

赣东北前寒武纪港边杂岩体的岩浆混合(和)作用及其地质意义

李昌年, 廖群安

(中国地质大学 地球科学学院 湖北武汉 430074)

摘要: 赣东北地区沿江绍断裂北缘和江南造山带南侧有大量的前寒武纪火山-侵入杂岩呈带状分布, 主要由大面积的陆相火山岩和若干长英质-镁铁质火成杂岩体组成, 后者中出露面积最大的港边杂岩体在填图尺度上可划分为长英质岩、镁铁质岩和过渡性岩 3 大组成部分, 长英质岩颗粒锆石 U-Pb 谐和-不一致曲线上交点年龄为 822 ± 4 Ma, 代表杂岩体中岩浆混合作用发生的时间。港边岩体中长英质岩石的 Nd 模式年龄为 1.49~1.68 Ga, 镁铁质岩中玄武质岩石为 1.51~2.21 Ga, 辉长岩的 Nd 模式年龄与玄武质岩石基本相同, 为 1.54~2.13 Ga, 经计算的过渡性岩石的 Nd 模式年龄为 1.58~1.90 Ga, 因此认为镁铁质岩石从源区分离的时间要远早于长英质岩石, 而过渡性岩石含有前两个端员岩浆相互混合(和)的信息。长英质岩石的 $\epsilon_{Nd}(t=822 \text{ Ma})$ 值为 $-0.8 \sim -4.4$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(822)$ 比值为 $0.70368 \sim 0.70549$; 玄武质岩石的 $\epsilon_{Nd}(822)$ 值为 $-2.6 \sim +2.3$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(822)$ 比值为 $0.70387 \sim 0.70527$, 这反映了镁铁质岩浆的源区接近总地球, 长英质岩浆则来自具壳幔混合性质的 EM1 型地幔的源区。可以推测, 赣东北前寒武纪也曾发生过岩浆底侵作用。底侵作用对港边火成杂岩体岩浆的形成起着重要的作用。底侵于壳-幔边界的玄武质岩浆使地壳熔融形成长英质岩浆并聚集于浅部岩浆房。随着长英质岩浆房降温, 长英质岩浆的结晶度和粘度增加, 其物理状态发生液态→(固+液)混合态→固态的变化, 当玄武质岩浆穿透下地壳并不断进入物理状态变化的长英质岩浆房时, 持续地发生两种岩浆的化学混合作用或两岩岩浆的机械混合作用或玄武质岩浆的侵入, 其混合作用的时间以长英质岩石的 U-Pb 谐和-不一致曲线上交点年龄 822 ± 4 Ma 界定。根据 Nd 模式年龄 (t_{DM}) 和 Nd 富集系数 ($f_{Sm/Nd}$) 分布特征, 可以确定中元古代江南造山带为太古宙扬子古陆核的横向增生体, 而新元古代陆相火山-侵入杂岩带则横向增生于江南造山带南缘。至此, 扬子古陆横向增生作用结束, 开始与华夏古陆拼贴, 包括港边火成杂岩体在内的新元古代火山-侵入杂岩带则成为两古陆连结的纽带。

关键词: 岩浆混合与岩浆混和作用, 地壳增生, 赣东北, 前寒武纪, 港边杂岩体

中图分类号: P588.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)05-0357-20

Magmatic mixing and mingling of Precambrian Gangbian complex in northeastern Jiangxi Province and their geological significance

LI Chang-nian and LIAO Qun-an

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Large quantities of Precambrian volcanic-intrusive complexes are distributed between the northern side of Jiangshao suture and the southern side of Jiangnan orogenic belt in northeastern Jiangxi Province. They consist mainly of Neoproterozoic volcanic rocks and felsic-mafic igneous complexes, of which the largest one is Gangbian body covering 120 km² in Hengfeng County. This complex body can be divided into felsic, mafic and transitional rock units at the mapping scale. The age of the upper intersection point on the U - Pb incongruent

收稿日期: 2006-04-19; 修订日期: 2006-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40172024)

作者简介: 李昌年(1946-), 男, 教授, 岩石学专业, E-mail: changnli@cug.edu.cn

curve of zircon from the felsic rocks is 822 ± 4 Ma. The Nd model ages of various rocks from Gangbian complex body are different from each other: felsic rocks are 1.49~1.68 Ga; mafic basaltic rocks are 1.51~2.21 Ga; Nd model ages of gabbro are approximately the same as those of basaltic rocks, being 1.54~2.13 Ga; the calculated Nd model ages of transitive rocks are 1.58~1.90 Ga. Therefore, the fractionation of mafic rocks in this body from the mantle must have occurred much earlier than that of the felsic rocks. Nevertheless, the Nd model ages of these transitive rocks contain some information on mutual mixing and mingling of the two end-member magmatic bodies. The authors obtained quite a few isotopic data for various rocks in Gangbian complex body: $\epsilon_{\text{Nd}}(t=822)$ values of the felsic rocks are $-0.8 \sim -4.4$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(822)$ ratios are $0.70368 \sim 0.70549$, $\epsilon_{\text{Nd}}(822)$ values of the mafic basaltic rocks are $-2.6 \sim +2.3$, and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(822)$ ratios are $0.70387 \sim 0.70527$. These data show that the source of the basaltic magma was close to the bulk earth, whereas the source of Neoproterozoic felsic magma in the complex was derived from the EM I mantle characterized by the mixing of mantle and crust. It is thus considered that northeastern Jiangxi area developed magmatic underplating in Precambrian, and this process played an important role in the formation of the magma of Gangbian complex. The formation of the felsic magma was controlled by the melting of the crust because underplating of the basaltic magma along the boundary between the mantle and the crust supplied thermal energy which was accumulated in the magma chamber; temperature of the diapiric felsic magma chamber decreased in company with increasing extent of crystallization and viscosity in the felsic chamber; the physical state of the felsic magma chamber also changed simultaneously in order of liquid \rightarrow (soild + liquid) \rightarrow solid. The liquid basaltic magma entered the felsic magma chamber through the lower crust, in which the physical condition was changing. Finally, the successive chemical mixing and mechanical mingling of the two end-member magma bodies and the intrusion of magma took place. The time of magmatic mixing is defined by the age of the upper intersection point on the U-Pb incongruent curve of the zircon, i. e., 822 ± 4 Ma. Based on the data of the Nd model age (t_{DM}) and the Nd enrichment coefficient ($f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$), it can be concluded that the middle Proterozoic Jiangnan orogenic belt was accreted on the southern margin of the Archean land nucleus in Yangtze paleocontinent, and that the Neoproterozoic terrestrial volcanic-intrusive complex zone was later accreted on the southern side of the Jiangnan orogenic belt. At that time, the accretion of Yangtze paleocontinent drew to its end and its piecing together with the Cathaysia paleocontinent began. Therefore, the Neoproterozoic volcanic-intrusive complex zone including Gangbian complex body became the link of these two paleocontinents.

Key words: magma mixing and mingling; crustal accretion; northeastern Jiangxi; Precambrian; Gangbian complex

岩浆混合(和)作用的研究由来已久,可以说“岩浆混合学说最终得到承认的历程是一部充满斗争的历史”(Wilcox, 1999)。岩浆混合(和)作用是岩浆混合作用与岩浆混和作用的中文并称,它们对应的英文名词分别是 magma mixing 和 magma mingling。前者意指两种岩浆的化学混合,后者表示为两种岩浆的机械混和(Synder *et al.*, 1997; Neves and Vanchez', 1995; Vernon *et al.*, 1988; 李昌年, 2002a)。岩浆混合(和)作用形成的岩石应称之为岩浆混合岩,由两端员岩浆岩和岩浆混合岩 3 部分共同组成的杂岩体称之为岩浆混合杂岩体(hybrid compxe)。

岩浆混合(和)是壳-幔相互作用、物质和能量交换的一种重要形式,对其研究有助于探测地球的内部过程(O'Hara, 1977; Didier *et al.*, 1991; 周新民等, 1992; 王德滋等, 1994; 曲晓明等, 1997)。岩浆混合(和)作用可以发育于不同的构造背景,尤其是在汇聚的板缘(大陆边缘、岛弧、弧后盆地以及造山带)中广泛存在。现在,人们十分重视把花岗岩质岩石中含有的微粒闪长岩包体作为岩浆混合(和)作用的重要例证(Vernon, 1984; Didier *et al.*, 1991; 王德滋等, 1994),然而对于火成杂岩体中发育持续的岩浆化学混合与岩浆机械混和作用在我国却鲜有报道。前人对本文涉及的赣东北前寒武纪港边火成杂

岩体未做过任何地质研究。笔者在前期对比杂岩体的 1:5 万地质测量工作中发现,按谱系单元法填图不能正确表达该杂岩体各组成单位的相互关系,最终利用岩浆混合理论成功地分解了该杂岩体。因此笔者认为,港边火成杂岩体是一个持续发育这两种岩浆混合(和)作用的完美实例,对其研究则具有重要的地质意义。

1 地质特征

赣东北地区在大地构造上地处扬子古大陆东南缘的江南造山带,其南为江绍深断裂带所隔的华夏古陆(王鸿祯,1983;Wang and Mo,1995);在江绍断裂北缘和江南造山带的南侧分布有大面积的前寒武纪火山-侵入杂岩带,它不仅仅出露于赣东北(称之为上墅组),而且东延至皖南(井潭组)-浙西(双溪坞组)一线(邢凤鸣等,1992)。杂岩带由陆相火山岩和其中若干长英质-镁铁质火成侵入杂岩体共同组成。这些火成杂岩体在平面上出露大小不

等、形状各异,但其长轴排列的 NE-NEE 向与江绍深断裂的走向近于一致。它们断续见于横峰县港边至玉山县仙岩间的百余公里范围内(图 1),向东还可延至浙江的诸暨角石(周新民等,1992),其中尤以出露面积最大的横峰县港边长英质-镁铁质火成杂岩体(120 km²)最为特征和典型。

港边火成杂岩体的围岩为新元古代上墅组(Pt_{3s})陆相火山岩,两者为渐变的接触关系,形成时间相近。火山岩围岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 847 ± 13 Ma(李昌年等,1999),杂岩体主要组成的长英质岩石颗粒锆石 U-Pb 谐和-不一致曲线上交点年龄为 822 ± 4 Ma(表 1、图 2),表明它们都形成于新元古代,但火山岩形成的时间略早。研究表明,长英质岩石与火山质围岩在化学成分上具一致性,同属高钾钙碱性-钾玄质岩系(见后面图 4),证实它们为同一岩浆作用的产物。

港边火成杂岩体可在填图尺度上划分为长英质岩、镁铁质岩和两者间过渡性岩 3 大组成部分。长英质岩石为杂岩体的主体,占 80% 左右,镁铁质岩仅

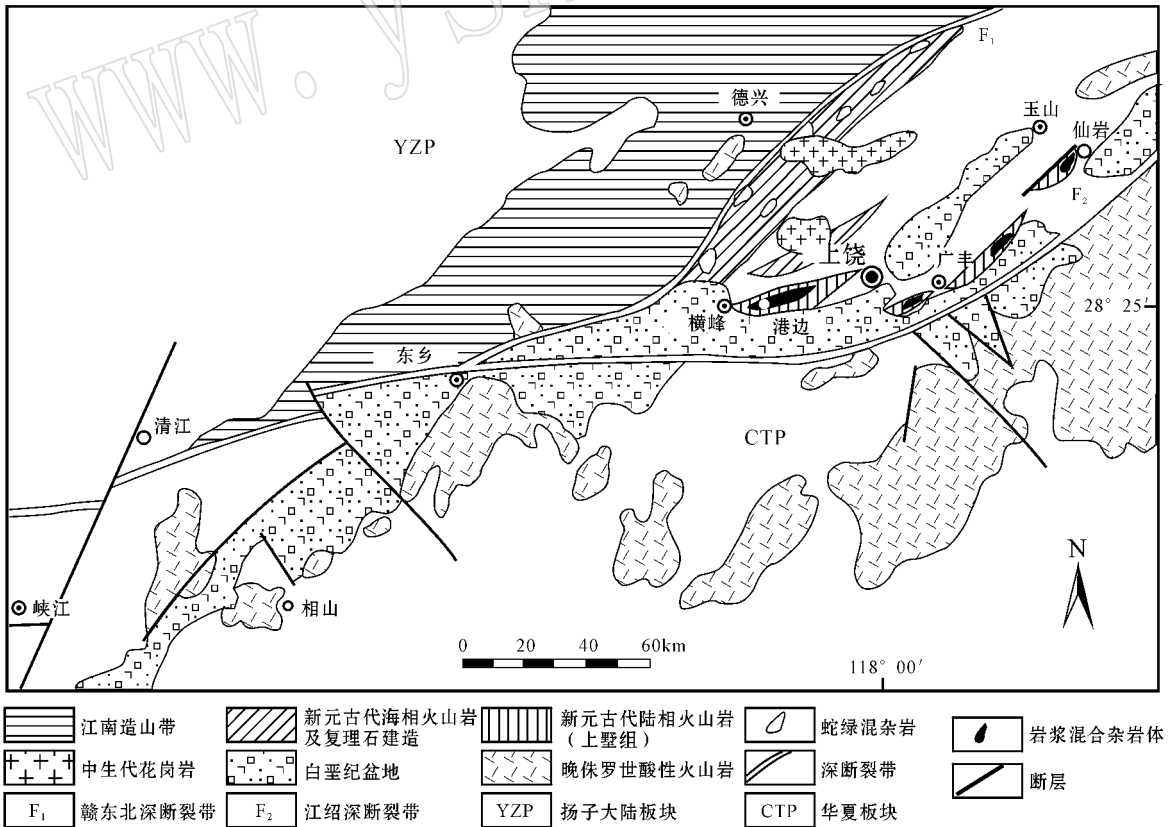


图 1 赣东北区域构造图

Fig. 1 Tectonic sketch map of northeastern Jiangxi

表 1 港边火成岩体中长英质岩石(GT-6-2)中颗粒锆石 U-Pb 法同位素地质年龄测定值

Table 1 U-Pb isotopic data of the zircon in felsic rock(GT-6-2) from Gangbian igneous complex

点号	锆石特征	质量/ μg	U Pb		普通铅 含量/ng	同位素原子比率*					表面年龄/Ma		
			$\frac{U}{Pb}$	$\frac{Pb}{U}$		$\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{208}Pb}{^{206}Pb}$	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$
1	黄棕色透明短柱状 自形晶体	30	169	30	0.078	558	0.324 0	0.135 3 (28)	1.238 (33)	0.066 37 (103)	818 (16)	818 (15)	818 (32)
2	黄棕色透明短柱状 自形晶体	20	348	45	0.055	819	0.301 1	0.103 9 (20)	0.919 (24)	0.064 15 (98)	637 (12)	662 (13)	746 (32)
3	黄棕色透明短柱状 自形晶体	30	296	40	0.250	226	0.225 6	0.095 5 (15)	0.827 (19)	0.062 79 (94)	588 (9)	612 (11)	701 (32)
4	黄棕色透明短柱状 自形晶体	30	346	49	0.450	140	0.290 0	0.084 9 (12)	0.719 (16)	0.061 43 (96)	525 (8)	550 (10)	654 (34)

* $^{206}Pb/^{204}Pb$ 已对实验空白 ($Pb=0.050ng$, $U=0.002ng$) 及稀释剂做了校正,其他比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素,括号内的数字是 2σ 绝对误差; 1 号点 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄值为 818 ± 16 Ma, 1~4 号上交点年龄值为 822 ± 44 Ma, 下交点年龄值为 327 ± 63 Ma。

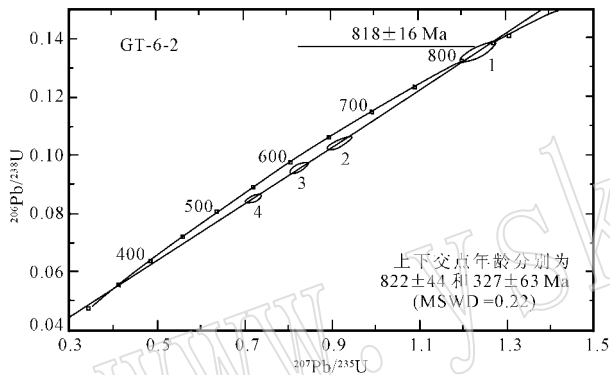


图 2 港边火成杂岩体长英质岩石的颗粒锆石 U-Pb 谐和-不一致曲线交点年龄

Fig. 2 The age of the intersection point on the U-Pb incongruent curve of zircon from Gangbian complex

为 5% 左右,又分为少斑-隐晶的玄武质岩石和粗粒的辉长岩,其中前者占绝大多数,其余剩下的 15% 为长英质岩石和玄武质岩石间的过渡性岩石。三者间呈渐变关系(李昌年, 2002b),而且是过渡性岩石包围玄武质岩石,同时自身又被长英质岩石所环绕(图 3)。在杂岩体中,镁铁质的辉长岩作为独立的小岩株或大的岩块出露,它与长英质岩石之间存在明显的分界且无过渡性岩石分布。

2 分析技术

采自野外新鲜露头的标本在经过薄片检查后从中再挑出未蚀变或蚀变最微弱的若干块,刷洗干净后烘干并切割边缘,然后用冲洗过的颚式碎样机进行破碎至 60 目,再在玛瑙碾钵中碾磨到 200 目以下。主量元素在湖北省岩矿测试中心使用 X 光荧光

光谱仪(XRF)进行测定,测试精度 < 5%; 稀土元素和微量元素分析在中国地质大学地质过程和矿产资源国家重点实验室完成,使用 ICP-MS 方法进行测定,测试精度 < 1%; Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素比值由湖北宜昌地质研究所使用 MAT261 测定,同位素比值测定精度小于 0.005%。

3 岩相学

根据岩石的化学性质和分布特征,港边火成杂岩体划分为长英质岩、镁铁质岩和过渡性岩石(岩浆混合岩) 3 大类,其中长英质岩为显晶的中-细粒结构,镁铁质岩进一步分为浅成相少斑-隐晶的玄武质岩石和深成相中粗粒辉长岩两亚类,两者未见直接接触,且后者往往呈囊状体或小的岩株分布于长英质岩石之中(图 3);过渡性岩(岩浆混合岩)分为均一构造和非均一构造两亚类。

对于长英质岩石和均一构造的岩浆混合岩,可根据标准矿物的 Q(F)-ANOR 图解定名(标准矿物石英 Q、似长石 F-钙长石 AN 和钾长石 OR 数值见表 3);镁铁质的玄武质岩石则用全碱-SiO₂ 图定名(图 5);非均一的岩浆混合岩用特殊的构造作为前缀加“岩浆混合岩”名称定名;粗粒的镁铁质岩用薄片研究定名。现将港边火成杂岩体内岩石类型及特征列于表 2。另需说明的是,因玄武质岩石为火山岩外貌但具浅成侵入的产状,故定名时按惯例加“玢岩”后缀。

火成杂岩体中过渡性岩石(岩浆混合岩)是非常特征的,除具均一的块状构造外,还大量发育非均一

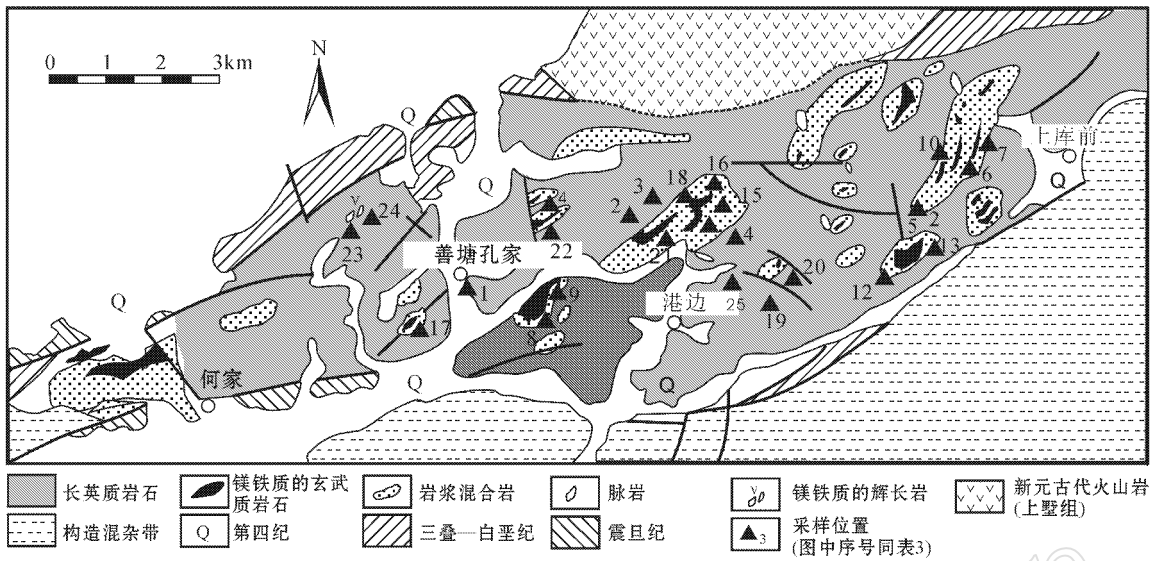


图 3 赣东北横峰县前寒武纪港边火成杂岩体地质图

Fig. 3 Geological sketch map of Precambrian igneous complex at Gangbian, Hengfeng County, northeastern Jiangxi

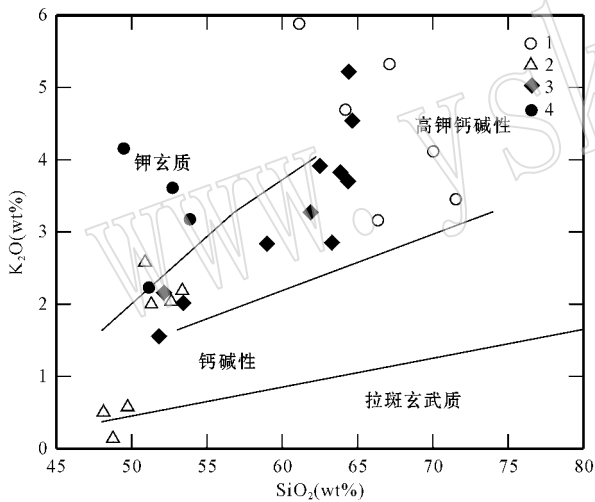


图 4 港边火成杂岩体及其火山质围岩的 K_2O-SiO_2 变异图(据 Peccerillo 等, 1976)

Fig. 4 Covariation of K_2O-SiO_2 of Gangbian complex and its country rocks(after Peccerillo *et al.*, 1976)

1—长英质岩石 2—镁铁质的玄武质岩石；3—过渡性的岩石；4—火山质围岩(上墅组, Pt_3S)

1—felsic rock ; 2—mafic basaltic rock ; 3—transitional rock ; 4—volcanic country rock (Shangshu Formation, Pt_3S)

的斑杂状、斑块状、角砾状、条带状、条痕状、树枝状、网脉状和片麻状等多种构造而显得十分引人注目(图 6)。在镜下这些岩浆混合岩普遍发育不平衡的结构类型:如环带结构(包括斜长石的非韵律性环带、不同 Q/O_r 量比的文象状钾长石表现的环带结构、角闪石的环带结构等),也发育非平衡矿物的共

生结构,表现为不同大小、不同牌号的斜长石共生,角闪石和石英共生以及相互包裹关系如石英和斜长石、钾长石和角闪石等矿物相互包含和穿插(图 7),以至于难以确定它们的结晶顺序(李昌年 2002b)。

4 岩石化学和地球化学

4.1 主量元素

港边火成杂岩体岩石主量元素成分列于表 3。

港边火成杂岩体内各岩石化学成分 SiO_2 与其他氧化物的变异表现出明显的规律性。一般地说,长英质岩与镁铁质岩的成分点位居变异图内两端部位置,而岩浆混合岩则处在两端点的连线内。除 Al_2O_3 和 Na_2O 外,在其他成分与 SiO_2 的成分变异图中,两端员岩石与岩浆混合岩的成分点基本上呈有规律的排列(图 8)。

4.2 稀土元素和微量元素

港边火成杂岩体各岩石的稀土和微量元素含量列于表 4。该杂岩体长英质岩的 Eu/Eu^* 比值变化较大,为 0.57~2.05;镁铁质的玄武质岩石近等于 1,变化范围为 0.91~1.11;镁铁质辉长岩多大于 1。该杂岩体中各岩石的 $(La/Yb)_N$ 比值也有一定的规律性,其长英质岩石的 $(La/Yb)_N$ 比值较大,除 1 个样品为 8.5 外,其余均大于 14;玄武质岩石的该比值较小,为 4.8~11.7,而辉长岩的该比值更小,除 1 个样品为 9.83 外,其余均小于 7。

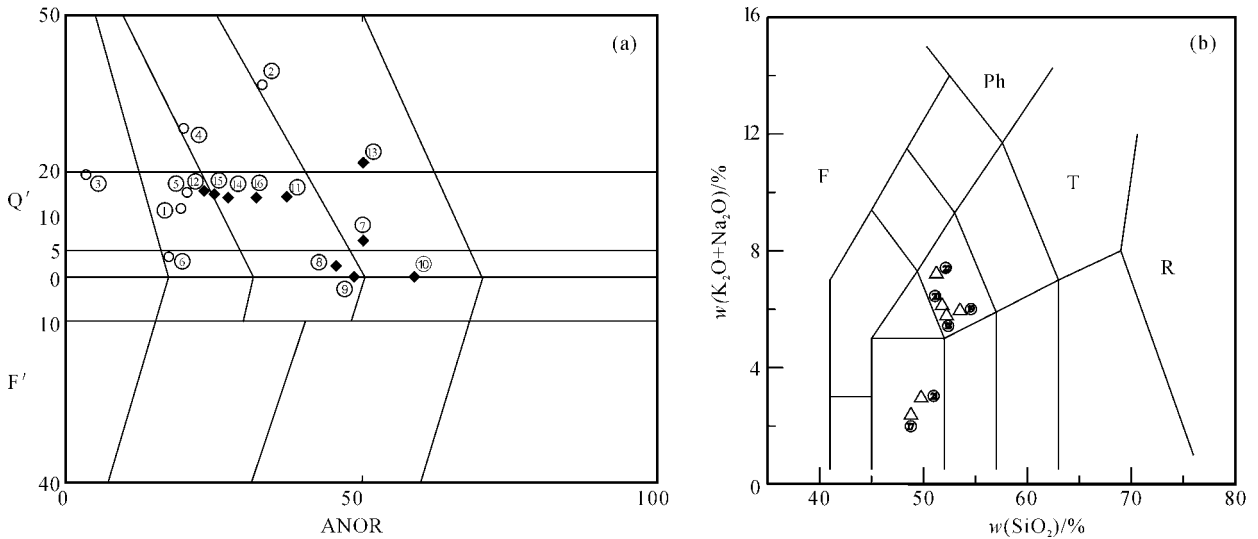


图 5 港边火成杂岩体的分类命名

Fig. 5 Classification and nomenclature of Gangbian igneous complex

图 a 为长英质岩石和均一构造的岩浆混合岩的 Q(F)-ANOR 命名 (据 Streckeisen 等, 1979); 图 b 为玄武质岩石的 TAS 命名 (据 Le Maitre 等, 1989); 图中成分点序号同表 3, 符号同图 4

a—Q(F)-ANOR diagram for felsic rocks and homogeneous magma-mixed rock (after Streckeisen *et al.*, 1979); b—TAS diagram for basaltic rocks (after Le Maitre *et al.*, 1989); The numbers are same as Table 3, symbols as for Fig. 4

表 2 港边火成杂岩体的组成及其岩石学特征

Table 2 Composition and petrological characteristics of Gangbian igneous complex

	端员的(长英质岩)		过渡性的(岩浆混合岩)		端员的(镁铁质岩)	
	长英质岩石	均一构造	非均一构造	玄武质岩石	辉长岩	
岩石类型	石英正长岩 石英碱长正长岩 正长花岗岩	石英二长闪长岩 石英二长岩 花岗闪长岩	岩浆混合岩	玄武玢岩 玄武质粗安玢岩	辉长岩 辉长岩 辉石岩 辉长闪长岩	
颜色	黄、肉红-黄褐	灰黑-灰白	杂色、斑驳状	灰绿-青灰	深灰	
结构	中-细粒文象	中-粗粒文象	不等粒文象	无斑隐晶 少斑隐晶	中粗粒 变形、蚀变	
构造	块状	块状	斑杂、角砾、条带状 条痕、树枝、片麻状	块状气孔状	块状	
矿物成分	Or(40%~50%) Qtz(10%~25%) Pl((10%~20%)) Hbl(5%)	Or(30%~50%) Pl(40%~60%) Qtz(3%~15%) Hbl(5%~20%)	不确定	Pl(2%) Cpx(1%) Ol(trace)	Pl(20%~60%) Cpx(40%~80%) Hbl(10%~20%)	

Or—钾长石; Qtz—石英; Pl—斜长石; Hbl—普通角闪石; Cpx—单斜辉石; Ol—橄榄石。

根据港边火山杂岩体内长英质岩石和镁铁质岩石球粒陨石标准化的稀土元素分布型式(图 9)可知,长英质岩石的分配型式十分相近,多具无 Eu 异常的轻稀土元素富集特征;镁铁质的玄武质岩石中部分样品具明显的正 Eu 异常。根据港边火成杂岩体内长英质岩石和镁铁质岩石 MORB 标准化的微量元素蛛网图(图 10)可知,蛛网曲线的排布也十分相似,

均为高场强元素(HFSE)亏损,大离子亲石元素(LILE)富集,其中长英质岩石 Nb 的亏损尤为明显。

利用微量元素含量比值 Rb/Sr 与 Zr/Hf 的变异关系图投影也可以得到过渡性岩石成分点位于长英质岩石和镁铁质的玄武质岩石两端员岩石成分范围之间的结果(图 11)。

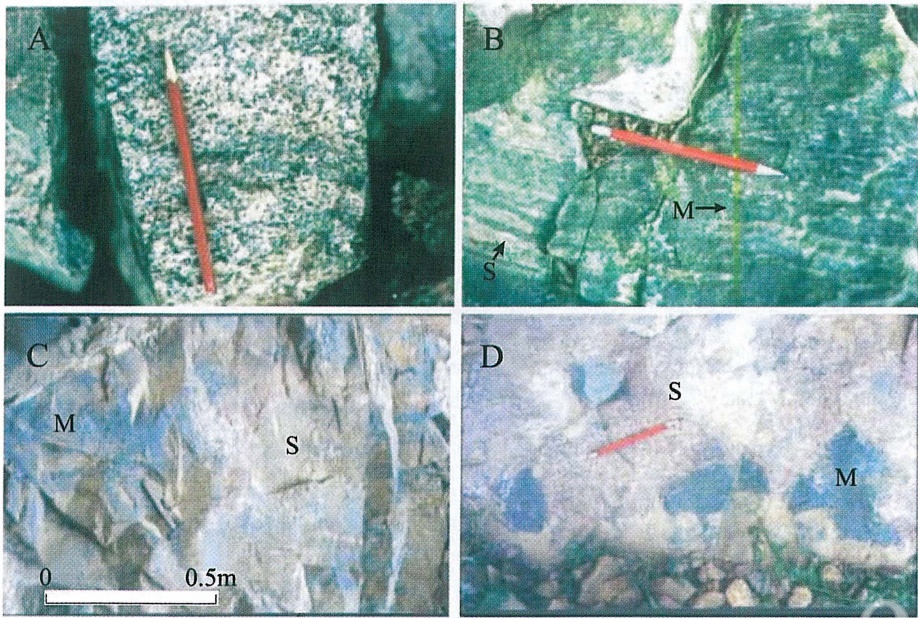


图 6 港边火成杂岩体岩浆混合岩构造特征

Fig. 6 The character of structure for the magma-mixed rocks in Gangbian igneous complex body

A—较均匀混合的块状构造，红色为钾长石和石英，绿色为角闪石、云母(石英二长闪长岩)；B—非均匀混合的条带状构造；
 C—一条痕状构造；D—斑杂状构造；S—红色，为长英质矿物组成；M—绿色，为隐晶少斑玄武质岩石
 A—homogeneous mixing massive structure; B—heterogeneous mixing banded structure; C—streaky structure;
 D—taxitic structure; S—red, felsic mineral; M—green, basaltic rocks

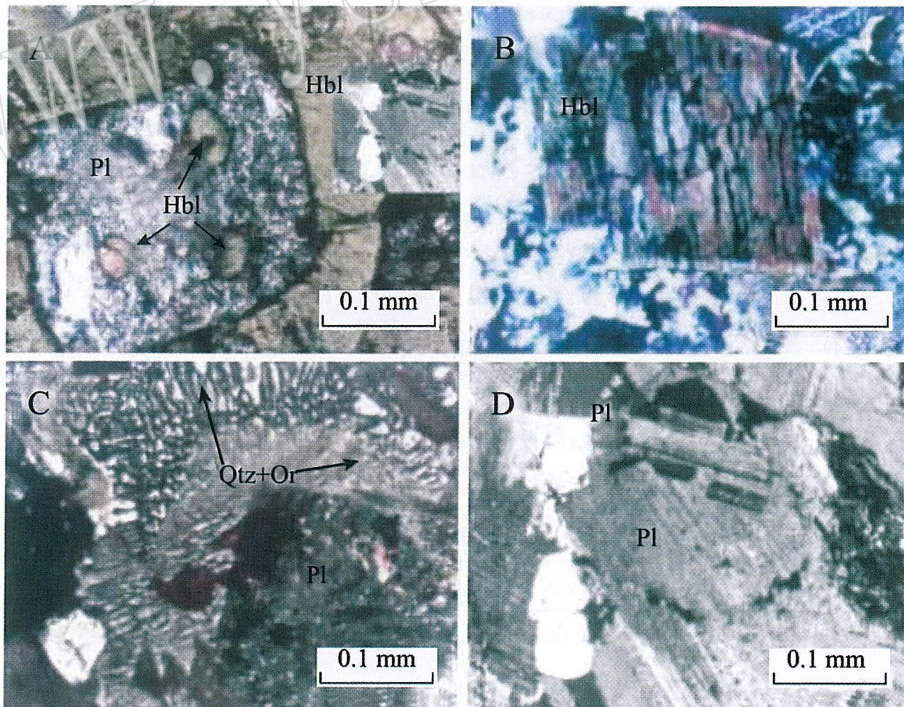


图 7 港边火成杂岩体岩浆混合岩的结构特征

Fig. 7 Character of texture for the magma-mixed rocks in Gangbian igneous complex body

A—角闪石(Hbl)和斜长石(Pl)的相互包含；B—角闪石的环带结构；C—石英和钾长石(Qtz+Or)的文象状钾长石的冠状体结构；D—斜长石的环带结构
 A—mutual poikilitic texture between hornblend (Hbl) and plagioclase (Pl); B—zoned texture of hornblend;
 C—capped texture of graphic K-feldspar; D—zoned texture of plagioclase

表 3 港边火成杂岩体各岩石的主量元素成分($w_B/\%$)及其岩石化学参数Table 3 Major element compositions($w_B/\%$) and their petrochemical parameters of various rocks in Gangbian igneous complex

序号	长英质岩石						过渡性岩石						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
样号	56000-1	Gb-15	Gb-3	Gb-10	56019-0	Gb-4	56019-3	56002	56006-3	56019-4	56019-1	279-4	279-6
岩石	石英 正长岩	二长花岗岩/ 花岗闪长岩	石英碱长 正长岩	二长 花岗岩	石英 正长岩	正长岩	石英二 长闪长岩	二长岩	二长岩	二长 闪长岩	石英 二长岩	石英 二长岩	花岗 闪长岩
SiO ₂	66.38	71.58	67.15	70.04	64.66	61.02	59.05	57.67	51.86	51.87	61.88	64.46	63.30
TiO ₂	0.45	0.31	0.61	0.43	0.52	0.72	1.04	0.91	1.02	1.95	0.71	0.62	0.79
Al ₂ O ₃	16.74	12.67	16.82	14.27	14.99	17.39	17.64	15.95	15.77	14.67	15.36	15.92	15.68
Fe ₂ O ₃	1.02	0.49	1.44	1.27	1.62	1.48	3.08	2.78	4.07	3.84	2.49	0.72	2.24
FeO	0.90	1.07	0.82	1.15	1.42	1.58	3.17	3.67	3.99	8.96	2.46	1.98	2.62
MnO	0.01	0.09	0.04	0.05	0.02	0.06	0.11	0.20	0.99	0.17	0.06	0.07	0.09
MgO	0.52	0.66	0.64	0.92	1.05	1.06	2.72	3.56	3.44	5.89	2.20	1.39	2.08
CaO	1.04	3.00	0.39	1.46	2.92	2.38	4.85	4.14	5.54	5.56	3.77	2.08	4.04
Na ₂ O	6.78	3.14	5.42	4.15	4.59	4.87	5.06	6.01	4.75	4.92	4.60	4.04	3.85
K ₂ O	3.16	3.45	5.33	4.11	4.54	6.06	2.84	2.08	2.52	1.56	3.27	5.22	2.84
P ₂ O ₅	0.09	0.07	0.13	0.20	0.15	0.16	0.45	0.21	0.12	0.60	0.22	0.16	0.23
H ₂ O ¹	0.79	0.96	0.70	1.28	1.24	1.16	1.46	1.62	2.37	2.43	1.51	1.03	1.40
CO ₂	1.45	2.24	0.20	1.07	1.91	1.73	0.59	1.44	3.67	0.61	0.82	1.94	0.46
Total	99.33	99.73	99.69	100.40	99.63	99.67	102.06	100.24	100.11	103.03	99.35	99.63	99.62
Ap	0.20	0.16	0.29	0.45	0.34	0.36	0.98	0.47	0.31	1.31	0.50	0.37	0.51
Ilm	0.88	0.61	1.17	0.83	1.02	1.41	1.98	1.78	2.09	3.71	1.39	1.23	1.54
Mt	1.52	0.74	1.02	1.88	2.43	2.22	4.47	4.15	4.92	5.57	3.72	1.09	3.32
Q	12.45	34.45	19.37	26.52	14.95	3.80	5.62	1.60	0.00	0.00	12.84	15.4	18.82
Or	19.25	21.14	31.91	24.79	27.83	37.04	16.80	12.66	16.02	9.23	19.94	32.28	17.18
Ab	59.02	27.49	46.37	35.77	40.28	42.53	42.76	52.27	43.15	41.59	40.07	35.69	33.28
An	4.77	10.62	1.19	6.19	7.1	7.89	16.99	10.67	15.33	13.31	11.92	9.81	17.46
Di	0.00	3.58	0.00	0.00	5.17	2.66	3.54	7.38	10.83	8.80	2.28	0.00	1.34
Hy	1.43	1.21	1.62	2.80	0.57	2.10	6.87	9.01	3.03	4.91	4.83	3.95	6.53
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.35	11.58	0.00	0.00	0.00
σ	4.23	1.52	4.79	2.52	3.85	6.63	3.89	4.46	5.97	4.73	3.28	4.00	2.20
DI	95.49	93.70	98.84	93.27	90.16	91.26	82.17	77.20	74.5	64.13	84.77	93.18	86.74
R1	1 212.4	2 676.8	1 227.2	2 156.2	1 552.4	820.60							
R2	465.00	602.20	403.60	481.60	658.20	648.00							

DI= Q + Or + Ab + An + Ne + Lc + Kp(标准矿物); R1= 4Si - 11(Na+K) - 2(Fe+Ti), R2= Al + 2Mg + 6Ca(阳离子数); R1和R2仅适用于长英质岩石的构造环境判别, 23~27号样为粗粒结构的岩石, 在肉眼条件下就可区别辉石和斜长石这两种实际矿物, 故在此表中未进行标准矿物计算。

表4 港边火成杂岩体中岩石的稀土和微量元素含量

 $w_B/10^{-6}$

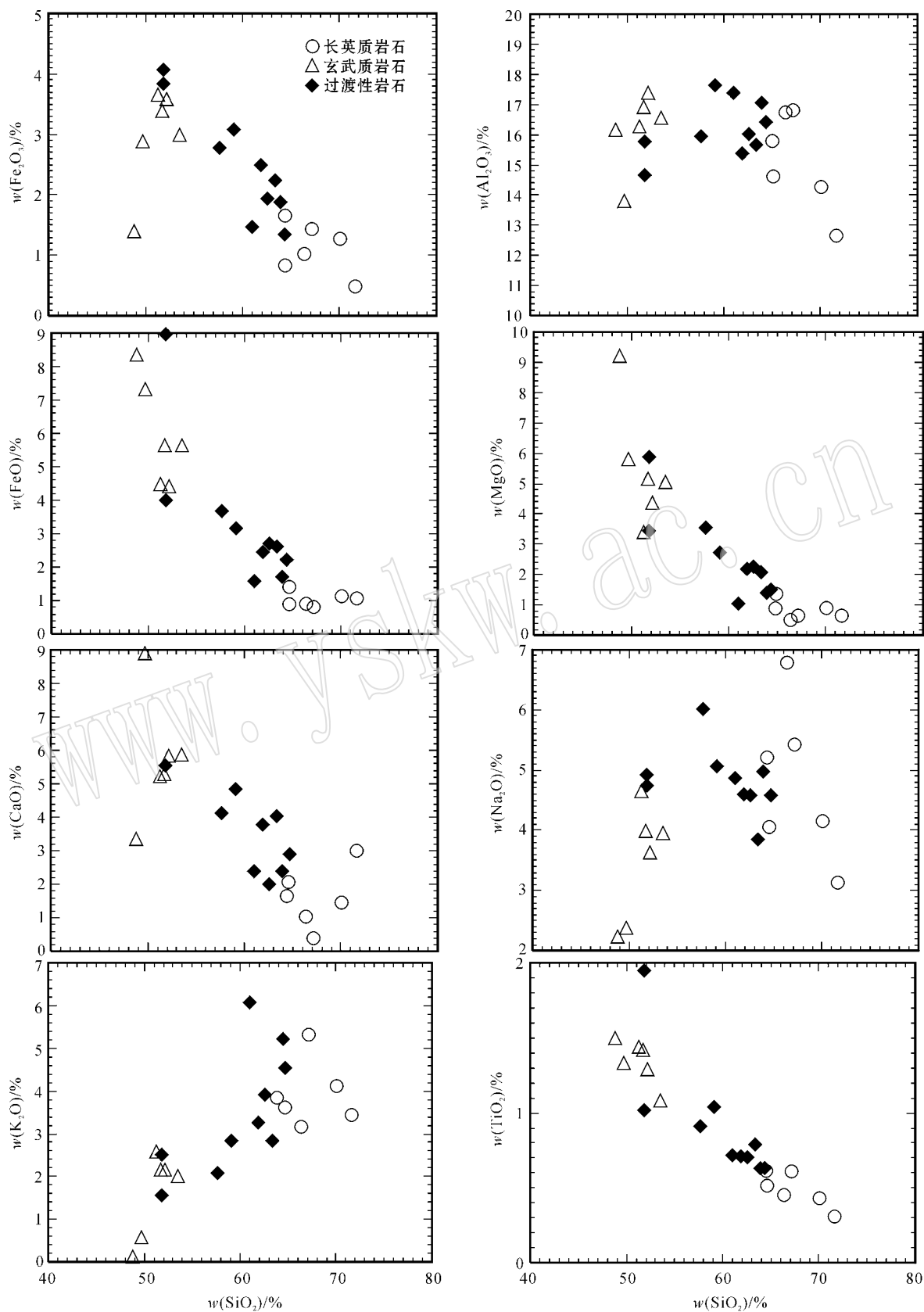
Table 4 Rare earth and trace element compositions of various rocks in Gangbian igneous complex

序号 样号	长英质岩石						过渡性岩石						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	56000-1	Gb-15	Gb-3	Gb-10	56019-0	Gb-4	56019-3	56002	56006-3	56019-4	56019-1	279-4	279-6
La	33.50	60.50	28.30	35.20	31.97	61.90	57.65	40.30	32.34	67.47	36.25	34.70	26.00
Ce	57.37	97.30	89.70	64.10	53.28	120	113.30	77.39	65.88	121.30	68.20	69.10	42.60
Pr	6.75	10.50	7.34	7.62	6.23	14.20	15.02	10.37	7.87	13.83	7.61	8.78	4.38
Nd	22.65	32.80	26.4	25.90	20.31	50.40	56.53	39.63	29.64	49.23	23.79	34.30	15.50
Sm	3.52	5.79	5.20	4.70	3.38	8.30	10.87	7.64	5.05	8.74	3.77	7.20	2.77
Eu	2.04	1.02	1.25	1.21	1.06	2.38	2.75	2.09	1.38	2.23	1.03	2.29	1.22
Gd	2.64	4.84	4.12	3.60	2.78	7.07	8.37	6.18	4.39	6.64	3.03	6.04	2.96
Tb	0.34	0.64	0.61	0.55	0.36	0.95	1.15	0.88	0.61	0.84	0.36	0.98	0.38
Dy	2.17	3.61	3.58	3.06	2.48	5.29	6.92	5.45	3.83	5.14	2.43	5.67	2.16
Ho	0.46	0.77	0.78	0.63	0.48	0.98	1.33	1.08	0.76	0.99	0.47	1.04	0.45
Er	1.22	2.34	2.23	1.83	1.42	2.76	3.37	2.80	2.03	2.53	1.26	2.66	1.22
Tm	0.18	0.34	0.32	0.26	0.22	0.37	0.47	0.41	0.31	0.37	0.20	0.34	0.18
Yb	1.23	2.15	2.25	1.82	1.46	2.82	2.71	2.58	1.83	2.41	1.22	2.44	1.31
Lu	0.21	0.38	0.37	0.30	0.23	0.45	0.41	0.41	0.30	0.40	0.19	0.34	0.21
ΣREE	134.28	222.98	172.45	150.78	125.66	277.42	280.84	197.21	156.22	282.12	148.81	145.88	101.34
(La/Yb) _N	17.88	19.00	8.50	13.10	14.42	14.80	14.01	10.29	11.64	18.44	19.38	9.60	13.30
Eu/Eu*	1.96	0.57	0.79	0.87	1.06	0.93	0.88	0.93	0.90	0.89	0.90	0.96	0.77
Cr	29	34.9	24.1	32.5	12	17.2	8	18	19	38	46	24.1	30.0
Ni	6	7.26	5.39	12.20	6	5.84	9	24	40	33	12	7.34	12.10
Co	4	4.51	2.44	4.04	7	4.13	15	22	26	33	13	4.39	11.70
Sc	4	4.26	8.82	4.83	6	5.79	9	20	22	21	10	9.85	12.70
V	18	30.20	31.20	34.00	50	41.80	86	172	234	302	113	46.20	93.30
Pb	3	12.00	10.70	9.20	16	13.60	11	8	15	19	13	14.00	11.40
K	26 398	28 628	44 228	34 104	37 688	50 285	22 995	17 267	20 919	12 452	27 145	43 314	23 566
Rb	61	61.80	85.6	80.7	91	117	67	45	67	41	92	106	61.2
Ba	1 700	1 188	1 559	949	1 430	1 875	1 470	1 730	938	608	1 330	1 877	1 285
Sr	156	323	128	380	353	176	761	327	616	370	438	477	774
Ga	17	12.9	13.2	16.0	14	14.1	17	13	14	17	16	16.5	17.10
Ta	0.98	1.26	1.04	1.01	1.02	1.71	1.29	0.92	0.98	2.77	1.23	1.01	0.65
Nb	9	12.4	18.8	14.6	13.2	21.3	16.8	9.6	8.2	24.3	13.90	14.40	10.7
Hf	11.20	5.63	9.73	5.15	6.30	13.50	6.40	6.10	5.60	16.60	5.20	7.28	5.92
Zr	469	244	451	216	228	520	152	179	169	527	176	274	235
Ti	2 698	1 858	3 657	2 578	3 117	4 316	6 055	5 455	6 115	11 271	4 256	3 720	4 740
Y	12	27.5	21.10	20.60	14	23.90	36	25	21	26	13	24.20	13.10
Th	3	35.0	6.89	10.90	9.80	10.30	6.30	5.80	7.10	18.50	5.40	9.72	8.87
U	1.08	5.30	1.55	2.36	3.42	3.01	2.21	1.25	1.01	4.42	2.92	2.20	2.50
K/Rb	433	463	517	423	413	430	341	380	313	303	295	409	385
K/Sr	169.22	88.60	345.50	89.70	106.80	285.70	30.20	52.80	34.00	33.70	62.00	90.80	30.40
Rb/Sr	0.39	0.19	0.67	0.21	0.26	0.66	0.09	0.14	0.11	0.11	0.21	0.22	0.08
Sr/Ba	0.09	0.27	0.08	0.40	0.25	0.09	0.52	0.19	0.66	0.61	0.33	0.25	0.77
Zr/Hf	41.9	43.30	46.40	41.90	36.20	38.5	23.80	29.30	30.20	31.8	33.90	37.60	39.70
U/Th	0.36	0.15	0.22	0.22	0.35	0.29	0.35	0.22	0.14	0.24	0.54	0.23	0.28
Nb/Ta	9.18	9.84	18.10	14.50	12.94	12.50	13.02	10.43	8.37	8.77	11.30	14.30	16.50
La/Nb	3.72	4.88	1.51	2.41	2.42	2.91	3.43	4.20	3.94	2.78	2.61	4.80	2.40
Zr/Nb	52.10	19.70	24.00	14.80	17.30	24.40	9.00	18.60	20.60	21.7	12.70	19.00	22.00

序号同表3, 稀土元素标准化比值(N)据Boynton(1984); Ti和K根据TiO₂和K₂O(w_B/%)计算。

续表 4
Continued Table 4

序号 样品	过渡性岩石			镁铁质岩(玄武质岩石)						镁铁质岩(辉长岩)				
	14 St-1	15 Gb-13	16 Gb-9	17 56083-3	18 Gb-1	19 WJ-1	20 W-1	21 279-3	22 Gs-4	23 WJ-2	24 WJ-3	25 YJ-1	26 56083-2	27 56019-8
La	31.20	42.30	37.50	25.30	34.20	16.30	18.50	22.60	28.60	4.41	5.92	9.40	6.42	12.27
Ce	55.90	78.30	67.30	47.17	64.60	29.40	38.00	46.90	52.70	8.79	12.80	20.40	11.67	29.38
Pr	6.13	9.69	8.05	5.56	8.06	3.46	4.88	5.88	6.82	0.81	1.40	2.77	1.53	3.17
Nd	22.10	34.20	28.60	25.08	32.40	14.40	21.40	23.50	27.30	3.79	6.48	12.60	6.09	16.93
Sm	3.80	6.47	5.44	4.92	6.51	3.67	4.54	4.96	5.74	1.02	1.48	3.32	1.24	3.61
Eu	1.20	1.70	1.55	1.35	1.91	1.13	1.54	1.64	1.55	0.54	0.56	1.00	0.45	1.14
Gd	3.28	4.94	4.27	4.18	5.71	3.51	3.78	4.49	4.40	1.11	1.16	3.08	1.04	3.37
Tb	0.47	0.71	0.63	0.60	0.82	0.59	0.60	0.68	0.65	0.17	0.20	0.45	0.16	0.47
Dy	2.62	3.80	3.72	3.36	4.51	4.10	3.50	4.08	3.44	1.10	1.35	2.73	0.90	2.95
Ho	0.52	0.81	0.77	0.72	0.84	0.84	0.67	0.77	0.68	0.24	0.27	0.54	0.17	0.55
Er	1.38	2.24	2.16	1.90	2.17	2.28	1.72	1.93	1.83	0.61	0.71	1.42	0.48	1.45
Tm	0.20	0.30	0.31	0.28	0.28	0.33	0.25	0.24	0.25	0.086	0.11	0.20	0.07	0.21
Yb	1.41	2.02	2.12	1.73	2.03	2.28	1.52	1.66	1.53	0.58	0.67	1.22	0.43	1.19
Lu	0.21	0.33	0.36	0.28	0.28	0.37	0.22	0.26	0.26	0.09	0.11	0.21	0.07	0.18
ΣREE	130.42	187.81	162.78	122.70	164.32	82.66	101.12	119.54	135.75	23.35	33.22	59.34	30.72	76.87
(La/Yb) _N	14.90	14.10	12.00	9.36	11.30	4.80	8.20	9.20	11.70	5.11	5.95	5.19	9.83	0.79
Eu/Eu*	0.99	1.10	1.10	1.09	0.93	0.95	1.11	1.04	0.91	1.54	1.26	0.94	1.21	0.99
Cr	25.30	35.90	24.9	211	35.80	66.10	45.10	57.50	137	192	224	109	250	12
Ni	12.90	8.94	16.70	118	23.20	25.30	39.20	19.50	64.30	67.40	175	92.90	132	77
Co	12.70	6.85	5.92	42	22.20	25.00	35.90	26.80	31.40	32.30	64.10	52.10	47	48
Sc	10.40	7.96	6.72	25	21.70	27.30	22.20	23.20	24.30	23.00	12.80	42.30	15	31
V	74.30	56.60	47.70	234	190	194	200	215	212	83.20	97.00	332	89	384
Pb	10.40	5.62	4.83	10	19.70	6.90	6.89	13.70	17.40	5.86	7.47	4.94	13	12
K	32 445	30 785	31 698	1 162	17 926	16 766	17 926	4 814	21 414	12 035	1 743	21 414	9 879	20 421
Rb	79.10	77.10	66.40	40	41.80	52.80	85.90	48.20	59.90	34.40	6.50	78.30	35	96
Ba	1 367	1 485	1 535	138	766	599	919	896	828	369	74.60	861	600	1 240
Sr	577	459	693	384	970	601	730	431	902	1266	408	435	654	299
Ga	15.20	20.30	18.40	13	20.80	16.40	18.60	16.10	21.80	13.40	12.20	17.80	11	11
Ta	0.63	0.87	0.91	1.48	0.55	0.39	0.47	0.48	0.61	0.16	0.18	0.26	0.31	0.87
Nb	9.30	16.90	15.20	9	10.10	5.99	7.74	8.27	11.20	2.47	3.01	4.97	4.30	8.40
Hf	5.42	6.06	6.16	6.70	4.09	3.34	2.99	3.50	3.16	0.66	0.72	1.61	3.50	5.10
Zr	206	300	271	160	154	117	113	116	150	22.50	32.1	58.20	45	85
Ti	4 200	3 780	3 780	8 993	7 740	6 480	8 520	7 980	8 640	2 100	2 880	7 860	2 218	8 933
Y	13.80	24.80	23.40	20	20.20	20.00	17.30	16.50	21.80	6.59	8.28	16.70	5	15
Th	8.65	7.40	8.16	6.4	4.43	3.82	2.21	2.62	3.65	1.91	1.21	2.62	4.70	8
U	3.92	1.67	2.52	3.27	1.02	1.02	0.57	0.68	1.03	0.50	0.34	0.65	0.24	0.63
K/Rb	410	399	477	465	429	318	209	100	358	350	268	274	282	212
K/Sr	56.20	67.10	45.70	3.00	18.50	27.90	24.60	11.20	23.70	9.50	4.30	49.20	15.10	68.30
Rb/Sr	0.14	0.17	0.10	0.10	0.04	0.09	0.12	0.11	0.07	0.03	0.02	0.18	0.05	0.32
Sr/Ba	0.42	0.31	0.45	2.78	1.27	1.00	0.79	0.48	1.09	3.43	5.47	0.51	1.09	0.24
Zr/Hf	38.00	49.50	44.00	23.90	37.60	35.00	37.80	33.10	47.50	34.10	44.60	36.10	12.80	16.6
U/Th	0.45	0.23	0.31	0.51	0.23	0.27	0.26	0.26	0.28	0.26	0.28	0.25	0.05	0.08
Nb/Ta	14.80	19.40	16.70	6.10	18.40	15.40	16.50	17.20	18.40	15.40	16.70	19.10	13.90	9.70
La/Nb	3.40	2.50	2.50	2.81	3.39	2.72	2.39	2.73	2.55	1.79	1.97	1.89	1.49	1.46
Zr/Nb	22.20	17.80	17.80	17.80	37.70	19.50	14.60	14.00	13.40	9.10	10.70	11.70	10.50	10.10

图8 港边火成杂岩体各岩石的 SiO_2 与其他氧化物的变异图Fig. 8 Covariation of SiO_2 and other oxides for various rocks in Gandbian igneous complex

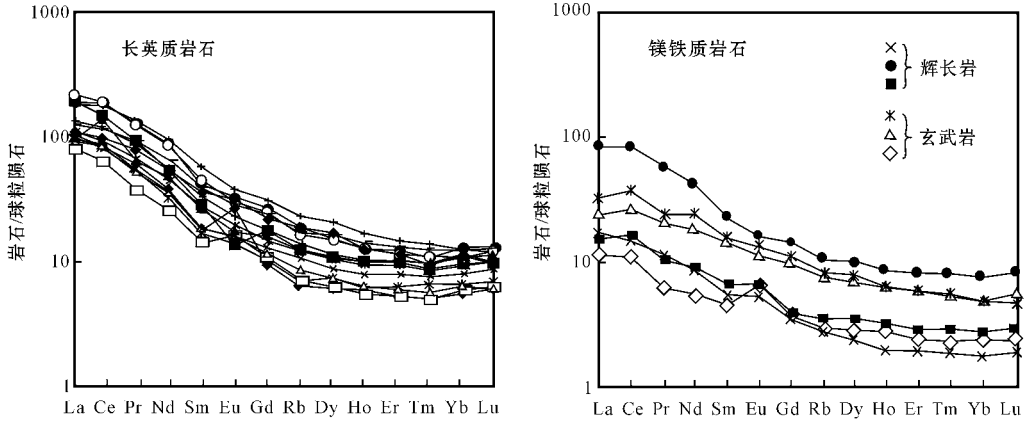


图 9 港边火成杂岩体长英质岩石和镁铁质岩石的稀土元素分布型式

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of felsic rocks and mafic rocks in Gangbian igneous complex

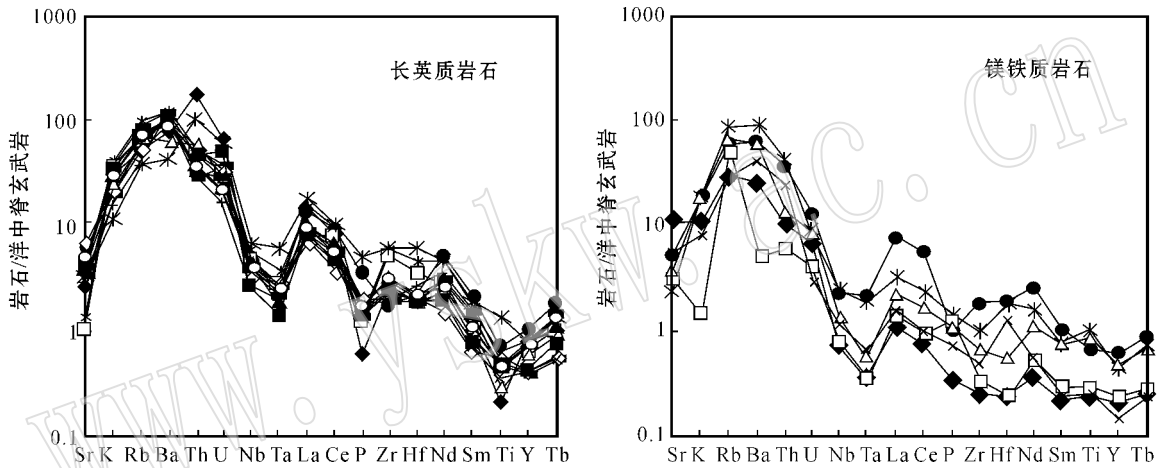


图 10 港边火成杂岩体内长英质岩石和镁铁质岩石的微量元素比值蛛网图(符号同图 9)

Fig. 10 Ratio spidergram of trace elements in felsic rocks and mafic rocks of Gangbian igneous complex (Symbols as for Fig. 9)

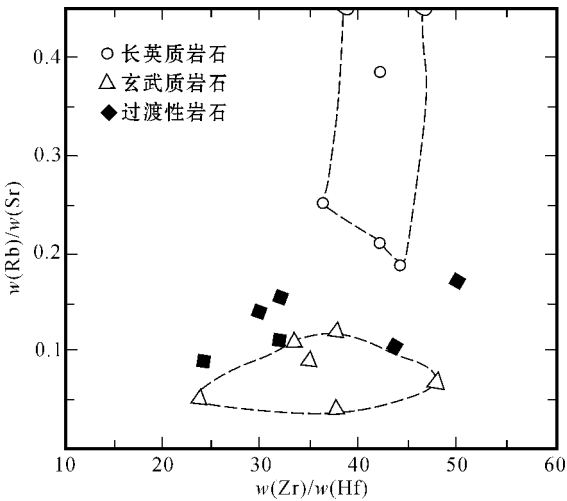


图 11 港边火成杂岩体各岩石 Rb/Sr - Zr/Hf 的变异关系

Fig. 11 Covariation of Rb/Sr - Zr/Hf specific ratios in various rocks of Gangbian igneous complex

4.3 Sr、Nd 同位素

赣东北前寒武纪港边火成杂岩体的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素比值及估算的特征值及 Nd 模式年龄列于表 5。从该表可知,火成杂岩体中长英质岩石的 $\epsilon_{Nd}(t=882)$ 为 $-0.8 \sim -4.4$, $^{87}Sr/^{86}Sr(t=822)$ 比值为 $0.70368 \sim 0.70549$, 富集系数 ($f_{Sm/Nd}$) 值为 $-0.41 \sim -0.53$; 镁铁质的玄武质岩石的 $\epsilon_{Nd}(t=822)$ 值为 $-2.6 \sim +2.3$, $^{87}Sr/^{86}Sr(t=822)$ 比值为 $0.70387 \sim 0.70527$, 富集系数 $f_{Sm/Nd}$ 值为 $-0.30 \sim -0.42$ 。从中可以看出,镁铁质的玄武质岩石具有由负到正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和相对集中且较小的 $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 比值和 $f_{Sm/Nd}$ 值,而长英质岩石具负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和相对分散和较大的 $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 比值和 $f_{Sm/Nd}$ 值。从 $\epsilon_{Nd}(t) - f_{Sm/Nd}$ 变异图也可以明显看出长英质岩和镁铁质岩特征值的分布特征(图 12)。

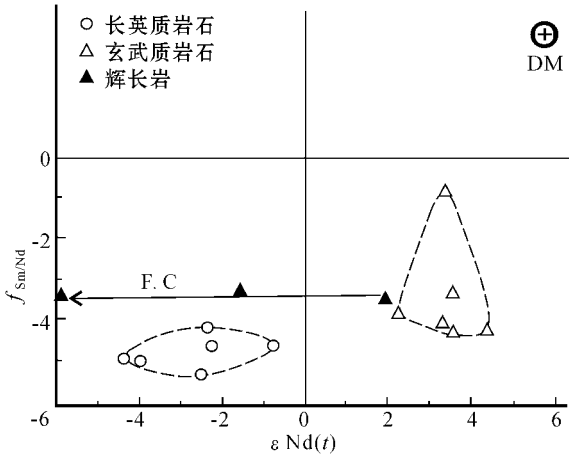


图 12 港边杂岩体两端员岩石的 $\epsilon Nd(t) - f_{Sm/Nd}$ 变异图

Fig. 12 Covariation of $\epsilon Nd(t) - f_{Sm/Nd}$ for two end member rocks in Gangbian igneous complex

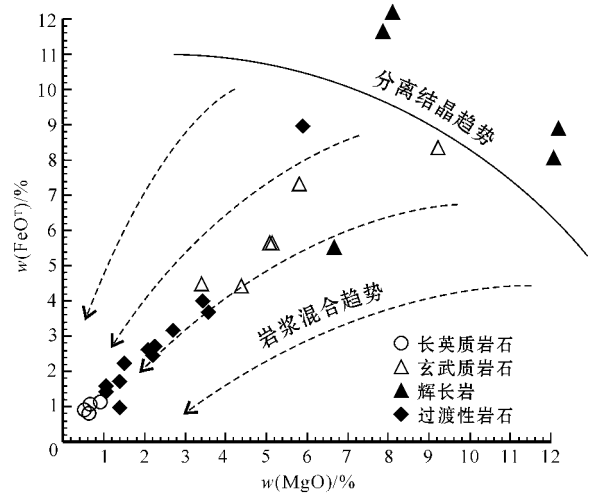


图 13 港边火成杂岩体各岩石的 $FeO^T - MgO$ 变异图

(据 Zorpi, 1989)

Fig. 13 Covariation of $FeO^T - MgO$ for various rocks in Gangbian igneous complex (after Zorpi, 1989)

5 岩浆混合与岩浆混和作用

5.1 岩浆混合(和)证据

根据野外地质观察,无论在平面上还是在剖面上长英质岩石和镁铁质岩石之间分布有多种过渡性岩石,过渡性变化表现在岩石的颜色和矿物成分等方面。从长英质岩石到玄武质岩石,岩石的颜色从肉红色变为红绿相间的杂色再变化为灰绿色;钾长石含量从大量到中等再到不含;斜长石从含量较少到含量较多;暗色矿物角闪石从含量较少到含量增多。而且,过渡性岩石与两侧的长英质岩石和玄武质岩石间均呈渐变关系而无截然的界线。显然,过渡性岩石为长英质岩浆和玄武质岩浆经混合(和)形成的岩浆混合岩(李昌年 2002b)。

如前所述,过渡性岩石在构造上分为两大类:一类为均一构造,即块状构造,此为完全液态的长英质岩浆和玄武质岩浆相互发生岩浆化学混合形成的构造;另一类为非均一构造(图 6),是岩浆物理状态不同的两岩浆发生岩浆机械混合形成的构造。过渡性岩石普遍发育不平衡的结构(图 7),这也是岩浆混合(和)作用在较小尺度上的一种表现。

在图 8 中,过渡性岩石的成分点均位于长英质岩石和镁铁质的玄武质岩石两端员之间。在图 13 中,过渡性岩石的成分点基本上沿岩浆混合趋势分布,而镁铁质的辉长岩却沿分离结晶趋势分布,表明火成杂岩体中的玄武质岩浆发生了与长英质岩浆相互混合的岩浆混合(和)作用,而辉长岩则是

玄武质岩浆分离结晶作用的产物。

5.2 岩浆混合(和)方式

根据港边火成杂岩体中两种端员岩石和过渡性岩石的产状、数量比例、结构和构造等特征,说明岩浆混合作用是由长英质岩浆房中注入玄武质岩浆所形成的。随着长英质岩浆的冷凝,不断注入的玄武质岩浆将与它发生了多种方式的岩浆混合作用过程,在长英质岩浆为主体的港边岩浆房定位之后,早期曾有大量的同成分岩浆补充,并造成其内的岩浆外溢、上升和喷发,形成上豎组(Pt_3s)火山岩;此后可能有少量的玄武质岩浆进入该长英质岩浆房,导致两种岩浆相互混合(和)。Didier 等(1991)研究认为,镁铁质岩浆加入到长英质岩浆中所发生的岩浆混合(和)作用主要取决于两种岩浆的相对状态。在新元古代的港边地区,以长英质岩浆为主体的港边岩浆房因冷凝固结而使其结晶度和粘度增大,同时该岩浆房中长英质岩浆的物理状态会按完全的液态→(固+液)混合状态→完全固态的趋势变化,但补充进入该岩浆房的少量玄武质岩浆仍保持液态状态,而且粘度也比较小。从而,在港边岩浆房内随时间依次持续地会发生两种岩浆的化学混合(液相 B+液相 A)、两种岩浆的机械混和[液相 B+(固-液)相 A]和侵入作用(液相 B+固相 A)(图 14)。

总结岩浆化学混合形成的岩浆混合岩具有以下特点:①岩石的颜色、结构和构造表现均一;②岩石多为中粗粒结构;③矿物结晶顺序混乱,互相包裹、

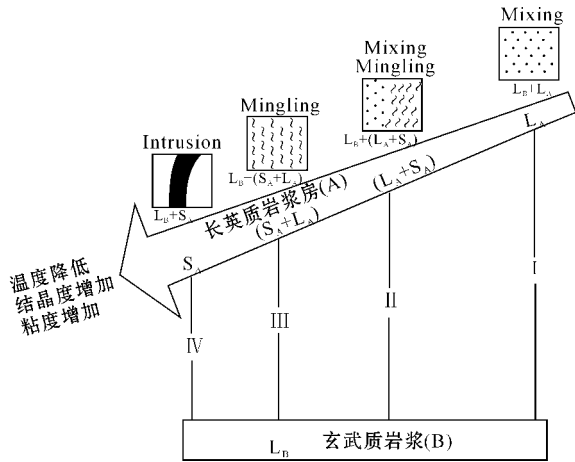


图 14 镁铁质的玄武质岩浆(B)进入不同状态的长英质岩浆房(A)中发生的持续岩浆混合与岩浆混合作用模式图

[据李昌年等(1997)简化和 Fernandez等(1991)修改]

Fig. 14 Successive magmatic mixing and mingling by injection of mafic magma into a felsic magma chamber at different crystallization stages of the felsic magma

I—岩浆混合作用($L_B + L_A$),形成均一构造的岩浆混合岩(石英二长闪长岩等);II—岩浆混合($L_B + L_A$)与岩浆混和作用[$L_B + (L_A + S_A)$],形成均一的岩浆混合岩和非均一的岩浆混和岩;III—岩浆混和作用[$L_B + (L_A + S_A)$],形成非均一的岩浆混和岩;IV—岩浆侵入作用($L_B + S_A$);L和S分别代表液相和固相,B和A分别代表玄武质和长英质组分

I—mixing ($L_B + L_A$), forming magma-mixed rocks of homogeneous structure (quartz monzodiorite); II—mixing and mingling, ($L_B + L_A$) and [$L_B + (L_A + S_A)$], forming homogeneous magma-mixed rocks and heterogeneous rocks; III—mingling [$L_B + (L_A + S_A)$], forming heterogeneous magma-mixed rocks; IV—intrusion ($L_B + S_A$); L and S represent liquid and solid, respectively; B and A signify basaltic and felsic mass, respectively

互相穿插;④形成继承性新矿物,即在原矿物外围附着生长同种属但具不同组成的新矿物,如斜长石具非韵律性的环带、文象状钾长石被Q/Or量比不同的文象状钾长石包围、普通角闪石的环带结构等。这都反映已结晶的长英质岩浆因镁铁质岩浆加入和混合导致形成新矿物并干扰其正常的结晶顺序。

总结岩浆机械混和形成的岩浆混合岩的主要特征为岩石的颜色、结构、构造具不均一性。其颜色的不均一性表现为红、绿相间的杂色;结构的不均一性表现为不等粒结构和混和斑状结构;构造的不均一性更为明显,如常见的斑块状、斑杂状、角砾状、条带状、条痕状、片麻状和网脉状等。此外,在镜下表现出不平衡的结构。如世代不同、大小不同、蚀变程度不同、牌号不同的斜长石共生,角闪石包含石英等。

野外调查发现,岩浆化学混合形成的均一构造的中粗粒石英二长闪长岩等岩石和岩浆机械混和形成的非均一构造的岩浆混和岩可以分别独立存在,也可以分别作为主要组成而与另一少量组成呈相互过渡和交互关系。由此说明,岩浆化学混合与岩浆机械混合作用存在阶段性,但在局部范围两者因持续发生而有可能重叠。

6 地质意义

6.1 构造背景

在地质上,港边火成杂岩体寄主的赣东北前寒武纪火山-侵入杂岩带广泛分布于江绍深断裂带北缘和扬子古大陆之南的江南造山带的南侧。这其中的江绍深断裂于中元古代只是扬子古大陆和华南洋的边界,后成为华南洋向扬子古大陆俯冲的缝合线,至新元古代,华南洋关闭至使扬子和华夏两古陆发生碰撞,并发生以长英质组成为主的岩浆作用。

在前述 K_2O-SiO_2 图(图4)中,港边火山杂岩体主体岩石及其火山质围岩(上墅组)的成分点属高钾钙碱性-钾玄岩岩系,其岩石类型多为粗面岩(正长岩)和石英粗面岩(石英正长岩),其稀土分布型式不具Eu的负异常(图9),这是典型的造山带崩塌处于晚期阶段形成的岩石特征(邓晋福等,1996)。这里选择适用于长英质岩石构造环境判别的 R_1-R_2 图对港边火成杂岩体中主体组成的长英质岩石进行研究,确认其长英质岩石形成于造山晚期阶段(图15A区),这与前面讨论的结果也是一致的。

6.2 地壳横向增生

岩石的Nd模式年龄可以作为地壳岩石中的Nd从地幔储集库中分离的时间。从表4可知,新元古代火成杂岩体主体的长英质岩石及其火山质围岩的Nd模式年龄(t_{DM})为1.4~1.7Ga,说明它们同是中元古期从地幔分离的。从区域上看,分布于江南造山带南缘的新元古期的火山-侵入杂岩带长达450km,宽达60km,其中陆相火山岩地层见于赣东北(上墅组)—皖南(井潭组)—浙西(双溪坞组)一线,具有一定的规模,本文研究的港边火成杂岩体仅是其中的代表。另据研究,此火山-侵入杂岩带之北的江南造山带的中元古代双桥山群基底的Nd模式年龄为1.5~2.5Ga(马长信等,1993),而江南造山带之北的扬子古陆太古代陆核崆岭群最古老的Nd模式年龄为3.3Ga(陈江峰等,1999)。上述3个地质

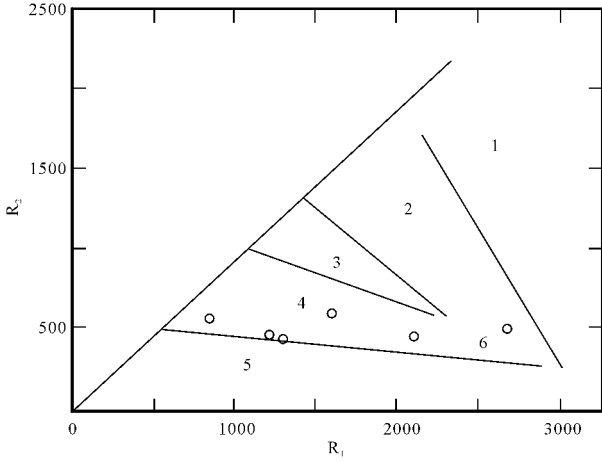


图 15 港边火成杂岩体中长英质岩石形成构造背景判别的 $R_1 - R_2$ 图(据 Batchelor 等, 1985)

Fig. 15 $R_1 - R_2$ diagram for discrimination of tectonic setting of felsic rocks in Gangbian igneous complex (after Batchelor *et al.*, 1985)

体的 Nd 模式年龄是逐渐增大的且几乎不具重叠性, 说明江南造山带和火山-侵入杂岩带为来自地幔的新生地质体, 而不是再改造的地壳物质。由此证明, 江南造山带于中元古代横向增生于扬子古大陆陆核南侧, 火山-侵入杂岩带又于新元古代横向增生于江南造山带的南侧。

Nd 模式年龄和 Nd 富集系数($f_{Sm/Nd}$)的相互关系也再次确认了扬子古大陆陆核、江南造山带、火山-侵入杂岩带于前寒武纪的横向增生关系(图 16), 且扬子古大陆向南横向增生随 Nd 模式年龄降低其 Nd 富集系数 $f_{Sm/Nd}$ 值同步减小。从该图可以看出, 杂岩体中的镁铁质岩(玄武质岩石和辉长岩)的成分点多在江南造山带基底范围, 说明它们并非是新生的横向增生物质。陈江峰等(1999)认为, 在赣东北还存在有与新元古代火山-侵入杂岩带同期的晋宁期花岗岩, 它们的 Nd 模式年龄多在江南造山带基底浅变质岩范围内, 平均为 1.8 Ga, 此类花岗岩的形成主要体现对地壳的改造而不是增生。显然, 扬子古大陆向南的横向增生在空间上终止于江绍深断裂, 在时间上截止至新元古代, 其标志则是前寒武纪的火山-侵入杂岩带。在此之后, 扬子古大陆和华夏古陆发生对接。从某种意义上说, 在两古大陆板块之间分布的前寒武纪火山-侵入杂岩带成为它们彼此连接的纽带(周新民等, 1992), 而该带内的岩浆混合(和)作用则有助于两大古陆的对接。

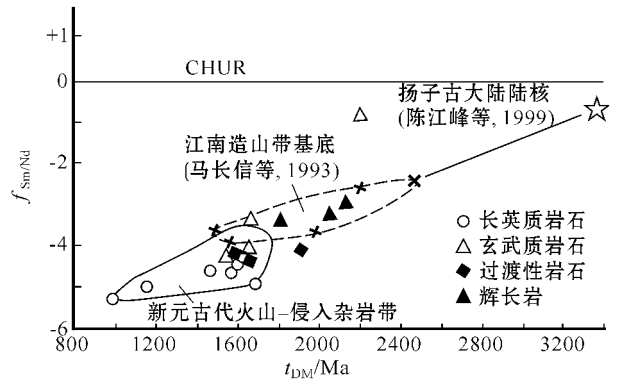


图 16 扬子古大陆东南地壳横向增生的 $f_{Sm/Nd} - t_{DM}$ 图

Fig. 16 $f_{Sm/Nd} - t_{DM}$ diagram for horizontal accretion of the crust in southeast Yangtze ancient continent

6.3 底侵作用

赣东北前寒武纪也曾发生过底侵作用。港边火成杂岩体中 EM I 型幔源镁铁质岩和 EM II 型壳幔混合源的长英质岩能证明这一点。除此以外, 赣东北江绍深断裂于前寒武纪还保持活动, 也为镁铁质岩浆的底侵提供诱发机制和通道。

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素示踪研究证明, 港边火成杂岩体中镁铁质岩石的源区接近总地球, 而且在地幔趋势范围, 而长英质岩石的源区偏离地幔主趋势而接近壳幔混合型的 EM I 型富集地幔(图 17)。

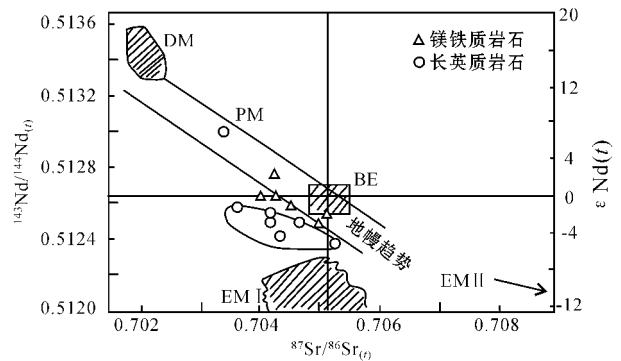


图 17 港边火成杂岩体各岩石源区示踪的 $\epsilon Nd(t) - ^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 图(据 Zindler, 1986)

Fig. 17 $\epsilon Nd(t) - ^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ diagram for tracing the source of various rocks in Gangbian igneous complex (after Zindler, 1986)

DM—亏损地幔; PM—原始地幔; EM I—富集 I 型(加入下地壳)地幔; EM II—富集 II 型(加入上地壳和海洋沉积物)地幔; BE—总地球

DM—depleted mantle; PM—primary mantle; EM I and EM II—enriched mantle of Type I and Type II, respectively; BE—bulk earth

前述已知, 镁铁质岩石具有两种产状和岩性: 一为浅成少斑-隐晶的玄武质岩石; 一为深成粗粒的辉长岩类, 后者还具强烈的变形特征, 表明它来自于较深的位置。Nb 是地壳亏损的标志性元素, 而 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(i)$ 比值在地壳中较恒定 (Kabeto *et al.*, 2001), 故可利用 $\text{Zr}/\text{Nb}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(i)$ 图解确定杂岩体内长英质岩石源区中地壳物质加入的趋势 (图 18)。

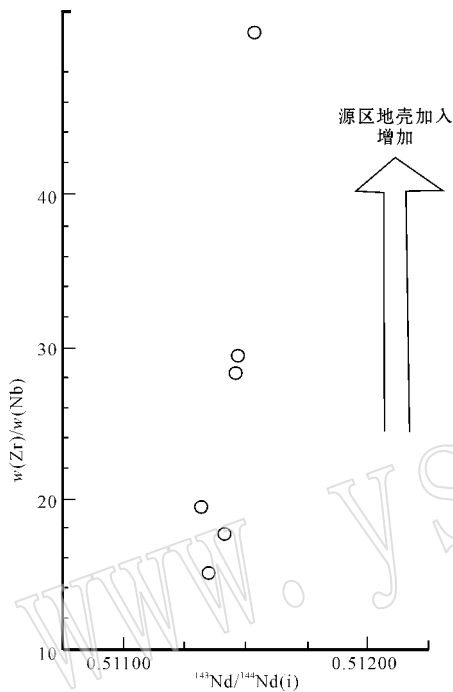


图 18 港边火成杂岩体内长英质岩石源区的 $\text{Zr}/\text{Nb}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(i)$ 示踪图

Fig. 18 $\text{Zr}/\text{Nb}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(i)$ diagram for tracing the source of felsic rocks in Gangbian complex

底侵作用的另一个证据是: 底侵的镁铁质的玄武质岩石的 Nd 模式年龄明显大于长英质岩石。需指出的是, 尽管镁铁质的玄武质岩石和辉长岩在产状和岩性上完全不同, 但它们却具相同的 Nd 模式年龄, 分别为 1.5~2.1 Ga 和 1.5~2.2 Ga, 它们各自的平均 Nd 模式年龄也十分相近, 分别为 1.7 Ga 和 1.8 Ga, 说明两者几乎为同期从地幔储集体中分离。上述两岩石稀土元素 Eu 异常 (Eu/Eu^*) 具有互补性, 玄武质岩石均小于 1 (表 3), 辉长岩却大于 1, 在前述 FeO^T-MgO 图中镁铁质的辉长岩的成分点分布于分离结晶趋势线 (图 11)。这些事实说明, 港边火成杂岩体中的辉长岩为玄武质岩浆分离结晶的固相产物。利用玄武质岩石中微量元素 Rb-Sr 和 Ba

-Sr 协变与矿物分离结晶矢量关系也进一步证明了这一点, 其分离结晶的矿物相为 Cpx 和 Pl (图 19)。

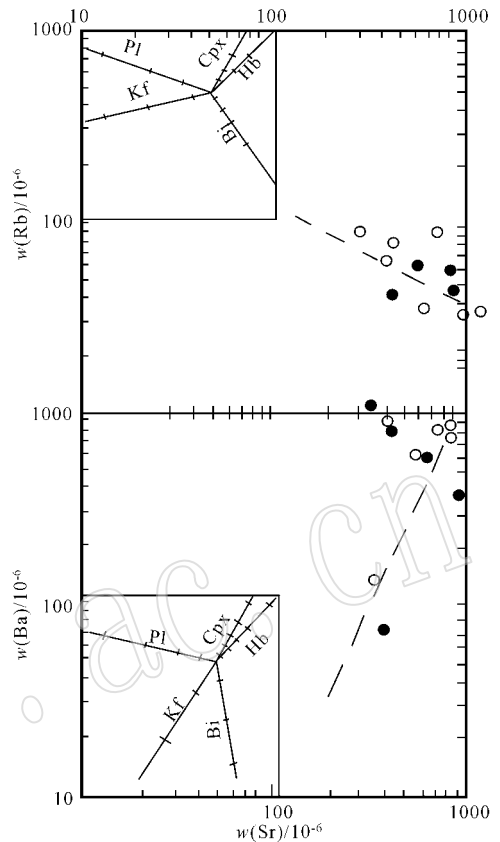


图 19 港边火成杂岩体中玄武质岩石的 Rb-Sr (a) 和 Ba-Sr (b) 协变与分离结晶矿物矢量关系

Fig. 19 Relationship between Rb-Sr (a) and Ba-Sr (b) covariation and mineral vector of fractional crystallization for basaltic rocks in Gangbian igneous complex

据 Condie (1982) 研究, 火成岩中的 K_{60} 值与地壳厚度 (C/km) 有一定的关系: $C = 18.2 \times K_{60} + 0.45$, 其中 K_{60} 为火成岩岩石样品中 SiO_2 含量为 60% 时 K_2O 的含量。选取港边火成杂岩体中 6 个玄武质岩石样品计算 K_{60} 平均值为 0.185 77, 进一步估算元古宙江南造山带的地壳厚度约为 34.26 km。Hollister 等 (1987) 提出的角闪石压力计为: $p (\pm 0.1 \text{ GPa}) = 5.64 \text{ Al}^{\text{IV}} - 4.76$, 其中 Al^{IV} 为角闪石晶体化学式中 Al^{IV} 与 Al^{VI} 之和。已知港边火成杂岩体中玄武质岩石内角闪石的 Al^{IV} 为 2.376 (钟称生, 2002), 按上述压力计估算出玄武质岩浆所处的压力为 $0.864 \pm 0.1 \text{ GPa}$ 。再经 1 GPa 相当于 33 km 的换算, 得知玄武质岩浆所在的深度为 $28.5 \pm 3.3 \text{ km}$ 。这一计算结果基本上与新元古代地壳厚度的计算值相当, 由此说明新元古宙的玄武质岩浆底侵和侵入至

壳-幔边界,这一作用使下地壳熔融直至形成长英质岩浆房。

7 结 论

(1)产于赣东北地区江绍断裂北缘前寒武纪火山-侵入杂岩带的港边杂岩体可以填图的尺度分解为长英质岩、镁铁质岩及过渡性岩石3大组成部分。

(2)3部分组成的接触关系、地质分布、岩石特征、岩石化学和地球化学性质以及同位素组成特点揭示,该杂岩体持续地发育岩浆的化学混合与岩浆的机械混和作用,长英质岩和镁铁质的玄武质岩石原为两端员岩浆,过渡性岩石则为两端员岩浆相互混合(和)形成的岩浆混合岩,港边火成杂岩体实际上是一个完美的岩浆混合(和)杂岩体。

(3)中元古代的江南造山带是扬子古大陆陆核东南的横向增生体,而港边火成杂岩体所在的赣东北-浙西火山-侵入杂岩带于新元古代又横向增生于江南造山带的东南侧,至此扬子古大陆无论在时间还是在空间上均终止了其横向增生作用,而火山-侵入杂岩带也成为扬子古大陆和华夏古陆连结的纽带。

(4)港边火成杂岩体中的长英质岩石形成于玄武质岩浆的底侵作用,玄武质岩浆在壳-幔边界曾发生过分离结晶作用,辉长岩则是其分离结晶的固相产物。

References

- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rockseries using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43~54.
- Bayaton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier science, 63~114.
- Chen Jiangfeng, Guo Xinsheng, Tang Jiafu. *et al.* 1999. Nd isotopic model ages: implications of the growth of the continental crust of southeastern China[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 35(6): 649~658(in Chinese).
- Condi K C. 1982. *Plate Tectonic and Crustal Evolution*[M]. Pergamon Press.
- Deng Jingfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, *et al.* 1996. Continental-Roots Plume Tectonics in China—a key of continental Dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- DePaol D J. 1982. Sm-Nd, Rb-Sr and U-Th-Pb Systematics of granulite facies rocks from Fyfe Hill, Enderby Land, Antarctica. *Nature*, 298: 614~618.
- Didier J and Barbarin B. 1991. Macroscopic features of mafic microgranular enclaves[A]. Didier J and Barbarin B. *Enclaves and Granite Petrology*[C]. Amsterdam: Elsevier, 253~262.
- Fernandez A N and Barbarin B. 1991. Relative rheology of coeval mafic and felsic microgranular enclaves[A]. Didier J and Barbarin B. *Enclaves and Granite Petrology*[C]. Elsevier Science, 263~275.
- Goldstein S L, O'Nions R K and Hamilton P J. 1984. A Sm-Nd study of atmospheric dusts and particulations from major river systems[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70: 221~236.
- Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calca-alkaline plutons[J]. *Am. Mineral.*, 72: 231~239.
- Jacobsem S B and Wasserburg G J. 1980. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50: 139~155.
- Kabeto K, Sawada Y, Lizumi S, *et al.* 2001. Mantle source and magma-crust interactions in volcanic rocks from the northern Kenya rift: geochemical evidences[J]. *Lithos*, 56: 111~139.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, *et al.* 1989. *A classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*[M]. Blackwell Oxford.
- Li Changnian. 1992. *Igneous Petrology for Trace Element*[M]. Wuhan: CUG Press(in Chinese).
- Li Changnian. 2002a. Comment on the magma mixing and their research [J]. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 49~54(in Chinese).
- Li Changnian. 2002b. Regional geological survey and petrological research of the Gangbian magma-mixed complex from northeastern Jiangxi Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 9~18(in Chinese).
- Li Changnian and Liao Qun'an. 1999. New knowledge about the volcanic rocks of Shangshu Formation from northeastern Jiangxi Province and their geological significance[J]. *Geological Review*, 45(sup): 717~723(in Chinese).
- Li Changnian, Xue Chongsheng, Liao Qun'an, *et al.* 1997. Petrology of Gangbian magma-mixed complex body and their genesis, Henfeng County, Jiangxi Province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 22(3): 261~267(in Chinese).
- Ma Changxin and Xiang Xinkui. 1993. Preliminary study of the Nd isotopic model ages of the Precambrian metamorphic stratum in northeastern Jiangxi Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 28(2): 145~150(in Chinese).
- Neves S P and Vanches A. 1995. Successive mixing and mingling of magmas in a plutonic complex of northeast Brazil[J]. *Lithos*, 34: 275~299.
- O'Hara M J. 1977. Geochemical evolution during fractional crystallization of a periodically refilled magma Chamber[J]. *Nature*, 266: 503~507.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Con-*

- tribution to Mineralogy and Petrology, 58 : 63~81.
- Qu Xiaoming and Wang Henian. 1997. Dynamic study on the crustal-mantle magma mixing and emplacement mechanism of Guo Jialing granite [J]. Chinese Journal of Geology, 32(4): 445~453 (in Chinese).
- Rollison H R. 1993. Using Geochemical Data : Evaluation, Presentaion, Interpretation [M]. Prearson Education Limited, UK.
- Streckeisen A and Le Maitre R W. 1979. A chemical approximation to modal QAPF classification of igneous rocks [J]. Neues Jahrbuch fiir Mineralogie Abhandlungen, 136 : 169~206.
- Syder D, Carmes C, Tait S, et al. 1997. Magma mingling in diikers and sil [J]. J. Geology, 105 : 75~86.
- Vernon R H, Etheridge M A and Wall V J. 1988. Shape and microstructure of microgranitoid enclaves : indicators of magma mingling and flow [J]. Lithos, 22 : 1~11.
- Vernon R H. 1984. Microgranitoid enclaves in granites-globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment [J]. Nature, 309 : 438~439.
- Wang Dezi, Zhou Xinmin, Xu Xisheng, et al. 1992. On geneses of microgranitoid enclaves [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, (3): 235~240 (in Chinese).
- Wang Dezi, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, et al. 1994. The magma mixing in early cretaceous volcanic activities in southeastern coast of China [J]. Journal of Najing University (Earth Sciences), 6(4): 317~322 (in Chinese).
- Wang H Z and Mo X X. 1995. An outline of the tectonic evolution of China. Episode [J], 18 : 6~16.
- Wang Hongzhen. 1983. The main stages of crustal development of China [J]. Earth Science- Journal of China University of Geosciences, (3): 155~178.
- Wilcox R E. 1999. The idea of magma mixing : history of a struggle for acceptance [J]. The J. Geology, 107 : 421~432.
- Xing Fengming, Xu Xiang, Chen Jiangfeng, et al. 1992. The Late Proterozoic continental accretionary history of the southwestern margin of the Yangtze platform [J]. Acta Geologica Sinica, 66(1): 59~72 (in Chinese).
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics [J]. Ann. Rev. Earth Planet Sci., 14 : 493~571.
- Zhong Chengsheng. 2002. Study on Precambrian Gangbian magma-mixed complex from northeastern Jiangxi Province and their magma mixing (master 's degree thesis [D]. Wuhan : China University of Geosciences (in Chinese).
- Zhou Xinmin and Zhu Yunhe. 1992. Magma mixing and Precambrian geology on the both sides of Jiangshao Deep Fracture Zon [J]. Science in China (Ser. B), (3): 296~303 (in Chinese).
- Zorpi W J, Coulon C, Orsini J B, et al. 1989. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons [J]. Tectonophysics, 157 : 315~329.

附中文参考文献

- 陈江峰, 郭新生, 汤家富, 等. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 35(6): 649~658.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 1996. 中国大陆根柱构造——大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 李昌年. 2002a. 岩浆混合作用及其研究评述 [J]. 地质科技情报, 21(4): 49~54.
- 李昌年. 2002b. 赣东北晚元古代港边岩浆混合杂岩体的区域地质调查及岩石学研究 [J]. 华南地质与矿产 (3): 9~18.
- 李昌年, 廖群安. 1999. 关于赣东北上墅组火山岩的再认识及其地质意义 [J]. 地质论评 (5 增刊): 717~723.
- 李昌年, 薛重生, 廖群安, 等. 1997. 江西横峰县港边岩浆混合杂岩体岩石学研究及其成因探讨 [J]. 地球科学, 22(3): 259~267.
- 马长信, 项新葵. 1993. 赣东北前寒武纪变质地层钨模式年龄初步研究 [J]. 地质科学, 28(2): 145~150.
- 曲晓明, 王鹤年. 1997. 郭家岭岩体壳幔岩浆混合作用与侵位机制动力学研究 [J]. 地质科学, 32(4): 445~453.
- 王德滋, 周金城, 邱检生, 等. 1994. 东南沿海白垩世火山活动中的岩浆混合及壳幔作用证据 [J]. 南京大学学报(地球科学), 6(4): 317~322.
- 王德滋, 周新民, 徐夕生, 等. 1992. 微粒花岗岩包体的成因 [J]. 桂林冶金地质学院学报 (3): 235~240.
- 王鸿祯. 1983. 中国地壳构造发展的主要阶段 [J]. 地球科学 (3): 155~178.
- 邢凤鸣, 徐 祥, 陈江峰, 等. 1992. 江南古陆东南缘晚元古代大陆增生史 [J]. 地质学报, 66(1): 59~72.
- 钟称生. 2002. 赣东北前寒武纪港边岩浆混合杂岩体及岩浆混合作用研究 [硕士学位论文]. 武汉: 中国地质大学.
- 周新民, 朱云鹤. 1992. 江绍断裂带的岩浆混合作用及两侧的前寒武纪地质 [J]. 中国科学 (B) (3): 296~303.