

doi:10.3799/dqkx.2017.073

# 东昆仑马尼特地区片麻状花岗闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造背景

赵菲菲, 孙丰月, 刘金龙

吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

**摘要:**为确定东昆仑马尼特地区片麻状花岗闪长岩的形成时代、源区性质和构造背景,对其进行了锆石 U-Pb 年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素研究。本次测试的片麻状花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS(laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry) U-Pb 加权平均年龄为  $495.6 \pm 1.1$  Ma(MSWD=0.13),属于晚寒武世。马尼特片麻状花岗闪长岩  $\text{SiO}_2$  含量为 61.47%~63.99%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{CaO}$  含量分别为 2.91%~3.64%、0.93%~2.31%和 4.29%~6.52%,全碱  $\text{ALK}=3.92\% \sim 5.69\%$ ,铝饱和指数  $\text{A/CNK}=0.83 \sim 0.97$ ,属准铝质钙碱性系列岩石。岩石具有富集大离子亲石元素(Rb、K)和不相容元素(Th、U),相对亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 高场强元素的特征,Nb/Ta、La/Nb、Th/Nb、Th/La 等比值显示出岩石具有壳源特征。岩石具有高的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(12.2~15.0),Hf 两阶段模式年龄在 506~662 Ma 范围内,其岩浆源区初始物质主要来源于新生地壳。岩石在微量元素 Rb-(Y+Nb)构造判别图落入火山弧花岗岩区域,在 R1-R2 构造判别图落入板块碰撞前消减区花岗岩区域。结合岩石成岩年龄、地球化学特征以及区域构造演化,推测其应形成于原特提斯洋俯冲的构造环境,属于大洋洋壳向南俯冲的产物,即柴达木地块和万宝沟大洋玄武岩高原之间的洋壳同时向南、北发生双向俯冲消减。

**关键词:**片麻状花岗闪长岩;地球化学;锆石 U-Pb 定年;年代学;马尼特地区;东昆仑。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2017)06-0927-14

收稿日期: 2016-11-02

## Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of the Gneissic Granodiorite in Manite Area from East Kunlun, with Implications for Geodynamic Setting

Zhao Feifei, Sun Fengyue, Liu Jinlong

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

**Abstract:** In order to determine the formation time, magma source, and tectonic setting of the gneissic granodiorite in Manite area, East Kunlun, zircon U-Pb dating, Hf isotope data and geochemistry of the gneissic granodiorite are studied in this paper. The chronology indicates that the magmatic zircon LA-ICP-MS (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry) U-Pb weighted mean age of the Manite gneissic granodiorite in the East Kunlun is  $495.6 \pm 1.1$  Ma (MSWD=0.13), belonging to the Late Cambrian. The gneissic granodiorites have  $\text{SiO}_2$  of 61.47%–63.99%,  $\text{Na}_2\text{O}$  of 2.91%–3.64%,  $\text{K}_2\text{O}$  of 0.93%–2.31%,  $\text{CaO}$  of 4.29%–6.52%,  $\text{ALK}$  of 3.92%–5.69% and  $\text{A/CNK}=0.83 \sim 0.97$ . Chemically, they are metaluminous and belong to calc-alkaline rock series. The gneissic granodiorite is characterized by the enrichment of LILEs (Rb and K) and incompatible elements(Th and U), and depletion of HFSEs(Nb, Ta, Zr and Ti). The ratios of Nb/Ta, La/Nb, Th/Nb and Th/La show crustal characteristics. The  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of zircons from the gneissic granodiorite range from 12.2–15.0, their Hf two-stage model ages vary from 506 to 662 Ma. The initial materials are mainly derived from the juvenile crust. The gneissic granodiorite falls into the volcano arc granite area with the determination of trace elements in Rb-(Y+Nb) tectonic discrimination diagram and falls into the zone of pre-plate collision with the characteristics of active continental margin before the collision. Combined with the geochronological data, geochemical characteristics and the regional tectonic evolution, it is concluded

**基金项目:**中国地质调查局地质大调查项目(No.12120111086020)。

**作者简介:**赵菲菲(1982-),男,博士研究生,主要从事矿床学研究,ORCID:0000-0003-4133-6718,E-mail:terry\_xp@163.com

\* **通讯作者:**孙丰月,E-mail:sfy@jlu.edu.cn

**引用格式:**赵菲菲,孙丰月,刘金龙,2017.东昆仑马尼特地区片麻状花岗闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造背景.地球科学,42(6): 927-940.

that the gneissic granodiorite in the Manite area was formed in the environment of Proto-Tethys Ocean crust subduction, presumably it belongs to the southward subduction of oceanic crust. The crust between the Qaidam massif and Wanbaogou oceanic plateau occurred bidirectional subduction to the south and the north.

**Key words:** gneissic granodiorite; geochemistry; zircon U-Pb dating; geochronology; Manite area; East Kunlun.

东昆仑造山带位于柴达木盆地南缘,隶属于中国大陆中央造山带西段(姜春发等,1992;殷鸿福和张克信,1997;姜春发等,2000).大量的研究表明东昆仑造山带是个多期一多旋回的复合造山带(罗照华等,1999;莫宣学等,2007),岩浆活动始于元古宙,止于新生代,不同时期的岩石组合记录了东昆仑多旋回边缘造山演化历史.马尼特地区位于都兰县洪水川南侧,布青山山脉中段主脊一带(97°38'00"~97°40'00"E;35°28'00"~35°29'00"N).前人从不同角度对本区大地构造背景及动力学演化做了大量研究,并认为本区存在早古生代和晚古生代两期洋一陆相互转化的构造演化过程(边千韬等,1999;裴先治,2001;李王晔等,2007;刘战庆等,2011;李瑞保等,2015;刘金龙等,2015).但上述研究主要集中在晚古生代古特提斯洋演化,而对于本区更早阶段原特提斯洋的演化过程研究目前较为薄弱.孙雨

(2010)通过对得力斯坦蛇绿岩(516 Ma)研究认为,该蛇绿岩代表了早古生代原特提斯洋洋壳残余体;刘战庆等(2011a)通过对布青山地区早志留世白日切特花岗岩闪长岩(441 Ma)和亿可哈拉尔花岗岩闪长岩(438 Ma)的研究认为,二者均属洋壳俯冲消减的岩浆响应.对于早古生代原特提斯洋俯冲早期的演化过程尚待明确.本文选择马尼特地区片麻状花岗岩闪长岩进行了岩相学、年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素研究,并探讨其岩浆源区、成岩时代及其形成的构造背景,可为原特提斯洋早期俯冲极性及其演化过程提供新的证据.

### 1 地质背景

东昆仑造山带是中国中央造山带的重要组成部分之一.前人根据不同的构造演化观点,对东昆仑造

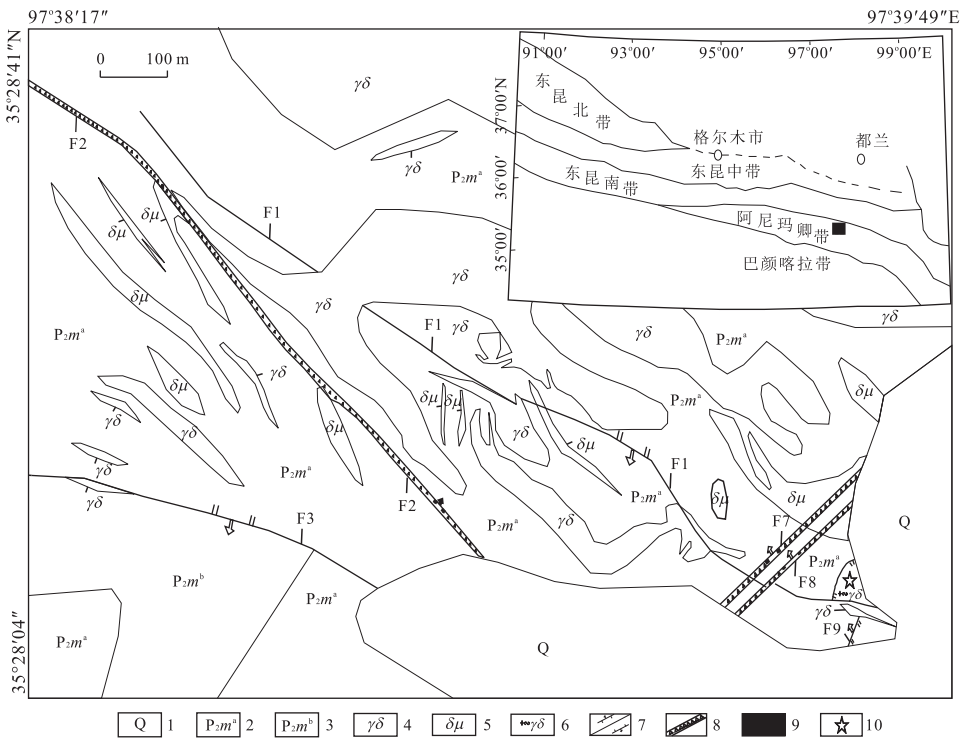


图 1 马尼特地区地质简图

Fig.1 The sketch geological map of the Manite area

1.第四系;2.中二叠世马尔争组板岩、千枚岩;3.中二叠世马尔争组砂岩、砾岩;4.华力西期花岗岩闪长岩;5.华力西期闪长玢岩脉;6.片麻状花岗岩闪长岩;7.正断层/逆断层;8.构造蚀变破碎带;9.研究区位置;10.岩体位置及取样位置;据青海省第三地质矿产勘查院,2013.青海省都兰县马尼特地区金矿普查2012年工作总结及2013年工作安排.青海

山带提出了不同的划分方案(古风宝,1994;许志琴等,1996;姜春发等,2000).孙丰月等(2003)以昆北、昆中、昆南和阿尼玛卿南缘4条断裂为界,将东昆仑造山带由北向南依次划为昆北加里东弧后裂陷带、昆中基底隆起花岗岩带、昆南复合拼贴带、阿尼玛卿蛇绿混杂岩带和北巴颜喀拉造山带.马尼特地区位于阿尼玛卿—布青山脉的北坡,大地构造位置处阿尼玛卿蛇绿混杂岩带内(图1).

马尼特地区出露的地层较为单一,主要为一套浅海相碎屑岩沉积,属中二叠世布青山群马尔争组,其次为第四纪冰碛及冲、洪积砂砾石层.其中二叠世布青山群马尔争组下岩段地层是本区的主体地层,总体呈NW-SE向展布,与区域构造线方向一致,倾向向北或向南,其主要岩石类型为砂质板岩、绢云母板岩和绢云母千枚状板岩.区内断裂构造发育,以NW向为主,其次为NE向断裂构造.NW向断裂构造主要出露有F1、F2,NE向以F7为代表.区内岩浆活动强烈,以华力西期中酸性侵入岩为主,岩性较为单一,主要为花岗闪长岩及其派生的闪长玢岩脉,花岗闪长岩主要呈岩株状或宽脉状产出,在中北部大面积出露,呈灰—深灰色,微细粒状结构,块状构造.闪长玢岩多以小岩脉形式产出,呈NW-SE向展布,与构造展布方向基本一致,呈土黄色—灰绿色—青灰色—浅灰色,变余斑状—斑状结构,块状构造.

本次研究的片麻状花岗闪长岩在马尼特地区东南部出露,蚀变比较强烈,呈深灰色,细粒结构,片麻状构造.LA-ICP-MS(laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry)锆石 U-Pb 测年获得片麻状花岗闪长岩年龄为  $495.6 \pm 1.1$  Ma,考虑到片麻状花岗闪长岩和围岩的地质时代,推测其与围岩为断层

接触关系,应为阿尼玛卿构造带中的构造岩片.

## 2 样品岩石学特征

本次测试的片麻状花岗闪长岩( $35^{\circ}28'11''N$ ,  $97^{\circ}39'39''E$ )为灰—深灰色,具有细粒结构和片麻状构造.显微镜下(图2)显示组成岩石主要的矿物为斜长石(40%~45%)、角闪石(20%~25%)、石英(20%~25%)和碱性长石(10%~15%).斜长石呈板柱状,粒度0.3~0.6 mm,表面因蚀变而模糊,局部可见聚片双晶;角闪石主要呈长柱状,粒度为0.4~2.0 mm,正中突起,多色性明显,呈蓝绿色—绿色,可见闪石式解理;石英呈他形粒状,粒度0.05~3.20 mm,表面干净,一级灰—白干涉色,有轻微的波状消光现象;碱性长石呈板状,粒度为0.20~0.35 mm,表面因蚀变而模糊.镜下命名为片麻状细粒花岗闪长岩.

## 3 样品分析方法

### 3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石的挑选由河北省廊坊区域地质调查研究所实验室利用标准重矿物分离技术分选完成.经过双目镜下仔细挑选,将不同特征的锆石粘在双面胶上,并用无色透明的环氧树脂固定;待其固化之后,将表面抛光至锆石的中心.在测试前,通过反射光和阴极发光(cathodoluminescence, CL)图像仔细研究锆石的晶体形态与内部结构特征,以选择最佳测试点.锆石制靶、反射光、阴极发光以及锆石 U-Pb 年龄测定和微量元素分析均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 同时分析完

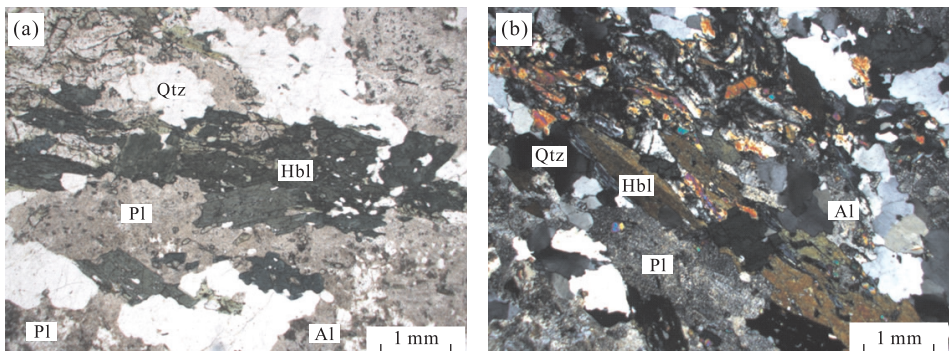


图2 马尼特片麻状花岗闪长岩显微照片

Fig.2 The micrographs of the Manite gneissic granodiorite

a.片麻状花岗闪长岩中定向的角闪石(单偏光);b.片麻状花岗闪长岩中角闪石的简单双晶及闪石式解理、石英、斜长石的聚片双晶(正交偏光).矿物代号缩写:Qtz.石英,Pl.斜长石,Hbl.角闪石,Al.碱性长石

成。本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为  $32\ \mu\text{m}$ , 激光剥蚀样品的深度为  $20\sim 40\ \mu\text{m}$ ; 实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,  $^{29}\text{Si}$  作为内标元素, 锆石中  $\text{SiO}_2$  的质量百分含量为 32.8% (袁洪林等, 2003); 普通铅校正采用 Anderson (2002) 推荐的方法 (Andersen, 2002); 样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICP-MS-DATECAL 程序 (Liu *et al.*, 2008, 2010), 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(ver3.0) 程序 (Ludwig, 2003)。

### 3.2 锆石 Lu-Hf 同位素测试

锆石 Lu-Hf 同位素测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(laser ablation multi-receiver inductively coupled plasma mass spectrometry, LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005 (Lambda Physik, 德国), 多接收器等离子质谱仪(multi-receiver inductively coupled plasma mass spectrometry, MC-ICP-MS)为 Neptune Plus(Thermo Fisher Scientific, 德国)。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 单点剥蚀模式, 斑束固定为  $44\ \mu\text{m}$ 。详细仪器操作条件和分析方法可参照侯可军等(2007), 分析过程中锆石标准 GJ1 的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  测试加权平均值为  $0.282\ 011 \pm 24$  ( $2SD, n=13$ ), 与文献 (Elhlou *et al.*, 2006; 侯可军等, 2007) 报道的值在误差范围内完全一致。

### 3.3 岩石地球化学测试

样品的主量、微量和稀土元素测试均由广州澳实矿物实验室中心完成。首先将待测样品在  $65\ ^\circ\text{C}$  左右低温干燥 24 h, 之后破碎, 经多次手工缩分出

300 g 均匀样品在振动研磨机上研磨至 200 目以备分析测试。主量元素由荷兰 PANalytical 生产的 Axios 仪器利用熔片 X-射线荧光光谱法测定, 并采用等离子光谱和化学法测定进行互相检测。微量元素和稀土元素采用美国 PerkinElmer 公司生产的 Elan9000 型电感耦合等离子质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定。主量元素分析精度和准确度优于 5%, 微量和稀土元素分析精度和准确度优于 10%。

## 4 测试结果

### 4.1 锆石 LA-ICP-MS 年代学

样品(MNT-N4)中锆石主要为长柱状, 部分呈短柱状, 长径约为  $80\sim 200\ \mu\text{m}$ 。CL 图像(图 3)显示, 样品中大多数锆石的自形程度较好, 具有均匀的韵律环带结构, 显示其岩浆成因。样品中共有 20 个有效年龄数据, U 和 Th 含量分别介于  $183 \times 10^{-6} \sim 751 \times 10^{-6}$  和  $57.4 \times 10^{-6} \sim 279.0 \times 10^{-6}$ , 锆石的 Th/U 比值介于  $0.26\sim 0.50$ , 均  $> 0.1$ , 为岩浆成因锆石 (Belousova *et al.*, 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003)。其中 19 个锆石分析点比较集中, 均落在谐和线上及其附近, 有一个偏离协和线, 锆石 U-Pb 加权平均年龄为  $495.6 \pm 1.1\ \text{Ma}$  (MSWD=0.130) (图 4) (测试数据见表 1), 属于晚寒武世。

### 4.2 Lu-Hf 同位素分析结果

对上述锆石 U-Pb 年龄测定的样品进行 Lu-Hf 同位素测试, 测试点尽量选择与 U-Pb 年龄测定位置相同或相近, 结果见表 2。马尼特片麻状花岗闪长岩中锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值为  $0.000\ 916 \sim$

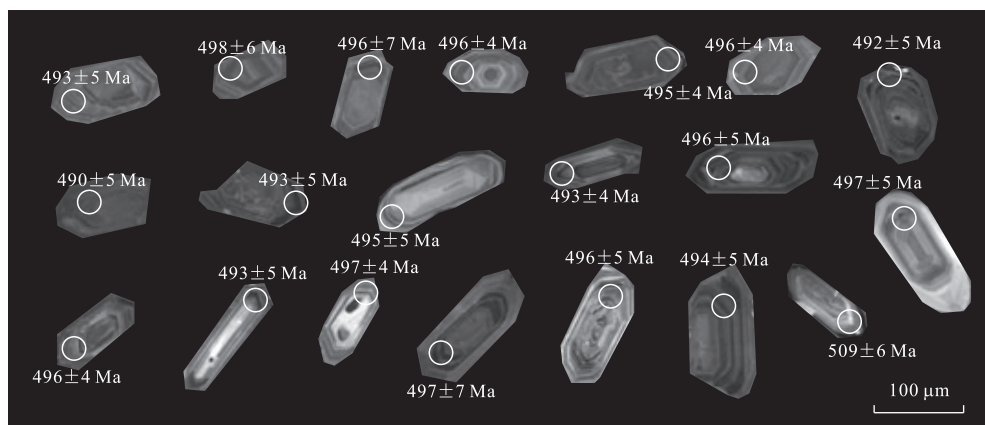


图 3 马尼特片麻状花岗闪长岩锆石阴极发光图像

Fig.3 Cathodoluminescence images of analyzed zircons of the Manite gneissic granodiorite



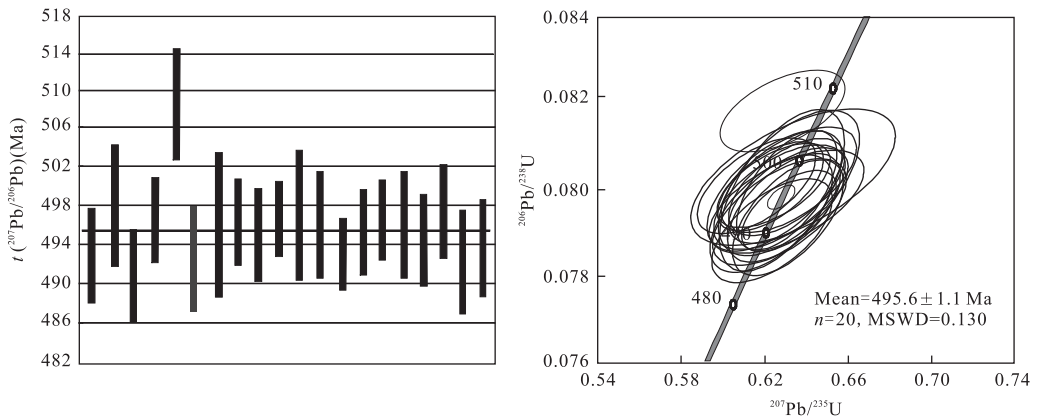


图 4 马尼特片麻状花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谱图

Fig.4 U-Pb concordia ages of the Manite gneissic granodiorite

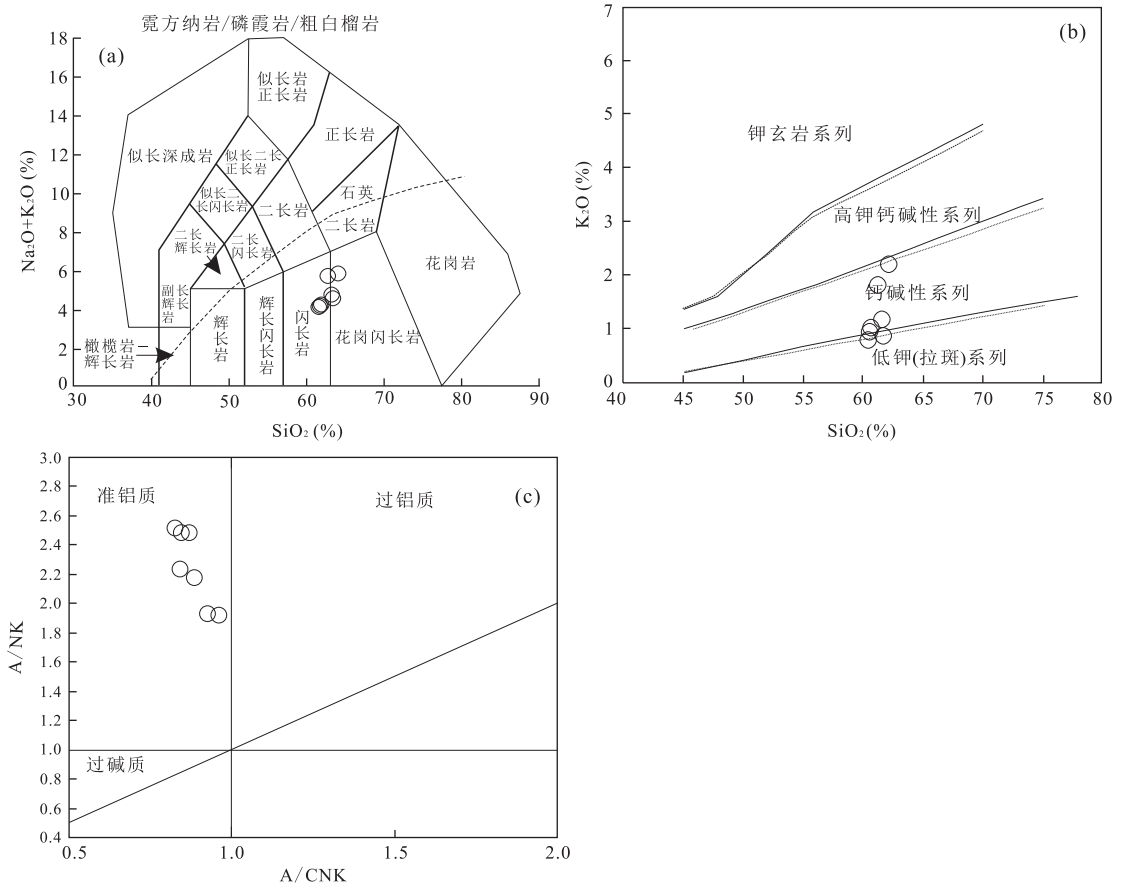


图 5 马尼特片麻状花岗闪长岩 TAS、SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 和 A/CNK-A/NK

Fig.5 Total alkali versus SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> versus K<sub>2</sub>O and A/CNK versus A/NK diagrams for the Manite gneissic granodiorite

a.据 Irvine and Baragar(1971); b.据 Peccerillo and Taylor(1976); c.据 Maniar and Piccoli(1989)

0.002 090,  $f_{Lu/Hf}$  值为  $-0.97 \sim -0.94$ , 低于上地壳 ( $^{176}Lu/^{177}Hf=0.009 3$ ,  $f_{Lu/Hf} = -0.72$ ) 的值 (Vervoort and Patchett, 1996). 锆石的  $^{176}Hf/^{177}Hf$  比值为  $0.282 821 \sim 0.282 898$ , 利用  $^{206}Pb/^{238}U$  计算获得  $\epsilon_{Hf}(t)$  为  $12.2 \sim 15.0$ , 二阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{DM2}$ ) 为

$506 \sim 662$  Ma, 平均为  $575$  Ma.

### 4.3 主量元素

马尼特地区片麻状花岗闪长岩主量元素、微量元素和稀土元素含量及特征值见表 3. 其中 SiO<sub>2</sub> 含量为  $61.47\% \sim 63.99\%$ , Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 和 CaO 含量分别为  $2.91\% \sim 3.64\%$ 、 $0.93\% \sim 2.31\%$  和  $4.29\% \sim$

表 1 马尼特片麻状花岗岩闪长岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素定年数据  
Table 1 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb isotope dating results of the Manite gneissic granodiorite

测点号	质量百分含量( $10^{-6}$ )				Th/U	同位素比率				同位素年龄(Ma)					
	Pb	Th	U	Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	
MNT-N4-1	43.9	92.1	275	0.33	0.056 8	0.002 0	0.626 6	0.021 3	0.079 5	0.000 8	81	494	13	493	5
MNT-N4-2	88.1	196.0	515	0.38	0.056 7	0.003 2	0.633 2	0.032 5	0.080 3	0.001 0	131	498	20	498	6
MNT-N4-3	39.8	79.9	276	0.29	0.057 1	0.001 8	0.622 9	0.019 2	0.079 0	0.000 8	70	492	12	490	5
MNT-N4-4	41.0	79.5	300	0.27	0.055 8	0.001 8	0.615 6	0.018 8	0.080 1	0.000 7	77	487	12	496	4
MNT-N4-5	27.9	57.4	183	0.31	0.054 3	0.002 4	0.621 0	0.028 5	0.082 1	0.001 0	98	490	18	509	6
MNT-N4-6	39.0	78.3	296	0.26	0.057 0	0.001 9	0.622 7	0.019 5	0.079 4	0.000 9	72	492	12	493	5
MNT-N4-7	58.4	122.0	378	0.32	0.056 7	0.001 5	0.627 8	0.019 9	0.080 0	0.001 2	61	495	12	496	7
MNT-N4-8	70.3	151.0	424	0.36	0.057 0	0.001 6	0.630 2	0.018 4	0.080 0	0.000 7	60	496	11	496	4
MNT-N4-9	39.0	73.2	272	0.27	0.056 9	0.001 9	0.626 6	0.021 0	0.079 8	0.000 8	74	494	13	495	5
MNT-N4-10	97.0	230.0	529	0.43	0.056 4	0.001 6	0.623 8	0.018 0	0.080 1	0.000 6	32	492	11	497	4
MNT-N4-11	43.7	98.1	315	0.31	0.056 9	0.001 9	0.631 3	0.022 4	0.080 1	0.001 1	77	497	14	497	7
MNT-N4-12	111.0	246.0	751	0.33	0.056 9	0.001 4	0.630 1	0.016 0	0.080 0	0.000 9	52	496	10	496	5
MNT-N4-13	90.0	210.0	577	0.36	0.057 3	0.001 4	0.631 2	0.015 1	0.079 5	0.000 6	52	497	9	493	4
MNT-N4-14	65.6	156.0	336	0.47	0.057 1	0.001 7	0.631 0	0.018 9	0.079 8	0.000 7	67	497	12	495	4
MNT-N4-15	113.0	279.0	560	0.50	0.056 2	0.001 6	0.622 3	0.016 9	0.080 1	0.000 7	63	491	11	496	4
MNT-N4-16	53.7	121.0	314	0.39	0.056 5	0.002 0	0.624 4	0.021 5	0.080 0	0.000 9	78	493	13	496	5
MNT-N4-17	42.0	93.8	233	0.40	0.057 1	0.002 3	0.630 2	0.024 7	0.079 7	0.000 8	61	496	15	494	5
MNT-N4-18	45.5	113.0	228	0.49	0.056 9	0.002 0	0.631 2	0.021 5	0.080 2	0.000 8	78	497	13	497	5
MNT-N4-19	59.2	121.0	435	0.28	0.057 3	0.001 6	0.630 8	0.017 5	0.079 3	0.000 9	61	497	11	492	5
MNT-N4-20	67.2	142.0	476	0.30	0.056 8	0.001 6	0.628 9	0.018 0	0.079 6	0.000 8	61	495	11	493	5

注:测试单位和测试时间:中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室,2014.

表 2 马尼特片麻状花岗闪长岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Manite gneissic granodiorite

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
MNT-N4-1	0.282 821	0.000 021	0.001 279	0.000 035	0.034 368	0.000 971	1.7	12.2	0.9	615	662	-0.96
MNT-N4-2	0.282 870	0.000 026	0.001 371	0.000 016	0.035 880	0.000 675	3.5	13.9	1.0	547	567	-0.96
MNT-N4-3	0.282 862	0.000 020	0.001 015	0.000 047	0.025 604	0.001 054	3.2	13.8	0.9	553	576	-0.97
MNT-N4-4	0.282 889	0.000 033	0.001 136	0.000 021	0.029 492	0.000 554	4.2	14.7	1.3	516	524	-0.97
MNT-N4-5	0.282 846	0.000 034	0.000 916	0.000 037	0.024 877	0.001 124	2.6	13.2	1.3	574	605	-0.97
MNT-N4-6	0.282 831	0.000 023	0.000 917	0.000 019	0.023 160	0.000 316	2.1	12.7	1.0	596	636	-0.97
MNT-N4-7	0.282 885	0.000 025	0.001 116	0.000 026	0.028 986	0.000 737	4.0	14.5	1.0	522	533	-0.97
MNT-N4-8	0.282 883	0.000 025	0.001 103	0.000 026	0.028 373	0.000 558	3.9	14.5	1.0	524	536	-0.97
MNT-N4-9	0.282 857	0.000 024	0.001 126	0.000 009	0.028 875	0.000 158	3.0	13.6	1.0	562	587	-0.97
MNT-N4-10	0.282 844	0.000 017	0.001 738	0.000 039	0.043 394	0.001 124	2.5	12.9	0.8	590	625	-0.95
MNT-N4-11	0.282 830	0.000 025	0.001 003	0.000 005	0.025 502	0.000 080	2.0	12.6	1.0	598	639	-0.97
MNT-N4-12	0.282 863	0.000 028	0.001 046	0.000 024	0.026 522	0.000 698	3.2	13.8	1.1	553	575	-0.97
MNT-N4-13	0.282 898	0.000 034	0.001 027	0.000 050	0.025 491	0.001 383	4.4	15.0	1.3	503	506	-0.97
MNT-N4-14	0.282 891	0.000 028	0.001 372	0.000 041	0.038 084	0.001 123	4.2	14.7	1.1	517	525	-0.96
MNT-N4-15	0.282 898	0.000 037	0.002 090	0.000 049	0.057 525	0.000 655	4.4	14.7	1.4	517	525	-0.94

6.52%，全碱  $\text{ALK}=3.92\% \sim 5.69\%$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 14.64%~15.52%，铝饱和指数  $\text{A/CNK}=0.83 \sim 0.97$ 。在图 5a 中，样品落入闪长岩和花岗闪长岩区域，属亚碱性系列；在图 5b 中，主要落入钙碱性区域；在图 5c 中全部落入准铝质区域，主量元素显示岩石具有准铝质、钙碱性特征。

#### 4.4 微量元素

片麻状花岗闪长岩的稀土总量较低， $\Sigma\text{REE}$  为  $54.98 \times 10^{-6} \sim 91.27 \times 10^{-6}$ ，不同样品具有相近的稀土元素配分曲线(图 6a)，表明岩浆源区相同。配分曲线呈轻稀土元素弱富集的右倾式，岩石 LREE 为  $46.57 \times 10^{-6} \sim 80.93 \times 10^{-6}$ ，HREE 为  $7.10 \times 10^{-6} \sim 10.34 \times 10^{-6}$ ，轻重稀土元素分馏较弱  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 5.07~8.08，岩石具有中等—微弱负铈异常( $\delta\text{Eu}=0.73 \sim 0.97$ ，平均值为 0.82)，暗示岩石可能在形成过程中斜长石分离结晶作用较弱或源区斜长石残留较少。

图 6b 显示，和原始地幔相比岩石富集大离子亲石元素(Rb、K)和不相容元素(Th、U)，不同程度的亏损 Nb、Ta、Zr、Ti。样品中反映岩石演化特征的元素比值  $\text{Nb}/\text{Ta}=9.85 \sim 12.14$ ， $\text{La}/\text{Nb}=3.82 \sim 6.44$ ， $\text{Th}/\text{Nb}=1.19 \sim 2.32$ ， $\text{Th}/\text{La}=0.27 \sim 0.39$ ， $\text{Rb}/\text{Sr}=0.08 \sim 0.33$ ， $\text{Rb}/\text{Nb}=7.47 \sim 26.48$ 。

## 5 讨论

### 5.1 岩浆源区

马尼特地区片麻状花岗闪长岩具有较高的硅(61.47%~63.99%)、相对中等质量分数的铝

(14.64%~15.52%)和全碱(3.92%~5.69%)以及准铝质等主量元素特征，岩石具有富集大离子亲石元素(Rb、K)和不相容元素(Th、U)，相对亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 高场强元素的特征，反映了其壳源特点(Mckenzie, 1989)。Ta、Nb 以及 Ti 的亏损暗示岩浆不可能由软流圈部分熔融直接产生(Foley, 1992)，可能由于地壳的混染作用(Mckenzie, 1989)或是源区经历了俯冲过程中的流体交代作用(Sun and McDonough, 1989)。Nb 和 Ta 由于性质相近，Nb/Ta 比值在岩浆分异中不会造成较大的分异，可以指示岩浆源区特征及演化过程。通常幔源岩浆的 Nb/Ta 比值为  $17.5 \pm 2.0$ ，壳源岩浆的 Nb/Ta 比值为 11~12(Green, 1995)，7 件片麻状花岗闪长岩样品中，Nb/Ta 比值为 9.85~12.14，可以反映出岩浆的壳源特点；La/Nb 比值(3.82~6.44)平均为 4.63，高于大陆地壳平均值 2.5，Th/Nb 比值(1.19~2.32)平均为 1.54，远高于大陆地壳平均值 0.7，Th/La 比值(0.27~0.39)平均为 0.33，也高于大陆地壳平均值 0.28(Rudnick and Gao, 2003)。综上所述，马尼特地区片麻状花岗闪长岩的微量元素显示出壳源特点。

锆石具有较强的稳定性，在其形成后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累，因此成为目前示踪岩浆源区的非常重要的矿物(Ameilin *et al.*, 2000；吴福元等, 2007)。在图 7 中，数据点均落在亏损地幔 Hf 同位素演化线之下，具有高的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(12.2~15.0)，Hf 两阶段模式年龄在 506~662 Ma 范围内。对花岗岩岩石而言，由于其主要来源于地壳岩石的部分熔融，所以其 Hf 模式年龄要远大于形成年龄。

表 3 马尼特片麻状花岗闪长岩主量元素(%)、稀土元素及微量元素( $10^{-6}$ )分析结果  
Table 3 Major(%), REE and trace ( $10^{-6}$ ) element compositions of the Manite gneissic granodiorite

样号	MNT-1	MNT-2	MNT-3	MNT-4	MNT-5	MNT-6	MNT-7
SiO <sub>2</sub>	62.64	61.67	61.80	63.28	63.19	61.47	63.99
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.39	0.38	0.36	0.36	0.39	0.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.52	14.84	14.99	14.64	14.79	14.81	15.37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.39	7.36	7.22	6.56	6.42	7.28	5.96
MnO	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14
MgO	2.71	3.60	3.55	3.12	3.40	3.64	2.04
CaO	4.67	6.28	6.04	5.87	5.38	6.52	4.29
Na <sub>2</sub> O	3.64	2.93	2.91	3.35	3.29	2.99	3.38
K <sub>2</sub> O	1.94	1.08	1.16	1.02	1.31	0.93	2.31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.11
LOI	1.74	1.52	1.62	1.49	1.55	1.65	1.94
Total	99.9	99.92	99.91	99.93	99.93	99.92	99.92
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.53	0.37	0.40	0.30	0.40	0.31	0.68
A/CNK	0.93	0.85	0.88	0.85	0.89	0.83	0.97
A/NK	1.92	2.48	2.48	2.21	2.16	2.50	1.91
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	5.58	4.01	4.07	4.37	4.60	3.92	5.69
V	140	162	161	148	143	172	123
Cr	31.0	62.1	57.4	50.9	65.0	62.6	13.5
Cs	1.080	0.796	0.839	0.757	1.080	0.726	1.20
Ga	11.50	9.94	10.00	9.49	10.50	9.86	9.97
Hf	1.27	1.22	1.24	1.26	1.39	1.09	1.15
Rb	73.9	24.5	29.2	27.8	42.4	20.4	77.6
Sr	268	269	282	269	292	259	234
Zr	32.5	25.7	32.3	28.6	35.6	24.0	30.3
Nb	3.37	2.63	2.85	3.13	3.63	2.73	2.93
Ba	598	426	464	299	385	292	626
Ta	0.32	0.27	0.25	0.29	0.30	0.26	0.27
Th	7.84	3.26	3.54	4.26	5.39	3.26	5.64
U	1.43	1.51	1.48	1.5	1.44	1.48	1.22
Y	13.6	11.9	11.7	11.1	12.1	12	10.3
La	21.7	11.8	10.9	14.0	15.0	11.4	14.2
Ce	36.9	21.1	21.1	24.4	27.5	20.6	24.9
Pr	4.03	2.45	2.40	2.78	3.11	2.38	2.77
Nd	14.70	9.64	9.51	10.50	11.90	9.69	10.10
Sm	2.83	2.02	2.13	2.06	2.51	2.06	1.96
Eu	0.77	0.58	0.53	0.53	0.64	0.59	0.61
Gd	2.91	2.09	2.19	2.28	2.78	2.10	1.85
Tb	0.47	0.40	0.35	0.42	0.41	0.34	0.32
Dy	2.47	2.09	2.09	1.95	2.26	2.16	1.75
Ho	0.52	0.44	0.44	0.40	0.46	0.43	0.36
Er	1.62	1.40	1.43	1.31	1.44	1.39	1.12
Tm	0.26	0.22	0.23	0.23	0.23	0.22	0.20
Yb	1.81	1.53	1.45	1.51	1.64	1.50	1.29
Lu	0.29	0.24	0.23	0.23	0.25	0.23	0.22
δEu	0.82	0.85	0.74	0.75	0.73	0.85	0.97
ΣREE	91.27	55.99	54.98	62.60	70.13	55.09	61.64
LREE	80.93	47.59	46.57	54.27	60.65	46.72	54.54
HREE	10.34	8.40	8.42	8.33	9.47	8.37	7.10
LREE/HREE	7.83	5.67	5.53	6.52	6.40	5.58	7.68
(La/Yb) <sub>N</sub>	8.08	5.20	5.07	6.25	6.17	5.12	7.42
Rb/Sr	0.28	0.09	0.10	0.10	0.15	0.08	0.33
Rb/Nb	21.93	9.32	10.25	8.88	11.68	7.47	26.48
Nb/Ta	10.60	9.85	11.26	10.98	12.14	10.71	10.89
La/Nb	6.44	4.49	3.82	4.47	4.13	4.18	4.85
Th/Nb	2.33	1.24	1.24	1.36	1.48	1.19	1.92
Th/La	0.36	0.28	0.32	0.30	0.36	0.29	0.40

注: LOI. 烧失量; A/CNK = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) 摩尔比; δEu = 2 × (Eu/0.0735) / (Gd/0.259 + Sm/0.195); LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu; HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu; (La/Yb)<sub>N</sub> = (La/0.310) / (Yb/0.209).



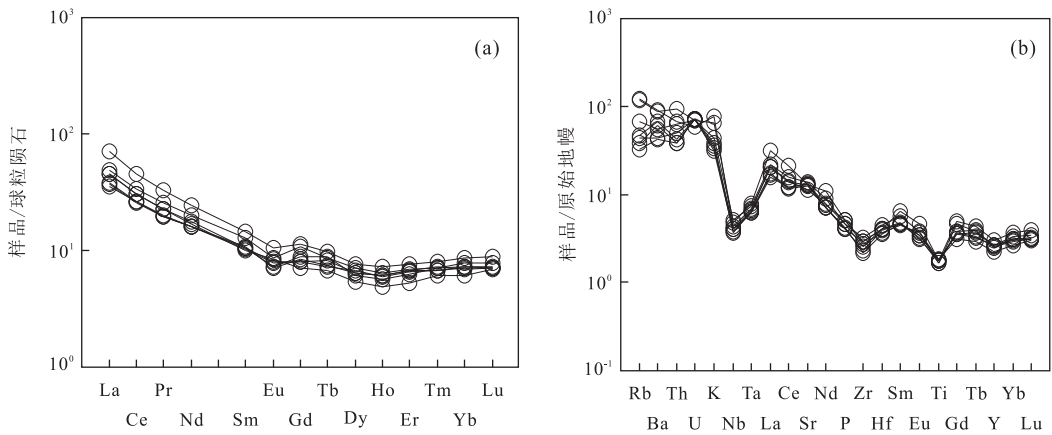


图 6 马尼特片麻状花岗闪长岩稀土元素配分模式和微量元素蛛网图

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element patterns for the Manite gneissic granodiorite a.球粒陨石值据 Boynton(1984); b.原始地幔值据 Sun and McDonough(1989)

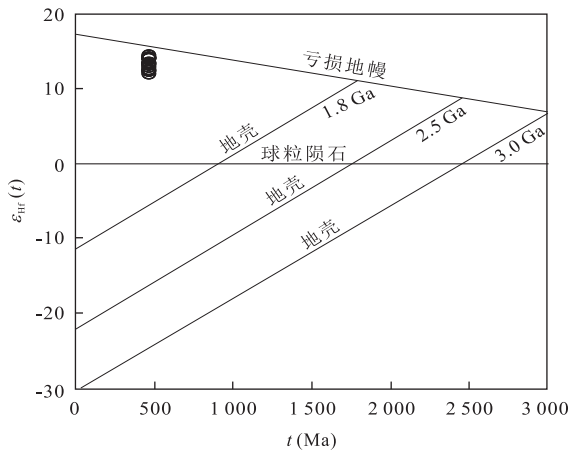


图 7 马尼特片麻状花岗闪长岩锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解

Fig.7  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  versus  $t$  diagram of the Manite gneissic granodiorite 据 Yang *et al.*(2006)

但若 Hf 模式年龄与其形成年龄相近,则表明其地壳源区是新生的(吴福元等,2007)。马尼特片麻状花岗闪长岩测定的年龄 495 Ma 与 Hf 两阶段模式年龄(506~662 Ma)相近,说明新生地壳物质的部分熔融很可能是本区片麻状花岗闪长岩的重要形成机制。Vervoot *et al.*(2000)和 Griffin *et al.*(2004)认为具有正  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的花岗质岩石来自亏损地幔或从亏损地幔中新增生的年轻地壳物质的部分熔融,负  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值则表明地壳 Hf 同位素为主导。样品具有高  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  锆石,表明亏损地幔中新增生的年轻地壳物质的部分熔融也参与到片麻状花岗闪长岩的形成。结合本次研究认为,马尼特片麻状花岗闪长岩的岩浆源区初始物质主要来源于新生地壳。

### 5.2 成岩年代

由于野外条件恶劣,地质关系复杂,对于本区片

麻状花岗闪长岩的形成年代前人没有做过详细研究。本次作者采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年法对其进行了年代学的测定,所测定的年龄  $495.6 \pm 1.1$  Ma 代表了片麻状花岗闪长岩的侵位结晶年龄,为晚寒武世。研究表明东昆仑地区存在广泛的晚寒武世岩浆事件,如东昆仑南缘得利斯坦蛇绿岩的形成时代为  $516.0 \pm 6.3$  Ma(刘战庆等,2011a),都兰可可沙石英闪长岩体的形成时代为  $515.2 \pm 4.4$  Ma(张亚峰等,2010),东昆仑清水泉地区出露的中高压麻粒岩年龄为  $507.7 \pm 8.3$  Ma(李怀坤等,2006),东昆仑南部阿尼玛卿地区出露的德尔尼闪长岩形成时代为  $493 \pm 6$  Ma(李王晔等,2007),昆南沟里地区的花岗闪长岩形成时代为  $491.4 \pm 7.2$  Ma(刘成东,2008),祁漫塔格山鸭子泉岛弧闪长岩形成时代为  $480 \pm 3$  Ma(崔美慧等,2011),祁漫塔格地区乌兰乌珠尔铜矿中酸性侵入岩的形成时代为  $475.3 \pm 2.0$  Ma(许庆林,2014),东昆仑早古生代纳赤台岩群变火山岩形成时代为  $474 \pm 7.9$  Ma(陈有炘等,2013)。上述的年龄数据表明,东昆仑地区在晚寒武世存在有构造—热事件并导致广泛的变质和深熔作用发生。

### 5.3 构造背景

马尼特片麻状花岗闪长岩在微量元素 Rb-(Y+Nb)构造判别图解(图 8a)中,样品全部落入火山弧花岗岩区域。岩石不同程度的亏损 Nb、Ta、Zr 和 Ti,表明了与火山弧构造环境的亲缘性。La/Nb 比值(3.82~6.44)平均为 4.63,这也与 Salters and Hart(1991)认为在活动大陆边缘区的 La/Nb 比值( $>2$ )是相符的。在图 8b 中,样品主要落入板块碰撞前消减区花岗岩区域,相当于活动板块边缘。区域上,东昆南阿尼玛卿地

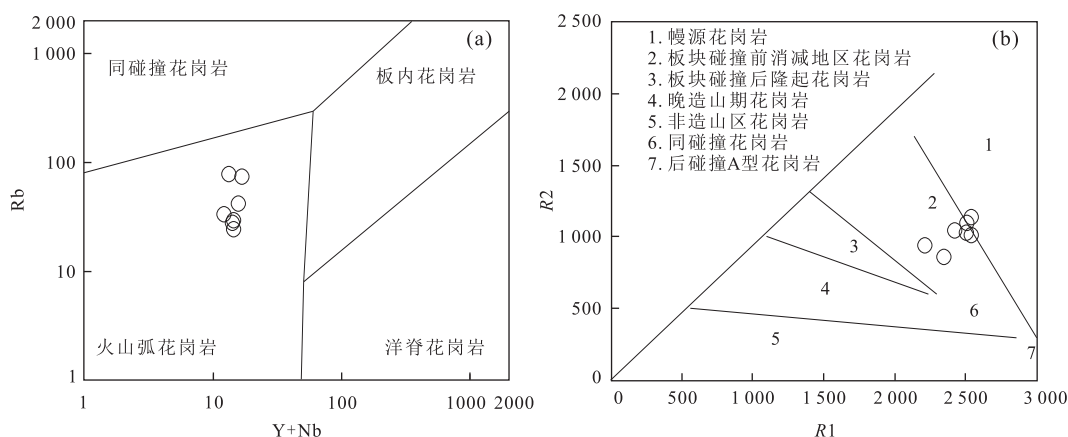


图 8 马尼特片麻状闪长岩构造环境判别图解

Fig.8 Tectonic setting discrimination diagrams of the Manite gneissic granodiorite

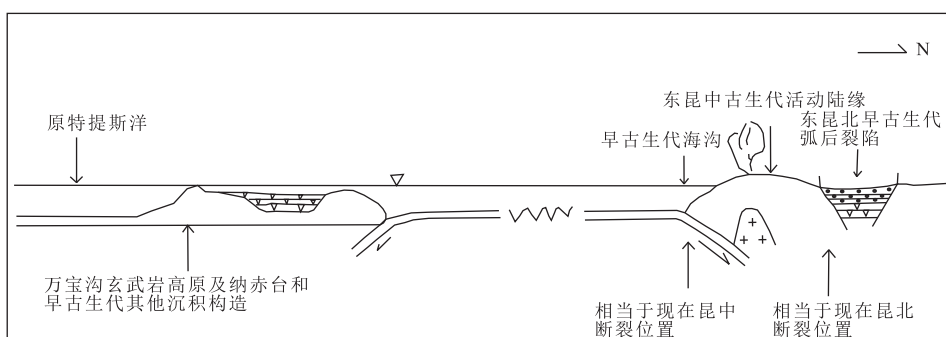
a.据 Harris *et al.*(1986); b.据 Pearce(1996)

图 9 柴达木地块和万宝沟大洋玄武岩高原之间的洋壳同时向南、北发生双向俯冲消减

Fig.9 The crust between the Qaidam massif and Wanbaogou oceanic plateau occurred bidirectional subduction to the south and the north  
据 Sun *et al.*(2003)

区德尔尼闪长岩锆石 U-Pb 年龄为  $493 \pm 6$  Ma(李王晔等, 2007), 具有富集大离子亲石元素 Rb、Th、U, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的特性, 被认为形成于岛弧环境。马尼特片麻状花岗闪长岩与它相比, 在矿物组合以及微量元素特征等方面基本相似, 较近的空间关系, 相近岩体的形成时代  $495 \pm 1.1$  Ma, 推测其形成于洋壳俯冲背景下。

东昆仑地区在加里东期一直处于持续挤压造山的构造背景(潘裕生, 1990; Sengor and Okurogul-lan, 1991; 潘裕生等, 1994)。孙丰月等(2003)通过研究东昆仑成矿带成矿规律, 认为东昆仑加里东早期花岗岩大多数为碰撞前和同碰撞花岗岩, 说明在加里东期东昆仑地区已经从被动大陆边缘转化为存在洋壳俯冲的活动大陆边缘。拜永山等(2001)通过对东昆仑东段加里东期造山旋回侵入岩特征研究, 认为该区早奥陶世弧花岗岩应形成于俯冲环境。莫宣学等(2007)认为东昆仑东部在早寒武世为洋盆形成及扩张阶段, 中寒武世开始进入俯冲阶段, 持续到晚

奥陶世。张亚峰等(2010)通过对东昆仑造山带都兰可可沙石英闪长岩体年代学研究, 认为其形成年龄  $515.2 \pm 4.4$  Ma 代表了洋盆俯冲开始的时间。李王晔等(2007)测得东昆仑南部的德尔尼岛弧闪长岩年代为  $493 \pm 6$  Ma, 认为其形成于洋壳消减的时代。崔美慧等(2011)测得祁漫塔格鸭子泉地区的早奥陶世岛弧型闪长岩年龄为  $480 \pm 3$  Ma, 认为形成于洋壳俯冲环境下。许庆林(2014)测得祁漫塔格地区乌兰乌珠尔铜矿片麻状花岗岩时代为  $475.3 \pm 2.0$  Ma, 认为乌兰乌珠尔中酸性侵入岩形成的构造环境应为原特提斯洋俯冲的活动大陆边缘环境。上述资料表明东昆仑地区在加里东早期存在一次重要的俯冲事件, 结合本次研究认为, 马尼特片麻状花岗闪长岩形成的构造环境应为加里东早期原特提斯洋壳俯冲的活动大陆边缘环境, 原特提斯洋俯冲到柴达木地块之下造成陆壳加厚, 新生的陆壳部分熔融形成马尼特片麻状花岗闪长岩。

孙丰月等(2003)通过研究纳赤台群火山岩认为

在昆中俯冲带以南存在另一个岛弧环境,并提出了在加里东期,柴达木地块和万宝沟大洋玄武岩高原之间的洋壳同时向南、北发生双向俯冲消减。王晓霞等(2012)通过研究柴达木盆地南缘晚奥陶世万宝沟花岗岩,认为如果加里东期在昆南构造带发育有弧花岗岩的话,应该是昆中缝合带向南俯冲的产物或者是阿尼玛卿缝合带向北俯冲的产物。马尼特片麻状花岗闪长岩位于昆南断裂以南,与纳赤台群火山岩和万宝沟群火山岩具有密切的空间关系,推测其应该属于大洋洋壳向南俯冲的产物,即柴达木地块和万宝沟大洋玄武岩高原之间的洋壳同时向南、北发生双向俯冲消减。

随着新元古代末期 Rodinia 超大陆的裂解,东昆仑地区演化也进入非常活跃的时期。在早寒武世之前,原特提斯洋打开和扩张(Yang *et al.*, 1996; 陆松年等, 2002)。加里东早期,原特提斯洋向南北两侧开始俯冲(图 9)。柴达木地块南缘由被动陆缘转换成活动陆缘,形成昆北、昆中的构造格局。随俯冲作用的进行,在昆中一带演化成活动陆缘弧,而昆北一带形成弧后裂隙,同时形成一系列双峰式火山岩组合、镁铁质深成侵入岩和基性脉岩(任军虎等, 2009; 王秉璋, 2011; 刘彬等, 2013)。此时昆中断裂以南的大洋环境主要为万宝沟群大洋玄武岩高原(阿成业等, 2003; 王国灿等, 2007),随着万宝沟大洋高原沿昆中断裂的位置拼贴到柴达木地块之上,致使东昆仑造山带内广泛发生深熔作用,形成很多与俯冲消减作用相关的岛弧型岩浆岩,如阿尼玛卿的德尔尼岛弧型闪长岩(李王晔等, 2007)、布青山的白日切特花岗岩(刘战庆等, 2011)、亿可哈拉尔花岗闪长岩(边千韬等, 1999),推测马尼特片麻状花岗闪长岩也是由万宝沟玄武岩高原俯冲形成的。到中志留世早期原特提斯洋最终关闭(陈能松等, 2002; 曹世泰等, 2011; 刘彬等, 2013),此时东昆仑南北三分的格局基本形成。

## 6 结论

(1) 马尼特片麻状花岗闪长岩岩浆锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄为  $495.6 \pm 1.1$  Ma, 属于晚寒武世。(2) 马尼特片麻状花岗闪长岩属准铝质钙碱性系列岩石, 岩石具有富集大离子亲石元素(Rb、K)和不相容元素(Th、U), 相对亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 高场强元素的特征, Nb/Ta、La/Nb、Th/Nb、Th/La 比值等显示出岩石具有壳源特征。马尼特片

麻状花岗闪长岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 12.2~15.0, Hf 两阶段模式年龄在 506~662 Ma 范围内, 其岩浆源区初始物质主要来源于新生地壳。(3) 马尼特片麻状花岗闪长岩在微量元素 Rb-(Y+Nb) 构造判别图落入火山弧花岗岩区域, 在 R1-R2 构造判别图落入板块碰撞前消减区花岗岩区域。综合岩石组合及地球化学特征认为其构造环境应为加里东早期原特提斯洋俯冲的活动大陆边缘环境洋壳俯冲环境, 推测其应该属于大洋洋壳向南俯冲的产物, 即柴达木地块和万宝沟大洋玄武岩高原之间的洋壳同时向南、北发生双向俯冲消减。

## References

- A. C. Y., Wang, Y. Z., Ren, J. Q., et al., 2003. Disintegration of the Wanbaogou Group and Discovery of Early Cambrian Strata in the East Kunlun Area. *Geology in China*, 30 (2): 199-206 (in Chinese with English abstract).
- Ameilin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., 2000. Early-Middle Archean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotopic Studies of Single Zircons Grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 4205-4225.
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192 (1-2): 59-79.
- Bai, Y. S., Chang, G. H., Tan, S. X., et al., 2001. Study on the Features of Caledonian Intrusive Rocks in the Eastern Sector of East Kunlun. *Qinghai Geology*, 9 (Suppl.): 28-35 (in Chinese with English abstract).
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622.
- Bian, Q. T., Luo, X. Q., Chen, H. H., et al., 1999. Discovery of Early Paleozoic and Early Carboniferous-Early Permian Cophiolites in the A'nyemaqen, Qinghai Province, China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 420-426 (in Chinese with English abstract).
- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63-114.
- Cao, S. T., Liu, X. K., Ma, Y. S., et al., 2011. Qimantage Area Silurian Intrusive Rocks and Its Geological Significance. *Qinghai Science and Technology*, 17(5): 26-30 (in Chinese).
- Chen, N. S., He, L., Sun, M., et al., 2002. Early Paleozoic Metamorphic Peak Precisely Defined and Thrusting Tectonic Deformation Era in East Kunlun Orogen Belt. *Chinese Science Bulletin*, 47(8): 628-631 (in Chinese).

- Chen, Y. X., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2013. Zircon U-Pb Age, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Metavolcanic Rocks from Naj Tal Group, East Section of East Kunlun. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 240—254 (in Chinese with English abstract).
- Cui, M. H., Meng, F. C., Wu, X. K., 2011. Early Ordovician Island Arc of Qimantag Mountain, Eastern Kunlun: Evidences from Geochemistry, Sm-Nd Isotope and Geochronology of Intermediate-Basic Igneous Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3365—3379 (in Chinese with English abstract).
- Elhlou, S., Belousova, E., Griffin, W. L., 2006. Trace Element and Isotopic Composition of GJ-Red Zircon Standard by Laser Ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158.
- Foley, S., 1992. Vein-Plus-Wall-Rock Melting Mechanisms in the Lithosphere and the Origin of Potassic Alkaline Magmas. *Lithos*, 28(3—6): 435—453.
- Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, 120(3—4): 347—359.
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3—4): 231—282.
- Gu, F. B., 1994. Geological Characteristics of East Kunlun and Tectonic Evolution in Late Palaeozoic-Mesozoic Era. *Qinghai Geology*, 2(1): 4—14 (in Chinese with English abstract).
- Harris, N. B. W., Pearce, J. A., Tindle, A. G., 1986. Geochemical Characteristics of Collision-Zone Magmatism. *Geological Society, London, Special Publication*, 19(5): 67—81.
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27—62.
- Hou, K. J., Li, Y. H., Zou, T. R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595—2604 (in Chinese with English abstract).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523—548.
- Jiang, C. F., Wang, Z. Q., Li, J. Y., et al., 2000. Tectonics of the Central Orogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing, 154 (in Chinese).
- Jiang, C. F., Yang, J. S., Feng, B. G., et al., 1992. Opening-Closing Patterns in Kunlun. Geological Publishing House, Beijing, 224 (in Chinese).
- Li, H. K., Lu, S. N., Xiang, Z. Q., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Age of the Granulite from the Qingshuiquan Area, Central Eastern Kunlun Suture Zone. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 311—321 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. B., Pei, X. Z., Li, Z. C., et al., 2015. Geological and Geochemical Features of Delisitannan Basalts and Their Petrogenesis in Buqingshan Tectonic Mélange Belt, Southern Margin of East Kunlun Orogen. *Earth Science*, 40(7): 1148—1162 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Li, S. G., Guo, A. L., et al., 2007. East Kunlun Tectonic Belt Oliver Gabbro and Diorite Dur'ngoi Zircon SHRIMP U-Pb Age and Trace Element Geochemistry—On “Qi-Cai-Kun” Late Neoproterozoic-Early Ordovician More Ocean Island's Southern Boundary Constraints, Qinghai. *Science in China: Earth Sciences*, 11(S1): 288—294 (in Chinese).
- Liu, B., Ma, C. Q., Guo, P., et al., 2013. Discovery of the Middle Devonian A-Type Granite from the Eastern Kunlun Orogen and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 38(5): 947—962 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. D., 2008. The Granite Magma Mixing in East Kunlun Orogen Belt. Geological Publishing House, Beijing, 142 (in Chinese).
- Liu, J. L., Sun, F. Y., Li, L., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopes of Gerizhuotuo Complex Intrusion in West of Anyemaqen Suture Zone. *Earth Science*, 40(6): 965—981 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 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.
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34—43.
- Liu, Z. Q., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2011a. Early Paleozoic Intermediate-Acid Magmatic Activity in Bairiqiete Area along the Buqingshan Tectonic Mélange Belt on the Southern Margin of East Kunlun: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Geology in China*, 38(5): 1150—1167 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2011b. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolites at the Buqingshan Area of the Anyemaqen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2):



- 185—194(in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Yu, H. F., Zhao, F. Q., et al., 2002. Geological Exploration of the Cambrian in the Northern Part of the Qinghai Tibet Plateau. Geological Publishing House, Beijing, 125(in Chinese).
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Geochronology Center, Berkeley.
- Luo, Z. H., Deng, J. F., Cao, Y. Q., et al., 1999. On Late Paleozoic-Early Mesozoic Volcanism and Regional Tectonic Evolution of Eastern Kunlun, Qinghai Province. *Geoscience*, 13(1): 51—56(in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of American Bulletin*, 101(5): 635—643.
- Mckenzie, D. P., 1989. Some Remarks on the Movement of Small Melt Fractions in the Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 95(1): 53—72.
- Mo, X. X., Luo, Z. H., Deng, J. F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403—414 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. S., 1990. Tectonic Features and Evolution of the Western Kunlun Mountain Region. *Scientia Geologica Sinica*, 25(3): 224—232(in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. S., Wang, Y., Matte, P. H., et al., 1994. Tectonic Evolution along the Geotraverse from Yecheng to Shiquanhe. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 295—307(in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., 1996. Sources and Settings of Granitic Rocks. *Episodes*, 19(4): 120—125.
- Peccerillo, A., Taylor, A. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81.
- Pei, X. Z., 2001. Geological Evolution and Dynamics of the Mianlue-A'nyemaqen Tectonic Zone, Central China. (Dissertation). Northwest University, Xi'an, 155(in Chinese with English abstract).
- Ren, J. H., Liu, Y. Q., Feng, Q., et al., 2009. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Dating and Geochemical Characteristics of Diabase-Dykes from the Qingshuiquan Area, Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1135—1145 (in Chinese with English abstract).
- Rundick, R. I., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise Geochem.*, (3): 1—64.
- Salter, V. J. M., Hart, S. R., 1991. The Mantle Sources of Ocean Ridges, Island Arcs; The Hf-Isotope Connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2): 364—380.
- Sengor, A. M. C., Okurogullari, A. H., 1991. The Role of Accretionary Wedges in the Growth of Continents; Asiatic Examples from Argand to Plate Tectonics. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 84(3): 539—597.
- Sun, F. Y., Chen, G. H., Chi, X. G., et al., 2003. Study of Metallogenic Regularity and Prospecting Direction in the East Kunlun Metallogenic Belt in Xinjiang-Qinghai Geological Survey Project. Research Report of China Geological Survey, Changchun (in Chinese).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., Magmatism in the Ocean Basins. *Geological Society, Special Publications*, (42): 313—345.
- Sun, Y., 2010. The Geological Characteristics, Age and Tectonic Environment Studies about Delishitan Ophiolites in Buqingshan, South of East Kunlun Mountains (Dissertation). Changan University, Xi'an, 60 (in Chinese with English abstract).
- Vervoot, J. D., Pachel, P. J., Albarède, F., et al., 2000. Hf-Nd Isotopic Evolution of the Lower Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 181(1): 115—129.
- Wang, B. Z., 2011. The Study and Investigation on the Assembly and Coupling Petrotectonic Assemblage during Paleozoic-Mesozoic Period at Qimantage Geological Corridor Domain (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Wei, Q. R., Jia, C. X., et al., 2007. Some Ideas of Precambrian Geology in the East Kunlun, China. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 929—937(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Hu, N. G., Wang, T., et al., 2012. Late Ordovician Wanbaogou Granitoid Pluton from the Southern Margin of the Qaidam Basin; Zircon SHRIMP U-Pb Age, Hf Isotope and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2950—2962 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. L., 2014. Study on Metallogenesis of Porphyry Deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province (Dissertation). Jilin University, Changchun, 195 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Chen, F. Y., 1996. The A'nyemaqen Suture Belt and the Dynamics in Subduction and Collision. In: Zhang, Q., ed., Ophiolite and Earth Dynamics Re-



- search. Geological Publishing House, Beijing, 185—189 (in Chinese).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Shao, J. A., et al., 2006. Constrains on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3—4): 336—352.
- Yang, J. S., Robinson, P. T., Jiang, C. F., et al., 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and Their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 258(1): 215—231.
- Yin, H. F., Zhang, K. X., 1997. Characteristics of the East Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 22(4): 339—342 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Determination of U-Pb Age and Trace Element of Zircon of Cenozoic Intrusion in NE China by Laser-Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511—1520 (in Chinese).
- Zhang, Y. F., Pei, X. Z., Ding, S. P., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Quartz Diorite at the Kekesha Area of Dulan County, Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 79—85 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 阿成业, 王毅智, 任晋祁, 等, 2003. 东昆仑地区万宝沟群的解体及早寒武世地层的新发现. *中国地质*, 30(2): 199—206.
- 拜永山, 常革红, 谈生祥, 等, 2001. 东昆仑东段加里东造山旋回侵入岩特征研究. *青海地质*, 9(增刊1): 28—35.
- 边千韬, 罗小全, 陈海泓, 等, 1999. 阿尼玛卿蛇绿岩带花岗—英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素定年及大地构造意义. *地质科学*, 34(4): 420—426.
- 曹世泰, 刘晓康, 马永胜, 等, 2011. 祁漫塔格地区早志留世侵入岩的发现及其地质意义. *青海科技*, 17(5): 26—30.
- 陈能松, 何蕾, 孙敏, 等, 2002. 东昆仑造山带早古生代变质峰期和逆冲构造变形年代的精确限定. *科学通报*, 47(8): 628—631.
- 陈有焯, 裴先治, 李瑞保, 等, 2013. 东昆仑东段纳赤台岩群变火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. *地质学前沿*, 20(6): 240—254.
- 崔美慧, 孟繁聪, 吴祥珂, 2011. 东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧: 中基性火成岩地球化学、Sm-Nd 同位素及年代学证据. *岩石学报*, 27(11): 3365—3379.
- 古凤宝, 1994. 东昆仑地质特征及晚古生代—中生代构造演化. *青海地质*, 2(1): 4—14.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595—2604.
- 姜春发, 王宗起, 李锦轶, 等, 2000. 中央造山带开合构造. 北京: 地质出版社, 154.
- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等, 1992. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社, 224.
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 等, 2006. 东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. *地质学前沿*, 13(6): 311—321.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等, 2015. 东昆仑南缘布青山构造混杂带得力斯坦南 MOR 型玄武岩地质、地球化学特征及岩石成因. *地球科学*, 40(7): 1148—1162.
- 李王晔, 李曙光, 郭安林, 等, 2007. 青海东昆仑构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及痕量元素地球化学——对“祁—柴—昆”晚新元古代—早奥陶世多岛洋南界的制约. *中国科学: 地球科学*, 11(增刊1): 288—294.
- 刘彬, 马昌前, 郭盼, 等, 2013. 东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义. *地球科学*, 38(5): 947—962.
- 刘成东, 2008. 东昆仑造山带东段花岗岩岩浆混合作用. 北京: 地质出版社, 142.
- 刘金龙, 孙丰月, 李良, 等, 2015. 青海阿尼玛卿蛇绿混杂岩带西段哥日卓托杂岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素. *地球科学*, 40(6): 965—981.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011a. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据. *中国地质*, 38(5): 1150—1167.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011b. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区二期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义. *地质学报*, 85(2): 185—194.
- 陆松年, 于海峰, 赵凤清, 等, 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社, 125.
- 罗照华, 邓晋福, 曹永清, 等, 1999. 青海省东昆仑地区晚古生代—早中生代火山活动与区域构造演化. *现代地质*, 13(1): 51—56.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等, 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. *高校地质学报*, 13(3): 403—414.
- 潘裕生, 1990. 西昆仑山构造特征与演化. *地质科学*, 25(3): 224—232.
- 潘裕生, 王毅, Matte, P. H., 等, 1994. 青藏高原叶城—狮泉河路线地质特征及区域构造演化. *地质学报*, 68(4): 295—307.
- 裴先治, 2001. 勉略—阿尼玛卿构造带的形成演化与动力学特征 (博士学位论文). 西安: 西北大学, 155.
- 任军虎, 柳益群, 冯乔, 等, 2009. 东昆仑清水泉辉绿岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年. *岩石学报*, 25(5): 1135—1145.