间内,在基础地质调查转型升级形势下的着力点和建议,继续夯实造山带基础地质研究,尤其需要加强新生代构造-地貌-气候耦合机制的调查与研究;逐步形成融合地层、构造、沉积岩、侵入岩、火山岩、变质岩等各专业数据的基础地质数据体系,为基础地质、矿产、能源及水工环领域业务发展提供有效的“数据支撑”,并在多专业融合过程中有效贯彻新时期地球系统科学的指导思想。

致谢:谨以此文庆祝中国地质调查局西安地质调查中心成立60周年!感谢李荣社教授级高工、王永和教授级高工、校培喜教授级高工、李向民研究员、何世平研究员、李智佩研究员、唐金荣研究员、王洪亮研究员等在本文成文过程中提供的有益建议和思路启示;感谢王健教授级高工提供紫阳动物群古生物化石及相关资料;感谢冯益民、张二朋、周志强、朱生英、张建中、杨合群等诸多老专家在本文修改时提出的宝贵意见;感谢审稿专家审阅全文并提出了建设性的修改意见;受限于文章篇幅,本文提纲挈领地梳理了西安地质调查中心60年来取得的重要成

果或进展。囿于作者的水平,难免有对成果总结梳理不到位或遗漏之处,敬请谅解。

## 参考文献(References):

- 曹宣铎,胡云绪. 秦岭商-丹断裂带南缘构造岩片地层初析[J]. 中国区域地质,2001,20(2):187-193.
- CAO Xuanduo, HU Yunxu. Tectono-stratigraphic Sheets on the South Margin of the Shang-Dan Fault zone, Qinling [J]. Regional Geology of China, 2001, 20(2): 187-193.
- 曹宣铎,赵江天,胡云绪. 秦岭石炭纪古海洋特征及古地理再造[J]. 地球科学,1995,20(6):624-630.
- CAO Xuanduo, ZHAO Jiangtian, HU Yunxu. Features and Reconstruction of Carboniferous Qinling Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(6): 624-630.
- 陈隽璐,白建科,张越,等. 中国阿尔泰-准噶尔地质图(1:500 000) [M]. 北京:地质出版社,2021.
- 丁培榛,金同安,孙秀芳. 东秦岭陕西镇安西口地区二叠纪地层及动物群[J]. 西北地质科学,1989,1:1-68.
- DING Peizhen, JIN Tongan, SUN Xiufang. The Marine Permian Strata and Its Faunal Assemblages in Xikou Area of Zhen'an County, South Shannxi, East Qinling Range[J]. Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, 1989, 1: 1-68.
- 丁培榛,姚守民. 新疆克拉玛依西部早石炭世晚期腕足类化石及地层意义[J]. 西北地质科学,1985,11: 65-74.
- DING Peizhen, YAO Shoumin. Some Early Stage of Lower Carboniferous Brachiopods from Western Part of Karamay, Xinjiang and Its Significances [J]. Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, 1985, 11: 65-74.
- 冯益民. 祁连造山带研究概况—历史、现状及展望[J]. 地球科学进展,1997,12(4):307-314.
- FENG Yimin. Investigatory Summary of the Qilian Orogenic Belt, China: History, Presence and Prospect[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 307-314.
- 冯益民,何世平. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京:地质出版社,1996.
- 傅力浦,宋礼生. 陕西紫阳地区(过渡带)志留纪地层及古生物[J]. 西北地质科学,1986,14:1-198.

- FU Lipu, SONG Lisheng. Stratigraphy and Paleontology of Silurian in Ziyang Region (Transitional Belt)[J]. Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, 1986, 14: 1-198.
- 傅力浦, 张子福, 耿良玉. 中国紫阳志留系高分辨率笔石生物地层与生物复苏[M]. 北京:地质出版社, 2006.
- 高俊, 江拓, 王信水, 等. 准噶尔一天山一北山蛇绿岩:对中亚造山带西南缘洋陆格局演化的制约[J]. 地质科学, 2022, 57(1): 42.
- GAO Jun, JIANG Tuo, WANG Xinshui, et al. The Junggar, Tianshan and Beishan Ophiolites: Constraint on the Evolution of Oceanic and Continental Framework Along the Southwestern Margin of the Central-Asian Orogenic Belt[J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(1): 42.
- 辜平阳, 陈锐明, 胡健民, 等. 高山峡谷区 1: 50 000 填图方法指南[M]. 北京:科学出版社, 2017.
- 何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 30-40.
- HE Shiping, REN Bingchen, YAO Wenguang, et al. The Division of Tectonic Units of Beishan Area, Gansu-Inner Mongolia [J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 30-40.
- 计文化, 李荣社, 陈奋宁, 等. 中国西北地区南华纪—古生代构造重建及关键问题讨论[J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 634-655.
- JI Wenhua, LI Rongshe, CHEN Fenning, et al. Tectonic Reconstruction of Northwest China in the Nanhua-Paleozoic and Discussion on Key Issues[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 634-655.
- 计文化, 杨博, 陈隽璐, 等. 西北主要成矿带地质矿产调查工程成果报告[R]. 中国地质调查局西安地质调查中心, 2018.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 148-168.
- LI Jinyi, HE Guoqi, XU Xin, et al. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 148-168.
- 李晋僧, 于芬玲. 陕西陇县中奥陶统平凉组牙形刺[J]. 西北地质科学, 1983, 1: 19-26.
- LI Jinseng, YU Fenling. The Conodonts of the Middle Ordovician Pingliang Formation from Longxian, Shaanxi [J]. Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, 1983, 1: 19-26.
- 李荣社, 计文化, 辜平阳. 造山带(蛇绿)构造混杂岩带填图方法[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2016.
- 李荣社, 计文化, 何世平, 等. 中国西部古亚洲与特提斯两大构造域划分问题讨论[J]. 新疆地质, 2011, 29(3): 247-250.
- LI Rongshe, JI Wenhua, HE Shiping, et al. The Two Tectonic Domain Division Discussion Between the Ancient Asian and Tethys in Western China[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(3): 247-250.
- 李荣社, 计文化, 杨永成, 等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社, 2008a.
- 李荣社, 徐学义, 计文化. 对中国西部造山带地质研究若干问题的思考[J]. 地质通报, 2008b, 12: 80-85.
- LI Rongshe, XU Xueyi, JI Wenhua. Some Problems of Geological Study in the Western China Orogenic Belt[J]. Geological Bulletin of China, 2008b, 12: 80-85.
- 李文渊. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2201-2210.
- LI Wenyuan. The Primary Discussion on the Relationship Between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(8): 2201-2210.
- 李文渊, 杨合群, 赵东宏, 等. 北祁连山发现塞浦路斯型富铜工业矿床[J]. 矿床地质, 1999, 18(3): 32.
- LI Wenyuan, YANG Hequn, ZHAO Donghong, et al. Cyprus Type Copper Deposits was Discovered in North Qilian Mountains [J]. Mineral Deposits, 1999, 18(3): 32.
- 李向民, 彭礼贵, 贺庆, 等. 甘肃白银矿田东部矿床成矿和找矿模式[M]. 北京:地质出版社, 2000.
- 李向民, 张占武, 王国强, 等. 北山成矿带地质矿产图(1: 500 000)[M]. 西安:西安地图出版社, 2016.
- 李智佩, 岳乐平, 聂浩刚, 等. 中国三北地区荒漠化区域分类与发展趋势综合研究[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 135-153.
- LI Zhipai, YUE Leping, NIE Haogang, et al. Regional Classification and Developing Trend of Desertification in Northern China[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 135-153.
- 刘训, 游国庆. 中国的板块构造区划[J]. 中国地质, 2015, 42

- (1):1-17.
- LIU Xun, YOU Guoqing. Tectonic Regional Subdivision of China in the Light of Plate Theory[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 1-17.
- 潘桂棠,郝国杰,冯艳芳,等. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2009, 26(1): 28.
- PAN Guitang, HAO Guojie, FENG Yanfang, et al. Subdivision of Tectonic Units in China[J]. *Geology in China*, 2009, 26(1): 28.
- 彭礼贵,任有祥,李智佩. 甘肃白银厂铜多金属矿床成矿模式[M]. 北京:地质出版社,1995.
- 任有祥,彭礼贵,李智佩,等. 北祁连山清水沟-白柳沟矿田块状硫化物矿床成矿条件和成矿预测[M]. 北京:地质出版社,2000.
- 宋述光,吴珍珠,杨立明,等. 祁连山蛇绿岩带和原特提斯洋演化[J]. *岩石学报*, 2019, 35(10): 2948-2970.
- SONG Shuguang, WU Zhenzhu, YANG Liming, et al. Ophiolite Belts and Evolution of the Proto-Tethys Ocean in the Qilian Orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(10): 2948-2970.
- 王国灿,陈超,胡健民,等. 戈壁荒漠覆盖区 1: 50 000 填图方法指南[M]. 北京:科学出版社,2018.
- 王洪亮,徐学义,何世平,等. 中国天山及邻区地质图(1: 1 000 000)[M]. 北京:地质出版社,2007.
- 王健,华洪,王欣,等. 紫阳动物群:华南一个早奥陶世斜坡相化石库[J]. *科学通报*, 2019, 64(22): 2342-2350.
- WANG Jian, HUA Hong, WANG Xin, et al. Ziyang Fauna: A Slope Facies Fossil Lagerstätte of Early Ordovician in South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(22): 2342-2350.
- 王永和,高晓峰,孙吉明,等. 西北地区大地构造环境与成矿[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2020.
- 邬介人,于浦生,黄玉春. 北祁连山清水沟-白柳沟地区铜、多金属成矿地质条件的分析[J]. *西北地质科学*, 1995, 16(1): 50-68.
- WU Jieren, YU Pusheng, HUANG Yuchun. Analysis for Metallogenetic and Geological Condition of Copper-Multi-Metal in Qingshuigou to Bailiugou Region, North Qilian[J]. *Northwest Geoscience*, 1995, 16(1): 50-68.
- 吴福元,万博,赵亮,等. 特提斯地球动力学[J]. *岩石学报*, 2020, 6: 1627-1674.
- WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan Geodynamics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 6: 1627-1674.
- 吴汉泉,冯益民,霍有光,等. 北祁连山中段甘肃南奥陶系变质硬柱石蓝闪片岩的发现及其意义[J]. *地质论评*, 1990, 36(3): 276-280.
- WU Hanquan, FENG Yimin, HUO Youguang, et al. The Discovery of Ordovician Lawsonite-Glaucophane Schist in the Middle Section of the Northern Qilian Mountains, Sunan county, Gansu Province, and Its Significance[J]. *Geological Review*, 1990, 36(3): 276-280.
- 西安地质矿产研究所主编. 西北地区地层古生物图册(陕甘宁分册)1—3 册[M]. 北京:地质出版社,1982.
- 夏林圻,夏祖春,任有祥,等. 北祁连山构造-火山岩浆-成矿动力学[M]. 北京:中国大地出版社,2001.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学[J]. *西北地质科学*, 1995, 16(1): 1-28.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi. Dynamics of Tectono-Volcano-Magmatic Evolution from North Qilian Mountains, China[J]. *Northwest Geoscience*, 1995, 16(1): 1-28.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京:地质出版社,1996.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,等. 天山及邻区石炭纪-一早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J]. *西北地质*, 2008, 41(4): 1-68.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi, et al. Petrogenesis of Carboniferous-Early Permian Rift-Related Volcanic Rocks in the Tianshan and Its Neighboring Areas, Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 2008, 41(4): 1-68.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,等. 天山岩浆作用[M]. 北京:中国大地出版社,2007.
- 夏林圻,徐学义,李向民,等. 中国及邻区构造演化过程中几个关键时段火山岩研究[M]. 北京:地质出版社,2016.
- 肖文交,宋东方, Windley Brian F, 等. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(10): 1512-1545.
- XIAO Wenjiao, SONG Dongfang, WINDLEY Brian F, et al. Research Progresses of the Accretionary Processes and Metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(10): 1512-1545.
- 肖序常,汤耀庆,冯益民,等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京:地质出版社,1992.

- 校培喜,高晓峰,胡云绪,等. 阿尔金—东昆仑西段成矿带地质背景研究[M]. 北京:地质出版社,2014.
- 徐学义,陈隽璐,张二朋,等. 秦岭及邻区地质图(1:500 000)[M]. 西安:西安地图出版社,2014a.
- 徐学义,何世平,王洪亮,等. 中国西北部地质概论——秦岭、祁连、天山地区[M]. 北京:科学出版社,2008a.
- 徐学义,李荣社,陈隽璐,等. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. 岩石学报,2014b,30(6):1521-1534.
- XU Xueyi, LI Rongshe, CHEN Junlu, et al. New constraints on the Paleozoic Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014b, 30(6): 1521-1534.
- 徐学义,李向民,陈隽璐,等. 祁连山及邻区成矿地质背景图(1:1 000 000)[M]. 北京:地质出版社,2008b.
- 徐学义,王洪亮,陈隽璐,等. 中国天山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社,2016.
- 杨合群,赵国斌,姜寒冰,等. 西秦岭成矿带矿床成矿系列概论[J]. 西北地质,2022,55(1):114-128.
- YANG Hequn, ZHAO Guobin, JIANG Hanbing, et al. Discussion on the Metallogenic Series of Mineral Deposits in the Metallogenic Belt of West Qinling, China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 114-128.
- 余吉远,王国强,李向民,等. 祁连造山带地质特征与成矿规律[M]. 北京:地质出版社,2021.
- 张二朋. 中华人民共和国秦岭—大巴山及邻区地质图(1:1 000 000)[M]. 北京:地质出版社,1992.
- 张国伟,郭安林,董云鹏,等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报,2019,25(5):746-768.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, DONG Yunpeng, et al. Rethinking of the Qinling Orogen[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 746-768.
- 张国伟,孟庆任,于在平,等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑:地球科学),1996,26(3):193-200.
- ZHANG Guowei, MENG Qingren, YU Zaiping, et al. Orogenic Process and Geodynamic Characteristics of the Qinling Orogen[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(3): 193-200.
- 张录易,华洪,谢从瑞. 新元古代末期高家山生物群研究新进展与展望[J]. 中国地质,2001,28(9):19-24.
- ZHANG Luyi, HUA Hong, XIE Congrui. New Progress and Prospect of Gaojiashan Biota in Late Neoproterozoic[J]. Chinese Geology, 2001, 28(9): 19-24.
- 张瑞林. 秦岭海盆演化及“中国型盆地”[J]. 岩相古地理, 1992,2:13-20.
- ZHANG Ruilin. Evolution of the Qinling Marine Basin and the “Chinese-Type Basin” [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1992, 2: 13-20.
- 赵祥生. 建所以来西北地区前寒武纪地质研究工作十大进展——回顾与展望[J]. 西北地质科学,1992,13(2):129-138.
- ZHAO Xiangsheng. Important Progress on Precambrian Geology Research[J]. Northwest Geoscience, 1992, 13(2): 129-138.
- 赵祥生,邹湘华. 碧口群内冰川沉积及冰期的划分与对比[J]. 地质科学,1992,3:260-268.
- ZHAO Xiangsheng, ZOU Xianghua. Division and Correlation of Glacial Deposits of Bikou Group and Glacial Periods[J]. Scientia Geologica Sinica, 1992, 3: 260-268.
- 赵祥生,邹湘华,牛道韞,等. 北山地区震旦系及冰川沉积[J]. 西北地质科学,1984,7:29-37.
- ZHAO Xiangsheng, ZOU Xianghua, NIU Daoyun, et al. The Sinian System and Its Glacial Deposits in Beishan District[J]. Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, 1984, 7: 29-37.
- 中国地质调查局西安地质调查中心. 行走与坚守:中国地质调查局西安地质调查中心史[M]. 西安:陕西人民出版社,2019.
- 周志强. 泥盆纪三叶虫 *Cordania* 在中国的发现及其动物地理学意义[J]. 古生物学报,1989,28(4):550-552.
- ZHOU Zhiqiang. Occurrence of Devonian Trilobite *Cordania* Clarke, and Its Palaeozoogeographical Significance[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1989, 28(4): 550-552.
- 周志强,校培喜. 对香山群时代的商榷[J]. 西北地质,2010,43(1):54-59.
- ZHOU Zhiqiang, XIAO Peixi. Discussion on the Age of the Xiangshan Group[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(1): 54-59.
- 周志强,周志毅,袁文伟. 扬子区奥陶纪宝塔组的划分[J]. 地层学杂志,1999,23(4):283-286.
- ZHOU Zhiqiang, ZHOU Zhiyi, YUAN Wenwei. On the Ordovician Pagoda Formation[J]. Journal of Stratigraphy, 1999, 23(4): 283-286.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, et al. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, China: Review and

- Synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(3): 213-237.
- Dong Yunpeng, Santosh M. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 1-40.
- Dong Yunpeng, Sun Shengsi, Santosh M., et al. Central China Orogenic Belt and Amalgamation of East Asian Continents [J]. *Gondwana Research*, 2021, 100: 131-194.
- Feng Yimin, Coleman R G, Tilton G, et al. Tectonic Evolution of the West Junggar Region, Xinjiang, China[J]. *Tectonics*, 1989, 8(4): 729-752.
- Li Jianxing, Yue Leping, Roberts Andrew, et al. Global Cooling and Enhanced Eocene Asian Mid-Latitude Interior Aridity [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3026.
- Pan Feng, Li Jianxing, Xu Yong, et al. Uplift of the Lüliang Mountains at ca. 5.7 ~ Ma: Insights from Provenance of the Neogene eolian Red Clay of the Eastern Chinese Loess Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 502: 63-73.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, et al. Tectonics of the North Qilian Orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1378-1401.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, et al. Tectonic Evolution of Early Paleozoic HP Metamorphic Rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3): 334-353.
- Song Shuguang, Yang Liming, Zhang Yuqi, et al. Qi-Qin Accretionary Belt in Central China Orogen: Accretion by Trench Jam of Oceanic Plateau and Formation of Intra-oceanic Arc in the Early Paleozoic Qin-Qi-Kun Ocean[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(15): 1035-1038.
- Wang Jian, Wang Xin, Petr Štorch, et al. Graptolite Fauna from the Llandovery-Wenlock Boundary Section, Southern Shaanxi Province, Central China.: Proceedings of the IGCP Project 591 Field Workshop 2014 Extended Summary[C]. 2014.
- Wang Jian, Wang Xin, Petr Štorch, et al. The Important Llandovery-Wenlock Boundary section, Ziyang county, Shaanxi province, China; Proceedings of the 5th International Symposium on the Silurian System and 5th Annual Meeting of the IGCP591-The Lower to Middle Paleozoic Revolution[C]. 2015.
- Wang Xin, Zhang Xingliang, Zhang Yuan, et al. New Materials Reveal Shaanxilithes as a Cloudina-Like Organism of the Late Ediacaran[J]. *Precambrian Research*, 2021, 362: 106277.
- Xia Linqi. The Geochemical Criteria to Distinguish Continental Basalts from Arc Related Ones[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 195-212.
- Xia Linqi, Xu Xueyi, Xia Zuchun. Petrogenesis of Carboniferous Rift-Related Volcanic Rocks in the Tianshan, Northwestern China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(3-4): 419-433.
- Xia Linqi, Li Xiangmin. Basalt Geochemistry as a Diagnostic Indicator of Tectonic Setting[J]. *Gondwana Research*, 2019, 65: 43-67.
- Xia Linqi, Li Xiangmin. Revisiting the Tectonic Setting of the Carboniferous Volcanic Rocks in the Chinese Tianshan and Its Neighboring Areas [J]. *Gondwana Research*, 2020, 84: 1-19.
- Xia Linqi, Clocchiatti Roberto. A New Classification of Silicate Melt Inclusions[J]. *Science Bulletin*, 1985, 30(4): 488-492.
- Xiao Wenjiao, Mao Qigui, Windley B F, et al. Paleozoic Multiple Accretionary and collisional processes of the Beishan Orogenic Collage[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(10): 1553-1594.
- Zhao Guochun, Wang Yuejun, Huang Baochun, et al. Geological Reconstructions of the East Asian Blocks: From the Breakup of Rodinia to the Assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 262-286.