

海南石碌铁矿外围花岗岩类成因 及形成的构造环境

余金杰¹ 陈福雄² 王永辉² 梁 将² 车林睿³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
2. 海南矿业联合有限公司, 海南 昌江 572700; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要:石碌铁矿床外围的印支期花岗岩属于昌江岩体的一部分。这些花岗岩岩性为二长花岗岩, 为准铝质-弱过铝质, 属于高钾钙碱性系列和钾玄岩系列。岩石稀土元素总量较低, 变化不大, ΣREE 介于 $134.96 \times 10^{-6} \sim 241.05 \times 10^{-6}$; 轻重稀土分异明显, LREE/HREE 变化于 4.44~9.67, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化于 3.95~10.69; 具有中等负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.28 \sim 0.57$), Ba、Nb(-Ta)、Ce、Sr、P、Ti 具明显负异常。Ba、Sr、Eu 的明显负异常表明源区有斜长石的大量残留或岩石经历了斜长石的结晶分异作用。花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比(I_{Sr})主要变化于 0.710 852~0.715 492(1 个样品 I_{Sr} 值为 0.706 364)。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.3 \sim -9.1$, T_{DM2} 模式年龄变化于 1.5~1.9 Ga。总体来说, I_{Sr} 值、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 T_{DM2} 值比较均匀, 表明源区是均匀的, 由中元古代抱板群部分熔融作用所形成。花岗岩形成于后碰撞环境。笔者在探讨海南岛与俯冲有关的弧岩浆活动、同碰撞岩浆活动和与后碰撞有关的岩浆活动基础上, 认为海南岛海西—印支期花岗岩可与北越南海西—印支期花岗岩进行对比。

关键词:印支期花岗岩; 后碰撞; 部分熔融; 石碌铁矿床外围; 海南岛

中图分类号: P618.31; P588.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1700-12

海南岛印支期花岗岩以位于白垩纪白沙盆地北西侧的昌江岩体和南东侧的琼中岩体为代表(图 1), 前人研究认为花岗岩的 Rb-Sr 全岩等时线年龄和锆石 U-Pb 年龄为 320~272 Ma^[1-3], 并认为它们是 S 型花岗岩, 由元古宙地壳岩石经改造重熔的产物^[1,3]。与此同时, 研究者们也注意到这些花岗岩具 I-S 型花岗岩的过渡性质。琼中岩体(也包括与其具相同时代与成因的小岩体)的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 237 Ma^[4], 单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 226~234 Ma^[5], 时代应为中—晚三叠世。原儋县岩基被肢解为二部分, 一部分属于燕山早期花岗岩, 本文仍称其为儋县岩体, 其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (186 ± 3) Ma^[4], 另一部分被称为昌江岩体, 其时代与琼中岩体相近, 应为中—晚三叠世。本文研究的石碌铁矿床外围花岗岩属于昌江岩体的一部分, 其锆石 LA-ICP-MS

U-Pb 年龄为 230 Ma(另文发表)。

本文以石碌铁矿床外围的中—晚三叠世花岗岩为研究对象, 在岩石学观察的基础上, 对这些花岗岩的岩石地球化学、Nd 和 Sr 同位素及形成时代进行了详细研究。在前人对海南岛海西—印支期花岗岩体研究的基础上, 本文论述了海西—印支期岩浆活动与古特提斯洋的俯冲—碰撞作用之间的关系。

1 区域地质背景

海南岛是中国东南陆缘海域中最大岛屿之一, 以琼州海峡与华南大陆相连。大地构造位置上, 位于太平洋板块、印度—澳大利亚板块和欧亚板块三叉结合部位(图 1-a), 受太平洋构造域和特提斯构造域两大地球动力学系统明显控制。海南岛构造单元的划分还有不同方案, 以南部九所—陵水断裂为界(图

收稿日期: 2012-11-06; 改回日期: 2012-11-13

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目“我国典型金属矿科学基地研究”(200911007-24)资助。

作者简介: 余金杰, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 从事金属矿成矿作用研究; E-mail: yjjchina@sina.com。

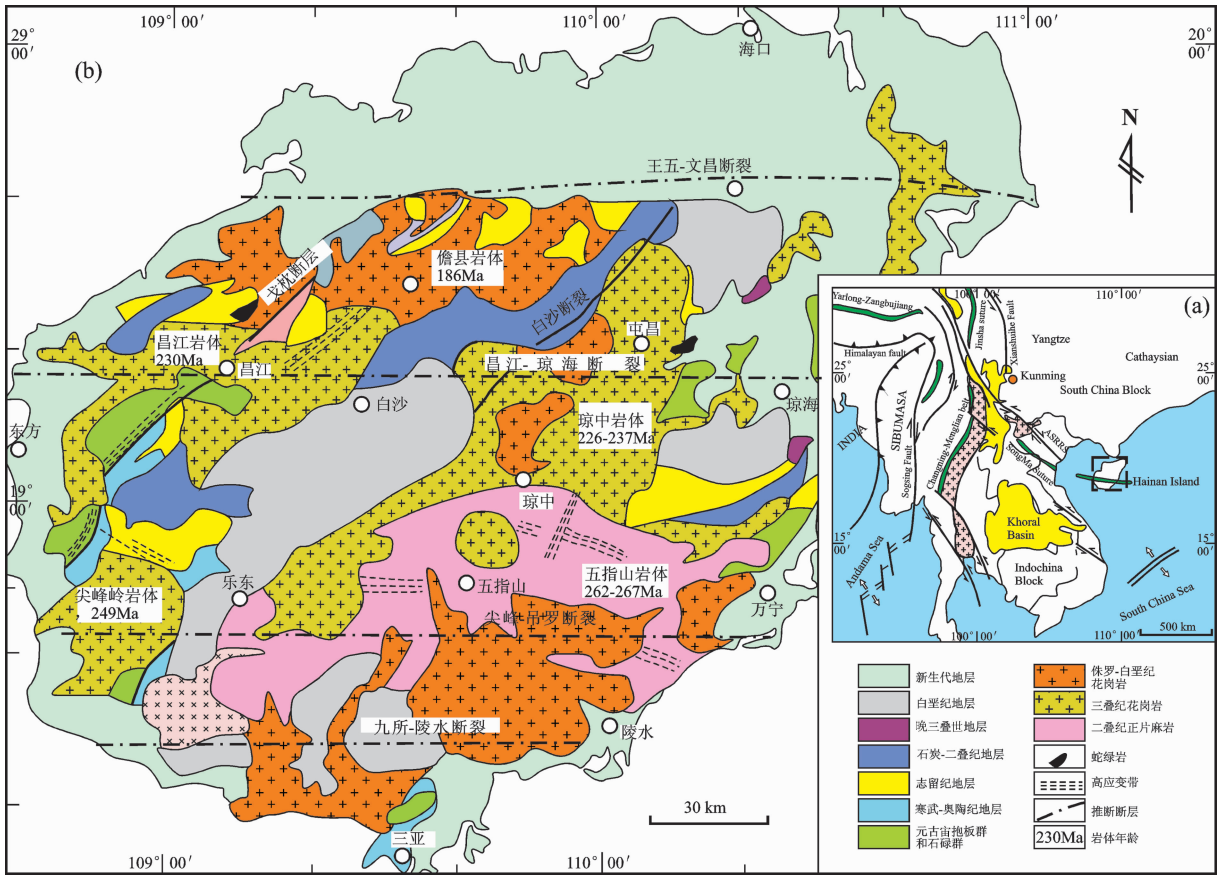


图 1 海南岛地质简图(据文献^[6]修改)

Fig.1 Geological sketch map of Hainan Island (modified after Reference^[6])

1-b), 海南岛可划分为属于华南褶皱系的岛北五指山褶皱带和属于南海地台的岛南微板块^[2], 石碌铁矿床位于五指山褶皱带的西段。另外一种看法是, 沿着昌江—琼海断裂出露有变基性岩(蛇绿岩, 图 1-b), 代表着古特提斯洋残片, 昌江—琼海断裂为华南地块与印支地块的板块缝合线^[7-10]。海南岛前寒武纪地层包括中元古代长城系抱板群和新元古代青白口系石碌群, 抱板群为一套火山—碎屑沉积岩建造, 遭受了高级绿片岩—角闪岩相的变质作用^[11-14]。石碌群为一套浅海—潟湖相(含铁)火山—碎屑岩建造和碳酸盐岩建造^[15,16], 遭受绿片岩相, 局部达角闪岩相变质作用。寒武系—奥陶系出露于昌江—琼海断裂以南地区, 岩性为页岩、砂岩、粉砂岩和板岩, 含少量灰岩夹层, 志留系为浅海相砂岩。晚古生代地层出露于九所—陵水断裂之北, 由泥盆系砂岩、石炭系板岩和变质的火山岩、下二叠统灰岩和中二叠统砂岩组成。

三叠系出露于海南中部琼海地区和北部安定地区, 其上覆地层为白垩系陆相碎屑岩。

海南岛主要构造线方向为东—西向和北东—南西向, 其次为北西向(图 1-b)。东西向构造自北到南主要包括王五—文昌断裂、昌江—琼海断裂、尖峰—吊罗断裂和九所—陵水断裂。北东—南西向构造主要为北东—南西走向的白沙断裂和戈枕断裂。这些构造可能形成于古生代—中生代或更早时期^[2,8,17-18]。

海南岛花岗岩约占海南岛陆地面积 37%, 包括片理化花岗岩和无片理化花岗岩。片理化花岗岩展布于乐东—五指山—万宁地区, 以晚二叠世五指山花岗质杂岩体为代表(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 262~267 Ma^[19])。无片理化花岗岩包括琼中岩体(锆石 U-Pb 年龄为 226~237 Ma^[4,5])、尖峰岭岩体(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (249±5) Ma^[20])和昌江岩体, 这些岩体均属于印支期。无片理化花岗岩还包括中

侏罗世—白垩世中粗粒二长花岗岩。

2 岩体地质和测试分析方法

2.1 岩体地质

石碌铁矿外围花岗岩属于昌江岩体的一部分,岩性主要由似斑状中粒到中粗粒二长花岗岩组成,少量为花岗闪长岩。本文对石碌矿区外围中—晚三叠世花岗岩样品进行了分析(图2)。岩石的主要成分是斜长石(40%左右)、钾长石(30%~35%)和石英(15%~20%),暗色矿物主要是黑云母(5%~10%),其次是普通角闪石。岩石中的斜长石常有两种形态:一种为半自形板状,粗粒,大小2~4 mm,是岩石的主要组成部分,多为更长石(An 20~30),有的斜长石具环带构造,中心可达中长石。另一部分斜长石为他形粒状,粒小,约0.2 mm,量少,大多属于中长石(An 30~35),它们分散或呈小团块嵌布于其他颗粒之间。钾长石呈半自形板状—他形粒状,部分粒径为5~7 mm,部分粒径<5 mm,杂乱或填隙状分布。黑云母呈鳞片—叶片状,片径一般<2 mm。岩体内广泛分布

不规则、椭圆状或布条状等大小不等的暗色包体,与主岩花岗岩呈突变或渐变关系。昌江岩体的矿物成分、结构和构造与琼中岩体^[5]基本一致。

2.2 分析方法

岩石的主量、微量和稀土元素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行,主量元素用X射线荧光光谱法测定,仪器型号为飞利浦PW2404 X射线荧光光谱仪。微量和稀土元素用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法测定,仪器型号为Finnigan MAT制造的HR-ICP-MS(Element I)。分析相对标准偏差(RSD)<5%。

岩石的Sr、Nd同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行,仪器型号为ISOPROBE-T热电离质谱仪,Rb-Sr和Sm-Nd同位素分析误差均以2σ计。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

石碌矿区外围印支期花岗岩主量元素分析结果

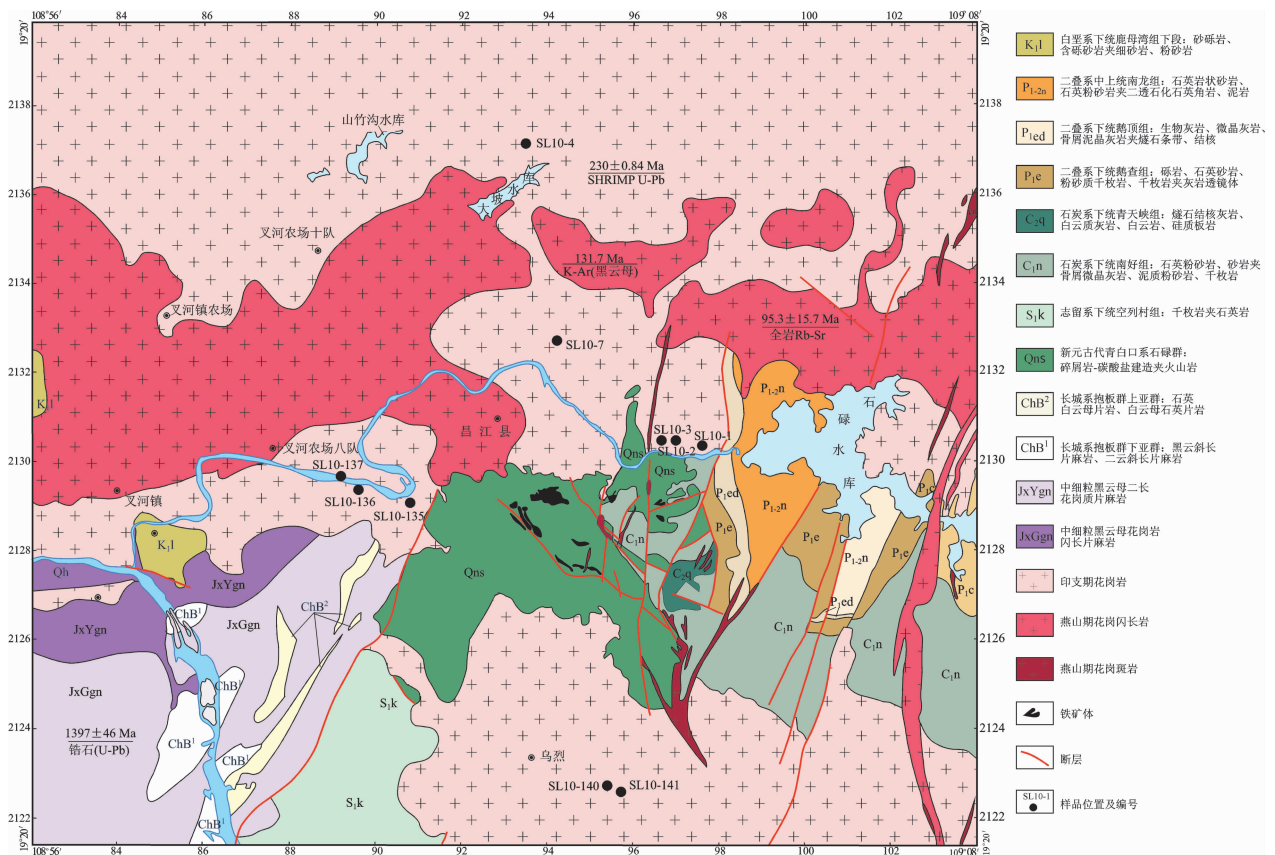


图2 石碌矿区及外围地质简图(据文献^[2]修改)

Fig.2 Geological sketch map of the Shilu deposit and its surrounding area (modified after Reference^[2])

表 1 石碌铁矿外围花岗岩主量(%)、微量和稀土元素(10⁻⁶)分析结果

Table 1 Major elements(%), trace elements and rare earth elements(10⁻⁶) data of granites in the periphery of the Shilu iron deposit

样品号	SL10-1	SL10-2	SL10-3	SL10-4	SL10-7	SL10-135	SL10-136	SL10-137	SL10-140	SL10-14
岩性	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗闪长岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩
SiO ₂	72.26	74.2	72.39	72.71	74.26	69.95	68.69	71.58	73.1	74.21
TiO ₂	0.33	0.26	0.42	0.4	0.33	0.46	0.45	0.18	0.34	0.21
Al ₂ O ₃	13.29	12.39	12.36	12.69	11.84	14.36	14.15	14.53	12.53	12.65
FeO*(全铁)	2.43	1.94	3.05	2.67	2.18	3.11	3.21	1.54	2.26	1.67
Fe ₂ O ₃	0.70	0.49	1.00	0.74	0.81	0.45	1.12	0.43	0.84	0.80
FeO	1.8	1.5	2.15	2	1.45	2.7	2.2	1.15	1.5	0.95
MnO	0.056	0.053	0.065	0.051	0.041	0.054	0.088	0.034	0.055	0.048
MgO	0.66	0.51	0.81	0.61	0.55	0.78	0.76	0.4	0.59	0.42
CaO	2.4	1.24	1.21	2.32	2.4	1.04	1.77	0.8	1.45	1.2
Na ₂ O	2.48	3.84	3.15	2.75	2.6	2.5	2.8	2.63	2.93	3.1
K ₂ O	5	4.09	4.2	4.74	3.79	5.02	4.7	6.52	5.59	5.48
P ₂ O ₅	0.099	0.086	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.054	0.11	0.06
LOI	0.51	0.89	1.51	0.41	1.32	1.98	2.45	1.32	0.54	0.51
Total	99.58	99.55	99.39	99.56	99.51	99.42	99.3	99.63	99.58	99.64
Mg#	33	32	32	29	31	31	30	32	32	31
Rb	225	183	177	227	144	230	235	240	288	324
Sr	206	96.3	211	217	238	136	66.9	143	80.3	56.5
Ba	387	268	421	593	336	525	255	627	461	300
Zr	164	189	219	180	139	222	250	183	345	261
Hf	5.54	6.98	6.52	5.92	4.34	6.58	8.28	5.72	10.3	8.44
Nb	13.5	13.6	15.5	12.5	11.6	13.2	15	9	18.9	18.4
Ta	1.65	1.98	1.57	1.61	1.07	1.52	2.23	0.864	2.25	2.82
Th	15.1	15.7	17.8	16.6	14.1	17.8	20.5	12.6	49.9	49.6
U	7.16	6.84	5.69	4.89	4.69	6.47	5.82	3.49	12.5	15.1
Y	26.7	41.4	30.8	34.2	22	28.4	43.6	19.9	40.9	62.6
La	29.7	25.7	39.6	38.5	27.4	25	33.7	34.4	51.1	46.8
Ce	58.6	52.6	76.2	76.4	53.8	53.2	67.8	64.8	98.2	75.1
Pr	7.17	6.37	9.43	9.33	6.48	6.53	8.67	7.82	11.5	10.2
Nd	27.4	25.5	35.9	34	25.4	25.8	32.9	28.7	42.9	37.1
Sm	5.96	5.97	7.01	6.54	5.05	5.43	7.1	5.37	8.27	7.73
Eu	1.04	0.93	0.928	1.25	0.921	0.954	0.856	0.929	0.92	0.736
Gd	5.13	5.63	5.96	5.37	4.58	5.08	6.61	4.36	7.21	8.32
Tb	0.988	1.21	1.14	0.97	0.812	0.965	1.31	0.767	1.32	1.77
Dy	5.39	7.15	5.92	5.78	4.34	5.55	7.5	3.92	7.51	10.3
Ho	0.954	1.45	1.13	1.18	0.788	1.09	1.52	0.712	1.45	2.24
Er	2.83	4.38	3.3	3.79	2.39	3.3	4.58	2.1	4.49	7.13
Tm	0.464	0.748	0.507	0.619	0.39	0.539	0.797	0.339	0.73	1.21
Yb	2.83	4.39	3.25	3.87	2.26	3.5	5.01	2.17	4.71	7.74
Lu	0.428	0.703	0.477	0.596	0.353	0.524	0.802	0.324	0.742	1.27
ΣREE	148.88	142.73	190.75	188.2	134.96	137.46	179.16	156.71	241.05	217.65
LREE/HREE	6.83	4.56	7.8	7.49	7.48	5.69	5.37	9.67	7.56	4.44
δEu	0.56	0.48	0.43	0.63	0.58	0.55	0.38	0.57	0.36	0.28
(La/Yb) _N	7.08	3.95	8.21	6.71	8.17	4.82	4.53	10.69	7.31	4.08

(表 1) 显示: 岩体 SiO₂ 含量在 68.69%~74.26%, Na₂O + K₂O 含量在 6.39%~9.15%, K₂O/Na₂O 在 1.07~2.48, 为富钾质特征, 在 TAS 图解中显示为亚碱性系列(图略), 除个别样品落入花岗闪长岩/石英闪长岩外, 其余样品均落入花岗岩区。在 SiO₂-K₂O 图解中(图 3), 属于高钾钙碱性系列和钾玄岩系列。Al₂O₃、TiO₂、P₂O₅、MgO、CaO 含量较低。铝饱和指数(A/CNK)介于 0.91~1.25, A/NK 变化于 1.15~1.50, 在铝饱和指数图解上(图 4), 样品落于准铝质-弱过铝质区。少数样品的 A/CNK>1.1, 落入强过铝质区。岩石 FeO*/MgO 值变化于 3.68~4.38, 与世界 S 型花岗岩平均值^[24](2.39)相当。

3.2 微量和稀土元素

石碌铁矿外围印支期花岗岩的微量元素和稀土元素分析结果(表 1)可看出: 印支期岩体高场强元

素(HFSE)含量较高, Zr 含量为 139×10⁻⁶~345×10⁻⁶, Hf 含量为 4.34×10⁻⁶~10.3×10⁻⁶, 而 Nb 含量和 Ta 含量比较低, Nb 含量为 9×10⁻⁶~18.9×10⁻⁶, Ta 含量为 0.864×10⁻⁶~2.82×10⁻⁶。

大离子亲石元素明显富集, Rb 含量为 144×10⁻⁶~324×10⁻⁶, Ba 含量为 255×10⁻⁶~627×10⁻⁶, U 含量为 3.49×10⁻⁶~15.1×10⁻⁶, Th 含量为 12.6×10⁻⁶~49.9×10⁻⁶, Sr 含量较低, 变化于 56.5×10⁻⁶~238×10⁻⁶, Rb/Sr 比值为 0.61~5.73。在微量元素蛛网图上(图 5), Rb、Th-(K)、Pb 明显正异常, Ba、Nb(-Ta)、Ce、Sr、P、Ti 具明显负异常。岩石稀土元素总量较低, 变化不大, ΣREE 介于 134.96×10⁻⁶~241.05×10⁻⁶; 轻重稀土分异明显, LREE/HREE 变化于 4.44~9.67, (La/Yb)_N 变化于 3.95~10.69; δEu 变化于 0.28~0.63, 具有中等负 Eu 异常特点; 在球粒陨石标准化配分图解(图

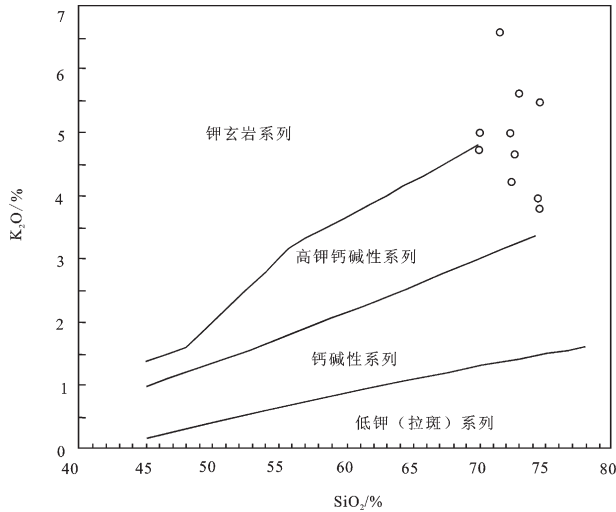


图3 SiO₂-K₂O图(据文献^[23])

Fig.3 SiO₂-K₂O diagram (after Reference^[23])

6)中,所有样品呈轻稀土富集、重稀土平缓的右倾型REE配分模式。

3.3 Sr-Nd 同位素

花岗岩的 Sr-Nd 数据见表 2。花岗岩 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比 (*I*_{Sr}) 变化于 0.706 364~0.715 492, 一个样品 *I*_{Sr} 值为 0.706364, 其它样品 *I*_{Sr} 值变化于 0.710 852~0.715 492。ε_{Nd}(*t*) = -7.3~-9.1, *T*_{DM2} 模式年龄变化于 1.5~1.9 Ga。总体来说, *I*_{Sr} 值、ε_{Nd}(*t*) 值和 *T*_{DM2} 值比较均匀。

4 讨论

4.1 石碌铁矿外围花岗岩的源区和成因

石碌铁矿外围花岗岩 Nb/Ta 比值中等 (介于 6.52~10.84), 与陆壳岩石值(约 11)相近^[26], 而与幔源岩石及球粒陨石值^[26,27] (17.5 ± 2) 明显不同, 也与被认为和幔源岩浆有关的 Gremiakha Vyrmes 正长岩^[28] (约 22) 明显不同。Rb/Nb 比值介于 11.42~26.67, 均明显高于地壳平均值 (5.36) 及铝质 A 型花岗岩的值, 而与世界 S 型花岗岩的值^[24] 相近, 显示其主要为地壳物质熔融而成。Nb 的明显亏损 (Nb/La 值为 0.26~0.53) 表明源区岩石中以陆壳组分为主。

花岗质岩石属于高钾钙碱性-钾玄岩系列岩石, 具明显的 Ba、Sr、Nb、Ti 负异常, 富集 Rb、Th、K、La (图 5), 与 Lachlan 褶皱带中花岗质岩石^[29]、喜马拉雅淡色花岗岩^[30,31] 和越南南部 Dalat 带中花岗质岩石^[32] 基本一致, 地壳源区的特征非常明显。起源于地壳的花岗质岩石成分比较复杂, 受源区成分和部分熔融条

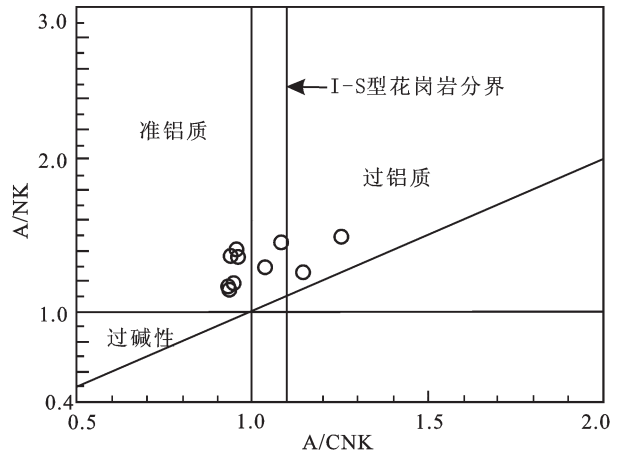


图4 花岗岩铝饱和指数图解(据文献^[23])

Fig.4 A/NK-A/CNK plot of granite (after Reference^[23])

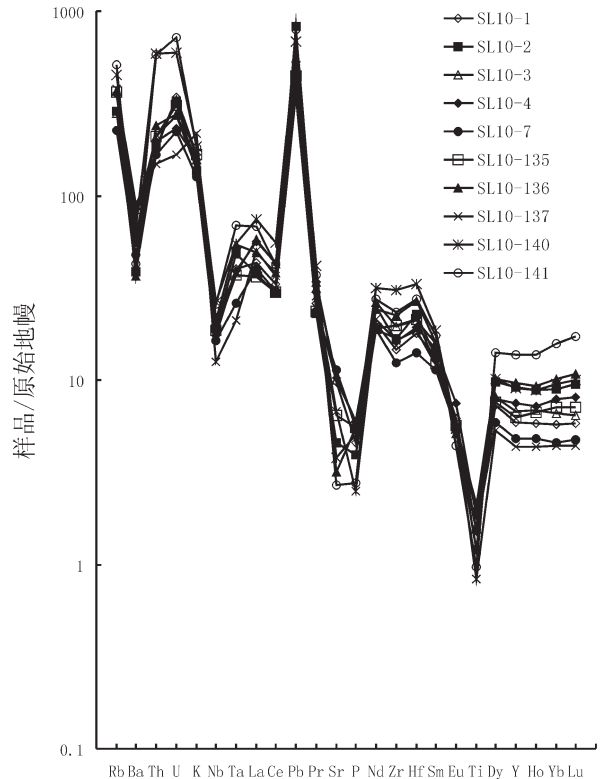


图5 石碌铁矿外围花岗岩原始地幔标准化的微量元素蛛网图(标准化值据文献^[29])

Fig.5 Primitive-mantle normalized spidergram of granite in the periphery of the Shilu iron deposit (normalization values after Reference^[29])

件(如 H₂O 含量、温度、压力和氧逸度)联合控制^[32]。在各种熔融条件下, 不同地壳源岩部分熔融产生的熔体成分具有不同的主要氧化物比值^[33], 角闪岩部

表 2 石碌铁矿外围花岗岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成

Table 2 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions of granites in the periphery of the Shilu iron deposit

样品号	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(2s)	I(Sr)	Sm/10 ⁻⁶	Nd/10 ⁻⁶
SL10-1	195	191	2.9505	0.722851±12	0.713200	5.35	26.5
SL10-2	167	89.7	5.3938	0.729638±13	0.711995	5.56	24.4
SL10-3	164	200	2.3804	0.720991±12	0.713205	7.17	36.8
SL10-4	203	209	2.8153	0.724701±11	0.715492	5.89	32.3
SL10-7	140	248	1.636	0.717924±12	0.712573	4.88	24
SL10-135	217	122	5.1476	0.730387±12	0.713549	4.99	23.5
SL10-136	227	58.6	11.2008	0.743002±11	0.706364	6.5	30.9
SL10-137	229	134	4.957	0.727618±10	0.711404	5.05	28.4
SL10-140	286	71	11.6592	0.748989±13	0.710852	7.73	41.2
SL10-141	309	52.6	17.0115	0.769900±18	0.714255	7.58	36.3
样品号	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(2σ)	eNd(t)	T _{DM1} (Ga)	T _{DM2} (Ga)	f _{Sm/Nd}	
SL10-1	0.1222	0.512135±6	-7.6	1.7	1.7	-0.38	
SL10-2	0.1378	0.512155±13	-7.7	2.0	1.9	-0.3	
SL10-3	0.1178	0.512123±9	-7.7	1.6	1.6	-0.4	
SL10-4	0.1102	0.512054±8	-8.9	1.6	1.6	-0.44	
SL10-7	0.1226	0.512058±18	-9.1	1.8	1.8	-0.38	
SL10-135	0.1284	0.512148±7	-7.6	1.8	1.7	-0.35	
SL10-136	0.1274	0.512160±8	-7.3	1.7	1.7	-0.35	
SL10-137	0.1074	0.512096±10	-8.0	1.5	1.5	-0.45	
SL10-140	0.1133	0.512135±15	-7.4	1.5	1.6	-0.42	
SL10-141	0.1263	0.512136±7	-7.7	1.8	1.7	-0.36	

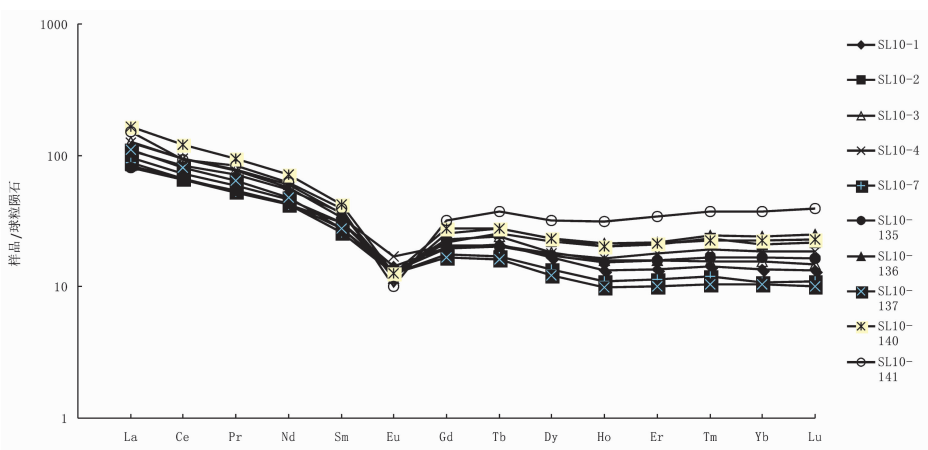


图 6 石碌铁矿外围花岗岩球粒陨石标准化的稀土配分模式图(标准化值据文献^[25])

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of granite in the periphery of the Shilu iron deposit (normalization values after Reference^[25])

分熔融产生的花岗质岩浆比变泥质岩产生的岩浆有低的 $Al_2O_3/(FeO^* + MgO + TiO_2)$ 和 $(Na_2O + K_2O)/(FeO^* + MgO + TiO_2)$ 值。在主要氧化物比值图上(图

7), 石碌铁矿外围花岗岩落入变杂砂岩区, 岩石的成因为不均匀变杂砂岩型地壳物质的脱水熔融作用所形成。在板块汇聚的同碰撞/碰撞后背景下, 地壳源

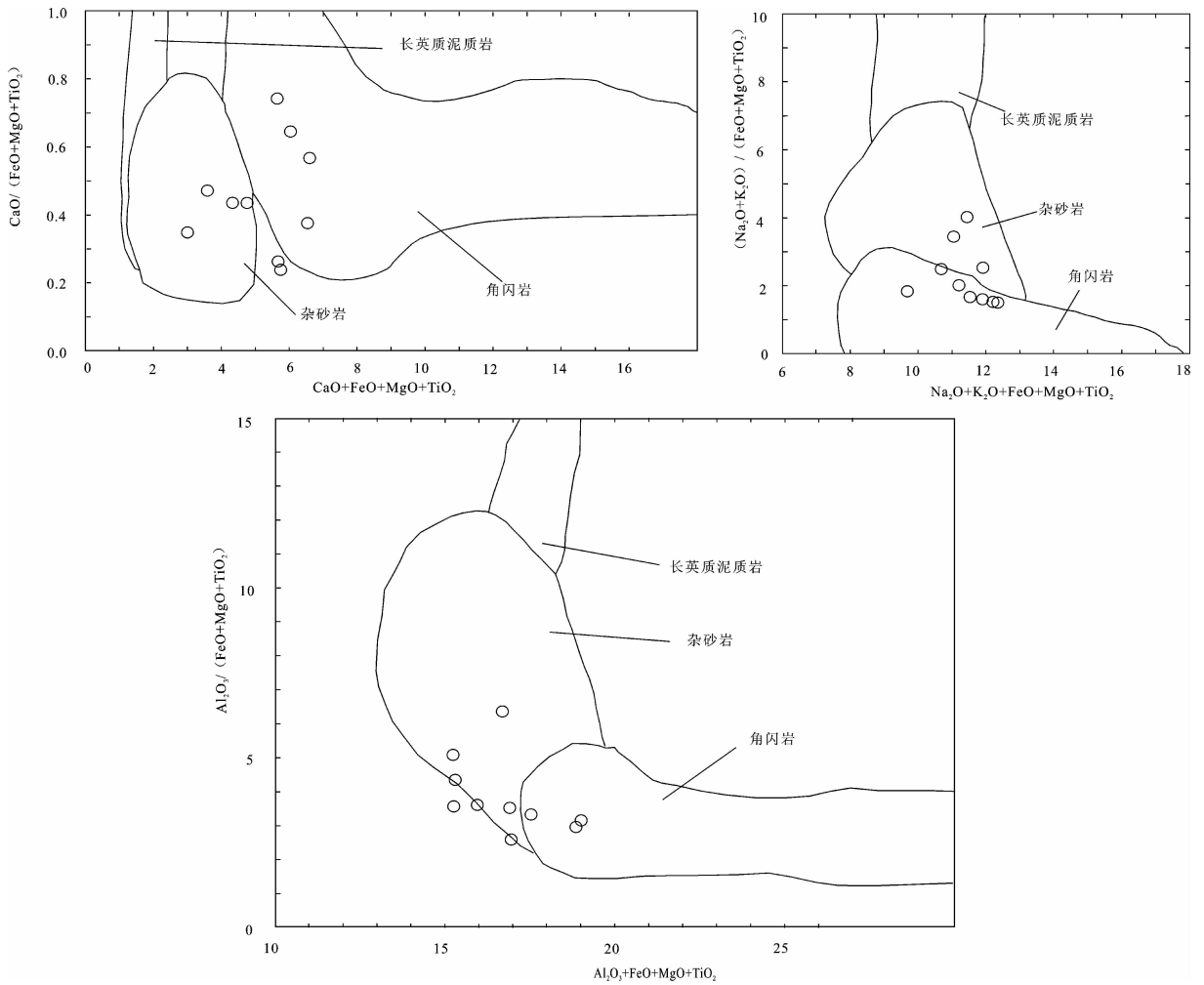


图 7 石碌铁矿外围花岗岩化学成分与某些实验熔体化学成分的对比如^[33]

Fig.7 Comparison of chemical compositions between the granites in the periphery of the Shilu iron deposit and compositional fields of some experimental melts^[33]

岩的部分熔融作用与由岩石圈根的拆沉作用或板片拆断作用所引起的减压作用有关^[34,35]。

花岗岩 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比 (I_{Sr}) 变化于 0.706 364~0.715 492, 1 个样品 I_{Sr} 值为 0.706 364, 其他样品 I_{Sr} 值变化于 0.710 852~0.715 492。 $\epsilon_{Nd}(t) = -7.3 \sim -9.1$, T_{DM2} 模式年龄变化于 1.5~1.9 Ga。这些数据已说明花岗岩源区是均匀的, 可能由中元古代抱板群部分熔融作用所形成。

世界上 I 型花岗岩并不全由火成岩部分熔融所形成, 例如阿拉斯加 I 型花岗岩由类复理石沉积物部分熔融所形成^[36], 德国 Schwarzwald 北部高钾钙碱性花岗岩由变质杂砂岩部分熔融所形成^[35], 越南南部 Dalat 带上高钾钙碱性 Cana 和 Deoca 花岗岩具有相同的形成机理^[32]。本文的资料也佐证此看法。

花岗岩显示强烈的 Sr、Ba 亏损, 具明显的负 Eu 异常, 说明熔体含斜长石残留相, 斜长石的分异作用对岩石的形成起着重要作用。轻重稀土元素分异明显, $(La/Yb)_N$ 变化于 3.95~10.69, 重稀土比较平坦 (图 6), 并且岩石 Sr 含量高, 表明石榴子石在地壳源区的作用微不足道, 岩石形成过程中未经历石榴子石分异作用或岩石源区没有石榴子石残留体。岩石 Ti 异常被归因于榴石的分异作用, p 异常归因于磷灰石的分异作用

4.2 形成的构造环境

花岗岩属于高钾钙碱性-钾玄岩系列岩石, 大离子亲石元素 K、Rb、U、Th 富集, 高场强元素 Nb、Ti 相对亏损 (图 5), 此类特征的花岗岩形成于与俯冲有关的环境^[32,37,38]。岩浆的微量元素成分主要依赖

于源岩成分,研究表明花岗岩中微量元素是示踪花岗岩浆形成构造环境的有力工具。在花岗岩微量元素图解上(图 8),石碌铁矿外围花岗岩落入后碰撞区和板内区,说明中—晚三叠世华南与印支地块已连在一起,总体处于后碰撞环境。

4.3 海南岛海西—印支期花岗岩及其形成的动力学背景

4.3.1 海南岛与俯冲有关的弧岩浆活动

以五指山片麻状花岗岩为代表,五指山花岗岩为一杂岩体,岩石组合为钾玄质侵入岩—二云母花岗岩—石榴石花岗岩—二长花岗岩。Li et al^[19]在五指山地区获得片麻状花岗岩锆石 SHRIMP U—Pb 年龄为 262~267 Ma,谢才富等(未刊数据)亦在五指山地区发现 SHRIMP U—Pb 年龄为 269~278 Ma 的过铝质花岗岩,钾玄质侵入岩锆石 SHRIMP U—Pb 年龄为(272±7) Ma^[40]。Li et al^[19]对五指山片麻状花岗岩进行了研究,五指山准铝质—弱过铝质花岗岩 SiO₂ 变化于 60.8%~74.5%,岩石富碱,K₂O 含量变化于 2.3%~6.9%,Na₂O 变化于 2.4%~3.2%,K₂O+Na₂O 含量变化于 6.3%~9.4%,A/CNK 变化于 0.9~1.08。具轻稀土富集和右倾的稀土元素展布型式,(La/Yb)_N 变化于 5~125,中等—强负 Eu 异常,δEu 介于 0.66~0.18。在原始地幔标准化蛛网图中,具 Ba、Sr、Nb、Ti 和 P 负异常,而 Rb、Th 和 K 为正异常。五指山片麻状花岗岩 I_{Sr}=0.7071~0.7105,ε_{Nd}(t)=-3.07~-7.72,T_{DM2} 变化于 1 290~1 660 Ma。该片麻状花岗岩为 I 型花岗岩,形成于岛弧环境,由俯冲带上交代地幔楔起源的玄武岩浆的分异作用所形成^[18],但在岩石形成过程中有地壳熔体的参与。

4.3.2 与同碰撞有关的岩浆活动

海南岛存在 240~250 Ma 的花岗质岩浆活动,尖峰岭岩体花岗岩中黑云母 ⁴⁰Ar—³⁹Ar 坪年龄为 236 Ma^[41],锆石 SHRIMP U—Pb 年龄为(249±5)Ma^[20]。中三叠世正长岩—花岗岩套分布于陵水—龙滚深断裂两侧及白沙深断裂南东侧,由石英二长岩、石英正长岩及正长花岗岩组成,Rb—Sr 等时线年龄为(241±7)Ma,2 个样品锆石 SHRIMP 年龄分别为(243±4)Ma 和(241±1)Ma^[42]。

尖峰岭复式岩基主要由中粗粒似斑状、细粒似斑状、粗中粒及细粒黑云母正长花岗岩组成,富硅(SiO₂ 含量变化于 70.90%~76.31%)、富钾(K₂O 含量为 4.46%~6.21%),Na₂O+K₂O 为 7.53%~9.40%;A/CNK

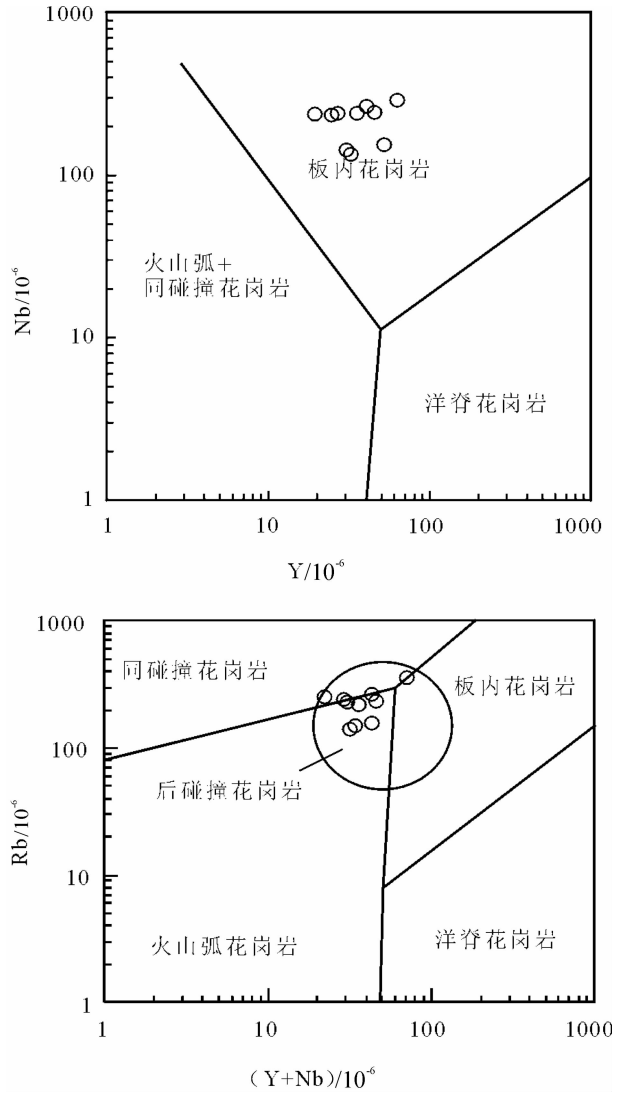


图 8 石碌铁矿外围花岗岩微量元素判别图解(据文献^[39])
Fig.8 Trace elements tectonic discrimination plot for granites (after Reference^[39])

为 0.92~1.22,岩石属弱过铝—准铝质,碱度率较高,属碱性系列。总体上富含 Rb、Cs、Th、U、Pb、Zr、Hf、Y 等微量元素,强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti 和适度亏损 Nb、Ta,轻重稀土分异较明显,(La/Yb)_N=8.29~30.36;中等—强烈亏损 Eu,δEu=0.43~0.05;早期单元稀土元素含量高而晚期单元明显降低。I_{Sr}=0.71658~0.71703,ε_{Nd}(t)=-7.59~-8.46,T_{DM2} 变化于 1639~1 709 Ma。成因类型介于 S 型和铝质 A 型花岗岩之间,并且类似于高热(HHP)花岗岩,由地壳变杂砂岩或变砂屑岩受到幔源流体富集后发生部分熔融的产物,熔融温度为 770~790℃,压力为(10~12.5)

$\times 10^8 \text{Pa}$ (相当于深 34~42 km)^[20]。

4.3.3 与后碰撞有关的岩浆活动

以昌江岩体和琼中岩体为代表,琼中岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 237 Ma^[4],单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 226~234 Ma^[5],昌江岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 230 Ma(另文发表)。岩体区域上呈北东向展布的大型花岗岩岩基,主体岩石长轴与区域构造线 NE 方向一致,岩体边界与地层产状基本整合,内部普遍发育原生定向组构(优选方向为 NE 向),大多数矿物(尤其是自形程度较高的钾长石斑晶)未见明显变形;由岩体边部向中心原生定向构造在程度上逐渐减弱。从早至晚,岩体似片麻状构造和矿物定向呈现出由强至弱的变化,表明岩浆结晶晚期阶段受区域性压应力作用的结果。以上证据均可说明岩体侵入活动是在海西—印支构造岩浆旋回末期,即在区域挤压应力减弱、地壳隆起阶段定位的,与后碰撞有关的岩浆活动。

5 与北越南海西—印支期花岗岩的对比

在北越南的 Truong Son 褶皱带,二叠纪—三叠纪中酸性岩浆活动十分发育,它们的形成与古特提斯洋的俯冲及印支地块和华南地块发生碰撞有关^[43,44]。在印支地块和华南地块发生碰撞期间,产生北西西向的断裂带或剪切带,形成时代为 240~250 Ma^[45]。晚二叠世—早三叠世的中酸性岩浆活动包括:1)与俯冲有关的钙碱性火山—深成岩组合,岩石的成岩年龄为 248~272 Ma;2)同碰撞作用形成的过铝质花岗岩,其年龄为 245~259 Ma;3)后碰撞形成的碱性长英质火山—深成岩组合,形成时代小于 245 Ma^[43]。在二叠纪—三叠纪,海南岛火山喷发岩不发育。

在北越南,与俯冲有关的岛弧花岗质岩石以 Dien Bien 和 Beng Giang—Que Son 杂岩体为代表,岩石组合为闪长岩—花岗闪长岩—花岗岩,为钙碱性—高钾钙碱性 I 型花岗岩,A/CNK 变化于 1.06~1.12,Dien Bien 闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 272 Ma,花岗闪长岩—花岗岩的 Rb-Sr 年龄为 266~252 Ma,Beng Giang—Que Son 杂岩体中花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 260 Ma。辉长闪长岩—闪长岩具平坦的稀土元素展布型式,(La/Yb)_N 值变化于 8~9,基本没有 Eu 异常,而花岗闪长岩具右倾的轻稀土元素富集的展布型式,(La/Yb)_N 值变化于 5~

19,具明显的负 Eu 异常,在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中,Nb、Ta、Sr、Ba 负异常,具火山弧花岗岩地球化学亲缘性^[43-44]。 $I_{\text{Sr}}=0.7058\sim 0.7101$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-4.7\sim -9.7$, T_{DM} 变化于 1 030~1 500 Ma。上述这些特点可与海南岛五指山花岗杂岩体比较。

在北越南,早二叠世同碰撞过铝质花岗岩主要形成大的侵入岩体,较小的侵入体也能见到。岩石主要为黑云母和二云母花岗岩,局部见花岗闪长岩,偶见闪长岩。花岗闪长岩 $\text{SiO}_2=62.9\%\sim 67.68\%$,花岗岩 $\text{SiO}_2=71.35\%\sim 74.66\%$,淡色花岗岩 $\text{SiO}_2=75.22\%\sim 76.07\%$,上述三种花岗岩 Al_2O_3 含量较高,变化于 16.77%~17.32%,A/CNK 值介于 1.01~1.56,主体为弱过铝质—强过铝质。Ba Na 侵入岩中黑云母和二云母花岗岩的 U-Pb、Rb-Sr 和 Ar-Ar 年龄为 248~245 Ma,Pu Si Lung 侵入岩 Rb-Sr 年龄为 259 Ma。花岗岩具右倾的轻稀土元素富集的展布型式,但重稀土元素平坦的展布型式。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中,Nb、Ta、Sr、Ba 负异常,而 U、Th、Pb 具正异常,与前述北越南岛弧花岗质岩石的展布型式一样。花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化于 0.750 26~0.807 28, T_{DM} 变化于 1 800~2 230 Ma,表明花岗岩由古老成熟的结晶地壳遭受部分熔融所形成,结晶地壳 Rb/Sr 比值较大; $\varepsilon_{\text{Nd}}(0)=-13.3\sim -10.2$,比较均匀。海南岛同碰撞的花岗质岩石不是强过铝质花岗岩,而是弱过铝质—准铝质,共同的特点是壳源岩石的部分熔融参与了花岗质岩浆的形成。

在北越南,后碰撞岩浆活动的深成—半深成岩岩石主要为花岗岩—花岗斑岩, $\text{SiO}_2=68.77\%\sim 75.73\%$, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.87\%\sim 8.42\%$ 。花岗岩具右倾的轻稀土元素富集的展布型式,但重稀土元素有平坦的展布型式,轻重稀土分异不是特别明显。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中,Nb、Ta、Sr、Ba 呈负异常,而 U、Th、K、Rb 具正异常。尽管缺乏详细的地球化学和 Sr、Nd 同位素资料,但笔者认为它们可与海南岛的琼中岩体和昌江岩体相对比。

6 结 论

(1)石碌铁矿外围花岗岩为昌江岩体的一部分,岩性为二长花岗岩,为准铝质—弱过铝质,属于高钾钙碱性系列和钾玄岩系列。由中元古代抱板群部分熔融作用所形成,花岗岩形成于后碰撞环境。

(2)哀牢山—Song Ma 缝合带向东延至海南岛,

与昌江—琼海缝合带相连,代表着华南地块和印支地块的边界线。海南岛海西—印支期花岗岩的形成与古特提斯洋的向南俯冲及华南地块和印支地块的碰撞有关,伴随古特提斯洋的收缩和圈闭,海南岛依次形成岛弧花岗岩、同碰撞花岗岩和后碰撞花岗岩。海南岛晚二叠世—中三叠世花岗岩岩浆活动的特点证实了古特提斯洋的向南俯冲。

(3)海南岛海西—印支期岛弧花岗岩、同碰撞花岗岩和后碰撞花岗岩可与北越南海西—印支期花岗岩进行对比。

参考文献(References):

- [1] 夏邦栋,于津海,方中,等.海南岛海西印支期花岗岩的地球化学特征及成因[J].地球化学,1990,4:365-373.
Xia Bangdong, Yu Jinhai, Fang Zhong, et al. Geochemical characteristics and origin of the Hercynian-Indosinian granites of Hainan Island, China [J]. Geochemistry, 1990, (4):365-373 (in Chinese with English abstract).
- [2] 汪啸风,马大铨,蒋大海.海南岛地质.(二)岩浆岩[M].北京,地质出版社,1991:1-273.
Wang Xiaofeng, Ma Daquan, Jiang Dahai. Geology of Hainan Island (Part 2):Magmatical Rocks [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1991:1-273(in Chinese).
- [3] 方中,于津海,夏邦栋,等.海南岛海西—印支期花岗岩和暗色包体的Sm-Nd同位素特征[J].南京大学学报,1995,31(2):338-343.
Fang Zhong, Yu Jinhai, Xia Bangdong, et al. Sm-Nd isotopic characteristics of Hercynian-Indosinian granites and xenoliths in Hainan Island, south China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1995, 31(2):338-343 (in Chinese with English abstract).
- [4] 葛小月.海南岛中生代岩浆作用及其构造意义——年代学、地球化学及Sr-Nd同位素证据[D].中国科学院研究生院博士学位论文,2003:1-87.
Ge Xiaoyue. Mesozoic Magmatism in Hainan Island (SE China) and its Tectonic Significance:Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd Isotope Evidences [D]. Ph.D. Thesis of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2003:1-87.
- [5] 李孙雄,云平,范渊,等.海南岛琼中地区琼中岩体锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].大地构造与成矿学,2005,29:234-241.
Li Sunxiong, Yun Ping, Fan Yuan, et al. Zircon U-Pb age and its geological significance for Qiongzong pluton in Qiongzong area, Hainan Island [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29:234-241 (in Chinese with English abstract).
- [6] Zhang F, Wang Y, Chen X, et al. Triassic high-strain shear zones in Hainan Island (South China) and their implications on the amalgamation of the Indochina and South China Blocks:Kinematic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints [J]. Gondwana Research, 2011, 19:910-925.
- [7] 李献华,周汉文,丁式江,等.海南岛“邦溪—晨星蛇绿岩片”的时代及其构造意义——Sm-Nd同位素制约[J].岩石学报,2000,16(3):425-432.
Li Xianhua, Zhou Hanwen, Ding Shijiang, et al. Sm-Nd isotopic constraints on the age of the Bangxi-Chenxing ophiolite in Hainan Island:implications for the tectonic evolution of eastern Paleo-Tethys[J].Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(3):425-432(in Chinese with English abstract).
- [8] Li X H, Zhou H W, Chung S L, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island, South China and their tectonic significance [J]. The Island Arc, 2002, 11:193-205.
- [9] Xu D R, Xia B, Li P C, et al. Protolith natures and U-Pb sensitive high mass-resolution ion microprobe (SHRIMP) zircon ages of the metabasites in Hainan Island, South China:Implications for geodynamic evolution since the late Precambrian [J]. The Island Arc, 2007, 16:575-597.
- [10] Xu D, Xia B, Nonna B C, et al. Geochemistry and Sr-Nd isotope systematics of metabasites in the Tunchang area, Hainan Island, South China:implications for petrogenesis and tectonic setting [J]. Mineralogy and Petrology, 2008, 92:361-391.
- [11] 侯威,陈惠芳,梁新权,等.海南岛前寒武纪地层的确定及其大地构造演化[J].长春地质学院院报,1992,22(2):136-143.
Hou Wei, Chen Huifang, Liang Xinquan, et al. The establishment of Precambrian strata and new recognition of the geotectonic evolution in Hainan Island [J]. Journal of Changchun University of Earth sciences,1992, 22 (2):136-143 (in Chinese with English abstract).
- [12] 梁新权.海南岛前寒武纪花岗岩-绿岩系Sm-Nd同位素年龄及地质意义[J].岩石学报,1995,11(1):71-76.
Liang Xinquan. Sm-Nd age and its geological significance for Precambrian granite and greenstone system, Hainan Island [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11 (1):71-76 (in Chinese with English abstract).
- [13] 马大铨,黄香定,肖志发,等.海南岛结晶基底——抱板群层序与时代[M].武汉:中国地质大学出版社,1998:1-51.
Ma Daquan, Huang Xiangding, Xiao Zhifa, et al. Crystalline basement of Hainan Island—Stratigraphy and age of the Baoban Group [M].Wuhan:Press of China University of Geosciences, 1998:1-51.
- [14] 许德如,夏斌,李鹏春,等.海南岛西北部前寒武纪花岗岩质岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及地质意义[J].大地构造与成矿学,2006,30(4):510-518.
Xu Deru, Xia Bin, Li Pengchun, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Precambrian granitoids in northwest Hainan Island and its geological implications [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(4):510-518(in Chinese with English abstract).
- [15] 许德如,肖勇,夏斌,等.海南石碌铁矿床成矿模式与找矿预测[M].北京:地质出版社,2009:1-331.

- Xu Deru, Xiao Yong, Xia Bin, et al. Model and Ore Prediction of the Shilu Iron Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 1-331 (in Chinese).
- [16] 张仁杰, 马国干, 徐光洪, 等. Chuaria-Tawuia 生物群在海南岛石碌群的发现及其意义[J]. 中国科学(B辑), 1989, (3), 304-311.
Zhang Renjie, Ma Guogan, Xu Guanghong, et al. Discovery of Chuaria-Tawuia life-form association in Shilu Group, Hainan Island and its insignificance [J]. Science in China, 1989, (3): 304-311 (in Chinese).
- [17] 中国科学院华南富铁科学研究队. 海南岛地质与石碌铁矿地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1-376.
Research Team of Iron-Rich Ores in South China, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Hainan Island and Geochemistry of the Shilu Iron Deposit [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1-376 (in Chinese).
- [18] Metcalfe I, Shergold I H, Li Z X. IGCP 321 Gondwana dispersion and Asian accretion: Fieldwork on Hainan Ireland [J]. Episodes, 1993, 16: 443-447.
- [19] Li X H, Li Z X, Li W X, et al. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian Magmatic Arc on Hainan Island [J]. Journal of Petrology, 2006, 114(3): 341-353.
- [20] 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2493-2508.
Xie Caifu, Zhu Jinchu, Ding Shijiang, et al. Age and Petrogenesis of the Jianfengling granite and its relationship to metallogenesis of the Baolun gold deposit, Hainan Island [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2493-2508 (in Chinese with English abstract).
- [21] 海南省地质勘查局资源环境调查院. 海南岛昌江县石碌铁矿区及外围工作程度图(1:5万)[R]. 2006.
Mineral resources and Environment Survey, Bureau of Geology and Prospecting of Hainan Province. Map of Level of Work (1/50000 scale) of the Shilu Iron Deposit and Its Surrounding Region [R]. 2006 (in Chinese).
- [22] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.
- [23] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of American Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- [24] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.
- [25] Sun S S, McDonough W E. Chemical and isotopic systematics of ocean basalt: Implication for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the ocean basins. Geological Society of London, Special Publication, 1989, 19: 13-345.
- [26] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. Chemical Geology, 1995, 120: 347-359.
- [27] Hofmann A W. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. Earth Planetary Science Letters, 1988, 90: 297-314.
- [28] Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. Anomalous alkaline rocks of Soustov. Kola: evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 2001, 140: 554-566.
- [29] Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh [J]. Earth Sciences, 1992, 83: 1-26.
- [30] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [C]// Coward M P, Ries A C (eds.). Collision Tectonics [M]. Geological Society of London, Special Publication, 1986, 19: 67-81.
- [31] Searle M P, Fryer B J. Garnet-tourmaline- and muscovite-bearing leucogranites, gneisses and migmatites of the higher Himalayas from Zaskar, Kulu, Lahoul and Kashmir [C]// Coward M P, Ries A C (eds.). Collision Tectonics. Geological Society of London, Special Publication, 1986, 19: 185-202.
- [32] Thuy N T B, Satir M, Siebel W, et al. Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of granitoids from the Dalat zone, southern Vietnam [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23: 467-82.
- [33] Patiño Douce A E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? [C]// Castro A, Fernandez C, Vigneresse J E (eds.). Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques. Geological Society of London, Special Publication, 1999, 168: 55-75.
- [34] Roberts M P, Clemens J D. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids [J]. Geology, 1993, 21: 825-828.
- [35] Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. Lithos, 2000, 50: 51-73.
- [36] Barker F, Farmer G L, Ayuso R A, et al. The 50 Ma granodiorites of the eastern Gulf of Alaska: melting in an accretionary prism in the forearc [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 6757-6778.
- [37] Rogers G, Hawkesworth C J. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 91: 271-285.
- [38] Sajona F G, Maury R C, Bellon H, et al. High field strength elements of Pliocene-Pleistocene island-arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines) [J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 693-726.
- [39] Pearce J A. Sources and settings of granitic rocks [J]. Episodes, 1996, 42: 120-125.
- [40] Xie Caifu, Zhu Jinchu, Ding Shijiang, et al. Identification of Hercynian shoshonitic intrusive rocks in central Hainan Island and

- its geotectonic implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (20):2507–2519.
- [41] 舒斌, 王平安, 李中坚, 等. 海南抱伦金矿的成矿时代研究及其意义[J]. 现代地质, 2004, 18(3):316–320.
Shu Bin, Wang Pingan, Li Zhongjian, et al. Research on mineralizing age of Baolun gold deposit in Hainan Province and its significance[J]. Modern Geology, 2004, 18(3):316–320(in Chinese with English abstract).
- [42] 周佐民, 谢才富, 徐倩, 等. 海南岛中三叠世正长岩-花岗岩套的地质地球化学特征与构造意义[J]. 地质论评, 2011, 57(4):515–531.
Zhou Zuomin, Xie Caifu, Xu Qian, et al. Geological and geochemical characteristics of Middle Triassic syenite-granite suite in Hainan Island and its geotectonic implications [J]. Geological Review, 2011, 57(4):515–531(in Chinese with English abstract).
- [43] Hoa T T, Anh T T, Phuong N T, et al. Permo-Triassic intermediate-felsic magmatism of the Truong Son belt, eastern margin of Indochina [J]. C.R.Geosciences, 2008, 340:112–126.
- [44] Lan C Y, Chung S L, Shen J J S, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of granitic rocks from northern Vietnam [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18:267–280.
- [45] Lepvrier C, Maluski H, Nguyen V V, et al. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam): ^{40}Ar - ^{39}Ar Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints [J]. Tectonophysics, 1997, 283:105–127.

Origin and rock-forming environment of the granitoids in the periphery of the Shilu iron deposit

YU Jin-jie¹, CHEN Fu-xiong², WANG Yong-hui², LIANG Jiang², CHE Lin-rui³

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Hainan Mining United Co., Ltd., Changjiang 572700 Hainan, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Indosinian granites in the periphery of the Shilu iron deposit belong to the Changjiang granitic body. These granites are mainly monzonitic granites. They lie between metaluminous field and weakly peraluminous field, and belong to high-K calc-alkaline series and shoshonitic series. The granites have $\sum\text{REE}$ values of 134.96–241.05 ppm and show relatively strong enrichment of light rare earth elements ($\text{LREE}/\text{HREE}=4.44\text{--}9.67$), with higher $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ratios of 3.95–10.69 and negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.28\text{--}0.57$). Mantle-normalized trace element spidergrams of all samples show obvious negative anomalies of Ba, Nb, Ta, Ce, Sr, P and Ti. The obvious negative Ba, Sr and Eu anomalies indicate that plagioclase existed in the source region or the granites experienced plagioclase crystallization and fractionation. The granites have a range of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ from 0.710852 to 0.715492 except for one sample (SL10–136) whose $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ value is 0.706364, a narrow $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value range of -7.3 to -9.1 and T_{DM2} model ages of 1.5–1.9 Ga, indicating a homogeneous source and partial melting of the Mid-Proterozoic Baoban Group. The granites were formed in a post-orogenic environment. Based on previous investigation of granite in Hainan Ireland, this paper deals with Ireland-arc, syn-orogenic and post-orogenic granitoids in Hainan Ireland. The Hercynian to Indosinian granitoids can be compared with granitoids in northern Vietnam.

Key words: Indosinian granites; post-orogenic environment; partial melting; periphery of the Shilu deposit; Hainan Island

About the first author: YU Jin-jie, male, born in 1966, doctor, senior researcher, engages in the study of metallic mineralization; E-mail: yjjchina@sina.com.