第 57 卷 第 5 期
2024 年（总 237 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 57 No. 5
2024(Sum237)

引文格式：张旗，李尚启，刘元，等. 新疆南天山红柳沟辉长岩地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质，2024，57(5)：248−258. DOI：10.12401/j.nwg.2024056

Citation：ZHANG Qi, LI Shangqi, LIU Yuan, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Gabbro from the South Tianshan Hongliugou in Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 248−258. DOI: 10.12401/j.nwg.2024056

新疆南天山红柳沟辉长岩地球化学特征及地质意义

张旗，李尚启*，刘元，沈锐，常昊，火兴开，晁文迪

（中国冶金地质总局西北地质勘查院，陕西 西安 710119）

摘 要：红柳沟辉长岩位于南天山北缘东段哈尔克-萨阿尔明晚古生代沟弧带东部，是南天山北缘-中天山南缘早古生代弧岩浆带内出露为数不多的基岩侵入岩体。辉长岩主要由斜长石(±48%)、普通辉石(±42%)、黑云母(±5%)、角闪石(±5%)组成。岩石化学成分显示辉长岩 Na_2O 含量为 2.49%～3.08%，平均为 2.83%；K_2O 含量为 1.6%～2.4%，平均为 2.02%，里特曼指数为 1.78～2.09，均小于 3.3；分异指数为 50.3～57.06，主、微量图解显示其为拉斑-钙碱性系列；辉长岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式与 E-MORB 相似，轻稀土富集，重稀土亏损，未见明显的 δEu 异常，微量元素具有 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素富集和 Ta、Nb、Ti 等高场强元素亏损；锆石原位 $\varepsilon Hf(t)$ 值为-1.27～8.75，反映辉长岩来源于亏损地幔，并上升的过程中受到地壳明显混染，基性岩的 $(Na_2O+K_2O)/TiO_2$ 判别图解显示红柳沟辉长岩源区碳酸盐化橄榄岩部分熔融。锆石 U-Pb 测年显示辉长岩形成年龄为为(410.4±2.3) Ma(MSWD=0.51，n=25)。本次研究补充了南天山构造带辉长岩年代学、地球化学证据，结合区域地质资料，笔者提出在早泥盆世，南天山洋存在洋陆俯冲作用，并伴随有基性岩侵入。

关键词：红柳沟；南天山；辉长岩；地球化学；年代学

中图分类号：P588.12 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2024)05-0248-11

Geochemical Characteristics and Geological Significance of Gabbro from the South Tianshan Hongliugou in Xinjiang

ZHANG Qi, LI Shangqi*, LIU Yuan, SHEN Rui, CHANG Hao, HUO Xingkai, CHAO Wendi

(Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Administration, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The Hongliugou gabbro is located in the eastern part of the Halke Saarming Late Paleozoic arc belt on the northern edge of the South Tianshan Mountains. It is one of the few intrusive rock masses exposed in the Early Paleozoic arc magmatic belt on the northern edge of the South Tianshan Mountains and the southern edge of the Central Tianshan Mountains. Gabbro is mainly composed of plagioclase (±48%), common pyroxene (±42%), biotite (±5%), and hornblende (±5%). The chemical composition of the rock shows that the Na_2O con-

收稿日期：2023-06-07；**修回日期**：2024-03-21；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：中国冶金地质总局项目“新疆和静县乌兰赛尔-红柳沟一带韧性剪切带型金矿成矿特征研究及找矿预测”（CMG-BK202105）资助。

作者简介：张旗(1984−)，男，工程师，从事基础地质、矿产勘查工作。E-mail：312267719@qq.com。

*** 通讯作者**：李尚启(1990−)，男，工程师，从事基础地质、矿产勘查工作。E-mail：349966977@qq.com。

tent of gabbro ranges from 2.49% to 3.08%, with an average of 2.83%; The K_2O content ranges from 1.6% to 2.4%, with an average of 2.02%. The Rittman index is 1.78 to 2.09, both of which are less than 3.3%; The differentiation index ranges from 50.3 to 57.06, and the main trace diagram shows that it belongs to the plaque calcium alkaline series; The standardized distribution pattern of rare earth elements in gabbro chondrite meteorites is similar to that of E-MORB, with enrichment of light rare earth elements and depletion of heavy rare earth elements, and no significant difference observed δ Eu anomaly, trace elements with enrichment of large ion lithophilic elements such as Rb, Ba, Th, U, and depletion of high field strength elements such as Ta, Nb, Ti; Zircon in-situ the εHf (*t*) value ranges from 1.27 to 8.75, indicating that the gabbro originated from the depleted mantle and was significantly contaminated by the crust during its ascent. The *w* (Na_2O+K_2O)/*w* (TiO_2) discrimination diagram of the basic rocks shows partial melting of carbonated peridotite in the Hongliugou gabbro source area. The zircon U-Pb dating shows that the age of gabbro formation is (410.4±2.3)Ma (MSWD=0.51, n=25). This study supplemented the dating and geochemical evidence of gabbro in the South Tianshan tectonic belt, and combined with regional geological data, we proposed that in the Early Devonian, there was oceanic continental subduction in the South Tianshan Ocean, accompanied by the intrusion of basic rocks.

Keywords：Hongliugou area；South Tianshan；gabbro；geochemistry；chronology

南天山造山带是天山造山带以及中亚造山带的重要组成部分，蕴含着天山洋盆演化的重要信息，一直是区域研究的热点(Huang et al., 2000; 肖文交等, 2006; 龙灵利等, 2006; Xiao et al., 2008; 左国朝等, 2011; 郭瑞清等 2013; 张斌等, 2014; 魏强等, 2017; 郭春涛等, 2018)。众多学者和地质工作者在南天山北缘和中天山北缘相继识别出了一条西起查干萨依东至库米什孔雀沟长达数百千米的早古生代辉长岩-闪长岩-花岗岩为岩性组合的钙碱性花岗岩带(Zhang et al., 2007; Yang et al., 2009; Yang et al., 2011; Chen et al., 2015)，为研究早古生代南天山洋的构造演化提供了便利。但关于南天山洋盆的闭合时限一直存在较大争议，其中引用较多的几种认识有：Han 等(2004)基于中天山南缘发现的铝质 A 型花岗岩认为南天山洋在 490～380 Ma 已经进入了造山晚期；Zhong 等(2015)基于中天山南缘发现的钾长花岗岩认为 417 Ma 时南天山洋已经闭合；田亚洲等(2014)基于中天山南缘的辉长岩认为南天山洋在 316 Ma 时仍在俯冲；郭瑞清(2018)等基于对塔里木北缘库鲁克塔格辉长岩脉认为南天山洋在 419 Ma 时仍处于向南的俯冲–消减作用。这些及其他基于不同类型的花岗岩(杨莉等, 2016; 于新慧等, 2020; 刘桂萍等, 2021; 刘传朋等, 2022)以及相邻构造带中辉长岩得出来南天山洋盆不同闭合时限观点显然具有较大的分歧，既矛盾也缺乏全南天山造山带岩浆活动的支持，因此，加强南天山早古生代辉长岩等基性岩成因、构造环境的研究将为解决这些问题提供重要的地球化学证据和约束条件。

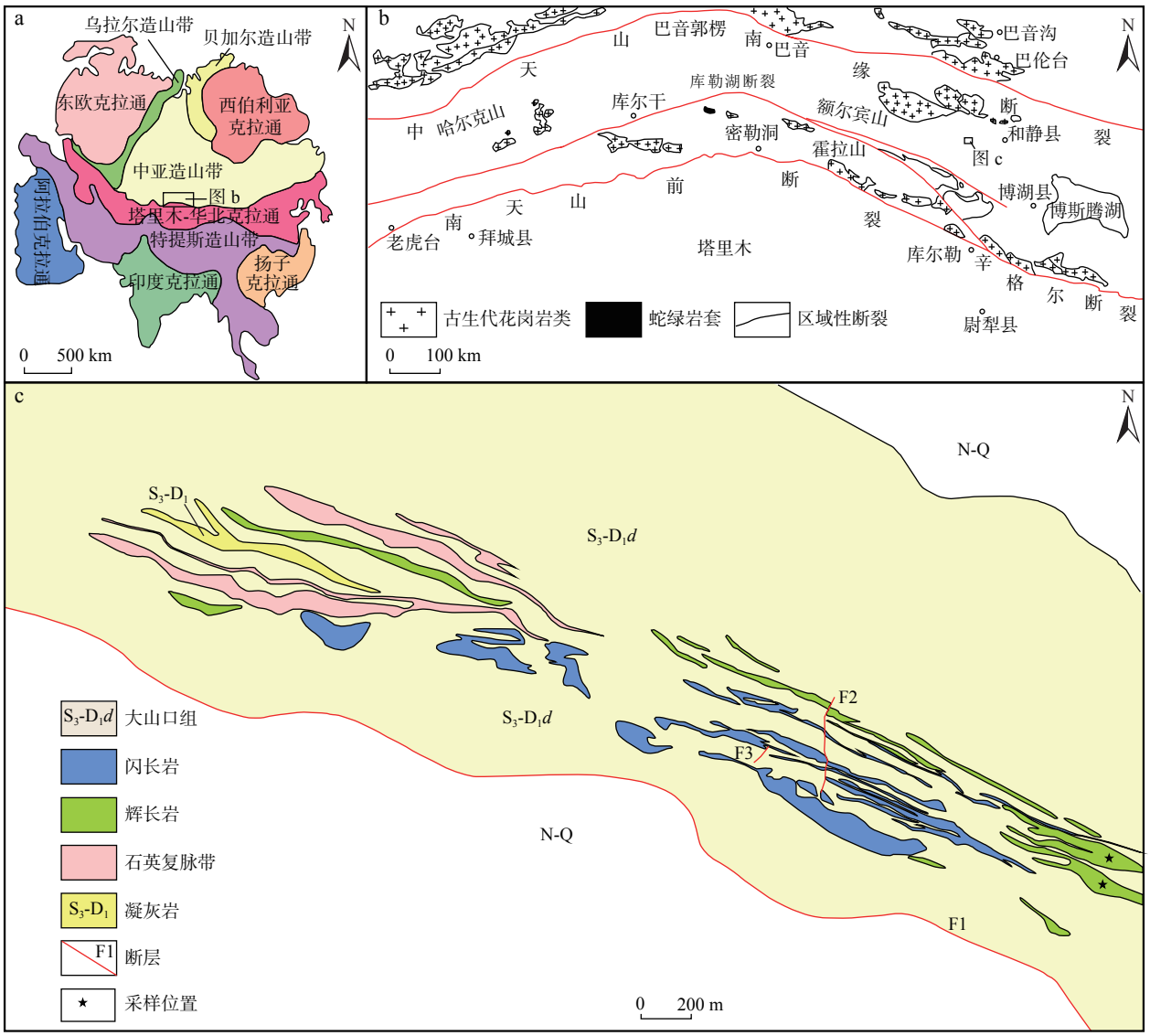
1　区域地质背景

红柳沟辉长岩体位于新疆和静县正西方向约 65 km 处，在区域上位于中天山南缘-南天山北缘早古生代钙碱性花岗岩带的东部，处于南天山造山带哈尔克-萨阿尔明晚古生代沟弧带之中，北侧为中天山南缘断裂带，南侧为南天山前断裂带(图 1b)。

研究区内通过 1∶2 000 地质测量发现 3 条断层(图 1c)，主要为区域大断裂(大山口断裂 F1)与 NNE 向断裂(F2、F3)。区内地层主要出露在中部，呈 EWW 向带状分布。主要为上志留统—下泥盆统大山口组(S_3-D_1d)，主要为一套浅变质碎屑岩，岩性为灰-浅灰黑色砂质板岩。区内出露的岩浆岩主要有辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩以及少量的晚志留世—早泥盆世凝灰岩，并且受后期构造的变形影响，多呈条带状平行分布，整体与区域大断裂 F1 方向一致呈 NWW 向。前人对红柳沟地区的岩浆岩研究较少，集中在大山口金矿的成矿流体及矿床成因方面(鲍庆中等, 2006; 董丰新等, 2011)，基础地质研究极为薄弱。

2　岩体地质和岩相学特征

辉长岩主要在研究区北部和东部大面积出露(图 1c)，受后期构造变形影响，多呈条带状平行分布，出露长度为 100～1 000 m、宽度为 50～200 m，整体与韧性剪切带方向一致呈 NWW 向，与大山口组砂质板



a.亚洲大陆构造图(据郭瑞清等，2013)；b.南天山地质简图(据郭瑞清等，2013)；c.红柳沟地区地质图

图1 红柳沟地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Hongliugou domain

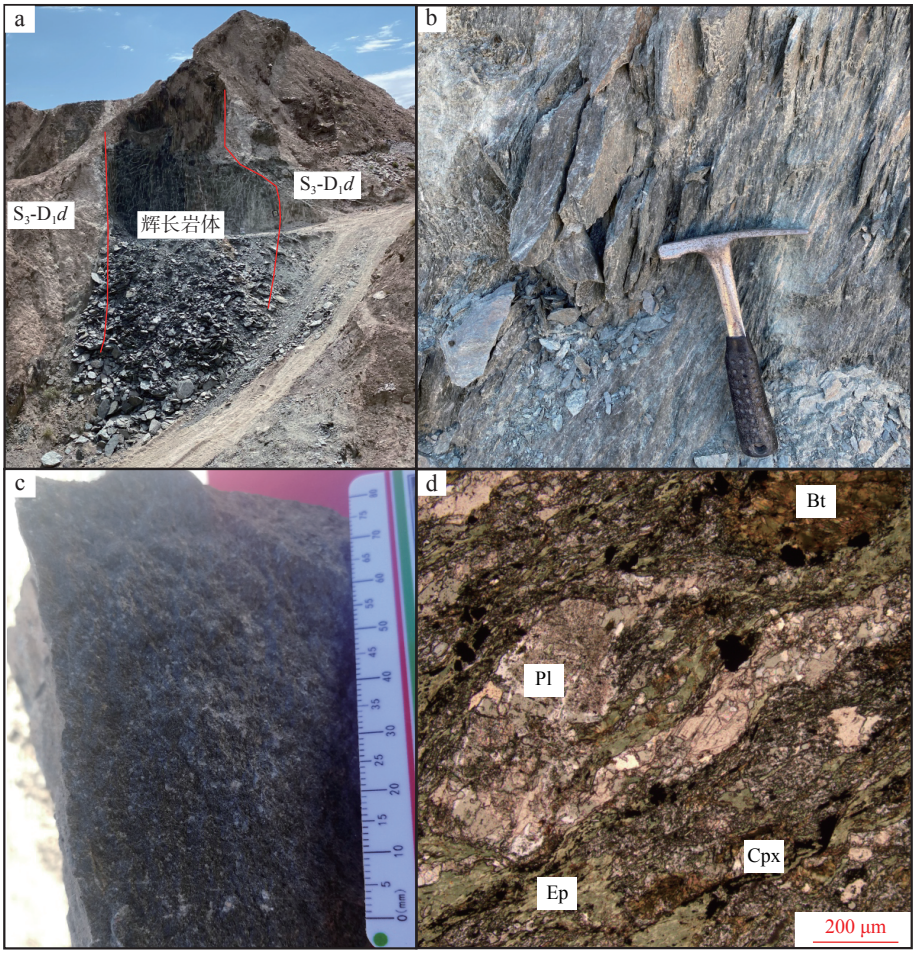
岩接触界线明显，呈侵入接触关系，接触界限呈锯齿状(图 2a)。

红柳沟辉长岩新鲜面呈灰绿-灰黑色，半自形细粒结构，块状构造(图 2b、图 2c)。岩石主要由斜长石(±48%)、普通辉石(±42%)、黑云母(±5%)、角闪石(±5%)及副矿物组成。显微镜下观察，斜长石呈半自形板状，聚片双晶发育，粒径一般为 0.8～1.2 mm，少数粒径为 2.0 mm，整体呈杂乱分布，部分斜长石发生绢云母化(图 2d)；普通辉石呈自形-半自形短柱状，粒径一般为 0.5～1.2 mm。黑云母呈片状，粒径一般为 1.0 mm，杂乱分布，局部发生绿泥石化蚀变；角闪石呈半自形短柱状，粒度多在 0.3～2.5 mm 不等。副矿物(±1%)为锆石、磁铁矿、榍石等，矿物粒径大部分为 0.1～1.2 mm，少量矿物粒径可达 2 mm(图 2d)。

3 分析方法

笔者共选取 9 件辉长岩样品进行测试研究，其中 8 件样品进行主量、微量以及稀土元素分析，1 件样品(H62-RZ1)进行锆石 U-Pb 测年。

主量、微量、稀土元素分析测试交由湖北省地质实验测试中心完成。测试样品在经历去污、碎样、去离子水洗涤和 2～3 次烘干等步骤后进行研磨(≤200 目)。然后在恒定温度(21 ℃)与湿度(58%)的环



S_3-D_1d. 上志留统—下泥盆统大山口组；Pl. 斜长石；Bt. 黑云母；Cpx. 辉石；Ep. 绿帘石

图2　红柳沟辉长岩野外(a、b、c)与显微镜下照片(d)

Fig. 2　(a, b, c) Field photographs and (d) photomicrographs of gsbbro from Hongliugou domain

境下进行测试分析。主量元素采用型号 RXF-1800, 编号为 27-HY-2009-001 X 荧光光谱仪进行分析测试, 分析精度优于 2%。微量与稀土元素采用型号为电感耦合等离子体质谱仪-X2 进行分析, 分析精度优于 2%。

本次锆石 U-Pb 定年在武汉上谱分析科技有限责任公司进行测定, 工作分为两部分, 前期完成锆石单矿物的挑选与制靶、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄测定, 后期在室内进行数据处理及相关图件的绘制。前期具体操作为: 将样品中挑选出的锆石粘于环氧树脂内并抛光, 对抛光之后的靶样采用透射光与反射光进行拍照并收集阴极发光(CL)图像, 开展综合判定, 选择无裂隙、无包裹体、环带清晰、大小合适的锆石圈定激光剥蚀区域。测年仪器采用安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900)以及相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统(GeoLas HD), 剥蚀采用直径为 32 um 的束斑, 频率选用 5 Hz, 激光能量为 80 mJ, 后期的数据处理工作采用 ICPMS Data Cal10.8 软件程序进行, 相关图件(谐和图与加权年龄图)的绘制和谐和年龄与加权年龄的计算采用 Isoplot3.0 程序。

4　分析结果

4.1　主量元素特征

本次实验所采集的 8 件辉长岩样品主量元素数据见表 1。红柳沟辉长岩 SiO_2 含量为 44.24%～46.29%, 平均值为 45.39%, Al_2O_3 含量为 12.26%～13.03%, 平均值为 12.68%。CaO 含量为 5.21%～7.56%, 平均值为 6.87%; Na_2O 含量为 2.49%～3.08%, 平均值为 2.83%; K_2O 含量为 1.6%～2.4%, 平均值为 2.02%; 里特曼指数 σ=1.78～2.09, 均小于 3.3; 分异指数 *DI* 介于 50.3～57.06, 平均值为 53.071。在 TAS 图解中(图 3a), 8 件辉长岩样品都落入辉长岩区域和碱性范围内; 根据 Zr-

Y 图解(图 3b),红柳沟 8 件样品均落入拉斑-钙碱性系列岩石范围内。

4.2 微量、稀土元素特征

红柳沟辉长岩的 8 件样品微量、稀土元素分析结果见表 2。在稀土元素球粒陨石标准化模式图上(图 4a),曲线整体呈平行不对称的右倾型。根据表 2,辉长岩的稀土元素总量∑REE=213.80×10^{-6}～237.27×10^{-6},平均值为 224.93×10^{-6};LREE=195.28×10^{-6}～217.51×10^{-6},HREE=18.52×10^{-6}～20.82×10^{-6};LREE/HREE=10.2～11.0,平均值为 10.64。$(La/Yb)_N$ 为 12.45～13.86,平均值为 13.11,$(Gd/Yb)_N$ 为 2.1～2.3,平均值为 2.21,说明轻稀土富集且分馏程度高;δEu=0.8～1.09,平均为 0.92,无明显的 Eu 异常,说明辉长岩轻稀土元素呈富集型。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 4b),Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素相对富集,而 Ta、Nb、Ti 等高场强元素相对亏损,表明该辉长岩可能受到地壳混染或发生变质作用。

4.3 锆石 U-Pb 定年

笔者对新疆红柳沟辉长岩样品 H62-RZ1 进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,分析结果见表 3,Th、U 含量值分别为 3×10^{-6}～653×10^{-6}、94×10^{-6}～613×10^{-6},Th/U 值范围为 0.03～1.06。在阴极发光(CL)图上,锆石颗粒粒径较小,一般为 80～120 μm,长宽比为 1.2∶1～1.8∶1,晶形主要呈自形-半自形短柱状,具有较清晰的地震荡环带,为岩浆锆石(图 5)。本次选取 25 颗清晰的锆石进行测年分析,结果表明,锆石 $^{206}Pb/^{238}U$

表 1 红柳沟辉长岩主量元素(%)分析结果表

Tab. 1 Major elements (%) analytic data table of the Hongliugou gabbro

样品号	H62-YQ1	H62-YQ2	H62-YQ3	H62-YQ4	H62-YQ5	H62-YQ6	H62-YQ7	H62-YQ8
SiO_2	45.76	46.29	44.24	45.31	45.96	45.86	44.52	45.24
TiO_2	0.833	0.940	0.848	0.859	0.860	0.964	0.772	0.813
Al_2O_3	12.26	12.67	12.78	12.93	12.90	13.03	12.26	12.58
Fe_2O_3	8.24	10.11	9.64	8.21	8.62	8.66	7.72	8.38
FeO	5.27	6.78	5.88	6.09	6.21	6.00	5.73	6.23
MnO	0.151	0.122	0.144	0.143	0.132	0.134	0.158	0.142
MgO	10.71	11.62	11.39	11.10	11.06	11.33	10.35	11.33
CaO	7.56	5.21	6.64	6.94	6.44	6.18	8.84	7.17
Na_2O	3.08	2.61	2.95	3.03	2.85	2.89	2.75	2.49
K_2O	1.60	2.14	2.09	2.10	2.40	1.79	1.93	2.13
P_2O_5	0.346	0.362	0.333	0.350	0.352	0.359	0.319	0.339
LOI	3.98	0.99	2.90	2.79	2.06	2.62	4.46	2.97
总量	99.79	99.85	99.84	99.86	99.83	99.81	99.82	99.81
$Mg^{\#}$	45.77	42.27	43.91	45.17	44.19	45.11	44.95	45.14

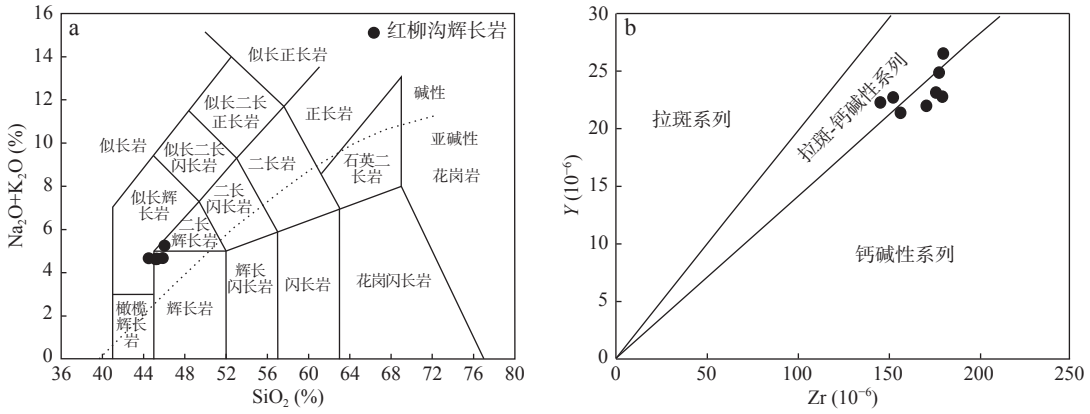


图3 红柳沟辉长岩 TAS 图解(a)和 Zr-Y 图解(b)

Fig. 3 (a) TAS diagram and (b) Zr-Y diagram of the Hongliugou gabbro

表 2　红柳沟辉长岩微量和稀土元素(10^{-6})分析结果表

Tab. 2　Trace and REE element (10^{-6}) analytic data table of the Hongliugou gabbro

样品号	H62-YQ1	H62-YQ2	H62-YQ3	H62-YQ4	H62-YQ5	H62-YQ6	H62-YQ7	H62-YQ8
Rb	108	144	134	132	160	109	120	130
Ba	1 670	649	746	548	1 279	1 114	1 103	1 121
Th	7.76	8.43	8.30	7.56	8.56	8.38	8.00	7.54
U	2.49	2.35	2.11	2.27	2.22	2.09	2.18	2.00
Ta	0.54	0.76	0.64	0.87	0.49	0.78	0.97	0.46
Nb	9.63	10.0	9.29	9.57	10.1	10.3	9.12	9.17
Sr	303	195	239	230	239	236	305	257
Zr	145	178	179	176	152	180	170	156
Hf	4.24	4.72	4.94	5.11	4.14	4.86	4.89	4.41
Y	22.3	24.9	22.8	23.1	22.7	26.5	22.0	21.3
La	46.4	49.0	45.9	46.1	48.2	48.4	45.3	45.1
Ce	89.4	94.7	86.9	87.9	94.6	91.7	84.9	85.2
Nd	44.9	49.6	46.2	46.1	47.8	47.9	43.2	44.6
Sm	8.43	9.27	8.76	8.95	9.01	9.16	8.06	8.31
Pr	11.6	12.7	11.9	12.0	12.5	12.5	11.5	11.5
Eu	2.74	2.14	2.12	2.12	2.48	2.72	2.40	2.38
Gd	6.44	6.69	6.56	6.66	6.87	6.91	6.12	6.48
Tb	1.02	1.11	1.02	1.06	1.06	1.15	0.99	1.00
Dy	4.62	5.28	4.93	5.10	4.93	5.57	4.92	4.72
Ho	0.85	0.94	0.90	0.90	0.95	1.06	0.85	0.88
Er	2.74	2.53	2.49	2.63	2.84	2.81	2.53	2.46
Tm	0.34	0.36	0.37	0.35	0.35	0.39	0.35	0.34
Yb	2.26	2.49	2.37	2.50	2.46	2.54	2.35	2.30
Lu	0.37	0.35	0.38	0.36	0.39	0.39	0.40	0.35
LREE	203.38	217.51	201.74	203.10	214.48	212.30	195.28	196.99
HREE	18.64	19.77	19.02	19.55	19.85	20.82	18.52	18.54
∑REE	222.02	237.27	220.76	222.65	234.33	233.11	213.80	215.53
δEu	1.09	0.79	0.82	0.8	0.93	1.0	1.0	0.96
LREE/HREE	10.91	11.00	10.61	10.39	10.81	10.20	10.55	10.63
$(La/Yb)_N$	13.86	13.25	13.07	12.45	13.19	12.87	12.97	13.18
$(Gd/Yb)_N$	2.30	2.17	2.24	2.15	2.25	2.20	2.10	2.27

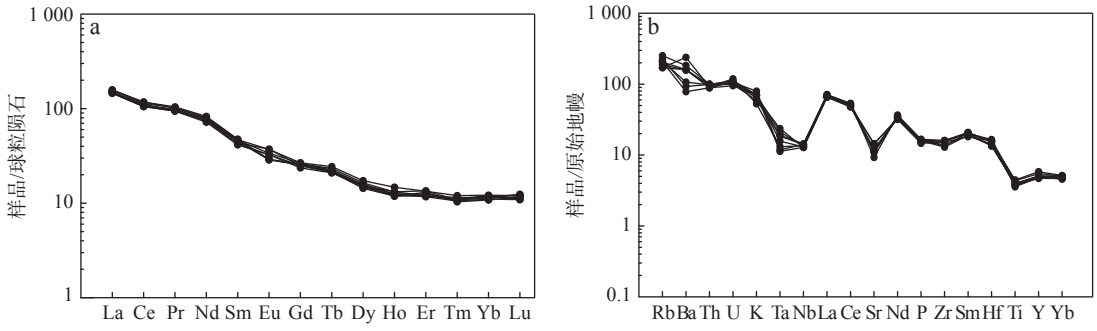


图4　稀土元素球粒陨石标准化模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 4　(a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) primitive mantle-normalized trace element diagrams

谐和年龄为 401～419 Ma, 加权平均年龄为(410.4±2.3) Ma(MSWD=0.51), 代表该辉长岩的结晶年龄(图 6), 形成于早泥盆世。

4.4　Lu-Hf 同位素

笔者在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年基础上, 选取 25 颗锆石在测年点近似相同的位置上进行 Hf 同位素

表 3 红柳沟辉长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Tab. 3 Ziron U-Pb dating data for the Hongliugou gabbro

测点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
				$^{207}Pb/^{206}Pb$	1δ	$^{207}Pb/^{235}U$	1δ	$^{206}Pb/^{238}U$	1δ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1δ	$^{207}Pb/^{235}U$	1δ	$^{206}Pb/^{238}U$	1δ
H62-RZ1-03	120	204	0.59	0.088 0	0.004 7	0.765 7	0.034 0	0.064 1	0.001 4	1 383	103.7	577	19.5	401	8.8
H62-RZ1-04	9	94	0.10	0.077 4	0.004 8	0.704 8	0.047 7	0.066 0	0.001 7	1 132	122.7	542	28.4	412	10.2
H62-RZ1-05	9	251	0.04	0.073 5	0.002 4	0.666 2	0.029 5	0.065 5	0.001 3	1 028	62.8	518	18.0	409	7.9
H62-RZ1-06	234	294	0.79	0.072 7	0.002 9	0.651 8	0.026 4	0.065 1	0.000 6	1 006	81.5	510	16.2	406	3.9
H62-RZ1-07	297	364	0.82	0.071 8	0.004 1	0.645 9	0.038 4	0.065 2	0.000 7	989	115.3	506	23.7	407	4.5
H62-RZ1-09	37	146	0.26	0.069 7	0.003 1	0.628 0	0.030 2	0.065 3	0.000 8	920	90.7	495	18.8	408	4.6
H62-RZ1-10	652	613	1.06	0.061 3	0.002 0	0.549 2	0.029 5	0.065 2	0.003 3	650	72.2	444	19.3	407	19.9
H62-RZ1-11	282	348	0.81	0.060 7	0.001 9	0.546 2	0.017 2	0.065 3	0.000 6	628	66.7	442	11.3	408	3.9
H62-RZ1-12	197	242	0.81	0.060 7	0.002 0	0.556 3	0.021 4	0.066 4	0.000 8	628	72.2	449	14.0	414	5.1
H62-RZ1-13	382	519	0.74	0.061 2	0.002 3	0.558 7	0.016 9	0.066 6	0.001 5	656	81.5	451	11.0	416	9.2
H62-RZ1-14	188	291	0.65	0.059 6	0.002 2	0.536 9	0.021 1	0.065 2	0.000 7	587	113.9	436	13.9	407	4.2
H62-RZ1-15	434	418	1.04	0.059 3	0.002 2	0.532 7	0.021 1	0.065 2	0.000 7	576	78.7	434	14.0	407	4.3
H62-RZ1-16	446	500	0.89	0.059 6	0.002 3	0.550 4	0.020 0	0.067 2	0.001 1	587	115.7	445	13.1	419	6.7
H62-RZ1-17	191	252	0.76	0.059 4	0.001 5	0.546 4	0.012 7	0.066 9	0.001 0	583	55.5	443	8.3	417	5.8
H62-RZ1-18	10	95	0.10	0.052 9	0.004 0	0.471 7	0.034 1	0.065 6	0.001 4	324	170.3	392	23.6	409	8.2
H62-RZ1-19	653	764	0.86	0.059 3	0.004 4	0.533 3	0.028 4	0.066 2	0.001 1	576	162.9	434	18.8	413	6.7
H62-RZ1-20	195	312	0.63	0.052 9	0.001 8	0.484 0	0.019 5	0.066 4	0.001 7	324	71.3	401	13.4	414	10.0
H62-RZ1-24	91	184	0.50	0.057 0	0.002 4	0.513 1	0.023 4	0.065 7	0.001 9	500	99.1	421	15.7	410	11.5
H62-RZ1-25	208	334	0.62	0.056 9	0.001 4	0.520 6	0.014 5	0.066 5	0.001 2	487	55.6	426	9.7	415	7.3
H62-RZ1-26	29	393	0.07	0.056 5	0.001 4	0.521 7	0.014 9	0.066 9	0.000 9	472	53.7	426	9.9	417	5.4
H62-RZ1-27	3	105	0.03	0.053 6	0.004 4	0.485 8	0.033 2	0.065 5	0.002 2	367	185.2	402	22.7	409	13.2
H62-RZ1-28	254	339	0.75	0.054 7	0.001 7	0.497 8	0.019 0	0.065 8	0.000 9	398	66.7	410	12.9	411	5.4
H62-RZ1-29	71	139	0.51	0.055 5	0.002 7	0.500 8	0.022 5	0.065 9	0.001 2	432	109.2	412	15.2	411	7.0
H62-RZ1-30	241	321	0.75	0.055 8	0.001 7	0.507 1	0.014 9	0.066 1	0.000 9	443	66.7	416	10.0	413	5.3
H62-RZ1-31	318	438	0.72	0.054 8	0.001 6	0.500 8	0.014 2	0.066 5	0.001 0	467	69.4	412	9.6	415	5.9

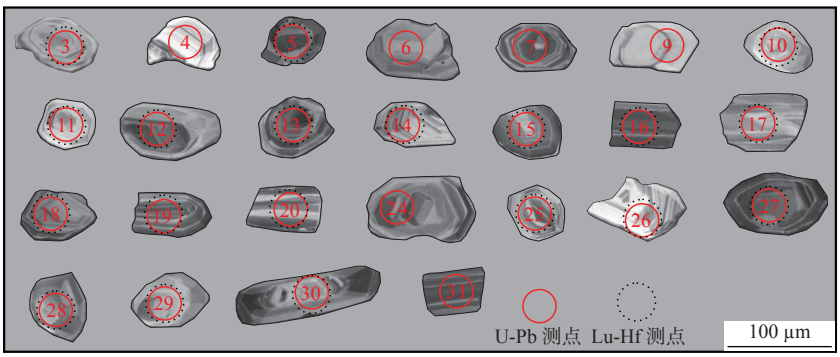


图5 红柳沟辉长岩锆石阴极发光图

Fig. 5 CL image of zircons of the Hongliugou gabbro

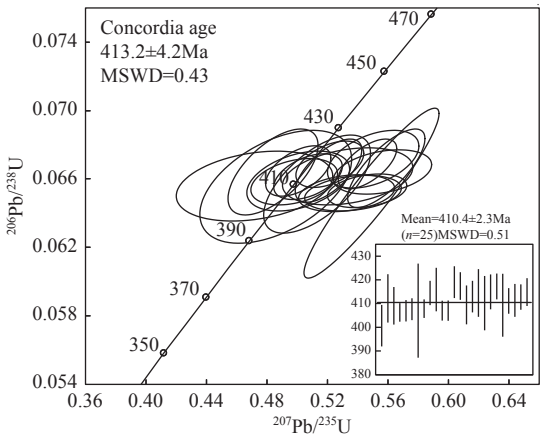


图6　红柳沟辉长岩锆石 U-Pb 谐和图和加权年龄平均图

Fig. 6　Concordia curves of zircons U-Pb data of the Hongliugou gabbro

分析(图 5), 数据结果显示(表 4): 红柳沟辉长岩锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 为 0.282 491～0.282 788, 平均值为 0.282 627, 可以代表锆石颗粒原始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值。$\varepsilon Hf(t)$ 变化范围为−1.27～8.75, 平均值为 3.30, 对应的二阶段模式年龄(T_{DM2}), 分布范围介于 0.84～1.50 Ga。

5　讨论

5.1　岩石成因与源区性质

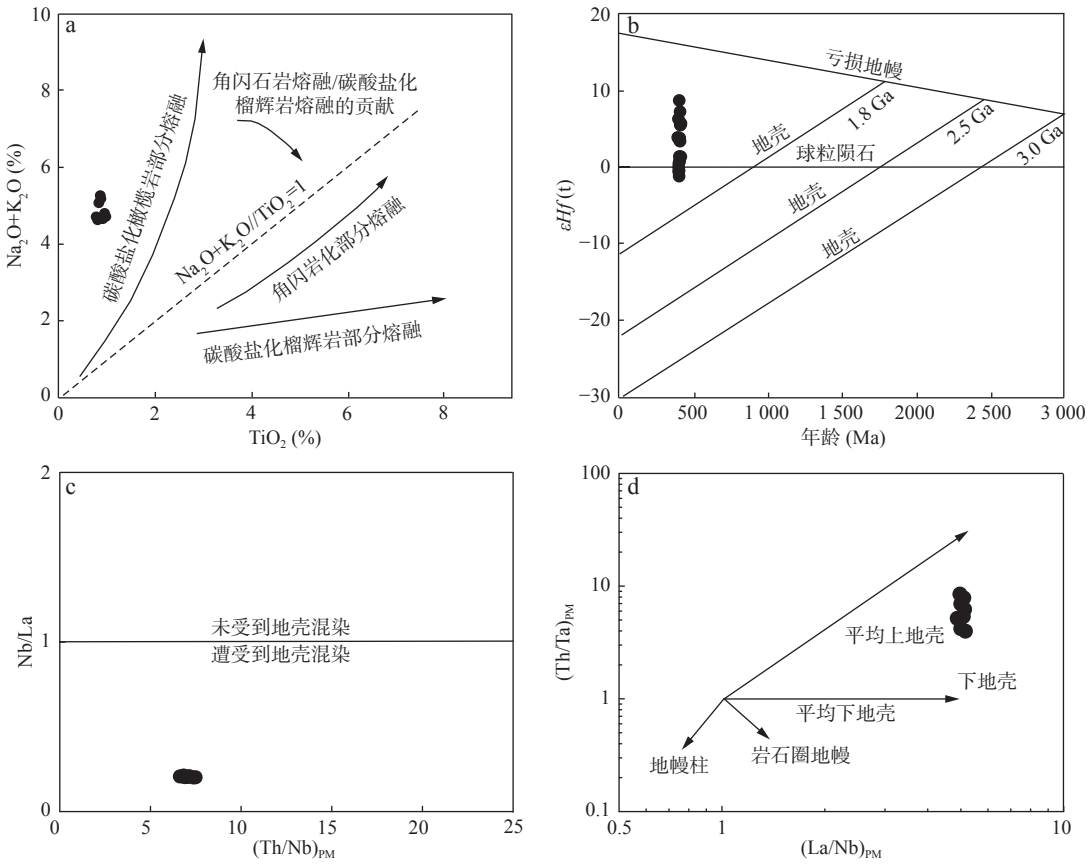
研究显示, 可以利用基性岩的 $(Na_2O+K_2O)/TiO_2$ 值来判断岩浆源区, 并对地幔源区、角闪石岩和碳酸盐化榴辉岩地幔源区的界线进行清楚的划分。图 7a 显示, 在 $(Na_2O+K_2O)/TiO_2>1$ 的范围内, 随着 TiO_2 含量的增高, 碳酸盐化橄榄岩地幔源区全碱含量表现出大幅度上升趋势; 而在 $(Na_2O+K_2O)/TiO_2<1$ 的范围内, 随着 TiO_2 含量的增高, 角闪石岩和碳酸盐化榴辉岩地幔源区全碱含量表现出缓慢上升。红柳沟辉长岩在图中投点落在 $(Na_2O+K_2O)/TiO_2>1$ 的范围内, 显示有碳酸盐化橄榄岩部分熔融趋势的特征。

通常来说, 基性岩浆通常来自岩石圈地幔或者软流圈地幔岩石的部分熔融, 利用岩石中不易受后期蚀变和低于角闪石相变质作用的高场强元素和重稀土

表 4　红柳沟辉长岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Tab. 4　Zircon Hf isotopic data for the Hongliugou gabbro

测点号	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	年龄(Ma)	εHf(0)	εHf(t)	T_{DM1}(Ma)	T_{DM2}(Ma)	$f_{Lu/Hf}$
H62-RZ1-03	0.116 058	0.001 210	0.003 363	0.000 048	0.282 657	0.000 024	401	−4.07	3.86	898.6	1 146.0	−0.899
H62-RZ1-05	0.046 197	0.000 359	0.001 391	0.000 012	0.282 542	0.000 033	409	−8.15	0.48	1 015.0	1 367.1	−0.958
H62-RZ1-10	0.040 480	0.000 183	0.001 150	0.000 006	0.282 705	0.000 046	407	−2.38	6.27	778.1	997.6	−0.965
H62-RZ1-11	0.033 934	0.000 073	0.001 120	0.000 002	0.282 491	0.000 024	408	−9.94	−1.27	1 079.3	1 477.1	−0.966
H62-RZ1-12	0.110 041	0.000 667	0.003 024	0.000 017	0.282 578	0.000 069	414	−6.88	1.42	1 008.1	1 311.7	−0.909
H62-RZ1-13	0.114 382	0.001 270	0.003 538	0.000 037	0.282 745	0.000 039	416	−0.94	7.24	769.4	942.5	−0.893
H62-RZ1-14	0.053 794	0.000 894	0.001 635	0.000 028	0.282 534	0.000 105	407	−8.43	0.08	1 033.2	1 390.6	−0.951
H62-RZ1-15	0.097 250	0.001 810	0.002 924	0.000 046	0.282 529	0.000 074	407	−8.61	−0.44	1 077.7	1 423.4	−0.912
H62-RZ1-16	0.060 179	0.000 714	0.001 907	0.000 021	0.282 689	0.000 028	419	−2.94	5.76	816.7	1 039.0	−0.943
H62-RZ1-17	0.106 043	0.001 360	0.003 139	0.000 037	0.282 690	0.000 055	417	−2.91	5.42	843.8	1 059.7	−0.905
H62-RZ1-18	0.154 616	0.002 070	0.004 256	0.000 057	0.282 649	0.000 049	409	−4.36	3.50	934.5	1 175.4	−0.872
H62-RZ1-19	0.050 009	0.000 531	0.001 423	0.000 020	0.282 631	0.000 024	413	−4.97	3.73	888.2	1 163.7	−0.957
H62-RZ1-20	0.049 060	0.000 338	0.001 494	0.000 006	0.282 728	0.000 044	414	−1.55	7.17	751.7	946.2	−0.955
H62-RZ1-25	0.088 510	0.000 480	0.002 601	0.000 024	0.282 631	0.000 018	415	−5.00	3.42	918.3	1 184.8	−0.922
H62-RZ1-26	0.056 476	0.000 804	0.001 639	0.000 024	0.282 557	0.000 022	417	−7.59	1.14	999.2	1 331.2	−0.951
H62-RZ1-27	0.092 919	0.000 309	0.002 561	0.000 009	0.282 575	0.000 056	409	−6.97	1.34	999.1	1 312.4	−0.923
H62-RZ1-28	0.017 302	0.000 215	0.000 572	0.000 007	0.282 492	0.000 027	411	−9.89	−1.00	1 061.7	1 462.5	−0.983
H62-RZ1-29	0.114 128	0.000 995	0.003 262	0.000 024	0.282 788	0.000 066	411	0.57	8.75	699.0	843.1	−0.902
H62-RZ1-30	0.076 111	0.000 460	0.002 223	0.000 012	0.282 695	0.000 088	413	−2.73	5.76	815.2	1 034.7	−0.933



a.TiO_2-(Na_2O+K_2O)判别图；b.年龄-$\varepsilon Hf(t)$图解；c.$(Th/Nb)_{PM}$-Nb/La 图解；d.$(La/Nb)_{PM}$-$(Th/Ta)_{PM}$ 图解

图7 红柳沟辉长岩岩石成因和岩浆源区判别图

Fig. 7 The discriminant diagrams of the rock formation and magma source from the Hongliugou gabbro

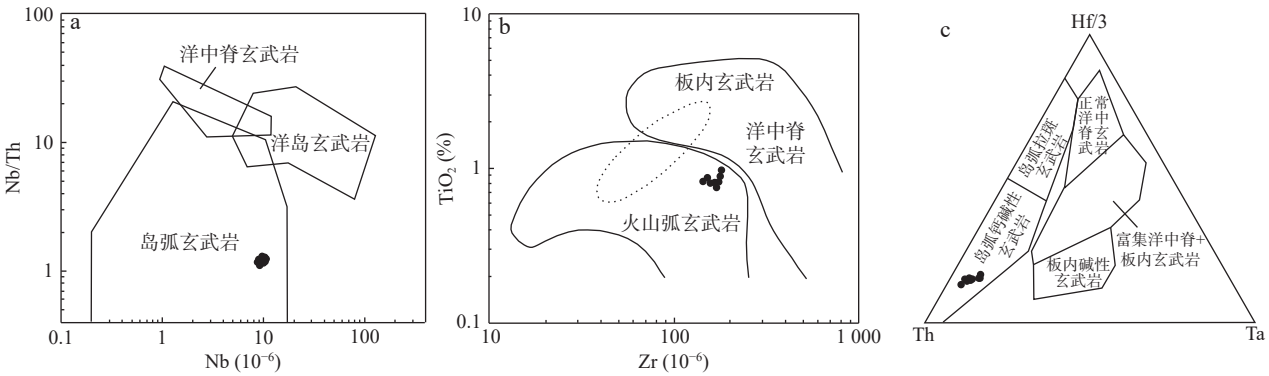
元素可以判断岩浆源区的性质，源于软流圈地幔的玄武岩 La/Nb ＜1.5，La/Ta ＜22，而源于岩石圈地幔的玄武岩与之相反(Huang et al., 2000)。文中辉长岩 La/Nb=4.7～4.97，平均为 4.86，均大于 1.5，La/Ta=46.78～99.12，平均为 72.58，均大于 22，指示红柳沟辉长岩岩浆源区为岩石圈地幔。笔者通过对红柳沟辉长岩 19 颗锆石 Lu-Hf 同位素分析，$^{176}Hf/^{177}Hf$ 初始值介于 0.282 491～0.282 788，$\varepsilon Hf(t)$ 的变化范围为−27～8.75，平均值为 3.30(＞0)，$\varepsilon Hf(t)$-年龄图解(图 7b)中红柳沟辉长岩全部落入地壳和亏损地幔演化线之间范围，因此表明红柳沟辉长岩岩浆源区可能来自受到地壳混染的亏损地幔。

前人研究提出$(Th/Nb)_{PM}$值和 Nb/La 值是判断岩石形成过程中是否受到地壳物质混染的两个重要指标，若$(Th/Nb)_{PM}$远大于 1，Nb/La ＜1，则说明基性岩形成过程中有地壳物质加入。红柳沟辉长岩$(Th/Nb)_{PM}$的范围为 6.62～7.49，Nb/La 的范围为 0.20～0.21；在$(Th/Nb)_{PM}$-Nb/La 的图解中(图 7c)，红柳沟辉长岩落在遭受地壳混染的区域内，显示岩浆在上升的过程中受到地壳的污染；在$(Th/Nb)_{PM}$-$(Th/Ta)_{PM}$图解(图 7d)中显示红柳沟辉长岩均落入上地壳区域内，表明红柳沟辉长岩在形成过程中原始岩浆受到上地壳的污染。

综上所述，红柳沟辉长岩岩浆可能来自岩石圈地幔的部分熔融，源区为碳酸盐化地幔橄榄岩混合物，并在上升过程中与地壳物质发生同化混染。

5.2 构造地质背景

一般来说，玄武质岩浆用来探讨构造环境是相对可靠的，因为玄武质岩浆具有独特的地球化学特征和特定的构造环境，文中红柳沟辉长岩总体显示轻稀土元素较重稀土元素相对富集以及 Ta、Nb、Ti 等元素明显的负异常，说明红柳沟辉长岩可能与弧环境相关的岩浆作用的产物密切相关。通常利用 Zr 与 Y 元素可以有效判别大陆弧与洋内弧玄武质岩浆，红柳沟辉长岩的 Zr/Y 值介于 6.5～7.86，为典型的大陆弧(Zr/Y＞3)；Nb/Th- Nb 图解(图 8a)与 Hf/3-Th-Ta 图解(图 8c)均显示红柳沟辉长岩样品均为岛弧质玄武岩；



a. Nb-Nb/Th 判别图；b. Zr-TiO_2 判别图；c. Th-Ta-Hf/3 图解

图8　红柳沟辉长岩构造环境判别图

Fig. 8　Discriminant diagrams of the tectonic environment from the Hongliugou gabbro

TiO_2-Zr 图解(图 8b)显示红柳沟辉长岩为火山弧玄武岩。综上所述,红柳沟辉长岩形成于与大陆岛弧相关的俯冲背景。

6　结论

(1)红柳沟辉长岩体为钙碱性辉长岩,锆石 U-Pb 获得的年龄为(410.4±2.3)Ma,补充了南天山构造带早古生代基性岩浆活动的地球化学和年代学证据。

(2)红柳沟辉长岩为富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素,亏损 Ta、Nb、Ti 等高场强元素的活动陆缘弧基性侵入岩,具负的和正的 $\varepsilon Hf(t)$,为亏损地幔的部分熔融在上升过程中受到地壳物质的混染。

(3)研究结果表明,早泥盆世南天山洋仍处于洋陆俯冲作用之下,南天山洋的闭合时间在早泥盆世之后。

参考文献(References):

鲍庆中, 王宏, 沙德铭, 等. 新疆和静县大山口金矿床成矿流体地球化学特征研究[J]. 西北地质, 2006, 36(2): 43−49.

BAO Qingzhong, WANG Hong, SHA Deming, et al. Study on the geochemical characteristics of ore-forming fluid inclusion of Dashankou gold deposit in Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2006, 36(2): 43−49.

董丰新, 薛春纪, 石福品. 新疆西天山大山口金矿地质及成矿流体包裹体地球化学[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 172−181.

DONG Fengxin, XUE Chunji, SHI Fupin. Geological characteristics and the geochemistry of ore-forming fluid inclusions in Dashankou gold deposit, Western Tian Shan, Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 172−181.

郭春涛, 高剑, 李忠. 塔里木盆地西北缘四石厂地区下二叠统沉积与物源记录及其反映的构造演化[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4149−4168.

GUO Chuntao, GAO Jian, LI Zhong. Depositional and provenance records of Lower Permian sandstones from Sishichang area, northwestern Tarim Basin: implications for tectonic evolution [J]. Earth Science, 2018, 43(11): 4149−4168.

郭瑞清, 尼加提. 阿布都逊, 秦切, 等. 新疆塔里木北缘志留纪花岗岩类侵入岩的地质特征及构造意义[J]. 地质通报, 2013, 32(21): 220−238.

GUO Ruiqing, Nijiat. Abdursul, QIN Qie, et al. Geological characteristics and tectonic significance of sil-uriangranitic intrusions in the northern Tarim craton, Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(21): 220−238.

郭瑞清, 秦切, 邹明煜, 等. 新疆库鲁克塔格西段辉长岩脉年代学、岩石地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 70−81.

GUO Rinqing, QIN Qie, ZOU Mingyu, et al. Geochronology, petrogeochemical characteristics and tectonic significance of gabbro dike from western quruqtagh in xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 70−81.

刘传朋, 邓俊, 刘同, 等. 南天山东段乌祖尔恩布拉格花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2022, 68(4): 1481−1500.

LIU Chuanpeng, DENG Jun, LIU Tong, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics, and geological significance of the Wuzur' enbulage intrusion in the eastern section of South Tianshan Mountains[J]. Geological Review, 2022, 68(4): 1481−1500.

刘桂萍, 郭瑞清, 魏震, 等. 新疆库鲁克塔格地区古生代花岗质侵入岩全岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素地球化学特征及其意义[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 39−50.

LIU Guiping, GUO Ruiqing, WEI Zhen, et al. Geochemical Characteristics and Significance of the Whole Rock Sr Nd and Zircon Hf Isotopic in the Paleozoic Granite-plutons in Kuruktag, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 39−50.

龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等. 南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征

及其年龄[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 65−73.

LONG Lingli, GAO Jun, XIONG Xianming, et al. The geochemical characteristics and the age of the Kule Lake ophiolite in the Sourthern Tianshan[J]. Acta Petrological Sinica, 2006, 22(1): 65−73.

田亚洲, 杨经绥, 刘飞, 等. 新疆布鲁斯台辉长岩岩石学特征及对南天山洋俯冲时限的制约[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2363−2380.

TIAN Yazhou, YANG Jingsui, LIU Fei, et al. Petrological characteristics of Bulusitai gabbro and its constraint to the time of South Tianshan ocean subduction[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(8): 2363−2380.

魏强, 张成立, 何贤英, 等. 南天山巴音布鲁克花岗岩岩体成因: 锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素及其地球化学证据[J]. 地质学报, 2017, 91(7): 1443−1453.

WEI Qiang, ZHANG Chengli, HE Xianying, et al. Origin of Bayinbuluk Pluton in Southern Tianshan: Evidences from Zircon U-Pb dating, Hf isotope and geochemistry[J]. Acta Geological Sinica, 2017, 91(7): 1443−1453.

肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1062−1076.

XIAO Wenjiao, HAN Chunming, YUAN Chao, et al. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of North Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleoasian Domain[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5): 1062−1076.

杨莉, 陈文, 张斌, 等. 新疆额尔宾山花岗岩侵位年龄和成因及其对南天山洋闭合时代的限定[J]. 地质通报, 2016, 35(1): 152−166.

YANG Li, CHEN Wen, ZHANG Bin, et al. Ages and geochemistry of the Erbeng granite in southern Tianshan orogenic belt, Xinjiang: New constraints on the tectonic evolution of the southern Tianshan Ocean[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(1): 152−166.

于新慧, 秦切, 黄河, 等. 南天山盲起苏花岗岩体的成因及构造意义: 来自年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素证据[J]. 地质学报, 2020, 94(10): 2893−2918.

YU Xinhui, QIN Qie, HUANG He, et al. Genesis and tectonic significance of the Mangqisu pluton in the South Tianshan: evidence from geochronology, geochemistry, and Nd-Hf isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(10): 2893−2918.

张斌, 陈文, 喻顺, 等. 南天山洋古生代期间俯冲作用过程探讨[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2351−2362.

ZHANG Bin, CHEN Wen, YU Shun, et al. Subduction process of South Tianshan Ocean during Paleozoic[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(8): 2351−2362.

左国朝, 刘义科, 张招崇, 等. 中亚地区中、南天山造山带构造演化及成矿背景分析[J]. 现代地质, 2011, 25(1): 1−14.

ZUO Guochao, LIU Yike, ZHANG Zhaochong, et al. Tection evoliution of central and South Tianshan or ogenic belts in the central Asia and mineralization background[J]. Geoscience, 2011, 25(1): 1−14.

Chen B, Long X P, Yuan C, et al. Geochronology and geochemistry of Late Ordovician-Early Devonian gneissic granites in the Kumishi area, northern margin of the South Tianshan Belt: Constraints on subduction process of the South Tianshan Ocean[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113(1): 293−309.

Han Baofu, He Guoqi, Wu Tairan, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical fratures of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: Implications for tectonic evolution[J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(1): 4−11.

Huang Yiming, Hawkesworth Chris, Smith Ian, et al. Geochemistry of Late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandee New Zealand: implications for mantel enrichment processes[J]. Chemical Geology, 2000, 164(3−4): 219−238.

Xiao Wenjiao, Han Chunming, Yuan Chao, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(2−4): 102−117.

Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Tianfu, et al. U-Pb ages of zircons from ophiolite and related rocks In the Kumishi region at the southern margin of Middle Tianshan, Xinjiang: Evidence of Early Paleozoic oceanic basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 77−95.

Yang Shenghong, Zhou Meifu. Geochemistry of the-430 Ma Jingbulake mafic-ultramafic intrusion in Western Xinjiang, NW China: Implications for subduction related magmatism in The South Tianshan orogenic belt.[J]. Lithos, 2009, 113: 259−273.

Zhang Chengli, Zhou Dingwu, Wang Juli, et al. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic composition and genesis implications of Hangjianshishan granite Kumishi area of southern Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1821−1829.

Zhong Linglin, Wang Bo, Shu Liangshu, et al. Structural overprints of early Paleozoic arc-related intrusive rocks in the Chinese Central Tianshan: Implications for Paleozoic accretionary tectonics in SW Central Asian Orogenic Belts[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113(1): 194−217.