

芬兰塔维瓦拉巨型黑色片岩型镍-铜-锌 矿床地质特征及成因*

丁成武^{1,2}, 聂凤军¹, 刘翼飞¹, 曹毅¹, 张伟波¹, 王丰翔¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

塔维瓦拉镍-铜-锌-钴矿床位于芬兰奥卢(Oulu)省凯努(Kainuu)区内, 西北距奥卢170 km, 地理坐标为N28°04'37", E63°58'25", 是目前世界上最大的以黑色片岩为容矿围岩的镍、铜和锌矿床。迄今为止探明的矿石量为2053 Mt, 镍、铜、锌和钴的平均品位分别为0.22%、0.13%、0.49%、0.02%(塔维瓦拉矿业公司, 2012, 网上公布)。尽管矿区及外围的地质调查和找矿工作已有百余年历史, 但是直到20世纪末, 部分矿化地段才进行了系统勘探和采选冶研究。2004年, 塔维瓦拉矿业公司对其进行了集中钻探和资源量评估工作, 2008年, 该矿床正式进入露天开采阶段, 目前镍的年产量维持在1.5~1.8万吨。

1 成矿背景

塔维瓦拉矿床产在凯努-奥托昆普(kainuu-outokumpu)地区北部的古元古代凯努片岩带中, 靠近区内太古代—元古代地层之间的界线(图1)。区域内主要为太古代和古元古代老地层, 岩性主要为厚层黑色片岩、千枚岩、云母片岩、变质杂砂岩和石英岩, 以及少量的橄榄岩、蛇纹岩、滑石碳酸岩(Loukola-Ruskeeniemi et al., 1998)和滑石-碳酸岩蚀变的蛇纹岩套地幔橄榄岩(Eilu, 2012), 区内的岩石经历了绿片岩到角闪岩相的变质作用。通过叶蛇纹石-橄榄石-透闪石矿物组合可以推测, 其变质峰期温度为480~530℃(200~400 MPa)(Peltonen et al., 1996)。区内断裂构造较为发育, 走向多为NE向(图1), 其中, 部分断裂切穿矿体或构成了矿体的边

界。区内岩浆侵入活动并不发育, 未见侵入岩体出露。需要指出的是, 除了塔维瓦拉矿床外, 还产出有与蚀变蛇纹岩有关的滑石矿床以及赋存在细粒石英岩中的铜-钴-锌硫化物矿床。

2 矿床地质

镍、铜和锌矿石主要在石英岩、云母片岩和黑色片岩中呈浸染状、角砾状和条带状产出, 其中超过90%发育在高变质和强变形的黑色片岩中(Loukola-Ruskeeniemi et al., 1996)。区内的黑色片岩可分为3类: ①低镍-锰($w(\text{Ni}) < 0.1\%$, $w(\text{Mn}) < 0.8\%$)黑色片岩, 相当于正常的凯努-奥托昆普地区的黑色片岩; ②富镍黑色片岩($w(\text{Ni}) \geq 0.1\%$, $w(\text{Mn}) < 0.8\%$), 通常含有致密细粒的浸染状硫化物, 是该矿床的主要组成部分, 其中的镍常均匀分布; ③富锰($w(\text{Mn}) \geq 0.8\%$)黑色片岩。除了上述3种, 在黑色片岩中还常见10 cm到3 m厚的黑色钙质硅酸岩($w(\text{Ca}) \geq 3.5\%$)夹层。

矿床主要由库斯兰皮(Kuusilampi)和科尔米索皮(Kolmisoppi)2个矿体组成(图1), 其中库斯兰皮矿体的长、宽分别为2.8 km、40~600 m, 钻孔揭露的最大深度为800 m, 科尔米索皮矿体的长、宽分别为2.5 km、30~350 m, 钻孔揭露的最大深度为800 m。矿石主要呈浸染状、角砾状和条带状产出, 并构成厚大的层状或似层状矿体。矿石中的金属矿物主要有黄铁矿和磁黄铁矿, 还见黄铜矿、闪锌矿、硫锰矿和镍黄铁矿, 除此之外局部地段也见少量电气

* 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)的资助

第一作者简介 丁成武,男,1987年生,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:dingchengwude@163.com

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

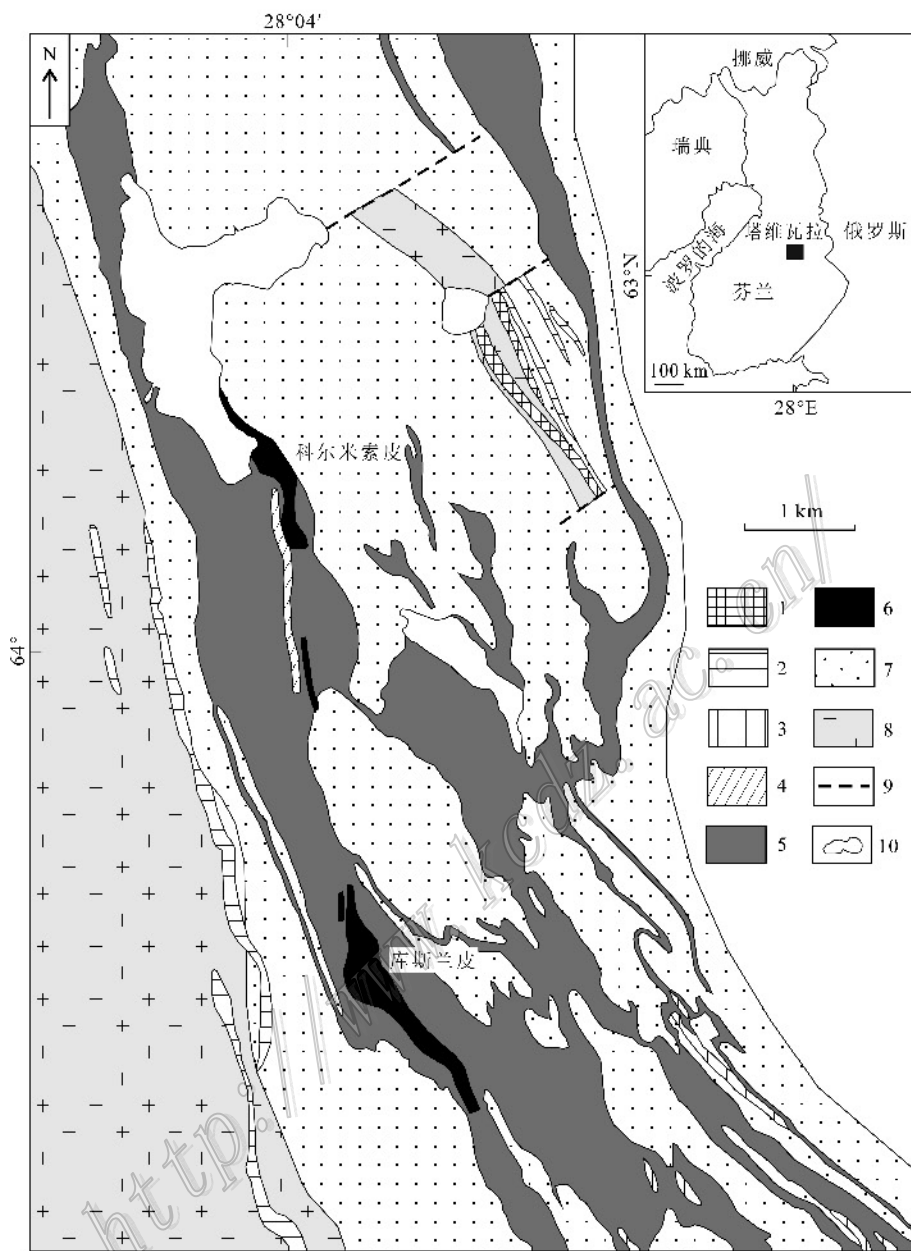


图1 芬兰塔维瓦拉黑色片岩型镍铜锌矿地质简图(根据 Loukola-Ruskeeniemi et al., 1996 资料改编)

1—橄辉岩; 2—变质辉绿岩; 3—蛇纹岩/滑石-碳酸岩; 4—富锰黑色片岩; 5—黑色片岩; 6—镍铜锌矿体; 7—云母片岩、含云母片岩夹层的石英岩、石英岩; 8—古太古代花岗岩和片麻岩; 9—断层; 10—湖泊

石、金红石、沥青铀钍矿、独居石、铈硫镍矿、黄锡矿、辉钼矿、白钨矿,且它们大多呈细粒浸染状产出。

矿床镍铜锌矿石样品中的石墨、硫、镍、铜、锌和锰含量较高,且其中的石墨与其他金属元素含量不具有任何相关性;与低镍-锰黑色片岩相比,富镍黑色片岩的钠含量明显偏低;黑色片岩和黑色钙质硅酸岩中黄铁矿矿化度(黄铁矿中的铁/(黄铁矿中的铁+活性铁),用于限定古老岩石的沉积环境特征,

可把沉积物分为富氧、低氧、缺氧3类)为0.56~0.99(Loukola-Ruskeeniemi et al., 1996),其中,黑色钙质硅酸岩和富石榴子石、富锰黑色片岩具有较低的黄铁矿矿化度,而含有细粒浸染状硫化物的黑色片岩的黄铁矿矿化度一般在0.9左右;硼的平均含量在低镍-锰黑色片岩中比在其他黑色片岩中要高,在黑色钙质硅酸岩中最低,塔维瓦拉黑色片岩的平均 $B/Al_2O_3 \times 10^4$ 值为2.4~4.8。

塔维瓦拉黑色片岩稀土元素的球粒陨石标准化模式为右倾斜曲线,并且具有铈和铈的负异常,用页岩标准化后同样具有铈的负异常(Loukola-Ruskeeniemi et al., 1996)。黑色钙质硅酸盐岩比黑色片岩具有较低的稀土元素含量,特别是镧-铈含量。

低镍-锰黑色片岩中磁黄铁矿、黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值分别为 -5.2% 、 -4.3% ,富镍黑色片岩中的磁黄铁矿和黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值都是 -3% ,黑色钙质硅酸盐岩中的磁黄铁矿、黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 $-3.8\% \sim +20.8\%$ 、 $-7.1\% \sim +20.8\%$ 。黑色片岩中有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值为 $-24\% \sim -27\%$,黑色钙质硅酸盐岩样品的有机碳同位素值为 $-23\% \sim -24\%$ (Loukola-Ruskeeniemi et al., 2013)。

3 成矿作用

鉴于镍、铜和锌均匀分布于黑色片岩的内部而不是仅仅存在于片岩的片理中,并且大量细粒石墨也会妨碍这些元素的大规模运移,所以镍不太可能是黑色片岩形成之后又进入黑色片岩中的,再综合考虑到矿床的规模(2053 Mt),因此,该矿床在一定程度上是同生矿床。

黑色片岩的 $\text{B}/\text{Al}_2\text{O}_3 \times 10^4$ 平均值、 $\delta^{13}\text{C}$ 值和稀土元素分布模式中铈的负异常等,均暗示矿床是在海相沉积环境中形成的;黄铁矿矿化度、高的硫(4%~13%)和碳(5%~10%)含量,以及有机碳和硫、钒、钼、镍之间的弱相关性等都指示了一个缺氧(可能是静海相)封闭的沉积环境;同时,黑色片岩中较高的镍、铜、锌和锰含量,较高的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,稀土元素的富集,黑色钙质硅酸盐岩相对于其他黑色片岩所表

现出的中轻稀土元素的亏损以及富镍黑色页岩中的钒亏损等都指示了热液流体活动的发生(Young et al., 2013)。这种富有机质的沉积物与富硫酸盐热液流体之间的反应,造成了硫化物的形成和硫同位素的分馏,反应过程中的细菌和热化学硫酸盐还原作用是造成还原硫生成和硫同位素异常分馏的原因。

综上所述,塔维瓦拉黑色片岩形成在含有大量生命体的缺氧海盆中,20亿年前大气中的氧含量开始增加,造成了原始厌氧生命的大规模灭绝,从而造成了片岩中极大量的有机碳和硫的沉淀(Loukola-Ruskeeniemi et al., 1998)。同时,在其形成过程中还伴随有多种流体活动,一种流体是来自海盆底部的流体,这种流体可能与超镁铁质岩石有关,流体活动一方面造成了海水中镍、铜、锌含量的升高和富镍黑色片岩的沉淀,另一方面黑色片岩中的钙质硅酸盐岩夹层可能直接从这种流体中沉淀出来;另一种流体是来自海盆外部的含氧流体,这种流体的活动具有周期性,造成了富锰黑色片岩的沉淀。不同流体对海水的改造以及间歇性活动造成了各种黑色片岩的互层出现(图2)。

4 初步结论

(1) 塔维瓦拉黑色片岩的沉积环境是含有大量生命体的缺氧海盆,20亿年前大气中氧含量的增加可能导致了片岩中异常高的碳和硫含量。

(2) 矿体、各种黑色片岩、钙质硅酸盐岩在一定程度上是同生的,且在塔维瓦拉沉积物的形成过程中伴随有热液流体的活动,不同流体对海水的改造以及间歇性活动是造成各种黑色片岩互层出现及矿床

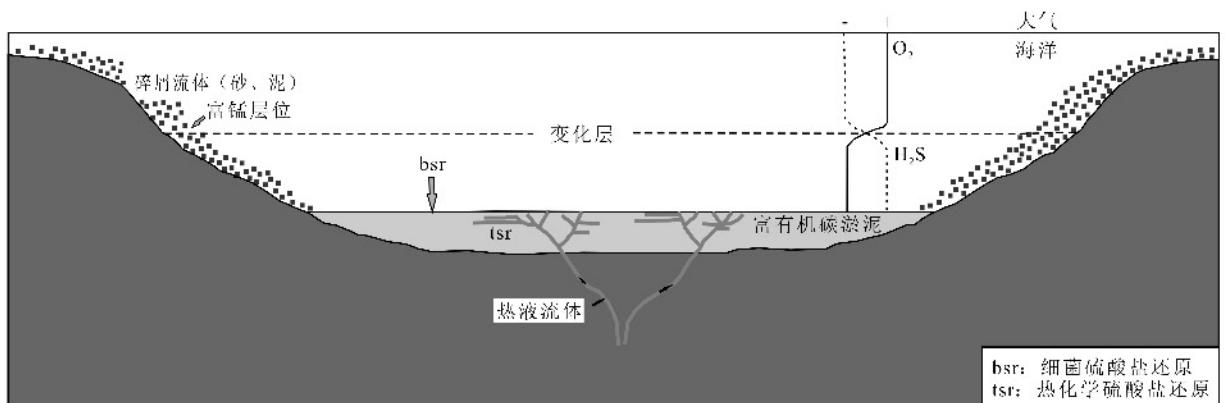


图2 塔维瓦拉矿床形成模式简图(根据 Young et al., 2013 资料改编)

形成的重要原因。

(3) 富有机质泥与热液流体之间的反应对硫化物的形成起到了重要的作用,同时,细菌和热化学硫酸盐还原作用是造成硫同位素异常分馏的原因。

(4) 华北克拉通北缘西段和华南地区黑色页(片)岩岩层分布广泛,个别地段如湖南张家界(柑子坪、三岔)、贵州(遵义、丹寨、三都)等地区镍、钼和贵金属异常带(点)星罗棋布(李胜荣等,2000),是寻找塔维瓦拉黑色片岩型镍多金属矿床的有利地段。

参考文献/References

李胜荣,高振敏. 2000. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪[J]. 中国科学(D辑),30(2):169-174.

Eilu P. 2012. Mineral Deposits and Metallogeny of Fennoscandia[C]. Geological Survey of Finland, Special Paper, 53:401.

Loukola-Ruskeeniemi K and Heino T. 1996. Geochemistry and genesis of the black shale-hosted Ni-Cu-Zn deposit at Talvivaara, Finland [J]. *Econ. Geol.*, 91:80-110.

Loukola-Ruskeeniemi K, Uutela A, Tenhola M and Paukola T. 1998. Environmental impact of metalliferous black shales at Talvivaara in Finland, with indication of lake acidification 9000 years ago[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 63(1-3):395-407.

Loukola-Ruskeeniemi K and Hannu L. 2013. Multiphase evolution in the black-shale-hosted Ni-Cu-Zn-Co deposit at Talvivaara, Finland[J]. *Ore Geology Reviews*, 52:85-99.

Peltonen P, Kontinen A and Huhma H. 1996. Petrology and geochemistry of metabasalts from the 1.95 Ga Jormua Ophiolite, northeastern Finland[J]. *Journal of Petrology*, 37(6):1359-1383.

Young S A, Loukola-Ruskeeniemi K and Pratt L M. 2013. Reactions of hydrothermal solutions with organic matter in Paleoproterozoic black shales at Talvivaara, Finland: Evidence from multiple sulfur isotopes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 367:1-14.

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