

doi: 10.12097/gbc.2023.04.039

北山及邻区晚古生代基性岩墙群几何特征及构造意义

——基于遥感影像研究

常旺¹, 张贵山^{1,2*}, 彭仁¹, 温汉捷^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 张磊^{1,2}, 孟乾坤¹, 王亮¹

CHANG Wang¹, ZHANG Guishan^{1,2*}, PENG Ren¹, WEN Hanjie^{1,2}, LIU Lei^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, MENG Qiankun¹, WANG Liang¹

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064;

2. 自然资源部新能源矿产与资源信息工程技术创新中心, 陕西 西安 710054

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Engineering Technology Innovation Center of New Energy Minerals and Resource Information, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要: 北山及邻区广泛发育晚古生代基性岩墙群,反映了该地先存裂隙(节理)的区域构造应力场和岩墙群形成后经历的构造活动,对探究岩浆活动、反演构造演化过程及分析岩墙几何特征与构造应力之间的耦合关系具有重要意义。综合遥感和地质方法,在遥感影像中解译提取1777条基性岩墙,通过几何工具计算得到岩墙走向数据,总结岩墙群空间分布规律,同时与其形成时的大陆动力学演化背景相对应。结果表明,北山及邻区岩墙优势走向方位集中于 $0^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 与 $320^{\circ}\sim 360^{\circ}$,绝大部分岩墙是在伸展作用中张性区域应力场控制下形成的,具张性性质或剪张性性质,部分岩墙受后期碰撞挤压环境影响,具张剪性性质。岩墙群主导成因机制是区域伸展构造作用,兼以地幔柱远程效应及热点作用。

关键词: 遥感地质;基性岩墙群;几何特征;区域构造应力场;北山

中图分类号: P534.5; P588.12⁴; P627 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)04-0536-10

Chang W, Zhang G S, Peng R, Wen H J, Liu L, Zhang L, Meng Q K, Wang L. Geometric characteristics and tectonic significance of Late Paleozoic mafic dyke swarms in Beishan and its adjacent areas—Based on remote sensing image research. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 536–545

Abstract: Late Paleozoic mafic dyke swarms are widely developed in Beishan and its adjacent areas, which reflect the regional tectonic stress field of the pre-existing fissures (joints) and the tectonic activities experienced after the formation of dyke swarms, and are of great significance for exploring magmatic activities, inverting the tectonic evolution process, and analyzing the coupling relationship between the geometric characteristics of the dyke and the tectonic stress. Combining remote sensing and geological methods, this paper interprets and extracts 1777 basic dykes from remote sensing images, calculates the trend data of dykes through geometric tools, summarizes the spatial distribution of dyke swarms, and discusses the genetic mechanism of dyke swarm in the study area corresponding to the continental dynamic evolution background when they were formed. The dominant strike directions of the dyke in the Beishan and its adjacent areas are concentrated in $0^{\circ}\sim 65^{\circ}$ and $320^{\circ}\sim 360^{\circ}$. Most of the dyke are formed under the control

收稿日期: 2023-04-20; 修订日期: 2023-07-05

资助项目: 国家自然科学基金面上项目《闽西及邻区晚中生代基性岩墙群年代学和地球化学研究》(批准号: 41073027)和陕西省自然科学基金面上项目《甘肃北山晚古生代基性岩墙群年代学和地球化学: 塔里木地幔柱证据》(编号: 2019JM-161)

作者简介: 常旺(1998-), 男, 在读硕士生, 地质学专业, 从事构造地质学研究。E-mail: 2329272785@qq.com

* 通信作者: 张贵山(1971-), 男, 博士, 教授, 从事岩石、矿床地球化学研究。E-mail: zygszh@chd.edu.cn

of the tensile regional stress field during the regional extension and have tensile or shear properties, while some of the dykes are affected by the late collision and extrusion environment and have the properties of tensile shear. The dominant genetic mechanism of dyke swarms is regional extensional tectonics, and also the remote effect and hot spot effect of mantle plume.

Key words: remote sensing geology; dyke swarms; geometrical characteristic; regional tectonic stress field; Beishan

岩墙是一种常见的地质单元,形成于大陆伸展背景下,是岩浆沿地壳裂隙侵入围岩而形成的不整合脉状侵入体,其物质来源主要为陆下软流圈或地幔岩石圈的岩浆侵入体,可以作为陆块伸展甚至裂解的关键遗迹(Halls, 1982, 1987; Fahrig, 1987; Emerman et al., 1990; 李江海等, 1997; Ahijado et al., 2001; Hou et al., 2008; 侯贵廷等, 2009; Peng et al., 2019; Salminen et al., 2019; Srivastava et al., 2019; 张贵山等, 2021)。岩墙多为群体行迹分布,其形成基础是地壳在区域应力系统作用下,于伸展或挤压环境中形成先存节理(裂隙),随着地壳活动加剧,岩浆热液上涌,或垂向或水平(斜向)侵入先存节理,节理拓展扩张,形成岩墙群(Pollard, 1987)。岩浆侵入和节理拓展过程往往同时发生,或存在较短的时间差,岩墙基本继承先存节理(裂隙)形成前的应力性质和基本特征。同时,岩墙侵位前的先存节理形态和侵位时的围岩应力状态决定了岩墙的几何形状(Hou et al., 2006; 侯贵廷, 2012),因此岩墙群的几何形态(主要包括走向、长度、厚度、空间分布等)保存了区域构造应力场和动力学信息,对于指示岩浆流动方向,探究岩浆活动,反演构造演化过程,分析岩墙形态特征与构造应力之间的耦合关系具有重要意义(Hou et al., 2008; Chen et al., 2014)。

北山及邻区处于中亚造山带南缘同一个构造单元,共同经历了构造演化过程,且前人在甘肃北山牛圈子、马鬃山等地的年代学分析集中于 280~240 Ma 之间,直接及间接证据表明,研究区广泛发育晚古生代基性岩墙群(林瑶等, 2014; 杨春霞等, 2015; 师震, 2019; Dai et al., 2020; 彭仁等, 2020),岩墙岩性多为辉绿岩,少数为辉绿玢岩和辉长辉绿岩,围岩以奥陶纪一二叠纪花岗岩为主(Zhang et al., 2015)。研究区植被覆盖度低,岩墙群露头状况良好,遥感影像中清晰可见基性岩墙呈暗黑色条带状分布。由于遥感在岩墙研究中的重要作用,国内外做了大量工作,例如著名的加拿大“Mackenzie”岩墙群及巨型地幔柱的发现等。通过影像解译提取岩墙信息,进行岩浆超压及地壳伸展量的估算、探究地球动力学环境

等(陈宁华等, 2013; 董津津等, 2013; 冯乾文等, 2015),但有关北山及邻区岩墙群的研究多集中于地球化学特征、岩石组合等方面,缺乏大、中区域尺度下岩墙群几何特征、构造变形等的相关研究,加之研究区地域广袤,多无人区、军事禁区,涉及一部分境外区域,常规地质调查方法存在诸多困难,利用遥感影像可以清晰、快速地捕捉研究区不同时期的岩墙形态分布。

综上所述,本文选定北山及邻区为研究区,在遥感影像解译的基础上,结合区域地质资料,分析该地单体岩墙和岩墙群的形态特征和应力性质,以期恢复研究区构造应力场,进一步确定岩墙群成因,探究北山及邻区岩墙群与周围岩浆事件的关系。

1 区域地质特征

北山及邻区构造位置位于中亚造山带南缘,地处华北板块、塔里木板块与哈萨克斯坦板块三大板块结合部位(图 1-a)(Xiao et al., 2010; 张文等, 2011; 杨建国等, 2012; 王国强等, 2014; Dai et al., 2020),连接着中亚造山带南缘东—西段构造单元,构造位置非常关键。研究区涵盖甘肃北山、内蒙古西部及蒙古国南部地区,经历了多期次大洋俯冲闭合增生作用,导致该地区岩浆作用强烈,构造运动活跃,特别是晚古生代古亚洲洋俯冲与闭合,对北山地区产生了深远影响(Xiao et al., 2009; Zhang et al., 2011; 陈超等, 2017; Zheng et al., 2021a)。独特的构造位置及强烈、复杂的岩浆活动造就了北山及邻区遍布各种形态的岩墙群景观。

有关研究区大地构造位置的具体归属尚未形成统一认识(何世平等, 2002; 张文等, 2011; 杨建国等, 2012)。北山地区早古生代经历了强烈的碰撞挤压造山活动(陈超等, 2017),为之后岩浆侵入形成岩墙地貌奠定了基础。寒武纪—奥陶纪红柳河、牛圈子、洗肠井一带在拉张作用下形成洋盆(何世平, 2005),志留纪洋盆向北俯冲至哈萨克斯坦板块(杨合群等, 2012),但对洋盆具体位置及洋盆闭合的最终时限都有不同认识(何世平等, 2005; 李奇祥等, 2010;

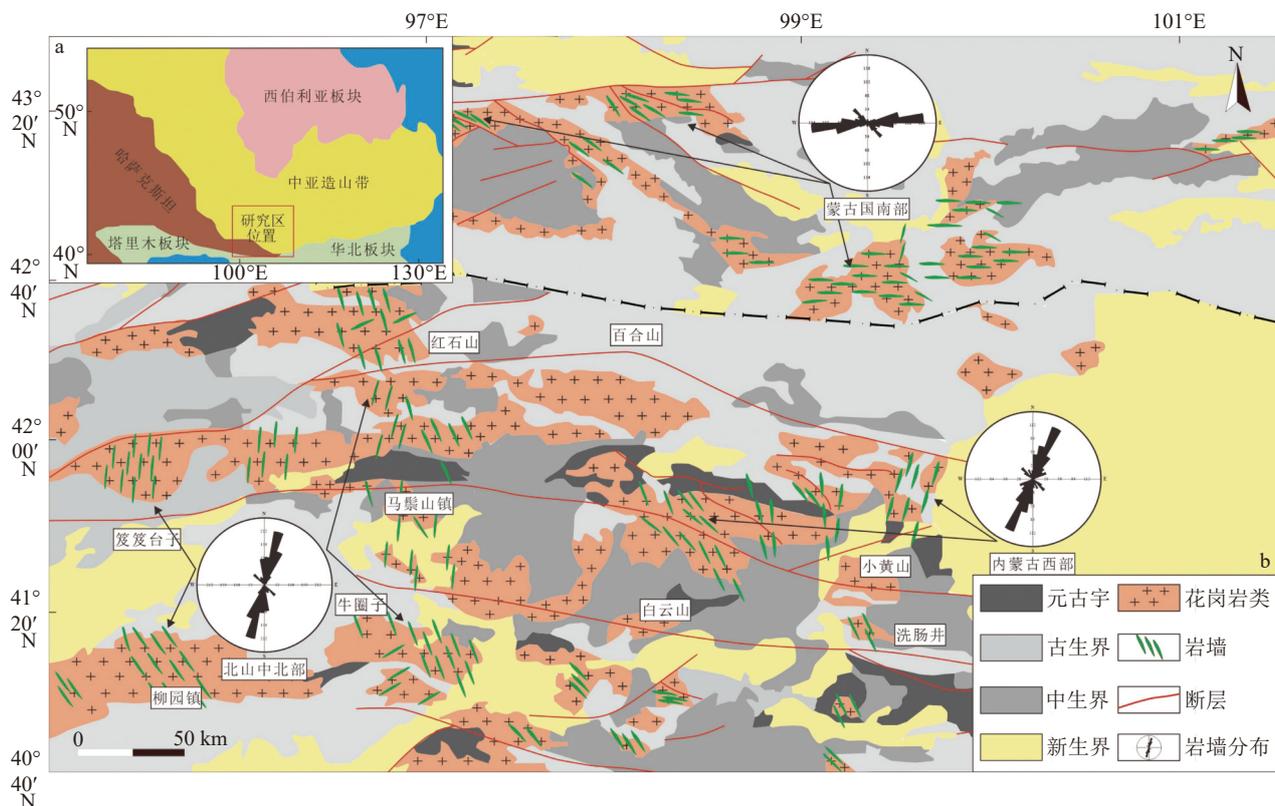


图1 北山及邻区大地构造位置略图(a, 据 Jahn, 2004 修改)和地质简图与岩墙群分布状况(b, 底图据 王国强等, 2015 修改)

Fig. 1 Geotectonic position map (a) and geological map and the distribution of dyke swarm (b) in Beishan and its adjacent areas

Mao et al., 2012; 梁积伟等, 2014; 专少鹏等, 2018; 赵宏刚等, 2019; 李沅柏等, 2021)。北山中南部地区出露的埃达克岩、花岗斑岩脉(288.5 Ma)指示了该地区早二叠世处于大洋板块俯冲环境(Mao et al., 2012), 与敦煌地块相关的构造变质单元是古亚洲洋中二叠世俯冲的产物, 古亚洲洋闭合晚于中二叠世, 反映北山中南部地区二叠世之后进入陆内演化阶段。该地区碰撞构造环境下的花岗岩(290~270 Ma)及辉长岩(281 Ma)岩石特征, 指示北山中南部地区于早二叠世发生了由挤压向碰撞环境的转变, 说明北山地区于二叠纪早期开始了洋-陆转化(郑荣国等, 2016), 进入中生代之后北山地区基本进入陆内演化阶段, 岩浆、构造等活动趋于平稳。

北山及邻区元古宙-新生代地层均有不同程度出露, 且地层沉积相对完整, 以古生代、中生代与新生代地层最发育(图 1-b)。元古宙地层散布在整个研究区, 主要为一套海相碎屑岩与碳酸盐岩沉积建造; 古生代地层广泛分布于甘肃北山牛圈子、马鬃山、百合山一带及蒙古国南部部分省份, 岩石组成主要为砂岩、泥岩、灰岩及火山岩; 中生代地层接触关

系多为角度不整合, 岩石组成主要为泥岩、细砂岩、粉砂岩, 分布于甘肃北山中东部白云山、洗肠井一带及蒙古国南部部分省份; 新生代地层为第四纪沉积物所覆盖, 岩性多为松散碎屑岩, 以内蒙古西部分布居多。研究区断裂构造发育, 断层与推测断裂带呈近 EW 向, 部分为 NEE 向展布。该地区岩浆活动频发, 出露大面积侵入岩, 本文研究的基性岩墙群主要为晚古生代强烈岩浆活动的产物, 其出露规模可观, 遍布北山及相邻地区, 有重要的研究价值。

2 研究方法

北山及邻区中基性岩墙纵横交汇, 空间分布规律明显, 暗示其形成严格受大地构造作用控制, 为采集、分析岩墙的几何特征提供了物质基础。研究区多为无人戈壁区, 工作条件艰苦, 传统野外地质调查方法难以直接观察到岩墙分布的全貌。遥感影像中基性岩墙与浅色花岗岩围岩有明显的色调差异, 岩墙表现为显著的暗黑色条带, 其几何形态清楚地展现在遥感卫星图像上, 利用高分辨率遥感图像解译可以克服传统野外地质调查的弊端, 清晰、快速地获

取研究区岩墙空间分布形态。

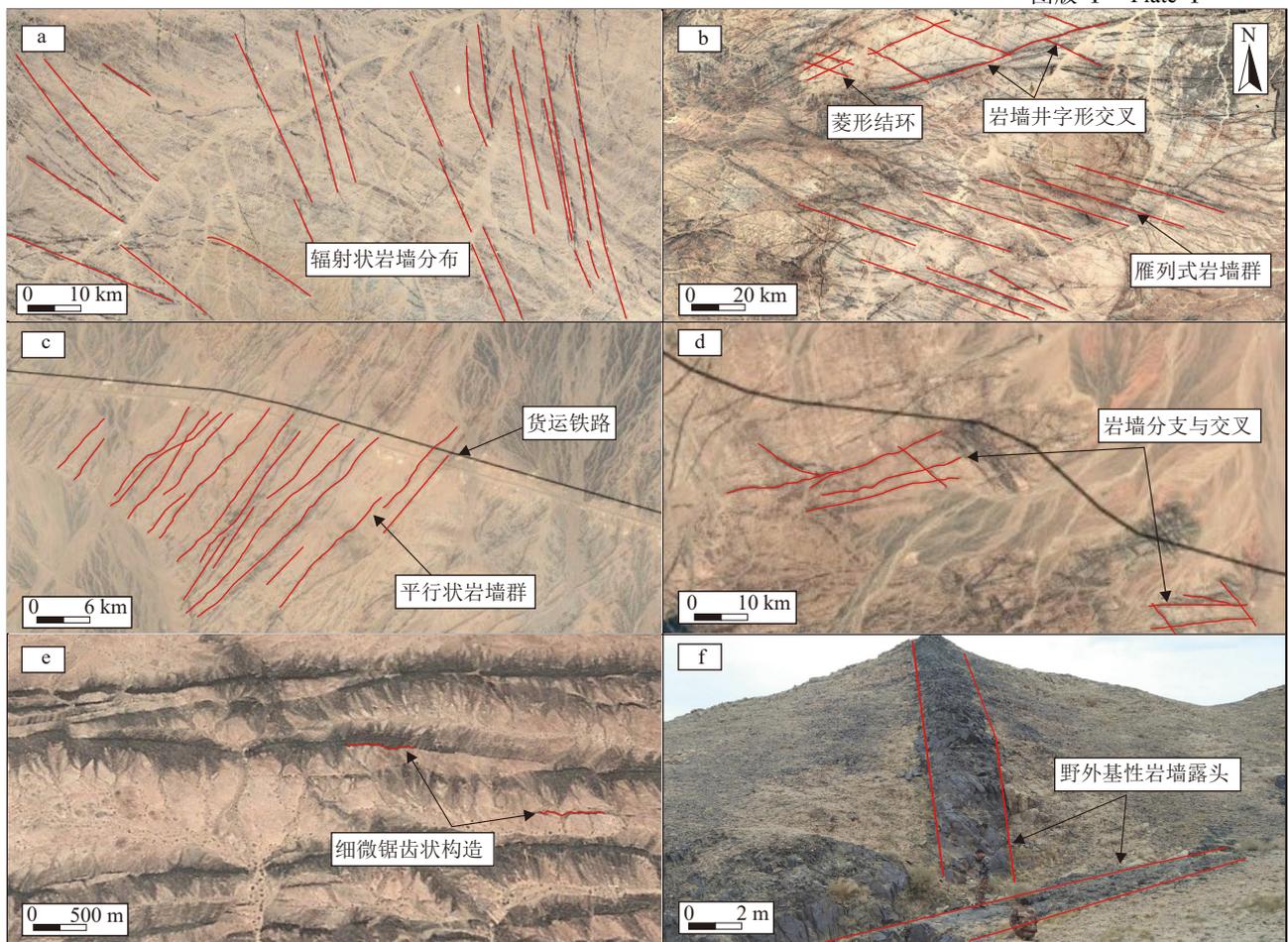
遥感影像主要使用 Google Earth 软件提供的高分辨率影像。Google Earth 卫星影像资料包括不同卫星影像与航拍数据的整合, 空间分辨率最高为 0.3 m, 解译精度高。以基性岩墙群为研究对象, 选取 2013 年秋季拍摄的遥感影像, 该季节研究区多为晴朗、云量少的天气, 影像效果好。

在 Google Earth 提供的高分辨率影像中, 分区逐段对岩墙进行目视解译, 并形成矢量数据文件, 转存至 Arcgis 软件几何工具中。在离散线段属性表中输入起点和终点坐标, 根据三角函数关系计算出岩墙走向数据, 导出数据, 绘制玫瑰花图、等密度图等进行统计分析。在此基础上, 统计岩墙宏观分布形态、几何特征(长度和厚度、优势走向、岩墙和断裂的关系等), 再通过岩石形变理论, 分析岩浆侵入时的区域构造应力场及其形成的大陆动力学背景及成因机制。

3 基性岩墙空间分布特征

北山及邻区岩墙群宏观层面基本表现出走向稳定、边界较平直的特点, 发育各种类型的构造形态, 且分布有一定规律, 代表了一个有机联系的破裂系统, 说明岩墙群严格受大地构造作用控制, 是先存破裂侵位发展而来的(侯贵廷, 2012)。北山及邻区晚古生代基性岩墙群沿先存破裂侵位形成, 破裂以花岗岩岩体中的裂隙或节理为主, 在影像资料中没有表现出明显的位移(图版 I), 从整体分布规律角度观察, 岩墙群侵位前的先存破裂群可以作为节理群讨论。本文在 Google Earth 提供的高分辨率遥感影像基础上, 对北山及邻区基性岩墙分布状况进行了精细的目视解译, 共解译出 1777 条岩墙, 分区制作走向玫瑰花图(图 2-a)和岩墙数量统计(图 2-b), 进

图版 I Plate I



a. 内蒙古西部“辐射状”岩墙群分布; b. 蒙古国南部省份近 EW 向岩墙群; c. 北山中部地区 NE—SW 向岩墙群; d. 北山地区曲折分布的岩墙群; e. 岩墙中细微锯齿状构造; f. 马鬃山地区野外岩墙穿插现象。原始遥感影像资料来源于 Google Earth

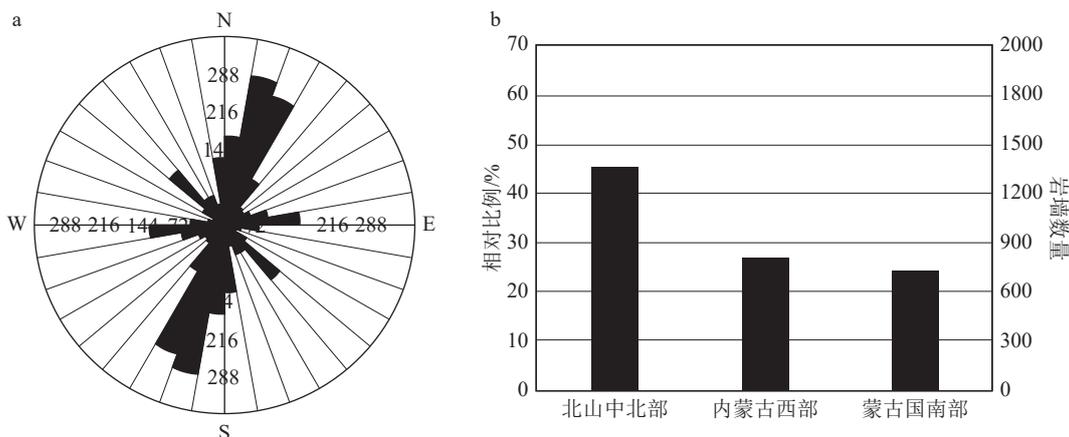


图2 北山及邻区 1777 条岩墙走向玫瑰图(a)与研究区岩墙数量统计直方图(b)
(分别与图 1 不同分区的走向玫瑰花图相对应)

Fig. 2 Trend rose (a) and quantity statistics (b) of 1777 dyke swarms in Beishan and adjacent areas

而通过走向玫瑰图表示研究区优势走向方位(图 2-a)。全区基性岩墙均有分布, 主要集中分布于北山中北部、南部、内蒙古西部及蒙古国南部地区(图 1-b、图版 I -b)。除区域地质调查图中已经标识的岩墙外, 许多细小、破碎的岩墙片段都被识别出来。研究区岩墙数量和走向统计显示, 最具优势走向发育为 $0^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 与 $320^{\circ}\sim 360^{\circ}$ (图 2), 其他走向岩墙也有发育, 数量较少。

宏观影像显示, 北山地区北部、中部及南部集中发育 NE—SW 向和近 SN 向岩墙, 约占本次研究岩墙总体的 46%(图 2-b), 其次为 NNW 向或近 EW 向(图 1-b)。岩墙走向稳定, 倾角多近直立, 规模相差较大, 最长的有数十千米, 最短的仅几十厘米, 一般长为 1~10 km; 岩墙宽度最宽的可达 1~3 m, 最窄的仅几十厘米, 平均宽度在 1~2 m 之间(图版 I)。部分岩墙较平直, 呈规律状雁列式左阶排列(图版 I -c), 具剪性特征; 主干岩墙呈不规则的弯曲特征, 岩墙短而弯曲, 填充裂隙面粗糙不平, 无擦痕, 不同的岩墙之间也表现出不规则的斜列与错断(图版 I -d), 反映岩墙形成前填充时裂隙的应力状态及受到后期构造运动的影响。NNW 向和近 EW 向岩墙在北山地区分布有限, 宽度不一, 大多数宽度较窄, 延伸长度有限, 形态弯曲、波折, 延伸方向与 NE—SW 向主体岩墙共轭, 交叉穿过主体岩墙, 形成许多张性应力控制下的典型构造形态, 但该走向岩墙数量有限, 为后期裂隙切割先存断裂系统, 二者为不同构造期次的产物。

NW—SE 向与近 EW 向岩墙主要分布于内蒙古

西部和蒙古国南部省份(图 1-b), NW—SE 向岩墙群形态较简明, 单体岩墙之间间隔相对均匀, 岩墙尾部呈“辐射状”、头部呈“束状”形态, NW 方向发散, SE 方向聚合, 岩墙单体宽度较窄, 延伸长度数十千米, 规模较可观(图版 I -a)。岩墙的边界从宏观上看都较平直, 局部有些曲折、不规则形态。近 EW 向岩墙主要分布在蒙古国南部省份, 看似岩墙杂乱、曲折, 实际顺着岩墙延伸方向观察, 西南向东北方向岩墙形态延伸呈一定规律状分布排列, 但该地岩墙表现出曲折、杂乱形态, 说明受到后期构造活动影响强烈(图版 I -b)。近 EW 向岩墙在北山地区内也有分布, 数量较少。

根据上述岩墙几何特征, 将北山及邻区的岩墙群构造形态主要分为 3 种类型: 平行形态类、放射形态类、交叉分支类。不同地区的岩墙群具有不同的一种或两种主要构造形态, 岩墙群表现的主要构造形态与其侵位时的力学环境有着密切的联系。

4 基性岩墙的力学特征及区域应力场环境

Pollard(1987) 通过弹性力学实验提出, 只要地块内部先存裂隙的长度和宽度达到一定程度, 那么地块受到较小的垂直于裂隙的张应力作用就会在裂隙末端处产生巨大的拉张应力, 使裂隙继续快速扩展, 最后形成深大裂隙, 为岩浆侵入提供充足的空间。岩墙群的形成实际就是先存节理群在应力系统作用下, 在伸展环境中扩展为大节理群, 随后岩浆侵入形成岩墙群。所以, 在北山及邻区探究岩墙群的力学性质, 就是探究节理群的力学性质。岩墙侵位前的

先存节理形态和侵位时的围岩应力状态决定着岩墙的几何形状,因此探讨岩墙群的力学性质应该首先从岩墙群的几何样式出发,揭示群体分布规律,才能准确反演先存节理群的区域构造应力场(侯贵廷, 2012),并进一步探讨岩墙形成的动力学背景,分析研究区岩墙群的成因机制。

4.1 不同走向岩墙填充裂隙的运动学及力学性质

不同走向基性岩墙的单体形态展现出不同的构造类型,表明岩墙群在形成前或形成后具有不同的力学性质。

4.1.1 蒙古国南部与内蒙古西部岩墙群

蒙古国南部省份与内蒙古西部地区大多数岩墙是 NW—SE 向,其次是近 EW 向,其他走向数量极少。这里绝大多数岩墙都具有以张性为主兼剪性的剪张性构造形态,少数岩墙具有以剪性为主兼张性的张剪性构造形态。

内蒙古西部 NW—SE 向岩墙形态简明,总体上近直立,倾角大于 80° ,可忽略倾角的影响,单体岩墙呈直线延伸,多弯曲、波折现象,还有分叉分支现象。岩墙与围岩接触边多呈不规则的镶嵌交错状。而且岩墙成辐射状、束状, NW 向发散, SE 向聚合(图版 I-a),先存节理走向与区域拉张方向垂直,这些现象表明岩墙是张节理构造形态,说明岩墙侵位前存节理为张节理。张应力作用下的裂隙形态表现为不规则的树枝状、各种网络状,特殊成因机制下构成放射状或同心圆状组合。

近 EW 向岩墙整体上走向较稳定,自 WS 向 EN 表现为规律状雁列式右阶排列,单体岩墙边界较平直,裂隙面平整光滑,延伸长度达十几千米,产状受地形影响小。不同走向岩墙交叉穿插,形成菱形形态,尾部有细微菱形结环构造(图版 I-b),这是典型剪节理的构造形态。区域内岩墙受到后期构造活动影响强烈,根据岩墙形态判断至少经历了 2 次大的构造活动,表现出曲折杂乱的形态,但整体上该区岩墙填充前裂隙具剪性性质,以张剪性为主要力学特征,同时反映岩墙群不完全是张性性质,也具有剪性性质。

4.1.2 甘肃北山中部地区岩墙群

甘肃北山地区基性岩墙群走向以 NE—SW 与近 SN 向为主, NNW 向与近 NW 向岩墙有少量分布。整体岩墙群以张性构造形态为主要特征,局部

区域岩墙表现为剪性形态。

北山中部地区岩墙走向不稳定,局部区域 NE—SW 向岩墙与 NW—SE 向和近 EW 向岩墙交叉,岩墙形态多样,各种类型的岩墙均有分布(图 1-b),西南部(图版 I-c)岩墙形态严格受构造作用控制,为平行状阶梯排列,岩墙间隔均匀,平直伸展,延伸长度长,属于伸展作用下典型的张节理构造形态,但岩墙细长、平直,表明该区域岩墙受到挤压环境的影响,存在右旋剪切力,具有剪性特征。但相比蒙古国南部近 EW 向剪节理特征,北山地区剪节理较小,为轻微压剪性裂隙,挤压环境指示北山地区洋盆闭合后碰撞作用的发生。

整体中部地区大多数岩墙宏观上呈直线延伸,如近 SN 向、NE 向岩墙群(图 1-b、图版 I-c)。细微处具有弯曲、波折现象,大多岩墙分叉分支(图版 I-d,e),岩墙边界不规则,甚至在平面上呈锯齿状(图版 I-e),这是典型张节理构造形态,表明北山中部地区岩墙群具有显著的张性构造形态。除原生细微锯齿形态外,岩墙锯齿状形态散落,沿水流方向表现出沉积特征,规模较大的岩墙呈锯齿状,其形成原因更多的是岩墙耐风化,突出形成高地,风化后镁铁质暗黑色岩石碎块散落形成,或在遥感影像上观察到更大规模的锯齿形状,锯齿尖端延伸长度达数百米,是岩墙边缘被第四纪沉积物覆盖,导致局部色浅,并非构造作用控制的结果。

野外地质调查与遥感解译结果相佐证,甘肃北山地区遍布暗黑色基性岩墙,如图版 I-f 处为 NE 向穿插 NW 向岩墙,岩墙岩性主要为辉绿岩。从岩墙宽度变化观察,不同方向上的岩墙拉张量不均一,表明张节理形成过程中还存在不大的右旋剪切力,该走向岩墙具有剪张性力学特征,整体上该地区岩墙形成前,先存节理群是在张性应力场控制下形成的。

在掌握岩墙单体形态及力学性质的基础上,进行岩墙群体分布规律分析。内蒙古西部地区的 NW—SE 向岩墙群以辐射状、束状为主要分布规律,由于其聚合方向在东南处,在聚合处未发现聚合点,或为第四纪沉积物覆盖或不存在辐射聚合点,究其露头规模和展布形迹,延伸长度有限且在其他方向未发现类似行迹的岩墙分布,判断其形成于张性构造应力场环境中,主导成因机制是伸展构造作用,拉张方向为 NE 向与岩墙走向垂直(图版 I-a)。蒙古

国南部省份近 EW 向岩墙群(图版 I -b)以雁列状排列为主要分布规律,说明先存剪节理是在剪切力偶作用下形成的,岩浆侵位后发育成一组右阶雁列式岩墙群。其成因机制与其先存节理形态及后期岩浆侵入扩张有关(图 3),其中岩浆入侵方向(v)与围岩主张应力(δ_3)垂直,才能使岩浆顺利侵入(Pollard, 1987)。甘肃北山中部地区 NE—SW 向及近 SN 向岩墙群(图 1-b、图版 I -c, d)整体呈张性构造形态分布规律,是拉张性构造应力场控的产物,部分岩墙表现为剪性性质(图版 I -c),与北山地区地处三大板块结合的构造位置有关,构造活动频繁、强烈,影响岩墙形态;可能是在晚古生代该地洋盆闭合,由最初的俯冲体系转变为碰撞体系(冯乾文, 2015),碰撞挤压环境致使岩墙群表现出不同的应力性质。从岩墙分布形迹角度分析,该地在岩墙侵位后至少经历了 2 次大的构造活动,以致呈现出多种类型的岩墙形态。

4.2 不同裂隙组合指示的应力场环境

据岩石脆性破裂变形理论,剪性裂隙产生于挤压环境,一般延伸较长,裂隙面较平直光滑,可能产生擦痕,剪裂隙排列往往具等距性;拉张性裂隙走向与区域拉张方向垂直时,张性裂隙产生于拉张环境;压张性裂隙走向与区域挤压方向平行时,张性裂隙产生于挤压环境。张性裂隙形态弯曲,长度较短,裂隙面粗糙,无擦痕。研究区岩墙发育情况复杂,需根据不同性质裂隙组合特征、形变特征及力学性质,确定其形成于何种应力场环境。

综上所述,NNW 向岩墙和 NE—SW 向岩墙及近 SN 向岩墙是张性应力场控制下的产物,其中 NNW 向岩墙与近 SN 向岩墙的走向大致与区域拉张方向

垂直,是拉张环境下的张性节理;NE—SW 向岩墙先存节理是拉张环境下的张节理,后受到碰撞挤压作用局部区域岩墙具剪性性质,形成以张性为主兼剪性的左行剪张性节理,与之伴生的还有 NEE—SWW 向压张性节理;近 EW 向岩墙同样为压张性节理,产生于 NWW 向挤压环境下,挤压方向与岩墙走向大致平行,形成以剪性为主兼张性的右行张剪性节理。

5 讨论

5.1 岩墙群侵入先存裂隙时的应力场环境

本次通过统计、分析北山及邻区单体岩墙几何形态、岩墙群体分布规律和岩墙变形特征,得出不同走向岩墙的应力性质及岩墙填充先存裂隙时所指示的应力场环境。无论是单体岩墙的展布形态、几何特征,还是岩墙群体的分布规律,都指示研究区岩墙群总体是在张性应力场环境控制中形成的。部分岩墙受后期碰撞挤压作用,展现出剪性为主兼具张性的张剪性特征。

利用岩墙几何特征恢复区域应力场环境,其科学性已经得到广泛认可(Pollard, 1987; 侯贵廷, 2012),但岩浆侵位形成岩墙后受到后期不同期次构造活动影响,会不同程度地发生变形、错断,仅单体岩墙的应力性质不足以判断应力场环境,容易对先存裂隙原始的应力性质产生误导。因此,本文在结合单体岩墙几何特征、群体岩墙分布规律及岩墙形变特征的基础上,得出北山及邻区晚古生代基性岩墙群侵位时先存破裂系统的构造应力场环境。

5.2 岩墙群成因机制

北山及邻区如此大体量岩墙群的形成,其动力机制和岩墙群空间分布形态与区域构造活动密切相

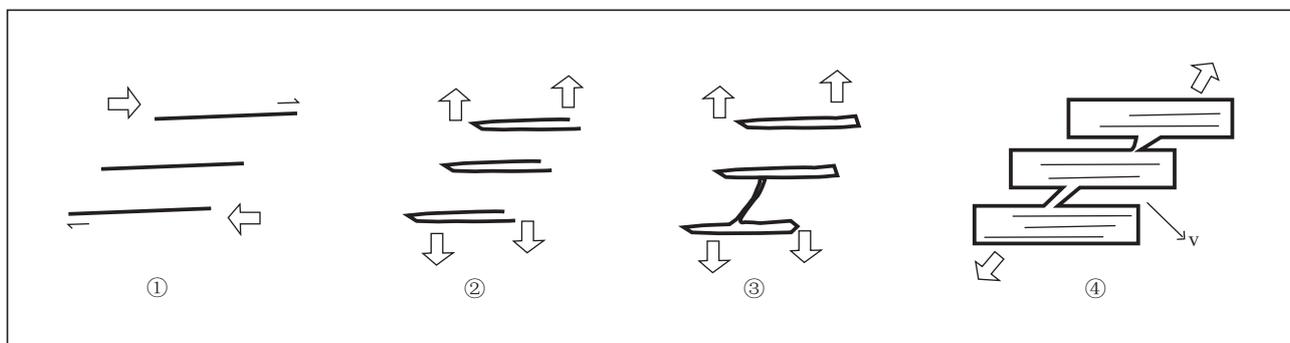


图 3 近 EW 向岩墙群雁列式形态形成过程(底图据侯贵廷等, 2012 修改; v 表示岩浆入侵方向; 箭头表示不同时期的主应力情况)

Fig. 3 Formation process of an echelon shape of nearly EW trending dyke swarms

①—先存节理; ②—围岩派生张应力状态; ③—岩浆侵入并扩张; ④—雁列式岩墙形成

关。研究区构造位置处于中亚造山带南缘(图 1-a), 中亚造山带是古亚洲洋新元古代—晚古生代长期俯冲-增生演化的结果, (Windley et al., 2007; Xiao et al., 2015), 其中晚古生代进入中生代是古亚洲洋由俯冲消减转为闭合碰撞体系的重要动力学转换时期, 具有重要的大地动力学意义。研究区遍布的基性岩脉反映了晚二叠世—三叠纪复杂、剧烈的岩浆活动, 揭示了古亚洲洋从俯冲增生的板块边缘岩浆作用转变为闭合碰撞后的板内岩浆作用(图 4)。在板块双向俯冲消减过程中, 基性岩的形成主要是由于板块边缘的俯冲作用, 碰撞造山过程则导致洋盆的消失及陆壳的缩短和增厚, 促使花岗质岩浆的熔出和侵位 (Zheng et al., 2021b), 保障了研究区岩墙群形成的动力条件和部分物质来源。

目前普遍认可的岩墙群成因模式集中于: ①火

山机构成因的小型放射状岩墙群; ②普遍发育于各大克拉通内, 规模巨大, 具有重要大地构造意义的地幔柱成因; ③与区域伸展作用相关的岩墙群(图 5) (侯贵廷, 2012)。

北山及邻区岩墙形成时的构造演化背景与岩墙群空间分布形态相对应, 佐证了研究区岩墙群主导成因机制为区域伸展构造运动。研究区岩墙群优势走向方位主要集中于 NE—SW 向, 涉及面积约 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北山地区和蒙古国南部广泛发育的 NE—SW 向、近 SN 向及近 EW 向岩墙群呈平行状分布, 是伸展构造作用下的产物, 主要为拉张构造环境, 形成张性裂隙或剪张性裂隙, 局部为挤压环境, 形成压张性裂隙。北山岩墙形态多样, 前人通过主量、微量和稀土元素的地球化学特征对比, 认为甘肃北山牛圈子地区基性岩墙群为塔里木大火成岩省的

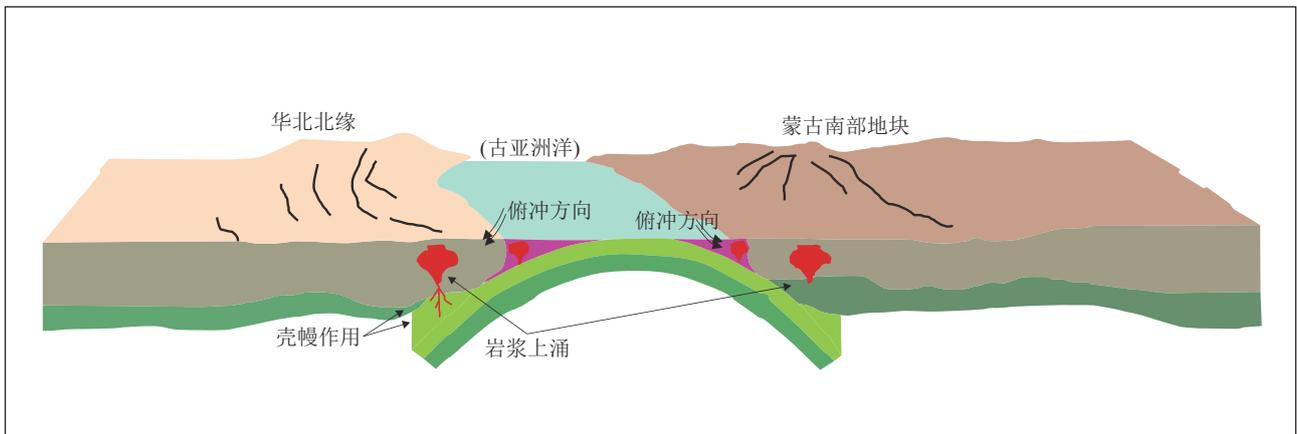


图 4 晚古生代古亚洲洋双向俯冲消减示意图(底图据 Xiao et al., 2015 修改)

Fig. 4 Schematic diagram of bidirectional subduction and subtraction of the Pale Asian Ocean in the Late Paleozoic

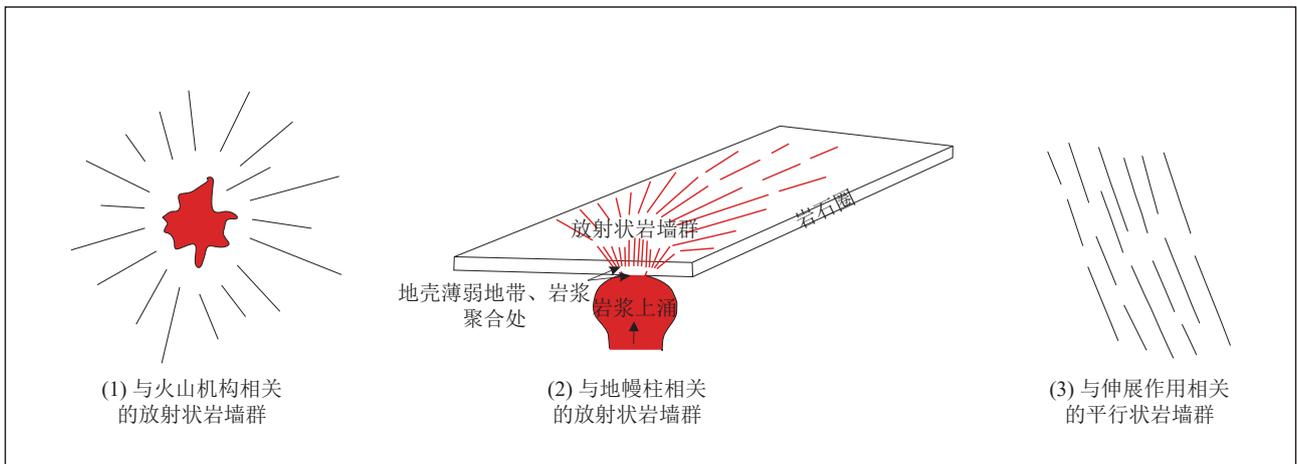


图 5 岩墙群成因模式图(底图据侯贵廷等, 2012)

Fig. 5 Genetic model map of dyke swarms

组成部分,其形成可能与地幔柱作用有关(齐琦等, 2017)。但甘肃北山区域内岩墙群未展现出典型地幔柱作用下的放射状形态,因此推测该地可能受到塔里木地幔柱远程效应的影响,主导成因机制仍是区域伸展构造作用。内蒙古西部岩墙群呈辐射状、束状分布,影像资料上露头长度达数十千米,规模较可观,但据岩墙群收敛方向和岩浆流动方向,该地岩墙群于SE方向汇聚,在岩墙相对方向未发现其他放射行迹的岩墙群分布,岩墙汇聚处没有发现汇聚点,究其展布规模与形态分布,相比地幔柱活动影响范围较小,可能受到热点作用控制,形成时的物质来源由热点活动携出,该地岩墙群的侵位机制也随之改变。

6 结论

(1)北山及邻区广泛发育基性岩墙群,在遥感影像上共提取了1777条岩墙片段,主要分布于甘肃北山中北部、南部,内蒙古西部及蒙古国南部地区,单体岩墙长度范围跨度大,从几米到几十千米不等,平均长度达二十多千米,厚度较窄,平均厚度小于2 m。岩墙优势走向方位集中于 $0^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 、 $320^{\circ}\sim 360^{\circ}$,与构造线斜交,部分近EW向岩墙与构造线平行,岩墙的几何形态反映北山及邻区经历了多期构造叠加,其展布形态严格受大地构造作用控制。

(2)通过分析北山及邻区晚古生代岩墙群形成时的构造演化过程及其空间分布规律,确定研究区基性岩墙群主导成因机制是区域伸展构造作用,兼受地幔柱远程效应及热点作用影响。多数岩墙形成于拉张性应力场环境,岩墙走向与区域拉张方向垂直,力学性质为张性裂隙;部分岩墙走向与区域拉张方向平行,形成以张性为主兼具剪性的剪张性裂隙;部分岩墙填充前裂隙形成于挤压环境,受后期构造运动影响,形成以剪性为主兼具张性的张剪性裂隙。

参考文献

- Ahijado A, Casillas R, Hernández-Pacheco A. 2001. The dyke swarms of the Amanay massif, Fuerteventura, Canary Islands (Spain)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(3): 333–345.
- Chen N H, Dong J J, Chen J Y, et al. 2014. Geometry and emplacement of the Late Cretaceous mafic dyke swarms on the islands in Zhejiang Province, Southeast China: Insights from high-resolution satellite images[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(pt.A): 302–311.
- Dai J, Xue L, Sang X, et al. 2020. Research method for dyke swarms based on UAV remote sensing in desert areas: A case study in Beishan, Gansu, China[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 558: 32–40.
- Emerman S H, Marrett R. 1990. Why dikes?[J]. *Geology*, 18(3): 231–233.
- Fahrig W F. 1987. The tectonic settings of continental mafic swarm: failed arc and early passive margin[C]// Halls H C, Fahrig W F. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34: 331–348.
- Hou G, Liu Y, Li J. 2006. Evidence for ~1.8 Ga extension of the Eastern Block of the North China Craton from SHRIMP U–Pb dating of mafic dyke swarms in Shandong Province[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(4): 392–401.
- Halls H C. 1982. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes[J]. *Geoscience Canada*, 9(3): 145–154.
- Halls H C. 1987. Dyke swarms and continental rifting: some concluding remarks[C]// Halls H C, Fahrig W F. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34: 6–10.
- Hou G T, Santosh M, Qian X L, et al. 2008. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: insights from radiating mafic dyke swarms[J]. *Gondwana Research*, 14: 395–409.
- Jahn B M. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[C]// Malpas J, Fletcher C J N, Ali J R, et al. Aspects of the tectonic evolution of China. Geological Society, London, Special Publications, 226(1): 73–100.
- Mao Q, Xiao W, Fang T, et al. 2012. 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 Altai[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 534–553.
- Pollard D D. 1987. Elementary fracture mechanism applied to the structural interpretation of dykes[C]// Halls H C, Fahrig W F. Mafic dyke swarms. Geological Association of Canada Special Paper, 34: 5–24.
- Peng P, Reec D, Us E, et al. 2019. Dyke swarms: Keys for Precambrian paleogeographic reconstruction—Proceedings of the Seventh International Dyke Conference[J]. *Precambrian Research*, 329: 1–4.
- Srivastava R K, Söderlund U, Ernst R E, et al. 2019. Precambrian mafic dyke swarms in the Singhbhum craton (eastern India) and their links with dyke swarms of the eastern Dharwar craton (southern India) – Reply[J]. *Precambrian Research*, 329: 5–17.
- Salminen J, Oliveira E P, Piispa E J, et al. 2019. Revisiting the paleomagnetism of the Neoproterozoic Uauá mafic dyke swarm, Brazil: Implications for Archean supercratons[J]. *Precambrian Research*, 329: 108–123.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31–47.
- Xiao W, Kröner A, Windley B. 2009. Geodynamic evolution of Central

- Asia in the Paleozoic and Mesozoic[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1185–1188.
- Xiao W J, Mao Q, Windley B, et al. 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. *American Journal of Science*, 310: 1553–1594.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. 2015. A tale of amalgamation of three Permo Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477–507.
- Zhang Y, Dostal J, Zhao Z, et al. 2011. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of mafic and ultramafic rocks from Southern Beishan area, NW China: implications for crust–mantle interaction[J]. *Gondwana Research*, 20(4): 816–830.
- Zhang Y Y, Yuan C, Sun M, et al. 2015. Permian doleritic dikes in the Beishan Orogenic Belt, NW China: Asthenosphere–lithosphere interaction in response to slab break–off[J]. *Lithos*, 233: 174–195.
- Zheng Y F, Gao P. 2021a. The production of granitic magmas through crustal anatexis at convergent plate boundaries[J]. *Lithos*, 402/403: 106232.
- Zheng R, Li J, Zhang J, et al. 2021b. A prolonged subduction–accretion in the southern Central Asian Orogenic Belt: Insights from anatomy and tectonic affinity for the Beishan complex[J]. *Gondwana Research*, 95: 88–112.
- 陈宁华, 董津津, 厉子龙, 等. 2013. 新疆北山地区二叠纪地壳伸展量估算: 基性岩墙群厚度统计的结果[J]. *岩石学报*, 29(10): 3540–3546.
- 陈超, 潘志龙, 修迪, 等. 2017. 北山地区红柳园组沉积时代、沉积环境及源区构造背景分析[J]. *沉积学报*, 35(3): 470–479.
- 董津津, 陈宁华, 厉子龙. 2013. 新疆库鲁克塔格地区基性岩墙群几何学与岩浆超压估算[J]. *岩石学报*, 29(10): 3547–3554.
- 冯乾文, 周可法, 王金林. 2015. 东准噶尔琼河坝岛弧晚古生代地球动力学环境——来自和尔赛岩体暗色岩墙时空分布的证据[J]. *地质科学*, 50(4): 1068–1082.
- 何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 2002. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J]. *西北地质*, (4): 30–40.
- 何世平, 周会武, 任秉琛, 等. 2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J]. *西北地质*, (3): 6–15.
- 侯贵廷, Henry H, Don D, 等. 2009. 华北基性岩墙群的古地磁极及其哥伦比亚超大陆重建意义[J]. *岩石学报*, 25(3): 650–658.
- 侯贵廷. 2012. 华北基性岩墙群[M]. 北京: 科学出版社: 117–139.
- 李江海, 何文渊, 钱祥麟. 1997. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义[J]. *高校地质学报*, 3(3): 272–280.
- 李沅柏, 李海泉, 周文孝, 等. 2021. 北山造山带新元古代热事件及其构造意义: 来自甘肃北山南带两期花岗岩的地球化学和年代学证据[J]. *地质通报*, 40(7): 1117–1139.
- 李奇祥, 廖群安, 三金柱, 等. 2010. 新疆哈密四顶黑山地区镁铁质–超镁铁岩特征及其构造意义[J]. *地质科技情报*, 29(4): 14–20.
- 林瑶, 汤庆艳, 张铭杰, 等. 2014. 新疆北部二叠纪基性岩墙群岩浆作用及其动力学背景[J]. *地球科学与环境学报*, 36(3): 73–82.
- 梁积伟, 陈玉良, 张文卿, 等. 2014. 甘肃北山地区泥盆系三个井组碎屑锆石年龄及其地质意义[J]. *地质科技情报*, 33(3): 1–9.
- 彭仁, 张贵山, 邱红信, 等. 2020. 甘肃北山晚古生代基性岩墙群岩石成因及其构造意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 39(2): 254–266.
- 齐琦, 王永和, 余吉远, 等. 2017. 甘肃北山牛圈子地区基性岩墙群年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *新疆地质*, 35(1): 99–106.
- 师震. 2019. 甘肃北山古堡泉辉绿岩脉群地质地球化学特征及形成构造环境[D]. 长安大学硕士学位论文: 2–19.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 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.
- 王国强. 2015. 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: 23.
- 杨合群, 赵国斌, 李英, 等. 2012. 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*, 31(2/3): 413–421.
- 杨建国, 谢春林, 王小红, 等. 2012. 甘肃北山地区基本构造格局和成矿系列特征[J]. *地质通报*, 31(2/3): 422–438.
- 杨春霞, 王启航, 高翔, 等. 2015. 甘肃北山造山带晚古生代辉绿岩墙的地球化学特征及构造背景[J]. *甘肃地质*, 24(1): 19–23.
- 张文, 冯继承, 郑荣国, 等. 2011. 甘肃北山音凹峡南花岗岩体的锆石 LA–ICP MS 定年及其构造意义[J]. *岩石学报*, 27(6): 1649–1661.
- 张贵山, 彭仁, 温汉捷, 等. 2021. 闽西南 E–MORB 型基性岩墙成因: 来自地球化学、锆石 U–Pb 年代学及 Sr–Nd 同位素证据[J]. *地球科学*, 46(12): 4230–4246.
- 专少鹏, 陈超, 申宗义, 等. 2018. 北山地区早古生代洋盆俯冲记录——来自石板井高镁闪长岩的年代学、地球化学证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(4): 533–546.
- 赵宏刚, 梁积伟, 王驹, 等. 2019. 甘肃北山算井子埃达克质花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 93(2): 329–352.
- 郑荣国, 王云佩, 张昭昱, 等. 2016. 北山南带音凹峡地区酸性火山岩年代学、地球化学研究: 二叠纪裂谷岩浆作用的新证据[J]. *大地构造与成矿学*, 40(5): 1031–1048.