

286938

矿产勘查的

地球化学

【美】H. E. 霍克斯 合著
【英】J. S. 韦布



3337

矿产勘查的地球化学

GEOCHEMISTRY IN MINERAL EXPLORATION

(美) H. E. 霍克斯 合著
(英) J. S. 韦布

谢学锦译

地质科学院物探研究所印

1974

序 言

本书的目的是要对地球化学在矿产勘查问题上的理论与应用提出全面的总结。我们打算使这个总结具有世界性的规模，代表作者二人在北美北方、温带及干旱地区以及非洲与东南亚热带及沙漠气候区个人经验的总和。它只是作为这个问题的入门，而不是作为化探工作者的手册。在书中尽量列出最重要的参考文献，并以图、野外观察和概括的形式从这些文献中搜集最重要的结论。

本书是写给下列四类读者的：（1）给学生，作为入门的教科书；（2）给亲缘领域（如普通地球化学与地球物理学）的研究工作者，他们希望看到有关应用地球化学的成就与技术的总结；（3）给非专门化的生产部门的地质工作者与地球物理工作者，他们需要有一本提供一般知识的书备查；（4）给应用地球化学方面的专家作为他们的基本参考书与文献目录。

本书大量援引了过去发表的一些总结中的观点。特别要提到的是霍克斯著的“地球化学探矿原理（Principles of Geochemical Prospecting）”，由美国地质调查所刊印在第1000-F号汇刊上，以及金兹堡的“地球化学探矿方法”的英译本，这本书总结了苏联在二十年内取得的经验。

H. E. 霍克斯

J. S. 布布

译 者 附 言

地球化学探矿是一种新的找矿方法，只有四十余年的发展历史。目前全面介绍化探知识的书还很缺乏。霍克斯与韦布合著的这本书比较系统地阐述了化探的理论基础与工作方法，并收集了非洲、北美及东南亚不同地质地理条件下化探工作的实际资料。这对我国地质与化探工作者是有参考价值的。

这本书是1962年出版的，在这十二年中化探重要的新发展，书中未提及者，在有关章节处加了简单的译者注。

书中个别段落，如序言中的致谢，及第16章谈及资本主义国家勘查矿产的管理工作等略去未译。原书中“编者前言”没有什么内容，亦略去未译。

个别名词译名与已出版之各种词汇有不同者，亦在相应的章节中作了说明。

由于全部查对有困难，故在译本中对苏联文献题目仍按原书用英译文，苏联作者亦按原书用英文拼音，未改换成俄文。

尤其应当说明的是，在本书出版后的十二年中，世界各地民族独立运动风起云涌，许多过去遭受帝国主义殖民统治的国家和地区，相继独立，原书中所用的不少国名及地区名称目前已有很大变更。本译文中除已将北罗德西亚改为赞比亚外，其余仍按原书名称译出，希读者参阅及引用时注意。另外，由于出版时间仓促，工作不够细致，尚有一些文字错误及疏漏之处，我们附印了一张勘误表，并在这里向读者表示歉意。

译 者

1974年

目 录

序 言

译者附言

第一章 绪 言	1
矿产勘查的地球化学 发展史 现状 文献	
第二章 基本原理	7
地球化学环境 地球化学分散 地球化学活动性 元素共生组合 地球化学分布模式 解释推断原则	
第三章 微迹分析原理	25
样品的制备 样品的分解 分离 估量 分析步骤	
第四章 原生分散	34
同生模式 热液分散模式 后生矿物中的压力-温度效应 原生矿石的特征 地球化学岩石测量 气态分散模式	
第五章 风 化	55
风化的特征 风化过程 影响风化过程的因素 风化产物	
第六章 成 壤	67
土壤剖面的发育 影响成壤的因素 主要土类及其地理分布 潮湿地区的土壤 半潮湿及干旱地区的土壤 山地土	
第七章 次生分散	85
化学及生物化学因素 机械因素 环境对分散的影响	
第八章 次生分散模式	107
次生分散模式的分类 同生模式 后生模式 分散组分在液体与固体介质中的分配 碎屑样品中金属的提取度 衬度 次生模式的形状 与矿床无关的异常 有意义异常的弱化	
第九章 残积复盖物中的异常	119
淋滤露头及铁帽中的异常 残积土中的同生异常	

残积土中的水成异常 与矿床无关的异常

第十章	运积复盖物中的异常	135
	运积复盖层中异常的一般特征 冰成复盖物 塌积层与冲积层 有机层 湖积物及海积物 其它类型的运积复盖物	
第十一章	地球化学土壤测量	148
	试点测量 野外操作 数据的解释推断 追踪的一般步骤	
第十二章	天然水中的异常	165
	元素的存在形式 异常持续性 时间变化 地下水异常 河水异常 湖水异常 与矿床无关的异常	
第十三章	水系沉积物中的异常	179
	泉及渗湿区 活性河水沉积物 河漫滩沉积物 与矿床无关的异常	
第十四章	地球化学水系测量	196
	试点测量 选择采样对象 采样布局 样品的采集 与加工 制图 数据的解释推断 追踪技术	
第十五章	植 被	208
	植物对矿物质的吸收 生物地球化学异常 生物地球化学 测量技术 地植物指标 地植物测量技术 摄影地质填图	
第十六章	矿产勘查的地球化学方法	226
	指导人员 地区的选择 勘查程序 勘查方法的选择 在一勘查体系中地球化学的作用 组织与操作	
第十七章	找矿例案	235
	东加拿大新不伦瑞克 赞比亚 菲律宾宿务	
第十八章	研究工作的现状与展望	248
	地球化学探矿学当前的研究工作 理论地球化学当前的研 究工作 应用地球化学的其它领域 矿冶工业的未来 地球化学探矿学的未来	
附录	元素的地球化学特徵	254
文献		273

第一章 绪 言

1940到1957年这一段时期内，探矿*活动达到了前所未有的规模。这意味着采矿业已经逐步认识到它不能再无限期的依赖缺乏训练的“探矿人”去发现矿产了。多数采矿公司都开展了更大规模组织起来的矿产勘查*工作，某些较大的采矿机构每年投资数百万元作为勘查费用已经成为很平常的事。

探矿活动的一部分力量是用于反复在岩石出露地区重作调查以期发现地表的矿化。这种工作一般收效不大，因为未被上一代单独活动的探矿人发现的出露矿体只剩下极少数了。新兴的大规模探矿活动中更大一部分力量则用于研究地表岩石露头，以期找到指示埋藏矿体的地质标志。除此以外还有逐年增加的，相当可观的一部分力量用于发展与应用新的地质构造填图技术，以及在有机碎屑层，土壤层，或空白岩石复盖下找寻隐伏矿体的新技术。这些新技术包括新近发展的航空照像地质学，地球物理与地球化学探矿方法。

1—1 矿产勘查的地球化学

按一般的用法，地球化学探矿指所有那些系统的测量某种天然产物的一种或几种化学性质的探矿方法。化学性质中最常用的是某些元素或某些元素组的微迹含量，天然产物可以是岩石，土壤，铁帽，冰川碎屑，植物，水系沉积物或水。测量的目的是发现与矿化有关的反常的地球化学模式，或称地球化学异常。

应该把勘查矿产的地球化学方法看作是近代探矿者武器库内必不可少的一部分。它们与其它收集地质资料的方法不同之处仅在于它们需要使用某些专门的技术。各种勘查方法的目的当然是相同的——都是企图发现隐伏矿体的线索。

1—2 发展史

地球化学探矿的原理与人类最早应用金属的历史同样悠久。最早的探矿人很快就发觉某些矿床的四周具有某些明显且带诊断性的特征。在原生矿体四周的地面上散布着新

*Exploration 科学出版社英汉综合地质学词汇（以后简称综合词汇）上译作“勘探”，“探测”Prospecting综合词汇亦译作“勘探”。实际上这两个词含义不尽相同。Exploration指任何类型有系统，有步骤对自然界任何对象进行的调查工作，这中间也包括调查矿产（从区测、普查到勘探）的全部过程。而Prospecting主要指找矿，其中还包括另星的小规模或个人的找矿活动。因为Exploration包括普查，勘探的全过程，单译成勘探似不妥，可译为查勘或勘查，现暂译为勘查而Prospecting则译为探矿或找矿（译者注）。

鲜的或遭到风化的矿石碎片。较小的矿石碎屑可以在流经矿化地区的水系沉积物中发现。探矿人认识到搜寻这些矿石碎屑，并沿着含量增高的方向追索，往往可以找到基岩中的金属源地。这时他是依靠他的肉眼所能看到的東西引导着他进行追索。但是他基本上也是在追随着与近代地球化学方法中所利用的完全类似的分散模式。

在十九世纪三十年代中期，微迹元素分析，作为肉眼观察的补充方法，已经开始在探矿技术中占有地位。从戈德施密特，费尔斯曼与维尔纳德斯基在理论地球化学领域内的经典性研究工作中得到启示，在斯堪地那维亚与苏联各自独立的进行了成功的实验工作，将土壤与植物的光谱微迹分析用作探矿的方法。在四十年代，随着湿法化学分析以及光谱方法的不断改进，日本，美国与加拿大的地球化学家继续制定了更为经济更为有效的地球化学探矿方法。在1950年研究活动的进展蔓延到英国，其后又蔓延到西欧的其它国家，与此同时，在非洲及远东也开展了活动。另外在澳大利亚，印度以及许多其它国家也开始进行实验研究，以致于在目前完全没有用任何种类地球化学方法研究过的矿田已经为数很少。

各种地球化学技术的演化过程尚未完成，而它们的发展程度又各不相同。地球化学土壤测量与植物测量无疑是最先进的，它们在三十年代就已开始大规模应用。地球化学水系测量直到五十年代才在生产中使用，但现在它的规模与应用范围正在迅速扩大。与它们相比，系统采集与分析未被风化的矿石与岩石的地球化学探矿方法仍处于早期实验阶段。

土壤测量 1932年苏联地质学者〔Fermilian, 1939; Sergeyev, 1941〕首先对系统采集的土壤及风化岩石样品进行化学分析，用这种方法来找矿。在苏联文献中这种技术被称之为“金属量测量”。1935年莫斯科全苏地质勘探研究所的地质工作者研究成功了适用于大规模地球化学土壤测量的光谱分析设备与采样步骤。1935年进行了三项野外工作，1937年是六项，1933年三项。其中共有七项是用半定量光谱方法分析土壤及水系沉积物中的锡（锡量测量）。在战前时期苏联的其它工作包括对Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, W, Mo及B的生产实验及探矿工作。

西方国家中，最早的地球化学土壤测量实验工作是在1947年由美国地质调查所进行的〔Hawkes and Lakins, 1949〕。随后安排了紧张的研究计划，几乎在美国所有的气候带都进行了研究。美国地质调查所还同时并进的研究与制定快速简单的比色分析方法，这与苏联计划中着重于光谱技术有所不同。在五十年代初期有几家大的采矿公司在它们的勘查程序中应用了地球化学土壤测量，特别是在南阿帕拉契亚及太平洋西北沿岸地区，并获得良好效果。某些早期工作结果业已发表〔Fulton, 1950; Gilbert, 1951, 1953; Kingman, 1951; Fulton et al, 1958〕。在加拿大，这些方法的野外实验工作是与美国同时进行的，由于冰川作用带来的复杂情况，加拿大的工作结果并不完全令人鼓舞。即使如此，地球化学土壤测量在加拿大的应用也有着相当的规模〔Riddell, 1960〕。

英联邦在联合王国与非洲进行了初步工作之后，1953年开始了大规模的研究与发展工作，基本上是按照美国体制进行〔Webb, 1953, 1958a; David William, 1956〕。工作主要在非洲与远东进行，其中大部分是由伦敦帝国科学工艺学院的地球化学探矿研

究中心担任。这些研究涉及在广泛的不同条件下找寻Cu, Pb, Zn, Co, Ni, Cr, Sn, W, Mo, Be, As及Sb的方法。迄今为止最引人注目的成果可能是地球化学普查方法在赞比亚与罗得西亚的不断增长的大规模的应用。在赞比亚与罗得西亚, 在地质及航空地质资料引导之下, 系统采集土壤及水系沉积物样品, 用化学方法分析铜及其它金属, 已经证明是在露头稀少, 风化很深的地区最为有效的综合方法。

植物测量 肉眼观察与矿化有关植物的分布和形态给传统的探矿人带来的帮助并不少于他对岩石露头与土壤所作的观察。早期最著名的指示植物是“三色堇”, 它在中欧及西欧仅生长于锌矿地区富含锌的土壤中。过去十余年内又发现了另外几种专属性的指示植物, 并已在找矿工作中成功的应用 [Nesvetaylova, 1955b; Cannon, 1957, 1960b; Horizon, 1959]。

生物地球化学探矿, 或是根据植物化学分析的探矿方法, 开始于1936年瑞典探矿公司帕姆奎斯特 (Palmqvist) 与布朗丁 (Brundin) 所作的实验工作。他们进行试验性地球化学植物测量结果, 发现在康沃尔 (Cornwall) 含锡钨甚高的土壤中生长的乔木与灌木, 其叶中含有异常高量的Sn及W, 而在威尔斯含高量铅锌的土壤中生长的树木, 叶中含高量的Pb与Zn [Swedish Prospecting Company, 1939]。根据这些实验取得了系统采集植物样品, 并用光谱方法分析植物灰分作为一种探矿方法的专利权 [Brundin, 1939]。有好几年瑞典探矿公司一直配合着它日常的地球物理探矿工作进行地球化学测量, 用系统的植物分析方法普查了许多地区。这一工作的成果很少发表过。

1945年华仑 (H.V. Warren) 及其在哥伦比亚大学的同事拟定了一个研究植物中金属含量的计划, 几年以后他们就开始将系统的植物分析用于实际的探矿工作。1948到1956年找铀的全盛时期内, 美国地质调查所在美国西部进行了大量的生物地球化学测量工作。尽管生物地球化学方法在许多地区应用得很成功, 但它的进一步更广泛的应用却受到限制, 这是由于使用较简便并更直接的地球化学土壤测量方法基本上可以得到相同的结果。

水系测量 地球化学水系测量起源于历史悠久的淘洗河砂追踪重矿物的方法。几乎世界上每一个大的原生金矿床与锡矿床都是靠淘洗重矿物中的金与锡石而发现的。目前在苏联的一种主要的找矿方法——“重砂法”, 就是系统的对水系沉积物中的重矿物进行填图的方法。

很早以前就已经想到可以应用河水的化学分析进行探矿工作。实际上比林古西奥 (Vannoccio Biringuccio) 在1540年出版的“火药术” (Pirotechnia) 一书中就说过: “有些人极度重视当水静止时所生成的残渣, 认为这是一种良好的征象。水在停滞数日, 并经常受日光蒸晒后, 在它的残渣的某些部分往往显现各种金属物质的色彩。另一些人常常将此水取来盛于陶制、玻璃制或其它材料制成的器皿中煮沸, 使水完全蒸乾, 然后他们用普通的火炼法或其它他们愿意使用的办法试验在底上残留的土状物质。这样 (虽然还没有确切的证据) 他们对这物质就有了一些认识。”

显然是苏联科学家早在1930年代就首先试用分析水系沉积物的方法。他们使用光谱分析技术测定水系沉积物细粒部分中的Sn含量, 以之作为找寻原生锡石矿床的一种方

法。现在这一方法在矿产普查中已经与样品中的矿物观察工作配合在一起使用。

苏联利用水中铀含量作为找寻富含铀地区的主要方法〔Vinogradov, 1956a〕这显然是首次将地球化学水系测量大规模用于生产程序。在西方,首次大规模的水系测量是1954年在加拿大东部进行的。这次测量主要是在27,000平方英哩的面积上采集水系沉积物,分析其中易溶性重金属含量〔Hawkes et al, 1956〕。其后在非洲与远东也进行了几次大规模的测量,分析水系沉积物中的Cu、Pb、Zn及Ni。

岩石测量 野外实验工作正不断发现基岩特征与矿体以某种方式相联系的更多实例,这些特征都只有靠化学分析才能发现。虽然已经进行了或者正在进行好几项精心安排的实验性地球化学岩石测量工作,但是迄今还没有进行系统采集新鲜基岩的生产性测量。

1—3 现 状

文献记载上有不少矿产的发现要归功于地球化学探矿方法。地球化学方法几乎总是与其它地质或地球物理探矿方法综合使用,因而把功绩归于单一的方法是不合实际情况的。由于只发表了很少几个比较详细的例案,因而也很难在每一个发现矿床的实例中指出地球化学资料在全部情报总和中究有多大成份的供献。这样看来列出一张矿床发现表并不一定是表示此法现状的很好的标志,而从过去十年间这一领域内活动的显著增长也许倒能够更好的看到它的现状。可以把工作的增长与规模看作是在世界上不同条件与不同地区取得的实际经验的基础上所反映出来的勘查界对这一方法的总的评价。

苏联在地球化学探矿原理与方法学方面的研究工作毫无疑问是最大的。这项工作由许多国家机构担任(见表1—1)。西方国家中仅有少数政府机构及大学在执行具有一定规模的有组织的研究计划(见表1—2)。但另外在某些大学及工业实验室中个别进行的研究工作在逐渐增长,这些工作加在一起数量也很可观。

估计生产工作量的一个有效指标是统计在地球化学测量工作中采集的样品数。应用这些数字时必须记得采样数目与探矿的效果之间的关系可以随地区条件与所用的地球化学方法的不同而有很大变化。另外统计采样数目的方法还很不完善,这里所列的估计数字也可能有着严重的误差。

表1—1 进行地球化学探矿方法研究与发展的苏联机构

苏联科学院 (АН СССР)

矿床地质, 岩石, 矿物与地球化学研究所, (ИГЕМ)

莫斯科稀有元素矿物, 地球化学与结晶化学研究所 (ИМГРЕ)

莫斯科维尔纳德斯基地球化学与分析化学研究所 (Геохи)

地质保矿部 (МГНОН)

莫斯科全苏航空地质托辣斯 (ВАГТ)

列宁格勒全苏地质研究所 (Всерен)

莫斯科全苏地球物理探矿研究所 (Вирг)
 莫斯科全苏水文地质与工程地质研究所 (Всерингео)
 列宁格勒全苏普查勘探方法研究所 (Витр)
 莫斯科全苏矿物原料研究所 (Вимс)

主要地球物理探矿机构：包括进行日常生产工作的地方地球物理托辣斯

大学院校

列宁格勒工艺学院
 列宁格勒大学
 莫斯科大学
 托姆斯克工艺学院

各共和国科学院

埃里温的阿尔美尼亚科学院
 阿拉木图的哈萨克斯坦科学院

表 1—2 进行地球化学探矿方法研究与发展的主要西方机构 (1960)

国家	机构	地址
加拿大	加拿大地质调查所	安大略渥太华。
	不列颠哥伦比亚大学地质系	不列颠哥伦比亚，温哥华。
芬兰	芬兰地质调查所	奥坦尼米
法国	地质与矿产研究局	巴黎。
	原子能委员会	巴黎。
联合王国	地球化学探矿研究中心	伦敦，帝国科学与工艺学院。
美国	美国地质调查所	丹佛。
	加里福尼亚大学	加里福尼亚，贝克莱。
挪威	矿物原料实验室	特隆赫姆

在苏联，至少到1956年为止，地球化学探矿生产工作主要是系统采集分析土壤及风化岩石的金属量测量。其它地球化学方法仅应用于实验性工作中，尽管有时规模也相当大。1955年按照地质保矿部的命令，所有地质机构在任何比例尺的找矿工作中都必须应用金属量测量 [Solovov, 1959, p.10]。表 1—3 列举了苏联自1948至1957年金属量测量工作的增长。绝大多数工作集中于中亚的沙漠地区 (哈萨克斯坦及邻近地区)，金属量测量方法在此处似乎特别适用。

表 1—3 地质保矿部金属量测量的工作量

年份	采样数目
1948	67,000
1949	238,000
1950	778,000

1951	2,325,000
1952	2,673,000
1953	3,063,000
1954	4,680,000
1955	4,955,000
1956	6,155,000
1957	6,722,000
总数	31,656,000

资料来源：索罗沃夫 [Solovov, 1959, p.12]

非洲在工作规模上仅次于中亚而占第二位。1959年非洲全区整个工作量的非正式统计是大约每年一百五十万样品，其中至少一百万是在中非洲采集的

在同一年内（1959）加拿大与美国总共采集了500,000个样品。在世界其它地区的工作规模大约总共不超过100,000到250,000个样品。

地球化学采样与分析的成本变动极大，以致于不能对地球化学方法的费用提出任何结论。不过在这方面看一看1958年加拿大某个最大的勘查公司的经费开支是很有意思的。它的年度预算6%分配给地球化学工作，18%分配给地球物理工作，野外地质占35%，钻探占41% [Solow, 1959]。同一年内对加拿大勘查公司所作的调查说明几乎有半数以上的公司在大规模应用土壤与水系测量 [Riddell, 1960]。

1—4 文 献

金兹堡 [Ginzburg, 1960] 与霍克斯 [Hawkes, 1957] 发表了有关矿产勘查中应用地球化学的主要的总结性著作。已发表的文集及论文是：美国地质调查所集刊第1000号；英国帝国学院地球化学探矿中心的通讯集及学位论文；克拉斯尼科夫主编的1956年全苏地球化学探矿方法会议论文集；在墨西哥城与哥本哈根的第廿及廿一次国际地质会议的应用地球化学讨论会报告集内的论文（大多是西方国家的贡献），以及第一次与第二次和平利用原子能国际会议会报中有关U的地球化学探矿方法的论文。所有这些论文中都载有丰富的早期文献。主要的讨论石油地球化学探矿方法的书是卡尔切夫等 [Kartsev et al, 1959] 发表的。

经常发表地球化学探矿论文的杂志包括经济地质 (Economic Geology)、"采矿工程" (Mining Engineering)，伦敦"矿冶学会会志" (Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy)，"探矿与护矿" (Разведка и Охрана недр) 与"地球化学" (Геохимия)。其它文献则分散于许多地质、化学与采矿工程的科学杂志与商业杂志之中。美国地质调查所第1000—A及1000—G号集刊列举了1954年以前的出版物。所有较新的西方文献几乎都可以在化学文摘第8部分中找到，而苏联与中国的文献可以到地质文摘 (Рефератный Журнал-Геология) 的矿产普查勘探部分中去查阅。

第二章 基本原理

梅逊 (Mason, 1958, p.2) 将戈德施密特最初对地球化学所下的定义概述如下: 地球化学的任务是: (1) 测定各元素在地球中的相对与绝对丰度, (2) 研究各个元素在地球中的分布与迁移, ……以期发现控制其分布与迁移的原理。

在戈德施密特的定义中隐示着地球化学领域的双重方向一部分目标是对地球物质中元素的分布作描述性研究, 另一部分目标则是探求控制此种分布的原理。

应用于矿产勘查的地球化学自然主要是描述性的, 因为它的任务是制作并解释地球化学图, 而不是去研究基本原理。尽管如此, 如果对于控制元素在地球中分布的原理没有透彻的了解, 地球化学探矿的作用就不可能充分得到发挥。

2—1 地球化学环境

地球化学环境的参数是压力、温度与最丰化学组份的反应能力, 在任何给定地点, 这些参数决定了哪些矿物相是稳定的。根据这些变数可以把地球上所有的天然环境分为两大类—原生的与次生的。

原生环境从循环的雨水的最低水平向下延伸直至能够形成正常岩石的最深水平。这是一个高温与高压的环境, 流体的循环受到限制, 游离氧的含量比较低。

次生环境是在地球表面风化, 侵蚀与沉积的环境。它的特点是温度低, 压力低且几乎不变, 溶液可以自由流动, 游离氧, 水及 CO_2 很丰富。

地球物质从一个环境移向另一个环境可以用一个封闭的旋回很好的表示出来 (参见图2—1)。从图解的右边开始顺着时针方向移动, 沉积岩遭遇到增高的温度、压力与体系以外新增加的物质而逐渐变质。它们终于变成液态, 以致在重结晶时能够分异成各种火成岩与热液。当侵蚀使所生成的岩石又进入地表环境时, 风化营力将其组成元素主要按其在水中的相对溶解度重加分配。这样就又沉积出一套新的沉积岩, 旋回从而闭合。图2—1上所示的图解自然是经过大大简化了的, 实际上, 在任何一个具体情况, 旋回中可以有很大一部分缺失。例如沉积的页岩砂岩可以暴露于风化与侵蚀作用中, 而不经再融化, 甚至没有发生任何明显的变质, 这是很正常的事。另外, 主要的旋回中还有几个重要的小旋回, 例如碳从空气中进入植物、动物、有机层, 然后再回到空气中的循环。

地球化学主旋回包括原生的变质与火成分异等深成过程, 以及次生的风化、侵蚀、搬运、沉积等表生过程。在图2—1中央的水平分界表示地球化学旋回的这两个扇面之间

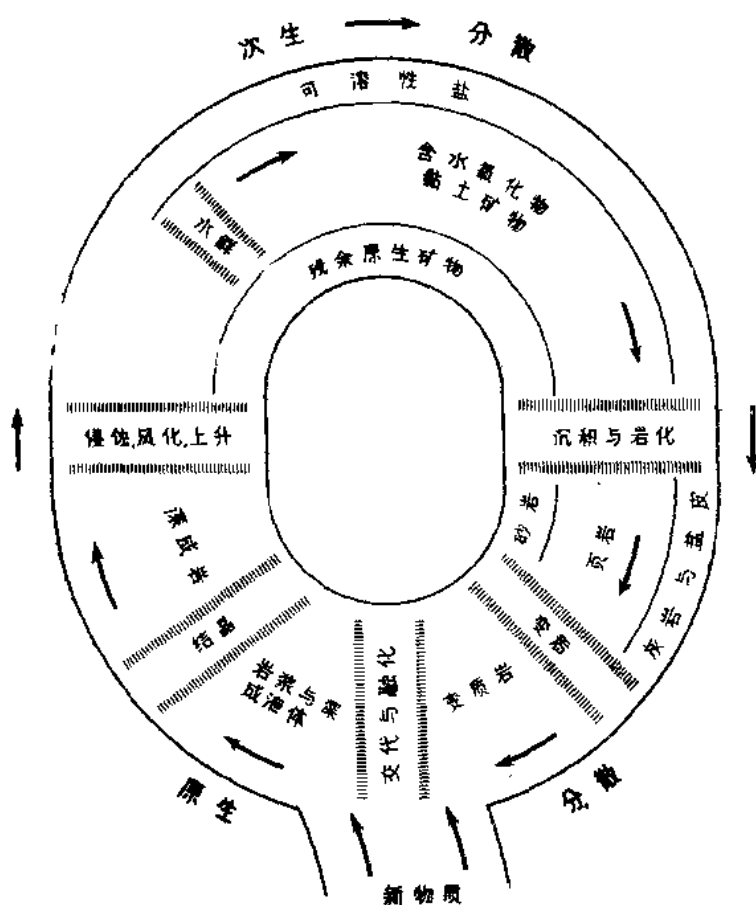


图2—1 地球化学旋回

的界限。

2—2 地球化学分散

分散是各种过程作用的结果，可以大致分为两类—机械的与化学的。分散可以完全是由机械营力形成，例如岩浆的注入与喷出，冰川活动使地表物质移动。除了黏土与砂的冲积分选以外，这类纯机械分散很少或者不能导致分散物质的分异。另一方面化学与生物化学过程主要是将物质选分为具不同活动性的部分，如果有适当的通道以及有化学势或物理势梯度，较活动的相就趋向于离开源地。当活动相完全进入一新的环境，而这里的条件有利于沉淀时，一部分进入的物质就将沉积（图2—2）。

分散按发生分散的地球化学环境可以是原生的或次生的。无论是高温与高压的原生环境或者是低P—T的次生环境都可以应用同一的构成分散过程的原理。在原生分散中，一般是深成岩的裂缝与粒间空隙构成了通道与重沉积的地点。另一方面，次生分散是在

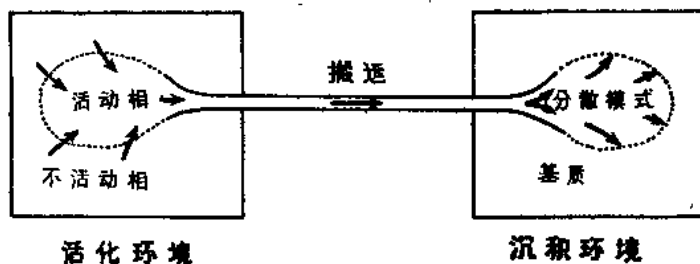


图2—2 分散过程

地表或近地表处发生，此处的模式系在近地表岩石的裂缝与节理，在复盖层的孔隙，甚至在空气中形成。

2—3 地球化学活动性

元素对分散过程的反应由元素的活性，亦即元素在任何给定环境下移动难易的程度所控制。在一定程度上，活性决定于活动相的机械特性，例如岩浆及溶液的黏滞度，以及在水流中碎屑颗粒的大小、形状、与比重。另一方面活性与化学分异之间的关系却是更为密切。这时主要的决定因素是：由于环境变化而生成的各种共存液体相（活动的）与晶体相（不活动的）相对稳定度的变化。

矿物稳定度 从地球化学旋回的某一部位过渡到另一部位从而对平衡造成的动乱，表现为新矿物的出现，这些新矿物在新环境内是稳定的。消耗早期存在的相而生长出来的任何新矿物总有一种抵抗与抵消新环境的趋势。在压力增高时，密度低的矿物变为密度高的矿物，温度增高时，新矿物相的形成一般都是吸热反应。同样，某种化学组份浓度增高将会促使能减低该组份在液相内浓度的矿物相生长。

不论在何种新矿物形成时，至少存在着两个相，——一个活动相（一般是液相）以及一个或多个不活动相（结晶相）。火成岩结晶时，活动相是岩浆。在变质过程中，活动相是晶间液体，它部份由外来物质供给，部份来自局部生成矿物的分解产物，这些矿物在当时的温度与压力条件下是不稳定的。在表生环境内，活动相是水溶液，原生矿物风化后的可溶性产物可被它溶解与带走。

当稳定的，也就是不活动的矿物、消耗活动相而生长之际，能容纳于矿物晶格内的某些元素就从液相内撤出并且被固定住。不能容纳于晶格中的元素仍留于活动相中，如果有机会，就可以自由离开此体系。了解了各种矿物在各种条件下的稳定度，就能够知道在这些矿物中所含元素的活性。

大多数矿物仅在其组分元素浓度较高的体系内是稳定的。在深成环境下，只有构成地壳质量98%以上的十个最普通的元素其浓度通常可达于此种要求。这些元素按照丰度递减次序排列是：O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti及H。以这些元素为主要组

份的矿物构成了所有普通火成岩与变质岩的绝大部分质量。如果在名单中再加入碳，那么就可以把沉积岩也包括进去。另外少数几个元素，如Zr、F、P、S以及镧族元素（稀土）是副矿物的主要组分。

稳定矿物中的微迹元素 大多数不普通的元素可以进入一种或多种普通的成岩矿物中，在晶格中占据一个原来由某一主要成份所占有的位置。结晶构造中阳离子的互换性系与它们对晶体键能的供献有关。这可由“离子交代指数”来表示，离子交代指数是由阳离子价、离子半径、配位数、以及电子构型计算而得〔Green, 1959, p1155〕。具有大致接近的离子指数具有最强的相互交换的趋势（表2—1）。因而Mn、Zn、Cu、Co及Ni倾向于在铁镁矿物中产出，而U、Th则倾向于在锆石中富集。

表2—1 普通阳离子的离子交代指数

Tl ⁺	0.03	Cu ⁺⁺	0.14	Be ⁺⁺	0.24
K ⁺	0.03	Co ⁺⁺	0.14	Nb ⁴⁺	0.28
Ag ⁺	0.04	Ni ⁺⁺	0.14	W ⁴⁺	0.28
Na ⁺	0.06	Mg ⁺⁺	0.14	Mo ⁴⁺	0.28
Cu ⁺	0.06	Th ⁴⁺	0.16	Ti ⁴⁺	0.28
Ba ⁺⁺	0.07	U ⁴⁺	0.19	Al ³⁺	0.35
Pb ⁺⁺	0.08	Zr ⁴⁺	0.20	Ge ⁴⁺	0.46
Ca ⁺⁺	0.09	Sc ³⁺	0.20	Si ⁴⁺	0.48
Mn ⁺⁺	0.13	Fe ³⁺	0.22	As ⁵⁺	0.60
Zn ⁺⁺	0.14	Cr ³⁺	0.22	P ⁵⁺	0.62
Fe ⁺⁺	0.14				

资料来源：Green, 1959。

可以合理的假设矿物的副组份的含量是生成矿物的活动相中这些副组份浓度的函数。当其它因素如温度为恒定时，那么伟晶岩中富含Sn的云母是从富含Sn的伟晶液中生成的，而在一个渗出带内富含Cu的褐铁矿意味着它是从含Cu量高的地下水中沉淀出来的。

在高温—高压条件下的活动性（深成活动性） 岩浆结晶时，在稳定的造岩矿物晶格内不能被容纳的组分富集于活动的残余流体之中。岩石冷却时，这一活动相中的极少一部分可以机械的被陷留，或者在晶格中呈包藏物，或者在晶间面上呈气泡或薄膜存在。而绝大部分则随时可以离开此体系，只要有出路存在。水是不能完全容纳于火成岩的矿物之中的，从而它逐渐在残余流体中富集。温度降低时，富含水的残余流体的特性逐渐与水溶液接近。在原生地球化学旋回的这一阶段可以沉积成热液脉矿床。残余液体后来终于达到地表，它们或者与地下水相混合，或者呈泉水流出地表。

在变质过程中也可以追索到类似的一般趋势。在高温与高压下，沉积岩的含水矿物变为不稳定，放出的水构成了活动相的主要组份。原岩中任何其它的不能见容于新矿物

之中的组份亦加入于富含水的活动相。这中间包括有相当数量的副元素*，其中有不少是成矿元素。目前所获得的高温高压条件下矿物稳定场的定量数据尚不足以用来纯粹从理论上予测副元素的活动性。因而矿物的稳定性，以及它们所含元素的相对活动性必须从经验式观察中去推测。

观察一个深成分异旋回中、不同阶段内形成的特定矿物种所含某些副元素的逐步贫化或逐步富集，可以获得有关副元素活动性的经验式情报。在晚期伟晶分异物的云母中Sn、Sr、Li含量较火成岩母体的同种云母中Sn、Sr、Li含量高，说明这些元素在当时条件下比较活动。元素的深成活动性还要看以该元素作为特征组分的矿床是与何种流体（气体、超临界溶液、正常水溶液）有关。按这种分类，就有属于复伟晶岩、热液脉矿床、初生水及喷气的元素

在低温—低压条件下的活动性（表生活动性） 矿物稳定场与元素活动性在低P—T条件下的关系与深成条件下基本上相同。在稳定的矿物种可溶性离子相之间的同一性是已知的，而同时这些矿物种的热力学常数已被测定的情况下，就有可能计算副元素在天然地表水中的相对溶解度以及其活动性〔Garrels, 1960〕。遗憾的是平衡往往被许多因素所扰乱，这些因素现在还不能定量的加以评价。其中最重要的是某些具有强烈清除活动（Scavenging action）的普通矿物种（主要是铁及锰氧化物）对副元素*的共沉淀效应，以及与地表天然溶液相接触时有机反应与有机物生活过程的效应。这些因素的定性效应将在第七章内讨论。

对地表条件下的相对活动性作定量估计虽然是困难的，但是对于共存的活动相与不活动相中副元素组份作比较可以由此获得一种经验式的估计。在动态的地表环境中，在此两相之间几乎不可能达成完全的平衡。但是对天然的流水及与之相接触的土壤的组份作比较可以得到一种近似的估计。将水与土壤的组份和未风化岩石（作为风化产物的母物质）的组份相比较也可以得到类似的情报。

史迈斯〔Smyth, 1913〕与波雷诺夫〔Poeynov 1937〕曾指出可以利用这些关系衡量元素在风化带内的活动性。史迈斯对于主元素**相对活动性的估计是建立在两个简化的假设之上：（1）母岩的组份可以地壳岩石平均组份来作近似估计，（2）流水中由风化作用带入的组份可以从新鲜水的平均组份来作近似的估计。波雷诺夫对此问题使用了类似的研究手段，他将火成岩平均组份与主要是流经大块火成岩地区的河流中矿物残渣组份加以比较。这两种计算所得到的活动性递减顺序都是： $Ca > Na > Mg > K > Si > Al = Fe$ 。

最近安德逊与霍克斯〔Anderson and Hawkes, 1958〕在新英格兰北部冰积地区

* 副元素（minor element）在分析化学中指含量在百分之几到万分之几的元素，但在地质学中则常与微迹元素（含量在万分之几以下，一词混用。没有把minor element译成“次要元素”是因为书中出现了“important minor element”这种词，如译次要元素就成了“重要的次要元素”这是说不通的。

** minor element译为副元素，major element就相应译为主元素