

西藏努林晚白垩世花岗闪长岩地球化学特征及成因

石洪召, 段志明, 李光明, 张林奎

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:南冈底斯晚白垩世岩浆岩的成因及地球动力学机制一直存在争议。本文对冈底斯南缘努林花岗闪长岩开展地球化学、锆石 U-Pb 年代学及同位素示踪研究。结果显示, 该岩体具有富 SiO_2 (66.62% ~ 67.81%)、高 Al_2O_3 (15.11% ~ 15.66%)、高 Sr ($>481 \times 10^{-6}$)、低 Y ($\leq 8.13 \times 10^{-6}$) 和低 Yb ($\leq 0.73 \times 10^{-6}$) 特征, Sr/Y 比值达 59 ~ 111, 显示埃达克岩的特征; 岩石轻稀土富集, 重稀土亏损, 具有显著的 Eu 正异常; 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素。($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.704011 ~ 0.704244, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +3.61 \sim +5.75$, 总体反映地幔源区的 Sr、Nd 同位素特征。锆石 U-Pb LA-ICP-MS 测年显示存在 83Ma 和 89Ma 两组年龄。结合地质及地球化学分析, 认为努林花岗闪长岩是新特提斯洋洋脊俯冲引起的镁铁质新生下地壳部分熔融的产物。

关键词:南冈底斯; 晚白垩世; 埃达克岩; 洋脊俯冲; 努林

中图分类号: P595

文献标识码: A

地质上, 冈底斯带一般指印度河-雅鲁藏布缝合带(IYZSZ)以北与班公湖-怒江缝合带(BNSZ)以南的近东西向、长约 2500km、南北宽 150 ~ 300km, 面积约 45 万平方千米的巨型构造-岩浆岩带(图 1a), 它记录了青藏高原从古特提斯至新特提斯以来的构造演化和印度-亚洲大陆碰撞造山作用等重要的地质信息^[1-3]。冈底斯带由北向南可分为北冈底斯(NG)、中冈底斯(MG)、冈底斯弧背断隆带(GRUB)和南冈底斯(SG)(图 1b)^[2]。已有研究表明, 南冈底斯晚白垩世岩浆作用强烈, 岩浆岩分布广泛, 构成了冈底斯岩浆弧的主体^[3], 其岩浆岩出露面积占冈底斯带总面积的 80% 以上, 岩浆岩形成时代可分为 205 ~ 152Ma、109 ~ 80Ma、65 ~ 41Ma 以及 33 ~ 13Ma 四个阶段^[4]。

对于南冈底斯晚白垩世岩浆岩的岩石成因及地球动力学机制存在许多争议, 前人提出若干模式, 如增厚下地壳部分熔融^[5-6]、新特提斯洋板片熔融^[7-8]、新特提斯洋平板俯冲或低角度俯冲^[5]、正常角度俯冲^[9]、板片回转^[8]以及洋脊俯冲^[6,10]等。鉴于此, 本文以冈底斯东段南缘乃东县努林地区出露的花岗闪长岩为研究对象, 对该花岗闪长岩体开展

岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd 同位素研究, 在此基础上探讨南冈底斯晚白垩世岩浆岩的岩石成因与动力学机制。

1 地质背景与样品

研究认为, 南冈底斯主要形成于中生代, 由岩浆底侵、岛弧侧向加积作用增生于拉萨地体而成^[11]。晚白垩世—古近纪, 南冈底斯经历了强烈的地壳缩短变形(缩短量 $>40\%$)^[12]。区域出露地层有三叠系查曲浦组(T_{1-2c})中酸性火山岩、碳酸盐岩及硅质岩; 姐德秀组(T_{3j})砂质板岩、中薄层状长石石英砂岩; 上侏罗统—下白垩统麻木下组(J_3-K_1m)钙碱性岛弧型火山岩夹碳酸盐岩、碎屑岩建造; 下白垩统比马组(K_1b)含煤碎屑岩、碳酸盐岩及岛弧钙碱性火山岩建造。岩浆活动强烈, 主体时代为早白垩世和中新世, 主要岩性有晚白垩世石英二长闪长岩、花岗闪长岩和始新世二长花岗岩、黑云母花岗岩、花岗闪长岩等(图 1c)。

努林地区位于南冈底斯东段南缘乃东县境内, 区内出露地层有白垩系下统比马组(K_1b)(变质)粉砂岩夹安山岩、流纹(斑)岩夹层、矽卡岩化粉砂岩;

收稿日期: 2020-03-10; 改回日期: 2020-05-19

作者简介: 石洪召(1983—), 女, 工程师, 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: shihongzhao@126.com

资助项目: 中国地质调查项目(编号: DD20190147)

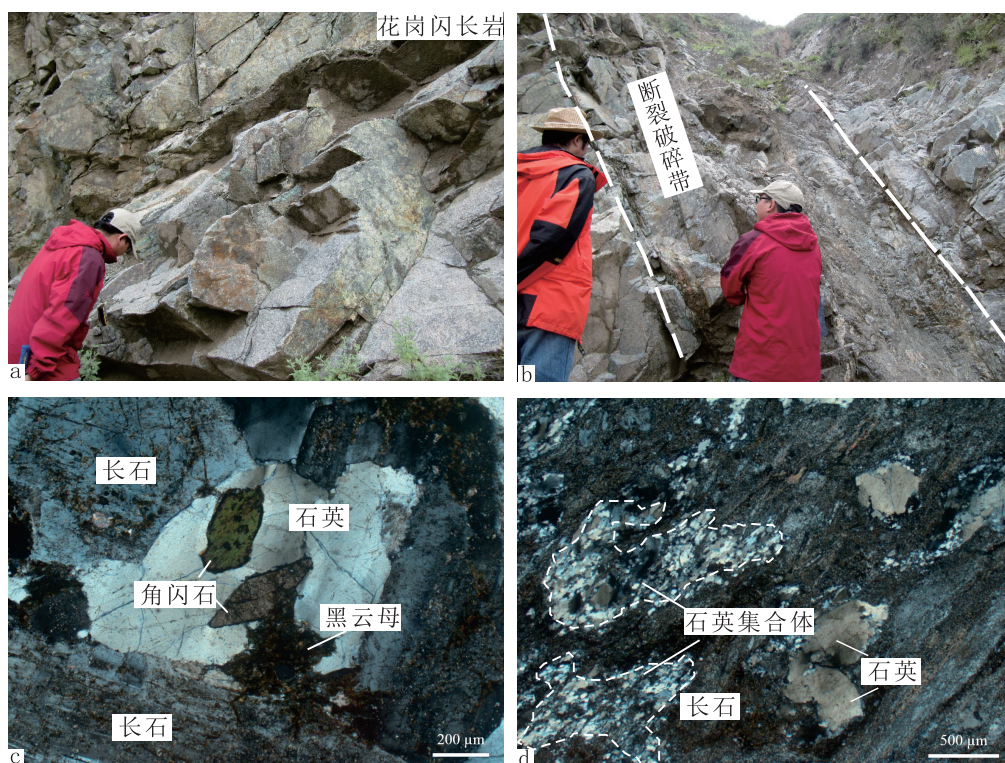


图2 努林花岗闪长岩野外及镜下显微照片

Fig. 2 Field photographs and microphotographs of granodiorite in Nulin

有 1.7ml Teflon 粉末的石英交换柱中完成。同位素比值测试在 MAT-262 热电离质谱计上完成。Sr 和 Nd 同位素比值测量精度优于 0.003%。详细的同位素分析流程参见 Chen et al.^[13]。

采集的 6 件岩石地球化学样品在自然资源部西南矿产资源监督检测中心完成全岩主量和微量元素分析,其中主量元素分析采用 X 荧光光谱仪测定,分析精度优于 2%;稀土和微量元素分析使用等离子质谱法测定,分析精度优于 5%。

3 分析结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

本次采集的花岗闪长岩样品锆石 U-Pb 同位素及年龄数据见表 1。花岗闪长岩样品锆石颗粒大多在 100 μm 以上,长宽比约 1:1 ~ 2:1,锆石晶形完整,为自形—半自形长柱状,样品 NLTW01 锆石 CL 图像色浅(图 3a),样品 NLTW02 中部分锆石 CL 图像色深(图 3b),且部分锆石具有黑色蚀变边,样品震荡环带清晰。所有测点 Th/U 比值介于 0.5 ~ 1 之间,表明属岩浆成因锆石。

对采自远离构造破碎带的花岗闪长岩样品(NLTW01)的 28 颗锆石进行了测试,结果显示,除 2

个点偏离谐和线予以剔除外,其余 26 个点全部落在谐和线上,26 个测点获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄在 88Ma ~ 92Ma 之间,加权平均年龄为 $89.6 \pm 0.61\text{Ma}$ ($n = 26$, MSWD = 0.55) (图 3a)。采自北东向断裂破碎带内的 NLTW02 样品,锆石加权平均年龄明显分为两组,其中一组加权平均年龄为 $89.6 \pm 0.64\text{Ma}$ ($n = 26$, MSWD = 0.38),与样品 NLTW01 所获得年龄一致;另一组加权平均年龄为 $83.5 \pm 1.1\text{Ma}$ ($n = 7$, MSWD = 0.27) (图 3b)。

3.2 岩石地球化学

努林地区花岗闪长岩样品的主量、微量和稀土元素分析结果见表 2。样品烧失量较低(0.76% ~ 1.29%),反映样品遭受风化蚀变改造较弱。将所测样品的主量元素含量及相关特征参数扣除烧失量后进行 100% 归一化,结果显示:样品 SiO₂ 含量为 66.59% ~ 67.81%, Al₂O₃ 变化范围为 15.11% ~ 15.66%, TiO₂ 含量较低(0.46% ~ 0.53%), MgO 含量也较低(1.71% ~ 2.09%),但 Mg[#] 较高(47.97 ~ 55.58), Na₂O/K₂O 比值介于 0.83 ~ 1.79 之间,显示该花岗闪长岩具有高硅、高铝的特点。在 TAS 图解中样品落入花岗闪长岩区域(图 4a);属于高钾钙碱性—钾玄岩系列(图 4b)。

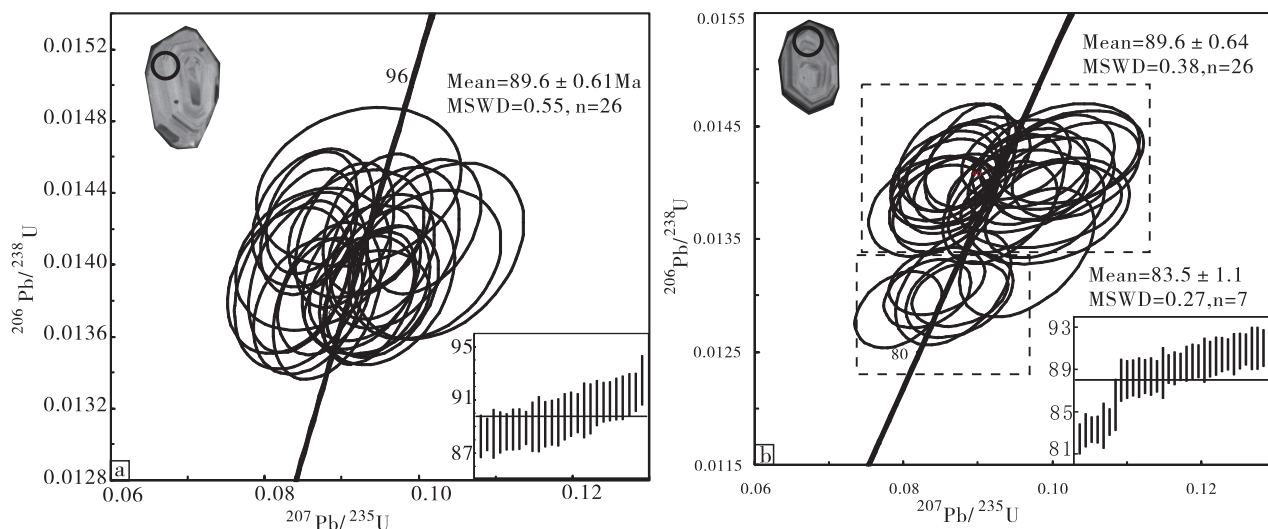
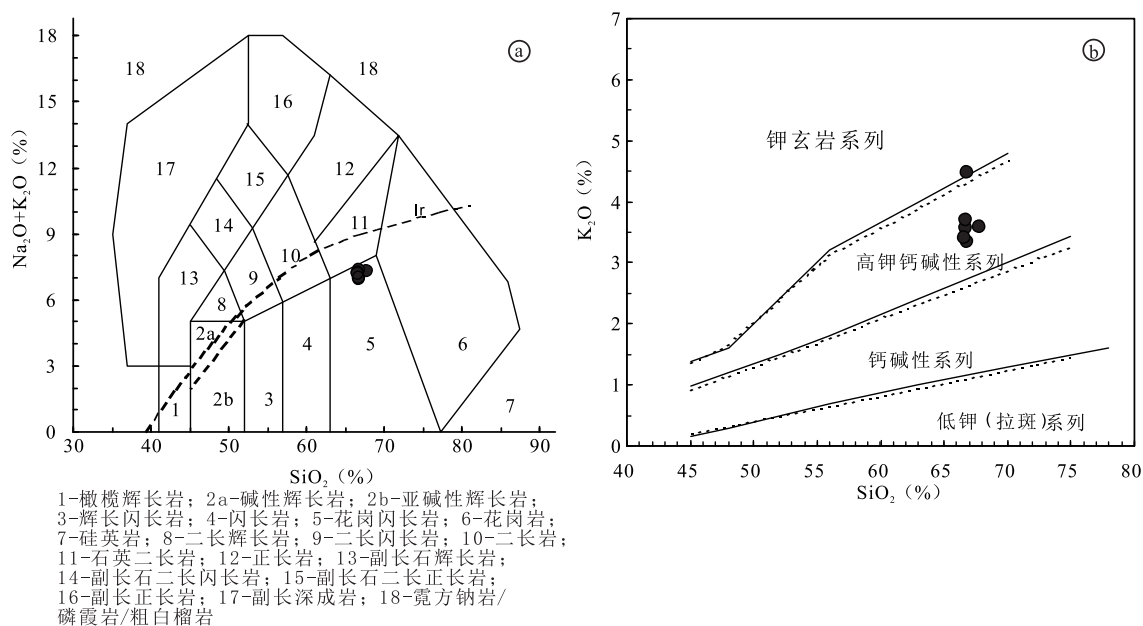


图3 努林花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram of granodiorite Nulin

图4 岩石 TAS 图解(底图据 Middlemost^[14])和 K₂O-SiO₂ 图解(据 Le Maitre^[15])Fig. 4 TAS classification(after Middlemost,1994)and K₂O-SiO₂ diagrams(after Le Maitre,2002)of granodiorite in Nulin

努林花岗闪长岩样品稀土元素特征为:稀土总量较低(ΣREE 为 $107.74 \times 10^{-6} \sim 126.81 \times 10^{-6}$),强烈富集轻稀土,严重亏损重稀土,轻重稀土分馏明显($(\text{La}/\text{Yb})_N = 23.46 \sim 29.16$),且中稀土和重稀土配分模式相对平坦,具有明显的正 Eu 异常($\delta \text{Eu} = 1.22 \sim 1.35$)(图 5a)。

微量元素组成上,努林花岗闪长岩富集大离子亲石元素,亏损高场强元素;Nb 和 Ta 元素显示负异常,Zr 和 Hf 元素几乎无异常(图 5b);高 Sr($481 \times$

$10^{-6} \sim 894 \times 10^{-6}$),低 Y($7.63 \times 10^{-6} \sim 8.13 \times 10^{-6}$)和低 Yb($0.67 \times 10^{-6} \sim 0.73 \times 10^{-6}$)。

3.3 Sr、Nd 同位素

努林花岗闪长岩 Sr、Nd 同位素变化范围较小(表 2), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在 $0.704409 \sim 0.705517$ 之间, $I_{(\text{Sr})}$ 为 $0.704011 \sim 0.704244$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 $0.512767 \sim 0.512904$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化在 $+3.61 \sim +5.75$ 之间,总体反映地幔源区的 Nd、Sr 同位素特征。

表 1 努林地区花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope dating results of the granodiorite in Nulin

测点号	含量(×10 ⁻⁶)				Th/U				同位素比值				年龄(Ma)				谐和度	
	Pb	Th	U		±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	(%)
花岗闪长岩 样号 NLTW01																		
2	12.1	285	377	0.76	0.0507	0.043	0.1008	0.0065	0.0140	0.0003	0.0003	0.0140	0.0003	97	6	89	1.7	91
20	15.1	241	302	0.80	0.0431	0.0034	0.0857	0.0046	0.0137	0.0002	0.0002	0.0137	0.0002	83	4	88	1.5	94
28	21.4	339	419	0.81	0.0470	0.0032	0.0933	0.0053	0.0137	0.0001	0.0001	0.0137	0.0001	90	4	88	1.2	97
11	9.9	157	250	0.63	0.0390	0.0035	0.0881	0.0046	0.0137	0.0002	0.0002	0.0137	0.0002	85	4	88	1.8	97
24	10.5	169	231	0.73	0.0423	0.0030	0.0937	0.0045	0.0040	0.0138	0.0138	0.0040	0.0138	90	3	89	1.5	97
26	14.7	233	325	0.72	0.0367	0.0028	0.0878	0.0040	0.0138	0.0002	0.0002	0.0138	0.0002	85	4	89	1.4	96
16	12.3	191	271	0.70	0.0384	0.0036	0.0953	0.0048	0.0138	0.0002	0.0002	0.0138	0.0002	92	4	89	1.5	95
27	13.1	208	286	0.73	0.0445	0.0031	0.0947	0.0045	0.0139	0.0002	0.0002	0.0139	0.0002	92	4	89	1.5	96
6	22.8	406	406	1.00	0.0442	0.0029	0.0927	0.0045	0.0139	0.0002	0.0002	0.0139	0.0002	90	4	89	1.2	98
15	7.1	105	191	0.55	0.0370	0.0042	0.0960	0.0058	0.0139	0.0003	0.0003	0.0139	0.0003	93	5	89	1.9	95
12	11.5	160	270	0.59	0.0365	0.0040	0.0848	0.0057	0.0139	0.0003	0.0003	0.0139	0.0003	83	5	89	2.1	92
22	12.0	169	264	0.64	0.0357	0.0035	0.0831	0.0052	0.0139	0.0003	0.0003	0.0139	0.0003	81	5	89	1.7	90
7	13.6	218	296	0.74	0.0431	0.0034	0.0926	0.0051	0.0139	0.0003	0.0003	0.0139	0.0003	90	5	89	1.7	99
21	12.3	180	249	0.72	0.0393	0.0034	0.0847	0.0045	0.0139	0.0003	0.0003	0.0139	0.0003	83	4	89	1.8	92
4	12.7	199	285	0.70	0.0371	0.0037	0.0864	0.0067	0.0140	0.0003	0.0003	0.0140	0.0003	84	6	90	1.7	93
8	16.1	256	349	0.73	0.0430	0.0032	0.0954	0.0044	0.0140	0.0002	0.0002	0.0140	0.0002	93	4	90	1.5	97
5	11.9	165	248	0.67	0.0483	0.0043	0.1026	0.0073	0.0141	0.0003	0.0003	0.0141	0.0003	99	7	90	2.1	90
13	9.7	141	228	0.62	0.0426	0.0042	0.0967	0.0057	0.0141	0.0003	0.0003	0.0141	0.0003	94	5	90	1.9	96
19	14.8	226	306	0.74	0.0401	0.0031	0.0904	0.0042	0.0142	0.0003	0.0003	0.0142	0.0003	88	4	91	1.7	96
3	16.3	251	329	0.76	0.0429	0.0038	0.0919	0.0058	0.0142	0.0002	0.0002	0.0142	0.0002	89	5	91	1.5	98
9	13.2	217	315	0.69	0.0389	0.0030	0.0858	0.0041	0.0142	0.0002	0.0002	0.0142	0.0002	84	4	91	1.5	91
23	9.1	158	213	0.74	0.0389	0.0033	0.1008	0.0049	0.0142	0.0002	0.0002	0.0142	0.0002	97	5	91	1.6	93
17	12.7	209	288	0.73	0.0419	0.0031	0.0947	0.0047	0.0142	0.0003	0.0003	0.0142	0.0003	92	4	91	1.6	99
18	18.3	268	317	0.85	0.0400	0.0033	0.0863	0.0052	0.0143	0.0003	0.0003	0.0143	0.0003	84	5	91	1.6	91
25	13.8	246	282	0.87	0.0302	0.0029	0.0862	0.0039	0.0143	0.0002	0.0002	0.0143	0.0002	84	4	91	1.4	91
10	13.8	208	253	0.82	0.0383	0.0047	0.0923	0.0088	0.0144	0.0003	0.0003	0.0144	0.0003	90	8	92	1.9	96
花岗闪长岩 NLTW02																		
7	11.4	203	267	0.76	0.0347	0.0029	0.0792	0.0038	0.0128	0.0002	0.0002	0.0128	0.0002	77	3	82	1.4	93

续表 1

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)				Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)				谐和度 (%)
	Pb	Th	U			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
10	12.7	184	333		0.55	0.0454	0.0038	0.0874	0.0047	0.0130	0.0002	85	4	83
9	24.1	442	446		0.99	0.0473	0.0030	0.0875	0.0042	0.0130	0.0001	85	3	83
3	12.0	195	273		0.71	0.0343	0.0029	0.0831	0.0038	0.0130	0.0001	81	3	83
21	11.5	192	292		0.66	0.0441	0.0044	0.0866	0.0051	0.0130	0.0003	84	4	83
8	22.7	392	414		0.95	0.0443	0.0031	0.0844	0.0042	0.0131	0.0001	82	3	84
13	12.2	147	218		0.67	0.0498	0.0053	0.0965	0.0059	0.0134	0.0003	93	5	85
4	10.6	136	224		0.61	0.0416	0.0045	0.0995	0.0072	0.0137	0.0003	96	6	88
24	16.8	260	297		0.88	0.0418	0.0042	0.0989	0.0052	0.0137	0.0002	95	4	88
31	17.9	277	327		0.85	0.0481	0.0037	0.0932	0.0048	0.0137	0.0002	90	4	88
15	13.5	192	291		0.66	0.0326	0.0037	0.0836	0.0055	0.0137	0.0002	81	5	88
34	14.6	210	258		0.81	0.0426	0.0041	0.098	0.0071	0.0138	0.0002	95	6	88
1	12.4	205	241		0.85	0.0373	0.0031	0.0854	0.0045	0.0138	0.0002	83	4	88
23	19.3	316	349		0.91	0.0395	0.0029	0.0845	0.0043	0.0138	0.0002	82	4	88
22	7.8	125	212		0.59	0.0379	0.0050	0.0933	0.0053	0.0138	0.0003	90	4	88
11	19.6	341	373		0.91	0.0429	0.0030	0.0854	0.0047	0.0139	0.0002	83	4	89
35	19.6	291	345		0.84	0.0502	0.0039	0.0952	0.0061	0.0139	0.0002	92	5	89
5	50.9	812	765		1.06	0.0472	0.0025	0.0875	0.0040	0.0139	0.0002	85	3	89
28	12.3	201	296		0.68	0.0368	0.0032	0.0853	0.0047	0.0139	0.0002	83	4	89
18	13.7	232	310		0.75	0.0400	0.0038	0.0967	0.0053	0.0140	0.0002	93	4	89
30	16.4	278	365		0.76	0.0475	0.0039	0.1002	0.0053	0.0140	0.0002	96	4	89
6	7.5	121	191		0.63	0.0346	0.0035	0.0871	0.0050	0.0140	0.0003	84	4	89
2	12.1	206	286		0.72	0.0363	0.0031	0.0854	0.0047	0.0140	0.0002	83	4	90
32	11.3	171	277		0.62	0.0465	0.0039	0.1031	0.0056	0.0141	0.0002	99	5	90
19	12.8	202	298		0.68	0.0370	0.0031	0.0867	0.0042	0.0141	0.0002	84	3	90
27	13.5	188	320		0.59	0.0479	0.0035	0.0970	0.0052	0.0141	0.0002	94	4	90
14	9.6	151	234		0.65	0.0415	0.0039	0.1000	0.0054	0.0141	0.0003	96	5	90
33	11.8	175	262		0.67	0.0413	0.0033	0.0898	0.0046	0.0141	0.0002	87	4	90
25	18.2	309	402		0.77	0.0473	0.0032	0.0950	0.0048	0.0142	0.0002	92	4	90
20	10.3	147	273		0.54	0.0404	0.0038	0.0872	0.0052	0.0142	0.0003	84	4	91
12	12.9	137	216		0.63	0.0259	0.0032	0.0884	0.0037	0.0142	0.0003	86	3	91
29	11.2	172	276		0.62	0.0495	0.0040	0.1023	0.0065	0.0142	0.0002	98	6	91
16	19.3	274	324		0.85	0.0407	0.0050	0.1009	0.0070	0.0142	0.0003	97	6	91

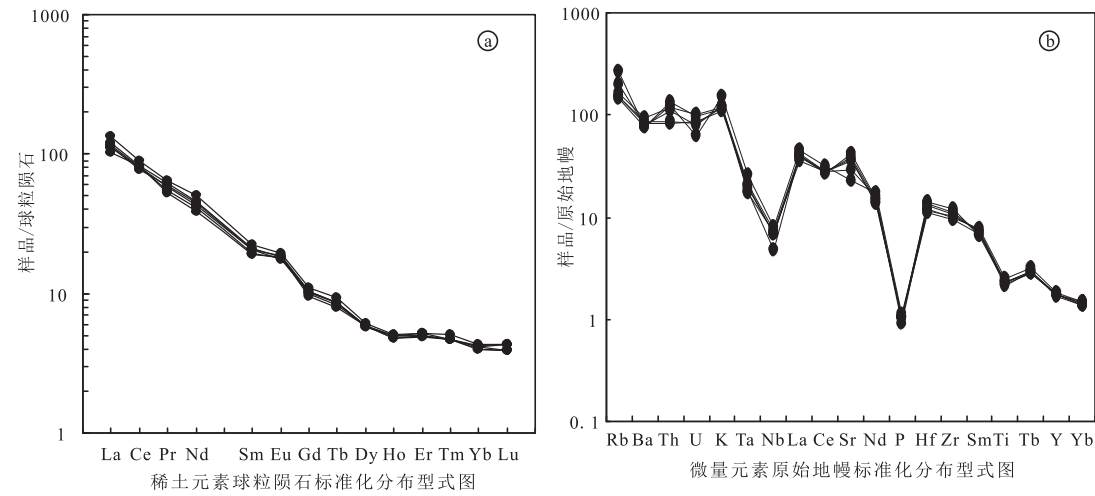


图5 努林花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化分配模式(a, 标准化值据 Sun and McDonough^[16])和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, 标准化值据 Taylor and McLennan^[17])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for granodiorite in Nulin

表2 努林花岗闪长岩元素地球化学组成(主量元素;wt%;稀土和微量元素: $\times 10^{-6}$)

样品号	NL01	NL02	NL03	NL04	NL05	NL06
SiO ₂	67.61	66.35	66.61	66.43	66.44	66.49
TiO ₂	0.46	0.50	0.53	0.48	0.50	0.50
Al ₂ O ₃	15.06	15.49	15.61	15.07	15.21	15.41
FeO	1.24	1.42	2.02	1.46	1.32	1.62
Fe ₂ O ₃	1.84	2.03	1.22	2.03	2.16	1.77
MnO	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
MgO	2.00	1.85	1.96	1.70	2.08	1.86
CaO	3.00	3.32	3.69	3.72	3.76	3.62
Na ₂ O	3.73	4.01	2.49	3.66	3.78	3.30
K ₂ O	3.57	3.33	4.46	3.56	3.40	3.69
P ₂ O ₅	0.20	0.22	0.24	0.22	0.22	0.22
LOI	0.94	0.76	0.79	1.29	0.80	1.17
Total	99.70	99.33	99.68	99.67	99.72	99.71
Cr	42.2	50.3	43.5	40.6	46.0	44.5
Co	8.95	9.61	8.72	9.55	8.09	8.76
Ni	21.9	21.7	19.6	22.2	21.4	21.7
Cd	904	533	87.5	124	192	136
Li	14.6	10.7	18.3	9.8	13.6	17.8
Rb	104	96	166	94.2	90.9	125
Cs	5.44	5.05	13.4	2.85	4.88	7.82
As	1.02	1.50	0.63	1.14	1.30	0.88
Sb	0.56	0.07	0.76	0.74	0.61	0.75
Bi	0.04	0.07	0.12	0.05	0.41	0.14
Sr	894	762	481	766	812	613
Ba	643	566	529	592	538	549
V	84.1	90.3	102	92.2	95.8	90.7

续表 2

样品号	NL01	NL02	NL03	NL04	NL05	NL06
Sc	7.93	7.99	9.52	8.14	8.50	8.32
Nb	5.17	4.84	5.68	5.08	4.93	3.44
Ta	0.54	0.49	0.65	0.44	0.51	0.45
Zr	118	104	109	136	122	113
Hf	4.00	3.47	3.65	4.41	4.12	3.56
Be	1.15	1.36	1.44	1.25	1.32	1.09
U	2.16	1.80	1.31	1.75	2.04	1.69
Th	9.93	6.95	10.3	7.26	11.2	9.13
La	27.2	26.2	31.5	24.3	27.6	28.7
Ce	47.6	48.8	54.9	50.5	48.9	50.0
Pr	5.65	5.25	6.17	5.01	5.55	5.89
Nd	20.8	19.3	23.4	18.2	20.0	21.2
Sm	3.16	2.98	3.44	2.94	3.13	3.24
Eu	1.08	1.03	1.12	1.06	1.02	1.05
Gd	2.12	2.05	2.27	1.95	2.07	2.13
Tb	0.32	0.31	0.35	0.30	0.32	0.32
Dy	1.47	1.48	1.54	1.48	1.48	1.49
Ho	0.28	0.27	0.29	0.27	0.28	0.28
Er	0.82	0.83	0.86	0.80	0.83	0.85
Tm	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12
Yb	0.68	0.71	0.73	0.70	0.72	0.67
Lu	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10
Y	8.04	7.88	8.13	7.84	7.82	7.63
Mg#	55.2	50.4	52.8	48.0	53.2	50.8
Na ₂ O/K ₂ O	0.96	0.83	1.79	0.97	0.90	1.12
Sr/Y	111	96.7	59.2	97.7	103	80.3
La/Yb	40.0	36.9	43.2	34.7	38.3	42.8
Eu/Eu *	1.28	1.27	1.22	1.35	1.22	1.22
(La/Yb) _N	27.0	24.9	29.2	23.5	25.9	28.9
(Ho/Yb) _N	1.24	1.14	1.19	1.16	1.17	1.26
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.704440	0.704512	0.705517	0.704457	0.704409	0.704851
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512871	0.512789	0.512829	0.512904	0.512767	0.512787
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.704011	0.704047	0.704244	0.704035	0.704024	0.704151
ε _{Nd} (t)	5.75	4.13	4.96	6.25	3.61	4.02

4 讨论

4.1 岩浆岩时空分布特征

孙渺等(2018)^[18]研究提出在 90 ~ 80Ma 之间,班公湖-怒江缝合带南侧(北冈底斯)发生过一期近东西向展布的大规模岩浆活动。朱弟成等(2009)^[11]提出中冈底斯带在 110Ma 左右发生了岩浆大爆发。高精度锆石 U-Pb 测年表明,在 90 ~ 79Ma 之间,南冈底斯从东部的米林、里龙到中西部的曲水、日喀则,发生了大规模平行于雅鲁藏布江缝合带的带状岩浆活动^[6-8,18]。本次对冈底斯南缘

努林地区出露的花岗闪长岩进行锆石 U-Pb 定年,获得了 89Ma 和 83Ma 两组年龄,表明该花岗闪长岩也属于南冈底斯 90 ~ 79Ma 之间岩浆活动的产物。

4.2 努林花岗闪长岩岩石成因

努林花岗闪长岩具有高 SiO₂ (66.59% ~ 67.81%),高 Al₂O₃ (15.11% ~ 15.66%),MgO < 3%,低 Y (< 9 × 10⁻⁶) 和低 Yb (< 1 × 10⁻⁶),高 Sr 含量(481 × 10⁻⁶ ~ 894 × 10⁻⁶),富集轻稀土元素,亏损重稀土和高场强元素的地球化学特征。在 Ta-Yb 图解中,样品点全部落入 VAG 范围内(图 6a),在 Sr/Y-Y 图解中落入埃达克岩范围内(图 6b)。

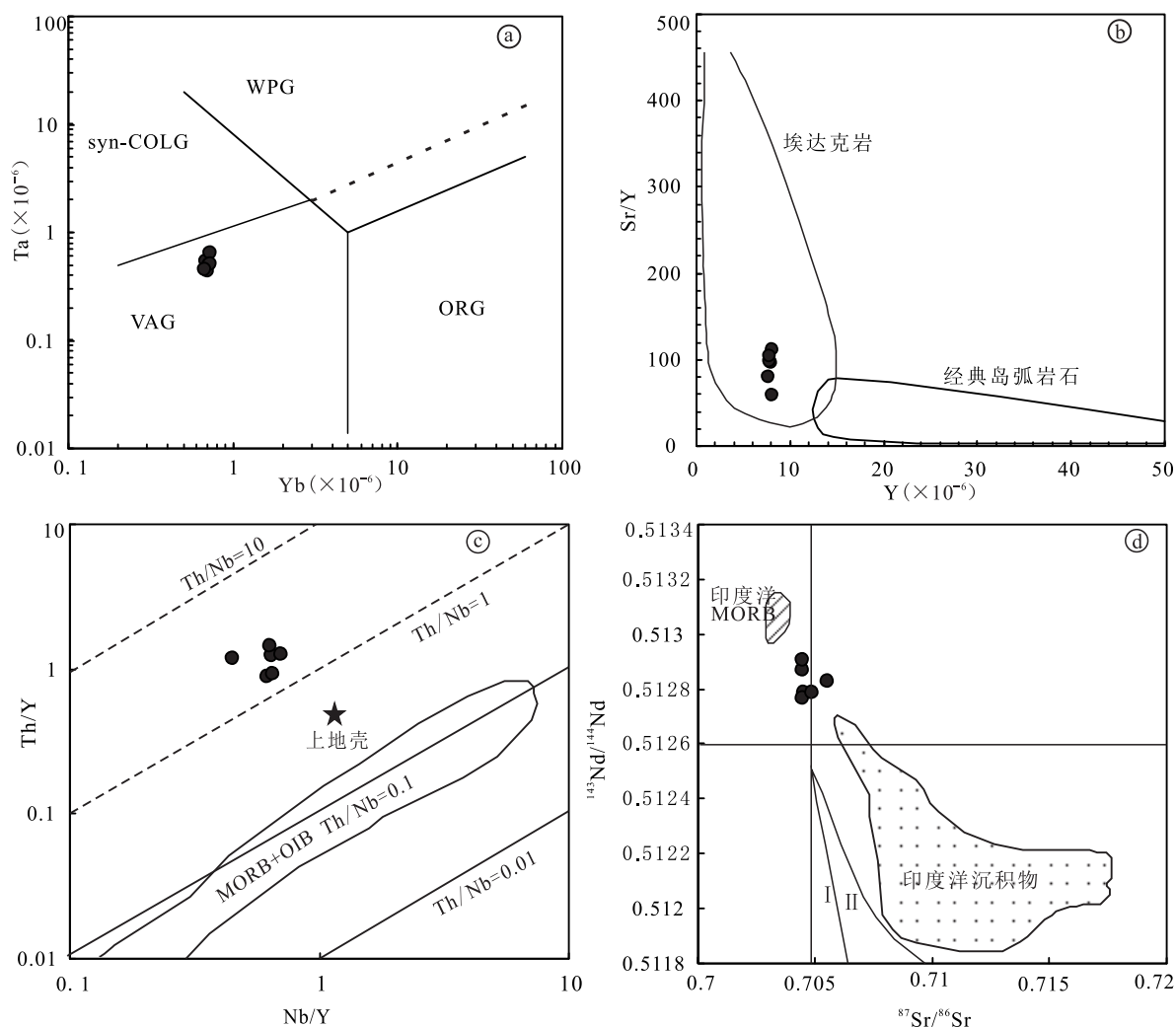


图6 努林花岗闪长岩成因判别图解

(a) Ta-Yb 图解据 Pearce et al., 1984^[19]; (b) Sr/Y-Y 图解据 Defant and Drummond, 1990^[20]; (c) Th/Y-Nb/Y 图解据 Boztuğ et al., 2007^[21]; (d) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解据曲晓明等, 2007^[22]

Fig. 6 Tectonic setting classifying diagrams for granite-diorite rocks in Nulin

当前研究普遍认为南冈底斯出露的高 Sr/Y 值的岩浆岩均与新特提斯洋北向俯冲有关,但对白垩纪高 Sr/Y 值岩浆作用的成因仍存在争议,学者们总结了多种模式:俯冲洋壳板片部分熔融^[8,23]、下地壳部分熔融^[5,6]、幔源玄武质岩浆结晶分异作用^[24]等。

在 La/Yb-La 图解中,努林花岗闪长岩显示岩石形成与部分熔融作用有关,结合研究区范围内未发现同时期大面积出露的超镁铁质岩或玄武岩,因此可排除由幔源玄武质岩浆结晶分异作用形成。岩石 Y/Nb 值介于 1.43 ~ 2.22 之间,大于 1.2,属壳源岩石部分熔融成因^[25];Nb/Ta 比值介于 7.6 ~ 11.5 之间,接近大陆地壳 Nb/Ta 值(11 ~ 14)^[17];K₂O 含量在 3.33% ~ 4.46%,高于板片熔融形成的埃达克

岩 K₂O 含量(1.72%)^[26],而与下地壳部分熔融形成的埃达克岩 K₂O 含量(2.9% ~ 4.1%)^[27]相近;结合其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.61 ~ +5.75),可排除由俯冲洋壳板片部分熔融形成。此外,浅部地壳部分熔融形成的岩石 Sr 含量和 Sr/Y 比值均较低^[28],努林花岗闪长岩具有高 Sr 含量(481×10^{-6} ~ 894×10^{-6})和高 Sr/Y 比值(59 ~ 111),据此判定其可能来自深部地壳的部分熔融,Th/Y-Nb/Y 图解中显示努林花岗闪长岩成岩物质来源于下地壳(图 6c)。努林花岗闪长岩 MgO 含量较低(<2.08%),也指示其形成可能与地壳熔融有关。但下地壳部分熔融形成的熔体一般 $\text{Mg}^\# < 40$ ^[29],而努林花岗闪长岩 $\text{Mg}^\#$ 较高(47 ~ 55),结合岩石具有高 Cr(40.61×10^{-6} ~ $50.31 \times$

10^{-6}) 及 Ni ($19.61 \times 10^{-6} \sim 22.21 \times 10^{-6}$) 含量, 推断其原岩可能混有幔源物质的加入; 岩石 Th/Yb 比值介于 9.8 ~ 15.6 之间, 指示其源区可能有沉积物的贡献。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解指示其源区介于印度洋 MORB 和印度洋沉积物之间(图 6d)。所测岩石样品均显示明显的 Eu 正异常 ($\delta\text{Eu} = 1.22 \sim 1.35$)

和中稀土亏损特征, 该特征可能是镁铁质下地壳物质在角闪岩相条件下发生部分熔融的结果^[30]。综上, 本文推断努林花岗岩闪长岩可能为镁铁质下地壳的部分熔融, 同时有地幔物质的加入。

4.3 地球动力学机制

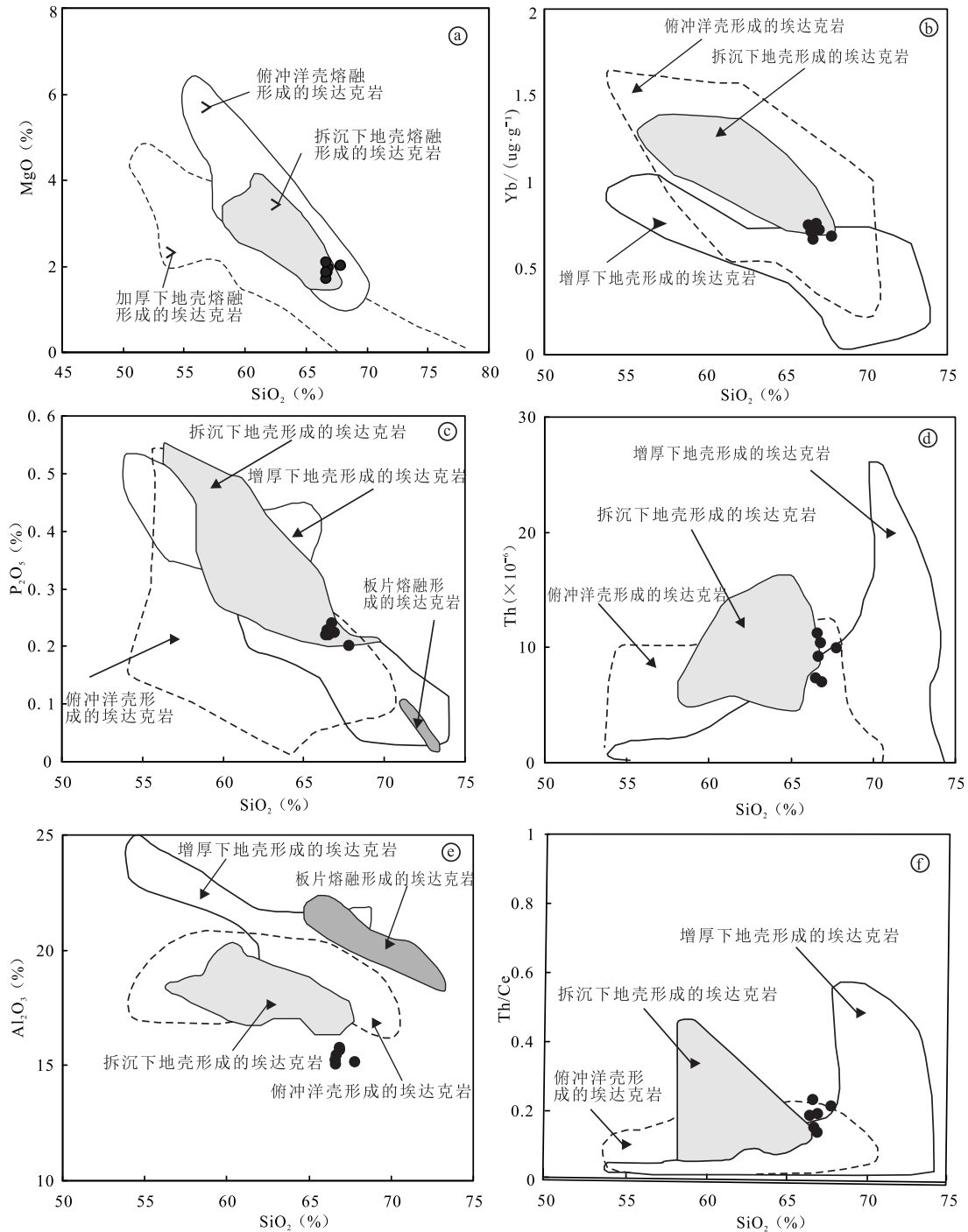


图 7 努林埃达克质岩成因判别图(底图据赵珍等^[31])

Fig. 7 Discrimination diagrams for the adakitic rocks in Nulin(After Zhao Zhen et al. ,2013)

关于冈底斯晚白垩世(100~85Ma)岩浆活动事件,前人提出了新特提斯洋板片回转^[8]、洋脊俯冲^[6,10]、拆沉作用^[32]等多个模型。

根据本次获得的地球化学数据,努林花岗闪长岩在 MgO-SiO_2 、 Yb-SiO_2 和 $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ 判别图解中落入俯冲洋壳与拆沉下地壳熔融形成的埃达克岩范围重叠区域(图 7a、b、c);在 Th-SiO_2 图解中落在俯冲洋壳、拆沉下地壳及增厚下地壳边界或重叠区域(图 7d);在 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 图解中落在拆沉下地壳与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩范围外,但靠近俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩范围(图 7e);在 Th/Ce-SiO_2 图解中,样品落入俯冲洋壳及拆沉下地壳边界及重叠区域(图 7f)。

拆沉下地壳熔融主要发生在板内伸展背景^[33], 83~89Ma,新特提斯洋仍处于俯冲阶段,因此可排除下地壳拆沉的动力学背景。板片回转模式下会导致拉萨地块由北向南火成岩年龄逐渐变新,然而冈底斯岩浆岩年龄并未显示这种趋势^[23]。而在洋脊俯冲动力学背景下,穿过板片窗的高热流向上运移,促使镁铁质下地壳岩石以及少量俯冲沉积物发生部分熔融,因此,本文认为洋脊俯冲模式是南冈底斯晚白垩世大规模带状岩浆作用的一种可能机制。

5 结论

(1) 西藏努林地区花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 89~83Ma,指示岩浆活动形成于晚白垩世早期。

(2) 西藏努林花岗闪长岩具有埃达克质岩石地球化学特征,Cr、Ni 含量和 $\text{Mg}^\#$ 较高,同时具有相对高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.61~+5.75),指示它们很可能是铁镁质下地壳在含水角闪岩相条件下发生部分熔融的产物。

(3) 南冈底斯晚白垩世带状岩浆活动可能与新特提斯洋洋脊俯冲有关。

致谢:野外工作中得到中国冶金总局第二地质勘查院西藏分院李秋平教授级高级工程师和张凯工程师的支持与帮助;成都地质调查中心曹华文博士在数据处理过程中也给予了诸多帮助,在此一并表示诚挚的感谢!同时感谢评审专家和编辑部老师提出的宝贵修改意见!

参考文献:

- [1] 莫宣学,董国臣,赵志丹,等. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报,2005,11(3): 281-290.
- [2] 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报,2006,22(3):521-533.
- [3] 朱弟成,潘桂棠,王立全,等. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. 地质通报,2008,27(9):1535-1550.
- [4] 纪伟强,吴福元,钟孙霖,等. 西藏南部冈底斯带基岩时代与岩石成因[J]. 2009. 中国科学(D辑),39(7):849-871.
- [5] Wen DR, Liu DY, Chung S L, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese batholith and implications for Neo-Tethyan subduction in southern Tibet [J]. Chemical Geology, 2008, 252(3-4):191-201.
- [6] 管琪,朱弟成,赵志丹,等. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩:新特提斯洋脊俯冲的产物? [J]. 岩石学报,2010,26(7):2165-2179.
- [7] Zhang ZM, Zhao GC, Santosh M, et al. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southern Tibet: Evidence for Neo-Tethyan Mid-Ocean Ridge subduction? [J]. Gondwana Research, 2010, 17(4):615-631.
- [8] Chen L, Qin KZ, Li GM, et al. Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the Nuri intrusive rocks in the Gangdese area, southern Tibet: Constraints on timing, petrogenesis, and tectonic transformation [J]. Lithos, 2015, 212-215:379-396.
- [9] Ji WQ, Wu FY, Chung S L, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet [J]. Chemical Geology, 2009, 262(3-4):229-245.
- [10] 代作文,李光明,丁俊,等. 西藏努尔晚白垩世埃达克岩:洋脊俯冲的产物[J]. 地球科学,2018,43(8):2727-2741.
- [11] 朱弟成,莫宣学,赵志丹,等. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化:新观点[J]. 地质前缘(中国地质大学(北京);北京大学),2009,16(2):1-20.
- [12] He SD, Kapp P, DeCelles P. G, et al. Cretaceous-Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet [J]. Tectonophysics, 2007, 433:15-37.
- [13] Chen FK, Li XH, Wang XL, et al. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China [J]. In J Earth Sci (geol Rundsch). 2007, 96:1179-1194.
- [14] Middlemost E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Annual Review of Earth & Planetary Science, 1994, 37(3-4):215-224.
- [15] Le Maitre R W. Igneous Rocks: A classification and glossary of terms [M]. 2nd Edition. London: Cambridge University Press, 2002, 33-39.
- [16] 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.
- [17] Taylor S. R., McLennan S. M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1985, 33: 241–265.
- [18] 孙渺, 陈伟, 曲晓明, 等. 西藏雄梅地区晚白垩世江巴组火山岩岩石成因及对加厚地壳减薄的指示[J]. *地壳科学*, 2018, 43(9): 3234–3251.
- [19] 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(4): 956–983.
- [20] Defant M. J., Drummond M. S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662–665.
- [21] Boztuğ D., Harlavan Y., Arelhart G. B., et al. K-Ar age, whole-rock and isotope geochemistry of A-Type granitoids in the Divriği-Sivas region, eastern-central Anatolia, Turkey [J]. *Lithos*, 2007, 97(1–2): 193–218.
- [22] 曲晓明, 辛洪波, 徐文艺. 西藏雄梅地区大型铜金矿床容矿火山岩的成因及其对成矿的贡献[J]. *地质学报*, 2007, 81(7): 964–971.
- [23] Zheng YC., Hou ZQ., Gong YL., et al. Petrogenesis of Cretaceous adakite-like intrusions of the Gangdese plutonic belt, southern Tibet: Implications for mid-ocean ridge subduction and crustal growth [J]. *Lithos*, 2014, 190–191: 240–263.
- [24] Macpherson C. G., Dreber S. T., Thirwall M. F. Adakites without slab melting: High pressure processing of basaltic island arc magma, Mindanao, the Philippines [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 2006, 243: 581–593.
- [25] Eby, G. M. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641–644.
- [26] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids [J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 411–429.
- [27] 孟繁一, 赵志丹, 朱弟成, 等. 西藏冈底斯东部门巴地区晚白垩世埃达克岩的岩石成因[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 2180–2192.
- [28] Liu CZ., Ji WQ., Sun L., et al. The Gangdese magmatic constraints on a Latest Cretaceous lithospheric delamination of the Lhasa terrane, southern Tibet [J]. *Lithos*, 2014, 210–211: 168–180.
- [29] Rapp R. P., Watson E. B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891–931.
- [30] Zhu D. C., Pan G. T., Chung S. L., et al. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Lower Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdese, South Tibet [J]. *International Geology Review*, 2008, 50(5): 442–471.
- [31] 赵珍, 胡道功, 陆露, 等. 西藏泽当地区晚白垩世埃达克岩的发现及其成矿意义[J]. *地质力学学报*, 2013, 19(1): 45–53.
- [32] 高家昊. 藏南冈底斯岩基复合岩体的构造岩浆动力学过程——以拉萨白垩复合岩体为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. 1–104.
- [33] 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 中国埃达克岩或埃达克质岩及相关金属成矿作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(4): 336–349.

Geochemistry and Genesis of the Late Cretaceous Granodiorite in Nulin, Tibet

Shi Hongzhao, Duan Zhiminng, Li Guangming, Zhang Linkui

(Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: There are different understandings of the genesis and geodynamic mechanism for the Late Cretaceous magmatic rocks of the South Gangdese. In this paper, we present geochemistry, zircon U-Pb and Sr-Nd isotopic data for the granodiorite from Nulin area. The results show that the rocks are characterized by high SiO_2 (66.62% ~ 67.81%), Al_2O_3 (15.11% ~ 15.66%), Sr ($> 481 \times 10^{-6}$), low Y ($\leq 8.13 \times 10^{-6}$) and Yb ($\leq 0.73 \times 10^{-6}$) and high Sr/Y ratio (59 ~ 111), implying adakitic geochemical features. These rocks are enriched in LREE and depleted in HREE, together with enrichment in large-ion lithophile elements (LILE) and depletion in high field strength elements (HFSE), as well as significant positive Eu. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.704011 \sim 0.704244$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 3.61 \sim 5.75$, indicating mantle source of Sr and Nd isotopic characteristics. The results of zircon U-Pb LA-ICP-MS of the granodiorite show that, the magmatic activities was 83Ma and 89Ma respectively. Based on the geological and geochemical analysis, we infer that the Nulin granodiorite may be the product of melting of the thickened juvenile lower crust which was triggered by the subduction of New Tethys ridge.

Key words: south gangdese; late cretaceous; adakitic; subduction of New Tethys ridge; Nulin