



# 瑞典布利登富金火山岩型块状硫化物矿床\*

曹毅, 聂凤军\*\*

(中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

布利登(Boliden)矿床位于瑞典北部西博滕省, 其东北距吕勒奥市 150 km, 南距离于默奥市 100 km, 是世界上最大的富金火山岩型块状硫化物矿床之一(Dubé et al., 2007; Mercier-Langevin et al., 2011)。该矿床发现于 1924 年, 金属储量为 830 万吨,  $w(\text{Au})$ 、 $w(\text{Ag})$  和  $w(\text{Cu})$  分别为 15.9 g/t、50 g/t 和 1.42%,  $w(\text{Zn})$ 、 $w(\text{Pb})$  和  $w(\text{As})$  分别为 0.9%、0.3% 和 6.8%。1925 年到 1966 年, 矿床开采的金、银、砷和铜分别为 132 吨、411 吨、56 万吨和 12 万吨。此外, 还回收有大量的硫、硒、铋、钴和红柱石(Grip et al., 1970)。迄今为止, 布利登矿床是欧洲产出规模最大的金矿床, 同时也是世界范围内产出规模最大的砷矿床, 该矿床的开发在瑞典的经济和社会发展中发挥着重要作用。

## 1 成矿环境

布利登矿床位于瑞典斯科勒费特矿化集中区的东部。迄今为止, 该矿集区长 80~120 km、宽 15~30 km, 其内共发现和圈定各类火山岩型块状硫化物(VMS型)矿床 85 处, 其中 31 家已投入开采(Allen et al., 1996), 另外, 金矿床、铜-金矿床和镍矿床星罗棋布, 为欧洲最重要的铜-金-铅-锌-镍-银矿化集中区。

矿集区内出露的地层主要是早元古宙斯科勒费特火山岩和瓦格弗斯(Vargfors)火山-沉积岩, 以及少量的侵入岩, 前者的厚度分别大于 3000 m 和 4000

m。斯科勒费特火山岩地层的类型有玄武质和流纹质火山岩以及浅成侵入岩, 局部夹有海相沉积岩。相比之下, 瓦格弗斯次火山-沉积岩主要有砂岩和含砾砂岩以及铁镁质火山岩和长英质火山岩。无论是斯科勒费特火山岩, 还是瓦格弗斯火山-沉积岩, 均遭到绿片岩相和低角闪岩相变质作用, 形成绿片岩和斜长角闪岩。火山岩型块状硫化物矿床多在斯科勒费特组的上部地层单元中产出, 少量出现在瓦格弗斯组地层下部层位中。有学者认为, 斯科勒费特矿集区的产出环境为古大陆边缘海相火山弧, 早期以火山活动为主, 后为火山活动与沉积作用所取代(Allen et al., 1996; Weihed 2004)。

## 2 矿床地质

布利登矿床金矿体产于斯科勒费特组火山岩上段, 如图 1 所示, 矿区北部出露流纹岩和火山碎屑岩, 矿体围岩为英安质的次火山岩。金矿体类型可分为块状硫化物矿石、黄铁矿(含砷黄铁矿)透镜体、含金石英-黄铜矿脉、角砾状含砷黄铁矿金矿石以及含金石英-电气石脉, 各类脉体变形特征明显。

矿区内块状硫化物分布从 590 m 平面一直延伸到 250 m 平面, 厚度达 40 m。在构造变形和低角闪岩相区域变质作用下, 矿石发生强烈的片理化, 硫化物组合发生糜棱岩化(图 2a)。矿石片理也被适度拉伸, 其长轴线平行于集中发育的向东倾伏的拉伸线理(Bergman et al., 1996)。矿化组合包括复杂的硫化

\* 本文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)的资助

第一作者简介 曹毅, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事金属矿床地质和地球化学研究。Email: cy19860725@foxmail.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球化学研究。Email: nfj@mx.cei.gov.cn

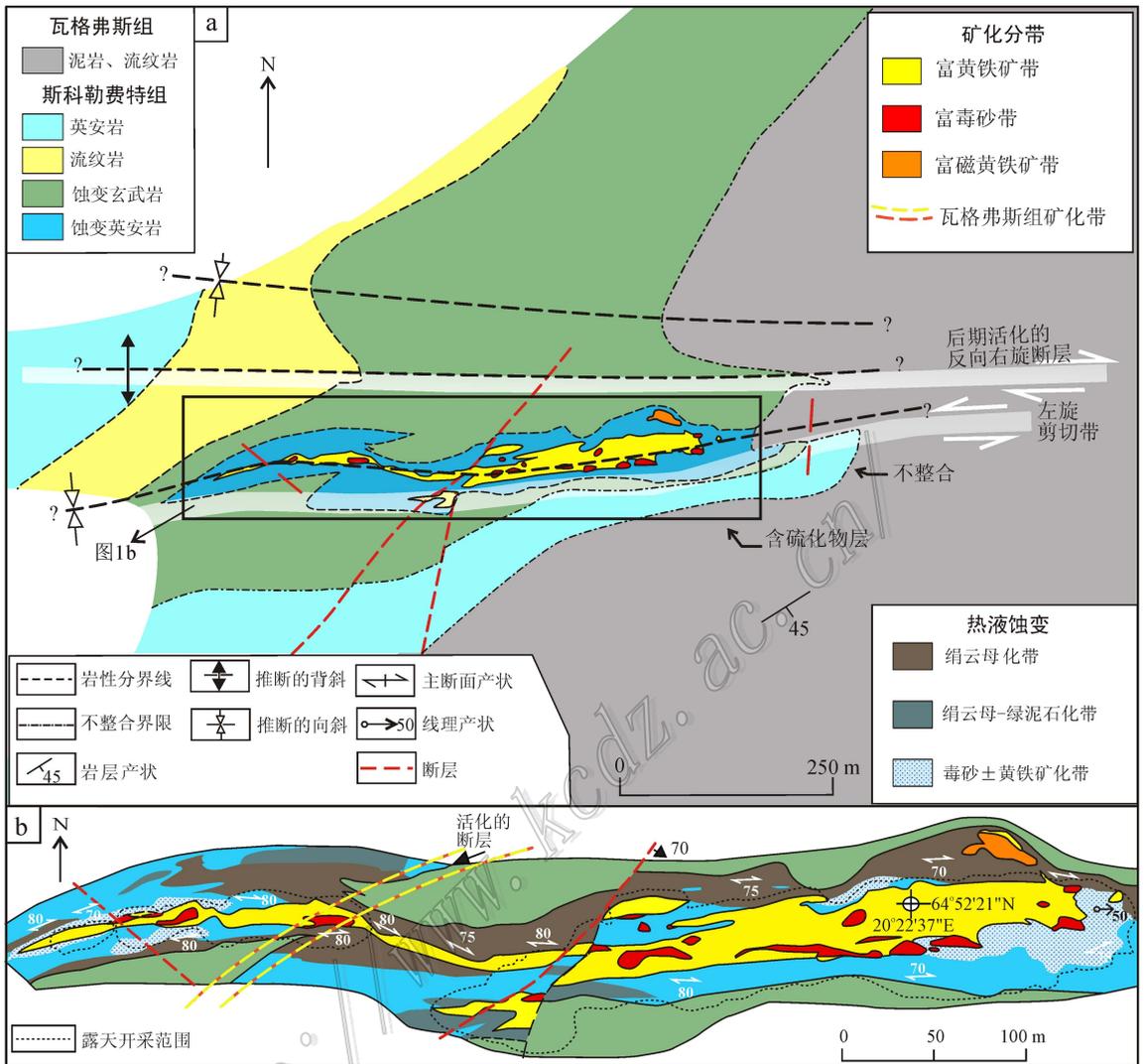


图 1 瑞典布利登矿床地质图(根据 Mercier-Langevin et al., 2012 修编)

a. 矿区地质简图; b. 露天开采区地质简图

物、硫盐和自然元素、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、闪锌矿，其中黄铁矿是主要的矿石矿物(Grip et al., 1970; Wagner et al., 2001)。黄铁矿强烈的再结晶，形成粒状、块状或条带状矿石。块状毒砂含量最高，占矿石体积的 23%，平均粒度介于 0.01~0.04 mm(图 2b);其次为极细的块状晶质毒砂，粒度平均只有 2~3 μm，这种矿石类似于钢铁，有贝壳状断口(图 2c)，全球罕见，这也是布利登矿石的一个显著的特点。细粒的砷黄铁矿矿石能干性很强，通常情况下呈角砾状(图 2b)。在矿床的某些部分可见毒砂浸染在硅化和绢云母化的长英质岩石中(图 2d)。矿区内可见部分矿化是逐步取代长英质岩石中石英斑晶形成的

(图 2e)。在毒砂矿石的某些部分中，矿石局部重结晶(图 2b)，发生叶理化和糜棱岩化(图 2b)，发育褶皱、再活化(图 2f)。

布利登矿床的金矿化主要发生在断裂面内以及晚期同变形的石英电气石脉中。该金矿床具有面状蚀变的特征，矿体附近为红柱石蚀变，外围是绢云母化和绿泥石化，矿床深部蚀变范围逐渐扩大。不同类型的毒砂测试表明，毒砂硫同位素组成在中级变质再活化及再结晶过程中，基本没有改变，毒砂矿石被晚期含石英硫化物组合的岩脉切割。晚期的矿石类型与围岩矿石相比明显富金，因此更具有重要的经济意义。两种矿石类型显示出十分相似的硫同位

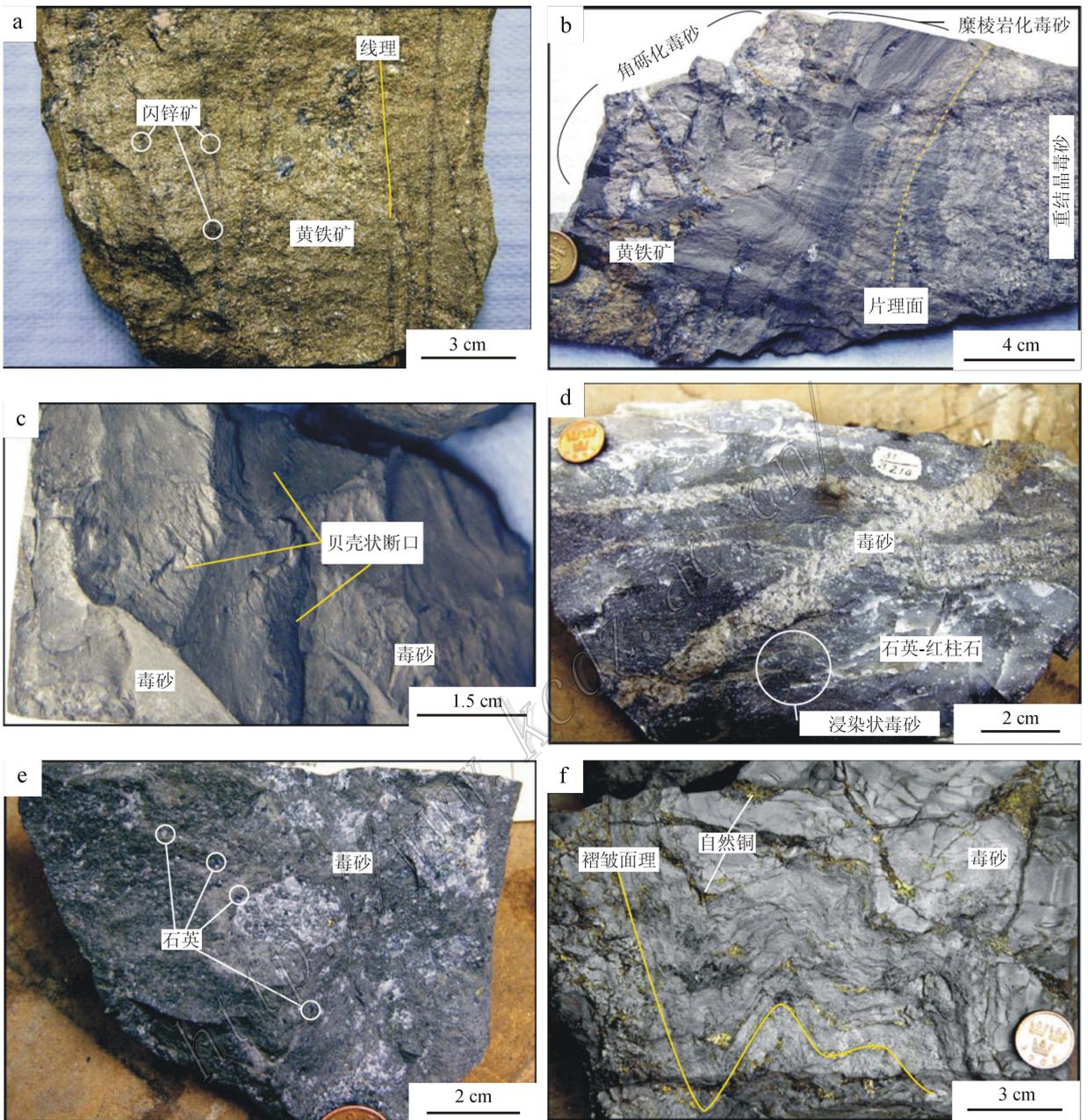


图2 布利登矿床矿区内典型矿石照片(根据 Mercier-Langevin et al., 2012 修编)

素组成,这与斯科勒费特地区的大多数块状硫化物矿床相似。横切火山岩型块状硫化物矿体的含金石英脉继承了变质围岩硫同位素的特点,属成矿期后岩浆活动作用及相关热液活动的产物,这对该矿区内相似的高品位金矿的研究及预测具有意义。

### 3 形成作用

尽管前人对布利登矿床的产出环境、地质特征

和形成作用开展过学术研究,并且提出不同的成因理论。有学者认为该矿床是岩浆流体的产物,属高硫化热液矿床,成矿作用发生的时间比火山岩晚 15~20 Ma(Bergman et al., 1996)。与上述成矿模式相比,Allen 等(1996)认为,该矿床是一处与火山活动有关的火山岩块状硫化物矿床。另外,也有学者提出变质交代模型(Ödman, 1941)、后生花岗岩类交代模型(Grip et al., 1970)、同火山喷流沉积模型(Barrett et al., 2007)和浅成低温热液模型(Weihed et

al., 1992)。Mercier-Langevin 等(2012)研究认为,金矿化作用可以从 1894 Ma 一直持续到 1891 Ma,同时,流纹岩发生强烈硅化和钾长石化以及金矿化。随着地质资料的不断积累,大多数学者认为布利登地区金矿化出现在主变形期前和变质作用的高峰期,矿体应该是同火山活动和变质变形作用相互叠加的产物(Wagner et al., 2004, 2007)。近几年的一些综述性文章比较统一的把布利登矿床归为 VMS 型矿床或者富金 VMS 型矿床类型(Franklin et al., 2005; Dubé et al., 2007; Galley et al., 2007; Mercier-Langevin et al., 2011)。

## 4 找矿标志

布利登富金火山岩型块状硫化物矿床的找矿标志主要有:

- (1) 含金石英脉和含金电气石-石英脉在断裂破碎带内产出;
- (2) 容矿围岩为流纹岩和英安岩以及长英质火山碎屑岩;
- (3) 矿石以含极细粒具贝壳状断口的毒砂为特点;
- (4) 具有面状蚀变的特征,矿体附近为红柱石蚀变,外围是绢云母化和绿泥石化;
- (5) 矿石糜棱岩化和片理化特点明显;
- (6) 地磁和激电异常形态规则,强度高、梯度陡;
- (7) 金、银、铜、锌、铅、砷元素异常明显。

## 5 初步结论

(1) 布利登地区金矿化主要出现在主变形期前和变质作用的峰期,但早期矿体形成之后遭受到一定程度的叠加和改造作用,属富金火山岩型块状硫化物矿床。

(2) 该矿床的金成矿作用发生时限从 1894 Ma 到 1891 Ma,持续时间为 3 Ma。矿床是长时间和多阶段构造-岩浆作用及相关流体活动的产物。

(3) 横切火山岩型块状硫化物矿体的含金石英脉继承了变质围岩硫同位素的特点,属成矿期后岩

浆作用及相关热液活动的产物,这对该区内相似的高品位金矿体的研究及预测很有意义。

## 参考文献/References

- Allen R L, Weighed P and Svensson S A. 1996. Setting of Zn-Cu-Au-Ag massive sulphide deposits in the evolution and facies architecture of a 1.9 Ga marine volcanic arc, Skellefte district, Sweden[J]. *Econ. Geol.*, 91:1022-1053.
- Barrett T J and Zetterqvist A. 2007. Chemostratigraphy and alteration at the Boliden massive sulfide deposit, Skellefte district, Sweden: Unpublished report to Boliden Mineral AB[M]. Boliden Sweden. 49p.
- Bergman W J, Bergstrom U, Billstrom K and Weighed P. 1996. Geology, tectonic setting, and origin of the Paleoproterozoic Boliden Au-Cu-As deposit, Skellefte district, Northern Sweden[J]. *Econ. Geol.*, 91:1073-1097.
- Dubé B, Gosselin P, Mercier-Langevin P, Hannington M and Galley A. 2007. Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits[A]. In: Goodfellow W D, eds. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*[C]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5: 75-94.
- Franklin J M, Gibson H L, Jonasson I R and Galley A G. 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits[A]. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J and Richards J R, ed. *Econ. Geol. 100th anniversary volume 1905-2005*[C]. 523-560.
- Galley A G, Syme R and Bailes A H. 2007. Metallogeny of the Paleoproterozoic Flin Flon Belt, Manitoba and Saskatchewan[A]. In: Goodfellow W D, eds. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*[C]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5. 509-531.
- Grip E and Wirstam A. 1970. The Boliden sulphide deposit, a review of geo-investigations carried out during the lifetime of the Boliden mine, Sweden (1924-1967). *Sveriges Geologiska Undersokning*, 651: 68.
- Mercier-Langevin P, Hannington M D, Dubé B and Bécu V. 2011. The gold content of volcanogenic massive sulfide deposit[J]. *Mineralium Deposita*, 46: 509-539.
- Mercier-Langevin P, McNicoll V, Allen R L, Blight J H and Dubé B. 2012. The Boliden gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit, Skellefte district, Sweden: New U-Pb age constraints and implications at deposit and district scale[J]. *Mineralium Deposita*, 1-20.
- Ödman O. 1941. Geology and ores of the Boliden deposit, Sweden[J]. *Sveriges Geologiska Undersokning*, 438: 190.
- Wagner T and Jonsson E. 2001. Mineralogy of sulfosalt-rich vein-type

- ores, Boliden massive sulfide deposit, Skellefte district, northern Sweden [ J ]. *Can Mineral*, 39 :855-972.
- Wagner T, Boyce A J, Jonsson E and Fallick A E. 2004. Laser microprobe sulphur isotope analysis of arsenopyrite: Experimental calibration and application to the Boliden Au-Cu-As massive sulphide deposit [ J ]. *Ore Geol*, 25 :311-325.
- Wagner T, Klemd R, Wenzel T and Mattsson B. 2007. Gold upgrading in metamorphosed massive sulfide ore deposits: Direct evidence from laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis of invisible gold [ J ]. *Geology*, 35 :775-778.
- Weihed P, Bergman J and Bergstrom U. 1992. Metallogeny and tectonic evolution of the Early Proterozoic Skellefte district, northern Sweden [ J ]. *Precambrian*, 58 :143-167.
- Weihed P. 2004. Overview of the geology and tectonic setting of northern Sweden [ A ]. In: Allen R L, Martisson O and Weihed P, ed. *Svecofennian ore-forming environments volcanic-associated Zn-Cu-Au-Ag, intrusion-associated Cu-Au, Sediment-hosted Pb-Zn, and magnetite-apatite deposits of Northern Sweden* [ C ]. Society of Economic Geologists Guidebook Series 33. Society of Economic Geologists, Littleton, 1-15.

<http://www.kcdz.ac.cn/>