



美国阿拉斯加福特-诺克斯超大型金矿床^{*}

蒋 喆^{1,2}, 聂凤军², 曹 毅², 张伟波^{2,3}, 丁成武², 李强峰^{1,2}

(1 石家庄经济学院研究生院, 石家庄 050031; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

福特诺克斯(Fort Knox)矿床位于美国阿拉斯加州中东部城市费尔班克斯(Fairbanks)东北方向 40 km 处,是费尔班克斯矿区中最重要的金矿床,同时也是北极圈周缘规模最大的金矿床之一。1902 年,美国人费里尔克斯佩德罗(Felix Pedro)于福特诺克斯金矿区附近的渔溪河(Fish Creek)下游发现了砂金,在此之后,费尔班克斯附近共产出砂金超过 220 t,但当时对于岩金矿床的认识甚少,勘察工作非常有限。20 世纪 80 年代,地质部门开始重视由砂金追索岩金矿床的理念,并且在该区进行了一系列地质勘察工作,最终发现了该矿床。1994 年,金罗斯黄金公司(Kinross Gold)取得了该矿的探矿权和开采权,进行了进一步勘探并投入开发。迄今为止,已确定矿石量为 4 亿 t,黄金储量 174 t,金的平均品位 0.43 g/t。在过去几年中,金矿石年产量大约维持在 13.6 万 t,金的年产量约 1 t(聂凤军等,2012)。2008 年金罗斯公司发布的福特-诺克斯扩建计划表明,该矿床露天开采的寿命可到 2014 年,此后将进行低品位矿石的重新处理,至 2021 年每年仍可以产出约 0.8 t 黄金(David et al., 2007)。福特诺克斯矿床巨大的黄金储量使人们对其成因及矿床特征产生了浓厚兴趣。(图 1)。

1 成矿环境

在大地构造位置上,福特诺克斯金矿床位于北科迪勒拉(Cordillera)造山带廷蒂纳(Tintinal)构造-岩浆带西北端,并和其中的白垩纪汤伯斯统(Tomb-

stone)深成侵入岩套中部分花岗岩类侵入岩有密切的空间分布关系(图 1)。区内出露地层主要为育空-塔那那(Yukon-Tanana)地块的花岗质侵入岩和查塔尼卡(Chatanika)地块的沉积变质岩系(图 2);其中前寒武纪—早古生代为费尔班克斯片岩,包括绿片岩、板岩、英云母片岩和石英岩等;中生代主要为奥陶纪榴辉岩、斜长角闪岩和长石石英片岩等;新生代主要为晚白垩纪—古近纪侵入岩和第四纪冲(洪)积物。区域范围内最主要的岩体为晚白垩世—古近纪的育空塔那那侵入体,其岩性主要为长英质花岗岩和花岗闪长岩,与金矿化具密切的时空分布关系。矿床位于育空-塔那那地体中的近东西向廷蒂纳断层和迪纳利断层(Denali fault)之间,成矿作用与 2 个断层有密切的联系。

2 矿床地质

矿区范围内出露的地层主要为前寒武纪—早古生代绿片岩以及晚白垩纪—古近纪花岗岩、花岗闪长岩,岩体与金矿化关系密切。含矿侵入岩体东西长约 1.1 km,南北宽约 0.6 km。矿区范围内断裂构造十分发育,矿体由一系列 NW 向和 NE 向褶皱带、剪切带和(低)角度断层控制(图 3)。金矿化多在花岗岩类侵入体中呈席状、网脉状、浸染状或条带状产出,并且构成透镜状、似层状、囊状和网脉状矿体。网状脉走向大多为近 EW 向,倾向变化较大,脉体向下延伸不稳定,其密度随深度加深而减小。主要金属矿物为自然金、辉铋矿、自然铋、毒砂、辉钼矿、磁

^{*} 本研究得到国家重点自然科学基金项目(编号:41030421)和地质调查项目(编号:1212010811029)联合资助

第一作者简介 蒋 喆,男,1991 年生,硕士研究生,构造地质学专业。Email:jiangzhejz2014@163.com

^{**} 通讯作者 聂凤军,男,1956 年生,研究员,博士生导师,主要从事金属矿床地质和地质化学研究。Email:nfj@cei.gov.cn

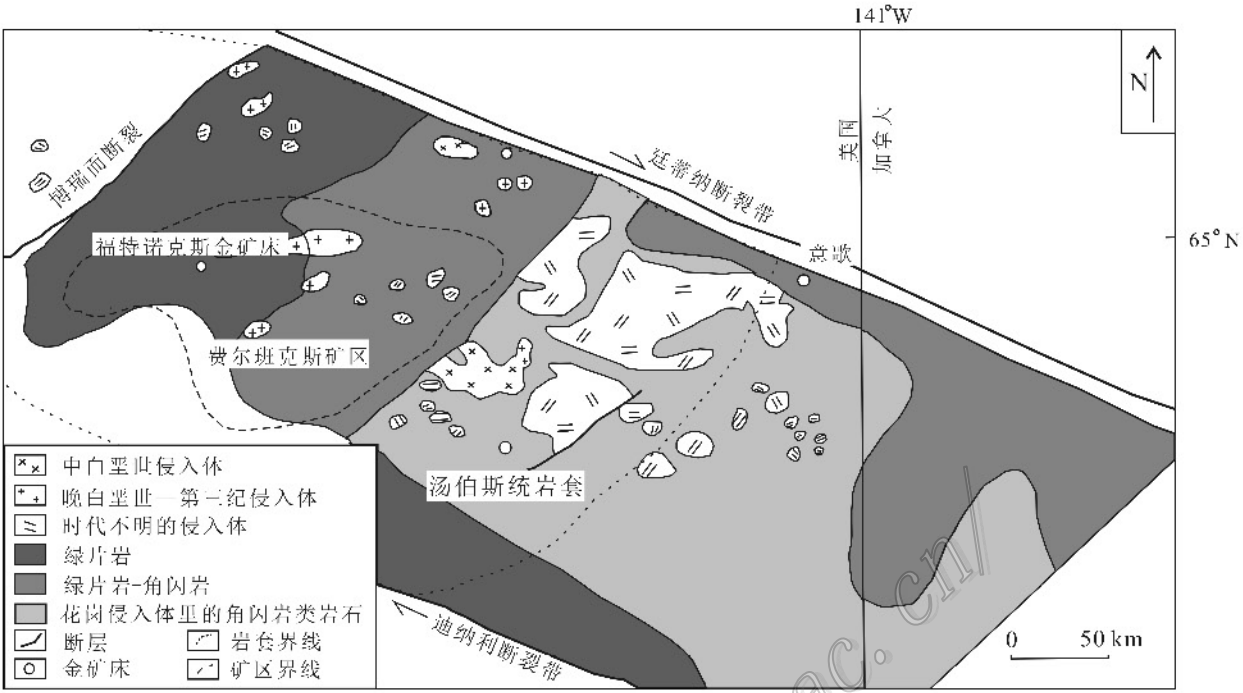


图 1 福特诺克斯金矿床大地构造位置图(据 Hollister, 1991; Goldfarb et al., 1998)

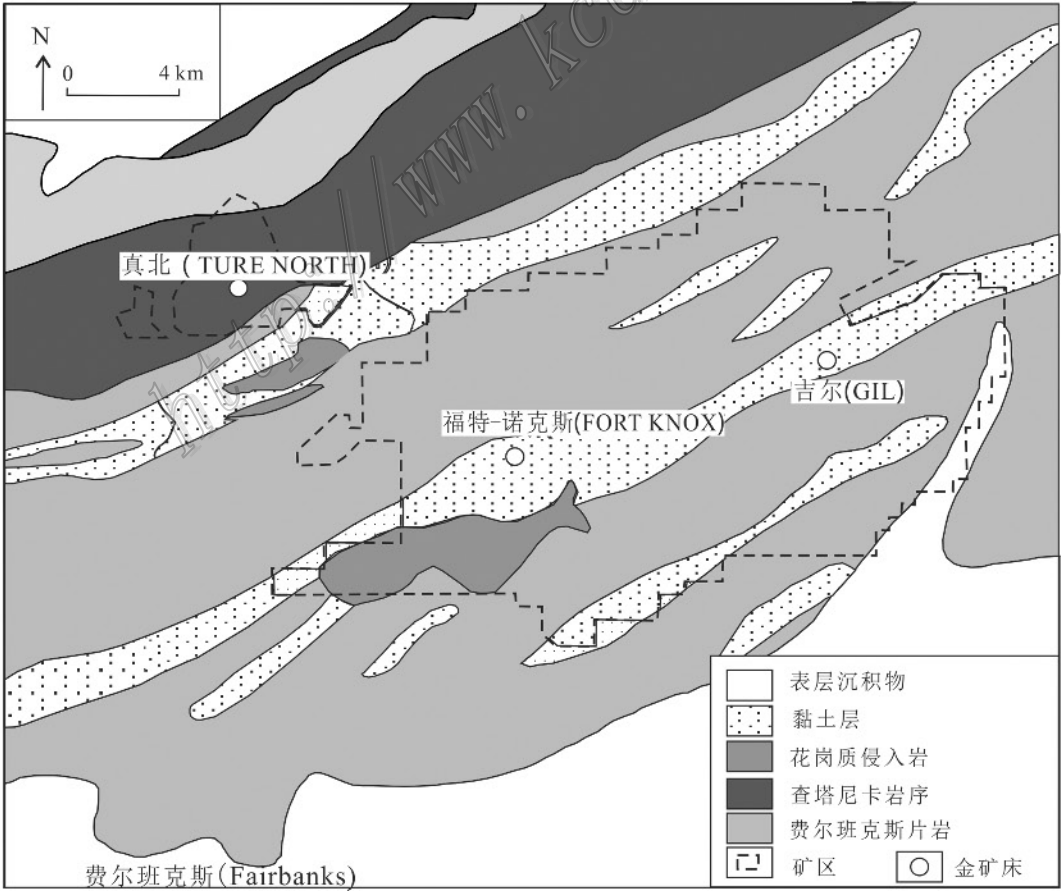


图 2 费尔班克斯矿区地质简图(据 David et al., 2007)

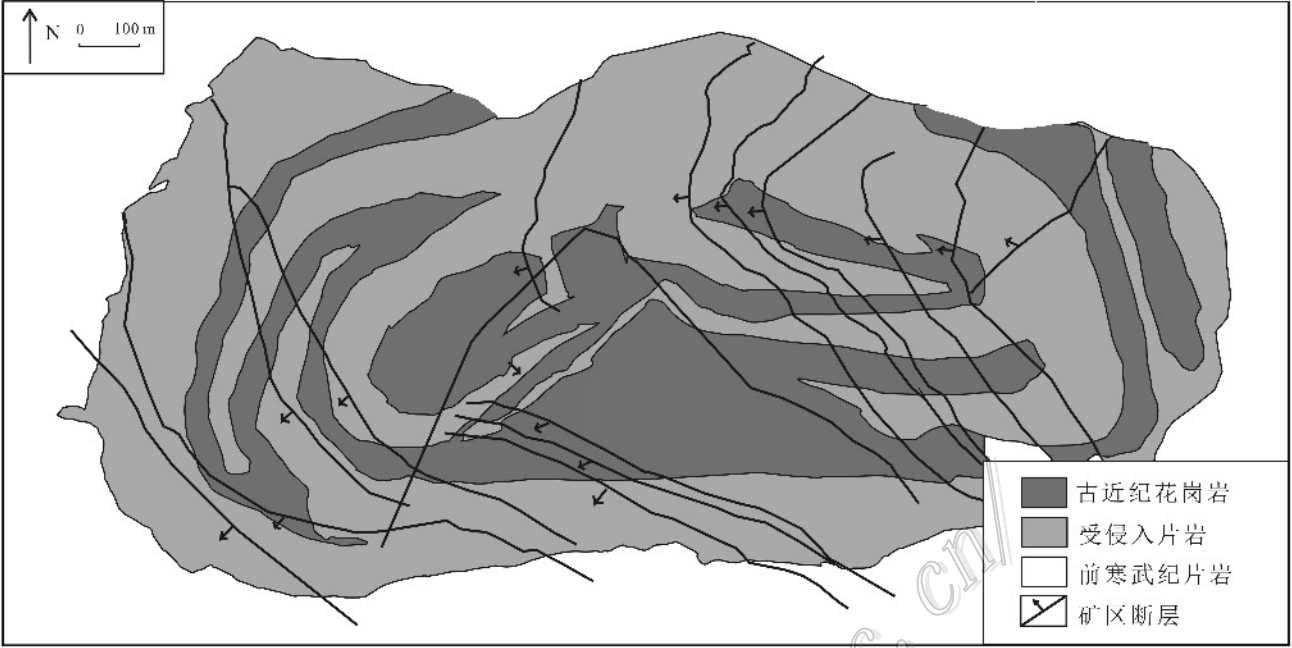


图3 福特诺克斯金矿床地质简图(据 David et al., 2007)

黄铁矿、黄铜矿、白钨矿和碲化物。脉石矿物为石英、绢云母、钾长石、钠长石、绿泥石和方解石等。主要元素组合为金-铋-碲-砷-锑-钨-钼。蚀变类型主要有钾长石化、绢云母化、石英化、钠长石化、青磐岩化、泥岩化、绿泥石化和方解石化。

矿石中辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 (92.6 ± 0.9) Ma, 在误差范围内与花岗岩锆石 U-Pb 年龄 (92.5 ± 0.2) Ma 相对应(John et al., 2002)。矿床成矿流体主要为低盐度含 CO_2 热液($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0~8%)。流体包裹体研究表明, 金矿石中钾长石与钠长石的形成温度变化于 400~450℃, 绢云母为 300~350℃, 以闪长岩为围岩的金矿脉中硫化物含量较低, $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿值为 -3.4‰。火山岩中 $\delta^{18}\text{O}$ 为 12.0‰~13.5‰, 脉体中斜长石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 5.4‰~10.9‰(Goldfarb et al., 1998), 可见脉体中 ^{18}O 相对于围岩有较大亏损, 反映了具重同位素成分的成矿流体和具较轻同位素成分的侵入岩之间的微量交换, 侵入过程中成矿物质是由深部流体运移到岩体之中。热液成因白云母的氢同位素测试结果表明 δD 为 -83‰, 结合氧同位素数据可以得知矿石中氢氧同位素来源于火成岩, 区内成矿流体主要为岩浆分异演化过程中形成的流体, 大气水极少参与。上述数据表明, 成矿物质主要来自花岗质熔浆(聂秀兰, 1999)。

3 矿床成因

关于福特诺克斯矿体成因, 大多数学者都认为它与氧化型中酸性岩浆作用及其相关流体活动有关, 是与侵入岩有关的金矿床(Goldfarb et al., 1997; 刘平, 2007; 聂凤军等, 2012)。

该区板块拉张作用结束时期, 发生了板块俯冲作用。下沉板块之上的软流圈地幔的部分熔融引发了一系列热事件, 包括先前加积到大陆边缘板块上部岩石的去挥发分作用和热液流体循环。深源岩浆上涌致使地壳内热流值骤然升高, 进而导致前寒武纪—古生代地层发生深熔或重熔作用。90 Ma 左右, 育空-塔那那地体之下岩石圈地幔熔融体沿逆掩断裂带上侵, 此时花岗质岩浆和含碳的深部流体沿经历了多期变形的浅部时代较老的变质-沉积岩系构造薄弱带灌入。需要指出的是, 流体中富含的二氧化碳对于成矿母岩的形成和金沉积具有重要作用。上侵期间岩浆体系中挥发性组分以独立形式存在并调节流体的 pH 值, 提高了金的溶解度, 使其一直保留在含 CO_2 相的熔体中, 在构造薄弱地带, 含金富挥发性组分流体可沿特定构造部位运移形成含金矿脉。含矿热流体演化的早期阶段, 金可与各

种不同类型的阴离子团结合形成含水的稳定络合物,并通过岩层(体)粒间孔隙或原生冷凝细微裂隙进行扩散与运移,进而在构造有利地段沉淀形成含矿石英脉。当含矿热液流体沿特定构造破碎带上升到近地表处时,成矿体系温度和压力的骤然降低,特别是 f_{O_2} 的明显增高和 pH 值大幅度降低可造成热液体系的不平衡,进而在花岗岩体内部或旁侧形成具工业价值的含金脉体(聂凤军等,2002;谭运金,2002)。

4 找矿模型

(1) 产出环境为古大陆边缘远后弧,属于汇聚型板块边缘内侧,并且与深成侵入岩套中部分花岗岩类侵入岩有密切的空间分布关系。

(2) 容矿围岩主要为寒武纪—早古生代石英云母片岩、板岩、绿片岩及与其呈侵入关系的晚白垩—古近纪花岗岩、花岗闪长岩等。

(3) 蚀变作用主要表现为钾长石化、绢云母化、石英化、钠长石化、绿泥石化和方解石化。

(4) 还原性质的矿物矿石组合,特征矿物组合为毒砂、磁黄铁矿,缺失磁铁矿和赤铁矿,金属矿物中硫化物含量低($<0.1\%$)。

(5) 主要元素组合为金-铋-碲-砷-锑-钨-钼。

5 初步认识

(1) 福特诺克斯金矿床在北科迪勒拉造山带产出,与氧化型中酸性侵入体侵入作用及其相关流体活动有关,属于与侵入岩有关的金矿床。

(2) 金矿化主要发生在晚白垩—古近纪花岗质侵入体与前寒武纪—早古生代片岩接触带上,并且受构造破碎带控制。裂隙脉、剪切构造带为成矿的有

利部位。

(3) 中国华北克拉通周缘前寒武纪地层分布广泛,各类含金侵入岩十分发育,金异常带(点)星罗棋布,是寻找与侵入岩有关的金矿床的有力地段(胡朋等,2006)。

参考文献/References

- 胡朋,聂凤军,江思宏. 2006. 与侵入岩有关金矿床的研究现状、存在问题及在中国的前景[J]. 地质评论, 52(4): 540-547.
- 刘平. 2007. 国外几个重要类型金矿的地质特征及对贵州金矿勘查工作的启示[J]. 国土资源情报, 2(1): 50-52.
- 聂凤军,江思宏,赵省民,白大明,李强之,郭晓东. 2002. 北山地区照壁山金矿床地质特征及成因[J]. 地质科学, 37(2): 207-218.
- 聂凤军,石成龙,赵元艺,李振清. 2012. 北极圈及邻区金属矿床地质特征、形成作用与找矿潜力[J]. 中国地质, 39(4): 855-868.
- 聂秀兰. 1999. 阿拉斯加侵入岩为容矿围岩的金矿床地质特征及成因[C]. 国外矿床地质, 63-67.
- 谭运金. 2002. 与侵入岩有关的金矿体系[J]. 矿产与地质, 16(3): 129-134.
- David Q., Chris E. and Klaus T. 2007. Technical report for the fort Knox mine[R]. 1-79.
- Goldfarb R J., Lance D M., David L L. and Lawrence W S. 1997. The gold deposit in metamorphic rocks in Alaska[J]. Econo. Geol., Monography 9: 151-190.
- Goldfarb R J., Phillips G N. and Nokleberg W J. 1998. The tectonic background of Pacific Rim synorogenic[J]. Ore Geology Reviews, Vol. 13: 185-218.
- Hollister V F. 1991. Origin of Placer gold in the Fairbanks, Alaska, Agea: A newly proposed lode source[J]. Economic Geology, 402-405.
- John F H., Thompson, Moira T S., David S., Robert A G. and Craig J R. 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralization: A comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods from the Tintina Gold Belt, Alaska[J]. Geological Society of America, 30(9): 791-794.