

黑龙江库尔滨下游金矿区火山岩年代学及地球化学特征

张春鹏¹, 韩仁萍^{1*}, 党宇宁², 毕中伟¹, 李雪峰³

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心(东北地质科技创新中心), 辽宁 沈阳 110034;

2. 江苏省南京工程高等职业学校, 江苏 南京 211100;

3. 黑龙江自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036



摘要:库尔滨下游金矿是小兴安岭北段新发现的浅成低温热液型金矿床, 金矿(化)体主要赋存于下白垩统甘河组安山岩中。为系统探究赋矿围岩与金成矿之间的关系, 开展了野外地质调查、岩石学、岩石地球化学及锆石 U-Pb-Hf 同位素分析。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 赋矿安山岩成岩年龄为 (106.4 ± 1.0) Ma, 形成于早白垩世晚期; 岩石地球化学与锆石 Hf 同位素特征表明, 该安山岩属低铁钙碱性系列镁安山岩, 具有高 MgO 含量(2.55%~4.72%)、高 $Mg^\#$ 值(48~64)和低 TFeO/MgO 比值(1.01~1.95)的特征, 其初始岩浆源于古太平洋板块俯冲后撤形成的滞留板片熔融, 经沉积物脱水流体混入、浅部地幔反应以及壳幔混合等多阶段作用形成; 锆石 Ce-U-Ti 氧逸度计分析结果显示, 矿区甘河组火山岩 ΔFMQ 值为 0.13~2.85, 呈现中等偏高的氧逸度特征, 具备良好的金矿成矿潜力。

关键词:同位素年代学; 岩石地球化学; 库尔滨下游金矿; 浅成低温热液型金矿; 镁安山岩; 氧逸度

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2026)01-0001-19 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.224
引用格式: 张春鹏, 韩仁萍, 党宇宁, 等. 黑龙江库尔滨下游金矿区火山岩年代学及地球化学特征[J]. 黄金科学技术, 2026, 34(1): 1-19. ZHANG Chunpeng, HAN Renping, DANG Yuning, et al. Geochronology and Petrogeochemistry Characteristics of Volcanic Rocks in the Lower Ku'erbin River Gold District, Heilongjiang Province[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 1-19.

小兴安岭北段是我国东北地区浅成低温热液型金矿床发育的典型区域之一(祁进平等, 2005; Deng et al, 2016; 孙景贵等, 2023)。自中生代以来, 该地区经历了强烈而频繁的火山活动, 广泛出露下白垩统中基性、中酸性火山岩和火山碎屑岩, 形成了自下而上的火山地层序列, 包括板子房组、宁远村组、甘河组和福民河组(曲关生, 1997)。前人研究表明, 宁远村组中酸性火山岩及次火山岩与该区浅成低温热液成矿作用存在显著的成因联系, 尤其是在东安、高松山、团结沟和伊东林场等大中型金矿床的成矿过程中(Zhang et al, 2010; Sun et al,

2013; Zhang et al, 2019; 赵忠海等, 2023)。因此, 长期以来许多学者认为下白垩统宁远村组是该地区重要的赋矿层位(王建新等, 2010; Liu et al, 2021; 王登红等, 2023)。

东安金矿是黑龙江小兴安岭北麓地区三座大型金矿床之一, 目前探明金储量约为 24 t, 远景资源量有望突破 50 t(郭继海等, 2004; 常景娟等, 2015)。近年来, 在东安金矿北部约 3.2 km 处的库尔滨河北岸地区, 即东安金矿外围新发现了库尔滨下游金矿点[图 1(a)]。尽管该矿点规模相对较小, 但其金矿(化)体主要分布在沿近 SN 和 NNW 向断裂中, 并赋

收稿日期: 2025-07-21; 修订日期: 2025-12-16

基金项目:深地国家科技重大专项课题“铜金多金属矿找矿模型与人工智能成矿预测”(编号: 2025ZD1008703)、中国地质调查局项目“黑龙江东安—汤旺河金矿大型资源基地综合地质调查”(编号: DD20242075)和江苏职业教育研究立项课题“助力地勘行业发展‘一体两翼三融合’高素质技术技能型人才培养的实践研究”(编号: XHZDB2023025)联合资助

作者简介:张春鹏(1982—), 男, 吉林四平人, 教授级高级工程师, 从事成矿规律与成矿预测研究工作。E-mail: zcp345@foxmail.com

***通信作者:**韩仁萍(1985—), 女, 辽宁辽阳人, 高级工程师, 从事矿床学研究工作。E-mail: Hansyzx@139.com

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

存于下白垩统甘河组安山岩内[图1(b)]。在该地区该层位中首次识别出金矿化特征,这一发现对区域矿产资源勘探具有重要的找矿指导意义。目前尚不清楚库尔滨下游金矿与东安金矿在成因上是否存在联系,但这一发现无疑引发了对二者之间可能存在的关联性和成矿背景的进一步研究兴趣。当前,库尔滨下游金矿仍处于勘查开发阶段,对赋矿火山岩的岩石学特征、地球化学性质及成矿年龄等方面的研究有待深入。

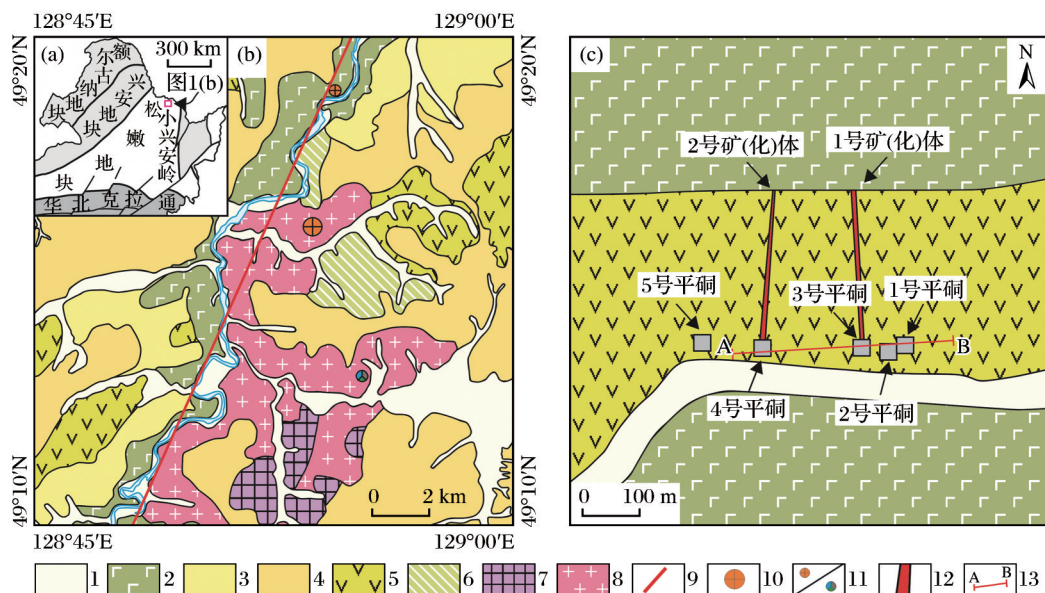
鉴于此,本文拟通过对库尔滨下游矿区内赋矿甘河组火山岩进行综合研究,运用年代学、岩石地球化学分析及Hf同位素研究方法,系统探讨其成岩与成矿时代及形成背景。研究成果将为东安金矿及其邻区后续的找矿工作提供理论指导。

1 区域地质背景及矿点地质特征

1.1 区域地质背景

本文研究区位于小兴安岭—张广才岭多金属成矿带的北缘,东安—汤旺河整装勘查区的北西段。该区域受古亚洲洋和古太平洋两大构造域的叠加影响,构造与岩浆活动极为强烈,具备优越的

成矿地质条件(Xu et al, 2013; Zhang et al, 2022; 冯光英等, 2022; Guan et al, 2024)。区内已勘查并评价出多处矿产地,包括东安大型岩金矿床、库尔滨下游岩金矿点和老新兴西山铜铅锌矿点等[图1(a)]。区内地层除大面积出露的第三系孙吴组砂砾岩外,主要发育下白垩统宁远村组和甘河组。岩性以陆相中性或酸性火山岩和火山碎屑岩为主,主要包括流纹岩、英安岩、安山岩和凝灰岩等,少量为流纹质角砾岩或集块岩。下白垩统宁远村组火山一次火山岩是本区重要的成矿地质体。此外,第四系大熊山玄武岩沿库尔滨河西岸大面积出露。区内侵入岩主要出露于库尔滨河东岸,岩性以碱长花岗岩、二长花岗岩和花岗闪长岩为主,少量为正长花岗岩,其形成时代分别为中奥陶世、晚三叠世和早侏罗世。其中,早侏罗世碱长花岗岩为东安金矿的主要赋矿围岩。区域构造以NE向库尔滨河断裂及其次级近SN和NW向断裂为主。库尔滨河断裂是区内最重要的控岩和控矿断裂,同时也是逊河—铁力—尚志岩石圈断裂北端东侧的边界断裂。该断裂对东安金矿床的形成起到关键的控制作用,而其发育的次级近SN和NW向断层则是区内矿产主要的控矿和赋矿构造。



1. 第四系河漫滩相; 2. 第四系大熊山组; 3. 第四系哈尔滨组; 4. 新近系孙吴组; 5. 下白垩统甘河组; 6. 下白垩统宁远村组; 7. 中二叠统土门岭组; 8. 花岗岩类(不分时代); 9. 库尔滨壳断裂; 10. 东安金矿床; 11. 库尔滨下游金矿点/老新兴西山铜铅锌矿点; 12. 金矿(化)体; 13. 实测剖面位置

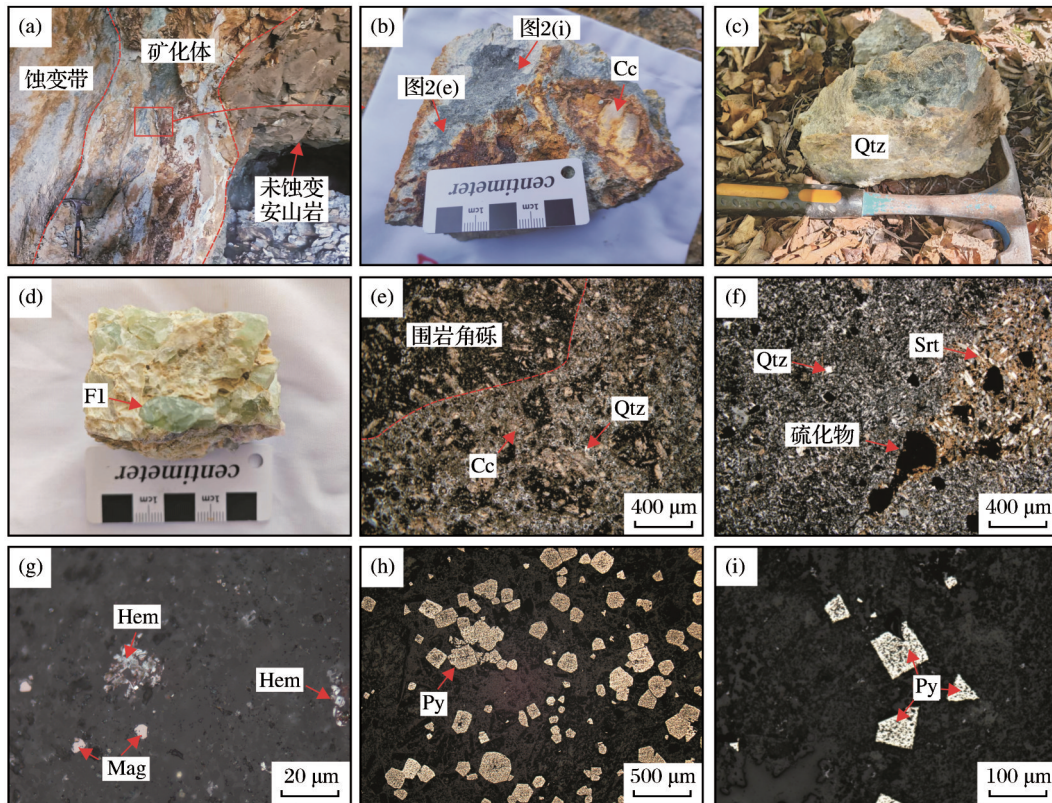
图1 库尔滨下游金矿区大地构造位置图(a)、区域地质图(b)和矿区地质简图(c)(修改自 Liu et al, 2017; 张春鹏等, 2025)

Fig. 1 Geotectonic location map (a), regional geological map (b) and geological sketch map (c) of the lower Ku'erbin River gold district(modified after Liu et al, 2017; Zhang et al, 2025)

1.2 矿点地质特征

目前库尔滨下游金矿区共发现2处金矿(化)体,这些矿(化)体主要赋存于下白垩统甘河组安山岩中,多沿库尔滨壳断裂派生的近SN和NNW向断裂分布[图1(c)]。金矿(化)体厚度为1~3 m,金品位为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-6}$ 。矿区内主要金属矿物为黄铁矿和次生氧化的褐铁矿,以及少量的磁铁矿。非金属矿物主要为石英、绢云母、萤石和方解石。围岩蚀变类型包括硅化、碳酸盐化、绿泥石化、萤石

化、绢云母化和黄铁矿化等(图2)。这些已发现的矿化蚀变特征与东安金矿极为相似(陈海明等,2006; Gao et al, 2021; Liu et al, 2021)。矿区内硅化现象可划分为线状硅化和面型硅化2种形式:线状硅化多见于构造破碎带或碳酸盐化带附近[图2(a)],面型硅化则多呈团块状分布于绢云母化带内[图2(c)]。现有研究结果表明,绢云母化带中的面型硅化和构造破碎带附近的线状硅化与金矿化之间存在一定的关联性。



Qtz-石英; Srt-绢云母; Cc-方解石; Fl-萤石; Mag-磁铁矿; Py-黄铁矿; Hem-褐铁矿

图2 库尔滨下游金矿区矿化蚀变手标本及显微镜下特征

Fig. 2 Hand specimens and microscopic characteristics of mineralization and alteration from the lower Ku'erbín River gold district

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集和描述

本次研究对库尔滨下游金矿赋矿围岩中的下白垩统甘河组火山岩地层进行了剖面测量(图3)。通过野外剖面测量和显微镜观察可知,该剖面的主体岩性为暗灰—灰色安山岩。另外,研究发现矿区

火山岩地层在局部受断裂的影响,出现不同程度的碎裂岩化和糜棱岩化特征[图3(a)和图3(b)]。在空间分布上,强烈的糜棱岩化区域往往伴随着显著的矿化蚀变现象[图3(c)和图3(d)]。在矿区外,该火山岩地层下部与下伏的下白垩统宁远村组火山岩呈喷发不整合接触。本次研究年代学和岩石地球化学样品选自矿区剖面中4号平硐附近的

天然露头[图3(b)和图4(a)],采样地理坐标为128°54'16"E,49°18'46"N。

甘河组安山岩新鲜面呈暗灰色和灰色,块状构造[图4(a)和图4(b)]。在显微镜下观察,该岩石具有斑状结构,斑晶含量占20%~30%。斑晶主要由斜长石和角闪石组成,偶见有黑云母。斜长石呈自形一半自形的长板状晶体,粒径为0.5~4.0 mm,

可见环带结构,表面绢云母化现象显著[图4(c)和图4(d)]。角闪石斑晶呈长柱状,粒径为0.5~3.0 mm,可见异常的靛蓝色干涉色,具有暗化边结构,表面被碳酸盐交代,同时伴有绿泥石化现象[图4(e)和图4(f)]。基质占岩石总体积的70%~80%,部分呈半自形粒状结构,主要由斜长石微晶组成,粒径为0.1~0.4 mm,基质间的空隙由隐晶质充填,构成了

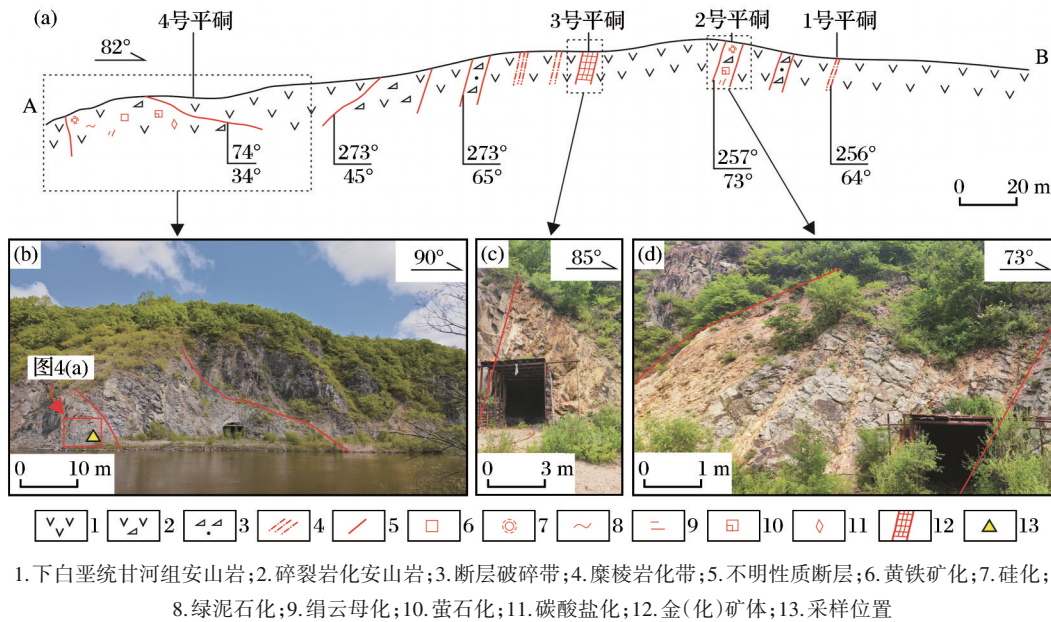


图3 库尔滨下游金矿区实测剖面(a)及探矿平硐照片(b~d)

Fig. 3 Measured section(a) and prospecting adit photos(b~d) of the lower Ku'erbin River gold district

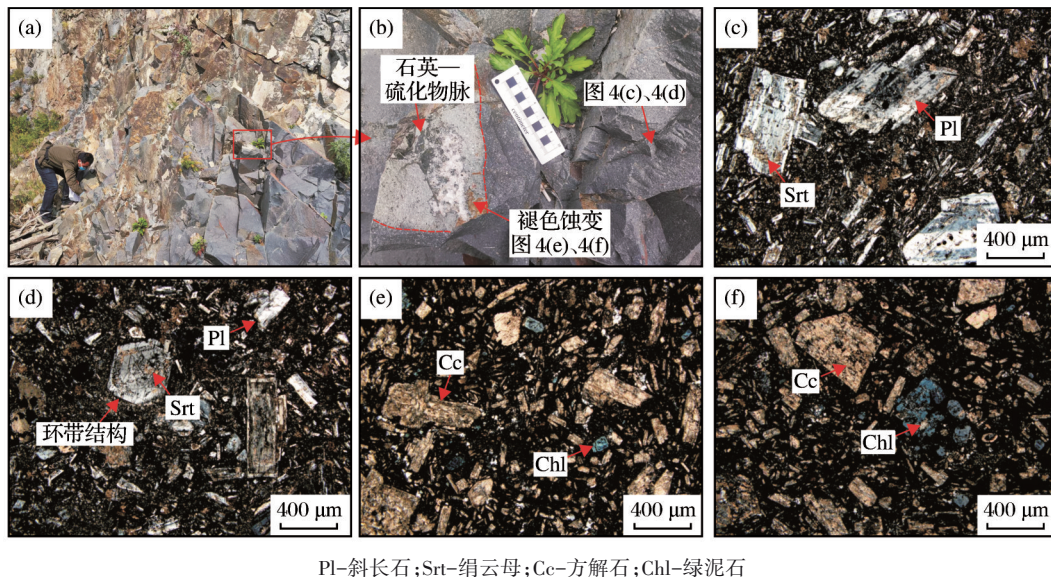


图4 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩手标本及显微镜下特征

Fig. 4 Hand specimens and microscopic characteristics of andesite in Ganhe Formation of the lower Ku'erbin River gold district

间隐结构[图4(c)和图4(f)]。

2.2 分析方法

锆石单矿物的挑选、制靶、阴极发光、U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素分析工作均由武汉上谱分析科技有限责任公司完成。U-Pb 同位素定年和微量元素含量的检测主要使用 GeolasPro 激光剥蚀系统和 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。本次分析中,激光束斑和频率分别设置为 32 μm 和 5 Hz。在 U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理过程中,采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作为外标,进行同位素和微量元素的分馏校正。原位微区锆石 Hf 同位素比值的测试主要依赖于 Geolas HD 激光剥蚀系统和 Neptune Plus 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MS-ICP-MS),采用单点剥蚀模式,斑束固定为 44 μm 。为确保分析数据的可靠性,将国际锆石标准 91500 和 GJ-1 与实际样品同时进行分析。所有分析数据的离线处理使用 ICPMSDataCal 软件完成(Liu et al, 2008, 2010)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制及年龄加权平均计算则采用 IsoplotR 软件(Vermeesch, 2018)进行。有关详细的仪器参数和分析流程,请参见 Hu et al (2012)和 Zong et al(2017)的相关研究。

全岩主量和微量元素分析工作由自然资源部东北矿产资源检测中心实验室完成。除 FeO 采用滴定法分析之外,其他主量元素采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)法进行测定,实验流程依据国家标准《硅酸盐岩石化学分析方法第 14 部分:氧化亚铁量测定》(GB/T14506.14-2010)和《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分:16 个主次成分量测定》(GB/T14506.28-2010)设置,分析精度和准确度优于 1%;全岩微量元素采用 PE Elan6000 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测定,实验流程依据国家标准《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分:44 个元素量测定》(GB/T14506.30-2010)设置。以 AMH-1 和 GBPG-1 作为参考标样,全岩微量元素的分析精度优于 10%。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 定年与微量元素

安山岩样品(样品编号:XY01)锆石 U-Pb 定年

和稀土元素分析结果见表 1 和表 2。锆石在 CL 图像上多呈暗灰—灰白色粒状和短柱状[图 5(a)],锆石长轴多为 50~120 μm ,长宽比多数在 1:1~1:2 之间,大部分锆石颗粒内部无分带或具弱分带结构特征。锆石 U 和 Th 含量范围分别为 36.07×10^{-6} ~ 271.05×10^{-6} 和 23.79×10^{-6} ~ 589.52×10^{-6} , Th/U 比值为 0.57~2.48,锆石的稀土元素总含量(ΣREE)为 191.84×10^{-6} ~ 2309.91×10^{-6} 。在锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图[图 5(b)]中,配分曲线表现为轻稀土(LREE)亏损和重稀土(HREE)富集,以及明显的 Ce 正异常和弱的 Eu 负异常特征,总体显示出岩浆成因锆石的特征(Corfu et al, 2003; Hoskin, 2003)。对 25 颗锆石进行分析,剔除个别不谐和年龄数据(样品编号分别为 XY01-9、XY01-13 和 XY01-19)后,获得 22 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(106.4\pm 1.0)\text{Ma}$ ($MSWD=1.8$) [图 5(c)和图 5(d)],属早白垩世晚期。

以往研究发现,锆石中富含 La 的矿物或熔体包裹体会对锆石的微量元素组成产生显著影响(王瑞等, 2021; 邹心宇等, 2021)。近年来,有学者提出可将 La 含量小于等于 0.03×10^{-6} 作为识别“干净锆石”的标志(Zhong et al, 2019)。基于此,本文在后续的投图及分析讨论中,剔除了“不干净锆石”[即 $w(\text{La}) > 0.03\times 10^{-6}$] 的数据(样品编号分别为 XY01-2、XY01-5、XY01-9、XY01-10 和 XY01-18)。

3.2 主量元素

甘河组安山岩 10 件样品主量元素分析结果见表 3。首先对所有样品进行烧失量校正(样品 LOI 值为 3.80%~6.15%),换成干体系后, SiO_2 含量为 60.05%~61.57%, TiO_2 含量为 0.72%~0.77%, Al_2O_3 含量为 17.39%~18.74%, MgO 含量为 2.55%~4.72%, CaO 含量为 3.71%~5.43%。里特曼指数(σ)为 1.87~3.23,平均值为 2.76,属于钙碱性岩系火山岩;铝饱和指数(A/CNK)为 0.98~1.08,平均值为 1.03,属于过铝质火山岩; $\text{Mg}^\#$ 为 48~64,平均值为 56。在 Zr/TiO_2 - SiO_2 判别图解[图 6(a)]上,所有火山岩样品投点均落入安山岩区域;在 Co-Th 判别图解[图 6(b)]中,火山岩样品投点落入高钾钙碱性系列与钙碱性系列过渡的区域。

3.3 微量元素

甘河组安山岩 10 件样品微量元素分析结果见

表1 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩锆石U-Pb同位素测年数据

Table 1 U-Pb isotopic dating data of zircons from the andesite of the Ganhe Formation in the lower Ku'erbin River gold district

样品 编号	含量/($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
XY01-01	83.69	100.80	0.83	0.05446	0.00457	0.12387	0.00921	0.01711	0.00034	390.8	188.9	118.6	8.3	109.3	2.1
XY01-02	297.67	180.96	1.64	0.05218	0.00375	0.11217	0.00676	0.01597	0.00026	294.5	164.8	107.9	6.2	102.1	1.6
XY01-03	37.08	42.80	0.87	0.05249	0.00617	0.12308	0.00944	0.01755	0.00066	305.6	270.3	117.9	8.5	112.2	4.2
XY01-04	48.07	56.11	0.86	0.04730	0.00612	0.10429	0.00933	0.01739	0.00049	64.9	281.4	100.7	8.6	111.1	3.1
XY01-05	78.12	109.40	0.71	0.04938	0.00374	0.11714	0.00825	0.01713	0.00038	164.9	179.6	112.5	7.5	109.5	2.4
XY01-06	589.52	271.05	2.17	0.05183	0.00304	0.11765	0.00643	0.01656	0.00022	279.7	102.8	112.9	5.8	105.9	1.4
XY01-07	39.32	39.55	0.99	0.05539	0.01026	0.11560	0.01679	0.01741	0.00053	427.8	366.6	111.1	15.3	111.2	3.4
XY01-08	57.29	73.81	0.78	0.04790	0.00513	0.10665	0.00959	0.01682	0.00036	94.5	237.0	102.9	8.8	107.5	2.3
XY01-09	44.51	61.93	0.72	0.08488	0.00901	0.20070	0.01829	0.01805	0.00048	1 322.2	207.1	185.7	15.5	115.3	3.1
XY01-10	409.64	164.91	2.48	0.04618	0.00333	0.10725	0.00666	0.01682	0.00029	5.7	166.7	103.4	6.1	107.5	1.8
XY01-11	28.36	44.34	0.64	0.04934	0.00780	0.10188	0.01088	0.01690	0.00053	164.9	333.3	98.5	10.0	108.1	3.4
XY01-12	37.73	54.52	0.69	0.05784	0.00710	0.11894	0.01089	0.01620	0.00047	524.1	272.2	114.1	9.9	103.6	3.0
XY01-13	33.37	43.27	0.77	0.06568	0.00969	0.14793	0.02064	0.01727	0.00056	796.0	314.8	140.1	18.3	110.4	3.5
XY01-14	68.56	72.39	0.95	0.05119	0.00568	0.10752	0.00926	0.01591	0.00036	250.1	237.0	103.7	8.5	101.7	2.3
XY01-15	23.79	36.07	0.66	0.05509	0.00795	0.12110	0.01299	0.01663	0.00055	416.7	325.9	116.1	11.8	106.3	3.5
XY01-16	77.53	106.22	0.73	0.05118	0.00534	0.10951	0.01000	0.01620	0.00033	255.6	216.6	105.5	9.1	103.6	2.1
XY01-17	63.04	70.66	0.89	0.05543	0.00559	0.12698	0.00881	0.01761	0.00044	427.8	225.9	121.4	7.9	112.5	2.8
XY01-18	100.39	85.40	1.18	0.04640	0.00466	0.10158	0.00848	0.01649	0.00037	20.5	222.2	98.2	7.8	105.5	2.4
XY01-19	37.70	48.40	0.78	0.04682	0.00754	0.08798	0.01046	0.01557	0.00048	39.0	348.1	85.6	9.8	99.6	3.0
XY01-20	92.09	90.50	1.02	0.05605	0.00593	0.11603	0.01004	0.01595	0.00036	453.8	230.5	111.5	9.1	102.0	2.3
XY01-21	33.21	47.53	0.70	0.05849	0.00793	0.11367	0.01017	0.01607	0.00048	546.3	300.0	109.3	9.3	102.8	3.1
XY01-22	26.34	42.62	0.62	0.05521	0.00945	0.11600	0.01429	0.01718	0.00056	420.4	344.4	111.4	13.0	109.8	3.6
XY01-23	39.00	68.86	0.57	0.05174	0.00542	0.12295	0.01133	0.01690	0.00041	272.3	242.6	117.7	10.2	108.0	2.6
XY01-24	36.27	49.23	0.74	0.05326	0.00666	0.12522	0.01275	0.01739	0.00047	338.9	291.6	119.8	11.5	111.1	3.0
XY01-25	51.40	79.17	0.65	0.05110	0.00555	0.10976	0.00942	0.01610	0.00039	255.6	220.4	105.7	8.6	103.0	2.5

表4。由表4可知,稀土元素总含量(ΣREE)为 $157.81 \times 10^{-6} \sim 177.47 \times 10^{-6}$,平均值为 162.72×10^{-6} , $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为11.30~12.73,平均值为11.98,轻稀土强烈富集, δEu 值为0.90~1.55,平均值为1.09,Eu无明显异常。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图[图7(a)]中,配分曲线整体呈右倾形态,呈现轻稀土(LREE)相对重稀土(HREE)富集的特征;在微量元素原始地幔标准化蛛网图[图7(b)]中,火山岩样品表现出大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、Th、U、K及轻稀土元素(LREE)相对富集,同时呈现高场强元素(HFSE)Nb、Ta、P和Ti的亏损特征。

3.4 锆石Hf同位素

甘河组安山岩样品(样品编号为XY01)中的锆

石Hf同位素测试点位置及结果见图4和表5。由表5可知,10个分析点的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.016670~0.050119, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.000508~0.001432, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.282706~0.282775,计算获得的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-0.57~1.94,平均值为0.72, T_{DM}^{c} 模式年龄为1 174~1 020 Ma。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解(图8)中,大部分样品落入亏损地幔区域[$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$],并有向古老地壳演化的趋势,指示源区可能包含亏损地幔物质和富集地壳混合组分。

4 讨论

4.1 成岩成矿时代

甘河组最早由黑龙江煤管局于1973年在内蒙

表2 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩锆石微量元素含量

Table 2 Trace elements compositions of zircons from the andesite of the Ganhe Formation in the lower Ku'erbin River gold district ($\times 10^{-6}$)

样品编号	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
XY01-1	16.49	0.02	21.18	0.15	2.33	4.05	1.24	20.44	7.03
XY01-2	11.76	8.88	58.29	2.51	14.17	7.05	2.84	30.66	10.49
XY01-3	17.08	0	10.14	0.08	1.74	2.35	0.57	13.93	4.40
XY01-4	16.60	0	13.30	0.06	1.22	1.97	0.74	9.38	3.00
XY01-5	8.67	3.87	32.45	0.97	5.05	2.93	0.82	13.73	4.46
XY01-6	9.86	0.01	72.64	0.22	3.20	6.86	3.29	37.68	12.19
XY01-7	14.10	0	12.46	0.09	1.59	3.81	1.09	17.32	5.27
XY01-8	12.53	0.01	14.34	0.07	1.32	2.07	0.70	8.93	2.80
XY01-9	25.90	0.21	15.35	0.11	1.44	2.63	0.70	12.28	4.29
XY01-10	13.27	0.40	92.54	1.97	29.17	35.52	16.39	123.32	31.87
XY01-11	8.66	0	8.06	0.05	0.70	1.32	0.57	6.42	2.08
XY01-12	13.65	0.01	10.92	0.07	1.07	1.64	0.65	8.02	2.67
XY01-13	10.02	0.01	10.65	0.08	1.55	2.56	1.22	11.32	3.59
XY01-14	12.51	0.02	10.80	0.19	3.05	4.75	1.83	17.69	5.18
XY01-15	15.47	0.01	6.94	0.04	3.08	1.03	0.63	4.90	1.66
XY01-16	10.33	0.01	24.77	0.08	1.42	2.37	0.91	13.57	4.73
XY01-17	15.82	0.02	18.28	0.13	2.15	3.93	0.87	19.21	6.00
XY01-18	14.71	0.04	21.90	0.25	4.74	8.22	1.98	34.55	10.55
XY01-19	17.36	0	11.35	0.05	0.88	2.08	0.67	8.98	3.09
XY01-20	12.00	0.02	17.33	0.30	4.53	5.71	2.06	25.67	7.85
XY01-21	12.93	0	10.22	0.04	0.75	1.23	0.57	6.32	1.99
XY01-22	10.42	0.01	6.75	0.03	0.63	0.90	0.48	5.38	2.04
XY01-23	9.36	0	9.56	0.08	1.22	2.33	0.92	9.73	3.49
XY01-24	14.82	0	10.97	0.06	0.99	1.79	0.62	9.22	3.04
XY01-25	6.53	0.01	12.50	0.04	0.83	1.34	0.54	5.99	2.26
样品编号	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	温度/ $^{\circ}\text{C}$	ΔFMQ
XY01-1	77.40	31.09	144.02	32.06	314.59	65.22	720.82	851	1.13
XY01-2	119.91	47.91	217.84	48.31	468.21	97.49	1 134.56	813	2.67
XY01-3	49.34	17.75	78.54	16.62	155.33	29.84	380.63	855	0.56
XY01-4	35.34	13.23	61.47	14.21	139.50	29.41	322.83	851	0.82
XY01-5	54.09	22.34	106.62	25.47	256.34	55.50	584.64	782	2.35
XY01-6	138.27	51.86	226.17	47.87	458.72	94.44	1 153.42	795	2.85
XY01-7	58.18	21.86	94.22	20.07	191.73	38.02	465.71	833	1.15
XY01-8	32.86	13.32	62.73	15.09	159.44	34.87	348.55	820	0.96
XY01-9	47.19	18.99	90.04	20.12	204.05	42.79	460.19	905	0.60
XY01-10	314.96	106.70	442.47	91.78	853.06	169.76	2 309.91	826	3.45
XY01-11	25.51	10.29	48.89	12.13	126.05	27.90	269.97	782	0.72
XY01-12	32.49	13.36	66.74	16.16	171.03	38.67	363.50	829	0.67
XY01-13	42.44	16.88	79.62	18.21	186.49	39.59	414.21	796	1.10
XY01-14	52.93	19.34	84.54	18.74	187.72	39.59	446.37	820	0.48
XY01-15	17.18	7.03	33.34	8.13	87.72	20.15	191.84	843	0.13
XY01-16	59.20	24.3	122.88	28.81	293.77	64.28	641.10	800	1.76
XY01-17	68.41	26.86	120.11	26.58	253.13	51.96	597.64	846	1.21
XY01-18	112.90	41.71	179.91	37.45	346.36	66.61	867.17	838	1.43
XY01-19	33.85	13.51	64.52	15.14	152.52	32.25	338.89	857	0.64
XY01-20	90.58	34.30	154.63	34.38	330.06	67.36	774.78	815	1.15
XY01-21	24.52	9.67	46.74	11.67	122.80	27.57	264.09	824	0.73
XY01-22	25.34	10.08	49.25	11.29	114.98	25.26	252.42	801	0.29
XY01-23	43.70	19.31	98.39	23.85	253.11	57.73	523.42	789	0.57
XY01-24	35.47	13.65	65.51	15.44	162.06	35.47	354.29	839	0.70
XY01-25	29.09	12.74	65.06	16.31	178.58	40.94	366.23	754	1.22

注:温度($^{\circ}\text{C}$)为锆石 Ti 温度计计算结果,其中 α_{SiO_2} 和 α_{TiO_2} 分别采用 1.0 和 0.6(据 Ferry et al, 2007); ΔFMQ 为 Ce-U-Ti 氧逸度计结果(据 Loucks et al, 2020)

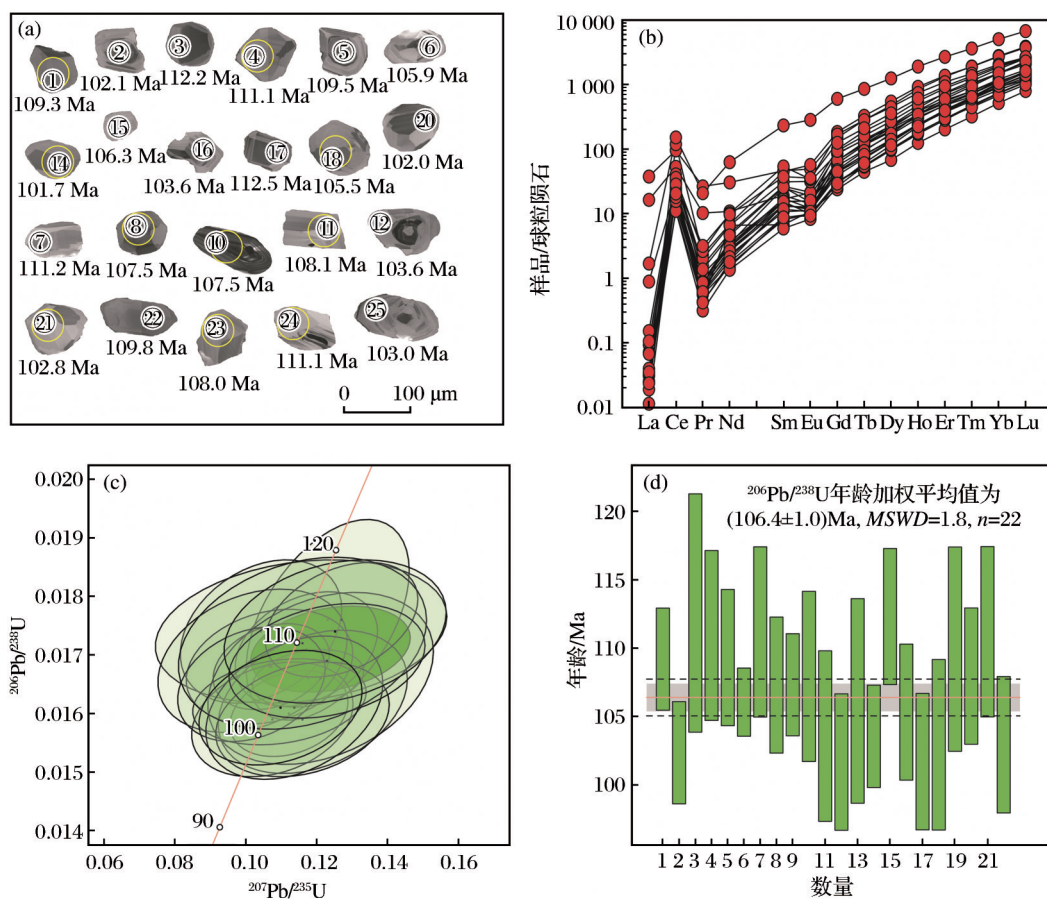


图5 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩锆石阴极发光(CL)图像(a)(白圈和黄圈分别代表U-Pb和Hf同位素分析点)、
稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b)及U-Pb年龄谐和图(c~d)

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images (a) (white and yellow circles represent U-Pb and Hf isotope analysis points),
chondrite-normalized REE-pattern (b) and U-Pb concordant diagrams (c~d) of zircon grains from the Ganhe Formation
andesites in the lower Ku'erbin River gold district

表3 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩主量元素组成(%)及其特征参数

Table 3 Major elements compositions (%) and their parameters of the Ganhe Formation andesites in the lower
Ku'erbin River gold district

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	SUM	σ	A/CNK	Mg [#]
XY01-1	58.47	0.69	16.58	0.65	4.03	0.10	4.13	3.54	4.30	2.63	0.22	3.97	99.31	2.88	1.01	62
XY01-2	58.09	0.69	17.19	0.72	4.03	0.09	4.28	4.14	4.03	2.71	0.23	3.56	99.76	2.82	1.01	62
XY01-3	58.55	0.69	17.04	1.07	3.74	0.09	3.18	5.01	2.82	2.78	0.24	4.65	99.85	1.87	1.02	55
XY01-4	58.20	0.69	17.19	1.34	3.62	0.09	3.20	5.19	3.20	2.63	0.23	4.15	99.74	2.08	0.98	54
XY01-5	58.88	0.69	17.38	1.54	3.13	0.08	3.20	4.51	3.24	2.75	0.23	3.80	99.43	2.11	1.05	56
XY02-1	56.25	0.68	16.61	1.02	3.57	0.08	4.42	3.96	2.50	4.33	0.23	5.96	99.61	3.12	1.04	64
XY02-2	56.05	0.72	17.49	0.65	3.88	0.09	2.85	4.44	2.81	4.11	0.24	6.15	99.49	3.22	1.02	53
XY02-3	57.44	0.68	17.19	0.96	3.47	0.08	3.22	3.84	2.76	4.38	0.23	5.52	99.78	3.20	1.06	57
XY02-4	57.48	0.69	17.13	1.38	3.41	0.08	2.39	3.56	2.69	4.53	0.23	5.95	99.52	3.23	1.08	48
XY02-5	57.26	0.71	16.94	0.80	3.73	0.09	2.93	3.82	2.49	4.54	0.23	6.03	99.57	3.10	1.06	54

注: $\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$; $\text{A/CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; $\text{Mg}^\# = 100 \times (\text{MgO} / 40.3044) / [\text{MgO} / 40.3044 + (\text{FeO} + 0.8998 \times \text{Fe}_2\text{O}_3) / 71.9464]$

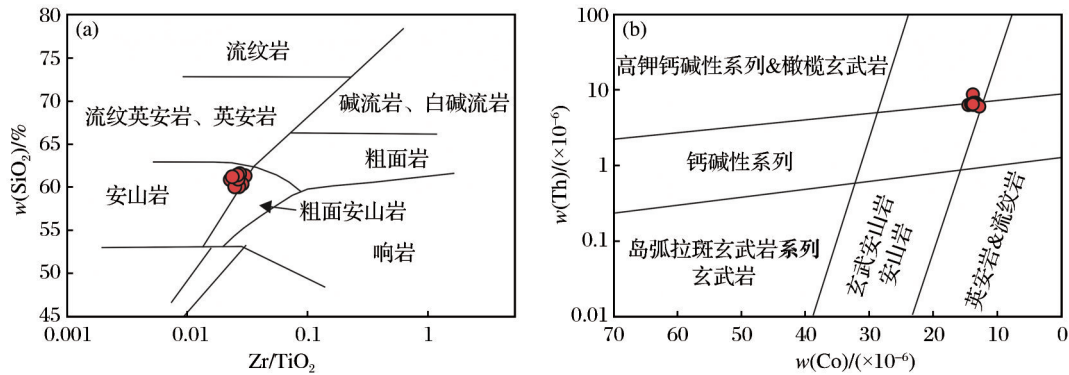


图6 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩 Zr/TiO_2-SiO_2 (a) 和 $Co-Th$ (b) 图解

(底图据 Winchester et al, 1977; Hastie et al, 2007)

Fig. 6 Zr/TiO_2-SiO_2 (a) and $Co-Th$ (b) diagrams of the Ganhe Formation andesites in the lower Ku'erbin River gold district (base map according to Winchester et al, 1977; Hastie et al, 2007)

表4 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩微量元素组成 ($\times 10^{-6}$) 及其特征参数

Table 4 Trace elements compositions ($\times 10^{-6}$) and their parameters of the Ganhe Formation andesites in the lower Ku'erbin River gold district

样品编号	Cr	Ni	Rb	Sr	Y	Nb	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
XY01-1	8.63	9.56	75.7	586	17.2	11.10	869	35.3	67.4	7.63	29.7	5.09	1.44	4.54	0.68	3.60
XY01-2	6.90	10.70	67.7	612	17.0	9.97	1 002	34.2	65.2	7.82	31.6	5.12	1.60	4.45	0.68	3.40
XY01-3	7.77	12.50	73.7	581	15.7	9.99	857	34.2	66.2	7.86	30.5	5.06	1.55	4.92	0.71	3.46
XY01-4	7.28	12.20	71.2	640	16.5	7.74	882	35.3	63.4	7.66	30.4	5.35	1.77	4.79	0.67	3.40
XY01-5	9.16	11.80	76.1	635	16.4	9.70	1 023	33.9	65.5	7.98	30.6	5.17	1.68	4.59	0.68	3.45
XY02-1	6.93	10.60	129	340	16.7	10.20	941	34.1	68.9	7.69	31.2	5.18	1.57	4.59	0.67	3.37
XY02-2	6.00	10.60	126	278	16.4	10.20	1 207	34.2	67.1	8.13	30.7	5.16	1.86	4.68	0.68	3.47
XY02-3	6.50	9.99	125	263	17.9	9.81	1 045	37.6	71.5	8.75	35.0	5.78	2.49	5.93	0.77	3.89
XY02-4	6.52	9.97	124	197	18.0	9.27	1 184	35.7	67.5	8.41	33.3	5.83	1.92	5.20	0.77	3.80
XY02-5	7.62	10.90	137	336	17.6	9.15	1 378	34.1	66.1	7.74	31.5	5.68	2.70	4.76	0.71	3.88
样品编号	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	ΣREE	$\Sigma LREE$	$\Sigma HREE$	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	δEu
XY01-1	0.64	2.01	0.31	1.96	0.29	6.13	0.96	8.70	1.81	160.59	146.56	14.03	12.14	4.36	1.87	0.90
XY01-2	0.63	1.91	0.31	1.93	0.30	6.48	1.12	6.77	1.84	159.15	145.54	13.61	11.95	4.20	1.86	1.00
XY01-3	0.65	1.93	0.30	1.91	0.30	5.62	0.86	6.30	1.71	159.55	145.37	14.18	12.07	4.25	2.08	0.94
XY01-4	0.66	1.95	0.30	1.87	0.29	5.31	0.45	6.46	1.74	157.81	143.88	13.93	12.73	4.15	2.07	1.05
XY01-5	0.66	1.91	0.30	1.88	0.27	5.53	0.77	6.74	1.84	158.57	144.83	13.74	12.16	4.12	1.97	1.03
XY02-1	0.63	2.03	0.30	1.86	0.29	5.40	0.89	6.32	1.66	162.38	148.64	13.74	12.36	4.14	1.99	0.96
XY02-2	0.65	2.00	0.30	1.90	0.28	5.56	0.79	6.35	1.64	161.11	147.15	13.96	12.14	4.17	1.99	1.14
XY02-3	0.70	2.18	0.32	2.23	0.33	6.21	0.64	6.30	1.69	177.47	161.12	16.35	11.37	4.09	2.15	1.29
XY02-4	0.69	2.22	0.33	2.13	0.32	5.98	0.64	6.01	1.65	168.12	152.66	15.46	11.30	3.85	1.97	1.05
XY02-5	0.65	2.05	0.32	1.99	0.30	5.37	0.56	6.45	1.65	162.48	147.82	14.66	11.55	3.78	1.93	1.55

注: $\delta Eu = 2 \times Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$, 标准化值引自 Boynton, 1984

古鄂伦春自治旗大杨树煤田建立,初始厘定为一套基性火山岩、火山碎屑岩夹沉积岩的岩石组合。1997年《黑龙江省岩石地层》(曲关生,1997)提出重要修订,认为伊春地区的美丰组与甘河组属于同物

异名关系,遂暂停使用美丰组,明确甘河组以一套基性火山岩夹少量沉积岩为地层代表。目前该地区美丰组与甘河组在使用中比较混乱,如王慧(2011)依据1981年黑龙江区域地质调查院1:20万

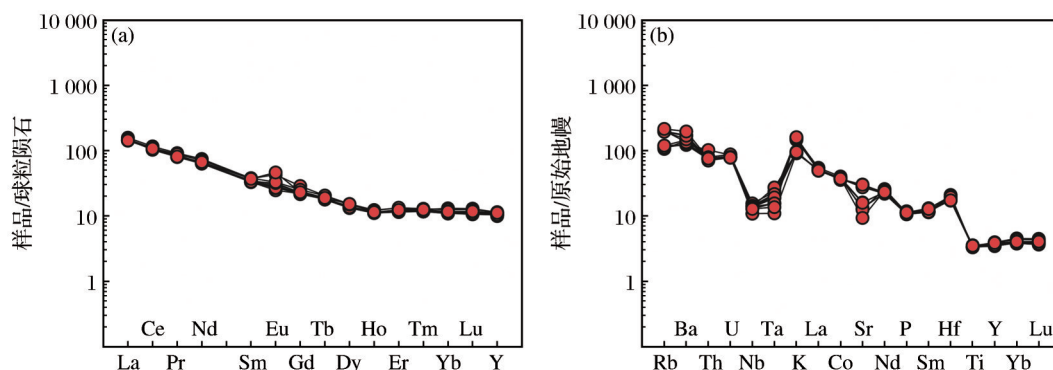


图7 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图和微量元素原始地幔标准化蛛网图
(标准化值据Sun et al, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE-pattern and primitive-mantle normalized spider diagrams of the Ganhe Formation andesites in the lower Ku'erbín River gold district (normalized values according to Sun et al, 1989)

表5 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩的锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 5 Zircon Lu-Hf analysis results of the andesite from the Ganhe Formation in the lower Ku'erbín River gold district

样品编号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}/Ma	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
XY01-01	109.3	0.049208	0.001432	0.282717	0.000016	0.282714	-2.4	-0.08	767	1 148	-0.96
XY01-04	111.1	0.029054	0.000877	0.282751	0.000014	0.282749	-1.2	1.21	707	1 067	-0.97
XY01-08	107.5	0.035369	0.001083	0.282755	0.000013	0.282753	-1.1	1.24	706	1 062	-0.97
XY01-10	107.5	0.050119	0.001421	0.282760	0.000018	0.282757	-0.9	1.41	705	1 051	-0.96
XY01-11	108.1	0.022312	0.000657	0.282721	0.000022	0.282719	-2.3	0.08	746	1 137	-0.98
XY01-14	101.7	0.016670	0.000508	0.282710	0.000014	0.282709	-2.6	-0.42	758	1 164	-0.98
XY01-18	105.5	0.042097	0.001217	0.282775	0.000016	0.282772	-0.4	1.89	680	1 019	-0.96
XY01-21	102.8	0.025785	0.000847	0.282706	0.000015	0.282704	-2.8	-0.57	770	1 174	-0.97
XY01-23	108.0	0.038104	0.001236	0.282732	0.000016	0.282730	-1.9	0.45	741	1 113	-0.96
XY01-24	111.1	0.029356	0.000869	0.282772	0.000015	0.282770	-0.5	1.94	678	1 020	-0.97

注： ^{176}Lu 的衰变常数采用 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund et al, 2004)；球粒陨石 Hf 同位素比值采用 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.033600$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282785$ (Griffin et al, 2000)；两阶段模式年龄采用平均地壳值($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}}=0.015$ (Griffin et al, 2002)

富饶等五幅联测成果,对美丰林场、上游林场及移山林场一带的中基性火山岩恢复使用美丰组命名。本文采用2006年《黑龙江地质调查研究总院1:25万乌云镇等三幅区调报告》的划分方案(赵海滨等, 2006),延续甘河组的地层称谓。其岩性特征为中性—中基性岩石组合,火山作用以单一喷溢方式为主,火山岩相多为溢流相。2019年,由黑龙江省有色金属地质勘查七〇七队承担的《黑龙江东安—汤旺河地区金矿整装勘查区矿产调查与找矿预测》项目,将东安地区火山岩地层划分为宁远村组、甘河组和大熊山组,为研究区提供最新地层划分方案(图9)。

目前东安地区甘河组火山岩尚未开展精确的

年代学研究工作,本文首次对库尔滨下游金矿区内的甘河组安山岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(106.4 \pm 1.0) \text{ Ma}$ ($MSWD=1.8$),其形成年代可精确地限定于早白垩世晚期。近年来,岳洪举等(2022)在孙吴地区通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试研究表明,该地区美丰组(与甘河组为同物异名地层)火山岩形成于早白垩世晚期 $[(105.2 \pm 0.5) \text{ Ma}]$,这一年龄也与本次研究结果相吻合。

由于库尔滨下游矿区内可用于限定金矿成矿年龄的金属硫化物含量较少,参考矿区赋矿围岩甘河组安山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果 $[(106.4 \pm 1.0) \text{ Ma}]$,推测库尔滨下游金矿的成

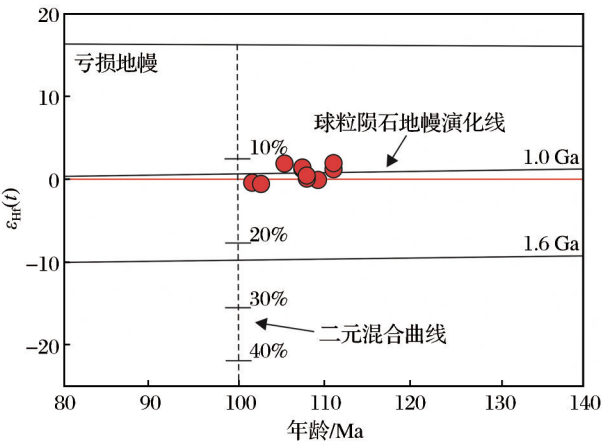


图8 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解
Fig. 8 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -age diagram of the Ganhe Formation andesites in the lower Ku'erbin River gold district

矿时代晚于该地层的形成年龄。值得关注的是,前人测得东安金矿5号主矿体冰长石 Ar-Ar 年龄为 $(105.14 \pm 0.7) \text{ Ma}$ (薛明轩, 2012), 该矿体和库尔滨下游金矿(化)体在空间上均沿同一构造连续延伸分布[图 1(a)], 且该年龄值完全落入库尔滨下游矿

区甘河组火山岩的年龄误差范围内, 据此推测该年龄可代表库尔滨下游金矿的成矿年龄。综合上述分析得出, 库尔滨下游金矿的成岩成矿作用发生于 106~105 Ma 之间, 属于早白垩世晚期的构造—岩浆活动产物。

4.2 岩石成因与构造背景

研究区内甘河组安山岩样品 MgO 含量为 2.55%~4.72%, 平均含量为 3.57%; $\text{Mg}^\#$ 值为 48~64, 平均值为 56; TFeO/MgO 比值为 1.01~1.95, 平均值为 1.40。已有研究表明, 与典型岛弧安山岩相比, 镁安山岩及高镁安山岩通常具有更高的 $\text{Mg}^\#$ 值、MgO 含量和更低的 TFeO/MgO 比值 (邓晋福等, 2010, 2015; Aydin et al, 2022; 康欢等, 2022)。在 SiO_2 -MgO 和 TFeO/MgO- SiO_2 判别图解 (图 10) 中, 本次研究的样品均落入实验界定的镁安山岩范围内。综合上述特征, 可判定库尔滨下游金矿区内甘河组安山岩应归为低铁钙碱性系列镁质安山岩。这一结论也与人关于黑河地区广泛分布早白垩世镁安山岩的认知相吻合 (邵帅等, 2018)。

火山地层			岩性柱状	厚度/m	主要岩性	同位素年龄	矿化蚀变类型	典型矿床
系	统	组						
第四系	更新统	大熊山组		40	上部为灰黑色、灰紫色气孔状玄武岩; 下部为灰色致密状玄武岩			
白垩系	下统	甘河组		>840	安山质晶屑凝灰岩		硅化、绢云母化、萤石化、黄铁矿化	库尔滨下游金矿点
				Au	玄武安山岩、安山岩	$(106.4 \pm 1) \text{ Ma}$		
		宁远村组		Au	流纹质角砾岩、英安质集块岩		硅化、绢云母化、冰长石化、萤石化、绿泥石化、黄铁矿化	东安金矿
					潜流纹岩、流纹斑岩	$(108.1 \pm 2.4) \text{ Ma}$		
				>1 260	流纹质晶屑熔结凝灰岩 流纹质熔结角砾岩			
					流纹质集块角砾岩、流纹质凝灰角砾岩、角砾凝灰岩、岩屑晶屑凝灰岩	$(109.1 \pm 0.87) \text{ Ma}$		
白垩系	下统	宁远村组		>1 260	粗安岩、英安岩、流纹岩	$(109.1 \pm 1) \text{ Ma}$		

图9 东安地区火山地层柱状图(同位素年龄引用自 Zhang et al, 2010; 谭红艳, 2013; 刘瑞萍, 2015a)
Fig. 9 Volcanic stratigraphic column of the Dong'an area (Isotopic ages quoted from Zhang et al, 2010; Tan 2013; Liu et al, 2015a)

前人已针对相邻东安金矿区内安山岩的物质来源及形成机制开展了一系列研究, 但目前仍存在 2 种观点: 一种认为区内安山岩的源区可能为经交代作用富集的岩石圈地幔, 由其发生减压熔融而形

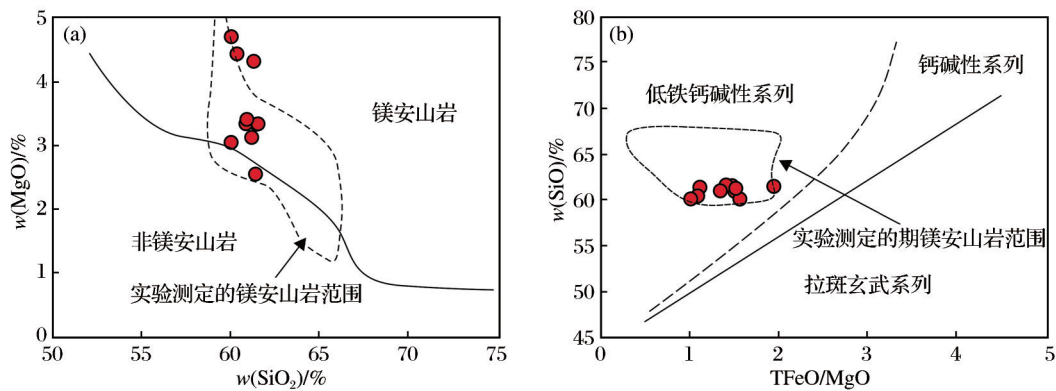


图 10 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩 SiO_2 - MgO (a) 和 TFeO/MgO - SiO_2 (b) 图解(底图据邓晋福等, 2010, 2015)

Fig. 10 SiO_2 - MgO (a) and TFeO/MgO - SiO_2 (b) diagrams for the Ganhe Formation andesites in the lower Ku'erbini River gold district (base map according to Deng et al, 2010, 2015)

成(Zhang et al, 2010);另一种则提出火山岩源于下地壳岩石部分熔融形成的母岩浆,后经结晶分异作用形成了不同岩性的火山岩,安山岩代表初始熔融产物(刘瑞萍等, 2015b; Li et al, 2021)。通常认为,由基性下地壳物质部分熔融形成的岩浆,往往具有较低的 $\text{Mg}^\#$ 值(一般小于 45),以及较高的 Lu/Yb 比值(0.16~0.18)和 Rb/Sr 比值(大于 0.5)(Rapp et al, 1999; Rudnick et al, 2003)。本次研究中,库尔滨下游金矿区甘河组安山岩的 Lu/Yb 比值为 0.14~0.16(平均值为 0.15), Rb/Sr 比值为 0.11~0.63(平均值为 0.3),这 2 组数据明显低于壳源岩浆的对应比值范围。由此可知,库尔滨下游金矿区内的甘河组安山岩由基性下地壳物质部分熔融形成的可能性较低。此外,库尔滨下游金矿区甘河组安山岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 0.57~1.94,平均值为 0.71,整体呈现低正值特征。这一同位素特征表明,其岩浆源区并非单一的富集岩石圈地幔,因为典型富集岩石圈地幔的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值通常表现为负值(韩宝福等, 2007),这与本研究的低正值特征明显相悖。

镁安山岩系列岩石是俯冲带弧岩浆岩中具有标志性意义的岩石类型之一(邓晋福等, 2010, 2015; 李康宁等, 2020)。在锆石 $\text{Y-Lu}/\text{Hf}$ 和全岩 Nb/Yb - Th/Yb 构造判别图解(图 11)中,样品分别落在火山弧和活动大陆边缘范围内。前人研究表明,由俯冲板块流体交代形成的岩浆具有高的 Ba 含量和高的 Ba/Th 比值(大于 170);由俯冲沉积物熔体形成的岩浆中 Th 含量升高, Th/La (大于 0.2)、 Th/Yb 比值(大于 2)较高(Elburg et al, 2002; Richards et al,

2007)。库尔滨下游金矿区甘河组安山岩的 Ba/Th 比值为 99.89~213.64(平均值为 158.77),但部分样品(样品编号为 XY02-2、XY02-4 和 XY02-5)已超过该阈值(大于 170),显示出一定的俯冲流体交代影响。另外,微量元素蛛网图也形成了典型的 TNT 异常(Nb-Ta-Ti 负异常)[图 7(b)],表明该火山岩的源区曾受到俯冲带流体的交代改造(Ionov et al, 1995)。 Th/La 比值和 Th/Yb 比值分别为 0.17~0.25(平均值为 0.19)和 2.82~4.44(平均值为 3.39),表明俯冲沉积物熔体的贡献更为显著。因此,甘河组安山岩的形成可能与俯冲带环境中沉积物熔体的加入密切相关,同时可能受到一定程度俯冲板块流体的影响。

近年来,随着地球深部动力学研究的持续深入,有学者提出早白垩世古太平洋板块在俯冲后撤过程中,为东亚地区独特的大地幔楔构造形成提供了关键动力学条件,而部分俯冲板片则滞留于地幔过渡带(Tang et al, 2023; 徐夕生等, 2024)。基于此,甘河组安山岩的初始岩浆端元可能源于上述滞留板片的熔融。具体而言,由洋壳与沉积物组成的滞留板片在高压环境下熔融时,石榴子石作为残留相得以保留,导致熔体呈现较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 比值特征(16.76~18.88);与此同时,随着滞留板片一同俯冲的沉积物在脱水过程中释放出富 Fe 、 Th 和 U 的流体,此类流体混入板片熔体后,进一步造成熔体 TFeO/MgO 比值升高(1.01~1.95),并使 Sr/Y 比值降低(10.94~38.79)。该岩浆在向上运移过程中,经历了显著的浅部地幔反应:浅部地幔楔的有限熔融反

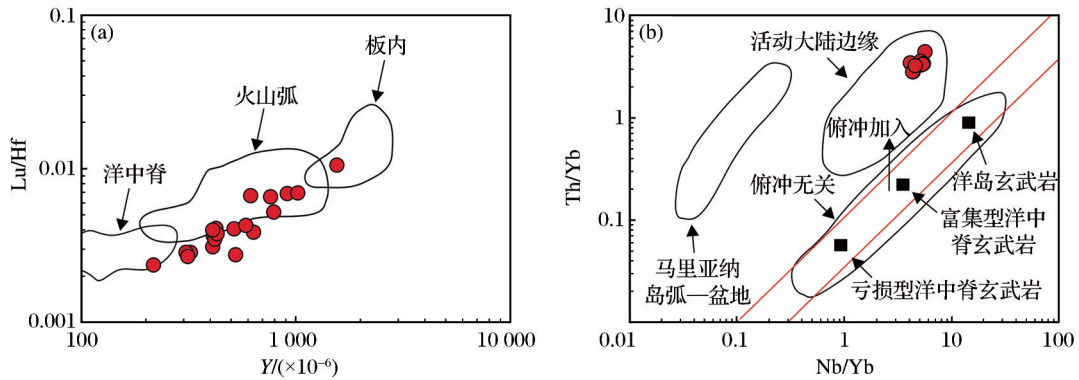


图 11 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩锆石 Y-Lu/Hf(a)和全岩 Nb/Yb-Th/Yb(b)图解
(底图据 Grimes et al, 2015; 王敬宇, 2022)

Fig. 11 Zircon Y-Lu/Hf(a) and whole-rock Nb/Yb-Th/Yb(b) diagrams of the Ganhe Formation andesites in the lower Ku'erbin River gold district (base map according to Grimes et al, 2015; Wang, 2022)

应为其提供了 Mg^{2+} , 有效提升了熔体的 $Mg^{\#}$ 值 (48~64); 但由于浅部地幔已因前期熔融发生物质亏损, 导致 Cr (6.00~9.16) 和 Ni (9.56~12.5) 含量未能显著提升。此外, Hf 同位素特征进一步印证了壳幔混合过程: 亏损地幔贡献的高放射性成因 Hf 使 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值偏向正值, 而古老地壳物质的混入则降低了整体 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值, 最终形成 -0.57~1.94 的低正值范围。简单的两端元混合模拟计算结果显示, 其源区物质可能由 90% 的亏损地幔与 10%~15% 的地壳物质混合而成 (贺振宇等, 2025a)。综上所述, 甘河组安山岩作为与俯冲带密切相关的镁安山岩, 其形成过程是滞留板片熔融、流体混入、浅部地幔反应和壳幔混合等多阶段地质作用协同耦合的结果 (图 12)。

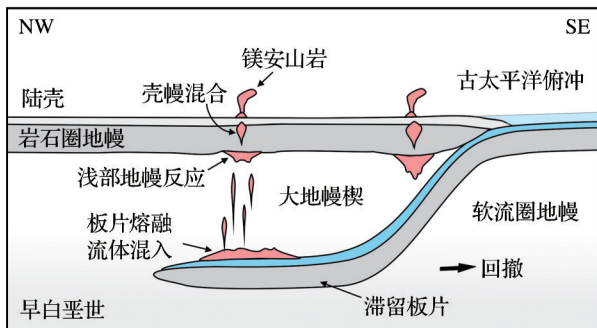


图 12 早白垩世古太平洋板块俯冲后撤与镁安山岩形成模式图

Fig. 12 Model diagram of Paleozoic Pacific Plate subduction retrogression and magnesian andesite formation pattern during the Early Cretaceous

4.3 对金矿形成的指示意义

尽管高氧逸度是成矿过程中必要非充分条件, 但 Au 的迁移和富集对氧化还原条件极其敏感, 高氧逸度有利于金以氯络合物形式长距离迁移, 中等氧逸度有利于硫络合物稳定, 二者共同决定金的运移范围 (张荣伟等, 2019; 刘星成等, 2021; 李守奎等, 2022); 另外, 氧逸度的突变 (升高或降低) 也是 Au 从流体中析出的关键“开关”, 控制着矿化的规模大小和富集程度 (梁培等, 2018; Wu et al, 2020; 王大钊等, 2024)。

锆石 Ce-U-Ti 氧逸度计是一种基于锆石微量元素地球化学的创新计算方法, 用于定量估算岩浆体系的氧逸度 (Loucks et al, 2020)。该方法通过整合锆石中 Ce、U 和 Ti 这 3 种元素的含量及年龄值, 建立了与氧逸度的直接关联。前人运用该方法对金沙江—哀牢山铜金成矿带中含铜、金矿化斑岩与无矿斑岩的锆石岩浆氧逸度差异进行研究 (Bao et al, 2023), 结果表明铜矿化斑岩 (ΔFMQ 平均值为 $+1.89 \pm 0.60$) 和金矿化斑岩 (ΔFMQ 平均值为 $+0.99 \pm 0.70$) 的氧逸度均显著高于无矿斑岩 (ΔFMQ 平均值为 -0.43 ± 0.91), 这一发现有力证实了该方法在区分岩浆氧逸度差异及评估成矿潜力方面的有效性。本次锆石氧逸度计算结果显示, 甘河组安山岩 ΔFMQ 值为 0.13~2.85, 平均值为 0.94, 指示了相对的氧化岩浆环境 [图 13(a)]。在锆石 Ti 温度- ΔFMQ 图解 [图 13(b)] 中, 锆石分析点大部分落在金沙江—哀牢山地区与金矿化岩体一致的区域范

围内,说明甘河组安山岩的金成矿潜力较大。

已有研究表明,下白垩统宁远村组火山岩与该地区浅成低温热液金、银成矿关系最为密切(赵忠海等,2023)。本次研究还对东安矿区内宁远村组流纹质含角砾晶屑凝灰岩进行锆石 U-Pb 同位素定年,结果显示为 (108.2 ± 1.2) Ma (未公开发表数据),略早于库尔滨下游矿区内的甘河组安山岩(图9),这也与野外观察到的层序关系相一致。通过对比不同矿区的氧逸度发现,东安矿区内宁远村组火山岩的氧逸度(ΔFMQ 平均值为 1.59)与库尔滨下游矿区内甘河组火山岩(ΔFMQ 平均值为 0.94)均显示为较中等高的氧逸度特征[图 13(a)],进一步印证了

氧逸度过高或过低均不利于金从地幔源区迁移到上部地壳成矿(刘星成等,2021),且宁远村组火山岩的氧逸度高于甘河组火山岩,说明前者具有更强的 Au 迁移富集能力。此外,库尔滨下游矿区甘河组火山岩的锆石 Ti 温度(平均值为 820°C)高于东安矿区宁远村组火山岩(平均值为 763°C)[图 13(b)],这一差异可能与早白垩晚期大规模岩浆系统对同一岩浆房持续补给过程密切相关(贺振宇等,2025b)。综上所述,该地区宁远村组与甘河组火山岩均具有较高的氧逸度,为成矿过程提供了更强的 Au 元素活化与迁移能力,也为后续开展更精细的勘查找矿工作明确了具体方向。

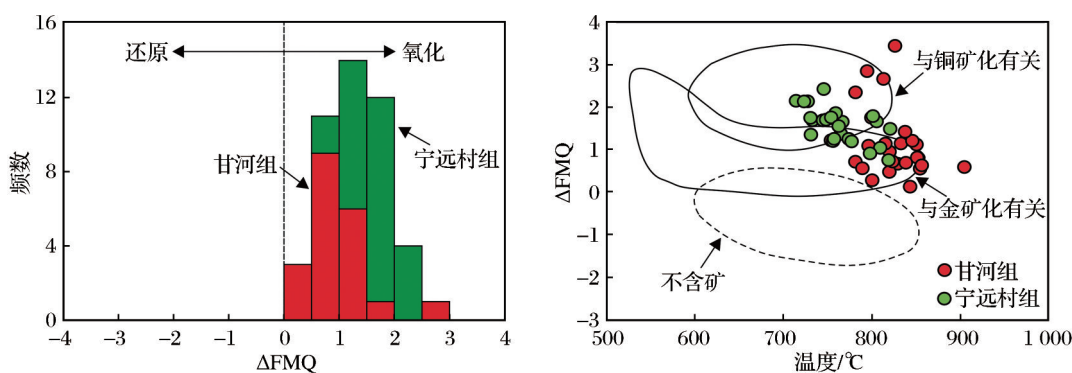


图 13 库尔滨下游金矿区甘河组安山岩锆石 ΔFMQ 频数直方图(a)和温度- ΔFMQ 图解(b)
(含矿与不含矿岩体据 Bao et al, 2023)

Fig. 13 Zircon ΔFMQ histogram (a) and temperature- ΔFMQ (b) diagrams of the Ganhe Formation andesites in the lower Ku'erbin River gold district (ore-bearing and ore-barren rock mass according to Bao et al, 2023)

5 结论

(1)黑龙江库尔滨下游金矿区的赋矿围岩以甘河组暗灰—灰色安山岩为主。对矿区剖面安山岩样品进行锆石 U-Pb 同位素定年分析,结果表明其形成时代为早白垩世晚期 [(106.4 ± 1.0) Ma]。结合已有年代学资料,推测库尔滨下游金矿点成矿时代为 106~105 Ma。

(2)库尔滨下游金矿区甘河组安山岩属低铁钙碱性系列镁安山岩系列岩石,形成于活动大陆边缘构造环境。其成因以滞留板片熔融为初始岩浆端元,一定程度上受俯冲沉积物熔体主导及俯冲流体的影响,岩浆在上升过程中经历了浅部地幔反应与壳幔混合作用,是多阶段地质过程协同耦合的产物。

(3)锆石 Ce-U-Ti 氧逸度计分析结果表明,库尔滨下游矿区甘河组火山岩具备中等高的氧逸度特征;同时,根据该组锆石 Ti 温度偏高的现象,推测与岩浆系统的长期补给过程密切相关。综合上述特征可证实,甘河组火山岩具有良好的金矿成矿潜力,这为区域后续勘查工作提供了重要的科学依据。

参考文献 (References):

- Aydin F, Sönmez M, Siebel W, et al, 2022. Slab break-off-related magnesian andesites and dacites with adakitic affinity from the early Quaternary Keçiboydur strato volcano, Cappadocia Province, central Turkey: evidence for slab/sediment meltmantle interaction and magma mixing [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 177(7): 65.
- Bao X S, He W Y, Mao J W, et al, 2023. Redox states and genesis

- of Cu- and Au-mineralized granite porphyries in the Jinshajiang Cu-Au metallogenic belt, SW China: studies on the zircon chemistry [J]. *Mineralium Deposita*, 58(6): 1123-1142.
- Boynton W V, 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [M]//Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P M, et al, 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469-500.
- Deng J, Wang Q F, 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework [J]. *Gondwana Research*, 36: 219-274.
- Elburg M A, van Bergen M, Hoogewerff J, et al, 2002. Geochemical trends across an arc-continent collision zone: magma sources and slab-wedge transfer processes below the Pantar Strait volcanoes, Indonesia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(15): 2771-2789.
- Ferry J M, Watson E B, 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429-437.
- Gao S, Hofstra A H, Zou X Y, et al, 2021. Oxygen isotope evidence for input of magmatic fluids and precipitation of Au-Ag-tellurides in an otherwise ordinary adularia-sericite epithermal system in NE China [J]. *American Mineralogist*, 106(12): 2003-2019.
- 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.
- Grimes C B, Wooden J L, Cheadle M J, et al, 2015. "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(5): 46.
- Guan Q B, Liu B R, Chen Z X, et al, 2024. Early Paleozoic tectonic affinity of the Lesser Xing' an-Zhangguangcai Range, NE China: a continental arc along the western margin of the Jiamusi Block [J]. *Lithos*, 466/467: 107467.
- Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, et al, 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram [J]. *Journal of Petrology*, 48: 2341-2357.
- Hoskin P W O, 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62.
- Hu Z C, 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(9): 1391-1399.
- Ionov D A, Hofmann A W, 1995. Nb-Ta-rich mantle amphiboles and micas: Implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 131(3/4): 341-356.
- Li G T, Sun F Y, Li B L, et al, 2021. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and Hf isotopic compositions of the trachyandesite in the Dong' an Au deposit, Lesser Xing' an Range, northeastern China [J]. *Geosciences Journal*, 25(6): 849-862.
- Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, et al, 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 43: 123-148.
- 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 from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 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(1/2): 34-43.
- Liu Y, Sun J G, Han J L, et al, 2021. Constraints of magmatic differentiation on epithermal mineralization at Dongan, NE China: Insights from zircon geochronology, elements and Sr-Hf-Nd isotope geochemistry [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 226: 106768.
- 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.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al, 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chemical Geology*, 160(4): 335-356.
- Richards J P, Kerrich R, 2007. Special paper: adakite-like rocks:

- their diverse origins and questionable role in metallogenesis [J]. *Economic Geology*, 102(4): 537-576.
- Rubatto D, 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 184(1/2): 123-138.
- Rudnick R L, Gao S, 2003. The Crust, 3.01: The composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1-64.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al, 2004. The ^{176}Lu 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 J G, Han S J, Zhang Y, et al, 2013. Diagenesis and metallogenetic mechanisms of the Tuanjieou gold deposit from the Lesser Xing' an Range, NE China: Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic constraints [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 373-388.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [M]//Saunders A D, Norry M J, eds. *Magma-tism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publication.
- Tang J, Wang F, Wang Y N, et al, 2023. Age, formation mechanisms, spatial extent, and geodynamic effects of the eastern and northeastern Asian big mantle wedges [J]. *Earth-Science Reviews*, 237: 104324.
- Vermeesch P, 2018. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology [J]. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1479-1493.
- Winchester J A, Floyd P A, 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 20: 325-343.
- Wu C, Chen H Y, Lu Y J, 2020. Magmatic water content and crustal evolution control on porphyry systems: insights from the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of Petrology*, 62(2): 1-15.
- Xu W L, Pei F P, Wang F, et al, 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167-193.
- Zhang C P, Wang E D, Bi Z W, et al, 2019. Geochronology and isotope geochemistry studies of an epithermal gold deposit in the northern Lesser Khingan Range, NE China: the Gao-songshan example [J]. *Ore Geology Reviews*, 105: 356-374.
- Zhang Y Q, Qiu E K, Dong S W, et al, 2022. Late Mesozoic intra-continental deformation and magmatism in North and NE China in response to multi-plate convergence in NE Asia: an overview and new view [J]. *Tectonophysics*, 835: 229377.
- Zhang Z C, Mao J W, Wang Y B, et al, 2010. Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks associated with the Dong' an adularia-sericite epithermal gold deposit, Lesser Hinggan Range, Heilongjiang Province, NE China: constraints on the metallogenesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 37(3/4): 158-174.
- Zhong S H, Seltmann R, Qu H Y, et al, 2019. Characterization of the zircon Ce anomaly for estimation of oxidation state of magmas: a revised Ce/Ce* method [J]. *Mineralogy and Petrology*, 113(6): 755-763.
- Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al, 2017. The assembly of Rodinia: the correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 290: 32-48.
- 常景娟, 李碧乐, 2015. 东安金矿光华组酸性火山凝灰岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义 [J]. *矿产保护与利用*, 35(6): 12-21.
- Chang Jingjuan, Li Bile, 2015. Geochemistry, U-Pb geochronology, and Hf isotopic characteristics and geological significance of the tuff from Dong' an gold deposit, Lesser Khingan Mountains, NE China [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 35(6): 12-21.
- 陈海明, 刘智明, 曲晖, 2006. 东安金矿床蚀变矿物特征 [J]. *黄金科学技术*, 14(4): 14-18.
- Chen Haiming, Liu Zhiming, Qu Hui, 2006. Mineralogy evidences of the Dong' an epithermal gold deposit in northern Heilongjiang Province [J]. *Gold Science and Technology*, 14(4): 14-18.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等, 2015. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换 [J]. *地质论评*, 61(3): 473-484.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, et al, 2015. Magmatic arc and ocean-continent transition: discussion [J]. *Geological Review*, 61(3): 473-484.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等, 2010. 高镁安山岩/闪长岩类 (HMA) 和镁安山岩/闪长岩类 (MA): 与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类 [J]. *中国地质*, 37(4): 1112-1118.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, et al, 2010. High magnesian andesitic/dioritic rocks (HMA) and magnesian andesitic/dioritic rocks (MA): two igneous rock types related to oceanic subduction [J]. *Geology in China*, 37(4): 1112-1118.
- 冯光英, 牛晓露, 刘飞, 等, 2022. 小兴安岭构造带早白垩世

- 最晚期镁铁质侵入岩的岩石成因及地质意义[J].地质学报, 96(12): 4224-4241. Feng Guangying, Niu Xiaolu, Liu Fei, et al, 2022. Petrogenesis and geological significance of latest Early-Cretaceous mafic intrusion in Lesser Xing'an Range, China [J]. Acta Geologica Sinica, 96(12): 4224-4241.
- 郭继海, 金凤鸣, 汪长生, 2004. 黑龙江东安金矿潜火山岩的控矿作用[J]. 矿产与地质, 18(3): 232-235. Guo Jihai, Jin Fengming, Wang Changsheng, 2004. Ore controlling role of subvolcanic rock in the Dong'an gold deposit, Heilongjiang [J]. Mineral Resources and Geology, 18(3): 232-235.
- 韩宝福, 张磊, 王亚妹, 等, 2007. 华北克拉通中部古元古代高Mg低Ti-P镁铁质岩墙的富集地幔源区——锆石Hf同位素的制约[J]. 岩石学报, 23(2): 277-284. Han Baofu, Zhang Lei, Wang Yamei, et al, 2007. Enriched mantle source for Palaeoproterozoic high Mg and low Ti-P mafic dykes in central part of the North China Craton: constraints from zircon Hf isotopic compositions [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 277-284.
- 贺振宇, 郭磊, 颜丽丽, 等, 2025a. 浙东长屿破火山岩浆起源与穿地壳岩浆系统演化: 锆石Hf同位素证据[J]. 地质学报, 99(2): 428-444. He Zhenyu, Guo Lei, Yan Lili, et al, 2025. Magma origin and the evolution of transcrustal magmatic system of the Changyu caldera in eastern Zhejiang Province: evidence from zircon Hf isotope [J]. Acta Geologica Sinica, 99(2): 428-444.
- 贺振宇, 颜丽丽, 陆天宇, 等, 2025b. 浙江芙蓉山复式破火山的形成与岩浆演化: 岩石学与年代学制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 44(2): 288-304, 202. He Zhenyu, Yan Lili, Lu Tianyu, et al, 2025. Formation and magmatic evolution of the Furongshan caldera complex in Zhejiang Province: constraints from petrology and geochronology [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 44(2): 288-304, 202.
- 康欢, 陈岳龙, 李大鹏, 等, 2022. 东天山觉罗塔格构造带晚三叠世镁安山岩的厘定及其构造意义[J]. 地学前缘, 29(4): 358-370. Kang Huan, Chen Yuelong, Li Dapeng, et al, 2022. Late Triassic Mg andesite of Juluotage, eastern Tianshan: Identification and tectonic implications [J]. Earth Science Frontiers, 29(4): 358-370.
- 李康宁, 刘伯崇, 狄永军, 2020. 三叠纪西秦岭西北部洋俯冲的记录: 来自镁安山岩/高镁安山岩的证据[J]. 中国地质, 47(3): 709-724. Li Kangning, Liu Bochong, Di Yongjun, 2020. Triassic oceanic subduction in northwestern West Qinling Mountain: evidence from Mg andesite and high-Mg andesite [J]. Geology in China, 47(3): 709-724.
- 李守奎, 刘学龙, 卢映祥, 等, 2022. 锆石氧逸度对义敦岛弧南段中甸矿集区斑岩型矿床差异性成矿控制因素的指示[J]. 地球科学, 47(4): 1435-1458. Li Shoukui, Liu Xuelong, Lu Yingxiang, et al, 2022. Indication of zircon oxygen fugacity to different mineralization control factors of porphyry deposits in Zhongdian ore-concentrated area, southern Yidun arc [J]. Earth Science, 47(4): 1435-1458.
- 梁培, 陈华勇, 吴超, 等, 2018. 东准噶尔北缘老山口铁—铜—金矿床古生代岩浆岩锆石U-Pb年代学、氧逸度特征及地质意义[J]. 地学前缘, 25(5): 96-118. Liang Pei, Chen Huayong, Wu Chao, et al, 2018. Geochemistry, geochronology and oxygen fugacity of volcanic and intrusive rocks from the Laoshankou Fe-Cu-Au deposit in the northern margin of East Junggar, NW China [J]. Earth Science Frontiers, 25(5): 96-118.
- 刘瑞萍, 2015a. 黑龙江伊春地区斑岩—浅成低温热液金矿床岩浆、流体与成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京). Liu Ruiping, 2015a. Magma, fluids and gold mineralization of the porphyry-epithermal gold deposits in the Yichun area, Heilongjiang Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- 刘瑞萍, 顾雪祥, 章永梅, 等, 2015b. 黑龙江东安金矿床赋矿岩浆岩锆石U-Pb年代学及岩石地球化学特征[J]. 岩石学报, 31(5): 1391-1408. Liu Ruiping, Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, et al, 2015b. Zircon U-Pb geochronology and petrogeochemistry of host igneous rocks of the Dong'an gold deposit in Heilongjiang Province, NE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 31(5): 1391-1408.
- 刘星成, 许婷, 熊小林, 等, 2021. 岩浆熔/流体中金的溶解度: 高温高压实验研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1477-1488. Liu Xingcheng, Xu Ting, Xiong Xiaolin, et al, 2021. Gold solubility in silicate melts and fluids: advances from high-pressure and high-temperature experiments [J]. Scientia Sinica (Terrae), 51(9): 1477-1488.
- 祁进平, 陈衍景, Franco Pirajno, 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景[J]. 矿物岩石, 25(2): 47-59. Qi Jinping, Chen Yanjing, Pirajno F, 2005. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the Northeast China [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 25(2): 47-59.
- 曲关生, 1997. 黑龙江省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. Qu Guansheng, 1997. Stratigraphy (lithostratic) of Heilongjiang Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press.

- 邵帅,邓晋福,刘翠,等,2018.黑龙江黑河地区早白垩世火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义[J].地学前缘,25(3):215-229. Shao Shuai, Deng Jinfu, Liu Cui, et al, 2018. Geochemical characteristics and tectonic setting of Early Cretaceous volcanic rocks in the Heihe area, Heilongjiang Province, China[J]. Earth Science Frontiers, 25(3):215-229.
- 孙景贵,刘阳,徐智恺,等,2023.试论中国东北部陆缘晚中生代浅成热液大规模成矿与深部地质过程对成矿制约[J].吉林大学学报(地球科学版),53(3):651-692. Sun Jinggui, Liu Yang, Xu Zhikai, et al, 2023. Large-scale epithermal mineralization of late Mesozoic and the constraints of deep geological processes on mineralization in the continental margin of NE China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 53(3):651-692.
- 谭红艳,2013.黑龙江小兴安岭—张广才岭成矿带成矿系列及找矿远景评价[D].北京:中国地质大学(北京). Tan Hongyan, 2013. Metallogenetic series and prospecting assessment in Lesser Xing'an Range-Zhangguangcai Range metallogenic belt of Heilongjiang Province [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing).
- 王大钊,张磊,甄世民,等,2024.华北克拉通北缘张家口地区古生代—中生代岩浆岩锆石氧逸度对金成矿的制约[J].岩石学报,40(8):2519-2537. Wang Dazhao, Zhang Lei, Zhen Shimin, et al, 2024. Restrictions on gold mineralization by zircon oxygen fugacity from the Paleozoic-Mesozoic magmatic rocks in the Zhangjiakou district, northern margin of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 40(8):2519-2537.
- 王登红,赵如意,陈毓川,等,2023.中国金矿床的预测类型及其应用[J].矿床地质,42(5):945-954. Wang Denghong, Zhao Ruyi, Chen Yuchuan, et al, 2023. Prediction types of gold deposits and its application in China[J]. Mineral Deposits, 42(5):945-954.
- 王慧,2011.黑龙江省小兴安岭北段白垩纪火山岩相及岩浆演化[D].西安:长安大学. Wang Hui, 2011. The cretaceous volcanic facies and magma evolution in North Lesser Khingan Range, Heilongjiang Province [D]. Xi'an: Chang'an University.
- 王建新,张俊华,王超,等,2010.东北地区中生代火山岩成分空间变异及其成矿规律[J].吉林大学学报(地球科学版),40(4):752-763. Wang Jianxin, Zhang Junhua, Wang Chao, et al, 2010. Spatial variability of composition of Mesozoic volcanic rocks and metallogenic regularity in Northeast China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(4):752-763.
- 王敬宇,2022.华北克拉通南缘古元古代早期岩浆作用及构造演化[D].西安:西北大学. Wang Jingyu, 2022. Early Paleoproterozoic magmatism and tectonic evolution of the Southern North China Craton [D]. Xi'an: Northwest University.
- 王瑞,罗晨皓,夏文杰,等,2021.冈底斯后碰撞斑岩成矿带高水、高氧逸度岩浆成因研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,40(5):1061-1077. Wang Rui, Luo Chenhao, Xia Wenjie, et al, 2021. Progresses in the study of high magmatic water and oxidation state of post-collisional magmas in the Gangdese porphyry deposit belt [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 40(5):1061-1077.
- 徐夕生,黄周传,姜鼎盛,等,2024.古太平洋板块的遗迹和残片:地球化学和地球物理学示踪[J].中国科学:地球科学,54(10):3091-3112. Xu Xisheng, Huang Zhouchuan, Jiang Dingsheng, et al, 2024. Remnants and fragments of the subducted paleo-Pacific plate: constraints from geochemistry and geophysics [J]. Scientia Sinica (Terrae), 54(10):3091-3112.
- 薛明轩,2012.黑龙江省内生金矿成矿作用研究[D].长春:吉林大学. Xue Mingxuan, 2012. Metallogenesis of endogenic gold deposits in Heilongjiang Province [D]. Changchun: Jilin University.
- 岳洪举,陆胜,于庆洋,等,2022.小兴安岭孙吴地区下白垩统美丰组火山岩年代学和岩石地球化学研究[J].地质论评,68(6):2138-2146. Yue Hongju, Lu Sheng, Yu Qingyang, et al, 2006. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks of Lower Cretaceous Meifeng Formation in Sunwu area, Lesser Khingan Mountains [J]. Geological Review, 68(6):2138-2146.
- 张荣伟,薛传东,薛力鹏,等,2019.西南三江甬哥金矿床磷灰石地球化学特征及地质意义[J].岩石学报,35(5):1407-1422. Zhang Rongwei, Xue Chuandong, Xue Lipeng, et al, 2019. The geochemical characteristics and their geological significance of apatite from the Bengge gold deposit in Sanjiang region, SW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 35(5):1407-1422.
- 赵海滨,牛延宏,马江水,等,2006.1:25万乌云镇幅、嘉荫县幅、太平沟幅区域地质调查报告[R].哈尔滨:黑龙江省地质调查研究院总院. Zhao Haibin, Niu Yanhong, Ma Jianguang, et al, 2006. 1:250 thousand regional geological survey report of Wuyun town map, Jiayin county map, Taipinggou map [R]. Harbin: Heilongjiang General Institute of Geological Survey and Research.
- 张春鹏,党宇宁,韩仁萍,等,2025.黑龙江东安地区航磁异

- 常特征及其金成矿靶区预测[J]. 黄金科学技术, 33(3): 482-496. Zhang Chunpeng, Dang Yuning, Han Renping, et al, 2025. Aeromagnetic anomaly characteristics and prediction of gold metallogenic target zones in the Dong'an area, Heilongjiang Province[J]. Gold Science and Technology, 33(3): 482-496.
- 赵忠海, 梁杉杉, 孙景贵, 等, 2023. 小兴安岭伊东林场金多金属矿床火山一次火山岩年代学、岩石地球化学及构造背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 53(3): 785-808. Zhao Zhonghai, Liang Shanshan, Sun Jinggui, et al, 2023. Zircon U Pb geochronology, geochemistry and tectonic environment of the volcanic-subvolcanic rocks at Yidong Linchang gold polymetallic deposit, Lesser Xing'an Range (Northeast China) [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 53(3): 785-808.
- 邹心宇, 蒋济莲, 秦克章, 等, 2021. 锆石微量元素的理论基础及其应用研究进展[J]. 岩石学报, 37(4): 985-999. Zou Xinyu, Jiang Jilian, Qin Kezhang, et al, 2021. Progress in the principle and application of zircon trace element [J]. Acta Petrologica Sinica, 37(4): 985-999.

Geochronology and Petrogeochemistry Characteristics of Volcanic Rocks in the Lower Ku'erbin River Gold District, Heilongjiang Province

ZHANG Chunpeng¹, HAN Renping¹, DANG Yuning², BI Zhongwei¹, LI Xuefeng³

1. Shenyang Center of China Geological Survey (Northeast Geology Science and Technology Innovation Center), Shenyang 110034, Liaoning, China;

2. Jiangsu Nanjing Engineering Vocational College, Nanjing 211100, Jiangsu, China;

3. Natural Resources Survey Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150036, Heilongjiang, China

Abstract: The lower Ku'erbin River gold deposit, presently in the exploration phase, represents a newly identified epithermal gold deposit within the northern Lesser Khingan Range. The gold orebodies, or mineralization, are predominantly hosted within the Lower Cretaceous Ganhe Formation andesites, marking the inaugural discovery of gold mineralization in this region. To systematically investigate the relationship between the host rocks and gold mineralization, comprehensive field geological surveys, petrological analyses, zircon U-Pb geochronology, and petrogeochemical studies were undertaken. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating indicates that the andesites hosting the ore were formed at $(106.4 \pm 1.0) \text{ Ma}$ ($MSWD=1.8$) during the late Early Cretaceous. Petrogeochemical and zircon Hf isotopic analyses reveal that the Ganhe Formation andesites in the lower Ku'erbin River gold district are characterized as magnesian andesites of the low-iron calc-alkaline series. These andesites exhibit high MgO contents (2.55%~4.72%), elevated $Mg^\#$ values (48~64), and low TFeO/MgO ratios (1.01~1.95), indicating formation in an active continental margin tectonic setting. Their genesis is attributed to stagnant slab melting, primarily influenced by subducted sediment melts with additional contributions from subduction-related fluids. The magma experienced interactions within the shallow mantle and crust-mantle mixing during its ascent, exemplifying the synergistic coupling of multi-stage geological processes. Zircon Ce-U-Ti oxybarometry analysis indicates that the volcanic rocks of the Ganhe Formation in the mining area exhibit ΔFMQ values ranging from 0.13 to 2.85, with an average of 0.94, suggesting moderately high oxygen fugacity. Furthermore, the zircon Ti temperatures are relatively elevated, averaging 820 °C, which is likely associated with the prolonged replenishment of the magmatic system. A comprehensive analysis suggests that the Ganhe Formation volcanic rocks possess significant gold mineralization potential, providing a crucial scientific foundation for future regional exploration efforts.

Key words: isotopic chronology; petrogeochemistry; lower Ku'erbin River gold deposit; epithermal gold deposit; magnesian andesite; oxygen fugacity