

# 陕西黄龙铺地区碱性花岗斑岩及辉绿岩的年代学与地球化学:岩石成因及其构造环境示踪

赵海杰<sup>1</sup> 毛景文<sup>1</sup> 叶会寿<sup>1</sup> 谢桂青<sup>1</sup> 杨宗喜<sup>2</sup>

(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. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

**摘要:** 陕西黄龙铺地区多处出露有花岗斑岩体和辉绿岩。花岗斑岩斑晶主要为石英和钾长石, 基质为钾长石、石英、斜长石、黑云母等。岩石具高硅、富碱、过铝质特征, 属碱性花岗斑岩。岩石具中等 Eu 亏损 ( $\delta \text{Eu}=0.36\sim 0.68$ ); 大离子亲石元素 Ba、K、Sr 及高场强元素 Ta 亏损, Th、U、Zr、Hf 等富集的特征。碱性花岗斑岩的岩石地球化学及铅同位素组成特征与区内含钼花岗斑岩相似, 暗示它们可能源于下地壳部分熔融。辉绿岩主要由普通辉石、斜长石、角闪石组成; 岩石的  $\text{SiO}_2$  含量变化于 48.78%~48.92%; 稀土元素配分曲线呈较一致的平滑右倾模式, 无明显 Eu 异常; 微量元素亏损高场强元素 Zr、Hf、Ta、Nb、Ti, 及大离子亲石元素 K、Rb、Sr, 此外, Ba 表现明显的富集特征。辉绿岩的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> 值介于 0.718~0.762,  $\epsilon \text{Nd}(t)$  值的范围为 -19.53~-19.69, 其高初始 Sr、低  $\epsilon \text{Nd}$  值的同位素特征揭示其可能来源于富集地幔。碱性花岗斑岩和辉绿岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为  $(131\pm 1)\text{Ma}$  和  $(129\pm 2)\text{Ma}$ , 形成于早白垩世, 构造环境判别分析表明, 两类岩体均形成于大陆板块内部伸展环境, 与此时东秦岭岩石圈发生大规模减薄作用相耦合。

**关键词:** 碱性花岗斑岩; 辉绿岩; SHRIMP U-Pb 年龄; 地球化学; 黄龙铺

**中图分类号:** P581; P597+.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3657(2010)01-0012-16

东秦岭钼成矿带是中国重要的大型钼成矿带, 地质研究程度相对较高, 特别是关于该带内钼矿床及相关岩体的成矿成岩动力学背景、年代学和成矿成岩机制备受地质学家的重视<sup>[1-5]</sup>。研究表明, 东秦岭中生代存在 3 个峰期钼成矿事件<sup>[6]</sup>, 其中两期均与花岗斑岩体有关。晚侏罗世—早白垩世(148~138 Ma)与钼(钨)铅锌成矿作用密切相关的花岗斑岩多为 I 型, 属壳幔同熔的产物<sup>[7-8]</sup>; 早白垩世(131~112 Ma)钼矿床则产于不同类型的花岗岩中, 包括 I 型、S 型及 A 型<sup>[9]</sup>, 如汝阳付店矿集区钼铅锌矿化密切相关的太山庙花岗岩基为铝质 A 型花岗岩<sup>[10]</sup>。

黄龙铺地区位于东秦岭钼成矿带的西段, 距金堆城超大型斑岩型钼矿床仅 12 km。区内出露的岩体包括壳幔同熔型的老牛山黑云母二长花岗岩基和

石家湾二长花岗斑岩, 后者构成石家湾中型斑岩钼矿的成矿母岩, 有研究认为石家湾二长花岗斑岩与金堆城花岗斑岩都是老牛山二长花岗岩派生出来的岩枝<sup>[11-12]</sup>。此外, 还出露代表幔源岩石的碳酸岩岩墙<sup>[12-14]</sup>, 并形成与之密切相关的黄龙铺脉状碳酸岩钼(铅)矿床, 该类钼矿床在东秦岭钼矿带比较特殊, 其成矿物质来源, 时代及类型与其他矿床不同, 为三叠纪晚期的产物<sup>[15-17]</sup>。迄今为止, 对于区内广泛出露的北西走向深断裂内多出露花岗斑岩体和辉绿岩脉尚未见研究报告, 因基性岩脉常被作为大陆伸展构造的标志<sup>[18]</sup>, 同时本区具有多种岩浆岩类型及复杂的源区特征(幔源及壳幔混源), 故本文拟开展对花岗斑岩和辉绿岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学特征研究, 并探讨这些岩石形成的构造环境。

收稿日期: 2009-09-10; 改回日期: 2009-12-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(k0816)、全国危机矿山接替资源找矿项目(20089949、200841019)共同资助。

作者简介: 赵海杰, 女, 1982 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: zhaohaijie\_610@163.com。

# 1 岩体地质及岩石学特征

花岗斑岩体位于陕西省黄龙铺老家沟地区 (图 1 左), 沿北西走向深断裂呈岩枝状出露。岩体侵入于中元古界高山河组石英砂岩和板岩中。岩石呈灰白色, 块状构造, 细粒斑状结构, 斑晶主要为肉红色钾长石和石英, 钾长石呈长柱状, 发育卡斯巴双晶, 粒径为 3~10 mm, 约占斑晶总数的 60%, 表面泥化呈尘土状, 部分已蚀变为高岭土、绢云母。石英斑晶呈自形-他形, 粒径 5~8 mm, 约占斑晶总数的 40%。基质由钾长石 (35%)、石英 (20%)、斜长石 (15%) 以及黑云母 (10%) 等组成, 副矿物组合为磷灰石、榧石、磁铁矿, 并含少量锆石。

辉绿岩沿北西方向侵位于高山河组石英砂岩中, 总体走向 290°~310°, 断续延伸 3800 m, 宽 40~250 m, 受压扭性断裂控制, 由一系列近平行的岩脉组成, 形态较规则, 呈脉状和透镜状 (图 1), 单个波状延伸 10 m 至千余米, 一般宽 10~30 m, 北东倾向为主, 倾角 30°~65°<sup>①</sup>。岩石呈深绿色, 块状构造, 辉绿结构, 主要矿物为斜长石 (~45%), 辉石 (~20%), 可见少量角闪石颗粒 (6~7%) 和石英 (~5%) 颗粒集合体, 副矿物主要为磁铁矿和钛铁矿。斜长石呈长柱状, 自形-半自型, 聚片双晶明显, 部分已绢云母化, 辉石晶体较破碎, 多色性明显。岩石交代蚀变现象明显, 可见绿泥石化和碳酸盐化。

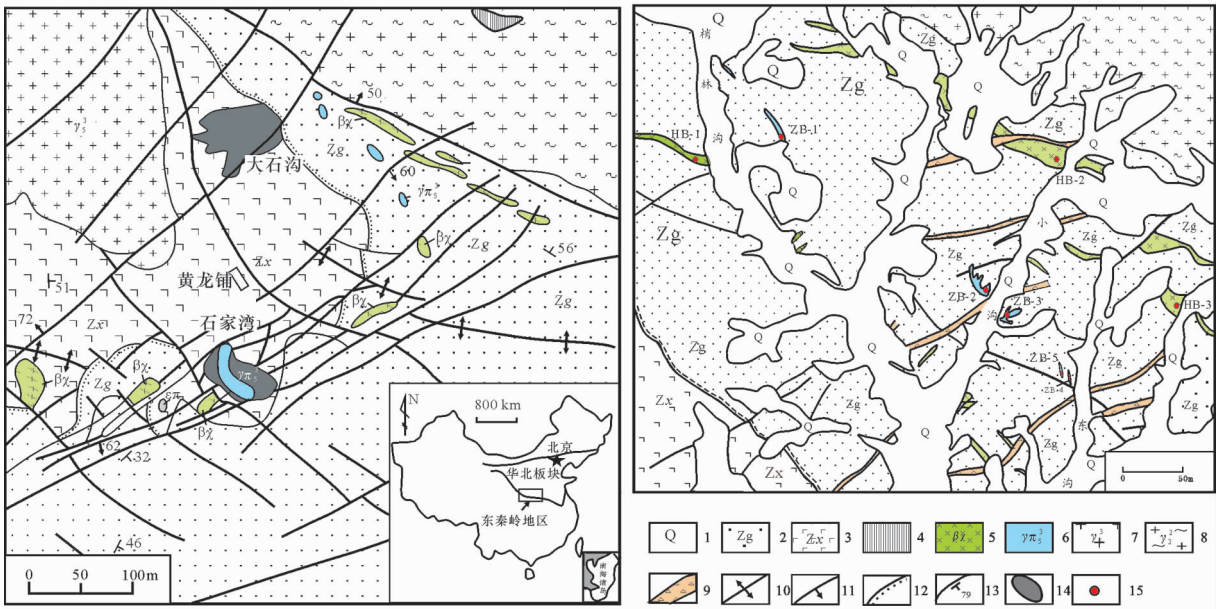


图 1 黄龙铺地区地质 (左底图据黄典豪等<sup>[16]</sup>修改) 及采样位置图 (右侧)

1—第四系; 2—中元古界高山河组泥砂质板岩、变石英砂岩、石英岩; 3—中元古界熊耳山群火山岩; 4—新太古界太华群角闪斜长片麻岩; 5—辉绿岩; 6—花岗斑岩; 7—老牛山花岗岩; 8—片麻状花岗岩; 9—断层角砾; 10—背斜; 11—断层; 12—不整合界线; 13—地质界线及产状; 14—黄龙铺矿体范围; 15—采样点

Fig.1 Geological sketch map of Huanglongpu area (base map on the left modified from Huang Dianhao<sup>[16]</sup>) and map of sampling locations (right)

1—Quaternary sediments; 2—Argillo-arenaceous slate and quartzite; 2. Metaquartzose sandstone of Mesoproterozoic Gaoshanhe Formation; 3—Volcanic rocks of Mesoproterozoic Xiong'er Group; 4—Amphibolite genesis of Archean Taihua Group; 5—Diabase; 6—Granitic porphyry; 7—Laoniushan granite; 8—Gneissic granite; 10—Anticline; 11—Fault; 12—Unconformity; 13— Geological boundary and attitude; 14—Limits of Huanglongpu ore body; 15—Sampling location

① 祝启明, 李六权. 陕西省洛南县黄龙铺钨矿区详细普查地质报告. 陕西省地质矿产局第十三地质队, 1989.

② 据陕西省核工业地质局 224 大队. 陕西省洛南县黄龙铺地区 1:10000 地质图, 2007.

## 2 采样位置、分析方法及精度

### 2.1 样品采集

样品采自黄龙铺寺耳金矿区,采样位置见图 1 右。在岩体出露的不同地点共采集 5 件花岗斑岩,3 件辉绿岩样品。

样品 ZB1 采自梢林沟花岗斑岩体,岩体呈北西向岩枝,样品灰绿色,斑状结构,斑晶主要为钾长石(60%)和石英(40%),钾长石斑晶粒径 2~6mm,大者可达 3 mm × 6mm,石英斑晶粒径为 1~4 mm,基质主要为钾长石、石英、斜长石、黑云母。ZB2 和 ZB3 样品采自小沟路左右两侧山上的岩体,其中 ZB2 的地理坐标为 34°21'17.7"N, 110°01'58"E,呈暗灰色,与 ZB1 样品相比,长石斑晶明显增大,但含量减少,基质为隐晶质结构,用于锆石定年研究。ZB3 样品为灰白色,斑晶含量少,主要为钾长石,肉眼未见石英斑晶,基质为斜长石及暗色矿物(黑云母含量增多)。ZB4 和 ZB5 采自东沟,前者呈淡红色,钾长石斑晶(35%)粒径 3~6 mm,石英(25%)颗粒大小均匀,约 2 mm,斜长石(40%)斑晶粒径为 3~5 mm。基质为隐晶质。后者斑晶含量少,为钾长石(40%)和斜长石(60%)。

辉绿岩样品 HB1 采自梢林沟西侧山上,植被覆盖严重,露头少,岩石呈绿色;HB2 采自小沟古采坑洞南侧,样品为墨绿色,地理坐标为 34°22'11.5"N, 110°02'24.3"E,用于锆石定年研究;HB3 样品采自东沟,与 HB1 颜色相近。

### 2.2 测试方法及精度

#### 2.2.1 岩石化学分析

岩石的主量元素测试工作在国家地质实验测试中心完成,除 FeO、LOI 采用标准湿化学分析方法外,其他元素分析采用 XRF 方法完成,精度优于 2%~5%。稀土和微量元素采用 ICP-MS 方法分析,相对标准偏差小于 5%。岩石地球化学数据处理采用 Geokit 软件<sup>[19]</sup>完成。样品的 Sr、Nd、Pb 同位素在核工业北京地质研究所分析,采用 ISOPROBE-T 热电离质谱仪,<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr、<sup>143</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 比值通过 ICP-MS 方法测得 Rb、Sr、Sm、Nd 含量计算得到,其详细分析流程和精度见 Qiao<sup>[20]</sup>。

#### 2.2.2 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

锆石颗粒采用常规方法从样品中分选出来,在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的颗粒。按照宋

彪等<sup>[21]</sup>描述的方法,将挑选好的锆石与标准锆石(M257,TEM)一起粘于环氧树脂靶上,凝固后磨至近一半并抛光,使锆石颗粒的内部暴露,用于锆石形态、阴极发光图像研究和年龄测定。单矿物锆石制靶,透、反射电子图像(BSE)和锆石阴极发光照相(CL)在北京离子探针中心进行。SHRIMP U-Th-Pb 同位素分析在北京离子探针中心的网络虚拟实验室进行,即通过 SHRIMP 远程控制系统(SHRIMP Remote Operation System, SROS)经网络远程操控澳大利亚 Curtin 理工大学(Curtin University of Technology)的 SHRIMP II 进行样品分析。标准锆石 TEM 与待测锆石的 U 含量用标准锆石 M257 标定,而待测锆石的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 同位素比值用 TEM 标定。标样锆石 M257 的相关信息见 Lutz Nasdala et al<sup>[22]</sup>。测定时优先选择生长环带明显的锆石,尽量避开其中的裂纹和包裹体。测试数据采用 SQUID 及 ISOPLOT 程序<sup>[23]</sup>进行处理,数据表(表 1 和表 2)年龄误差为 1σ 绝对误差,文中所使用的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄加权平均值具 95%置信度误差。

## 3 测试结果

### 3.1 锆石 SHRIMP U-Pb 年代学

#### 3.1.1 花岗斑岩

花岗斑岩 ZB2 样品中锆石颗粒在可见光下多为无色或浅色,少数略带淡黄色半透明。锆石颗粒较大,一般 150~250 μm,长宽比主要为 2:1~3:1。锆石呈不规则短柱状或长柱状,晶棱晶面清晰,具有清晰的振荡型岩浆生长环带,部分由于 U 含量较高产生放射性损伤,裂纹较多。阴极发光图像上可见锆石的砂钟结构(图 2 点 21.1),并含有少量继承性锆石(图 2 点 1.1 和 17.1),锆石中可见明显的核-幔-边构造(点 3.1),反映锆石经历了多期生长的信息。核部 CL 图像较亮,U 含量低,幔部则有明显的振荡环带,分带不明显,可能是 U 含量差异产生黑亮交替的环带,最外围为一圈很暗的增生边,在测试过程中发现,具有核-幔-边构造的锆石核部年龄较幔部老 10 Ma 左右,边部由于 U 含量较高无法测试。

从表 1 和图 2 中可以看出,花岗斑岩 19 个测点结果显示,锆石的 U、Th 含量变化较大,其中 U 含量介于(71~2850)×10<sup>-6</sup>,Th 含量范围为(40~1889)×10<sup>-6</sup>,Th/U 值除点 12.1 为 0.08,其余为 0.33~1.11,结合锆石的晶形及发育清晰的环带结构,表明锆石

表 1 黄龙铺碱性花岗斑岩(ZB2)锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircons from alkaline granite-porphyry (ZB2) in Huanglongpu area

Spot	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> %	U/10 <sup>-6</sup>	Th/10 <sup>-6</sup>	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb*/10 <sup>-6</sup>	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb*	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb age/Ma	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U age/Ma
ZB2-1.1	--	171	176	1.06	10.1	0.0598 (4.8)	0.569 (5.2)	0.0689(1.9)	598(104)	429.8(7.8)
ZB2-2.1	0.13	1206	503	0.43	22.3	0.04814(1.7)	0.1429(2.4)	0.02154(1.7)	106(40)	137.4(2.3)
ZB2-3.1	--	960	1140	1.23	17.3	0.04886(1.5)	0.1417(2.3)	0.02103(1.8)	141(36)	134.2(2.3)
ZB2-4.1	0.57	191	95	0.52	3.39	0.0455 (4.0)	0.1293(4.5)	0.02059(1.9)	-27(98)	131.4(2.5)
ZB2-5.1	0.09	876	289	0.34	15.2	0.04873(1.7)	0.1353(2.4)	0.02013(1.7)	135(40)	128.5(2.2)
ZB2-6.1	0.10	2368	805	0.35	46.5	0.04862(1.0)	0.1531(2.0)	0.02283(1.7)	130(24)	145.5(2.4)
ZB2-7.1	0.58	318	245	0.80	6.49	0.0460 (4.9)	0.1501(5.2)	0.02366(1.9)	-1(118)	150.7(2.8)
ZB2-9.1	--	182	162	0.92	3.11	0.0528 (4.7)	0.1456(5.1)	0.01999(2.0)	322(147)	127.6(2.5)
ZB2-10.1	--	208	224	1.11	3.68	0.0539(6.4)	0.154 (6.7)	0.02069(2.0)	368(103)	132.0(2.7)
ZB2-11.1	0.35	312	142	0.47	5.57	0.0449 (6.3)	0.1280(6.6)	0.02068(1.9)	-63(154)	132.0(2.4)
ZB2-12.1	0.08	841	68	0.08	16.3	0.0504 (2.6)	0.1564(3.2)	0.02251(1.7)	213(61)	143.5(2.5)
ZB2-12.2	0.02	2850	1889	0.68	55.4	0.04800(0.97)	0.1497(2.0)	0.02262(1.7)	99(23)	144.2(2.4)
ZB2-13.1	2.18	2052	1216	0.61	38.5	0.0456 (6.4)	0.1342(6.6)	0.02134(1.7)	-24(154)	136.1(2.3)
ZB2-15.1	--	71	42	0.60	1.22	0.068 (15)	0.193 (16)	0.02044(3.3)	882(316)	130.4(4.3)
ZB2-16.1	--	744	717	1.00	12.7	0.0523 (3.0)	0.1441(3.5)	0.01997(1.7)	300(39)	127.5(2.2)
ZB2-17.1	0.01	170	95	0.58	40.7	0.09705(0.74)	3.733(1.9)	0.2790 (1.8)	1568(14)	1,586(2.5)
ZB2-18.1	--	77	78	1.05	1.33	0.0541 (5.2)	0.1495(5.7)	0.02004(2.4)	376(116)	127.9(3.0)
ZB2-19.1	0.31	1076	853	0.82	19.0	0.0468 (2.5)	0.1324(3.0)	0.02052(1.7)	40(60)	130.9(2.2)
ZB2-20.1	0.16	894	819	0.95	16.2	0.0481 (2.3)	0.1395(2.9)	0.02105(1.7)	103(54)	134.3(2.3)
ZB2-21.1	0.34	1061	1625	1.58	18.3	0.0497 (2.6)	0.1374(3.2)	0.02004(1.7)	183(62)	127.9(2.2)

为岩浆成因<sup>[24]</sup>。花岗斑岩的锆石 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄变化范围较大,但主要集在 130 Ma 左右,参与计算的 13 个测点在 U-Pb 年龄谐和图上集中成群分布 (图 4),<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄 (131±1)Ma (MSDW=1.5),该年龄可代表岩体的侵位年龄。锆石中也记录了古老的年龄信息:点 1.1 位于锆石的核部 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 429.8 Ma,点 17.1 的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄为 1568 Ma,这两颗锆石 CL 图像不同于其他锆石,可能为捕获围岩的锆石。

### 3.1.2 辉绿岩

辉绿岩 HB3 样品中锆石颗粒较小,且多不完整,大者可达 50 μm×50 μm,小的为 20 μm×20 μm,CL 图像中(图 3)锆石的晶形、环带及内部结构等明显不同于花岗斑岩。辉绿岩中的锆石颗粒多为不规则一半自形短柱状,环带不明显,无核-幔-边结构。

辉绿岩样品 HB3 中的 16 颗锆石 17 个测点结果(表 2)显示,锆石的 U、Th 含量分别介于(208~626)×10<sup>-6</sup>和(99~948)×10<sup>-6</sup>,Th 含量变化较大。所有锆石的 Th/U 比值均大于 0.1,范围介于 0.32~2.3,暗示锆石为岩浆成因。点 2.1、3.1、6.1、14.1、14.2 的年龄值远远大于大多数颗粒的年龄值,故这些点都被排除在年龄计算之外,剩余参与计算的 12 个测点在年龄谐和图上集中分布(图 5),<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的年龄范围值为(126~131)Ma。<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为(129±2)Ma (MSDW=0.71),代表辉绿岩的侵位年龄。因此,辉绿岩、花岗斑岩均是早白垩世岩浆活动的产物。

与花岗斑岩相同,辉绿岩样品中捕获了部分继承锆石并给出了较老的年龄信息,如位于锆石边部的点 14.1 给出 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 为 404.8 Ma,而同一锆石核部点 14.2 却获得相对年轻的 369.5 Ma 的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U

表2 黄龙铺辉绿岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果

Table 2 SHRIMP U-Pb data for zircons from diabase (HB3) in Huanglongpu area

Spot	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	U / $10^{-6}$	Th / $10^{-6}$	$^{232}\text{Th}$ / $^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ / $10^{-6}$	同位素比值			年龄/Ma	
						$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
HB3-1.1	13.93	246	524	2.20	5.00	0.0297(29)	0.080(29)	0.01955(1.9)	750(596)	129.7(3.6)
HB3-2.1	30.63	218	423	2.00	6.08	0.055(59)	0.165(60)	0.02182(2.8)	1371(1099)	143.5(8.3)
HB3-3.1	0.05	319	99	0.32	70.0	0.09252(0.67)	3.266(2.3)	0.2560(2.2)	1444(15)	1467(29)
HB3-4.1	5.17	249	414	1.72	4.66	0.0713(13)	0.209(13)	0.02125(1.9)	194(663)	131.9(3.1)
HB3-5.1	41.16	356	1236	3.59	10.1	0.178(12)	0.559(13)	0.02281(1.9)	910(1505)	123.7(7.4)
HB3-6.1	1.34	370	192	0.54	37.0	0.0445(4.2)	0.681(4.5)	0.1110(1.7)	968(88)	700(12)
HB3-7.1	0.40	273	455	1.72	4.90	0.0714(2.3)	0.2079(3.0)	0.02112(1.9)	615(164)	132.9(2.6)
HB3-8.1	1.10	252	252	1.04	4.41	0.0547(2.9)	0.1531(3.5)	0.02030(1.9)	188(139)	128.7(2.5)
HB3-9.1	0.54	208	253	1.25	3.72	0.0523(3.3)	0.1492(3.8)	0.02071(1.9)	259(287)	132.0(2.7)
HB3-10.1	3.18	214	345	1.67	3.79	0.0599(3.1)	0.1691(3.7)	0.02048(1.9)	-308(476)	127.6(2.7)
HB31-1.1	5.54	153	188	1.27	2.76	0.0425(6.0)	0.1175(6.3)	0.02004(2.0)	-614(640)	126.7(3.2)
HB31-2.1	8.64	354	788	2.30	6.67	0.0959(2.3)	0.2834(2.9)	0.02144(1.8)	-137(658)	127.8(2.9)
HB31-3.1	0.53	226	316	1.45	4.02	0.0513(3.0)	0.1465(3.6)	0.02070(1.9)	91(176)	131.5(2.6)
HB3-14.1	0.14	626	339	0.56	34.9	0.05747(1.1)	0.516(2.0)	0.0651(1.7)	362(29)	404.8(6.8)
HB3-14.2	--	446	387	0.90	22.5	0.06389(1.1)	0.524(2.6)	0.0595(2.4)	513(41)	369.5(8.6)
HB3-15.1	7.34	225	344	1.58	4.11	0.0589(4.7)	0.1615(5.1)	0.01990(2.0)	247(615)	125.6(3.2)
HB3-16.1	2.31	577	948	1.70	10.2	0.0711(1.9)	0.2016(2.6)	0.02056(1.8)	335(218)	128.2(2.4)

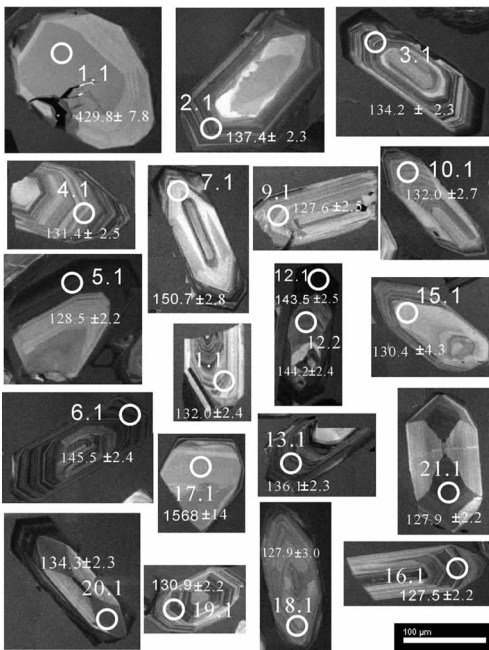


图2 花岗斑岩 ZB2 阴极发光(CL)图像及 SHRIMP 测定时的斑点位置、编号及年龄值

Fig.2 CL imagine of zircons from granite porphyry (ZB2) as well as spot locations, serial number and ages of SHRIMP

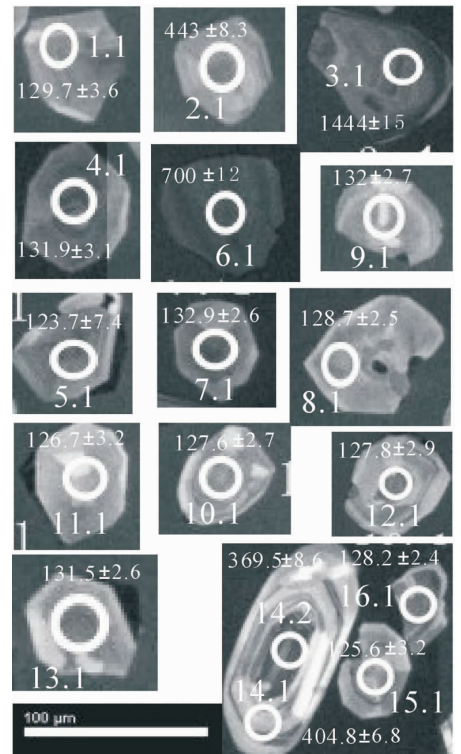


图3 辉绿岩 HB3 的阴极发光(CL)图像及 SHRIMP 测定时的斑点位置、编号及年龄值

Fig.3 CL imagine of zircons from diabase (HB3) as well as spot locations, serial number and ages of SHRIMP

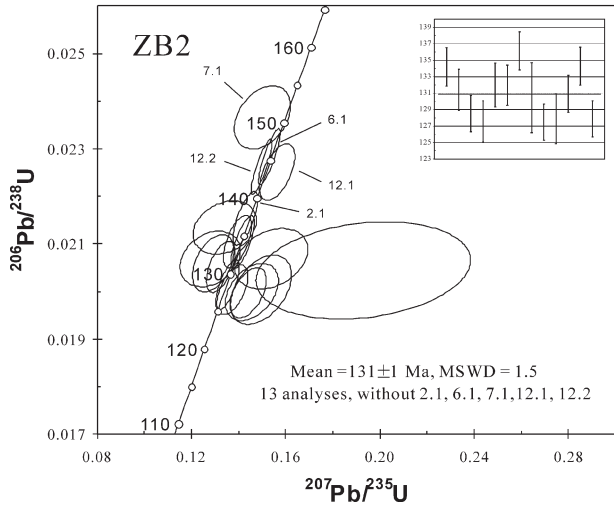


图 4 碱性花岗斑岩 ZB2 的锆石 U-Pb 谐和图  
Fig.4 U-Pb concordia diagrams for zircons from alkaline granite porphyry (ZB2)

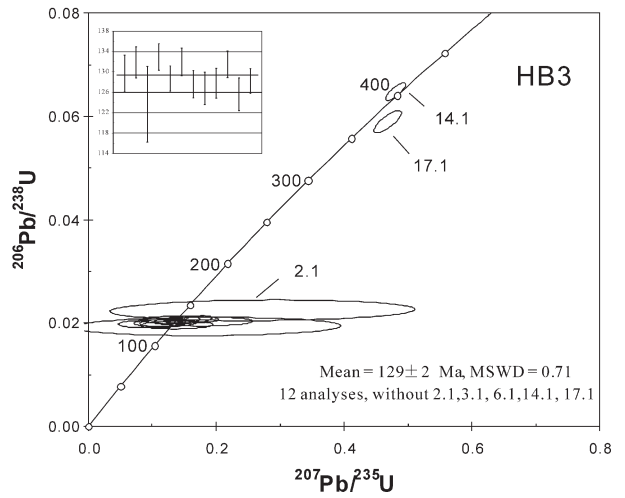


图 5 辉绿岩 HB3 的锆石 U-Pb 谐和图  
Fig.5 U-Pb concordia diagrams for zircons from diabase (HB3)

年龄,显然是矛盾的,此颗锆石点 14.1 和 14.2 的 U 含量相差较大,CL 图像中锆石晶形明显不同于其他锆石。此外,点 3.1 和 6.1 分别为 1444 Ma  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  锆石年龄和 700 Ma  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄,说明是捕获锆石,指示岩浆在上升过程中受到古老地壳的混染。

### 3.2 地球化学特征

岩石地球化学测试结果见表 3。

#### 3.2.1 碱性花岗斑岩

花岗斑岩  $\text{SiO}_2$  含量为 72.23%~74.86%, 平均 73.62%, ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ ) 为 7.95%~10.25%, 明显富碱, 岩体富  $\text{K}_2\text{O}$  (5.24%~9.82%), 贫  $\text{Na}_2\text{O}$  (0.094%~3.54%)。TAS 图解(图 6)除 ZB5 碱质含量较高落入图外,其余样品均落入碱性花岗岩范畴;  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图显示花岗斑岩属钾玄质系列。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13.67%~14.71%, 普遍高于碱性花岗岩<sup>[26]</sup>, 铝饱和指数为 1.08~1.54, 在 ANCK-ANC 图解中, 80%碱性花岗斑岩样品属于过铝质系列。此外,碱性花岗斑岩样品含有较低的  $\text{FeOT}$  (0.52%~1.22%)、 $\text{MgO}$  (0.14%~0.63%)、 $\text{MnO}$  (0.07%~0.13%)、 $\text{CaO}$  (0.06%~0.97%)、 $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.01%~0.05%)。因此,碱性花岗斑岩具有高硅、富铝、富碱、低镁、贫钙的特征,元素成分特征与金堆城花岗斑岩相似<sup>[27]</sup>。在 Harker 图解中, $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Sr}$  呈明显的负相关关系,与  $\text{K}_2\text{O}$  呈正相关关系,与  $\text{Na}_2\text{O}$  不具有相关性。

稀土元素分析结果(表 3)表明,黄龙铺碱性花岗

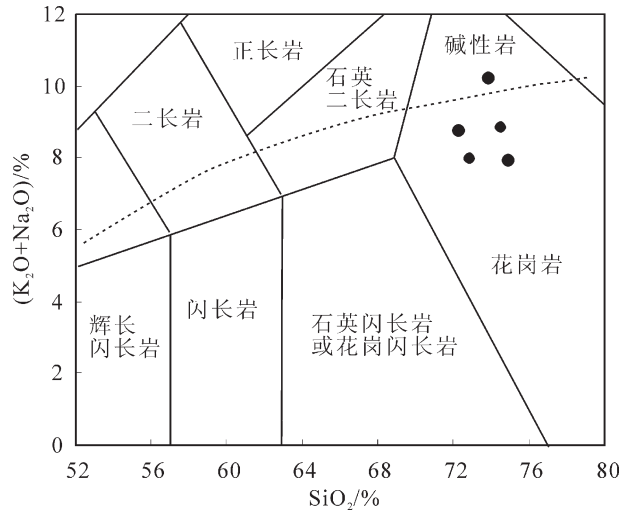


图 6 碱性花岗斑岩的 TAS 图解<sup>[25]</sup>  
Fig.6 TAS diagram of alkaline granite porphyry

斑岩的  $\Sigma\text{REE}$  为  $(11.5\sim 83.9)\times 10^{-6}$ , 平均  $43.3\times 10^{-6}$ , 含量较低。稀土元素配分曲线呈明显的“V”型谷状形式(图 7-a), 与秦巴造山带内的碱性花岗岩相似<sup>[30]</sup>。轻重稀土分馏程度不明显,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  变化于 2.1~11.4, 平均值为 7.5。5 个碱性花岗斑岩样品中轻稀土含量相差很大, 但重稀土较为接近, 碱性花岗斑岩  $\delta\text{Eu}$  为 0.35~0.68, 平均 0.58, 接近于壳源岩浆的  $\delta\text{Eu}$  值 (0.45)<sup>[31]</sup>。微量元素蛛网图(图 7-b), 岩体以亏损大离子亲石元素 Ba、K 及高场强元素 Ta, 富集 Th、U、Zr、Hf 为特征。

表 3 碱性花岗斑岩和辉绿岩岩石地球化学分析数据  
Table 3 Major and trace element compositions of alkaline granite porphyry and diabase in Huanglongpu area

样号	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	HB1	HB2	HB3
岩性	碱性花岗斑岩					辉绿岩		
SiO <sub>2</sub> /10 <sup>-2</sup>	72.79	72.23	74.42	74.86	73.80	48.78	48.92	48.86
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.17	0.05	0.07	0.04	2.87	2.98	2.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.20	14.37	13.92	13.90	13.67	13.05	13.12	13.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.08	0.93	0.62	0.88	0.30	10.69	8.88	9.09
FeO	0.25	0.34	0.13	0.05	0.25	6.02	8.27	7.77
MnO	0.07	0.07	0.17	0.13	0.12	0.26	0.40	0.42
MgO	0.63	0.35	0.23	0.22	0.14	4.28	4.72	5.27
CaO	0.21	0.97	0.15	0.06	0.07	8.66	5.19	5.62
Na <sub>2</sub> O	0.18	3.54	2.93	0.09	0.43	1.68	4.71	3.49
K <sub>2</sub> O	7.83	5.24	5.96	7.86	9.82	0.16	0.40	0.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.05	<0.01	0.01	<0.01	0.54	0.59	0.59
Loi	1.85	1.54	1.05	1.43	0.87	2.54	1.51	2.10
Total	99.3	99.8	99.6	99.6	99.5	99.5	99.7	99.6
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	8.01	8.78	8.89	7.95	10.25	1.84	5.11	3.69
A/CNK	1.73	1.47	1.54	1.73	1.32	1.24	1.27	1.42
La/10 <sup>-6</sup>	26.1	14.4	6.1	21	2.53	40.3	40.7	41.6
Ce	30.2	12.9	5.29	11.9	3.1	83.3	85.8	85.9
Pr	3.74	2.55	1.07	3.07	0.51	9.97	10.2	10.6
Nd	12.80	9.02	3.59	9.73	1.66	41.80	43	43.7
Sm	2.21	1.50	0.79	1.64	0.46	8.36	8.61	8.54
Eu	0.45	0.32	0.14	0.35	0.06	2.69	2.72	2.84
Gd	2.15	1.33	0.73	1.44	0.57	8.02	8.17	8.61
Tb	0.38	0.23	0.14	0.28	0.13	1.23	1.30	1.32
Dy	2.17	1.23	0.87	1.74	0.76	7.20	7.45	7.41
Ho	0.44	0.24	0.17	0.37	0.17	1.39	1.40	1.44
Er	1.31	0.70	0.57	1.26	0.51	3.87	3.96	4.03
Tm	0.22	0.12	0.11	0.23	0.10	0.51	0.54	0.55
Yb	1.55	0.87	0.83	1.85	0.80	3.30	3.50	3.51
Lu	0.22	0.13	0.16	0.29	0.14	0.49	0.50	0.51
Y	13.1	7.70	5.98	11.30	5.99	33.10	33.1	32.5
ΣREE	83.72	45.41	20.4	54.86	11.36	211.94	217.35	220
LREE/HREE	8.95	8.39	4.74	6.39	2.62	7.17	7.12	7.06
(La/Yb) <sub>N</sub>	11.35	11.16	4.95	7.65	2.13	8.23	7.84	7.99
δ Eu	0.62	0.67	0.55	0.68	0.36	0.98	0.97	1
V	15.30	14.80	2.25	3.93	1.08	472	422	442
Cr	0.79	<0.05	<0.05	<0.05	6.40	64.5	50.8	60.2
Co	1.49	1.32	0.24	0.52	0.20	47.2	46.7	48.8
Cu	11.70	4.34	1.44	2.57	5.79	41.6	45	46
Zn	52.5	31.3	35.7	60.6	30.3	171	180	235
Sc	2.93	1.41	1.81	2.4	2.06	46.2	44.6	43.4
Rb	535	282	577	640	964.	8.22	9.16	3.14
Sr	82.1	128	35.3	11.8	46.7	794	425	573
Zr	111.00	125	87.50	85.1	74.9	205	209	203
Nb	34.2	29	82.7	78.7	86.2	22	22.5	22.6
Mo	3.90	0.34	0.80	8.68	2.32	0.77	0.97	0.47
Cs	5.21	4.09	8.44	10.8	6.78	0.19	0.87	0.17
Ba	2240	714	409	543	291	492	299	392
Hf	4.92	4.9	7.28	6.42	6.96	5.52	5.72	5.79
Ta	1.39	1.2	2.29	2.08	2.33	0.78	0.76	0.74
Pb	37.9	33.3	33.4	231	51.5	29.2	16.7	15.7
Th	14.4	8.25	14.4	15.9	15.4	3.76	3.68	3.63
U	5.38	4.70	8.88	3.78	8.26	0.67	0.68	0.71

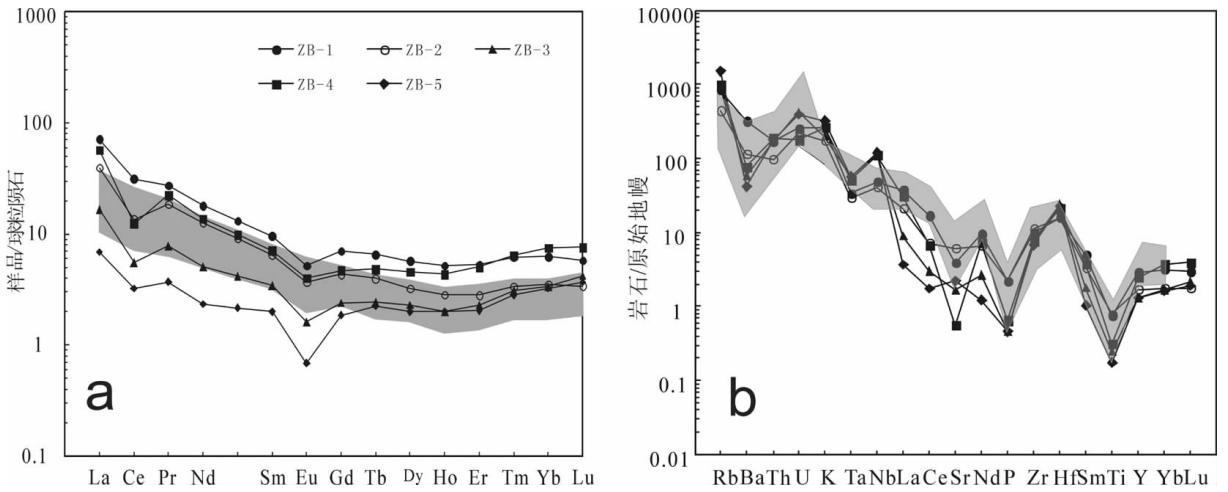


图 7 碱性花岗斑岩稀土配分曲线(a)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(黑色区域为金堆城花岗斑岩, 数据来源于朱赖民<sup>[27]</sup>) (a 标准数据采用 Boynton<sup>[28]</sup>; b 标准化数值采用 Sun and McDonough<sup>[29]</sup>)  
 Fig.7 Chondrite normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-element plots (b) of alkaline granite porphyry

表 4 黄龙铺碱性花岗斑岩的铅同位素组成

Table 4 Pb isotopic compositions of alkaline granite porphyry in Huanglongpu area

No	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	20	18	19
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	17.745	17.644	17.939	17.476	17.789	17.637	17.84	17.536
2 s	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001			
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.477	15.47	15.469	15.438	15.459	15.428	15.417	15.438
2 s	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001			
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	37.892	37.846	37.844	37.722	37.807	37.94	37.724	37.68
2 s	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002			
t(Ma)	131	131	131	131	131	140	140	140
$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	1.1465	1.1405	1.1597	1.132	1.1507	1.1432	1.1572	1.1359
$\mu$	9.3	9.3	9.26	9.26	9.26	9.22	9.17	9.25
?	36.81	37.15	35.42	37.31	36.02	37.19	34.98	36.75
Th/U	3.83	3.87	3.7	3.9	3.76	3.9	3.69	3.85
$\Delta a$	31.99	26.12	43.27	16.35	34.55	26.38	38.19	20.5
$\Delta B$	9.86	9.4	9.34	7.32	8.69	6.7	5.98	7.35

注: 20 为老牛山花岗岩全岩, 18, 19 为金堆城钼矿的方铅矿和钾长石, 3 个样品数据引自文献[15];  $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ;  $\omega = ^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 。

碱性花岗斑岩具有范围较小的铅同位素组成, 其中  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  范围介于 17.476~17.939,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 15.44~15.48,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 37.72~37.89, 同位素组成属于放射成因不高的正常铅, Th/U 比值为 3.7~3.9,  $\mu$  值范围为 9.26~9.30。与研究区内老牛山花岗岩和金堆城花岗斑岩对比, 碱性花岗斑岩与其铅同位素组成<sup>[12]</sup> 较为一致, 暗示与两岩体的源区相似。

### 3.2.2 辉绿岩

辉绿岩样品的  $\text{SiO}_2$  含量为 48.78%~48.92%, 变

化范围较小, 全碱含量 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) 1.84%~5.11%, 3 个样品  $\text{Na}_2\text{O}$  大于  $\text{K}_2\text{O}$ , 相对富钠。样品具有低的  $\text{MgO}$  含量 (4.28%~5.27%) 和  $\text{Mg}\#$  值 (0.30~0.35),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高 (13.05%~13.24%),  $\text{TiO}_2$  变化于 2.87%~2.99%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  变化于 0.54%~0.59%,  $\text{FeOT}$  含量介于 15.6%~16.3%, 辉绿岩成分上主要显示了碱性玄武岩的主量元素特征, 而不同于岛弧玄武岩 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 < 16\%$ ,  $\text{TiO}_2 < 1\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 < 0.3\%$ ) 和活动大陆边缘玄武岩 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 17\%$ ,  $\text{TiO}_2 < 1.2\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 < 0.4\%$ )<sup>[32]</sup>。



表5 黄龙铺辉绿岩的 Sr、Nd 同位素组成  
Table 5 Sr, Nd isotopic composition of diabase in Huanglongpu area

No	Rb	Sr	Sm	Nd	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	eSr(t)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	eNd(t)	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$
HB1	8.22	794	8.36	41.8	0.579	0.721	236.3	0.721	0.121	0.512	-19.5	0.511
HB2	9.16	425	8.61	43	0.579	0.762	820	0.762	0.121	0.512	-19.7	0.511
HB3	3.14	573	8.54	43.7	0.565	0.718	196.6	0.718	0.118	0.512	-19.5	0.511

注:  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}}^0=0.7045$ ,  $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}}^0=0.0827$ ,  $(^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}^0=0.51238$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}^0=0.51267$ ;  $\lambda_{\text{Rb}}=1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$ ,  $\lambda_{\text{Sm}}=6.5 \times 10^{-12}/\text{a}$

辉绿岩样品的稀土元素含量较高,  $\sum\text{REE}$  变化于  $212.43 \times 10^{-6} \sim 220.56 \times 10^{-6}$ , 在球粒陨石标准化图解上, 样品表现出比较平滑一致的 LREE 富集的右倾型配分型式(图 8-a), 轻重稀土分异不明显,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=7.83 \sim 8.23$ , 平均 8.02,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.88 \sim 1.98$ ,  $\delta\text{Eu}=0.96 \sim 0.99$ , 无 Eu 异常, 类似于幔源岩浆。Y/Nb=1.44~1.50, 与碱性玄武岩低的 Y/Nb 比值相近。微量元素蛛网图(图 8-b)显示辉绿岩具有大离子亲石元素 K、Rb、Sr 亏损, Ba 明显富集的特征。

辉绿岩的 Sr、Nd 同位素分析值及其特征(表 5), 采用本文所得的年龄  $t=129\text{ Ma}$  计算, 样品的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值介于 0.718~0.762, 变化范围较大; 而 Nd 同位素组成却较一致, 均为 0.5114~0.5116,  $\varepsilon\text{Nd}(t)$  值的范围为 -19.53~-19.69。辉绿岩的高  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、低  $\varepsilon\text{Nd}(t)$  同位素特征与胶东地区早白垩世基性脉

岩相似<sup>[33,34]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 年代学

对黄龙铺地区碱性花岗斑岩进行锆石 SHRIMP-U-Pb 定年, 获得  $(131 \pm 1)\text{Ma}$  加权平均年龄值, 而辉绿岩的 SHRIMP 锆石的 U-Pb 年龄为  $(129 \pm 2)\text{Ma}$ , 表明碱性花岗斑岩、辉绿岩均形成于早白垩世。

区内脉状碳酸岩型钼矿的辉钼矿 Re-Os 年龄为  $(221.5 \pm 0.3)\text{Ma}$ <sup>[17]</sup>, 推测与矿化密切相关的碳酸岩墙侵位年龄约 221 Ma。采用锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测得石家湾岩体第三次侵入的钾长花岗斑岩为  $(141.44 \pm 0.59)\text{Ma}$ <sup>[35]</sup>, 同种方法得到的老牛山花岗岩体和金堆城斑岩的年龄分别为  $(146.35 \pm 0.55)\text{Ma}$  和

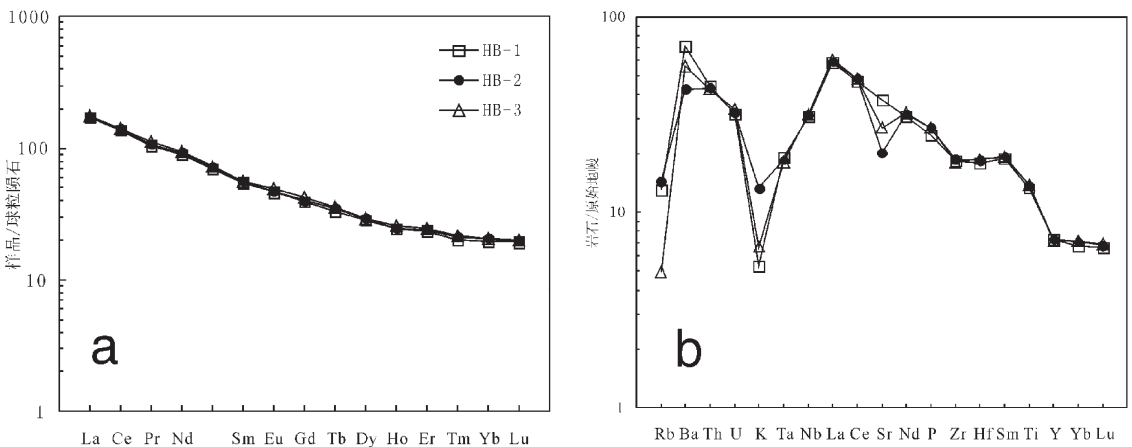


图8 辉绿岩的稀土元素曲线(a)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值同图7)

Fig.8 Chondrite normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-element plots (b) of diabase (normalized data as for Fig. 7)

(140.95±0.45) Ma<sup>[29]</sup>, 均属于东秦岭晚侏罗世成岩成矿体系的一部分。从黄龙铺地区岩浆岩的侵位年龄数据可知, 区内存在 3 期岩浆活动, 从早到晚依次为: ①三叠纪地幔来源的碳酸岩, 年龄约 220 Ma<sup>[17,36]</sup>; ②晚侏罗—早白垩世石家湾、金堆城花岗斑岩和老牛山花岗岩, 后者的 LA-ICP-MS 年龄为 (146.35±0.55) Ma<sup>[29]</sup>; ③早白垩世碱性花岗斑岩及辉绿岩脉, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 129 Ma ~131 Ma。

综合分析东秦岭成矿带成岩成矿年龄数据, 发现碱性花岗斑岩和辉绿岩并不是早白垩世发生的孤立的偶然的岩浆活动, 如 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得合峪岩体似斑状二长花岗岩的年龄为 (127.0±1.4) Ma, 童子庄附近含中斑黑云母二长花岗岩的黑云母 Ar-Ar 坪年龄为 (131.8±0.7) Ma<sup>[37]</sup>。花山黑云母花岗岩 (130.7±1.4) Ma<sup>[38]</sup>, 同时, 早白垩世秦岭地区伴随着重要的钼铅等成矿作用, 东沟大型斑岩型钼矿的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (115.1±2.0 Ma)<sup>[39]</sup>、雷门沟矿床的辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 (131.4±1.4) Ma<sup>[4]</sup>, 产于合峪复式花岗岩体中的鱼池岭钼矿的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (131.2±1.4) Ma<sup>[40]</sup>。由此可见, 正如 Mao et al<sup>[6]</sup> 所指出, 131~112 Ma 构成了东秦岭地区一个重要的岩浆与成矿事件的峰期, 而黄龙铺地区碱性花岗斑岩、辉绿岩是该时

限岩浆活动的组成部分。

## 4.2 岩石源区特征及成岩方式

### 4.2.1 碱性花岗斑岩

碱性花岗斑岩具有高硅、富碱、低镁、贫钙的特征, 与金堆城花岗斑岩一致, 不同的是铝质含量略高于金堆城花岗斑岩。稀土元素及微量元素也显示较为一致的变化特征 (图 7), 其铅同位素组成变化范围较小, 与金堆城的方铅矿和钾长石铅组成较为接近, 比值属于放射成因不高的正常铅范畴。在 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb - <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 和 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb - <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 图解上, 样品点落入下地壳范围, 且与金堆城岩体落入相同范围内 (图 9), 说明碱性花岗斑岩与金堆城花岗斑岩具有相同或相似的源区。卢欣祥等<sup>[8]</sup> 通过金堆城花岗斑岩及矿石铅同位素研究表明, 成矿与成岩具有相同的铅源, 并来源于深源。黄典豪等<sup>[12]</sup> 通过铅和铋同位素的研究认为金堆城花岗斑岩为基底岩石由深熔作用所产生的岩浆结晶分异作用的产物。薛祖雷等<sup>[42]</sup> 认为区内花岗岩是太华群基底在下地壳或上地幔物质的参与下, 发生分离熔融而形成的。

在元素的 La-La/Sm 图解上, 碱性花岗斑岩样品落于平衡部分熔融线附近, 并落入东秦岭 I 型花岗岩的范围内 (图 10), 说明其与后者成岩方式相同, 广泛被接受的观点认为东秦岭与燕山期钼成矿

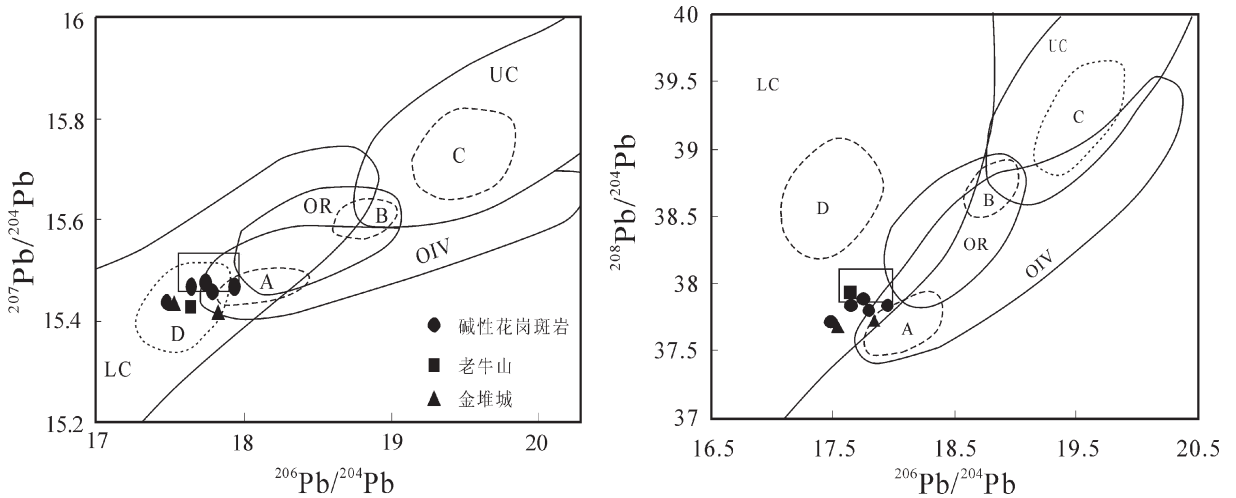
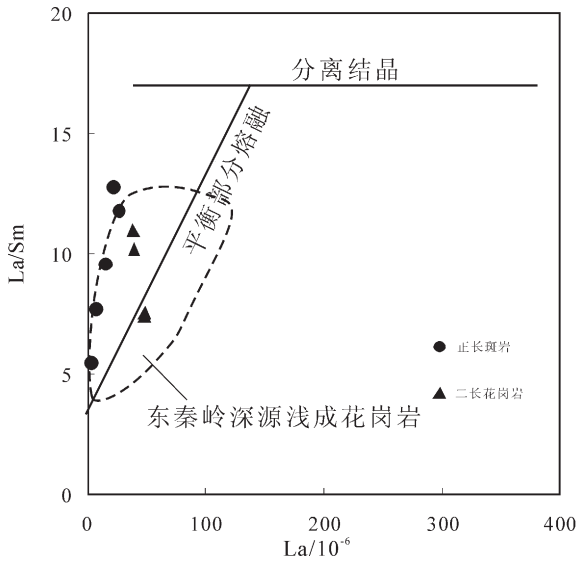


图 9 黄龙铺碱性花岗斑岩铅同位素组成图解<sup>[12,43,44]</sup>

LC—下地壳; UC—上地壳; OIV—洋岛火山岩; OR—造山带; A、B、C、D 分别为各区中样品的相对集中区<sup>[41]</sup> (老牛山数据引自文献<sup>[42]</sup>, 金堆城数据引自文献<sup>[12]</sup>)

Fig.9 Diagram for lead isotopic compositions of alkaline granite porphyry<sup>[12,42,43]</sup>

LC—Lower crust; UC—Upper crust; OIV—Ocean island volcanics; OR—Orogenic belt. A, B, C, D show the relative concentration areas of the districts<sup>[41]</sup> (data of Laoniusshan and Jinduicheng from references<sup>[42]</sup> and<sup>[12]</sup> respectively)

图 10 碱性花岗斑岩的 La-La/Sm 图解<sup>[12,44]</sup>Fig.10 La-La/Sm plot of alkaline granite porphyry<sup>[12,44]</sup>

作用相关的 I 型花岗岩经部分熔融形成<sup>[12]</sup>。因此,可以认为碱性花岗斑岩系源区物质经部分熔融作用形成。在熔融过程中,分配系数低的高场强元素 Th、U、Zr、Hf 等优先进入熔体相,导致碱性花岗斑岩中这些元素的相对富集, Eu 的强烈亏损部分归因于长石保留在残留相中,并导致熔体相 Sr 含量较低,亏损程度远高于金堆成花岗斑岩及成岩时间的略滞后说明其熔融程度略高。SiO<sub>2</sub> 与 TiO<sub>2</sub> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 具有负的相关性。Ti 和 P 的亏损与榍石和磷灰石的分离结晶作用有关,镜下可见到榍石的晶体颗粒。因此,通过碱性花岗斑岩的铅同位素组成对比分析,结合其地球化学特征,可知与区内含钼斑岩体相同,碱性花岗斑岩来源于下地壳部分熔融,并在上升过程中发生分离结晶作用。

#### 4.2.2 辉绿岩

黄龙铺辉绿岩的 Sr、Nd 同位素组成具有高 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>, 低 ε Nd(t) 特征。目前,关于这种特点的脉岩来源争论较大,主要存在 3 种观点:①地幔岩浆上升至地表过程中经过地壳物质的混染作用形成<sup>[46]</sup>;②富集岩石圈地幔物质的迁移、熔融形成<sup>[47,48]</sup>;③大陆地壳部分熔融形成<sup>[49]</sup>。

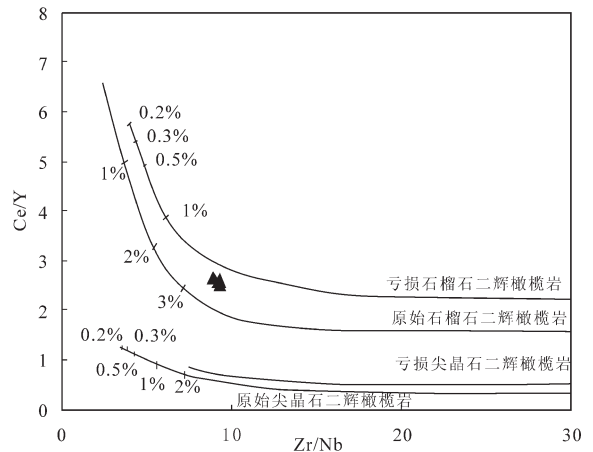
从辉绿岩地球化学分析数据看,样品中具有低 MgO 含量及 Mg#, 低 Cr 含量 (50.8~64.5)×10<sup>-6</sup> 及高 TiO<sub>2</sub> 含量,暗示其不具有与地幔橄辉岩平衡的熔体成分<sup>[50]</sup>,即不来源于原生地幔。Sr 含量范围(425~

724)×10<sup>-6</sup>, 平均 597.3×10<sup>-6</sup>, 略高于大陆地壳 (503×10<sup>-6</sup>), 而 Nd 含量 (41.8~43.7)×10<sup>-6</sup>, 大于地壳的平均含量 (23×10<sup>-6</sup>), 结合无 δ Eu 的异常, 推测辉绿岩不可能是地壳熔融的产物。由前文所述黄龙铺辉绿岩 Sr、Nd 组成与胶东地区早白垩世中基性脉岩类似, 笔者认为辉绿岩来自于富集的岩石圈地幔, 而从含有捕获锆石说明辉绿岩遭受了地壳混染。样品 (Th/Nb)<sub>N</sub> 比值为 1.35~1.43, La/Nb 比值为 1.81~1.84, 而未受地壳混染的大陆火山岩 (Th/Nb)<sub>N</sub> (远大于 1)<sup>[51]</sup> 和 La/Nb (>1)<sup>[52]</sup>, 再次暗示其受到地壳混染作用。此外, 辉绿岩样品中的 Th 含量较低 (3.63×10<sup>-6</sup>~3.76×10<sup>-6</sup>) 表明可能混入的是下地壳物质, 而不是上地壳物质<sup>[53]</sup>。采用 Zr/Nb-Ce/Y 图解进一步判断黄龙铺辉绿岩源区矿物相组成<sup>[54]</sup>, 样品 Zr/Nb=8.98~9.32, Ce/Y=2.52~2.64, 落入石榴石二辉橄辉岩和亏损石榴石二辉橄辉岩之间 (图 11), 暗示岩石更可能是富含石榴石二辉橄辉岩源区低程度部分熔融的产物 (3%)。

#### 4.3 构造背景

已有研究暗示中国东部早白垩世处于岩石圈伸展环境, 大规模的岩浆及成矿事件发生于岩石圈拆沉作用导致的岩石圈减薄<sup>[9,38,57]</sup>。如长江中下游地区发现早白垩世大陆裂谷型碱性玄武岩特征的基性包体<sup>[58]</sup>、双峰式火山岩、A 型花岗岩、变质核杂岩以及钾玄质火山岩充填的断陷盆地等<sup>[59]</sup>, 胶东地区同时期的基性脉岩<sup>[34]</sup>等充分证明中国东部早白垩世处于伸展环境。

张国伟等<sup>[60]</sup>指出, 东秦岭中生代以前为华北板块的组成部分, 具有典型的板块边缘特征。区内属于

图 11 辉绿岩的 Zr/Nb-Ce/Y 图解<sup>[46]</sup>Fig.11 Zr/Nb versus Ce/Y plot of diabase<sup>[46]</sup>

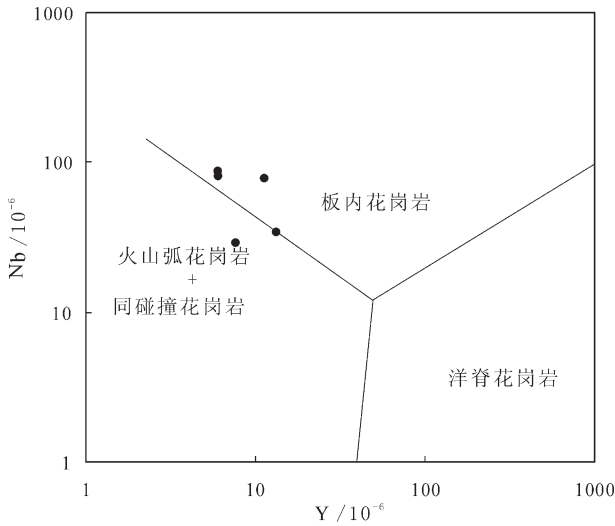


图 12 碱性花岗斑岩的构造环境判别<sup>[54]</sup>

Fig.12 Tectonic discrimination diagram of granite porphyry<sup>[57]</sup>

非造山型早白垩世太山庙铝质 A 型花岗岩形成于大陆板内拉伸环境<sup>[10]</sup>。黄龙铺地区 140 Ma 左右的老牛山岩体及金堆城岩体地球化学特征揭示出两者形成于板内环境下，是由陆内俯冲作用引起的基性岩浆的底侵作用而形成的混合花岗岩，岩体形成于挤压向拉张转化的构造环境<sup>[27]</sup>。

黄龙铺地区碱性花岗斑岩除样品 ZB5 中 Ba 含量为  $219 \times 10^{-6}$  外，其他样品微量元素含量变化于  $409 \times 10^{-6} \sim 2240 \times 10^{-6}$ ，多大于  $500 \times 10^{-6}$ ，Ta 含量为  $1.2 \times 10^{-6} \sim 2.33 \times 10^{-6}$ ，均小于  $3.0 \times 10^{-6}$ ，与减薄的大陆壳板内花岗岩相同。在花岗岩的 Y-Nb 构造环境判别图解中(图 12)，大多数碱性花岗斑岩样品落入板内花岗岩区，表明碱性花岗斑岩形成于大陆陆内拉伸环境。

黄龙铺地区辉绿岩稀土分配曲线呈轻稀土富集的右倾型(图 9)，总量相近及球粒陨石标准化曲线与华南地区新生代大陆裂谷型玄武岩 ( $205 \times 10^{-6} \sim 233 \times 10^{-6}$ )<sup>[30]</sup>相似。微量元素具有大离子亲石元素 K、Rb、Sr 亏损，Ba 表现明显富集特征，高场强元素 Zr、Hf、Ta、Nb、Ti 中等亏损(图 8-b)。具有明显的 Nb、Ta 和 Ti 负异常，与岛弧环境下火山岩或受地壳污染的大陆玄武岩特征相似，而 Zr 的含量为  $32.5 \times 10^{-6} \sim 33.1 \times 10^{-6}$ ，Hf 为  $5.52 \times 10^{-6} \sim 5.79 \times 10^{-6}$ ，Nb 为  $22.0 \times 10^{-6} \sim 22.6 \times 10^{-6}$ ，Ta 为  $0.74 \times 10^{-6} \sim 0.78 \times 10^{-6}$ ，远

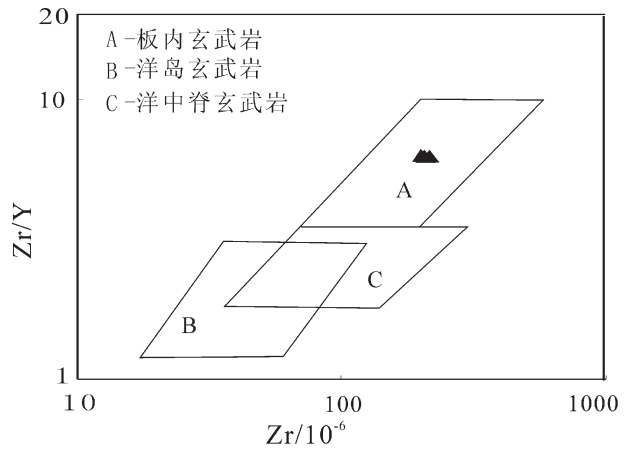


图 13 辉绿岩的环境判别<sup>[56]</sup>

Fig.13 Tectonic discrimination diagram of diabase<sup>[58]</sup>

大于典型的岛弧玄武岩中相应元素的含量 ( $Zr=40 \times 10^{-6} \sim 70 \times 10^{-6}$ ,  $Hf=1.17 \times 10^{-6} \sim 2.23 \times 10^{-6}$ ,  $Nb=1.7 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ ,  $Ta=0.1 \times 10^{-6} \sim 0.18 \times 10^{-6}$ )<sup>[55]</sup>，暗示其不可能形成于岛弧环境。辉绿岩样品的 Zr/Nb 比值变化于 9.0~9.3,  $Th/Ta=4.8 \sim 4.9$ ,  $Ta/Hf=0.13 \sim 0.14$ ，均与板内玄武岩值相近 ( $Zr/Nb=10$  左右<sup>[32]</sup>,  $Th/Ta > 1.6$ ,  $Ta/Hf > 0.1$ )<sup>[61]</sup>，在 Zr-Zr/Y 玄武岩构造环境判别图解中，样品也落入板内玄武岩区(图 13)，与碱性花岗斑岩判别结果一致，说明两岩体均形成于大陆伸展环境。

## 5 结论

(1) SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果表明，黄龙铺地区碱性花岗斑岩的形成年龄为  $(131 \pm 1) \text{Ma}$ ，辉绿岩的年龄为  $(129 \pm 2) \text{Ma}$ ，两者均形成于早白垩世。

(2) 岩石地球化学分析揭示出碱性花岗斑岩样品具有高硅、富碱、过铝质特征，微量元素以亏损大离子亲石元素 Ba、K、Sr 及高场强元素 Ta，富集 Th、U、Zr、Hf 为特征。岩石地球化学特征及铅同位素组成与区内含钼斑岩体的相近，揭示碱性花岗斑岩可能由下地壳部分熔融形成的岩浆经分离结晶作用形成。

(3) 辉绿岩属于亚碱性向碱性玄武岩过渡系列，样品具有富碱，低 MgO 含量和 Mg# 值，微量元素 Zr、P、Ti，大离子亲石元素除 K 强亏损，Ba 富集。高铯、低钆的同位素特征暗示辉绿岩来源于富集地幔，岩浆可能形成于源区为石榴石二辉橄榄岩低程度部

分熔融(3%),在上升的过程受到了一定程度地壳的混染。

(4)碱性花岗斑岩和辉绿岩的岩石地球化学特征一致指向其形成于大陆板内拉伸环境。

**致谢:** 在野外工作期间得到洛南县九龙矿业有限公司技术人员,以及寺耳金矿有限责任公司王建杰总工程师的大力支持与协助,室内工作得到北京离子探针中心董春艳博士,万渝生研究员的帮助与指点,两位审稿人对本文提出了建设性的修改意见,在此一并表示衷心感谢!

### 参考文献(References):

- [1] 罗铭玖,张辅民,董群英,等.中国钼矿床[M].郑州:河南科技出版社,1991:1-452.  
Luo Mingjiu, Zhang Fumin, Dong Qunying, et al. Molybdenum Deposits in China [M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1991:1-452(in Chinese).
- [2] 陈衍景,李超,张静,等.秦岭钼矿带斑岩体锶氧同位素特征与岩石成因机制和类型[J]. 中国科学(D辑),2000,30(增刊):64-72.  
Chen Yanjing, Li Chao, Zhang Jing, et al. Isotopic characters of Sr-O, rock forming mechanism and style of porphyry molybdenum deposit zone in Qinling[J]. Science in China (Series D), 2000, 30 (supp.):65-72 (in Chinese).
- [3] 张伟伟,朱炳泉,常向阳,等.东秦岭钼矿带成矿背景及时空统一性[J]. 高校地质学报,2001,307-315.  
Zhang Zhengwei, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, et al. Petrogenetic-metallogenetic background and time-space relationship of the east Qinling molybdenum ore belt, China[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7 (3): 307-315 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李永峰,毛景文,胡华斌,等.东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质,2005,25(3):292-304.  
Li Yongfeng, Mao Jingwen, Hu Huabin, et al. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area [J]. Mineral Deposits, 2005, 24 (3): 292-301 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李永峰,毛景文,刘敦一,等.豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 及辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义 [J]. 地质论评,2006,52(1):122-131.  
Li Yongfeng, Mao Jingwen, Liu Dunyi, et al. Shrimp Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, west Henan and its geological implication [J]. Geological Review, 2006, 52(1):122-131(in Chinese with English abstract).
- [6] Mao Jingwen, Xie Guiqing, Bierlein F, et al. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2008, 72 (18):4607-4626.
- [7] 卢欣祥,董有,常秋岭,等.秦岭印支期沙河湾奥长环斑花岗岩及其动力学意义[J]. 中国科学(D辑),1996,26(3):244-248.  
Lu Xinxiang, Dong You, Chang Qiuling, et al. Indosinian Shahewan rapakivi granite in Qinling and its dynamic significance [J]. Science in China (Series D), 1996, 26 (3):244-248(in Chinese).
- [8] 卢欣祥,于在平,冯有利,等.东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景[J]. 矿床地质,2002,21(2):168-175.  
Lu Xinxiang, Yu Zaiping, Feng Youli, et al. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in east Qinling mountain[J]. Mineral Deposits, 2002, 21 (2):168-178 (in Chinese with English abstract).
- [9] 毛景文,叶会寿,王瑞廷,等.东秦岭中生代钼铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J]. 地质通报,2009,28(1):72-79.  
Mao Jingwen, Ye Huishou, Wang Ruiting, et al. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposit in the eastern Qinling, central China and its implication for prospecting[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(1):72-79(in Chinese with English abstract).
- [10] 叶会寿,毛景文,徐林刚,等.豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征 [J]. 地质评论,2008,54(5):699-711.  
Ye Huishou, Mao Jingwen, Xu Lingang, et al. Shrimp zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taishanmiao aluminous A-type granite in west Henan Province [J]. Geological Review, 2008, 54 (5): 699-711(in Chinese with English abstract).
- [11] 聂凤军,樊建廷.陕西金堆城-黄龙铺地区含相花岗岩类稀土元素地球化学研究[J]. 岩石矿物学杂志,1989:24-32.  
Nie Fengjun, Fan Jianting. REE elements geochemical research of molybdenum granite in Jinduicheng-Huanglongpu, Shaanxi province[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 1989, 1 (8):24-33 (in Chinese with English abstract).
- [12] 黄典豪,聂凤军,王义昌,等.东秦岭地区钼矿床铅同位素组成特征及其成矿物质来源初探[J]. 矿床地质,1984,3(4):20-28.  
Huang Dianhao, Nie Fengjun, Wang Yichang, et al. Lead isotopic composition and the source of metallogenetic materials research on molybdenum deposit of east Qinling [J]. Mineral Deposits, 1984, 3 (4): 20-28 (in Chinese with English abstract).
- [13] Xu Cheng, Ian H, Campbell, et al. Flat rare earth element patterns as an indicator of cumulate processes in the Lesser Qinling carbonatites, China[J]. Lithos, 2007, 95:267-278.
- [14] 许成,宋文磊,漆亮,等.黄龙铺钼矿田含矿碳酸岩地球化学特征及其形成构造背景[J]. 岩石学报,2009,25(2):422-430.  
Xu Cheng, Song Wenlei, Qi Liang, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatites in Huanglongpu Mo ore field [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (2): 422-430(in Chinese with English abstract).
- [15] 黄典豪,王义昌,聂凤军,等.黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床的硫、碳、氧同位素组成及成矿物质来源[J]. 地质学报,1984,58(3):252-264.  
Huang Dianhao, Wang Yichang, Nie Fengjun, et al. Isotopic

- composition of sulfur, carbon and oxygen and source material of the Huanglongpu carbonatite vein - type of molybdenum (lead) deposits [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1984, 58 (3):252-264 (in Chinese with English abstract).
- [16] 黄典豪, 王义昌, 聂凤军, 等. 一种新的钼矿床类型-陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及成矿机制 [J]. *地质学报*, 1985, 59(3): 241-257.
- Huang Dianhao, Wang Yichang, Nie Fengjun, et al. A new type of molybdenum deposit geological characteristics and metallogenetic mechanism of the Huanglongpu carbonatite vein - type of molybdenum(lead) deposit, Shaanxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1985, 59(3): 241-257 (in Chinese with English abstract).
- [17] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. Highly precise and accurate Re -Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt Shanxi Province, China [J]. *Econ.Geol.*, 1997, 92:827-835.
- [18] Hall H C. The importance and potential of mafic dyke swarm in studies of geodynamic process [J]. *Geosciences Canada*, 1982, 9: 145-154.
- [19] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5):459-464.
- Lu Yuanfa. GeoKit -A geochemical toolkit for Microsoft Excel. *Geochemica*, 2004, 33 (5): 459-464 (in Chinese with English abstract).
- [20] Qiao GS. Normalization of isotopic dilution analyses: a new program for isotope mass spectrometric analysis [J]. *Scientia Sinica (Series A)*. 1998, 31:1263-1268.
- [21] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 2002, 48(增刊):26-30.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, et al. Mounting and analytical procedure of zircon SHRIMP dating [J]. *Geological Review*, 2002, 48(supp.): 26-30(in Chinese with English abstract).
- [22] Lutz Nasdala, Wolfgang Hofmeister, Nicholas Norberg, et al. Zircon M257 -a homogeneous natural reference material for the Ion Microprobe U-Pb analysis on zircon. geostandards and geoanalytical research, 2008, 32:247-265.
- [23] Ludwig KR. Isoplot/Ex Version 2.02-A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication. CA, 2002.
- [24] Hoskin PW O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid -state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Metamorphic Geol.*, 2000, 18:423-439.
- [25] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Sci Rev.*, 1994, 37:215-224.
- [26] 童英, 王涛, V P Kovach, 等. 阿尔泰中蒙边界塔克什肯口岸后造山富碱侵入岩体的形成时代、成因及其地壳生长意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5):1267-1278.
- Tong Ying, Wang Tao, Kovach V P, et al. Age and origin of the Takeshiken postorogenic alkali -rich intrusive rocks in southern Altai, near the Mongolian border in China and its implications for continental growth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5):1267-1278(in Chinese with English abstract).
- [27] 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景 [J]. *地质学报*, 2008, 82(2):204-218.
- Zhu Laimin, Zhang Guowei, Guo Bo, et al. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the large Jinduicheng Porphyry Mo deposit in the east Qinling, China, and its metallogenetic geodynamical setting[J]. *Acta Geological Sinica*, 2008, 82 (2):204-218 (in Chinese with English abstract).
- [28] Boynton W V. *Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studied* [C]//Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. New York: Elsevier, 1984:63-114.
- [29] Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C] //Saunders A D and Norry M J (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. *Geol. Soc. London. Spec. Publ*, 1989, 42:313-345.
- [30] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992:1-189.
- Li Changnian. *Trace Elements and Petrology of Igneous Rocks*[M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1992:1-189 (in Chinese).
- [31] Roger J W, Greenberg J K. Late -orogenic, post -orogenic and anorogenic granites: distinction by major -element and trace element chemistry and possible origins [J]. *J. Geol.*, 1990, 98:291-309.
- [32] Wilson M. *Igneous petrogenesis (Global tectonic approach)* [M]. London:Oxford University Press, 1989, 1-466.
- [33] 徐红, 徐光平. 胶东煌斑岩的地球化学特征及成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(1): 36-44.
- Xu Hong, Xu Guangping. Geochemical characteristics and genesis of the lamprophyres in the Jiaodong gold ore district, Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2000, 19(1): 36-44 (in Chinese with English abstract).
- [34] Yang Jinhui, Cheng Sunlin, Zhai Mingguo, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle[J]. *Lithos*, 2004, 73:145-160.
- [35] 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗斑岩的年代学及岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约 [J]. *矿床地质*, 2010, (待发表).
- Zhao Haijie, Mao Jingwen, Ye Huishou, et al. Chronology and petrogenesis of the Shijiawan granite porphyry in Shaanxi Province: constrains from zircon U -Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Mineral Deposits*, 2010, in Press.
- [36] 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义[J]. *矿床地质*, 1994, 13(3):221-229.
- Huang Dianhao, Wu Chengyu, Du Andao, et al. Re -Os isotope ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance [J]. *Mineral Deposit*, 1994, 13 (3): 221-229 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [37] Han Y G, Zhang S H, Pirajno F, et al. Evolution of the Mesozoic granites in the Xiongershan-Waifangshan region, western Henan Province, China, and its tectonic implications [J]. *Acta Geological Sinica (English edition)*, 2007, 81(2):253-265.
- [38] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 2005, 31(1):169-188. Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- [39] 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等. 大秦东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(7):1078-1087. Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, et al. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the super large Donggou porphyry Mo deposit in east Qinling, China, and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(7): 1078-1087(in Chinese with English abstract).
- [40] 周珂, 叶会寿, 毛景文, 等. 豫西鱼池岭斑岩型钼矿床地质特征及其辉钼矿铼-钨同位素年龄[J]. *矿床地质*, 2009, 28(2):170-184. Zhou Ke, Ye Huishou, Mao Jingwen, et al. Geological characteristics and molybdenites Re-Os isotopic dating of Yuchiling porphyry Mo deposit in western Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(2): 170-184(in Chinese with English abstract).
- [41] Zartman R E, Doe B R. Lead-isotope evolution. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1981, 169-170.
- [42] 焦建刚, 袁海潮, 刘瑞平, 等. 陕西华县老牛山和金堆城花岗岩体 La-ICP-MS 定年与岩浆源区[C] //陈毓川等主编. 第九届全国矿床会议论文集. 北京:地质出版社, 2008:461-462. Jiao Jianggang, Yuan Haichao, Liu Ruiping, et al. LA-ICP-MS dating and magma source of Laoniushan and Jinduicheng Granite rockbody in Huaxian County, Shannxi Province [C]//Chen Yuchuan (ed.). *The 9th National Conference of Mineral Deposits, China*. Beijing:Geological Publishing House, 2008:461-462 (in Chinese).
- [43] 薛祖雷, 吴向东, 王养苍, 等. 陕西金堆城地区含钼花岗岩类成因及成矿的讨论[J]. *陕西地质*, 1984, 2(2):37-46. Xue Zulei, Wu Xiangdong, Wang Yangcang, et al. A review on the genesis and metallogeny of the molybdenite-bearing granitoid at Jinduicheng, Shaanxi[J]. *Geology of Shaanxi*, 1984, 2(2):37-46 (in Chinese with English abstract).
- [44] Allegre C J, Treuil M, Minster J F, et al. Systematic use of trace element in igneous process: Part I, fractional crystallization processes in volcanic suites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1977, 60(1):57-75.
- [45] Hardarson B S, Fitton J G. Increased mantle melting beneath Snaefellsjokull volcano during late Pleistocene glaciation[J]. *Nature*, 1991, 353:62-64.
- [46] Menzies M A, Leeman W P, Hawkesworth C J. Geochemical and isotopic evidence for the origin of continental flood basalts with particular reference to the Snake River Plain, Idaho, USA [J]. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 1984, A310: 643-660.
- [47] Carlson J R. Isotopic constraints on Columbia River flood basalt genesis and the nature of the subcontinental mantle [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, 48:2357-2372.
- [48] Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. *Chemical Geology*, 1999, 157:119-146.
- [49] Thompson R N. Magmatism of the British Tertiary volcanic province[J]. *Scoot. J. Geol.*, 1982, 18:49-107.
- [50] Cox K G. A Model for flood basalt volcanism [J]. *Journal of Petrology*, 1980, 21:629-650.
- [51] Saunders A D, Storey M, Kent R W et al. Consequences of plume lithosphere interaction. In: Storey BC, Alabaster T, Pankhurst RJ (eds.). *Magmatism and the Causes of Continental Break-up* [J]. London: Geol Soc Spec Pub, 1992, 68:41-60.
- [52] Kieffer B, Arnde N, Lapiere H. Flood and shield basalts from Ethiopia: magmas from the African superswell [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(4):7993-834.
- [53] 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义[J]. *地学前缘*, 2002, 9(4):329-338. Li Xianghua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, et al. U-Pb Zircon Geochronological, Geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic Basaltic magmatism in western Sichuan: Petrogenesis and Geodynamic implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(4): 329-338(in Chinese with English abstract).
- [54] Deniel C, Vidal P, Coulon C, et al. Temporal evolution of mantle sources during continental rifting: the volcanism of Djibouti (Afar) [J]. *Journal of Geophysics Research*. 1994, 99:2853-2869.
- [55] Pearce J A, Halls H B W, Trindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25:956-983.
- [56] Pearce JA. Trace Element Characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C]//Thorpe R S (ed.). *Andesites* [J]. New York: John Wiley and Sons., 1982, 525-548
- [57] Wu Fuyuan, Lin J Q, Simon A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. *Earth Planet. Sci*, 2005, 233:103-119.
- [58] 杜扬松, 秦新龙, 田世洪. 安徽铜陵铜官山矿区中生代岩浆-热液过程: 来自岩石包体及其寄主岩的证据[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2):339-350. Du Yangsong, Qin Xinlong, Tian Shihong. Mesozoic magmatic to hydrothermal process in the Tongguanshan ore field, Tongling, Anhui province, China: evidence from xenoliths and their hosts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2):339-350 (in Chinese with

English abstract).

[59] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, et al. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 2008, 104: 216-230.

[60] 张国伟, 张本仁, 袁学诚. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-729.

Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng. Qinling Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-729 (in Chinese).

[61] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413-421.

Wang Yunliang, Zhang Chengjiang and Xiu Shuzhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17 (3): 413-421 (in Chinese with English abstract).

## Geochronology and geochemistry of the alkaline granite porphyry and diabase dikes in Huanglongpu area of Shaanxi Province: Petrogenesis and implications for tectonic environment

ZHAO Hai-jie<sup>1</sup>, MAO Jing-wen<sup>1</sup>, YE Hui-shou<sup>1</sup>, XIE Gui-qing<sup>1</sup>, YANG Zong-xi<sup>2</sup>

(1. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China*; 2. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing, 100037, China*)

**Abstract:** Granite porphyry and diabase dikes are outcropped sporadically in irregular shapes in Huanglongpu area, Shaanxi Province. Megacrysts of granite porphyry contain reddish orthoclase (~60%) and quartz (~40%), and the matrix comprises plagioclase (~15%) and biotite (~10%). The mineral assemblages of the diabase mainly consists of plagioclase (~45%), pyroxene (20%), amphibole (6%~7%) and quartz (~10%). The composition of the granite porphyry exhibits geochemical signatures of high SiO<sub>2</sub> (72.23%~74.86%) and alkali composition (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O=7.95%~10.25%) as well as peraluminous nature (A/CNK=1.32~1.72), and the projects of the composition in TAS shows that it belongs to alkaline granite porphyry. Its rocks are characterized by weakly inclined REE patterns with strong depleted Eu, enrichment of Th, U, Zr, Hf elements and depletion of large ion lithophile elements such as Ba, K, Sr, and high field strength element Ta. Its geochemical signatures and Pb isotopic compositions are similar to Mo-bearing granitoids in East Qingling region, implying that it was produced by partial melting of the lower crust and subjected to fractional crystallization during its evolution. The diabase contains SiO<sub>2</sub> between 48.78% and 48.92% and has preserved flat, identical and rightly inclined REE patterns without obvious depletion of Eu. High initial Sr (0.718~0.762) and extremely low εNd values (-19.53~-19.69) of the samples are consistent with things of the mafic dikes occurring in the Jiaodong gold Peninsula, indicating an enriched mantle source. SHRIMP zircon U-Pb dating was conducted for both granite porphyry and diabase, and yielded (131±1)Ma (MSWD=1.5, n=13) and (129±2)Ma (MSWD=0.71, n=12) of weighted mean ages respectively. They are considered to be the products of lithospheric extensional environment of intraplate in Early Cretaceous age.

**Key words:** granite porphyry; diabase dikes; SHRIMP zircon U-Pb age; geochemistry; Huanglongpu

**About the first author:** ZHAO Hai-jie, female, born in 1982, doctor candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit; E-mail: zhaohaijie\_610@163.com.