

西秦岭德乌鲁岩体成因及地质意义

——来自岩石地球化学的证据

冯小明, 李注苍, 齐建宏

(甘肃省地矿局 第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 西秦岭德乌鲁岩体位于夏河-合作断裂和力士山-围当山断裂之间, 寄主岩石以花岗闪长岩为主, 石英闪长岩和石英二长闪长岩次之, 并含有大量暗色微粒包体(MMEs)。对德乌鲁岩体开展了年代学研究, 获得的花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 225.9 ± 1.3 Ma, 表明该岩体形成于晚三叠世早期, 可能与扬子板块与华北板块陆陆碰撞有关。岩石地球化学研究表明, 寄主岩石具有高 K_2O 、低 Y、MgO 的特点, 而暗色微细粒包体(MMEs)具低 K_2O 、高 Y、MgO 的特点, 在微量元素蛛网图解和稀土元素配分模式上它们具有类似的曲线, 在 $Al_2O_3/MgO - SiO_2/MgO$ 图上呈现明显的线性关系, 表明这些岩石之间发生了明显的物质交换, 说明德乌鲁岩体中的石英闪长岩、石英二长闪长岩和花岗闪长岩是由镁铁质岩浆和长英质岩浆混合产生的, 可能与扬子板块和华北板块陆陆碰撞后伸展环境下发生的强烈壳-幔相互作用有关。MMEs 可能是镁铁质岩浆的残余物, 地球化学特征显示可能有幔源物质的加入, 并带来了 Au、Cu 等成矿元素, 在岩体形成演化过程中生成富含 Cu 和 Au 的含矿热液, 从而在德乌鲁岩体中形成了热液型铜金矿床。

关键词: 年代学; 地球化学; 岩浆混合; 德乌鲁岩体; 西秦岭

中图分类号: P597⁺.3; P588.12⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0347-16

The origin and geological significance of the Dewulu pluton in West Qinling: Evidence from petrogeochemistry

FENG Xiao-ming, LI Zhu-cang and QI Jian-hong

(The Third Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Dewulu pluton is located between Xiahe-Hezuo fault and Lishishan-Weidangshan fault. The host rock is predominantly composed of granodiorite with subordinate quartz diorite and quartz monzodiorite, and contains a large number of microgranular mafic enclaves (MMEs). Some Cu-Au deposits occur within the pluton and have been studied by many researchers; nevertheless, there are few researches on the pluton. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating on the granodiorite of the Dewulu pluton yielded an age of 225.9 ± 1.3 Ma, suggesting that the pluton was formed in the early period of late Triassic, and might have been related to the continental collision between the Yangtze and North China plates. Petrogeochemical studies show that host rocks are characterized by high K_2O and low Y and MgO, while the MMEs by low K_2O and high Y and MgO. Both host rocks and MMEs have similar features in trace element spider diagram and REE distribution pattern and obvious linear relationship on $Al_2O_3/MgO - SiO_2/MgO$ diagram. These phenomena indicate that material exchange took place in these rocks, and quartz diorite,

收稿日期: 2020-08-21; **接受日期:** 2021-02-05; **编辑:** 尹淑苹

基金项目: 甘肃省省财政调查评价项目(甘财建[2010-254])

作者简介: 冯小明(1969-), 男, 高级工程师, 从事区域地质矿产调查工作, E-mail: 2225396801@qq.com。

quartz monzodiorite and granodiorite were generated by the mixing of mafic and felsic magmas resulting from the strong crust-mantle interaction occurring in the extensional environment after the collision of the Yangtze and North China plates. MMEs may be the remnant of the parental mafic magma, and their geochemical characteristics show that they might have been derived from the mantle which was enriched in Au, Cu and other ore-forming elements. The Cu and Au enriched fluid was produced during the evolution of the mixed magma, and precipitated in the Dewulu pluton to form the hydrothermal Cu-Au deposits.

Key words: geochronology; geochemistry; magma mixing; Dewul pluton; Western Qinling

Fund support: Financial Services of Gansu Province(2010-254)

西秦岭处于扬子板块、华北板块和特提斯构造带的结合部位,呈楔形插入祁连和昆仑造山带内部(图1a),是秦岭构造带的西延部分。该区构造-岩浆活动强烈,发育大量三叠纪岩浆岩以及与这些岩浆岩关系密切的铜金矿床(付长垒等,2016)。不同学者对秦岭造山带的构造演化历史进行了研究,表明秦岭造山带自新元古代以来,经历了长期复杂的造山活动,于印支晚期发生板块汇聚并且碰撞造山,然后转向陆内构造造山体制(黄雄飞等,2013;徐东等,2014),形成了现今由华北板块、秦岭微板块、扬子板块以及商丹缝合带和阿尼玛卿-勉略缝合带组成的复合型造山带(张国伟等,1995;李金春等,2020)。西秦岭地区具有良好的成矿地质背景和成矿地质条件,形成了丰富多样的内生金属矿产,铜、金矿床(点)及其化探异常广布,构成了西秦岭重要的铜、金多金属成矿带(姚书振等,2002,2006;李宏伟,2018;戴帅军等,2018;史文全等,2018)。前人研究表明,西秦岭发育以印支早期(242~237 Ma)和印支晚期(225~210 Ma)为主的两期岩浆活动(秦江锋等,2011;徐学义等,2012;靳晓野等,2013;李康宁,2017)。这些岩浆活动及相关矿床的形成与古特提斯洋演化具有密切成因联系(闫臻等,2012;付长垒等,2016)。但目前,对于这些侵入岩产出的大地构造环境、岩浆成因、源区及成矿物质与深部岩浆岩物质交换的关系等尚存在很多争议(金维浚等,2005;李婷等,2012),对西秦岭地区印支期侵入岩与区内铜、金成矿关系认识不统一。笔者对西秦岭印支晚期德乌鲁岩体开展了岩石学、岩相学、岩石地球化学和同位素年代学研究,探讨该岩体地质成因,以期对深入认识夏河-合作一带岩浆活动与Cu-Au成矿作用的关系以及指导找矿提供支持。

1 地质背景

研究区位于西秦岭造山带的西段(图1),区内主体构造格架由北西西向断裂构造组成,多以脆韧性断裂为主,具有多期性活动的特点。区内地层、岩浆岩和矿产的分布与区域性断裂展布有密切关系。已发现的矿床和矿化点与夏河-合作断裂、力士山-围当山断裂和科才-临潭断裂等北西向断裂关系密切。区内出露地层主要有石炭系、二叠系、三叠系、新近系和第四系,下石炭统巴都组(C_1b)分布于力士山-围当山断裂北部,岩性为砂岩、砂砾岩和灰岩,为滨浅海相沉积岩;下二叠统毛毛隆组(P_1m)在区内主要分布于中部,岩性为中细粒砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质板岩,具浅海-半深海沉积特征;三叠系在区内主要分布于南侧,出露地层有下三叠统山尕岭群(T_1s)、中上三叠统古浪堤组(T_{2-3g})和上三叠统华日组(T_3hr)。山尕岭群(T_1s)岩性为板岩、粉砂质板岩,具深海-半深海相沉积特征;古浪堤组(T_{2-3g})岩性为泥硅质板岩、粉砂质板岩和砂岩,具有陆棚斜坡沉积相特征;华日组(T_3hr)分布于麦秀-德乌鲁一带,以酸性火山熔岩为主,火山碎屑岩次之;新近系甘肃群(NG)和第四系在区内呈零星分布。

区内印支期岩浆活动频繁,多以岩基、小岩株、岩枝或者岩脉及火山岩形式出露,呈北西向带状分布,与区域性构造线方向基本一致。区内侵入岩由西向东主要有江里沟正长花岗岩体、双朋花岗闪长岩体、阿姨山黑云母花岗岩体、德乌鲁花岗闪长岩体和美武二长花岗岩体等。

西秦岭地区矿产丰富,主要以金、铅、锌、锑、铜、铁等为主,其中铜、金为主要特色矿种(图2),这些中

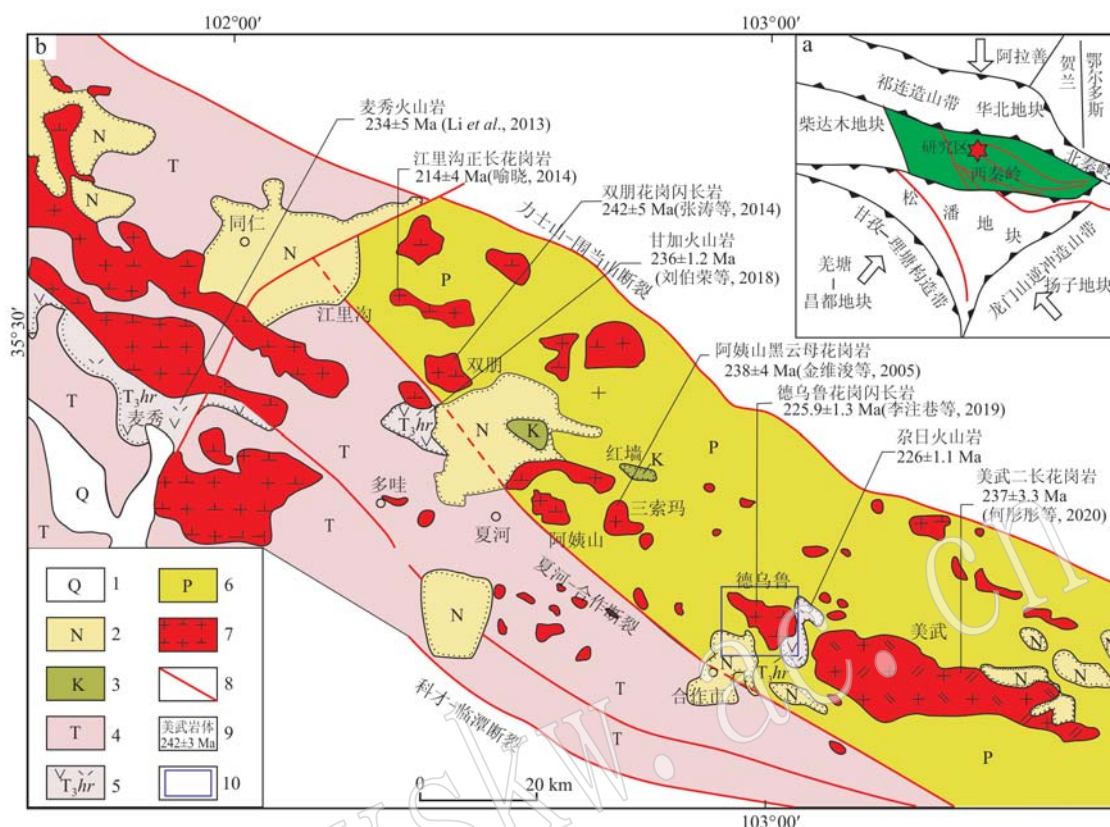


图1 西秦岭夏河-合作一带区域构造图(a)和地质简图(b)(据李康宁, 2017 修改)

Fig. 1 Regional tectonic map (a) and geological map (b) of the Hezuo-Xiahe area in West Qinling (after Li Kangning, 2017)

1—第四系; 2—新近系; 3—白垩系; 4—三叠系; 5—上三叠统华日组; 6—二叠系; 7—花岗岩类; 8—西秦岭范围; 9—断裂;
10—岩体及年龄

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Cretaceous; 4—Triassic; 5—Upper Triassic Huari Formation; 6—Permian; 7—granite; 8—West Qinling;
9—fracture; 10—name and age of rock body

低温热液铜金矿床主要发育在二叠系和三叠系及阿姨山、德乌鲁等岩体的内外接触带和岩体之中。在德乌鲁岩体中已经发现以地南大型铜金矿床(周俊烈等, 2010; 黄启富, 2016)、录斗艘中型金矿床(周杰斌, 2011)、拉不在卡金矿点、吉利金矿点及德乌鲁铜矿点(刘升有, 2015)、南办铜矿点等。而德乌鲁岩体与这些铜金矿床的形成关系密切, 德乌鲁岩体中SN向铜金矿体明显受近SN向次级断裂构造控制。江志成(2017)在岗盆金矿获得黄铁矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $229.9 \pm 4.7 \sim 225.3 \pm 3.4$ Ma, 与西秦岭地区铜金多金属矿成矿高峰期年龄基本一致(毛景文等, 2012), 时代为晚三叠世。

2 岩体地质及岩石学特征

德乌鲁岩体出露于夏河-合作断裂带的北侧, 走向为NW向, 长约8.5 km, 宽度为0.8~4.0 km, 出露

面积约 18.9 km^2 。德乌鲁岩体侵入于下二叠统毛毛隆组 and 上三叠统华日组中(李注苍等, 2016), 岩体边部具较强的角岩化和矽卡岩化。岩体主要由花岗闪长岩($\gamma\delta T_3$)、石英二长闪长岩($\eta\delta\sigma T_3$)和石英闪长岩($\delta\sigma T_3$)组成(图2)。花岗闪长岩为主体岩性, 在岩体中分布面积最大, 石英闪长岩呈近圆状分布于岩体的东部, 而石英二长闪长岩位于岩体的北部, 呈不规则状产出。在野外调查中查明在石英闪长岩、石英二长闪长岩和花岗闪长岩中都有大量的暗色微细粒包体(MMEs)(图2、图3a、图3c), 因此, 暗色微细粒包体的寄主岩石为石英闪长岩、石英二长闪长岩和花岗闪长岩。暗色微细粒包体大小不一, 其形态多呈不规则状(3a)和椭圆状(图3c)。

花岗闪长岩($\gamma\delta T_3$): 灰色-灰白色, 中细粒结构(图3a、3d), 块状构造。主要矿物斜长石呈自形的板条状、短柱状和近粒状形态, 粒径2~3 mm, 含量为49%~52%(体积分数, 下同), 发育聚片双晶和环带;

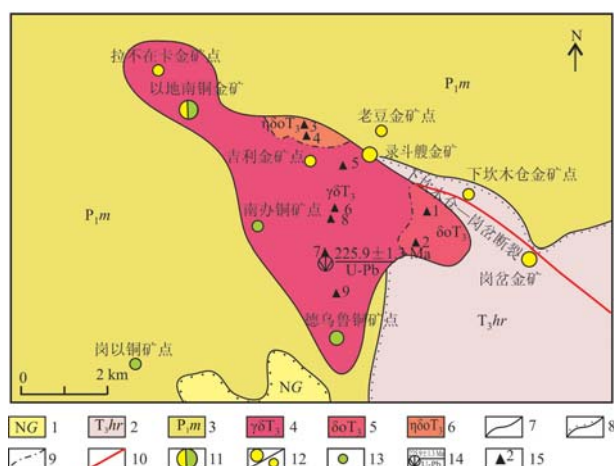


图2 德乌鲁岩体地质图

Fig. 2 Geological map of the Dewulu pluton

1—新近系甘肃群; 2—上三叠统华日组; 3—下二叠统毛毛隆组; 4—花岗闪长岩; 5—石英闪长岩; 6—石英二长闪长岩; 7—侵入界线; 8—不整合地质界线; 9—脉动侵入界线; 10—断层; 11—大型铜金矿; 12—中型金矿/金矿点; 13—铜矿点; 14—同位素年龄及测试方法; 15—采样位置及编号

1—Neogene Gansu Group; 2—Upper Triassic Huari Formation; 3—Lower Triassic Maomao Formation; 4—granodiorite; 5—quartz diorite; 6—quartz monzodiorite; 7—intrusive boundary; 8—unconformable boundary; 9—pulsating intrusion boundary; 10—fault; 11—large-sized Cu-Au deposit; 12—medium-sized Au deposit/Au ore spot; 13—Cu ore spot; 14—iso-topes age and test method; 15—sampling site and its serial number

钾长石为正长石和条纹长石, 条纹长石具不规则的条纹构造, 粒径1~2 mm, 含量10%; 石英多为不规则的它形粒状, 粒径0.2~0.5 mm, 含量20%; 角闪石为自形的长柱状, 轻微绿泥石化, 含量7%~10%, 黑云母呈鳞片状, 含量10%。副矿物有磷灰石、锆石等。

石英闪长岩($\delta\delta T_3$): 灰色, 细粒结构(图3b、3e), 块状构造。斜长石呈自形的板条状、短柱状, 粒径1~2 mm, 含量51%~65%; 钾长石卡式双晶发育, 局部微高岭土化, 粒径1~2 mm, 含量3%~8%; 石英多为不规则的它形粒状, 粒径小于0.5 mm, 含量6%~10%; 角闪石呈长柱状, 含量8%~15%; 黑云母呈鳞片状, 粒径在1.0 mm, 含量10%~22%。副矿物为锆石、榍石、磷灰石等。

石英二长闪长岩($\eta\delta\delta T_3$): 灰色-灰白色, 中细粒结构(图3c、3f), 块状构造。斜长石呈板条状、短柱状, 粒径2~4 mm, 含量43%~61%; 钾长石为他形晶粒状, 粒径1~3.0 mm, 含量10%~20%; 石英呈它形粒状分布于其他矿物的空隙中, 含量10%~15%, 粒径0.2~0.5 mm; 角闪石呈长柱状, 含量5%~15%; 黑云母含量8%~23%。副矿物为榍石、磷灰石等。

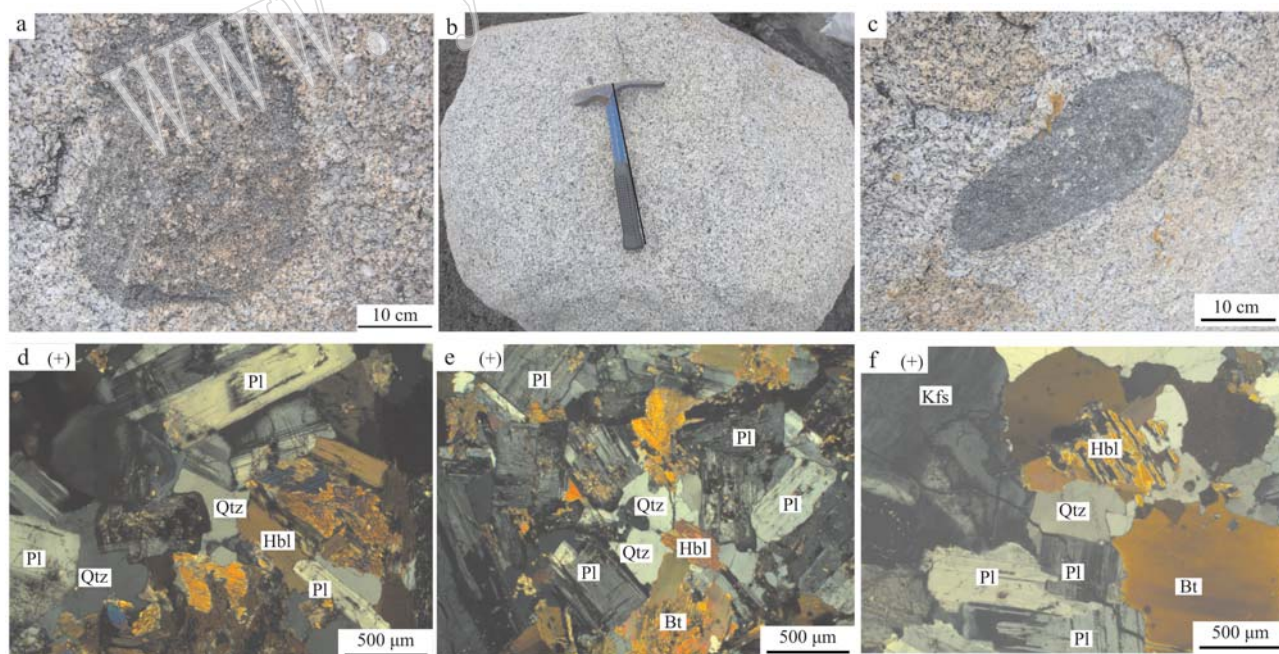


图3 德乌鲁岩体的岩相学特征

Fig. 3 Characteristics of petrography for the Dewulu pluton

a—花岗闪长岩中的暗色微细包体; b—石英闪长岩; c—石英二长闪长岩中的暗色包体; d—中细粒花岗闪长岩; e—细粒石英闪长岩; f—中细粒石英二长闪长岩; Hbl—角闪石; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母; Qtz—石英

a—dark microgranular enclaves in granodiorite; b—quartz diorite; c—dark microgranular enclaves in quartz monzodiorite; d—medium-fine grained granodiorite; e—fine-grained quartz diorite; f—medium-fine grained quartz monzodiorite; Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Bt—biotite; Qtz—quartz

暗色微细粒包体(MMEs):岩性为闪长岩,具有似斑状结构。斑晶主要为角闪石、斜长石、黑云母和石英,粒径1~2 mm,其中角闪石含量10%、斜长石含量5%、黑云母含量3%、石英含量5%。基质成分为斜长石、角闪石和黑云母,粒径小于1 mm,为微细粒。斜长石含量45%、角闪石含量10%、黑云母含量20%。MMEs中的黑云母、斜长石、石英斑晶有类似于捕虏晶的结构特点,溶蚀交代结构明显。角闪石等暗色矿物围绕石英斑晶结晶形成眼球状构造,斜长石晶体边部具有较典型的生长环带构造。暗色微细粒包体中可见长针柱状磷灰石,插在其他矿物之间,晶形完好。在暗色微细粒包体颜色较深与寄主岩呈截然的接触关系,发育典型的淬冷边。另外一些暗色微细粒包体颜色较浅,与寄主岩石接触关系模糊,呈渐变过渡关系,表明此类暗色微细粒包体与寄主岩石之间发生过较明显的成分交换。颜色较深暗色微细粒包体在德乌鲁岩体占比为4%,颜色较浅的暗色微细粒包体在德乌鲁岩体中占比为10%。

3 样品采集与分析方法

采集主量元素、微量元素和稀土元素样品共9件,其中石英闪长岩1件,石英二长闪长岩2件,花岗闪长岩3件,暗色微细粒包体3件,锆石 U-Pb 同位素测试样品1件, Sr-Nd 同位素测试样品2件。具体采集位置详见图2所示。用于锆石 U-Pb 同位素测定的样品为新鲜花岗闪长岩,在河北省廊坊市区域地质矿产调查研究所实验室分选出锆石单矿物。锆石样品的制靶、锆石阴极发光(CL)图像照相及锆

石 U-Pb 同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。详细的分析过程和参数见相关文献(Horn *et al.*, 2000; 王顺安等, 2016)。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER 4.0 软件,并采用 Andersen (2002) 软件对测试数据进行普通铅校正,年龄计算及谐和图利用 Isoplot 3.0 软件处理分析数据(Ludwig, 2003),得到谐和曲线。主量元素、微量元素和稀土元素分析由国土资源部兰州矿产资源监督检测中心实验室完成。其中主量元素采用 X 射线荧光光谱仪分析,仪器型号为 ZSX Primus II。X 射线荧光光谱分析,相对误差小于2%。微量元素及稀土元素的分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成,仪器型号为 Agilent 7500a,微量元素分析相对误差小于5%。对石英闪长岩和花岗闪长岩2件样品进行 Sr-Nd 同位素测试,样品在国土资源部中南矿产资源监督检测中心采用 Phoenix 热表面电离质谱仪测定完成。

4 分析结果

4.1 花岗闪长岩锆石 U-Pb 定年

德乌鲁岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄样品 TW-1 的采样点地理坐标为北纬 35°04.55'、东经 102°59.01'。锆石晶体为浅黄色-无色,大部分颗粒较大,呈自形-半自形晶,个别颗粒较小,呈浑圆状。锆石 CL 图像显示(图4),生长环带清晰发育明显的岩浆振荡环带和明暗相间的条纹,为岩浆成因锆石(胡振华等, 2020),该岩浆岩锆石的 U-Pb 同位素体系保持完全封闭,未受后期变质作用扰动。16个测

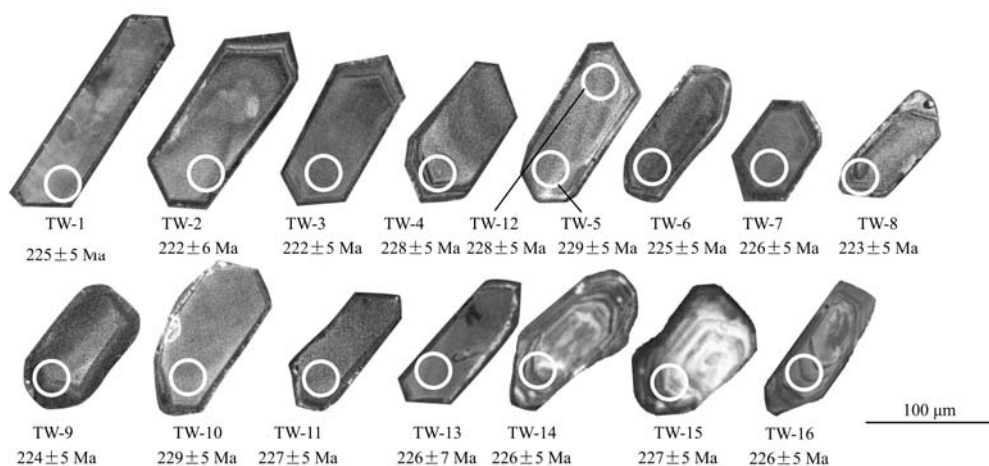


图4 德乌鲁杂岩体锆石的阴极发光图像
Fig. 4 Zircon CL images of the Dewulu pluton

表 1 德乌鲁岩体花岗岩闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for granodiorite from the Dewulu pluton

点号	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值										年龄/Ma					
	U	Pb	Th			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ					
TW-01	18.02	78.42	216.66	0.36	0.049 78	0.001 95	0.244 22	0.009 45	0.035 56	0.000 84	0.014 13	0.001 20	185	48	222	8	225	5	284	24	
TW-02	20.62	56.68	162.62	0.35	0.050 84	0.002 47	0.245 93	0.011 65	0.035 07	0.000 89	0.009 62	0.001 25	234	64	223	9	222	6	194	25	
TW-03	12.32	59.10	136.73	0.43	0.050 69	0.002 08	0.245 31	0.009 91	0.035 08	0.000 84	0.011 41	0.001 15	227	51	223	8	222	5	229	23	
TW-04	33.45	155.71	314.52	0.50	0.050 81	0.001 67	0.252 18	0.008 25	0.035 98	0.000 82	0.011 65	0.000 75	232	37	228	7	228	5	234	15	
TW-05	16.75	89.18	178.01	0.50	0.049 63	0.001 72	0.247 36	0.008 50	0.036 12	0.000 83	0.012 55	0.000 90	178	40	224	7	229	5	252	18	
TW-06	19.39	82.80	188.51	0.44	0.049 93	0.002 13	0.244 53	0.010 25	0.035 50	0.000 85	0.011 89	0.001 10	192	54	222	8	225	5	239	22	
TW-07	17.33	82.13	159.55	0.51	0.051 39	0.001 48	0.252 84	0.007 37	0.035 66	0.000 79	0.011 74	0.000 70	258	31	229	6	226	5	236	14	
TW-08	23.43	106.49	278.24	0.38	0.047 75	0.001 93	0.231 70	0.009 23	0.035 18	0.000 83	0.011 71	0.001 11	87	51	212	8	223	5	235	22	
TW-09	18.79	77.23	219.22	0.35	0.051 58	0.001 58	0.251 44	0.007 73	0.035 34	0.000 79	0.011 73	0.000 62	267	34	228	6	224	5	236	12	
TW-10	25.78	130.39	225.27	0.58	0.050 34	0.001 83	0.250 76	0.009 06	0.036 10	0.000 84	0.012 50	0.000 95	211	43	227	7	229	5	251	19	
TW-11	18.83	86.62	198.86	0.44	0.049 88	0.001 69	0.246 19	0.008 33	0.035 77	0.000 82	0.011 51	0.000 85	189	39	223	7	227	5	231	17	
TW-12	25.88	122.88	284.98	0.43	0.049 90	0.001 51	0.247 74	0.007 53	0.035 99	0.000 81	0.012 39	0.000 67	190	34	225	6	228	5	249	13	
TW-13	25.84	125.45	241.55	0.52	0.051 55	0.004 35	0.253 90	0.020 62	0.035 70	0.001 19	0.014 53	0.003 06	266	125	230	17	226	7	292	61	
TW-14	14.74	58.58	160.36	0.37	0.049 89	0.002 11	0.245 42	0.010 20	0.035 66	0.000 86	0.013 33	0.001 15	190	53	223	8	226	5	268	23	
TW-15	14.13	53.62	142.09	0.38	0.051 34	0.001 91	0.253 86	0.009 35	0.035 84	0.000 84	0.011 70	0.001 03	256	44	230	8	227	5	235	21	
TW-16	16.71	81.65	176.74	0.46	0.051 91	0.002 30	0.255 83	0.011 10	0.035 72	0.000 88	0.010 84	0.001 25	281	56	231	9	226	5	218	25	

点数据谐和度较好(表1),数据点在谐和图上整体落在谐和曲线上。16个测定数据点拟合的直线与谐和曲线的交点年龄为 226.0 ± 5.2 Ma, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 225.9 ± 1.3 Ma (95%置信度;

MSWD=0.75)(图5),代表了其结晶年龄,形成时代为晚三叠世,为西秦岭印支晚期大规模岩浆活动产物。

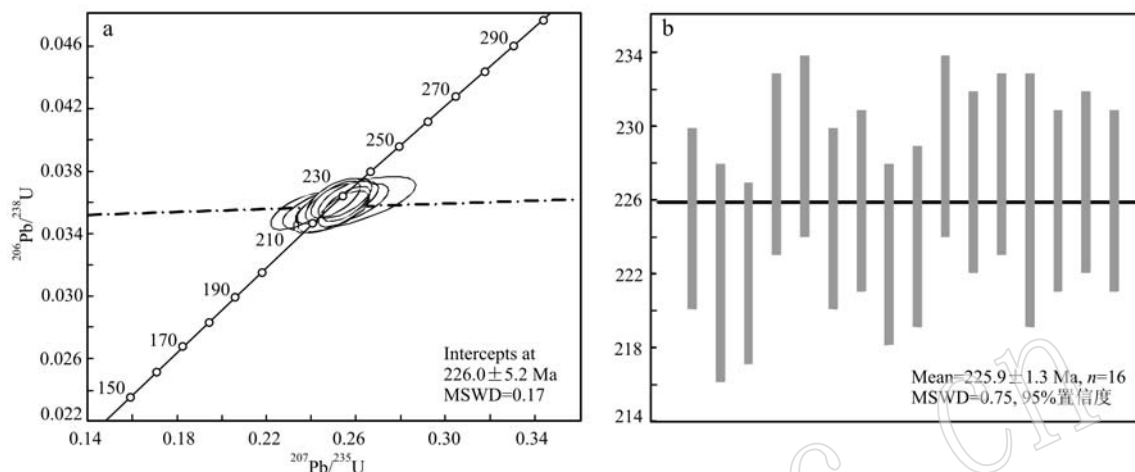


图5 德乌鲁花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄图(b)

Fig. 5 Diagrams of LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia age (a) and weighted average age (b) for the Dewulu pluton

4.2 主量元素地球化学特征

从主量元素分析结果(表2)可以看出德乌鲁岩体具有以下特点:①寄主岩石 SiO_2 含量较高,为 63.16%~65.96%,MMEs 的 SiO_2 含量较低,为 56.28%~58.60%;②寄主岩石 K_2O 含量较高,为 2.69%~3.86%,MMEs 的 K_2O 含量较低,为 1.65%~2.98%;③寄主岩石 TiO_2 含量较低,为 0.50%~0.62%,MMEs 的 TiO_2 含量高,为 0.59%~0.74%;④寄主岩石 MgO 含量低,为 1.68%~3.81%, $\text{Mg}^\#$ 为 49.76~60.43,而 MMEs 的 MgO 含量较高,为 4.94%~6.61%, $\text{Mg}^\#$ 为 60.31~85.24;⑤寄主岩石 MnO 含量低,为 0.05%~0.08%,MMEs 的 MnO 含量高,为 0.10%~0.15%;⑥寄主岩石的里特曼指数变化范围不大, σ 值(1.58~2.23)<4,为钙碱性系列岩石,而 MMEs 的 σ 值变化较大,为 1.36~5.40。总的来说,寄主岩石的 SiO_2 、 K_2O 含量明显高于 MMEs,而寄主岩石的 TiO_2 、 MgO 、 MnO 低于 MMEs。

在哈克图解中(图6), TiO_2 、 FeO^T 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Cr 、 Ni 与 SiO_2 含量之间具有明显的负相关关系, Co 与 Th 也具负相关关系,而 Na_2O 与 SiO_2 含量之间具正相关关系。

4.3 微量和稀土元素特征

在稀土元素配分曲线图(图7a)上,德乌鲁岩体总体显示轻稀土明显富集、重稀土较为亏损型。稀

土总量 $124.32 \times 10^{-6} \sim 184.87 \times 10^{-6}$;LREE/HREE 为 4.21~9.22,表示岩浆分异程度较弱。MMEs 与寄主岩石具有不同的分配模式,都表现为向右倾斜,但重稀土元素部分的曲线较平缓。MMEs 曲线区别不大,稀土元素含量基本一致,轻稀土元素和重稀土元素分馏强烈。寄主岩石 $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N}$ 为 13.14~32.22, $(\text{La}/\text{Sm})_\text{N}$ 为 3.88~4.64,而 MMEs 的 $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N}$ 为 6.46~11.60, $(\text{La}/\text{Sm})_\text{N}$ 为 2.75~3.56,总体都低于寄主岩石。这表明幔源基性岩浆与酸性岩浆混合后,发生了较强烈的均一化和轻、重稀土元素的分馏异常,均一化作用使酸性花岗岩中的轻稀土元素带入基性端员,导致轻稀土元素在 MMEs 异常富集。同样,基性端员的重稀土元素带入花岗岩中,形成了岩浆混合使得暗色微细粒包体和酸性花岗岩中重稀土元素的异常富集。德乌鲁岩体的 δEu 值为 0.47~0.98,存在弱的负 Eu 异常,表明在岩浆分馏结晶作用中有斜长石分离出来,但是岩浆分异程度相对不高。

从微量元素分析结果(表2)可以看出,寄主岩石 Sr 含量 $262.00 \times 10^{-6} \sim 477.00 \times 10^{-6}$,相对较高,MMEs 的 Sr 含量 $325.00 \times 10^{-6} \sim 395.00 \times 10^{-6}$ 。而寄主岩石 Y 含量较低,为 $7.40 \times 10^{-6} \sim 16.84 \times 10^{-6}$,MMEs 的 Y 含量较高,为 $17.07 \times 10^{-6} \sim 26.20 \times 10^{-6}$ 。相容元素 Cr、Ni 含量比较高,寄主岩石的 Cr、Ni 含量分别为 $18.20 \times 10^{-6} \sim 129.28 \times 10^{-6}$ 、 $5.10 \times 10^{-6} \sim$

表2 德乌鲁岩体主量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Analytical results of major elements ($w_B/\%$), trace elements and REE ($w_B/10^{-6}$) for the Dewulu pluton

岩石名称	石英闪长岩	石英二长闪长岩	花岗闪长岩				暗色包体		
样品号	QWX-2	QWX-3	QWX-4	QWX-5	QWX-6	QWX-7	QWX-1	QWX-8	QWX-9
SiO ₂	63.16	64.60	65.15	65.96	65.31	65.68	58.60	56.28	58.18
TiO ₂	0.61	0.57	0.52	0.50	0.62	0.56	0.74	0.59	0.73
Al ₂ O ₃	14.48	14.72	14.23	14.51	16.76	16.48	14.86	15.64	17.13
Fe ₂ O ₃	0.55	0.56	0.63	0.59	0.07	0.16	0.44	4.92	4.32
FeO	4.55	4.39	3.89	3.87	3.18	2.98	6.29	2.06	2.26
MnO	0.08	0.08	0.08	0.07	0.05	0.05	0.11	0.15	0.10
MgO	3.81	3.54	3.30	3.24	1.75	1.68	5.31	6.61	4.94
CaO	4.32	4.25	3.96	3.99	4.01	3.59	5.94	6.76	3.67
Na ₂ O	2.84	3.24	2.88	3.25	2.84	2.93	1.80	6.78	2.90
K ₂ O	3.86	2.69	3.86	2.78	3.73	3.65	2.98	1.69	1.65
P ₂ O ₅	0.14	0.12	0.12	0.10	0.14	0.13	0.15	0.12	0.18
H ₂ O ⁺	0.54	0.46	0.32	0.12	0.96	1.04	1.20	0.22	0.34
H ₂ O ⁻	0.43	0.24	0.31	0.27	0.14	0.12	0.62	0.30	0.53
Total	99.37	99.47	99.24	99.25	99.56	99.05	99.04	102.12	96.93
FeO ^T	5.04	4.89	4.46	4.40	3.24	3.12	6.69	6.49	6.15
A/NKC	0.91	1.02	0.92	1.02	1.10	1.12	0.98	0.74	1.48
σ	2.23	1.63	2.05	1.58	1.93	1.91	1.46	5.40	1.36
Ba	493	474	437	454	608	608	326	143	350
Rb	126.40	136.70	141.00	141.00	157.00	171.00	73.50	127.00	63.70
Sr	300	291	269	262	477	466	325	342	395
Y	15.89	16.68	16.84	15.86	8.30	7.40	17.07	26.20	19.01
Nb	10.25	10.46	9.94	9.95	9.40	9.50	9.35	7.80	8.38
Th	15.84	16.57	19.77	18.68	18.90	15.70	9.89	6.77	9.30
Ni	37.37	35.47	32.06	31.39	5.10	5.80	49.82	69.10	76.30
Cr	129.28	123.42	105.21	108.54	18.20	22.82	198.20	378.02	170.01
Hf	6.10	6.50	6.00	6.00	7.30	6.70	5.10	3.85	5.38
Ta	1.20	1.10	1.40	1.10	1.20	1.10	0.70	0.77	0.68
Co	15.31	14.68	13.39	12.81	11.81	10.6.03	22.63	25.02	17.01
Zr	161.69	167.78	163.69	158.86	189.01	159.02	170.25	133.01	197.03
Cs	12.01	13.19	13.51	15.56	13.51	15.12	11.64	17.82	10.01
La	32.32	33.33	37.89	33.28	35.10	28.20	29.25	25.41	27.61
Ce	62.71	64.90	72.15	63.93	75.50	50.50	57.55	59.72	54.63
Pr	7.52	7.86	8.43	7.52	7.43	5.77	7.08	7.53	6.27
Nd	27.38	28.57	30.07	26.93	28.60	20.50	26.98	29.90	25.20
Sm	5.10	5.41	5.50	4.96	5.04	3.82	5.22	5.81	4.87
Eu	0.89	0.88	0.88	0.84	1.30	1.15	1.04	0.85	1.17
Gd	4.28	4.28	4.58	4.12	4.02	3.17	4.30	5.16	4.22
Tb	0.62	0.68	0.66	0.60	0.45	0.38	0.65	0.81	0.60
Dy	3.20	3.34	3.31	3.15	1.82	1.68	3.49	4.67	3.31
Ho	0.59	0.61	0.62	0.59	0.33	0.26	0.64	0.90	0.64
Er	1.71	1.75	1.73	1.65	0.84	0.72	1.78	2.57	1.90
Tm	0.26	0.27	0.27	0.26	0.11	0.10	0.27	0.37	0.26
Yb	1.57	1.71	1.68	1.66	0.77	0.59	1.70	2.65	1.79
Lu	0.24	0.26	0.26	0.25	0.11	0.08	0.27	0.37	0.26
LREE	135.92	140.95	154.92	137.46	152.97	109.94	127.12	129.19	119.71
HREE	28.36	29.58	29.95	28.14	16.75	14.38	30.17	17.50	12.98
Σ REE	164.28	170.53	184.87	165.60	169.72	124.32	157.29	146.69	132.69
LREE/HREE	4.79	4.77	5.17	4.88	9.13	7.65	4.21	7.38	9.22
δ Eu	0.57	0.54	0.52	0.55	0.86	0.98	0.65	0.47	0.77
(La/Yb) _N	13.88	13.14	15.21	13.52	30.73	32.22	11.60	6.46	10.40
(La/Sm) _N	3.99	3.88	4.33	4.22	4.38	4.64	3.52	2.75	3.56
Nb/Ta	8.54	9.51	7.10	9.05	7.83	8.64	13.36	10.13	12.32
Zr/Nb	15.77	16.04	16.47	15.97	20.11	16.74	18.21	17.05	23.51
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04
Zr/Hf	26.51	25.81	27.28	26.48	25.89	23.73	33.38	34.55	36.62

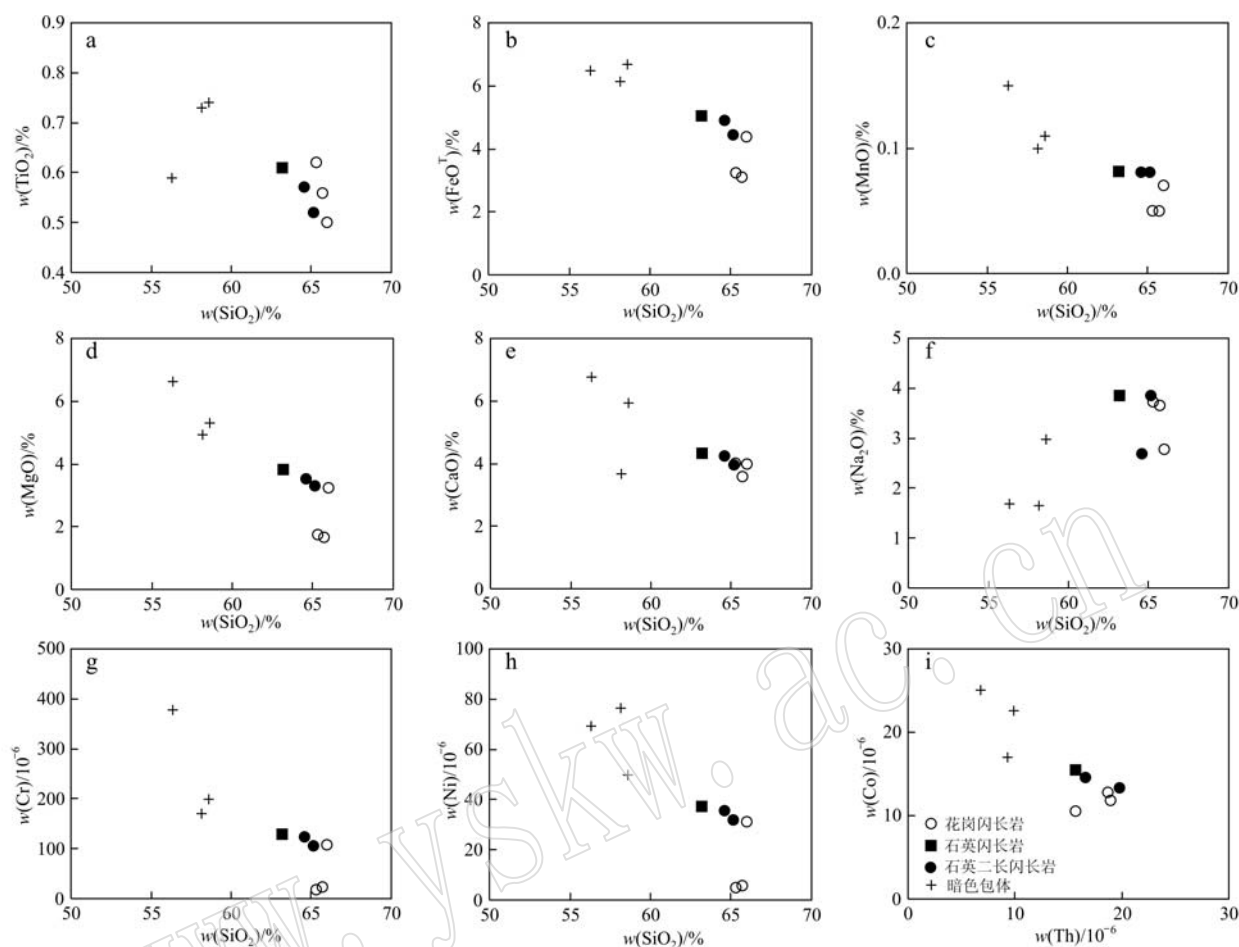


图6 德乌鲁岩体的哈克图解

Fig. 6 Harker diagrams for Dewulu pluton

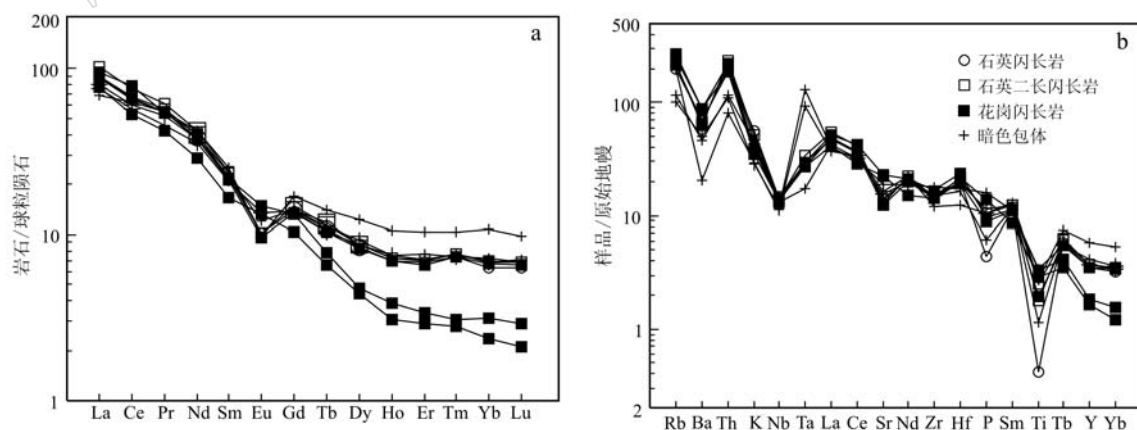


图7 德乌鲁岩体的稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989; 球粒陨石值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 7 The REE distribution patterns (a) and trace elements spider diagram (b) for the Dewulu pluton (primitive mantle normalization values after Sun and McDonough, 1989; chondrite normalization values after Taylor and McLennan, 1985)

37.37×10^{-6} ; MMEs 的 Cr 和 Ni 含量分别为 $170.01 \times 10^{-6} \sim 378.02 \times 10^{-6}$ 、 $49.82 \times 10^{-6} \sim 76.30 \times 10^{-6}$ 。原始

地幔标准化微量元素蛛网图解(图 7b)显示:MMEs 与寄主岩石具有类似的曲线,都明显富集大离子亲

石元素 Rb、Th、U 和轻稀土元素,亏损 Ba、K、Nb、Sr、P 和 Y,无明显 Zr、Hf 异常,具有低 Sr、Y 的特点。

4.4 Sr-Nd 同位素分析结果

德乌鲁岩体中的石英闪长岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709\,008$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\,037$;花岗闪长岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.711\,758$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511\,932$ (表

3)。它们的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.708$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} < 0.512\,6$,暗示其源区可能以下地壳为主,但有地幔物质加入。石英闪长岩和花岗闪长岩的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值分别为 -11.71 、 -12.57 ,均小于0, $\varepsilon\text{Sr}(t)$ 值分别为 63.99 、 103.02 ,均大于0,暗示其成因与富钾的玄武质下地壳的部分熔融有关(靳晓野等,2013)。

表3 德乌鲁岩体花岗岩类 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the granitoids in the Dewulu pluton

样号	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\varepsilon\text{Sr}(t)$	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\varepsilon\text{Nd}(t)$	t_{2DM}/Ga
TW-1	120.40	309.00	1.145	0.709 008	0.000 013	1.1450	63.99	5.40	26.38	0.107	0.512 037	0.000 007	0.512 036	-11.71	1.59
TW-2	142.30	279.00	1.184	0.711 758	0.000 009	1.1840	103.02	5.60	32.07	0.122	0.511 932	0.000 007	0.511 992	-12.57	1.92

注:球粒陨石均一库(CHUR)值用 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.084\,7$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704\,5$; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.196\,7$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\,638$; $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Steiger and Jäer, 1977); $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Lugmair and Marti, 1978); $I_{\text{Sr}}(t)$ 和 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 在 $t = 132 \text{ Ma}$ 下换算;单阶段模式年龄(t_{DM})或者二阶段模式年龄(t_{2DM})计算方法根据 Jahn 等(1999)。

5 讨论

5.1 德乌鲁岩体成因

德乌鲁岩体中含有大量的 MMEs,通常情况下,形成 MMEs 的可能成因有:镁铁质岩浆在结晶过程中形成的同源包体;花岗质岩浆在上升过程中夹带的难熔惰性组分;注入到花岗岩熔体中的镁铁质熔体(Lowell and Young, 1999)。德乌鲁岩体中的 MMEs 和寄主岩石具有相似的稀土元素总量、稀土元素与微量元素配分模式,表明这些 MMEs 不是堆晶矿物的同源产物或者同源岩浆的早期结晶产物。

产于德乌鲁岩体中的 MMEs 最常见的形状为圆形、浑圆状、椭圆状、不规则状、葫芦状等,包圆度良好,而球度变化极大这一事实,恰好说明其最初应该是粥状的基性岩浆,而寄主岩石是由酸性花岗岩类岩浆形成。由此看来,MMEs 是由于基性岩浆混入酸性岩浆之后被携带、搬运发生分裂而形成的,犹如两种粥状物质混合在一起造成形态变化一样,其形态特征记录了 MMEs 被“包裹”时的物理状态(贾儒雅等,2019)。

MMEs 中的斜长石、石英斑晶有类似于捕虏晶的结构特点,溶蚀交代结构明显,角闪石等暗色矿物围绕石英斑晶结晶形成眼球状构造,斜长石晶体边部具有较典型的生长环带构造,MMEs 中可见长针柱状磷灰石,插在其他矿物之间,晶形完好。在岩相学研究中,镜下观察到的针状磷灰石和具有复杂的振荡分区和重复吸收表面的斜长石,常被解释为不平衡

的结构证据,并且表明熔体在晶体生长过程中发生过化学或热的变化,很有可能是岩浆混合的结果(Baxter and Feely, 2002; Grogan and Reavy, 2002)。在 MMEs 中有针状的磷灰石(靳晓野等,2013),表明其是在淬冷状态下结晶形成的,说明形成 MMEs 的基性岩浆与寄主酸性岩浆有较大的温度差,结晶过程中有快速的放热现象,这从一个侧面证明了德乌鲁岩体有岩浆混合作用。总的来说,MMEs 比寄主岩石具有较低的 SiO_2 含量($56.28\% \sim 58.60\%$),但具更高的全铁($6.15\% \sim 6.69\%$)和 MgO ($4.94\% \sim 6.61\%$)含量,因此,MMEs 可能是花岗闪长岩的基性端员。

MMEs 和寄主岩石的 Nb/Ta 值分别为 $10.13 \sim 13.36$ 、 $7.10 \sim 9.51$,MMEs 的 Nb/Ta 值比寄主岩石的 Nb/Ta 值高,寄主岩石接近下地壳值(平均 8.3 , Rudnick and Gao, 2003)。这表明寄主岩石来源于下地壳,而 MMEs 来源于地幔。此外,这些岩石的 $\text{Ti}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Zr/Nb 值相似。 SiO_2/MgO 与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 之间呈现明显的线性关系(图8),表明这些岩石之间发生了明显的物质交换,说明 MMEs 可能是镁铁质岩浆的残余物,而石英闪长岩、石英二长闪长岩和花岗闪长岩演化与其关系密切。

在 $\text{FeO}^T - \text{MgO}$ 图中(图9),MMEs、石英闪长岩、石英二长闪长岩以及花岗闪长岩都投在趋势 I 的演化线上,表明了寄主岩石(花岗闪长岩)参与了化学的和/或机械的混合作用过程。这也支持了前面的认识,即花岗闪长岩和石英闪长岩、石英二长闪长岩是镁铁质和长英质岩浆的混合产物,其中

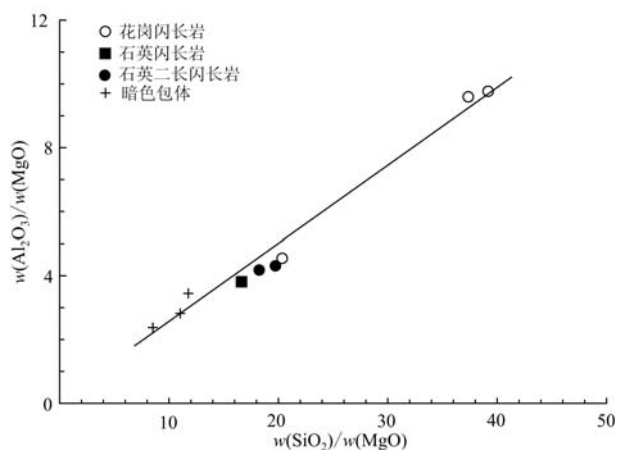


图8 花岗闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩和暗色包体的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO} - \text{SiO}_2/\text{MgO}$ 图

Fig. 8 Plots of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ versus SiO_2/MgO of the granodiorites and their MMEs

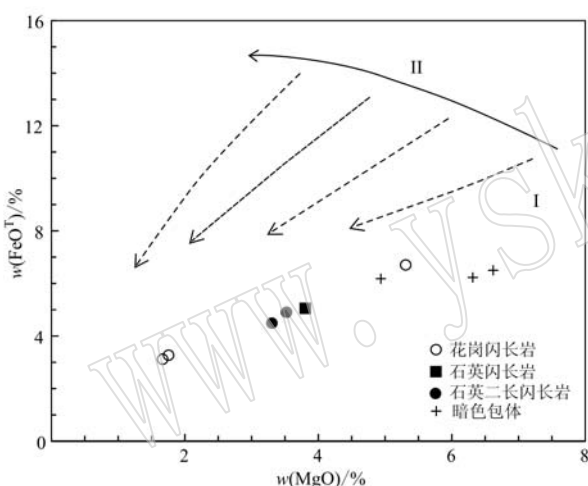


图9 花岗闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩和暗色包体的 $\text{FeO}^T - \text{MgO}$ 图

Fig. 9 Plot of FeO^T versus MgO for the granodiorites, quartz diorite, quartz monzodiorite and their enclosed magmatic mafic enclaves (MMEs)

I—包体的混合演化趋势; II—更偏镁铁质包体的拉斑玄武质演化趋势 (Zorpi *et al.*, 1989)

I—hybridization trend of the enclaves; II—tholeiitic evolutionary trend of the more mafic (less hybridized) enclaves (after Zorpi *et al.*, 1989)

MMEs 代表了镁铁质岩浆。因此,笔者认为花岗闪长岩中的 MMEs 是通过混合作用将镁铁质岩浆组分注入长英质岩浆房的产物。

作为最接近酸性端员的寄主岩石,有 2 件样品具有高 Sr 低 Y 的特征,其 Sr 和 Y 的含量分别为 $466 \times 10^{-6} \sim 477 \times 10^{-6}$ 和 $7.40 \times 10^{-6} \sim 8.30 \times 10^{-6}$,具有埃达克质岩的特征(图 10),表明这些酸性端员的岩石其源岩可能来自加厚的下地壳,这与前

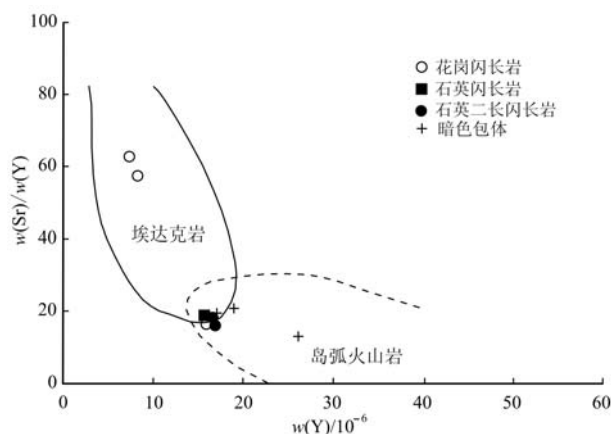


图10 德乌鲁岩体 Sr/Y - Y 图解(底图据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 10 Plot of Sr/Y versus Y for Dewulu pluton (base map after Defant and Drummond, 1990)

人观点认为区域上同期岩体主要为下地壳熔融产物相一致(徐学义等, 2012)。

关于 MMEs 的源区,前已述及,它来自基性端员,并与酸性端员有混合,只是比例不大而已。从 MMEs 的微量元素比值上可以看到,其 Nb/Ta 值为 10.13~13.36,低于地幔的 Nb/Ta 值 17.5 ± 2.0 (Sun and McDonough, 1989),但是介于下地壳值 (8.5, Rudnick and Gao, 2003) 与地幔值之间。这表明基性端员有可能来自地幔,幔源高温岩浆底侵至基性下地壳,既能下地壳的熔融提供足够的热量,同时幔源岩浆也与下地壳熔融出来的酸性岩浆发生了混合作用。

5.2 该期岩浆活动与金铜成矿作用关系

众多研究结果显示,德乌鲁岩体周边的铜、金矿床成矿与岩浆活动关系密切,成矿流体、成矿物质主要来源于印支期的岩浆热液活动(刘升有, 2015; 宋开瑞, 2016; 黄启富, 2016; 江志成, 2017)。就西秦岭夏河-合作一带岩浆活动和成矿作用资料显示:西秦岭麦秀高镁安山岩年龄为 234 ± 5 Ma (Li *et al.*, 2013),合作孕日火山岩年龄为 226 ± 1.1 Ma (李注苍等, 2019),甘加火山岩年龄为 236 ± 1.2 Ma (刘伯崇等, 2018);大桥金矿区花岗闪长岩年龄为 228 ± 2.4 Ma (陕亮等, 2016),西功卡花岗闪长岩体年龄为 227.2 ± 7.3 Ma (杨瀚文等, 2018),江里沟正长花岗岩年龄为 214 ± 4 Ma (喻晓, 2014),阿姨山黑云母花岗闪长岩年龄为 238 ± 4 Ma (金维浚等, 2005),双朋花岗闪长岩年龄为 242 ± 5 Ma (张涛等, 2014),美武岩体的年龄为 237 ± 3.3 Ma (何彤彤等, 2020)。就德

乌鲁岩体而言,其成岩年龄为 225.9 ± 1.3 Ma,这与西秦岭中酸性岩体的主期成岩时代(242~200 Ma)一致,均属印支中晚期岩浆作用产物(王顺安等, 2016)。西秦岭造山带的早中生代花岗岩体形成于后碰撞伸展环境(张成立等, 2008)。徐学义等(2014)对西秦岭北缘花岗质岩浆作用及构造演化的研究认为,地幔活动有利于成矿,而地壳加厚有利于形成金铜矿床。毛景文等(2012)认为这些二叠纪、三叠纪的矿产形成于碰撞造山或后碰撞环境。

陈明辉等(2016)对德乌鲁岩体周围的几个金矿床进行了硫同位素研究,以地南铜金矿黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S} = 2.2\text{‰} \sim 4.9\text{‰}$,老豆金矿黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S} = -5.9\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$,岗岔金矿床黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0.6\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$,这些硫同位素值与陨硫和地幔硫($0 \sim 3\text{‰}$)非常接近,说明这3个矿床都是在同一构造背景下形成的,其硫同位素具有可比性。据此认为金的成矿物质主要来自于印支期的岩浆活动,成矿热液硫源可能来自混有深源硫(幔源硫)的混合硫源,表明矿石中硫主要来源于深部岩浆期后热液。

在中三叠世,扬子板块和华北板块相向汇聚造山(陈衍景, 2004; 马光等, 2004; 陈衍景, 2010),西秦岭古特提斯洋盆闭合,海水从秦岭地区全面退出。晚三叠世早期,沿秦岭造山带的陆陆碰撞,扬子板块俯冲至华北板块下使得地壳增厚、地热梯度增高(闫臻等, 2012),下地壳物质由于温度升高,发生部分熔融,形成高温岩浆,指示当时地壳厚度已经超过 50 km(张成立等, 2008; 李佐臣等, 2013)。前述 MMEs 的研究揭示可能有幔源岩浆的加入,并从地幔中带来了 Cu 和 Au 等成矿元素(张旗等, 2009; 瞿泓滢等, 2019),在岩浆上升演化过程中形成富含 Cu 和 Au 的成矿热液。在岩浆侵入后期,含矿热液沿德乌鲁岩体中的次级构造裂隙充填,形成以地南铜金矿、录斗艘金矿等与岩浆岩有关的热液型铜金矿床。

综上所述,基于德乌鲁岩体及 MMEs 成因、年代学研究和岩石地球化学示踪研究,表明该期岩浆活动与加厚下地壳的熔融作用有关,且有地幔物质的参与,而 Cu、Au 等成矿元素可能来源于地幔。

6 结论

(1) 德乌鲁岩体花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS 定年结果表明,其侵位年龄为 225.9 ± 1.3 Ma,形成于印支晚期,属于西秦岭晚三叠世构造-岩浆活动

产物。

(2) 德乌鲁岩体形成于壳源岩浆与幔源岩浆的混合作用,其中的寄主岩岩浆形成于加厚的下地壳部分熔融,而 MMEs 岩浆则形成于受板块俯冲作用改造过的富钾的岩石圈地幔源区部分熔融,并伴随有后期镁铁质矿物的分异,与扬子板块和华北板块陆陆碰撞后伸展环境下发生的强烈壳-幔相互作用有关。

(3) 在三叠纪,扬子板块与华北板块对接的碰撞造山带,地壳厚度大,岩浆活动频繁,地幔处于高度活动状态,地幔活动有利于成矿,而地壳加厚则形成埃达克质熔体,并从地幔中获取大量的 Cu、Au 等成矿元素,形成富含铜金等成矿物质的岩浆热液,在德乌鲁岩体中形成铜金多金属矿床,这一认识对夏河-合作一带的找矿勘查工作具有重要的指导意义。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59~79.
- Baxter S and Feely M. 2002. Magma mixing and mingling textures in granitoids: Examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland [J]. *Mineral Petrol.*, 76: 63~74.
- Chen Minghui, Guo Suxiong, Xu Junwei, *et al.* 2016. Diagenetic, metallogenic, geological and geochemical characteristics of gold polymetallic metallogenic province inside inner and outer contact zone of Dewulu rock mass[J]. *Mineral Resources and Geology*, 30(4): 517~530 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China[J]. *Geology in China*, 37(4): 854~865 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, *et al.* 2004. Carlin and Carlin-like gold deposits in western Qinling mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. *Geological Review*, 50(2): 134~152 (in Chinese with English abstract).
- Defant M T and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347(6 297): 662~665.
- Dai Shuaijun and Xue Yafei. 2018. Metallogenic relationship between gold, silver and brass of Qinling orogenic belt tectonic development [J]. *China's Manganese Industry*, 36(1): 69~71, 82 (in Chinese with English abstract).

- Fu Changlei, Yan Zhen, Guo Xianqing, *et al.* 2016. Magma source and tectonic setting of the granitoids associated with Saishitang Cu deposit in the West Qinling terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 1997~2014 (in Chinese with English abstract).
- Grogan S E and Reavy R J. 2002. Disequilibrium textures in the Leinster Granite Complex, SE Ireland: Evidence for acid-acid magma mixing [J]. *Mineral. Mag.*, 66(6): 929~939.
- He Tongtong, Hua Yongcheng and Lu Wenhui. 2020. Study on characteristics of chronology, geochemistry of the Mesozoic rock mass and metallogenic relationship in the Dewulu-Meiwu area of West Qinling [J]. *Gold*, 7(41): 17~25 (in Chinese with English abstract).
- Horn I, Rudnick R L and McDonough W F. 2000. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and LA-IPC-MS: Application to geochronology[J]. *Chemical Geology*, 167: 405~425.
- Hu Zhenhua, Cheng Zhaoxun and Zhang Yuelong. 2020. U-Pb ages and geochemical characteristics of volcanic rocks in the Baiyingaolao formation of the Hesigewula Ranch, Dongwudi, inner Mongolia [J]. *Geology and Exploration*, 56(2): 359~371 (in Chinese with English abstract).
- Huang Qifu. 2016. Geological characteristics and ore controlling factors of Yidinan gold deposit in Gansu [J]. *Gold*, 37(2): 26~29 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiongfei, Mo Xuexuan, Yu Xuehui, *et al.* 2013. Zircon U-Pb chronology, geochemistry of the late Triassic acid volcanic rocks in Tanchang area, West Qinling and their geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3968~3980 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, *et al.* 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional maficultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. *Chemical Geology*, 157(1~2): 119~146.
- Jia Ruya, Wang Tao, Li Kangning, *et al.* 2019. Petrogenesis and tectonic implications of the Dewulu ore-bearing pluton and mafic enclaves from the Western Qinling [J]. *Earth Science Frontiers*, 26: 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhicheng. 2017. Metallogenic Model and Exploration Potential of the Gangcha Gold Deposit in Gansu [D]. China University of Geosciences (Beijing), 107~112 (in Chinese with English abstract).
- Jin Weijun, Zhang Qi, He Dengfa, *et al.* 2005. SHRIMP dating of adakite in western Qinling and their implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 959~966 (in Chinese with English abstract).
- Jin Xiaoye, Li Jianwei, Sui Jixiang, *et al.* 2013. Geochronological and geochemical constraints on the genesis and tectonic setting of Dewulu intrusive complex in Xiahe-Hezuo district of western Qinling [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(3): 20~38 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongwei. 2018. Ore-controlling factors, prospecting criteria assessment in igneous and deep metallogenic prognosis in Yangshan gold ore belt, West Qinling Mountain [J]. *Mineral Deposits*, 37(1): 67~80 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinchun, Shen Junfeng, Liu Haiming, *et al.* 2020. Dating for ore-hosting rock of the Gangcha gold deposit in Western Qinling Mountains and its geological significance [J]. *Geoscience*, 30(1): 36~49 (in Chinese with English abstract).
- Li Kangning. 2017. The volcanic apparatus and evolution of Triassic Huari formation in Taiwulong area of West Qinling [J]. *Gansu Geology*, 26(4): 10~17 (in Chinese with English abstract).
- Li Ting, Xu Xueyi, Chen Junlu, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and tectonic setting of Zhongchuan intrusion, Lixian area, western Qinling orogen [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(6): 875~883 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaowei, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2013. Petrology and geochemistry of the early Mesozoic pyroxene andesites in the Maixiu Area, West Qinling, China: Products of subduction or syncollision [J]. *Lithos*, 172/173: 158~174.
- Li Zhucang, Li Yongjun, Qi Jianhong, *et al.* 2016. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Lower Triassic Stata Huari Formation volcanics in West Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 49(1): 26~33 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhucang, Zhang Xuekui, Zeng Junjie, *et al.* 2019. The characteristics and geological significance of the Adakite rocks of the upper Triassic Stata Huari formation volcanics in west Qinling [J]. *Mineral Exploration*, 10(6): 1361~1368 (in Chinese with English abstract).
- Li Zuochen, Pei Xianzhi, Ding Saping, *et al.* 2013. Geochemical features and tectonic setting of the Laohegou granite and the Shaiziyan granite in Bikou block, in Northwest Sichuan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 84(3): 343~356 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bochong, Li Kangning, Shi Hailong, *et al.* 2018. Petrogenesis and tectonic implications of Late Triassic volcanic rocks at the Gansu Qinghai junction in the West Qinling Mountains [J]. *Geoscience*, 32(4): 704~717 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shengyou. 2015. Geological characteristics and metallogenic model of Dewulu skarn type copper deposits in west Qinling, Gansu Province [J]. *Northwestern Geology*, 48(2): 176~185 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Lowell G R and Young G J. 1999. Interaction between coeval mafic and felsic melts in the St. Francois Terrane of Missouri[J]. *Precamb. Res.*, 95: 69~88.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for a Geochronological Toolkit for Microsoft Excelisoplot(Isoplot/Ex version 3. 0) [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publications, 4: 1~71.
- Lugmair G W and Marti K. 1978. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 39: 349~357.
- Ma Guang, Liu Jishun and Gong Li. 2004. Geological feature of carlin type gold deposit in Qinling area[J]. *Gold*, 25(3): 8~12 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Feng Chengyou, *et al.* 2012. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. *Geology in China*, 39(6): 1 437~1 471 (in Chinese with English abstract).
- Qin Jiangfeng and Lai Shaocong. 2011. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Late Triassic Granitoids from the Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Qu Hongying, Mao Jingwen, Zhou Shumin, *et al.* 2019. Geochronology and geochemistry of Silurian dacite porphyry in Daobaoshan deposit, northern Guangdong Province, and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 38 (2): 331~354 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[A]. Rudnick R L. *Treatise on Geochemistry*[C]. The Crust. Elsevier, 1~64.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental crust: Its composition and evolution[J]. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 312.
- Shan Liang, Zhang Dongming, Pang Yingchun, *et al.* 2016. Late Triassic magmatic activity in the Daqiao gold deposit of West Qinling belt: Zircon U-Pb chronology and Lu-Hf isotope evidence[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(12): 2 045~2 057 (in Chinese with English abstract).
- Shi Wenquan and Zhang Bo. 2018. Prospecting indicators and potential of the Dashui gold ore concentration area in southern Gansu Province [J]. *Geology and Exploration*, 54(3): 490~500 (in Chinese with English abstract).
- Song Kairui. 2016. The Characteristics of the Ore Forming Granitoids and Ore Genesis of the Dewulu Copper Deposit, Western Qinling[D]. Beijing: China University of Geosciences, 18~44 (in Chinese with English abstract).
- Steiger R H and Jäger E. 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 359~362.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 42: 313~345.
- Wang Shun'an, Wang Xiaoxia, Ke Changhui, *et al.* 2016. Zircon U-Pb age and geochemistry of Lijing granitoid pluton in Western Qinling and their significance[J]. *Acta Petrologica et Minerologica*, 35(1): 33~51 (in Chinese with English abstract).
- Xu Dong, Liu Jianhong and Zhao Yanqing. 2014. The ore control factors of gold deposits and prospecting direction in West Qinlin of Gansu province[J]. *Northwestern Geology*, 47(3): 83~90 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Chen Junlu and Gao Ting. 2014. Granitoid magmatism and tectonic evolution in northern edge of the Western Qinling terrane [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 371~389 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Li Ting, Chen Junlu, *et al.* 2012. The granitoids magmatism and mineralization in west section of the Western Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 45 (4): 76~82 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Li Jiliang, *et al.* 2012. Tectonic settings and accretionary orogenesis of the West Qinling terrane, northeastern margin of the Tibet plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1 808~1 828 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hanwen, Shen Junfeng, Wei Liyong, *et al.* 2018. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and tectonic implications of Xigongka granodiorite around Gonghe Basin, west of Western Qinling Mountains[J]. *Geoscience*, 31(2): 316~328 (in Chinese with English abstract).
- Yao Shuzhen, Ding Zhenju, Zhou Zonggui, *et al.* 2002. Metallogenic systems of Qinling orogen[J]. *Earth Science*, 27(5): 599~604 (in Chinese with English abstract).
- Yao Shuzhen, Zhou Zonggui, Lü Xinqiao, *et al.* 2006. Mineralization characteristics and prospecting potential in the Qinling Metallogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 39(2): 156~178 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xiao. 2014. The Geochemistry Characteristics and Mineralization of Jiangligou Granite in Tongren, Qinghai Province[D]. Beijing: Chi-

- na University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling orogenic belt [J]. Geological Journal of China Universities, 14(3): 304~316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing and Dong Yunpeng. 1995. Tectonic characteristics and tectonic significance of the main tectonic lithostratigraphic units in the Qinling Mountains orogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 11(2): 101~113 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Yin Xianming, Yin Yong, *et al.* 2009. Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan type granite in west Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3 103~3 122 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao, Zhang Dehui and Yang Bing. 2014. SHRIMP zircon U-Pb dating of Gangcha intrusions in Qinghai and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(9): 2 739~2 748 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiebin. 2011. Study on geological characteristics and metallogenic mechanism of the Ludousou gold deposit in Gansu Province [J]. Gansu Metallurgy, 33(1): 56~60 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Junlie, Sui Fengchun and Zhang Shixin. 2010. Geological characteristics of the gold and multiple metal mineralization areas in the Deluwu rock body and surroundings in Hezuo city, Gansu Province [J]. Geology and Exploration, 46(5): 779~787 (in Chinese with English abstract).
- Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B, *et al.* 1989. Magma mingling, zoning and emplacement in calcalkaline granitoid plutons [J]. Tectonophysics, 157: 315~329.
- 陈明辉, 郭素雄, 徐军伟, 等. 2016. 德乌鲁岩体内外接触带金多金属成矿区成岩成矿地质地球化学特征及成因探讨 [J]. 矿产与地质, 30(4): 517~530.
- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景, 岩浆活动及成矿作用 [J]. 中国地质, 37(4): 854~865.
- 陈衍景, 张 静, 张复新, 等. 2004. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式 [J]. 地质论评, 50(2): 134~152.
- 戴帅军, 薛亚飞. 2018. 秦岭造山带东段的构造发展演化及金、银、铜的成矿关系 [J]. 中国锰业, 36(1): 69~71, 82.
- 付长垒, 闫 臻, 郭现轻, 等. 2016. 西秦岭与赛什塘铜矿床有关的花岗质岩岩岩浆源区特征及大地构造背景探讨 [J]. 岩石学报, 32(7): 1 997~2 014.
- 何彤彤, 华永成, 逯文辉. 2020. 西秦岭德乌鲁-美武地区中生代岩体年代学、地球化学特征及与成矿关系研究 [J]. 黄金, 7(41): 17~25.
- 胡振华, 程招勋, 张跃龙. 2020. 内蒙古贺斯格乌拉牧场白音高老组火山岩 U-Pb 年龄及地球化学特征 [J]. 地质与勘探, 56(2): 359~371.
- 黄启富. 2016. 甘肃以地南金矿床地质特征及控矿因素 [J]. 黄金, 37(2): 26~29.
- 英雄飞, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2013. 西秦岭宕昌地区晚三叠世酸性火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义 [J]. 岩石学报, 29(11): 3 968~3 980.
- 贾儒雅, 王 涛, 李康宁, 等. 2019. 西秦岭德乌鲁含矿岩体及其包体的岩石学成因和构造意义 [J]. 地质前缘, 26: 1~14.
- 江志成. 2017. 甘南岗岔金矿成矿模式及找矿预测 [D]. 中国地质大学(北京), 107~112.
- 金维浚, 张 旗, 何登发, 等. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义 [J]. 岩石学报, 21(3): 959~966.
- 靳晓野, 李建威, 隋吉祥, 等. 2013. 西秦岭夏河-合作地区德乌鲁杂岩体的侵位时代、岩石成因及构造意义 [J]. 地球科学与环境学报, 35(3): 20~38.
- 李宏伟. 2018. 西秦岭阳山金矿带控矿因素、找矿标志及深部成矿预测 [J]. 矿床地质, 37(1): 67~80.
- 李金春, 申俊峰, 刘海明, 等. 2020. 西秦岭格娄昂金矿床赋矿斑岩岩石成因及其地质意义 [J]. 现代地质, 30(1): 36~49.
- 李康宁. 2017. 西秦岭台乌龙一带晚三叠世华日组火山机构及演化 [J]. 甘肃地质, 26(4): 10~17.
- 李 婷, 徐学义, 陈隽璐, 等. 2012. 西秦岭造山带礼县地区中川岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境 [J]. 地质通报, 31(6): 875~883.
- 李注苍, 李永军, 齐建宏, 等. 2016. 西秦岭中三叠统华日组火山岩地球化学特征及构造环境分析 [J]. 西北地质, 49(1): 26~33.
- 李注苍, 张学奎, 曾俊杰, 等. 2019. 西秦岭上三叠统华日组火山岩埃达克岩特征及其地质意义 [J]. 矿产勘查, 10(6): 1 361~1 368.
- 李佐臣, 裴先治, 丁仁平, 等. 2013. 川西北碧口地块老河沟岩体和筛子岩岩体地球化学特征及其构造环境 [J]. 岩石学报, 84(3): 343~356.
- 刘伯崇, 李康宁, 史海龙, 等. 2018. 西秦岭甘青交界一带晚三叠世火山岩岩石成因及构造指示意义 [J]. 现代地质, 32(4): 704~

- 717.
- 刘升有. 2015. 西秦岭北缘德乌鲁砂卡岩型铜矿床地质特征及成矿模式讨论[J]. 西北地质, 48(2): 176~185.
- 马光, 刘继顺, 宫丽. 2004. 秦岭地区卡林型金矿地质特征[J]. 黄金, 25(3): 8~12.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 等. 2012. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. 中国地质, 39(6): 1437~1471.
- 秦江锋, 赖绍聪. 2011. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩成因与深部动力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 瞿泓滢, 毛景文, 周淑敏, 等. 2019. 粤北大宝山志留纪次英安斑岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 38(2): 331~354.
- 陕亮, 张东明, 庞迎春, 等. 2016. 西秦岭大桥金矿区晚三叠世岩浆活动——锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素证据[J]. 地质通报, 35(12): 2045~2057.
- 史文全, 张波. 2018. 甘肃南部大水金矿集区找矿标志及找矿潜力分析[J]. 地质与勘探, 54(3): 490~500.
- 宋开瑞. 2016. 西秦岭德乌鲁铜矿床成矿母岩特化与矿床成因[D]. 北京: 中国地质大学, 18~44.
- 王顺安, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 2016. 西秦岭闫井花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(1): 33~51.
- 徐东, 刘建宏, 赵彦庆. 2014. 甘肃西秦岭地区金矿控矿因素及找矿方向[J]. 西北地质, 47(3): 83~90.
- 徐学义, 陈隽璐, 高婷, 等. 2014. 西秦岭北缘花岗质岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报, 30(2): 371~389.
- 徐学义, 李婷, 陈隽璐, 等. 2012. 西秦岭西段花岗岩浆作用与成矿[J]. 西北地质, 45(4): 76~82.
- 闫臻, 王宗起, 李继亮, 等. 2012. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程[J]. 岩石学报, 28(6): 1808~1828.
- 杨瀚文, 申俊峰, 魏立勇, 等. 2018. 西秦岭西段共和盆地周缘西功卡花岗闪长岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 现代地质, 31(2): 316~328.
- 姚书振, 丁振举, 周宗桂, 等. 2002. 秦岭造山带金属成矿系统[J]. 地球科学, 27(5): 599~604.
- 姚书振, 周宗桂, 吕新彪, 等. 2006. 秦岭成矿带成矿特征和找矿方向[J]. 西北地质, 39(2): 156~178.
- 喻晓. 2014. 青海省同仁县江里沟花岗岩地球化学及其与成矿关系[D]. 北京: 中国地质大学.
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 14(3): 304~316.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 11(2): 101~113.
- 张旗, 殷先明, 殷勇, 等. 2009. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题[J]. 岩石学报, 25(12): 3103~3122.
- 张涛, 张德会, 杨兵. 2014. 青海岗察岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(9): 2739~2748.
- 周杰斌. 2011. 甘肃录斗艘金矿床地质特征及成矿机理浅析[J]. 甘肃冶金, 33(1): 56~60.
- 周俊烈, 随风春, 张世新. 2010. 甘肃省合作市德乌鲁岩体及外围金多金属成矿区成矿地质特征[J]. 地质与勘探, 46(5): 779~787.