

# 胶西北滕家金矿基性脉岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义

张泽涛<sup>1,2</sup>, 段留安<sup>2\*</sup>, 石满乾<sup>2</sup>, 侯庆苓<sup>2</sup>

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074;  
2. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000



**摘要:**招远滕家金矿是近年来招平成矿带发现的特大型蚀变岩型金矿, 金矿体主要赋存在晚侏罗世玲珑花岗岩中的破碎带内。矿区大量发育有基性脉岩, 本次在基性脉岩中发现金矿体(金品位为 $1.50 \times 10^{-6}$ ), 为探究含金与不含金两类基性脉岩的岩石成因、形成年代及其与成矿的关系, 开展了岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素等研究工作。分析结果显示, 脉岩具有富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE), 且亏损高场强元素(HFSE)和重稀土元素(HREE)的特征,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为负值, 推测脉岩岩浆以富集岩石圈地幔为主, 混入了古老下地壳物质, 与太平洋板块向华北板块俯冲有关。含金脉岩的 Ce-U-Ti 氧逸度计  $\Delta\text{FMQ}$  平均值为 0.89, 不含矿脉岩  $\Delta\text{FMQ}$  平均值为 -0.96, 认为高氧逸度熔体更具有成矿的潜力。脉岩中存在多时期的继承锆石, U-Pb 年龄显示脉岩侵位过程中, 穿越的地壳经历了华北克拉通在新太古代、中元古代、新元古代经历的地质事件以及苏鲁造山带在三叠纪时期经历的地质事件。成矿期后脉岩最年轻的锆石年龄可以代表脉岩的结晶年龄, 认为滕家金矿成矿作用最晚发生在  $(117.5 \pm 1.6)\text{Ma}$ 。含金脉岩锆石 U-Pb 年龄为  $(154.4 \pm 1.3)\text{Ma}$ , 证明胶东存在一期 162~151 Ma 的金成矿事件。

**关键词:**含金脉岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 蚀变岩型金矿; 滕家金矿; 胶西北

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)06-1084-19 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.100  
引用格式: 张泽涛, 段留安, 石满乾, 等. 胶西北滕家金矿基性脉岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(6): 1084-1102. ZHANG Zetao, DUAN Liu'an, SHI Manqian, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry of Gold-bearing Dike from the Tengjia Gold Deposit in the Northwest Jiaodong and Its Geological Significance[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1084-1102.

胶东地区是我国金矿资源最为富集的区域, 该区域金矿床以成矿高度富集、规模巨大、矿石品位显著偏高且成矿时限短暂为主要特征, 被我国地质学家誉为一次典型的“中生代矿化作用集中爆发事件”(翟明国等, 2004)。近几十年来, 研究人员在胶东地区开展了大量的地质工作, 取得了一系列成果, 但胶东金矿床成矿物质来源仍存在较大的分

歧。早期研究提出新太古代胶东岩群变质火山—沉积岩系为金矿形成提供了基底物源(杨敏之等, 1996); 中生代岩浆活化理论则强调玲珑花岗岩与郭家岭花岗岩作为直接矿源岩体的控制作用, 揭示了深部岩浆热液系统对成矿的关键贡献(田瑞聪等, 2022); 而幔源成矿观点认为, 金主要来自形成中基性脉岩的深部幔源岩浆系统; 该系统形成于富

收稿日期: 2025-02-27; 修订日期: 2025-07-30

基金项目: 国家重点研发计划项目“脉状金系统的综合找矿技术与增储示范”(编号: 2022YFC2903605)、中国地质调查局项目“山东招远玲珑—水旺庄金矿资源调查评价”(编号: DD20243128)和烟台市高端人才引育“双百计划”联合资助

作者简介: 张泽涛(1997—), 男, 河南沁阳人, 硕士研究生, 从事资源与环境研究工作。E-mail: 524207489@qq.com

\*通信作者: 段留安(1976—), 男, 河南长葛人, 正高级工程师, 从事矿产勘查及地球化学研究工作。E-mail: liuanduan@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

集地幔的部分熔融过程,并在这一熔融过程中萃取Au元素,最终迁移至浅部形成矿床(Wang et al, 2024)。目前,对于成矿流体来源的争论主要集中于岩浆流体与变质流体孰为主导的问题,尽管存在分歧,但多数学者认同成矿流体具有多源性特征,即在变质水或岩浆水的基础上混入了大气降水组分,且普遍认为其来源深度较大或包含深源成分(毛景文等,2005;姜晓辉等,2011a)。目前,更多学者认为基性脉岩与金矿化具有成因联系(汪在聪等,2023;Wang et al, 2024),尤其是钙碱性煌斑岩与金矿床时空关系密切,对于研究金矿床成因具有十分重要的意义。

近年来,胶东地区脉岩研究取得了显著进展,但仍存在分歧。该区域脉岩主要形成于早白垩世(140~100 Ma),属于燕山晚期岩浆活动产物,岩性包括煌斑岩、闪长玢岩和石英闪长岩等中基性脉岩(宋明春等,2003;张增奇等,2014)。主流观点认为这些脉岩多源于富集岩石圈地幔,对于这种富集作用成因,一方面强调是古太平洋板块俯冲释放的流体对地幔楔的改造,另一方面更重视三叠纪扬子克拉通深俯冲至华北地块之下所带来的陆壳物质的贡献,这2种机制在元素和同位素地球化学证据上存在交织和竞争(刘燊等,2005;马遥等,2019)。在脉岩与金矿成矿的时空和成因关系上认识不一致,一些研究认为脉岩活动直接提供了成矿热液和部分物质,其蚀变矿化与金矿化是同一流体系统的产物;另一些研究则指出,精确的年代学数据显示部分脉岩略晚于主成矿期,只是用了相同的断裂系统,可能对先存矿体起到了破坏或改造作用,而非成因上的直接联系(王建国等,2008;梁亚运等,2014)。本研究首次发现的含金脉岩,是深化认识区域金成矿规律的关键,其所揭示的矿化特征与成因联系,将对后续研究产生显著的推动作用。

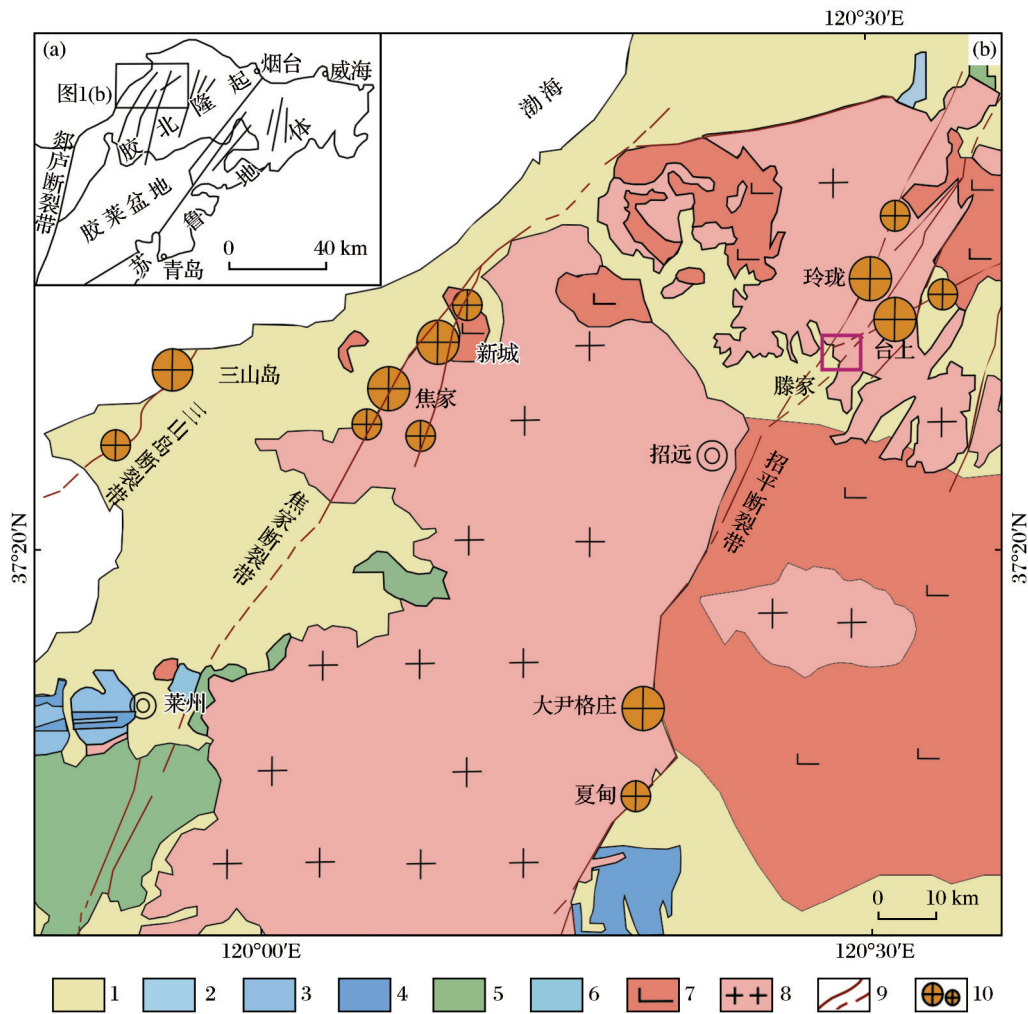
滕家金矿地处招平断裂带的北部(图1),是新探明的特大型金矿床,地处台上超大型金矿西南侧,主要金矿体赋存在招平断裂带①号脉I号构造蚀变带内(段留安等,2024a)。目前该区金矿研究已取得阶段性进展,重点围绕赋矿围岩地球化学特征、成矿物质来源以及成矿规律等方面(段留安等,2024a;Hao et al, 2024;张泽涛等,2025),为区域找矿预测奠定了理论基础。然而,钻孔岩心显示,中

基性脉岩与矿化蚀变带空间上紧密共生,显示二者具有密切的成因联系,但其形成时代、岩石成因及其与金成矿作用的具体关系尚不明确。本次研究在孔深1 662.6 m处发现含金脉岩,以滕家矿区含金与不含金两类脉岩作为研究对象,开展了岩石地球化学、锆石U-Pb年代学和Lu-Hf同位素组成分析,并结合前人研究成果,旨在深入探讨区内脉岩的岩石成因、源区属性、成岩时代及其与金矿化的关系。

## 1 区域地质概况及矿床地质

胶西北矿集区位于郯庐断裂带以东,胶北隆起西北部[图1(a)],产出众多大型—超大型金矿床,主要包括石英脉型金矿床(玲珑式)和破碎蚀变岩型金矿床(焦家式),截至目前,已探明的黄金储量超过5 000 t(陈炳翰等,2014;宋明春,2015)。

该区域的主要地层由老至新分别为新太古界胶东群、古元古界荆山群和粉子山群,以及新元古界蓬莱群等[图1(b)]。其中胶东群由黑云斜长片麻岩、麻粒岩和角闪片岩等组成,主要以NEE-NWW向呈包体状或带状广泛发育,与荆山群呈不整合接触;荆山群以蛇纹石化大理岩、火山镁铁质岩石和变粒岩为主,与上覆粉子山群呈角度不整合接触;粉子山群以黑云片岩、大理岩和浅变质砂岩为主,与荆山群上部部分地层存在着重叠相变的关系,且与荆山群呈断层接触关系(陈光远等,1993;杨忠芳等,1998;周勉,2016)。中生代印支期至燕山期形成并发展的NE-NEE向旋转压扭性断裂,是胶西北地区最主要的控矿构造,自西向东有三山岛、焦家和招平断裂,该区已探明的金矿床均与这些断裂带有关,如三山岛、焦家、新城、仓上、台上、玲珑、大尹格庄和夏甸等中型—超大型金矿(阳琼艳,2013;Song et al, 2021)。区域内主要发育中生代花岗岩,主要包括玲珑型花岗岩(166~146 Ma)、郭家岭型花岗岩(135~123 Ma)和伟德山型花岗岩(123~110 Ma),玲珑型花岗岩与郭家岭型花岗岩为该区域的赋矿围岩(李经纬等,2023;于晓卫等,2023)。中—基性脉岩分布非常广泛,包括闪长岩、闪长玢岩、煌斑岩和辉绿岩等,脉岩与矿体在空间上常常相伴而生,在时间先后上可将脉岩划分为矿前脉岩、矿期脉岩和矿后脉岩。部分脉岩矿化明显,部



1. 第四系; 2. 新元古界蓬莱群; 3. 古元古界粉子山群; 4. 古元古界荆山群; 5. 太古宇胶东群; 6. 早白垩世艾山岩体; 7. 早白垩世郭家岭岩体; 8. 晚侏罗世玲珑岩体; 9. 断层/推测断层; 10. 金矿床

图1 胶西北区域地质简图(修改自张泽涛等, 2025)

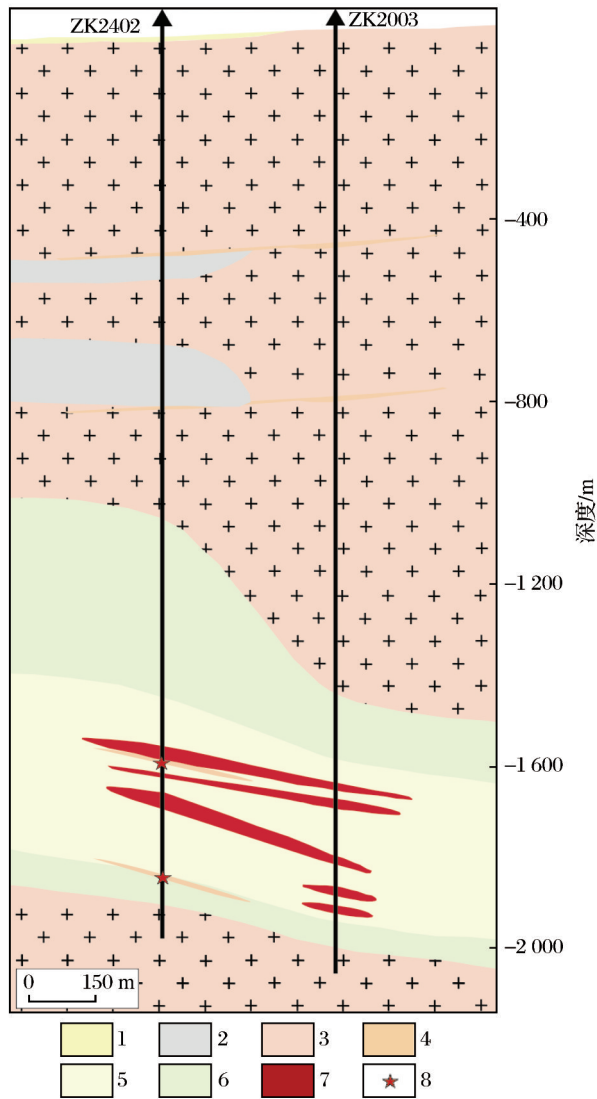
Fig. 1 Simplified geological map of Northwest Jiaodong region (modified after Zhang et al, 2025)

分脉岩切割蚀变带或矿体,与构造活动关系密切,中一基脉岩与金矿化有重要联系(季海章等,1992;罗镇宽等,2001)。

滕家矿区金矿体严格受招平断裂带控制,其特征与招平断裂成矿带典型蚀变岩型金矿床极为相近,均赋存于该断裂带的破碎带内。现有数据显示,全区推断(TD)金资源总量达52.96 t,已探明8个金矿体,其中I-3、I-4和I-5共3个主矿体的资源量占全区总资源量的68.86%。I-3矿体分布于12~28号勘探线间,整体走向60°,倾向SE,倾角为27.3°~37.0°,平均倾角为33.5°。该矿体控制走向长度为826 m,最大斜深为410 m,平均厚度为5.73 m,平均

金品位为 $4.62 \times 10^{-6}$ ;估算推断资源量为23.12 t,占全区总资源量的43.66%(段留安等,2024b)。

滕家矿区岩浆岩主要为玲珑花岗岩,浅部与深部均有基性脉岩侵入,玲珑花岗岩内常见基性脉岩穿插发育,表明脉岩形成时间晚于(或略晚于)玲珑花岗岩。招平断裂带内(花岗质碎裂岩、碎裂状花岗岩和金矿体等)也可见多期次脉岩沿破碎带发育,少量后期脆性断裂切穿基性岩脉(图2)。以矿化带为中心蚀变强度向外围逐渐减弱,矿化带中岩石破碎强烈,黄铁矿沿裂隙发育,蚀变类型为绢英岩化和黄铁矿化。矿石类型主要包括黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩和黄铁绢英岩等。矿石中的金属



1. 第四系; 2. 绢英岩化花岗质碎裂岩; 3. 玲珑花岗岩; 4. 中基性脉岩; 5. 黄铁绢英岩化带; 6. 绢云母化带; 7. 矿体; 8. 样品位置

图2 滕家金矿地质剖面图(修改自Hao et al, 2024)

Fig. 2 Geological section of the Tengjia gold deposit (modified after Hao et al, 2024)

矿物以黄铁矿为主, 伴生有少量黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等。金矿物的产出状态具有明显的共生特征, 多与黄铜矿、方铅矿相伴出现, 其赋存形式主要为包裹金或裂隙金, 且主要分布于黄铁矿内部(张泽涛等, 2025)。

## 2 样品与测试方法

样品取自滕家矿区ZK2402钻孔孔深1 662.6 m附近的含金煌斑岩[图3(a)]和1 856 m附近成矿期

后的不含金煌斑岩[图3(b)]。

含金煌斑岩[图3(c)]: 斑状结构, 块状构造。斑晶主要为斜长石和普通辉石。斜长石呈半自形—自形板状分布, 粒径为0.3~1.2 mm, 发育环带结构, 多被方解石交代, 保留斜长石环带结构和晶形, 含量约为10%。普通辉石呈半自形柱状分布, 粒径为0.2~1.2 mm, 已完全被方解石交代, 只保留形态。基质为辉绿结构, 自形较好的板状斜长石搭成三角架中充填普通辉石和角闪石等暗色矿物, 成分与斑晶成分相似, 主要为斜长石、普通辉石、角闪石、黑云母及少量他形石英颗粒, 多为微粒结构。

不含金煌斑岩[图3(d)]: 煌斑结构, 块状构造, 岩石碳酸盐化蚀变。斑晶主要为角闪石和斜长石。斜长石呈半自形板条状分布于基质中, 发育卡斯巴—钠长石双晶, 粒径为0.4~1.0 mm, 斜长石部分碳酸盐化和绢云母化, 含量约为12%。角闪石呈自形长柱状分布于基质中, 横截面可见闪石式解理, 粒径为0.4~1.3 mm, 单光下具浅绿—黄绿色多色性, 部分角闪石蚀变强烈, 被绢云母和碳酸盐交代, 含量约为18%。辉石呈自形柱状分布, 粒径为0.4~1.2 mm, 辉石蚀变完全, 主要蚀变为绢云母和碳酸盐, 保留辉石晶形, 含量约为5%。基质成分主要为斜长石、角闪石和辉石, 与斑晶成分相似, 基质中暗色矿物晶形较好, 基质蚀变主要为碳酸盐化。

样品的全岩主微量元素分析测试、锆石U-Pb年龄测试和Lu-Hf同位素分析测试工作由中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室完成。采用X射线荧光光谱法(XRF)测定全岩主量元素, 测试于Axios max型X射线荧光光谱仪上完成。分析时试验参数设定为电压50 kV、电流60 mA, 以国家标准物质GBW07101-14构建标准曲线。全岩微量元素含量分析借助Thermo Scientific X2 ICP-MS完成, 为监控其分析精度, 选取AGV-2、BCR-2和GSR-3等岩石标样进行校准。与参考值对比, 主量元素和微量元素的分析准确度分别优于5%和10%。

锆石U-Pb同位素分析采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术完成, 试验中, 氦气被用作载气, 而氩气则作为补偿气体来调整仪器的灵敏度, 每个分析点先采集20~30 s的空白信号, 随后再采集40 s的样品信号。数据处理借助

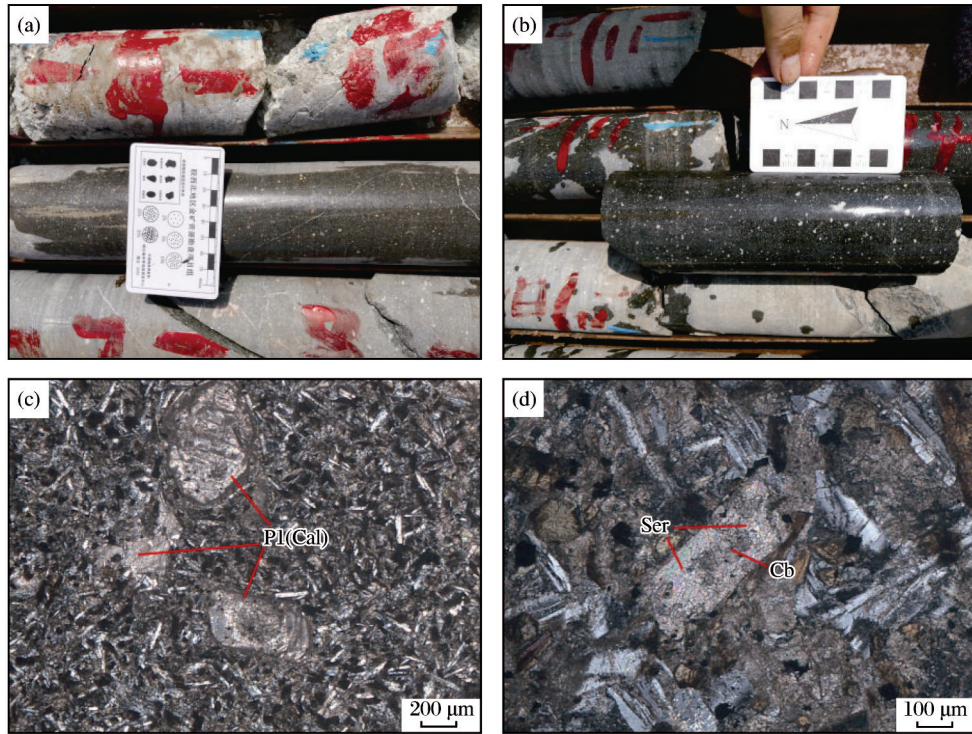


图3 滕家金矿脉岩手标本(a,b)和显微(c,d)照片

Fig. 3 Hand specimens (a,b) and microscopic (c,d) photos of dike in the Tengjia gold deposit

ICPMSDataCal 软件, 涵盖信号选择、灵敏度调整和 U-Th-Pb 同位素年龄计算等。最终利用 Isoplot 软件完成锆石 U-Pb 年龄测定及谐和图的绘制(Ludwig, 2003; Liu et al, 2008; 侯可军等, 2009)。

通过激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)技术完成了锆石 Hf 同位素的分析工作, 具体测试流程及分析方法见参考文献(徐平等, 2004; Wu et al, 2006)。在试验过程中, 分别采用  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$  和  $^{173}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=1.35274$  作为标准值来校正 Hf 和 Yb 同位素质量。计算所用的  $^{176}\text{Lu}$  衰变常数为  $(1.867 \pm 10^{-11})\text{a}^{-1}$ , 球粒陨石现今  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  参考值分别取 0.282772 和 0.0332。Hf 模式年龄计算中, 单阶段模式年龄 ( $T_{\text{DM1}}$ ) 与二阶段模式年龄 ( $T_{\text{DM2}}$ ) 分别采用现今亏损地幔参数 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$ ,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$ ) 和大陆地壳平均值 ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ ) 进行计算(Griffin et al, 2000, 2002)。

### 3 测试结果

#### 3.1 地球化学特征

滕家矿区两类脉岩的主量元素含量测试结果

如表1所示。含金脉岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 44.08%~45.75%, 平均值为 44.90%; 全碱含量为 3.85%~4.33%, 平均值为 4.15%;  $\text{MgO}$  含量为 7.79%~9.77%, 平均值为 8.33%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.78%~14.03%, 平均值为 13.36%;  $\text{TiO}_2$  含量为 0.77%~0.87%, 平均值为 0.82%;  $\text{Mg}^\#$  值范围为 66.77~71.07, 平均值为 69.06。不含金脉岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 47.58%~49.80%, 平均值为 48.62%; 全碱含量为 4.54%~4.82%, 平均值为 4.65%;  $\text{MgO}$  含量为 6.59%~7.92%, 平均值为 7.10%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13.27%~13.95%, 平均值为 13.60%;  $\text{TiO}_2$  含量为 0.68%~0.72%, 平均值为 0.70%;  $\text{Mg}^\#$  值范围为 65.19~67.72, 平均值为 66.08。Ti/Y 比值为 257.4~269.8, 两类脉岩均符合低 Ti 煌斑岩的特征 ( $\text{TiO}_2 < 1.1\%$ ,  $\text{Ti/Y} < 270$ ) (马亮, 2013)。

根据 TAS 岩石分类图解[图 4(a)] 和 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 判别图解[图 4(b)] 显示, 含金脉岩主要分布于玄武岩与碱玄武岩的过渡区域, 属于碱性系列; 而不含金脉岩则集中落在玄武岩区间, 属于亚碱性系列。二者在主量元素组成上均表现出富碱、高钾及低钛的地球化学特征, 符合同源岩浆经结晶分异作用演化的规律。

表1 滕家金矿脉岩主微量和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace elements and REE elements analysis results of dike samples in the Tengjia gold deposit

元素	含金煌斑岩						不含金煌斑岩					
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
SiO <sub>2</sub>	45.75	44.88	44.08	44.46	44.95	45.25	48.79	49.12	47.58	48.70	47.71	49.80
TiO <sub>2</sub>	0.87	0.83	0.77	0.80	0.82	0.85	0.72	0.69	0.68	0.69	0.69	0.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.03	13.40	12.78	12.90	13.36	13.69	13.95	13.53	13.27	13.68	13.31	13.88
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.68	7.82	7.76	7.88	7.97	7.73	7.48	7.33	6.97	7.12	6.99	7.35
MnO	0.11	0.12	0.13	0.12	0.11	0.11	0.12	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10
MgO	7.79	8.87	9.42	9.77	8.92	8.20	7.92	7.30	6.59	6.78	6.70	7.31
CaO	8.36	8.32	8.39	8.17	8.27	8.31	7.71	7.00	7.46	7.10	7.33	7.07
Na <sub>2</sub> O	1.68	1.46	1.28	1.34	1.46	1.56	2.60	2.49	2.89	2.72	2.83	2.56
K <sub>2</sub> O	2.65	2.76	2.57	2.67	2.70	2.77	1.94	2.11	1.93	1.92	1.92	1.99
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.28	0.26	0.25	0.25	0.24	0.26	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
LOI	9.98	11.08	12.82	11.71	11.39	10.60	8.17	10.11	12.31	11.44	11.83	9.09
Total	99.18	99.80	100.25	100.07	100.19	99.33	99.57	99.94	99.95	100.42	99.58	100.02
A/CNK	1.47	1.11	1.07	1.04	1.06	1.07	1.08	1.14	1.17	1.08	1.17	1.10
A/NK	1.79	3.24	3.18	3.32	3.22	3.21	3.16	3.07	2.94	2.75	2.95	2.80
Mg <sup>#</sup>	54.06	56.27	57.71	58.18	56.16	54.58	55.67	53.95	51.80	52.29	52.42	54.06
Li	12.5	11.5	18.1	11.8	10.2	10.2	19.8	16.4	12.6	19.5	13.9	18.2
Be	1.70	0.86	0.83	0.83	0.78	0.79	0.82	0.83	0.89	1.12	1.16	0.97
Sc	3.75	23.9	22.5	21.8	23.2	22.5	23.4	19.2	18.0	16.7	17.3	17.3
V	4.75	162	157	145	149	152	155	145	140	132	136	138
Cr	9.53	450	570	620	650	600	530	470	480	430	420	430
Co	1.12	32.9	35.4	36.8	39.2	35.1	33.6	29.1	27.1	26.6	26.4	25.9
Ni	3.13	122.0	163.0	196.0	197.5	169.5	133.5	103.5	95.7	75.1	81.6	75.3
Cu	3.88	27.1	25.6	23.9	26.5	25.0	25.2	3.6	12.7	21.7	13.4	16.5
Zn	30.40	77	74	96	75	72	72	81	80	73	86	75
Ga	19.80	15.9	15.3	14.4	14.8	15.4	16.0	18.5	18.3	17.9	17.7	17.4
Rb	129.10	79.6	97.7	84.8	98.3	92.1	92.2	60.3	71.2	61.4	61.5	63.5
Sr	463.20	1 035	974	1 000	909	929	974	896	869	937	819	861
Zr	96.33	146	140	130	131	139	146	130	133	133	134	130
Nb	9.44	6.2	6.0	5.7	5.7	6.1	6.4	4.6	4.8	4.6	4.6	4.5
Mo	0.79	0.76	0.69	0.70	0.77	0.74	2.32	0.46	0.52	0.66	0.36	1.11
In	0.052	0.051	0.049	0.051	0.050	0.052	0.049	0.051	0.046	0.046	0.048	0.048
Cs	1.98	2.39	2.58	2.42	2.28	2.25	1.38	1.56	1.11	1.10	1.28	1.28
Ba	1 645	1 520	1 540	1 410	1 475	1 665	963	1 465	1 325	1 000	1 230	1 390
Hf	3.4	3.2	3.0	3.1	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.3	3.3	3.4
Ta	0.35	0.33	0.31	0.33	0.35	0.36	0.26	0.27	0.26	0.26	0.25	0.27
W	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Tl	0.55	0.72	0.60	0.69	0.66	0.66	0.36	0.40	0.31	0.35	0.33	0.36
Pb	17.9	12.4	18.2	14.4	13.0	18.1	24.1	19.4	17.3	24.0	18.0	25.4
Bi	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Th)	5.78	5.58	5.33	5.38	5.46	5.82	6.04	6.21	6.13	6.15	5.85	6.26
U	0.92	0.87	0.84	0.85	0.85	0.89	1.17	1.24	1.17	1.22	1.14	1.20
Y	20.0	19.2	18.0	17.8	19.1	19.2	16.0	15.4	15.3	15.4	15.6	15.9
La	48.0	46.0	42.6	43.6	45.7	47.7	37.3	36.9	37.0	36.1	35.8	37.3
Ce	91.8	89.5	83.4	84.6	88.5	93.1	71.4	70.5	69.7	70.1	69.1	70.3
Pr	10.75	10.45	9.64	9.80	10.35	10.75	8.20	8.16	8.03	8.06	7.98	8.20
Nd	6.2	6.0	5.7	5.7	6.1	6.4	4.6	4.8	4.6	4.6	4.5	4.7
Sm	6.68	6.56	6.10	6.17	6.48	6.81	5.26	5.03	4.96	5.00	4.90	5.02
Eu	1.74	1.77	1.58	1.67	1.67	1.82	1.40	1.37	1.28	1.38	1.32	1.41
Gd	4.79	4.68	4.51	4.49	4.66	4.79	3.78	3.61	3.62	3.71	3.53	3.76
Tb	0.68	0.67	0.59	0.64	0.66	0.67	0.54	0.52	0.51	0.53	0.51	0.51
Dy	3.70	3.78	3.37	3.54	3.59	3.79	2.97	2.88	2.68	2.78	2.77	2.83
Ho	0.71	0.71	0.66	0.68	0.70	0.73	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.56
Er	1.98	1.96	1.89	1.86	1.93	1.96	1.60	1.53	1.41	1.54	1.52	1.46
Tm	0.30	0.29	0.26	0.27	0.28	0.29	0.24	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23
Yb	1.75	1.68	1.64	1.68	1.74	1.78	1.46	1.40	1.36	1.32	1.34	1.41
Lu	0.28	0.26	0.26	0.26	0.26	0.28	0.23	0.22	0.22	0.21	0.22	0.22
ΣREE	179.36	174.31	162.20	164.96	172.62	180.87	139.56	137.71	136.15	136.10	134.25	137.91
LREE	165.17	160.28	149.02	151.54	158.80	166.58	128.16	126.76	125.57	125.24	123.60	126.93
HREE	14.19	14.03	13.18	13.42	13.82	14.29	11.40	10.95	10.58	10.86	10.65	10.98
LREE/HREE	11.64	11.42	11.31	11.29	11.49	11.66	11.24	11.58	11.87	11.53	11.61	11.56
δEu	0.94	0.98	0.92	0.97	0.93	0.98	0.96	0.98	0.92	0.98	0.97	0.99
δCe	1.00	1.01	1.02	1.01	1.01	1.02	1.01	1.01	1.00	1.02	1.01	1.00
(La/Yb) <sub>N</sub>	19.67	19.64	18.63	18.62	18.84	19.22	18.33	18.91	19.51	19.62	19.16	18.98

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为×10<sup>-6</sup>

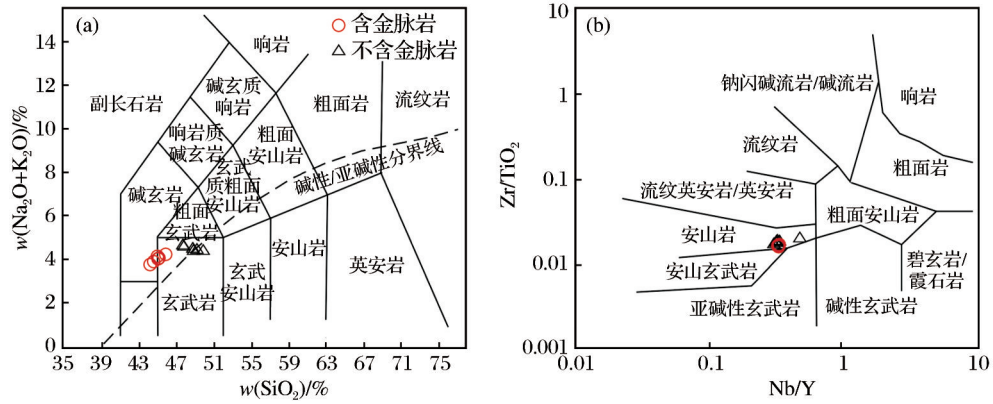


图4 滕家金矿脉岩 TAS 图解(a)和 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解(b)

Fig. 4 TAS diagram (a) and Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> diagram (b) of dike in the Tengjia gold deposit

稀土元素和微量元素含量见表1。含金脉岩稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $192 \times 10^{-6} \sim 214 \times 10^{-6}$ , 其中轻稀土元素(LREE)总量为  $179.12 \times 10^{-6} \sim 200.08 \times 10^{-6}$ , 重稀土元素(HREE)总量为  $13.18 \times 10^{-6} \sim 14.29 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土比值(LREE/HREE)为 13.18~14.29,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值为 18.62~19.67,  $\delta\text{Eu}$  为 0.93~0.98,  $\delta\text{Ce}$  值为 1.00~1.02。不含金脉岩稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $159.45 \times 10^{-6} \sim 165.56 \times 10^{-6}$ , LREE 元素总量为  $148.80 \times 10^{-6} \sim 154.16 \times 10^{-6}$ , HREE 元素总量为  $11.40 \times 10^{-6} \sim 10.98 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE=13.52~14.21,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 18.33~19.62,  $\delta\text{Eu}$  值为 0.92~0.99,  $\delta\text{Ce}$  值为 1.00~1.02。球粒陨石标准化稀土元素配分图[图5(a)]

中,含金脉岩的稀土元素含量高于不含金脉岩,可能是含金脉岩的源区更富集,或经历了更低程度的熔融,导致熔体中不相容元素(REE)高度富集;二者的配分曲线均表现为右倾特征,LREE 相对富集,HREE 相对亏损,表明源区上存在相似性,没有 Ce 负异常,表明岩石没有受低温蚀变作用的影响(Zou et al, 2000)。原始地幔标准化微量元素蛛网图[图5(b)]揭示,该含金脉岩呈现大离子亲石元素(LILE)Ba、Th、U 和 K 相对富集的特征,同时伴随高场强元素(HFSE)Nb、P 和 Ti 相对亏损,这一地球化学特征强烈指示其与富集地幔源区具有成因上的密切关联性。

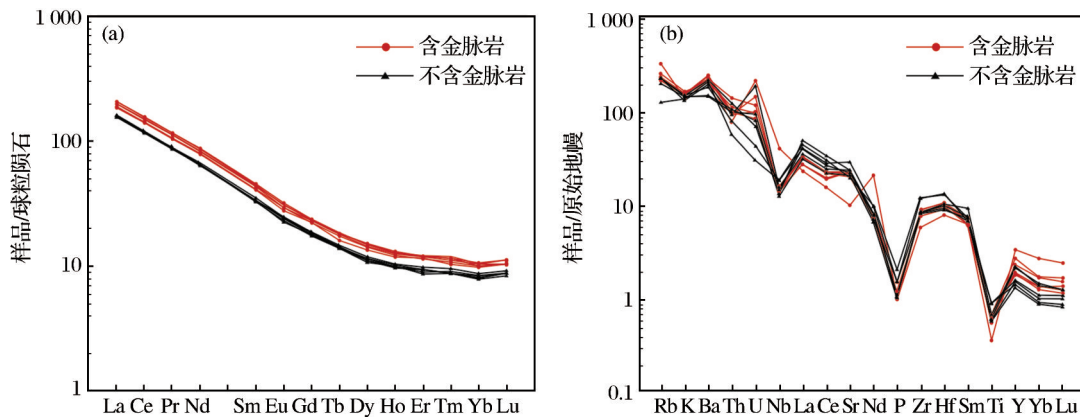


图5 滕家金矿脉岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for the dike from the Tengjia gold deposit (a) and primitive mantle normalized trace elements spider diagram (b)

### 3.2 锆石 U-Pb 年龄

对含金脉岩 ZK2402-1 和不含金脉岩 ZK2402-2 锆石进行挑选,含金脉岩做了 32 个点次的分析测

试,锆石 U 含量为  $56.33 \times 10^{-6} \sim 1068.60 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $39.83 \times 10^{-6} \sim 267.00 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值为 0.25~0.71,平均值为 0.43,大部分锆石的 Th/U 比值介于

0.1~0.4(表2),Pb含量相对较高,锆石有明显震荡环带,显示出岩浆锆石的特征[图6(a)]。对不含金脉岩锆石做了18个点次分析测试,锆石颜色为浅

粉色,透明,金刚光泽,大部分具有平行环带或无内部结构,为岩浆成因锆石,少量锆石呈浑圆状,内部裂隙发育,属于变质锆石[图6(b)]。

表2 滕家金矿脉岩锆石U-Pb分析结果  
Table 2 Zircon U-Pb analysis results of dike in the Tengjia gold deposit

测试点编号	含量/( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$
ZK2402-1-1	22.096	55.46	208.35	0.27	0.05283	0.00371	0.17101	0.01168	0.02349	0.00044	320.5	312.8	160.3	19.8	149.7	2.4
ZK2402-1-3	11.523	41.26	82.01	0.50	0.05937	0.00651	0.2031	0.02165	0.02483	0.00069	579.7	466.9	187.7	35.8	158.1	4.5
ZK2402-1-5	7.8	39.83	56.33	0.71	0.05817	0.00705	0.20665	0.02441	0.02578	0.00076	535.2	520.0	190.7	40.3	164.1	5.4
ZK2402-1-7	6.542	40.17	56.65	0.71	0.05797	0.00688	0.19461	0.02248	0.02436	0.00072	527.6	509.8	180.6	37.4	155.2	4.9
ZK2402-1-9	120.87	267.18	1 068.6	0.25	0.05185	0.00193	0.18172	0.00655	0.02543	0.00032	277.8	167.0	169.5	11.0	161.9	1.9
ZK2402-1-10	51.01	214.7	465.88	0.46	0.05212	0.00261	0.17157	0.00836	0.02389	0.00036	289.7	224.3	160.8	14.2	152.2	1.4
ZK2402-1-14	36.159	133.72	331.53	0.40	0.04827	0.00281	0.15123	0.00854	0.02265	0.00037	111.5	269.3	143.0	14.8	144.4	1.6
ZK2402-1-15	20.102	99.87	162.59	0.61	0.05712	0.00417	0.19647	0.0139	0.02486	0.0005	495.2	315.4	182.1	23.1	158.3	3.2
ZK2402-1-17	44.857	119.54	375.71	0.32	0.04843	0.00263	0.16062	0.00845	0.02397	0.00037	119.3	250.9	151.2	14.5	152.7	2.6
ZK2402-1-18	55.216	134.08	513.14	0.26	0.04787	0.0024	0.15306	0.00744	0.02311	0.00034	91.8	232.8	144.6	12.8	147.3	1.2
ZK2402-1-22	27.749	101.97	228.05	0.45	0.05215	0.00322	0.17902	0.01075	0.02480	0.00041	291.0	276.4	167.2	18.1	157.9	2.1
ZK2402-1-24	32.74	127.73	254.99	0.50	0.05382	0.00326	0.18674	0.01098	0.02510	0.00043	362.5	267.8	173.8	18.4	159.8	1.3
ZK2402-1-28	71.69	212.03	592.64	0.36	0.05419	0.00233	0.18901	0.00786	0.02522	0.00034	377.9	189.6	175.8	13.2	160.6	2.2
ZK2402-1-30	71.32	252.61	612.64	0.41	0.05421	0.00254	0.1717	0.00778	0.02290	0.00033	378.8	206.5	160.9	13.2	146.0	4.1
ZK2402-1-31	20.198	100.47	158.45	0.63	0.06351	0.00421	0.20627	0.01324	0.02351	0.00042	724.4	275.6	190.4	21.8	149.8	5.2
ZK2402-1-32	12.307	58.97	89.05	0.66	0.05574	0.00455	0.1967	0.01561	0.02554	0.00053	441.0	355.9	182.3	26.0	162.6	6.5
ZK2402-2-1	810.35	47.78	483.11	0.10	0.10817	0.00243	4.81793	0.10289	0.32241	0.00339	1 768	80.4	1 788.0	35.2	1 801.5	32.4
ZK2402-2-2	10.625	58.52	59.31	0.99	0.04900	0.00437	0.23062	0.02004	0.03402	0.00073	146.8	409.9	210.7	32.4	215.7	8.9
ZK2402-2-3	8.38	385.12	336.06	1.15	0.04881	0.00262	0.12268	0.00662	0.01825	0.00003	139.8	128.3	117.1	6.5	116.3	2.1
ZK2402-2-4	165.24	43.11	85.07	0.51	0.10938	0.00263	5.01710	0.11478	0.33164	0.00368	1 788.3	85.9	1 822.2	38.0	1 846.3	34.9
ZK2402-2-5	182.2	70.36	108.44	0.65	0.08728	0.00225	2.80535	0.06923	0.23267	0.00261	1 365.8	97.3	1 357.0	36.2	1 348.5	26.8
ZK2402-2-6	87.08	463.49	472.29	0.98	0.04903	0.00197	0.21629	0.00841	0.03194	0.0004	148.2	184.6	198.8	13.8	202.7	4.9
ZK2402-2-7	36.346	76.67	176.68	0.43	0.05164	0.00262	0.28745	0.01417	0.04029	0.00059	268.5	228.1	256.6	21.9	254.6	7.2
ZK2402-2-8	577.7	19.31	308.84	0.06	0.15227	0.00335	7.76971	0.16223	0.36937	0.00389	2 370.8	73.5	2 204.7	36.8	2 026.4	35.9
ZK2402-2-9	369.75	326.64	782.54	0.42	0.15409	0.00407	1.62912	0.0407	0.07670	0.00086	2 391.1	88.1	981.5	30.8	476.4	10.1
ZK2402-2-10	782.18	1 015.45	909.24	1.12	0.08459	0.0018	1.75261	0.03478	0.15029	0.00143	1 305.3	81.0	1 028.1	25.1	902.6	15.7
ZK2402-2-11	42.84	126.95	357.63	0.35	0.06223	0.00289	0.19551	0.00875	0.02279	0.00033	681.1	194.4	181.3	14.6	145.3	4.1
ZK2402-2-12	223.798	45.35	1 721.54	0.03	0.04678	0.00145	0.17295	0.00514	0.02682	0.00030	36.9	145.4	162.0	8.7	170.6	3.7
ZK2402-2-13	613.39	103.67	500.97	0.21	0.09423	0.00244	3.04545	0.07499	0.23447	0.00255	1 511.9	95.8	1 419.1	36.9	1 357.9	26.1
ZK2402-2-14	28.1	767.69	1 257.15	0.61	0.04954	0.00152	0.12644	0.00407	0.01871	0.00023	146.4	72.1	121.9	4.6	119.2	1.4
ZK2402-2-15	345.9	28.67	234.23	0.12	0.10686	0.00283	4.14107	0.10421	0.28115	0.00313	1 745.7	95.1	1 662.4	40.3	1 597.2	30.9
ZK2402-2-16	805.9	448.86	1 340.75	0.33	0.06931	0.0018	1.10749	0.02731	0.11593	0.00125	907.1	104.9	757	25.8	707.1	14.2
ZK2402-2-17	107.33	330.77	563.33	0.59	0.04879	0.00177	0.23984	0.00839	0.03566	0.00043	136.7	167.1	218.3	13.5	225.9	5.2
ZK2402-2-18	306.32	720.37	562.49	1.28	0.09365	0.00256	1.10944	0.02876	0.08595	0.00096	1 500.2	101.3	757.9	27.1	531.5	11.2

对于含金脉岩,在剔除继承性锆石和个别不谐和年龄数据后,锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据点集中在谐和线及其附近[图7(a)], $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄

为144.3~165.3 Ma,加权平均年龄为(154.4 $\pm$ 1.3)Ma ( $MSWD=0.9,n=16$ ),代表了含金脉岩的年龄。

对于不含金脉岩,锆石Pb含量为 $27.45\times 10^{-6}$ ~

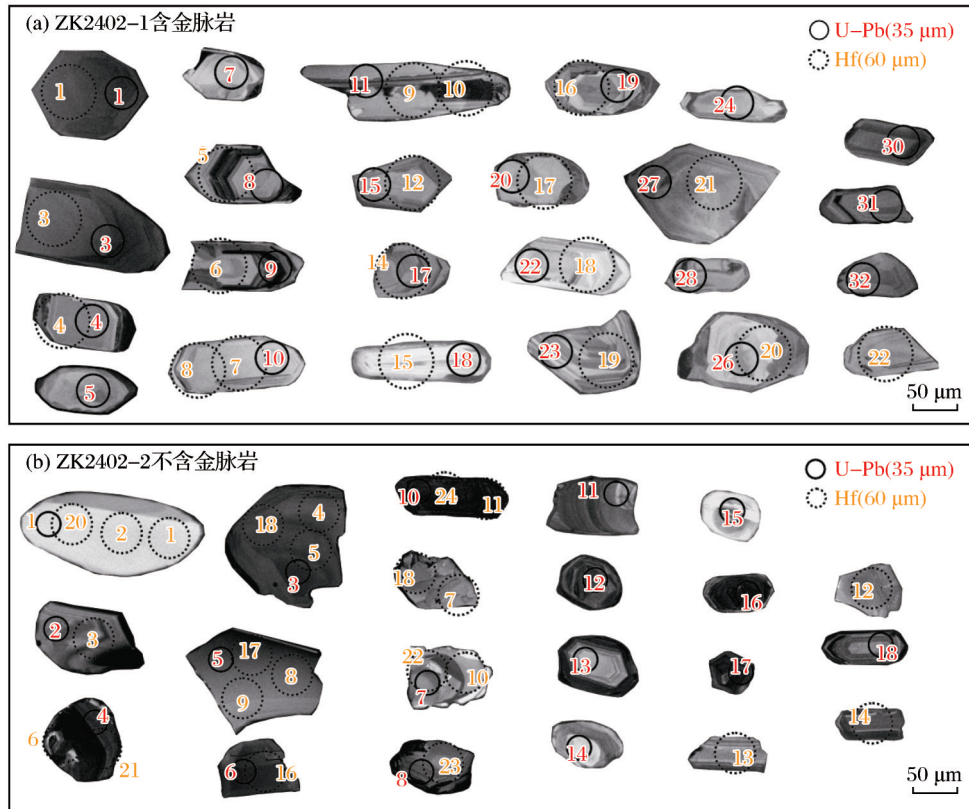


图6 滕家金矿脉岩锆石 CL图(红色代表U-Pb测点、橙色代表Hf同位素测点)

Fig. 6 Zircon CL images of dike in the Tengjia gold deposit

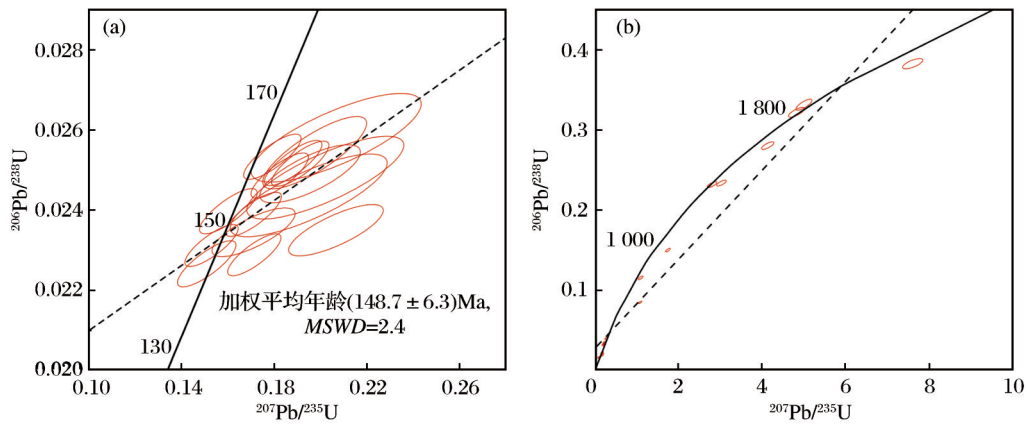


图7 滕家金矿脉岩锆石U-Pb加权平均年龄

Fig. 7 Zircon U-Pb weighted average ages of the dike in the Tengjia gold deposit

810.35 $\times 10^{-6}$ , Th和U含量分别为19.31 $\times 10^{-6}$ ~1 015.45 $\times 10^{-6}$ 和59.31 $\times 10^{-6}$ ~1 721.54 $\times 10^{-6}$ , Th/U比值为0.10~1.28(表2)。个别数据点落在一致曲线下方,表明有一定程度的铅丢失,多数数据点均落于谐和线上或附近[图7(b)],具有多组年龄,其中最年轻锆石有

2粒,分别为ZK2402-2-3和ZK2402-2-14,锆石2-3无内部结构,晶型较好,Th/U比值为1.15,年龄为(116.3 $\pm 2.1$ )Ma,锆石2-14有明显的韵律环带,Th/U比值为0.61,年龄为(119.2 $\pm 1.4$ )Ma,加权平均年龄为(117.5 $\pm 1.6$ )Ma,  $n=2$ ,说明成矿后脉岩的结晶年龄小

于等于(117.5±1.6)Ma。

### 3.3 锆石微量元素

锆石微量元素分析结果如表3所示。经球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线如图8所示,其中含金脉岩的配分模式一致[图8(a)]:轻稀土亏损、重稀土富集,具有显著Ce正异常和较弱Eu负异常,与典型岩浆锆石特征相符;少数不含金脉岩表现出LREE富集的热液锆石特征[图8(b)]。根据锆石中微量元素Ti对岩浆形成温度进行限定, $T_{\text{zircon}} = (4\ 800 \pm 86) / (5.711 \pm 0.072 - \lg \text{Ti} - \lg a_{\text{SiO}_2} + \lg a_{\text{TiO}_2}) - 273$ ,

$a_{\text{SiO}_2}$ 和 $a_{\text{TiO}_2}$ 分别为SiO<sub>2</sub>和TiO<sub>2</sub>活度,根据矿物共生组合设定(一般为0.5~1.0),误差在70℃之内(Watson et al, 2006)。根据锆石Ti含量计算得到2种脉岩结晶温度分别为628~811℃(平均值为727℃)和613~941℃(平均值为758℃),由于锆石Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup>的组成受斜长石、榍石的分离结晶和矿物包裹体的影响,Eu<sub>N</sub>/Eu<sub>N</sub><sup>\*</sup>组成受地壳厚度的影响, X<sub>Ce<sup>4+</sup></sub>/X<sub>Ce<sup>3+</sup></sub>氧逸度计的结果受岩浆含水量的影响,研究人员根据Ce<sup>4+</sup>、U<sup>4+</sup>和Ti<sup>4+</sup>提出新的锆石氧逸度计,避免了所有基于REE<sup>3+</sup>的氧逸度计中可能遇到的问题。 $\Delta \text{FMQ} = 3.998 (\pm 0.124) \times \lg (\text{Ce} / \sqrt{U_i \times \text{Ti}}) + 2.284 (\pm 0.101)$ ,

表3 滕家金矿脉岩锆石微量元素测试结果

Table 3 Zircon trace elements test results of dike in the Tengjia gold deposit ( $\times 10^{-6}$ )

测试点编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ti	Y	Hf	T/℃	ΔFMQ
ZK2402-1-1	0.01	2.39	0.03	0.41	2.19	0.40	13.42	5.62	70.02	29.59	140.04	31.24	312.86	59.34	2.01	906	9 744	652	-1.47
ZK2402-1-3		7.92	0.06	0.91	2.55	0.63	15.69	4.44	48.63	17.29	74.02	15.82	162.42	29.43	3.10	510	10 328	687	1.04
ZK2402-1-5		7.94	0.05	1.21	2.13	1.26	11.79	3.34	41.38	14.74	61.29	12.53	121.73	23.47	4.52	431	8 586	720	1.04
ZK2402-1-7		10.16	0.04	0.95	2.27	1.33	14.66	4.58	52.10	19.77	85.99	18.76	186.59	34.38	3.77	588	9 764	704	1.62
ZK2402-1-10		22.08	0.05	1.27	5.86	1.22	31.54	12.35	162.66	58.87	263.13	55.69	547.06	96.25	3.83	1 763	10 171	705	1.13
ZK2402-1-14		15.40	0.04	0.80	2.55	1.54	24.53	9.03	112.99	45.43	206.66	46.60	452.31	86.49	1.45	1 352	10 007	628	1.64
ZK2402-1-15	0.13	10.12	0.08	2.12	4.31	1.19	20.67	6.13	63.90	23.14	93.02	18.93	189.81	34.30	11.39	673	9 766	810	-0.26
ZK2402-1-17	0.02	19.33	0.13	1.74	4.75	2.16	23.71	8.50	108.12	42.28	183.06	39.22	369.98	66.26	4.30	1 194	11 729	715	0.71
ZK2402-1-18	0.01	13.56	0.03	1.04	3.72	0.63	23.34	10.00	124.57	47.96	217.87	47.23	458.86	80.36	2.62	1 477	12 597	673	0.77
ZK2402-1-22	0.09	12.40	0.16	2.75	3.72	2.64	25.85	7.69	89.71	32.34	128.05	26.68	241.15	43.73	8.34	919	9 937	778	0.97
ZK2402-1-24		16.15	0.06	1.48	4.05	1.31	25.85	8.96	110.57	42.07	193.33	40.44	408.33	77.71	6.60	1 285	10 221	755	0.64
ZK2402-1-28	0.05	23.55	0.11	1.94	5.51	1.74	32.73	12.07	146.56	52.22	217.91	46.56	422.90	69.44	11.51	1 549	10 457	811	0.98
ZK2402-1-30		7.80	0.09	0.88	4.52	1.41	31.92	10.22	128.07	51.44	224.05	50.07	437.16	81.00	6.17	1 476	9 767	748	-1.33
ZK2402-1-31	0.02	15.86	0.27	3.77	6.80	2.32	29.48	7.90	76.98	27.74	113.79	22.85	212.35	38.89	5.08	805	8 412	730	1.25
ZK2402-1-32	0.02	8.30	0.14	2.65	4.22	1.73	19.00	6.65	67.09	25.04	111.82	22.04	206.31	41.40	9.35	761	8 524	789	0.09
Zk2402-2-1	0.02	2.50	0.03	0.27	0.69	0.03	7.46	3.14	46.45	20.00	110.81	29.68	367.47	77.13	7.84	586	13 360	772	-1.55
Zk2402-2-2	0.01	16.36	0.10	1.89	3.64	0.83	14.41	3.80	43.34	15.64	65.87	14.09	135.08	25.09	8.51	452	9 384	780	-1.70
Zk2402-2-3	0.11	37.55	0.08	0.99	2.86	0.55	12.32	5.29	70.52	32.31	163.22	41.50	437.44	86.26	2.71	1 014	10 218	676	3.18
Zk2402-2-4	0.00	7.26	0.04	0.65	1.79	0.16	6.58	2.60	28.72	10.78	52.43	11.61	106.95	20.11	11.84	336	9 481	814	-0.55
Zk2402-2-6	0.02	5.65	0.11	1.34	1.11	0.37	5.42	1.75	20.18	8.73	36.92	8.02	84.55	16.45	1.18	269	7 302	613	-0.23
Zk2402-2-8	0.01	2.92	0.02	0.18		0.11	2.98	0.77	9.33	4.37	24.81	7.40	93.24	20.53	5.35	143	11 339	735	-2.61
Zk2402-2-10	0.42	50.09	1.20	13.42	31.57	25.21	150.91	32.68	238.47	62.76	242.31	50.40	482.65	95.16	34.45	1 845	10 528	941	-0.05
Zk2402-2-11	0.08	18.03	0.12	0.88	2.20	1.11	13.66	4.32	49.00	18.39	87.70	20.23	234.74	49.70	2.80	606	14 098	679	1.28
Zk2402-2-12	0.01	2.35	0.03	0.26	1.16	0.43	9.28	3.82	50.61	21.04	105.12	28.12	310.38	62.14	4.45	657	12 973	718	-4.03
Zk2402-2-13	0.01	5.83	0.03	0.22	0.80	0.11	6.15	2.11	24.47	9.97	52.48	12.91	145.89	29.18	4.76	330	13 646	724	-1.61
Zk2402-2-14	0.01	48.38	0.11	1.97	4.22	1.57	16.32	4.88	58.04	21.79	104.82	26.43	278.45	55.23	5.29	703	9 420	734	-2.35
Zk2402-2-15		1.17	0.04	0.34	2.12	0.33	9.32	3.38	37.87	15.66	72.45	17.98	167.80	32.82	4.99	452	8 620	729	-1.82
Zk2402-2-16	1.20	39.31	2.45	20.64	47.17	34.74	216.66	44.85	283.61	69.65	255.93	49.48	505.88	91.60	17.46	2 047	13 050	857	-0.18
Zk2402-2-17	0.01	13.33	0.06	1.03	4.09	0.76	29.19	11.49	144.92	60.88	280.03	60.23	592.54	105.19	3.75	1 714	9 526	703	0.10
Zk2402-2-18	1.96	68.48	2.26	23.62	23.87	4.45	52.85	11.24	87.05	22.92	76.89	12.66	103.64	16.65	25.69	627	10 745	903	1.22

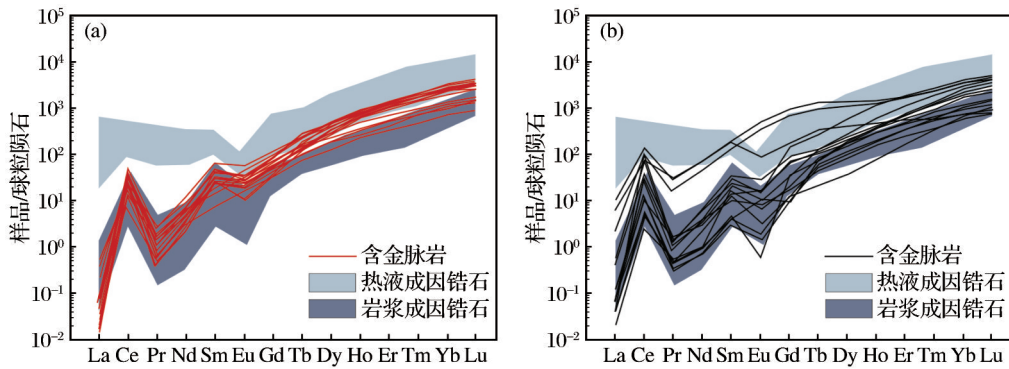


图8 滕家金矿脉岩锆石稀土元素球粒陨石模式图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from the dike of the Tengjia gold deposit

Ce、Ti为锆石的Ce和Ti含量,  $U_i$ 为U的初始含量, 用U含量和年龄值计算(Loucks et al, 2020)。滕家金矿两类脉岩Ce-U-Ti氧逸度计 $\Delta FMQ$ 的范围分别为-1.17~1.64和-4.03~3.18。

### 3.4 锆石Lu-Hf同位素

锆石的Lu-Hf同位素组成是一种非常敏感的地球化学示踪剂, 可用于探测地壳和地幔物质的演化历史, 本次测试结果见表4。2种脉岩锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围分别为0.000438~0.003504和0.000195~0.002252 (<0.004), 表明锆石形成后放射性成因Hf的积累极弱, 其测试结果能够有效代表其形成时的初始Hf同位素组成(吴福元等, 2007)。

含金脉岩锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围在0.281184~0.282522之间, 变化范围较小。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为-52.5~-5.7, 平均值为-32.2, 均为负值, 相应的Hf同位素单阶段模式年龄为 $T_{\text{DM1}}=1\ 078\sim 2\ 838\ \text{Ma}$ , 二阶段模式年龄为 $T_{\text{DM2}}=1\ 567\sim 4\ 502\ \text{Ma}$ 。

将锆石Hf模式年龄明显小于结晶年龄的异常点剔除, 这类数据通常被认为存在严重问题(如后期扰动、混合信号或分析误差), 不宜进一步讨论(吴福元等, 2007), 不含金脉岩锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围在0.281383~0.282203之间,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为-44.91~-8.32, 相应的Hf同位素单阶段模式年龄为 $T_{\text{DM1}}=1\ 530\sim 2\ 721\ \text{Ma}$ , 二阶段模式年龄为 $T_{\text{DM2}}=2\ 253\sim 3\ 147\ \text{Ma}$ 。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因和岩浆源区特征

基性脉岩(如辉绿岩和煌斑岩等)是地壳伸展环境下深部地幔岩浆快速上升并侵位的产物, 其形

成与壳幔相互作用、岩石圈伸展减薄密切相关(宋英昕等, 2018)。作为连接深部地幔与浅部地壳的“探针”, 基性脉岩为揭示地幔源区性质、岩浆演化过程及壳幔物质交换提供了重要窗口。

Nb、Ta和Zr等高场强元素性质稳定, 后期蚀变中不易迁移, 可作为指示岩石成因及岩浆源区特征的标志(任军虎等, 2010)。由表1可知, 含金脉岩的Nb、Ta元素含量分别为 $5.7\times 10^{-6}\sim 6.4\times 10^{-6}$ (平均值为 $6.0\times 10^{-6}$ )和 $0.31\times 10^{-6}\sim 0.36\times 10^{-6}$ (平均值为 $0.34\times 10^{-6}$ ), 介于板内玄武岩(Nb= $13\times 10^{-6}\sim 18\times 10^{-6}$ , Ta= $0.73\times 10^{-6}\sim 5.90\times 10^{-6}$ )与岛弧玄武岩(Nb= $1.7\times 10^{-6}\sim 2.7\times 10^{-6}$ , Ta= $0.10\times 10^{-6}\sim 0.18\times 10^{-6}$ )之间。不含金脉岩Nb、Ta元素含量分别为 $4.5\times 10^{-6}\sim 4.8\times 10^{-6}$ (平均值为 $4.6\times 10^{-6}$ )和 $0.25\times 10^{-6}\sim 0.27\times 10^{-6}$ (平均值为 $0.26\times 10^{-6}$ ), 与洋中脊玄武岩MORB的Nb、Ta元素含量(Nb= $0.46\times 10^{-6}$ , Ta= $0.29\times 10^{-6}$ )接近。2种脉岩的Zr、Hf元素含量相近, 分别为 $130\times 10^{-6}\sim 146\times 10^{-6}$ (平均值为 $135\times 10^{-6}$ )和 $3.0\times 10^{-6}\sim 3.4\times 10^{-6}$ (平均值为 $3.3\times 10^{-6}$ ), 与板内玄武岩Zr、Hf元素含量相近, 远高于火山弧玄武岩(Zr= $40\times 10^{-6}$ , Hf= $1.17\times 10^{-6}$ )和MORB型玄武岩(Zr= $92\times 10^{-6}$ , Hf= $2.4\times 10^{-6}$ )平均含量。脉岩的Nb/Ta比值为17.3~18.3, 接近原始地幔值(17~18), 且具有富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素的特征, 反映其源区与富集型地幔密切相关。由脉岩微量元素Ta/Yb-Ce/Yb图解[图9(a)]可以看出, 两类脉岩的地球化学特征均表现为高碱度富集, 且其源区演化趋势与板块俯冲过程有关, 由Th/Yb-Th/Yb图解[图9(b)]可知, 脉岩属于活动大陆边缘的玄武岩, Th-Hf-Ta判别图[图9(c)]显示脉岩为岛弧钙

表4 滕家金矿脉岩锆石Lu-Hf同位素分析数据结果

Table 4 Results of zircon Lu-Hf isotope analysis data of dike in the Tengjia gold deposit

测试点编号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM2}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
ZK2402-1-1	149.7	0.047619	0.001096	0.281914	-30.34	-27.07	1 885	2 913	-0.97
ZK2402-1-3	158.1	0.034116	0.000760	0.281950	-29.08	-25.73	1 819	2 831	-0.98
ZK2402-1-5	154.3	0.025490	0.000512	0.281792	-34.65	-31.24	2 022	3 176	-0.98
ZK2402-1-6	161.9	0.065465	0.001352	0.281920	-30.13	-26.78	1 889	2 898	-0.96
ZK2402-1-7	152.2	0.045900	0.001051	0.281468	-46.13	-42.74	2 497	3 890	-0.97
ZK2402-1-8	152.2	0.061432	0.001395	0.281926	-29.91	-26.52	1 882	2 883	-0.96
ZK2402-1-9	154.3	0.063052	0.001518	0.282144	-22.21	-18.81	1 583	2 401	-0.95
ZK2402-1-10	154.3	0.119668	0.002610	0.281876	-31.70	-28.41	2 018	3 001	-0.92
ZK2402-1-12	158.3	0.018844	0.000438	0.281184	-56.16	-52.59	2 838	4 502	-0.99
ZK2402-1-14	152.7	0.056052	0.001223	0.281928	-29.82	-26.29	1 871	2 873	-0.96
ZK2402-1-15	147.3	0.048267	0.000953	0.281938	-29.48	-25.90	1 844	2 850	-0.97
ZK2402-1-16	154.3	0.106328	0.0020713	0.281509	-44.67	-41.20	2 507	3 799	-0.94
ZK2402-1-17	154.3	0.032986	0.000667	0.281503	-44.88	-41.23	2 424	3 805	-0.98
ZK2402-1-18	157.9	0.048270	0.000928	0.281934	-29.62	-25.97	1 848	2 857	-0.97
ZK2402-1-19	154.3	0.128894	0.002628	0.282522	-8.83	-5.71	1 078	1 567	-0.92
ZK2402-1-20	154.3	0.050424	0.001066	0.281541	-43.55	-40.26	2 398	3 733	-0.97
ZK2402-1-21	154.3	0.088086	0.001837	0.281295	-52.24	-49.01	2 790	4 272	-0.94
ZK2402-1-22	154.3	0.061642	0.001472	0.281950	-29.08	-25.79	1 854	2 834	-0.96
Zk2402-2-1	1 801.5	0.026505	0.000598	0.281933	-29.66	9.82	1 834	1 854	-0.98
Zk2402-2-2	1 801.5	0.021739	0.000508	0.281953	-28.96	10.63	1 803	1 803	-0.98
Zk2402-2-4	254.6	0.024175	0.000546	0.281520	-44.26	-38.78	2 393	3 714	-0.98
Zk2402-2-5	254.6	0.026982	0.000605	0.281496	-45.13	-39.66	2 430	3 768	-0.98
Zk2402-2-10	254.6	0.016223	0.000396	0.281346	-50.42	-44.91	2 618	4 093	-0.99
Zk2402-2-16	202.7	0.112391	0.002252	0.282203	-20.13	-15.99	1 530	2 253	-0.93
Zk2402-2-18	254.6	0.014253	0.000288	0.282141	-22.33	-16.80	1 537	2 343	-0.99
Zk2402-2-20	1 601.5	0.030269	0.000685	0.281973	-28.25	11.13	1 783	1 772	-0.98
Zk2402-2-21	1 646.3	0.045411	0.001144	0.282032	-26.16	13.66	1 723	1 649	-0.97
Zk2402-2-22	254.6	0.008625	0.000195	0.281361	-49.90	-44.37	2 585	4 060	-0.99
Zk2402-2-23	2 026.4	0.027400	0.000656	0.281283	-52.66	-8.32	2 721	3 147	-0.98

碱性玄武岩系列,推测滕家矿区脉岩主要来自富集地幔岩浆。

通常认为不同类型富集岩石圈地幔或古老地壳物质的锆石Hf同位素中 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较小( $\leq 0.282772$ ),对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值(吴福元等,2007;郭文琳等,2019),滕家矿区脉岩的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.281184~0.282522, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-52.5~-5.7,说明脉岩地幔源区古老且富集,对应的Hf模式年龄明显老于岩体结晶年龄,表明岩浆源区受到过古老下地壳物质的混染(吴福元等,2007)。在Hf同位素图解(图10)中,所有的数据点均位于亏损地幔演化线之下,集中分布在1.8 Ga、3.0 Ga和4.0 Ga地壳演化线

附近,表明脉岩来自华北克拉通古老的岩石圈地幔(梁亚运,2017)。脉岩的HFSE相对亏损,这被认为是俯冲交代作用的结果,表明可能受到了太平洋板块俯冲作用交代改造。综上所述,滕家矿区脉岩岩浆源区以富集岩石圈地幔为主,混入了古老下地壳物质。

#### 4.2 锆石U-Pb年龄揭示区域关键地质事件

本次测试中,不含金脉岩只有2颗形成于早白垩世[(116.3±2.1)~(117.5±1.6)Ma]的年轻锆石,其余均为残留锆石或围岩锆石,这类锆石可记录不同阶段岩浆活动特征,为解析中基性岩浆通道周边地质体的演化提供重要依据(李洪奎等,2017)。本文测得的继承锆石年龄主要有以下阶段:2.1~1.8 Ga、

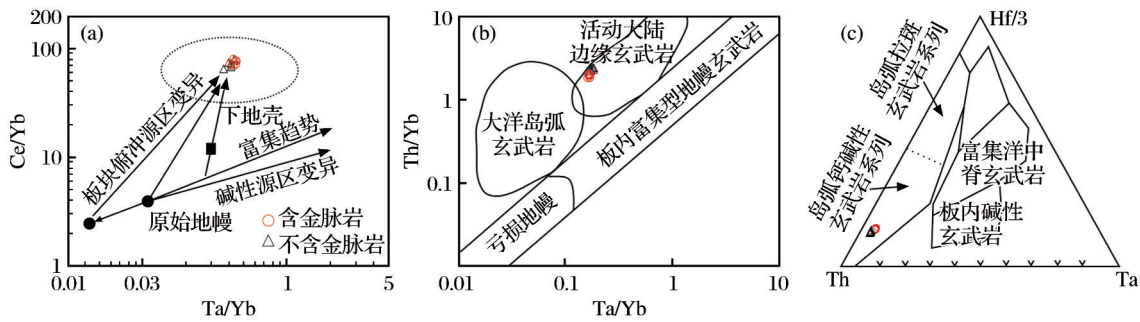


图9 滕家金矿脉岩微量元素判别图(底图据Pearce, 1982)

Fig. 9 Trace elements discriminant diagram of dike in the Tengjia gold deposit (base map after Pearce, 1982)

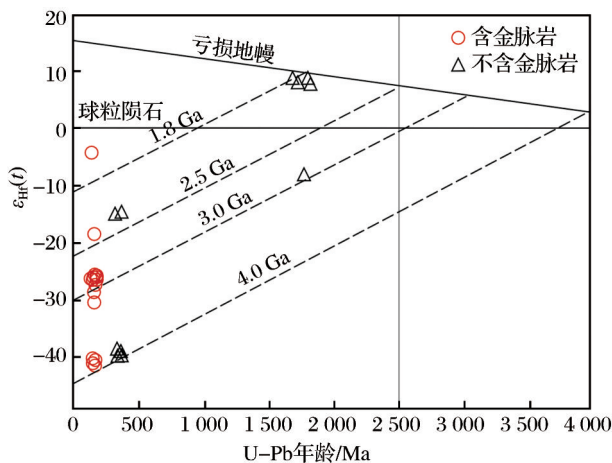


图10 滕家金矿脉岩中锆石Hf同位素图解

Fig. 10 Zircon Hf isotopic diagram of dike in the Tengjia gold deposit

1.6~1.3 Ga、900~700 Ma、500~400 Ma、250~210 Ma 和 145 Ma, 结合前人数据, 老锆石的同位素年龄分别记录了太古宙、古元古代、新元古代和中生代的岩浆事件和变质事件(宋英昕等, 2018; 韩小梦等, 2024)。2.5 Ga 的锆石对应太古宙华北克拉通晚期的构造—热事件(高级变质作用和岩浆活动), 表明该区存在太古宙陆壳物质, 为中生代岩浆活动和金成矿提供了古老物质来源(翟明国等, 2000)。2.1~1.8 Ga 的锆石年龄与古元古代华北克拉通碰撞拼贴事件(如胶—辽—吉活动带闭合)相关, 古元古代地壳再造为中生代岩浆提供了部分熔融源区(李三忠等, 2003); 900~700 Ma 的锆石可能与新元古代扬子板块与华北板块的相互作用有关, 暗示着胶东地区可能受到新元古代区域构造热事件的影响, 或存在外来物质(如扬子板块)的加入(Li et al, 2007); 500~400 Ma 的锆石记录了后期热事件扰动, 即中生

代岩浆活动对古老锆石的部分重置(许志琴等, 2006); 锆石 U-Pb 年龄(250~210 Ma)记录了三叠纪扬子板块与华北板块之间的构造碰撞事件, 说明胶东中生代岩浆岩受到三叠纪板块碰撞物质的混染(宋英昕等, 2018); 145 Ma 记录了中生代古太平洋板块俯冲事件: 俯冲引发的弧后伸展导致胶东岩石圈减薄和岩浆活动(孙卫东等, 2008)。滕家矿区脉岩中包含多时期、多来源的锆石, 表明基性脉岩在从深部向浅部侵位的过程中, 穿过了具有复杂演化历史的地壳。该地壳既包含华北克拉通在新太古代、中元古代至新元古代形成的地质体及相应地质事件, 也留存有苏鲁造山带在古生代与三叠纪时期的构造活动及演化历程。

### 4.3 脉岩构造背景及与金成矿的关系

锆石 Ce-U-Ti 氧逸度计  $\Delta FMQ$  和 Ti 温度计是研究岩浆—热液系统中成矿条件的重要参数。二者共同控制金的迁移、富集和沉淀过程, 其相互作用对金成矿具有关键影响。高  $\Delta FMQ$  时(氧化条件), 可以促进金以  $Au(HS)_2$  等金硫络合物形式溶解, 增加岩浆中金的溶解度, 增强金的迁移能力, 高氧逸度熔体更有成矿的潜力(段留安等, 2012); 低  $\Delta FMQ$  时(还原条件), 导致硫化物(如黄铁矿等)沉淀, 破坏金络合物稳定性, 促使金以自然金或合金形式沉淀; 高温(>400 °C)可以促进流体活动性和金的迁移, 而中低温(200~350 °C)有利于硫化物沉淀和金的富集(赵振华, 2010)。从锆石  $\Delta FMQ$ -锆石 Ti 温度计图解(图 11)可以看出, 不含金脉岩的氧逸度较低, 说明在此之前 Au 已经从流体中沉淀。根据脉岩与金矿体的穿切关系, 不含金脉岩为成矿期后脉岩, 本文测得成矿期后脉岩的结晶年龄为(117.5±

1.6)Ma。前人对玲珑金矿田的成矿年龄做了大量的研究,认为玲珑金矿田成矿时代为 122~118 Ma(杨进辉等,2000;阳琼艳,2013;林祖苇,2019),本研究成果与该区确定的成矿时代下限具有一致性,认为滕家金矿成矿作用最晚发生在(117.5±1.6)Ma 之前。

脉岩与金矿的形成均受控于伸展构造动力学背景,伸展断裂系统为岩浆和热液提供了运移路径,脉岩贡献了幔源物质与热能,驱动成矿流体活动,且脉岩与围岩的界面可作为化学障促使金沉淀,对金矿的形成也起到了一定作用。

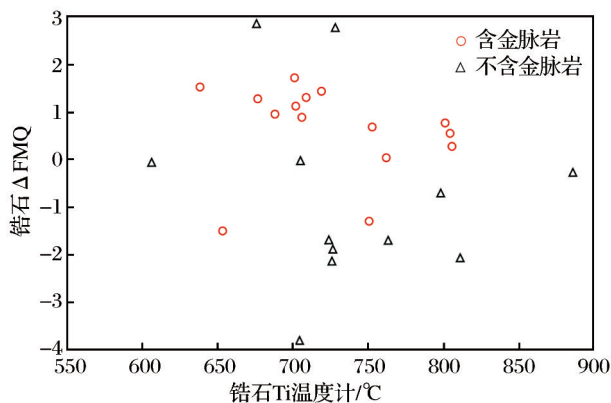


图 11 锆石  $\Delta$ FMQ-锆石 Ti 温度计图解  
(底图据 Cao et al, 2022)

Fig. 11 Zircon  $\Delta$ FMQ-zircon Ti thermometer  
(base map after Cao et al, 2022)

以往研究表明,留村金矿黄铁矿的 Rb-Sr 等时线年龄为(151.0±2.7)Ma,揭示了约 150 Ma 的一次小规模金矿化事件(姜晓辉等,2011b),且该事件与东部玲珑岩体的侵位密切相关;张良(2016)通过对平里店金矿石英白云母黄铁矿矿石中白云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年,获得了(162.5±0.8)Ma 的坪年龄,认为这是蚀变矿化的时间,并将其归因于晚侏罗纪的金成矿事件。同时对该区与黄铁矿共生的热液独居石开展 U-Pb 年代学研究,得到的成矿年龄为(119±2.1)Ma(另文发表)。本文测得的含金脉岩锆石 U-Pb 年龄为(154.4±1.3)Ma,这些数据共同表明,胶东地区存在一期 162~151 Ma 的金成矿事件,这一成矿期与玲珑期重熔型花岗岩的岩浆活动事件相对应。含矿煌斑岩仅在 ZK2402 钻孔中有发现,大规模成矿事件仍发生在 120 Ma 左右,这与区域大规模金成矿事件一致。

## 5 结论

(1)滕家金矿脉岩具有富集 LILE、LREE 以及亏损 HFSE、HREE 的特征,岩浆源区以富集岩石圈地幔为主,混入古老下地壳物质,与太平洋板块向华北板块俯冲有关。

(2)滕家金矿脉岩中包含多时期、多来源的锆石,表明基性脉岩侵位过程贯穿了具有多期构造叠加的地壳,既包括华北克拉通在新太古代、中元古代和新元古代多期次岩浆-变质事件,也叠加了苏鲁造山带三叠纪陆陆碰撞相关的构造热事件。

(3)滕家矿区含金脉岩锆石 U-Pb 年龄为(154.4±1.3)Ma,认为存在一期 162~151 Ma 的金成矿事件。成矿期后脉岩最小锆石年龄为(117.5±1.6)Ma,代表了基性脉岩的结晶年龄,即该区成矿作用最晚发生在(117.5±1.6)Ma。因此,滕家金矿是两期成矿事件的产物。

## 参考文献 (References):

- Cao K, Yang Z M, Hou Z Q, et al, 2022. Contrasting porphyry Cu fertilities in the Yidun arc, eastern Tibet: insights from zircon and apatite compositions and implications for exploration [M]//Tectonomagmatic influences on metallogeny and hydrothermal ore deposits: a tribute to Jeremy P. Richards (Volume II). Littleton: Society of Economic Geologists.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al, 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al, 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 61(3/4): 237-269.
- Hao J Y, Duan L A, Zhang Y, et al, 2024. Machine learning on white mica short-wave infrared (SWIR) spectral data in the Tengjia Au deposit, Jiaodong Peninsula (Eastern China): a prospecting indicator for lode gold deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 173: 106230.
- Li X H, Li Z X, Li W X, et al, 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a

- subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 96(1/2): 186-204.
- Liu F L, Gerdes A, Zeng L S, et al, 2008. SHRIMP U-Pb dating, trace elements and the Lu-Hf isotope system of coesite-bearing zircon from amphibolite in the SW Sulu UHP terrane, Eastern China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(12): 2973-3000.
- Loucks R R, Fiorentini M L, Henríquez G J, 2020. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon [J]. *Journal of Petrology*, 61(3): ega034.
- Ludwig K R, 2003. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 70.
- Pearce, 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [M]//Thorpe RS (ed.). *Andesites: orogenic andesites and related rocks*. New York: Wiley.
- Song M C, Li J, Yu X F, et al, 2021. Metallogenic characteristics and tectonic setting of the Jiaodong gold deposit, China [J]. *Solid Earth Sciences*, 6(4): 385-405.
- Wang X, Wang Z C, Zhang W, et al, 2024. Sulfur isotopes of lamprophyres and implications for the control of metasomatized lithospheric mantle on the giant Jiaodong gold deposits, Eastern China [J]. *GSA Bulletin*, 136(7/8): 3405-3418.
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B, 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413-433.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al, 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 234(1/2): 105-126.
- Zou H B, Zindler A, Xu X S, et al, 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance [J]. *Chemical Geology*, 171(1/2): 33-47.
- 陈炳翰, 王中亮, 李海林, 等, 2014. 胶东台上金矿床成矿流体演化: 载金黄铁矿稀土元素和微量元素组成约束 [J]. *岩石学报*, 30(9): 2518-2532. Chen Binghan, Wang Zhongliang, Li Hailin, et al, 2014. Evolution of ore fluid of the Taishang gold deposit Jiaodong: constraints on REE and trace element component of auriferous pyrite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2518-2532.
- 陈光远, 孙岱生, 邵伟, 1993. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化 [M]. 北京: 中国地质大学出版社. Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhao Wei, 1993. The Genetic mineralogy of Guojialing granodiorite in Jiaodong and its gold mineralization [M]. Beijing: China University of Geosciences Press.
- 段留安, 王建田, 郭云成, 等, 2024a. 胶西北招平成矿带新发现一处特大型金矿床: 招远滕家金矿 (50 t) [J]. *中国地质*, 51(4): 1441-1442. Duan Liu'an, Wang Jiantian, Guo Yuncheng, et al, 2024a. Discovery of Zhaoyuan Tengjia super-large gold deposit (50 t) in Zhaoping metallogenic belt in the northwest Jiaodong Peninsula [J]. *Geology in China*, 51(4): 1441-1442.
- 段留安, 王建田, 王利鹏, 等, 2024b. 山东省招远市滕家矿区金矿普查报告 [R]. 烟台: 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心. Duan Liu'an, Wang Jiantian, Wang Lipeng, 2024b. Prospecting report on the gold deposit in the Tengjia mining area, Zhaoyuan City, Shandong Province [R]. Yantai: Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey.
- 段留安, 杨晓勇, 汪方跃, 等, 2012. 长江中下游成矿带贵池抛刀岭金矿含矿岩体年代学及地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 28(10): 3241-3254. Duan Liu'an, Yang Xiaoyong, Wang Fangyue, et al, 2012. Geochemistry and zircon U-Pb age of ore-bearing porphyry in the Paodaoling gold deposit in Guichi, Middle-Lower Yangtze metallogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3241-3254.
- 郭文琳, 苏文博, 张健, 等, 2019. 天津蓟县铁岭组新剖面钾质斑脱岩锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素研究 [J]. *岩石学报*, 35(8): 2433-2454. Guo Wenlin, Su Wenbo, Zhang Jian, et al, 2019. Zircon U-Pb dating and Hf isotopes of K-bentonites from the Tieling Formation in a new exposure of the Jixian Section, Tianjin, North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2433-2454.
- 韩小梦, 段留安, 王建田, 等, 2024. 胶东前垂柳金矿床中一基性脉岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及对成矿时代的约束 [J]. *地质通报*, 2025, 44(9): 1641-1661. Han Xiaomeng, Duan Liu'an, Wang Jiantian, et al, 2024. Zircon U-Pb age and geochemistry of intermediate-Mafic Dikes and implication for mineralization age of Qianchuli gold deposit, Jiaodong Peninsula [J/OL]. *Geological Bulletin of China*, 44(9): 1641-1661.
- 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. Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong, 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481-492.
- 季海章, 赵懿英, 卢冰, 等, 1992. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探 [J]. *地质与勘探*, 28(2): 15-18. Ji Haizhang, Zhao Yiying, Lu Bing, et al, 1992. On the relation of lampro-

- phyre to gold ore in the Jiaodong area [J]. *Geology and Prospecting*, 28(2): 15-18.
- 姜晓辉, 范宏瑞, 胡芳芳, 等, 2011a. 胶东三山岛金矿中深部成矿流体对比及矿床成因[J]. *岩石学报*, 27(5): 1327-1340. Jiang Xiaohui, Fan Hongrui, Hu Fangfang, et al, 2011a. Comparative studies on fluid inclusion in different depths and ore genesis of the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1327-1340.
- 姜晓辉, 范宏瑞, 胡芳芳, 等, 2011b. 胶西北留村金矿成矿流体特征与矿床成因[J]. *矿床地质*, 30(3): 511-521. Jiang Xiaohui, Fan Hongrui, Hu Fangfang, et al, 2011b. Ore-forming fluids and genesis of Liucun gold deposit in northwestern Jiaodong Peninsula [J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 511-521.
- 李洪奎, 李大鹏, 耿科, 等, 2017. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境: 来自单颗锆石 SHRIMP 年代学的记录 [J]. *地质学报*, 91(1): 163-179. Li Hongkui, Li Dapeng, Geng Ke, et al, 2017. The Mesozoic magmatic activities framework in Jiaodong area: SHRIMP chronology recording of single particle zircon [J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 163-179.
- 李经纬, 邱昆峰, 马明, 等, 2023. 胶东旧店金矿床赋矿岩浆岩岩石成因及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 39(2): 393-410. Li Jingwei, Qiu Kunfeng, Ma Ming, et al, 2023. Petrogenesis of ore-hosting magmatic rocks from the Jiudian gold deposit in Jiaodong area, and its geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(2): 393-410.
- 李三忠, 郝德峰, 韩宗珠, 等, 2003. 胶辽地块古元古代构造—热演化与深部过程 [J]. *地质学报*, 77(3): 328-340. Li Sanzhong, Hao Defeng, Han Zongzhu, et al, 2003. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao-Liao massif [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 328-340.
- 梁亚运, 2017. 胶东早白垩世基性脉岩岩石成因与成矿动力学驱动 [D]. 北京: 中国地质大学(北京). Liang Yayun, 2017. Petrogenesis of the Early Cretaceous mafic dikes and metallogenic dynamics in Jiaodong Peninsula [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- 梁亚运, 刘学飞, 李龚健, 等, 2014. 胶东地区脉岩成因与金成矿关系的研究: 年代学及 Sr-Nd-Pb 同位素的约束 [J]. *地质科技情报*, 33(3): 10-24. Liang Yayun, Liu Xuefei, Li Gongjian, et al, 2014. Petrogenesis and connection with gold deposits of dikes in Jiaodong Peninsula, eastern of North China Craton: constraint on geochronology and Sr-Nd-Pb isotope [J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(3): 10-24.
- 林祖苇, 2019. 胶东玲珑金矿田石英脉型与蚀变岩型矿体黄铁矿矿物学和地球化学的对比及对成因的指示 [D]. 武汉: 中国地质大学. Lin Zuwei, 2019. A comparative study on pyrite mineralogy and geochemistry of vein type and dissemination type of gold mineralization in the Linglong gold ore field, Jiaodong: implications for ore genesis [D]. Wuhan: China University of Geosciences.
- 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等, 2005. 胶东北部碱性超基性脉岩地球化学特征及环境和成因探讨 [J]. *地质科学*, 40(1): 69-83. Liu Shen, Hu Ruizhong, Zhao Junhong, et al, 2005. Geochemical features, environment and petrogenesis of the alkaline ultramafic dikes in north Shandong Peninsula [J]. *Chinese Journal of Geology*, 40(1): 69-83.
- 罗镇宽, 关康, 苗来成, 2001. 胶东玲珑金矿田煌斑岩脉与成矿关系的讨论 [J]. *黄金地质*, 7(4): 15-21. Luo Zhenkuan, Guan Kang, Miao Laicheng, 2001. Discussion on relationship between lamprophyre veins and mineralization in the Linglong gold field, eastern Shandong [J]. *Gold Geology*, 7(4): 15-21.
- 马亮, 2013. 胶东地区中生代岩石圈快速减薄过程中岩浆与金成矿事件的地球化学研究 [D]. 南京: 南京大学. Ma Liang, 2013. Geochemistry of Mesozoic magmatic rock and gold mineralization events during rapid lithospheric thinning beneath the Jiaodong Peninsula [D]. Nanjing: Nanjing University.
- 马遥, 刘学飞, 梁亚运, 等, 2019. 胶东早白垩世中—酸性脉岩造岩矿物微区地球化学特征研究 [J]. *岩石学报*, 35(5): 1566-1582. Ma Yao, Liu Xuefei, Liang Yayun, et al, 2019. Microregional geochemical characteristics of rock-forming minerals in Early Cretaceous intermediate-felsic dikes in Jiaodong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 1566-1582.
- 毛景文, 李厚民, 王义天, 等, 2005. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据 [J]. *地质学报*, 79(6): 839-857. Mao Jingwen, Li Houmin, Wang Yitian, et al, 2005. The relationship between mantle-derived fluid and gold ore-formation in the eastern Shandong Peninsula: evidences from D-O-C-S isotopes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 839-857.
- 任军虎, 柳益群, 周鼎武, 等, 2010. 东昆仑小庙基性岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(4): 859-868. Ren Junhu, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al, 2010. Geochemical characteristics and

- LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of basic dykes in the Xiaomiao area, eastern Kunlun [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 859-868.
- 宋明春, 王沛成, 2003. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社. Song Mingchun, Wang Peicheng, 2003. Regional geology of Shandong Province [M]. Jinan: Shandong Map Publishing House.
- 宋明春, 2015. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展[J]. *地质通报*, 34(9): 1758-1771. Song Mingchun, 2015. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 34(9): 1758-1771.
- 宋英昕, 宋明春, 孙伟清, 等, 2018. 胶东金矿成矿时代及区域地壳演化: 基性脉岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 37(5): 908-919. Song Yingxin, Song Mingchun, Sun Weiqing, et al, 2018. Metallogenic epoch and regional crust evolution in the Jiaodong gold deposit, Shandong Province: evidence from SHRIMP zircon U-Pb ages of mafic dykes [J]. *Geological Bulletin of China*, 37(5): 908-919.
- 孙卫东, 凌明星, 汪飞跃, 等, 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 27(3): 218-225. Sun Weidong, Ling Mingxing, Wang Fangyue, et al, 2008. Pacific plate subduction and Mesozoic geological event in Eastern China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 218-225.
- 田瑞聪, 李大鹏, 张文, 等, 2022. 胶北隆起中生代壳幔岩浆的混合反应是巨量金质来源的关键[J]. *岩石学报*, 38(1): 23-40. Tian Ruicong, Li Dapeng, Zhang Wen, et al, 2022. The mixing of Mesozoic crust-mantle magma is the key to the source of large amounts of gold deposits in the Jiaobei uplift, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(1): 23-40.
- 汪在聪, 汪翔, 宗克清, 等, 2023. 华北克拉通壳幔演化与胶东巨量金成矿作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 42(6): 1231-1247, 1210. Wang Zaicong, Wang Xiang, Zong Keqing, et al, 2023. The secular crust-mantle evolution of the North China Craton and the formation of giant Jiaodong gold deposits [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42(6): 1231-1247, 1210.
- 王建国, 李秀臣, 刘洪臣, 2008. 招平断裂带脉岩群对金成矿的约束[J]. *中国矿业*, 17(12): 64-70. Wang Jianguo, Li Xiuchen, Liu Hongchen, 2008. Relationship of dike and gold mineralization in Zhao-Ping fault belt [J]. *China Mining Magazine*, 17(12): 64-70.
- 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*, 23(2): 185-220. Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al, 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220.
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等, 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. *科学通报*, 49(14): 1403-1410. Xu Ping, Wu Fuyuan, Xie Liwen, et al, 2004. U-Pb isotopic dating of Hf isotopes of standard zircon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(14): 1403-1410.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2006. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成[J]. *地质学报*, 80(12): 1793-1806. Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al, 2006. The early Palaeozoic Terrene framework and the formation of the high-pressure (HP) and ultra-high pressure (UHP) metamorphic belts at the central orogenic belt (COB) [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1793-1806.
- 阳琼艳, 2013. 胶东玲珑金矿中生代岩浆作用与金成矿动力学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京). Yang Qiongyan, 2013. Mesozoic magmatism and metalogeny geodynamics of Linglong gold deposit in Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- 杨进辉, 周新华, 2000. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代[J]. *科学通报*, 45(14): 1547-1553. Yang Jinhui, Zhou Xinhua, 2000. Rb-Sr isochron age of ore and gold-bearing minerals in the Linglong gold deposit, Jiaodong region, and its metallogenic epoch [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(14): 1547-1553.
- 杨敏之, 吕古贤, 1996. 胶东绿岩带金矿地质地球化学[M]. 北京: 地质出版社. Yang Minzhi, Lü Guxian, 1996. Geology and geochemistry of gold deposits in the Jiaodong greenstone belt [M]. Beijing: Geology Press.
- 杨忠芳, 徐景奎, 赵伦山, 等, 1998. 区域地壳演化与金成矿作用地球化学[M]. 北京: 地质出版社. Yang Zhongfang, Xu Jingkui, Zhao Lunshan, et al, 1998. Geochemistry of regional crustal evolution and gold mineralization [M]. Beijing: Geology Press.
- 于晓卫, 王来明, 刘汉栋, 等, 2023. 胶东中生代花岗岩与金矿关系及成矿期划分[J]. *地质学报*, 97(6): 1848-1873. Yu Xiaowei, Wang Laiming, Liu Handong, et al, 2023. The relationship between Mesozoic granite, gold deposits and the division of metallogenic period in eastern Shandong [J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(6): 1848-1873.

- 翟明国,卞爱国,2000.华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解[J].中国科学(D辑:地球科学),30(增刊1):129-137.Zhai Mingguo, Bian Aiguo, 2000. Late Neoproterozoic supercontinent assemblage and late Proterozoic-Mesoproterozoic disintegration in North China Craton[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 30(Suppl.1): 129-137.
- 翟明国,范宏瑞,杨进辉,等,2004.非造山带型金矿:胶东型金矿的陆内成矿作用[J].地学前缘,11(1):85-98.Zhai Mingguo, Fan Hongrui, Yang Jinhui, et al, 2004. Large-scale cluster of gold deposits in east Shandong: anorogenic metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 85-98.
- 张良,2016.胶西北金成矿系统热年代学[D].北京:中国地质大学(北京).Zhang Liang, 2016. Application of thermochronology to hydrothermal gold deposits, northwestern Jiaodong Peninsula, China[D]. Beijing: China University of Geosciences.
- 张泽涛,段留安,郭云成,等,2025.胶西北招远滕家金矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学、Lu-Hf 同位素特征及对金成矿的制约[J].地质通报,44(8):1416-1435.Zhang Zetao, Duan Liu'an, Guo Yuncheng, et al, 2025. Zircon U-Pb age, geochemistry and Lu-Hf isotope of granites from the Tengjia gold mine in Zhaoyuan, northwest Jiaodong Peninsula and its restriction on gold mineralization [J]. *Geological Bulletin of China*, 44(8): 1416-1435.
- 张增奇,张成基,王世进,等,2014.山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J].山东国土资源,30(3):1-23. Zhang Zengqi, Zhang Chengji, Wang Shijin, et al, 2014. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 30(3): 1-23.
- 赵振华,2010.副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J].地学前缘,17(1):267-286.Zhao Zhenhua, 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis [J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 267-286.
- 周勉,2016.胶东地区玲珑金矿岩浆岩地球化学特征研究[D].北京:中国地质大学(北京).Zhou Mian, 2016. Study on geochemical characteristics of magmatic rocks in Linglong gold mine in Jiaodong area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).

## Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry of Gold-bearing Dike from the Tengjia Gold Deposit in the Northwest Jiaodong and Its Geological Significance

ZHANG Zetao<sup>1,2</sup>, DUAN Liu'an<sup>2</sup>, SHI Manqian<sup>2</sup>, HOU Qingling<sup>2</sup>

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey, Yantai 264000, Shandong, China

**Abstract:** The Tengjia gold deposit, a recently identified super-large alteration-type gold deposit, is located within the Zhaoping metallogenic belt. The gold orebodies are predominantly situated within fracture zones of the Late Jurassic Linglong granite. The mining area is characterized by the extensive presence of mafic dikes. This study is the first to report the discovery of gold orebodies within these mafic dikes, with a gold grade of  $1.50 \times 10^{-6}$ . To elucidate the genetic relationships among petrogenesis, formation ages, and mineralization processes, a comprehensive investigation was conducted, incorporating petrogeochemical analysis, zircon U-Pb geochronology, and Lu-Hf isotopic analyses were conducted on both gold-bearing and barren mafic dike varieties. The analytical findings indicate that the dikes are characterized by enrichment in large-ion lithophile elements (LILE) and light rare earth elements (LREE), along with depletion in high-field-strength elements (HFSE) and heavy rare earth elements (HREE). Combined with negative  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values, these characteristics suggest that the magmas were primarily derived from an enriched lithospheric mantle source with contributions from ancient lower crustal materials, likely related to the subduction of the Pacific Plate beneath the North China Craton. Gold-bearing dikes exhibit an average Ce-U-Ti oxygen fugacity proxy ( $\Delta\text{FMQ}$ ) of +0.89, whereas barren dikes display a lower average  $\Delta\text{FMQ}$  of -0.96. This observation implies that melts with elevated

oxygen fugacity are characterized by enhanced metallogenic potential. The dikes contain zircons with evidence of multiple stages of inheritance. U-Pb dating reveals that the emplacement history of the dikes encapsulates geological events experienced by the North China Craton during the Neoproterozoic, Mesoproterozoic, and Neoproterozoic eras, as well as events associated with the Sulu orogenic belt in the Triassic period. The youngest zircon age from post-mineralization dikes is indicative of their crystallization age, suggesting that the most recent gold mineralization at the Tengjia gold deposit occurred no later than  $(117.5 \pm 1.6)$  Ma. The zircon U-Pb age of the gold-bearing dikes is  $(154.4 \pm 1.3)$  Ma, corroborating the occurrence of a gold mineralization event in Jiaodong (eastern Shandong Peninsula) during the period of 162 Ma to 151 Ma.

**Key words:** gold-bearing dikes; zircon U-Pb age; geochemistry; alteration rock type gold deposit; Tengjia gold deposit; northwestern Jiaodong

### 云南武定地区前寒武纪铜钴矿找矿预测 取得突破性进展

云南武定地区是扬子地块西南缘康滇前寒武纪铁铜钴多金属成矿省重要组成部分之一,相比于相邻的拉拉、东川、易门和大红山等矿集区铁铜钴多金属矿床“多、富、大”成矿特征,武定地区铁铜钴多金属矿要逊色得多。武定地区铁铜钴多金属矿化信息十分丰富,长期是滇中地区重点找矿靶区,但近40年来找矿突破鲜有报道。在云南省重大科技专项重点研发计划项目“云南康滇地区铜多金属矿深部外围接替资源找矿关键技术研究”(编号:202402AB080006)、国家自然科学基金委—中国地质调查局地质联合基金重点项目“扬子板块西缘前寒武纪铜铁钴耦合富集机制及关键控制因素”(编号:U2444206)等项目资助下,云南大学联合省内外科研院所、地调系统、地勘单位和矿山企业实施科技攻关,在武定地区开展了铜钴矿找矿关键技术研发与应用示范,取得了找矿预测突破性进展。

(1)在研究区新发现10余处铜、钴矿(化)点和找矿线索,其中观天厂钴矿点剥土工程刻槽样Co平均品位大于0.18%,并伴有Cu异常(Cu品位最高达0.45%)。

(2)在研究区某沉积岩容矿层状铜矿床中首次发现银金矿,同时发现大量辉砷钴矿。化学分析显

示,在Cu平均品位约1.63%的原矿石中,Au平均品位为 $0.02 \times 10^{-6}$ ,Ag平均品位为 $4.08 \times 10^{-6}$ ,Co平均品位为0.01%;在Cu平均品位约为22.0%的精矿中,Au平均品位为 $0.23 \times 10^{-6}$ ,Ag平均品位为 $41.25 \times 10^{-6}$ ,Co平均品位为0.36%。

(3)研发了植物—矿物双指标找矿预测模型(已授权发明专利:遥感识别头花蓼植物指示铜矿的找矿方法、系统及设备,授权号:ZL 202510046657.X)和岩石破碎程度—充填胶结物谱学—化学找矿预测系统(已授权发明专利:一种基于岩石碎裂程度表征构造应力的找矿方法和系统,授权号:ZL 202510177460.X),结合大比例尺专项地质填图和高精度物化探测量成果,圈定找矿靶区3处,估算Cu金属资源超过30.0万t,Co金属资源超过1.00万t。

(4)合作单位在研究区实施钻孔验证,取得找矿突破性进展,部分钻孔揭露到厚度超过4.00 m、Cu平均品位超过1.00%的工业铜矿体,全部钻孔均揭露到钴矿(化)体(Co平均品位超过0.02%,达到伴生Co资源评价工业指标)。

本次科技联合攻关实现武定地区深部隐伏铜钴矿勘查的历史性突破,为滇中前寒武系沉积岩容矿层控铜钴矿的勘探范式革新与资源接续提供了科学依据。

(来源:云南大学铜铁钴项目组)