

黑龙江省乌拉嘎金矿赋矿花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及其地质意义^{*}

王永彬¹ 刘建明¹ 孙守恪¹ 李艳² 李凤友³ 胡海涛³

WANY YongBin¹, LIU JianMing¹, SUN ShouKe¹, LI Yan², LI FengYou³ and HU HaiTao³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室, 北京 100029

2. 中国石油渤海钻探工程有限公司第二录井分公司, 沧州 062552

3. 黑龙江乌拉嘎黄金矿业有限责任公司, 伊春 153221

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Second Mud Logging Company of CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Cangzhou 062552, China

3. Wulaga Gold Mining Corporation, Yichun 153221, China

2011-80-10 收稿, 2011-12-01 改回.

Wang YB, Liu JM, Sun SK, Li Y, Li FY and Hu HT. 2012. Zircon U-Pb geochronology, petrogenesis and geological implication of ore-bearing granodiorite porphyry in the Wulaga gold deposit, Heilongjiang Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2):557–570

Abstract Heilongjiang is one of China's most famous gold producing districts. Past production in the area was partially from epithermal gold mineralization, which was associated with the Mesozoic subaerial volcanic to subvolcanic intrusions. However, a little work has been done for the petrogenesis of these igneous rocks. In this paper, LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, coupled with whole-rock major, trace elements and Sr-Nd-Pb isotopic data are present to constrain the geochronology and the petrogenesis of ore-bearing granodiorite in the Wulaga gold deposit, also discuss the epithermal gold mineralization potential of Heilongjiang Province. Two U-Pb zircon ages from Putaogou granodiorite intrusion and its southern ore-bearing granodiorite porphyry apophysis that occur in the Wulaga gold district are respectively 108.2 ± 1.2 Ma and 106 ± 1.1 Ma, which are similar to the age of surrounding volcanic rocks. Thus it is inferred that the gold mineralization hosted within the granodiorite porphyry apophysis was also formed in the Early Cretaceous, which was contemporaneous with the Dong'an gold deposit and Gaosongshan gold deposits. The granodiorite porphyry is the typically I-type, calc-alkaline ($\sigma = 1.83 \sim 2.18$) granitoid with meta-aluminous attributes ($A/NCK = 0.97 \sim 1.16$). Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic features suggest that the granodiorite porphyry was likely derived from partial melting of the Neoproterozoic juvenile mafic low-crust, which is inferred to be the source of partial mineral-forming components by comparing with other gold deposits. Early Cretaceous magmatism favored an extensional regime in NE China, when complex tectonic activities occurred, at the same time as intense low crust-sourced magmatism. This result suggests that there is likely huge mineralization potential for epithermal gold deposits in the Heilongjiang Province, through comparison with regional mining epithermal gold deposits.

Key words Granodiorite porphyry; Zircon U-Pb; Petrogenesis; Wulaga gold deposit; Heilongjiang Province

摘 要 黑龙江省是我国著名金矿产区之一, 发育多个浅成低温热液型金矿, 它们与中生代陆相火山-次火山岩有密切的关系, 但对这些陆相火山-次火山岩的成因缺乏系统研究, 制约了本区金矿的成因认识和矿床勘查。本次研究采用先进的 LA-ICP-MS 锆石定年法、地球化学 Sr-Nd-Pb 同位素示踪等方法, 对与乌拉嘎浅成低温热液金矿存在密切成因联系的次火山岩(花岗闪长斑岩)进行深入研究。LA-ICP-MS 锆石定年法获得乌拉嘎矿区葡萄沟岩体及其南部含矿岩枝的成岩年龄分别为 108.2 ± 1.2 Ma 和 106 ± 1.1 Ma, 与区内宁远村组火山岩成岩时间基本相近, 推断金矿成矿时代为早白垩世晚期, 与东安金矿和高松山金矿为同期。岩石地球化学确定该岩体为高钾钙碱性($\sigma = 1.83 \sim 2.18$)偏铝质 I 型花岗岩特征, 结合微量元素和 Sr-Nd-Pb 研究显示其具有活动陆缘弧岩岩特点, 进一步得出岩浆源区和成矿物质具有来源于新元古代形成的镁铁质下地壳的部分

^{*} 本文受全国危机矿山接替资源综合研究项目(20089931)、中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA08100500)和国家自然科学基金项目(40972065)联合资助。

第一作者简介: 王永彬, 男, 1985 年生, 博士生, 矿床学专业, E-mail: wangyongbin@mail.iggcas.ac.cn

熔融的属性。早白垩世时,中国东部处于伸展应力体制下,尤其黑龙江构造活动强烈,起源于新生下地壳重融的岩浆活动频繁,结合已有的浅成低温热液金矿床资料显示,推断区内具有巨大的成矿潜力。

关键词 花岗闪长斑岩;锆石 U-Pb;岩石成因;乌拉嘎金矿;黑龙江省

中图法分类号 P588.12; P597.3

1 引言

自二十世纪七八十年代,浅成低温热液金矿成矿模型的建立,带动了全世界新一轮寻找同类型金矿的热潮,在中国东部中生代陆相火山-次火山岩中陆续发现了多个同类型的金矿床(如乌拉嘎金矿等),这为深入研究我国发育的浅成热液成矿系统提供了良好的研究实例。大量研究表明,浅成低温热液金矿与火山-次火山岩具有密切时空联系(Sillitoe and Bonham,1984)。岩浆活动不仅为金矿形成提供主要的热源,而且还提供一定量的成矿流体和成矿物质(Hedenquist and Houghton,1987; White and Hedenquist,1990; Giggenbach,1996;)。因此,深入研究与金矿化作用密切相关的火山-次火山岩,对深化中国东部中生代浅成低温热液成矿系统的认识与指导区域找矿都具有重要意义。

乌拉嘎金矿(又称团结沟金矿)作为我国浅成低温热液型金矿典型代表之一,受到众多学者关注,在矿床地质特征(吴尚全,1995)、成矿流体(孙丰月等,2008)和矿床成因(来又东,2008;聂喜涛,2010)等方面获得大量成果,但前人对于

成矿关系密切的次火山岩缺乏深入系统的岩石成因研究,制约了成矿物质来源及其矿床勘探的研究。因此,本次研究选择乌拉嘎矿区赋矿次火山岩体作为研究对象,在详细野外地质观察基础上,通过对采集样品的精确定年学、岩石地球化学、同位素示踪等研究,结合区域资料与国内外相关研究进展,深入探讨本区次火山岩的成因类型、源区性质及其与金矿化之间的联系。

2 成矿地质背景和矿床地质特征

乌拉嘎金矿区大地构造位置独特,位于中亚造山带(天山-兴蒙造山带)的东段,佳木斯地块与松嫩地块的衔接处北端(图1a),同时又处于滨太平洋构造域(Nei,1991; Şengör and Natal'in,1996; Jahn *et al.*,2000a; Li,2006)。自古生代到中生代先后受到了古亚洲洋和古太平洋演化的影响,具有多块体、多阶段的演化特征(唐克东等,1995; 李锦轶,1998; Li,2006; Wu *et al.*,2007; Zeng *et al.*,2009,2011a, b)。

矿区构造主要表现为脆性断裂,呈现多期活动的特点,古老的东西向断裂可能在中生代复活并被改造,NNE 向的乌

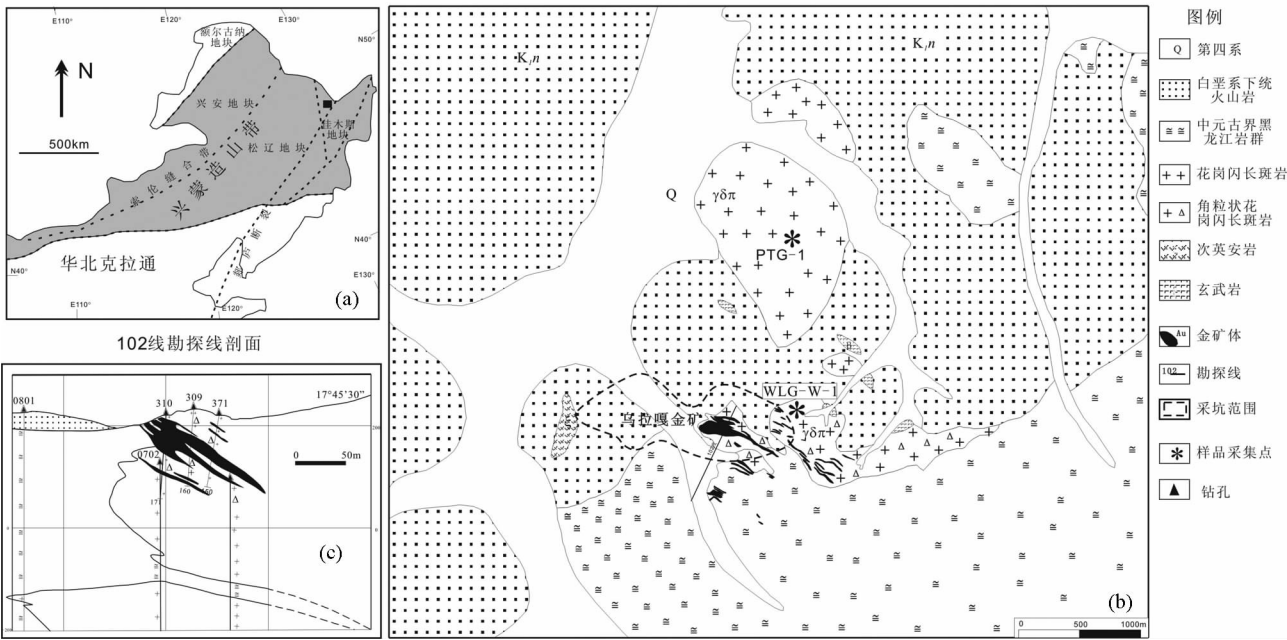


图1 区域构造示意图与矿区地质图
(a)-东北地区构造格架图(据 Gu *et al.*, 2007);(b)-乌拉嘎金矿矿区地质图(据聂喜涛,2010);(c)-乌拉嘎金矿 102 线地质剖面图
Fig.1 Regional tectonic sketch and local geological map
(a)-tectonic framework of northeastern China (after Gu *et al.*, 2007); (b)-simplified geological map of Wulaga gold deposit (after Nie, 2010);
(c)-geological cross-section of No. 102 exploration line of Wulaga gold deposit

拉嘎深断裂旁侧发育着一系列 NWW、NNW、NEE 向次级断裂,不同程度地控制本区的成岩成矿作用。

矿区地层简单,呈双层结构,下伏的元古代黑龙江群,为一套绿片岩相到角闪岩相变质岩,主要由斜长角闪岩、绿泥片岩、云母石英片岩等各种中深成相变质岩组成。90 年代,黑龙江群中中断断续续发现蓝片岩、含放射虫化石的硅质岩、含几丁虫化石的千枚岩等,认为黑龙江群为一套增生碰撞杂岩(Wu *et al.*, 2007),并识别出洋壳残片,对其定年研究,确认存在 $777 \pm 18\text{Ma}$ 的结晶年龄,并受到 $437 \pm 7\text{Ma}$ 的变质作用影响(颜炳强等, 2008)。

上覆地层为晚中生代宁远组火山岩,为陆相火山碎屑岩建造和火山熔岩堆积,其岩性为中酸性(安山质-英安质-流纹质)火山熔岩和碎屑岩为主,并以夹有珍珠岩、黑耀岩为特征(来又东, 2008);宁远村组(K_1n)的前人测得全岩 K-Ar 同位素年龄分别为 118Ma 、 109Ma 及 100.1Ma (曲关生, 2008)。

矿区浅成侵入岩分布于乌拉嘎断陷东侧的葡萄沟、张才沟、团结沟一带,有数个岩体出露,主要呈岩株、岩舌状,具有燕山晚期的火山岩浆沿嘉荫断陷东缘断裂乌拉嘎段的火山管道上升至近地表实现侵位的次火山岩相特征。乌拉嘎含矿岩体呈岩株状,矿区钻孔推断其可能是葡萄沟岩体南部的舌状分枝。本次研究确认两者岩性相似,均为花岗闪长斑岩。岩相学研究确认:主要造岩矿物由斜长石(35% ~ 55%)、石英(20% ~ 25%)、正长石(10% ~ 20%)及少量黑云母(3% ~ 5%)组成,副矿物为锆石、磷灰石和磁铁矿等。以含有宽大的斜长石和石英斑晶的斑状结构为特征,其中斜长石斑晶为中长石,具有典型的环带结构,普遍发育聚片双晶,石英斑晶多被熔蚀成港湾结构(如图 2d),明显的高温浅

成相产物。

乌拉嘎金矿化范围波及早白垩世火山岩、花岗闪长斑岩及中元古界黑龙江地层,但是具有工业意义的矿体则主要赋存于花岗闪长斑岩上部的隐爆角砾岩带(如图 1b, c)。因金矿化不均匀,变化性较大,矿体与围岩无明显界线,矿体形态和大小只能根据边界品位圈定,总体呈 NWW-NW 走向的雁形排列,倾向北北东,倾角 $20^\circ \sim 45^\circ$ 。金属矿物以黄铁矿、白铁矿和辉锑矿为主,硅化和绢云母化等蚀变与矿体紧密共生。

前人(孙凤兴等, 1996;魏仪方和刘春华, 1996)研究中,矿化与岩浆活动具有密切的成因关系,其成矿物质和成矿流体的来源,均有岩浆作用的迹象,且岩体成矿元素分析,发现中生代火山岩-次火山岩本身金的丰度较高,近乎数倍于地壳克拉克值,且其标准离差和变化系数较小,反映其中的金分布比较均匀且集中,是可能的矿源岩,因此深入探讨含矿次火山岩,对金矿的研究具有重要意义。

3 测试方法

3.1 LA-MC-ICP 锆石定年

本次研究所用锆石,来自两个样品,即:WLG-W-1(乌拉嘎含矿岩枝)和 PTG-1(北部葡萄沟岩体)。锆石的分选工作由河北省区域地质调查大队地质实验室完成:样品粉碎后,通过浮选和磁选获得锆石(>1000 粒);样品靶的制备按照 SHRIMP 定年锆石样品的制备方法进行(宋彪等, 2002),在中国科学院地质与地球物理研究所 IMS-1280 实验室制靶中心完成:在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒,然后将它们粘贴在环氧树脂表面,抛光后将锆石进行透射光、反射光和阴极发光显微照相。锆石阴极发光(CL)显微照相在中国科学院地质与地球物理研究所的电子探针与电镜实验室,通过德国 LEO1450VP 扫描电子显微镜(SEM)完成(电压 15kV ;电流 1.1nA);锆石定年和微量元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所多接受等离子体质谱仪实验室(MC-ICPMS Laboratory)完成:激光剥蚀系统为 GeolasPlus 型 193nm ArF 准分子激光器,ICP-MS 设备为 Agilent7500a 型 Q-ICPMS。实验室的激光输出能量密度在 $15\text{J}/\text{cm}^2$ 的情况下,激光束斑大小为 $4 \sim 160\mu\text{m}$ 调整,激光脉冲速率为 $2 \sim 10\text{Hz}$ 。实验室采用 He 气作为剥蚀物质的载气,Ar 气用来增加传输速率,由于采用高纯度的 Ar 和 He 气, ^{204}Pb 和 ^{202}Hg 的背景值大多 $<100\text{cps}$,数据采集模式为 Time-resolved Analysis,选用一个质量峰采集一点的跳峰方式(peak hopping, one point per peak),每 8 个样品分析点分别测定一组标样(两个标准锆石 91500 和 GJ-1,一个微量元素标样 NIST SRM 610)。每个分析点的气体背景采集时间为 30s,信号采集时间为 40s, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ($^{235}\text{U} = ^{238}\text{U}/137.88$), $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的比值采用标准锆石 GJ-1 为外部标准进行校正(除了考虑样品和外标锆石 GJ-1 同位素比值在测定过程中产生的标准偏差外,GJ-1 相对偏差设定

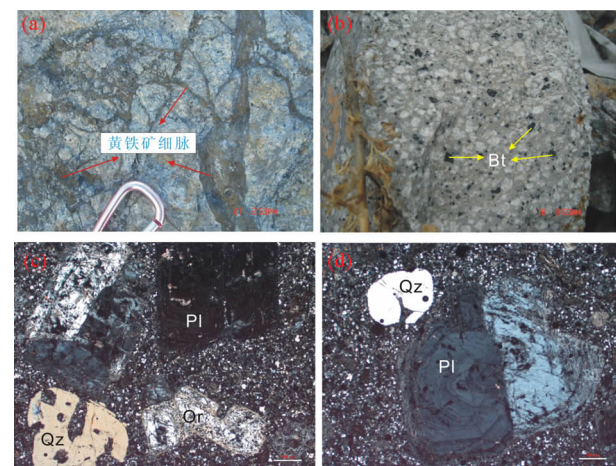


图2 乌拉嘎金矿床矿石标本(a)、花岗闪长斑岩(b)及花岗闪长斑岩显微照片(c、d)

Qz-石英;Or-正长石;Pl-斜长石;Bt-黑云母

Fig. 2 Photographs of ore samples (a), granodiorite porphyry sample (b), microphotographs of granodiorite porphyry (c, d) in Wulaga gold deposit

Qz-quartz; Or-orthoclase; Pl-plagioclase; Bt-biotite

为2%)。分馏校正和结果计算采用 GLITTER4.0 软件处理,普通铅校正采用 Anderson (2002) 的方法,年龄的处理采用 Ludwig(2003)的 ISOPLOT3.0 程序。元素浓度采用 GLITTER (4.0)程序计算,以 NIST SRM610 作外标,以 Si 作为内标。详细的分析流程参考 Xie *et al.* (2008)。

3.2 主微量测试

挑选新鲜的岩石样品,由河北省区域地质调查大队地质实验室粉碎成 200 目粉末。岩石地球化学主量元素、微量元素及稀土元素的分析在核工业北京地质研究院分析测试:主量元素分析采用 PHILIPS PW-2404 X-荧光光谱仪,详细测试流程见 Norrish and Hutton (1969),样品先按照 1:5 的比例放入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 溶液中,在 1050 ~ 1250°C 温度下熔化,然后将熔化样品制成玻璃薄片进行分析,分析精度估计 1% (SiO_2) 和 2% (其它氧化物)。微量元素和稀土元素的分析采用 ELEMENT-2 型离子质谱仪,详细的测试流程参考 Qi *et al.* (2000),将 50mg 全岩粉末(200 目)置于 Teflon 烧瓶中分别用 HNO_3 和 HF 溶解 2d 后加入 HClO_4 进一步溶解。蒸干后用 5% 的 HNO_3 溶液将样品稀释到 50mL,最后做微量元素分析。分析过程中同时测定两个 GBW 系列标样:一个标样校正 Li, Ba, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Cs, Ba, Pb, Th, U, Sc, Y 及稀土元素;另一个标样校正 W, Mo, Nb, Ta, Zr 和 Hf 等元素。分析误差 <5%。

3.3 Sr-Nd-Pb 同位素测试

Sr-Nd-Pb 同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。根据微量元素中 Rb-Sr-Sm-Nd 含量称取适量样品于 Teflon 闷罐中,加入 ^{87}Rb - ^{84}Sr 和 ^{149}Sm - ^{150}Nd 混合稀释剂并用 HF、 HNO_3 和 HClO_4 充分溶解后用离子交换树脂分离出 Rb、Sr、Sm 和 Nd,最后在 ISOPROBE-T 热电离质谱仪 (TIMS) 上测试。整个分析流程实验本底为: Rb, Sr < 100×10^{-12} ; Sm, Nd < 50×10^{-12} 。

称取约 120mg 样品于 Teflon 闷罐中,加入 HF 和 HNO_3 ,在 100°C 电热板上加热一周充分溶解后用离子交换树脂将 Pb 分离出来,同样在 ISOPROBE-T 热电离质谱仪上测试。Pb 的全流程本底小于 50×10^{-12} 。

4 实验测试结果

4.1 锆石 LA-ICP-MS 定年

4.1.1 锆石特征

锆石广泛存在于各类岩石中,富含 U 和 Th,低普通 Pb 以及非常高的矿物稳定性,使得锆石 U-Pb 定年成为同位素年代学研究中最常用和最有效的方法之一(吴元保和郑永飞,2004),但锆石可以形成于岩浆结晶过程、岩浆期后热液活动过程中,并在高温高压变质过程中可以增生,因此对其成因的判断尤其重要。岩浆锆石的判断标准包括:(1)阴极

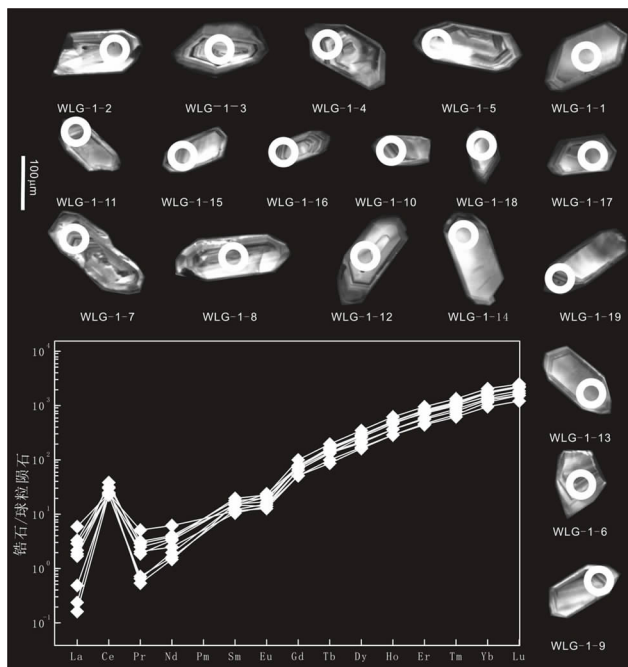


图3 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩枝中锆石的形态、分析点位图及锆石稀土模式图(球粒陨石标准值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) image and chondrite-normalized REE diagrams of zircon from ore-bearing granodiorite porphyry apophysis in Wulaga gold deposit (chondrite REE values after Sun and Mcdonough, 1989)

发光照像 (CL) 显示典型振荡环带结构(简平等,2001);(2) Th/U 比值多为 0.1 ~ 1.0 (Belousova *et al.*, 2002),一般大于 0.5 (Hoskin and Schaltegger, 2003);(3) 岩浆锆石 REE 含量和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 更低, δCe 更高 (Hoskin *et al.*, 2005)。

本次研究的锆石,来自两个样品(图3、图4),但是其特征具有相似性。锆石无色透明,晶型较好,多为长柱状或短柱状,长 100 ~ 200 μm ,长宽比介于 1.5 : 1 ~ 3 : 1。阴极发光下具有清晰均匀的振荡环带,未发现增长边或核幔结构。样品中锆石 Th、U 含量分别为: $55.01 \times 10^{-6} \sim 286.4 \times 10^{-6}$; $206.2 \times 10^{-6} \sim 581.4 \times 10^{-6}$, Th/U 比值均大于 0.1 (0.2 ~ 0.54 之间), Th、U 之间正相关性较好,数据见表 1,同时利用 LA-ICP-MS 测试的锆石稀土数据作图(图3、图4),两个样品表现具有一致性,其 REE 含量较高 ($526 \times 10^{-6} \sim 833 \times 10^{-6}$),富集重稀土,强烈亏损轻稀土,其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值近乎 0,但铈异常明显较高, δCe 值达到 4.33 ~ 156。综合以上特征本次选测的锆石为典型的岩浆锆石,其年龄可以代表其结晶年龄。

4.1.2 锆石年龄

样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据列于表 1。本次测定有效外标 GJ-1 锆石数据共 20 个点,其中样品 WL-G-W-1, 附带标样 6 个,表面年龄 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$: 595.8 ~ 610Ma,加权平

表 1 乌拉嘎金矿花岗岩闪长斑岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 Zircon U-Pb LA-ICPMS data for granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit

测点号	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ
样品 WLG-W-1															
WLG-W-1-1	78.74	251.21	0.31	0.04832	0.00213	0.1119	0.00457	0.0168	0.00039	0.0055	0.0003	107.7	4.18	107.4	2.46
WLG-W-1-2	127.28	412.7	0.31	0.04836	0.00192	0.11157	0.0041	0.01674	0.00037	0.00548	0.00027	107.4	3.74	107	2.34
WLG-W-1-3	104.17	400.19	0.26	0.04845	0.00261	0.11215	0.00555	0.0168	0.00045	0.00559	0.00041	107.9	5.07	107.4	2.87
WLG-W-1-4	113.17	368.54	0.31	0.04845	0.00267	0.10766	0.00544	0.01612	0.00044	0.00496	0.00036	103.8	4.99	103.1	2.8
WLG-W-1-5	157.32	460.84	0.34	0.04803	0.00171	0.10749	0.00353	0.01624	0.00034	0.00513	0.00023	103.7	3.24	103.8	2.18
WLG-W-1-6	285.7	642.25	0.44	0.04779	0.0015	0.10798	0.00314	0.0164	0.00033	0.00531	0.00019	104.1	2.88	104.8	2.08
WLG-W-1-7	166.37	425.99	0.39	0.04823	0.00159	0.10891	0.0033	0.01639	0.00034	0.00502	0.0002	105	3.02	104.8	2.14
WLG-W-1-8	123.73	533.94	0.23	0.04827	0.00143	0.10928	0.00299	0.01643	0.00032	0.0053	0.00025	105.3	2.73	105.1	2.06
WLG-W-1-9	191.91	428.68	0.45	0.0481	0.00276	0.11284	0.00597	0.01703	0.00047	0.00538	0.00033	108.6	5.45	108.8	3
WLG-W-1-10	205.19	505.7	0.41	0.0485	0.00151	0.11404	0.00328	0.01706	0.00034	0.00574	0.00021	109.6	2.99	109.1	2.17
WLG-W-1-11	192.75	408.34	0.47	0.04774	0.00182	0.1079	0.00379	0.0164	0.00036	0.00507	0.00021	104	3.48	104.9	2.27
WLG-W-1-12	109.9	377.6	0.29	0.04813	0.00192	0.11259	0.00414	0.01698	0.00038	0.00625	0.00032	108.3	3.78	108.5	2.41
WLG-W-1-13	123.49	354.7	0.35	0.04789	0.00179	0.11146	0.00383	0.01689	0.00037	0.00541	0.00025	107.3	3.5	108	2.34
WLG-W-1-14	111.36	349.4	0.32	0.04817	0.00188	0.11094	0.00398	0.01671	0.00037	0.0053	0.00027	106.8	3.64	106.9	2.37
WLG-W-1-15	183.24	415.79	0.44	0.04827	0.00434	0.10767	0.00888	0.01618	0.00065	0.00609	0.00055	103.8	8.14	103.5	4.12
WLG-W-1-16	223.83	518.95	0.43	0.04951	0.00443	0.11305	0.00926	0.01657	0.00066	0.00524	0.00052	108.8	8.45	105.9	4.22
WLG-W-1-17	55.01	206.2	0.27	0.04849	0.00328	0.10888	0.00679	0.01629	0.00051	0.0057	0.00051	104.9	6.21	104.2	3.25
WLG-W-1-18	100.21	275.93	0.36	0.04819	0.004	0.10706	0.00817	0.01612	0.0006	0.00511	0.0005	103.3	7.49	103.1	3.79
WLG-W-1-19	67.47	229.82	0.29	0.04809	0.00353	0.10645	0.00716	0.01606	0.00054	0.00623	0.00055	102.7	6.57	102.7	3.46
样品 PTG-1															
PTG-1-1	169.62	450.67	0.38	0.04849	0.00144	0.10974	0.003	0.01643	0.00032	0.00544	0.0002	105.7	2.75	105	2.01
PTG-1-2	130.6	349.96	0.37	0.04771	0.00282	0.11095	0.00604	0.01688	0.00048	0.00542	0.00038	106.8	5.52	107.9	3.02
PTG-1-3	70.96	240.1	0.30	0.04783	0.00365	0.11343	0.00795	0.01721	0.0006	0.00731	0.00064	109.1	7.25	110	3.77
PTG-1-4	230.23	548.05	0.42	0.04856	0.00129	0.11408	0.00281	0.01705	0.00032	0.00534	0.00017	109.7	2.56	109	2.02
PTG-1-5	195.94	462.61	0.42	0.04819	0.00228	0.11594	0.00503	0.01746	0.00043	0.00589	0.0003	111.4	4.58	111.6	2.72
PTG-1-6	255.43	497.4	0.51	0.04832	0.00373	0.11736	0.00831	0.01763	0.00062	0.00624	0.00047	112.7	7.55	112.7	3.94
PTG-1-7	107.96	418.48	0.26	0.04886	0.00393	0.1152	0.0085	0.01711	0.00062	0.00637	0.00068	110.7	7.74	109.4	3.96
PTG-1-8	157.72	482.03	0.33	0.0484	0.00173	0.11219	0.00369	0.01682	0.00035	0.00569	0.00025	108	3.37	107.5	2.22
PTG-1-9	286.36	542.76	0.53	0.04786	0.00131	0.10929	0.00276	0.01658	0.00031	0.00515	0.00015	105.3	2.53	106	1.99
PTG-1-10	101.61	330.68	0.31	0.04805	0.00181	0.11235	0.0039	0.01697	0.00037	0.00573	0.00029	108.1	3.56	108.5	2.34
PTG-1-11	90.08	341.12	0.26	0.0486	0.00367	0.1154	0.008	0.01723	0.0006	0.00543	0.00058	110.9	7.28	110.2	3.77
PTG-1-12	93.15	295.37	0.32	0.04862	0.00179	0.11643	0.00398	0.01738	0.00037	0.00545	0.00026	111.8	3.62	111.1	2.34
PTG-1-13	470.46	553.31	0.85	0.04799	0.00302	0.11032	0.0064	0.01668	0.0005	0.00563	0.00028	106.3	5.85	106.7	3.15
PTG-1-14	90.8	360.21	0.25	0.0482	0.00249	0.11553	0.00548	0.01739	0.00045	0.00611	0.00044	111	4.99	111.2	2.87
PTG-1-15	55.01	221.08	0.25	0.0482	0.00453	0.1134	0.00975	0.01707	0.00071	0.00556	0.00076	109.1	8.89	109.1	4.51
PTG-1-16	119.97	398.83	0.30	0.04806	0.0027	0.11454	0.00591	0.0173	0.00047	0.00587	0.00042	110.1	5.38	110.5	2.99
PTG-1-17	87.85	309.06	0.28	0.04819	0.00174	0.11049	0.00367	0.01664	0.00035	0.006	0.00028	106.4	3.36	106.4	2.22
PTG-1-18	153.11	392.06	0.39	0.0485	0.00179	0.11204	0.00383	0.01677	0.00035	0.00568	0.00024	107.8	3.49	107.2	2.23
PTG-1-19	97.5	295.89	0.33	0.04832	0.00292	0.10992	0.00609	0.01651	0.00048	0.00499	0.0004	105.9	5.58	105.6	3.06

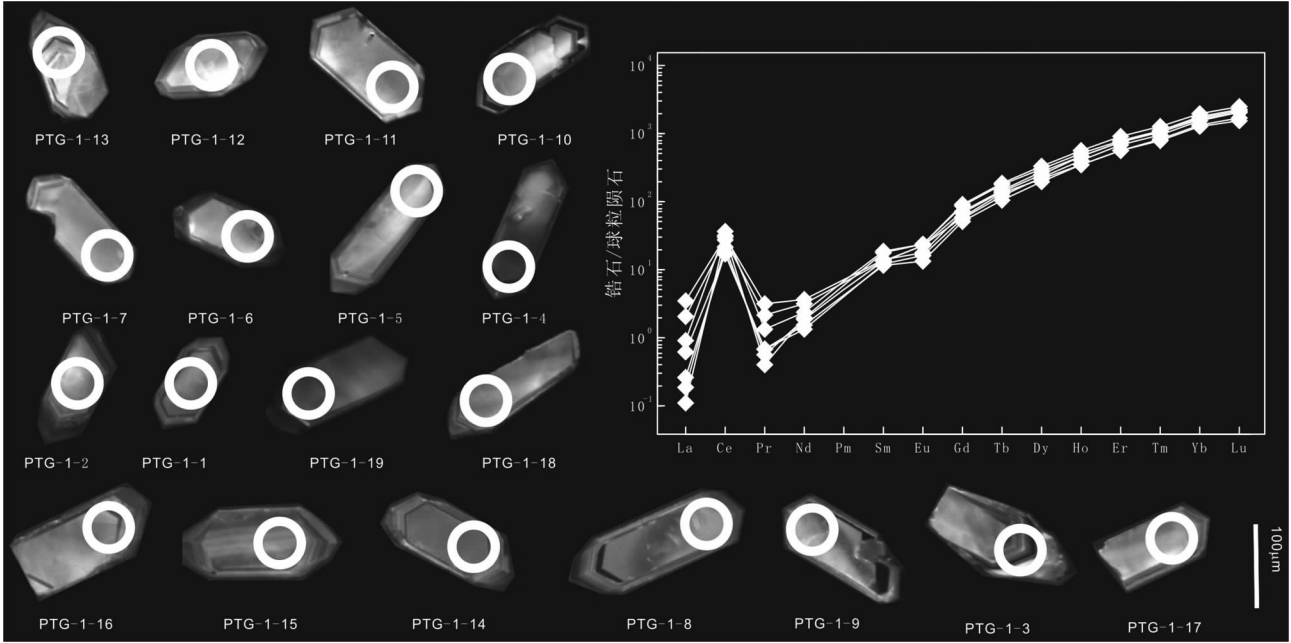


图4 乌拉嘎金矿葡萄沟岗闪长斑岩中锆石的形态、分析点位图及锆石稀土模式图(球粒陨石标准值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig.4 Cathodoluminescence (CL) image and chondrite-normalized REE diagrams of zircon from ore-baring granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit (chondrite REE values after Sun and Mcdonough, 1989)

均值为 603.7Ma; 样品 PTG-1, 附带标样 7 个, 表面年龄 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$: 597.9 ~ 612.4Ma, 加权平均值为 607.6Ma。上述标样年龄值, 均在标准值 $603.12 \pm 2.4\text{Ma}$ (柳小明等, 2007) 的误差 ($\pm 5\%$) 范围内, 本次测量数据真实可靠。

样品 WLG-W-1, 测定了 19 个有效单颗粒锆石, 19 个测点锆石 U-Pb 同位素组成在误差范围内非常谐和, 均落在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $106 \pm 1.1\text{Ma}$ (可信度 95%, $\text{MSWD} = 0.61$) (图 5)。

样品 PTG-1, 测定了 19 个有效单颗粒锆石, 19 个测点锆石 U-Pb 同位素组成在误差范围内非常谐和, 均落在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $108.2 \pm 1.2\text{Ma}$ (可信度 95%, $\text{MSWD} = 0.82$) (图 6)。

4.2 岩石地球化学特征

4.2.1 主量元素特征

本次研究选择了 6 个新鲜样品进行分析, 数据列表见表 2。地球化学特征具有相似性: SiO_2 的含量为 64.34% ~ 65.62%, 属中酸性岩范畴; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.85\% \sim 16.21\%$, A/NCK 为 0.97 ~ 1.16, 多数值落在 1 ~ 1.1 之间, 为偏铝质-弱过铝质花岗岩特征; $\text{Na}_2\text{O} = 3.29\% \sim 3.95\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2.57\% \sim 3.28\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量高, 平均为 6.62%, 富钠 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$), 在 SiO_2 - K_2O 联合图解上, 样品落入高钾钙碱性区域, 与计算的里特曼指数 [$= (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$] 一致, 为钙碱性 ($= 1.85 \sim 2$); 相对富钙 (2.48% ~ 3.12%) 和富镁

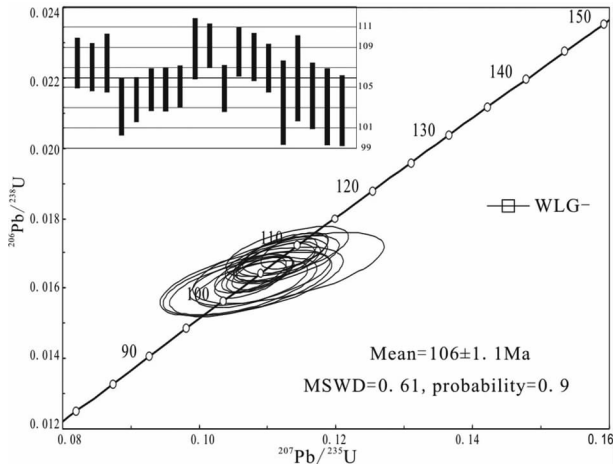


图5 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩岩枝(WLG-W-1)锆石年龄谐和图

Fig.5 Concordia diagram of the ore-bearing granodiorite porphyry apophysis (WLG-W-1) in Wulaga gold district

(1.37% ~ 2.01%), 镁指数较高 [$\text{Mg}^\# = \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + 0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/72) = 0.49 \sim 0.52$]。另外, P_2O_5 含量低且变化小 (0.11% ~ 0.15%), 低 TiO_2 (0.46% ~ 0.76%), 低 FeO^{T} 。岩石主量数据在 TAS 和 R1-R2 投图 (图 7), 结果相似, 位于亚碱性的花岗闪长岩区间, 与镜下岩相学定名具有统一性。

4.2.2 稀土及微量元素特征

乌拉嘎金矿含矿岩体的稀土含量变化不大, 配分模式几

表 2 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩主量元素 (wt%)、稀土元素及微量元素 (×10⁻⁶) 分析结果

Table 2 The analyzed data of major (wt%) , rare earth and trace elements (×10⁻⁶) for ore-bearing granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit

样品号	PTG-2	PTG-3	PTG-4	PTG-5	PTG-6	PTG-7	样品号	PTG-2	PTG-3	PTG-4	PTG-5	PTG-6	PTG-7
SiO ₂	64.39	65.34	65.6	65.35	65.34	65.62	Cs	5.97	5.93	7.82	7.89	4.56	6.2
Al ₂ O ₃	15.82	16.21	13.85	14.01	15.51	14.16	Ba	290	369	601	578	504	504
Fe ₂ O ₃	2.83	2.74	3.83	3.69	2.69	3.53	La	17.7	18	30.8	29.6	17.1	28.7
FeO	2.3	2.1	2.55	2.6	1.45	2.4	Ce	34.6	34.9	56.9	54.1	33.4	52.2
MgO	1.47	1.37	2.01	1.94	1.44	1.68	Pr	3.77	3.8	6.07	5.81	3.66	5.71
CaO	3.12	2.48	2.63	2.95	2.65	2.7	Nd	15.7	15.3	23.6	22.5	14.4	21.8
Na ₂ O	3.95	3.94	3.5	3.45	3.87	3.29	Sm	2.9	2.7	4.24	4.06	2.75	3.79
K ₂ O	2.57	2.71	3.28	3.22	2.67	3.28	Eu	0.787	0.828	1.18	1.05	0.868	1.06
MnO	0.06	0.05	0.065	0.061	0.049	0.074	Gd	2.52	2.53	3.58	3.79	2.34	3.62
TiO ₂	0.47	0.48	0.75	0.73	0.46	0.76	Tb	0.405	0.359	0.626	0.647	0.341	0.625
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.15	0.15	0.11	0.15	Dy	1.9	1.81	3.04	3.11	1.83	3.19
烧失量	4.8	4.25	3.83	4	4.81	4.22	Ho	0.287	0.305	0.549	0.548	0.277	0.53
总量	99.59	99.69	99.50	99.55	99.60	99.46	Er	0.857	0.877	1.68	1.64	0.861	1.55
Li	26	28.1	51.8	51.6	26.1	42.8	Tm	0.128	0.099	0.248	0.249	0.121	0.265
Be	1.86	1.9	2.93	2.7	1.76	2.68	Yb	0.767	0.772	1.53	1.61	0.741	1.5
Sc	5.72	5.5	7.87	7.41	5.35	7.69	Lu	0.102	0.098	0.225	0.208	0.11	0.217
V	90.1	57.4	92.5	101	64.9	78.9	Ta	0.592	0.584	1.92	1.82	0.503	1.72
Cr	34.8	32.7	53.9	55.7	33.2	52.4	W	0.636	0.553	1.26	1.19	0.511	1.18
Co	8.43	9.03	12.5	12.4	7.43	10.4	Tl	0.509	0.564	0.86	0.786	0.548	0.748
Ni	17.7	19.8	25.3	24	22.3	19.1	Pb	20	19	22	18.9	20.5	18.8
Cu	17.2	18.5	18.7	18.8	18.4	19	Bi	0.085	0.085	0.049	0.049	0.56	0.079
Zn	45.3	63.5	63	58.6	136	52.8	Th	5.2	5.24	11.3	11.2	4.93	10.2
Ga	18.6	19	19.4	19.3	17.7	17.9	U	1.81	2.02	4.36	3.36	1.65	3.76
Rb	83.4	85.9	134	129	76.6	120	Zr	56.8	57.5	99.7	99.9	55.1	116
Sr	278	284	307	319	323	281	Hf	1.82	1.72	2.77	3.15	1.76	3.39
Y	9.77	9.43	16.8	17.4	9.04	16.8	ΣREE	82.42	82.38	134.3	128.9	78.80	124.8
Nb	6.97	7.24	18.9	18.3	6.77	17	LREE	75.46	75.53	122.8	117.1	72.18	113.3
Mo	0.753	0.47	0.972	1.02	0.324	0.993	HREE	6.97	6.85	11.48	11.80	6.62	11.50
Cd	0.051	0.072	0.135	0.057	0.043	0.059	LREE/HREE	10.83	11.03	10.70	9.92	10.90	9.85
In	0.027	0.031	0.043	0.034	0.031	0.035	(La/Yb) _N	16.55	16.72	14.44	13.19	16.55	13.72
Sb	1.93	2.07	0.644	0.556	1.45	0.747	δEu	0.89	0.97	0.93	0.82	1.05	0.87

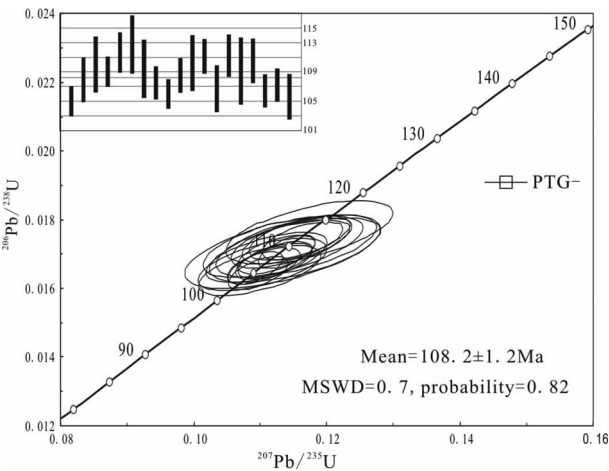


图 6 葡萄沟花岗闪长斑岩 (PTG-1) 锆石年龄谐和图

Fig.6 Concordia diagram of granodiorite porphyry (PTG-1) in the Putaogou area of the Wulaga gold district

乎平行(表 2、图 8)。岩体的稀土含量整体较低,变化为 78.8 × 10⁻⁶ ~ 134.3 × 10⁻⁶,但样品的稀土配分模式相似的表现 为轻稀土富集(ΣLREE = 72.18 × 10⁻⁶ ~ 122.8 × 10⁻⁶),重 稀土亏损(ΣHREE = 6.62 × 10⁻⁶ ~ 11.8 × 10⁻⁶)的右倾模 式,轻重稀土分馏明显((La/Yb)_N = 13.19 ~ 16.72),无明显 铕异常(δEu = 0.82 ~ 1.05),暗示源区可能有石榴石或角闪 石矿物残留。微量元素(图 8)组成上,亏损 Nb、Ta、P、Zr、Hf 和 Ti 等高场强元素,富集 Rb、K 和 Sr 等大离子亲石元素,强 烈富集 U 和 Pb,弱亏损 Th,高 Sr 含量(278 × 10⁻⁶ ~ 323 × 10⁻⁶),低 Y 含量(9.04 × 10⁻⁶ ~ 17.4 × 10⁻⁶),中等 Sr/Y 比 值(16.73 ~ 35.73,均值 24.61);Rb/Sr 比值(0.24 ~ 0.44)变 化不大;稀土配分模式和微量元素蛛网图综合分析,具有活 动陆缘弧花岗岩特点。

4.2.3 Sr-Nd-Pb 同位素特征

本次研究中乌拉嘎金矿成矿母岩-葡萄沟岩体(编号 PTG)的花岗闪长斑岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成见表 3、表 4 和

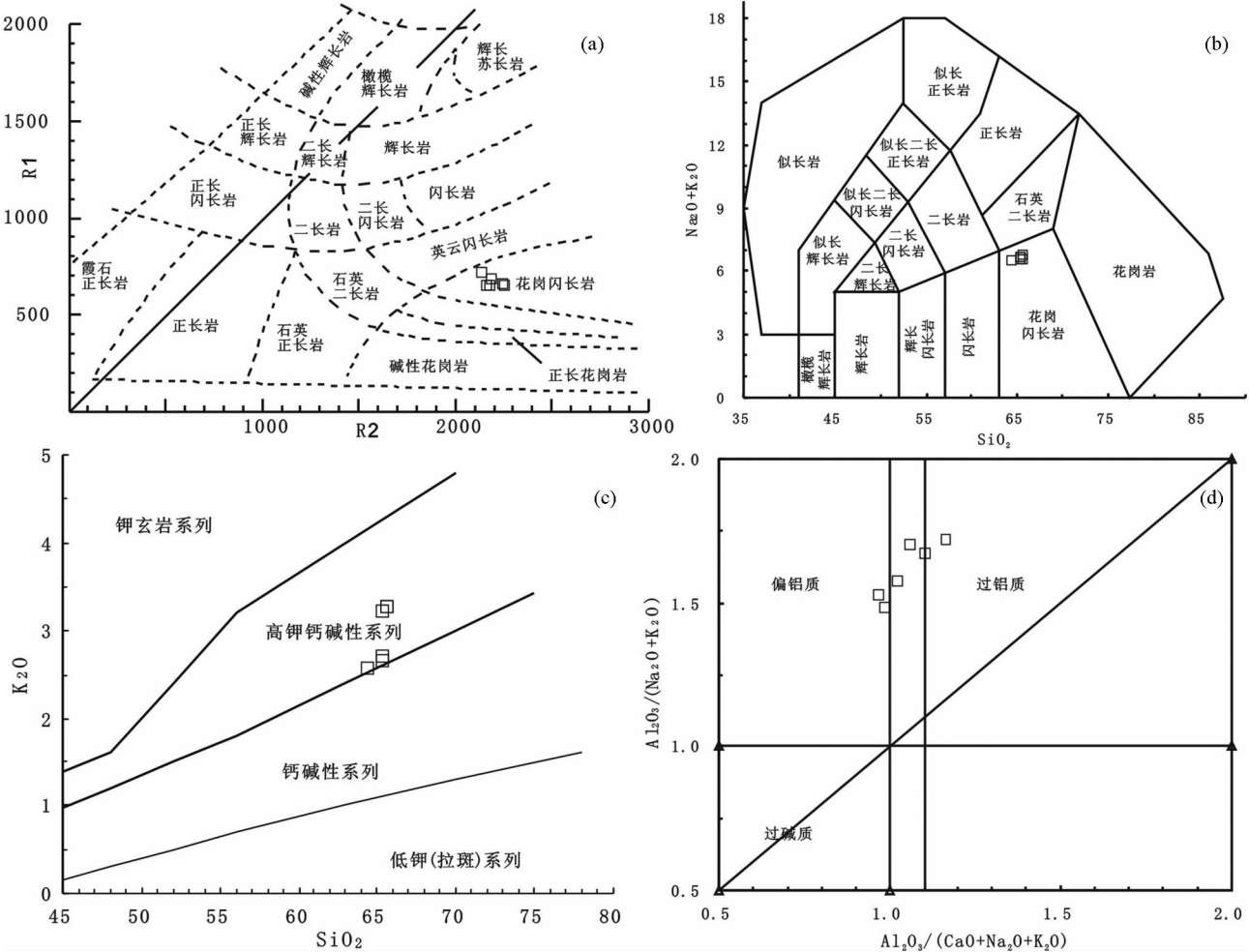


图7 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩主量元素特征 (a)-R1-R2图解;(b)-TAS图解(底图据 Middlemost, 1985);(c)-硅钾图(底图据 Rickwood, 1989);(d)-铝饱和指数图(底图据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig.7 Characteristics of major elements of granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit (a)-R1-R2 diagram; (b)-TAS diagram (after Middlemost, 1985); (c)-SiO₂-K₂O diagrams (after Rickwood, 1989); (d)-discriminant diagram of A/NK-A/CNK (after Maniar and Piccoli, 1989)

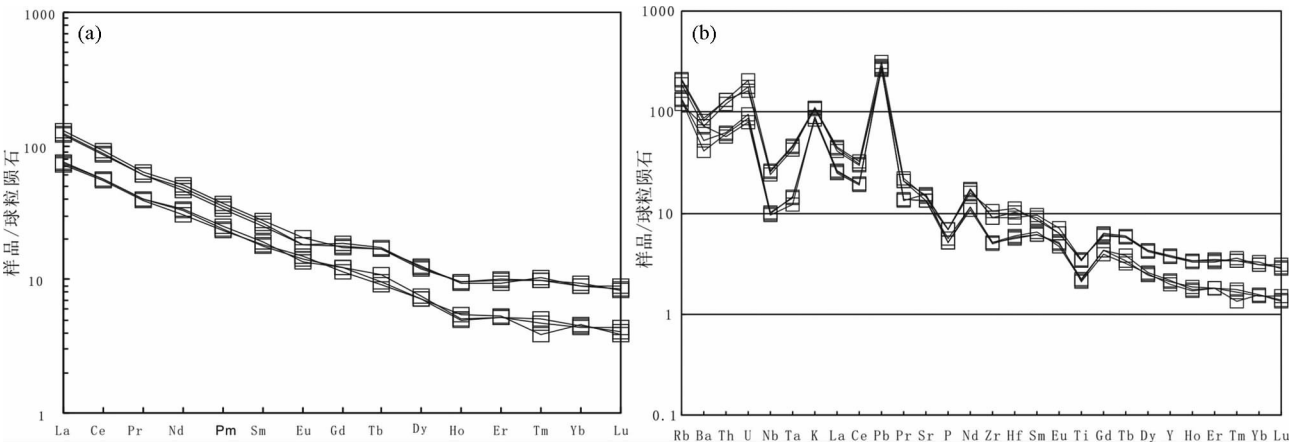


图8 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩稀土元素配分曲线(a)及微量元素蛛网图(b) (标准化值来自 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig.8 Chondrite-normalized REE (a) and chondrite-normalized trace element spider diagrams (b) of ore-barren granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit (normalization values after Sun and Mcdonough, 1989)

表3 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩 Sr-Nd 同位素分析结果及主要参数
Table 3 The Sr-Nd isotopic determination data and some major parameters for ore-bearing granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit

样品号	Age (Ma)	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}}$	$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}$	$\pm 2\sigma$	$\left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_i$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{{}^{147}\text{Sm}}{{}^{144}\text{Nd}}$	$\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}}$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
PTG-2	108	83.4	278	0.866365	0.706539	0.00001	0.705209	2.9	15.7	0.112384	0.5126128	0.000007	0.7	852.1	-0.43
PTG-3		85.9	284	0.873488	0.706597	0.00012	0.705256	2.7	15.3	0.107368	0.512588	0.000008	0.3	885.9	-0.45
PTG-4		134	307	1.260640	0.707591	0.00009	0.705656	4.24	23.6	0.109310	0.5126107	0.000008	0.7	852.0	-0.44
PTG-5		129	319	1.167993	0.707971	0.00013	0.706178	4.06	22.5	0.109786	0.5125951	0.000009	0.4	877.3	-0.44
PTG-6		76.6	323	0.684879	0.706725	0.00014	0.705674	2.75	14.4	0.116191	0.512587	0.000007	0.1	897.4	-0.41
PTG-7		120	281	1.233369	0.707434	0.00013	0.705541	3.79	21.8	0.105777	0.5126294	0.000007	1.1	818.3	-0.46

注：球粒陨石均一库 (CHUR) (${}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr} = 0.0847$, ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} = 0.7045$, $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$, ${}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd} = 0.1967$, ${}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd} = 0.512638$, ${}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd}(\text{DM}) = 0.2137$, ${}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}(\text{DM}) = 0.513151$, $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ year}^{-1}$ (Lugmair and Hart, 1978))

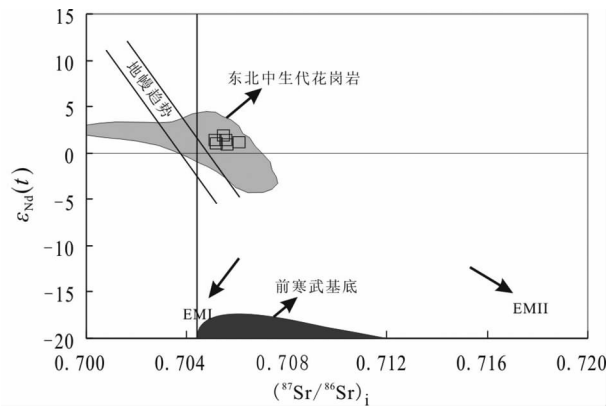


图9 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_i$ 图解 (据 Wu *et al.* ,2000)
Fig.9 The $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_i$ diagram of the granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit (after Wu *et al.* , 2000)

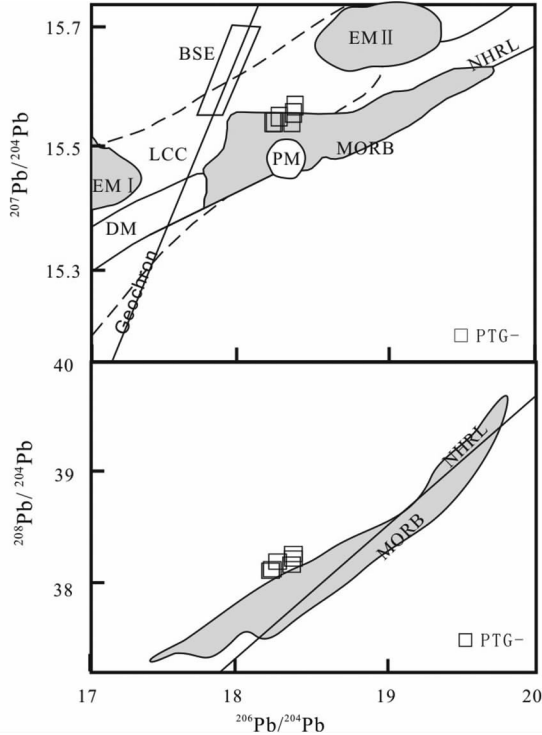


图10 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩初始 ${}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ - ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ 和 ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ - ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ 图解 (据 Zindler and Hart, 1986)
Fig. 10 The ${}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ - ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ and ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ - ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ diagrams of granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit (after Zindler and Hart, 1986)

图9、图10。基于先前的同位素年龄数据,取108Ma的平均年龄代表乌拉嘎岩体的侵位时代,并据此对有关参数进行计算。在计算Nd模式年龄时,采用两阶段模式。所采用的参数见表3,计算公式引自Li and McCulloch(1996)以及沈渭洲

表4 乌拉嘎金矿含矿花岗闪长斑岩 Pb 同位素分析结果及主要参数

Table 4 The Pb isotopic determination data and some major parameters for ore-bearing granodiorite porphyry in Wulaga gold deposit

样品号	Age (Ma)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	2SE (M) %	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	2SE (M) %	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	2SE (M) %	$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$	$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$	$\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$
PTG-2	108	18.343	0.002	15.515	0.002	38.182	0.005	18.232	15.510	38.080
PTG-3		18.373	0.002	15.517	0.002	38.196	0.004	18.243	15.511	38.088
PTG-4		18.625	0.002	15.538	0.002	38.402	0.005	18.381	15.526	38.200
PTG-5		18.587	0.002	15.522	0.002	38.377	0.004	18.368	15.511	38.144
PTG-6		18.381	0.002	15.525	0.001	38.259	0.004	18.282	15.520	38.165
PTG-7		18.634	0.002	15.549	0.002	38.468	0.004	18.387	15.537	38.254

等(1999)。

其($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i变化不大,介于0.705209~0.706178,平均值为0.705586; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值较高(介于0.512505~0.512533),平均为0.512526, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 绝对值较小,为0.1~1.1,该值远高于华北克拉通古老下地壳的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-44~-32;Jahn *et al.*, 1999),与兴蒙造山带显生宙花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-2.22~7.11,平均值为+2.0;吴福元等,1999;洪大卫等,2000,2003)一致。亏损地幔模式年龄 t_{DM2} 较为年轻,其值介于800~897Ma之间。研究区花岗岩的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 均为负值,数据比较集中(介于-0.46~-0.41),表明源区的稀土元素Sm、Nd分馏不明显,因此运用上述测试数据计算的钕二阶段同位素模式年龄是可靠的。

本次测试选择花岗岩具有较高的放射性成因铅组成和较低的非放射性成因铅 ^{204}Pb 。 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=18.232\sim18.387$,平均为18.315; $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.51\sim15.537$,平均值为15.519; $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=38.08\sim38.254$,平均值为38.155。由铅同位素比值计算出的 μ 值介于9.3~9.34之间,低于 $\mu=9.74$ 的陆壳演化线。上述Pb同位素组成和大兴安岭构造同位素地球化学省Pb同位素特征(张理刚,1995)相似。

综上所述,乌拉嘎金矿岩体具有低铽初始值,较高的钕初始值, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 略高于0,钕同位素亏损地幔二阶段模式年龄较年轻,岩石富集放射性铅组分,而非放射性成因铅 ^{204}Pb 含量较低,总体特征显示兴蒙造山带显生宙花岗岩特点。

5 讨论

5.1 成岩时代

乌拉嘎金矿矿体赋存于燕山晚期的花岗闪长斑岩与中元古界黑龙江群下亚群接触带附近的近东西向展布的隐爆角砾岩中,金矿化主要受隐爆角砾岩带控制。成矿与矿区内花岗闪长斑岩有密切的联系,斑岩年龄的确定是对成矿时代有效的制约。前人曾对此进行了各种方法的定年尝试:斑岩锆石同位素年龄为105Ma、114Ma(江雄新,1986);全岩K/Ar同位素年龄为100Ma、102Ma、112.6Ma(吴尚全,1995);锆石LA-ICP-MS同位素年龄109Ma(聂喜涛,2010),基本确定岩

体为早白垩世岩浆浅成侵入产物。但是受限于当时的定年方法和测试精度,使得斑岩年龄波动较大(100~114Ma)。

本次研究对矿区出露的两个岩体(WLG-W-1;PTG-1)分别采样,选择锆石进行系统定年,通过精确的LA-ICP-MS定年方法,得到准确的年龄分别为(106±1.1)和(108.2±1.2)Ma,其中含矿岩体(WLG-W-1)略晚于矿区北部的无矿岩体(PTG-1),与聂喜涛(2010)所获得的年龄几乎一致。由此验证了乌拉嘎含矿岩体为葡萄沟岩体在南部的舌状分支,且推断含矿岩体为岩浆演化晚期产物,可能富集更多的气液成分,为成矿提供了必要条件。

前人对区内存在的白垩纪宁远村组火山岩研究成果显示,其成岩时代区间为100~118Ma(全岩K-Ar同位素年龄),而聂喜涛(2010)通过对宁远村组英安质岩屑晶屑熔结凝灰岩进行了单颗粒锆石年代学研究,获得单颗粒锆石的年龄在102~121Ma,其加权平均值为113.3±1.2Ma,为早白垩世晚期火山作用产物。而区内花岗闪长斑岩年龄为106~108Ma,比火山岩稍晚,基本为一期火山-岩浆作用产物,结合前人(孙凤兴等,1996;魏仪方和刘春华,1996)研究,乌拉嘎金矿显示的亲岩浆特征,推断成矿时代为早白垩世晚期。

黑龙江省内分布大量同期的早白垩世火山-次火山岩,且伴生一定量的浅成低温热液金矿,例如产于光华组的东安金矿,其成岩和成矿年龄分别为:112Ma和108Ma(敖贵武等,2004);产于甘河组(美丰组)的高松山金矿(刘桂阁等,2006;边红业等,2009;尹西君等,2010)等。早白垩世火山岩中浅成低温热液金矿的发育,尤其突显早白垩世火山-侵入作用的重要,本次研究的岩体正可作为其中典型代表,深入探讨其背景,有助于加深区域矿床的研究和勘查。

5.2 成因类型

花岗岩的分类历来都是学者关注和研究的热点,当下最常用的花岗岩成因分类方案是MISA(即M、I、S和A型)(吴福元等,2007)。A型和M型具有典型成因特征,本次研究涉及的岩体明显不符,所以在此仅做I型和S型探讨即可。Chappell and White(2001)在I型和S型花岗岩分类提出25周年之际,再次总结了两类花岗岩的分类特征:相比而言,前者具有富钠、富钙、富暗色矿物(角闪石等),且铝饱和指数低(A/NCK<1.1),少过铝质矿物等。

通过对乌拉嘎金矿有关的花岗闪长斑岩的地球化学特征研究发现,该岩体为中酸性($\text{SiO}_2 = 64.34\% \sim 65.62\%$),钙碱性岩石系列($\sigma = 1.85 \sim 2$),全碱含量较高($6.52\% \sim 7.31\%$);富钠($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$),相对富钙($2.48\% \sim 3.12\%$)和富镁($1.37\% \sim 2.01\%$),镁指数略高($\text{Mg}^\# = 0.49 \sim 0.52$),但 P_2O_5 含量低且变化小($0.11\% \sim 0.15\%$),铝饱和指数(A/NCK)不高,为 $0.97 \sim 1.16$,多数值落在 $1 \sim 1.1$ 之间,为偏铝质-弱过铝质花岗岩特征。以上地球化学特征均显示其为典型的 I 型花岗岩。

同期含矿的火山岩(宁远村组、光华组和甘河组)以中酸性安山-流纹岩为主,杂生基性火山岩(尹西君等,2010),地球化学研究显示多为偏铝-弱过铝质的钙碱性火山岩。稀土元素分析,配分曲线与乌拉嘎花岗闪长斑岩相似,均呈重稀土富集,轻稀土亏损的右倾模式,其中宁远村组和甘河组安山质火山岩没有明显的铕异常,而光华组与矿有关的潜流文岩具有明显铕异常(于建波,2006),铕异常的差别可能源于样品的不同,潜流纹岩形成于火山活动晚期,源区残留斜长石的缘故。黑龙江省白垩世火山岩地球化学性质总体类似活动大陆活动边缘火山岩,众所周知,此类火山岩石环太平洋浅成低温热液金矿的重要赋矿围岩(Mitchell and Garson, 1981; White and Hedenquist, 1990)。

5.3 岩浆源区

前文讨论认为本次研究的花岗闪长斑岩为高钾钙碱性 I 型花岗岩,且轻重稀土明显分馏,亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti、P),富集大离子亲石元素(Rb、Th、U 和 Pb)和微弱的 Eu 异常,其源岩应为壳源火成岩。但其 $\text{Mg}^\#$ 值(均值为 0.51)略高于壳源中酸性岩石的最高值(约 0.5),推断其可能为下地壳底部部分熔融,或有部分地幔物质的加入。同时花岗闪长斑岩具有较低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i($0.705209 \sim 0.706178$)和弱富集的 Nd 同位素组成[$\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 0.1 \sim 1.1$],在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i图解(图9)中,样品点均位于亏损地幔和 EMI 型富集地幔之间,处于兴蒙造山带显生宙花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值区间内,明显高于世界典型壳源花岗岩(洪大卫等,2000),Wu *et al.* (2000)认为 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$ 的花岗质岩浆源自年轻的新生的镁铁质下地壳。初始 Pb-Pb 同位素组成图解(图10)上,花岗闪长斑岩样品点投在 MORB 与下地壳区域交界处。一般认为由地幔部分熔融直接形成中酸性岩浆的可能性极小(Green, 1980; Martin, 1999),因此乌拉嘎金矿赋矿围岩的源区物质应该是新生的镁铁质地壳的部分熔融,这种镁铁质下地壳可能是早期幔源岩浆底侵作用的产物,结合其具有相近且年轻的亏损地幔 Nd 模式年龄($t_{\text{DM2}} = 800 \sim 897\text{Ma}$),推测这种年轻的地壳主要形成于新元古代之初。

5.4 成矿岩浆背景

晚中生代,中国东部受控于太平洋俯冲作用,并发生了由东西向转变为北东向-北北东向构造体制的转折。至早白

垩世,中国东部处在伸展应力状态下,产生了一些列的 NE-NNE 向的断层和左旋拉伸盆地,乌拉嘎断陷盆地就是其中之一。在西太平洋板块的俯冲作用下,牡丹江-乌拉嘎等断裂复活,诱发了大规模具有活动陆缘性质的陆相火山岩(宁远组、光华组和甘河组等)喷发和岩浆侵入(Wu *et al.*, 2005)同时伴生了一批浅成低温热液型金矿(乌拉嘎金矿、东安金矿和高松山金矿等)。

本次研究的乌拉嘎金矿赋矿花岗闪长斑岩,其地球化学特征和 Sr-Nd-Pb 同位素显示,其来源可能为晚元古代新生的镁铁质下地壳,其形成多有幔源岩浆的贡献。Taylor *et al.* (1985)统计大陆地壳中金丰度时发现,下部大陆地壳金丰度(3.4×10^{-9})明显高于上部地壳(1.8×10^{-9})。而近年来胶东金矿研究显示,地幔作用在成矿过程中提供了部分成矿物质(毛景文等,2002,2005;刘建明等,2003),侯增谦(2004)认为初生的埃达克质熔体与地幔橄榄岩/幔源熔体的相互作用,可能是埃达克质熔体获取金属和硫的重要途径。由此推断与地幔作用具有紧密关系的下地壳可能是潜在的矿源层,而乌拉嘎、东安金矿和高松山金矿赋矿火山-次火山岩金的高含量(魏仪方和刘春华,1996;郭继海等,2004),也侧面验证了这一推断。

从成因学角度来说,热液型矿床的定义为成矿物质被成矿热液搬运到适当的空间富集成具有经济价值的地质体。矿床的形成条件:充足的矿源层提供成矿物质,强烈的岩浆活动提供热源和热液,复杂且强烈的构造活动提供运移通道。而早白垩世伸展体制下,黑龙江构造活动强烈,起源于新生下地壳重融的岩浆活动频繁,结合已有的矿床资料显示,区内具有巨大的成矿潜力。

6 结论

(1) 锆石 LA-ICP-MS 定年获得乌拉嘎矿区葡萄沟岩体(PTG)及其南部含矿分枝(WLG)的成岩年龄分别为 $108.2 \pm 1.2\text{Ma}$ 和 $106 \pm 1.1\text{Ma}$,与区内宁远村组火山岩成岩时间基本相近,推断金矿成矿时代为早白垩世晚期,与东安金矿和高松山金矿为同期。

(2) 地球化学研究表明赋矿花岗闪长斑岩为高钾钙碱性、偏铝质 I 型花岗岩,其微量元素和 Sr-Nd-Pb 研究显示其具有活动陆缘弧岩浆特点,推断岩浆源区和成矿物质具有来源于新元古代形成的镁铁质下地壳的部分熔融的属性。

(3) 早白垩世时,中国东部处于北西向伸展应力体制下,黑龙江构造活动强烈,起源于新生下地壳(潜在矿源层)重熔的岩浆活动频繁,具有巨大的浅成热液金矿床成矿潜力。

致谢 感谢黑龙江省乌拉嘎金矿公司有关领导和技术人员为野外工作提供的帮助;锆石 U-Pb 定年得到了中国科学院地质与地球物理研究所杨岳衡老师的帮助;地球化学(主量、微量、Sr-Nd-Pb)测试得到了北京核工业第三研究院刘牧

老师的帮助;论文写作过程中与曾庆栋老师、褚少雄、孙燕等进行了有益的交流;论文修改过程中,匿名审稿专家和编辑部俞良军老师提供了宝贵的建设性意见,使作者收益匪浅;在此一并表示衷心的感谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79
- Ao GW, Liu ZM, Xue MX, Pei ZX, Wang CS, Chen HM and Jiang YJ. 2004. Metallogenic mechanism of the Dong'an gold deposit in Heilongjiang. *Gold Geology*, 10(1): 15–19 (in Chinese with English abstract)
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NL. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622
- Bian HY, Chen M, Liu HL and Zhao CR. 2009. Geology and genesis of the Gaosongshan gold deposit in Xunke County, Heilongjiang Province. *Geology and Resources*, 18(2): 91–95 (in Chinese with English abstract)
- Chappell BW and White AJR. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 489–499
- Giggenbach WF. 1986. The use of gas chemistry in delineating the origin of fluids discharged over the Taupo volcanic zone: A review. *International Volcanological Congress, New Zealand. Proc. Symposium*, 5: 47–50
- Green TH. 1980. Island arc and continent-building magmatism: A review of petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63: 367–385
- Gu L, Zheng Y, Tang X, Zaw K, Delle-Pasque F, Wu C, Tian Z, Lu J, Ni P, Li X, Yang F and Wang X. 2007. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, NE China. *Ore Geology Review*, 30: 1–29
- Guo JH, Wang CS and Shi YJ. 2004. Geological and geochemical features of the Dongan gold deposit in Heilongjiang. *Geology and Prospecting*, 40(4): 37–41 (in Chinese with English abstract)
- Hedenquist JW and Houghton BF. 1987. Epithermal gold mineralization and its volcanic environments. *Earth Resources Foundation, the University of Sydney*, 422–423
- Hong DW, Wang SG, Xie XL and Zhang JS. 2000. Genesis of positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ granitoids in the Da Hinggan Mountains-Mongolia orogenic belt and growth of continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441–456 (in Chinese with English abstract)
- Hong DW, Wang SG, Xie XL, Zhang JS and Wang T. 2003. Correlation between continental growth and the supercontinental cycle: Evidence from the granites with positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ in the Central Asian orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 203–209 (in Chinese with English abstract)
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62
- Hoskin PWO. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637–648
- Hou ZQ. 2004. Porphyry Cu-Mo-Au deposit: Some new insights and advances. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 131–144 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusion of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157: 119–146
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000a. Granitoids of central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91: 181–193
- Jahn BM, Griffin WL and Windley R. 2000b. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328: 7–10
- Jian P, Cheng YQ and Liu DY. 2001. Petrographical study of metamorphic zircon: Basic roles in interpretation of U-Pb age of high grade metamorphic rocks. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 183–191 (in Chinese with English abstract)
- Jiang XX. 1986. The main geological characteristics and mineralization of Tuanjieou gold deposits. In: *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources (ed.). Collection of Gold Geological Research*. Beijing: Geological Publishing House, 71–83 (in Chinese)
- Lai YD. 2008. Study on geological characteristics and enrichment regularities of gold mineralization in Wulaga gold deposit, Heilongjiang Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 35–59 (in Chinese with English summary)
- Li JY. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas. *Geological Review*, 44(4): 339–347 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 207–224
- Li XH and McCulloch MT. 1996. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China. *Precambrian Research*, 76: 67–76
- Liu GG, Wang ED, Chang CJ, Jin BY and Yu WQ. 2006. Discussion on metallogeny of Gaosongshan gold deposit, Xunke County, Heilongjiang Province. *Non-ferrous Mining and Metallurgy*, 22(4): 1–4 (in Chinese with English abstract)
- Liu JM, Ye J, Xu JH, Sun JG and Shen K. 2003. C-O and Sr-Nd isotopic geochemistry of carbonate minerals from gold deposits in East Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 775–785 (in Chinese with English abstract)
- Liu XM, Gao S, Diwu CR, Yuan HL and Hu ZC. 2007. Simultaneous in-Situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 μm spot size. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 1257–1264
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00, a geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronological Center Special Publication*, 4: 25–32
- Lugmair GW and Harti K. 1978. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 39: 349–357
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643
- Mao JW, He Y and Ding TP. 2002. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong (East Shandong) gold district: Evidence of C, O and H isotopes. *Mineral Deposits*, 21(2): 121–128 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Li HM, Wang YT, Zhang CQ and Wang RT. 2005. The relationship between mantle-derived fluid and gold ore-formation in the eastern Shandong Peninsula: Evidences from D-O-C-S isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 839–857 (in Chinese with English abstract)
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- Middlemost EAK. 1985. *Magmas and Magmatic rocks*. Essex: Longman Group Ltd
- Mitchell AHG and Garson MS. 1981. *Mineral Deposits and Global*

- Tectonic Settings. Academic Press, London, 405–406
- Nei S. 1991. Paleoclimatic and paleomagnetic constraints on the Paleozoic reconstructions of South China, North China and Tarim. *Tectonophysics*, 196: 279–308
- Nie XT. 2010. Study on metallogenic geological background and metallogenic model in Tuanjieou gold deposit, Heilongjiang Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 34–50 (in Chinese with English summary)
- Norrish K and Hutton JT. 1969. An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33(4): 431–453
- Qi L, Hu J and Conrad GD. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507–513
- Qu GS. 2008. Petrology and Formation of Heilongjiang. Wuhan: Chinese Geology University Press, 1–300 (in Chinese)
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of minor elements. *Lithos*, 22: 247–263
- Shen WZ, Ling HF, Li WX, Huang XL and Wang DZ. 1999. Study on the Nd-Sr isotopic composition of granitoids in SE China. *Geological Journal of China Universities*, 5(1): 22–25 (in Chinese with English abstract)
- Şengör AMC and Natal'in BA. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. In: Yin A and Harrison M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 486–640
- Sillitoe RH and Bonham HF. 1984. Volcanic landforms and ore deposits. *Econ. Geol.*, 79: 1286–1298
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Sampling dating and discussion of the zircon SHRIMP. *Geological Review*, 48 (Suppl.): 26–30 (in Chinese with English abstract)
- Sun FX, Wu GX and Yang P. 1996. Geological features and metallogenetic model from Tuanjieou gold deposit, Heilongjiang Province, China. *Jilin Geology*, 15(2): 52–60 (in Chinese with English abstract)
- Sun FY, Wang L, Huo L and Wang KY. 2008. Fluid inclusion study on Wulaga gold deposit in Heilongjiang Province and implications for ore genesis. *Geology in China*, 35(6): 1267–1273 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Oceanic Basalts*. Geological Society Special Publication, 313–345
- Tang KD, Wang Y, He GQ and Shao JA. 1995. Continental-margin structure of Northeast China and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 69(1): 16–28 (in Chinese with English abstract)
- Wei YF and Liu CH. 1996. The geological and geochemical model of Tuanjieou gold deposit. *Gold*, 2: 3–11
- White NC and Hedenquist JW. 1990. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. In: Hedenquist JW, White NC and Siddleley G (eds.). *Epithermal Gold Mineralization of the Circum-Pacific: Geology, Geochemistry, Origin and Exploration*, I. J. Geochem. Explor., 36: 445–468
- Wu FY, Jahn BM and Lin Q. 1997. Isotopic characteristics of the postorogenic granites in orogenic belt of northern China and their implications in crustal growth. *Chinese Science Bulletin*, 43(5): 420–424
- Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181–189 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89–113
- Wu FY, Yang JH, Lo CH, Wilde SA, Sun DY and John BM. 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China. *Island Arc*, 16: 156–172
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu SQ. 1995. Geology of Tuanjieou Porphyry Gold Deposit in Heilongjiang. Beijing: Seismological Press, 5–44 (in Chinese)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Xie HQ, Zhang FQ, Miao LC, Chen FK and Liu DY. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the amphibolite from “Heilongjiang Group” and the granite in Mudanjiang area, NE China, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1237–1250 (in Chinese with English abstract)
- Xie LW, Zhang YB, Zhang HH, Sun JF and Wu FY. 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. *Chinese Science Bulletin*, 53(10): 1565–1573
- Yin XJ, Lian YL and Pan C. 2010. Rock geochemical characteristics of Gaosongshan gold district of Xunke, Heilongjiang Province. *Gold*, 31(10): 22–26 (in Chinese with English abstract)
- Yu JB, Su RK and Liu ZM. 2005. Ore-controlled facer and ore-forming material originate of the Donggan gold deposit, Heilongjiang Province. *Gold Science and Technology*, 13(6): 8–11 (in Chinese with English abstract)
- Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Jia CS, Yu CM, Ye J and Liu HT. 2009. Geology and lead-isotope study of the Baiyinnuoer Zn-Pb-Ag deposit, south segment of the Da Hinggan Mountains, Northeastern China. *Resource Geology*, 59(2): 170–180
- Zeng QD, Liu JM, Yu CM, Ye J and Liu HT. 2011a. Metal Deposits in the Da Hinggan Mountains, NE China: Styles, characteristics, and exploration potential. *International Geology Review*, 53: 846–878
- Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Chen WJ and Zhang WQ. 2011b. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenic belt in eastern Inner Mongolia, China. *International Journal of Earth Sciences*, 100: 1791–1809
- Zhang LG. 1995. Block-Geology of Eastern Asia Lithosphere: Isotope Geochemistry and Dynamics of Upper Mantle, Basement and Granite. Beijing: Science Press, 153–173 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Plant. Sci.*, 14: 493–571

附中文参考文献

- 敖贵武, 刘志明, 薛明轩, 裴志霞, 汪长生, 陈海明, 姜迎久. 2004. 黑龙江东安金矿床成矿机理. *黄金地质*, 10(1): 15–19
- 边红业, 陈满, 刘洪利, 赵春荣. 2009. 黑龙江省逊克县高松山金矿床地质特征及成因分析. *地质与资源*, 18(2): 91–95
- 郭继海, 汪长生, 石耀军. 2004. 黑龙江东安金矿地质及地球化学特征. *地质与勘探*, 40(4): 37–41
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7(2): 441–456
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 张季生, 王涛. 2003. 从中亚正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系. *地质学报*, 77(2): 203–207
- 侯增谦. 2004. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床: 新认识与新进展. *地学前缘*, 11(1): 131–144

- 简平, 程裕洪, 刘敦一. 2001. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据. 地学前缘, 8(3): 183–191
- 江雄新. 1986. 团结沟金矿床主要地质特征及其成矿作用. 见: 沈阳地质矿产研究所编. 金矿地质论文集. 北京: 地质出版社, 71–83
- 来又东. 2008. 黑龙江省乌拉嘎金矿床地质特征及矿化富集规律研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 35–59
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. 地质论评, 44(4): 339–347
- 刘桂阁, 王恩德, 常春郊, 金宝义, 喻万强. 2006. 黑龙江省逊克县高松山金矿成因探讨. 有色矿冶, 22(4): 1–4
- 刘建明, 叶杰, 徐九华, 孙景贵, 沈昆. 2003. 胶东金矿床碳酸盐矿物的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究. 岩石学报, 19(4): 775–785
- 柳小明, 高山, 第五春荣, 袁洪林, 胡兆初. 2007. 单颗粒锆石的 20 μ m 小斑束原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和微量元素的同时测定. 科学通报, 52(4): 228–235
- 聂喜涛. 2010. 黑龙江省团结沟金矿床成矿地质背景与成矿模式研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 34–50
- 毛景文, 赫英, 丁梯平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据. 矿床地质, 21(2): 121–128
- 毛景文, 李厚民, 王义天, 张长青, 王瑞廷. 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. 地质学报, 79(6): 839–857
- 曲关生. 2008. 黑龙江省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–300
- 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 黄小龙, 王德滋. 1999. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究. 高校地质学报, 5(1): 22–25
- 宋彪, 张玉梅, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26–30
- 孙凤兴, 吴国学, 杨鹏. 1996. 团结沟金矿床地质模型. 吉林地质, 15(2): 52–60
- 孙丰月, 王力, 霍亮, 王可勇. 2008. 黑龙江乌拉嘎大型金矿床流体包裹体特征及矿床成因研究. 中国地质, 35(6): 1267–1273
- 魏仪方, 刘春华. 1996. 团结沟金矿床地质地球化学模型. 黄金, 2: 3–11
- 唐克东, 王莹, 何国琦, 邵济安. 1995. 中国东北及邻区大陆边缘构造, 地质学报, 69(1): 16–28
- 吴福元, 江博明, 林强. 1997. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义. 科学通报, 42(20): 2188–2192
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 15(2): 181–189
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217–1238
- 吴尚全. 1995. 黑龙江省团结沟斑岩金矿地质. 北京: 地震出版社, 5–44
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589–1604
- 颜颂强, 张福勤, 苗来成, 陈福坤, 刘敦一. 2008. 东北牡丹江地区“黑龙江群”中斜长角闪岩与花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质学意义. 岩石学报, 24(6): 1237–1250
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53(2): 220–228
- 于建波, 苏仁奎, 刘志明. 2005. 东安金矿床控矿因素及成矿物质来源浅析. 黄金科学技术, 13(6): 8–11
- 尹西君, 连永牢, 潘超. 2010. 黑龙江省逊克县高松山金矿区岩石地球化学特征. 黄金, 31(10): 22–26
- 张理刚. 1995. 东亚岩石圈块体地质-上地幔-基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 北京: 科学出版社, 153–173