



宜章县长城岭燕山期两类岩浆岩的 岩石学及构造背景

张术根¹, 刘贤红^{1,2}, 朱书林¹

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 湖南省地球物理地球化学勘查院, 长沙 410116)

摘 要: 长城岭铅锌锑多金属矿区位于南岭有色金属成矿带中段, 区内发育多组燕山期硅铝质岩墙群及少量镁铁质岩瘤、岩墙。这两类岩浆岩的产出均受区域性北东向断裂带控制, 空间分布交织, 同属燕山期, 但玄武岩形成于燕山早期第一阶段, 辉绿玢岩形成于燕山早期第二阶段, 花岗斑岩和石英斑岩形成于燕山早期第三阶段, 辉长岩可能形成于燕山晚期, 因而其研究对探讨南岭地区燕山期岩浆演化、岩石成因及成岩构造环境具有重大意义。通过详细的野外地质调查、岩相学和岩石地球化学综合研究, 试图系统分析这两类岩浆岩成因、岩石学及岩石地球化学特征, 并探讨其成岩构造环境及动力学背景。研究表明: 本区硅铝质岩富硅、铝、钾, 为钙碱性, 强过铝质, ΣREE 低, 稀土配分模式具四分组效应, 属 S 型岩浆岩、石英斑岩; 镁铁质岩富 SiO_2 、贫碱, 为钙碱性, 过铝质, ΣREE 偏高, 属壳幔混染型岩浆岩。相较而言, 从玄武岩到辉绿玢岩再到辉长岩, $\text{Mg}^\#$ 值、 Zr/Hf 值依次增大, 玄武岩、辉绿玢岩及辉长岩的稀土配分曲线均为右倾型, 以辉绿玢岩曲线更陡, 而辉长岩曲线平坦。基于壳体构造理论与两类岩浆岩的岩石学及地球化学特征, 研究认为本区岩浆岩是燕山期陆内活化产物。随着燕山期地幔蠕动和热能聚集强度与方式的有规律变化, 其动力学环境相应变化, 岩浆源区深度、壳幔相互作用程度及物质组成也有规律变化, 因而上述岩浆岩无论成因、岩石学或地球化学特征都随燕山期岩浆侵入活动阶段而明显变化。

关键词: 长城岭; 硅铝质岩; 镁铁质岩; 岩石地球化学; 构造背景

中图分类号: P581

文献标志码: A

Petrology and tectonic setting of two types of magmatic rocks produced in early Yanshannian in Changchengling, Yizhang, China

ZHANG Shu-gen¹, LIU Xian-hong^{1,2}, ZHU Shu-lin¹

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Changsha 410116, China)

Abstract: Changchengling Pb-Zn-Sb polymetallic orefield locates in the middle segment of Nanling nonferrous metals metallogenic belt, there occurs groups of Yanshanian granitic dykes and a few scattered mafic bosses and dykes. These two types of magmatic rocks are mainly controlled by the northeast-trending regional fracture zone, and are spatially interweaving. Basaltic, diabasic porphyry and granitic are respectively intruded at the first, second and third stages of early Yanshanian periods and gabbro dykes are the latest intruded magmatic rocks probably in later Yanshanian period, so their petrologic, genetic and geochemical studies are of great significance in understanding of the Yanshanian regional magmatic evolution, petrogenesis, and tectonic settings of Nanling region. On the base of comprehensive studies on field

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAB43B00); 校企合作项目

收稿日期: 2014-08-20; 修订日期: 2015-10-20

通信作者: 张术根, 教授, 博士; 电话: 18673150979; E-mail: zhangshugen@163.com

investigation, petrography and rock geochemistry, the petrologic, geochemical and genetic characteristics, tectonic and geodynamic settings of these two types of magmatic rocks were discussed systematically. The results show that granitic rocks here with high Si, Al, K and low REE are calc-alkaline and strongly peraluminous, their REE pattern has obvious tetrad effect, therefore they belong to the S-type; the mafic rocks with high SiO_2 , REE and low alkali are calc-alkaline and peraluminous, thus they derive from the mixed crust-mantle. As for basalt, diabase porphyry and gabbro, their $\text{Mg\#}$ value and $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ value increase orderly, the REE partition curves are all right-inclined, but diabase is steeper and gabbro goes flate. According to the theory of Crustobody geotectonics and the petrologic characteristics, these two types of magmatic rocks are the products of Yanshanian continental mobilization. With the regular change of intensity and mode of mantle creep-flow and heat energy convergence in Yanshanian period, the geodynamic setting and crust-mantle interaction extent transform correspondingly, the depth and compositions of the magma source region change accordingly, so the genetic, petrologic and geochemical characteristics of these magmatic rocks are all varied obviously with the magmatic intrusion stages of Yanshanian.

Key words: Changchengling; granitic rock; mafic rock; geochemistry; tectonic setting

南岭地区地质构造较为复杂, 其中生代大地构造背景一直是地学界研究的热点, 研究人员提出了多种模式或观点, 归纳起来有 3 种: 一是与其内部印支期洋(海)盆的俯冲碰撞或与古太平洋板块西向俯冲有关^[1-3], 如特提斯多岛洋(海)碰撞造山、弧后造山^[4-6]、阿尔卑斯型碰撞造山^[7]、岩石圈俯冲后撤与岩浆底侵作用模型^[8]等; 二是陆内变形、盆岭伸展构造与岩石圈伸展减薄作用的产物, 与俯冲碰撞作用无关^[9-16]; 三是地幔柱作用产物^[17-19]。

湖南省宜章县长城岭地区虽未出露较大规模的岩浆岩体, 但发育多组燕山期硅铝质岩墙群及少量镁铁质岩瘤、岩墙。该区以往地质研究程度较低, 仅在讨论南岭地区构造-岩浆热事件时偶有提及^[20], 尤其是针对本区镁铁质岩的研究低^[21], 仅有少量年龄数据发表^[22-23]。但本区两类岩浆岩侵位时代相近, 空间分布相邻或交切, 都是燕山早期岩浆活动产物。作为南岭中段的重要组成部分, 本区在研究南岭中段甚至是整个南岭地区岩浆岩形成的构造环境方面具有得天独厚的优势(见图 1)。因此, 本文作者着重从这两类岩浆岩的岩相学和岩石地球化学特征来研究其岩石学特征与成因, 探讨其成岩构造环境及地球动力学背景。

1 地质背景

区域地质资料表明^[25-27], 南岭中段位于晚元古代早期(距今约 900 Ma)聚合的古扬子壳体与古华夏壳体的结合部位, 这两个古壳体聚合后, 在南华期和加里

东期, 构造环境较为活跃, 主要发育复理石、类复理石建造, 早古生代还少量发育不纯碳酸盐建造, 及至志留纪晚期加里东运动, 上述沉积建造遭受广泛的区域变质并强烈褶皱变形, 发育花岗岩岩基。海西期构造环境相对稳定, 沉积碳酸盐岩建造、细碎屑岩建造, 构造、岩浆活动微弱。三叠纪中期开始又处在活动环境, 沉积陆相碎屑岩(含煤)建造, 印支期形成大规模宽展型褶皱与 NE 向逆冲断裂, 但岩浆活动强度较低, 仅出现少量过铝质岩浆活动。燕山早期构造活动强度达到顶峰, 形成宽展型褶皱及 NE、NNE 向逆冲断裂, 壳源重熔型硅铝质岩浆活动强烈, 镁铁质岩浆小规模活动; 燕山晚期构造活动强度减弱, 形成断陷山间盆地及河湖相红色含膏盐碎屑岩建造, 见镁铁质岩浆及少量硅铝质岩浆活动。晚白垩世晚期以来, 沉积陆相红色碎屑岩层, 区域地壳活动性显著降低, 发育宽展性褶皱与断陷盆地。

长城岭地区位于南岭中段北缘, 处在北东向炎陵—郴州—蓝山断裂带和北西向仁化—郴州—邵阳断裂带交汇部位的南西边缘, 区内出露地层简单, 除零星分布第四系褐红色亚粘土、粘土外, 主要为晚古生代稳定浅海环境形成的中泥盆统一下石炭统碳酸盐岩夹细碎屑岩建造, 其次为中生界下侏罗统(J_1)陆相含煤碎屑岩建造。区内构造变形强烈, 处在五盖山倒转背斜与资兴向斜之间的南端, 北东向断裂构造($F_{101} \sim F_{104}$)是炎陵—郴州—蓝山区域断裂带的重要组成部分。区内岩浆岩发育程度较低, 仅在 $F_{101} \sim F_{104}$ 断裂夹持地带分布多组硅铝质岩墙及少量镁铁质岩石。沿该断裂带的花岗斑岩发育部位零散出现铅锌多金属矿化(见图 1)。

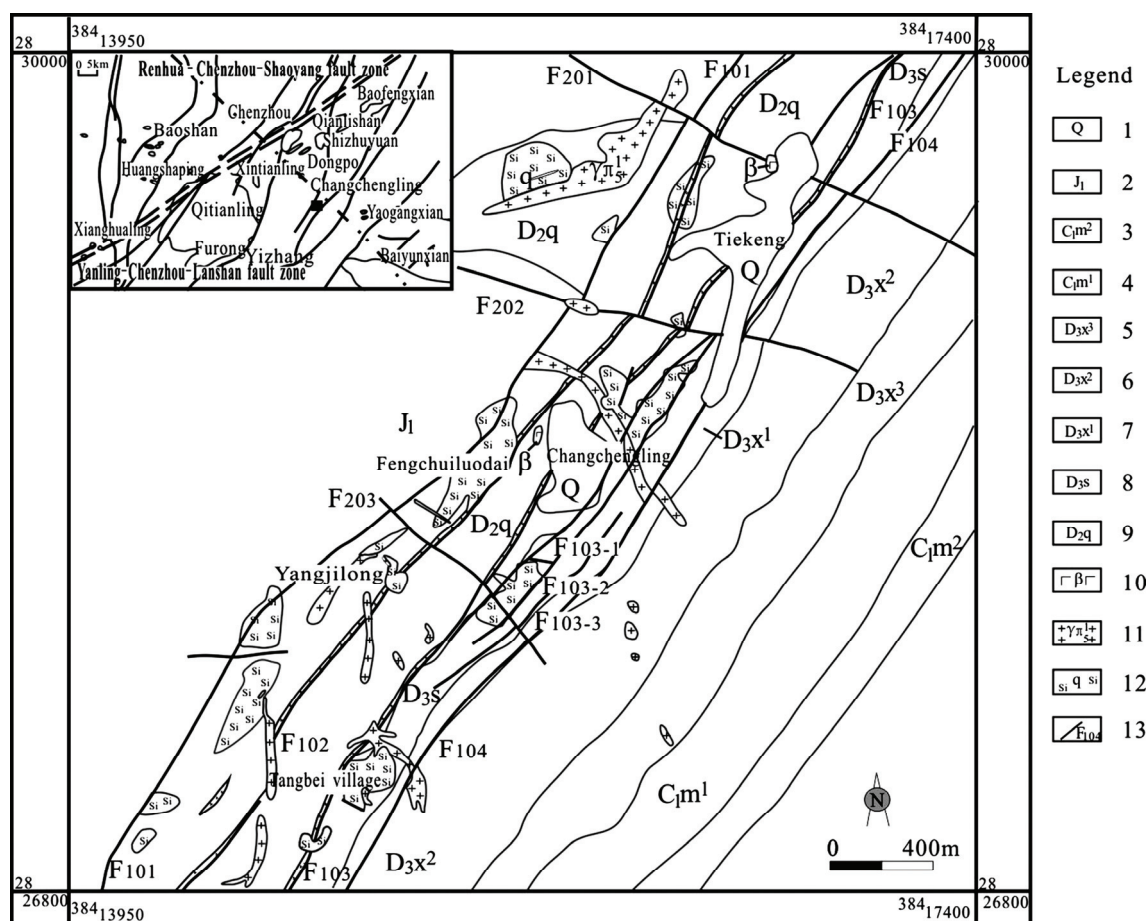


图 1 长城岭地区地质略图^[24]: 1—第四系; 2—下侏罗统; 3—石炭系下统孟公坳组上段; 4—石炭系下统孟公坳组下段; 5—泥盆系上统锡矿山组上段; 6—泥盆系上统锡矿山组中段; 7—泥盆系上统锡矿山组下段; 8—泥盆系上统余田桥组; 9—泥盆系中统棋梓桥组; 10—玄武岩; 11—花岗斑岩; 12—硅化体; 13—断层

Fig. 1 Geological sketch map of Changchengling area^[24]: 1—Quaternary; 2—Lower Jurassic; 3—Menggong'ao Fm, upper member; 4—Menggong'ao Fm, lower member; 5—Xikuangshan Fm, upper member, 6—Xikuangshan Fm, middle member, 7—Xikuangshan Fm, lower member, 8—Shetianqiao Fm; 9—Qiziqiao Fm; 10—Basalt; 11—Granite porphyry; 12—Silicide body; 13—Fault

2 岩相学特征

本区发育有硅铝质岩(花岗斑岩、石英斑岩)及镁铁质岩(玄武岩、辉长岩、辉绿玢岩), 据前期研究^[22-23], 两类岩浆岩都是燕山期岩浆活动产物。根据现场调查研究(地表、坑道、采场)表明, 燕山期岩浆岩侵入的最新地层为下侏罗统, 呈硅铝质岩墙和镁铁质岩瘤、岩墙产出, 可分为北东、北西(西)向及近南北向 3 组, 主要夹持在 F_{101} 与 F_{104} 之间呈北东向带状展布。硅铝质岩中花岗斑岩墙主要分布在本区北段、中段, 石英斑岩墙主要分布在南段, 与区内铅锌锡矿化关系密切。

镁铁质岩中玄武岩仅在北段铁坑、长城岭各发育 1 处小岩瘤, 长轴近南北向, 夹于断层 F_{102} 与 F_{103} 之间, 与区内被铅锌锡矿脉穿插切割的棕色菱铁矿化关系密切; 辉绿玢岩岩墙主要分布在中段和南段, 在矿山坑道、采场较为常见, 规模较大者大致沿 F_{102} 断裂带的次级断裂断续出露地表, 总长度大于 1 km, 厚度 0.5~1.5 m, 被北西向断裂切成数段或被花岗斑岩穿切, 在花岗斑岩侵入或铅锌锡矿化地段遭受强烈热液蚀变, 局部可见铅锌锡矿化; 辉长岩见于矿山部分坑道和采场, 规模更小, 走向延伸不足 100 m, 厚度不足 0.5 m, 呈 NNE 向平直规则脉状, 局部可见其明显切割花岗斑岩及铅锌锡矿体。由此可见, 本区岩浆岩依玄武岩、辉绿玢岩、花岗斑岩(石英斑岩)、辉长岩

次序先后产出。

硅铝质岩呈灰白色, 部分蚀变显浅黄绿色, 中—细粒斑状结构, 块状构造。斑晶主要为石英和长石, 少量黑云母、白云母, 偶见角闪石, 随岩浆结晶程度不同, 斑晶含量与各矿物所占比例略有差异; 基质为长英质, 见隐晶质结构、显微球粒嵌晶结构、显微细粒结构等; 副矿物为锆石、磷灰石、电气石、榍石、金红石、石榴子石、褐帘石、黄铁矿及磁铁矿等。花岗斑岩局部隐爆^[28], 可见隐晶质基质贯穿或岩石包合同成分角砾, 石英斑晶常碎裂、熔蚀或次生加大, 黑云母褪色蚀变强烈、绿泥石化微弱, 长石粘土化及碳酸盐化强烈。岩体及旁侧围岩常见萤石化、硅化及蛇纹石化, 萤石多沿裂隙脉状分布, 局部见强萤石化花岗斑岩(见图 2)。

镁铁质岩呈黑色、棕褐色、暗绿色、墨绿色等, 斑状结构、块状构造。玄武岩斑晶为斜长石、辉石,

偶见橄榄石; 基质为间粒间隐结构, 组成矿物与斑晶相似; 副矿物为磁铁矿、钛铁矿和磷灰石。偶见绿泥石化、蛇纹石化、绢云母化、葡萄石化等微弱蚀变, 斜长石发育卡钠双晶和聚片双晶。少许杏仁体, 充填石英、沸石或方解石。辉长岩斑晶为斜长石、辉石, 偶见角闪石、碎裂状橄榄石; 基质为辉长结构, 组成矿物与斑晶相似; 副矿物为磁铁矿、钛铁矿。斜长石发育卡钠双晶、肖钠长石律双晶, 可见聚斑结构和辉石的角闪石反应边。辉绿玢岩斑晶主要为斜长石、钾长石, 少量辉石和角闪石; 基质为辉绿结构, 组成矿物与斑晶相似; 副矿物为钛铁矿、磁铁矿、磷灰石。斜长石无双晶, 多钠黝帘石化; 辉石常见绿泥石化、碳酸盐化及暗化边, 偶见蛇纹石化。部分岩石热液蚀变强, 绿泥石化、碳酸盐化强烈。杏仁体发育, 多充填玉髓、石英、蛋白石、方解石、火山玻璃等(见图 3)。

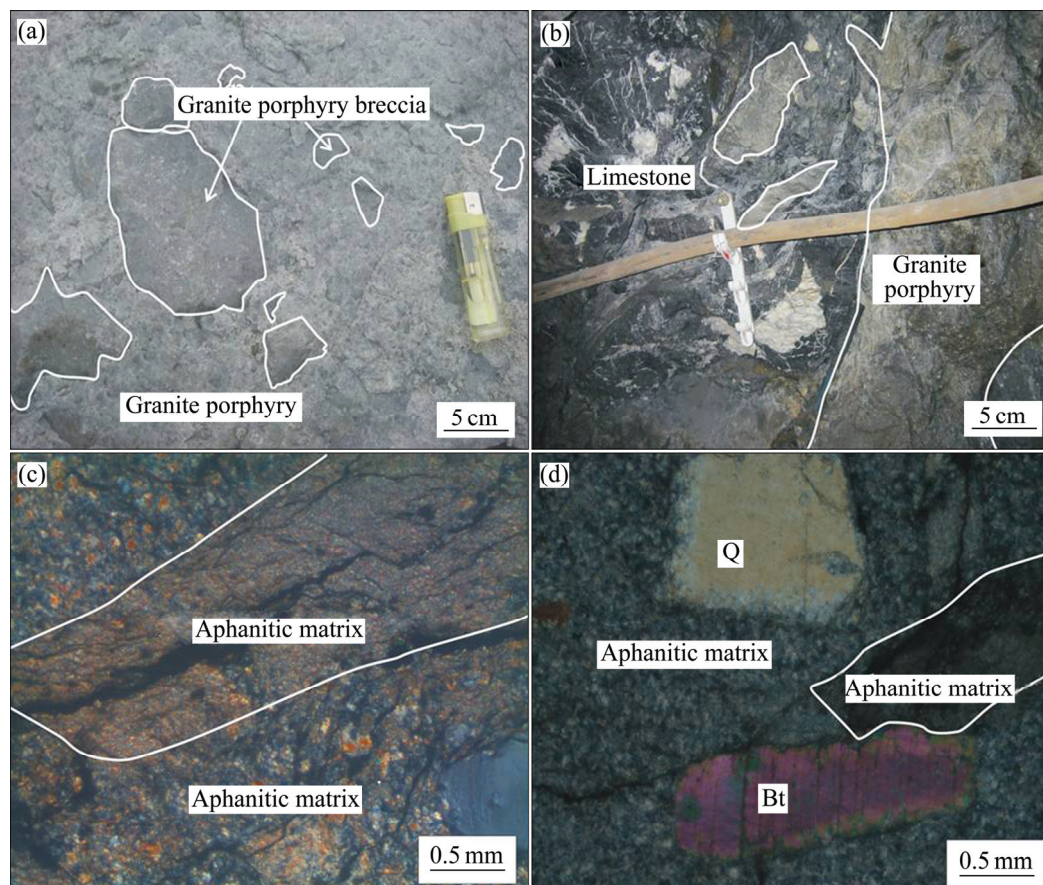


图 2 长城岭地区硅铝质岩照片: (a) 花岗斑岩浆爆现象; (b) 花岗斑岩脉侵入灰岩中; (c) 隐晶质基质贯入另一隐晶质基质中(+); (d) 斑状结构(+)

Fig. 2 Photos of Changchengling granitic rocks: (a) Explosive magmatic of explosion phenomenon; (b) Granite porphyry invade limestone; (c) Aphanitic matrix insert into another one(+); (d) Porphyritic texture (+)

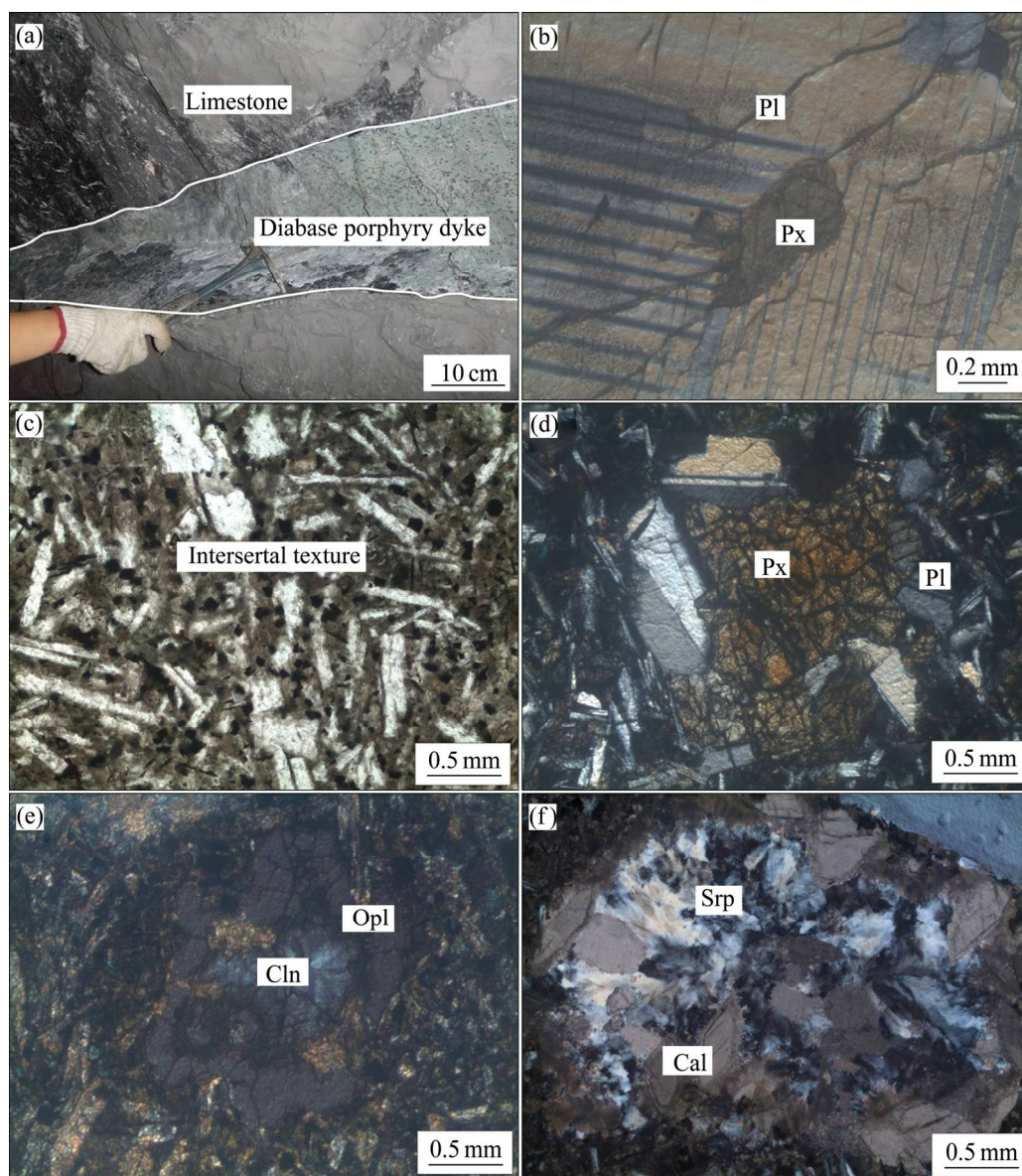


图 3 长城岭地区镁铁质岩照片: (a) 井下强蚀变的辉绿玢岩墙沿裂隙侵入泥盆系地层中; (b) 玄武岩斜长石(Pl)斑晶孔隙中充填它形辉石(Px)(+); (c) 玄武岩基质间隐结构(-); (d) 辉长岩中斜长石与辉石聚斑结构(+); (e) 辉绿玢岩气孔中充填蛋白石(Opl)与玉髓(Cln)(+); (f) 辉绿玢岩中辉石斑晶蛇纹石(Srp)化、方解石化(Cal)(+)

Fig. 3 Photos of Changchengling mafic rocks: (a) Diabase porphyry dyke (already highly altered) intruding into Devonian strata; (b) Plagioclase phenocryst in basalt wedged with allotriomorphic pyroxene(+); (c) Intersertal texture(-); (d) Gregaritic texture(+); (e) Pores in diabase porphyry filled with opal and chalcedony(+); (f) Serpentinized and calcitized pyroxene phenocryst in diabase porphyry(+)

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

据主量元素分析结果可知(见表 1), 硅铝质岩 $w(\text{SiO}_2)$ (70.88%~79.23%)(质量分数, 下同)和分异指数 DI(80.93%~89.42%)较高, 基性组分中 $w(\text{MnO})$ 、

$w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{FeO})$ 、 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 较低, $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{MnO})$ 尤其低, 岩浆演化分异充分, 酸性强。全碱质量分数偏低(1.54%~5.65%), $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值高且变化范围较大(4.34~23.83); $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 较高(0.03%~0.30%); 里特曼指数 σ_{43} 偏低(0.07~1.03), 属钙碱性; 铝饱和指数 A/CNK 为 2.04~9.88, 属强过铝质。结合 QAP 图解(见图 4)、 $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 图解(见图 5)可知, 本区硅铝质岩属强

表 1 硅铝质岩-镁铁质岩的主量元素分析结果

Table 1 Major element compositions of granitic-mafic rocks

岩类	岩体	编号	w _B /%											I _g ¹⁾	σ43	AR	SI	DI	A/CNK
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅						
花岗岩	乌鸦山	K71	79.23	0.04	12.10	0.30	0.64	0.04	0.35	0.23	0.18	3.44	0.12	3.20	0.36	1.83	88.76	7.25	2.73
		北坡	76.81	0.05	13.72	0.30	0.65	0.05	0.45	0.27	0.19	3.87	0.15	3.19	0.48	1.82	87.20	8.34	2.75
		(NE 向)	K76	71.94	0.03	17.42	0.29	0.65	0.14	0.36	0.11	0.26	4.92	3.57	0.91	1.84	85.05	5.60	2.93
	长城岭	K31	72.56	0.03	15.40	0.29	0.66	0.12	0.75	1.04	0.35	3.89	0.13	4.47	0.60	1.69	82.06	12.67	2.31
		(NW 向)	K32	74.72	0.03	14.11	0.29	0.67	0.12	0.82	0.97	0.36	4.13	3.81	0.63	1.85	84.03	13.12	2.07
			K53	73.65	0.0	14.51	0.29	0.67	0.13	1.09	0.54	3.92	0.13	4.27	0.64	1.80	83.08	13.23	2.04
	风吹罗带	K77	74.34	0.01	15.80	0.28	0.68	0.11	0.83	0.20	0.42	4.58	0.30	3.26	0.79	1.91	85.33	12.25	2.63
		(NW 向)	K78	70.88	0.02	16.96	0.28	0.68	0.12	1.03	0.35	0.33	5.08	4.28	1.03	1.91	83.62	13.96	2.54
	羊犄垄	Y23	75.52	0.02	14.34	0.28	0.69	0.10	0.78	0.21	0.18	4.29	0.16	3.45	0.61	1.89	86.22	12.61	2.70
		(SN 向)	Y27	76.01	0.05	14.30	0.28	0.69	0.05	0.69	0.05	0.21	4.39	2.59	0.64	1.94	87.01	10.99	2.75
花岗岩	上塘背	K84	79.14	0.03	11.71	0.27	0.70	0.05	0.57	0.02	0.17	3.92	0.09	3.32	0.46	2.07	89.42	10.18	2.57
		(SN 向)	K85	78.33	0.05	13.31	0.27	0.70	0.06	0.48	0.03	0.28	3.16	3.24	0.33	1.70	87.36	9.85	3.38
	塘背小学	K60	75.98	0.02	14.33	0.27	0.71	0.11	0.59	0.94	0.28	1.90	0.19	4.81	0.14	1.33	81.64	15.93	3.39
		(SN 向)	K61	74.44	0.02	17.81	0.27	0.71	0.10	0.04	0.25	1.21	0.12	5.13	0.07	1.18	80.93	4.49	9.88
	玄武岩	Y02	51.12	2.63	16.97	2.72	6.77	0.15	3.81	7.69	2.59	1.19	0.29	3.02	1.52	1.36	38.61	22.31	0.87
		(SN 向)	Y06	50.33	2.61	17.23	2.69	7.11	0.15	4.12	7.71	2.64	1.18	2.96	1.69	1.36	36.87	23.22	0.88
	辉绿玢岩	Y09	48.65	1.89	17.31	1.98	6.64	0.06	4.38	4.65	0.68	2.66	0.24	10.05	1.22	1.36	40.90	26.80	1.39
	辉长岩	Y19	54.48	1.67	14.26	2.67	7.76	0.14	6.71	6.68	1.84	0.41	0.09	2.58	0.41	1.24	33.18	34.61	0.91

主量、微量元素分析测试单位：湖南建材与非金属测试利用研究所；实验依据：GB/T 14506-2010 硅酸盐化学分析方法；测试仪器：ICP6300 电感耦合等离子体发射光谱仪；测试时间：2013 年 5 月(硅铝质岩)，2014 年 4 月(镁铁质岩)。

Unit of major and trace element analysis: Hunnan Building Materials and Non-metal Testing and Using Research Institute; Experimental evidence: GB/T 14506-2010silicate chemical analysis methods; Analysis instrument: ICP6300 inductively coupled plasma emission spectrometer(ICP-AES). Text time: May 2013(Granitic rocks); April 2014(Mafic rocks). 1) Ig is ignition loss.

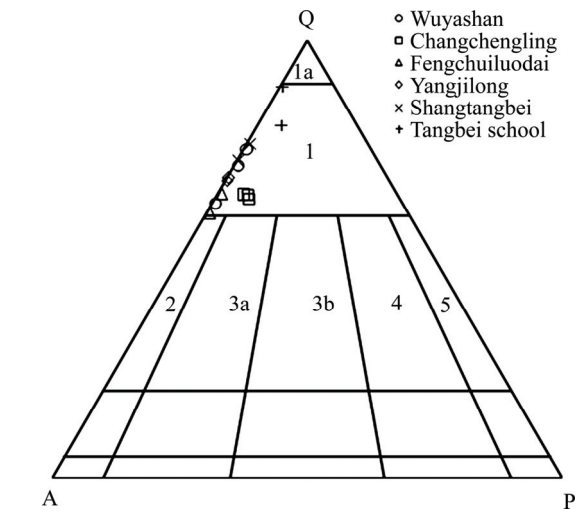


图 4 花岗岩类岩石 Q-A-P 分类三角图解^[29]
Fig. 4 Granitoid rocks Q-A-P classification triangle^[29]. 1a—Silexit; 1—Quartz rich granite; 2—Alkali feldspar granite; 3a—Granite; 3b—Monzonitic granite; 4—Granodiorite; 5—Tonalitic granite

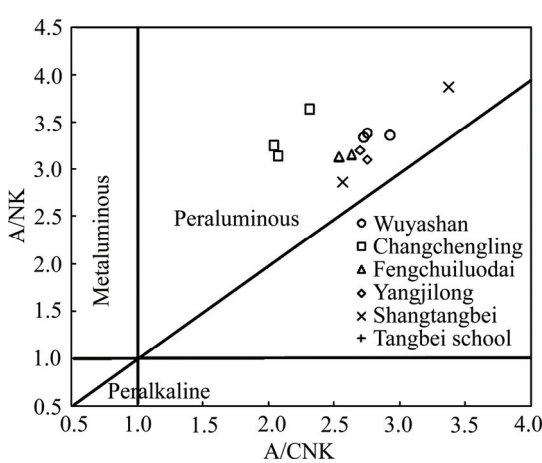
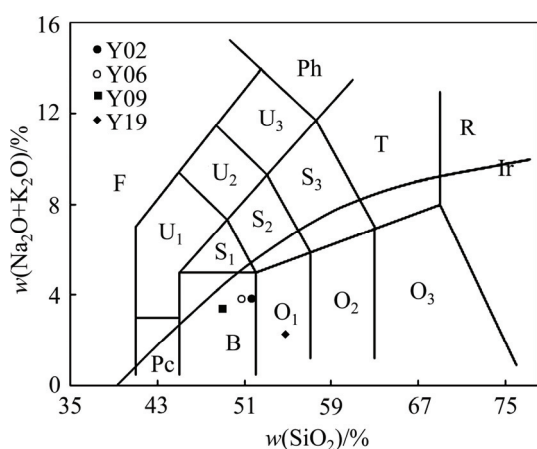
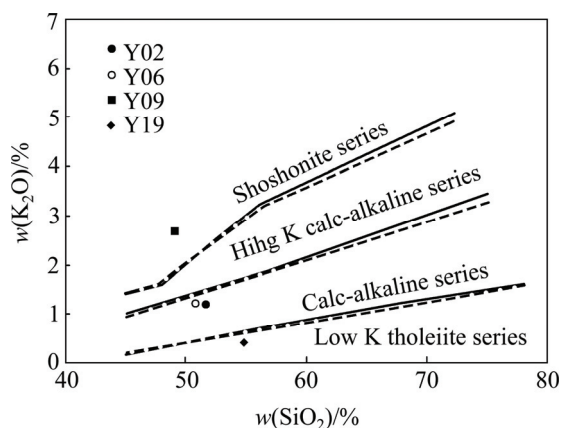


图 5 A/NK-A/CNK 图解^[30]
Fig. 5 A/NK-A/CNK diagram^[30]

过铝质钙碱-高钾钙碱系列花岗斑岩、石英斑岩。
镁铁质岩 $w(\text{SiO}_2)$ 较高(48.65%~54.48%)，全碱质量分数低(2.25%~3.82%)， $w(\text{Na}_2\text{O}) > w(\text{K}_2\text{O})$ ，仅辉绿

玢岩 $w(\text{K}_2\text{O}) > w(\text{Na}_2\text{O})$; σ_{43} 均小于 3.3, 为钙碱性, 尤以辉长岩钙碱性最强; $w(\text{TiO}_2)$ (1.67%~2.63%)、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (14.36%~17.45%) 较高, 且辉长岩中 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值最低。分异指数 DI 为 33.18%~40.90%, 固结指数 SI 为 22.31%~34.61%, 辉长岩 DI 最小而 SI 最大。 $\text{Mg}^\#$ 值为 0.42~0.54, 依玄武岩、辉绿玢岩、辉长岩次序增大。据 TAS 图解(见图 6)、 $w(\text{K}_2\text{O})$ - $w(\text{SiO}_2)$ 图解(见图 7)及岩相学特征可知, 本区镁铁质岩属过铝质亚碱性系列玄武岩、辉绿玢岩、辉长岩, 相较而言, 玄武岩属钙碱性系列; 辉绿玢岩属钾玄岩系列; 辉长岩属低钾系列。

图 6 TAS 图解^[31]Fig. 6 TAS diagram^[31]图 7 $w(\text{K}_2\text{O})$ - $w(\text{SiO}_2)$ 图解^[32-33]Fig. 7 $w(\text{K}_2\text{O})$ - $w(\text{SiO}_2)$ diagram^[32-33]

3.2 稀土元素

据稀土元素分析结果所知(见表 2), 硅铝质岩的稀土元素质量分数偏低, 与其高分异演化导致富 REE 矿物晶出有关; $w(\text{LR})/w(\text{HR})=1.73\sim6.03$, $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N=1.13\sim3.81$, $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N=1.11\sim3.70$, 轻稀土相对略

富集且存在一定分馏作用。 $w(\text{Y})/w(\text{Ho})$ 值除个别为 26.72 外, 多集中于 31.61~39.42 之间; $\delta_{\text{Ce}}=0.60\sim0.91$, 具较弱的负铈异常; $\delta_{\text{Eu}}=0.05\sim0.17$, δ_{Eu} 强烈亏损; Dy 相对略亏损; $\text{TE}_{1.3}$ 值大部分位于 0.65~0.94 之间, 少部分位于 1.13~1.54 之间; 稀土配分模式具明显的四分组效应(见图 8(a)), 多为 w 型曲线且相对分散, 反映区内花岗质岩浆存在富挥发份(F, Cl)流体与熔体的强烈相互作用。

镁铁质岩稀土元素含量偏高, 其中辉长岩富集程度相对较低。从辉长岩到辉绿玢岩再到玄武岩, $w(\text{LR})/w(\text{HR})$ 值(2.54~5.31)、 $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$ 值(1.45~2.61)、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值(2.24~6.03)及 $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$ 值(1.56~1.91)均依次增大, 分馏程度依次增高, 轻稀土相对略富集且轻、重稀土之间及内部都存在轻微分馏。 $\delta_{\text{Ce}}=0.86\sim0.94$, 具较弱负铈异常。玄武岩 $\delta_{\text{Eu}}=0.99\sim1.00$, 辉长岩 $\delta_{\text{Eu}}=0.97$, 基本无亏损, 辉绿玢岩 $\delta_{\text{Eu}}=0.91$ 。玄武岩、辉绿玢岩曲线右倾(辉绿玢岩曲线更陡), 辉长岩曲线相对平坦(见图 8(b))。

3.3 微量元素

据微量元素分析结果所知(见表 3), 硅铝质岩微量元素含量总体相似, 正如稀土元素出现四分组效应和现场观察其部分地段遭受强烈热液蚀变所指示的那样, 在微量元素蛛网图上(见图 9(a)), 其曲线分布相对集中, 明显富集高场强元素 Th、U、Ta、Nd、Hf 等及大离子亲石元素 Rb, 相对亏损大离子亲石元素 K、Sr、Eu 等及高场强元素 Ti, 不相容元素 Rb、Th 含量较高, 具强过铝质花岗岩特征; 强烈亏损 Ba、K 及 Ti 元素; $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值为 8.36~21.81(低于 33~40), $w(\text{K})/w(\text{Rb})$ 值为 12.31~43.62; 高 $w(\text{Rb})/w(\text{Ba})$ 值和 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 值同样显示岩浆演化过程中熔体与富含挥发分流体相互作用明显。

镁铁质岩微量元素含量整体偏高, 明显富集高场强元素 Th、Nd、Hf、Ti 等及大离子亲石元素 K、Eu, 相对亏损高场强元素 U、Nb、P、Zr 等。玄武岩异常值 $\text{Nb}^*=0.56$ 、 $\text{P}^*=0.73$ 、 $\text{Zr}^*=1.06$, 辉绿玢岩异常值 $\text{Nb}^*=0.30$ 、 $\text{P}^*=0.68$ 、 $\text{Zr}^*=1.30$, 辉长岩异常值 $\text{Nb}^*=0.68$ 、 $\text{P}^*=0.41$ 、 $\text{Zr}^*=1.23$ 。从玄武岩到辉绿玢岩再到辉长岩, $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 值(1.18~1.60)、 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值(24.87~26.37)依次减小, 而 $w(\text{Th})/w(\text{Nb})$ 值(0.13~0.27)、 $w(\text{Zr})/w(\text{Nb})$ 值(10.47~13.12)依次增大。玄武岩和辉绿玢岩曲线相近(见图 9(b)), 均为右倾, 但后者更富 K 元素; 辉长岩曲线分布相对偏下, LILE、HFSE 富集程度低, 尤其低 Nb、P 元素。

表 2 硅铝质岩-镁铁质岩的稀土元素分析结果

Table 2 REE element compositions of granitic-mafic rocks

编号	$w_B/10^{-6}$															ΣREE	$w(\text{LR})/$	$w(\text{La})_N/$	$w(\text{La})_N/$	δ_{Eu}	δ_{Ce}	$\text{TE}_{1,3}$
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y		$w(\text{HR})_N$	$w(\text{Sm})_N$	$w(\text{Yb})_N$			
K71	10.65	17.09	2.81	8.70	2.81	0.11	3.21	0.88	0.50	0.92	2.69	0.50	3.51	0.47	30.18	54.85	3.32	2.39	2.18	0.12	0.75	0.65
K72	11.11	18.18	2.97	9.26	3.17	0.11	3.17	0.90	1.05	0.89	2.47	0.46	3.42	0.46	28.74	57.63	3.49	2.21	2.33	0.11	0.76	0.80
K76	3.12	4.97	0.81	2.50	1.06	0.06	1.04	0.27	3.81	0.21	0.63	0.12	1.04	0.13	7.77	19.77	1.73	1.85	2.16	0.17	0.75	1.54
K31	4.43	7.54	1.24	3.57	1.72	0.05	1.77	0.49	0.68	0.42	1.05	0.23	1.77	0.22	11.24	25.16	2.80	1.62	1.79	0.09	0.78	0.89
K32	4.36	7.06	1.20	3.54	1.72	0.04	1.75	0.51	0.92	0.44	1.24	0.25	1.95	0.24	13.91	25.22	2.46	1.60	1.61	0.07	0.74	0.94
K53	5.76	11.73	1.69	5.29	2.15	0.07	2.10	0.56	0.88	0.47	1.41	0.26	2.15	0.27	15.64	34.77	3.29	1.69	1.92	0.09	0.91	0.93
K77	3.15	4.64	0.71	2.26	0.78	0.03	0.81	0.23	1.07	0.20	0.54	0.11	0.98	0.15	6.40	15.66	2.83	2.54	2.30	0.11	0.73	1.13
K78	2.95	4.74	0.77	2.30	1.00	0.03	0.86	0.26	0.94	0.19	0.57	0.12	1.13	0.15	7.49	16.01	2.80	1.86	1.88	0.10	0.75	1.17
Y23	4.14	7.05	1.19	3.49	1.36	0.06	1.30	0.35	1.76	0.25	0.76	0.16	1.33	0.18	8.67	23.37	2.83	1.92	2.23	0.13	0.77	1.26
Y27	11.17	17.58	2.76	8.34	2.73	0.10	3.11	0.89	0.40	0.90	2.65	0.48	3.33	0.45	31.12	54.89	3.50	2.58	2.40	0.10	0.75	0.63
K84	10.95	17.22	2.74	7.45	2.18	0.05	2.00	0.59	0.41	0.57	1.70	0.34	2.72	0.36	18.78	49.26	4.67	3.16	2.89	0.07	0.75	0.73
K85	14.65	25.44	4.05	10.84	2.42	0.04	2.03	0.56	1.05	0.59	1.69	0.34	2.84	0.41	19.89	66.97	6.03	3.81	3.70	0.05	0.80	0.93
K60	2.99	5.64	1.02	3.10	1.67	0.06	1.66	0.49	1.42	0.37	1.01	0.22	1.94	0.25	13.42	21.84	1.97	1.13	1.11	0.12	0.79	1.13
K61	8.63	11.51	2.47	7.04	2.41	0.08	2.00	0.53	0.97	0.43	1.23	0.24	2.10	0.29	14.64	39.94	4.12	2.25	2.94	0.11	0.60	0.90
Y02	23.23	42.58	5.51	23.16	5.60	1.87	5.85	0.87	5.16	1.03	2.89	0.39	2.60	0.39	25.58	121.14	5.31	2.61	6.03	0.99	0.86	
Y06	20.28	40.40	5.20	22.65	5.19	1.80	5.78	0.86	4.96	0.98	2.98	0.39	2.45	0.40	24.66	114.31	5.08	2.46	5.60	1.00	0.91	
Y09	16.17	33.70	4.26	18.19	4.31	1.35	4.69	0.70	4.07	0.85	2.47	0.34	2.20	0.34	20.99	93.62	4.98	2.37	4.98	0.91	0.94	
Y19	6.78	14.53	1.98	9.67	2.95	1.09	3.95	0.64	4.07	0.82	2.44	0.31	2.05	0.30	20.24	51.57	2.53	1.45	2.24	0.97	0.92	

稀土元素测试单位：长沙核工业二三〇研究所分析测试中心；检测方法：GB/T14506.30-2010(硅铝质岩)，GB/T14506.28，29，30-2010(镁铁质岩)；测试仪器：电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)。Unit of REE analysis: Test Center Analysis of 230 Nuclear Industry Research; Experimental evidence: GB/T14506.30-2010(Granitic rocks); GB/T14506.28, 29, 30-2010(Mafic rocks); Analysis instrument: Inductively coupled plasma mass spectrometry(ICP-MS).

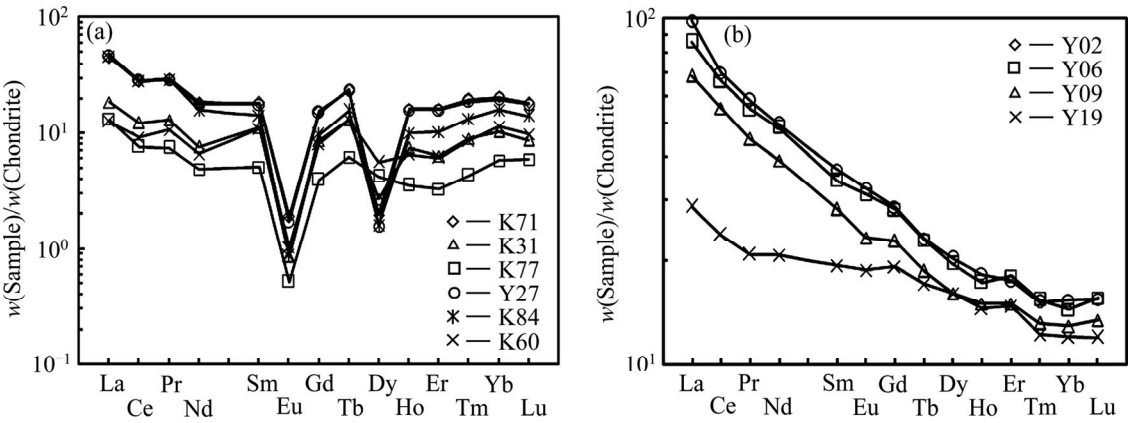


图 8 稀土元素球粒陨石标准化分布模式图^[34]
Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns^[34]: (a) Granitic rocks; (b) Mafic rocks

表 3 硅铝质岩-镁铁质岩的微量元素分析结果($w_B/10^{-6}$)

Table 3 Trace element compositions of granitic-mafic rocks ($w_B/10^{-6}$)

编号	Li	Ba	Th	U	Ta	Nb	Zr	Hf	Cd	Cr	Rb	Sr
K71	167.40	530.50	17.23	21.64	55.61	57.41	36.89	1.70	0.03	97.23	681.90	46.79
K72	217.10	639.90	18.57	21.46	61.16	63.88	39.57	1.89	0.21	95.13	831.64	58.76
K76	862.60	915.60	11.60	9.58	190.14	92.90	20.11	1.90	0.35	77.06	1941.45	44.79
K31	678.60	846.70	11.28	12.04	114.28	76.48	22.28	1.74	0.15	117.70	1358.92	46.40
K32	665.10	864.80	12.09	15.96	108.53	77.42	18.49	1.47	0.05	114.40	1248.84	34.61
K53	721.90	60.62	12.89	15.65	108.82	78.51	23.23	1.60	0.04	92.62	1255.52	23.07
K77	487.70	310.70	9.65	9.59	235.77	78.18	17.98	2.15	0.68	67.16	2261.45	20.93
K78	455.20	866.30	11.26	12.35	247.99	60.18	24.69	2.80	0.25	76.45	1994.75	36.27
Y23	682.00	594.00	13.86	10.28	119.70	87.03	16.79	1.28	0.31	68.01	1492.10	21.70
Y27	249.20	717.80	19.66	17.00	62.92	66.41	40.56	1.86	0.43	152.60	847.73	20.18
K84	333.30	385.10	20.07	14.83	74.36	75.94	38.10	1.84	0.03	80.88	959.22	11.78
K85	392.30	31.97	19.49	4.61	72.59	74.90	37.63	1.87	0.21	68.91	1038.16	13.87
K60	2066.00	608.50	13.95	12.21	118.49	95.52	18.35	1.30	0.42	137.00	1104.55	25.60
K61	3627.00	655.30	15.75	8.86	126.56	99.30	20.52	1.49	0.23	88.07	853.77	25.28
Y02	0.35	313.50	2.20	0.41	0.34	14.56	152.41	5.78	1.74	25.17		
Y06	0.40	79.85	1.88	0.35	4.47	14.01	146.59	5.89	1.84	35.26		
Y09	84.30	90.85	1.79	0.39	2.43	12.18	150.95	5.82	2.39	29.20		
Y19	2.05	108.50	1.57	0.28	0.81	5.73	75.17	4.23	3.65	168.40		

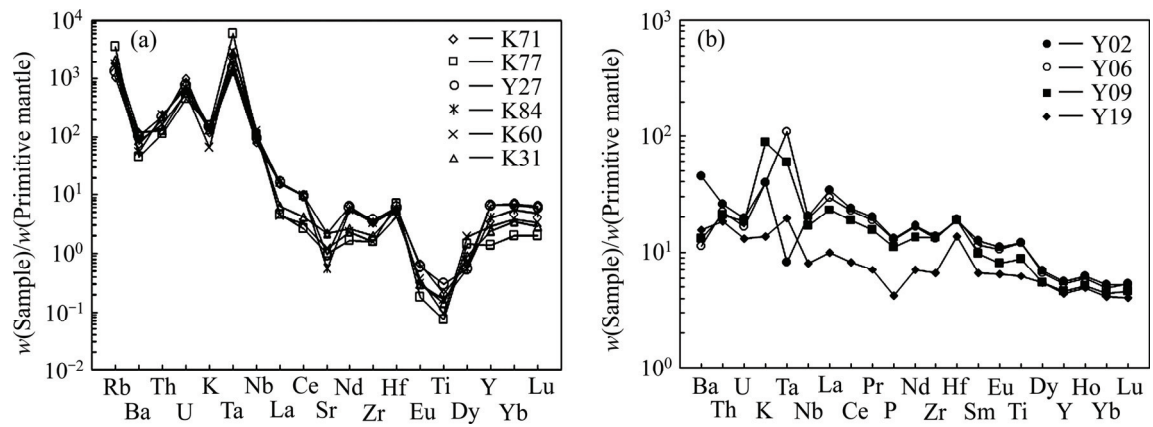


图 9 微量元素原始地幔标准化蛛网图^[34]

Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element spider grams^[34]: (a) Granitic rocks; (b) Mafic rocks

3.4 岩石成因类型

本区硅铝质岩富硅、铝、钾, 为过铝质, 钙碱性, 部分岩脉含石榴子石等副矿物, ΣREE 含量低, 稀土配分模式具四分组效应, 富集 HFSE(Th、U、Ta、Nd、Hf 等), 亏损 LILE(K、Sr、Eu 等), $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值为 4.34~23.83, 具鲜明壳源花岗岩特点, 在 $w(\text{Na}_2\text{O})$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ 图中(见图 10)为 S 型花岗岩。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 值均大于 100, $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值除个别外, 均小于 0.3, 其源区为泥质岩。据前人报道的

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果(153 ± 14) Ma^[23], 原位 Hf 同位素分析结果 $w(^{176}\text{Yb})/w(^{177}\text{Hf})=0.1680\sim0.1017$, $w(^{176}\text{Lu})/w(^{177}\text{Hf})=0.0004\sim0.0024$, $w(^{176}\text{Hf})/w(^{177}\text{Hf})=0.282279\sim0.282745$; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-12.34\sim+15.6$; $t_{\text{DM}}=1.23\sim2.90$ Ga, 再结合其岩体产出特征、岩石学、岩石地球化学信息, 可知本区硅铝质岩年龄为燕山早期第三阶段, 是中元古代陆壳重熔型(S 型)花岗斑岩、石英斑岩。本区镁铁质岩富硅, 贫碱, 为钙碱性, 过铝质, $\text{Mg}^\#$ 值为 0.42~0.54, ΣREE 偏高, 富集 HFSE(Th、Nd、

Hf、Ti 等)与 LILE(K、Eu), 异常值 $Nb^* < 1$, $P^* < 1$, $Zr^* > 1$, 属壳幔混染型玄武岩、辉绿玢岩、辉长岩。相较而言, 玄武岩、辉绿玢岩、辉长岩的 $Mg^{\#}$ 值依侵位先后顺序增大, 表明侵位最早的玄武岩原始岩浆演化程度相对最高, 而侵位最晚的辉长岩最低; REE、HFSE 及 LILE 富集程度依此次序减小, 玄武岩、辉绿玢岩稀土配分曲线右倾(辉绿玢岩更陡), 辉长岩曲线平坦; 且 $w(La)_N/w(Nb)_N$ 值、 $w(La)_N/w(Yb)_N$ 值、 $w(Zr)/w(Hf)$ 值也依此次序减小; 而 $w(Th)/w(Nb)$ 值、 $w(Zr)/w(Nb)$ 值则依此次序增大。这些都说明岩浆演化过程中混染了陆壳物质, 辉长岩、玄武岩、辉绿玢岩混染壳源程度依次增高。据 $w(Y)-w(Zr)$ 图解(见图 11)及前人测定的同位素数据: 玄武岩中黑云母 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 坪年龄为 (178.03 ± 3.57) Ma, 全岩 Nd-Sr 等时线年龄为 (181.53 ± 3.6) Ma, $w(^{87}Sr)/w(^{86}Sr) = 0.704221 \sim 0.708673$, $\varepsilon_{Sr}(t) = -1.00 \sim +62.23$, $w(^{143}Nd)/w(^{144}Nd) = 0.512733 \sim 0.512955$, $\varepsilon_{Nd}(t) = +0.31 \sim +6.78$, 且 $f_{Sm/Nd}$ 值 $(-0.166 \sim -0.381)$ 与 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 呈正值变化不“匹配”, 源区地幔具有富集作用^[22]; 辉绿玢岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (153.7 ± 4.2) Ma, $w(^{176}Hf)/w(^{177}Hf) = 0.280829 \sim 0.282486$, $\varepsilon_{Hf}(t) = -12.34 \sim +8.38$; $t_{DM} = 1.23 \sim 2.90$ Ga^[23], 再结合该区各类岩浆岩的产出就位特征、相互穿切关系及其与菱铁矿化、锑铅锌矿化先后关系, 可知本区玄武岩年龄为燕山早期第一阶段, 辉绿玢岩年龄为燕山早期第二阶段晚期, 辉长岩明显晚于花岗斑岩, 可能形成于燕山晚期。由此可见: 随着镁铁质岩依次产出, 先喷出幔源区深度较大、壳源物质混染程度较低的玄武岩, 然后侵入幔源区深度较浅、壳源物质混染程度相对较高的辉绿玢岩, 最后侵入幔源区为更深部的、壳源物质混入程度最低的辉长岩。

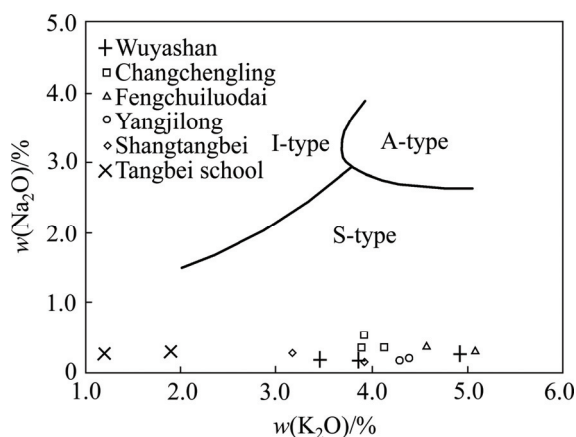


图 10 花岗斑岩 $w(Na_2O)-w(K_2O)$ 图解^[35]

Fig. 10 $w(Na_2O)-w(K_2O)$ diagram of granitic rocks^[35]

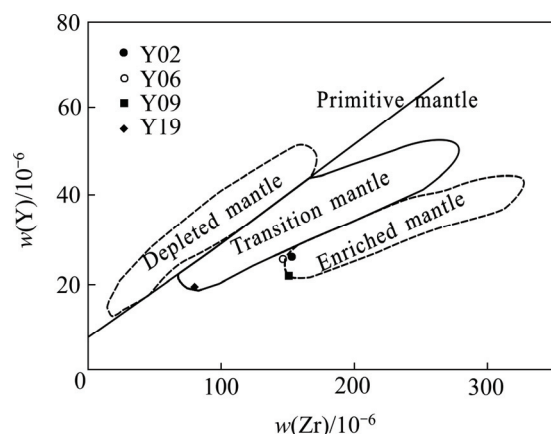


图 11 镁铁质岩 $w(Y)-w(Zr)$ 图^[36]

Fig. 11 $w(Y)-w(Zr)$ diagram of mafic rocks^[36]

4 构造环境探讨

尽管近年来地学界对南岭中生代大规模岩浆作用的成因存在不同的认识^[37-40], 但大多数学者都使用岩浆岩的岩石地学化学特征来反演其成岩过程与构造背景, 推测岩浆岩成因。

本区两类岩浆岩都是燕山期岩浆活动的产物, 尽管花岗质岩浆熔体与流体相互作用, 但 Rb、Yb、Ta、Nb、Y、Hf、Zr、Th 等元素随流体-熔体相互作用而差异变化并不强烈, 且处在相同地壳运动期的玄武岩、辉长岩均无明显的流体-熔体相互作用, 也没有明显蚀变, 它们的构造判别图解应该是可靠的, 故产于玄武岩之后, 辉长岩之前的花岗质岩及辉绿玢岩的构造判别图解也具有参考价值。

综上所述, 基于板块理论建立的构造环境判别图解, 区内硅铝质岩在微量元素构造环境判别图解(见图 12)中均投点于板内花岗岩; 在主元素构造环境判别图解(见图 13)中投点于大陆碰撞花岗岩类, 其 $w(Al_2O_3)/[w(CaO)+w(Na_2O)+w(K_2O)]$ 值均大于 1.15。区内镁铁质岩在 $w(Ti)/100-w(Zr)-3w(Y)$ 图解(见图 14(a))中, 投影点处在或接近板内构造环境范围; 在 $w(TFeO)-w(MgO)-w(Al_2O_3)$ 图解(见图 14(b))中, 除辉长岩外, 均投入造山带; 而在 $w(Ta)/w(Hf)-w(Th)/w(Hf)$ 构造判别图解(见图 14(c))中, 玄武岩投入岛弧玄武岩区和地幔热柱玄武岩区, 辉绿玢岩投入地幔热柱玄武岩区, 辉长岩投入陆内裂谷玄武岩区。

从上述图解可知, 显然即使被认为构造环境指示性较为可靠的镁铁质岩, 尤其是区内玄武岩和辉长岩,

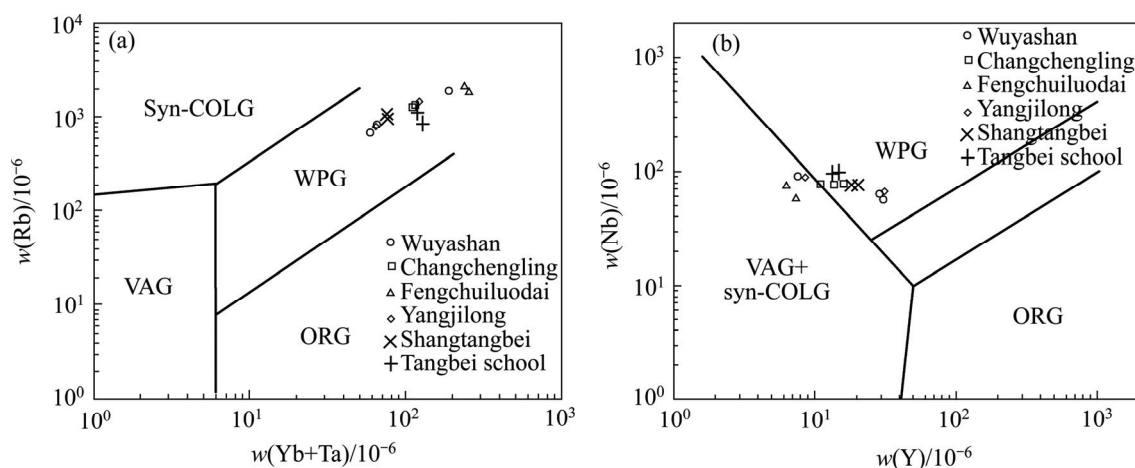
图12 花岗斑岩微量元素构造环境判别图^[41]

Fig.12 Trace element discrimination diagrams of granitic rocks^[41]: (a) $w(\text{Rb})-w(\text{Yb}+\text{Ta})$; (b) $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$. (VAG—Volcanic arc granite; WPG—Within plate granite; Syn-COLG—Syncollision granite; ORG—Ocean ridge granite)

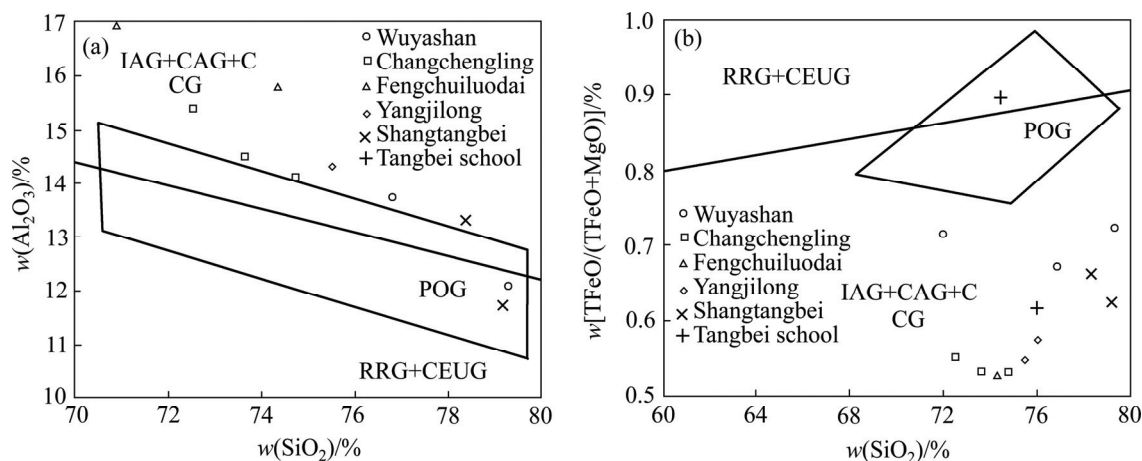
图13 花岗斑岩构造环境判别图^[42]

Fig. 13 Discrimination diagrams of granitic rocks^[42]: (a) $w(\text{Al}_2\text{O}_3)-w(\text{SiO}_2)$; (b) $w(\text{TFeO})/w(\text{TFeO}+\text{MgO})-w(\text{SiO}_2)$. (IAG—Island arc granitoid; CAG—Continental arc granite; CCG—Continental collision granitoid; POG—Post-orogenic granite; RRG—Rift-related granitoids; CEUG—Continental epeirogenic uplift related granitoids)

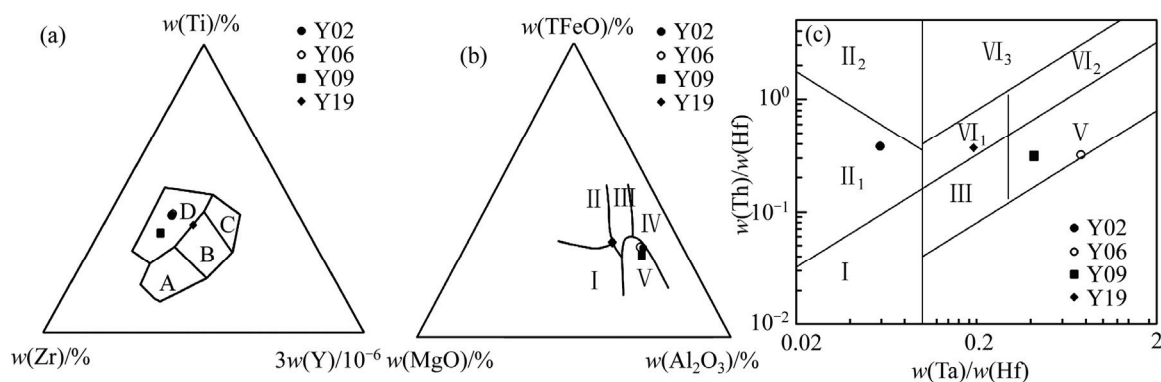
图14 镁铁质岩 $w(\text{Ti})/100-w(\text{Zr})-3w(\text{Y})$ ^[43]、 $w(\text{TFeO})-w(\text{MgO})-w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ^[44]、 $w(\text{Ta})/w(\text{Hf})-w(\text{Th})/w(\text{Hf})$ ^[45]构造判别图

Fig. 14 Discrimination diagrams of mafic rocks: (a) $w(\text{Ti})/100-w(\text{Zr})-3w(\text{Y})$ ^[43], (b) $w(\text{TFeO})-w(\text{MgO})-w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ^[44], (c) $w(\text{Ta})/w(\text{Hf})-w(\text{Th})/w(\text{Hf})$ ^[45]. (a) A, B—Calc-alkaline basalt, B—Ocean floor basalt, C—Low-K tholeiite, D—Within plate basalt; (b) I—Mid-ocean ridges or ocean floor, II—Oceanic island, III—Continent, IV—Dilated central island, V—Orogenic belt; (c) I—N-MORB Margin of divergent oceanic plate, II—Margin of convergent (II₁—Island arc of continental margin, II₂—Volcanic arc if continental margin), III—Oceanic island and seamount basalt of oceanic intra plate, T-MORB, E-MORB, IV—Continental intraplate (IV₁—Continental rift, IV₂—Alkaline basalt zone, IV₃—Tensional zone), V—Mantle plume

其不同图解所指示的构造环境也是相互冲突的,但无论硅铝质或镁铁质岩石,板内环境是其共同的构造环境指向,虽然该指向与南岭地区中生代地壳演化事实即处在陆内演化构造环境相吻合,但所谓陆内造山带环境或大陆碰撞环境是板块理论所无法解释的,也是其所无法回避的矛盾。其实,基于壳体构造理论^[39,46],上述两类岩浆岩都是中生代陆内(地台)活化产物,本区在经过地壳活动相对宁静的海西期后,印支期地幔蠕动和热能聚集强度开始增强,岩石圈开始随之膨胀,但壳幔相互作用依然较弱,构造、岩浆活动强度依然较低;至燕山早期 150 Ma 左右的晚阶段,地幔蠕动和热能聚集强度达到顶峰,岩石圈高度膨胀,壳幔相互作用最为活跃,构造-岩浆活动最为强烈,及至燕山晚期,因前期强烈的构造、岩浆活动,地幔蠕动和热能聚集强度显著降低,岩石圈转向全面拉张,壳幔相互作用强度显著降低,岩浆活动强度显著降低。与上述构造环境和动力学背景相匹配,区内燕山早期第一阶段出现源区深度较大、壳源物质混染程度较低的小规模玄武质岩浆活动,燕山早期第二阶段晚期发育源区深度较浅、壳源物质更多的辉绿玢岩,随后到燕山早期第三阶段,与南岭地区大量发育陆壳重熔型花岗岩相吻合,长城岭地区大量出露花岗岩斑岩、石英斑岩;燕山晚期仅出现极少量源区深度更大、壳源物质混入程度最低的辉长岩。由上述源岩性质及源区深度可知,本区岩浆岩的物质成分、岩石地球化学特征、元素的富集或亏损等都与陆内活化阶段地幔蠕动、热能聚散的变化规律相匹配,佐证了本区在燕山期处于陆内活化阶段。因此,随着陆内活化过程的发展,软化熔融界面位置发生有极强规律性的变化:燕山早期第一阶段深度较大,至早期第三阶段深度显著较浅,燕山晚期比燕山早期第一阶段深度更大。根据研究区岩浆岩的上述研究成果,结合已有的南岭地区岩浆岩成因、成岩构造环境及地球动力学研究资料,本文作者认为南岭地区中生代岩石圈减薄是不争的事实,但其减薄机制不是所谓“岩石圈拆沉作用”,而是陆内活化高峰期深部热异常剧烈,岩石圈高度膨胀,深部软化熔融界面上移,岩石圈底部被大规模熔融加入软流圈,导致岩石圈减薄。这种机制也是所谓“中生代华南地幔柱”和南岭地区中生代富集地幔形成的真正原因。

5 结论

1) 长城岭地区岩浆活动尽管都发育于燕山期,但

根据相互切割关系、与区内菱铁矿化和铅锌铋矿化的时空关系,各类脉岩的侵位先后次序是玄武岩、辉绿玢岩、花岗(石英)斑岩、辉长岩。

2) 硅铝质岩富硅、铝、钾,为强过铝质钙碱性,低 ΣREE ,稀土配分模式具四分组效应,富集 HFSE(Th、U、Ta、Nd、Hf 等),亏损 LILE(K、Sr、Eu 等),属 S 型花岗斑岩、石英斑岩。

3) 镁铁质岩包括玄武岩、辉绿玢岩、辉长岩,为过铝质,钙碱性, ΣREE 偏高,相较而言,其 $\text{Mg}^\#$ 值、 $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 值和 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值依次增大,REE、HFSE 及 LILE 富集程度依次减小,玄武岩、辉绿玢岩稀土配分曲线右倾(辉绿玢岩更陡),辉长岩曲线平坦,属壳幔混染型,且辉长岩、玄武岩、辉绿玢岩混染壳源程度依次增高。

4) 本区岩浆岩都是中生代陆内活化产物,随着燕山期地幔蠕动、热能聚散的规律性变化,岩浆源区类型、深度及动力学背景发生改变,燕山早期岩石圈膨胀,第一阶段出现源区深度较大的壳幔混染型玄武岩,第二阶段晚期发育源区深度较浅、壳源物质更多的壳幔混染型辉绿玢岩,随后出现源区深度最浅的陆壳重熔型花岗岩斑岩、石英斑岩,及至燕山晚期,岩石圈转向全面拉张,仅出现极少量源区深度最大、壳源物质混入程度最低的辉长岩。

5) 本区燕山期岩浆岩的源岩性质及源区深度的变化规律佐证了南岭地区燕山期处于陆内活化环境,其岩浆源区性质、类型、深度及岩浆活动产物均受制于地幔蠕动与热能聚集强度变化。因此,软化熔融界面位置发生从燕山早期第一阶段到第三阶段深度逐渐变浅,再到燕山晚期深度又明显增大的规律性变化。

6) 本区岩石圈减薄机制不是所谓“岩石圈拆沉作用”,而是陆内活化高峰期深部热异常剧烈,岩石圈高度膨胀,软化熔融界面上移,岩石圈底部被大规模熔融至软流圈,岩石圈减薄。这种机制也是所谓“中生代华南地幔柱”和南岭地区中生代富集地幔形成的真正原因。

REFERENCES

- [1] DONG Shu-wen, ZHANG Yue-qiao, LONG Chang-xing, YANG Zhen-yu, JI Qiang, WANG Tao, HU Jian-ming, CHEN Xuan-hua. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the “Yanshan Movement”[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2): 334–347.
- [2] 邢光福, 卢清地, 陈 荣, 张正义, 聂童春, 李龙明, 黄家龙, 林 敏. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究—兼与华北燕山地区对比[J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 451–463.

- XING Guang-fu, LU Qing-di, CHEN Rong, ZHANG Zheng-yi, NIE Tong-chun, LI Long-ming, HUANG Jia-long, LIN Min. Study on the ending time of Late Mesozoic tectonic regime transition in South China—Comparing to the Yanshan area in North China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 451–463.
- [3] 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施 炜, 苏金宝, 李 勇. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. *地球学报*, 2012, 33(3): 257–279.
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, LI Jian-hua, CUI Jian-jun, SHI Wei, SU Jin-bao, LI Yong. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(3): 257–279.
- [4] 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 彭元桥. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. *地球科学*, 1999, 24(1): 1–12.
- YIN Hong-fu, WU Shun-bao, DU Yuan-sheng, PENG Yuan-qiao. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system[J]. *Earth Science*, 1999, 24(1): 1–12.
- [5] ZHOU Xin-min, SUN Tao, SHEN Wei-zhou, SHU Liang-shu, NIU Yao-ling. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26–33.
- [6] LI Zheng-xiang, LI Xian-hua. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179–182.
- [7] HSU K J, LI Ji-liang, CHEN Hai-hong, WANG Qing-chen, SUN Shu, SENGOR A M C. Tectonics of South China: Key to understanding west Pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 1990, 183: 9–39.
- [8] ZHOU Xin-min, LI Wu-xian. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 2000, 326: 269–287.
- [9] 柏道远, 马铁球, 王先辉, 张晓阳, 陈必河. 南岭中段中生代构造—岩浆活动与成矿作用研究进展[J]. *中国地质*, 2008, 35(3): 436–455.
- BAI Dao-yuan, MA Tie-qiu, WANG Xian-hui, ZHANG Xiao-yang, CHEN Bi-he. Progress in the study of Mesozoic tectono—magmatism and mineralization in the central segment of the Nanling Mountains[J]. *Geology in China*, 2008, 35(3): 436–455.
- [10] 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春方. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球化学背景[J]. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(4): 279–289.
- CHEN Pei-rong, HUA Ren-min, ZHANG Bang-tong, LU Jian-jun, FAN Chunfang. Early Yanshanian post-Orogenic granitoids in Nanling region: Petrological restriction and Geodynamic settings[J]. *Science in China (D Series)*, 2002, 32(4): 279–289.
- [11] ZHU Wei-guang, ZHONG Hong, LI Xian-hua, HE De-feng, SONG Xie-yan, Ren Tao, CHEN Zhong-quan, SUN Hui-si, LIAO Jin-qing. The early Jurassic mafic-ultramafic intrusion and A-type granite from northeastern Guangdong, SE China: Age, origin, and tectonic significance[J]. *Lithos*, 2010, 119: 313–329.
- [12] GILDER S A, GILL J, COE R S, ZHAO Xi-xi, LIU Zhong-wei, WANG Gen-xian, YUAN Kui-rong, LIU Wen-long, KUANG Guo-dong, WU Hao-ruo. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(7): 16137–16154.
- [13] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾晟彦. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 291–304.
- HUA Ren-min, CHEN Pei-rong, ZHANG Wen-lan, YAO Jun-ming, LIN Jin-fu, ZHANG Zhan-shi, GU Sheng-yan. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(3): 291–304.
- [14] 范蔚茗, 王岳军, 郭 锋, 彭头平. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 159–179.
- FAN Wei-ming, WANG Yue-jun, GUO Feng, PENG tou-ping. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi provinces and the lithospheric extension[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 159–179.
- [15] 周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1–691.
- ZHOU Xin-min. Petrogenesis and lithosphere dynamic evolution of Late Mesozoic batholith granite in Nanling region south China[M]. Beijing: Science Press, 2007: 1–691.
- [16] 孔 华, 费利东, 钟江临, 王 高, 刘士杰, 周伟平, 全铁军. 湖南新生矿区花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(1): 229–238.
- KONG Hua, FEI Li-dong, ZHONG Jiang-lin, WANG Gao, LIU Shi-jie, ZHOU Wei-ping, QUAN Tie-jun. Zircon U-Pb ages and Hf isotope and their geological significance of granites in Xinsheng deposit, Hunan province, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(1): 229–238.
- [17] 贾大成, 胡瑞忠, 卢 焱. 湘东南玄武质岩石地球化学特征及构造环境[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2002, 32(3): 0209–0214.
- JIA Da-cheng, HU Rui-zhong, LU Yan. Lithogeochemistic characteristics and tectonic setting of basaltic rocks in southeastern Hunan province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2002, 32(3): 0209–0214.
- [18] 童航寿. 华南地幔柱构造与成矿[J]. *铀矿地质*, 2010, 26(2): 65–73.
- TONG Hang-shou. Mantle plume structure and metallogenesis in South China[J]. *Uranium Geology*, 2010, 26(2): 65–73.
- [19] 全铁军, 奚小双, 孔 华, 吴瑛虹, 陈泽锋. 湘南燕山期区域三叉断裂构造型式及成矿作用[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(9): 2613–2620.

- QUAN Tie-jun, XI Xiao-shuang, KONG Hua, WU Qian-hong, CHEN Ze-feng. Yanshanian triple junction tectonic pattern and metallogenesis in southern Hunan, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(9): 2613–2620.
- [20] 饶家荣, 金小燕, 曾春芳. 南岭中段北缘深部构造—岩浆(岩)控矿规律及找矿方向[J]. *地质勘查*, 2006, 3(3): 30–36.
- RAO Jia-rong, JIN Xiao-yan, ZENG Chun-fang. The ore control regularity and prospecting direction of deep structure and magma(rock) in the northern margin of the middle segment of Nanling[J]. *Geological Exploration*, 2006, 3(3): 30–36.
- [21] 谢 昕, 徐夕生, 邹海波, 蒋少涌, 张 明, 邱检生. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J₂早期玄武岩[J]. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(7): 587–605.
- XIE Xin, XU Xi-sheng, ZOU Hai-bo, JIANG Shao-yong, ZHANG Ming, QIU Jian-sheng. The prelude of late Mesozoic large-scale magmatism in Southeastern China: Basalt in early J₂[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(7): 587–605.
- [22] 赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(增刊): 7–14.
- ZHAO Zhen-hua, BAO Zhi-wei, ZHANG Bo-you. Geochemistry of Mesozoic basalts in Southern Hunan province[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(Suppl.): 7–14.
- [23] 刘 勇, 李廷栋, 肖庆辉, 耿树方, 王 涛, 陈必河. 湘南宜章地区辉绿岩、花岗斑岩、安山岩的形成时代和成因[J]. *地质通报*, 2012, 31(9): 1363–1378.
- LIU Yong, LI Ting-dong, XIAO Qin-hui, GENG Shu-fang, WANG Tao, CHEN Bi-he. Formation epoch and origin of the Yizhang andesite, diabase and granite-porphyry in Yizhang county, southern Hunan province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(9): 1363–1378.
- [24] 黄革非, 龚述清, 蒋希伟, 谭双喜, 黎传标, 刘东红. 湘南骑田岭锡矿成矿规律探讨[J]. *地质通报*, 2005, 22(6): 445–451.
- HUANG Ge-fei, GONG Shu-qing, JIANG Xi-wei, TAN Shuang-xi, LI Chuan-biao, LIU Dong-hong. Exploration on the ore-forming regularities of tin deposits in Qitianling area, southern Hunan[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 22(6): 445–451.
- [25] 柏道远, 黄建中, 李金冬, 王先辉, 马铁球, 张晓阳, 陈必河. 华南中生代构造演化过程的多地质要素约束—湘东南及湘粤赣边区中生代地质研究的启示[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 1–13.
- BAI Dao-yuan, HUANG Jian-zhong, LI Jin-dong, WANG Xian-hui, MA Tie-qiu, ZHANG Xiao-yang, CHEN Bi-he. Multiple geological elements constraint on the Mesozoic tectonic evolution of South China: apocalypse of the Mesozoic geological evolution in southeastern Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(1): 1–13.
- [26] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 619–641.
- Hunan geological and mineral resource bureau. Regional geology of Hunan province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 619–641.
- [27] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 418–431.
- SHU Liang-shu. Predevonian tectonic evolution of South China: from Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(4): 418–431.
- [28] 张术根, 钱丽华, 刘贤红. 宜章县长城岭浅成花岗质岩浆隐爆机制及找矿意义探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(4): 1–13.
- ZHANG Shu-gen, QIAN Li-hua, LIU Xian-hong. The cryptoexplosive mechanism of the hypabyssal granitic magma in the Changchengling area, Yizhang County, Hunan Province, and its implications for mineral prospecting[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2014, 33(4): 1–13.
- [29] STRECKEISEN A, LE MAITRE R W. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks[J]. *Neues Jahrb Mineral Abh*, 1979, 136: 169–206.
- [30] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247–263.
- [31] MARJORIE W. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of petrology*, 1986, 27(3): 745–750.
- [32] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of eocenecalc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- [33] MIDDLEMOST E A K. Magmas and magmatic rocks: an introduction to igneous petrology[M]. London: Longman, 1985, 1–266.
- [34] SUN S S, McDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society*, 1989, 42(1): 313–345.
- [35] COLLINS W J, BEAM S D, WHITE A J R, CHAPPELL B W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1982, 80(2): 189–200.
- [36] ROEX A P L, DICK H J B, ERLANK A J, REID A M, FREY F A, HART S R. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the Southwest Indian Ridge between the Bouvet triple Junction and 11 Degrees East[J]. *Journal of Petrology*, 1983, 24(3): 267–318.
- [37] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(9): 981–991.
- LI Xian-hua, LI Wu-xian, LI Zheng-xiang. Further discussions

- on the genetic type and tectonic significance of the early Yanshan granitoids in Nanling area[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9): 981–991.
- [38] 张术根, 姚翠霞, 杨汉壮, 原桂强. 粤北凡口式铅锌硫化物矿床关键成矿控制系统及成矿预测研究[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013: 63–67.
- ZHANG Shu-gen, YAO Cui-xia, YANG Han-zhuang, YUAN Gui-qiang. Key metallogenic control system and metallogenic prediction research on Fankou type lead and zinc sulfide ore deposits in northern Guangdong Province[M]. Changsha: Central South University Press, 2013: 63–67.
- [39] 张术根, 袁莹, 姚翠霞. 南岭中段诸广山复式花岗岩岩石学及控矿作用研究[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(6): 1585–1598.
- ZHANG Shu-gen, YUAN Ying, YAO Cui-xia. Study on petrology and ore-control of Zhuguangshan composite granitic pluton in the middle section of Nanling region[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(6): 1585–1598.
- [40] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2329–2338.
- MAO Jin-wen, XIE Gui-chun, GUO Chun-lin, CHEN Yu-chuan. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: metallogenic ages and corresponding geodynamic process[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2329–2338.
- [41] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956–983.
- [42] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoid[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- [43] PEARCE J A, CANN J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analyses[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19: 290–300.
- [44] PEARCE T H, GORMAN B E, BIRKETT T C. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1977, 36(77): 121–132.
- [45] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 413–421.
- WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, XIU Shu-zhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 413–421.
- [46] 陈国达. 壳体构造——一种综合大地构造学新概念[J]. 大地构造与成矿学, 1994, 18(4): 283–300.
- CHEN Guo-da. Crustobody geotectonics—An integrative and new type tectonics[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1994, 18(4): 283–300.

(编辑 王超)