

华北西部贺兰山-桌子山及周缘地区 奥陶纪构造演化与沉积响应研究评述

王振涛¹, 王训练²

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 生物地质与环境地质国家重点实验室, 北京 100083

摘要 华北西部贺兰山-桌子山及其邻区奥陶纪构造亲缘性、洋陆格局、盆地原型、物源以及板块缝合带的存在与否和具体位置等基础地质问题, 长期以来一直存在激烈争论。近年来, 随着岩石地球化学、古地磁、锆石地球化学和年代学等新数据的大量积累, 相继提出一些新证据和新假说, 将上述科学问题的研究引向深入。梳理近年来一系列最新进展, 重点对一些关键基础地质问题存在的学术争议进行了评述。

关键词 贺兰山; 桌子山; 板块缝合带; 盆地原型; 浊积岩

克拉通的长期稳定性, 使之能够更完整地保存、记录大陆地壳的生长和改造历史等过程信息, 具有重要的研究价值。华北克拉通具有 38 亿年的漫长化演历史^[1-3], 是世界上最古老的陆块之一, 吸引了国内外地质学家的广泛关注。特别是华北克拉通西部存在许多长期悬而未决的基础地质问题, 如华北西部早古生代洋陆格局、界线、盆地原型及其与阿拉善地块之间的构造归属关系, 构成了当下的一个研究热点。大量资料显示, 早古生代是祁连山-秦岭洋-贺兰山地区最重要的洋-陆转化阶段, 而奥陶纪是其构造沉积演化的重要关键时期^[4]。再者, 贺兰山构造带位于我国南北构造带上, 是地球物理场和地壳厚度急剧变化带, 也是原特提斯北界东西交接关键部位^[4]。这种复杂的时空配置, 使得奥陶纪贺兰山构造带及其周缘成为一个关键的研究地区。

近年来, 基于新数据的大量积累, 学者们对早古生代华北克拉通西部的一些基础地质问题提出的新观点

对一些传统认识产生了挑战, 为重新认识华北克拉通西部奥陶纪盆地原型、构造演化与沉积响应提供了新的框架和视角, 具有重要的基础地质意义。同时, 目前相关的研究已经提供了大量的资料, 老问题没有很好地解决, 新问题又大量地涌现, 因此十分有必要针对华北西部贺兰山-桌子山地区的奥陶纪构造演化、沉积响应有关的若干基础地质问题进行总结和评述。

本文结合一些新的研究探讨以下重要问题: (1) 奥陶纪华北克拉通是一个孤立的板块还是与西伯利亚大陆或冈瓦纳大陆存在构造亲缘性; (2) 华北克拉通与阿拉善地块的界线(板块缝合带)应置于何处, 或两者本来就是一个统一的块体; (3) 华北克拉通西部贺兰山构造带及周缘奥陶系的物源到底是来自华北本身, 还是来自阿拉善地块、北祁连造山带, 或来自其他大陆; (4) 奥陶纪华北克拉通西部是一个被动大陆边缘盆地、活动大陆边缘盆地还是弧后裂谷盆地, 或是一个大洋。

收稿日期: 2018-08-21; 修回日期: 2018-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602704)

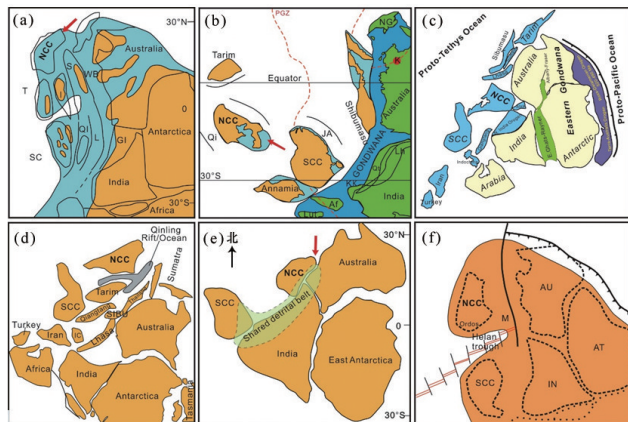
作者简介: 王振涛, 副研究员, 研究方向为沉积学与大地构造, 电子信箱: wangz@cags.ac.cn; wangzhentao@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 王振涛, 王训练. 华北西部贺兰山-桌子山及周缘地区奥陶纪构造演化与沉积响应研究评述[J]. 科技导报, 2018, 36(23): 68-86; doi: 10.3981/j.

issn.1000-7857.2018.23.010

1 奥陶纪华北克拉通的构造亲缘性

对奥陶纪华北克拉通构造亲缘性的讨论,将有助于从宏观角度整体约束华北西北部贺兰山及周缘地区的构造归属。近20年来,超大陆的重建和演化一直是国际上的重要研究课题。由于缺少可靠的、系统的古地磁数据,早古生代期间华北克拉通相对于冈瓦纳大陆的位置一直存在争议^[5-10](图1)。



(a)寒武纪-奥陶纪^[5]; (b)寒武纪早期^[6]; (c)晚奥陶世^[7]; (d)中寒武世^[8]; (e)寒武纪晚期^[9]; (f)晚奥陶世^[10](注:朝鲜半岛的位置用红色箭头表示)

图1 早古生代东冈瓦纳大陆古地理重建具代表性的模型

Fig. 1 Selected paleogeographic reconstructions of East Gondwana during the early Paleozoic

长期以来,学术界对华北克拉通与冈瓦纳大陆之间关系的研究存在两种观点。传统上认为华北克拉通作为一个独立的块体,与冈瓦纳大陆间不存在构造联系^[6,8,11-19]。基于华北西部贺兰山-桌子山地区新元古界-中奥陶统碎屑锆石年龄谱系^[9,20-21]与冈瓦纳大陆的同期地层展现了完全不同的面貌,Myrow等^[21]推断华北西北部与冈瓦纳大陆不存在构造亲缘性的可能。但实际上,最新的研究发现桌子山地区上奥陶统浊积砂岩碎屑锆石年龄峰值与冈瓦纳大陆的同期地层几乎一致^[7]。另外一种观点认为华北克拉通位于冈瓦纳大陆边缘且存在构造亲缘性^[9,21-26]。最新的碎屑锆石、地层层序、生物古地理等证据显示中寒武世和奥陶纪华北克拉通与东冈瓦纳大陆北部边缘可能存在构造亲缘性^[7,9,21,23,25-27],这无疑为华北克拉通西部贺兰山-桌子山地区的洋陆格局、构造背景和奥陶系浊积砂岩的物源(详见下文)提供了整体的约束。因为,如果华北克拉通是一个孤立块体,华北克拉通内部和边缘的物源基本上只能来自其本身或者边缘岛弧,其西部的构造背景也更可能是被动大陆边缘或者大洋盆地。

2 华北克拉通与阿拉善地块的关系

2.1 阿拉善地块是否曾为一个独立块体

阿拉善地块与华北克拉通之间的关系和界线位置,是讨论奥陶纪华北西部盆地原型、物源乃至华北克拉通、阿拉善地块构造亲缘关系无法回避的问题。首先须明确华北克拉通与阿拉善地块之间是否存在板块缝合带,也就是说,阿拉善地块在地质历史时期是否曾是一个独立的块体?如果在地质历史时期两者始终是一个统一的整体,两者之间也就不存在所谓的板块缝合带。长期以来,学术界对两者之间的亲缘关系和界线存在激烈争论,对其关注程度构成了当下的一个研究热点。

对华北克拉通构造格局的传统认识中,一直将阿拉善地块视为华北克拉通的西延部分^[19,28-43]。持另外一种观点的科学家意识到阿拉善地块与华北克拉通之间可能存在板块缝合带^[44-45],但一直缺乏足够的证据。其后,依据贺兰山-陇东一线华北克拉通西部大陆边缘的存在,认识到早古生代阿拉善地块可能不属于华北克拉通^[46]。接着,认识到华北克拉通西部和西南缘分布的复理石(O₂₋₃-S)-磨拉石(D₁₋₂)地层序列可能揭示了周缘前陆盆地原型^[47],推测在华北克拉通西部应有一条由近南北向的古缝合带^[48]。直到华北克拉通主体缺乏的新元古代花岗岩在阿拉善地块直接发现^[49-51],认识到古元古代阿拉善地块岩浆变质事件的时间和性质以及新元古代岩浆事件的动力学背景和基底特征都与华北克拉通存在差异^[52-56]。随着更多沉积学、构造地质学、古地磁数据和同位素地质年代学证据的积累^[50,59-76],阿拉善地块很可能是独立于华北克拉通演化的^[57-58]认识不断得到强化。除此以外,岩石圈导电性三维成像和地震测深揭示现代阿拉善与鄂尔多斯地区具有不同的岩石圈结构^[77-79],表明两者可能是不同的两个陆块。这自然就引出了阿拉善地块与华北克拉通之间的板块缝合带位于何处以及两者何时拼合成一体的问题。

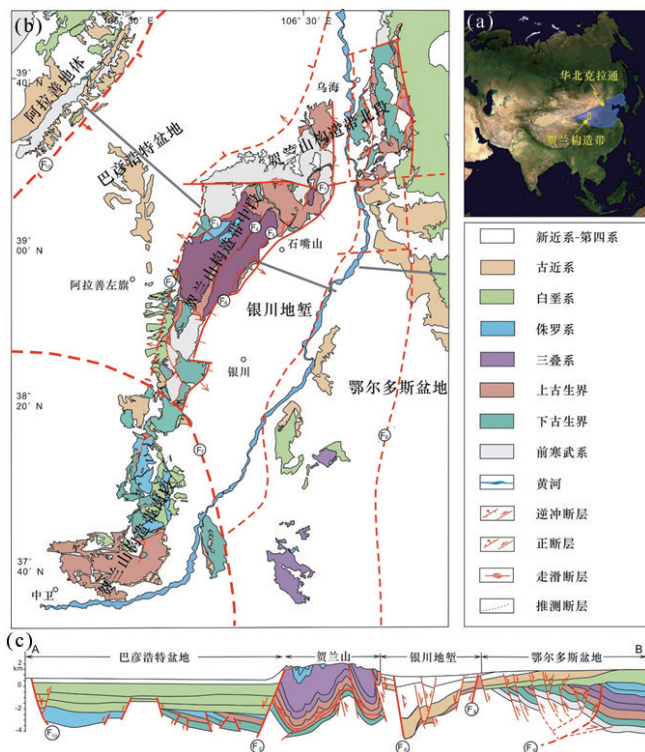
2.2 阿拉善地块与华北克拉通拼合的时间

对于阿拉善地块与华北克拉通的拼贴时间,目前依然存在分歧,粗略归纳起来主要有如下不同观点:古元古代晚期^[35]、新元古代晚期^[59,80]、早古生代^[31,34,54,56,65,74,81-83]和晚古生代^[62,63,67-69,71-73,84-86]。需要强调的是,依据古地磁资料,提出中三叠世后,特别是印支运动使阿拉善地块相对于华北发生约30°逆时针旋转,导致阿拉善地块最终与华北克拉通拼合^[71,73]。但李锦轶

等^[63]认为华北与阿拉善两个陆块之间的拼合事件应发生在三叠纪中晚期之前,原因是华北北缘与阿拉善北缘发育相同的晚石炭世至三叠纪中酸性侵入岩带^[87-88],那一时期两者已经连接在一起了。对贺兰山构造带中、上三叠统碎屑岩的沉积相和古流向研究也表明三叠纪期间阿拉善地块与华北克拉通就已是一个整体了^[89]。结合后文提出的晚奥陶世时贺兰山地区很可能与华北克拉通仍大洋相隔的分析,本文赞同李锦轶等^[63]的观点:“华北与阿拉善两个古陆拼合发生在晚奥陶世至泥盆纪早期之间的某一地质时期”。

2.3 阿拉善地块与华北克拉通板块缝合带的位置

对阿拉善地块与华北克拉通之间板块缝合带的位置,归纳起来,主要存在以下几种代表性方案^[89-90],如图2所示。



F1—宗别立—正谊关断裂; F2—贺兰山西麓断裂; F3—小松山逆冲推覆断裂; F4—塔塔沟—插旗沟断裂; F5—大水沟门—大武口断裂; F6—贺兰山东麓断裂; F7—龙首山—查汗—三关口—青铜峡—固原断裂;

F8—黄河断裂; F9—阿色浪—车道断裂; F10—巴彦乌拉山断裂

(a) 华北克拉通位置; (b) 贺兰山构造带及周缘地区构造纲要;

(c) 贺兰山构造带及周缘地区图切剖面

图2 华北克拉通西部贺兰山构造带及周缘地区构造纲要图及其剖面^[89-90]

Fig. 2 Simplified tectonic map of the Helanshan Tectonic Belt showing the tectonic units and the cross-section of the Helanshan Tectonic Belt^[89-90]

1) 鄂尔多斯西缘断裂^[65,71-73],从贺兰山与桌子山中间南北向穿过,向南依次穿过牛首山、大罗山、小罗山东麓。但是个别文献将鄂尔多斯西缘断裂北部置于桌子山地区以东,也就是将桌子山地区从华北克拉通分割出去^[74,82]。

2) 贺兰山西缘断裂^[58,63,65,80,91]或阿左旗—固原断裂^[63]。阿左旗—固原断裂大体上沿贺兰山北段西麓向南,在银川以西转为南南东穿过贺兰山南段,又转为近南北向沿牛首山、大罗山和小罗山以东延伸过固原后,与祁连造山系北部边界的青铜峡—固原断裂相交^[63]。贺兰山西缘断裂大体上为阿左旗—固原断裂的北缘部分。熊盛青等^[92]提出将华北克拉通的西界置于乌拉特后旗东—阿拉善左旗—同心—宝鸡一线,其南段阿拉善左旗—同心—宝鸡部分与阿左旗—固原断裂^[63]大致相当。

3) 龙首山—查汗—三关口—青铜峡—固原断裂^[81,91,93]。查汗断裂在不同的文献中有不同的称谓,如查汉布拉格断裂^[93]、查汗布勒格断裂^[94]。查汗断裂呈东西向横过巴彦浩特盆地南部的腾格里沙漠区,长逾200 km,属龙首山—青铜峡—固原断裂的一部分,是巴彦浩特盆地内南北不同结晶基底的分界断裂(基底大断裂)^[91]。三关口断裂为分割贺兰山中北段与南段的界线^[90,93],也是青铜峡—固原断裂通过贺兰山的具体地点,该断裂通过贺兰山后逐渐转为东西向,西接龙首山—查汗断裂。

4) 巴彦乌拉山—香山—固原断裂,在贺兰山以西呈西向凸出的弧度^[66,95]。

5) 巴彦乌拉山—贺兰山东麓—固原断裂^[7]。

6) 狼山—贺兰山东麓断裂^[96],将狼山分成南北两个部分,沿南南东方向从贺兰山与桌子山之间通过。

7) 巴彦乌拉山断裂^[54,56,97],一直向西南方向延伸,直到与龙首山南缘断裂相交。

8) 贺兰山以西,隐伏在巴彦浩特盆地沉积盖层之下^[62]。

由此可见,对于阿拉善地块与华北克拉通之间板块缝合带的位置,目前学术界存在激烈争议。一个重要原因是,长期以来并未在上述“缝合带”附近地层中发现高压变质岩和蛇绿岩等揭示造山事件或古缝合带的痕迹。另一个原因是,对贺兰山以西的巴彦浩特盆地的下伏沉积建造和深部地质特征还不清楚。

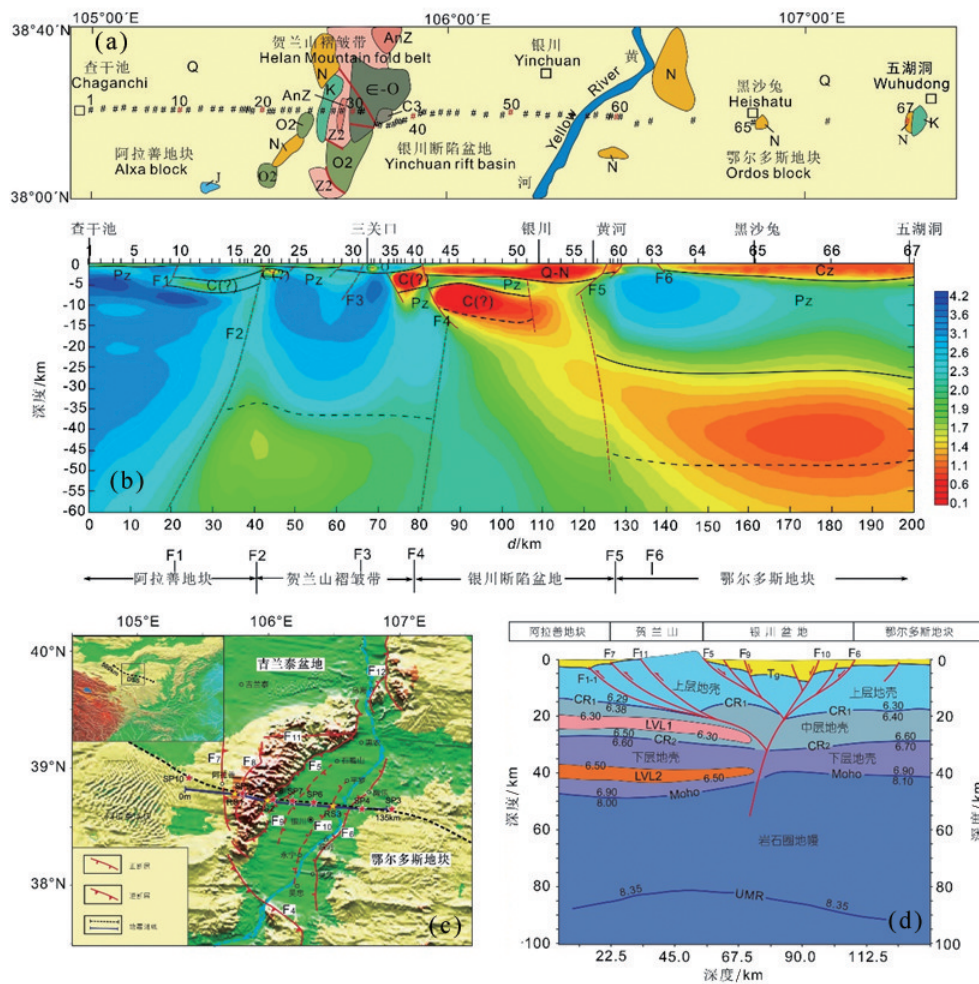
阿拉善地区露头少且不连续,研究程度低,又由于大部分地区缺失古生代沉积,限制了阿拉善地块与华

北克拉通古生代地质属性的对比研究。

贺兰山西麓断裂以西的巴彦浩特盆地,在构造位置上长期被视为阿拉善地块的东南部分^[91,98]。但地球物理与钻井资料证实,该盆地东部保存有较完整的古生代沉积,其总的沉积特征、岩性和古生物面貌与贺兰山同期沉积十分一致^[99]。有两种模型可以解释这种相似性。一是奥陶纪时巴彦浩特盆地东部可能是稳定的华北地台向西延伸的部分^[56,90]。若果真如此,则意味着奥陶纪华北克拉通最西部的位置可能至少向西越过了巴彦浩特盆地的东部^[62]。另一种可能是巴彦浩特盆地东

部与贺兰山仍大洋相隔,只不过两者的距离很近,如果两者当时同时都为冈瓦纳大陆陆缘的一部分^[7,65],那么两者发育的沉积层序不但可以相似,其物源都可能都是一致的。

另外,深地震反射剖面和二维电性结构揭示地壳结构在贺兰山东侧出现急剧变化^[100-101],为确定阿拉善地块与华北克拉通之间的界线提供了一个参考,如图3所示。但研究区的地球物理表征的仅是现今的状态^[100-101],况且研究区新生代构造活动强烈,它们有多大程度能反映奥陶纪时的地壳结构,还需深入研究。



F1—海原断裂;F2—香山—天景山断裂;F3—烟筒山断裂;F4—青铜峡—固原断裂;F5—贺兰山东麓断裂;F6—黄河断裂;F7—巴彦浩特断裂;F8—贺兰山西麓断裂;F9—芦花台断裂;F10—银川断裂;F11—正谊关断裂;F12—桌子山山前断裂
图(c)(d)中的蓝色线为界面,红色线为断裂,数字为宽角反射/折射剖面得到的界面速度,蓝色实线为深地震反射剖面,黑色虚线为宽角反射/折射剖面,黄色五星对应深地震反射炮点,红色五星对应宽角反射/折射炮点

(a)(b)贺兰山及邻区深地震剖面解释图;(c)(d)贺兰山及邻区深地震二维电性结构

图3 贺兰山及邻区深地震剖面解释^[100]和二维电性结构^[101]

Fig. 3 Deep seismic reflection profile^[100] and 2-D geo-electrical structure model^[101] of the Helanshan Mountain and its adjacent region

2.4 数据解释存在的分歧

2.4.1 碎屑锆石数据解释

对于华北克拉通西部早古生代地层碎屑锆石年龄的解释存在不同的认识,原因可能在于数据的完备性不足,或者是对碎屑锆石样品采集地或地层系统的构造归属存在不同认识。譬如学者将阿拉善地块的南部界线置于龙首山断裂^[41,42,56,85],还有一些学者^[65,66,84,95,102-105]则将之置于龙首山断裂以南的北祁连俯冲带,也就是将河西走廊带看作阿拉善地块的南部被动大陆边缘。通过对大罗山、小罗山、牛首山地区与阿拉善左旗中奥陶统米钵山组^[65,106]以及阿拉善地块东南缘香山群^[66]、大黄山群^[67]碎屑锆石年龄的系统对比研究,认为这些碎屑锆石中出现的泛非期(500~600 Ma)和早新元古代(800~1000 Ma)的年龄峰值不是来源于华北克拉通,据此推断早古生代阿拉善地块与华北地块处于分离状态。显然,这些作者^[65,106]认为贺兰山西缘、牛首山、大罗山、小罗山(河西走廊带)属于阿拉善地块的一部分。然而,张建新和宫江华^[42]认为“河西走廊-贺兰山南部早古生代沉积岩系(大黄山群和香山群)不属于阿拉善地块,而是祁连造山带的组成部分,其碎屑锆石组成和代表的物源特征不能作为阿拉善地块与华北克拉通在早古生代彼此分离的证据。”

这样的问题同样出现在贺兰山构造带及邻区,贺兰山地区的构造归属迄今存在异议。最近Dong等^[80]在贺兰山地区埃迪卡拉系正目观组、寒武系苏峪口组的碎屑锆石中识别出(818±4)Ma和(905±8)Ma的峰值年龄,结合锆石的Hf同位素特征,认为这些碎屑锆石很可能源自阿拉善地块新元古代火成岩,进而推断新元古代末期甚至更早期阿拉善地块可能仍为华北克拉通的一部分。Dong^[80]选择将贺兰山看作华北克拉通的一部分^[80],最后的推论自然是富有新意的。但如果选择贺兰山属于阿拉善地块的一部分作为前提,那么其物源来自阿拉善地块本身,这样的推论就显得本无特别之处。同样,如果贺兰山属于阿拉善地块的一部分,那么在阿拉善地块东缘的中奥陶统碎屑锆石中找不到华北克拉通提供的物源的推论^[106]将是合理的,因为当时两者很可能被大洋相隔^[63,65,106]。同样,依据千里山-贺兰山地区基性岩墙群的岩石地球化学和斜锆石、锆石的定年结果推测贺兰山地区与阿拉善地块存在密切的亲缘关系^[43],也就不足为奇。不同的证据需要在一个共同的框架之下去审视和对比,这就离不开对华北克拉通与

阿拉善地块关系的判断,尤其是在通过碎屑锆石年龄与Hf同位素数据的对比来考虑块体之间的构造亲缘性方面尤其如此。可见,对于华北克拉通与阿拉善地块的关系,仍然是无法回避的基础地质问题。

2.4.2 古地磁数据解释

并不是所有的古地磁数据都指向相同的结论。Yuan等^[73]指出,晚二叠世、三叠纪阿拉善地块与华北克拉通主体之间的古地磁极存在明显不同的现象。而Huang等^[19]则持有不同的见解,认为在阿拉善地块若干剖面已报道的9个二叠纪、三叠纪古地磁极数据中,3个采自玉门地区的晚二叠世-早三叠世地层的地磁极与华北克拉通的同期样品相当一致;同时,相对同时期华北克拉通的古地磁极,它们要么明显顺时针旋转要么大量逆时针旋转。Yuan等^[73]将前面提到的明显旋转的二叠纪、三叠纪地磁极而不是玉门地区的地磁极^[107]当作阿拉善地块固有的地磁极,这种理解导致相对华北克拉通同时期的参考极来说会产生明显的顺时针旋转。因此,Huang等^[19]更倾向于将阿拉善-河西走廊地块奥陶纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪地磁极与那些华北克拉通同时期的地磁极看作一个整体。由此可见,目前阿拉善地块的古地磁数据还不足以弥补分歧,尤其是龙首山断裂以北早古生代可靠的古地磁数据亟需报道。虽然阿拉善地块缺失古生代的大部分地层,但不排除通过岩心样品^[99]获取古地磁的可能。

3 奥陶纪贺兰山及周缘地区的盆地原型

3.1 盆地原型的不同认识

前人对贺兰山-桌子山及周缘地区早古生代的盆地原型进行了大量的研究,但在原型盆地的性质、范围、边界和构造属性等方面存在较多分歧,归纳起来主要有以下几种观点。

1) 拗拉槽(称为贺兰拗拉槽)^[21,40,108-115],这是目前被广为接受的一种观点,但部分学者提出了不同意见^[65,76,81,106,116]。拗拉槽观点的实质是认为阿拉善地块与华北板块当时尚未完全拉张分开,只是一个夭折的三叉裂谷系。

2) 被动大陆边缘斜坡^[46,117-118]。

3) 早奥陶世为被动大陆边缘,中晚奥陶世为周缘前陆盆地^[47,119]或活动大陆边缘^[7]。孙肇才^[47]认为不能把寒武系-下奥陶统仍看作是拗拉槽沉积,应是一个典型

的与塔里木、扬子克拉通时代相同的被动大陆边缘。接着,孙肇才和胡显慕^[47,120]提出鄂尔多斯盆地西南缘下奥陶统与中、上奥陶统是一个重要的层序与盆地原型分界:寒武纪-早奥陶世为以被动陆缘上的台地相碳酸盐岩占优势的伸展盆地,中奥陶世-早中泥盆世代表了加里东期聚敛到碰撞的挠曲型复理石至磨拉石前陆盆地,其中中、晚奥陶世是以巨厚的陆源碎屑岩特别是浊积岩相占优势的复理石前陆盆地。

4) 寒武纪-中奥陶世古海洋盆地^[65,63,106],中、晚奥陶世-泥盆纪初期大洋关闭。其实质是认为阿拉善地块与华北克拉通之间曾是两个独立的地块,其间被大洋相隔,但对大洋盆地的性质和细节未详细描述。

5) 前陆盆地模型,譬如弧后前陆盆地:北祁连岛弧靠大陆一侧的弧后盆地,在晚期演变为弧后前陆盆地^[121];北祁连早古生代周缘前陆盆地^[65,106]、复理石前陆盆地^[47,120]、华北克拉通-阿拉善地块甚或华北克拉通-冈瓦纳大陆碰撞形成的前陆盆地^[7,56]等。

6) 转换型大陆边缘^[73-74,81,122-123]。在贺兰山及其周缘地区缺乏蛇绿岩、高压-超高压变质带和岛弧岩浆岩的地质记录,推测贺兰山可能是华北和阿拉善之间的一个“转换型边界”。随着阿拉善地块沿着贺兰山“转换边界”向华北斜走向滑拼贴,两者逐渐靠近,最终在晚奥陶世拼合为一个整体^[4,81]。在拼贴过程中,如果贺兰山地区形成周缘前陆盆地,那就与方案(3)的认识一致。

7) 海沟/岛弧/弧后裂谷盆地/斜坡/台地模式^[124]。该模式认为华北克拉通西南缘在沉积相在中-晚奥陶世发生转换,由先前的陆表海碳酸盐岩台地转化为深海斜坡、深海盆地,其动力是构造体制由离散型大陆边缘向汇聚型大陆边缘转换引起的。与方案(3)的细节部分一致,关键在于弧后裂谷盆地还不能合理解释贺兰山-桌子山地区浊积砂岩碎屑锆石的物源。

沉积与构造的结合始终是盆地原型分析的中心环节,构造是控制沉积充填的首要因素,沉积记录是恢复构造的核心资料^[125]。贺兰山构造带中南段中奥陶统和北段桌子山地区上奥陶统浊积砂岩的岩石地球化学特征^[126-128]和碎屑锆石年龄揭示的物源^[7,65,106]普遍没有来自华北克拉通的信息,而且物源区都形成于与活动大陆边缘和大陆岛弧相关的构造背景。这是“贺兰拗拉槽”和(华北克拉通的)被动大陆边缘两种模式无法解释的。同样重要的是,用拗拉槽体制能解释的贺兰山地区奥陶系沉积组合特征^[112-113],同样可以用前陆盆地构

造体制来解释^[93,120,129]。

3.2 构造转换事件的地层显示

鄂尔多斯盆地西缘早古生代地层存在一个明显的不整合:中奥陶统三道坎组与下伏寒武系芙蓉统阿不切亥组之间的不整合。但是一直以来,学术界对该不整合代表的地质含意有着不同的解读^[21,130-131]。奥陶纪期间,华北克拉通有3次重要的海平面相对下降^[130]:第一次海平面下降在华北地区造成了广泛的不整合,在鄂尔多斯盆地造成了寒武系与奥陶系之间的显著不整合以及上寒武统至下奥陶统下部不同程度的地层缺失。Myrow等^[21]详细研究了华北西部内蒙古乌海地区寒武系-奥陶系的沉积学、生物地层学和化学地层学,提出寒武系(阿不切亥组)与中奥陶统(三道坎组)之间的不整合跨越了30 Ma的时限,与喜马拉雅地区的不整合间隔的时限很相似,借此指出当时华北西部十分靠近喜马拉雅西部,支持华北克拉通西部与喜马拉雅存在构造亲缘性的假说^[9]。对此, Lee等^[131]提出了质疑,认为上述不整合的形成机制除了可以用海平面变化解释之外,还可以用构造掀斜来解释。

在对西藏雅鲁藏布缝合带两侧沉积记录研究基础上,胡修棉等^[132]指出“在被动大陆边缘紧邻缝合带附近,寻找深水环境的地层剖面,开展详细的地层学、沉积学、物源分析工作,如成功获得物源区从被动大陆向活动大陆转变的时间,则可以用来准确地约束大陆初始碰撞时间”。实际上,相似的研究已经在贺兰山构造北段的桌子山地区开展过(图4)。Wang等^[7]对桌子山地区的奥陶系经典剖面展开了系统的碎屑锆石年代学研究,并结合牙形石生物地层的详细约束,中、上奥陶统碎屑锆石年龄谱系存在明显差异,中奥陶统物源来自华北本身,而上奥陶统物源来自华北克拉通之外的陆块,譬如东冈瓦纳大陆。此次物源转换可能代表了一次碰撞造山事件,使得桌子山地区由被动大陆边缘转换为活动大陆边缘^[7,133-134]。此次构造转换事件的始发时间被牙形石生物带限定为约458 Ma^[7]。

4 贺兰山-桌子山地区的沉积环境、浊积岩及物源

4.1 沉积环境及事件沉积

在几乎所有的奥陶纪鄂尔多斯盆地乃至华北克拉通的岩相古地理图^[30,83,135-138]上,可以明显看出鄂尔多斯

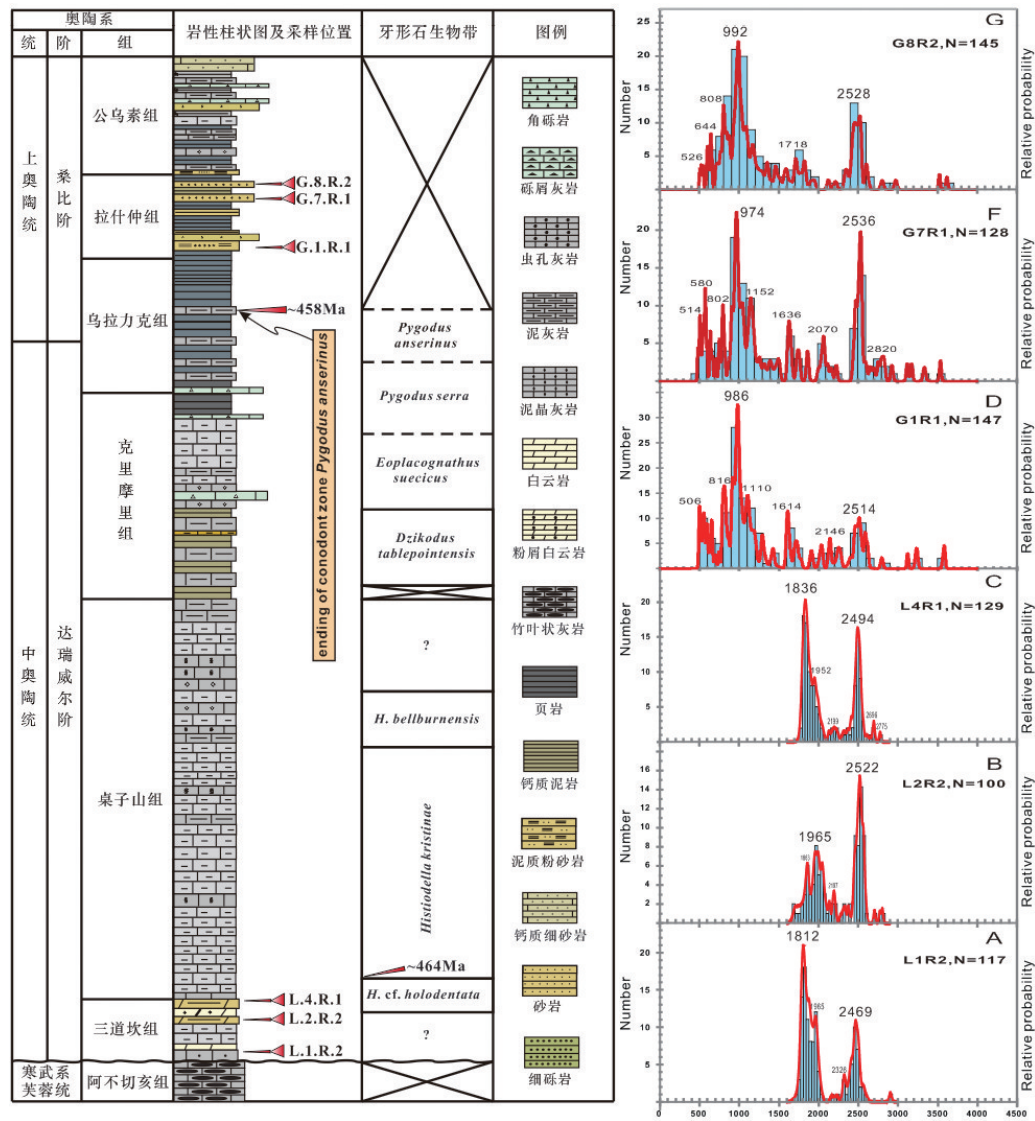


图4 华北西部桌子山地区奥陶系柱状图、采样位置及相应砂岩样品的碎屑锆石年龄谱系^[7,133-134]

Fig. 4 Measured sections including conodont biostratigraphy through the Middle and Upper Ordovician Sandaokan, Zhuozishan, Kelimoli, Wulalike, Lashizhong, and Gongwusuformations, and the location of samples for detrital zircon analysis and histograms and relative probability density diagram of ages for the analyzed samples^[7,133-134]

盆地本部与其西缘、西南缘在沉积环境上发生的明显分异:鄂尔多斯盆地本部继承性地发育区域性碳酸盐台地相沉积,而盆地西缘主要发育(较)深水相的大陆边缘斜坡相、盆地相沉积,如重力流、等深流、内波、内潮汐沉积^[111-113,118,124,127,135,139-147],而且在这些沉积物中发现了大量原地的放射虫化石^[46,148]。除此以外,华北克拉通西、南缘奥陶系还发育了一系列火山喷发事件沉积——火山沉凝灰岩(或称斑脱岩)^[149-156],它们是源区造山活动的直接产物,与造山带的活动性密切相关^[124]。

区域大陆构造重建的核心主题就是以事件为纲领表征地质历史中因果演变的连续过程。带有特定过程印记的标志性岩浆、火山和沉积事件等可作为串联处

于支离破碎状态的地质演化痕迹的可靠纽带。以事件沉积为例,它往往出现在沉积速率相对缓慢的背景沉积之中,记录了某些突发性的信息,往往反映了盆地构造演化的阶段性变化或调整,对追索盆地的形成和发展历史可以起到关键性的作用^[157]。通过对中国5省区内选择的20余条古深水沉积剖面的深人系统研究,晋慧娟等^[158]强调指出,重力流沉积特别是浊流沉积是“灾变性”的沉积作用类型之一。对重力流沉积、沉凝灰岩夹层、盆地演化阶段、相对海平面变化以及 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线等时空演变的综合分析表明,中奥陶世晚期—晚奥陶世早期代表了华北克拉通西南缘演化中的活跃期^[145],如图5所示。尤其是重力流沉积、沉凝灰岩

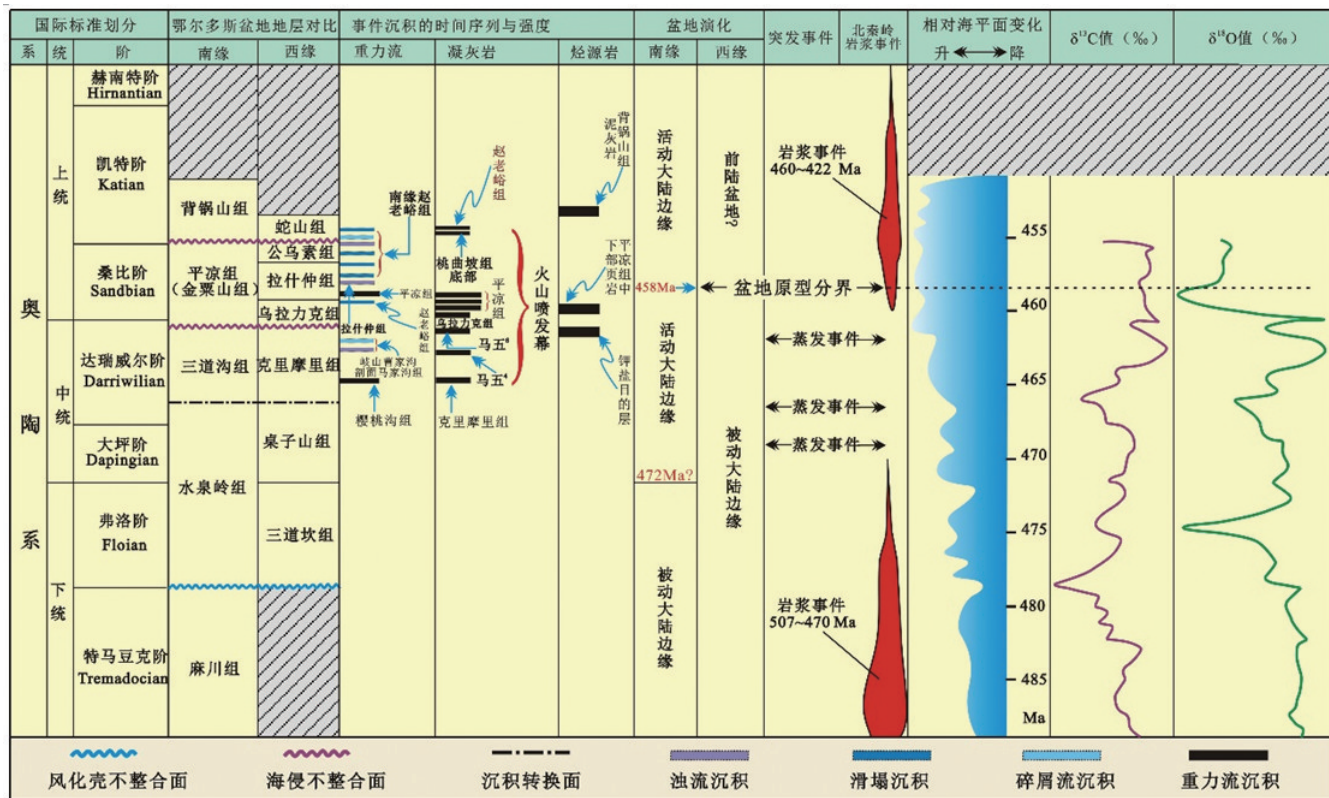


图5 华北克拉通西南缘奥陶系事件沉积的规模及时间序列(据文献[145]修改)

Fig. 5 The scale and time series of the Ordovician event sediments in the southwestern North China Craton (Modified after literature[145])

时空分布集中发育的事实,为精细构建当时的古构造格架和精细刻画当时的构造演化提供了研究基础。

4.2 浊积岩与古造山带的关系

贺兰山-桌子山及其邻区奥陶系分布有一系列复理石或“类复理石”沉积:贺兰山构造带中南段的中奥陶统米钵山组^[106],亦称青铜峡复理石^[159],中奥陶统樱桃沟组^[127];桌子山地区中、上奥陶统浊积岩系^[7,142]。中国大陆上展布的各造山带,不论地质时代的新老,都毫无例外地有着浊流及其他重力流沉积的分布,且地层厚度大,一般都在数百米甚至数千米^[158]。浊积岩系在造山带内分布的普遍性,有理由推测贺兰山、桌子山及其周缘地区的浊积岩系有可能指示古造山带的痕迹。岩石地球化学资料显示,贺兰山中段奥陶系米钵山组(柳树村剖面及高石墩剖面^[126])、中奥陶统樱桃沟组(胡基台剖面^[127])和贺兰构造带北段的桌子山地区上奥陶统拉什仲组(原文为乌拉拉克组)(卧龙岗剖面及哈图克沟剖面^[128])发育的浊积砂岩的物源区都形成于与活动大陆边缘和大陆岛弧相关的构造背景。但需要注意的是,这些浊积砂岩的岩矿标志一般表明盆地形成前物

源区的构造环境,仅能反映可能的古老造山带被剥露的去顶程度^[160],尚无法准确判示物源。要精准追溯物源区,显然还需要其他证据,碎屑锆石年龄的获取为此提供了可能。

4.3 浊积砂岩的碎屑锆石年龄揭示的物源证据

沉积物源分析可以用于重建古地理、约束造山带的迁移和构建造山带尺度的构造隆升模型。1991年的伦敦沉积物源会议之后,国际沉积物源研究由先前的侧重于构造背景判别转向更高可信度和分辨率的物源分析^[161]。尤其是近十多年LA-ICP-MS U-Pb定年技术的突破,极大地推动了碎屑锆石在物源分析中的应用。

长期以来,由于缺乏系统的碎屑锆石年代学数据,华北地台西部奥陶纪地层的物源一直存有争议。以贺兰山地区的中奥陶统物源为例,在早期沉积学研究的基础上,有学者^[141]认为该物源来自东部的鄂尔多斯古陆,其他学者^[111-113,163]认为来自阿拉善古陆。Darby等^[20]率先报道了桌子山地区新元古界、中寒武统和下奥陶统共三个样品的250颗碎屑锆石的年龄数据,认为它们的物源来自华北克拉通自身的结晶基底或再旋回的更

古老沉积物。接着,张进及其团队报道了贺兰山北段(阿拉善左旗-乌海公路阿拉善左旗收费站北侧塔尔岭水库大坝北侧山沟)和南段(牛首山、大罗山、小罗山)更广范围的中奥陶统米钵山组砂岩碎屑锆石年龄数据,发现这些物源均没有来自华北的信息^[65,106],而是出现了大量泛非期(500~600 Ma)和早新元古代(800~1000 Ma)的年龄峰值。依据这种差异,有学者^[4]认为应将贺兰山解体,将之分为贺兰山北段(正谊关断裂以北)的亲华北型和中南段的亲华南型两种,进而推断中奥陶世之前华北克拉通和贺兰山中南段并非一个整体,两者之间相隔距离较远或存在水体间隔。实际上,暂且不论这些沉积物是否能代表所在地区或地块的固有成分,贺兰山北段桌子山地区上奥陶统^[7]也发现了与Zhang等^[65]和张进等^[106]十分一致的碎屑锆石年龄谱系,并不支持上述将贺兰山解体^[4]的推断。

如前所述,既然贺兰山构造带北段、中段、南段奥陶系浊积砂岩的物源不是来自华北克拉通^[7,65,106],那么是否可以确定它们一定来自阿拉善地块?前文提到,有一种观点认为阿拉善地块与华北克拉通原来一直大洋相隔,直到古生代晚期两者才拼合成一个整体,这就意味着中、晚奥陶世阿拉善地块无法提供物源(前提是认为贺兰山是华北克拉通的一部分)。再者,从岩相古地理来看,奥陶纪时贺兰山构造带已处于深水沉积环境,阿拉善古陆并无提供物源的通道,除非贺兰山构造带地区为阿拉善地块的一部分(意即为阿拉善地块的东缘斜坡)。因为如果贺兰山地区是华北克拉通的固有部分,那么根据当时的岩相古地理,贺兰山地区的奥陶系应接受来自华北克拉通本身的物源供给才对。另外,阿拉善地块东缘奥陶系不甚发育,目前尚无明确代表阿拉善地块奥陶系的碎屑锆石年龄和古地磁数据可资对比。

对贺兰山构造带南段牛首山中寒武统香山群第三亚群下段碎屑岩中获得的碎屑锆石U-Pb年龄、Hf同位素证据以及对比研究^[163]显示,其格林威尔期的峰值为1710 Ma的碎屑物质很可能源于澳大利亚西南部,排除了阿拉善地块、北祁连造山带、中祁连地块和华北板块作为碎屑物质源区的可能。袁伟和杨振宇^[163]提供的数据与贺兰山构造带内奥陶系浊积砂岩的高度相似,但是否可以据此就认为后者也可以适用前者的推论?如果可以适用,那么贺兰山构造带中奥陶统浊积砂岩的物源就只能另寻他“陆”,也就是除了华北克拉通和阿

拉善地块之外的某个陆块。在确认这个推论之前,还有个问题需要解决。Dan等^[56]认为阿拉善地块与华北克拉通在晚奥陶世发生初始碰撞,阿拉善地块东缘一侧的岩石发生抬升、剥蚀,而碰撞之前处于被动大陆边缘的华北克拉通一侧,在碰撞之后转变为前陆盆地,并接收了来自对面阿拉善地块的物源供给,两者的板块缝合带位于更靠西的巴彦乌拉山西缘断裂。按照该模式^[56],贺兰山构造带奥陶系浊积岩的古流向整体上应是由西向东(相对于现在的地理位置)。但通过对贺兰山构造带北段桌子山地区上奥陶统拉什仲组^[142]、贺兰山中段奥陶系米钵山组^[164]和贺兰山构造带南段中奥陶统徐家圈组(上覆地层为米钵山组)^[165]的浊积砂岩的古水流总体特征一致指向SW向,而不是Dan等^[56]模型中提出的大致由西向东方向(相对现在的地理位置),说明物源区可能在研究区的东侧,而不是阿拉善地块本身。古水流证据显示,物源应来自华北克拉通^[142,164-165],但遗憾的是针对这些浊积砂岩碎屑锆石更深入的研究排除了华北克拉通作为物源区的可能^[7,65,106]。这说明在中、晚奥陶世,贺兰山-桌子山地区与华北克拉通很可能还是彼此分离的。

中、上奥陶统这些浊积砂岩的物源区还有一个可能选择,就是东冈瓦纳大陆^[7]。华北西部和东冈瓦纳大陆于中、晚奥陶世存在一次短暂的碰撞造山事件,使得华北西部桌子山地区接受了来自东冈瓦纳大陆的上奥陶统沉积物^[7],这无疑提供了新资料和新视角。虽然在桌子山地区周缘奥陶系迄今尚未发现高压变质岩和蛇绿岩等揭示此次造山事件的岩石类型,但如前文所述,贺兰山地区中、上奥陶统滑塌堆积时空分布和浊积砂岩碎屑锆石年龄揭示的中奥陶统物源特征表明了这些滑塌堆积和浊积岩可能响应了中、晚奥陶世华北西部发生的碰撞造山事件^[7]或汇聚型大陆边缘的形成^[124]。

4.4 浊积岩系中的滑塌堆积

贺兰山地区奥陶系沉积建造序列中滑塌堆积较为发育。在空间上,这些滑塌堆积整体上呈南北向线状分布^[118,166],向东滑塌堆积的层数和厚度明显减小^[118]。在这些滑塌堆积的研究中,中奥陶统樱桃沟组研究程度颇高^[111,127,144-146,167]。樱桃沟组岩相和厚度变化剧烈,在樱桃沟厚仅141 m,向西约10 km,厚度陡增至千余米,岩性也随之变粗^[148]。在时间分布上,沿贺兰山一线西侧的外带地区(向西),与重力流、滑塌相关的沉积时间始于中奥陶世晚期,明显早于内带(始于晚奥陶世初期)^[168]。上

述滑塌堆积和重力流的这种时空分布特点表明,与当时贺兰山地区可能发生的碰撞造山事件由西向东逐渐扩展(以现在华北的位置为参考)的过程相似。

5 结论

1) 早古生代阿拉善地块和华北克拉通的亲缘性和拼合时间仍是没有取得共识的基础地质问题,现在还不能给出一个明确的结论。目前的古地磁数据还存在争议,未来阿拉善地块早古生代有代表性的可靠的古地磁数据仍是解决该问题的关键,但遗憾的是,阿拉善内部缺失大部分同期沉积,期待来自阿拉善地块内部的古地磁数据依然很困难。但是,综合已有资料,本文倾向于认为阿拉善地块在地质历史时期曾是一个独立块体,于晚奥陶世至泥盆纪早期之间的某一地质时期才与华北克拉通拼合成一个整体。

2) 对贺兰山-桌子山及其周缘地区碎屑锆石数据存在的不同解释是依据不同的边界条件造成的,突出了阿拉善地块与华北克拉通之间缝合带的具体位置对其他研究的制约作用。解决问题的关键是确定贺兰山-桌子山地区的构造归属。虽然现有的地球物理资料揭示了阿拉善地块和鄂尔多斯盆地西缘的地壳结构存在明显差异,具体在贺兰山东侧出现急剧变化,为确定阿拉善地块与华北克拉通之间的界线提供了一个参考,但问题是现代的地壳特征有多大程度能反映奥陶纪时的地壳结构,目前还无法回答。贺兰山构造带以西的巴彦乌拉山断裂作为新近提出的方案,得到广泛关注,但该方案显示的物源方向与贺兰山构造带中、上奥陶统实际的古水流方向存在矛盾。

3) 贺兰山构造带南段中奥陶统徐家圈组、中段奥陶统米钵山组和贺兰构造带北段桌子山地区上奥陶统拉什仲组都发育浊积岩系,其中浊积砂岩的古水流总体特征一致指向SW向,表明物源区可能为研究区东侧的华北克拉通。但对这些浊积砂岩的碎屑锆石年龄的对比研究排除了华北克拉通作为物源区的可能。这说明在中、晚奥陶世,贺兰山-桌子山地区与华北克拉通很可能处于被水体分开的状态。这个水体的性质是大洋还是陆内盆地,牵涉到对盆地原型的判断。

4) 对于贺兰山-桌子山地区奥陶纪时期的沉积环境基本取得了一致意见:鄂尔多斯盆地本部继承性地发育区域性碳酸盐台地相沉积,而盆地西缘主要发育

较深水相的大陆边缘斜坡相、盆地相沉积。目前已基本明确,桌子山地区中、晚奥陶世是盆地原型发生转换的关键时期,其转换时限大约为458 Ma。对还存在争议的奥陶纪贺兰山-桌子山地区盆地原型的众多选项中,早奥陶世为被动大陆边缘、中晚奥陶世转换为周缘前陆盆地或活动大陆边缘模型是一个有竞争力的方案。

5) 奥陶纪华北克拉通相对冈瓦那超大陆的地理位置,仍是无法回避的基础问题,对当时洋陆格局细节的详细描绘仍避不开对贺兰山构造带构造归属的判断。需要指出的是,如果贺兰山构造带奥陶纪时期是一个独立的地块,对研究区盆地原型和华北克拉通、阿拉善地块的构造亲缘性的判断将更趋复杂。

致谢:张进研究员、周洪瑞教授、景秀春副教授和审稿专家提出了富有建设性的修改意见,中国地质大学(北京)硕士研究生鞠鹏程清绘了部分图件。

参考文献(References)

- [1] 中国科学院科技战略咨询研究院, 中国科学院文献情报中心, 科睿唯安信息服务(北京)有限公司. 2017 研究前沿[R]. 北京: 中国科学院科技战略咨询研究院, 2018. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences; National Science Library, Chinese Academy of Sciences; Clarivate Analytics. 2017 Research frontier[R]. Beijing: Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [2] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 1992, 20: 339-342.
- [3] Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, et al. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 2008, 308, 200-231.
- [4] Liou J G, Tsujimori T, Yang J, et al. Recycling of crustal materials through study of ultrahigh-pressure minerals in collisional orogens, ophiolites, and mantle xenoliths: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 386-420.
- [5] Metcalfe I. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of east Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context[J]. *Gondwana Research*, 2006, 9: 24-46.
- [6] Burrett C, Zaw K, Meffre S, et al. The configuration of Greater Gondwana—Evidence from LAICPMS, U-Pb geochronology of detrital zircons from the Palaeozoic and Mesozoic of southeast Asia and China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26: 31-51.
- [7] Wang Z T, Zhou H R, Wang X L, et al. Detrital zircon finger-

- prints link western north China Craton with east Gondwana during Ordovician[J]. *Gondwana Research*, 2016, 40: 58–76.
- [8] Cocks L R M, Torsvik T H. The dynamic evolution of the Palaeozoic geography of eastern Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 117, 40–79.
- [9] McKenzie, N R, Hughes, N C, Myrow, P M, et al. Trilobites and zircons link north China with the eastern Himalaya during the Cambrian[J]. *Geology*, 2011, 39: 591–594.
- [10] Cho D L, Lee S R, Koh H J, et al. Late Ordovician volcanism in Korea constrains the timing for breakup of Sino-Korean Craton from Gondwana[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 279–286.
- [11] 黄宝春, 朱日祥. 华北地块早古生代古地磁结果的大地构造意义[J]. *地球物理学报*, 1996, 39(增刊 1): 166–172.
Huang Baochun, Zhu Rixiang. Tectonic implications of early Paleozoic paleomagnetic results in North China block[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1996, 39(Suppl1): 166–172.
- [12] 杨振宇, 马醒华, 孙志明, 等. 华北地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J]. *中国科学*, 1998, 28(Suppl): 44–56.
Yang Zhenyu, Ma Xinghua, Sun Zhiming, et al. Phanerozoic paleomagnetic shift curve and block motion in the North China block[J]. *Scientia Sinica*, 1998, 28(Suppl): 44–56.
- [13] Santosh M, Maruyama S, Yamamoto S. The making and breaking of supercontinents: Some speculations based on super plumes, super downwelling and the role of tectosphere[J]. *Gondwana Research*, 2009, 15: 324–341.
- [14] Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M, The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113: 303–341.
- [15] 姜洪福, 李江海. 全球古板块再造、岩相古地理及古环境图集[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
Jiang Hongfu, Li Jianghai. Global paleo-plate reconstruction, lithofacies paleogeography and paleoenvironment atlas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [16] Xu Y J, Cawood P A, Du Y S, et al. Linking South China to northern Australia and India on the margin of Gondwana: Constraints from detrital zircon U–Pb and Hf isotopes in Cambrian strata[J]. *Tectonics*, 2013, 32: 1547–1558.
- [17] Yu S, Li S Z, Zhao S J, et al. Long history of a Grenville orogenic relic—The North Qinling terrane: Evolution of the Qinling orogenic belt from Rodinia to Gondwana[J]. *Precambrian Research*, 2015, 271: 98–117.
- [18] Cai K D, Sun M, Buslo, M M, et al. Crustal nature and origin of the Russian Altai: Implications for the continental evolution and growth of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. *Tectonophysics*, 2016, 674: 182–194.
- [19] Huang B C, Yan Y G, Piper J D A et al. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during Late Paleozoic and Early Mesozoic times[J/OL]. *Earth-Science Reviews*, 2018 (in press). . <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.004>.
- [20] Darby B J, Gehrels G, Detrital zircon reference for the North China block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26: 637–648.
- [21] Myrow P M, Chen J, Snyder Z, et al. Depositional history, tectonics, and provenance of the Cambrian–Ordovician succession in the western margin of the North China block[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127: 1174–1193.
- [22] Li Z X, Powell C M, An outline of the palaeogeographic evolution of the Australasian region since the beginning of the Neoproterozoic[J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 53: 237–277.
- [23] Zhao X X, Coe R S, Gubbins D. Plate tectonics, China[M]// Herrero-Bervera E, ed. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*[M]. Amsterdam: Springer, 2007.
- [24] Goldman D, Mitchell C E, Melchin M J, et al. Biogeography and mass extinction: Extirpation and re-invasion of *Normalograptus* species (Graptolithina) in the Late Ordovician Palaeotropics[J]. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 2011, 58: 227–246.
- [25] Metcalfe I, Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 1–33.
- [26] Han Y G, Zhao G C, Cawood P A, et al. Tarim and North China cratons linked to northern Gondwana through switching accretionary tectonics and collisional orogenesis[J]. *Geology*, 2015, 44(2): 95–98.
- [27] Hally L A, Paterson J R. Biodiversity, biofacies and biogeography of middle Cambrian (Series 3) arthropods (Trilobita and Agnostida) on the East Gondwana margin[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26: 654–674.
- [28] Huang T K. On major tectonic forms of China[J]. *Geological Memoirs (Series A)*, 1945, 20, 1–165.
- [29] 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, et al. China's geotectonic structure and its evolution[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [30] 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1985.
Wang Hongzhen. Atlas of the palaeogeography of China[M]. Beijing: Sinomaps Press, 1985.
- [31] Huang, B C, Yang Z Y, Otofujii Y I, et al. Early Paleozoic paleomagnetic poles from the western part of the North China Block and their implications[J]. *Tectonophysics*, 1999, 308: 377–402.
- [32] Zhai M G, Bian A G, Zhao T P, The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaeoan and its breakup during late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic[J]. *Science in China: Series D—Earth Sciences*, 2000, 43: 219–232.
- [33] 黄宝春, Otofujii Y I, 杨振宇, 等. 河西走廊和阿拉善东缘地区中寒武世古地磁研究的初步结果[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 393–401.
Huang Baochun, Otofujii Y I, Yang Zhenyu, et al. Preliminary result and its tectonic implication of Middle Cambrian paleo-

- magnetism in the Alashan and Hexi corridor terrane[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(3): 393-401.
- [34] Kusky T M, Li J H, Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 22: 383-397.
- [35] Zhao G C, Sun M, Wilde S A. et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136: 177-202.
- [36] 沈其韩, 耿元生, 王新社, 等. 阿拉善地区前寒武纪斜长角闪岩的岩石学、地球化学、形成环境和年代学[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24: 21-31.
Sheng Qihan, Geng Yuansheng, Wang Xinshe, et al. Petrology, geochemistry, formation environment and ages of Precambrian amphibolites in Alxa region[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(1): 21-31.
- [37] Dong C Y, Liu D Y, Li J J, et al. Palaeoproterozoic Khondalite Belt in the western North China Craton: New evidence from SHRIMP dating and Hf isotope composition of zircons from metamorphic rocks in the Bayan Ul-Helan Mountains area[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52: 2984-2994.
- [38] Tang Q Y, Li C S, Zhang M J, et al. Detrital zircon constraint on the timing of amalgamation between Alxa and Ordos, with exploration implications for Jinchuan-type Ni-Cu ore deposit in China[J]. Precambrian Research, 2014, 255: 748-755.
- [39] Wu S J, Hu J M, Ren M H, et al. Petrography and zircon U-Pb isotopic study of the Bayanwulashan complex: Constrains on the paleoproterozoic evolution of the Alxa Block, westernmost North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 94: 226-239.
- [40] 张光亚, 刘伟, 邓胜徽, 等. 中国克拉通海相原型盆地岩相古地理与油气[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
Zhang Guangya, Liu Wei, Deng Shenghui, et al. Lithofacies paleogeography and oil and gas in the marine craton prototype basin in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [41] Gong J H, Zhang J X, Wang Z Q, et al. Origin of the Alxa Block, western China: New evidence from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the Longshoushan Complex [J]. Gondwana Research, 2016, 36: 359-375.
- [42] 张建新, 宫江华. 阿拉善地块性质和归属的再认识[J]. 岩石学报, 2018, 34(4): 940-962.
Zhang Jianxin, Gong Jianghua. Revisiting the nature and affinity of the Alxa Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(4): 940-962.
- [43] 彭澎, 王欣平, 周小童, 等. 千里山基性岩墙群的厘定及其对华北克拉通西部地质演化的启示[J]. 岩石学报, 2018, 34(4): 1191-1203.
Peng Peng, Wang Xinping, Zhou Xiaotong, et al. Identification of the ~810 Ma Qianlishan mafic dyke swarm and its implication for geological evolution of the western North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(4): 1191-1203.
- [44] Klimetz M F, Speculation on the Mesozoic plate tectonic evolution of eastern China[J]. Tectonic, 1983(2): 139-166.
- [45] Sengör A M C, The Cimmeride Orogenic system and the Tectonics of Eurasia[J]. Geological Society of America Special Paper, 1984, 195: 1-74.
- [46] 安太庠, 马文璞. 中朝地台的中奥陶统-下石炭统及其古地理和构造含意[J]. 地球科学, 1993, 18(6): 777-791.
An Taixiang, Ma Wenpu. Middle Ordovician-Lower Carboniferous of Sino-Korean platform and its paleogeography and structural significance[J]. Earth Science, 1993, 18(6): 777-791.
- [47] 孙肇才. 简论鄂尔多斯盆地地质构造风格及其油气潜力—纪念朱夏院士逝世10周年[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 291-296, 306.
Sun Zhaocai. Discussion on the geotectonic style of the Ordos basin and its hydrocarbon potential—Marking the tenth anniversary of Academician Zhu Xia's death[J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(4): 291-296, 306.
- [48] Watson M P. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition[J]. Marine Petroleum Geology, 1987(4): 205-225.
- [49] 耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 阿拉善地区新元古代晋宁期变形花岗岩的发现及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(4): 412-420.
Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, et al. The discovery of Neoproterozoic Jinningian deformed granites in Alax area and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(4): 412-420.
- [50] 李献华, 苏犁, 宋彪, 等. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(4): 401-402.
Li Xianhua, Su Li, Song Biao, et al. SHRIMP zircon U-Pb age and geological significance of Jinchuan ultramafic intrusive rock[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(4): 401-402.
- [51] Li X H, Su L, Chung S L, et al. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: associated with the ~825 Ma south China mantle plume?[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2005, 6(11): 1-16.
- [52] Dan W, Li X H, Guo J H, et al. Integrated in situ zircon U-Pb age and Hf-O isotopes for the Helanshan khondalites in North China Craton: Juvenile crustal materials deposited in active or passive continental margin?[J]. Precambrian Research, 2012a, 222-223: 143-158.
- [53] Dan W, Li X H, Guo J H, et al. Paleoproterozoic evolution of the eastern Alxa Block, westernmost North China: Evidence from in situ zircon U-Pb dating and Hf-O isotopes[J]. Gondwana Research, 2012b, 21: 838-864.
- [54] Dan W, Li X H, Wang Q, et al. Neoproterozoic S-type granites in the Alxa Block, westernmost north China and tectonic implications: In-situ zircon U-Pb-Hf-O isotopic and geochemical constraints[J]. American Journal of Sciences, 2014, 314: 110-153.
- [55] Dan W, Li X H, Wang Q, et al. Paleoproterozoic S-type gran-

- ites in the Helanshan Complex, Khondalite Belt, North China Craton: Implications for rapid sediment recycling during slab break-off[J]. *Precambrian Research*, 2014, 254: 59-72.
- [56] Dan W, Li X H, Guo J H, et al. Phanerozoic amalgamation of the Alxa Block and North China Craton: Evidence from Paleozoic granitoids, U-Pb geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf-O isotope geochemistry[J]. *Gondwana Research*, 2016, 32: 105-121.
- [57] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 1-28.
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 1-28.
- [58] 吴昌华. 华北克拉通的变质沉积岩及其克拉通的构造划分[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 442-457.
Wu Changhua. Meta-sedimentary rock and tectonic division of the North China craton[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 442-457.
- [59] 郭进京, 张国伟, 陆松年, 等. 中国新元古代大陆拼合与Rodinia超大陆[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(2): 148-156.
Guo Jinjing, Zhang Guowei, Lu Songnian, et al. Neoproterozoic continental block collage of China and Rodinia Supercontinent[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(2): 148-156.
- [60] 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 等. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成[J]. *地球学报*, 2003, 24(4): 319-324.
Wan Yusheng, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, et al. The Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and neighboring areas: Its ages and compositions[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(4): 319-324.
- [61] 段吉业, 葛肖虹. 中国西北地区各构造单元之间地层和生物古地理的亲缘关系——兼论西北地区构造格局[J]. *地质通报*, 2005, 24(6): 558-563.
Duan Jiye, Ge Xiaohong. Stratigraphic and paleobiogeographic affinities between different tectonic units in northwestern China: With a discussion of the tectonic framework of northwestern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(6): 558-563.
- [62] 葛肖虹, 马文璞, 刘俊来, 等. 对中国大陆构造格架的讨论[J]. *中国地质*, 2009, 36(5): 949-965.
Ge Xiaohong, Ma Wenpu, Liu Junlai, et al. A discussion on the tectonic framework of Chinese mainland[J]. *Geology in China*, 2009, 36(5): 949-965.
- [63] 李锦轶, 张进, 曲军峰. 华北与阿拉善两个古陆在早古生代晚期拼合——来自宁夏牛首山沉积岩系的证据[J]. *地质论评*, 2012, 58(2): 209-214.
Li Jinyi, Zhang Jin, Qu Junfeng. Amalgamation of North China craton with Alxa block in the late of Early Paleozoic: Evidence from sedimentary sequences in the Niushou Mountain, Ningxia Hui Autonomous Region, NW China[J]. *Geological Review*, 2012, 58(2): 209-214.
- [64] 耿元生, 周喜文. 阿拉善地区新元古代岩浆事件及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 779-795.
Geng Yuansheng, Zhou Xiwen. Early Neoproterozoic granite events in Alax area of Inner Mongolia and their geological significance: Evidence from geochronology[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 779-795.
- [65] Zhang J, Li J Y, Liu, J F, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Middle Ordovician flysch sandstones in the western ordos margin: New constraints on their provenances, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 1030-1047.
- [66] Zhang J, Zhang Y P, Xiao W X, et al. Linking the Alxa Terrane to the eastern Gondwana during the Early Paleozoic: Constraints from detrital zircon U-Pb ages and Cambrian sedimentary records[J]. *Gondwana Research*, 2015, 28:1168-1182.
- [67] Zhang B H, Zhang J, Zhang Y P, et al. Tectonic affinity of the Alxa Block, Northwest China: Constrained by detrital zircon U-Pb ages from the early Paleozoic strata on its southern and eastern margins[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 339: 289-303.
- [68] Zhang Y P, Zhang J, Chen X H, et al. Late Palaeozoic tectonic setting of the southern Alxa Block, NW China: constrained by age and composition of diabase[J]. *International Geology Review*, 2016, 59(8): 1028-1046.
- [69] Zhang J, Zhang B H, Zhao H, Timing of amalgamation of the Alxa Block and the North China Block: Constraints based on detrital zircon U-Pb ages and sedimentologic and structural evidence[J]. *Tectonophysics*, 2016, 668-669: 65-81.
- [70] 王荃. 中朝古陆的解体与华北、华泰二克拉通的确立[J]. *地质学报*, 2012, 86(10): 1553-1568.
Wang Quan. Breakup of China-Korea Platform and establishment of North China and Huatai cratons[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(10): 1553-1568.
- [71] 杨振宇, 袁伟, 仝亚博, 等. 阿拉善地块前中生代构造归属的新认识[J]. *地球学报*, 2014, 35(6): 673-681.
Yang Zhenyu, Yuan Wei, Tong Yabo, et al. Tectonic affinity reconnaissance of the Alxa Block in the Pre-Mesozoic[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2014, 35(6): 673-681.
- [72] Yuan W, Yang Z Y, The Alashan Terrane was not part of North China by the Late Devonian: Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 1270-1282.
- [73] Yuan W, Yang Z Y, Permian and Carboniferous paleomagnetic results from the eastern Hexi Corridor-Alashan terrane and its tectonics implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 104: 145-159.
- [74] 许淑梅, 冯怀伟, 李三忠, 等. 贺兰山及周边地区加里东运动研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(7): 2137-2150.
Xu Shumei, Feng Huaiwei, Li Sanzhong, et al. Study on Caledonian Movement in Helanshan and its surrounding area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(7): 2137-2150.
- [75] Song D F, Xiao W J, Collins A S, et al. New chronological

- constrains on the tectonic affinity of the Alxa Block, NW China[J]. *Precambrian Research*, 2017, 299: 230–243.
- [76] Zhang B H, Zhang J, Zhao H, et al. Tectonic evolution of the western Ordos Basin during the Palaeozoic–Mesozoic time as constrained by detrital zircon ages[J]. *International Geology Review*, 2018: 1–20.
- [77] 李松林, 张先康, 张成科, 等. 玛沁–兰州–靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(2): 210–217.
Li Song Lin, Zhang Xiankang, Zhang Chengke, et al. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin–Lanzhou–Jingbian by means of deep seismic sounding profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(2): 210–217.
- [78] Liu B J, Feng S Y, Ji J F, et al. Lithospheric structure and faulting characteristics of the Helan Mountains and Yinchuan Basin: Results of deep seismic reflection profiling[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(3): 589–601.
- [79] Ouro-Djobo S B, 魏文博, 叶高峰, 等. 华北大地电磁测深阵列观测实验与岩石圈导电性快速成像模型[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(6): 2508–2524.
Ouro-Djobo S B, Wei Wenbo, Ye Gaofeng, et al. Experiments of magnetotelluric observation network on North China and lithospheric conductivity structure from fast imaging method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(6): 2508–2524.
- [80] Dong X P, Hu J M, Li Z H, et al. Provenance of Ediacaran (Sinian) sediments in the Helanshan area, North China Craton: Constraints from U–Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 2017, 298: 490–511.
- [81] 薛友辰. 原特提斯北界东–西段交接转换过程: 秦岭–祁连–贺兰构造关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Xue Youchen. The conjunction and transition of the eastern and western segments of the Proto-Tethys northern boundary: The tectonic relationship of the Qinling–Qilian–Helan[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [82] Xu S M, Feng H W, Li S Z, et al. Closure time in the East Qilian Ocean and Early Paleozoic ocean–continent configuration in the Helan Mountains and adjacent regions, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 575–588.
- [83] 牟传龙, 周恳恳, 陈小炜, 等. 中国岩相古地理图集(埃迪卡拉纪–志留纪)[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
Mu Chuanlong, Zhou Kenken, Chen Xiaowei, et al. Atlas of the lithofacies–palaeogeography of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [84] Xiao W J, Windley B F, Yong Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple–accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35: 323–333.
- [85] Zhang J., Li J Y, Li Y F, et al. How did the Alxa Block respond to the Indo–Eurasian collision?[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 1511–1528.
- [86] Zhao X C, Liu C Y, Wang J Q, et al. Detrital zircon U–Pb ages of Paleozoic sedimentary rocks from the eastern Hexi Corridor Belt (NW China): Provenance and geodynamic implications[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 339(1): 32–45.
- [87] 张拴宏, 赵越, 宋彪, 等. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚古生代片麻状花岗闪长岩–锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 621–626.
Zhang Shuanghong, Zhao Yue, Song Biao, et al. The late Paleozoic gneissic granodiorite pluton in early Pre–Cambrian high–grade metamorphic terranes near Longhua county in northern Hebei Province, North China: Result from zircon SHRIMP U–Pb dating and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 621–626.
- [88] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 565–582.
Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, et al. Shuangjingzi Middle Triassic syn–collisional crust–derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino–Korean paleo–plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 565–582.
- [89] Sun J P, Dong Y P. Middle–Late Triassic sedimentation in the Helanshan Tectonic Belt: constrain on the tectono–sedimentary evolution of the Ordos basin, North China[J/OL]. *Geoscience Frontiers*, [2018–10–31]. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.05.017>.
- [90] Yang X Y, Dong Y P. Mesozoic and Cenozoic multiple deformations in the Helanshan Tectonic Belt, Northern China[J]. *Gondwana Research*, 2018, 60: 34–53.
- [91] 汤锡元, 冯乔, 李道燧. 内蒙古西部巴彦浩特盆地的构造特征及其演化[J]. *石油与天然气地质*, 1990, 11(2): 127–135.
Feng Xiyuan, Feng Qiao, Li Daosui. Tectonic characteristics and evolution of Bayanhot Basin, western Inner Mongolia[J]. *Oil & Gas Geology*, 1990, 11(2): 127–135.
- [92] 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 等. 中国航磁大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2018, 45(4): 658–680.
Xiong Shengqing, Yang Hai, Ding Yanyun, et al. Subdivision of tectonic units in China based on aeromagnetic data[J]. *Geology in China*, 2018, 45(4): 658–680.
- [93] 张进, 马宗晋, 任文军. 贺兰山南部构造特征及其与固原–青铜峡断裂的关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(2): 187–205.
Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun. The tectonic characteristics of southern Helan Mountain and their relationships with the Guyuan–Qingtongxia fault[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, 34(2): 187–205.
- [94] 方国庆, 刘德良. 鄂尔多斯盆地中部东西向天然气聚集带研究[J]. *石油实验地质*, 2000, 22(2): 146–154.
Fang Guoqing, Liu Deliang. Study of the west–east trend natural gas accumulation zone in the middle of the Ordos basin, China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2000, 22(2): 146–154.
- [95] Zhang J, Li J, Xiao W, et al. Kinematics and geochronology of

- multistage ductile deformation along the eastern Alxa block, NW China: New constraints on the relationship between the North China Plate and the Alxa block[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 57: 38–57.
- [96] Wang Z Z, Han B F, Feng L X, et al. Tectonic attribution of the Langshan area in western Inner Mongolia and implications for the Neoproterozoic–Paleoproterozoic evolution of the Western North China Craton: Evidence from LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of the Langshan basement[J]. *Lithos*, 2016, 261: 278–295.
- [97] 陈孟晋, 汪泽成, 孙粉锦. 鄂尔多斯西缘前陆盆地油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
Chen Mengjin, Wang Zecheng, Sun Fenjin. *Petroleum geology of foreland basin on the western edge of the Ordos Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [98] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷 12): 长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
Changqing Oilfield Petroleum Geological Records Writing Group. *Petroleum geology of China (Vol.12): Changqing oil field*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [99] 袁效奇, 耿国仓. 巴彦浩特盆地东部古生代沉积的发现及其大地构造意义[J]. *石油与天然气地质*, 1992, 13(4): 381–389.
Yuan Xiaoqi, Geng Guocang. Discovery of Paleozoic sediments in east Bayanhot Basin and its tectonic significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 1992, 13(4): 381–389.
- [100] 王鑫, 詹艳, 赵国泽, 等. 鄂尔多斯盆地西缘构造带北段深部电性结构[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(3): 595–604.
Wang Xin, Zhan Yan, Zhao Guoze, et al. Deep electric structure beneath the northern section of the western margin of the Ordos basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(3): 595–604.
- [101] 刘保金, 酆少英, 姬计法, 等. 贺兰山和银川盆地的岩石圈结构和断裂特征—深地震反射剖面结果[J]. *中国科学(地球科学)*, 2017, 47: 179–190.
Liu Baojin, Feng Shaoyin, Ji Jifa, et al. Lithospheric structure and faulting characteristics of the Helan Mountains and Yinchuan Basin: Results of deep seismic reflection profiling [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2017, 60: 589–601.
- [102] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28(1): 211–280.
- [103] Tapponnier P, Meyer B, Avouac J P, et al. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in Northeastern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97(3–4): 382–383, 387–403.
- [104] Laurie J R, Burrett C. Biogeographic significance of Ordovician brachiopods from Thailand and Malaysia[J]. *Journal of Paleontology*, 1992, 66: 16–23.
- [105] Tseng C Y, Yang H J, Yang H Y, et al. The Dongcaohe ophiolite from the North Qilian Mountains: A fossil oceanic crust of the Paleo–Qilian Ocean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52: 2390–2401.
- [106] 张进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 早古生代阿拉善地块与华北地块之间的关系: 来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2912–2934.
Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, et al. The relationship between the Alxa Block and the North China Plate during the Early Paleozoic: New information from the Middle Ordovician detrital zircon ages in the eastern Alxa Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(9): 2912–2934.
- [107] 孙知明, 李海兵, 裴军令, 等. 阿尔金断裂走滑作用对青藏高原东北缘山脉形成的古地磁证据[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1928–1936.
Sun Zhiming, Li Haibing, Pei Junling, et al. Strike–slip movement of the Altyn Tagh fault and implications for mountain formation inferred from paleomagnetic data in northern Tibetan plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(6): 1928–1936.
- [108] He G Q, Wang S G, Cui G Z, et al. On the features of reactivation of the Sino–Korean plate[J]. *Tectonophysics*, 1983, 100: 119–130.
- [109] 孙国凡, 刘景平. 贺兰坳拉槽与前渊盆地及其演化[J]. *石油与天然气地质*, 1983, 4(3): 236–245.
Sun Guofan, Liu Jingping. Helanaulacogen and front basin and their evolution[J]. *Oil & Gas Geology*, 1983, 4(3): 236–245.
- [110] 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989.
Zhang Kang. *Block structure and resources of the Ordos*[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1989.
- [111] 朱如凯, 孟祥化, 葛铭. 巴彦浩特盆地东缘中奥陶统混合型深水重力流沉积层序及其旋回[J]. *沉积学报*, 1994, 12(2): 77–85.
Zhu Rukai, Meng Xianghua, Ge Ming. Mixed deep–water gravity current sedimentary sequences of Middle–Ordovician series in the east margin of Bayanhaote basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 77–85.
- [112] 林畅松, 杨起, 李思田, 等. 贺兰奥拉槽早古生代深水重力流体系的沉积特征和充填样式[J]. *现代地质*, 1991, 5(3): 252–262.
Lin Changsong, Yang Qi, Li Sitian, et al. Sedimentary characters of the Paleozoic deep water gravity flow systems and basin filling style in the Helanaulacogen, Northwest China [J]. *Geoscience*, 1991, 5(3): 252–262.
- [113] 林畅松, 杨起, 李思田. 贺兰坳拉槽盆地充填演化分析[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
Lin Changsong, Yang Qi, Li Sitian. *Filling evolution of Helan trough*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [114] Darby B J, Ritts B D. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: The intraplate Western Ordos fold thrust belt China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 205: 13–24.

- [115] 白云来, 王新民, 刘化清, 等. 鄂尔多斯盆地西部边界的确定及其地球动力学背景[J]. 地质学报, 2006, 80(6): 792-813.
Bai Yunlai, Wang Xinmin, Liu Huaqing, et al. Determination of the borderline of the western Ordos basin and its geodynamics background[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 792-813.
- [116] 邸领军, 谢广成. 对贺兰拗拉槽的质疑[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 16-21, 36-39.
Di Lingjun, Xie Guangcheng. Queries about Helanulacogen [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(2): 16-21, 36-39.
- [117] 周志毅, 周志强, 张进林. 华北地台及其西缘奥陶纪三叶虫相[J]. 古生物学报, 1989, 28(3): 296-313.
Zhou Zhiyi, Zhou Zhiqiang, Zhang Jinlin. Ordovician trilobite biofacies of North China platform and its western marginal area[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1989, 28(3): 296-313.
- [118] 张抗. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶系滑塌堆积[J]. 沉积学报, 1992, 10(1): 11-18.
Zhang Kang. Olistostrome in Ordovician system, western and southern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(1): 11-18.
- [119] 解国爱, 张庆龙, 郭令智. 鄂尔多斯盆地西缘和南缘古生代前陆盆地及中央古隆起成因与油气分布[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 18-29.
Xie Guoai, Zhang Qinglong, Guo Lingzhi. The genesis and hydrocarbon distribution of western and southern margins of Paleozoic foreland basin and central paleouplift in Ordos Basin Earth and Planetary Science Letters[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(2): 18-29.
- [120] 孙肇才, 胡显穆. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系的对比划分意见及其对中西部油气勘探的意义[J]. 海相油气地质, 2002, 7(4): 41-58.
Sun Zhaocai, Hu Xianmu. View on the correlation and demarcation of the Ordovician strata in the southwestern margin region of Ordos Basin and the signification of petroleum exploration in central-western part of China[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2002, 7(4): 41-58.
- [121] 张进, 马宗晋, 任文军. 再论贺兰山地区新生代之前拉张活动的性质[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 8-11.
Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun. Re-discussion on natures of extension in Helanshan region before Cenozoic era [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(6): 8-11.
- [122] Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J/OL]. *Earth-Science Reviews*, [2018-10-31]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.011>.
- [123] Li Y C, Zhang K X, He W H, et al. Division of tectonic-strata superregions in China[J]. *China Geology*, 2018(1): 236-256.
- [124] Yang R C, Loon A J V, Jin X H, et al. From divergent to convergent plates: Resulting facies shifts along the southern and western margins of the Sino-Korean Plate during the Ordovician[J/OL]. *Journal of Geodynamics*, [2018-08-31]. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.001>.
- [125] 李本亮, 杨海军, 陈竹新, 等. 中国海相克拉通盆地地质构造[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Li Benliang, Yang Haijun, Chen Zhuxin, et al. Geological structures of the marine craton basins in China[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [126] 黄喜峰, 钱壮志, 途东霞, 等. 贺兰山中南段奥陶系米钵山组的沉积环境与构造背景分析[J]. 地球学报, 2009, 30(1): 65-71.
Huang Xifeng, Qian Zhuangzhi, Tu Dongxia, et al. Element geochemistry and depositional setting of Ordovician Miboshan Formation in central-southern Helan Mountain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(1): 65-71.
- [127] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 贺兰山地区中奥陶统樱桃沟组物源及构造背景分析[J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 68-80.
Wang Zhentao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. Provenance and tectonic settings analysis of Yingtaogou Formation of Middle Ordovician in Helan Mountain area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 68-80.
- [128] 吴素娟, 张永生, 邢恩袁. 桌子山地区奥陶系乌拉力克组碎屑岩地球化学特征及其对物源的制约[J]. 地质学报, 2016, 90(8): 1860-1873.
Wu Sujuan, Zhang Yongsheng, Xing Enyuan. Geochemistry of Ordovician detrital rocks and its constrains on provenance in Zhuozishan area, northwest Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(8): 1860-1873.
- [129] Sinclair H D. Tectonostratigraphic model for underfilled peripheral foreland basins: An Alpine perspective[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, 109(3): 324-346.
- [130] Shi X Y, Chen J Q, Mei S L, et al. Cambrian sequence stratigraphy and sea level cycles of North China platform[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1999, 10 (2): 110-118.
- [131] Lee J H, Lee S B. Depositional history, tectonics, and provenance of the Cambrian-Ordovician boundary interval in the western margin of the North China block: Comment[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2017, doi.org/10.1130/B31806.1.
- [132] 胡修棉, 王建刚, 安慰, 等. 利用沉积记录精确约束印度-亚洲大陆碰撞时间与过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47: 261-283.
Hu Xiumian, Wang Jiangang G, An Wei, et al. Constraining the timing of the India-Asia continental collision by the sedimentary record[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 47: 261-283.
- [133] Jing X C, Wang X L, Zhou H R. Ordovician (middle Darriwilian-earliest Sandbian) conodonts from the Wuhai area of Inner Mongolia, North China[J]. *Journal of Paleontology*, 2016, 89 (5): 768-790.
- [134] Jing X C, Wang X L, Zhou H R. Ordovician (middle Darriwilian-earliest Sandbian) conodonts from the Wuhai area of Inner Mongolia, North China[J]. *Journal of Paleontology*,

- 2016: 1–23.
- [135] 吴胜和, 冯增昭, 张吉森. 鄂尔多斯地区西缘及南缘中奥陶统平凉组重力流沉积[J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(3): 226–235.
- Wu Shenghe, Feng Zengzhao, Zhang Jisen. Sedimentology of gravity flow deposits of Middle Ordovician Pingliang Formation in west and south margins of Ordos[J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(3): 226–235.
- [136] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Feng Zengzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies paleogeography of the Cambrian and Ordovician in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [137] 马占荣, 白海峰, 刘宝宪, 等. 鄂尔多斯西部地区中—晚奥陶世克里摩里期—乌拉力克期岩相古地理[J]. 古地理学报, 2013, 15(6): 751–764.
- Ma Zhanrong, Bai Haifeng, Liu Baoxian, et al. Lithofacies paleogeography of the Middle–Late Ordovician Kelimoli and Wulalike Ages in western Ordos area[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(6): 751–764.
- [138] 陈小伟, 牟传龙, 周恩恩, 等. 鄂尔多斯西缘中晚奥陶世大坪阶—艾家山阶岩相古地理[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2028–2038.
- Chen Xiaowei, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, et al. Lithofacies–paleogeography of middle–late Ordovician Daping stage–Aijiashan stage on the western margin of the Ordos Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2028–2038.
- [139] 张抗. 滑塌堆积及其构造意义[J]. 岩相古地理, 1994, 14(6): 15–24.
- Zhang Kang. Olistostromes and their tectonic significance[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1994, 14(6): 15–24.
- [140] 高振中, 罗顺社, 何幼斌, 等. 鄂尔多斯地区西缘中奥陶世等深流沉积[J]. 沉积学报, 1995, 13(4): 16–26.
- Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, He Youbin, et al. The Middle Ordovician contourite on the west margin of Ordos[J]. Acta Geologica Sinica, 1995b, 13(4): 16–26.
- [141] 高振中, 罗顺社, 何幼斌, 等. 鄂尔多斯西缘奥陶纪海底扇沉积体系[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 119–126.
- Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, He Youbin, et al. Ordovician submarine fan systems in west margin of Ordos[J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2): 119–126.
- [142] 晋慧娟, 孙明良, 李育慈. 内蒙古桌子山中奥陶统的“特殊”浊积岩系[J]. 沉积学报, 2005, 23(1): 34–40.
- Jin Huijuan, Sun Mingliang, Li Yuci. The "Special" turbidite measure of the middle ordovician series in Zhuozishan Area, Inner Mongolia[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(1): 34–40.
- [143] 丁海军, 孟祥化, 葛铭, 等. 贺兰拗拉谷北段奥陶系等深流沉积[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1): 58–64.
- Ding Haijun, Meng Xianghua, Ge Ming, et al. Ordovician contourite of the north part of Helanaulacogen[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 31(1): 58–64.
- [144] 许强, 陈洪德, 赵俊兴, 等. 贺兰拗拉槽胡基台地区中奥陶统樱桃沟组深海重力流沉积特征[J]. 海相油气地质, 2010, 15(2): 14–20.
- Xu Qiang, Chen Hongde, Zhao Junxing, et al. The features of Middle Ordovician Yingtaogou deep-seagravitational current deposits at Hujitai area in the Helan Aulacogen, Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(2): 14–20.
- [145] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶纪地质事件群耦合作用[J]. 地质学报, 2015a, 89(11): 1990–2004.
- Wang Zhentao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. Ordovician geological events group in the West and South Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2015a, 89(11): 1990–2004.
- [146] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 贺兰山地区中奥陶统樱桃沟组深水牵引流沉积的发现及其意义[J]. 地学前缘, 2015b, 22(2): 221–231.
- Wang Zhentao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. Discovery of deep-water tractive current deposits in Middle Ordovician Yingtaogou Formation, Helan Mountain area, and its significance[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 221–231.
- [147] 李向东, 阙易, 郇雅棋. 桌子山中奥陶统克里摩里组下段薄层状石灰岩垂向序列分析[J]. 地球科学进展, 2017, 32(3): 276–291.
- Li Xiangdong, Que Yi, Huan Yaqi. Analysis of vertical sedimentary successions in the lower part of Kelimoli Formation, Middle Ordovician, Zhuozishan area[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(3): 276–291.
- [148] 郑昭昌, 李玉珍. 贺兰山奥陶系研究的新进展[J]. 现代地质, 1991, 6(5): 119–137.
- Zheng Zhaochang, Li Yuzhen. The new advances in the study of the Ordovician system in Helan Shan area[J]. Geoscience, 1991, 5(2): 119–137.
- [149] 贾振远, 蔡华, 蔡忠贤, 等. 鄂尔多斯地区南缘奥陶纪层序地层及海平面变化. 地球科学, 1997, 22(5): 48–60.
- Jia Zhenyuan, Cai Hua, Cai Zhongxian, et al. Sequence stratigraphy and sea level change of the Ordovician in the southern margin of Ordos region[J]. Oil & Gas Geology, 1997, 22(5): 48–60.
- [150] 贾振远. 一个碳酸盐沉积古斜坡的基本特征. 石油与天然气地质, 1988, 9(2): 171–177.
- Jia Zhenyuan. Fundamental characters of a carbonate palaeoslope[J]. Oil & Gas Geology, 1988, 9(2): 171–177.
- [151] 袁卫国. 鄂尔多斯盆地南缘中奥陶统火山凝灰岩的研究与意义[J]. 石油实验地质, 1995, 17(2): 167–170.
- Yuan Weiguo. Research and significance of volcanic tuff from Mid-Ordovician series in the southern margin of the Ordos basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 1995, 17(2): 167–170.
- [152] 李文厚, 梅志超, 陈景维, 等. 陕西渭北奥陶系放射虫硅质岩与火山凝灰岩的成因环境[J]. 中国区域地质, 1997, 16(4): 87–92.
- Li Wenhou, Mei Zhichao, Chen Jingwei, et al. Genetic environment of Ordovician Radiolarian cherts and volcanic tuffs

- in Weibei, Shaanxi Province[J]. *Regional Geology of China*, 1997, 16(4): 87-92.
- [153] 陈诚, 史晓颖, 裴云鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南缘晚奥陶世钾质斑脱岩—SHRIMP 测年及其成因环境[J]. *现代地质*, 2012, 26(2): 205-219.
Chen Cheng, Shi Xiaoying, Pei Yunpeng, et al. K-Bentonites from the Jinsushan Formation of Late Ordovician, Southern Ordos Basin: SHRIMP Dating and Tectonic Environment [J]. *Geoscience*, 2012, 26(2): 205-219.
- [154] 吴素娟, 李振宏, 胡健民, 等. 鄂尔多斯盆地南缘赵老峪剖面奥陶系凝灰岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质论评*, 2014, 60(4): 903-912.
Wu Sujuan, Li Zhenhong, Hu Jianmin, et al. Confirmation of Ordovician sediments in south margin of Ordos Basin by SHRIMP U-Pb zircon dating of volcanic tuff interlayers and its significance[J]. *Geological Review*, 2014, 60(4): 903-912.
- [155] 吴素娟, 张永生, 邢恩袁. 鄂尔多斯盆地西北缘奥陶纪凝灰岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2017, 63(5): 1309-1327.
Wu Sujuan, Zhang Yongsheng, Xing Enyuan. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of tuff in Wulalike Formation in the northwestern Ordos Basin[J]. *Geological Review*, 2017, 63(5): 1309-1327.
- [156] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶纪火山活动记录: 来自陕甘地区平凉组钾质斑脱岩地球化学和锆石年代学的信息[J]. *岩石学报*, 2015c, 31(9): 2633-2654.
Wang Zhen tao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. Volcanic event records at the southwestern Ordos Basin: The message from geochemical and zircon U-Pb geochronology of K-bentonites from Pingliang Formation, Shaanxi and Gansu region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015c, 31(9): 2633-2654.
- [157] 和政军, 宋天锐, 丁孝忠, 等. 燕山中元古代裂谷早期同沉积断裂活动及其对事件沉积的影响[J]. *古地理学报*, 2000, 2(3): 83-91.
He Zhengjun, Song Tianrui, Ding Xiaozhong, et al. The early synsedimentary faulting of the Mesoproterozoic Yanshan Rift and its influence on event sedimentation[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(3): 83-91.
- [158] 晋慧娟, 李育慈, 方国庆. 中国古代深海沉积和遗迹化石群落[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Jin Huijuan, Li Yuci, Fang Guoqing. *Paleo-abysmal deposits and ichnocoenoses in China*[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [159] 许靖华, 孙枢, 王清晨, 等. 中国大地构造相图(1: 400000)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Xu Jinghua, Sun Shu, Wang Qingchen, et al. *China phanerozoic tectonic phase map (1: 4000000)*[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [160] 陈发景, 汪新文, 陈昭年. 前陆盆地分析[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Chen Fajing, Wang Xinwen, Chen Shaonian. *Foreland basin analysis*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [161] Haughton P D, Todd S P, Morton A C. Sedimentary provenance studies[J]. London, Geological Society Special Publications, 1991, 57(1): 1-11.
- [162] 郭峰, 郭岭, 赵卫卫. 贺兰坳拉谷奥陶纪岩相古地理[J]. *海相地质与第四纪地质*, 2011, 31(5): 51-58.
Guo Feng, Guo Ling, Zhao Weiwei. Ordovician paleogeography in Helanaulacogen[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 51-58.
- [163] 袁伟, 杨振宇. 河西走廊带与澳大利亚的亲缘性——来自牛首山中寒武统碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的证据[J]. *地质通报*, 2012, 31(10): 1537-1553.
Yuan Wei, Yang Zhenyu. The affinity of the Hexi Corridor and Australia: Evidence from U-Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons from Middle Cambrian strata in Niushoushan[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(10): 1537-1553.
- [164] 王浩霖, 田鹏州, 李印宝. 贺兰山中段奥陶系米钵山组砂岩磁组构特征及古水流分析[J]. *资源调查与环境*, 2015, 36(4): 261-265.
Wang Haolin, Tian Pengzhou, Li Yinbao. Analysis on magnetic fabric and paleocurrent of the sandstones from the Miboshan Formation in the middle section of Helan Mountain [J]. *Resources Survey and Environment*, 2015, 36(4): 261-265.
- [165] 李向东, 何幼斌, 王丹, 等. 贺兰山以南中奥陶统香山群徐家圈组古水流分析[J]. *地质论评*, 2009, 55(5): 653-622.
Li Xiangdong, He Youbin, Wang Dan, et al. Analysis on paleocurrent in the Xujiajuan Formation, Xiangshan Group, Middle Ordovician, in southern Helan Mountains[J]. *Geological Review*, 2009, 55(5): 653-622.
- [166] 张进, 马宗晋, 任文军, 等. 滑塌堆积在逆冲构造中的作用——以宁夏牛首山中奥陶统米钵山组为例[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 85-95.
Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun, et al. The role of olistostrome in thrusting: A case study from the Miboshan Formation of Middle Ordovician in the Niushou Mountain, Ningxia [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 85-95.
- [167] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西缘北部奥陶纪盆地原型: 来自贺兰山和桌子山地区奥陶系的沉积响应[J]. *地质论评*, 2016, 62(4): 1040-1061.
Wang Zhen tao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. The Ordovician Basin Prototype in the Northwest Ordos Basin: Constraint from the Ordovician Sedimentary Response in the Helan-Zhuozi Mountains[J]. *Geological Review*, 2016, 62(4): 1040-1061.
- [168] 郭彦如, 赵振宇, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理[J]. *石油学报*, 2012, 33(增刊2): 95-109.
Guo Yanru, Zhao Zhenyu, Fu Jinhua, et al. Sequence lithofacies paleogeography of the Ordovician in Ordos Basin, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 33(Suppl 2): 95-109.

Ordovician tectonic evolution and sedimentary response in the Helanshan–Zhuozishan Mountains and the peripheral regions, western North China: A review

WANG Zhentao¹, WANG Xunlian²

1. Ministry of Natural Resources Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract The early Paleozoic ocean–continent framework, the basin prototype and the tectonic setting of the Helanshan–Zhuozishan Mountains, the western North China Craton (NCC) and its tectonic affinity remain as controversial issues, and the hot topics in the international geological community. In recent years, with the accumulation of new data such as the petrogeochemistry, the paleomagnetism, the zircon geochemistry and the chronology, some new lines of evidence and hypotheses were put forward, raising these scientific problems to a new level, but without consensus yet being reached. This paper reviews a series of latest progresses, and comments on some crucial basic geological problems, and puts forward suggestions for future research focusing on scientific issues.

Keywords Helanshan; Zhuozishan; suture zone; basin prototype; turbidite ●



(责任编辑 韩星明)