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*

陈宁华 董津津 厉子龙 倪妮娜
CHEN NingHua, DONG JinJin, LI ZiLong and NI NiNa

浙江大学地球科学系,杭州 310027
Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, *China*
2013-05-15 收稿, 2013-08-20 改回.

Chen NH, Dong JJ, Li ZL and Ni NN. 2013. Permian crustal extension of Beishan area in Xinjiang, NW China: Estimation from the statistical thickness of exposed mafic dyke swarms. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10):3540 – 3546

Abstract The geology of Beishan area in Xinjiang, Northwest China is characterized by numerous Late Paleozoic intrusive rocks, and widespread mafic dyke swarms, which indicate continental lithospheric extensional events. This work focused on using multisource high-resolution remote sensing images (ETM +, SPOT, CORONA KH4B, Geoeye1 and Quickbird2) to extract the geometric features of mafic dykes and estimate the Permian crustal extension of this area. 1375 dykes were extracted from the area about 26880km^2. The spatial distribution of the dyke density and crustal extension are obtained based on the statistics of 1375 extracted mafic dykes. The results show that NNW-NNE-trending dykes dominate. The length and thickness distributions of dykes follow statistical laws with negative exponent. The maximum length of individual dyke is about 34km, the mean length is about 5km, and the maximum and mean dyke thicknesses are 31m and 7.9m, respectively. The crustal extension of the area ranges from 0.59% to 2.01%. From south to north, the dilation decreases gradually. The crustal extension in the intrusive rock is as high as 8.32%. In sedimentary and metamorphic rock areas, the crustal extension only ranges from 0.05% ~0.3%. The Permian mafic dyke swarms have a close spatial relationship with intrusive rocks, meanwhile, are controlled and transformed by regional faults.
Key words Mafic dyke swarms; Crustal extension; Remote sensing; Beishan area; Xinjiang

摘 要 新疆北山地区广泛发育晚古生代侵入岩和基性岩墙群。本文利用多源高分辨率卫星遥感影像(ETM +, SPOT, CORONA KH4B, Geoeye1, Quickbird2)在该区约26880km^{2}范围定量提取基性岩墙1375条。基性岩墙侵入石炭、二叠系火山岩、侵入岩、沉积岩和前寒武纪变质岩。岩墙单体长250m至34km,平均长度5km,厚度从1m至31m,平均厚度7.9m,岩墙长度和厚度均呈负指数分布。约70%的岩墙呈NNW-NNE方向展布。受NEE向走滑断层影响,在断裂带附近岩墙发生强烈扭曲。从北到南垂直岩墙的主要走向,取3条剖面,分段统计岩墙的厚度并计算伸展量。结果表明:该区二叠纪地壳伸展量为0.59% ~2.01%,自南向北伸展率逐渐减小,在侵入岩体伸展量高达8.32%,沉积岩/变质岩区的伸展量为0.05% ~0.3%。该区二叠纪基性岩墙发育与侵入岩体有密切的时空关系并受断裂控制和改造。
关键词 基性岩墙群;伸展量;遥感;北山;新疆
中图法分类号 P541;P588.124;P628

1 引言

基性岩墙群是岩石圈伸展的产物,来源于深部地幔或下地壳,其岩浆来源、侵位机制、时空分布、构造形态与某地区的岩浆活动、区域构造应力场特征及地壳演化等有密切联系(Hall, 1982; Fahrig, 1987; Gudmundsson, 1990; Park *et al.*, 1995; 侯贵廷等, 1998, 2003; 陈汉林等, 1997; Le Gall *et al.*, 2005; Hou *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2006; 董传万等, 2010; Hou, 2012a)。因其蕴涵着丰富的深部源区及成岩过程等地球动力

* 本文受国家973计划项目(2011CB808902)和国家自然科学基金项目(41372205)联合资助.
第一作者简介: 陈宁华,男,1973年生,博士,副教授,主要从事遥感地质和构造地质研究,E-mail: geo316@zju.edu.cn, ninghuachen@163.com

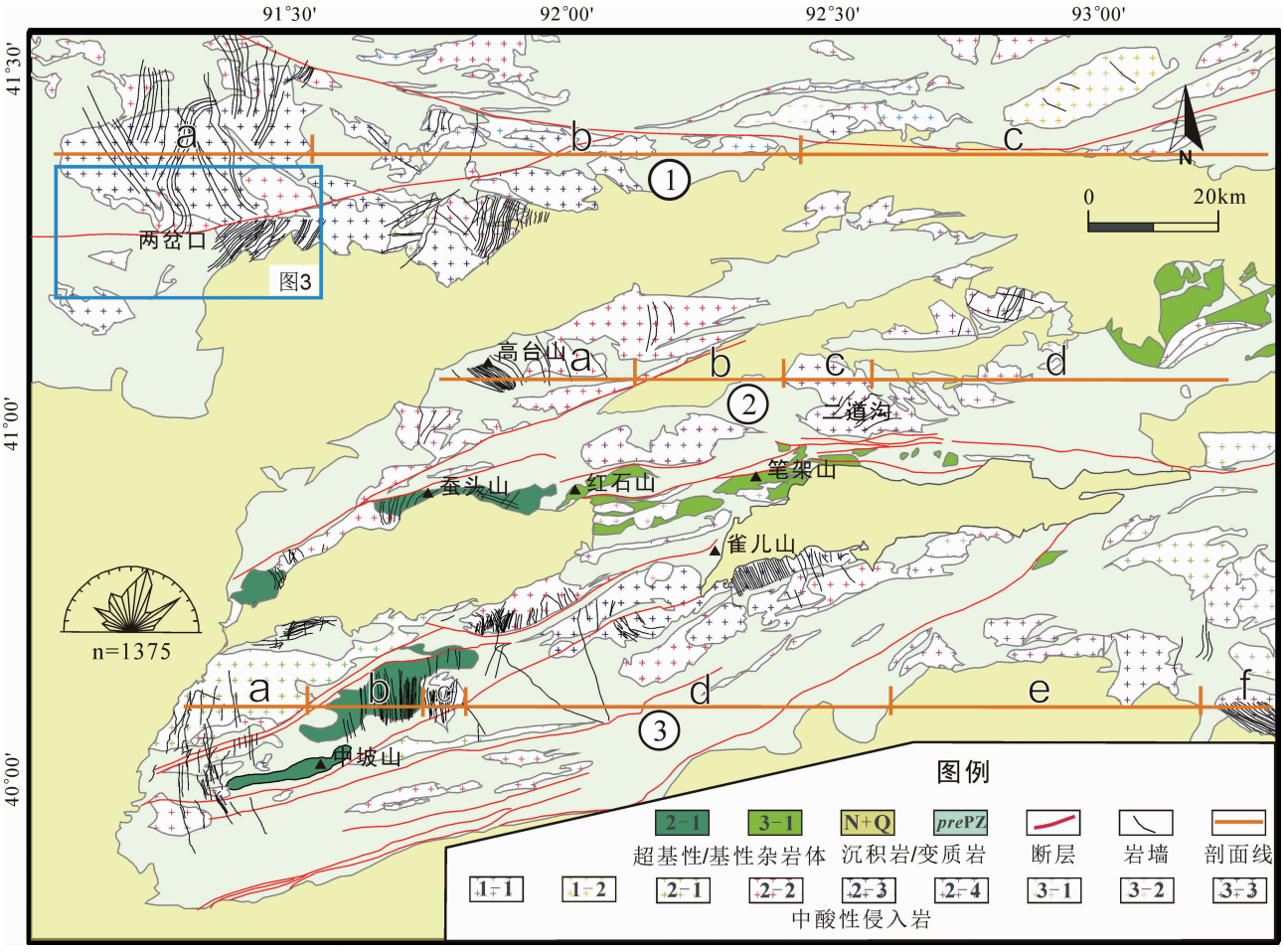


图 1 新疆北山地壳地质简图(根据新疆维吾尔自治区地质矿产局,1979①,1990②修改)

岩墙群空间分布提取自遥感影像,玫瑰图显示 1735 条岩墙的走向统计

Fig. 1 Geological map of Beishan area in Xinjiang

The distribution of dyke swarm is extracted in multisource remote sensing images

学信息,基性岩墙群已成为研究地幔柱活动、大火成岩事件、大陆裂解及与之形成的矿产资源的重要纽带(Ernst *et al.*, 1995;Ernst and Buchan,1997,2003;Mège and Korme,2004;徐义刚和钟孙霖,2001;徐义刚等,2007;李宏博等,2010; Olsson *et al.*,2011;Hou,2012a)。

新疆北山地区出露着壮观的与幔源岩浆作用相关的基性岩墙群(校培喜等,2006;Mao *et al.*, 2011,2012;Qin *et al.*, 2011;Su *et al.*,2012)。该地区不同位置的岩墙群地球化学和同位素年代学研究显示,这些基性岩墙群形成时代主要为二叠纪(Qin *et al.*,2011;Zhang *et al.*,2012),岩墙与围岩的穿插关系也证实,这些岩墙群侵入了石炭系、二叠系地层(校陪喜等,2006)。近年来,随着大火成岩省和地幔柱研究的深入,很多学者提出了关于塔里木二叠纪大火成岩省(杨树锋等,2005;陈咪咪等,2010;Li *et al.*,2011;Qin *et al.*,2011)或巴楚大火成岩省(Zhang *et al.*, 2010a,b)在岩石学、地球化学和同位素年代学等多方面证据,并在此基础上研究其与二叠纪地幔柱活动的关系。基性岩墙群作为地幔柱活动的重要证据,这些出露在新疆北山地区的密集基性岩墙群引起了很多学者的兴趣,并成为研究热点和争论的焦点(校培喜等,2006;Zhang *et al.*,2010a,b;Qin *et al.*, 2011),这些研究多侧重从同位素年代学和地球化学方面论证岩墙群与塔里木二叠纪地幔柱之间的关系。然而,由于北山地理位置偏远、气候条件恶劣,基性岩墙群的几何学与运动学特征仍缺乏细致的研究。本文利用多源高分辨率卫星遥感影像提取岩墙群几何特征(包括长度、厚度和走向),通过统计分析计算该区地壳伸展率,在此基础上探讨该区岩墙群与大火成岩省和地幔柱的关系。

① 新疆维吾尔族自治区地质矿产局. 1979. 白玉山幅、幅白山幅 1∶20 万区域地质调查报告

② 新疆维吾尔族自治区地质矿产局. 1990. 大平台幅、库木库都克幅 1∶20 万区域地质调查报告

2 地质背景

新疆北山地区处于天山造山带(中亚造山带南缘)和塔里木克拉通关键位置(图 1),西起罗布泊东缘,东至星星峡-明水,属于北山构造带西段。该区出露古老的前寒武纪结晶基底,由北山群、古硐井群、杨吉布拉克群和蓟县系爱尔兰基干群组成,上覆古生代沉积盖层并受到强烈挤压褶皱。区内中基性火山岩、晚古生代花岗岩以及密集的基性岩墙群和铁镁质-超铁镁质杂岩体出露广泛(姜常义等,2006; Ao *et al.*, 2010; Su *et al.*, 2012),断裂极为发育,主要呈北东东向平行排列。该区经历了多期复杂的构造、变质和岩浆作用,对该区的地质演化过程存在较大争议,对其构造单元划分、各构造单元性质及归属、二叠纪该区是大陆裂谷还是弧后盆地等问题存在不同的认识。基性岩墙群侵入和与地幔柱活动相关的大陆裂谷以及洋壳俯冲相关的弧后盆地环境均有联系。校培喜等(2006)认为北山地区基性岩墙群的形成与该区二叠纪裂谷作用有关,可能是地幔柱上涌之后在石炭纪裂谷或裂谷陆缘上侵位的产物。然而,二叠纪同时也是天山造山带进入后碰撞阶段的时期,期间可能涉及大规模的软流圈地幔上涌,因此基性岩墙群与地幔柱的关系仍需深入研究。

3 数据和方法

3.1 遥感数据

本次研究工作区位于新疆北山(E91°3′ ~ 93°18′, N40°16′ ~ 41°33′),覆盖面积达 26880km^2,由于交通条件差,气候恶劣,野外调查难以全面展开。然而良好的地质裸露条件,为利用遥感技术开展调查提供了有利条件。本文因此采用多源高分辨率遥感影像结合的方法开展基性岩墙群的几何学研究。多源遥感影像数据包括 Landsat 7 ETM +、SPOT、CORONA KH4B、QuickBird2 和 Geoeye1。Landsat 7 ETM + 有 8 波段,其中第 8 波段分辨率 15m,主要用于岩性识别和地层划分;CORONA KH4B 是美国 70 年代的间谍卫星全色影像,最佳空间分辨率为 1.83m; QuickBird2 是美国高分辨率商业卫星影像有 4 个多光谱波段和一个分辨率 0.61m 的全色影像; Geoeye1 是美国高分辨卫星 IKONOS 的后续卫星,能够提供全色 0.41m 分辨率和多谱段 1.65m 分辨率的超高分辨率影像。由于 QuickBird2、Geoeye1 商业高分辨率卫星价格高昂,因此岩墙群提取主要采用性价比高的 CORONA KH4B 影像,保证经济和效率上的可行。

3.2 伸展量计算

岩墙一般沿着垂直围岩主张应力($\sigma 3$)的面侵入。利用出露的岩墙群来计算地壳伸展量已经被很多学者所采纳(Marinoni, 2001; 侯贵廷, 2012b)。利用几何构图法可以精确地计算岩墙侵位产生的地壳伸展量,然而该方法费时费力,很少为人使用(Marinoni, 2001)。目前常用的方法是采用绝对伸展量和伸展率来表示地壳扩张。该方法假定岩墙倾角垂直或者忽略了岩墙倾角的影响。绝对伸展量(D)是岩墙厚度(T)、走向(β)和剖面方位角(α)的函数,通过以下公式计算(Marinoni, 2001):

$$D = T\sin(\alpha - \beta)$$

伸展率通常由以下公式计算(Walker, 1959, 1960; Gautneb *et al.*, 1989; Jolly and Sanderson, 1995; Klausen, 2006; 侯贵廷, 2012b):

$$\lambda = \sum d_i/(L - \sum d_i)$$

其中 λ 是伸展率,d_i 是岩墙的厚度,L 是剖面的长度。

由于岩墙厚度总和比剖面长度小的多,近似可采用岩墙厚度与剖面长度比率来表示伸展率。采用该方法,岩墙厚度和剖面长度可以通过高分辨率遥感影像方便地测量。本文采用伸展率来表示地壳伸展量。

4 多源遥感影像信息提取

4.1 侵入岩

研究区没有植被覆盖,线性构造和环状构造在遥感影像上非常清楚。侵入岩十分发育,多呈岩株、岩枝、岩基状出露。在 ETM + 多光谱影像上花岗岩一般色调较浅,颜色多为土黄色、浅红色,呈浑圆状、椭圆状、与围岩有明显的界限。超基性-基性杂岩体色调较深,颜色多为深褐色、墨绿色,多呈肠状、条带状分布。大部分岩体沿断裂两侧分布并呈北东东向展布。中坡山以北杂岩体是研究区最大的铁镁质超基性-基性岩体,岩体形态似葫芦状,内部岩相呈同心环状,出露面积 180km^2。根据姜常义等(2006)岩石学和同位素年龄研究,该岩体由角闪辉长岩、橄榄辉长岩、苏长辉长岩和斜长岩组成,锆石 U-Pb 同位素年龄 274 ± 4Ma。根据侵入岩体侵入的最新地层、沉积接触关系和侵入体之间的穿插关系,该岩体被定为华力西期中期第一次侵入(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1979, 1990)。遥感影像上清晰显示密集的岩墙群近南北向贯穿该岩体。

4.2 岩墙群

遥感技术作为地质调查的重要手段已广泛用于岩墙群的研究(EI Rakaiby, 1997; Mège and Korme, 2004; 张自力等, 2008)。高分辨率遥感技术的发展为精细提取岩墙几何特征提供了可能。野外测量证实,QuickBird2、Geoeys1 卫星影像可满足大于 0.5m 厚度岩墙的测量精度(Chen *et al.*, 待发表)。我们利用多源遥感影像在新疆北山地区共提取了岩墙 1375 条。该区多为铁镁质基性岩墙,在 ETM + 遥感影像上,大部分岩墙为黑色、深绿色,呈线性平行排列,岩墙分枝、复合较少。岩墙分布不均匀,主要侵入到石炭、二叠纪火山岩、侵入岩和前寒武纪变质岩中(图 1)。根据岩墙的聚集性特征

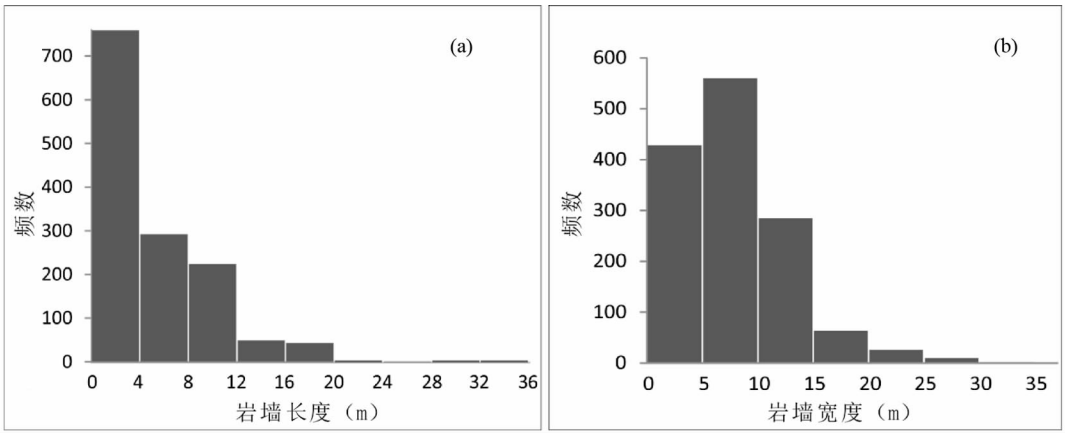


图 2 岩墙的长度(a)和厚度(b)呈负指数分布

Fig. 2 Length (a) and thickness (b) distributions of dykes follow statistical law with negative exponent

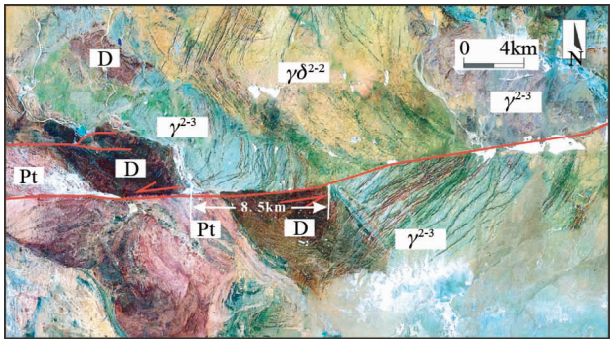


图 3 Landsat ETM 假彩色合成影像显示两岔口走滑断层将岩层、侵入岩体和岩墙群左旋位错，滑移量超过 8.5km

Fig. 3 The false color and fusion imagery of Landsat ETM imagery showing the strike-slip fault

可以将北山岩墙群分为两岔口、高台山、蚕头山、罗东、中坡山北、雀儿山等亚群(subswarms)。通过对提取的 1375 条岩墙统计，约 70% 的岩墙呈 NNW-NNE 方向展布且与构造线大角度斜交(见图 1 走向玫瑰图)。岩墙单体长 250m 至 34km，平均长度约 5km，岩墙厚度从 1m 至 31m，平均厚度 7.9m，单体厚度基本稳定，岩墙长度和厚度均呈负指数分布(图 2a，b)。岩墙分布受断裂带控制，并受断裂改造而形变。图 3 显示两岔口岩墙受 NE 向走滑断层影响，在断裂带附近岩墙发生强烈剪切变形、褶皱弯曲和布丁化。环状岩墙也有发育，但规模较小，漩涡岭可见直径约 2km 的呈同心圆的环状岩墙。

5 讨论

5.1 侵入岩时空分布特征及与岩墙群关系

区内侵入岩面积约 4927km^2 占研究区面积 18.3%。根据 1∶20 万区调资料(新疆维吾尔自治区地质矿产局，1979，1990)、前人对该区侵入岩体的同位素年龄数据和遥感解译

表 1 侵入岩、沉积岩、变质岩出露面积和岩墙密度分布

Table 1 Statistical parameters of distributions of areas of intrusive rock, sedimentary rock and metamorphic rocks and density of dykes

岩性	年代/期次	出露面积(km^2)	面积比(%)	岩墙总长(km)	岩墙密度
中酸性侵入岩	1-1	110	0.4	4.2	0.038
	1-2	243	0.9	35.6	0.147
	2-1	590	2.2	64.5	0.109
	2-2	1301	4.8	338.5	0.26
	2-3	1270	4.7	579.9	0.45
	2-4	696	2.6	214.9	0.30
	3-1	99	0.4	0	0
	3-2	90	0.3	12.5	0.139
	3-3	67	0.2	31.2	0.465
超基性/基性杂岩	2-1	256	1.0	223.6	0.87
	3-1	205	0.8	0	0
沉积岩/变质岩	N + Q	11658	43.4	0	0
	prePZ	10295	38	331.4	0.028

注：华力西各期次侵入分布表示为早期 1-1，1-2；中期 2-1，2-2，2-3，2-4；晚期 3-1，3-2，3-3；N + Q 为新近系和第四系覆盖；prePZ 为前古生代沉积岩和变质岩

的侵入岩的穿插关系，该区侵入岩对应为华力西早、中、晚三期侵入，早期分两次，中期分四次，晚期分 3 次。依据划分结果对各期侵入岩体面积和岩墙群在各期侵入岩体密度进行了统计(表 1)。岩墙分布密度是按单位面积侵入岩体内岩墙的长度计算。表 1 显示华力西中期侵入岩体面积大、分布广，占侵入岩面积 78%。超基性/基性杂岩体分布较少，约占侵入岩面积的 9%。在华力西中期第 3 次侵入体和华力西晚期第 3 次侵入体中密度较大；华力西中期第一次侵入超基性/基性杂岩体中岩墙密度最大。岩墙主要集中在中坡山北超基性/基性杂岩体内，根据姜常义等(2006)对该杂岩体的锆石 U-Pb 年龄(274 ±4Ma)，揭示岩墙群侵入时间为早二叠世。

表 2 研究区通过 3 条剖面的岩墙数量及地壳扩展率

Table 2 Percentage dilation for individual traverses in Beishan area

剖面	分段	长度(km)	经过主要岩体	岩墙数量	平均厚度(m)	岩墙总厚度(m)	伸展率(%)
剖面1	①-a	36.8	中酸性侵入岩	57	11.2	618	1.68
	①-b	73.4	prePZ	2	18.5	37	0.05
	①-c	74.6	N+Q	0	0	0	0
剖面2	②-a	34.4	prePZ	49	8.8	431	1.25
	②-b	19.6	N+Q	0	0	0	0
	②-c	13.6	中酸性侵入岩	10	6.5	654	4.99
	②-d	52.5	prePZ	4	9.8	39	0.07
剖面3	③-a	20.1	中酸性侵入岩	57	4.9	277	1.37
	③-b	18.2	超基性/基性岩	286	3.9	1115	6.12
	③-c	6.5	中酸性侵入岩	102	5.3	541	8.32
	③-d	54.5	prePZ	26	5.9	163	0.3
	③-e	63.3	N+Q	0	0	0	0
	③-f	10.6	中酸性侵入岩	41	2.8	115	1.08

注:①、②、③和 a、b、c、d、e、f 分别表示剖面号及剖面分段;N+Q 为新近系和第四系覆盖;prePZ 为前古生代沉积岩和变质岩

5.2 地壳伸展率

岩墙群形成于地壳伸展环境,记录了岩墙侵位时的古构造应力场。岩墙侵位产生的地壳伸展量(扩张量)揭示了岩墙群所在区域古构造应力场的变化,从而有助于深入探讨岩墙群的古构造应力场与区域构造事件的关系,分析岩墙群形成的大地构造背景和地球动力学成因机制(侯贵廷,2012b)。同时,由岩墙侵位而引起的地壳伸展量(扩张量)的变化是研究岩浆动力学的重要参数,可以帮助区分岩墙(岩席)类型,指示岩浆源,估算岩墙侵位深度等(Gudmundsson,1990; Klausen,2006)。我们在研究区内从北到南垂直岩墙的主要走向,取 3 条剖面(见图 1 所示),分段统计岩墙的厚度并计算伸展量(表 2)。剖面 1 长 185km,根据剖面切过岩性分为 3 段。岩墙群集中分布于剖面西段(1-a 段)两岔口走滑断层两侧,主要侵入华力西中期侵入岩内,岩墙沿 NNW-NNE 展布,伸展率 1.68%,在沉积岩/变质岩区(1-b 段)伸展率为 0.05%,忽略第四纪覆盖,平均伸展率为 0.59%。剖面 2 长 120km,分为 4 段,主要切过高台山和二道沟岩墙群,高台山岩墙群侵入,伸展率 1.25%,二道沟岩墙群侵入华力西中期第 3 次侵入花岗岩,伸展率为 4.99%,平均伸展率为 1.12%。剖面 3 长 173km,分为 6 段,主要切罗布泊东和中坡山北岩墙群,伸展率 0.3% ~8.3%,平均伸展率为 2.01%。通过剖面的岩墙的数量及地壳伸展率揭示,岩墙群与侵入岩体有密切的时空关系,而岩墙很少侵入沉积岩和变质岩。自南向北,岩墙扩张引起的地壳伸展率逐渐减小,揭示南部所受的区域应力较小,可能是岩浆上涌的主要通道。

5.3 基性岩墙群与二叠纪地幔柱

大火成岩省及地幔柱活动常伴随大规模的基性岩墙群的侵位(Ernst *et al.*,1995; Ernst and Buchan,1997; 徐义刚和钟孙霖,2001; 徐义刚等,2007)。目前,国际地学界已将大火成岩省和巨型放射状岩墙群的发育作为验证地幔柱存在的主要证据。地幔柱含有巨大能量会导致地幔大规模的熔融和大火成岩省的形成,大火成岩省主要为铁镁质的喷出岩和侵入岩,记录了特定时期内物质和能量从地球内部向外的迁移(徐义刚,2002)。许多放射状岩墙群是大火成岩省中溢流玄武岩剥蚀的残留(王德滋和周金城,2005)。Ernst and Buchan(1997)通过对巨型岩墙群几何特征研究,提出了 3 种可以指示地幔柱中心的岩墙群空间展布模式,即连续扇形、分开扇形和中心发散状。由于后期构造运动和剥蚀作用的影响,多数岩墙群不是理想的放射状(Ernst and Buchan, 1997; 李宏博等,2012)。峨眉山大火成岩省(徐义刚等,2001; 李宏博等,2010)和塔里木大火成岩省(杨树锋等,2005; Li *et al.*,2011; Qin *et al.*,2011)的研究进展促进了有关塔里木二叠纪地幔柱活动的深入讨论。Qin *et al.*(2011)根据对北山和东天山超基性/基性杂岩体的同位素年代学和岩石地球化学研究提出了塔里木二叠纪地幔柱模型,推测地幔柱头位于北山和东天山。北山地区的岩墙群分布不均匀,基本上与侵入岩体伴生并沿断裂两侧出露,多数岩墙呈 NNW-NE 走向与构造线大角度斜交,近平行状产出,局部受断裂改造变形。两岔口亚群虽受两岔口走滑断层影响局部变形,但总体呈 NNE-NEE 走向;高台山亚群呈 NWW-NNW 向延伸,且有向 SE 收敛的趋势;蚕头山亚群呈 NW-NEE 走向延伸,形态似扇状向 S 收敛;罗东亚群近 SN 向,岩墙相对稀疏,但单体较宽,延伸较远。中坡山北亚群近 SN 向平行产出,岩墙间隔小,分布密集。雀儿山亚群呈 NW 平行状排列,岩墙密集。从岩墙群的分布和形态来看,北山地区的岩墙群可能来自岩浆侵位形成的多个岩浆房,岩浆从各岩浆房沿着受控于区域断裂的裂隙系统侧向侵位。

岩墙的厚度与侵位深度、岩浆压力和围岩性质有关,通常与地幔柱有关的岩墙厚度比较大,平均厚度约 10 ~ 30m(Ernst *et al.*,1995)。例如世界上最大的放射状岩墙群,加拿大 Mackenzie 岩墙群(Ernst and Baragar,1992; Hou *et al.*, 2012a)岩墙的平均厚度为 30m,长度达 2000km。但也有例外,如与非洲东部埃塞俄比亚大火成岩省相关的基性岩墙的平均厚度仅为 3.7m(Mège and Korme,2004)。北山地区岩墙厚度最大 31m,平均 7.9m,相对其它地区与地幔柱相关的岩墙群,平均厚度也偏小,这可能是与地表剥蚀深度不够有关。对于岩墙群的区域性几何特征、空间展布对塔里木二叠纪地幔柱的指示还需要从更广的空间来细致研究。

6 结论

(1)新疆北山地区广泛分布二叠纪基性岩墙群,岩墙分布不均匀,与侵入岩体伴生主要沿断裂两侧分布。岩墙单体长 250m 至 34km,平均长约 5km;厚度从 1m 至 31m,平均厚

度7.9m，长度和厚度均呈负指数分布。约70%的岩墙呈NNW-NE方向展布。受NE向走滑断层影响，岩墙在断裂带附近岩墙发生强烈扭曲。

（2）根据岩墙数量、厚度与围岩的时空关系统计，岩墙多侵入华力西中期侵入岩体，岩墙密度0.1～0.87，在华力西中期第一次侵入的超基性/基性岩体中密度最大。北山地区二叠纪地壳伸展率为0.59%～2.01%，自南向北地壳伸展率逐渐减小。在侵入岩体伸展率高达8.32%，沉积岩伸展率仅为0.05%～0.3%。

（3）北山地区岩墙群几何特征反映岩墙群可能来自岩浆侵位形成的多个岩浆房，岩浆从各岩浆房沿着受控于区域断裂的裂隙系统侧向侵位。岩墙群厚度比与已知地幔柱活动有关的岩墙群相比厚度较窄，可能与地表剥蚀深度不够有关。

References

Ao SJ, Xiao WJ, Han CM, Mao QG and Zhang JE. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: Implications for Late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaids. Gondwana Research, 18(2-3): 466-478

Chen NH, Dong JJ, Chen JY, Dong CW and Shen ZY. 2013. Geometry and emplacement of the Late Cretaceous mafic dyke swarms on the islands in Zhejiang Province, Southeast China: Insights from high-resolution satellite images. Journal of Asian Earth Sciences, DOI: 10.1016/j.jseaes.2013.10.001

Chen HL, Yang SF, Dong CW *et al*. 1997. Confirmation of Permian basite zone in Tarim Basin and its tectonic significance. Geochimica, 26(6): 77-87 (in Chinese with English abstract)

Chen MM, Tian W, Zhang ZL, Pan WQ and Song Y. 2010. Geochronology of the Permian basic-intermediate-acidic magma suite from Tarim, Northwest China and its geological implications. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 559-572 (in Chinese with English abstract)

Dong CW, Yan Q, Zhang DR, Du ZY and Zhu GQ. 2010. Late Mesozoic extension in the coastal area of Zhejiang and Fujian provinces: A petrologic indicator from the Dongji island mafic dike swarms. Acta Petrologica Sinica, 26(4): 1195-1203 (in Chinese with English abstract)

EI Rakaiby ML. 1997. Remote sensing studies for dyke swarms in the central Eastern Desert of Egypt. Journal of African Earth Sciences, 24(4): 653-656

Ernst RE and Baragar WRA. 1992. Evidence from magnetic fabric for the flow pattern of magma in the Mackenzie giant radiating dyke swarm. Nature, 356(6369): 511-513

Ernst RE, Head JW, Parfitt E, Grosfils E and Wilson L. 1995. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus. Earth-Science Reviews, 39(1-2): 1-58

Ernst RE and Buchan KL. 1997. Giant radiating dyke swarms: Their use in identifying pre-Mesozoic large igneous provinces and mantle plumes. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. Washington, DC: American Geophysical Union, 297-333

Ernst RE and Buchan KL. 2003. Recognizing mantle plumes in the geological record. Annual Review of Earth Planetary Sciences, 31(31): 469-523

Fahrig WF. 1987. The tectonic settings of continental mafic dyke swarms: Failed arm and early passive margin. Geological Association of Canada, 34: 331-348

Gautneb H, Gudmundsson A and Oskarsson N. 1989. Structure, Petrochemistry and evolution of a sheet swarm in an Icelandic central volcano. Geol. Mag., 126: 659-673

Gudmundsson A. 1990. Emplacement of dikes, sills and crustal magma chambers at divergent plate boundaries. Tectonophysics, 176(3-4): 257-275

Hall HC. 1982. The importance and potential of mafic dyke swarm in study of geodynamic process. Geosciences Canada, 9: 145-154

Hou GT, Zhang C and Qin XL. 1998. The formation mechanism and tectonic stress field of the Mesoproterozoic mafic dike swarms in the North China craton. Geological Review, 44(3): 309-314 (in Chinese with English abstract)

Hou GT, Li JH, Halls HC and Qian XL. 2003. The flow structures and mechanics of Late Precambrian mafic dyke swarms in North China craton. Acta Geologica Sinica, 77(2): 210-216 (in Chinese with English abstract)

Hou GT, Li JH and Liu YL. 2005. Late paleoproterozoic extensional events in North China Craton: Aulacogen and dyke swarms. Progress in Natural Science, 15(11): 1366-1373 (in Chinese)

Hou GT. 2012a. Mechanism for three types of mafic dyke swarms. Geoscience Frontiers, 3(2): 217-223

Hou GT. 2012b. Mafie Dyle Swarms of North China. Beijing: Science Press, 124-126 (in Chinese)

Jiang CY, Chen SL, Ye SF, Xia MZ, Jiang HB and Dai YC. 2006. Lithogeochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body, at Beishan region, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 115-126 (in Chinese with English abstract)

Jolly RJH and Sanderson DJ. 1995. Variation in the form and distribution of dykes in the Mull swarm, Scotland. Journal of Structural Geology, 17(11): 1543-1557

Klausen MB. 2006. Similar dyke thickness variation across three volcanic rifts in the North Atlantic region: Implications for intrusion mechanisms. Lithos, 92(1-2): 137-153

Le Gall B, Tshoso G, Dyment J, Kampunzu AB, Jourdan F, Fèraud G, Bertrand H, Aubourg C and Vétel W. 2005. The Okavango giant mafic dyke swarm (NE Botswana): Its structural significance within the Karoo Large Igneous Province. Journal of Structural Geology, 27(12): 2234-2255

Li HB, Zhang ZC and Lü LS. 2010. Geometry of the mafic dyke swarms in Emeishan large igneous province: Implications for mantle plume. Acta Petrologica Sinica, 26(10): 3143-3152 (in Chinese with English abstract)

Li HB, Zhang ZC, Lü LS, Wang YF, Kou CH, Liao BL and Li YS. 2012. Petrological, geochemical and geometric characteristics of dyke swarms and their tectonic significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(1): 91-103 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Li ZX, Wingate MTD, Chung SL, Liu Y, Lin GC and Li WX. 2006. Geochemistry of the 755Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? Precambrian Research, 146(1-2): 1-15

Li ZL, Chen HL, Song B, Li YQ, Yang SF and Yu X. 2011. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin in northwestern China. Journal of Asian Earth Sciences, 42(5): 917-927

Mao JW, Pirajno F, Zhang ZH and Wan YS. 2012. SHRIMP zircon U-Pb dating of alkaline dykes in the Pobei area, Beishan rift, Xinjiang Autonomous Region, China: Implications for tectonic setting and mantle plume event. Acta Geologica Sinica, 86(4): 879-884

Mao QG, Xiao WJ, Brian FW, Han CM, Qu JF, AO SJ, Zhang JE and Guo QQ. 2011. The Liuyuan complex in the Beishan, NW China: A Carboniferous-Permian ophiolitic fore-arc sliver in the southern Altaids. Geol. Mag., 149(3): 483-506

Marinoni LB. 2001. Crustal extension from exposed sheet intrusions: Review and method proposal. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 107(1-3): 27-46

Mège D and Korme T. 2004. Dyke swarm emplacement in the Ethiopian Large Igneous Province: Not only a matter of stress. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 132(4): 283-310

Olsson JR, Söderlund U, Hamilton MA, Klausen MB and Helffrich GR. 2011. A Late Archaean radiating dyke swarm as possible clue to the origin of the Bushveld Complex. Nature Geoscience, 4(12): 865 – 869

Park JK, Buchan KL and Harlan SS. 1995. A proposed giant radiating dyke swarm fragmented by the separation of Laurentia and Australia based on paleomagnetism of ca. 780Ma mafic intrusions in western North America. Earth and Planetary Science Letters, 132(1 – 4): 129 – 139

Qin KZ, Su BX, Sakyi PA, Tang DM, Li XH, Su H, Xiao QH and Liu PP. 2011. Sims Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim basin (NW China): Constraints on a ca. 280Ma mantle plume. American Journal of Science, 311(3): 237 – 260

Su BX, Qin KZ, Sun H, Tang DM, Sakyi PA, Chu ZY, Liu PP and Xiao QH. 2012. Subduction-induced mantle heterogeneity beneath Eastern Tianshan and Beishan: Insights from Nd-Sr-Hf-O isotopic mapping of Late Paleozoic mafic-ultramafic complexes. Lithos, 134 – 135: 41 – 51

Walker GPL. 1959. Geology of the Reydarfjördur area, Eastern Iceland. Quart. J. Geol. Soc., 114: 367 – 391

Walker GPL. 1960. Zeolite zones and dike distribution in relation to the structure of the basalts of Eastern Iceland. J. Geol., 68(5): 515 – 528

Wang DZ and Zhou JC. 2005. New progress in studying the Large Igneous Provinces. Geological Journal of China Universities, 11(1): 1 – 8 (in Chinese with English abstract)

Xiao PX, Huang YH, Wang YX, Wang XA and Li YJ. 2006. Geological characteristic and tectonic environment of basic dike swarms in the Beishan area, southern Hami, Xinjiang, China. Geological Bulletin of China, 25(1): 189 – 193 (in Chinese with English abstract)

Xu YG and Zhong SL. 2001. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions. Geochimica, 30(1): 1 – 9 (in Chinese with English abstract)

Xu YG. 2002. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences. Earth Science Frontiers, 9(4): 341 – 353 (in Chinese with English abstract)

Xu YG, He B, Huang XL, Luo ZY, Zhu D, Ma JL and Shao H. 2007. The debate over mantle plumes and how to test the plume hypothesis. Earth Science Frontiers, 14(2): 1 – 9 (in Chinese with English abstract)

Yang SF, Chen HL, Ji DW, Li ZL and Dong CW. 2005. Geological process of early to middle Permian magmatism in Tarim basin and its geodynamic significance. Geological Journal of China Universities, 11(4): 504 – 511 (in Chinese with English abstract)

Zhang W, Pease V, Wu TR, Zheng RG, Feng JC, He YK, Luo HM and Xu C. 2012. Discovery of an adakite-like pluton near Dongqiyishan (Beishan, NW China): Its age and tectonic significance. Lithos, 142 – 143: 148 – 160

Zhang CL, Li ZX, Xu YG, Zhou G and Ye HM. 2010a. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275Ma mantle plume? GSA Bulletin, 122 (11 – 12): 2020 – 2040

Zhang CL, Xu YG, Li ZX, Wang HY and Ye HM. 2010b. Diverse permian magmatism in the Tarim block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? Lithos, 119(3 – 4): 537 – 552

Zhang ZL, Qin QM, Tian W *et al.* 2008. Emplacement characteristics and spatial distribution of Permian Mazhartager basic dike swarms in Bachu area, Tarim basin. Acta Petrologica Sinica, 24(10): 2273 – 2280 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈汉林, 杨树锋, 董传万等. 1997. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的确定及大地构造意义. 地球化学, 26(6): 77 – 87

陈咪咪, 田伟, 张自力, 潘文庆, 宋宇. 2010. 塔里木二叠纪基性-中性-酸性岩浆岩的年代学及其地质意义. 岩石学报, 26(2): 559 – 572

董传万, 闫强, 张登荣, 杜振永, 竺国强. 2010. 浙闽沿海晚中生代伸展构造的岩石学标志: 东极岛镁铁质岩墙群. 岩石学报, 26(4): 1195 – 1203

侯贵廷, 张臣, 钱祥麟. 1998. 华北克拉通中元古代基性岩墙群形成机制及构造应力场. 地质论评, 44(3): 309 – 314

侯贵廷, 李江海, Halls HC, 钱祥麟. 2003. 华北晚前寒武纪镁铁质岩墙群的流动构造及侵位机制. 地质学报, 77(2): 210 – 216

侯贵廷,李江海,刘玉琳,钱祥麟. 2005. 华北克拉通古元古代末的伸展事件:拗拉谷与岩墙群. 自然科学进展, 15(11):1136 – 1373

侯贵廷. 2012b. 华北基性岩墙群. 北京: 科学出版社, 124 – 126

姜常义, 程松林, 叶书峰, 夏明哲, 姜寒冰, 代玉财. 2006. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因. 岩石学报, 22(1): 115 – 126

李宏博, 张招崇, 吕林素. 2010. 峨眉山大火成岩省基性墙群几何学研究及对地幔柱中心的指示意义. 岩石学报, 26(10): 3143 – 3152

李宏博, 张招崇, 吕林素, 汪云峰, 寇彩化, 廖宝丽, 李永生. 2012. 岩墙群的岩石学, 地球化学和几何学特征及其大地构造意义. 岩石矿物学杂志, 31(1): 91 – 103

王德滋, 周金城. 2005. 大火成岩省研究新进展. 高校地质学报, 11(1): 1 – 8

校培喜, 黄玉华, 王育习, 王兴安, 李育敬. 2006. 新疆哈密南部北山地区基性岩墙群的地质特征及形成构造环境. 地质通报, 25(1): 189 – 193

徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件. 地球化学, 30(1): 1 – 9

徐义刚. 2002. 地幔柱构造, 大火成岩省及其地质效应. 地学前缘, 9(4): 341 – 353

徐义刚, 何斌, 黄小龙, 罗震宇, 朱丹, 马金龙, 邵辉. 2007. 地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说. 地学前缘, 14(2): 1 – 9

杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 厉子龙, 董传万. 2005. 塔里木盆地早-中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义. 高校地质学报, 11(4): 504 – 511

张自力, 秦其明, 田伟等. 2008. 塔里木麻扎尔塔格基性岩墙群的侵位特征和空间分布规律研究. 岩石学报, 24(10): 2273 – 2280