

菅坤坤, 魏燕霞, 施彬, 等. 东昆仑造山带中灶火地区早中生代镁铁质岩墙群的成因及地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1457–1470.
Jian Kunkun, Wei Yanxia, Shi Bin, et al. Petrogenesis and geological significance of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in Zhongzaohuo area, East Kunlun orogenic belt[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1457–1470(in Chinese with English abstract).

东昆仑造山带中灶火地区早中生代镁铁质岩墙群的成因及地质意义

菅坤坤¹ 魏燕霞² 施彬³ 刘力⁴ 王星¹ 袁璋¹

(1. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710016; 2. 中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西 西安 710016; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034)

摘要:东昆仑造山带中灶火地区镁铁质岩墙群以闪长玢岩为主, 含少量闪斜煌斑岩、辉绿玢岩及辉绿岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学指示该套岩墙群结晶侵位年龄为(249±1)Ma。稀土元素含量整体较高, 富集轻稀土元素($\Sigma REE=99.9 \times 10^{-6} \sim 173.9 \times 10^{-6}$, (La/Yb)_N=3.5~9.3); 微量元素表现出富集大离子亲石元素(LILE), 亏损高场强元素(HFSE)的特征; 源区分析表明, 镁铁质岩浆为俯冲洋壳析出的流体交代富集地幔的结果, 且在岩石成因中部分熔融起到主导作用, 地壳混染和分离结晶作用对岩浆成分分异起到的作用有限。构造环境分析表明, 岩石的形成与俯冲作用有关, 结合区域构造演化认为镁铁质岩墙群的成因为: 早三叠世, 在古特提斯洋向北俯冲的环境下, 俯冲板片释放的流体交代富集地幔, 诱发地幔部分熔融形成镁铁质岩浆, 受弧后伸展的动力学背景影响, 岩浆最终上升侵位形成镁铁质岩墙群。

关键词:东昆仑造山带; 镁铁质岩墙群; 锆石 U-Pb 年代学; 俯冲带流体

中图分类号: P588.12⁴ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1457-14

Petrogenesis and geological significance of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in Zhongzaohuo area, East Kunlun orogenic belt

JIAN Kun-kun¹, WEI Yan-xia², SHI Bin³, LIU li⁴, WANG Xing¹, YUAN Zhang¹

(1. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710016, Shaanxi, China; 2. No. 3 Co., Ltd., Sinohydro Bureau, Xi'an 710016, Shaanxi, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China)

Abstract: The Zhongzaohuo mafic dyke swarms in East Kunlun are principally composed of dioritic porphyrite with minor lamprophyre, porphyritic diabase, and diabase. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating indicates that the mafic dykes were emplaced

收稿日期: 2015-01-14; 改回日期: 2015-08-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212010918021)资助。

作者简介: 菅坤坤, 男, 1987年生, 硕士, 助理工程师, 岩石学专业; E-mail: jiankunryan@163.com。

at (249 ± 1) Ma. The mafic dykes are enriched in LILE and depleted in HFSE. The rocks have higher total REE, with slightly enriched LREE ($\sum \text{REE} = 99.9 \times 10^{-6} \sim 173.9 \times 10^{-6}$, $(\text{La/Yb})_N = 3.5 \sim 9.3$). Source region analysis shows that mafic magma resulted from the fluid from subducted ocean crust and the mantle metasomatism, and partial melting played a dominant role in magma evolution, while crustal contamination and fractional crystallization played a limited role in magmatic differentiation. Tectonic setting analysis shows that the formation of the rocks was related to subduction; in combination with the tectonic evolution of East Kunlun, the authors hold that the formation process of mafic dyke swarms in this paper is as follows: in early Triassic, as the result of northward subduction of Paleo-Tethys Ocean, fluids from the subduction slab were dehydrated and mantle peridotite experienced metasomatism, which promoted the mantle peridotite partial melting into mafic magma; the magma was affected by the dynamic background of the back-arc extension, and then it migrated upward to the upper crust along the fissures to form the mafic dykes.

Key words: East Kunlun; mafic dykes; zircon U-Pb geochronology; fluids in subduction zone

About the first author: JIAN Kun-kun, male, born in 1987, master, assistant engineer, majors in petrology; E-mail: jiankunryan@163.com.

镁铁质岩墙群是深部(地幔或下地壳)岩浆沿张性裂隙侵入到地壳结晶的产物,通常被作为伸展构造的标志,是研究火山作用与深部地幔性质、壳幔相互作用的媒介^[1-2]。前人研究表明,形成造山带镁铁质岩墙群的构造环境主要有两类:(1)造山后伸展环境,例如,与岩石圈拆沉作用有关的基性岩墙^[3];(2)常与弧后拉张作用有关的俯冲环境^[4-6]。因此,对镁铁质岩墙群的研究,不仅可以提高对地幔属性的认识,而且能够限定造山带构造体制转换时间,对恢复古构造环境有着至关重要的作用。

东昆仑造山带是经历了前原特提斯、原特提斯等几个演化阶段^[7],后于晚石炭世进入古特提斯洋演化域^[8],并发现了大量的与古特提斯洋俯冲、碰撞有关的中酸性岩浆岩^[9-10],但缺乏与其相关的镁铁质岩墙等中基性岩浆活动的研究^[3]。前人对东昆仑古特提斯构造域伸展阶段岩浆活动缺乏详细的研究,缺少对弧后伸展等构造岩浆活动的时空限制^[11],这极大地限制了对东昆仑造山带构造体制演化的研究。通过区域地质调查工作,笔者在东昆仑中灶火地区发现一套早中生代镁铁质岩墙群,代表区内早中生代伸展构造背景。笔者在野外地质工作的基础上,结合岩墙群的锆石年代学、元素地球化学的研究及东昆仑区域地质演化史,分析东昆仑中灶火地区镁铁质岩墙群的岩石成因,并探讨其形成的构造环境。

1 东昆仑区域地质概况

东昆仑造山带是经历了多期次的俯冲、碰撞形成的复杂造山带,是中央造山带的一部分^[7]。造山

带内由北向南发育东昆中构造混杂岩带和东昆南(阿尼玛卿)蛇绿混杂岩带,根据前人及本次区域地质调查工作取得的成果,以两条构造混杂岩带为界将研究区由北向南依次划分为东昆北地块,东昆南俯冲增生楔和巴颜喀拉地块(图1)。

东昆北地块出露的地层以古元古界白沙河岩组和中元古界小庙岩组结晶基底岩系为主。白沙河岩组为一套变质程度总体为高角闪岩相、局部麻粒岩相的变质地层,其主要岩石组合有浅粒岩-变粒岩、片麻岩、斜长角闪岩-麻粒岩和大理岩;小庙岩组为一套角闪岩相变质地层,其主要岩石组合有黑云石英片岩-石英岩、片麻岩-片岩、石英岩-大理岩。区内岩浆活动主要经历了早古生代及晚古生代一早中生代两期构造-岩浆旋回,分布着大量岩浆岩^[12]。本文研究的中灶火地区镁铁质岩墙群就位于东昆北地块(图1),其直接围岩为晚古生代酸性岩浆岩和早古生代花岗岩体。研究表明,古特提斯洋于晚二叠世开始大规模向北俯冲,并产生大量与俯冲作用有关的岩浆活动,结合岩石地球化学特征和锆石U-Pb年龄,笔者认为,本文镁铁质岩墙群是在古特提斯洋向北俯冲的背景下形成的。

2 镁铁质岩墙特征

2.1 野外特征

镁铁质岩墙的围岩为早二叠世花岗闪长岩和晚志留世糜棱岩化花岗岩(图1)。其中早二叠世花岗闪长岩未发生变形,岩石为中细粒花岗结构,块状构造,主要矿物组成为石英、斜长石,少量钾长石及黑云母;晚志留世花岗岩,发生区域性韧性变形,

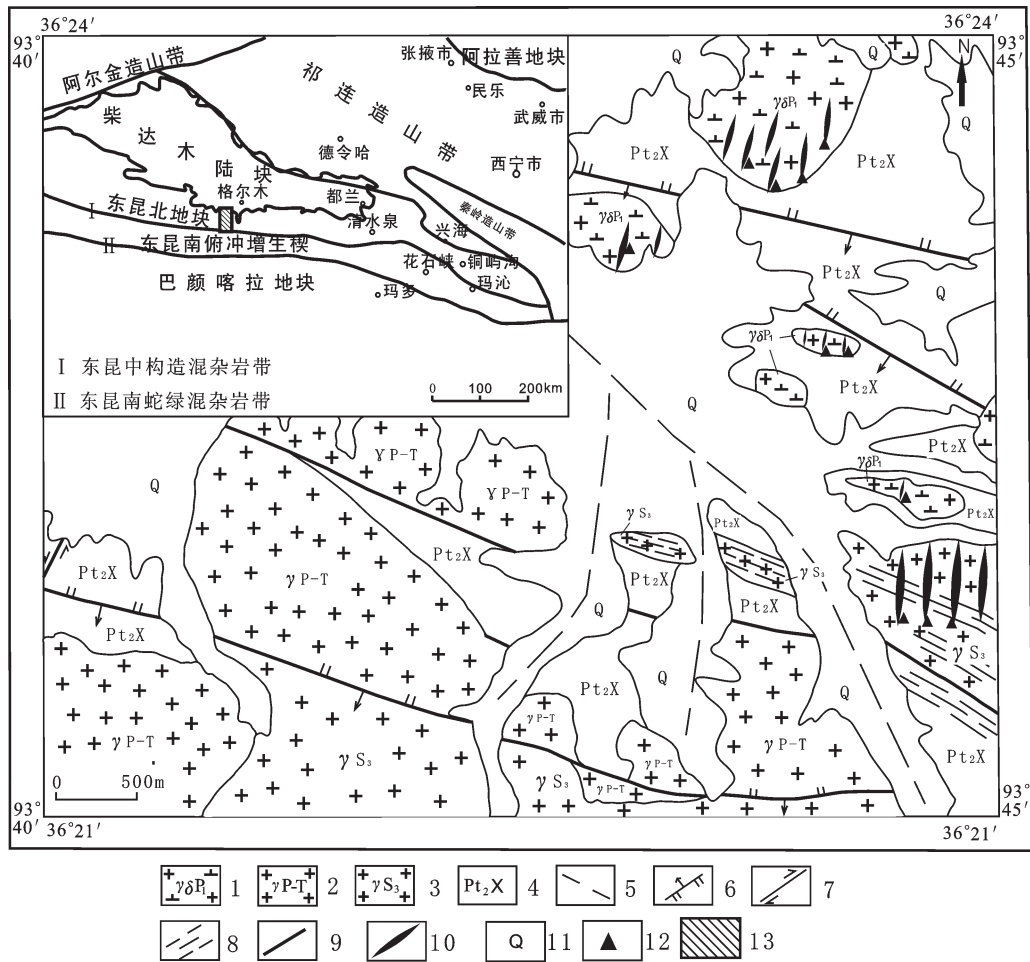


图1 东昆仑大地构造简图及中灶火地区区域地质简图

1—晚二叠世花岗岩;2—二叠—三叠纪花岗岩;3—晚志留世花岗岩;4—中元古界小庙岩组;5—推测断层;6—逆断层;7—平移断层;
8—韧性剪切带;9—性质不明断层;10—镁铁质岩墙;11—第四系;12—采样位置;13—研究区

Fig.1 Geotectonic framework of East Kunlun and simplified geological map of Zhongzaohuo area

1—Late Permian granodiorite; 2—Permian-Triassic granite; 3—Late Silurian granite; 4—Meso-Proterozoic Xiaomiao Rock Group; 5—Inferred fault; 6—Thrust fault; 7—Strike-slip fault; 8—Shear zone; 9—Fault; 10—Mafic dykes; 11—Quaternary; 12—Sampling site; 13—Study area

致使糜棱岩化强烈,暗色矿物黑云母呈定向排列,糜棱面理产状为 $200^{\circ}\angle 65^{\circ}$,岩石的侵位时代为417 Ma(朱云海未发表)。镁铁质岩墙群野外及镜下均无明显变形,表明岩墙的侵位时间晚于围岩及围岩糜棱岩化的时间。镁铁质岩墙近直立状产出(图2-a),与围岩呈截然接触关系,除一个岩墙发育烘烤边外,其余岩墙均不发育烘烤边和冷凝边,结合岩石微量元素特征,笔者认为镁铁质岩浆与地壳未发生明显的混染作用,本文所采集的岩石样品可以代表岩浆成分。

镁铁质岩墙的走向整体近NNW至NNE向($10^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 之间),宽度为10~150 cm,各岩墙之间近平行

产出,岩墙之间无相互接触。不同的岩墙岩性各有差异,同一岩墙岩性均一,镁铁质岩墙的岩性主要为闪长玢岩,少量岩墙岩性为闪斜煌斑岩、辉绿玢岩和辉绿岩。岩墙多为灰黑色,细晶结构,斑状结构(图2-a~d),块状构造,斑晶的成分主要为角闪石及斜长石。

2.2 镜下特征

闪长玢岩:岩石为斑状结构,基质为辉长、辉绿结构(图2-c)。斑晶的主要成分为角闪石,少量斜长石和黑云母。斑晶角闪石,褐黄色,形态为较自形的柱状、板状及近菱形的六边形状,少数发育颜色环带结构和扭折带,局部发生绿泥石和绿帘石

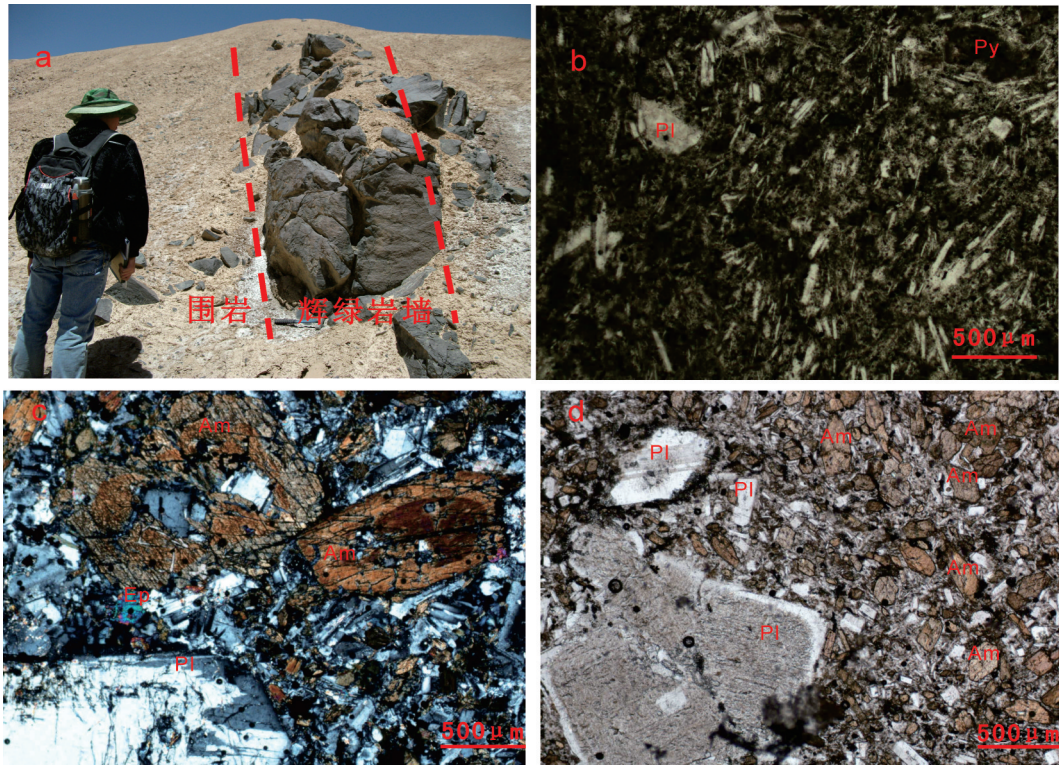


图2 镁铁质岩墙群野外及典型结构显微照片

a—辉绿岩墙; b—辉绿玢岩; c—闪长玢岩; d—闪斜煌斑岩; Pl—斜长石; Py—辉石; Am—角闪石; Ep—绿帘石

Fig. 2 Outcrop photos and photomicrographs showing the typical textures of the mafic dykes

a—Diabase dyke; b—Porphyritic diabase; c—Dioritic porphyrite; d—Lamprophyre

Pl—Plagioclase; Py—Pyroxene; Am—Amphibole; Ep—Epidote

化,含量为25%~35%;斑晶斜长石,形态为较自形的板状,矿物蚀变严重,高岭土化及绢云母化,表面很脏,局部波状消光,扭折带发育,反映岩石可能局部受到挤压作用,聚片双晶、环带结构较为发育,含量为10%~15%;斑晶黑云母,含量5%~10%,细条状,仅部分岩石中有发育。基质为微晶斜长石及颗粒较为细小的角闪石,少量辉石和黑云母颗粒,基质整体弱的碳酸盐化,局部斜长石微晶呈现波状消光。副矿物主要为磁铁矿和锆石,含量不足5%。

闪斜煌斑岩:岩石为斑状结构(图2-d),斑晶的主要成分为角闪石和斜长石,斑晶的含量约为50%,基质成分为斜长石微晶及细小的角闪石和辉石颗粒。斑晶角闪石,褐黄色,多呈较自形的菱形和柱状,含量约30%;斑晶斜长石,板状、柱状,斜长石蚀变严重,为绢云母化及高岭土化,含量约为25%。副矿物主要为不透明矿物及磷灰石,含量约为5%。

辉绿玢岩:岩石为斑状结构,基质为辉绿结构

(图2-b),斑晶成分主要有斜长石,含量5%~15%,蚀变严重,主要为高岭土化及绢云母化;斑晶辉石,含量5%~10%,已完全蚀变,仅保留晶型。基质整体碳酸盐化,微晶斜长石空隙间暗色矿物已完全蚀变,仅见少量的不透明磁铁矿。

辉绿岩:岩石为辉绿结构,整体碳酸盐化较为严重。斜长石微晶蚀变特别严重,表面很脏,多为绢云母化。斜长石微晶空隙间充填物有辉石、角闪石及黑云母,暗色矿物颗粒整体较小,且绿泥石化较为严重。

3 测试分析方法

用于锆石年代学测试所需的样品,均采自野外新鲜的露头,经人工去除风化面后由河北廊坊地质诚信公司完成锆石的挑选。锆石的制靶:在双目镜下挑选不同晶型,不同颜色的锆石颗粒,粘在双面胶上然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后对锆石表面进行抛光,至锆石内部暴

露。通过反射光、透射光、阴极发光显微图像对锆石的内部结构进行分析,然后进行锆石 LA-ICP-MS 分析。锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行,测试仪器为 Agilent 7500a 型杆质谱仪和 GeoLas 2005 型激光剥蚀系统,使用 He 作为激光剥蚀物质的载气,激光斑束直径 32 μm 。锆石年龄分析采用标准锆石 91500 外部校正法,利用 GJ-1 作为外标对同位素分馏进行校正,微量元素含量采用国际标样 NIST610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。数据处理利用 ICPMSDataCal^[13] 完成,年龄采用 3.71 版本的 Isoplot 程序计算。

用于全岩主、微量元素分析的样品均为 200 目以下的新鲜粉末样,全岩主量元素的测试采用武汉综合岩矿测试中心的 RIX2100 型 X 射线荧光光谱仪进行分析,样品分析精度优于 5%。全岩微量元素含量在武汉综合岩矿测试中心利用 Agilent7500a ICP-MS 分析完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理步骤如下:(1)将研磨至 200 目以下的岩石粉末 50mg 置于 Teflon 坩埚中;(2)采用 Teflon 溶样弹将样品用 HF + HNO₃ 在 195℃ 条件下消解大于 48 h;(3)将在 120℃ 条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO₃ 稀释 2000 倍,定容于干净的聚酯瓶。样品分析精度优于 5%~10%。

4 锆石 U-Pb 年代学

中灶火地区镁铁质岩墙群中岩性主要为闪长玢岩,少量的闪斜煌斑岩、辉绿(玢)岩,本次仅对一条闪长玢岩岩墙进行了锆石 U-Pb 年代学测试(样

品编号为 D0007-1,采样点的坐标为北纬 36°22.8';东经 93°43.2'),此次共完成了 16 颗锆石的 17 个有效点分析,分析结果见表 1。在锆石 CL 图像上,锆石发育振荡环带,且环带较宽,具有典型的岩浆锆石的特征,锆石的核部阴极发光图像较暗,边部相对较亮(图 3)。岩浆锆石具有较高的 Th、U, Th/U 的比值一般大于 0.4^[14],中灶火镁铁质岩墙的锆石均具有较高的 Th、U 的含量(Th: $101 \times 10^{-6} \sim 343 \times 10^{-6}$; U: $170 \times 10^{-6} \sim 417 \times 10^{-6}$), Th/U 比值介于 0.57~0.89。结合 CL 图像及锆石的化学特征,表明该样品所选的锆石为岩浆锆石^[14-16]。

闪长玢岩中 17 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值比较集中,介于 (244±3)Ma 与 (252±3)Ma 之间,加权平均年龄为 (249±1)Ma (MSWD=0.42) (图 4-b),所有点均分布在谐和线上及其附近区域(图 4-a)。CL 图像上所有分析锆石的环带结构较为清晰,一般认为高温环境下锆石的结晶环带较宽,低温环境下锆石的结晶环带较窄^[14],该样品中所有锆石的环带均较宽,不同于花岗岩中锆石的环带较窄的特点,且分析锆石中未获得古老锆石的年龄值。以上特征均表明,中灶火镁铁质岩墙中缺少围岩的捕获锆石,因此,本文所分析的锆石年龄为镁铁质岩墙的结晶年龄, (249±1)Ma 解释为中灶火镁铁质岩墙群的侵位时代。

5 镁铁质岩墙地球化学特征

5.1 主量元素特征

中灶火地区镁铁质岩墙群主量元素、微量元素、稀土元素分析结果见表 2 和表 3。

镁铁质岩墙群的 SiO₂ 介于 48.4%~56.6%,全碱

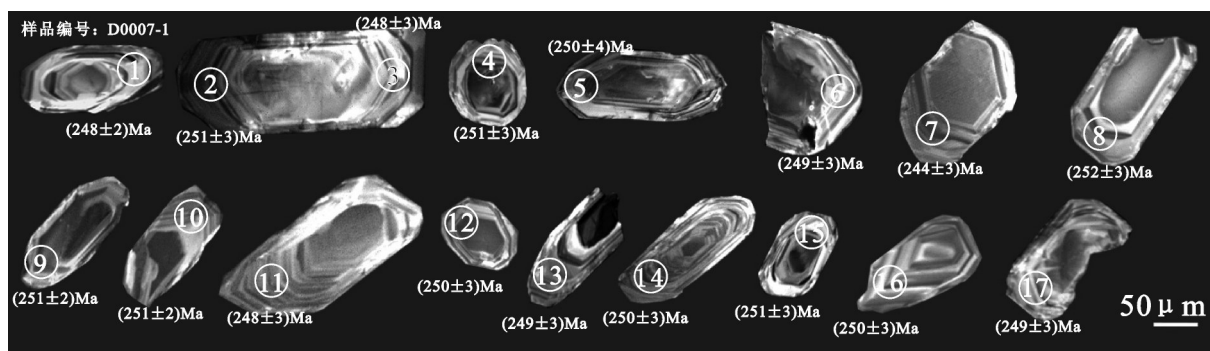


图3 镁铁质岩墙锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄分析点

Fig.3 CL images of zircons from mafic dykes, and the points for U-Pb analysis

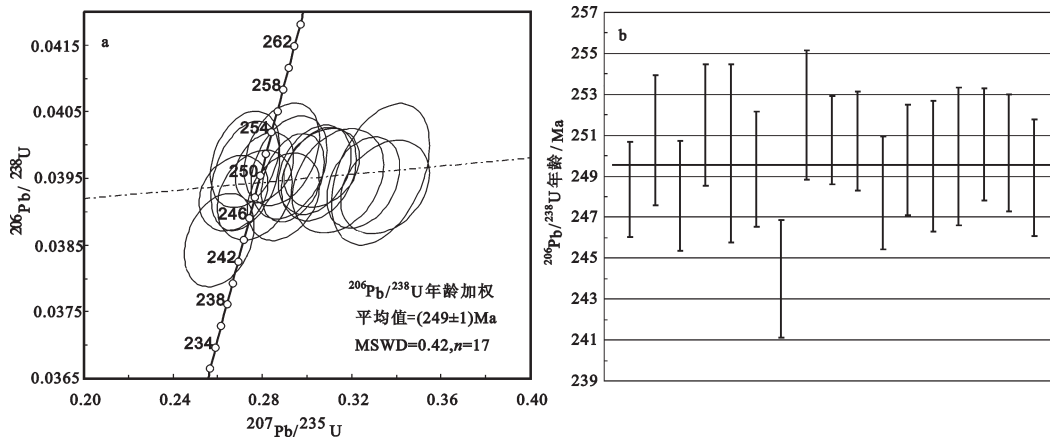


图4 闪长玢岩锆石U-Pb年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b)
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram a and weighted average age b for dioritic porphyrite

表1 中灶火镁铁质岩墙的LA-ICP-MS 锆石U-Pb 同位素分析
Table 1 LA-ICPMS zircon U-Pb data for Zhongzaohuo mafic dyke

测点号	元素含量/ 10^{-6}				同位素比值				同位素年龄/Ma					
	Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
0430B01	36.0	159	218	0.73	0.0495	0.0019	0.2671	0.0101	0.0393	0.0004	240	8	248	2
0430B02	28.2	123	208	0.59	0.0537	0.0021	0.2919	0.0112	0.0397	0.0005	260	9	251	3
0430B03	25.2	102	180	0.57	0.0541	0.0021	0.2895	0.0107	0.0392	0.0004	258	8	248	3
0430B04	45.3	205	275	0.74	0.0495	0.0018	0.2722	0.0102	0.0398	0.0005	244	8	251	3
0430B05	36.5	149	242	0.61	0.0600	0.0022	0.3330	0.0145	0.0396	0.0007	292	11	250	4
0430B06	37.1	157	215	0.73	0.0601	0.0022	0.3252	0.0108	0.0394	0.0005	286	8	249	3
0430B07	27.5	118	199	0.59	0.0491	0.0020	0.2607	0.0103	0.0386	0.0005	235	8	244	3
0430B08	33.5	160	243	0.66	0.0526	0.0020	0.2887	0.0111	0.0399	0.0005	258	9	252	3
0430B09	72	343	417	0.82	0.0513	0.0016	0.2809	0.0086	0.0397	0.0003	251	7	251	2
0430B10	32.8	149	224	0.66	0.0561	0.0021	0.3066	0.0112	0.0397	0.0004	272	9	251	2
0430B11	27.9	124	212	0.58	0.0514	0.0021	0.2767	0.0111	0.0393	0.0004	248	9	248	3
0430B12	55.8	288	320	0.90	0.0538	0.0017	0.2936	0.0093	0.0395	0.0004	261	7	250	3
0430B13	23.3	101	170	0.60	0.0582	0.0026	0.3139	0.0135	0.0395	0.0005	277	10	249	3
0430B14	31.2	145	229	0.63	0.0502	0.0019	0.2724	0.0102	0.0395	0.0005	245	8	250	3
0430B15	39.4	201	252	0.80	0.0554	0.0019	0.3035	0.0108	0.0396	0.0004	269	8	251	3
0430B16	35.6	177	240	0.74	0.0561	0.0020	0.3054	0.0111	0.0396	0.0005	271	9	250	3
0430B17	39.5	184	207	0.89	0.0623	0.0025	0.3350	0.0132	0.0394	0.0005	293	10	249	3

($\text{ALK}=\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)介于3.6%~4.8%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为1.3~3.3, 表现出富钠的特征。 Al_2O_3 为15.7%~18.9%, MgO 为1.8%~5.0%, $\text{Mg}^\#(\text{Mg}^\# = 100 \times \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+}+\text{Fe}^{2+}))$ 为42~58, 仅一个样品为29, 平均为47, 低于原生岩浆的参考值68~73^[17], 表明岩浆经历了

一定程度的分离结晶。

由于所研究的样品遭受了不同程度的蚀变作用, 样品烧失量较大, 因此, 只采用不活动的元素来讨论地球化学特征和岩石成因。 利用蚀变过程中不活泼元素(Zr、Ti、Nb、Y)进行岩石分类判别, 在Zr/

表2 镁铁质岩墙主量元素地球化学组成(%)
Table 2 Major element compositions of mafic dykes in the Zhongzaohuo area (%)

样品号	D423 3-1	D355 6-1	D437 9-4	D437 9-5	D452 3-2	D452 3-3	D000 3-1	D000 7-1	D449 5-1	D464 5-2	D000 2-1	D437 9-1
岩性	煌斑岩				闪长玢岩				辉绿(玢)岩			
SiO ₂	56.16	56.62	55.10	55.91	49.75	50.26	56.52	52.76	52.53	50.88	51.08	48.41
Al ₂ O ₃	18.29	18.46	17.59	17.87	18.26	18.42	17.60	15.73	17.23	17.84	18.90	17.98
Fe ₂ O ₃	1.80	3.46	1.36	1.34	2.56	2.35	2.50	0.55	1.55	1.58	2.13	1.00
FeO	5.30	4.30	5.88	7.20	7.15	7.10	5.55	6.30	5.85	7.25	6.55	7.80
CaO	7.35	6.78	6.85	7.11	8.91	8.64	6.88	7.56	6.58	7.35	7.42	7.98
MgO	3.71	3.35	3.53	1.75	4.00	3.67	2.69	5.04	3.56	3.52	4.84	3.53
K ₂ O	1.50	1.72	1.60	1.41	0.94	0.92	1.23	1.44	1.14	1.99	1.99	1.76
Na ₂ O	3.08	2.65	2.90	3.26	2.68	2.74	3.15	2.19	3.70	2.48	2.59	3.01
TiO ₂	0.94	1.00	0.92	0.77	1.28	1.21	0.86	0.96	0.86	1.02	1.05	1.02
P ₂ O ₅	0.15	0.22	0.18	0.50	0.23	0.23	0.22	0.19	0.28	0.31	0.17	0.29
MnO	0.12	0.10	0.14	0.22	0.19	0.19	0.17	0.12	0.15	0.17	0.16	0.17
H ₂ O ⁺	1.17	1.09	2.14	1.47	2.36	2.47	1.82	3.30	3.02	2.54	2.60	3.30
CO ₂	0.24	0.04	1.63	0.99	1.53	1.63	0.64	3.72	3.36	2.86	0.31	3.55
LOST	0.82	0.68	2.99	1.45	3.12	3.16	1.95	6.38	5.68	4.49	2.22	6.15
TOTAL	99.81	99.79	99.82	99.80	99.84	99.83	99.83	99.86	99.81	99.79	99.79	99.80
Mg [#]	52.22	50.73	49.46	28.76	46.45	44.75	42.04	58.08	49.46	44.32	53.71	43.51

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$

TiO₂-Nb/Y 的分类图解上(图5)有4个样品落在安山岩区域,其余均落在安山玄武岩区域。MgO通常是岩浆演化的指标,在以MgO为横坐标的哈克图解中(图略)MgO与Na₂O负相关,与TiO₂正相关,与其他元素均无明显的相关性,表明镁铁质岩墙群结晶分异作用较弱。

5.2 稀土元素特征

岩石整体具有较高的稀土含量 $\Sigma REE = 99.9 \times 10^{-6} \sim 173.9 \times 10^{-6}$, 平均 133.5×10^{-6} ; $\Sigma LREE / \Sigma HREE = 4.43 \sim 8.7$ (平均6.0); $(La/Yb)_N = 3.5 \sim 9.3$ (平均5.6), 表明轻、重稀土元素分馏较为明显,且更富集轻稀土元素。 $(La/Sm)_N = 2.2 \sim 4.1$, 轻稀土元素内部分馏较为明显; $(Gd/Lu)_N = 1.1 \sim 2.0$ (平均1.4), 表明重稀土元素内部分馏不明显。由于Eu与斜长石中Ca的晶体化学性质相似,容易进入斜长石晶格内部置换Ca离子,因此,斜长石的分离结晶会使熔体中的Eu亏损。本文镁铁质岩墙 $\delta Eu = 0.7 \sim 1.0$, 平均为0.9, 具有轻微的Eu负异常,说明斜长石发生了一定程度的分离结晶^[18]; $\delta Ce = 0.96 \sim 1.13$, 平均为1.0, 异常值不明

显。所有样品稀土元素特征基本一致,暗示本文镁铁质岩墙具有同源性。球粒陨石标准化稀土元素配分模式图整体为轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损的平缓右倾型(图7-a),反应源区可能有石榴子石的残留。

5.3 微量元素特征

微量元素含量整体较高,原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图7-b)上,所有样品具有相似的特征,暗示镁铁质岩墙可能具有同源性。岩石富集大离子亲石元素K、Rb、Ba以及Pb明显正异常,高场强元素Ta、Nb、Zr、Hf等相对亏损,表明岩石可能受到了地壳物质的混染或者流体交代作用的影响^[19]。相容元素Ni、Cr的含量($Ni = 0.4 \times 10^{-6} \sim 34.2 \times 10^{-6}$, $Cr = 1.5 \times 10^{-6} \sim 127.3 \times 10^{-6}$)明显低于地幔橄榄岩中Ni、Cr的丰度($Cr = 500 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$, $Ni = 250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ ^[21]), Co、Sc的丰度也较低,含量分别为 $10.6 \times 10^{-6} \sim 23.3 \times 10^{-6}$, $7.2 \times 10^{-6} \sim 25.9 \times 10^{-6}$ 。在微量元素与MgO的相关图解(图6)中,Ni、Co、Cr与MgO呈现不太明显的正相关,表示岩浆可能经历了一定程

表3 镁铁质岩墙微量元素地球化学组成(10^{-6})
Table 3 Trace element compositions of mafic dykes in the Zhongzaohuo area(10^{-6})

样品号	D423 3-1	D355 6-1	D437 9-4	D437 9-5	D452 3-2	D452 3-3	D000 3-1	D000 7-1	D449 5-1	D464 5-2	D000 2-1	D437 9-1
岩性	煌斑岩		闪长玢岩				辉绿(玢)岩					
La	21.5	21.3	21.7	25.8	16.0	17.2	31.39	16.39	17.0	21.9	12.78	16.9
Ce	42.2	44.0	43.0	53.9	36.2	35.9	61.33	34.52	42.4	46.0	28.57	35.0
Pr	4.70	5.30	4.90	6.44	4.28	4.60	7.23	4.55	4.83	5.80	3.93	4.30
Nd	18.2	21.1	18.6	26.5	17.9	19.3	27.17	18.59	21.4	24.1	16.79	18.2
Sm	3.80	4.62	4.01	5.66	4.27	4.48	4.77	3.88	4.66	5.54	3.67	4.11
Eu	1.03	1.04	1.06	1.58	1.21	1.29	1.49	1.22	1.25	1.39	1.20	1.192
Gd	3.52	4.14	3.61	5.29	4.24	4.56	4.39	3.54	4.59	5.44	3.74	4.07
Tb	0.58	0.690	0.597	0.901	0.725	0.769	0.69	0.55	0.754	0.985	0.62	0.661
Dy	3.50	4.16	3.66	5.70	4.63	4.93	4.04	2.97	4.59	6.43	3.71	4.13
Ho	0.715	0.807	0.740	1.15	0.939	0.997	0.84	0.58	0.924	1.36	0.77	0.832
Er	2.01	2.25	2.17	3.37	2.65	2.82	2.30	1.46	2.69	3.91	2.09	2.32
Tm	0.309	0.334	0.324	0.529	0.405	0.433	0.36	0.23	0.405	0.616	0.32	0.352
Yb	2.08	2.27	2.20	3.61	2.70	2.85	2.28	1.40	2.70	4.17	2.03	2.34
Lu	0.297	0.327	0.327	0.550	0.396	0.419	0.38	0.22	0.402	0.623	0.34	0.348
Y	19.6	22.1	21.1	32.9	26.4	26.7	21.59	14.55	25.4	36.7	19.29	23.0
Σ REE	124.0	134.4	127.9	173.9	122.9	127.2	170.3	104.6	133.9	164.8	99.9	117.7
Rb	68.3	70.7	67.1	49.2	35.7	32.0	45.66	95.09	37.9	76.3	85.60	84.2
Ba	385	539	397	437	229	239	267.7	368.5	331	478	467.0	410
Th	6.79	4.80	5.94	5.56	4.38	4.59	6.74	2.50	3.56	4.87	3.40	3.01
U	1.24	0.72	1.07	1.09	0.79	0.75	0.98	0.77	0.74	1.44	0.61	0.57
Ta	0.36	0.50	0.39	0.68	0.28	0.32	0.84	0.66	0.29	0.52	0.60	0.29
Nb	8.38	9.16	9.14	13.3	6.95	7.67	9.01	7.65	6.17	8.70	7.12	8.22
La	21.5	21.3	21.7	25.8	16.0	17.2	31.39	16.39	17.0	21.9	12.78	16.9
Ce	42.2	44.0	43.0	53.9	36.2	35.9	61.33	34.52	42.4	46.0	28.57	35.0
Pb	29.8	94.9	19.3	12.7	19.4	12.9	10.17	42.22	28.1	9.00	4.30	11.0
Pr	4.70	5.30	4.90	6.44	4.28	4.60	7.23	4.55	4.83	5.80	3.93	4.30
Sr	374	376	367	431	358	364	448.2	400.5	442	436	441.8	387
Nd	18.2	21.1	18.6	26.5	17.9	19.3	27.17	18.59	21.4	24.1	16.79	18.2
Zr	126	138	126	184	115	121	178.8	134.0	133	198	119.0	112
Hf	3.59	3.83	3.53	4.89	3.20	3.48	3.9	3.3	3.79	5.29	3.0	3.04
Sm	3.80	4.62	4.01	5.66	4.27	4.48	4.77	3.88	4.66	5.54	3.67	4.11
Eu	1.03	1.04	1.06	1.58	1.21	1.29	1.49	1.22	1.25	1.39	1.20	1.192
Dy	3.50	4.16	3.66	5.70	4.63	4.93	4.04	2.97	4.59	6.43	3.71	4.13
Y	19.6	22.1	21.1	32.9	26.4	26.7	21.59	14.55	25.4	36.7	19.29	23.0
Ho	0.715	0.807	0.740	1.15	0.939	0.997	0.84	0.58	0.924	1.36	0.77	0.832
Yb	2.08	2.27	2.20	3.61	2.70	2.85	2.28	1.40	2.70	4.17	2.03	2.34
Lu	0.297	0.327	0.327	0.550	0.396	0.419	0.38	0.22	0.402	0.623	0.34	0.348

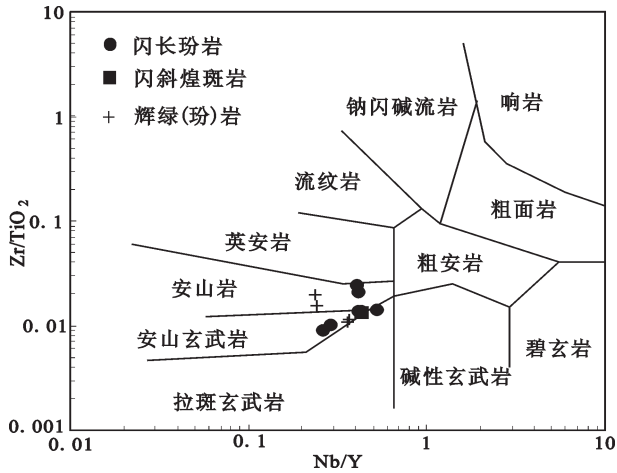


图5 中灶火镁铁质岩墙群Nb/Y-Zr/TiO₂岩石分类图解 (底图据文献[20])

Fig.5 Nb/Y-Zr/TiO₂ diagram of the Zhongzaohuo mafic dyke (after reference [20])

度的橄榄石与单斜辉石的分离结晶。Sc强烈溶于石榴子石中,而Sc与MgO表现出较好的正相关关系,表明源区残留有石榴子石。

6 讨论

6.1 岩石成因

6.1.1 地壳混染及流体交代

前人研究表明,地壳混染可能不是岩墙岩浆成分富集的主要原因^[23-24]。本文镁铁质岩Nb/Ta比值介于10.7~28.5,平均为19.5,Zr/Hf比值介于34.9~45.4,平均为37.5,高于大陆地壳值(Nb/Ta=11,Zr/Hf=33)^[22],但与地幔平均值较为相近(分别为(17.5±2)和36.7)^[25-26],说明岩浆没有受到明显的地壳混染,这与岩石中缺少捕获的古老锆石年龄一致。Nb/Y-Th/Y关系图(图8-d)能较好地反映岩浆的演

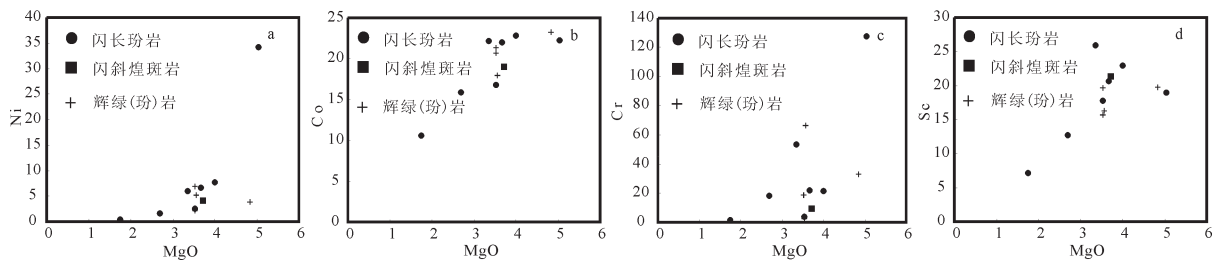


图6 中灶火镁铁质岩墙群微量元素与MgO相关图解

Fig. 6 Diagrams of trace elements versus MgO for the mafic dykes from Zhongzaohuo

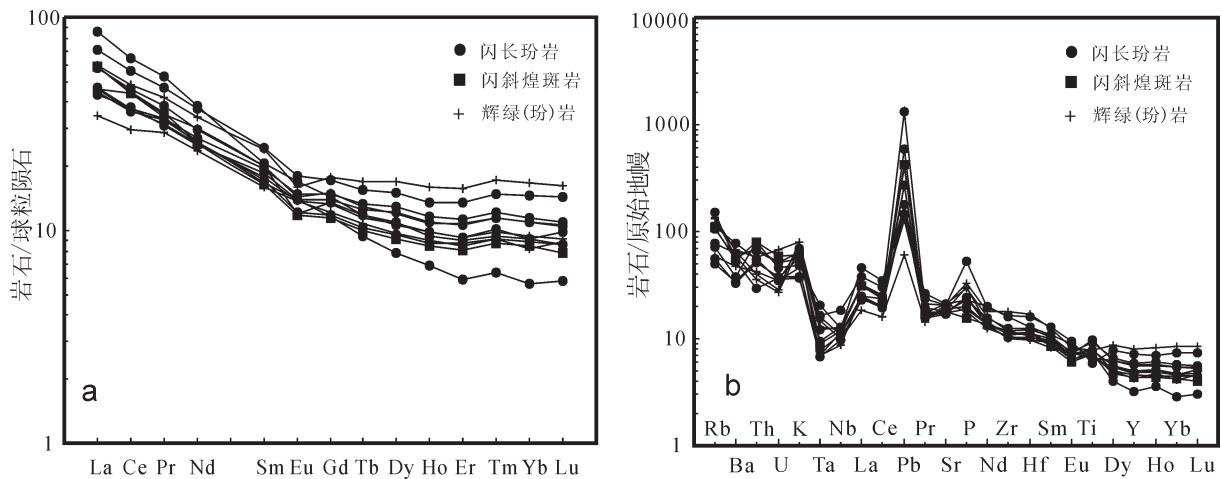


图7 镁铁质岩墙球粒陨石标准化稀土配分图(a,标准化值据参考文献[22])和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b,标准化值据参考文献[19])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a,normalizing values after reference [22]) and primitive mantle normalized trace element patterns (b,normalizing values after reference [19]) in the Zhongzaohuo mafic dykes

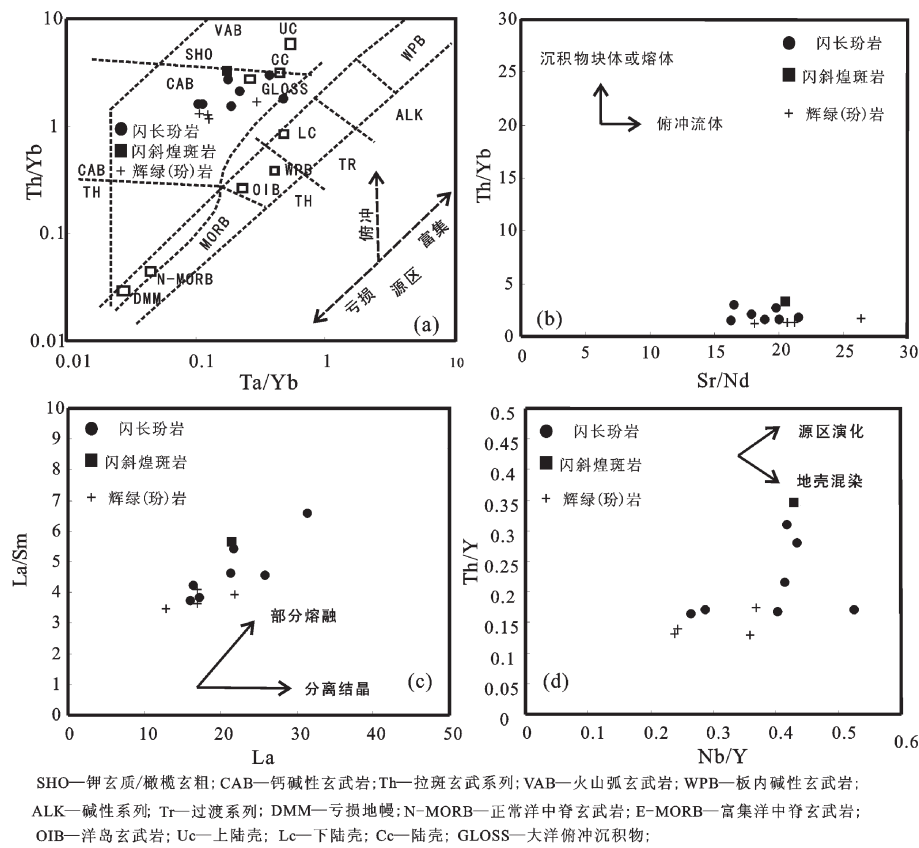


图8 镁铁质岩墙源区性质及演化趋势判别图(底图 a:参考文献[32];b-d:参考文献[22])
 a—Ta/Yb—Th/Yb; b—Sr/Nd—Th/Yb; c—La—La/Sm; d—Nb/Y—Th/Y

Fig. 8 Discrimination diagrams of the source characteristics and evolution trend of the mafic dykes (a after reference [32];
 b-d after reference [22])
 a—Ta/Yb—Th/Yb diagram; b—Sr/Nd—Th/Yb diagram; c—La—La/Sm diagram; d—Nb/Y—Th/Y diagram

化过程,由图可见,岩石以源区演化为主,地壳混染的作用有限。本文镁铁质岩具有富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素的特征,同时岩浆未受到地壳物质的混染,应该是继承了地幔源区的性质^[27]。U 含量平均值 0.9×10^{-6} , 及 Pb 含量 $4.3 \sim 94.9 \times 10^{-6}$ 与 MORB (0.23×10^{-6} 和 0.38×10^{-6})^[28] 相比明显偏高,暗示源区可能受到了流体的交代作用。研究表明,如果排除地壳物质的混染,地幔楔中富集亲石元素(Rb、K、U 和 Pb 等)最有可能是流体交代作用引起^[29]。因此,笔者认为本文镁铁质岩富集大离子亲石素(Rb、K、U、Pb),亏损高场强元素(Ta、Nb、Zr、Hf)的特征是由于岩浆源区受到了流体交代作用的结果。

6.1.2 分离结晶

本文镁铁质岩 $Mg^\#$ 介于 42~58 之间,仅一个样

品为 29,平均为 47,说明岩石经历了一定程度的结晶分异的过程,但一般宽度不大于 1 m 的脉岩,决定了其快速冷却固结的特点^[30]。因此,分离结晶、同化混染的过程很难主导整个岩浆的成分变异,即使不同成分的脉岩存在相互演化的关系,也是在接近于岩浆源区的位置完成^[3],即大多数脉岩的成因是源区岩石经过不同程度的部分熔融形成原始岩浆,而后发生固结的结果^[31]。中灶火镁铁质岩以岩墙群的形式产出,岩墙的宽度在 150 cm 以下,岩石大部分为斑状结构,表明岩浆快速冷却固结,符合罗照华等^[31]所述脉岩的特点,那么分离结晶可能不是镁铁质岩岩浆演化的主要趋势,岩石中等的 $Mg^\#$ 可能是由于部分熔融形成的岩浆在源区附近或者上升的过程中经历一定程度分离结晶而形成角闪石、辉石斑晶的结果。La—La/Sm 图解对岩浆的演化趋势进

行判别(图8-c),图中显示,岩浆演化过程中以部分熔融作用为主,分离结晶作用有限。

6.1.3 源区性质及部分熔融

Th/Yb-Ta/Yb关系图(图8-a)对岩浆的源区具有较好的示踪作用^[32],Ta/Yb高于N-MORB岩石来自于富集地幔源区,低于N-MORB则来自于亏损地幔,本文样品点基本投在富集地幔源区边界以外,说明岩石源区来自富集地幔,但可能会有壳源物质的加入^[18]。岩石微量元素地球化学特征及野外地质特征表明,镁铁质岩浆未受地壳物质的污染。另外,所有样品的Th元素显著富集,说明镁铁质岩浆在上升侵位过程中没有和地壳物质发生混染,而是由于俯冲洋壳析出的流体交代地幔的结果^[33]。Sr/Nd-Th/Yb关系图显示岩浆源区可能与俯冲流体的作用有关(图8-b)。

综上所述,中灶火镁铁岩墙来源于富集地幔的部分熔融,且部分熔融与俯冲流体有关。结合区域构造演化,俯冲流体的来源应该和古特提斯洋大规模向北俯冲有关。

6.2 构造环境分析

大量研究表明,加里东运动之后,青藏高原东北部总体转化为相对稳定的陆内环境。从早石炭世开始东昆仑进入古特提斯洋演化阶段,石炭纪一二叠纪是古特提斯洋发展的主要时期,这阶段代表性洋盆为研究区以南的东昆南(阿尼玛卿)蛇绿构造混杂岩带,其北部东昆中构造混杂岩带和东昆北

地块基本为滨浅海环境或相对稳定的陆内环境,代表性地层如东昆北地区石炭系大干沟组和缙歙苏组的碎屑岩-碳酸盐岩-火山岩沉积。古特提斯洋于晚二叠世开始向北俯冲于东昆仑地体之下,并产生大量与俯冲-碰撞造山相关的岩浆活动,时代集中在260~230 Ma^[10,34-36]。洋盆的闭合及随后的陆内造山的时间在230~190 Ma^[3,35,37],研究区北部发育一套鄂拉山组陆内中酸性火山岩,时代为(225±2) Ma(朱云海,数据未发表),表明区内晚三叠世进入陆内演化阶段。前人在东昆中构造混杂岩带北缘发现大量的岛弧火山岩和弧花岗岩类,时代为石炭纪至二叠纪^[34,38-40],综合以上证据笔者认为研究区晚古生代一早中生代期间处于弧后盆地的沉积环境。

熊富浩等在白日其利地区发现了一套镁铁质岩墙群,认为是弧后伸展环境下的产物,并获得了(251±2)Ma的加权平均年龄^[41]。通过对比中灶火地区镁铁质岩墙群与白日其利岩墙群具有相似的地球化学性质,具体表现为:二者均具有较低的K₂O/Na₂O比值(K₂O/Na₂O < 1),较高的TiO₂(TiO₂ > 0.9),中等的Mg[#](40~60),轻稀土元素相对富集;(La/Sm)_N比值二者分别为2.19~4.14、1.31~3.11,这显著区别于东昆仑洋中脊、岛弧和后碰撞火山岩的地球化学特征^[34],暗示中灶火镁铁质岩墙群同样形成于弧后伸展的动力学背景。

岩石地球化学特征表明,本文镁铁质岩墙的形成均与俯冲流体作用有关。为进一步判别其形成的构

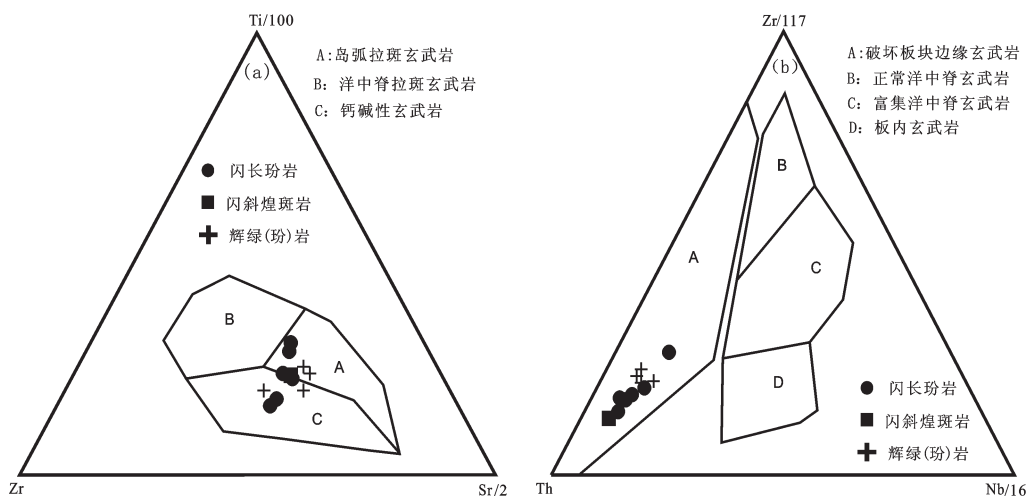


图9 镁铁质岩墙构造环境判别图(a:参考文献[42];b:参考文献[44])

Fig.9 Tectonic discriminative diagrams of the mafic dykes(a after reference [42]; b after reference [44])

造背景,分别运用两种构造环境判别图对岩石的大地构造背景进行讨论。Zr、Y、Nb 和 Ti 等不相容元素受部分熔融或分离结晶作用的影响较小^[42-43],因此能有效地判别岩石形成的构造环境。

在图9-a中,岩石表现出岛弧拉斑玄武岩及钙碱性玄武岩的特征;图9-b中,样品均落在破坏板块边缘玄武岩区域,暗示镁铁质岩墙群形成于俯冲作用有关的环境。

镁铁质岩墙群作为一种特殊的构造岩浆类型,它的形成本身就代表一种伸展拉张的构造背景,而俯冲带镁铁质岩墙群又可以形成于多种动力学背景下,如弧后盆地伸展背景及弧下岩石圈减薄背景^[15,45]。结合研究区区域构造演化及镁铁质岩墙群的地球化学特征,认为镁铁质岩墙群形成于弧后盆地环境,且岩浆的形成受控于流体的交代作用。结合东昆仑区域构造演化,笔者认为本文镁铁质岩墙群成因为:早三叠世,在古特提斯洋向北俯冲的环境下,俯冲板片形成的流体交代富集地幔,诱使地幔部分熔融形成镁铁质岩浆,在弧后伸展背景下岩浆上升侵位形成镁铁质岩墙群。

7 结 论

(1)东昆仑中灶火地区镁铁质岩墙群的岩性主要为闪长玢岩,少量闪斜煌斑岩、辉绿玢岩和辉绿岩。

(2)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,中灶火地区镁铁质岩墙群结晶侵位的年龄为(249±1)Ma(MSWD=0.42)。

(3)中灶火地区镁铁质岩墙群富集 LILE 和 LREE,相对亏损 HFSE,岩浆演化以部分熔融为主导,经历了一定程度的分离结晶,岩浆上升过程中未受到地壳物质的混染。岩石成因分析表明,镁铁质岩浆起源于富集地幔,并与俯冲流体有关。

(4)构造环境判别表明,岩石具有岛弧拉斑及钙碱性玄武岩特征。结合东昆仑区域构造演化,笔者认为镁铁质岩墙的成因为古特提斯洋向北俯冲的过程中,俯冲板片释放的流体交代富集地幔,并诱发地幔的部分熔融形成镁铁质岩浆,受弧后伸展动力学背景的影响,岩浆上升侵位。

致谢:感谢朱云海教授和林启祥教授在研究工作中给予的帮助;感谢金鑫鏢、王利伟、喻星星、刘彬、于炎炎、代雄、陈小龙等同学在野外地质考察及

实验工作中给予的帮助。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Walker G P L, Eyre P R. Dike complexes in American Samoa[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 69(3): 241-254.
- [3] 罗照华,魏阳,辛后田,等.造山后脉岩组合的岩石成因——对岩石圈拆沉作用的约束[J]. *岩石学报*, 2006, 22(06):1672-1684. Luo Zhaohua, Wei Yang, Xin Houtian, et al. Petrogenesis of the post-orogenic dike complex—Constraints to lithosphere delamination[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(06):1672-1684 (in Chinese with English abstract).
- [4] Girardi V A V, Correa Da, Costa P C, et al. Petrology and Sr-Nd characteristics of the Nova Lacerda dike swarm, SW Amazonian Craton: new insights regarding its subcontinental mantle source and Mesoproterozoic geodynamics[J]. *International Geology Review*, 2012, 54(2):165-182.
- [5] Khan T, Murata M, Karim T, et al. A Cretaceous dike swarm provides evidence of a spreading axis in the back-arc basin of the Kohistan paleo-island arc, northwestern Himalaya, Pakistan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(2):350-360.
- [6] Mir A R, Alvi S H, Balaram V. Geochemistry of mafic dikes in the Singhbhum Orissa craton: implications for subduction-related metasomatism of the mantle beneath the eastern Indian craton[J]. *International Geology Review*, 2010, 52(1):79-94.
- [7] 殷鸿福,张克信.东昆仑造山带的一些特点[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1997, 22(4):339-342. Yin Hongfu, Zhang Kexin. Characteristics of the Eastern Kunlun orogenic belt[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(4):339-342(in Chinese with English abstract).
- [8] 潘桂棠.东特提斯地质构造演化[M].北京:地质出版社,1997. Pan Guitang. *Geological Tectonic Evolution of East Tethys*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997 (in Chinese).
- [9] 姜春发,杨经绥,冯秉贵,等.昆仑开合构造[M].北京:地质出版社,1992. Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, et al. *Opening-Closing Tectonic of Kunlun Mountains*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992 (in Chinese).
- [10] Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 1996, 258(1):215-231.
- [11] 熊富浩,马昌前,张金阳,等.东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地

- 球化学[J]. 岩石学报, 2011, 27(11):3350-3364.
- Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, et al. LA-ICP-MS zircon U- Pb dating, elements and Sr- Nd- Hf isotope geochemistry of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in East Kunlun orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011,27(11): 3350-3364(in Chinese with English abstract).
- [12] 许志琴, 李海兵, 杨经绥, 等. 造山的高原——青藏高原地体的拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. Orogenic Plateaux-Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007(in Chinese).
- [13] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA- ICP- MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1): 34-43.
- [14] 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.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on inter pretation of U- Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16) :1589-1604(in Chinese with English abstract).
- [15] 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.
- [16] Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U- Th- Pb microanalysis of amphibolite- to- granulite facies zircons:geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999,134(4):380-404.
- [17] Frey F A, Green D H, Roy S D. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilities from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological date[J]. Journal of Petrology, 1978,19(3): 463-513.
- [18] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1992.
- Li Changnian. Trace Element Petrology of Igneous Rocks[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992(in Chinese).
- [19] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in Oceanic Basins. London: Geological Society Special Publication, 1989, 42 (1): 313-345.
- [20] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chem. Geol., 1977, 20: 325-343.
- [21] Wilson B. Igneous petrogenesis: A global tectonic approach[M]. Berlin: Springer, 1989.
- [22] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Blackwell: Oxford Press, 1985.
- [23] 范蔚茗, 郭锋. 华北地区晚中生代镁铁质岩浆作用及其地球动力学背景[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(01):44-55.
- Fan Weiming, Guo Feng. Late Mesozoic mafic magmatism from the eastern part of North China block and its adjacent regions: Magma genesis and geodynamic implications for lithospheric thinning[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(1):44- 55(in Chinese with English abstract).
- [24] Condie K C. Sources of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios[J]. Precambrian Research, 1997, 81(1):3-14.
- [25] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust- mantle system[J]. Chemical Geology, 1995, 120(3):347-359.
- [26] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90(3):297- 314.
- [27] 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 山东中生代基性脉岩的元素地球化学及其成因[J]. 地球化学, 2005, 34(4):339-350.
- Liu Shen, Hu Ruizhong, Zhao Junhong, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Mesozoic mafic dikes from Shandong Province[J]. Geochimica, 2005, 34(4):339- 350(in Chinese with English abstract).
- [28] Kelemen P B, Hanghøj K, Greene A R. One view of the geochemistry of subduction- related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust [M]. New York: Elsevier, 2003.
- [29] Liu S, Hu R S, Gao S, et al. Zircon U- Pb age and Sr- Nd- Hf isotope geochemistry of Permian granodiorite and associated gabbro in the Songliao Block, NE China and implications for growth of juvenile crust[J]. Lithos, 2010, 114(3):423-436.
- [30] Webber K L, Simmons W B, Falster A U, et al. Cooling rates and crystallization dynamics of shallow level pegmatite- aplite dikes, San Diego County, California[J]. American Mineralogist, 1999, 84 (5):708-717.
- [31] 罗照华, 白志达, 赵志丹, 等. 塔里木盆地南北缘新生代火山岩成因及其地质意义[J]. 地学前缘, 2003, 10(03):179-189.
- Luo Zhaohua, Bai Zhida, Zhao Zhidan, et al. Cenozoic magmatism in the south and northrims of Tarim Basin: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(3) :179-189(in Chinese with English abstract) .
- [32] Pearce JA. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]//Thorpe R S. Andesites. New York: Wiley, 1982:528-548.
- [33] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 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.
- Li Xianhua, Hu Ruizhong, Rao Bing. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dykes from northern Guangdong , SE China[J]. Geochimica, 1997, 26 (2):14- 31 (in Chinese with English abstract) .

- [34] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(5):369–380.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Haibing, et al. The paleo–Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A' nyemaqen region of East Kunlun, northern Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(5):369–380(in Chinese with English abstract).
- [35] 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 青藏东昆仑晚古生代末—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质, 1998, 12(3):344–352.
Guo Zhengfu, Deng Jinfu, Xu Zhiqin, et al. Late Palaeozoic–Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate–acidic igneous rocks from the Eastern Kunlun Mountains of Northwestern China[J]. *Geoscience*, 1998, 12(3):344–352(in Chinese with English abstract).
- [36] 南卡俄吾, 贾群子, 唐玲, 等. 青海东昆仑哈西雅图矿区花岗岩闪长岩锆石 U–Pb 年龄与岩石地球化学特征 [J]. 中国地质, 2015, 42(3):702–712.
Namka Norbu, Jia Quanzi, Tang Ling, et al. Zircon U–Pb age and geochemical characteristics of granodiorite from the Haxiyantu iron–polymetallic ore district in Eastern Kunlun[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3):702–712(in Chinese with English abstract).
- [37] 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑造山带晚三叠世岩浆混合作用: 以和勒冈希里克特花岗岩闪长岩体为例 [J]. 中国地质, 2013, 40(4):1044–1065.
Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Late Triassic magma mixing in the East Kunlun orogenic belt: A case study of Helegang Xilikete granodiorites[J]. *Geology in China*, 2013, 40(4):1044–1065(in Chinese with English abstract).
- [38] 许志琴, 李海兵, 杨经绥. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J]. 地学前缘, 2006, 13(4):1–17.
Xu Zhiqin, Li Haibing, Yang Jingsui. An orogenic plateau—the orogenic collage and orogenic types of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(4):1–17(in Chinese with English abstract).
- [39] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3):403–414.
Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, et al. Granitoids and crustal growth in the East–Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3):403–414(in Chinese with English abstract).
- [40] 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑早石炭世火山岩的地球化学特征及其构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(4):289–295.
Yuan Wanming, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of the Early Carboniferous volcanic rocks in East Kunlun mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1998, 17(4):289–295(in Chinese with English abstract).
- [41] 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带白日其利辉长岩体 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. 地质通报, 2011, 30(8):1196–1202.
Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, et al. Zircon LA–ICP–MS U–Pb dating of Bairiqili gabbro pluton in East Kunlun orogenic belt and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(8):1196–1202(in Chinese with English abstract).
- [42] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2):290–300.
- [43] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69(1):33–47.
- [44] Wood D A, Joron J L, Treuil M. A re–appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 45(2):326–336.
- [45] Scarrow J H, Leat P T, Wareham C D, et al. Geochemistry of mafic dykes in the Antarctic Peninsula continental–margin batholith: A record of arc evolution[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 131(2/3):289–305.