

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.09.008

藏南古堆地区基性岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及构造背景

袁和, 洪秀伟*

YUAN He, HONG Xiuwei*

辽宁省第四地质大队有限责任公司, 辽宁 阜新 123000

Liaoning Fourth Geological Team Limited Liability Company, Fuxin 123000, Liaoning, China

摘要:藏南古堆地区处于喜马拉雅带北东段,雅鲁藏布江缝合带南部,措美大火成岩省东南部,区内基性岩分布较广泛,主要呈脉状侵位于侏罗纪—三叠纪地层中。为探讨古堆地区基性岩的成因及其构造动力学背景,对区内基性岩进行了锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学等研究。结果表明,SHRIMP 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 同位素测年得出辉绿岩年龄加权平均值为 137.7 ± 0.9 Ma; 辉长岩年龄加权平均值为 133.8 ± 0.8 Ma, 其形成时代为早白垩世,与措美大火成岩省 OIB 型基性岩形成时代相近(130~136 Ma)。岩石地球化学证据表明,基性岩具有高 TiO_2 和 P_2O_5 特点,不具有 Nb-Ta 槽特征,微量元素比值(Ce/Zr 、 Zr/Nb 、 Zr/Y 、 Th/Yb)及稀土元素配分模式与板内洋岛玄武岩(OIB)相似。综合研究表明,古堆地区基性岩源于富集地幔,并且基性岩浆在上侵过程中未受到地壳混染,其形成于板内构造环境,可能是 Kerguelen 地幔柱早期活动的产物。对古堆地区基性岩的研究,为近一步认识藏南地区早白垩世基性岩的成因及其大地构造背景提供了地质年代学和岩石地球化学方面的证据。

关键词:基性岩; 锆石 U-Pb 年龄; 岩石地球化学; 构造环境; 藏南古堆; 地质调查工程

中图分类号:P588.1; P597+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)09-1589-12

Yuan H, Hong X W. Zircon U-Pb ages, petrogenesis and tectonic setting of basic rocks in Gudui area, southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(9): 1589-1600

Abstract: The Gudui area in southern Tibet is located in the northeast section of the Himalaya belt, the south of the Yarlung Zangbo River suture zone, and the southeast of the Cuomei large igneous province. The basic rocks in the area are widely distributed, mainly located in the Jurassic-Triassic strata. In order to explore the origin and structural dynamic background of basic rocks in Gudui area, zircon U-Pb chronology and rock geochemistry of basic rocks in the area are studied in this paper. The results show that the SHRIMP zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ isotopic dating shows that the weighted average age of diabase is 137.7 ± 0.9 Ma, and the weighted average age of gabbro is 133.8 ± 0.8 Ma, its formation age is early Cretaceous, which is similar to that of OIB basic rocks in Cuomei igneous Province (130~136 Ma). Rock geochemical evidence shows that the basic rocks have high TiO_2 and P_2O_5 characteristics, not Nb-Ta groove characteristics, and the trace element ratios (Ce/Zr , Zr/Nb , Zr/Y , Th/Yb) and rare earth distribution patterns are similar to those of intraplate ocean island basalt (OIB). The comprehensive study shows that the basic rocks in gudui area originated from the enriched mantle, and the basic magma was not contaminated by the crust during the upwelling process. It was formed in the intraplate tectonic environment and may be the product of the early activities of the Kerguelen mantle plume. Through this study of basic rocks in Gudui area, geological chronology and rock geochemistry evidence are provided for further understanding the genesis and tectonic background of Early Cretaceous basic rocks in the southern Tibet.

Key words: basic rock; zircon U-Pb age; rock geochemistry; tectonic environment; Gudui area of south Tibet; geological survey engineering

收稿日期:2021-02-10; 修订日期:2021-05-28

资助项目:中国地质调查局项目《西藏古堆地区金锑多金属矿产远景调查》(编号:1212011121236)

作者简介:袁和(1985-),男,硕士,高级工程师,从事矿床学、地球化学研究。E-mail:yuanhe1985@126.com

* 通信作者:洪秀伟(1968-),男,教授级高级工程师,从事地质矿产调查。E-mail:hong.xiuwei@163.com

藏南特提斯喜马拉雅带广泛分布白垩纪火成岩^[1]。近年,区域地质调查工作的开展及众多学者的研究表明,在雅鲁藏布江缝合带南侧浪卡子—洛扎—措那—措美等地区出露一套以玄武岩、辉长岩、辉绿岩等为主的火成岩,其形成时代主要集中于早白垩世^[2-5]。众多学者对上述地区出露的火成岩的成因及其构造背景等进行了大量研究,但对藏南古堆地区基性岩的研究甚少。因此,本次研究有望填补该地区基性岩的形成时代、成因及其构造背景等方面的空白。

目前,尽管前人对藏南地区基性岩进行了深入研究,但一些关键问题仍然存在争议。如早白垩世基性岩的成因及其构造动力学背景,有学者^[2-3,6-7]认为,早白垩世基性岩的形成与新特提斯洋晚期大规模的扩张有关,是被动大陆边缘伸展背景下的产物;另有学者^[8-10]认为,早白垩世基性岩与 Kerguelen 地幔柱岩浆活动有关,可能是 Kerguelen 地幔柱早期活动的产物。为解决上述争议,本文以藏南古堆地区基性岩为研究对象,在野外地质调查和岩相学研究的基础上,开展锆石 U-Pb 地质年代学、岩石地球化学等研究,为进一步认识藏南地区早白垩世基性岩的成因及其大地构造背景提供地质龄和岩石地球化学方面的证据。

1 地质概况和岩石矿物学特征

班公湖—怒江缝合带(BNSZ)将青藏高原南部地区划分为两大构造区,即晚古生代羌塘—三江构造区和冈瓦纳北缘中生代冈底斯—喜马拉雅构造区^[11],在冈底斯—喜马拉雅构造区,以雅鲁藏布江缝合带(IYZSZ)为界,北部为拉萨地块,南部为喜马拉雅带(图1-a)。藏南古堆地区处于喜马拉雅带北东段、雅鲁藏布江缝合带的南部、措美大火成岩省东南部(图1-b)。在措美大火成岩省内广泛分布白垩纪火成岩,其岩石类型主要有玄武岩、辉绿岩、辉长岩等。

研究区出露的地层为古生代—新生代沉积岩及火山碎屑岩。其中中生代地层较发育,以NW向断裂及逆冲推覆断裂为界(图1-c),其东北部为三叠系涅如组,西南部为侏罗系。岩石类型以泥质砂岩、砂页岩、炭质板岩为主。该地层被认为是金、金—锑和锑矿床(点)的主要容矿围岩^[12]。研究区北部分布达拉变质核杂岩,变质核杂岩核部为淡色花

岗岩体,其成因可能与藏南拆离系有关^[13-14]。

研究区基性岩较发育,岩石类型为辉绿岩、辉长岩等,基性岩主要呈脉状侵位于侏罗纪—三叠纪地层中。岩脉宽度从数米至数十米不等,长度为数米至数百米,且分布较广泛。

辉绿岩多呈灰绿色,具辉绿结构,块状构造。主要矿物为斜长石、辉石,两者含量占85%以上。次要矿物主要为角闪石,含量为10%左右(图2-a)。显微镜下,斜长石为无色,呈长板状、长柱状,自形程度较好。单斜辉石为无色,呈半自形短柱状—他形粒状,自形程度较差。岩石中还含有少量磁铁矿、石英等(图2-c)。

辉长岩多呈暗灰色,具辉长结构,块状构造。矿物成分主要为辉石和斜长石,其中辉石含量占40%左右,斜长石含量为40%~50%,副矿物为少量钛铁矿(图2-b)。显微镜下,辉石呈半自形短柱状,自形程度较差,以单斜辉石为主。斜长石呈长柱状,自形程度较好。钛铁矿呈不透明粒状。岩石蚀变见弱绿泥石化(图2-d)。

2 样品分析方法

样品锆石按常规方法进行分选,在双目镜下挑选,将待测的锆石与 RESE 参考样 SL13 和数粒 TEM 放在环氧树脂中将其固定,抛磨至露出内部中心面,用于透射光、反射光及阴极发光(CL)研究。CL 研究在中国地质科学院矿产资源研究所(牛津 MINICL 阴极发光探测仪)完成,具体操作流程见周剑雄等^[15]。样品 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析在北京离子探针中心完成,在分析过程中主要运用标准锆石 TEM(417 Ma)进行元素分馏校正,Pb/U 校正公式运用 $Pb/U = A(UO/U)^{2[16]}$;运用澳大利亚国立大学地学院标准锆石 SL13(年龄为 572 Ma;U 含量为 238×10^{-6})进行标定所测锆石的 U、Th、Pb 含量,具体分析流程及原理见宋彪等^[17]。

本次在研究区基性岩中采集了7件样品,对其进行全岩地球化学分析,主量元素由武警黄金十一支队实验室测试完成,采用 X 荧光光谱仪 2100 测试,并执行 JY/T 016—1996 标准;微量和稀土元素由自然资源部长沙矿产资源监督检测中心测试完成,微量元素运用 ICP、Au 运用原子吸收、稀土元素运用 ICP-MS 方法进行测试分析,主量元素分析精度 RSD<5%,微量和稀土元素分析精度 RSD<10%。

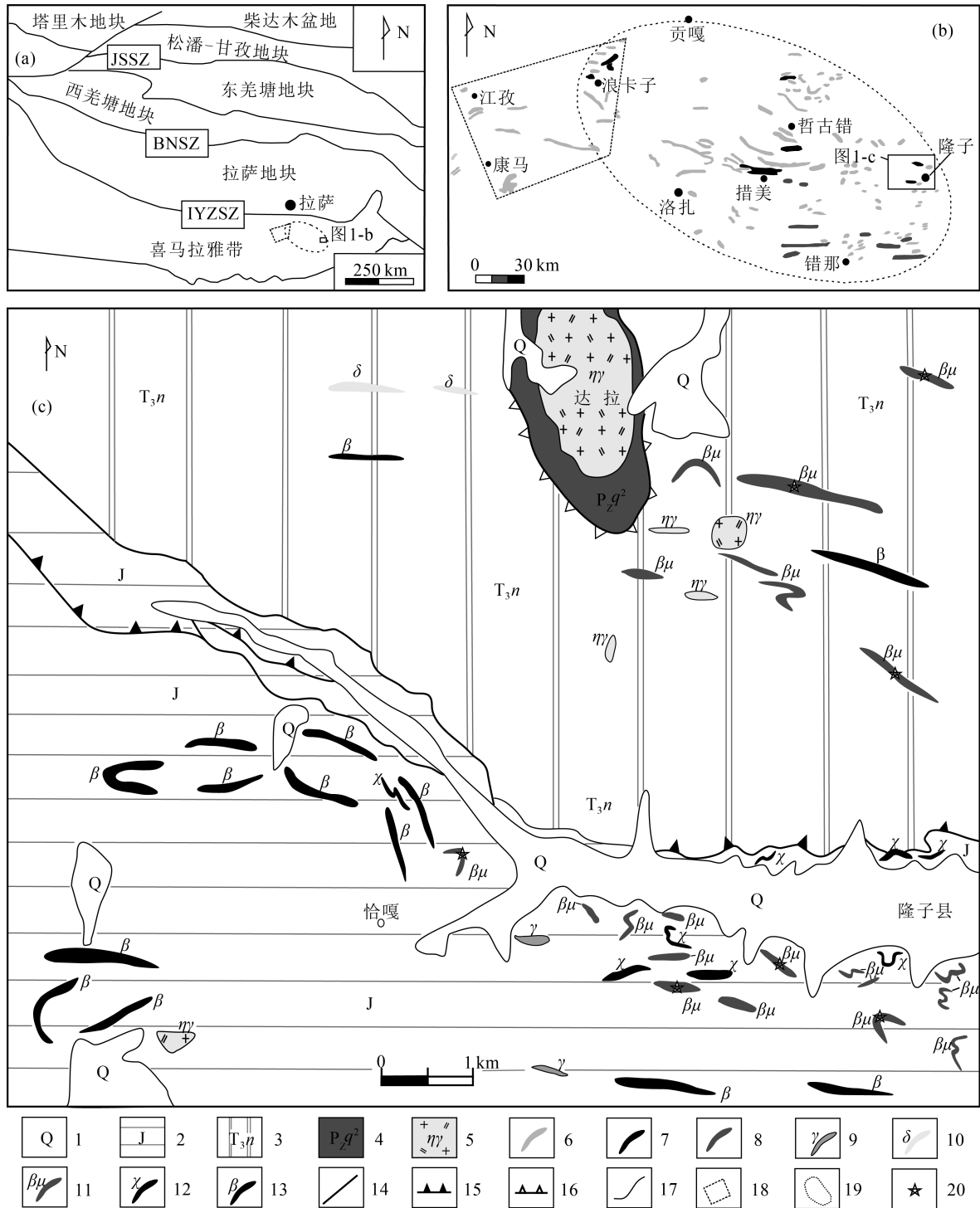


图 1 古堆地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Gudui area

JSSZ—金沙江缝合带; BNSZ—班公湖-怒江缝合带; IYZSZ—印度河-雅鲁藏布江缝合带; 1—第四系; 2—侏罗系; 3—三叠系涅如组; 4—古生界曲德贡岩组; 5—黑云母二长花岗岩; 6—措美大火成岩省辉绿岩墙; 7—措美大火成岩省辉长岩; 8—措美大火成岩省玄武岩; 9—花岗岩; 10—闪长岩; 11—辉绿、辉长岩; 12—煌斑岩; 13—火山岩; 14—断层; 15—逆冲推覆断裂; 16—拆离断层; 17—地质界线; 18—最初提出的措美大火成岩省范围; 19—后续新增的措美大火成岩省范围; 20—采样点

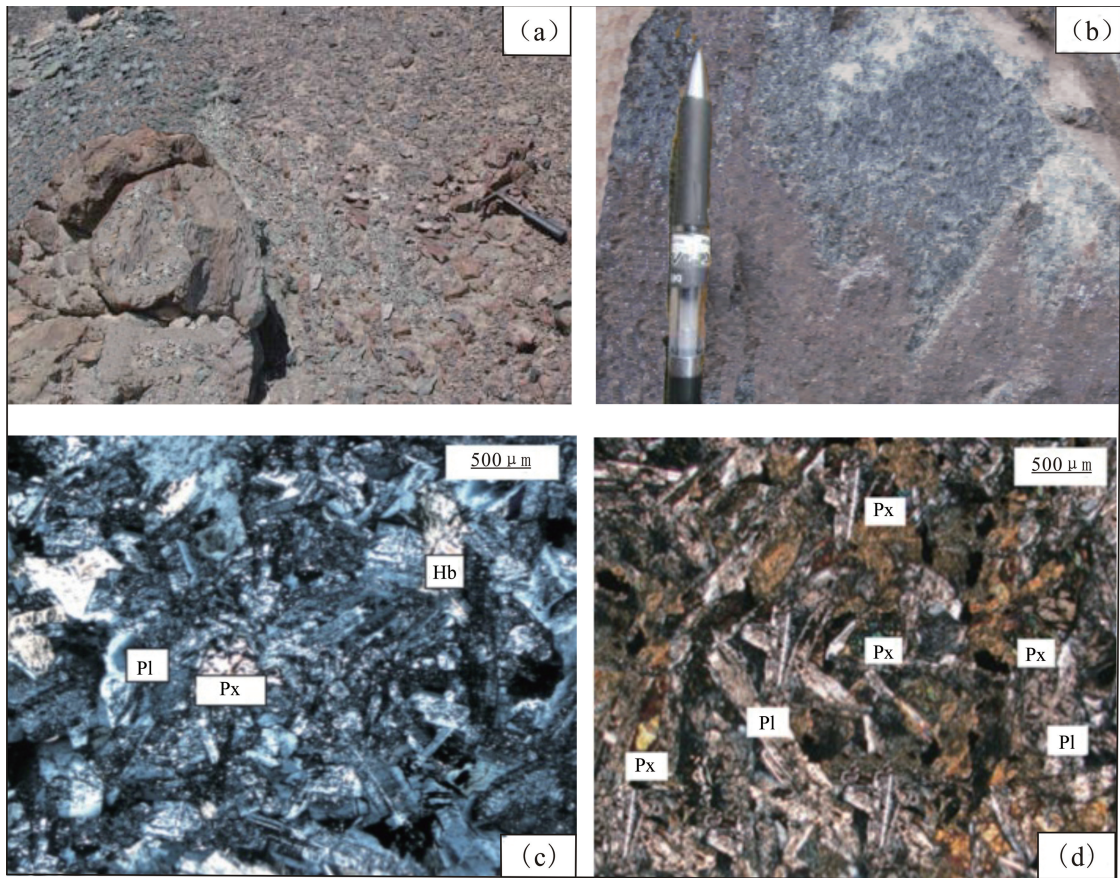


图2 辉绿岩(a、c)、辉长岩(b、d)野外照片及显微照片

Fig. 2 Field photos and micrographs of diabase(a,c) and gabbro(b,d)

Pl—斜长石;Hb—角闪石;Px—辉石

3 测试结果

表1显示,辉绿岩锆石的Th、U含量分别为 $684 \times 10^{-6} \sim 3840 \times 10^{-6}$ 和 $397 \times 10^{-6} \sim 1282 \times 10^{-6}$, Th/

U值介于1.72~3.00之间,平均值为2.16,大于0.4,属于岩浆成因锆石^[18]。10个锆石测点均落在谐和线或其附近(图3-a),其锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄多集中在136.0~140.3 Ma之间,年龄加权平均值为

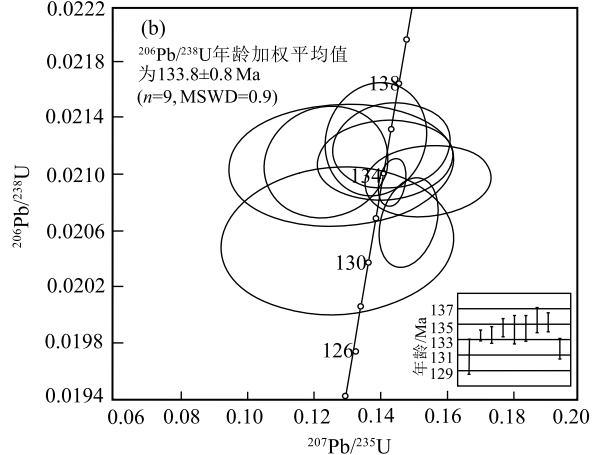
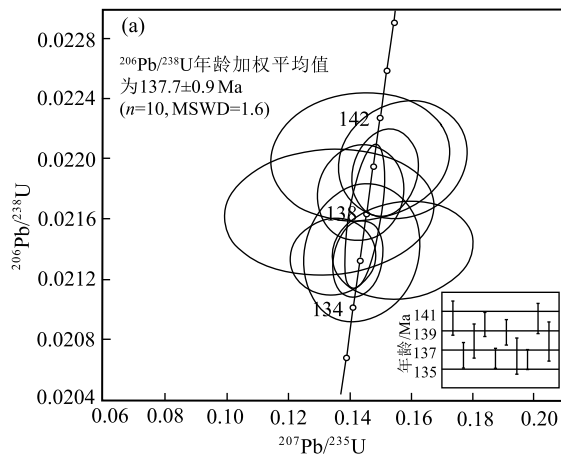


图3 古堆地区辉绿岩(a)和辉长岩(b)SHRIMP 锆石谐和曲线

Fig. 3 SHRIMP zircon harmonic curves of diabase(a) and gabbro(b) in Gudui area

表 1 古堆地区辉绿岩和辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 1 SHRIMP zircon U-Th-Pb analysis results of diabase and gabbro in Gudui area

测试点号	$^{206}\text{Pb}_c$		含量/ 10^{-6}			$^{232}\text{Th}/$ ^{238}U	$^{207}\text{Pb}^*/$ $^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/$ ^{235}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	年龄/Ma
	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th									
辉绿岩														
1	1.21	549	1156	10.5	2.17	0.0473	13.6	0.14	13.6	0.0220	1.3	140.3	1.8	
2	0.68	933	1914	17.3	2.12	0.0533	9.7	0.16	9.7	0.0214	1.0	136.5	1.4	
3	1.71	585	1118	11.1	1.97	0.0447	16.9	0.13	17.0	0.0216	1.3	137.9	1.8	
4	0.49	589	1061	11.1	1.86	0.0501	4.7	0.15	4.8	0.0219	0.9	139.7	1.2	
5	0.83	835	2244	15.4	2.78	0.0457	6.8	0.13	6.8	0.0213	0.8	136.1	1.1	
6	1.01	483	903	9.1	1.93	0.0479	6.3	0.14	6.4	0.0218	1.0	138.8	1.3	
7	0.54	397	684	7.3	1.78	0.0488	8.6	0.14	8.8	0.0214	1.4	136.4	1.9	
8	0.35	774	1972	14.2	2.63	0.0482	3.7	0.14	3.8	0.0213	0.8	136.0	1.0	
9	0.64	427	799	8.1	1.93	0.0518	9.0	0.16	9.1	0.0220	1.1	140.3	1.6	
10	0.30	1282	3840	23.9	3.09	0.0487	2.8	0.15	3.2	0.0216	1.5	137.9	2.1	
辉长岩														
1	2.28	210	92	3.8	0.44	0.0449	18.1	0.13	18.2	0.0205	1.7	130.8	2.2	
2	0.00	1302	1962	23.4	1.51	0.0497	1.8	0.14	1.9	0.0209	0.5	133.6	0.7	
3	1.74	1043	2010	19.1	1.93	0.0534	8.2	0.15	8.2	0.0209	0.8	133.6	1.1	
4	2.04	991	2028	18.3	2.11	0.0485	9.5	0.14	9.6	0.0211	0.9	134.5	1.2	
5	1.52	408	810	7.5	2.05	0.0439	17.0	0.13	17.1	0.0210	1.4	134.3	1.8	
6	1.13	1020	2629	18.7	2.66	0.0427	10.2	0.12	10.2	0.0211	1.2	134.4	1.7	
7	0.68	628	1343	11.5	2.21	0.0471	7.5	0.14	7.6	0.0212	1.2	135.5	1.6	
8	1.31	818	2446	15.1	3.09	0.0490	8.2	0.14	8.3	0.0212	0.9	135.2	1.2	
9	0.52	718	1567	12.8	2.26	0.0519	3.9	0.15	4.1	0.0207	1.0	131.8	1.3	

137.7 \pm 0.9 Ma (MSDW = 1.6), 代表了辉绿岩的结晶年龄, 时代为早白垩世。辉长岩锆石的 Th、U 含量分别为 92~2629 $\times 10^{-6}$ 和 210~1302 $\times 10^{-6}$, Th/U 值介于 0.44~2.99 之间, 平均值为 1.98, 大于 0.4, 属于岩浆成因锆石。辉长岩样品 9 个锆石测点均落在谐和线上或其附近 (图 3-b), 其锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据多集中在 130.8~135.5 Ma 之间, 年龄加权平均值为 133.8 \pm 0.8 Ma (MSDW = 0.9), 代表了辉长岩的结晶年龄, 时代为早白垩世。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

11PM302 样品的烧失量 (LOI) 较高 (表 2), 为 9.66%, 表明该样品受到一定程度的蚀变。其余样品的烧失量介于 2.02%~3.19% 之间, 平均值为 2.63%, 小于 3%, 表明蚀变不严重^[19]。为消除蚀变

作用的影响, 本文对主量元素进行了重新归一化处理^[20]。

经扣除烧失量, 归一化到 100% 后^[21], 样品中 SiO₂ 含量为 48.14%~52.14%, 平均值为 50.05%; K₂O 含量为 0.12%~1.63%, 平均值为 1.13%; Na₂O 含量为 2.46%~4.39%, 平均值 3.3%; 全碱 K₂O + Na₂O 含量为 3.19%~5.54%, 平均值 4.4%; K₂O/Na₂O 平均值为 0.35; Al₂O₃ 含量为 13.34%~14.68%, 平均值 14.06%; TiO₂ 含量为 2.22%~4.13%, 平均值 3.0%; P₂O₅ 含量为 0.26%~0.66%, 平均值 0.4%; A/CNK 为 0.65~0.73, 平均值为 0.69, 属于偏铝质岩石。由于部分样品受到一定程度的蚀变, 本文选用抗蚀变较强的元素进行岩石分类。Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解 (图 4) 显示, 有 3 件样品落入亚碱性玄武岩区域, 其余 4 件落入碱性玄武岩区域。里特曼指数 σ 显示, 有 6 件样品的 σ 小于 4, 有 1 件样品 σ 大于 4, 其

表2 古堆地区基性岩主量、微量和稀土元素分析结果
Table 2 Analysis results of major, trace and rare earth elements of basic rocks in Gudui area

元素	辉长岩					辉绿岩		元素	辉长岩					辉绿岩	
	PM4QY002	11PM101	11PM102	11PM301	11PM302	11Q6	11Q8		PM4QY002	11PM101	11PM102	11PM301	11PM302	11Q6	11Q8
SiO ₂	52.14	49.85	48.76	49.18	48.14	51.70	50.61	Lu	0.69	0.48	0.31	0.49	0.54	0.74	0.72
TiO ₂	3.64	2.93	2.84	4.13	2.51	2.42	2.22	Y	48.98	34.71	35.19	36.53	42.41	55.17	49.69
Al ₂ O ₃	13.96	14.68	13.86	14.36	13.88	14.36	13.34	ΣREE	325.49	128.53	265.92	184.2	235.31	220.31	191.63
Fe ₂ O ₃	3.02	3.24	2.70	2.32	2.92	2.12	1.86	LREE	287.48	103.89	235.78	156.72	203.2	184.7	160.01
MnO	0.15	0.17	0.16	0.15	0.17	0.16	0.15	HREE	38.01	24.64	30.14	27.48	32.11	35.61	31.62
MgO	3.54	3.53	6.36	4.48	3.63	5.33	5.42	LREE/ HREE	7.56	4.22	7.82	5.7	6.33	5.19	5.06
CaO	6.52	7.51	8.90	6.79	6.66	7.65	8.50	(La/ Yb) _N	8.73	2.37	12.19	5.1	7.12	5.3	5.09
Na ₂ O	3.84	3.82	3.07	4.39	2.83	2.74	2.46	δEu	1.01	1.02	1.4	1.12	0.92	1.34	1.36
K ₂ O	1.63	1.37	0.12	1.15	0.91	1.44	1.31	Ba	433	501.5	155.7	205.8	201.8	355.4	279.4
FeO	7.48	8.59	8.56	8.91	8.14	7.95	7.34	Co	40.8	24.2	45.5	52.2	36.5	43.83	41.65
P ₂ O ₅	0.66	0.53	0.34	0.47	0.51	0.29	0.26	Cu	27	11.4	20.1	18.8	6	—	—
Mg [#]	46.00	42.52	57.22	47.51	44.53	54.69	57.07	Ni	17.6	18.1	49.6	18.7	2	20.33	24.01
烧失量	2.89	2.69	3.19	2.52	9.66	2.02	2.49	Sc	19.6	17.6	26.8	23.6	16.7	26.3	25.4
总计	99.47	98.91	98.86	98.85	98.96	98.18	97.96	Sr	441.6	128.9	121.7	183.8	127.3	394.3	412.3
σ	3.27	3.93	1.77	4.97	2.72	2.01	1.87	Zn	119.8	99.7	100.9	103	110.5	100.5	95.43
Na ₂ O ⁺	5.47	5.19	3.19	5.54	3.74	4.18	3.77	Cr	12.2	37.5	132.6	18.8	11.8	131.7	115.8
K ₂ O	0.42	0.36	0.04	0.26	0.32	0.53	0.53	Rb	22.2	125.3	5.0	20.4	26.1	50.3	49.92
K ₂ O/ Na ₂ O	0.70	0.68	0.65	0.69	0.72	0.72	0.73	Nb	61.7	27.15	18.19	41.99	29.24	26.44	28.56
A/CNK	57.72	10.69	38.74	24.02	37.03	37.34	32.84	Ta	3.54	1.69	0.97	2.54	1.45	0.72	0.63
La	119.2	44.51	94.78	65.64	85.91	78.77	68.17	W	0.68	2.64	0.91	0.62	0.41	2.11	1.59
Ce	15.94	6.37	13.7	9.15	11.56	10.23	8.78	Pb	13.8	26	5.7	13.7	20.9	21.65	24.77
Pr	75.72	32.31	69.13	45.03	54.38	43.64	37.5	Th	3.64	23.55	1.4	3	4.87	5.8	5.61
Nd	14.45	7.58	13.58	9.56	11.13	10.34	8.86	U	1.06	2.43	0.28	0.69	0.43	0.61	0.81
Sm	4.45	2.43	5.85	3.32	3.19	4.38	3.86	Sn	8.3	3.74	3.92	2.35	5	2.82	2.07
Eu	11.96	6.68	11.28	8.25	9.64	9.35	8.17	Zr	914.8	387.8	332.1	598.3	175.3	273.6	216.3
Gd	2.08	1.37	1.9	1.53	1.83	1.72	1.49	Li	17.2	39.8	35.7	31.5	74.1	36.92	25.66
Tb	10.39	7.13	8.67	7.69	9.14	10.39	9.08	Hf	12.8	10.2	5.4	6.8	7.3	7.21	10.82
Dy	2.04	1.47	1.59	1.57	1.83	2.05	1.83	V	237.8	139.7	271.4	312	256.4	273.2	257.3
Ho	5.38	3.76	3.7	4.02	4.76	5.45	4.91	Au	0.1	0	0	0	0.07	0.82	0.88
Er	0.73	0.52	0.41	0.55	0.64	0.86	0.79	Sb	1.12	0.72	0	0.57	0.54	0	0
Tm	4.74	3.23	2.28	3.38	3.73	5.05	4.63								
Yb															

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶,其中Au为10⁻⁹

值为4.97,暗示部分岩石的碱性程度较高。总体表明,研究区基性岩属于亚碱性—碱性玄武岩系列。

4.2 稀土及微量元素

稀土元素测试结果(表2)显示,样品的稀土元素总量(ΣREE)较高,介于128.53×10⁻⁶~325.49×

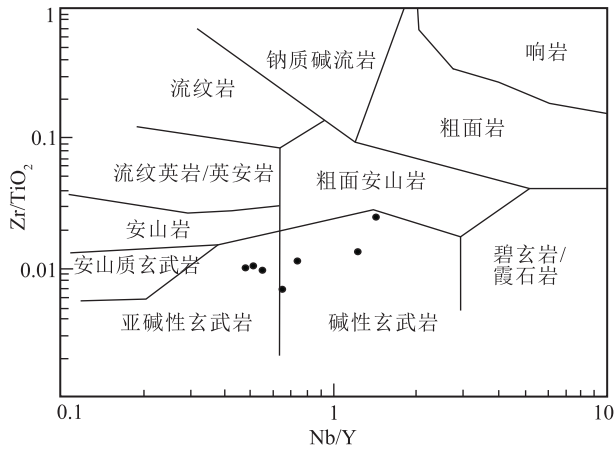


图 4 古堆地区基性岩 Nb/Y-Zr/TiO₂图解

Fig. 4 Nb/Y-Zr/TiO₂ diagram of basic rocks in Gudui area

10⁻⁶之间,平均值为 221.63×10⁻⁶,明显富集轻稀土元素(LREE/HREE = 4.22~7.82,平均值为 5.98),相对亏损重稀土元素,轻、重稀土元素分馏显著((La/Yb)_N = 2.37~12.19,平均值为 6.56),具有轻微正 Eu 异常特征(δEu = 0.92~1.42,平均值为 1.17)。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 5-a)显示,样品稀土元素曲线表现为右倾型,与洋岛玄武岩(OIB)相似。

在微量元素方面,富集大离子亲石元素(LILE) Rb、Th、Sr 亏损,富集高场强元素 Nb、Ta、Ce、P 相对亏损。不相容元素如 Ce/Zr、Zr/Nb、Zr/Y 与 Th/Yb 值分别为 0.11~0.49、6.00~14.83、4.13~18.68和0.61~7.29,平均值为 0.25、12.22、9.87、1.89,与 OIB 玄武岩相似(分别为 0.3、5.8、9.7 和 1.9)^[22-23]。

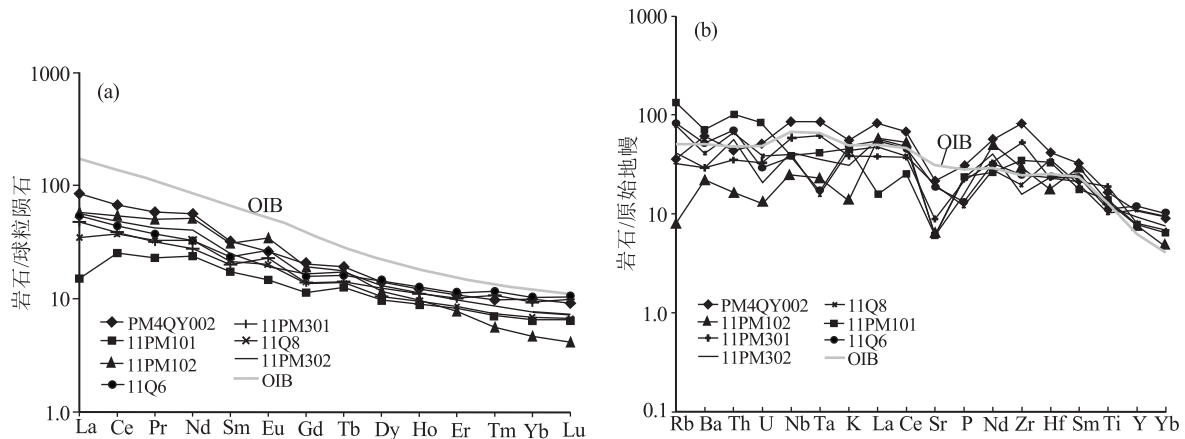


图 5 基性岩稀土元素标准化图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 REE normalization graph(a)and trace element spider diagram (b) of basic rocks

此外,样品中 Sb 含量为 0.54×10⁻⁶~1.12×10⁻⁶,平均值为 0.74×10⁻⁶,是陆壳平均值(0.2×10⁻⁶)^[24]的 3.7 倍,而其他元素(Au、Cu、Zn、Ni 等)的含量低于或接近陆壳平均值,显示基性岩浆的侵入为后期区内铋矿的形成提供了部分物源。

5 讨论

5.1 岩石成因

5.1.1 岩浆源区

古堆地区基性岩样品中 Ba/Nb、La/Nb、Ba/La (平均值分别为 9.87、1.12、12.93)等参数比值均接近 EM I OIB 的比值,暗示基性岩浆可能源于 EM I 型富集地幔区域^[25]。设想如果基性岩浆源于亏损地幔,那么 Zr/Nb 值应大于 18^[26],而古堆地区基性岩 Zr/Nb 值(平均值为 12.22)小于 18。此外,在稀土元素配分曲线上可见轻稀土元素(LREE)呈富集趋势,指示其源区可能为富集型地幔源区。另据图 6 显示,7 件样品均落在富集地幔或靠近富集地幔端元,其岩浆具有富集地幔的特征。综上所述,古堆地区基性岩源于富集地幔,这与藏南地区多处 OIB 型基性岩墙群的源区一致^[2,9,18]。

5.1.2 地壳混染

野外地质调查发现,基性岩主要呈脉状侵入于侏罗纪—三叠纪地层中,那么基性岩浆在上侵过程中是否受到地壳混染? ①通常基性岩受地壳混染后,往往具有明显富集 LILE 的特征^[27],且地壳物质通常具有低 Nb、Ta 和高 Th 的特征,因此受地壳混染后会导致 Nb、Ta 与 Th 之间呈现明显的负相关关

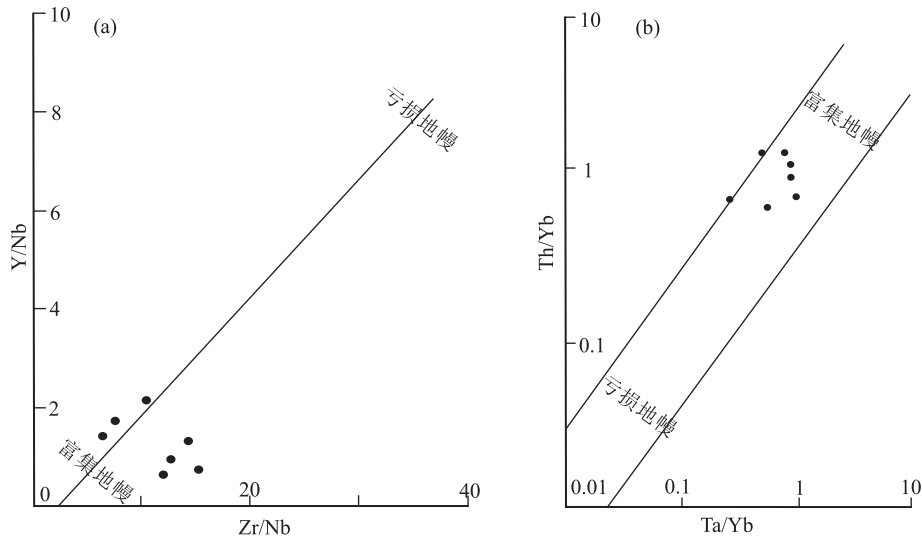


图6 古堆地区基性岩 Zr/Nb-Y/Nb(a)与 Ta/Yb-Th/Yb(b)图解

Fig. 6 Zr/Nb-Y/Nb(a) and Ta/Yb-Th/Yb(b) diagrams of basic rocks in Gudui area

系^[19],而古堆地区基性岩 Nb、Ta 与 Th 之间负相关关系并不明显(图7)。^②样品的 Th/Ta 值为1.03~13.9,除 11PM101 样品外,其余样品的 Th/Ta 值均小于大陆地壳比值(约为10)^[28]。另外,样品的 Zr/Hf=19.99~87.99,远大于陆壳值(11),表明基性岩受地壳混染的可能性较小^[29]。^③Lassiter 等^[30]认为,岩浆在上侵过程中受地壳混染后,La/Sm 值会迅速增加到5以上,而古堆地区基性岩的 La/Sm 值为1.4~3.9(小于5)。上述研究表明,古堆地区基性岩浆在上侵过程中未遭受地壳混染。

5.1.3 结晶分异

样品中 Mg[#]值均大于40,变化范围介于42.52~57.22之间,平均值为49.93,稍低于原生玄武岩浆的 Mg[#]值(参考值为65)^[31-32]。Ni 含量为 2.00×10^{-6} ~ 49.6×10^{-6} ,Cr 含量为 11.8×10^{-6} ~ 132.6×10^{-6} ,Ni、Cr

含量较低,暗示基性岩可能是原生玄武岩浆经历一定程度的结晶分异作用的产物^[32-34]。Harker 图解(图8-a,b)显示,Mg[#]与 Ni、Cr 呈正相关线性关系,暗示岩浆演化过程中分异橄榄石和(或)单斜辉石等;Mg[#]与 TFe₂O₃、TiO₂ 呈负相关线性关系(图8-c,d),暗示 Fe-Ti 氧化物的分离作用不明显;Mg[#]与 CaO 呈正相关线性关系(图8-e),暗示含 Ca 矿物(如单斜辉石)的分离^[34]。样品中的 Sr 具有明显的负异常特征,而 Sr 的负异常一般与斜长石的结晶分异作用有关。然而,Mg[#]与 Al₂O₃呈负相关线性关系(图8-f)及样品轻微的正 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.92 \sim 1.42$)特征暗示,岩浆演化过程中斜长石的结晶分异作用不明显,或斜长石是在岩浆演化晚期才晶出的^[32,34],因此推测 Sr 的负异常可能是斜长石在岩浆演化的晚期结晶所致,或岩石受轻微蚀变作用所

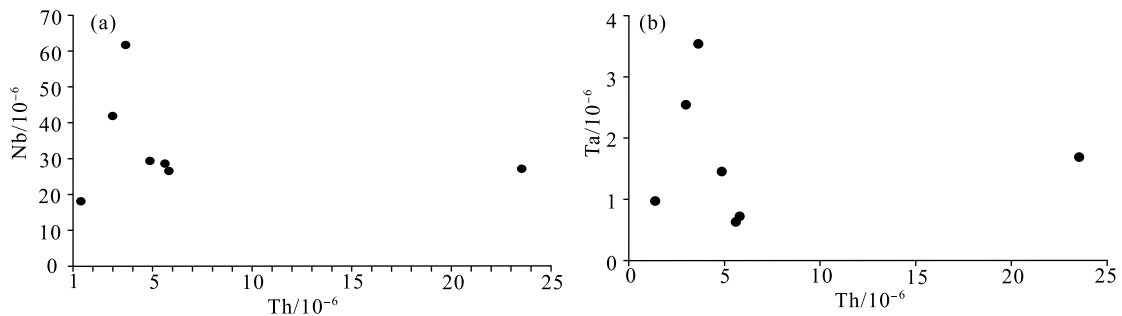


图7 古堆地区基性岩 Th-Nb(a)和 Th-Ta(b)图解

Fig. 7 Th-Nb(a) and Th-Ta(b) diagrams of basic rocks in Gudui area

致^[35]; $Mg^\#$ 与 P_2O_5 、Zr 大体呈负相关线性关系 (图 8-g, h), 暗示磷灰石、锆石等分异作用不明显^[34]。

5.2 构造环境

基性岩一般是深源岩浆侵位于不同地壳层次的产物, 且含有丰富的地球动力学背景方面的信

息^[2], 因此通过对基性岩的研究, 可以推测其形成时的大地构造背景。在古堆地区基性岩 FMA 构造环境判别图 (图 9-a) 上, 绝大多数样品落入陆内环境。在 Zr-Zr/Y 构造环境判别图 (9-b) 上, 有 4 件样品落在板内构造环境, 其余样品落在靠近板内构造环境附近区域, 这与朱弟成等^[36] 和江思宏等^[2] 的研究

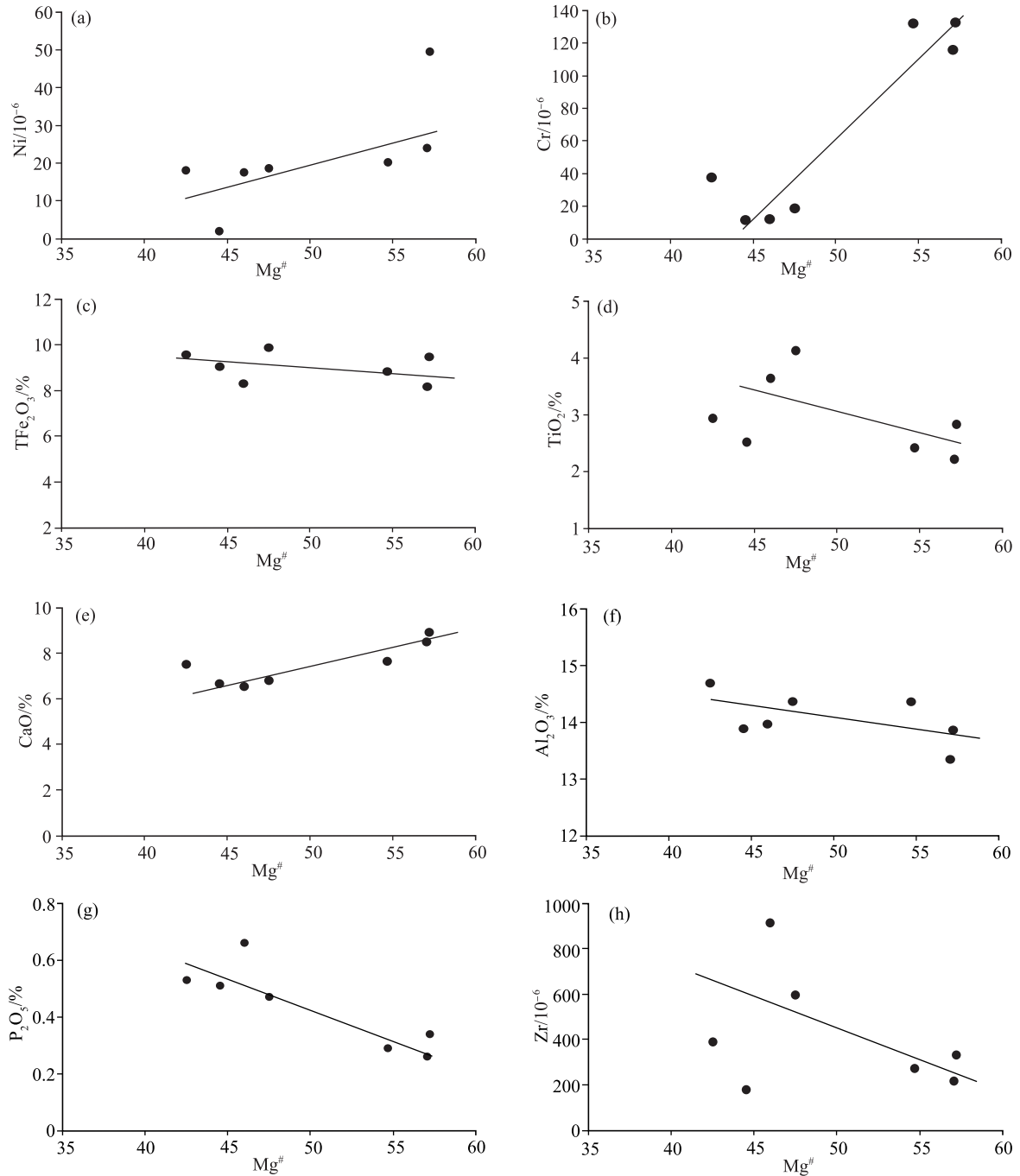


图 8 古堆地区基性岩样品 Harker 图解

Fig. 8 Harker diagrams of basic rock samples in the Gudui area

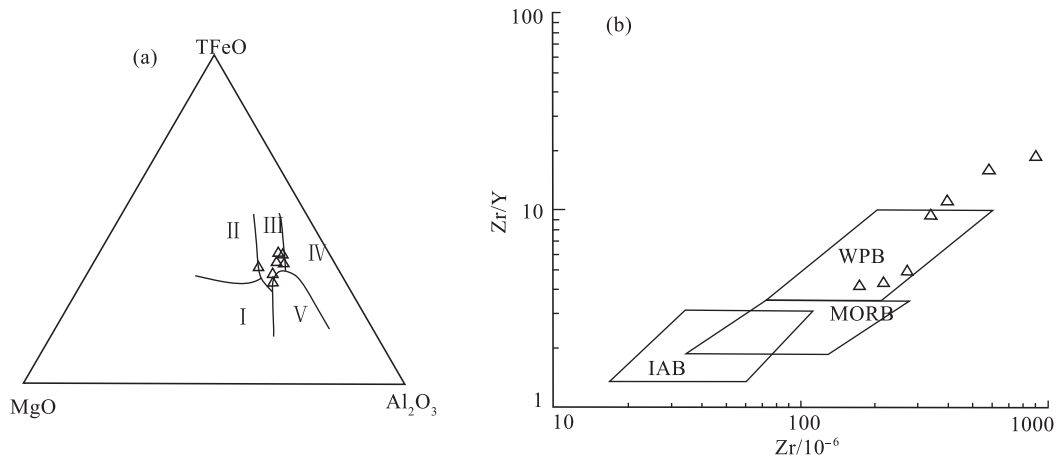


图9 古堆地区基性岩 FMA(a) 和 Zr-Zr/Y(b) 构造判别图解

Fig. 9 FMA(a) and Zr-Zr/Y(b) structural discrimination diagrams of basic rocks in Gudui area

I—洋中脊和洋底; II—洋岛; III—大陆; IV—扩展型中央岛; V—造山带; WPB—板内玄武岩; MORB—大洋中脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩

结果一致。综上所述,古堆地区基性岩形成于板内构造环境。

长期以来,藏南地区基性岩的形成被认为与雅鲁藏布新特提斯洋晚期大规模扩张有关,是被动大陆边缘伸展背景下的产物^[2-3,6-7]。值得注意的是,在雅鲁藏布新特提斯洋晚期发生大规模扩张时,洋脊扩张产生的推动力促使扩张脊两侧的洋壳岩石圈发生相向运动,在被动大陆边缘一侧形成一种挤压背景,因此,用被动大陆边缘伸展模式解释藏南地区基性岩的成因及相应的大地构造背景不妥。另一种解释是,基性岩可能是拉萨陆块南缘雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈向北初始俯冲作用的产物,但前人^[37-40]的研究成果表明,在俯冲作用下形成的镁铁质岩石通常具有明显的 Nb-Ta 槽,并含有非常低的 Ti 含量(如典型岛弧玄武岩的 TiO₂ 含量大部分小于 1%)和 Zr 含量(岛弧玄武岩 Zr 含量小于 130×10⁻⁶)。而研究区基性岩的 Ti(TiO₂ 平均值为 3.0%)和 Zr(Zr 含量平均值为 414.03×10⁻⁶)含量较高,且不具有 Nb-Ta 槽特征,因此用俯冲作用解释古堆地区基性岩的构造背景也不合适。

朱弟成等^[41-42]的研究表明,早白垩世措美大火成岩省内发生了大规模的岩浆活动,形成了 OIB 型基性火山岩、酸性火山岩等,这些白垩纪火山岩主要分布于浪卡子—洛扎—错那—措美等地区(图 1-b)。随后的研究表明,措美大火成岩省地幔柱头部物质成分(Sr/Nd 同位素、锆石 Hf 同位素, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_t =

0.7047, $\epsilon_{Nd}(t) = +1.5$, $\epsilon_{Hf}(t) = +2.1 \sim +5.7$)与白垩纪 Kerguelen 地幔柱头部物质成分非常相似^[42],指示措美大火成岩省与 Kerguelen 地幔柱具有共同的岩浆源区^[43-44],并认为 OIB 型基性岩可能是 Kerguelen 地幔柱早期活动的产物^[41-42,45-46]。夏瑛等^[38]研究发现,措美大火成岩省 OIB 型镁铁质岩具有典型的高 TiO₂、P₂O₅ 特征,碱性镁铁质岩(OIB)未受地壳混染,且不具有 Nb-Ta 负异常。本次研究发现,古堆地区基性岩 TiO₂(平均值为 3.0%)和 P₂O₅(平均值为 0.4%)含量较高,与夏瑛等^[38]研究成果一致(TiO₂ 平均值为 3.0%, P₂O₅ 平均值为 0.4%),且样品未受地壳混染,不具有 Nb-Ta 负异常。此外,辉长岩和辉绿岩的结晶年龄分别为 133.8±0.8 Ma、137.7±0.9 Ma,与措美大火成岩省 OIB 型基性岩的结晶年龄相近(130~136 Ma)^[41],且同样显示 OIB 的地球化学特征。综上所述,古堆地区基性岩属于措美大火成岩省的一部分,其成因可能是 Kerguelen 地幔柱早期活动的产物。

6 结 论

(1)通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年得出,藏南古堆地区辉长岩、辉绿岩年龄加权平均值分别为 133.8±0.8 Ma, (MSDW = 0.9) 和 137.7±0.9 Ma (MSDW = 1.6),形成于早白垩世。

(2)辉长岩和辉绿岩具有高 TiO₂ 和 P₂O₅ 特点,不具有 Nb-Ta 负异常特征。微量元素比值(如

Ce/Zr、Zr/Nb、Zr/Y、Th/Yb) 及稀土元素配分模式均与板内洋岛玄武岩(OIB)相似。

(3) 古堆地区基性岩形成于板内构造环境, 其成因可能是 Kerguelen 地幔柱早期活动的产物, 且基性岩浆在上侵过程中未受到地壳混染。

致谢: 野外工作过程中, 得到武警黄金第十一支队李武毅、陈武等诸多同仁的帮助; 论文写作过程中, 得到桂林理工大学地球科学学院罗先熔教授的指导; 审稿专家提出宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 449-450.
- [2] 江思宏, 聂凤军, 胡朋, 等. 藏南基性岩墙群的地球化学特征[J]. 地质学报, 2007, 81(1): 60-72.
- [3] 童劲松, 刘俊, 钟华明, 等. 藏南洛扎地区基性岩墙群锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及构造意义[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1654-1664.
- [4] 周邦国, 张志, 李光明, 等. 藏南柯月铅锌矿床辉绿岩年代学及地球化学特征研究[J]. 矿物岩石, 2018, 38(1): 27-34.
- [5] 李永灿, 周清, 李应棚, 等. 藏南色岗辉绿岩墙群年代学及成因研究[J]. 高校地质学报, 2017, 23(1): 26-38.
- [6] 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考[J]. 地质通报, 2004, 23(1): 12-19.
- [7] 钟华明, 童劲松, 夏军, 等. 藏南羊卓雍错南部桑秀组火山岩的特征及构造环境[J]. 地质通报, 2005, 24(1): 72-79.
- [8] Zhu D C, Chuang S L, Mo X X. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day southeastern Australia[J]. *Geology*, 2009, 37: 583-586.
- [9] 裘碧波, 朱弟成, 赵志丹, 等. 藏南措美残余大火成岩省的西延及其意义[J]. 岩石学报, 2011, 26(7): 2207-2216.
- [10] Hu X M, Jansa L, Chen L, et al. Provenance of Lower Cretaceous Wölong volcanics in the Tibetan Tethyan Himalaya: Implications for the final breakup of Eastern Gondwana [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 223(3/4): 193-205.
- [11] 张运昌, 陈彦, 杨青, 等. 西藏冈底斯带中部南木林地区林子宗群火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 2019, 38(5): 719-732.
- [12] 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 等. 藏南地区金和铋矿床(点)类型及其时空分布特征[J]. 地质学报, 2005, 79(3): 373-385.
- [13] 张刚阳. 藏南金铋多金属成矿带成矿模式与找矿前景研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2012.
- [14] Murphy M A, Harrison T M. The relationship between leucogranites and the South Tibet an detachment system, Rongbuk Valley, southern Tibet[J]. *Geology*, 1999, 27: 831-834.
- [15] 周剑雄, 陈振宇. 锆石等测年矿物的电子探针及阴极射线致发光综合研究新方法[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 31-35.
- [16] Claoue-Long J C, Compston R W, Fanning C M. Two Carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis [C]//Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, et al. *Geochronology time scales and global stratigraphic coelation: SEPM Special publication*, 1995, 5(4): 3-31: Implications for the final breakup of Eastern Gondwana: *Sedimentary Geology*, 1995, 223(3/4): 193-205.
- [17] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26-31.
- [18] 吕晓春, 任冲, 成明, 等. 藏南隆子地区早白垩世双峰式火山岩的发现——来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学的证据[J]. 地质论评, 2016, 62(4): 945-954.
- [19] 陈雪峰, 刘希军, 许继峰, 等. 桂西那坡基性岩地球化学: 峨眉山地幔柱与古特提斯俯冲相互作用的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(3): 531-548.
- [20] 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄辉岩的岩石学研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3179-3196.
- [21] 曹光跃, 薛怀民, 刘哲, 等. 鲁西临朐地区早白垩世青山群火山岩的年代学、地球化学及岩石成因[J]. 地质学报, 2018, 92(3): 503-519.
- [22] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C]//Thorpe R S. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester, England: John Wiley and Sons, 1982: 528-548.
- [23] 丁枫, 高建国, 徐琨智. 西藏南部绒布地区基性岩脉岩石地球化学、年代学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2020, 36(2): 391-408.
- [24] Taylor S R, Mc Clellan S. *The continental crust: Composition and evolution* [M]. Blackwell Scientific Publications, 1985: 209-230.
- [25] 张航, 柏勇, 徐争启, 等. 攀枝花大田地区辉绿岩脉岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2018, 38(4): 30-38.
- [26] 郑吉林, 刘涛, 徐立明, 等. 大兴安岭嘎仙蛇绿混杂岩中超镁铁质岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2020, 39(4): 480-490.
- [27] Halama R, Marks M, Brgmann G, et al. Crustal contamination of mafic magmas: evidence from a petrological, geochemical and Sr-Nd-Os-O isotope study of the proterozoic Isortoq dike swarm, South Greenland [J]. *Lithos*, 2004, 74: 199-232.
- [28] Sun S S, McDough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in ocean basins*. Geol. Soc. London. Spec. Publ., 1989, 42: 313-345.
- [29] Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constrains [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 381-297.
- [30] Lassiter J C, Depaolo D J. Plume lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts; chemical and isotopic constrains [C]//Mahoney J J, Coffin M F. *Large igneous provinces; Continental, oceanic and planetary flood volcanism*, Washington DC. American Geophysical Union Monograph, 2000, 100: 335-355.
- [31] Perfit M R, Gust D A, Bench A E. Chemical Characteristics of Island-Arc Basalts: Implications for Mantle Sources [J]. *Chemical Geology*,

- 1980,30: 227-256.
- [32] 贺新星,肖龙,王国灿,等.西准噶尔晚古生代中基性岩墙群岩石学成因及地质意义[J].地球科学—中国地质大学学报,2015,40(5): 777-796.
- [33] 董国臣,莫宣学,赵志丹,等.西藏冈底斯南带辉长岩及其所反映的壳幔作用信息[J].岩石学报,2008,24(2): 203-210.
- [34] 王喜臣,夏斌,刘维亮,等.西藏蓬错蛇绿岩年代学、地球化学及岩石成因[J].大地构造与成矿学,2018,42(3): 550-569.
- [35] 张招崇,王福生,郝艳丽,等.峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J].地质学报,2004,78(2): 171-180.
- [36] 朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等.特提斯喜马拉雅桑秀组英安岩锆石 SHRIMP 年龄及其意义[J].科学通报,2005,50(4): 375-379.
- [37] 张雨轩,解超明,于云鹏,等.早侏罗世新特提斯洋俯冲作用——来自松多高镁闪长岩锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素的制约[J].地质通报,2018,37(8): 1387-1399.
- [38] 夏瑛,朱弟成,赵志丹,等.藏东南措美大火成岩省中 OIB 型镁铁质岩的全岩地球化学和锆石 Hf 同位素[J].岩石学报,2012,28(5): 1588-1602.
- [39] 刘飞,杨经绥,连东洋,等.雅鲁藏布江缝合带西段北亚带的基性岩成因和构造意义[J].地球学报,2015,36(4): 441-454.
- [40] Kelemen P B, Hanghoj K, Greene A R, et al. One View of the geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust [J]. Treatise on Geochemistry, 2003,3: 593-659.
- [41] 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].地学前缘,2009,16(2): 1-20.
- [42] 朱弟成,夏瑛,裘碧波,等.为什么要提出西藏东南部早白垩世措美大火成岩省[J].岩石学报,2013,29(11): 3659-3670.
- [43] Frey F A, McNaughton N J, Nelson D R, et al. Petrogenesis of the Bunbury basalt, western Australia: Interaction between the Kerguelen plume and Gondwana lithosphere? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1996,144(1/2): 163-183.
- [44] Ingle S, Scoates J S, Weis D, et al. Origin of Cretaceous continental basalts in southwestern Australia and eastern Indian: Insights from Os and Hf isotopes[J]. Chemical Geology, 2004,209(1/2): 83-106.
- [45] 杨高学,李永军,佟丽莉,等.西准噶尔蛇绿混杂岩中洋岛玄武岩研究新进展[J].地质学报,2015,89(2): 392-405.
- [46] 陈万峰,王金荣,张旗,等.洋岛和洋底高原玄武岩数据挖掘: 地球化学特征及其与 MORB 的对比[J].地质学报,2017,91(11): 2443-2455.