

doi: 10.12029/gc20190503

牛文超, 辛后田, 段连峰, 王根厚, 赵泽霖, 张国震, 郑艺龙. 2019. 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, 46(5): 977–994.

Niu Wenchao, Xin Houtian, Duan Lianfeng, Wang Genhou, Zhao Zelin, Zhang Guozhen, Zheng Yilong. 2019. The identification and subduction polarity of the Baiheshan ophiolite mélanges belt in the Beishan area, Inner Mongolia—New understanding based on the geological map of Qinghegou Sheet (1:50000)[J]. Geology in China, 46(5): 977–994(in Chinese with English abstract).

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

牛文超¹, 辛后田¹, 段连峰¹, 王根厚², 赵泽霖¹, 张国震¹, 郑艺龙³

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:造山带内蛇绿混杂岩带结构与组成的精细研究可为古板块构造格局重建和古洋盆演化提供最直接证据。北山造山带内存在多条蛇绿混杂岩带, 记录了古亚洲洋古生代以来的俯冲和闭合过程, 然而其大地构造演化长期存在争议。红石山—百合山蛇绿混杂岩带位于北山造山带北部, 主要由蛇绿(混杂)岩和增生杂岩组成, 具典型的“块体裹挟于基质”的混杂岩结构特征, 发育紧闭褶皱、无根褶皱、透入性面理和双重逆冲构造。蛇绿混杂岩带中岩块主要由超镁铁质—镁铁质岩(变质橄榄岩、辉石橄榄岩、异剥辉石岩、蛇纹岩)、辉长岩、玄武岩、斜长花岗岩、硅质岩等洋壳残块以及奥陶纪火山岩、灰岩等外来岩块组成, 基质则主要为蛇纹岩、砂板岩及少量的绿帘绿泥片岩; 在蛇绿混杂岩带北侧发育有台地相灰岩与深水浊积岩组成的沉积混杂块体, 具滑塌堆积特征。蛇绿混杂岩带内发育三期构造变形, 前两期为中深构造层次下形成的透入性变形, 第三期为浅表层次的脆性变形, 未形成区域性面理。空间上, 由增生杂岩和蛇绿(混杂)岩组成的百合山蛇绿混杂岩带共同仰冲于绿条山组浊积岩之上, 具有与红石山地区蛇绿混杂岩带相似的岩石组成、构造变形和时空结构特征。百合山蛇绿混杂岩带南侧发育同期的明水岩浆弧, 由晚石炭世石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩以及白山组岛弧火山岩组成, 其与百合山蛇绿混杂岩带共同构成了北山造山带北部石炭—二叠纪的沟—弧体系, 指示了红石山—百合山洋盆向南俯冲的极性。

关键词:北山造山带; 百合山蛇绿混杂岩; 增生杂岩; 沟—弧体系; 地质调查工程
中图分类号: P54 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)05-0977-18

The identification and subduction polarity of the Baiheshan ophiolite mélanges belt in the Beishan area, Inner Mongolia—New understanding based on the geological map of Qinghegou Sheet (1:50000)

NIU Wenchao¹, XIN Houtian¹, DUAN Lianfeng¹, WANG Genhou², ZHAO Zelin¹,
ZHANG Guozhen¹, ZHENG Yilong³

(1. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

收稿日期: 2019-07-14; 改回日期: 2019-09-30

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160039, DD20160039-17)资助。

作者简介: 牛文超, 男, 1986年生, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质调查和造山带构造研究工作; E-mail: billynu2003@163.com。

通讯作者: 辛后田, 男, 1969年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩石大地构造方面的研究; E-mail: xinht@163.com。

Abstract: Detailed studies of the texture and composition of ophiolite mélanges belt can provide important information for the reconstruction of ancient plate tectonics and the evolution of ancient ocean basins. The Beishan orogenic belt contains multiple belts of ophiolite mélanges and records Paleozoic subduction and closure processes of the Paleo-Asian Oceans. However, the tectonic evolution of the North Beishan orogenic belt (NBOB) is still hotly debated. Hongshishan-Baiheshan ophiolite mélanges belt which consists of ophiolite and accretionary complex is located in the north of the Beishan orogenic belt. The ophiolite mélanges show that typical block-in-matrix fabric is characterized by intense deformation recorded by tight fold, rootless intrafolial folds, penetrative foliations and duplex thrust faults. The mélange is composed of various exotic or native blocks, including ultramafic rock (metamorphic peridotite, pyroxene peridotite, peel pyroxenite and serpentinite), gabbro (344Ma), basalt, plagiogranite (297Ma), chert, limestone and Ordovician volcanic rocks. The matrix consists of serpentinite, sandstone and a small quantity of epidote-chlorite schist. The sedimentary blocks composed of limestone and turbidite suggest a characteristic of slump deposit. The ophiolite mélanges belt developed three distinct foliations which showed middle and deep tectonic stratigraphy in the first two phase and non-penetrative foliation in the third phase. Spatially, the Baiheshan ophiolite mélanges belt composed of ophiolite and accretionary complex was thrust over turbidite of Lvtiaoshan Formation and shared similar compositions, deformations, spatial and temporal distributions to that in Hongshishan area. The Mingshui magmatic arc consisting of quartz diorite-granodiorite-monzonitic granite and Baishan Formation arc volcanic rocks is located in the north of the Baiheshan ophiolite mélanges belt. Baiheshan ophiolite mélanges belt and the Mingshui magmatic arc constitute a Carboniferous-Permian trench-arc system within the North Beishan orogenic belt (NBOB) during the Carboniferous-Permian southward subduction of the Hongshishan-Baiheshan Ocean.

Key words: The Beishan orogenic belt; Baiheshan ophiolite mélanges; accretionary complex; trench-arc system; geological survey engineering

About the first author: NIU Wenchao, male, born in 1986, engineer, majors in regional geological survey and structural geology; E-mail: billynu2003@163.com.

About the corresponding author: XIN Houtian, male, born in 1969, senior engineer, majors in petrogeotectonics; E-mail: xinht@163.com.

Found support: Supported by China Geology Survey Project (No. DD20160039, DD20160039-17).

1 引 言

混杂岩是形成于多种构造环境下(汇聚板块边缘俯冲带、被动大陆边缘、裂谷、碰撞带等),主要由岩块和基质共同构成的内部无序岩石混杂体,其是造山带内最基本的大地构造相单元和最常见的地质体(Robertson et al., 1994; 潘桂棠等, 2008; 王根厚等, 2009; Wakabayashi, 2011; Festa et al., 2012; 张克信等, 2016; 闫臻等, 2018)。通常将形成于俯冲带环境并由洋壳物质组成的混杂岩分为蛇绿混杂岩和增生杂岩两种类型(Wakita et al., 2005, 2015)。蛇绿岩是非原地的上地幔和大洋地壳岩石组合,其可形成于板块分离至最终板块聚合的各个阶段(即威尔逊旋回的不同阶段),并在板块汇聚作用中卷入造山带(Diek and Furnes, 2011; 张进等, 2012),蛇绿混杂岩是在洋-陆及洋-洋俯冲过程中蛇绿岩原始层序发生构造肢解并离开原地而形成的沿碰撞型或增生型缝合带分布的残留型地质体(Cawood

et al., 2009; Lister et al., 2009; Dilek and Furnes, 2014);增生杂岩则被认为是大洋岩石圈在仰冲板块前端发生底侵、刮削及侵蚀作用而使得大洋岩石圈残片(蛇绿岩套物质、洋岛/海山)和其上的沉积物(硅质岩、硅质页岩)与陆缘碎屑沉积物(通常为浊积岩)发生构造混杂而行成的楔形地质体(Moore and Silver, 1987; 闫臻等, 2018)。蛇绿混杂岩和增生杂岩共同构成分隔大陆岩石圈和大洋岩石圈边界的蛇绿混杂岩带(王国灿等, 2019),并表现出刚性块体(洋壳残块、硅质岩、火山岩)分布于强变形基质(蛇纹岩、浊积岩)的结构特征(Agard et al., 2009; Wakabayashi, 2015)。因此,对造山带内蛇绿混杂岩带的识别不仅可以有效地确定古俯冲带和古洋盆的存在,而且精细地厘定其结构、组成以及形成过程对于恢复古洋盆和造山带结构以及识别造山作用类型等重大基础地质问题都具有最直接的基础地质资料支撑作用。

天山-兴蒙造山带(中亚造山系在中国境内部

分)位于塔里木—中朝古板块与西伯利亚古板块之间,是古亚洲洋在古生代经过俯冲—增生形成的复合型造山带(Buchan et al., 2002; Windley et al., 2007; Xiao et al., 2010),其中的北山造山带则是连接天山造山带和兴蒙造山带的关键地带,记录了古亚洲洋长时间、多期次的俯冲—碰撞作用过程(Sengör et al., 1993; Kröner et al., 2007; Xiao et al., 2010; 李向民等, 2012; Tian et al., 2014; Cleven et al., 2015; 牛文超等, 2019)。在长期的洋陆演化过程中,北山造山带自南向北共形成辉铜山—帐房山、红柳河—牛圈子—洗肠井、芨芨台子—小黄山和红石山—百合山4条蛇绿混杂岩(超基性岩)带,但是对于这4条蛇绿混杂岩(超基性岩)带的组成和大地构造意义的认识众说纷纭(左国朝等, 1990; 何世平等, 2005; 杨合群等, 2010; 李向民等, 2012; 王国强等, 2014; Song et al., 2015; 孙立新等, 2017; Shi et al., 2017)。目前,前人已对北山造山带南部3条蛇绿混杂岩(超基性岩)带(辉铜山—帐房山蛇绿混杂岩带、红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带和芨芨台子—小黄山超基性岩带)进行了大量的研究,并普遍认为红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带应为早古生代塔里木和哈萨克斯坦两大板块的缝合带,具有板块分化边界的意义(何世平等, 2005; 杨合群等, 2010; Ao et al., 2012; 孙立新等, 2017; 宋东方等, 2018),而作为北山造山带最北部的红石山—百合山蛇绿混杂岩带的研究相对薄弱,其物质组成和构造属性长期存有争议,特别是对蛇绿混杂岩所代表的洋盆俯冲消减极性认识的差异,有南向俯冲(魏志军等, 2004; 黄增保和金霞, 2006; 任云伟等, 2019)和双向俯冲(赵志雄等, 2018)两种认识。同时,对于北山北部洋盆(古亚洲洋)最终闭合时间也存在中泥盆世(王国强等, 2014; 卢进才等, 2018)、早石炭世(刘雪亚和王荃, 1995)和中晚二叠世(Xiao et al., 2010; Song et al., 2015)等多种认识。究其原因,主要在于缺少对红石山—百合山地区蛇绿混杂岩的物质组成、变形特征及其形成时代和构造背景的调查研究,也缺乏与蛇绿混杂岩配套的岛弧岩浆岩带的组成展布和时代的调查研究,没有开展造山带结构的精细研究。

本次笔者在1:5万清河沟幅区调过程中,对前人所划超基性岩带(实为蛇绿混杂岩带)及其两侧

地质体进行了详细的调查,开展了大比例尺地质填图,识别出保存较为完整的蛇绿岩套和沉积混杂堆积的增生楔,重新厘定了百合山蛇绿混杂岩带。本文在详细介绍百合山蛇绿混杂岩带的物质组成和变形特征的基础上,结合蛇绿混杂岩带空间展布特征及其与两侧地质体的时空关系,探讨百合山蛇绿混杂岩带的形成过程以及北山造山带北部晚古生代大地构造格局和洋盆俯冲极性。

2 地质背景

北山造山带位于甘新蒙三省(区)交界,东部与索伦缝合带相连,西部与天山造山带相邻,南北两侧分别与敦煌地块和蒙古造山带相接(图1b),经历了自古生代以来强烈的增生造山过程(Xiao et al., 2010; Ao et al., 2012; Tian et al., 2014; Song et al., 2015)。北山造山带南部发育完整的早古生代沟—弧—盆体系,主要包括蛇绿混杂岩、增生杂岩、中高级变质岩带、岛弧和弧后盆地等地质单元(杨合群等, 2010; Xiao et al., 2010; 李向民等, 2012; Tian et al., 2014; Song et al., 2015, 2018)。北山造山带北部则主要由前寒武纪变质结晶基底(北山岩群)、早古生代岛弧火山岩及火山—沉积岩、晚古生代蛇绿混杂岩及其大面积分布的陆缘弧岩浆岩组成(左国朝等, 1990; 何世平等, 2005; Xiao et al., 2010; 王国强等, 2014; 牛文超等, 2017, 2019)。红石山—百合山蛇绿混杂岩带位于北山造山带北部,明水—旱山地块的北缘。区域上,红石山地区出露的地层主要有前寒武纪变质岩系(敦煌岩群)、泥盆纪火山岩(雀儿山群)、石炭纪碎屑岩及火山岩(绿条山组)、二叠纪滨浅海相沉积岩系(双堡塘组)及新近纪地层(王国强等, 2014),空间上与红石山蛇绿混杂岩相伴产出的主要为一套浅变质碎屑岩系夹硅质岩及玄武岩,其中红石山蛇绿岩岩性组合主要包括变质超镁铁质岩(纯橄岩、辉橄岩、单辉橄岩、二辉橄岩)、超镁铁—镁铁质岩(辉橄岩、辉长岩、辉石岩)、玄武岩、硅质岩等(黄增保和金霞, 2006; 王国强等, 2014; Shi et al., 2017)。

研究区位于北山造山带北部,红石山—百合山蛇绿混杂岩带从图幅内穿过。区内出露最老地层为早奥陶世咸水湖组,其次为晚志留世碎石山组、中泥盆世清河沟组、早石炭世绿条山组、石炭纪白

山组和第四纪松散堆积物(图1c)。咸水湖组和碎石山组主要分布于百合山蛇绿混杂岩带北侧,其中,咸水湖组呈北西向条带状展布,分为一段变质火山-碎屑岩段和二段变质火山岩段,火山-碎屑岩段岩性主要为凝灰质砾岩、凝灰质砂岩及中细粒长石岩屑砂岩等;火山岩段岩性包括安山岩、玄武安山岩、少量的英安岩以及同质的火山碎屑岩。碎石山组呈断块产出,出露面积不大,区内主要为一套陆缘碎屑岩组合,岩性包括变质长石岩屑细砂岩夹灰岩透镜体,灰岩中产珊瑚化石(*Romingerella* sp.)。中泥盆世清河沟组为一套滨浅海相碎屑沉积岩组合,岩性为钙质长石岩屑砂岩、变质细砾岩、中细粒粒屑钙质砂岩、含砂质重结晶泥亮晶鲕粒灰岩;灰岩中见较多生物碎屑岩,灰岩和钙质砂岩中见珊瑚化石(*Favosites* sp., *Squameofavosites* sp.)。早石炭世绿条山组为一套深海—半深海浊积岩序列沉积组合,区域上可分为粗碎屑岩和细碎屑岩两个岩性段(王国强等,2014;任邦方等,2019),区内两个岩性段均有出露,岩性包括变质中细粒长石岩屑砂岩和变质粉砂岩,局部可见砾岩和粗砂岩,粒序层理发育。石炭纪白山组整合于绿条山组之上,整体为一套岛弧火山岩和火山碎屑岩组合,局部见火山-沉积岩夹层,由一段中基性火山岩段和二段中酸性火山岩段组成。中基性火山岩段岩性主要为安山岩及安山质火山碎屑岩,极少量的玄武安山岩,安山岩中见气孔、杏仁构造;中酸性火山岩段分布面积较大,岩性以流纹岩、英安岩、流纹质/英安质火山碎屑岩为主,区内见集块岩及火山角砾岩。除以上地层之外,研究区大面积分布石炭—二叠纪基性和中酸性侵入岩,岩性主要有辉长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩。

3 百合山蛇绿混杂岩带的基本特征

3.1 岩石组合特征

百合山蛇绿混杂岩带位于图幅北侧,呈北西向条带状展布,南北宽4~7 km,东西长20 km左右,南北两侧分别与石炭纪白山组和早奥陶世咸水湖组呈断层接触。该混杂岩带主要由蛇绿混杂岩和增生杂岩组成,为洋壳俯冲型混杂岩(Wakita et al., 2005, 2015),具“基质包裹岩块”的特征(图2a,图

2b)。蛇绿混杂岩位于混杂岩带的西侧,构造就位前人所划的“绿条山组”砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩之上。“绿条山组”砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩中发育粒序层理、平行层理以及小型波纹层理,具“鲍马序列”组合,呈现出复理石沉积建造特征,为(半)深水沉积环境(卢进才等,2018)。值得注意的是,在野外调查中可见“绿条山组”中多处出露火山岩、砾岩、灰岩等构造透镜体,透镜体规模一般在数米至数十米不等,具有“基质裹挟岩块”的特征,且原始层理多被置换,表现出非史密斯地层的结构特征(张克信等,2003)。蛇绿混杂岩由岩块和基质组成,在野外及剖面中均表现明显。基质主要为灰白色蛇纹岩和灰绿色绿泥绿帘片岩,少量的硅质岩,发育强烈韧性剪切流变及揉皱变形。岩块为蛇绿岩残块,包括超镁铁-镁铁质岩(变质橄榄岩、辉石橄榄岩、异剥辉石岩、蛇纹岩)、辉长岩、玄武岩、硅质岩以及极少量的斜长花岗岩,其中硅质岩岩块分为灰黑色和灰红色两种类型。岩块大小在数厘米至数十米之间,呈透镜状或椭球状,部分发育“ σ ”型右旋拖尾,长轴定向与基质变形方向一致。同时,值得注意的是,在测区蛇绿混杂岩中仍能识别出3条保存较为完整的洋壳残片,且各洋壳残片之间以逆冲断层相互叠置,在各残片中存在不同蛇绿岩块(辉长岩与玄武岩岩块,玄武岩与硅质岩岩块)之间的直接接触,岩块接触部位多为剪切破碎的块体碎屑,缺少蛇纹岩或绿泥绿帘片岩基质,这些特征与Shervais et al. (2011)指出的蛇绿混杂岩特征是一致的。

百合山蛇绿混杂岩带内增生杂岩(增生楔)相比于蛇绿(混杂)岩,岩块更为丰富,且基质成分相差较大。增生杂岩中岩块不仅包括蛇绿岩等洋壳残块(变质橄榄岩、异剥辉石岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩等),也存在奥陶纪火山岩、灰岩等外来岩块,基质则以砂板岩为主(表1)。岩块大小差异明显,呈透镜状,地貌上多表现为突起的小包,部分硅质岩(硅质泥岩)块体中可见强烈的褶皱变形;基质整体变形强烈,原生面理多已被后期面理置换,但仍可在局部识别出粒序层理、平行层理等原生构造,反映了浊流沉积特征。此外,在增生楔内部,见有台地相灰岩与半深海浊积岩组成的沉积混杂块体,灰岩中发育尺度不等的揉皱,与浊积岩接触部位见

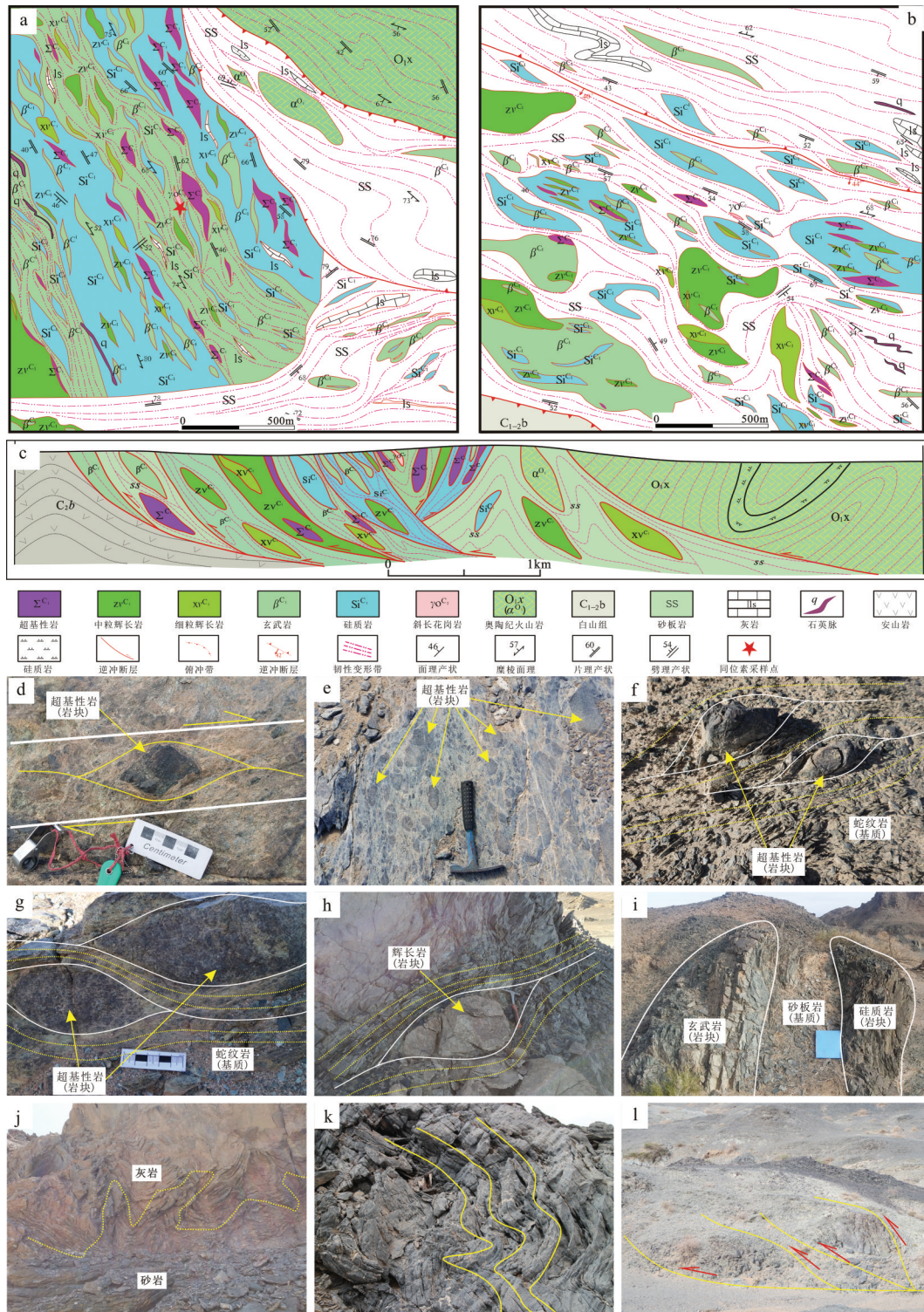


图2 百合山蛇绿混杂岩带结构及物质组成特征

a—蛇绿混杂岩大比例尺图;b—增生杂岩大比例尺图;c—蛇绿混杂岩剖面图;d—i—蛇绿混杂岩带野外露头特征;
j—k—灰岩与砂岩接触部位软沉积变形和灰岩中揉皱特征;l—与俯冲相关的叠瓦状逆冲构造

Fig.2 The texture and composition of the Baiheshan ophiolite mélanges belt

a—Large scale topographical map of ophiolite mélanges; b—Large scale topographical map of accretionary wedge; c—Cross section of the Baiheshan ophiolite mélanges belt; d—i—Photographs of field occurrences of ophiolite mélange; j—k—Deformation characteristics of limestone and sandstone; l—Imbricate thrust structure related to the subduction

表1 百合山蛇绿混杂岩带内不同类型的岩块和基质划分方案

Table 1 The partition scheme of different types of block and matrix in the Baiheshan ophiolite mélanges belt					
构造混杂岩带	构造地质体类型	时代	填图单位	岩性	
百合山蛇绿混杂岩带	基质	蛇纹岩基质	石炭纪	$\psi\omega$	蛇纹岩,透闪石片岩
		砂板岩基质	石炭纪	ss	变质细砂岩、粉砂岩,硅泥质板岩
		绿泥片岩基质	石炭纪	chs	绿泥绿帘片岩
	岩块	超镁铁质岩块	早石炭世	Σ^{c1}	橄榄岩,辉石橄榄岩,异剥辉石岩,蛇纹石化橄榄岩
		镁铁质岩块	早石炭世	zV^{c1}	中粒辉长岩
				xV^{c1}	细粒辉长岩
		玄武质岩块	早石炭世	β^{c1}	玄武岩
		斜长花岗岩岩块	晚石炭世	γ^{c2}	斜长花岗岩
		硅质岩岩块	早石炭世	S^{c1}	硅质岩、硅泥岩
		碳酸盐岩岩块	石炭纪	ls	灰岩
火山岩岩块	早奥陶世	α^{p1}	玄武安山岩、安山质晶屑凝灰岩		

软沉积构造,且伴生有小规模的逆冲断层,沉积混杂和滑塌堆积的特征明显(张进等,2007)。

3.2 岩相学特征

超镁铁质岩块野外多被灰白色蛇纹岩基质包裹,部分基质为强烈变形的硅泥质板岩和绿泥绿帘片岩,两者之间变形程度差异明显,部分块体发生强烈的剪切流变,具右旋“ σ ”型拖尾。超镁铁质岩块岩性包括变质橄榄岩、辉石橄榄岩、异剥辉石岩及蛇纹岩,整体均发生不同程度蚀变。

变质橄榄岩发生不同程度的变形,深灰绿色-灰黑色,主要由蛇纹石(60%)、橄榄石(30%)、菱镁矿(5%~8%)及少量滑石(2%)组成(图3a)。橄榄石多呈假象产出,粒径一般2~4 mm,少部分0.4~2 mm,杂乱分布,被蛇纹石交代;蛇纹石:主要呈纤维状,束状、扇状集合体产出,一般<0.3 mm,少数0.3~0.5 mm,多沿矿物网眼交代。

辉石橄榄岩灰黑色,由单斜辉石(45%~50%)、橄榄石假象(50%)及少量透闪石(2%~3%)组成(图3b),单斜辉石:无色,半自形柱粒状,粒径一般2~4 mm,杂乱分布,具轻微纤闪石化,解理较发育,部分可见晶体弯曲变形现象,少见显微破碎现象,有的可见席勒构造。橄榄石:呈半自形柱粒状,粒径一般2~4 mm,少部分0.4~2 mm,杂乱分布,被蛇纹石交代,呈假象产出。透闪石:无色,半自形-他形柱粒状,粒径一般0.1~0.6 mm,似填隙状分布于单斜辉石、橄榄石假象间。

异剥辉石岩,灰白色,野外较易识别,多呈孤立块体产出,与辉石橄榄岩等伴生。岩石由异剥辉石

(100%)组成(图3c)。异剥辉石:无色,呈半自形柱粒状,粒径一般2~4 mm,部分0.5~2 mm,长轴方向性排列,受片理化作用影响明显,常见晶体弯曲变形、波状消光及显微破碎现象,干涉色二级蓝绿至橙黄,少部分0.1~0.5 mm。岩内见少量透闪石呈网脉状分布并交代岩石。见少量后期显微裂隙分布,被次生石英充填。

蛇纹岩(图3g),原岩为橄榄岩,局部可见橄榄石假象,蛇纹石主要呈纤维状,粒度<0.2 mm,杂乱分布,少部分集合体似放射状、似束状,构成岩石主体,少量可见残余网格结构,岩内见后期碳酸盐充填的网状裂隙。部分蛇纹岩蚀变为透闪石片岩,矿物沿长轴方向性排列,受片理化作用影响明显。

辉长岩岩块,分为中粒辉长岩(浅灰色-灰白色)和细粒辉长岩(深灰色-灰黑色)两种,两者颜色差异较大,野外易于区分,均发生明显的片理化,不同程度蚀变。中粒辉长岩灰白色,主要由斜长石(40%~50%)和辉石(50%~60%)组成(图3d),具微弱堆晶结构。斜长石呈半自形板状,粒度一般为2~5 mm,发育卡钠复合双晶。细粒辉长岩灰黑色,蚀变强烈,主要由斜长石(50%~55%)、辉石(45%~50%)组成,辉石多被阳起石交代,呈假象产出。斜长石:呈近半自形板状,粒径一般0.4~1.7 mm,杂乱似镶嵌状分布,具微弱定向。

玄武岩块蚀变强烈,受构造应力改造明显,部分蚀变为绿泥阳起片岩。岩石呈灰绿色,部分变形较弱块体可见斑状结构,斑晶由斜长石(5%±)、角闪石(5%~10%)组成(图3e),粒径一般0.2~1.3 mm,长

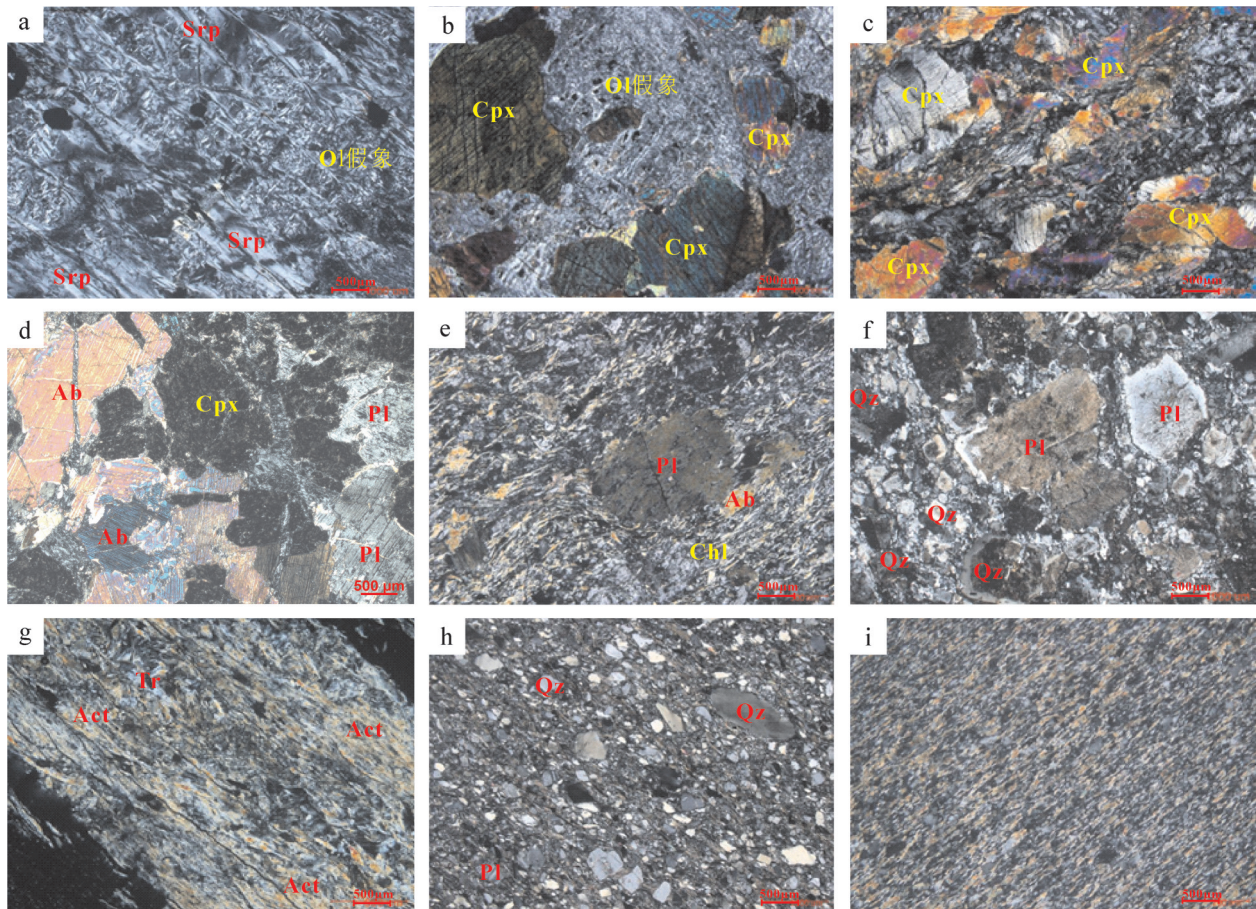


图3 蛇绿混杂岩带中不同块体及基质显微结构照片(正交偏光)

a—变质橄榄岩(岩块);b—辉石橄榄岩(岩块);c—异剥辉石岩(岩块);d—辉长岩(岩块);e—玄武岩(岩块);f—斜长花岗岩(岩块);g—蛇纹岩(基质);h—长石岩屑砂岩(基质);i—硅泥质岩(基质);矿物代号:Srp—蛇纹石;Ol—橄榄石;Cpx—单斜辉石;Ab—角闪石;Pl—斜长石;Chl—绿泥石;Qz—石英;Act—阳起石;Tr—透闪石

Fig.3 Photomicrographs of various blocks and matrix within the Baiheshan ophiolite mélanges belt (cross-polarized light)
a—Metamorphic peridotite (block); b—Pyroxene peridotite (block); c—Diopside pyroxenolite (block); d—Gabbro (block); e—Basalt (block); f—Plagiogranite (block); g—Serpentinite (matrix); h—Sandstone (matrix); i—Siliceous argillaceous rock (matrix); Srp—Serpentine; Ol—Olivine; Cpx—Clinopyroxene; Ab—Amphibole; Pl—Plagioclase; Chl—Chlorite; Qz—Quartz; Act—Actinolite; Tr—Tremolite

轴方向性排列,斜长石呈半自形宽板状,微弱阳起石化,局部绿帘石化,隐约可见聚片双晶,常见晶体弯曲变形及显微破碎现象。基质由斜长石(40%±)、阳起石(45%~50%)组成,长径一般0.02~0.2 mm,少数0.2~0.35 mm,长轴方向性排列,颗粒间镶嵌状,部分可见晶体弯曲变形及波状消光现象。

斜长花岗岩(图3f),灰白色略带浅灰绿色,变余半自形晶结构、糜棱岩化结构,块状构造、定向构造(图3f),岩石主要由斜长石、石英、绿帘石、方解石和副矿物等组成。其中,斜长石含量60%~65%,呈较自形板状,大小(0.05~0.75) mm×1.5 mm,多(0.1~0.75) mm×1.5 mm,较污浊,表面具斜黝帘石

化、绿帘石化、绢云母化等,常见聚片双晶,具定向排列,部分略破碎;石英含量20%~25%,呈他形粒状,大小0.05~0.35 mm,无色,洁净光亮,常构成粒状集合体,具定向排列;绿帘石7%~8%,呈粒状、柱状,高正突起,不均匀异常鲜艳干涉色;方解石含量2%~3%,呈粒状,无色,闪突起,高级白干涉色。

硅质岩(硅质泥岩)(图3i),整体变形较弱,内部发育因剪切流变引起的石英出溶条带和不对称褶皱,见有较多“σ”旋转碎斑系,岩石分灰红色和灰黑色两类,多含泥质,板状或片状构造,岩石由长英质(90%)、绿泥石(5%)、绢云母(5%)组成。长英质,主要为石英,粒径一般0.01~0.08 mm,少数0.08~0.2

mm, 颗粒间多齿状、缝合线状镶嵌, 绿泥石、绢云母、黑云母: 呈微鳞片状, 片径一般 <0.04 mm, 长轴方向性排列, 多相对富集似线痕状分布。

长石岩屑砂岩(图 3h), 变形较强, 多发育紧闭褶皱、无根钩状褶皱等, 岩石浅灰色-深灰色, 由长英质和绢云母组成。长英质: 部分重结晶呈他形粒状, 部分单晶和集合体保留砂粒次圆状外形, 粒度部分 $0.5\sim 1.8$ mm, 杂乱状分布, 具方向性排列; 石英具强波状、带状消光, 长石包括单晶斜长石和少量单晶钾长石, 主为单晶斜长石, 具绢云母化、高岭土化, 少量可见双晶弯曲、错位现象; 绢云母呈微鳞片状, 片径一般 <0.1 mm, 集合体相对富集呈线痕状定向排列, 可能为黏土质杂基变质的产物。

3.3 构造变形特征

大比例尺填图结果显示, 百合山蛇绿混杂岩带变形强烈, 发育三期褶皱构造和与之配套的断裂构造, 其中前两期褶皱构造变形具透入性面理, 第三期构造变形层次较浅, 未形成透入性面理; 断裂则以叠瓦状逆冲断层和双重逆冲构造为主, 这种构造样式与藏北羌塘中部增生杂岩及拉脊山口增生楔非常一致(王根厚等, 2009; 付长垒等, 2018)。

百合山蛇绿混杂岩带中第一期变形以中深构造层次的韧性流变为主, 形成了第一期以NW-SE向和近E-W向为主构造行迹的韧性剪切变形。该期变形形成透入性韧性剪切面理 S_1 , 并使得硅质岩中同构造石英脉发育不对称拖尾及“ σ ”型旋转碎斑(图 4a、4c); 同时由于次生的剪溶或压溶作用而在碎屑岩(浊积岩)和硅质(泥)岩中形成密集的变质分异条带(图 4b), 形成“假纹层”构造。在岩块和基质组成的系统中, 则表现为岩块在基质内部旋转, 呈现明显的定向性, 尾部常伴随拖尾, 指示“右”型剪切特征, 基质多发生强烈片理化, 围绕岩块分布, 在尾部则随岩块同步变形, 形成露头尺度的“旋转碎斑系”(图 2d、f、g、h)。总体上, 第一期韧性剪切变形塑造了蛇绿混杂岩带的内部结构和混杂样式, 应代表了洋壳俯冲期的强剪切变形。第二期变形以NE-SW向挤压引起的收缩变形为主, 在浅变质碎屑岩中形成了大量波长在厘米、分米级的褶皱, 褶皱形态多为紧闭褶皱(图 4e)、不对称斜歪褶皱和无根褶皱(图 4d), 紧闭褶皱翼间角在 $0\sim 30^\circ$, 枢纽走向NW, 在砂板岩中常见因能干性不一致而在转折

端形成“M”型褶皱(图 4e); 无根褶皱在露头尺度多表现为早期面理的再褶皱, 褶皱两翼减薄或拉断, 转折端加厚, 轴面常与片理面平行(图 4d)。而在能干性相对较强且厚度较大的硅质岩中则以尺度在几十米至几百米的中常-等厚褶皱为主。第三期变形以浅构造层次的脆性变形为主, 主要表现为早期面理再褶皱形成的枢纽近于直立的倾竖褶皱, 且局部表现为小型膝折并伴有脆性破裂(图 4h)。

区域上, NE向清河沟断裂穿过蛇绿混杂岩带, 且分割了西侧增生杂岩与石炭纪白山组(图 1b), 该断层与蛇绿混杂岩带内片理面截切, 断层经过区域可见早期片理面(劈理面)发生明显的北向弯曲(与第三期构造变形对应), 且其切割的最新地质体为中二叠世辉长岩。以上说明, 清河沟断裂形成时代较晚, 明显晚于蛇绿混杂岩带内褶皱和断裂形成时间, 根据早期片理面变形特征及辉长岩错动方位判断该期断层具左型走滑特征。因此, 可以推测百合山蛇绿混杂岩带受到该期NE向断裂的叠加改造。

4 百合山蛇绿混杂岩带南侧明水岩浆弧组成

红石山-百合山蛇绿混杂岩带南侧沿明水-旱山地块北缘大面积分布晚古生代岩浆岩, 其西接东天山康古尔塔格断裂南缘的雅满苏弧, 向东延入内蒙古巴丹吉林沙漠中, 南北宽大于 40 km, 东西延伸超过 400 km, 包括石炭纪白山组火山岩和与之配套的同期侵入岩类, 区域上将其称为明水岩浆弧(白山岩浆弧)。该岩浆弧在区内沿百合山蛇绿混杂岩带南侧呈NW-SE向条带状展布, 东西向延伸大于 20 km, 主要由白山组火山岩及同质的火山碎屑岩和石炭纪一早二叠世中酸性侵入岩组成。空间上, 白山组火山岩紧邻百合山蛇绿混杂岩带南侧产出, 包括一段中性火山岩段和二段酸性火山岩及火山碎屑岩段, 同期的侵入岩类呈带状分布于白山组火山岩南侧, 两者之间为侵入接触关系。

白山组火山岩在研究区呈NW向条带状展布, 为一套海陆过渡相中酸性火山岩, 岩性主要为灰黑色玄武安山岩、灰紫色安山岩、灰白色流纹岩、浅灰色英安岩及同质的火山碎屑岩, 时代为 ~ 318 Ma, 整体表现出岛弧火山岩性质。区域上, 白山组火山岩沿甘蒙交界的双红山、大红山一带, 向东经清河沟、

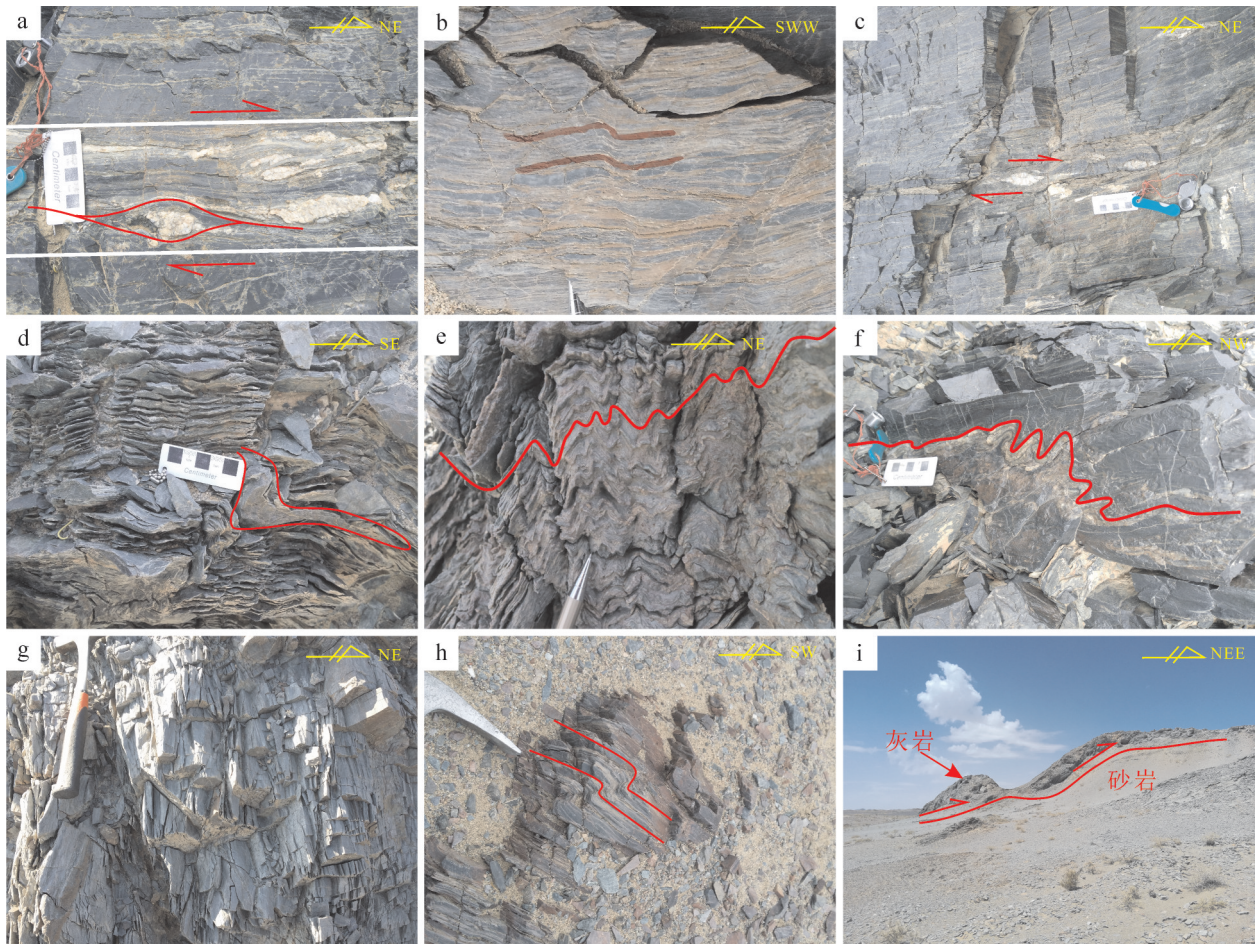


图4 百合山蛇绿混杂岩带变形特征

a-c—早期韧性流变引起的“σ”型眼球及强糜棱岩化带；d—砂板岩中形成的无根钩状褶皱；e—砂板岩中转折端形成的“M”型小褶皱；f—早期石英脉因强烈挤压形成的肠状褶皱；g—粉砂岩中形成的杆状构造；h—最晚期变形引起的膝折（脆性）；i—灰岩与砂岩中逆冲断层

Fig.4 Deformation characteristics of the Baiheshan ophiolite mélanges belt

a-c—Eyeball structures and strong mylonitization zone by the ductile shearing in the depth; d—The “M” type small fold of sandstone in the thickened bending; f—Ptygmatic folding within the quartz vein; g—Rod structure in the siltstone; h—Kink fold by last deformation; i—Thrust fault within the limestone and sandstone

哈珠地区延至额济纳旗以北的黑红山、风雷山一带，断续出露达200 km，整体为一套钙碱性岩石组合，岩性主要为安山岩、流纹岩、英安岩和同质的火山碎屑岩，成岩时代集中在299~325 Ma(贾元琴等, 2016; 任云伟等, 2019)，具陆缘弧火山岩地球化学特征(黄增保和金霞, 2006; 贾元琴等, 2016; 任云伟等, 2019)。

区内侵入岩类岩性包括花岗闪长岩-英云闪长岩-奥长花岗岩等TTG岩石组合以及二长花岗岩-正长花岗岩等GG岩石组合，此外，还零星分布有石英闪长岩、闪长岩等侵入体。空间上，该套侵入体与白山组火山岩相伴产出，沿红石山-百合山蛇绿混杂岩带南侧大红山、清河沟、哈珠、独龙包、交叉沟等地大

面积分布。区域上，该套侵入岩主体为一套钙碱性岩石组合，分布于哈珠地区的花岗岩类形成时代集中在308~320 Ma， T_{DM}° 主要集中于450~800 Ma，岩浆来源于新生地壳的部分熔融，形成于陆缘弧环境(李敏等, 2018)，与形成于独龙包、交叉沟等地的花岗岩类形成时代(303~306 Ma)及其构造背景均一致(赵志雄等, 2015, 2018)，均为红石山-百合山洋盆俯冲过程中形成的陆缘弧岩浆岩组合。

5 斜长花岗岩形成时代

为了确定洋盆的演化时限，本文选取斜长花岗岩块体进行锆石U-Pb测年。斜长花岗岩采自百合山蛇绿混杂岩带内(采样坐标：N42°28′5.96″，E98°5′

4.94”)。单矿物锆石分选工作由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。样品按照常规粉碎淘洗后,经磁选和重液分离,然后在双目镜下人工挑选纯度在99%以上的锆石。锆石的制靶和透射光、反射光、阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司完成。样品测年工作在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成,采用LA-MC-ICP-MS进行锆石U-Pb同位素定年,激光烧蚀多接收器等离子质谱仪由美国ESI公司NEW WAVE 193nm FX激光器和美国赛默飞世尔公司NEPTUNE多接收器等离子质谱组成,型号为Agilent 7500a,分析中采用的激光束斑直径为35 μm,以氦气作为剥蚀物质的载气,分析流程和测试数据的计算处理采用ISOPLLOT 3.0程序完成(Ludwing, 2003)。

斜长花岗岩锆石晶形整体较好,多呈较自形短柱状,部分呈粒状,大小中等,粒径多在80~200 μm,多数锆石锥面发育,柱面相对不发育,内部可见细密振荡环带发育(图5),为岩浆锆石的特征。本次测试共采集30个样品点,测试数据如表2所示。所有样点的Th/U比值均>0.4,平均值高达0.84,为典型岩浆锆石特点。除一个测点由于Pb丢失偏离谐和线外,其余测点均落在谐和线上。从年龄分布谐和图上可以看出,斜长花岗岩年龄信息存在4个密

集分布区(图5,表2)。其中,测点10、21、24号²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值(433.0±5) Ma,测点2、12、17、27、29号²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值(393.0±3.4) Ma,这两个年龄可能代表了捕获的早古生代老锆石年龄,这与研究区百合山蛇绿混杂岩带北侧大面积分布早古生代地层等地质事实一致。测点13、19、30号²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值(342.4±3.9) Ma,与红石山蛇绿岩中辉长岩的年龄信息一致(王国强等,2014),代表了早期洋壳的形成时代,剩余18个测点的加权平均年龄为(297.3±1.5) Ma,代表了斜长花岗岩的成年年龄。

6 讨论

6.1 百合山蛇绿混杂岩带的形成过程

大洋板块地层(OPS)是指大洋岩石圈从洋中脊扩张中心开始直到海沟俯冲完成这段时间内,在洋壳基底之上形成的火山-沉积地层序列,通常包括洋盆和活动陆缘两大类地层建造(张克信等,2016;闫臻等,2018)。一般认为,大洋岩石圈岩浆岩和沉积岩序列共同构成了理想的彭罗斯蛇绿岩层序,其主要由方辉橄榄岩、超基性堆晶岩、辉长岩、席状岩墙、枕状玄武岩和远洋沉积物质组成(Anonymous, 1972),而枕状玄武岩(MORB、OIB)和远洋沉积物

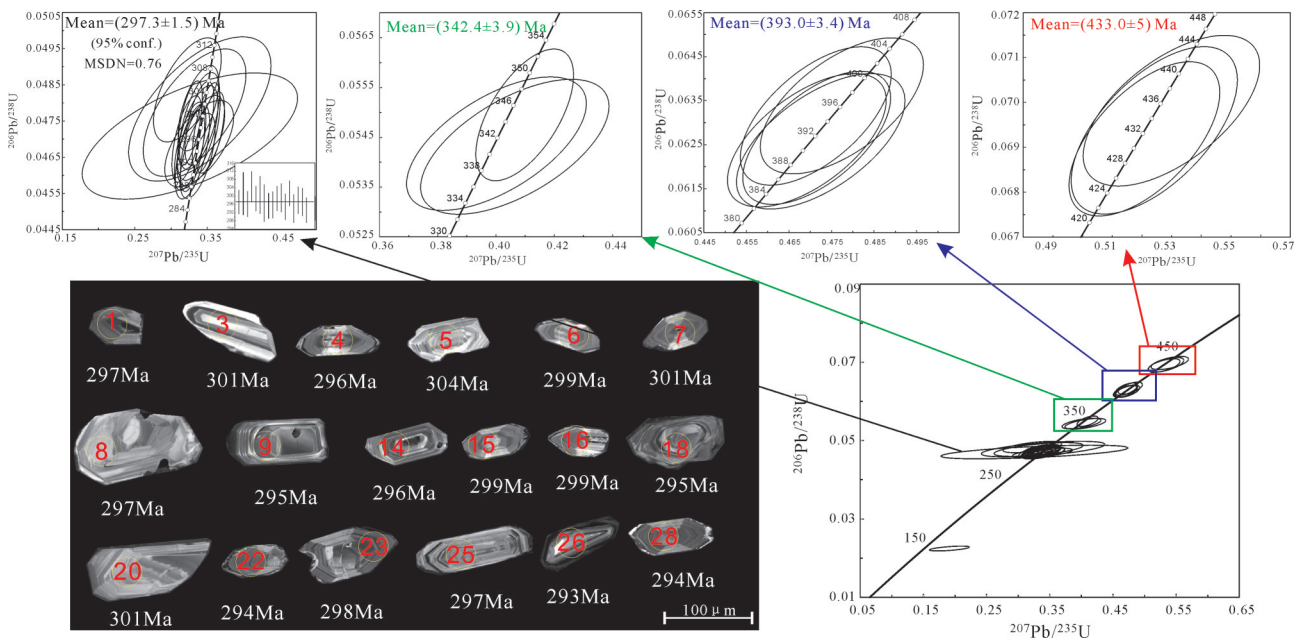


图5 斜长花岗岩锆石阴极发光图像及年龄谐和曲线

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images and LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of zircons from plagiogranite within the Baiheshan ophiolite mélanges belt

表2 百合山地区斜长花岗岩LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of plagiogranite within the Baiheshan ophiolite mélanges belt

样品号	元素含量/ 10^{-6}		同位素比值						年龄/Ma				
	U	Th	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
TW5804.3													
Sam.1	233	48	0.2052	0.0472	0.0005	0.3539	0.0080	0.0544	0.0012	297	3	308	7
Sam.2	349	122	0.3508	0.0634	0.0006	0.4774	0.0078	0.0546	0.0008	396	4	396	7
Sam.3	105	56	0.5289	0.0478	0.0008	0.3396	0.0400	0.0515	0.0058	301	5	297	35
Sam.4	224	50	0.2234	0.0470	0.0005	0.3218	0.0084	0.0497	0.0012	296	3	283	7
Sam.5	178	93	0.5225	0.0484	0.0006	0.3225	0.0190	0.0484	0.0028	304	4	284	17
Sam.6	242	66	0.2726	0.0474	0.0005	0.3262	0.0069	0.0499	0.0010	299	3	287	6
Sam.7	137	34	0.2446	0.0477	0.0007	0.3324	0.0289	0.0505	0.0043	301	5	291	25
Sam.8	144	47	0.3266	0.0471	0.0007	0.3259	0.0606	0.0502	0.0090	297	4	286	53
Sam.9	286	74	0.2583	0.0469	0.0005	0.3387	0.0194	0.0524	0.0029	295	3	296	17
Sam.10	178	90	0.5073	0.0692	0.0007	0.5308	0.0104	0.0556	0.0010	431	4	432	8
Sam.11	114	73	0.6368	0.0225	0.0002	0.1912	0.0129	0.0618	0.0042	143	2	178	12
Sam.12	449	57	0.1274	0.0627	0.0006	0.4715	0.0071	0.0546	0.0007	392	4	392	6
Sam.13	144	88	0.6118	0.0544	0.0005	0.4001	0.0126	0.0534	0.0016	341	3	342	11
Sam.14	245	103	0.4224	0.0470	0.0005	0.3410	0.0134	0.0527	0.0020	296	3	298	12
Sam.15	214	45	0.2085	0.0474	0.0005	0.3391	0.0081	0.0518	0.0012	299	3	297	7
Sam.16	345	89	0.2576	0.0475	0.0005	0.3392	0.0113	0.0518	0.0015	299	3	297	10
Sam.17	330	104	0.3157	0.0626	0.0006	0.4692	0.0076	0.0544	0.0008	391	4	391	6
Sam.18	321	234	0.7267	0.0468	0.0005	0.3261	0.0089	0.0505	0.0013	295	3	287	8
Sam.19	299	179	0.5991	0.0550	0.0005	0.4098	0.0068	0.0541	0.0008	345	3	349	6
Sam.20	146	50	0.3423	0.0479	0.0005	0.3378	0.0114	0.0512	0.0017	301	3	295	10
Sam.21	196	66	0.3354	0.0698	0.0007	0.5399	0.0121	0.0561	0.0012	435	4	438	10
Sam.22	281	44	0.1554	0.0467	0.0005	0.3294	0.0097	0.0512	0.0015	294	3	289	8
Sam.23	343	79	0.2305	0.0473	0.0005	0.3485	0.0078	0.0534	0.0011	298	3	304	7
Sam.24	234	38	0.1643	0.0694	0.0008	0.5341	0.0114	0.0558	0.0011	432	5	435	9
Sam.25	204	88	0.4307	0.0472	0.0005	0.3367	0.0115	0.0518	0.0014	297	3	295	10
Sam.26	158	83	0.5253	0.0465	0.0005	0.3365	0.0099	0.0524	0.0015	293	3	295	9
Sam.27	398	21	0.0535	0.0632	0.0006	0.4713	0.0072	0.0541	0.0007	395	4	392	6
Sam.28	243	43	0.1748	0.0467	0.0005	0.3294	0.0068	0.0512	0.0010	294	3	289	6
Sam.29	236	196	0.8302	0.0626	0.0006	0.4725	0.0081	0.0548	0.0009	391	4	393	7
Sam.30	110	45	0.4095	0.0543	0.0006	0.4064	0.0132	0.0543	0.0017	341	3	346	11

质(远洋硅质岩、半远洋硅质页岩、泥岩、灰岩及海沟浊积岩)则构成了相对完整的OPS剖面(Wakita et al., 2005; Kusky et al., 2013)。大洋岩石圈上部火山-沉积地层(OPS)通常被认为是增生杂岩的主要组成物质,而大洋岩石圈下部岩浆岩序列则被认为构成了蛇绿混杂岩的主要组成(闫臻等, 2018)。它们的形成过程实质上就是大洋岩石圈“蛇绿岩地层序列”和大洋板块地层(OPS)在俯冲带位置的肢解和重新排列过程,其物质组成和结构特征共同记录了大洋板块产生和俯冲消亡以及大陆地壳增长和壳-幔相互作用的地球动力学过程(闫臻等, 2018;

李廷栋等, 2019)。

在古洋壳俯冲过程中,蛇绿岩和大洋板块地层(OPS)在俯冲带上盘常遭受底侵、刮削和底辟作用而发生强烈改造和破坏,进一步发生位移、肢解和混杂,从而形成不同类型的混杂岩(蛇绿混杂岩、沉积混杂岩、构造混杂岩和底辟混杂岩)。这些混杂岩通常表现为“整体无序局部有序”的空间结构特征和“块体裹挟基质”的物质组成特征(Strasser et al., 2009; 潘桂棠等, 2019)。蛇绿混杂岩的就位过程可以分为俯冲、仰冲和碰撞三种形式,而俯冲刮削就位的蛇绿混杂岩通常变质程度低,发育典型的

叠瓦状逆冲构造,且部分逆冲片段可能相对完整地记录了OPS某一位序“片段”的时空结构,主要体现在顺着俯冲方向,蛇绿岩的形成时代具有逐渐年轻的特征(闫臻等,2018;王国灿等,2019)。因此,蛇绿混杂岩带组成、结构及变形变质作用的精细研究,可为古板块构造和大洋板块地层重建提供直接证据。

百合山蛇绿混杂岩带主要由超镁铁质岩、辉长岩、玄武岩、灰红色和灰黑色硅质岩、硅质泥岩、灰岩、砂板岩组成,其中包括了远洋沉积序列(灰红色和灰黑色硅质岩、硅质泥岩)和半深海浊积岩(砂板岩)。而其中的蛇绿混杂岩则主要是由蛇纹岩基质裹挟变质橄榄岩、辉石橄榄岩以及斜长辉石岩组成,增生杂岩中混杂岩则是由砂板岩基质裹挟洋壳残块(超镁铁质岩、辉长岩、玄武岩、斜长花岗岩等)和外来岩块(奥陶纪火山岩、灰岩)组成,在局部地段可见到由碳酸盐台地相灰岩和浊积岩组成的沉积混杂岩块体。笔者对百合山蛇绿混杂岩中斜长花岗岩所测的时代为(297.3±1.5) Ma,辉长岩形成时代在344 Ma左右(牛文超等,待刊)。结合已有的研究资料,笔者认为北山北部红石山—百合山地区在石炭纪(344~297 Ma)存在古洋盆,在洋盆俯冲消减过程中,大洋岩石圈物质组成(蛇绿岩、玄武岩、远洋沉积物等)也随同古洋盆一同发生俯冲、消减,并在仰冲板块前端遭受持续的底侵、刮削和底辟作用,同时随着俯冲的继续发生侧向加积、堆垛,进而形成了由蛇绿岩、远洋—半远洋沉积(OPS)、(半)深海浊积岩以及海沟滑塌堆积共同组成的蛇绿混杂岩带。

6.2 北山北部洋盆俯冲时限及晚古生代大地构造格局

蛇绿混杂岩被认为是增生型和碰撞型造山带的重要组成部分,其形成和就位过程与造山事件密切相关(闫臻等,2018;王国灿等,2019;潘桂堂等,2019)。北山造山带自南向北存在4条蛇绿混杂岩(超基性岩)带(辉铜山—柳园蛇绿混杂岩带、红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带、石板井—小黄山超基性岩带和红石山—百合山蛇绿混杂岩带)。前人通过对不同蛇绿混杂岩带构造属性的研究认为,古亚洲洋在北山南部的演化自早寒武世就已开始(Ao et al., 2012),并且经历了完整的早古生代沟—弧—盆体系演化(杨合群等,2010; Xiao et al., 2010;

李向民等,2012; Tian et al., 2014; Song et al., 2015, 2018)。而对于北山北部构造格局,特别是晚古生代(石炭—二叠纪)构造背景和构造演化,一直以来存在不同认识:(1)古亚洲洋在北山北部于早石炭世末期闭合,晚石炭世—二叠纪该区进入陆内裂谷演化阶段(刘雪亚和王荃,1995);(2)古亚洲洋在北山北部的闭合时间在中泥盆世,该区石炭—二叠纪为板内(陆内)演化阶段(左国朝等,1990;何世平等,2005;杨合群等,2010;王国强等,2014;卢进才等,2018);(3)北山北部石炭—二叠纪为洋陆演化阶段,古亚洲洋在该区的最终消亡时间为二叠纪,在长期的洋陆演化过程中形成了包括大洋、岛弧、弧后盆地等不同构造背景的地质体(Xiao et al., 2010; Song et al., 2015; 任云伟等,2019)。从以上争议可以看出,北山北部洋盆闭合时限的精确厘定对于了解北山造山带晚古生代构造演化和大地构造格局具有重要意义。

蛇绿岩可以形成于大洋岩石圈演化的各个阶段,而其组成单元中不同类型岩浆岩的精确定年对于揭示洋壳俯冲时限和造山带演化具有重要意义(简平等,2003)。蛇绿混杂岩带是由不同时代地质体经历混杂、叠置和构造置换作用而形成,其整体时空范畴具有“单向有限”的特征(王根厚等,2009)。前人对红石山地区蛇绿(混杂)岩中辉长岩测得锆石U-Pb年龄集中在357~346 Ma(王国强等,2014; Shi et al., 2017),本次笔者在百合山蛇绿混杂岩带辉长岩中也获得了(344.6±1.8) Ma的锆石U-Pb年龄,揭示红石山—百合山洋盆在早石炭世早期或更早就已开启。百合山斜长花岗岩呈岩块产于蛇绿混杂岩带中,野外可见强烈构造变形,石英等矿物定向明显,表明其经受了百合山洋盆俯冲消减作用的改造。该斜长花岗岩具有高Sr、低Y和高Sr/Y比值等埃达克质岩石的地球化学特征,这种特征的斜长花岗岩通常被认为是洋壳板块在俯冲过程中部分熔融的产物(Gillis and Coogan, 2002; France et al., 2010),其形成时代往往晚于蛇绿岩的形成时代(简平等,2003;彭银彪等,2018)。百合山地区斜长花岗岩锆石U-Pb年龄为(297.3±1.5) Ma,为蛇绿混杂岩带中最年轻的块体,代表了洋盆俯冲拼贴的时代下限(Xiao et al., 2017)。

区域上,百合山蛇绿混杂岩带南侧哈珠地区露出一套碱长花岗岩,锆石U-Pb年龄为(289±1.3)

Ma,形成于后碰撞伸展环境(李敏等,2019)。同时,研究区黑高山一带出露有一套细粒辉长岩,锆石U-Pb年龄为(278.2±1.3) Ma,与同期形成的正长花岗岩共同构成了双峰式岩浆岩。以上事实表明,北山造山带北部在早二叠世中晚期处于伸展构造体制。此外,代表残余海盆相沉积的双堡塘组(P_{1-2S})在研究区西北部大红山神螺滩一带角度不整合覆盖于石炭纪白山组之上,底部发育代表沉积间断的底砾岩,也进一步表明北山北部造山演化结束于早一中二叠世。结合蛇绿混杂岩中辉长岩344~357 Ma的锆石U-Pb年龄(王国强等,2014; Shi et al., 2017)以及斜长花岗岩块体约297 Ma的形成时代,笔者认为红石山—百合山所代表的洋盆开启时间在早石炭世早期或更早,而最终闭合时间在297~280 Ma,即早二叠世中晚期。

百合山蛇绿混杂岩带为北山造山带最北侧的一条蛇绿混杂岩带,从前述分析可知,其为典型的洋壳俯冲型蛇绿混杂岩带。蛇绿混杂岩主要由变质橄榄岩、辉石橄榄岩、异剥辉石岩、蛇纹岩、辉长岩、玄武岩和斜长花岗岩组成,且地球化学特征显示SSZ型蛇绿岩特征。区域上,红石山—百合山蛇绿混杂岩带南侧广泛分布的晚石炭世明水岩浆弧为一套钙碱性岩浆岩组合,形成于与俯冲相关的陆缘弧环境,为红石山—百合山洋盆向南侧明水—早山地块俯冲消减的产物(赵志雄等,2015,2018;贾元琴等,2016)。同时,白山组火山岩由北向南(远离蛇绿混杂岩带方向)具有从中性火山岩(钙碱性系列)→酸性火山岩(高钾钙碱性系列)的演化趋势,指示了洋盆向南俯冲的极性(任云伟等,2019),而与之相伴生的侵入岩类(英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等)也具有与火山岩相似的地球化学极性(李敏等,2018)。空间上,百合山蛇绿(混杂)岩仰冲并叠置于增生杂岩(增生楔)之上,并与增生杂岩(增生楔)共同仰冲于半深水浊积岩(绿条山组)之上,代表了俯冲带的上盘。以上事实说明,红石山—百合山洋盆在晚石炭世向南侧明水—早山地块俯冲,蛇绿混杂岩带代表了洋壳俯冲消减的遗迹,而其南侧广泛分布的石炭—二叠纪明水岩浆弧则是与俯冲碰撞相关的强烈岩浆活动的产物,两者共同构成了北山北部石炭—二叠纪相对完整的沟—弧体系。

7 结 论

(1)百合山蛇绿混杂岩带主要由超镁铁—镁铁质岩(变质橄榄岩、辉石橄榄岩、异剥辉石岩、蛇纹岩)、辉长岩、玄武岩、斜长花岗岩、硅质岩等洋壳残块以及奥陶纪火山岩、灰岩等外来岩块和蛇纹岩、砂板岩、绿泥绿帘片岩等基质组成,发育逆冲断层、双重逆冲构造、紧闭褶皱、无根褶皱和透入性面理;同时在混杂岩带内发育由碳酸盐台地相灰岩和半深海浊积岩组成的增生楔,具典型的滑塌堆积特征。

(2)蛇绿混杂岩带南侧广泛分布的由石炭纪白山组火山岩和同期的侵入岩类(花岗闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩、英云闪长岩等)组成的明水岩浆弧,时代集中在299~325 Ma,代表了红石山—百合山洋盆向南侧明水—早山地块俯冲形成的陆缘弧岩浆岩带。

(3)百合山蛇绿混杂岩带所代表的洋盆在早石炭世早期(344~357 Ma)就已打开,最终闭合时间在早二叠世中晚期,其与南侧的明水岩浆弧共同构成了北山造山带北部石炭—二叠纪的沟—弧体系,指示了洋盆向南俯冲的极性。

致谢:中国地质调查局天津地质调查中心赵凤清研究员对本文的初稿进行了审阅,匿名审稿专家和郝梓国主编对本文提出了很多中肯的修改意见,让本文得到了很大的提升,在此一并致以诚挚的感谢。中国地质调查局基础部区调处公王斌在本文的写作过程当中给予了很多帮助,李奎芳、张超、任邦方、张永参加了部分野外工作,在此一并致以谢意!

注释

①牛文超,辛后田,段连峰,赵泽霖,张国震,张永,任邦方. 2018. 内蒙古1:5万清河沟幅区域地质矿产图.

References

- Anonymous. 1972. Penrose field conference on ophiolites[J]. *Geotimes*, 17: 24-25.
- Ao S J, Xiao W J, Han C M, Li X H, Qu J F, Zhang J E, Guo Q Q, Tian Z H. 2012. Cambrian to early Silurian ophiolite and accretionary processes in the Beishan collage, NW China: Implications for the architecture of the Southern Altai[J]. *Geological Magazine*, 149: 606-625.
- Agard P, Yamato P, Monié P, Burov E. 2009. Timing and mechanisms of oceanic blueschist and eclogite exhumation: Implications for

- subduction mechanics[J]. *Agu Fall Meeting Abstracts*, 92(1/2): 53–79.
- Buchan C, P fander J, Kroner A, Brewer T S, Tomurtogoo O, Tomurhuu D, Cunningham D, Windley B F. 2002. Timing of accretion and collisional deformation in the Central Asian Orogenic Belt: Implications of granite geochronology in the Bayankhongor ophiolite zone[J]. *Chemical Geology*, 192 (1/2): 23–45.
- Cawood P A, Kroner A. 2009. Earth accretionary orogens in space and time[J]. *Geological Society of London Special Publication*, 318: 1–36.
- Cleven N R, Lin S F, Xiao W J. 2015. The Hongliuhe fold–and–thrust belt: Evidence of terminal collision and suture–reactivation after the Early Permian in the Beishan orogenic collage, Northwest China[J]. *Gondwana Research*, 27(2): 796–810.
- Dilek Y, Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123: 387–411.
- Dilek Y, Furnes H. 2014. Ophiolites and Their Origins[J]. *Elements*, 10 (2): 93–100.
- France L, Koepke J, Ildefonse B, Cichy S B, Deschamps F. 2010. Hydrous partial melting in the sheeted dike complex at fast spreading ridges: Experimental and natural observations[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(5): 683–704.
- Gillis K M, Coogan L A. 2002. Anatectic migmatites from the roof of an ocean ridge magma chamber[J]. *Journal of Petrology*, 43(11): 2075–2095.
- He Shiping, Zhou Huiwu, Ren Bingchen, Yao Wenguang, Fu Lipu. 2005. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China[J]. *Northwestern Geology*, 38 (3): 6–15 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zengbao, Jin Xia. 2006. Geological characteristics and its setting for volcanic rocks of Baishan Formation in Hongshishan area of Gansu Province[J]. *Gansu Geology*, 15(1): 19–24 (in Chinese with English abstract).
- Jia Yuanqin, Zhao Zhixiong, Xu Hai, Wang Xinliang, Liu Qiang, Wang Jinrong. 2016. Zircon LA–ICP–MS U–Pb dating of and tectonic setting of rhyolites from Baishan Formation in Fengleishan area of the Beishan orogenic belt[J]. *Geology in China*, 43 (1): 91–98 (in Chinese with English abstract).
- Jian Ping, Liu Dunyi, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Shi Guanghai, Zhang Lvqiao, Tao Hua. 2003. Shrimp dating of ophiolite and leucocratic rocks within ophiolite[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 439–456 (in Chinese with English abstract).
- Festa A, Dilek Y, Pini G A, Codegone G. 2012. Mechanisms and processes of stratal disruption and mixing in the development of mélanges and broken formations: Redefining and classifying mélanges[J]. *Tectonophysics*, 568/569: 7–24.
- Fu Changlei, Yan Zhen, Wang Zongqi, Niu Manlan, Guo Xianqing, Yu Liangjun, Li Jiliang. 2018. Texture and composition of the Lajishankou accretionary wedge of the South Qilian belt, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 2049–2064 (in Chinese with English abstract).
- Kröner A, Windley B F, Badarch G, Tomurtogoo O, Hegner E, Jahn B M, Gruschka S, Khain E V, Demoux A, Wingate M T D. 2007. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian–Nubian–Shield[J]. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 200: 181–209.
- Kusky T, Windley B, Safonova I, Wakita K, Wakabayashi J, Polat A, Santosh M. 2013. Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: A record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion[J]. *Gondwana Research*, 24: 501–547.
- Li Min, Ren Bangfang, Teng Xuejian, Zhang Yong, Duan Xiaolong, Niu Wenchao, Duan Lianfeng. 2018. Geochemical characteristics, Zircon U–Pb age and Hf isotope and geological significance of granitoid in Beishan Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 43(12): 4586–4605 (in Chinese with English abstract).
- Li Min, Xin Houtian, Ren Bangfang, Ren Yunwei, Zhang Kuo, Duan Xiaolong, Niu Wenchao, Duan Lianfeng. 2019. Petrogenesis and structure significance of Late Palaeozoic granitoids in Hazhu area, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 44(1): 328–343 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiangmin, Yu Jiyuan, Wang Guoqiang, Wu Peng. 2012. Geochronology of Jijitaizi ophiolite of Beishan area, Gansu Province, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31 (12): 2025–2031 (in Chinese with English abstract).
- Li Tingdong, Xiao Qinghui, Pan Guitang, Lu Songnian, Ding Xiaozhong, Liu Yong. 2019. A consideration about the development of Ocean Plate Geology[J]. *Earth Science*, 44(5): 1441–1451 (in Chinese with English abstract).
- Lister G, Forster M. 2009. Tectonic mode switches and the nature of orogenesis[J]. *Lithos*, 113: 274–291.
- Liu Xueya, Wang Quan. 1995. Tectonics of the orogenic belts in Beishan Mts., western China and their evolution[J]. *Geological Research*, 28: 37–48 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jincai, Shi Jizhong, Niu Yazhuo, Song Bo, Zhang Yuxuan, Yu Long. 2018. The Carboniferous–Permian sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Beishan–Yin’e region, western Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10): 3101–3115 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. *Isoplot/Ex, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Version 3.00*[J]. Berkeley Geochronology Center. Special Publication, 4: 1–43.
- Moore J C, Silver E A. 1987. Continental margin tectonics: Submarine accretionary prisms[J]. *Reviews of Geophysics*, 25(6): 1305–1312.
- Niu Wenchao, Ren Bangfang, Ren Yunwei, Sun Lixin, Duan Xiaolong, Duan Lianfeng, Li Min, Zhang Jiahui. 2017. Discovery of

- Neoproterozoic Gneissic Granite from the Beishan area, Inner Mongolia: Zircon U–Pb Chronologic Evidence[J]. *Geology in China*, 44(2): 409–410(in Chinese with English abstract).
- Niu Wenchao, Ren Bangfang, Ren Yunwei, Duan Xiaolong, Duan Lianfeng, Sun Lixin, Li Min, Zhang Jiahui. 2019. Neoproterozoic magmatic records in the north Beishan Orogenic Belt: Evidence of the gneissic granites from the Hazhu area, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 44(1):284–297(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhi Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2008. Definition, classification, characteristics and diagnostic indications of tectonic facies[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1614–1637(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Zhang Kexin, Yin Fuguang, Ren Fei, Peng Zhimin, Wang Jiakuan. 2019. Recognition of the oceanic Subduction–Accretion Zone from the orogenic belt in continents and its important scientific significance[J]. *Earth Science*, 44(5): 1544–1561(in Chinese with English abstract).
- Peng Yinbiao, Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Li Sanzhong, Sun Deyou. 2018. Timing of Early Paleozoic oceanic crust subduction in North Altun: Evidence from plagiogranite and granodiorite[J]. *Geology in China*, 45(2): 334–350(in Chinese with English abstract).
- Ren Bangfang, Ren Yunwei, Niu Wenchao, Duan Lianfeng, Sun Lixin, Li Min, Tian Jian, Duan Xiaolong, Zhang Yongqing. 2019. Zircon U–Pb ages and Hf isotope characteristics of the volcanic rocks from Queershan group in the Hazhudongshan area of Beishan, Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Earth Science*, 44(1): 298–311(in Chinese with English abstract).
- Ren Yunwei, Ren Bangfang, Niu Wenchao, Sun Lixin, Li Min, Zhang Kuo, Zhang Jiahui, Duan Lianfeng. 2019. Carboniferous volcanics from the Baishan formation in the Hazhu Area, Inner Mongolia: Implications for the Late Paleozoic active continental margin magmatism in the Northern Beishan[J]. *Earth Science*, 44(1) 312–327(in Chinese with English abstract).
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364:299–307.
- Shi Y R, Li L L, Krner A, Ding J, Zhang W, Huang Z B, Jian P. 2017. Carboniferous Alaskan–type complex along the Sino–Mongolian boundary, southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Acta Geochimica*, 36(2):1–15.
- Shervais J W, Choi S H, Sharp W D, Ross J, Zogman–Schuman M, Mukasa S B. 2011. Serpentinite matrix mélange: Implications of mixed provenance for mélange formation[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 480: 1–30.
- Song D F, Xiao W J, Windley B F, Han C M, Tian Z H. 2015. A Paleozoic Japan–type subduction–accretion system in the Beishan orogenic collage, Southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 224–225: 195–213.
- Song D F, Xiao W J, Han C M, Tian Z H, Li Y C. 2018. Accretionary processes of the central segment of Beishan: Constraints from structural deformation and ⁴⁰Ar–³⁹Ar geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 2087–2098(in Chinese with English abstract).
- Michael S, Gregory F M, Gaku K, Yujin K, Achim J K, Siegfried L, JinOh P, Elizabeth J S, Xin Su, Michael B U, Xixi Zhao. 2009. Origin and evolution of asplay fault in the Nankai accretionary wedge[J]. *Nature Geoscience*, 2:648–652.
- Sun Lixin, Zhang Jiahui, Ren Bangfang, Niu Wenchao, Ren Yunwei, Zhang Kuo. 2017. Geochemical characteristics and U–Pb age of Baiyunshan ophiolite mélange in the Beishan Orogenic Belt and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 131–147(in Chinese with English abstract).
- Tian Z H, Xiao W J, Windley B F, Lin L N, Han C M, Zhang J E, Wan B, Ao S J, Song D F, Feng J Y. 2014. Structure, age and tectonic development of the Huoshishan–Niujuanzi ophiolitic mélanges, Beishan, southernmost Altaids[J]. *Gondwana Research*, 25(2): 820–841.
- Wakabayashi J, Dilek Y. 2011. Introduction: Characteristics and tectonic settings of mélanges, and their significance for societal and engineering problems[J]. *The Geological Society of America Special Paper*, 480.
- Wakabayashi J. 2015. Anatomy of a subduction complex: Architecture of the Franciscan complex, California, at multiple length and time scales[J]. *International Geology Review*, 57: 669–746.
- Wakita K, Metcalfe I. 2005. Ocean plate stratigraphy in East and Southeast Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 670–702.
- Wakita K. 2015. OPS mélange: A new term for mélanges of convergent margins of the world[J]. *International Geology Review*, 57: 529–539.
- Wang Genhou, Han Fanglin, Yang Yunjun, Li Yuanqing, Cui Jiangli. 2009. Discovery and geologic significance of Late Paleozoic accretionary complexes in central Qiangtang, northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1181–1187 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Zhang Pan. 2019. A new understanding on the emplacement of ophiolitic mélanges and its tectonic significance: Insights from the structural analysis of the remnant oceanic Basin–Type ophiolitic mélanges[J]. *Earth Science*, 44(5): 1688–1704 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guoqiang, Li Xiangmin, Xu Xueyi, Yu Jiyuan, Wu Peng. 2014. Zircon U–Pb chronological study of the Hongshishan ophiolite in the Beishan area and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1685–1694(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaohong, Yang Jianguo, Xie Xie, Wang Lei. 2013. The genetic type and tectonic significance of Hongshishan basic–ulteabasic Rocks in Beishan, Gansu Province[J]. *Northwestern Geology*, 46

- (1): 40–55(in Chinese with English abstract).
- Wei Zhijun, Huang Zengbao, Jin Xia, Sun Yongjun, Huo Jinchang. 2004. Geological characteristics of ophiolite migmatitic complex of Hongshishan region, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 37(2): 13–18 (in Chinese with English abstract).
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, Kroner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. [J] *Journal of the Geological Society*, 164: 31–47.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, Han C M, Qu J F, Zhang J E, Ao S J, Guo Q Q, Cleven N R, Lin S F, Shan Y H, Li J L. 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. *American Journal of Science*, 310: 1553–1594.
- Xiao W J, Ao S J, Yang L, Han C M, Wan B, Zhang J E, Zhan Z Y, Li R, Chen Z Y, Song S H. 2017. Anatomy of composition and nature of plate convergence: Insights for alternative thoughts for terminal India–Eurasia collision[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 60: 1015–1039.
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Fu Changlei, Niu Manlan, Ji Wenhua, Li Rongshe, Qi Shengsheng, Mao Xiaochang. 2018. Characteristics and thematic geological mapping of mélanges[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(2/3): 167–191 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Zhao Guobin, Li Wenyuan, Wang Xiaohong, Jiang Hanbing, Tan Wenjuan, Sun Nanyi. 2010. Character and structural attribute of the Beishan ophiolite[J]. *Northwestern Geology*, 43(1): 26–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Yin Hongfu, Zhu Yunhai, Wang Guocan, Feng Qinglai, Gong Yiming. 2003. Smith Strata and Non-Smith Strata[J]. *Earth Science*, 23(6): 24–30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, He Weihong, Xu Yadong, Luo Mansheng, Song Bowen, Kou Xiaohu, Zhang Zhiyong, Xiao Qinghui, Pan Guitang. 2016. Palaeo geographic distribution and tectonice bolytion of OPS in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 24–30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun, Lei Yongliang. 2007. 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*, 14(4): 85–95(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Pan Guitang, Zhang Zhiyong, Feng Yanfang. 2012. New advances in the study of ophiolites[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(1):1–12(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhixiong, Jia Yuanqin, Xu Hai, Wang Jinrong, Wang Xinliang, Liu Qiang. 2015. LA–ICP–MS Zicon U–Pb age of Quartz diorite from the Jiaochagou Area in Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia, and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1210–1218 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhixiong, Xiong Yu, Jia Yuanqin, Wang Jinrong, Xu Hai, Gao Jian, Wang Xinliang, Liu Qiang. 2018. The continental arcs magmatic at the Dulongbao Area in Beishan orogenic belt in Late Carboniferous: Evidences from zircon U – Pb dating and geochemistry of the granodiorite[J]. *Geological Review*, 64(3): 597–609 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, He Guoqi. 1990. Plate Tectonics and Metallogenic Regularities in Beishan Region[M]. Beijing: Peking University Press, 1–226 (in Chinese).

附中文参考文献

- 付长全, 闫臻, 王宗起, 牛漫兰, 郭现轻, 俞良军, 李继亮. 2018. 南祁连拉脊山口增生楔的结构与组成特征[J]. *岩石学报*, 34(7):2049–2064.
- 何世平, 周会武, 任秉探, 姚文光, 付力浦. 2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J]. *西北地质*, 38(3):6–15.
- 黄增保, 金霞. 2006. 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*, 33(5): 1030–1037.
- 贾元琴, 赵志雄, 许海, 王新亮, 刘强, 王金荣. 2016. 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*, 43(1): 91–98.
- 简平, 刘敦一, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U–Pb 测年[J]. *地学前缘*, 10(4): 439–456.
- 李敏, 任邦方, 滕学建, 张永, 段霄龙, 牛文超, 段连峰. 2018. 内蒙古北山造山带花岗岩地球化学、锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素特征及地质意义[J]. *地球科学*, 43(12):4586–4605.
- 李敏, 辛后田, 任邦方, 任云伟, 张阔, 段霄龙, 牛文超, 段连峰. 2019. 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*, 44(1):328–343.
- 李向民, 余吉远, 王国强, 武鹏. 2012. 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*, 31(12): 2025–2031.
- 李廷栋, 肖庆辉, 潘桂棠, 陆松年, 丁孝忠, 刘勇. 2019. 关于发展洋板块地质学的思考[J]. *地球科学*, 44(5):1441–1451.
- 刘雪亚, 王荃. 1995. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化[J]. *地学研究*, 28:7–48.
- 卢进才, 史冀忠, 牛亚卓, 宋博, 张宇轩, 余龙. 2018. 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*, 34(10):3101–3115.
- 牛文超, 任邦方, 任云伟, 孙立新, 段霄龙, 段连峰, 李敏, 张家辉. 2017. 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*, 44(2): 409–410.
- 牛文超, 任邦方, 任云伟, 段霄龙, 段连峰, 孙立新, 李敏, 张家辉. 2019. 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*, 44(1):284–297.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2008. 大地构造相的定义、划分、特征及其鉴别标志[J]. *地质通报*, 27(10):1614–1637.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 任飞, 彭智敏, 王嘉轩. 2019. 大陆中洋

- 壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. 地球科学, 44(5):1544-1561.
- 彭银彪,于胜尧,张建新,李三忠,孙德有. 2018. 北阿尔金地区早古生代洋壳俯冲时限:来自斜长花岗岩和花岗闪长岩的证据[J]. 中国地质, 45(2): 334-350.
- 任邦方,任云伟,牛文超,段连峰,孙立新,李敏,田健,段霄龙,张永清. 2019. 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,44(1):298-311.
- 任云伟,任邦方,牛文超,孙立新,李敏,张阔,张家辉,段连峰. 2019. 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, 44(1)312-327.
- 孙立新,张家辉,任邦方,牛文超,任云伟,张阔. 2017. 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, (2):131-147.
- 宋东方,肖文交,韩春明,田忠华,李咏晨. 2018. 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, 34(7):2087-2098.
- 王根厚,韩芳林,杨运军,李元庆,崔江利. 2009. 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, 28(9):1181-1187.
- 王国灿,张攀. 2019. 蛇绿混杂岩就位机制及其大地构造意义新解:基于残余洋盆型蛇绿混杂岩构造解析的启示[J]. 地球科学, 44(5):1688-1704.
- 王国强,李向民,徐学义,余吉远,武鹏. 2014. 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, 30(6):1685-1694.
- 王小红,杨建国,谢燮,王磊. 2013. 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, 46(1):40-55.
- 魏志军,黄增保,金霞,孙永君,火军昌. 2004. 甘肃红石山地区蛇绿混杂岩地质特征[J]. 西北地质, 37(1):13-18.
- 闫臻,王宗起,付长垒,牛漫兰,计文化,李荣社,祁生胜,毛晓长. 2018. 混杂岩基本特征与专题地质填图[J]. 地质通报, 37(2/3):167-191.
- 杨合群,李英,赵国斌,李文渊,王小红,姜寒冰,谭文娟,孙南一. 2010. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. 西北地质, 43(1): 26-36.
- 张克信,殷鸿福,朱云海,王国灿,冯庆来,龚一鸣. 2003. 史密斯地层与非史密斯地层[J]. 地球科学, 28(4):361-369.
- 张克信,何卫红,徐亚东,骆满生,宋博文,寇晓虎,张智勇,肖庆辉,潘桂棠. 2016. 中国洋板块地层分布及构造演化[J]. 地学前缘, 23(6): 24-30.
- 张进,马宗晋,任文军,雷永良. 2007. 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, 14(4): 85-95.
- 张进,邓晋福,肖庆辉,陆松年,潘桂棠,张智勇,冯艳芳. 2012. 蛇绿岩研究的最新进展[J]. 地质通报, 31(1):1-9.
- 赵志雄,贾元琴,许海,王金荣,王新亮,刘强. 2015. 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, 89(7):1210-1218.
- 赵志雄,熊煜,贾元琴,王金荣,许海,高鉴,王新亮,刘强. 2018. 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, 64(3):597-609.
- 左国朝,何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律[M]. 北京:北京大学出版社, 1-226.