

南岭东段含稀土矿花岗岩体中暗色包体地质特征 ——以陂头岩体为例^{*}

范飞鹏¹, 肖惠良¹, 陈乐柱¹, 鲍晓明¹, 蔡逸涛¹, 周 延¹, 李海立²

(1 南京地质矿产研究所, 南京 210016) (2 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:在野外地质调查和室内综合研究的基础上,通过研究南岭东段风化壳淋积型矿中含稀土矿花岗岩层中暗色包体的地质特征,发现分布在岩体中的大量暗色包体具流面和流线构造,主要组成矿物为石英、辉石和斜长石,具典型的辉长结构。暗色包体低硅、钾和钠,高钙、铝、镁、铁、钛和锰,属亚碱性—铝不饱和型;富集 U、La、Pr、Nd、Sm、Dy,亏损 Nb、Sr、Zr、Hf、Ti 等微量元素;REE 总量低于寄主含矿花岗岩层稀土总量,Ce 和 Eu 具有明显的负异常。这些特征说明暗色包体的原岩可能来自早期基性岩,其形成与燕山早期陂头岩体的分异演化关系密切。与南岭地区花岗岩中此类暗色包体进行对比,有助于在该区寻找稀土矿床和稀有金属矿床。

关键词:风化壳淋积型;稀土矿;暗色包体;南岭东段;燕山早期

中图分类号:P588.12⁺4

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2016)01-036-09

花岗岩中的捕虏体和包体是落入熔浆中的岩块发展至不同阶段的产物^[1-2],对花岗岩成因及成矿研究具有重要意义。国内外学者对花岗岩中暗色微粒包体进行了详细研究^[3-29],认为暗色包体主要是由混入花岗岩浆中的中基性岩浆固结而成^[6-9,15-22]和岩石部分熔融后的残余物^[1-2,5,12-14,18-22,30-35]。在赣南地区部分稀土矿的含矿花岗岩层中可见大量暗色包体(或捕虏体),对成矿和找矿具有指示作用^[36],但前人对这类暗色包体研究较少。南岭地区风化壳淋积型稀土矿中含矿层位为花岗岩(碱性花岗岩)^[37],母岩多为黑云母二长花岗岩,属准铝质 A 型花岗岩,稀土矿形成的时间为第三纪—第四纪^[36]。变质基底层、岩浆多期活动和岩浆期后脆性断裂构造活动是此类矿床形成的主要因素^[34]。前人对南岭地区风化壳淋积型型稀土矿中暗色包体仅有形态特征的描述,在岩石学和地球化学方面研究较少。本文通过对此类暗色包体进行岩石学及地球化学方面研究,探讨其成因及对稀土矿成矿作用的影响,这对研究该类矿床和指导找矿具有重要意义。

1 区域地质特征

研究区处于南岭东段钨锡多金属成矿带,受北东向大型构造控制,构造—岩浆活动频繁。

变质基底构造层由震旦系、寒武系及奥陶系浅变质岩系组成,沉积盖层主要为泥盆系、石炭系、二叠系、下侏罗统、白垩系和古近系。

褶皱构造主要为基底褶皱(加里东期)和盖层褶皱。基底褶皱由轴向北西—近南北向、轴面近乎直立的不完整紧闭背斜和向斜组成。受后期构造—岩浆活动影响,盖层褶皱形态复杂,轴向多变,多呈波状和穹窿状。断裂构造主要为北西向、北东向、北东东向、东西向线性构造。

区内以印支期—燕山期岩浆活动最为强烈,见少量加里东期岩体。岩体主要为龙源坝复式岩体、陂头复式岩体和塔背岩体。印支晚期岩体中可见伟晶花岗岩捕虏体,多沿流面构造线定向分布,长石多呈定向排列,斑晶多>1.5 cm。燕山期岩体属 S 型花岗岩,多侵位于早期岩体,来源于早元古代壳—幔分异产生的地壳^[38-39],代表性岩体为陂头岩体和塔

^{*} 收稿日期:2015-01-30 改回日期:2015-05-12 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(项目编号:1212011120813、1212011120811、1212010881305、1212010533003)资助。

第一作者简介:范飞鹏,1982 年生,男,高级工程师,主要从事矿产资源勘查和矿床学研究工作。

背岩体,可见大量暗色包体和花岗岩捕虏体。陂头岩体属壳—幔混合,塔背岩体属幔源型,两者为板内裂谷型环境^[38-39]。

岩体多侵位于震旦系、寒武系、泥盆系和二叠系,白垩系地层分布在北部,第四系坡积物分布在河谷及低凹地段。

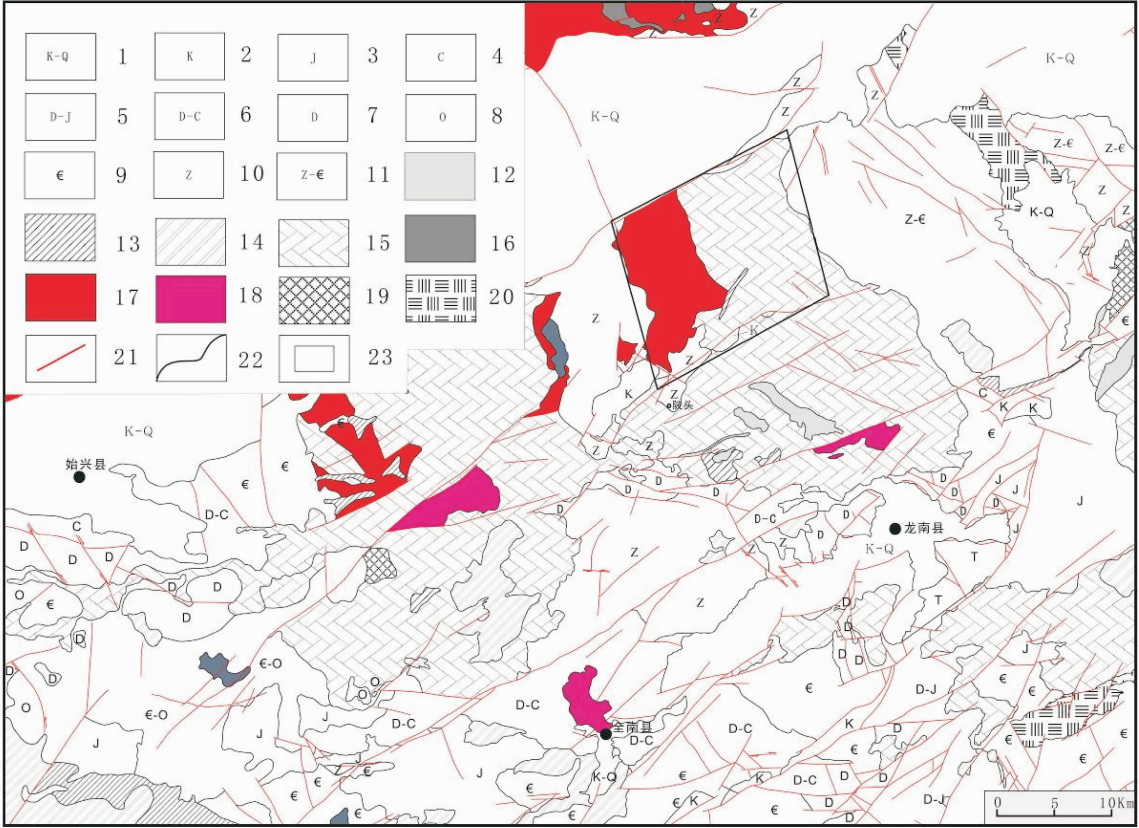


图 1 陂头地区地质简图(据文献[34]修改)

Fig.1 Generalized geologic map of the Pitou area (modified after reference [34])

1-白垩—第四系;2-白垩系;3-侏罗系;4-石炭系;5-泥盆—侏罗系;6-泥盆—石炭系;7-泥盆系;8-奥陶系;9-寒武系;10-震旦系;11-震旦系—寒武系;12-燕山晚期花岗岩斑岩;13-燕山晚期花岗岩;14-燕山早期第二阶段第二次花岗岩;15-燕山早期第二阶段第一次侵入花岗岩;16-燕山早期第一阶段第二次侵入花岗岩;17-燕山早期第一阶段第一次侵入花岗岩和闪长岩;18-燕山早期第三阶段侵入正长岩;19-燕山早期第一阶段次安山玢岩;20-加里东期二长花岗岩;21-断层;22-地质界线;23-稀土矿点分布区

2 暗色包体地质特征

区内稀土矿点主要分布于陂头岩体,含矿母岩均为印支—燕山期花岗岩岩体。陂头岩体主要为黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩,砖红色—红褐色,中粒似斑状花岗结构,块状构造,主要矿物为石英、钾长石、斜长石和黑云母,含少量角闪石。显微镜下钾长石和斜长石矿物晶面粘土化强烈,黑云母具弱的绿泥石化。副矿物为钛铁矿、磁铁矿、锆石、萤石、独居石、钍石和少量磷灰石等。岩浆期后断裂活动频繁,岩体风化强烈,风化色呈红褐色、砖红色,风化层较厚。

稀土矿点(床)分布的岩体均侵入早期岩体以及震旦系和寒武系,在岩体接触带及岩体顶部见大量暗色包体,这些暗色包体“镶嵌”在风化剥蚀面上,具

有明显的流面和流线构造,风化后呈现为“蛋壳”,多呈椭圆状(图 2)。含矿岩体整体受 NEE 向断裂控制,主要为构造—岩浆活动形成的断裂和岩浆期后断裂。

暗色包体为辉长岩,多呈椭圆状,随深度增加有变小消失的趋势,主要分布于全风化和半风化花岗岩层,围岩主要为黑云母二长花岗岩和黑云母花岗岩,风化色多呈红褐色、砖红色和紫红色。全风化层多呈松散状,大多数长石风化成粘土矿物,并见少量云母,暗色包体主要分布在全风化层底部。半风化层岩石中黑云母和长石矿物大多保留完好,部分长石完全粘土化,颜色呈浅黄褐色略带红色,原岩结构基本保留。

本次研究选取的暗色包体显微镜下显示主要矿物为辉石和斜长石,同时见少量黑云母、角闪石、磁黄铁矿和磷灰石等矿物。斜长石多搭构成三角格



图 2 研究区暗色包体地质特征

Fig. 2 Geologic characteristics of dark enclaves in the studied area

架,格架内多充填辉石,构成辉长结构(图 3);辉石和斜长石多绿泥石化,石英矿物边缘见溶蚀边和裂纹;黑云母多被磁黄铁矿占据,大多呈现骸晶结构;磷灰石多穿切斜长石。

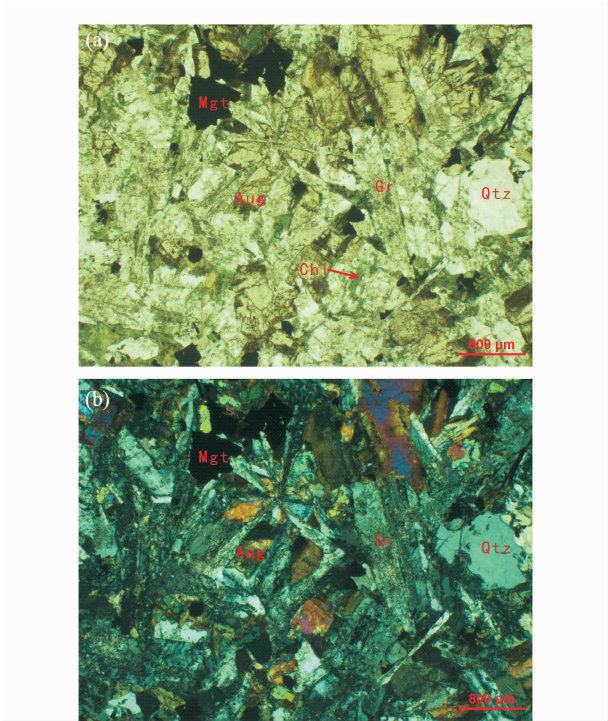


图 3 研究区暗色包体矿物组成及辉长结构(a-单偏光;b-正交偏光)

Fig. 3 Mineral compositions and gabbro texture of dark enclaves in the studied area

3 样品采集及实验测试

典型样品均从采矿面剥离出来,选取直径较大的样品用去离子水进行多次清洗后逐层进行剥皮,直至露出新鲜面以及风化影响较小的核部,确保样品具有一定的新鲜度,再清洗进行薄片镜下研究。

选取蚀变和风化较弱的样品进行主量、微量和稀土元素测试,样品加工和测试在国土资源部华东矿产资源监督检测中心完成。主量元素采用 XRF 分析,精度优于 1%,其中主量元素测试得到的为 TFe_2O_3 ,然后酸消解、重铬酸钾滴定测量氧化亚铁(0.01%~100%),用所测 TFe_2O_3 和 FeO 含量计算 Fe_2O_3 含量,公式为 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) = w(\text{TFe}_2\text{O}_3) - w(\text{FeO}) \times 1.11134$ 。烧失量:空坩埚在 1000℃马弗炉中灼烧至恒重,冷却后,称其重量 m_1 ,称取样品 1g(m)于恒重好的坩埚中,在 1000℃马弗炉中灼烧至恒重,冷却后,称其重量 m_2 , $w(\text{LOI}) = (m + m_1 - m_2) / m \times 100\%$ 。

稀土元素和微量元素采用 ICP-MS 测定。粉末样品在 105℃下烘干备用,样品前处理在 100 级超净实验室进行。准确称取 50mg 样品于 15mLPFA 管型熔样瓶中,用少量蒸馏水润湿,分别加入 1mLHF、1mLHNO₃ 和 1mLHClO₄ 溶液,密封加热至 150℃,放置过夜,冷却后开盖蒸干,加入 1:1 稀王水,密封加热至 130℃,保温 3 小时以溶解残渣,保证分解完全。待溶液冷却后,定容至 100mL。样品溶液在 Finnigan MAT Element 2 型高分辨电感耦合等离子体质谱仪(美国热电公司)进行分析测定,各元素检出限 $<0.5 \times 10^{-9}$,精密密度 $<5\%$ 。

4 分析测试结果

4.1 主量元素

暗色包体及塔背、陂头和车步岩体主量元素地球化学分析数据见表 1,可知暗色包体 SiO_2 含量为 48.67%~49.07%,与车步辉长岩体的 SiO_2 含量相近,但小于塔背和陂头岩体的 SiO_2 含量。暗色包体的 CaO 含量为 8.09%~8.99%, Al_2O_3 含量为 13.4%~13.52%, MgO 含量为 5.13%~5.32%, P_2O_5 含量为 0.23%, CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 及 P_2O_5 的含量均小于塔背正长岩和车步辉长岩的相应含量,均大于其余花岗岩类的相应含量。暗色包体的 Fe_2O_3 含量为 5.4%~5.58%, FeO 含量为 9.31%~9.43%, TiO_2 含量为 2.63%~2.67%, MnO 含量为 0.21%~0.218%, Fe_2O_3 、 FeO 、 TiO_2 及 MnO

表 1 暗色包体及塔背、陂头和车步岩体主量元素地球化学分析数据(%)

Table 1 Major elements geochemical compositions of dark enclaves and rock mass in Tabei, Pitou and Chebu areas											
样品及 岩体	PTK- YQ1	PTK- YQ2	塔背岩体	陂头岩体	车步岩体	陂头岩体					
岩性	基性 包体	基性 包体	正长岩	黑云母钾 长花岗岩	辉长岩	中细粒 二云母花 岗岩(相)	中细粒 黑云母花 岗岩相	富钾花 岗岩相	钾长花 岗岩相	碱性花 岗岩相	正长岩相
样品数量	1	1	3	5	2	1	1	1	1	1	1
SiO ₂	48.67	49.07	64.89	73.90	48.96	78.23	74.6	74.49	74.945	74.8	64.87
Al ₂ O ₃	13.52	13.4	16.43	12.57	16.23	12.55	12.73	12.91	12.175	11.44	16.265
Fe ₂ O ₃	5.58	5.4	2.24	1.02	2.80	0.73	0.74	0.9	1.07	3.8	1.86
FeO	9.31	9.43	2.16	1.22	7.61	0.66	1.32	0.99	1.03	0.63	2.485
TiO ₂	2.67	2.63	0.40	0.18	1.84	0.09	0.16	0.165	0.115	0.29	0.485
CaO	8.99	8.09	1.20	0.81	8.35	0.35	0.61	0.58	0.675	0.27	1.655
MgO	5.32	5.13	0.26	0.16	6.76	0.125	0.33	0.205	0.28	0.14	0.53
K ₂ O	0.41	0.85	4.86	5.37	1.14	4.825	5.39	5.55	4.825	4.85	3.9
Na ₂ O	1.78	2.19	6.29	3.36	3.11	3.4	3.11	3.9	3.465	3.4	6.575
P ₂ O ₅	0.23	0.23	0.15	0.08	0.38	0.02	0.03	0.045	0.02	0.02	0.13
MnO	0.21	0.218	0.11	0.16	0.17	0.015	0.03	0.02	0.045	0.01	0.08
烧失量	3.62	3.5	0.72	0.88	2.43	0.815	0.75	0.555	0.795	0.78	0.966
总量	100.3	100.14	99.70	99.60	99.75	99.81	99.8	100.315	99.44	100.23	99.79
ALK	2.19	3.04	11.15	8.73	4.25	8.225	8.5	9.45	8.29	8.25	10.475
K ₂ O/Na ₂ O	0.23	0.39	0.78	1.64	0.39	1.42	1.73	1.42	1.39	1.43	0.59
A/NK	4.01	2.96	1.05	1.11	2.56	1.16	1.16	1.04	1.11	1.05	1.08
A/CNK	0.68	0.70	0.92	0.98	0.76	1.09	1.05	0.96	1.00	1.01	0.90
资料来源	本文实测			[39]			[41]				

含量均大于区内塔背、陂头和车步岩体的相应含量。暗色包体的 K₂O 含量为 0.41%~0.85%,Na₂O 含量为 1.78%~2.19%,均小于区内塔背、陂头和车步岩体的相应含量。暗色包体铝饱和指数为 0.68~0.70,与车步辉长岩的铝饱和指数接近,属铝不饱和型。在(Na₂O + K₂O)-SiO₂ 分类图中暗色包体主要分布在亚碱性辉长岩区(图 4)。

4.2 微量元素

相对于原始地幔^[43],研究区暗色包体微量元素原始地幔标准化配分曲线与塔背岩体、陂头岩体和车步岩体的曲线相差较大(图 5),U、La、Pr、Nd、Sm、Dy 等相对富集,亏损 Nb、Sr、Zr、Hf、Ti 等(表 2),反映研究区暗色包体与区其他内各岩体具有不同特征。在指示岩石分异演化的元素比值上,暗色包体 Nb/Ta 为 13.88~14.62,大于陂头岩体的 Nb/Ta 值,小于塔背岩体和车步辉长岩体的 Nb/Ta 值;Zr/Hf 为 44.36~45.1,小于塔背正长花岗岩的 Zr/Hf 值,大于陂头岩体和车步辉长岩体的 Zr/Hf 值;暗色包体 Rb/Sr 为 0.2~0.33,大于车步辉长岩体的 Rb/Sr 值,小塔背和陂头岩体的 Rb/Sr 值(表 2),说明暗色包体与车步辉长岩体具一定的相似特

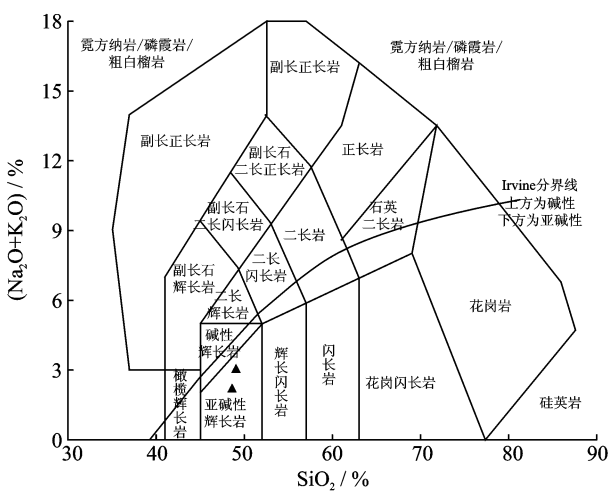


图 4 研究区暗色包体(Na₂O+K₂O)-SiO₂ 分类图(底图据文献[40])

Fig. 4 (Na₂O + K₂O) vs. SiO₂ discrimination diagram of dark enclaves in the studied area

征,与陂头岩体分异演化关系较密切。

4.3 稀土元素

岩石稀土元素分析结果(表 2)表明,暗色包体与寄主含矿花岗岩层具有相似的曲线形态,但曲线

表 2 暗色包体与含矿花岗岩层、区内各岩体和地层微量元素及稀土元素组成(×10⁻⁶)

Table 2 Trace element and rare earth element compositions of dark enclaves, ore-bearing granites ,rock mass and strata in the studied area (×10⁻⁶)

样品	PTK-YQ1	PTK-YQ2	PTK-4-H3	PTK-4-H5	PTK-4-H8	PTK-4-H9	PTK-4-H10	塔背岩体	陂头岩体	车步岩体	Z	∈	O	D
样品数量	1	1	1	1	1	1	1	3	5	2				
Sr	196	324						231.6	53.70	373.00				
Rb	39.3	106						92.27	196.40	62.55				
Ba	391	506						950.33	321.60	222.50				
Th	2.82	3.09						10.38	31.66	4.88				
U	0.78	0.88						2.58	4.81	1.06				
Nb	11.8	13.6						87.73	33.96	19.25				
Ta	0.85	0.93						5.37	2.60	1.18				
Zr	189.4	186.3						571.67	150.20	150.50				
Hf	4.2	4.2						10.28	6.16	3.84				
Ga	23.1	21.7						26.93	20.90	9.20				
Nb/Ta	13.88	14.62						16.33	13.06	16.31				
Zr/Hf	45.10	44.36						55.61	24.38	39.24				
Rb/Sr	0.20	0.33						0.40	3.66	0.17				
La	60.60	81.30	205.00	245.00	328.00	186.00	52.60	65.63	102.98	18.35	29.19	23.48	25.88	24.74
Ce	39.20	47.20	189.00	179.00	251.00	207.00	12.80	113.23	191.60	39.60	23.44	29.07	40.76	29.54
Pr	17.10	23.00	45.80	54.40	79.10	48.70	12.10	12.79	23.50	5.12	6.84	4.93	4.46	5.47
Nd	76.00	97.40	174.00	212.00	285.00	189.00	43.50	44.30	82.18	21.75	20.32	16.93	4.89	19.33
Sm	19.50	24.40	31.40	37.70	46.00	26.60	6.80	7.88	14.84	5.21	3.81	3.30	2.47	3.31
Eu	5.92	5.10	4.92	5.64	5.57	2.82	1.00	2.49	1.25	1.59	0.67	0.68	0.33	0.59
Gd	23.10	27.20	31.10	29.90	26.90	15.20	3.58	6.54	11.35	5.34	2.61	2.70	1.73	2.24
Tb	3.61	4.28	4.23	3.72	2.84	1.73	0.45	0.95	1.68	0.87	0.48	0.50	0.30	0.42
Dy	20.70	24.80	21.20	18.20	13.00	7.82	2.16	5.31	9.32	5.13	2.13	2.49	1.35	1.86
Ho	3.98	4.71	3.80	3.15	2.15	1.28	0.36	1.02	1.76	1.04	0.34	0.44	0.22	0.35
Er	10.70	13.00	9.66	7.82	5.39	3.07	0.94	2.91	4.89	2.82	0.90	1.22	0.60	0.99
Tm	1.48	1.74	1.30	1.07	0.77	0.43	0.14	0.44	0.69	0.42	0.11	0.16	0.07	0.15
Yb	9.42	10.50	7.71	6.29	4.62	2.58	1.00	2.94	4.46	2.59	0.76	1.02	0.46	0.93
Lu	1.32	1.54	1.03	0.86	0.63	0.35	0.13	0.47	0.64	0.39	0.13	0.19	0.07	0.17
Y	81.00	134.00	112.00	85.70	56.30	28.60	7.38	27.30	44.16	27.45	8.79	12.89	6.12	9.9
ΣREE	292.63	366.17	730.15	804.75	1050.97	692.58	137.56	266.91	451.03	110.21	91.73	87.11	83.59	90.09
LREE/HREE	2.94	3.17	8.12	10.33	17.67	20.34	14.70	12.43	11.95	4.95	11.30	8.99	16.41	11.67
LaN/YbN	4.35	5.23	17.97	26.32	47.98	48.72	35.54	15.52	16.69	5.10	25.95	15.56	38.02	17.98
δEu	0.85	0.60	0.48	0.50	0.45	0.39	0.56	1.05	0.28	0.9	0.62	0.68	0.46	0.63
δCe	0.28	0.25	0.44	0.35	0.36	0.50	0.12							
资料来源	本文实测								[39]			[44]		

较寄主含矿花岗岩层缓(图 6),REE 总量低于寄主含矿花岗岩层的稀土总量,轻重稀土分异不明显。δCe 为 0.25~0.28,Ce 具有明显的负异常;δEu 为 0.6~0.85, Eu 具有明显的负异常,(La/Yb)_N 为 4.35~5.23。

暗色包体与区内塔背、陂头和车步岩体的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线均呈右倾型(图 7)。暗色包体的稀土元素总量低于陂头岩体的稀土元素总量,但高于塔背正长岩体和车步辉长岩体的稀土

元素总量。陂头岩体 Eu 出现更明显的负异常,Ce 负异常不明显。

暗色包体与区内各地层的稀土元素球粒陨石标准化曲线均呈略向右倾斜(图 8)。暗色包体的稀土元素总量远高于各地层的稀土元素总量。除了奥陶系(O)呈现出 Eu 的负异常外,其余泥盆系(D),寒武系(∈)和震旦系(Z)均出现与暗色包体相似的 Eu 和 Ce 弱负异常,说明包体在形成过程中与地壳关系较为密切。

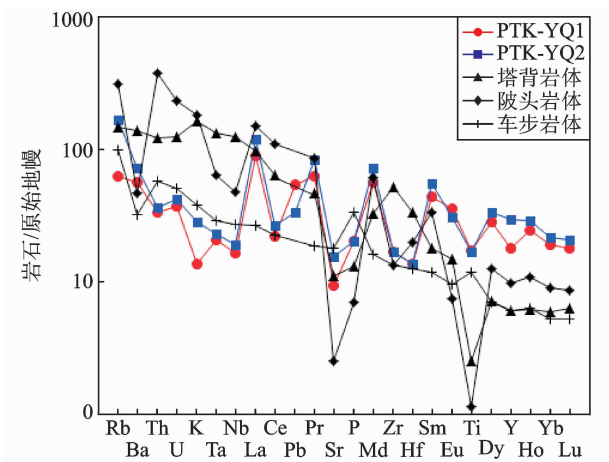


图 5 暗色包体与区内塔背、陂头和车步岩体的微量元素原始地幔标准化配分曲线图^[42]

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of dark enclaves and rock mass at Tabei, Pitou and Chebu in the studied area^[42]

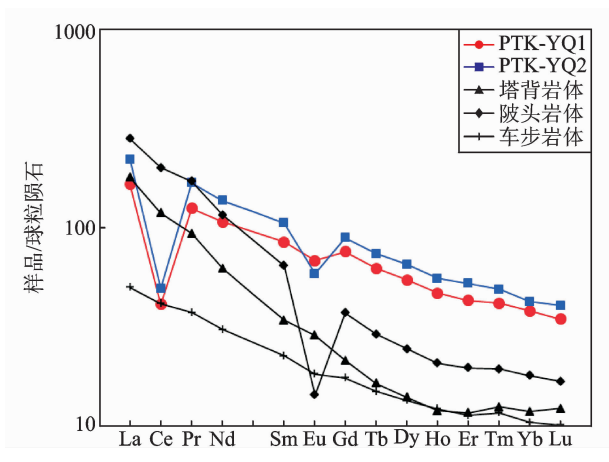


图 7 暗色包体与区内塔背、陂头和车步岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图^[42]

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of dark enclaves and rock mass in the Tabei, Pitou and Chebu areas^[42]

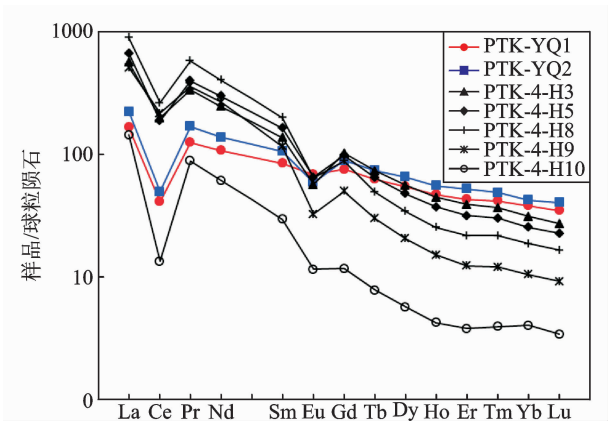


图 6 暗色包体与含矿花岗岩层稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图^[42]

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of dark enclaves and ore-bearing granites^[42]

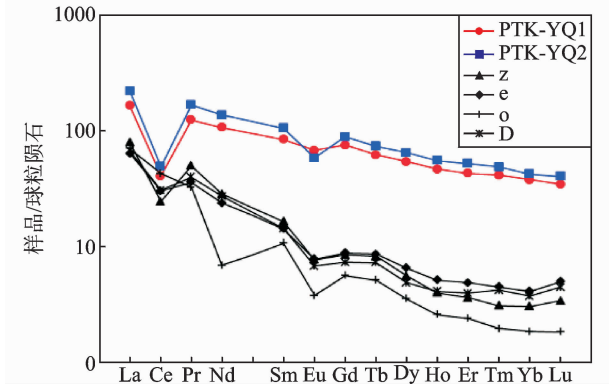


图 8 暗色包体与区内老地层稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图^[42]

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of dark enclaves and the old strata in the studied area^[42]

5 讨论

5.1 暗色包体的形成时代

有学者认为该地区双峰式侵入杂岩形成于早一中侏罗世^[44]。区内车步辉长岩体 SHRIMP U-Pb 锆石年龄为 172.9 Ma^[45], 陂头岩体的全岩—矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 178.15 ± 0.84 Ma^[46], 单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄为 186.3 ± 1.1 Ma^[38], 塔背正长岩体单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄为 188.6 ± 2.2 Ma^[38], 均为燕山早期。这些年龄样品均采自陂头南部, 经项目组野外调查发现, 黄田江为一北东东向断裂带, 断裂带南部研究程度较高主要因为岩石

风化较弱, 保存较完整。而断裂带以北岩石风化强烈, 所有的稀土矿均分布于其中, 暗色包体均分布于强风化岩体中, 说明包体原岩形成时间早于岩体。

5.2 暗色包体的来源及形成

从岩石地球化学特征看, 暗色包体主量元素地球化学特征与区内辉长岩的地球化学特征较相似, 但微量元素和稀土元素地球化学特征相差较大, 说明暗色包体与区内辉长岩可能不是同一期。从稀土元素球粒陨石标准化配分曲线看, 区内陂头岩体具有明显的 Eu 负异常, 暗色包体 Eu 亏损一般。区内泥盆系、寒武系和震旦系的稀土元素总量虽小于暗色包体的含量, 但稀土元素配分曲线特征与暗色包体的曲线特征相近, 均具有 Ce 和 Eu 负异常。结合

暗色包体显微镜下特征,说明区内暗色包体应为早期基性岩,虽被后期岩浆热液熔融改造和元素交换迁移,但仍保留原岩的某些地质特征,与车步辉长岩明显不同。

5.3 对稀土矿形成的指示作用

南岭乃至整个华南地区在印支期和燕山期岩浆活动十分强烈^[44],岩浆对上覆盖层进行了强烈的原地重熔和改造,盖层和岩浆之间各种元素进行了重新分配和组合。花岗岩热液流体中的成矿元素含量取决于卷入熔融的沉积—变质原岩中成矿元素的原始浓度^[47],上覆盖层的特征和含矿性决定花岗岩的矿化特征,特别是早期这类基性岩和老地层对稀土矿的后期富集成矿奠定了基础,这类暗色包体也是解密地质事件的关键。

6 结 论

(1)区内淋积型稀土矿层中的暗色包体为盖层岩块,属于早期基性岩类受后期岩浆热液熔融改造形成,仍保留原岩岩石化学方面的特征。对比研究南岭地区含稀土矿强风化花岗岩中的暗色包体,对寻找稀土矿床和稀有金属矿床具有重要意义。

(2)暗色包体是上覆岩块被岩浆熔融的特定阶段,其形成与燕山早期陂头岩体的分异演化关系密切,说明燕山期在南岭地区发生了大规模岩浆侵位,盖层多被熔融形成含矿的花岗岩层。

参考文献

[1] 陈国能. 关于花岗岩岩石包体的成因及岩基的定位问题——与杜杨松教授讨论[J]. 高校地质学报, 1998, 4 (3): 107-110.

[2] 陈国能, 张珂, 邵荣松, 等. 原地重熔及其地质效应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 40(3): 95-99.

[3] Didier J. Granites and Their Enclaves[M]. Amsterdam, London, New York: Elsevier Scientific Publishing, 1973.

[4] Didier J. Contribution of enclaves studies to the understanding of origin and evolution of granitic magmas [J]. Geologische Rundschau, 1987, 76(1): 41-50.

[5] Didier J, Barbarin B. Enclaves and Granite Petrology [M]. Amsterdam, London, New York: Elsevier Science Publishers B. V., 1991.

[6] Barbarin B, Didier J. Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various types of inter-

action between coexisting felsic and mafic magmas[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1992, 83(1/2): 145-153.

[7] Silva M M V G, Neiva A M R, Whitehouse M J. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area, central Portugal [J]. Lithos, 2000, 50 (1/3): 153-170.

[8] Blake S, Fink J H. On the deformation and freezing of enclaves during magma mixing[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, 95(1/4): 1-8.

[9] Diego P, Giampiero P. Chaotic dynamics and fractals in magmatic interaction processes: A different approach to the interpretation of mafic microgranular enclaves[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 175(1/2): 93-103.

[10] Kim J S, Shin K C, Lee J D. Petrographical study on the Yucheon granite and its enclaves[J]. Geosciences Journal, 2002, 6(4): 289-302.

[11] Barbarin, Bernard. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: Nature, origin, and relations with the hosts[J]. Lithos, 2005, 80(1/4): 155-177.

[12] Chen Guoneng, Grapes R H. An In-situ melting model of granite formation: Evidence from southeast China [J]. International Geology Review, 2003, 45(7): 611-622.

[13] Chen Guoneng, Grapes R H, Zhang Ke. A Model for Mesozoic crustal melting and tectonic deformation in southeast China [J]. International Geology Review, 2003, 45(10): 948-957.

[14] Chen Guoneng, Grapes R H. Granite Genesis: In-situ Melting and Crustal Evolution[M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2007.

[15] 周新民, 姚玉鹏, 徐夕生. 浙东大衢山花岗岩中淬冷包体及其成因机制[J]. 岩石学报, 1992, 8(3): 234-242.

[16] 杜杨松. 酸性—中酸性火山—侵入杂岩中岩石包体研究的新进展[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 169-174.

[17] 徐夕生, 周新民. 皖南前寒武纪花岗岩类中的岩石包体[J]. 矿物岩石, 1991, 11(1): 24-28.

[18] 彭卓伦, 陈国能, 庄文明, 等. 暗色微粒包体与花岗岩的成因关系研究[C]//中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会论文集. 广州: 中国矿物岩石地球化学学会, 2011.

[19] 彭卓伦, 陈国能, Rodney Grapes. 深圳王母岩体暗色包体中的蚀变矿物[C]//中国矿物岩石地球化学学会.

- 中国矿物岩石地球化学学会第 11 届学术年会论文集. 广州:中国矿物岩石地球化学学会,2007.
- [20] 彭卓伦, Grapes R, 庄文明, 等. 华南花岗岩暗色微粒包体矿物组成及微结构研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(1):63-73.
- [21] 彭卓伦, Grapes R, 庄文明, 等. 华南花岗岩暗色微粒包体的岩石化学组成特征及其意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(1):74-81.
- [22] 彭卓伦, Grapes R, 庄文明, 等. 华南花岗岩暗色微粒包体成因研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(1):82-88.
- [23] Zhou X. M., Li W. X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. Tectonophysics, 2000, 326(3/4): 269-287.
- [24] Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung S L, et al. A Hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence [J]. Lithos, 2006, 89(1/2): 89-106.
- [25] Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung S L, et al. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2004, 68(21): 4469-4483.
- [26] Roland M A A S, Nicholls I A, Legg C. Igneous and metamorphic enclaves in the S-type deddick granodiorite, Lachlan fold belt, SE Australia: Petrographic, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence for crustal melting and magma mixing[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(7): 815-841.
- [27] Eberz G W, Karlsruhe, Nicholls I A, et al. Microgranitoid enclaves from the swifts creek pluton SE-Australia: Textural and physical constraints on the nature of magma mingling processes in the plutonic environment[J]. Geologische Rundschau, 1988, 77(3): 713-736.
- [28] Cole J W, Gamble J A, Burt R M, et al. Mixing and mingling in the evolution of andesite-dacite magmas: Evidence from co-magmatic pluton enclaves, Taupo volcanic zone, New Zealand[J]. Lithos, 2001, 59(1/2): 25-46.
- [29] Frost T P, Mahood G A. Field, chemical and physical constraints on mafic-felsic magma interaction in the Lamark Granodiorite, Sierra Nevada, California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1987, 99(2): 272-291.
- [30] Chappell B W, White A J R, Wyborn D. The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis[J]. Journal of Petrology, 1987, 28(6): 1111-1138.
- [31] Elburg M A. Evidence of isotopic equilibration between microgranitoid enclaves and host granodiorite, Warburton granodiorite, Lachlan Fold Belt, Australia [J]. Lithos, 1996, 38:1-22.
- [32] 陈国能, 张珂, 徐伟, 等. 华南中生代花岗岩岩石包体的成因与分类[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1993, 32(z1): 305-311.
- [33] García-Moreno O, Castro A, Corretgé L G, et al. Dissolution of tonalitic enclaves in ascending hydrous granitic magmas: An experimental study[J]. Lithos, 2006, 89(3/4): 245-258.
- [34] 范飞鹏, 肖惠良, 陈乐柱, 等. 赣南陂头一带风化壳淋积型稀土矿成矿地质特征[J]. 中国稀土学报, 2014, 32(1):101-107.
- [35] 霍明远. 中国南岭风化壳型稀土资源分布特征[J]. 自然资源学报, 1992, 7(1):64-70.
- [36] 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 等. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比[J]. 岩石学报, 2007, 23(10):2321-2328.
- [37] 杨大欢, 肖光铭. 广东省离子吸附型稀土矿区域成矿规律研究[J]. 地质与资源, 2011, 20(6):462-468.
- [38] 张敏, 陈培荣, 黄国龙, 等. 南岭东段龙源坝复式岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(7):984-994.
- [39] 陈培荣, 周新民, 张文兰, 等. 南岭东段燕山早期正长岩-花岗岩杂岩的成因和意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004, 34(6): 493-503.
- [40] Middelmost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3/4):215-224.
- [41] 江西省地质矿产局. 足洞花岗岩风化壳离子吸附型重稀土矿[R]. 南昌:江西省地质矿产局, 1987.
- [42] Sun S-S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]. London: Special Publications, 1989: 313-345.
- [43] Taylor S. R, McLennan S. M. The continental crust: its composition and evolution[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1985: 312.
- [44] 周新民, 陈培荣, 徐夕生, 等. 南岭晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 627-640.
- [45] Li Xianhua, Chen Zhigang, Liu Dunyi, et al. Jurassic

gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi province, SE China: age, origin, and tectonic significant [J]. *International Geology Review*, 2003, 45(10): 898-921.

[46] 范春方, 陈培荣. 赣南陂头花岗岩体 Nd-Sr 同位素特征及其意义[J]. *地质找矿论丛*, 2000, 15(3): 282-287.

[47] 陈国能, 洛尼·格拉佩斯. 花岗岩成因: 原地重熔与地壳演化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009: 169-170.

Geological features of dark enclaves in REE-bearing granites
in eastern Nanling: an example from the Pitou rock mass

FAN Fei-peng¹, XIAO Hui-liang¹, CHEN Le-zhu¹,
BAO Xiao-ming¹, CAI Yi-tao¹, ZHOU Yan¹, LI Hai-li²

(1. *Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China*)

(2 *Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: On the basis of field geological survey and indoor integrated study, this study analyzed the geological features of dark enclaves from the REE-bearing granites in weathering crust infiltration deposits in eastern Nanling. A large amount of dark enclaves in the rock mass is found to occur in platy and linear structures, and consists of quartz, pyroxene and plagioclase with typical gabbro texture. The dark enclaves are low in Si, K and Na, and high in Ca, Al, Mg, Fe, Ti and Mn, belonging to sub-alkaline-aluminum unsaturated type; enriched in U, U, La, Pr, Nd, Sm, Dy and depleted in Nb, Sr, Zr, Hf, Ti. The total REE content of dark enclaves is lower than that of host bearing granite, with obvious negative Ce and Eu anomalies. All these characteristics suggest that the protolith may originate from the early mafic rocks related to differentiation and evolution of Pitou rock mass in early Yanshanian. Comparison with dark enclaves of granites in the Nanling area will help search for rare earth deposits and rare metal deposits.

Key words: weathering crust infiltration deposit; rare earth deposit ; dark enclaves; eastern Nanling; Early Yanshanian