

新疆甜水海地块种羊场石炭纪火山岩年代学和地球化学:岩石成因和地质意义*

胡军^{1, 2, 3} 王核^{1**} 黄朝阳⁴

HU Jun^{1, 2, 3}, WANG He^{1**} and HUANG ChaoYang⁴

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205

4. 重庆工程职业技术学院, 重庆 402260

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

4. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China

2015-04-16 收稿, 2015-10-11 改回.

Hu J, Wang H and Huang CY. 2016. Geochronology and geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in Zhongyangchang from Tianshuihai terrane, Xinjiang: Petrogenesis and geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (6):1699–1714

Abstract A suit of interbedding basalts, basaltic andesites and rhyolites distributes in Zhongyangchang located in the western part of Tianshuihai terrane. In this paper, the signatures of geology, petrology, geochronology and geochemistry characteristics on the rocks are researched. Three groups of ages are acquired by LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of rhyolite. The age of 343.5 ± 4.1 Ma indicates the volcanic rocks are formed during Early Carboniferous. The ages of 2439 ± 26 Ma and 1988 ± 36 Ma imply the existence of the Precambrian crystalline basement in Tianshuihai terrane. Lithologic characteristics of the basaltic rocks transit from tholeiitic series, calc-alkaline series to alkaline series. Additionally, the basaltic rocks which have some difference from typical continental marginal arc Okinawa Trough basalts, display E-MORB (OIB), continental within-plate basalt and island-arc basalt signatures, implying that the volcanic rocks in Zhongyangchang may form in abnormal back-arc basin in Tianshuihai terrane. The difference in major, trace element and REE normalized patterns of basaltic rocks and rhyolites suggests the different source. The source of basaltic rocks is similar to mantle source of E-MORB (OIB) and occurred partial melting. When the primary magma ascent, the mineral fractionation took place, moreover, crustal contamination also occurred. The rhyolites are characterized by high-silicon, high-alkali and generated by partial melting of upper crust. The Early Carboniferous volcanic rocks in Zhongyangchang may be the record of the extension in early period for the western part of Palo-Tethys Ocean, providing new evidence for the pattern of poly-islands oceanic basin in Karakorum-Tianshuihai terrane.

Key words Tianshuihai terrane; Carboniferous; Volcanic rocks; Back-arc basin; Extension; Palo-Tethys Ocean

摘要 甜水海地块西段的种羊场地区发育一套互层状产出的玄武岩-玄武安山岩-流纹岩, 本文对其进行了岩石学、同位素年代学和地球化学研究。结果表明, 流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得三组年龄: 343.5 ± 4.1 Ma 表明火山岩的形成时代为早石炭纪, 2439 ± 26 Ma 和 1988 ± 36 Ma 说明甜水海地块存在前寒武纪结晶基底。其中玄武质岩石岩性从拉斑系列、钙碱性系列向碱性系列过渡, 呈现出 E-MORB(OIB)、大陆板内拉张和岛弧的混合特征, 与典型弧后盆地 Okinawa 玄武岩有一定的差异, 表明其可能是异常陆缘弧后盆地拉张裂解的产物。玄武质岩石和流纹岩的主量元素、稀土元素和微量元素比值对的差

* 本文受国家“十二五”科技支撑项目(2011BAB06B05-01、2015BAB05B03)联合资助。

第一作者简介: 胡军, 男, 1988 年生, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: aa226039@126.com

** 通讯作者: 王核, 男, 1966 年生, 研究员, 博士生导师, 矿床学专业, E-mail: wanghe@gig.ac.cn

异表明它们不是同源岩浆演化的产物,玄武质岩石的源区为类似 E-MORB(OIB)的岩石圈地幔,且发生了部分熔融,原始岩浆上升过程中经历了矿物分离结晶和地壳混染作用。流纹岩属于高硅高碱的钙碱性火山岩,是上地壳部分熔融的产物。种羊场早石炭纪火山岩可能代表了古特提洋西端早期扩张的记录,为西昆仑-喀喇昆仑地区晚古生代多岛洋格局提供了新的证据。

关键词 甜水海地块;石炭纪;火山岩;弧后盆地;拉张;古特提洋

中图法分类号 P588.14; P597.3

1 引言

新疆西昆仑-喀喇昆仑山地区处于塔里木盆地西南缘,青藏高原西构造结北部弧顶部位,被认为是古特提斯洋消减的产物(潘裕生等, 2000; 方爱民等, 2003; 袁超等, 2005)。然而由于该区自然条件恶劣,地质矿产研究程度相对薄弱,对该区大地构造演化模式争议不断,主要有岛弧增生模式和微陆块拼合模式(Şengör and Natal'in, 1996; 潘裕生等, 2000; 姜春发, 2002; 肖文交等, 2003; Xiao *et al.*, 2002, 2004)。

位于青藏高原西北缘的塔什库尔干县一带是研究喀拉昆仑-昆仑山地质演化的重要地区之一(计文化等, 2011)。该县南部种羊场附近发育一套互层产出的玄武岩-玄武安山岩-流纹岩组合,其对古特提斯洋的演化和西昆仑造山带的构造格局研究有重要的意义,前人进行了年代学和地球化学的初步研究,提出了不同的见解:丁道桂等(1998)认为其是二叠纪大陆边缘盆地火山岩组合,玄武岩具有洋脊和岛弧混合特征;曲军峰(2007)认为玄武岩是震旦纪 Rodinia 超大陆裂解产物,推测塔什库尔干地体曾是塔里木的一部分;计文化等(2011)在种羊场火山岩东侧布伦阔勒群中发现了一套类似的岩石组合,认为其形成时代为古元古代,基性火山岩形成于大陆板内构造环境,证实塔什库尔干-甜水海地区存在前寒武纪基底。前人的研究为该地区火山岩和构造演化的认识提供了坚实基础,但是争议较大,缺乏精确的同位素年代学资料,岩石成因(形成机制和演化过程)研究甚少。

本文在种羊场火山岩实测剖面基础上,对其进行系统的地质-岩石学-地球化学特征分析,结合 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法,厘定火山岩的形成时代,研究岩石成因,探讨其形成的构造背景和地质意义,为古特提斯洋的演化以及西昆仑-喀喇昆仑造山带的构造格局研究提供一些新的线索。

2 地质背景

西昆仑造山带由北向南由库地-其曼于特缝合带、苏巴什-康西瓦-瓦恰缝合带、乔尔天山-红山湖缝合带将其分为北昆仑地体、南昆仑地体、甜水海地块、喀喇昆仑地块(图1),构造格局与特提斯洋演化过程密切相关。伴随缝合带分布着多条蛇绿岩带,如库地-柯岗蛇绿混杂带(426~860.5Ma)、石炭纪-二叠纪的康西瓦-木孜塔格和苏巴什蛇绿混杂带分别记录了原特提斯洋、古特提斯洋开合的过程(计文化等,

2004; 董连慧等, 2010);同时也伴随着火山活动,阿卡孜变质火山岩的发现表明震旦纪塔里木南缘曾发生过一次重要的裂解事件,是原特提斯洋打开的标志(袁超等, 2005)。石炭纪-二叠纪早古生代晚期形成的弧后盆地扩张、下沉,西昆仑再次进入裂解高峰期,形成了昆北活动陆缘裂谷盆地、苏巴什洋盆以及大量双峰式火山岩,古特提洋在这种环境下打开。火山岩集中分布在南北各带上,多为玄武岩、英安岩(安山岩)、流纹岩、火山碎屑岩组合(潘裕生等, 2000; 李荣社等, 2008; 计文化等, 2009),南带从东向西主要出露在苏巴什、麻扎和瓦恰地区,形成于岛弧环境(计文化等, 2004; 李博秦等, 2006);北带主要分布在阿美、库地北、奥依塔格-昆盖山地区,东部二叠纪火山岩为陆内裂谷型(李荣社等, 2008),西部上石炭统火山岩形成环境有弧后盆地(孙海田等, 2003)和扩张洋盆(邓万明, 1995)两种认识。西昆仑造山带内消减,走滑作用强烈,分布着多条重要断裂,如喀喇昆仑断裂、塔阿西断裂、乔尔天山-红山湖断裂等。

种羊场火山岩出露在喀喇昆仑断裂东侧,苏巴什-康西瓦-瓦恰缝合带以西,紧靠乔尔天山-红山湖缝合带(图1),区域上位于甜水海地块西段。研究区出露地层主要有古元古代布伦阔勒群,岩性为一套富含石榴石、夕线石等特征变质矿物的变质岩系,原岩为一套中基性火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩建造,前人获得该群的同位素年龄为 540~2700Ma(张传林等, 2007; 王建平, 2008);志留纪主要为变质长石石英砂岩、变质石英粉砂岩夹火山岩、硅质岩、粉晶灰岩等组成的复理石沉积建造;石炭纪下部主要为灰色含粉砂泥岩、钙质细粒长石砂岩、含碳硅质岩及含粉砂泥晶灰岩,上部为溢流相火山熔岩、英安岩、流纹岩夹英安质角砾岩的火山岩;二叠纪为碎屑岩-碳酸盐岩夹火山岩组合。全区岩浆活动不强,以中酸性的小型岩株、岩瘤为主,研究区主要出露中生代花岗岩和新生代碱性侵入岩,中生代花岗岩年龄为 123~94Ma,新生代碱性侵入岩为 54~11Ma(河南地质调查院, 2004^①)。

前人研究认为,种羊场火山岩沿北西南东方向伸展,在达布达尔附近横穿中巴公路,一直延伸到国境线之外,主要岩性为各种玄武岩、玄武安山岩及英安岩等(丁道桂等, 1998; 曲军峰, 2007)。本文研究对象主要位于塔什库尔干县以南种羊场东侧,长约 11km,宽约 2.5km,面积约 27km²,与志留系温泉沟组呈断层接触,西侧为上石炭统恰提尔群(图1)。

^① 河南地质调查院. 2004. 1:25 万叶城县幅、塔什库尔干县幅区域地质调查成果报告

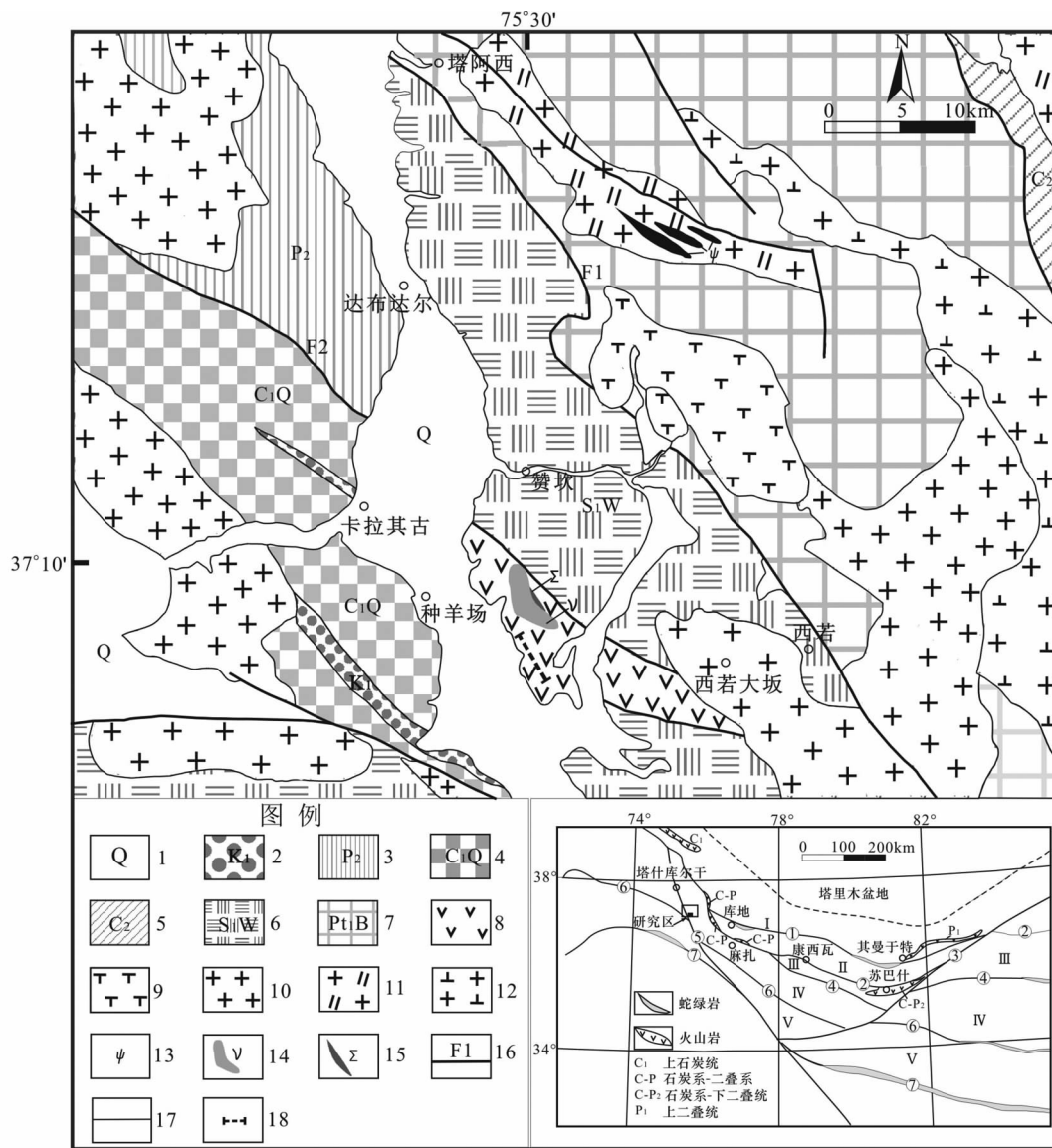


图1 甜水海种羊场地区地质简图(据潘桂棠等, 2004; 计文化等, 2009, 2011 修改)

①库地-其曼于特缝合带;②苏巴什-康西瓦-瓦恰缝合带;③阿尔金断裂;④郭扎错-西金乌兰缝合带;⑤喀喇昆仑断裂;⑥乔尔天山-红山湖缝合带;⑦班公湖-怒江缝合带. I 北昆仑地体; II 南昆仑地体; III 巴颜喀拉地体; IV 甜水海-北羌塘地体; V 喀喇昆仑-南羌塘地体. F1 塔阿西断裂; F2 乔尔天山-红山湖断裂分支. 1-第四系; 2-上白垩统; 3-中二叠统; 4-上石炭统恰提尔群; 5-未分石炭系; 6-志留系温泉沟组; 7-古元古界布伦阔勒群; 8-晚石炭世火山岩; 9-新近纪正长岩; 10-白垩纪花岗岩; 11-青白口纪二长花岗岩; 12-青白口纪花岗岩闪长岩; 13-辉石岩; 14-辉长岩; 15-超基性岩; 16-断层及编号; 17-地质界线; 18-采样剖面位置

Fig.1 Geological map of Zhongyangchang region in Tianshuihai (modified after Pan *et al.*, 2004; Ji *et al.*, 2009, 2011)

①Kudi-Qianyute suture; ②Subashi-Kangxiwa-Waqia suture; ③Altyn fault; ④Guozhacuo-xijinwulan suture; ⑤Karakorum fault; ⑥Qiaoertianshan-Hongshanhu suture; ⑦Bangonghu-Nujiang suture. I Northern Kunlun terrane; II Southern Kunlun terrane; III Bayankala terrane; IV Tianshuihai-Northern Qiangtang terrane; V Karakorum-Southern Qiangtang terrane. F1 Tax fault; F2 branch of Qiaoertianshan-Hongshanhu fault. 1-Quaternary; 2-Upper Cretaceous; 3-Middle Permian; 4-Upper Carboniferous Qiatier Group; 5-Carboniferous; 6-Silurian Wenquan Formation; 7-Paleoproterozoic Bulunkuo Group; 8-Upper Carboniferous volcanic rocks; 9-Neogene syenite; 10-Cretaceous granite; 11-monzogranite in Neoproterozoic Qingbaikouan System; 12-granodiorite in Neoproterozoic Qingbaikouan System; 13-Pyroxenolite; 14-gabbro; 15-ultrabasic rocks; 16-faults and serial numbers; 17-geological boundary; 18-locality of sampling geological section

3 火山岩特征

作者实测了一条 1.36 km 的地层采样剖面, 见变玄武岩、

变流纹岩呈互层状产出夹有少量变玄武安山岩和变英安岩, 见少量硅质岩出露(图 2a, b)。火山岩地层发生了强烈的构造变形, 揉皱、片理化发育, 局部见枕状玄武岩出露。岩石中出现绿片岩相-角闪岩相不同程度的变质, 部分岩石中有石

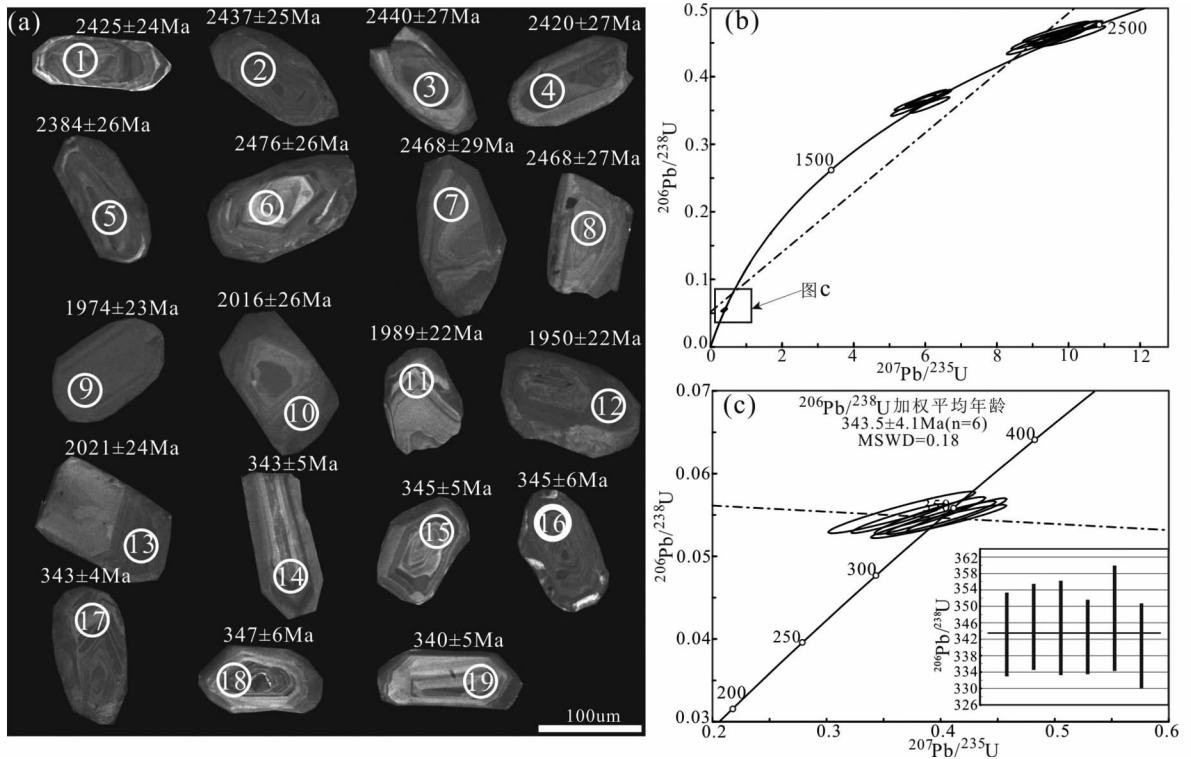


图3 种羊场流纹岩样品(样品 ZYCB05)锆石阴极发光图像(a)和 U-Pb 谐和图(b、c)

Fig. 3 Zircon CL images (a) and zircon U-Pb concordia diagrams (b, c) of rhyolite (Sample ZYCB05) in Zhongyangchang

采用美国国家标样技术研究院的人工合成硅酸盐标准参考物质 NISTSRM 610 为外标,²⁹Si 作为内标。数据处理采用 ISOPLOT 3.0 程序(Ludwing, 2001)。

对所有样品进行了地球化学研究。样品经破碎后,岩屑用去离子水清洗后烘干,磨至 200 目,在中国科学院广州地球化学研究所同位素国家重点实验室对全部样品进行了主量元素、微量元素分析,分别在 Varian VISTA-PRO ICP-AES 和 Perkin Elmer Elan 6000 ICP-MS 上进行,主量元素的分析精度优于 1%,稀土元素的分析精度可达 3%,其余微量元素的分析精度可达 5%。

5 结果

5.1 年代学研究

5.1.1 锆石特征及 U-Pb 年龄

本次共计测定 20 个分析点,校正后锆石数据有效点为 19 个,测试结果见表 1。依据锆石年龄结果和锆石的形态、内部结构特征,可划分为三组锆石。第一组锆石:该组锆石有 8 颗,编号 1~8(图 3a),晶形主要为短柱状和不规则柱状,锆石长度在 100~160 μm 之间,长宽比多在 1.5:1~2:1 之间。多数锆石内部环带较为发育,Th/U 比值变化范围较大,在 0.21~0.98 之间,测点整体落在谐和线上或者附近(图 3b),具岩浆锆石的特点,加权平均年龄为 2439 \pm 26Ma

(MSWD = 1.4)。第二组锆石:该组锆石有 5 颗,编号 9~13(图 3a),晶形主要为短柱状和不规则粒状,锆石长度在 90~130 μm 之间,长宽比在 1:1.5 左右,锆石环带结构不清晰,且有多晶及内核等结构,个别边部发育环带,Th/U 比值差异较大,在 0.43~1.59 之间,测点整体落在谐和线上或者附近(图 3b),加权年龄为 1988 \pm 36Ma (MSWD = 1.6)。第三组锆石:该组锆石有 6 颗,编号 14~19(图 3a),自形程度较好,为长柱状-短柱状晶体,两端可见双锥,锆石长度在 100~140 μm 之间,长宽比在 1:2 左右,从中心到边部发育较好的韵律环带,且结构清晰。Th/U 比值变化不大,在 0.23~0.31 之间,具典型岩浆锆石的特点,加权平均年龄为 343.5 \pm 4.1Ma (MSWD = 0.18)(图 3c)。

5.1.2 锆石形成温度和稀土元素特征

锆石-Ti 温度计是近些来提出的单矿物微量元素温度计,它对于正确认识地质过程具有重要意义(Watson and Harrison, 2005; 高晓英和郑永飞, 2011; MacDonald *et al.*, 2015; Qiao *et al.*, 2016)。

结果表明第一组和第二组锆石变化范围较大(表 2),分别在 638~800 $^{\circ}\text{C}$ 和 691~790 $^{\circ}\text{C}$ 之间,第三组锆石变形成温度较为均一,在 729~769 $^{\circ}\text{C}$ 之间,平均温度为 739 $^{\circ}\text{C}$,显示出与前两组锆石形成环境不同,且平均温度比爆发相火山岩的形成温度低,原因可能是种羊场火山岩呈溢流相产出。

流纹岩样品的锆石稀土元素分析结果见表 2,在 REE 配分模式图(图 4)上,均具有 Ce 的正异常,Pr 与 Ce 表现相反

表1 种羊场流纹岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analysis of rhyolite sample in Zhongyangchang

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ
1	73.98	66.05	121.49	0.54	9.73639	0.29015	0.45670	0.00551	2410	27	2425	24
2	86.15	77.59	142.95	0.54	9.64973	0.31613	0.45933	0.00559	2402	30	2437	25
3	88.28	104.26	138.22	0.75	10.1518	0.35964	0.46013	0.00605	2449	33	2440	27
4	119.35	98.76	201.20	0.49	9.20946	0.32712	0.45550	0.00604	2359	33	2420	27
5	72.90	55.67	125.61	0.44	9.03012	0.30895	0.44743	0.00591	2341	31	2384	26
6	78.04	29.09	138.47	0.21	10.1303	0.33483	0.46830	0.00581	2447	31	2476	26
7	42.40	38.37	69.77	0.55	9.93139	0.36245	0.46642	0.00656	2428	34	2468	29
8	81.39	122.32	125.42	0.98	9.65644	0.38036	0.46652	0.00621	2403	36	2468	27
9	67.65	64.23	148.99	0.43	6.12816	0.22445	0.35819	0.00481	1994	32	1974	23
10	55.02	152.16	95.91	1.59	6.08455	0.26333	0.36707	0.00549	1988	38	2016	26
11	67.08	130.82	136.97	0.96	5.71852	0.23616	0.36151	0.00466	1934	36	1989	22
12	43.51	87.37	86.24	1.01	5.53213	0.20017	0.35329	0.00470	1906	31	1950	22
13	106.73	142.45	227.79	0.63	6.02342	0.23652	0.36831	0.00499	1979	34	2021	24
14	20.74	83.48	336.40	0.25	0.40033	0.01963	0.05467	0.00082	342	14	343	5
15	22.57	86.47	357.76	0.24	0.41419	0.01787	0.05498	0.00084	352	13	345	5
16	16.44	81.87	265.59	0.31	0.39070	0.01984	0.05493	0.00092	335	14	345	6
17	26.50	100.02	431.33	0.23	0.36291	0.01683	0.05457	0.00072	314	13	343	4
18	23.12	89.75	370.89	0.24	0.36598	0.02631	0.05532	0.00103	317	20	347	6
19	29.86	129.60	476.45	0.27	0.39826	0.02426	0.05422	0.00083	340	18	340	5

表2 种羊场流纹岩锆石微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果及其锆石 Ti 温度Table 2 Trace element ($\times 10^{-6}$) analysis and $T_{\text{Ti-in-zircon}}$ of zircons from rhyolite sample in Zhongyangchang

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu	Ti	$T_{\text{Ti-in-zircon}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.0114	9.06	0.0607	1.10	2.81	0.940	16.4	6.44	84.7	36.6	182	41.6	417	86.7	0.42	3.18	649.5
2	0.2250	18.1	0.1920	2.72	4.46	0.939	15.9	4.69	51.6	20.1	89.1	20.0	194	38.6	0.34	4.57	676.6
3	0.0208	10.8	0.0824	1.27	2.56	0.223	14.1	4.97	58.7	22.7	98.0	21.0	191	35.2	0.11	18.9	799.8
4	0.0095	12.4	0.0298	0.656	1.90	0.292	8.78	3.50	42.9	15.9	75.8	16.7	158	30.2	0.22	9.51	736.4
5	0.0432	31.9	0.0487	0.878	1.12	0.268	9.38	3.21	41.0	16.3	78.1	18.3	188	41.1	0.25	6.95	709.9
6	0.0063	3.77	0.0477	0.615	1.10	0.0989	7.52	2.55	32.5	12.1	54.8	11.4	109	21.4	0.11	10.2	742.2
7	0.0430	9.57	0.0853	1.16	2.94	0.772	19.2	6.61	98.2	42.8	212	46.9	444	96.4	0.32	2.71	638.1
8	1.400	23.0	0.5970	5.88	6.75	1.51	23.5	6.43	67.2	24.3	108	21.5	203	40.8	0.37	5.85	696.0
9	0.0067	5.99	0.0429	0.548	1.03	0.507	7.16	2.45	27.0	10.5	48.3	10.2	97.7	19.5	0.57	6.77	707.8
10	0.0822	48.9	0.5750	8.14	9.88	2.05	32.2	8.14	75.5	24.0	96.2	18.2	161	31.6	0.35	11.5	753.3
11	0.0432	20.5	0.0690	1.26	2.26	0.351	12.8	3.76	44.7	14.6	62.2	11.9	107	21.1	0.20	17.1	790.1
12	0.0482	12.5	0.0580	0.425	1.95	0.420	11.0	3.40	38.5	14.1	61.3	12.0	108	21.1	0.28	13.0	764.1
13	0.0016	14.0	0.0590	1.409	5.07	0.0357	35.7	12.1	141	50.9	207	38.9	319	57.5	0.59	5.52	691.4
14	0.0087	1.37	0.0633	1.891	5.69	0.143	37.1	15.0	188	74.0	339	73.4	654	124	0.03	11.8	755.5
15	0.0091	1.38	0.1160	2.617	7.07	0.224	47.1	17.8	224	86.8	386	81.8	739	141	0.04	12.0	757.0
16	0.0095	1.52	0.0714	1.649	5.02	0.0921	34.4	12.9	161	62.5	278	60.0	545	102	0.02	13.8	769.4
17	0.0275	1.30	0.0902	1.624	5.41	0.0868	35.7	14.4	187	73.7	340	72.8	669	128	0.02	8.88	730.5
18	0.0066	1.26	0.0658	1.086	4.64	0.0431	31.7	12.4	158	62.4	289	61.6	565	109	0.01	8.92	733.7
19	0.0354	2.15	0.1580	3.862	7.94	0.199	49.7	18.9	246	97.0	433	90.7	818	158	0.03	8.77	729.3

的异常行为。第三组锆石测点相比第一组锆石、第二组锆石具有更加强化的轻稀土亏损和重稀土富集,且具有更加强化的 Eu 负异常,表明斜长石是岩浆岩中 Eu 的主要载体,在斜长石分离结晶的体系中,结晶生长的锆石出现明显的 Eu 负异常。第三组锆石具有典型岩浆锆石的化学特征,形成环境与其它锆石有所不同(Hoskin and Schaltegger, 2003; 宋国学

等, 2010)。

5.1.3 火山岩形成时代讨论

本文从锆石的形态、内部结构特征和地球化学特征推断种羊场火山岩的形成年龄为 $343.5 \pm 4.1\text{Ma}$ (早石炭纪), 第一组锆石和第二组锆石所代表的年龄 $2439 \pm 26\text{Ma}$ 和 $1988 \pm 36\text{Ma}$ 可能为火山岩形成过程中捕获的(继承的)古老锆石,

表3 种羊场火山岩主量元素(wt%)和微量、稀土元素($\times 10^{-6}$)含量表Table 3 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) components of volcanic rocks in Zhongyangchang

样品号	ZYC04	ZYC07	ZYC12	ZYC15	ZYC22	ZYC25	ZYC18	ZYC19	ZYCB14	ZYCB02	ZYCB03	ZYCB05
岩性	玄武岩						玄武安山岩		英安岩	流纹岩		
SiO ₂	44.89	50.49	51.79	48.58	49.81	50.56	54.36	52.22	67.58	78.72	78.01	80.89
TiO ₂	3.11	1.42	1.48	1.68	2.54	1.15	1.42	1.48	0.07	0.17	0.36	0.20
Al ₂ O ₃	14.23	14.20	12.23	14.87	12.23	13.05	13.29	12.97	5.18	6.91	11.13	9.34
Fe ₂ O ₃ ^T	14.41	13.32	14.52	14.47	17.52	13.48	12.36	12.15	0.41	0.57	1.63	0.68
MnO	0.13	0.15	0.13	0.16	0.22	0.18	0.15	0.15	0.12	0.03	0.01	0.01
MgO	6.37	6.03	4.41	4.77	4.19	6.61	5.37	5.93	0.58	0.37	0.71	0.40
CaO	5.95	6.59	10.58	8.12	6.63	5.57	8.23	9.31	14.88	4.76	0.41	0.84
Na ₂ O	3.62	3.31	1.94	3.63	2.43	2.58	3.04	2.55	1.78	1.17	0.19	2.23
K ₂ O	0.89	0.96	0.24	1.11	1.53	1.98	0.46	0.61	1.34	2.77	5.33	3.89
P ₂ O ₅	0.46	0.13	0.14	0.16	0.23	0.12	0.13	0.13	0.03	0.05	0.11	0.12
L. O. I	5.99	3.47	2.59	2.46	2.61	4.72	1.31	2.56	8.07	4.24	1.55	1.21
Mg [#]	51	51	41	43	36	53	50	53				
Total	100.07	100.06	100.04	100.00	99.95	100.01	100.11	100.03	100.04	99.76	99.44	99.80
Sc	31.8	31.0	25.1	37.6	42.0	35.6	29.8	30.3	2.24	1.46	2.59	2.37
Ti	17533	7958	8272	9144	13357	5941	7801	8205	374	905	2018	1120
V	339	256	301	364	517	239	252	262	3.52	16.6	27.8	14.4
Cr	57.4	52.6	92.1	43.8	11.5	14.3	22.0	18.0	4.28	8.49	22.0	16.1
Co	45.9	53.8	35.7	46.1	49.2	39.4	42.1	43.4	1.52	1.27	2.38	1.11
Ni	37.9	123	65.6	55.9	38.9	53.2	67.0	76.4	3.58	2.75	7.77	4.80
Rb	21.0	18.2	4.97	28.3	29.6	43.4	10.2	16.6	32.3	76.5	150	94.7
Sr	133	344	635	348	445	68.5	375	347	387	151	43.5	74.2
Y	23.8	18.0	25.4	22.6	29.9	21.0	19.8	20.3	14.1	20.7	14.3	11.5
Zr	176	120	130	112	161	121	126	129	40.8	132	254	153
Nb	19.5	6.32	6.84	5.63	8.47	5.35	6.86	7.07	1.18	3.10	6.75	3.62
Ba	407	316	61.7	307	415	287	168	302	315	764	875	764
La	28.9	18.0	18.9	16.5	24.5	17.2	18.9	18.3	13.3	31.9	38.9	21.6
Ce	61.7	37.1	39.2	34.7	51.0	37.0	38.4	37.2	24.5	57.1	69.4	40.4
Pr	7.97	4.81	5.10	4.57	6.65	4.65	4.96	4.78	2.83	6.53	8.00	4.71
Nd	33.7	19.9	22.1	19.1	27.9	18.8	21.0	20.1	10.4	24.2	28.7	17.5
Sm	6.57	4.38	5.03	4.11	5.80	4.03	4.59	4.46	1.85	4.29	4.72	3.00
Eu	2.46	1.20	1.80	1.27	1.61	1.16	1.42	1.38	0.452	1.23	1.18	0.835
Gd	6.29	4.32	5.46	4.22	6.12	4.16	4.58	4.54	1.92	3.82	3.60	2.60
Tb	0.905	0.683	0.835	0.709	0.973	0.688	0.723	0.71	0.327	0.64	0.515	0.393
Dy	5.05	3.80	4.96	4.24	5.88	4.16	4.17	3.93	2.05	3.71	2.77	2.20
Ho	0.992	0.751	1.02	0.944	1.22	0.876	0.86	0.845	0.48	0.771	0.544	0.441
Er	2.44	1.97	2.71	2.54	3.40	2.43	2.17	2.10	1.40	2.10	1.48	1.14
Tm	0.335	0.273	0.354	0.354	0.482	0.35	0.31	0.293	0.201	0.32	0.218	0.162
Yb	2.11	1.60	2.11	2.34	3.21	2.20	1.87	1.82	1.34	2.12	1.38	1.02
Lu	0.312	0.244	0.295	0.351	0.486	0.342	0.276	0.278	0.215	0.324	0.199	0.138
Ta	1.18	0.417	0.46	0.366	0.56	0.368	0.465	0.439	0.108	0.237	0.502	0.272
Pb	8.12	4.40	6.31	5.60	4.63	4.00	3.65	4.01	12.49	9.12	6.69	8.61
Th	2.84	4.02	3.51	2.73	4.18	3.04	3.55	3.45	2.33	5.94	8.98	5.10
U	0.5	0.717	0.853	0.696	1.01	0.759	0.718	0.687	0.278	1.04	1.08	0.79

代表甜水海地块前寒武纪地质事件发生的时间,表明该地区可能存在古元古代结晶基底。研究区东北侧的布伦阔勒群火山岩中获得的 $2481 \pm 14\text{Ma}$ 和 $2016 \pm 39\text{Ma}$ 的年龄(计文化等, 2011);塔里木、柴达木、昆仑等地体有与华北相似的前寒武纪基底(李荣社等, 2008);华北克拉通分布大面积的 25 亿和 18 亿年的新太古代-古元古代基性火山岩(彭澎和翟明

国, 2002),前人的这些研究成果为本文的推断提供了坚实的科学基础。

5.2 主量元素特征

由表3可以看出,种羊场火山岩样品烧失量(LOI)变化范围较大,介于 1.31% ~ 8.07%,表明后期有不同程度的蚀

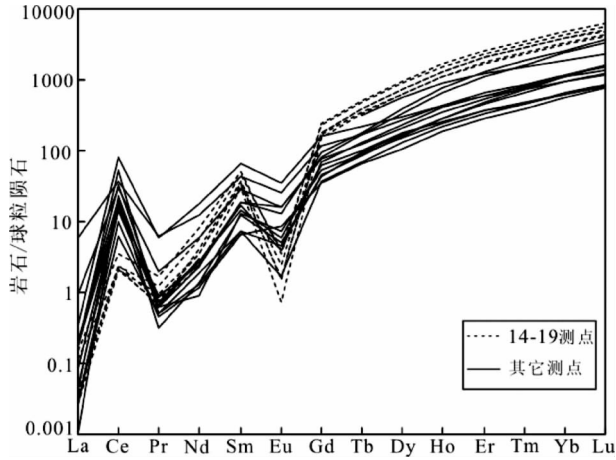


图4 种羊场流纹岩(样品 ZYCB05)锆石稀土元素球粒陨石标准化图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from rhyolite (Sample ZYCB05) in Zhongyangchang (normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

变。其中 ZYCB14 烧失量大(8.07%),可能存在物质的带入带出,某些地球化学特征分析时,不做讨论。岩石样品 SiO_2 含量主要变化于 44.89% ~ 54.36% 和 67.58% ~ 80.89% 之间,成分上显示出双峰式火山岩的特点,在划分蚀变、变质火山岩较为有效的 Nb/Y- SiO_2 图解(图 5a)中,样品主要位于玄武岩、玄武安山岩、流纹岩区,ZYC04 落入到碱性玄武岩区,其余样品均落入到亚碱性火山岩区。玄武质岩石(玄武岩、玄武安山岩) MgO (4.19% ~ 6.61%, 平均值为 5.46%)、 CaO (5.57% ~ 10.58%, 平均值为 7.62%)、 Al_2O_3 (12.23% ~ 14.87%, 平均值为 13.38%), $\text{Mg}^\#$ 值为 36 ~ 53,接近于板内玄武岩($\text{MgO} = 5.90\%$ 、 $\text{CaO} = 9.70\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.30\%$),与

大陆裂谷玄武岩成分也十分相近;在 AFM 图解(图 5b)中,显示出拉斑系列向钙碱系列过渡的特征; TiO_2 (1.15% ~ 3.11%, 平均值为 1.78%),基本落入到弧后盆地玄武岩的范围(TiO_2 0.70% ~ 2.0%),在 $\text{Ti/Y-Mg}^\#$ 图解(图 5c)中主要分布在低钛区域中。

流纹岩 SiO_2 含量高,为 78.01% ~ 80.89%; Na_2O 含量为 0.19% ~ 2.23% (平均值为 1.20%); K_2O 含量为 2.77% ~ 5.33% (平均值为 4.00%), $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 3.94% ~ 6.12%,具高碱的特征; A/CNK 为 0.51、0.99、1.63,整体显示低铝特征。岩石属于高硅高碱低铝钙碱性系列。

在种羊场火山岩哈克图解(图 6)中,玄武质岩石 SiO_2 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 P_2O_5 显示一定的负相关性; $\text{Mg}^\#$ 与 Ni 显示出正相关性(图略)。流纹岩在这些氧化物和元素对应关系中没有明显趋势,在 SiO_2 与 Na_2O 、 P_2O_5 表现出与玄武质岩石明显的相反的关系,流纹岩样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 比值明显较玄武质岩石高的多,而亲石元素 Sr 在玄武质火山岩中含量明显高于流纹岩,反映了两者源区性质不同,并非同源岩浆连续演化的产物。

5.3 微量元素特征

玄武质岩石 ΣREE 含量为 95.90×10^{-6} ~ 160.0×10^{-6} , LREE/HREE 比值介于 5.11 ~ 7.66 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 5.06 ~ 9.84, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 2.43 ~ 2.84,轻重稀土分异明显。稀土配分模式为右倾平滑曲线(图 7a),介于洋岛玄武岩(OIB)和富集地幔(E-MORB)之间,与 OIB 配分模式较为相似,表现为轻稀土元素富集型。 δEu 值介于 0.83 ~ 1.17,显示轻微的 Eu 负异常。玄武质岩石的原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 7c)整体与 OIB 和 E-MORB 比较相似。玄武质岩石富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素,Zr、Hf、Ti 轻微富集,具有 Pb 的明显正异常,高场强元素 Nb、Ta 相对亏损,但绝对含

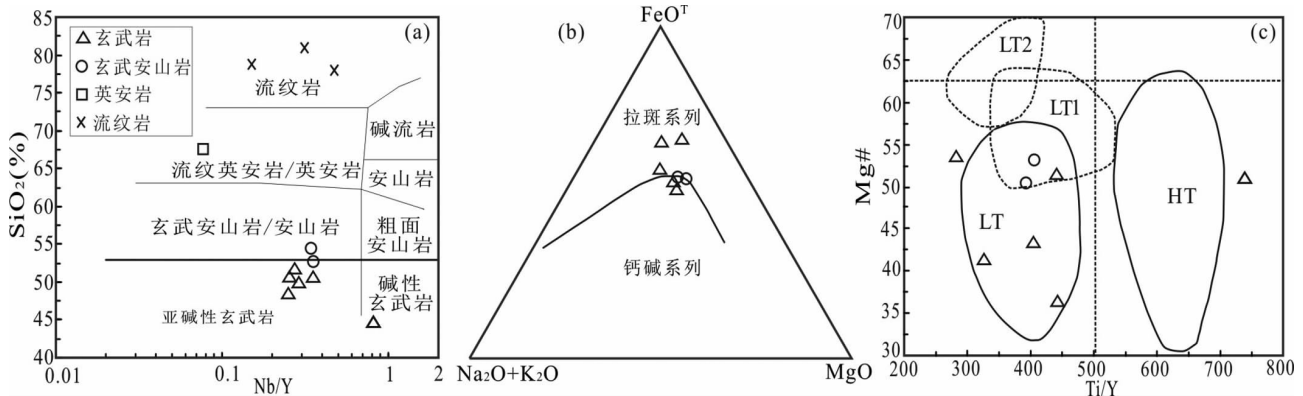


图5 种羊场火山岩地球化学特征

(a) Nb/Y vs. SiO_2 图解(Winchester and Floyd, 1977); (b) FAM 图解(Irvine and Baragar, 1971); (c) Ti/Y vs. $\text{Mg}^\#$ 图解(Lai *et al.*, 2012)

Fig. 5 Petrochemical characteristics of volcanic rocks in Zhongyangchang

(a) Nb/Y vs. SiO_2 diagram (Winchester and Floyd, 1977); (b) FAM diagram (Irvine and Baragar, 1971); (c) Ti/Y vs. $\text{Mg}^\#$ diagram (Lai *et al.*, 2012)

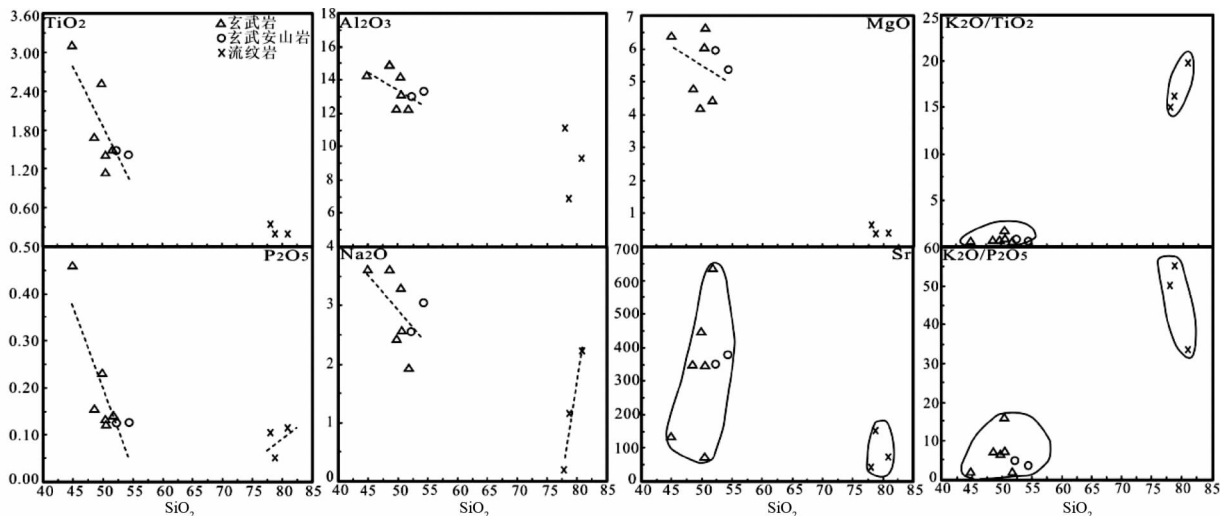


图6 种羊场火山岩哈克图解

Fig. 6 Harker diagram of volcanic rocks in Zhongyangchang

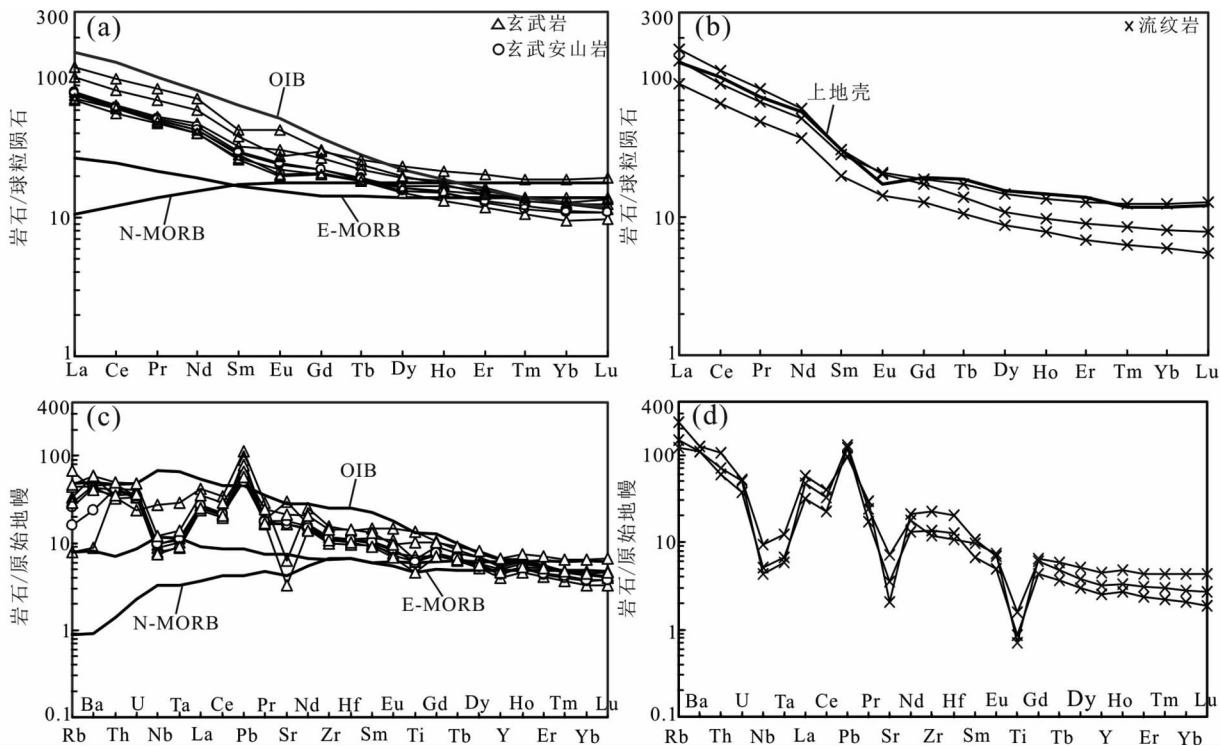


图7 种羊场火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a,b)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(c,d)

标准化值、N-MORB、E-MORB、OIB 数值据 Sun and McDonough, 1989; 上地壳数值据 Gao *et al.*, 2004

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a, b) and primitive mantle-normalized trace element patterns (c, d) of volcanic rocks in Zhongyangchang

Normalizing values, N-MORB, E-MORB, OIB compositions after Sun and McDonough, 1989; upper crust compositions after Gao *et al.*, 2004

量并不低,样品 ZYC04 较为接近 OIB,其他玄武质岩石的 Nb、Ta 含量较为接近富集地幔。

流纹岩 ΣREE 含量为 $96.20 \times 10^{-6} \sim 162.0 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值介于 9.08 ~ 14.1 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 10.8

~ 20.3 , $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 4.65 ~ 5.32, 岩石轻/重稀土分馏强烈, 在球粒陨石标准化 REE 配分曲线 (图 7b) 显示右倾特征, 轻稀土强烈富集, δEu 值介于 0.87 ~ 0.93, 显示 Eu 负异常, 与上地壳配分模式较为一致。流纹岩 (图 7d) 相对玄武岩质岩

石更加富集 Rb、Ba 等元素,强烈亏损 Nb、Ta、Ti、Sr 等元素。

上述地球化学特征的差异说明流纹岩并非基性岩浆演化的最终产物,有可能是地壳部分熔融的产物。

6 构造环境讨论

双峰式火山岩是一组时空上紧密伴生的、SiO₂ 含量集中分布在两个区间、其间存在一定成分间断的火山岩系(王焰等, 2000),可以形成在大陆裂谷(Wilson, 1989)、洋内岛弧(Brouxel *et al.*, 1987)、活动大陆边缘(Pin and Paquette, 1997)以及弧后盆地(Hinjo and Kato, 2000)。据前文所述,种羊场火山岩成分上具双峰式火山岩特征,玄武质岩石高 Ti ($5941 \times 10^{-6} \sim 17533 \times 10^{-6}$)、Zr ($112 \times 10^{-6} \sim 176 \times 10^{-6}$)、V ($239 \times 10^{-6} \sim 517 \times 10^{-6}$)、Sc ($25.1 \times 10^{-6} \sim 42 \times 10^{-6}$) 和 Y ($18.0 \times 10^{-6} \sim 29.9 \times 10^{-6}$) 含量(表 3),较高的 Ti/Sc (167 ~ 557) 和 Ti/V (24.9 ~ 51.7),显示弧后盆地(边缘盆地)火山岩的特征(Hollings and Kerrich, 2000)。与典型陆缘弧后盆地的 Okinawa 玄武岩(OTB)(Shinjo *et al.*, 1999; Shinjo and Kato, 2000)和弧-弧后盆地拉张形成的 Brich-Uchi 绿岩带玄武岩(BUB)(Hollings and Kerrich, 2000)微量元素特征具有一定的相似性,在可以区分地幔源区的 Nb/Yb-Ta/Yb、Nb/Yb-La/Yb、Nb/Yb-Th/Yb 图解中(图 8a-c)(Pearce and Peate, 1995),种羊场玄武质岩石显示出与 OTB 和 BUB 的相似性。样品 ZYC04 投影点与 OIB 非常接近,其他玄武质岩石则落到 E-MORB 的附近,但是相比 OIB ($Ce/Pb = 25$ 、 $(Nb/Th)_{PM} = 1.43$ 、 $(Nb/La)_{PM} = 1.25$) 和 E-MORB ($Ce/Pb = 25$ 、 $(Nb/Th)_{PM} = 1.65$ 、 $(Nb/La)_{PM} = 1.27$),具有较低的 Ce/Pb (6.19 ~ 11)、 $(Nb/Th)_{PM}$ (0.21 ~ 0.82)、 $(Nb/La)_{PM}$ (0.30 ~ 0.65),所以种羊场火山岩并不是真正的 E-MORB(OIB),只是具有其特征,产出的环境并不相同,前者往往产出在大陆边缘而不是大洋里面(Xu *et al.*, 2003; Cole *et al.*, 2006; Castillo, 2008; Tian *et al.*, 2010)。在 Hf/3-Th-Ta 图解(图 8d)上,投点落在火山弧玄武岩(CAB)区,但与典型的岛弧玄武岩($Ti/V < 20$; $Zr/Y < 3$; $25 < Zr/Nb < 70$)相比,种羊场玄武岩的 Ti/V (24.9 ~ 51.7), Zr/Y (4.94 ~ 7.42), Zr/Nb (9.05 ~ 22.6) 明显不同(Servais, 1982; 袁超等, 2005; 毛治国等, 2010)。在 $Ti/100-Zr-3Y$ 图解(图 8e)上落入板内玄武岩区内,在 $La/Nb-Ba-Ta$ 图解(图 8f)上,种羊场玄武质岩石都落入到弧后盆地玄武岩区内,在 $Nb/Yb-Th/Yb$ 图解(图 8c)上,样品投影到大陆弧内,而不是大洋弧内。在 $Ta/Hf-Th/Hf$ 图解(图 8g)上投点落入大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区。综上所述,种羊场玄武岩具有 E-MORB(OIB)、岛弧和板内拉张的混合特征,与 OTB 和 BUB(具有 MORB 和岛弧混合特征)(图 8d, e)有所差异,表明种羊场玄武质岩石的形成环境可能是较靠近陆壳的异常弧后扩张盆地,种羊场玄武岩拉斑系列、钙碱系列向碱性系列过渡也显示了大陆边缘盆地的火山岩特征。

石炭纪,西昆仑地区的裂解已经达到了一定规模,初步形成了坳垒相间的格局,大部分沉积物中都普遍夹有基性火山岩,西昆仑造山带北缘发育了泥盆纪-石炭纪陆缘弧后裂谷,出露早石炭世基性火山岩和晚石炭世中-酸性火山岩(孙海田等, 2003; 李荣社等, 2008),说明西昆仑地区在石炭纪时期处于陆内伸展环境,这也是种羊场火山岩可能产于盆地拉张环境的有力证据,研究区出露的志留纪复理石沉积建造和上石炭统海滩及滩后台地沉积相的碳酸盐夹碎屑岩和少量火山岩,其可能是奥陶纪晚期已经形成的弧后盆地(潘裕生等, 2000)再次拉张分裂形成的。由于没有出现真正的洋盆,可能是盆地拉张的早期阶段(洋盆转换阶段),就夭折了。

7 岩石成因讨论

双峰式火山岩中玄武岩源于地幔部分熔融争议不大,但是流纹岩却有有两种不同的成因机制,即同源玄武岩浆结晶分异产物,其中只有微量或根本没有陆壳物质的加入(Grove and Donnelly-Nolan, 1986)和地壳物质部分熔融的结果(Huppert and Sparks, 1988; Wilson, 1989)。前述岩石的主微量元素的差异表明种羊场玄武质岩石和流纹岩可能不是同源岩浆演化的产物。在蚀变过程中,高场强元素(如 Th、U、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti、Y 和 Yb 等)和稀土元素,具有弱的活动性。玄武质岩石 Ti/Y (282 ~ 738)、 Hf/Ta (3.65 ~ 8.61)、 Zr/Y (4.94 ~ 7.42)、 Zr/Nb (9.05 ~ 22.6)、 Th/Yb (1.17 ~ 2.51)、 La/Sm (3.76 ~ 4.40) 和流纹岩 Ti/Y (43.9 ~ 141)、 Hf/Ta (12.6 ~ 14.3)、 Zr/Y (6.39 ~ 17.7)、 Zr/Nb (37.6 ~ 42.6)、 Th/Yb (2.80 ~ 6.52)、 La/Sm (7.21 ~ 8.24) 的差异,也说明两者形成机制并不相同。

7.1 玄武质岩石成因

研究表明,稀土元素的丰度和比值可以被广泛地用于对幔源岩石源区特征及地幔熔融的程度限定(Johnson, 1998; Zhao and Zhou, 2007; Liu *et al.*, 2010)。用 Yb 标准化的 HFSE 比值可以消除或者减少部分熔融和高压分离结晶作用对元素含量产生的影响,从而得到岩浆源区的地球化学性质(Macdonald *et al.*, 2000; 徐学义等, 2009)。种羊场玄武岩的稀土元素以及某些微量元素特征(Zr/Hf 、 Nb/Ta 、 Th/Yb 、 Ta/Yb 、 La/Yb 和 Th/Yb) 与 E-MORB(OIB) 具有相似性,表明玄武质岩石源区可能类似 E-MORB(OIB) 源。在 $Sm-Sm/Yb$ 图解(图 9a)中,玄武质岩石 Sm/Yb 比值(1.76 ~ 3.12)较尖晶石二辉橄榄岩熔融曲线高,与石榴石+尖晶石二辉橄榄岩(50:50)熔融曲线相吻合。玄武质岩石具弱的 Eu 负异常到正异常、较低的 Y 和 Yb 含量,较高的 Sr 含量, La/Yb 值为 7.05 ~ 13.72, Dy/Yb 为 1.81 ~ 2.40 > 1.5, 表明源区深度较大且熔融程度不高(柴凤梅等, 2012)。对微量元素的模拟计算也表明种羊场玄武质岩石为部分熔融(5% ~ 20%)的产物(图 9a)。

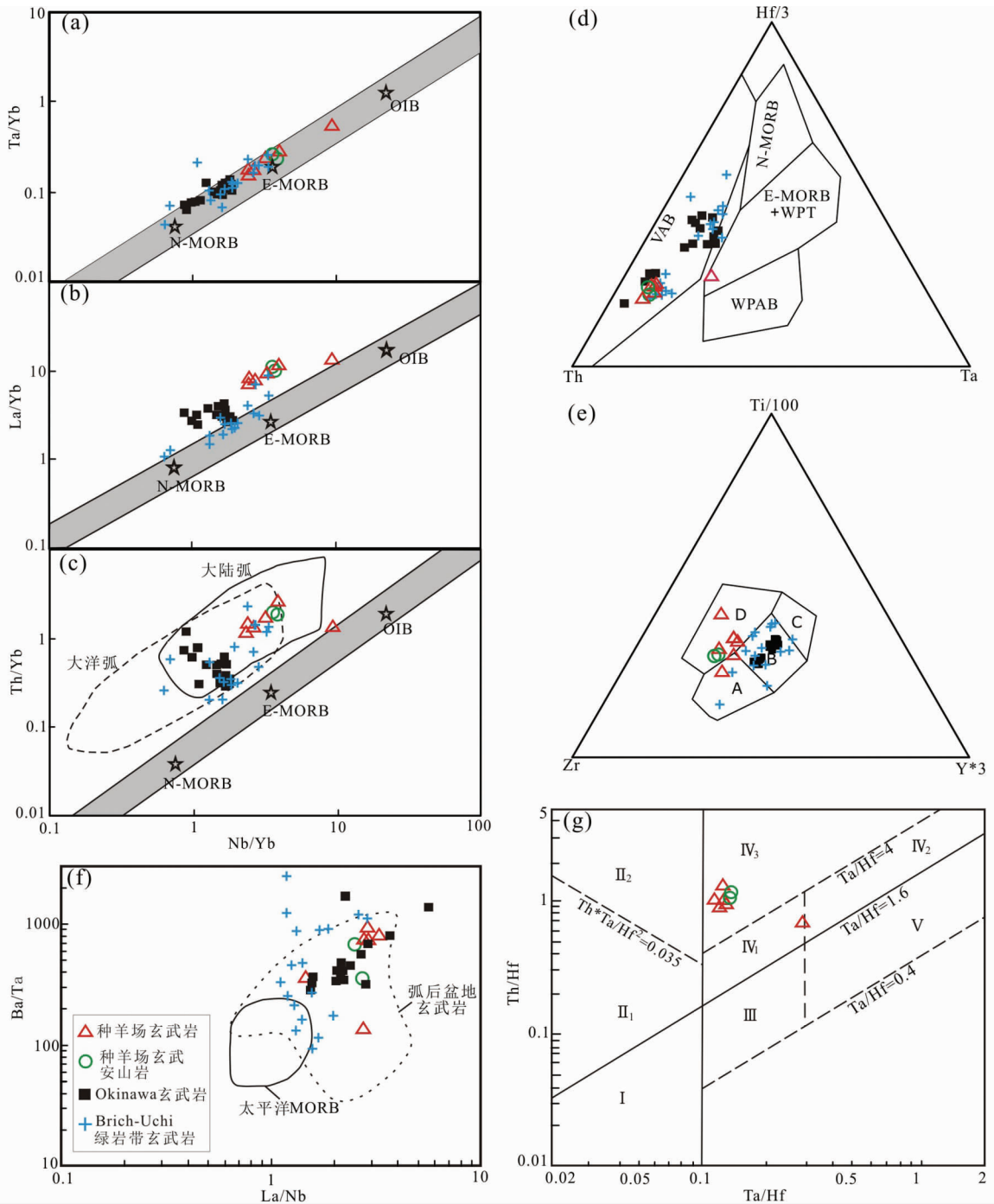


图 8 种羊场玄武质岩石构造判别图解

(a, b) 玄武质岩石 Nb/Yb-Ta/Yb、Nb/Yb-La/Yb 图解, 阴影区表示不同类型大洋玄武岩的变化范围 (N-MORB、E-MORB、OIB) 相应元素的变化范围 (标准值据 Sun and McDonough, 1989); (c) 玄武质岩石 Nb/Yb-Th/Yb 图解 (Xu *et al.*, 2003); (d) 玄武质岩石 Hf/3-Th-Ta 图解 (Wood, 1980); (e) 玄武质岩石 Ti/100-Zr-3Y 图解 (Meschede, 1986), A-CAB; B-MORB + VAB; C-IAT; D-WPB; (f) 玄武质岩石 La/Nb-Ba/Ta 图解 (Cole and Stewart, 2009); (g) 种羊场玄武质岩石 Ta/Hf-Th/Hf 图解 (汪云亮等, 2001)

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams of basaltic rocks in Zhongyangchang

(a, b) Nb/Yb vs. Ta/Yb diagram and Nb/Yb vs. La/Yb diagram of basaltic rocks, shaded regions indicate the rang of oceanic basalts (N-MORB, E-MORB and OIB) (normalizing values after Sun and McDonough, 1989); (c) Nb/Yb vs. Th/Yb diagram of basaltic rocks (Xu *et al.*, 2003); (d) Hf/3-Th-Ta diagram of basaltic rocks (Wood, 1980); (e) Ti/100-Zr-3Y diagram of basaltic rocks (Meschede, 1986), A-CAB; B-MORB + VAB; C-IAT; D-WPB; (f) La/Nb vs. Ba/Ta diagram of basaltic rocks (Cole and Stewart, 2009); (g) Ta/Hf vs. Th/Hf diagram of basaltic rocks in Zhongyangchang (Wang *et al.*, 2001)

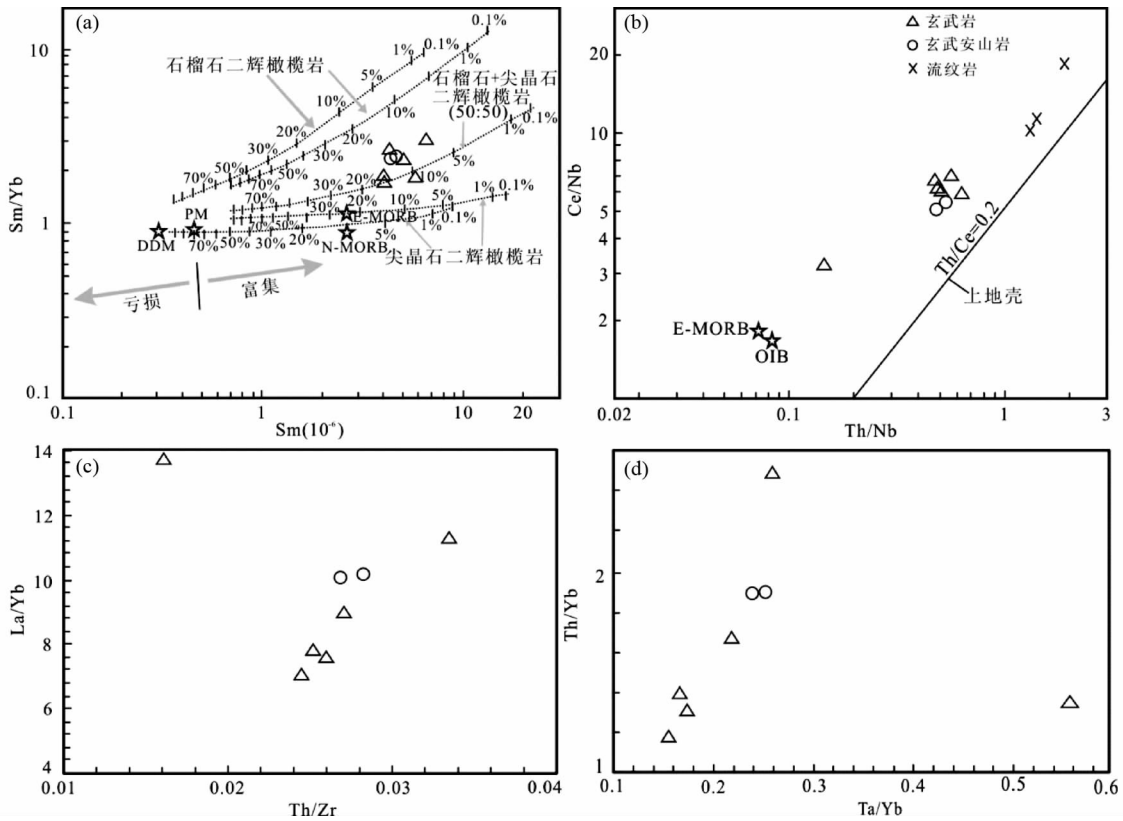


图9 种羊场火山岩成因图解

(a) 玄武质岩石 Sm-Sm/Yb 图解 (冯光英等, 2011), 熔融曲线为尖晶石二辉橄榄岩 (Kinzler, 1997) 和石榴子石二辉橄榄岩 (Walter, 1998); 矿物基质分配系数以及 DMM 引自 McKenzie and O' Nions, 1991; PM、N-MORB 和 E-MORB 数值据 (Sun and McDonough, 1989); 每条曲线上的数字对应于给定地幔源区的部分熔融程度; (b) 种羊场火山岩 Th/Nb-Ce/Nb 图解; (c、d) 玄武质岩石 Th/Zr-La/Yb、Ta/Yb-Th/Yb 图解

Fig. 9 Petrogenesis diagrams of basaltic rocks in Zhongyangchang

(a) Sm vs. Sm/Yb diagram of basaltic rocks (Feng *et al.*, 2011), melt curves are drawn for spinel-herzolite (Kinzler, 1997) and for garnet-herzolite (Walter, 1998); mineral/matrix partition coefficients and DMM are from the compilation of McKenzie and O' Nions, 1991; PM, N-MORB and E-MORB compositions are from Sun and McDonough, 1989; Tick marks on each curves correspond to degrees of partial melting for a given mantle source; (b) Th/Nb vs. Ce/Nb diagram of volcanic rocks in Zhongyangchang; (c, d) Th/Zr vs. La/Yb, Ta/Yb vs. Th/Yb diagram of basaltic rocks

种羊场玄武质岩石较低的 MgO (4.19% ~ 6.61%)、Mg[#] 值 (36 ~ 53)、Ni (37.9 × 10⁻⁶ ~ 123 × 10⁻⁶)、Cr (11.5 × 10⁻⁶ ~ 92.1 × 10⁻⁶) 含量; La/Sm 比值 (3.76 ~ 4.40) 随着 La 含量的增加而变化较弱, 这些特点表明其是原始岩浆经历了一定程度分异作用后的产物。SiO₂ 与 Al₂O₃ 和 MgO 的负相关、Mg[#] 与 Ni 的正相关、明显低于原生玄武岩浆 (Ni = 300 × 10⁻⁶ ~ 400 × 10⁻⁶, Cr = 300 × 10⁻⁶ ~ 500 × 10⁻⁶) (Hess, 1992) 的含量以及岩石中普遍存在的单斜辉石、角闪石以及少量橄榄石斑晶, 表明母岩浆经历了单斜辉石、角闪石和橄榄石的分离结晶作用; 同时源区岩浆还经历了少量的斜长石 (SiO₂ 与 Na₂O 负相关和弱的 Eu 负异常)、钛铁矿 (SiO₂ 与 TiO₂ 负相关) 和磷灰石 (SiO₂ 和 P₂O₅ 负相关) 分离结晶作用。

种羊场玄武质岩石强烈的大陆亲缘性, 可能是岩浆上升侵位过程中受到陆壳物质的同化混染作用。根据不会因结晶作用而改变、对同化混染作用又敏感的元素比值 (例如, Th/Yb、Ta/Yb、La/Yb、Zr/Yb、Th/Nb、Ce/Nb、Th/Zr 和 Zr/Nb

等) 之间的协变关系, 可以准确的判断是否存在混染现象 (Barker *et al.*, 1997; MacDonald *et al.*, 2001)。在 Th/Nb-Ce/Nb、Th/Zr-La/Yb 和 Ta/Yb-Th/Yb 相关图解 (图 9b-d) 中, 表现出明显正相关; 在图解 Th/Nb-Ce/Nb (图 9b) 中落入到 E-MORB (OIB) 与上地壳之间, 表明种羊场玄武质岩石形成过程中存在同化混染现象。

综上所述, 种羊场玄武质岩石源区为类似 E-MORB (OIB) 的地幔源区, 随着 LREE 的富集程度增大, 向更加类似 OIB 特征的方向靠近, 反映了其源区的富集。伴随地壳的拉伸减薄, 深部热的软流圈物质发生快速上涌, 上覆的岩石圈地幔发生减压部分熔融, 原始岩浆在上升过程中经历了一定程度的分离结晶和地壳混染作用, 由于玄武质岩浆的底侵作用, 使地壳加热而进一步发生部分熔融, 在地壳薄弱地带喷发基性岩浆。

7.2 流纹岩成因

地壳 (俯冲洋壳、镁铁质下地壳、长英质上地壳) 深融作

用可以形成流纹岩岩浆。种羊场流纹岩低 Sr、高 Y、贫 Al_2O_3 的特征与俯冲的洋壳部分熔融形成的高 Sr、低 Y、富 Al_2O_3 的埃达克岩 (Defant and Drummond, 1990) 特征明显不同。较低的 Nb/Ta (13.08 ~ 13.45) 排除了蚀变的硅质洋壳 (Nb/Ta > 17) (Ben Othman *et al.*, 1989)。高的 SiO_2 (78.01% ~ 80.89%) 和极低的 MgO (0.37% ~ 0.71%) 和 Fe_2O_3 (0.57% ~ 1.63%), 弱的负 Eu 异常, 不可能是幔源岩浆直接演化的产物, 也很难发生强烈的分离结晶作用 (耿新霞等, 2010), 但是其 $Mg^\#$ 值 (50 ~ 60) (未在表 3 中列出) 却高于大多玄武岩, 对于如此高硅的酸性岩, $Mg^\#$ 值也许不能作为其幔源特征的可靠依据, 如美国 Medicine 湖幔源玄武岩浆演化的流纹岩具有更低的 SiO_2 (68.2% ~ 70.4%)、更高的 MgO (0.30% ~ 1.54%) 和 Fe_2O_3 (1.87% ~ 3.51%) (Grove and Donnelly-Nolan, 1986); 又如新疆阿尔泰南缘康布铁堡组钾-钠质流纹岩 (地壳部分熔融的产物) $Mg^\#$ 值多分布在 62 ~ 74 之间 (单强等, 2012)。种羊场流纹岩高的 K_2O/TiO_2 (14.9 ~ 19.8)、 K_2O/P_2O_5 (33.4 ~ 55.2)、 Al_2O_3/TiO_2 比值 (31.2 ~ 47.5), 表现了壳源岩浆的亲缘性 (Condie, 1986; 刘树文等, 2013); 明显富集 Rb、Ba、K、Th、U、轻稀土元素和高场强元素 Zr、Hf, 低的 Cr、Ni、Co 含量, 强烈亏损 Nb、Ta、Ti、Sr、P 等元素; Nb/Ta 比值在 13.08 ~ 13.45, 与大陆地壳值相近 (Nb/Ta = 12 ~ 13); K/Rb 值为 296.02 ~ 341.25, 接近于上地壳平均值 283 (Gao *et al.*, 2004); 较低的 Ti/Zr 比值 (6.86 ~ 7.94) 和 Nb/Y (0.15 ~ 0.471); 与上地壳吻合的球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线, 都说明流纹岩的原始岩浆来源于上地壳。在 Th/Nb-Ce/Nb 图解中, 落入到上地壳 Th/Ce = 0.2 的直线附近 (Kerrick *et al.*, 1999; 单强等, 2012), 这是种羊场流纹岩是上地壳部分熔融的产物的又一佐证。

8 地质意义

晚古生代以来, 西昆仑地区出现了小洋盆与微陆块相间的构造格局, 苏巴什-康西瓦-瓦恰缝合带以南到班公错-怒江缝合带以北地区为晚古生代裂谷进一步演化的洋盆, 其间夹持若干地块, 构成复杂的多岛洋盆, 即古特提斯洋 (计文化等, 2004; 李荣社等, 2008)。青藏高原演化过程中, 古特提斯洋自早石炭世打开, 早二叠世扩张到最大规模后开始俯冲消减, 逐渐缩小 (莫宣学和潘桂棠, 2006)。石炭纪-二叠纪形成的昆北活动陆缘裂谷盆地和大量双峰式火山岩 (李荣社等, 2008; 计文化等, 2009)。苏巴什和西乌金兰湖北岸弧后盆地蛇绿岩 (潘裕生等, 2000; 计文化等, 2004) 以及阿然保泰二叠纪 OIB 型玄武岩 (任广利等, 2010) 的发现为该阶段喀喇昆仑-甜水海区古特提斯演化提供了一定的依据。原特提斯洋俯冲过程中, 其弧后盆地可能开始于奥陶纪, 并发生破裂, 甜水海地体上奥陶-志留系的复理石沉积, 或许代表了其早期破裂的产物, 早古生代末期大陆碰撞造山, 昆仑山成陆, 由汇聚挤压环境开始向陆内伸展环境转变, 石炭纪早期,

塔什库尔干-甜水海地体原弧后盆地再次扩张, 下沉, 沿多条破裂带拉开成洋, 因此没有形成统一的大洋地壳盆地, 而是在洋盆中保留了许多陆壳或者岛链 (潘裕生等, 2000), 上石炭统恰提尔群海滩及滩后台地沉积相的碳酸岩夹碎屑岩和少量火山岩说明该时期已经进入了海相沉积阶段。石炭纪晚期-二叠纪古特提斯洋不断的扩张, 开始向南 (沿乔尔天山-红山湖缝合带)、向北 (沿苏巴什-康西瓦-瓦恰缝合带) 开始消减收缩。

古特提斯洋扩张规模从东往西呈收敛趋势, 由发育较完整蛇绿岩组合的有限洋盆, 转变为陆间裂谷至大陆边缘裂谷, 蛇绿岩组合逐渐消失, 火成岩逐渐变为裂谷型双峰式火山岩 (赖绍聪和刘池阳, 1999)。种羊场一带石炭纪早期火山岩的发现, 可能代表了塔古特提洋西端早期扩张的记录, 为西昆仑-喀喇昆仑地区晚古生代多岛洋格局提供了新的证据。

9 结论

(1) 种羊场火山岩是一套互层产出的玄武岩-玄武安山岩-流纹岩组合, 具双峰式火山岩特征, 其中流纹岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄测定得出三组年龄, 343.5 ± 4.1 Ma 代表了火山岩的形成年龄, 2439 ± 26 Ma 和 1988 ± 36 Ma 说明了甜水海地区可能存在前寒武纪结晶基底。

(2) 种羊场玄武质和流纹质岩石地球化学特征的差异表明它们不是同源岩浆演化的产物。玄武质岩石呈现出 E-MORB (OIB)、板内拉张和岛弧的混合特征, 可能是异常陆缘弧后盆地拉张裂解的产物。源区为类似 E-MORB (OIB) 的岩石圈地幔, 形成机制是深部热的软流圈物质发生快速上涌致使上覆的岩石圈地幔发生减压部分熔融, 并经历了分离结晶和地壳混染作用。流纹岩属于高硅高碱的钙碱性火山, 是地幔物质底侵作用使地壳加热部分熔融形成的产物。

(3) 种羊场石炭纪火山岩的发现, 可能代表了古特提洋西端早期扩张的记录, 为西昆仑-喀喇昆仑地区晚古生代多岛洋格局提供了新的证据。

致谢 感谢肖文交研究员及另外一名匿名审稿专家对本文提出建设性修改意见! 感谢牛贺才研究员、许继峰研究员和王焰研究员在论文修改过程中进行了悉心指导! 感谢编辑部对完善本文提出宝贵意见! 野外工作得到国家 305 项目办公室、新疆塔什库尔干县县委及国土资源局的支持。在此一并表示感谢。

References

- Baker JA, Menzies MA, Thirlwall MF and MacPherson CG. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a Yemen: Implications for plume-lithosphere interaction and polybaric melt hybridization. *Journal of Petrology*, 38(10): 1359 - 1390

- Ben Othman D, White WM and Patchett J. 1989. The geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis, and crust-mantle recycling. *Earth and Planetary Science Letters*, 94(1-2): 1-21
- Brouxel M, Lapiere H, Michard A and Albrède F. 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: Geochemistry of the Copley-Balaklala series, northern California. *Earth and Planetary Science Letters*, 85(4): 386-400
- Castillo PR. 2008. Origin of the adakite-high-Nb basalt association and its implications for postsubduction magmatism in Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 120(3-4): 451-462
- Chai FM, Yang FQ, Liu F, Geng XX, Lü SJ, Jiang LP, Zang M and Chen B. 2012. Geochronology and genesis of volcanic rocks in Beitashan Formation at the northern margin of the Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2183-2198 (in Chinese with English abstract)
- Cole RB, Nelson SW, Layer PW and Oswald PJ. 2006. Eocene volcanism above a depleted mantle slab window in southern Alaska. *Geological Society of America Bulletin*, 118(1-2): 140-158
- Cole RB and Stewart BW. 2009. Continental margin volcanism at sites of spreading ridge subduction: Examples from southern Alaska and western California. *Tectonophysics*, 464(1-4): 118-136
- Condie KC. 1986. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic supercrustal rocks in the southwestern United States. *Journal of Geology*, 94: 845-864
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665
- Deng WM. 1995. Geological features of ophiolite and tectonic significance in the Karakorum-West Kunlun Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 11(Suppl.): 98-111 (in Chinese with English abstract)
- Ding DG, Liu WX, Wang DX and Sun SQ. 1998. Early Permian back arc basin in the Karakorum Mountains. *Regional geology of China*, 17(1): 74-79, 93 (in Chinese with English abstract)
- Dong LH, Zhu ZX, Qu X, Wang KZ and Zhao TY. 2010. Spatial distribution, geological features and latest research progress of the main ophiolite zones in Xinjiang, NW-China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2894-2904 (in Chinese with English abstract)
- Fang AM, Li JL, Liu XH, Hou QL, Lee IJ, Xiao WJ, Yu LJ and Zhou H. 2003. Tectonic settings of the basic igneous rocks in the Kudi ophiolite zone of West Kunlun Mountains, Xinjiang Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 409-417 (in Chinese with English abstract)
- Feng GY, Liu S, Feng CX, Jia DC, Zhong H, Yu XF, Qi YQ and Wang T. 2011. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and the petrogenesis of the ultramafic pluton in Hongqingling, Jiling Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1594-1606 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(7019): 892-897
- Gao XY and Zheng YF. 2011. On the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon geothermometers. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 417-432 (in Chinese with English abstract)
- Geng XX, Chai FM, Yang FQ, Zuo WZ, Guo ZL, Liu F and Zhang ZX. 2010. Geochronology and genesis of the bimodal volcanic rocks in Dalawuzi from the southern margin of Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2967-2980 (in Chinese with English abstract)
- Grove TL and Donnelly-Nolan JM. 1986. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake Volcano, California: Implications for the origin of compositional gaps in calc-alkaline series lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(3): 281-302
- Hess PC. 1992. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalts. In: Morgan JP, Blackman DK and Sinton JM (eds.). *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges*. Washington, DC: American Geophysical Union, 71: 67-67
- Hollings P and Kerrich R. 2000. An Archean arc basalt-Nb-enriched basalt-adakite association: The 2.7 Ga Confederation assemblage of the Birch-Uchi greenstone belt, Superior Province. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(2): 208-226
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62
- Huppert HE and Sparks RSJ. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *Journal of Petrology*, 29(3): 599-624
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523-548
- Ji WH, Han FL, Wang JC and Zhang JL. 2004. Composition and geochemistry of the Subashi ophiolitic mélange in the West Kunlun and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1196-1201 (in Chinese with English abstract)
- Ji WH, Chen SJ, Li RS, He SP, Zhao ZM and Wang C. 2009. Geological feature of copper mineralization and its ore-prospecting significance in Kungai Mountains, west Kunlun, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1361-1367 (in Chinese with English abstract)
- Ji WH, Li RS, Chen SJ, He SP, Zhao ZM, Bian XW, Zhu HP, Cui JG and Ren JG. 2011. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and its geological significance. *Science China (Earth Sciences)*, 54(1): 61-72
- Johnson KTM. 1998. Experimental determination of partition coefficients for rare earth and high-field-strength elements between clinopyroxene, garnet, and basaltic melt at high pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133(1-2): 60-68
- Kerrich R, Polat A, Wyman D and Hollings P. 1999. Trace element systematics of Mg-, to Fe-tholeiitic basalt suites of the Superior Province: Implications for Archean mantle reservoirs and greenstone belt genesis. *Lithos*, 46(1): 163-187
- Kinzel RJ. 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid-ocean ridge basalt petrogenesis. *Journal of Geophysical Research*, 102(B1): 853-874
- Lai SC and Liu CY. 1999. Discussion on the tectonic setting during Indo-China epoch of the Lazhulong-Xijiuwulan-Yushu suture zone, on north margin of Qiangtang. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 29(1): 59-62 (in Chinese with English abstract)
- Lai SC, Qin JF, Li YF, Li SZ and Santosh M. 2012. Permian high Ti/Y basalts from the eastern part of the Emeishan Large Igneous Province, southwestern China: Petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 216-230
- Li RS, Ji WH, Yang YC *et al.* 2008. *Geology of Kunlun Mountains and Adjacent Areas*. Beijing: Geological Publishing House, 1-389 (in Chinese)
- Liu SW, Yang PT, Wang ZQ, Luo P, Wang YQ, Luo GH, Wang W and Guo BR. 2013. LA-ICPMS zircon U-Pb ages and geochemistry of Neoproterozoic low-grade metavolcanic rocks in Wuyuan-Dexing area of northeastern Jianxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 581-593 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Gao S, Hu ZH, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-north China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571
- Ludwig K. 2001. *Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49)*: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 1A: 1-55
- MacDonald JM, Goodenough KM, Wheeler J, Crowley Q, Harley SL, Mariani E and Tatham D. 2015. Temperature-time evolution of the Assynt Terrane of the Lewisian Gneiss Complex of Northwest Scotland from zircon U-Pb dating and Ti thermometry. *Precambrian Research*,

260; 55-75

- Macdonald R, Hawkesworth CJ and Heath E. 2000. The Lesser Antilles volcanic chain: A study in arc magmatism. *Earth-Science Reviews*, 49(1-4): 1-76
- Macdonald R, Rogers NW, Fitton JG, Black S and Smith M. 2001. Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift, East Africa. *Journal of Petrology*, 42(5): 877-900
- Mckenzie D and O' nions RK. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32(5): 1021-1091
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56(3-4): 207-218
- Mo XX and Pan GT. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: Constrained by tectono-magmatic events. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 43-51 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Zhu DC, Wang LQ, Liao ZL, Geng QR and Jiang XS. 2004. Bangong Lake-Nu River suture zone-the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 371-382 (in Chinese with English abstract)
- Pan YS, Wen SX, Sun DL *et al.* 2000. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains. Beijing: Science Press, 1-523 (in Chinese)
- Pearce JA and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251-286
- Peng P and Zhai MG. 2002. Two major Precambrian geological events of North China Block (NCB): Characteristics and property. *Advance in Earth Sciences*, 17(6): 818-825 (in Chinese with English abstract)
- Pin C and Paquette JL. 1997. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian Belt; Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the Late Devonian Brévenne metavolcanics, Massif Central (France). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 129(2-3): 222-238
- Qiao HZ, Yin CQ, Li QL, He XL, Qian JH and Li WJ. 2016. Application of the revised Ti-in-zircon thermometer and SIMS zircon U-Pb dating of high-pressure pelitic granulites from the Qianlishan-Helanshan complex of the Khondalite Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 276: 1-13
- Qu JF. 2007. The petrologic study of high-pressure granulites and mafic volcanic rocks and their tectonic implication in Tashkorgan, Western Kunlun. Ph. D. Dissertation. Beijing: Peking University, 1-101 (in Chinese)
- Ren GL, Wang H, Liu JP, Wu YF, Fu WW and Huang CY. 2010. Geochemistry and tectonic significance of Permian OIB-type basalts from Aranbaotai in Karakorum Mts., Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3085-3094 (in Chinese with English abstract)
- Sengör AMC and Natal' in BA. 1996. Paleotectonics of Asia; Fragments of synthesis. In: Yin A and Harrison M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 486-640
- Shan Q, Zeng QS, Li NB, Yang WB, Luo Y, Jiang YH and Yu XY. 2012. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the potassic and sodic rhyolites of the Kangbutiebao Formation in the southern margin of Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2132-2144 (in Chinese with English abstract)
- Shervais JW. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 101-118
- Shinjo R, Chung SL, Kato Y and Kimura M. 1999. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin. *Journal of Geophysical Research*, 104(B5): 10591-10608
- Shinjo R and Kato Y. 2000. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin. *Lithos*, 54(3-4): 117-137
- Song GX, Qin KZ, Liu TB, Li GM and Shen P. 2010. The U-Pb ages, Hf isotope and REE patterns of older zircons from Devonian volcanic rocks in Ashele basin on the southern margin of Altai orogen and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2946-2958 (in Chinese with English abstract)
- Sun HT, Li CJ, Wu H *et al.* 2003. Introduction on West Kunlun Metallogenic Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-255 (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Tian W, Campbell IH, Allen CM, Guan P, Pan WQ, Chen MM, Yu HJ and Zhu WP. 2010. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from Northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(3): 407-425
- Walter MJ. 1998. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere. *Journal of Petrology*, 39(1): 29-60
- Wang JP. 2008. Geological features and tectonic significance of melange zone in the Taxkorgan area, West Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2057-2066 (in Chinese with English abstract)
- Wang YL, Zhang CJ and Xiu SZ. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413-421 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Harrison TM. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841-844
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman, 1-466
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11-30
- Xiao WJ, Windley B, Hao J and Li JL. 2002. Arc-ophiolite obduction in the Western Kunlun Range (China): Implications for the Palaeozoic evolution of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 159(5): 517-528
- Xiao WJ, Zhou H, Windley BF, Yuan C, Chen HL, Zhang GC, Fang AM and Li JL. 2003. Structures and evolution of the multiple accretionary complexes, Western Kunlun orogenic belt (China). *Xinjiang Geology*, 21(1): 31-36 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li JL, Qin KZ and Wang ZH. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: Implications for the growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339-342
- Xu JF, Castillo PR, Chen FR, Niu HC, Yu XY and Zhen ZP. 2003. Geochemistry of Late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, Northwest China: Implications for backarc mantle evolution. *Chemical Geology*, 193(1-2): 137-154
- Xu XY, Chen JL, Li XM, Ma ZP, Wang HL, Li P and Li T. 2009. Geochemical constrains on the petrogenesis and tectonic setting discrimination of volcanic rocks from the Baimianxia and the Sanwan formations. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1703-1718 (in Chinese with English abstract)
- Yuan C, Sun M, Yang JS, Zhou H and Zhou MF. 2005. Akaz greenschist, West Kunlun: Within-plate basalt contaminated by continental crust origin of the Akaz greenschist (metabasalt), West Kunlun: Accreted seamount or continental rift basalt? *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 65-76 (in Chinese with English abstract)

- Zhang CL, Lu SN, Yu HF and Ye HM. 2007. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Science in China (Series D)*, 50(6): 825–835
- Zhao JH and Zhou MF. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research*, 152(1–2): 27–47

附中文参考文献

- 柴凤梅, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 藏梅, 陈斌. 2012. 新疆准噶尔北缘北塔山组火山岩年龄及岩石成因. *岩石学报*, 28(7): 2183–2198
- 邓万明. 1995. 喀喇昆仑-西昆仑地区蛇绿岩的地质特征及其大地构造意义. *岩石学报*, 11(增刊): 98–111
- 丁道桂, 刘伟新, 王道轩, 孙世群. 1998. 喀喇昆仑地区早二叠世弧后盆地. *中国区域地质*, 17(1): 74–79, 93
- 董连慧, 朱志新, 屈迅, 王克卓, 赵同阳. 2010. 新疆蛇绿岩带的分布、特征及研究新进展. *岩石学报*, 26(10): 2894–2904
- 方爱民, 李继亮, 刘小汉, 侯泉林, Lee IJ, 肖文交, 俞良军, 周辉. 2003. 新疆西昆仑库地混杂带中基性火山岩构造环境分析. *岩石学报*, 19(3): 409–417
- 冯光英, 刘葵, 冯彩霞, 贾大成, 钟宏, 于晓飞, 齐有强, 王涛. 2011. 吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因. *岩石学报*, 27(6): 1594–1606
- 高晓英, 郑永飞. 2011. 金红石 Zr 和锆石 Ti 含量地质温度计. *岩石学报*, 27(2): 417–432
- 耿新霞, 柴凤梅, 杨富全, 左文喆, 郭正林, 刘锋, 张志欣. 2010. 新疆阿尔泰山南缘达拉乌兹双峰式火山岩年龄及岩石成因. *岩石学报*, 26(10): 2967–2980
- 计文化, 韩芳林, 王炬川, 张俊量. 2004. 西昆仑于田南部苏巴什蛇绿混杂岩的组成、地球化学特征及地质意义. *地质通报*, 23(12): 1196–1201
- 计文化, 陈守建, 李荣社, 何世平, 赵振明, 王超. 2009. 西昆仑昆盖山北坡铜矿化点的地质特征及其找矿意义. *地质通报*, 28(9): 1361–1367
- 计文化, 李荣社, 陈守建, 何世平, 赵振明, 边小卫, 朱海平, 崔继岗, 任绢刚. 2011. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义. *中国科学(地球科学)*, 41(9): 1268–1280
- 赖绍聪, 刘池阳. 1999. 羌塘地块北界拉竹龙-西金乌兰-玉树结合带印支期构造环境探讨. *西北大学学报(自然科学版)*, 29(1): 59–62
- 李荣社, 计文化, 杨永成等. 2008. 昆仑山及邻区地质. 北京: 地质出版社, 1–389

- 刘树文, 杨朋涛, 王宗起, 罗平, 王永庆, 罗国辉, 王伟, 郭博然. 2013. 赣东北婺源-德兴地区新元古代浅变质火山岩的地球化学和锆石 U-Pb 年龄. *岩石学报*, 29(2): 581–593
- 莫宣学, 潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束. *地质前缘*, 13(6): 43–51
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 廖忠礼, 耿全如, 江新胜. 2004. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据. *地质前缘*, 11(4): 371–382
- 潘裕生, 文世宣, 孙东立等. 2000. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社, 1–523
- 彭澎, 翟明国. 2002. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质. *地球科学进展*, 17(6): 818–825
- 曲军峰. 2007. 西昆仑塔什库勒干地区高压麻粒岩和基性火山岩岩石学研究及其大地构造意义. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 1–101
- 任广利, 王核, 刘建平, 吴玉峰, 付王伟, 黄朝阳. 2010. 新疆喀喇昆仑阿然保泰二叠纪 OIB 型玄武岩地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(10): 3085–3094
- 单强, 曾乔松, 李宁波, 杨武斌, 罗勇, 姜玉航, 于学元. 2012. 新疆阿尔泰山南缘康布铁堡组钾-钠质流纹岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学. *岩石学报*, 28(7): 2132–2144
- 宋国学, 秦克章, 刘铁兵, 李光明, 申萍. 2010. 阿尔泰山南缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的 U-Pb 年龄、Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(10): 2946–2958
- 孙海田, 李纯杰, 吴海等. 2003. 西昆仑金属成矿省概论. 北京: 地质出版社, 1–255
- 王建平. 2008. 西昆仑塔什库勒干混杂岩的地质特征及其大地构造意义. *地质通报*, 27(12): 2057–2066
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. *岩石学报*, 17(3): 413–421
- 肖文交, 周辉, Windley BF, 袁超, 陈汉林, 张国成, 方爱民, 李继亮. 2003. 西昆仑造山带复式增生楔的构造特征与演化. *新疆地质*, 21(1): 31–36
- 徐学义, 陈隽璐, 李向民, 马中平, 王洪亮, 李平, 李婷. 2009. 扬子地台北缘白勉峡组和三湾组火山岩形成构造环境及岩石成因的地球化学约束. *地质学报*, 83(11): 1703–1718
- 袁超, 孙敏, 杨经绥, 周辉, 周美夫. 2005. 西昆仑阿卡孜达坂绿片岩: 受大陆地壳混染的板内玄武岩. *岩石学报*, 21(1): 65–76
- 张传林, 陆松年, 于海锋, 叶海敏. 2007. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据. *中国科学(D辑)*, 37(2): 145–154