

青海祁漫塔格玛兴大坂晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素组成*

吴祥珂^{1,2} 孟繁聪^{2**} 许虹¹ 崔美慧²

WU XiangKe^{1,2}, MENG FanCong^{2**}, XU Hong¹ and CUI MeiHui²

1. 中国地质大学,北京 100083

2. 中国地质科学院地质研究所,大陆构造与动力学国家重点实验室,北京 100037

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2011-05-10 收稿, 2011-09-18 改回.

Wu XK, Meng FC, Xu H and Cui MH. 2011. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd-Hf isotopic compositions of the Mxingdaban Late Triassic granitic pluton from Qimantag in the eastern Kunlun. Acta Petrologica Sinica, 27 (11):3380-3394

Abstract The main rock type of Mxingdaban granitic pluton from Qimantag of Qinghai in the eastern Kunlun is monzogranite. It consists of plagioclase (30% ~ 35%) + K-feldspar (25% ~ 33%) + quartz (23% ~ 25%) + biotite (3% ~ 5%). Whole-rock analysis shows SiO₂ 68.61% ~ 69.37%, K₂O 3.95% ~ 4.08%, P₂O₅ 0.11% ~ 0.12%, FeO^T/MgO 4.02 ~ 4.21, A/CNK (0.96 ~ 0.99) < 1, which must be high-K calc-alkaline series metaluminous granite. It represents the features of I-type granite. According to REE partition diagram and spider diagram, the granite shows a marked chemical resemblance to continental arc granite, exhibiting enrichment in LILEs such as Rb and Th, but depletion in HFSEs such as Sr, P, Ti, Nb and Ta. ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd (0.512326 ~ 0.512340) and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-2.5 ~ -3.2) imply the monzogranite shares the characters of crust-mantle mixed I-type granite. Based on LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating, the emplacement of Mxingdaban monzogranitic pluton occurred at 218 ± 2Ma. Zircon ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf ratio is low (0.282517 ~ 0.282623), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ is -4.43 ~ -0.62, which may indicate a mixture with mantle source (large positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$) and ancient crust (large negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$). The accordance of t_{DM2} (1.20 ~ 1.25Ga) of Nd and t_{DM2} (1.08 ~ 1.28Ga) of Hf leads to the conclusion that the crust-mantle differentiation occurred at Mesoproterozoic in Qimantag and indicates the source of the granite may be partly from the pre-Mesoproterozoic materials. It is suggested that the Mxingdaban monzogranitic pluton emplaced at the same time with the Qimantag Late Triassic volcanic rock, when the Paleo-Tethys Ocean closed.

Key words U-Pb age; Geochemistry; Nd-Hf isotope; Monzogranite; Mxingdaban; Qimantag

摘要 青海东昆仑祁漫塔格玛兴大坂岩体岩石类型为二长花岗岩,主要矿物组合为斜长石(30% ~ 35%) + 钾长石(25% ~ 33%) + 石英(23% ~ 25%) + 黑云母(3% ~ 5%),全岩地球化学总体显示 SiO₂ 为 68.61% ~ 69.37%, K₂O 为 3.95% ~ 4.08%, P₂O₅ 为 0.11% ~ 0.12%, FeO^T/MgO 为 4.02 ~ 4.21, A/CNK (0.96 ~ 0.99) < 1, 为高钾钙碱性系列准铝质花岗岩,具有 I 型花岗岩的特征。其稀土元素配分图和蛛网图显示具有大陆弧花岗岩特点,富集 Rb、Th 等大离子亲石元素,而相对亏损 Sr、P、Ti、Nb 和 Ta 等元素;玛兴大坂二长花岗岩的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.512326 ~ 0.512340, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.5 \sim -3.2$, 指示该花岗岩具有壳幔混合 I 型花岗岩的特征;锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄数据显示玛兴大坂二长花岗岩体的侵位时代为 218 ± 2Ma;锆石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值较低(0.28251 ~ 0.282623), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -4.43 ~ -0.62, 可能为幔源物质(大的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)与古老地壳物质(大的负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)混合后的结果。Nd 同位素 t_{DM2} (1.20 ~ 1.25Ga) 与 Hf 同位素 t_{DM2} (1.08 ~ 1.28Ga) 基本一致,推测中元古代末期祁漫塔格地区存在壳幔分异作用,而玛兴大坂二长花岗岩的部分源岩为中元古代以前的物质。认为玛兴

* 本文受中国地质调查局项目(1212010918003)和创新研究群体科学基金项目(40921001)联合资助。

第一作者简介: 吴祥珂,男,1987年生,硕士研究生,岩石、矿物、矿床学专业, E-mail: wu.ak74@163.com

** 通讯作者: 孟繁聪,男,1967年生,博士,研究员,岩石学专业, E-mail: mengfancong@yeah.net

大坂二长花岗岩与祁漫塔格晚三叠世火山岩形成时代相近, 响应于三叠纪末古特提斯洋的关闭。

关键词 U-Pb 年龄; 地球化学; Nd-Hf 同位素; 二长花岗岩; 玛兴大坂; 祁漫塔格

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

东昆仑造山带位于中央造山带中段, 西被阿尔金断裂带切割, 东与西秦岭相接, 是青藏高原内部可与冈底斯带相媲美的一条巨型构造岩浆岩带(姜春发等, 2000; 莫宣学等, 2007)。祁漫塔格位于东昆仑造山带西段, 重建该区的构造岩浆演化不仅有助于了解东昆仑造山带的形成历史, 而且对深入认识青藏高原东北部的形成演化也有着重要意义。

印支期是昆仑地区构造岩浆活动表现非常强烈的时期之一(姜春发等, 1992), 一般认为东昆仑地区晚古生代-早中生代构造岩浆旋回可划分为两个阶段: 早期的洋壳俯冲阶段、晚期的大洋(昆南洋)闭合和碰撞造山阶段(罗照华等, 1999); 或者更加详细地划分为 3 个阶段: (1) 洋脊(昆南洋)形成与扩张阶段(309~260Ma); (2) 大洋板块大规模俯冲阶段(260~230Ma); (3) 陆内造山阶段(230~190Ma)(郭正府等, 1998); 或者认为昆仑带在晚古生代到中生代的演化集中表现为多岛弧的形成演化(潘桂棠等, 2001; 尹福光等, 2003)。可见, 对东昆仑地区从晚古生代到中生代地球动力学演化过程仍有争议。关于昆南洋的闭合时间, 多数学者认为是华力西期, 并指出二叠纪晚期古特提斯洋(昆南洋)闭合以后, 印支期东昆仑进入陆内造山阶段(姜春发等, 1992; 罗照华等, 1999, 2002; 袁万明等, 2000; 刘成东等, 2002, 2003, 2004; 任纪舜, 2004; 谌宏伟等, 2005; 莫宣学等, 2007)。

东昆仑大规模的印支期花岗岩还与区域多金属矿产有密切关系(莫宣学等, 1998^①; 张德全和罗照华, 2001^②)。在对祁漫塔格乌兰乌珠尔铜矿、鸭子沟多金属矿、卡尔却卡铜多金属矿、四角羊沟多金属矿的研究中, 认为印支期岩浆和流体为祁漫塔格多金属矿提供了主要成矿物质(余全等, 2007; 李世金等, 2008; 王松等, 2009; 丰成友等, 2010; 李洪普, 2010), 如印支期岩浆热液是肯德可克铁多金属矿的主要成矿物质来源(王力等, 2003; 赵财胜等, 2006)。因此研究东昆仑祁漫塔格印支期花岗岩, 还对认识东昆仑多金属矿产成因有着重要意义。

本文以祁漫塔格玛兴大坂花岗岩体为研究对象, 根据其岩石地球化学、Sm-Nd 同位素和锆石原位 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征来探讨花岗岩的成因及其与多金属矿产的关系。

2 地质背景

2.1 区域地质概况

东昆仑造山带位于青藏高原的东北部, 柴达木盆地南

缘, 西至阿尔金断裂, 东被温泉断裂所截, 自北向南有两条重要的深大断裂带-东昆中和东昆南断裂带, 将东昆仑造山带区分为不同的构造单元(图 1a)(姜春发等, 2000)。祁漫塔格岩浆岩带主要位于东昆仑造山带的西段, 东北与柴达木地块相邻, 西南以昆南断裂为界(图 1a, b)。

玛兴大坂位于祁漫塔格山东南部, 北靠乌兰乌珠尔山, 南邻那陵郭勒河, 西临喀雅克登塔格, 东邻尕林格地区(图 1b)。区内老的变质基底呈残块出露于东、西部和北部, 主要为元古界金水口群(Ptj)和狼牙山群(Ptl), 前者主要由一套中深变质的混合岩、变粒岩、二云斜长片麻岩、石英片岩及少量的石英岩和大理岩夹层构成; 后者主要由白云岩、白云质灰岩等浅变质的碳酸盐和碎屑岩构成(刘红涛, 2001)。另外还有规模较大的三叠系鄂拉山组中酸性火山岩系以及沿着巴音郭勒河和那陵郭勒河两侧分布的第三系和第四系地层(图 1c)。侵入岩主要为晚华力西-印支期花岗岩, 尤以印支期花岗岩规模大, 岩石组合复杂, 构成了规模巨大的祁漫塔格岩浆岩构造带(莫宣学等, 2007)。该岩浆岩带多以不规则的长条状岩基或岩株, 沿祁漫塔格山体的走向(NW-SE)展布。祁漫塔格地区经历了加里东期和华力西-印支期裂解-闭合的复合造山旋回, 形成了一系列与裂隙-火山作用和构造-岩浆作用有关的铁、金、钴等多金属矿产(潘彤, 2005)。在玛兴大坂岩体北侧肯德大湾发现的储量为 6668.52×10^4 t 的肯德可克铁矿, 是以铁、金为主的多金属矿产, 矿区钙矽卡岩中金云母 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年龄为 214Ma(张绍宁和陈世顺, 2004^③); 矿床中斜长石 ^{39}Ar - ^{40}Ar 中子活化法年龄为 207.8 ± 1.9 Ma(赵财胜等, 2006), 证明肯德可克铁多金属矿形成于印支期。

2.2 岩体特征

玛兴大坂岩体出露面积 50km², 岩石类型为二长花岗岩, 岩体成分较均一, 呈不规则椭圆状侵入华力西期的喀雅克登塔格杂岩体中, 此杂岩体以浅肉红色二长花岗岩为主, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 394 ± 13 Ma(谌宏伟等, 2006), 二者一起呈 NWW-SEE 方向展布, 长轴方向大致平行东昆中断裂(图 1c)。

本文研究的四件花岗岩样品(Q08-9-1.1、Q08-9-1.2、

- ① 莫宣学, 邓晋福, 喻学惠等. 1998. 青海东昆仑铜\金成矿作用及其地质背景. 科研报告
- ② 张德全, 罗照华. 2001. 柴达木盆地南北缘成矿地质环境及找矿远景对比研究. 科研报告
- ③ 张绍宁, 陈世顺. 2004. 青海省格尔木市肯德可克矿区铁金多金属矿资源量估算报告. 青海省矿产资源评审报告

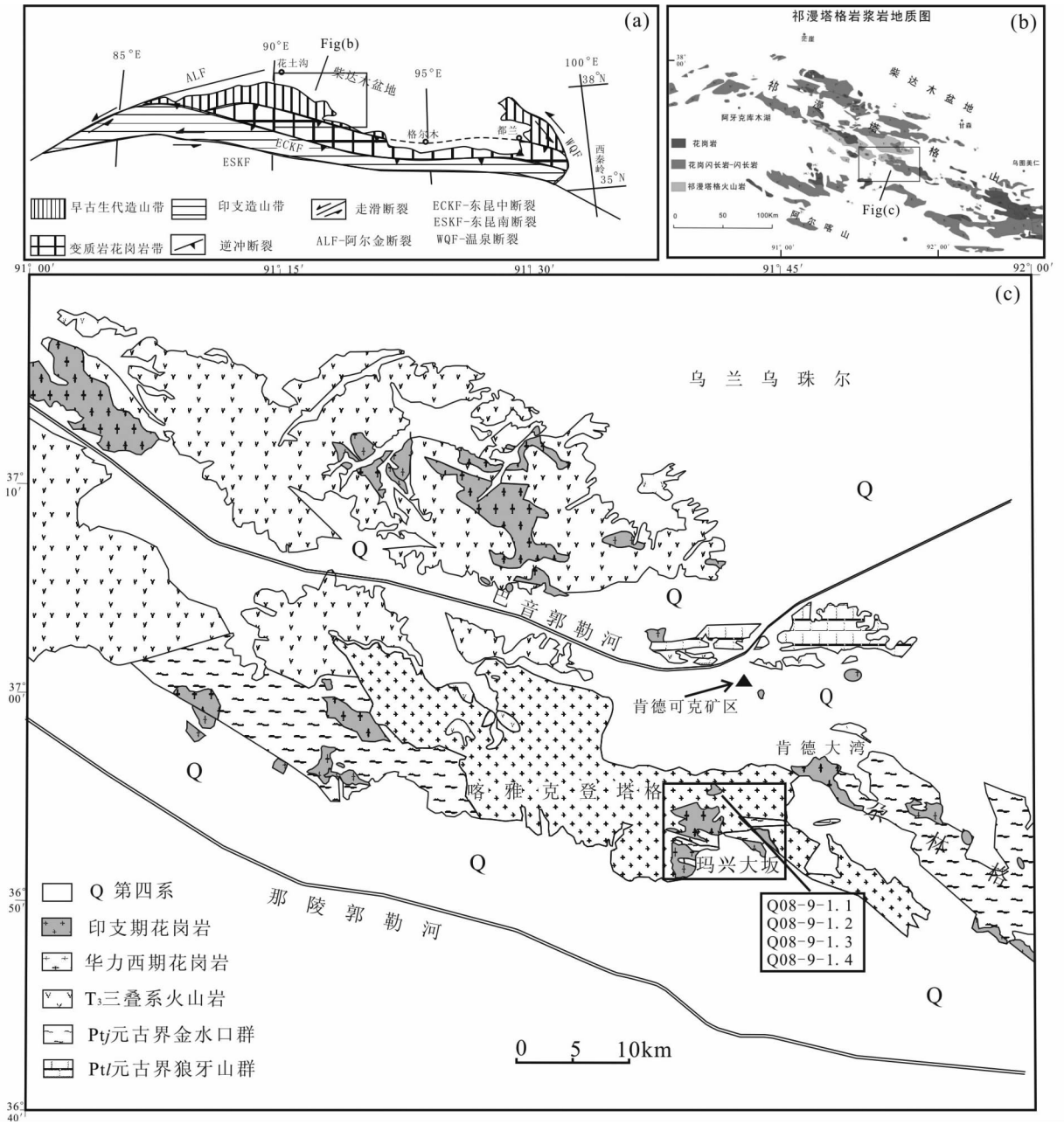


图1 东昆仑大地构造图(a, 据姜春发等, 2000)、祁漫塔格岩浆岩地质简图(b, 据青海省区测队, 1971^①)和青海祁漫塔格玛兴大坂岩体地质图(c, 据青海省地质矿产局第一区域调查队, 1983^②)

Fig. 1 Tectonic map of the East Kunlun (a, after Jiang *et al.*, 2000), simplified geological map of the Qimantag magmatite belt (b) and simplified geological map of the Maxingdaban granitic pluton in Qimantag, Qinghai Province (c)

Q08-9-1.3、Q08-9-1.4) 都来自玛兴大坂岩体, 采样位置为 36°55.33'N, 91°40.17'E; 样品均为二长花岗岩, 呈灰白色, 中粗粒等粒结构, 块状构造, 主要矿物组合为斜长石 (30% ~ 35%)、钾长石 (25% ~ 33%)、石英 (23% ~ 25%)、黑云母

(3% ~ 5%), 副矿物主要为锆石、微量的磷灰石。黑云母呈现弱的绿泥石化, 长石表面部分高岭土化, 部分绢云母化与碳酸盐岩化 (图 2a, b)。

① 青海省区测队. 1971. 中华人民共和国 1:100 万区域地质调查图青海图幅

② 青海省地质矿产局第一区域调查队. 1983. 中华人民共和国 1:20 万区域地质调查报告伯咯里克幅, J-46-[26]

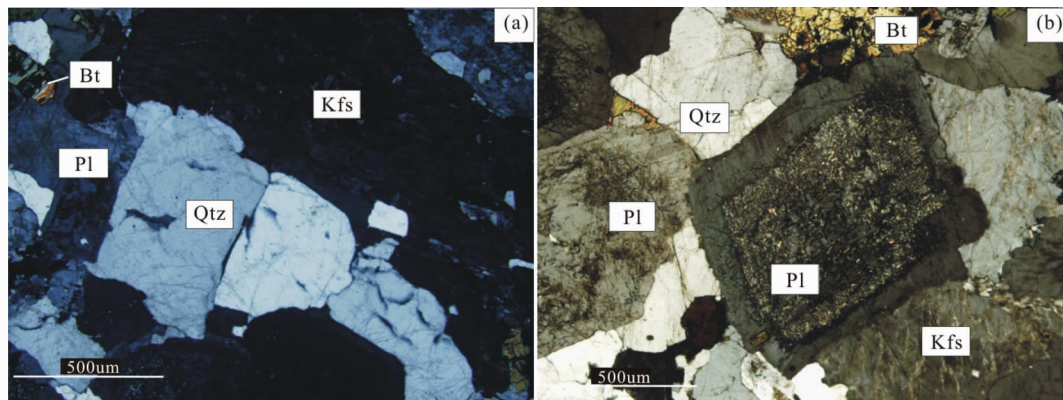


图2 玛兴大坂花岗岩矿物组成

(a)-二长花岗岩由斜长石+石英+钾长石+黑云母组成(样品 Q08-9-1.1);(b)-二长花岗岩中流体作用引起斜长石核部绢云母化与碳酸盐岩化(样品 Q08-9-1.2)

Fig.2 Mineral assemblage of the Moxingdaban granite

(a)-mineral assemblage of monzogranite is plagioclase + quartz + K-feldspar + biotite (sample Q08-9-1.1); (b)-plagioclase sericitization and carbonatization by action of a fluid of monzogranite (sample Q08-9-1.2)

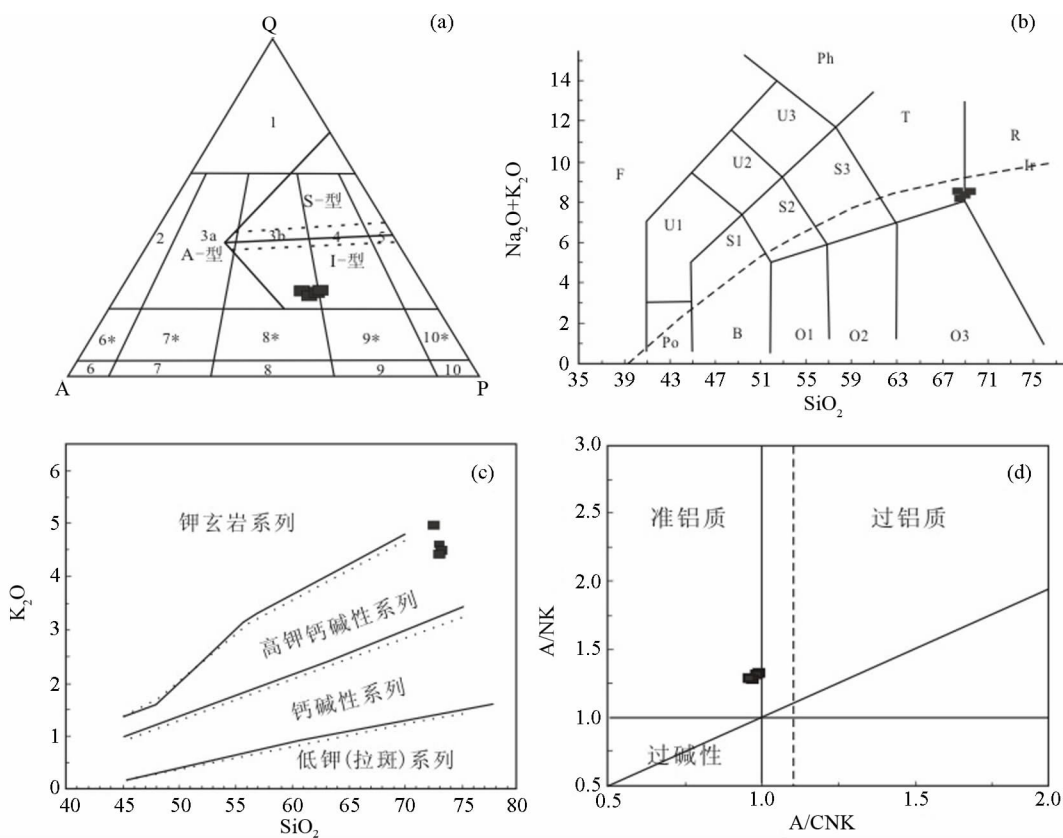


图3 花岗岩分类图解

(a)-玛兴大坂二长花岗岩的 QAP 三角分类图(据 Le Maitre *et al.*, 1989), QAP 的 I、S、A 型分界线(据 Bowden *et al.*, 1982); 3b-二长花岗岩, 4-花岗闪长岩; (b)-玛兴大坂二长花岗岩硅碱图(据 Middlemost, 1994); 碱性系列和钙碱性/拉斑系列的分界线据 Irvine and Baragar (1971); (c)-玛兴大坂二长花岗岩 K_2O-SiO_2 图(据 Rickwood, 1989); (d)-玛兴大坂二长花岗岩 A/CNK-A/NK 图(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig.3 Various classification diagrams of the granites

(a)-QAP diagram of the Moxingdaban monzogranite (after Le Maitre *et al.*, 1989); boundaries of ISA type (after Bowden *et al.*, 1982); 3b-monzogranite, 4-granodiorite; (b)-TAS diagram of the Moxingdaban monzogranite (after Middlemost, 1994); boundaries of alkaline series and calc-alkaline/tholeiitic series after Irvine and Baragar (1971); (c)- K_2O-SiO_2 diagram of the Moxingdaban monzogranite (after Rickwood, 1989); (d)-A/CNK-A/CK plot of the Moxingdaban monzogranite (after Maniar and Piccoli, 1989)

表1 玛兴大坂二长花岗岩全岩常量元素 (wt%)、稀土元素和微量元素 ($\times 10^{-6}$)Table 1 Chemical compositions of major (wt%), rare earth and trace elements ($\times 10^{-6}$) for the Maxingdaban monzogranite

样品号	Q08-9-1.1	Q08-9-1.2	Q08-9-1.3	Q08-9-1.4	样品号	Q08-9-1.1	Q08-9-1.2	Q08-9-1.3	Q08-9-1.4
SiO ₂	69.37	68.99	68.98	68.61	Dy	3.81	3.41	3.67	3.71
TiO ₂	0.41	0.38	0.4	0.39	Ho	0.8	0.7	0.75	0.75
Al ₂ O ₃	14.75	15.1	14.92	15.12	Er	2.47	2.18	2.29	2.46
Fe ₂ O ₃	1.56	1.44	1.59	1.33	Tm	0.37	0.34	0.34	0.36
FeO	1.67	1.44	1.62	1.64	Yb	2.51	2.35	2.46	2.44
MnO	0.09	0.07	0.08	0.08	Lu	0.4	0.34	0.38	0.38
MgO	0.73	0.68	0.74	0.68	ΣREE	219.7	136.4	214.2	192.8
CaO	2.12	2.1	2.09	2.09	LREE/HREE	13.06	8.83	13.30	11.81
Na ₂ O	4.3	4.32	4.31	4.55	(La/Yb) _N	15.52	9.25	15.37	13.38
K ₂ O	4.08	3.97	3.95	3.95	δEu	0.51	0.65	0.56	0.57
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.12	0.11	δCe	0.96	0.97	0.94	0.96
H ₂ O ⁺	0.62	0.54	0.86	0.66	Y	22.5	19.9	21.2	21.4
CO ₂	0.3	0.22	0.3	0.22	Rb	139	120	127	130
LOI	0.74	0.76	0.92	0.78	Sr	247	274	259	263
A/CNK	0.96	0.99	0.98	0.97	Ba	723	793	749	735
A/NK	1.28	1.32	1.31	1.29	Nb	16.8	14.6	15.8	15.3
ALK	8.38	8.29	8.26	8.50	Ta	1.34	1.19	1.11	1.16
AKI	0.57	0.55	0.55	0.56	Zr	347	323	322	330
FeO ^T /MgO	4.21	4.02	4.12	4.17	Hf	8.22	7.71	7.67	7.88
La	54.3	30.3	52.7	45.5	Th	20.8	11.2	20.8	18.8
Ce	99.1	57.9	95.2	85	U	1.26	1.67	1.7	1.14
Pr	10.3	6.41	10.4	9.32	V	21.6	19.1	21	20.8
Nd	34.3	23	34.9	31.8	Cr	19.8	7.62	12.5	4.05
Sm	5.23	4.06	5.15	5.23	Co	3.97	3.29	3.82	4.29
Eu	0.84	0.87	0.9	0.91	Ni	9.66	4.74	6.77	3.39
Gd	4.6	3.98	4.47	4.34	Sc	3.76	3.28	3.8	3.66
Tb	0.66	0.58	0.62	0.61					

注: ALK = K₂O + Na₂O; AKI = (K₂O + Na₂O)/Al₂O₃; 摩尔比: A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O), 摩尔比: A/NK = Al₂O₃/(Na₂O + K₂O); FeO^T/MgO = (FeO + 0.8998 × Fe₂O₃)/MgO

3 分析方法

岩石化学分析在国家地质实验测试中心完成。常量元素采用 ICP-AES (原子发射光谱) 其中 FeO 采用容量法, K₂O 采用原子吸收; LOI 为 1000℃ 烧失; 稀土元素中, La、Ce 采用 ICP-AES, 其他元素采用 ICP-AES 和 ICP-MS (等离子质谱) 两种方法, 微量元素中 Sr、Ba 采用 ICP-AES; Nb、Rb、Zr、Cr、V、Co、Th、Hf、Ta、U、Sc、Ni 采用 ICP-MS。具体分析步骤见文献 (孟繁聪等, 2003)。

锆石的分选在河北廊坊区域地质调查研究院进行, 首先对样品进行人工重砂、重液、电磁仪等多种方法分离, 然后在双目镜下选择透明、无包裹体具有代表性的锆石颗粒, 将待测的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶, 磨至锆石颗粒中心部分后抛光, 样品抛光后进行 CL 显微结构观察, 锆石的 CL 分析在中国地质科学院地质研究所国土资源部大陆动力学重点实验室进行。在此基础上选择合适的锆石颗粒进行 U-Pb 年龄测定, 锆石 U-Pb 同位素测年在中国地质调查局天津地质矿产研究所测试中心完成, 采用单颗粒锆石 U-Pb 法。所用

仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193nm 激光取样系统 (LA-MC-ICP-MS)。锆石标样采用 TEMORA 标准锆石, 数据处理采用中国地质大学刘勇胜编写的 ICPMS DataCal 程序和 Kenneth R. Ludwig 的 ISPLIT 程序进行分析和作图, 采用²⁰⁸Pb 对普通铅进行校正, 利用 NIST612 作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。详细测试流程见文献 (李怀坤等, 2009)。

样品的 Sm-Nd 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所完成, 仪器采用 VG354 质谱仪, Sm、Nd 测定金属离子, 用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 进行 Nd 同位素质量歧视校正。样品测定期间标样的测量结果为: JMC 0.511973 ± 15 ~ 0.511972 ± 11 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd), 实验室全流程本底大约为 Sm、Nd: 10⁻¹¹ g。Sm-Nd 的化学分离和质谱测定详细流程见文献 (Qiao, 1988)。

锆石 Hf 同位素在 U-Pb 分析后进行, 测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP 213 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行的, 分析点靠近 U-Pb 测定点。ε_{Hf}(t) 计算采用衰变常数 λ = 1.865 × 10⁻¹¹

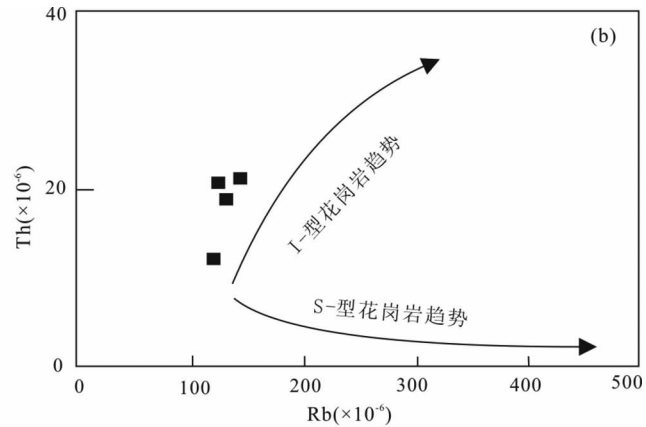
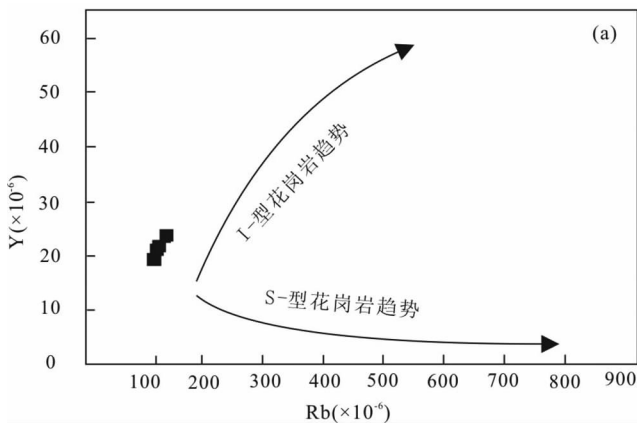


图4 玛兴大坂二长花岗岩的 Th/Rb 图(a)和 Y/Rb 图(b)

I型和S型花岗岩趋势线据 Chappell and Stephens (1988)

Fig.4 Th/Rb diagram (a) and Y/Rb diagram (b) of the Maxingdaban monzogranit

The trends of I-type and S-type granites after Chappell and Stephens (1988)

year⁻¹, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$ (Bichert-Toft *et al.*, 1997), 亏损地幔模式年龄 (t_{DM1}) 计算采用 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2002), 两阶段 Hf 模式年龄计算时, 平均地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.015。相关仪器运行条件及详细分析流程见文献 (侯可军等, 2007)。

4 分析结果

4.1 常量元素

选取玛兴大坂二长花岗岩岩体代表性岩石样品 (Q08-9-1.1、Q08-9-1.2、Q08-9-1.3、Q08-9-1.4) 进行了地球化学分析 (表1)。岩石的 SiO₂ 含量为 68.61% ~ 69.37%, K₂O 含量为 3.95% ~ 4.08%, P₂O₅ 含量为 0.11% ~ 0.12%, MgO 含量为 0.68% ~ 0.74%, CaO 含量为 2.09% ~ 2.12%, 在 QAP 图中主要落入二长花岗岩区域, 少数投点落在二长花岗岩与花岗闪长岩的分界线上 (图 3a), 与岩相学观察结果一致 (图 2)。岩石全碱含量 (ALK) 为 8.26% ~ 8.38%, 碱指数 (AKI) 为 0.55 ~ 0.57 (表 1), 反映岩石总体为亚碱性; 根据 TAS 系列划分图解和 SiO₂-K₂O 协变图解 (图 3b, c), 显示岩石为高钾钙碱性系列。

玛兴大坂二长花岗岩的 A/CNK = 0.96 ~ 0.99 < 1、A/NK = 1.28 ~ 1.32, 显示为准铝质花岗岩 (图 3d), 具有 I 型花岗岩特征 (Barbarin, 1999; 肖庆辉等, 2002)。CIPW 标准矿物中无透辉石、刚玉分子, 比较接近 I 型花岗岩特征 (肖庆辉等, 2002)。同时通过 QAP 投图 (Le Maitre *et al.*, 1989), 数据点都落入 I 型花岗岩区域 (图 3d)。花岗岩的 FeO^T/MgO 比值能有效地区分其成因类型 (Eby, 1990; 朱弟成等, 2009), 玛兴大坂二长花岗岩 FeO^T/MgO 比值偏低为 4.02 ~ 4.21, 平均值 4.13, 可以排除 A 型, 而属于 I 型或者 S 型。Y/

Rb 和 Th/Rb 的关系也能反映岩石成因类型问题 (Chappell and Stephens, 1988; Li *et al.*, 2007), 玛兴大坂二长花岗岩的 Y 与 Rb 含量呈正相关关系, Th 与 Rb 含量也呈现正相关关系 (图 4a, b), 与澳大利亚 Lachlan 褶皱带典型 I 型花岗岩的特征类似。

4.2 稀土微量元素

玛兴大坂二长花岗岩稀土元素显示具有明显的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.51 \sim 0.65$), 稀土总量为 $136.4 \times 10^{-6} \sim 219.7 \times 10^{-6}$, 轻重稀土总量比为 8.83 ~ 13.30, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 9.25 \sim 15.52$, 反映了岩石不同程度的富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素。各个样品稀土元素配分曲线呈现出右倾型, 轻稀土较陡, 重稀土较缓, 说明轻稀土分馏程度高, 重稀土分馏较弱, 这与传统的地壳重熔型或地幔型的稀土元素构成有所不同 (李昌年, 1992)。与祁漫塔格鄂拉山组火山岩和肯德可克铁多金属矿床矿石-砂卡岩的稀土配分曲线相似 (图 5a), 反映了它们可能是同源岩浆演化的产物。Eu 的负异常可能与斜长石 (钾长石) 的分离结晶作用有关 (李昌年, 1992), 而源区越深, 其分离结晶越强时才能使残余岩浆变成酸性, 分离结晶越强时残余岩浆中的 Eu 的亏损就越明显。玛兴大坂二长花岗岩的 $\delta\text{Eu} = 0.51 \sim 0.65$, 岩浆可能经历过较长时间的分离结晶作用。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上 (图 5b), 玛兴大坂二长花岗岩富集 Rb、Th 等大离子亲石元素, 明显亏损高场强元素 (Sr、P、Ti、Nb、Ta)。而大陆弧背景下造山花岗岩均具有 Sr、P、Ti 等元素的亏损, 而 Nb 的负异常更能反映花岗岩具有大陆壳的特征 (李昌年, 1992); 玛兴大坂二长花岗岩具有 Sr、P、Ti、Nb 等元素的亏损, 因此, 认为该岩石为大陆弧造山花岗岩。

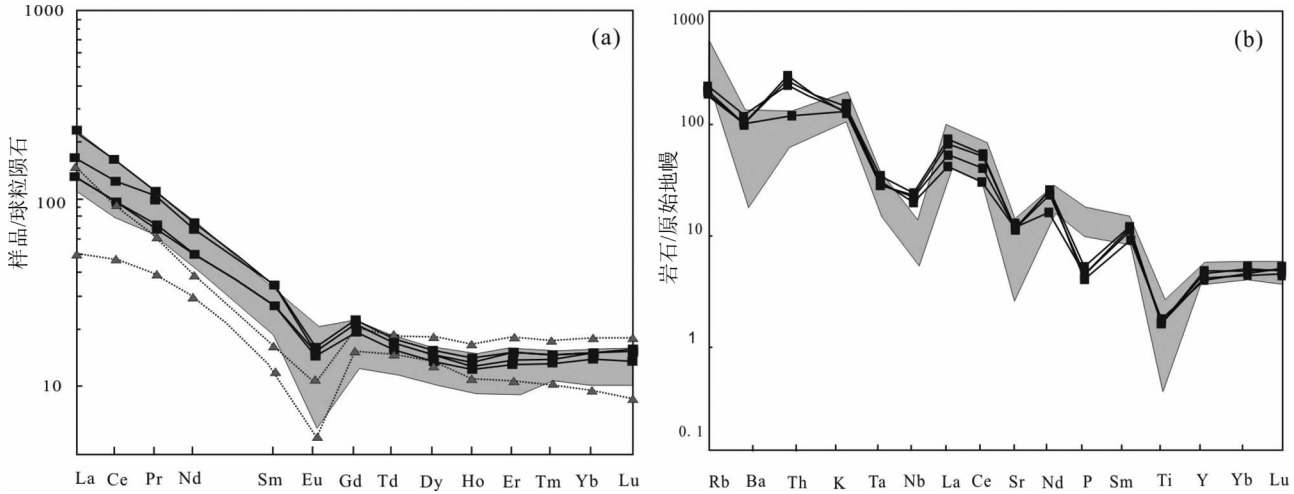


图5 玛兴大坂二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化配分图(b) (据 Sun and McDonough, 1989)

图中灰色部分为祁漫塔格火山岩的数据(据刘红涛,2001),虚线为肯德可克铁金多金属矿床矿石和矽卡岩的数据(据李洪普,2010)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle-normalized spidergrams patterns (b) of the Moxingdaban monzogranite (after Sun and McDonough, 1989)

Gray lines are the data of the Qimantag volcanic rock (after Liu, 2001), broken lines are the data of ore minerals and Skarn from Kendekeke iron and polymetallic deposit (after Li, 2010)

表2 玛兴大坂二长花岗岩 Sm-Nd 同位素成份

Table 2 Sm-Nd isotopic compositions of the Moxingdaban monzogranite

样品号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$	2σ	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}_i$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM} (Ma)	t_{DM2} (Ma)
Q08-9-1.1	5.587	36.916	0.09154	0.512326	5	0.512195	-0.53	-6.1	-3.2	1030	1254
Q08-9-1.2	4.409	25.416	0.10490	0.512380	9	0.512230	-0.47	-5	-2.5	1081	1199
Q08-9-1.3	5.413	36.403	0.08994	0.512340	6	0.512212	-0.54	-5.8	-2.8	1000	1228
Q08-9-1.4	5.343	33.733	0.09580	0.512339	10	0.512202	-0.51	-5.8	-3.0	1050	1243

注:同位素校正公式: $\lambda = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} + (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m \times (e^{\lambda t} - 1)$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}(t)} - 1] \times 10^4$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}(t)} = 0.512638 - 0.1967 \times (e^{\lambda t} - 1)$; $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.51315) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.21317)] \}$; $\lambda_{\text{Sm-Nd}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$; t_{DM2} 为二阶段模式年龄(参数据 Keto and Jacobsen, 1987)

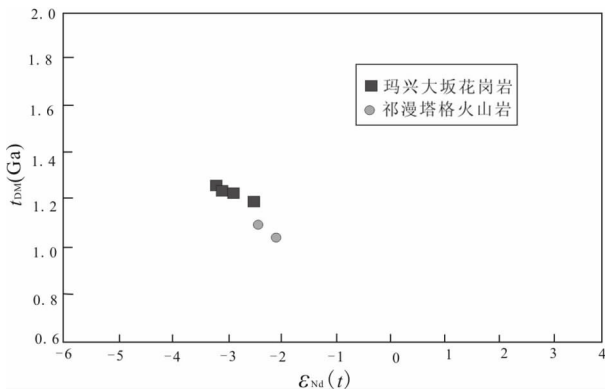


图6 玛兴大坂二长花岗岩与祁漫塔格火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t_{DM} 对比图

Fig.6 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t_{DM} diagram for the Moxingdaban monzogranite and Qimantag lava

4.3 Sm-Nd 同位素

对玛兴大坂二长花岗岩体的四个样品进行了 Sm-Nd 同位素分析(表2),得到的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为0.512326~0.512340, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.5 \sim -3.2$,根据其形成年龄为218Ma(下文),计算得到岩体的 Nd 同位素二阶段模式年龄为1.20~1.25Ga。

玛兴大坂二长花岗岩与祁漫塔格陆相火山岩的 Nd 同位素组成非常接近(图6),祁漫塔格陆相火山岩位于祁漫塔格山东段的依夏克帕提-野马泉一带,在空间上与玛兴大坂毗邻(图1c),形成于塔里木陆块南缘印支期活动大陆边缘(刘红涛,2001)。

4.4 锆石年代学

二长花岗岩(Q08-9-1.1)的锆石大部分为自形晶,呈短

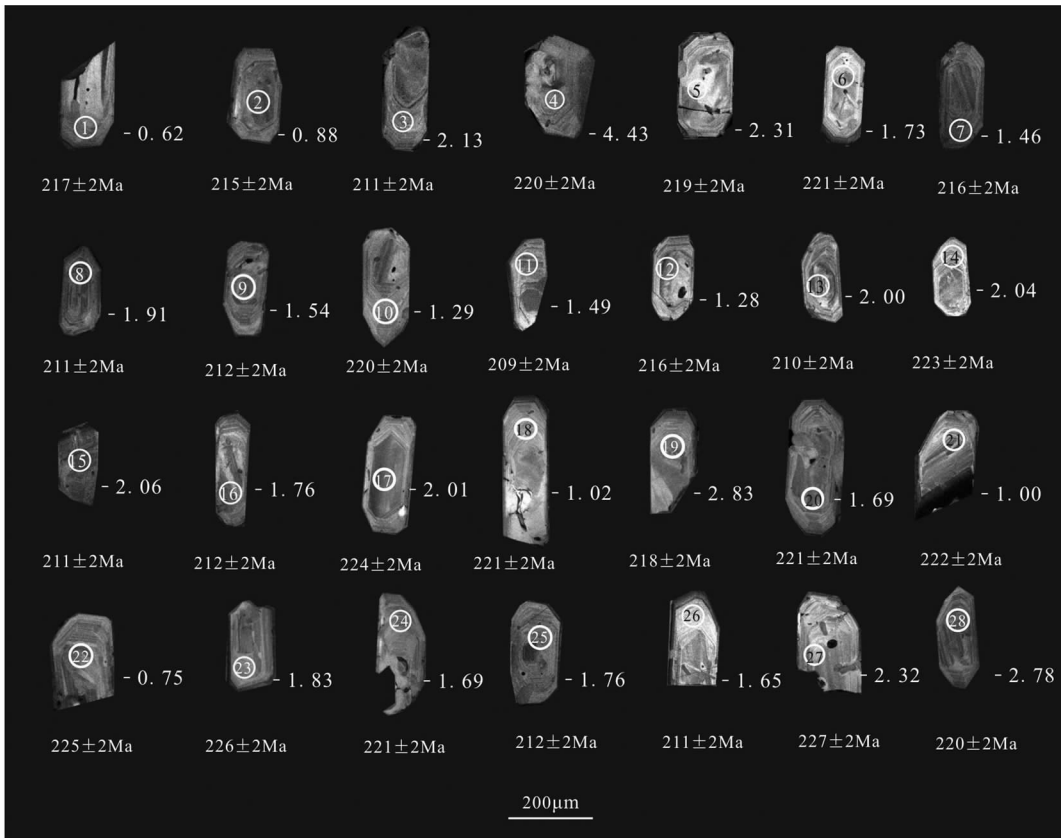


图7 玛兴大坂二长花岗岩 (Q08-9-1.1) 锆石 CL 图像、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和原位 Hf 同位素初始比值

Fig.7 CL images of the representative zircon grains with $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age and initial Hf isotope ratio of the Maxingdaban monzogranite (sample Q08-9-1.1)

柱-长柱状, 颗粒长 × 宽为 $200 \sim 400 \mu\text{m} \times 50 \sim 150 \mu\text{m}$, CL 图像显示锆石发育较宽的岩浆振荡环带 (图7), 表明锆石属于岩浆成因 (Rubatto and Gebauer, 2000)。对其中 28 粒锆石进行了 U-Pb 同位素测试 (表3), 其 Th/U 比值为 0.29 ~ 0.46, 平均值为 0.37, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中于 209 ~ 226 Ma 之间, 其加权平均值为 $218 \pm 2 \text{ Ma}$ (MSWD = 7.3), 在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 同位素年龄谱和图上, 数据点基本位于谐和曲线上 (图8), 此年龄代表了玛兴大坂二长花岗岩的形成时代, 相当于晚三叠世, 属于印支晚期。

4.5 锆石 Hf 同位素

对二长花岗岩中 28 颗测年锆石进行了 Lu-Hf 同位素分析 (表4), 锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别是 0.019944 ~ 0.062107 和 0.000621 ~ 0.001708, 显然锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 表明这些锆石形成以后, 仅有少数放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (吴福元等, 2007)。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-4.43 \sim -0.62$, 平均值为 -1.80 (图7), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 全部显示为微弱的负值, 且变化范围不大。

由于锆石的 Lu/Hf 值 ($f_{\text{Lu/Hf}} = -0.95 \sim -0.98$) 显著小

于大陆地壳, 因此 Hf 的二阶段模式年龄能更真实地反映其源区物质从亏损地幔抽取的时间 (第五春荣等, 2007), 而所有样品锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 1.08 ~ 1.28 Ga, 与该岩体的 Nd 同位素二阶段模式年龄 1.20 ~ 1.25 Ga 基本一致 (表2), 表明玛兴大坂地区初始地壳可能形成于 1.08 ~ 1.28 Ga 之间的中元古代晚期。

5 讨论

5.1 与东昆仑祁漫塔格火山岩对比

祁漫塔格火山岩位于柴达木南缘, 祁漫塔格山东段, 那陵郭勒河北部 (图1c), 主要由中酸性熔岩和火山碎屑岩构成, 且火山碎屑岩所占比例大于 70% (刘红涛, 2001)。祁漫塔格火山岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄 ($208 \pm 4 \text{ Ma} \sim 222 \pm 2 \text{ Ma}$) 为晚三叠世 (刘红涛, 2001), 而玛兴大坂二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄 $218 \pm 2 \text{ Ma}$ 也为晚三叠世。同时, 它们的微量元素配分图和蛛网图也显示了相似性 (图5a, b)。Nd 同位素中, 对于 $f_{\text{Sm/Nd}} = -0.3 \sim -0.5$ 之间的样品, 用单阶段模式计算 t_{DM} 是合适的, 但对于 $f_{\text{Sm/Nd}} > -0.3$ 或 < -0.5 , 采用两阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 计算方法较合理 (Liew and Hofman,

表3 玛兴大坂二长花岗岩 (Q08-9-1.1) LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 3 LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of zircons from Mxingdaban monzogranite (sample Q08-9-1.1)

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值						表面年龄 (Ma)					
				$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ
1	6	175	0.29	0.0342	0.0003	0.2400	0.0070	0.0509	0.0015	217	2	232	6	364	67
2	8	230	0.35	0.0339	0.0003	0.2476	0.0070	0.0530	0.0015	215	2	223	6	251	62
3	9	251	0.34	0.0333	0.0003	0.2560	0.0087	0.0558	0.0017	211	2	230	8	323	69
4	7	191	0.33	0.0347	0.0003	0.2451	0.0056	0.0512	0.0011	220	2	218	5	236	51
5	4	120	0.35	0.0346	0.0003	0.2567	0.0093	0.0538	0.0002	219	2	228	8	353	83
6	7	185	0.41	0.0349	0.0003	0.2545	0.0062	0.0529	0.0013	221	2	231	6	444	56
7	7	214	0.42	0.0342	0.0003	0.2523	0.0038	0.0536	0.0015	216	2	225	3	328	63
8	9	251	0.46	0.0333	0.0003	0.2571	0.0068	0.0530	0.0014	211	2	222	6	328	60
9	10	295	0.36	0.0335	0.0003	0.2440	0.0062	0.0530	0.0013	212	2	226	6	328	58
10	8	217	0.38	0.0347	0.0003	0.2497	0.0066	0.0530	0.0014	220	2	232	6	328	61
11	8	230	0.43	0.0329	0.0003	0.2409	0.0067	0.0530	0.0015	209	2	238	6	328	63
12	12	341	0.44	0.0341	0.0003	0.2583	0.0059	0.0530	0.0012	216	2	211	5	328	51
13	7	215	0.43	0.033	0.0003	0.2314	0.0066	0.0530	0.0015	210	2	233	6	328	65
14	10	242	0.36	0.0352	0.0003	0.2466	0.0054	0.0530	0.0012	223	2	219	5	328	50
15	6	187	0.34	0.0332	0.0003	0.2284	0.0069	0.0530	0.0016	211	2	224	6	328	69
16	9	255	0.33	0.0335	0.0003	0.2353	0.0069	0.0530	0.0016	212	2	209	6	328	57
17	10	269	0.40	0.0353	0.0003	0.2388	0.0064	0.0530	0.0014	224	2	215	6	328	61
18	8	218	0.40	0.0349	0.0003	0.2553	0.0070	0.0530	0.0015	221	2	220	6	328	63
19	7	198	0.33	0.0344	0.0003	0.2542	0.0073	0.0530	0.0015	218	2	231	7	328	65
20	8	217	0.33	0.0349	0.0003	0.2500	0.0070	0.0530	0.0015	221	2	230	6	328	64
21	7	197	0.44	0.0351	0.0003	0.2461	0.0064	0.0530	0.0014	222	2	217	6	328	59
22	7	196	0.43	0.0355	0.0003	0.2536	0.0079	0.0530	0.0016	225	2	227	7	328	67
23	16	429	0.35	0.0356	0.0003	0.2498	0.0056	0.0530	0.0012	226	2	234	5	328	51
24	8	211	0.34	0.0349	0.0003	0.2405	0.0064	0.0530	0.0014	221	2	229	6	328	60
25	7	207	0.32	0.0335	0.0003	0.2353	0.0069	0.0530	0.0016	212	2	236	6	328	66
26	6	166	0.36	0.0332	0.0003	0.2422	0.0041	0.0530	0.0009	211	2	223	4	328	39
27	10	270	0.33	0.0359	0.0003	0.2614	0.0066	0.0530	0.0014	227	2	219	6	328	59
28	8	226	0.38	0.0347	0.0003	0.2587	0.0070	0.0530	0.0014	220	2	226	6	328	61

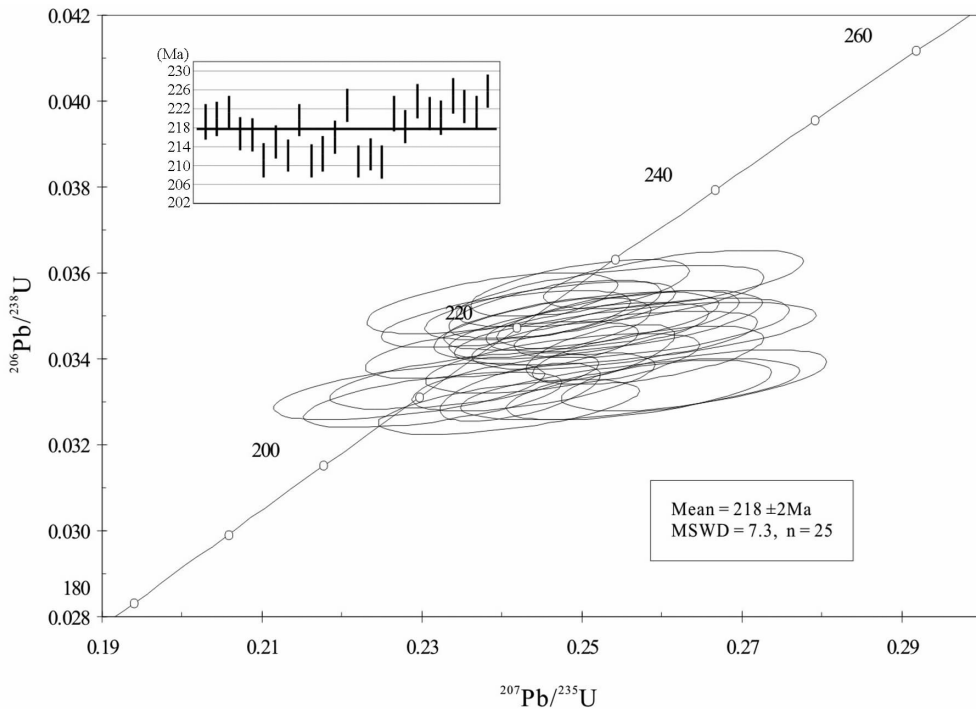


图8 玛兴大坂二长花岗岩 (Q08-9-1.1) 的锆石 U-Pb 同位素谱和图

Fig. 8 Zircon U-Pb concordia diagram of the Mxingdaban monzogranite (sample Q08-9-1.1)

表 4 玛兴大坂二长花岗岩 (Q08-9-1.1) LA-MC-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素原位测试数据

Table 4 LA-MC-ICP-MS in-situ analysis of zircon Lu-Hf isotope composition of the Maxingdaban monzogranite (Q08-9-1.1)

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_t$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM} (Ga)	t_{DM2} (Ga)
1	217	0.020863	0.000632	0.282623	0.000011	0.282620	-0.98	-5.28	-0.62	0.88	1.08
2	215	0.023959	0.000702	0.282617	0.000012	0.282614	-0.98	-5.49	-0.88	0.89	1.09
3	211	0.033192	0.000946	0.282585	0.000011	0.282581	-0.97	-6.63	-2.13	0.94	1.15
4	220	0.062107	0.001708	0.282517	0.000012	0.282510	-0.95	-9.00	-4.43	1.06	1.28
5	219	0.028731	0.000776	0.282574	0.000015	0.282571	-0.98	-7.00	-2.31	0.95	1.17
6	221	0.026281	0.000826	0.282589	0.000012	0.282586	-0.98	-6.46	-1.73	0.93	1.14
7	216	0.029044	0.000856	0.282600	0.000011	0.282596	-0.97	-6.09	-1.46	0.92	1.12
8	211	0.021602	0.000670	0.282590	0.000011	0.282587	-0.98	-6.45	-1.91	0.93	1.14
9	212	0.023090	0.000712	0.282599	0.000011	0.282596	-0.98	-6.12	-1.57	0.92	1.12
10	220	0.021522	0.000684	0.282602	0.000012	0.282599	-0.98	-6.00	-1.29	0.91	1.12
11	209	0.023840	0.000713	0.282603	0.000012	0.282601	-0.98	-5.96	-1.49	0.91	1.12
12	216	0.028287	0.000827	0.282605	0.000012	0.282602	-0.98	-5.90	-1.28	0.91	1.11
13	210	0.026037	0.000877	0.282589	0.000015	0.282586	-0.97	-6.47	-2.00	0.94	1.14
14	223	0.034422	0.001015	0.282581	0.000011	0.282576	-0.97	-6.77	-2.04	0.95	1.16
15	211	0.027691	0.000837	0.282586	0.000012	0.282583	-0.97	-6.57	-2.06	0.94	1.15
16	212	0.023484	0.000730	0.282594	0.000011	0.282591	-0.98	-6.31	-1.76	0.93	1.13
17	224	0.022837	0.000679	0.282579	0.000011	0.282576	-0.98	-6.81	-2.01	0.94	1.16
18	221	0.022529	0.000672	0.282609	0.000010	0.282606	-0.98	-5.77	-1.02	0.90	1.10
19	218	0.035407	0.001030	0.282561	0.000011	0.282557	-0.97	-7.47	-2.83	0.98	1.19
20	221	0.038152	0.001077	0.282591	0.000013	0.282587	-0.97	-6.39	-1.69	0.94	1.14
21	222	0.022198	0.000641	0.282608	0.000011	0.282606	-0.98	-5.79	-1.00	0.90	1.10
22	225	0.021500	0.000649	0.282614	0.000011	0.282611	-0.98	-5.58	-0.75	0.89	1.09
23	226	0.039802	0.001125	0.282585	0.000013	0.282580	-0.97	-6.61	-1.83	0.95	1.15
24	221	0.038152	0.001077	0.282591	0.000013	0.282587	-0.97	-6.39	-1.69	0.94	1.14
25	212	0.023484	0.000730	0.282594	0.000011	0.282591	-0.98	-6.31	-1.76	0.93	1.13
26	211	0.019944	0.000621	0.282597	0.000011	0.282595	-0.98	-6.18	-1.65	0.92	1.13
27	227	0.034546	0.000991	0.282570	0.000012	0.282566	-0.97	-7.14	-2.32	0.96	1.17
28	220	0.033564	0.000971	0.282561	0.000011	0.282557	-0.97	-7.46	-2.78	0.98	1.19
平均值	—	—	—	—	—	—	—	-6.44	-1.80	0.93	1.14

1988;李献华等,1996),因此玛兴大坂二长花岗岩模式年龄采用 $t_{\text{DM2}} = 1.20 \sim 1.25\text{Ga}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.5 \sim -3.2$ (表 2),而祁漫塔格火山岩对应的模式年龄采用 $t_{\text{DM}} = 1.03 \sim 1.10\text{Ga}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.09 \sim -2.36$ (刘红涛,2001),显然它们之间模式年龄以及 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值都相近 (图 6),说明玛兴大坂二长花岗岩和祁漫塔格火山岩起源于中元古代之前的物质。因此,我们认为玛兴大坂二长花岗岩与祁漫塔格火山岩可能为同一时期同一构造环境下的产物,玛兴大坂二长花岗岩为侵入岩,祁漫塔格火山岩为喷出岩,而后者形成于活动大陆边缘 (刘红涛,2001),那么,玛兴大坂二长花岗岩可能具有类似的构造环境-活动大陆边缘。

5.2 岩石成因

东昆仑地区广泛发育三叠纪基性侵入体 (沈远超等,1999,2000;杨金中等,2000),它们产在深变质岩中或者与岩浆混合成因的花岗岩类共生,暗示下地壳物质的部分熔融与基性岩浆底侵作用有关 (罗照华等,1999,2002;刘红涛,

2001;刘成东等,2002,2003,2004;谌宏伟等,2005;莫宣学等,2007)。

玛兴大坂岩体显示了 SiO_2 含量中等 (68.61% ~ 69.37%)、高 K_2O (3.95% ~ 4.08%)、 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 值偏低 (4.02 ~ 4.21,平均值 4.13) 的特征,结合稀土微量元素证据 (前文),表明它经历了相对高程度结晶分异。玛兴大坂二长花岗岩 $\text{A}/\text{CNK} = 0.96 \sim 0.99$ 、 $\text{A}/\text{NK} = 1.25 \sim 1.32$,为准铝质 (图 3d),具有 I 型花岗岩特征。同时,因为富 Y 矿物不会在准铝质 I 型岩浆演化的早期阶段结晶出来,从而分异的准铝质 I 型花岗岩的 Y 含量高,并与 Rb 含量呈正相关关系 (Li *et al.*, 2007),而玛兴大坂二长花岗岩 Y 与 Rb 含量也呈正相关关系 (图 4a),显示了分异的准铝质 I 型花岗岩的特征。这些特点都暗示玛兴大坂岩体为壳幔混合的 I 型花岗岩。

而壳源 S 型花岗岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值一般小于 0.5121,壳幔混合的 I 型花岗岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化在 0.51210 ~ 0.51250 之间 (毛存孝等,1989;陆松年,1992)。考虑到研究区花岗岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值在 0.512326 ~ 0.512380 之间,均大于 0.51210 (表 2),表明玛兴大坂二长花岗岩具有壳幔

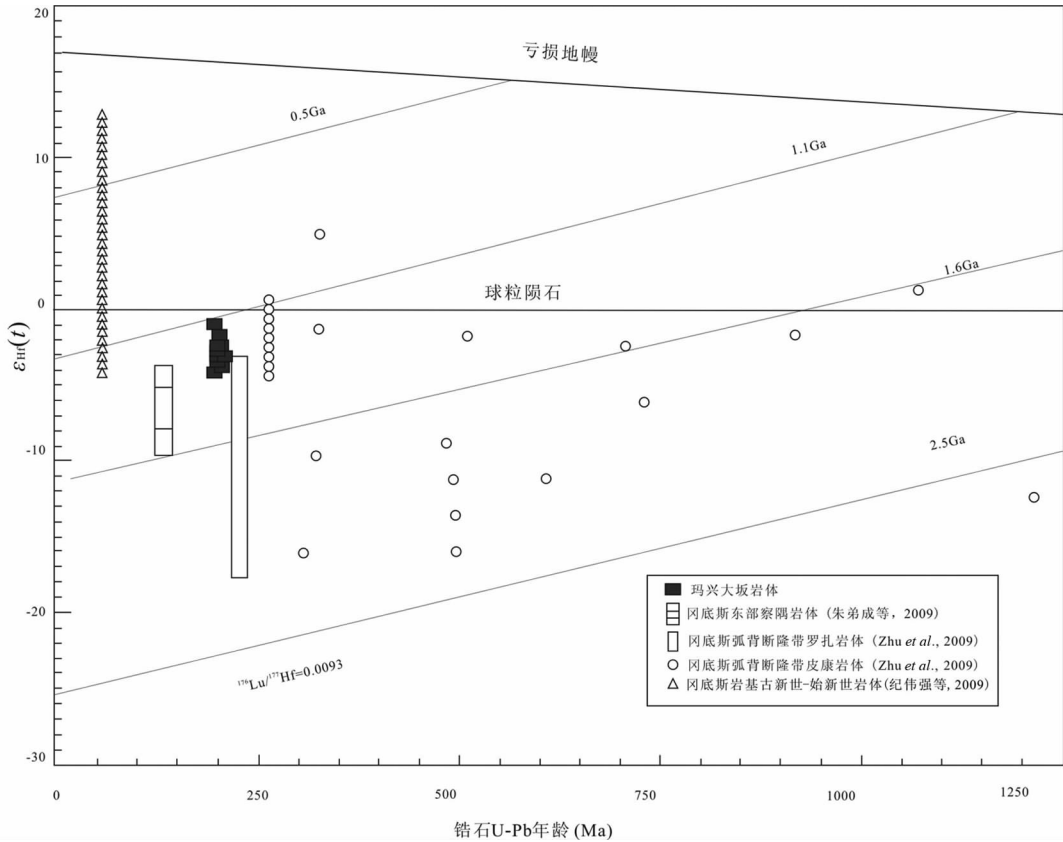


图9 玛兴大坂二长花岗岩体锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. 锆石 U-Pb 年龄相关图

地壳演化线的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.0093(据 Veroort and Patchert, 1996);冈底斯东部察隅岩体数据(据朱弟成等,2009);冈底斯弧北断隆带罗扎和皮康岩体数据(据 Zhu *et al.*, 2009);冈底斯弧背断隆带皮康岩体(据 Zhu *et al.*, 2009);冈底斯岩基古新世-始新世岩体数据(据纪伟强等,2009)

Fig. 9 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb diagram for zircon from the Maxingdaban monzogranitic pluton

The crustal evolution path assuming a crustal $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ratio of 0.0093 (after Veroort and Patchert, 1996); Chayu granitic pluton in eastern Gangdise data (after Zhu *et al.*, 2009); Luozha and Pikang granitic pluton in the central Lhasa terrane data (after Zhu *et al.*, 2009); Paleocene and Eocene granitic pluton in Gangdise batholith data (after Ji *et al.*, 2009)

混合 I 型花岗岩的特征。

样品 Q08-9-1.1 中 28 颗锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-4.43 \sim -0.62$, 全部显示为微弱的负值, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较低为 $0.282517 \sim 0.282623$, 表明玛兴大坂二长花岗岩主要来自于地壳岩石的部分熔融(吴福元等,2007;Jiang *et al.*, 2010), 其中 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的四个数值接近 0(表 4), 暗示玛兴大坂二长花岗岩可能为壳源和幔源岩浆共同作用的结果。

冈底斯岩浆岩带是青藏高原内部可与东昆仑造山带相媲美的构造岩浆岩带, 对比 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ / 锆石 U-Pb 年龄相关图(图 9), 表明玛兴大坂二长花岗岩岩体和冈底斯东部察隅岩体、冈底斯弧背断隆罗扎-皮康岩体、冈底斯岩基古新世-始新世岩体的锆石具有相似的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 组成。其中冈底斯东部察隅岩体很可能是幔源岩浆诱发拉萨微陆块的古老地壳物质重熔, 又与该壳源熔体混合而形成(朱弟成等,2009); 而冈底斯弧背断隆罗扎岩体和皮康岩体, 是地幔物质加入到成熟的大陆地壳形成(Zhu *et al.*, 2009); 冈底斯岩基古新世-始新世岩体在熔融过程中, 有古老陆壳物质涉入形成的(纪伟

强等,2009); 所以现今获得的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 实际上可能代表了幔源物质(大的正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)与古老地壳物质(大的负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)混合后的结果。

5.3 地球动力学背景

通常认为, 在东昆仑地区, 到三叠纪末古特提斯洋已经关闭, 沿昆南断裂带发生了羌塘-东昆仑大陆碰撞(姜春发等,1992;郭正府等,1998)。研究表明, 在俯冲-碰撞的动力学背景下容易发生幔源岩浆的底侵作用(罗照华等,1999, 2002;刘成东等,2003,2004;谌宏伟等,2005)。在三叠纪东昆仑造山带基性岩浆底侵作用发育, 这可以从花岗岩带中较为广泛分布的三叠纪辉长岩得到证明, 例如: 约格杂岩体中的角闪辉长岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $239 \pm 6\text{Ma}$ (谌宏伟等,2005); 石灰沟外滩岩体中角闪辉长岩的角闪石 $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 坪年龄为 $226.4 \pm 0.4\text{Ma}$ (罗照华等,2002); 玛兴大坂二长花岗岩形成于 $218 \pm 2\text{Ma}$ (图 8), 在附近的肯德可克也有同时代的辉长岩形成(未发表数据)。底侵基性岩浆

带来的巨大热量导致地壳物质熔融,形成大规模的花岗质岩浆;同时幔源基性岩浆与壳源花岗质岩浆(古地壳重熔形成花岗质岩浆)发生不同程度的混合(罗照华等,1999;刘成东等,2002;谌宏伟等,2005;莫宣学等,2007)。

从以上分析可以看出,玛兴大坂二长花岗岩岩体可以与东昆仑其它三叠纪岩体进行对比,说明印支期祁漫塔格岩浆带是东昆仑岩浆带的西延部分,形成于相似的构造环境。

5.4 与肯德可克铁多金属矿床的联系

肯德可克铁多金属矿位于玛兴大坂二长花岗岩岩体北的肯德大湾中(经纬度 $37^{\circ}01.800'N, 91^{\circ}44.587'E$) (图 1c)。矿区的中酸性侵入岩较少,除零星的闪长岩外,主要为一些中酸性脉岩。在斜井、探槽及钻孔中也见有石英斑岩、闪长岩和石英二长岩等浅成脉岩。

矿体总体走向近东西,与岩体在地表显示的走向相似。围岩蚀变主要有矽卡岩化、金云母化和绿泥石化等。肯德可克铁多金属矿区矽卡岩中金云母 $^{39}Ar-^{40}Ar$ 年龄为 214Ma(张绍宁和陈世顺,2004),矿床中斜长石 $^{39}Ar-^{40}Ar$ 中子活化法年龄为 207.8Ma(赵财胜等,2006),矿区内发育的二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 230.5Ma(奚仁刚等,2010),说明肯德可克铁多金属矿床矿化阶段在 207.8~230.5Ma 之间,属于印支晚期。而玛兴大坂二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 218Ma(表 2),相当于晚三叠世,同属于印支晚期,说明了肯德可克铁多金属矿与玛兴大坂二长花岗岩基本同时形成。

玛兴大坂二长花岗岩体微量元素具有强不相容元素 Rb 富集、Nb、Sr 等中等不相容元素略亏损,弱不相容元素 Y 略富集等特点,而肯德可克铁多金属矿矿石中微量元素也具有以上特点(李洪普,2010)。同时,玛兴大坂二长花岗岩体稀土元素曲线呈向右倾斜,明显的 Eu 负异常,与肯德可克铁多金属矿床中矿石和矽卡岩的稀土元素曲线相似(图 5a)。因此,我们认为它们之间有着密切关系。二长花岗岩中斜长石的结构表明,斜长石应当是花岗岩岩浆的首晶区矿物,并遭受了同岩浆交代作用,使其核部发生蚀变(图 2b),这是流体作用的可靠性证据,含矿流体是成矿物质的主要来源(罗照华等,2008)。因此,我们推测肯德可克铁多金属矿床的物质来源可能为玛兴大坂二长花岗岩岩浆中携带的含矿流体。

6 结论

(1) 玛兴大坂二长花岗岩高 K_2O, FeO^{T}, MgO 值偏低,准铝质,属高钾钙碱性系列,为分异程度较高的 I 型花岗岩类。锆石 Hf/全岩 Nd 同位素特征表明玛兴大坂二长花岗岩具有壳幔混合 I 型花岗岩的特征。

(2) 玛兴大坂二长花岗岩体形成年龄为 $218 \pm 2Ma$,与祁漫塔格火山岩为同一时期,推测它们形成的构造环境类似,与三叠纪古特提斯洋关闭有关。

(3) 年代学和地球化学数据显示,肯德可克铁多金属矿

床的形成可能与相邻的玛兴大坂二长花岗岩岩浆中流体活动有密切联系。

致谢 天津地质矿产研究所李怀坤和耿建珍协助完成了锆石年代学测试;中国地质科学院地质研究所于胜尧和矿产资源研究所侯可军帮助完成了锆石 Hf 同位素测试;中国地质大学(北京)徐进同学参加了野外工作,余宇星、杨利军同学协助完成数据处理的工作;审稿人吴才来研究员和罗照华教授提出了宝贵修改意见;在此一并表示感谢。

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605 – 626
- Bichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243 – 258
- Bowden P, Didier J, Lameyre J and Allegre C.J. 1982. Classification of granitoids: Geological, petrological and geochemical criteria. In: Didier J (ed.). *International Colloquium on Geochemistry and Petrology of Granitoids*, Conference: Colloque international geochimie et petrologie des granitoïdes, french, 1982. French: Didier J, 32 – 33
- Chappell BW and Stephens WE. 1988. Origin of infracrustal (I-type) granite magmas. *Royal Society of Edinburgh Transactions: Earth Science*, 79(2–3): 71 – 86
- Chen HW, Luo ZH, Mo XX, Liu CD and Ke S. 2005. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt. *Geology in China*, 32(3): 386 – 395 (in Chinese with English abstract)
- Chen HW, Luo ZH, Mo XX, Zhang XT, Wang J and Wang BZ. 2006. SHRIMP ages of Kayakedengtage complex in the East Kunlun and their geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 25 – 32 (in Chinese with English abstract)
- Diwu CR, Sun Y, Lin CL, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 253 – 262 (in Chinese with English abstract)
- Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical and characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1–2): 115 – 134
- Feng CY, Li DS, Wu ZS, Li JH, Zhang ZY, Zhang AK, Shu XF and Su SS. 2010. Major types, time-space distribution and metallogenesis of polymetallic deposits in the Qimantage metallogenic belt, eastern Kunlun area. *Northwestern Geology*, 43(4): 10 – 18 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237 – 269
- Guo ZF, Deng JF, Xu ZQ, Mo XX and Luo ZH. 1998. Late Palaeozoic-Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate-acidic-igneous rocks from the eastern Kunlun Mountains of northwestern China. *Geoscience*, 12(3): 344 – 352 (in Chinese with English abstract)
- Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 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 TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canada J. Earth Sci.*, 8: 523–548
- Ji WQ, Wu FY, Zhong SL and Liu CZ. 2009. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet. *Science in China (Series D)*, 39(7): 849–871 (in Chinese)
- Jiang CF, Yang JS and Feng BG. 1992. Opening-closing Tectonics of Kunlun Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 101–217 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CF, Wang ZQ and Li JY. 2000. Opening-closing Tectonics of the Central Orogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House, 1–108 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YH, Jin GD and Liao SY. 2010. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, Central China; Implications for a continental arc to continent-continent collision. *Lithos*, 117: 183–197
- Keto LS and Jacobsen SB. 1987. Nd and Sr isotopic variations of Early Paleozoic oceans. *Earth and Planetary Science Letters*, 84: 27–41
- Le Maitre RW. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Oxford: Blackwell, 1–193
- Li CN. 1992. Minor Elemental Petrography of Volcanics. Beijing: Geological Publishing House, 97–109 (in Chinese)
- Li HK, Gen JZ, Hao S, Zhang YQ and Li HM. 2009. Study on Zircon U-Pb Dating by LA-ICP MS. *Acta Mineralogica Sinica*, (Suppl.): 600–601 (in Chinese)
- Li HP. 2010. Metallogenic geological characteristics and metallogenic prediction of Qimantage iron and polymetallic deposit of East Kunlun Mountains. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1–168 (in Chinese with English summary)
- Li SJ, Sun FY, Feng CY, Liu ZH, Zhao JW, Li YC and Wang S. 2008. Geochronological study on Yazigou polymetallic deposit in eastern Kunlun, Qinhai Province. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 949–957 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 1996. A discussion on the model and isochron ages of Sm-Nd isotopic systematics; Suitability and limitation. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 97–105 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I and A-type granites from central Guangdong, SE China; A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96: 186–204
- Liew TC and Hofmann AW. 1988. Precambrian crustal components, plutonic assimilations, plate environment of the Hercynian fold belt of central Europe; Indications from Nd and Sr isotopic study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98: 129–138
- Liu CD, Zhang WQ, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Li SW and Zhao X. 2002. The features of mafic-microgranular enclaves of Yuegelu granite and its origin in eastern Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 739–744 (in Chinese with English abstract)
- Liu CD, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Chen HW, Li SW and Zhao X. 2003. Pb-Sr-Nd-O isotope characteristics of granitoids in East Kunlun orogenic belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(6): 584–588 (in Chinese with English abstract)
- Liu CD, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Chen HW, Li SW and Zhao X. 2004. Mixing events between the crust and mantle-derived magmas in eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP II chronology. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 506–602 (in Chinese)
- Liu HT. 2001. Qimantage terrestrial volcanics; Petrologic evidence of active continental margin of Tarim plate during Late Indo-China epoch. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 337–351 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN. 1992. Pay attention to using information of Sm-Nd isotope geological. *Foreign Precambrian Geological Journal*, 58(21): 1–13 (in Chinese)
- Luo ZH, Deng JF, Cao YQ, Guo ZF and Mo XX. 1999. Volcanism and regional tectonic evolution during Late Paleozoic-Early Mesozoic period in the East Kunlun, Qinghai Province. *Geoscience*, 13(1): 51–56 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Ke S, Cao YQ, Deng JF and Chen HW. 2002. Late indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292–297 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Lu XX, Guo SF, Sun J, Chen BH, Huang F and Yang ZF. 2008. Metallogenic systems on the transmagmatic fluid theory. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2669–2678 (in Chinese with English abstract)
- Mao CX, Zhu NJ, Zhu BQ, Shi ZE and Huang RS. 1989. Determining techniques for Sm-Nd isotopic systematics and their application. *Geochimica*, 1: 36–43 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635–643
- Meng FC, Xu ZQ, Zhang ZM and Liu FL. 2003. Geochemical characteristics of the Mesozoic post-collisional granites in northern Jiangsu, China and their geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 566–577 (in Chinese with English abstract)
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in magma/igneous rock system. *Earth Sci. Rev.*, (37): 215–224
- Mo XX, Luo ZH, Deng JF, Yu XH, Liu CD, Chen HW, Yuan WM and Liu YH. 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 GT, Xu Q and Wang LQ. 2001. The frame mechanism of multiple island arc-basin system in Tibetan plateau. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(3): 186–189 (in Chinese with English abstract)
- Pan T. 2005. Study on the metallogenic series of cobalt deposits in eastern Kunlun orogenic belt. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1–147 (in Chinese with English summary)
- Qiao GS. 1988. Normalization of isotopic dilution analysis. *Science in China (Series D)*: 31(10): 1263–1268
- Ren JS. 2004. Some problems on the Kunlun-Qinling orogenic system. *Northwestern Geology*, 37(1): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247–263
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM microprobe: Some examples from the western Alps. *Cathodoluminescence in Geosciences*, 373–400
- She HQ, Zhang DQ, Jing XY, Guan J, Zhu HP, Feng CY and Li DX. 2007. Geological characteristics and genesis of the Ulan Uzhur porphyry copper deposit in Qinghai. *Geology in China*, 3(2): 306–315 (in Chinese with English abstract)
- Shen YC, Yang JZ and Wang YJ. 1999. Petrologic characteristic and tectonic setting of volcanic rocks from upper Triassic system in the Qimantage region East Kunlun orogenic belt, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(1): 50–58 (in Chinese with English abstract)
- Shen YC, Yang JZ, Liu TB, Li CM and Mang YJ. 2000. Chronology and tectonic settings of upper Triassic volcanic rocks in the Qimantage area of East Kunlun orogenic belt, Xinjiang. *Geology and Prospecting*, 36(3): 32–35 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 42: 313–345
- Vervoort JD and Patchett PJ. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717–3733
- Wang L, Sun FY, Chen GH, Li BL and Chi XG. 2003. Mineralogical features of Kendekeke gold-nonferrous metal deposit in East Kunlun Mountain, Qinghai Province. *Global Geology*, 22(1): 50–56 (in

Chinese with English abstract)

- Wang S, Feng CY, Li SJ, Jiang JH, Li D and Sun SS. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaergueka polymetallic ore deposit, Qimantage mountain, Qinghai Province, and its geological implications. *Geology in China*, 36(1): 74 - 84 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 18 - 220 (in Chinese with English abstract)
- Xi RG, Xiao PX, Wu YZ, Dong ZC, Guo L and Gao XF. 2010. The geological significances, composition and age of the monzogranite Kendekeke iron mine. *Northwestern Geology*, 43(4): 195 - 202 (in Chinese with English abstract)
- Xiao QH, Deng JF, Ma DQ *et al.* 2002. Ideas and Methods in Granite Research. Beijing: Geol. Pub. House, 265 - 275 (in Chinese)
- Yang JZ, Shen YC and Liu TB. 2000. Tectonic environment analysis on volcanic rocks from Qimantage group, East Kunlun orogenic belt, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 18(2): 105 - 112 (in Chinese with English abstract)
- Yin FG, Pan GT and Li XZ. 2003. Multi-arc-basin system of Kunlun orogenic belt and the Pan-Cathaysian continental accretion. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(1): 22 - 28 (in Chinese with English abstract)
- Yuan WM, Mo XX, Yu XH and Luo ZH. 2000. The record of Indosinian tectonic setting from the granitoid of eastern Kunlun Mountains. *Geological Reviews*, 46(2): 203 - 211 (in Chinese with English abstract)
- Zhao CS, Yang FQ and Dai JZ. 2006. Metallogenic age of the Kendekeke Co, Bi, Au deposit in East Kunlun Mountains, Qinghai Province, and its significance. *Mineral Deposits*, 25(Suppl.): 427 - 431 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Mo XX, Niu YL *et al.* 2009. Zircon U-Pb dating and in-situ Hf isotopic analysis of Permian peraluminous granite in the Lhasa terrane, southern Tibet; Implications for Permian collisional orogeny and paleogeography. *Tectonophysics*, 469: 48 - 60
- Zhu DC, Mo XX, Wang LQ *et al.* 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Science in China (Series D)*, 39(7): 833 - 848 (in Chinese)

附中文参考文献

- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 刘成东, 柯珊. 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制. *中国地质*, 32(3): 386 - 395
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 张雪亭, 王瑾, 王秉璋. 2006. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义. *矿物岩石学杂志*, 25(1): 25 - 32
- 第五春荣, 孙勇, 林慈蕊, 柳小明, 王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. *岩石学报*, 23(2): 253 - 262
- 丰成友, 李东生, 吴正寿, 李军红, 张占玉, 爱奎, 舒晓峰, 苏生顺. 2010. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用. *西北地质*, 43(4): 10 - 18
- 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 莫宣学, 罗照华. 1998. 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. *现代地质*, 12(3): 344 - 352
- 侯可军, 李延国, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 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

- 纪伟强, 吴福元, 鍾孙霖, 刘传周. 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因. *中国科学(D辑)*, 39(7): 849 - 871
- 姜春发, 杨经纬, 冯秉贵. 1992. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社, 101 - 217
- 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 2000. 中央造山带开合构造. 北京: 地质出版社, 1 - 108
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 97 - 109
- 李洪普. 2010. 东昆仑祁漫塔格铁多金属矿成矿地质特征与成矿预测. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学北京, 1 - 168
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. *矿物学报*, (增刊): 600 - 601
- 李世金, 孙丰月, 丰成友, 刘振宏, 赵俊伟, 李玉春, 王松. 2008. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿的成矿年代学研究. *地质学报*, 82(7): 949 - 957
- 李献华. 1996. Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性. *地质科学*, 31(1): 97 - 105
- 刘成东, 张文秦, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 李述为, 赵欣. 2002. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征与成因. *地质通报*, 21(11): 739 - 744
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 谌宏伟, 李述为, 赵欣. 2003. 东昆仑造山带花岗岩 Pb-Sr-Nd-O 同位素特征. *地球学报*, 24(6): 584 - 588
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 谌宏伟, 李述为, 赵欣. 2004. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. *科学通报*, 49(6): 506 - 602
- 刘红涛. 2001. 祁漫塔格陆相火山岩: 塔里木陆块南缘印支期活动大陆边缘的岩石学证据. *岩石学报*, 17(3): 337 - 351
- 陆松年. 1992. 注意利用 Sm-Nd 同位素地质信息. *国外前寒武纪地质*, 58(21): 1 - 13
- 罗照华, 邓晋福, 曹永清, 郭正府, 莫宣学. 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
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 邓晋福, 谌宏伟. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. *地质通报*, 21(6): 292 - 297
- 罗照华, 卢欣祥, 郭少丰, 孙静, 陈必河, 黄凡, 杨宗锋. 2008. 透岩浆流体成矿体系. *岩石学报*, 24(12): 2669 - 2678
- 毛存孝, 朱乃娟, 朱炳泉, 施泽恩, 黄荣生. 1989. Sm-Nd 同位素体系测定技术与应用讨论. *地球化学*, 1: 36 - 43
- 孟繁聪, 许志琴, 张泽明, 刘福来. 2003. 苏北中生代碰撞后花岗岩的地球化学特征及其地质意义. *地质学报*, 77(4): 566 - 577
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 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
- 潘桂棠, 徐强, 王立全. 2001. 青藏高原多岛弧盆-系格局机制. *矿物岩石*, 21(3): 186 - 189
- 潘彤. 2005. 青海省东昆仑钨矿成矿系列研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 1 - 147
- 任纪舜. 2004. 昆仑-秦岭造山系的几个问题. *西北地质*, 37(1): 1

-5

- 余宏全, 张德全, 景向阳, 关军, 朱华平, 丰成友, 李大新. 2007. 青海省乌兰乌拉珠尔斑岩铜矿床地质特征与成因. 中国地质, 3(2): 306-315
- 沈远超, 杨金中, 王岳军. 1999. 新疆东昆仑祁漫塔格地区上三叠统火山岩岩石成因初探. 大地构造与成矿学, 23(1): 50-58
- 沈远超, 杨金中, 刘铁兵, 李光明, 王岳军. 2000. 新疆东昆仑祁漫塔格地区上三叠统火山岩的年代及构造环境研究. 地质与勘探, 36(3): 32-35
- 王力, 孙丰月, 陈国华, 李碧乐, 迟效国. 2003. 青海东昆仑肯德可克有色金属矿床矿物特征研究. 世界地质, 22(1): 50-56
- 王松, 丰成友, 李世金, 江军华, 李东, 苏生顺. 2009. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 36(1): 74-84
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185-220
- 奚仁刚, 校培喜, 伍跃中, 董增产, 过磊, 高晓峰. 2010. 东昆仑肯德可克铁矿二长花岗岩组成、年龄及地质意义. 西北地质, 43(4): 195-202
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 265-275
- 杨金中, 沈远超, 刘铁兵. 2000. 新疆东昆仑祁漫塔格群火山岩建造成因分析. 新疆地质, 18(2): 105-112
- 尹福光, 潘桂棠, 李兴振. 2003. 昆仑多岛弧盆地及泛华夏大陆的增生. 大地构造与成矿学, 27(1): 22-28
- 袁万明, 莫宣学, 喻学慧, 罗照华. 2000. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录. 地质论评, 46(2): 203-211
- 赵财胜, 杨富全, 代军治. 2006. 青海东昆仑肯德可克钴铋金矿床成矿年龄及意义. 矿床地质, 25(增刊): 427-431
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全等. 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成锆石 U-Pb 年代学地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束. 中国科学(D 辑), 39(7): 833-848