

国外地质资料选编 (八十五)

化探资料选编

(五)

地质矿产部情报研究所

一九八三·八

前 言

本期“选编”向读者推荐几篇近期发表的综述性文章和多人代表某些研究方向的论文，以便于广大化探工作者和热心地球化学方法的地质工作者思考某些涉及勘查地球化学发展方向的问题。

从近期看到的国外化探文献分析，似乎可以说，勘查地球化学正在孕育着和部分进入了一个新的发展阶段。其特征是：从任务上看，把寻找隐伏矿（包括沉积盆地中的油气和金属矿）作为主要攻关目标；从理论上讲，强调元素迁移富集现象与内外生地质-成矿-地球化学作用联系的研究，特别是填补已有的大量原生成矿作用资料与少量表生作用资料间的空白，即查明两种作用间过渡联系的地球化学作用的研究；从研究方法上看，单纯对异常表现规律作统计和概括已嫌不足，正着手对典型矿床和地区作深入研究，建立地质-地球化学模型；从化探方法上看，更加注重对具深部找矿潜力的方法（如原生晕、气体、水地球化学等）的研究，并发展引用新技术成就的方法；从技术装备上看，研究灵敏度和精密度更高的分析仪器，发展各种偏提取和相分析技术，研制轻便高效的表部和深部取样工具。在这种形势下，总结我们自己的和国外的经验，认真思考一下发展我国勘查地球化学的一些基本问题，是十分有益的。

由于篇幅和编者水平所限，不可能在本选编中把涉及上述内容的所有主要文章都收集和编译出来。有些文章已在《物探化探译丛》、《地质科技动态》、《国外地质科技》等刊物上发表。这里仅为读者提供六篇文章，多少可以反映出上述观点，希望有助于大家思考问题。

我们把W.C. 奥弗斯特里特等的述评文章放在首篇，因为该文对近二十五年来美国地质调查所的化探工作成果作了系统的总结，并以大量实例具体说明作者的论点，对于广大生产和科研人员都会有所补益。值得注意的是：作者指出，F.W. 克拉克在其经典地球化学专著中提出的元素地球化学分布和地球化学循环的原理，近六十年来在美国的化探实践中几乎未被采用，而苏联B.И. 维尔纳茨基和A.E. 费尔斯曼的地球化学理论一经提出，很快在找矿中被应用，这是一个值得深思的问题；应用地球化学未来的成功，取决于地球化学系统完善模型的建立、分析技术的发展、针对矿床出露几何结构的野外工作方法（主要指找隐伏矿）研究等问题；从大量野外工作经验中抽取某些规律性的概念和总结有效的技术，是进一步发展化探方法的基础。

B.Л. 巴尔苏科夫的文章指出了一个重要的问题，成矿理论的发展是应用地球化学继续进步的基本前提。他从成矿作用中物质来源、控制矿质沉淀的物理化学条件及围岩条件出发，系统探讨了成矿-成晕的地球化学过程，提出了一些值得借鉴的研究思路和方法，指出了这种研究对探索新的找矿指示标志和找矿方法的意义。作者明确提出，现在已是在原生分散晕研究方面迈出下一步的时候了。研究者不应仅仅关注成矿元素本身的分散晕，还应研究阴离子和碱性元素；只是对原生晕特征作综合和概括性研究已经不够，已是在考虑控矿裂隙

带周围岩石渗透性的前提下对其细微结构进行详细研究的时候了。

Л.Н. 奥甫钦尼科夫是大家熟悉的研究热液矿床原生晕的著名学者。我们选他的新作“火山成矿作用的某些规律”，是想介绍他在研究过去化探涉及甚少的某些类型矿床（如火山-沉积型）分散晕时的思路。可以看出，他与B.Л. 巴尔苏科夫探讨的问题虽有不同，但从成矿作用入手这一点是非常一致的。

B. B. 波里卡尔波奇金等的文章是苏联科学院西伯利亚学部地球化学研究所近二十多年研究次生晕和分散流的最新总结。在次生晕法的研究和运用方面，作者着重指出苏联南部和北部由于景观条件和成晕机制有明显差别，方法应用及资料解释准则也是不同的，说明了对成晕地质作用的研究是提高找矿效果的重要基础。该文还讨论了西伯利亚地区开展依据次生异常进行大区域化探的战略问题，并对在山前和山间拗陷及地台区地球化学普查试验工作做了总结。提出了水化学方法在这类地区找矿中的重要意义。

M. A. 卡拉西克等的文章系统地介绍了苏联气体地球化学普查法的现状，以及为提高这种方法的效果所进行的理论和实验研究。同时，提出了分两个阶段完善气体地球化学普查法的总体设想。

最后，我们编入了R. W. 鲍伊尔的综述文章“发现隐伏矿床的地球化学方法”。他指出，依据次生晕和分散流的面积性（二维）地球化学测量在发现各种类型的大量矿床中起了很大促进作用，但是，人们对寻找隐伏矿很有效的原生晕和渗滤晕三维测量却很少注意（可能指在加拿大等国）。作者详细探讨了各种类型矿床原生晕中大量和微量元素的分布规律，探寻某些矢量标志，以期对普查和勘探中判定矿体可能位置提供有用信息。本选编先发表该文的第一部分，主要谈原生晕的特征及应用。其第二部分包括土壤、水、生物、气体等地球化学方法，将在《化探资料选编》（六）中发表。

由于编者水平所限，上述提到的一些观点是否妥当，译编中可能会有的错误，敬请读者指正。

地质矿产部情报研究所化探组

一九八三年八月

目 录

地球化学勘查的某些概念和技术·····	(1)
成矿理论的发展是应用地球化学继续进步的基本前提·····	(31)
火山成矿作用的某些规律·····	(40)
次生晕和分散流地球化学普查方法的理论与实践·····	(48)
采用气体地球化学方法普查金属矿床的远景·····	(57)
发现隐伏矿床的地球化学方法·····	(65)

地球化学勘查的某些概念和技术

W.C. Overstreet 等

摘 要

地球化学勘查法是一种相对较新的找矿方法，它的基础是已确立的元素地球化学循环和分布的准则。这种新技术兴起的直接原因，是工业发展需要源源不断地供应大量矿物原料。迄今为止，矿产勘查的重点仍被放在露头矿上，但是未来的原料供应来源必定主要是隐伏矿；这类矿床的发现，要使用各种各样的采样和分析技术，并且要和完善的矿床成因和分布模型结合起来。若以地质和地球物理方法为引导，勘查地球化学在找矿中可发挥很大的优越性。美国地质调查局从文献中选择了一些地球化学用于矿产勘查的实例，以便尽可能广泛地提供与矿床类型、出露的几何结构、气候条件、规模和样品介质有关的地球化学概念和工作方法。这些工作方法的改进可望在未来的隐伏矿勘查中起重要作用。

绪 言

引子

许多政府和私人机构都进行了矿产的地球化学勘查，因此，可以从世界范围的文献中抽取所使用的概念和技术。在本文中，作者从《经济地质》创刊五十周年纪念卷出版以来美国地质调查局研究人员所发表的文献中，挑选了一些由该机构研制和使用的工作方法，把它们加以编排，以供发表。其目的是作一次总的回顾，引起读者的兴趣，使欲知详情者有文献可考。

背景

从历史上看，勘查地球化学发源于元素地球化学分布和地球化学循环的原理，即 F.W. 克拉克 (1924) 所说的“物质演化和离解”原理。作为这些概念的支柱的分析数据，由克拉克 (1908) 进行了汇集和解释，构成了现代的首部地球化学专著《地球化学数据》。今天有必要作一回顾，并且问一问，为什么该著作提出的作为新矿床找矿标志的概念后来几乎未被应用？特别是考虑到截至 1924 年克拉克的教科书已五次再版，而且经过两代人的时间，在迈克尔·弗莱谢尔主编之下，其第六版已开始作为美国地质调查局第 440 号专业论文的章节出版，上述情况就更值得深思了。在苏联，B.И. 维尔纳茨基的专著《地球化学》(1924) 最初在巴黎出版，以后，A.E. 费尔斯曼关于理论和应用地球化学的著作 (1933—1934) 在三十年代很快被用到找矿中去了。

元素在岩石圈中的地球化学分布，取决于它们的丰度和含有某种给定元素的地质物质的形成压力和温度。采用这些参数，可以将岩石圈的地质物质划分成原生和次生的两种地球化

学环境。从一种地球化学环境转为另一种地球化学环境，就构成了元素的地球化学大循环。在每个大循环中又有一些地球化学小循环。在循环中的任何位置上，由于机械或化学营力的驱使，元素可以分散，亦可以富集。

一种元素的地球化学分散程度，取决于该元素在特定的原生或次生环境中的活动性。活动程度的差异，加之同类元素有一起产出的趋势，使我们可以利用具地球化学亲合性的一套元素中活动性最强者，作为我们所需要的活动性较弱的成矿金属的探途元素。母岩种类和矿床类型可对活动性产生很大影响。因此，针对一次测量选定的地球化学样品介质的种类和拟测定的元素，便构成了把元素的地球化学循环与所应用的勘查地球化学联系起来的纽带。

二次世界大战结束以来，由于各公司、各州和联邦政府，以及国际组织在其找矿活动中采用了化探技术，化探方法已经推广，内容丰富多采。地球化学勘查也为理论地球化学、环境问题和人类与牲畜健康提供了有用资料。这种进展在标准教科书，勘查地球化学工作者协会出版的书目，以及各种国际专题讨论会论文集均有记载。在评述未来的勘查地球化学时，有三个重要因素应予注意：（1）具经济意义的矿床的找矿成本不断上升，上升速度高于从这些矿床中生产出的金属单位价格的上升速度；（2）勘查地球化学工作者往往没能利用新技术和现代工艺去了解基底的作用过程和系统；（3）大学、政府和勘探公司必须承担很大义务去纠正这种不平衡的状况。

地球化学勘查可按规模分成踏勘测量和详查测量。踏勘测量要扫过很大地域，其宗旨是查明可供进一步详查的在化学上异常的地区。它的采样密度低，但这种调查能以很高的概率查明成矿省，确定构成有利容矿岩石的岩性，查明一般元素以及可以指示特定矿床类型的微量元素和指示元素浓集的区域趋势及大范围的区域分带。同踏勘测量相反，详查地球化学测量涉及的地区相对较小，其目的是尽可能确切地圈定矿床或可能存在的矿床的指示标志，因而采样密度大。

应用地球化学未来的成功，不仅取决于矿床地球化学系统的完善模型的建立和分析技术的发展，而且也取决于针对矿床出露的几何结构所使用的野外化探方法。R. L. 艾利克森（1973）曾就出露情况及对勘查所提出的问题考虑过几何结构，他描述了四种情况的矿床：（1）出露的或只有薄层覆盖的；（2）被成矿前盖层或无矿基岩深覆盖的；（3）被火山岩或沉积岩等成矿后盖层覆盖的；（4）被厚层残积土、冰川碎屑、风成砂或冲积层等成矿后盖层覆盖的。根据出露或覆盖的情况，可以采用不同的化探方法去发现新矿床。

化探中的微量元素分析

化探主要依据的是矿床指示标志的检测和测定。微量元素就是这种指示标志。由于检测地质材料中微量元素的分析方法的发展，勘查地球化学已成为实用的科学。微量元素是指分析物质中浓度低于0.02%的元素。E. B. 桑德尔（1959）在评论微量分析时说道：“微量分析的基本特点并非在于某种微量物质的测定，而在于当能对微量组分的反应产生严重影响的其它组分在数量上占绝对优势的情况下，对这种微量进行测定”。

在苏联和瑞典最早进行的化探测量，在很大程度上依赖于用直流电弧激发的发射光谱法，而廉价和简便的微量分析方法是必不可少的。

二次世界大战之后，美国地质调查局开始研究地表水、地下水、土壤和植物中的微量元

素，以确定它们作为找矿标志的使用价值。特别针对化探需要，设计了可在野外使用的24种元素的微量化学分析方法。一般说来，这些方法只要求部分地分解地质样品，使有意义的一种或多种元素进入溶液。业已证明，通过部分分解取得的数据比通过全部溶解取得的数据在化探中更为有用，因为所得到的异常与背景物质中微量元素含量的衬值要更大一些。如果将全样溶解，许多测试可能就做不成。这种部分溶解技术的概念已经牢固确立，正是由于这些快速简便的微量分析方法的发展和推广，促使矿产勘查的地球化学技术在世界范围内被采纳。与此相伴，美国地质调查局的研究证明，建造车载光谱实验室是可取的，它可开抵野外调查区使用。到1968年，建立了六阶梯减光板直流发射光谱法。

用原子吸收法逐渐取代微量分析的比色法，是顺应化学分析仪器化的总趋势的。起初，许多原子吸收法限于单元素测定。随着人们认识到许多矿床应该用一套元素来描述其特征，对多元素分析的需求就变得十分迫切了。以仪器法为基础的多元素分析已发展起来，有助于满足这种需求。

新近，美国地质调查局完全为化探应用而研制出的原子吸收分析法，包括了铋、砷、铋、钴、铜、铅、锌、金、硒、碲和锡的分析。R.W. 莱恩士和 D.J. 格兰姆斯(1978)研制出一种分析地质材料中不到微克量钨的化学光谱法。银、金、铋、镉、铜、铅和锌的感应耦合等离子测定的应用有限。目前，包括直流电弧和感应耦合等离子激发在内的发射光谱法，包括常规火焰原子化和石墨炉原子化在内的原子吸收光谱法，提供了在世界范围化探中所使用的80%以上的微量元素分析数据。

样品介质的选用

在过去25年中，由于勘查活动已扩展到地球上的各个气候区和地貌区，金属矿化探所选用的样品介质类型已变得五花八门。现在，样品介质包括岩石，土壤，冲积物和湖积物，岸滩沉积物和海洋沉积物，各种来源的重矿物，岩石或矿物颗粒上的披膜和沉淀物，植被，气体和包括冰和雪在内的水。一般说来，测量仅用一种介质为依据，但混合介质测量已证明优于单一介质测量。多数化探文献讨论的是以岩石、土壤、冲积物和植被为依据的测量。较少使用的介质，特别是重矿物、披膜和沉淀物、气体和水，看来日益引人注目，开始大量用于常规测量和混合介质测量。鉴于这些人们不甚了解的介质在化探中的重要性正在增长，本文对其实际应用作一探讨。

矿产勘查中使用的化探方法实例选介

下述用于矿产勘查的已确认的化探方法实例选自美国地质调查局的研究工作，其目的在于就矿床类型、出露的几何结构、气候条件、测量规模和样品介质等方面，从尽可能宽广的范围内提出地球化学的概念和工作方法。这些方法已经过良好的试验，因此，它们的应用和改进可望在未来的隐伏矿勘查中起到出色的作用。

异常的微量元素组合

在化探技术的发展过程中，对许多已知矿床和矿区进行了研究，以便确定它们的化学特

征。这些描述性的研究确认了与特定种类矿床相伴生的元素组合。解释地球化学数据的目的之一，是要区分出异常的元素组合，并把它们与一定的矿床类型联系起来。

内华达州科特兹金矿 与矿化伴生的异常微量元素组合的地球化学概念，在1966年直接导致了内华达州科特兹浸染型金矿的发现（图1）。1962和1963年，在科特兹附近罗伯茨逆掩断层下盘碳酸盐岩石分布区对断裂带、剪切带、铁帽和角砾岩进行了岩石采样，发现这些岩石含有异常量的砷、锑和钨，当时知道，它们是包括金和汞在内的一套元素组合中的元素。第二年，通过采用新的快速可靠的检测微量金和汞的分析方法，证实了内华达州格彻尔矿山的岩石和土壤中异常含量的砷、锑、钨和汞与金矿有着密切的伴生关系。接着，在科特兹地区把格彻尔矿区的元素组合作为找金依据进行了试验，并在那里发现了该组合中的另外两个元素——汞和金。随后，由私人公司进行的勘探揭露了一个可露采的金矿，矿石储量300万吨，平均品位0.3盎司/吨。

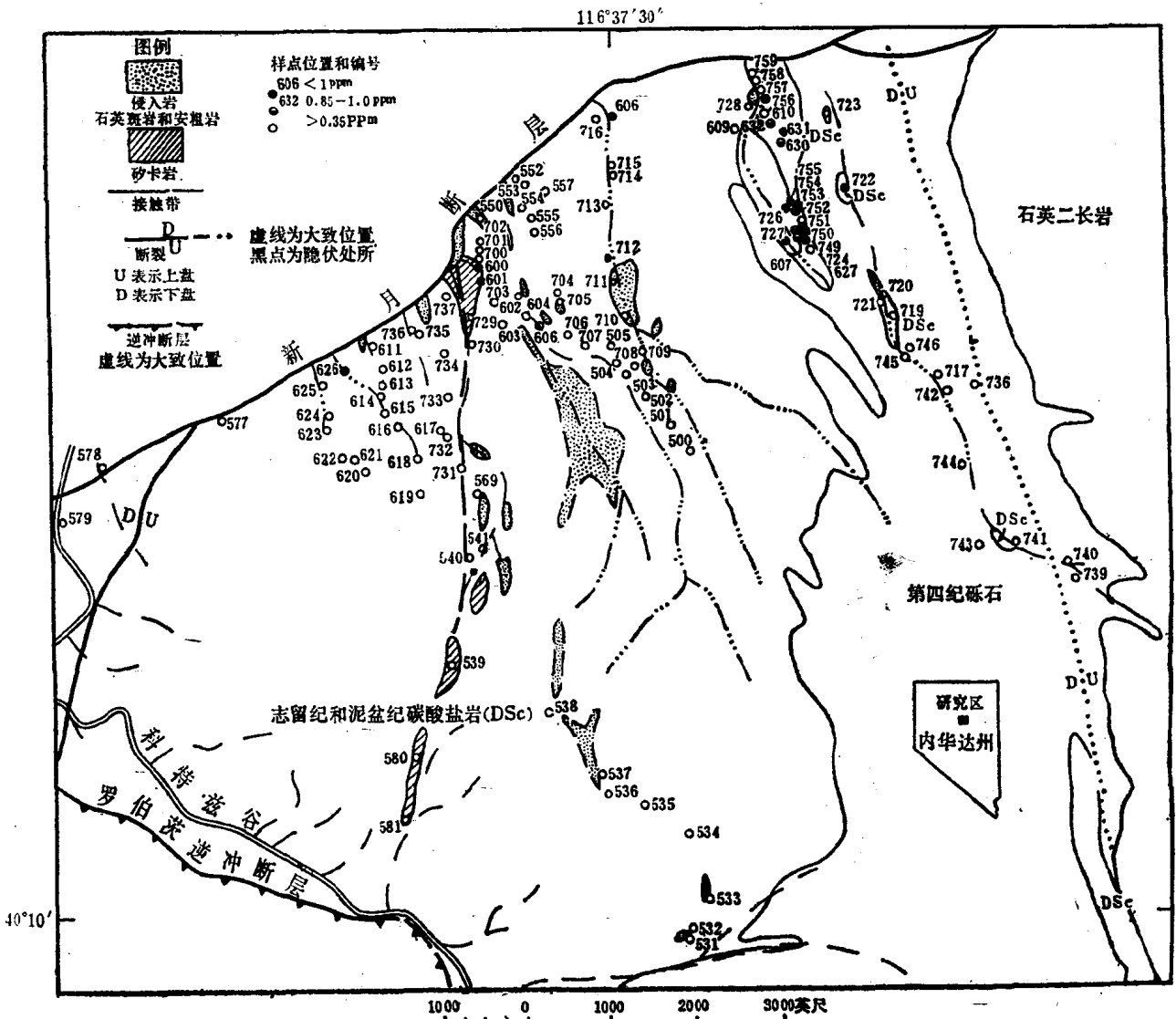


图1 表示金的分布和丰度的地球化学—地质图（内华达州科特兹幅中北部的一个地区）

此后，内华达州中北部的所有低品位金矿床（格彻尔、卡林、布特斯特拉普、“金地”、科特兹）都证明含有这种特征性的微量金属组合。汞（高达 200ppm）看来是与金有最直接关系的元素，而砷和锑可以在最强的金矿化外围形成晕。钨在晕中是常见元素，但并非总会存在。新的检测岩石和土壤中这些金属异常含量的化学技术，已经提高了这种勘查手段在寻找与低温热液和温泉沉积有关的识别不出的金矿中的实用性。

内华达州艾利矿区 内华达州艾利矿区的岩石采样查明了金属的分带现象，并且说明元素的富集程度一般是按与其地壳中的正常丰度相反的顺序提高的。围绕着矿区的巨大地球化学异常勾画出了露头的形态。在地球化学晕内，铁、铜和钼占据矿区的中心部位，外围依次分布着锌、铋、铅和锰。在此巨大的地球化学晕中，镉同锌密切相关，银与铅相关。锰似乎位于矿区的外缘，并与铜相对，占据着分带序列的另一端。因此，Mn/Cu 比值显示出一个完整地包围着矿区的晕。

与地壳相比，在艾利矿区的岩石物质中有 15 种以上的亲铜元素发生了富集。各元素富集程度的大小与它们的地壳丰度值的顺序相反，某些稀有元素，如碲，可能具有最大的浓集克拉克值（1000000）。表 1 给出了内华达州伊利矿区强矿化岩石中各选用元素的平均丰度和相对地壳丰度的浓集度。该表说明，伊利矿区富集有碲、银、锑、砷、铜和锌。该矿区过去的生产情况支持这些结论。一种元素越是稀少，它要造成高于地壳正常丰度的明显浓集克拉克值所需的元素量就越小。被带入整个矿区的各种元素，看来是按照与其地壳丰度相反的顺序富集的，富集的数量多少不一，但顺序大致不变。

明尼苏达州德卢斯杂岩体 明尼苏达州东北部的德卢斯杂岩体是一个大型的分层火成侵入体，其时代为元古代 Y。在西面，它侵入并切掉了变质沉积岩和花岗岩。在西部，沿杂岩体的底部赋存着已知的有经济意义的矿化，该处的浸染状铜镍硫化物矿体在橄长岩和辉长岩中形成不连续的矿带或扁豆体。

美国地质调查局于德卢斯杂岩体所在地区进行了一项区域地球化学调查，目的是对寻找被冰碛盖层掩盖的硫化矿床的方法作一评价。在研究区内，冰碛层的厚度平均为 7 米。该项目使用了大间距的土壤 B 层取样（1 个样/平方公里）。采样深度 23 至 38 厘米。将样品烘干、磨碎和筛分，得到 <177 微米（-80 目）粒级的土壤样品，用标准的半定量光谱技术分析 32 种元素。

利用土壤分析结果把德卢斯杂岩体底部的硫化物矿化清楚地圈定出来，并且在杂岩体内还圈出了几条线性延展的元素异常。其中一个主要异常在杂岩体内平行于西接触带分布，可追索 13 公里。另外几个线性延展的元素异常，走向与这个主异常及接触带近于直角相交。

土壤中的 Cu/Ni 比值沿着接触带朝东北方向下降。在杂岩体内，从平行于接触带呈线性延展的内部异常中采得的样品，该比值的降低方向基本上与土壤中相反。横向线性延展的地球化学异常表明，铜含量向西逐渐增大。上述两个方向异常的交切区一般出现最强的地球化学异常。

土壤地球化学数据与钻孔数据的对比表明，冰川作用并没有使地球化学异常移位。从铜含量高达 3000ppm 的土壤样品中分离出了重矿物。在显微镜下对它们作了检查，发现不含硫化物矿物。因此，微量元素异常浓度呈线性延展的一种可能的解释是：微量元素溶解在地下水中华作垂直运移，在发育于冰碛盖层上的土壤 B 层中，它们又被铁和锰的氧化物从水中吸附出来。

表 1
内华达州伊利矿区某些元素的平均浓度和相对地壳丰度的浓集度

元素	相对地壳丰度的浓集度	强矿化岩石中的元素相对地壳丰度的浓集度 (以拉克值为单位)									
		地壳丰度*	铁帽	碧玉类	裂隙充填物	燧石	灰岩	页岩	二长岩		
Fe	5.6%	960	7.3	0.66	8.0	2.8	4.3	4.3	4.3	5.18	
Mn	一般 > 5 倍	425	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4	6.9	6.9	5.39	
Ba		260	12	7.06	10.1	12	12	4.5	4.5	11.76	
当量 S		70	125	119	136	117	42	7.7	7.7	45	
Zn		55	857	857	857	857	714	127	127	186	
Cu		12	91	91	91	91	54	8	8	91	
Pb		2	800	800	800	800	800	357	357	800	
Sn	一般 > 100 倍	1.8	250	250	133	32	77	25	25	154	
As		1.5	1,876	1,224	2,589	1,209	333	414	414	299	
Mo		1.5	417	667	419	200	32	291	291	353	
W		0.45	750	387	688	215	17	13	13	67	
Tl		0.2	191	40	456	51	34	53	53	53	
Cd		0.2	1,450	750	605	100	255	1,000	1,000	100	
Sb		0.2	5,000	2,500	5,330	1,500	2,080	570	570	395	
Bi		0.17	5,082	5,882	5,882	2,118	424	829	829	2,012	
In	一般 > 1000 倍	0.1	1,030	444	12,100	350	100	11	11	260	
Ag		0.07	4,205	14,284	5,600	4,285	1,429	643	643	243	
Te		0.002	500,000	27,600	730,000	85,000	11,500	19,000	19,000	52,500	
Au		0.002	5,000	8,000	2,000	1,250	1,050	300	300	900	

* 除标明单位外, 其余均以 ppm 作计算值单位。
元素按它们的地壳丰度排列; 数据取自 Gott 和 McCarthy, 1966 年。

德卢斯杂岩体内的线性地球化学异常受构造控制，并产在相应的构造上。土壤样品中变化着的 Cu/Ni 比值反映了深部硫化矿床中总成分的差异。此外，土壤地球化学特征表明，铜镍矿化与德卢斯杂岩体岩石被花岗质或其它长英质组分混染的程度之间有密切关系。铅、铍和钼的密切共生关系出现在杂岩体的矿化接触带中，而且在杂岩体内铜和镍的线性地球化学异常中亦可察觉到这种关系。

今后在类似于明尼苏达州东北部的地区开展区域化探时，必须对经选择性浸提的土壤样品作多元素分析，这样可把吸附于铁和锰氧化物中的元素组分提取出来，不必费力去浸溶硅酸盐和粘土。获得的化学数据必须按元素组合而不是按单元素来解释。理想的做法是，这种方法应以在已知矿床上建立的地球化学模型为依据。这种模型要有一定的自由度，以适应区域内地下水状况的变化。

波多黎各自由联邦 在波多黎各自由联邦的几个斑岩铜矿上进行的土壤和残积土地球化学研究表明，在探测被潮湿的亚热带地区常见的厚层残积盖层覆盖的斑岩铜矿床时，金是最有用的单元素。引起次生富集的淋滤作用的强度在不同矿床上明显不同，因而覆盖层中铜及其它酸性淋滤元素的浓度也相应有别。相反，矿床覆盖层中的金浓度在不同矿床上却十分相近。事实上，覆盖层中的金含量与其下伏原生矿床中的近似。在具有次生富集带的矿床的覆盖层中，钼浓度异常之高，看来是因为相伴而来的低 pH 环境有利于铁钼华的形成，使钼固定在土壤中。

因此，在所观测到的侵蚀水平上，土壤和残积土中铜、钼和金的相对分配情况，有助于鉴别发生了次生富集的矿床的覆盖层和原生矿床的覆盖层。发生过次生富集矿床的覆盖层，其特点是金和钼的浓度异常之高，铜的浓度接近于背景；而原生矿床的覆盖层，其特点是金和铜的浓度异常之高，钼的浓度接近于背景。

混合介质测量

混合介质地球化学测量一般是在在试验性测量查明单一样品介质不足以从化学上或矿物学上圈出矿床地质位置的地区进行。再者，当区内可供利用的地质和地球化学资料很少，又没有足够时间进行常规试验性测量时，也需要作混合介质测量。在对大区域作资源评价时，通常是使用混合介质测量。

阿拉斯加州 1975 到 1979 年间，在阿拉斯加州布鲁克斯山脉中段进行了混合介质地球化学测量，圈出了一条区域性的构造控矿带，在其东西向的变火成岩、变沉积岩和变火山岩中产有铜和钼矿点。这一矿带从安布勒幅向东延伸 375 公里，直到阿拉斯加的昌达拉幅和菲利普史密斯幅，位于西经 147° 至 156° 之间；从北到南延展 220 公里以上，位于北纬 67° 与 69° 之间（图 2）。这些地球化学研究还圈出了另外一些靶区，在那里补做多介质测量，有可能发现这些金属的新矿床。

这次测量所用的介质和样品量为：4677 个水系沉积物样，2286 个从水系中淘洗的重砂样。用半定量光谱分析 <177 微米（-80 目）的水系沉积物和从水系沉积物中淘洗出的重砂（比重 <2.86）的非磁性组分。分析结果确定了两个地球化学组合：铜-铅-锌贱金属组合和锡-钨-钼的钼组合。这些地球化学组合表明，在此变质带中存在多种类型的矿化，每一种居优势的类型都与特定的变质岩岩性有关。潜在的斑岩钼矿系统与该变质带中部的变火成岩有

关。矽卡岩铜矿化可能局部地产生在与该变质带毗邻的变沉积岩中。变火山岩区被确认为潜在块状硫化物矿化的靶区。由 <177 微米(-80目)的水系沉积物粒级得出的地球化学数据,对于查明铜、铅、锌和钼的异常浓集是最有效的,而重砂则指示锡和钨的浓集。若不采用两种介质,测量结果只能部分地圈出这些矿化区。

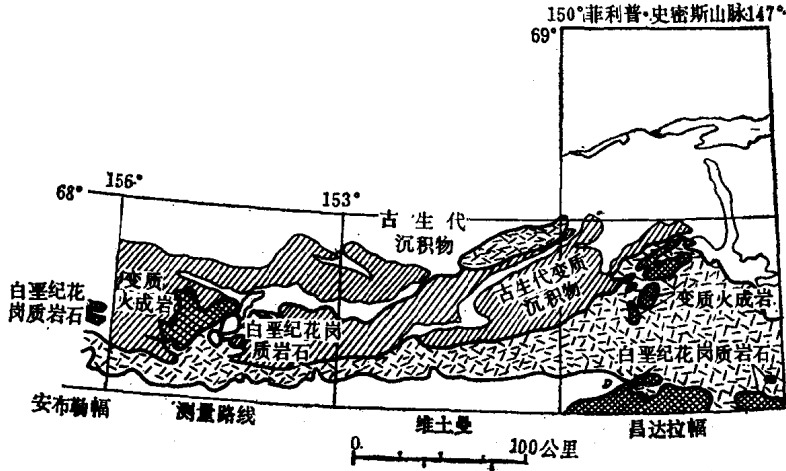


图 2 布鲁克斯山脉中段的地质略图,表示中部变质带和 $1^{\circ} \times 3^{\circ}$ 范围内各图幅的名称

墨西哥的索诺拉州 对墨西哥索诺拉州干旱区应使用的化探方法进行过研究,结果发现, <590 微米(-30目)的水系沉积物和选定的水系沉积物重砂组分的半定量光谱分析结果,与常规的 <177 微米(-80目)沉积物的结果相比,可为解释工作提供更好的依据。编制了1:25万、1:5万和1:1万的地球化学图,并作了对比。在小比例尺(1:25万)的工作中,用磁选机在0.6安培下分选出的非磁性重砂对化探是最有用的。在大比例尺(1:1万或更大)工作中,对于许多矿带业已出露的热液系统来说, <590 微米(-30目)水系沉积物的分析结果最为有用。

在踏勘阶段的调查中,在一个29000平方公里的地区内进行1:25万比例尺工作时,布置了1200个采样点。样品采自小溪源头以下2到10公里的河沟内。分离出的相对较粗的重碎屑矿物含有大部分异常金属元素。这些矿物的粒径通常较粗,大于177微米(80目),平均粒径约为840微米(20目)。因此,合乎需要的是较粗的水系沉积物粒级,而不是常规的 <177 微米(-80目)的物质。 <590 微米(-30目)的粒级还有一个优点,就是比常规的 <177 微米(-80目)粒级更容易和更快的采得。在选择最佳介质时,样点间距和表生带的矿物学特征看来是起控制作用的因素。因为选来作详细工作的成矿作用系统碰巧是出露的热液系统,这种直接的结论可能并不适用于出露不好的系统。

在不同比例尺的图件上编制出的微量元素分布的地理模式大不相同。当比例尺为1:25万时,异常的排列系统明显,相对地呈线性模式,说明热液系统的分布在宽广的范围内受区域构造控制。这样的例子有著名的北西向延伸的卡纳内阿线性体,以及同样明显但不那么出名的北东向延伸的带,它们似乎控制着沿卡纳内阿线性体(可能还有在其外侧)分布的矿化。在1:5万比例尺的情况下,异常排列呈半同心模式,它表明和概括了在一个大的热液系统中各元素的总体分带现象。当比例尺为1:1万和更大时,异常的排列重又呈线性,显

示出在一个热液系统的各个带内局部构造对金属分布的控制。异常模式随比例尺而变化的情况，可能是地球化学分布的一个普遍特征，在部署地球化学测量和解释其资料时，应当预计到这一点。

对大部分元素来说， <590 微米（-30目）的水系沉积物得出的值域很窄。其异常值只能作常规的解释。例如，铜的分布清楚地圈出了纳科萨里附近、卡纳内阿附近及其西北方的一些出露于地表的已知铜矿区（图3）。把这一模式与佩雷兹等（1977，1978）或霍利斯特（1978）编制的图件作一对比，表明这两个矿床与 <590 微米（-30目）的水系沉积物异常密切相关；它还突出了这样一个事实，即沿着卡纳内阿线性体的投影，从卡纳内阿正南到纳科萨里附近，显然不存在其它已知矿床，亦不存在异常。

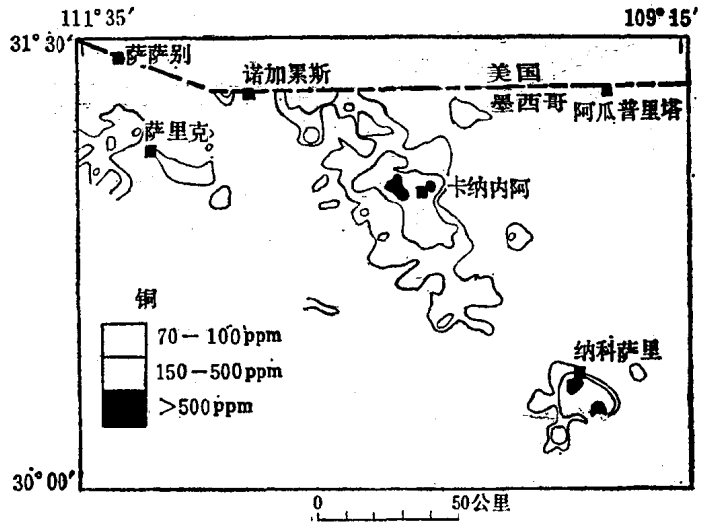


图3 墨西哥索诺拉州纳科萨里和卡纳内阿的地球化学图，表示铜在 <590 微米（-30目）的水系沉积物和出露的铜矿床中的分布情况

根据水系沉积物淘洗重砂的非磁性重矿物，可以更清楚地表现出上述模式，有助于判断沿卡纳内阿线性体矿化明显中断的性质。非磁性重砂极可能含有热液系统微量元素组分的主矿物。例如，铈在任何水系沉积物样品中都检测不到，但在占5%的重矿物中却发现高达2000ppm的铈。这种增强是由于在富选过程中把 <590 微米（-30目）沉积物中起着铈等元素稀释剂作用的大量无矿造岩矿物淘洗掉的结果。沿卡纳内阿线性体铜矿化明显中断带的北部，在卡纳内阿的东南方，有一群富铈的采样点。经解释，这群采样点的存在说明在中断带内存在着热液系统，但它们仅在其更近末端的带内才出露地表。

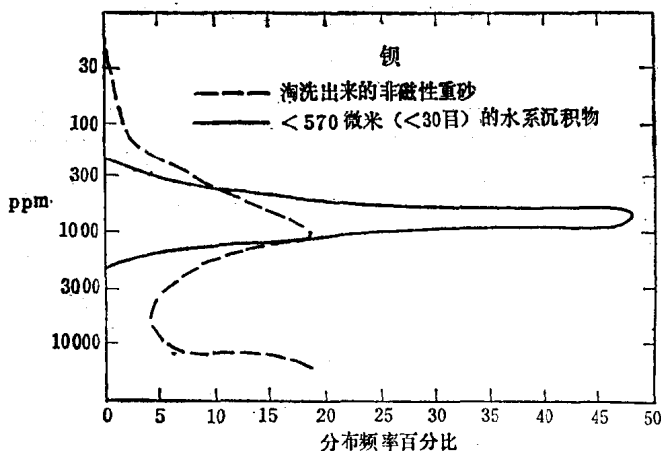


图4 墨西哥索诺拉州 <590 微米（-30目）水系沉积物和非磁性重砂中钡浓度变化范围的对比

在索诺拉州，大量的钡以次要组分结合在长石和其它造岩矿物中。 <590 微米（-30目）的样品中钡含量的变异性很小，几乎完全受含钡和无钡造岩矿物相对比例的控制，也就是受 <590 微米（-30目）沉积物原岩岩性总体变异的控制。在淘洗和磁法分选时，长石和大部分含钡较少的矿物被分离出去。因此，在选出的非磁性重砂中，钡的浓度与重晶石的存在与否有关。图4将 <590 微米（-30目）的沉积物与非磁性重砂中钡浓度的变

化范围作了一个对比。重砂中钡浓度的凸形模式反映出了富重晶石或贫重晶石的采样点。非磁性重砂的曲线形态反映出钡含量高于1%的重砂样品占23%。

富钡重砂在地理上一般分布在卡纳内阿东南的卡纳内阿线性体中断带内(图5)。假设在此系统中钡就在这个位置上,钡的这种分布模式可进一步证实热液系统在此中断带内仍然连续。钡的分布也说明,侵蚀作用只把矿化的最上带剥露了出来。

铅和钡一样,也是某些常见造岩矿物中的次要组分。铅的矿石矿物及其表生矿物既是重矿物又是非磁性矿物。再者,通过重砂的分选,除去了围岩岩性对<590微米(-30目)水系沉积物的影响,这样就增大了与热液系统有关的铅的出现率,有可能作出好得多的解释。重砂中铅的地理分布(图6)提供了一个沿北东向的带存在有矿化的强有力的证据,该带是G.L.雷恩斯(1978)独立地根据陆地卫星图象上线性特征的集中而确定的。雷恩斯确定的五个带中有四个位于地球化学测量区内,而且这四个带都显示出矿化的地球化学证据——不仅沿着卡纳内阿线性体有此证据,而且在北东向带的整个长度上凡有数据的地方皆显示出这种证据。根据地球化学资料,矿化最连续的证据位于雷恩斯所圈定的带中最弱的带里,这个带穿过了卡纳内阿线性体的明显中断带。最强的地球化学异常沿着雷恩斯指出的最明显的带——诺加累斯线性体分布。

图5 墨西哥索诺拉地区富钡的非磁性重砂地球分布的地球化学图

根据重砂中钼和一套伴生元素的区域分布模式确定了一个完全出乎意料的与热液系统无关的矿化区。虽然这一套元素可能暗示着一组富稀土花岗岩(其中钼是独居石或褐帘石等稀土矿物的次要组分)的存在,但对重砂中主要钼矿物钼石的快速鉴定却说明了另一种情况。在此地区勘查这些元素矿床的潜力尚未作过验证,但局部异常很强足以说明值得进行详查。

在埃尔科雷欧地区(图7),重砂中铅和钼的含量很高,但没有矿山,于是被选来进行1:5万的详查,以验证新确立的北东向矿化带的概念。该区位于诺加累斯线性体上,卡纳内

阿线性体

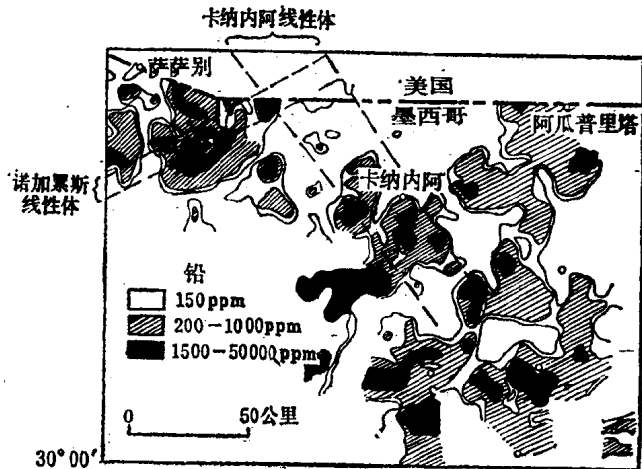
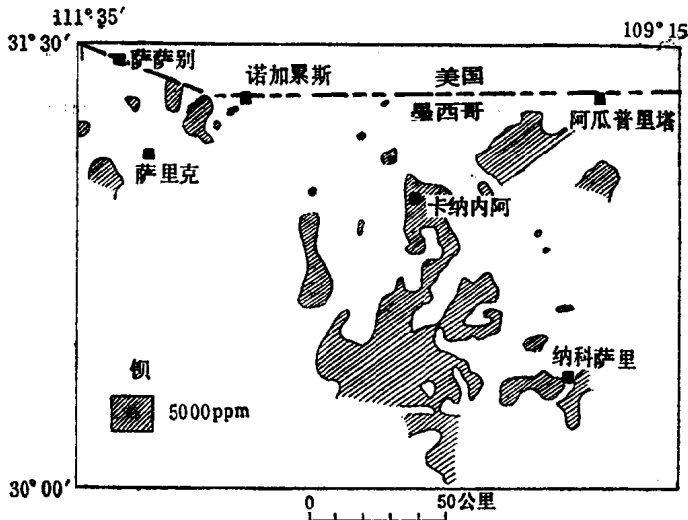


图6 墨西哥索诺拉地区非磁性重砂中铅的地理分布及诺加累斯和卡纳内阿线性体的地球化学图

阿线性体的西南。在 580 个采样点上采集了水系沉积物和重砂,平均密度为1.5平方公里一个点。非磁性重砂再次证明诸如钼之类的元素是很有用的,因为在 <590 微米(~ 30 目)的沉积物中,长石中的钼的稀释作用有力地掩蔽了与矿化有关的钼的分布。重晶石中钼的宽阔而不连续的异常带似乎代表矿化的最外带,这个带离推测的矿化系统中心有 10 多公里远。奇怪的是,对于铅、钼等通常被认为是稀少的元素来说,就是凭借这些元素超丰度的含量来圈定异常,重砂也是无效的。一半以上的重砂样品铅含量超过 1%,因此产生了分布广而分散,且无法分辨的异常。而采用不经分选富集的沉积物,却得到了一系列明显的铅异常,其异常下限为 400 和大于 900ppm (图 7),这些异常在离矿化系

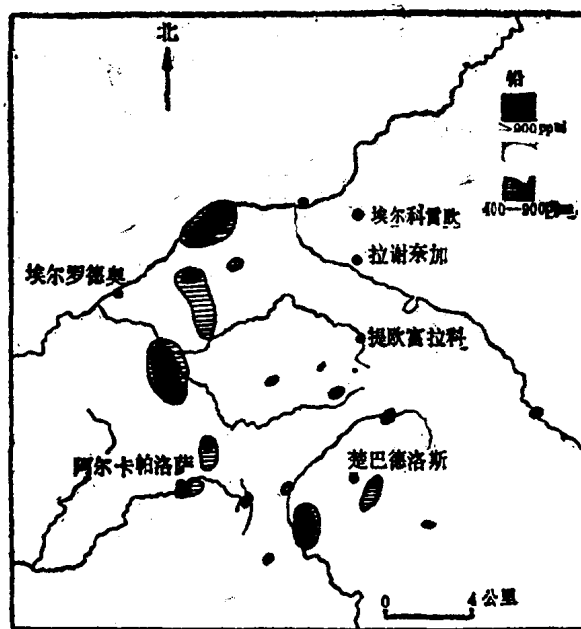


图 7 墨西哥索诺拉州埃尔科雷欧地区 <590 微米(~ 30 目)水系沉积物中铅异常的地球化学图,铅的异常下限取 400ppm 和 >900 ppm

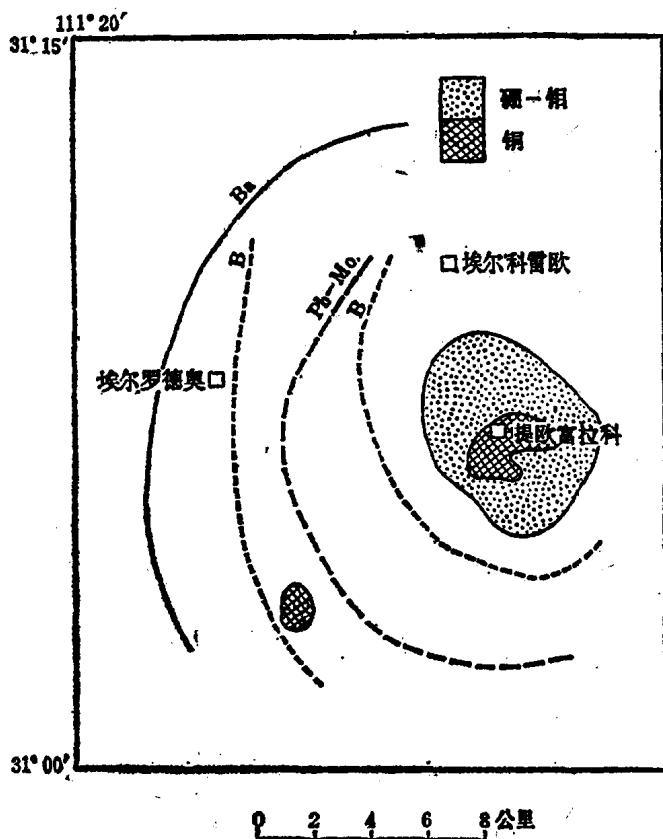


图 8 墨西哥索诺拉州埃尔科雷欧地区与热液系统有关的元素同心环状分带顺序的地球化学图

统中心大约 9 公里的地方构成了一个弓形的带。主要的铅矿物是钼铅矿 ($PbMoO_4$),在重砂中很容易识别,因此,钼的分布模式与外带中铅的分布模式相似。然而,在该系统的中心,钼产生了第二种类型的异常;在此它与铜伴生。

对各地球化学模式的归纳得出了与热液系统有关的各元素的大小的分带顺序(图 8)。在东北部,该系统被一北西向延展,其内沉积有砾石的大地堑截断。更详细的 1:5 万比例尺的采样表明,埃尔科雷欧地区的地球化学模式呈同心圆状,并不象在 1:25 万比例尺的踏勘采样时所揭示的那样呈线性特征,各热液系统是一条北东向延伸的串珠上的珠子,沿着明显的断裂迹线,即普让查斯·德·普拉塔谷地分布。在用 1:5 万比例尺圈定的异常范围内,以 1:1 万比例尺进行了详细

地球化学采样，使用的介质是水系沉积物、土壤和岩石碎片。后一种介质效果最差，因为矿化最强的岩石往往出露得最差。由于水系沉积物代表着一个汇水盆地的化学成分，对于1:1万的详细测量是有价值的。它们大大缩小了需要进行土壤采样的地区。沿山脊测线以30米点距采集的土壤样品，提供了最为明确的钻探靶区。在详查时只使用了少量重砂样品，主要是解决矿物学方面的问题。

在详细工作时分析的样品中发现有极高的浓度。在铅带的<590微米(-30目)的水系沉积物中发现有高达20%的铅和5%的钼。常见的做法是取1%铅作为异常下限。在提欧富拉科的热液系统中心及阿尔卡帕洛萨的外围热液系统附近发育的富铜区(图7)，水系沉积物和土壤中的铜含量接近1%，一般用0.1%(1000ppm)作为铜的异常下限。在水系沉积物中可见到钼铅矿、硅孔雀石，局部地区还有辉铜矿。侵蚀作用明显地破坏了热液系统，致使富含金属的矿物直接或以机械方式分散到土壤和沉积物中。

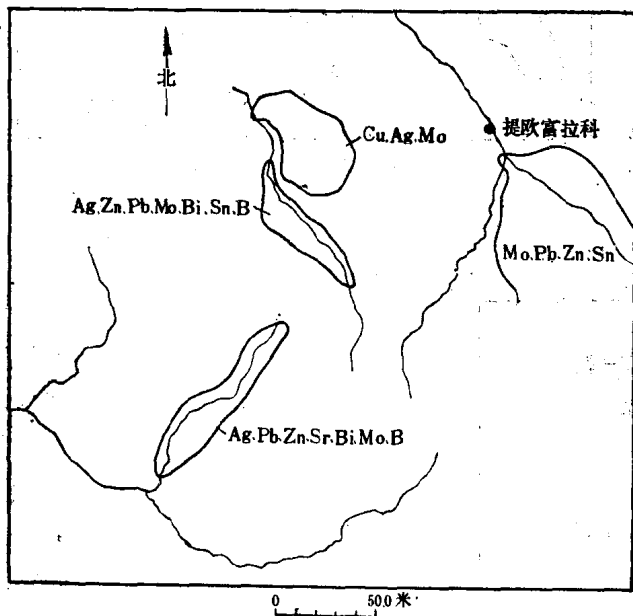


图9 墨西哥索诺拉州提欧富拉科地区以<590微米(-30目)水系沉积物为依据的综合地球化学异常图

在提欧富拉科地区以1:1万比例尺采集的<590微米(-30目)水系沉积物样品，其地球化学数据的地区性模式反映出了各个矿床种类的特点(图9)。铜-银-钼异常和钼-铅-锌-锡异常近于不规则的圆形，所反映的显然是与相对年青的流纹质侵入岩有关的网脉状矿化。在测区西南部有两个沿水系分布的线性程度较大的贱金属异常，它们显然源于沿北东向和北西向断裂发育的受构造控制的矿化。

利用异常范围内的重砂样品能为解释工作提供有价值的矿物学资料。例如，在提欧富拉科地区的几个地方发现了游离金，这就大大增加了该区经济上的潜力。在铅带(图8)范

围内，从土壤中分离出的重砂起码以某种难以分类的铅的磷酸盐的形式提供了钼铅矿的原生母矿物，它在化学成分上与磷氯铅矿相似，但结构不同。这种矿物学上的原委或许能说明该区何以没有采矿活动。

沙特阿拉伯乌埃雅哈环形构造 在沙特阿拉伯王国前寒武纪地盾东部的库赛米雅火成杂岩体(3000平方公里)内，有一个乌埃雅哈环形构造，处于沙漠环境，这里的地球化学调查证明，使用粗粒级沉积物和重矿物在沙漠区勘查钨、钼和铋是可行的。在库赛米雅杂岩体中分散的沙海具有一种自然地理模式，这一模式主要受低级火山变质岩和沉积变质岩的岩性和构造特征，以及深成的斑状花岗闪长岩、石英二长岩和碱性花岗岩控制。花岗岩，特别是乌埃雅哈环形构造的上覆地层发育区，通常是平缓的山前侵蚀平原，而往往在碱性花岗岩之上发育成的浑圆形孤山，高出于平原之上。在环形构造中，地形的变化特点是阶梯状起伏，这就

影响到采自地表碎屑物中的样品的组分，对地球化学资料的解释也至关重要。最常见的情况是地形的台阶被稳定的沙丘前缘所掩盖，沙丘前缘又构成风成沙的陡立坡面。

进行了以选择适当分析介质为目的的试验测量。根据这些测量的结果，证实由于风积物的混染，传统的<177微米（-80目）的沉积物样品间含量基本上没有差异。<2000微米，>590微米（-10目，+30目）粒级的砂和非磁性淘洗重砂被证明是最理想的分析介质。

根据<2000微米>590微米（-10目，+30目）的地表碎屑物取得的地球化学数据，主要与主岩性单元的组分有关；根据重砂得到的分析数据，用于确定钨、钼和铋异常的位置。采用这两种介质的地球化学测量结果标绘出来以后，同地质填图及航磁、伽玛能谱等地球物理测量确定的接触界线密切一致；而根据<177微米（-80目）的常规沉积物得出的地球化学数据，与地质情况没有相关关系。

用重矿物、披膜和沉淀物增强异常

在美国近些年的化探技术中，增强异常是最重大的发展趋势。未来的研究极可能主要致力于发展寻找隐伏矿的方法和技术，对这些矿床来说，地表样品中的地球化学异常可能是难以捉摸或强度不足的。为了探测这些矿床，已经使用了多种多样的异常增强技术，其中包括用物理和化学方法选择性地富集一部分物质。物理方法包括：淘洗重砂，重砂的磁性和非磁性组分的分离，从重砂中选择性地分离出诸如黑云母、磁铁矿、角闪石和石榴石等矿物。化学方法包括：选择性地浸提铁和锰的氧化物，稀酸浸提物，冷提取技术。实际上，在现今的许多地球化学踏勘工作中，只是由于应用了某种形式的富集物或其它增强技术，才发现了有意义的异常。

对重矿物（比重大于2.86）作化学和矿物学分析正在变成一种更广泛使用的勘查方法。这些分析既可对重砂进行，也可对分离出的矿物组分进行。重矿物的好处是使许多异常得到增强，在某些应用中，实际上可把欲测元素的浓度提高到常规分析方法所具有的较低的检出限。人们一般认为，重矿物是在元素原生分散过程中形成的，但是在重砂中显然也出现次生分散产物的例子，包括通常见到的铁和锰的氧化物。有意思的是，火成的或变质成因的磁铁矿在以后的碎屑循环中可以从循环水中吸收金属离子，因而，在次生过程中变得富含与磁铁矿本身没有成因联系的成矿金属。灰岩中的热液成因重矿物，可以作为不溶残渣回收出来，用以分析那些在灰岩母岩中含量低于检出限的微量元素。

在充气环境下，铁和锰在土壤和沉积物中呈氧化物和氢氧化物以披膜、结核或分散的细微胶体颗粒的形式产出。在次生风化环境中这些氧化物的普遍存在，它们的化学活动性，以及它们很强的吸取成矿金属的能力，都使它们成为吸引化探工作者注意的介质。现在已有现成的选择性提取次生铁锰氧化物及其有关金属的分析技术。

这些技术的使用者应当致力于鉴别那些与矿化无关，而是因为从无矿石岩中吸收金属而形成的明显的元素异常。F.C.坎尼（1966），R.H.卡彭特等（1975），赵景德和P.K.西奥博尔（1976），以及R.H.卡彭特和W.B.海斯（1979）曾报道过一些解释披膜和沉淀物地球化学分析结果的方法，包括：一种或多种元素与锰的比值法；一种或多种元素与铁的比值法；一种或多种元素与铁加锰的比值法。用以确定与样品中铁、锰氧化物的增大浓度有关的元