

# 北山造山带古生代蛇绿混杂岩研究现状及进展

王国强<sup>1,2,3</sup>, 李向民<sup>1,2,3</sup>, 徐学义<sup>4</sup>, 余吉远<sup>1,2,3</sup>, 武鹏<sup>1</sup>, 计波<sup>1,2,3</sup>

WANG Guoqiang<sup>1,2,3</sup>, LI Xiangmin<sup>1,2,3</sup>, XU Xueyi<sup>4</sup>, YU Jiyuan<sup>1,2,3</sup>, WU Peng<sup>1</sup>, JI Bo<sup>1,2,3</sup>

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
  2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054;
  3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054;
  4. 中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083
1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
2. Center for Orogenic Belt Geology, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
3. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
4. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing 100083, China

**摘要:**蛇绿混杂岩带作为造山带最重要的组成部分之一,其形成和就位过程与区域造山事件密切相关。通过系统梳理北山造山带蛇绿混杂岩的研究现状及存在问题,认为在北山造山带内卷入的4条蛇绿混杂岩带中,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带为形成时代最古老的蛇绿岩,代表了北山洋盆最早于早寒武世即已开启,北山地区发育的洋盆最晚可能于二叠纪闭合,构造属性研究表明,已发现的各蛇绿混杂岩带单独作为一级构造单元划分的证据依然不足。以客观表达目标地质体为主的北山各蛇绿岩带的地质调查程度制约了蛇绿岩的识别、形成、就位时代、各洋盆之间演化关系及构造属性等问题的研究,建议未来区内的深入研究及解决热点问题时应采取如下关键手段:开展各蛇绿混杂岩带大比例尺的精细基础地质调查工作。

**关键词:**蛇绿岩;构造演化;形成时代;古生代;北山造山带

**中图分类号:**P534.4;P583 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)01-0071-11

**Wang G Q, Li X M, Xu X Y, Yu J Y, Wu P, Ji B. Research status and progress of Paleozoic ophiolites in Beishan orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(1): 71-81**

**Abstract:** As one of the most important parts of orogenic belt, the formation and emplacement of the ophiolitic mélangé belt is closely related to regional orogenic events. Four ophiolitic mélangés belts are involved in the Beishan orogenic belt, of which the Hongliuhe-Niujuanzi-Xichangjing ophiolitic mélangé belt is the oldest one, indicating that the Beishan Ocean was opened as early as Early Cambrian, and might be closed in Permian at the latest. The study of tectonic affinity also shows that the evidence for the division of the discovered ophiolitic mélangé zones as the first-scale tectonic unit is still insufficient. Because the identification, formation, emplacement age of ophiolites and evolution of various ocean basins, as well as their tectonic properties are restricted by objective expression about geological survey of Beishan ophiolite belts, it is suggested that one of the key means to further study and solve hot issue in the area in the future is to pay attention to the large scale fine basic geological survey of each ophiolite belt.

**Key words:** ophiolite; tectonic evolution; formation age; Paleozoic; Beishan orogenic belt

德国著名地质学家 Steinmann<sup>[1]</sup> 首次将不同的认识被后人总结为蛇绿岩的“三位一体”(即蛇绿岩岩石组成部分看作具有紧密时空联系的组合,这一主要由蛇纹石化橄榄岩、少量辉长岩和玄武岩组

收稿日期:2020-07-15;修订日期:2020-09-16

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

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

成)。随着海底扩张和板块学说的提出,蛇绿岩愈来愈受到地质学界的重视,尤其是1972年彭罗斯会议,将蛇绿岩定义为一种可与洋壳对比的、特殊的镁铁质-超镁铁质岩石组合,引领蛇绿岩研究进入新的阶段<sup>[2]</sup>;进入21世纪以来,Delike<sup>[3-4]</sup>在对蛇绿岩理论体系不断细化、丰富和完善的基础上,进一步将其与构造环境结合,将蛇绿岩分为与俯冲相关、与俯冲无关两大类及5个亚类,较合理地诠释了蛇绿岩构造背景的多样性。

现今造山带中的蛇绿岩代表已消失的古老洋壳的残余,基本以蛇绿混杂岩的形式存在,且大多沿缝合带或深大断裂带呈线性分布于造山带中。蛇绿混杂带作为显著的地体边界,是造山带中最重要的组成部分之一,通过对蛇绿混杂岩及其相关岩石构造单元的时空配置关系研究,可为揭示古洋盆存在、存续时间、俯冲极性及其造山带演化过程提供重要依据<sup>[5-6]</sup>。蛇绿岩可形成于板块分离至聚合过程中的多种强烈拉张使洋壳出露的构造环境,如大洋中脊、俯冲带之上、大陆边缘、火山岛弧、地幔柱等<sup>[4]</sup>。

中亚造山带(CAOB)位于西伯利亚、俄罗斯、

塔里木及华北克拉通之间,总体上属于古亚洲构造域的组成部分(图1-a)<sup>[7-8]</sup>。它是世界上最大的拼贴造山带,其造山过程受控于各板块之间的古亚洲洋的演化,而古生代是古亚洲洋演化的重要时期<sup>[29-41]</sup>,因此成为关注的焦点。尽管前人对中亚造山带进行了大量研究,但对该造山带的形成和演化历史仍然存在不同认识,主要分歧在于对与俯冲有关的造山作用的终止时限有多种认识,如晚泥盆世<sup>[42-43]</sup>、早石炭世早期<sup>[44-49]</sup>、早一中石炭世<sup>[50-52]</sup>、晚石炭世<sup>[53-63]</sup>、晚石炭世—早二叠世<sup>[64-65]</sup>,甚至更晚的二叠纪末—中三叠世<sup>[14,66-71]</sup>。

北山造山带位于中亚增生造山带中南缘,呈东西向展布,向西连接天山造山带,向东连接索伦缝合带,与南部塔里木克拉通北缘的敦煌地块的前寒武纪地壳相连,东南部与华北克拉通相连(图1-a)。北山造山带内分布众多的代表古洋壳的蛇绿岩残片<sup>[72-73]</sup>,自南向北大致可划分为4条蛇绿混杂岩带。由于蛇绿岩的形成时代与环境认识不同,导致蛇绿岩的对比、连接,以及构造单元划分等问题存在明显分歧,不同蛇绿混杂岩带曾被不同学者作为板块缝合线开展过古生代构造演化历史研究及板

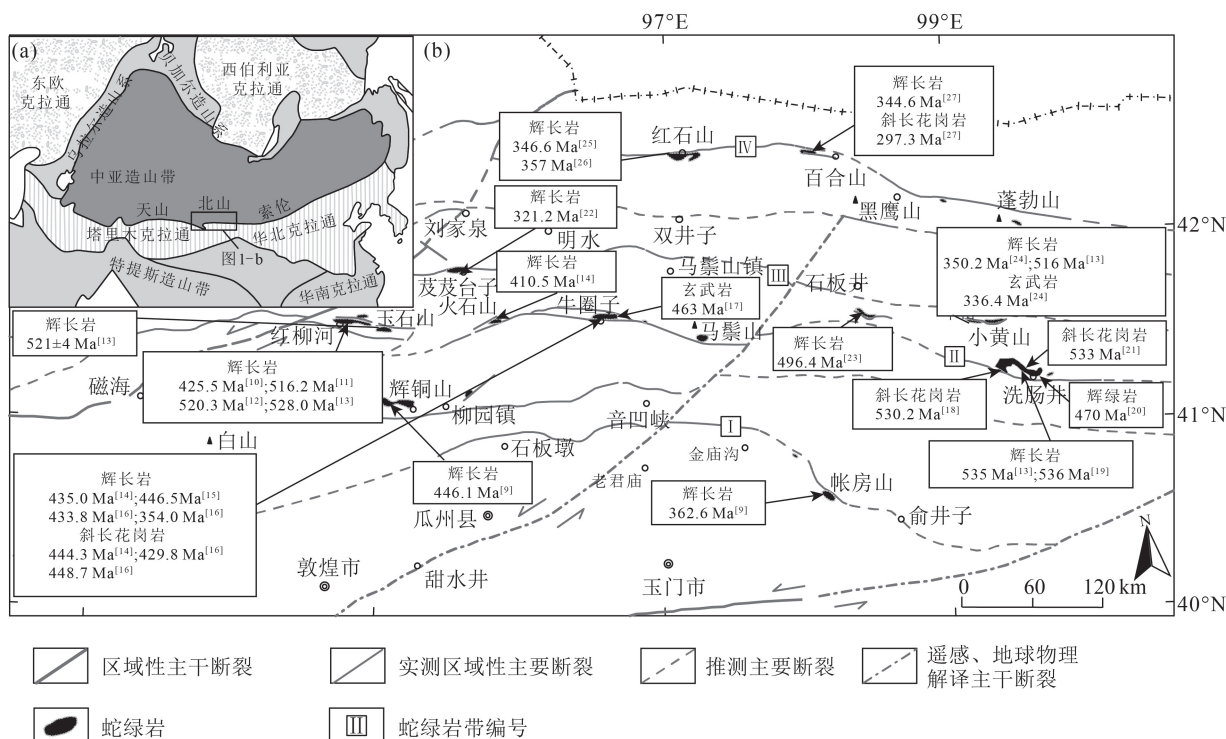


图1 北山造山带构造位置(a)、主要断裂及蛇绿混杂岩带分布图(b)(据参考文献[28]修改)

Fig.1 Simplified tectonic map(a) and distribution of major faults and ophiolitic mélangé belt in Beishan orogenic belt(b)

块划分工作<sup>[72, 74-78]</sup>。对于北山造山带, 持有“泥盆纪为与俯冲有关的造山作用的终止时限”观点的学者认为, 中泥盆世是北山地区古生代洋盆演化过程中洋-陆转换的重要阶段, 墩墩山地区分布的中泥盆世三个井组和晚泥盆世墩墩山群是这一过程的地质记录<sup>[72, 79-81]</sup>。然而, 部分学者不仅认为泥盆纪并非最终拼合的时代, 而且认为包括泥盆纪在内的一系列古生代岛弧地质体构成了西伯利亚板块南缘的一条重要增生边界, 属于古亚洲洋中弧增生系统的组成部分, 并认为中亚造山带是以多岛洋盆长期多阶段复式增生模式形成的<sup>[14, 37, 70, 82-83]</sup>。在以上观点中, 蛇绿岩研究始终在北山构造单元划分及造山带演化过程研究中占据重要地位, 尤其是蛇绿混杂岩带代表的古洋盆开、合时限的研究, 制约了“究竟是一个洋盆继续演化还是多个洋盆同时演化”、“北山地区古生代沟弧盆地地质体的时空配置关系”、构造单元划分等问题的探讨。

近年来, 北山造山带蛇绿岩的研究取得了诸多进展, 积累了大量新的调查与研究资料。本文总结、梳理了当前北山 4 条蛇绿混杂岩带的形成、就位时代及构造环境研究的最新进展, 并在此基础上分析了研究中存在的问题及基础地质调查在解决区域重大地质问题中的重要性。前人主要根据北山蛇绿混杂岩的出露地名对其命名, 由于受构造肢解并在侵位时遭受强烈破坏, 加之受到相当程度的剥蚀作用影响, 造成现今呈破碎带产出的特征, 因此也出现了对同一空间展布的蛇绿混杂岩带使用名称不一致的情况<sup>[37, 75, 77-79, 84]</sup>。考虑到北山范围内蛇绿混杂岩带断续分布的空间展布特征及地名的代表性, 本文采用杨合群等<sup>[78]</sup>的划分(命名)方案, 自南向北对各条蛇绿混杂岩带的研究进展进行论述, 蛇绿混杂岩带的具体空间位置及形成时代见图 1-b。此外, 北山地区各条蛇绿混杂岩带地质特征的概括和总结参考了最早开展北山蛇绿岩研究的资料<sup>[72]</sup>、笔者参与的野外调查及相关文献。

## 1 北山各蛇绿岩带研究现状及进展

### 1.1 辉铜山-帐房山蛇绿混杂岩带

该蛇绿岩带主要出露于辉铜山(柳园西)、花南沟、帐房山等地, 大致沿柳园-大奇山(音凹峡西)-帐房山断裂两侧断续分布约 300 km。该蛇绿岩岩石组合为方辉橄榄岩、纯橄榄岩、堆晶辉长岩、玄武

岩等, 岩石均遭受了后期蚀变作用。辉铜山-帐房山蛇绿混杂岩带为北山地区最南部出露的蛇绿混杂岩带(图 1-b), 有研究认为辉铜山、帐房山等地出露的蛇绿岩为同一条蛇绿混杂岩带<sup>[72, 77-78]</sup>。代表性的剖面为辉铜山<sup>[85]</sup>和帐房山剖面<sup>[80]</sup>。

Mao 等<sup>[86]</sup>基于区域地质特征及侵入至柳园混杂岩中的早二叠世辉长岩形成于俯冲带之上环境的认识, 认为柳园(辉铜山)蛇绿岩形成于石炭纪-二叠纪的弧前环境, 但不同的观点<sup>[87]</sup>认为, 该期辉长岩为早二叠世碰撞后裂解作用的产物, 其显示弧相关的地球化学特征, 是壳-幔相互作用的结果。余吉远等<sup>[9]</sup>对辉铜山蛇绿岩中的辉长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年, 获得其形成年龄为  $446.1 \pm 3$  Ma, 属晚奥陶世, 辉铜山北侧的花牛山蛇绿岩亦被认为是辉铜山蛇绿混杂岩带的组成部分; 对帐房山蛇绿岩中的辉长岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年, 获得其形成年龄为  $362.6 \pm 4$  Ma, 属晚泥盆世, 经对比分析认为辉铜山蛇绿岩与帐房山蛇绿岩并不属于同一条蛇绿岩带, 前者形成于陆缘裂谷环境, 后者可能形成于“红海型”洋盆环境。研究表明, 该条蛇绿混杂岩带最终混杂时间可能为晚二叠世石板山弧与花牛山弧拼合之时<sup>[86]</sup>。

辉铜山蛇绿混杂岩带曾被认为具有缝合带的意义, 分割了塔里木板块与哈萨克斯坦板块<sup>[77]</sup>。最新的研究亦认为, 柳园(辉铜山)蛇绿混杂岩是中亚增生型造山带南缘最终缝合带位置所在<sup>[37, 85]</sup>。柳园镇南峰期变质时代约为 467 Ma 的古堡泉榴辉岩的原岩, 被认为具有与洋中脊玄武岩相似的地球化学特征(代表俯冲洋壳)<sup>[88-89]</sup>, 榴辉岩是柳园蛇绿混杂岩代表的古亚洲洋向北俯冲过程中形成的<sup>[86]</sup>, 然而这一解释仍然受到质疑, 因为古堡泉榴辉岩的原岩为侵入元古宙陆壳的新元古代基性岩脉, 中奥陶世北山南部古亚洲洋闭合和碰撞过程导致了地壳增厚和基性岩脉榴辉岩相变质作用的发生<sup>[90]</sup>。

### 1.2 红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带

该带主要出露地段为红柳河、火石山、牛圈子、白云山、洗肠井等地, 该带是北山延伸最长的蛇绿岩带, 断续延长约 440 km, 呈近东西走向, 受阿尔金北东向左行走滑断裂影响错断为 3 节。该蛇绿岩岩石组合为蛇纹石化橄榄岩、片理化辉石橄榄岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩等。典型的蛇绿混杂岩地段的剖面已有多处报道, 如牛圈子<sup>[14, 16-17, 72]</sup>、火石



山<sup>[14,91]</sup>及洗肠井一带<sup>[72]</sup>,然而受岩石出露程度所限,即使同一地段的蛇绿混杂岩露头,在不同学者研究的剖面中,岩块(片)之间逆冲断层的方向也不同,尤其以牛圈子蛇绿混杂岩最典型。

该条蛇绿构造混杂岩带是北山地区出露较好的蛇绿岩带,前人对该带中不同地段的蛇绿岩的形成时代开展了大量的年代学研究(图1-b)。根据与基性熔岩共生的灰岩中的珊瑚化石碎片,推测红柳河蛇绿岩的形成时代为中一晚志留世<sup>[92-93]</sup>;通过对红柳河蛇绿岩中的辉长岩进行锆石 U-Pb 同位素定年,获得其形成年龄为  $425.5 \pm 2.3$  Ma,属早志留世<sup>[10,94]</sup>;基于对红柳河蛇绿岩伸展变形和 Ar-Ar 年代学的研究,提出红柳河蛇绿岩伸展构造形成于洋壳闭合之前的洋壳扩张过程,洋盆扩张发育在中奥陶世(约 462 Ma)<sup>[95]</sup>;通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年,获得红柳河蛇绿岩中堆晶辉长岩的形成年龄分别为  $516.2 \pm 7.1$  Ma<sup>[11]</sup>和  $520.3 \pm 5.8$  Ma<sup>[12]</sup>,代表红柳河蛇绿岩的形成年龄为早寒武世。最新定年结果显示,红柳河蛇绿岩中辉长岩及玉石山(紧邻红柳河东)辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为  $528 \pm 3$  Ma 和  $521 \pm 4$  Ma<sup>[13]</sup>。关于牛圈子一带蛇绿混杂岩的形成时代,前人最早通过对玄武岩开展全岩 Rb-Sr 同位素定年研究,获得等时线年龄为  $463 \pm 18$  Ma<sup>[17]</sup>;武鹏等<sup>[15]</sup>最早对牛圈子蛇绿混杂岩中辉长岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得牛圈子蛇绿岩中辉长岩的锆石年龄为  $446.5 \pm 4.0$  Ma;随后的研究分别对牛圈子蛇绿混杂岩中的辉长岩和斜长花岗岩及火石山蛇绿混杂岩中的辉长岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,分别获得  $435 \pm 1.9$  Ma、 $444.3 \pm 1.9$  Ma 和  $410.5 \pm 3.7$  Ma 的年龄<sup>[14]</sup>;部分研究结果<sup>[16]</sup>显示,牛圈子蛇绿岩中辉长岩和斜长花岗岩存在  $433.8 \pm 3.1$  Ma 和  $354 \pm 3.3$  Ma、 $429.8 \pm 2$  Ma 和  $448.7 \pm 2$  Ma 两组锆石 U-Pb 年龄,认为在早石炭世牛圈子一带仍然存在洋盆的扩张。关于洗肠井蛇绿混杂岩的形成时代,周国庆等<sup>[20]</sup>通过对辉绿岩进行 Sm-Nd 同位素定年,认为该蛇绿岩形成于 470 Ma,与通过化石年代学得出的地层年龄(中奥陶世)一致<sup>[72]</sup>;对洗肠井蛇绿混杂岩中的辉长岩及斜长花岗岩开展 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,分别获得  $535 \pm 6$  Ma<sup>[13]</sup>、 $536 \pm 7$  Ma<sup>[19]</sup>和  $533 \pm 1.7$  Ma 的年龄<sup>[21]</sup>;对洗肠井西一带的白云山和月牙山蛇绿混杂岩中的斜长花岗岩和辉长岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb

定年,分别获得其形成年龄为  $530.2 \pm 1.2$  Ma<sup>[18]</sup>和  $496.4 \pm 2.2$  Ma<sup>[23]</sup>。红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带一系列高精度测年结果显示,该带存在目前所报道的中国境域古亚洲洋最老年龄,即早寒武世。除以上高精度同位素定年结果外,在北山中部仍存在 2 条地质证据支持该洋盆开启下限为早寒武世:①下寒武统双鹰山组不整合覆盖于新元古代洗肠井群冰碛岩之上,且在不整合面存在古风化壳,古风化壳之上为含磷砾岩,洗肠井群中冰碛岩以大陆冰川沉积为主,伴有少量滨海冰川沉积,两者具有逐渐过渡的关系。北山地区冰碛岩可与相邻的库鲁克塔格微地块、卡瓦布拉克微地块、那拉提微地块、柯平-阿克苏微地块上的新元古代冰碛岩对比;冰碛层上覆寒武系的底部,发育一套含磷岩层,这些冰碛层在华北和华南地区都有分布,这些地质记录暗示,在元古宙末期应当存在一个包括中国西北、华南、华北在内的 Rodinia 联合古陆,北山地区可能为 Rodinia 超大陆的组成部分。②寒武系地层结构特征显示,底部下寒武统双鹰山组为灰黑色薄层状灰岩,少量为大理岩,且灰黑色灰岩中含大量的生物碎屑,标志其形成于浅海或滨海相环境;中一晚寒武统西双鹰山组主要为青灰色硅质岩夹薄层状灰岩,标志其为深海相化学沉积的产物,从双鹰山组到西双鹰山组,反映了水体加深的过程<sup>[96]</sup>。

总体看,该蛇绿混杂岩带代表的洋盆开启的下限为早寒武世,洋盆存续时间的研究显示绝大多数集中于早寒武世一晚奥陶世,极少数学者认为延续至早泥盆世或早石炭世。蛇绿岩形成时代的差异是不同地段拉张裂解出洋壳时间上差异的体现。此外,由于侵入红柳河蛇绿混杂岩中未发生构造变形的二长花岗岩的年龄为 356 Ma,认为红柳河蛇绿混杂岩的时代早于晚泥盆世<sup>[94]</sup>。Cleven 等<sup>[12]</sup>获得侵入覆盖于红柳河蛇绿混杂岩之上地层中未变形英云闪长岩的年龄为 413 Ma,证明该蛇绿岩就位时代应早于早泥盆世;在牛圈子以南的墩墩山地区三个井组砾岩的硅质岩砾石中发现了奥陶纪一志留纪放射虫<sup>[97]</sup>,该时期的放射虫仅在红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带中发现<sup>[80]</sup>,意味着中泥盆世该区的碰撞造山已经结束,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带已经就位;洗肠井蛇绿岩是在早寒武世形成于俯冲带之上的蛇绿岩,并在晚奥陶世一早志

留世因洋壳向北侧岛弧之下俯冲最终仰冲就位<sup>[21]</sup>;牛圈子混杂带内的基质包含寒武纪、志留纪、泥盆纪及石炭纪不同时代的化石,因此岩块与基质混杂时间发生于晚石炭世,甚至更晚,再结合最年轻的蛇绿混杂岩的年龄和晚二叠世地层不整合于基质(公婆泉群)的地质证据,认为牛圈子蛇绿岩可能最终就位于晚二叠世<sup>[14]</sup>。由此看来,尽管该条蛇绿混杂岩带不同位置蛇绿岩的最终混杂时代尚未形成一致认识,但更深入的牛圈子蛇绿混杂岩的研究为最终混杂时代的确定提供了更多的地质证据。

关于红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带形成的构造环境及其是否为主缝合带位置所在,众说纷纭,概括起来主要包括 3 种观点:第一种观点认为,该蛇绿岩是北山芨芨台子-小黄山古洋盆向南俯冲形成的弧后盆地的产物<sup>[72, 80, 98-99]</sup>;第二种观点认为,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带代表了早古生代塔里木板块和哈萨克斯坦-准葛尔板块的缝合带,具有板块分割意义,属大洋扩张脊型蛇绿岩<sup>[17, 76, 78, 91, 100-101]</sup>,最新研究根据年代学、构造及区域地层的时空对比认为,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩可能代表古亚洲洋缝合带位置,北山造山带可能并非中天山的东延部分<sup>[102]</sup>;第三种观点则根据蛇绿岩中斜长花岗岩和基性熔岩的元素地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成特征,推断其形成于与岛弧无关的洋中脊环境,并将其解释为形成于板内深大断裂-初始裂谷演化至陆间有限小洋盆构造环境<sup>[19]</sup>。

洗肠井蛇绿岩中玄武岩兼具正常洋中脊玄武岩(N-MORB)和岛弧玄武岩(IAB)特征<sup>[19, 96, 98]</sup>,且该混杂岩带两侧早古生代地层、古生物等均具可比性,因此认为其虽表现出洋中脊特征,但地质证据并不支持其代表具有分割意义的大洋。结合以上认识,笔者认为,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩可能形成于自寒武纪的板内拉张裂解至有限洋盆的构造环境,不同地段在寒武纪-奥陶纪拉张裂解出代表洋壳的蛇绿岩,即为裂解事件的地质响应。

### 1.3 芨芨台子-小黄山蛇绿混杂岩带

该带主要出露地段为芨芨台子山南、石板井、小黄山等地,大体沿明水-早山地块南缘的芨芨台子-小黄山断裂带两侧呈构造透镜体或串珠状近东西向分布(图 1-b)。该蛇绿岩岩石组合为变质橄榄岩、堆晶辉长岩、基性喷出岩等,各岩石单元均发生

了不同程度的变质及片理化,局部辉长岩具糜棱岩化。由于遭受后期构造作用,该蛇绿岩呈逆冲岩片形式产出。代表性的剖面为芨芨台子山南<sup>[22]</sup>和小黄山<sup>[72, 103-104]</sup>。

前人根据芨芨台子蛇绿岩产出的构造位置,将其与北山东部小黄山蛇绿岩的时代类比<sup>[76, 78, 100-101]</sup>,根据小黄山蛇绿岩外围地层为震旦系及奥陶系,且其北侧火山沉积岩系中“生物灰岩透镜体或砾状灰岩透镜体”中所含的化石,认为该蛇绿岩形成于奥陶纪-志留纪<sup>[80]</sup>,并将芨芨台子蛇绿岩的时代亦置于奥陶纪-志留纪;李向民等<sup>[22]</sup>对芨芨台子蛇绿岩中的辉长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,结果显示其结晶年龄为  $321.2 \pm 5.7$  Ma,可代表蛇绿岩的形成时代,即早石炭世。对小黄山蛇绿岩组成单元中的辉长岩和玄武岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年,测得辉长岩的结晶年龄为  $350.2 \pm 8.8$  Ma,玄武岩的结晶年龄为  $336.4 \pm 4.1$  Ma,认为小黄山蛇绿岩形成于早石炭世,与南蒙古境内和阿拉善恩格尔乌苏蛇绿混杂岩的对比认为,小黄山蛇绿混杂岩代表的北山洋盆在晚石炭世末期闭合<sup>[24]</sup>。已有的高精度同位素年龄,基本可代表芨芨台子-小黄山蛇绿混杂岩带所代表的洋盆的形成下限,而前人在小黄山北侧火山沉积岩系中发现的“生物灰岩透镜体或砾状灰岩透镜体”是北山早古生代构造演化阶段的产物,最终可能以构造岩块形式混杂于小黄山蛇绿岩中<sup>[96]</sup>。然而,尽管已经获得了较一致的高精度同位素年龄,但仍然存在小黄山蛇绿岩属于早古生代蛇绿岩的零星报道,如小黄山蛇绿岩中辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果显示其形成于  $516 \pm 8$  Ma,属早寒武世<sup>[13]</sup>。此外,研究表明,小黄山蛇绿岩中的玄武岩和辉长岩均具有典型的弧岩浆岩地球化学特征,且被认为形成于俯冲带之上的构造环境<sup>[104]</sup>。

芨芨台子-小黄山蛇绿混杂岩带为早古生代北山洋壳残片,代表了塔里木板块与哈萨克斯坦板块的缝合带位置<sup>[24, 72, 99]</sup>,持有此种观点的学者认为,红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带是芨芨台子蛇绿混杂岩带代表的北山早古生代洋盆向南俯冲形成的弧后盆地俯冲消减的产物。然而,已有的高精度定年结果更多地指向该洋盆形成于晚古生代;亦有学者认为,芨芨台子-小黄山蛇绿混杂岩带是红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带代表的北山洋盆向北俯冲形

成的弧后盆地俯冲消减的产物<sup>[17, 76, 78, 100, 102, 105]</sup>。笔者则认为,在北山早古生代洋盆已闭合的基础上,闭合洋盆于早石炭世又开始新的伸展裂解作用,芨芨台子蛇绿岩形成于初始大陆裂解之后大洋盆地演化的早期阶段<sup>[96]</sup>。

#### 1.4 红石山-百合山-蓬勃山蛇绿混杂岩带

红石山地区出露的蛇绿岩向东与百合山、蓬勃山一带断续出露的蛇绿岩相连,它们均为红石山-百合山-蓬勃山蛇绿混杂岩带的组成部分。该蛇绿混杂岩带位于北山北部红石山深大断裂带中,呈近东西—北西西向弯曲弧形分布,是目前北山4条蛇绿混杂岩带最北侧的一条带(图1-b)。该蛇绿岩岩石组合为变质超镁铁杂岩块、堆晶超镁铁-镁铁岩块、均质辉长岩块、上覆火山-沉积岩块、硅质岩等(百合山存在斜长花岗岩),构成了较完整的蛇绿岩组合,蛇绿岩岩块在平面上呈透镜状,东西向延展,与区域构造线一致。然而,亦有少数观点认为,红石山地区的基性-超基性岩组合为石炭纪阿拉斯加型杂岩体<sup>[26, 106]</sup>。代表性蛇绿混杂岩剖面为红石山(2)、百合山<sup>[27]</sup>。

红石山蛇绿岩形成时代的最初依据是该蛇绿岩组合产于下石炭统白山组的复理石沉积组合中,故将该蛇绿岩带形成时代置于早石炭世<sup>[72]</sup>;1:5万红岭幅<sup>②</sup>报道了在红石山西骆驼峰一带,碎屑岩夹层(属构成蛇绿岩组合的玄武岩所赋存的地层)中存在微古植物化石,因此将红石山蛇绿岩的形成时代定为早石炭世;1:25万红宝石幅区域地质调查综合区域资料<sup>③</sup>则认为,红石山蛇绿岩的形成时代应早于早石炭世;王国强等<sup>[25]</sup>对红石山蛇绿岩组成单元中的辉长岩进行了LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年,结果显示其形成于 $346.6 \pm 2.8$  Ma,随后对红石山蛇绿岩中的辉长岩进行SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,获得 $357 \pm 4$  Ma 的年龄<sup>[26]</sup>,进一步证实红石山蛇绿岩代表的洋盆开启于早石炭世。牛文超等<sup>[27]</sup>对该蛇绿混杂岩东段的百合山蛇绿岩开展了年代学研究,获得蛇绿岩组成单元中的辉长岩和斜长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄分别为 $344.6 \pm 1.8$  Ma 和 $297.3 \pm 1.5$  Ma。结合红石山和百合山蛇绿岩中辉长岩的形成时代( $344 \sim 357$  Ma)、代表百合山最年轻蛇绿岩形成时代的斜长花岗岩的形成年龄(297 Ma),以及区域上早—中二叠世双堡塘组与下伏石炭纪白山组之间的角度不整合接

触关系,进一步证明红石山-百合山-蓬勃山蛇绿混杂岩带代表的洋盆,开启于早石炭世,最终闭合于早—中二叠世。

红石山-百合山-蓬勃山蛇绿混杂岩带的形成环境及其构造意义受到诸多学者的广泛关注,归纳起来主要有以下几种认识:①分布于北山地区红石山-百合山-蓬勃山蛇绿岩带的形成环境为大洋中脊,该蛇绿岩带是早古生代洋-陆转化结束后于晚古生代(石炭纪)重新裂解拉张形成的主大洋的地质记录,即为哈萨克斯坦板块与塔里木板块的最终缝合带<sup>[75-76, 100, 107-109]</sup>。②红石山蛇绿岩是古亚洲洋自早古生代持续演化至晚古生代的残余洋壳的地质记录,将红石山蛇绿混杂岩带作为哈萨克斯坦板块与西伯利亚板块的缝合线<sup>[74, 77]</sup>;③红石山蛇绿岩所处的蛇绿混杂岩带并不具有板块缝合带的性质,该蛇绿岩是早古生代洋-陆格局演化结束后于石炭纪重新拉张裂解而形成,构造环境为裂谷小洋盆环境<sup>[72, 78]</sup>或陆间扩展带环境<sup>[110]</sup>。王国强等<sup>[25]</sup>认为,红石山蛇绿岩中的玄武岩属 MORB 型,通过构造环境分析认为至少在早石炭世整个北天山—北山地区处于裂谷拉张环境,表明随着大陆裂解作用的进一步加剧而出现初始洋壳,代表了大陆裂谷向大洋裂谷的转换环境,红石山蛇绿岩形成于类似于现今“红海”的构造环境<sup>[44, 111-113]</sup>;④Xiao 等<sup>[37]</sup>通过区域综合对比分析认为,在晚古生代北山北部的红石山-百合山-蓬勃山蛇绿混杂岩带和北山南部的辉铜山-帐房山蛇绿混杂岩带代表的古亚洲洋的分支洋盆,共同将北山造山带分割成3个活动大陆边缘(岛弧)。

北山石炭系展布在空间上呈现南北2条带的特征,从空间叠置关系看,北山北部的红石山-百合山-蓬勃山蛇绿岩、芨芨台子蛇绿岩出露范围在空间上与北山北带石炭系的出露范围一致。北山南部同样具有形成于362 Ma 的蛇绿岩,其在空间上与北山南带石炭系相伴产出<sup>①</sup>。由此看来,北山晚古生代蛇绿岩的发育很可能与石炭系的空间展布具有联系,洋盆发育的规模与石炭纪地层发育的规模之间可能存在联系;正在开展的红石山蛇绿构造混杂岩带1:5万区域地质调查初步表明,该蛇绿混杂带内岩块和基质成分以石炭系为主,极少量为志留纪小红山岩组,混杂成分较单一,规模较小。因此,以上地质证据并不支持红石山蛇绿岩代表的洋盆为



具有分割意义的大洋,即其不能代表板块缝合带。

## 2 讨 论

尽管从北山 4 条蛇绿混杂岩带中获得了一批高精度的同位素年龄数据,但由于部分工作未涉及到或未提供采样对象所在的蛇绿岩剖面、蛇绿岩大比例尺野外地质图及混杂特征的相关描述,因此很难完整而客观地判断蛇绿岩与周边地质体的野外交触关系,亦很难在判断定年对象(玄武岩、辉长岩等)是否为蛇绿混杂岩带的组成部分方面取得一致认识,部分对蛇绿混杂岩带(如红石山蛇绿岩)的认识甚至依然存在究竟是蛇绿岩还是基性-超基性侵入体的争议;早前的蛇绿混杂岩带划分主要是基于不同地点蛇绿岩处于同一区域构造中,然而即使同一蛇绿构造混杂岩带不同位置的蛇绿岩也出现形成时代差异达上百个百万年的情况(如芟芟台子-小黄山蛇绿岩带等),北山各条蛇绿岩的形成时代影响其所代表洋盆之间的演化关系研究。因此,蛇绿混杂岩带的认识不仅需要更准确的蛇绿岩端元的高精度同位素年龄(同位素年龄样品的具体位置及其与周围地质体的接触关系需交代清楚)的制约,同时也需要更多野外精细填图后的物质组成对比、时空配置关系对比、构造特征等佐证。

通过构造、沉积作用研究,卷入增生造山带中最年轻的角度不整合时代、增生楔中最年轻的放射虫硅质岩时代代表古亚洲洋最终闭合时限的观点,近年来取得诸多成果<sup>[14, 37, 71, 85, 114-116]</sup>,然而不可忽视大量的石炭纪—二叠纪火山岩研究<sup>[72, 117-119]</sup>,晚泥盆世<sup>[120]</sup>、早二叠世<sup>[121]</sup>镁铁-超镁铁质岩,早一中泥盆世 A 型花岗岩<sup>[122-124]</sup>,晚泥盆世 A 型流纹岩<sup>[125]</sup>,早二叠世后碰撞高 K 花岗岩类<sup>[126]</sup>的产出,以及新近开展的北山古生代花岗岩类岩浆作用系统的地球化学研究<sup>[127]</sup>,则支持北山造山带在晚古生代已进入陆内演化阶段。不同的研究手段取得的研究结果并不一致,重要原因之一是由地球化学的多解性造成的。因此,在北山地区古生代构造演化具有复杂性的前提下,需要更多的基于客观地质事实的精细调查研究,获取第一手的野外地质证据,统筹考虑区内构造、岩浆及沉积作用之间的耦合关系,进一步推进北山造山带乃至中亚造山带南缘的研究水平。

近年来,以 1:5 万区域地质调查和综合研究为

手段,以解决制约造山带关键科学问题为目标的造山带蛇绿混杂岩基础地质调查工作,取得了一系列重要成果与认识,如中国地质调查局西安地质调查中心和西澳地质调查局联合开展的 1:5 万牛圈子幅区域地质调查,详细地填绘了北山造山带牛圈子蛇绿岩的物质组成及结构构造,对原划的“牛圈子蛇绿岩”典型出露位置提出了多条质疑证据,并识别出新的蛇绿构造混杂岩带,将其命名为马鬃山蛇绿构造混杂岩带<sup>[128]</sup>,进一步完善和丰富了“红柳河-牛圈子-洗肠井”蛇绿岩带的认识;识别出一套早古生代洋盆俯冲早期的典型埃达克岩,通过对该区钠质花岗岩及区域埃达克岩的研究,认为北山俯冲-增生过程在晚古生代初即结束,并未延伸到二叠纪<sup>[129]</sup>。天津地质调查中心组织实施的清河沟幅 1:5 万区域地质调查项目<sup>[27]</sup>,详细地厘定了百合山蛇绿混杂岩的物质组成,认为其蛇绿岩组合较完整,构造混杂岩带具有“基质包裹岩块”的特征,在空间上由增生杂岩和蛇绿(混杂)岩组成百合山蛇绿混杂岩带,并在该带识别出 3 期构造变形,最终探讨了其时空结构和构造属性。西安地质调查中心通过在红石山地区开展 1:5 万填图工作,已初步在传统认识的“红石山蛇绿岩”以东及以北区域填绘出一套典型的蛇绿混杂岩岩石组合,“岩块+基质”的混杂特征明显,通过初步精细填图工作,将原红石山地区蛇绿混杂岩带的范围再向北进行扩展,并分析其形成环境及构造属性(待发表)。在以上关键地段开展的大比例尺区域地质调查工作,是近十余年来总结的造山带蛇绿混杂岩带填图方法<sup>[5-6, 130]</sup>的进一步实践和应用,同时也为在上述区域解决重大地质问题奠定了坚实的基础。

## 3 结 论

(1)北山地区洋盆最早于早寒武世即已开启,最晚可能于二叠纪闭合;该区蛇绿混杂岩的时空分布复杂,将已知任意一条蛇绿混杂岩带单独作为一级构造单元划分的证据依然不足。

(2)对北山地区蛇绿混杂岩带开展精细基础地质调查,客观地表达目标地质体,系统梳理区域地质问题,可为解决北山古生代构造演化研究中构造、沉积与岩浆作用研究之间不一致的问题提供更多直接的地质证据支持。

致谢:感谢参与北山野外调查工作的所有项目

组成员的辛苦付出及有益帮助,感谢加拿大滑铁卢大学林寿发教授提供的宝贵修改意见。

## 参考文献

- [1] 张进, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 蛇绿岩研究的最新进展[J]. 地质通报, 2012, 31(1): 1-12.
- [2] 张旗. 蛇绿岩研究中的几个问题[J]. 岩石学报, 1995, (S1): 228-240.
- [3] Dilek Y. Ophiolite concept and its evolution [J]. The Geological Society of America Special Paper, 2003, 373: 1-16.
- [4] Dilek Y, Fumes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere [J]. Geological Society of America Bulletin, 2011, 123(3/4): 387-411.
- [5] 闫臻, 王宗起, 付长垒, 等. 混杂岩基本特征与专题地质填图[J]. 地质通报, 2018, 37(2/3): 167-191.
- [6] 王根厚, 韩芳林, 杨运军, 等. 藏北羌塘中部晚古生代增生杂岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2009, 28(9): 15-21.
- [7] Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. Opening and Tectonic Evolution of the Paleo-Asian Ocean [J]. International Geology Review, 1995, 37(4): 335-360.
- [8] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [9] 余吉远, 李向民, 王国强, 等. 北山地区辉铜山、帐房山蛇绿岩 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质通报, 2012, 31(12): 2038-2045.
- [10] 于福生, 李金宝, 王涛. 东天山红柳河地区蛇绿岩 U-Pb 同位素年龄[J]. 地球学报, 2006, 27(3): 213-216.
- [11] 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): 803-809.
- [12] Cleven N, Lin S, Guilmette C, et al. Petrogenesis and implications for tectonic setting of Cambrian suprasubduction-zone ophiolitic rocks in the central Beishan orogenic collage, Northwest China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 369-90.
- [13] Shi Y R, Zhang W, Kröner A, et al. Cambrian ophiolite complexes in the Beishan area, China, southern margin of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 153: 193-205.
- [14] Tian Z H, Xiao W J, Windley B F, et al. Structure, age, and tectonic development of the Huoshishan - Niujuanzi ophiolitic mélange, Beishan, southernmost Altai [J]. Gondwana Research, 2014, 25(2): 820-841.
- [15] 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.
- [16] Wang S, Zhang K, Song B, et al. Geochronology and geochemistry of the Niujuanzi ophiolitic mélange, Gansu Province, NW China: implications for tectonic evolution of the Beishan Orogenic Collage [J]. International Journal of Earth Sciences, 2018, 107(1): 269-289.
- [17] 任秉琛, 何世平, 姚文光, 等. 甘肃北山牛圈子蛇绿岩铷-锶同位素年龄及其大地构造意义[J]. 西北地质, 2001, 34(2): 21-27.
- [18] 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.
- [19] 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): 1008-1018.
- [20] 周国庆, 赵建新. 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.
- [21] 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 architecture of the Southern Altai [J]. Geological Magazine, 2012, 149(4): 606-625.
- [22] 李向民, 余吉远, 王国强, 等. 甘肃北山地区芨芨台子蛇绿岩年代学研究及其意义[J]. 地质通报, 2012, 31(12): 2025-2031.
- [23] 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, 36(2): 131-147.
- [24] Wu T R, Zheng R G, Zhang W, et al. Tectonic framework of Beishan Mountain-Northern Alxa Area and the time constraints for the closing of the Paleo-Asian Ocean [C]//Proceedings of the Fifth Workshop on 1:5M International Geological Map of Asia 2011. Beijing, 2011.
- [25] 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.
- [26] Shi Y, Li L, Kröner A, et al. Carboniferous Alaskan-type complex along the Sino-Mongolian boundary, southern margin of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Acta Geochim, 2017, 36(2): 276-290.
- [27] 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.
- [28] 李向民, 张占武, 王国强, 等. 北山成矿带地质矿产图(1:500000) [M]. 西安: 西安地图出版社, 2016.
- [29] Sengör A M C, Natal'in, B. A., Burtman, V. S. Evolution of the Altai tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. Nature, 1993, 364(22): 299-307.
- [30] 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(3/4): 135-159.
- [31] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2324-2328.
- [32] Jahn B, Wu F, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. Episodes, 2000, 23(2): 82-92.
- [33] Jahn B. Phanerozoic continental growth in Central Asia [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(5): 599-603.
- [34] Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H, et al. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan Range (western China): implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt [J]. Chemical Geology, 2007, 236(1): 42-64.
- [35] 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(1): 31-47.



- [36] Xiao W J, Windley B F, Han C M, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1189-1217.
- [37] 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(10): 1553-1594.
- [38] Xiao W J, Huang B, Han C M, et al. A review of the western part of the Altaids: a key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(2): 253-273.
- [39] Xiao W J, Windley B F, Allen M B, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1316-1341.
- [40] Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(2): 516-531.
- [41] Xiao W J, Windley B F, Badarch G, et al. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161(3): 339-342.
- [42] 王宝瑜, 郎智君, 李向东, 等. 中国天山西段地质剖面综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [43] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [44] Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(3/4): 419-433.
- [45] Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, et al. Carboniferous post-collisional rift volcanism of the Tian Shan Mountains, northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2003, 77(3): 338-360.
- [46] Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, et al. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31(4/6): 357-378.
- [47] Wang B, Shu L, Faure M, et al. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan: Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélange (NW China)[J]. *Tectonophysics*, 2011, 497(s1/4): 85-104.
- [48] Wang B, Ruffet G. Structural and Geochronological Study of High-Pressure Metamorphic Rocks in the Kekesu Section (Northwestern China): Implications for the Late Paleozoic Tectonics of the Southern Tianshan[J]. *Journal of Geology*, 2010, 118(1): 59-77.
- [49] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Syn- and post-collisional granitoids in the Central Tianshan orogen: geochemistry, geochronology and implications for tectonic evolution. *Gondwana Res*[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(2/3): 568-581.
- [50] Volkova N I, Sklyarov E V. High-pressure complexes of Central Asian Fold Belt: Geologic setting, geochemistry, and geodynamic implications[J]. *Russian Geology & Geophysics*, 2007, 48(1): 83-90.
- [51] Klemd R, Bröcker M, Hacker B, et al. New age constraints on the metamorphic evolution of the high-pressure/low-temperature belt in the western Tianshan Mountains, NW China[J]. *The Journal of Geology*, 2005, 113(2): 157-168.
- [52] Gao J, Klemd R. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints[J]. *Lithos*, 2003, 66(1/2): 1-22.
- [53] 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.
- [54] Li Q L, Lin W, Su W, et al. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China[J]. *Lithos*, 2011, 122(1/2): 76-86.
- [55] Gao J, Klemd R, Qian Q, et al. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen[J]. *Tectonophysics*, 2011, 499(1/4): 118-131.
- [56] 肖序常, 何国琦, 徐新. 中国新疆地壳结构与地质演化[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [57] Su W, Gao J, Klemd R, et al. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2010, 22(4): 473-478.
- [58] Glorie S, Grave J D, Buslov M M, et al. Multi-method chronometric constraints on the evolution of the Northern Kyrgyz Tien Shan granitoids (Central Asian Orogenic Belt): From emplacement to exhumation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 38(s3/4): 131-146.
- [59] Konopelko D, Seltmann R, Biske G, et al. Possible source dichotomy of contemporaneous post-collisional barren I-type versus tin-bearing A-type granites, lying on opposite sides of the South Tien Shan suture[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 35(2): 206-216.
- [60] Solomovich L I. Postcollisional magmatism in the South Tien Shan Variscan Orogenic Belt, Kyrgyzstan: Evidence for high-temperature and high-pressure collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 30(1): 142-153.
- [61] Konopelko D, Biske G, Seltmann R, et al. Hercynian post-collisional A-type granites of the Kokshaal Range, Southern Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. *Lithos*, 2007, 97(1/2): 140-160.
- [62] Solomovich L I, Trifonov B A. Postcollisional granites in the South Tien Shan Variscan Collisional Belt, Kyrgyzstan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21(1): 7-21.
- [63] Windley B F, Allen M B, Zhang C, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan range, Central Asia[J]. *Geology*, 1990, 18(2): 128-131.
- [64] Allen M B, Windley B F, Zhang C. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 1992, 220: 89-115.
- [65] Chen C, Lu H, Jia D, et al. Closing history of the southern Tianshan

- oceanic basin, western China: an oblique collisional orogeny [J]. *Tectonophysics*, 1999, 302(1/2): 23-40.
- [66] Zhang L, Ai Y, Li X, et al. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks [J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 266-280.
- [67] Brookfield M E. Geological development and Phanerozoic crustal accretion in the western segment of the southern Tien Shan (Kyrgyzstan, Uzbekistan and Tajikistan) [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1): 1-14.
- [68] Xiao W J, Windley B F, Han C M, et al. End Permian to mid-Triassic termination of the southern Central Asian Orogenic Belt [J]. *International journal of earth sciences*, 2009, 98(6): 1189-1217.
- [69] Xiao W J, Han C M, Chao Y, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of North Xinjiang NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2/4): 102-117.
- [70] Song D F, Xiao W J, Han C M, et al. Progressive accretionary tectonics of the Beishan orogenic collage, Southern Altaids: insights from zircon U-Pb and Hf isotopic data of high-grade complexes [J]. *Precambrian Research*, 2012, 227: 368-388.
- [71] 肖文交, 宋东方, Windley B F, 等. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1512-1545.
- [72] 左国朝, 何国琦, 李红诚. 北山板块构造及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990: 1-226.
- [73] 辛后田, 牛文超, 田健, 等. 内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化 [J]. *地质通报*, 2020, 39(9): 1297-1316.
- [74] 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: 37-48.
- [75] 龚全胜, 刘明强, 李海林, 等. 甘肃北山造山带类型及基本特征 [J]. *西北地质*, 2002, 35(3): 28-34.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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, 25(4): 305-314.
- [80] 左国朝, 李茂松. 甘肃北山地区早古生代岩石圈形成与演化 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1996: 1-92.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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(3): 1127-1151.
- [84] Zhang W, Wu T R, Zheng R G, et al. Post-collisional Southeastern Beishan Granites: Geochemistry, geochronology, Sr-Nd-Hf isotopes and their implications for tectonic evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 58: 51-63.
- [85] Mao Q G, Xiao W J, Fang T H, et al. Late Ordovician to early Devonian adakites and Nb-enriched basalts in the Liuyuan area, Beishan, NW China: Implications for early Paleozoic slab-melting and crustal growth in the southern Altaids [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 534-553.
- [86] 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*, 2011, 149(3): 483-506.
- [87] Zhang Y, Dostal J, Zhao Z, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of mafic and ultramafic rocks from Southern Beishan area, NW China: Implications for crust-mantle interaction [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(4): 816-830.
- [88] Liu X, Chen B, Jahn B, et al. Early Paleozoic (ca. 465 Ma) eclogites from Beishan (NW China) and their bearing on the tectonic evolution of the southern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(4): 715-731.
- [89] Qu J, Xiao W J, Windley B F, et al. Ordovician eclogites from the Chinese Beishan: Implications for the tectonic evolution of the southern Altaids [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29: 803-820.
- [90] Saktura W, Buckman S, Nutman A, et al. Continental origin of the Gubaoquan eclogite and implications for evolution of the Beishan Orogen, Central Asian Orogenic Belt, NW China [J]. *Lithos*, 2017, 294(294/295): 20-38.
- [91] 王立社, 杨建国, 谢春林, 等. 甘肃北山火石山地区早古生代蛇绿混杂岩的发现及其地质意义 [J]. *现代地质*, 2007, 21(3): 451-456.
- [92] 周国庆. 古塔里木大陆东北缘加里东期蛇绿岩套的发现及其构造意义 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1988, 24(1): 39-54.
- [93] 郭召杰, 马瑞士, 郭令智, 等. 新疆东部三条蛇绿混杂岩带的比较研究 [J]. *地质论评*, 1993, 39(3): 236-247.
- [94] 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.
- [95] 郭召杰, 史宏宇, 张志成, 等. 新疆甘肃交界红柳河蛇绿岩中伸展构造与古洋盆演化过程 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 95-102.
- [96] 王国强. 北山古生代蛇绿岩、火山岩研究与构造演化 [D]. 长安大学博士学位论文, 2015.
- [97] 何世平, 周会武, 姚文光, 等. 甘肃北山中泥盆统砾岩中放射虫的发现及其地质意义 [J]. *西北地质*, 2004, 37(3): 24-28.
- [98] 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.
- [99] Zhang W, Pease V, Wu T R, et al. Discovery of an adakite-like pluton near Dongqiyishan (Beishan, NW China): Its age and tectonic significance [J]. *Lithos*, 2012, 142/143: 148-160.
- [100] 何世平, 周会武, 任秉琛, 等. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化 [J]. *西北地质*, 2005, 38(3): 6-15.
- [101] 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.

- [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] 宋泰忠, 王瑾, 林海, 等. 内蒙古北山地区小黄山蛇绿岩地质特征[J]. *西北地质*, 2008, 41(3): 55-63.
- [104] Zheng R G, Wu T R, 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.
- [105] 杨合群, 赵国斌, 李英, 等. 新疆 甘肃 内蒙古衔接区古生代构造背景与成矿的关系[J]. *地质通报*, 2012, 42(4): 60-75.
- [106] 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.
- [107] 赵茹石, 周振环, 毛金海, 等. 甘肃省板块构造单元划分及其构造演化[J]. *中国区域地质*, 1994, 13(1): 28-36.
- [108] 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.
- [109] 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.
- [110] 王作勋, 郭继易, 吕喜超, 等. 天山多旋回构造演化及成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1-217.
- [111] Saunders A, Storey M, Kent R, et al. Consequences of plume-lithosphere interactions[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1992, 68(1): 41-60.
- [112] 徐学义, 夏林圻, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 83-94.
- [113] Wilson M. *Igneous petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-464.
- [114] Ao S J, Xiao W J, Han C M, et al. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: Implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaids[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(2): 466-478.
- [115] Guo Q Q, Xiao W J, Windley B F, et al. Provenance and tectonic settings of Permian turbidites from the Beishan Mountains, NW China: Implications for the Late Paleozoic accretionary tectonics of the southern Altaids[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 54-68.
- [116] 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.
- [117] 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 北山石炭纪-二叠纪火山岩成因及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(6): 884-900.
- [118] 许伟, 徐学义, 牛亚卓, 等. 北山南部早二叠世 A 型流纹岩地球化学特征及其地球动力学意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(10): 3011-3032.
- [119] Wang Y, Luo Z, Santosh M, et al. The Liuyuan Volcanic Belt in NW China revisited: evidence for Permian rifting associated with the assembly of continental blocks in the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Geological Magazine*, 2017, 154(2): 265-285.
- [120] Xie W, Song X Y, Deng Y F, et al. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Lithos*, 2012, 144/145(7): 209-230.
- [121] Su B X, Qin K Z, Santosh M, et al. The Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan Terrane, NW China: Alaskan-type intrusives or rift cumulates? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 66: 175-187.
- [122] 李舫, 王涛, 童英, 等. 北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造演化意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(5): 407-421.
- [123] 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[J]. *地质学报*, 2009, 83(3): 377-387.
- [124] 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): 237-252.
- [125] Guo Q Q, Chung S, 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.
- [126] Li S, Wilde S A, Wang T. Early Permian post-collisional high-K granitoids from Liuyuan area in southern Beishan orogen, NW China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2013, 179: 99-119.
- [127] Yuan Y, Zong K Q, He Z Y, 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.
- [128] 余吉远, 李建星, 孟勇, 等. 中澳合作填图试点 1: 5 万牛圈子幅区域地质图[M]. 西安: 西安地图出版社, 2016.
- [129] 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.
- [130] 李荣社, 计文化, 辜平阳. 造山带(蛇绿)构造混杂岩带填图方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016: 1-119.
- ①李向民, 王国强, 余吉远, 等. 北山-祁连成矿带地质矿产综合研究报告. 2013.
- ②甘肃省地质调查院. 1: 5 万红岭幅区域地质调查报告. 2004.
- ③甘肃省地质调查院. 1: 25 万红宝幅区域地质调查报告. 2005.