

福建潘田铁矿床花岗岩岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年代学及其与成矿的关系*

来守华^{1,2} 陈仁义^{2**} 张达¹ 狄永军¹ 龚勇¹ 袁远¹ 陈良³

LAI ShouHua^{1,2}, CHEN RenYi^{2**}, ZHANG Da¹, DI YongJun¹, GONG Yong¹, YUAN Yuan¹ and CHEN Liang³

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 国土资源部矿产勘查技术指导中心, 北京 100120

3. 中国五矿集团公司, 北京 100044

1. Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Centre of Technological Guidance, National Exploration & Development Planning, Ministry of Land & Resources, Beijing 100120, China

3. China Minmetals Corporation, Beijing 100044, China

2014-04-28 收稿, 2014-05-25 改回.

Lai SH, Chen RY, Zhang D, Di YJ, Gong Y, Yuan Y and Chen L. 2014. Petrogeochemical features and zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of granite in the Pantian iron ore deposit, Fujian Province and their relationship with mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6):1780–1792

Abstract The Pantian iron ore deposit is a high-grade iron deposit with great prospecting potential. The orebodies mainly occur in silico-calcium lithologic boundaries in the outer contact zone of the granite, and the mineralization is closely related to the granitic intrusion. But there were little study on the granite. Therefore, petrogeochemistry characteristics and zircon U-Pb age of the granite is studied in this paper to discuss its petrogenesis, tectonic setting, emplacement age and the relationship with the iron ore mineralization. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the granite indicates that the granite intruded in Early Cretaceous ($131.68 \pm 0.48\text{Ma}$, MSWD = 1.3). The granite is characterized by high-K calc-alkaline series and weakly peraluminous-metaluminous rocks, and has a moderate smooth REE pattern characterized by lower Σ REE, higher LREE than HREE, and obvious negative Eu anomalies, and has an intensive enrichment in LILE and different depletion in HFSE. The petrogeochemical analysis shows that Pantian granite belongs to highly fractionated I-type granites and forms on the post-collisional extensional environment. By analyzing the spatial distribution rule and genetic relation between iron orebodies and the granite, we infer that the granite intrusion determine the spatial orientation of main ore bodies, and the granite is the metallogenic geological body of Pantian iron ore deposit which is the typical silicon-calcium mineralization. The lithologic boundaries between the clastic rocks of Lindi Formation and carbonate rocks of Huanglong-Qixia formations are the beneficial ore-forming positions. And the deposit we study in this paper belongs to the typical metallogenic mechanism of “multi-factor coupling, critical transformation, and marginal metallogenesis”.

Key words Highly fractionated I-type granites; Zircon U-Pb geochronology; Silico-calcium lithologic boundaries; Iron ore deposit; Pantian

摘要 潘田铁矿床矿体主要赋存于潘田花岗岩体外接触带的“硅钙岩性界面”中,其成矿与花岗岩侵入关系密切,是一个具有很大找矿潜力的富铁矿床。但前人对该花岗岩的研究还很薄弱,本文对潘田铁矿花岗岩进行了岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 定年研究,探讨其岩石成因、形成时代、构造环境、及其与成矿的关系。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得其结晶年龄为 $131.68 \pm 0.48\text{Ma}$ 。该岩体为高钾钙碱性系列,属弱过铝质-准铝质岩石;稀土元素总量较低,轻稀土相对于重稀土富集,具有明显铈负异常,重稀土配分模式相对平坦,中稀土相对亏损。微量元素中相对富集大离子亲石元素而亏损高场强元素。岩石地

* 本文受中国地质调查项目(1212011085472)和国土资源部公益性行业科研专项(201411024)联合资助。

第一作者简介: 来守华,男,1984年生,博士生,矿床学专业,E-mail: laishouhua@gmail.com

** 通讯作者: 陈仁义,男,1966年生,博士,研究员,主要从事矿床学研究及矿产勘查规划研究工作,E-mail: cgschenry@126.com

球化学特征表明潘田岩体为高分异 I 型花岗岩, 形成于碰撞后拉张环境。潘田铁矿床矿体与花岗岩体的空间分布规律与成因关系表明, 花岗岩侵入作用是控制主成矿阶段矿体空间定位的地质作用, 花岗岩是铁矿床的成矿地质体, 林地组碎屑岩与黄龙组-栖霞组碳酸盐岩的接触界面是成矿有利部位, 矿床类型属于典型“硅钙岩性界面”成矿, 本矿床的成因类型属于“多因耦合、临界转换、边界成矿”的典型案例。

关键词 高分异 I 型花岗岩; 锆石 U-Pb 年代学; 硅钙岩性界面; 铁矿床; 潘田

中图法分类号 P588.121; P597.3

华南地块位于太平洋西缘, 是世界上主要火成岩省之一。中生代发生了大规模多期次岩浆活动, 可能与古太平洋向欧亚大陆北西向俯冲有关 (Zhou and Li, 2000; 胡瑞忠等, 2010)。与中生代岩浆作用伴生产出大量内生金属矿床, 构成了环太平洋成矿带的一个重要组成部分 (毛景文等, 2004, 2008)。闽西南地区位于南岭成矿带东段, 属于东南沿海早白垩世岩浆岩带的一部分。福建潘田铁矿床是潘洛铁矿区的重要组成部分, 保有铁资源储量达中型规模, 矿石品位极富, 平均品位 > 50%, 是福建省最重要的富铁矿山之一, 与福建马坑铁矿、洛阳铁矿、阳山铁矿等矿床构成了一条重要的铁多金属成矿带, 属于闽西南多金属成矿区“马坑式”铁矿的重要组成部分。前人对“马坑式”铁矿的主体-马坑铁矿相关的侵入体 (如大洋和莒舟花岗岩) 进行了深入研究 (洪大卫等, 1980; 赵一鸣等, 1983; 张承帅等, 2012a, b), 锆石 U-Pb 定年表明大洋和莒舟岩体均形成于早白垩世, 年龄分别为 $132.6 \pm 1.3\text{Ma}$ (SHRIMP) 和 $129.6 \pm 0.8\text{Ma}$ (LA-ICP-MS) (张承帅等, 2012a)。但是对“马坑式”铁矿其他矿床的相关岩体研究较少, 尤其是潘田铁矿, 前人仅对其地质构造特征和硫同位素特征进行过叙述 (杨志, 1982; 程天枝, 2009), 而对与成矿有关的花岗岩的岩石地球化学、年代学以及成矿关系的研究还很薄弱, 这无疑影响了对其成矿机制的认识。因此本文重点对该花岗岩体进行了岩石地球化学和锆石 U-Pb 定年研究, 并探讨其岩石成因、构造环境、形成时代及其与成矿的关系, 这一研究对该地区寻找隐伏-半隐伏矿床具有重要的指导意义。

1 地质背景及矿床特征

潘田铁矿床位于永梅晚古生代凹陷带的南东缘, 政和大埔大断裂的南东侧 (图 1)。

区内主体地层由老至新主要为中-上元古界龙北溪组 ($\text{Pt}_{2,3}l$): 主要岩性为角闪片岩、云母片岩、石英片岩; 下石炭统林地组 (C_1l): 上部岩性主要为石英砂砾岩、粉砂岩, 岩石多已蚀变为红柱石角岩, 下部岩性主要为变质含砾粗砂岩和中粗粒砂岩, 岩石多已钾长石化、砂卡岩化和磁铁矿化, 上、下部岩石均含褐铁矿, 铁质含量较高; 中石炭统-下二叠统黄龙组-栖霞组 ($\text{C}_2\text{-P}_1q$): 岩性主要为微粒灰岩、大理岩化灰岩、大理岩, 局部为硅质岩、泥灰岩, 底部多见有厚薄不一的磁铁矿体, 伴有锌矿化; 上三叠统文宾山组 (T_3w): 岩性主要为变质砂砾岩和石英砂岩; 下侏罗统梨山组 (J_1l): 岩性主要

为粉砂岩、泥岩和细砂岩; 以及少量第四系 (Q) (图 1)。

区内断裂十分发育, 以北西向、北北西向为主, 北东向、北北东向次之, 由挤压破碎带和逆断层组成, 倾向北东, 倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$, 将龙北溪组推覆于林地组、黄龙组-栖霞组之上 (图 2)。主要控矿构造为 F3 正断层, 其为一层间断裂, 发育于林地组碎屑岩与黄龙-栖霞组灰岩接触界面及附近, 长 1.6km, 走向 $300^\circ \sim 320^\circ$, 倾向北东, 倾角地表较陡 ($60^\circ \sim 85^\circ$), 深部变缓 ($0^\circ \sim 30^\circ$)。破碎带宽窄不一, 呈线状, 破碎带较宽的地方常见矿体成群出现, 且矿体厚度较大, 呈似层状、透镜状 (图 2)。

侵入岩仅出露于矿区南东角, 为长坑岩体, 钻孔深部揭露了隐伏花岗岩, 呈浅灰-肉红色, 他形粒状结构, 块状构造; 矿物主要由钾长石、斜长石、石英和少量黑云母组成 (图 3a-c), 其中钾长石呈半自形短柱状, 他形不规则粒状, 粒径 $0.5 \sim 3.0\text{mm}$, 具卡式双晶, 表面高岭土化, 含量 40%; 斜长石呈半自形柱状、他形柱状, 粒径 $0.5 \sim 2.0\text{mm}$, 聚片双晶, 含量 15%; 石英呈半自形-他形粒状, 粒径 $0.5 \sim 2.0\text{mm}$, 含量 30%; 副矿物主要为榍石 (图 3c)。

矿体主要赋存在花岗岩外接触带林地组 (C_1l) 碎屑岩和黄龙组-栖霞组 ($\text{C}_2\text{-P}_1q$) 碳酸盐岩的硅钙岩性界面 (指碳酸盐类岩石和碎屑岩类岩石接触界面, 因界面岩石化学成分为 CaCO_3 和硅铝酸盐, 叶天竺和薛建玲 (2007) 称为“硅钙面” (图 2), 主矿体长约 750m, 延伸大于 473m, 平均厚 21m。矿体产状与“硅钙面”产状一致, 呈似层状, 其上部及底部常有透镜状锌矿层。主要金属矿物为磁铁矿, 次为黄铁矿、赤铁矿、闪锌矿、褐铁矿、辉钼矿等; 非金属矿物以石榴石、透辉石为主, 次为方解石、石英、阳起石、绿泥石、方柱石等; 磁铁矿呈他形-半自形-自形粒状结构, 部分呈不规则状或八面体自形晶, 以块状、斑杂状、稠密浸染状构造为主, 粒度为 $0.01 \sim 0.50\text{mm}$ (图 3d)。

2 样品及分析方法

2.1 主微量元素分析

本文对矿区南东部长坑岩体 2 件代表性花岗岩样品及钻孔中 1 件花岗岩样品进行了主量元素和微量元素测试, 分析测试在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所进行。FeO 和烧失量 (LOI) 采用标准湿化学法进行分析, 其它的主量元素采用熔片法 X-射线荧光光谱法 (XRF) 进行分析。稀土和微量元素采用等离子体质谱法 (ICP-MS) 进行分析。

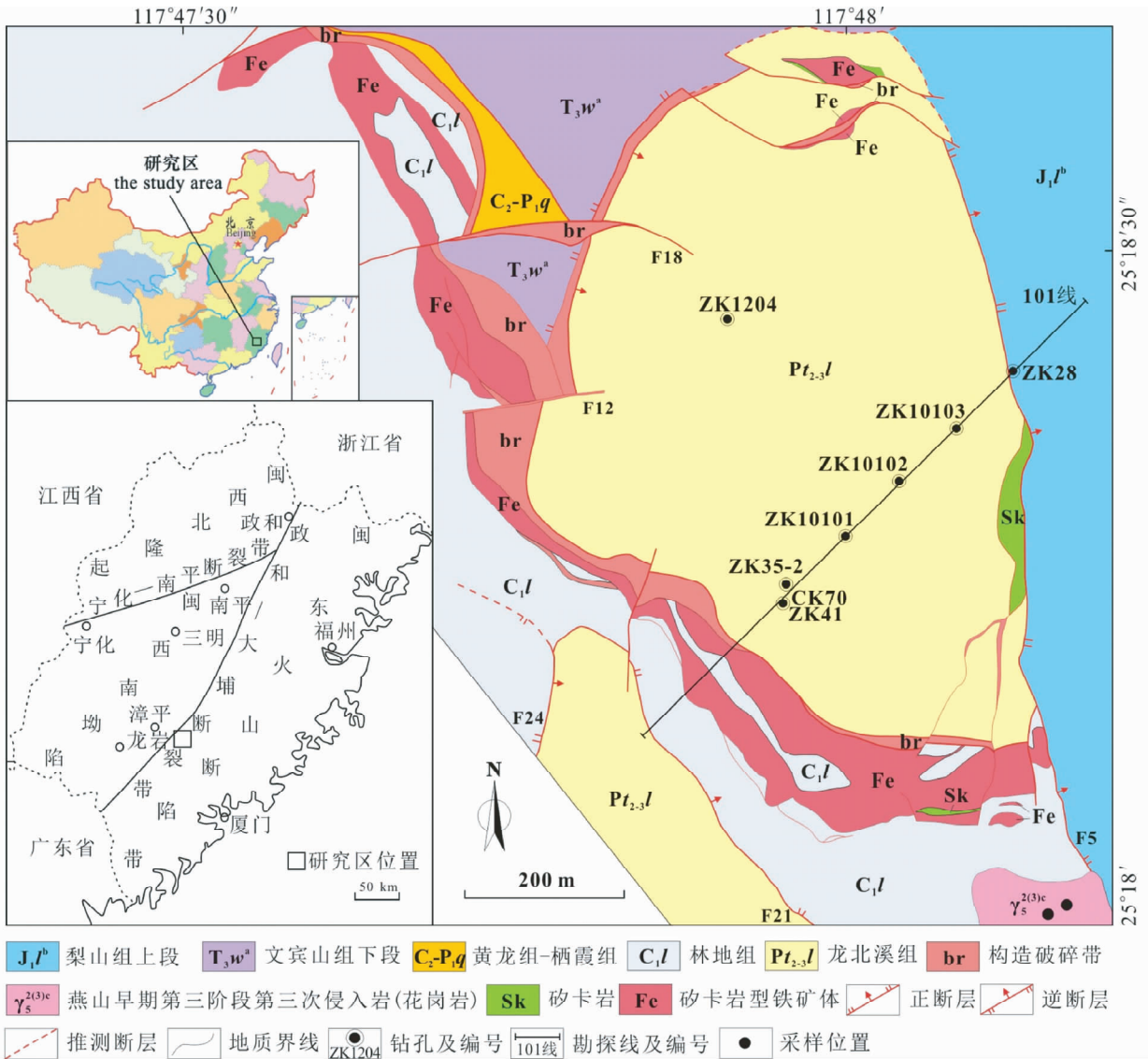


图 1 潘田矿区地质简图 (据福建省闽东南地质大队, 2010^① 修绘)

Fig. 1 Geological map of the Pantian iron ore deposit

2.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析

选取矿区内花岗岩 1 件样品进行锆石测年工作, 样品采于钻孔 ZK1204 (326.2m 处) 花岗岩中。钻孔 ZK1204 开孔 GPS 点位为 $x = 39580406$, $y = 2800511$ 。岩石比较新鲜, 蚀变较弱。首先将样品送实验室机械碎样至 200 目后经淘洗和磁选后, 在双目镜下挑选出锆石, 再进行制靶和测试工作。

样品碎样和锆石挑选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 锆石样品制靶在中国地质科学院地质力学研究所完成。锆石的 U-Pb 同位素测试在天津地质矿产研究所同位素实验室的 LA-MC-ICP-MS 仪器 (Thermo Fisher 公司制造的 Neptune) 上完成, 采用美国 ESI 公司生产的 UP193-FX

ArF 准分子激光器 (激光波长 193nm, 激光剥蚀的束斑直径为 $35\mu\text{m}$)。年龄计算时, 采用 TEMORA 作为外部锆石年龄标准。采用中国地质大学刘永胜博士 (Liu *et al.*, 2010) 研发的 ICP-MS Data Cal 程序和 Ludwig (2012) 的 Isoplot 程序进行数据处理, 采用 Andersen (2002) 的方法进行普通铅校正。利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

3 分析结果

3.1 主量、微量及稀土元素特征

矿区隐伏花岗岩 (ZK1204-b1) 和南东部地表出露的长坑

^① 福建省闽东南地质大队. 2010. 福建省安溪潘田矿区大理岩矿地质报告

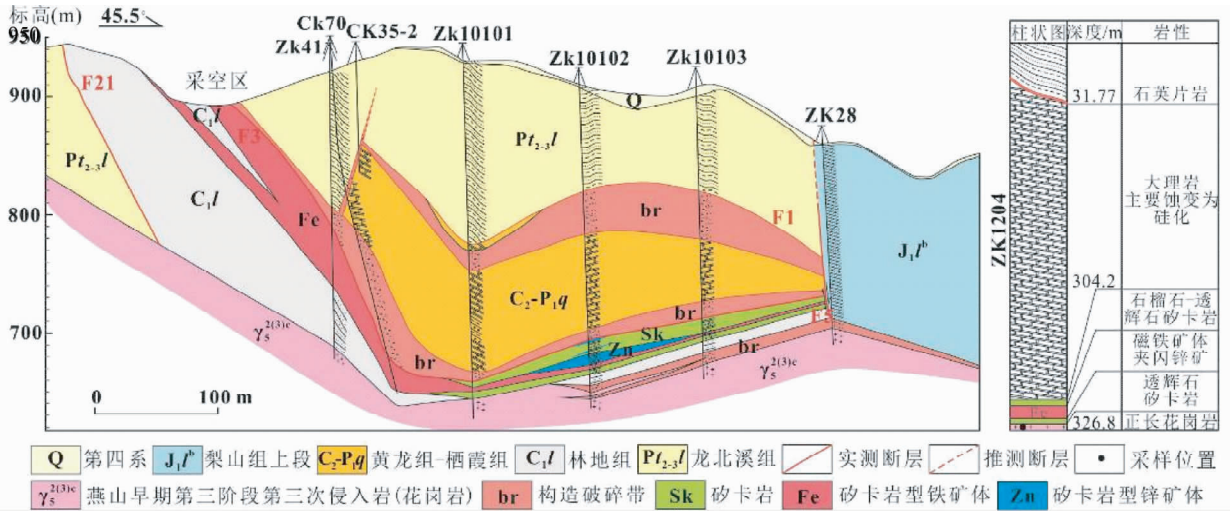


图2 潘田铁矿床 101 线勘查剖面图(据福建省闽东南地质大队,2010 修绘)

Fig.2 Geological profile of the exploration line No. 101 of the Pantian iron ore deposit

表 1 潘田矿区花岗岩主量元素 (wt%)、微量和稀土元素 (×10⁻⁶) 分析结果

Table 1 Major (wt%), trace elements and REE (×10⁻⁶) contents of Pantian granite

样品号	PT-b6	PT-b7	ZK1204-b1	样品号	PT-b6	PT-b7	ZK1204-b1
SiO ₂	77.68	77.52	77.16	Ho	0.55	0.55	0.55
TiO ₂	0.10	0.10	0.14	Er	1.89	1.79	1.87
Al ₂ O ₃	12.07	12.10	11.91	Tm	0.38	0.33	0.40
Fe ₂ O ₃	0.58	0.43	0.52	Yb	2.74	2.50	3.04
FeO	0.15	0.30	0.38	Lu	0.42	0.40	0.51
MnO	0.02	0.02	0.03	Y	15.57	15.41	17.65
MgO	0.07	0.08	0.16	ΣREE	109.6	122.4	143.9
CaO	0.33	0.30	0.93	LREE	98.90	111.6	132.3
Na ₂ O	3.85	3.80	3.04	HREE	10.70	10.80	11.62
K ₂ O	4.58	4.74	4.96	LREE/HREE	9.24	10.33	11.38
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.02	(La/Yb) _N	6.95	9.11	9.71
烧失量	0.29	0.31	0.48	(La/Sm) _N	8.74	8.38	10.11
Total	99.72	99.71	99.74	(Gd/Yb) _N	0.60	0.80	0.68
A/NK	1.07	1.06	1.15	δEu	0.51	0.52	0.63
A/CNK	1.02	1.01	0.99	δCe	1.11	0.96	0.88
K ₂ O/Na ₂ O	1.19	1.25	1.63	Rb	133.1	131.2	128.7
AKI	0.94	0.94	0.87	Ba	112	121	373
K ₂ O + Na ₂ O	8.43	8.54	8.00	Th	23.67	26.30	31.55
AR	5.25	5.43	4.30	U	3.26	4.09	6.90
DI	97.08	97.18	93.95	K	38048	39364	41177
La	26.51	31.70	41.11	Ta	1.74	1.45	1.99
Ce	53.16	55.75	63.78	Nb	25.44	24.53	26.60
Pr	4.29	5.31	6.14	Pb	12.8	14.9	15.3
Nd	12.65	15.95	18.13	Sr	20	26	138
Sm	1.96	2.44	2.63	P	45.83	45.12	97.05
Eu	0.34	0.42	0.53	Zr	105.6	106.8	73.8
Gd	1.98	2.43	2.49	Hf	4.51	4.64	2.92
Tb	0.37	0.41	0.40	Ti	582	577	856
Dy	2.37	2.39	2.37				

注: A/NK = Al₂O₃ / (K₂O + Na₂O) (molar/molar); A/CNK = Al₂O₃ / (K₂O + Na₂O + CaO) (molar/molar); AKI = (K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ (molar/molar); DI-分异指数; AR-碱度率

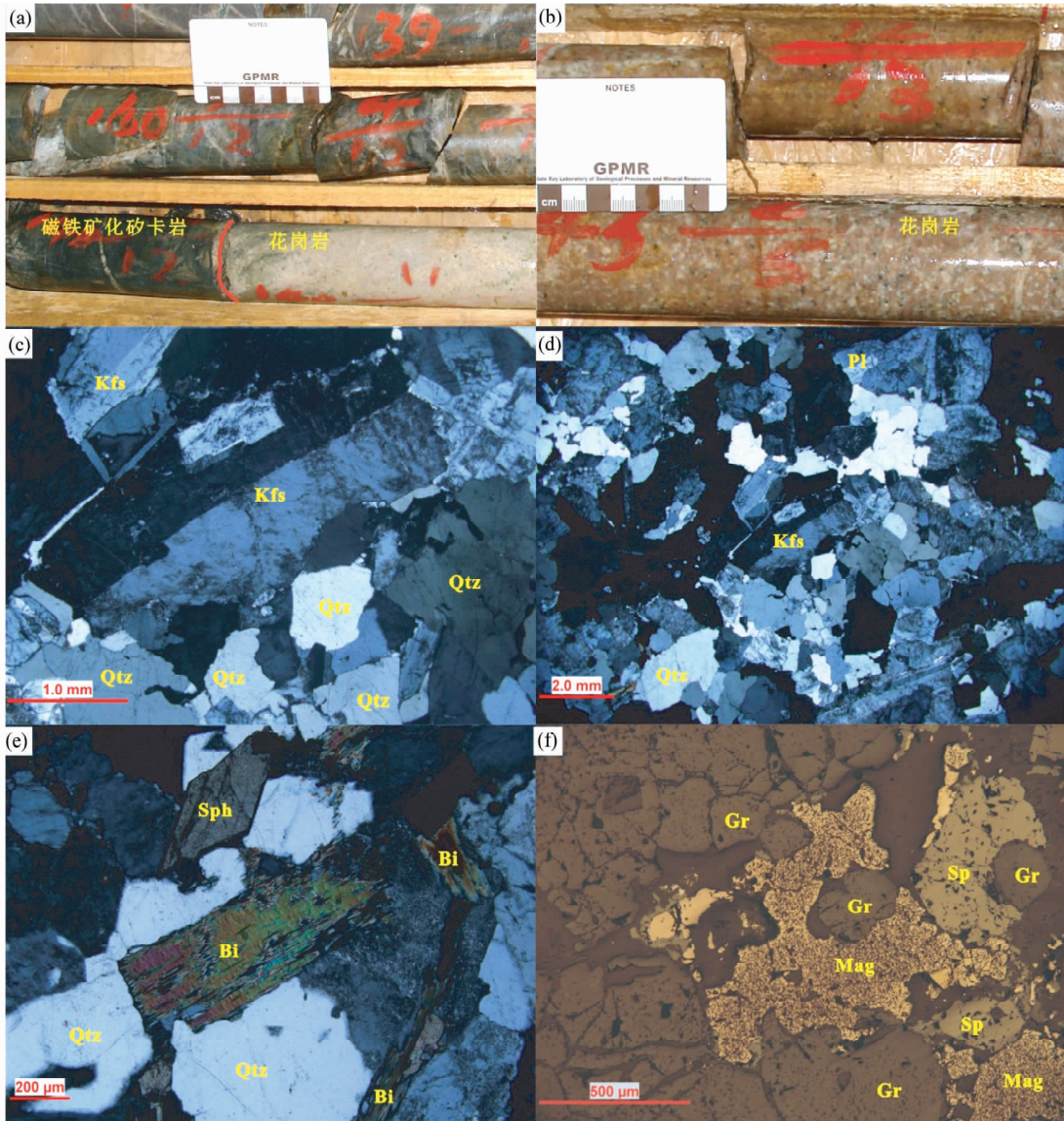


图3 潘田矿区内花岗岩和矿石的标本及显微照片

(a)-花岗岩与磁铁矿化砂卡岩接触界线;(b)-花岗岩,样品 ZK1204-b1;(c-e)-花岗岩的显微照片,样品 ZK1204-b1;(f)-矿石显微照片,样品 ZK1204-b12。Kfs-钾长石;Pl-斜长石;Qtz-石英;Bi-黑云母;Sph-榍石;Gr-石榴子石;Mag-磁铁矿;Sp-闪锌矿

Fig.3 Photographs and microscopic images of granite and iron ore from Pantian deposit

(a)-the contact boundary between granite and magnetite skarn; (b)-granite, sample ZK1204-b1; (c-e)-microphotographs of granite, sample ZK1204-b1; (f)-microphotograph of ore, sample ZK1204-b12. Kfs-K-feldspar; Pl-plagioclase; Qtz-quartz; Bi-biotite; Sph-sphene; Gr-garnet; Mag-magnetite; Sp-sphalerite

花岗岩(PT-b6、PT-b7)的岩石化学参数列于表1。其结果表明,隐伏花岗岩与长坑岩体在主要元素组成上非常相似:(1)高硅, SiO_2 含量介于77.16%~77.68%,高的分异指数(DI)介于93.95%~97.18%,反映了矿区花岗岩经过了高度的分异演化作用;在侵入岩CIPW标准矿物计算的 Q' -ANOR分类图解(图4)中,位于碱长花岗岩和正长花岗岩区,与岩相学观察特征一致。(2)富碱, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 介于8.00%~8.54%,且相对富钾, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 介于1.19~1.63, K_2O 含量介于4.58%~4.96%,在 SiO_2 - K_2O 图(图5a)上投影于高钾

钙碱性系列。岩石的碱度率指数(AR值)介于4.30~5.43,碱铝指数(AKI值)介于0.87~0.94,反映岩石碱含量较高。(3)样品的铝过饱和指数A/CNK值介于0.99~1.02,A/NK介于1.06~1.15,在铝饱和指数图解中位于弱过铝质-准铝质区(图5b)。(4) TiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 P_2O_5 的含量均很低, TiO_2 含量介于0.10%~0.14%, P_2O_5 质量分数仅介于0.01%~0.02%,反映出岩浆经历了显著的磁铁矿和磷灰石等矿物的分离结晶作用。与马坑铁矿有关的大洋-莒舟花岗岩的主要元素特征基本相似(图5)。

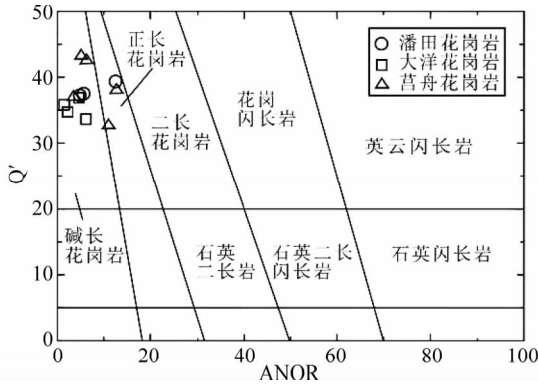


图 4 Q'-ANOR 侵入岩分类图解 (底图据 Streckeisen and Le Maitre, 2002)

Fig. 4 Q'-ANOR classification diagram (after Streckeisen and Le Maitre, 2002)

潘田花岗岩稀土元素组成特征总体表现为稀土总量较低, 稀土总量 (ΣREE) 介于 $109.6 \times 10^{-6} \sim 143.9 \times 10^{-6}$; 轻重稀土比值 (LREE/HREE) 介于 9.24 ~ 11.38, $(La/Yb)_N$ 介于 6.95 ~ 9.71, 变化范围不大, 反映出潘田隐伏岩体和南部出露的花岗岩都是岩浆演化到同一阶段的产物, 属于轻稀土富集型, 且重稀土分异不明显, $(La/Sm)_N$ 介于 8.38 ~ 10.11, $(Gd/Yb)_N$ 介于 0.60 ~ 0.80; 具有中等 Eu 负异常, δEu 值介于 0.51 ~ 0.63, 表现为向右中等倾斜、明显铕负异常的稀土配分模式 (图 6a), 与大洋-莒舟花岗岩的稀土配分模式相比, 后者具有较强的 Eu 负异常, 呈明显的略右倾“V”型稀土配分模式, 表明岩浆分异更彻底 (图 6c)。

潘田花岗岩的微量元素分布比较一致, 均表现为富集

K、Rb、Th、Yb、Y, 贫 Sr、Ba、Ti、P; 在微量元素蛛网图中, Sr、Ba、Ti、P 呈明显的“V”型谷 (图 6b), 与大洋-莒舟花岗岩的微量元素蛛网图相比, 后者更加亏损 Sr、Ba、Ti 和 P (图 6d), 表明其经历了钛铁矿、磷灰石等的分离结晶作用 (赵希林等, 2013)。具典型的低 Ba-Sr 高 Y 花岗岩的特征; U、Th 含量也显著偏高。上述特征表明岩体的成岩过程经历了高度的分异演化作用。

3.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

潘田隐伏花岗岩样品 ZK1204-b1 中的锆石主要呈柱状、短柱状, 无色、透明, 内见细小的包裹体及裂纹。阴极发光图像显示锆石具有岩浆震荡环带结构和扇形环带 (图 7), 应该为岩浆成因 (原岩结晶锆石) (Hanchar and Miller, 1993)。锆石 Th/U 值变化范围为 0.06 ~ 1.21, 表明锆石具有岩浆成因的特征。样品 ZK1204-b1 锆石共测试了 33 个点 (表 2), 其中测试点 14、25、28、29、30、31 均位于谐和线的下方 (图 7), 谐和度低, 是 Pb 扩散丢失的结果, 其锆石年龄不可靠, 不能参与加权平均年龄的计算; 测试点 26 的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 172Ma, 明显高于大多数锆石年龄, 未参与加权平均年龄的计算, 但该测试点落在谐和线上, 其锆石也具有清晰的震荡环带结构 (图 7), Th/U 值为 0.84, 具有岩浆锆石的特征, 可能是被捕获的燕山早期岩浆锆石, 与附近区域出现燕山早期花岗岩 (如汤泉岩体和紫金山岩体) 的现象相吻合。剩余 25 粒锆石的 26 个测试点 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值介于 130 ~ 134Ma 之间, 变化范围较小, 谐和度较高 (大于 95%), 具有非常一致的年龄, 说明锆石保持了良好的 U-Pb 封闭体系, 基本没有 U、Pb 同位素的丢失或加入, 其 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 $131.68 \pm 0.48Ma$, $MSWD = 1.3$, 属于早白垩世。

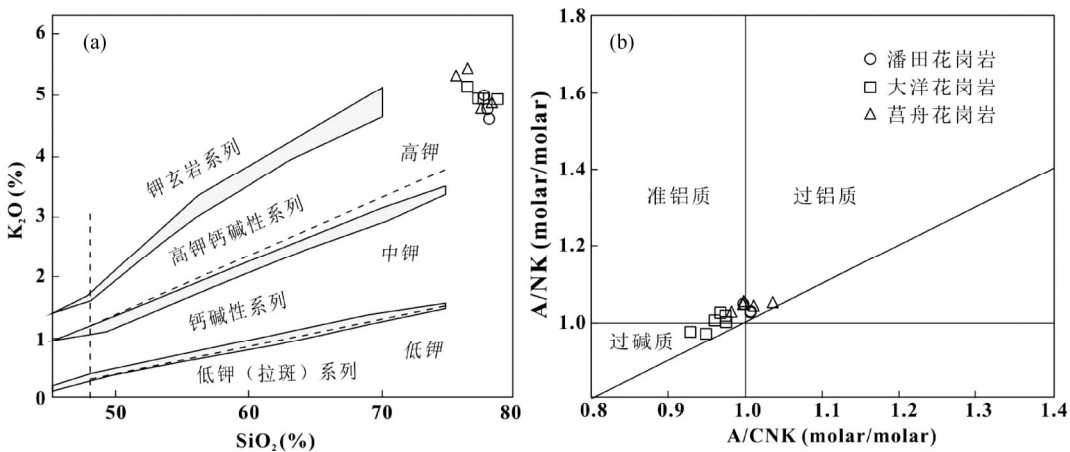


图 5 潘田花岗岩和莒舟-大洋岩体的 SiO_2-K_2O (a, 底图据 Le Maitre, 2002; Rickwood, 1989) 和含铝指数 (b, 底图据 Peccerillo, 1976) 图解

大洋-莒舟岩体数据据赵一鸣等, 1983; 张承帅等, 2012a. 图 6、图 8 和图 9 数据来源同此图

Fig. 5 SiO_2-K_2O (a, after Le Maitre, 2002; Rickwood, 1989) and A/CNK-A/NK (b, after Peccerillo, 1976) diagrams for

Pantian granite and Dayang-Juzhou granites

Data of Dayang-Juzhou granites after Zhao *et al.*, 1983; Zhang *et al.*, 2012a; data source of Fig. 6, Fig. 8 and Fig. 9 same as in this figure

表 2 潘田矿区花岗岩样品 ZK1204-b1 中锆石 LA-ICP-MS 的 U-Pb 同位素定年结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating results of zircons of sample ZK1204-b1 from granite in the Pantian ore deposit

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)				同位素比值				年龄 (Ma)								
	^{206}Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ					
	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ					
1	7	257	293	0.88	0.0204	0.0002	0.1369	0.0486	0.0020	0.0061	0.0000	130	1	130	5	127	98
2	7	214	288	0.74	0.0204	0.0002	0.1368	0.0487	0.0023	0.0063	0.0001	130	1	130	6	132	109
3	10	335	440	0.76	0.0205	0.0001	0.1373	0.0485	0.0014	0.0064	0.0000	131	1	131	4	124	67
4	8	229	336	0.68	0.0207	0.0002	0.1376	0.0483	0.0017	0.0088	0.0002	132	1	131	5	113	85
5	92	2840	4072	0.70	0.0205	0.0002	0.1367	0.0485	0.0004	0.0065	0.0000	131	1	130	1	122	19
6	4	126	154	0.82	0.0204	0.0002	0.1352	0.0481	0.0044	0.0069	0.0001	130	1	129	12	103	216
7	14	668	562	1.19	0.0205	0.0002	0.1357	0.0480	0.0013	0.0069	0.0000	131	1	129	3	101	62
8	7	210	266	0.79	0.0207	0.0002	0.1361	0.0476	0.0024	0.0083	0.0001	132	1	130	7	81	121
9	4	127	156	0.81	0.0206	0.0002	0.1380	0.0487	0.0044	0.0079	0.0002	131	1	131	12	133	213
10	5	162	183	0.88	0.0206	0.0002	0.1369	0.0483	0.0025	0.0087	0.0001	131	1	130	7	114	121
11	6	213	264	0.81	0.0205	0.0002	0.1374	0.0486	0.0027	0.0077	0.0001	131	1	131	7	127	132
12	5	124	181	0.69	0.0209	0.0002	0.1387	0.0481	0.0026	0.0109	0.0003	133	1	132	7	105	129
13	3	66	119	0.56	0.0208	0.0003	0.1375	0.0479	0.0056	0.0115	0.0004	133	2	131	15	96	275
14	22	777	647	1.20	0.0243	0.0001	0.2928	0.0875	0.0024	0.0103	0.0001	155	1	261	7	1371	53
15	11	396	434	0.91	0.0208	0.0002	0.1372	0.0479	0.0020	0.0092	0.0001	133	1	131	5	94	99
16	5	217	192	1.13	0.0205	0.0002	0.1378	0.0488	0.0026	0.0074	0.0001	131	1	131	7	138	124
17	7	258	276	0.93	0.0206	0.0001	0.1387	0.0489	0.0020	0.0067	0.0001	131	1	132	5	141	95
18	15	410	610	0.67	0.0209	0.0001	0.1374	0.0476	0.0020	0.0094	0.0003	133	1	131	6	81	101
19	7	24	384	0.06	0.0204	0.0002	0.1370	0.0486	0.0016	0.0056	0.0000	130	1	130	4	131	78
20	7	294	301	0.98	0.0204	0.0002	0.1358	0.0482	0.0019	0.0058	0.0000	130	1	129	5	108	92
21	12	326	526	0.62	0.0206	0.0002	0.1380	0.0485	0.0014	0.0069	0.0001	132	1	131	4	124	67
22	5	159	195	0.82	0.0210	0.0001	0.1366	0.0472	0.0019	0.0086	0.0001	134	1	130	5	59	96
23	6	223	257	0.87	0.0209	0.0001	0.1416	0.0491	0.0018	0.0081	0.0001	134	1	134	5	152	84
24	11	362	472	0.77	0.0208	0.0001	0.1360	0.0475	0.0018	0.0080	0.0001	132	1	129	5	75	89
25	29	778	1066	0.73	0.0246	0.0001	0.1852	0.0546	0.0008	0.0070	0.0001	157	1	173	3	396	31
26	15	414	493	0.84	0.0270	0.0003	0.1847	0.0496	0.0017	0.0075	0.0001	172	2	172	7	175	80
27	11	518	428	1.21	0.0206	0.0002	0.1372	0.0483	0.0025	0.0065	0.0000	132	1	131	6	113	120
28	3	98	105	0.94	0.0238	0.0002	0.4391	0.1337	0.0065	0.0112	0.0003	152	1	370	20	2147	85
29	3	96	118	0.82	0.0217	0.0002	0.2465	0.0822	0.0057	0.0094	0.0003	139	1	224	16	1250	136
30	10	352	322	1.09	0.0233	0.0001	0.3076	0.0959	0.0030	0.0097	0.0002	148	1	272	9	1545	59
31	5	167	178	0.94	0.0231	0.0002	0.3092	0.0969	0.0045	0.0102	0.0002	148	1	274	13	1565	87
32	8	278	339	0.82	0.0208	0.0002	0.1339	0.0467	0.0021	0.0084	0.0002	133	1	128	6	36	108
33	5	118	195	0.60	0.0207	0.0002	0.1392	0.0488	0.0026	0.0092	0.0003	132	1	132	7	139	126

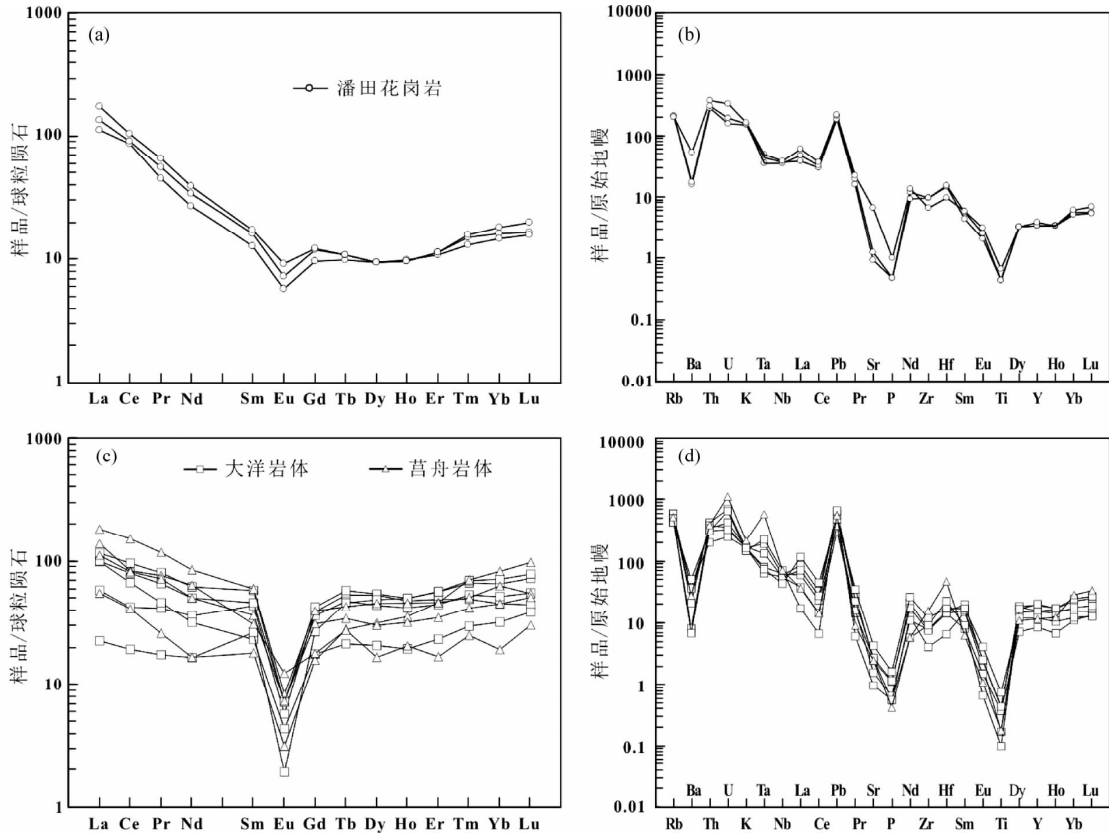


图6 潘田、大洋-莒舟花岗岩稀土元素模式图(a, c)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, d) (标准化值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a, c) and primitive-mantle-normalized trace elements patterns (b, d) for Pantian granite and Dayang-Juzhou granites (normalizing values after McDonough and Sun, 1995)

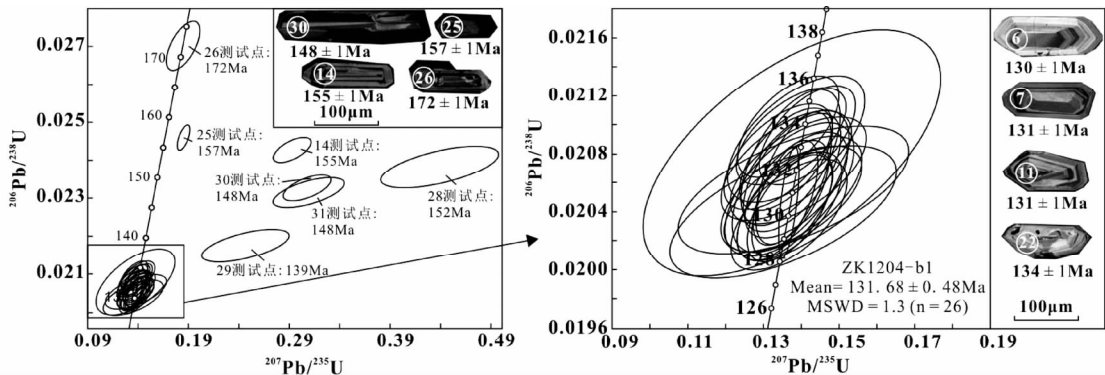


图7 潘田花岗岩 ZK1204-b1 样品的锆石 U-Pb 年龄图

Fig.7 Zircon U-Pb age and its diagram of sample ZK1204-b1 from Pantian granite

4 讨论

4.1 岩石成因类型

潘田花岗岩和马坑铁矿相关的大洋-莒舟花岗岩的岩石地球化学特征、年代学特征非常相似,均形成于早白垩世,且

都具有高硅、富碱、贫钙镁铁和高分异指数等特点,属于弱过铝质-准铝质花岗岩;稀土元素总量较低,呈明显铈负异常的中等右倾配分模式;微量元素以富集大离子亲石元素和亏损高场强元素为特征。这些相似的特征暗示了与“马坑式”铁矿有关的岩体有着相似源区,形成于同一岩浆-构造热事件(林东燕,2011)。潘田、大洋、莒舟花岗岩中均不含过铝质矿物如白云母、堇青石等,且它们的铝饱和指数 $ACNK < 1.1$,排

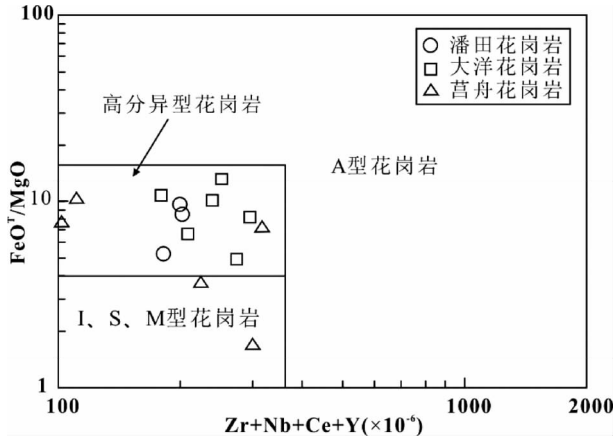


图8 Zr + Nb + Ce + Y 对 FeO^T/MgO 图解 (底图据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 8 Diagram of Zr + Nb + Ce + Y vs. FeO^T/MgO (after Whalen *et al.*, 1987)

除 S 型花岗岩这种可能性。此外,这些岩体尽管富碱,有着高的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量,但是它们的高场强元素含量偏低,Zr + Ce + Nb + Y 均小于 350×10^{-6} , $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值也小于 2.6,并且所有样品中均未发现碱性暗色矿物霓石、钠闪石等,暗示了这些花岗岩不属于 A 型花岗岩 (Eby, 1992; 许保良等, 1998; 魏春生, 2000; 蒋少涌等, 2008; Jiang *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013)。三个岩体的地球化学特征反应了它们可能是 I 型花岗岩。在稀土配分曲线图中,中稀土 (MREE) 相对亏损, Eu 负异常较明显,暗示了角闪石的分异 (Zhao *et al.*, 2007)。花岗岩样品均具有极高的 SiO_2 含量和极低的 MgO 、 Fe_2O_3 含量,在 Zr + Nb + Ce + Y vs. FeO^T/MgO 图解上 (图 8),除了莒舟花岗岩两个样品外,均投影于高分异型花岗岩区域,所有样品的 Zr + Ce + Nb + Y 值均小于 350×10^{-6} , FeO^T/MgO 比值绝大多数介于 4 ~ 16 之间,也进一步反映了岩浆在后期经历过分异演化 (Whalen *et al.*, 1987; Chappell, 1999; Li *et al.*, 2007; 吴福元等, 2007)。综上所述,我们认为这些与马坑铁矿相关的岩浆岩属于高分异 I 型花岗岩,很可能由下地壳中变质火成岩部分熔融形成的熔体在岩浆房中进一步分异演化形成的,并提供了部分成矿物质。

4.2 大地构造背景

在华南地块东南缘广泛的壳幔相互作用形成了晚中生代岩浆作用 (Zhou and Li, 2000; 胡瑞忠等, 2010; Meng *et al.*, 2012)。侏罗-白垩纪岩浆作用从内陆向沿海逐渐变年轻 (Li *et al.*, 2014)。在华南东南沿海地区,巨量的早白垩纪火山-侵入杂岩体构成了一个钙碱性岩浆岩带。这些火成岩侵位的年龄主要集中于 135 ~ 90Ma,主要包括 I 型和 A 型花岗岩类以及少量的双峰型岩浆岩。潘田铁矿位于闽西南拗陷的南东缘。受西太平洋大陆边缘构造活动的影响,本区在

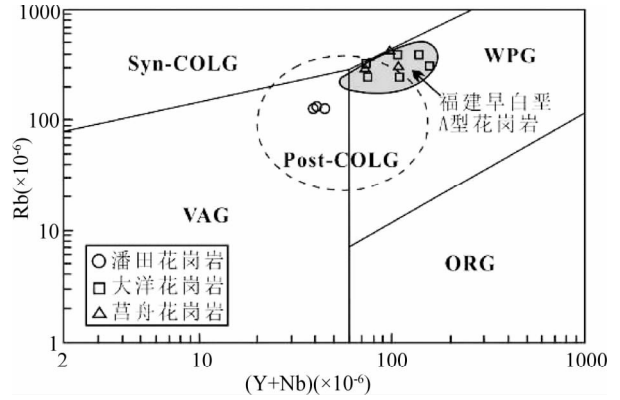


图9 Rb-(Y + Nb) 花岗岩判别图解 (底图据 Pearce, 1996)

Fig. 9 Tectonic distinction diagram of Rb vs. (Y + Nb) for granites (after Pearce, 1996)

中生代产生了北东向为主的构造,并与晚古生代北东向构造复合,使断陷-断裂活动进一步加强,燕山早期岩浆活动强烈,伴随大规模的成矿作用 (裴荣富等, 1987; 李建康等, 2013; Mao *et al.*, 2013)。晚侏罗世东南大陆已经有伸展构造的岩浆活动记录,如闽西南地区汤泉花岗闪长岩形成于 183 ~ 158Ma,是该区开始岩石圈伸展的岩石学记录 (毛建仁等, 2004)。晚侏罗世-早白垩世,由于闽西南地区政和-大浦断裂 NNE 走向与古太平洋板块的俯冲缝合线走向一致; 135Ma 古太平洋板块俯冲方向发生转向,造成大陆岩石圈处于伸展背景,同时导致政和-大浦断裂重新拉张活化,在闽西南地区形成较大规模的火山-岩浆作用,如大洋-莒舟岩体 (张承帅等, 2012a)。潘田铁矿与马坑铁矿、洛阳铁矿具有相似的成矿地质条件和岩石地球化学特征。在花岗岩类构造判别图解中 (图 9),大洋和莒舟岩体的样品均落于板内花岗岩范围内,反映其具有板内拉张环境的特征;潘田花岗岩的样品均落于碰撞后花岗岩区域,可能也暗示具有拉张环境的特征。与此同时,福建省在早白垩世发育的大量 A 型花岗岩,同样投在板内花岗岩区域,支持早白垩世福建省处于较明显的板内拉张环境。因此,本文认为潘田岩体可能就是在这一时期的碰撞后拉张构造环境下形成的。

4.3 岩浆作用与成矿的关系

虽然前人对“马坑式”铁矿做了较为系统的研究,但其矿床成因一直存在较多争议,主要观点有:“海相火山沉积-热液改造矿床说” (邹天人等, 1981; 葛朝华等, 1981; 梁祥济和曲国林, 1982; 韩发和葛朝华, 1983a, b)、“复合叠生层状矿床说” (潘廓祥等, 1982) 和“层控钙矽卡岩型铁矿床说” (赵一鸣等, 1982, 1983)。“马坑式”铁矿床与后期岩浆作用关系密切,高演化的中生代花岗岩对铁矿成矿作用的后期富集起到了重要作用 (赵希林等, 2013),显然研究成矿成岩的时代关系是确定矿床成因的一个重要依据。

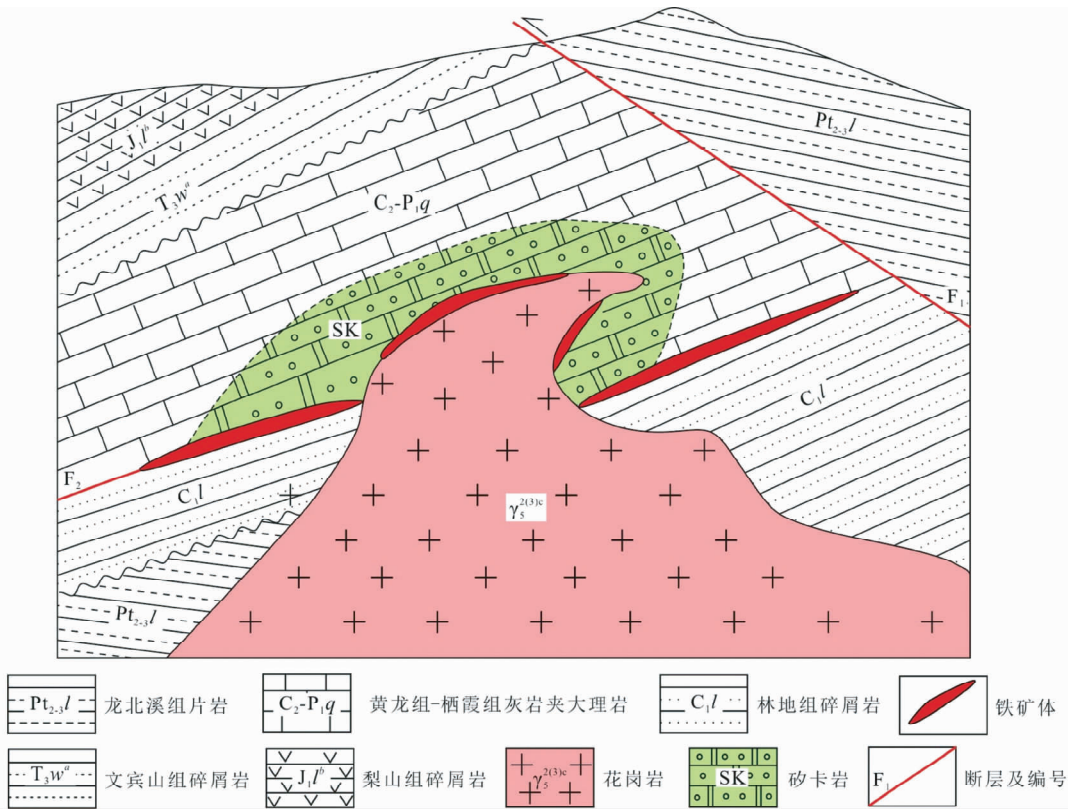


图 10 潘田铁矿床成矿预测模式图

Fig. 10 Mineralization model of Pantian iron ore deposit

马坑铁矿与矿体共生的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $130.50 \pm 0.92\text{Ma}$ (王登红等, 2010) 至 133Ma (张承帅等, 2012c), 与成矿有关的莒舟花岗岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 136Ma 和 133.9Ma (毛建仁等, 2006), 莒舟花岗岩和大洋花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 $129.6 \pm 0.8\text{Ma}$ 和 $132.6 \pm 1.3\text{Ma}$ (张承帅等, 2012a); 洛阳铁矿与矿体共生的辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 $133.0 \pm 1.9\text{Ma} \sim 134.0 \pm 4.2\text{Ma}$, 与成矿有关的花岗斑岩和中细粒斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $131 \pm 1\text{Ma}$ 和 $131.64 \pm 0.62\text{Ma}$ (张达等, 2012); 本文测得与潘田铁矿床成矿有关的花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $131.68 \pm 0.48\text{Ma}$ 。这些年龄数据说明“马坑式”铁矿的岩体年龄与辉钼矿年龄一致, 均形成于早白垩世, 而且辉钼矿与磁铁矿共生, 证实了成岩成矿时空关系密切。

马坑铁矿的成矿物质来源可能是多方面的。赵一鸣等 (1983) 对区域上出露较好的黄龙组、林地组地层进行了含铁量测定, 发现碎屑岩层中的粉砂岩和细砂岩含铁偏高, 累积厚度较大, 全铁平均含量可达 $5\% \sim 7\%$, 可能是原始的富铁层位; 马坑矿区内的辉绿岩含铁量也较高, 实验研究证实了其在一定的条件下相互交代形成了铁矿 (梁祥济和曲国林, 1982), 但其规模较小, 提供铁质有限; 马坑铁矿硫同位素研究 (张承帅, 2012; 张承帅等, 2012c) 也表明矿化硫源主要来源于岩浆硫, 部分混染了围岩中的硫。潘田铁矿中没有发现辉绿岩, 硫同位素研究表明其硫化物的硫源主要来源于深源

岩浆 (杨志, 1982)。因此, 本文认为花岗岩是潘田铁矿床成矿地质作用的实物载体-成矿地质体。

闽西南地区在早白垩世由于下地壳中变质火成岩部分熔融形成花岗质熔体, 在拉张环境下向上侵位, 到达潘田矿区浅部时发生固液分离, 花岗岩结晶的同时分异出富含挥发分、携带大量铁等金属络合剂的超临界流体。超临界流体继续向上迁移, 经过林地组碎屑岩层时, SiO_2 大量加入流体, 流体为酸性, 并萃取了其中部分铁质并继续迁移, 经过林地组 (C_1l) 碎屑岩类岩石和黄龙组-栖霞组 ($\text{C}_2\text{-P}_1\text{q}$) 碳酸盐类岩石接触界面 (硅钙面) 时, 由于接触面岩石化学成份为 CaCO_3 和硅铝酸盐, 同时又是构造薄弱部位, 成为十分重要的成矿地球化学障。因此, 超临界流体很容易直接顺层灌入, 在高温高压条件下, 首先与碎屑岩交代形成红柱石等角闪岩, 同时与碳酸盐岩发生交代作用, 形成石榴石、透辉石等矽卡岩化, 碳酸盐岩中的大量 CaCO_3 转为 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 溶入流体, 同时分解出 OH^- (即: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$), 流体为碱性介质。碱性流体与碎屑岩发生交代作用, 形成阳起石 $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 、绿泥石 $\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ 等羟基矿物。流体中的 OH^- 随之减少, pH 降低, 流体性质由碱性向酸性转化。含矿流体中的金属络合物开始大量沉淀, 导致铁、锌、钼、硫等成矿物质发生了大规模的卸载、沉淀, 沿“硅-钙岩性界面”就位成矿 (叶天竺和薛建玲,

2007;叶天竺等,2007;叶天竺,2013)(图10),形成顺层产出的矿体。

根据矿体产出的空间地质特征,本文认为该矿床属于隐伏-半隐伏花岗岩成矿,矿床成因上属于“多因耦合、临界转换、边界成矿”(翟裕生等,2009;翟裕生,2014)的典型实例。潘田铁矿主要成矿要素除花岗岩外,还有岩性界面、物理化学转换面、层间破碎带等,以及提供不同成矿物质的地层等共同构成了多因耦合的重要因素。“硅钙岩性界面”是该矿床寻找隐伏矿体的重要依据,此外,通过野外踏勘,本文认为花岗岩的“超覆部位”也是潘田铁矿床的成矿有利地段,加强岩体“超覆部位”和“硅钙岩性界面”的研究是下一步找矿的重要方向。

5 结论

(1)潘田铁矿床内钻孔揭露的隐伏花岗岩与矿区南东部出露的长坑花岗岩为同一岩体;利用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年法测得矿区花岗岩的年龄为 $131.68 \pm 0.48\text{Ma}$ (MSWD = 1.3),岩体形成于早白垩世古太平洋板块碰撞后拉张构造环境。

(2)岩石地球化学特征表明潘田矿区内花岗岩为高钾钙碱性系列,属弱过铝质-准铝质花岗岩,稀土元素总量较低,富集轻稀土,轻稀土分馏程度高于重稀土,具有明显铈负异常,呈中等右倾的稀土配分模式。矿区内花岗岩的微量元素特征也表明岩体的成岩过程经历了高度的分异演化作用。潘田岩体应为高分异I型花岗岩。

(3)通过分析潘田铁矿床矿体与相关花岗岩的空间分布规律与成因关系,结合前人的研究,本文认为花岗岩侵入作用是控制主成矿阶段矿体空间定位的地质作用,花岗岩是潘田铁矿床的成矿地质体,矿床成因属于典型“硅钙岩性界面”成矿,矿体一般呈顺层产出,林地组碎屑岩与黄龙组-栖霞组碳酸盐岩的接触界面是成矿有利部位。花岗岩体的“超覆”部位是下一步找矿的有利地段。

(4)潘田铁矿成因类型上属于“多因耦合、临界转换、边界成矿”的典型实例。该矿床属于隐伏-半隐伏花岗岩成矿,为下一步深部找矿工作的开展以及同区域同类型矿床的找寻提供了科学依据。

致谢 野外工作中得到了福建省闽东南地质大队的帮助;锆石U-Pb定年得到天津地质调查中心耿建珍老师的帮助;在论文撰写过程中得到了国土资源部矿产勘查技术指导中心吕志成研究员、李永胜博士和贾儒雅硕士以及中国地质大学(北京)杜泽忠博士和赵婕博士的帮助;审稿人提出了宝贵的修改意见;在此一并表示诚挚的感谢!

References

Andersen T. 2002. Correlation of common lead in U-Pb analyses that do

- not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59–79
- Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551
- Cheng TZ. 2009. Geological structure properties of Pantian iron ore deposit and its genesis of formation. *Mining Engineering*, 7(4): 12–13 (in Chinese with English abstract)
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implication. *Geology*, 20(7): 641–644
- Ge CH, Han F, Zou TR and Chen DQ. 1981. Geological characteristics of the Makeng iron deposit of marine volcano-sedimentary origin. *Acta Geoscientica Sinica*, 3(1): 47–69 (in Chinese with English abstract)
- Han F and Ge CH. 1983a. Geological and geochemical characteristics of the Makeng submarine volcanic hydrothermal-sedimentary iron ore. *Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences*, (2): 154–156 (in Chinese)
- Han F and Ge CH. 1983b. Makeng iron deposit: A submarine volcanic hydrothermal-sedimentary ore. *Science in China (Series B)*, (5): 438–446 (in Chinese)
- Hanchar JM and Miller CF. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories. *Chemical Geology*, 110: 1–13
- Hong DW, Chen XZ, Li CJ and Yu SM. 1980. Typomorphic characteristics of the rock-forming minerals of the Juchow-Dayang granite and the conditions of their formation. *Acta Geologica Sinica*, 54(1): 52–69 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Mao JW, Fan WM, Hua RM, Bi XW, Zhong H, Song XY and Tao Y. 2010. Some scientific questions on the intra-continental metallogeny in the South China continent. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 13–26 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH and Dai BZ. 2008. Characteristics and genesis of Mesozoic A-type granites and associated mineral deposits in the southern Hunan and northern Guangxi provinces along the Shi-Hang belt, South China. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 496–509 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YH, Zhao P, Zhou Q, Liao SY and Jin GD. 2011. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China. *Lithos*, 121(1): 55–73
- Le Maitre RW. 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press, 1–236
- Li JK, Wang DH, Liang T, Xu YM, Zhang YJ, Liang HY, Lu HZ, Zhao B, Li JG, Qu WJ, Zhou SC, Wang RC, Wei LM and Lin JF. 2013. Progress of research on metallogenic regularity and deep exploration in Nanling region and its indication for W-Sn exploration in Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 58–74 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei G and Qi C. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1): 186–204
- Li Z, Qiu JS and Yang XM. 2014. A review of the geochronology and geochemistry of Late Yanshanian (Cretaceous) plutons along the Fujian coastal area of southeastern China: Implications for magma evolution related to slab break-off and rollback in the Cretaceous. *Earth-Science Reviews*, 128: 232–248
- Liang XJ and Qu GL. 1982. A preliminary experiment on the formation temperature and pressure of the iron deposit in Makeng, Fujian. *Acta Geoscientica Sinica*, 4(1): 83–94 (in Chinese with English abstract)
- Lin DY. 2011. Research on Late Paleozoic-Triassic tectonic evolution and metallogenic regularities of iron-polymetallic deposits in the southwestern Fujian Province. Ph. D. Dissertation. Beijing: China

- University of Geosciences, 1 - 138 (in Chinese with English summary)
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China orogen; U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571
- Ludwig KR. 2012. User's Manual for Isoplot 3.75: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1-75
- Mao JR, Xu NZ, Hu Q, Xing GF and Yang ZL. 2004. The Mesozoic rock-forming and ore-forming processes and tectonic environment evolution in Shanghang-Datian region, Fujian. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 285-296 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Chen R, Li JY, Ye HM and Zhao XL. 2006. Geochronology and geochemical characteristics of Late Mesozoic granitic rocks from southwestern Fujian and their tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1723-1734 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Li XF, Zhang CQ and Mei YX. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45-55 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL, Yuan SD, Cheng YB and Chen YC. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510-526 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Cheng YB, Chen MH and Franco P. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48(3): 267-294
- Meng L, Li ZX, Chen H, Li XH and Wang XC. 2012. Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China Block support the flat-slab subduction model. *Lithos*, 132: 127-140
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120(3): 223-253
- Pan KX, Lian TP, and Lin YS. 1982. Discussion on sedimento-altered reformed genesis of Makeng type iron deposit. *Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci.*, 3(2): 1-14 (in Chinese)
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120-125
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63-81
- Pei RF, Wu LS and Zhao Y. 1987. Formational environments, emplacement types and mineralization of granites in the South China region. *Acta Geoscientia Sinica*, 9(1): 53-72 (in Chinese)
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247-263
- Streckeisen A and Le Maitre RW. 1979. A chemical approximation to the model QAPF classification of the igneous rocks. *Neues Jahrbuch Mineralogische Abteilung*, 136: 169-206
- Wang DH, Chen ZH, Chen YC, Tang JX, Li JK, Ying LJ, Wang CH, Liu SB, Li LX, Qin Y, Li HQ, Qu WJ, Wang YB, Chen W and Zhang Y. 2010. New data of the rock-forming and ore-forming chronology for Chinese important mineral resources areas. *Acta Geologica Sinica*, 84(07): 1030-1040 (in Chinese with English abstract)
- Wang KX, Sun T, Chen PR, Ling HF and Xiang TF. 2013. The geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Early Mesozoic A-type granite and diabase in northwestern Fujian Province. *Lithos*, 179: 364-381
- Wei CS. 2000. The genetic model of A-type granites and their geodynamic significances. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 238 (in Chinese)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)
- Xu BL, Yan GH and Zhang C. 1998. Petrological subdivision and source material of A-type granites. *Earth Science Frontiers*, 5(3): 113-124 (in Chinese with English abstract)
- Yang SY, Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH, Ling HF and Luo L. 2012. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China. *Lithos*, 150: 155-170
- Yang Z. 1982. The sulfur isotope characteristics and the genesis of Pantian iron ore deposit in Anxi, Fujian Province. *Geological Institute of Ministry of Metallurgical Industry*, (1): 140-141 (in Chinese)
- Ye TZ and Xue JL. 2007. Geological study in search of metallic ore deposits at depth. *Geology in China*, 34(5): 855-969 (in Chinese with English abstract)
- Ye TZ, Xiao KY and Yan GS. 2007. Methodology of deposit modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 11-19 (in Chinese with English abstract)
- Ye TZ. 2013. Theoretical framework of methodology of deposit modeling and integrated geological information for mineral resource potential assessment. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1053-1072 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Wang JP, Peng RM and Liu JJ. 2009. Research on superimposed metallogenic systems and polygenetic mineral deposits. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 282-290 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS. 2014. A preliminary discussion on fundamental model of metallogenic mechanism. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 1-8 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CS, Su HM, Yu M and Hu ZG. 2012a. Zircon U-Pb age and Nd-Sr-Pb isotopic characteristics of Dayang-Juzhou granite in Longyan, Fujian Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 225-242 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CS, Li L, Zhang CQ and Wang JR. 2012b. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Dayang granite from Longyan, Fujian Province. *Geoscience*, 26(3): 433-444 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CS, Mao JW, Xie GQ, Zhao CS, Yu M, Wang JX and Liu WG. 2012c. Molybdenite Re-Os ages of Makeng skarn Fe-Mo deposit and their geological significance in Fujian Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(Suppl. 1): 224-236 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CS. 2012d. Geology and geochemistry of Makeng Fe-Mo deposit, Fujian. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1-188 (in Chinese with English summary)
- Zhang D, Wu GG, Di YJ, Wang CM, Yao JM, Zhang YY, Lv LJ, Yuan Y and Shi JJ. 2012. Geochronology of diagenesis and mineralization of the Luoyang iron deposit in Zhangping City, Fujian Province and its geological significance. *Earth Science*, 37(6): 1217-1231 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL, Liu K, Mao JR, Ye HM, Yu SY. 2013. The differences of geochemical characteristics and relative with ore-forming processes of two types Early-Cretaceous granites in southwestern Fujian Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(1): 87-96 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YM, Tan HJ and Sun JH. 1982. Characteristics of the skarn zoning of the Makeng and Yangshan iron ore deposits in Fujian and their relationship with the mineralization zoning. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1(01): 11-22 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YM, Tan HJ, Xu ZN, Yuan RG, Bi CS, Zheng RL, Li DX and Sun JH. 1983. The calcic-skarn iron ore deposit of Makeng type in southwestern Fujian. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, (1): 1-141 (in Chinese with English abstract)

- Zhao ZF, Zheng YF, Wei CS and Wu YB. 2007. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. *Lithos*, 93(3): 248–272
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3): 269–287
- Zou TR, Ge CF, Han F and Chen DQ. 1981. On the minerogenetic characteristics of the Makeng iron deposits and their conditions of formation. Institute of Mineral Deposit Geology Branch of Bulletin Chinese Academy of Geological Sciences, 2(1): 1–25 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 程天枝. 2009. 潘田铁矿床地质构造特征及矿床成因探讨. *矿业工程*, 7(4): 12–13
- 葛朝华, 韩发, 邹天人, 陈德潜. 1981. 马坑铁火山沉积成因探讨. *地球学报*, 3(1): 47–69
- 韩发, 葛朝华. 1983a. 福建马坑铁矿床海相火山热液-沉积成因的地质地球化学特征. *中国地质科学院年报*, (2): 154–156
- 韩发, 葛朝华. 1983b. 马坑铁矿——一个海相火山热液-沉积型矿床. *中国科学(B辑)*, (05): 438–446
- 洪大卫, 陈学正, 李纯杰, 余始美. 1980. 福建龙岩莒舟-大洋花岗岩体造岩矿物的标型特征和形成条件. *地质学报*, 54(1): 52–69
- 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 华仁民, 毕献武, 钟宏, 宋谢炎, 陶琰. 2010. 华南陆块内成矿作用的一些科学问题. *地学前缘*, 17(2): 13–26
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 戴宝章. 2008. 十杭带湘南-桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论. *高校地质学报*, 14(4): 496–509
- 李建康, 王登红, 梁婷, 许以明, 张怡军, 梁华英, 卢焕章, 赵斌, 李建国, 屈文俊, 周四春, 王汝成, 韦龙明, 林锦福. 2013. 南岭区域成矿与深部探测的研究进展及其对西藏钨锡找矿的指示. *地球学报*, 34(1): 58–74
- 梁祥济, 曲国林. 1982. 福建马坑铁矿床形成温度和压力实验的初步研究. *地球学报*, 4(1): 83–94
- 林东燕. 2011. 闽西南地区晚古生代-三叠纪构造演化与铁多金属矿成矿规律研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1–138
- 毛建仁, 许乃政, 胡青, 邢光福, 杨祝良. 2004. 福建省上杭-大田地区中生代成岩成矿作用与构造环境演化. *岩石学报*, 20(2): 285–296
- 毛建仁, 陈荣, 李寄岬, 叶海敏, 赵希林. 2006. 闽西南地区晚中生代花岗质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化. *岩石学报*, 22(6): 1723–1734
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. *地学前缘*, 11(1): 45–55
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. *高校地质学报*, 14(4): 510–526
- 潘福祥, 连天萍, 林永生. 1982. 再论马坑式铁矿的沉积-改造(再造)成因. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 3(2): 1–14
- 裴荣富, 吴良士, 赵余. 1987. 华南地区花岗岩形成环境、侵位类型与成矿. *地球学报*, 9(1): 53–72
- 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 唐菊兴, 李建康, 应立娟, 王成辉, 刘善宝, 李立兴, 秦燕, 李华芹, 屈文俊, 王彦斌, 陈文, 张彦. 2010. 我国重要矿产成岩成矿年代学研究新数据. *地质学报*, 84(7): 1030–1040
- 魏春生. 2000. A 型花岗岩成因模式及其地球动力学意义. *地学前缘*, 7(1): 238
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238
- 许保良, 阎国翰, 张臣. 1998. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源. *地学前缘*, 5(3): 113–124
- 杨志. 1982. 福建安溪潘田铁矿硫同位素地质特征及矿床成因. *冶金工业部地质研究所所报*, (1): 140–141
- 叶天竺, 薛建玲. 2007. 金属矿床深部找矿中的地质研究. *中国地质*, 34(5): 855–969
- 叶天竺, 肖克炎, 严光生. 2007. 矿床模型综合地质信息预测技术研究. *地学前缘*, 14(5): 11–19
- 叶天竺. 2013. 矿床模型综合地质信息预测技术方法理论框架. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(4): 1053–1072
- 翟裕生, 王建平, 彭润民, 刘家军. 2009. 叠加成矿系统与多成因矿床研究. *地学前缘*, 16(6): 282–290
- 翟裕生. 2014. 试论矿床成因的基本模型. *地学前缘*, 21(1): 1–8
- 张承帅. 2012. 福建马坑铁矿床地质与地球化学. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1–188
- 张承帅, 苏慧敏, 于森, 胡兆国. 2012a. 福建龙岩大洋-莒舟花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 28(1): 225–242
- 张承帅, 李莉, 张长青, 王九如. 2012b. 福建龙岩大洋岗 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, Hf 同位素组成及其地质意义. *现代地质*, 26(3): 433–444
- 张承帅, 毛景文, 谢桂青, 赵财胜, 于森, 王金祥, 刘武刚. 2012c. 福建马坑砂卡岩型铁(钼)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(S1): 224–236
- 张达, 吴淦国, 狄永军, 王长明, 姚继明, 张垚垚, 吕良冀, 袁远, 石建基. 2012. 福建漳平洛阳铁矿床成岩成矿年代学及其地质意义. *地球科学*, 37(6): 1217–1231
- 赵希林, 刘凯, 毛建仁, 叶海敏, 于胜尧. 2013. 闽西南地区早白垩世两类花岗质岩体地球化学异同及其与成矿作用关系. *矿物岩石地球化学通报*, 32(1): 87–96
- 赵一鸣, 谭惠静, 孙静华. 1982. 福建马坑、阳山铁矿床的砂卡岩分带特征及其与矿化分带的关系. *岩矿测试*, 1(1): 11–22
- 赵一鸣, 谭惠静, 许振南, 袁润广, 毕承思, 郑人来, 李大新, 孙静华. 1983. 闽西南地区马坑式钙砂卡岩型铁矿床. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, (1): 1–141
- 邹天人, 葛朝华, 韩发, 陈德潜. 1981. 论马坑铁矿的成矿特征和形成条件. *中国地质科学院院报(矿床地质研究所分刊)*, 2(1): 1–25