

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.01.004

青海省那陵郭勒河中游晚三叠世侵入岩 地球化学特征及地质意义

吉明甲^{1,2}, 魏丽琼¹, 徐博¹, 刘博¹, 白洪溪¹, 陈晓琳¹, 李兄¹

(1. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810001; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:那陵郭勒河中游位于东昆仑西段祁漫塔格地区, 分布着大量的花岗岩。对该地区晚三叠世侵入岩的研究有助于认识东昆仑造山带印支期构造-岩浆演化历史。对研究区内花岗岩进行了岩石学、年代学及岩石地球化学分析。分析结果表明, 研究区花岗闪长岩和二长花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 (225.7 ± 1) Ma、 (213.74 ± 1) Ma, 为晚三叠世岩浆活动产物。岩石地球化学分析结果显示, 该地区晚三叠世侵入岩属高钾钙碱性系列, 饱和铝指数显示为偏铝质到过铝质, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 明显亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素。花岗岩具有 I 型花岗岩特征, 具有板块俯冲阶段的特征。通过分析认为岩浆岩形成于板块碰撞前的火山弧环境中。

关键词:花岗岩; 地球化学; 晚三叠世; 那陵郭勒河中游; 东昆仑

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2021)01-0041-14

Geochemical Characteristics and Geological Significance of Late Triassic Intrusive Rocks in the Middle Reaches of Naling Guole River, Qinghai Province

Ji Mingjia^{1,2}, WEI Liqiong¹, XU Bo¹, LIU Bo¹, BAI Hongxi¹, CHEN Xiaolin¹, LI Xiong¹

(1. Qinghai Geological Survey Bureau, Xining 810001, Qinghai, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The middle reaches of Naling Guole River is located in the western part of Qimantage area in East Kunlun Mountains, where a large number of granites are distributed. The study of the Late Triassic intrusive rocks in this area is of help to understand the Indosinian tectono-magmatic evolution history of the East Kunlun orogenic belt. Petrological, chronological and geochemical analyses of granites in the study area were carried out. The results show that the zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of granodiorite and monzogranite porphyry in the study area are (225.7 ± 1) Ma and (213.74 ± 1) Ma respectively, which are the products of late Triassic magmatism. The results of petrogeochemical analysis show that the Late Triassic intrusive rocks in this area belong to the high-K calc-alkaline series. The saturated aluminium index shows that

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-11-04

基金项目: 青海省地勘基金项目“青海省格尔木市浑德伦地区 J46E021011、J46E021012 两幅 1:5 万区域地质矿产调查”(青国土资矿[2011]404 号)

作者简介: 吉明甲(1990-), 男, 地质矿产工程师, 主要从事地质勘查管理及地质资料管理工作。E-mail: jimingjiahyj@163.com

they are meta-aluminous to peraluminous, enriched with large ion lithophile elements such as Rb, Th, K and light rare earth elements, and obviously depleted with high field strength elements such as Nb, P and Ti. Granite is characterized by highly differentiated I-type granite and plate subduction stage. The analysis shows that the magmatite formed in the volcanic arc environment before plate collision.

Keywords: granite; geochemistry; Late Triassic; middle reaches of the Naling Guole River; East Kunlun

东昆仑造山带是青藏高原北部的巨型岩浆岩带(马昌前等,2015),侵入岩和火山岩分布广泛,尤其以侵入岩最为发育(4.84 万 km^2),从元古宙到晚中生代均有分布,并以花岗岩类为主(占侵入岩出露面积的 98%),主要分布在昆中断裂以北,总体呈北西—南东东向展布,基本与区域构造线方向一致(袁万明等,2000)。祁漫塔格地区位于青海省西部、柴达木盆地西南缘,构造位置处东昆仑造山带西段,岩浆侵入活动广泛而强烈,以华力西期和印支期为主(丰成友等,2012)。近年来,在祁漫塔格地区发现了哈西雅图大型铁多金属矿床、夏日哈木超大型镍矿以及拉陵高里河沟脑、拉陵灶火中游小型铜钼矿床,已成为中国重要的资源接替基地(王秉璋,2014)。现有研究资料表明,本区印支期中酸性侵入岩体发育,尤其是呈小岩株、岩脉、岩枝及不规则状产出的中晚三叠世花岗质侵入岩体广泛分布(丰成友等,2012)。王松等(2009)在那陵郭勒河上游南部的卡而却卡地区获得富含暗色微粒包体的花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(237 \pm 2) \text{ Ma}$,刘云华等(2006)报道了野马泉地区的景忍钾长花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(204.1 \pm 2.6) \text{ Ma}$,但对那陵郭勒河中游地区侵入岩研究未见报道。笔者以祁漫塔格那陵郭勒河中游一带花岗岩为研究对象,进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学研究,分析岩石成因,推断成岩构造背景,对提高该区岩浆岩研究程度有重要意义。

1 地质概况

研究区地质工作程度较低,20 世纪 50~60 年代地质工作者在东昆仑造山带西段祁漫塔格那陵郭勒河中游地区开展了路线地质调查和 1:100 万区域地质调查,初步建立了调查区地层系统,圈定了主要岩体,确定了区域构造格架。目前,1:100 万、1:20

万、1:5 万基础性地质调查覆盖全区,建立了本区的构造格架、地层系统,查明了岩浆岩的分布及时空演化特征,划分了变质作用类型等(刘长财等,2015)。研究区位于东昆仑西段祁漫塔格那陵郭勒一带,大地构造划分隶属秦祁昆造山系之东昆仑弧盆系北昆仑岩浆弧。研究区断裂构造发育,东北部有北西向昆北断裂,北西向、北东向、近东西向等次级断裂也十分发育(图 1)。地层区隶属秦祁昆地层大区东昆仑地层区,分属祁漫塔格地层分区和北昆仑地层分区。出露地层主要有古元古代金水口岩群(Pt_1J)片麻岩夹片岩岩组、片麻岩夹大理岩岩组,次为晚泥盆世牦牛山组(D_3m^2)及第四系冲洪积物。

区内晚三叠世岩浆活动强烈,侵入岩发育,主要分布在那陵郭勒河中游两侧,呈巨大的岩基、岩株状产出,平面形态呈不规则条带状、浑圆状、岩枝状等。侵入体总体呈近东西向展布。岩体侵入于金水口岩群,侵入界限清晰,侵入接触面弯曲不平,岩体与围岩的接触带上一一般都见有强烈的硅化、角岩化等蚀变现象(图 2a)。部分侵入晚泥盆世侵入体,使其残留顶盖出露。本期侵入体主体受北西—南东走向断层控制比较明显,局部地段岩石裂隙可见有绿泥石化、帘石化蚀变,大多岩石表面见有褐铁矿化,受北西向构造应力作用,岩石发育与构造方向一致的破劈理带及节理、裂隙(图 2b)。裂隙多被同期的闪长岩和正长岩脉所充填。在与古老地层接触带,局部可见蜂窝状的烘烤边,有褐铁矿化现象,在外接触带的围岩中局部可见不同程度的糜棱岩化。

2 岩石学特征

研究区内晚三叠世侵入岩岩性有中细粒花岗闪长岩、中粒花岗闪长岩、粗粒花岗闪长岩、不等粒石英闪长岩、二长花岗岩、二长花岗斑岩等。

花岗闪长岩($\gamma^{\text{ss}}\text{T}_3$ 、 $\gamma^{\text{db}}\text{T}_3$ 、 $\gamma^{\text{dc}}\text{T}_3$):灰色,花岗

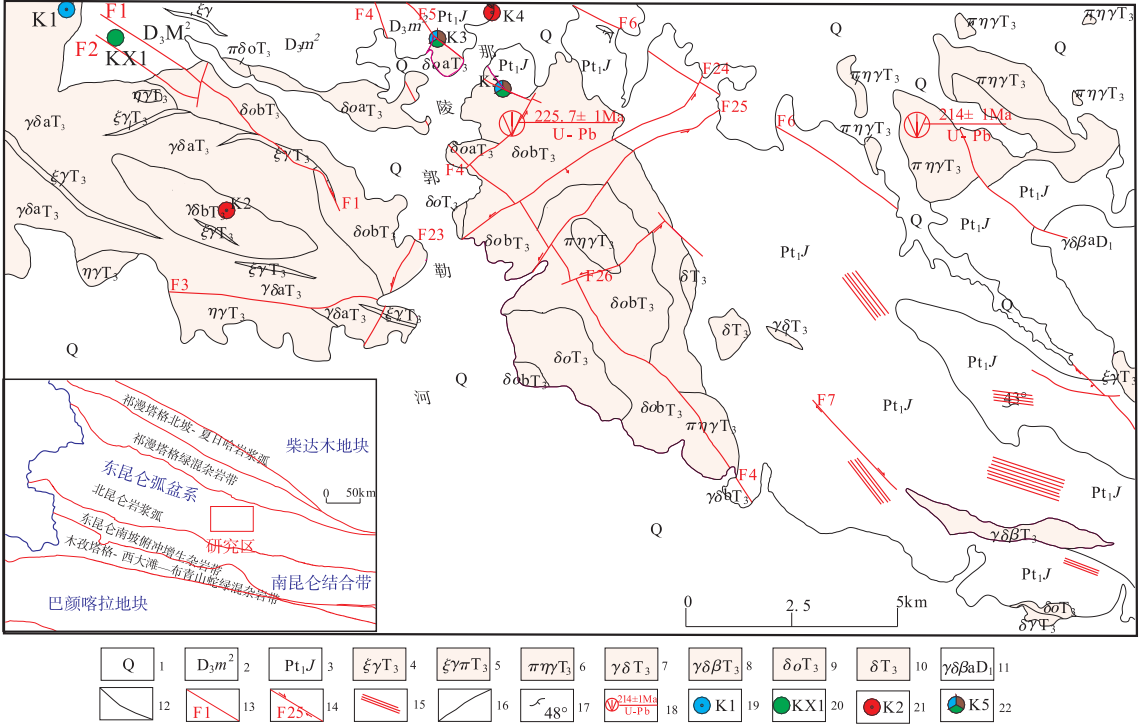


图 1 青海那陵郭勒河中游地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of middle reaches of Naling Guole River, Qinghai

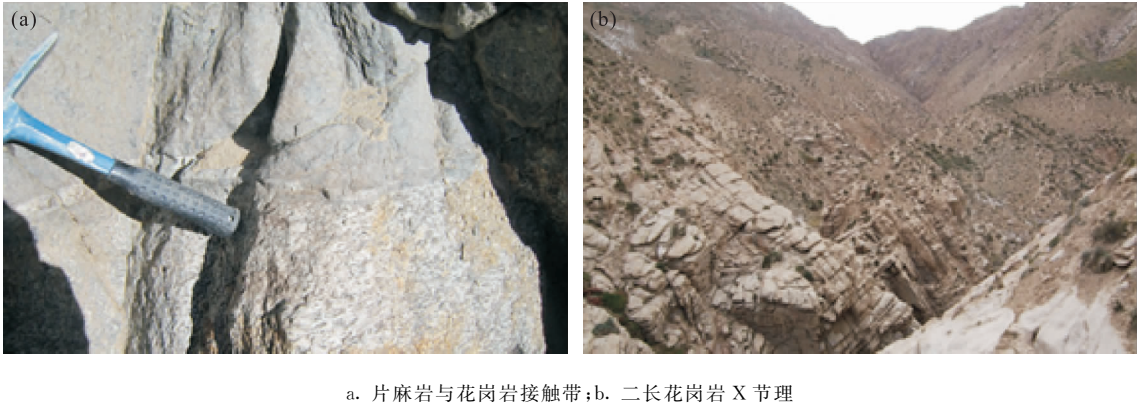


图 2 晚三叠世侵入岩野外照片

Fig. 2 Field photographs of Late Triassic intrusive rocks (a, gneiss-granite contact zone; b, monzonitic granite X-joints)

结构,块状构造。主要矿物成分:斜长石约为 35%~40%,钾长石为 20%~25%,石英约为 15%~20%,角闪石为 5%~10%,黑云母为 3%~5%。斜长石半自形粒状,具聚片状双晶、环带状构造,见少量显微鳞片状绢云母化、他形粒状碳酸盐化等;钾长

石主要为正长石,少量微斜长石,他形粒状结构;石英无色透明,呈他形粒状结构,聚斑状、集合体状分布;角闪石浅绿色,多色性与吸收性极强,已基本绿泥石化,与团块状绿泥石共生,同时析出铁质;黑云母为褐色,多色性与吸收性极强,呈显微鳞片状

结构。

石英闪长岩($\delta\delta T_3$):灰白色,半自形粒状结构,块状构造。主要矿物成分:斜长石约为45%~50%,钾长石约为10%~15%,石英约为15%~20%,角闪石约为10%~15%。斜长石半自形中细粒状结构,粒径 $<2.0\text{ mm}$,少量达5 mm,具聚片状双晶、环带状构造,见显微鳞片状绢云母化、他形粒状碳酸盐化等;钾长石主要为正长石,少量微斜长石,半自形粒状;石英无色透明,他形粒状结构,呈聚斑状、集合体状分布;角闪石浅绿色,针状或放射状,多色性与吸收性极强,已基本绿泥石化,与团块状绿泥石共生。

二长花岗岩($\eta\gamma T_3$):肉红色,半自形粒状结构,块状构造。主要矿物成分:斜长石为30%~35%,钾长石为25%±,石英为20%~25%,角闪石为5%±,绿泥石为5%~10%。斜长石半自形粒状结构,其晶体具明显的双晶纹,为聚片状双晶,晶带较宽,An值不易测定,从突起和双晶看为钠-更长石;钾长石为简单双晶正长石,条纹长石、格子状双晶的微斜长石,表面亦有高岭土化;石英无色透明,他形粒状结构;角闪石无色,高正突起,干涉色比较鲜艳,一组解理完全发育,局部具闪石式解理,偶有绿帘石化;绿泥石浅绿色,叶片状,是黑云母、角闪石等暗色矿物的蚀变产物。岩石可见绿泥石化,少量的绢云母化等。

二长花岗斑岩($\eta\gamma\pi T_3$):肉红色,斑状结构,块状构造。岩石由斑晶和基质两部分组成。斑晶约为58%,2~5 mm,由石英,斜长石,钾长石,黑云母等矿物组成。石英多呈自形熔蚀状,熔蚀浑圆状,斜长石具环带构造。基质约为42%,0.1~0.3 mm,由石英、斜长石呈细晶结构组成。亦可见粒度为0.5~1 mm的斜长石,黑云母呈星散分布。

本次研究工作主要选区那陵郭勒河中游一带出露的花岗闪长岩和二长花斑岩为主要研究对象。

3 样品采集及分析方法

3.1 化学分析

笔者选择那陵郭勒河中游地区7件晚三叠世花岗岩新鲜岩石样品进行了化学全分析。在北京锆年领航科技有限公司实验测试室进行了主量元素、微量元素和稀土元素分析。除 H_2O 用重量法和FeO用容量滴定法测定外,其余主量元素都用X荧光光

谱仪测定,分析精度(相对误差)优于1%。微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪测定,分析误差小于5%。

3.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年

根据野外地质特征,在出露面积较大的花岗岩体中,采取中粒花岗闪长岩(U-Pb6-1)和二长花岗斑岩(U-Pb4-1)作为测试对象。锆石挑选在北京锆年领航科技有限公司实验室完成,采集无蚀变的花岗岩作为同位素分析样品,先将其破碎至60~80目,用水淘洗粉尘,然后用磁铁将磁铁矿除去,重选出锆石等重矿物,最后在双目镜下挑选出晶形较好透明锆石晶体。

锆石 U-Pb 年龄测定在北京锆年领航科技有限公司实验室进行,首先将样品粉碎至 $100\text{ }\mu\text{m}$ 左右,利用重液和电磁法分选,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,打磨抛光并使其露出中心部位,进行CL显微结构观察,在此基础上选择合适的锆石颗粒进行U-Pb年龄测定,利用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)进行了微区原位U-Pb同位素测定,数据处理及做图采用ICPMSDataCal和ISOPLOT程序。详细测试流程见李怀坤(2009)。

4 岩石化学特征

4.1 主量元素特征

研究区内晚三叠世花岗闪长岩氧化物含量见表1,其中石英闪长岩、石英闪长玢岩样 SiO_2 含量较低,为57.59%~60.58%,其余样品 SiO_2 含量为63.52%~70.66%,整体平均值为64.64%,属于酸性岩范畴。 Al_2O_3 含量中等,为14.22%~18.17%,平均值为16.34%; K_2O 含量为2.18%~5.22%, Na_2O 含量为3.24%~4.26%,CaO含量为1.26%~5.28%。岩石全碱 K_2O+Na_2O 含量为5.65%~8.31%, $K_2O/Na_2O=0.62\sim1.68$,里特曼指数 $\sigma=1.65\sim2.62$,属高钾的钙碱性岩。铝饱和指数(A/CNK)为0.85~1.18,为偏铝质-过铝质花岗岩。碱度率(AR)=1.63~2.33。岩石固结指数(SI)为5.7~22.44。P2GS3-1、P11GS19-1号样属于低程度,P5GS2-1、P9GS18-1、P11GS8-1、P17GS19-1、P17GS29-1号样属

表 1 那陵郭勒河中游地区侵入岩主要元素(%)和稀土、微量元素(10^{-6})分析结果表

样品编号	P11GS19-1	P2GS3-1	P17GS19-1	P5GS2-1	P17GS29-1	P9GS18-1	P11GS8-1
岩石名称	二长花岗岩	二长花岗岩	花岗闪长斑岩			花岗闪长岩	花岗闪长岩
SiO ₂	70.66	68.17	66.02	65.92	63.52	60.58	57.59
TiO ₂	0.27	0.34	0.54	0.60	0.50	0.85	1.09
Al ₂ O ₃	14.22	16.43	15.88	16.06	16.48	18.17	17.17
Fe ₂ O ₃	0.01	2.925	1.84	4.26	1.70	1.69	1.61
FeO	2.22	0.34	2.48	0.38	2.53	3.52	5.10
MnO	0.04	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09
MgO	0.57	0.83	1.68	1.85	1.87	2.33	3.73
CaO	1.26	2.405	3.77	4.14	3.49	5.28	6.39
Na ₂ O	3.09	3.315	3.40	3.40	4.26	3.47	3.3
K ₂ O	5.22	3.81	2.88	2.75	2.77	2.18	2.88
P ₂ O ₅	0.05	0.08	0.12	0.13	0.14	0.1	0.12
Σ	97.61	98.71	98.69	99.57	97.34	98.25	99.01
A/CNK	1.09	1.18	1.02	1.00	1.01	1.03	0.85
A/NK	1.32	1.72	1.82	1.87	1.65	2.25	2.01
σ	2.50	2.02	1.71	1.65	2.41	1.82	2.62
AR	2.33	2.09	1.94	1.88	2.09	1.63	1.71
DI	86.67	79.04	70.45	68.61	71.39	59.07	52.55
SI	5.13	7.40	13.68	14.64	14.24	17.66	22.44
La	22.9	33.75	27.40	27.60	22.80	23.10	24.10
Ce	48.60	64.80	54.20	50.60	44.20	45.50	68.70
Pr	5.98	6.64	6.43	5.58	5.33	5.32	8.40
Nd	22.10	22.55	23.80	19.40	19.40	19.90	32.10
Sm	4.98	3.82	4.66	3.49	3.74	3.84	6.43
Eu	0.56	1.00	1.32	1.10	1.07	1.21	1.51
Gd	4.36	3.72	4.34	3.25	3.36	3.44	5.76
Tb	0.78	0.55	0.72	0.53	0.58	0.54	1.01
Dy	4.63	3.05	4.49	3.235	3.44	2.90	5.73
Ho	0.84	0.57	0.82	0.65	0.64	0.55	1.23
Er	2.31	1.78	2.36	1.94	1.77	1.58	3.41
Tm	0.35	0.28	0.35	0.31	0.28	0.21	0.55
Yb	2.11	1.73	2.35	1.97	1.94	1.43	3.24
Lu	0.31	0.29	0.37	0.32	0.32	0.20	0.52
Y	21.80	16.00	20.40	19.35	16.60	15.50	32.50
ΣREE	142.61	160.51	154.01	139.32	125.47	125.22	195.19
LREE	105.12	132.55	117.81	107.77	96.54	98.87	141.24
HREE	37.49	27.96	36.2	31.55	28.93	26.35	53.95

续表 1

样品编号	P11GS19-1	P2GS3-1	P17GS19-1	P5GS2-1	P17GS29-1	P9GS18-1	P11GS8-1
岩石名称	二长花岗岩	二长花岗岩	花岗闪长斑岩		花岗闪长岩		花岗闪长岩
LREE/HREE	2.80	4.74	3.25	3.42	3.34	3.75	2.62
δEu	0.36	0.80	0.88	0.98	0.91	1.00	0.74
δCe	0.98	0.98	0.95	0.93	0.93	0.95	1.16
(La/Yb) _N	10.85	19.51	11.66	14.01	11.75	16.15	7.44
Cs	8.62	8.73	2.87	7.06	7.85	2.69	6.99
Rb	200.00	140.25	58.40	114.00	74.60	54.78	123.20
Sr	221.00	311.00	398.97	350.00	351.67	429.00	351.00
Ba	428.90	796.00	528.68	498.00	581.70	437.90	521.90
Nb	14.40	11.49	10.41	11.30	10.29	13.90	14.60
Ta	2.08	0.75	0.93	1.21	0.64	1.23	1.37
Zr	201.00	168.00	47.73	120.00	53.16	98.30	200.00
Hf	6.51	4.54	1.90	4.62	2.34	3.27	5.83
Th	14.20	11.50	9.12	10.24	13.74	7.89	13.00
Cr	32.10	17.50	11.90	20.30	10.23	11.60	43.40
Co	9.25	2.89	8.21	11.40	9.15	11.00	14.90
Rb/Sr	0.90	0.45	0.15	0.33	0.21	0.13	0.35

于高程度。分异指数(*DI*)为 52.66~86.67,除石英闪长岩类,其余岩样均在 70 以上,较高,表明岩石酸性程度较高,岩浆分离结晶作用较强、分异程度较高。

岩石在侵入岩 TAS 图解(图 3)中落入正长闪长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩区域,样品整体落入亚碱性区域;在 AFM 图解(图 4)中落入钙碱性区域;在 SiO₂-K₂O 图解(图 5)中落入高钾钙碱性系列;在 A/CNK-A/NK 图解(图 6)中落入过铝质区域。从 Harker 图解(图 7)中可以看出,Al₂O₃、CaO、MgO、P₂O₅、TiO₂ 含量均具有相

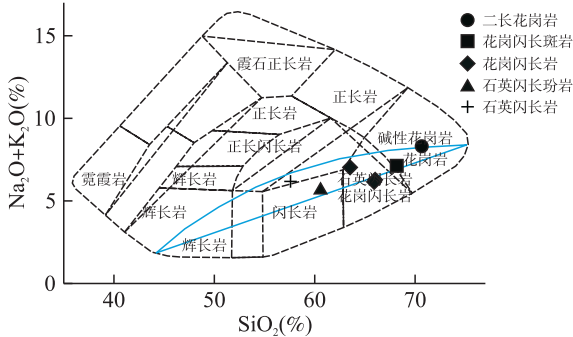


图 3 侵入岩 TAS 图解(据 Wilson,1989)
Fig. 3 TAS diagram of intrusive rocks

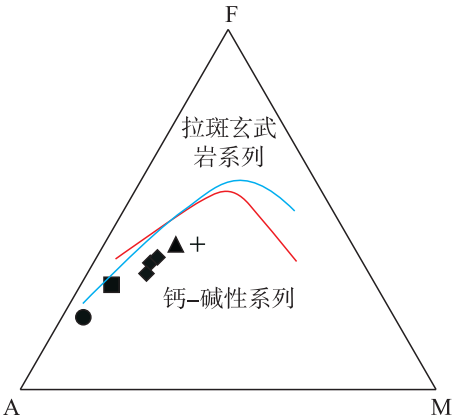


图 4 岩浆岩 AFM 图解(据 Kuno,1968;
Irvine Barager,1971)

Fig. 4 AFM of igneous rocks

同的变化趋势,随着 SiO₂ 含量增高而降低,K₂O 与 SiO₂呈正相关,Na₂O、MnO、Fe₂O₃与 SiO₂之前的协变关系不明显。

4.2 稀土元素特征

研究区晚三叠世侵入岩稀土元素含量及特征值见表 1,岩石稀土总量(Σ REE)为 $125.22 \times 10^{-6} \sim 195.19 \times 10^{-6}$,重稀土(HREE)总量为 $26.35 \times 10^{-6} \sim 53.95 \times 10^{-6}$,轻稀土(LREE)总量

为 $96.54 \times 10^{-6} \sim 141.24 \times 10^{-6}$, 轻重稀土比 (LREE/HREE) 值为 $2.62 \sim 4.74$, 轻稀土元素强烈富集, $(La/Yb)_N$ 值为 $7.44 \sim 19.51$, δEu 值为 $0.36 \sim 2.04$, 大部分特征值均小于 1。在稀土配分曲线图(图 8a)中, 配分曲线表现为右倾的轻稀土富集型, 二长花岗岩呈正 Eu 异常, 其余岩样均不同程度呈负 Eu 异常, 以石英闪长岩尤为突出。各岩石稀土元素含量曲线近于平行, 反映属同源岩浆产物。

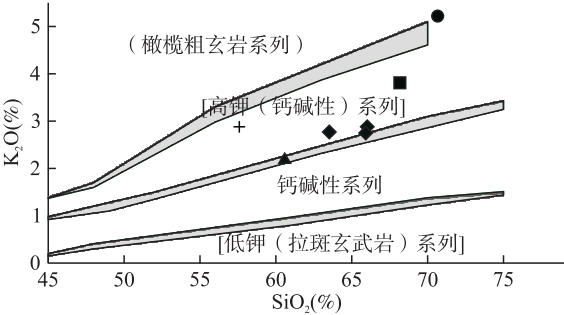


图 5 SiO₂-K₂O 图解 (据 Rickwood, 1989)

Fig. 5 SiO₂-K₂O diagram

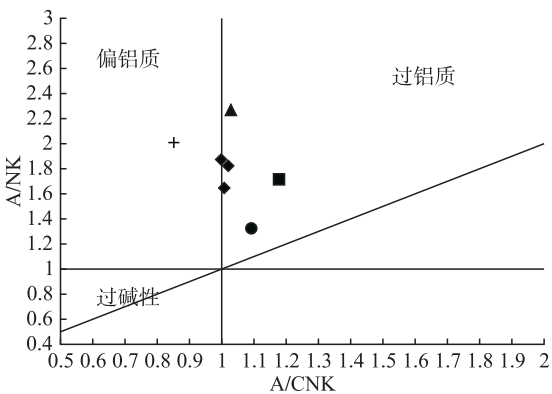


图 6 A/NK-A/CNK 图解 (据 Maniar et al., 1989)

Fig. 6 A/NK-A/CNK diagram

4.3 微量元素特征

晚三叠世侵入岩岩石微量元素含量表见 1, 微量元素含量与中国花岗闪长岩(鄢明才, 1997; 迟清华, 2003)元素丰度相比, 在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 8b)中, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 明显亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素, 相对于 Rb 和 Th 明显亏损 Ba, 显示大陆弧背景下造山花岗岩的特征(李昌年, 1992)。

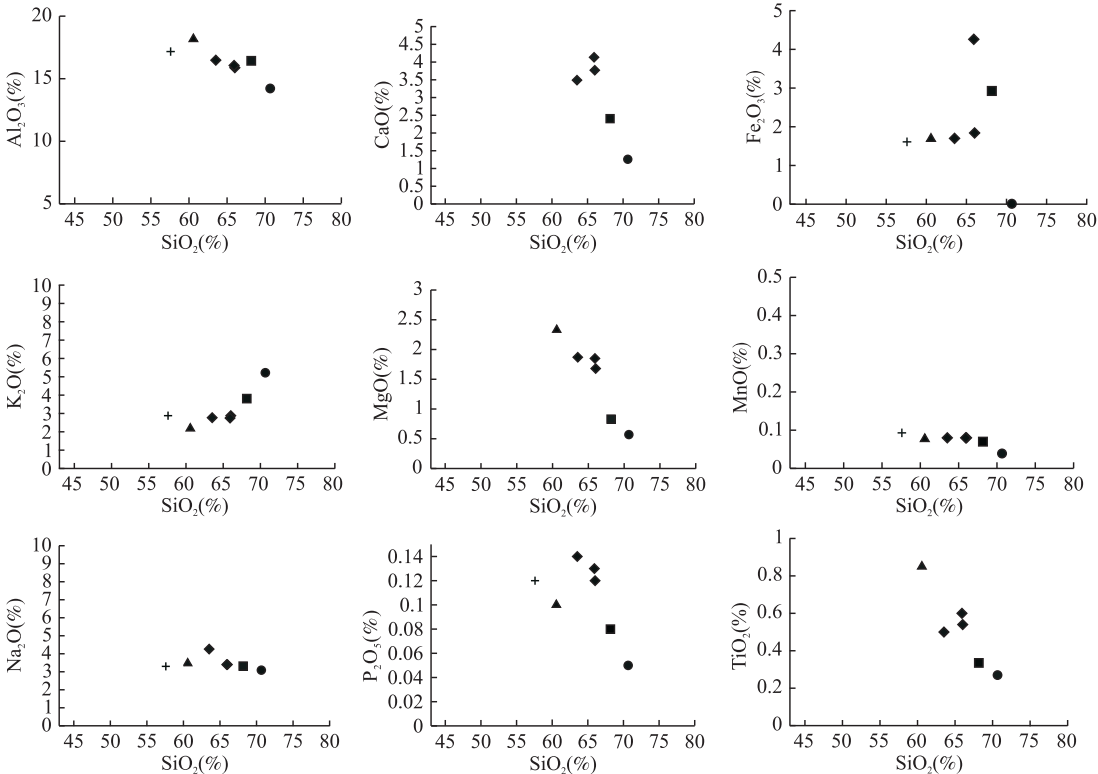


图 7 那陵郭勒河中游地区侵入岩 Harker 图解

Fig. 7 Harker diagram of intrusive rocks in the middle reaches of the Nalinguole River

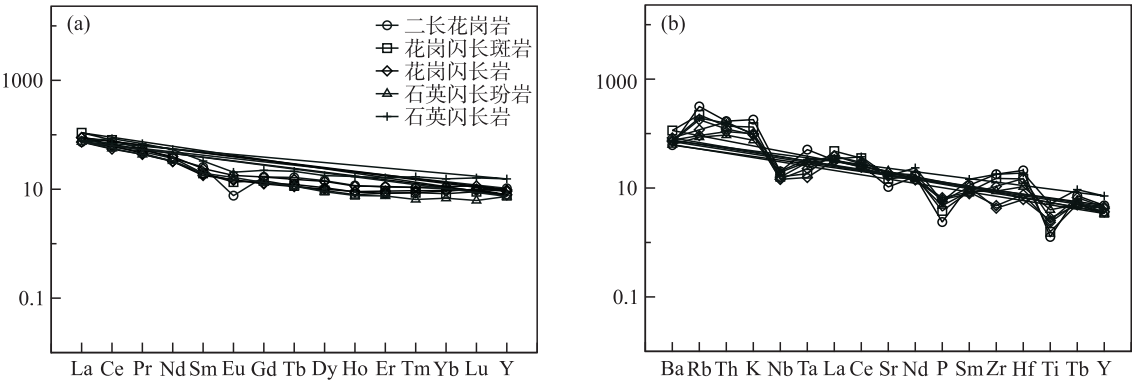


图 8 (a)那陵郭勒河中游地区侵入岩稀土、(b)微量元素分配曲线(据 Sun et al. ,1989)

Fig. 8 (a) Distribution curves of rare earth and (b) trace elements in intrusive rocks in the middle reaches of Naling Guole River

5 锆石 U - Pb 测年

本次在那陵郭勒河中游地区中选取中粒花岗闪长岩(U - Pb6 - 1)和二长花岗斑岩(U - Pb4 - 1)2件样品进行了锆石 U - Pb 测年(表 2)。花岗闪长岩共测试 25 个测点,均投影于谐和线上或其附近,²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面加权平均年龄为(225.7±1) Ma(图

9a、图 9b)。花岗斑岩共测试 25 个测点,均投影于谐和线上或其附近,²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面加权平均年龄为(213.7±0.7) Ma(图 9c、图 9d),显示时代均为晚三叠世。前人在邻区祁漫塔格阿格腾地区花岗岩中获得 U - Pb 年龄值为(220.7±5) Ma、(215.3±0.5) Ma、(220.7±0.4) Ma、(220.6±1.4) Ma,均显示晚三叠世(徐博等,2019),这与本次所测结果基本一致。因此,可以将本区本期的侵入岩厘定为晚三叠世。

表 2 那陵郭勒河中游地区花岗岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 分析结果表

Tab. 2 LA - ICP - MS zircon U - Pb analysis of granite in the middle reaches of Naling Guole River

测点	元素含量(10 ⁻⁶)		同位素比值					同位素年龄(Ma)					
	Pb	U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
花 岗 闪 长 岩(U - Pb6 - 1)													
1	77	1 680	0.035 1	0.252 3	0.052 1	0.006 4	2.478 8	222	2	228	6	292	43
2	51	1 030	0.034 7	0.287 8	0.060 2	0.013 0	1.578 6	220	2	257	3	609	26
3	64	1 409	0.035 3	0.246 9	0.050 7	0.010 2	1.476 5	224	2	224	4	229	43
4	97	1 966	0.035 2	0.251 8	0.051 9	0.010 0	1.967 8	223	2	228	5	283	45
5	56	1 086	0.035 5	0.242 2	0.049 5	0.013 1	1.669 4	225	2	220	4	173	35
6	98	1 533	0.035 1	0.238 2	0.049 2	0.021 7	1.679 9	222	2	217	4	159	43
7	48	1 097	0.035 4	0.249 8	0.051 2	0.012 1	1.066 0	224	2	226	2	251	21
8	76	1 643	0.035 6	0.251 3	0.051 2	0.012 7	1.260 9	226	2	228	2	248	22
9	32	686	0.035 6	0.254 5	0.051 9	0.012 0	1.387 0	225	2	230	3	281	24
10	84	1 680	0.036 6	0.230 6	0.045 6	0.008 1	2.404 0	232	2	211	3	—21	34
11	100	2 168	0.035 4	0.244 4	0.050 0	0.011 4	1.377 5	224	2	222	2	196	21
12	166	3 980	0.036 2	0.231 1	0.046 3	0.012 8	0.799 0	229	2	211	2	14	24

续表 2

测点	元素含量(10 ⁻⁶)		同位素比值					同位素年龄(Ma)					
	Pb	U	²⁰⁶ Pb/	²⁰⁷ Pb/	²⁰⁷ Pb/	²⁰⁸ Pb/	²³² Th/	²⁰⁶ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ
			²³⁸ U	²³⁵ U	²⁰⁶ Pb	²³² Th	²³⁸ U	²³⁸ U		²³⁵ U		²⁰⁶ Pb	
花 岗 闪 长 岩(U-Pb6-1)													
13	90	1 907	0.036 1	0.244 7	0.049 1	0.011 9	1.361 0	229	2	222	3	155	31
14	65	1 343	0.036 1	0.235 3	0.047 2	0.014 2	1.282 7	229	2	215	3	62	37
15	38	806	0.035 9	0.238 4	0.048 2	0.013 6	1.223 8	227	4	217	11	107	95
16	59	1 177	0.035 8	0.246 0	0.049 8	0.013 8	1.443 7	227	2	223	10	185	94
17	72	1 413	0.036 9	0.239 5	0.047 1	0.009 5	2.101 8	233	2	218	3	56	30
18	24	728	0.035 6	0.250 7	0.051 1	0.012 9	0.062 8	225	2	227	5	247	48
19	38	727	0.035 4	0.269 8	0.055 3	0.014 7	1.586 2	224	2	243	3	425	24
20	89	1 842	0.035 9	0.256 2	0.051 8	0.011 3	1.601 3	227	2	232	3	278	24
21	68	1 442	0.035 4	0.254 1	0.052 1	0.010 7	1.626 5	224	2	230	5	288	47
22	38	727	0.035 6	0.246 7	0.050 2	0.014 3	1.590 0	226	2	224	3	204	31
23	48	988	0.035 7	0.276 0	0.056 0	0.012 6	1.483 8	226	2	247	5	453	38
24	37	906	0.036 9	0.258 1	0.050 7	0.011 4	0.745 7	234	2	233	3	226	22
25	77	1 680	0.035 1	0.252 3	0.052 1	0.006 4	2.478 8	222	2	228	6	292	43
二长花岗斑岩(U-Pb4-1)													
1	34	990	0.033 6	0.240 2	0.051 9	0.012 7	0.360 2	213	2	219	2	282	25
2	30	818	0.033 6	0.251 0	0.054 2	0.013 2	0.482 4	213	2	227	2	378	24
3	40	1 078	0.034 1	0.238 4	0.050 7	0.017 9	0.366 7	216	2	217	3	226	31
4	26	703	0.034 0	0.236 7	0.050 6	0.013 5	0.512 7	215	2	216	5	221	55
5	13	362	0.033 8	0.235 7	0.050 6	0.013 3	0.349 0	214	2	215	4	223	39
6	25	708	0.033 7	0.233 4	0.050 2	0.015 0	0.302 1	214	2	213	4	203	38
7	23	616	0.033 8	0.234 2	0.050 2	0.014 2	0.514 6	214	2	214	5	204	48
8	22	621	0.034 1	0.236 5	0.050 4	0.014 3	0.388 5	216	2	216	2	212	16
9	38	1 016	0.034 0	0.248 1	0.052 9	0.014 2	0.520 6	216	2	225	2	323	21
10	34	990	0.033 5	0.239 9	0.051 9	0.012 5	0.368 4	212	2	218	4	282	45
11	22	635	0.034 8	0.242 9	0.050 7	0.014 6	0.276 1	220	2	221	4	226	39
12	29	811	0.035 1	0.241 5	0.049 9	0.013 5	0.323 2	222	2	220	4	191	39
13	23	629	0.033 9	0.236 9	0.050 7	0.015 6	0.374 8	215	2	216	5	227	55
14	24	671	0.034 3	0.238 9	0.050 6	0.011 3	0.513 7	217	2	217	3	221	34
15	25	744	0.033 6	0.232 5	0.050 3	0.010 9	0.352 4	213	2	212	3	207	30
16	21	626	0.033 5	0.236 5	0.051 3	0.010 2	0.325 8	212	2	216	2	253	16
17	21	617	0.033 9	0.237 9	0.050 8	0.009 4	0.477 1	215	2	217	3	234	36
18	25	725	0.033 5	0.234 1	0.050 7	0.010 1	0.466 1	212	2	214	5	226	53
19	23	739	0.033 8	0.266 9	0.061 6	0.011 0	0.062 8	214	2	240	18	661	158
20	13	391	0.033 9	0.236 1	0.052 6	0.010 1	0.363 5	215	2	215	4	312	38
21	23	673	0.033 5	0.233 3	0.050 5	0.010 0	0.430 4	213	2	213	12	218	128
22	5	158	0.033 3	0.223 4	0.050 2	0.009 1	0.544 3	211	2	205	5	205	59
23	14	424	0.033 1	0.229 5	0.050 4	0.013 0	0.362 3	210	2	210	3	212	30
24	31	853	0.033 5	0.236 0	0.052 6	0.010 2	0.614 2	213	2	215	5	313	53
25	23	652	0.033 6	0.256 0	0.055 2	0.011 4	0.429 2	213	2	231	2	421	16

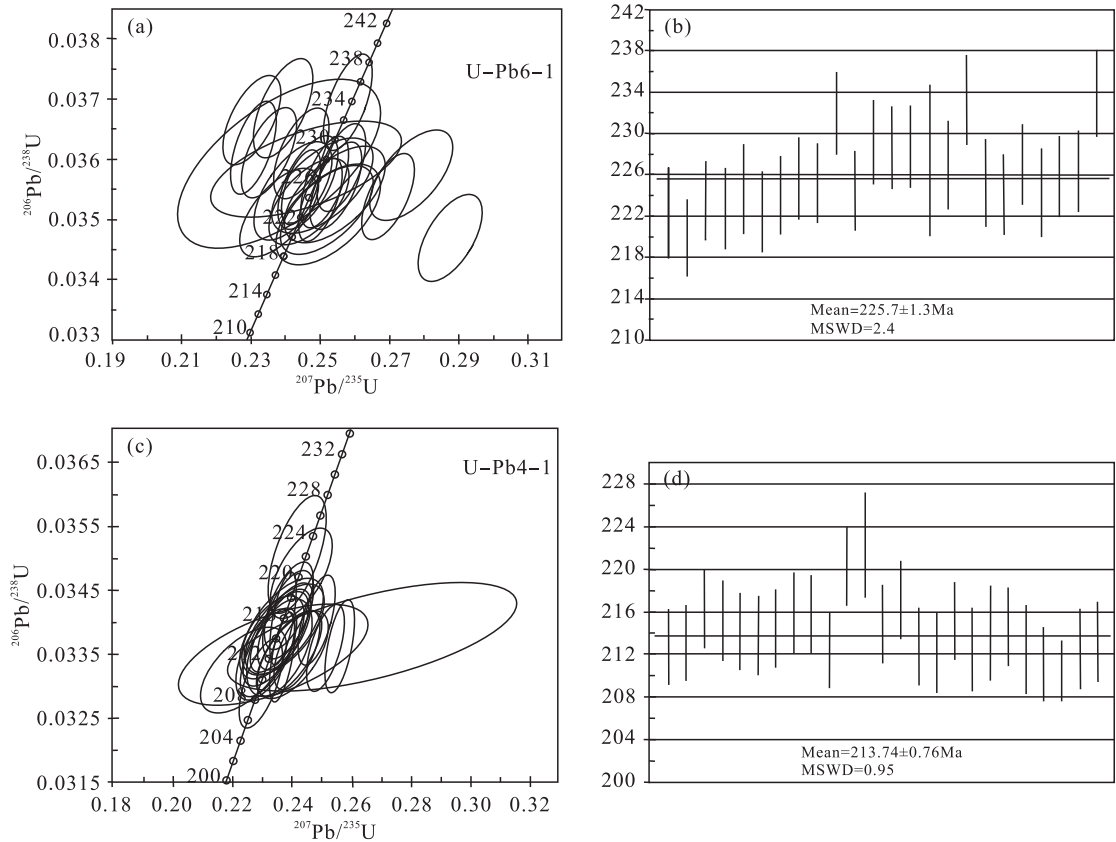


图 9 (a、c)那陵郭勒河中游地区中粒花岗闪长岩(U-Pb6-1)和二长花岗斑岩(U-Pb4-1)U-Pb 年龄谐和图及(b、d) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄

Fig. 9 (a, c) U-Pb Age Concordance Diagrams and (b, d) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Weighted Average Ages of Mesogranular Granodiorite (U-Pb6-1) and Monzonitic Granite Porphyry (U-Pb4-1) in the middle reaches of Naling Guole River

6 讨论

6.1 花岗岩类型及岩石成因

对花岗岩成因类型研究不仅可以反映岩浆源区的性质,而且还可以判别岩浆形成的构造环境(陈静等,2013)。研究区花岗岩主要矿物中未见碱性暗色矿物,且相对亏损 Nb、P、Ti 高场强元素,具有较低 $\text{Zr}(<250\times10^{-6})$ 、Nb、Y($<60\times10^{-6}$)、Ce($<140\times10^{-6}$)含量,与典型的 A 型花岗岩的矿物学和微量元素特征不同(Whalen et al.,1987)。前人的研究表明,研究区在华力西—印支期整体处于一个俯冲—碰撞造山加厚构造环境(莫宣学等,2007;何成等,2018),这也与 A 型花岗岩一般产于伸展减薄的环境不符,并且在 Whalen 的判别图解(图 10)中样品均落入未分的 M、I、S 型花岗岩区,因此可以排除

A 型花岗岩的可能。在表 1 中可以看出 A/CNK 值为 0.85~1.18(平均值为 1.02),说明岩石铝饱和指数并不是很高。在 Harker 图解中 SiO_2 与 P_2O_5 呈负相关,且 P_2O_5 的含量较低(均值 $<0.1\%$)。该区花岗岩也没有出现堇青石和白云母等过铝矿物(何成等,2018),这与 S 型花岗岩的特征不符。I 型花岗岩具有 Fe_2O_3 含量较高(I 型平均为 1.04,S 型平均为 0.56),较低的 Rb/Sr 值(I 型平均为 0.61,S 型平均为 1.81),Th 和 Y 与 Rb 呈正消长演化关系(Chappell et al.,1988;Xu Xisheng et al.,2010), SiO_2 含量在 53%~76%, Na_2O 含量大于 3.2(邱家骧,1991)等地球化学特征。分析那陵郭勒河中游地区花岗岩岩石地球化学特征,表 1 中主量元素 SiO_2 含量为 57.59%~72.82%, Na_2O 含量为 3.09%~4.26%, Fe_2O_3 含量较高,平均值为 1.81,Rb/Sr 值较低,平均为 0.37,Th 和 Y 含量较高,并与 Rb 呈

正相关(表 1),这些特征均与 I 型花岗岩地球化学特征相符。因此,笔者认为研究区中晚三叠世侵入岩属于 I 型花岗岩范畴。

那陵郭勒河中游地区花岗岩的主量元素在 Harker 图解中显示 CaO 、 MgO 、 P_2O_5 和 TiO_2 与 SiO_2 呈负相关,而 K_2O 和 Na_2O 与 SiO_2 呈正相关,岩浆具有一致的演化趋势,表明他们为同源岩浆演化的产物(李金超等,2015)。岩体明显富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素,明显亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素,相对于 Rb 和 Th 明显亏

损 Ba,显示具有岛弧环境的特点(李金超等,2015)。岩石具有 Ta-Nb-Ti 负异常和低的 Nb/Ta 值特征,显示俯冲带幔源岩石的成分特征(Sun et al., 1989)。Rb/Sr 值(0.13~0.9)介于上地幔值 0.034 (Taylor et al., 1995)和地壳值 5.36~6.55 (Rudnick et al., 1995)之间,显示壳幔混合的特点(李金超等,2015)。前人在野外调查发现晚三叠世侵入岩普遍发育暗色闪长质包体及围岩捕虏体(丰成友等,2012;赵明福等,2017 年),因此该期侵入岩可能为壳幔混合源成因。

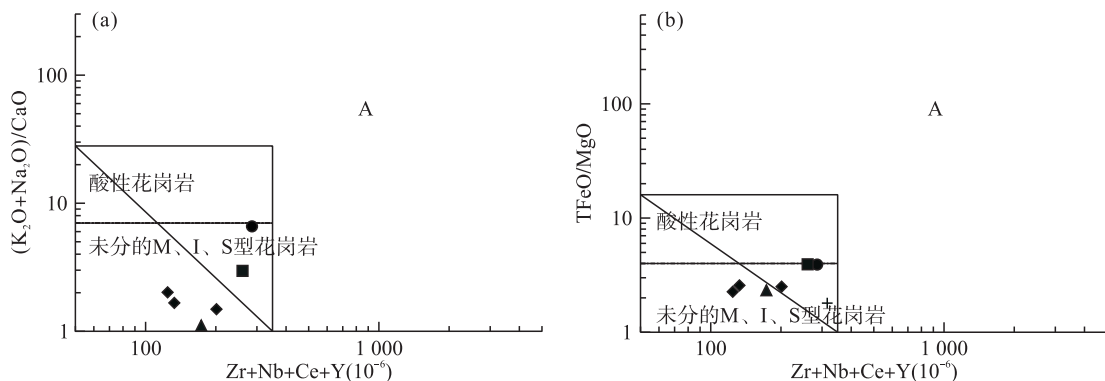


图 10 花岗岩类型判别图(据 Whalen et al., 1987)

Fig. 10 Discriminant map of granite type (After Whalen et al., 1987)

6.2 构造环境分析

东昆仑造山带有着复杂而独特的构造演化史,经历了多次大洋俯冲到陆内碰撞的转换过程(陈加杰等,2016)。祁漫塔格地区属于古特提斯洋的一部分,华力西晚期—印支期洋盆依次向北俯冲、消减,在东昆仑南侧形成三叠世前陆堆积,在其北侧的微板块南缘则有华力西期—印支期花岗岩的大面积侵入,成为古特提北部的活动边缘。

以往研究表明,无负 Eu 异常的中酸性侵入岩标志着一个加厚陆壳的存在,具负 Eu 异常的中酸性侵入岩形成于一个正常厚度的陆壳,或形成于双倍陆壳的中上部(郭正府,1998)。研究区侵入岩具有负 Eu 异常,其不具备形成于双倍陆壳的中上部特征,因为形成于陆壳中上部的多为 S 型花岗岩,这说明其形成于一个正常厚度的陆壳。花岗岩 Sr 和 Yb 的含量可以判断地壳厚度, $\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 1.5 \times 10^{-6}$ 为正常厚度的陆壳(张旗,2011)。研究区花岗岩样品 Sr 均值为 344.66×10^{-6} , Yb 均值为 2.11×10^{-6} ,显示地壳为正常厚度。上述特征表明,

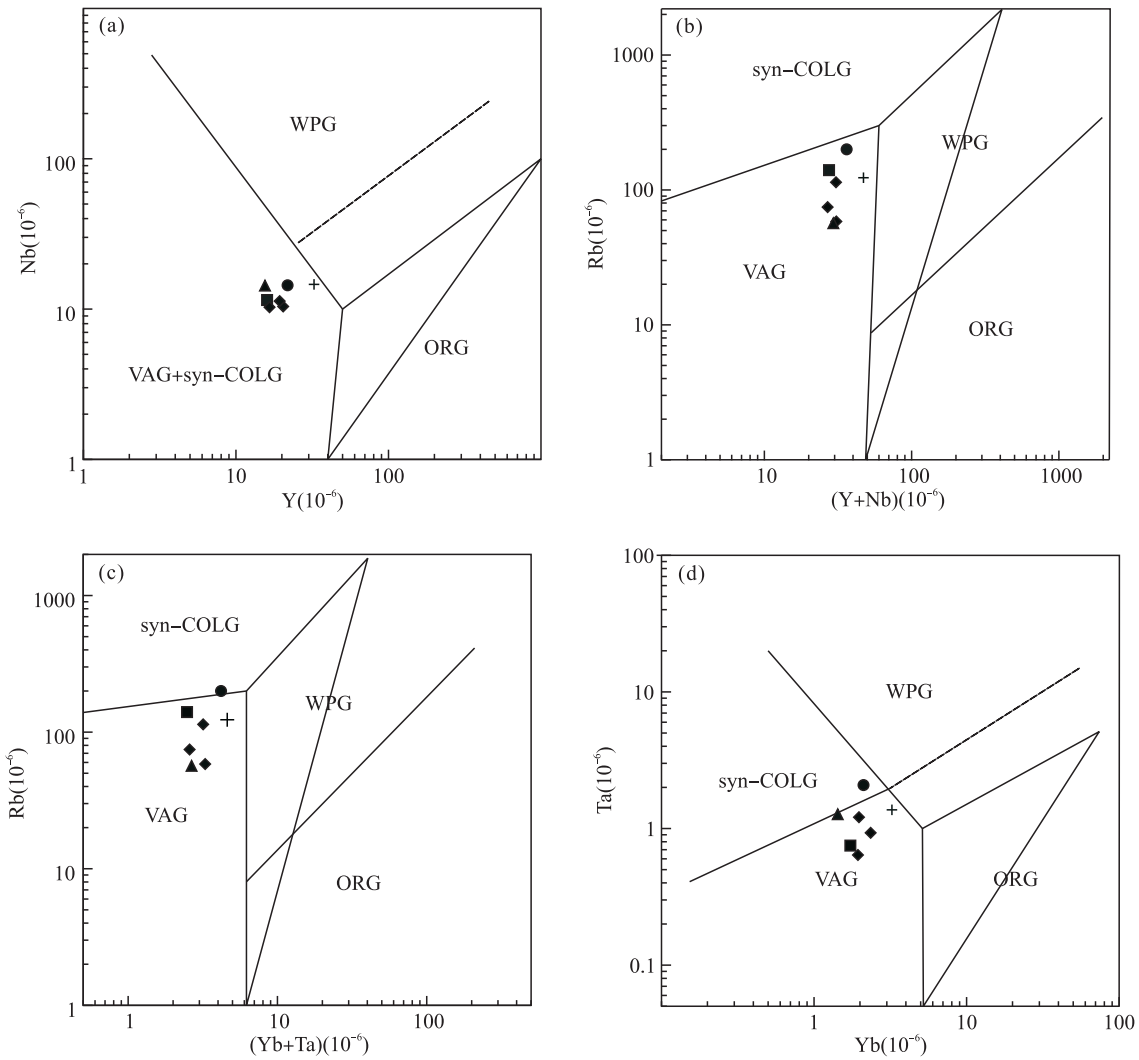
那陵郭勒河中游地区地壳还没有纵向加厚,处于板块俯冲阶段。在微量元素构造环境判别图中(图 11)可见,大部分样品落入火山弧(VAG)区域,一个落入同碰撞区(syn-CLOG),表明俯冲已进入晚期,火山弧相对较为成熟(徐博等,2019)。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 8b)中,富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素,明显亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素,相对于 Rb 和 Th 明显亏损 Ba,显示大陆弧背景下造山花岗岩的特征(李昌年,1992)。

在东昆仑草木策地区上三叠统八宝山组下部发现有海相动物化石,并有较多灰岩夹层,沉积环境属海陆交互相;东昆仑南部地区治多—当江一带的上三叠统清水河组中夹数层不纯硅质岩或硅质页岩,且在横向上硅质岩分布较稳定,具有由半深海—深海—浅海沉积环境特征。这些是否意味着晚三叠世古特提斯洋依然存在?显然仅靠这些不足以限定古特提斯洋的闭合时限,仍需进行更为深入的研究。

综上所述,那陵郭勒河中游地区晚三叠世侵入岩从地球化学特征、地壳加厚程度来看具有明显的

俯冲型岩浆特征,在俯冲阶段晚期,说明该地区岩浆

岩为板块碰撞前的火山弧环境中的产物。



VAG. 火山弧; syn - CLOG. 同碰撞; WPG. 板内; ORG. 洋脊

图 11 那陵郭勒河中游地区晚三叠世花岗岩构造环境判别图(据 Pearce et al. ,1984)

Fig. 11 Late Triassic granite tectonic environment discrimination map in the middle reaches of Naling Guole River

7 结论

(1)青海省那陵郭勒河中游地区侵入岩具有高钾钙碱性、过铝质,富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素,明显亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素,相对于 Rb 和 Th 明显亏损 Ba 等地球化学特征,显示具有大陆弧背景下造山花岗岩的特征。

(2)那陵郭勒河中游地区中酸性侵入岩形成年龄分别为(225. 7±1) Ma、(213. 74±1) Ma,时代为晚三叠世。

(3)那陵郭勒河中游地区晚三叠世侵入岩具有 I 型花岗岩特征,可能属壳幔混合成因,岩浆岩是板块碰撞前的火山弧环境中的产物。

参考文献(References):

陈静,谢智勇,李彬,等. 东昆仑拉陵灶火地区泥盆纪侵入岩成因及其地质意义[J]. 矿物岩石,2013, 33(02):26-34.
CHEN Jing,XIE Zhiyong,LI Bin,et al. Petrogenesis of Devonian Intrusive Rocks in Lalingzaohuo Area, Eastern Kunlun,and its Geological Significance[J]. Journal of

- Mineralogy and Petrology, 2013, 33(02): 26-34.
- 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(02): 665-678.
- FENG Chengyou, WANG Song, LI Guochen, et al. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 665-678.
- 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 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[J]. 现代地质, 1998, (03): 51-59.
- GUO Zhengfu, DENG Jinfu, XU Zhiqin, et al. Late Palaeozoic-mesozoic Intracontinental Orogenic Process and Intermediate-acidic Igneous Rocks from the Eastern Kunlun Mountains of Northwestern China [J]. Geoscience, 1998, (03): 51-59.
- 何成, 王力圆, 田立明, 等. 东昆仑哈拉森地区花岗岩类岩石成因及地质意义[J]. 地球科学, 2018, 43(04): 1207-1221.
- HE Cheng, WANG Liyuan, TIAN Liming, et al. Petrogenesis and Geological Implications of Granitoids from Halasen, East Kunlun[J]. Earth Science, 2018, 43(04): 1207-1221.
- 李昌年. 构造岩浆判别的地球化学方法及其讨论[J]. 地质科技情报, 1992, (03): 73-84.
- LI Changnian. A Geochemical Method for Tectonomagmatic Discrimination[J]. Geological Science and Technology Information, 1992, (03): 73-84.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 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[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 600-601.
- LI Huaikun, GENG Jianzhen, HAO Shuang, et al. Study on zircon U-Pb dating by LA-ICP MS[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(S1): 600-601.
- 李金超, 杜玮, 孔会磊, 等. 青海省东昆仑大水沟金矿英云闪长岩锆石 U-Pb 测年、岩石地球化学及其找矿意义[J]. 中国地质, 2015, 42(03): 509-520.
- LI Jinchao, DU Wei, KONG Huilei, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the tonalite in the Dashuigou gold deposit of Eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province[J]. Geology in China, 2015, 42(03): 509-520.
- 马昌前, 熊富浩, 尹烁, 等. 造山带岩浆作用的强度和旋回性: 以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3555-3568.
- MA Changqian, XIONG Fuhao, YIN Shuo, et al. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: An example from a Paleo-Tethyan granitoid batholith, Eastern Kunlun, northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(12): 3555-3568.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 49(03): 403-414.
- MO Xuanxue, LUO Zhaozhua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 49(03): 403-414.
- 王秉璋, 陈静, 罗照华, 等. 东昆仑祁漫塔格东段晚二叠世—早侏罗世侵入岩岩石组合时空分布、构造环境的讨论[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3213-3228.
- WANG Bingzhang, CHEN Jing, LUO Zhaozhua, et al. Spatial and temporal distribution of Late Permian-Early Jurassic intrusion assemblages in eastern Qimantag, East Kunlun, and their tectonic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3213-3228.
- 徐博, 李海宾, 南燕云, 等. 祁漫塔格山阿格腾地区晚三叠世火成岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评, 2019, 65(02): 353-369.
- XU Bo, LI Haibin, NAN Yanyun, et al. LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and tectonic significance of the Late Triassic igneous rocks in Ageteng area, Qimantage Mountains[J]. Geological Review, 2019, 65(02): 353-369.
- 鄯明才, 迟清华, 顾铁新, 等. 中国火成岩化学元素的丰度与分布[J]. 地球化学, 1996, (05): 409-424.
- YAN Mingcai, CHI Qinghua, GU Tiexin, et al. Abundance and Distribution of Chemical Elements of Igneous Rocks in China[J]. Geochimica, 1996, (05): 409-424.
- 迟清华. 岩石化学元素丰度在地球化学块体研究中的意义[J]. 物探与化探, 2003, 27(6): 428-444.
- CHI Qinghua. The Significance of Element Abundances of Rocks in the Study of Geochemical Blocks[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2003, 27(6): 428-444.
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. 地质论评, 2000, (02): 203-211.

- YUAN Wanning, MO Xuanxue, YU Xuehui, et al. Geological records of the regional tectonic environments during the IndoChinese period within granites in the East-Kunlun[J]. *Geological Reviews*, 2000, (02):203-211.
- 赵明福, 李成福, 史连昌, 等. 青海省拉陵高里河一带中三叠世花岗岩闪长岩地球化学特征及其意义[J]. *西北地质*, 2017, 50(03):12-21.
- ZHAO Mingfu, LI Chengfu, SHI Lianchang, et al. Petrochemical Characteristics and Geological Significance of Middle Triassic Granodiorites from Lalinggaoli River Area in Qinghai[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(03):12-21.
- 陈加杰, 付乐兵, 魏俊浩, 等. 东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗岩闪长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约[J]. *地球科学*, 2016, 41(11):1863-1882.
- CHEN Jiajie, FU Lebing, WEI Junhao, et al. Geochemical Characteristics of Late Ordovician Granodiorite in Gouli Area, Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province: Implications on the Evolution of Proto-Tethys Ocean[J]. *Earth Science*, 2016, 41(11):1863-1882.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 花岗岩与地壳厚度关系探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(2):259-269.
- ZHANG Qi, JIN Weijun, LI Chengdong, et al. Granitic Rocks and their Formation Depth in the Crust[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(2):259-269.
- 王松, 丰成友, 李世金, 等. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗岩闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2009, 36(01):74-84.
- WANG Song, FENG Chengyou, LI Shijin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantage Mountain, Qinghai Province, and its geological implications[J]. *Geology in China*. 2009, 36(01):74-84.
- 刘云华, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑野马泉地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, (10):2457-2463.
- LIU Yunhua, MO Xuanxue, YU Xuehui, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Jingren granite, Yemaquan region of the east Kunlun and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, (10):2457-2463.
- 邱家骧, 林景仟. 岩石化学[M]. 北京:地质出版社, 1991:1-276.
- QIU Jiaxiang, LIN Jingqian. Petrochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:1-276 (in Chinese without English abstract).
- 刘长财, 周春波, 杨晓刚, 等. 青海省格尔木市浑德伦地区 J46E021011、J46E021012 两幅 1:5 万区域地质矿产调查报告[R]. 西宁:青海省核工业地质局, 2015.
- Sun S S, 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. Spc. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 1989, 42: 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33 (2): 241-165.
- Rudnick L R, Fountain M D. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 267-309.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101:635-643.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956-983.
- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22: 247-263.
- 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.
- Wilson M. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1989, 1-464.
- Chappell B W, Stephens W E. Origin of infracrustal (I-type) granite magmas[J]. *Royal Society of Edinburgh Transactions: Earth Science*, 1988, 79(2~3):71-86.
- Xu Xisheng, Qiu Jiansheng. *Igneous Petrology*[M]. Beijing: Science Press, 2010, 215-220 (in Chinese without English abstract).