

西天山新源南部二叠纪辉绿岩墙群地球化学特征、 锆石U-Pb年龄及其地质意义

冯 博¹,薛春纪²,赵晓波²,汪 冰¹,张 恩¹

FENG Bo¹, XUE Chunji², ZHAO Xiaobo², WANG Bing¹, ZHANG En¹

1. 核工业航测遥感中心,河北石家庄 050002;

2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室/中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083

1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, Hebei, China;

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources/School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

摘要:南天山古洋盆闭合、碰撞造山时限等洋-陆格局的演化过程是西天山备受关注的地球动力学问题,紧邻那拉提北缘断裂的新源地区二叠纪放射状辉绿岩墙提供了解决这个问题的良好机会。新源地区辉绿岩具辉绿结构,斑晶为斜长石和普通辉石,基质主要由斜长石、辉石、绿泥石等副矿物组成。岩石为富钠贫钾、过铝质、钙碱性岩浆系列。辉绿岩岩墙富集Rb、Th和La等元素,明显亏损Nb、Ta等元素,显示 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为正值(+3.3~+3.8)和低的初始锶比值($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70479 \sim 0.70548$),幔源物质明显。与该区炭纪玄武岩地球化学性质相似,岩浆可能为二叠纪软流圈和岩石圈相互作用的产物,其起源与软流圈上涌有关。辉绿岩岩墙LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 $280.4 \pm 3.6\text{ Ma}$,被解释为岩脉成岩年龄,即岩脉形成于二叠纪。结合区域构造背景,推测辉绿岩岩脉形成于塔里木地块与中天山-伊犁地块碰撞闭合后的板内伸展环境,并与南天山洋洋壳岩石圈板块断离密切相关。

关键词:辉绿岩岩墙;二叠纪;岩石成因;LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄;新疆西天山

中图分类号:P534.46; P588.12 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2019)06-1028-11

Feng B, Xue C J, Zhao X B, Wang B, Zhang E. Geochemistry and zircon U-Pb age of the Permian radial diabase dyke from southern Xinyuan area, Western Tianshan Mountains, Xinjiang, and their geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(6):1028-1039

Abstract: The accretionary processes of the Western Tianshan Mountains is a hot topic but there is no consensus on the final closure of the Paleo-South Tianshan Ocean basin and subsequent post-collision process. The Permian radial diabase dyke exposed near the North Nalati Fault provides an opportunity for understanding these problems. The dyke shows a typical ophitic texture. The phenocryst is composed of plagioclase and pyroxene, and the substrate is mainly composed of plagioclase, pyroxene, chlorite and some other accessory minerals. The diabase dyke has sodium-rich, potassium-poor and peraluminous characteristics, and hence belongs to the calc-alkaline series. The dyke is characterized by depletion of Nb and Ta and enrichment of Rb, Th and La, and has mantle source material with positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (+3.3~+3.8) and low initial Sr($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70479 \sim 0.70548$). These geochemical characteristics are similar to those of the Carboniferous basalt of the study area, suggesting that the parental magma was formed by the interaction of asthenosphere and lithosphere. Zircon U-Pb dating of the dyke yielded an age of $280.4 \pm 3.6\text{ Ma}$. Combined with regional tectonic background, the authors hold that these Permian diabases were formed from intraplate extension after the collision

收稿日期:2017-02-16;修订日期:2017-03-29

资助项目:国家重点研发计划深地资源勘查开采项目《北方增生造山成矿系统的深部结构与成矿过程》(编号:2017YFC0601202)

作者简介:冯博(1990-),男,硕士,助理工程师,从事矿产普查与勘探、矿床学及遥感地质学工作。E-mail:943510198@qq.com

stage which was closely related to the oceanic lithosphere break-off.

Key words: diabase dyke; Permian; petrogenesis; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; Western Tianshan Mountains in Xinjiang

基性岩墙是源于地幔的玄武质岩浆受分异作用或地壳混染作用的影响充填于张性空间而成,作为幔源岩浆浅侵位的产物,常被认为是大洋和大陆伸展构造的重要标志之一^[1-5]。基性岩墙地球化学特征能为地幔源区的物质组成和深部过程提供制约,是获取特定地质时期深部地慢性质及其演变的重要途径^[6-7]。

天山造山带是中亚巨型复合造山系的中国境内部分,它是挟持于北部西伯利亚地块与南部塔里木地块、华北地块之间的古亚洲洋,在形成、演化和消亡过程中伴随诸多陆块拼合、增生-俯冲、碰撞造山^[8-9](图1-a),早古生代晚期Terskey古洋闭合后,塔里木北缘发生拉张解体,形成南天山洋;中天山地块及伊犁地块南缘分布大量形成时代在436~276Ma的花岗质岩体和火山岩,指示南天山洋俯冲开始时间为早志留世晚期,南天山洋的闭合和增生造山作用的时间存在较大争议,大部分学者认为南天山古洋盆于晚古生代闭合^[9-18],也有学者认为南天山为三叠纪碰撞造山带^[19-22]。新疆天山广泛出露的火山-沉积岩即大哈拉军山组火山岩的成因同样存在争议,部分学者认为其形成于伊犁-中天山板块南北两侧板块俯冲造成的大陆减薄拉张环境^[23-24];部分学者认为其属于裂谷火山岩系,形成于碰撞后大陆裂谷拉伸阶段^[25-29],大部分学者认为其形成于大陆边缘岛弧环境,与南天山洋或北天山洋向伊犁-中天山板块之下俯冲有关^[30-39]。

新疆新源县南出露较大面积的大哈拉军山组火山岩(图1-a),火山岩内存在多组辉绿岩墙(图1-b),该区以往研究工作较少,仅朱永峰等获得该区玄武岩锆石SHRIMP年龄为 353.7 ± 4.5 Ma^[32],而对侵入其中的基性、中基性侵入岩并未进行年龄和地球化学等报道,显然,正确认识这些辉绿岩墙形成演化过程,可以为认识其围岩大哈拉军山组火山岩的成因及深入讨论南天山洋古洋盆闭合、碰撞造山时限等洋-陆格局的演化问题提供新的约束资料。

1 区域地质背景和样品岩石学特征

新疆西天山造山带位于新疆天山的西部,多数学者依据尼古拉耶夫线-那拉提北缘断裂和中天山南缘断裂将西天山由北向南划分为北天山、中天

山、南天山3个构造单元^[13,40](图1-b)。北天山主体为哈萨克斯坦-伊犁板块及其南、北活动大陆边缘,前寒武纪变质基底之上,发育上、下古生界双结构盖层,下古生界为被动陆缘沉积建造发展为活动陆缘中性火山建造,泥盆系-石炭系呈现活动陆缘安山岩建造,二叠系转为火山磨拉石和陆相碎屑沉积建造^[41];中天山多为隆起带,前寒武纪变质结晶基底多有出露,盖层为古生界中性、中基性海相火山岩夹碳酸盐岩-碎屑岩建造^[42];南天山主体为塔里木板块北部被动大陆边缘,前寒武纪基底之上的盖层为下古生界浅变质含炭复理石、泥盆纪-石炭纪残余浅海碎屑岩-碳酸盐岩建造^[42]。

新疆西天山构造活动频繁,岩浆活动强烈,侵入岩时空分带性明显^[43],早古生代侵入岩主要分布于那拉提山及虎拉山南缘一带,那拉提山一带早古生代侵入岩存在2种侵入岩,一种是与板块俯冲有关的钙碱性花岗岩^[44-45],另一种为与同碰撞有关的偏铝和过铝花岗岩^[46],塔里木北缘的早古生代花岗岩则主要为富铝和富钾花岗岩^[47],与同碰撞和后造山有关;晚古生代侵入岩分布较广,泥盆纪侵入岩呈带状分布,主要分布于北天山、那拉提山和虎拉山南缘,主要为一套与俯冲有关的钙碱性花岗岩,与同期火山岩组成晚古生代早期活动陆缘岩浆岩带^[34,48],石炭纪一二叠纪侵入岩呈面状分布,石炭纪侵入岩主要以偏铝和富铝的同碰撞花岗岩为主^[49],二叠纪花岗岩分布与石炭纪花岗岩基本一致,以富钾花岗岩为主^[50],主要为后造山花岗岩。近年来国内学者对新疆多地的古生代、中生代岩墙开展了研究^[51-53],对讨论新疆大地构造演化及地球动力学具有重要意义。中天山地区基性岩墙、岩脉多有出露,骆驼沟见晚石炭世辉长岩^[54]、昭苏北部大哈拉军山组中侵入的晚石炭世辉长岩^[55]、特克斯哈拉达拉306~308 Ma的基性-超基性岩体^[49,56]。

研究区位于伊犁地块南缘紧邻那拉提北缘深大断裂(图1-b),伊犁地块南缘出露一套分布面积很广的大哈拉军山组火山岩,其形成时代跨度较大,晚泥盆世-晚石炭世均有出露^[32]。新源县南的大哈拉军山组火山岩上部为凝灰岩夹砂岩和灰岩透镜体,下部为玄武岩、安山岩、流纹岩夹凝灰岩和火山角砾岩(图1-c),最早形成的玄武岩锆石

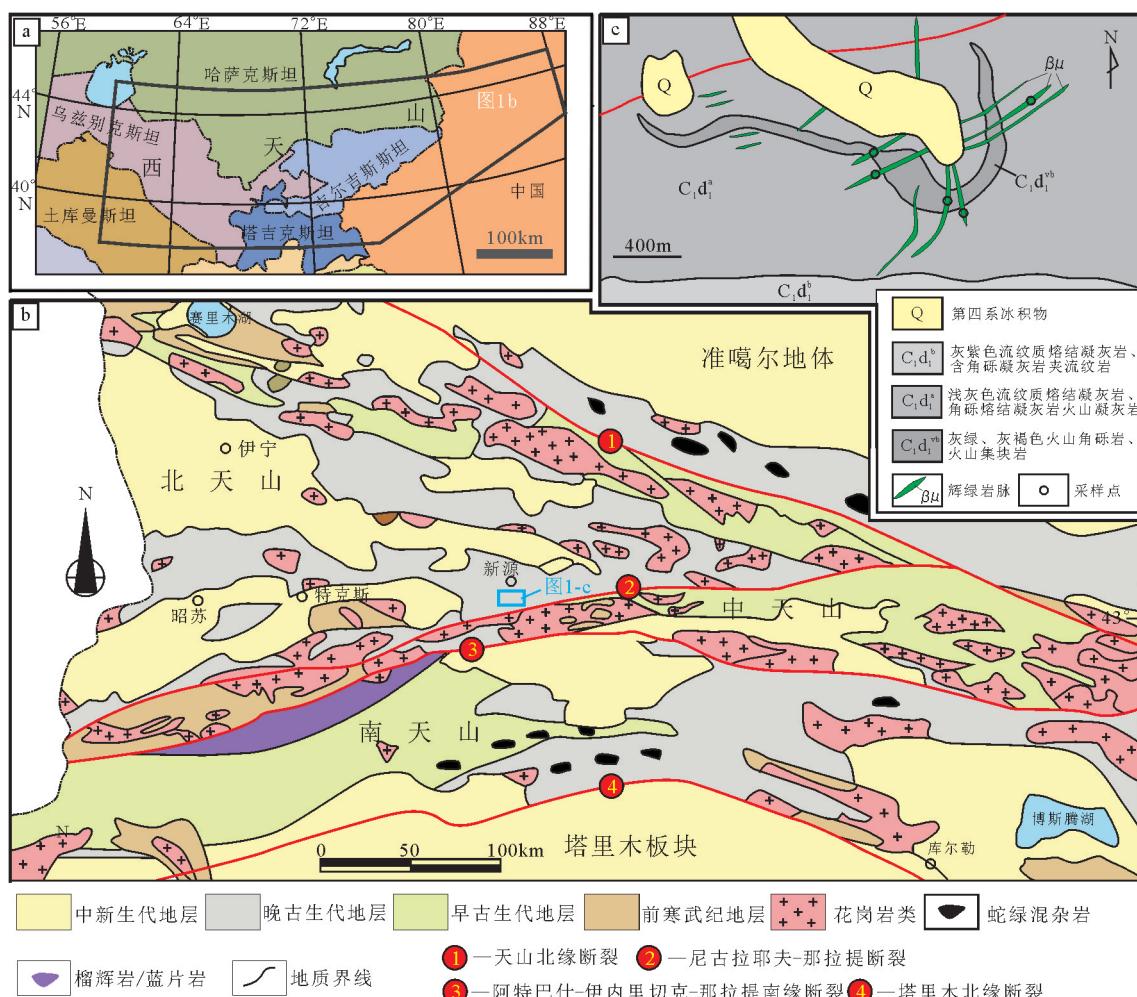


图1 西天山地质纲要图(a)、新疆西天山区域地质图(b)和新源南地质简图(c)

Fig. 1 Tectonic map of the Western Tianshan Mountains (a), regional geological map of the Western Tianshan Mountains, Xinjiang (b) and geological map of southern Xinyuan area, showing the occurrence of the diabase dyke (c)

SHRIMP年龄为 $353.7\pm4.5\text{ Ma}$ ^[32,57-58]。最新的大地构造研究和地球化学资料表明,新源县南出露的火山岩具有典型大陆弧的地球化学特征,是南天山古洋洋壳向伊犁-中天山地块俯冲的产物^[33,59]。

本文报道的辉绿岩墙群位于那拉提山南坡新源县南5km处,岩墙呈脉状侵入大哈拉军山组火山岩(图1-c),岩性主要为流纹岩和凝灰岩,火山岩易风化,在野外呈负地形,辉绿岩抗风化能力较强,呈正地形直立突出,岩墙宽4m,长10m,延伸稳定。该区具火山构造,辉绿岩墙沿火山口呈放射状分布(图2-a)。岩石手标本为深灰色,块状构造,辉绿结构明显,其中斜长石含量为43%~55%,辉石含量为24%~36%(图2-b)。斜长石呈自形或半自形板状,蚀变弱,粒径在斑晶中为0.15~6mm,基质中为0.06~

0.3mm;辉石呈他形粒状,蚀变较弱,粒径为0.06~0.3mm;绿泥石为蚀变矿物,他形;副矿物主要为磁铁矿、磷灰石、榍石、锆石等(图2-c)。

2 分析方法

样品采自辉绿岩墙内,共采集5件样品,分别为HSX-1、HSX-3、HSX-4、HSX-5、HSX-6,具体采样位置见图1-c。原岩样品新鲜,未风化,无蚀变矿化。锆石单矿物从HSX-1样品中进行分选,分选工作由廊坊宇能矿物分选公司完成。将锆石颗粒制作成DEVCON环氧树脂制靶,打磨至颗粒中心部位出露后抛光,然后拍摄锆石阴极发光(CL)图像(图3),锆石制靶工作在锆年领航公司完成。锆石的U-Pb同位素及微量元素含量测定在西北大学大陆

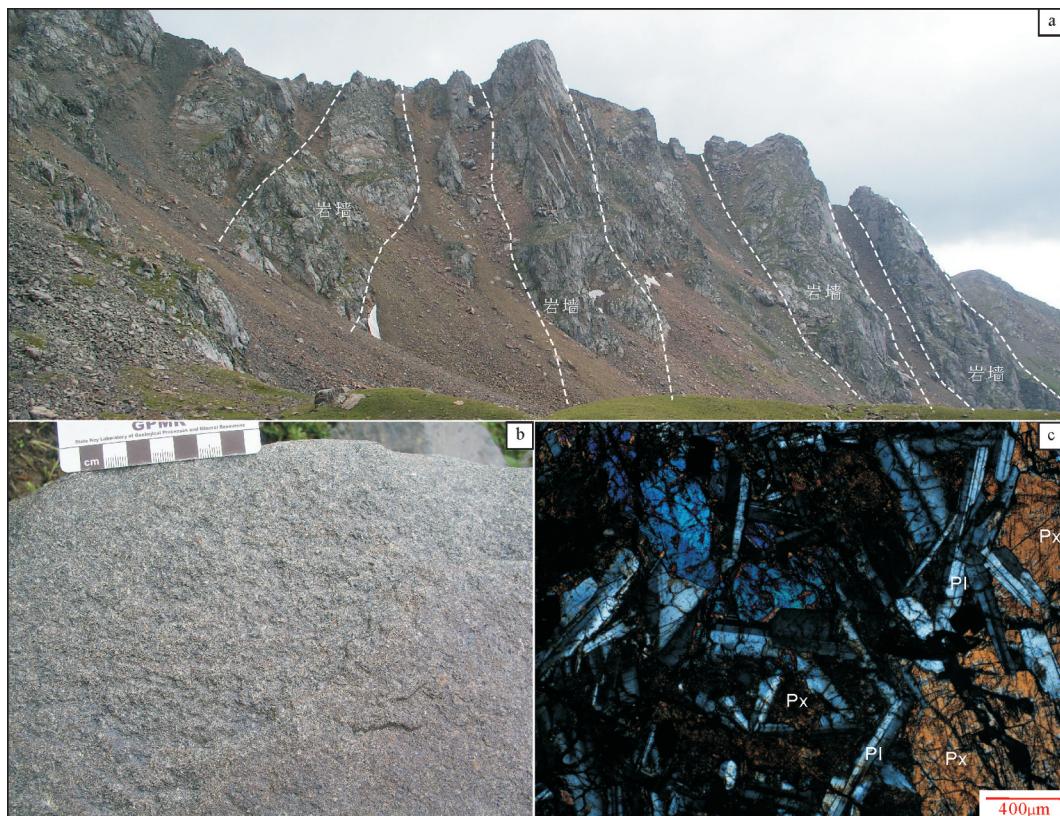


图2 新源南部辉绿岩墙野外照片(a)、手标本照片(b)和电子显微镜照片(c)

Fig. 2 Field occurrences (a), sample (b) and photomicrograph of the diabase dyke (c) in southern Xinyuan area
Pl—斜长石; Px—辉石

动力学国家重点实验室的Agilent7500a型ICP-MS上完成,测定时的激光束斑直径为 $30\mu\text{m}$,剥蚀深度为 $20\sim40\mu\text{m}$,采用标准锆石GJ-1测值校正锆石U-Pb同位素分馏,采用美国国家标准技术研究院人工合成硅酸玻璃NIST SRM610进行仪器最佳化,锆石年龄采用国际标准锆石91500为外标,元素含量采用NIST SRM610为外标, ^{29}Si 为内标;实验数据处理采用Glitter(Version4.0, Meaquare University)软件,年龄计算及谐和图绘制采用Isoplot(Ver 3.0)。详细的分析步骤和数据处理方法见参考文献[59-60],同位素测试结果见表1。

新鲜岩石样品粉碎至200目,在中国核工业集团北京地质研究院分析测试研究中心完成全岩主量和微量元素分析,主量元素在AB-104L-PW2404型X荧光光谱仪上测定,元素分析精度优于1%;微量元素和稀土元素在ELEMENT-XR型等离子质谱仪

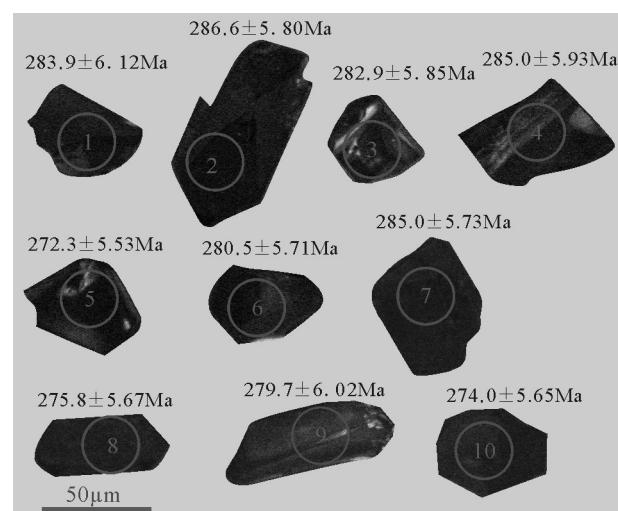


图3 新源南部辉绿岩墙锆石阴极发光图像
Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircon grains from the diabase dyke in southern Xinyuan area

表1 新源南部辉绿岩墙 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测定结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb data for zircons from diabase dyke in southern Xinyuan area

样点编号	元素含量/ 10^{-6}			同位素比值						年龄/Ma			
	^{238}U	^{232}Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
20-01	1418	4294	3.03	0.054	0.002	0.338	0.012	0.045	0.001	283.9	6.1	392.6	96.5
20-02	4436	13171	2.97	0.052	0.001	0.327	0.007	0.046	0.001	286.6	5.8	298.1	71.8
20-03	1431	3606	2.52	0.056	0.002	0.347	0.010	0.045	0.001	282.9	5.9	456.3	79.6
20-04	1302	2207	1.69	0.053	0.002	0.336	0.010	0.045	0.001	285.0	5.9	367.3	84.4
20-05	2388	7741	3.24	0.055	0.001	0.333	0.008	0.043	0.001	272.3	5.5	451.8	72.9
20-06	1605	3262	2.03	0.053	0.001	0.325	0.008	0.044	0.001	280.5	5.7	329.9	76.7
20-07	4354	16456	3.78	0.053	0.001	0.334	0.008	0.045	0.001	285.0	5.7	356.5	72.5
20-08	20389	5304	2.60	0.058	0.002	0.349	0.010	0.044	0.001	275.8	5.7	531.3	79.7
20-09	771	1167	1.51	0.051	0.002	0.312	0.013	0.044	0.001	279.7	6.0	245.8	106.5
20-10	2198	5204	2.37	0.052	0.002	0.314	0.009	0.043	0.001	274.0	5.7	306.0	86.0

上进行,样品测试经 GBW 系列标样监控分析精度优于 2%,具体的测试流程见参考文献[61],样品测试结果见表2。

Sr、Nd 同位素分离和测试均在中国科技大学地球与空间科学学院固体同位素地球化学实验室完成,Sr、Nd 同位素的分离在超净实验室完成,分离后的 Sr、Nd 在 Finnigan MAT-261 型多接收器固体质谱仪上完成,实验流程见参考文献[62],Sr 同位素比值测定采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 进行质量分馏矫正,Rb-Sr 全流程空白本底约 0.5ng, Nd 同位素分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正,Sm-Nd 分析流程空白本底约为 10pg, Sr 标样 NBS-987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710250 \pm 7(2\sigma)$, Nd 标样 JMC 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512109 \pm 3(2\sigma)$, Sr-Nd 同位素测试结果见表3。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

辉绿岩墙样品锆石的颗粒形态较简单,主要呈短柱状,粒度介于 80~230 μm 之间,长宽比在 2:1~3:1 之间,在透射光和反射光下为无色、透明-半透明。阴极发光图像显示,锆石环带不明显,部分显示弱的扇形分带,具岩浆成因特征,部分晶体内部发育裂隙(图3)。锆石 Th/U 值为 1.51~3.24,均大于 0.4,与岩浆成因锆石特征一致^[63~65]。测得 10 颗锆石的 10 个数据在 U-Pb 谐和图中分布较集中(图4),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 272.3 ± 5.5 ~ 286.6 ± 5.8 Ma 之间,年龄加权平均值为 280.4 ± 3.6 Ma(MSWD=0.78),故研究区辉绿岩墙侵位于早二叠世。

3.2 地球化学特征

本次样品以新鲜、蚀变程度弱为选取原则,电子显微镜下仍观察到较弱的热液蚀变特征,样品主量元素测试结果中的烧失量同样有所反映。热液蚀变作用会导致大离子亲石元素(LILE)中的 Sr、Ba、Rb 元素,以及 Ca、Na、K 等元素的迁移,而某些主量元素如 Fe、P、Ti,稀士元素,高场强元素(HFSE)及过渡性元素基本不发生迁移^[66~67]。为此,本文使用的地球化学数据仅来自弱蚀变样品或不易迁移元素。

研究区辉绿岩墙样品的主量、微量元素测试结果见表2。样品具有较高的烧失量,在 2.07%~3.30% 之间; SiO_2 含量为 47.45%~47.72%; Na_2O 含量为 2.84%~3.06%, K_2O 含量为 0.74%~0.97%,全碱含量为 3.62%~3.95%,富钠贫钾, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.25~0.33。在 Wilson 侵入岩 TAS 分类图解^[68](图 5-a) 中,样品投点于辉长岩范畴,与镜下观察的典型辉绿结构及野外地质产状相符(图 2-c),岩性鉴定结果为辉绿岩;样品具有较低的 MgO 含量(4.93%~5.51%), $\text{Mg}^{\#}=35.63\sim39.42$; P_2O_5 含量为 0.66%~0.75%, TFeO 为 15.04%~15.89%, CaO 为 8.60%~9.51%, Al_2O_3 为 13.52%~14.04%, TiO_2 含量较高(3.13%~3.55%)。

样品全岩稀土元素含量较高,稀土总量(ΣREE)变化于 196×10^{-6} ~ 248×10^{-6} 之间。在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 6-a)上,样品呈较平坦的右倾型配分模式,轻、重稀土分异较弱,轻、重稀土比值为 1.29~1.37, $(\text{La/Yb})_{\text{N}}=2.00\sim2.29$, $(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}=1.27\sim$

1.41, Eu异常不明显, $\delta\text{Eu}=1.01\sim1.19$, 稀土元素配分谱线相互平行, 分异程度相当, 指示样品具同源特征。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图6-b)中, 样品显示右倾斜, 明显富集大离子亲石元素Rb、Th、La, 高场强元素较低, 强烈亏损Nb、Ta, 呈现出明显的Ta、Nb和Ti“谷”状, 显示板内玄武岩特征,

表2 新源南部辉绿岩墙主量、微量及稀土元素组成

Table 2 Major, trace elements and REE data for diabase dyke in southern Xinyuan area

样品号	HSX-1	HSX-3	HSX-4	HSX-5	HSX-6
SiO ₂	47.72	47.47	47.46	47.64	47.45
TiO ₂	3.13	3.32	3.34	3.30	3.55
Al ₂ O ₃	14.04	13.70	13.70	13.52	13.67
Fe ₂ O ₃	13.77	8.68	7.50	8.61	10.05
FeO	2.65	7.90	8.34	7.82	6.84
MnO	0.22	0.24	0.26	0.24	0.23
MgO	5.19	5.44	5.51	5.44	4.93
CaO	8.76	8.60	9.51	9.12	8.81
Na ₂ O	3.06	2.98	2.85	2.84	2.97
K ₂ O	0.80	0.97	0.82	0.78	0.74
P ₂ O ₅	0.66	0.70	0.71	0.70	0.75
烧失量	2.26	2.74	2.13	2.07	3.30
Rb	29.80	40.60	39.90	38.00	32.90
Ba	321	340	270	311	399
Th	2.65	2.53	2.44	2.77	2.80
U	0.86	0.83	0.88	0.91	0.99
Nb	6.40	6.84	6.78	7.34	8.11
Ta	0.64	0.61	0.59	0.66	0.69
Sr	334	318	321	317	324
Zr	341	349	336	386	413
Hf	9.04	9.48	9.12	10.40	10.60
Y	51.40	52.50	55.60	63.20	64.50
La	17.90	20.50	19.40	23.30	24.70
Ce	44.50	48.10	47.60	55.60	54.60
Pr	6.28	7.31	6.97	8.30	8.37
Nd	30.70	34.10	33.50	38.30	39.00
Sm	8.24	9.47	9.31	10.60	10.90
Eu	3.13	3.36	3.13	3.41	3.61
Gd	7.67	8.72	8.67	9.68	10.3
Tb	1.57	1.77	1.7	1.91	1.99
Dy	9.74	10.7	10.7	11.9	12.3
Ho	2.02	2.22	2.26	2.52	2.52
Er	5.21	5.51	5.73	6.06	6.28
Tm	1.04	1.09	1.09	1.24	1.22
Yb	6.03	6.34	6.39	7.13	7.28
Lu	0.84	0.88	0.90	0.98	0.96

注:锆石单矿物从HXS-1样品中挑选; 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

样品具较低的Nb/Zr值(0.001~0.02), 暗示岩浆源区可能为亏损地幔。在TFeO-(Na₂O+K₂O)-MgO₂图解(图5-b)中, 大部分样品落入拉斑玄武岩区, 稀土和微量元素特征与E-MORB相似, 样品具有较高的Nb/La值(0.32~0.36)和Zr含量(336×10^{-6} ~ 413×10^{-6})、Nb含量(6×10^{-6} ~ 8×10^{-6}), 反映岛弧岩浆的性质。样品锆石单矿物稀土元素配分图(图6-c)显示, 从La到Lu陡峭的正坡角, 正Ce异常和Eu相对亏损, $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}=48.5\sim216.9$, 表明锆石为岩浆来源^[69], 与岛弧花岗岩锆石特征相似^[70]。

3.3 Sr-Nd同位素组成

样品的Sr、Nd同位素测试结果及年龄校正结果见表3。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.304\sim0.439$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7067275\sim0.756585$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1671\sim0.1690$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512756\sim0.512795$, 经过280.4 Ma年龄校正后, 样品HXS-6的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值与其他样品相差较大, 对比样品间的烧失量值, 推测该样品受蚀变作用影响较大。其余样品初始 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.70479\sim0.70548$, 较集中, 平均值为0.70519, 为辉绿岩墙的初始同位素信息, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于+3.3~+3.8之间, $f_{\text{Sm/Nd}}$ 值变化于-0.14~-0.15之间, t_{DM} 模式年龄为1.1~1.3 Ga, 具较低的初始Sr值, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+3.3~+3.8)指示辉绿岩具有亏损地幔源区的特征。

4 讨论

4.1 分离结晶作用和地壳混染

岩浆岩的分离结晶作用是岩浆演化过程的重要阶段, 对于中酸性岩浆而言, 富铁镁质矿物的结

表3 新源南部辉绿岩墙Sr-Nd同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of diabase dyke in southern Xinyuan area

样品号	HXS-1	HXS-3	HXS-4	HXS-5	HXS-6
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.304	0.439	0.394	0.371	0.319
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.706695	0.707055	0.706770	0.706275	0.756585
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1684	0.1676	0.1686	0.1690	0.1671
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512766	0.512756	0.512779	0.512759	0.512795
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.70548	0.70530	0.70520	0.70479	0.75531
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512457	0.512448	0.512470	0.512449	0.512488
$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	3.5	3.3	3.8	3.4	4.1
$f_{\text{Sm/Nd}}$	-0.14	-0.15	-0.14	-0.14	-0.15
t_{DM}	1297	1307	1259	1338	1166

注: $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.1967$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$,

$(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}}=0.0847$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}}=0.7047$, 计算辉绿岩

墙的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 t_{DM} 时 $T=280.4\text{ Ma}$

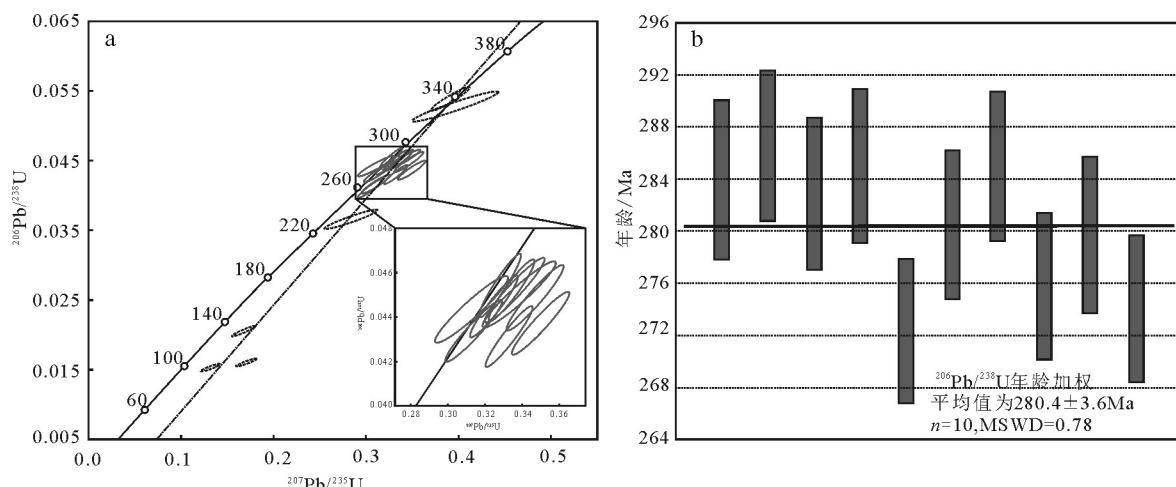
图4 新源南部地区辉绿岩墙锆石U-Pb谐和图(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(b)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age (b) of the diabase dyke in southern Xinyuan area

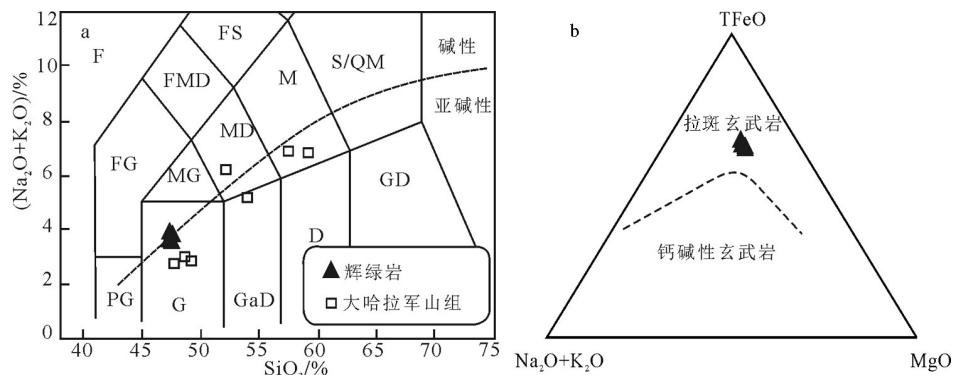
图5 新源南部辉绿岩墙主量元素特征
(大哈拉军山组火山岩岩性为玄武岩、粗面安山岩、安山岩和流纹岩, 数据参考文献[58])

Fig. 5 Major element characteristics of the diabase dyke in southern Xinyuan area

D—闪长岩; F—似长石岩; FG—似长石二长闪长岩; FMD—似长石二长闪长岩; FS—似长石二长闪长岩; G—辉长岩; GaD—辉长闪长岩;
GD—花岗岩; M—二长岩; MD—二长闪长岩; MG—二长辉长岩; PG—橄榄辉长岩; S/QM—正长岩/石英二长岩

晶分异作用十分普遍, 可通过 Mg、Cr、Ni 等的含量确定岩浆岩的分离结晶作用。很高的 MgO、Cr 及 Ni 含量, 显示岩浆岩来源接近于原始地幔^[71], 含量若较低则指示经历了橄榄岩、辉石等的分离结晶作用。研究区辉绿岩岩墙中, 样品 MgO < 6%, Ni < 70×10^{-6} , Cr < 110×10^{-6} , 变化范围较小, 表明它们是原始岩浆演化后的产物, 且在演化过程中经历了辉石等的分离结晶作用。

大陆玄武岩岩浆从地幔向大陆上升过程中经常受地壳物质的混染, 地球化学数据及同位素数据可用于判断是否存在地壳混染。辉绿岩微量元素蛛网图富集大离子亲石元素, Nb、Ta 相对亏损(图

6-b), 表明与俯冲有关的岩浆作用有关^[72-73], 可能受到地壳物质混染作用^[74]; 地壳具有较高的 K/Nb 值, 一般大于 500^[75], 辉绿岩的 K/Nb 值及变化范围非常大, 介于 2.11~3.28 之间, 指示具地壳混染的过程; 研究区岩墙具有很高的 Zr/Nb 值, 变化范围也很大, 介于 49.56~53.28 之间, 同样指示源区存在地壳物质的混合^[64,75]。

4.2 岩浆源区和构造环境

锆石饱和温度可代表原始母岩浆的形成温度^[76], 辉绿岩墙样品的锆石饱和温度为 700~729°C, 所以幔源物质在辉绿岩形成过程中发挥了重要的作用。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 图解(图 7-a)中^[77],

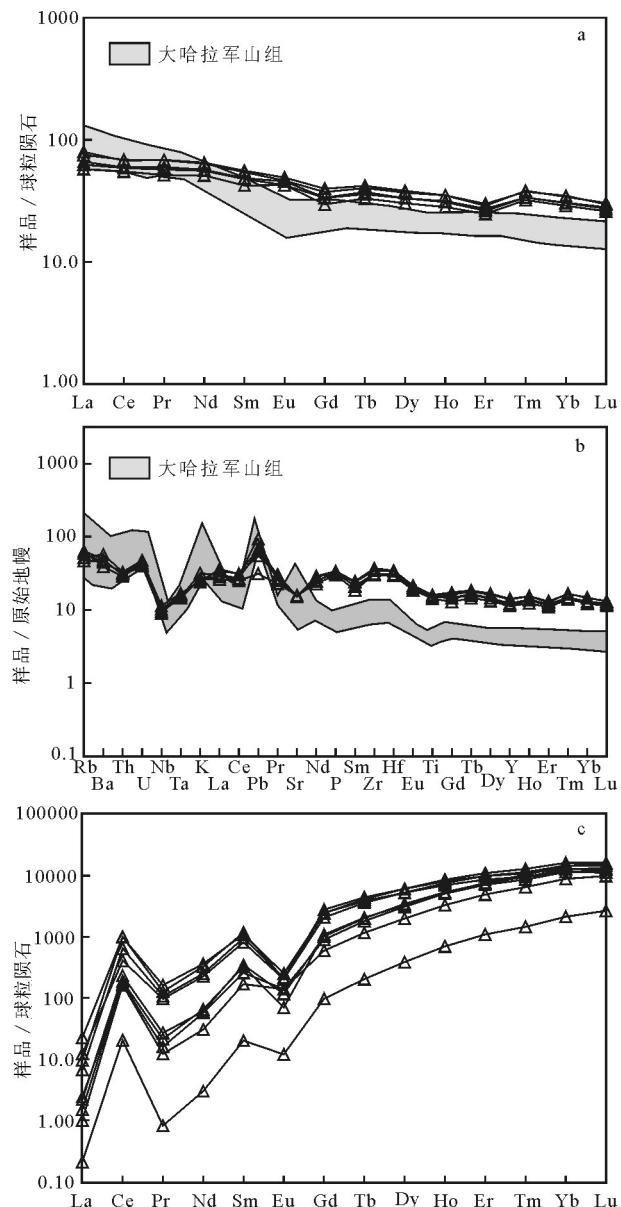


图6 新源南部辉绿岩墙稀土元素球粒陨石标准化配分模式(a)、微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)和锆石稀土元素球粒陨石配分模式图(c)
(大哈拉军山组火山岩数据参考文献[58])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a), primitive-mantle-normalized trace element patterns (b) and chondrite-normalized REE patterns of zircon grains (c) of the diabase dyke in southern Xinyuan area

辉绿岩的地壳物质所占百分比为20%左右,表明其成岩物质中平均地幔成分含量(PMC)达到70%。同时,在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解(图7-b)中,辉绿岩墙样品偏高的初始($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)值说明其并非为亏损地幔直

接部分熔融的产物,与中国东南沿海新生代起源于软流圈-岩石圈交互作用的板内玄武岩的Sr-Nd同位素组成类似,本地区的地幔软流圈可以由北天山早石炭世巴音沟蛇绿岩代表(344Ma , $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=+8\sim+9$),石炭纪岛弧玄武岩显示富集同位素特征($\epsilon_{\text{Nd}}(t)<+2.0$),代表了岩石圈地幔的组成。在La/Y- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图8-a)中,新源南部辉绿岩具有从交代岩石圈地幔到地幔软流圈的演化趋势,地球化学特征显示辉绿岩墙具有岩石圈地幔和地幔软流圈的共同特征。另外,La/Yb-Dy/Yb图解(图8-b)所指示的源区熔融特点,反映发生熔融的源区深度较浅,新源南大哈拉军山组火山岩具有相似的微量元素和Sr-Nd同位素特征, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高,表明地幔的富集时间距岩浆产生的时间较短,富集作用可能与古生代(早石炭世末期之前)南天山洋向伊犁-中天板块之下的俯冲作用有关。

本次辉绿岩墙LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄显示为早二叠世($280.4\pm3.4\text{Ma}$),辉绿岩样品具有富钠钙碱性准铝质特征,富集大离子亲石元素,亏损Ba、Sr、Nb、Ta、Eu等元素,在微量元素构造环境判别图(图9)中,大多数样品落入板内花岗岩(WPB)区;较低的初始Sr同位素比值,正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值也显示出后碰撞的特征。辉绿岩墙围岩火山岩的形成年龄为 $313\sim354\text{Ma}$ ^[58],为南天山洋向伊犁板块俯冲阶段岛弧岩浆喷发的产物,Sr-Nd同位素特征显示,晚石炭世该区已处于岛弧演化的后阶段^[59],同时区域构造演化也表明南天山洋闭合时间为晚石炭世^[16];二叠纪该区域已进入后碰撞阶段的调整期,塔里木北部被动大陆边缘古生代地层中分布的后碰撞碱性花岗岩($298\sim260\text{Ma}$)侵入体也进一步限定南天山洋增生造山结束的时间早于 300Ma 。因此认为,研究区辉绿岩墙形成于板内构造环境,即南天山洋关闭后,塔里木板块和伊犁-中天山板块碰撞造山阶段后伸展的构造环境。

4.3 地球动力学机制及地质意义

前人研究表明,天山造山带出现石炭纪较大的火山岩省与地幔柱相关^[78-80]。新源县南辉绿岩墙具地幔软流圈和岩石圈地幔混合源区的特征,同时熔融深度较浅,与地幔柱较深的模型不符。北天山存在石炭纪岛弧性质岩浆岩,说明南天山洋俯冲持续了 312Ma ,然而,北天山存在 $345\sim320\text{Ma}$ 的岩浆间隙,这段时间大洋板块经历了板块回旋过程,即可

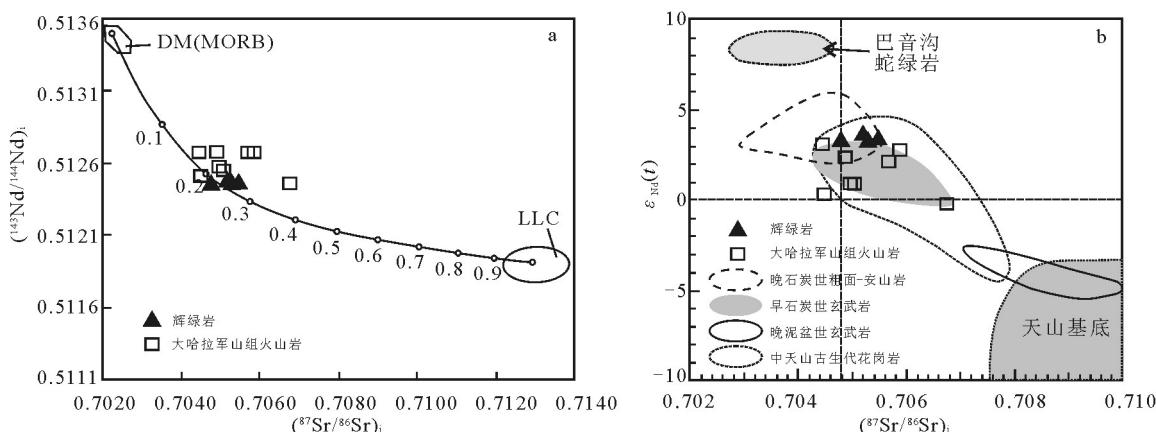


图7 新源南部辉绿岩墙 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) $-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(b)

(大哈拉军山组火山岩数据参考文献[58], 巴音沟蛇绿岩数据参考文献[78], 天山基底数据参考文献[35-36], 晚石炭世粗面-安山岩、早石炭世玄武岩、晚泥盆世玄武岩和中天山古生代花岗岩数据参考文献[40,44])

Fig. 7 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram (a) and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram (b) of the diabase dyke in southern Xinyuan area

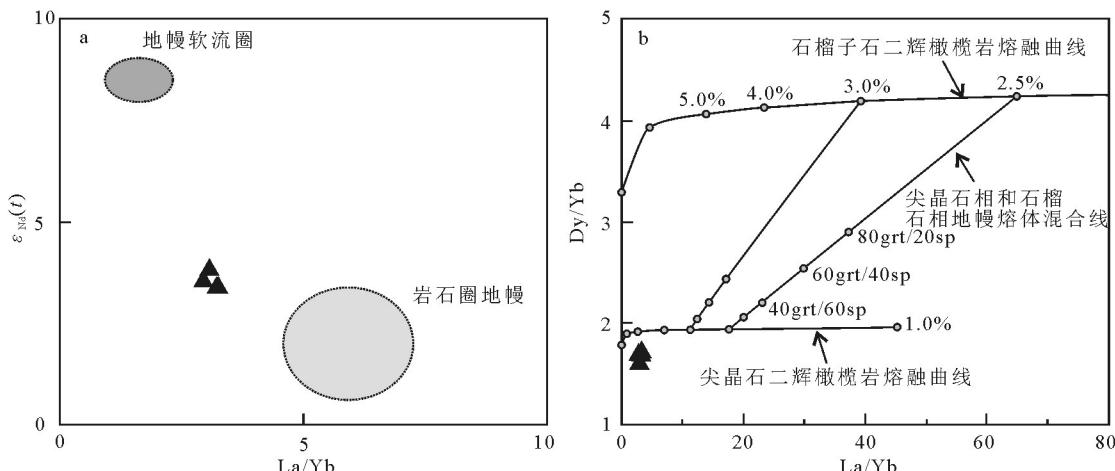


图8 新源南部辉绿岩墙 La-Yb- $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(a)和 La-Yb-Dy-Yb 图解(b)

Fig. 8 La/Yb- $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and La/Yb-Dy/Yb diagrams (b) of the diabase dyke in southern Xinyuan area

能为北向俯冲的南天山洋洋壳岩石圈发生板块分离,热的软流圈物质沿断离形成的板片窗上涌^[81-82]所引起,同时上涌的地幔软流圈物质使上覆地壳处于伸展拉张背景,幔源岩浆沿石炭纪火山通道上升到浅部就位,形成研究区放射状的辉绿岩墙。

伊犁地块晚古生代火山岩总体存在3个喷发旋回:晚泥盆世—早石炭世大哈拉军山组、晚石炭世伊什基里克组和早二叠世乌郎组^[83-86]。前人对大哈拉军山组内的基性、中性侵入岩进行了同位素定年,限定其时代主要为晚泥盆世—早石炭世末期,例如朱永峰等获得新源南大哈拉军山组火山岩形成时代为313~354Ma^[58]。本文获得大哈拉军山组火

山岩辉绿岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 280.4 ± 3.6 Ma,限定了该区域火山岩时代的上限。同时,对大哈拉军山组火山岩的构造环境,不同学者有不同的认识,部分学者认为其形成于大陆减薄拉张环境,与伊犁—中天山板块受南北两侧板片俯冲密切相关^[23-24];一些学者认为其形成于碰撞后大陆裂谷拉伸环境^[25-29];其他学者认为其形成于大陆边缘岛弧环境^[30-39],与南天山洋或北天山洋向伊犁—中天山板块下俯冲有关。本文对辉绿岩地球化学数据研究表明,辉绿岩与大哈拉军山组火山岩具有相似的岩浆源区,指示西天山石炭纪火山岩形成于南天洋向北俯冲的大陆边缘岛弧环境。

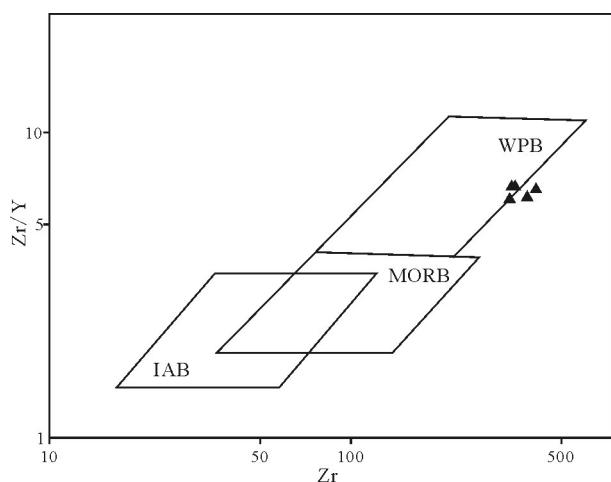


图9 新源南部地区辉绿岩岩墙构造环境判别图

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of the diabase dyke in southern Xinyuan area
WPB—板内玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩

5 结 论

(1) 西天山新源县南大哈拉军山组的辉绿岩墙形成于二叠纪(280.4 ± 3.6 Ma), 具有富钠过铝质钙碱性, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$, 与大哈拉军山组火山岩具有相似的地球化学特征, 源区为受俯冲流体交代的富集地幔。

(2) 辉绿岩墙形成于塔里木地块与中天山-伊犁地块碰撞闭合后的板内伸展环境, 与南天山洋洋壳岩石圈发生板块断离密切相关, 幕源岩浆沿石炭纪火山通道上升至浅部就位, 与新源地区大哈拉军山组火山岩具有相似的岩浆源区, 指示南天山洋西段在晚石炭世已经闭合, 二叠纪西南天山已进入后碰撞演化阶段。

致谢: 分析测试工作分别在西北大学大陆动力学国家重点实验室、核工业北京地质研究院分析测试中心及中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室完成, 得到实验室老师的悉心帮助和指导, 审稿专家提出的修改意见和建议对完善本文有重要帮助, 特此一并感谢。

参考文献

- [1] Walker G P L, Eyre P R. Dike complexes in American Samoa[J]. Journal of volcanology and geothermal research, 1995, 69(3): 241–254.
- [2] Windley B F. The evolving continents[M]. John Wiley and Sons, 1984.
- [3] 李献华, 胡瑞忠. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 14–31.
- [4] 侯贵廷, 李江海, Halls H C, 等. 华北晚前寒武纪铁镁质岩脉的流动构造和侵位机制[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 210–215.
- [5] 董传万, 张登荣, 徐夕生, 等. 福建晋江中-基性岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1696–1702.
- [6] Thompson R N, Gibson S A, Dickin A P, et al. Early Cretaceous basalt and picrite dykes of the southern Etendeka region, NW Namibia: windows into the role of the Tristan mantle plume in Paraná – Etendeka magmatism[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2049–2081.
- [7] Chen B, Zhai M. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle[J]. Geological Magazine, 2003, 140(1): 87–93.
- [8] Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of central Asia[J]. American Journal of Science, 2004, 304(4): 370–395.
- [9] Gao J, Long L, Klemd R, et al. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1221–1238.
- [10] Coleman R G. Continental growth of northwest China[J]. Tectonics, 1989, 8(3): 621–635.
- [11] Allen M B, Windley B F, Zhang C. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia[J]. Tectonophysics, 1993, 220(1): 89–115.
- [12] 车自成, 刘洪福, 刘良. 中天山造山带的形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1–135.
- [13] Gao J, John T, Klemd R, et al. Mobilization of Ti–Nb–Ta during subduction: evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(20): 4974–4996.
- [14] Gao J, Klemd R. Formation of HP–LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints[J]. Lithos, 2003, 66(1): 1–22.
- [15] 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 天山古生代洋盆开启, 闭合时限的岩石学约束[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 55–62.
- [16] 高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? [J]. 岩石学报, 2006, (5): 3–15.
- [17] 李锦铁, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, (1): 150–170.
- [18] Su W, Gao J, Klemd R, et al. U–Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaiids[J]. European Journal of Mineralogy, 2010, 22(4): 473–478.
- [19] 李曰俊, 宋文杰, 买光荣, 等. 库车和北塔里木前陆盆地与南天山造山带的耦合关系[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(5): 376–381.
- [20] 张立飞, 艾永亮, 李强, 等. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化[J]. 岩石学报, 2005, 4: 1029–1038.

- [21]肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 新疆北部石炭纪一二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2006, (5): 16–30.
- [22]Zhang L, Ai Y, Li X, et al. Triassic collision of western Tianshanorogenic belt, China: evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogiticrocks[J]. Lithos, 2007, 96 (1): 266–280.
- [23]李天福, 杨军臣. 天山西段木札尔特河和独库公路沿线火山岩与晚古生代板块构造的关系[J]. 西北地质科学, 1997, 18(2): 11–20.
- [24]陈丹玲, 刘良, 车自成, 等. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 378–384.
- [25]车自成, 刘良, 刘洪福, 等. 论伊犁古裂谷[J]. 岩石学报, 1996, 12 (3): 478–490.
- [26]夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 55–62.
- [27]夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10): 903–910.
- [28]夏林圻, 李向民, 夏祖春, 等. 天山石炭一二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱[J]. 西北地质, 2006, 39(1): 1–49.
- [29]Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, et al. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116(3/4): 419–433.
- [30]姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(4): 289–300.
- [31]赵振华, 白正华, 熊小林, 等. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素定年[J]. 地球化学, 2003, 32(4): 317–327.
- [32]朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. 科学通报, 2005, 50(18): 2004–2014.
- [33]Zhu Y, Zhang L, Gu L, et al. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western TianshanMountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(19): 2201–2212.
- [34]Zhu Y F, Xuan G , Song B, et al. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, N W China[J]. Journal of the Geological Society, London, 2009, 166: 1085–1099.
- [35]钱青, 高俊, 熊贤明, 等. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征, 成因及形成环境[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1307–1323.
- [36]王博, 舒良树, Cluzel D, 等. 新疆伊犁北部石炭纪火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 498–508.
- [37]Wang B, Shu L S, Cluzel D, et al. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): implication for the tectonic evolution of Western Tianshan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29(1): 148–159.
- [38]Wang B, Cluzel D, Shu L S, et al. Evolution of calc-alkaline to alkaline Magmatism through Carboniferous convergence to Permian transcurrent tectonics, western Chinese Tianshan[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1275–1298.
- [39]龙灵利, 高俊, 钱青, 等. 西天山伊犁地区石炭纪火山岩地球化学特征及构造环境[J]. 岩石学报, 2008, (4): 77–88.
- [40]Biske Y S, Seltmann R. Paleozoic Tian-Shan as a transitional region between the Rheic and Urals-Turkestan oceans[J]. Gondwana Research, 2010, 17(2): 602–613.
- [41]薛春纪, 赵晓波, 莫宣宇, 等. 西天山巨型金铜铅锌成矿带构造成矿演化和找矿方向[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2490–2531.
- [42]薛春纪, 赵晓波, 莫宣宇, 等. 西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 128–155.
- [43]朱志新, 李锦铁, 董连慧, 等. 新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 170–179.
- [44]杨天南, 李锦铁, 孙桂华, 等. 中天山早泥盆世陆弧: 来自花岗质糜棱岩地球化学及 SHRIMP U/Pb 定年的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 41–48.
- [45]龙灵利, 高俊, 雄贤明, 等. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(4): 719–732.
- [46]朱志新, 王克卓, 郑玉洁, 等. 新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗质侵入体锆石 SHRIMP 定年及其形成时构造背景的初步探讨[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1193–1200.
- [47]韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 等. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. 新疆地质, 2004, 22 (1): 4–11.
- [48]朱永峰, 安芳, 薛云兴, 等. 西南天山特克斯科桑溶洞火山岩的锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 岩石学报, 2010, 26: 2255–2263.
- [49]薛云兴, 朱永峰. 西南天山哈拉达拉岩体的锆石 SHRIMP 年代学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1353–1363.
- [50]张招崇, 董书云, 黄河, 等. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学: 岩石成因和构造背景[J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1827–1839.
- [51]齐进英. 新疆准噶尔脉岩群地质及成因[J]. 岩石学报, 1993, 9 (3): 287–299.
- [52]李辛子, 韩宝福, 季建清, 等. 新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和 K-Ar 年代学[J]. 地球化学, 2004, 33(6): 574–584.
- [53]欧阳征健, 周鼎武, 林晋炎, 等. 博格达山白杨河地区中基性岩墙地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30 (4): 495–503.
- [54]Tang G J, Wang Q, Derek A. Wyman, et al. Metasomatized lithosphere- asthenosphere interaction during slab roll-back: Evidence from Late Carboniferous gabbros in the Luotuogou area, Central Tianshan[J]. Lithos, 2012, 155: 67–80.
- [55]林靓, 钱青, 王艳玲, 等. 西天山昭苏北部大哈拉军山组火山岩中辉长岩体的形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(6): 1749–1760.
- [56]龙灵利, 王玉往, 唐萍芝, 等. 西天山 CuNi-VTiFe 复合型矿化镁铁-超镁铁杂岩-哈拉达拉岩体成岩成矿背景特殊性讨论[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2015–2028.
- [57]赵长缨, 荆振华, 王惠民, 等. 新疆新源县一带大哈拉军山组火山岩形成环境探讨[J]. 陕西地质, 2006, 24(1): 37–44.
- [58]郭璇, 朱永峰. 新疆新源县城南石炭纪火山岩岩石学和元素地球化学研究[J]. 高校地质学报, 2006, 12(1): 62–73.
- [59]Yuan H, Wu F, Gao S, et al. Determination of U-Pb age and rare

- earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(22): 2411-2421.
- [60] Yuan H, Gao S, Liu X, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 353-370.
- [61] 闫欣, 许荣华. 等离子体质谱法测定岩石中的锆、铪、铌、钽[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 458-460.
- [62] Zhang H, Gao S, Zhong Z, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China[J]. Chemical Geology, 2002, 186(3): 281-299.
- [63] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 2002, 184(1): 123-138.
- [64] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(3): 267-309.
- [65] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [66] Smith R E, Smith S E. Comments on the use of Ti, Zr, Y, Sr, K, P and Nb in classification of basaltic magmas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 32(2): 114-120.
- [67] Zhou J X. Geochemistry and Petrogenesis of Igneous Rocks Containing Amphibole and Mica: A Case Study of Plate Collision Involving Scotland and Himalayas[J]. Science Press, 1999: 41-72.
- [68] Wilson BM. Igneous petrogenesis a global tectonic approach[M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [69] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27-62.
- [70] Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 53: 59-66.
- [71] Hart S R, Davis K E. Nickel partitioning between olivine and silicate melt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40(2): 203-219.
- [72] Samaniego P, Martin H, Robin C, et al. Transition from calc-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: insights into slab melts and mantle wedge interactions[J]. Geology, 2002, 30(11): 967-970.
- [73] Petterson M G, Treloar P J. Volcanostratigraphy of arc volcanic sequences in the Kohistan arc, North Pakistan: volcanism within island arc, back-arc-basin, and intra-continental tectonic settings[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 130(1): 147-178.
- [74] Rollinson H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[M]. London: Longman Group UK, 2014: 40-206.
- [75] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985: 312.
- [76] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64(2): 295-304.
- [77] 张东阳, 张招崇, 艾羽, 等. 西天山莱历斯高尓一带铜(钼)矿成矿斑岩年代学、地球化学及其意义[J]. 岩石学报, 2009, (6): 1319-1331.
- [78] 徐学义, 夏林圻, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 83-94.
- [79] Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, et al. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9): 903-910.
- [80] Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, et al. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 31(4): 357-378.
- [81] Chen B, Arakawa Y. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggarfoldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(5): 1307-1320.
- [82] Han B F, He G Q, Wang X C, et al. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yilterrane in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 109(3): 74-93.
- [83] Long L, Gao J, Klemd R, et al. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2011, 126(3): 321-340.
- [84] 朱志新, 董连慧, 刘淑聪, 等. 新疆西天山伊犁地块晚古生代火山岩地质特征及构造意义[J]. 新疆地质, 2012, 30(3): 258-263.
- [85] 刘松柏, 窦虎, 李海波, 等. 新疆东天山博格达地区晚侏罗世中酸性侵入岩的发现、锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2019, 38(2/3): 288-294.
- [86] 冯博, 计文化, 白建科, 等. 西天山博罗科努地区志留系碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2019, 38(2/3): 276-287.