

矿产勘查新理论与新方法综述

董耀松, 范继璋

(吉林大学综合信息矿产预测研究所, 吉林 长春 130026)

[摘要] 近十年来, 矿产勘查新理论和新方法层出不穷, 本文系统地总结了目前矿产勘查的新理论和新方法, 并展望其与高新技术相结合的发展前景。介绍了新的成矿理论, 主要有地球化学障成矿、陨击成矿、地幔柱成矿、边缘成矿和海底成矿理论; 新方法主要有预测沉积矿产的古地磁法、预测铅、铀矿稳定同位素法、气体测量法、预测卡林型金矿的顺磁共振法以及应用于寻找隐伏矿床的元素活态提取法和金属地震法等等。

[关键词] 地球化学障; 地幔柱; 古地磁; 顺磁共振

[中图分类号] P611 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-2427 (2004) 04-039-06

我国的矿产资源总量比较丰富, 但人均占有量不足世界平均水平的一半。随着我国人口和经济的发展, 国民经济消费水平的提高, 我国矿产资源供需形势日趋紧张。但目前, 发现露头矿和浅部矿的可能性越来越小。为了提高找矿效果, 寻找大量难识别、难发现和难勘查的隐伏矿, 我国加强了地质成矿理论和勘查方法研究, 采用高新技术和手段, 提出了许多新理论和新方法。

1 新理论

随着科学技术的飞速发展, 矿产普查与勘探应用最新科学技术方法, 使得矿产普查与勘探的理论和方法不断地提高、完善, 许多新理论层出不穷。如“地球化学障成矿”、“陨击成矿”、“地幔柱成矿”、“边缘成矿”、“海底成矿”和大比例尺的隐伏矿体预测等理论与方法。

1.1 地球化学障成矿

在成矿元素迁移过程中, 常会遇到环境物理化学条件的突变, 从而使成矿热源原有的地球化学平衡被破坏, 使成矿元素的迁移活动强度在很短的距离内急剧变小, 并在局部地段发生沉淀富集, 这样的地段被称为地球化学障。各种化学的、物理的、以及生物化学的地质因素发生突变的地段都可以构成地球化学障。在剪切带发育的地段, 容易发生流体的混合、水岩反应、稀释作用、相的分离、沸腾作用、络合物的氧化—还原反应、流体值[pH值、 Eh 值、 $f(O_2)$ 、 $f(S)$]的改变、压力及温度急剧下降、微生物活动及胶体的絮凝等, 从而构成地球化学障, 结果导致成矿物质的溶解度急剧变小, 迅速达到过饱和状态, 从成矿热液中沉淀析出。当上述因素存在而构成地球化学障时, 热液系统中的成矿元素在一个有限的范围内沉淀下来构成工业矿体。假若上述物理化学条件是逐渐变化的, 便不能构成地球化学障, 那么成矿物质就“散落”在热液流经的所有范围内, 就不能形成具有工业价值的矿床^[1]。地球化学障成矿理论成功地解释了构造带对矿床的形成具有明显的成矿控矿作用, 为在构造带发育地段寻找矿产资源, 提供了理论依据。

[收稿日期] 2003-03-16; **[修订日期]** 2003-10-15

[作者简介] 董耀松 (1969-), 男, 陕西户县人, 吉林大学博士生。

1.2 陨击成矿

陨石撞击成因说是解释白云鄂博稀土元素矿床和加拿大肖德贝利镍矿床的成因而提出的。据姚德、张丽洁、Wiltshire J、Malahoff A 等^[2]研究认为：内蒙古白云鄂博稀土矿床是约 1 500Ma 前一块富含 REE、Nb 的铁陨石撞击在华北地台北缘碳酸盐沉积陆架上形成的。陨石撞击碳酸盐陆架释放的巨大能量使海水（含镁）迅速受热溶解陨石中的 REE、Nb 等形成含金属热液蚀变沉积成因方解石质碳酸盐沉积物。由于撞击释放的巨大热能，在撞击体（陨石）下部相对不易释放，导致部分碳酸盐沉积物在富含 REE、Nb、Mg 等的热液参与下熔融，然后侵入到周围岩石裂隙形成矿区内众多的富含 REE、Nb 的白云岩脉。撞击的瞬间导致大量岩石、矿物碎屑、海水、蒸汽弥漫在天空中，同时引发巨大的海啸，然后在撞击区及其周围沉积形成白云鄂博群上部具角砾状构造的板岩层。加拿大肖德贝利镍矿为一块 Fe-Ni 陨石于 1 850Ma 前撞击在加拿大地盾上（可能无水）瞬间，巨大的能量使陨石体和围岩熔融混合，然后结晶分异形成的。因此对于高温成矿物质有明显的“幔源性”，但在矿区没有发现在时间、空间上与成矿有直接联系的深大断裂和火成岩体的大型、超大型矿床，陨击成矿理论能较好地解释这类矿床的绝大多数的主要的地质特征。

1.3 地幔柱成矿

自地核边界上升的物质，当其汇聚成圆柱状的结合体，并因其相对于周围地幔环境来说具有温度更高、活动性更强、粘度更低等特点而能够上升到壳幔边界时，一般可以演化成为具有宽厚的冠状构造和细长的尾部构造的地幔柱，并可以在地表记录下一系列的热点或形成巨大的火成岩省。地幔柱进一步与地壳发生作用，使深部物质上隆，大量散布的幔源岩浆活动和流体作用可能是大规模成矿作用的重要原因^[3]。近年来，国内外在地幔柱与成矿关系研究方面取得了显著成果，如以 Naldrett^[15]为首的研究组对卡林型金矿矿集区以及与基性超基性岩有关 Ni-Cu-Co-PGE（铂族元素）硫化物矿床与地幔柱关系的研究等方面取得了显著进展。国内近年来对地幔柱与成矿关系的研究的成果很显著，主要有邓晋福等著的《地幔柱与成矿作用》以及牛树银等对幔枝构造及成矿的研究等。

1.4 边缘成矿

据孙启桢等研究^[4]，在板块、地台及地槽褶皱系、盆地、岩体、构造形迹边缘和地层及岩石交界面是某些矿种的有利成矿部位。

板块边缘控制了全球性成矿带，著名的环太平洋成矿带和地中海成矿带就是受控于板块边缘。在板块边缘，由于板块运动方向和方式的异相差异，形成汇聚型与离散型板块边缘。在汇聚板块边缘，板块俯冲时由于温度、压力较高，物理、化学作用强烈，岩浆携带大量多种金属矿物组分沿裂隙上升，形成各种金属矿床。在离散板块边缘，由于地幔物质上涌到地壳表层，所携带的金属矿物通过地球化学作用，结晶、沉淀和富集在有利的位置上。同时，板块离散时还使大陆边缘下沉，给大陆搬运来的含矿物质造成有利的成矿空间，形成各类沉积矿床。由于现代大陆边缘多由不同时代和类型的板块边缘构成，因此大陆边缘是找矿的有利部位。

在地台、地槽褶皱系边缘，由于两侧地块运动方向的异相差异，往往发育深大断裂，成为岩浆和热液的通道，形成大量岩浆和热液矿床，如俄罗斯地台东缘的乌拉尔多金属成矿带；华北地台北缘的冀北、辽西多金属成矿带；华南地槽褶皱系北缘的铜、钨矿带；在海盆边缘，由于海陆环境的异相差异，形成地球物理障和地球化学障。它既可挡住大陆搬运

来的金属向海盆分散，又可挡住海洋里的（包括海底火山的）金属向大陆扩散，使来自大陆和海洋的成矿物质都在海盆边缘富集，如我国瓦房子锰矿、广西铝土矿等都位于海盆边缘；在岩体边缘，由于侵入体与围岩不仅岩性差异明显，而且构造作用强烈，物理、化学条件巨变，使它成为矿液流通和沉淀的有利场所；在地层及岩石交界面，在化学性质活泼与化学性质稳定的岩层接触面，由于岩性异相差异较大，形成化学热（浓度）梯度，在化学性质活泼的岩层一侧有利于金属矿物交代成矿。

1.5 海底成矿

由于深海潜深器技术的发展，使现代海底成矿作用的成矿理论引起人们的关注。海底成矿作用大致起始于洋底海水下渗，流经沉积层及下伏的玄武岩层，在渗流过程中汲取了一些金属元素，并将它们搬运到压力释放处，即洋中脊，并会同自洋中脊上溢的含矿岩浆热液，形成了黑烟囱、白烟囱等成矿产物。含矿热液运行的驱动力为蕴育在洋壳中的地热能。在20世纪80~90年代，在一些实验室进行了喷流成矿的模拟，并在太平洋、大西洋、印度洋等洋中脊的若干地方都观察到海底成矿作用^[5]。

除了上述理论外，为提高预测矿体可能位置的能力，大比例尺的隐伏矿体预测的理论与方法已成为当前矿产勘查学领域的前沿与热点。我国学者在这一方面已取得了丰硕成果，发表了大量论文和专著。其中主要专著有胡惠民等著的《大比例尺成矿预测方法》、刘安洲等著《成矿信息论与大比例尺矿产靶区定量预测》等。

2 新方法

为了寻找大量的难识别、难发现和难勘查的隐伏矿，国内外已经研究探索能发现地下深部微弱的、与矿化有关的直接找矿信息的新技术。随着灵敏度极高的分析技术和计算机技术的发展，特殊有效采样介质的合理选择，已开发形成了应用古地磁、稳定同位素、地气法、顺磁共振法、元素活态提取法、金属地震、计算机模拟对比等新方法。

2.1 古地磁方法

岩石中剩磁分为原生剩磁和次生剩磁。原生剩磁是岩石结晶过程中受当时地磁场作用被磁化而形成的剩磁。次生剩磁是岩石成岩后由于热动力条件的变化发生矿物相的转变、形成新矿物（如退变质、原生矿物被氧化形成氧化矿物）时形成的剩磁，次生剩磁的一部分是由现代电磁场对岩石磁化产生的剩磁。用古地磁方法对岩心测量并分解出岩石样品中由现代地磁场引起的剩磁分量，依其方向与现代地磁场一致的原则，对岩心进行定向，恢复岩石样品的空间方位和产状，进行隐伏矿体的预测^[6-7]。另外，利用古地磁方法确定古地极位置，并根据标本产地的古地磁场方向来推算古纬度、探讨古地理和古气候的问题，从而进一步根据古地理和古气候资料来预测沉积矿产可能的时间和空间分布。

2.2 稳定同位素方法

随着稳定同位素地质学研究的迅速发展，目前已将其成果应用于成矿预测。如应用铅、硫、碳、氧等同位素进行地球化学的预测找矿。M. L. 詹生^[6]对热液粘土矿物，以及热液白云石化或重结晶碳酸盐建造中 $\delta^{18}\text{O}$ 值作了初步研究，提出可以做出 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布的理想模式，以指示向矿液源接近时的温度变化，并可用来估计离矿液源的距离，认为这是一种很有远景的地球化学预测找矿的方法。M. 希玛^[6]等研究了日本野之胁铁矿和加拿大赫冷铁矿等矿山的矿体边缘蚀变带的硫同位素，都发现 $\delta^{34}\text{S}$ 随远离矿体而有不同程度的下降，这

种变化规律用于矿产预测具有重要的意义。R. S. 康隆^[6]等在《密西西比流域铅锌矿中铅同位素标志探查》一文中, 提出了异常富集²⁰⁶Pb 和²⁰⁷Pb 的“铅-铀”矿物, 对于找寻铀矿具有特殊的意义, 找到含有这种铅成分的方铅矿, 就有可能发现铀矿床的线索; 并可利用铅同位素资料指出找寻铅锌矿的有利区域。

2.3 气体测量方法

在地下深部气体呈微气泡形式上升, 通过矿体或地质构造时, 将一些微量元素或成矿元素附着于气泡表面带至地表。因此利用地气捕集器技术, 采集这种地气, 通过测量、分析地气中的微量元素, 可以反映隐伏构造和隐伏矿床。德国和捷克斯洛伐克物理公司用地气采集器放在空中离地表一定距离, 移动抽气采样, 用原子吸收光谱方法分析样品。试验结果, 在隐伏金矿床、隐伏多金属矿床上都有较高的金属元素异常。并利用地气中Ca+Zn+K 含量参数研究隐伏构造。这种方法被称为元素分子形式法的地气找矿法^[8]。此外, 地下矿体经氧化分解, 一些挥发性元素或气体在地表常有反映和形成空中的“气晕”异常, 这种气晕异常往往是地下矿化的指示。在美国和加拿大, 对斑岩铜矿、金矿的研究表明, 汞与许多金属矿产密切伴生, 利用汞蒸汽测量可以指示许多有色金属硫化物矿床, 特别是对预测硫化锌和硫化汞矿床, 汞是一种有效的远程指示元素。

2.4 顺磁共振法

在自然界中, 各种天然石英晶体由于包裹大量其它原子, 晶格中有许多杂质, 特别是杂质浓度高, 快速生长的石英和硅质岩会有很强的顺磁性。因为原子中顺向或逆向状态的未成对电子在一个很强的变化磁场中受到微波作用会产生顺磁共振。而理想的石英没有杂质, 无晶体缺陷, 因此无未成对电子, 就不会产生顺磁信号。所以电子顺磁共振谱提供了一种理想的描述石英和硅质岩的含杂质程度^[8]。因此利用顺磁共振法结合基岩地球化学测量可对石英脉、硅化岩石进行含矿性评价, 在微细浸染型金矿和块状硫化物矿床应用效果明显, 并可用于预测隐伏矿床。例如, J. Cvan Moort^[14]在美国卡林金矿, 测定了含矿与非矿石英和硅质岩石, 结果表明: 含矿岩石顺磁共振谱线复杂, 峰谷数多, 而且顺磁强度大。

2.5 元素活态提取法

在矿体形成后, 矿体中金属元素的小部分由于受到地气流、水化学、电化学作用, 可以溶解活化, 并以多种方式沿着裂隙向地表迁移, 被地表疏松沉积物选择性地吸收。对地表这种分离吸附介质、富集活动态元素进行测定, 就可以发现与矿化有关的信息。根据活动元素的赋存状态、富集分离方法的不同, 元素活态提取法(MFE)又可分为: 热磁法(TMGM)、有机络合物法(MPF)、地电化学法(CHIM)。其中热磁法是20世纪80年代由前苏联地化专家^[8]提出的寻找隐伏矿床的新方法。土壤中的非晶质铁锰氧化物对活动态元素具有强的吸附性, 在隔氧还原、高温加热条件下, 非晶质铁锰氧化物转变为具有较强磁性的晶质铁锰氧化物, 磁性增强, 将加热后的样品进行磁分离, 测定强磁性部分的成矿元素质量分数可反映深部的含矿性。有机络合物法的原理是呈活动态迁移上来的元素与土壤中的有机络合物结合, 形成稳定的络合物, 利用焦磷酸钠加氢氧化钠浸取剂提取土壤样品中的有机络合物, 测定提取液中的成矿元素和指示元素质量分数。用有机络合物金属质量分数及其与有机碳比值及有关参数累积值, 提高异常衬度, 发现隐伏矿床。地电化学法的原理是利用外加电场使土壤中的活动态元素富集到电极上, 通过分析富集活动态元素质量分数, 寻找隐伏矿床。上述方法已得到广泛的应用, 并取得了很好的效果, 如桂林工学院

罗先熔^[13]在广西新路用地电化学综合方法,找到了埋深190多米的隐伏锡矿体。

2.6 金属地震法

利用地下深部物质对地震波反射的差异,查明深部控矿构造、圈定容矿岩石甚至直接寻找深部盲矿体的金属矿地震方法,近几年来在数据采集、处理和解释等诸多方面得到了很大的改进和完善。该方法已从过去的试验性方法逐步向实用性方法过渡和转变。最近几年来在美国卡林金矿区,通过改进反射地震数据收录和处理方法,开展了金属地震测量,准确地圈出了容矿岩层和不含矿岩层的界面,其结果得到钻探资料的证实^[12]。随着数据测量、处理和解释技术的改进和完善,金属地震方法正在逐步发展成为一种寻找深部隐伏矿体的有效方法。

2.7 计算机模拟法

利用遥感、地质、地球化学、地球物理等资料通过计算机模拟成矿过程,实现成矿过程可视化,结合计算机图形处理和图形学,进行三维立体地质填图,从而揭示矿体、矿化带的空间延伸和变化规律,将有助于隐伏矿体的寻找和定位^[9-10]。

上述的理论和方法在矿产普查与勘探工作中,应用前景广阔。但它们是建立在地质、地球物理、地球化学、现代测试技术、计算机技术等学科的基础上的,因此,矿产普查与勘探的新理论、新方法要在实际工作中取得丰硕成果,必须重视基础地质、物化探和测试技术研究,结合常规物化探和其它方法综合勘查才是隐伏矿勘查最有效的途径。

3 对矿产勘查理论与方法发展的展望

随着科学技术的飞速发展,矿产勘查理论和方法应和高新技术结合起来,与其它学科实现大跨度的交叉渗透,在全球地学数据库进入因特网及其在地质学的应用方面深入研究;结合地理信息系统、遥感信息系统及全球定位系统(即“3S”系统),开展全球性环境、资源等方面的综合研究,以及全球性地质、化探、物探、遥感等综合信息的研究;结合地质统计学、数字模型与模拟,建立高精度的预测模型;加强高性能计算机与网络通讯及多媒体技术在地学中的应用,建立数字地球,为解释地球科学的时间—空间系统中的各种复杂现象和相互作用作出贡献^[11]。

参 考 文 献

- [1] 胡明安,章传玲.四川石棉田湾金矿床韧性剪切构造带地球化学障的成矿意义[J].地质科技情报,2000,19(2):33-36.
- [2] 张丽洁,W. iltshire. J, M. alahoff. A, 业渝光等.中国内蒙古白云鄂博Fe-Nb-REE矿床地质特征与陨石撞击成因[J].海洋地质与第四纪地质,1998,18(4):87-96.
- [3] 王登红.地幔柱的概念、分类、演化与大规模成矿——对中国西南部的探讨[J].地学前缘,2001,8(3):67-72.
- [4] 孙启祯.边缘成矿概论[M].北京:地质出版社,2001.
- [5] 涂光炽.过去20年矿床事业发展的概略回顾[J].矿床地质,2001,20(1):1-9.
- [6] 卢作祥,范永香,刘辅臣.成矿规律和成矿预测学[M].武汉:中国地质大学出版社,1989.
- [7] 陈柏林,董法先.用古地磁方法确定隐伏岩层产状的尝试[J].地质与勘探,2000,36(4):48-51.
- [8] 丁汝福.国内外寻找隐伏矿化探新方法研究进展[J].地质与勘探,1999,35(2):30-34.
- [9] 方金云,姚书振.成矿过程可视化研究进展[J].地质科技情报,1999,18(3):66-71.
- [10] 张正伟,蔡克勤,徐章华.大比例尺成矿预

- 测研究方法[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 12.
- [11] 陈建平. 矿产资源勘查与评价学科发展动态——记第五届国际矿产资源学术讨论会[J]. 地质科技情报, 1999, 18(3): 47-50.
- [12] 吴其斌, 王军恒, 崔林沛. 勘查隐伏金属矿的新方法[J]. 地质与勘探, 1999, 35(6): 44-47.
- [13] 伍宗华, 金仰芬等. 地气测量的原理及其在地质勘察中的应用[J]. 物探与化探, 1996, 20(4): 259-264.
- [14] Van Moort. J. C, Hotchkis M. A. C, Aung Pwa. EPR spectra and lithogeochemistry of Jasperoids at Carlin, Nevada; distinction between auriferous and barren rock [A]. Proc. 16th IEGS, J. Geochem [C]. Exploration, 1995.
- [15] Sproule, R. A. Plume-generated magmatism in the Superior Province [A]. 31th IGC Abstract Volume [C], Brazil. 2000.

A review of the new theories and new methods of mineral resources exploration

DONG Yao-song, FAN Ji-zhang

(Research Institute of Synthesis Information and Mineral Forecasting,
Jilin University, Changchun 130026, China)

[Abstract] In the last decade, the new theories and methods of prospecting for mineral resources are proposed one after another. At present, this paper systematically summarizes the new theories and methods of prospecting for mineral resources and describes its developmental prospect. The new metallogenetic theories include geochemical barrier metallization, meteorite — impact metallization, mantle plume metallization, marginal metallization, and submarine metallization. The new methods include paleomagnetism for prospecting deposit minerals, stable isotope for prospecting Pb, U; gasometry; paramagnetic resonance for prospecting Carlin gold deposit; and metallo-organic forms of elements and metal—quake for prospecting buried ore deposit.

[Key words] geochemical barrier; mantle plume; paleomagnetism; paramagnetic resonance