智利北部斑岩铜矿系统的航磁特征及其地质意义

1 引 言

智利北部以寻找黑色和有色金属为目的地质勘探愈来愈多地使用区域航磁测量，其中有些测量面积相当大。这种测量的例子有20世纪60年代以来智利ENAP石油公司和20世纪70年代至今智利地质调查局(Sernageomin)开展的航磁工作。随后，有的测量是由CODELCO-Chile等矿业公司所作的，这些公司从20世纪90年代初一直在积极从事区域矿产勘查。

1991年CODELCO-Chile开始了一项寻找斑岩铜矿床的大范围勘查计划，除其它勘查方法外，还沿Domeyko断层带采用了大规模的高分辨率航空磁测。Domeyko断层带在空间上与一些第三纪已知产量最高的斑岩铜矿床有关，如La Escondida、Chuquicamata、El Abra和Collahuasi矿床。此次测量覆盖面积约800km(南北)×60km(东西)。测量完成后，编出首批大比例尺彩色栅格图，它们显示出总体上为东西向的大型区域磁异常。看来所有已知斑岩铜矿床在空间上都与这些异常有关，据推测可能与汇聚大陆边缘的岩浆演化有关。本文的目的在于较详细地显示观测磁异常与智利北部已知斑岩铜矿床和矿点的空间关系，并针对这种共生关系提出地球物理和地质假说。

2 航磁数据收录

1992年，CODELCO的航磁测量重点放在南纬19°45′和27°15′之间的Domeyko断层带上。次年，CODELCO让同一承包商用同一收录系统在南纬18°15′和27°00′之间补充收录了航磁数据，从而补足了Domeyko断层以西的测量。东部块段的数据集对应于CODELCO 1992年开展的飞行，它覆盖了Domeyko断层带上方较高、较崎岖的地形，而1993年飞的西部块段主要覆盖了Domeyko山脉以西平坦的大草原区。

表1列出了文中所用数据集的特征，该数据有一部分以简化的形式显示。

表1 汇编航磁数据集的总体技术规格

数据集	额定离地高度(m)	测线方向	测线间距(m)	覆盖面积(km^2)
西部块段(1993年)	150	南北	1000	40000
东部块段(1992年)	300	南北	500	72900

磁测使用的是Cessna 404 Titan双引擎飞机，机尾配有刚性复合材料尾刺，长2.5m，装有分离光束铯磁力仪——Scintrex公司的VIW 2321H 8(灵敏度0.001nT)。另一个类似传感器用作基点测量，以控制磁场强度的日变。为了准确补偿飞机的俯仰、侧摆和方位偏转，机舱内装有均方根磁补偿器。导航系统包括一个GPS Trimble 4000AX装置，由Litton公司的LTN-51惯性导航系统支持，用于在GPS未能覆盖的短时间内控制经纬度。为控制海拔和高度，飞机配有Honeywell公司的HG 7510CC01雷达测高计(测程10000英尺，分辨率5英尺)和Sander公司的BA2气压测高计(测程30000英尺，分辨率5英尺)。

磁传感器的采样率为每秒10次测量，

灵敏度为0.01nT。在测量之前和期间通常进行几种标准校定试验(补偿试验、延迟试验)。此外,还作一些地面磁测,以验证磁异常的位置。测量的最终总精度,据计算定位(x、y、z)为±5m,总磁场强度优于1nT。

3 航磁数据的处理和显示

在对原始数据进行通常校平之后,利用1990年的系数计算国际地磁参考场。将该场校正到每次飞行的日期并从数据中减去。用最小曲率算法将剩余值数据内插到100×100m的网格上。为了简化起见,并避免脱离真实的数据,本文中不再显示进一步的处理。需要指出的是,我们不展示所谓"化极图",因为这种处理在低纬地区会引入人为因素。

编制的智利北部总磁场剩余强度图(原图为彩色图,此处略去,译者注),北起智利-秘鲁边界,南到El Salvador矿山地段,用深蓝色表示低于-130nT的负剩余强度。-130nT被选作负异常域的界线,因为-100nT左右是测区的平均剩余磁场强度。这一负的平均剩余强度很可能是由于确定该区域的国际地磁参考场不精确造成的。

值得指出的是,在南半球,由当地的正常感应磁化引起的磁性地质体或地球物理磁源的磁场在其南侧显示大的最低值,在其北侧则产生相应的较弱最高值。因此,我们所研究的南纬地区的磁力低位置(即图中的暗色条带)显示引起异常的地质体的大致位置。这表明正常感应磁化与任何剩余磁化相比都占优势。在整个文章中,我们将术语"横向磁异常"和"区域磁力低"都看作是空间上重合的概念。

从磁场图上可以看到,以磁力低为主、负异常值超过-130nT的主要磁异常,如何由太平洋沿岸延伸到测区的东部边界,其中有些指向主要火山中心的方向。这些异常的连续性和横向排列使我们提出了"横向磁异常"的概念。这些横向磁异常的另一明显特征是南北向上有不稳定的间隔。磁异常图上还表示出主要已知斑岩铜矿床、Domeyko断层带和主要的安第斯火山中心。

4 斑岩铜矿床和横向磁异常的空间关系

测区(北起Arica南到El Salvador地段)的大多数斑岩铜矿床是世界级产铜大户,如Chuquicamata(5500万吨Cu)、El Abra(850万吨Cu)、Collahuasi(Rosario;2550万吨Cu)。

所有的斑岩都在横向磁异常范围内或在其附近。这种空间关系有力地说明这些区域磁异常源和斑岩铜矿床来源之间的因果联系。此外,它们与特定横向磁异常的共同关系表明,组合成群的矿床有共同的磁源。有些矿集区(cluster)是沿横穿造山带的方向排列的,如Quebrada Blanca-Collahuasi-Ujina、El Abra-Conchi和Chimborazo-La Escondida-Zaldivar等矿集区。

Quebrada Blanca矿集区

该矿集区显示出相距5至10km的两个横向磁异常的复杂图形。矿集区中的斑岩铜矿床有:Copaquiri、Quebrada Blanca、Collahuasi和Ujina。这四个矿床表现出明显的东西向排列,与横向磁异常的区域走向非常吻合。西部裂隙是Domeyko断层带的一级分支之一,位于Copaquiri附近,而其它三个矿床位于该构造以东。

Chuquicamata和El Abra矿集区

El Abra矿床位于典型横向磁异常的南缘,异常向东延续60km,达到目前的火山前锋。在这个横向磁异常上有两个已知斑岩铜矿床(El Abra和Conchi),它们大致沿N55°-60°W方向排列。

Chuquicamata矿集区包括Chuquicamata、Radomiro Tomic、MM和Opache斑岩矿床,本矿集区矿床具有明显的南北向排列,在构造上受Domeyko断层带控制。MM矿体位于一个小异常的东端和Domeyko断

层带的西侧。Opache 矿床与一个单独的横向磁异常有关，很可能亦与 Domeyko 断层带的西部分支有关。该矿集区斑岩铜矿床中最大者为 Chuquicamata 和 Radomiro Tomic。它们位于 Domeyko 断层带(在磁场图上表现为等值线的轻微畸变)与大型 Chuquicamata 横向磁异常的交点上。沿 Domeyko 断层带达 35 km 的右行和成矿后左行移动两种推测都曾经提出过。尽管如此，Chuquicamata 横向磁异常和附近的其他磁特征并未被明显错动。此外，El Abra 和 Opache 横向磁异常都没有表现出任何显著的位移，这种情况向下一步的研究和修改勘查策略提出了挑战。

La Escondida **矿集区**

La Escondida 矿集区包括 La Escondida、Zaldivar 和 Chimborazo 斑岩铜矿。这三个矿体中的头一个位于大型横向磁异常的南界，Zaldivar 则处于同一磁力低的北缘。像在 Chuquicamata 矿集区中一样，这两个矿床均位于横向磁异常与磁场图上略有显示的南北向区域性磁场线性特征的交点上，该线性特征可能是 Domeyko 断层带的一个分支。Chimborazo 矿床位于 Zaldivar 西北约 10km 处，显然是在主横向磁异常的一个单独分支上。

El Salvador **和** Potrerillos **矿区**

El Salvador 矿山刚好位于大型横向磁异常的北侧。Potrerillos 矿山位于相应横向磁异常东面一点，如果考虑到推测的逆掩断层和 Potrerillos 斑岩可能是源于矿山以西岩浆房的同构造侵入体，这种明显的偏离是可以解释的。

5 横向磁异常的地球物理解释

利用商业化和内部软件解释重磁数据，我们计算出沿有代表性的南北向剖面以及一些模拟矿集区的简单三维合成磁性体的模型。虽然位场的解在理论上是非单一的，但通过合乎情理地假设磁化率差，有可能得到稳定解。针对这些特定的计算，我们假定磁源体的磁化率在 0.001 到 0.005 cgs 单位范围内。

图 1 为穿过 Quebrada Blanca 矿集区的二维模型的南北向剖面，该处有两个相距很近的横向磁异常。模型显示出一些理想的磁化体，它们加在一起所产生的计算异常(细线)与本剖面的实测磁化强度(粗线)拟合得最好。仅仅出于计算的目的，将地区性区域场用于该剖面，因而在计算中采用相对的零异常水平(图 1 中的水平直线)，而不是绝对值－130nT。该模型预测，在现代地面以下 1000 至 1500m 左右有三个岩基大小的磁性体，它们的磁化方向与现代磁场相同，其南北方向的范围为公里级。正如上面所确定的那样，它们的磁化率差，约 0.005 cgs 单位，这意味着磁铁矿含量约 2 至 3(体积)%。在 Quebrada Blanca 模型中还有 6 个较小的地质体，它们的磁化方向各不相同并离地面较近。所计算的磁性体仅代表与实测场拟合的一种理论解。不过，用其它几何排列进行几次尝试后，证明该解代表一种稳定解。在所有情况下，大而深的磁性体与实测数据吻合表明，磁化方向与正常感应磁化相同。小而浅的磁性体要采用不同的磁化方向才能与实测数据最好地拟合。分隔深浅两组磁性体的界线可能代表以前就位时下部韧性地壳和上部脆性地壳之间的过渡带。已计算出，欲使斑岩在 Domeyko 断层带剥露，现代地面以上的总侵蚀要超过 5km。在其它主要横向磁异常上也得到了概念上近似的模型。在每种情况下，大侵入体的顶端在隆起和侵蚀之后位于大约几公里的深度上。大侵入体的底部形态和深度在某种程度上是任意选择的。从理论上讲，其形态和深度可在较大范围内变化，而不会对计算所得的异常有很大影响。

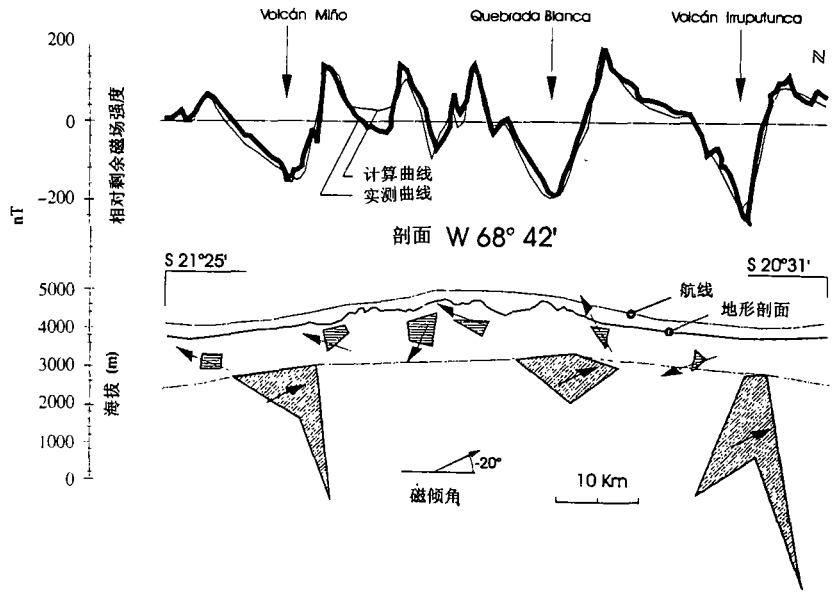


图1　穿过 Quebrada Blanca-Collahuasi 矿集区的南北向剖面的地球物理模型。注意顶部深度在大约1000至2000 m之间的大型磁源体和可能将其与浅部较小磁源分隔开的滑脱带(见正文)。所有磁源体的磁化率差均假定为 0.005 cgs 单位。

图2给出对总磁场图的三维模拟,它是根据几个大而深的磁源体和若干浅部磁源体的相互作用计算的,它们在规模和形态方面模仿在二维剖面上得到的磁源体。在本例中,磁源体被简化、表现为垂向的矩形柱体(详见图2的说明)。深而大的磁源体磁化率较高,可模拟大的镁铁质至中性侵入体,上部的磁源体被赋予负的磁化率差,以模拟蚀变或矿化岩石。在这些岩石中,磁铁矿大多转化成与斑岩铜矿系统上层有关的赤铁矿、硫化物及其它蚀变产物。该合成模型的目的在于显示,计算的磁场强度在形态和规模上如何近似于实际横向磁异常的典型磁场。本例中的模型与 Quebrada Blanca 矿区有些相像。

6　横向磁异常的地质解释

基于上述横向磁异常的地球物理解释,我们将它们解释为镁铁质至中性组分岩基大小侵入体的磁性显示,这些侵入体通常沿横穿造山带的通道就位。针对这些假设的侵入体,提出了"横向岩基"的称谓。如模拟所示,假设的侵入体侵蚀后的或现代的顶端位于几公里范围的深度上。这一深度惊人地浅,但与已发表的研究结果一致。这些大型侵入体可能是沿着含水熔融途径就位的,同时岩浆的前锋自西向东横穿造山带移动,许多研究人员都描述过自西而东的移动。如此移动的证据是侵入岩的年龄由太平洋沿岸山脉(侏罗纪-早白垩世岩浆弧)向约 200km 以东的现代火山弧递减。因此,横向磁异常可能代表岩浆前锋由西向东沿通道或狭长含水熔融途径移动的大型地壳弱化带的磁特征。Keith 和 Swan(1996)针对美国西南部 Laramide 斑岩铜矿系统的东北矿集区,提出这些途径是在下行俯冲板块上方发育的,不过后者的此种移动发生在短得多的时间内。图3显示提出的这种弧移动机制的概念示意图。在这种情况下,我们认为,只有大陆边缘的俯冲侵蚀才是横穿造山带弧移动的驱动力。岩浆前锋向东移动并在身后留下一系列侵入体,即横向岩基,它们共同形成

了观测到的横向磁异常。构造侵蚀,作为弧移动的一个重要因素,曾经针对像智利北部这样的非加积活动大陆边缘详细描述过。其证据是由太平洋沿岸近海声呐侧向扫描详测数据提供的。关于南纬21°俯冲带深部几何形态的最新知识是通过近期详细的地震反射和折射工作获得的。

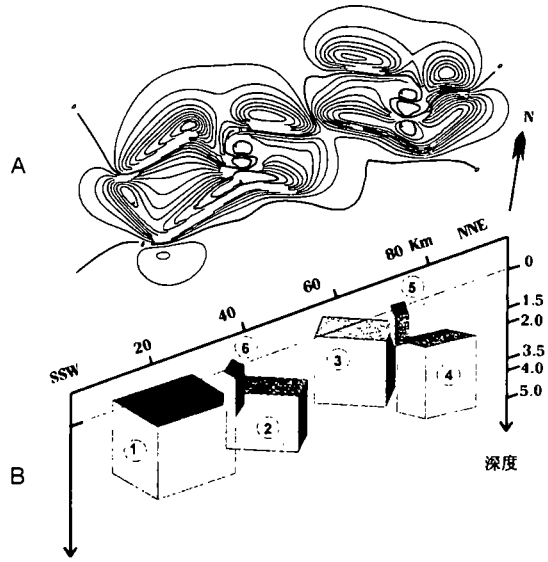


图2 大磁源体(A)形成的总磁场强度异常及(B)三维合成模型。粗等值线间隔100nT,细等值线间隔10nT。磁源体用垂向柱体P1至P6模拟,其尺寸分别如下(单位为km):P1:15×20,顶深=1.5,底深=4;P2:15×12,顶深=2.0,底深=4.0;P3:15×12,顶深=2.0,底深=3.5;P4:15×8,顶深=2.0,底深=5.0;P5:3×3,顶深=0.15,底深=1.5;P6:3×3,顶深=0.15,底深=1.5;磁化率为cgs单位。P1至P4代表$K=0.005$的镁铁质侵入体,P5和P6代表$K=0.001$的蚀变斑岩侵入体。背景(如古生界的围岩)的$K=0.002$。合成磁异常与Quebrada Blanca-Collahuasi矿区的实测异常(见正文)有某些总体上的相似之处。

7 智利北部斑岩铜矿矿集区与横向磁异常之间的关系

如以上指出的那样,所观测到的斑岩铜矿矿集区与特定横向磁异常的共生关系提出了一种地质解释,说明组合成这些矿集区的矿床可能具有共同的侵入体来源。这种模型曾针对内华达州的Yerington岩基和Yerington斑岩铜矿区提出过。从地球物理角度讲,相应的横向磁异常是母侵入体的标志。因此,横向磁异常证实了侵入杂岩是成群斑岩铜矿床母体的思路。总的来说,智利北部全部已知斑岩铜矿床均与这种横向磁异常有关。因此,可以推测,横向磁异常的存在是重大斑岩铜矿床产出的必要条件,但不是充分条件。事实上,横向磁异常可以代表能指望有斑岩铜矿床产出的地点。另一个重要的条件可能是存在像Domeyko断层带这样的一级区域构造系统及其二级断层的连接和交叉。

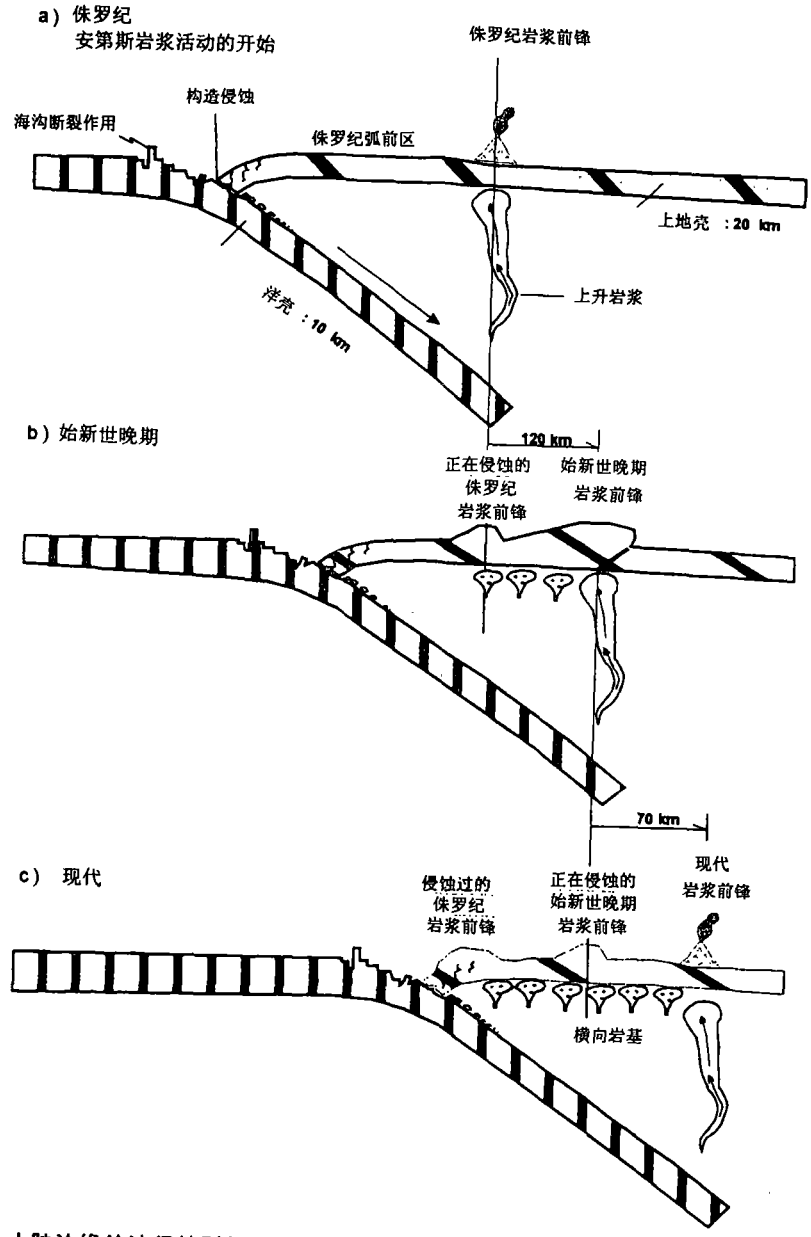


图3　由大陆边缘俯冲侵蚀引起的安第斯岩浆前锋自西向东移动的概念示意图（未按比例尺）。表示了三个阶段：侏罗纪、始新世和现代。向东移动的岩浆前锋在上地壳底部留下一系列侵入体（横向岩基）。

8　结论和地质推测

智利北部的已知斑岩铜矿矿集区，其排列与横向磁异常有密切的空间关系。我们认为，下伏的横向岩基可能是这些成群矿床中每一个的共同岩浆源。研究还发现，横向磁异常南北方向上的距离变化在50～100km范围内。这可能意味着，主要岩浆作用的推进，伴随岩浆前锋沿某些优选的通道（轨迹）自西向东移动。这些通道可能在安第斯构造旋回开始时便已确定，而此后是作为每次熔岩挤压时暂处于静态的岩浆前锋向东移动引起的再活化。岩浆前锋分段的机制是根据

瑞利-泰勒的熔融带配分作用说提出的。Yanez 和 Maksaev(1994)利用这一机制解释了智利中部的磁异常分段。早期分段的其它可能机制也可以追溯到大陆边缘区域性地壳构造的存在。

更仔细地分析主要横向磁异常东西向的连续性表明,其中一些由沿岸山脉一直延伸到现代火山前缘。其它的则断续延伸,可以与识别出的穿越智利北部的不同岩浆构造旋回联系起来。根据 Mpodozis 和 Ramos (1990)的文章,由白垩纪中期延续至现代的安第斯旋回收缩事件可以划分为五个构造岩浆阶段,这些阶段对应于早白垩世、古新世、始新世晚期-渐新世、中新世早-中期和中新世晚期-上新世。这些阶段的每一个均与收缩变形作用和岩浆活动有关,后者本身又与斑岩系统有关。这些构造旋回有可能反映在横向磁异常的东西向分段上,例如,大多数沿岸山脉的横向磁异常仅在早白垩世地质格架范围内表现出连续性。其它异常与古新世岩浆事件有关,它们在某些情况下一直延伸到现代活动火山弧。最后,有些重要的横向磁异常,如 Collahuasi 和 El Abra,源于始新世晚期-渐新世岩带,理所当然,可以认为,横向磁异常也带有所描述岩浆活动阶段东西向分段的磁性特征。

如果横向磁异常的存在确实证明是斑岩铜矿系统存在的必要条件,则所得出的负面结论是,智利北部的远景区将减少到略少于 20 个左右的主要横向磁异常。这些异常是斑岩铜矿可能产出的地点。再进一步讲,如果只考虑第三纪岩浆活动阶段横向磁异常上产量高的交点,而且在其范围内存在着相关区域构造的有利特征,则有潜力找到新斑岩铜矿床的地区会再次减少。对在该区未来勘查斑岩铜矿床的策略而言,这会是一种颇为引人注目的结论。

(李仕明摘译自 Economic Geology, V. 96, 2001, p. 239～248)

自然界中的天然气水合物

早在 1966 年就已知道自然界中形成并存在天然气水合物。天然生成的天然气水合物最初是在 1967 年发现的。这些水合物主要产在极地附近和深水区域。

据估计,这些天然生成的天然气水合物中所含的天然气可能超过 16 万亿吨石油当量。有人估计,这些资源 98%产在近海,其他 2%产在陆地永冻带中。产在陆地上的这 2%可能包含 3000 多亿 m^3 天然气,相当于全世界天然气证实储量的 2 倍。

然而,要想了解这些资源的潜力和在多孔介质中形成的水合物晶体的形态,还需要做更多的工作,要对全世界各种不同盆地内适当位置上的天然气做出更好的估计。同样,还必须研制从含有水合物的地层中生产天然气的技术方法。

这些水合物可能对地球的热状态有影响,并生成温室气体。它们可能还包含一些有关宇宙物体的形成和动力学方面的线索。

(张秋明译自 Oil & Gas Journal/Feb. 5, 2001)