

南秦岭黄羊山贫矿碱性岩体地球化学特征和成因及其与成矿岩体的对比研究: 对区域稀土成矿的指示意义

查志辉^{1,2} 陈伟^{1,2*} 张伟¹ 马荣林^{1,2}

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学 北京 100049

摘要: 南秦岭分布有一系列志留纪碱性岩体, 其稀土矿化程度有明显差异, 原因不明。本文聚焦研究较为薄弱的贫矿岩体(黄羊山岩体), 开展了岩石学、元素地球化学和同位素年代学分析测试, 以期通过与成矿岩体(庙垭+杀熊洞)对比揭示稀土成矿差异的原因。结果表明, 黄羊山岩体(正长岩和碱性花岗岩)形成于(438.8±3.7) Ma, 岩石具过碱质、高钾钙碱性-钾玄岩特征; 具有右倾的球粒陨石标准化稀土配分曲线和 Eu 负异常; 微量元素蛛网图显示 Eu、Ba 和 Sr 负异常但无高场强元素异常; 具高的 Zr 和 Nb 含量、Ga/Al 比值和锆石饱和温度(~830 °C), 与典型 A 型花岗岩类相似; $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 2.31~3.43, 与区域上同期幔源基性岩类似。结合相关地球化学特征, 约束其来源于新生的基性地壳, 不同于来源富集地幔的同期成矿正长岩体。对比研究显示, 贫矿岩体与成矿岩体的岩浆源区不同, 这可能是导致南秦岭不同碱性岩体在地球化学特征及稀土含矿性上存在差异的关键因素。

关键词: 碱性岩; 岩石成因; 稀土成矿差异性; 黄羊山岩体; 南秦岭

中图分类号: P581 文章编号: 1007-2802(2022)03-0488-17 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.029

Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the REE-barren Huangyangshan Alkaline Intrusion in the South Qinling, Central China and the Comparative Study to the REE Mineralized Intrusions: Implication for the Regional REE Mineralization

ZHA Zhi-hui^{1,2}, CHEN Wei^{1,2*}, ZHANG Wei¹, MA Rong-lin^{1,2}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The key factors controlling obviously different degrees of REE mineralization (fertile and barren) among a series of Silurian alkaline intrusions distributed in the South Qinling orogenic belt have long been poorly understood. In this paper, we have conducted a combined petrological, geochemical, and isotopic investigation of the REE-barren Huangyangshan alkaline pluton, in order to make a comprehensive comparison with REE-mineralized intrusions (the Miaoya and Shaxiongdong) and then to explore the reason why there is obvious difference among those intrusions in terms of the REE mineralization. Our results show that rocks (syenite and alkaline granite) of the Huangyangshan intrusion, which was formed in 438.8±3.7 Ma, have peralkaline, shoshonitic and high-K calc-alkaline characteristics. They have right-declined (LREE-rich) chondrite-normalized REE distribution patterns with negative Eu anomalies, obvious depletion of Eu, Ba, and Sr but weak HSFES anomalies in the primitive mantle-normalized trace-elemental spider diagrams, and have high Zr and Nb contents, high Ga/Al ratios, and high zircon saturation temperatures (~830 °C). They are similar to the typical A-type granite. The Huangyangshan alkaline rocks have $\epsilon_{Nd}(t)$ values of 2.31~3.43 which are similar to those of the contemporaneous mantle-derived mafic rocks in the region. In combination with related geochemical features of these

收稿编号: 2022-028 2022-3-1 收到 2022-4-14 改回

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602302); 国家自然科学基金项目(42121003); 中科院前沿科学重点项目(QYZDB-SSW-DQC008)

第一作者简介: 查志辉(1996-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: zhazhihui@mail.gyig.ac.cn.

* 通信作者简介: 陈伟(1984-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿床学研究。E-mail: chenwei@mail.gyig.ac.cn.

rocks, it is constrained that their parental magmas could be derived from partial melting of juvenile crustal mafic rocks. They are different from the contemporaneous REE-mineralized syenite which was derived from enrich mantle (EM I). The comparison of barren and mineralized intrusions show that they were derived from different magma sources. Thus, it is believed that the different magma sources of different alkaline intrusions in the South Qinling orogenic belt could be key factors resulting in their different geochemical characteristics and different properties of the REE mineralization.

Key words: alkaline rock; petrogenesis; the REE metallogenic difference; the Huangyangshan pluton; south Qinling

0 引言

碳酸岩-碱性岩型稀土矿床是世界上最重要的稀土矿床类型,已探明的稀土资源量超过全球总储量的30%。然而,全世界分布有530多处碳酸岩体,形成稀土矿床的却不到4%(Woolley and Kjarsgaard, 2008)。何种因素导致不同碱性岩-碳酸岩体的成矿差异目前仍不清楚。近年来,国内外针对该问题开展了大量研究并取得不少新认识,如成矿岩体源区有富稀土沉积物的加入,晚期富硫酸盐热液流体的出溶可能是稀土成矿的关键因素(Xie et al., 2009; Hou et al., 2015; Cui et al., 2020; Wan et al., 2021)。由于缺乏同期同区域贫矿与成矿碱性岩-碳酸岩体的系统对比,有关导致成矿差异性的关键原因仍不清楚。

南秦岭是我国重要的稀土成矿带,区内与稀土成矿相关的碱性岩体主要分布于武当地体附近(李石, 1991a; 张成立等, 2002; Xu et al., 2008),例如湖北十堰市西南的庙垭和杀熊洞正长岩-碳酸岩杂岩体。除上述成矿岩体外,南秦岭地区还分布有一系列同时代但不成矿的碱性岩体,如湖北随州地区的黄羊山、观子山岩体等(李石, 1988, 1990; 张成立等, 2002)。迄今为止,成矿碱性岩体已积累有大量研究资料(Xu et al., 2008, 2010, 2015; Ying et al., 2017, 2020; Çimen et al., 2018; Chen et al., 2018; Su et al., 2019, 2022; Zhang et al., 2019b, 2019a; Ma et al., 2021; Wu et al., 2021; Lu et al., 2021),但贫矿岩体的研究仍较为薄弱,且缺乏成矿与贫矿岩体之间系统的对比。为此,本文对该区研究相对薄弱的黄羊山贫矿岩体开展系统的岩石学、地球化学和年代学分析,并探讨黄羊山岩体的岩石成因。同时通过收集该区前人发表的成矿与贫矿岩体的地球化学数据,开展两者的系统对比,揭示导致南秦岭地区不同碱性岩体成矿差异性的原因,为区域稀土找矿提供理论依据。

1 岩体地质及岩相学特征

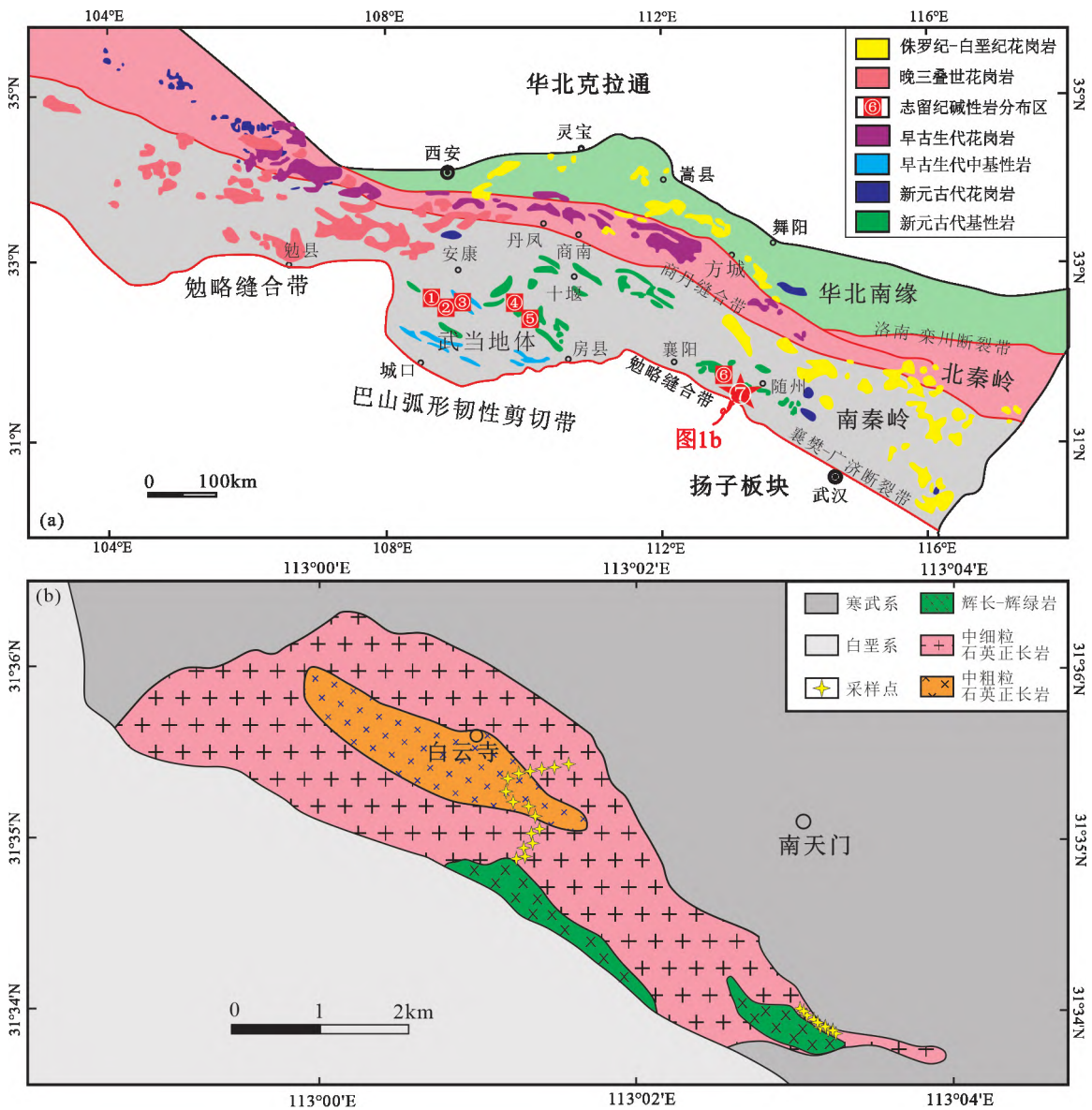
秦岭造山带位于我国中部,被洛南-栾川断裂带、商丹缝合带和勉略缝合带分成华北克拉通南

缘、北秦岭、南秦岭和扬子板块北缘四个构造单元(图1a)(Meng and Zhang, 2000; Wu and Zheng, 2013)。南秦岭构造单元位于商丹缝合带和勉略缝合带之间,其中出露大片变质基底岩石,基底上部为变基性火山岩系(如耀岭河群)、下部为变中酸性火山岩系(如郧西-武当山群),盖层为上震旦统-三叠系的浅海相沉积(Meng and Zhang, 2000)。该区早古生代岩浆活动广泛发育,主要包括志留纪的镁铁质-超镁铁质岩墙、碱性火山杂岩、粗面岩、正长岩和碳酸岩等(李石, 1991b; 张成立等, 2007)。

黄羊山岩体位于湖北随州三里岗镇北西10 km处,岩体呈NW320°向侵入寒武系庄子沟组中,南部被白垩系沉积岩覆盖,在岩体南部和西侧有辉绿岩墙侵入(图1b)。组成岩体的岩石有两种岩性:中部为中粗粒石英正长岩,外围为中细粒石英正长岩或碱性花岗岩(图1b)。二者间无明显界限,仅在粒度上有差别。前者具斑状结构,主要组成矿物为碱性长石(45%~60%)、斜长石(10%~15%)、石英(10%~20%)、角闪石(10%~15%)以及少量黑云母(图2)。碱性长石呈半自形板状、粒状,粒径为0.4~2 mm,包括条纹长石和钾长石;斜长石呈半自形,粒径0.2~1.5 mm;石英呈半自形;角闪石呈半自形-自形粒状。后者也呈斑状结构,主要组成矿物有碱性长石(55%~60%)、石英(20%~25%)、斜长石(10%~15%)、角闪石(5%~10%)等。碱性长石呈半自形板状、粒状,粒径为0.8~1.5 mm;石英呈半自形;斜长石呈半自形,粒径0.2~1.5 mm;角闪石呈半自形-自形粒状。二者的副矿物都有锆石、磷灰石、榍石、钛铁矿、磁铁矿以及独居石。

2 分析方法

样品HYS17-5至HYS17-23(共16件)的全岩主量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室完成,测试仪器为ARL Perform' X 4200型X射线荧光光谱仪。以GSR-01国产花岗岩标样为质控样,分析精度优于1%。全岩微量元素分析在贵州同微测试科技有限公司完成,测试仪器为Thermo Fisher ICP-MS(型号X Series 2),以W-2a



(a) 修改自朱煜翔(2019); (b) 修改自 Ma 等(2005)。

数字: ①紫阳岩墙群; ②岚皋岩墙群; ③平利、镇坪岩墙群; ④庙垭岩体; ⑤杀熊洞杂岩体; ⑥观子山岩体; ⑦黄羊山岩体

图1 秦岭岩浆岩分布简图(a)和黄羊山岩体地质简图(b)

Fig. 1 (a) Distribution sketch map of magmatic rocks in the Qinling orogenic belt;

(b) Simplified geological map of the Huangyangshan pluton

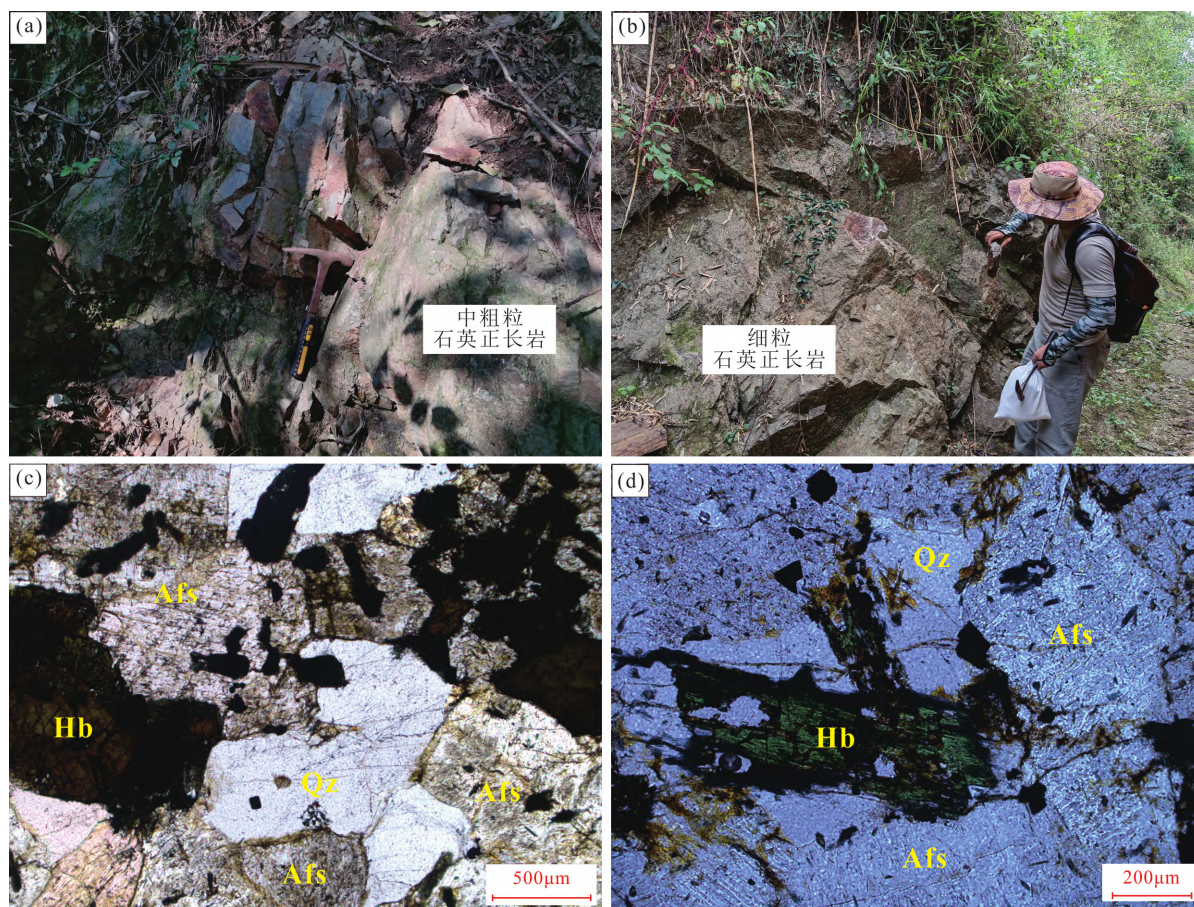
和 BHVO-2 标样,分析精度优于 10%。

样品 HYS21-8 至 HYS21-10(共 10 件)的全岩主、微量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成,测试仪器分别为 X 射线荧光光谱仪(分析精度优于 5%)和 PE Elan6000 ICP-MS(分析精度优于 10%)。相关分析方法详见杨小鹏等(2019)。

在北京锆年领航科技有限公司完成锆石单矿物分选,挑选出具有代表性的锆石,用环氧树脂制靶,进行了锆石显微镜照相(透射光和反射光)和阴极发光(CL)照相。样品的锆石 U-Pb 同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,使用仪器为

LA-ICP-MS,GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e,详细的仪器参数和分析流程见 Zong 等(2017)和 Hu 等(2015)。标样为锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610,监控标样为 GJ-1 及 Plesovice。采用 ICPMSDataCal 软件(Liu et al.,2008,2010)进行数据处理,利用 ISOPLLOT 软件(Ludwig,2003)完成年龄计算。

样品的全岩 Nd 同位素测定在贵州同微测试科技有限公司完成,采用仪器为 Nu Instruments MC-



(a) (c) 中粗粒石英正长岩; (b) (d) 细粒石英正长岩; 矿物符号: Qz—石英; Afs—碱性长石; Hb—角闪石

图2 黄羊山岩体正长岩野外和镜下照片

Fig. 2 Field and Microscopic photos of the Huangyangshan syenite

ICP-MS(型号 Plasma 3)。Nd 同位素质量分馏采用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd 值(0.7219)进行校正,测定标样 JNdI-1 的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 平均值为 0.512 113 ± 0.000 009 (n = 11), 与前人结果一致(0.512 115 ± 0.000 007) (Tanaka et al., 2000)。

3 地球化学特征

3.1 全岩主、微量元素组成

黄羊山岩体样品的主量元素分析结果(表1)显示其 SiO₂ 含量为 60.39%~73.64% (平均 66.87%), Al₂O₃ 为 10.25%~16.72% (平均 13.34%), MgO 为 0.05%~2.16% (平均 0.29%), Na₂O 为 4.11%~8.59% (平均 5.71%), K₂O 为 0.50%~5.66% (平均 4.26%), 全碱为 8.15%~11.08% (平均 9.97%)。在 TAS 图解上,大多数点投在碱性系列区域,主要投点为正长岩和石英二长岩,少数为碱性花岗岩(图3a)区域。在 SiO₂-K₂O 图解中,落入高钾钙碱性及钾玄岩系列区域(图3b);在 A/CNK-A/NK 图解上,显示为过碱质特征(图3c)。

样品的微量元素和稀土元素分析结果(表2)显示 稀土元素总量变化较大(145 × 10⁻⁶ ~ 866 × 10⁻⁶), 在球粒陨石标准化稀土配分图上均显示为轻稀土富集、重稀土平坦的曲线(图4a)。样品的 La_N/Yb_N 值为 3.85~14.45, 反映轻重稀土分异较为明显; 除少数几个样品外, 均具有明显的 Eu 负异常(Eu_N/Eu_N^{*} 为 0.30~1.49) (图4a)。此外, 样品还富集大离子亲石元素(Rb), 高场强元素(Zr、Nb、Ta、Th) 无明显异常, 具有明显的 Sr 和 Ba 负异常(图4b)。

3.2 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄

所有样品中的锆石在显微镜下均为无色透明, 具有自形晶型, 大多呈短柱状。阴极发光(CL)图像显示锆石颗粒具有明显的振荡环带结构(图5), 无继承锆石核的出现, 表明这些锆石均为岩浆结晶的产物(Hoskin, 2000; Belousova et al., 2002)。LA-ICPMS U-Pb 年龄分析结果(表3)显示, 锆石的 Th、U 含量分别为 37 × 10⁻⁶ ~ 1003 × 10⁻⁶ 和 12 × 10⁻⁶ ~ 3955 × 10⁻⁶, 对应的 Th/U 比值为 0.63~8.17, 类似于

表 1 黄羊山岩体全岩主量元素含量
Table 1 Contents of major elements in rocks of the Huangyangshan pluton

样品编号	HYS17-5	HYS17-6	HYS17-7	HYS17-8	HYS17-9	HYS17-10	HYS17-11	HYS17-13	HYS17-14	HYS17-15	HYS17-16	HYS17-17	HYS17-18
SiO ₂	69.07	69.67	71.60	70.44	73.64	71.85	67.74	62.26	67.28	63.83	61.83	60.39	69.65
Al ₂ O ₃	14.02	12.95	12.79	12.44	10.25	10.27	12.18	14.51	13.54	16.11	14.93	11.29	10.49
TFe ₂ O ₃	4.06	5.51	4.10	4.91	5.79	6.69	7.93	8.12	6.47	5.95	8.27	10.73	7.81
MgO	0.41	0.13	0.08	0.12	0.12	0.14	0.14	0.41	0.15	0.34	0.39	1.96	0.16
CaO	0.70	0.15	0.21	0.31	0.28	0.13	0.24	1.63	0.22	1.24	1.41	3.81	0.32
Na ₂ O	4.93	5.61	5.23	5.55	4.47	4.69	5.72	6.24	6.16	6.87	6.43	5.75	5.24
K ₂ O	5.66	4.74	5.09	4.99	4.44	4.43	4.76	4.21	4.76	4.21	3.87	2.81	4.99
P ₂ O ₅	0.06	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.15	0.04	0.16	0.22	0.35	0.02
TiO ₂	0.54	0.54	0.30	0.39	0.50	0.61	0.74	0.90	0.47	0.50	1.36	2.13	0.33
MnO	0.10	0.10	0.09	0.07	0.04	0.17	0.17	0.25	0.21	0.22	0.33	0.27	0.14
烧失量	0.54	0.54	0.52	0.48	0.60	0.70	0.40	1.27	0.50	0.63	0.74	0.49	0.57
总和	100.09	99.97	100.03	99.72	100.14	99.70	100.05	99.95	99.79	100.05	99.78	100.00	99.71

样品编号	HYS17-20	HS17-22	HS17-23	HYS21-8-1	HYS21-8-2	HYS21-8-3	HYS21-8-4	HYS21-8-5	HYS21-8-6	HYS21-8-7	HYS21-8-8	HYS21-8-9	HYS21-10
SiO ₂	62.66	72.14	70.50	66.65	66.13	64.55	65.74	66.17	64.63	64.85	66.02	64.10	65.36
Al ₂ O ₃	16.72	10.72	11.78	14.22	14.03	13.84	13.83	13.98	14.42	14.51	13.90	13.98	15.04
TFe ₂ O ₃	4.30	7.70	6.13	6.96	7.27	7.91	7.37	6.92	7.89	7.33	7.75	8.76	7.04
MgO	2.16	0.13	0.09	0.08	0.06	0.11	0.10	0.08	0.05	0.05	0.05	0.08	0.08
CaO	3.29	0.36	0.18	0.92	0.84	1.04	0.95	0.86	0.95	0.97	0.90	1.08	0.97
Na ₂ O	8.59	4.11	5.47	5.98	5.44	5.81	5.36	5.48	5.73	5.98	5.44	5.58	6.59
K ₂ O	0.50	4.04	4.95	4.00	4.58	3.83	4.54	4.61	4.40	4.08	4.48	4.29	3.51
P ₂ O ₅	0.13	0.03	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04
TiO ₂	0.74	0.48	0.46	0.85	0.88	1.04	1.00	0.94	1.04	1.02	0.90	1.20	1.10
MnO	0.07	0.09	0.17	0.09	0.10	0.15	0.12	0.09	0.07	0.08	0.09	0.10	0.09
烧失量	0.61	0.34	0.45	0.66	0.63	0.83	0.82	0.92	0.52	0.74	0.50	0.90	0.71
总和	99.76	100.14	100.18	100.45	100.00	99.15	99.87	100.08	99.73	99.65	100.07	100.12	100.53

表 2 黄羊山岩体全岩微量元素和稀土元素含量
Table 2 Contents of trace elements in rocks of the Huangyangshan pluton

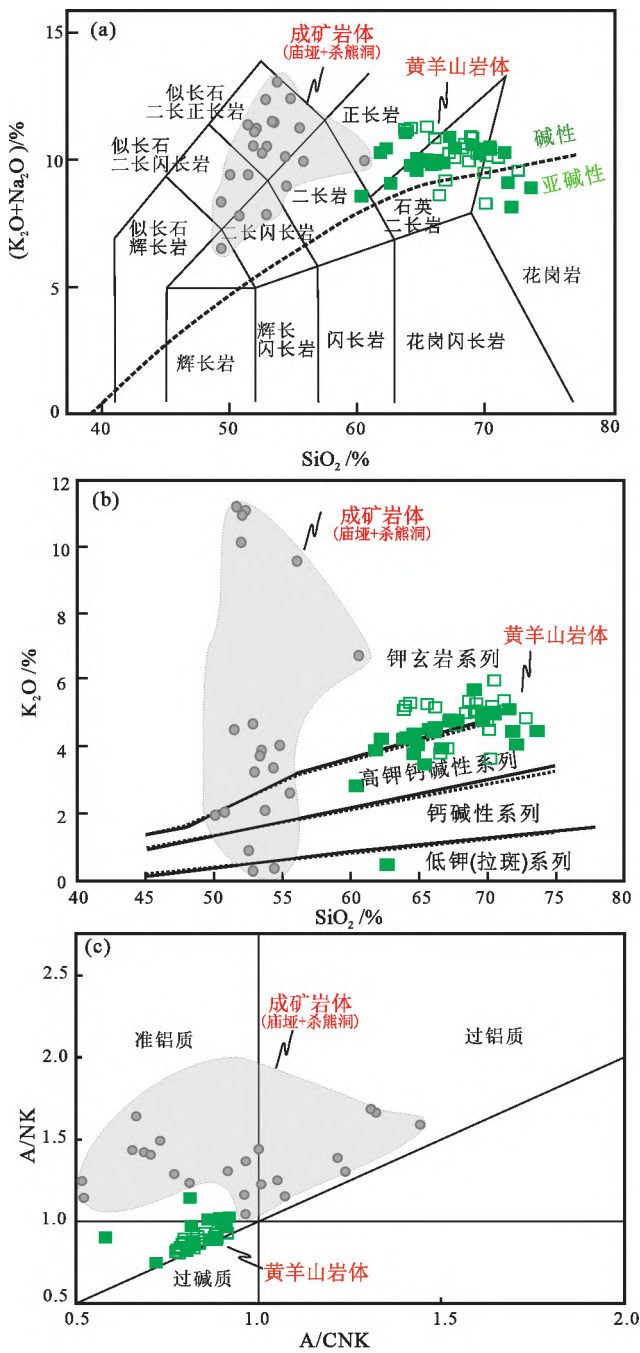
样品编号	HYS17-5	HYS17-6	HYS17-7	HYS17-8	HYS17-9	HYS17-10	HYS17-11	HYS17-12	HYS17-13	HYS17-14	HYS17-15	HYS17-16	HYS17-17	HYS17-18
Li	4.55	9.63	6.78	3.59	18.1	45.4	20.9	22.1	12.5	11.4	11.3	3.38	5.28	15.2
Be	3.01	3.05	2.92	3.43	4.35	6.89	3.53	3.35	1.73	2.94	2.64	7.41	1.52	6.41
Sc	1.66	0.001	0.003	0.019	0.50	0.51	0.38	0.48	4.56	0.71	0.62	1.61	11.9	0.001
V	16.9	1.85	0.88	1.52	1.41	1.43	1.32	1.36	4.53	1.85	2.45	30.9	1.78	7.15
Cr	14.4	12.2	16.3	9.01	12.4	9.36	11.0	13.8	12.4	8.10	9.97	12.3	8.67	6.40
Co	193	156	172	243	214	206	150	166	101	169	138	175	76.3	187
Ni	18.8	14.1	15.5	24.2	20.1	19.5	14.3	15.4	8.94	12.2	13.1	16.7	7.67	18.0
Cu	4.45	2.12	2.29	2.24	2.03	2.47	3.28	3.98	9.76	3.10	2.19	7.32	3.12	1.99
Zn	104	121	112	94.0	104	316	137	140	139	182	130	132	119	169
Ga	34.3	44.1	42.5	43.3	37.0	36.4	42.2	40.9	30.7	41.3	40.3	41.4	29.4	40.4
Rb	120	91.4	106	104	103	145	116	116	69.7	70.1	66.2	34.1	55.7	185
Sr	31.5	3.50	6.71	3.87	4.27	2.23	2.43	2.25	141	8.18	8.04	48.7	93.3	8.37
Y	40.6	26.7	35.4	30.5	27.2	55.8	32.9	28.8	35.9	29.7	26.6	137	31.3	66.1
Zr	161	268	287	388	307	522	297	269	248	281	245	1089	200	1044
Nb	98.8	47.7	53.5	57.4	54.5	97.7	48.4	49.2	56.6	50.9	44.2	192	56.4	155
Sn	4.50	2.47	2.21	2.84	3.67	4.41	2.78	2.99	2.15	3.17	2.42	7.08	1.63	10.5
Cs	0.57	0.21	0.35	0.28	0.11	0.22	0.52	0.54	0.88	0.37	0.13	0.44	1.62	0.48
Ba	197	56.2	45.4	48.5	33.6	29.3	43.4	43.6	2484	445	441	176	3956	48.7
La	20.3	37.4	34.7	46.6	40.3	66.8	41.1	35.4	41.1	31.7	34.5	173	39.8	88.5
Ce	49.9	70.2	74.4	96.5	77.1	141	82.1	69.6	90.6	67.8	66.5	360	83.6	163
Pr	7.29	9.85	9.56	10.9	9.22	16.0	10.8	9.10	11.4	9.33	10.6	41.4	11.3	20.4
Nd	31.5	37.6	38.1	40.6	34.7	60.3	42.6	35.9	48.1	38.3	42.2	160	48.1	75.0
Sm	8.16	7.96	8.48	7.70	6.59	13.5	8.73	7.45	10.6	8.48	8.84	32.8	10.4	14.0
Eu	1.27	0.81	0.96	0.78	0.67	1.40	0.91	0.76	3.89	1.48	1.55	3.65	4.73	1.34
Gd	7.29	6.04	7.06	5.81	4.98	11.1	6.91	5.86	8.72	6.64	6.60	28.9	8.44	11.4
Tb	1.33	0.94	1.13	1.01	0.83	1.86	1.15	0.90	1.32	1.08	1.02	4.67	1.25	2.05
Dy	7.58	5.28	6.24	5.73	4.80	10.9	6.34	5.24	7.04	6.08	5.65	26.6	6.62	12.1
Ho	1.47	1.01	1.25	1.12	0.99	2.15	1.16	1.07	1.34	1.16	1.05	5.29	1.18	2.62
Er	3.92	2.78	3.32	3.17	2.94	5.86	3.25	2.95	3.48	3.25	3.06	14.0	3.17	7.84

续表 2

样品编号	HYS17-5	HYS17-6	HYS17-7	HYS17-8	HYS17-9	HYS17-10	HYS17-11	HYS17-12	HYS17-13	HYS17-14	HYS17-15	HYS17-16	HYS17-17	HYS17-18
Tm	0.58	0.40	0.50	0.48	0.48	0.89	0.51	0.45	0.50	0.53	0.49	2.01	0.45	1.29
Yb	3.78	2.71	3.28	3.21	3.63	6.03	3.60	3.40	3.49	3.86	3.71	12.7	3.14	9.21
Lu	0.55	0.41	0.48	0.45	0.57	0.85	0.55	0.55	0.53	0.62	0.59	1.68	0.47	1.41
Hf	5.48	6.75	7.27	9.72	7.86	12.5	7.73	6.92	6.19	7.39	6.14	27.2	5.08	27.4
Ta	5.08	3.65	3.85	3.82	2.84	4.62	3.47	3.30	3.18	3.22	2.75	12.1	3.21	9.45
Tl	0.26	0.15	0.22	0.081	0.041	0.052	0.25	0.23	0.15	0.15	0.12	0.069	0.24	0.16
Pb	18.2	4.70	6.98	11.0	5.04	12.2	5.67	25.6	3.59	5.85	5.25	5.31	8.51	14.9
Th	6.94	5.31	5.51	8.12	5.46	16.2	7.23	6.65	4.35	4.95	4.30	26.0	3.66	25.1
U	1.41	1.10	1.37	1.51	0.94	2.70	0.91	0.85	0.95	1.00	0.83	5.35	0.70	3.67
ΣREE	145	183	189	224	188	338	210	179	232	180	186	866	223	410
La _N /Yb _N	3.85	9.89	7.59	10.41	7.95	7.94	8.18	7.47	8.45	5.90	6.68	9.77	9.09	6.89
Eu _N /Eu _N ⁺	0.49	0.35	0.37	0.34	0.34	0.34	0.35	0.34	1.20	0.58	0.59	0.36	1.49	0.32
Yb/Ta	0.74	0.74	0.85	0.84	1.28	1.30	1.04	1.03	1.10	1.20	1.35	1.05	0.98	0.97
Y/Nb	0.41	0.56	0.66	0.53	0.50	0.57	0.68	0.59	0.63	0.58	0.60	0.71	0.56	0.43
样品编号	HYS17-20	HS17-21	HS17-22	HS17-23	HYS21-8-1	HYS21-8-2	HYS21-8-3	HYS21-8-4	HYS21-8-5	HYS21-8-6	HYS21-8-7	HYS21-8-8	HYS21-8-9	HYS21-10
Li	14.4	2.20	4.02	28.1	1.70	1.00	1.00	3.60	3.40	0.60	0.50	1.40	2.90	0.50
Be	5.58	3.05	4.97	4.04	2.21	2.18	2.04	2.97	2.86	2.25	2.08	2.45	2.99	2.40
Sc	0.36	0.13	0.17	0.14	0.40	0.40	0.50	0.40	0.40	0.40	0.30	0.40	0.40	0.30
V	7.28	11.0	8.59	1.45	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Cr	10.6	8.62	13.3	7.39	10.0	10.0	30.0	10.0	10.0	10.0	<10	10.0	10.0	<10
Co	206	171	150	153	120	214	88.1	89.0	73.6	72.8	95.4	76.2	94.8	0.60
Ni	19.8	14.9	14.0	15.3	10.4	8.50	7.80	7.10	6.00	5.50	8.00	5.70	8.10	0.70
Cu	2.17	3.27	3.35	2.70	3.80	3.20	10.6	6.50	7.90	1.30	0.50	2.30	3.10	<0.2
Zn	170	80.3	117	181	218	124	100	113	92.0	71.0	174	110	96.0	102
Ga	40.3	38.1	41.3	40.0	43.7	42.8	45.1	44.8	44.0	44.8	44.9	43.0	44.6	45.9
Rb	184	43.9	46.0	106	37.8	44.6	37.9	41.2	41.2	37.9	34.1	44.3	41.1	30.2
Sr	8.05	34.6	273	4.51	34.0	31.8	41.1	38.2	34.8	39.6	44.5	34.7	35.6	56.5
Y	71.0	45.4	124	55.3	39.7	40.5	27.8	50.0	49.0	37.3	37.8	45.7	45.0	53.6
Zr	1039	338	875	592	330	331	205	426	451	306	360	389	319	398
Nb	135	57.9	174	111	49.6	48.7	34.4	66.4	72.1	55.4	47.5	53.7	54.5	66.2
Sn	10.6	5.17	10.2	3.59	5.00	4.40	2.90	3.60	3.60	4.80	4.20	4.40	4.00	5.20

续表 2

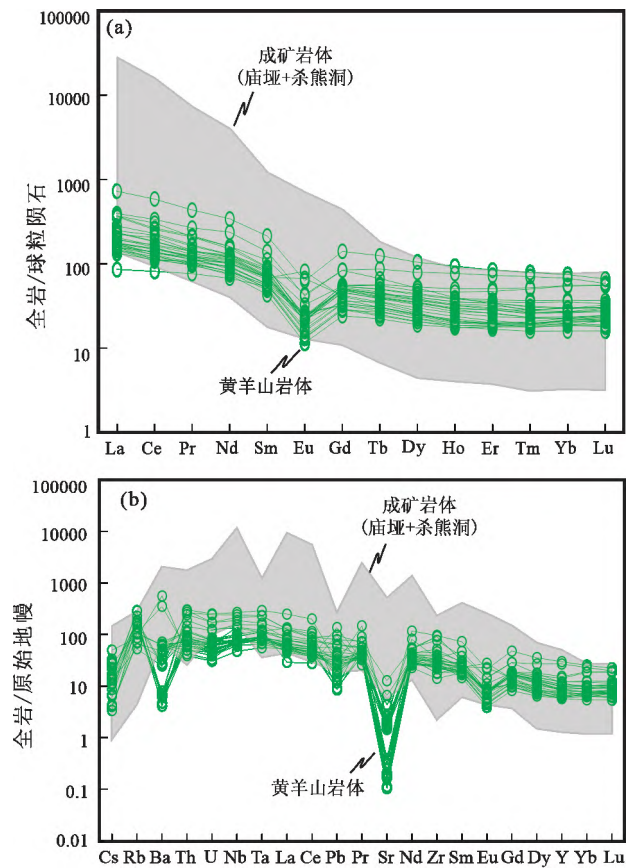
样品编号	HYS17-20	HS17-21	HS17-22	HS17-23	HYS21-8-1	HYS21-8-2	HYS21-8-3	HYS21-8-4	HYS21-8-5	HYS21-8-6	HYS21-8-7	HYS21-8-8	HYS21-8-9	HYS21-10
Cs	0.43	0.13	0.14	0.44	0.74	0.99	0.90	0.91	0.70	0.45	0.44	1.08	0.94	0.37
Ba	49.5	333	237	184	322	366	441	508	461	462	447	350	418	439
La	85.4	52.9	88.4	58.5	37.4	42.1	37.1	55.8	54.9	37.5	45.4	41.5	48.4	93.7
Ce	157	126	186	134	84.6	92.9	78.5	114	112	85.3	103	93.0	101	206
Pr	19.7	13.7	20.0	15.4	10.8	11.6	9.83	13.6	13.3	10.8	13.3	11.8	12.4	25.3
Nd	70.5	56.1	75.3	59.7	47.3	50.5	44.0	56.9	55.3	48.1	59.6	52.6	54.0	111
Sm	13.7	12.8	17.0	12.8	9.89	10.6	8.82	11.3	11.0	10.4	12.0	10.9	10.8	21.3
Eu	1.32	1.20	2.51	1.90	1.23	1.25	1.02	1.31	1.23	1.21	1.30	1.31	1.37	2.42
Gd	11.4	10.7	17.3	11.1	9.37	10.0	7.75	10.5	10.4	9.55	10.1	10.4	10.3	17.3
Tb	2.14	1.73	3.25	1.88	1.46	1.50	1.14	1.66	1.64	1.44	1.48	1.61	1.54	2.49
Dy	13.4	9.32	20.1	11.3	8.61	8.90	6.44	10.2	10.2	8.30	8.87	9.77	9.52	13.1
Ho	2.86	1.82	4.35	2.21	1.66	1.69	1.20	2.00	2.01	1.54	1.62	1.87	1.82	2.25
Er	8.36	4.78	12.1	6.17	4.71	4.69	3.24	5.67	5.65	4.33	4.26	5.31	5.00	5.56
Tm	1.33	0.71	1.80	0.94	0.67	0.65	0.45	0.78	0.80	0.59	0.59	0.73	0.68	0.71
Yb	9.45	5.08	11.4	6.31	4.62	4.51	3.13	5.00	5.11	3.99	3.83	5.03	4.44	4.65
Lu	1.42	0.77	1.49	0.93	0.75	0.72	0.54	0.76	0.77	0.62	0.61	0.82	0.69	0.68
Hf	26.6	9.04	23.7	15.2	8.90	9.00	5.60	10.8	11.3	8.50	9.60	10.50	8.40	10.00
Ta	6.88	3.45	9.65	6.32	3.60	3.70	2.30	4.60	5.10	3.70	3.30	3.70	3.70	4.80
Tl	0.090	0.041	0.047	0.40	0.11	0.15	0.08	0.10	0.10	0.08	0.09	0.09	0.13	0.04
Pb	18.1	5.49	7.94	11.8	7.20	3.90	2.20	2.90	3.30	1.70	1.60	6.30	4.00	1.70
Th	21.0	7.44	23.0	12.4	6.41	6.81	3.34	9.74	10.2	6.21	6.17	7.79	6.46	9.53
U	3.64	1.35	5.12	2.56	3.80	3.20	10.6	6.50	7.90	1.30	0.50	2.30	3.10	<0.2
ΣREE	398	298	461	323	223	242	203	289	284	224	266	247	262	506
La _N /Yb _N	6.49	7.46	5.54	6.65	5.81	6.70	8.50	8.01	7.71	6.74	8.50	5.92	7.82	14.45
Eu _N /Eu _N *	0.31	0.30	0.44	0.47	0.38	0.37	0.37	0.36	0.35	0.37	0.35	0.37	0.39	0.37
Yb/Ta	1.37	1.47	1.19	1.00	1.28	1.22	1.36	1.09	1.00	1.08	1.16	1.36	1.20	0.97
Y/Nb	0.53	0.78	0.71	0.50	0.80	0.83	0.81	0.75	0.68	0.67	0.80	0.85	0.83	0.81



(a) 底图据 Middlemost (1994); (b) 底图及实线据 Peccerillo 和 Taylor (1976), 虚线据 Middlemost (1985); (c) 底图据 Rickwood (1989) 数据来源: 成矿岩体据 Xu 等(2008), Zhu 等(2017), Zhang 等(2019a), Su 等(2019, 2022); 黄羊山岩体绿色实心为本文数据, 绿色空心数据来自 Ma 等(2005), Ahmed 等(2018), Abdallsamed 等(2018)

图3 黄羊山岩体与南秦岭碱性岩带成矿岩体(庙埡+杀熊洞)的 TAS 图解(a)、 SiO_2 - K_2O 图(b)和 A/CNK-A/NK 图(c)

Fig. 3 Diagrams of TAS (a), SiO_2 vs. K_2O (b) and A/CNK vs. A/NK (c) of rocks in the Huangyangshan pluton and mineralized plutons in the south Qinling orogenic belt



球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun 和 McDonough(1989); 成矿岩体数据引自: Xu 等(2008, 2010), Zhu 等(2017), Chen 等(2018), Zhang 等(2019a), Su 等(2019, 2022)

图4 黄羊山碱性岩体与成矿岩体球粒陨石标准化稀土元素模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of rocks in the Huangyangshan pluton and mineralized plutons in the south Qinling orogenic belt

岩浆锆石。在年龄谱和图(图5)上, 22个分析点均具有较好的谐和度, 因此获得 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(438.8±3.7) Ma (MSWD=0.52), 代表了黄羊山岩体的侵位年龄。

3.3 Nd 同位素特征

样品的全岩 Nd 同位素分析结果显示, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 和 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值分别为 0.512 598~0.512 641 和 0.1238~0.1565(表4)。利用锆石年龄(439 Ma)计算的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值、单阶段和两阶段模式年龄(t_{DM1} 和 t_{DM2}) 分别为 2.31~3.43、936~1355 Ma 和 896~947 Ma, 且后者与区域上同期基性岩墙的单阶段模式年龄基本一致(张成立等, 2007)。

表 3 黄羊山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析数据

Table 3 The LA-ICP-MS U-Pb isotopic data for zircons from the Huangyangshan pluton

样品编号	含量/($\times 10^{-6}$)		Th/U	比值				年龄/Ma			
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
HYS20-5	412	266	1.54	0.5112	0.0212	0.0686	0.0007	419.2	14.2	427.6	4.4
HYS20-10	266	42	6.30	0.5112	0.0344	0.0707	0.0016	419.3	23.1	440.1	9.7
HYS20-14	200	96	2.09	0.5089	0.0254	0.0697	0.0012	417.7	17.1	434.5	7.0
HYS20-18	553	76	7.25	0.5491	0.0325	0.0713	0.0012	444.4	21.3	444.2	7.5
HYS20-21	399	50	7.94	0.5973	0.0321	0.0688	0.0012	475.5	20.4	428.6	7.5
HYS20-24	459	80	5.74	0.5402	0.0265	0.0707	0.0010	438.6	17.5	440.2	5.9
HYS20-30	37	12	3.16	0.5242	0.0424	0.0704	0.0023	428.0	28.3	438.9	13.7
HYS20-31	1003	557	1.80	0.5452	0.0140	0.0707	0.0008	441.8	9.2	440.3	4.8
HYS20-32	299	3955	0.76	0.5512	0.0151	0.0709	0.0007	445.8	9.9	441.8	4.0
HYS20-33	181	253	0.72	0.5518	0.0180	0.0711	0.0009	446.2	11.8	442.6	5.2
HYS20-34	473	434	1.09	0.5389	0.0154	0.0707	0.0008	437.7	10.2	440.1	4.6
HYS20-35	391	418	0.94	0.5301	0.0132	0.0711	0.0007	431.9	8.8	442.8	4.0
HYS20-36	779	596	1.31	0.5321	0.0127	0.0707	0.0007	433.2	8.5	440.4	4.2
HYS20-39	404	587	0.69	0.5371	0.0151	0.0711	0.0007	436.5	10.0	442.8	4.0
HYS20-40	227	358	0.63	0.5342	0.0154	0.0707	0.0008	434.6	10.2	440.6	4.6
HYS17-08-04	469	221	2.12	0.5580	0.0284	0.0704	0.0011	450.3	18.5	438.8	6.7
HYS17-08-05	148	20	7.36	0.5338	0.0549	0.0702	0.0030	434.3	36.4	437.5	18.1
HYS17-08-07	633	95	6.69	0.5730	0.0437	0.0709	0.0018	460.0	28.2	441.5	10.7
HYS17-08-08	478	64	7.46	0.5468	0.0406	0.0700	0.0015	442.9	26.7	436.3	9.2
HYS17-08-09	209	44	4.73	0.5417	0.0473	0.0683	0.0021	439.5	31.2	426.2	12.5
HYS17-08-16	586	72	8.17	0.5508	0.0462	0.0729	0.0017	445.5	30.3	453.4	10.1
HYS17-08-18	170	58	2.91	0.5825	0.0565	0.0685	0.0016	466.1	36.2	427.0	9.4

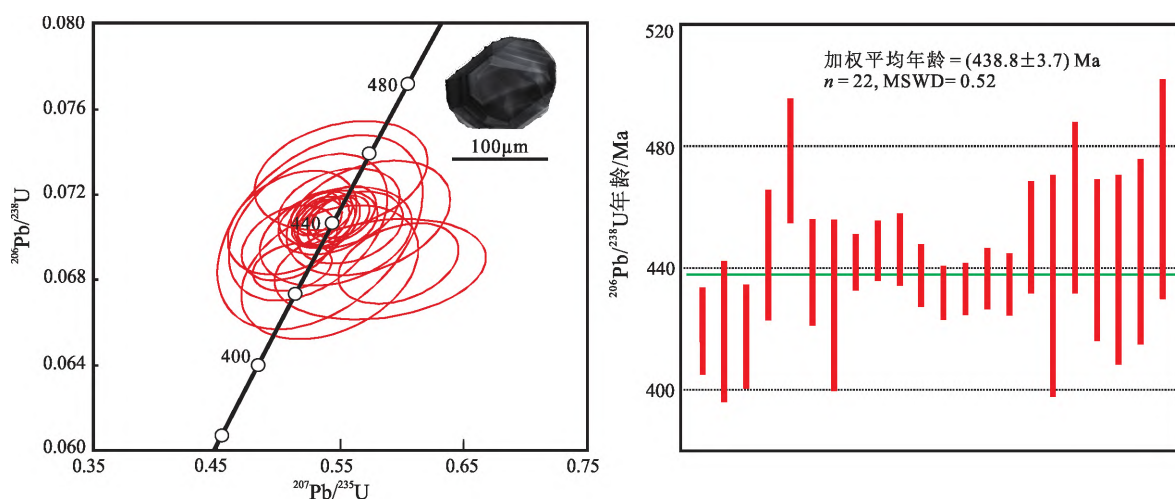


图 5 黄羊山岩体正长岩锆石 U-Pb 谐和图和代表性锆石 CL 图像

Fig. 5 The concordia and weighted average diagrams of U-Pb dating ages for zircons and a CL image of a representative zircon from syenite of the Huangyangshan pluton

4 讨论

4.1 黄羊山岩体的岩石成因

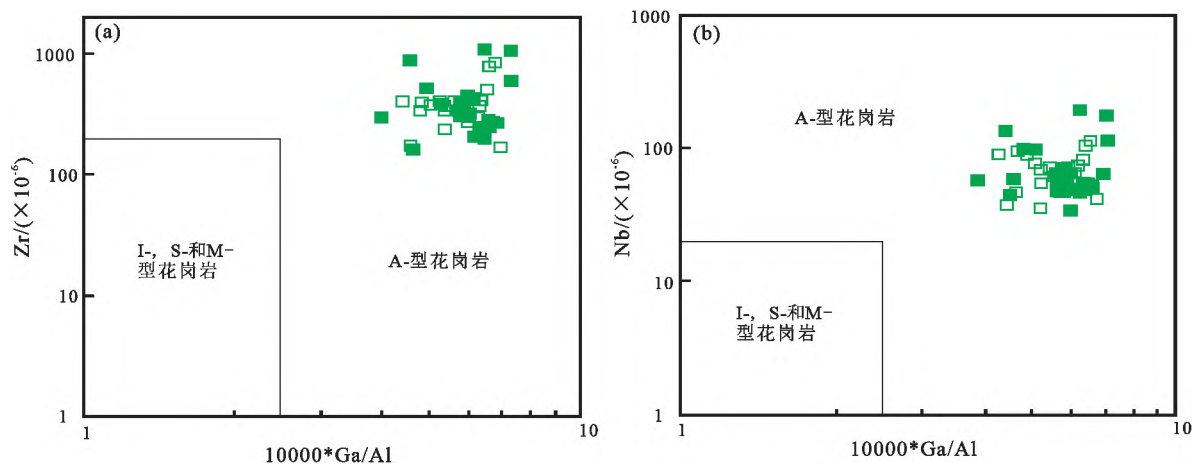
前人研究显示,黄羊山岩体具有 A 型花岗岩的特征 (Abdallsamed et al., 2018)。本次研究 (表 2) 也显示,其具有高的 Zr ($161 \times 10^{-6} \sim 1089 \times 10^{-6}$)、Nb ($34.4 \times 10^{-6} \sim 192 \times 10^{-6}$) 含量及高 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ ($3.99 \sim 7.28$) 比值,类似于 A 型花岗岩而明显不同于 I 或 S 型花岗岩类 (Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; Bonin, 2007) (图 6a、6b)。同样,利用 Watson 和 Harrison (1983) 的锆石饱和温度公式,计算出黄羊山岩体具有较高的锆石饱和温度 ($696 \sim 939 \text{ }^\circ\text{C}$, 峰值为 $\sim 830 \text{ }^\circ\text{C}$) (图 7d)。因其岩浆中 Zr 不饱和 (岩石中缺乏继承锆石),该温度代表下限值 (Miller et al., 2003)。尽管如此,该温度仍明显高于 I 或 S 型花岗岩,与 A 型花岗岩类似。

形成 A 型花岗岩通常有三种方式: ①幔源基性岩浆的分离结晶 (Collins et al., 1982; Eby, 1992; Bonin, 2007); ②地幔或地壳源区在相对较高温度下的低程度部分熔融 (Whalen et al., 1987; Rapp and Watson, 1995; King et al., 1997); ③幔源岩浆与壳源酸性岩浆的混合作用 (Griffin et al., 2002; Wu et al., 2002; Kemp et al., 2005)。黄羊山岩体的全岩 Nd 同位素结果 ($1.81 \sim 3.62$) (图 7b) 以及前人得到的锆石 Hf 同位素组成 ($6.6 \sim 10.0$) (Abdallsamed et al., 2018) 的变化范围都较小,说明黄羊山岩体不可能由幔源岩浆与壳源酸性岩浆的混合作用形成。另外, La/Yb 比值对岩浆作用的敏感度高,可用于识别部分熔融与分离结晶 (Karsli et al., 2011; 杨斌武等, 2011)。从 $\text{La}/\text{Yb}-\text{La}$ 图解 (图 8) 中可以看出,黄羊山岩体样品的地球化学趋势更倾向于部分熔融,可能仅在晚期经历了一定程度的分

表 4 黄羊山岩体全岩 Nd 同位素组成及年龄

Table 4 Whole-rock Nd isotopic compositions and ages of samples from the Huangyangshan pluton

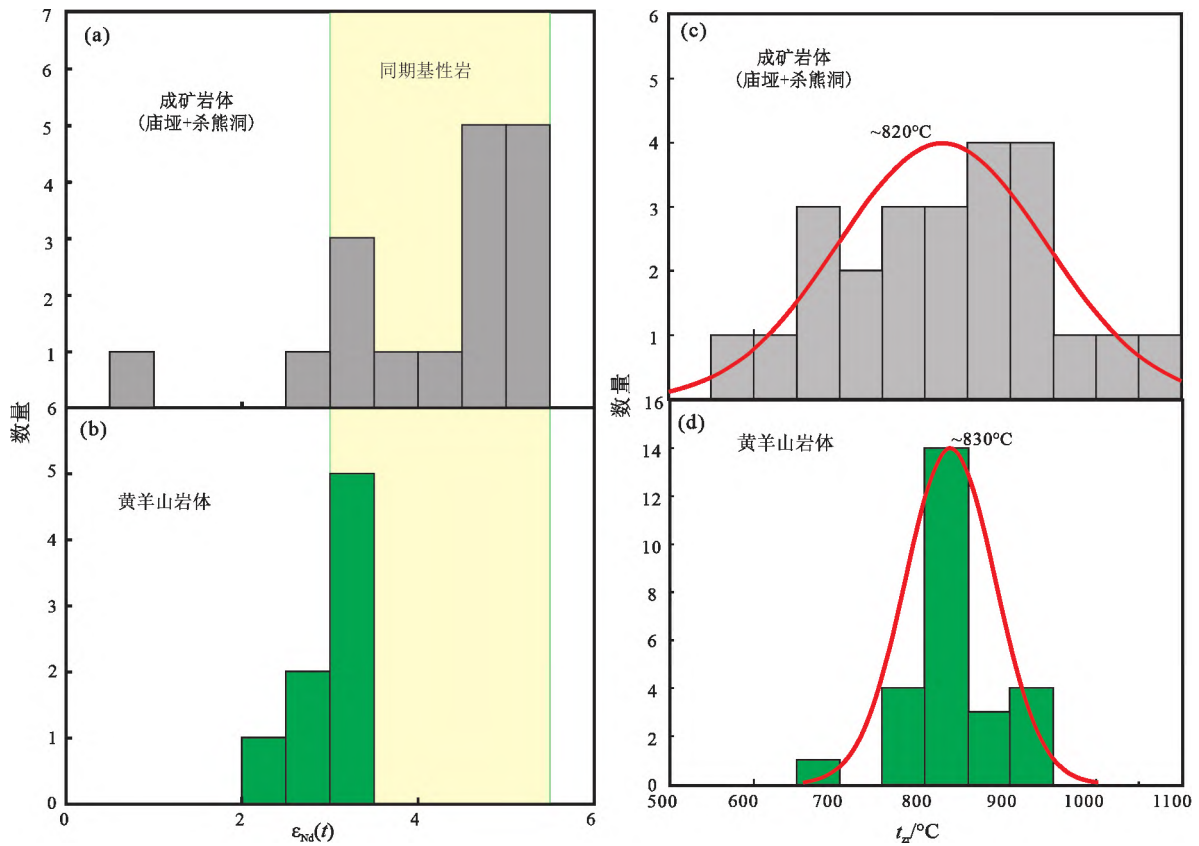
样品编号	Sm/($\times 10^{-6}$)	Nd/($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	同期基性岩 t_{DM}/Ma
HS17-5	8.16	31.5	0.1565	0.512 641	2.31	1355	986	
HS17-13	10.6	48.1	0.1326	0.512 610	3.05	1014	927	
HS17-14	8.48	38.3	0.1338	0.512 611	3.00	1029	931	
HS17-15	8.84	42.2	0.1265	0.512 612	3.43	940	896	
HS17-16	32.8	160	0.1238	0.512 598	3.31	936	906	818~997
HS17-17	10.5	48.1	0.1313	0.512 609	3.10	1001	923	
HS17-21	12.8	56.1	0.1376	0.512 614	2.85	1073	943	
HS17-22	17.1	75.3	0.1367	0.512 609	2.80	1071	947	



绿色空心数据来自: Ma 等 (2005), Ahmed 等 (2018), Abdallsamed 等 (2018); 实心为本文数据

图 6 黄羊山岩体 $10\,000 \text{ Ga}/\text{Al}$ 与 Zr (a) 和 Nb (b) 图解

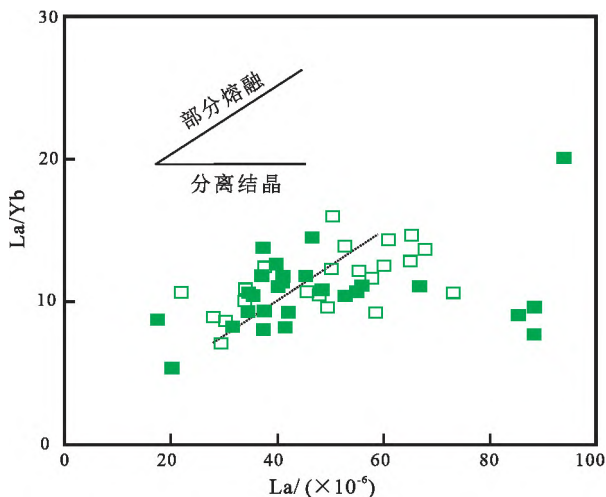
Fig. 6 Discrimination diagrams of $10\,000 \text{ Ga}/\text{Al}$ vs. Zr (a) and $10\,000 \text{ Ga}/\text{Al}$ vs. Nb (b) for rocks in the Huangyangshan pluton



(a) (b) 成矿岩体数据来自: Xu 等(2008) ,Zhu 等(2017) ,Zhang 等(2019a) ,Su 等(2019 ,2022) ; (c) (d) 成矿岩体数据引自 Xu 等(2008 ,2014) ,Cimen 等(2018) ,Zhang 等(2019a) ,Su 等(2019 ,2022) ; 基性岩数据(浅黄色背景)引自张成立等(2007)

图7 成矿岩体和黄羊山岩体 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值直方图(a,b)和锆石饱和温度直方图(c,d)

Fig. 7 Histograms of $\epsilon_{Nd}(t)$ values (a,b) and zircon saturation temperatures (t_{Zr}) (c,d) for the Huangyangshan pluton and mineralized plutons in the South Qinling orogenic belt



绿色实心为本文数据; 绿色空心数据来自 Ma 等(2005) , Ahmed 等(2018) ,Abdallsamed 等(2018)

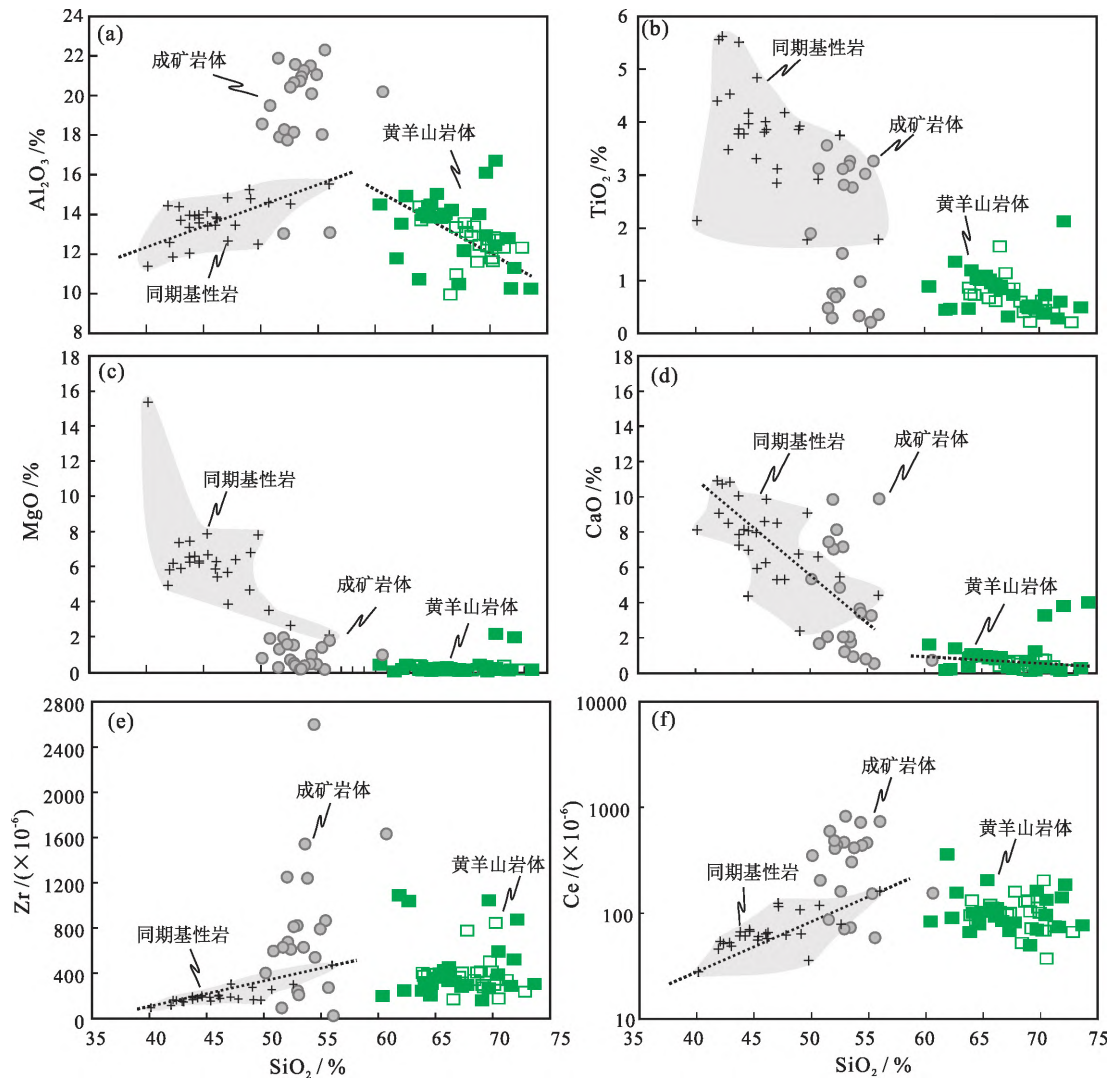
图8 黄羊山岩体的 La-La/Yb 图解

Fig. 8 Diagram of La vs. La/Yb for samples of the Huangyangshan pluton

分离结晶作用(如 $La > 70 \times 10^{-6}$)。此外,通过与区域上

同期幔源基性岩成分进行对比,在哈克图解中二者间并未显示明显的相关关系,甚至有不同演化趋势(图9),说明黄羊山岩体也并非由幔源基性岩浆通过强烈的分离结晶过程演化形成。因此,黄羊山岩体的地球化学特征说明其可能由地幔或地壳源区在相对较高温度下的低程度部分熔融形成。

Nd 同位素数据(表4)显示,黄羊山岩体具有正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(2.31~3.43),与区域上同期幔源基性岩基本重叠(3.28~5.02)(张成立等2007)。但是,黄羊山岩体具有相对较高的 SiO_2 含量(60.39%~73.64%,平均值为67.78%)、较低的 MgO 含量(0.08%~2.16%,平均值为0.43%)(表1),指示其不可能由地幔直接部分熔融形成。另外,黄羊山岩体的 Nd 同位素两阶段模式年龄明显老于岩体形成年龄(表3),似乎暗示着源区可能为新元古代地壳。然而,南秦岭地区新元古代基底岩石具有明显低于黄羊山岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(Yang et al., 2016),也不可能是黄羊山岩体的岩浆源区。有意思的是,黄羊山



黄羊山岩体数据: 绿色实心为本文数据, 绿色空心数据来自 Ma 等(2005), Ahmed 等(2018), Abdallsamed 等(2018); 成矿岩体数据来自 Xu 等(2008), Zhu 等(2017), Zhang 等(2019a), Su 等(2019, 2022); 基性岩数据来自张欣(2010), 陈虹等(2014)

图9 南秦岭黄羊山岩体和部分基性岩哈克图解

Fig. 9 Harker diagrams of rocks from the Huangyangshan pluton and mafic rocks in the South Qinling orogenic belt

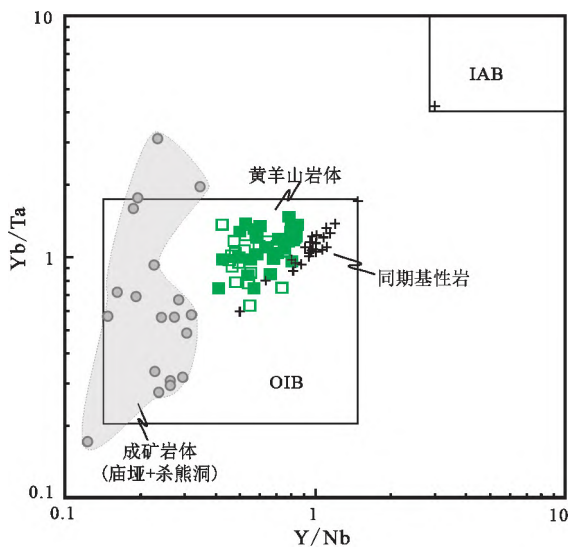
岩体样品和区域上同期幔源基性岩不仅有类似的 Nd 同位素模式年龄(前者为两阶段、后者为单阶段)(表 4), 而且在 Yb/Ta-Y/Nb 判别图(图 10)上均落于洋岛玄武岩(OIB)范围, 显示与 OIB 类似的微量元素特征。这些相似性说明黄羊山岩体极有可能是由类似于同期幔源基性岩成分的新生基性下地壳部分熔融形成。

4.2 与成矿岩体对比: 对稀土成矿的指示意义

样品的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果(表 3)表明, 黄羊山岩体的成岩年龄为(438.8±3.7) Ma(图 5), 与南秦岭南缘广泛分布的碱性岩体或火山岩同期(表 5), 均属于志留纪岩浆活动的产物, 共同构成了该区从北大巴山→武当地块→桐柏地区的一条与稀土-铌成矿密切相关的碱性岩带(张成立

等 2002)。因此, 基于该碱性岩带中不同岩体成矿存在差异性的事实, 本文进一步对黄羊山贫矿正长岩与成矿正长岩(庙垭+杀熊洞)开展全方位的对比, 以期在该区稀土致矿因素上获得一些初步认识。

通过对比发现, 黄羊山贫矿岩体与成矿岩体正长岩具有大致类似的锆石饱和温度和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(图 7), 似乎预示着他们可能来自于同一个源区。然而, 两者地球化学特征却存在较大差异, 与该结论并不契合。例如, 成矿岩体正长岩具相对较低的 SiO_2 含量但却含有更高的稀土含量和 $(La/Yb)_N$ 比值(图 11), 显示了较大的稀土成矿潜力; 在 A/CNK-A/NK 图解上投于过铝质-准铝质区域, 而贫矿岩体则集中在过碱质区域内(图 3c); 具有较弱的 Eu 负异常, 而贫矿岩体具显著 Eu 负异常(图 4a 和图 11)。



成矿岩体数据来自: Xu 等(2008) ,Zhu 等(2017) ,Zhang 等(2019a) ,Su 等(2019, 2022); 黄羊山岩体数据绿色实心为本文数据,绿色空心数据来自: Ma 等(2005) ,Ahmed 等(2018) ,Abdallsamed 等(2018); 基性岩数据来自: 张欣(2010) ,陈虹等(2014)
IAB—岛弧玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

图 10 南秦岭黄羊山岩体、成矿岩体和部分基性岩的 Y/Nb-Yb/Ta 二元判别图解

Fig. 10 Binary discrimination diagrams of Y/Nb vs. Yb/Ta for samples of the Huangyangshan pluton, mineralized plutons, and mafic rocks in the South Qinling orogenic belt

显然,这些地球化学特征的差别无法仅仅依靠“两者来自同一源区、仅在岩浆分异程度上的差别”进行解释。例如,稀土总量和 $(La/Yb)_N$ 与Eu异常程度之间均缺乏明显的、与斜长石结晶分异有关的负相关关系(图11)。因此,更为可能的是,这些贫矿

与成矿岩体之间在地球化学特征上的差异主要受控于源区性质。在 Nb-Th 和 Zr-Nb 图解中,两者与同期幔源基性岩在元素含量变化趋势上的明显不同(图12),进一步揭示了两者岩浆源区的显著差异。例如,黄羊山岩体与同期基性岩在图解中均呈连续的正相关关系且具较为稳定的 Th/Nb 和 Nb/Zr 比值(图12),与其来源于新生基性下地壳源区相符,而成矿岩体则明显不同。正如前人研究所示,成矿岩体(如庙垭和杀熊洞)的岩浆源区可能为富CO₂流体交代后的岩石圈地幔(Xu et al., 2008; Zhu et al., 2017; 应元灿, 2018; Su et al., 2019)。

总之,通过对比研究,确定成矿与贫矿岩体在地球化学特征存在明显差异,而该差异主要受控于岩浆源区的不同(即源区稀土的“肥沃程度”不同),最终导致南秦岭碱性岩体在稀土矿化程度上存在显著差异。的确,近些年研究显示深海富稀土沉积物及其脱出富CO₂流体交代的岩石圈地幔,是成矿碳酸岩-碱性岩的重要源区(Hou et al., 2015)。

5 结论

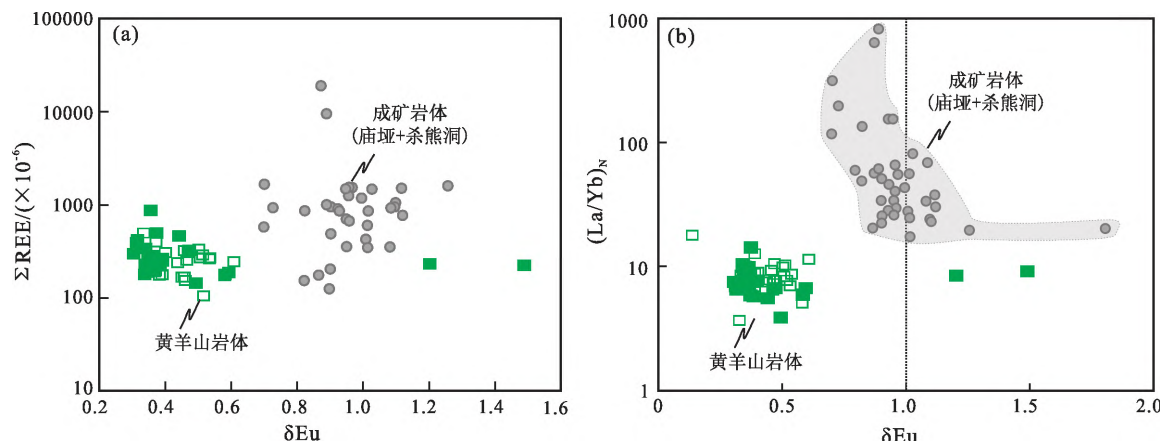
(1) 利用 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素定年,确定了黄羊山贫矿岩体形成于~440 Ma,与南秦岭南缘广泛分布的稀土矿化碱性岩体或火山岩同期,属于同一期碱性岩浆活动的产物。地球化学与同位素结果显示,黄羊山岩体具 A 型花岗岩类的特征,由新生基性地壳部分熔融形成,晚期可能经历了一定程度的分离结晶过程。

(2) 与南秦岭成矿岩体的详细对比显示,贫矿与成矿岩体在地球化学特征上和含矿性存在较为显著的差别。并进一步证实该差别主要受控于两

表 5 南秦岭南缘早古生代碱性岩浆岩年龄

Table 5 Summary of ages of the Paleozoic alkaline magmatic rocks in the southern margin of the South Qinling orogenic belt

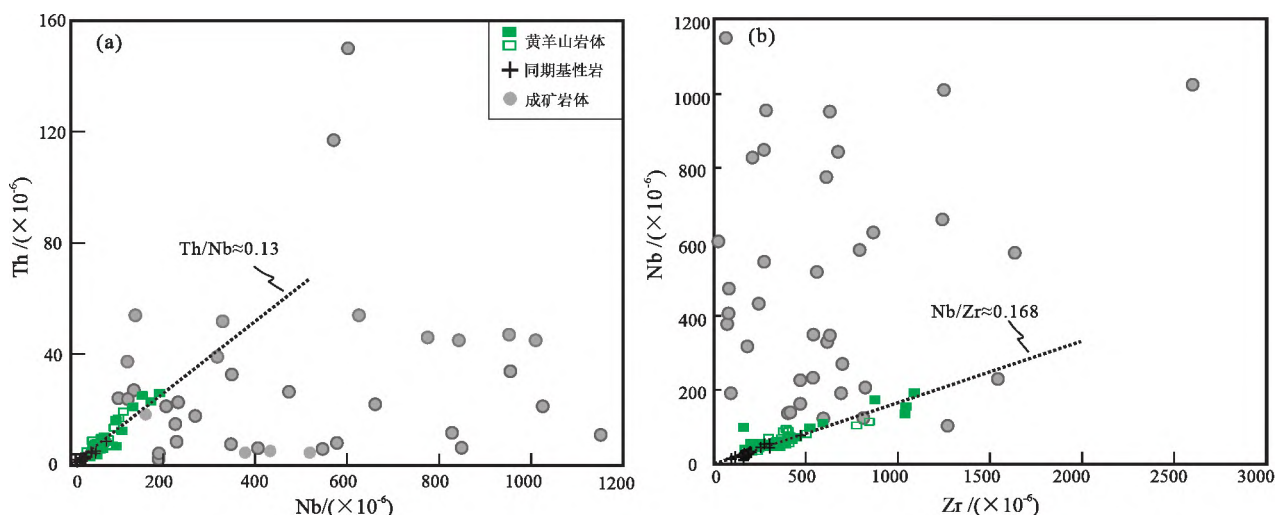
大地位置	岩体名称	测年方法	年龄/Ma	岩石类型	参考文献
平利-紫阳地区	紫阳岩床群	锆石 SHRIMP U-Pb	432±5.8	正长斑岩	龙井山(2016)
		金云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(共生的火山碎屑岩)	446±3	碱性玄武岩	向忠金等(2016)
	岚皋岩墙群	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	432.5±2.5	粗面岩	王刚(2014)
竹山-竹溪地区	庙垭杂岩体	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	445.2±2.6, 442.6±4.0, 443±4	正长岩	Zhu 等(2017); Ying 等(2017); Su 等(2019)
		锆石 LA-ICP-MS U-Pb	434.3±3.2, 426.5±8.0, 428.4±3.1	碳酸岩	Zhu 等(2017); Ying 等(2017); Su 等(2019)
	杀熊洞杂岩体	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	441.8±2.2	正长岩	Xu 等(2008)
	杀熊洞杂岩体	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	427.8±8.6, 436.9±8.9	碳酸岩	Chen 等(2018)
随枣-桐柏地区	黄羊山岩体	锆石 SHRIMP U-Pb、锆石 LA-ICP-MS U-Pb	439±6, 445±6, 450±3	石英正长岩	Ma 等(2005); Abdallsamed 等(2018); Ahmed 等(2018)
	观子山岩体	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	450±11	霞石正长岩	Ahmed 等(2018)



成矿岩体数据来自 Xu 等(2008) Zhu 等(2017) Zhang 等(2019a) Su 等(2019, 2022); 黄羊山岩体数据绿色实心为本文数据, 绿色空心数据来自于 Ma 等(2005) ,Ahmed 等(2018) ,Abdallsamed 等(2018)

图 11 南秦岭成矿岩体和黄羊山岩体的 $\delta\text{Eu}-\Sigma\text{REE}$ 与 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_n$ 图解

Fig. 11 Diagrams of δEu vs. ΣREE (a) and δEu vs. $(\text{La}/\text{Yb})_n$ (b) for samples of the Huangyangshan pluton and mineralized plutons in the South Qinling orogenic belt



成矿岩体数据来自: Xu 等(2008) Zhu 等(2017) Zhang 等(2019a) Su 等(2019, 2022); 黄羊山岩体数据绿色实心为本文数据, 绿色空心数据来自: Ma 等(2005) ,Ahmed 等(2018) ,Abdallsamed 等(2018); 基性岩数据来自: 张欣(2010) 陈虹等(2014)

图 12 南秦岭黄羊山岩体、成矿岩体和同期基性岩 Nb-Th 和 Zr-Nb 图解

Fig. 12 Diagrams of Nb vs. Th and Zr vs. Nb for samples of the Huangyangshan pluton, mineralized plutons, and mafic rocks in the South Qinling orogenic belt

者岩浆源区的不同,从而导致南秦岭碱性岩体在稀土矿化程度上存在显著差异。

致谢: 中国科学院地球化学研究所张兴春研究员和沈能平副研究员在野外工作和实验分析中提供了帮助,数据处理得到胡儒权和李晓栋的协助,在此一并致以衷心感谢。

参考文献 (References):

Abdallsamed M I M, Wu Y B, Zhang W X, Zhou G Y. 2018. Paleozoic peralkaline A-type magmatism of the Tongbai Orogen, Central China: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 322:

268-280

Ahmed H A, Ma C Q, Wang L X, Palinkaš L A, Girei M B, Zhu Y X, Habib M. 2018. Petrogenesis and tectonic implications of Peralkaline A-type granites and syenites from the Suizhou-Zaoyang region, central China. *Journal of Earth Science*, 29(5): 1181-1202

Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622

Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1-2): 1-29

Chen W, Lu J, Jiang S Y, Ying Y C, Liu Y S. 2018. Radiogenic Pb reservoir contributes to the rare earth element (REE) enrichment in South Qinling carbonatites. *Chemical Geology*, 494: 80-95

Çimen O, Kuebler C, Monaco B, Simonetti S S, Corcoran L, Chen W,

- Simonetti A. 2018. Boron, carbon, oxygen and radiogenic isotope investigation of carbonatite from the Miaoya complex, Central China: Evidences for late-stage REE hydrothermal event and mantle source heterogeneity. *Lithos*, 322: 225–237
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200
- Cui H, Zhong R C, Xie Y L, Yuan X Y, Liu W H, Brugger J, Yu C. 2020. Forming sulfate- and REE-rich fluids in the presence of quartz. *Geology*, 48(2): 145–148
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641–644
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269
- Hoskin P W O. 2000. Patterns of chaos: Fractal statistics and the oscillatory chemistry of zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(11): 1905–1923
- Hou Z Q, Liu Y, Tian S H, Yang Z M, Xie Y L. 2015. Formation of carbonatite-related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments. *Scientific Reports*, 5(1): 10231
- Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, Gao S, Li M, Zong K Q, Chen H H, Hu S H. 2015. “Wave” signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: Application to lead isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152–1157
- Karsli O, Ketenci M, Uysal I, Dokuz A, Aydin F, Chen B, Kandemir R, Wijbrans J. 2011. Adakite-like granitoid porphyries in the Eastern Pontides, NE Turkey: Potential parental melts and geodynamic implications. *Lithos*, 127(1–2): 354–372
- Kemp A I S, Wormald R J, Whitehouse M J, Price R C. 2005. Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia. *Geology*, 33(10): 797–800
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 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
- Lu J, Chen W, Ying Y C, Jiang S Y, Zhao K D. 2021. Apatite texture and trace element chemistry of carbonatite-related REE deposits in China: Implications for petrogenesis. *Lithos*, 398–399: 106276
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 70
- Ma C Q, She Z B, Xu P, Wang L Y. 2005. Silurian A-type granitoids in the southern margin of the Tongbai-Dabieshan: Evidence from SHRIMP zircon geochronology and geochemistry. *Science in China: Earth Sciences*, 48(8): 1134–1145
- Ma R L, Chen W T, Zhang W, Chen Y W. 2021. Hydrothermal upgrading as an important tool for the REE mineralization in the Miaoya carbonatite-syenite complex, Central China. *American Mineralogist*, 106(10): 1690–1703
- Meng Q R, Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 323(3–4): 183–196
- Middlemost E A K. 1985. *Magma and magmatic rocks*. London: Longman, 1–266
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529–532
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247–263
- Su J H, Zhao X F, Li X C, Hu W, Chen M, Xiong Y L. 2019. Geological and geochemical characteristics of the Miaoya syenite-carbonatite complex, Central China: Implications for the origin of REE-Nb-enriched carbonatite. *Ore Geology Reviews*, 113: 103101
- Su J H, Zhao X F, Li X C, Hu W, Chen W, Slezak P. 2022. Unmixing of REE-Nb enriched carbonatites after incremental fractionation of alkaline magmas in the Shaxiongdong complex, Central China. *Lithos*, 416–417: 106651
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345
- Tanaka T, Togashi S, Kamioka H, Amakawa H, Kagami H, Hamamoto T, Yuhara M, Orihashi Y, Yoneda S, Shimizu H, Kunimaru T, Takahashi K, Yanagi T, Nakano T, Fujimaki H, Shinjo R, Asahara Y, Tanimizu M, Dragusanu C. 2000. JNdi-1: A neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chemical Geology*, 168(3–4): 279–281
- Wan Y, Wang X L, Chou I M, Li X C. 2021. Role of sulfate in the transport and enrichment of REE in hydrothermal systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 569: 117068
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Woolley A R, Kjarsgaard B A. 2008. Carbonatite occurrences of the world: Map and database. *Geological Survey of Canada*, 1–22

- Wu B, Hu Y Q, Bonnetti C, Xu C, Wang R C, Zhang Z S, Li Z Y, Yin R. 2021. Hydrothermal alteration of pyrochlore group minerals from the Miaoya carbonatite complex, central China and its implications for Nb mineralization. *Ore Geology Reviews*, 132: 104059
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1-2): 143-173
- Wu Y B, Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China. *Gondwana Research*, 23(4): 1402-1428
- Xie Y L, Hou Z Q, Yin S P, Dominy S C, Xu J H, Tian S H, Xu W Y. 2009. Continuous carbonatitic melt-fluid evolution of a REE mineralization system: Evidence from inclusions in the Maoniuping REE Deposit, Western Sichuan, China. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 90-105
- Xu C, Campbell I H, Allen C M, Chen Y J, Huang Z L, Qi L, Zhang G S, Yan Z F. 2008. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of carbonatite and syenite complexes from the Shaxiong-dong, China. *Lithos*, 105(1-2): 118-128
- Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A R, Campbell I H, Allen C M. 2010. Trace-element modeling of the magmatic evolution of rare-earth-rich carbonatite from the Miaoya deposit, central China. *Lithos*, 118(1-2): 145-155
- Xu C, Chakhmouradian A R, Taylor R N, Kynicky J, Li W B, Song W L, Fletcher I R. 2014. Origin of carbonatites in the south Qinling orogen: Implications for crustal recycling and timing of collision between the south and North China blocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 189-206
- Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A R, Li X H, Song W L. 2015. A case example of the importance of multi-analytical approach in deciphering carbonatite petrogenesis in South Qinling orogen: Miaoya rare-metal deposit, central China. *Lithos*, 227: 107-121
- Yang Y N, Wang X C, Li Q L, Li X H. 2016. Integrated in situ U-Pb age and Hf-O analyses of zircon from Suixian Group in northern Yangtze: New insights into the Neoproterozoic low- $\delta^{18}\text{O}$ magmas in the South China Block. *Precambrian Research*, 273: 151-164
- Ying Y C, Chen W, Lu J, Jiang S Y, Yang Y H. 2017. In situ U-Th-Pb ages of the Miaoya carbonatite complex in the South Qinling orogenic belt, central China. *Lithos*, 290-291: 159-171
- Ying Y C, Chen W, Simonetti A, Jiang S Y, Zhao K D. 2020. Significance of hydrothermal reworking for REE mineralization associated with carbonatite: Constraints from in situ trace element and C-Sr isotope study of calcite and apatite from the Miaoya carbonatite complex (China). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 280: 340-359
- Zhang D X, Liu Y, Pan J Q, Dai T G, Bayless R C. 2019a. Mineralogical and geochemical characteristics of the Miaoya REE Prospect, Qinling Orogenic Belt, China: Insights from Sr-Nd-C-O isotopes and LA-ICP-MS mineral chemistry. *Ore Geology Reviews*, 110: 102932
- Zhang W, Chen W T, Gao J F, Chen H K, Li J H. 2019b. Two episodes of REE mineralization in the Qinling Orogenic Belt, Central China: In-situ U-Th-Pb dating of bastnäsite and monazite. *Mineralium Deposita*, 54(8): 1265-1280
- Zhu J, Wang L X, Peng S G, Peng L H, Wu C X, Qiu X F. 2017. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of the Miaoya syenite and carbonatite complex, Central China. *Geological Journal*, 52(6): 938-954
- Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, He Z Y, Guo J L, Shi X L, Liu Y S, Hu Z C, Zhang Z M. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of Early Neoproterozoic (Ca. 900Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32-48
- 陈虹, 田蜜, 武国利, 胡健民. 2014. 南秦岭构造带内早古生代碱性岩岩浆活动: 古特提斯洋裂解的证据. *地质论评*, 60(6): 1437-1452
- 李石. 1988. 花山寨英碱正长岩地球化学特征及岩石成因探讨. *湖北地质*, (2): 23-28
- 李石. 1990. 湖北观子山硬玉钙霞正长岩初步研究. *岩石矿物学杂志*, 9(1): 22-30
- 李石. 1991a. 南秦岭武当-桐柏地区碱性岩研究. *中国区域地质*, (1): 40-53
- 李石. 1991b. 鄂北地区碱性岩的时代及成因. *岩石学报*, (3): 27-36
- 龙井山. 2016. 陕南紫阳基性岩墙和正长斑岩脉的地球化学特征及地质意义. 硕士学位论文. 西安: 长安大学
- 王刚. 2014. 北大巴山紫阳-岚皋地区古生代火山岩浆事件与中生代成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 向忠金, 闫全人, 宋博, 王宗起. 2016. 北大巴山超基性、基性岩墙和碱质火山杂岩形成时代的新证据及其地质意义. *地质学报*, 90(5): 896-916
- 杨斌虎, 张成立, 李雷. 2011. 东秦岭陡岭杂岩花岗岩的 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义. *地质通报*, 30(Z1): 439-447
- 杨小鹏, 王长兵, 李文庆. 2019. 大兴安岭北段索图罕地区碱长花岗岩成因及形成构造背景. *吉林大学学报(地球科学版)*, 49(5): 1338-1349
- 应元灿. 2018. 湖北庙垭碳酸岩杂岩体年代学和地球化学特征及成岩成矿过程. 硕士学位论文. 武汉: 中国地质大学
- 张成立, 高山, 张国伟, 柳小明, 于在平. 2002. 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义. *中国科学: 地球科学*, 32(10): 819-829
- 张成立, 高山, 袁洪林, 张国伟, 晏云翔, 罗静兰, 罗金海. 2007. 南秦岭早古生代地幔性质: 来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素证据. *中国科学: 地球科学*, 37(7): 857-865
- 张欣. 2010. 南秦岭紫阳-镇巴地区基性侵入体动力学机制及地质意义讨论. 硕士学位论文. 西安: 长安大学
- 朱煜翔. 2019. 东秦岭新元古代方城碱性杂岩体的成因及 Nb-Ta 富集机制. 硕士学位论文. 武汉: 中国地质大学

(本文责任编辑: 付绍洪; 英文审校: 张兴春)

专 栏 作 者 简 介



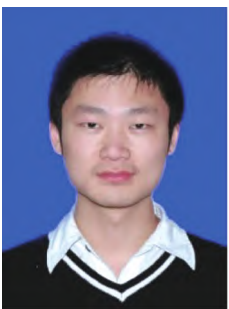
许德如,1966年生,东华理工大学地球科学学院院长,教授、博士生导师,江西省“双千计划”获得者。主要研究方向为大陆边缘构造与成矿学。兼任国际矿床成因协会矿床大地构造委员会主席(IA-GOD)、中国地质学会核资源与环境专业委员会主任委员、中国地球物理学会构造物理化学专业委员会副主任委员、中国地质学会矿床专业委员会委员, *Ore Geology Reviews* 副主编。



牛贺才,1963年生,中国科学院广州地球化学研究所研究员,博士生导师。主要从事岩浆活动与金属成矿作用研究,以第一作者和通讯作者在国内发表学术论文50余篇,出版学术专著1部。



陈伟,1984年生,中国科学院地球化学研究所研究员,海外高层次人才计划获得者。长期从事关键矿产成矿机理和找矿预测研究,在热液 Fe-Cu-REE-Co 矿床和碳酸岩型 REE-Nb 矿床的形成机制与示矿指标等方面取得不少成果。在 *EG*、*MD*、*AM*、*CMP*、*CG*、*AJS* 等国内外主流刊物上发表第一/通讯作者学术论文近30篇;主持承担或参与国家重点研发计划课题、中科院前沿重点项目、基金委面上、重点、创新群体和优秀青年项目等近10项。



焦骞骞,1986年生,博士,昆明理工大学国土资源工程学院讲师,硕士生导师,主要从事地质构造与成矿作用的研究和教学工作。以第一或通讯作者在 *Ore Geology Reviews*、*岩石学报* 等期刊发表SCI论文5篇。



翁强,1994年生,2017年9月起在中国科学院广州地球化学研究所攻读博士学位,主要从事矿床学研究,围绕碱性岩浆活动与稀土成矿作用主题已在 *American Mineralogist* 和 *Ore Geology Reviews* 上发表第一作者文章4篇。



查志辉,1996年生,中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室硕士研究生,主要从事岩石学、矿物学及矿床学研究工作,重点为碳酸岩型稀土矿床的形成机制,现工作重点主要聚焦于南秦岭早古生代碱性岩稀土成矿差异性研究。



邢介奇,1995年生,中国科学院广州地球化学研究所矿物学、岩石学、矿床学专业博士生,研究方向为纳米矿物学和成因矿物学。主要利用透射电镜和激光-ICPMS等微区分析手段研究关键金属赋存状态。目前主要从事海相富稀土磷矿和深海沉积物的关键金属赋存状态研究。以第一作者身份发表SCI论文1篇。



刘恩豪,1998年生,中国科学院广州地球化学研究所读硕士研究生。目前主要从事地下水与离子吸附型稀土矿成矿过程方面研究。