

# 综合信息成矿系列预测的 基本原理和方法<sup>①</sup>

陈永清 王世称  
(长春地质学院)

**提要** 文章主要论述了综合信息区域成矿预测的基本原理和方法。基本原理包括:成矿学原理、地球化学原理、地球物理和遥感地质原理。文章认为,地球化学信息对任何矿种都是直接找矿信息,其信息特征在很大程度上直接反映了矿产资源体的特征。从区域综合异常评价的角度,综合信息成矿系列预测,实质上是运用数学模型对地球化学异常及其产出的地质背景(地层、岩体和构造)的综合定量评价,从而提高了异常评价的有效性。

基本方法主要包括综合信息成矿系列预测图的编制和综合信息成矿系列找矿模型建立。文中强调在成矿系列理论指导下,通过对异常及其产出地质背景的综合分析,以地质体或矿产资源体为单元,进行信息提取、关联和转换,最终建立综合信息成矿系列找矿模型,通过找矿模型实现成矿系列的定量定位预测。

成矿系列系指具有统一成矿过程,时、空上具有伴生特点,成因上具有内在联系的一组矿床类型或类型组合<sup>(1)</sup>。据其产出的地质背景和成矿作用,成矿系列被划分为四大类、八亚类(表1)。

表1 成矿系列基本类型

| 类           | 亚类                             | 主要矿产                             |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
| I. 变质成矿系列   | I <sub>a</sub> . 变质同生成矿系列      | Fe、P、Mg、B、Mn、Al                  |
|             | I <sub>b</sub> . 变质后生成矿系列      | Au、Ag、Pb、Zn、Cu                   |
| II. 沉积成矿系列  | II <sub>a</sub> . 沉积同生成矿系列     | Fe、Mn、P、Al、煤                     |
|             | II <sub>b</sub> . 沉积后生成矿系列     | Pb、Zn、Cu、Au、Ag                   |
| III. 火山成矿系列 | III <sub>a</sub> . 陆相火山成矿系列    | Fe、Cu、Au、Ag、Mo、金刚石               |
|             | III <sub>b</sub> . 海相火山成矿系列    | Cu、Pb、Zn、S                       |
| IV. 侵入成矿系列  | IV <sub>a</sub> . 基性超基性侵入岩成矿系列 | Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Pt、石棉             |
|             | IV <sub>b</sub> . 中、酸性侵入岩成矿系列  | Cu、Pb、Zn、Au、Ag、W、Mo、Sn、Nb、Ta、REE |

① 本文1994年2月收到

上述成矿系列形成于不同的地质背景,具有不同的成矿作用,从而决定了它们各自的地质、地球物理和地球化学特征。正是上述特征构成了综合信息成矿系列预测的基础。

综合信息成矿系列预测是指在成矿系列理论指导下,深入研究成矿系列产出的地质背景特征、成矿作用特征、矿床共生组合规律,建立成矿系列成因模式;以此为基础,统计对比分析同一成矿系列已知矿床的地质标志、地球化学标志、地球物理和遥感地质标志,建立以成矿系列综合标志信息为特征的综合信息成矿系列找矿模型;运用找矿模型实现对未知矿化单元的成矿系列预测。

## 一、综合信息成矿系列预测的基本原理

### (一)成矿学原理

综合信息成矿系列预测的成矿学原理—成矿系列理论,即矿床形成的空间关系、时间关系、物质共生关系及内在成因联系的总和。空间上,矿产表现为地理上的分布规律(成矿区域);时间上,表现为地史上的分布规律(成矿时期);在矿质的分散聚集上,表现为矿床、矿体的形成分布规律和矿种及矿床的共生规律<sup>[2]</sup>(即成矿系列)。

不同的成矿系列受控于不同的成矿地质条件。变质成矿系列形成于以持续抬升运动为主的地台区,沉积成矿系列则形成于以持续沉降运动为主的拗陷区。同一成矿系列的不同类型的矿床成矿地质条件亦有差异。如侵入岩金成矿系列的蚀变岩型金矿形成于较深的地质环境,控矿断裂通常为韧性剪切带,控矿岩体为交代型花岗岩;石英脉型金矿则形成于较浅的地质环境,控矿断裂通常为脆性破裂带,控矿岩体多为侵入型花岗岩<sup>[3,4]</sup>。

同一矿种有不同的成矿系列,它们可能形成于同一成矿期,亦可能分属于不同的成矿时代,但在空间上似乎受统一矿源制约,形成矿化集中区。如鲁西金矿化集中区,它是由一系列呈北西向展布的金矿化带构成。区内可初步划分为三个成矿系列:金的变质成矿系列,分布于北西向隆起核部的出露基底区,矿化受太古宙含金绿岩带及北西向韧性剪切带控制,成矿时代为早元古代。金的火山成矿系列,分布在发育于前寒武结晶基底之上的中生代断陷火山盆地的边部,矿化受长期复活的北西向基底断裂及次火山岩体控制,成矿时代为燕山晚期。金的侵入岩成矿系列,分布于隆起和盆地过渡区的隐伏基底(下部为泰山群,上部为寒武、奥陶系),矿化受长期复活的北西向基底断裂和燕山晚期浅成斑状杂岩体控制,部分矿体赋存于深部绿岩带中。显然前寒武结晶基底及长期复活的基底断裂是该区金成矿的必要条件。这表明成矿矿源的统一性、成矿物质的继承性和成矿作用的叠加性。

### (二)地球化学原理

综合信息成矿系列预测的地球化学原理是基于元素的成矿地质背景及成矿系列分别具有独特的元素组合和异常类型,并且二者之间具有某种内在联系。

1. 控矿地质背景的地球化学特征:我们把对成矿具有某种控制作用的地质体(地层或岩体)称为控矿地质背景或成矿地质背景。这种地质背景通常具有成矿元素(或其伴生元素)的高丰度。鲁西太古宙含金绿岩带除富含 Au( $12.55 \times 10^{-9}$ )外,亦富集 Cr( $1155 \times$

$10^{-6}$ )、Co( $184 \times 10^{-6}$ )、Ni( $494 \times 10^{-6}$ )、V( $103 \times 10^{-6}$ )<sup>①</sup> 等铁族元素(上述元素的区域背景为: Au: $1.54 \times 10^{-9}$ 、Cr: $718 \times 10^{-6}$ 、Co: $128 \times 10^{-6}$ 、Ni: $325 \times 10^{-6}$ 、V: $87 \times 10^{-6}$ )<sup>②</sup>,从而构成了上述元素呈面形分布的低缓的区域地球化学异常(或高背景带);与金成矿有关的岩体通常环绕岩体形成 Au、Cu、Pb、Zn、Ag、Sb 等元素的环形地球化学异常,发育金的火山成矿系列的火山岩盆地的边缘亦断续分布有 Au、Cu 和 Ag 的异常;控矿断裂则往往发育金的线形异常。

2. 成矿系列的地球化学异常类型及异常组合特征:成矿系列在地球化学上通常表现为不同类型地球化学异常的叠加组合。鲁西地区金的变质成矿系列位于出露基底,以金的线形异常(受断裂控制)和面形异常(受含金绿岩带控制)的叠加组合为特征并发育金的高温组合(Au—W—As—Cr)异常;金的侵入岩成矿系列位于隐伏基底,以金的线形异常(受断裂控制)和环形异常(受岩体控制)的叠加组合为特征并发育金的中温组合(Au—Cu—Pb—Zn)异常;金的火山成矿系列位于中生代火山岩盆地的边部,也以发育金的线形(受断裂控制)和环形(受火山机构控制)异常为特征,发育金的低温组合(Au—Ag—Sb)异常。

3. 控矿地质背景与成矿系列的地球化学关系探讨:前已述及,控矿地质背景系指对成矿具有控制性的地质体,成矿系列系指成因上具有内在联系的矿产资源体组合。地质体与矿产资源体都具有等级性。地层的等级性表现为群、组、段,侵入岩的等级性表现为岩区、岩套和岩体,矿产资源体的等级性则表现为矿带、矿田、矿床和矿体。地球化学异常也具有等级性,表现为区域性地球化学异常和局部地球化学异常。前者通常对应控矿地质背景,后者则对应于矿产资源体。据矿产资源体的等级性,局部地球化学异常还可进一步划分为矿带异常、矿田异常、矿床异常和矿体异常。因此,从地球化学的观点,控矿地质背景与矿产资源体的关系是区域地球化学异常与局部地球化学异常的关系。后者是在前者基础上地质演化的产物,前者对后者主要表现为丰度制约法则。

4. 不同等级矿产资源体之间的地球化学关系探讨:背景和异常是相对的,区域地球化学异常通常可视为局部异常的背景。背景和异常的划分往往与不同类型、不同等级的地质体或矿产资源体相联系。地球化学勘查方法的选择亦取决于勘查目标的等级<sup>[5]</sup>。水系沉积物测量的勘查目标是矿带、矿田或矿床(取决于采样密度),土壤和基岩地球化学测量通常以矿床和矿体为勘查目标。虽然不同等级矿产资源体的勘查所采用的地球化学测量方法不同,但异常评价的结论则形成一个有机关联的整体。这是因为综合信息成矿系列预测要求地球化学信息的提取、关联和转换是以不同等级的矿产资源体为单元的,不同方法的地球化学测量只不过是不同的尺度对不同等级的矿产资源体的度量。从集合论的观点,矿体可视为构成矿田的元素,矿床可视为矿田的子集,矿体、矿床按一定地质规律作有序排列,构成一个完整的集合。因此,不同等级矿产资源体之间的地球化学信息是有机关联的,这种关联是通过建立以地球化学信息为核心的综合信息找矿模型而实现的。综合信息找矿模型亦具有等级性(矿田模型、矿床模型和矿体模型)。

① 据分布于雁翎关绿岩带的 64 个水系沉积物网格化数据计算。资料来源:山东地矿局物化探大队。

② 鲁西金成矿系列综合信息预测研究报告。山东地矿局,1993

5. 地球化学异常的地质演化:矿产资源体是地质作用长期继承、发展、演化的产物。如鲁西不同类型的金成矿系列正是在太古宙含金绿岩带的基础上,自变质找矿作用向岩浆成矿作用演化的结果。其地球化学异常类型亦由“面”、“线”叠加向“环”、“线”叠加演化,地球化学异常元素组合亦由“高温型”向“中、低温型”转变,这反映了金的成矿由“层”控、“裂”控型向“岩”控、“裂”控型转变。从地质演化的角度研究地球化学异常的空间结构特征及元素组合特征是定性评价异常的重要原则,异常的定性评价是其定量评价的前提。

### (三)地球物理和遥感地质原理

对于区域成矿预测,除铁矿外,地球物理信息主要用于研究成矿区域地质背景的地球物理标志及深部地质特征,区域构造格架及其演化规律。如与金成矿有关的太古宙绿岩带,除富含金外,亦富含铁镁质组分,因此,具有较高的磁场(通常为火山跳跃场)和重力场,形成区域重磁标志层。与金成矿有关的岩体,其密度相对较低,通常位于重力场梯度带上,并可用重力垂向二阶导数圈定其隐伏边界。断裂作为不同地质体单元的界面通常引起区域重磁场显著的梯度变化,其变化梯度与断裂带深度成正比。通常通过区域重磁场不同延拓高度的不同方向一阶导数的解译,编制重磁构造格架图,通过不同延拓高度二阶导数的解译推断与金成矿有关的地层、岩体和断裂的深部变化趋势及其产出状态,从而使地质图三维化,实现成矿系列的立体预测。据控制磁场的断裂形成在先,破坏磁场的断裂形成在后的准则,推断断裂形成的先后顺序,并结合地球化学信息,达到从地质演化的角度研究物化探异常之目的。

遥感影像宏观地反映了研究区景观地理特征,反映了山势、水系组合模式及岩性特点。块状岩系通常发育格状影像,层状岩系通常发育断、续分布的短线形影像,连续分布的长线形影像几乎完全与重磁断裂吻合且反映了深大断裂的存在(如郯庐断裂);环形影像通常反映侵入体边界、火山口、围岩蚀变、和向斜、背斜核部等,具体类形需通过综合信息推断之。

## 二、综合信息成矿系列预测的基本方法

综合信息成矿系列预测的根本途径是建立其找矿模型,通过模型实现预测。

### (一)综合信息成矿系列找矿模型的建立

综合信息成矿系列找矿模型的建立,是以建立地球化学找矿模型为核心的。这是因为地球化学信息对任何矿种都是一种直接找矿信息,其异常本身的特征在很大程度上直接反映了矿产资源体的特征。从区域综合异常评价的角度,综合信息成矿系列预测,实质上是对地球化学异常本身的特征(异常元素组合特征和结构特征)及其产出的地质背景(地层、岩体、构造)特征的综合定量评价,从而提高了异常评价的有效性。

综合信息成矿系列找矿模型的建立,是以编制综合信息成矿系列预测图为基础的。尔后,在该图上以不同等级的地质体和矿产资源体为单元,通过信息提取、信息关联及信息转换等程序,最终建立综合信息成矿系列找矿模型。

1. 综合信息成矿系列预测图的编制:综合信息成矿系列预测图是推断构造纲要图与多级汇水盆地网系地球化学图相关联,重点提取与成矿元素地球化学异常有关的地层、岩

体、构造的综合信息编制而成。推断构造纲要图是以研究区地质图为基础,通过对研究区以地质体和矿产资源体为单元的重、磁和遥感解译编制的具推断性质的立体地质图。它是地质实际观测(地质填图)和区域宏观分析(重、磁和遥感解译)相结合的产物。具体编制请参看有关专著<sup>[6]</sup>。下面详述多级汇水盆地网系地球化学异常图的编制方法及特点。

水系沉积物和重砂的空间分布严格受水系网系控制,二者分别是地质体(或矿产资源体)化学风化和物理风化的产物,并在水流作用下迁移(化学迁移和机械迁移)、分异(化学分异和机械分异)。为建立异常和矿产资源体的对应关系,必须按水系的分布规律研究水系沉积物和重砂异常的分布。

多级汇水盆地网系图是按自然水系流域范围宏观地圈定汇水盆地。因为一个水系流域范围只有一个最大汇水盆地,具体划分是在一定比例尺地形图上对水系作有序分割,即从河流的最低入水口(入海口、入湖口等)起,由大到小逐级划分不同等级汇水盆地,从而形成多级汇水盆地网系图。以不同等级的汇水盆地为单元,将多级汇水盆地网系图与同比例尺的标准化地球化学图相关联,提取成矿元素组合异常汇水盆地,从而形成多级汇水盆地网系地球化学异常图。它具有以下特点:①汇水盆地网系图宏观地反映了独立水系流域的完整性、系统性和划分结果的唯一性。因此,多级汇水盆地网系地球化学异常图反映了整个水系流域内矿产资源体及其地质背景地球化学异常的空间分布特征。②以地质体或矿产资源体所在的汇水盆地为单元,研究它们的水系沉积物地球化学元素组合异常及重矿物组合异常特征,以便有利于实现以地质体或矿产资源体为单元的信息关联和信息转换。

2. 矿床原生异常与其水系沉积物异常和重矿物异常的信息关联:成矿系列预测图的编制过程,实际上亦是一个信息综合、提取、关联和转换的过程,已知矿床研究表明,在矿产资源体分布的汇水盆地内,水系沉积物元素异常组合与重矿物组合具有内在联系,并对原生矿床在组分上具明显的继承性(表 2)。

表 2 辽南猫岭金矿田原生组分与次生组分的分布

| 矿石矿物组合                           | 矿石异常组分   | 重砂矿物组合                             | 水系沉积物异常元素组合  |
|----------------------------------|--|------------------------------------|--|
| 自然金、金银矿、毒砂<br>黄铁矿、方铅矿、闪锌矿<br>黄铜矿 | Au(298)*、As(108)<br>Sb(46)、Ag(6.8)、Hg(5)<br>W(2.8)、Pb(2.4)、Bi(1.9)、<br>Mo(1.6)、Cr(1.3) | 自然金、黄铁矿、斑铜矿<br>白铅矿、闪锌矿、磁黄铁<br>矿、辰砂 | Au(47)**、As(36)、Bi(33)、<br>Mo(30)、Pb(28)、Ag(27)<br>W(24)、Hg(22)、Sb(19) |

注:\* 异常村度,\*\* 矿田内异常个数

重矿物与水系沉积物的发育程度受景观地球化学条件及其本身在表生条件下的稳定性制约。在以物理风化为主的干旱、半干旱及高寒山区,以发育重砂异常为特征;在以化学风化为主的温湿气候条件下,以发育水系沉积物异常为特征。因此,对同源而赋存状态和迁移形式不同的两种分散流异常特征的综合分析,有助于推断矿产资源体的水系沉积物地球化学异常类型(表 3)。

表3 华北地台部分金矿及其水系沉积物异常类型

| 异常类型              | 重矿物组合              | 异常元素组合            | 金矿床      |
|-------------------|--------------------|-------------------|----------|
| 金—多金属硫化物型         | 自然金、多金属硫化物         | Au—Ag—Cu—Pb—Zn    | 辽西金厂沟梁金矿 |
| 金—多金属硫化物、白钨矿、泡铋矿型 | 自然金、多金属硫化物、白钨矿、泡铋矿 | Au—Cu—Pb—Zn—W—Bi  | 辽西长皋金矿   |
| 金—多金属硫化物、毒砂、磁黄铁矿型 | 金—多金属硫化物、毒砂、磁黄铁矿   | Au—Cu—Pb—As—Zn—Ni | 辽东五龙金矿   |
| 金—多金属硫化物辉钼矿型      | 金—多金属硫化物           | Au—Cu—Pb—Zn—Mo    | 冀东金厂峪金矿  |

据矿石矿物在表生作用下的相对稳定性,可将其分为三类:稳定性矿物、半稳定性矿物和不稳定性矿物。在同一景观气候条件下,前者多形成重矿物,后者则易形成水系沉积物。华北地台金成矿预测研究表明,同水系沉积物异常组合元素相伴生的稳定性矿物有自然金、白钨矿、黑钨矿和锡石;半稳定性矿物有方铅矿(白铅矿)、黄铜矿(辉铜矿、赤铜矿)、辉铋矿(泡铋矿)、和辉钼矿;不稳定矿物有自然银、辉铋矿和闪锌矿等。

重矿物组合异常的分带及其迁移距离对向源追索具有重要意义。常见的分带规律是,非稳定性矿物位于异常的上部(迁移距离最短),半稳定矿物位于异常的中部,稳定性矿物位于异常的最下端(迁移最长)。就华北地台而言,一些重矿物的迁移距离通常为:自然金5—7km,黄铁矿3—5km,方铅矿2—3km,黄铜矿小于1.5km。

3. 建立综合信息成矿系列找矿模型:综合信息成矿系列找矿模型是在控矿因素分析、成矿规律研究、成矿模式研究基础上建立的实用找矿标志组合及矿化信息量化的综合表达形式,它是定量预测变量提取的基础。下面以鲁西侵入岩金成矿系列找矿模型的建立说明之。

成矿地质背景分析:模型单元(已知典型矿床)研究表明,鲁西侵入岩系列金矿床位于中生代断陷盆地边缘的隐伏基底区,基底岩系为太古宙含金绿岩带,盖层岩系为寒武—奥陶系灰岩或白垩系基性火山岩。控矿构造为北西向和东西向重磁吻合的深大断裂及其一级构造。成矿岩体为燕山期中酸性或中偏碱性的斑状杂岩体,并发育金的环形异常。

矿产资源体异常特征分析:矿异常通常分布于线形和环型金异常的叠加分布区,这一区域通常位于成矿岩体的倾伏端或两组成矿构造的交会域。成矿元素金具有清晰的浓度分带,并伴有Cu、Pb、Zn(Ag)等组合异常。综上所述,该区侵入岩系金成矿系列综合信息找矿模型是:

- (1)金异常具清晰的浓度分带;
- (2)金具有组合元素异常;
- (3)金组合异常位于线形和环形金异常的叠加分布区;
- (4)金组合异常位于成矿岩体的倾伏端或两组断裂的交会域;
- (5)赋矿地层为太古宙绿岩带和寒武—奥陶系灰岩、白云质灰岩和硅化灰岩;
- (6)太古宙绿岩带具有较高的Au、Cr、Ni、V的地球化学场;

- (7)太古宙绿岩带具有较高的重、磁场(磁场为火山跳跃场);
- (8)控矿构造以东西向和北西向重、磁吻合断裂为主,兼有其它方向的次级断裂;
- (9)储矿断裂具金组合异常;
- (10)控矿岩体为燕山期中酸性或中偏碱性杂岩体;
- (11)控矿岩体发育金的环形异常;
- (12)成矿岩体位于重力场梯度带上;
- (13)金矿田发育环形遥感影像群。

## (二)成矿系列预测:

首先以成矿元素的组合异常为目标,以成矿元素或其伴生元素的最大异常边界为界限,结合不同方向、不同性质的断裂圈定矿化单元。根据找矿模型构置地质变量,据每个变量在诸单元的存在或不存在分别赋值为 1 或 0,从而形成资源预测变量数据矩阵。根据数据矩阵,运用特征分析数学模型<sup>[7]</sup>,首先计算模型单元的变量权和联系度,再根据模型单元的变量权分别计算每个预测单元的联系度。联系度越大越接近于模型单元,其成矿的可能性亦就越大,从而实现成矿系列的定量定位预测。

表 4 是鲁西侵入岩金成矿系列矿化单元联系度。其中 11 号单元为一大型金矿,13 号单元为一中型铜金矿;5、7、16 号单元为金成矿系列预测的最佳靶区,并已被山东地矿局列为金矿详查的后备基地。

表 4 鲁西侵入岩金成矿系列矿化单元联系度

| 单元编号 | 联系度    | 单元编号 | 联系度    | 单元编号 | 联系度    | 单元编号 | 联系度    |
|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| 1    | 0.5178 | 6    | 0.6369 | 11*  | 0.9298 | 16** | 0.8627 |
| 2    | 0.5220 | 7**  | 0.8598 | 12   | 0.7293 | 17   | 0.7825 |
| 3    | 0.5504 | 8    | 0.7966 | 13*  | 0.8986 | 18   | 0.4724 |
| 4    | 0.8399 | 9*   | 0.7742 | 14   | 0.6355 | 19   | 0.5225 |
| 5**  | 0.8272 | 10   | 0.3406 | 15   | 0.5235 |      |        |

注:\* 为模型单元,\*\* 为扩充模型单元

## 参 考 文 献

- [1]程裕淇,陈毓川,赵一鸣,1979,初论矿床的成矿系列问题。中国地质科学院院报,1(1):32—57。
- [2]冯景兰,1990,关于成矿控制及成矿规律的几个问题的初步探讨(朱上庆等编,冯景寺教授诞辰 90 周年纪念文集),地质出版社,22—38。
- [3]裘有守等,1988,山东招远—掖县地区金矿区域成矿条件,辽宁科学技术出版社,222—250。
- [4]王世称等,1990,金矿资源综合信息评价方法,吉林科学技术出版社,158—175。
- [5]谢学锦,1979,区域化探,地质出版社,37—56。
- [6]王世称等,1989,综合信息解译原理,吉林大学出版社,56—69。
- [7]Richard BM, Joseph MB, Richard SL, Roger WB. Characteristic Analysis — 1981: Final program and a possible discovery. Math. Geol., 1983, 15(1): 59—83.

## THE BASIC PRINCIPLES AND METHODS ORE—FORMING SERIES PROGNOSIS OF COMPREHENSIVE INFORMATION

Chen Yongqing Wang Shicheng

(*Changchun University of Earth Science, Changchun 130026*)

### Abstract

The basic principles and methods of comprehensive information regional metallogenic prognosis are shown in this paper. The basic principles include the principles on metallogeny, geochemistry, geophysics and remote sensing geology. The Authors think that geochemical information is the direct prospecting signation for any mineral deposits. From the view point of regional synthetic evaluation on anomaly, the comprehensive information ore—forming series prognosis is, in fact, a synthetic quantitative appraisal on geochemical anomaly as well as the geological background in which it occurs by mathematical models, and hence, raises the effectiveness effectiveness on anomaly estimation.

The basic methods include compiling the synthetic information prognostic map and builestablishing up the synthetic information prospecting model. The Authors think the catchment basin must be used as an unit to study the anomaly distribution of despersion train (heavy mineral and stream sediment), and that the synthetic analysis on two kinds of despersion trains which come from the same source will give aid to recognize their types of geochemical anomaly.

In the establishment of the comprehensive information prospecting model a synthetic analysis of anomalies aid its geologic background is carried out and the geological body or mineral resource body should be used as an unit to connect, transform and extract various kinds of ore—forming information under the ore—forming series theory's guidance, and eventually the quantitative locating predication of ore—forming series is realized with the help of the prospecting model.