

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.019

# 柴北缘小赛什腾山片麻状花岗岩的成因:来自地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束

彭璇<sup>1,2</sup>, 庄玉军<sup>1,2</sup>, 辜平阳<sup>1,2\*</sup>, 时超<sup>1,2</sup>, 何世平<sup>1,2</sup>, 曹佰迪<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**小赛什腾山位于柴北缘的西北部, 笔者对小赛什腾山片麻状花岗岩进行了岩相学、锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学分析和锆石 Hf 同位素研究。对片麻状花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定, 获得年龄为  $(422.1 \pm 1.6)$  Ma, 指示该岩体为晚志留世岩浆活动产物。片麻状花岗岩地球化学成分显示高硅( $\text{SiO}_2$  为 70.16%~72.43%)、高碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  为 7.20%~9.04%) 和较高的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值( $>1$ ), 低镁( $\text{MgO}$  为 0.82%~1.29%)、磷( $\text{P}_2\text{O}_5$  为 0.09%~0.13%) 及钛( $\text{TiO}_2$  为 0.3%~0.49%), 铝饱和指数 A/CNK 值大于 1, 里特曼指数小于 3.3, 属于过铝质和高钾钙碱性系列; 并且它们稀土元素总量高, 轻重稀土分馏程度较高, 具有弱的负 Eu 异常( $\delta\text{Eu}$  为 0.73~0.96)。球粒陨石标准化配分曲线模式图上曲线一致向右倾斜, 原始地幔标准化微量元素蛛网图上样品都具有相似的配分型式, 具有富集大离子亲石元素 Rb 和亏损高场强元素 Nb、Ti 的地球化学特征。全岩锆石饱和温度为 721~752℃, 平均值为 739℃, 属于 I 型花岗岩。锆石 Hf 同位素研究表明, 片麻状花岗岩的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为负值(-6.47~-12.85), 模式年龄  $T_{\text{DM}2}$  平均值是 2 030 Ma, 指示小赛什腾山片麻状花岗岩的源区物质有中元古代的古老地壳物质混入, 该花岗岩形成时有流体加入, 由地壳基底物质重熔形成。综合分析后认为小赛什腾山片麻状花岗岩形成于后碰撞环境。

**关键词:**片麻状花岗岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 小赛什腾山; 柴北缘

**中图分类号:**P588.1; P597+3 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2022)04-0221-19

## Petrogenesis of the Gneissic Granite in Xiaosaishiteng Mountain, Northern Qaidam: Constraint from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes

PENG Xuan<sup>1,2</sup>, ZHUANG Yujun<sup>1,2</sup>, GU Pingyang<sup>1,2,\*</sup>, SHI Chao<sup>1,2</sup>, HE Shiping<sup>1,2</sup>, CAO Baidi<sup>1</sup>

(1. MNR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Center for Orogenic Belt Geology China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The Xiaosaishiteng Mountain is located in the Northwest Qaidam tectonic belt. An integrated study of petrography, zircon U-Pb chronology, geochemistry and zircon Hf isotopes in

**收稿日期:**2021-11-20; **修回日期:**2021-12-01; **网络发表日期:**2022-11-15; **责任编辑:**姜寒冰

**基金项目:**中国地质调查局项目“商丹-大柴旦地区区域地质调查”(DD20190069), 陕西省自然基础研究计划项目, 青年项目“西秦岭夏河-合作铜金矿集区印支期埃达克质火山岩成因”(2022JQ-286)联合资助。

**作者简介:**彭璇(1984-), 女, 工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: pengxuan2012@163.com。

**\* 通讯作者:**辜平阳(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事前寒武纪地质、岩石地球化学研究工作。E-mail: pingyang-322@163.com。

gneissic granite of the Xiaosaishiteng Mountain were conducted in this paper. The LA-ICP-MS zircon U-Pb data results indicate that the gneissic granites, which have high  $\text{SiO}_2$  (70.16% ~ 72.43%), total alkali ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.20\% \sim 9.04\%$ ) with  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ , and low  $\text{MgO}$  (0.82% ~ 1.29%),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.09% ~ 0.13%) and  $\text{TiO}_2$  (0.3% ~ 0.49%), were formed in the late Silurian ( $422.1 \pm 1.6$ ) Ma. Their A/CNK ratios are larger than 1, the Ritman index mainly are less than 3.3, therefore these gneissic granites are belong to peraluminous and high-K calc-alkaline series. They have relatively high REEs contents, enrichment in light REE with depletion in heavy REE, and exhibit weak negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 0.73 \sim 0.96$ ). The chondrite normalized REE patterns show dipped-right pattern, the primitive mantle Normalized trace elements spider diagram have the similar pattern. The gneissic granites strongly enriched in LILE and depletion of HFSE setting, such as Nb and Ti. The zircon saturation temperature is  $721 \sim 725^\circ\text{C}$ , the average is  $739^\circ\text{C}$ , belongs to I-type granite. The results of zircon Hf isotope shows that the  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  of gneissic granite are negative ( $-6.47 \sim 12.85$ ), and the crustal model age (2030 Ma) indicates that the source rocks of the Xiaosaishiteng mountain gneissic granite was mixed with the granitic magma and the ancient crustal material of the Middle Proterozoic. The granite was formed when fluid was added, which from the remelting of crust. Comprehensive analysis shows that the granites was formed in the post-collision environment.

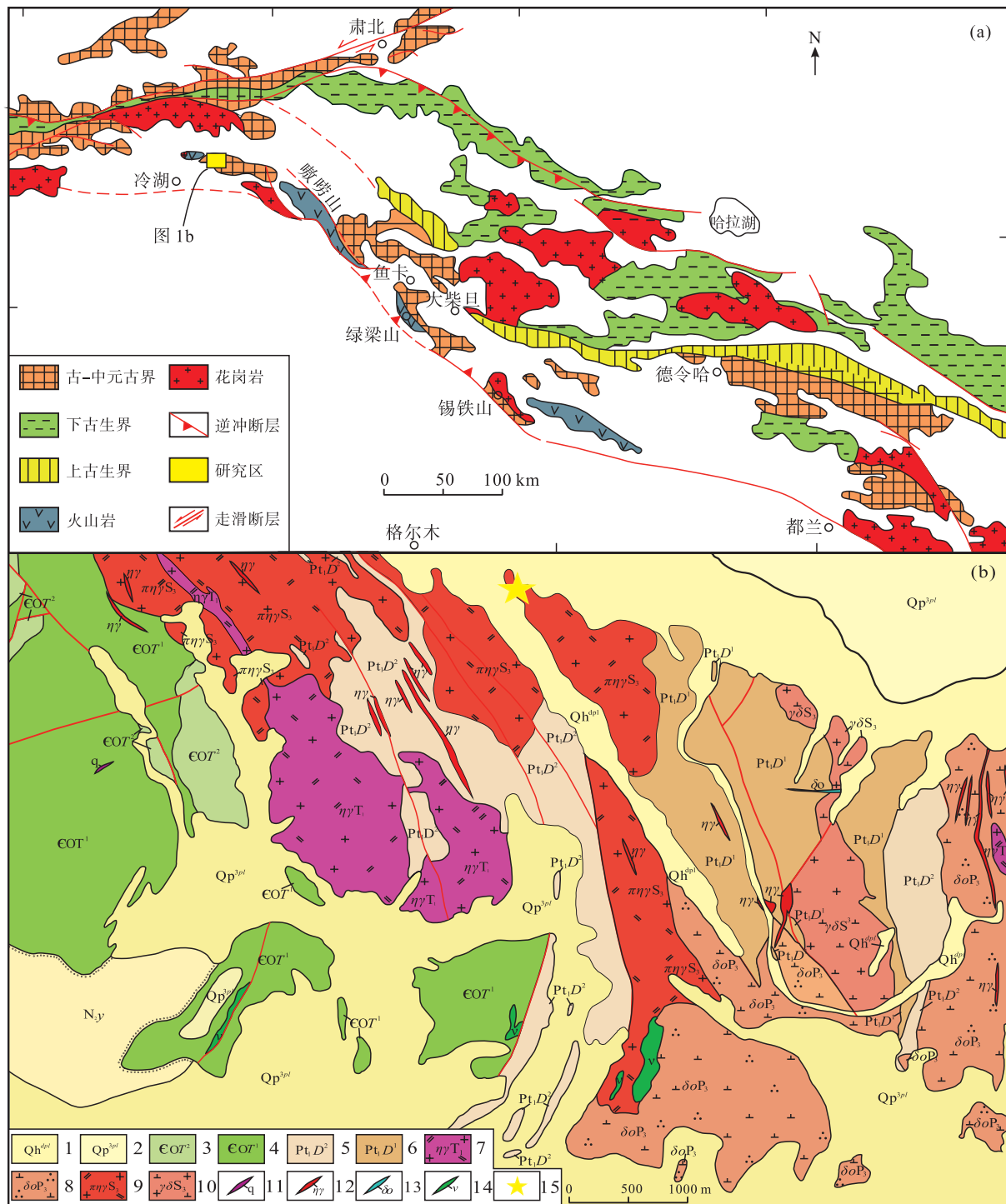
**Keywords:** gneissic granite; geochemistry; zircon U-Pb geochronology; Hf isotope; the Xiaosaishiteng Mountain; Northern Qaidam

柴达木盆地北缘(柴北缘)构造带位于青藏高原东北部,呈狭长状夹于南祁连板块与柴达木板块之间,整体呈反S型展布,是中国中央造山带重要组成部分(吴锁平,2008;宋述光等,2009;吴才来等,2014;任云飞,2017)。由北向南被划为3个构造单元,依次是:宗务隆构造带、欧龙布鲁克微陆块和柴北缘早古生代俯冲带(潘桂棠等,2002;陆松年等,2002a;王惠初等,2005)。其中,欧龙布鲁克微陆块是重要的古陆块群之一(陆松年等,2002b),双层结构明显,岩系发育,记录了丰富的构造、岩浆演化信息。研究表明,柴北缘古生代花岗岩广泛出露(查显锋等,2016),是祁连板块和柴达木板块碰撞造山的产物(王惠初等,2005),且经历了洋壳俯冲、陆壳俯冲以及板块折返3个岩浆活动期次(吴才来,2008)。近年来,针对柴北缘构造带的花岗岩开展了很多工作,但研究成果大都集中在东南部的花岗岩上(吴才来等,2008;朱小辉等,2010,2014,2016;岳悦等,2020)。相比而言,西段花岗岩的研究程度偏低,时空格架难以建立,尤其是位于西段的小赛什腾山花岗岩缺乏更多同位素年代学证据(陈世悦等,2016;余梦丽,2018),岩石成因与源区性质尚未得到很好认识。

笔者在小赛什腾山地区开展专项地质调查时,在欧龙布鲁克微陆块中获得了晚志留世的片麻状花岗岩,通过开展岩石学、年代学研究,结合其岩石地球化学特征,对岩石成因、构造环境进行探讨,由此为柴北缘晚古生代构造演化的梳理提供了基础数据支撑。

## 1 区域地质背景

小赛什腾山地区出露的地层有早元古代达肯大坂群和寒武纪—奥陶纪滩间山群。早元古代达肯大坂群主要分布在东部,岩石组合为长英质片麻岩、片岩和少量大理岩等;寒武纪—奥陶纪滩间山群主要分布在西部,岩石组合为一套片岩夹变中酸性火山岩组合和一套浅变质碎屑岩夹碳酸盐岩。陈世悦等(2016)对中部出露的糜棱花岗岩研究表明,小赛什腾山地区至少存在  $470 \sim 480\text{Ma}$ 、 $440 \sim 450\text{Ma}$ 、 $390 \sim 400\text{Ma}$  3期古生代花岗质岩浆侵入旋回。高万里等(2019)对小赛什腾西部的花岗岩研究表明,主要形成在中二叠世  $260 \sim 280\text{Ma}$ ,与北部宗务隆小洋盆俯冲板片的部分熔融有关。本次样品选取在小赛什腾山东部(图1)。



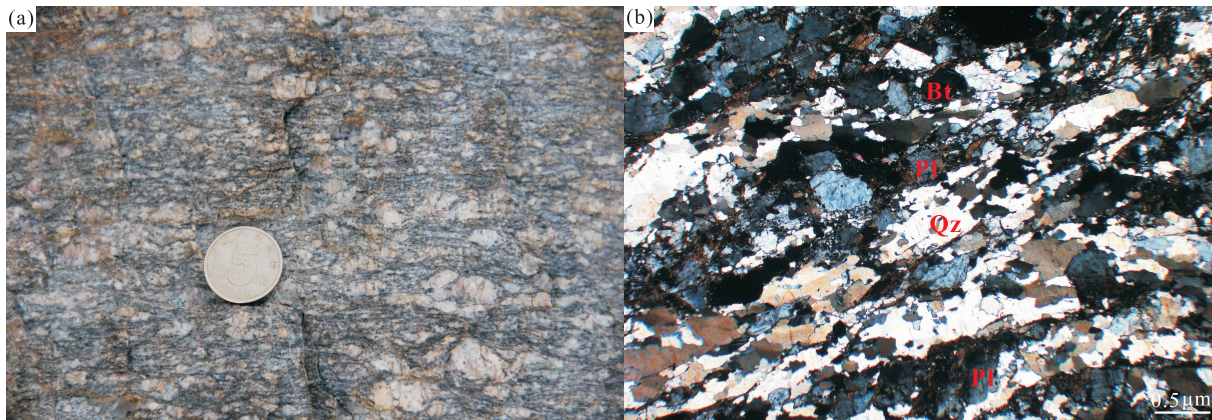
1. 全新世坡洪积物;2. 晚更新世洪积物;3. 滩间山群碳酸岩组;4. 滩间山群碎屑岩组;5. 达肯大坂(岩)群第二岩组;6. 达肯大坂(岩)群第一岩组;7. 中细粒二长花岗岩;8. 中细粒石英闪长岩;9. 片麻状中细粒斑状二长花岗岩;10. 片麻状中细粒花岗闪长岩;11. 石英脉;12. 二长花岗岩脉;13. 石英闪长岩脉;14. 辉长岩脉;15. 采样点

图 1 (a)柴北缘地区地质图(杨经绥等,2001 修改)及(b)研究区地质图

Fig. 1 (a) Geological map of the North Qaidam and (b) the geological map of the study area

## 2 样品及岩相学特征

晚志留世片麻状花岗岩主要分布在小赛什腾山中部,整体呈北西向及近南北向展布。与早志留世片麻状黑云母花岗岩、晚二叠世石英闪长岩呈侵入接触关系,与滩涧山群呈侵入接触关系,与第四系呈不整合接触。本次样品采集点坐标为  $E93^{\circ}43'55''$ ,  $N38^{\circ}49'23''$ 。



Qz. 石英;Pl. 斜长石;Bt. 黑云母

图2 (a)小赛什腾山片麻状花岗岩野外露头 and (b)正交显微镜下照片

Fig. 2 (a)Outcrop of gneissic granite in Xiaosaishiteng mountain and (b)microphotograph of granite

## 3 分析方法

于赛什腾花岗岩体内的片麻状花岗岩中采集新鲜样品用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年。

用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的样品(样品编号 D0018-1TW)。锆石的分选在廊坊诚信地质服务有限公司完成,锆石的制靶及反射光阴极发光照相在陕西爱思拓普测试技术有限公司完成, U-Pb 同位素定年中国地质调查局西安地质调查中心国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。激光剥蚀系统为德国 M-IcroLas 公司生产的 GeoLas Pro, ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7700x。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。每个时间分辨分析数据包括大约 10 s 的空白信号和 40 s 的样品信号。锆

在野外呈灰白色,为片状构造,中粗粒花岗结构(图2)。岩石的矿物成分由斜长石( $>30\%$ )、石英( $<50\%$ )、黑云母( $>10\%$ )、白云母( $<10\%$ ),少量方解石组成,暗色矿物较少。斜长石矿物晶体呈粒状,发育卡钠复合双晶结构,粒径为  $0.1\sim0.3\text{ mm}$ ,局部斜长石聚集,粒径可达  $0.5\text{ mm}$ ;石英晶体呈粒状,粒径为  $0.05\sim0.3\text{ mm}$ ,局部在斜长石中呈蠕虫状嵌晶;白云母多以变斑晶形式产出;黑云母呈片状,常呈连续片状集合体与长英质相定向分布。

石年龄采用标准锆石 91500 作为标样,计算同位素比值及元素含量采用 Glitter(ver4.0, Macquarie University)程序,年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver3.0)完成。锆石 Lu-Hf 同位素测试是用 Neptune 型多接收等离子体质谱仪和 Geolas Pro 型激光剥蚀系统联用的方法完成的,测试竖斑直径为  $32\text{ }\mu\text{m}$ ,每分析 6 个样品测点分析一次锆石标准 GJ-1 作为监控,本次实验 GJ-1 的测试精准度为  $0.282030\pm20(2\text{SD})$ 。对锆石的详细仪器参数和测试过程参考李艳广等(2015),锆石 Lu-Hf 同位素测试流程可参照 Menget al.(2017)。

样品的地球化学测试在中国地质调查局西安地质调查中心完成,主量元素除 FeO、烧失量用标准湿化学法分析外,其他采用 SX45 型 X 荧光光谱仪(XRF)分析测定,误差小于  $1\%$ ;微量和稀土元素采用 SX50 型电感耦合等离子体光谱仪(ICP-MS)测定,误差为  $5\%\sim10\%$ 。

4 分析结果

4.1 锆石 U - Pb 定年

用于锆石定年的样品为天然露头的新鲜样品，赛什腾山片麻状花岗岩中的锆石为无色，多数为长柱状，少数为短柱状，锆石长轴方向粒径为 80~200 μm，锆石长宽比为 1~3。锆石 Th 含量为  $59\times10^{-6}$

$\sim573\times10^{-6}$ ，U 含量为  $226\times10^{-6}\sim2\,149\times10^{-6}$ ，Th、U 含量具有有良好的正相关关系，Th/U 比值在 0.06~0.52，结合阴极发光图像特征(图 3)显示具有岩浆成因锆石的特点。本次测试选了 36 颗具有振荡环带结构的锆石进行了 U - Pb 分析，其中 22 颗锆石测点数据(表 1)给出的加权平均年龄为  $(422.1\pm1.6)\text{Ma}$ ( $MSWD=0.052$ )(图 4)，代表该样品岩石的岩浆结晶年龄。

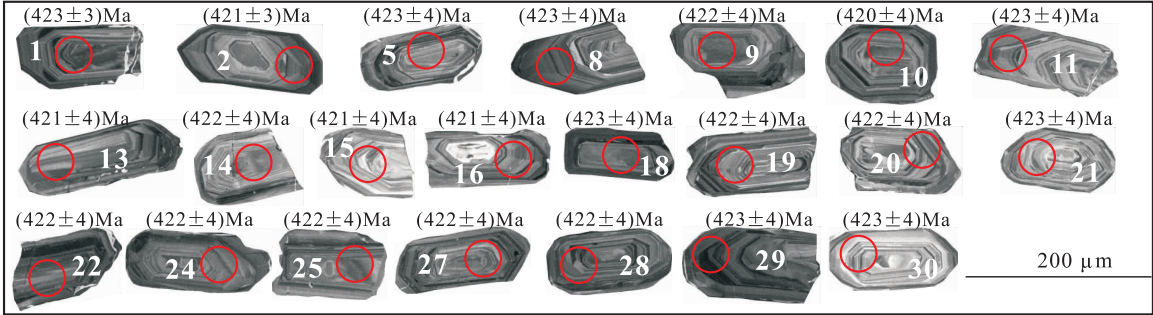


图 3 片麻状花岗岩锆石阴极发光图像  
Fig. 3 Zircon CL images of gneissic granite

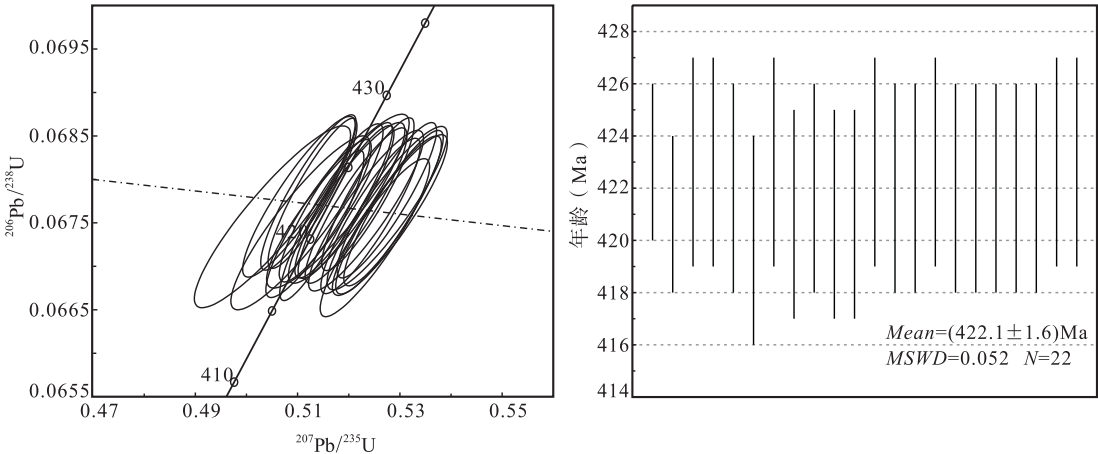


图 4 片麻状花岗岩 U - Pb 年龄谐和图  
Fig. 4 Diagrams of zircon U - Pb Concordia age for gneissic granite

4.2 岩石地球化学特征

笔者选取了新鲜的片麻状花岗岩样品开展了主量、微量和稀土元素地球化学分析，相关计算所得结果见表 2。

4.2.1 主量元素

样品的 SiO<sub>2</sub> 含量较高，为 70.16%~72.43%，平均为 71.19%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量相对较高，为 14.37%~15.15%，平均为 14.82%；Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 含量为 7.20%~9.04%，平均为 8.03%，K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值均

大于 1。里特曼指数(δ)为 1.83~2.89(小于 3.3)，与 SiO<sub>2</sub> - K<sub>2</sub>O 图解一致，属于高钾钙碱性系列(图 5a)。CaO 含量为 1.37%~2.49%，MgO 含量为 0.82%~1.29%，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 0.09%~0.13%，TiO<sub>2</sub> 含量为 0.3%~0.49%，它们都和 SiO<sub>2</sub> 含量具有一定的负相关性(图 6))。它们具有较低的 FeO/(FeO+MgO) 比值，属镁质花岗岩系列(图 5b)。样品 A/CNK 值为 1.02~1.08，为过铝质系列(图 5c)。

表 1 小赛什腾山片麻状花岗岩 SHRIMP U – Pb 年龄分析结果

Tab. 1 SHRIMP zircon U – Pb data ofgneiss sic granite in Xiaosaishiteng Moutain

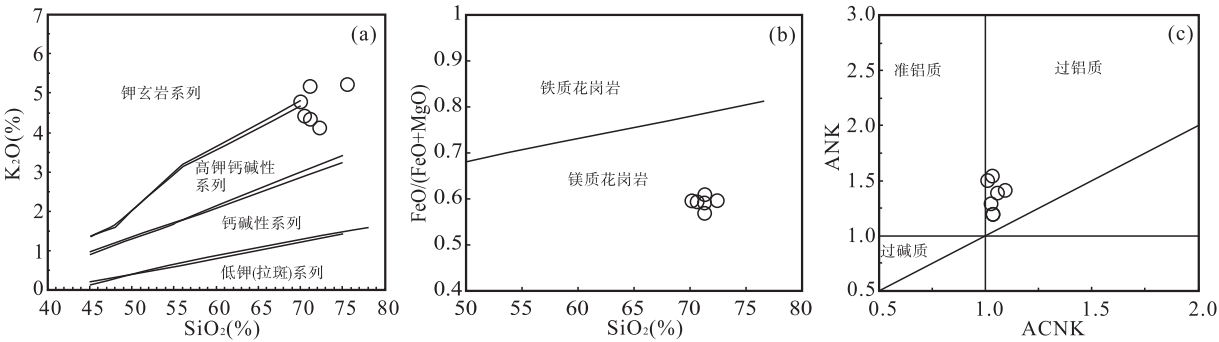
| 样点编号 | Th  |       | U<br>(10 <sup>-6</sup> ) | Th/U     |                                          | 同 位 素 比 值 |                                          |          |                                           | 年 龄 (Ma) |                                          |     |                                          | 谐和度 |   |      |
|------|-----|-------|--------------------------|----------|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|----------|-------------------------------------------|----------|------------------------------------------|-----|------------------------------------------|-----|---|------|
|      | Th  | U     |                          | 1σ       | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | 1σ        | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | 1σ       | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | 1σ       | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | 1σ  | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ |     |   |      |
| 1    | 233 | 841   | 0.28                     | 0.054 84 | 0.000 71                                 | 0.512 92  | 0.005 74                                 | 0.067 84 | 0.000 57                                  | 406      | 12                                       | 420 | 4                                        | 423 | 3 | 0.99 |
| 2    | 123 | 1 142 | 0.11                     | 0.055 33 | 0.000 68                                 | 0.514 75  | 0.005 43                                 | 0.067 47 | 0.000 57                                  | 426      | 11                                       | 422 | 4                                        | 421 | 3 | 1.00 |
| 5    | 300 | 888   | 0.34                     | 0.056 01 | 0.000 73                                 | 0.523 75  | 0.005 96                                 | 0.067 83 | 0.000 58                                  | 453      | 12                                       | 428 | 4                                        | 423 | 4 | 1.01 |
| 8    | 85  | 936   | 0.09                     | 0.055 56 | 0.000 76                                 | 0.519 01  | 0.006 3                                  | 0.067 76 | 0.000 59                                  | 435      | 13                                       | 424 | 4                                        | 423 | 4 | 1.00 |
| 9    | 150 | 567   | 0.27                     | 0.056 13 | 0.000 88                                 | 0.523 38  | 0.007 42                                 | 0.067 64 | 0.000 61                                  | 458      | 16                                       | 427 | 5                                        | 422 | 4 | 1.01 |
| 10   | 143 | 723   | 0.20                     | 0.056 58 | 0.000 85                                 | 0.525 12  | 0.007 06                                 | 0.067 33 | 0.000 6                                   | 475      | 15                                       | 429 | 5                                        | 420 | 4 | 1.02 |
| 11   | 152 | 844   | 0.18                     | 0.054 75 | 0.000 75                                 | 0.512 11  | 0.006 16                                 | 0.067 85 | 0.000 59                                  | 402      | 13                                       | 420 | 4                                        | 423 | 4 | 0.99 |
| 13   | 193 | 579   | 0.33                     | 0.055 21 | 0.000 82                                 | 0.514 1   | 0.006 81                                 | 0.067 55 | 0.000 6                                   | 421      | 15                                       | 421 | 5                                        | 421 | 4 | 1.00 |
| 14   | 123 | 757   | 0.16                     | 0.055 33 | 0.000 81                                 | 0.516 56  | 0.006 7                                  | 0.067 73 | 0.000 6                                   | 426      | 14                                       | 423 | 4                                        | 422 | 4 | 1.00 |
| 15   | 240 | 764   | 0.31                     | 0.054 23 | 0.001 17                                 | 0.505 09  | 0.010 09                                 | 0.067 57 | 0.000 69                                  | 381      | 27                                       | 415 | 7                                        | 421 | 4 | 0.98 |
| 16   | 145 | 835   | 0.17                     | 0.054 87 | 0.001 05                                 | 0.510 54  | 0.008 97                                 | 0.067 5  | 0.000 66                                  | 407      | 22                                       | 419 | 6                                        | 424 | 4 | 0.99 |
| 18   | 238 | 832   | 0.29                     | 0.055 63 | 0.007 5                                  | 0.519 48  | 0.006 19                                 | 0.067 74 | 0.000 58                                  | 438      | 13                                       | 425 | 4                                        | 423 | 4 | 1.00 |
| 19   | 185 | 816   | 0.23                     | 0.055 88 | 0.000 79                                 | 0.521 44  | 0.006 57                                 | 0.067 7  | 0.000 59                                  | 448      | 14                                       | 426 | 4                                        | 422 | 4 | 1.00 |
| 20   | 204 | 769   | 0.27                     | 0.056 69 | 0.000 78                                 | 0.528 76  | 0.006 42                                 | 0.067 67 | 0.000 59                                  | 479      | 13                                       | 431 | 4                                        | 422 | 4 | 1.00 |
| 21   | 86  | 591   | 0.15                     | 0.055 46 | 0.001 07                                 | 0.517 88  | 0.009 2                                  | 0.067 75 | 0.000 66                                  | 431      | 23                                       | 424 | 6                                        | 423 | 4 | 1.00 |
| 22   | 140 | 514   | 0.27                     | 0.055 66 | 0.000 89                                 | 0.519 59  | 0.007 52                                 | 0.067 73 | 0.000 61                                  | 439      | 17                                       | 425 | 5                                        | 422 | 4 | 1.00 |
| 24   | 573 | 1 105 | 0.52                     | 0.056 68 | 0.000 88                                 | 0.528 06  | 0.007 42                                 | 0.067 59 | 0.000 61                                  | 479      | 16                                       | 431 | 5                                        | 422 | 4 | 1.02 |
| 25   | 178 | 608   | 0.29                     | 0.056 56 | 0.000 92                                 | 0.527 52  | 0.007 75                                 | 0.067 67 | 0.000 62                                  | 474      | 17                                       | 430 | 5                                        | 422 | 4 | 1.01 |
| 27   | 336 | 1 013 | 0.33                     | 0.056 66 | 0.000 82                                 | 0.527 79  | 0.006 82                                 | 0.067 59 | 0.000 61                                  | 478      | 14                                       | 430 | 5                                        | 422 | 4 | 1.01 |
| 28   | 268 | 750   | 0.36                     | 0.056 28 | 0.000 78                                 | 0.524 27  | 0.006 41                                 | 0.067 58 | 0.000 59                                  | 463      | 13                                       | 428 | 4                                        | 422 | 4 | 1.01 |
| 29   | 71  | 1 039 | 0.07                     | 0.056 48 | 0.000 78                                 | 0.527 46  | 0.006 42                                 | 0.067 76 | 0.000 59                                  | 471      | 13                                       | 430 | 4                                        | 423 | 4 | 1.01 |
| 30   | 178 | 682   | 0.26                     | 0.054 6  | 0.000 86                                 | 0.510 25  | 0.007 26                                 | 0.067 8  | 0.000 61                                  | 396      | 17                                       | 419 | 5                                        | 423 | 4 | 0.99 |

表 2 片麻状花岗岩化学成分稀土(%)以及微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果  
Tab. 2 Major elements( $wt\%$ ), trace elements and REE( $10^{-6}$ ) compositions of gneissic granite

| 样品号                                | D0018-1HX-1 | D0018-1HX-2 | D0018-1HX-3 | D0018-1HX-4 | D0018-1HX-5 | D0018-1HX-6 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>                   | 69.02       | 70.61       | 70.5        | 69.83       | 70.68       | 71.1        |
| TiO <sub>2</sub>                   | 0.49        | 0.41        | 0.34        | 0.42        | 0.3         | 0.36        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 14.71       | 14.71       | 14.42       | 14.85       | 15.02       | 14.11       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1.09        | 0.73        | 0.67        | 0.8         | 0.6         | 0.61        |
| FeO                                | 1.9         | 1.57        | 1.43        | 1.66        | 1.19        | 1.52        |
| MnO                                | 0.05        | 0.04        | 0.03        | 0.04        | 0.03        | 0.03        |
| MgO                                | 1.29        | 1.01        | 1.09        | 1.14        | 0.82        | 1.03        |
| CaO                                | 1.8         | 2.7         | 1.37        | 1.78        | 2.49        | 1.83        |
| Na <sub>2</sub> O                  | 3.21        | 2.85        | 2.96        | 3.89        | 2.8         | 3.46        |
| K <sub>2</sub> O                   | 4.68        | 4.28        | 5.98        | 4.35        | 5.11        | 4.02        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 0.13        | 0.09        | 0.09        | 0.11        | 0.1         | 0.09        |
| LOI                                | 1.51        | 0.91        | 1.02        | 1.03        | 0.76        | 1.72        |
| TOTAL                              | 99.88       | 99.91       | 99.9        | 99.9        | 99.9        | 99.88       |
| δ                                  | 2.39        | 1.84        | 2.91        | 2.53        | 2.26        | 1.99        |
| A/CNK                              | 1.08        | 1.03        | 1.04        | 1.04        | 1.02        | 1.06        |
| A/NK                               | 1.42        | 1.58        | 1.27        | 1.34        | 1.48        | 1.40        |
| Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O | 7.89        | 7.13        | 8.94        | 8.24        | 7.91        | 7.48        |
| R1                                 | 2 322.48    | 2 660.54    | 2 220.40    | 2 221.12    | 2 495.12    | 2 541.62    |
| R2                                 | 545.15      | 627.54      | 483.53      | 538.31      | 601.73      | 523.68      |
| La                                 | 30.4        | 24.4        | 25.7        | 30.6        | 42.4        | 27          |
| Ce                                 | 62.9        | 49.8        | 53.1        | 61.2        | 87          | 53.5        |
| Pr                                 | 8.08        | 6.15        | 6.47        | 7.28        | 10.8        | 6.83        |
| Nd                                 | 30          | 23          | 24          | 26.8        | 39.1        | 24.6        |
| Sm                                 | 5.74        | 4.26        | 4.38        | 4.85        | 6.8         | 4.72        |
| Eu                                 | 1.25        | 1.19        | 1.14        | 1.16        | 1.44        | 1.16        |
| Gd                                 | 4.39        | 3.12        | 3.24        | 3.51        | 4.72        | 3.66        |
| Tb                                 | 0.606       | 0.45        | 0.426       | 0.456       | 0.621       | 0.497       |
| Dy                                 | 2.74        | 2.08        | 1.9         | 2.01        | 2.62        | 2.18        |
| Ho                                 | 0.441       | 0.338       | 0.307       | 0.325       | 0.416       | 0.367       |
| Er                                 | 1.11        | 0.826       | 0.713       | 0.756       | 0.946       | 0.853       |
| Tm                                 | 0.145       | 0.109       | 0.096       | 0.102       | 0.124       | 0.118       |
| Yb                                 | 0.927       | 0.641       | 0.587       | 0.588       | 0.714       | 0.716       |
| Lu                                 | 0.133       | 0.086       | 0.086       | 0.09        | 0.092       | 0.101       |
| Ba                                 | 644         | 581         | 690         | 537         | 730         | 615         |
| Rb                                 | 146         | 157         | 183         | 145         | 172         | 149         |
| Sr                                 | 248         | 270         | 196         | 250         | 273         | 211         |
| Co                                 | 3.85        | 3.45        | 2.78        | 3.36        | 2.91        | 2.71        |
| V                                  | 40.6        | 34.3        | 26          | 35.2        | 28.5        | 26          |
| Cr                                 | 14.9        | 17          | 10.4        | 13.2        | 13.6        | 12.1        |
| Ni                                 | 3.6         | 3.47        | 2.5         | 3.83        | 2.99        | 2.78        |
| Nb                                 | 10.8        | 8.79        | 7.86        | 9.46        | 7.13        | 8.77        |
| Ta                                 | 0.906       | 0.753       | 0.729       | 0.862       | 0.65        | 0.864       |
| Zr                                 | 108         | 74.8        | 90.8        | 108         | 86.4        | 104         |

续表 2

| 样品号                  | D0018-1HX-1 | D0018-1HX-2 | D0018-1HX-3 | D0018-1HX-4 | D0018-1HX-5 | D0018-1HX-6 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Hf                   | 3.82        | 2.74        | 3.37        | 3.79        | 3.08        | 3.84        |
| Y                    | 11.9        | 9.28        | 7.81        | 8.63        | 10.6        | 9.9         |
| Cs                   | 2.97        | 4.66        | 4.62        | 3.35        | 4.26        | 2.36        |
| Th                   | 13.4        | 11.2        | 11.1        | 11.7        | 17.8        | 12.2        |
| U                    | 1.1         | 0.777       | 1.49        | 1.89        | 0.978       | 1.33        |
| Pb                   | 35.6        | 33          | 37.9        | 31          | 39.9        | 31          |
| Li                   | 44.7        | 25.2        | 26.9        | 23.9        | 22.8        | 29.3        |
| Be                   | 2.95        | 2.79        | 2.32        | 3.07        | 2.81        | 2.57        |
| Sc                   | 8.15        | 6.78        | 6.2         | 8.33        | 5.96        | 6.95        |
| Cu                   | 17.6        | 5.21        | 5.44        | 10.2        | 5.1         | 6.95        |
| Zn                   | 81.6        | 65.3        | 65          | 66.6        | 50.4        | 55.7        |
| Ga                   | 19.8        | 21          | 20.1        | 22.5        | 20.4        | 20.2        |
| Ge                   | 2.01        | 1.34        | 1.55        | 1.1         | 1.22        | 1.53        |
| ∑REE                 | 160.76      | 125.73      | 129.96      | 148.36      | 208.39      | 136.20      |
| LREE                 | 138.37      | 108.80      | 114.79      | 131.89      | 187.54      | 117.81      |
| HREE                 | 22.39       | 16.93       | 15.17       | 16.47       | 20.85       | 18.39       |
| LREE/HREE            | 6.18        | 6.43        | 7.57        | 8.01        | 8.99        | 6.41        |
| δEu                  | 0.73        | 0.96        | 0.89        | 0.82        | 0.74        | 0.82        |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | 22.16       | 25.72       | 29.59       | 35.17       | 40.13       | 25.48       |
| (La/Sm) <sub>N</sub> | 3.33        | 3.61        | 3.69        | 3.97        | 3.92        | 3.60        |
| (Gd/Yb) <sub>N</sub> | 3.84        | 3.94        | 4.47        | 4.83        | 5.36        | 4.14        |



a. SiO<sub>2</sub> - K<sub>2</sub>O 图(Rickwood,1989); b. FeO/(FeO+MgO) vs. SiO<sub>2</sub> 图(Maniar and Piccoli,1989); c. A/CNK - A/NK 图(Peccerillo and Taylor,1976)

图 5 片麻状花岗岩的主量元素图解

Fig. 5 Major element diagram of gneissic granite

4. 2. 2 稀土及微量元素

稀土及微量元素分析结果表明,稀土元素总量较低,为  $125.73 \times 10^{-6} \sim 208.39 \times 10^{-6}$ ,平均含量为  $151.57 \times 10^{-6}$ 。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线模式图上(图 7a),轻稀土相对重稀土富集(LREE/HREE 为 6.18~8.99),轻重稀土分馏明显,(La/Yb)<sub>N</sub> 为 22.16~40.13。配分曲线都向右

倾斜,轻重稀土分馏程度均较高((La/Sm)<sub>N</sub> 为 3.33~3.97,平均值 3.69;(Gd/Yb)<sub>N</sub> 为 3.84~5.36,平均值 4.43)。片麻状花岗岩具有弱的负 Eu 异常(δEu=0.73~0.96,平均值为 0.83)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 7b),样品都具有相似的配分型式,富集大离子亲石元素 Rb( $145 \times 10^{-6} \sim 183 \times 10^{-6}$ )和高场强元素 Th( $11.1 \times 10^{-6} \sim 17.8 \times$

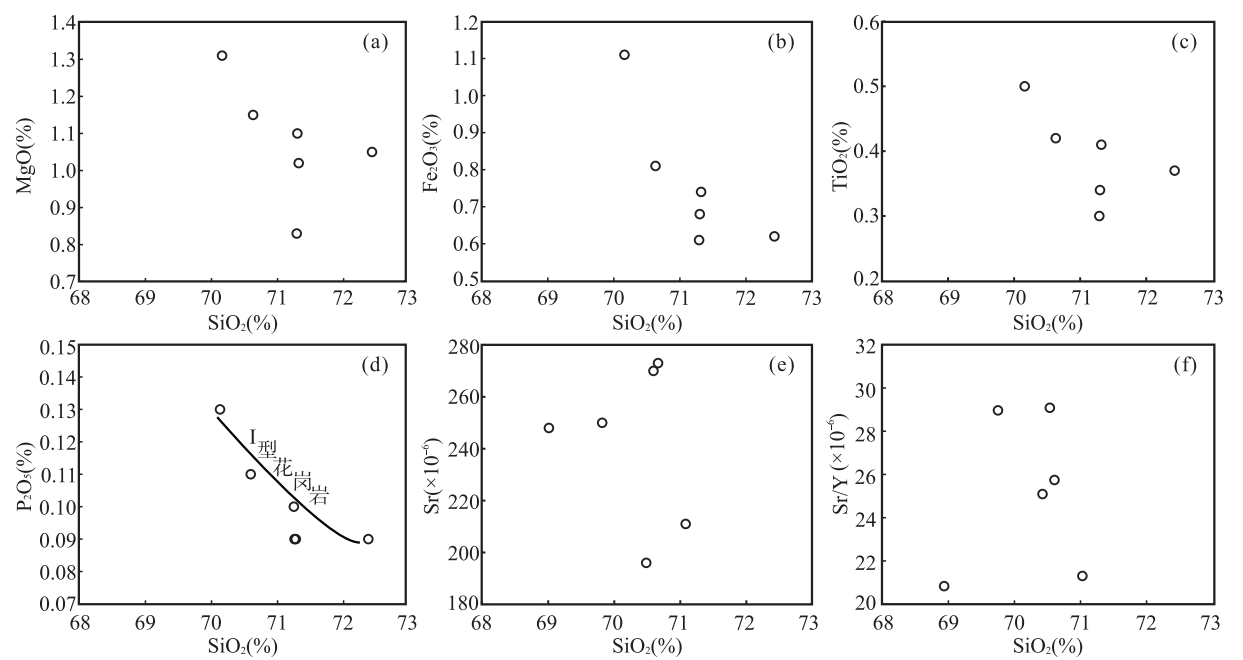


图 6 片麻状花岗岩哈克图解

Fig. 6 Harker diagrams for gneissic granite

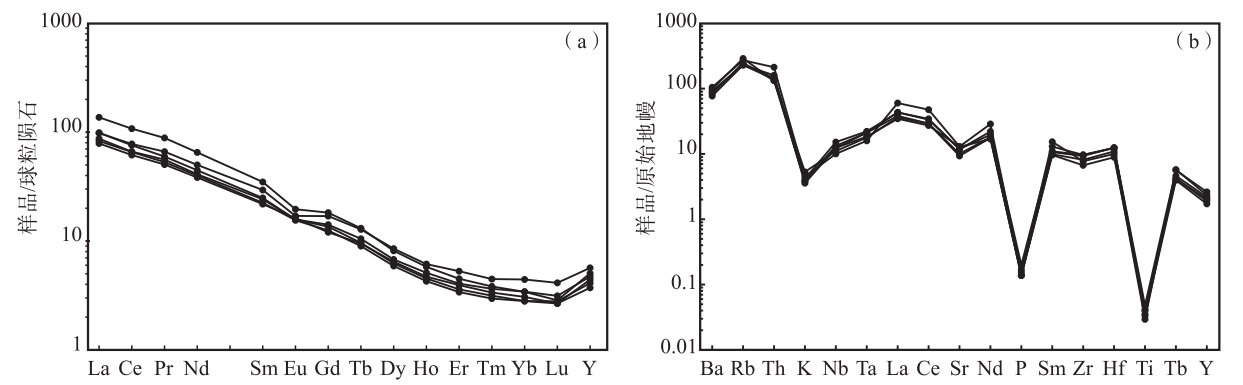


图 7 (a)片麻状花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图与(b)原始地幔标准化微量元素蛛网图  
(标准化值据 Sun and Mc Donough,1989)

Fig. 7 (a)Chondrite-normalized REE patterns and (b)primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for gneissic granite

$10^{-6}$ )、U( $0.78\times10^{-6}\sim1.49\times10^{-6}$ ), 亏损大离子亲石元素 Ba( $537\times10^{-6}\sim730\times10^{-6}$ )、Sr( $196\times10^{-6}\sim273\times10^{-6}$ )以及高场强元素 Nb( $8.77\times10^{-6}\sim10.8\times10^{-6}$ )、Ti( $37.55\times10^{-6}\sim61.33\times10^{-6}$ ), 且 Ti 亏损很严重。

4.2.3 锆石原位 Lu - Hf 同位素

对小赛什腾山片麻状花岗岩的 30 颗锆石进行了 Lu - Hf 同位素分析(表 3)。锆石 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.021 305~0.042 71 和 0.000 588~0.001 172, 平均值分别为 0.028 523 和

0.000 757, 所有锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值均小于 0.002, 表明锆石形成后积累了极低含量的放射成因 Hf(第五春荣, 2008), 可以为锆石的成因提供重要信息; 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值范围为 0.282 195~0.282 333, 平均值为 0.282 235; 对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $-6.47\sim-12.85$ , 平均值  $-9.92$ , 在年龄  $-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  图解(图 8)上, 所有点均位于 1.8~2.5 Ga 地壳, 分布十分集中。锆石的  $f_{\text{Lu-Hf}}$  为 0.99~0.96, 显著小于镁铁质地壳和硅铝质地壳的 Lu/Hf 比 ( $-0.34$ 和 $-0.72$ ), 计算得到锆石二阶段 Hf 模式年

龄  $T_{DM2}$  为 1 814~2 214 Ma,平均值是 2 030 Ma。在 中,存在 2.05 Ga 的峰值年龄和 1.93 Ga 的峰值年龄。  
锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄频谱直方图(图 9)

表 3 片麻状花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果表  
Tab.3 Zircon Hf isotope data of gneissic granite

| 测点号 | T(Ma) | <sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf | <sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf | <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf | 2σ        | ( <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf) | ε <sub>Hf</sub> (t) | 1σ   | T <sub>DM2</sub> /Ma | f <sub>Lu-Hf</sub> |
|-----|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|---------------------|------|----------------------|--------------------|
| 1   | 423   | 0.021 305                            | 0.000 588                            | 0.282 195                            | 0.000 028 | 0.282 19                                | −11.29              | 0.99 | 2117                 | −0.98              |
| 2   | 421   | 0.027 609                            | 0.000 755                            | 0.282 302                            | 0.000 025 | 0.282 30                                | −7.58               | 0.86 | 1882                 | −0.98              |
| 5   | 423   | 0.034 701                            | 0.000 913                            | 0.282 333                            | 0.000 028 | 0.282 33                                | −6.47               | 0.97 | 1814                 | −0.97              |
| 8   | 423   | 0.019 184                            | 0.000 509                            | 0.282 150                            | 0.000 019 | 0.282 15                                | −12.85              | 0.68 | 2214                 | −0.98              |
| 9   | 422   | 0.018 432                            | 0.000 502                            | 0.282 283                            | 0.000 022 | 0.282 28                                | −8.15               | 0.78 | 1919                 | −0.98              |
| 10  | 420   | 0.025 679                            | 0.000 682                            | 0.282 208                            | 0.000 021 | 0.282 20                                | −10.92              | 0.73 | 2091                 | −0.98              |
| 11  | 423   | 0.024 758                            | 0.000 670                            | 0.282 229                            | 0.000 021 | 0.282 22                                | −10.10              | 0.73 | 2042                 | −0.98              |
| 13  | 421   | 0.028 703                            | 0.000 774                            | 0.282 224                            | 0.000 023 | 0.282 22                                | −10.33              | 0.79 | 2055                 | −0.98              |
| 14  | 422   | 0.029 047                            | 0.000 758                            | 0.282 188                            | 0.000 023 | 0.282 18                                | −11.61              | 0.79 | 2136                 | −0.98              |
| 15  | 421   | 0.025 730                            | 0.000 723                            | 0.282 307                            | 0.000 024 | 0.282 30                                | −7.41               | 0.85 | 1872                 | −0.98              |
| 16  | 424   | 0.028 899                            | 0.000 825                            | 0.282 224                            | 0.000 026 | 0.282 22                                | −10.32              | 0.92 | 2057                 | −0.98              |
| 18  | 423   | 0.024 208                            | 0.000 665                            | 0.282 162                            | 0.000 026 | 0.282 16                                | −12.49              | 0.90 | 2192                 | −0.98              |
| 19  | 422   | 0.029 941                            | 0.000 800                            | 0.282 223                            | 0.000 026 | 0.282 22                                | −10.37              | 0.90 | 2058                 | −0.98              |
| 20  | 422   | 0.037 911                            | 0.000 967                            | 0.282 218                            | 0.000 028 | 0.282 21                                | −10.59              | 0.97 | 2072                 | −0.97              |
| 21  | 423   | 0.029 372                            | 0.000 797                            | 0.282 211                            | 0.000 023 | 0.282 20                                | −10.77              | 0.82 | 2084                 | −0.98              |
| 22  | 422   | 0.029 280                            | 0.000 792                            | 0.282 284                            | 0.000 028 | 0.282 28                                | −8.22               | 0.97 | 1923                 | −0.98              |
| 24  | 422   | 0.042 710                            | 0.001 172                            | 0.282 285                            | 0.000 023 | 0.282 28                                | −8.29               | 0.80 | 1927                 | −0.96              |
| 25  | 422   | 0.033 632                            | 0.000 865                            | 0.282 168                            | 0.000 029 | 0.282 16                                | −12.33              | 1.00 | 2181                 | −0.97              |
| 27  | 422   | 0.012 065                            | 0.000 305                            | 0.282 231                            | 0.000 023 | 0.282 23                                | −9.96               | 0.82 | 2033                 | −0.99              |
| 28  | 422   | 0.033 260                            | 0.000 872                            | 0.282 245                            | 0.000 022 | 0.282 24                                | −9.61               | 0.77 | 2011                 | −0.97              |
| 29  | 423   | 0.039 764                            | 0.001 064                            | 0.282 251                            | 0.000 025 | 0.282 24                                | −9.43               | 0.87 | 2000                 | −0.97              |
| 30  | 423   | 0.024 095                            | 0.000 662                            | 0.282 255                            | 0.000 021 | 0.282 25                                | −9.17               | 0.74 | 1984                 | −0.98              |

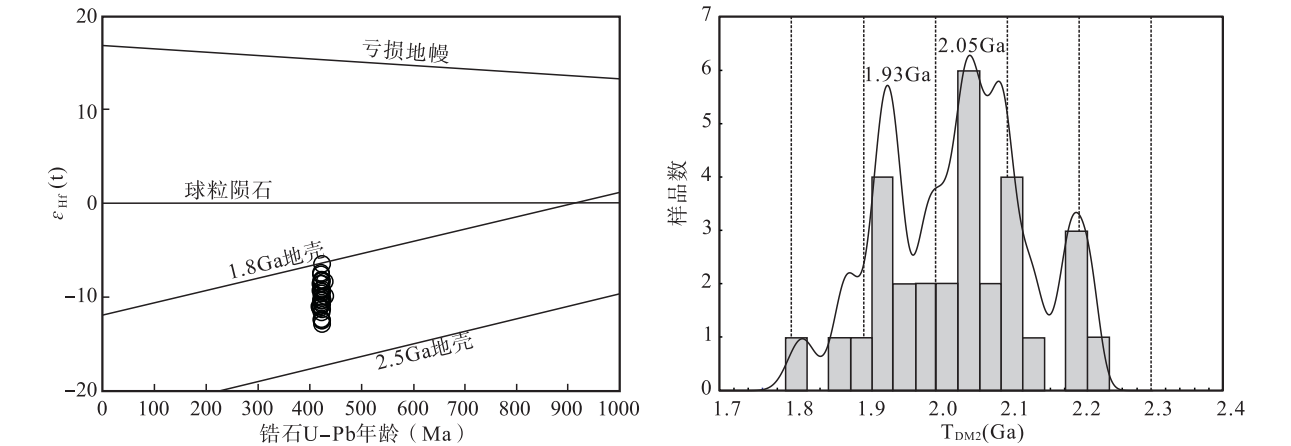


图 8 片麻状花岗岩锆石 U - Pb 年龄-ε<sub>Hf</sub>(t)图和锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄年龄( $T_{DM2}$ )频谱直方图  
Fig. 8 Plots of zircon U - Pb age versus ε<sub>Hf</sub>(t) of gneissic granite and the Spectrum histogram of two-stages model age( $T_{DM2}$ ) for zircon Hf

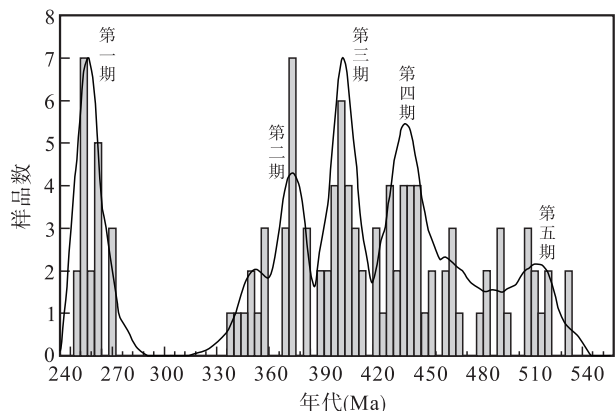


图9 柴北缘古生代花岗质岩浆活动的形成年龄频率

Fig. 9 Age histograms of the Paleozoic granitoid bodies in the northern Qaidam

## 5 讨论

### 5.1 岩体形成时代

根据近年来柴北缘古生代花岗质岩浆活动大量的年龄数据,可以将其划分为5期(图9):第一期早奥陶世—中晚寒武世(480~535 Ma),分布在柴北缘中部的绿梁山、锡铁山地区,为洋壳俯冲作用的产物(袁桂邦等,2002;朱小辉,2011;朱小辉等,2014;陈世悦等,2016;刘一珉等,2018;脱昱,2019;廖宇斌等,2020;江小强等,2020);第二期晚志留世—早奥陶世(420~473 Ma),在柴北缘各地均有分布,表现为陆陆碰撞作用形成的同碰撞花岗岩(吴才来等,2004,2007;卢欣祥等,2007;吴锁平,2008;朱小辉等,2010,2013,2016;朱小辉,2011;周宾等,2013,2014,2019;宋艳芳,2014;邱士东等,2015;张新远等,2015;陈世悦等,2016;孙健和孙东亮,2017;付彦文等,2018;张金明等,2019;王莉丽等,2020;岳悦,2020;岳悦等,2020;路增龙等,2020;江小强等,2020);第三期早泥盆世—晚志留世(389~416 Ma),都兰和柴达木山地区分布较多,与俯冲板块断离并折返有关(吴才来等,2004,2007,2014;吴锁平,2008;周伟等,2015;陈世悦等,2016;王飞等,2017;张耀玲等,2018;贺小元等,2019;岳悦,2020;岳悦等,2020);第四期早石炭世—中泥盆世(338~383 Ma),软流圈上涌(吴才来等,2004,2007,2014;吴锁平,2008;赵志雄,2011;贾群子等,2013;张延军等,2016;高歌悦等,2018;邵鹏程等,2018;杨佰慧等,

2018;庄玉军等,2019;韩建军等,2020;姜芷筠等,2020;岳悦,2020;岳悦等,2020);第五期早—晚二叠世(251~271 Ma),较集中在冷湖北山地区,与陆内俯冲有关(吴锁平,2008;赵志雄,2011;董增产等,2014,2015a,2015b;吴才来等,2016;徐旭明等,2017;辜平阳等,2018;高万里等,2019;陈敏等,2020)。通过对其成因和形成背景的梳理,与Wu et al. (2018)的5期的划分(①早中奥陶世 465~473 Ma;②志留世—晚奥陶世 423~446 Ma;③晚志留世—早泥盆世 391~413 Ma;④晚泥盆世 372~383 Ma;⑤早三叠世—二叠纪 240~271 Ma)在成因方面基本是相吻合的。

本次选取小赛什腾山的片麻状花岗岩样品,在锆石阴极发光图像分析的基础上,利用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年方法,得到了( $422.1 \pm 1.6$ )Ma ( $n=22$ ,  $MSWD=0.052$ )的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄,处在柴北缘花岗质岩浆作用的第二期。

### 5.2 岩浆源区

片麻状花岗岩的 $\text{SiO}_2$ 含量较高,为70.16%~72.43%,A/CNK值为1.02~1.08,在野外呈中粗粒花岗结构,局部斜长石聚集,推断其原岩为花岗岩。根据原始地幔标准化微量元素蛛网图可以看出,具有大离子亲石元素Rb相对富集,Sr、Ba亏损,高场强元素Th、U相对富集,Nb、Ti亏损,且Ti亏损严重,这与上部地壳分布特征相似,说明原岩有可能来自上地壳物质。

锆石极强的稳定性让Hf同位素组成受到后期地质事件的影响较小,Lu含量极低,但能获得准确的Hf同位素组成,因此锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值可以代表锆石形成时的Hf同位素组成(Griffin et al., 2000; Andersen T, 2005;第五春荣等,2008),在此样品测试点的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均小于0,表明古老物质参与了循环或改造。锆石的Hf模式年龄 $T_{\text{DM}}$ 代表锆石寄主岩石源区是从亏损地幔分离进入地壳的,其模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为1 814~2 214 Ma,平均值是2 029 Ma,远远大于它的锆石U-Pb年龄422.1 Ma,说明其源区物质有中元古代的古老地壳物质混入。

结合上述岩石地球化学和锆石Hf同位素的分析,与前人论证的柴北缘构造带中早古生代花岗岩源岩是中元古代形成的(吴才来等,2008,2014)认识是一致的。

5.3 岩石成因

小赛什腾山片麻状花岗岩在哈克图解上,表现为化学成分比较集中,花岗岩  $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  与  $\text{SiO}_2$  有明显的负相关性(图 6a~图 6c),说明在岩浆演化的过程中发生了以角闪石为主的镁铁质矿物分离结晶作用。 $\text{Sr}/\text{Y}$  与  $\text{SiO}_2$  表现为非正相关性(图 6f),排除了地球化学特征为岩浆分异成因的可能性。 $\text{Sr}$  与  $\text{SiO}_2$  线性关系不明显(图 6e),结合原始地幔标准化微量元素蛛网图中  $\text{Ba}$ 、 $\text{Sr}$  的亏损,与  $\text{Eu}$

的负异常相对应,指示了岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用,可能是壳源物质部分熔融的产物(Harris et al. ,1992)。

小赛什腾山花岗岩体属于高钾钙碱性,弱过铝质岩石,主量元素  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量随着  $\text{SiO}_2$  含量增加而减少,呈明显的负相关性(图 6d), $\text{A}/\text{CNK}$  值均小于 1,具有较高的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}^\text{T}$  和  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  含量,在  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  图解(图 10)中样品都落在未分的 M、I、S 型花岗岩区域内。

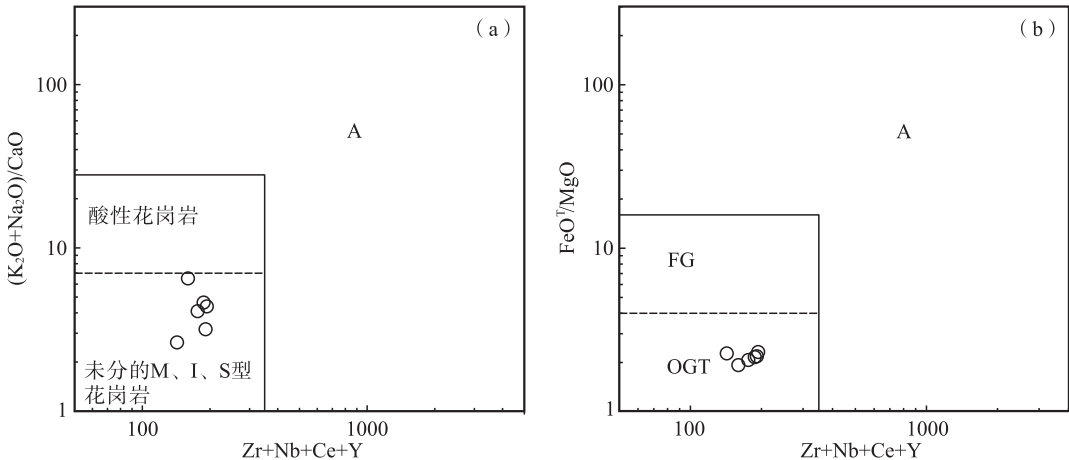


图 10 (a)片麻状花岗岩  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  与 (b)  $(\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO})-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  判别图解(据 Whalen et al. ,1987)

Fig. 10 (a)Discrimination diagrams of  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  and (b)  $(\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO})-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  for gneissic granite

根据张旗等(2006)关于  $\text{Sr}$ 、 $\text{Yb}$  分类,可以看出,该样品属于低  $\text{Sr}(196\times 10^{-6}\sim 273\times 10^{-6})$ 、低  $\text{Yb}(0.59\times 10^{-6}\sim 0.93\times 10^{-6})$  型,轻稀土富集,且明显的负  $\text{Eu}$  异常,其富硅富钾贫铝,推测可能是在较高的压力下部分熔融形成的。

Watson and Harrison(1983)通过温度在  $750\sim 1\,020^\circ\text{C}$  内的水热试验得出锆石溶解度、温度和熔体主要元素组成的关系式: $\ln D_{\text{Zircon}/\text{melt}}=\{-3.8-[0.85(\text{M}-1)]\}+12900/\text{T}$ ,其中  $D_{\text{Zircon}/\text{melt}}$  为  $\text{Zr}$  的分配系数, $\text{T}$  为绝对温度,令  $\text{Si}+\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}+\text{P}=1$ (阳离子分数),全岩岩石化学参数  $\text{M}=(2\text{Ca}+\text{K}+\text{Na})/(\text{Al}\times\text{Si})$ ,将上述关系式转换成摄氏温度后为: $\text{T}_{\text{Zr}}=12\,900/[2.95+0.85\text{M}+\ln(49\,600/\text{Zr}_{\text{melt}})]$ ,纯  $\text{Zr}$  的含量为  $4960\,000\times 10^{-6}$ ,故可用全岩  $\text{Zr}$  含量代表熔体中  $\text{Zr}$  含量。根据本文样品的主量元素和  $\text{Zr}$  的含量(表 1),全岩锆石饱和温

度介于  $721^\circ\text{C}\sim 752^\circ\text{C}$ ,平均值为  $739^\circ\text{C}$ (表 4),温度较低,低于 A 型花岗岩的形成温度( $850^\circ\text{C}\sim 950^\circ\text{C}$ )(Wu et al. ,2002),说明该花岗岩形式时有流体加入,由下地壳物质部分熔融而成。同时,锆石  $\text{Hf}$  同位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(\text{t})$  为  $-6.47\sim -12.85$ ,均为负值,可以进一步推测该花岗岩是由中元古代地壳基底物质重熔形成。

表 4 片麻状花岗岩锆石饱和温度计算结果表  
Tab. 4 The Results of zircon saturated temperatures for gneissic granite

| 样品号         | $D_{\text{Zr}}$ | M    | $\ln(D_{\text{Zr}})$ | $\text{T}_{\text{Zr}}(^{\circ}\text{C})$ |
|-------------|-----------------|------|----------------------|------------------------------------------|
| D0018-1HX-1 | 4 592.6         | 1.40 | 8.43                 | 752                                      |
| D0018-1HX-2 | 6 631           | 1.44 | 8.80                 | 721                                      |
| D0018-1HX-3 | 6 631           | 1.44 | 8.80                 | 736                                      |
| D0018-1HX-4 | 4 592.6         | 1.47 | 8.43                 | 748                                      |
| D0018-1HX-5 | 5 740           | 1.46 | 8.66                 | 731                                      |
| D0018-1HX-6 | 4 769           | 1.40 | 8.47                 | 750                                      |

铝饱和指数值 $>1.1$ 为 S 型花岗岩,小于 1.1 为 I 型花岗岩(Chappell et al., 1974, 1983),本文样品  $A/CNK=1.02\sim 1.08$ ,平均值 1.05。综上,小赛什腾山片麻状花岗岩体为高钾钙碱性 I 型花岗岩。

#### 5.4 地质意义

小赛什腾山岩体的 Nb/Ta 值为  $10.15\sim 11.97$ ,平均值为 11.08,与大陆地壳平均值 11 接近

(Taylor and McLennan, 1985), Zr/Hf 值为  $26.94\sim 28.49$ ,平均值为 27.69,与壳源岩浆值 33(Sun and McDonough, 1989)比较接近,显示了壳源岩浆性质。在  $Al_2O_3/(MgO+FeO^T)-CaO/(FeO^T+MgO)$  图解(图 11)中,所有样品都落入变杂砂岩部分熔融区域,指示其源区以杂砂岩为主。综合以上都表明它们是成熟度较高的地壳物质部分熔融的产物。

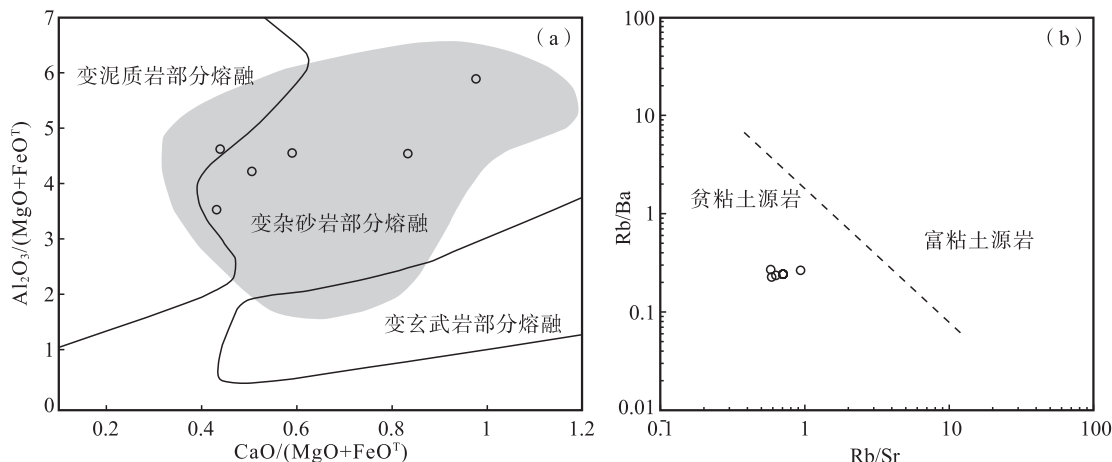


图 11 (a)片麻状花岗岩 A/FM - C/FM 图解和 (b) Rb/Ba - Rb/Sr 图解

Fig. 11 (a)Diagrams of A/FM - C/FM and (b) Rb/Ba - Rb/Sr for gneissic granite

晚志留世-早泥盆世时期,柴达木盆地北缘发育的具有岛弧地球化学特征的花岗岩被认为是后碰撞阶段伸展阶段作用的产物(吴才来等, 2004; 孟繁聪等, 2005; 夏文静等, 2014), 且具有活动大陆边缘的属性(辜平等, 2018)。结合区域上大柴旦地区花岗岩[( $408.6\pm 4.4$ ) Ma, ( $403.3\pm 3.8$ ) Ma, ( $401.8\pm 3$ ) Ma](吴才来等, 2007), 这组年龄表明花岗质岩浆活动与板块的折返有关, 与退变质作用相对应; 铁石观花岗岩( $422\pm 6.4$ ) Ma(周宾等, 2014), 形成于大陆后碰撞造山阶段, 为加厚陆壳重熔形成的晚志留世埃达克岩; 尕秀雅平东辉长岩( $420\pm 2.3$ ) Ma(宋艳芳, 2014), 处于大陆边缘伸展或裂谷化阶段; 红柳沟北暗色橄榄辉长岩( $418.3\pm 2.8$ ) Ma(周伟等, 2015), 在晚志留世后造山伸展阶段形成的; 小赛什腾山长英质初糜棱岩( $400.1\pm 7.9$ ) Ma(陈世悦等, 2016), 与俯冲-碰撞晚期岩石圈拆沉关系密切; 柴达木山花岗岩( $404.6\pm 2.9$ ) Ma(贺小元等, 2019), 属于晚志留世后碰撞造山伸展环境下的岩浆活动的产物。

综上所述, 本次研究通过对柴北缘小赛什腾山晚志留世的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素及地球化学的研究, 测定了早古生代晚期的花岗质岩浆作用, 结合岩浆源区和岩石成因的分析, 认为柴北缘构造带中早古生代花岗岩源岩是中元古代形成的产物, 并且进一步印证了早古生代晚期岩浆活动大都形成于同碰撞环境。

## 6 结论

(1) 岩石地球化学特征表明, 具富硅富钾贫铝特征, 轻稀土相对重稀土富集, 具有弱的负 Eu 异常, 稀土元素球粒陨石标准化配分图表现为轻稀土富集的右倾型, 属于高钾钙碱性的过铝质 I 型花岗岩类。

(2) 小赛什腾山片麻状花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为( $422.1\pm 1.6$ ) Ma, 属于晚志留世。结合柴北缘古生代区域构造演化, 认为形成于同碰撞环境。

(3) 锆石 Hf 同位素组成表明, 小赛什腾山片麻

状花岗岩的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为负值,其模式年龄平均值是 1 426 Ma,表明花岗质岩浆源岩有中元古代的古老地壳物质混入,由地壳基底物质重熔形成。

## 参考文献(References):

陈敏,薛春纪,薛万文,等.柴北缘宗务隆构造带蓄集地区闪长岩的发现及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,2020,39(5):552-568.

CHEN Min, XUE Chunji, XUE Wanwen, et al. Discovery and geological significance of Xuji diorite in Zongwulong tectonic belt on the northern margin of Qaidam Basin [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2020, 39(5): 552-568.

陈世悦,张跃,孙娇鹏,等.小赛什腾山古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年及地质意义[J].矿物学报,2016,36(1):119-124.

CHEN Shiyue, ZHAGN Yue, SUN Jiaopeng, et al. LA-ICP-MS U-Pb Dating for Paleozoic Granite from Xiaosaishiteng Mountain and its Geological Significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2016, 36(1):119-124.

第五春荣,孙勇,袁洪林,等.河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义[J].科学通报,2008,(16):1923-1934.

DIWU Chunrong, SUN Yong, YUAN Honglin, et al. Detrital zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geological implication of zircons from the Songshan quartzite in Dengfeng area, Henan [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, (16):1923-1934.

董增产,校培喜,辜平阳,等.青海冷湖盐场北山花岗闪长岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征[J].西北地质,2014,47(4):141-155.

DONG Zengchan, XIAO Peixi, GU Pingyang, et al. Geochronology, Geochemistry and Hf isotope characteristics of Yanchangbeishan granodiorite of Lenghu area in Qinghai [J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 141-155.

董增产,辜平阳,陈锐明,等.柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征[J].地球科学(中国地质大学学报),2015a,40(1):130-144.

DONG Zengchan, GU Pingyang, CHEN Ruiming, et al. Geochronology, Geochemistry and Hf isotope of Yanchangbeishan adamellite of Lenghu area in Qinghai [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015a, 40(1):130-144.

董增产,杨成,辜平阳,等.青海冷湖盐场北山黑云母二长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J].大地构造与成矿学,2015b,39(1):167-178.

DONG Zengchan, YANG Cheng, GU Pingyang, et al. Geochronology and geochemistry of Yanchangbeishan biotite adamellite of Lenghu area in Qinghai and their geological significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015b, 39(1):167-178.

付彦文,余福承,逯永卓,等.青海塔塔棱河中上游地区花岗岩地球化学和年代学研究[J].西北地质,2018,51(2):46-56.

FU Yanwen, YU Fucheng, LU Yongzhuo, et al. Geochemical and Chronological Characteristics of Early Silurian Granitic Rocks from the Upper-middle Reaches of Tata Leng River in Qinghai [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(2):46-56.

高歌悦,李碧乐,杨佰慧,等.柴北缘锡铁山花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素[J].世界地质,2018,37(3):747-760.

GAO Geyue, LI Bile, YANG Baihui, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopic of granite porphyry in Xitieshan area of north margin of Qaidam basin [J]. Global Geology, 2018, 37(3):747-760.

高万里,王宗秀,李磊磊,等.柴达木盆地北缘小赛什腾山二叠纪花岗岩的发现及其构造意义[J].地质学报,2019,93(4):816-829.

GAO Wanli, WANG Zongxiu, LI Leilei, et al. Discovery of the Permian granite in saishiteng mountain of the northern qaidam basin and its tectonic significance [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2019, 93(4):816-829.

辜平阳,陈锐明,查显锋,等.柴达木盆地西北缘石英闪长岩的形成时代、岩石成因及地质意义[J].岩石矿物学杂志,2018,37(1):19-33.

GU Pingyang, CHEN Ruiming, ZHA Xianfeng, et al. The age, protogenesis and geological significance of quartz diorite on the northwestern margin of Qaidam basin [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(1):19-33.

韩建军,宋传中,何俊,等.柴北缘牛鼻子梁地区闪长-花岗质岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J].大地构造与成矿学,2020,44(1):157-170.

HAN Jianjun, SONG Chuansong, HE Jun, et al. Zircon U-Pb age, geochemical and geological characteristics of the dioritic-granitic intrusive rocks in the Niubiziliang area, northern Qaidam basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(1):157-170.

贺小元,王永,郭瑞华.柴达木山花岗岩的岩石学、地球化学

- 及锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地质论评, 2019, 65 (S1):55-56.
- HE Xiaoyuan, WANG Yong, GUO Ruihua. Petrology Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Chaidamu Mountain granite[J]. Geological Review, 2019, 65 (S1):55-56.
- 贾群子, 杜玉良, 赵子基, 等. 柴达木盆地北缘滩间山金矿区斜长花岗岩斑岩锆石 LA-MC-ICPMS 测年及其岩石地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1):87-93.
- JIA Qunzi, DU Yuliang, ZHAO Ziji, et al. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating and geochemical characteristics of the Plagiogranite porphyry from Tanjianshan gold ore district in north margin of Qaidam basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1):87-93.
- 江小强, 肖渊甫, 李建兵, 等. 柴北缘阿木尼克山滩间山群火山岩地球化学特征及地质意义[J]. 地质找矿论丛, 2020, 35(1):73-84.
- JIANG Xiaoqiang, XIAO Yuanfu, LI Jianbing, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Volcanic rocks in the Tanjianshan Formation of the Amunik mountains in the northern margin of the Qaidam Basin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2020, 35(1):73-84.
- 姜芷筠, 赵呈祥, 李碧乐, 等. 柴北缘滩间山金矿田细晶沟花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征及其与金矿化的关系[J]. 黄金, 2020, 41(5):3-10.
- JIANG Zhijun, ZHAO Chengxiang, LI Bile, et al. U-Pb ages, Hf isotope of zircons from granite porphyry in Xijinggou, Tanjianshan gold field, northern margin of Qaidam basin, and their relation to the gold mineralization [J]. Gold, 2020, 41(5):3-10.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. 地质学报, 2015, 89 (12): 2400-2418.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Minwu, et al. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(12):2400-2418.
- 廖宇斌, 李碧乐, 孙永刚, 等. 柴达木盆地北缘锡铁山铅锌矿区辉长岩锆石 U-Pb 年代、岩石地球化学和 Hf 同位素特征[J]. 世界地质, 2020, 39(3):495-508.
- LIAO Yubin, LI Bile, SUN Yonggang, et al. Zircon U-Pb age, petrochemistry and Hf isotope characteristics of gabbro in Xitieshan Pb-Zn mining area in northern margin of Qaidam Basin[J]. Global Geology, 2020, 39 (3):495-508.
- 刘一珉, 任收麦, 郭天旭, 等. 柴北缘构造带深部岩石的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及微量元素研究:对全吉地块基底演化的启示[J]. 世界地质, 2018, 37 (2): 334-351.
- LIU Yimin, REN Shoumai, GUO Tianxu, et al. Zircon LA-ICP-MS geochronology and trace element features of rocks deep in northern margin of Qaidam tectonic belt: implications to evolution of Quanjia massif basement[J]. Global Geology, 2018, 37(2):334-351.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 等. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. 地质通报, 2002a, 21(1):19-23.
- LU Songnian, WANG Huichu, LI Huaikun, et al. Redefinition of the “Dakendaban Group” on the Northern margin of the Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 2002a, 21(1):19-23.
- 陆松年, 于海峰, 金巍, 等. 塔里木古大陆东缘的微大陆块体群[J]. 岩石矿物学杂志, 2002b, 21(4):317-326.
- LU Songnian, YU Haifeng, JIN Wei, et al. Micro continents on the eastern margin of Tarim paleocontinent [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002b, 21(4): 317-326.
- 卢欣祥, 孙延贵, 张雪亭, 等. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的 SHRIMP 年龄[J]. 地质学报, 2007, (5): 626-634.
- LU Xinxiang, SUN Yangui, ZHANG Xueting, et al. The SHRIMP Age of Tatalin Rapakivi Granite at the North margin of Qaidam Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, (5):626-634.
- 路增龙, 张建新, 毛小红, 等. 柴北缘东段奥陶纪埃达克岩-富 Nb 玄武岩:对大陆深俯冲之前大洋俯冲及地壳增生的启示[J]. 岩石学报, 2020, 36(10):2995-3017.
- LU Zenglong, ZHANG Jianxin, MAO Xiaohong, et al. Ordovician adakite-Nb-enriched basalt suite in the eastern North Qaidam Mountains: Implications for oceanic subduction and crustal accretion prior to deep continental subduction[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(10): 2995-3017.
- 孟繁聰, 张建新, 杨经绥. 俯冲的大陆岛弧——柴北缘片麻岩的地球化学和同位素证据[J]. 地质学报, 2005, 79(1): 46-55.
- MENG Fancong, ZHANG Jianxin, YANG Jingsui. Subducted continental arc:geochemical and isotopic evidence of gneisses in the North Qaidam[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 79(1):46-55.
- 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 青藏高原及邻区大地构造单元

- 初步划分[J].地质通报,2002,21(11):701-707.
- PAN Guitang, LI Xingzhen, WANG Liquan, et al. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(11):701-707.
- 秦海鹏.北祁连造山带早古生代花岗岩岩石学特征及其与构造演化的关系[D].北京:中国地质科学院,2012.
- QIN Haipeng. Petrology of early Paleozoic granites and their relation to tectonic evolution of orogen in the North Qilian Orogenic Belt[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological sciences, 2012.
- 邱士东,董增产,辜平阳.柴达木盆地北缘西端埃达克质花岗岩的发现及地质意义[J].地质学报,2015,89(7):1231-1243.
- QIU Shidong, DONG Zengchan, GU Pingyang. The discovery of adakitic granite in the west segment of the north margin of Qaidam and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(7):1231-1243.
- 任云飞.柴北缘构造带从中元古代到早古生代构造演化[D].西安:西北大学,2017.
- REN Yunfei. Mesoproterozoic to Early Paleozoic tectonic evolution of the North Qaidam orogenic belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- 邵鹏程,陈世悦,孙娇鹏,等.柴达木盆地北缘西段噶喇山辉长闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩石地球化学特征[J].地质学报,2018,92(9):1888-1903.
- SHAO Pengcheng, CHEN Shiyue, SUN Jiaopeng, et al. Shrimp zircon U-Pb dating and Petro-geochemistry of Aolaoshan Gabbro-diorite in the western north margin of Qaidam basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9):1888-1903.
- 宋述光,牛耀龄,张立飞,等.大陆造山运动:从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限—以北祁连山、柴北缘为例[J].岩石学报,2009,25(9):2067-2077.
- SONG Shuguang, NIU Yaoling, ZHANG Lifei. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision, exhumation: An example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(9):2067-2077.
- 宋艳芳.柴北缘杂岩雅平东岩体岩石成因与成矿条件分析[D].西安:长安大学,2014.
- SONG Yanfang. Study on petrogenesis and metallogenic conditions of the Gaxiuyapingdong Mafic-ultramafic Intrusion in north margin of Qaidam[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- 孙健,孙东亮.青海省亚马托侵入岩地球化学特征及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的构造意义[J].地质力学学报,2017,23(4):567-576.
- SUN Jian, SUN Dongliang. The geochemical characteristics and tectonic significance of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Yamatuo intrusive rocks, Qinghai province[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(4):567-576.
- 脱昱.柴北缘早古生代大洋活动的记录[D].西安:西北大学,2019.
- TUO Yu. Records of early Paleozoic ocean activities in the North Qaidam-contraints from Kaipinggou ophiolite[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- 王飞,王力,孙丰月,等.柴北缘牛鼻子梁地区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究[J].世界地质,2017,36(1):93-104.
- WANG Fei, WANG Li, Sun Fengyue, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Niubiziliang granodiorite in northern margin of Qaidam basin[J]. Global Geology, 2017, 36(1):93-104.
- 王惠初,陆松年,莫宣学,等.柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统[J].地质通报,2005,24(7):603-612.
- WANG Huichu, LU Songnian, MO Xuanxue, et al. An Early Paleozoic collisional orogen on the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(7):603-612.
- 王莉丽,李梦疑,李楠.青海省德令哈市东泽令沟花岗岩特征及锆石 U-Pb 年龄[J].陕西地质,2020,38(1):56-66.
- WANG Lili, LI Mengyi, LI Nan. Granite characteristics and zircon U-Pb age in the east of Zelinggou, Delingha city, Qinghai province[J]. Geology of Shaanxi, 2020, 38(1):56-66.
- 吴才来,郜源红,李兆丽,等.都兰花岗岩锆石 SHRIMP 定年及柴北缘超高压带花岗岩年代学格架[J].中国科学:地球科学,2014,44(10):2142-2165.
- WU Cailai, GAO Yuanhong, LI ZhaoLi, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from Dulan and the chronological framework of the North Qaidam UHP belt, NW China[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(10):2142-2165.
- 吴才来,郜源红,吴锁平,等.柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征[J].中国科学(D辑:地球科学),2008,23(8):930-949.
- WU Cailai, GAO Yuanhong, WU Suoping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of the western Qaidam granites[J]. Science in China Series (D:Earth Sciences), 2008, 23(8):930-949.
- 吴才来,郜源红,吴锁平,等.柴达木盆地北缘大柴旦地区古

- 生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2007, 23(8):1861-1875.
- WU Cailai, GAO Yuanhong, WU Suoping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8):1861-1875.
- 吴才来, 杨经绥, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗质岩浆作用[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 658-674.
- WU Cailai, YANG Jingsui, Xu Zhiqin, et al. Granitic Magmatism on the Early Paleozoic UHP Belt of Northern Qaidam, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5):658-674.
- 吴锁平. 柴北缘古生代花岗岩类成因及其造山响应[D]. 北京:中国地质科学院, 2008.
- WU Suoping. The petrogenesis of Paleozoic granitoids in the North Margin of Qaidam Basin and their orogenic response[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological sciences, 2008.
- 夏文静, 牛漫兰, 闫臻, 等. 柴北缘牦牛山地区牦牛山组沉积相组合特征[J]. 地质学报, 2014, 88(5):943-955.
- XIA Wenjing, NIU Manlan, YAN Zhen, et al. Sedimentary Facies of the Maoniushan Formation in Maoniushan area along the Northern Margin of Qaidam Terrane[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(5):943-955.
- 徐旭明, 刘广, 梁国庆. 赛什腾山一带火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 新疆地质, 2017, 35(3):250-254.
- XU Xuming, LIU Guang, LIANG Guoqing. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the volcanic rocks in the area of Saishiteng Mountain [J]. *Xinjiang Geology*, 2017, 35(3):250-254.
- 杨佰慧, 李碧乐, 金烨, 等. 青海锡铁山地区二长花岗岩 U-Pb 年代学、地球化学、Hf 同位素研究及其地质意义[J]. 黄金, 2018, 39(4):7-14.
- YANG Baihui, LI Bile, JIN Ye, et al. U-Pb dating, geochemistry, Hf isotopic compositions and their geological implications of monzogranite from Xitieshan area, Qinghai Province[J]. *Gold*, 2018, 39(4):7-14.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型超高压矿物—柯石英 [J]. 地质学报, 2001, 75(2):175-179.
- YANG Jingsui, SONG Shuguang, XU Zhiqin, et al. Discovery of Coesite in the North Qaidam Early Paleozoic Ultrahigh-high Pressure (UHP-HP) Metamorphic Belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 175-179.
- 余梦丽. 柴达木盆地北缘西段新生代构造隆升及沉积响应 [D]. 西安:西北大学, 2018.
- YU Mengli. Cenozoic tectonic uplift and sedimentary response in the western part of the Northern Qaidam Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- 袁桂邦, 王惠初, 李惠民, 等. 柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及意义[J]. 前寒武纪研究进展, 2002, 25(1):36-40.
- YUAN Guibang, WANG Huichu, LI Huimin, et al. Zircon U-Pb age of the Gabbros in Luliangshan area on the Northern Margin of Qaidam Basin and its Geological Implication [J]. *Progress in Precambrian Research*, 2002, 25(1):36-40.
- 岳悦, 孙德有, 侯可军, 等. 柴北缘乌兰北部三叠纪辉长岩的年代学和地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020a, 50(1):154-168.
- YUE Yue, SUN Deyou, HOU Kejun, et al. Chronology and Geochemistry of the Triassic Gabbro in the Northern area of Wulan on the Northern Margin of Qaidam Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020a, 50(1):154-168.
- 岳悦. 柴北缘古生代花岗质岩石的成因及其形成构造背景 [D]. 长春:吉林大学, 2020b.
- YUE Yue. The petrogenesis and tectonic setting of Paleozoic granitoids in the North Qaidam[D]. Changchun: Jilin University, 2020b.
- 查显锋, 辜平阳, 董增产, 等. 柴北缘西段早古生代构造-热事件及其构造环境[J]. 地质科学, 2016, 41(4):586-604.
- ZHA Xianfeng, GU Pingyang, DONG Zengchan, et al. Geological record of tectono-thermal event at early Paleozoic and its tectonic setting in west segment of the north Qaidam[J]. *Earth Science*, 2016, 41(4):586-604.
- 赵志雄. 阿尔金东段—柴北缘古生代花岗岩年代学及其构造意义的研究[D]. 兰州:兰州大学, 2011.
- ZHAO Zhixiong. Geochronology and tectonic significance of Paleozoic granites in the east Altyn-north Qaidam, western China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- 张金明, 王秉璋, 许海全, 等. 柴北缘胜利口东地区白云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J/OL]. 中国地质, 2021:1-14.
- ZHANG Jinming, WANG Bingzhang, XU Haiquan, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopes of the east Shenglikou muscovite monzonite in the northern margin of Qaidam Basin[J/OL]. *Geology in China*, 2021:1-14.

- 张旗,王焰,李承东,等.花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J].岩石学报,2006,22(9):2249-2269.
- ZHANG Qi, WANG Yan, LI Chengdong, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implication[J]. Acta Petrological Sinica, 2006, 22(9): 2249-2269.
- 张新远,李五福,王春涛,等.柴北缘夏日哈地区二长花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J].青海大学学报(自然科学版),2015,33(3):64-72+89.
- ZHANG Xinyuan, LI Wufu, WANG Chuntao, et al. Zircon U-Pb dating of mafic dikes and geochemical features and significance in Xiariha area on the northern rim of Qaidam Basin[J]. Journal of Qinghai University(Natural Science Edition), 2015, 33(3):64-72+89.
- 张延军,孙丰月,许成瀚,等.柴北缘大柴旦滩间山花岗岩斑岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素[J].地球科学,2016,41(11):1830-1844.
- ZHANG Yanjun, SUN Fengyue, XU Chenghan, et al. Geochronology, Geochemistry and zircon Hf isotopes of the Tanjianshan granite porphyry intrusion in Dachaidan area of the north margin of Qaidam basin, NW China[J]. Earth Science, 2016, 41(11):1830-1844.
- 张耀玲,倪晋宇,沈燕绪,等.柴北缘牦牛山组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].现代地质,2018,32(2):329-334.
- ZHANG Yaoling, NI Jinyu, SHEN Yanxu, et al. Zircon U-Pb ages and geological significance of volcanic rocks from Maoniushan formation in the northern margin of Qaidam basin[J]. Geoscience, 2018, 32(2):329-334.
- 周宾,郑有业,聂晓亮,等.柴北缘滩间山群玄武岩锆石定年及其地质意义[J].东华理工大学学报(自然科学版),2019,42(3):227-233+246.
- ZHOU Bin, ZHENG Youye, NIE Xiaoliang, et al. Zircon U-Pb dating for basaltic and esite of Tanjianshan group in the Lvliangshan region of Qaidam basin north margin and its geological significance[J]. Journal of East China University of Technology(Natural Science), 2019, 42(3):227-233+246.
- 周宾,郑有业,童海奎,等.柴北缘早古生代埃达克质花岗岩锆石定年及其地质意义[J].现代地质,2014,28(5):875-883.
- ZHOU Bin, ZHENG Youye, TONG Haikui, et al. Zircon dating of early Paleozoic adakitic granite on the Northern Margin of Qaidam basin and its geological significance[J]. Geoscience, 2014, 28(5):875-883.
- 周宾,郑有业,许荣科,等.青海柴达木山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素特征[J].地质通报,2013,32(7):1027-1034.
- ZHOU Bin, ZHENG Youye, XU Rongke, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope geochemical characteristics of Qaidamshan intrusive body[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(7):1027-1034.
- 周伟,夏明哲,伍学恒,等.柴北缘杂秀雅平东和红柳沟北镁铁-超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄及其找矿意义[J].地质通报,2015,34(10):1860-1868.
- ZHOU Wei, XIA Mingzhe, WU Xueheng, et al. U-Pb dating of zircons from Gaxiuyapingdong and Hongliugoubei mafic-ultramafic intrusions on the northern margin of Qaidam Basin and its geological and prospecting significance[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(10):1860-1868.
- 朱小辉,陈丹玲,刘良,等.柴北缘西段团鱼山岩体的地球化学、年代学及 Hf 同位素示踪[J].高校地质学报,2013,19(2):233-244.
- ZHU Xiaohui, CHEN Danling, LIU Liang, et al. Geochemistry, Geochronology, and Hf isotopic Compositions of Tuanyushan Pluton from the Western Segment of the Northern Qaidam[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(2):233-244.
- 朱小辉,陈丹玲,刘良,等.柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J].岩石学报,2014,30(3):822-834.
- ZHU Xiaohui, CHEN Danling, LIU Liang, et al. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back-arc type ophiolite in Lvliangshan area, North Qaidam[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3):822-834.
- 朱小辉,王洪亮,杨猛.祁连南缘柴达木山复式花岗岩体中部二长花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].中国地质,2016,43(3):751-767.
- ZHU Xiaohui, WANG Hongliang, YANG Meng. Zircon U-Pb age of the monzogranite from the middle segment of the Qaidam Mountain composite granite on the south margin of the Qilian Mountain[J]. Geology in China, 2016, 43(3):751-767.
- 朱小辉.柴达木盆地北缘滩间山群火山岩地球化学及年代学研究[D].西安:西北大学,2011.
- ZHU Xiaohui. Geochemical and zircon U-Pb dating studies of the volcanic of Tanjianshan Group in the North Qaidam[D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- 朱小辉,陈丹玲,刘良,等.柴达木盆地北缘都兰地区旺尕秀辉长杂岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意

- 义[J]. 地质通报, 2010, 29(2/3): 227-236.
- ZHU Xiaohui, CHEN Danling, LIU Liang, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Wanggaixiu gabbro complex in the Dulan area, northern margin of Qaidam Basin, China and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2/3): 227-236.
- 庄玉军, 辜平阳, 李培庆, 等. 柴北缘构造带欧龙布鲁克地块西北缘辉长岩脉地球化学、年代学及 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 2019, 38(11): 1801-1812.
- ZHUANG Yujun, GU Pingyang, LI Peiqing, et al. Geochemistry, geochronology and Hf isotopic compositions of metagabbro dykes on the northeastern margin of Oulongbuluke micro-block on the northern margin of Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(11): 1801-1812.
- Andersen T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance; limiting conditions from statistics and numerical simulation[J]. Chemical Geology, 2005, 226(1).
- Chappell B W, White A J R. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt[M]. Southeastern Australia, 1983.
- Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173-174.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(1).
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- Meng E, Wang Chaoyang, Li Yanguang, et al. Zircon U-Pb-Hf isotopic and whole-rock geochemical studies of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the northern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, China: Implications for provenance and regional tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2017, 298: 472-489.
- Harris N B W, Inger S. Trace element modelling of pelite-derived granites[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1992, 110(1).
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. J. Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
- Rickwood Peter C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Elsevier, 1989, 22(4).
- Sun, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and process[C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 1985, 94(4): 57-72.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in variety of crustal magma types[J]. Elsevier, 1983, 64(2).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- Wu Cailai, Wu Di, Chris Mattinson, et al. Petrogenesis of granitoids in the Wulan area: Magmatic activity and tectonic evolution in the North Qaidam, NW China[J]. Gondwana Research, 2018, 67: 147-171.
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Wooden J, et al. Zircon SHRIMP dating of granite from Qaidamshan, NW China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, (5): 418-422.