

内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化

辛后田^{1,2}, 牛文超^{1,2}, 田健^{1,2}, 滕学建^{1,2}, 段霄龙^{1,2}

XIN Houtian^{1,2}, NIU Wenchao^{1,2}, TIAN Jian^{1,2}, TENG Xuejian^{1,2}, DUAN Xiaolong^{1,2}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170

1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China

摘要:内蒙古北山造山带自北向南发育红石山-百合山、月牙山-洗肠井和帐房山-玉石山3条蛇绿构造混杂岩带。其中北部的2条蛇绿岩带揭示了北山造山带两阶段演化的历史:月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带洋壳形成于530~520 Ma,沿该带多处保存较完好的蛇绿岩洋壳残块(洋壳结构具向北变新特征),与北侧的早古生代公婆泉岩浆弧(由南向北岛弧成熟度变高)共同指示了北山洋向北俯冲消减的过程,即490 Ma初始俯冲,450~440 Ma为俯冲峰期,430~420 Ma为同碰撞阶段,400 Ma的双峰式岩浆岩组合指示了北山洋的消亡和后造山伸展的过程;红石山-百合山蛇绿混杂岩带是发育在雀儿山-圆包山岛弧基础上的SSZ型蛇绿岩,弧后开裂洋壳的形成与南侧最早发育的岛弧岩浆作用年龄接近(340~320 Ma),310~290 Ma俯冲峰期造成南侧白山岩浆弧大量的岩浆活动,早二叠世末期(275 Ma)的辉长岩和花岗岩侵位及早—中二叠世双堡塘组下部的角度不整合均反映了红石山洋盆的闭合。前人划“石板井-小黄山蛇绿岩带”实为一条早古生代发育的深大断裂,沿带发育中基性侵入体及少量超基性岩,后期(志留纪末)叠加有较强的韧性剪切变形。中生代以来的走滑作用和逆冲推覆构造改造了古生代的构造格架,使红石山-百合山蛇绿混杂岩带向北左行切错了十余千米,北山南部的中—新元古界推覆至下古生界之上。对内蒙古北山造山带时空结构的厘定,有助于中亚造山带造山作用过程的理解及其对古生代地壳增生的深入研究,也对银额盆地晚古生代新层系油气资源勘查起到基础支撑。

关键词:北山造山带;构造单元划分;蛇绿构造混杂岩;洗肠井;百合山;中亚造山带;古亚洲洋

中图分类号:P542 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)09-1297-20

Xin H T, Niu W C, Tian J, Teng X J, Duan X L. Spatio-temporal structure of Beishan orogenic belt and evolution of Paleo-Asian Ocean, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(9): 1297-1316

Abstract: The Beishan orogenic belt is composed of Late Paleozoic Hongshishan-Baiheshan ophiolite mélange belt, Early Paleozoic Yueyashan-Xichangjing ophiolite mélange belt and late Paleozoic Zhangfangshan-Yushishan ophiolite mélange belt from north to south in Inner Mongolia. The “Shibanjing-Xiaohuangshan ophiolite belt” defined by previous researchers is actually an Early Paleozoic trans-crustal fault zone, across which there are intermediate-mafic rocks and minor ultramafic rocks. At the end of the Silurian, intense ductile shear deformation was superimposed upon it. The two ophiolite belts in the north reveal the two-stage evolution history of Beishan orogenic belt: The Yueyashan-Xichangjing ophiolite mélanges belt was formed from 530 Ma to 520 Ma, and there exist many intact ophiolite oceanic crust fragments along the belt (the oceanic crust structure has the characteristics of becoming younger from south to north), which, together with the Early Paleozoic Gonpoquan magmatic arc (the maturity of island arc increased from south to north), indicates the process of northward subduction of the Beishan Ocean, which included the initial subduction of 490 Ma, the peak period of subduction ranging from 450 Ma to 440 Ma, and the syn-collision stage ranging from 430 Ma to 420 Ma. The 400 Ma bimodal magmatic rock assemblage indicates the extinction of Beishan Ocean and the beginning of a new tectonic cycle. The Hongshishan-

收稿日期:2019-09-10;修订日期:2019-11-12

资助项目:中国地质调查局项目《阴山成矿带小狐狸山和雅布赖地区地质矿产调查项目》(编号:DD20160039)

作者简介:辛后田(1969-),男,博士,教授级高级工程师,从事岩石大地构造方面的研究。E-mail:2680452804@qq.com

Baiheshanophiolite mélangé belt is a SSZ-type ophiolite developed on the basis of the Quershan-Yuanbaoshan island arc. The formation time of the back arc cracked oceanic crust approached the earliest developed island arc magmatism in the south, which happened from 340 Ma to 320 Ma. The period of 310~290 Ma subduction caused a lot of magmatic activities that formed the Baishan magmatic arc. The existence of gabbro and granite bimodal intrusions at the end of Early Permian (275 Ma) and the Early-Middle Permian angular unconformity events of the Shuangbaotang Formation commonly reflect the closure of the Hongshishan Ocean basin. The strike-slip and thrust nappe structures since Mesozoic have transformed the Paleozoic tectonic framework, resulting in the northward left-lateral slipping of Hongshishan-Baiheshanophiolite mélangé belt for more than 10 kilometers and the thrusting of Middle-Upper Proterozoic strata on the Early Paleozoic strata. The authors determined the spatial and temporal structure of the Beishan orogenic belt, which is helpful to the further research on the orogenesis and crustal accretion process of the Central Asian Orogenic Belt, and also provides research basis for the exploration of the Late Paleozoic hydrocarbon resources in the Yin'e basin.

Key words: Beishan orogenic belt; division of tectonic units; ophiolite mélangé; Xichangjing; Baiheshan; Central Asian Orogenic Belt; Paleo-Asian Ocean

中亚造山带是位于西伯利亚板块、塔里木板块和华北板块之间的巨型造山带,记录了古亚洲洋自新元古代早期(约 1000 Ma)—古生代晚期(约 250 Ma)长期复杂的地质演化过程^[1-7]。前人对中亚造山带西部的阿尔泰造山带^[8-9]、准噶尔地块^[10-11]和天山造山带^[12-13],以及中部兴蒙造山带^[14-15]和东部兴安造山带^[16-17]的研究显示,中亚造山带是显生宙以来全球最大的增生造山带和大陆地壳生长最显著的地区之一^[18-27]。

北山造山带位于中亚造山带中南缘,处在塔里木板块、西伯利亚板块和哈萨克斯坦板块的交汇部位^[28-33],东侧与兴蒙造山带相接,西侧以星星峡断裂为界与东天山造山带分隔,北侧和南侧分别与蒙古造山带和敦煌地块相邻。该造山带由多个微陆块、岛弧、蛇绿混杂岩带/增生杂岩等构造单元组成,其中月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带及其以北地区是由多个洋内岛弧经 2 个阶段俯冲、拼贴作用形成的复杂增生系统,是研究中亚造山带增生造山作用和古亚洲洋演化的关键地段^[5, 34-40]。前人认为,该造山带自北向南依次发育红石山-百合山、石板井-小黄山、月牙山-洗肠井和柳园-帐房山 4 条蛇绿混杂岩(超基性岩)带^[5, 28, 31-32, 41]。左国朝等^[28]最早以石板井-小黄山蛇绿混杂岩带为界,将北山地区划归为塔里木板块和西伯利亚板块 2 个大的构造单元,相当于北山南带和北山北带的界线。后来的研究对北山地区的构造属性和构造单元划分提出了不同方案,先后划分为塔里木板块和哈萨克斯坦板块^[31, 41-44]、西伯利亚和塔里木板块^[45-47],以及西伯利亚、哈萨克斯坦和塔里木板块^[30, 48]及多岛洋弧盆系增生造山带^[5, 27, 49-50]。关于北山造山带内古亚

洲洋最终闭合位置和闭合时间也存在诸多争议,主要有:①早古生代闭合于石板井—小黄山一线^[28];②中—晚泥盆世闭合^[51-53],最终的缝合带为月牙山—洗肠井蛇绿混杂岩带^[32, 43, 47];③石炭纪于红石山—百合山一线闭合^[30-31, 42];④早二叠世—三叠纪闭合,最南侧的柳园—帐房山蛇绿混杂岩带代表了最终的缝合带^[5, 54-55]。

造成上述争议的主要原因应归结于对北山造山带内岩浆岩时空分布、地层划分对比、蛇绿构造混杂岩带的性质等基础地质资料掌握程度的差异。20 世纪 70—80 年代,北山及邻区基础地质工作曾由新疆、甘肃、宁夏和内蒙古 4 个不同省(自治区)的多家地勘单位主导,不同的调查者对地层的厘定和分区(公婆泉群、咸水湖组、白云山组等地层单位曾被划为不同的地层分区)、蛇绿构造混杂岩带时代和构造属性的认识存在严重分歧,对构造岩浆岩带没有开展过系统梳理。中国地质调查局天津地质调查中心自 2012 年开始在内蒙古北山地区连片部署 72 幅 1:5 万区域地质调查工作。笔者在系统总结、集成这些图幅成果的基础上,综合内蒙古北山地区古生代地层区划和构造岩浆岩带特征,明确了不同蛇绿混杂岩带的时代和性质,重新厘定并提出了该地区大地构造单元新的划分方案,探讨北山造山带的结构和古生代以来古亚洲洋的演化过程。

1 内蒙古北山地区构造边界特征与构造单元划分

蛇绿混杂岩带作为古洋盆和汇聚板块边界的直接判别标志,通常可以指示古板块的构造格局^[56-57]。北山造山带发育的蛇绿混杂岩带及其时

空展布、性质同样是北山地区构造单元划分的重要标志^[5, 28-32, 42, 58]。本文结合近年区域地质调查项目最新成果和 1:5 万区调中的新发现、新认识,分别以月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带、红石山-百合山蛇绿混杂岩带和账房山-玉石山蛇绿混杂岩带为界将内蒙古北山地区划分为华北-塔里木板块(I)和中亚造山带(II,即北山造山带)2个一级大地构造单元,以及敦煌地块(I₁)、马鬃山微陆块(II₁)和西伯利亚南缘陆缘增生带(II₂)3个二级构造单元,并进一步划分为 11 个构造单元,自南向北分别为红柳园晚古生代裂谷(I₁¹)、帐房山-玉石山晚古生代蛇绿混杂岩带(I₁²)、古铜井中-新元古代克拉通盆地(I₁³)、西双鹰山早古生代被动陆缘盆地(I₁⁴)、月牙山-洗肠井早古生代蛇绿混杂岩带

(II₁¹)、公婆泉早古生代岩浆弧(II₁²)、明水-旱山地块(II₁³)、白山晚古生代岩浆弧(II₁⁴)、红石山-百合山蛇绿混杂岩带(II₁⁵)、黑鹰山晚古生代弧后盆地(II₂¹)和雀儿山-圆包山早中古生代岛弧带(II₂²)(图 1;表 1)。需要指出的是,作为构造单元划分标志的 3 条蛇绿构造混杂岩带均为重要的构造带,发育较强的韧性剪切变形,是北山地区重要的构造边界,同时也是重要的构造单元。故本文将其在本节介绍,但不否认其构造单元的属性。

1.1 月牙山-洗肠井早古生代蛇绿混杂岩带

月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带呈北西西向带状展布于内蒙古北山地区,向西延伸至白云山及甘肃红柳河-牛圈子一带^[5, 31-32],在内蒙古北山地区出露宽 2~6 km,断续延伸大于 50 km,南、北两侧分别为西

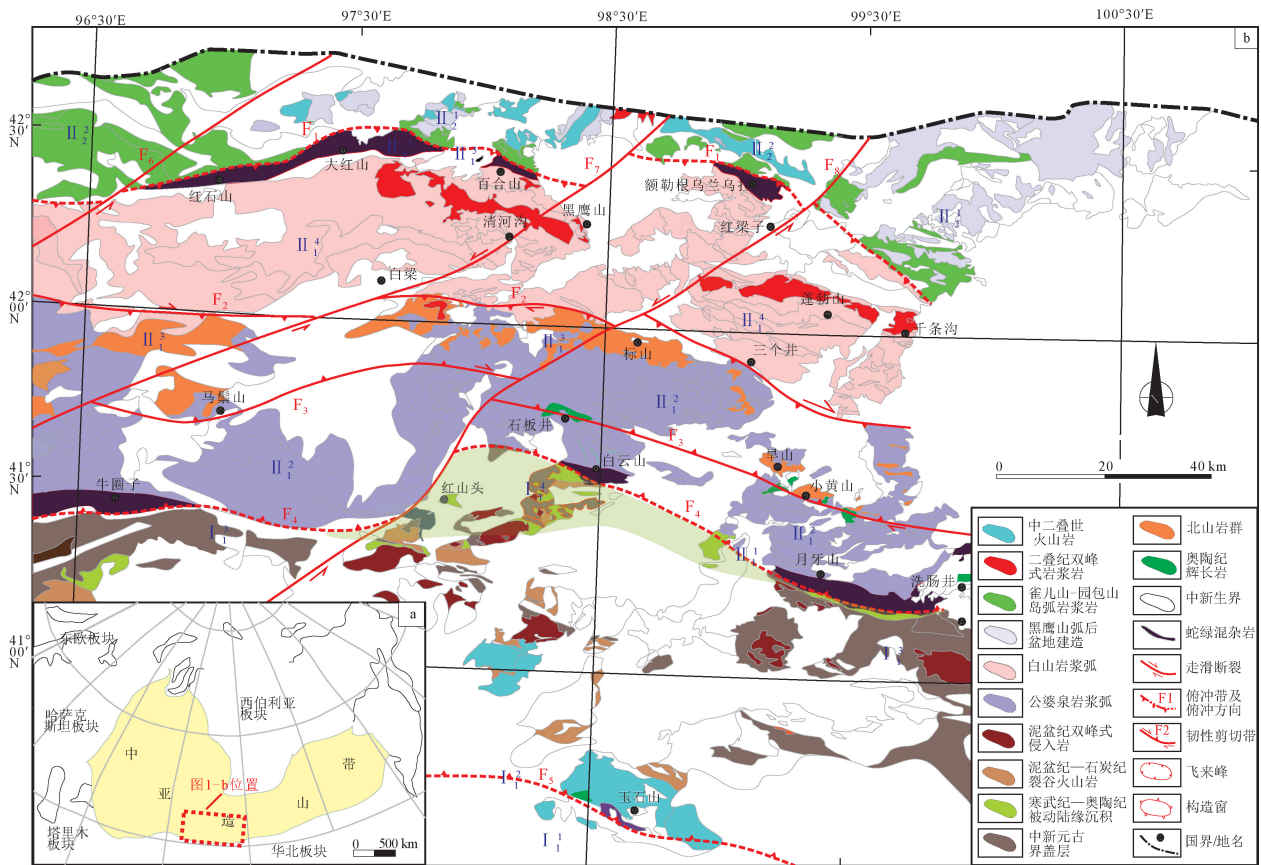


图 1 内蒙古北山造山带大地构造单元划分图

Fig. 1 The tectonic units of the Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia

- I₁¹—红柳园晚古生代裂谷; I₁²(F₅)—帐房山-玉石山晚古生代蛇绿混杂岩带; I₁³—古铜井中-新元古代克拉通盆地;
 II₁¹(F₄)—月牙山-洗肠井早古生代蛇绿混杂岩带; II₁²—公婆泉早古生代岩浆弧; II₁³—明水-旱山地块; II₁⁴—白山晚古生代岩浆弧;
 II₁⁵(F₁)—红石山-百合山晚古生代蛇绿混杂岩带; II₂¹—黑鹰山晚古生代弧后盆地; II₂²—雀儿山-圆包山早、中古生代岛弧带;
 F₂—白梁-三个井构造带; F₃—石板井-小黄山构造带; F₆—星星峡走滑断裂; F₇—清沟沟走滑断裂; F₈—红梁子走滑断裂

表1 内蒙古北山地区构造单元划分
Table 1 The division of tectonic units for the
Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia

一级构造单元	二级构造单元	三级构造单元
中亚造山带 (北山造山带)	西伯利亚南缘 陆缘增生带	雀儿山-圆包山早-中生代岛弧带 黑鹰山晚古生代弧后盆地
	红石山-百合山晚古生代蛇绿混杂岩带	
	马鬃山微陆块	白山晚古生代岩浆弧 明水-早山地块 公婆泉早古生代岩浆弧
月牙山-洗肠井早古生代蛇绿混杂岩带		
华北-塔里 木板块	敦煌地块	西双鹰山早古生代被动陆缘盆地 古铜井中-新元古代克拉通盆地 账房山-玉石山晚古生代蛇绿混杂岩带 红柳园晚古生代裂谷

双鹰山早古生代被动陆缘和公婆泉早古生代岩浆弧,均为断层接触。该蛇绿混杂岩带岩块包括洋壳残块及外来岩块两部分,其中洋壳残块主要由超基性岩(橄榄岩、方辉橄榄岩、尖晶石二辉橄榄岩、橄辉岩等)、(堆晶)辉长岩、玄武岩、硅质岩和斜长花岗岩组成。超基性岩强蛇纹石化,在月牙山、白云山和洗肠井多地均可见保存较好的堆晶超基性岩;辉长岩在月牙山一带也见明显的堆晶结构,堆晶矿物呈层状展布;玄武岩蚀变为绿泥绿帘片岩;硅质岩包括灰黑色和灰红色2种,代表远洋沉积物质;外来岩块主要为灰岩及砂岩岩块。蛇绿混杂岩基质主要为蛇纹岩、绿帘绿泥片岩、砂板岩等。在月牙山、洗肠井等地可见保存相对完好的蛇绿岩残块,具有向北变新的洋壳层序。蛇绿混杂岩与南北两侧地质体(早古生代西双鹰山组、罗雅楚山组及公婆泉组)发生强烈构造混杂,中心地带构造混杂较弱,可识别出3期构造变形,并经受了后期中生代逆冲推覆构造的改造,局部被中-新元古代地层掩盖。

该蛇绿混杂岩带中辉长岩和斜长花岗岩的锆石U-Pb年龄集中在540~520 Ma之间^[47, 59-62],笔者也测得多个同时代的年龄信息,但也存在少数445~425 Ma的年龄信息^[55, 63-64]。墩墩山组下部磨拉石建造角度不整合于蛇绿混杂岩之上,其上部火山岩层的同位素年代介于385~375 Ma之间,间接说明该蛇绿岩构造就位的时间早于385 Ma。另外,遍布蛇绿混杂岩带南北两侧的同碰撞花岗岩(430~

420 Ma)和双峰式岩浆岩组合(405~405 Ma),说明蛇绿岩的就位年龄不晚于430 Ma。

月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带的形成存在弧后盆地^[5, 28, 41, 65]和大洋中脊^[32, 47, 52, 62, 66-67]两种认识。笔者对不同时代的蛇绿岩形成环境分别进行了研究,认为其中形成于530~520 Ma的蛇绿岩具轻稀土元素略亏损、重稀土元素平坦的洋脊玄武岩(MORB)的地球化学特征,而445~425 Ma的蛇绿岩均具有轻稀土元素富集并强烈分馏,重稀土元素平坦的岛弧拉斑玄武岩(IAT)特征^[64]。此外,南侧敦煌地块和北侧马鬃山微陆块的前寒武纪基底物质组成存在明显差异^[28-30, 32],且两侧的早古生代地层古生物组合、构造岩浆作用特征也存在较大区别^[36, 68],暗示月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带可能为一级板块构造边界,代表了北山地区的早古生代板块缝合带^[31-32, 47, 67, 69]。

1.2 红石山-百合山晚古生代蛇绿混杂岩带

该构造单元分隔了南侧马鬃山微陆块和北侧西伯利亚南缘陆缘增生带,在内蒙古境内主要分布于小红山-天目山、百合山和额勒根乌兰乌拉一带,向西延至甘肃省肃南县红石山地区,整体呈北西-南东向展布,两侧均以逆冲断层与相邻地质体分隔。前人根据区域重磁资料,认为东部蓬勃山地区也有类似红石山和百合山的高磁异常,故按照北西向展布的区域构造线方向将该蛇绿混杂岩带连至蓬勃山地区^[70]。调查发现,高正磁异常在蓬勃山地区对应着英云闪长岩岩体和外围的白山组玄武安山岩,没有较大的基性和超基性岩岩基存在,仅有的少量辉长岩脉年龄也是276 Ma^①,且岩石基本没有发育后期的变形构造。张正平等^②在额勒根乌兰乌拉地区填图不仅识别出较发育的紫色薄层状硅质岩,也有与蛇绿岩套配套的辉长岩、斜长花岗岩和玄武岩,并证明其为红石山-百合山蛇绿构造混杂岩带东延的部分。该蛇绿混杂岩带由洋壳残块、外来岩块及碎屑岩基质组成。洋壳残块岩性包括超基性岩(变质橄榄岩、辉石橄榄岩、异剥辉石岩、蛇纹岩)、辉长岩、玄武岩和硅质岩;外来岩块包括灰岩和奥陶纪火山岩岩块;基质主要为蛇纹岩、砂板岩及少量绿泥绿帘片岩^[71]。

红石山-百合山蛇绿构造混杂岩带具有强烈的变形,在西部小红山地区和东部额勒根乌兰乌拉地区,强韧性剪切变形导致蛇绿岩岩块多呈构造片岩

产出,与基质难以识别。相对而言,大红山和百合山两地保留有较好的蛇绿岩残块和较多的地幔岩石,蛇绿构造混杂岩特征明显。该混杂岩带经历 3 期变形:第一期为百合山洋壳俯冲期形成的深构造层次韧性变形,变形面理走向为北西—南东向,发育不对称剪切褶皱;第二期变形为百合山洋挤压碰撞期形成的紧闭褶皱,枢纽走向为北西—南东向,构成了该构造单元主期面理;第三期变形较弱,未形成区域性的面理,仅在部分早期面理上形成北东向倾伏的线理构造。

牛文超等^[71]在百合山地区辉长岩中获得了 344.6 ± 1.8 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,与红石山地区的蛇绿混杂岩形成时代(360 ~ 340 Ma)基本一致^[72-73],表明红石山洋形成于早石炭世或更早。关于红石山-百合山蛇绿混杂岩的形成环境,主要存在大洋中脊^[74-75]、初始裂谷^[65, 72, 76]和超基性岩侵入体^[73, 77] 3 种观点。笔者研究认为,红石山-百合山蛇绿混杂岩所代表的洋盆很可能为弧后有限洋盆,主要证据如下:①混杂岩带南侧白山组火山岩以钙碱性火山岩为主,尤其与红石山洋壳形成时代一致的火山岩也具有岛弧性质,可以排除初始裂谷的成因认识^[78-79];②百合山一带超基性岩具有典型的混杂岩特征,含有发育较齐全的蛇绿岩组合^[71],以及北侧的增生楔地体,与超基性侵入体区别明显;③百合山蛇绿混杂岩兼具有洋中脊(MORB)和岛弧(IAB)的地球化学性质,显示其形成于与俯冲相关的构造环境,属 SSZ 型蛇绿岩^③,是在雀儿山-圆包山岛弧演化基础上裂解的有限洋盆。本次工作也在百合山蛇绿混杂岩带斜长花岗岩中获得了 297.3 ± 1.5 Ma 的年龄^[71],不排除在早石炭世开裂的弧后盆地在俯冲汇聚过程中存在后期局部的裂解。

1.3 帐房山-玉石山蛇绿混杂岩带

该蛇绿混杂岩带位于内蒙古北山地区最南部,分布范围较小,大体沿帐房山—玉石山一带呈东西向条带状展布,出露宽度在 2~5 km 之间,两侧分别与敦煌地块和红柳园晚古生代裂谷呈断层接触。其主要由堆晶辉长岩、辉橄岩、辉长岩、硅质岩和黑色板岩及少量灰岩等岩块组成,基质以泥砂质为主^[80],岩块野外多呈透镜状,部分地段被早二叠世双堡塘组角度不整合覆盖^[32, 81]。早期的研究认为,帐房山-玉石山蛇绿混杂岩带向西与柳园-辉铜山蛇绿混杂岩带相连,为北山地区早古生代陆缘裂谷

的产物^[28, 31]。然而辉铜山蛇绿混杂岩锆石 U-Pb 年龄为 446.1 ± 3.0 Ma^[81],帐房山蛇绿混杂岩锆石 U-Pb 年龄为 362.6 ± 4.0 Ma^[81],暗示这 2 条蛇绿混杂岩带可能并非同一条蛇绿混杂岩带。本次研究在玉石山蛇绿混杂岩带斜长花岗岩中获得了 350.6 ± 2.0 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,与帐房山一带年龄基本一致^[81],表明帐房山-玉石山蛇绿混杂岩带形成于晚古生代,与辉铜山蛇绿混杂岩带的时代(早古生代)和性质都存在较大差异,前者可能形成于晚古生代的陆内裂谷环境^[32, 81],后者则与早古生代北山南部的洋陆演化进程关系密切^[5, 54]。

1.4 石板井-小黄山构造带

该构造带长期以来被认为是塔里木板块和明水-旱山地块的缝合带^[28],或是中亚造山带的一级大地构造边界^[82]。新近完成的多个区调项目发现,在公婆泉早古生代岩浆弧上发育一条规模较大的韧性剪切变形带,沿该变形带自东向西多处可见超基性岩、辉长岩和闪长岩、石英闪长岩等岩体,向西越过且末-星星峡断裂,延至马鬃山地区的野马泉和勒巴泉。前人依据格尔木-额济纳旗地学断面剖面布格重力异常认为,石板井-小黄山断裂为倾向北北东的逆断层,断距约 2.5 km^[80, 83]。磁测资料也显示该断裂北倾,倾角近直立^[84]。

在小黄山一带发现辉石橄榄岩呈岩株状侵入于北山岩群石英片岩中,围岩见明显的烘烤边,辉长岩和角闪闪长岩发育较强的韧性变形,条带状构造明显,而非堆晶结构,与之配套的前人认为的玄武岩实为玄武安山岩,辉长岩侵位时代为 472 ± 1.0 Ma^④。中部的阿门乌苏一带,侵入公婆泉组变质砂岩中的强糜棱岩化辉长岩侵位时代为 462.5 ± 3.2 Ma^⑤;西部石板井一带辉长闪长岩和闪长岩-石英闪长岩组合中辉长闪长岩年龄为 470.7 ± 4.3 Ma,石英闪长岩侵位时代为 463.7 ± 4.9 Ma^⑥。前人根据该构造带未变形最老花岗岩限定韧性剪切变形年龄上限为 416 Ma^[85]。本次研究表明,该构造带经历了 2 期变形事件,早期(430~400 Ma)是在中高温低角闪岩相-高绿片岩相变质条件下的低角度北倾右行斜冲运动,可见侵入于构造带的早泥盆世辉长岩没有遭受早期构造的改造;晚期(早于 376 Ma)叠加有低绿片岩相低温韧性变形,为构造折返过程中南倾的高角度反冲断裂,早泥盆世的双峰式脉岩群遭受变形改造形成牵引褶皱,而晚泥盆世英云闪长岩

岩体明显侵入构造带。

1.5 白梁-三个井韧性剪切带

该韧性剪切带大致沿 320° 方向延伸,西起少斜沟、白梁地区,向东依次经红柳峡南部、哈珠南山抵达东部的三个井、千条沟南部微波山一带,为一大型向南右行斜冲的韧性剪切带。在西部少斜沟地区,卷入构造带的主要地质体为石炭系绿条山组、白山组和晚石炭世、早二叠世花岗岩,形成糜棱岩化的碎屑岩、花岗岩、长英质糜棱岩和条带状钙质糜棱岩。强变形域普遍发育不对称旋转碎斑和云母鱼、S-C 组构、压力影、不对称剪切褶皱等形迹,并常见矿物拉伸线理和新生矿物线理。运动学性质显示,该期韧性变形具有右行走滑分量的南倾逆断层性质。红柳峡南部,该韧剪带主要发育在白山组流纹岩、流纹质晶屑凝灰岩中,各类剪切变形构造发育同上,可见剪切出熔的石英脉及其石香肠构造,糜棱面理产状为 23° ∠ 46°, 拉伸线理产状为 37° ∠ 65°, 具斜向逆冲特征。与少斜沟一带不同的是,红柳峡南韧性剪切带为具左型走滑特征的逆冲型韧性剪切变形。东部的三个井一带韧性剪切带主要发育在泥盆纪、志留纪花岗岩和石炭纪绿条山组中,走向北西西向,宽 8 km 左右;该处剪切带运动学性质均为右旋剪切,剪切带内广泛发育透入性面理、矿物拉伸线理、剪切褶皱、以 σ 型眼球体最发育的不对称眼球构造、S-C 组构等^[85]。在这同一条韧性剪切带中,存在左行和右行不同的运动学方向,也表征其具有多期活动的历史,即既有早期俯冲阶段向南的逆冲,又有红柳峡地区晚期造山折返过程中的反冲构造。

卷入该韧性变形带的最新岩体,在少斜沟、白梁一带为晚石炭世二长花岗岩(309.5±1.3 Ma)和白山组火山岩(312.2±2.1 Ma),在砾石滩一带也为晚石炭世二长花岗岩(315.4±3.5 Ma),在红柳峡地区影响到的最新花岗岩的年龄为 295.4±1.2 Ma,而侵入构造带的最老侵入体年龄为 276 Ma。结合构造带内变形地质体的时代(白山组火山岩时代),限定该韧性剪切带早期变形时代为早二叠世(290~275 Ma)。

2 其他构造单元特征

2.1 敦煌地块

敦煌地块位于塔里板块的东缘,北部和南部分别与北山造山带和祁连造山带相接^[86-88]。在内蒙古

古北山地区主要分布于月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带以南(图 1-b)。敦煌地块早前寒武纪变质结晶基底主要由敦煌岩群组成^[88-90],岩石类型包括黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、角闪黑云斜长变粒岩、斜长石英岩、斜长角闪岩、钙硅酸盐岩、大理岩等,部分岩石中含石榴子石、矽线石、堇青石等富铝硅酸盐矿物。在北山大兰湖墩山一带侵入敦煌岩群的变质花岗岩中获得了 1639±46 Ma 的锆石 U-Pb 年龄^⑦,结合前人在敦煌岩群中获得 3.1~2.6 Ga 的碎屑锆石峰值年龄^[88]和 2670±13 Ma 的变质侵入体年龄^[86],表明敦煌地块形成时代在新太古代—古元古代早期。此外,北山地区敦煌岩群普遍经历了高角闪岩相变质作用,浅色深熔脉体发育,其上被中—新元古代沉积盖层角度不整合覆盖。中新元古代地层中均大量发育 3.2~3.3 Ga 的碎屑锆石年龄,进一步表明该区古老结晶基底的存在。

2.2 红柳园晚古生代陆内裂谷

该裂谷呈近东西向展布于大白山、咸水沟地区,向西延入甘肃境内的红柳园、芦草滩一带。主要由晚泥盆世墩墩山组、早石炭世红柳园组和晚石炭世芨芨台子组组成,与下伏早泥盆世三个井组之间角度不整合接触^[51],上部被早二叠世双堡塘组角度不整合覆盖^[91]。晚泥盆世墩墩山组主要分布于白云山东部地区,向西则延伸至甘肃境内的墩墩山一带,岩性包括玄武岩、安山岩、流纹岩和同质的火山碎屑岩及少量英安岩和英安斑岩,其时代集中在 370~360 Ma 之间^[51, 92-93],为一套裂谷型火山岩组合^[32, 51]。红柳园组主要分布于大兰湖墩山—咸水沟—小红山和马鬃山南—白石山—古铜井一带,下部火山岩包括细碧岩、玄武岩、流纹岩和同质的火山碎屑岩,形成于裂谷环境^[94],上部碎屑岩中发育典型鲍马序列,具深水浊流沉积特征^[95]。在红柳园组下部火山岩中获得了 359.9±1.4 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,显示其形成时代为晚泥盆世—早石炭世^[94]。晚石炭世芨芨台子组在北山地区主要分布于咸水沟一带,岩性为灰色中厚层状灰岩夹少量岩屑砂岩,整体属一套水体能量较高的碎屑岩—碳酸盐岩沉积组合。区域上,北山地区墩墩山组为一套山前伸展型磨拉石沉积建造,指示自晚泥盆世进入板内构造演化阶段^[31, 51, 91],而甘肃北山双峰山、辉铜山和哈儿根头口布一带广泛分布的早泥盆世 A 型花岗岩也为后造山或造山晚期演化阶段的产物^[96-98]。

此外,本次工作在内蒙古北山月牙山—文革山一带获得大量早泥盆世(405~396 Ma)双峰式岩浆岩组合^③,进一步反映北山南部自早泥盆世以后处于造山后伸展演化阶段,红柳园晚古生代陆内裂谷带则为该构造背景下的产物。

2.3 古铜井中—新元古代克拉通盆地

该构造单元位于敦煌地块北缘,大体沿咸水沟—盘陀山—古铜井一线分布,北侧以西双鹰山早古生代被动陆缘为界,南侧与红柳园晚古生代裂谷带相邻,沉积长城系古铜井群和蓟县系平头山组、野马街组及青白口系大豁落山组,局部可见震旦纪洗肠井群角度不整合覆于其上。古铜井群主要分布于白云山—盘陀山一带,被加里东期酸性侵入岩侵入,为正常碎屑岩夹碳酸盐岩沉积建造,形成于高能无障碍砂质海岸的滨岸沉积环境。平头山组主要分布于五道明水、儿驼山、月牙山一带,沿盘陀山北—炮台山西一带呈近东西向展布,为碳酸盐岩沉积组合,下部形成于局限台地潮间带,向上为浅海陆棚潟湖沉积环境,局部见叠层石化石。野马街组主要分布于盘陀山北东,此外在炮台山西东侧有少量出露,总体为一套浅变质碎屑岩组合,上部夹少量碳酸盐岩,主要形成于滨浅海的沉积环境。大豁落山组主要分布于盘陀山北一带及二龙包西南部,以碳酸盐沉积夹少量陆源碎屑岩为特征,形成于局限台地相至盆地边缘相沉积环境。该构造单元内地层整体遭受了晋宁期低绿片岩相区域变质作用^[99],而蓟县系平头山组平行不整合于长城系古铜井群之上,为晋宁旋回晚期的地质记录。

后期逆冲推覆构造将该构造单元向北推覆至西双鹰山早古生代被动陆缘之上,甚至部分推覆到牛圈子—洗肠井结合带两侧的破城山、沙井子、平头山和梧桐井、白云山一带。这套中—新元古代碳酸盐岩地层构成了前锋带的飞来峰构造,而早古生代灰绿色片岩组合构成构造窗。推覆面下伏地层多发育透入性的新生劈理,东西走向近于直立。

2.4 西双鹰山早古生代被动陆缘盆地

该构造单元沿红山头、儿驼山、西双鹰山一线近东西向展布,南侧以三道明水断裂为界与古铜井中—新元古代相接,北界为月牙山—洗肠井蛇绿混杂岩带。发育寒武纪—奥陶纪海进序列沉积地层,包括寒武纪—早奥陶世西双鹰山组和早奥陶世罗雅楚山组,底部为震旦纪洗肠井群冰碛砾岩,与下

伏中—新元古界基底为角度不整合接触^[99]。西双鹰山组为一套复理石建造,主要由成熟度较低的粉砂岩、岩屑长石砂岩和含砾砂岩构成,中下部见少量硅质岩和碳酸盐岩,形成于陆棚浊流沉积环境。罗雅楚山组主要岩性为岩屑砂岩、长石砂岩夹粉砂岩和少量硅质岩、砾岩、砂质灰岩,为一套滨浅海碎屑岩组合,形成于大陆斜坡环境。该套地层部分卷入北侧月牙山—洗肠井蛇绿混杂岩带中,与其他地质体为构造接触。该构造单元内地层在早古生代晚期由于强烈的挤压收缩作用形成近东西向展布的北向逆冲褶皱系,之后发生走滑剪切,造成强烈的构造置换^[5]。

2.5 公婆泉早古生代岩浆弧

公婆泉岩浆弧呈近东西向展布于内蒙古北山地区的公婆泉、石板井、东七一山一带,北部以石板井—小黄山深大断裂为界,南部以白云山—月牙山—洗肠井蛇绿混杂岩带为界。主要由晚奥陶世—早志留世公婆泉组变质火山岩及同期的中酸性侵入岩构成(图2),在其中零星分布的寒武纪基性侵入岩代表了北山南部早古生代洋盆扩张期的产物^[100]。公婆泉岩浆弧形成时代为490~420 Ma^[52,100-102],根据其岩性组合和时代特征大致可分为晚寒武世—早奥陶世辉长岩—闪长岩组合(470~500 Ma)、中—晚奥陶世英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩组合(460~440 Ma)和晚志留世正长花岗岩—二长花岗岩组合(430~420 Ma)^[103]。公婆泉岩浆弧地球化学特征^[103]和构造变形特征^[102]均显示其具有向北俯冲的极性,应为早古生代白云山—月牙山—洗肠井所代表的洋盆向北俯冲的陆缘弧岩浆岩^[69,102,104-105]。此外,公婆泉岩浆弧中还存在大小不等的早泥盆世双峰式岩浆岩组合(405~395 Ma)^[103],包括侵入于红柳河蛇绿混杂岩(与月牙山—洗肠井蛇绿混杂岩相连)中的早泥盆世花岗岩^[59,106]和辉长岩(405 Ma)及三个井组流纹岩和玄武岩组合,共同指示白云山—月牙山—洗肠井所代表的大洋(北山洋)闭合时间早于泥盆纪。公婆泉岩浆弧的北端石板井—小黄山一带发育的晚古生代韧性变形作用与北侧红石山—百合山洋盆闭合有关。

2.6 明水—旱山地块

明水—旱山地块最早由左国朝等^[28]命名,指分布于石板井—小黄山构造带以北的古老地块,前寒武纪结晶基底类似于中元古界长城系星星峡群。

刘雪亚等^[30]将其称为马鬃山地块,但限定其范围为月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带以南的区域,基底地层为长城系白湖群、蓟县系平头山群、青白口系大豁落山群、通畅口群等。本次将该地块的基底限定为北山岩群,为一套低绿片岩相-高角闪岩相的变质岩系组合^[42,99],其南界抵石板井-小黄山构造带,北侧以白梁-三个井韧性剪切带为界与白山岩浆弧焊接。主要证据有:①明水-旱山地块航磁异常和重力异常的分布范围与月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带和白梁-三个井韧性变形带限定的范围一致^③;②北山岩群在内蒙古北山地区主要分布于月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带以北和白梁-三个井韧性剪切带以南区域,前人所划石板井-小黄山构造带两侧均分布北山岩群,且小黄山超基性岩呈脉状侵入到北山岩群中,表明其两侧可能为同一地块;③月牙山-洗肠井以南的中-新元古界主要为一套滨浅海相碳酸盐岩和碎屑岩组合,可能为敦煌地块结晶基底之上的盖层沉积^[5,31],与北侧古老地块的结晶基底北山岩群(主要由斜长角闪岩、石英岩、大理岩、云母片岩等组成)存在较大差异^[107],应分属于 2 个不同的地块。本次工作在北山岩群黑云变粒岩和石英岩中分别获得了 1825 ± 23 Ma 和 1753 ± 23 Ma 的碎屑锆石最小年龄,与已报道的北山岩群碎屑锆石年龄^[107-109]一致,结合侵入到北山岩群中斜长角闪岩的年龄(约 1.6 Ga)^[109],认为明水-旱山地块的基底岩系时代应为古元古代晚期。

2.7 白山晚古生代岩浆弧

白山岩浆弧(也称明水岩浆弧)在内蒙古北山地区沿双红山、哈珠、黑鹰山、交叉沟一线呈北西-南东向大规模展布,北侧以红石山-百合山蛇绿混杂岩带为界,南侧以白梁-三个井韧性变形带为界与明水-旱山地块相邻,主要由石炭系白山组火山岩和同期的侵入岩组成(图 2)。白山组火山岩主要由安山岩、英安岩、流纹岩和同成分的火山碎屑岩组成,局部见火山角砾岩^[75-76]。前人在白山组火山岩中获得了大量 320~300 Ma 的锆石 U-Pb 年龄数据^[78-79]。本次在大红山、哈珠、标山、少斜沟、风雷山、千条沟等地区白山组火山岩中获得了大量 320~298 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,其中,中基性火山活动时限为 315~327 Ma,英安岩-流纹岩类火山岩活动时限 320~298 Ma,显示白山组火山活动从早石炭世晚期一直持续到晚石炭世末,并以中酸性火

山岩活动最强烈。另外,在白山晚古生代岩浆弧中还存在早二叠世晚期(约 278 Ma)双峰式脉岩组合(二长花岗岩及辉长岩)及约 289 Ma 的碱长花岗岩^[110]。

以往的研究认为,白山组火山岩具有双峰式火山岩的特征,可能形成于裂谷环境^[67,111],但多个项目调查获得的白山组火山岩以安山岩、流纹岩为主,极少存在玄武岩,总体为一套岛弧型钙碱性火山岩组合^[78-79],与之同期的侵入岩也多具有陆缘弧岩浆岩特征^[110,112-113],两者的地球化学性质(由北向南具有从钙碱性岩浆岩→高钾钙碱性岩浆岩演化的趋势)共同反映了红石山洋向南俯冲的极性^[79,110]。由此认为,白山岩浆弧是与北侧红石山洋俯冲消减有关的岩浆活动产物,形成于明水-旱山地块北缘的陆缘弧环境,指示了洋盆向南俯冲的极性。

2.8 黑鹰山晚古生代弧后盆地

该构造单元位于北侧的雀儿山-圆包山岛弧和南侧的白山岩浆弧之间,紧邻红石山-百合山蛇绿混杂岩带北侧,在内蒙古北山地区大体沿骆驼口、大红山、青山、黑鹰山、大狐狸山、哈珠、红梁子、千条沟一带呈北西-南东向展布。其主要由早石炭世绿条山组、白山组和少量石炭纪-二叠纪花岗岩组成(图 2)。受盆地不同部位沉积环境的影响,绿条山组在物质组成上也存在一定差别,在盆地北缘靠近雀儿山-圆包山岛弧的浅水部位,主要沉积一套滨浅海相碎屑岩和碳酸盐组合,含大量腕足类、双壳类、珊瑚等海相动物化石,其中双壳类包括 *Paralleledonolensi-Nucundata cf. cuiluanensis-Schizodus subquadratus* 等组合^[114]。在盆地中央的深水-半深水部位,则主要为一套复理石沉积建造,岩性包括粉砂质-泥质板岩、变质细粒岩屑杂砂岩、变泥质粉砂岩,局部夹砾岩等,上部为灰绿色粉砂岩、岩屑砂岩,局部可见典型的鲍马序列组合。该构造单元受后期红石山-百合山洋盆俯冲消减影响,部分卷入造山带的变质碎屑岩发生强烈的构造变形^[71]。

2.9 雀儿山-圆包山古生代岛弧带

该岛弧带位于红石山-百合山蛇绿混杂岩带北侧,沿黄戈壁、砾石山、呼鲁赤古特、额勒根乌兰乌拉、希热哈达南乌拉珠嘎顺一带呈北西-南东向展布。主要出露奥陶纪-泥盆纪火山岩、侵入岩和与之同期的弧缘碎屑岩和碳酸盐岩(图 2)。火山岩包括早-中奥陶世咸水湖组、早志留世圆包山组下部

火山岩段和泥盆纪雀儿山群,侵入岩包括中志留世石英闪长岩、早泥盆世花岗闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩等。咸水湖组为一套中基性-酸性火山岩夹正常沉积碎屑岩组合,在百合山北和呼仍巴斯克地区的咸水湖组流纹质晶屑凝灰岩和流纹岩中分别获得了 490.2 ± 2.9 Ma 和 462 ± 3 Ma^[115] 的锆石 U-Pb 年龄,指示其形成时代为早-中奥陶世。乌兰布拉格组为一套正常沉积碎屑岩夹碳酸盐岩组合,下部为钙质含量较高的粗碎屑岩夹碳酸盐岩透镜体,含海百合、腕足等化石,上部以一套细碎屑岩为主,夹少量流纹质玻屑凝灰岩,根据化石(*Lingulella* sp. 和 *Rafinesquina* sp., 时代为中奥陶世) 和其中的火山碎屑岩夹层年龄(448 ± 2.3 Ma), 确定该组时代为中-晚奥陶世^②。中志留世侵入岩分布于百合山以北的碎石山和黄戈壁一带,岩性为石英闪长岩,本次在该套岩体中获得了 425 ± 4 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,表明其形成时代为中志留世。早志留世圆包山组和晚志留世碎石山组均为一套滨浅海相碎屑岩夹碳酸盐岩组合,希热哈达一带的圆包山组中单列笔石(*Stimulograptus Sedgwickii*) 时代指示该组形成于早志留世^②。早泥盆世侵入岩主要由花岗闪长岩、英云闪长岩和石英闪长岩组成,时代在 403~400 Ma 之间,地球化学性质显示其为一套洋壳或弧地壳俯冲至不同深度发生部分熔融形成的弧岩浆岩^③。泥盆纪雀儿山群为一套中基性-酸性火山碎屑岩、火山碎屑熔岩和火山碎屑沉积岩组合,从下到上可以分为红尖山组、清河沟组和圆锥山组^[99],其锆石 U-Pb 年龄从早泥盆世(422 ± 3 Ma)^④ 至晚泥盆世(386.9 ± 1.7 Ma^[116]) 均有分布,表明其在整个泥盆纪均存在不同程度的火山活动。

与前人研究结果一致,早-中奥陶世咸水湖组形成于岛弧或陆缘弧背景^[115,117],本次研究也支持咸水湖组为一套具岛弧性质的火山岩组合。此外,中志留世侵入岩、泥盆纪雀儿山群火山岩^[116] 和早泥盆世侵入岩^⑤ 的地球化学性质均显示形成于岛弧背景,结合该时期不同时代碎屑岩的沉积环境和物源特征判断,北山北部奥陶纪-泥盆纪应处于与俯冲相关的挤压环境,并形成一系列与俯冲相关的岛弧岩浆岩。

3 北山造山带构造演化

北山造山带横跨塔里木、哈萨克斯坦和西伯利

亚三大古板块,记录了古亚洲洋及其分支洋盆古生代以来长期而复杂的地质演化过程,加之后期喜马拉雅造山运动的远程效应影响(阿尔金走滑断裂及其分支断裂),造就了北山造山带多阶段、多期次等异常复杂的构造格局和地层格架^[5,30-32,42,118-121]。关于古亚洲洋及其分支洋盆最终闭合位置及闭合时间仍存在诸多争议:①早古生代闭合于石板井-小黄山一线^[28];②中晚泥盆世闭合^[51-53],最终的缝合带为月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带^[32,43,47];③石炭纪于红石山-百合山一线闭合^[30-31,42];④早二叠世-三叠纪闭合,最南侧的柳园蛇绿混杂岩带代表了最终的缝合带^[5,54-55]。

根据最新的研究结果,小黄山构造带很可能是早古生代伸展构造体制下形成的深大断裂,并非洋盆消减形成的蛇绿混杂岩带(详见本文),因此其可能并不具有板块分化边界的意义。月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带以南的晚泥盆世墩墩山组与早泥盆世三个井组之间的角度不整合^[28-31,51] 在甘肃墩墩山、红柳河至内蒙古白云山一带均有出露,断续延伸超过 100 km,揭示泥盆纪北山南部存在一次大的构造事件。而早泥盆世广泛分布的 A 型花岗岩和三个井组磨拉石建造^[28,31,51],表明月牙山-洗肠井以南的北山南部地区在早-中泥盆世之后进入后造山演化阶段^[52-54,96-98],晚泥盆世(360~370 Ma)墩墩山组和晚泥盆世-早石炭世红柳园组(约 360 Ma)裂谷型火山岩建造反映造山作用结束,进入陆内伸展构造体制^[51,53,94]。因此笔者推测,柳园蛇绿混杂岩带很可能是北山南部陆内裂谷演化的产物,并非古亚洲洋最终闭合位置。月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带两侧地壳基底构成及早古生代岩石组合均存在明显差异,表明其作为早古生代南北 2 个板块边界是合适的。但现有众多研究成果均显示,北山地区洋陆演化持续进行到晚古生代晚期^[5,69,71,75,122],根据造山带中最年轻的蛇绿混杂岩带应代表了洋盆最终的闭合位置^[123-125],笔者认为,北山造山带最北部的晚古生代红石山-百合山蛇绿混杂岩带很可能代表了古亚洲洋最终消亡的位置。基于以上认识,结合区域地质资料和北山造山带内不同地块基底属性、岛弧或陆缘弧岩石组成、蛇绿混杂岩带地球化学性质及地层特征,将北山造山带构造演化分为三大阶段,进一步细分为 12 个演化时期(图 3)。

3.1 前寒武纪陆块基底形成阶段

3.1.1 太古宙古陆核形成与发展

北山地区太古宙古陆核演化仅在南部敦煌地块有记录,古陆核物质组成主要为一套高角闪岩相变质岩系,分布于南部大兰湖墩山一带,岩性包括黑云斜长片麻岩、变粒岩、黑云二长片麻岩、黑云角闪斜长变粒岩夹含石榴黑云斜长石英岩、浅粒岩、斜长角闪岩、透辉斜长变粒岩、斜长透辉岩及大理岩、白云石大理岩,可与区域上的敦煌岩群对比。在浅色变质脉体中获得 1639 Ma 的锆石 U-Pb 年龄^③。根据岩石变质程度及侵入其中的岩脉年龄,结合区域上在敦煌岩群斜长角闪岩中获得的 2.9 Ga 的 Sm-Nd 等时线年龄^[126]判断,敦煌岩群可能代表了太古宙表壳岩,太古宙末和古元古代早期的岩浆热事件(五台运动)造成高角闪岩相的变质作用,代表古陆核的形成。

3.1.2 古元古代初始陆壳形成与发展

北山地区古元古代地质演化集中于北部马鬃山微陆块,以北山岩群为代表,断续分布于西林陶勒、标山、小黄山一线。北山岩群原岩为石英砂岩、杂砂岩、亚杂砂岩、铁质白云质泥灰岩、灰岩夹富铝粘土岩的沉积建造^[107, 127],代表相对稳定的浅海环境沉积。古元古代末的吕梁运动使其遭受低角闪岩相-高绿片岩相区域变质变形作用改造,并造成地层北东向褶皱,初始陆壳形成。随着中元古代陆缘碎屑沉积范围的增大,褶皱回返形成刚性陆壳^[128]。该微陆块可能为古亚洲洋演化阶段某个先存的古元古代板块的裂离地块,与东部的阿拉善地块、宝音图地块及锡林浩特微陆块可能属于同一块体的裂离体。

3.1.3 中-新元古代盖层沉积

中-新元古代早期,北山南部敦煌地块北缘经历了多次沉降形成巨厚的盖层沉积。长城纪,区内地壳下降,为宽阔稳定、东西向展布的陆表海环境,形成石英砂岩为主的古铜井群沉积建造,成分和结构成熟度较高,表明物源较远,地壳相对稳定。从建造特征看,由早到晚,总体上水体由深变浅。长城纪末,沉积区上升,出现沉积间断。蓟县纪,区内地壳再次下沉,形成开阔的陆缘海潮坪环境,区内主要沉积平头山组碳酸盐岩建造。早期为富硅镁的白云岩、白云质砾屑灰岩;晚期为灰岩、白云质灰岩夹硅质岩、粉砂岩及赤铁矿层。从建造特征分

析,海侵初期,古地形为东高西低,环境较封闭,随着持续下沉作用,水体变深,形成了以灰岩、白云质灰岩为主的碳酸盐岩建造。蓟县纪末,地壳抬升,出现沉积间断。青白口纪,区内地壳再次下沉,接受沉积,形成野马街组和大豁落山组沉积地层。早期在潮间及潮下形成钙质粉砂岩、泥灰岩、含钙细粒石英砂岩沉积及灰岩(野马街组)。之后,海平面缓慢下降,在盆地中堆积了一套巨厚的富硅镁碳酸盐岩沉积体系(大豁落山组)。青白口纪末期,晋宁运动使区内地层褶皱上升,普遍遭受低绿片岩相区域变质作用。震旦纪,受全球性冰川事件的影响,在北山地区形成洗肠井群冰碛岩、泥砾岩、板岩和白云质灰岩的地层序列,主体位于额济纳旗白云山和洗肠井一带,其既包括由冰川直接堆积而成的冰碛岩,也包括冰前各种环境中形成的冰水沉积,指示其形成环境具有从大陆冰川向滨海冰川过渡的特点^[129]。

新元古代晚期,受 1.0~0.8 Ga 的格林维尔造山事件影响,北山地区广泛发育新元古代岩浆事件。甘肃北山柳园地区存在 880~930 Ma 的岩浆记录,代表了北山南部新元古代的构造-热事件^[130-132]。杨经绥等^[133]在北山古泉堡一带发现变质年龄为 819±21 Ma(原岩年龄为 1007±20 Ma)的榴辉岩,认为其代表一次重要的板块裂解和俯冲事件。本次在北山北部哈珠地区发现 880 Ma 左右的新元古代花岗岩,显示北山北部存在新元古代岩浆活动^[134-135]。Rodinia 超大陆的汇聚和相应的造山作用在全球范围内开始于约 1300 Ma,最终在 900 Ma 左右结束^[136-137]。北山地区新元古代岩浆活动记录了 Rodinia 超大陆的聚合在北山地区的响应。

3.2 古生代洋-陆演化阶段

北山地区古生代主体位于古亚洲洋构造域^[5],但在洋-陆演化的不同阶段,又存在不同的分支洋盆演化进程,主要表现在南部北山洋和北部红石山洋在时代和洋盆性质上的明显差异^[31-32, 47, 71],下面对其演化过程分别描述。

3.2.1 早古生代北山洋洋陆转化

(1) 寒武纪大洋形成与扩张

寒武纪初期,北山地区沿红柳河—牛圈子—洗肠井一带裂解,并逐渐发展为大洋^[47, 59, 61-62]。在大豁落山一带,早寒武世双鹰山组海相地层角度不整合于新元古代洗肠井群大陆冰碛岩之上,代表了北

山洋开启的下限^[42]。寒武纪北山地区总体处于伸展构造体制,洋盆持续扩张。在这种构造背景下,古老基底(如敦煌岩群及北山岩群)中多发育高韧性、低粘度的固态流变变形。与此对应的岩浆岩则以早寒武世花岗闪长岩(527.8 ± 2.7 Ma)、晚寒武世变质辉长岩(498.9 ± 2.4 Ma)、变质二长花岗岩(491.6 ± 2.8 Ma)等双峰式岩浆岩组合为主,代表了早期伸展环境下的产物^[103]。

(2) 早奥陶世—早志留世俯冲汇聚

奥陶纪早期,洋壳向北开始俯冲,北山洋盆进入俯冲—汇聚阶段,明水—旱山地块南缘转换为活动陆缘,形成变质二长辉长岩(470.7 Ma)、片麻状石英二长闪长岩(463.7 Ma)和片麻状花岗闪长岩(471.7 Ma)组成的初始弧岩岩浆组合,代表了北山洋初始俯冲的时间^[103]。沿海沟消减带则形成红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿构造混杂岩带。

奥陶纪中期,洋壳继续向北俯冲,在窑洞怒如—公婆泉—石板井一带发生中基性火山岩(钠长阳起岩、钠长阳起片岩、斜长角闪片岩等)喷发,形成公婆泉组火山岩。晚奥陶世—早志留世北山洋盆向北俯冲作用加剧,大洋板片俯冲至深部发生脱水作用,使板片之上的地幔楔发生部分熔融,形成的玄武质岩浆上升至地壳浅部,加热下部地壳使之发生深熔作用形成中酸性岩浆,导致本区晚奥陶世—早志留世大量具有同构造变形的高钾钙碱性中酸性侵入岩($464.4 \pm 2.1 \sim 433 \pm 2$ Ma)和高镁闪长岩(456 ± 2 Ma)侵位,与公婆泉组火山岩共同组成区域上的早古生代公婆泉岩浆弧^[99]。随着俯冲的继续,在公婆泉岩浆弧北侧(弧后)石板井—小黄山一带派生出张性环境,形成深大断裂,沿该断裂断续产出中奥陶世基性岩(471 ± 1.3 Ma^[138])、超基性岩(472.1 ± 4.4 Ma^[100])侵入到北山岩群中。

需要指出的是,在西邻甘肃花牛山地区,存在早古生代变质杂岩花牛山群和一些奥陶纪—志留纪岛弧型花岗岩组合,据此部分学者认为,牛圈子所代表的大洋向南俯冲或双向俯冲,分别形成了南北两侧的岩浆弧^[139-141]。而内蒙古北山地区无论月牙山—洗肠井蛇绿岩带南侧的早古生代地层还是中—新元古代地层除接受 $430 \sim 420$ Ma花岗岩侵位影响外,并无更老的花岗岩侵位,花牛山一带的早古生代杂岩是否是牛圈子构造带向西的延伸,需要进一步证实。

(3) 晚志留世碰撞造山与晚泥盆世陆内伸展

晚志留世($430 \sim 420$ Ma),公婆泉岛弧与明水旱山地块发生碰撞,北山洋关闭,岛弧岩浆岩已演化成高分异I型和A型花岗岩,块状产出且分布于结合带两侧的二长花岗岩和正长花岗岩组合,明显区别于俯冲阶段形成的沿月牙山—洗肠井蛇绿构造混杂岩带北侧分布的片麻状英云闪长岩—花岗闪长岩组合。

此后在辉铜山、双峰山、三道明水和基东一带发育早泥盆世A型花岗岩及辉长岩小岩株,南侧邻区发育角度不整合于寒武纪、奥陶纪海相地层之上的早泥盆世三个井组双峰式火山岩,代表了后碰撞伸展阶段的产物^[96-98]。早泥盆世三个井组在西邻甘肃境内具有前陆盆地的沉积特征,为一套山前磨拉石沉积建造^[51,91],代表北山南部造山作用的结束。

晚泥盆世沿墩墩山—白云山一带发育灰紫色墩墩山组碎屑岩—火山岩地层,在月牙山、洗肠井等地可见其明显呈角度不整合于蛇绿混杂岩之上,且其下部层位具有紫红色砂砾岩组合的磨拉石建造特点,上部层位则具有板内碱性火山岩的特征,而同期发育的富含包体与脉体的钙碱性花岗岩尽管具有岛弧岩浆岩的性质^[92,142],但也只能反映源区岩石的性质或裂谷型岩浆岩遭受地壳物质强烈混染的结果^[143-144]。

(4) 石炭纪陆内裂谷

沿咸水沟、大白山一带广泛分布的早石炭世(359.9 ± 1.4 Ma)红柳园组,也为一套裂谷型双峰式火山岩组合^[94]和深水复理石沉积建造^[95],代表了北山地区早石炭世进入强烈的裂谷拉伸期,与北侧红石山弧后洋盆拉张时代接近,表明古亚洲构造域在早石炭世初期存在伸展的大地构造背景。账房山—玉石山蛇绿岩的年龄介于 $360 \sim 350$ Ma之间,表明敦煌地块柳园地区发育晚古生代的洋盆。一些研究者认为,这里是古亚洲洋最终关闭的主洋盆,柳园—帐房山蛇绿混杂岩带代表了最终的缝合带^[5,54-55],但无法解释其北部存在的敦煌岩群及中—新元古代盖层和早古生代的被动陆缘沉积。新近越来越多的学者对敦煌造山带开展了深入研究,认为其为稳定古老地块卷入中亚造山带,并经历了早古生代和晚古生代2期造山运动的改造^[145]。与天山造山带和北山造山带一样,存在志留纪—泥盆纪地体的增生与碰撞,以及古亚洲洋在二叠纪末

闭合前的强烈构造岩浆活动——俯冲型岛弧花岗岩(284~275 Ma)和后碰撞花岗岩(255~238 Ma)^[146-147]。笔者认可敦煌地块深度卷入中亚造山带,在敦煌地块之上石炭纪发育的板内裂谷带最终也导致晚古生代晚期的洋盆发育,但无法取代月牙山-洗肠并结合带对于内蒙古北山地区地层区划和构造岩浆岩带的分化作用。

3.2.2 晚古生代百合山有限小洋盆的洋陆转换过程

(1) 寒武纪—泥盆纪俯冲增生期

已有研究表明,北山造山带以北的蒙古国境内存在一个早古生代大洋(Zoolen 大洋)^[148-149],其自晚寒武世(511±5 Ma 和 520±5 Ma)开始发生俯冲^[150],并在蒙古国南部形成一条早古生代蛇绿混杂岩带^[149]。Helo 等^[151]认为,该洋盆至少演化至晚古生代,造就了由不同时代的岛弧、蛇绿岩、增生楔和微陆块碰撞形成的复杂造山带(南蒙古构造带),其中的 Nemegt Uul-Altan Uul 地体、Gurvan Sayhan 地体及 Zoolen 地体,均是由洋内弧、弧前和弧后增生楔组成的晚古生代弧盆体系^[152],因此北邻的南蒙古构造带存在一个一直张开的晚古生代大洋,该大洋的最终闭合是否与中蒙古构造带的形成有关尚不清楚。从现有证据看,北山造山带北部的雀儿山-圆包山古生代岛弧带很可能是北侧寒武纪 Zoolen 大洋向南侧明水-旱山地块俯冲过程中形成的岛弧增生体^[115],指示了蒙古陆块(西伯利亚板块中微陆块)与明水-旱山地块早古生代的俯冲增生事件。

自晚寒武世—早奥陶世开始,Zoolen 大洋向南侧明水-旱山地块俯冲消减^[115, 150],消减带南侧伴有强烈的岩浆活动,在北山北部圆包山、碎石山、希热哈达、雀儿山和呼仍巴斯克一带形成雀儿山-圆包山岛弧^[44, 115-117],其间夹杂有具埃达克岩性质的晚志留世石英闪长岩,为洋壳板片俯冲后部分熔融的产物。中晚志留世—早中泥盆世,岩浆活动进入高峰期,形成区域上大规模分布的晚志留世—泥盆纪岛弧岩浆岩带^[116],并在岛弧靠海一侧形成晚志留世碎石山组沉积碎屑岩和中泥盆世清河组滨浅海相碎屑岩沉积组合。该期俯冲消减使百合山以北早—中奥陶世咸水湖组和侵入到咸水湖组中的中—晚志留世石英闪长岩发生明显的韧性变形。

(2) 晚泥盆世—早石炭世弧后洋盆扩张期

南蒙古中—晚古生代具有复杂的造山带结构,

由一系列泥盆纪—二叠纪的岛弧、蛇绿岩、增生楔、微陆块和晚石炭世—二叠纪火山岩组成^[151]。与之类似,明水-旱山地块北侧的内蒙古北山造山带也经历了复杂的晚古生代洋陆转化过程。晚泥盆世—早石炭世,北侧古亚洲洋盆向南侧明水-旱山地块俯冲,在雀儿山-圆包山岛弧带南侧形成黑鹰山晚古生代弧后盆地。随着俯冲的持续进行,弧后盆地持续拉张并伴有新生洋壳的产生,形成沿红石山、百合山一带近东西向展布的晚泥盆世—早石炭世有限小洋盆^[71],而在盆地边缘及内部分别沉积了绿条山组滨浅海相碎屑岩、碳酸盐岩及深海-半深海复理石沉积建造。

(3) 晚石炭世—早二叠世陆缘弧形成期

早石炭世末期—晚石炭世早期,红石山有限小洋盆向南俯冲,卷入俯冲带的洋壳物质和深海沉积物在强烈的俯冲走滑和挤压收缩变形作用下发生韧性剪切流变和挤压收缩变形^[71],形成沿红石山—百合山一线近东西向展布的蛇绿混杂岩带。洋盆的消减伴随着强烈的岩浆活动,在俯冲带(红石山—百合山蛇绿混杂岩带)南侧形成一套具陆缘弧性质的石炭纪火山岩组合^[77-78]和同期的花岗岩类侵入^[110, 112-113],两者共同构成了北山北部晚古生代陆缘岩浆弧^[71]。此后,随着洋盆进一步消减,弧-陆碰撞,自北向南强烈的挤压作用使北山北部晚古生代地层(主要为绿条山组和白山组)发生明显的构造变形,构成北山北部北西—南东走向的构造线,并伴随着强烈的褶皱(华力西晚期褶皱)、逆冲断裂系(百合山逆冲断裂系)和与之相伴生的韧性变形带(白梁—千条沟韧性变形带)。

(4) 中—晚二叠世后造山伸展期

早二叠世中—晚期,红石山洋俯冲闭合^[71],北侧的雀儿山-圆包山古生代岛弧和南侧的明水-旱山地块最终靠拢,以弧-陆碰撞的方式发生拼贴,结束了板块构造格局。中二叠世,在造山后地壳减薄的伸展体制下形成具裂谷型特征的辉长岩(锆石U-Pb 年龄为 278.2±1.3 Ma)和具后碰撞 I 型花岗岩特征的二长花岗岩^[110],加之北山西北部大红山神螺滩一带的早—中二叠世双堡塘组角度不整合于石炭纪白山组之上,预示北山地区晚古生代碰撞造山作用的结束。

3.3 中生代板内构造演化阶段

三叠纪北山地区整体处于伸展构造体制,早—中

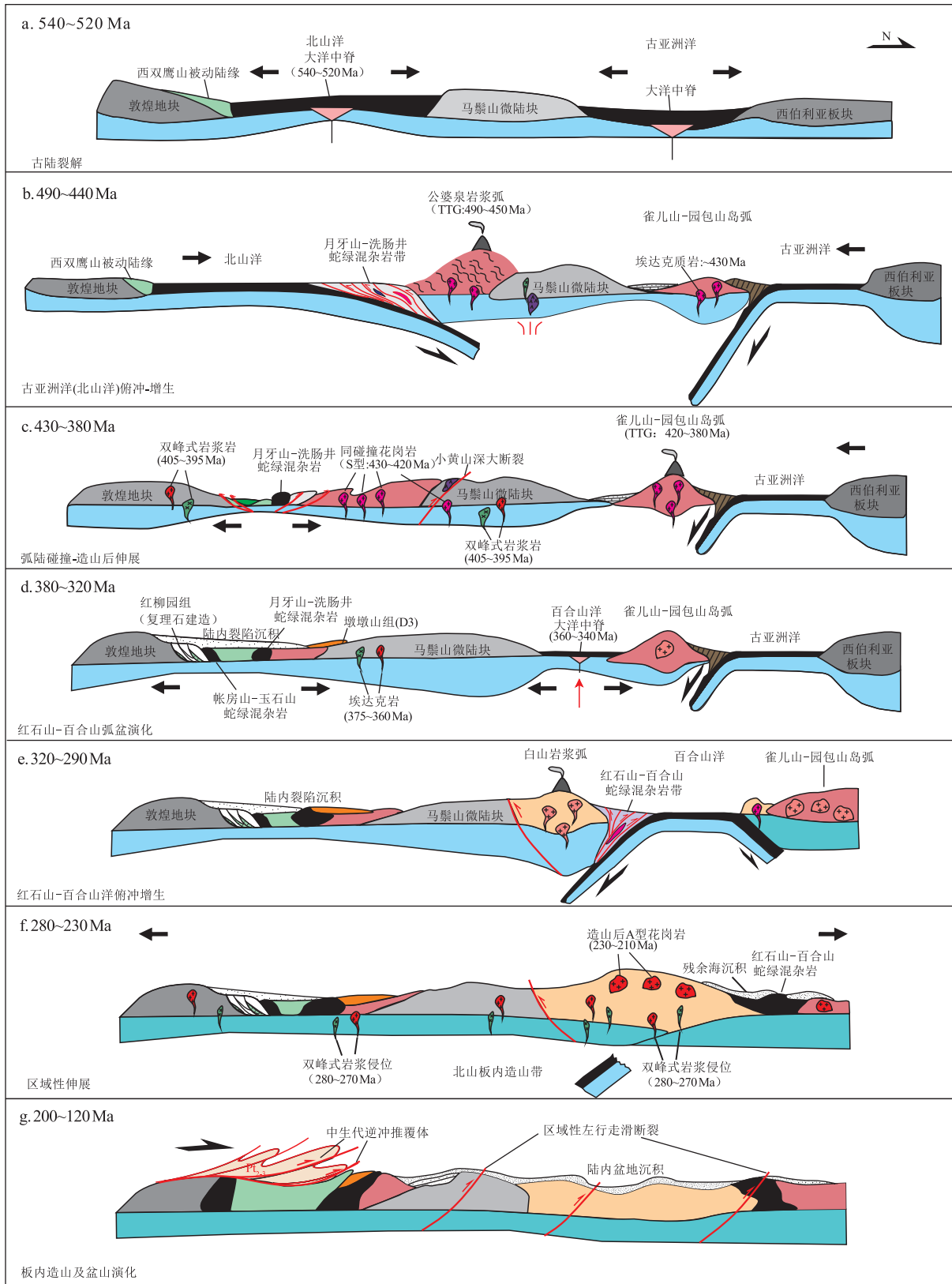


图3 内蒙古北山造山带大地构造演化图

Fig. 3 The tectonic evolution of the Beishan orogenic belt, Inner Mongolia

三叠世,受造山后地壳伸展减薄影响,在北山北部大红山一带形成中三叠世碱长花岗岩(239.8 ± 1.8 Ma),代表北山北部进入板内演化阶段。而在北山南部西林陶勒一带,受北东向断裂的影响,形成山前断陷盆地,快速沉积了一套紫红色冲积相地层(早—中三叠世二断井组)^[153]。晚三叠世,受印支运动影响,在东北—南西向构造应力场下,二断井组中发育北东向褶皱和断裂构造,且一度抬升而缺失正常沉积地层,造成其后的早侏罗世芟芟沟组角度不整合于下伏地层之上。晚侏罗世受中特提斯闭合的影响,北山地区处于强烈的挤压环境,在北山中部梧桐井一带发育近东西向逆冲推覆构造及其伴生褶皱,使中—新元古界逆冲至古生代—中生代地层之上^[154-155]。早白垩世在青藏高原由南向北挤压的远程效应下,该区发育走滑断裂构造并形成拉分盆地,沉积了赤金堡组滨、浅湖相沉积建造。同时该期走滑断裂还造成了内蒙古北山地区近东西向构造线的错断,导致红石山—百合山蛇绿混杂岩带向北左行切错了十余千米。随着南北向挤压的加剧,北山地区在晚白垩世—中新世整体抬升,遭受风化剥蚀。

4 结 论

(1)牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带为华北—塔里木板块与北山造山带的结合带,红石山—百合山蛇绿混杂岩带则为北山造山带内部的构造单元分界,分割雀儿山—圆包山古生代岛弧带和南侧的白山晚古生代岩浆弧;石板井—小黄山构造带是北山造山带公婆泉早古生代岩浆弧内于早—中奥陶世(475~460 Ma)形成的超壳断裂,叠加后期右行斜冲韧性变形。以上述构造带为界,将内蒙古北山地区划分为 3 个二级构造单元和 11 个次级构造单元,全面反映了北山造山带的内部结构。

(2)牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带和红石山—百合山蛇绿混杂岩带的形成,以及与之成对出现的岩浆弧的演化,代表了北山地区南、北 2 个洋盆不同的洋陆演化进程。南部北山洋盆于 530~520 Ma 形成新生洋壳,490 Ma 开始初始俯冲,其北侧公婆泉岩浆弧的形成(450~440 Ma)指示北山洋壳向北大规模俯冲消减;早中志留世正长花岗岩—二长花岗岩组合(430~420 Ma)与早泥盆世(400 Ma)双峰式岩浆岩组合表明北山洋闭合。北部红石山洋为晚古

生代(340~290 Ma)沟弧盆演化体系中发育弧后小洋盆,洋壳形成时代为 360~340 Ma,与南侧明水岩浆弧最早期岩浆作用基本同时(340~330 Ma),俯冲峰期为晚石炭世(320~310 Ma),早二叠世进入弧陆碰撞阶段(300~290 Ma),中二叠世双峰式侵入岩组合(275 Ma)标志着北山造山带造山过程结束,此后进入板内—陆内演化阶段。

(3)牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带代表了古亚洲洋南部的分支主洋盆,早古生代其南北分别对应被动陆缘和活动陆缘弧,并于泥盆纪前完成了敦煌地块与马鬃山微陆块的对接。古亚洲洋的北侧分支洋盆也在早古生代开始向南不断增生拼贴,在马鬃山微陆块北缘形成了雀儿山—圆包山岛弧,俯冲的加剧导致沿红石山—百合山出现石炭纪—二叠纪的沟弧盆体系,最终形成了白山岛弧增生带和红石山—百合山增生楔。目前认为,该带是北山地区最晚出现并消失的洋,可能为古亚洲洋最终闭合的位置或更北侧某个尚未揭开面目的大洋。

致谢:中国地质大学(北京)王根厚教授、中国地质大学(武汉)张克信教授、内蒙古地质调查院邵积东教授级高工、中国地质调查局天津地质调查中心王惠初研究员与笔者在野外一同进行了调研;中国地质科学院李锦轶研究员与笔者就中亚大地构造问题进行了研讨;中国地质大学(武汉)张克信教授和中国地质科学院地质力学所胡健民研究员审阅了全文并提出了建设性修改意见;在此一并谨致谢忱。

参考文献

- [1] Sengör A M C, Natal'In B A, Burtman V S, et al. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [2] Xiao W, Santosh M. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 1429-1444.
- [3] Kröner A, Windley B F, Badarch G, et al. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian Nubian-Shield[J]. *Memoir of the Geological Society of America*, 2007, 200: 181-209.
- [4] Xiao W J, Huang B T, Han C M, et al. A review of the western part of the Altai: A key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(2/3): 253-273.
- [5] Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. *American*

- Journal of Science, 2010, 310: 1553–1594.
- [6] Safonova I, Seltmann R, Kröner A, et al. A new concept of continental construction in the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Episodes*, 2011, 34: 186–196.
- [7] Jian P, Kröner A, Jahn B M, et al. Zircon ages of metamorphic and magmatic rocks within peridotite-bearing mélanges: Crucial time constraints on early Carboniferous extensional tectonics in the Chinese Tianshan [J]. *Lithos*, 2013, 172/173: 243–266.
- [8] Cai K D, Sun M, Yuan C, et al. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: evidence from zircon U–Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 949–968.
- [9] Liu W, Liu X J, Xiao W J. Massive granitoid production, but not massive continental-crust growth in the Chinese Altay (CA)—an integration of zircon U–Pb age and Hf isotope, geochemical and Nd–Sr isotopic compositions of granitoids, volcanics, and metasedimentary rock of the CA as compared with its southern and northern terrains [J]. *American Journal of Science*, 2012, 312: 629–684.
- [10] Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd–Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 1997, 138(3): 135–159.
- [11] Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrance, NW China: Nd–Sr isotope and trace element evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 692–703.
- [12] Seltmann R, Konopelko D, Biske G, et al. Hercynian post-collisional magmatism in the context of Paleozoic magmatic evolution of the Tien Shan orogenic belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(5): 821–838.
- [13] Yuan C, Sun M, Wilde S A, et al. Post-collisional plutons in the Balikun area, East Chinese Tianshan: evolving magmatism in response to extension and slab break-off [J]. *Lithos*, 2010, 119: 269–288.
- [14] Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Sal'nikova E B, et al. Geochronology of igneous rocks and formation of the late Paleozoic South Mongolian active margin of the Siberian continent [J]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2008, 16: 162–181.
- [15] Jahn B M, Litvinovsky B A, Zanzvilevich A N, et al. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian–Transbaikalian Belt: Evolution, petrogenesis and tectonic significance [J]. *Lithos*, 2009, 113(3/4): 521–539.
- [16] Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic belt, China and Mongolia [J]. *Lithos*, 2010, 118: 169–190.
- [17] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 1–30.
- [18] Khain E V, Bibikova E V, Kröner A, et al. The most ancient ophiolite of Central Asian fold belt: U–Pb and Pb–Pb zircon ages for the Dunzhungur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications [J]. *Earth and Planet Science Letters*, 2002, 199: 311–325.
- [19] Jahn B M, Windley B, Natal'in B. Phanerozoic continental growth in Central Asia [J]. *J. Asian Earth Science*, 2004, 23: 599–603.
- [20] Windley B F, Kröner A, Guo J, et al. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution [J]. *Journal of Geology*, 2002, 110: 719–739.
- [21] Li Y J, Wang G, Santosh M, et al. Subduction initiation of the SE paleo-Asian Ocean: Evidence from a well preserved intra-oceanic forearc ophiolite fragment in central Inner Mongolia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 535: 116087. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116087>.
- [22] Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, et al. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: geological and isotopic evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23: 605–627.
- [23] Cawood P A, Kröner A. Earth accretionary orogens in space and time [J]. *Geological Society of London Special Publication*, 2009, 318: 1–36.
- [24] Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M. The Altaids of Central Asia: a tectonic and evolutionary innovative review [J]. *Earth Science Review*, 2012, 113: 303–341.
- [25] Kröner A, Kovach V, Belousova E, et al. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 103–125.
- [26] Xiao W J, Windley B F, Yuan C, et al. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids [J]. *American Journal of Science*, 2009, 309: 221–270.
- [27] Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A tale of amalgamation of three collage systems in the Permian Middle Triassic in Central Asia: oroclines, sutures and terminal accretion [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 477–507.
- [28] 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 等. 北山地区早古生代板块构造特征 [J]. *地质科学*, 1990, 4: 305–314.
- [29] 左国朝, 刘文科, 刘春燕. 甘新蒙北山地区构造格局及演化 [J]. *甘肃地质学报*, 2003, 12(1): 1–15.
- [30] 刘雪亚, 王荃. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化 [J]. *地质研究*, 1995, 28: 7–48.
- [31] 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.
- [32] 杨合群, 李英, 赵国斌, 等. 北山蛇绿岩特征及构造属性 [J]. *西北地质*, 2010, 43(1): 26–36.
- [33] 李向民, 余吉远, 王国强, 等. 甘肃北山地区芨芨台子蛇绿岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 测年及其地质意义 [J]. *地质通报*, 2012, 31(12): 2025–2031.
- [34] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(12): 31–47.
- [35] Li S, Wang T, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Triassic granitoids from Beishan, NW China [J]. *Lithos*, 2012, 134/135: 123–145.
- [36] Song D F, Xiao W J, Han C M, et al. Provenance of metasedimentary

- rocks from the Beishan orogenic collage, southern Altaids: constraints from detrital zircon U-Pb and Hf isotopic data [J]. *Gondwana Research*, 2013, 24: 1127-1151.
- [37] 贺振宇, 宗克清, 姜洪颖, 等. 北山造山带南部早古生代构造演化: 来自花岗岩的约束[J]. *岩石学报*, 2014, 30(8): 2324-2338.
- [38] Zhang W, Pease V, Meng Q, et al. Timing, petrogenesis, and setting of granites from the southern Beishan late Palaeozoic granitic belt, Northwest China and implications for their tectonic evolution [J]. *International Geology Review*, 2015, 57: 1975-1991.
- [39] Shi Y R, Jian P, Kröner A, et al. Zircon ages and Hf isotopic compositions of Ordovician and Carboniferous granitoids from central Inner Mongolia and their significance for early and late Paleozoic evolution of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 117: 153-169.
- [40] He Z Y, Klemd R, Yan L L, et al. The origin and crustal evolution of microcontinents in the Beishan orogen of the southern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 1-14.
- [41] 周国庆, 赵建新, 李献华. 内蒙古月牙山蛇绿岩特征及形成的构造背景: 地球化学和 Sr-Nd 同位素制约 [J]. *地球化学*, 2000, 29(2): 108-119.
- [42] 龚全胜, 刘明强, 梁宏宏, 等. 北山造山带大地构造相及构造演化 [J]. *西北地质*, 2003, 36(1): 11-17.
- [43] 杨合群, 李英, 李文明, 等. 北山成矿构造背景概论 [J]. *西北地质*, 2008, 41(1): 22-28.
- [44] 邵积东, 王惠, 张梅, 等. 内蒙古大地构造单元划分及其地质特征 [J]. *西部资源*, 2011, 2: 51-56.
- [45] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 香港: 香港文化教育出版社, 1994: 1-437.
- [46] 李锦铁, 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): 150-170.
- [47] 孙立新, 张家辉, 任邦方, 等. 北山造山带白云山蛇绿混杂岩的地球化学特征、时代及地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 2: 131-147.
- [48] 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-408.
- [49] Xiao W J, Windley B F, Han C M, et al. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 94-128.
- [50] Zheng R, Wu T, Zhang W, et al. Late Paleozoic subduction system in the southern Central Asian Orogenic Belt: evidences from geochronology and geochemistry of the Xiaohuangshan ophiolite in the Beishan orogenic belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62: 463-475.
- [51] 李向民, 余吉远, 王国强, 等. 甘肃北山红柳园地区泥盆系三个井组和墩墩山群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其意义 [J]. *地质通报*, 2011, 30(10): 1501-1507.
- [52] Yu J Y, Guo L, Li J X, et al. The petrogenesis of sodic granites in the Niujuanzi area and constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the Beishan region, NW China [J]. *Lithos*, 2016, 256/257: 250-268.
- [53] Niu Y Z, Liu C Y, Shi G R, et al. Unconformity-bounded Upper Paleozoic megasequences in the Beishan region (NW China) and implications for the timing of the Paleo-Asian Ocean closure [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 167: 11-32.
- [54] Mao Q G, Xiao W J, Windley B F, et al. The Liuyuan complex in the Beishan, NW China: a Carboniferous-Permian ophiolitic fore-arc sliver in the southern Altaids [J]. *Geological Magazine*, 2012, 149: 483-509.
- [55] Tian Z H, Xiao W J, Windley B F, et al. Structure, age, and tectonic development of the Huoshishan-Niujuanzi ophiolitic mélange, Beishan, southernmost Altaids [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 820-841.
- [56] Wakabayashi J, Dilek Y. Introduction: Characteristics and tectonic settings of mélanges, and their significance for societal and engineering problems [J]. *The Geological Society of America Special Paper*, 2011, 480: V-X.
- [57] Kemkin I V, Khanchuk A I, Kemkina R A. Accretionary prisms of the Sikhotealin Orogenic Belt: composition, structure and significance for reconstruction of the geodynamic evolution of the eastern Asian margin [J]. *Journal of Geodynamics*, 2016, 102: 202-230.
- [58] 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 古亚洲构造域侵入岩时空演化框架 [J]. *地质论评*, 2015, 61(6): 1211-1224.
- [59] 张元元, 郭召杰. 甘新交界红柳河蛇绿岩形成和侵位年龄的准确限定及大地构造意义 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 804-809.
- [60] 侯青叶, 王忠, 刘金宝, 等. 北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及 SHRIMP 定年 [J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 174-184.
- [61] Ao S J, Xiao W J, Han C M, et al. Cambrian to Early Silurian Ophiolite and Accretionary processes in the Beishan Collage, NW China: Implications for the tectonics of the southern Altaids [J]. *Geological Magazine*, 2012, 149(4): 606-625.
- [62] 胡新苗, 赵国春, 胡新悦, 等. 内蒙古北山地区月牙山蛇绿质构造混杂岩带地质特征、形成时代及大地构造意义 [J]. *地质通报*, 2015, 34(2/3): 205-216.
- [63] 于福生, 王春英, 漆家福, 等. 甘新交界红柳河地区早志留世蛇绿混杂岩的厘定及大地构造意义 [J]. *矿物岩石*, 2000, 20(4): 60-66.
- [64] Xin H, Tian J, Teng X, et al. The recognition of the Late Silurian SSZ-type ophiolite and Baiyunshan fore-arc basin in Baiyunshan area, Inner Mongolia and its tectonic significance [J]. *Journal of Earth Science*, 2020 (in press).
- [65] 郑荣国, 吴泰然, 张文, 等. 北山地区月牙山-洗肠井蛇绿岩的地球化学特征及形成环境 [J]. *地质学报*, 2012, 86(6): 961-971.
- [66] 武鹏, 王国强, 李向民, 等. 甘肃北山地区牛圈子蛇绿岩的形成时代及地质意义 [J]. *地质通报*, 2012, 31(12): 2032-2037.
- [67] 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 中国西北部地质概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2008, 1-358.
- [68] Song D F, Xiao W J, Han C M, et al. Polyphase deformation of a Paleozoic forearc-arc complex in the Beishan orogen, NW China [J]. *Tectonophysics*, 2014, 632: 224-243.
- [69] 宋东方, 肖文交, 韩春明, 等. 北山中部增生造山过程: 构造变形和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学制约 [J]. *岩石学报*, 2018, 34(7): 2087-2098.
- [70] 严加永, 吕庆田, 孟贵祥, 等. 内蒙古北山地区地球物理场特征与构造分区及深部结构研究 [J]. *地球物理学进展*, 2009, (2): 439-447.
- [71] 牛文超, 辛后田, 段连峰, 等. 内蒙古北山地区百合山蛇绿混杂岩带的厘定及其洋盆俯冲极性——基于 1:5 万清河沟幅地质图

- 的新认识[J].中国地质,2019,46(5): 977-994.
- [72] 王国强,李向民,徐学义,等.甘肃北山红石山蛇绿岩锆石 U-Pb 年代学研究及构造意义[J].岩石学报,2014,30(6): 1685-1694.
- [73] Shi Y R, Li L L, Kröner A, et al. Carboniferous Alaskan-type complex along the Sino-Mongolian boundary, southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Acta Geochimica, 2017, 36(2): 1-15.
- [74] 魏志军,黄增保,金霞,等.甘肃红石山地区蛇绿混杂岩地质特征[J].西北地质,2004,37(1): 13-18.
- [75] 黄增保,金霞.甘肃北山红石山蛇绿混杂岩带中基性火山岩构造环境分析[J].中国地质,2006,33(5): 1030-1037.
- [76] 卢进才,史冀忠,牛亚卓,等.内蒙古西部北山—银额地区石炭纪—二叠纪层序地层与沉积演化[J].岩石学报,2018,34(10): 3101-3115.
- [77] 王小红,杨建国,谢燮,等.甘肃北山红石山基性—超基性岩体的成因类型及构造意义[J].西北地质,2013,46(1): 40-55.
- [78] 贾文琴,赵志雄,许海,等.北山风雷山地区白山组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造环境[J].中国地质,2016,43(1): 91-98.
- [79] 任云伟,任邦方,牛文超,等.内蒙古哈珠地区石炭纪白山组火山岩:北山北部晚古生代活动陆缘岩浆作用的产物[J].地球科学,2019,44(1): 312-327.
- [80] 李治,朱文斌,吴海林,等.北山马鬃山地区野马泉和勒巴泉韧性剪切带构造变形特征与年代学约束[J].高校地质学报,2019,25(6): 932-942.
- [81] 余吉远,李向民,王国强,等.甘肃北山地区辉铜山和帐房山蛇绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].地质通报,2012,31(12): 2038-2045.
- [82] 李锦轶,张进,杨天南,等.北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(04): 584-605.
- [83] 孟令顺,管焯,齐立,等.格尔木—额济纳旗地学断面及其邻区重力场与深部地壳构造[J].地球物理学报,1995,38(S2): 36-45.
- [84] 余钦范,楼海,胡中栋,等.格尔木—额济纳旗地学断面岩石圈结构的磁场分析[J].地球物理学报,1995,38(S2): 58-70.
- [85] 高勇,丁华磊,郭瑞军,等.北山造山带公路井—三个井韧性剪切带构造变形特征及其地质意义[J].中国地质调查,2016,3(1): 26-34.
- [86] 梅华林,于海峰,李铨,等.甘肃北山地区首次发现榴辉岩和古元古花岗质岩石[J].科学通报,1998,43(19): 2105-2111.
- [87] 许志琴,杨经绥,张建新,等.阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J].地质学报,1999,73(3): 193-205.
- [88] 孟繁聪,张建新,相振群,等.塔里木盆地东北缘敦煌群的形成和演化:锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素证据[J].岩石学报,2011,27(1): 59-76.
- [89] Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments[J]. Precambrian Research, 2008, 160: 94-107.
- [90] Long X P, Yuan C, Sun M, et al. Reworking of the Tarim Craton by underplating of mantle plume-derived magmas: Evidence from Neoproterozoic granitoids in the Kuluketage area, NW China[J]. Precambrian Res., 2011, 187: 1-14.
- [91] 左国朝,刘春燕,白万成,等.北山泥盆纪碰撞造山火山—磨拉石地质构造及地球化学特征[J].甘肃地质学报,1995,4(1): 35-43.
- [92] Guo Q Q, Xiao W J, Hou Q L, et al. Construction of Late Devonian Dundunshan arc in the Beishan orogen and its implication for tectonics of southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2014, 184/187: 361-378.
- [93] 田健,辛后田,滕学建,等.内蒙古北山造山带白云山地区上泥盆统墩墩山组火山岩的厘定及其构造意义[J].岩石学报,2020,36(2): 509-525.
- [94] 潘志龙,王硕,邱振,等.内蒙古北山地区咸水沟一带早石炭世红柳园组火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J].地质调查与研究,2017,40(2): 99-108.
- [95] 陈超,潘志龙,修迪,等.北山地区红柳园组沉积时代、沉积环境及源区构造背景分析[J].沉积学报,2017,35(3): 470-479.
- [96] 王立社,杨建国,谢春林,等.甘肃北山火山岩哈尔根头口布花岗岩年代学、地球化学及其地质意义.地质学报,2009,83(3): 377-387.
- [97] 李舫,王涛,童英,等.北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及构造演化意义[J].岩石矿物学杂志,2009,28(5): 407-422.
- [98] 李舫,王涛,童英,等.北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因及构造意义[J].岩石学报,2011,27(10): 3055-3070.
- [99] 内蒙古地质矿产局.内蒙古自治区岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [100] 陈超,修迪,潘志龙,等.北山造山带中部早古生代伸展构造体制:来自石板井辉长岩的年代学及地球化学证据[J].地质学报,2017,91(8): 1161-1673.
- [101] Zhang W, Pease V, Wu T R, et al. Discovery of an adakite-like pluton near Dongqiysishan (Beishan, NW China) — Its age and tectonic significance[J]. Lithos, 2012, 142/143: 148-160.
- [102] Song D F, Xiao W J, Windley B F, et al. A Paleozoic Japan-type subduction-accretion system in the Beishan orogenic collage, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2015, 224/225: 195-213.
- [103] 李敏,辛后田,田健,等.北山造山带公婆泉岩浆弧的组成、时代及其大地构造意义[J].地球科学,2020,网络首发. doi: 10.3799/dqkx.2020.123.
- [104] Ao S J, Xiao W J, Windley B F, et al. Paleozoic accretionary orogenesis in the eastern Beishan orogen: Constraints from zircon U-Pb and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronology [J]. Gondwana Research, 2016, 30: 224-235.
- [105] 王鑫玉,袁超,龙晓平,等.北山造山带尖山和石板井花岗岩年代学、地球化学研究及其地质意义[J].地球化学,2018,47(1): 63-78.
- [106] 郑荣国,吴泰然,张文,等.甘肃北山中带早泥盆世的构造—岩浆作用:来自公婆泉花岗岩体年代学和地球化学证据[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(4): 603-616.
- [107] 徐旭明,程海峰,段炳鑫,等.内蒙古北山地区标山一带北山岩群长石石英岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].新疆地质,2018,36(3): 393-398.
- [108] 杨富林,赵志雄,贾文艳,等.内蒙古北山地区北山岩群形成时代探讨[J].地质调查与研究,2015,39(2): 89-94.
- [109] 张正平,段炳鑫,孟庆涛,等.内蒙古北山地区北山岩群斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].地质与勘

- 探,2017,53(6): 1129-1139.
- [110] 李敏,辛后田,任邦方,等.内蒙古哈珠地区晚古生代花岗岩类成因及其构造意义[J].地球科学,2019,44(1): 328-343.
- [111] 牛亚卓,魏建设,史冀忠,等.甘肃北山地区北部上石炭统火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].地质通报,2013,32(11): 1720-1727.
- [112] 赵志雄,贾元琴,许海,等.北山交叉沟石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及构造意义[J].地质学报,2015,89(7): 1210-1218.
- [113] 赵志雄,熊煜,贾元琴,等.北山独龙包地区晚石炭世陆缘弧岩浆作用-花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学证据[J].地质论评,2018,64(3): 597-609.
- [114] 杨帅师,陈志勇,康小龙,等.内蒙古西部北山地区中、上二叠统双堡塘组地层古生物特征[J].地质通报,2005,24(3): 272-276.
- [115] 陈智斌,于洋,薄海军.内蒙古额济纳地区奥陶纪火山岩地球化学特征及其地质意义[J].地球科学,2020,45(2): 503-518.
- [116] 任邦方,任云伟,牛文超,等.内蒙古北山哈珠东山泥盆系雀儿山群火山岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J].地球科学,2019,44(1): 298-311.
- [117] 谢春林,杨建国,王立社,等.甘肃北山地区古亚洲南缘古生代岛弧带位置的讨论[J].地质学报,2009,83(11): 1584-1600.
- [118] Zuo G, Zhang S, He G, et al. Plate tectonic characteristics during the early Paleozoic in Beishan near the Sino-Mongolian border region, China[J]. Tectonophysics, 1991, 188: 385-392.
- [119] 李锦轶,曲军峰,张进,等.中国北方造山区显生宙地质历史重建与成矿地质背景研究进展[J].地质通报,2013,32(2/3): 207-219.
- [120] 张克信,潘桂棠,何卫红,等.中国构造-地层大区划分新方案[J].地球科学,2015,40(2): 206-233.
- [121] 潘桂棠,陆松年,肖庆辉,等.中国大地构造阶段划分和演化[J].地学前缘,2016,23(6): 1-23.
- [122] Yuan Y, Zong K, He Z, et al. Geochemical evidence for Paleozoic crustal growth and tectonic conversion in the Northern Beishan Orogenic Belt, southern Central Asian Orogenic Belt [J]. Lithos, 2018, 302/303: 189-202.
- [123] 李春昱,王荃,等.我国北部边陲及邻区的古板块构造与欧亚大陆的形成[C]//中国北方板块构造文集,第一集.北京:地质出版社,1983: 3-16.
- [124] 李继亮.增生型造山带的基本特征[J].地质通报,2004,23(9/10): 947-951.
- [125] 肖文交,李继亮,宋东方,等.增生型造山带结构解析与时空制约[J].地球科学,2019,44(5): 1661-1687.
- [126] 李志琛.敦煌地块变质岩系时代新认识[J].中国区域地质,1994,2: 131-134.
- [127] 周海,陈亮,孙勇.北山造山带南带中元古代副变质岩的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究——对北山造山带南带前寒武纪物质演化的探索[J].地质学报,2018,92(5): 44-61.
- [128] 袁学诚.论中国大陆基底构造[J].地球物理学报,1995,38(4): 448-459.
- [129] 夏林圻,张国伟,夏祖春,等.天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J].地质通报,2002,21(2): 55-62.
- [130] 叶晓峰,宗克清,张泽明,等.北山造山带南缘柳园地区新元古代花岗岩的地球化学特征及其地质意义[J].地质通报,2013,32(2/3): 307-317.
- [131] 姜洪颖,贺振宇,宗克清,等.北山造山带南缘北山杂岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究[J].岩石学报,2013,29(11): 3949-3967.
- [132] Yuan Y, Zong K Q, He Z Y, et al. Geochemical and geochronological evidence for a former early Neoproterozoic microcontinent in the South Beishan Orogenic Belt, southernmost Central Asian Orogenic Belt [J]. Precambrian Research, 2015, 266: 409-424.
- [133] 杨经纬,吴才来,陈松永,等.甘肃北山地区榴辉岩的变质年龄:来自锆石的 U-Pb 同位素定年证据[J].中国地质,2006,33(2): 317-325.
- [134] 牛文超,任邦方,任云伟,等.内蒙古北山地区发现新元古代片麻状花岗岩: 锆石 U-Pb 定年证据[J].中国地质,2017,44(2): 409-410.
- [135] 牛文超,任邦方,任云伟,等.北山北带新元古代岩浆记录:来自内蒙古哈珠地区片麻状花岗岩的证据[J].地球科学,2019,44(1): 284-297.
- [136] Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis [J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 179-210.
- [137] 陆松年,相振群,李怀坤,等.华北克拉通对罗迪尼亚超大陆事件的响应——GOSEN 连接假设[J].地质学报,2012,86(9): 1396-1406.
- [138] 王育习,侯岚,周庆华,等.甘肃北山石板井地区花岗岩成因探讨[J].新疆地质,2014,32(3): 377-385.
- [139] 谢建强,第鹏飞,杨婧,等.甘肃北山地区花牛山群变英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J].西北地质,2018,51(1): 54-64.
- [140] 余吉远,王国强,李向民,等.北山地区花牛山群的重新厘定——来自火山岩球化学证据[J].新疆地质,2015,33(4): 537-543.
- [141] 赵泽辉,郭召杰,王毅.甘肃北山柳园地区花岗岩类的年代学、地球化学特征及构造意义[J].岩石学报,2007,23(8): 1847-1860.
- [142] Guo Q Q, Chung S L, Xiao W J, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Late Devonian arc volcanic rocks in southern Beishan orogen, NW China: Geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic constraints [J]. Lithos, 2017, 278/281: 84-96.
- [143] Ernst R E, Buchan K L, Campbell I H. Frontiers in large igneous province research [J]. Lithos, 2005, 79(3/4): 271-297.
- [144] 夏林圻,夏祖春,徐学义,等.利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J].岩石矿物学杂志,2007,26(1): 77-89.
- [145] Zhao Y, Sun Y, Diwu C R, et al. Paleozoic intrusive rocks from the Dunhuang tectonic belt, NW China: Constraints on the tectonic evolution of the southernmost Central Asian Orogenic Belt [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 138: 562-587.
- [146] Feng L M, Lin S F, Davis D W, et al. Dunhuang Tectonic Belt (DTB) in northwestern China as a part of the Central Asian Orogenic Belt: Structural and U-Pb geochronological evidence [J]. Tectonophysics, 2018, 747/748: 281-297.
- [147] Feng L M, Lin S F, Li L M. Constraints on the tectonic evolution of the southern central Asian orogenic belt from early Permian-middle Triassic granitoids from the central Dunhuang orogenic belt, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 194: 1-17.

- [148] Zonenshain L P. The Evolution of Central Asiatic Geosynclines through Sea-Floor Spreading[J]. *Tectonophysics*, 1973, 19(3): 213-232.
- [149] Zonenshain L P, Kuzmin M I. The Khan-Taishir ophiolitic complex of Western Mongolia, its petrology, origin and comparison with other ophiolitic complexes [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1978, 67: 95-109.
- [150] Jian P, Körner A, Jahn B M, et al. Zircon dating of Neoproterozoic and Cambrian ophiolites in West Mongolia and implications for the timing of orogenic processes in the central part of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 133(6): 62-93.
- [151] Helo C, Hegner E, Kröner A, et al. Geochemical signature of Paleozoic accretionary complexes of the Central Asian Orogenic Belt in South Mongolia: Constraints on arc environments and crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 2006, 227(3/4): 236-257.
- [152] Taylor J, Webb L, Johnson C, et al. The lost South Gobi microcontinent: Protolith studies of metamorphic tectonites and implications for the evolution of continental crust in southeastern Mongolia[J]. *Geosciences*, 2013, 3(3): 543-584.
- [153] 张金龙, 陈超, 潘志龙, 等. 内蒙古北山西林陶勒二断并组的厘定与沉积环境分析[J]. *地质调查与研究*. 2017, 40(4): 274-280.
- [154] 刘明强, 党引业, 龚全胜. 甘肃北山平头山逆冲推覆构造的特征[J]. *西北地质*, 2002, 35(1): 22-27.
- [155] 郑亚东, 张青, 王玉芳, 等. 北山—南戈壁地区侏罗纪巨型逆冲推覆体[J]. *内蒙古地质*, 1998, 4: 1-12.
- ① 赵志雄, 高勇, 陈海东, 等. 内蒙古 1:5 万风雷山等 4 幅区域地质矿产调查报告. 内蒙古地质矿产勘察院. 2014.
- ② 张正平, 程海峰, 徐旭明, 等. 内蒙古 1:5 万黑红山等三幅区域地质矿产调查报告. 河北省区域地质矿产调查研究所. 2018.
- ③ 辛后田, 滕学建, 张永, 等. 阴山成矿带小狐狸山和雅布赖地区地质矿产调查项目成果报告. 中国地质调查局天津地质调查中心. 2019.
- ④ 梁国庆, 徐旭明, 孟庆涛, 等. 内蒙古 1:5 万旱山等四幅区域地质矿产调查报告. 河北省区域地质矿产调查研究所. 2014.
- ⑤ 孟宪锋, 段炳鑫, 董洪凯, 等. 内蒙古 1:5 万标山等四幅区域地质矿产调查报告. 河北省区域地质矿产调查研究所. 2015.
- ⑥ 陈超, 张金龙, 张欢, 等. 内蒙古 1:5 万西林陶勒等四幅区域地质矿产调查报告. 河北省区域地质矿产调查研究所. 2016.
- ⑦ 潘志龙, 刘增校, 魏文通, 等. 内蒙古 1:5 万基东等四幅区域地质矿产调查报告. 河北省区域地质矿产调查研究所. 2015.
- ⑧ 刘畅, 卫彦升, 杨五宝, 等. 内蒙古 1:5 万额勒斯图浑迪等五幅区域地质矿产调查报告. 山西省地质调查院. 2016.
- ⑨ 闫涛, 卫彦升, 杨五宝, 等. 内蒙古 1:5 万甜水井等三幅区域地质矿产调查报告. 山西省地质调查院. 2018.