

金矿遥感情报
专题系列资料 (一四一)

金矿遥感及其综合评价方法

——综述：问题讨论

(三)

全国遥感地质协调工作小组
地质矿产部情报研究所

一九九一、三.

金矿遥感及其综合评价方法

——综述：问题讨论

(三)

杨廷槐 刘聚海 主编
薛祖陶 李 涌

全国遥感地质协调工作小组
地质矿产部情报研究所
一九九一、三.

内 容 简 介

本《综述》资料从发展金矿遥感快速评价方法角度，简介了对下列技术问题的部分调研认识：勘查模型及选靶准则、区域快速评价的作用、图象增强的特征波谱依据、混合象元分解技术、走滑断层系统及其拉伸区解译、定量矿物填图和地面波谱测量的应用，等，这些问题也是当今国内外遥感地质技术开发的重点。所以仅能在有限篇幅内着重简介其中一些值得关注的生长点或发展动态，达到介绍所述技术的最新研究动向的目的。

本资料可供从事金矿勘查、填图、构造与成矿规律研究的地质、遥感和物化探工作者以及有关院校师生参考。

金矿遥感及其综合评价-综述

金矿遥感情报专题成果之（三）

编辑：薛祖陶 李涌 刘聚海

地质矿产部情报所出版（内部）

北京市新闻出版局准印证号：3061-91511

前 言

《金矿遥感及其综合评价方法—综述：问题讨论》与已刊出的《金矿遥感及其综合评价方法—工作例案》(一)(二)册构成一个文集系列，它是全国遥感地质协调组所组织的《金矿遥感情报调研》专题工作的部分成果，由地矿部情报所、有色总公司遥感中心、天津冶金地质研究院情报室、核工总局遥感中心派员组成的专题组完成的。《工作例案》(一)、(二)册共汇编了51篇资料、八十多项工作案例，内容涉及部分金矿地质新知、成矿规律，火山岩区巨型金矿特征、火山机构解译、遥感勘查、化探数据处理、岩石化学找矿预测、蚀变带增强、剪切带及其扩容赋矿区、矿致植物波谱异常检测等；本《综述：问题讨论》资料则是在上述内容基础上，补充讨论了当前开发金矿遥感评价方法所涉及的一些问题：勘查模型及其选靶准则的评价、遥感区域评价的策略作用、图象增强的波谱依据、混合象元分解技术、区域走滑断层系统及其拉伸扩容区、定量矿物填图及地面反射比测量，等。这些问题也是当前整个地质遥感技术开发的重点领域；本专题的任务不是全面调研这些问题，但给出的资料已基本反映了这些领域中的一些最新的研究内容和动向。

本《综述》由杨廷槐先生主笔撰写，薛祖陶、李勇、刘聚海分别参加部分编写及编辑任务。

限于我们的水平，资料中存在一些缺点，错误在所难免，谨请读者批评、指正。

附：金矿遥感情报专题组成员名单

负责人：杨廷槐、阎玉琦、张肇元

成 员：戴自希、邱郁文、陆波、沈承珩、张力、薛祖陶、吴其斌、刘聚海、李涌、张肇元、阎玉琦、杨廷槐。

《金矿遥感情报专题组》

1991.3.

目 录

一、部分金矿地质及新知：遥感找矿模型的依据	(1)
(一) 关于建立模型及评价选靶准则的问题	(1)
(二) 金矿成因认识的改变直接影响勘查模型及选靶准则评价工作	(4)
(三) 部分金矿地质与新知—评价选靶准则的必要信息	(5)
二、金矿遥感的几种区域找矿策略	(10)
(一) 充当现行的一种勘查策略——选区方法，评价老区进一步的找矿方向或 确定靶区	(10)
(二) 超前评价成矿区带的区域成矿规律，清查新区的有利成矿条件，确定综 合评价的技术组合	(13)
(三) 利用老区规律在未知区作快速勘查或评价	(18)
(四) 开发新型的快速廉价的区域成矿普查手段	(28)
三、关于岩性和蚀变带图象增强技术应用的若干问题	(28)
(一) 从选靶准则角度确定测区的特定岩性类型和蚀变分带，判别具有区域和 局部找矿意义的岩性异常	(29)
(二) 以岩性特征波谱为依据，起用机载扫描仪有效波段，开发实用性的增 强技术	(31)
(三) 干扰物质（植被、地衣等）的波谱排除或掩蔽和混合象元处理技术的 开发	(34)
四、构造解译：区域平移断层系统及多级拉伸区的研究	(40)
(一) 配合常规地质观察和物探资料，建立剪切—平移断层系统及其应力场结 构，确定剪切扩容区的分布及机制	(41)
(二) 图象系统为拉伸区的追索、评价程序的实际应用创造更好条件	(41)
(三) 剪切应力场统计分析中应变椭球体 R 、 R' 剪切分布模式的研究：吻合 与变差	(45)
(四) 生成赋矿扩容部位的拉伸构造的成因，剪切形变参数的图象判别	(48)
(五) 地貌构造分析的步骤与实例	(51)
五、综合评价的其它两个技术应用问题	(53)
(一) 定量矿物信息的研究和利用	(53)
(二) 多源数据的综合评价	(59)
六、结语	(61)

金矿遥感综合评价方法

——综述：问题讨论

金矿遥感综合评价方法是整个金矿勘查方法学的一个组成部分，在实际工作中，金矿遥感已成为金矿综合找矿评价方法的一种技术途径，其特点是通过现代计算机图象处理系统，将遥感地质、常规地质普查、物化探和室内测试分析等工作按一定的勘查模型安排在统一的勘查程序之中，较快速地完成一定范围或一定研究深度的普查评价任务。在一个金矿成矿区带的地质找矿工作的实际进程中，金矿遥感有时也与面积性的物化探测量项目一样，在该区带的总体勘查程序的某一阶段作为相对独立的工作形式被超前安排施工，在这种情况下，它时常可以发挥其工作系统的综合功能，有针对性地综合地、物、化等资料快速揭示区域或地区性的构造和岩性异常，达到区域预测选区或具体靶区圈定的工作目的，为面上后续工作乃至在已知区内或外围确定远景地带提供决策依据，或提供具体矿化标记。必须指出，金矿遥感作为一种找矿方法，目前还是处在发展提高阶段，还存在较多的找矿策略和具体找矿技术开发的问题，调研 these 问题是本项专题的主要任务之一，这里仅就其中一些问题作初步讨论和资料介绍。鉴于专题工作性质，讨论中所列举的例案均是国外工作，而且凡是《例案》文集已介绍过的，这里便从略交代，未刊出过的则略为详细介绍，供读者参考。

一、部分金矿地质及新知：金矿遥感找矿模型的依据

金矿遥感综合评价方法的技术应用和部署都是以迄今所掌握的金矿成因模型和考虑到具体成矿区带景观地质条件所建立起来的找矿勘查模型为依据的，其找矿地质效果在很大程度上决定于所建立模型的代表性、可靠性以及作为选靶依据的地质特征或有关参数的“探途”程度。因此，掌握国内外、区内外已知金矿成矿地质规律，并在此基础上确定选靶准则和正确建立勘查模型有决定性意义。这就是国外金矿遥感综合评价方法应用的一个基本经验。

（一）关于建立模型及评价选靶准则的问题

近年来有关各类矿产成因模型和勘查概念模型的文献越来越多，这些资料对发展金矿遥感勘查模型工作有推动意义。但必须看到，有些模型资料的总结有极强的学术性和不确定性，与一个时期来建模研究工作的初始目标是提高理论找矿效率这一中心方向有些偏离。对金矿遥感工作来说，它所依据的成因模型和勘查模型的要素更必须是很强的实用性，模型的指标或选靶准则应易于观察、检测，能适时和可靠地指导勘查工作。就选靶准则来说，它们不仅必须是与矿化有空间共生关系的特征，而且还应是与矿化间有某种成因联系的特征，它们作为适时可用的准则又应是图象易于增强显示和野外易于圈定检验的。例如，产于绿岩带的金矿类型一般与特定种类的长英质侵入体伴生，这些侵入体的存在常常是有用的选靶标志。相反，太古代金矿床的流体液包体富含 CO_2 虽在研究成因上

有意义，却不能作为实际找矿可用的选靶标志。即使对勘查浅成热液型金矿来说流体包体的气体含量有时可作为一种标志，但也是在查明了相应的区域控矿构造背景和局部赋矿有利构造环境时才是如此。资料表明，金矿遥感所利用的建模要素和选靶准则归纳起来有以下几大类：

1、反映不同环境范围内与成矿有空间和成因关系的明显而具体的岩性分布，包括与矿化分属于一定区域内不同地质演变期“地质事件”的产物、与同属于引起成矿的地质过程的“近缘”产物。如上所述，在加拿大、南非等地绿岩带内，长英斑岩较集中于各大金矿区，而从整个绿岩带范围来看，赋矿岩石则包括了基性到超基性变火山岩与侵入岩类。后者反映绿岩带的发育和形变活动的区域岩性背景，前者则反映火山作用晚期长英质斑岩浆与其派生的含矿流体的成因关系。对浅成低温热液金矿来说，则有反映岛弧火山发育环境的岩石系列及晚期分异的有利赋矿层位的分布；

2、反映控矿与赋矿的有利空间的构造或“构造关系”，也包括区域与局部两种环境，如下述造成各种规模的扩容应力部位的多种构造、矿化与特定构造要素的统计距离或分布规律；

3、反映成矿有利环境的地物关系或分布模式，包括由相应构造或岩性分布影像所构成的模式，如下述的区域控矿乃至赋矿的聚矿构造带及其结点的模式，火山机构模式等；

4、由成象机制所反映的隐伏或隐蔽的地质体或地质—景观环境，如大型构造不连续带、隐伏岩体和断裂、热点、剥蚀深度、弱蚀变带等；

5、由地面或空中遥感所检测、能反映成矿环境的影像异常，如反映近矿特征蚀变分带模式的矿物组合分布、矿致地球化学异常和地植物波谱响应、赋矿层位的热异常分布等；

6、上述特征的组合模式和其它物、化探指标。

正确利用这些要素和准则除决定于项目工作性质的需要之外，还要解决好正确评价的方法，同时必须看到，准则的评价总是受到一定历史阶段占统治地位的矿床成因认识的制约，也受工作者主观经验的影响。图 1、2 是 C.J.霍奇森讨论评价选靶准则提出的示意图，说明不同准则的相对重要性随勘查工作进程而变化以及准则有一定的适用范围。根据他的观点，正确评价、选取选靶准则的三个依据是：

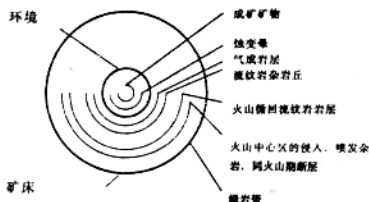


图 1 加拿大地盾苏必利尔构造省金矿的选靶准则，表示不同准则的相对重要性随勘查靶区的缩小而改变

(1) 选靶准则与矿化具有共生关系地区的大小以及选出的靶区标志能用于选靶的地区范围；

(2) 被列为靶区标志的每一项特征作为成矿环境基本组成内容的可靠程度；

(3) 这些标志与矿床经济规模的关系；

考虑靶区标志的适用范围是建模工作很重要的环节，一个标志的适用范围相对于项目

工作性质和工作阶段是有变化的，即一个标志在该工作范围内是重要的而在另一工作范围内则可能是不重要的。例如，在加拿大和西澳的绿岩带内，多数大型金矿床赋存于以镁铁质-超镁铁质火山岩为主的层序与以沉积岩为主的层序之间的界面附近或其下面，所以这种接触带作为选靶标志在矿田或矿区范围的选靶评价是有用的，但对局部采矿区内确定钻探靶则完全无作用。一般来说，适用范围较大的靶区标志比范围较小的标志更重要，因而描述和确定大范围内各种地质现象之间的成因关系要比小范围内的同类工作更为困难。对有些类别的靶区标志来说，如构造部位或蚀变分带，适用范围较大的标志常被认为是确定有利于矿化的地质环境，而较小范围的标志则是确定矿床的。在这方面，近年太古代绿岩带金矿构造研究所得出的有些认识对金矿遥感勘查建模和评价靶区准则工作有积极意义，例如构造应力拉裂区的解释就是其中一种可能有指导意义的选靶准则评价工作。从区域到局部地段，不同构造应力拉裂作用可以产生不同类型的扩容构造部位，构成了矿田、矿床乃至矿体赋存的有利区段，因此有人总结出了相应的勘查程序和有关选靶标志（图3），这套建模和选靶准则已为多项金矿遥感勘查项目所应用，并收到效果（见下述），故对此很值得研究探索。

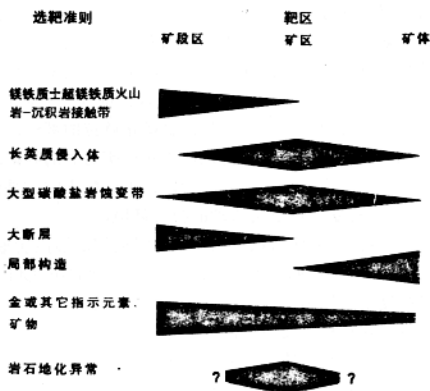


图2 示意图 表示在地质特征与矿化具有共生关系的不同范围的地区内，“成矿环境”地质特征与“矿化”区地质特征有不同

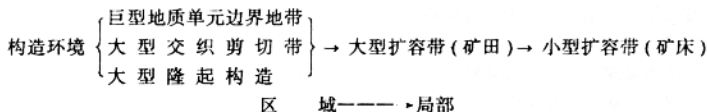


图3 金矿勘查的构造准则

矿床勘查中一个重要任务是要正确评价上述靶区标志的可靠性。霍奇森提出三种评价途径：第一种途径是记录一个已知区带内有关矿群内的各种特征的分布，根据这些特征与矿化的共生相对频率以及它们在无矿地带缺失的程度进行评价。例如某一个特征在10个矿床内的9个矿床上存在而在别处很少出现，它就好比那些在半数矿床内出现又存在于无矿地区的其它特征更为重要；第二种途径是从成因模型方面考虑，即根据与成矿作用的关系来评价、描述作为靶区标志的特征的可靠性或重要性。例如，认为含矿流体是来自与矿床共生的长英质侵入体的相同岩浆，那么这种侵入体的岩性特征对鉴别可作为选靶准则的工作就有重要意义，如果矿化与长英质侵入体的共生关系只是共生于相同的构造体系内，那么对这种侵入体及其类型的研究就不重要；第三个研究途径则是分析一定矿床特征与矿床

经济意义的关系。许多勘查学家认为，凡是经济意义较大即规模较大的矿床，它在矿物、构造和岩石学方面总比同类型但规模小的矿床要复杂很多。以绿岩带型金矿的分布为例，构造控矿程度是含矿流体便于产生汇聚形成大型金矿床的重要条件，许多绿岩带内应变分布不均一的岩带结构（如由低应变岩石构成的岩带内有高应变的岩带）、穿透性断裂及发育滑移活动的剪切带系统，都是金矿化就位的部位，而且具体赋矿部位又进一步出现在下列环境内，即断裂系统与物化性质对成矿有利的容矿岩层的交切地段、断裂系统内的拉张带或交切断层很发育的地方，所以，下列标志时常是应予以注意和评价的选靶特征：

- 1) 伴有复杂正断层活动的拉裂环境；
- 2) 独立的剪切带系统在一定次级剪切断裂内所形成的张裂隙和拉裂带；
- 3) 大型走滑断裂系统内所发育的复杂的压性和张性构造组合，包括拉裂带在内的局部错综复杂的构造，以及穿切了不均质层状地层区内部有较大规模和较均一性侵入体构造干扰带。在这种扰动带内，应力迹线较复杂，可能表明拉裂带具备了容矿的“空间”。

对金矿遥感地质工作来说，考虑成矿特征与矿床规模的关系应该比常规地面地质工作更易行和有效，因为它可以直观地综合分析构造、岩性、蚀变带及有关矿物标型的空间分布。

上述特征的评价过程实际上就是勘查模型的建立过程，可以概括为下列三个基本步骤：

搜集编汇已知的一群矿床的资料，并力求对照、研究区外和国外同类矿床的资料，应注意到采用描述成矿特征资料不完全的模型往往是导致勘查决策出错的基本原因，而现成的模型又总是不完善的，这就造成建模工作是一种反复不断修正的研究过程。国内外大部分重要金矿床都有几上几下的经历，道理也在此。例如，不认识辉钼矿与金矿化经常共生以及大型金矿床不产于高变质岩相区，曾延误了赫姆洛金矿床的发现；奥林匹克坝铜金矿床的发现则与澳大利亚西部矿业公司奥德里斯科尔的工作有关，他基于多年对提提斯扭曲（实际就是区域滑移断层活动的拉裂区）的研究认识，具体评价了当地的图象线性体分布模式与地面重力异常的构造含义。

建立勘查模型的第二个步骤则是详细研究导致所编汇矿床群被发现的一些主要特征，分析它们与矿床之间的时空关系和成因关系，这也就是对靶区标志的评价工作。

接下来是建立成矿作用模型，并根据这些模型来评价各种特征的成因及其作为选靶准则的可靠性，这一步要反复进行，如有可能还要验证或检查。

这三个步骤不是截然分开的，它们应成为项目相对独立的重要工作而得到安排，条件允许时更宜与图象处理方案的制定和操作一起进行，以人机交互方式观察分析有关选靶准则，达到提高处理技术针对性和评价可靠性的双重结果。

（二）金矿成因认识的改变直接影响勘查模型及选靶准则评价工作

在上面讨论中我们已涉及一些不同成因认识对准则评价有影响的例子。金矿成因是一个复杂的问题，迄今的金矿成因理论的变化具有明显的历史阶段性，对找矿工作的影响也带有世界性，因此必须作为一个问题略加讨论。

一般说，不同时期的找矿工作所建立的勘查模型总受约于当时对相应矿床类型的成因认识；金矿勘查历史也如此。以上述加拿大太古代金矿的成因模型的变化为例：1972年以前，加拿大（和美国）普遍接受岩浆热液成矿的理论，认为含矿热液是由沿着大型断裂

上侵的“阿尔戈马”花岗岩体带来，并在构造扩容带内沉淀下金矿物和有关矿物，与金矿物广泛伴生的斑岩体也被视为是这种含金的阿尔戈马火成活动的具体表现，具有重要构造意义。此外，虽然这时期人们认为岩石的机械性质比化学性质更重要，但还是广泛接受了存在有化学性质对成矿有利的岩石单元的认识。例如认为金矿总侵位于含铁岩层；到了1970—1982年期间，罗伯茨（1981）等人提出新的成因模型，认为金的富集成矿是海底和近海底的热泉活动的结果，把构造控制的后成金矿说成是绿岩带晚期的形变和变质作用过程所产生的活化产物，以往认为是复杂构造变动造成的许多岩性和矿化的复杂模式，重新被解释为一些同火山期过程的产物：构造削顶变成了地层尖灭、不整合变成了相变、斑岩侵入体变成了侵入喷发杂岩、剪切带成了凝灰岩层、剪切带内的一些条带状矿脉和硫化物交代矿化带被解释成了含金的喷气岩带、致密角砾岩层内的金矿变成了变质改造型砂金矿。此外，以往认为是在构造和化学性质上对成矿有利的赋矿岩石含铁岩系也被广泛当成了原生的含金气成岩层，甚至有人（里德勒，1970）把阿比提比岩带的区域破裂带解释为含铁碳酸盐岩带。这些新解释也有一系列的化学、同位素、稀土、构造和火山学的佐证支持。这些金矿成因模型变化对找矿的影响是十分深远的，例如以往是找有利构造变成现在是找有利层序和层位；火山岩有利层位内的层状导体被认为是最有利的找矿目标，而不管其构造条件如何；在阿比提比岩带，许多金矿分布的规律，如所有大矿都位于大型破裂带几公里范围内的地带这样的规律不再被强调了。

在这种喷气成矿模型的同时期内，对金矿流体来源的岩浆热液认识转变成了变质热液说。按照变质热液理论，含金流体被视为火山活动衰退期花岗岩类侵位造成的进化变质作用的脱水反应产生的，变质流体也说成是绿岩带形变和变质活动最晚期长英质岩浆侵位引起的变质作用的产物。这种变质热液模型强化了认为金矿床不产于高变质程度岩类内或深成花岗岩石内的观点。在霍姆洛主矿带被发现以前，这种模型认识对在那里工作的地质人员曾经有很大影响并贻误了见矿。

变质热液成矿理论也造成对斑岩体的存在及金矿与其它岩浆热液矿床（如Mo矿床）的空间关系作不同解释，按岩浆热液模型认识，测区内斑岩体被视为是与含矿流体有成因关系、即同岩浆源的地质体，而变质热液理论则把它看成是一种次要特征，认为它只反映对流体或岩浆具有高渗透性的一种构造环境罢了。

近五年，加拿大的金矿模型认识又有回潮，即回到后生成矿的观点。但是有许多成因疑难问题未得到解决，如金的来源和成矿的流体问题；目前对矿液成因主要是岩浆说与变质说的争论，所以，在勘查金矿的主要选区准则以及圈定最佳勘查地段方面的观点差异很大。

通过以上讨论不难得出一种认识，即金矿遥感工作应以有关的勘查模型及选靶准则为依据，但又不宜生搬硬套已有的模型，这就需要发挥遥感地质在研究成矿的区域和局部构造和岩性条件方面胜于常规地面地质的优势，具体分析测区的规律，并及时搜集国内外、区内外的新认识。

（三）部分金矿地质与新知——评价选靶准则的必要信息

1、浸染型金矿的新认识

六十年代在美国西部发现微细浸染型金矿以来，随着对这一类型金矿床不断深入研究和勘查，各种成矿模型和勘查模型不断得到修改，甚至被突破：

1) 有利的赋矿岩性

自六十年代在内华达州 NW 向构造窗中的一些硅化碳酸盐中发现浸染型金矿后, 曾一度认为这种硅化碳酸盐岩是唯一的赋矿岩石, 并据此发现了不少矿床。随着研究和勘查的不断深入, 相继发现了其它的赋矿岩石, 如片岩、燧石岩、凝灰岩、板岩等。

虽然浸染型金矿赋存于很多类型的火山岩、沉积岩中, 但近年来的研究发现不同的赋矿岩石(岩性、物理性质)具不同的矿化型式和矿体几何形态。不同的矿床赋矿岩石一般富含有机质, 其孔隙度和渗透性也较大。如美国西部卡林区域成矿带上的三个金矿床(卡林、雷恩、戈尔登阔里)各自具有不同的岩性、构造、蚀变、矿化型式和几何形态, 经研究发现, 矿化特征受构造和地层控制, 特别是矿床品位和形态受赋矿岩石的孔隙度和渗透性控制作用较明显, 当孔隙度和渗透性均匀时, 矿床品位和物理性质也均匀, 反之亦然。

2) 成矿模型研究的新进展

过去, 一般认为浸染型金矿是地热成因, 金是由地下水从围岩中淋滤出来的。但近年来的野外第一手资料和地球化学数据对该成因观点提出了异议。首先, 近年来在卡林区域成矿带的深部发现了高品位的大矿, 如波斯特-贝兹硫化物金矿, 平均品位 7-13.5 克/吨, 储量达 311 吨, 矿化深度可达 600 米。这是地热成因观点无法解释的; 其次, 近年来获得的同位素年龄数据也对这一观点提出了异议。

最近 R. H. 西利托等人 (1990) 对马来西亚沙捞越州石龙门金矿和美国西部的一些沉积岩中浸染型金矿进行了详细研究和对比, 依据: 1) 侵入体、矽卡岩 Cu-Au 矿、碳酸岩交代 Pb-Zn-Ag (Au) 矿及浸染型金矿空间关系密切, 年龄资料和野外证据也表明它们的形成时间基本一致; 2) 主要的金矿床一般离侵入体距离较远 (5-8km), 但总是相伴。提出浸染型金矿与侵入体有关的成因观点。这一观点认为上述几种类型矿化(中心部位为斑岩型 Cu-Mo-Au 矿化, 向外逐渐由矽卡岩型 Cu-Au 或 W-Mo 矿化变为含 Au (Ag) 的 Pb-Zn 矽卡岩或碳酸盐岩交代体, 最远端为沉积岩中的浸染型金矿化) 的含矿热液均是从侵入体中释放出, 被地下水和同生水逐渐冷却和稀释, 贱金属、Ag、Au 从在斑岩、矽卡岩和碳酸盐岩交代体内迁移的流体中释放出来。金属的沉淀是由一种或多种机制造成的氯化物络合物的不稳定而引起的。在矿区的外缘, 由于盐度已变得很低, 阻止了大量贱金属的络合, 只有 Sb、As 和剩下的 Au 能够以二硫化物络合物的形式继续运移并最终沉淀下来。侵入体远端的沉积岩中浸染型金矿化与侵入体的距离达数公里, 一般认为只有背斜或高角度正断层以及压力的降低才能造成流体运移如此之远。以上成因解释对该类型矿床勘查技术的选择和实施具有重大意义。

最近, 美国地调所公布了其与弗里波特公司合作研究内华达州杰里特谷金矿床的成果: 1) 金与二氧化硅带入沉积岩有关; 2) 含金流体是中等盐度, 当这些流体与富氧的低盐度水混合时, 金沉淀下来; 3) 上述提到的有利赋矿岩石所富含的有机物, 可能是金沉淀的营力。

2. 绿岩带金矿形成的控制因素是绿岩带本身形成时的构造环境

太古代绿岩带素有金矿带之称, 在世界的黄金生产中占极重要的地位, 世界上已知的所有太古代绿岩带均有大型金矿, 但矿化程度却各不相同。如西澳地盾区的诺斯曼-威卢纳绿岩带及加拿大地盾区的阿比提比绿岩带矿化较好, 而南非巴伯顿绿岩带矿化则较差。

D. I. 格罗夫斯等对西澳地盾区绿岩及其金矿特征进行了研究, 认为绿岩带金矿受变质

作用、构造活动、围岩及矿源岩等四个因素控制。1) 变质作用: 变质条件为高温高压, 变质相为绿片岩相—角闪岩相的界限或其下; 2) 构造活动: 发育地壳规模的断裂带, 并且处于拉张应力或局部为拉张应力的环境中; 3) 围岩: 成分相对富铁, 如拉斑玄武岩或粒玄岩及条带状含铁建造; 4) 源岩: 某些科马提岩和硫化物层间流沉积层可能提供了金的来源。

不同构造环境条件和时代形成的绿岩, 上述四个方面的条件也不相同。绿岩带按形成的构造环境和时代可以划为四类: 1) 较古老的地台型绿岩; 2) 较古老的裂谷型绿岩; 3) 较年轻的地台型绿岩; 4) 较年轻的裂谷型绿岩。按绿岩带金矿的上述四个条件衡量, 四种类型绿岩金矿化潜力依次增大, 以较年轻的裂谷型绿岩的矿化潜力最大。这种绿岩形成于地壳拉张和变薄的克拉通内裂谷中, 地热梯度高, 是高温—低压变质作用的理想地区。另外还发育大型走滑断裂带, 有助于大规模流体汇集、对流循环。所形成的拉斑玄武岩—粒玄岩在矿化前的铁含量较高, 科马提岩和硫化物层间流沉积分布也较广泛。

西澳地盾区的诺斯曼—威尔逊绿岩带和加拿大地盾区阿比提比绿岩带是典型的年轻裂谷型绿岩带, 这种绿岩带具有如下特点: 1) 部分发育在早期形成的地台型绿岩上, 部分发育在变薄的硅铝质地壳上; 2) 总体上呈线状构造格局; 3) 形成绿岩的火山作用、沉积作用、构造作用、变质作用和晚期岩浆侵入等全部过程的时间跨度小于 1 亿年; 4) 火山岩系很厚, 发育大量的科马提岩; 5) 沉积环境多种多样, 形成的岩石有浊积岩、含硫化物的页岩、燧石岩; 6) 常有火山成因块状铜—锌硫化物矿、与科马提岩伴生的铜镍矿床、火山岩容矿的金矿等组合。

3. 对麻粒岩成因及与麻粒岩相变质作用有关成矿作用的新认识

以往对麻粒岩成因的普遍认识是: 麻粒岩相不含水, 是难溶的基底物质; 由于麻粒岩中的流包体都是 CO_2 气包体, 因而有人认为 CO_2 造成斜长角闪岩脱水后形成麻粒岩; 麻粒岩形成时代是太古代, 近年来, 国外的研究成果改变了上述看法:

1) 在形成时代上, 认为麻粒岩相变质作用并不局限于地球历史上的某一特定阶段, 而是与大多数重要的大陆地壳形成幕和改造幕伴生。现已发现了显生宙麻粒岩, 改变了以往认为麻粒岩只形成于前寒武纪的看法。特别是在墨西哥火山活动期间观察到的现象表明, 目前墨西哥中部地壳下正在形成麻粒岩;

2) 形成的温压条件, 可以是高压高温, 有的甚至温度达 1000°C ;

3) 原岩成分: 过去认为是中基性火山岩或硬砂岩, 现在有些资料表明它可由泥质岩石变质而成;

4) 在形成的地质环境上, 过去一直认为是造山褶皱带, 但一些研究成果表明在拉伸或扭张的地质环境下也可形成麻粒岩;

5) 成矿作用: 很多人认为麻粒岩区是贫矿的, 即使原来有过矿产富集, 也会被变质和构造作用所破坏或分散。然而近年来发现很多大型矿床赋存于麻粒岩层中。据目前所知, 在麻粒岩区既有麻粒岩相变质作用之前形成的受变质矿床, 也有变质作用期间形成的变成矿床, 还有在麻粒岩相变质作用之后形成的各种矿床。如津巴布韦的伦科矿即是产于麻粒岩中的金矿床, 主要岩石类型为长英质片麻岩、紫苏花岗岩、紫苏花岗岩闪长岩和二辉石花岗岩变晶岩。研究表明, 矿石的矿物组合经受了麻粒岩相变质作用。

E.M.卡梅伦甚至认为太古代金矿床与麻粒岩的形成有直接关系, 并认为太古代是地

壳生长和稳定以及麻粒岩形成的主要时期，也是金矿成矿作用的顶盛时期。

值得一提的是 M.S.R. 尼古拉斯等认为太古代中温热液金矿床与钙碱性煌斑岩直接有关，过去有关这类矿床的成因一直存在两种截然不同的观点，其一是与麻粒岩化有关的假说，另一种是与花岗岩侵入体有关的假说。两种假说都是依据大量的同位素资料，但两种假说均有几种重要特征无法解释。如与花岗岩侵入体有关的假说无法解释金矿与侵入体之间的时差及一些侵入体规模和 Au 含量与矿床规模极不协调等；与麻粒岩化有关的假说也无法解释形成大量 Au 富集的流体聚集等。有资料表明，世界上有很多金矿床形成时间与钙碱性煌斑岩相同，空间伴生关系极为密切，只是目前研究得不够深入或将有些煌斑岩误划为其它类型的基性岩。虽然在成因解释中对这一假说还存在大量疑问，但太古代中温热液金矿床与钙碱性煌斑岩密切的时空关系具有重要的勘查意义。

4. 斑岩体系中的含金潜力不容忽视

R.H. 西利托 (1988) 对世界范围内很多现有的 Au、Ag 矿床与斑岩 Cu、Mo 等矿床的空间关系进行了研究，发现火山-侵入岩区的很多浅成热液 Au-Ag 矿与斑岩体系具有密切的空间关系。一些乍看起来是孤立的 Au/Ag 矿床，实际上是斑岩体系的一部分，只是由于露头、剥蚀和研究程度等的原因而未被揭示出来。

通过初步研究发现，斑岩体系的不同部位分别具有不同类型的贵金属矿化。在斑岩铜矿之内，网脉状 Au-Cu 矿化出现于斑岩株内或其附近发育的钾硅酸盐蚀变带内，Au、Ag 在角砾岩筒和岩脉中的斑岩 Cu 矿和 Mo 矿网脉内富集，或迭加在这些 Cu、Mo 矿网脉上；在斑岩铜和钼矿周围，Au 与 Cu 伴生退化组合出现于钙质矽卡岩附近。在距斑岩铜矿较远部位，Au 和 Ag 出现于受构造和岩性控制的碳酸盐岩交代体内。在个别情况下也可以不是碳酸盐岩。斑岩铜矿周围的 Au、Ag 也定位于区域构造中的岩脉群中；在斑岩铜矿之上，Au（有些情况下还有 Ag）与硫砷铜矿及其它富硫矿物相伴出现于各种岩脉和角砾岩中，这些岩脉和角砾岩的围岩通常是火山岩。Au 也可出现于似碧玉岩取代碳酸盐岩的浅部地带。在斑岩钼矿之上，Au 在晚期的角砾岩筒中富集。从矿化特点来看，斑岩体系的浅部贵金属矿表现为浅成热液特点，斑岩铜矿之上的贵金属矿为高硫系（酸性硫酸盐型），而斑岩铜矿周围的贵金属矿则表现为低硫系（冰长石-绢云母型）。在斑岩铜矿之内和其上的金矿床一般 Au 较富，但也有个别 Au 较贫的。网脉状钼矿化之上或其旁侧的金矿则很少有贫 Au 的。

从世界范围来看，与斑岩体系中 Au、Ag 矿化有关的火成岩类型多种多样，但就斑岩矿床之内的 Au、Ag 矿床来说，有关的岩石类型如下：闪长岩-石英闪长岩、花岗闪长岩以及石英二长岩/石英安粗岩-橄辉玄粗岩、正长岩。

5. 矿化与非矿化火山机构之间的差异

随着八十年代以来发现了三个巨型火山岩型金矿（巴布亚新几内亚的波尔盖拉金矿、拉多拉姆金矿和日本的菱刈金矿），火山岩、次火山型金矿备受青睐，特别是近年来又在巴布亚新几内亚发现了三个大型金矿床（希登瓦利、米西玛、野狗），勘查者对这一所占储量比例并不大但品位高、近地表类型的矿床更加重视。火山岩、次火山岩型金矿除受区域构造的一级控制外，矿体则受到火山机构的控制，因此，火山机构是金矿勘查的重要目标。但并不是所有的火山机构都含矿，即使是含矿火山机构也存在着各自的特异性。

最近，在西班牙东南部的火山岩区又发现了几个火山机构，这些火山机构的形成时间

间隔相对较短,形成条件也相似,但确实有一些火山机构含金、贱金属等矿床(如罗德阿基拉火山机构),而另外一些(如洛斯弗雷里斯火山机构)不含矿。C.G.坎宁安等人(1990)对这些火山机构内的岩浆、热液活动和构造特征进行对比研究,发现含矿与无矿火山机构存在下述差异:

1) 岩浆活动:洛斯弗雷里斯等无矿火山机构岩浆演化程度较低,主要岩石类型为英安岩,没有广泛的流纹岩分布。而比其稍年轻的罗德阿基拉等含矿火山机构岩浆演化程度较高,并具有含石英流纹岩的大面积分布的特点;

2) 热液蚀变:洛斯弗雷里斯等无矿火山机构内实际上未发生热液蚀变,而罗德阿基拉等含矿火山机构内具有广泛的硅化和泥化等蚀变;

3) 构造特征:无矿火山机构未遭受到像含矿火山机构那样多期而复杂的构造变形,在该火山岩区,含矿火山机构内金矿脉大多赋存于SN向断裂及火山机构边缘断裂中。对构造控制金矿体研究表明:大约发生于11Ma时期的构造活动触发了一次岩浆脉动,形成浅层岩浆房,并将岩浆演化时间拉长,逐步演化为流纹岩浆和相应的热液体系,构造活动产生的裂隙成为热液流动通道和就位场所。

6. 剪切带中金矿的分布特点及控制因素

世界上很多大型脉金矿床,特别是前寒武纪岩区分布的一些大型和特大型脉金矿床,均与大型剪切带有关。如加拿大苏必利尔省和西澳耶尔冈地盾区的特大型金矿均分布于大型剪切带旁侧。多年的勘查实践证明:金矿化实际上是沿一级剪切带旁侧的二、三级甚至更次级的脆-韧性剪切带发育。对于这一普遍规律,R.克里奇(1989)认为是由一级剪切带与其旁侧二、三级断裂构造之间的压力、温度梯度所造成的。大型韧性剪切带是非地震性的,是深部热流体上升的通道,其旁侧的二、三级脆-韧性剪切带是地震-非地震性的。实验表明:地震-非地震性转变的最主要特征是引起流体压力的波动,这种波动引起的地震泵效应对一级剪切带内的热流体具虹吸作用,使热流体进入二、三级脆-韧性剪切带。同时,由于温度的降低,使热流体中 CO_2 的溶解度、PH值和氧逸度(f_{O_2})随之发生变化,引起金的沉淀。

7. 剪切带中具经济意义的金矿化是剪切带连续演化、逐步成熟的结果

M.博纳梅宗(1990)根据在法国海西期基底岩区含金剪切带的研究结果,提出剪切带中具有经济意义金矿化是由剪切带发育过程中使金逐渐富集的三个连续阶段组成:

1) 早期阶段:在剪切断裂的应力和应变集中部位,形成渗透率很高的热流体通道。这样,剪切带成为各种来源热流体混合和对围岩进行蚀变的场所。在蚀变过程中,形成含金磁黄铁矿,构成最早的浸染型金矿化。随着热液蚀变作用的进一步进行,在剪切带核部形成了贫钛强硅化带,并使磁黄铁矿转变为白铁矿-黄铁矿,其中的金析出,以固溶体的形式固定在毒砂晶体的边缘带;

2) 中期阶段:在早期阶段剪切带内部或其附近围岩张裂隙中已充填的乳白色贫金石英脉,遭受剪切作用而强烈破碎或形成微糖粒状石英,构成容矿构造,早期已初步富集的金再次富集;

3) 晚期阶段:含金剪切带受到拉伸变形作用,形成很多张裂隙,同时富Pb、Cu、Ag的晚期成矿溶液进入张裂隙,形成新的矿物组合,并以粗粒金产出,其中的Ag含量较高。

由此看来, 剪切带不但是一种成矿空间, 剪切作用本身亦构成一种重要的成矿机制, 在剪切带演化的不同阶段, 出现不同的金矿化。

8. 赋矿构造部位(扩容区)的应变性质及形成机制

控制金矿成矿和分布的构造形式是多种多样的, 但成矿期或赋矿的部位必然处于拉伸应力状态或局部表现为拉伸应力状态, 即扩容区。前述的与金矿成矿关系密切的剪切带, 实际上沿其展布方向, 并不是每一地段均发生过矿化, 这可能反映局部地质、地球化学条件的差异, 但更重要的控制因素恐怕还是具诱发张应力的边界条件, 即形成扩容区的岩石物理和几何条件。这种扩容区赋矿规律已被很多勘查实践所证实。如西班牙西北部蒙特罗索等金矿床均位于雁行状断层的间断点上, 且大部分出露的侵入体(与金矿化有关)也位于这种间断点上。当断层发生滑动时, 这种走向发生变化的拐点处的应力状态表现为张性, 使靠近断裂的围岩内流体进入这些扩容区, 如果断层延伸交切到岩浆流体, 岩浆流体就会进入到这种断裂系统内, 形成所谓的“热拐点”。这一观点成功地解释了该区金矿床的空间分布规律, 并用于圈定成矿远景地带。

扩容区的形成是受区域应力场、所形成构造的展布及其变化、不同方向断裂交叉处及岩石物理性质所决定的。C.J.霍德森等人(1989)经过系统研究脉状金矿的时空变化规律, 认为至少有下列六种变形机制可产生扩容区(见下述), 而且在不同力学机制下形成的扩容区是各种规模的, 大型剪切带形成大规模的扩容区, 反之, 次级剪切带形成小型扩容区。不同规模扩容区热液活动的波及范围也各异, 显然, 剪切带的规模及滑移程度越大, 赋矿潜力就越大。在金矿勘查、选靶时, 首先以区域剪切带分布模式及滑移特点, 寻找大的扩容系统, 逐步缩小勘查靶区直至最后找出赋矿的扩容区, 每一步均应以分析剪切滑移方向和空间分布规律而寻找张应力环境为主。

二、金矿遥感的几种区域找矿策略

80年代尤其是80年代中期以来, 国外金矿勘查工作中运用遥感技术及其有关图像处理系统的矿业公司逐步增多, 找矿效果得到确认。调研表明, 造成这种结果的原因主要是: 70年代末期以来各国一直保持着找金热; 构造分析是找金矿一种基本找矿方法, 遥感图象构造解译适应了这种需要; 多数金矿类型具有较宽的蚀变带, 检测蚀变带成为在有利的构造环境内找热液中心的矿化的常规步骤, 多种增强蚀变带及其特征矿物组合的图象处理技术引起地质人员的极大兴趣, 成为一种扫面方法, 即使在一些老的成矿区带内; 世界一些重要金矿成矿区带的找矿历史悠久, 迄今的找矿工作仍主要集中在这些地带, 竞争剧烈, 地皮租金高, 促使一些中小公司转向新区, 遥感地质方法成为实现这种找矿策略转移最廉价而有效的工作手段之一, 等等。从技术开发和方法应用的总趋势来看, 金矿遥感综合评价方法的下列几种应用具有区域找矿的战略意义:

(一) 充当现行的一种勘查策略—选区方法, 评价老区进一步的找矿方向或确定靶区

在这方面应首推美国西部尤其是大盆地及其周围地区近五年来的变化。美国在其西部许多矿区上的大量实验和研究评价工作, 以及这些工作对发展传感器的贡献, 已是众所周知的, 但西部许多公司对遥感技术找矿的有效性多持冷漠态度。1985年以来由于金矿找

矿工作策略变化的需要和机载扫描仪检测蚀变带技术取得突破性进展的影响,起用遥感技术的找矿公司增多起来,一些飞行和地质解译承包商因此得到发展机会。如澳大利亚的地质扫描公司(Geoscan)从1984年以来在国内外用机载扫描仪(MK I、II型)为矿业公司飞了50万 km^2 ,发现大批靶区;在美国西部,1989年第一季度仅该公司的MK II型机载扫描仪在大盆地地带内就飞行了有关租地100,00 km^2 ,并在内华达州洪堡县等地导致见矿。

从具体技术上看,近年大盆地的找矿目标仍以卡林型及其相关类型的金矿为主,但具体工作区不同:1)在盆山区内的山地(Range)勘查仍有地表显示(蚀变及其派生产物)的隐伏矿;2)在盆山区内的下陷谷地边缘的山前地带找山麓冲积扇覆盖层下的隐伏矿;3)在已知矿床内找深部矿。第一种靶区除了构造之外主要是解译蚀变分带任务。大盆地的卡林型及其相关类型矿化的特征不尽相同,但有一个共同特点,即它们都是大型热流系统内的浅成热流活动产物,赋矿岩性分别为沉积岩、火山岩乃至深成岩,构造控制是形成矿液通道极重要的条件。虽然热液作用形成的蚀变分带晕,尤其是铁矿染广泛分布区曾是过去导致发现大部分工业矿床的地表露头,现在的工作则是要在多种环境不利干扰下找出不明显和复杂的铁矿染或黄铁矿化背景内的“泥化”、硅化等近矿蚀变。近年在该地带已投入生产飞行的道德拉斯AADS1268、Geoscan AMSS(MK II型)机载扫描仪有关波段数据经相应增强技术处理,已基本满足这种需要;第二种靶区,主要是构造解译,在这方面有关公司与地调所共同完成一些区域构造研究工作具有指导意义。如根据研究,该区带的细粒浸染型金矿化是多期成矿,每一个成矿期均与当地的每一次火山

活动旋回有关,其控矿构造表现为一种镶嵌断裂网的模式,即中生代晚期的北-北东向断层与盆地运动断层把所在区分割成一系列断块山与下陷盆地,较大型的断块又分割成较小

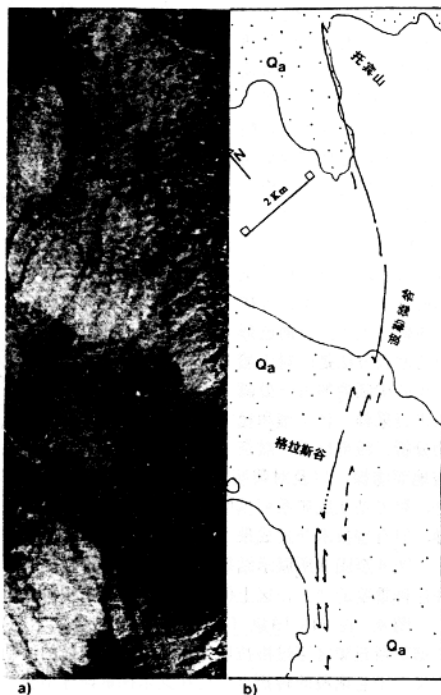


图4 戈尔德班斯-波勒德谷,内华达州珀欣县黎明前热红外图象及解译图

的单元。在空间上，这种模式与早中新世火山活动中心又相对应，镶嵌断裂与已知矿化区关系密切，且位于上升的同期岩浆体的上方。另外，J.C.多布伦温德对大盆地新构造编图结果发现，该区各个新构造地块在盆山构造的发育过程具有时间、方向和活动强度上的差异；另外发现，内华达州盆山区新构造特征表现在山前与冲积层覆盖区的分布上，即不同新构造地块的这类地区

的规模、连续性、分布及密度均有明显差别。这些资料与地下地质资料结合起来便可推断一些局部盆地地下的三度结构，如中—东北部托诺帕幅便显示了区内三个大的山间盆地分别为非对称和对称地堑，以及它们的深度变化、边界断层性质。这些工作对大盆地金矿找矿向山前区转移的具体工作部署的作用是不言而喻的。在山前地带内寻找类似于近年所发现的斯利珀、戈尔德巴尔、马里戈德等矿床的靶区工作，目前已形成的勘查方法是：对山麓冲积砂矿区内的一处处露头进行采样，作土壤和植物分析、浅部地震、航空

与地面物探，以及对黎明前热红外图象作解译。对第三种勘查任务，除提供构造背景之外，更多是从成矿系列模型角度进行一些技术开发工作，至今未见得到实际生产应用的报导，但有些技术开发成果（如对含挥发份稳定矿物的波谱响应的检测实验等）值得注意。

图4至图9所展示结果是美国西部评价金矿的部分点上或面上的工作实例，说明即使在这种重要的老工作区上仍具有选区和指出找矿方向的作用。

图4：在TIR图象（黎明前热红外成象，下同）上检测到一条弯曲构造线，它由戈尔德班斯丘陵区穿过格拉斯谷达到托宾山南麓的波勒德谷后又继续向北延伸。该构造线的意义在于它南段的转折点出现在戈尔德班斯脉型金矿区内，而在托宾山它的反方向转折处又位于分布有硅化和黄铁矿化流纹岩的地方。这些流纹岩无贵金属矿化，但直接在该TIR构造线上的一处小型的硅化断层角砾岩露头有矿化（Au：140ppb）；

图5：黎明前热红外图象解译得到一环形构造，如奥斯古德深成岩体隐伏边缘所发育断裂线的地表迹线。已知该花岗岩体在远离其与围岩的接触带的北面处有一强热晕圈，可能在深部有更大的深成岩体。

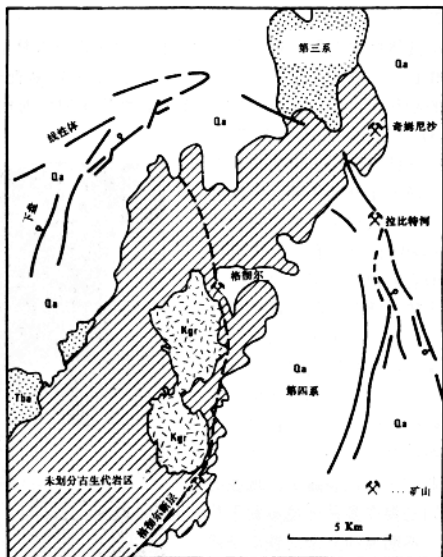


图5 奥斯古德山脉区，内华达州洪堡县