# 加拿大曼尼托巴省福克斯矿体周围金属分散的研究

## 前　言

本文目的是研究曼尼托巴省利恩湖西南27英里的福克斯铜-锌矿体中伴生元素的原生分散特征。对109个样品中的17种组分测了近1400数据。这17种组分是：Cu、Pb、Zn、Co、Hg、Mo、Ni、Cr、S、挥发物、$K_2O$、$Na_2O$、CaO、$ExK_2O$、$ExNa_2O$、ExCaO和$SiO_2$。样品采自2100英尺标高，经过钻孔和穿脉巷道、横穿矿体的三条剖面。

1960年在该区作了区域性地质填图，1961年发现矿体，1970年投产。地质简图见图1。

矿区岩层认为是太古代的，属于沃塞克旺群的部分变质沉积岩和部分变质火山岩。岩层呈等斜褶皱，向北陡倾，根据同位素年令测定，得知受有克诺造山运动和哈德逊造山运动的影响。岩层主要是石英-角闪石和石英-角闪石-黑云母片麻岩、板状沉积岩、长石砂岩、石英岩和安山岩。这些岩层均被辉长岩、闪长岩、闪岩、花岗岩和霏细岩等岩脉所侵入。

硫化矿主要为块状，局部呈浸染状。矿物为黄铜矿和闪锌矿；其他重要硫化矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂和方铅矿。矿体成一整体，其走向为北85°东，向北倾斜，倾角近70°。矿带周围有一热蚀变带，热蚀变带的走向北70°东，有石英、白云母、绢云母、黑云母、闪石、滑石和绿泥石等特征矿物。围岩变化大，大部分已蚀变，失去其原来组分。

## 采样和分析方法

在2100英尺标高的三条剖面（见图1）上以50英尺间距采样。

剖面1—包括钻孔UF648全长和主穿脉巷道到竖井附近这一段，总长约3000英尺，其中在矿体以北的一段约2000英尺，在矿体以南一段约1000英尺。此剖面称作“横切剖面”。

剖面2—位于矿体以东，通过钻孔UF649，钻孔长1200英尺，以50英尺间距采样。

剖面3—位于矿体以西，通过钻孔UF647。在该孔最前的1100英尺那一段采样。

取样时，尽可能保持50英尺间距；但在无代表性特征的地方，在标志点3英尺范围内采样。

对钻孔岩心取样时，取大约6英寸长一段。所有样品都要洗涤去掉灰尘泥土等污染，然后破碎过100网目筛。将常用的几种分析方法（原子吸收光谱，X射线萤光光谱和分光光度计）结合起来进行17个组分的测定。用原子吸收光谱测定Cu、Pb、Zn、Co、Cr、Ni和Hg。

精确称出1克样品，用王水溶解，使容量达到50毫升。王水几乎可将这些金属全部溶解。有几个样品用$HF/HClO_4$酸可完全溶解，发现硅酸盐相含有不到1%的碱金属。根据12次重复分析，测定结果的分析精度用变化系数表示如下：Cu—4.6%，Pb—7.1%，Zn—6.4%，Co—6.6%，Cr—9.5%，Ni—9.9%。另取部分样品用$HNO_3/H_2SO_4$混合酸冷提取，再用原子吸收法测定Hg。用变化系数表示的测定精度不到10%。Mo也是另取部分岩粉用$H_2SO_4$热提取，再用抗坏血酸-硫氰酸钾法作比色测定（方法中采用了溶剂提取手续）。

用X射线萤光光谱法测定$SiO_2$、$Na_2O$、



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$CaO$和S。将岩粉用硼酸作本底做成球团。可提取的$K_2O$、$Na_2O$和CaO，是和测定碱金属一样，用王水溶解，溶解物用火焰光度计来测定。测定精度高，其变化系数高于4%。

文中所提到的挥发物代表燃烧损失测定。是用3克岩粉在1050°C温度中燃烧30分钟进行重量测定的。

## 结　果

**平均值、方差曲线与相关关系**　用平均值和标准离差表示的分析结果示于表1。表中包括图1所表示的7种岩层的数据和总数据。矿体本身的数值已从计算结果中扣除。蚀变带比其它岩层含有较高的Cu和Co，含有较低的Hg。长石砂岩-石英岩的Cu和Co含量低，而泥质板岩和石英-角闪石-黑云母片麻岩的Cu、Ni、Zn的平均值较高，反映出矿体以北大约500英尺的星点矿化。总的讲，岩层之间元素的差别不显著，特别是考虑到标准离差所表示的变化性时更是如此（表1）。

三条剖面的变化曲线示于图2和图3。绘曲线所用的值是三个样品移动平均值。除蚀变带外，其微迹元素含量有明显差别，只有Cu和Co的浓度是趋向矿体方向增大（图2），但对于所测定的17种组分中，没有一种有大范围的分散模式。图2、图3的变化曲线指出，岩石和元素之间没有共生关系，只

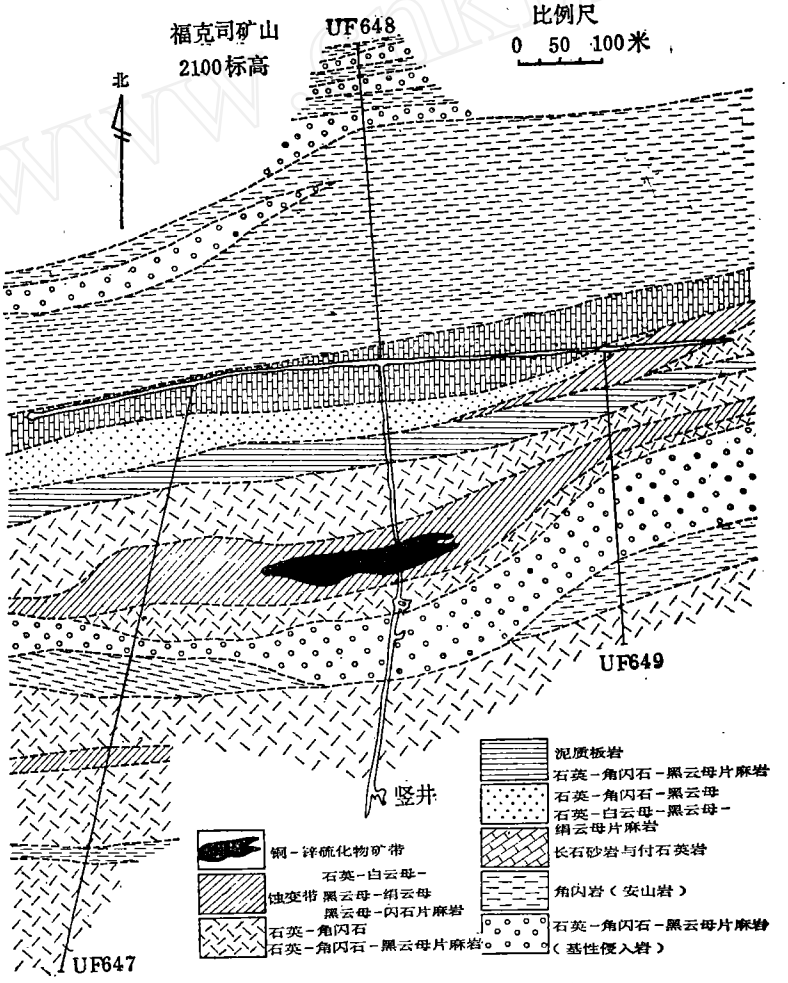


图1　地质略图（示有钻孔位置）



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

## 分 析 结 果 总 览

表1

（所示数值为算术平均值，误差为标准误差。括号内为每类样品的个数。岩石类型见图1。）

| | 总数据 | 蚀变带 | 石英-角闪石，石英-角闪石-黑云母片麻岩 | 泥质板岩，石英-角闪石-黑云母片麻岩 | 石英-角闪石-黑云母，石英-白云母-黑云母-绢云母片麻岩 | 长石沙岩与付石英岩 | 角闪岩（安山岩） | 石英-角闪石-黑云母片麻岩 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu ppm | 98 ±206(109) | 425 ±572(9) | 57 ±37(30) | 146 ±78(8) | 58 ±94(9) | 16 ±6(6) | 81 ±58(23) | 52 ±48(13) |
| Pb ppm | 44 ±76(109) | 48 ±15(9) | 59 ±129(30) | 77 ±77(8) | 33 ±8(9) | 48 ±16(6) | 27 ±15(23) | 34 ±17(18) |
| Zn ppm | 113 ±314(109) | 68 ±38(9) | 64 ±26(30) | 696 ±878(8) | 44 ±19(9) | 48 ±10(6) | 56 ±36(23) | 106 ±228(18) |
| Co ppm | 21 ±10(109) | 27 ±13(9) | 21 ±9(30) | 25 ±9(8) | 25 ±12(9) | 14 ±4(6) | 20 ±8(23) | 19 ±10(18) |
| Hg ppm | 66 ±50(82) | 32 ±11(6) | 66 ±25(22) | 93 ±81(5) | 55 ±39(8) | 66 ±24(6) | 63 ±72(72) | 56 ±41(11) |
| Mo ppm | 7 ±4(65) | 2 ±3(2) | 5 ±4(17) | 7 ±5(3) | 10 ±8(4) | 2 ±2(4) | 3 ±4(20) | 5 ±4(9) |
| Ni ppm | 57 ±42(109) | 58 ±27(9) | 35 ±19(30) | 113 ±76(8) | 54 ±58(9) | 48 ±30(6) | 72 ±33(23) | 48 ±27(18) |
| Cr ppm | 140 ±72(109) | 126 ±55(9) | 121 ±66(30) | 12 ±51(8) | 115 ±45(9) | 150 ±82(6) | 168 ±78(23) | 156 ±80(18) |
| S% | 0.08 ±0.13(65) | ±0.05 0.04(2) | 0.10 ±0.16(17) | 0.33 ±0.28(3) | 0.05 ±0.05(4) | 0.04 ±0.03(4) | 0.06 ±0.03(20) | 0.04 ±0.03(9) |
| 挥发物% | 1.40 ±0.88(65) | ±0.72 0.10(2) | 1.31 ±0.61(17) | 0.99 ±0.09(3) | 0.52 ±0.24(4) | 1.63 ±0.48(4) | 2.39 ±1.12(20) | 0.89 ±0.43(9) |
| $K_2O$% | 1.0 ±0.8(65) | 1.2 ±0.5(2) | 1.2 ±0.7(17) | 1.0 ±0.03(3) | 1.5 ±0.5(4) | 25 ±0.5(4) | 0.6 ±0.6(70) | 0.9 ±0.7(9) |
| $Na_2O$% | 2.6 ±1.2(65) | 2.7 ±1.2(2) | 3.0 ±1.1(17) | 3.4 ±1.6(3) | 2.5 ±1.1(4) | 2.2 ±0.9(4) | 2.4 ±0.7(20) | 3.3 ±0.7(9) |
| CaO% | 7.3 ±3.7(65) | 7.7 ±0.2(2) | 6.7 ±3.3(17) | 8.2 ±3.4(3) | 7.4 ±0.5(4) | 2.5 ±2.3(4) | 9.9 ±3.2(20) | 7.3 ±2.3(9) |
| $ExK_2O$% | 0.33 ±0.41(65) | 0.43 ±0.65(2) | 0.48 ±0.50(17) | 0.31 ±0.32(3) | 0.62 ±0.55(4) | 0.78 ±0.44(4) | 0.15 ±0.24(20) | 0.34 ±0.41(9) |
| $ExNa_2O$% | 0.19 ±0.11(65) | 0.11 ±0.04(2) | 0.15 ±0.12(17) | 0.12 ±0.8(3) | 0.10 ±0.05(4) | 0.08 ±0.04(9) | 0.24 ±0.13(20) | 0.15 ±0.08(9) |
| ExCaO% | 0.74 ±0.95(65) | 0.28 ±0.14(2) | 0.78 ±1.45(17) | 1.57 ±1.54(3) | 0.37 ±0.23(4) | 0.18 ±0.04(4) | 1.20 ±1.25(20) | 0.68 ±0.85(9) |
| $SiO_2$% | 57.8 ±9.2(65) | 53.3 ±1.6(2) | 58.6 ±7.0(17) | 57.2 ±3.1(3) | 56.8 ±4.2(4) | 79.7 ±14.3(4) | 55.7 ±6.5(20) | 55.5 ±5.0(9) |

$ExNa_2O$等—为用酸可提取的Na O；$Na_2O$为$Na_2O$的全量（译者注）



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有一种岩石除外，那就是角闪岩(安山岩)，它的某些变量表现有明显的分散模式，例如，$SiO_2$、$Na_2O$和$K_2O$低，CaO和Cu高。

作出了17种组分的相关矩阵，结果归纳于表2。值得注意的是Cu、Pb、Zn、Co、Hg和Mo（可是矿石就是脉石元素）并没有显示出任何显著的亲合性。确实存生伴生关系，例如Zn和S有明显的相关关系，这种伴生关系证明有简单化学的亲合性。我们把$K_2O$和CaO之间的负相关解释为长石成分的反映。随着斜长石含量的增大，钾长石的含量减小。同样，我们把$Na_2O$全量和酸可溶解$Na_2O$之间的负相关看作是由于随着钠含量的增大，斜长石的稳定性降低，这与鲍温的反应系列是一致的。

**因子分析** 为了估计所测定的组分的空间分布特征，用Q式因子分析方法对数据进行了分析。用这种方法能将个数很多的变量减少到只有几个（在我们这里是将17个变量减少成三个），称为因子，每个因子由原来数目的变量以不同比例组成。此外，Q式因子分析还给出在每个样品位置的因子的得分。因为在剖面1对17种组分都作了测定，其它两个剖面只作了6种组分（Cu、Pb、Zn、Co、Ni、Cr）的测定，所以只对剖面1进行了分析。因子分析结果见表3，是变量（即组分）的三种不同组合的方差最大因子矩阵。

首先，对17个变量（即17种组分）作了计算(表3a)，三个因子表示了方差的79%。第一个因子以主要氧化物占优势，Co是此因子的显著成分，它在这里离析出来是它亲铁的一种标志。在二个因子中将Mo（一种亲钙元素）和Cr（一种亲石元素）离析出

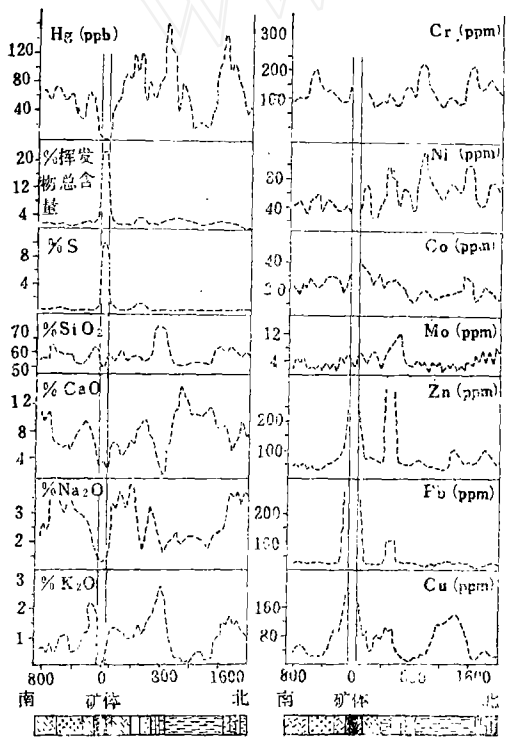


图2 穿脉巷道剖面的方差曲线
（岩性剖面参照图1所示岩类）

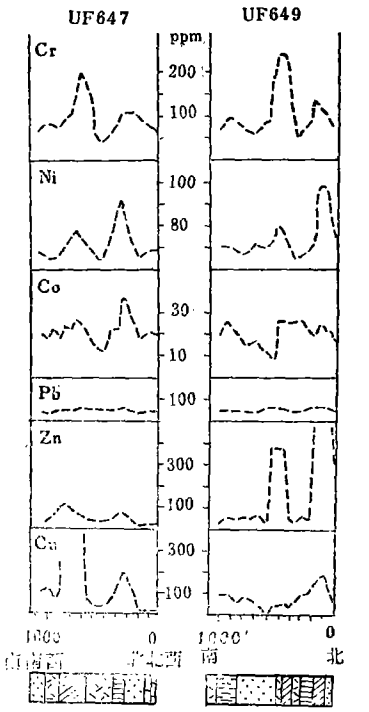


图3 钻孔UF647和UF649剖面方差曲线
（岩性剖面参照图1所示岩类）



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

来。因此，可看成是亲钙亲石元素的混合组合。第三种因子析出Mo和Cu（均为亲钙元素），是占优势的成分，而Ni和Cr（分别为亲铁和亲石元素）具有负相关关系。因此，此因子可认为是亲钙的组合。

同样，对8种金属组分的计算结果（表3b）表现有和上面对17种变量分析结果中主要氧化物占优势的模式相似。因子Ⅰ中，Ni和Co的值高，Mo的值低，是亲铁组；因子Ⅱ中是Mo、Hg和Cr的值高，是亲钙亲石的混合组合。顺便要讲一下，这三种元素在高的pH和Eh的环境中迁移率高。第三个因子表现出Cr组分高，Ni和Zn组分低。Cr是一种亲石元素，所以可以认为此因子是一种亲石组合。

在数据的第三种组合中9个变量都是主要氧化物（表3c）。此表没有显示出任何有意义的组合（可能因为三个主因子只说明了系统的累积方差的21%）。此种组合的意义是，岩性变化是随机的，在化学上各种岩石的差异不是太大。

所测17种组分的相关矩阵简表　　表2

| r<+·5 | r ±(·5~·7) | r ±(0.7-0.9) | r>±0.9 |
|---|---|---|---|
| Cu | Ni-Cr(0.69) | $\Sigma K_2O$-Ex$K_2O$ | Zn-S |
| Pb | Ni-挥发物(0.58) | (0.79) | (0.93) |
| Zn | Zn-挥发物(0.68) | $\Sigma CaO$-Ex$Na_2O$ | |
| Co | S-挥发物(0.61) | (0.76) | |
| Hg | $\Sigma K_2O$-$SiO_2$(0.67) | | |
| Mo | -$\Sigma CaO$(0.58) | | |
| | $\Sigma CaO$-$SiO_2$(0.69) | | |
| | -Ex$CaO$(0.60) | | |
| | $\Sigma Na_2O$-Ex$Na_2O$ | | |
| | (-0.55) | | |

以变化曲线表示的，给出每个样品点因子得分的因子变化曲线示于图4，在图4还附有岩石断面图。这些变化曲线未能显示出任何清晰的、相对矿体而言的空间分布模式；但在闪岩（安山岩）上确实显示出一种有特征的模式。

## 讨论与结论

对福克斯矿体两侧岩石的17种组分评价的结果，发现在蚀变带中有几个变量有化学

横穿剖面由方差极大因子矩阵给出的主因子组合（括号内为方差极大因子得分）　　表3

| | 因子Ⅰ | 因子Ⅱ | 因子Ⅲ |
|---|---|---|---|
| (a) 所有17个变量<br>Cu、Pb、Zn、Co、Hg、Mo<br>Ni、Cr、$SiO_2$<br>$K_2O$、$Na_2O$、CaO<br>Ex$K_2O$、Ex$Na_2O$、Ex$CaO$<br>S、挥发物 | Ex$Na_2O$(+2.518)<br>CaO(+2.271)<br>$SiO_2$(+1.465)<br>Co(+1.370)<br>$Na_2O$(+0.715) | $K_2O$(+1.751)<br>Ex$K_2O$(+1.772)<br>$SiO_2$(+1.503)<br>Mo(+1.410)<br>$Na_2O$(+1.372)<br>Cr(+1.021) | Cr(-1.853)<br>Mo(+1.847)<br>Ex$Na_2O$(+1.583)<br>Ni(-1.382)<br>$Na_2O$(+1.583)<br>Cu(+0.702) |
| 用这些因子解释的累积方差的% | 36.74 | 73.45 | 79.07 |
| (b) 8个变量<br>Cu、Pb、Zn、Co、Hg、Mo<br>Ni、Cr | Ni(+2.111)<br>Co(+1.984)<br>Mo(-1.869) | Mo(+2.395)<br>Hg(+1.627)<br>Cr(+1.246) | Ni(-0.622)<br>Cr(+0.521)<br>Zn(-0.385) |
| 用这些因子解释的累积方差的% | 40.24 | 70.75 | 70.86 |
| (c) 9个变量<br>$SiO_2$、$K_2O$、$Na_2O$、CaO<br>Ex$K_2O$、Ex$Na_2O$、Ex$CaO$<br>S、挥发物 | CaO(+2.204)<br>Ex$Na_2O$(+1.797)<br>S(+0.956) | $Na_2O$(-2.224)<br>$SiO_2$(+0.748)<br>Ex$K_2O$(-0.737) | $K_2O$(+2.345)<br>挥发物(+0.782)<br>$Na_2O$(-0.834) |
| 用这些因子解释的累积方差的% | 14.34 | 19.27 | 21.85 |



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

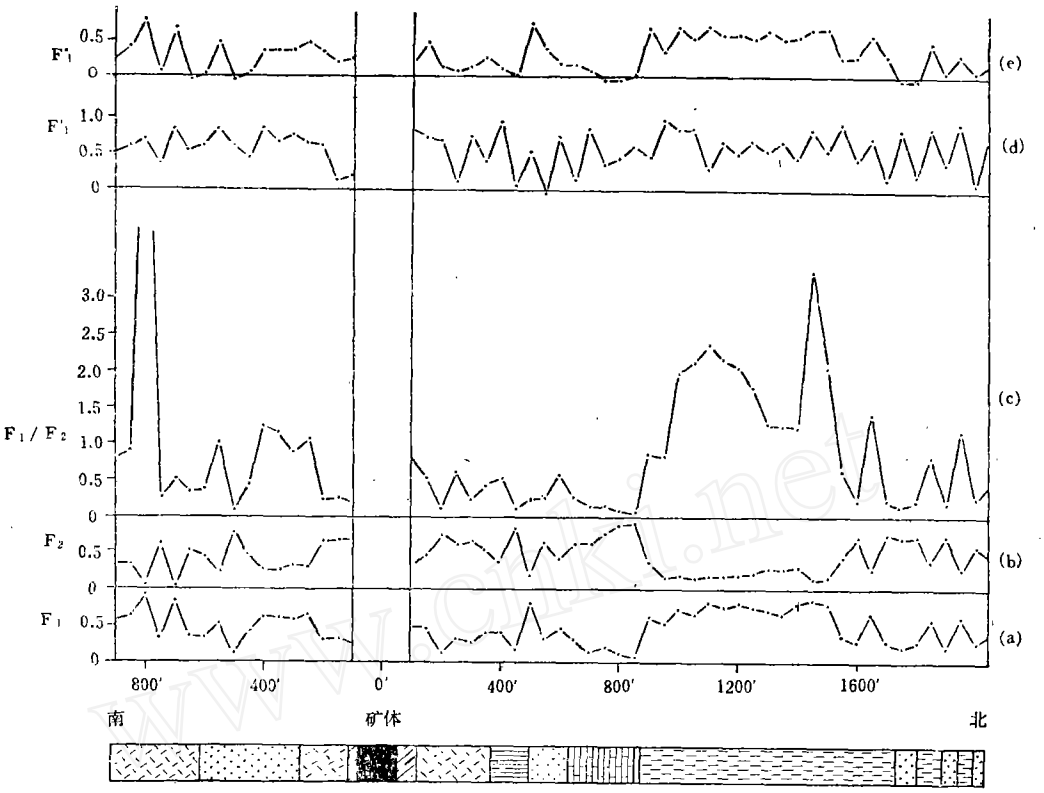


图4　横穿剖面方差极大因子曲线（岩性剖面参照图1所示剖面）

（a）、（b）和（c）：分别为17个变量的第一因子、第二因子及其比值（参见表3）；

（d）：8个变量（Cu、Pb、Zn、Co、Hg、Mo、Ni、Cr）的分析结果的第一因子（参见表8b）；

（e）：9个变量（$SiO_2$、$K_2O$、$Na_2O$、CaO、$ExK_2O$、$ExNa_2O$、ExCaO、S、挥发物）的分析结果的第一因子（参见表3c）。

异常。在通过矿体的主剖面上蚀变带的特征是：Cu、Pb、Zn、Co和$K_2O$的值高，$Na_2O$和CaO的值低（图2）。在矿体以西，蚀变带的标志是Cu、Zn、Ni、Cr值高；在矿体以东，则是Zn、Ni、Cr值高（图3）。在蚀变带以外，似乎只有Cu和Co的值（图2）显示出向矿体方向系统地增大，所以它们可能是有价值的矿化标志；但是这种模式分布范围不大。金属分布与岩石类型的关系不突出，说明变质作用已使这些岩石完全均化。只有一种岩石，角闪岩（安山岩）确实显示痕量元素有清楚的含量，在因子分子分析结果中也表现有清楚的模式。

17种组分的相关矩阵显示出元素之间的相关系数大，在化学上是相关的。Q式因子分析未能证明对矿体存在有空间分布模式。提取出来的因子的组合，我们把它解释为是简单的化学结合（即金属硫化物或氧化物相的亲合性）。

我们猜想矿体发生侵位是在区域温度上升时期，矿化与变质作用可能是同时期的。另外，因为矿体确实表现有遭受变质作用的现象，成矿作用发生在基诺地质年代，以后发生的变质作用是丘吉尔造山运动的结果，这是可能的。

对于利恩湖的镍-铜矿床来讲，已证明其年代至少是2045百万年，比丘吉尔造山运

（下转第83页）



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的富铜的亚带，平均含铜16%，含锌6%。此富铜带与其他钻孔的任何带到现在都对比不上。

对分带的任何解释，都被方铅矿与(或)黄铜矿在变质作用和（或）变形时的再活化所复杂化了。这些矿物通常在一起呈孤立的斑点或细脉离块状硫化物很远处出现，有时成层地出现在块状硫化物之上。铅再活化的一个明显例子发生在一个钻孔里面，在该钻孔中晚期伟晶岩的化验结果，在42英尺多范围里面含铅0.68%，但上下邻近的块状硫化矿的化验结果分别为最近的36英尺范围内含铅0.26%，和在最近的41英尺范围内含铅0.37%。但在此情况下铜没有明显的活动。

伊佐克湖中心带的主要硫化矿物为闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿。次要的和微量的硫化矿物和硫酸盐类包括有方铅矿、黝铜矿和一种银硫酸盐类（暂定为硫锑铜银矿）。与这些硫化物伴生的其他有意义矿物是少量的磁铁矿，局部有少量锌尖晶石。闪锌矿以不同的变种产出，颜色呈灰琥珀色至黑色。浅色的几种通常产于闪锌矿与硅酸盐邻近的地方，而黑色的几种通常与黄铁矿伴生。颜色可能反映变质作用时铁参与的程度。如果有锌尖晶石，则它与闪锌矿-硅酸盐接触带伴生。当然，在变质含锌的矿床中它是一种特征矿物。磁铁矿在整个硫化矿中与黄铁矿伴生。我们认为，它是一种黄铁矿变质破碎的产物。

在块状硫化矿体内，局部见到规模不大的硫化物层；通常是一些富黄铁矿和富含闪锌矿的互层，但是这些分层并不多，也不突出，而多数硫化物在很大的厚度呈一种实际上是均匀的集合体产出。最明显的结构特征是有黄铁矿斑状变晶存在。这些特征在富含闪锌矿的矿石中特别明显。斑状变晶的直径可达2英寸，最常见的是1/4英寸或稍大一点。

总之，伊佐克湖的硫化矿体与许多其他这类矿床相似，是那种变质的火山成因的块状硫化矿床。它与加拿大地盾的太古代岩层中的多数这种矿床的不同处在于，锌的平均含量特高，高于铜和铅的平均含量，而且比许多但不是所有的这样的矿床变质、变形更强烈。这种差异的学术意义不大，但却有经济意义！我们深信以下事实：此矿床的品位高，矿石平均颗粒大（主要是由于变质作用）、矿床大部分或者全部可能用露天开采，虽然伊佐克湖位于边远地区，但这是值得开采的一个矿床。

摘译自《Canadian Mining Journal》，1976，Vol. 97，№5，P.24～27

作者P.L.莫尼，J.B.赫斯洛普

金益 译 柳淮之、贝庚 校

（上接第89页）

动要早。因此，如果福克斯湖和利恩的矿床属于同一成矿期，我们提出前者属于基诺年代的可能是正确的。

为了评价主元素变化与矿体的空间关系，我们测定了Na、K和Ca，已证明在阿比提比地区是有这样的关系的。在我们这里观察到$Na_2O$含量减少，但只局限于蚀变带。同样，硫和挥发物可当作是矿体周围有热力梯度和化学梯度的一种良好标志，因为硫化物比围岩保持热量的时间要长，正如表1中的数据和图2、图3所证明的那样，这些变量并没有显示出与矿体有关的空间分布模式。

译自 《The Candian mining and metallurgical bulletin》1976.Vol.69，№770，P.104～110

金益 译 罗春元、贝庚 校



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net