

云南大坪金矿新元古代成矿事件

——来自热液锆石和闪长岩 U-Pb 年代学及 Hf 同位素的约束

曹 原¹, 何小虎^{1,2}, 谈树成^{1,2}, 杨建宇³, 刘沛颖¹

(1. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南省高校关键矿产成矿学重点实验室, 云南 昆明 650091;
3. 云南华联锌铜股份有限公司, 云南 文山 663701)

摘 要: 大坪金矿是哀牢山-红河韧性剪切带南段最重要的大型金矿床之一, 由于其成矿时代和构造背景一直存在争议, 不利于带内金矿床成矿模型的建立和进一步找矿勘探。本文利用 LA-ICP-MS 对矿区内含金石英脉中热液锆石、闪长岩和花岗闪长岩脉中岩浆锆石开展了 U-Pb 年代学研究, 获得热液锆石 U-Pb 年龄为 760 ± 10 Ma, 表明大坪金矿区可能存在新元古代金矿化事件; 获得闪长岩和花岗闪长岩脉的锆石 U-Pb 年龄分别为 773 ± 9 Ma 和 766 ± 9 Ma, 与区域上 Rodinia 超大陆裂解和哀牢山地区的晋宁-澄江期大规模火山-岩浆活动事件时代一致。热液锆石与闪长岩、花岗闪长岩脉具有相似的 Hf 同位素组成特征和在误差范围内一致的年龄, 表明新元古代金矿化事件可能与闪长岩和花岗闪长岩脉的侵入有密切的成因联系。本文新元古代成矿事件的厘定, 结合前人的新生代始新世—渐新世为大坪金矿主要成矿时期的研究结果, 表明大坪金矿可能是新元古代和新生代不同岩浆-构造-热液事件叠加成矿作用的产物。

关键词: 哀牢山-红河韧性剪切带; 大坪金矿; 新元古代; 热液锆石; 闪长岩; U-Pb 定年

中图分类号: P588.1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0411-18

Neoproterozoic mineralization event of the Daping gold deposit in Yunnan Province: Constraints from U-Pb geochronology and Hf isotope of hydrothermal zircons and diorites

CAO Yuan¹, HE Xiao-hu^{1,2}, TAN Shu-cheng^{1,2}, YANG Jian-yu³ and LIU Pei-ying¹

(1. College of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Key Laboratory of Critical Minerals Metallogeny in Universities of Yunnan Province, Kunming 650091, China; 3. Yunnan Hualian Zinc & Indium Stock Co., Ltd., Wenshan 663701, China)

Abstract: The Daping Au deposit is one of the most important large-sized gold deposits in the south of the Ailao Mountain-Honghe River ductile shear zone. Due to the disputes on its mineralization timing and tectonic setting, it's difficult to establish the metallogenic model as well as further explore and exploit gold deposits in this belt. In this paper, LA-ICP-MS was used to study the U-Pb geochronology of hydrothermal zircon from Au-bearing quartz veins and magmatic zircon from diorite and granodiorite vein in the Daping Au deposit. The result shows that the age of hydrothermal zircon is 760 ± 10 Ma, suggesting that there was a Neoproterozoic mineralization event for the Daping gold deposit. The magmatic zircons from the diorite and granodiorite vein yielded ages of 773 ± 9 Ma and

收稿日期: 2020-11-02; 接受日期: 2021-01-18; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702084); 云南省教育厅研究科学研究基金项目(C176240111)

作者简介: 曹 原(1996-), 男, 硕士研究生, 从事矿床地球化学工作, E-mail: caoyuan5400@126.com; 通讯作者: 何小虎(1986-), 男, 副教授, 从事矿床/岩石地球化学教学和科研工作, E-mail: xhhe@yun.edu.cn。

766 ± 9 Ma, respectively. These results coincide with the breakup of the zircons from the diorite and granodiorite veins. Therefore, combined with their consistent ages within the error range, the authors hold that the Neoproterozoic gold mineralization event might have been Rodinia supercontinent and the Jinning-Chengjiang large-scaled volcanic-magmatic event in the Ailao Mountain area. The hydrothermal zircons have similar Hf isotopic composition to those of related intrusions of diorite and granodiorite. Although the Eocene-Oligocene was thought to be a main mineralization period for the Daping gold deposit in previous literature, the authors consider that the Daping gold deposit probably resulted from superimposed mineralization from the Neoproterozoic and Cenozoic magmatic-tectonic-hydrothermal events, as shown by the determination of the Neoproterozoic mineralization event in this study.

Key words: Ailao Mountain-Honghe River shear zone; Daping gold deposit; Neoproterozoic; hydrothermal zircon; diorite; U-Pb dating

Fund support: National Nature Science Foundation of China (41702084); Research and Scientific Research Fund Project of Yunnan Education Department(C176240111)

哀牢山-红河韧性剪切带位于特提斯构造域东段,是东南亚最重要的线性构造(长约1 000 km)之一,亦是扬子板块与印支地块的重要分界。新生代,哀牢山-红河韧性剪切带在印度板块向欧亚板块的斜向俯冲碰撞导致印支块体发生挤出、旋转和逃逸的过程中起着重要的调节作用(Burnard, 1999; 刘俊来等, 2011)。同时,该剪切带内发育一系列金(铜-钼)多金属矿床,金矿资源丰富,找矿潜力巨大,是我国重要的金成矿远景区之一(孙晓明等, 2007a; 石贵勇等, 2010; 田广等, 2014)。大坪金矿是位于哀牢山-红河韧性剪切带南段元阳县境内的大型金矿床,但其成矿时代、物质来源和动力学背景仍存在争议。前人对大坪金矿的矿床地质(金世昌等, 1994; 胡云中等, 1995; 毕献武等, 1997; 杨立强等, 2011; 李伟, 2014; 李勇兵等, 2015)、矿石矿物学(周跃飞等, 2003; 孙晓明等, 2007a)、成矿流体(Sun *et al.*, 2009; 石贵勇等, 2010; 朱路华等, 2011)等特征和成矿时代(金世昌等, 1994; 韩润生等, 1997; 应汉龙, 1998; 孙晓明等, 2007b; 张燕等, 2011)开展了大量研究工作。在成矿物质与成矿流体来源方面,存在两种观点:①地壳浅部(2 km左右)区域岩浆水和地下水混合来源,金来源于闪长岩围岩(金世昌等, 1994; 胡云中等, 1995; 毕献武等, 1997);②地幔流体和下地壳麻粒岩相富含CO₂变质流体混合来源(孙晓明等, 2006, 2007b; 熊德信等, 2007; 袁士松等, 2010; 石贵勇等, 2010)。在大坪矿区围岩闪长岩的成岩时代和该矿床的成矿时代方面,由于分析测试方法和对象的不同,一直存在争议。例如,前人通过角闪石 K-Ar 和全岩 Rb-Sr 等时线方法获得了闪长岩围岩的成岩年

龄在较大的范围内变化(926.15 ~ 481 Ma, 金世昌等, 1994; 韩润生等, 1997; 应汉龙, 1998),张燕等(2011)利用锆石 SHRIMP U-Pb 法获得闪长岩年龄为新元古代(773 ± 12 Ma)。在成矿时代方面,朱炳泉等(2001)对大坪金矿脉石英流体包裹体⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄测定给出高温坪年龄为 765.5 ± 7.0 Ma,孙晓明等(2006)对含金石英脉中热液绢云母的⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年结果为 33.76 ± 0.65 Ma, Bi 等(1996)利用含金石英脉中石英 ESR 获得大坪金矿成矿年龄为 58 ~ 41.3 Ma。这些争议不利于哀牢山-红河韧性剪切带内金矿床成矿构造背景和成矿模型的建立,也限制了该区的进一步勘查工作。针对上述问题,本文选取哀牢山-红河韧性剪切带中大坪金矿床含金石英脉中的热液锆石、赋矿围岩闪长岩和花岗闪长岩脉中的岩浆锆石为研究对象,开展了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年、微量元素和原位微区 Hf 同位素组成的测定,并结合前人的研究结果,厘定了大坪金矿床存在新元古代金矿化事件;明确了闪长岩和花岗闪长岩脉形成时代,并通过锆石微量元素和 Hf 同位素探讨了闪长岩和花岗闪长岩脉的来源及其与金矿化的关系。

1 区域与矿区地质概况

1.1 区域地质概况

大坪金矿位于哀牢山-红河韧性剪切带南段,属哀牢山成矿带。该区域经历了印支期和喜马拉雅期构造作用,形成了多个构造世代的叠加构造变形、多期构造动力体制转换和岩浆作用,导致金成矿作用复杂多变(邓军等, 2010a, 2010b; 杨立强等, 2010,

2011)。除大坪金矿床外,区内还发育墨江金矿、镇沅老王寨金矿、金平长安金(铜)矿等多个金矿床,沿哀牢山-红河断裂带,自北西往南东方向呈线性分

布。大坪金矿是哀牢山成矿带内储量最大的石英脉型金矿,主要分布在哀牢山断裂带西侧浅变质岩带内(图1)。

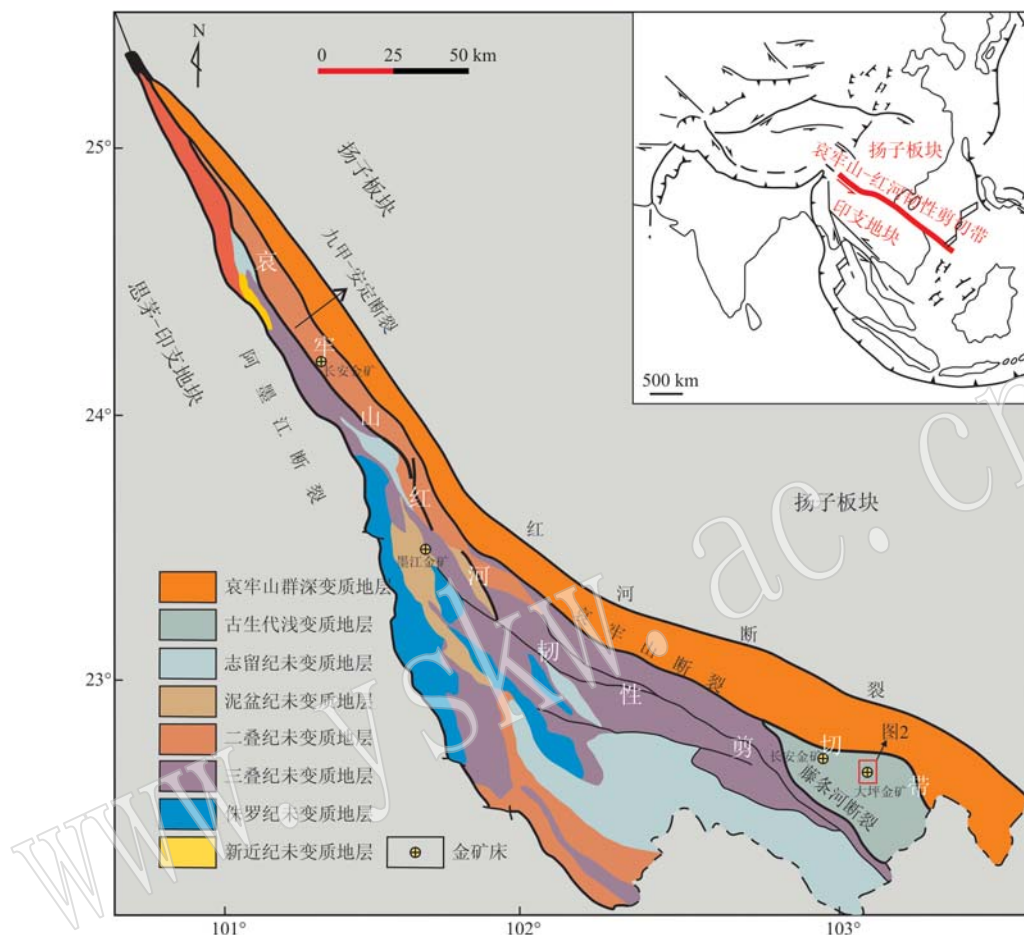


图1 哀牢山-红河韧性剪切带区域地质简图[据陈耀煌等(2014)修改]

Fig. 1 Regional geological map of Ailao Mountain-Honghe River shear zone (modified after Chen Yaohuang *et al.*, 2014)

红河-哀牢山韧性剪切带是喜山期由于印度板块与亚欧板块剪切碰撞形成的大型左行走滑韧性剪切带。新生代以来,受印度大陆与欧亚大陆碰撞的影响,哀牢山-红河韧性剪切带经历了多期左行走滑变形运动(Leloup *et al.*, 1995, 1999; 张进江等, 2006),形成了区内张性断裂(如小新街断裂),为成矿流体上升与金矿的沉淀提供了有利条件(Leloup and Kienast, 1993; Leloup *et al.*, 1995)。区域出露地层以哀牢山浅变质岩或未变质岩系为主,浅变质岩主要为泥盆系碳酸盐岩、页岩、砂岩等,志留系碳酸盐岩,奥陶系砂岩、板岩等(应汉龙, 1998)。未变质区域出露地层为下古生界碎屑岩、中生界碎屑岩和酸性喷出岩(流纹斑岩)。同时,发育系列北西向断裂及相间排列的中酸性岩和基性-超基性岩,控制

了区域内低品位铜和铜镍及钒钛磁铁矿矿床的产出(杨立强等, 2011)。

1.2 矿区地质概况

大坪金矿区位于哀牢山-红河韧性剪切带南部,夹于哀牢山和藤条河深大断裂之间的金平浅变质带区内(图1)。矿区内断裂十分发育,除哀牢山主断裂外,还发育有小寨金坪断裂、小新街断裂、三家河断裂等北西向次一级断裂贯穿整个矿区,并控制着矿体的分布。以小寨金坪断裂与三家河断裂为界,围绕着小新街断裂均匀分布有诸多雁列状更次一级断裂,这些断裂是大坪的主要储矿构造(图2)。以北西向的三家河断裂带为界,东北部主要出露新元古代闪长岩、燕山期黑云二长花岗岩、喜山期中基性火山岩(煌斑岩)。矿区金矿体以含金石英脉为主,

产状为北西-南东向,穿插在新元古代闪长岩体中。闪长岩体中部常发育有与金矿脉产状近似的花岗闪长岩脉,金矿脉偶尔穿插其中(图2)。除此之外,野外偶见含金石英脉与煌斑岩脉共生。矿床探明储量为60.00 t,平均品位为 14.30×10^{-6} 。矿区西南部出

露下奥陶统砂岩、板岩,中志留统碳酸盐岩,以及中泥盆统碳酸盐岩、页岩和砂岩等地层。区内围岩蚀变较强烈,主要有硅化、绿泥石化、绿帘石化、铁白云石化、方解石化。石英脉中黄铁矿是主要的载金矿物,偶见自然金(杨立强等,2011)。

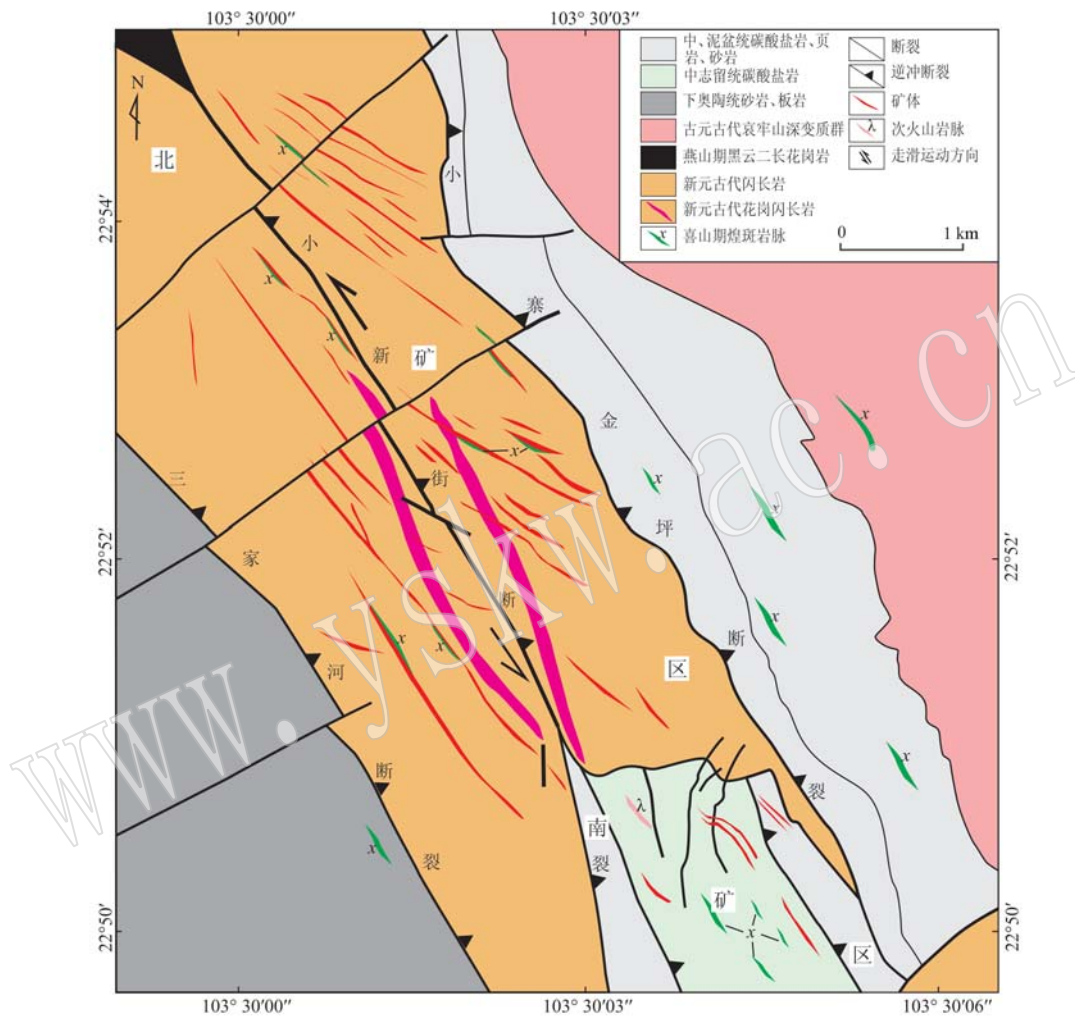


图2 大坪金矿区构造地质简图(据朱路华等,2011 修改)

Fig. 2 Structural geological map of the Daping gold deposit (modified after Zhu Luhua *et al.*, 2011)

2 样品特征及分析测试方法

2.1 样品特征

本文含金石英脉(DP-04)、赋矿闪长岩(DP-02)和花岗闪长岩脉(DP-03)样品均采自大坪金矿坑。石英脉宽度一般大于10 cm,呈乳白色,穿插在闪长岩、糜棱岩和板岩围岩中(图3a)。含金石英脉中矿石矿物主要为黄铁矿、方铅矿、黄铜矿等金属硫化

物,脉石矿物主要为石英,金属硫化物与石英脉体多呈共生关系(图3a)。两类(花岗)闪长岩主要呈浅绿色和灰白色,呈半自形-自形粒状结构、块状构造(图3a、3b)。主要矿物为斜长石(60%~70%)和角闪石(20%~30%),次要矿物为黑云母、碱性长石、石英等。赋矿闪长岩中角闪石含量略高于花岗闪长岩脉,且赋矿闪长岩矿物自形程度更高。花岗闪长岩脉中斜长石多呈破碎状,矿物(石英除外)多数发生强烈的绢云母化、绿泥石化等蚀变。

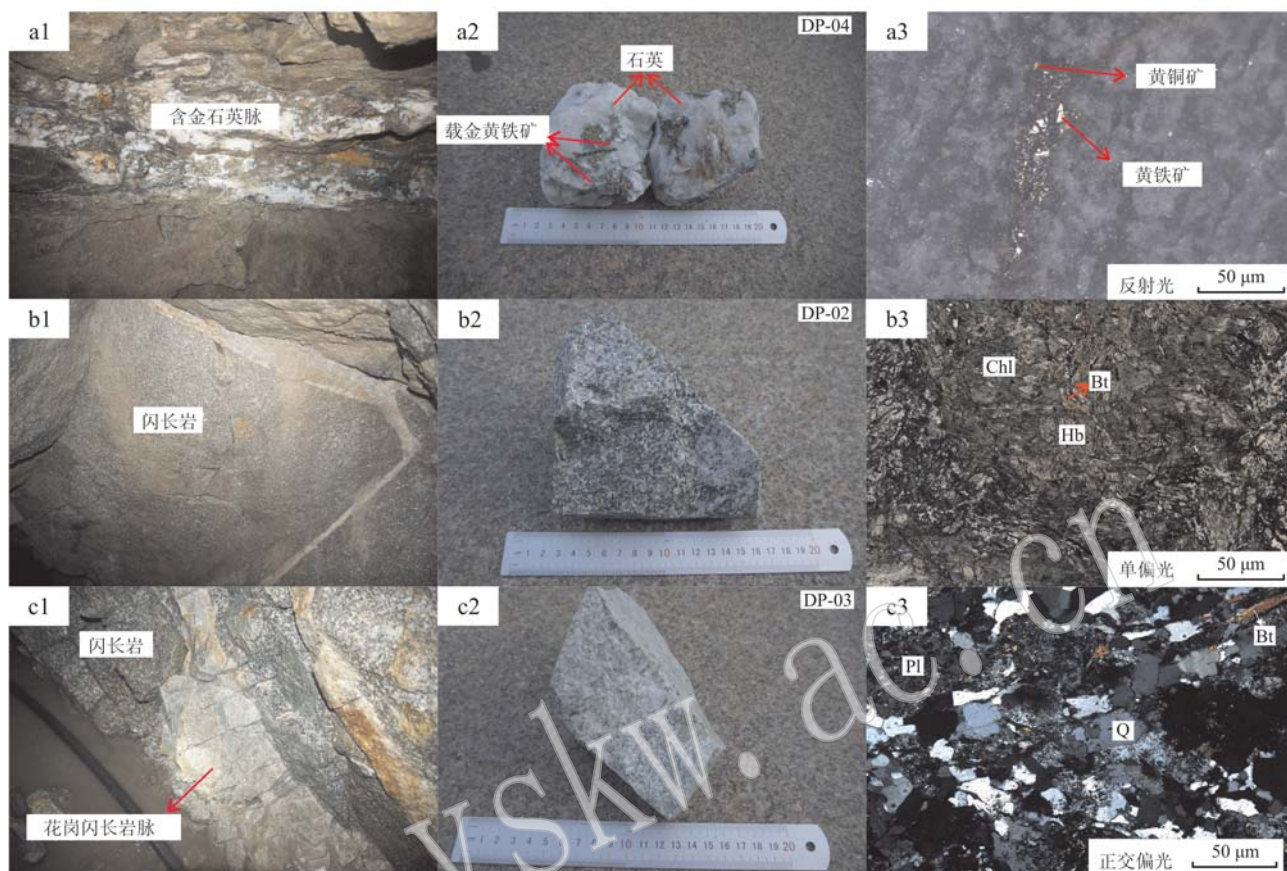


图3 大坪金矿床含金石英脉矿石(a)、闪长岩(b)和花岗闪长岩(c)的野外、手标本和镜下照片

Fig. 3 Photos of outcrop, hand specimen and microphotograph of gold-bearing quartz-vein (a), diorite (b) and granodiorite vein (c) from the Daping gold deposit

Chl—绿泥石; Bt—黑云母; Hb—角闪石; Q—石英; Pl—斜长石

Chl—chlorite; Bt—biotite; Hb—hornblende; Q—quartz; Pl—plagioclase

2.2 分析测试方法

样品中锆石的分选工作在河北省廊坊市区域地质调查所进行,先将样品破碎至60目,再将破碎的样品通过淘洗、磁选、重液分离和双目镜观察以挑选出代表性锆石置于环氧树脂中制靶。锆石阴极发光图像、U-Pb年代学和微量元素分析均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源重点实验室进行。锆石阴极发光图像(CL)采用JSM-IT100高真空扫描电子显微镜(配备有GATAN MINICL系统)完成,工作电场电压为10.0~13.0 kV,钨灯丝电流为80~85 μA 。LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源重点实验室测试完成,采用安捷伦公司四级杆质谱Agilent 7700e与193nm准分子激光剥蚀系统(GeolasPro)联用,激光斑束直径为32 μm ,频率为5 Hz。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏

度,二者在进入ICP之前通过1个T型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置。在U-Pb同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准91500和玻璃标准物质NIST610作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正, ^{29}Si 作内标进行微量元素浓度计算。每个时间分辨分析数据包括20~30 s空白信号和50 s样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMSDataCal完成(Liu *et al.*, 2008, 2010; Hu *et al.*, 2015)。锆石样品的U-Pb年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用Isoplot/Ex-ver3完成(Ludwig, 2003)。

锆石原位微区Hf同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用激光剥蚀多接收杯等离子质谱(LA-MC-ICP-MS)完成,激光束斑直径为44 μm ,

频率为 8 Hz, 激光剥蚀时间约 70 s。每次分析包含 20 s 背景采集和 50 s 激光剥蚀。采用锆石标准 91500 和 GJ-1 作为外标, 测试过程中, 每 10 个分析点之后测试 1 个 91500 和 GJ-1。采用 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0.793\ 81$ (Segal *et al.*, 2003; Fisher *et al.*, 2014) 和 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.026\ 56$ (Belousova *et al.*, 2009) 消除 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰, 用 Yb 的质量分馏系数 (β_{Yb}) 来校正 Lu 的质量分馏。数据处理采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 完成。仪器设置和分析详细流程见 Liu 等 (2008)、

侯可军等 (2009)、Hu 等 (2012)。

3 分析测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学及微量元素特征

样品的阴极发光图像和 U-Pb 年龄谐和图分别见图 4, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据见表 1, 锆石微量元素分析数据见表 2。阴极发光图像显示, 含金石英脉 (DP-04) 中锆石颗粒表现出面形分带、晶棱圆化和港湾状结构, 无明显震荡环带结构, 颗粒边部出

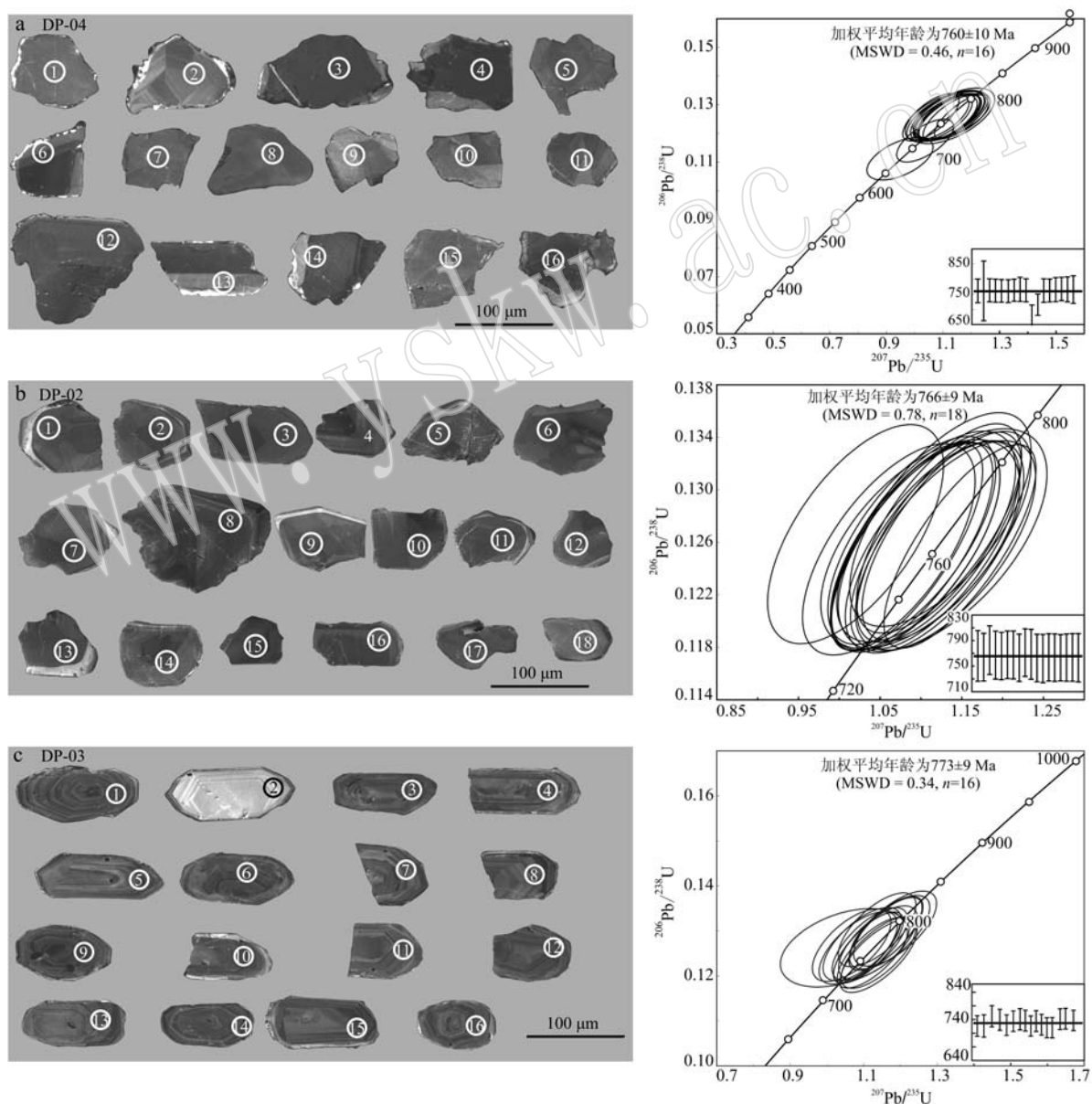


图 4 大坪金矿区闪长岩及含金石英脉热液锆石 CL 图及 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb age concordia diagrams and cathodoluminescence (CL) images of zircon from diorite and Au-bearing quartz vein from the Daping gold deposit

表 1 大坪金矿区闪长岩、花岗闪长岩与含金石英脉

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating result of diorite, granodiorite and Au-bearing quartz vein from the Daping gold deposit

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/ U	同位素年龄/Ma			
	Pb	Th	U		U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$
闪长岩								
DP-02-01	174	456	302	1.51	766	20	766	25
DP-02-02	150	357	250	1.43	764	19	753	24
DP-02-03	192	476	263	1.81	775	19	765	22
DP-02-04	219	526	334	1.57	767	19	764	20
DP-02-05	171	430	246	1.75	766	19	748	20
DP-02-06	170	392	363	1.08	768	19	768	20
DP-02-07	338	822	507	1.62	768	19	756	22
DP-02-08	401	1 029	603	1.71	763	18	745	19
DP-02-09	152	357	252	1.42	771	19	764	20
DP-02-10	251	600	416	1.44	769	20	714	22
DP-02-11	194	472	372	1.27	763	19	750	20
DP-02-12	171	443	267	1.66	762	19	734	21
DP-02-13	348	915	470	1.95	764	19	762	20
DP-02-14	172	429	261	1.64	763	19	748	20
DP-02-15	449	1 125	726	1.55	763	18	776	18
DP-02-16	138	327	265	1.23	763	19	750	21
DP-02-17	157	411	259	1.59	764	19	768	21
DP-02-18	102	237	230	1.03	763	19	761	21
花岗闪长岩脉								
DP-03-01	190	334	539	0.62	766	19	746	21
DP-03-02	40.2	70.1	108	0.65	766	20	727	35
DP-03-05	262	455	662	0.69	756	19	773	20
DP-03-06	207	360	547	0.66	789	19	771	21
DP-03-07	132	239	406	0.59	770	19	737	21
DP-03-08	225	372	711	0.52	784	19	782	19
DP-03-09	80	132	233	0.57	791	19	794	21
DP-03-10	121	199	422	0.47	786	19	787	21
DP-03-11	298	557	891	0.62	766	18	758	18
DP-03-12	248	445	681	0.65	785	19	782	19
DP-03-13	147	255	485	0.53	771	19	761	20
DP-03-14	198	356	576	0.62	760	18	766	19
DP-03-15	119	209	367	0.57	760	19	773	20
DP-03-17	137	234	411	0.57	771	19	751	21
DP-03-18	179	307	546	0.56	773	19	772	21
DP-03-20	271	530	667	0.79	767	19	760	19
含金石英脉								
DP-04-01	488	1329	297	4.48	761	20	748	23
DP-04-03	106	285	213	1.34	763	19	765	22
DP-04-04	485	1 448	518	2.80	762	19	766	22
DP-04-05	1 335	4 131	901	4.58	761	19	768	19
DP-04-07	153	417	287	1.45	761	19	757	22
DP-04-08	465	1 045	1 555	0.67	764	18	784	18
DP-04-09	299	833	219	3.79	766	20	764	24
DP-04-10	49	117	168	0.70	763	19	769	25
DP-04-11	139	435	127	3.42	679	18	677	25
DP-04-12	159	448	288	1.55	716	18	723	21
DP-04-13	167	443	329	1.35	763	19	733	20
DP-04-14	382	1 196	234	5.12	763	19	743	23
DP-04-15	1 120	3 569	624	5.72	766	20	767	23
DP-04-16	705	2 254	270	8.36	768	19	768	27
DP-04-17	179	525	257	2.04	767	20	764	25
DP-04-18	476	1 412	649	2.18	766	23	770	29

现白色蚀变边等(图 4a), 这些形态特征暗示其为典型的热液锆石。另外, 该样品中锆石 U 和 Th 含量异常, Th/U 值(0.67~8.36)变化较大, 在球粒陨石标准化稀土元素配分图上无明显 Ce 或 Eu 异常, 且其稀土元素总量明显高于其他样品(表 2、图 5a), 这些特征与前人研究的热液锆石较为一致(Hancher and Westrene, 2007; 赵志丹等, 2018; 蔡宏明等, 2019)。研究表明, 锆石可以在中低温热液中结晶生长(Sinha *et al.*, 1992; Kerrich and Kyser, 1994; Dubińska *et al.*, 2004), 形成的热液锆石可以用来有效地确定热液作用以及金矿化的时代(张小文等, 2009)。本文分析结果显示, 含金石英脉中锆石加权平均年龄为 760 ± 10 Ma (MSWD=0.46, $n=16$), 该年龄可以代表含金石英脉的形成年龄, 暗示大坪金矿区可能存在一期新元古代的金矿化事件。

闪长岩(DP-02)和花岗闪长岩脉(DP-03)中锆石颗粒均具有明显的岩浆震荡环带结构, Th/U 值均大于 0.1(0.47~1.95), 且变化较小, 具有较低的 ΣREE 。球粒陨石标准化稀土元素配分图中表现出 HREE 相对于 LREE 强烈富集、Ce 正异常和 Eu 负异常的特征(图 5b、5c), 这些特征表明它们为典型的岩浆锆石(Hoskin and Schaltegger, 2000; Hoskin and Ireland, 2000; Belousova *et al.*, 2002; 吴元保等, 2004; Singh, 2018; 鲁倩等, 2019)。在锆石年龄谱和图中数据点成群分布(图 4b、4c), 计算得到闪长岩和花岗闪长岩脉的加权平均年龄分别为 766 ± 9 Ma (MSWD=0.78, $n=18$) 和 773 ± 9 Ma (MSWD=0.34, $n=16$)。两个年龄在误差范围内基本一致, 可以代表大坪金矿区闪长岩和花岗闪长岩脉的形成年龄, 其形成时代均应为新元古代。

3.2 锆石 Hf 同位素特征

本次研究通过 LA-MC-ICP-MS 获得了原位锆石 Hf 同位素组成(原位测点见图 4 中 CL 图), 结果列于表 3。 $\varepsilon \text{Hf}(t)$ 的计算方法见 Söerlund 等(2004)和王挽琼等(2019)。结果显示, DP-02 样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.282 371~0.282 480, 计算的 $\varepsilon \text{Hf}(t)$ 值范围为 2.52~6.39, t_{DM}^{C} 模式年龄为 1 500~1 260 Ma; DP-03 样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.282 155~0.282 274, 计算的 $\varepsilon \text{Hf}(t)$ 值范围为 -5.14~-0.91, t_{DM}^{C} 模式年龄为 1 982~1 691 Ma。含金石英脉样品(DP-04)中锆石颗粒 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.282 375~0.282 594, 计算的 $\varepsilon \text{Hf}(t)$ 值范围为 2.64~10.41, t_{DM}^{C} 模式年龄为 1 512~1 019 Ma。

表2 大坪金矿区闪长岩、花岗闪长岩及含金石英脉中锆石稀土元素和微量元素组成

 $w_B/10^{-6}$

Table 2 REE and trace elemental compositions of zircons from diorites, granodiorites and Au-bearing quartz veins from the Daping gold deposit

样品点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
DP-02-01	0.02	7.25	0.00	0.42	1.57	0.28	5.25	1.99	23.4	7.89	35.6	7.66
DP-02-02	0.00	6.61	0.05	0.80	1.44	0.42	7.13	2.30	27.3	9.60	42.5	9.46
DP-02-03	0.00	8.14	0.09	1.00	1.74	0.36	7.33	2.58	26.9	9.51	39.2	8.47
DP-02-04	0.02	8.83	0.07	1.19	2.31	0.60	8.03	2.69	30.1	9.95	43.8	9.91
DP-02-05	0.00	6.83	0.05	0.68	1.37	0.33	5.41	1.57	18.9	6.19	27.4	5.84
DP-02-06	0.00	8.32	0.06	0.69	1.18	0.40	6.76	1.81	23.1	7.42	33.8	7.31
DP-02-07	0.03	8.92	0.23	2.96	4.08	1.09	13.60	3.92	44.4	14.90	62.6	13.70
DP-02-08	0.03	11.60	0.18	2.41	3.13	0.72	10.70	3.19	34.9	10.10	42.9	8.66
DP-02-09	0.00	6.47	0.04	0.51	1.02	0.24	4.54	1.58	19.1	6.90	30.0	6.95
DP-02-10	0.00	9.65	0.14	1.82	1.67	0.48	9.85	2.54	26.2	8.15	31.4	6.34
DP-02-11	0.01	7.39	0.08	1.39	1.36	0.40	5.58	1.90	20.3	6.93	30.4	6.81
DP-02-12	0.00	7.15	0.05	1.22	1.66	0.47	6.28	1.90	18.9	6.11	23.7	5.00
DP-02-13	0.00	11.50	0.09	2.03	1.86	0.55	9.89	2.68	28.7	9.04	36.2	7.82
DP-02-14	0.01	6.79	0.05	0.85	1.34	0.39	6.40	2.00	22.9	7.92	34.4	7.39
DP-02-15	0.02	29.80	0.24	3.97	5.58	0.81	22.30	7.32	80.2	28.90	123.0	26.70
DP-02-16	0.02	13.70	0.21	2.67	3.87	0.75	14.90	4.59	47.7	17.60	78.8	17.90
DP-02-17	0.03	6.95	0.06	0.83	1.71	0.54	7.48	2.40	26.0	8.29	31.0	6.31
DP-02-18	0.01	13.90	0.14	2.43	3.53	0.60	15.20	4.70	55.6	21.50	99.9	22.90
DP-03-01	0.00	24.90	0.04	1.08	2.19	0.74	10.18	3.49	41.1	17.20	83.1	21.30
DP-03-02	0.01	24.60	0.09	1.57	2.84	1.18	16.20	6.13	79.1	33.30	170	41.80
DP-03-05	7.18	36.30	1.53	7.22	3.13	0.82	10.04	3.42	40.4	16.00	76.4	19.50
DP-03-06	2.04	32.90	0.48	3.40	2.63	0.83	12.80	4.52	56.9	23.70	117.0	30.10
DP-03-07	0.03	19.80	0.09	1.20	2.11	0.89	11.20	4.28	58.1	23.50	117.0	29.90
DP-03-08	6.81	33.70	1.48	6.28	2.47	0.83	13.20	4.10	54.6	23.10	113.0	30.30
DP-03-09	1.73	15.90	0.43	2.42	1.93	0.66	7.64	2.42	30.0	11.60	53.3	13.60
DP-03-10	0.33	11.60	0.09	0.82	1.97	0.15	14.30	6.18	79.0	33.60	164.0	39.70
DP-03-11	8.40	38.70	1.86	7.33	3.12	0.82	10.80	3.68	44.2	19.00	91.9	23.50
DP-03-12	4.00	25.30	0.78	4.66	2.79	0.35	13.20	5.26	70.9	29.70	152.0	38.60
DP-03-13	0.15	18.00	0.09	0.83	1.29	0.65	7.63	2.89	33.8	14.10	72.3	19.00
DP-03-14	0.00	23.50	0.04	1.06	2.53	0.53	11.30	3.73	46.0	18.60	89.2	23.90
DP-03-15	0.17	13.60	0.06	0.92	1.91	0.32	11.70	3.97	51.8	20.60	98.5	23.10
DP-03-17	0.22	16.00	0.04	0.96	1.34	0.59	7.33	2.73	28.6	12.60	58.9	15.10
DP-03-18	0.02	26.80	0.07	1.08	2.46	1.05	12.80	5.15	61.9	24.90	123.0	31.40
DP-03-20	3.56	37.00	0.89	4.89	3.24	0.80	10.90	3.91	48.0	18.90	89.6	22.70
DP-04-01	0.03	11.20	0.24	4.11	5.57	1.91	25.70	7.04	74.5	25.40	103.2	21.20
DP-04-03	0.05	8.26	0.13	2.25	2.79	0.82	11.90	4.15	46.7	18.60	92.9	22.00
DP-04-04	0.07	6.65	0.27	3.34	4.87	1.31	14.50	4.71	54.6	20.80	91.8	19.70
DP-04-05	0.11	18.70	0.70	7.55	9.15	2.87	69.30	23.20	257.0	86.60	327.0	63.00
DP-04-07	0.00	4.84	0.04	0.68	0.96	0.50	5.02	1.54	17.8	6.73	29.4	7.01
DP-04-08	0.10	6.70	0.35	4.14	9.08	3.85	39.00	8.89	72.3	18.10	57.0	10.50
DP-04-09	0.04	9.80	0.13	1.80	3.34	0.93	13.40	4.29	48.7	17.20	74.4	16.30
DP-04-10	0.01	10.50	0.15	2.51	3.60	1.33	24.30	8.83	119.0	50.90	261.0	60.30
DP-04-11	0.03	6.10	0.06	1.15	1.54	0.47	8.20	2.43	25.8	9.28	41.0	8.80
DP-04-12	0.00	4.19	0.07	0.95	1.17	0.75	7.41	2.35	27.3	8.81	39.5	9.30
DP-04-13	0.06	3.45	0.05	1.22	1.32	0.55	3.97	1.21	14.5	5.35	23.9	5.26
DP-04-14	0.01	13.50	0.11	2.12	2.80	0.58	13.00	3.94	44.9	15.40	65.9	13.50
DP-04-15	0.28	35.70	0.77	17.20	32.30	9.34	125.00	33.50	319.0	97.10	358.0	66.00
DP-04-16	0.11	18.40	0.63	10.02	12.4	2.40	53.70	14.90	143.0	44.90	159.0	29.50
DP-04-17	0.10	5.18	0.25	2.99	2.66	1.44	9.64	3.00	33.3	12.10	56.9	13.30
DP-04-18	0.06	7.84	0.13	1.64	2.36	0.99	9.53	2.91	34.6	14.20	60.4	13.80

续表 2

Continued Table 2

样品点号	Yb	Lu	P	Ti	Y	Nb	Hf	Ta	Pb	Th	U	Σ REE
DP-02-01	71.4	13.10	201	9.60	252	0.34	9 323	0.44	174	456	302	428
DP-02-02	89.7	16.90	175	8.92	311	0.33	8 677	0.28	150	357	250	525
DP-02-03	78.0	13.0	161	11.60	292	0.45	8 068	0.34	192	476	263	488
DP-02-04	92.8	14.90	183	11.80	330	0.41	8 710	0.26	219	526	334	555
DP-02-05	54.9	8.55	147	11.60	201	0.30	8 082	0.40	171	430	246	339
DP-02-06	67.1	11.20	189	14.70	238	0.32	7 342	0.26	170	392	363	407
DP-02-07	123.0	19.20	187	14.60	453	0.30	8 590	0.51	338	822	507	766
DP-02-08	75.3	10.90	274	14.60	323	0.38	7 839	0.41	401	1 029	603	538
DP-02-09	67.0	10.7	141	10.40	214	0.34	8 716	0.30	152	357	252	369
DP-02-10	54.7	8.39	241	13.90	255	0.40	6 812	0.34	251	600	416	417
DP-02-11	62.1	10.80	161	13.90	219	0.41	8 700	0.40	194	472	372	375
DP-02-12	44.9	6.36	153	14.00	195	0.38	8 243	0.37	171	443	267	319
DP-02-13	65.8	10.10	199	18.50	292	0.46	7 441	0.33	348	915	470	478
DP-02-14	69.8	11.30	159	12.30	253	0.29	8 697	0.31	172	429	261	424
DP-02-15	247.0	39.80	383	21.20	907	1.94	8 798	1.86	449	1 125	726	1 523
DP-02-16	177.0	30.60	285	19.50	553	0.65	8 986	0.55	138	327	265	963
DP-02-17	55.4	8.17	163	12.20	244	0.29	7 718	0.37	157	411	259	399
DP-02-18	229.0	39.70	276	20.10	690	1.07	8 804	0.87	102	237	230	1 200
DP-03-01	232.0	46.10	161	6.00	543	1.61	11 073	1.31	190	334	539	1 026
DP-03-02	452.0	87.80	277	6.81	1 065	3.39	9 413	0.98	40	70.1	108	1 981
DP-03-05	202.0	39.40	628	9.60	499	2.29	10 866	1.61	262	455	662	963
DP-03-06	318.0	63.30	354	1.61	774	2.79	10 426	1.67	207	360	547	1 443
DP-03-07	324.0	65.20	203	4.60	761	1.72	9 769	1.10	132	239	406	1 419
DP-03-08	340.0	69.20	1110	4.37	739	1.91	11 381	1.39	225	372	711	1 439
DP-03-09	145.0	27.80	315	5.21	360	0.64	9 797	0.66	80	132	233	674
DP-03-10	407.0	76.40	198	2.40	1 045	3.95	11 371	2.13	121	199	422	1 880
DP-03-11	255.0	53.60	1067	11.50	601	1.76	11 471	1.68	298	557	891	1 162
DP-03-12	392.0	72.00	395	4.47	952	3.19	10 567	2.21	248	445	681	1 763
DP-03-13	219.0	44.30	211	2.80	471	1.42	11 614	1.26	147	255	485	905
DP-03-14	258.0	49.90	155	4.37	602	1.84	10 990	1.65	198	356	576	1 130
DP-03-15	238.0	42.90	190	7.14	635	1.09	11 207	0.95	119	209	367	1 143
DP-03-17	171.0	33.20	182	5.17	386	1.05	11 240	0.96	137	234	411	734
DP-03-18	337.0	66.10	254	3.59	796	3.18	10 900	1.66	179	307	546	1 491
DP-03-20	246.0	49.10	700	4.59	604	1.70	11 578	1.55	271	530	667	1 144
DP-04-01	184.0	32.60	217	16.80	778	0.24	7 629	0.30	488	1 329	297	1 275
DP-04-03	215.0	43.60	320	13.50	636	0.42	7 309	0.66	106	285	213	1 106
DP-04-04	172.0	28.90	163	13.60	670	0.18	5 757	0.18	485	1 448	518	1 094
DP-04-05	505.0	80.60	351	18.60	2 632	2.18	8 095	1.52	1335	4 131	901	4 083
DP-04-07	63.9	11.90	193	12.70	216	0.16	5 989	0.13	153	417	287	366
DP-04-08	84.5	12.30	161	8.68	508	0.77	6 398	1.97	465	1 045	1 555	835
DP-04-09	149.0	26.70	266	20.20	549	0.80	7 287	0.53	299	833	219	916
DP-04-10	581.0	113.00	346	19.40	1 677	1.18	9 512	0.46	49.3	117	168	2 914
DP-04-11	85.1	15.50	175	16.60	303	0.34	8 058	0.34	139	435	127	509
DP-04-12	85.9	15.80	154	9.70	295	0.13	6 791	0.37	159	448	288	498
DP-04-13	50.1	8.56	167	7.01	183	0.13	7 607	0.15	167	443	329	302
DP-04-14	118.0	20.10	247	21.20	493	0.40	8 332	0.51	382	1 196	234	807
DP-04-15	535.0	83.50	554	24.70	2 874	1.96	7 787	0.88	1 120	3 569	624	4 587
DP-04-16	237.0	35.40	269	20.40	1 371	0.64	8 086	0.71	705	2 254	270	2 133
DP-04-17	131.0	26.40	152	11.70	399	0.09	6 692	0.20	179	525	257	698
DP-04-18	129.0	22.50	326	0.20	444	0.27	5 836	0.12	476	1412	649	744

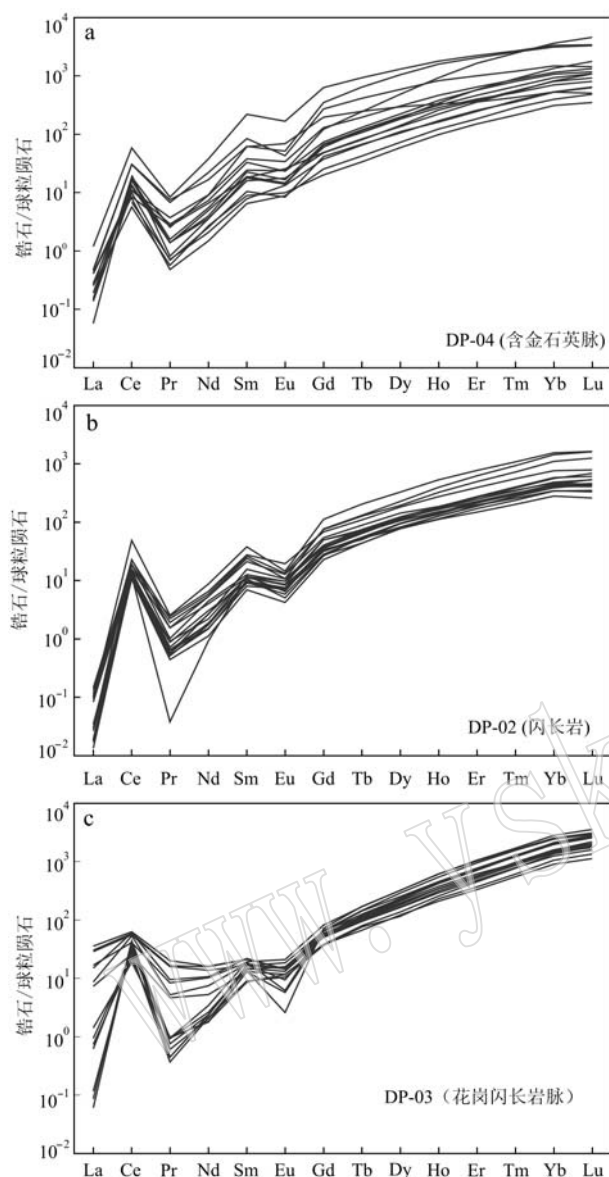


图5 大坪金矿区闪长岩、花岗闪长岩和含金石英脉锆石球粒陨石标准化REE配分型式图(标准化值据McDonough and Sun, 1995)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of zircon in diorite, granodiorite and Au-bearing quartz vein in the Daping gold deposit (normalized values after McDonough and Sun, 1995)

4 讨论

4.1 大坪金矿区闪长岩形成时代及成因

前人围绕大坪金矿区赋矿围岩闪长岩成岩年龄已开展了大量的工作,并得出了不同的结果。金世昌等(1994)利用Rb-Sr等时线法测得闪长岩的成岩

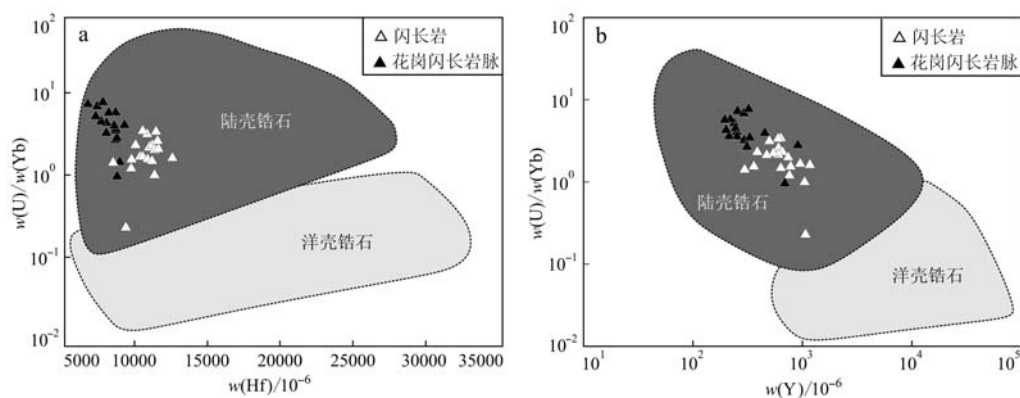
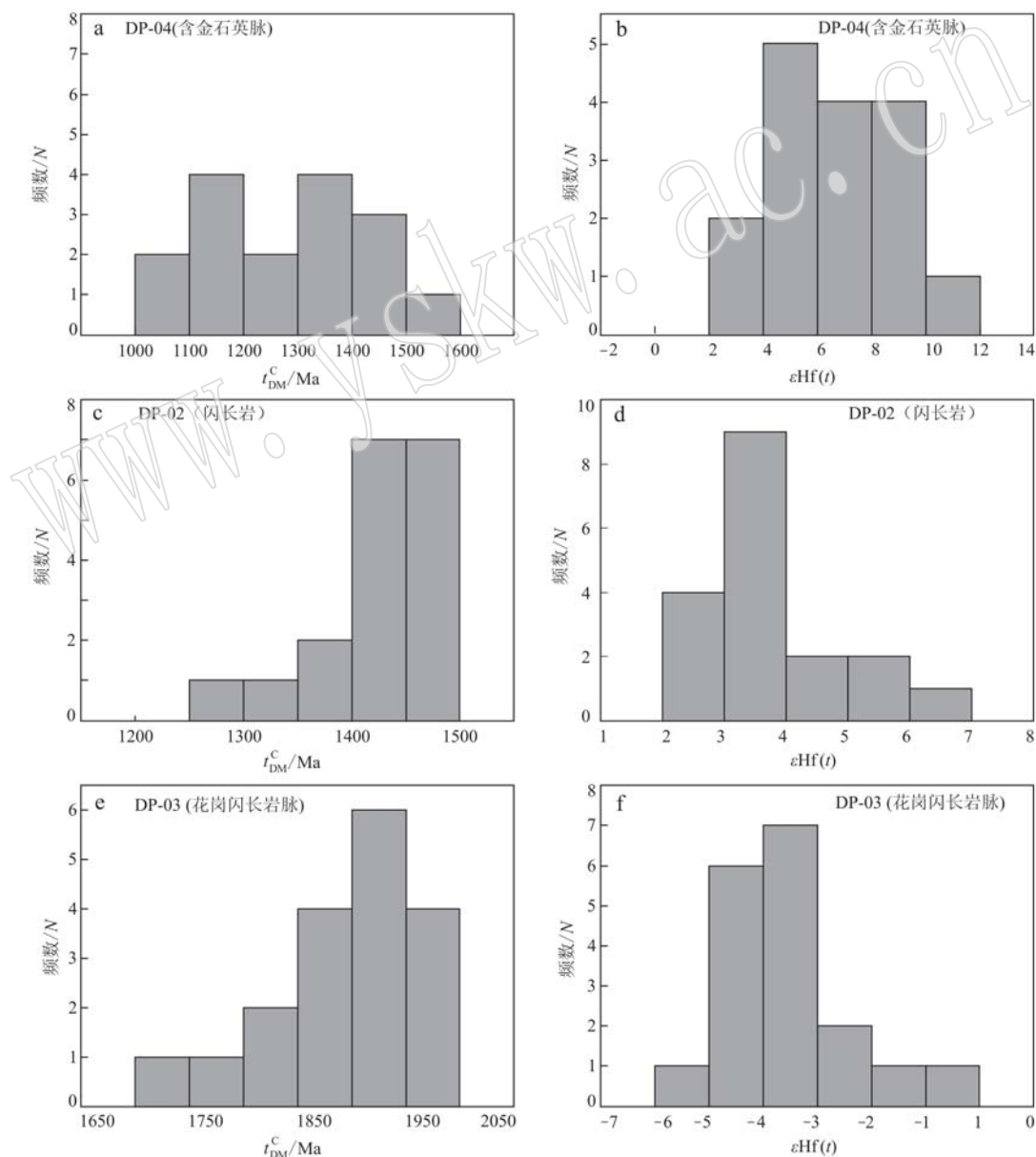
年龄为481 Ma,而后韩润生等(1997)采用K-Ar法测得闪长岩全岩年龄为 844.63 ± 33.66 Ma,并通过其中角闪石获得单矿物年龄为 $926.15 \pm 94.51 \sim 845.26 \pm 12.74$ Ma。由于闪长岩蚀变强烈,其中角闪石受到后期多期次热液作用影响,增加了Rb-Sr等时线法和K-Ar法获得成岩年龄的不确定性。张燕等(2011)利用锆石SHRIMP定年方法获得闪长岩的成岩年龄为 773 ± 12 Ma,陈耀煌(2015)利用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年方法获得闪长岩的成岩年龄为 761 ± 7 Ma。显然锆石获得的闪长岩成岩年龄更为可靠。本文通过LA-ICP-MS获得围岩闪长岩与花岗闪长岩脉样品的U-Pb加权平均年龄分别为 766 ± 9 Ma和 773 ± 9 Ma,在误差范围内与张燕等(2011)和陈耀煌(2015)测得的成岩年龄结果基本一致。成岩年龄结果显示,大坪金矿区闪长岩属于新元古代晚期岩浆作用的产物,与区域上同时期Rodinia超大陆裂解和哀牢山地区的晋宁-澄江期大规模火山岩岩浆活动在误差范围内一致(金世昌等, 1994; 朱炳泉等, 2001)。

由于矿区内闪长岩蚀变严重,烧失量较大(LOI在1.34%~14.03%之间)(陈耀煌等, 2014),利用其主量和微量元素地球化学特征对其成因及构造背景进行约束可能存在较大误差。前人对各种不同成因的锆石(包括岩浆锆石、变质锆石和热液锆石)进行了详细的研究,发现不同成因锆石微量元素组成不同,可以通过锆石稀土及微量元素反演其成因和母岩浆的源区、演化历史和分离结晶温度等信息(Hoskin and Schaltegger, 2000; 吴元保等, 2004; Wang *et al.*, 2012; 雷玮琰, 2013)。由于锆石具有封闭温度高、化学性质稳定、不易受蚀变影响等,可以用来讨论寄主岩石的成因并约束其形成的构造背景。大坪金矿闪长岩中锆石具有较高的U/Yb值以及近乎一致的Hf、Y含量,具有强烈的陆壳源区特征(图6a、6b),表明大坪金矿区闪长岩可能主要来源于陆壳。锆石Hf同位素的模式年龄 t_{DM}^C 代表锆石寄主岩石源区从亏损地幔分离进入地壳的时间(Zheng *et al.*, 2006; 陈道公等, 2007),含金石英脉(DP-04)的 t_{DM}^C 模式年龄变化范围为1 512~1 019 Ma,集中在1.5~1.0 Ga之间(图7a),具正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(2.64~10.41,图7b),相对闪长岩与花岗闪长岩而言其具有更广泛的二阶段模式年龄与 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值,说明含金石英脉中的锆石很可能形成于完全不同的环境。

表 3 大坪金矿区闪长岩、花岗闪长岩及含金石英脉中锆石 Hf 同位素结果

Table 3 Hf isotopic compositions of zircons from diorite, granodiorite and Au-bearing quartz vein from the Daping gold deposit

样品点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
DP-02-1	766	0.005 092	0.000 045	0.000 191	0.000 002	0.282 397	0.000 021	3.43	1 183	1 447	-0.99
DP-02-2	764	0.007 849	0.000 074	0.000 296	0.000 002	0.282 403	0.000 026	3.66	1 177	1 437	-0.99
DP-02-3	775	0.006 676	0.000 022	0.000 226	0.000 001	0.282 371	0.000 028	2.52	1 219	1 500	-0.99
DP-02-4	767	0.006 222	0.000 015	0.000 221	0.000 001	0.282 406	0.000 026	3.76	1 171	1 426	-0.99
DP-02-5	766	0.004 094	0.000 015	0.000 140	0.000 001	0.282 415	0.000 030	4.08	1 156	1 404	-1.00
DP-02-6	768	0.006 664	0.000 039	0.000 221	0.000 001	0.282 480	0.000 029	6.39	1 069	1 260	-0.99
DP-02-7	768	0.011 482	0.000 029	0.000 365	0.000 001	0.282 380	0.000 024	2.82	1 212	1 490	-0.99
DP-02-8	763	0.006 048	0.000 013	0.000 196	0.000 000	0.282 398	0.000 031	3.48	1 181	1 445	-0.99
DP-02-9	771	0.005 744	0.000 021	0.000 202	0.000 001	0.282 417	0.000 029	4.16	1 155	1 398	-0.99
DP-02-10	769	0.006 746	0.000 028	0.000 195	0.000 001	0.282 394	0.000 029	3.32	1 187	1 452	-0.99
DP-02-11	763	0.005 590	0.000 016	0.000 186	0.000 001	0.282 378	0.000 028	2.76	1 209	1 491	-0.99
DP-02-12	762	0.004 160	0.000 013	0.000 128	0.000 001	0.282 403	0.000 028	3.66	1 172	1 433	-1.00
DP-02-13	764	0.006 289	0.000 039	0.000 193	0.000 001	0.282 443	0.000 031	5.06	1 120	1 345	-0.99
DP-02-14	763	0.006 122	0.000 029	0.000 205	0.000 001	0.282 407	0.000 024	3.81	1 169	1 425	-0.99
DP-02-15	763	0.022 057	0.000 179	0.000 677	0.000 004	0.282 399	0.000 026	3.52	1 194	1 458	-0.98
DP-02-16	763	0.013 419	0.000 155	0.000 476	0.000 006	0.282 380	0.000 022	2.85	1 214	1 494	-0.99
DP-02-17	764	0.005 363	0.000 016	0.000 166	0.000 000	0.282 390	0.000 022	3.18	1 192	1 463	-1.00
DP-02-18	763	0.024 867	0.000 380	0.000 856	0.000 010	0.282 448	0.000 026	5.24	1 132	1 356	-0.97
DP-03-01	766	0.016 750	0.000 166	0.000 661	0.000 008	0.282 184	0.000 018	-4.11	1 492	1 937	-0.98
DP-03-02	766	0.047 985	0.000 710	0.001 827	0.000 022	0.282 271	0.000 023	-1.03	1 415	1 780	-0.94
DP-03-05	756	0.018 035	0.000 244	0.000 730	0.000 009	0.282 196	0.000 018	-3.67	1 478	1 918	-0.98
DP-03-06	789	0.015 619	0.000 188	0.000 599	0.000 007	0.282 191	0.000 020	-3.88	1 481	1 906	-0.98
DP-03-07	770	0.027 008	0.000 569	0.001 041	0.000 019	0.282 214	0.000 025	-3.05	1 465	1 880	-0.97
DP-03-08	784	0.030 607	0.000 205	0.001 247	0.000 006	0.282 209	0.000 021	-3.22	1 480	1 889	-0.96
DP-03-09	791	0.015 956	0.000 127	0.000 625	0.000 005	0.282 198	0.000 023	-3.62	1 471	1 889	-0.98
DP-03-10	786	0.026 265	0.000 403	0.000 925	0.000 011	0.282 237	0.000 022	-2.25	1 429	1 816	-0.97
DP-03-11	766	0.015 079	0.000 095	0.000 596	0.000 003	0.282 196	0.000 021	-3.67	1 473	1 907	-0.98
DP-03-12	785	0.036 000	0.000 497	0.001 255	0.000 016	0.282 274	0.000 022	-0.91	1 389	1 744	-0.96
DP-03-13	771	0.018 696	0.000 162	0.000 787	0.000 006	0.282 240	0.000 026	-2.11	1 419	1 812	-0.98
DP-03-14	760	0.018 435	0.000 243	0.000 739	0.000 010	0.282 163	0.000 022	-4.86	1 524	1 990	-0.98
DP-03-15	760	0.015 274	0.000 099	0.000 548	0.000 002	0.282 207	0.000 021	-3.30	1 456	1 886	-0.98
DP-03-17	771	0.015 557	0.000 238	0.000 649	0.000 011	0.282 177	0.000 024	-4.36	1 501	1 949	-0.98
DP-03-18	773	0.011 037	0.000 329	0.000 464	0.000 014	0.282 155	0.000 024	-5.14	1 524	1 991	-0.99
DP-03-20	767	0.014 628	0.000 307	0.000 622	0.000 013	0.282 183	0.000 019	-4.15	1 492	1 938	-0.98
DP-04-01	761	0.020 296	0.000 133	0.000 634	0.000 004	0.282 416	0.000 030	4.13	1 169	1 420	-0.98
DP-04-03	763	0.022 108	0.000 074	0.000 795	0.000 003	0.282 422	0.000 037	4.31	1 167	1 412	-0.98
DP-04-04	762	0.023 129	0.000 039	0.000 732	0.000 002	0.282 434	0.000 043	4.75	1 148	1 383	-0.98
DP-04-05	761	0.052 708	0.000 081	0.001 380	0.000 001	0.282 482	0.000 036	6.46	1 099	1 296	-0.96
DP-04-07	761	0.010 730	0.000 093	0.000 383	0.000 003	0.282 404	0.000 049	3.69	1 179	1 440	-0.99
DP-04-08	764	0.009 536	0.000 088	0.000 281	0.000 004	0.282 429	0.000 039	4.58	1 141	1 378	-0.99
DP-04-09	766	0.018 573	0.000 284	0.000 641	0.000 012	0.282 561	0.000 033	9.25	968	1 092	-0.98
DP-04-10	763	0.047 939	0.000 204	0.001 752	0.000 005	0.282 559	0.000 026	9.19	1 000	1 134	-0.95
DP-04-11	679	0.014 234	0.000 690	0.000 421	0.000 014	0.282 564	0.000 030	9.37	958	1 132	-0.99
DP-04-12	716	0.009 709	0.000 175	0.000 360	0.000 008	0.282 481	0.000 042	6.41	1 072	1 295	-0.99
DP-04-13	763	0.004 825	0.000 111	0.000 157	0.000 005	0.282 514	0.000 035	7.57	1 021	1 185	-1.00
DP-04-14	763	0.012 220	0.000 088	0.000377	0.000 002	0.282 427	0.000 032	4.48	1 148	1 388	-0.99
DP-04-15	766	0.032 112	0.001 382	0.001 046	0.000 027	0.282 556	0.000 035	9.08	986	1 117	-0.97
DP-04-16	768	0.023 487	0.000 304	0.000 692	0.000 012	0.282 594	0.000 032	10.41	924	1 019	-0.98
DP-04-17	767	0.017 702	0.000 226	0.000 704	0.000 013	0.282 375	0.000 039	2.64	1 230	1 512	-0.98
DP-04-18	766	0.023 249	0.001 097	0.000 783	0.000 033	0.282 469	0.000 041	6.00	1 100	1 303	-0.98

图6 研究区锆石来源判别图(底图据 Grimes *et al.*, 2007)Fig. 6 Zircon source discrimination diagram in the study area (after Grimes *et al.*, 2007)图7 大坪金矿区闪长岩、花岗闪长岩及含金石英脉中锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值和 t_{DM}^{C} 直方图Fig. 7 Histograms of zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ and t_{DM}^{C} from diorite, granodiorite and Au-bearing quartz vein in the Daping gold deposit

闪长岩 (DP-02) 的 t_{DM}^C 模式年龄变化范围为 1 500~1 260 Ma, 主要集中在 1.5~1.4 Ga 之间 (图 7c), 暗示该闪长岩源区可能为中元古代地壳物质。其正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值 (2.52~6.39, 图 7d) 进一步暗示其源区物质为中元古代新生下地壳 (图 8)。

花岗闪长岩脉 (DP-03) 的 t_{DM}^C 模式年龄为 1 982~1 691 Ma, 主要集中在 2.00~1.85 Ga 之间 (图 7e), $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值变化于 -5.14~-0.91 之间, 主要集中在 -5~-1 之间 (图 7f), 与闪长岩 (DP-02) 有着显著不同的 Hf 同位素组成。在 $\varepsilon_{Hf}(t)-t$ 图解 (图 8) 中投点靠近下地壳, 一般认为具有负 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的花岗岩其岩浆物质来源于古老的地壳物质 (吴福元等, 2007), 暗示大坪金矿区花岗闪长岩脉可能来源于古老地壳物质的重熔。

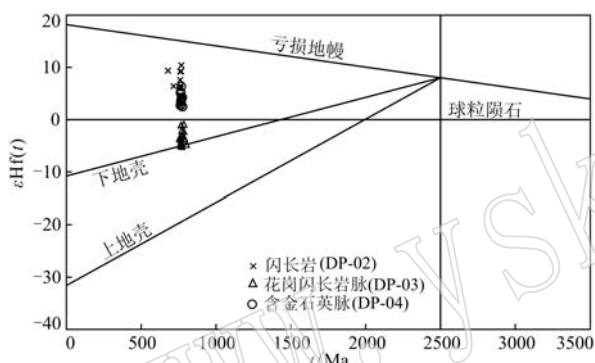


图 8 大坪金矿区闪长岩、花岗闪长岩和含金石英脉中锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)-t$ 图解

Fig. 8 $\varepsilon_{Hf}(t)$ versus t diagram of zircons from diorite, granodiorite and Au-bearing quartz vein from the Daping gold deposit

4.2 大坪金矿化时代及对矿床成因的指示

本文含金石英脉中热液锆石 U-Pb 年龄为 760 ± 10 Ma, 与区域闪长岩围岩成岩年龄 (766 ± 9 Ma) 基本一致, 暗示热液锆石的形成可能与闪长岩侵入时代是同期的。热液锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值 (2.64~10.41) 与闪长岩围岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值 (2.52~6.39) 近似, 表明其形成可能与闪长质岩浆带来的岩浆流体有关, 因为热液锆石所在的石英脉与金矿物质呈包裹、共生关系, 可以认为它们是同一时期同一地质作用的产物。该热液锆石年龄与朱炳泉等 (2001) 获得的大坪金矿脉石英流体包裹体 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 高温坪年龄 (765.5 ± 7.0 Ma) 较为一致, 表明大坪金矿床存在新元古代金矿化事件。Bi 等 (1996) 利用含金石英脉中石英 ESR 获得大坪金矿成矿年龄为 58~41.3 Ma, 孙晓明等

(2006) 对含金石英脉中热液绢云母进行的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年结果为 33.76 ± 0.65 Ma, 朱路华等 (2011) 对大坪金矿含金石英矿脉的 ESR 定年结果表明成矿时代为 29~17 Ma, 这些测年结果分别对应新特提斯洋板块与亚欧板块的碰撞、碰撞导致的地幔上涌及哀牢山构造带大规模走滑剪切运动, 显示哀牢山成矿与构造动力体制转换过程中的壳幔物质强烈交换和构造变形密切相关, 表明大坪金矿可能存在新元古代和新生代两期金矿化事件。

前人对大坪金矿的成因模式主要有 2 种不同的观点: ① 由于大坪金矿受控于哀牢山-红河韧性剪切带中深大断裂及次级断裂, 产于区域变质岩中, 成矿作用与该区新生代大规模碱性岩浆活动同步, 这些特征使其被认为是典型的造山型金矿 (孙晓明等, 2006, 2007a, 2007b; 熊德信等, 2006a, 2006b; Sun *et al.*, 2009; 石贵勇等, 2010); ② 对其矿石组构和矿物共生组合、容矿断裂性质、围岩蚀变类型及分带、流体包裹体及稳定同位素等特征的研究结果 (葛良胜等, 2007; 杨立强等, 2010, 2011), 表明大坪金矿具有浅成低温热液型金矿床的特征。新生代的金矿化明显与浅成低温热液相关, 但大坪金矿区内未发现与该期成矿作用同期的陆相钙碱性火山岩, 杨立强等 (2011) 指出将大坪金矿床归为深部造山型+浅部低温热液型组合成因可以更好地解释其兼具造山型金矿和浅成低温热液型金矿床基本特征的原因。由于大坪金矿床所在的哀牢山-红河韧性剪切带经历了复杂的地球动力学演化, 导致其成矿过程较为复杂。印度板块与欧亚板块 ~55 Ma 碰撞, 到新生代始新世—渐新世时期, 研究区处于造山后伸展构造环境, 张性断裂构造发育, 新元古代形成的金矿体被抬升至近地表, 受到大气水的叠加改造 (葛良胜等, 2007; Zhang *et al.*, 2018), 发生浅成低温热液型金矿化。从两期金矿化事件来看, 大坪金矿可能是新元古代和新生代不同岩浆-构造-热液事件叠加成矿作用的结果。

5 结论

(1) 闪长岩和花岗闪长岩脉锆石 U-Pb 年龄结果显示, 大坪金矿区闪长岩形成于新元古代 ($773 \pm 9 \sim 766 \pm 9$ Ma), 可能是区域上同时期 Rodinia 超大陆裂解和哀牢山地区的晋宁-澄江期大规模火山岩浆活动事件的产物。

(2) 含金石英脉中热液锆石 U-Pb 年龄为 760 ± 10 Ma, 表明大坪金矿存在新元古代矿化事件。与区内闪长岩、花岗闪长岩脉一致的成岩年龄 (766 ± 9 Ma) 和相似的 Hf 同位素组成特征, 表明新元古代金矿化事件与闪长岩侵入可能有密切成因联系。新元古代成矿事件的厘定, 暗示了大坪金矿可能是新元古代和新生代不同岩浆-构造-热液事件叠加成矿作用的产物。

致谢 野外工作得到云南省地质调查局的李宗勇高级工程师、刘飞工程师的大力帮助, 成文过程中云南大学朱江、李良博士后给予了有益的指导和讨论, 在此一并表示衷心感谢。

References

- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602~622.
- Belousova E A, Reid A J, Griffin W L, *et al.* 2009. Rejuvenation vs. recycling of Archean crust in the Gawler Craton, South Australia: Evidence from U-Pb and Hf isotopes in detrital zircon [J]. *Lithos*, 113(3~4): 570~582.
- Bi X W, Hu R Z and He M Y. 1996. Age determination of Ailaoshan gold metallogenic belt by ESR method and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 41(18): 1 546~1 549.
- Bi Xianwu, Hu Ruizhong and He Mingyou. 1997. Characteristics of ore-forming fluid of three gold deposits in Ailaoshan gold mineralization belt [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(4): 435~441 (in Chinese with English abstract).
- Burnard P G. 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China [J]. *Geochim. Cosmo. Chim.*, 63: 1 595~1 604.
- Cai Hongming, Liu Guiping and Zhan Xinzong. 2019. Hydrothermal zircon identification and its application in geochronology of hydrothermal gold deposits [J]. *China Metal Bulletin*, 9: 270~271 (in Chinese).
- Chen Daogong, Ni Tao and Xie Liewen. 2007. Zircon Lu-Hf isotopic compositions of ultra-high pressure metamorphic rocks from Dabie Terrain, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 331~342 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yaohuang. 2015. Metallogenic Conditions and Gold Enrichment Regularity in the Daping Gold Deposit, Yunnan Province, P. R. China [D]. China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Chen Yaohuang, Yao Shuzhen, Zeng Guoping, *et al.* 2014. Ore-controlling structure and mineralization rules of main auriferous quartz veins in the Daping gold deposit: An example of the Ailao Shan metallogenic belt in Yunnan Province [J]. *Geology and Exploration*, 50(3): 419~431 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, *et al.* 2010a. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys [J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 37~42 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Yang Liqing, Ge Liangsheng, *et al.* 2010b. Character and post-ore changes, modifications and preservation of Cenozoic alkali-rich porphyry gold metallogenic system in western Yunnan, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 633~1 645 (in Chinese with English abstract).
- Dubińska E, Bylina P, Kozłowski A, *et al.* 2004. U-Pb dating of serpentinization: Hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland) [J]. *Chemical Geology*, 203(3~4): 183~203.
- Fisher C M, Vervoort J D and Hanchar J M. 2014. Guidelines for reporting zircon Hf isotopic data by LA-MC-ICPMS and potential pitfalls in the interpretation of these data [J]. *Chemical Geology*, 363: 125~133.
- Ge Liangsheng, Deng Jun, Li Hanguang, *et al.* 2007. Superposed mineralization in Daping Au-Cu-Ag-Pb deposit, Yunnan province: Evidences from geology, fluid inclusions and stable isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2 131~2 143 (in Chinese with English abstract).
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, *et al.* 2007. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance [J]. *Geology*, 35(7): 643~646.
- Han Runsheng, Jin Shichang and Lei Li. 1997. Geochemistry of ore-forming hydrothermal system of daping reworked gold deposit, Yuan-yang, Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(3): 337~344 (in Chinese with English abstract).
- Hanchar J M and Westrenen W V. 2007. Rare earth element behavior in zircon-melt systems [J]. *Elements*, 3(1): 37~42.
- Hoskin P W O and Ireland T R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator [J]. *Geology*, 28(7): 627~630.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2000. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27~62.

- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492 (in Chinese with English abstract).
- Hu Yunzhong, Tang Shangchun, Wang Haiping, *et al.* 1995. *Geology of Ailaoshan Gold Deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 106~250 (in Chinese).
- Hu Z, Zhang W, Liu Y, *et al.* 2015. "Wave" Signal-smoothing and mercury-removing device for Laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: Application to lead isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1 152~1 157.
- Hu Z, Liu Y S, Gao S, *et al.* 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27: 1 391~1 399.
- Jin Shichang and Han Runsheng. 1994. Geochemical characteristics of metallogenic hydrothermal system of the reformed deposit[J]. *Yunnan Geology*, 13(1): 17~22 (in Chinese with English abstract).
- Kerrick R and Kyser T K. 1994. 100 Ma timing paradox of Archean gold, Abitibi greenstone-belt (Canada): New evidence from U-Pb and Pb-Pb evaporation ages of hydrothermal zircons[J]. *Geology*, 22(12): 1 131~1 134.
- Lei Weiyan. 2013. Trace Element Composition of Zircon from Myanmar Jadeite, the Daixian Rutile Deposit and the Huangbaikeng Rhyolite Porphyry[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Leloup P H and Kienast J R. 1993. High temperature metamorphism in a major strike-slip shear zone: The Ailao Shan-Red River (P. R. C.) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 118(1/2/3/4): 213~214.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, *et al.* 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China): Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 251(1/2/3/4): 3~84.
- Leloup P H, Ricard Y, Battaglia J, *et al.* 1999. Shear heating in continental strike-slip shear zones: Model and field examples[J]. *Geophysical Journal International*, 136: 19~40.
- Li Wei. 2014. The Geological feature and prospecting criteria of Daping Au deposit in Yuanyang, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 33(3): 371~374 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongbing, Pu Zhongqi and Pu Jiacong. 2015. Genesis and prospecting potentiality of Daping Au deposit in Yuanyang, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 34(2): 198~203 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junlai, Tang Yuan, Song Zhijie, *et al.* 2011. The Ailaoshan Belt in Western Yunnan: Tectonic framework and tectonic evolution[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1 285~1 303 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537~571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel* [M]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 39.
- Lu Qian, Sun Jinggui, An Jiu hai, *et al.* 2019. Petrogenesis and forming environment of Mesozoic porphyritic granite in Songjianghe Region of Dunhua, Jilin Province: Evidences from element geochemistry, Hf isotope and U-Pb[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(3): 673~689 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The Composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(120(3/4)): 223~253.
- Segal I, Halicz L and Platzner I T. 2003. Accurate isotope ratio measurements of ytterbium by multiple collection inductively coupled plasma mass spectrometry applying erbium and hafnium in an improved double external normalization procedure[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18(10): 1 217~1 223.
- Shi Guiyong, Sun Xiaoming, Zhang Yan, *et al.* 2010. H-O-C-S isotopic compositions of ore-forming fluids in Daping gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 751~1 759 (in Chinese with English abstract).
- Singh S. 2018. Protracted zircon growth in migmatites and In situ melt of Higher Himalayan Crystallines: U-Pb ages from Bhagirathi valley, NW Himalaya, India[J]. *Geoscience Frontiers*, 10(3): 793~809.
- Sinha A K, Wayne D M, Hewitt D A, *et al.* 1992. The hydrothermal stability of zircon: Preliminary experimental and isotopic studies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(9): 3 551~3 560.
- Söerlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ¹⁷⁶Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3/4): 311~324.
- Sun Xiaoming, Shi Guiyong, Xiong Dexin, *et al.* 2007a. Platinum Group Elements Geochemistry and Re-Os Isotopic Compositions of Daping Gold Deposit in Ailaoshan Gold Belt, Yunnan Province, China and

- Their Metallogenic Implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 394~404(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaoming, Xiong Dexin, Shi Guiyong, *et al.* 2007b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of gold deposit hosted in the Daping ductile shear zone in the Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 88~93(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaoming, Xiong Dexin, Wang Shengwei, *et al.* 2006. Noble gases isotopic composition of fluid inclusions in scheelites collected from Daping gold mine, Yunnan Province, China, and its application for ore genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 725~732(in Chinese with English abstract).
- Sun X, Zhang Y, Xiong D, *et al.* 2009. Crust and mantle contributions to gold-forming process at the Daping deposit, Ailaoshan gold belt, Yunnan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1): 235~249.
- Tian Guang, Zhang Changqing, Peng Huijuan, *et al.* 2014. Petrogenesis and geodynamic setting of the Chang'an gold deposit in southern Ailaoshan metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 125~138(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhu D, Zhao Z, *et al.* 2012. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 59~66.
- Wang Wanqiong, Liu Zhenghong, Xu Zhongyuan, *et al.* 2019. Zircon SHRIMP dating and its significance of Dongwufenzi formation of Sertengshan group in Uard Zhongqi Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(4): 1 053~1 062(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese with English abstract).
- Xiong Dexin, Sun Xiaoming, Huo Wei, *et al.* 2007. CO_2 -rich fluid inclusions in auriferous quartz veins from the Daping ductile shear zone hosted gold deposit in Yunnan Province, China, and its implications for gold mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 640~653(in Chinese with English abstract).
- Xiong Dexin, Sun Xiaoming, Shi Guiyong, *et al.* 2006a. Trace elements, rare earth elements (REE) and Nd-Sr isotopic compositions in scheelites and their implications for the mineralization in Daping gold mine in Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 733~741(in Chinese with English abstract).
- Xiong Dexin, Sun Xiaoming, Zhai Wei, *et al.* 2006b. Graphite inclusions with high crystallinity in the auriferous quartz veins from Daping Gold Deposit in Yunnan Province, China: Evidence for involvement of metamorphic fluid from granulite-facies lower crust in the mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1 448~1 456(in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Deng Jun, Zhao Kai, *et al.* 2011. Tectono-thermochronology and gold mineralization events of orogenic gold deposits in Ailaoshan orogenic belt, Southwest China: Geochronological constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2 519~2 532(in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Liu Jiangtao, Zhang Chuang, *et al.* 2011. Superimposed orogenesis and metallogenesis: An example from the orogenic gold deposits in Ailaoshan gold belt, Southwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 723~1 739(in Chinese with English abstract).
- Ying Hanlong. 1998. The Geochemistry characteristics of wallrock alteration and isotopes of the Daping gold deposit[J]. *Gold Science and Technology*, 6(4): 14~23(in Chinese with English abstract).
- Yuan Shisong, Ge Liangsheng, Lu Yanming, *et al.* 2010. Relationship between crust-mantle reaction and gold mineralization in Ailaoshan metallogenic belt: A case study of Daping gold deposit in Yuanyang[J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 253~264(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Zhong Dalai, Sang Haiqing, *et al.* 2006. Structural and geochronological evidence for multiple episodes of deformation since Paleocene along the Ailao Shan-Redriver shear zone southeastern Asia[J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(2): 291~310(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaowen, Xiang Hua, Zhong Zengqiu, *et al.* 2009. U-Pb dating and trace elements composition of hydrothermal zircons from Jianfengling granite, Hainan: Restriction on the age of hydrothermal event and mineralization of Baolun Gold Deposit[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 921~930(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yan, Sun Xiaoming, Shi Guiyong, *et al.* 2011. SHRIMP U-Pb dating of zircons from diorite batholith hosting Daping gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2 600~2 608(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Y, Zhang D, Wu G G, *et al.* 2018. Origin of the Daping gold deposit in the Ailaoshan metallogenic belt, SW China: Insights from

- geology, isotope geochemistry and geochronology [J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 1~12.
- Zhao Zhidan, Liu Dong, Wang Qing, *et al.* 2018. Zircon trace elements and their use in probing deep processes [J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 124~135 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, *et al.* 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in Dabie orogen [J]. *Chemical Geology*, 231(1~2): 135~158.
- Zhou Yuefei, Liu Xing and Qi Chunying. 2003. The typomorphic characteristics of quartz in Daping gold deposit and their ore-prospecting significance [J]. *Yunnan Geology*, 22(3): 288~294 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, Qiu Huaning, *et al.* 2001. Chronology of Precambrian basement formation and metamorphism and mineralization in Yunnan [J]. *Progress in Precambrian research*, (2): 75~82 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Luhua, Qi Xuexiang, Peng Songbai, *et al.* 2011. Evolution of ore-forming fluid of Daping gold deposit in Ailaoshan tectonic zone, Southeast Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (11): 241~254 (in Chinese with English abstract).
- 毕献武, 胡瑞忠, 何明友. 1997. 哀牢山金矿带主要金矿床成矿流体特征 [J]. *矿物学报*, 17(4): 435~441.
- 蔡宏明, 刘桂萍, 展新忠. 2019. 热液锆石鉴定特征及在热液型金矿床年代学研究中的应用 [J]. *中国金属通报*, 9: 270~271.
- 陈道公, 倪 涛, 谢烈文. 2007. 大别地体超高压变质岩石锆石 Lu-Hf 同位素研究 [J]. *岩石学报*, 23(2): 331~342.
- 陈耀煌. 2015. 云南省元阳县大坪金矿成矿条件与金富集规律 [D]. 中国地质大学.
- 陈耀煌, 姚书振, 曾国平, 等. 2014. 大坪金矿床主矿体控矿构造与矿化富集规律 [J]. *地质与勘探*, 50(3): 419~431.
- 邓 军, 侯增谦, 莫宣学, 等. 2010a. 三江特提斯复合造山与成矿作用 [J]. *矿床地质*, 29(1): 37~42.
- 邓 军, 杨立强, 葛良胜, 等. 2010b. 滇西富碱斑岩型金成矿系统特征与变化保存 [J]. *岩石学报*, 26(6): 1 633~1 645.
- 葛良胜, 邓 军, 李汉光, 等. 2007. 云南大坪大型金多金属矿床叠加成矿作用: 地质、流体包裹体和稳定同位素证据 [J]. *岩石学报*, 23(9): 2 131~2 143.
- 韩润生, 金世昌, 雷 丽. 1997. 云南元阳大坪改造型金矿床的成矿热液系统地球化学 [J]. *矿物学报*, 17(3): 337~344.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术 [J]. *矿床地质*, 28(4): 481~492.
- 胡云中, 唐尚鹑, 王海平, 等. 1995. 哀牢山金矿地质 [M]. 北京: 地质出版社, 106~250.
- 金世昌, 韩润生. 1994. 改造型矿床的成矿热液系统地球化学特征——以元阳金矿床为例 [J]. *云南地质*, 13(1): 17~22.
- 雷玮琰. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究: 以缅甸硬玉岩、山西金红石矿等中锆石为例 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李 伟. 2014. 云南元阳大坪金矿地质特征及找矿标志 [J]. *云南地质*, 33(3): 371~374.
- 李勇兵, 普仲琪, 普家聪. 2015. 云南元阳县大坪金矿矿床成因及找矿前景 [J]. *云南地质*, 34(2): 198~203.
- 刘俊来, 唐 渊, 宋志杰, 等. 2011. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(5): 1 285~1 303.
- 鲁 倩, 孙景贵, 安久海, 等. 2019. 吉林敦化松江河地区中生代似斑状花岗岩成因和形成环境: 元素、Hf 同位素和锆石 U-Pb 年代学证据 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 49(3): 673~689.
- 石贵勇, 孙晓明, 张 燕, 等. 2010. 云南哀牢山大坪金矿床成矿流体 H-O-C-S 同位素组成及其成矿意义 [J]. *岩石学报*, 26(6): 1 751~1 759.
- 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 等. 2007a. 云南哀牢山金矿带大坪金矿铂族元素(PGE)和 Re-Os 同位素地球化学及其矿床成因意义 [J]. *地质学报*, 81(3): 394~404.
- 孙晓明, 熊德信, 石贵勇, 等. 2007b. 云南哀牢山金矿带大坪韧性剪切带型金矿⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年 [J]. *地质学报*, 81(1): 88~93.
- 孙晓明, 熊德信, 王伟生, 等. 2006. 云南大坪金矿白钨矿惰性气体同位素组成特征及其成矿意义 [J]. *岩石学报*, 22(3): 725~732.
- 田 广, 张长青, 彭慧娟, 等. 2014. 哀牢山长安金矿成矿机制及动力学背景初探: 来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和黄铁矿原位微量元素测定的证据 [J]. *岩石学报*, 30(1): 125~138.
- 王婉琼, 刘正宏, 徐仲元, 等. 2019. 内蒙古乌拉特中旗色尔腾山岩群东五分子岩组锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 49(4): 1 053~1 062.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 3(2): 185~220.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 49(16): 1 589~1 604.
- 熊德信, 孙晓明, 霍 伟, 等. 2007. 云南大坪初性剪切带型金矿富 CO₂ 流体包裹体及其成矿意义 [J]. *地质学报*, 81(5): 640~653.

- 熊德信, 孙晓明, 石贵勇, 等. 2006a. 云南大坪金矿白钨矿微量元素、稀土元素和 Sr-Nd 同位素组成特征及其意义[J]. 岩石学报, 22(3): 733~741.
- 熊德信, 孙晓明, 翟 伟, 等. 2006b. 云南大坪金矿含金石英脉中高结晶度石墨包裹体: 下地壳麻粒岩相变质流体参与成矿的证据[J]. 地质学报, 80(9): 1 448~1 456.
- 杨立强, 邓 军, 赵 凯, 等. 2011. 哀牢山造山型金矿的成矿时序及其动力学背景探讨[J]. 岩石学报, 27(9): 2 519~2 532.
- 杨立强, 刘江涛, 张 闯, 等. 2010. 哀牢山造山型金成矿系统: 复合造山构造演化与成矿作用初探[J]. 岩石学报, 26(6): 1 723~1 739.
- 应汉龙. 1998. 云南大坪金矿床围岩蚀变和同位素地球化学特征[J]. 黄金科学技术, 6(4): 14~23.
- 袁士松, 葛良胜, 路彦明, 等. 2010. 哀牢山成矿带壳幔相互作用与金成矿关系探讨——以元阳大坪金矿床为例[J]. 矿床地质, 29(2): 253~264.
- 张进江, 钟大赉, 桑海清, 等. 2006. 哀牢山-红河构造带古新世以来多期活动的构造和年代学证据[J]. 地质科学, 41(2): 291~310.
- 张小文, 向 华, 钟增球, 等. 2009. 海南尖峰岭岩体热液锆石 U-Pb 定年及微量元素研究: 对热液作用及抱伦金矿成矿时代的限定[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 34(6): 921~930.
- 张 燕, 孙晓明, 石贵勇, 等. 2011. 云南大坪金矿床赋矿闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(9): 2 600~2 608.
- 赵志丹, 刘 栋, 王 青, 等. 2018. 锆石微量元素及其揭示的深部过程[J]. 地学前缘, 25(6): 124~135.
- 周跃飞, 刘 星, 亓春英. 2003. 大坪金矿石英标型特征及其找矿意义[J]. 云南地质, 22(3): 288~294.
- 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 等. 2001. 云南前寒武纪基底形成与变质时代及其成矿作用年代学研究[J]. 前寒武纪研究进展, (2): 75~82.
- 朱路华, 戚学祥, 彭松柏, 等. 2011. 青藏高原东南缘哀牢山大坪金矿成矿流体演化[J]. 岩石学报, 27(11): 3 395~3 408.