

甘肃红石山地区泥盆纪—石炭纪有限洋盆重建与蛇绿混杂岩深部结构

方维萱, 郑小明, 方同辉, 倪杰才, 郭玉乾, 李建旭

FANG Weixuan, ZHENG Xiaoming, FANG Tonghui, NI Jiecai, GUO Yuqian, LI Jianxu

有色金属矿产地地质调查中心, 北京 100012

China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012

摘要:采用构造岩相学和构造—古地理单元恢复、AMT、地面高精度磁法等综合方法,对甘肃红石山和邻区泥盆纪—石炭纪有限洋盆进行重建,对红石山蛇绿混杂岩带进行构造岩相学解剖和深部探测。划分出5个构造层,前华里西期、华里西期、印支期、燕山期和喜山期。北部构造带为四顶黑山—雀儿山晚古生代岩浆弧相,中部构造带红石山蛇绿混杂岩带恢复为泥盆纪—石炭纪有限洋盆相+洋壳残片相,南部构造带为白山—狼娃山晚古生代岛弧相。蛇绿岩套从下到上的垂向单元为晚泥盆世—早石炭世变质超镁铁杂岩→堆晶超镁铁—镁铁岩→均质辉长岩和少量的辉绿岩墙→早石炭世扫子山期深水相硅质岩和含炭硅质细碎屑岩(有限洋盆相)。陆缘海相岛弧地体南北两侧为早石炭世扫子山期和白山期浅海相火山岛弧带。哈萨克斯坦板块南缘南向俯冲碰撞在敦煌地块北缘增生楔构造背景下,形成SSZ型蛇绿岩套。红石山构造—蛇绿混杂岩带与周缘地质体具有不同的构造岩相学边界,从北向南具有明显的4个构造岩相学水平分带,中心部位为超基性岩构造岩块单元,以糜棱岩相辉长岩和蛇纹石片岩为包络面的构造岩片(基质单元),蛇绿混杂岩带总体为无根状大型透镜体。红石山构造—蛇绿混杂岩带将两侧地质体卷入混杂岩带内,这种复杂镶嵌结构的构造岩相体有利于形成大型—超大型斑岩型金铜钼矿床、浅成低温热液金矿床和造山型金矿床。

关键词:泥盆纪—石炭纪有限洋盆;SSZ型蛇绿岩套;糜棱岩相辉长岩;岛弧造山带;区域成矿学;红石山

中图分类号:P534.44;P534.45;P588.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)05-0649-25

Fang W X, Zheng X M, Fang T H, Ni J C, Guo Y Q, Li J X. Restoration of the Devonian—Carboniferous limited ocean basin and deep structure of ophiolitic melange in the Hongshishan area of Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40 (5): 649–673

Abstract: Based on the comprehensive studies of tectonic lithofacies, restorations of tectonic paleogeographic units, AMT, and high-precision ground magnetic survey, the Devonian—Carboniferous limited ocean basin in the Hongshishan area of Gansu province was reconstructed. Furthermore, the depth structures of ophiolitic melange were detected by the means of AMT and tectonic lithofacies. It is classified into five tectospheres, namely, Pre-Variscan tectosphere, Variscan tectosphere, Indosinian tectosphere, Yanshanian tectosphere and Himalayan tectosphere. The northern tectonic belt is the Siding Heishan—Quershan Late Paleozoic magmatic arc facies, the central tectonic belt is the Hongshishan ophiolite melange belt which is restored to the Devonian—Carboniferous limited oceanic basin facies + oceanic crust remnant facies, and the southern tectonic belt is the Baishan—Langwashan Late Paleozoic island arc facies. The Hongshishan ophiolitic units from the lower to the top are the Devonian—Carboniferous metamorphized ultramafic complex→cumulate ultramafic to mafic complex→homogeneous gabbro and diabase dikes→cherts and carbonic fine-clastic rocks formed from the deep water environment in the Early Carboniferous Saoshan period (the limited oceanic facies). The north and south sides of the continental margin

收稿日期:2020-04-12;修订日期:2020-08-31

资助项目: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)和国家973项目课题《古陆缘成矿系统与铜金多金属成矿作用》(编号:2001CB409805)

作者简介:方维萱(1961—),男,研究员,博士生导师,从事沉积盆地与造山带、矿产普查与勘探。E-mail:569026971@qq.com

marine island arc terrain are Early Carboniferous Sazoshanian and Baishanian shallow marine volcanic island arc belts. As a result of southward subduction of the Kazakhstan plate, the Hongshishan SSZ-type ophiolitic melange might be formed on the accretionary wedge on the northern margin of the Dunhuang terrain. Hongshishan ophiolitic melange belt and its peripheral terrain are defined by different tectonic petrography boundaries, which obviously show four tectonic petrography zones from north to south. The center is ultramafic rocks characterized by gabbro and serpentine schist mylonite. The ophiolite melange belt is generally a large rootless lens. The Hongshishan tectonic-ophiolite melange belt involved the geological terrains on its both sides to form a complex mosaic structural lithofacies conducive to the formation of large-super-large porphyry Au, Cu, Mo deposits, epithermal gold deposits and orogenic gold deposits.

Key words: Devonian-Carboniferous limited ocean basin; SSZ-type ophiolitic melange; mylonitic gabbro; arc-type orogenic belt; regional metallogeny; Hongshishan

蛇绿混杂岩是造山带内特殊的大地构造相,由构造变形变位后的地质体单元和相体相互套叠组成。构造-蛇绿混杂岩带由块体和基质共同构成内部无序的镶嵌相体结构,为构造岩相体+岩石地层体的异时同位叠加多维镶嵌相体。以大比例尺独立地质填图单元对蛇绿混杂岩和增生杂岩进行解析研究,可为有限洋盆重建、板块边界和俯冲极性恢复、矿产预测等提供依据,为洋-陆转换演化和造山带深部结构等提供信息,是长期研究和关注的热点^[1-11]。混杂岩带的结构构造、物质组成、现今时空配置等构造岩相学特征,记录了构造-古地理单元、有限洋盆地层系统、大陆地壳侧向增生与垂向增生历史等信息。对造山带中的混杂岩分布区进行1:5万专题地质填图和大比例尺(1:25000~1:1000)构造岩相学解析研究,是揭示造山带蛇绿混杂岩和增生杂岩结构、组成及其时空配置关系与形成机制的有效手段。

混杂岩作为大地构造相类型^[2-5],形成于汇聚板块边缘上弧前盆地、弧间盆地和弧后盆地,被动大陆边缘、大陆裂谷、陆内挤压变形带等不同构造环境。按照物质组成和成因,可分为蛇绿混杂岩、增生杂岩、大洋板块地层混杂岩、构造混杂岩、沉积混杂岩、底辟混杂岩、复成因混杂岩等类型^[1-2,6-7]。遵循构造环境和物质组成原则开展岩片类型划分,将造山带混杂岩划分为滑动岩块、滑塌岩块、蛇绿岩片、玄武岩片、超镁铁岩片、硅质泥岩岩片、碳酸盐岩片、火山弧岩片、复理石岩片、磨拉石岩片、裂解块体岩片、(超)高压变质岩片12个类型,同时将火山弧岩片定义为火山、海山或火山弧残片,由喷出相火山岩、火山弧深成岩相根部和来源于火山弧的沉积碎屑构成^[10-11]。增生杂岩、蛇绿混杂岩、增生岩浆弧和弧前盆地是增生型造山过程和板块俯

冲极性的依据,也是造山带研究的难点问题^[8-11]。构造-古地理单元恢复、建立大地构造水平相序结构和水平相序分带,利用增生杂岩、蛇绿混杂岩、俯冲带变质作用等进行综合构造岩相学研究,在多学科综合研究基础上进行融合解释,有助于解决这些难点问题。专题填图^[11-14]、大比例尺构造岩相学和深部构造岩相学专项填图^[15-18],对于解决复杂相体和复杂构造岩相学类型具有重要意义,也有助于解决上述难题。

前人从区域地层、火山岩和侵入岩角度对甘肃北山和邻区的研究取得了显著进展^[19-62],但仍有诸多难题有待解决。①对红石山蛇绿岩套和构造演化存在不同认识^[31,33-35,38,43-48,59]。左国朝等^[43]将红石山超基性-基性岩成因类型归入蛇绿岩套。Xiao等^[44]认为,从北向南依次发育的雀儿山岛弧、红石山蛇绿混杂岩、黑鹰山-旱山岛弧、小黄山蛇绿混杂岩、马鬃山岛弧、红柳河-洗肠井蛇绿混杂岩、双鹰山-花牛山岛弧、柳园蛇绿混杂岩、石板山岛弧、敦煌地块等构造单元组成的区域构造分带,确定了红石山蛇绿混杂岩带在中亚造山带研究中的价值。经1:25万红宝石幅研究,认为该蛇绿混杂岩中存在超镁铁-镁铁质堆晶岩,发现了洋脊型玄武岩^①。王国强等^[45]报道了红石山蛇绿混杂岩带内的辉长岩形成于 346.6 ± 2.8 Ma,与内蒙百合山蛇绿混杂岩带内辉长岩形成年龄(344 Ma)^[38]相近。但王小红等^[59]认为,红石山基性-超基性岩体和火山沉积建造是一种壳幔双层岩浆源区成因模型,与大陆裂谷环境的双峰式火山岩组合特征相似,是一种与古亚洲大洋消亡过程密切相关而发生在弧后盆地内的大陆裂谷环境地幔岩浆作用的产物,而不是蛇绿岩类型的地幔变质橄榄岩残块;是一个滞后于火山-沉积作用的岩浆侵入体。总之,在红石山蛇绿混杂

岩带研究方面仍有分歧和不同观点。因对红石山—百合山晚古生代有限洋盆重建研究不够深入,宏观上制约了对红石山蛇绿混杂岩带区域构造演化的深入研究。②甘肃北山金属成矿带东侧,发育蒙古国南戈壁奥尤陶勒盖超大型斑岩型金铜钼矿床^[24],西侧发育东天山土屋斑岩型铜矿床,北侧紧邻蒙古塔林大型金矿床和陆内造山带^[23],虽然有较多新发现和新进展,但至今仍未取得找矿重大突破。如甘肃460金矿床属浅成低温热液金矿床,在金矿区内发育石炭纪富钠质的钙碱性系列侵入岩体,石英闪长岩($\delta_{\text{O}}\text{C}_{1\text{b}}$)和斑状石英闪长岩($\delta_{\text{O}}\text{C}_{1\text{b}}$)具有高Al、高Sr和Sr/Y值,低Y和Yb,属埃达克岩质花岗闪长岩($340.4\pm3.9\sim341.4\pm3.3\text{ Ma}^{[41]}$);石英闪长岩($334.1\pm3.8\text{ Ma}$)为接近原始埃达克岩浆的典型埃达克岩^[42],与洋壳俯冲板片熔融有密切关系。20世纪80年代,对甘肃马鞍山和460金矿区进行1:25000基岩地球化学测量,揭示460金矿区深部具有寻找斑岩型金铜钼矿床的潜力^{[61]②},但对北山北带区域构造演化研究不够深入,制约了深部找矿预测和金矿勘查突破。③地表对蛇绿岩套进行相关研究也取得了新进展,虽然单一方法是传统地质学的优势,但对大陆造山带中蛇绿岩套和深部构造的认识有限,而蛇绿混杂岩带为构造变形变位后的产物,需要采用地质和综合物探方法对蛇绿岩套深部特征进行探测,将地面地质填图与蛇绿混杂岩带深部构造岩相学填图结合,有助于提升对蛇绿岩套物质组成、深部结构及构造演化的深入研究。④在泥盆纪构造演化与大地构造相研究方面^[20-44],对北山构造演化与金属成矿研究方面取得进展^[25-29, 36-57, 62],为本次恢复北山地区晚古生代造山带—岛弧—沉积盆地等构造—古地理单元恢复提供了依据。但造山带—岛弧—沉积盆地耦合与转换是中国大陆造山带的重要特点,需要从多学科综合研究^[60-64]。将大地构造相、区域构造岩相学、深部构造岩相学专项填图等研究相结合^[15-18],从构造—沉积学和构造岩相学多方面进行约束,进行区域构造—岩浆—沉积事件和构造演化融合解释;对于与这些侵入岩体密切有关的岩石地层和构造岩石地层进行研究,恢复甘肃北山北带晚古生代相关构造—古地理单元,进行红石山晚古生代有限洋盆重建,深入揭示红石山蛇绿混杂岩带形成演化规律。

本文在甘肃北山北带红石山晚泥盆世—石炭

纪蛇绿混杂岩带和相邻区研究的基础上,采用大地构造岩相学类型恢复、大地构造岩相学水平相序结构研究、构造—古地理单元恢复、区域构造单元研究等综合方法,重建红石山泥盆纪—石炭纪有限洋盆和相关构造—古地理单元;在对红石山蛇绿混杂岩带进行地表研究、物探综合探测和深部构造岩相学专项填图的基础上,揭示红石山蛇绿混杂岩带深部三维结构,为红石山晚古生代有限洋盆形成演化提供新认识,揭示北山北带金成矿带的成矿地质背景、构造演化和深部找矿前景。

1 北山岛弧造山带的构造层特征与演化

甘肃红石山和邻区经历了复杂的构造演化历史,在甘肃北山地区、东天山和西蒙、蒙古南缘等区域路线构造岩相观测和综合对比研究基础上,以晚古生代构造格架为主导,本文将前泥盆纪构造岩石地层归入晚古生代基底构造层,将红石山和邻区构造层划分为前华里西期、华里西期、印支期、燕山期和喜山期5个主要构造层。

根据野外路线地质观测、不同重点地区地质普查和物化探异常检查评价,在大地构造岩相学和区域构造岩相学类型研究和综合对比基础上,将甘肃北山北带地区划分为3个主要区域构造带(图1),分别为:Ⅰ四顶黑山—雀儿山晚古生代岛弧地体(浅海相火山岛弧带+深成岩浆弧带);Ⅱ苦水—红石山—百合山有限洋盆相+洋壳残片相,该构造带控制了甘肃460—甜水井金(钨)成矿带(图1),以肃北县大型浅成低温热液型460金矿床、甜水井小型金矿床和梭梭泉北小型岩浆热液型钨矿床为代表,区域金矿点和金矿化点较发育;Ⅲ白山—狼娃山—黑鹰山晚古生代岛弧地体。以狼娃山金矿点、黑鹰山铁磷钼矿床为代表,西段转向马庄山浅成低温热液金银矿床,为弧形金铁磷钼成矿带。

1.1 晚古生代岛弧基底构造层:前华里西期构造层

根据前泥盆纪地层和构造型相,前华里西期构造层分为新太古代—古元古代下基底构造层、中—新元古代中基底构造层和早古生代上基底构造层,其特征和演化规律如下。

(1)新太古界—古元古界敦煌岩群($\text{Ar}_3\text{—Pt}_1\text{D}$)下基底构造层(结晶基底)。分布在敦煌地区。敦煌杂岩由TTG质片麻岩和变质表壳岩组成,如英云闪长质片麻岩、奥长花岗质片麻岩、花岗闪长质

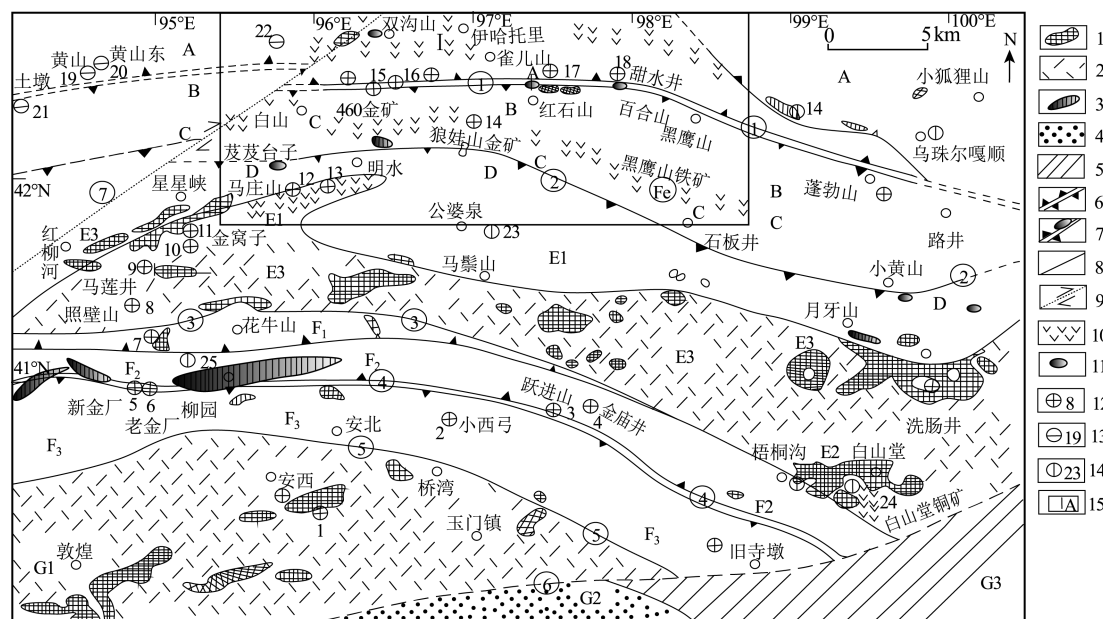


图1 甘肃北山地区区域构造纲要与矿产分布简图(北山南带据参考文献[62]修改,构造格架为本文划分)

Fig. 1 Simplified regional tectonic map of the Beishan area in Gansu showing distribution of mineral deposits

1—前泥盆纪基底构造层;2—敦煌地块前寒武纪变质岩;3—早古生代蛇绿岩套;4—北祁连山早古生代造山带;5—华北板块西缘;6—早古生代蛇绿岩块和板块碰撞带;7—晚古生代蛇绿岩块和板块碰撞带;8—逆冲断层;9—斜冲走滑断层;10—晚古生代岛弧地体;11—石炭纪超基性岩和蛇绿混杂岩带;12—金矿床和编号(1—小宛南山;2—小西弓;3—跃进山;4—金庙井;5—新金厂;6—老金厂;7—拾金坡;8—照壁山;9—马莲井;10—210金矿;11—金窝子;12—马庄山;13—南金山;14—狼娃山;15—460金矿;16—扫子山;17—红石山北;18—甜水井);13—铜镍矿床及编号(19—黄山;20—黄山东;21—土墩;22—葫芦);14—铜矿床及编号(23—公婆泉铜矿;24—白山堂铜矿;25—辉铜山铜矿);15—重点研究区范围和红石山蛇绿岩套 AMT 深部探测剖面位置;A—四顶黑山—雀儿山晚古生代岛弧地体(浅海相火山岛弧带+深成岩浆弧带);B—苦水—红石山—百合山有限洋盆相+洋壳残片相;C—白山—狼娃山—黑鹰山晚古生代岛弧地体(浅海相火山岛弧带+深成岩浆弧带);D—晚古生代芨芨台子—小黄山有限洋盆和蛇绿岩块;E—北山中带晚古生代岛弧造山带;E1—马庄山石炭纪陆缘成熟岛弧带;E2—白山堂泥盆纪陆缘成熟岛弧;E3—马莲井—马鬃山—月牙山晚古生代造山带(深成岩浆弧带);F1—花牛山岛弧增生地体;F2—柳园—跃进山岛弧增生地体;F3—安北—旧寺墩陆缘构造带;G1—敦煌结晶基底构造层;G2—祁连山古生代褶皱带;G3—华北板块西缘;①—红石山—百合山—蓬勃山断裂和石炭纪蛇绿岩块;②—芨芨台子—石板井—小黄山断裂和石炭纪蛇绿岩块;③—花牛山—白山堂断裂;④—柳园—跃进山(二道井—红旗山)断裂;⑤—安北—桥湾断裂;⑥—阿尔金山断裂;⑦—红柳河—星星峡北东向走滑断裂带

片麻岩、石榴子石斜长角闪岩、石榴子石黑云母片岩和大理岩。红柳峡花岗闪长质片麻岩(2376 ± 68 Ma)和干沟花岗闪长质片麻岩(2057 ± 75 Ma)、大水峡(1842 ± 39 Ma)和三危山(1846 ± 100 Ma)、大水峡—瓜州南($500 \sim 400$ Ma)等,指示了原岩形成时代和构造—岩浆事件在 2.3 Ga、2.0 Ga、1.85 Ga、500~400 Ma^[19]。①在红石山蛇绿混杂岩带东南侧,敦煌岩群(Ar_3 - Pt_1 D)岩石组合为斜长角闪片麻岩、斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩和变粒岩^①,呈构造岩片混杂在小红山岩组($(Ar_3-S_3)D$)中。②在四顶黑山—雀儿山北部构造带内,红岭混合岩—片麻岩($AnChH$)^①位于小草湖北—红岭南西,在四顶黑山基性—超基性岩体南缘的脆韧性剪切带中可见残留体。与石炭系扫子山组和四顶黑山基性—超基性岩体呈断

层接触,被后期花岗岩体侵入。③在白山—狼娃山南部构造带内,斜沟地区残留的敦煌岩群(Ar_3 - Pt_1 D)呈构造岩片分布在石炭纪和二叠纪侵入岩体内。上述 3 套构造岩石地层构造变形相—变质相(下称构造型相)为流变褶皱—糜棱岩相+低角闪岩相,总体无序,多期构造面理(片麻理、糜棱面理、片理)置换强烈。

(2)中元古代—寒武纪中基底构造层(褶皱基底),包括中元古界长城系星星峡岩群、古铜井群和蓟县系平头山组、震旦系和寒武系^[20],呈构造岩片分布在星星峡—马鬃山—月牙山(图1)。古铜井群呈东西向分布在星星峡等地,石英岩中碎屑锆石年龄为 1213 ± 24 Ma^[21]。铅炉子沟群变碎屑岩夹火山岩,下部中基性火山岩具气孔和杏仁构造,夹碎屑岩和泥质岩。星星峡群由灰色大理岩夹石墨片岩、

黑云母角闪石英片岩及角闪片岩组成。塔里木北缘和敦煌地块北缘震旦系冰碛砾岩、震旦系—寒武系黑色硅质岩系等被动陆缘沉积体系,指示寒武纪存在统一古大陆。将它们归入中元古代—寒武纪中基底构造层(褶皱基底),与相邻地质体多以韧性剪切带为分隔界线。构造型相为断褶带+糜棱岩化相+绿片岩相。

(3)早古生代上基底构造层。中奥陶统咸水湖组和志留系公婆泉群(S_2G)为早古生代褶皱基底构造层。①咸水湖组(O_2x)以变余含砾粗粒长石岩屑杂砂岩、变余凝灰质砂砾岩、变余含砾沉凝灰岩、变玄武岩、变安山玄武岩、变安山岩、变英安岩及变沉凝灰岩为主,其次为变安山玄武岩、变流纹岩,局部夹结晶灰岩或大理岩,呈近东西向带状分布在依哈托里地区,南侧与二叠系双堡塘组和泥盆系雀儿山群呈断层接触;北侧与志留系公婆泉群呈断层接触,华力西期侵入岩体产于咸水湖组中。咸水湖组呈构造岩块镶嵌于北部晚古生代岛弧带,构造型相为宽缓褶皱—断裂带+绿片岩相。②中志留统公婆泉群(S_2G)^[22]呈近东西向带状分布在红石山蛇绿混杂岩带以北和东侧,与蒙古南戈壁和奥尤陶勒盖金铜矿区志留系可对比,岩石组合为灰绿色、深灰色、浅灰色安山岩和凝灰岩,夹含珊瑚类生物化石灰岩层,厚度大于1955 m。公婆泉群分布在西蒙额济纳旗黑鹰山和红石山东侧碎石山,在碎石山—圆包山地区岩石组合为玄武岩、角闪安山岩夹英安岩、粗面安山岩、流纹岩等,火山弧演化序列为基性火山岩系→酸性火山岩系,火山岩层厚度达4000 m^[20],具有向上沉积水体变浅序列。③在塔里木东北缘甘新接壤区,志留系为南天山构造带物质组成。在哈密塔水北东志留系岩石组合为石英砂岩、粉砂岩、凝灰岩、安山玢岩及少量灰岩。在红柳河火车站西侧,志留系构造—蛇绿混杂岩带中,大型构造岩块带发育,为早古生代板块碰撞带构造岩相学标志。④中—上志留统黑尖山组和碎石山组均具有向上变粗变浅的沉积序列,沉积环境从半深海—深海→浅海相→滨浅海环境,晚志留世从早到晚海盆收缩,水体变浅并逐步退出。⑤恢复早古生代构造—古地理单元从南到北为(图1):红柳河—洗肠井早古生代弧后裂谷盆地相→马鬃山—石板井早古生代深成岩浆弧内弧花岗岩→公婆泉早古生代浅海火山岛弧相→星星峡—明水前寒武纪中基底构造

层→四顶黑山—雀儿山早古生代浅海火山岛弧相(红石山地区),红石山地区构造型相为宽缓褶皱—断裂+糜棱岩相—绿片岩相。

1.2 晚古生代有限洋盆和石炭纪蛇绿混杂岩带:华力西期构造层

从北到南,泥盆纪具有不同类型大地构造相,指示了不同的构造—古地理单元类型。

(1)在四顶黑山—雀儿山北部构造带中(图1、图2),小黑包—黑石山地区下泥盆统大南湖组(D_1d)为中性—中基性火山岩和火山沉积岩夹有少量陆源碎屑岩系,厚度大于1606.9 m。岩石组合为灰绿色、深灰色辉石安山岩、安山岩、玄武岩、紫红色安山质火山角砾熔岩及相应的火山角砾岩和凝灰岩。在粉砂岩夹层含有腕足类、三叶虫、腹足类、海扇类等化石,腕足类属哈萨克斯坦的巴尔格什至俄罗斯东北的鄂霍茨克腕足动物地理区,为早泥盆世中—晚期浅海环境^[20]。从区域对比看:①在东天山大南湖组为浅海相中性火山岩、火山碎屑岩夹碎屑岩和灰岩,含较丰富的腕足类、珊瑚和三叶虫。与上覆中泥盆统头苏泉组角度不整合接触。②在东侧蒙古国 Nemegt—Altan Uul^[23]和奥尤陶勒盖铜金区^[24],志留系中发育钙碱性火山—沉积岩系,顶部为向上变粗变浅的沉积序列。泥盆系发育底砾岩和粗碎屑岩系,指示从泥盆纪初开始了构造沉降和沉积作用,为哈萨克斯坦板块南缘浅海相岛弧带。③雀儿山群($D_{1-2}Q$)下伏地层为下泥盆统大南湖组(D_1d),上覆地层为头苏泉组(D_2ts)。石炭纪浅海相火山岛弧围绕泥盆纪火山岛弧持续增长。④泥盆纪、石炭纪—二叠纪深成岩浆弧发育在早古生代岛弧基底构造层之上,四顶黑山—雀儿山北部构造带显现浅海相火山岛弧+深成岩浆弧叠加特征,为哈萨克斯坦南缘晚古生代成熟岛弧带,在二叠纪演化为陆缘岛弧造山带。

(2)在红石山中部构造带内石炭系海相火山岩、深水相火山—沉积体系等组成了有限洋盆内构造—沉积—岩浆系统,以石炭纪富钠质的钙碱性侵入岩为主。在红石山蛇绿混杂岩带东南侧,小红山岩组($(Ar_3-S_3)D$)构造混杂岩带相伴。红石山有限洋盆西与东天山苦水有限洋盆连接,东与西蒙百合山有限洋盆连接。石炭系扫子山组(C_1s)、绿条山组(C_1l)和白山组(C_1bs)具有“总体无序,局部有序”,被卷入构造—蛇绿混杂岩带内。

(3) 白山-狼娃山南部构造带发育泥盆纪-石炭纪深成岩浆弧带、早石炭世浅海相火山岛弧, 随着早石炭世末-晚石炭世火山岛弧作用减弱, 沉积水体增深。晚石炭世陆缘成熟岛弧岩浆隐爆作用增强, 岛弧造山作用增强, 指示了红石山有限洋盆向南侧俯冲消减过程。

(4) 在红柳河-牛圈子-白云山-洗肠井南侧, 白云山地区上泥盆统墩墩山组呈近东西向分布于蛇绿岩带两侧, 岩石组合为底砾岩、岩屑砂岩、安山岩、英安岩、英安质角砾熔岩及英安质凝灰岩。北山中部晚泥盆世陆缘弧为花岗岩闪长岩(英安岩)和二长花岗岩(流纹岩), 与柳园弧后洋盆向北俯冲有关, 俯冲洋壳+地幔楔及增生弧体为晚泥盆世墩墩山期火山岩主要源区, 洋壳及弧增生体部分熔融是北山中部晚泥盆世陆壳增生的方式之一; 英安质角砾熔岩及英安质凝灰岩形成年龄分别为 368.1 ± 1.8 Ma 和 363.5 ± 2.5 Ma^[25]。北山中带在红柳河-牛圈子-白云山-洗肠井以北曾存在经剥蚀和消失的造山带, 发育同碰撞造山期泥盆纪火山-磨拉石相^[26]。在明水-马鬃山-石板井形成断块造山带、泥盆纪侵入岩带和混合岩化带、墩墩山泥盆纪火山断陷盆地和磨拉石相、同碰撞造山期(O_3 -D)等相关的大地构造相^[26-28]。在北山南带墩墩山中泥盆统三个井群砾岩内, 在硅质岩砾石中含奥陶纪放射虫, 蚀源岩区为墩墩山以北的红柳河-牛圈子隆升剥蚀区^[28], 证实造山带物质在泥盆纪被剥蚀和再循环, 将含奥陶纪放射虫硅质岩砾石搬运到同碰撞期中-晚泥盆世前陆磨拉石相盆地中。

总之, 泥盆纪具有山弧盆耦合转换格局, 从北到南大地构造相水平分带为四顶黑山-雀儿山泥盆纪浅海火山岛弧相+深成岩浆弧相→红石山泥盆纪深成岩浆弧+构造岩块(北山北带)→泥盆纪岛弧造山带+脆韧性剪切带(北山中带)→同造山期泥盆纪磨拉石相盆地(北山南带)。石炭纪大地构造相类型本文后续详细论述。研究区二叠纪为深成岩浆弧和陆内挤压走滑造山过程, 在弧-陆碰撞造山期, 局部断陷伸展转换成盆为二叠纪弧后前陆盆地演化期。在大地构造单元上, 北山北带属中亚造山系北山造山带, 位于哈萨克斯坦板块南缘与华北板块北缘拼合部位, 以红石山蛇绿混杂岩带为标志。在区域构造-古地理单元恢复基础上(图1), 将甘肃红石山地区从北到南恢复为4种类型的大地

构造相, 划分为3个构造带(图2)。北部构造带为四顶黑山-雀儿山晚古生代岩浆弧相; 中部构造带为红石山-百合山 SSZ 型蛇绿构造混杂岩带, 恢复为晚泥盆世-石炭纪有限洋盆相+洋壳残片相; 南部构造带为白山-狼娃山晚古生代火山弧盆+岩浆弧相。

1.3 新生代陆内构造层

(1) 印支期构造层为中-新生代陆内构造-岩浆-热事件的构造岩相学记录, 沿红石山蛇绿混杂岩带形成走滑-逆冲推覆作用, 以三叠纪深成岩浆侵入和地壳垂向增生为主。

(2) 燕山期构造层在红石山地区主要为陆内构造变形, 在西蒙和蒙古南部发育侏罗纪-白垩纪陆内裂谷盆地, 红石山北侧发育陆相次火山岩-酸性侵入岩和白垩纪陆内断陷盆地。

(3) 喜马拉雅期构造层。古近纪蒙古高原抬升显著, 以新近系苦泉组和第四系戈壁沙砾和风沙沉积物为标志, 揭示了蒙古高原剥蚀夷平过程中, 形成闭流高原盆地。

2 北部构造带: 四顶黑山-雀儿山晚古生代岛弧带

2.1 四顶黑山-雀儿山晚古生代火山岛弧带特征

四顶黑山-雀儿山晚古生代陆缘成熟岛弧带由浅海火山岛弧+深成岩浆弧组成, 发育在早古生代基底构造层(岛弧型地壳)之上。下泥盆统大南湖组(D_1d)底部粗碎屑岩系分布在早古生代岛弧型地壳上。大南湖组(D_1d)、雀儿山群($D_{1-2}Q$)和头苏泉组(D_2ts)呈断层接触。晚石炭世-早二叠世近东西向深成岩浆弧内, 侵入岩体呈同心圆状和不规则状。下二叠统双堡塘组(P_1sp)为狭长带状, 呈角度不整合分布在前二叠纪地层之上。雀儿山晚古生代陆缘成熟岛弧带南侧界线为红石山有限洋盆北缘, 雀儿山群($D_{1-2}Q$)被卷入红石山构造蛇绿混杂岩带北侧外缘带。上新统苦泉组(N_2k)呈北东向和近东西向叠置在雀儿山晚古生代陆缘成熟岛弧带之上, 显示经历了显著陆内新生代构造运动和构造侵蚀作用。

(1) 雀儿山群($D_{1-2}Q$)由中基性、中性、中酸性、酸性火山岩和相应成分的火山碎屑岩, 夹正常沉积陆源碎屑岩、少许碳酸盐岩等。雀儿山群中富含腕足类、珊瑚、三叶虫、腹足类、海百合茎等生物化石,

指示了滨-浅海沉积环境;安山岩、英安岩和流纹岩属富钠的钙碱-碱性系列中酸性火山岩,推测为哈萨克斯坦洋壳向南俯冲消减于塔里木-华北板块之下,洋壳板片俯冲消减作用形成富钠质的火山岩^[29]。头苏泉组呈近东西向展布,为一套中性钙碱性火山岩夹少量砂岩及灰岩,厚度大于 280 m,主要岩性为深灰色安山岩、安山质晶屑凝灰岩、凝灰质砂岩及深灰色含生物碎屑灰岩,以温暖浅海地带群居型珊瑚和海百合茎等底栖古生物为主,指示了哈萨克斯坦板块南缘的浅海相岛弧带。从东天山、北山北带、西蒙和蒙古南戈壁纵向综合对比看,哈萨克斯坦板块南缘在泥盆纪向南俯冲消减,东天山苦水-甘肃红石山-西蒙百合山石炭纪有限洋盆北侧为晚古生代成熟岛弧带,东延到内蒙古东乌旗。东天山大南湖组为海相岛弧沉积,中泥盆统头苏泉组为陆相火山碎屑系夹流纹质火山泥球凝灰岩和煤线,呈角度不整合于大南湖组之上,同期北天山洋盆闭合过程,形成准噶尔板块南缘早古生代弧沟系统的俯冲拼贴增生楔^[30]。与甘肃明水-马鬃山-石板井泥盆纪造山过程和同造山期泥盆纪火山-磨拉石相盆地^[26-28]具有时间域上的对应关系。

(2)下石炭统扫子山组下岩段为变岩屑杂砂岩夹黑云绢云千枚岩、绢云千枚岩、黑云母斑点板岩等;变岩屑杂砂岩为低成熟度陆源粗碎屑岩,底部含砾较多,向上粒度逐渐变细且泥质岩夹层增多,指示晚泥盆世一早石炭世初沉积水体逐渐加深。扫子山组上岩段以含粉砂泥质板岩、千枚状板岩、炭泥质板岩、炭硅质板岩等变粉砂泥质岩为主,夹变岩屑长石杂砂岩,局部夹变英安岩、变安山玢岩、变凝灰岩、变沉凝灰岩等。深水相细碎屑岩+炭泥质岩+炭硅质岩组合指示了有限洋盆主成盆期的滞流还原沉积环境,伴有较强的安山岩-英安岩双峰式火山岩与弧内伸展作用。在扫子山组与侵入岩体接触带中发育灰黑色黑云母角岩化相+微晶石墨相+斑点状黑云母板岩和千枚岩等接触热变质相。

(3)二叠纪弧陆碰撞带与弧后前陆盆地。双堡塘组呈狭长带状东西向展布,微角度不整合于雀儿山群和石炭系之上,被中一晚二叠世花岗岩侵入。双堡塘组为海相陆源碎屑岩系夹灰岩透镜体,下部局部夹有基性火山岩,厚 1009~3126 m。岩石组合为中细粒砂岩和页岩,少量砾岩;灰岩和砂质灰岩中富含腕足类、菊石类、腹足类、珊瑚等化石,双堡

塘组从下到上具有“粗→细→粗”夹基性火山岩,以及弧后前陆盆地层序结构,推测在残余海盆基础上演化为弧后前陆盆地,它们为弧陆碰撞过程的沉积学记录。红石山地区北侧公路边双堡塘组英安质晶屑凝灰熔岩形成年龄为 $299.4 \pm 5.9 \text{ Ma}$ ^[31]。该构造带内发育二叠纪和三叠纪花岗岩侵入岩体,具有较大规模的地壳垂向增生作用^[33-35]。

2.2 四顶黑山-雀儿山晚古生代深成岩浆弧特征

(1)四顶黑山弧花岗岩侵入体为花岗岩(γD)和英云闪长岩(γoD),在地表呈不规则状产出,侵位于中元古界片岩-变火山岩、奥陶系变玄武岩和泥盆系雀儿山群;西与东天山觉罗塔格构造岩浆带东端相接。花岗岩具有高硅、高碱($\text{K}_2\text{O} = 3.35\% \sim 4.68\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 2.26\% \sim 3.85\%$)、富铝,以及低 MgO 、 CaO 、 TiO_2 、 P_2O_5 特征, A/CNK 值为 $0.83 \sim 1.00$ (准铝质型),负 Eu 异常较明显($\delta\text{Eu} = 0.70 \sim 0.73$)。该岛弧型花岗岩形成年龄为 $380.4 \pm 3.7 \text{ Ma}$,具有成熟岛弧带特征,属觉罗塔格洋向南俯冲过程的产物^[32]。在四顶黑山晚泥盆世花岗岩体两侧分布早石炭世镁铁-超镁铁质岩体,指示早石炭世具有显著的岛弧伸展作用,与南侧红石山有限洋盆成熟期具有区域构造协调性。

(2)四顶黑山基性-超基性杂岩沿四顶黑山-双沟山慢型断裂带断续分布,侵入于上石炭统梧桐窝子组和下一中泥盆统雀儿山群中,接触变质不明显,仅局部发育角岩化相。岩石组合为辉长岩、角闪辉长岩、橄榄辉长岩、苏长岩、单辉橄榄岩、单辉辉石岩、角闪石岩等,超镁铁质岩 m/f 值为 $1.60 \sim 2.17$,为低钛($\text{TiO}_2 < 1.0\%$)系列,形成年龄为 $327 \pm 9.0 \text{ Ma}$ ^[36],属早石炭世晚期谢尔普霍夫阶。铜矿化体赋存于上部辉石岩和橄榄岩中,镍矿化赋存于超基性岩下部和底部橄榄岩、橄榄辉长岩中。在活动大陆边缘局部张裂环境内,地幔玄武质的科马提质岩浆在局部张裂环境沿断裂多期次脱离地幔而上侵,形成四顶黑山基性-超基性杂岩,地幔源区具有斜长石-角闪石地幔岩^[37]。

2.3 四顶黑山-雀儿山晚古生代岛弧带的构造变形特征

(1)雀儿山-红尖山复背斜具有“南陡北缓”的几何学特征,指示了自北向南的挤压应力场特征,总体轴向为东西向,长 75 km,南北宽 16~20 km,南翼倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$,北翼倾角 $30^\circ \sim 50^\circ$,由次级紧闭背

斜和开阔舒缓的向斜组成。在雀儿山群内部,褶皱规模长约5000 m,轴面近东西向,宽1000~2000 m,两翼倾角 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,具有中常斜歪倾伏褶皱特点^①。

(2)红石山西北侧1524高地背斜南翼倾向南东—南,倾角为 $66^{\circ}\sim 70^{\circ}$,由雀儿山群($D_{1-2}Q$)、上石炭统干泉组和下二叠统双堡塘组组成。北翼倾角为 $47^{\circ}\sim 64^{\circ}$,由雀儿山群、干泉组和双堡塘组组成。晚石炭世—早二叠世花岗闪长岩($\gamma\delta C_2-P_1$)沿该背斜核部侵位。①在1524高地背斜北翼,雀儿山群向南高角度逆冲,导致双堡塘组产状变陡,为北倾 89° ,局部反转为南西倾向,倾角 41° ,或倾向北向,倾角 67° ,指示了北西走向的高角度斜冲走滑断裂运动学特征。②红石山西北侧1524高地背斜南翼双堡塘组内发育北东走向次级褶皱和断裂带,造成南翼地层破坏程度明显高于北翼地层,揭示南翼具有较大的构造强度。③1524高地背斜南翼双堡塘组南侧逆冲于下石炭统扫子山组第一岩性段之上,二者呈断层接触,二者产状相反,双堡塘组南侧倾向北,倾角 $59^{\circ}\sim 75^{\circ}$;扫子山组第一岩性段倾向南东,倾角 $58^{\circ}\sim 69^{\circ}$ 。双堡塘组发育北东走向次级褶皱,为断层相关褶皱,指示红石山西北侧1524高地背斜南翼向南发生了逆冲推覆构造作用。总之,红石山西北侧1524高地背斜核部为雀儿山群,向两翼分别为干泉组和双堡塘组,在晚古生代为同生披覆背斜,晚石炭世—早二叠世花岗闪长岩($\gamma\delta C_2-P_1$)侵位以底拱褶皱作用再次强化。印支期在南北向主挤压应力场下,南翼发生了南向逆冲推覆构造作用,双堡塘组内发育的北东走向次级褶皱为断层相关褶皱;北翼叠加了北西走向的高角度斜冲走滑断裂。

(3)泥盆纪—二叠纪经历了4期构造演化。①双堡塘组底砾岩与下伏干泉组为局部不整合面,与晚石炭世构造抬升事件有关。②石炭纪—二叠纪经历了深成岩浆弧叠加,形成底拱褶皱和韧性剪切带,也是岛弧反转构造带的构造样式和物质组成。③印支期经历了南向逆冲推覆构造作用,形成红石山西北侧1524高地背斜,同期在双堡塘组形成断层相关褶皱。④早白垩世陆相次火山岩叠加侵位与陆内断陷成盆相变。在燕山期—喜马拉雅期叠加了脆性构造变形。

(4)构造型相揭示经历了3期构造变形—变质事件。①第一期泥盆纪局域化脆韧性变形—变质事件,

形成矿物定向排列和显著的构造面理($S_0//S_1$),矿物拉伸线理为 $330^{\circ}\angle 20^{\circ}$,晚石炭世—早二叠世构造型相为断褶带糜棱岩相+角岩化相+绿片岩相,经晚石炭世—早二叠世深成岩浆弧中构造—岩浆—热事件形成。②第二期为侵入地层内的细粒花岗岩发生了脆韧性变形,形成S-L透镜体和香肠化,构造面理产状为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。印支期构造型相为冲断褶皱带糜棱岩化相+低绿片岩相。③第三期脆性变形事件形成密集破劈理,破劈理产状为 $320^{\circ}\sim 0^{\circ}\angle 40^{\circ}\sim 45^{\circ}$,燕山期构造型相片理化相—劈理化相+粘土化蚀变相。早白垩世形成陆相次火山岩侵入构造和粘土化蚀变相带。

(5)在四顶黑山—雀儿山北部构造带中,构造局域化分形作用显著,构造型相具有“南强北弱”的特点,自北向南的次级构造样式和构造组合分带清晰,构造变形强度依次为:北缘为宽缓向斜+晚石炭世—早二叠世花岗闪长岩岩株和岩脉群→中部为晚石炭世—早二叠世花岗闪长岩($\gamma\delta C_2-P_1$)底拱侵位褶皱作用带+糜棱岩化相带→南缘为逆冲推覆构造和断层相关褶皱带,中部和南缘被卷入红石山构造—蛇绿混杂岩带中,指示自北向南的挤压收缩作用和逆冲推覆构造作用。

3 中部构造带:红石山晚古生代有限洋盆与构造混杂岩带

3.1 石炭纪有限洋盆与弧—盆体系

构造—蛇绿混杂岩带代表了洋盆单元和相关地质体,形成于有限洋盆、弧后盆地等不同构造单元,采用不同岩性—填图单位进行调查和研究^[1-5,38],以揭示其物质组成和形成演化史。红石山地区晚古生代有限洋盆及两侧弧—盆体系的相关地质体(图2),由石炭系、晚泥盆世变超基性岩和基性侵入岩、石炭纪侵入岩等组成。下石炭统扫子山组分布在红石山蛇绿混杂岩带北侧,其南侧为白山组和石炭纪—二叠纪侵入岩,小红山岩组以构造岩块形式存在,它们均卷入红石山构造—蛇绿混杂岩带内。

在骆驼峰—霍勒扎德盖—扫子山一带,下石炭统扫子山组(C_{1s})现今呈东西向带状分布(图2),扫子山组为浅变质碎屑岩、沉凝灰岩夹硅质岩、玄武岩、安山岩等,总厚度6631.2 m。根据第四岩性段早石炭世古孢子化石^[39]和野马泉扫子山组底部含砾砂岩中灰岩砾石的早石炭世早期珊瑚化石^[40],

扫子山组具有早石炭世火山岛弧带构造-火山-沉积体系特征,是哈萨克斯坦板块南缘火山弧内地层系统。下石炭统扫子山组可划分为4个岩性段,总厚度为6631.2 m^[39]。①第一岩性段(C_1s^1)厚1321.6 m,岩石组合为灰绿色变安山质凝灰岩、变凝灰质砂岩、凝灰质板岩、粉砂质板岩、绢云千枚岩、绢云绿泥千枚岩、片理化安山岩、泥硅质板岩、灰黑色硅质板岩、钙碱性玄武岩-安山岩和相应的中基性-中性火山碎屑岩发育,夹少量碳酸盐岩;发育火山沉积相、火山溢流相、火山爆发-溢流相等。在红石山北侧,英安质糜棱岩相(376 Ma, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,未刊数据,下同)之上,扫子山组以浅紫红色铁泥硅质岩+钙屑铁泥硅质岩+浅红色赤铁碧玉岩,属洋盆平原相沉积,推测英安质糜棱岩为红石山有限洋盆内英安质凝灰岩或英安岩经过构造变形加积形成,属构造混杂岩相。②第二岩性段(C_1s^2)厚372.2 m,厚度变化较大,且厚度明显增大。岩石组合为灰绿色强蚀变玄武岩、暗紫色和紫红色硅质岩、紫红色硅质板岩、灰绿色粉砂质板岩、灰色长石石英砂岩。下部含砾较多,向上砾石含量降低变细,炭质含量明显开始增加。在向上变细的火山浊流沉积体系中,伴有少量岛弧型安山玢岩和英安质熔岩夹层;该岩性段侵入较多的灰绿色蚀变辉长岩和闪长玢岩脉,周边发育劈理化相、黑云母角岩相和斑点状黑云母角岩化相。在红石山地区西北侧扫子山组二段内发育同生滑移褶皱群落、同生断裂相带和同生角砾岩相带,指示曾发生了2期同生断裂活动并导致洋盆边缘发生了同生滑塌沉积,同生滑移褶皱群落总体指向自西向东发生同生滑移再沉积,属该期洋盆伸展断陷成盆的构造-沉积学响应。③第三岩性段(C_1s^3)厚4711.7 m。岩石组合为灰绿色蚀变玄武岩、绿泥石千糜岩、糜棱岩化青磐岩化蚀变玄武岩、紫红色铁质硅质岩-紫灰色铁硅质岩-灰黑色硅质岩、碳酸盐化铁质硅质岩、浅灰色和灰黑色硅质板岩、含炭泥硅质板岩、中细粒砂质板岩、粉砂质板岩、钙质泥质板岩、浅灰色中细粒岩屑石英变砂岩、黑云绢云硅质板状千枚岩。该段以变中基性-变基性火山岩夹硅质岩和铁碧玉岩、与硅泥质粉细砂岩-硅泥质岩共生为特色,以深水环境中紫红色-红色薄层状和纹层状硅质泥岩-泥硅质岩相(深海红色硅泥层-泥硅层)为洋盆平原相沉积标志,它们为有限洋盆主成盆期(有限

洋盆深水相+变基性火山岩相)构造-火山-沉积的产物。同时,该段内糜棱岩相-糜棱岩化相-千糜岩相发育,构造动力变质作用强烈,指示扫子山组被卷入红石山构造-蛇绿混杂岩带中。④第四岩性段(C_1s^4)厚约1547.33 m,灰绿色、浅灰绿色晶屑凝灰岩、灰绿色片理化安山岩、灰绿色安山质沉凝灰岩、变凝灰质砂岩、泥硅质板岩、灰黑色硅质板岩、凝灰质板岩、粉砂质板岩、绢云千枚岩、绢云绿泥千枚岩。含炭粉砂泥质岩向上炭质含量增加,揭示沉积水体逐渐变深,为滞流强还原深水相。上部为微晶石墨炭质层(含炭质为10%~25%)、少量岛弧型安山玢岩和英安质熔岩夹层。⑤上石炭统干泉组与扫子山组(C_1s)具有显著的构造岩相学差异,揭示二者之间存在重大构造岩相学事件,干泉组底部与扫子山组为火山喷发不整合接触,二者之间以古风化层为界线;在干泉组火山锥相和周缘火山浊积扇相、海岸火山锥相、滨岸火山浊积扇相等安山质火山岩相体地层内,发育节理、裂隙、宽缓褶皱、断裂等脆性构造变形型相,干泉组安山质火山岩相体地层为岛弧造山带环境形成的安山岩系;而下伏扫子山组以面理置换、流变褶皱、韧性剪切带等韧性变形型相为主;指示了早-晚石炭世间构造挤压和抬升事件,造成红石山有限洋盆在晚石炭世强烈萎缩变浅。

总之,①扫子山组一段钙碱性中基性-中性火山岩夹碳酸盐岩组合,指示早石炭世扫子山期初为滨浅海相火山岛弧环境,向上以绿色夹红紫色层纹状硅质岩和细碎屑岩组合为标志,指示了盆地深水相环境。②含炭泥硅质板岩和含炭粉砂泥质岩指示了主成盆期内滞流还原的深水相,这种构造岩相学垂向相序结构指示,红石山有限洋盆在洋壳扩张脊形成超基性岩后,蛇绿岩套(洋壳残片记录)顶部的深水相硅质岩-细碎屑岩。③深水相含炭泥质岩、硅质岩和硅泥粉细砂岩,与变中基性-基性火山岩和蛇绿岩套、富钠质基性火山岩、富钠质辉长岩-富钠质闪长岩,为红石山晚泥盆世-早石炭世有限洋盆和相关地质体。④早-晚石炭世构造挤压和抬升事件,造成红石山有限洋盆在晚石炭世强烈萎缩变浅,上石炭统干泉组安山岩系为岛弧造山带中形成的火山岩系。

3.2 460 金矿区石炭纪富钠质的钙碱性侵入岩与深成岩浆弧

在肃北县460金矿区内发育富钠质的钙碱性系

列侵入岩体,包括石英闪长岩(δoC_{1b})和斑状石英闪长岩(δoC_{1b})、花岗闪长岩($\gamma\delta\text{C}_{1b}$)、黑云母斜长花岗斑岩等。花岗闪长岩为富钠质的钙碱性系列,具有高 Al、高 Sr 和 Sr/Y 值,低 Y 和 Yb,属埃达克质花岗闪长岩,形成年龄为 340.4 ± 3.9 Ma、 340.5 ± 3.3 Ma、 340.9 ± 3.9 Ma、 341.4 ± 3.3 Ma,460 金矿床属浅成低温热液型金矿床^[41]。石英闪长岩属富钠质的钙碱性系列,具有高 Al、高 Sr 和 Sr/Y 值,低 Y 和 Yb 特征,为接近原始埃达克岩浆的典型埃达克岩,具有洋壳板片熔融的岩石成因特征,形成年龄为 334.1 ± 3.8 Ma^[42]。在 460 金矿区和外围,基岩地球化学异常元素组合为 Au-Ag-Cu-Mo-Hg,异常源为含金石英脉($\text{Au} > 1000 \times 10^{-9}$)、碎裂状花岗斑岩(平均含 Au 为 102×10^{-9} , $n=22$,最高为 $\text{Au} > 1000 \times 10^{-9}$)、黑云母斜长花岗斑岩($\text{Au} = 15 \times 10^{-9}$, $n=38$,最高 Au 为 110×10^{-9})、闪长玢岩($\text{Au} = 155 \times 10^{-9}$, $n=27$,最高为 $\text{Au} > 1000 \times 10^{-9}$)、磁铁赤铁碧玉岩等,围绕黑云母斜长花岗斑岩形成内带 Au-Ag-Cu-Mo-Hg-As→中带 Au-Cu-Mo→外带 Ni-Zn-Cr-V-Ti,在碎裂状花岗斑岩和闪长玢岩中发育低品位金矿体,伴生 Mo 矿化,具有寻找石英脉型金矿和隐伏斑岩型金铜钼矿床的潜力。发育富钠质钙碱性系列闪长岩侵入岩-花岗闪长岩系列,它们是形成与闪长岩有关的大型斑岩铜金矿床和大型浅成低温热液型金矿床的有利条件,在肃北县 460 金矿区已经圈定了面状 Au-Ag-Cu-Mo 岩石地球化学异常,与含金蚀变花岗斑岩脉和含金蚀变闪长岩密切相关,外围也发育带状 Au-Ag-Cu-Mo 综合异常,具有寻找斑岩型金铜矿的潜力^{[59]②}。

3.3 红石山蛇绿混杂岩带物质组成与深部结构探测

(1)红石山蛇绿混杂岩带在物质域(ΣM)-时间域(t)-空间域(S)与周缘地质体具有不同的构造岩相学边界。①红石山蛇绿混杂岩位于敦煌地块北缘,由构造岩块(如基性-超基性岩)、构造岩片(如蛇纹石片岩、片理化糜棱岩化相辉长岩等)、强变形盆地深水相系、强变形陆缘海盆相系、构造混杂岩带(卷入强变形域内的不同时代地层)、构造变形带(糜棱岩化相辉长岩等)、后期叠加构造变形相系七大系列的构造岩相学单元组成。②在时间域上,以红石山蛇绿混杂岩中心为构造岩块,与周边构造岩片和基质强变形单元呈镶嵌结构。南侧为

糜棱岩化辉长岩(366.1 ± 1.6 Ma, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,未刊数据),揭示晚泥盆世法门阶为地幔热物质涌出侵位,晚泥盆世一早石炭世杜宪阶为红石山有限洋盆主成盆期的洋脊扩张高峰期。红石山蛇绿混杂岩带南侧灰绿色细粒石英黑云角闪闪长岩(343.4 ± 1.0 Ma,未刊数据)与蛇绿岩套内辉长岩形成年龄(346.6 ± 2.8 Ma)^[45]相近,推测为洋壳物质分异形成,并持续分异出浅褐色细粒黑云二长花岗岩(336.8 ± 1.4 Ma,未刊数据)。现今蛇绿混杂岩呈大型透镜状基性-超基性岩体(岩块单元),脆韧性剪切带发育(基质单元,变基性-超基性岩)。在地表几何学特征为大型 S-L 透镜体状,长轴呈近东西向展布,长 13.7 km,宽 100~3000 m。两侧与扫子山组火山-沉积岩系呈韧性断裂相接触。构造岩片由多个无根的构造透镜体组成。在构造-蛇绿混杂岩带内印支期花岗岩体红石山超单元侵入岩叠加。在燕山期-喜马拉雅期以垂向断隆-断陷改造为主,发育碎裂岩化相。红石山蛇绿杂岩带经历了二叠纪和中三叠世花岗岩侵入($237.8 \sim 240$ Ma)^[46]和印支期构造变形、变位事件后,最终构造定位的复杂相体结构。③在空间域上具有自北向南的构造单元分带性,在构造-蛇绿混杂岩带北侧外缘带,将雀儿山群卷入并以韧性断裂为北界线,在雀儿山群内脆韧性剪切带为构造混杂岩带与相邻地质体界线。北侧雀儿山群与周边石炭系和二叠系均为断层接触,以逆冲推覆构造和断层相关褶皱为红石山构造-蛇绿混杂岩带北部外缘带。在北中部带卷入了下石炭统扫子山组和绿条山组,形成了强—中—弱变形构造分形样式。绿条山组发育逆冲推覆构造和断层相关褶皱,向斜构造变形强烈。中心带为红石山蛇绿混杂岩带。南中部带将小红山岩组全部卷入,小红山岩组为构造混杂岩带的南中部带物质组成之一,向西突然相变为扫子山组第三岩性段,向东突然相变为志留系构造岩块。南外缘带卷入地层为下石炭统白山组。④从北到南红石山构造-蛇绿混杂岩带具有不对称的构造岩相学分带,北外缘带(雀儿山群+双堡塘组)→北中部带(扫子山组+绿条山组)→中心带(红石山变形变位后的蛇绿岩套)→南中部带(小红山岩组)→南外缘带(白山组)。

(2)在现今平面水平分带上,红石山蛇绿混杂岩带从北向南的 4 个构造岩相学水平分带为:①糜

糜棱岩化相辉长岩(νmC_1)-辉长岩(νC_1)呈构造岩片分布在边缘;②北缘辉橄岩(σ)-纯橄岩(Σ)-糜棱岩化相纯橄岩(Σm)外侧与糜棱岩化相辉长岩接触;③北中部纯橄岩(Σ)-中细粒单辉辉橄岩($\nu\sigma$)岩相带,析离体状纯橄岩中发育铬铁矿化;④中心部位为纯橄岩(Σ)-斜辉辉橄岩-粗粒单辉辉橄岩($\psi\sigma$)岩相带,它们为超基性岩体主体部位,面积约11 km²。岩石组合为单辉辉橄岩-斜辉辉橄岩($\nu\sigma$)-纯橄岩-辉石岩(ψ),纯橄岩多呈不规则和长条状析离体形,发育铬铁矿矿化体;⑤南缘纯橄岩-中细粒斜辉辉橄岩岩相带位于南部边缘,发育铬铁矿化。从西到东可划分为6个构造岩相带:①糜棱岩化相辉长岩(νmC_1)相→②辉橄岩($\nu\sigma$)→③中三叠世黑云母二长花岗岩($\eta\gamma\beta T_2$)→④糜棱岩化相纯橄岩(Σm)→⑤糜棱岩化相辉长岩(νmC_1)→⑥辉橄岩(σ)。虽然遭受中三叠世黑云母二长花岗岩侵入叠加破坏,蛇绿岩套似环形岩相学分带特征依然保存。

(3)在红石山地区北侧,根据物探磁异常和构造岩相学综合解释(图3、图4),推测深部存在隐伏

玄武岩,与遥感色彩异常圈定的地面羟基异常带和铁化蚀变带吻合。在地面路线构造岩相学调查过程中,发现蛇纹石片岩和透闪石蛇纹石片岩具有较高的磁化率异常, $15.5 \times 10^{-3} \sim 17.7 \times 10^{-3}$ SI,磁化率较高与磁铁矿-蛇纹石相密切相关。浅色辉长岩磁化率为 $1.21 \times 10^{-3} \sim 3.78 \times 10^{-3}$ SI。随着透辉石和透闪石含量增高,磁化率显著降低,透辉石岩磁化率为 $0.38 \times 10^{-3} \sim 1.20 \times 10^{-3}$ SI,透闪石岩磁化率为 $0.92 \times 10^{-3} \sim 1.33 \times 10^{-3}$ SI,以透闪石相为流体交代作用标志,指示随着剪切带内羟基蚀变增强,磁化率显著减弱。磁铁矿蛇纹石片岩和透闪石蛇纹石片岩分布在韧性剪切带内,发育大型S-C组构、置换剪切面理、蛇纹石质糜棱岩等,揭示曾经历了强烈的韧性剪切变形,为超基性岩单元物质组成,现今以蛇纹石质糜棱岩(基质单元)分布在地表。

总之,中心部位为超基性岩构造岩块单元,以糜棱岩相辉长岩和蛇纹石片岩为包络面的构造岩片(基质单元),结合区域构造岩相学综合对比看,红石山地区在石炭纪构造-古地理格局为有限洋盆-岛弧带-造山带(山弧盆体系),在哈萨克斯坦板

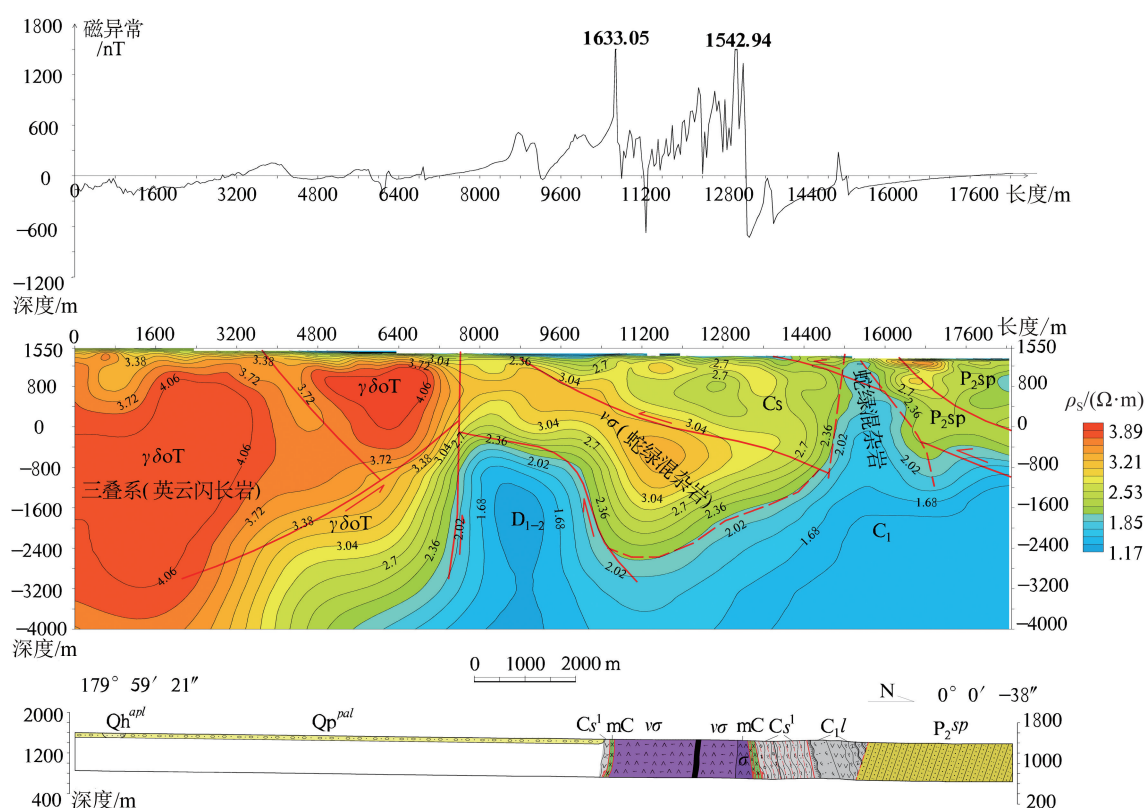


图3 红石山蛇绿混杂岩带二维剖面结构图(基于AMT测深剖面解释)

Fig. 3 The deep tectonic lithofacies pattern of the Hongshishan ophiolitic melange (based on AMT detected profile)

岗岩体引起,深部具有逐渐变小的趋势,暗示花岗岩具有气球膨胀侵位机制,花岗岩内发育指向岩脉群也揭示同岩浆侵入期,北侧断裂带北盘具有向西运动的运动学特征,北西向、近南北向和北东东向岩脉群,指示了同岩浆侵入期末补充侵位的岩脉群,沿花岗岩岩基的冷凝断裂侵入。AMT 剖面揭示局部存在反冲断裂。上部纯橄岩和深部辉橄岩空间叠置关系,隐伏较厚大辉橄岩岩体,对于深部寻找隐伏贵金属矿产较有利。北端二叠系中发育反冲断裂和断层相关褶皱,断层相关褶皱与地表地质特征吻合。②红石山蛇绿混杂岩带具有在深部连接的特征,向东端深部蛇绿混杂岩带规模减小,向西端侧伏并隐伏在深部(图4),与地面高精度磁法测量揭示深部存在隐伏磁性体(基性岩-超基性岩)吻合。在东端南侧存在高阻体为志留纪小红山岩组($(Ar_3-S_3)D$),从 AMT 剖面深部解译情况看,小红山岩组($(Ar_3-S_3)D$)也具有无根状特征,推测为与板块俯冲带有关的构造岩片,具有寻找蛇绿岩-碰撞带-高压岩片的潜力。

图4显示有正负相伴的磁异常。①北侧正负相伴近东西向航磁异常为变基性-超基性岩体所形成,揭示了深部蛇绿混杂岩带信息,变基性-超基性岩体向西侧伏于深部。②中部正负相伴航磁异常,具有中磁性-低密度体特征,经构造岩相学研究,认为与海底原生磁铁矿蛇纹石蚀变带有密切关系,揭示该磁性体在深部具有较大规模,经探槽揭露也证实高磁化率的相体与海底原生磁铁矿蛇纹石蚀变岩(原生蛇纹石岩相+原生磁铁矿蛇纹石岩相)密切相关,并与大规模蛇纹石岩和磁铁矿化关系密切,具有寻找含铂族磁铁矿型矿床的潜力。③南部正负相伴航磁异常带,推测与深部海底原生磁铁矿蛇纹石蚀变岩有关,它们也是寻找含 Au-Ir PGE 磁铁矿型矿床对象,值得进行战略性矿产评价和深部找矿预测。

3.4 红石山蛇绿混杂岩带垂向单元恢复

考虑到蛇绿岩套的构造变形变位和变质作用(构造型相),进行岩块单元和基质单元解析研究,以蛇绿岩套垂向序列五单元对比,对红石山蛇绿岩套的垂向岩相学序列恢复如下。

(1)变质超镁铁-镁铁杂岩单元为红石山变超基性岩主体(蛇绿岩套底部第一单元),岩石组合为纯橄岩-斜辉橄岩-二辉橄岩、含蛇纹石片岩

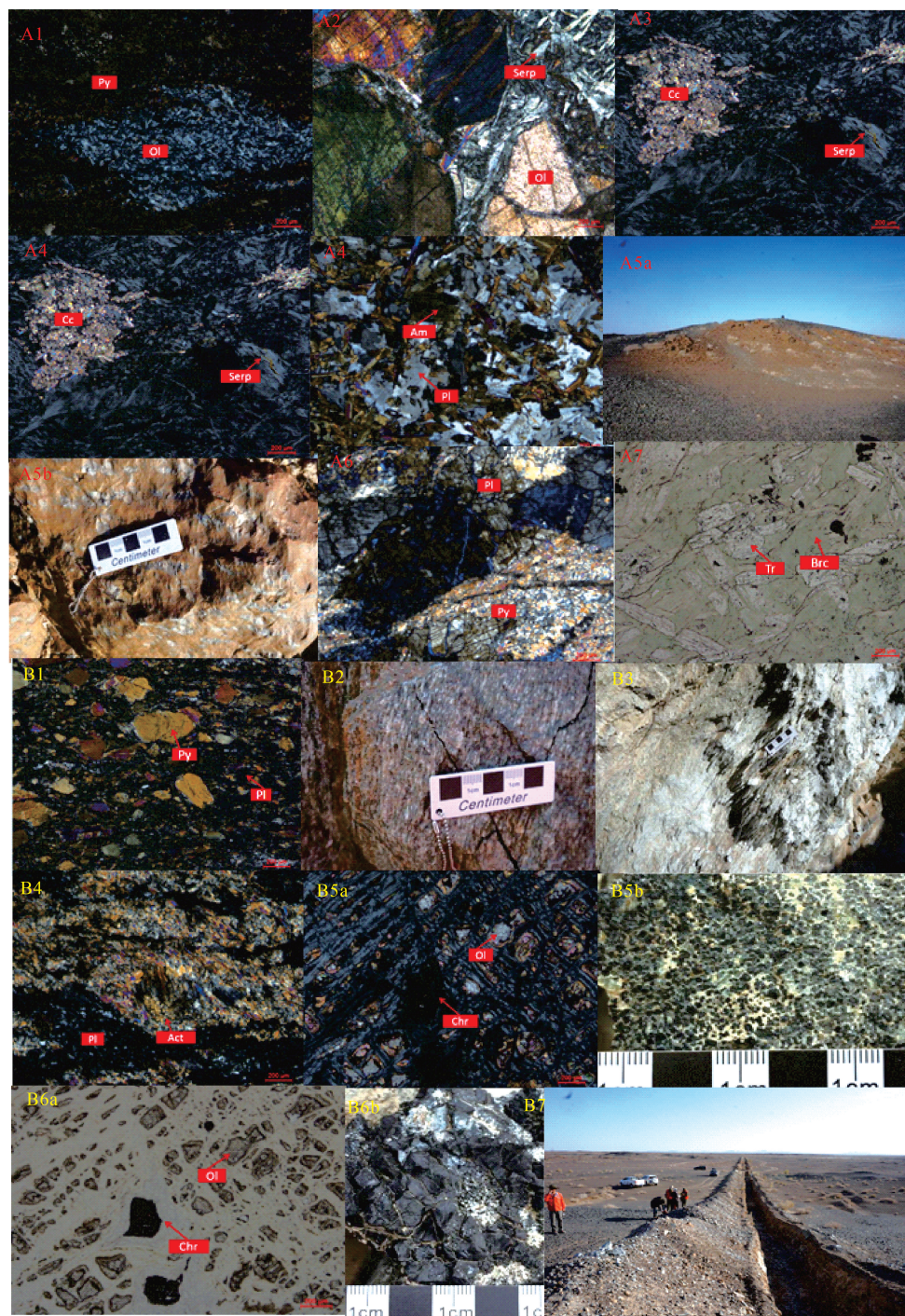
和蛇纹石化相基质单元。浅黄绿色纯橄岩分布于构造岩块北缘,含铬铁矿、尖晶石、磁铁矿、钙钛矿等标志矿物,形成了豆荚状铬铁矿石和铬铁矿化体。采用2条探槽圈定和揭露控制了糜棱岩化辉长岩、辉长岩质糜棱岩、二辉岩、斜辉橄岩、纯橄岩等岩相单元界线和分布范围。辉橄岩和斜辉橄岩具变余残留结构、假斑晶状结构和网格状结构,由假斑晶透闪石化辉石、绢石化辉石等组成。眼球状橄榄石残晶被纤蛇纹石和胶蛇纹石完全交代,以网格状次生胶蛇纹石为特征。辉石和斜长石发育旋转碎斑等典型的糜棱岩相-糜棱岩化相标志,为基质单元与岩块单元的分界线标志(图版I)。

蚀变辉橄岩(糜棱岩化相辉橄岩,岩块单元,DT0101,图版I-A1)组成矿物为橄榄石(56%)和辉石(42%),少量不透明矿物(2%)。橄榄石整体为长粒状、透镜状、眼球状蛇纹石组成的集合体,粒径小,为0.6~2.1 mm。辉石深色层和蛇纹石浅色层经历蚀变作用后再经历韧性变形作用,部分为眼球状和透镜状集合体特征,整体为定向条带状构造,属糜棱岩化相。归入变超镁铁-镁铁杂岩岩块单元,发育糜棱岩化相指示了临近基质单元。

黄绿色蛇纹石化辉橄岩(岩块单元,PM19-18-b2等,图版I-A2)组成矿物为橄榄石(69%)、辉石(12%)和蛇纹石(18%),少量不透明矿物(1%)。裂纹状橄榄石呈半自形柱状、粒状和交代残余状。普通辉石呈半自形柱状,常见交代残余状,粒径0.6~3.5 mm。蛇纹石呈叶片状和纤维状,集合体呈束状、放射状、细脉和网脉状。考虑到橄榄石和辉石多发生次生蛇纹石化,多数保留原柱状和粒状形态,原岩恢复为辉橄岩(蛇纹石化相)。蛇纹石化辉橄岩(变质超镁铁-镁铁杂岩单元)为岩块单元与基质单元分界线。

浅灰绿色蛇纹石化橄岩(基质单元,PM19-18-b1等,图版I-A3)组成矿物为蛇纹石(92%),少量橄榄石(2%)、碳酸盐矿物(2%)、绿帘石(1%)和不透明矿物(3%)。蛇纹石呈纤维状集合体,粒径0.02~0.2 mm,平行或近于平行消光,部分位置放射状呈扇形或十字形消光。橄榄石多蚀变为蛇纹石并伴有磁铁矿析出,为海底原生蛇纹石相。碳酸盐矿物呈粒状(0.01~0.06 mm)。绿帘石呈粒状与碳酸盐矿物共生,粒径0.01~0.2 mm,高突起,二级干涉色鲜艳且分布不均匀。含橄榄石蛇纹石岩的原

图版 I Plate I



A1~B7.红石山蛇绿岩套有关单元的构造岩相学特征。A1.蚀变辉橄岩(辉橄岩,DT0101,5×(+)),橄榄石鱼尾化,糜棱岩化相;A2.蛇纹石化辉橄岩(辉橄岩,PM19-18-b2)5×(+),蛇纹石化相;A3.含橄榄石蛇纹石岩(PM19-18-b1)5×(+);A4.灰褐色细粒石英角闪辉长岩(TC1-1-14-b1,5×(+));A5a.堆晶辉长岩组成的残余山丘景观;A5b.辉长岩岩块,堆晶辉长岩中辉石堆晶(灰色)和斜长石(棕色);A6.灰绿色蚀变辉长岩(TC2-13-b1,5×(+));A7.灰绿色透闪水镁石岩5×(-);B1.糜棱岩化相辉长岩(BD3-7,5×(+));B2.辉长岩质糜棱岩;B3.透闪石阳起石千糜岩(片岩);B4.浅灰绿色中粒蚀变辉长岩(PM16-5-B1,5×(+));B5.褐色蛇纹石化纯橄岩(含铬铁矿纯橄岩,TC1-1-13-b15×(+),稠密浸染状铬铁矿);B6.褐色蛇纹石化纯橄岩((TC1-1-13-b1,5×(-))块状铬铁矿);B7.块状铬铁矿。Py—辉石;Ol—橄榄石;Am—角闪石;Pl—斜长石;Serp—蛇纹石;Cc—碳酸盐矿物;Brc—水镁石;Tr—透闪石;Act—辉石蚀变为阳起石(旋转碎斑);Chr—铬铁矿

岩恢复为纯橄岩,变质超镁铁-镁铁杂岩单元中蛇纹石岩相为原生大规模羟基水化蚀变相,归入基质单元。

(2)超镁铁-镁铁质堆晶岩(辉长岩质堆晶岩)及斜长石浅色岩单元(蛇绿岩套底部第二单元)。辉长岩质堆晶岩呈透镜状、条带状、孤岛状和岩浆析离体状分布。岩石组合有堆晶辉橄岩、堆晶辉石岩、堆晶辉长岩和斜长岩(浅色岩)。恢复从底到顶的堆晶相序结构为含铬尖晶石堆晶辉橄岩→堆晶辉石岩→堆晶辉长岩→斜长岩,向上橄榄石和辉石含量减少,浅色斜长石含量增多,在上部堆晶辉长岩和堆晶斜长岩岩浆析离体共存或堆晶辉长岩→斜长岩条带呈韵律状交替产出。在底部发育豆荚状铬铁矿化体。

辉长岩(岩块单元,TC1-1-14-b1,图版 I-A4)组成矿物为角闪石(45%)、斜长石(43%)和石英(12%),金属矿物微量。斜长石呈半自形板状和宽板状,粒径 0.2~0.8 mm,聚片双晶由中长石及更长石组成。黄绿色-绿色角闪石呈半自形粒状(0.02~0.8 mm),边缘见绿泥石化。他形石英呈粒状(0.02~0.4 mm)。半自形斜长石由中长石及更长石组成。半自形柱状角闪石的绿泥石化较强。原岩恢复为辉长岩(岩块单元),经历了角闪石相流体交代作用。堆晶辉长岩具有显著辉长岩和斜长岩的岩浆析离体,可见岩浆熔离分异结构和透镜体(图版 I-A5),在地表呈残余山丘景观。

灰绿色蚀变辉长岩(岩块单元,TC2-13-b1,图版 I-A6)组成矿物为单斜辉石(53%)和斜长石(47%),不透明矿物微量。单斜辉石残留半自形-他形柱状,粒径 0.3~1.5 mm,以透闪石化和阳起石化为主,无色透闪石略带浅绿色调,呈针柱状、纤维状,闪石式解理发育;辉石由交代蚀变矿物集合体替代,具假象结构。斜长石呈半自形柱状,粒径 0.15~2.2 mm,交代蚀变较强,基本上由钠长石、黝帘石等集合体替代,具斜长石外形。辉长岩经历了较强的破碎和交代蚀变,为同构造期透闪石-阳起石相的流体交代作用形成。辉长岩岩块单元分布在红石山蛇绿混杂岩带两侧,均经历了同构造期角闪石相→透闪石-阳起石相流体作用,推测为地壳深部同构造期的流体交代作用形成。

灰绿色透闪水镁石岩(基质单元,水镁石岩相,BD3-10,图版 I-A7)组成矿物为水镁石(67%)和

透闪石(33%)。水镁石呈无色和浅绿色,弱多色性,粒径 0.02~0.4 mm,可能含少量绿泥石呈片状和扭折状。无色片状透闪石具有浅绿色调,粒径 0.2~1.2 mm。斜方辉石或橄榄石蚀变为水镁石,片状水镁石集合体呈放射状和束状;透闪石残留原细粒结构特征,原岩恢复为二辉岩(透辉橄岩)。透闪石-水镁石岩相为强烈羟基水化蚀变相,因水镁石(67%)含量高,对这种特种耐火材料矿产需进一步评价。

(3)糜棱岩化变辉长岩单元(糜棱岩化相,蛇绿岩套底部第二单元辉长岩质杂岩)。糜棱岩化相辉长岩分布在北缘,以脆韧性剪切带与扫子山组为接触界线,二者之间发育构造片岩相,以强烈构造片理化带分割单元,经探槽揭露圈定了覆盖层之下的地质体界线。糜棱岩化辉长岩(流体交代的糜棱岩化相,岩块单元,PM16-5-B1,图版 I-B1)矿物组成为辉石(50%)和斜长石(40%),少量石英(5%)和热液脉体(5%)。阳起石呈鳞片状集合体,原为辉石,部分核部残留半自形柱状,2组近正交解理特征,几乎全部由阳起石替代。斜长石发生了强烈的钠黝帘石化,内生成细小的板条状钠长石,粒径 0.2~2.5 mm,几乎全部由钠长石、绿帘石、黝帘石等集合体替代,残留原形态特征。热液脉体内充填绿泥石、绿帘石等矿物。浅黄绿色条带为阳起石集合体形态,具有残留部分辉石特征;黑色条带为钠长石和黝帘石的集合体,具有眼球状和条带状集合体特征,可能为辉长岩经历较强的交代蚀变而成,原岩恢复为辉长岩。在阳起石化蚀变之后,岩石经历一定动力变质作用而成,出现递进变形且具条带状和眼球状特征,部分斜长石变斑晶为糜棱岩化作用,以构造岩相学复式命名法命名为糜棱岩化相辉长岩;或以矿物含量法命名为钠长石阳起石岩。

辉长岩质糜棱岩(强流体交代糜棱岩相,PM16-6-B2,图版 I-B2、B3)的磁化率为 $20 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \text{SI}$ 。变斑晶为斜长石(10%)和辉石(5%)。基质为阳起石(27%)、钠长石(20%)、斜长石假象(34%);含有脉体(2%)和不透明矿物(2%)。旋转碎斑为原辉长岩残留,斜长石为眼球状,粒径 0.5~1 mm,发育聚片双晶且双晶纹较宽,为拉长石特征。浅黄绿色辉石为眼球状,粒径 0.2~0.5 mm,发育辉石式解理。基质中浅色条带为阳起石和钠长石,阳起石为长柱状集合体,斜消光;钠长石为长粒状和糖粒状,粒径 0.02~0.12 mm,发育聚片双晶。暗色

条带为强烈钠黝帘石化。原岩恢复为辉长岩,阳起石-钠黝帘石化为动力变质作用形成;眼球状韧性变形的斜长石和辉石为糜棱岩化相标志。恢复深部流体交代作用-构造事件序列为同构造期钠长石阳起石相→韧性剪切变形糜棱岩相。辉长岩质糜棱岩(强流体交代糜棱岩相→钠长石-阳起石相,基质单元)为地壳深部流体交代廊道标志。

(4)辉绿岩岩枝(脉)单元(蛇绿岩套第三单元镁铁质席状岩墙杂岩)。辉绿岩岩枝侵入扫子山组火山沉积岩系和糜棱岩化相辉长岩之间,呈绿泥透闪阳起石片岩等形式的构造岩片产出。四顶黑山基性-超基性杂岩和黑山梁南侧石炭纪—二叠纪辉长岩类侵入岩等属同源后期异相产物。

(5)海相基性喷出岩单元可与蛇绿岩套顶部第四单元镁铁质火山杂岩对比。在红石山基性-超基性岩两侧均分布有变基性火山岩(绿泥石片岩)和深水相沉积,南缘白山组中绿泥片岩夹硅质岩,北缘扫子山组由南到北依次为绿泥片岩、硅质岩、安山岩及千枚状砂质板岩。尤其是在北侧糜棱岩化相辉长岩以北,扫子山组绿泥石片岩和石英绢云母片岩原岩恢复为深水相细碎屑岩系。褐色玄武岩具有间粒间隐结构,脉状、块状构造。主要组成矿物成分为斜长石(35%)和辉石(10%),隐晶质-玻璃质(39%)和脉体(10%),少量绿泥石(2%)和不透明矿物(4%)。其中,斜长石呈半自形板状和长柱状,粒径0.04~0.4 mm,发育聚片双晶,且双晶纹较宽,为基性斜长石特征,边缘相对干净,核部钠黝帘石化较强,整体杂乱排列构成三角空隙。辉石呈他形粒状,粒径0.02~0.2 mm,分布于斜长石间隙内。绿泥石呈片状、鳞片状,粒径0.04~0.3 mm,异常靛蓝干涉色。不透明矿物呈粒状,粒径0.01~0.05 mm。脉体内充填隐晶质硅质和碳酸盐矿物,带状近平行排列,推测原为不规则气孔,后被硅质和碳酸盐矿物充填为杏仁体。岩石整体结构表现为基性斜长石杂乱排列,内充填隐晶质-玻璃质,细粒辉石、铁质不透明矿物、片状绿泥石,构成间片-间粒-间隐结构,整体为块状构造。该褐色玄武岩归入岩块单元。

黄绿色糜棱岩化玄武岩(海相基性喷出岩单元玄武岩,基质单元,糜棱岩化相,BD5-3)组成矿物为斜长石(75%)、辉石(20%)、绿泥石(3%)和不透明矿物(2%)。斜长石呈粒状和板粒状(0.02~4

mm),表面因钠黝帘石化等蚀变较强而混浊,以拉长石为主。短柱状和柱粒状辉石具有2组近直交解理。浅绿色鳞片状绿泥石(0.02~0.1 mm)部分可见交代辉石。因为糜棱岩化相变为基质单元,恢复为海相基性喷出岩单元玄武岩。

(6)蛇绿岩套中的其他标志。①在蛇绿岩套中地幔岩浆可演化形成基性岩、中性岩、酸性岩等序列,它们以海相火山岩和侵入岩形式存在,也是重要的辅助标志,在460金矿区发育黑云母斜长花岗岩、埃达克岩质石英闪长岩和花岗闪长岩。②在构造-蛇绿混杂岩带中,具有蛇绿岩→构造混杂岩→高压变质岩分带结构,糜棱岩化相辉长岩(νmC_1)和小红山岩组为角闪岩相的构造岩块。③蛇绿岩套底部为形成铬铁矿的有利岩相带,铬铁矿岩较发育是寻找大型铬铁矿床的标志,也是判断SSZ型蛇绿岩套的辅助标志。

含铬铁矿纯橄榄岩(TC1-1-13-b1,图版I-B5、B6)的磁化率为 $42\times 10^{-3}\sim 107\times 10^{-3}\text{SI}$,最高达 $135\times 10^{-3}\text{SI}$ 。组成矿物为蛇纹石(82%)、橄榄石(14%),少量铬铁矿(4%)。淡黄绿色蛇纹石呈叶片状、纤维状和胶状,集合体呈束状、放射状、细脉和网脉状;粒径0.01~0.4 mm。橄榄石呈半自形柱状、粒状、交代残余状,裂纹发育,粒径0.2~8 mm,次生蛇纹石化分布在网格中,橄榄石残余分布在网眼中。粒状铬铁矿的粒径大小为0.2~1.2 mm,全消光。含铬铁矿橄榄蛇纹石岩中发育残余半自形柱状橄榄石和交代残余结构,次生蛇纹石化(相)整体呈网脉状,原岩恢复为含铬铁矿纯橄岩,为蛇绿岩套的辅助识别标志,归入基质单元。

4 南带构造带:白山-狼娃山晚古生代岛弧带与演化

4.1 泥盆纪构造-古地理单元恢复与白山-跃进山泥盆纪深成岩浆弧

(1)白山-狼娃山南部构造带发育泥盆纪和石炭纪深成岩浆弧带,发育在加里东期侵入岩、元古宙下基底构造层等组成的岛弧型地壳上。岩石组合为辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩,分布于白山东、七口井、红柳沟、公婆泉铁矿西和小红山南,平面上呈不规则团块状、条带状和透镜状。①在红石山南新确定了晚石炭世—早二叠世深成岩浆弧,形成年龄为 $309.9\pm 1.1\sim 283.4\pm 1.4\text{Ma}$ (未

刊数据),指示红石山有限洋盆在晚古生代具有向南俯冲消减的构造极性。② 内蒙古北山地区三个井辉长岩(404.9 ± 1.6 Ma)^[47]为红石山-百合山-蓬勃山有限洋盆向南俯冲形成的早期泥盆纪深成岩浆弧。③ 茈茈台子蛇绿岩套中辉长岩形成年龄为 $314.9 \pm 5.0 \sim 329.0 \pm 5.1$ Ma,年龄加权平均值为 321.2 ± 5.7 Ma^[48];小黄山蛇绿岩套中辉长岩和玄武岩形成年龄分别为 350.2 ± 8.8 Ma 和 336.4 ± 4.1 Ma^[49]。茈茈台子-小黄山晚古生代有限洋盆可能向南俯冲,形成马鬃山石英闪长岩(363.7 ± 3.7 Ma)和花岗闪长岩(365.6 ± 6.6 Ma)^[50]深成岩浆弧、马庄山晚石炭世石英斑岩等构造-热事件。

(2) 石英斑岩侵位事件是地壳垂向增生的重要标志,为地壳重熔形成过铝质的高钾钙碱性系列岩浆。① 在白山堂铜矿区(图 1),晚泥盆世流纹质次火山侵入体由流纹斑岩、英安斑岩、角砾熔岩、凝灰熔岩、石英粗面岩组成。流纹斑岩呈岩株和岩墙产出,东部及北部被侏罗系火山沉积岩掩盖,西部与铅炉子沟群呈侵入接触。流纹斑岩具有钙碱性、过铝质(A/CNK 值为 $1.12 \sim 1.65$)、高硅(70%~74%)、高钾(4.34%~8.75%)和低钙(0.13%~1.16%)特征,负 Eu 异常明显,大离子亲石元素富集,Nb、Ta、Sr、P、Ti 亏损,岩浆起源于古老地壳物质部分熔融;非常低 Sr 和高 Yb 特征表明,岩体形成时压力较低,全岩锆石饱和温度约为 750℃;形成年龄为 374.9 ± 2.3 Ma^[51]。马庄山和白山堂陆缘成熟岛弧作用,指示北山中部具有显著地壳垂向增生和造山作用。② 墩墩山地区流纹斑岩(369.9 ± 1.5 Ma)^[52]、安山岩(367.4 ± 9.3 Ma)^[53]等,属北山南带干泉-墩墩山-碱泉子同造山期火山-磨拉石相区^[26],在碱泉子志留系之上,下泥盆统底部砂砾岩夹猪肝色页岩、玄武岩、安山岩和砂砾岩互层,在上部粉砂岩中含化石灰岩透镜体,揭示沉积水体逐渐加深。含化石层之上砂砾岩中夹有巨大滑塌灰岩岩块,上覆巨砾岩层,砾石为石英岩、火山岩、灰岩和混合岩,灰岩砾石中含志留纪化石。巨砾岩与下伏层呈平行不整合关系。这种垂向构造岩相学相序结构为同造山期快速多次抬升形成的垂向相序结构。北山南带同造山期泥盆纪磨拉石相广泛出露在墩墩山、花牛山、柳园、辉铜山、磨盘山等地^[26]。③ 上泥盆统墩墩山群为紫红色基性、中性、酸性火山岩夹碎屑岩地层,分布有裸子植物化石碎

片,指示了陆相火山喷发作用。中泥盆统与上泥盆统之间为不整合接触,上泥盆统分布面积增加。中泥盆统三个井子群由凝灰质砾岩、砂砾岩、砾岩、砂岩等组成,这种粗碎屑岩系与下古生界砂岩和加里东期花岗岩呈区域性角度不整合接触,山麓洪积扇相-辫状河流相的组合,揭示发育中泥盆世山间断陷洼地。

(3) 在敦煌加里东期造山带东北部长山子构造混杂带中,长山子变形变质岩系在晚志留世末—早泥盆世初变质事件(419~417 Ma)中,具有西阿尔卑斯型变质作用 p - T 轨迹,高压基性麻粒岩岩块为 $790 \sim 874^\circ\text{C}$ 、 $12.9 \sim 1.37$ GPa,石榴斜长角闪片麻岩岩块为 $681 \sim 684^\circ\text{C}$ 、 $0.89 \sim 0.97$ GPa,泥质麻粒岩基质为 $860 \sim 879^\circ\text{C}$ 、 $0.90 \sim 1.14$ GPa^[19],揭示在构造折返过程中形成构造-变质混杂岩。根据敦煌地区早泥盆世构造折返隆升事件、马庄山和白山堂一带过铝质的高钾钙碱性系列岩浆侵位事件,结合甘肃东南部西秦岭上泥盆统发育向上变粗变浅沉积层序和磨拉石相,推测它们为古祁连山泥盆纪造山带东南侧同造山期粗碎屑岩系。这种粗碎屑岩系构造岩相学特征表明,敦煌-古祁连山造山带泥盆纪初就形成了山弧盆耦合转换格局,在泥盆纪曾经历 3 期显著的抬升-剥蚀-沉积事件。

4.2 石炭纪白山-狼娃山岛弧带

(1) 白山组(C_1bs)厚约 4126.2 m,分 3 个岩性段,揭示了白山-狼娃山陆缘火山弧在石炭纪的发育过程。① 下段厚 1845.8 m,岩石组合为灰黑色、紫灰色、暗红色安山质火山角砾熔岩、英安质火山角砾岩、英安质晶屑玻屑熔结角砾岩、英安质含火山角砾凝灰角砾岩等。下段主要为中性-酸性火山碎屑岩段,以火山爆发相为主,属陆缘火山岛弧发展初期的产物。② 中段厚 1698.4 m,岩石组合为灰褐色和浅灰绿色安山岩、流纹岩、英安岩、英安质凝灰熔岩、安山质凝灰熔岩、灰白色-深灰色细晶、微晶灰岩及泥质粉砂岩、粉砂岩、细砾岩。中段以厚层中性和酸性火山熔岩为主,夹薄层火山碎屑岩和灰岩,局部夹薄层碎屑岩,灰岩中产丰富的珊瑚和少量腕足化石,指示了浅海沉积环境和浅海相岛弧带,以火山溢流相为主,伴有火山爆发相、火山沉积岩相和同期异相的含生物碎屑灰岩,弧内伸展作用增强,属陆缘火山岛弧发育期。③ 上段厚 582 m,岩石组合为变凝灰岩、含粉砂泥硅质板岩、灰黑色硅

质板岩、凝灰质板岩、绢云千枚岩、绢云绿泥千枚岩等。深水相细碎屑岩和硅质岩指示了陆缘沉积盆地水体加深过程,火山喷发减弱,沉积作用显著增强,属红石山有限洋盆南缘部分。浅变质岩段为陆缘弧盆被卷入红石山蛇绿混杂岩的中带和外缘带。

④ 白山-狼娃山-黑鹰山石炭纪岛弧带中,黑鹰山金铁磷-钇矿床(图1)为火山喷溢沉积成因,致密块状铁矿体呈似层状、囊状和透镜状产于白山组火山-沉积岩层中,白山组中黑鹰山富铁-磷钇矿床成矿年龄为 $322.0 \pm 4.3 \text{ Ma}^{[55]}$,说明白山组时代不早于早石炭世晚期谢尔普霍夫阶。

(2) 白山-狼娃山晚古生代陆缘岛弧带位于红石山蛇绿混杂岩带南侧,南北宽逾 40 km,东西长逾 300 km,向西延入新疆东天山,与康古尔塔格断裂南缘的雅满苏石炭纪弧相接,向东延入内蒙古,以蓬勃山石炭纪岛弧带相连接。明水西新井埃达克岩质早石炭世晚期—中石炭世早期石英闪长岩出露于肃北县马鬃山镇西明水地区,构造上位于塔里木板块北缘,分布于哈萨克斯坦板块华力西缝合带南侧白山岩浆弧带上。

(3) 在白山-狼娃山晚古生代岛弧带内,晚古生代钙碱性火山岩+中酸性侵入岩广泛分布。① 下石炭统白山组中酸性火山岩类的岩石组合为安山岩、英安岩和流纹岩,与弧内沉积岩和弧内生物碎屑灰岩等呈同期异相结构,为陆缘岛弧钙碱性火山-沉积岩系。② 中酸性岩多呈较大的岩基出露,如明水岩基、狼娃山岩基和大石山岩基,成因类型多为 S 型、I 型和 A 型花岗岩,是复杂的岛弧碰撞造山带组成部分。③ 在晚古生代岛弧演化上,明水西新井埃达克质石英闪长岩分布于白山-狼娃山-黑鹰山晚古生代岛弧带明水岩基南侧。石英闪长岩呈形态各异的残留体团块状分布,在新井较大岩株面积达 500 km^2 ,侵入于白山组和前长城纪敦煌岩群中,被明水岩基主体侵入的淡色二长花岗岩侵入蚕食,呈捕虏体形式产出。岩石组合为中细粒闪长岩-似斑状中细粒石英闪长岩-中细粒石英闪长岩,分布较广的中细粒石英闪长岩中含辉长质包体和角闪质包体,脉岩主要为片理化闪长玢岩脉、斜长花岗斑岩脉、闪长岩脉、花岗伟晶岩脉、石英闪长斑岩脉等。齐瑞荣等^[55]认为,早石炭世晚期—中石炭世早期($314 \pm 14 \text{ Ma}$)明水西新井埃达克质石英闪长岩为洋壳板片俯冲熔融形成的产物,指示白山-狼娃山-

黑鹰山晚古生代岛弧带在早石炭世晚期—中石炭世早期为地壳侧向增生和垂向增生机制并存,对于金多金属成矿有利。

(4) 马庄山浅成低温热液型金银矿床赋存在下石炭统白山组中。白山组下段为砂岩、板岩、安山岩、玄武岩夹凝灰岩、火山角砾岩、灰岩和大理岩;中段为安山岩、英安质角砾岩、凝灰岩、流纹岩及板岩;上段为生物灰岩、安山岩和英安质火山碎屑岩,揭示马庄山地区更接近古陆缘,早石炭世白山期末仍为浅海环境;且早石炭世白山期末仍有火山溢流相和火山爆发相,晚石炭世石英斑岩等次火山岩侵入相和岩浆隐爆角砾岩相也继承了陆缘火山岛弧带前期活动历史。晚石炭世石英斑岩侵入于白山组内,形成顺层和切层岩浆隐爆角砾岩筒,金银矿体赋存在岩浆隐爆角砾岩相中,指示其与晚石炭世石英斑岩和岩浆隐爆角砾岩相关系密切。晚石炭世石英斑岩具有富碱、高钾($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 $3.55\% \sim 9.67\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 $2.57 \sim 66.5$)、过铝质(Al_2O_3 为 $10.37\% \sim 14.28\%$)特征,为下地壳物质的部分熔融形成石英斑岩的初始岩浆,侵位至地壳浅部以次火山岩侵入岩体形式产出,形成年龄为 $315.4 \pm 0.6 \text{ Ma}^{[56]}$,指示晚石炭世以下地壳物质部分熔融的地壳垂向增生作用显著,以晚石炭世早期巴什基尔阶石英斑岩和岩浆隐爆角砾岩为代表。

(5) 白山组构造混杂岩片位于白山-狼娃山岛弧带中,白山组中岩石劈理发育,发育同斜紧闭褶皱,糜棱岩带。早期 S_1 透入性面理、 S_2 剪切面理、不对称掩卧-同斜-歪斜褶皱构造等构造样式,与糜棱岩带、韧性剪切带、剪切碎斑系和低绿片岩相相伴,以南向的逆冲剪切片理化带和逆冲推覆构造为主。晚期以走滑叠加褶皱变形为主,片理面不对称褶曲变形,叠加了北东向脆性断裂及褶皱,伴有不均一的低绿片岩相。

5 红石山晚古生代有限洋盆与岛弧造山带构造演化

5.1 早古生代上基底构造层的构造型相与构造演化

早古生代海相火山岛弧在晚古生代经过构造反转后,成为泥盆纪—石炭纪深成岩浆弧带。围绕早古生代岛弧周缘形成了泥盆纪火山岛弧增生,但演化为陆缘成熟岛弧带,对早古生代基底构造层构

造样式、构造组合和变形变质相进行构造岩相学筛选如下。①咸水湖组(O_2x)火山岩类似于岛弧火山岩^[57],岩石组合指示海相水下岛弧地体特征,南与二叠纪双堡塘组呈断层接触,北与公婆泉群呈断层接触,因华力西期花岗岩侵入而反转演化为晚古生代深成岩浆弧。咸水湖组为向斜构造南翼,该褶皱南翼产状为 $60^\circ\sim 75^\circ\angle 50^\circ\sim 65^\circ$,受断层破坏,局部变缓为 $15^\circ\angle 50^\circ$ 。北翼受华力西期岩浆侵入作用破坏严重。该褶皱长大于7000 m,宽大于2500 m。褶皱轴向为北西西向或近东西向。咸水湖组构造型相为低绿片岩相+断裂+褶皱。②从区域对比看,在星星峡-明水-旱山古陆两侧分布志留系,南侧红柳河-公婆泉-东七一山和北侧双沟山-黑鹰山(本文研究区),晚志留世星星峡-明水-旱山古陆不断隆起,经加里东期构造期后,逐渐成为敦煌造山带北侧外缘带。③四顶黑山-双沟山志留纪中酸性火山岩为海相火山岛弧岩^[58],发育弥漫式剪切劈理,韧性剪切带内发育糜棱岩化相。灰岩层中发育S型雁列脉,变火山岩层石英脉呈紧闭同斜褶皱、石香肠和钩状褶皱。构造型相为近东西向断裂+褶皱+低绿片岩相。

5.2 下-中基底构造层的构造型相与构造演化

(1)在小红山岩组($(Ar_3-S_3)D$)构造混杂岩带内,含有较多敦煌岩群($(Ar_3-Pt)D$)构造岩片信息,甘肃省地质调查院在1:25万红宝石幅内获得小红山黑云斜长片麻岩形成年龄为 2656 ± 146 Ma^①。小红山岩组内片麻岩套岩石组合为黑云斜长片麻岩、黑云更长片麻岩、二云斜长片麻岩及含石榴子石更长片麻岩。发育透入性片麻理,近东西向叠加韧性变形、流变褶皱、S-C 组构、 σ 、 δ 旋斑等韧性变形型相,指示了地壳深层次韧性剪切变形特征,以糜棱岩相+角闪石相构造型相发育为标志,暗示存在中压-高温变形变质相带。经历了绿片岩相退变作用和碎裂岩化相变形,被脆韧性剪切带(基质单元)围限和分割。

(2)本区东邻小红山北—大红山南地区,上志留统小红山岩组(S_3x)由山西地质调查院于2017年建立^②,岩石组合为灰色长英质片岩、二云石英片岩、绢云石英片岩、石英岩、绢云千枚岩及少量磁铁石英岩、斜长角闪片岩、绿帘角闪片岩。后期构造强烈变形作用形成了石英糜棱岩、长英质糜棱岩、长英质糜棱片岩、二云石英糜棱岩、含榴含磁铁二

云石英糜棱岩等。小红山组碎屑岩内碎屑锆石加权平均年龄为 436.5 ± 1.4 Ma,小红山岩组变基性火山岩的年龄为338~343 Ma 和276~279 Ma(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法)^②。红石山东南侧小红山岩组(S_3x)糜棱岩相-糜棱岩化相与本区类似,但构造岩片(片麻岩套)有差异。

(3)小红山岩组构造混杂岩带的构造变形-变质期次暂时划分为6期构造变形变质事件。①加里东期,经历了地壳中深层次韧性剪切变形,韧性变形型相包括流变褶皱、无根褶皱、S-C 组构、 σ 和 δ 旋斑、透入性片麻理置换等,变形变质主期暂定为加里东期。以高绿片岩相-角闪岩相为主。②泥盆纪深成岩浆弧与岛弧反转构造期。在东侧1:5万大红山幅内,发育泥盆纪花岗闪长岩类($\gamma\delta D^2$)、英云闪长岩类($\gamma\delta oD^2$)和石英二长岩序列,与红石山南侧片麻岩套有对应关系^{①②},多以糜棱岩形式存在。灰色花岗岩形成年龄分别为 399 ± 3 Ma 和 364.2 ± 2.2 Ma(谐和线的下交点年龄,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年)^②。泥盆纪侵入岩为深成岩浆弧,指示基底构造层被卷入晚古生代深成岩浆弧带中,深成岩浆弧持续演化到石炭纪末期。泥盆纪侵入岩经历了糜棱岩化相变形变质,岩石组合为花岗闪长质初糜棱岩、长英质糜棱岩、糜棱岩化英云闪长岩。③晚石炭世侵入岩序列中糜棱岩化石英闪长岩(δoC^2 , 319.7 ± 1.5 Ma)和糜棱岩化花岗闪长岩($\gamma\delta C^2$, 315.6 ± 1.6 Ma)^②,糜棱岩化相和糜棱岩相间的空间异质性结构,也指示糜棱岩化相可能形成于二叠纪,糜棱岩相形成更早,于二叠纪末—三叠纪变形变质为千糜岩相。糜棱岩化相-千糜岩相为强变形域的基质单元,与泥盆纪普遍发育糜棱岩相均质化结构的岩块单元具有差异,推测为哈萨克斯坦洋壳向南俯冲碰撞形成的敦煌地块北陆缘成熟岛弧。晚泥盆世—早石炭世,有限洋盆扩张垂向热物质驱动应力场耦合作用,形成敦煌地块北缘构造岩相的空间分形结构。④在红石山蛇绿混杂岩带南侧晚石炭世石英黑云角闪闪长岩(343.4 ± 1.0 Ma, 本文)、晚石炭世—早二叠世花岗闪长岩($309.9\pm 1.1\sim 283.4\pm 1.4$ Ma)等侵入岩体内,各类脉岩群发育,主要有辉长岩、闪长岩、石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩、二长花岗岩等,具有北西西向、南北向、北东向等系统性定向结构,暗示敦煌地块北缘经历了大规模的岩浆底侵和地壳垂向增生作用,形

成地壳浅部脉岩群,从东侧大红山→本区红石山东南部→本区红石山西南部。这些地层和侵入岩中的系列脉岩群指示,敦煌地块北缘具有反时针旋转构造应力场,南部构造带与中部红石山构造—蛇绿混杂岩带和北部四顶黑山—雀儿山构造带,具有完全不同的三大类构造岩相学和构造动力学特征。⑤ 在本区红石山蛇绿混杂岩带内,叠加了中三叠世花岗岩侵入(237.8~240 Ma)^[46],在红石山构造—蛇绿混杂岩带形成了南向逆冲推覆构造和断层相关褶皱带,伴随 C 型糜棱岩化相—糜棱岩相。⑥ 燕山期—喜马拉雅期北东向陆内断陷盆地,斜向叠置在红石山近东西向构造—蛇绿混杂岩带上,中部被苦泉组和第四系覆盖。

5.3 红石山洋壳残片和有限洋盆的变形构造样式、构造组合与构造演化

(1) 洋壳残片相。晚泥盆世—早石炭世洋壳扩张脊以红石山蛇绿混杂岩带为残存标志(图 6-A),南侧晚泥盆世糜棱岩化辉长岩($m\eta D_3$, 366.1 ± 1.6 Ma)和北侧辉长岩($m\eta C_{1b}$, 346.6 ± 2.8 Ma)^[45],估算洋脊扩张期持续了约 19.5 Ma,以红石山蛇绿混杂岩带南侧灰绿色细粒石英黑云角闪闪长岩(δC_{1b} , 343.4 ± 1.0 Ma)和糜棱岩化黑云二长花岗岩($m\eta \delta C_{1c}$, 336.8 ± 1.4 Ma,图 2)为该事件结束的构造岩相学标志,构造—岩浆—热事件持续时间约 29.3 Ma。前述本区蛇绿岩套从下到上的垂向单元序列恢复为:①变质超镁铁杂岩(变质橄榄岩);②堆晶超镁铁—镁铁岩;③均质辉长岩和少量的辉绿岩墙;④早石炭世扫子山期深水相硅质岩和含炭硅质细碎屑岩(有限洋盆相);⑤陆缘海相岛弧地体为南北两侧早石炭世扫子山期和白山期浅海相火山岛弧带;⑥小红山岩组等构造岩片为敦煌地块北缘前泥盆纪基底构造层。从区域构造岩相学类型水平分带性和综合对比看,红石山地区构造—古地理单元具有山弧盆体系特点,为哈萨克斯坦板块南缘南向俯冲碰撞,在敦煌地块北缘增生楔构造背景下,形成弧后扩张环境中形成的晚泥盆世—早石炭世有限洋盆,指示红石山构造—蛇绿混杂岩带为 SSZ 型蛇绿岩套。⑦ 扫子山组构造型相为低绿片岩相+千糜岩相+糜棱岩相,发育构造面理置换,形成绿泥石千糜岩等,蛇纹石糜棱岩和透闪石蛇纹石糜棱岩(基质单元),如在红石山北侧,扫子山组内蛇纹石糜棱岩和蛇纹石千糜岩中, C 型面理产状为

$118^\circ \angle 54^\circ$, S 型面理产状为 $169^\circ \angle 57^\circ$, 韧性剪切带优势产状为 $150^\circ \angle 73^\circ$ 。在石英闪长斑岩边部发育糜棱岩化相—糜棱岩相,扫子山组内千糜岩—糜棱岩化相—糜棱岩相为基质单元,这些动力变质作用和构造型相指示了它们被卷入构造—蛇绿混杂岩带,为有限洋盆内共生相关地质体单元(图 6-A),包含有晚泥盆世之前的洋底滑塌岩块相的信息。

(2) 红石山地区石炭纪构造—古地理单元恢复为:① 扫子山组内深水相细碎屑岩+硅质岩+赤铁碧玉岩为早石炭世有限洋盆相;② 以 460 金矿床埃达克岩质石英闪长岩和花岗闪长岩,揭示了与洋壳俯冲消减有关的埃达克岩质富钠质的钙碱性系列深成岩浆弧相;③ 红石山蛇绿岩套为晚泥盆世—早石炭世扩张洋脊经构造变形变位后保留的洋壳残片相标志;④ 扫子山组和白山组为浅海相岛弧相+浅海盆地相,大致呈对称结构分布在红石山有限洋盆南北两侧。晚泥盆世—早石炭世洋脊扩张中心向南北两侧为洋壳残片相→石炭纪有限洋盆相+富钠质的钙碱性系列深成岩浆弧相→浅海岛弧相+浅海盆地相(图 6-B)。

(3) 经 AMT 和磁法综合探测(图 3、图 4),蛇绿岩套为深部无根状,经历了强烈的构造变形变位作用。蛇绿混杂岩带经历了 4 期变形变质演化阶段,在大地构造相时间域垂向构造岩相学序列上,构造岩相学演化史恢复为:① 小红山岩组构造型相为糜棱岩相—糜棱岩化相+高绿片岩相—角闪岩相,在退变质过程中,叠加了碎裂岩化相+粘土化蚀变相。它们与蛇绿混杂岩带共生的先存前泥盆纪基底构造层。② 晚泥盆世—早石炭世形成伸展弧和洋壳扩张脊,辉长岩形成年龄为 366.1 ± 1.6 Ma($m\eta D_3$, 本文),在糜棱岩化相变辉长岩和辉长岩质糜棱岩相中,早期糜棱面理为角闪石和斜长石旋转碎斑和面理置换(角闪石相),早期构造型相为糜棱岩相—糜棱岩化相+角闪岩相,以角闪石和斜长石旋转碎斑和生长拉伸线理等空间均质性变形为特征。铬铁矿发育旋转碎斑结构和鱼尾结构,显示在岩浆熔离结晶分异后经历了韧性剪切变形,推测为准同期末发生构造变形。在红石山东 10 km 小红山处,糜棱岩化相辉长岩呈构造岩片,与近东西向辉绿岩脉相伴。蛇绿岩套底部第二单元辉长岩质杂岩由糜棱岩化相辉长岩和辉长岩质堆晶岩 2 个单元组成。② 中期糜棱岩化相面理由阳起石—透闪石—钠长石

等矿物组成,进一步演化为阳起石透闪石片岩-钠长透闪阳起石片岩等。在主变形带内发育无根流变褶皱和鞘褶皱,拉伸线理发育,流变褶皱发育。中期发育同构造期强烈流体交代作用,形成阳起石-透闪石相流体交代作用。糜棱岩化辉长岩(流体交代的糜棱岩化相,图 6-C)恢复地壳深部流体交代作用-构造事件的序列为:同构造期角闪岩相→同构造期透闪石阳起石相→韧性剪切变形糜棱岩化相。晚石炭世—早二叠世弧侵入岩+弧火山岩、浅海火山岛弧带、石炭纪末期有限洋盆萎缩强烈,从早二叠世构造-沉积-火山活动等综合构造岩相学特征看(图 6-D),与哈萨克斯坦板块南缘持续向南俯冲碰撞有密切关系。二叠纪大规模构造反转期,也是山弧盆耦合转换与弧盆碰撞期,发育中—晚二叠世同造山期磨拉石相上叠盆地、脆韧性剪切带。二叠纪和印支期具有自北向南逆冲推覆构造作用和压剪性走滑剪切带。早—中二叠世大面积断隆造山和深成岩浆弧发育,同造山期局部狭长带状的残余海盆内发育复理石相,向上演替为火山岩相+火山磨拉石相,最终演化为陆内湖泊相。③晚期(千糜岩相+构造片岩相)发生强烈的构造面理置换,构造岩相分形作用强烈,形成构造岩相的空间异质性结构,蛇纹石、绿泥石、绢云母、白云石等矿物呈网络状沿裂隙和节理分布,为早期糜棱岩化相辉长岩在构造抬升过程中形成,叠加了浅层次脆韧性剪切变形的构造样式,绿片岩相变质以强烈构造带水化蚀变为特征。受印支期黑云母二长花岗岩侵入叠加改造和近南北向逆冲推覆构造改造较强烈。④末期燕山期—喜马拉雅期陆内北东向和北西向断陷盆地和陆相火山-岩浆侵入,形成羟基蚀变相(粘土化蚀变相)+碎裂岩化相,伴随表生粘土化蚀变相。

5.4 红石山有限洋壳演化和构造-岩浆-成矿事件序列

蛇绿岩套、区域构造演化与区域成矿学内在联系密切^[60-72],红石山地区晚泥盆世—早石炭世有限洋盆和二叠纪岛弧型造山带对区域成矿规律具有独特的控制作用,主要与区域构造-岩浆演化作用密切相关,具有寻找铬铁矿矿床、含 Au-IrPGE 磁铁矿型矿床、斑岩型-浅成低温热液矿床金铜钼矿床、宝玉石矿床、特种耐火材料、环境修复矿产等潜力,建议进行战略性矿产综合找矿评价和深部找矿预测。

(1)红石山地区构造-蛇绿混杂岩套有利于形成较大规模的铬铁矿床和含 Au-IrPGE 磁铁矿型矿床。前人已经在红石山地区发现了小型铬铁矿矿床,根据磁法异常预测含铬铁矿超基性岩具有向西侧伏趋势;含铬尖晶石堆晶辉橄岩→堆晶辉石岩→堆晶辉长岩→斜长岩与含铬铁矿纯橄榄岩具有良好的岩浆结晶分异作用,指示有利于大型规模铬铁矿床形成。海底原生磁铁矿蛇纹石蚀变岩相发育,这是寻找含 Au-IrPGE 磁铁矿型矿床的重要标志,在磁铁矿-蛇纹石相蚀变带内具有寻找含 Au-IrPGE 磁铁矿型矿床的潜力。在表生过程中水镁石和蛇纹石富集成矿,具有寻找特种耐火材料和环境修复特种材料的条件,如蛇纹石料可用于高氟饮用水的净化。

(2)在红石山地区北侧,蛇纹石化相+透闪石化相、透闪石化相、滑石化相十分发育,而且深源菱铁矿-菱镁矿等组成的碳酸盐蚀变相发育,与金云母化相共生,含有绿辉石和蓝闪石,暗示经历了较高级别的构造变形,地表以蛇纹石片岩、透闪石蛇纹石片岩等为主,羟基蚀变异常与蛇纹石质糜棱岩和透闪石蛇纹石片岩密切相关,预测该区域具有寻找高档玉石和宝石矿床的条件。

(3)石炭纪富钠质的钙碱性系列闪长岩-花岗闪长岩单元,对于形成大型斑岩铜金矿床和浅成低温热液型金矿床十分有利。如甘肃 460 金矿床储矿相体为花岗闪长岩($\gamma\delta C_{1b}$)和石英闪长岩(δC_{1b}),早石炭世中期维宪阶深成岩浆弧和埃达克岩与俯冲洋壳板片密切相关,对形成大型金铜钼矿床有利,460 金矿区和外围发育面状 Au-Ag-Cu-Mo-Hg 综合异常,具有寻找大型斑岩型金铜矿床的潜力^{[61]③}。

(4)与岛弧造山带大致平行的脆韧性剪切带,有利于形成造山型金矿床。460 金矿-红石山-甜水井金矿为大型脆韧性剪切带,已经发现和圈定了一批沿该脆韧性剪切带分布的化探异常、金矿床和金矿点,属寻找造山型金矿床有利靶区。

(5)在岛弧造山带大致平行的脆韧性剪切带和构造-蛇绿杂岩带内,形成了中生代花岗岩叠加侵位和岩浆热液成矿事件,发育岩浆热液型钨矿脉带,深部具有寻找钨(铍铀)矿床潜力。

6 结 论

(1)将红石山和邻区构造层划分为前华里西

变形变质演化。

(2) 结合区域构造岩相学对比, 红石山和邻区在石炭纪构造-古地理格局为有限洋盆-岛弧带-造山带, 为哈萨克斯坦板块南缘南向俯冲碰撞, 在敦煌地块北缘增生楔中形成 SSZ 型蛇绿岩套。红石山地区划分为北部构造带四顶黑山-雀儿山晚古生代火山岛弧相+深成岩浆弧相, 中部构造带红石山 SSZ 型蛇绿混杂岩带恢复为晚泥盆世-石炭纪有限洋盆相+洋壳残片相+深成岩浆弧, 南部构造带为白山-狼娃山晚古生代火山岛弧相+深成岩浆弧相, 蛇绿混杂岩带将两侧地质体卷入混杂岩带内。这种复杂镶嵌结构的构造岩相体有利于形成大型-超大型斑岩型金铜钼矿床、浅成低温热液金矿床和造山型金矿床。

(3) 红石山蛇绿岩套从下到上垂向单元序列恢复为晚泥盆世-早石炭世变质超镁铁杂岩→堆晶超镁铁-镁铁岩→均质辉长岩和少量辉绿岩墙→早石炭世扫子山期深水相硅质岩和含碳硅质细碎屑岩(有限洋盆相)。南北两侧陆缘海相岛弧地体为早石炭世浅海相火山岛弧带。蛇绿混杂岩带与周缘地质体具有不同的构造岩相学边界, 从北向南具有明显的 4 个构造岩相学水平分带, 中心部位为超基性岩构造岩块单元, 以糜棱岩相辉长岩和蛇纹石片岩为包络面的构造岩片(基质单元), 蛇绿混杂岩带总体为无根状大型透镜体。

致谢:感谢审稿专家提出的修改意见, 使本文得到了完善和提升。

参考文献

- [1] 闫臻, 王宗起, 付长奎, 等. 混杂岩基本特征与专题地质填图[J]. 地质通报, 2018, 34(2/3): 168-191.
- [2] Raymond L A. Classification of mélanges [J]. Geological Society of America Special Paper, 1984, 198: 7-20.
- [3] Robertson A H F. Role of the tectonic facies concept in the orogenic analysis and its application to Tethys in the eastern Mediterranean region[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37: 139-213.
- [4] 李继亮. 全球大地构造相当议[J]. 地质通报, 2009, 28: 1375-1381.
- [5] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 大地构造相的定义、划分、特征及其鉴别标志[J]. 地质通报, 2008, 27: 1614-1637.
- [6] Festa A, Pini G A, Dilek Y, et al. Mélanges and mélange-forming processes: a historical overview and new concepts [J]. International Geology Review, 2010, 52: 1040-1105.
- [7] Festa A, Dilek Y, Pini G A, et al. Mechanisms and processes of strata disruption and mixing in the development of mélanges and broken formations: redefining and classifying mélanges [J]. Tectonophysics, 2012, 568/569: 7-24.
- [8] Maruyama S. Pacific-type orogeny revised: Miyashiro-type orogeny proposed[J]. Island Arc, 1997, 6: 91-120.
- [9] Cawood P A, Kröner A, Collins W J, et al. Earth accretionary orogens in space and time [J]. Geological Society of London Special Publication, 2009, 318: 1-36.
- [10] 中国地质调查局. 中国地质调查局地质调查专报 G1: 青藏高原区域地质调查野外工作手册[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001: 1-282.
- [11] 李荣社, 计文化, 辜平阳, 等. 造山带(蛇绿)构造混杂带填图方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016: 1-128.
- [12] 王涛, 计文化, 胡建民, 等. 专题地质填图及有关问题讨论[J]. 地质通报, 2016, 35(5): 633-641.
- [13] 李荣西, 王涛, 刘海青. 地质流体与流体地质填图[J]. 地质通报, 2018, 37(2/3): 325-336.
- [14] 耿兴忠, 陈懋弘, 刘旭, 等. 构造-蚀变填图在贵州泥堡金矿床的初步实践[J]. 地质通报, 2018, 37(2/3): 254-261.
- [15] 方维萱, 杜玉龙, 李建旭, 著. 大比例尺构造岩相学填图技术与找矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2018: 1-381.
- [16] 方维萱, 王磊, 王寿成, 等. 塔西砂砾岩型铜铅锌矿床成矿规律与找矿预测[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1-424.
- [17] 方维萱. 论热液角砾岩构造系统及研究内容、研究方法和岩相学填图应用[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(2): 237-265.
- [18] 方维萱. 岩浆侵入构造系统 I: 构造岩相学填图技术研发与找矿预测效果[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(3): 473-506.
- [19] 范文寿, 王浩, 张谦, 等. 敦煌造山带长山子地区变质演化及年代学研究[J]. 岩石学报, 2018, 34(9): 2773-2792.
- [20] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-535.
- [21] 余吉远, 计波, 过磊, 等. 甘肃北山地区古铜井群地质特征与时代厘定[J]. 地质通报, 2018, 37(4): 704-715.
- [22] 王方成, 魏志军, 张国英, 孙新春. 甘肃北山北带红石山地区志留纪地层新资料[J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1162-1163.
- [23] Rippington S J. The crustal evolution of Nemegt and Altan Uul, southern Mongolia[D]. Master's thesis, the University of Leicester, 2007: 1-195.
- [24] Wainwright A J. Volcanostratigraphic framework and magmatic evolution of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au district, South Mongolia[D]. PhD thesis, the University of British Columbia, 2008: 1-223.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 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.
- [28] 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.
- [29] 陈玉良, 康文彬, 梅华平, 等. 甘肃北山北部红石山地区泥盆系雀儿山群火山岩地球化学特征及构造环境分析[J]. 西北地质, 2015, 48(4): 50-59.
- [30] 李生虎, 李文铅, 夏明, 等. 新疆东天山地区“大草滩运动”的建立与其地质意义[J]. 西北地质, 2002, 35(3): 48-52.
- [31] 卢进才, 牛亚卓, 魏仙样, 等. 北山红石山地区晚古生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 岩石学报, 2013,

- 29(8): 2685-2694
- [32] 王静,王学武,邓明国,等.新疆四顶黑山花岗岩体锆石 LA-ICP-MS-U-Pb 年龄及地质意义[J].地质找矿论丛,2018,33(3): 365-373.
- [33] 黄增保,金霞,李葆华,等.甘肃红石山地区印支期花岗岩地球化学特征及成因讨论[J].西北地质,2011,44(1): 10-19.
- [34] 刘明强,王建军,代文军.甘肃北山红石山地区马鞍山北花岗岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].岩石矿物学杂志,2006,25(6): 473-479
- [35] 刘明强,王建军,代文军,等.甘肃北山造山带红石山地区正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 花岗质岩石的成因及地质意义[J].地质通报,2005,24(9): 831-836.
- [36] 史文全,代文军.四顶黑山镁铁质-超镁铁质岩 Sm-Nd 等时线年龄及其意义[J].甘肃地质,2008,17(1): 13-22.
- [37] 代文军.甘肃北山四顶黑山镁铁、超镁铁质岩地球化学特征及其地质意义[J].甘肃地质,2010,19(2): 8-17.
- [38] 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.
- [39] 魏海峰,张国英.北山霍勒扎德盖石炭系扫子山组岩石地层及古孢子化石特征[J].甘肃地质,2008,17(2): 19-23.
- [40] 甘肃地矿局.区域地质志[M].北京:地质出版社,1989.
- [41] 李雷.甘肃北山地区 460 金矿床地质及成矿流体研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2015.
- [42] 莫亚龙,吕新彪,朱江,等.甘肃北山 460 金矿埃达克岩锆石年龄、地球化学特征及其地质意义[C]//2011 International Conference on Fuzzy Systems and Neural Computing,2011: 619-622.
- [43] 左国朝,何国琦.北山板块构造及成矿规律[M].北京:北京大学出版社,1990: 1-226.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 黄增保,金霞,李葆华,等.甘肃红石山地区印支期花岗岩地球化学特征及成因讨论[J].西北地质,2011,44(1): 10-19.
- [47] 陈海东,高勇,何国强,等.内蒙古北山地区三个井辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J].中国地质调查,2020,7(1): 53-59.
- [48] 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.
- [49] Wu T, Zheng R, 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 Proceedings of the Fifth Workshop on 1:5M International Geological Map of Asia,2011.
- [50] 李小菲.北山马鬃山地区古生代花岗岩形成年龄、地球化学特征及其地质意义[D].西北大学硕士学位论文,2013.
- [51] 惠卫东,朱江,邓杰,等.甘肃北山白山堂矿区流纹斑岩的 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J].地质与勘探,2013,49(3): 484-495.
- [52] 郭谦谦,肖文交,侯泉林,等.北山南部墩墩山弧的识别及充填层序厘定[C]//第五届全国构造地质与地球动力学学术研讨会摘要集.武汉:中国地质大学出版社,2012: 83-84
- [53] 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.
- [54] 聂凤军,江思宏,刘妍,等.内蒙古黑鹰山富铁矿床磷灰石-铋同位素年龄及其地质意义[J].矿床地质,2005,24(2): 134-140.
- [55] 齐瑞荣,雷志才,黄增保.甘肃北山北带明水西新井埃达克岩质石英闪长岩地球化学特征及地质意义[J].西北地质,2016,49(2): 134-140.
- [56] 王琦崧,张静,王肃,等.东天山马庄山金矿区赋矿石英斑岩的岩石成因和构造背景:元素地球化学、U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J].岩石学报,2019,35(5): 1503-1518.
- [57] 王国强,李向民,徐学义,等.甘蒙北山地区奥陶纪火山岩地球化学特征及构造背景探讨[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(3): 848-860.
- [58] 王国强,李向民,徐学义,等.甘蒙北山志留纪公婆泉群火山岩的地球化学及其对岩石成因和构造环境的制约[J].地质学报,2016,90(10): 2603-2619.
- [59] 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.
- [60] 方维萱,黄转盈,唐红峰,等.东天山库姆塔格-沙泉子晚石炭世火山-沉积岩相学地质地球化学特征与构造环境[J].中国地质,2006,33(3): 529-544.
- [61] Fang W X, Huang Z Y, Zhou B, et al. Characteristics of rock-chip geochemical anomalies of No.460 gold deposits in Gansu Province, China [C]//Mao J W, Bierlein F P. Mineral deposit research: Meeting the global challenge. Springer,2005: 1523-1526.
- [62] 聂凤军,江思宏,白大明,等.蒙甘新相邻(北山)地区金铜矿床时空分布特征及成矿作用[J].矿床地质,2003,22(3): 234-245.
- [63] 方维萱,胡瑞忠,谢桂青,等.云南哀牢山地区构造岩石地层单元及其构造演化[J].大地构造与成矿学,2002,26(1): 33-41.
- [64] 方维萱,韩润生.云贵高原-造山带-沉积盆地的构造演化与成岩成矿作用(代序)[J].大地构造与成矿学,2014,38(4): 729-731.
- [65] Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. J Asian Earth Sci,2006,26: 207-224.
- [66] 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.
- [67] 潘桂棠,陆松年,肖庆辉,等.中国大地构造阶段划分和演化[J].地质前缘,2016,23(6): 1-23.
- [68] 王国强,李向民,徐学义,等.北山造山带古生代蛇绿混杂岩研究现状及进展[J].地质通报,2021,40(1): 71-81.
- [69] 张旗,张维,姜丽莉,等.造山橄榄岩及其意义[J].地质通报,2020,39(10): 1489-1506.
- [70] 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.
- [71] 卫彦升,闫涛,杨五宝,等.内蒙古北山造山带北带晚古生代地层时空格架的建立[J].地质通报,2020,39(9): 1367-1388.
- [72] 田健,辛后田,滕学建,等.内蒙古北山造山带白云山蛇绿混杂岩的厘定及其对北山洋俯冲消减的指示[J].地质通报,2020,39(9): 1436-1447.
- ①甘肃省地质调查院.中华人民共和国地质图说明书(红宝石幅 1:250 000).2004.
- ②甘肃省地质调查院.1:50 000 区域地质调查报告红岭幅(K47 E 009001)、阿勒腾阔尔梗兑乌勒幅(K47 E 009002)双沟山幅(K47 E 009003).2004.
- ③方维萱.甘肃省肃北县马鞍山测区 1986 年度岩石地球化学普查找矿工作报告.西北有色金属物探队,1987.