

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.02.007

柴达木西北缘大通沟南山北闪长岩年代学、 地球化学特征及其地质意义

刘军¹, 息朝庄^{2,*}, 黄波³, 杨涛⁴, 夏浩东⁵, 邓会娟⁵

(1. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068; 2. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳 413000;
3. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局物化探总队, 贵州 都匀 558000; 4. 贵州理工学院建筑与城乡规划学院,
贵州 贵阳 550000; 5. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 燕郊 065201)

摘要:大通沟南山北闪长岩岩体位于柴达木地块西北缘, 岩石类型为石英闪长岩、闪长岩、花岗闪长岩, 具有高硅、富碱、富铝、贫钛特征。A/CNK 值为 1.52~1.57, 均大于 1.10, 为强过铝质花岗岩; 轻稀土富集, 重稀土亏损, 具负 Eu 异常, 标准化曲线呈明显的右倾型; 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 相对亏损 Nb、Ti、Y、Yb 等高场强元素, Sr、P、Ti 元素呈“V”型谷, 具有明显亏损。通过对地球化学研究, 表明岩浆来源于以砂屑岩为主的壳幔混合源, 岩体成因类型属 I-型花岗岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果为 (270±3) Ma (MSWD=0.076), 系早—中二叠世岩浆活动的产物, 形成于俯冲环境下的岛弧花岗岩。

关键词:大通沟南山北; 闪长岩; 年代学; 地球化学; 柴达木西北缘

中图分类号: P588.12 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2022)02-0093-13

Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Thediorite in Datonggou Nanshanbei, Northwestern Qaidam Basin

LIU Jun¹, XI Chaozhuang^{2,*}, HUANG Bo³, YANG Tao⁴, XIA Haodong⁵, DENG Huijuan⁵

(1. Xi'an Northwest Nonferrous Geophysical-Geochemical Corps Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China; 3. Geophysical Nonferrous Metals and Geochemical Survey, Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Duyun 558000, Guizhou, China; 4. College of Architecture and Urban Planning, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550000, Guizhou, China; 5. Cores and Samples Center of Natural Resources, CGS, Yanjiao 065201, Hebei, China)

Abstract: The Datonggou Nanshanbei diorite body is located in the northwest Qaidam basin, with the main rock types quartz diorite, diorite and granodiorite, and it is characterized by high silicon, rich alkali, rich aluminum and poor titanium. A/CNK ranges from 1.52 to 1.57, more than

收稿日期: 2021-05-22; 修回日期: 2021-11-25; 网络发表日期: 2022-05-10; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金和贵州喀斯特科学研究中心联合项目(U1812402); 贵州理工学院高层次人才科研启动项目“贵州实物地质资料汇聚与服务体系建设研究”(XJGC20161101); 湖南省教育厅科学研究一般项目“湘东北万大型金矿床毒砂 Re-Os 年代学研究”(20C0381); 益阳市社科联项目(2021YS133)。

作者简介: 刘军(1968-), 男, 大学本科, 高级工程师, 主要从事地质勘查、物化探及相关工作。E-mail: liujun714@sohu.com。

* 通讯作者: 息朝庄(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产普查与勘探研究工作。E-mail: xczcsummmmm@126.com。

1.10, and belongs to strong peraluminous granite type. Light rare earth elements (LREE) is enriched while heavy rare earth elements is depleted, and there is negative Eu anomaly. The normalized curve is obviously right inclined, with the feature of enrichment of large ion lithophile elements Rb, Th, K and LREE and the relative depletion of high field strength elements Nb, Ti, Y, Yb. The elements such as Sr, P and Ti show a "V" shaped valley with obvious depletion. The geochemical study shows that the magma is derived from the crust-mantle mixed source mainly composed of arenaceous rocks, and the genetic type belongs to I-type granite. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the zircon formation age is (270 ± 3) Ma (MSWD=0.076), which is the product of magmatic activity in the Middle to Early Permian, and was formed in the island arc granite under subduction environment.

Keywords: Datonggou Nanshanbei; diorite; chronology; geochemistry; northwestern Qaidam basin

柴达木西北缘地处柴达木地块和阿尔金构造带交界处,柴达木地块和塔里木地块的交汇部位。阿尔金断裂从该区北侧穿过,次级构造发育,成矿条件和找矿前景优越。研究区成矿区域地层齐全,构造活动强烈,岩浆活动活跃,矿产资源丰富,有铜镍矿床、铜多金属矿点等(孙小攀等,2018a,2018b)。近年来,众多学者分别对大通沟闪长岩(刘军等,2020)、大通沟北山闪长岩体(孙小攀等,2018a,2018b)、柴北缘西段花岗岩、南阿尔金茫崖地区花岗岩、都兰花岗岩(吴才来等,2008,2014a,2014b,2016)和柴北缘双口山金-银-铅矿床(俞军真等,2020)进行年代学研究;钱兵等(2017)、李卓凡等(2020)对柴北缘榴辉岩进行岩石学和矿物学研究;也有学者对柴北缘赛坝沟金矿(唐名鹰等,2021)、柴达木西北缘古生代镁铁-超镁铁质岩体铜-镍成矿条件(钱兵等,2017)进行矿床成因研究。

柴北缘高压-超高压变质作用和蛇绿岩研究成为近年来的研究热点,尤其在研究超高压变质作用和大陆俯冲作用方面(王佳兴等,2020;刘良等,2015)。因为研究区自然条件恶劣,对这些岩体研究程度不高,仍需进一步做深入的研究工作。笔者选取大通沟南山北序列闪长岩为研究对象,在野外详细调查的基础上,开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究,以期厘定其成岩时代,探讨岩石成因、源区性质和构造环境,为研究区构造演化过程和岩浆活动提供新认识。

1 区域地质背景与岩石学特征

1.1 区域地质背景

大通沟南山北岩浆岩序列大地构造位置位于柴

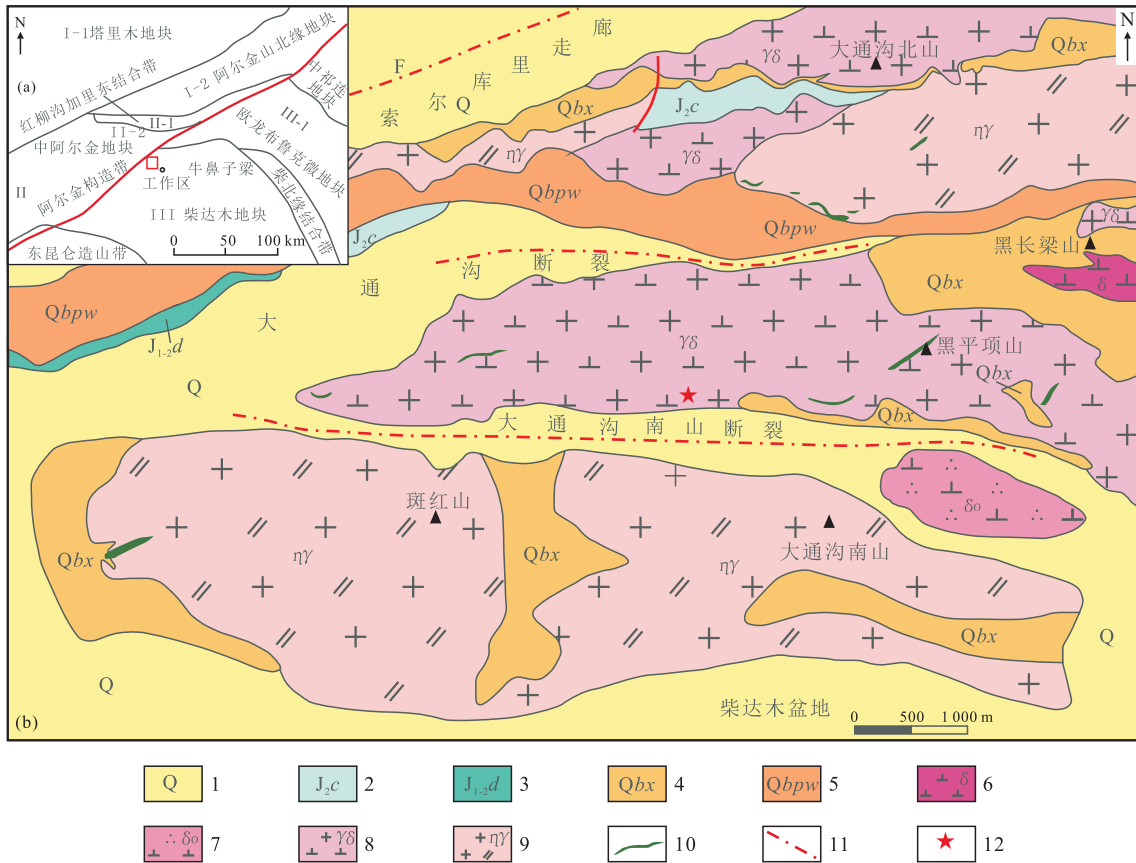
达木板块、阿尔金构造带接触处(图 1a),主要位于调查区南部的大通沟南山北侧一带;岩体主要侵入于元古界青白口系小泉达坂组中,岩体南侧为大通沟南山序列(图 1b),北侧受大通沟南山北断裂控制,呈东西向长条状展布,出露面积小,东西长 8 km,南北宽 3 km,面积约为 16.76 km^2 。笔者以同源岩浆演化序列观点为依据,对大通沟南山序列进行划分;结合花岗岩各类岩石学特征、花岗岩与围岩及相互间的接触关系、时代及分布特征,将大通沟南山北侧的花岗岩划分为大通沟南山北序列;其岩性为灰色中细粒石英闪长岩、灰白色中细粒闪长岩(图 2a)。

岩石类型主要为闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩。其中,闪长岩沿岩体北侧边部分布;石英闪长岩为岩体的主要岩石类型,出露面积较大,局部夹花岗闪长岩。大通沟南山北序列与青白口系小泉达坂组接触界线呈港湾状;在二长花岗岩和闪长岩中可见小泉达坂组的捕虏体;剖面测制和地质填图中可见闪长岩与二长花岗岩呈涌动接触关系,同时在石英闪长岩中可见闪长岩包裹体(图 2b)。

1.2 岩石学特征

大通沟南山北岩浆岩序列由早到晚由深灰色细粒闪长岩、灰色中细粒石英闪长岩组成,具体岩石学特征如下。

细粒闪长岩(图 2c):浅灰色,细粒半自形粒状结构,块状构造,斜长石含量为 $70\% \sim 75\%$,呈半自形板状、板条状,粒径大小为 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$,成分是 $An \approx 30 \sim 40$ 的中长石,发生了轻度绢云母化,聚片双晶清楚,杂乱分布;角闪石约占 $15\% \sim 20\%$,呈柱粒状,粒径大小为 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$,少数发生了纤闪石



1. 第四系; 2. 中侏罗统采石岭组; 3. 中一下侏罗统大煤沟组; 4. 小泉达坂组; 5. 平洼沟组; 6. 闪长岩; 7. 石英闪长岩; 8. 花岗闪长岩; 9. 二长花岗岩; 10. 基性-超基性岩; 11. 断层; 12. 采样位置

图 1 大通沟南山地区地质简图(孙小攀等, 2018)

Fig. 1 Geological sketch map of the Datonggou Nanshan

化, 杂乱分布; 黑云母很少, 少于 5%, 呈板状, 片径小于 1 mm, 呈棕褐色, 星点状散布; 石英很少, 呈他形粒状, 粒径大小为 0.1~0.5 mm, 散布于部分斜长石之间; 微量磁铁矿。

中细粒石英闪长岩(图 2d): 灰色, 中细粒半自形粒状结构, 块状构造。斜长石含量为 75%~80%, 成分是 $An \approx 30 \sim 40$ 的中长石, 少数具环带构造, 呈半自形板状, 粒径为 0.5~3 mm 的中细粒级, 有轻度绢云母化, 聚片双晶清楚, 杂乱分布; 石英约占 5%~10%, 呈他形粒状, 粒径大小为 0.1~0.5 mm, 杂乱散布于斜长石晶体之间; 暗色矿物总含量约为 10%~15%, 成分以角闪石为主, 其次为黑云母。角闪石呈柱粒状, 粒径大小为 0.5~2 mm, 少数发生了绿泥石化和黑云母化, 杂乱分布; 黑云母呈板状, 片径大小为 0.5~2 mm, 杂乱分布, 少数黑云母呈细小片状分布于角闪石颗粒的边部, 系角闪石次变形成。

2 样品采集与测试方法

本次用于岩石地球化学和同位素测试的样品采自大通沟一斑红山之间分布面积最大的花岗岩体, 确保样品的代表性。岩石地球化学在西北有色研究院实验室测试完成, 主量元素由 PANalytical 生产的 AxiosmAX 型 X 射线荧光光谱仪完成测试分析; 微量元素与稀土原色由 Agilent 公司 7700X 型电感耦合等离子体质谱仪完成测试工作。

锆石 LA-ICP-MS 测年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 测试仪器为 Agilent 7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统。测年样品重约 5kg, 先在实验室将样品粉碎至 80~100 目, 经常规浮选和磁选



Pl. 斜长石; Hbl. 角闪石

图2 石英闪长岩野外和典型显微照片

Fig. 2 Outcrop photos and micrographs of quartz diorite

方法分选后得到 >200 粒锆石。在双目镜下选出晶型较完好的锆石作为测定对象。将锆石样品置于DEVCON环氧树脂中,待固结后抛磨至锆石粒径的大约二分之一,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相、CL显微图像研究及U-Pb定年分析。锆石的阴极发光(CL)照相在西北大学大陆动力学实验室扫描电镜实验室完成。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光照片进行初选,再与CL照片对比,力求避开内部裂隙和包裹体,以获得尽可能准确的年龄信息。

3 分析结果

3.1 主量元素

大通沟南山北闪长岩主量元素、稀土元素和微量元素分析结果见表1。从表1可看出, SiO_2 含量为60.57%~66.88%,介于中性至酸性岩石范畴; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为5.06%~6.28%,平均为5.80%,富

碱, K_2O 较低,相对富Na, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为0.13~0.44,平均为0.26。里特曼指数(σ)介于1.46~1.64,平均为1.53,反映其为钙碱性系列。在全碱-硅(TAS)图解中(图3a),样品多处于花岗闪长岩区,其中有一个样品落入了闪长岩区。 Al_2O_3 含量为15.15%~16.76%,平均为15.98%,A/NK值介于2.56~3.31,平均为2.77,A/CNK值介于1.52~1.57,平均为1.55,在A/NK-A/CNK图解(图3b)中属过铝质花岗岩。在 SiO_2 -Ce图解中(图3c),样品均落在I-型花岗岩中;在 SiO_2 - K_2O 图解(图3d)中投影在钙碱性系列和低钾系列范围内。

综上所述,该花岗岩侵入岩主要为高钠钙碱性岩石系列,具有碱性系列变化趋势。

3.2 稀土元素

大通沟南山北岩浆岩序列稀土总量(表1)变化较大, $\sum\text{REE}$ 为 43.09×10^{-6} ~ 102.45×10^{-6} ,平均为 67.46×10^{-6} , $\sum\text{LREE}$ 为 33.60×10^{-6} ~ $74.35\times$

表 1 大通沟南山北岩体主量元素、稀土元素和微量元素地球化学组成表
 Tab. 1 Major, REE and trace elements compositions of Datonggou Nashanbei rock

样号	XT5	XT6	XT7	XT13	XT14
岩石名称	石英闪长岩	石英闪长岩	闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩
SiO ₂	65.34	66.88	60.57	66.92	65.61
TiO ₂	0.57	0.52	0.59	0.50	0.55
Al ₂ O ₃	16.07	15.80	16.76	15.15	16.10
TFe	4.11	3.92	5.26	3.68	3.96
MnO	0.09	0.09	0.11	0.08	0.08
MgO	1.71	1.72	3.81	1.73	1.65
CaO	4.48	4.12	6.00	4.02	3.99
Na ₂ O	5.00	4.85	4.49	4.38	4.35
K ₂ O	1.06	1.08	0.57	1.27	1.93
P ₂ O ₅	0.13	0.13	0.16	0.12	0.14
LOI	0.64	0.83	1.14	1.58	0.89
TOTAL	99.20	99.94	99.46	99.43	99.25
σ	1.64	1.47	1.46	1.33	1.74
Na ₂ O+K ₂ O	6.06	5.93	5.06	5.65	6.28
K ₂ O/Na ₂ O	0.21	0.22	0.13	0.29	0.44
SI	14.39	14.87	26.96	15.64	13.88
A/CNK	1.52	1.57	1.52	1.57	1.57
A/NK	2.65	2.66	3.31	2.68	2.56
La	9.15	7.46	4.94	7.33	14.47
Ce	24.15	20.27	15.37	18.46	31.07
Pr	2.76	2.35	1.71	2.31	4.05
Nd	11.41	9.77	7.54	9.64	16.60
Sm	2.58	2.16	1.66	2.20	3.57
Eu	0.77	0.68	0.62	0.60	0.89
Gd	2.62	2.20	1.76	2.28	3.71
Tb	0.42	0.33	0.28	0.37	0.59
Dy	2.31	1.93	1.59	2.04	3.38
Ho	0.48	0.40	0.33	0.44	0.70
Er	1.26	1.08	0.87	1.15	1.91
Tm	0.18	0.15	0.12	0.17	0.29
Yb	1.19	0.94	0.74	1.07	1.83
Lu	0.18	0.15	0.10	0.17	0.28
Y	10.16	8.39	3.88	7.91	15.19
Sc	3.07	2.60	1.57	2.05	3.92
Σ REE	72.69	60.87	43.09	58.19	102.45
Σ LREE	53.44	44.89	33.60	42.83	74.35
Σ HREE	19.25	15.98	9.49	15.36	28.10

续表 1

样号	XT5	XT6	XT7	XT13	XT14
LREE/HREE	2.78	2.81	3.54	2.79	2.65
δEu	0.90	0.95	1.09	0.81	0.74
δCe	1.17	1.18	1.29	1.09	0.98
(La/Yb) _N	5.52	5.68	4.76	4.91	5.67
(La/Sm) _N	2.29	2.23	1.92	2.16	2.61
(Gd/Yb) _N	1.82	1.94	1.96	1.76	1.67
Hf	3.11	3.09	2.54	3.23	5.32
Ta	0.46	0.37	0.18	0.38	0.57
Nb	4.33	3.75	2.49	3.86	7.59
Ga	14.26	13.47	13.76	14.03	16.73
Rb	22.26	24.19	2.77	6.34	35.93
Sr	323	303	334	267	355
Ba	153	157	99	154	366
Pb	6.12	5.44	4.71	5.45	10.87
Bi	0.07	0.05	0.04	0.05	0.08
Th	3.20	2.62	0.22	1.55	7.42
U	1.39	1.04	0.28	0.77	1.76
Zr	104	106	94	108	185
Y+Nb	14.48	12.14	6.37	11.77	22.77
Yb+Ta	1.65	1.31	0.93	1.45	2.41

注:主量元素:%,稀土与微量元素: $\times 10^{-6}$ 。

10^{-6} ,平均为 49.82×10^{-6} , Σ HREE 为 $9.49 \times 10^{-6} \sim 28.10 \times 10^{-6}$,平均为 17.64×10^{-6} , LREE/HREE 值为 2.78~3.54,具轻稀土富集、重稀土亏损特征。δEu 介于 0.74~1.10,多小于 1.0,仅一个样品的 δEu 大于 1.0,具负 Eu 异常。在岩石的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图上可以看出,5 个样品具有一致的稀土配分曲线,呈明显的右倾型分配模式(图 4a)。

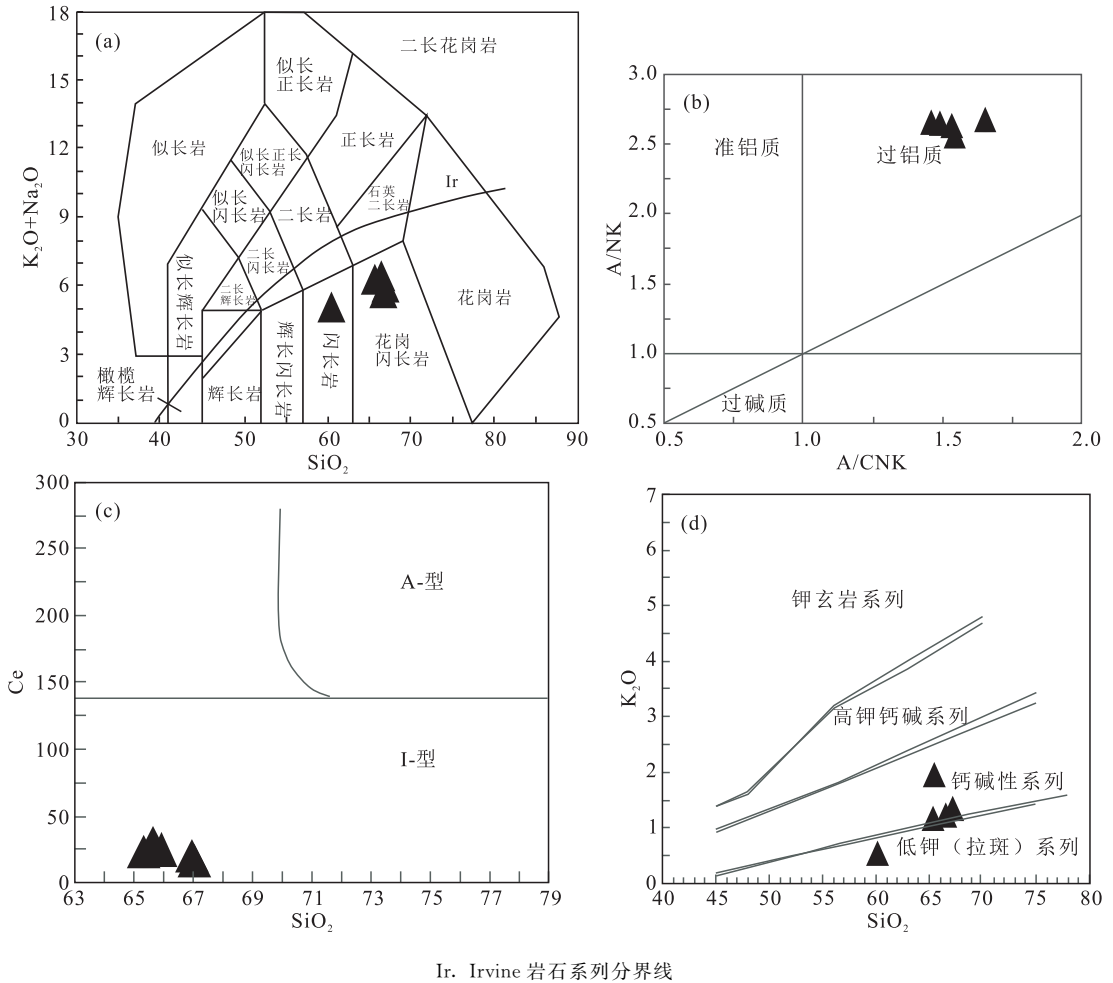
3.3 微量元素

大通沟南山北岩浆岩序列微量元素分析结果见表 1。岩体各微量元素含量变化较大,Rb 含量为 $2.77 \times 10^{-6} \sim 35.93 \times 10^{-6}$,Sr 含量为 $266.9 \times 10^{-6} \sim 354.6 \times 10^{-6}$,Ba 含量为 $98.8 \times 10^{-6} \sim 365.6 \times 10^{-6}$,Y 含量为 $3.88 \times 10^{-6} \sim 15.19 \times 10^{-6}$,Nb 含量为 $2.49 \times 10^{-6} \sim 7.59 \times 10^{-6}$,Ta 含量为 $0.18 \times 10^{-6} \sim 0.57 \times 10^{-6}$ 。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4b)中表现出不同程度的富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、K 等和轻稀土

元素(LREE),相对亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ti、Y、Yb,和 Ti 元素,呈“V”型谷,具有明显亏损。

3.4 锆石 U-Pb 同位素分析结果

在显微镜下观察,石英闪长岩和花岗闪长岩中的锆石呈无色透明或浅玫瑰色,锆石短轴长度为 $30 \sim 75 \mu\text{m}$,长轴为 $55 \sim 120 \mu\text{m}$,呈自形、短柱状、长条状。在锆石样品 CL 图像中发现清晰岩浆振荡环带结构(图 5)。在测试数据中获得 36 个有效数据(表 2),U 含量为 $37.74 \times 10^{-6} \sim 89.44 \times 10^{-6}$,Th 含量为 $0.22 \times 10^{-6} \sim 7.42 \times 10^{-6}$,Rb 含量为 $20.54 \times 10^{-6} \sim 87.94 \times 10^{-6}$,Th/U 值为 $0.54 \sim 1.13$,大于岩浆锆石 Th/U 值(>0.40),属典型岩浆锆石(Wu et al.,2004)。锆石年龄数据集集中于 $252 \sim 284 \text{ Ma}$,误差范围内基本一致,协和图上(图 6a)可看出分析点位范围集中。石英闪长岩和花岗闪长岩的锆石年龄加权平均值为 $(270 \pm 3) \text{ Ma}$ (95%置信度,MSWD=0.076)(图 6b)。因此,将大通沟南山北花岗岩时代厘定为中一早二叠世。



Ir. Irvine 岩石系列分界线

图 3 (a)大通沟南山北系列闪长岩 TAS 图解(据 Cox et al.1979)、(b)A/CNK - A/NK 图解(据 Peccerillo et al.1976)、(c)SiO₂ - Ce 图解和 (d)SiO₂ - K₂O 图解(据 Rickwood, 1889)

Fig. 3 (a) TAS classification diagrams, (b) A/CNK - A/NK plots, (c) SiO₂ - Ce plots and (d) SiO₂ - K₂O plots of the diorite in Datonggou Nanshanbei

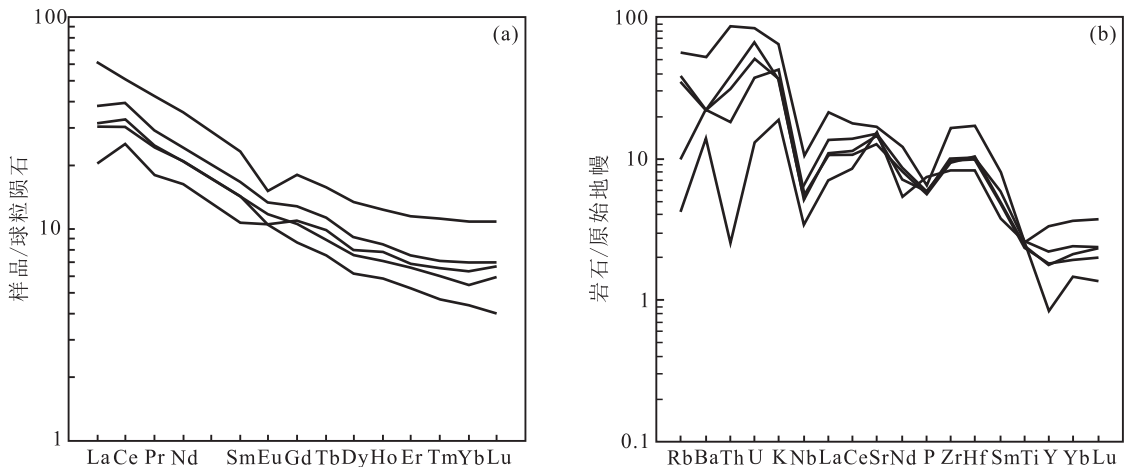


图 4 (a)闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(据 Sun et al.1989)和(b)原始地幔标准化微量元素蛛网图(据 SUN et al.1989)
Fig. 4 (a) Chondrite-normalized REE patterns(After SUN et al,1989) and (b) primitive mantle normalized trace element abundances of the diorite(After Sun et al,1989)

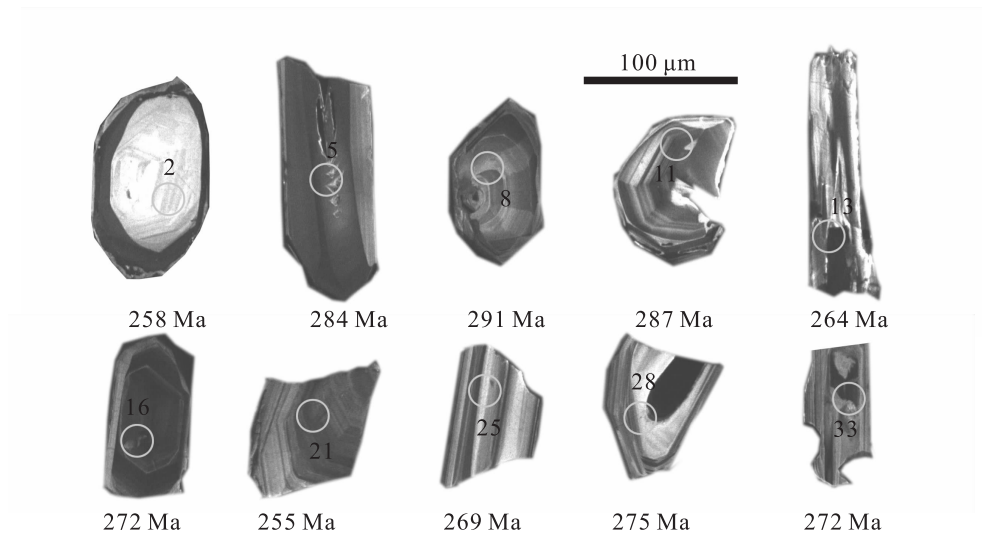


图5 大通沟南山北闪长岩锆石 CL 图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images of zircons from the Datongou Nanshanbei diorite

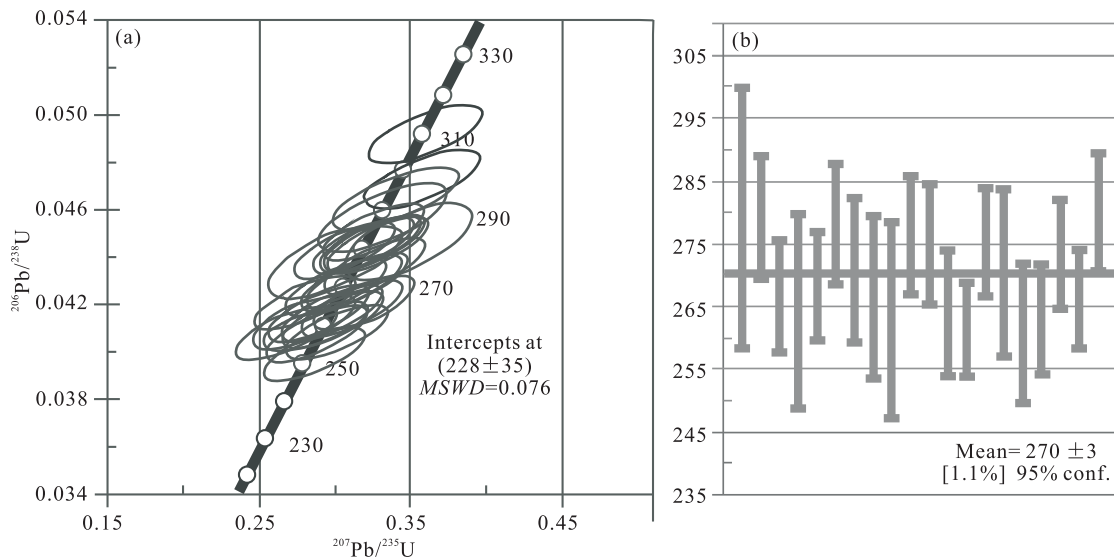


图6 (a)大通沟南山北闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和(b)频数图

Fig. 6 (a) Concordia diagram and (b) frequency diagram showing zircon U-Pb dating result of the Datongou Nanshanbei diorite

4 讨论

4.1 岩石类型与岩浆源区

大通沟南山北花岗岩序列具有高硅、富碱、富铝、贫钛特征。铝饱和指数(A/CNK)为1.52~1.57,均大于1.10,为强过铝质花岗岩。在SiO₂-Ce图解中(图3),样品均落在I-型花岗岩中。5件样品ΣREE含量较低,平均为67.46×10⁻⁶,具有负Eu异常,反映可能存在弱的斜长石的分离结晶作用

或部分熔融过程中有斜长石的残留;(La/Sm)_N值介于1.92~2.61,(La/Yb)_N值为4.76~5.68,反映了岩石具有轻重稀土分馏,轻稀土富集的特征;重稀土表现的相对亏损,这可能是残留体中含量较高的富重稀土石榴子石和角闪石引起的(sun et al., 1989)。

LREE/HREE值为2.78~3.54,平均为2.91,轻重稀土分异程度较高。岩石学特征显示,研究区花岗闪长岩中斜长石广泛发育于斑晶及基质中,斜长石分离结晶作用明显。

表2 大通沟南山北闪长岩锆石 U - Pb 同位素定年数据表
 Tab.2 Zircon U - Pb isotopic dating results of the Datonggou Nanshanbei diorite

样点	含量($\times 10^{-6}$)		同位素比值												年龄(Ma)			
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	σ
NY2-2	47.20	48.70	0.05117	0.00551	0.28972	0.03056	0.04106	0.00068	0.01464	0.00036	249	23	258	24	259	4	294	7
NY2-3	48.02	56.32	0.05241	0.00491	0.32256	0.02926	0.04464	0.00091	0.01429	0.00053	303	20	284	22	282	6	287	11
NY2-5	37.96	47.04	0.05293	0.00919	0.32306	0.05495	0.04427	0.00168	0.01495	0.00130	326	35	284	42	279	10	300	26
NY2-6	39.72	51.59	0.05265	0.00412	0.32134	0.02413	0.04427	0.00079	0.01359	0.00045	314	16	283	19	279	5	273	9
NY2-7	57.62	58.56	0.05475	0.00494	0.35728	0.03116	0.04733	0.00099	0.01374	0.00052	402	19	310	23	298	6	276	10
NY2-8	87.94	78.15	0.05264	0.00565	0.33176	0.03453	0.04570	0.00117	0.01426	0.00057	313	22	291	26	288	7	286	11
NY2-9	43.04	63.11	0.05175	0.00387	0.30140	0.02162	0.04224	0.00073	0.01271	0.00043	274	16	268	17	267	5	255	9
NY2-10	53.13	59.06	0.05273	0.00693	0.30424	0.03893	0.04184	0.00125	0.01210	0.00074	317	27	270	30	264	8	243	15
NY2-11	67.96	70.98	0.05304	0.00493	0.32642	0.02933	0.04463	0.00095	0.01520	0.00057	330	19	287	22	282	6	305	11
NY2-12	35.77	58.23	0.05161	0.00378	0.30253	0.02122	0.04251	0.00071	0.01324	0.00044	268	15	268	17	268	4	266	9
NY2-13	48.00	57.46	0.05281	0.00567	0.29718	0.03096	0.04081	0.00100	0.01144	0.00048	321	22	264	24	258	6	230	10
NY2-14	23.81	40.00	0.04977	0.00415	0.30272	0.02439	0.04411	0.00077	0.01338	0.00047	184	18	269	19	278	5	269	9
NY2-15	39.65	49.59	0.05225	0.00421	0.32598	0.02529	0.04524	0.00083	0.01362	0.00044	296	17	287	19	285	5	273	9
NY2-16	23.47	43.68	0.05185	0.00529	0.30703	0.03047	0.04294	0.00093	0.01222	0.00062	279	21	272	24	271	6	246	12
NY2-17	24.59	43.50	0.04983	0.00618	0.29019	0.03521	0.04222	0.00105	0.01461	0.00076	187	26	259	28	267	7	293	15
NY2-18	32.89	56.50	0.05148	0.00559	0.31510	0.03323	0.04439	0.00110	0.01440	0.00076	262	23	278	26	280	7	289	15
NY2-19	44.22	51.07	0.05146	0.00716	0.29526	0.04014	0.04160	0.00127	0.01087	0.00064	262	29	263	31	263	8	218	13
NY2-21	72.12	89.44	0.05197	0.00512	0.28590	0.02723	0.03989	0.00093	0.01192	0.00042	284	21	255	22	252	6	240	8
NY2-22	48.65	62.59	0.05491	0.00387	0.33186	0.02234	0.04382	0.00076	0.01246	0.00036	409	15	291	17	277	5	250	7
NY2-23	34.21	50.37	0.05162	0.00414	0.31029	0.02401	0.04359	0.00077	0.01236	0.00043	268	17	274	19	275	5	248	9

续表 2

样点	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值										年龄(Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	σ
NY2-25	41.14	62.79	0.66	0.05265	0.00417	0.30348	0.02308	0.04180	0.00082	0.01253	0.00045	314	17	269	18	264	5	252	9
NY2-26	55.00	77.72	0.71	0.05150	0.00304	0.29380	0.01637	0.04136	0.00061	0.01117	0.00029	263	13	262	13	261	4	225	6
NY2-27	45.93	65.49	0.70	0.05152	0.00334	0.28856	0.01777	0.04061	0.00065	0.01132	0.00033	264	14	257	14	257	4	228	7
NY2-28	72.64	69.17	1.05	0.05168	0.00317	0.31097	0.01807	0.04364	0.00069	0.01155	0.00027	271	13	275	14	275	4	232	5
NY2-29	43.33	47.68	0.91	0.05161	0.00620	0.30488	0.03578	0.04284	0.00108	0.01196	0.00059	268	25	270	28	270	7	240	12
NY2-30	24.87	38.51	0.65	0.05159	0.00481	0.29375	0.02652	0.04129	0.00090	0.01059	0.00043	267	20	262	21	261	6	213	9
NY2-31	21.90	37.76	0.58	0.05301	0.00543	0.34018	0.03386	0.04653	0.00106	0.01292	0.00066	329	21	297	26	293	7	259	13
NY2-32	35.30	50.64	0.70	0.05135	0.00391	0.28993	0.02129	0.04095	0.00067	0.01142	0.00038	257	16	259	17	259	4	230	8
NY2-33	44.09	63.94	0.69	0.05355	0.00376	0.30756	0.02062	0.04165	0.00072	0.01178	0.00039	352	15	272	16	263	4	237	8
NY2-34	20.54	37.74	0.54	0.05206	0.00461	0.31965	0.02738	0.04452	0.00090	0.01241	0.00060	288	19	282	21	281	6	249	12
NY2-35	24.42	43.44	0.56	0.05201	0.00409	0.32402	0.02455	0.04518	0.00081	0.01272	0.00052	286	17	285	19	285	5	256	10
NY2-36	36.91	56.72	0.65	0.05177	0.00347	0.30933	0.01980	0.04333	0.00071	0.01140	0.00038	275	14	274	15	273	4	229	8
NY2-37	42.24	52.33	0.81	0.05294	0.00464	0.35957	0.03050	0.04925	0.00101	0.01314	0.00049	326	18	312	23	310	6	264	10
NY2-38	43.08	59.47	0.72	0.05097	0.00467	0.28578	0.02536	0.04066	0.00087	0.01133	0.00047	240	19	255	20	257	5	228	9
NY2-39	38.82	66.18	0.59	0.05194	0.00302	0.30190	0.01661	0.04216	0.00064	0.01122	0.00033	283	12	268	13	266	4	226	7
NY2-40	31.42	51.04	0.62	0.05181	0.00380	0.31707	0.02232	0.04438	0.00077	0.01114	0.00042	277	15	280	17	280	5	224	8

据前人研究指出 Rb 元素和 K 元素地球化学特征相似,在地球演化中 Rb 元素和 K 元素逐渐迁移演化进入硅铝层;而 Sr 元素和 Ca 元素地球化学特征相似,并富集于斜长石中,取代 Ca(徐克勤等,1982;王德滋等,1993)。因此,花岗闪长岩 Rb/Sr 值和 Rb/Ba 值越高,则表明源岩多来自于上部陆壳。部分学者认为幔源 Rb/Sr < 0.05,壳幔混合源 Rb/Sr 值为 0.05 ~ 0.5,壳源 Rb/Sr > 0.5(Tischendorf, 1986)。研究区花岗闪长岩 Rb/Sr 值为 0.01 ~ 0.10,表明源区物质主要为壳幔混合源。前人研究表明(桑明帅等,2020),属不同源区的部分熔融而形成的过铝质花岗岩具有不同的 CaO/Na₂O 值;CaO/Na₂O < 0.3,暗示岩浆可能形成于泥质岩石重熔;若 CaO/Na₂O > 0.3,则砂屑岩石重熔而形成过铝质花岗岩(钟长汀等,2007)。研究区花岗闪长岩 CaO/Na₂O 值为 0.85 ~ 1.34,表明源区可能以砂屑岩为主。综上所述,笔者认为岩浆来源于以砂屑岩为主的壳幔混合源。

4.2 构造环境

研究区位于青海柴北缘大通沟地区,构造位置隶属柴达木板块、阿尔金构造带接触处。区内岩浆活动强烈,侵入岩广泛分布,由于受后期阿尔金断裂影响,呈现从北东向南带状展布,分别有闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩的岩石组合与岩浆序列特征(图 1)。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示,大通沟南山北花岗闪长岩形成于中一早二叠世,其时代为 (270 ± 3) Ma。据吴才来等(2014a)研究,将研究区岩浆活动划分为 3 期:①大于 (460 ~ 450) Ma,岩石组合包括石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩。②(410 ~ 400) Ma,岩石组合包括花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩。③265 Ma,

岩石为石英闪长岩和二长花岗岩。由表 3 可看出,研究区锆石 U-Pb 年龄为 (458.3 ± 8.2) ~ (263.0 ± 2.0) Ma,与前人研究成果基本符合。

据吴才来等(2008)研究,认为柴北缘西段三岔沟花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (260.4 ± 2.3) Ma 和 (271.2 ± 1.5) Ma,通过分析认为其形成时代为晚石炭世-早二叠世,由于古特提斯洋的关闭,柴北缘的构造应力从拉张改为收缩,从而发生陆内俯冲,致使本区隆升为古陆,并且深部幔源物质与能量的上侵造成区内中下部地壳重熔,形成丰富的花岗质岩浆。

本区花岗岩是由基性岩浆上升底侵从而导致地壳物质熔融的产物,具岛弧岩浆岩特征。因此,认为区内花岗岩应该形成于火山弧构造环境;本文花岗岩里特曼指数介于 1.46 ~ 1.64,平均为 1.53,为钙碱性火成岩系列,铝饱和指数平均为 1.55,与 RRG 及 CEUG 具有强过铝质 (A/CNK > 1.15) 相似。在 Pearce 等提出的 Rb-Hf-3Ta 和 Rb-Y+Nb 构造环境判别图中(图 7),样品分别落在火山弧花岗岩范围内,这反映了岩石为俯冲环境下的岛弧花岗岩(Pearce et al., 1984)。

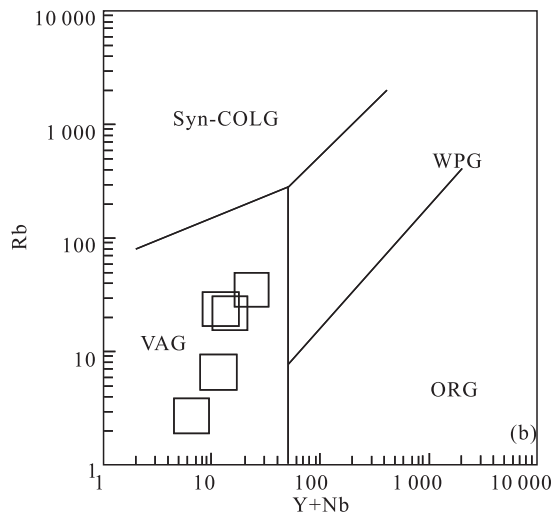
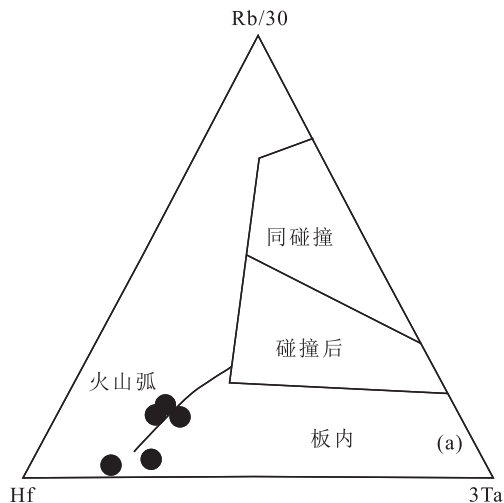
5 结论

(1)大通沟南山北闪长岩具有高硅、富碱、富铝、贫钨特征。铝饱和指数 (A/CNK) 为 1.52 ~ 1.57,均大于 1.10,为强过铝质花岗岩。轻稀土富集,重稀土亏损。具负 Eu 异常。呈明显的右倾型曲线。富集大离子亲石元素 (LILE) Rb、Th、K 等和轻稀土元素 (LREE),相对亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ti、Y、Yb、Sr 和 Ti 元素,呈“V”型谷,具有明显亏损。岩浆来源于以砂屑岩为主的壳幔混合源,属 I-型花岗岩。

表 3 大通沟南山闪长岩锆石 U-Pb 同位素年龄表

Tab. 3 Zircon U-Pb isotopic dating of the Datonggou Nanshan diorite

岩体	岩性	测试方法	年龄值 (Ma)	锆石数量	资料来源
大通沟	闪长岩	LA-ICP-MS	367.5 ± 5.2	24	刘军等,2020
大通沟北山	闪长岩	LA-ICP-MS	362.3 ± 4.9	12	孙小攀等,2018
大通沟	花岗岩	LA-ICP-MS	353.7 ± 1.1	24	菅坤坤等,2018
大通沟南山	辉长岩	LA-ICP-MS	458.3 ± 8.2	19	钱兵等,2017
大通沟南山	花岗闪长岩	LA-ICP-MS	270.3 ± 1.3	12	大通沟等三幅 1:5 万区调
大通沟南山	花岗闪长岩	LA-ICP-MS	269.5 ± 4.4	13	大通沟等三幅 1:6 万区调
大通沟南山北	花岗闪长岩	LA-ICP-MS	270.0 ± 3.0	36	本文
盐场北	英云闪长岩	LA-ICP-MS	263.0 ± 2.0	24	邱士东等,2015



Syn-COLG. 通碰撞花岗岩;WPG. 板内花岗岩;VAG. 火山弧花岗岩;ORG. 洋脊花岗岩

图7 闪长岩 Hf-Ta-Rb 图解和 Rb-Y+Nb 图解(底图据 Pearce et al., 1984)

Fig. 7 Hf-Ta-Tb diagram and Rb-Y+Nb diagram of diorite

(2)大通沟南北闪长岩锆石 U-Pb 定年结果表明,其形成时代为 $(270 \pm 3) \text{ Ma}$ ($MSWD = 0.076$),厘定为中一早二叠世。

(3)本区岩石为俯冲环境下的岛弧花岗岩,是由基性岩浆上升底侵导致地壳物质熔融的产物。

参考文献(References):

菅坤坤,刘向东,何元方,等. 阿尔金中段大通沟花岗岩体年代学、地球化学特征及其成因[J]. 中国地质, 2018, 45(4):740-752.

JIAN Kunkun, LIU Xiangdong, HE Yuanfang, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Datonggou granitic plutons in the middle section of Altun Mountains [J]. Geology in China, 2018, 45(4): 740-752.

李卓凡,于胜尧,侯可军,等. 柴北缘绿梁山榴辉岩变质演化—来自岩石学和矿物学的证据[J]. 新疆地质, 2020, 38(3):325-331.

LI Zhuofan, YU Shengyao, HOU Kejun, et al. Metamorphic evolution process of eclogite in Luliangshan, northern Qaidam—Evidence from Petrology and Chronology [J]. Xinjiang Geology, 2020, 38(3): 325-331.

刘军,刘敏,杨春雷,等. 青藏高原北缘大通沟闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及意义[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(1):68-85.

LIU Jun, LIU Min, YANG Chunlei, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of the Datonggou diorite in the northern margin of the Tibetan Plateau and its significance[J]. Non-ferrous Metals(Mining Section), 2020, 72(1): 68-85.

刘良,康磊,曹玉亭,等. 南阿尔金早古生代俯冲碰撞过程中

的花岗质岩浆作用[J]. 中国科学:地球科学, 2015, 45(8):1126-1137.

LIU Liang, KANG Lei, CAO Yuting, et al. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(8): 1126-1137.

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.

钱兵,张照伟,刘会文,等. 柴达木西北缘古生代镁铁-超镁铁质岩体 Cu-Ni 成矿条件与找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2017, 50(1):35-49.

QIAN Bing, ZHANG Zhaowei, LIU Huiwen, et al. Analysis on the prospecting potentiality and Cu-Ni metallogenetic conditions of the Paleozoic Mafic-ultramafic in the Northwestern margin of Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 35-49.

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.

桑明帅,张奎,黄基汉,等. 东昆仑造山带西端乌尊科勒晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、构造环境及地质意义[J]. 新疆地质, 2020, 38(4):431-438.

SANG Mingshuai, ZHANG Jiankui, HUANG Jihan, et al.

- LA - ICP - MS zircon U - Pb dating, Petrogenesis and geologic significance of late Triassic granites in the western section of the east Kunlun Orogen, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2020, 38(4): 431-438.
- 孙小攀, 杨春雷, 高毅, 等. 柴达木西北缘大通沟北山闪长岩体地球化学特征及年代学研究[J]. *矿产与地质*, 2018, 32(4): 686-694.
- SUN Xiaopan, YANG Chunlei, GAO Yi, et al. Geochemistry and geochronology of the Dagonggou Beishan diorite in the northwestern margin of Qaidam Basin[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2018, 32(4): 686-694.
- 孙小攀, 杨春雷, 齐耀辉, 等. 柴达木西北缘大通沟南山基性-超基性岩地球化学特征及找矿前景分析[J]. *西北地质*, 2018, 51(3): 53-66.
- SUN Xiaopan, YANG Chunlei, QI Yaohui, et al. Geochemistry and prospecting potential of Datonggou South mountain Basic-ultrabasic rocks in Northwest Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(3): 53-66.
- 唐名鹰, 何宗围, 朱德全, 等. 柴北缘赛坝沟金矿床硫、铅同位素组成: 对成矿物质来源的指示[J]. *矿床地质*, 2021, 40(1): 117-127.
- TANG Mingying, HE Zongwei, ZHU Dequan, et al. S and Pb isotopic compositions in Saibagou gold deposit on north margin of Qaidam Basin: An indication to the source of metallogenic materials[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(1): 117-127.
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 和相山 S 型两类碎斑岩对比[J]. *岩石学报*, 1993, 9(1): 4-53.
- WANG Dezi, LIU Changshi, SHEN Weizhou, et al. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type clastoporphyritic Lava [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(1): 4-53.
- 王佳兴, 蔺梦, 刘泽宇, 等. 柴北缘超高压变质带变质蛇绿岩组合及其地质意义[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 1-10.
- WANG Jiaying, LIN Meng, LIU Zeyu, et al. Petrological study of the Meta-ophiolite from the Northern Qaidam UHP metamorphic belt and its geological implications [J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 1-10.
- 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, 38(8): 930-949.
- 吴才来, 郜源红, 雷敏, 等. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMP U - Pb 定年、Lu - Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2014a, 30(8): 2297-2323.
- WU Cailai, GAO Yuanhong, LEI Min, et al. Zircon SHRIMP U - Pb dating, Lu - Hf isotopic characteristics and petrogenesis of the Palaeozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2297-2323.
- 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*, 2014b, 44(10): 2142-2159.
- 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*, 2014b, 44(10): 2142-2159.
- 吴才来, 雷敏, 张昕, 等. 南阿尔金花岗岩锆石 Lu - Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *中国地质*, 2016, 43(6): 1853-1883.
- WU Cailai, LEI Min, ZHANG Xin, et al. Petrogenesis and zircon Lu - Hf isotopic characteristics of the granites from the southern Altun area, Northwest China[J]. *Geology in China*, 2016, 43(6): 1853-1883.
- 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 等. 华南两类不同成因花岗岩岩石学特征[J]. *岩矿测试*, 1982, 1(2): 1-12.
- XU Keqin, SUN Ding, WANG Dezi, et al. Two genetic series of granitic rocks in southeastern China[J]. *Acta Petrologica Mineralogica Et Analytica*, 1982, 1(2): 1-12.
- 俞军真, 郑有业, 许荣科. 柴北缘双口山金-银-铅矿床赋矿围岩及含金石英脉热液锆石 U - Pb 定年对成矿时代的限定及其成因启示[J]. *地质学报*, 2020, 94(11): 3361-3375.
- YU Junzhen, ZHENG Youye, XU Rongke. LA - ICP - MS zircon U - Pb age of the host rock and hydrothermal zircon in gold-bearing quartz vein of Shuangkoushan Au - Ag - Pb deposit, North Qaidam: limitation for the mineralization age and implication for the genesis of the deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(11): 3361-3375.
- 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 等. 华北克拉通北缘中段古元古代造山作用的岩浆记录: S 型花岗岩地球化学特征及锆石 SHRIMP 年龄[J]. *地球化学*, 2007, 36(6): 633-637.
- ZHONG Changding, DENG Jinfu, WAN Yusheng, et al. Magma recording of Paleoproterozoic orogeny in central segment of northern margin of north China craton: geochemical characteristics and zircon SHRIMP dating of S-type granitoids[J]. *Geochimica*, 2007, 36(6): 633-637.
- Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. *The Interpretation of Igneous Rocks* [M]. London: Allen and Unwin, 1979, 30-450.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- Tischendorf G. Classification of grantioids[J]. *Abroad Geological Science and Technology*, 1986, 7: 25-33.
- Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U - Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554-1569.