

冈底斯带东段鲁朗—墨脱地区中新世花岗岩的地球化学、年代学及成因

耿全如¹, 郑来林¹, 董 翰², 孙志明¹, 欧春生², 王小伟²

GENG Quan-ru¹, ZHENG Lai-lin¹, DONG Han²,

SUN Zhi-ming¹, OU Chun-sheng², WANG Xiao-wei²

1. 国土资源部成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082;

2. 甘肃省地勘局第三地质矿产勘察院, 甘肃 兰州 730050

1. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China;*

2. *Third Geological and Mineral Exploration Institute, Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration, Lanzhou 730050, Gansu, China*

摘要:冈底斯东段的鲁朗—色季拉和墨脱—崩崩拉一带花岗岩的岩石类型主要为二长花岗岩、黑云母花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等。墨脱花岗岩的K-Ar年龄为19~22 Ma;鲁朗花岗岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为14~18 Ma。岩石地球化学研究结果表明,本区花岗岩主要属于高钾钙碱性系列和钙碱性系列,同时具有某些埃达克岩的特征,表现为高SiO₂(65.60%~76.40%)、Al₂O₃(12.32%~17.23%)、Sr/Y(2.41~86.46)、(La/Yb)_n(6.65~56.14)比值,低Y(4.23×10⁻⁶~39.40×10⁻⁶)等特点。呈典型的LREE和LILE富集型分配模式, Eu为正到弱负异常。本区中新世花岗岩主要来源于中下陆壳的硅铝质成分和镁铁质成分的重熔,不同于具埃达克岩成分的冈底斯中新世含矿花岗岩斑岩。以中新世花岗岩侵位为标志,东喜马拉雅构造结地区的初始伸展可能在22 Ma左右,早于冈底斯中段(20 Ma左右)。

关键词:冈底斯东段;中新世花岗岩;地球化学;年代学;初始伸展

中图分类号:P588.12⁺1;P595;P597⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2008)01-0069-14

Geng Q R, Zheng L L, Dong H, Sun Z M, Ou C S, Wang X W. Geochemistry, geochronology and petrogenesis of Miocene granites in the Lunang-Mêdog area in the eastern segment of the Gangdise belt, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(1): 69-82

Abstract: The major types of Miocene granites in Lunang-Sejila and Mêdog-Bungbung La in the eastern segment of the Gangdise Mountains are monzogranite, biotite granite, granodiorite and quartz diorite. The K-Ar ages of the Mêdog granite are 19-22 Ma and the ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of the Lunang granite are 14-18 Ma. Geochemical study suggests that the granites in the study area mainly belong to the calc-alkaline and high-K calc-alkaline series and show adakitic affinity, i.e., they have high contents of SiO₂ (65.60%-76.40%) and Al₂O₃ (12.32%-17.23%), high ratios of Sr/Y (2.41-86.46) and (La/Yb)_n (6.65-56.14) and a low Y content (4.23×10⁻⁶-39.40×10⁻⁶). They also display LREE- and LILE-enriched patterns with positive to weak negative Eu anomalies. Miocene granites in this area were mainly derived from partial melting of the mid-lower continental sialic and mafic crust, which is different from Miocene mineralized granite porphyry of adakitic affinity in Gangdise. The initial crustal extension in the syntax area in the eastern Himalayas may have occurred at ~22 Ma, earlier than that in the central segment of the Gangdise (~20 Ma), as indicated by Miocene granite emplacement.

Key words: eastern segment of Gangdise; Miocene granite; geochemistry; geochronology; initial crustal extension

收稿日期:2007-08-03;修订日期:2007-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40573003,40773001)和中国地质调查局国土资源调查项目(编号:H46C003004)成果。

作者简介:耿全如(1963-),男,研究员,从事青藏高原构造地质和岩石学研究。E-mail: cdgquanru@cgs.gov.cn

西藏冈底斯带位于雅鲁藏布结合带(IYS)和班公湖-怒江结合带(BNS)之间,是青藏高原岩浆活动期次最多、规模最大和岩浆岩类型最复杂的构造-岩浆岩带^[1-3]。冈底斯带花岗岩主要形成于早侏罗世—中新世,在空间上从北向南可分为3个带^[2-3]。北带位于BNS以南和狮泉河-永珠-嘉黎-迫龙藏布断裂带(YNS)以北。花岗岩的时代为170~75 Ma,但主要集中在早白垩世(128~99 Ma),主要为钙碱性系列的石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩。该花岗岩带与班公湖-怒江特提斯洋的俯冲、闭合有关。中带位于YNS以南和麦拉-洛巴堆-米拉山断裂(MLMF)以北,相当于“弧背断隆带”^[4]或“隆格尔-念青唐古拉复合古岛弧带”^[5]。花岗岩的时代主要有三叠纪—早侏罗世(227~195.3 Ma)、晚侏罗世—白垩纪(178~65 Ma)和古近纪—中新世(62~13.6 Ma)3个阶段。该带是晚喜马拉雅期花岗岩(小于40 Ma)集中分布区,被称为“冈底斯小岩体带”^[6]。南带位于MLMF以南和IYS之间,隆格尔-工布江达断隆带以南地区,是冈底斯-下察隅花岗岩带的主体,主要为大型岩基,伴随大规模的中酸性火山岩。莫宣学等^[2]将该带划分为4种成因类型:俯冲型花岗岩类(127~70 Ma)、同碰撞花岗岩类(65~45 Ma)、同碰撞—后碰撞强过铝花岗岩(56~8 Ma)、含铜花岗斑岩(18~12 Ma)。

冈底斯花岗岩是青藏高原地质研究的热点之一。在中新世含矿花岗斑岩带的发现和提出埃达克质花岗斑岩与成矿具有内在联系的理论之后,此类研究显得更加重要。中新世含铜花岗斑岩体分布在冈底斯南缘的墨竹工卡县甲马至谢通门县一带,东西长约400 km、南北宽近50 km,已发现甲马、洞嘎、驱龙、甲马、冲江等含矿斑岩体^[7]。这些含矿斑岩规模一般小于1 km²,断续出露,侵位于俯冲型及碰撞型大花岗岩体或中—新生代含火山岩的地层中。含矿斑岩主要为二长花岗斑岩、石英二长斑岩、正长花岗斑岩,具有埃达克岩的地球化学特征,来源于俯冲的特提斯洋壳和加厚的藏南镁铁质下地壳的部分熔融,与碰撞后伸展阶段的南北向正断层有关^[8-11]。

目前对冈底斯花岗岩带的研究主要侧重于中部的谢通门、羊八井、拉萨和墨竹工卡一带,冈底斯带东段的林芝岩体仅做过少量的年代学和地球化学研究^[12-13]。近年的地质调查发现,鲁朗—色季拉和波密—墨脱一带广泛分布中新世花岗岩,但对这些岩体的研究较薄弱。本区属于冈底斯东段,为喜马拉雅

东构造结的外围,历来备受地质学家的关注。本文在地质调查资料的基础上,对鲁朗—色季拉和墨脱地区的中新世花岗岩进行年代学、岩石地球化学研究,并探讨其成因。

1 花岗岩的地质概况

冈底斯东段可划分为2个花岗岩带^[2-3]。以隋拉-尼弄松多断层(相当于“弧背断隆带”南界断层MLMF的东延部分)为界,北部花岗岩体的时代主要为早侏罗世,局部出露晚三叠世和白垩纪的岩体。根据花岗岩的岩石化学特征、时代和分布规律,晚三叠世—白垩纪花岗岩的形成应与班公湖-怒江特提斯洋的闭合造山有关^[4]。隋拉-尼弄松多断层南部为中新世花岗岩体,分布在大拐弯西北侧的林芝—鲁朗一带和南东侧的墨脱—崩崩拉一带(图1)。

在鲁朗、色齐拉和林芝县一带广泛出露的中新世花岗岩为面积大于1000 km²的巨大岩基(图1)。岩体呈不规则状,长轴略呈NE向展布,侵位于前寒武纪念青唐古拉岩群中,并常见顶垂体。岩体变质变形不明显。围岩为条带状、眼球状黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩、石英岩等。花岗岩体与围岩的边界一般较清楚并常见冷凝边,局部地段岩体与围岩有强烈的混染现象并呈脉状穿插围岩。接触带附近岩体常见硅化,围岩见角岩化。

区域地质调查将鲁朗—色季拉地区的中新世岩基划分为21个大小不等的侵入体,主要包括鲁朗二长花岗岩组合和色季拉石英闪长岩、花岗闪长岩组合^①。其他主要岩石类型还有含斑黑云母二长花岗岩、中粒黑云母石英二长闪长岩、中细粒黑云母花岗闪长岩、细粒英云闪长岩、中粒黑云母石英闪长岩、中粒石英二长岩等。各岩体的岩性和结构单一,仅局部斑晶含量略有变化。

在雅鲁藏布大拐弯东南侧的墨脱—崩崩拉一带,广泛分布的中新世花岗岩基面积大于3400 km²,是波密-察隅花岗岩带的一部分^[15-17]。围岩为念青唐古拉岩群,接触界线较清楚,局部围岩见强烈的脉体穿插和角岩化、同化混染现象等^②。墨脱—崩崩拉一带的岩基由36个大小不等的侵入体组成,可归并为墨脱黑云母花岗岩组合和金珠拉花岗闪长岩、英云闪长岩组合。其他岩石类型还有中粒含斑黑云母二长花岗岩、中粒黑云母二长花岗岩、中粒黑云母石英闪长岩等。

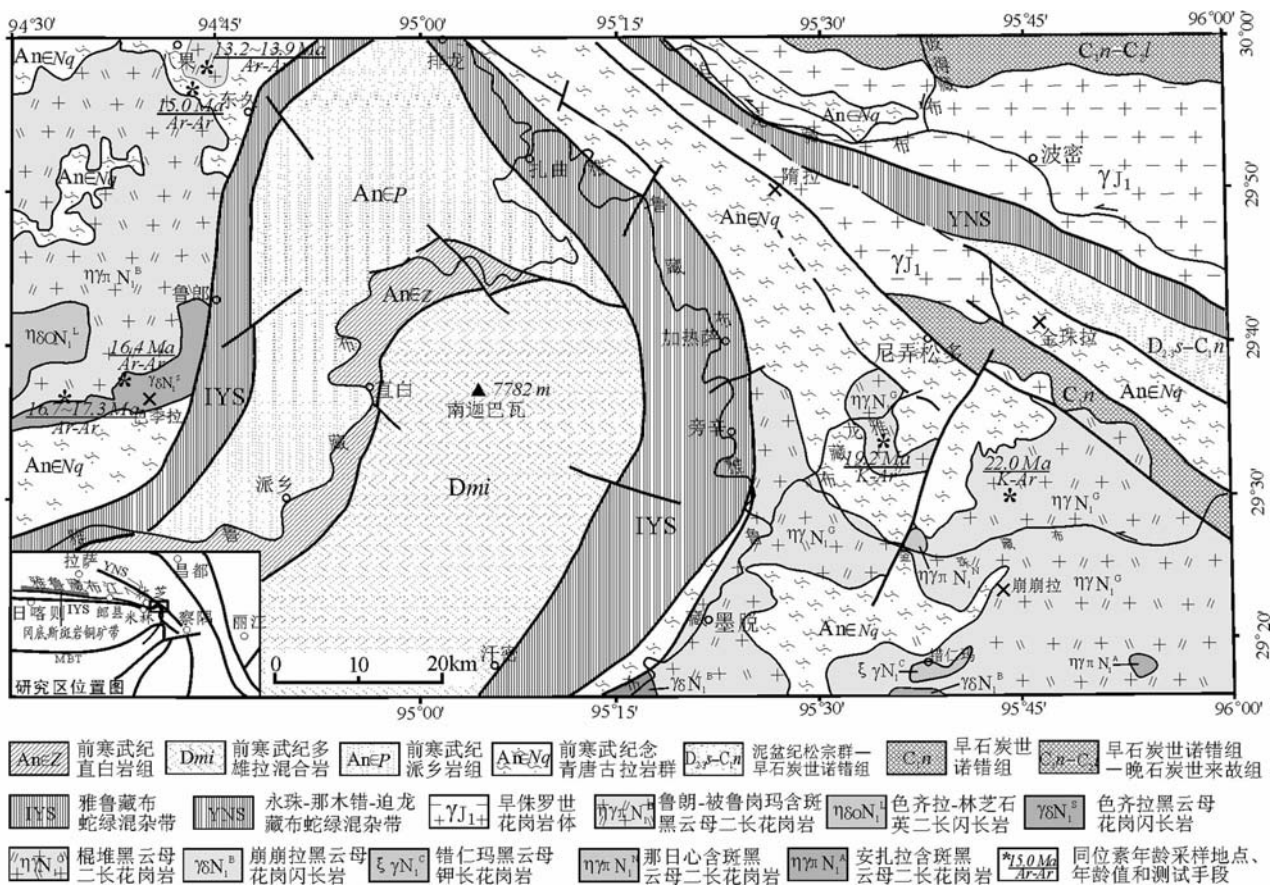


图1 雅鲁藏布大峡谷地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Yarlung Zangbo canyon

据野外和镜下观察,色季拉—鲁朗地区的中新世花岗岩主要为中—细粒花岗结构,块状构造。局部为似斑状结构,斑晶含量可达5%~8%。矿物粒度1~6 mm,主要为斜长石(20%~40%)、钾长石(25%~50%)、石英(10%~30%)、黑云母(2%~12%)、白云母(2%~5%),副矿物主要有磷灰石、磁铁矿、榍石。岩石局部轻微蚀变,次生矿物为绿帘石、绿泥石、方解石等。墨脱—崩崩拉地区的中新世花岗岩主要为中—粗粒花岗结构,矿物粒度达2~6 mm。主要矿物为斜长石、钾长石、石英、黑云母和白云母,含量与色季拉—鲁朗岩体相似。副矿物主要为磷灰石、磁铁矿、榍石和锆石。

研究区中新世花岗岩的主要矿物成分和副矿物类型与南冈底斯中段含矿埃达克质小花岗岩体相似^[9],与喜马拉雅带和拉轨岗日带喜马拉雅期小型S型花岗岩不同,后者的副矿物主要为白云母、电气石、磁铁矿、榍石、铁铝榴石等^[3]。

2 花岗岩的岩石地球化学特征

笔者在1:20万波密幅和1:25万墨脱幅野外地质调查的基础上,对色季拉—鲁朗和墨脱—崩崩拉地区的中新世花岗岩进行了显微镜下的观察研究,选取较新鲜的样品进行岩石化学测试。常量元素由国土资源部成都地质矿产研究所测试,测试方法为火焰原子吸收法,分析精度优于1%。微量元素和稀土元素由国家地质实验测试中心完成。检测使用仪器为等离子质谱ICP-MS(TJA X-Series)、等离子光谱ICP-AES(TJA IRIS)。常量元素、微量元素、稀土元素测试结果和重要岩石化学参数见表1、表2。

2.1 常量元素

本区花岗岩类的SiO₂含量除少量英云闪长岩和石英闪长岩较低外,主要在70%~75%之间,平均为71.84%。酸性程度高于冈底斯中新世含矿斑岩(SiO₂平均为69.39%)^[9],也高于中段花岗岩类的平均值

(65.66%)^[18]。Al₂O₃含量为12.32%~17.23%，平均为14.57%，略低于冈底斯中新世含矿斑岩(14.88%)和冈底斯中段花岗岩的平均值(15.37%)；铝饱和指数A/CNK为0.96~1.35，平均为1.08，说明总体属于过铝质系列^[8,10,18]。

镁铁比值 $Mg^* [(Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+}))]$ 在鲁朗地区花岗岩中为15.30~37.03，平均为31.83；在墨脱花岗岩中为26.93~57.46，平均为43.90。两者均与冈底斯含矿斑岩的相应比值(Mg^* 为32~74)相似^[10]。

K₂O含量在鲁朗—色齐拉岩体和墨脱—崩崩拉岩体中相似，主要为2.00%~6.00%，平均为3.59%，个别样品(S-90)K₂O含量极低，可能与后期的钠长石化有关；K₂O/Na₂O平均为1.14。K₂O含量明显低于冈底斯含矿花岗岩(2.6%~8.7%)^[10]。

在SiO₂—K₂O图解(图2)中，本区花岗岩样品的投影点较分散，但多数投点落在高钾钙碱性系列和钙碱性系列范围内。与冈底斯中新世含矿花岗岩斑岩的差别主要是SiO₂含量高，与南冈底斯带白垩纪花岗岩有些相似。这可能暗示花岗岩的成因与南冈底斯带白垩纪的俯冲—消减作用有关。

研究区花岗岩的全碱含量低于冈底斯中新世含矿花岗岩斑岩。在色季拉—鲁朗地区，全碱含量为5.70%~8.67%，平均为6.78%，与南冈底斯带白垩纪花岗岩相似(6.45%左右)；墨脱—崩崩拉岩体全碱含量为3.83%~9.83%，平均为7.37%。两者均低于冈底斯中新世含矿花岗岩斑岩(8.81%)。

总之，与同期的冈底斯中新世含矿花岗岩斑岩相比，该花岗岩SiO₂含量偏高，全碱和K₂O含量偏低，总体仍属于高钾钙碱性系列和钙碱性系列，与南冈底斯带白垩纪花岗岩也存在某些相似之处。

2.2 微量元素和稀土元素

在微量元素蜘蛛图和稀土元素配分模式图中，研究区花岗岩显示典型的LILE和LREE富集型模式(图3)。鲁朗岩体的稀土元素总量 $\sum REE$ 为55.66×10⁻⁶~293.19×10⁻⁶(均值137.88×10⁻⁶)，轻、重稀土元素比值LREE/HREE为10.94~21.12(均值15.90)，(La/Yb)_n为12.40~37.99(均值27.89)。墨脱岩体的稀土元素总量 $\sum REE$ 为76.43×10⁻⁶~424.10×10⁻⁶(均值172.26×10⁻⁶)，LREE/HREE为6.85~28.93(均值15.46)，(La/Yb)_n为6.65~56.14(均值21.32)。鲁朗和墨脱2地花岗岩稀土元素的特征相似。在蜘蛛图中，鲁朗花岗岩体的显著特点是Nb、P、Ti呈明显的负异常；墨脱地区的岩体则

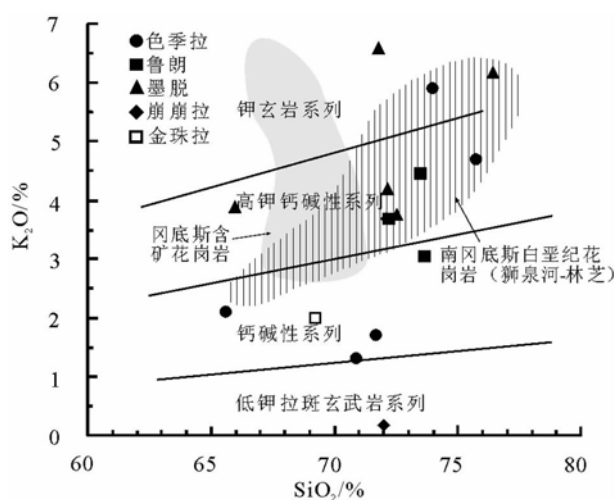


图2 研究区花岗岩SiO₂—K₂O图解
(冈底斯含矿花岗岩的范围据参考文献[10])

Fig. 2 SiO₂—K₂O diagram for granites in the study area

显示十分显著的Nb、P、Zr负异常，Ti异常不明显。Sr、Eu在鲁朗岩体中为正异常，在墨脱地区呈弱负异常(图3、表2)。鲁朗岩体的Yb、Y含量低，分别为0.49×10⁻⁶~2.33×10⁻⁶(均值0.87×10⁻⁶)、4.23×10⁻⁶~22.41×10⁻⁶(均值11.72×10⁻⁶)。墨脱岩体的Yb、Y、Sc含量分别为0.64×10⁻⁶~2.47×10⁻⁶(均值1.36×10⁻⁶)、6.00×10⁻⁶~39.40×10⁻⁶(均值13.71×10⁻⁶)、1.56×10⁻⁶~12.70×10⁻⁶(均值3.83×10⁻⁶)。鲁朗和墨脱岩体也具有较高的Sr/Y和La/Yb比值，但Zr/Sm比值在墨脱岩体中偏低(表3)。

从微量元素和稀土元素的地球化学特征看，本区的中新世花岗岩与典型的埃达克岩、冈底斯带中新世含矿的埃达克质斑岩有相似之处^[19-21]，与南冈底斯带的白垩纪花岗岩则区别较大(表3)。

3 ⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素年代学

野外区域地质调查和花岗岩的地质年代学研究结果表明，本区北部的波密花岗岩带以早侏罗世为主，局部出现晚三叠世花岗岩，其全岩Rb/Sr法年龄为215 Ma±63 Ma、195.3 Ma±7.0 Ma、153.0 Ma±9.0 Ma等^[14]。在墨脱东北部江别塘和尼弄松多分别获得花岗岩的K/Ar法年龄为22.0 Ma和19.2 Ma^②。墨脱—崩崩拉—金珠拉一带属于察隅喜马拉雅期花岗岩带的北西段，其南东部大量出现年龄为10~25 Ma的花岗岩体^[16]，因此本区中新世花岗岩体的时代基本可以确定。

表1 中新世花岗岩的常量元素分析结果

Table 1 Major element data for Miocene granites in the study area

样品号 采样位置 岩 性	t-26 鲁朗—被鲁冈玛 含斑黑云母二长花岗岩	t-46 色齐拉 黑云花岗闪长岩	t-39 色齐拉 黑云花岗闪长岩	t-58 色齐拉 黑云花岗闪长岩	t-9 林芝拐弄 石英二长闪长岩	t-98 林芝拐弄 石英二长闪长岩	t-143 德母拉 石英 闪长岩	t-76 薄 穷 英云 闪长岩
SiO ₂	73.66	73.5	72.24	73.98	71.66	75.72	65.6	70.9
TiO ₂	0.23	0.3	0.25	0.16	0.39	0.16	0.64	0.33
Al ₂ O ₃	14.16	13.47	14.54	13.34	14.85	13.1	17.23	15.44
Fe ₂ O ₃	0.36	0.3	0.73	0.49	0.93	0.33	1.05	0.48
FeO	1.71	1.38	0.99	1.04	1.3	0.66	2.39	1.71
MnO	0.06	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02
MgO	0.61	0.45	0.34	0.15	0.67	0.3	1.1	0.68
CaO	2.62	1.89	1.69	0.69	2.59	1.35	3.39	3.09
Na ₂ O	2.9	2.77	3.7	2.76	3.98	2.49	4.26	4.42
K ₂ O	3.05	4.45	3.69	5.91	1.72	4.69	2.1	1.32
P ₂ O ₅	0.05	0.09	0.09	0.06	0.07	0.06	0.3	0.11
LOI	1.03	0.57	0.91	0.66	0.86	1.07	1.07	0.65
总量	100.44	99.21	99.20	99.28	99.04	99.95	99.16	99.15
A/CNK	1.10	1.05	1.11	1.09	1.13	1.13	1.12	1.08
Mg*	34.84	32.72	26.90	15.30	35.86	35.85	37.03	36.14
样品号 采样位置 岩 性	b-10 墨脱错仁玛 黑云母 钾长花岗岩	S-99 黑云母二长花岗岩	S-147 棍 堆 黑云母二长花岗岩	S-113 棍 堆 黑云母二长花岗岩	S-116 棍 堆 黑云母二长花岗岩	S-90 崩 崩 拉 黑云花岗闪长岩	b-18 崩 崩 拉 黑云母石英闪长岩	S-112 金珠拉 黑云母石英闪长岩
SiO ₂	71.78	76.4	72.14	72.54	65.96	72.02	72.12	69.2
TiO ₂	0.13	0.06	0.16	0.18	0.44	0.33	0.16	0.36
Al ₂ O ₃	14.78	12.32	14.61	14.48	16.22	14.6	14.6	15.41
Fe ₂ O ₃	0.49	0.19	1.23	0.18	2.24	1.17	0.97	1.49
FeO	0.59	0.83	0.53	1.36	1.48	1.76	0.82	1.26
MnO	0.03	0	0.04	0.01	0.05	0.05	0.04	0.04
MgO	0.29	0.64	0.56	1.04	1.66	1.12	0.35	1.97
CaO	1.21	1.35	2.03	1.93	2.92	2.54	1.63	3.81
Na ₂ O	3.24	2.26	3.24	3.86	4.26	3.66	4.02	4
K ₂ O	6.59	6.16	4.2	3.76	3.88	0.17	3.68	2
P ₂ O ₅	0.05	0	0	0	0	0	0.05	0
LOI	0.45	0.98	1.13	1.4	0.94	1.61	0.99	1.01
总量	99.63	101.19	99.87	100.74	100.05	99.03	99.43	100.55
A/CNK	1.01	0.96	1.08	1.04	0.98	1.35	1.08	0.98
Mg*	33.40	53.27	37.89	54.92	45.85	41.52	26.93	57.46

注:氧化物含量%;Mg*=Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺)

在本区西北部的林芝—鲁朗岩基的林芝一带,测得林芝岩体的K/Ar法年龄为18.8~21.0 Ma、20.3 Ma和23.9 Ma,同时在片麻状花岗岩中测得锆石U—Pb年龄为73.5 Ma,可能是继承性锆石的年龄^[23-24]。1:25万林芝幅地质调查也采用了这些年龄数据^④。虽然林

芝—鲁朗岩基西段的年龄可以确认为中新世,但是岩基东段的色季拉—鲁朗一带则没有年龄数据。因此笔者在本区开展区域地质调查的过程中,对鲁朗—色季拉一带的花岗岩进行了⁴⁰Ar/³⁹Ar单矿物年代学测试,证实该岩基的时代为中新世。

本文 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测试由中国科学院广州地球化学研究所同位素中心采用MM-1200型质谱仪完成,测试对象为单矿物样品,包括7件黑云母和1件白云母。采用9阶段加热分析,所获数据均构成良好的年龄坪和相关性很高的等时线(测试数据参见区域地质调查成果^①和参考文献[26]),年龄样品采样位置见图1。所有样品均进行了等时线和反等时线计算,结果显示 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄与 $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线和 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}-^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄的一致性良

好,主要测试结果和重要参数见图4、图5和表4。坪年龄对应的 ^{39}Ar 析出率为87.28%~99.34%,平均达95.51%。等时线的MSWD值为0.25~3.8,反等时线的MSWD值为0.07~2.0,反映等时线和反等时线的精度较高,仅部分样品的数据点有些偏差。等时线对应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为243~310,平均值为269,略低于大气中的Ar的成分(295.5),说明样品中的过Ar有较小的影响^[27]。综上所述,8件单矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 年龄结果可信。

表2 中新世花岗岩的微量元素和稀土元素分析结果

Table 2 Trace element and REE data for Miocene granites in the study area

样品号	t-26	t-46	t-39	t-58	t-9	t-98	t-143	t-76	M1(00) b10	b-10
采样位置	鲁朗—被鲁冈玛			色齐拉		林芝拐弄	德母拉	薄穷	墨脱错仁玛	
岩性	含斑黑云母二长花岗岩			黑云母花岗 闪长岩		石英二长闪长岩	石英 闪长岩	英云 闪长岩	黑云钾长花岗岩	
La	42.77	19.98	26.92	65.22	27.36	13.11	32.56	25.06	19.7	18.52
Ce	85.14	34.89	53.67	136.5	53.5	24.3	60.69	46.38	38.6	33.31
Pr	9.96	4.06	6.52	15.25	6.4	2.83	7.36	5.09	3.83	4.01
Nd	32.16	12.69	21.84	49.77	19.86	8.91	24.7	16.56	13.6	12.96
Sm	6.4	2.48	3.99	9.42	3.2	1.68	4.21	2.57	2.57	2.3
Eu	1.86	0.81	0.8	0.47	0.99	1.01	1.01	1.02	0.66	0.62
Gd	4.96	1.89	2.69	6.89	2.06	1.22	3.33	1.7	1.72	1.55
Tb	0.78	0.3	0.36	1.03	0.31	0.21	0.61	0.25	0.13	0.25
Dy	4.11	1.35	1.57	4.57	1.35	0.93	3.75	1.16	1.21	1.19
Ho	0.89	0.25	0.29	0.75	0.25	0.17	0.68	0.23	0.27	0.24
Er	2.52	0.64	0.72	1.78	0.64	0.5	1.67	0.61	0.65	0.64
Tm	0.39	0.09	0.1	0.23	0.09	0.08	0.19	0.09	0.11	0.1
Yb	2.33	0.54	0.54	1.16	0.49	0.62	0.67	0.58	0.65	0.64
Lu	0.31	0.08	0.08	0.15	0.08	0.09	0.09	0.09	0.1	0.1
ΣREE	194.58	80.05	120.09	293.19	116.58	55.66	141.52	101.39	83.8	76.43
δEu	0.97	1.10	0.71	0.17	1.11	2.06	0.80	1.41	0.91	0.95
LREE/HREE	10.94	14.57	17.91	16.70	21.12	13.57	11.88	20.53	16.31	15.23
(La/Yb) _n	12.40	25.00	33.69	37.99	37.73	14.29	32.84	29.20	20.48	19.55
Cr	9.1	3.6	3	3	9.9	4.8	8.1	4.7	24.7	5.6
Sc									1.56	
V	26.7	23.1	19.8	6.6	29.5	16.8	45.2	14.2	11.4	12
Rb	78	142	108	385	75	136	104	60	137	162
Ba	909	768	766	272	490	1063	506	223	923	1114
Sr	285	241	409	73	470	227	632	530	399	408
Ta	0.5	0.6	0.5	1	0.8	0.5	0.8	0.5	0.51	0.5
Nb	9.3	12.8	11	29	12.5	9.6	15.6	10.5	3.63	10
Hf	5.8	4.2	4.1	4.7	4.9	3	5.3	4.6	0.6	2.6
Zr	197	172	147	158	189	122	238	196	4.2	88
Y	22.41	6.47	8.1	19.62	6.52	4.23	20.28	6.13	6	6.41
Th	16.6	9.2	8.4	43.3	8.5	8.9	8.3	7.1		7.3
U	0.6	0.8	0.5	1.8	0.5	0.8	0.6	0.5	12	0.6
Sr/Y	12.72	37.25	50.49	3.72	72.09	53.66	31.16	86.46	66.50	63.65
Y/Yb	9.62	11.98	15.00	16.91	13.31	6.82	30.27	10.57	9.23	10.02
δSr	0.54	0.96	1.13	0.09	1.34	1.31	1.25	1.61	1.65	1.84

续表 2

样品号	M1(00)b-9	M1(00)b-2	M1(00)b-49	M1(00) b-1	M1(00) b-27	M1(00) b-4	M1(00) b-13	M1(00) b-25	M1(00) b-18	b-18
采样位置	墨脱安扎拉		那心日		棍堆			崩崩拉		
岩性	斑状黑云 二长花岗岩		含斑黑云 二长花岗岩		黑云母二长花岗岩			黑云母花岗岩闪长岩		
La	27.8	79	33.8	18.1	57.7	22.6	108	46.9	24.3	22.85
Ce	55.3	170	62.6	37.6	108	42.3	202	99.3	47.5	43.09
Pr	5.95	18.7	6.64	3.97	10.8	4.23	19.3	9.73	5	4.85
Nd	19.7	70.6	19.9	15.6	34.4	15	67.5	39.1	15.8	15.18
Sm	3.33	15.8	4	3.79	5.56	2.9	11.1	8.66	3.02	2.57
Eu	0.75	1.24	0.8	0.59	1.12	0.62	2.03	1.05	0.59	0.56
Gd	2.07	14.2	2.93	3.3	3.41	2.14	6.57	7.14	2.15	1.9
Tb	0.22	1.86	0.46	0.53	0.36	0.32	0.76	1.07	0.3	0.31
Dy	1.25	9.23	2.38	2.97	1.68	1.85	3.04	5.5	1.72	1.53
Ho	0.3	1.69	0.63	0.64	0.4	0.43	0.65	1.21	0.4	0.31
Er	0.83	3.7	1.67	1.8	0.92	1.12	1.39	3.04	1.03	0.87
Tm	0.15	0.44	0.3	0.27	0.16	0.18	0.23	0.44	0.18	0.14
Yb	0.98	2.45	1.84	1.84	0.91	1.17	1.3	2.47	1.19	0.9
Lu	0.18	0.35	0.3	0.27	0.18	0.19	0.23	0.37	0.2	0.14
ΣREE	118.81	389.26	138.25	91.27	225.6	95.05	424.1	225.98	103.38	95.2
δEu	0.81	0.25	0.68	0.50	0.73	0.73	0.67	0.40	0.67	0.74
LREE/HREE	18.87	10.48	12.15	6.85	27.13	11.84	28.93	9.64	13.42	14.61
(La/Yb) _n	19.17	21.79	12.41	6.65	42.85	13.05	56.14	12.83	13.80	17.16
Cr	22.8	47.9	22	25.6	24.8	25.5	25.2	24.9	24.4	3.8
Sc	2.23	12.7	3.22	2.94	4.31	1.83	2.66	5.3	1.57	
V	21.3	46.2	10.4	15.4	35.1	15.5	13.7	15.2	9.65	11.5
Rb	95.3	166	109	160	99.4	89.5	73	108	104	124
Ba	675	129	691	269	1039	546	1848	812	654	653
Sr	472	95	247	131	175	206	451	87	339	490
Ta	1.37	3.39	0.39	2.08	0.79	0.99	0.68	0.75	1.21	1.3
Nb	8.62	28.4	5.62	8.65	14.2	8.21	9.13	13	10	15.7
Hf	1.2	1.6	0.5	4.9	0.8	1.2	0.8	0.6	1	2.8
Zr	13	7.62	3.52	11.3	10.9	16.1	10.9	8.44	20	117
Y	7.44	39.4	13.7	16.3	7.48	10.6	12.9	26.3	9.44	8.5
Th	10		29.1	19						14
U	10	42	29	0	14	6.4	41	19	15	1.5
Sr/Y	63.44	2.41	18.03	8.04	23.40	19.43	34.96	3.31	35.91	57.65
Y/Yb	7.59	16.08	7.45	8.86	8.22	9.06	9.92	10.65	7.93	9.44
δSr	1.35	0.09	0.61	0.54	0.26	0.76	0.37	0.14	1.14	1.75

注:稀土元素和微量元素含量 10^{-6}

在色季拉西侧中细粒花岗岩中测得2件黑云母的 $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线年龄为 $17.2\text{ Ma}\pm 0.8\text{ Ma}$ 和 $17.2\text{ Ma}\pm 1.4\text{ Ma}$,对应的坪年龄为 $16.8\text{ Ma}\pm 0.3\text{ Ma}$ 和 $17.3\text{ Ma}\pm 0.5\text{ Ma}$ 。测得1件白云母的等时线年龄为

$18.2\text{ Ma}\pm 1.6\text{ Ma}$,坪年龄为 $16.7\text{ Ma}\pm 0.3\text{ Ma}$ 。在色季拉西北部细粒英云闪长岩中测得黑云母等时线年龄 $16.8\text{ Ma}\pm 1.2\text{ Ma}$,坪年龄为 $16.4\text{ Ma}\pm 0.3\text{ Ma}$ (图1、图4、图5和表4)。

表3 本区花岗岩、埃达克岩及其他相关侵入岩的地球化学指标对比

Table 3 Comparison of geochemical proxies for granites, adakite and other related intrusive rocks in the area

	本区花岗岩	Adakite	冈底斯含矿斑岩	南冈底斯白垩纪花岗岩
Yb/ 10^{-6}	鲁朗 0.87, 墨脱 1.36	≤ 1.9	0.47	2.18
Y/ 10^{-6}	鲁朗 11.72, 墨脱 13.71	≤ 18	4.93	20.28
Sc/ 10^{-6}	墨脱 1.56~12.7, 均值 3.83	< 10	3.59	8.25
Sr/Y	鲁朗 43.44, 墨脱 33.06	$> 20\sim 40$	97.89	19.51
La/Yb	鲁朗 41.28, 墨脱 31.56	> 20	42.53	17.58
Zr/Sm	鲁朗 52.28, 墨脱 9.15	> 50	48.75	36.19
Eu 异常	鲁朗 1.04, 墨脱 0.67	正	0.95	0.65
Sr 异常	鲁朗 1.03, 墨脱 0.87	正	正	无一弱负

注: Adakite 据参考文献[19]; 冈底斯含矿斑岩据文献[8]; 南冈底斯白垩纪花岗岩据文献[26, 30]

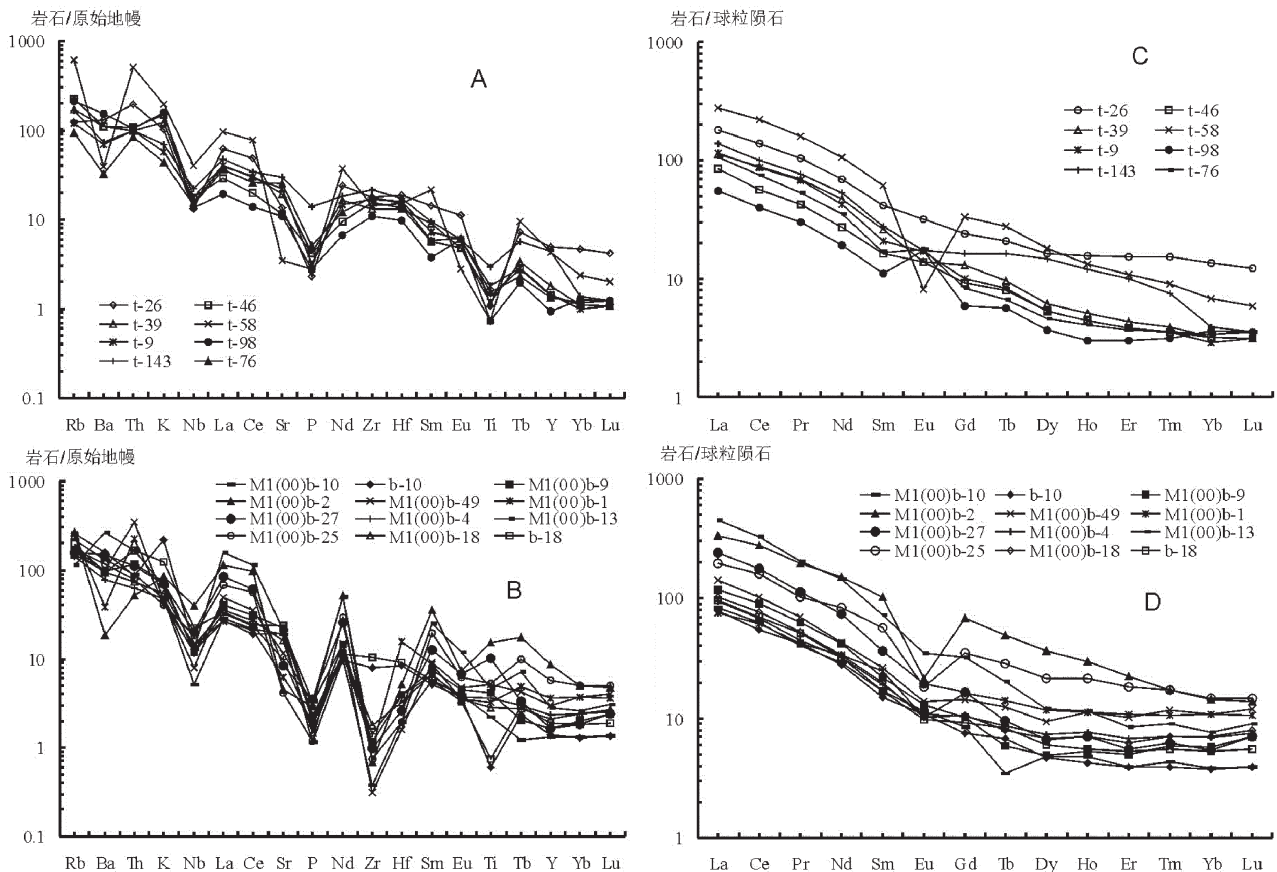


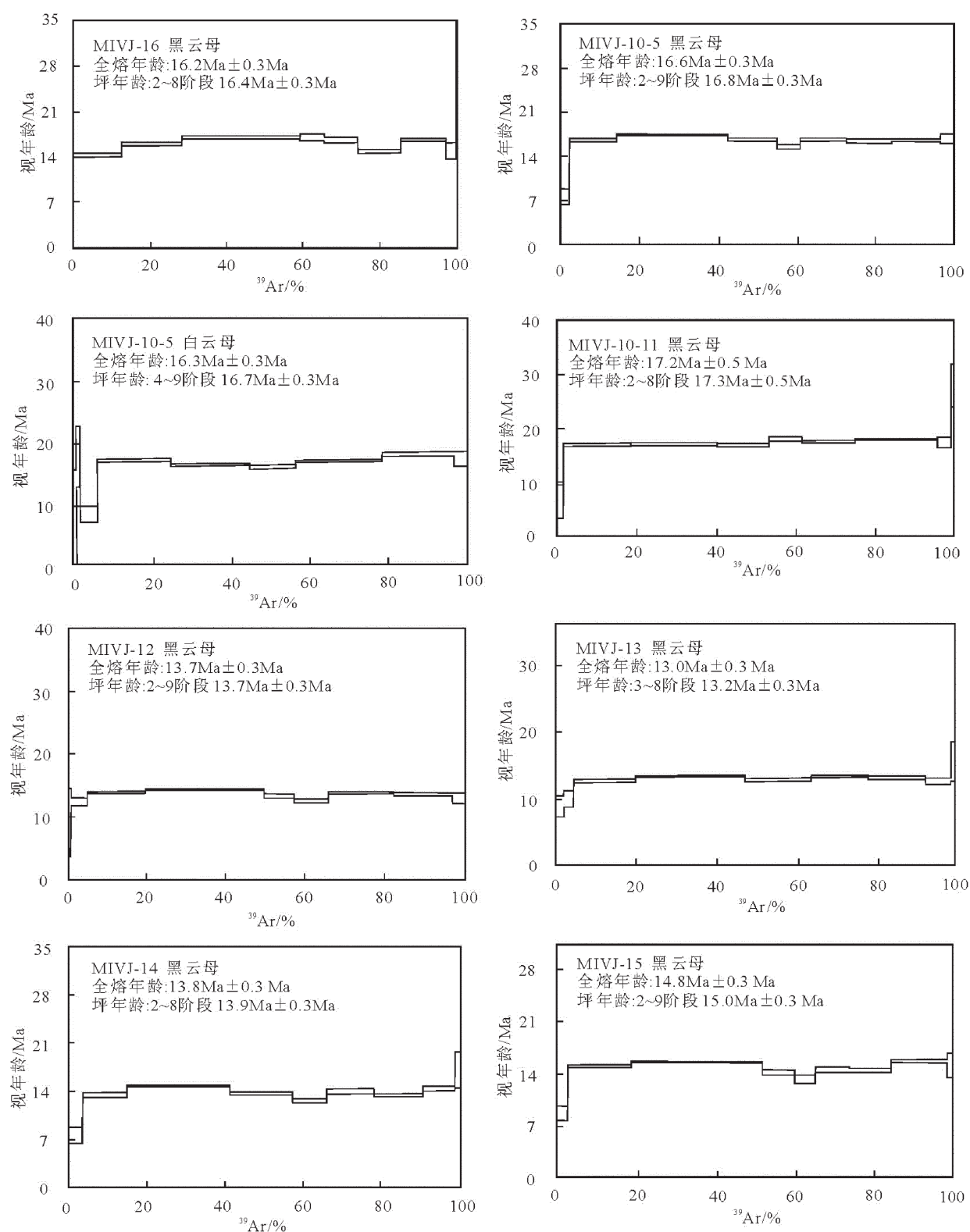
图3 本区花岗岩的稀土元素和微量元素配分模式

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element patterns and chondrite-normalized REE patterns for granites in the area

A、C分别为鲁朗-色季拉岩基微量元素蛛网图和稀土元素配分模式; B、D分别为墨脱-崩崩岩基微量元素蛛网图和稀土元素配分模式。球粒陨石和原始地幔值据参考文献[22]

在东久北西部八果村附近细粒花岗岩和石英闪长岩中, 测得黑云母等时线年龄为 $14.2 \text{ Ma} \pm 0.9 \text{ Ma}$ 、

$13.4 \text{ Ma} \pm 0.9 \text{ Ma}$ 和 $14.4 \text{ Ma} \pm 1.1 \text{ Ma}$, 对应的坪年龄为 $13.7 \text{ Ma} \pm 0.3 \text{ Ma}$ 、 $13.2 \text{ Ma} \pm 0.3 \text{ Ma}$ 和 $13.9 \text{ Ma} \pm 0.3 \text{ Ma}$ 。

图4 色季拉和东久花岗岩体的单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄Fig. 4 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau ages of mineral separates from the Sejila and Dongjug granites

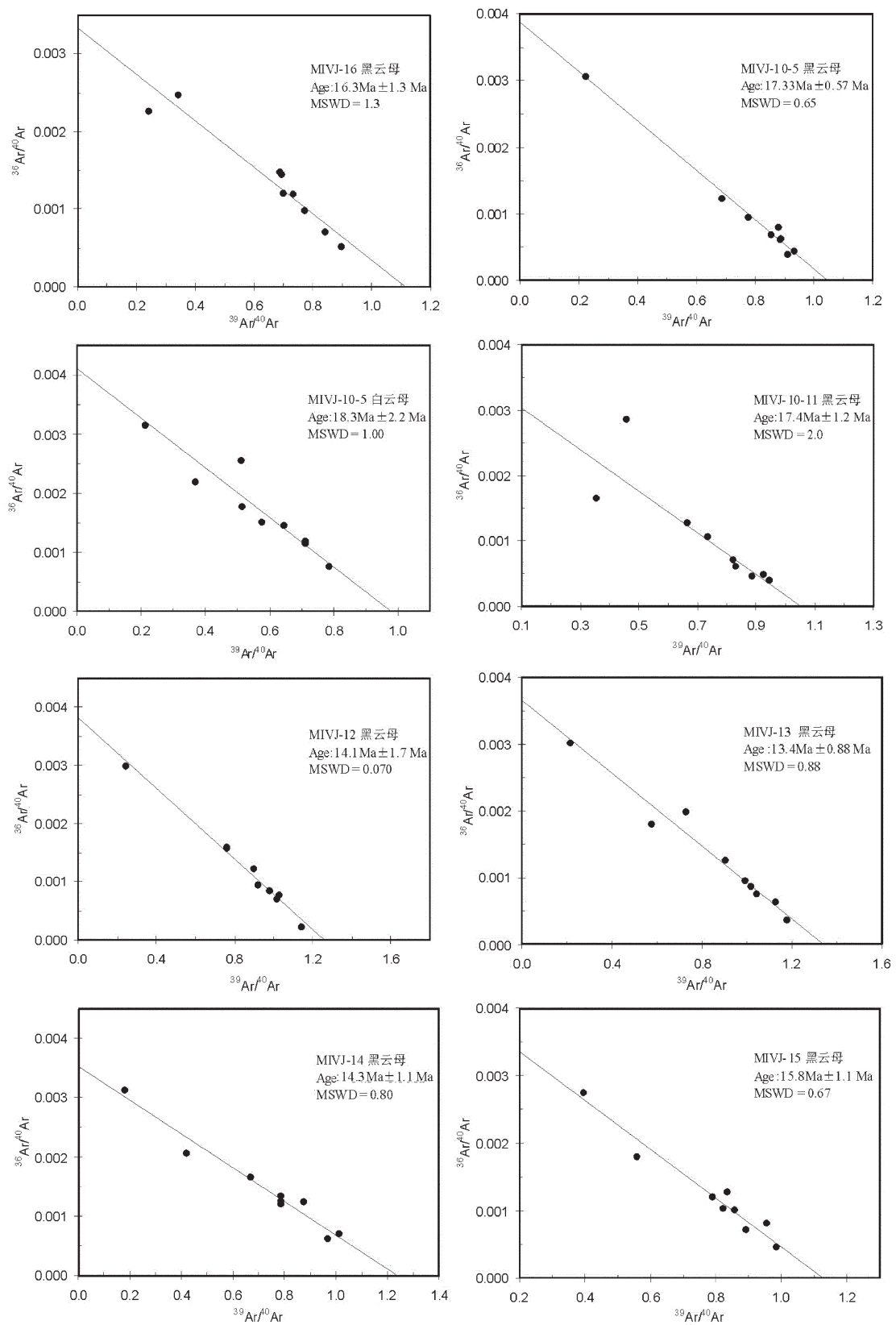
图5 色季拉和东久花岗岩体的单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 反等时线年龄Fig. 5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ inverse isochron ages of mineral separates from the Sejila and Dongjug granites

表4 色季拉和东久花岗岩体的单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测试结果Table 4 Summary of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses of mineral separates from the Sejila and Dongjug granites

样品编号	单矿物	坪年龄 /Ma	等时线 年龄/Ma	MSWD	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	反等时线 年龄/Ma	MSWD	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
MIVJ-16	黑云母	16.4±0.3	16.8±1.2	1.12	283±42	16.3±1.3	1.30	300±33
MIVJ-10-5	黑云母	16.8±0.3	17.2±0.8	0.52	261±46	17.33±0.57	0.65	258±19
MIVJ-10-5	白云母	16.7±0.3	18.2±1.6	1.70	248±47	18.3±2.2	1.00	243±38
MIVJ-10-11	黑云母	17.3±0.5	17.2±1.4	3.80	310±100	17.4±1.2	2.00	299±92
MIVJ-12	黑云母	13.7±0.3	14.2±0.9	0.25	257±43	14.1±1.7	0.07	261±61
MIVJ-13	黑云母	13.2±0.3	13.4±0.9	0.73	272±40	13.4±0.88	0.88	274±28
MIVJ-14	黑云母	13.9±0.3	14.4±1.1	3.70	278±52	14.3±1.1	0.80	283±28
MIVJ-15	黑云母	15.0±0.3	15.7±0.9	1.04	243±41	15.8±1.1	0.67	245±36

注:等时线和反等时线年龄采用ISOPLOT程序^[23]计算,误差用 1σ 表示,MSWD为平均加权偏差平方, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为初始值

在前寒武纪青唐古拉岩群的围岩(黑云母石英片岩)中测得黑云母等时线年龄为 $15.7\text{ Ma}\pm 0.9\text{ Ma}$,坪年龄为 $15.0\text{ Ma}\pm 0.3\text{ Ma}$ (图1、图4、图5和表4)。

年龄测试结果表明,色季拉一带的花岗岩基形成于 $16.4\sim 17.3\text{ Ma}$ 之间,东久花岗岩形成于 $13.2\sim 13.9\text{ Ma}$ 之间,但是发生于 15 Ma 左右的围岩变质事件可能与花岗岩的侵入有关。因此,鲁朗花岗岩的形成时间为 $13.2\sim 17.3\text{ Ma}$ 。岩体侵位持续时间约 4 Ma 。墨脱—金珠拉一带的花岗岩形成较早,为 $19\sim 22\text{ Ma}$ 。因此冈底斯东段的中新世花岗岩具有多期侵位的特征,侵位持续的时间可能大于 8 Ma 。

4 花岗岩成因讨论

花岗岩在研究大陆地壳演化和矿产聚集方面具有重要意义,但花岗岩的类型是多种多样的,花岗岩的源岩和成因至今仍是最具争议的问题之一。花岗岩形成于热量从地幔到地壳的大规模转移期间,形成机制包括地壳物质的部分熔融、幔源玄武岩浆的分离结晶(FC)或同化作用伴随分离结晶(AFC)。一般认为,冈底斯带中生代花岗岩的形成与BNS和IYS新特提斯洋的俯冲消减有关,为火山弧型花岗岩^[2],源区成分较复杂,可能涉及上、下地壳和俯冲洋壳的部分熔融,并可能有幔源成分加入^[28-29]。成因类型在南冈底斯中东段以I型花岗岩为主,中西段(日喀则和狮泉河)为I型向S型过渡的类型。青藏高原新生代花岗岩是 65 Ma 以来印度与亚洲板块汇聚阶段的产物。对于新生代花岗岩至少已提出3种

成因模式:①大陆汇聚阶段的镁铁质下地壳部分熔融作用,与软流圈上涌和地幔减薄或拆沉作用造成的超钾质岩浆活动有关,并可能有年轻的俯冲洋壳成分的加入^[11,21,30-31]。②滞留在上地幔的洋壳残片的部分熔融,并可能有富集地幔楔成分的加入^[8]。③富集的岩石圈地幔(金云母—石榴子石—单斜辉石)低度重熔($1\%\sim 5\%$),直接形成具钾玄岩特征的花岗斑岩^[32]。

冈底斯东段中新世花岗岩的形成时代($13\sim 22\text{ Ma}$)略早于冈底斯中段的含矿斑岩($14\sim 20\text{ Ma}$)^[8],且持续时间更长、规模更大。在地球化学方面,本区花岗岩 SiO_2 的含量高($>65\%$)、 A/CNK 接近于 $1.1(1.08)$;经CIPW标准矿物计算,本区花岗岩出现刚玉(1.23%)和紫苏辉石(3.37%),无透辉石和角闪石,具有S型花岗岩的成因类型特征。但是大多数样品无Eu异常, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值较低,也表明源区并非硅铝质上地壳。另一方面,本区花岗岩为规模较大的岩基,不存在共生的同源中、基性岩浆岩,可以排除FC成因的可能性。

微量元素地球化学的研究结果表明,本区花岗岩具有某些埃达克岩的特征(表3),表现为大部分样品的 Sr/Y 比值较高,大于 20 ;大部分样品的 La/Yb 比值也大于 20 ,平均达 35.44 ;Y和HREE含量低,Y和Yb的平均含量仅为 12.91×10^{-6} 和 1.16×10^{-6} ;Eu和Sr为正—弱负异常。在Y— Sr/Y 图解(图6-A)中,本区花岗岩样品的投点较分散,但主要落在埃达克岩范围内,部分落在南冈底斯带白垩纪花岗岩范围内。在

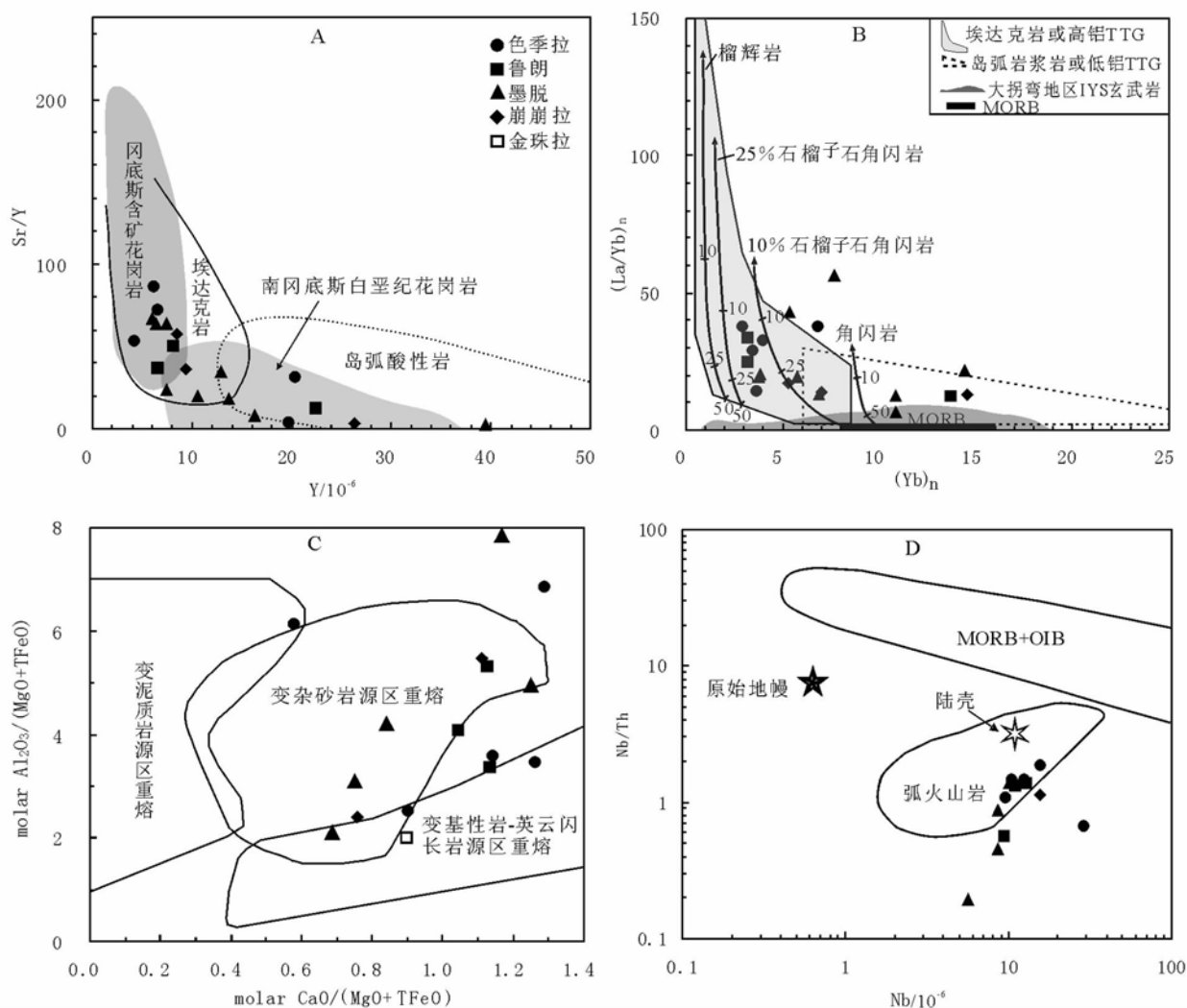


图6 本区花岗岩的Y-Sr/Y、(Yb)_n-(La/Yb)_n、CaO/(MgO+TFE0)-Al₂O₃/(MgO+TFE0)和Nb-Nb/Th图解

Fig. 6 Y-Sr/Y, (Yb)_n-(La/Yb)_n, CaO/(MgO+TFE0)-Al₂O₃/(MgO+TFE0) and Nb-Nb/Th diagrams for granites in the study area

A—冈底斯含矿斑岩范围,据参考文献[8-9],埃达克岩和岛弧酸性岩范围,据参考文献[19];B—底图据参考文献[11,19],大拐弯地区IYS变玄武岩类,据参考文献[26];C—底图据参考文献[32-33];D—底图据参考文献[36]

该图中,南冈底斯带白垩纪花岗岩与典型的埃达克岩和具埃达克岩特征的冈底斯中新世含矿斑岩部分重叠,可能暗示中新世与中生代花岗岩侵入体的源区具有某些相似性,同时说明本文研究的冈底斯东段中新世花岗岩可能兼具埃达克岩和白垩纪岛弧花岗岩的成因特征和源区特征。在(Yb)_n-(La/Yb)_n图解(图6-B)中,本区花岗岩主要落在埃达克岩范围内,而墨脱-崩崩拉花岗岩则有部分落在岛弧岩浆岩范围内或其附近,与图6-A的判别结果相似。CaO/(MgO+TFE0)-Al₂O₃/(MgO+TFE0)判别图也用于

花岗岩类的源区类型的判别(图6-C)^[33-34]。在此图中,本区花岗岩样品的投影点较分散,但主要分布在变杂砂岩源区和变基性岩-英云闪长岩源区的交界处附近。利用高场强元素Nb/Th比值可判别花岗岩类的源区,因为Nb和Th作为地球化学性质相似的稳定元素,在源区和部分熔融形成的熔体中基本一致。幔源玄武岩类Nb/Th比值较高,而陆壳和弧火山岩则较低^[35]。在图6-D中,本区花岗岩样品投点落在“陆壳和弧火山岩”范围内或附近,有些样品的Nb/Th比值更低。本区花岗岩的镁铁比值Mg*为15.30~

57.46, 平均为37.87, 低于冈底斯带中新世含矿斑岩(36~71)^[8]。

从图6的判别结果和其他地球化学特征可见, 本区中新世的鲁朗—色齐拉花岗岩体和墨脱—崩崩拉—金珠拉一带的花岗岩体的成因类型和源区特征相似, 应来源于陆壳的重熔, 可能涉及到早期俯冲到岛弧之下的洋壳和硅铝质陆壳的部分熔融, 与埃达克岩和具埃达克成分特征的冈底斯中新世含矿斑岩既有某些相似性, 又有区别。稍早形成的墨脱—崩崩拉花岗岩的原始岩浆可能涉及相对较多的镁铁成分的重熔, 源区位于相对较深的中下地壳; 较晚形成的鲁朗花岗岩的源区稍浅, 花岗岩浆来源于相对较多的上地壳重熔或侵位过程中有上陆壳成分的卷入。

中新世为印度板块与亚洲板块碰撞后的青藏高原迅速抬升阶段^[37-38], 在构造减压过程中高喜马拉雅带和北喜马拉雅带形成浅色花岗岩体^[39]。冈底斯中段南北向正断层的出现和花岗斑岩的侵入, 代表东西向伸展的初始时间大约在20 Ma。但在东构造结地区, 以中新世花岗岩侵位为标志, 初始伸展时间可能在22 Ma左右。从花岗岩的规模和地球化学特征看, 东构造结一带伸展减压和地壳的熔融程度、规模更大, 可能暗示软流圈上涌造成的热量更强。

5 结 论

冈底斯东段的鲁朗—色季拉和墨脱—崩崩拉一带广泛出露中新世花岗岩, 均为面积较大的岩基, 岩石类型主要为二长花岗岩、黑云母花岗岩和花岗闪长岩、石英闪长岩等。墨脱花岗岩的形成时代稍早, 为19~22 Ma, 鲁朗花岗岩形成于13.2~17.3 Ma。岩石地球化学研究结果表明, 本区花岗岩属于高钾钙碱性系列和钙碱性系列, 同时具有某些埃达克岩的特征, 表现为较高的Sr/Y、La/Yb比值和较低的HFS、HREE和Y含量, Eu和Sr为正—弱负异常。花岗岩主要来源于中下陆壳的硅铝质成分和镁铁质成分的重熔, 不同于具埃达克岩成分的冈底斯中新世含矿花岗斑岩。在东构造结地区, 以中新世花岗岩侵位为标志, 地壳初始伸展的时间可能在22 Ma左右, 早于冈底斯中段(20 Ma左右)。从花岗岩的规模和地球化学特征看, 东构造结一带伸展减压造成的下陆壳的熔融程度更大。

致谢: 在本文写作的过程中, 得到张宏飞教授、周肃教授、金振民院士和潘桂棠研究员的指导和帮

助。审稿专家提出了建设性的修改意见。李洪德、李洪睿、何来信、张万仁高级工程师和廖光宇、楼雄英、付恒、李生教授级高级工程师等参加了野外工作。周长勇工程师也提供了帮助。在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 135-148.
- [2] 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.
- [3] 潘桂棠, 丁俊, 姚东生, 等. 青藏高原及邻区地质图(附说明书)(1:1500000)[M]. 成都: 成都地图出版社, 2004.
- [4] 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 等. 喜马拉雅岩石圈构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 201-210.
- [5] 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.
- [6] 金成伟, 杨瑞英, 赵珍兰, 等. 喜马拉雅和冈底斯中段花岗岩类的微量元素和稀土元素特征[C]//喜马拉雅地质II, 中法合作喜马拉雅地质考察1981年成果之一. 北京: 地质出版社, 1984: 167-182.
- [7] 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带[J]. 矿床地质, 2001, 24(4): 354-366.
- [8] 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华. 冈底斯晚第三纪斑岩的岩石学、地球化学及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 418-428.
- [9] 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的富含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例[J]. 矿床地质, 2003, 22(1): 1-12.
- [10] 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 等. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因与构造控制[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 239-248.
- [11] Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220: 139-155.
- [12] 涂光炽, 张玉泉, 赵振华, 等. 西藏南部花岗岩类的特征和演化[J]. 地球化学, 1981, 1: 1-7.
- [13] 张玉泉, 王中刚, 赵振华. 从中酸性的岩浆活动论西藏高原地壳运动特征[J]. 地球化学, 1981, 1: 136-142.
- [14] 耿全如, 潘桂棠, 郑来林. 论雅鲁藏布大峡谷地区冈底斯岛弧花岗岩带[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(2): 16-22.
- [15] 刘振声, 王洁民. 青藏高原南部花岗岩地质地球化学[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994: 1-35.
- [16] 王增, 申屠保涌, 丁朝建. 藏东花岗岩类及其成矿作用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995: 1-92.
- [17] 刘朝基, 刁志忠, 张正贵. 川西藏东特提斯地质[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996: 8-98.
- [18] 王中刚, 张玉泉, 赵惠兰. 西藏南部花岗岩类的岩石化学研究[J]. 地球化学, 1981, 1: 19-25.
- [19] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern compositions[J]. Journal of geophysical research, 95: 21503-21521.
- [20] Defant M J, Drummond M S, Mount S T. Helens: potential exam-

- ple of partial melting of subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 1993, 21:547-550.
- [21]蔡志勇,邱瑞照,熊小林,等.西藏西部地区埃达克质侵入岩及铜金找矿意义[J].*大地构造与成矿学*,2005,29(4):491-501.
- [22]Sun 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*. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42:313-345.
- [23]张玉泉,戴樟漠,洪阿实.西藏高原南部花岗岩类同位素地质年代学[J].*地球化学*,1981,1:8-18.
- [24]周云生,张旗,梅厚均,等.西藏岩浆活动和变质作用[M].北京:科学出版社,1981:1-363.
- [25]路远发.Geokit:一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J].*地球化学*,2004,33(5):459-464.
- [26]Geng Q R, Pan G T, Zheng L L, et al. The Eastern Himalayan syntaxis: major tectonic domains, ophiolitic mélanges and geologic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27:265-285.
- [27]曲晓明,侯增谦,李振清.冈底斯铜矿带含矿斑岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质意义[J].*地质学报*,2003,77(2):245-252.
- [28]熊清华.西藏曲水岩基4个系列花岗岩类的特征及构造意义[J].*中国区域地质*,1998,17(4):347-352.
- [29]江万,莫宣学,赵崇贺,等.青藏高原冈底斯带中段花岗岩类及其中铁镁质微粒包体地球化学特征[J].*岩石学报*,1999,15(1):89-97.
- [30]金成伟,周云生.喜马拉雅和冈底斯山弧形山系中的岩浆岩带及其形成模式[J].*地质科学*,1978,4:297-312.
- [31]Xu R H, Scharer U, Allagré C J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): a geochronological study [J]. *Journal of Geology*, 1985, 93:41-57.
- [32]Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241:617-633.
- [33]Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium,calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 2000, 50: 51-73.
- [34]Tchameni R, Pouclet A, Penaye J, et al.. Petrography and geochemistry of the Ngaoundere Pan-African granitoids in Central North Cameroon: Implications for their sources and geological setting[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 44:511-529.
- [35]Boztug D, Harlavan Y, Arehart G B, et al. K-Ar age, whole-rock and isotope geochemistry of A-type granitoids in the Divrigi-Sivas region, eastern-central Anatolia, Turkey[J]. *Lithos*, 2007, doi:10.1016/j.lithos.2006.12.014.
- [36]Rollison H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[M]. Longman Group, UK Ltd., 1993:1-275.
- [37]郑来林,廖光宇,耿全如,等.墨脱县幅地质调查新成果及主要进展[J].*地质通报*,2004,23(5/6):458-462.
- [38]郑来林,耿全如,欧春生,等.藏东南迦巴瓦地区雅鲁藏布江蛇绿混杂岩中玻安岩的地球化学特征和地质意义[J].*地质通报*,2003,22(11/12):908-911.
- [39]张宏飞,Harris N, Parrish R,等.北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学:区域对比、岩石成因及其构造意义[J].*地球科学*,2005,30(3):275-288.
- ①成都地质矿产研究所.1:25万墨脱县幅地质图和区域地质调查报告.2003.
- ②甘肃省地矿局区调队.1:20万波密幅地质图和区域地质调查报告.1995.
- ③王立全,朱弟成,耿全如,等.喜马拉雅-冈底斯造山带岩浆岩地质.青藏高原南部空白区基础地质综合研究项目成果之三.2006.
- ④云南省地质调查院.1:25万林芝县幅地质图和区域地质调查报告.2003.