

骑田岭花岗岩体的地球化学特征及其对成矿的制约

邓希光^{1,2}, 李献华², 刘义茂², 黄革非³, 侯茂松³

(1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;
3. 湘南地质勘察院, 湖南 郴州 423000)

摘要: 骑田岭花岗岩体位于湖南省南部, 在其东北部接触带有骑田岭大型夕卡岩型锡矿, 南部接触带有新探明的芙蓉超大型锡多金属矿床。本文采用 ICP_AES 和 ICP_MS 分析了骑田岭花岗岩全岩的主量、微量和稀土元素含量。其主量元素特征表明, 骑田岭花岗岩具有富硅富碱富铝、贫镁铁的特点, 经历了较大程度的结晶分异。稀土元素总量较高, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损。岩石富集大离子亲石元素, 特别是富集 Rb、Th, 推测源岩可能来源于陆壳物质。与相邻的千里山花岗岩比较, 虽然没有显著的四分组效应, 但它们的地球化学性质具有很大的相似性。另对岩体的成因、形成时代和成矿作用进行了讨论, 认为骑田岭花岗岩超大型锡多金属矿床的形成是侏罗纪岩石圈在伸展环境下引起地幔物质上涌使地壳物质发生重熔, 同时在热液作用参与下金属元素重新富集的结果。

关键词: 地球化学; 地壳重熔; 超大型锡多金属矿床; 骑田岭岩体

中图分类号: P588.12⁺1; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)02-0093-10

Geochemical characteristics of Qitianling granites and their implications for mineralization

DENG Xi-guang^{1,2}, LI Xian-hua², LIU Yi-mao², HUANG Ge-fei³ and HOU Mao-song³

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Xiangnan Institute of Mineral Resources and Survey, Hunan Institute of Geological Survey, Chenzhou 423000, China)

Abstract: Qitianling granites are located in southern Hunan. Recent geological survey shows that there exists a superlarge tin polymetallic deposit there. The contents of major, minor, and rare earth elements of Qitianling granites were analyzed by ICP_AES and ICP_MS. The contents of major elements indicate that these granites are of metaluminous type characterized by rich Si, Al and alkali and poor Mg and Fe, suggesting that they might have experienced remarkable crystal differentiation. The contents of rare earth elements (REE) are rather high, being $199.28 \times 10^{-6} \sim 448.34 \times 10^{-6}$ (307.03×10^{-6} on average) and characterized by rich light REE and poor heavy REE. In addition, these granites are obviously rich in large lithophile elements, especially rich in Rb and Th, but poor in Ba, Nb, Ta, Sr, P, Eu and Ti, implying that the source of the granites might have derived from crust rocks. Based on a comparison between Qitianling granites and Qianlishan granites, this paper points out that granites in these two places have similar geochemical features. Furthermore, the genesis, age and mineralization of Qitianling granites are discussed. The formation of superlarge Sn polymetallic deposits might have caused by the ascending of the mantle which resulted in the remelting of crustal materials together with hydro-

收稿日期: 2004-06-07; 修订日期: 2004-11-01

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2_102); 国家自然科学基金资助项目(40202023); 广州海洋地质调查局局控项目

作者简介: 邓希光(1969-), 男, 汉族, 博士, 高级工程师, 从事地球化学和构造地质研究, 电话: 020-82251637, E-mail: dengxg68@163.com。

thermal activity under the Jurassic extensional setting, which led to the enrichment of metal elements.

Key words: geochemistry; remelting of the crust; superlarge Sn-polymetallic deposit; Qitianling granites

湘南省是我国重要的钨多金属矿产基地之一,其中有柿竹园、瑶岗仙、红旗岭、新田岭、黄沙坪和界牌等大型、超大型矿床,引起国内外研究者的兴趣。近年来对湘南骑田岭岩体进行了地质和锡矿综合调查,在南部接触带新发现一个超大型锡多金属矿床(陈民苏和刘星辉,2000;许以明等,2000;黄革非等,2001;罗小亚等,2001;魏绍六等,2002)。

骑田岭岩体位于湖南省郴州市南西约40 km,面积约521 km²(图1),前人已对该岩体进行了比较详细的地质调查(刘明,1991;黄革非,1992)及1:5万的地质填图和部分地球化学工作(范蔚茗,1987),认为该岩体是一个复式岩体,形成于印支-燕山期,主要形成于燕山早期,并划分为两个超单元(菜岭超单元和芙蓉超单元)和10个单元(刘明,1991;黄革非,1992)。对于其成因,早期的工作认为骑田岭花岗岩体是地壳来源的(王联魁等,1982;湖南省地质矿产局,1988),但后来工作表明可能有幔源物质参与(刘明,1991;朱金初等,2003)。近年来对该岩体进行了矿产普查,在南部接触带发现了超大型锡多金属矿床,因此有必要对骑田岭岩体形成的大地构造背景、时代和成因等进行重新研究。刘义茂等(2002)、朱金初等(2003)、付建明等(2004)和毛景文等(2004)对骑田岭岩体进行了测年和矿石定年,认为骑田岭岩体为燕山期岩体,而不是印支-燕山期岩体。本文旨在通过对骑田岭岩体的主量、微量和稀土元素的研究,探讨其成因,并与千里山岩体进行对比,以进一步阐明其对成矿的制约。

1 地质背景

骑田岭岩体位于南岭纬向构造带中段北缘(湖南南部),地处邵阳-郴州北西向断裂带和茶陵-郴州断裂构造带交会部位,断裂构造十分发育,构造线总体呈北东向展布。在骑田岭岩体周围出露的地层有早石炭世至早二叠世滨海沼泽相粉砂岩建造、海相碳酸盐岩,早二叠世至早三叠世闭塞台地相硅质岩建造及滨海相砂页岩建造,早白垩世山麓-湖泊相碎屑、泥质建造及第四纪洪积、残坡积建造等(图1)。

骑田岭岩体为一复式岩体,具有多期活动的特点,根据1:5万区调资料,划分为两个超单元10个单元,早期为菜岭超单元,晚期为芙蓉超单元。岩性

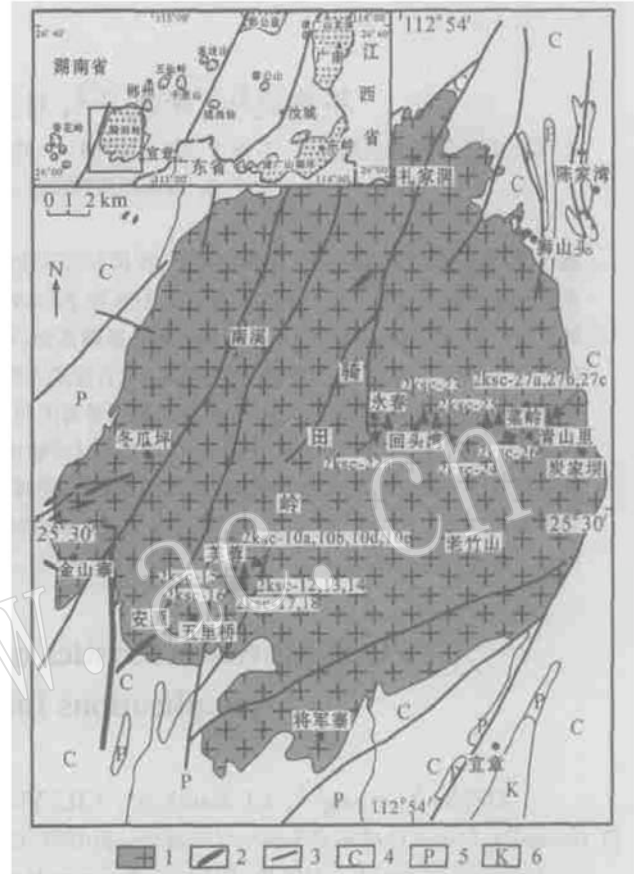


图1 骑田岭岩体地质图[据刘义茂等(2002)修改]

Fig. 1 Geological map of Qitianling granites [after Liu Yimao et al. (2002)]

- 1—骑田岭花岗岩; 2—花岗斑岩脉; 3—断层;
4—石炭系; 5—二叠系; 6—白垩系
1—Qitianling granites; 2—granite porphyry; 3—fault;
4—Carboniferous; 5—Permian; 6—Cretaceous

主要有(细)中粒斑状角闪石黑云母钾(二)长花岗岩(角闪石含量1%~8%)和(中)细粒斑状黑云母钾(二)长花岗岩,同时还有花岗斑岩、石英斑岩和细粒花岗岩脉侵入到岩体接触带和岩体内部。

2 分析结果

本文分析样品包括骑田岭岩体菜岭超单元最底部枫树下单元到芙蓉超单元的将军寨单元的岩体,所有样品均新鲜无蚀变,其中样品2ksc_11~2ksc_18为骑田岭芙蓉锡多金属矿床钻孔2k011、2k082、2k171、2k091岩心样。样品经破碎、多次去离子水

超声波洗涤、烘干、磨碎 (> 200 目) 制成。所有样品分析前均经过烘干处理。

本文样品主量元素是在中国科学院广州地球化学研究所用 ICP_AES 分析, 除 SiO₂ 采用碱溶法测定和灼失量采用重量法分析外, 其他氧化物采用酸熔法测定, 分析精度优于 2% ~ 5% (李献华等, 2002)。

微量元素在中国科学院广州地球化学研究所用 PE Elan 6000 型等离子体质谱测定(ICP_MS), 分析精度优于 1% ~ 3% (刘颖等, 1996)。化学处理均在中国科学院广州地球化学研究所超净实验室完成。其主量元素、微量元素及稀土元素分析数据见表 1。

表 1 骑田岭岩体花岗岩的主量元素 (w_B/%)、微量元素 (w_B/10⁻⁶) 及稀土元素 (w_B/10⁻⁶) 分析数据

Table 1 Contents of major (w_B/%), trace and rare earth (w_B/10⁻⁶) elements in Qitianling granites

样品号	2ksc-10a	2ksc-10b	2ksc-10d	2ksc-10e	2ksc-12	2ksc-13	2ksc-14	2ksc-15	2ksc-16	2ksc-17	2ksc-18	2ksc-22a	2ksc-23	2ksc-24	2ksc-25	2ksc-26	2ksc-27a	2ksc-27b	2ksc-27c
SiO ₂	67.03	67.67	69.59	67.97	66.48	64.84	74.57	69.08	69.19	69.59	67.63	70.55	75.32	76.59	75.44	72.41	66.14	65.95	67.25
TiO ₂	0.58	0.60	0.48	0.78	0.72	1.12	0.24	0.58	0.64	0.66	0.58	0.45	0.10	0.13	0.21	0.45	0.69	0.94	0.81
Al ₂ O ₃	14.27	14.51	12.96	14.19	14.33	13.36	12.00	13.57	13.85	13.15	13.47	13.88	12.50	11.78	12.33	13.36	14.81	13.77	14.03
Fe ₂ O ₃ T	4.73	4.34	3.54	5.12	4.95	7.08	2.06	4.23	4.32	4.56	4.41	3.39	1.55	1.40	1.92	3.39	4.39	6.03	5.06
MgO	0.72	0.76	0.58	0.90	0.85	1.34	0.25	0.72	0.75	0.79	0.56	0.52	0.05	0.09	0.18	0.43	0.86	1.21	0.95
MnO	0.06	0.07	0.06	0.08	0.07	0.11	0.03	0.05	0.07	0.08	0.07	0.05	0.02	0.02	0.02	0.05	0.07	0.09	0.08
CaO	1.85	1.88	1.60	2.84	2.50	3.15	1.31	2.46	2.35	2.75	2.26	2.02	0.67	0.66	1.33	1.83	2.34	2.81	2.81
Na ₂ O	3.14	3.00	2.77	3.30	3.42	3.00	2.84	3.31	3.12	3.21	2.99	3.15	3.17	2.82	3.06	3.22	3.21	3.07	2.99
K ₂ O	5.35	6.18	5.63	4.28	4.77	4.48	5.37	4.98	5.52	4.43	5.56	5.08	5.74	5.70	4.64	4.99	5.83	4.84	4.17
P ₂ O ₅	0.19	0.23	0.16	0.26	0.24	0.36	0.09	0.21	0.21	0.22	0.21	0.12	0.00	0.01	0.04	0.11	0.21	0.28	0.26
LOI	1.67	1.18	1.69	1.13	1.02	0.80	0.25	1.19	0.74	1.02	2.96	0.84	0.53	0.56	0.58	0.74	1.54	1.27	1.26
Total	99.58	100.41	99.07	100.85	99.34	99.66	99.00	100.39	100.76	100.45	100.69	100.06	99.67	99.76	99.75	100.99	100.09	100.27	99.68
A/CNK	1.00	0.96	0.95	0.93	0.93	0.86	0.93	0.89	0.90	0.87	0.89	0.97	0.99	0.98	0.99	0.95	0.93	0.89	0.96
Sc	5.72	6.06	4.30	8.79	6.53	19.40	1.39	5.40	5.25	5.51	6.13	4.92	0.67	0.31	1.92	3.60	7.65	12.93	7.49
V	33.52	37.40	25.96	44.57	40.46	70.34	12.48	32.21	34.81	36.05	31.39	25.15	2.24	2.77	6.96	20.51	39.84	55.96	54.69
Cr	9.95	10.96	9.33	12.46	10.57	22.83	6.70	10.03	27.73	10.44	13.92	31.11	10.49	15.68	7.78	17.44	13.40	14.89	13.29
Co	4.30	6.30	5.03	7.31	6.96	11.75	3.23	5.99	6.39	6.61	5.59	4.79	1.17	1.59	1.87	4.18	7.49	10.53	9.02
Ni	4.35	4.55	3.73	5.22	4.91	13.20	2.94	6.95	12.25	4.74	4.86	15.69	2.79	2.02	2.56	9.78	4.81	7.28	5.80
Ga	22.13	21.40	19.73	23.30	23.17	24.31	17.02	22.55	21.36	21.39	22.17	21.31	20.63	18.34	19.11	20.95	20.88	21.50	21.70
Ge	1.46	1.59	1.39	1.70	1.68	1.90	1.33	1.43	1.43	1.41	1.60	1.42	1.82	1.34	1.63	1.29	1.44	1.61	1.65
Rb	422.22	387.20	420.64	293.34	433.42	328.54	322.82	468.29	312.54	260.33	262.30	383.87	654.46	493.07	400.71	399.96	274.77	260.25	238.53
Sr	223.28	230.33	176.97	176.40	183.29	168.84	111.83	159.16	176.32	162.35	220.84	144.60	21.94	58.73	85.03	111.46	227.55	213.96	222.58
Y	41.40	41.99	31.62	47.23	44.57	76.98	19.76	38.67	37.07	38.45	42.21	34.23	49.20	18.39	31.48	40.14	41.42	48.34	44.49
Zr	233.49	289.21	208.26	307.07	237.69	311.32	85.17	227.94	181.82	208.93	266.07	173.15	166.76	126.05	150.15	164.43	215.48	316.36	299.13
Nb	22.95	23.43	19.31	30.56	26.94	45.22	12.13	21.05	22.90	23.89	15.66	21.01	27.71	12.08	17.95	25.34	23.13	30.32	29.36
Cs	16.60	13.75	16.61	17.49	51.23	32.90	15.86	43.67	24.81	16.04	15.24	23.65	21.64	18.30	23.11	30.87	12.43	12.25	12.24
Ba	818.88	1078.10	652.23	447.72	509.88	476.07	228.90	469.12	711.32	416.30	905.42	518.03	19.25	243.38	131.46	262.65	1042.91	737.92	489.30
La	77.03	57.65	84.23	74.21	80.66	78.83	50.95	64.18	89.77	84.14	53.86	70.47	79.58	88.54	75.07	79.04	35.43	52.95	40.79
Ce	143.98	114.99	149.44	147.95	153.55	190.10	90.23	122.72	178.85	151.05	108.92	128.69	144.99	148.47	129.47	141.73	79.42	112.04	92.93
Pr	16.20	14.01	15.95	17.62	17.55	22.97	9.48	14.16	18.08	16.52	13.77	14.21	15.02	14.38	13.28	15.64	10.76	14.61	12.47
Nd	54.91	50.46	51.18	62.07	59.91	85.82	30.08	49.18	60.02	54.57	52.45	47.00	45.32	40.42	40.45	50.67	43.31	55.89	48.69
Sm	9.87	9.83	8.30	11.64	10.88	17.74	4.74	9.30	10.12	9.50	10.61	8.16	7.91	5.16	6.51	8.94	9.39	11.38	10.15
Eu	1.58	1.68	1.30	1.49	1.49	1.54	0.88	1.37	1.47	1.36	1.87	1.23	0.26	0.59	0.80	1.01	1.72	1.65	1.51
Gd	8.47	8.51	6.70	9.55	9.11	14.90	3.52	7.85	8.08	7.76	9.51	6.67	6.64	3.17	4.94	7.39	8.60	9.76	8.76
Tb	1.33	1.34	1.04	1.51	1.42	2.41	0.60	1.24	1.22	1.22	1.42	1.07	1.19	0.53	0.87	1.20	1.34	1.55	1.38
Dy	7.59	7.57	5.73	8.48	7.89	13.97	3.32	6.97	6.70	6.86	7.89	5.99	7.41	2.80	5.02	6.84	7.57	8.85	7.91
Hf	1.49	1.48	1.11	1.66	1.56	2.73	0.66	1.36	1.31	1.34	1.50	1.16	1.55	0.57	1.02	1.36	1.46	1.72	1.55
Er	4.27	4.29	3.25	4.83	4.55	7.88	1.95	3.91	3.73	3.92	4.12	3.45	4.97	1.71	3.17	3.99	4.09	4.92	4.45
Tm	0.66	0.67	0.52	0.75	0.70	1.17	0.35	0.62	0.57	0.61	0.61	0.56	0.87	0.31	0.56	0.64	0.63	0.74	0.67
Yb	4.19	4.19	3.18	4.72	4.47	7.23	2.19	3.80	3.52	3.76	3.62	3.51	6.00	1.97	3.64	4.04	3.79	4.54	4.19
Lu	0.62	0.63	0.48	0.70	0.67	1.05	0.34	0.57	0.52	0.56	0.53	0.52	0.92	0.31	0.57	0.60	0.56	0.67	0.62
Hf	7.59	8.88	6.93	10.03	7.70	10.06	2.91	7.38	5.72	6.68	8.28	5.78	7.79	4.26	5.46	5.48	6.57	9.48	8.76
Ta	2.64	2.49	2.27	3.42	3.30	4.55	2.13	2.25	2.30	2.65	1.68	2.70	5.25	1.42	3.02	2.80	2.34	2.81	2.79
Pb	39.90	39.73	34.19	30.54	33.94	31.36	39.27	31.21	37.68	34.37	35.79	36.24	36.91	37.29	30.71	29.85	34.71	30.58	30.69
Th	40.66	43.56	41.15	36.84	34.27	46.56	53.71	42.17	42.59	46.93	24.75	50.72	90.68	81.55	68.80	61.78	10.34	25.46	31.55
U	11.89	11.53	11.40	13.49	12.54	12.89	15.75	9.76	9.96	15.07	7.68	14.71	37.91	18.45	15.35	12.07	4.80	6.39	7.18
ΣREE	332.20	277.29	332.41	347.17	354.43	448.34	199.28	287.25	383.98	343.18	270.69	292.69	322.62	308.93	285.37	323.09	208.08	281.26	236.07
L/H	10.61	8.67	14.10	9.78	10.67	7.73	14.42	9.91	13.96	12.18	8.27	11.76	9.92	26.18	13.42	11.40	6.42	7.59	6.99
Eu*	0.52	0.55	0.52	0.42	0.45	0.28	0.63	0.48	0.48	0.47	0.56	0.49	0.11	0.41	0.42	0.37	0.57	0.47	0.48

注: 主量元素、微量元素和稀土元素测试均在中国科学院广州地球化学研究所完成; Fe₂O₃T 为全铁, L/H 为轻稀土元素总量与重稀土元素总量之比。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

从表1中可以发现, 骑田岭花岗岩体的主量元素具有如下特征: SiO_2 为 64.83% ~ 76.59%, 平均值 69.65%, SiO_2 含量很明显有两组, 一是 75% 左右, 一是 67% 左右, 在 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 分类图(图2)上, 75% 表现为花岗岩, 67% 为石英二长岩, 其原因是骑田岭岩体为两期次岩体。早期超单元花岗岩 SiO_2 含量低, 晚期超单元花岗岩 SiO_2 含量高, 钻孔深部花岗岩 SiO_2 含量低, 浅部花岗岩 SiO_2 含量高; Al_2O_3 为 11.78% ~ 14.81%, 平均 13.48%; $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ 为 1.40% ~ 7.04%, 平均 4.02%; MgO 为 0.05% ~ 1.34%, 平均 0.66%; CaO 为 0.66% ~ 2.84%, 平均 2.08%; TiO_2 为 0.10% ~ 1.12%, 平均 0.57%; Na_2O 为 2.77% ~ 3.42%, 平均 3.09%; K_2O 为 4.17% ~ 6.18%, 平均 5.13%; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 7.16% ~ 9.18%, 平均 8.22%, $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.38 ~ 2.06, 平均 1.67。骑田岭花岗岩类具有富硅富铝富碱、贫镁铁的特点, 显然经历了较大程度的结晶分异, 其 SiO_2 含量低于华南改造型花岗岩的平均值(72.82%, 刘昌实和朱金初, 1989)。样品的铝饱和指数(A/CNK)为 0.86 ~ 1.00, 平均 0.94, 属于偏铝质花岗岩, 为典型的 I 型花岗岩, 而且骑田岭花岗岩的矿物学特征(含角闪石)及 P 与 SiO_2 呈负相关(图3)也是 I 花岗岩的特征。与千里山花岗岩(毛景文等, 1995; 沈渭洲等, 1995)相比, 骑田岭花岗岩贫硅(千里山 SiO_2 为 72.12% ~ 78.68%)、富其他主量元素(千里山 Al_2O_3 为 10.92% ~ 13.96%, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ 为 0.48% ~ 2.68%, MgO 为 0.02% ~ 0.49%, CaO 为 0.49% ~ 1.79%, Na_2O 为 1.99% ~ 3.62%, K_2O 为 3.89% ~ 5.29%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 6.31% ~ 8.16%, TiO_2 为 0.02% ~ 0.16%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 与千里山花岗岩相似, 均为 0.6 左右, 与华南改造型花岗岩(0.62, 刘昌实和朱金初, 1989)也相似。

在 Harker 图解(图3)中, 骑田岭花岗岩的 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ 、 MgO 、 CaO 、 MnO 、 P_2O_5 、 TiO_2 含量与 SiO_2 含量呈明显的负相关关系, 而 Na_2O 、 K_2O 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 与 SiO_2 含量没有明显的相关性。这说明在岩浆的演化过程中有富铝矿物、铁镁矿物、斜长石、磷灰石、含钛矿物等结晶, 从而使骑田岭花岗岩

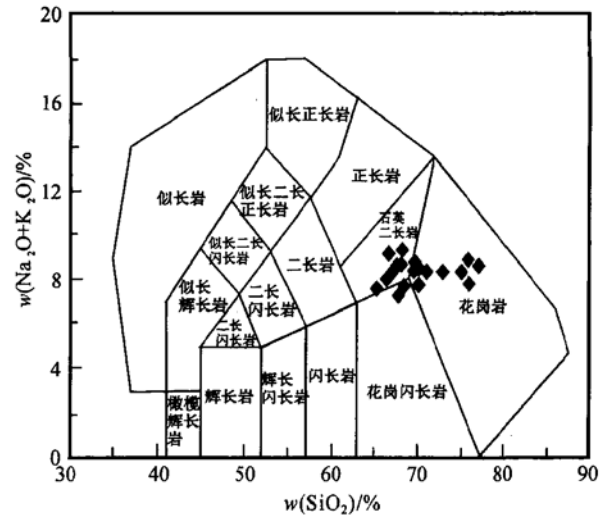


图2 骑田岭花岗岩类 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 的分类图
(据 Cox 等, 1979)

Fig. 2 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ classification of Qitianling granites (after Cox *et al.*, 1979)

最后富硅铝碱。

3.2 稀土元素

在球粒陨石标准化稀土元素分布模式图上(图4和表1), 稀土元素总量较高, 为 $199.28 \times 10^{-6} \sim 448.34 \times 10^{-6}$, 平均值为 307.03×10^{-6} , 轻稀土元素(LREE)富集, 为 $180.04 \times 10^{-6} \sim 396.99 \times 10^{-6}$, 平均值为 280.05×10^{-6} , 重稀土元素(HREE)亏损, 为 $11.37 \times 10^{-6} \sim 51.35 \times 10^{-6}$, 平均值为 27.02×10^{-6} , LREE/HREE 为 $6.42 \times 10^{-6} \sim 26.18 \times 10^{-6}$, 平均值为 11.26, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 6.31 ~ 30.31, 平均值为 12.63, LREE 内部分异较明显, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 2.44 ~ 11.09, 平均值为 5.14, 除个别样品外, 具有中等的铕异常($\delta\text{Eu} = 0.28 \sim 0.63$), 说明有斜长石的结晶。

与千里山花岗岩的稀土元素相比(毛景文等, 1995; 沈渭洲等, 1995), 骑田岭花岗岩的 LREE 相对富集, HREE 相对亏损, LREE、HREE 分异更加明显, 但稀土元素总量低于千里山花岗岩(千里山花岗岩平均值为 393.8×10^{-6}), 铕异常没有那么明显(千里山花岗岩 $\delta\text{Eu} = 0.03 \sim 0.27$)。在稀土元素模式图上, 骑田岭花岗岩没有四分组效应, 为“斜倾式”, 而千里山花岗岩的稀土元素具有四分组效应, 为“海鸥式”(图4), 这是高程度演化的花岗岩岩浆结晶晚期流体/熔体相互作用的结果(赵振华等, 1999)。

3.3 微量元素

在骑田岭花岗岩的微量元素蛛网图(图5)上,

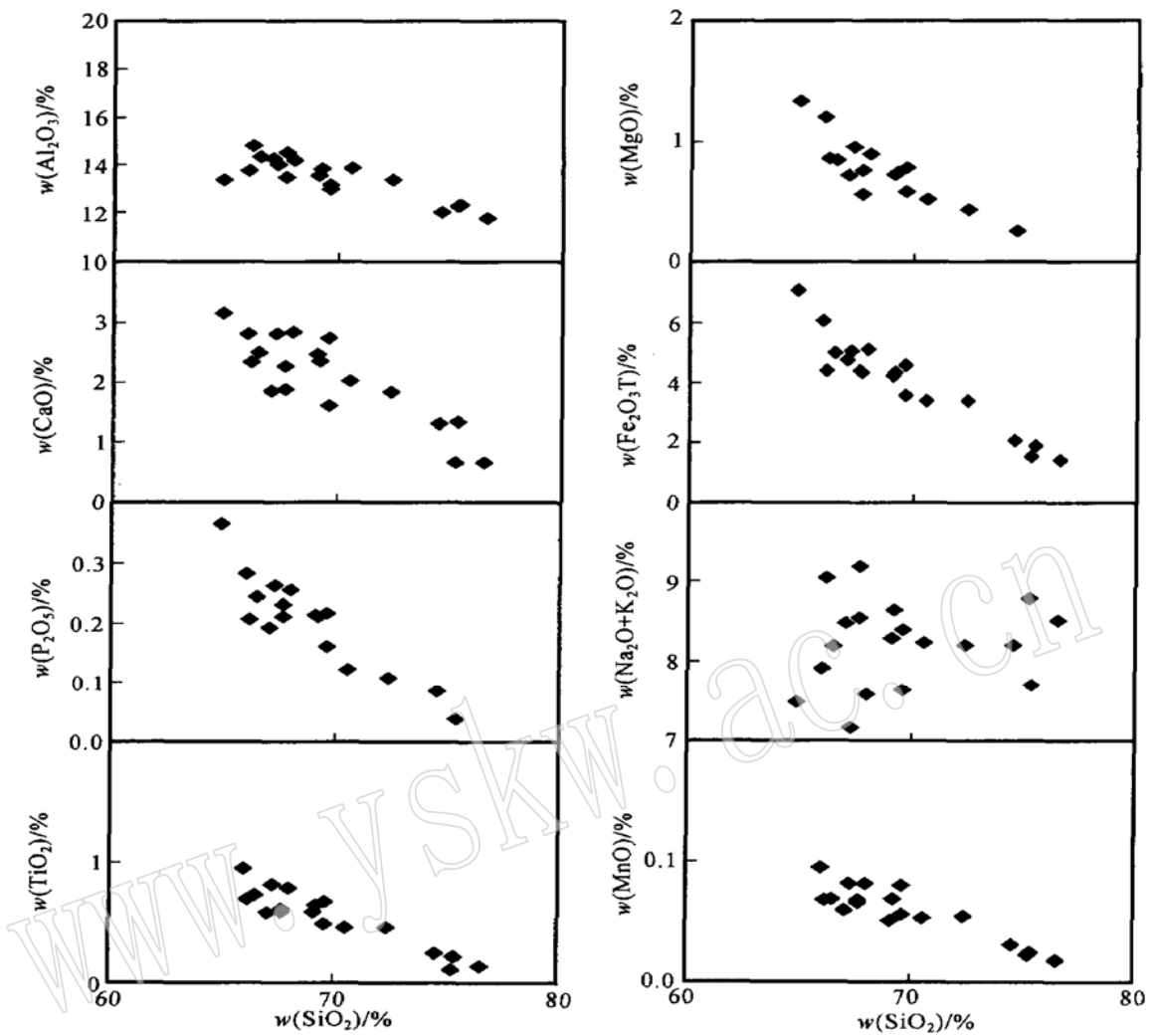


图 3 骑田岭花岗岩类的 Harker 图解
 Fig. 3 Harker diagram of Qitianling granites

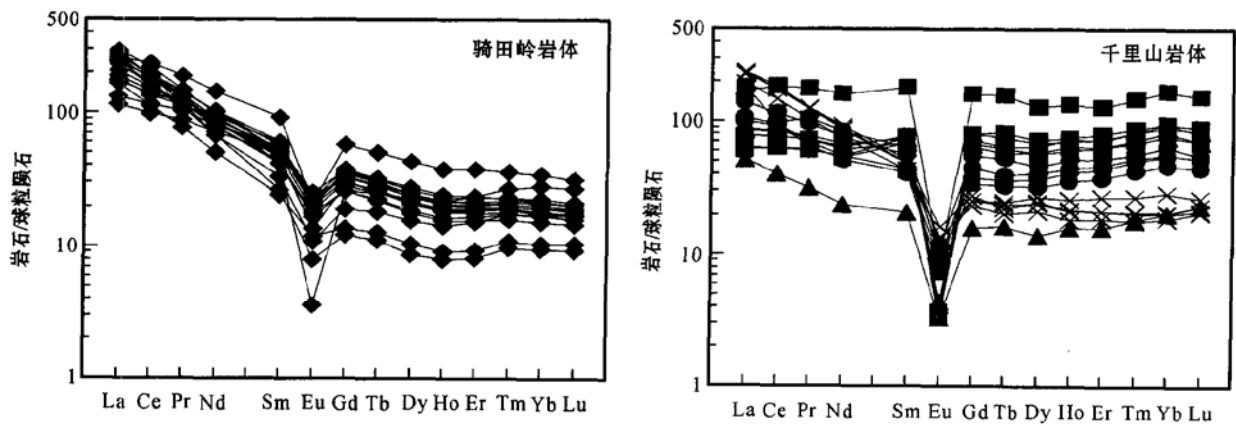


图 4 骑田岭和千里山花岗岩类稀土元素分布模式图
 Fig. 4 Rare earth element patterns of Qitianling granites and Qianlishan granites
 千里山花岗岩的数据来自毛景文等(1995)
 Data of Qianlishan granites from Mao Jingwen *et al.* (1995)

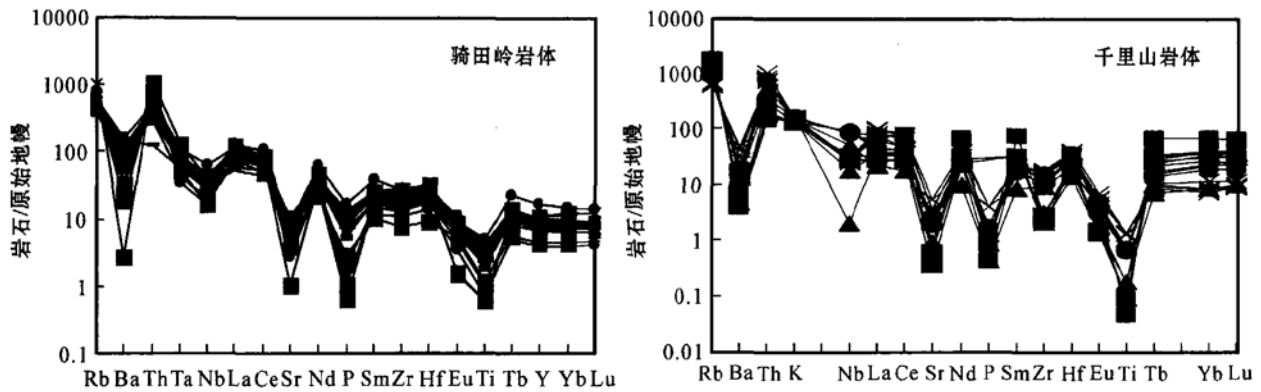


图5 骑田岭和千里山花岗岩类微量元素蛛网图

Fig. 5 Primitive mantle-normalized spidergrams of Qitianling granites and Qianlishan granites
 千里山花岗岩的数据来自毛景文等(1995);原始地幔的微量元素含量引自 Sun and McDonough(1989)
 Data of Qianlishan granites from Mao Jingwen *et al.* (1995), contents of trace elements of primitive mantle
 from Sun and McDonough (1989)

岩石明显富集大离子亲石元素,特别是 Rb、Th。样品均有 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Eu、Ti 的亏损,而 Ba、Sr、Eu 与 Ca 的性质十分接近,随 Ca 一起结晶、富集和分异,导致这类元素在早期岩石中富集、晚期岩浆中贫化的差异,使这类元素亏损。而 Nb、Ta、Ti 的亏损类似于形成岛弧环境的岩石特征,可能来源陆壳物质,但 Ti 的负异常还可能与钛铁矿的分离结晶作用有关。岩石中 P 的负异常表明有磷灰石的分离结晶。与千里山花岗岩的微量元素特征相比(图5),二者几乎没有差别,但千里山花岗岩类具有更大的 Ti 异常,同时有 Zr 的负异常,有可能是分析过程中锆石未完全溶解引起的。

骑田岭花岗岩类具有富 Rb、Th、Zr 贫 Sr、U 的特征。Rb/Sr 为 1.19~29.83,除样品 2KSC_23 外,其他均小于 10,一般在 2 左右,平均值为 3.95,高于中国上地壳值(0.45),接近于华南改造型花岗岩值(5.8),明显低于千里山花岗岩类(4.6~122.9,平均值为 37.9)(沈渭洲等,1995);Th/U 为 2.16~4.48,平均值为 3.61,与中国上地壳值(3.1)相近,高于千里山花岗岩类(0.9~5.4,平均值为 2.3);U 的含量为 4.80×10^{-6} ~ 37.91×10^{-6} ,平均值为 13.10×10^{-6} ,也与华南改造型花岗岩值(13.8×10^{-6})接近,但低于千里山花岗岩类的值(14.2×10^{-6} ~ 25.7×10^{-6} ,平均值为 19.2×10^{-6})(沈渭洲等,1995);Zr/Hf 为 21.42~34.16,平均值为 30.48,也与中国上地壳值(44.2)接近,高于千里山花岗岩类(6.0~49.8,平均值为 22.5)(沈渭洲等,1995)。

4 岩石成因与讨论

4.1 岩体时代

骑田岭岩体是一个多阶段侵入的复式岩体,它侵入的最新地层为早三叠世大冶灰岩,在岩体南侧不远处的早白垩世红层中,含有岩性与骑田岭岩体主侵入期岩性相当的花岗岩砾石和华岗质碎屑岩夹层。据此可以认定,骑田岭岩体的侵入时代在早三叠世与早白垩世之间(湖南省地质矿产局,1988),但具体时间各家看法不一。过去大多数学者将其作为印支期花岗岩(贵阳地球化学研究所,1979;南京大学地质系,1981;湖南省地质矿产局,1988;地质矿产部南岭项目花岗岩专题组,1989),亦有人认为是侏罗纪岩体(莫柱荪等,1980)。在 1:5 万区域地质调查(永春幅和宜章幅)的过程中,识别出多个侵入体,建立了 2 个超单元和 10 个单元,将骑田岭岩体的时代划分为印支期、燕山早期和燕山晚期(黄革非,1992)。近年来,由于超大型锡多金属矿床的发现,又进行了更精确的年代学工作。刘义茂等(2002)对骑田岭岩体进行了 ^{39}Ar - ^{40}Ar 定年,年龄为 139~144 Ma;朱金初等(2003)对骑田岭岩体中所谓的印支期花岗岩菜岭超单元进行的单颗粒锆石熔融法 U-Pb 年龄和全岩 Rb-Sr 等时线年龄测定结果均为燕山期,年龄值分别为 161 ± 2 Ma 和 159 ± 1.2 Ma;付建明等(2004)对菜岭单元进行了精确的锆石 SHRIMP 定年研究,其年龄值为 160 ± 2 Ma。毛景文等

(2004)对骑田岭岩体的矿石和岩体进行了测年,得到的一致年龄分别为 156.1 ± 0.4 Ma、 160.1 ± 0.9 Ma 和 157.5 ± 0.3 Ma, 这些年龄值均说明骑田岭岩体是燕山期侵位形成的, 与同一带上的千里山花岗岩(129~162 Ma)具有同时性。千里山岩体花岗斑岩的 Ar₄₀/Ar₃₉ 年龄为 142~144 Ma, 主体花岗岩的年龄为 158~162 Ma(刘义茂等, 1997); 毛景文等(1995)对千里山花岗岩体第一期花岗岩测定 Rb/Sr 等时线年龄为 131~152 Ma; 李红艳等(1996)对千里山花岗岩第一期花岗岩进行 Re/Os 同位素等时线年龄测定为 151 Ma; Li 等(2004)对千里山花岗岩进行了 Sm/Nd(交代矿物)和 SHRIMP 锆石 U/Pb 测年, 结果分别为 149 ± 2 Ma 和 152 ± 2 Ma, 这说明骑田岭岩体和千里山岩体是同时代形成的。而且毛景文等(2004)在对华南地区中生代成矿作用进行研究时发现, 华南地区的锡多金属矿床的成矿时代可能在 90~170 Ma 之间, 划分为 3 个成矿时代: 170~150 Ma、140~126 Ma 和 113~90 Ma, 其中 170~150 Ma 是华南地区成矿的高峰期, 同时对骑田岭岩体中锡矿床矿石中白云母进行了 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年, 获得了为 156 Ma 和 160 Ma 的年龄数据, 可见骑田岭花岗岩体的成矿时代与华南地区成矿高峰期相一致。很明显骑田岭岩体的形成时代基本上与其成矿时代相吻合, 这说明骑田岭岩体是在侏罗纪华南处于岩石圈伸展状态下的大构造背景时侵位的。

4.2 岩石成因

从地球化学特征来看, 骑田岭花岗岩类具有富硅富铝富碱、贫镁铁的特点, 显然经历了较大程度的结晶分异, 但 SiO₂ 含量低于华南改造型花岗岩的平均值(72.82%), 稀土元素总量较高, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 岩石明显富集大离子亲石元素, 特别是 Rb、Th。样品均亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Eu、Ti, 而 Ba、Sr、Eu 与 Ca 的性质十分接近, 随 Ca 一起结晶、富集和分异, 导致这类元素在早期岩石中富集, 晚期岩浆中贫化, 从而使这类元素亏损, 而 Nb、Ta、Ti 的亏损类似于形成岛弧环境的岩石特征, 可能来源陆壳物质。从骑田岭岩体的稀土元素和微量元素图解来看, 以前划分的超单元和单元是同源岩浆分异的产物, 定位和冷却都是在深部同源岩浆分异事件中形成, 这与苏州花岗岩复式岩体的研究结果(陈江峰等, 1993)相同, 也与庄锦良等(1988)关于骑田岭岩体正长石斑晶的长轴方向有很好的定向性的研究结果相吻合(刘义茂等, 2002)。

从上面的分析数据及元素地球化学特征来看, 骑田岭花岗岩类与华南改造型花岗岩类似, 而 REE 组成与上地壳平均值接近, 说明骑田岭花岗岩应是地壳物质重熔而成, 这为金属元素的重新富集创造了条件。据朱金初等(2003)对骑田岭花岗岩体菜岭单元花岗岩的 Sr、Nd 同位素特征及主量元素、微量元素地球化学特征研究, 菜岭单元有地幔物质的参与, 是在侏罗纪华南岩石圈伸展的构造背景下定位的, 邻区粤北白垩纪的基性岩也是在拉张环境下形成的(李献华等, 1997)。赵振华等(2000)认为柿竹园超大型矿床在形成过程中有强烈的深源岩浆活动, 壳幔相互作用对矿床的形成有重要贡献。中国东部在 160~100 Ma 期间岩石圈-软流圈系统曾发生大灾变(Deng *et al.*, 2004), 岩石圈变薄, 软流圈物质上涌, 导致大规模花岗质岩浆重熔, 骑田岭岩体正是在这种大环境下形成。地壳物质重熔的热源可能来自于地幔, 壳幔的相互作用, 形成骑田岭超大型锡多金属矿床, 由于可能有较多的地幔物质参与, 使骑田岭花岗岩比千里山花岗岩偏基性。

4.3 成矿作用

骑田岭岩体处于华夏大陆与扬子大陆的边界, 位于重力异常带和地球化学急变带的部位, 邵阳-郴州北西向断裂构造带也相交于此, 这为岩体的侵位、热液的活动和成矿物质的重新聚集提供了条件。骑田岭岩体的锡多金属超大型矿床和柿竹园超大型矿床一样, 位于地球化学急变带收缩并出现南北错动处的华夏块体一侧(朱炳泉, 2001), 也是 Pb 同位素和 Nd 模式年龄的急变带, 是不同块体之间壳幔相互作用的结果。朱金初等(2003)、赵振华等(2000)和毛景文等(2004)从不同角度认为壳幔相互作用对矿床的形成有重要贡献, 认为由于岩石圈的伸展导致软流圈物质大量涌入上地壳, 出现大面积的壳源花岗岩和锡多金属矿床。刘义茂等(2002)认为骑田岭岩体是地壳在挤压剪切向拉张伸展转化的时期形成的, 而且源区比千里山岩体及花岗斑岩都要深, 千里山岩体是在地壳处于强烈剪切挤压的晚期形成的。从成分上看, 骑田岭岩体和千里山岩体化学成分有一定差别, 骑田岭岩体相对贫 Si、F、Nb、Ta、U、Rb, 而富 Ti、Al、Fe、Ca、V、Cr、Co、Ni, 碱度基性度均比千里山岩体高, 说明在骑田岭花岗岩的形成过程中有地幔物质参与, 这也使骑田岭花岗岩有利于形成超大型矿床。

骑田岭岩体的锡矿床主要赋存在岩体边部接触

带,属于热液交代型多金属矿床。骑田岭岩体围岩主要为古生界,其中泥盆纪余田桥组、石炭纪石碇子组、二叠纪栖霞组均是主要赋矿层位(黄革非等,2001)。李方林等(1996a,1996b)在对湘南区域地层的地球化学研究中也发现在石炭系、二叠系和三叠系中富集锡等多金属元素,而且骑田岭花岗岩酸碱性程度高,岩石 SiO_2 含量多在 73% 以上, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 7.16% ~ 9.18%, 平均含量为 8.22%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.38 ~ 2.06, 平均为 1.67, 远高于世界、中国及南岭花岗岩平均值,与华南改造型花岗岩($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 0.62, 刘昌实和朱金初,1989)相似,具有含锡花岗岩的特点。主量元素富硅碱、贫铁镁的特点也是成矿花岗岩的判别标志。骑田岭岩体 Sn 的丰度甚高,据郑基俭和贾宝华(2001)的研究,Sn 平均含量最低 26.3×10^{-6} , 最高 200×10^{-6} , 是维氏酸性岩值的 9~67 倍,而且花岗岩含 F、B 等挥发分较高,F 含量是维氏酸性岩值的 2~5.5 倍。在花岗岩侵入时,多金属元素发生交代作用,使这些元素重新富集成为大型或超大型矿床。

5 结论

(1) 骑田岭花岗岩全岩的主量元素具有富硅富铝富碱、贫铁镁的特点,经历了较大程度的结晶分异。稀土元素总量较高,为 199.28×10^{-6} ~ 448.34×10^{-6} , 平均 307.03×10^{-6} , 轻稀土元素元素富集,重稀土元素亏损;

(2) 样品均有 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Eu、Ti 的亏损,而 Ba、Sr、Eu 与 Ca 的性质十分接近,随 Ca 一起结晶、富集和分异,导致这类元素在早期岩石中富集、晚期岩浆中贫化的差异,使这类元素亏损。而 Nb、Ta、Ti 的亏损类似于形成岛弧环境的岩石特征,可能来源于陆壳物质;

(3) 与相邻的千里山花岗岩比较,骑田岭花岗岩没有显著的四分组效应,但它们的地球化学性质具有很大的相似性,由于地幔物质的参与较多,使得骑田岭花岗岩岩体比千里山花岗岩偏基性;

(4) 骑田岭花岗岩体超大型锡多金属矿床的形成是侏罗纪时岩石圈伸展环境下引起地幔物质上涌,使地壳物质发生重熔,同时在热液作用参与下,金属元素重新富集而形成的。

致谢 在样品的分析过程中得到了刘颖副研究

员、涂湘林副研究员、胡光黔工程师和曾文工程师的帮助,在写作过程中也得到广州海洋地质调查局的后勤保证,谨致以诚挚的感谢。

References

- Chen Jiangfeng, Foland K A and Liu Yimao. 1993. Precise ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of the Suzhou composite granite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(1): 77~85 (in Chinese with English abstract).
- Chen Minsu and Liu Xinghui, 2000. Metallogenic model and resource general capacity forecast of Furong Sn field in Chenzhou[J]. *Hunan Geology*, 19(1): 43~47 (in Chinese with English abstract).
- Cox C G, Bell J D and Pankhurst R J. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*[M]. London: George, Allen and Unwin.
- Deng J F, Mo X X, Zhao H L, *et al.* 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: continental roots-plume tectonics[J]. *Earth Science Reviews*, 65(3~4): 223~275.
- Department of Geology, Nanjing University. 1981. *Granitoids of Various Ages and Their Metallogenic Relations in South China* M1. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Granitoid Research Group of Nanling Project. 1989. *Geology of Granitoids of Nanling Range and Their Petrogenesis and Mineralization* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Fan Weiming. 1987. Origin of the Qitianling granite in southern Hunan: Rb,Sr isotopic and REE constraints[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 11(1): 47~54 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, South China, and its significance[J]. *Geology in China*, 31(1): 96~100 (in Chinese with English abstract).
- Huang Gefei. 1992. Discussion on emplacement time of Qitianling composite rock masses[J]. *Geology and Prospecting*, 25(1): 7~11 (in Chinese with English abstract).
- Huang Gefei, Zeng Qinwang, Wei Shaoliu, *et al.* 2001. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Furong orefield, Qitianling, Hunan[J]. *Chinese Geology*, 28(10): 29~34 (in Chinese with English abstract).
- Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1988. *Regional Geology of Hunan Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1979. *Geochemistry of Granitoids in South China*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Li Fanglin, Chen Dexing and Zhang Benren. 1996a. Geochemistry and its implication of the provenance of rocks of Permian system in southern Hunan[J]. *Geology of Hunan*, 15(1): 19~21 (in Chinese with English abstract).
- Li Fanglin, Chen Dexing and Zhang Benren. 1996b. Geochemical characteristics and metallization of the strata in south Hunan[J]. *Earth*

- Sciences - Journal of China University of Geosciences, 21(5): 536~ 540(in Chinese with English abstract).
- Li Hongyan, Mao Jingwen, Sun Yali, *et al.* 1996. Re-Os isotopic chronology of molybdenites in the Shizhuyuan polymetallic tungsten deposit, Southern Hunan[J]. Geological Review, 42(3): 261~ 267(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Hu Ruizhong and Rao Bing. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China[J]. Geochimica, 36(2): 14~ 31 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Liu Dunyi, Sun Min, *et al.* 2004. Precise Sm-Nd and U-Pb isotopic dating of the supergiant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, SE China[J]. Geological Magazine, 141(2): 225~ 231.
- Li Xianhua, Liu Ying, Tu Xianglin, *et al.* 2002. Precise determination of chemical compositions in rock samples using ICP-AES and ICP-MS: a comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution[J]. Geochimica, 31(3): 289~ 294 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi and Zhu Jinchu. 1989. Petrochemical features of four genetic types of granitoids in southeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2: 38~ 48(in Chinese with English abstract).
- Liu Ming. 1991. Characteristics of Qitianling granite and preliminary discussion on its origin and diagenesis[J]. Hunan Geology, 10(4): 295~ 299 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yimao, Xu Jifeng, Dai Tongmo, *et al.* 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic ages of Qitianling granite and their geologic implications[J]. Science in China (Ser. D), 46(Supp.): 50~ 59(in Chinese).
- Liu Yimao, Dai Tongmo, Lu Huazhang, *et al.* 1997. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Sm-Nd ages for the magmatism and mineralization of Qianlishan granite intrusion[J]. Science in China (Ser. D), 27(5): 425~ 430 (in Chinese).
- Liu Ying, Liu Haichen and Li Xianhua. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS [J]. Geochemistry, 25(6): 552~ 558 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xiaoya, Jiang Xiwei, Wei Shaoliu, *et al.* 2001. Present Geological situation and its prospecting thought[J]. Hunan Geology, 20(4): 303~ 308(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Hongyan and Pei Rongfu. 1995. Nd-Sr isotopic and petrogenetic studies of the Qianlishan granite stock, Hunan Province[J]. Mineral Deposits, 14(3): 235~ 242(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Hongyan, Pei Rongfu, *et al.* 1995. Geology and Geochemistry of the Qianlishan granites stock and its relationship to polymetallic tungsten mineralization[J]. Mineral Deposits, 14(1): 12~ 25(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. Earth Science Frontiers, 11(1): 45~ 55(in Chinese with English abstract).
- Mo Zhusun and Ye Bodan. 1980. The Geology of the Granites in the Nanling Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Shen Weizhou, Wang Dezi, Xie Yonglin, *et al.* 1995. Geochemical characteristics and material sources of the Qianlishan composite granite body, Hunan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 14(3): 193~ 202 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins[C]. Geol. Soc. Special Publication, 42: 313~ 345.
- Wang Liankui, Zhu Weifang and Zhang Shaoli. 1982. Evolution of two petrogenetic-metallogenetic series for granitoids in South China [J]. Geochimica, 4: 329~ 339(in Chinese with English abstract).
- Wei Shaoliu, Zeng Qinwang, Xu Yiming, *et al.* 2002. Characteristics and ore prospects of tin deposits in the Qitianling area, Hunan[J]. Geology in China, 29(1): 67~ 75(in Chinese with English abstract).
- Xu Yiming, Hou Maosong, Liao Xingyu, *et al.* 2000. Deposit types and prospect for prospecting of Sn deposits in Furong ore field, Chenzhou[J]. Hunan Geology, 19(2): 95~ 100 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei, Zhang Boyou, *et al.* 2000. Crust-Mantle interaction background for the formation of Shizhuyuan superlarge W-polymetal deposit[J]. Science in China (Ser. D), 30(supp.): 161~ 168(in Chinese).
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin and Han Xiaodong. 1999. The discussion of tetrad effect of rare earth elements in granites: cases studies of Qianlishan granite and Baerzhe granite[J]. Science in China (Ser. D), 29(4): 331~ 338(in Chinese).
- Zheng Jijian and Jia Baohua. 2001. Geological characteristics and related tin-polymetallic mineralization of the Qitianling granite complex in southern Hunan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 1: 50~ 57(in Chinese with English Abstract).
- Zhu Bingquan. 2001. Geochemical Province and Geochemical Changeable belt[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhu Jinchu, Huang Gefei, Zhang Peihua, *et al.* 2003. On the emplacement age and material sources for the granites of Cailing superunit, Qitianling pluton, south Hunan Province[J]. Geological Review, 49(3): 245~ 252(in Chinese with English abstract).
- Zhuang Jinliang, Liu Siwei, Tan Bixiang, *et al.* 1988. Relation between minor intrusions and mineralization in the Hunan area and forecasting of under deposits II. Hunan Geology. 4(supp): 10~ 15(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈江峰, Folang K A, 刘义茂. 1993. 苏州复式花岗岩岩体的精确 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年[J]. 岩石学报, 9(1): 77~ 85.
- 陈民苏, 刘星辉. 2000. 郴州芙蓉锡矿田成矿模式及资源总量预测 [J]. 湖南地质, 19(1): 43~ 47.
- 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成因和

- 成矿作用[M]. 北京:地质出版社.
- 范蔚茗. 1987. 湘南骑田岭花岗岩岩体的成因: Rb-Sr 同位素和 REE 的制约[J]. 大地构造与成矿学, 11(1): 47~ 54.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 2004. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国地质, 31(1): 96~ 100.
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 黄革非. 1992. 骑田岭复式岩体侵位时代讨论[J]. 地质与勘探, 25(1): 7~ 11.
- 黄革非, 曾钦旺, 魏绍六, 等. 2001. 湖南骑田岭芙蓉矿田锡矿地质特征及控矿因素初步分析[J]. 中国地质, 28(10): 29~ 34.
- 李方林, 陈德兴, 张本仁. 1996a. 湘南二叠系岩石地球化学及其物源指示[J]. 湖南地质, 15(1): 19~ 21.
- 李方林, 陈德兴, 张本仁. 1996b. 湘南区域地层地球化学特征及其成矿意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 21(5): 536~ 540.
- 李红艳, 毛景文, 孙亚利, 等. 1996. 柿竹园钨多金属矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄研究[J]. 地质论评, 42(3): 261~ 267.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 36(2): 14~ 31.
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 等. 2002. 岩石样品化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定——酸溶与碱溶分解样品方法的对比[J]. 地球化学, 31(3): 289~ 294.
- 刘昌实, 朱金初. 1989. 华南四种成因类型花岗岩类岩石化学特征对比[J]. 岩石学报, 2: 38~ 48.
- 刘明. 1991. 骑田岭花岗岩各单元特征及物质来源与成岩方式初步探讨[J]. 湖南地质, 10(4): 295~ 299.
- 刘义茂, 戴樟模, 卢焕章, 等. 1997. 千里山花岗岩成岩成矿的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 Sm-Nd 同位素年龄[J]. 中国科学(D辑), 27(5): 425~ 430.
- 刘义茂, 许继峰, 戴樟模, 等. 2002. 骑田岭花岗岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国科学(D辑), 32(增刊): 41~ 48.
- 刘颖, 刘海辰, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 25(6): 552~ 558.
- 罗小亚, 蒋希伟, 魏绍六, 等. 2001. 湘南地区锡矿地质工作现状及其找矿思考[J]. 湖南地质, 20(4): 303~ 308.
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富. 1995. 湖南千里山花岗岩岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究[J]. 矿床地质, 14(3): 235~ 242.
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富, 等. 1995. 千里山花岗岩岩体地质地球化学及与成矿关系[J]. 矿床地质, 14(1): 12~ 25.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 11(1): 45~ 55.
- 莫柱荪, 叶伯丹. 1980. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京:地质出版社.
- 南京大学地质系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系[M]. 北京:科学出版社.
- 沈渭洲, 王德滋, 谢永林, 等. 1995. 湖南千里山复式花岗岩岩体的地球化学特征和物质来源[J]. 岩石矿物学杂志, 14(3): 193~ 202.
- 王联魁, 朱为方, 张绍立. 1982. 华南花岗岩两个成矿系列的演化[J]. 地球化学, 4: 329~ 339.
- 魏绍六, 曾钦旺, 许以明, 等. 2002. 湖南骑田岭地区锡矿床特征及找矿前景[J]. 中国地质, 29(1): 67~ 75.
- 许以明, 侯茂松, 廖兴钰, 等. 2000. 郴州芙蓉矿田锡矿类型及找矿远景[J]. 湖南地质, 19(2): 95~ 100.
- 赵振华, 包志伟, 张伯友, 等. 2000. 柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景[J]. 中国科学(D辑), 30(增刊): 161~ 168.
- 赵振华, 熊小林, 韩小东. 1999. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨——以千里山和巴尔哲花岗岩为例[J]. 中国科学(D辑), 29(4): 331~ 338.
- 郑基俭, 贾宝华. 2001. 骑田岭岩体的基本特征及其与锡多金属成矿作用关系[J]. 华南地质与矿产, 4: 50~ 57.
- 中国科学院贵阳地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类的地球化学[M]. 北京:科学出版社.
- 朱炳泉. 2001. 地球化学省与地球化学急变带[M]. 北京:科学出版社.
- 朱金初, 黄革非, 张佩华, 等. 2003. 湘南骑田岭岩体菜岭超单元花岗岩侵位年龄和物质来源研究[J]. 地质论评, 49(3): 245~ 252.
- 庄锦良, 刘思伟, 谭必祥, 等. 1988. 湘南地区小岩体与成矿关系及隐伏矿床预测[J]. 湖南地质, 4(增刊): 10~ 15.