

皖南休宁县里东坑似斑状花岗闪长岩 成岩成矿特征分析

陈子微¹ 余心起¹ 周翔¹ 郝国胜² 邱骏挺¹ 李鹏举¹

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 安徽省地质矿产勘查局 332 地质队, 安徽 黄山 245000)

摘要:通过野外考察、岩石地球化学、锆石 U-Pb 测年和 Re-Os 同位素测试等手段,对里东坑似斑状花岗闪长岩及钼矿床的成因类型、成岩机制以及与壳幔作用的关系进行了分析讨论。测试结果显示:赋矿似斑状花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (153.01 ± 0.90) Ma (MSWD=1.14), 辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 (144.9 ± 1.9) Ma (MSWD=2.0), 成岩与成矿均发生于燕山早期。微量元素分析结果显示:岩石富 Si 和 K, 贫 Mg、Ca、P 等元素, 具有高 Rb、低 Yb+Ta 的特征, 稀土元素具有轻微负 Eu 异常, 轻稀土富集; 辉钼矿样品 Re 含量主要介于 $24.17 \sim 27.92 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。说明赋矿似斑状花岗闪长岩具有 I 型花岗岩的特征, 并经历了壳幔混合作用, 判断里东坑似斑状花岗闪长岩为碰撞花岗岩类, 形成于挤压背景, 具备良好的成矿条件。

关键词:I 型花岗岩; 壳幔混源; 里东坑钼矿; 锆石 U-Pb 定年; Re-Os 定年

中图分类号:P588.12; P618.15 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)06-1762-15

1 前言

中国东南部地区侏罗—白垩纪岩浆活动是中国大陆地质的显著特征之一, 伴随这一时期的岩浆活动形成了多种矿产资源, 如 W, Sn, U, Nb-Ta, Mo, Cu, Pb, Zn 和 REE 等, 支撑中国南部矿产经济发展。对这一时期花岗岩的空间分布、形成时代、成因及其形成构造背景的研究是认识中国大陆地质演化和寻找矿产资源的关键。

浙赣皖相邻区发育数量较多的侏罗—白垩纪花岗岩, 随着近期大中型 W-Mo 矿床的陆续发现^[1,2], 该地区岩浆作用与成矿之间的关系受到广泛的关注。近年来围绕浙赣皖相邻区及其周边(特别是中国东南部)花岗岩的研究取得了显著成果。在成岩年代学方面, 多数学者认为浙赣皖相邻区的岩浆活动可

以大致分为 180~160 Ma 和 <145 Ma 的两期^[3-7]: 第一期以花岗闪长岩为主, 最早形成在赣东北一带, 时代约从 180 Ma 开始, 最近发现扩大到浙西、皖南一带, 在 167~155 Ma^[8], 部分区域延续至 146~140 Ma^[9]。第二期以花岗岩为主, 主要形成于早白垩世^[5-7,9]。在成岩背景方面, 部分研究者认为华南晚中生代构造—岩浆—成矿地球动力学背景与 Izanagi 板块俯冲作用有关^[10-12], 赣杭带南侧的早白垩世花岗岩与晚白垩世花岗岩分别形成于挤压和拉张背景, 与 110 Ma 左右的 Izanagi 板块由向北西的俯冲转为后撤有关^[7,12-13]。在岩石成因方面, 人们已认识到大多数花岗岩浆的发育和演化受岩石圈上地幔作用过程的制约, 于是把壳—幔相互作用研究与花岗岩形成演化紧密结合作为新的研究领域^[14-17]。

里东坑钼矿位于皖南休宁县, 前期的地质工作

收稿日期: 2013-05-06; 改回日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272232)资助。

作者简介: 陈子微, 女, 1991 年生, 资源勘查工程专业; E-mail: chenziweichq@163.com。

通讯作者: 余心起, 教授; E-mail: yuxinqi@cugb.edu.cn。

主要集中在大比例尺填图方面,而对矿区内岩浆与成矿关系的讨论则非常薄弱,严重制约了矿区地质找矿的效果。本文通过岩石学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年和辉钼矿 Re-Os 定年等分析手段,对里东坑似斑状花岗闪长岩及钼矿床的形成时代、形成背景和成因类型进行系统的讨论,以期对该地区成矿预测和进一步的地质找矿工作提供重要的参考依据。

2 地质背景

2.1 区域地质背景

里东坑钼矿大地构造上位于扬子板块东南部、“江南古陆”(或称江南新元古代造山带)东段(图1)。区域上主要发育新元古界青白口系、南华系、震旦系及少量寒武系、奥陶系,偶见石炭系、二叠系零星露头,另在祁门县城、休宁—屯溪一带发育侏罗—白垩系红色盆地沉积。以祁门—潜口断裂为界,南区(包括里东坑矿区)基底由溪口群漳前组(Pt_{3z})、木坑组(Pt_{3m})和板桥组(Pt_{3b})片岩、千枚岩、板岩、千枚岩化砂岩组成,部分地区出露变质流纹岩(井潭组, Qnj)。南华系及其上地层构成了该地区的第一盖层。区内主要断裂构造有近东西向的祁门—潜口断裂,以及加里东—燕山期形成的 NE、NW 向断裂。祁门断裂走向近东西,是区域上一条较大规模的断裂,属皖浙赣断裂带体系,控制区内岩浆岩、矿产和中生代红色盆地的展布,是一条重要的控岩控矿断裂。区内岩浆岩发育,主要成岩时期为晋宁期和燕山期。

2.2 里东坑似斑状花岗闪长岩地质特征

里东坑钼矿区位于休宁县城南西 40 km 处,中心地理坐标: E117°45'30", N29°42'30"。

里东坑似斑状花岗闪长岩呈小型岩株状产出,出露面积约 0.028 km²,平面上为不规则的梭形,其北侧呈一狭长条带,而西北方向零星出露花岗斑岩、花岗闪长岩和闪长玢岩。围岩为前南华系溪口群木坑组(Pt_{3m})一套浅变质海相碎屑岩,其上部灰绿、黄绿色薄层千枚岩夹千枚状含砂粉砂岩和砂质千枚岩等,具韵律结构。接触带附近木坑组(Pt_{3m}),角岩化明显;围绕着里东坑岩体或较大断裂破碎带附近,因受热液蚀变作用的影响,发育不同程度的硅化、绿泥石化(图 2-d)、绢云母化、黄铁矿化和微弱的碳酸盐化等蚀变(图 1-c)。岩体深部发育热液细脉,主要有石英脉、钾化脉(图 2-c)和方解石脉,主要金属矿物为辉钼矿和少量黄铁矿(图 2-b)。其

钼以辉钼矿的形式赋存于网状石英—辉钼矿细脉、石英—辉钼矿大脉、角砾岩、或以片状或花瓣状分散于岩体中。

矿区发育呈交叉状分布的含矿石英岩脉(图 2-a),主要表现为二组,产状分别为 340°∠78°和 220°∠87°,野外判断前者早于后者。脉宽几厘米至几十厘米不等,少见>1 m 的石英脉体,矿脉的产状与含矿石英脉依存的节理裂隙相符。

岩石呈灰黑色,主要为微细粒似斑状花岗闪长岩,似斑状—基质微细粒花岗结构,块状构造。斑晶主要为斜长石、石英。斜长石(2%~3%)半自形板状,大小 2~3 mm,星散状分布,被绢云母、白云母交代,表面很脏。石英(约 5%)半自形粒状,大小 2~5 mm,星散状分布,边部呈不规则状。基质主要为斜长石、钾长石、石英、黑云母,大小 0.2~1 mm,少 1~2 mm(细粒),部分 0.1~0.2 mm(微粒),杂乱分布。斜长石(60%~65%)半自形板状,被绢云母交代,部分表面脏。钾长石(约 10%)半自形—他形粒状,轻土化。石英(15%~20%)半自形粒状,表面干净。黑云母(约 5%)片状,被白云母、绿泥石交代,见少量残留。副矿物有磁铁矿、锆石、磷灰石等,次生矿物有绢云母、白云母、绿泥石、高岭土、不透明矿物等。从矿物学特征上看,里东坑似斑状花岗闪长岩属于 I 型花岗岩。

3 样品特征与分析结果

3.1 采样位置

本文采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、Re-Os 同位素分析和全岩地球化学分析对里东坑赋矿似斑状花岗闪长岩及辉钼矿进行测试分析。用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的样品 LDKZK105-B11 采自 ZK105 钻孔 309 m 处,岩石为似斑状花岗闪长岩;用于 Re-Os 同位素分析的辉钼矿样品有 LDK02 取自地表石英脉、LDKZK105-B7、LDKZK105-B10、LDKZK105-B13 和 LDKZK105-B15,后 4 个样品分别取自 ZK105 钻孔 267 m、307 m、429.5 m 和 448.7 m 处,具有硅化和钾化蚀变,有细脉状钼矿化和黄铁矿化;用于岩石地球化学分析的样品 D032-1、D032-2、D032-3、D032-4 和 D032-5 采自里东坑钼矿以西山坡上,岩石为似斑状花岗闪长岩,可见含矿石英脉体发育。

3.2 锆石 U-Pb 测年

锆石 U-Th-Pb 同位素分析由中国地质科学院

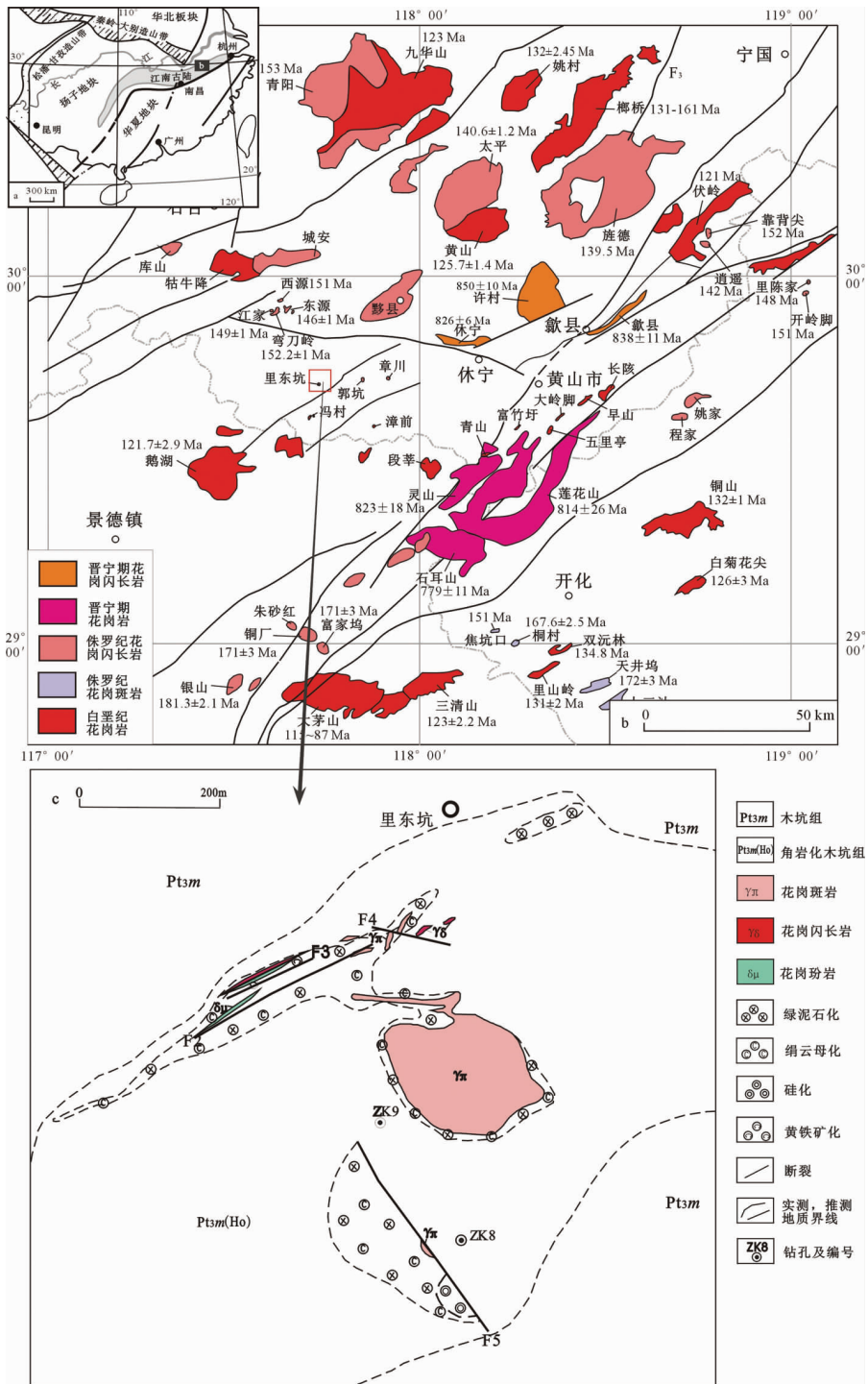


图1 安徽省休宁县里东坑钼矿大地构造背景(a)、浙赣皖相邻地区燕山期花岗岩分布图(b)(据文献[18]修改)和休宁县里东坑钼矿矿区地质简图(c)(据安徽省地质矿产勘查局 332 地质队资料修改)

Fig.1 Tectonic background (a), distribution of Yanshanian granites(b)(modified after references[18]), and geological sketch map of the Lidongkeng Mo deposit in Xiuning County, Anhui Province (c) (simplified after No. 332 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources)

①安徽省地质矿产勘查局 332 地质队. 安徽省休宁县里东坑钼矿多金属矿普查项目设计书, 2009.

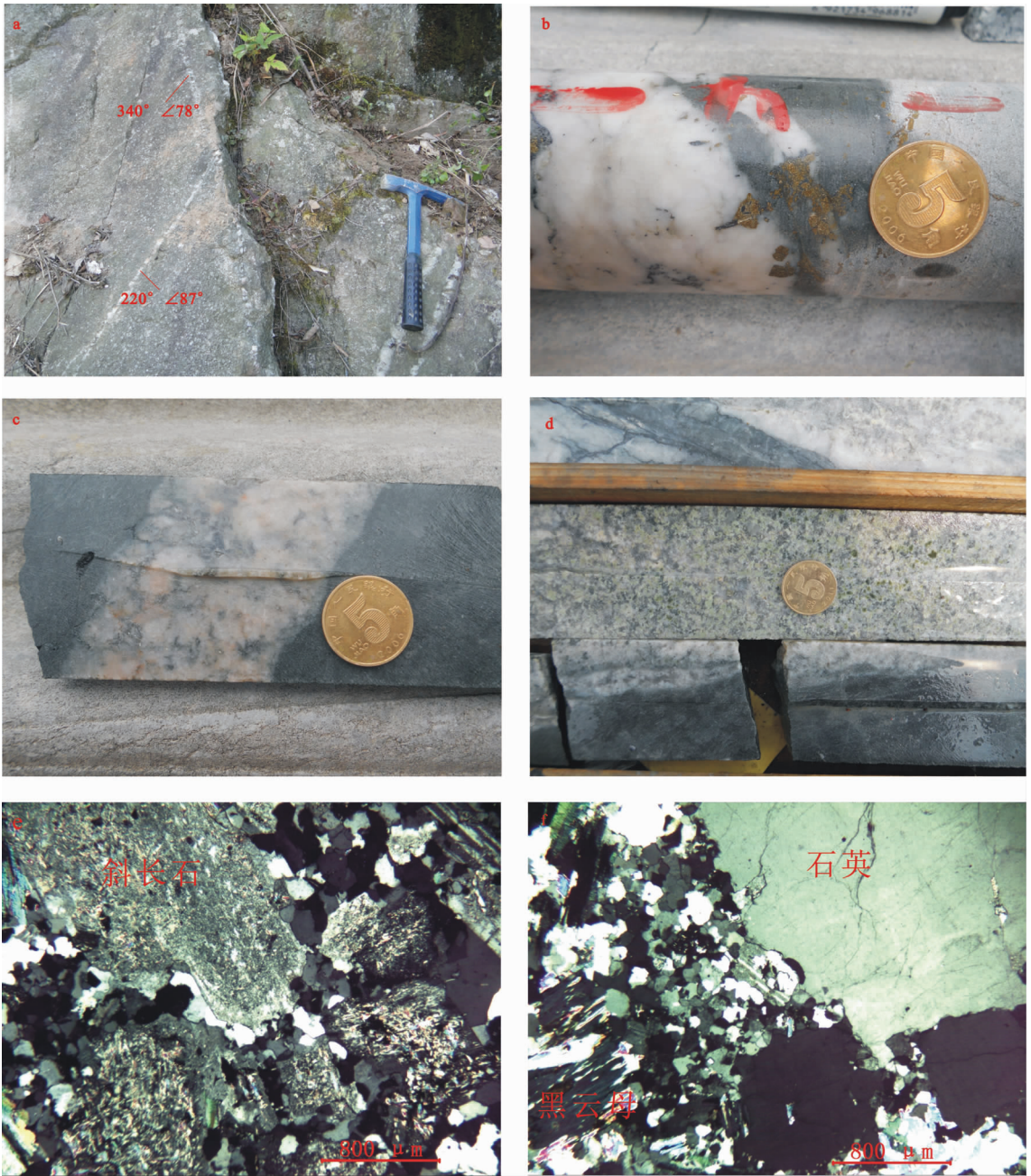


图 2 里东坑岩体蚀变特征和显微照片

a—含矿石英脉体;b—石英细脉含辉钼矿;c—钾化脉;d—似斑状花岗闪长岩绿泥石化;
e—斜长石高岭土化;f—黑云母发生交代

Fig.2 Features of the altered porphyritic granodiorite and microphotographs of the Lidongkeng Mo deposit
a— Ore-bearing quartz veins; b— Quartz veinlets of molybdenite; c— Potassic veins; d— Chloritization of porphyritic granodiorite; e— Kaolinization of plagioclase; f— Metasomatism in biotite

矿产资源研究所利用激光烧蚀等离子质谱法 (LA-ICP-MS)完成。所采样品为新鲜的、无风化的似斑状花岗闪长岩。将岩石样品清洗干净后,按照岩石中的锆石粒度,将样品粉碎至 200 目,然后反复淘洗,

来富集重矿物组分中的锆石,接下来进行电磁选分离,最后把样品分成不同磁性的组分。然后挑选用于分析的锆石样品,需要经双目镜下检查,以除去其他残留矿物。将锆石样品、锆石标准和硅酸盐玻璃分别

用胶粘在玻片上,待固化后进行抛光,以最大面积露出锆石(为防止击穿,磨掉的锆石部分均小于整体的1/2)。随后进行透射和反射光下的显微照相,以及阴极发光下的锆石图像观察与拍照,以确定适合所分析的锆石颗粒与位置。具体测试过程见侯可军等^[19]。

里东坑似斑状花岗闪长岩样品中分离出的锆石多为长柱状,自形—半自形,其阴极发光图像具有清晰的生长震荡环结构(图3),且测点 $\text{Th}/\text{U}=0.33\sim 0.58$, 比值较高,多数大于0.4,具有岩浆锆石的特征。20个测点 LA-ICP-MS 测试分析结果(表1)显示:其中12个数据点集中在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为148~160 Ma, 其加权平均值为 $(153.01\pm 0.90)\text{Ma}$, $\text{MSWD}=1.14$ (图4), 代表里东坑似斑状花岗闪长岩的成岩时代,属于晚侏罗世晚期。在不参与统计的8个测点中,5个得出较老的年龄,推测为继承锆石; LDKZK105-B11-4 年龄最小,与其他年龄不谐和; LDKZK105-B11-5 和 LDKZK105-B11-19 两个测点本身的年龄数值差别过大(表1)。

3.3 Re-Os 年龄测试

用于 Re-Os 年龄测试的5件样品采自岩心。Re-Os 同位素分析在国家地质实验中心 Re-Os 同位素实验室,采用美国 TJA 公司生产的 TJA PQ ExCell ICP-MS 仪完成。步骤分别为,首先分解样品,然后蒸馏分离 Os 和萃取分离 Re,最后质谱测定。辉钼矿中 Re 含量可达 $n\times 10^{-2}\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 且自晶出后未发生过 Re 和 Os 的化学分馏,可以通过比较 Re 含量和放射成因 Os 含量的方法确定辉钼矿的

年龄。等离子体质谱技术,其分离步骤和质谱测定参考 Du et al^[20]、杜安道等^[21-24]、屈文俊等^[25]、李超等^[26] 文献。测试获得的每个样品中 Re 和 Os 含量以及根据公式计算的模式年龄见表2, Re-Os 等时线年龄和加权平均值见图5。LDK02 号样品 Re-Os 模式年龄比较离群,可能是送样量过少所致,作图时未采用。

Re-Os 同位素分析结果(表2)显示:辉钼矿样品 Re 含量为 $24.17\sim 27.92\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (除 LDKZK105-B13), Os 含量为 $0.07\sim 0.86\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 辉钼矿的 Re-Os 模式年龄集中在 $132.2\sim 147.0\text{Ma}$ 。样品 LDKZK105-B13 的 ^{187}Re 含量高,其余样品 ^{187}Re 含量较为集中,除去 LDKZK105-B13 样品,其余5组数据等时线年龄为 $(143\pm 11)\text{Ma}$ 。由于每件样品 Re、Os 含量相近,等时线没有拉开,造成等时线年龄不确定度较大, $\text{MSWD}=3.9$, 辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值 $(144.9\pm 1.9)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=2.0$)。Re-Os 年龄指示成矿年龄,测试结果表明里东坑钼矿属于燕山期侏罗纪和白垩纪之间成矿。

3.4 岩石地球化学

岩石地球化学分析在广州澳实矿物实验室完成。挑选新鲜的岩石样品,将其破碎至 $<1\text{cm}$ 的碎块,在 HCL 溶液中浸泡 2~3 h,之后用蒸馏水洗净,待其完全干燥后,用无污染玛瑙球磨机研磨至 200 目以下,进行元素含量的测试。

试样煅烧后加入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7-\text{LiBO}_2$ 助熔物,充分混和后,放置在自动熔炼仪中,使之在 1000°C 以上熔融。测定主量元素,熔融物倒出后形成扁平玻璃

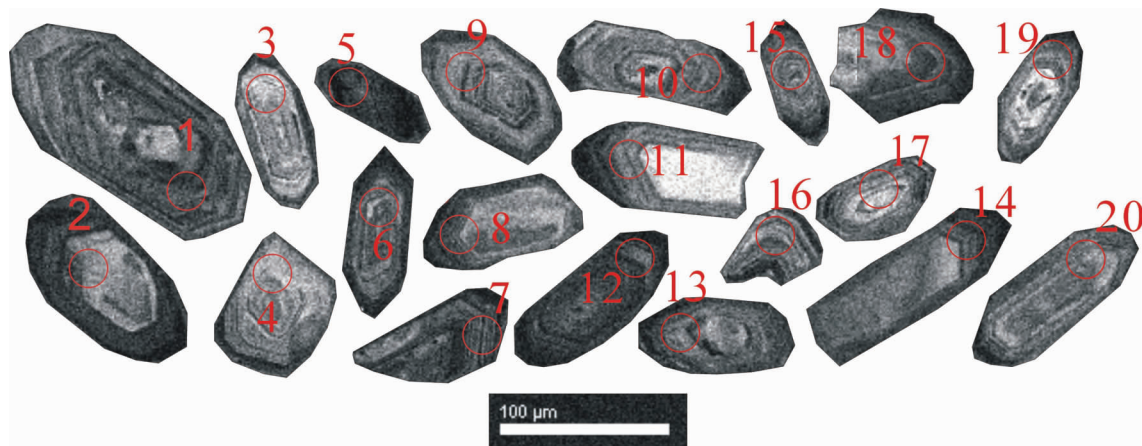


图3 里东坑钼矿样品锆石阴极发光(CL)图像

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from the Lidongkeng Mo deposit

表 1 里东坑似斑状花岗闪长岩 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data for Lidongkeng porphyritic granodiorite

测点	Pb	Th	U	Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma					
					$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
LDKZK105-B11-1	79.622	198.36	455.50	0.44	0.00028	0.00200	0.02412	0.00020	231.55	17.59	158.94	1.73	153.65	1.25
LDKZK105-B11-2	48.461	127.63	338.16	0.38	0.00054	0.00209	0.02357	0.00019	105.65	25.93	147.50	1.83	150.16	1.19
LDKZK105-B11-3*	101.78	49.26	112.58	0.44	0.00655	0.01326	0.11403	0.00115	833.33	18.52	727.01	6.58	696.13	6.63
LDKZK105-B11-4*	41.333	63.54	96.39	0.66	0.04894	0.00089	0.02251	0.00019	146.38	42.59	143.56	2.63	143.53	1.21
LDKZK105-B11-5*	100.67	61.02	410.31	0.15	0.09266	0.00100	0.02604	0.00037	1481.17	20.37	291.51	4.16	165.71	2.29
LDKZK105-B11-6*	109.91	106.61	212.27	0.50	0.06086	0.00066	0.05439	0.00069	635.20	24.07	381.79	5.24	341.39	4.21
LDKZK105-B11-7	71.779	176.04	397.94	0.44	0.05036	0.00027	0.02416	0.00028	213.04	17.59	157.52	1.83	153.92	1.76
LDKZK105-B11-8	57.09	116.65	294.11	0.40	0.05173	0.00037	0.02440	0.00021	272.29	21.30	162.77	1.56	155.38	1.31
LDKZK105-B11-9	48.057	102.98	177.59	0.58	0.05020	0.00041	0.02415	0.00031	211.19	23.14	156.82	2.09	153.84	1.95
LDKZK105-B11-10	37.73	103.60	288.26	0.36	0.05072	0.00034	0.02414	0.00027	227.85	14.81	158.55	2.02	153.76	1.70
LDKZK105-B11-11	37.142	82.64	253.65	0.33	0.05006	0.00033	0.02372	0.00027	198.23	12.03	153.83	1.79	151.15	1.72
LDKZK105-B11-12	34.71	91.08	228.64	0.40	0.05014	0.00036	0.02388	0.00021	211.19	16.66	155.10	1.60	152.14	1.32
LDKZK105-B11-13	37.815	119.37	250.32	0.48	0.04854	0.00067	0.02405	0.00044	124.16	33.33	151.47	3.06	153.19	2.75
LDKZK105-B11-14	38.253	102.78	314.20	0.33	0.05109	0.00035	0.02413	0.00025	255.62	16.67	159.51	1.90	153.73	1.57
LDKZK105-B11-15**	112.91	97.78	134.84	0.73	0.07312	0.00055	0.06462	0.00110	1016.67	10.19	511.06	8.81	403.64	6.65
LDKZK105-B11-16**	133.21	119.38	132.39	0.90	0.06092	0.00072	0.05182	0.00078	635.20	25.92	366.75	5.58	325.68	4.75
LDKZK105-B11-17	80.41	132.80	309.36	0.43	0.05157	0.00182	0.02404	0.00021	264.88	81.47	160.56	5.80	153.14	1.35
LDKZK105-B11-18	52.145	125.80	256.63	0.49	0.05163	0.00072	0.02464	0.00069	333.39	33.33	164.41	5.26	156.92	4.36
LDKZK105-B11-19**	89.615	176.96	309.96	0.57	0.05353	0.00049	0.03017	0.00048	350.06	20.37	204.13	3.38	191.63	3.00
LDKZK105-B11-20**	184.37	106.79	230.15	0.46	0.06421	0.00049	0.08219	0.00151	750.01	16.67	554.99	8.23	509.19	9.00

注: **表示未参与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值计算。

片,再用X荧光光谱仪分析。测定稀土元素时用硝酸定容,再用等离子体质谱仪分析。测定微量元素使用仪器等离子体发射光谱与等离子体质谱(ICP-AES & ICP-MS),试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解后,用稀盐酸溶解定容,再用电感耦合等离子发射光谱进行分析。若Bi/Hg/Mo/Ag/W较高,需做相应稀释,再用等离子体质谱分析。元素之间的光谱干扰经校正后,获得最后的分析结果,见表3。

主量元素分析结果(表3)表明,里东坑岩体富SiO₂,含量为69.15%~69.78%,MgO、CaO含量低,K₂O/Na₂O>1,K₂O含量相对较高,即里东坑岩体富Si和K,贫Mg、Ca等元素。在Si₂O-(Na₂O+K₂O)图(图6)中样品投影在花岗闪长岩区域内,Si₂O-K₂O图(图6)显示为高钾钙碱系列岩石。

稀土元素总量(∑REE)为132.61~150.25 μg·g⁻¹,轻稀土元素总量(∑LREE)为111.16~125.26 μg·g⁻¹,

重稀土元素总量(∑HREE)为21.45~28.09 μg·g⁻¹,属轻稀土富集型(LREE/HREE=4.34~5.82),Eu负异常不显著(δEu=0.69~0.87,图7-a),δCe近于1(0.87~0.97)。在经原始地幔标准化微量元素蛛网图显示Sr和Nb负异常(图7-b),岩石相对亏损Sr和Nb。

4 讨论

4.1 成岩成矿时代

同位素年龄测试需要保证测年载体的封闭,从岩体侵位到同位素体系达到封闭需要一段时间,传统的测年方法如Rb-Sr测年法,具有较低的封闭温度,一方面不利于后期保存,另一方面测定的年龄也与岩体侵位年龄存在较大的差异。锆石具有较高的封闭温度,高达850℃,在花岗岩体系中锆石属于首批析出的矿物,其年龄可以代表成岩年龄^[7]。本文使用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果获得的²⁰⁶Pb/

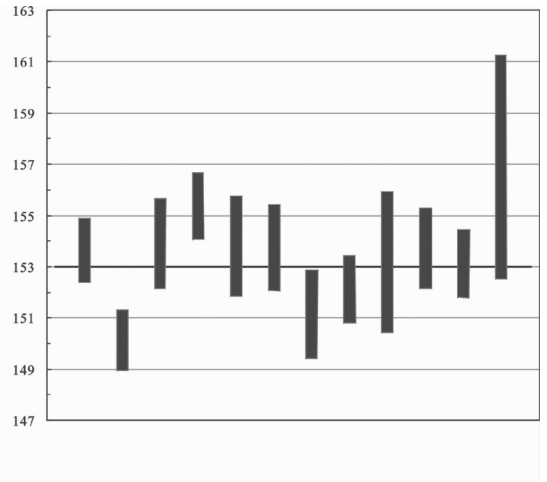
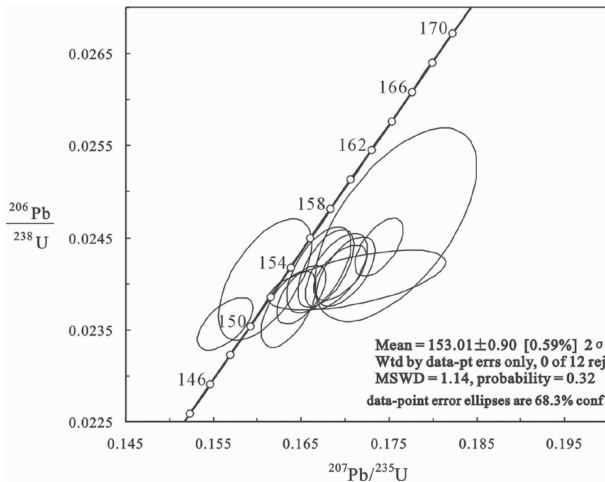


图4 里东坑似斑状花岗闪长岩锆石U-Pb年龄谐和图与年龄分布图
Fig.4 Concordia diagram and U-Pb age of porphyritic granodiorite

表2 里东坑矿区中辉钼矿Re-Os同位素数据

Table 2 Re-Os isotopic data for molybdenites from the Lidongkeng Mo deposit

分析编号	原始样品编号	样重/g	Re/μg·g ⁻¹		普Os/ng·g ⁻¹		¹⁸⁷ Re/μg·g ⁻¹		¹⁸⁷ Os/ng·g ⁻¹		模式年龄/Ma	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
1111184	LDKZK105-B10	0.0102	27.92	0.22	0.0841	0.036	17.55	0.14	43.01	0.39	147	2.1
111226-7	LDKZK105-B10	0.01261	27.17	0.2	0.0658	0.0191	17.07	0.13	41.58	0.34	146	2
111214-9	LDKZK105-B13	0.00062	44.14	0.5	0.8506	0.1915	27.74	0.31	66.57	0.57	143.8	2.3
111214-10	LDK02	0.00068	22.41	0.21	0.0799	0.448	14.09	0.13	31.06	0.25	132.2	1.9
111214-11	LDKZK105-B7	0.00196	24.17	0.25	0.0273	0.0919	15.19	0.16	36.47	0.3	144	2.2
111214-12	LDKZK105-B15	0.00578	24.98	0.2	0.6505	0.0306	15.7	0.12	37.59	0.34	143.6	2.1

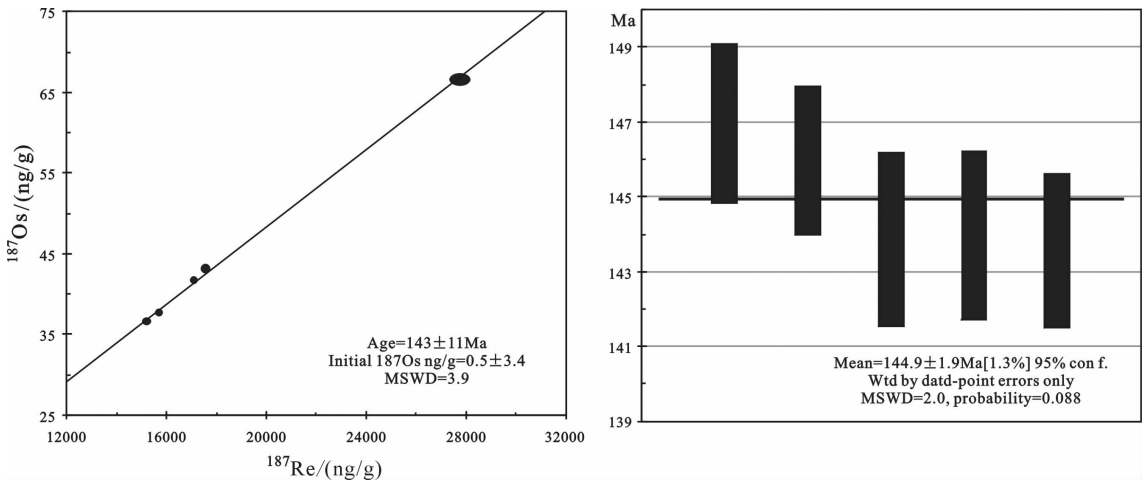


图 5 里东坑矿区中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线和模式年龄加权平均

Fig.5 Re-Os isochron diagram and model ages of molybdenite from the Lidongkeng Mo deposit

表 3 里东坑岩体似斑状花岗闪长岩主量元素(%)、微量元素及稀土元素($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)分析结果

Table 3 Major elements (%) and trace elements ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) analyses of Lidongkeng porphyritic granodiorite

分析项目	D032-1	D032-2	D032-3	D032-4	D032-5	分析项目	D032-1	D032-2	D032-3	D032-4	D032-5
SiO ₂	69.15	69.28	69.78	69.16	69.74	La	27.80	30.10	25.30	29.60	28.80
Al ₂ O ₃	15.87	15.46	15.57	16.25	15.86	Lu	0.15	0.17	0.15	0.15	0.16
Fe ₂ O ₃	3.30	3.22	3.58	3.23	3.22	Nb	9.20	9.30	9.40	10.40	9.90
CaO	0.28	0.58	0.34	0.21	0.35	Nd	25.00	25.80	23.30	25.80	25.40
MgO	0.94	0.93	0.98	0.89	0.86	Pr	6.70	6.89	6.21	7.05	6.72
Na ₂ O	2.60	2.69	2.71	2.17	2.52	Rb	210.00	203.00	199.50	259.00	215.00
K ₂ O	4.22	4.02	3.92	4.38	4.15	Sm	4.65	4.82	4.43	4.70	4.59
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	Sn	5.00	5.00	6.00	6.00	5.00
TiO ₂	0.49	0.48	0.47	0.52	0.48	Sr	166.00	204.00	189.00	74.90	171.50
MnO	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	Ta	1.20	1.20	1.20	1.30	1.30
P ₂ O ₅	0.17	0.16	0.16	0.18	0.18	Tb	0.55	0.61	0.52	0.51	0.53
LOI	2.41	2.34	2.33	2.76	2.52	Th	14.85	12.45	13.30	14.10	14.05
Total	99.46	99.19	99.88	99.77	99.89	Tl	1.00	0.90	0.80	1.10	0.90
Pb	25.00	27.00	30.00	8.00	21.00	Tm	0.17	0.18	0.17	0.17	0.17
Ba	461.00	491.00	444.00	455.00	506.00	U	4.08	4.79	5.54	5.32	6.24
Ce	55.90	53.20	50.90	57.10	55.80	V	65.00	62.00	65.00	67.00	58.00
Cr	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	W	25.00	19.00	19.00	73.00	40.00
Cs	61.90	60.10	54.10	82.80	60.90	Y	12.40	16.60	11.80	11.50	12.60
Dy	2.67	2.90	2.52	2.41	2.61	Yb	1.09	1.17	1.01	1.12	1.12
Er	1.19	1.35	1.10	1.16	1.19	Zr	152.00	153.00	167.00	177.00	155.00
Eu	1.03	1.35	1.02	1.01	1.02	REE	143.94	150.25	132.61	146.77	145.21
Ga	23.00	23.10	23.40	24.90	22.70	LREE/HREE	5.30	4.35	5.18	5.82	5.35
Gd	4.18	4.57	3.74	4.06	4.03	δ Eu	0.70	0.87	0.75	0.69	0.71
Hf	4.30	4.20	4.60	5.00	4.20	δ Ce	0.97	0.87	0.97	0.94	0.95
Ho	0.46	0.54	0.44	0.43	0.47						

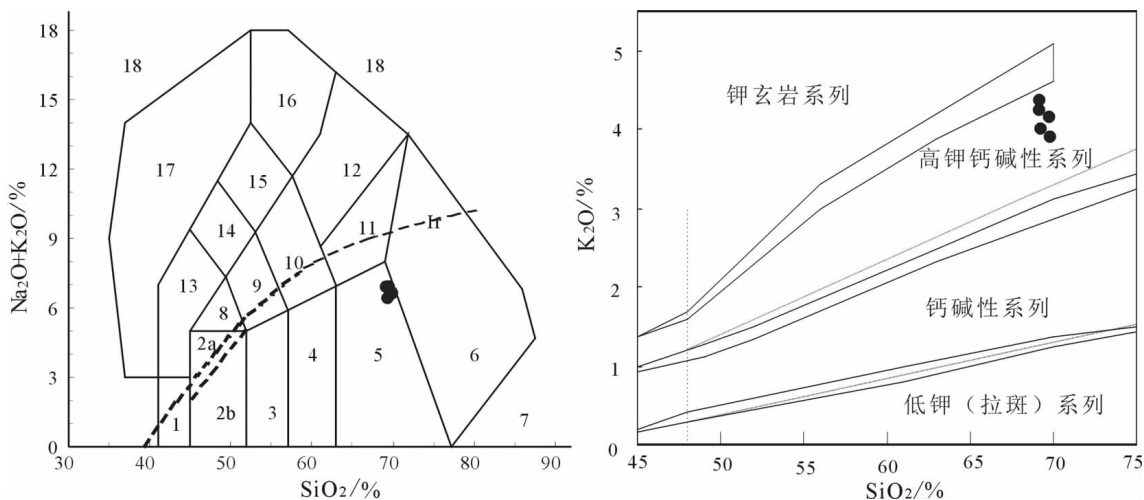


图6 里东坑 Si₂O-(Na₂O+K₂O)图和 Si₂O-K₂O 图

1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—石英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩; 14—副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长正长岩; 17—副长深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩; Ir—Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性

Fig.6 Si₂O-Na₂O+K₂O diagram and Si₂O-K₂O diagram for Lidongkeng porphyritic granodiorite

1- Olivine gabbro; 2- Alkaline gabbro; 3- Gabbro-diorite; 4- Diorite; 5- Granodiorite; 6- Granite; 7- Quartzolite; 8- Monzogabbro; 9- Monzodiorite; 10- Monzonite; 11- Quartz monzonite; 12- Syenite; 13- Feldspathoid gabbro; 14- Feldspathoid monzodiorite; 15- Feldspathoid monzosyenite; 16- Feldspathoid syenite; 17- Foidolite; 18- Tawite/ urtite/ italtite; Ir- Irvine boundary, with the area above the dividing line being alkaline and that below the dividing line being sub-alkaline

²³⁸U 加权平均年龄值为 (153.01±0.90)Ma (MSWD=1.14), 指示了里东坑似斑状花岗闪长岩的成岩时代大约在 153 Ma, 属于晚侏罗世侵入岩。

另一方面测年载体需要具有较高的同位素含量才能保证测年的准确性, 对于 Sm-Nd 等测年法来说, 同位素异常仅有千分之几, 这就要求质谱仪的测定精度要达到十万分之几, 而辉钼矿中的 O_s 异常

可达几个数量级, 因此 ICP-MS 的测定精度就可完全反映 ¹⁸⁷O_s 异常, 并准确计算辉钼矿的形成年龄。又 Sm-Nd 等测年法主要针对古老辉钼矿, 而经过近年来对分析方法的改进, Re-Os 测年法不仅对古老的, 对于年轻的矿床亦十分有效。虽然 Re、Os 都是耐熔元素, Re-Os 同位素体系封闭性也较强, 但后期的热液活动仍然有可能使 O_s 同位素发生重叠^[26]。本

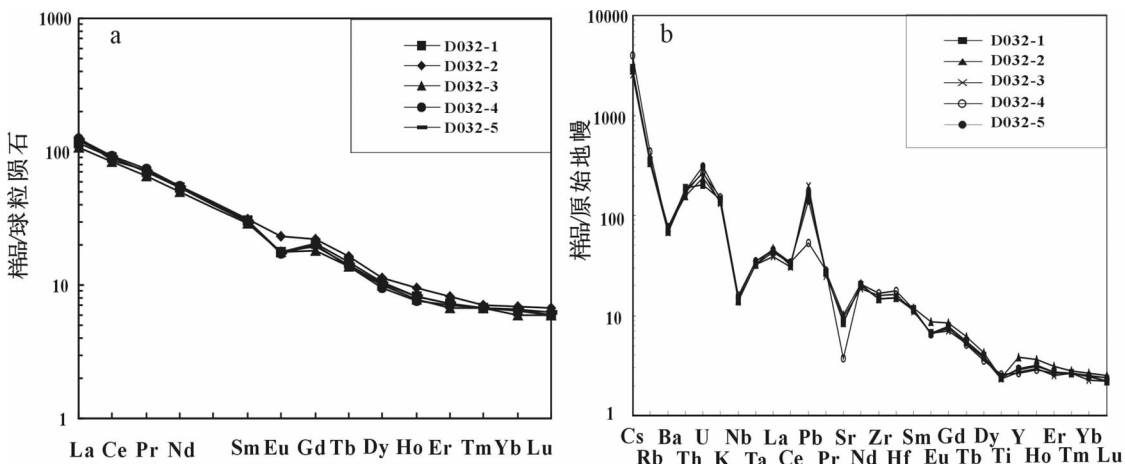


图7 里东坑似斑状花岗闪长岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.7 REE patterns (a) and spider diagram (b) for Lidongkeng porphyritic granodiorite

文采用 Re-Os 同位素测定里东坑钼矿的年龄加权平均值为 (144.9 ± 1.9) Ma (MSWD=2.0), 辉钼矿样品的模式年龄和 Re-Os 等时线年龄基本一致, 辉钼矿的失耦现象不明显, 说明里东坑钼矿形成于燕山期早期侏罗纪和白垩纪之交。

似斑状花岗闪长岩的 U-Pb 年龄与辉钼矿 Re-Os 年龄虽然同属于燕山期, 但两者之间存在约 8 Ma 的差异。野外观察发现, 里东坑似斑状花岗闪长岩中存在明显的硅化、云英岩化、绢云母化等蚀变, 证明岩体就位后发生了明显的热液活动。从辉钼矿的赋存状态上看, 矿体与石英脉有空间上的联系, 同样也说明辉钼矿可能形成于热液活动阶段。因此, 岩体的 U-Pb 年龄和 Re-Os 年龄之差可能代表了从岩体就位到热液活动最终成矿的时间差异^[28]。对于里东坑矿区, 岩体年龄与成矿年龄相差约 8 Ma, 说明后期成矿热液活动持续了一段时间。这种成矿年龄晚于岩体形成年龄的情况在中国许多典型的斑岩型矿床中都有出现^[28-31]。

LDKZK105-B11-4 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 143.53 Ma 最年轻年龄(表 1)与辉钼矿成矿年龄接近, 也可能表示岩浆活动持续时间长, 延续到与辉钼矿形成较接近的时候才结束。

毛景文等^[32]在广泛的地质调查和同位素年龄数据的基础上, 将华南地区中生代主要金属矿产成矿分为 3 个阶段: 晚三叠世(230~210 Ma)、中晚侏罗世(170~150 Ma)和早白垩世(134~80 Ma)。其中中晚侏罗世矿化组合可进一步分为 170~160 Ma 斑岩-矽卡岩型铜矿和 160~150 Ma 与花岗岩有关的 W-Sn 多金属矿床。结合本文报道的似斑状花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄, 认为里东坑钼矿的成岩成矿作用与华南地区中生代第二阶段成矿事件相对应。

4.2 成因类型

毛景文等^[33,34]在综合分析对比了中国斑岩型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量后, 认为辉钼矿的 Re 含量可以指示成矿物质的来源。从幔源—壳幔混源—壳源, 矿石中的 Re 含量逐级递减, 与幔源—I 型—S 型花岗岩有关的矿床, 其 Re 含量从 $n \times 10^{-4} \sim n \times 10^{-5} \sim n \times 10^{-6}$, 呈数量级下降。里东坑辉钼矿 Re-Os 年龄测试结果表明, 辉钼矿样品 Re 含量在 $24.17 \sim 27.92 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由上述推测里东坑岩体成因类型为 I 型, 其成矿物质来源为壳幔混源。

李献华等^[35]提出, 以磷灰石在强过铝质和准铝质/弱过铝质花岗岩浆中溶解度的差异为基础, 通过样品中 SiO_2 与 P_2O_5 相关关系, 对原始岩浆的性质进行判断。结合全岩地球化学分析结果和矿物学分析, 里东坑似斑状花岗闪长岩表现高 SiO_2 、低 P_2O_5 的化学特征, SiO_2 - P_2O_5 呈负相关(图 8), 岩石含白云母, 具有典型的 I 型花岗岩特征。且在 Si_2O -Nb 图(图 9)中, 里东坑似斑状花岗闪长岩皆投影在 I 型区域内, 而在 $\delta\text{Eu}-\text{La}_N/\text{Yb}_N$ 图(图 9)中, 皆投影在壳幔混源型中, 这为里东坑岩体成因类型为 I 型及物质来源为壳幔混源提供依据。

里东坑岩体全岩地球化学表明, 岩石具有微弱 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu}=0.69\sim 0.87$, 图 7), 说明斜长石的分离结晶作用不明显。稀土元素总量 ($\sum\text{REE}$) 为 $132.61\sim 150.25 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $\text{LREE}/\text{HREE}=4.34\sim 5.82$, 属轻稀土富集型, 且稀土元素球粒陨石标准化曲线较陡。岩石较原始地幔相对亏损 Ba 和 Nd、Sr(图 7), 且岩浆岩系列为高钾钙碱系列, 岩浆来源有早期岩浆岩物质加入, 说明物质来源虽为壳幔混源, 但以壳源为主。同时结合右倾的稀土元素配分特征, 认为岩浆源区存在石榴石等高压变质矿物, 说明里东坑似斑状花岗闪长岩主要源于陆壳变火成岩的深熔作用。

4.3 构造背景

中国东南部广泛发育走向为 NE、NNE 和 NEE 的褶皱和推覆构造, 形成于印支期, 构造运动时间在三叠纪之后, 该地区晚中生代岩浆活动(侏罗—白垩纪)之前。李武显等^[14]认为, 古太平洋板块向欧亚板块快速低角度俯冲, 形成了中国东南部大规模的褶皱和推覆构造, 随后, 板块汇聚速度降低, 俯冲角度

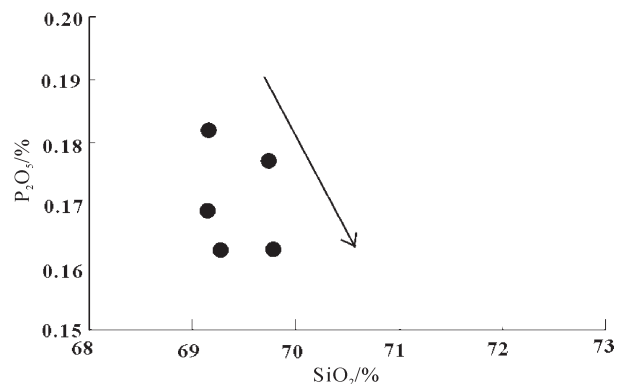


图 8 里东坑似斑状花岗闪长岩 SiO_2 - P_2O_5 图
Fig.8 SiO_2 - P_2O_5 diagram for Lidongkeng porphyritic granodiorite

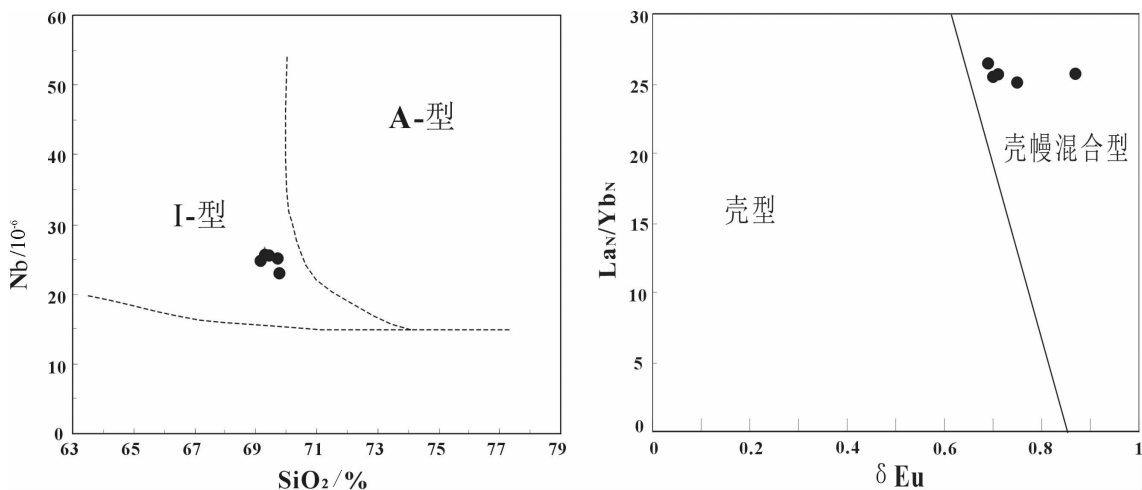


图9 里东坑似斑状花岗闪长岩 $\text{Si}_2\text{O}-\text{Nb}$ 图和 $\delta \text{Eu}-\text{La}_N/\text{Yb}_N$ 图

Fig.9 $\text{Si}_2\text{O}-\text{Nb}$ diagram and $\delta \text{Eu}-\text{La}_N/\text{Yb}_N$ diagram for Lidongkeng porphyritic granodiorite

变陡,岩浆弧向东迁移,导致中国东南部在晚中生代发生大面积的岩浆活动。该时期形成的岩体多直接参与成矿,形成一系列与岩体密切相关的矿床。

一般认为,岩体侵位比较容易发生在伸展环境,下地壳减薄且强度弱,反之在挤压环境下,地壳加厚不利于岩体的侵位。但是,从平面应力上看,在同时受到挤压和拉伸时,地质体会按张裂—剪裂—压裂的顺序发生变形。由于裂隙交汇处会发生应力集中,使这些地区更容易遭受后期应力的破坏,因此即便是在挤压环境中,在诸如断裂交汇处这一类薄弱的地区也容易发生岩体的侵位作用,这种现象被称为“断裂结点控岩作用”。结合动力学背景和成矿作用研究,发现碰撞造山带通常是大规模成矿的有利地带,挤压到伸展的转变期更是成矿的有利时期^[36-38]。

皖南地区经历了印支—燕山期等多期构造运动,褶皱和断裂等构造发育^[14,39-40]。邻近里东坑钼矿,祁门县东源钨钼矿和歙县邓家坞钨钼矿都在同一时期成矿,东源辉钼矿 $\text{Re}-\text{Os}$ 同位素等时线为 $(146.4 \pm 2.3)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=2.0$),模式年龄为 $(146.4 \pm 0.93)\text{Ma}$ ^[9],邓家坞辉钼矿 $\text{Re}-\text{Os}$ 同位素等时线为 $(141.8 \pm 2.2)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.049$),模式年龄为 $141.1 \sim 141.6 \text{Ma}$ ^[11]。里东坑、东源和邓家坞钨钼矿体呈 NE 向分布,在构造上处于一个断裂带,里东坑钨钼矿成矿受 NE 向的皖浙赣断裂带控制。

根据里东坑似斑状花岗闪长岩 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图(图 10)和 $(\text{Yb}+\text{Ta})-\text{Rb}$ 图(图 11), Al_2O_3 含量较高,占 $15.46\% \sim 16.25\%$,Rb 含量为 $199.5 \sim 259 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,

$\text{Yb}+\text{Ta}$ 含量为 $2.21 \sim 2.42 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,表现为高 Rb、低 $\text{Yb}+\text{Ta}$ 的化学特征,判断里东坑似斑状花岗闪长岩为碰撞花岗岩类。里东坑钨钼矿形成于挤压背景下,又受控于皖浙赣断裂带,具备良好的成矿条件。

成矿于燕山期的里东坑岩体区域应力场总体处于挤压状态,与古太平洋板块向欧亚板块俯冲作用有关。断裂活动为岩浆快速侵入提供通道,运移通道通畅,岩浆主动且快速侵位,冷却结晶快速,结晶分异现象不明显(Eu 负异常不显著),形成酸性侵入岩体,岩体规模较小,呈岩株状。

5 结论

(1) 锆石 $\text{U}-\text{Pb}$ 定年代表锆石结晶温度,在花岗岩中,可指示成岩时代, $\text{Re}-\text{Os}$ 年龄测试代表成矿时代。岩浆先冷却结晶,已固结的岩浆经历后期热液活动,发生成矿作用,使 Os 同位素叠加,导致里东坑岩体锆石 $\text{U}-\text{Pb}$ 定年结果相比 $\text{Re}-\text{Os}$ 年龄较老,其成岩成矿时差约为 8Ma ,说明岩浆活动持续时间或者热液活动时间较长。

(2) 通过锆石 $\text{U}-\text{Pb}$ 定年和 $\text{Re}-\text{Os}$ 年龄测试,以及全岩地球化学分析,里东坑岩体成岩成矿在燕山期,其成因类型为 I 型,受浙赣皖 NE 向断裂带控制,岩浆上涌,形成酸性岩体,其成矿物质来源为壳幔混源,且以壳源为主。

(3) 里东坑岩体成矿与其动力构造背景有关。中国东南部受到古太平洋板块向欧亚板块俯冲作用,形成褶皱和推覆构造,在晚中生代大规模发生岩浆活

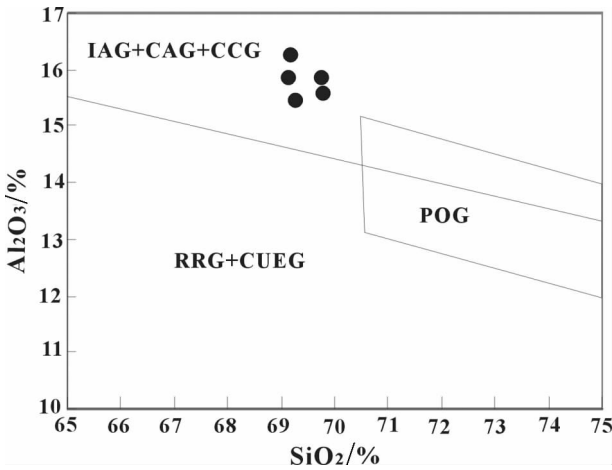


图 10 里东坑似斑状花岗闪长岩 SiO₂-Al₂O₃ 图
 IAG—岛弧花岗岩;CAG—大陆弧花岗岩类;CCG—大陆碰撞花岗岩类;POG—后造山花岗岩类;RRG—与裂谷有关的花岗岩类;CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类
 Fig.10 SiO₂-Al₂O₃ diagram for Lidongkeng porphyritic granodiorite
 IAG—Island arc granite;CAG—Continental arc granitoids; CCG—Continental collision granitoids;POG—Post-orogenic granitoids;RRG—Rift-related granitoids;CEUG—Granite related to continent epirogenetic uplift

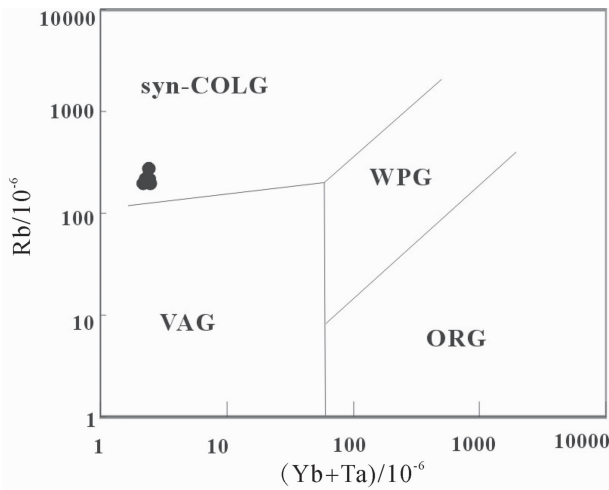


图 11 里东坑似斑状花岗闪长岩 (Yb+Ta)-Rb 图
 VAG—火山弧花岗岩;syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩;ORG—洋脊花岗岩
 Fig.11 (Yb+Ta)-Rb diagram for Lidongkeng porphyritic granodiorite
 VAG— Volcanic arc granite;syn-COLG— Syn-collisional granite;WPG—Intraplate granite;ORG—Ocean ridge granite

动。里东坑岩体形成于碰撞环境下,处于挤压背景。

致谢: 锆石 U-Pb 定年在中国地质科学院研究所同位素实验室进行,Re-Os 测年由国家地质测试中心承担,野外工作中得到安徽省地质矿产勘查局 332 地质队的支持,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

[1] 黄凡,陈毓川,王登红,等. 中国钼矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质, 2011, 3(5): 1111-1134.
 Huang Fan, Chen Yuchuan, Wang Denghong, et al. A discussion on the major molybdenum ore concentration areas in China and their resource potential[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1111-1134(in Chinese with English abstract).

[2] 梁景时,漆富勇,胡论元,等. 江西安远同岭寨矿区钼矿床地质特征及矿床成因探讨[J].中国地质, 2012, 39(5): 1327-1338.
 Liang Jingshi, Qi Fuyong, Hu Lunyuan, et al. Geological characteristics and genesis of the Yuanlingzhai molybdenum deposit in Anyuan, Jiangxi Province [J]. Geology in China, 2012, 39(5): 1327-1338 (in Chinese with English abstract).

[3] Li H, Ling M X, Li C Y, et al. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: Indication of ridge subduction[J]. Lithos, 2012, doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.021.

[4] Yang S Y, Jiang S Y, Zhao K D, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China [J]. Lithos, 2012, doi: 10.1016/j.lithos.2012.01.028.

[5] 邱骏挺,余心起,张德会,等. 浙西北开化桐村花岗斑岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义 [J]. 地质通报, 2011, 30(9): 1360-1368.
 Qiu Junting, Yu Xinqi, Zhang Dehui, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Tongcun porphyry in Kaihua County, western Zhejiang Province, and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(9): 1360-1368(in Chinese with English abstract).

[6] 薛怀民,汪应庚,马芳,等. 皖南太平-黄山复合岩体的 SHRIMP 年代学: 由钙碱性向碱性转变对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄时间的约束 [J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2009, 39(7): 979-993.
 Xue Huaimin, Wang Yinggen, Ma Fang, et al. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the Taiping (calc-alkaline)-Huangshan (alkaline) composite intrusive: Constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton, China[J]. Science in China (Ser. D), 2009, 39(7): 979-993(in Chinese).

[7] 秦燕,王登红,吴礼彬,等. 安徽东源钨矿含矿斑岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地质学报, 2010, 84(4): 479-484.
 Qin Yan, Wang Denghong, Wu Libing, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons in mineralized porphyry of the Dongyuan W deposit in Anhui Province and its geological significance of the newly found Dongyuan W-Mo deposit in Huangshan area, Anhui Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84 (4): 479-484 (in Chinese with English abstract).

[8] 周翔,余心起,王德恩,等. 皖南东源含 W、Mo 花岗闪长斑岩及成矿年代学研究[J]. 现代地质, 2011, 25(2): 201-210.
 Zhou Xiang, Yu Xinqi, Wang Deen, et al. Characteristics and

- geochronology of the W, Mo-bearing granodiorite porphyry in Dongyuan, Southern Anhui[J]. *Geoscience*, 2011, 25(2): 201-210 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王德恩, 周翔, 余心起, 等. 皖南祁门地区东源钨钼矿区花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征 [J]. *地质通报*, 2011, 30(10): 1514-1529.
- Wang Deen, Zhou Xiang, Yu Xinqi, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating and characteristics of Hf isotopes of the granodiorite porphyries in the Dongyuan W-Mo ore district, Qimen area, southern Anhui [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10): 1514-1529(in Chinese with English abstract).
- [10] Jiang Y H, Zhao P, Zhou Q, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China[J]. *Lithos*, 2011, 121: 55-73.
- [11] 李武显, 周新民. 中国东南部晚中生代俯冲带探索[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(2): 164-169.
- Li Wuxian, Zhou Xinmin. Late Mesozoic subduction zone of southeastern China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(2): 164-169(in Chinese with English abstract).
- [12] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300 km-wide intra-continental orogen and post-orogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35, 179-182.
- [13] He Z Y, Xu X S. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction [J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 208-221.
- [14] 周涛发, 袁峰, 侯明金, 等. 江南隆起带东段皖赣相邻区燕山期花岗岩类的成因及形成的地球动力学背景 [J]. *矿物岩石*, 2004, 24(3): 65-71.
- Zhou Taofa, Yuan Feng, Hou Mingjin, et al. Genesis and geodynamic background of Yanshanian granitoids in the eastern Jiangnan Uplift in the adjacent area of Anhui and Jiangxi Provinces, China[J]. *Journal Mineral Petrol.*, 2004, 24(3): 65-71(in Chinese with English abstract).
- [15] Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting[J]. *Lithos*, 2009, 107: 185-204.
- [16] 肖庆辉, 邢作云, 张昱, 等. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. *地质学前沿*, 2003, 10(3): 221-229.
- Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yu, et al. The major frontiers of the recent studies of granite[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 221-229(in Chinese with English abstract).
- [17] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4): 556-565.
- Zhou Xinmin. My thinking about granite geneses of south China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(4): 556-565 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李鹏举, 余心起, 邱骏挺, 等. 浙赣皖相邻区燕山期花岗岩类含矿性及其氧逸度特征[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2013, (5): 161-168.
- Li Pengju, Yu Xinqi, Qiu Junting, et al. The ore-bearing potential and oxygen fugacity of the Yanshanian granites in the intersection area of Zhejiang, Jiangxi, and Anhui Provinces, SE China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2013, (5): 161-168(in Chinese with English abstract).
- [19] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481-492.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
- [20] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, et al. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 2004, 28(1): 41-52.
- [21] 杜安道, 何红菱, 殷宁万, 等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 1994, 68(4): 339-347.
- Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwang, et al. A study on the Rhenium-Osmium geochronometry of molybdenites [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(4): 339-347 (in Chinese with English abstract).
- [22] 杜安道, 赵敏, 王淑贤, 等. Carius 管溶样-负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄[J]. *岩矿测试*, 2001, 20(4): 247-252.
- Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, et al. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius tube sample preparation [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2001, 20(4): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- [23] 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 Os 的失耦现象[J]. *矿床地质*, 2007, 26(5): 572-580.
- Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, et al. Subgrain-size decoupling of Re and ¹⁸⁷Os within molybdenite [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(5): 572-580(in Chinese with English abstract).
- [24] 杜安道, 屈文俊, 李超, 等. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(3): 288-304.
- Du Andao, Qu Wenjun, Li Chao, et al. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(3): 288-304(in Chinese with English abstract).
- [25] 屈文俊, 杜安道. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. *岩矿测试*, 2003, 22(4): 254-257.
- Qu Wenjun, Du Andao. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with Carius tube sample digestion [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2003, 22(4): 254-257(in Chinese with English abstract).
- [26] 李超, 屈文俊, 杜安道. 铼-钨同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(3): 233-238.
- Li Zhao, Qu Wenjun, Du Andao. Comprehensive study on extraction of rhenium with acetone in Re-Os isotopic dating [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(3): 233-238(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [27] 朱金初, 王汝成, 陆建军, 等. 关于南岭中生代花岗岩侵位年龄与锆石 U-Pb 年龄的时差问题: 与章邦桐教授等讨论[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1): 119-123.
Zhu Jinchu, Wang Rucheng, Lu Jianjun, et al. On the time span between emplacement age and zircon U-Pb age of the mesozoic granites in Nanling Range, south China: A discussion with Prof. Zhang Bangtong et al [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(1): 119-123(in Chinese with English abstract).
- [28] 王孝磊, 周金城, 邱检生, 等. Re-Os 同位素体系在地质研究中的应用 [C]//地球科学与社会可持续发展——2005 年华东六省一市地学科技论坛论文集. 2005: 289-294.
Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, et al. Re-Os isotopic system and its application in geologic research[C]//Earth Science and Society Sustainable Development—the Geoscience Technology Forum Proceedings, East China Provinces. 2005: 289-294(in Chinese with English abstract).
- [29] 孟祥金, 徐文艺, 吕庆田, 等. 安徽沙坪沟斑岩钼矿锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 486-494.
Meng Xiangjin, Xu Wenyi, Lv Qingtian, et al. Zircon U-Pb dating of ore-bearing rocks and molybdenite Re-Os age in Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Anhui Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86 (3): 486-494 (in Chinese with English abstract).
- [30] 章永梅, 顾雪祥, 董树义, 等. 内蒙古西沙德盖钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 矿物岩石, 2011, 31(2): 33-41.
Zhang Yongmei, Gu Xuexiang, Dong Shuyi, et al. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Xishadegai deposit in Inner Mongolia and its geological significance [J]. J. Mineral. Petrol., 2011, 31(2): 33-41(in Chinese with English abstract).
- [31] 王磊, 胡明安, 屈文俊, 等. 粤北大宝山多金属矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 29-42.
Wang Lei, Hu Ming'an, Qu Wenjun, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Dabaoshan polymetallic deposit in northern Guangdong Province and its geological implications[J]. Geology in China, 2012, 39(1): 29-42 (in Chinese with English abstract).
- [32] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境 [J]. 高校地质学报, 2008, 14 (4): 510-526.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in south China and their metallogenic settings [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 510-526(in Chinese with English abstract).
- [33] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance [J]. Geochemical et Cosmochimica Acta, 1999, 63(11/12): 1815-1818.
- [34] 黄凡, 王登红, 陈毓川, 等. 中国钼矿中辉钼矿的稀土元素地球化学及其应用[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 287-301.
Huang Fan, Wang Denghong, Chen Yuchuan, et al. REE characteristics of molybdenites from endogenous molybdenum deposits in China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 287-301(in Chinese with English abstract).
- [35] Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, et al. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (14): 1873-1885. DOI:10.1007/s11434-007-0259-0.
- [36] 王京彬, 徐新. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿 [J]. 地质学报, 2006, 80(1): 23-31.
Wang Jingbing, Xu Xin. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 23-31(in Chinese with English abstract).
- [37] Zhang Z Q, Cao S W, Xu H B, et al. Ore control and Sn ore prospect in Chaoyanggou granitic body, Inner Mongolia [J]. Contributions to Geology and Mineral Research, 2007, 22 (3): 214-217
- [38] 余长发, 毛景文, 赵海杰, 等. 粤西大金山花岗岩体地球化学特征及岩石成因探讨[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1670-1689.
Yu Changfa, Mao Jingwen, Zhao Haijie, et al. Geochemical features and petrogenesis of the Dajinshan granites in west Guangdong Province [J]. Geology in China, 2012, 39 (6): 1670-1689 (in Chinese with English abstract).
- [39] 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 皖赣相邻区燕山期花岗岩类构造背景及其意义 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28(9): 1130-1134.
Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, et al. Tectonic setting of granitoids of Yanshanian Stage in the adjoining region of Anhui and Jiangxi Province and Its Significance [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2005, 28 (9): 1130-1134(in Chinese with English abstract).
- [40] 王磊, 龙文国, 周岱. 云开地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1016-1029.
Wang Lei, Long Wenguo, Zhou Dai. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of Caledonian granites from Precambrian basement in Yunkai area and its geological implications [J]. Geology in China, 2013, 40 (4): 1016-1029 (in Chinese with English abstract).
- [41] 李双, 杨晓勇, 孙卫东. 皖南歙县邓家坞钼矿床年代学及 Hf 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 3980-3992.
Li Shuang, Yang Xiaoyong, Sun Weidong. Ages and zircon Hf isotope geochemistry of the Dengjiawu Mo deposit in Shexian, South Anhui Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 3980-3992(in Chinese with English abstract).

Rock-forming and ore-forming characteristics of the Lidongkeng porphyritic granodiorite in Xiuning County, south Anhui Province

CHEN Zi-wei¹, YU Xin-qi¹, ZHOU Xiang¹, HAO Guo-sheng², QIU Jun-ting¹, LI Peng-ju²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. No. 332 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources, Huangshan 245000, Anhui, China)

Abstract: The Lidongkeng molybdenum deposit is located in Xiuning County, south Anhui Province. Accompanied by detailed geological description, this paper presents new ages and bulk-rock geochemistry for the Lidongkeng deposit. The LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb age of 153.01 ± 0.90 Ma (MSWD = 1.14) for the ore-bearing porphyritic granodiorite and the Re-Os model age of 144.9 ± 1.9 Ma (MSWD = 2.0) for the molybdenite suggest that both of the ore body and the porphyry occurred during the Early Yanshanian period. According to the analyses of elements, the rock is rich in Si and K but poor in Mg, Ca and P and is characterized by high Rb and low Yb + Ta values, suggesting a collision environment. The porphyry is geochemically characterized by slight negative Eu anomaly. The porphyry shows I-type granite affinity. The molybdenite samples have Re content from 24.17 to 27.92 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ which implies that the molybdenum in the Lidongkeng deposit might have been derived from the crust with partial mixture of mantle materials.

Key words: I-type granite; mixture of the crust and the mantle; Lidongkeng Mo deposit; zircon U-Pb dating; Re-Os dating

About the first author: CHEN Zi-wei, female, born in 1991, bachelor, majors in resources prospecting engineering; E-mail: chenziwei.chq@gmail.com.

About the corresponding author: YU Xin-qi, professor; E-mail: yuxinqi@cugb.edu.cn.