



# 加拿大萨德伯里超大型镍-铜-铂族元素矿床\*

聂凤军<sup>1</sup>, 辛洪波<sup>1</sup>, 张伟波<sup>1,2</sup>, 赵元艺<sup>1</sup>, 刘翼飞<sup>1</sup>

(1 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;

2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

萨德伯里(Sudbury)矿床位于加拿大安大略省的东南角, 休伦湖北岸, 东南距渥太华 430 km, 是世界上产出规模最大的镍矿床。1883年人们在修筑横穿加拿大的铁路时, 在这一地区首先发现铜矿化露头, 接着又找到一系列产出规模较大的含铂族元素的镍矿体, 进而为这一全球最大镍-铜-铂族元素矿床的开发奠定了基础。迄今为止, 人们在东西长 60 km, 南北宽 20~25 km 的范围内, 先后发现和圈定各种类型镍-铜矿床(点) 49处, 探明的矿石量为 16 亿吨(图 1)。在已确定的金属储量中, 镍、铜和铂族元素分别为 1858 万吨, 1703 万吨和 240 万吨, 平均品位分别为 1.2%、1.1% 和  $0.4 \times 10^{-6}$ 。另外, 其中的金、银和钴也具有一定的经济价值。在过去的 129 年间, 萨德伯里矿区的镍和铜产量分别为 720 万吨(160 亿磅) 和 680 万吨(150 亿磅), 银、铂和金的产量分别是 2550 吨(8599 万盎司), 510 吨(1700 万盎司) 和 90 吨(300 万盎司), 在加拿大经济和社会发展中发挥了重要作用。

## 1 成矿环境

从大地构造位置上看, 萨德伯里矿床地处加拿大地盾苏必利尔(Superior)新太古代片麻岩块体与胡仁(Huronian)古元古代火山-沉积岩地体之间的椭圆形盆地内, 并且与萨德伯里火成岩杂岩体(Sudbury Igneous Complex, 简称 SIC)具有密切时空分布关系。野外地质调查结果表明, 火成岩杂岩体东西长 60 km, 南北宽 20~25 km, 出露面积 1500 km<sup>2</sup>。镍、镍-铜和铂族元素矿床(点)大都沿火成岩杂岩体

边缘产出, 数量多达 49 处, 其中 35 处为生产矿山。尽管萨德伯里杂岩体南北两侧岩石类型略有差异, 但是从整体上看, 其下部为苏长岩类、中部为辉长岩类和上部为花斑岩类。主要岩石类型有角砾岩、镁铁质苏长岩、长英质苏长岩、石英苏长岩、辉长岩、石英辉长岩、花斑岩、富斜长石花斑岩和微文象岩, 其中镁铁质岩石的钐-钕同位素年龄值为 1849 Ma, 属于拉斑玄武质岩浆活动的产物。另外, 杂岩体的底部和顶部分别为花岗岩巨砾岩和各类角砾岩(图 1)。

## 2 矿床地质

尽管镍、铜和铂族元素矿化大多在镁铁质侵入角砾岩带内产出, 但是矿体产出形态存在有一定的差别。矿化类型大体可划分为以下 3 种: ① 底层型(Sublayer): 在火成岩杂岩体底部, 浸染状和角砾状矿化沿火成岩杂岩体与前寒武纪变质岩(体)接触带产出, 含矿岩石为苏长岩和角砾岩; ② 枝脉型(Offset): 火成岩杂岩体的放射状(环状)岩脉侵入到前寒武纪变质岩层(体), 并且产出浸染状、斑杂状和团块状矿化, 含矿岩石为石英闪长岩和角砾岩; ③ 底板型(Footwall): 火成岩杂岩体底部发生强烈角砾岩化, 并且见有假玄武玻璃脉, 同时被富铜席状脉和网脉所切割, 部分脉体与杂岩体的距离可达千余米。单个矿体呈条带状、透镜体状、似层状和港湾状分布, 长度为 500~6000 m, 平均值 1200 m, 宽度为 500~1000 m, 平均值 750 m, 厚度为 200~1000 m, 平均值 500 m。矿石矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、方硫镍钴矿、含钴砷镍矿、铈

\* 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)资助

第一作者简介 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: nfjj@mx.cci.gov.cn

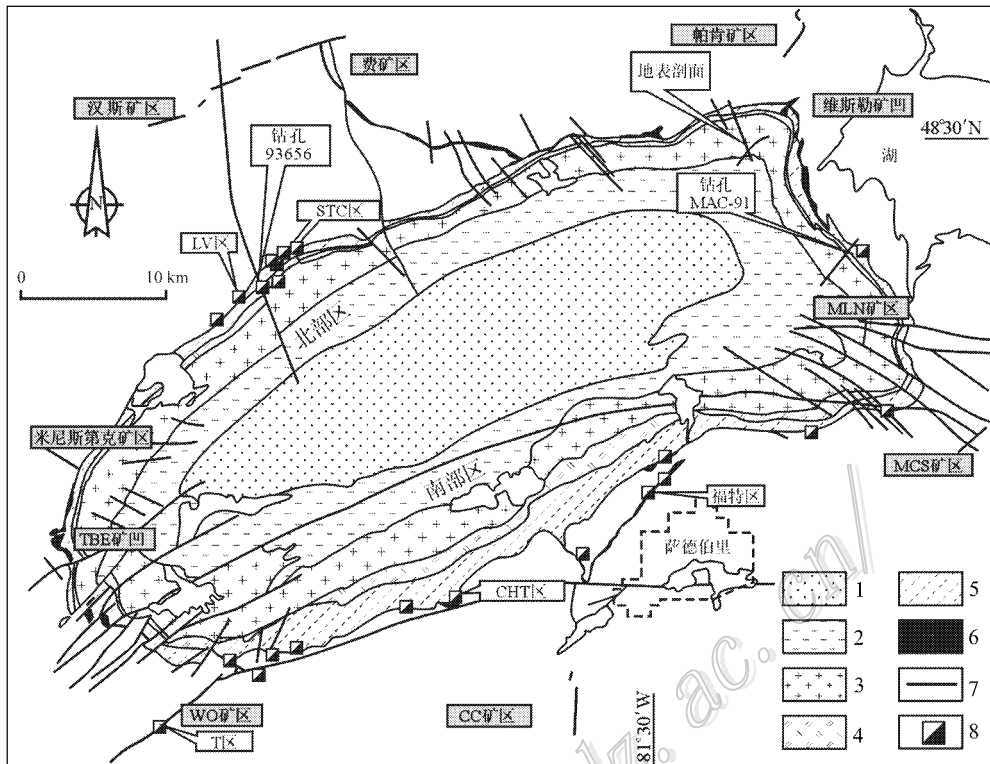


图1 加拿大萨德伯里镍-铜和铂族元素矿化区地质简图(根据 Keays et al., 2004 修改)

1~2—维特瓦特群: 1—恩瓦丁组; 2—恩阿平组; 萨德伯里火成岩杂岩体; 3—花岗岩; 4—石英辉岩; 5—镁铁质和长英质苏长岩; 6—似层状苏长岩和分枝状石英闪长岩脉; 7—断层; 8—矿区

铋钼矿、碲钼矿、砷碲钼矿和砷铂矿; 脉石矿物有橄榄石、辉石、斜长石、角闪石、方解石、阳起石、绿泥石、绿帘石和阳起石。矿石  $\text{Cu}/(\text{Ni} + \text{Cu})$  和  $\text{Pt}/(\text{Pt} + \text{Pb})$  比值分别为 0.25 和 0.45,  $(\text{Pb} + \text{Pd})/(\text{Ru} + \text{Ir} + \text{Os})$  比值为 19.27。

### 3 形成作用

关于萨德伯里火成岩杂岩体及相关矿床的成因, 人们存在有不同的认识。绝大多数学者认为陨石对地球表面的撞击作用是导致萨德伯里火成岩杂岩体及相关矿床形成的主要因素 (Dietz, 1964; Dressler, 1984; Grieve, 1994), 并且指出, 如果落在地表的陨石块体的直径为 10 km, 那么它将会产生直径达 200 km 的环状构造形迹 (Dietz, 1964)。这很好地解释了萨德伯里地区分布的陨击角砾岩和反转岩(体)层以及观察到的回落冲击和锥状震裂构造形迹, 所以陨石撞击说为许多人所接受。与世界上许多巨型金属矿床一样, 萨德伯里矿床也是独一无二的镍-铜-铂族元素矿床, 其形成作用与陨石撞击地球

所诱发的高温岩浆(远高于硅酸盐岩浆, 温度可达 1700℃) 活动有关, 属异常地质作用的产物。受地壳的重熔作用影响, 地壳原岩中的硫化物全部发生熔融, 并且进入岩浆房。含矿岩浆一般由镁铁质和长英质熔体的乳浊液所构成, 重力沉淀和结晶分异作用可能是导致成矿物质堆积的主导因素。随着岩浆体系温度的下降, 熔体中的硫逐渐达到饱和状态, 并且发生沉淀。当这些含镍-铜-铂族元素硫化物到达岩浆房底部时再次发生重熔, 含矿熔体是通过特定地质营力灌入到地壳上部, 并且形成极高品位的镍-铜-铂族元素矿床。此外, 也有学者根据区域地球物理和地球化学资料, 指出萨德伯里火成岩杂岩体中的暗色岩及相关矿床可能是元古代幔源岩浆活动的产物 (Naldrett, 1989; Lightfoot et al., 1997)。无论哪种成矿模式, 大家均承认, 绝大多数镍-铜-铂族元素矿床与镁铁质侵入岩具有密切的空间分布关系, 但是在矿床形成过程中, 有大量地壳物质参与其中。其中的成矿物质有 90%~100% 来自地壳。相比之下, 俄罗斯诺里尔斯克镍-铜矿床中的地壳物质少于 20%。

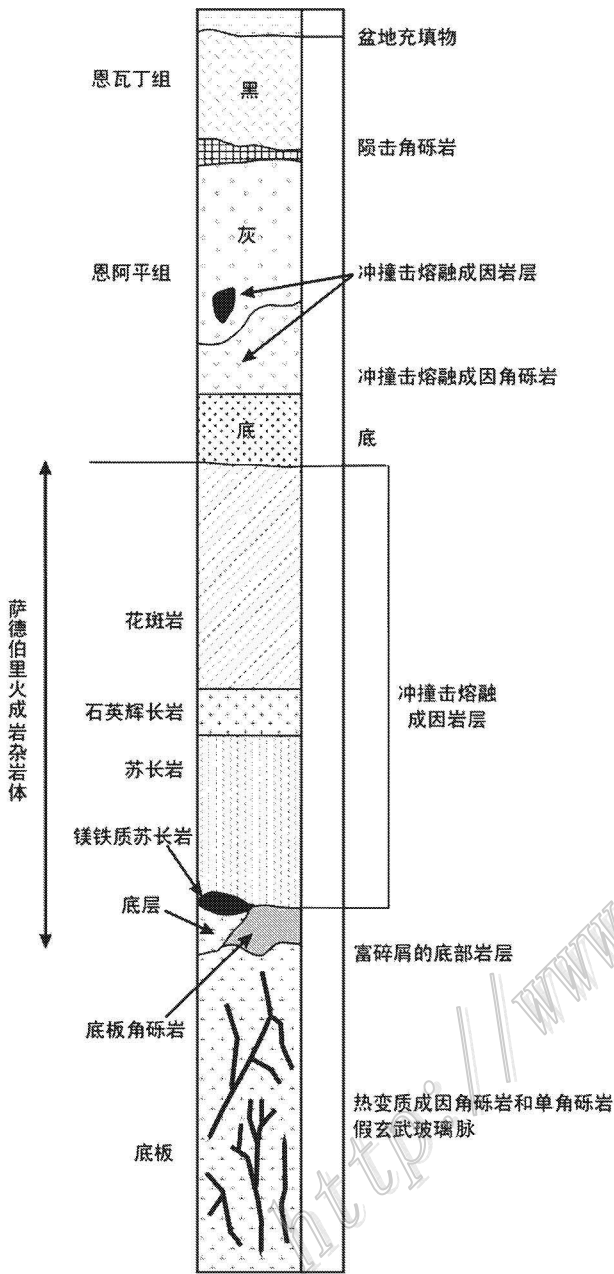


图 2 加拿大萨德伯里矿区火成岩杂岩体柱状剖面简图 (根据 Lightfoot, 2007 修改)

## 4 找矿模型

萨德伯里超大型矿床的找矿标志主要有：① 椭圆形、环形和半环形盆地中时代年轻的火山-沉积岩层之下产出有镁铁质侵入杂岩体；② 岩石类型主要有苏长岩、辉长岩、花斑岩和石英闪长岩以及各类角砾岩；③ 层状侵入杂岩体底部与围岩接触部位，特别是线状构造转弯处；④ 线性、半环状-环状断裂构



图 3 加拿大萨德伯里镍-铜-铂族元素矿床代表性钻孔岩芯和矿脉露头 (引自 Lightfoot, 2012 个人通讯资料)

造十分发育，并且具有明显的镍、铜和铂族元素异常；⑤ 形态规则、强度高和梯度陡的地磁和激电异常，局部弱重力异常；⑥ 侵入杂岩及围岩内广泛分布各类硫化物，铬、镍、铜、钴(金、银)、硒和碲异常明显。

## 5 初步结论

(1) 萨德伯里矿床的形成作用与陨石撞击地球所诱发的极高温度(可达 1700℃)镁铁质岩浆活动有关，属异常地质作用的产物；

(2) 受地壳重熔作用的影响，地壳原岩中的硫化物全部发生熔融，并且进入岩浆房，此后通过多次熔融和结晶形成富大矿体；

(3) 尽管镍-铜-铂族元素矿床与镁铁质侵入岩具有密切的空间分布关系，但是在火成岩杂岩体及矿床形成过程中，有大量地壳物质参与其中，成矿物质的 90%~100% 来自地壳源；

(4) 火成岩杂岩体底部与围岩接触部位，特别是线状构造转弯处以及线性、半环状-环状断裂构造

区与镍、铜和铂族元素异常叠加部位是寻找镍-铜矿体的有利地段。

#### 参考文献/References

Barnes S J and Lightfoot P C. 2005. Formation of magmatic Nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents. Society of Economic Geologists, 100th Anniversary ?

Dietz R S. 1964. Sudbury structure- an astrobleme[J]. J. Geol. , 72 : 412-434.

Lightfoot P C , Keays R R and Doherty W. 2001. Chemical evolution and origin of nickel sulfide mineralization in the Sudbury Igneous

Complex , Ontario , Canada[J]. Econ. Geol. , 96 : 1855-1875.

Lightfoot P C. 2007. Advances in Ni-Cu-PGE sulphide deposit models and implications for exploration technologies[ A ]. In Milkereit B , ed. Proceedings of Exploration 07 : Fifth decennial international conference on mineral exploration[ C ]. 629-646.

Maier W D and Groves D I. 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposit[ J ]. Mineralium Deposita , 46 : 841-857.

Keays R R and Lightfoot P C. 2004. Formation of Ni-Cu-Platinum Group Element sulfide mineralization in the Sudbury impact melt sheet[ J ]. Mineral and Petrology , 84 : 217-258.

Pye E G , Naldrett A J and Giblin P E. 1984. The geology and ore deposits of the Sudbury Structure[ J ]. Ont. Geol. Surv. Spec. , Vol 1 : 603p.

## 《矿床地质》等被评为“2012 中国最具国际影响力学术期刊”

2012年12月26日,中国知网(CNKI)、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、清华大学图书馆和中国科学文献计量评价研究中心在北京国家会议中心发布了《中国学术期刊国际引证报告(2012版)》,公布了评选出的“2012 中国最具国际影响力学术期刊”和“2012 中国国际影响力优秀学术期刊”各209种(科技类175种,社科类34种)并颁发了奖状。新闻出版总署副署长邬书林、清华大学党委副书记史宗恺、新闻出版总署新闻报刊司司长王国庆及中国科协、教育部、社科院等单位领导参加了发布会并作重要讲话。期刊代表及媒体近2000人参加了发布会、听取了大会报告。

《中国学术期刊国际引证报告(2012版)》(缩写为CAJ-IJCR)是基于中国正式出版的学术期刊(未包括港澳台地区)2011年被Web of Science的JCR来源文献为引用统计源,科技类的统计源选用SCI收录的8336种期刊,社科类统计源是SSCI和A&H收录的2996种期刊。给出了5025个中国学术期刊的引证报告。

按照各期刊被上述期刊引用的他引总被引频次和他引影响因子的加权(他引总被引频次权重为2,他引影响因子权重为1)综合排序,位列前5%的期刊(科技类共175种)被评为“2012 中国最具国际影响力学术期刊”,前5%~10%的期刊被评为“2012 中国国际影响力优秀学术期刊”。中国地质学会刊物《矿床地质》、《地质学报》(中、英文版)、《地质论评》和《岩石矿物学杂志》均进入“Top5%”。

综合分析结果表明,有34种被SCI收录的期刊(占中国被SCI收录期刊的28%)未能进入“Top5%”,尚有23种被SCI收录的期刊(占中国被SCI收录期刊的18%)未能进入“Top10%”;而据Web of Science的JCR报告分析,中国的上述“Top10%”期刊中的非SCI期刊,在SCI中的他引总被引频次和他引影响因子已高于1239种SCI收录的其他期刊。