1000-0569/2011/027(09)-2553-66 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

滇西北羊拉铜矿矿区花岗岩成因及其构造意义*

朱经经[1,2] 胡瑞忠[1**] 毕献武[1] 钟宏[1] 陈恒[1,2] 叶雷[3] 龙斐[4]

ZHU JingJing[1,2], HU RuiZhong[1**], BI XianWu[1], ZHONG Hong[1], CHEN Heng[1,2], YE Lei[3] and LONG Fei[4]

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室,贵阳 550002
2. 中国科学院研究生院,北京 100049
3. 有色金属矿产地质调查中心新疆地质调查所,乌鲁木齐 830011
4. 云南迪庆矿业开发股份有限责任公司,香格里拉 674400
1. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002, *China*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3. *Xinjiang Institute of Geological Survey, China Nonferrous Metal Geological Survey, Urumqi* 830011, *China*
4. *Mining Development Co., Ltd, Diqing, Yunan, Shangri-La* 674400, *China*

2010-05-25 收稿, 2011-07-04 改回.

Zhu JJ, Hu RZ, Bi XW, Zhong H, Chen H, Ye L and Long F. 2011. Genesis and tectonic significance of granites in the Yangla ore district, northwestern Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2553－2566

Abstract The Yangla copper deposit is located in the middle zone of Jinshajiang suture zone. The Beiwu, Linong and Lunong granitoids exhibit a linear distribution from north to south in the ore district. The three granitoids have similar compositions of major, trace elements and Sr-Nd isotopes, indicating that they have a common magma source. They do not contain muscovite, and have high concentrations of SiO_2 (64% ~73%), K_2O (2.15% ~4.05%) and low P_2O_5 (0.04% ~0.11%) content. In addition, they have low $\delta((K_2O+Na_2O)^2/(SiO_2-43)$; 1.4 ~2.4) and A/CNK (molecular $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$; 0.92 ~1.11). The granitoids display significantly negative anomalies of Nb, Ta, Ti and P, obvious enrichment of LREE and Rb, Th, U and Pb. The 10000Ga/Al ratios (1.7 ~2.1) of those rocks are lower than typical A-type granites. Moreover, considering the slightly negative Eu anomalies, it is suggested that the three granitoids belong to high-K calc-alkaline, metaluminous-slightly peraluminous I-type granites. Compared with the continental crust (i.e., the Lincang granite and the Shaba granulite), the granites have lower $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.7078 ~0.7105) and higher $\varepsilon_{Nd}(t)$ (－5.1 ~ －6.7), with ancient Nd two-stage model age (t_{DM2} =1.5Ga). And there occur a number of coeval mafic microgranular enclaves (MMEs) in these granitoids, suggesting that mantle-drived magmas were involved in the source region (see in a separate article). By combining with comparative analyses of the tectonic settings, we propose a model in which the Beiwu, Linong and Lunong granitoids were generated under a late collisional or post-collisional setting. Decompression induced those mantle-derived magmas underplated and provided the heat for the anatexis of the crust. The hybrid melts (i.e., mantle-derived and the lower crustal magmas) and subsequent fractional crystallization could be responsible for the formation of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids.

Key words I-type granite; Whole rocks geochemistry; Sr-Nd isotope; Beiwu, Linong and Lunong granitoids; Crust-mantle mixing

摘 要 羊拉铜矿位于金沙江缝合带中段,贝吾、里农和路农岩体在矿区内从北向南呈线状分布。3个岩体主要岩性为花岗闪长岩,具有相似的地球化学和Sr-Nd同位素组成特征,反映它们可能具有相同岩浆源区。岩体具高的SiO_2(64% ~73%)、较高的K_2O(2.15% ~4.05%)和低的P_2O_5(0.04% ~0.11%)含量,δ(里特曼指数)=1.4 ~2.4,铝饱和指数(摩尔$Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$)为0.92 ~1.11。同时3个岩体均富集Rb、Th、U、Pb和LREE等元素,显著亏损Nb、Ta、Ti和P等元素。

---

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421005)和中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-Q04-08、KZCX2-YW-Q04-01)联合资助.

第一作者简介: 朱经经,男,1985年生,博士研究生,地球化学专业,E-mail: zhujingjing-1103@163.com

** 通讯作者: 胡瑞忠,男,1958年生,博士、研究员,从事矿床学和矿床地球化学研究,E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn

10000Ga/Al 比值(1.7 ~2.1)较典型 A 型花岗岩偏低,Eu 负异常不明显,这些特征表明 3 个岩体属于准铝-弱过铝质的、高钾钙碱系列 I 型花岗岩。与区域上大陆地壳物质相比(如临沧黑云母二长花岗岩和川西沙坝麻粒岩),贝吾、里农和路农岩体具有相对低的($^{87}Sr/^{86}Sr$)$_i$(0.7078 ~0.7105)和相对高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$(-5.1 ~ -6.7),并具古老的 Nd 同位素二阶段模式年龄(t_{DM2} = 1.5Ga)。结合花岗岩体内部发育大量的同时代的暗色微粒包体(MME),认为岩浆源区存在幔源物质的加入。区域地质背景分析表明,贝吾、里农和路农岩体很可能是在中咱微陆块与昌都-思茅微陆块碰撞的晚期或后碰撞的动力学背景之下,由底侵的幔源基性岩浆及其诱发的中下地壳长英质岩浆在深部岩浆房混合,并经一定程度的分离结晶作用而形成。

关键词 I 型花岗岩; 全岩地球化学; Sr-Nd 同位素; 贝吾、里农和路农岩体; 壳幔混合
中图法分类号 P588.121

1 引言

以往研究认为,单一的地幔物质部分熔融不可能形成花岗质岩浆(蛇绿岩中出现的少量的大洋斜长花岗岩除外),即花岗岩主要是地壳来源(Wyllie, 1977; 吴福元等,2007; 张旗等,2008);然而越来越多的研究表明: 对于大多数花岗岩,幔源物质的加入可能是不可避免的,即使是强过铝质的 S 型花岗岩和流纹岩,也是含有不同比例幔源物质的壳幔岩浆混合物(Sylvester, 1998; Patiño, 1999; Clemens, 2003; Healy *et al.*, 2004; 吴福元等,2007; Zhu *et al.*, 2009; 李献华等,2009)。此外,大规模的花岗岩岩浆活动常常与俯冲带或造山后伸展背景有关(吴福元等,2007),而在这 2 种构造背景下发育的岩浆底侵作用,可能与花岗岩特别是 I 型花岗岩成因关系极为密切(Roberts and Clements, 1993; 周新民和李武显,2000; 邱检生等,2005; 范蔚茗等,2009)。

西南"三江"地区属特提斯-喜马拉雅构造域的东段,位于冈瓦纳大陆与欧亚大陆结合带,花岗岩分布十分广泛(莫宣学等,1993; 吕伯西等 1993; 李兴振等,1999)。由于古特提斯洋俯冲-闭合事件的影响,印支期成为本区花岗岩形成的重要时期(王立全等,1999; 侯增谦等,2001; 彭头平等,2006; 王全伟等,2008)。按照吕伯西等(1993)的划分方法,区域内印支期花岗岩可分为错交玛-稻城岩带、江达-德钦岩带、维西-绿春岩带和东达山-临沧岩带。羊拉铜矿位于本区金沙江缝合带中段,是区内目前发现的最大的铜矿,铜平均品位约为 1%,远景储量为 $130 \times 10^4 \sim 150 \times 10^4$t(云南省地矿资源股份有限公司和云南省地质调查院,2004[①])。矿区内花岗岩(贝吾、里农和路农岩体)隶属于江达-德钦岩带,对于该花岗岩的成因,目前存在 3 种不同认识:(1)为金沙江洋向昌都-思茅微陆块俯冲过程中形成的陆缘弧型花岗岩(魏君奇等,1997,2000; 战明国等,1998);(2)为早二叠世形成的羊拉洋内弧的延续,属于岛弧同熔型花岗岩(王立全等,1999);(3)为三叠纪晚期中咱微陆块和昌都-思茅微陆块发生碰撞形成的"同碰撞"型花岗岩(曲晓明等,2004)。造成这些不同解释的原因很大程度上是由于以往分析技术条件的限制,对该区花岗岩的成岩时代、岩浆起源的源区性质和成岩过程缺乏系统的研究。

本文报道了羊拉矿区花岗岩体全岩的地球化学及 Sr-Nd 同位素数据,并基于近年来花岗岩研究取得的新认识,结合区域内前人研究资料,探讨了该岩体的成因机制。研究工作对揭示研究区印支期花岗岩形成演化机制和相关成矿作用具有重要价值,而且对深入认识该区基底特征及古特提斯洋的演化具有重要意义。

2 地质背景与样品特征

通常认为(莫宣学等,1993; 莫宣学和潘桂棠,2006; 潘桂棠等,2002,2003; 尹福光等,2006),在西南"三江"地区,古特提斯洋主要由澜沧江-昌宁孟连洋、金沙江-哀牢山洋和甘孜-理塘洋组成(图 1a),其中,昌宁-孟连大洋被认为是古特提斯洋的主洋盆(沈上越等,2002; 范蔚铭等,2009; Jian *et al.*, 2009a, b),金沙江洋则为晚泥盆世或早石炭世昌都-思茅微陆块从扬子板块裂离而形成的弧后洋盆(孙晓猛等,1994; Wang *et al.*, 2000; Metcalfe, 2002)。金沙江蛇绿混杂岩带(缝合带)是金沙江洋闭合后在"三江"地区的残余,西侧为江达-维西碰撞弧带和昌都-思茅微陆块,东侧以里甫-日雨断裂为界,与中咱微陆块相邻。羊拉铜矿夹持于羊拉断裂和金沙江断裂之间,紧邻金沙江西侧。矿区内岩浆活动活跃,由北向南主要分布有贝吾岩体、里农岩体、路农岩体和加仁岩体等花岗岩侵入体(图 1b),此外,矿区内分布有少量的花岗斑岩、花岗细晶岩及英安斑岩等。与 4 个主要的花岗岩体相对应,羊拉矿区被划分为贝吾、里农、路农和加仁等矿段。其中里农和路农矿段为该矿床的主矿段,贝吾矿段处于待开采状态,而加仁矿段仍处于详查阶段。此外,加仁岩体的研究程度相对较高(王全伟等,2008),因而,本文着重探讨贝吾、里农和路农岩体。

贝吾岩体呈椭圆状岩株产出,出露面积约为 0.5km^2; 里农岩体为一花岗岩穹窿,面积约 2.5km^2; 路农岩体北段与里农岩体以 F_4 断层为界,南接加仁花岗岩带。各岩体均侵入到上覆泥盆系大理岩、变质石英砂岩和绢云板岩、片岩中(图 1b; 云南地调院,2004; 朱骏等,2009)。路农矿段铜矿体产出于路农岩体和围岩的内、外接触带中,矿体产状受接触带形态控制; 里农和贝吾矿段铜主矿体主要分布于岩体与围岩的

① 云南省地矿资源股份有限公司和云南省地质调查院(云南地调院). 2004. 云南省德钦县羊拉铜矿地质勘探报告. 1-254

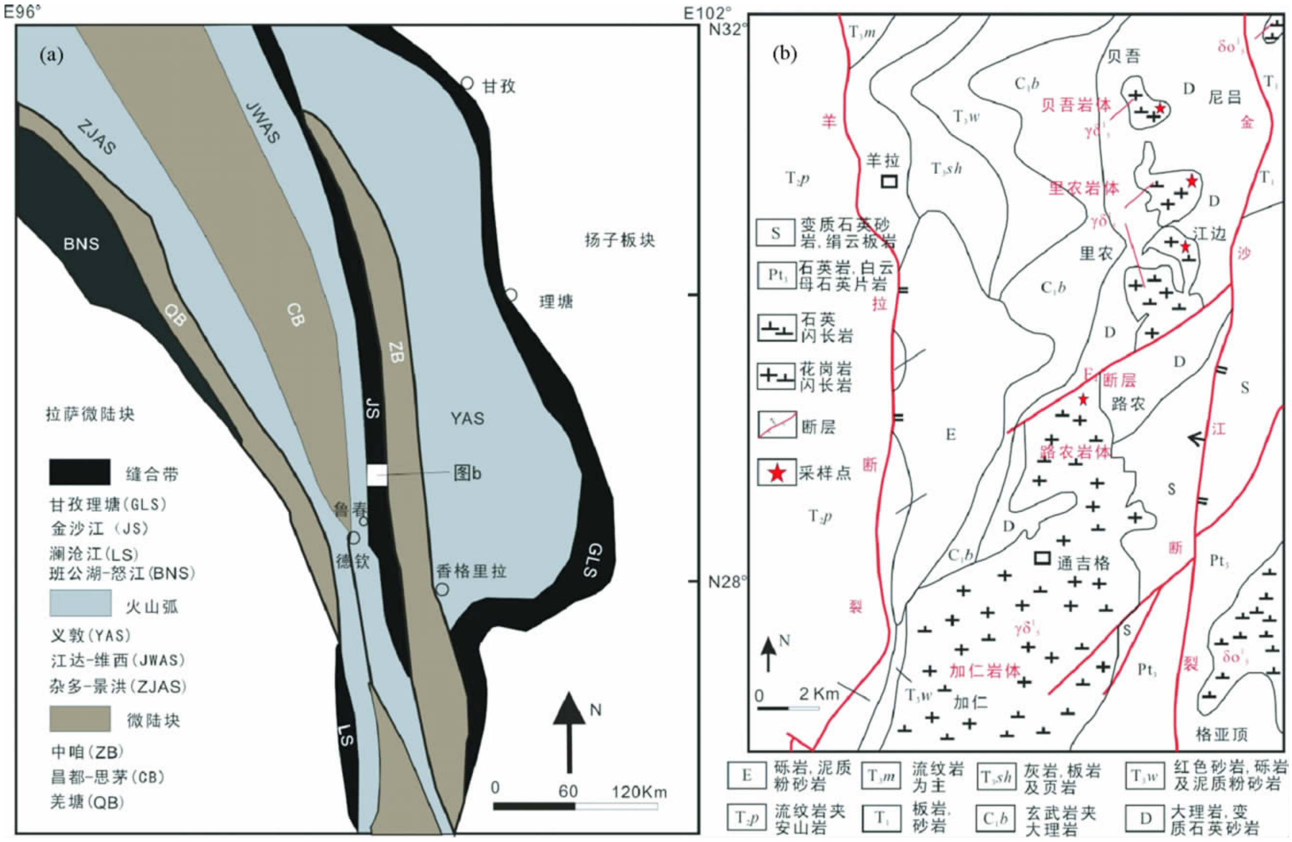

图 1 西南"三江"地区中北段构造单元划分(a,据莫宣学等,1993) 和羊拉铜矿矿区地质图(b,据云南地调院,2004 修改)

Fig. 1 Tectonic outline of the middle-northern Sanjiang region, Southwest of China (a, after Mo *et al.*, 1993) and geological map of Yangla copper deposit (b)

外接触带,呈层状-似层状产出,并显著受层间破碎带和滑脱带控制(曲晓明等,2004; 刘学龙等,2009) 。围岩蚀变以矽卡岩化为主,其次为硅化、绢云母化和角岩化。此外,四个岩体(含加仁岩体) 沿金沙江西岸呈线状分布,构成一条与区域构造线方向一致的 NNE 向延伸的花岗岩带(战明国等,1998) 。

贝吾岩体主要岩性为花岗闪长岩,灰白色,中粗粒结构,块状构造; 主要造岩矿物为斜长石(40%) 、石英(20%) 、钾长石(20%) 、角闪石(15%) 及黑云母(5%) ,其中斜长石、石英较自形; 副矿物主要有锆石、榍石、磷灰石和磁铁矿。里农岩体主要岩性为花岗闪长岩和二长花岗岩,灰白色,中粗粒结构,块状构造,造岩矿物同样主要为斜长石、石英、钾长石、角闪石和黑云母,副矿物亦以锆石、榍石、磷灰石和磁铁矿为主。其中花岗闪长岩中斜长石含量约为 35% ,石英为 25% ,钾长石为 20% ,角闪石为 15% ,黑云母约 5%; 二长花岗岩中斜长石含量为 30% 左右,石英为 25% ,钾长石为 30% ,角闪石为 10% ,黑云母约 5% 。路农岩体岩性特征与里农岩体中的花岗闪长岩一致。此外,里农花岗岩体中可见少量暗色包体,颜色为深灰色-灰黑色,包体大小变化很大(2 ~ 15cm) ,形状多样,包体与寄主花岗岩之间接触界线清晰,未见明显的烘烤边和冷凝边(图 2) 。全岩 Rb-Sr 年龄显示,里农岩体形成时代为 227 ± 1. 4Ma(魏君奇等,1997; 战明国等,1998) ,本课题组最新测定的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 230. 0 ± 2. 0Ma,路农岩体和贝吾岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄分别为 232. 2 ± 1. 8Ma 和 233. 1 ± 1. 9Ma(Zhu *et al.*, 2011) ,反映 3 个岩体形成时代在误差范围内一致,均为中三叠世晚期。综上表明,贝吾岩体斜长石含量相对较高,但总体岩性特征与里农、路农岩体一致。

3 分析方法

以贝吾、里农和路农岩体的新鲜全岩样品为分析对象。主量元素采用 Axios PW4400 型 X 射线荧光光谱仪(XRF) 分析,元素分析的重现性(准确度) 优于 3%; 微量元素采用 ICP-MS 分析,分析精度优于 10% ,二者均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。其中,微量元素具体分析流程参照 Qi *et al.* (2000) 。Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成分析在中国地质大学(武汉) TRITON 质谱计上完成,Sr 同位素的质量分馏校正采用 $^{86}Sr/^{88}Sr = 0.1194$ 标准化,国际标准样品 NBS987 的测定值为 0. 710254 ± 0. 000008 (n = 18) ; $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值采用 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.721900$ 标准化,国际标准样品 La Jolla 的测定值为 0. 511856 ± 0. 000012 (n =

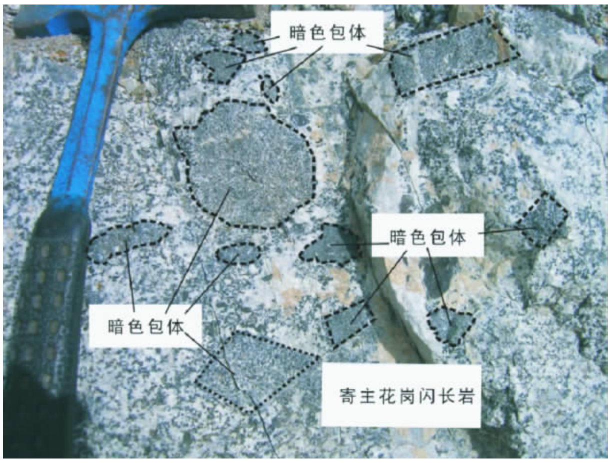

图2 里农岩体及微粒暗色包体

Fig. 2 The Linong granitoid and inclusive enclaves

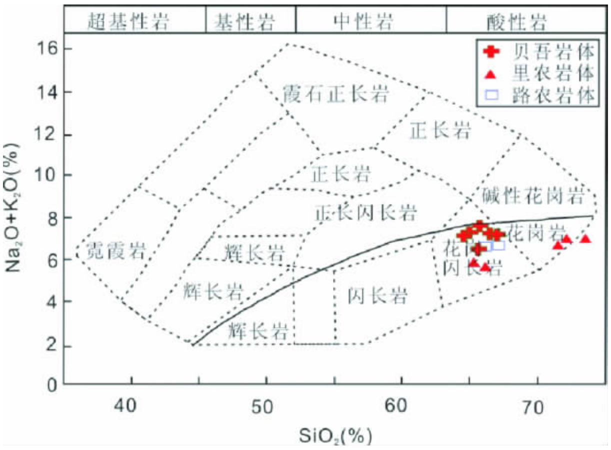

图3 贝吾、里农和路农岩体全碱硅分类图解(据 Wilson, 1989)

Fig. 3 Whole rock SiO_2 vs. ($K_2O + Na_2O$) classification diagram of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids (after Wilson, 1989)

15)。全过程本底为: $Rb = 3 \times 10^{-11}$, $Sr = 1.2 \times 10^{-10}$; $Sm = 3 \times 10^{-11}$, $Nd = 1.2 \times 10^{-10}$, 具体分析流程见周炼等(2007)。

4 分析结果

4.1 主量元素

贝吾、里农和路农岩体的主量元素分析结果列于表1。结合岩石学特征及镜下观察, 3个岩体特征可以归纳如下: (1) SiO_2 = 64% ~ 73%, 均值为66%, 编号为LiN-1、3、4的3件样品相对较高, 这与其岩石学特征相吻合(采自里农岩体, 手标本定名为二长花岗岩); (2) $K_2O + Na_2O$ = 5.67% ~ 7.52%, 平均为6.77%, 在 SiO_2-($K_2O + Na_2O$)图解(图3)上主要投在花岗闪长岩区, LiN-1、3、4投在花岗岩区, 且都属于钙碱性系列, δ(里特曼指数) = 1.4 ~ 2.4, 均值1.8, 同样反映样品属于钙碱性系列; (3) K_2O总体含量较高, 为2.15% ~ 4.05%, 均值为3.45%, K_2O/Na_2O平均为1.08, SiO_2-K_2O图解(图4)显示样品主要为高钾钙碱性系列; (4) 铝饱和指数(A/CNK) = 0.92 ~ 1.11, 显示准铝质-弱过铝质花岗岩特征(图5); (5) P_2O_5含量较低(0.04% ~ 0.11%), TiO_2 = 0.17%

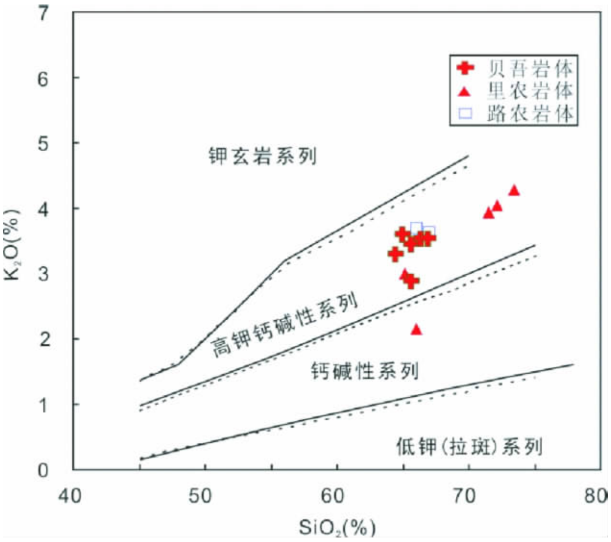

图4 贝吾、里农和路农岩体 SiO_2-K_2O 岩浆系列判别图解(据 Rickwood, 1989; Rollinson, 1993; Morrison, 1980)

Fig. 4 Whole rock SiO_2 vs. K_2O discrimination diagram of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids (after Rickwood, 1989; Rollinson, 1993; Morrison, 1980)

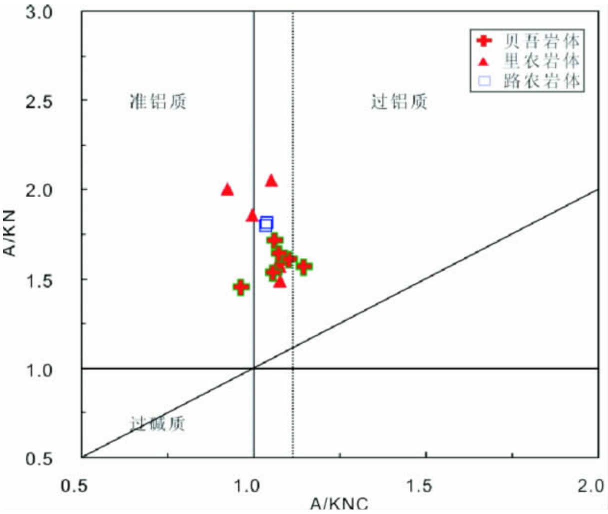

图5 贝吾、里农和路农岩体 A/NK-A/CNK 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5 Al_2O_3/($Na_2O + K_2O$) molar vs. Al_2O_3/($CaO + Na_2O + K_2O$) molar plot of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids (after Maniar and Piccoli, 1989)

表 1 贝吾、里农和路农岩体主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 1 The analytical results of major (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids

样品号	贝吾岩体						里农岩体					路农岩体	
	BW-1	BW-2	BW-3	BW-4	BW-5	BW-6	LiN-1	LiN-3	LiN-4	LiN-5	LiN-6	LuN-1	LuN-2
SiO_2	65.65	65.71	66.50	65.00	64.53	67.00	71.50	72.11	73.49	66.04	65.20	67.00	66.03
TiO_2	0.41	0.38	0.38	0.42	0.43	0.36	0.28	0.19	0.17	0.47	0.45	0.41	0.40
Al_2O_3	14.87	15.56	15.39	15.73	15.98	14.87	14.24	14.58	13.56	16.26	16.35	16.03	16.02
$Fe_2O_3^T$	3.88	3.42	3.78	4.17	4.19	3.59	2.83	2.16	1.93	3.19	4.39	3.15	3.99
MgO	1.48	1.37	1.51	1.61	1.55	1.43	0.84	0.65	0.52	1.76	1.81	1.64	1.58
MnO	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05	0.07
CaO	2.90	2.92	1.95	2.41	2.78	2.37	2.41	2.34	1.90	5.21	4.16	3.61	3.62
Na_2O	3.01	4.65	3.66	3.61	3.78	3.59	2.77	2.97	2.72	3.52	2.87	3.03	2.92
K_2O	3.44	2.87	3.52	3.58	3.28	3.52	3.94	4.05	4.29	2.15	2.99	3.62	3.69
P_2O_5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.06	0.05	0.04	0.11	0.11	0.10	0.10
烧失量	3.40	2.93	2.99	3.03	2.76	2.96	0.75	0.66	0.90	0.92	1.12	1.15	1.21
总量	99.28	100.00	99.94	99.84	99.55	99.94	99.78	99.88	99.64	99.76	99.63	99.92	99.73
δ	1.84	2.49	2.19	2.35	2.32	2.11	1.58	1.69	1.61	1.40	1.55	1.84	1.90
K_2O/Na_2O	1.14	0.62	0.96	0.99	0.87	0.98	1.42	1.36	1.58	0.61	1.04	1.19	1.26
FeO^T/MgO	2.36	2.25	2.25	2.33	2.43	2.26	3.03	2.99	3.34	1.63	2.18	1.73	2.27
A/NK	1.71	1.45	1.56	1.60	1.63	1.53	1.61	1.57	1.49	2.00	2.05	1.80	1.82
A/CNK	1.06	0.97	1.15	1.11	1.08	1.06	1.08	1.08	1.08	0.92	1.05	1.03	1.04
K_2O+Na_2O	6.45	7.52	7.18	7.19	7.06	7.11	6.71	7.02	7.01	5.67	5.86	6.65	6.61
Sc	7.69	8.46	9.04	8.22	8.76	8.61		4.36	3.62	11.7	11	8.37	9.29
V	47.8	49.9	56.5	47.8	47.3	47.6		22.4	17.2	68.1	69.4	48.1	55.5
Cr	384	393	496	417	510	410		342	245	259	333	358	251
Co	7.99	11.3	9.94	7.59	9.32	7.05		4.76	3.84	7.27	9.81	6.25	8.81
Ni	235	237	311	257	310	245		216	154	159	200	210	160
Cu	5.72	9.16	10.4	7.22	5.45	5.85		10.1	11.6	35.1	178	3.38	3.16
Zn	64.9	30.5	41.2	42.2	38.8	25.1		36.7	38.5	37.2	58.4	31.5	38.8
Ga	15.4	15.1	16	15.4	14.2	14.7		13.2	12.5	14.9	17.7	17.6	15.8
Rb	145	112	123	139	103	130		181	167	73.6	112	120	138
Sr	194	174	190	279	234	182		167	146	297	329	413	286
Ba	759	513	783	690	609	624		551	616	434	771	674	644
Cs	4.58	1.4	3.44	7.99	2.31	3.35		6.81	3.47	2.93	4.42	5.45	6.77
Th	15.0	15.8	16.8	13.0	13.8	13.0		23.0	20.2	13.9	15.4	25.6	35.8
U	4.35	4.56	9.32	4.20	4.34	4.28		4.96	4.27	3.46	2.57	2.79	4.50
Ta	0.81	0.89	0.94	0.77	0.79	0.79		0.97	1.27	1.15	0.81	0.90	0.91
Nb	7.94	8.42	9.97	8.15	8.23	8.19		7.14	7.78	11.80	10.80	9.00	9.45
Zr	90.8	104	119	91.1	104	111		90.2	91.2	104	91.6	91.1	75.8
Hf	2.48	2.84	3.22	2.61	2.76	2.9		2.66	2.88	2.97	2.45	2.58	2.15
Y	13.6	14.3	16.7	15.1	16.2	14.7		13.5	11.8	20.2	16.6	16.3	16.4
Pb	20.1	79.0	15.2	13.0	22.4	23.6		33.5	34.0	28.8	28.4	32.3	29.7
La	21.7	23.1	27.5	21.7	27.1	21.4		28.1	25.9	21.1	19.0	64.5	48.9
Ce	49.0	51.8	56.8	49.1	62.6	47.2		59.4	53.5	49.3	45.2	96.3	98.0
Pr	4.40	4.61	5.17	4.50	5.55	4.39		4.70	4.52	4.86	4.39	9.26	8.59
Nd	14.6	15.4	17.0	15.2	19.4	15.9		14.6	14.3	18.5	16.7	28.2	28.2
Sm	2.56	2.80	3.22	2.72	3.43	3.02		2.66	2.32	3.69	3.23	3.95	4.31
Eu	0.655	0.713	0.845	0.680	0.813	0.849		0.557	0.522	0.760	0.967	0.964	0.825
Gd	2.30	2.61	2.94	2.57	3.09	2.69		2.41	1.99	3.30	3.03	3.23	3.68
Tb	0.329	0.364	0.390	0.381	0.445	0.360		0.320	0.270	0.491	0.434	0.430	0.448
Dy	2.08	2.29	2.38	2.40	2.59	2.30		2.07	1.74	3.18	2.69	2.54	2.63
Ho	0.419	0.442	0.500	0.488	0.516	0.463		0.404	0.335	0.606	0.548	0.498	0.527
Er	1.17	1.31	1.47	1.34	1.46	1.28		1.34	1.05	1.73	1.64	1.53	1.54
Tm	0.186	0.189	0.207	0.2	0.217	0.199		0.202	0.165	0.258	0.227	0.211	0.196
Yb	1.27	1.31	1.48	1.44	1.57	1.40		1.55	1.30	1.91	1.48	1.46	1.42
Lu	0.194	0.220	0.217	0.214	0.245	0.210		0.221	0.204	0.281	0.220	0.229	0.215
$\sum$REE	101	107	120	103	129	102		119	108	110	100	213	199
LREE/HREE	11.7	11.3	11.5	10.4	11.7	10.4		12.9	14.3	8.36	8.72	20.1	17.7
$(La/Yb)_N$	11.5	11.9	12.6	10.2	11.7	10.3		12.3	13.5	7.5	8.7	29.9	23.3
$(Gd/Yb)_N$	1.47	1.62	1.61	1.44	1.59	1.56		1.26	1.24	1.40	1.66	1.79	2.10
δEu	0.81	0.79	0.83	0.78	0.75	0.89		0.66	0.73	0.65	0.93	0.80	0.62
T_{Zr}(℃)	735	733	764	737	744	751		741	745	728	731	731	717

注: δ(里特曼指数) $=(K_2O+Na_2O)^2/(SiO_2)-43$, A/CNK=摩尔 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$, A/NK=摩尔 $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$; $Fe_2O_3^T$ 是以 Fe_2O_3 表示的全铁含量, $FeO^T=0.9\times Fe_2O_3^T$; T_{Zr}(℃): 锆石饱和温度,计算方法见 Watson and Harrison (1983)

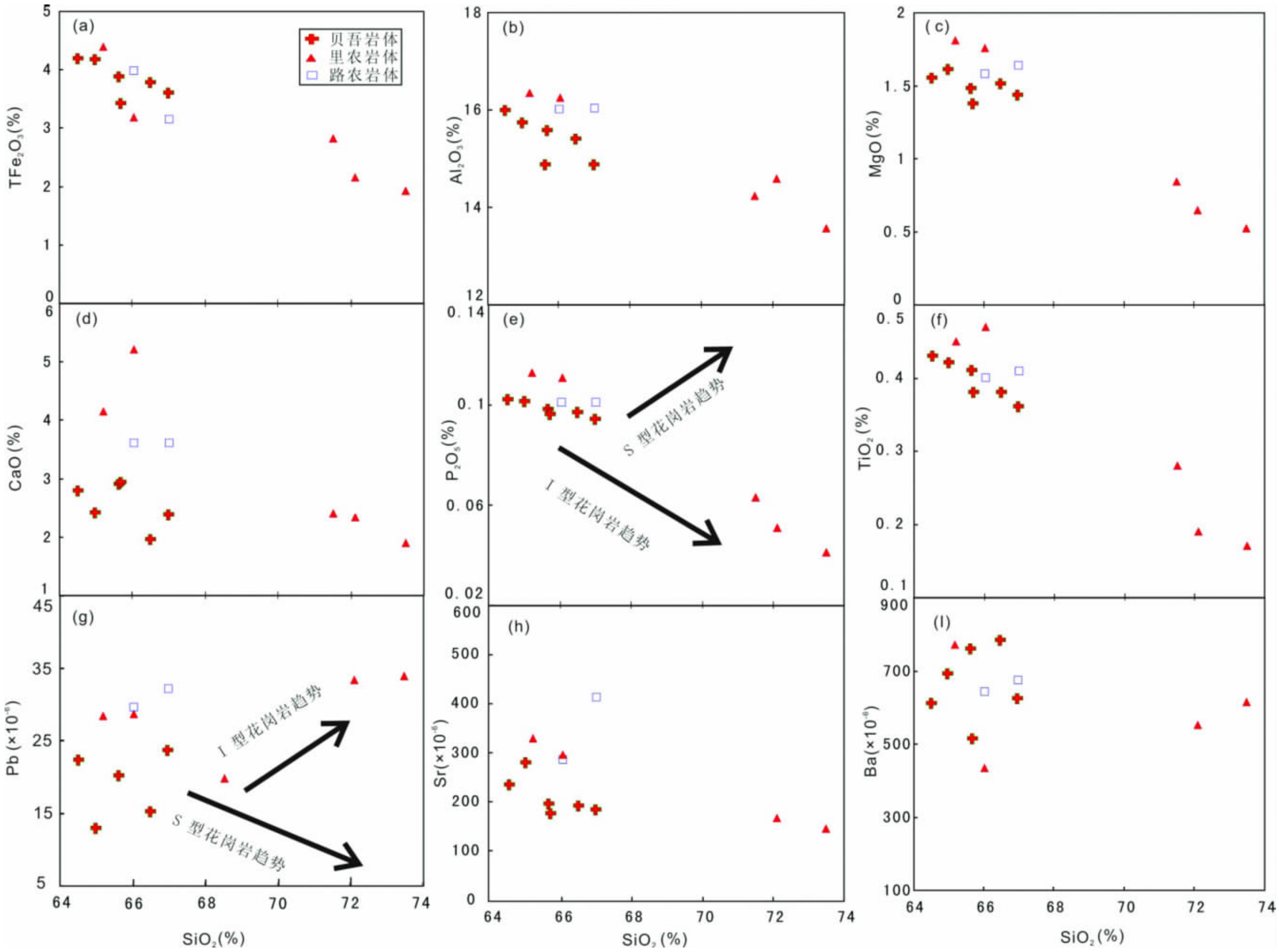

图6 贝吾、里农和路农岩体全岩主量元素(a-f)和部分微量元素(g-i)与 SiO_2 关系图(据邱检生等,2002)

I型花岗岩趋势引自 Li *et al.* (2007)

Fig. 6 Major elements (a-f) and trace elements (g-i) vs. SiO_2 diagram for the whole rock of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids (after Qiu *et al.*, 2002)

I-type granite trend is after Li *et al.* (2007)

~0.43%;(6)在主量元素与 SiO_2 关系图(图6)中,SiO_2 与 CaO、$Fe_2O_3^T$、MgO、Al_2O_3、P_2O_5 和 TiO_2 呈负相关,反映可能存在铁镁矿物、铁-钛氧化物及磷灰石等矿物的分离结晶(李献华等,2000; Liu *et al.*, 2009; Zhong *et al.*, 2009)。

4.2 微量元素

贝吾、里农和路农岩体的微量元素、稀土元素分析结果列于表1。

在原始地幔标准化蛛网图(图7b)中,3个岩体的微量元素变化特征一致,均表现为富集 Rb、Ba、Th、U、K 和 La 等大离子亲石元素,相对亏损 Nb、Ta、Ti、Zr 及 Hf 等高场强元素。此外,各岩体都显著富集 Pb 元素,亏损 P 元素;Ba 相对于 Rb 和 Th 较亏损,Sr 弱亏损,Sr、Ba 随 SiO_2 含量的增加有降低的趋势(图6h-i)。

3个岩体稀土元素特征较为一致:稀土总量较高,$\sum REE = 100\times10^{-6} \sim 213\times10^{-6}$; LREE/HREE = 8.3 ~ 20,$(La/Yb)_N$ 为 7.5 ~ 30,$(Gd/Yb)_N$ 为 1.2 ~ 2.1,说明轻、重稀土分馏显著并强烈富集轻稀土,而重稀土本身分馏不明显;$\delta Eu = 0.62 \sim 0.93$,均值为0.77。在球粒陨石标准化稀土模式图(图7a)上,3个岩体均表现为右倾的平滑曲线,Eu 负异常不明显,暗示贝吾、里农和路农岩体可能具有相同的岩浆源区和成岩过程。

4.3 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素

Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析结果见表2。贝吾、里农和路农岩体的 Sr、Nd 同位素特征(图8)基本一致:$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 为 0.7078 ~ 0.7105,$\varepsilon_{Nd}(t)$ 为 −5.1 ~ −6.7(t=230Ma),分别低于和高于重新计算到230Ma的区内临沧过铝质黑云母二长花岗岩体(很可能是区域内成熟大陆上地壳重熔的产物;图8)的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值(0.7265)和$\varepsilon_{Nd}(t)$值(−13.1)(刘昌实

表2 贝吾、里农和路农岩体 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析结果

Table 2 Rb-Sr, Sm-Nd isotopic compositions for the Beiwu, Linong and Lunong granitoids

岩体	样品号	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_m$	$\pm2\sigma$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_m$	$\pm2\sigma$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$	$\varepsilon_{Nd}(t)$	$f_{Sm/Nd}$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)
里农	LiN-3	3.132	0.718022	4	0.707775	0.1099	0.512187	4	0.512021	−6.3	−0.44	1415	1515
	LiN-4	3.306	0.719900	5	0.709086	0.0980	0.512168	6	0.512021	−6.3	−0.50	1294	1516
	LiN-5	0.716	0.711487	3	0.709144	0.1204	0.512180	4	0.511999	−6.7	−0.39	1585	1551
	LiN-6	0.984	0.712358	3	0.70914	0.1166	0.512194	7	0.512018	−6.3	−0.41	1502	1520
路农	LuN-1	0.840	0.713265	4	0.710518	0.0847	0.512209	5	0.512081	−5.1	−0.57	1113	1420
	LuN-2	1.394	0.714218	4	0.709656	0.0923	0.512206	6	0.512067	−5.4	−0.53	1187	1443
贝吾	BW-1	2.160	0.716128	4	0.709062	0.1058	0.512197	4	0.512038	−5.9	−0.46	1347	1489
	BW-2	1.860	0.715142	3	0.709057	0.1097	0.512188	5	0.512023	−6.2	−0.44	1410	1513
	BW-3	1.871	0.714817	7	0.708697	0.1147	0.512197	5	0.512024	−6.2	−0.42	1468	1511
	BW-4	1.440	0.714244	3	0.709534	0.1082	0.512190	6	0.512027	−6.1	−0.45	1387	1506
	BW-5	1.272	0.712874	4	0.708713	0.1070	0.512200	7	0.512039	−5.9	−0.46	1358	1487
	BW-6	2.064	0.715819	5	0.709066	0.1151	0.512202	5	0.512029	−6.1	−0.41	1466	1503

注: m 代表测试数据; 球粒陨石均一储库值为: $^{87}Rb/^{86}Sr=0.0847$, $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7045$, $^{147}Sm/^{144}Nd=0.1967$, $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512638$; $\lambda_{Rb\text{-}Sr}=1.42\times10^{-11}a^{-1}$ (Steiger and Jăger, 1977), $\lambda_{Sm\text{-}Nd}=6.54\times10^{-12}a^{-1}$ (Lugmair and Harti, 1978); t_{DM2} 为二阶段模式年龄,计算方法见 Keto and Jacobsen (1987); $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$、$(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$ 和 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 计算过程中 $t=230Ma$

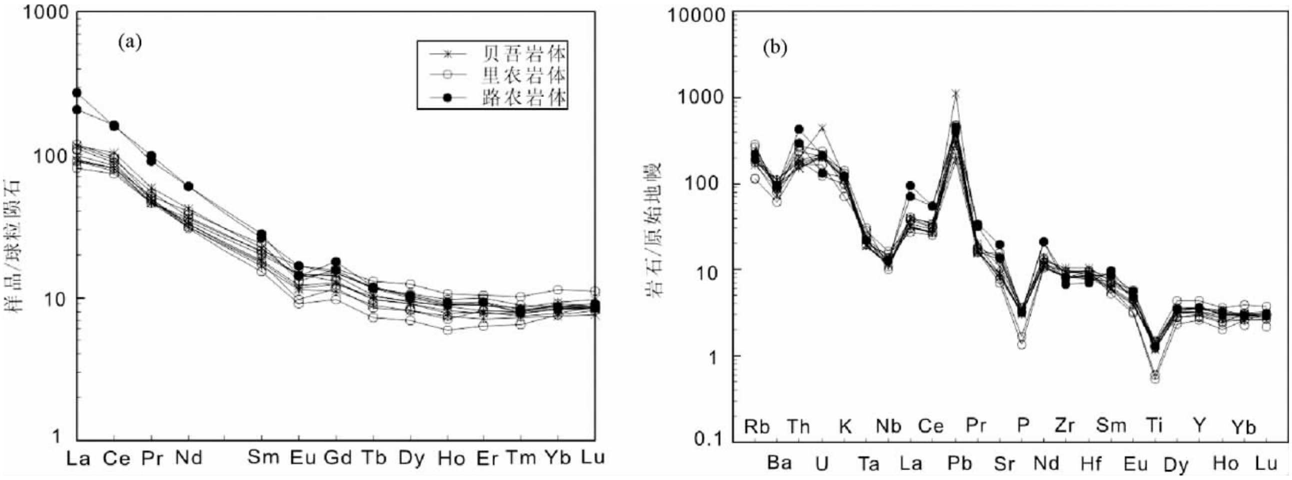

图7 贝吾、里农和路农岩体稀土元素球粒陨石标准化(a)和微量元素原始地幔标准化图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element concentrations (b) of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

和朱金初,1989)。3 个岩体的 Nd 同位素二阶段模式年龄 t_{DM2}(Nd) = 1489 ~ 1515Ma,均值为 1.5Ga。由于 $f_{Sm/Nd}$ 介于 −0.2 ~ −0.6 之间,说明 t_{DM2}(Nd) 值是可信的(Wu *et al.*, 2003a),进一步表明贝吾、里农和路农岩体可能具有相同的岩浆源区。

5 讨论

5.1 成因类型

自从 Chappell and White(1974) 将花岗岩分为 I 型和 S 型以来,通常依据岩浆源区的性质,将花岗岩分为 I 型、S 型、A 型和 M 型(吴福元等,2007)。M 型花岗岩由玄武质岩浆分异而形成(White, 1979),如蛇绿岩套中的大洋斜长花岗岩。贝吾、里农和路农岩体具有与区内玄武岩显著不一致的 Sr-Nd 同位素特征(图8),并且区域内存在较大规模的中-晚三叠世花岗岩岩浆活动(简平等,2003a; 王全伟等,2008),这些显然无法用玄武岩浆结晶分异来解释,因而 3 岩体不可能是 M 型花岗岩。贝吾、里农和路农岩体的 10000Ga/Al 为 1.7 ~ 2.1,低于 A 型花岗岩的下限; FeO^T/MgO 较小,为 1.6 ~ 3.0,有别于 A 型花岗岩显著富铁的特征; 在 Y-10000Ga/

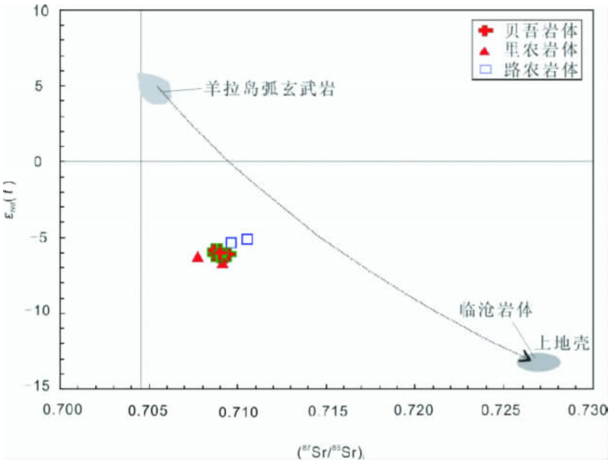

图 8 贝吾、里农和路农岩体 $\varepsilon_{Nd}(t)$-$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解

上、下地壳趋势据 Jahn *et al.* (1999);羊拉岛弧玄武岩(6 件样品平均值,作者未刊数据)被用来代表俯冲带之上的幔源岩浆:$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7055$,$Sr = 46.2\times10^{-6}$,$\varepsilon_{Nd}(t) = 4.9$,$Nd = 8.2\times10^{-6}$;临沧黑云母二长花岗岩(刘昌实和朱金初,1989)被用来代表成熟大陆上地壳物质组分:$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7265$,$Sr = 139.8$,$\varepsilon_{Nd}(t) = -13.1$,$Nd = 39.37$,$t = 230$Ma

Fig. 8 $\varepsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids

The trends of the upper and lower crust are from Jahn *et al.* (1999); The Yangla island arc basalts (average value of six samples, unpublished data from author) represents mantle-drived magmas above subduction zone: $\varepsilon_{Nd}(t) = 4.9$, $Nd = 8.2\times10^{-6}$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7055$, $Sr = 46.2\times10^{-6}$; Luchun syn-collisional arc rhyolites (Liu and Zhu, 1989) represents mature upper continental crust: $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7265$, $Sr = 139.8$, $\varepsilon_{Nd}(t) = -13.1$, $Nd = 39.37$, $t = 230$Ma

Al、$(K_2O + Na_2O)$-10000Ga/Al、Nb-10000Ga/Al 及 Zr-10000Ga/Al 图解(图 9a~d)中,样品均落在 I 型和 S 型花岗岩区;高场强元素 Nb、Ta、Ti 相对亏损,同样表明该组岩体不属于 A 型花岗岩(Wu *et al.*, 2003b)。

近年来,磷灰石在 I 型和 S 型花岗岩浆中的不同行为被成功用于区分 I 型和 S 型花岗岩(Chappell, 1999; Wu *et al.*, 2003b; Li *et al.*, 2007)。实验证明,在准铝质—弱过铝质 I 型花岗岩中,磷灰石的溶解度很低,并在岩浆分异过程中随 SiO_2 的增加而降低;而在过铝质 S 型花岗岩中,磷灰石溶解度变化趋势与此相反。本文花岗岩为准铝-弱过铝质(大部分 A/CNK < 1.1),P_2O_5 含量较低(0.04% ~ 0.11%),并且 SiO_2 与 P_2O_5 具显著负相关关系(图 6e),与 I 型花岗岩演化趋势一致。另外,Pb 随 SiO_2 含量的增加而增加(图 6g)同样揭示了 I 型花岗岩的演化趋势(Li *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009)。结合岩石薄片中 S 型花岗岩的标志矿物(如白云母、堇青石)较罕见、CIPW 标准矿物计算中刚玉 < 1.0% 等特点,

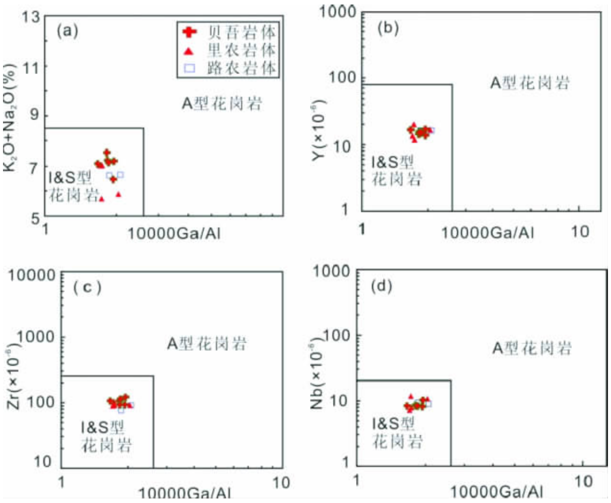

图 9 贝吾、里农和路农岩体 $K_2O + Na_2O$、Y、Zr、Nb 与 10000Ga/Al 分类图解(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 9 $K_2O + Na_2O$, Y, Zr, Nb vs. 10000Ga/Al classification diagrams of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids (after Whalen *et al.*, 1987)

认为贝吾、里农和路农岩体属于 I 型花岗岩。

5.2 分离结晶过程

贝吾、里农和路农岩体具有高的 SiO_2(最高达 73%)含量,P、Nb、Ti 等元素显著亏损,Ba 相对于 Rb 和 Th 亏损,分异指数(DI)为 70~87,这些特征表明,岩体经历了一定程度的分离结晶作用(邱检生等,2005)。Nb、Ti、Ta、Zr 和 Hf 等高场强元素的亏损,一方面可能反映了源岩的特征,因为典型的地壳熔体就是亏损高场强元素的(Ryerson and Watson, 1987);另一方面,Nb、Ta 和 Ti 的亏损程度较高,反映了可能存在富钛矿物(如钛铁矿、榍石等)的分离结晶(图 6F),而 P 的亏损反映了磷灰石的分离结晶(Wu *et al.*, 2003b; Liu *et al.*, 2009; Zhong *et al.*, 2009; 朱弟成等,2009)。通过计算 Ba、Sr、Sm、Gd 和 Eu 等元素在斜长石和钾长石中的分配(Arth, 1976),认为 Ba 的亏损、Sr 的弱亏损与钾长石和斜长石分离结晶有关。Eu/Eu* -Ba 关系图(图 10a)显示钾长石分离结晶程度更高,表明 Ba 的亏损主要受控于钾长石的分离结晶;结合 Eu/Eu* -Sr 关系图(图 10b)表明,Eu/Eu* 主要受控于斜长石的分离结晶,由于斜长石分离结晶程度较低,因而 Eu 的负异常较弱。

SiO_2-Zr 相关系图(图略)上,随着 SiO_2 含量的增加,Zr 的含量降低,这说明锆石在岩浆中是饱和的,并且存在锆石的分离结晶(Li *et al.*, 2007)。锆石饱和温度(Watson and Harrison, 1983)可以大致反映花岗质岩石液相线的温度(Calvin *et al.*, 2003),贝吾、里农和路农岩体的锆石饱和温度较均一,为 717~764℃(表 1)。

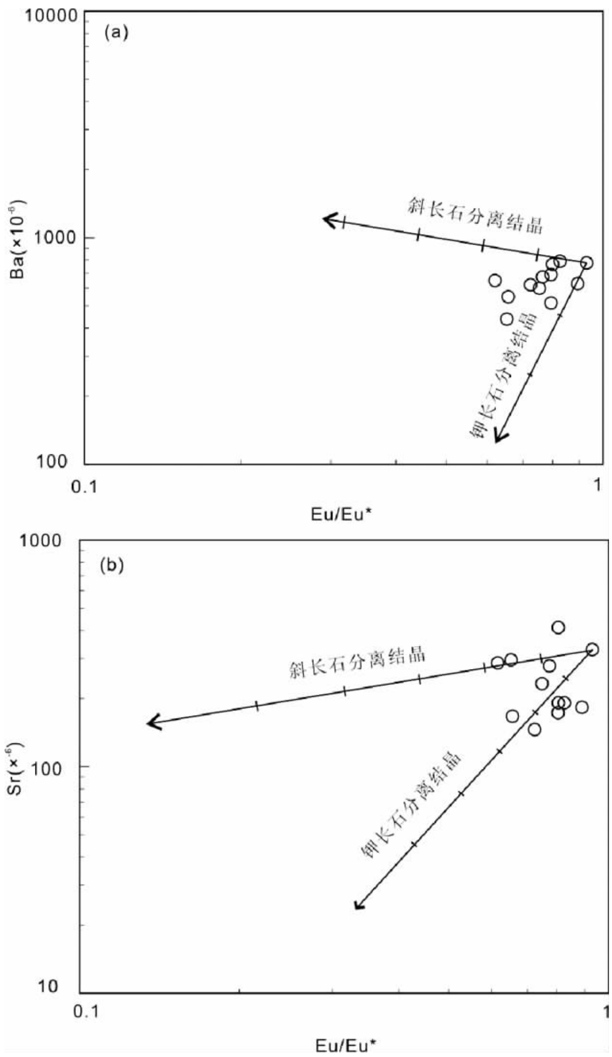

图 10　贝吾、里农和路农岩体 Eu/Eu* -Ba (a) 和 Eu/Eu* -Sr (b) 图解

各分配系数引自 Arth (1976); 以分异指数最低的样品代表原始岩浆, 分异趋势线上的竖线反映分离结晶的程度, 并以 10% 为间隔

Fig. 10　Eu/Eu* vs. Ba (a) and Eu/Eu* vs. Sr (b) diagrams of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids

The mineral fractionation vectors, calculated using partition coefficients derive from Arth (1976). The sample with the lowest DI is supposed to be parent melt. The tick marks indicate the percentage of mineral phase removed, in 10% intervals

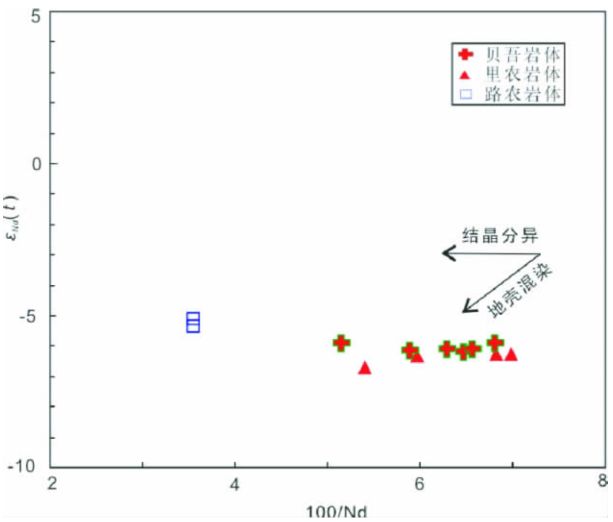

图 11　贝吾、里农和路农岩体 $\varepsilon_{Nd}(t)$ -100/Nd 图解

结晶分异和地壳混染趋势引自邱检生等(2003)

Fig. 11　$\varepsilon_{Nd}(t)$ vs. 100/Nd diagrams of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids

Trending lines of crystallization fractionated and crustal contamination are from Qiu *et al.* (2003)

5.3　源区特征

主量元素、微量元素和同位素地球化学特征表明, 贝吾、里农和路农岩体可能具有相同的岩浆源区和成岩方式。贝吾、里农和路农岩体均为钙碱性-高钾钙碱性 I 型花岗岩, 并具 Nb、Ti 的负异常、Pb 的正异常, 这些特征与大陆地壳十分相似(Rudnick and Fountain, 1995), 初步表明上述岩体可能主要来源于地壳物质的部分熔融。3 岩体具有较高的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.7078 ~ 0.7148)、较低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ (−5.1 ~ −6.7) 以及古老的 Nd 同位素二阶段模式年龄(t_{DM2} = 1.5Ga), 对此有 3 种可能解释: (1) 它们单纯来源于古老地壳物质的重熔或深熔; (2) 来源于幔源岩浆与古老地壳物质部分熔融岩浆在源区的混合; (3) 幔源岩浆在上升过程中受到大陆地壳的强烈混染(毕献武等, 2005)。因为 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值较均一, 且在 $\varepsilon_{Nd}(t)$ -Nd/100 关系图(图 11) 中, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 与 100/Nd 不具有相关性, 这就排除了地壳混染的可能性(Poitrasson, 1998; 邱检生等, 2003)。区域内临沧岩体被认为是典型的 S 型花岗岩, 其主要来源于大陆上地壳物质的重熔(刘昌实和朱金初, 1989), $\varepsilon_{Nd}(t)$ -$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 关系图(图 8) 显示, 贝吾、里农和路农岩体的 Sr-Nd 同位素特征与临沧岩体显著不同; 麻粒岩相岩石是中下地壳的典型代表, 区域内, 由于昌都-思茅微陆块和中咱微陆块在晚古生代以前均为扬子西缘的一部分(莫宣学等, 1993; 孙晓猛等, 1994; 战明国等, 1998), 因而认为滇西地区与扬子地台西缘可能具有统一的基底。川西沙坝麻粒岩 Nd 同位素二阶段模式年龄为 1580Ma, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 返算到 230Ma 为 −7.1, 徐士进等(2002) 认为该麻粒岩可能代表扬子西缘下地壳的基本组成。相对于沙坝麻粒岩, 贝吾、里农和路农岩体的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值略高, t_{DM2} 偏低。上述分析表明, 单纯上地壳或下地壳的熔融均无法解释 3 岩体的同位素组成, 暗示岩浆源区可能存在幔源物质的加入。Nb/Ta 比值常常可以有效地识别源区的特征(Eby *et al.*, 1998)。本研究中样品 Nb/Ta 比值分布范围较广(6.1 ~ 13.3), 横跨下地壳(8.3) 到亏损地幔(> 17.0) (Sun and McDocough, 1989) 的范围, 同样暗示幔源岩浆的贡献。而各

岩体中发育大量暗色微粒包体(MME)为壳幔岩浆混合提供了地质方面的证据，该包体锆石 U-Pb 年龄为 235.9 ± 3.3Ma，与主岩在误差范围内一致；同时 SiO_2 含量(53.2% ~ 59.9%)介于主岩和典型幔源岩石之间，暗示包体可能为壳幔岩浆混合的产物(作者未刊数据)。另外，若临沧岩体在同位素组成上可以代表大陆上地壳物质，羊拉岛弧玄武岩(作者未刊数据)作为岩体中识别出的幔源组分，Sr-Nd 同位素混合二元模拟结果显示，贝吾、里农和路农岩体的落点不在由两端元组分构成的混合线上(图 8)。结合 Eu 负异常不明显(正常上地壳具显著 Eu 负异常，中下地壳 Eu 弱负异常(张本仁和傅家谟，2005))的特征，认为参与"壳幔混合"的地壳组分很有可能是中下地壳物质。

幔源岩浆加入源区有 2 种可能方式，一是地幔物质部分熔融形成的岩浆与其诱发的地壳物质部分熔融形成的长英质岩浆直接混合，另一种可能性是幔源岩浆早期首先侵入到地壳基底岩石中形成新生地壳，然后在后期热事件的影响下，新生地壳与古老地壳构成的混合地壳发生部分熔融(邱检生等，2008)。因为花岗岩主要是地壳物质部分熔融的产物，所以，对于壳幔混合 I 型花岗岩，多数学者主张后一种模式(Wu *et al.*, 2003b)。但就本文研究的花岗岩而言，由于 Nd 同位素二阶段模式年龄本身较古老，且区域内暂未发现新生地壳存在的证据，因而倾向于认为幔源岩浆与古老地壳部分熔融形成的长英质岩浆在地壳深部直接混合。

5.4 构造意义

金沙江洋是古特提斯洋的重要组成部分，近 20 年来，在金沙江带相继识别出蛇绿岩、洋脊(准洋脊)/洋岛玄武岩、弧火山岩和弧花岗岩，记录了晚古生代以来该区存在古特提斯洋形成、消减和陆陆(弧陆)碰撞事件。尽管其俯冲碰撞时限还没有很好的限定，但晚古生代以来沉积/岩浆建造及其所揭示的构造背景(莫宣学等，1993；莫宣学和潘桂棠，2006；孙晓猛等，1994；沈上越等，1995；汪啸风等，1999；王立全等 1999，2000)，以及近年来锆石 U-Pb 定年技术的发展为探讨金沙江洋的演化提供较好的约束。例如，在蛇绿岩套中发现的之用层状角闪辉长岩和书松斜长岩获得了 328 ± 8Ma 和 329 ± 7Ma 单颗粒锆石 U-Pb 年龄(简平等，2003a，b；Jian *et al.*, 2008)，反映金沙江大洋可能打开于早石炭世；娘九山俯冲型斜长花岗岩获得的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 285 ± 6Ma(简平等，2003b)，指示大洋的俯冲在早二叠世已经开始；而中心绒地区"同碰撞"型花岗岩获得的 255 ~ 238Ma 的 Rb-Sr 年龄(Wang *et al.*, 2000)表明昌都-思茅微板块及中咱微板块可能在晚二叠世或早三叠世已经发生碰撞。另外，滇西元江-墨江一带发现上三叠统一碗水组不整合于蛇绿岩之上，其底部砾岩中含有蛇绿岩与铬铁矿碎屑，证明碰撞完成不晚于晚三叠世(莫宣学和潘桂棠，2006)。

贝吾、里农和路农岩体为典型 I 型花岗岩，其 SIMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 233.9 ± 1.4Ma (2σ)、233. ± 1.5Ma (2σ) 和 231.0 ± 1.6Ma (2σ)。根据上述讨论，区域的陆-陆碰撞可能在晚三叠世已经完成，因而从本文研究的 3 个岩体可能产出于碰撞晚期或后碰撞构造背景。同时研究发现，贝吾、里农和路农 3 个岩体与区域内兰坪盆地攀天阁组酸性火山岩(全岩 Rb-Sr 年龄约 236Ma，初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.7072；牟传龙和余谦，2002)和德钦鲁春-红坡牛场上叠裂谷盆地酸性火山岩(全岩 Rb-Sr 年龄约 224Ma，初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.7114；王立全等，2002)具有相似地球化学特征和形成时代。而这些火山岩是以一套酸性火山岩夹玄武质岩石为特征的"双峰式"火山岩，这种形成时代相近、地球化学特征相似的一套以"双峰式"为特征火山岩为碰撞晚期-碰撞后构造环境的产物；另外，区内同时代的芒怀组酸性火山岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 231.0 ± 5.0Ma，初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.7082 ~ 0.7104)和临沧花岗岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 229.4 ± 3.0Ma)被证实同样产出于碰撞晚期—碰撞后构造环境(彭头平等，2006；范蔚茗等，2009)。在 Rb/30-Hf-3 × Ta 图解中，样品点基本落在碰撞晚期或碰撞后花岗岩范围内(图 12)。因此，综合上述分析，认为形成于 230Ma 左右、具有相似地球化学特征的贝吾、里农和路农岩体应形成于碰撞晚期或碰撞后构造环境。

基于以上的讨论，金沙江带在晚三叠世前已进入碰撞晚期或后碰撞造山阶段。在这种构造背景之下，对贝吾、里农和路农岩体的成因可以做如下描述：由于碰撞晚期或后碰撞拉张裂解作用，幔源岩浆发生上涌并底侵于地壳下部。在断裂引起的减压作用和幔源基性岩浆底侵带来足够热量的影响下，中下地壳物质发生部分熔融并形成长英质岩浆。幔源基性岩浆与长英质岩浆在深部岩浆房混合产生混合的母岩

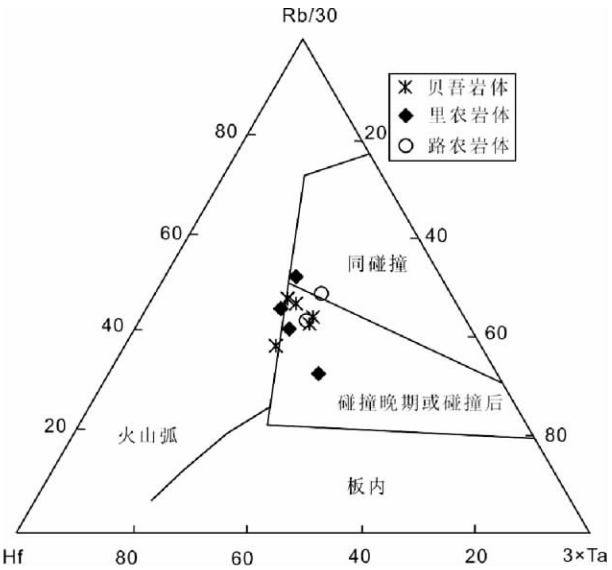

图 12 贝吾、里农和路农岩体 Rb/30-Hf-3 × Ta 图解(据 Pearce and Harris, 1984)

Fig. 12 Rb/30 vs. Hf vs. 3 × Ta diagram of the Beiwu, Linong and Lunong granitoids (after Pearce and Harris, 1984)

浆，后者再经一定程度的分异演化，即形成本文所讨论的贝吾、里农和路农岩体。

6 结论

（1）贝吾、里农和路农岩体具有富硅、高钾和低磷等特征，铝饱和指数（A/CNK）为0.92~1.11，富集Rb、Th、U、Pb和LREE等元素，显著亏损Nb、Ta、Ti和P等元素，10000Ga/Al比值（1.7~2.1）较典型A型花岗岩偏低，Eu负异常不明显，属准铝-弱过铝质的、钙碱系列-高钾钙碱系列I型花岗岩；

（2）与区域上大陆地壳物质相比，贝吾、里农和路农岩体具有相对低的（$^{87}Sr/^{86}Sr$）$_i$（0.7078~0.7105）和相对高的$\varepsilon_{Nd}(t)$（-5.1~-6.7），并具古老的Nd同位素二阶段模式年龄（t_{DM2}=1.5Ga），全岩地球化学及Sr-Nd同位素特征综合表明，岩浆源区可能存在幔源物质的加入；

（3）贝吾、里农和路农岩体很可能是在中咱微陆块与昌都-思茅微陆块碰撞的晚期或后碰撞的动力学背景之下，由底侵的幔源基性岩浆及其诱发的中下地壳长英质岩浆在深部岩浆房混合，并经较高程度分离结晶作用形成。

致谢 野外工作得到了迪庆矿业有限公司地质科刘月东、罗诚等工程师的大力支持；论文撰写过程中得到中科院地球化学研究所刘燊研究员、齐有强博士、冷成彪博士及中国地质大学（北京）朱弟成教授的热情指导；匿名审稿人的建设性意见对完善本文起到重要作用；在此一并表示感谢！

References

Arth JG. 1976. Behavior of trace elements during magmatic progresses: A summary of theoretical models and their applications. Journal of Research US Geological Survey, 4: 41-47

Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Wu KX, Su WC and Zhan ZX. 2005. Geochemical characteristics of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 113-124 (in Chinese with English abstract)

Calvin FM, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implication of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31(6): 529-532

Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geology, 8: 173-174

Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46: 535-551

Clemens JD. 2003. S-type granitic magmas-petrogenetic issues, models and evidence. Earth Science Reviews, 61: 1-18

Eby GN, Woolley AR, Din V and Platt G. 1998. Geochemistry and petrogenesis of nepheline syenite: Kasungu-Chipala, Ilomba, and Ulindi nepheline syenite intrusions, north Nyasa alkaline province, Malawi. Journal of Petrology, 39: 1405-1424

Fan WM, Peng TP and Wang YJ. 2009. Triassic magmatism in the southern Lancangjiang zone, southwestern China and its constraints on the tectonic evolution of Paleo-Tethys. Earth Science Frontiers, 16(6): 291-302 (in Chinese with English abstract)

Healy B, Collins WJ and Richards SW. 2004. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: The Murrumbidgee Batholith example. Lithos, 78: 197-216

Hou ZQ, Qu XM, Zhou JR, Yang YQ, Huang DH, Lv QT, Tang SH, Yu JJ, Wang HP and Zhao JH. 2001. Collision-orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: Record of granites. Acta Geologica Sinica, 73(3): 484-497 (in Chinese with English abstract)

Jahn BM, Wu FY, Lo CH, Tsai and Lo CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. Chemical Geology, 157: 119-146

Jian P, Liu DY and Sun XM. 2003a. SHRIMP dating of Baimaxueshan and Ludian granitoid batholiths northwestern Yunnan Province, and its geological implications. Acta Geoscience Sinica, 24(4): 337-342 (in Chinese with English abstract)

Jian P, Liu DY and Sun XM. 2003b. SHRIMP dating of Carboniferous Jinshajiang ophiolite in western Yunnan and Sichuan: Geochronological constraints on the evolution of the Paleo-Tethys oceanic crust. Acta Geologica Sinica, 77(2): 217-230 (in Chinese with English abstract)

Jian P, Liu DY and Sun XM. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys. Journal of Asian Earth Sciences, 32: 371-384

Jian P, Liu DY, Kröner A, Zhang Q, Wang YZ., Sun XM and Zhang W. 2009a. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (I): Geochemistry of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks. Lithos, 113: 748-766

Jian P, Liu DY, Kröner A, Zhang Q, Wang YZ., Sun XM and Zhang W. 2009b. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province. Lithos, 113: 763-784

Keto LS and Jacobsen SB. 1987. Nd and Sr isotopic variations of Early Paleozoic oceans. Earth and Planetary Science Letters, 84: 27-41

Li XH, Zhou HW, Liu Y, Li JY, Chen ZH, Yu JS and Gui XT. 2000. Mesozoic shoshonitie intrusives in the Yangchun basin, western Guangdong, and their tectonic significance: I. Petrology and isotope geochronology. Geochimica, 29(6): 513-520 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? Lithos, 96: 186-204

Li XH, Li WX, Wang XC, Li QL, Liu Y and Tang GQ. 2009. Role of mantle-derived magma in genesis of Early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China: In situ zircon Hf-O isotopic constraints. Science in China (Series D), 52(9): 1262-1278

Li XZ, Liu WJ, Wang YZ, Zhu QW, Du DX, Shen GF, Liu CJ, Que MY, Yang SH, Li DM and Feng QL. 1999. The Tectonic Evolution and Metallogenesis in the Tethys of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Area, Southwestern China. Beijing: Geological Publishing House, 1-275 (in Chinese)

Liu CS and Zhu JC. 1989. Quantitative modeling source rocks of Lincang granite batholith, West Yunnan. Acta Petrologica et Mineralogica, 8(1): 1-12 (in Chinese with English abstract)

Liu S, Hu RZ, Gao S, Feng CX, Huang ZL, Lai SC, Yuan HL, Liu XM, Coulson IM, Feng GY, Wang T and Qi YQ. 2009. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan Block, western Yunnan Province, SW China. Journal of Asian Earth Sciences, 36: 168-182

Liu XL, Zhang N, Yin GH, Wang CW and Luo HY. 2009. Beiwu-Nilv copper deposit of Yangla, Deqin, Yunnan. Yunnan Geology, 28(1): 34-39 (in Chinese with English abstract)

Lugmair GW and Harti K. 1978. Lunar initial $^{143}Nd/^{144}Nd$: Differential evolution of the lunar crust and mantle. Earth and Planetary Science Letters, 39: 349-357

Lv BX, Wang Z, Zhang ND, Duan JZ, Gao ZY, Shen GF, Pan CY and Yao P. 1993. Granitoids in the Sanjiang Region (Nujing-Lancangjiang-Jinshajiang Region) and Their Metallogenetic Specialization. Beijing: Geological Publishing House, 1-328 (in Chinese)

Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101: 635-643

Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and paleogeography of SE Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 20: 551-566

Morrison GW. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. Lithos, 13(1): 97-108

Mo XX, Lu FX, Shen SY, Zhu QW, Hou ZQ, Yang KH, Deng JF, Liu XP, He CX, Lin PY, Zhang BM, Tai DQ, Chen MH, Hu XS, Ye S, Xue YX, Tan J, Wei QR and Fan L. 1993. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization. Beijing: Geological Publishing House, 1-267 (in Chinese)

Mo XX and Pan GT. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet plateau: Constrained by tectono-magmatic events. Earth Science Frontiers, 13(6): 43-51 (in Chinese with English abstract)

Mu CL and Yu Q. 2002. The age of volcanic rock of the Pantiange Formation in the Lanping basin, Yunnan Province. Journal of Stratigraphy, 26(4): 289-292 (in Chinese with English abstract)

Pan GT, Li XZ, Wang LQ, Ding J and Chen ZL. 2002. Preliminary division of tectonic units of Qinghai-Tiber plateau and its adjacent regions. Geological Bulletin of China, 21(11): 701-707 (in Chinese with English abstract)

Pan GT, Xu Q, Hou ZQ, Wang LQ, Du DX, Mo XX, Li DM, Wang MJ, Li XZ and Jiang XS. 2003. Archipelagic Orogenesis, Metallogenic Systems and Assessment of the Mineral Resources along the Nujing-Langcangjiang-Jinshajiang Area in Southwestern China. Beijing: Geological Publishing House, 1-420 (in Chinese)

Patiňo DAE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds.). Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques. Geological Society Special Publication, 168: 55-75

Pearce JA and Harris NBW. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25: 956-983

Peng TP, Wang YJ, Fan WM, Liu DY, Sh YR and Miao LC. 2006. Early Mesozoic acidic volcanic rocks from the southern Lancangjiang zone: Zircon SHRIMP U-Pb geochronology and tectonic implications. Science in China (Series D), 49(10): 1032-1043

Poitrasson FPC. 1998. Extreme Nd isotope homogeneity in a large rhyolitic province: The Estérel massif, southeast France. Bulletin of Volcanology, 60: 213-223

Qi L, Hu J and Conrad GD. 2000. Determination of trace elements in grantes by inductively coupled plasma mass spectrometry. Talanta, 51: 507-513

Qiu JS, Wang DZ, Liu H and Ling WL. 2002. Post-collisional potash-rich volcanic rocks in the north margin of Dabie orogenic belt: Geochemistry and petrogenesis. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 319-330 (in Chinese with English abstract)

Qiu JS, Xu XS and Jiang SY. 2003. Deep subduction of crust materials and its implication to the genesis of potash-rich volcanic rocks. Earth Science Frontier, 10(3): 191-200 (in Chinese with English abstract)

Qiu JS, Hu J, Wang XL, Jiang SY, Wang RC and Xu XS. 2005. The Baishigang pluton in Heyuan, Guangdong Province: A highly fractionated I-type granite. Acta Geologica Sinica, 79(4): 503-514 (in Chinese with English abstract)

Qiu JS, Xiao E, Hu J, Xu XS, Jiang SY and Li Z. 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Nd-Hf isotope. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2468-2484 (in Chinese with English abstract)

Qu XM, Yang YQ and Li YG. 2004. A discussion on origin of Yangla copper deposit in light of diversity of ore-hosting rock type. Mineral Deposits, 23(4): 431-442 (in Chinese with English abstract)

Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of minor elements. Lithos, 22: 247-263

Roberts MP and Clements JD. 1993. Origin of high potassium, calc-alkaline, I-type Granite. Geology, 21: 825-828

Rollinson HR. 1993. Using Geochemical Date: Evaluation, Presentation, Interpretation. New York: Longman Group UK Ltd., 1-352

Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. Reviews of Geophysics, 33: 267-309

Ryerson FJ and Watson EB. 1987. Rutile saturation in magmas: Implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts. Earth and Planetary Science Letters, 86: 225-239

Shen SY, Zhang BM and Wei QR. 1995. Volcanic rocks in southern Jomda-Weixi Arc in the Nujiang-Lancang-Jinsha rivers region. Tethyan Geology, 19: 38-55 (in Chinese with English abstract)

Shen SY, Feng QL, Liu BP and Mo XX. 2002. Study on ocean ridge, ocean island volcanic rocks of Changning-Menglian belt. Geological Science and Technology Information, 21(3): 13-17 (in Chinese with English abstract)

Steiger RH and Jǚger E. 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology. Earth and Planetary Science Letters, 36: 359-362

Sun XM, Nie ZT and Liang DY. 1994. On the time and tectonic significance of ophiolitic mélange in Jingshangjjiang river belt, northwest Yunnan. Geosciences, 8(3): 241-246 (in Chinese with English abstract)

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Ocean Basins. London: Geological Society Special Publication, 42: 313-345

Sylvester PJ. 1998. Postcollisional strongly peraluminous granites. Lithos, 45: 29-44

Wang LQ, Pan GT, Li DM, Xu Q and Lin SL. 1999. The spatio-temporal frame work and geological evolution of the Jinshajiang arc-basin systems. Acta Geologica Sinica, 73(3): 206-218 (in Chinese with English abstract)

Wang LQ, Pan GT, Li DM and Xu TR. 2000. The evolution and mineralization of the Jomda-Weixi continental marginal volcanic arc, southwestern China. Tethyan Geology, 20(2): 1-17 (in Chinese with English abstract)

Wang LQ, Pan GT, Li DM and Xu TR. 2002. The Rb-Sr age determinations of the "bimodal" volcanic rocks in the Luchun-Hongponiuchang superimposed rift basin, Deqen, Yunna. Tethyan Geology, 22(1): 65-71 (in Chinese with English abstract)

Wang QW, Wang KM, Que ZZ and Fu XF. 2008. Granites in Western Sichuan Province and Its Metallogenesis Series. Beijing: Geological Publishing House, 1-305 (in Chinese)

Wang XF, Jian P, He LQ and Wang CS. 1999. Discovery of Proterozoic remnant basements in the Jinshajiang suture zone: Evidence from isotopic age. Geology and Mineral Resources of South China, 2: 53-58 (in Chinese with English abstract)

Wang XF, Metcalfeb I, Jian P, He LQ and Wang CS. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan suture zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution. Journal of Asian Earth Sciences, 18: 675-690

Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth and Planetary Science Letters, 64: 295-304

Wei JQ, Zhan MG, Lu YF, Chen KX and He LQ. 1997. Granites in

Deqin Yangla copper deposit district, western Yunnan Province. Geology and Mineral Resources of South China, 4: 50 – 56 (in Chinese with English abstract)

Wei JQ, Chen KX and Wei FY. 2000. Tectonic evolution-magmatism-metallogenesis in Yangla copper deposit, western Yunnan Province. Geology and Mineral Resources of South China, 1: 59 – 62 (in Chinese with English abstract)

Whalen JB, Currie, KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contribution to Mineralogy and Petrology, 95: 407 – 419

White AJR. 1979. Sources of granite magmas. Geological Society of America Abstract with Programs, 11: 539

Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis. London: Allen and Unwin, 1 – 466

Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. Lithos, 67: 191 – 204

Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. Lithos, 66: 241 – 273

Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217 – 1238 (in Chinese with English abstract)

Wyllie. 1977. Crustal anatexis: An experimental review. Tectonophysics, 43: 41 – 71

Xu SJ, Yu HB, Wang RC, Fu HP and Fang Z. 2002. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic ages of Shaba granulite from western Sichuan Province and their geological significanc. Geological Journal of China Universities, 8(4): 399 – 408 (in Chinese with English abstract)

Yin FG, Pan GT, Wan F, Li XZ and Wang FG. 2006. Tectonic facies along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang orogenic belt in southwestern China. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 26(4): 33 – 39 (in Chinese with English abstract)

Zhan MG, Lu YF, Chen SF, Dong FL, Chen KX, Wei JQ, He LQ, Huo XS, Gan JM and Yu FM. 1998. Deqin Yangla Copper Deposit in Western Yunnan Province. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 – 163(in Chinese)

Zhang BR and Fu JM. 2005. Progresses in Geochemistry. Beijing: Chemical Industry Press, 199 – 248 (in Chinese with English abstract)

Zhang Q, Wang Y, Pan GQ, Li CD and Jin WJ. 2008. Sources of granites: Some crucial questions on granite study (4). Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1193 – 1204 (in Chinese with English abstract)

Zhong H, Zhu WG, Hu RZ, Xie LW, He DF, Liu F and Chu ZY. 2009. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Panzhihua A-type syenitic intrusion in the Emeishan large igneous province, southwest China and implications for growth of juvenile crust. Lithos, 110: 109 – 128

Zhou L, Gao S, Liu YS, Ling WL and Zhang L. 2007. Geochemistry and implications of clastic sedimentary rocks from the northern margin of Yangtze craton. Earth Science, 32(1): 29 – 38 (in Chinese with English abstract)

Zhou XM and Li WX. 2000. The petrogenesis of Late Mesozoic magmatic rocks, Southeast China: A mode of lithosphere eliminated combined with basalt underplating. Progress in Nature Science, 10(3): 240 – 247 (in Chinese)

Zhu DC, Mo XX, Niu YL, Zhao ZD, Wang LQ, Pan GT and Wu FY. 2009. Zircon U-Pb dating and in-situ Hf isotopic analysis of permian peraluminous granite in the Lhasa terrane, southern Tibet: Implications for Permian collisional orogeny and paleogeography. Tectonophysics, 469: 48 – 60

Zhu DC, Mo XX, Wang LQ, Zhao ZD, Niu YL, Zhou CY and Yang YH. 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. Science in China (Series D), 52(9): 1223 – 1239

Zhu J, Zeng PS, Zeng LC and Yin J. 2009. Stratigraphic subdivision of the Yangla copper ore district, northwestern Yunnan. Acta Geologica Sinica, 83(10): 1415 – 1420 (in Chinese with English abstract)

Zhu JJ, Hu RZ, Bi XW, Zhong H and Chen H. 2011. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of granitoids in the Jinshajiang suture zone, SW China: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the Paleo-Tethys ocean. Lithos, 126: 248 – 264

附中文参考文献

毕献武，胡瑞忠，彭建堂，吴开兴，苏文超，战志新. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征. 岩石学报，21(1)：113 – 124

范蔚茗，彭头平，王岳军. 2009. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录. 地学前缘，16(6)：291 – 302

侯增谦，曲晓明，周继荣，杨岳清，黄典豪，吕庆田，唐绍华，余今杰，王海平，赵金花. 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程：花岗岩记录. 地质学报，75(4)：484 – 497

简平，刘敦一，孙晓猛. 2003a. 滇西北白马雪山和鲁甸花岗岩基 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 地球学报，24(4)：337 – 342

简平，刘敦一，孙晓猛. 2003b. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年：古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约. 地质学报，77(2)：217 – 230

李献华，周汉文，刘颖，李寄嵎，陈振宏，于津生，桂训唐. 2000. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义：I. 岩石学和同位素地质年代学. 地球化学，29(6)：513 – 520

李献华，李武显，王选策，李秋立，刘宇，唐国强. 2009. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用：锆石原位 Hf-O 同位素制约. 中国科学(D 辑)，39(7)：872 – 887

李兴振，刘文均，王义昭，朱勤文，杜德勋，沈敢富，刘朝基，阙梅英，杨时惠，李定谋，冯庆来. 1999. 西南三江地区特提斯构造演化与成矿(总论). 北京：地质出版社，1 – 275

刘昌实，朱金初. 1989. 滇西临沧岩基源区物质定量模拟. 岩石矿物学杂志. 8(1)：1 – 12

刘学龙，张娜，尹光侯，王超伟，罗海燕. 2009. 云南德钦羊拉贝吾-尼吕铜矿. 云南地质，28(1)：34 – 39

吕伯西，王增，张能德，段建中，高子英，沈敢富，潘长云，姚鹏. 1993. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性. 北京：地质出版社，1 – 328

莫宣学，路凤香，沈上越，朱勤文，侯增谦，杨开辉，邓晋福，刘祥品，何昌祥，林培英，张保民，邰道乾，陈美华，胡享生，叶松，薛迎喜，谭劲，魏启荣，范例. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京：地质出版社，1 – 267

莫宣学，潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成：构造-岩浆事件的约束. 地学前缘，13(6)：43 – 51

牟传龙，余谦. 2002. 云南兰坪盆地攀天阁组火山岩的 Rb-Sr 年龄. 地层学杂志，26(4)：289 – 292

潘桂棠，李兴振，王立全，丁俊，陈智梁. 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分. 地质通报，21(11)：701 – 707

潘桂棠，徐强，侯增谦，王立全，杜德勋，莫宣学，李定谋，汪明杰，李兴振，江新胜，胡云中. 2003. 西南"三江"多岛弧造山过程成矿系统与资源评价. 北京：地质出版社，1 – 420

彭头平，王岳军，范蔚茗，刘敦一，石玉若，苗来成. 2006. 澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义. 中国科学(D 辑)，36(2)：123 – 132

邱检生,王德滋,刘洪,凌文黎. 2002. 大别造山带北缘后碰撞富钾火山岩:地球化学与岩石成因. 岩石学报,18(3):319－330
邱检生,徐夕生,蒋少涌. 2003. 地壳深俯冲与富钾火山岩成因. 地学前缘,10(3):191－200
邱检生,胡建,王孝磊,蒋少涌,王汝成,徐夕生. 2005. 广东河源白石冈岩体:一个高分异的I型花岗岩. 地质学报,79(4):503－514
邱检生,肖娥,胡建,徐夕生,蒋少涌,李真. 2008. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因:锆石U-Pb年代学、地球化学和Nd-Hf同位素制约. 岩石学报,24(11):2468－2484
曲晓明,杨岳清,李佑国. 2004. 从赋矿岩系岩石类型的多样性论羊拉铜矿的成因. 矿床地质,23(4):431－442
沈上越,张保民,魏启荣. 1995. "三江"地区江达-维西弧南段火山岩研究. 特提斯地质,19:38－55
沈上越,冯庆来,刘本培,莫宣学. 2002. 昌宁-孟连带洋脊、洋岛型火山岩研究. 地质科技情报,21(3):13－17
孙晓猛,聂泽同,梁定益. 1994. 滇西北金沙江带蛇绿混杂岩的形成时代及大地构造意义. 现代地质,8(3):241－246
汪啸风,简平,何龙清,王传尚. 1999. 金沙江缝合带元古宙残留基底的发现—来自同位素地质年龄的证据. 华南地质与矿产,2:53－58
王立全,潘桂棠,李定谋,徐强,林仕良. 1999. 金沙江弧-盆系时空结构及地史演化. 地质学报,73(3):206－218
王立全,潘桂棠,李定谋,须同瑞. 2000. 江达-维西陆缘火山弧的形成演化及成矿作用. 特提斯地质,20(2):1－17
王立全,李定谋,管士平,须同瑞. 2002. 云南德钦鲁春-红坡牛场上叠裂谷盆地"双峰式"火山岩的Rb-Sr年龄值. 特提斯地质,22(1):65－71
王全伟,王康明,阙泽忠,付小方. 2008. 川西地区花岗岩及其成矿系列. 北京:地质出版社,1－305
魏君奇,战明国,路远发,陈开旭,何龙清. 1997. 滇西德钦羊拉矿区花岗岩类地球化学. 华南地质与矿产,4:50－56
魏君奇,陈开旭,魏福玉. 2000. 滇西羊拉地区构造-岩浆-成矿作用分析. 华南地质与矿产,1:59－62
吴福元,李献华,杨进辉,郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报,23(6):1217－1238
徐士进,于航波,王汝成,陆怀鹏,方中. 2002. 川西沙坝麻粒岩的Sm-Nd和Rb-Sr同位素年龄及其地质意义. 高校地质学报,8(4):399－408
尹福光,潘桂棠,万方,李兴振,王方国. 2006. 西南"三江"造山带大地构造相. 沉积与特提斯地质,26(4):33－39
战明国,路远发,陈式房,董方浏,陈开旭,魏君奇,何龙清,霍乡生,甘金木,余凤鸣. 1998. 滇西德钦羊拉铜矿. 武汉:中国地质大学出版社,1－163
张本仁,傅家谟. 2005. 地球化学进展. 北京:化学工业出版社,199－248
张旗,王焰,潘国强,李承东,金惟俊. 2008. 花岗岩源岩问题——关于花岗岩的思考之四. 岩石学报,24(6):1193－1204
周炼,高山,刘勇胜,凌文黎,张利. 2007. 扬子克拉通北缘碎屑沉积岩地球化学特征及意义. 地球科学,32(1):29－38
周新民,李武显. 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因:岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式. 自然科学进展,10(3):240－247
朱弟成,莫宣学,王立全,赵志丹,牛耀龄,周长勇,杨岳衡. 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异I型花岗岩的成因:锆石U-Pb年代学、地球化学和Sr-Nd-Hf同位素约束. 中国科学(D辑),39(7):833－848
朱俊,曾普胜,曾礼传,尹静. 2009. 滇西北羊拉铜矿区地层划分. 地质学报,83(10):1415－1420