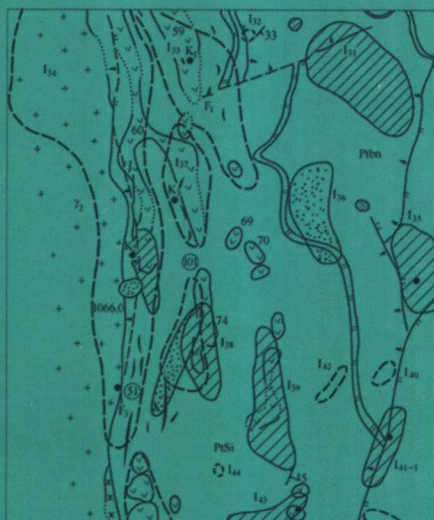


• 高等学校教学用书 •

勘查地球化学

罗先熔 文美兰 欧阳菲 唐甲光 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校教学用书

勘查地球化学

罗先熔 文美兰 欧阳菲 唐甲光 编著

北 京
冶金工业出版社
2007

内 容 提 要

本教材为资源勘查工程、勘查技术工程专业的地球化学找矿课程教材,全书共 10 章,分别介绍了勘查地球化学的基本概念、岩石地球化学测量、土壤地球化学测量、水系沉积物地球化学测量、水文地球化学找矿、气体地球化学测量、化探野外工作方法、化探分析方法简介、化探中常用的数据处理方法、资料整理及异常值的确定。

本书也可作为高等工科院校矿业工程其他相关专业本科生、研究生教学参考书,也可供从事地球化学找矿工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

勘查地球化学/罗先熔等编著. —北京:冶金工业出版社, 2007.3

高等学校教学用书

ISBN 978-7-5024-4211-8

I. 勘… II. 罗… III. 地球化学勘探—高等学校—教材
IV. P632

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020670 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张 卫(联系电话:010-64027930;电子信箱:bull2820@sina.com)

李培禄(联系电话:010-64027930)

王雪涛(联系电话:010-64062877)

美术编辑 李 心 责任校对 石 静 李文彦 责任印刷 丁小晶

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2007 年 3 月第 1 版,2007 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17 印张; 452 千字; 261 页; 1—2500 册

34.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·选矿卷	本书编委会 编	140.00
中国冶金百科全书·采矿卷	本书编委会 编	180.00
采矿学(本科教材)	王 青 主编	39.80
碎矿与磨矿(第2版)(本科教材)	段希祥 主编	30.00
安全原理(第2版)(本科教材)	陈宝智 编著	20.00
系统安全评价与预测(本科教材)	陈宝智 编著	20.00
选矿厂设计(本科教材)	冯守本 主编	36.00
选矿概论(本科教材)	张 强 主编	12.00
工艺矿物学(第2版)(本科教材)	周乐光 主编	32.00
矿石学基础(第2版)(本科教材)	周乐光 主编	32.00
矿山环境工程(本科教材)	韦冠俊 主编	22.00
矿业经济学(本科教材)	李祥仪 等编	15.00
可持续发展的环境压力指标及其应用	顾晓薇 等著	18.00
固体矿产资源技术政策研究	陈晓红 等编	40.00
矿床无废开采的规划与评价	彭怀生 等著	14.50
矿物资源与西部大开发	朱旺喜 主编	38.00
冶金矿山地质技术管理手册	中国冶金矿山 编 企业协会	58.00
金属矿山尾矿综合利用与资源化	张锦瑞 等编	16.00
矿业权估价理论与方法	刘朝马 著	19.00
矿山事故分析及系统安全管理	山东招金集团 编 有限公司	28.00
矿浆电解原理	杨显万 等著	22.00
常用有色金属资源开发与加工	董 英 等编著	88.00
矿山工程设备技术	王荣祥 等编	79.00
重力选矿技术(技师培训教材)	周小四 主编	38.00
磁电选矿技术(技师培训教材)	陈 斌 主编	29.00
浮游选矿技术(技师培训教材)	王 资 主编	36.00
碎矿与磨矿技术(技师培训教材)	杨家文 主编	35.00
矿井风流流动与控制	王海宁 著	30.00
露天矿边际品位最优化的经济分析	谢英亮 编著	16.00
中国东部中生代次火山岩型铜银多 金属矿床	耿文辉 姚金炎 编著	29.00
矿井通风与防尘(本科教材)	王英敏 主编	20.00
矿石及有色金属分析手册	北京矿冶研究总院 编	47.80
矿石可选性研究(第2版)(本科教材)	许 时 主编	35.00
统计地球化学及其应用	蒋 志 编著	15.00

前 言

本教材是为地学类专业编写的教材,既可作为高校地质专业本科生的勘查地球化学教材,亦可供从事地质专业和地球化学勘查工作和研究的工作者参考。

本教材是在罗先熔教授所编《勘查地球化学》(内部教材)基础上,收集了勘查地球化学在找矿应用方面的新资料,吸取国内外各兄弟院校教学的经验,结合编者多年从事勘查地球化学的教学、科研成果和找矿工作的实践,同时参考了黎彤、倪守斌编的《地球化学讲义》(1982),吴锡生编的《化探及其数据处理方法》(1984),H. E. 霍克斯(美)、J. S. 韦布(英)合著,谢学锦译的《矿产勘查的地球化学》(1979),云南省冶金局勘探公司编的《化探》(1976)部分内容编写成的。

本教材对一个多世纪以来在科研、找矿实践中行之有效的岩石地球化学测量、水化学测量、气体地球化学测量等方法技术做了单独论述,以方便从业者的实际应用。由于生物地球化学测量在找矿应用的局限性和技术上的复杂性,本教材在这方面仅予以较小的篇幅,只讲述生物地球化学异常形成的现象。

自20世纪70年代至今,国内外地球化学勘查在找矿勘查方面引入了较多的数据处理方法和技术,在发现新的找矿信息方面取得了令人关注的成效,在地球化学异常评价解释方面也获得了可喜的进步。因此,本教材编入了这两方面的新内容,以弥补以往同类教材在此方面的不足,希望能给读者在这两方面的应用探索有所启迪。

本教材系统阐述了有关勘查地球化学的基本概念、研究方法和实际应用,并附以较多的应用实例,力求定义明确,概念清晰,文字简明扼要。书后的附录是为实际工作中使用方便而编排的。本教材内容较丰富,读者可根据专业需要及课程安排选用。本教材在编写中参考了相关教材,在此向黎彤、倪守斌、谢学锦、吴锡生等老师和有关单位表示敬意。

本教材共分十章,第一~第六章由罗先熔、文美兰编写,第七~十章由欧阳菲、唐甲光编写。

本教材的出版由广西高校“地质资源与地质工程”人才小高地建设项目经费资助。

由于编写时间仓促,编者学识有限,书中不妥之处,敬请读者、专家批评指正。

编 者
2007年1月18日

目 录

第一章 勘查地球化学的基本概念	1
第一节 元素在地壳中的分布	1
一、元素在岩石圈中的分布量	1
二、元素在土壤中的分布量	4
三、元素含量的概率分布形式	5
第二节 地壳中元素的存在形式和元素的迁移	6
一、地球化学环境	6
二、元素的存在形式	7
三、元素的迁移	7
第三节 地球化学异常与地球化学找矿	9
一、地球化学异常	10
二、地球化学找矿	12
第四节 地球化学指标与评价	12
一、地球化学指标	12
二、地球化学异常评价	19
第五节 勘查地球化学特点及应用范围	20
一、勘查地球化学特点	20
二、勘查地球化学应用范围	20
第二章 岩石地球化学测量	22
第一节 热液矿床原生晕的形成	23
一、成晕元素的迁移方式	23
二、元素在溶液中的存在形式及活动性	23
三、元素的沉淀	24
四、影响元素迁移的因素	24
第二节 岩石地球化学测量的应用	26
一、矿化带的评价与盲矿体的寻找	26
二、成矿地质条件和地质体的含矿性	30
三、区域地质研究	34
第三章 土壤地球化学测量	36
第一节 风化与土壤	36
一、风化作用	36

二、土壤及其形成	37
第二节 矿床次生晕的形成	38
一、成矿元素的次生分散	38
二、成矿元素次生分散因素的控制	40
第三节 土壤地球化学测量的应用	44
一、被覆盖矿体的寻找与矿石类型、矿化规模的预测	45
二、铁帽组分与找矿评价	52
三、地质问题与间接找矿	54
第四章 水系沉积物地球化学测量	56
第一节 分散流的形成	56
第二节 水系沉积物地球化学测量的应用	57
一、在区域找矿中的应用	57
二、在区域成矿规律研究中的应用	58
三、在地质研究中的应用	60
第五章 水文地球化学找矿	61
第一节 天然水正常的化学成分	61
第二节 水晕	61
第六章 气体地球化学测量	65
第一节 气体异常形成	65
一、异常的形成	65
二、找矿的指示气体	68
第二节 土壤气汞测量	69
一、汞在各种天然物质中的含量	69
二、土壤汞气晕的特征	69
三、土壤中汞气晕的控制因素	70
四、土壤气汞量测量的适用条件和作用	72
第七章 化探野外工作方法	73
第一节 踏勘、试验与工作设计	73
第二节 化探方法的选择	73
一、选择的依据	73
二、化探方法的选用	73
第三节 指示元素的选择	74
一、选择的原则	74
二、选择的方法	74
第四节 采样布局	74
第五节 采样	76

一、水系沉积物测量	76
二、土壤测量	77
三、岩石地球化学测量	77
四、水文地球化学测量	78
第六节 样品加工处理	78
第八章 化探分析方法简介	80
第一节 化探对分析方法的要求	80
一、高灵敏度	80
二、足够的精密度和准确度	80
三、分析方法快速、简便、经济、轻便	81
第二节 化探常用的分析方法简介	82
一、比色分析	82
二、斑点分析	82
三、纸色层分析	82
四、偏提取与冷提取分析	82
五、原子发射光谱分析	83
六、原子吸收光谱分析	84
七、测汞仪	84
八、荧光分析	85
九、极谱分析	87
十、离子选择性电极	87
十一、中子活化分析	88
第三节 分析方法的选择	89
第九章 化探中常用的数据处理方法	91
第一节 回归分析方法	91
一、回归分析	91
二、一元线性回归	91
三、一元非线性回归	99
四、多元线性回归	100
五、最优回归方程的选择(逐步回归)	113
第二节 判别分析方法	120
一、判别分析	120
二、判别函数的建立	121
三、预测指标的确定	123
四、应用实例	123
五、相似性判别分析	125
第三节 簇群分析方法	127
一、簇群分析	127

二、原始数据的处理	127
三、分类统计量	127
四、分类系统的形成	130
五、实例	133
第四节 因子分析方法	135
一、因子分析的概念	135
二、主成分分析	135
三、因子分析的方法	141
四、因子旋转	146
五、因子的度量	149
六、应用实例	149
第五节 对应分析方法	156
一、对应分析	156
二、数学方法	156
三、应用实例	163
第六节 典型相关分析方法	165
一、典型相关分析	165
二、总体典型变量与典型相关系数	166
三、典型变量与典型相关系数	167
四、典型变量的性质	169
五、典型变量与典型相关系数计算步骤	171
六、典型相关系数的显著性检验	172
第七节 方差分析方法	174
一、方差分析	174
二、一个因素的方差分析	175
三、双因素方差分析	183
四、双因素具有交互作用的情况	187
第十章 资料整理及异常值的确定	196
第一节 地球化学背景值及背景上限值的确定	196
一、长剖面法	196
二、直方图解法	197
三、概率格纸图解法	198
四、算法	200
第二节 资料的整理	204
一、原始资料的整理	204
二、实际材料图的编制	204
三、综合性图件的编制	206
第三节 地球化学异常的解释与评价	206
一、异常解释与评价的程序	206

二、异常解释与评价的任务和要求	206
三、异常解释与评价的依据	207
四、异常的分类、检查和评价	208
五、不同的找矿工作阶段化探异常评价的要求	213
第四节 地球化探异常解释与评价方法	214
一、一般评价方法	214
二、原生晕轴向分带序列的确定	218
三、应用原生晕特征评价异常	222
四、应用统计方法评价异常	230
附 录	243
附录 1 化探常用含量单位	243
附录 2 元素在土壤和地表植物中丰度的比较	243
附录 3 各国标准筛及其对应关系	244
附录 4 区域化探全国扫面样品分析的测定元素与测定范围表	252
附录 5 化探对分析灵敏度的要求与化探分析主要方法目前达到的灵敏度	253
附录 6 区域化探对分析方法准确度和精密度的要求	254
附录 7 成矿区(带)地球化学普查中某些元素的允许误差范围	255
附录 8 美国如何利用元素丰度估计矿产的资源潜力	256
附录 9 利用 K_2O 值估计俯冲带深度和地壳厚度	258
参考文献	261

第一章 勘查地球化学的基本概念

勘查地球化学(exploration geochemistry)又称地球化学探矿。它是以地质学、地球化学作为理论基础,通过系统测试(或测试其中某些方面)矿体(矿带或矿床)周围三度空间与成矿有关系(时间、空间和成因)的化学元素(包括同位素)的分布分配、组分分带、存在形式以及与成矿有关的物理化学参数(温度、压力、pH和EH)等,并用这些标志进行找矿的一门科学。

第一节 元素在地壳中的分布

一、元素在岩石圈中的分布量

研究元素在地壳中的分布,是地球化学的一项基本任务,也是勘查地球化学工作的基础。

通常,地壳岩石圈中元素的分布量用“克拉克值”表示,有些国家则称其为“丰度”。克拉克值指的是元素在地壳岩石圈中的平均含量。其含量表示有的用百分比表示,有的用g/t(克/吨)、(γ/g)(伽马/克)表示(1g/t=1γ/g相当于1ppm=0.0001%)。岩石圈中元素的克拉克值及各类岩石中的平均含量见表1-1。

表 1-1 某些元素的克拉克值及在各类岩石中的平均含量(%)

元素	克拉克值	超基性岩	基性岩	中性岩	酸性岩[富钙]	酸性岩[贫钙]	砂岩	页岩	碳酸岩盐
Ag	7×10^{-6}	6×10^{-6}	1.1×10^{-5}	$n \times 10^{-6}$	5.1×10^{-6}	3.7×10^{-6}	$n \times 10^{-6}$	7×10^{-6}	$n \times 10^{-6}$
Al	8.2	2.0	7.8	8.8	8.2	7.2	2.5	8.0	0.4
As	1.8×10^{-4}	1	2×10^{-4}	1.4×10^{-4}	1.9×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1×10^{-4}
Au	4×10^{-7}	6×10^{-7}	4×10^{-7}	$n \times 10^{-7}$	4×10^{-7}	4×10^{-7}	$n \times 10^{-1}$	$n \times 10^{-7}$	$n \times 10^{-7}$
B	1×10^{-3}	3×10^{-4}	5×10^{-4}	9×10^{-4}	9×10^{-4}	1×10^{-3}	3.5×10^{-3}	1×10^{-2}	2×10^{-3}
Ba	4.3×10^{-2}	4×10^{-5}	3.3×10^{-2}	1.6×10^{-1}	4.2×10^{-2}	8.4×10^{-2}	$n \times 10^{-3}$	5.8×10^{-2}	1×10^{-3}
Be	2.8×10^{-4}	$n \times 10^{-5}$	1×10^{-4}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-4}	$n \times 10^{-5}$	3×10^{-4}	$n \times 10^{-5}$
Bi	1.7×10^{-5}	—	7×10^{-7}	—	—	1×10^{-6}	—	—	—
Br	2.5×10^{-4}	1×10^{-4}	3.6×10^{-4}	2.7×10^{-4}	4.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1×10^{-4}	4×10^{-4}	6.2×10^{-4}
Ca	4.15	2.5	7.6	1.8	2.5	5.1×10^{-1}	3.9	2.2	30.2
Cd	2×10^{-5}	$n \times 10^{-5}$	2.2×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	$n \times 10^{-6}$	3×10^{-5}	3.5×10^{-6}
Cl	1.3×10^{-2}	8.5×10^{-3}	6×10^{-3}	5.2×10^{-2}	1.3×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1×10^{-3}	1.8×10^{-2}	1.5×10^{-3}
Co	2.5×10^{-3}	1.5×10^{-2}	4.8×10^{-3}	1×10^{-4}	7×10^{-4}	1×10^{-4}	3×10^{-5}	1.9×10^{-3}	1×10^{-5}
Cr	1×10^{-2}	1.6×10^{-1}	1.7×10^{-2}	2×10^{-4}	2.2×10^{-3}	4.1×10^{-4}	3.5×10^{-3}	9×10^{-3}	1.1×10^{-3}
Cu	5.5×10^{-3}	1×10^{-3}	8.7×10^{-3}	5×10^{-4}	3×10^{-3}	1×10^{-3}	$n \times 10^{-4}$	4.5×10^{-3}	4×10^{-4}
F	6.3×10^{-2}	1×10^{-2}	4×10^{-2}	1.2×10^{-1}	5.2×10^{-2}	8.5×10^{-2}	2.7×10^{-2}	7.4×10^{-2}	3.3×10^{-2}
√Fe	0.63	9.43	8.65	3.67	2.96	1.42	9.8×10^{-1}	4.72	3.8×10^{-1}
Ga	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-4}	1.7×10^{-3}	3×10^{-3}	1.7×10^{-3}	1.7	1.2×10^{-3}	1.9×10^{-3}	4×10^{-4}
Ge	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	8×10^{-5}	1.6×10^{-4}	2×10^{-5}

续表 1-1

元素	克拉克值	超基性岩	基性岩	中性岩	酸性岩[富钙]	酸性岩[贫钙]	砂岩	页岩	碳酸岩盐
Hf	3×10^{-4}	6×10^{-5}	2×10^{-4}	11×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.9×10^{-4}	3.9×10^{-4}	2.8×10^{-4}	3×10^{-5}
Hg	3×10^{-6}	$n \times 10^{-6}$	9×10^{-6}	11×10^{-3}	8×10^{-6}	8×10^{-6}	3×10^{-6}	4×10^{-5}	4×10^{-6}
I	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	1.7×10^{-4}	2.2×10^{-4}	1.2×10^{-4}
In	1×10^{-5}	1×10^{-6}	2.2×10^{-5}	$n \times 10^{-6}$	$n \times 10^{-6}$	2.6×10^{-5}	$n \times 10^{-6}$	1×10^{-5}	$n \times 10^{-6}$
K	2.09	4×10^{-3}	8.3×10^{-1}	4.8	2.52	4.2	1.07	2.6	2.7×10^{-1}
Li	2×10^{-3}	$n \times 10^{-5}$	1.7×10^{-3}	2.8×10^{-3}	2.4×10^{-3}	4×10^{-3}	1.5×10^{-3}	6.8×10^{-3}	5×10^{-4}
Mg	2.33	20.4	4.6	5.8×10^{-1}	9.4×10^{-1}	1.6×10^{-1}	7×10^{-1}	1.50	4.7
Mn	9.5×10^{-2}	1.62×10^{-1}	1.5×10^{-1}	8.5×10^{-2}	5.4×10^{-2}	3.9×10^{-2}	$n \times 10^{-3}$	8.5×10^{-2}	1.1×10^{-1}
Mo	1.5×10^{-4}	3×10^{-5}	1.5×10^{-4}	6×10^{-5}	1×10^{-4}	1.3×10^{-4}	2×10^{-5}	2.6×10^{-4}	4×10^{-5}
Na	2.36	4.2×10^{-1}	1.8	4.04	2.84	2.58	3.3×10^{-1}	9.6×10^{-1}	4×10^{-2}
Nb	2×10^{-3}	1.6×10^{-3}	1.9×10^{-3}	3.5×10^{-3}	2×10^{-3}	2.1×10^{-3}	$n \times 10^{-6}$	1.1×10^{-3}	3×10^{-5}
Ni	7.5×10^{-3}	2×10^{-1}	1.3×10^{-2}	4×10^{-4}	1.5×10^{-3}	4.5×10^{-4}	2×10^{-4}	6.8×10^{-3}	2×10^{-3}
P	1.05×10^{-1}	2.0×10^{-2}	1.1×10^{-1}	8×10^{-2}	9.2×10^{-2}	6×10^{-2}	1.7×10^{-2}	7×10^{-2}	4×10^{-2}
Pb	1.25×10^{-3}	1×10^{-4}	6×10^{-4}	1.2×10^{-3}	1.5×10^{-3}	1.9×10^{-3}	7×10^{-4}	2×10^{-3}	9×10^{-4}
Rb	9×10^{-3}	2×10^{-5}	3×10^{-4}	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.7×10^{-2}	6×10^{-3}	1.4×10^{-2}	3×10^{-4}
S	2.6×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-2}	2.4×10^{-2}	2.4×10^{-1}	1.2×10^{-1}
Sb	2×10^{-5}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	$n \times 10^{-5}$	2×10^{-5}	2×10^{-5}	$n \times 10^{-6}$	1.5×10^{-4}	2×10^{-5}
Si	28.1	20.5	23.0	29.1	31.4	34.7	36.8	7.3	2.4
Sn	2×10^{-4}	5×10^{-5}	1.5×10^{-4}	$n \times 10^{-5}$	1.5×10^{-4}	3×10^{-4}	$n \times 10^{-4}$	1.5×10^{-4}	2×10^{-5}
Sr	3.75×10^{-2}	1×10^{-4}	4.65×10^{-2}	2×10^{-2}	4.4×10^{-2}	1×10^{-2}	2×10^{-3}	3×10^{-2}	6.1×10^{-2}
Ta	2×10^{-4}	1×10^{-4}	1.1×10^{-4}	2.1×10^{-4}	3.6×10^{-4}	4.2×10^{-4}	$n \times 10^{-6}$	8×10^{-5}	$n \times 10^{-6}$
Th	9.6×10^{-4}	4×10^{-7}	4×10^{-4}	1.3×10^{-3}	8.5×10^{-4}	1.7×10^{-3}	1.7×10^{-4}	1.2×10^{-3}	1.7×10^{-4}
Ti	5.7×10^{-1}	3×10^{-2}	1.38	3.5×10^{-1}	3.4×10^{-1}	1.2×10^{-1}	1.5×10^{-1}	4.6×10^{-1}	4×10^{-2}
U	2.7×10^{-4}	1×10^{-7}	1×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	4.5×10^{-5}	3.7×10^{-4}	2.2×10^{-4}
V	1.35×10^{-2}	4×10^{-3}	2.5×10^{-2}	3×10^{-3}	8.8×10^{-3}	4.4×10^{-3}	2×10^{-3}	1.3×10^{-2}	2×10^{-3}
W	1.5×10^{-4}	7.7×10^{-5}	7×10^{-5}	1.3×10^{-4}	1.03×10^{-4}	2.2×10^{-4}	1.6×10^{-4}	1.8×10^{-4}	6×10^{-5}
Y	3.3×10^{-3}	$n \times 10^{-5}$	2.1×10^{-3}	2×10^{-3}	3.5×10^{-3}	4×10^{-3}	4×10^{-3}	2.6×10^{-3}	9×10^{-3}
Zn	7×10^{-3}	5×10^{-3}	1.05×10^{-2}	1.3×10^{-2}	6×10^{-3}	3.9×10^{-3}	1.6×10^{-3}	9.5×10^{-3}	2×10^{-3}
Zr	1.65×10^{-2}	4.5×10^{-3}	4×10^{-2}	5×10^{-2}	1.4×10^{-2}	1.75×10^{-2}	2.2×10^{-2}	1.6×10^{-2}	1.9×10^{-3}

注：克拉克值据泰勒(1964)；各类岩石中元素平均含量据涂里干和费德波(1961)；表中的横划(—)表示无此项元素含量。

克拉克值反映了岩石圈中的平均化学成分,提供了衡量各组成部分元素分配的尺度,如各类地质体、岩石或矿物中某元素的平均含量若高于其克拉克值,表明该元素相对集中;反之,则说明相对分散。因而常用地质体中某元素平均含量与克拉克值的比值(称为浓度克拉克值)表示元素的集散状况。浓度克拉克值大于1,说明该元素在地质体中相对集中;反之,则分散。浓度克拉克值的概念,对研究元素的分散、集中与迁移,进行地球化学找矿工作是很有意义的。

各种矿产都是元素集中的结果。但是不同的矿产集中的程度很不相同。各种矿产最低可采品位与其克拉克值的比值称为该元素的“浓集系数”,常用以反映元素在矿床中的集中程度。不同元素的“浓集系数”相差很大,说明其集中的程度很不相同。如铁在矿床中仅富集6倍,而Sb、Bi、B等则富集达万倍以上(见表1-2)。“浓集系数”大的元素,在矿床中集中程度高,含量增高的

幅度大,有利于用以追踪矿床。过去地球化学找矿研究的多是“浓集系数”较大的元素,其原因也在此。

表 1-2 某些元素的“浓集系数”表

元 素	克拉克值	最低可采品位/%	浓集系数	元 素	克拉克值	最低可采品位/%	浓集系数
Ag	1×10^{-5}	0.02	2000	K	2.6	30	12
Al	8.8	25	约 3	Li	6.5×10^{-3}	0.5	80
As	5×10^{-4}	2	4000	Mg	2.1	13	约 6
Au、Pt	5×10^{-7}	0.0003	6000	Mn	9×10^{-2}	10	110
B	5×10^{-4}	5	17000	Mo	3×10^{-4}	0.04	130
Ba	5×10^{-2}	约 30	600	Na	2.64	39	15
Be	6×10^{-4}	0.4	670	Ni	8×10^{-3}	0.6	70
Bi	2×10^{-5}	0.5	25000	Pb	1.6×10^{-3}	1	600
Ca	3.6	40	11	Sb	4×10^{-5}	1	25000
Co	3×10^{-3}	0.1	30	Si	27.6	约 46	1.5
Cr	2×10^{-2}	约 8	400	Sn	4×10^{-3}	0.15	40
Cu	1	0.5	50	Ti	6×10^{-1}	10	约 7
Fe	5.1	30	约 6	V	1.5×10^{-2}	0.5	30
Hg	7×10^{-6}	0.1	14000	Zn	5×10^{-3}	3	600

对各种类型岩石中微量元素的研究,不仅可了解岩石中各元素较之在岩石圈中富集或分散,而且还可了解各种岩类之间元素富集分散的趋势。以岩浆岩为例,由表 1-1 可看出含量的变化趋势可分为四种类型:

- (1) 在超基性岩中富集:如 Cr、Ni、Co、Pt 族元素等,随着岩石酸性程度增高而含量逐渐降低。这些元素只在超基性岩中富集形成岩浆矿床。
- (2) 在基性岩中富集:如 Cu、Mn、V、Ti、Sc 等元素在基性岩中富集,在超基性岩、中性岩、酸性岩中含量都较低。
- (3) 在酸性岩中富集:元素的含量随着岩石酸性程度增高而增加,属于这类的元素有 Li、Be、Rb、Cs、Tl、Sr、Ba、Y、TR、U、Th、Ta 及 W、Sn、Pb 等。这些元素的矿床与中酸性侵入体、伟晶岩及其热液活动有关。
- (4) 富集倾向不明,有的元素含量变化趋势不明显,属于这一类的有 Au、As、Ge、Sb 等。

上述情况反映了岩浆分异作用中成矿元素集中分散的总趋势。但是值得说明的是,集中和分散是相对的。各类型岩石对比地壳岩石圈而言都有富集的元素,但是对比矿体而言,这些元素则又属于分散。即使在同类型的岩体中,元素的集散情况也不相同(见表 1-3)。

表 1-3 花岗岩中某些元素含量变化表

元 素	花岗岩中的平均含量/%	最低含量/%	最高含量/%	最高含量 最低含量
Pb	0.002	0.00067	0.003	4.5
Zn	0.006	0.0019	0.014	7.5
Ni	0.0008	0.00024	0.002	8.0
Co	0.0005	0.0001	0.0015	15

由上所述,元素的分布是不均匀的,根据元素在地壳岩石圈中的平均含量或在各种类型岩石中的平均含量,研究分散与集中,也可以在不同程度上说明一些地球化学有关问题,但是对于具体地区的成矿研究和找矿来说,则需要研究元素分散或富集的具体含量标志。研究的方法将在有关章节中讨论。

二、元素在土壤中的分布量

各元素在土壤中的分布量,如同在岩石圈中一样变化很大(见表1-4)。将土壤中元素的含量和岩石圈中克拉克值对比,可以看出从岩石风化到土壤形成这一过程中,各元素的集散情况很不一样。根据风化和成壤过程中的集散情况,可将元素分为以下三类。

表 1-4 土壤中元素分布量

元 素	克拉克值 /%	土壤中含量 /%	土壤中含量与 克拉克值之比	元 素	克拉克值 /%	土壤中含量 /%	土壤中含量与 克拉克值之比
Ag	7×10^{-5}	(1×10^{-5})	1.43	K	2.09	1.36	0.65
Al	0.20	7.13	0.87	Li	2×10^{-3}	3×10^{-3}	1.50
As	1.8×10^{-4}	5×10^{-4}	2.77	Mg	2.33	0.60	0.26
B	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1.00	Mn	9.5×10^{-2}	8.5×10^{-2}	0.90
Ba	4.3×10^{-2}	5×10^{-2}	1.16	Mo	1.5×10^{-4}	2×10^{-4}	1.33
Be	2.8×10^{-4}	6×10^{-4}	2.14	Na	2.36	0.63	0.27
Ca	4.15	1.37	0.33	Ni	7.5×10^{-3}	4×10^{-3}	0.53
Cd	2×10^{-5}	(5×10^{-5})	2.50	P	1.05×10^{-1}	8×10^{-2}	0.76
Co	2.5×10^{-3}	8×10^{-4}	0.32	Pb	1.25×10^{-3}	1×10^{-3}	0.80
Cr	1×10^{-2}	2×10^{-2}	2.00	Si	28.10	33.00	1.17
Cu	5.5×10^{-3}	2×10^{-3}	0.36	Sn	2×10^{-4}	1×10^{-3}	5.00
Fe	5.63	3.80	0.68	Ti	5.7×10^{-1}	4.6×10^{-1}	0.81
Ga	1.5×10^{-3}	3×10^{-3}	2.00	V	1.35×10^{-2}	1×10^{-2}	0.74
Ge	1.5×10^{-4}	(1×10^{-4})	0.66	Zn	7×10^{-3}	5×10^{-3}	0.71
Hg	8.3×10^{-6}	1×10^{-6}	0.11	Zr	1.65×10^{-2}	3×10^{-2}	1.81
I	5×10^{-5}	5×10^{-6}	0.10				

(1) 在风化成壤过程中明显集中的元素。这类元素主要是一些在表生带能形成稳定矿物的元素,其土壤浓度克拉克值大于1.2,如 Sn、As、Cd、Be、Cr、Ga、Zr、Li、Ag、Mo 等。

(2) 在风化成壤过程中明显分散的元素。属于这一类的是土壤浓度克拉克值小于0.8的元素,如 I、Hg、Na、Mg、Co、Ca、Cu、Ni、K、Ge、Fe、Zn、V、P 等。可以看出这类元素除了易溶的碱金属外,主要是些亲硫元素。

(3) 在风化成壤过程中集散情况不很显著的元素,其土壤浓度克拉克值为1左右(0.8~1.2),如 Pb、Ti、Al、Mn、B、Si、Ba 等。

需要说明的是,表1-4所列元素在土壤中的含量皆为平均值,土壤浓度克拉克值系根据土壤中平均含量值计算结果。各处土壤中元素的含量也有一定变化(见图1-1)。土壤是岩石风化的产物,不同原岩元素富集的特点不同,成壤后富含的元素也不一样。基性——超基性岩的土壤中富含 Ni、Cr、Co、Cu 等,中酸性岩则富含 W、Sn、Be、Mo、Pb、Li、Na、Th、TR 等。即使同类型岩石所形成的土壤,其中元素的分布如同在各类岩石中一样也是不均匀的。因而如同基岩一样,研究具体地区土壤中元素的富集情况,也应具体确定元素含量标志。

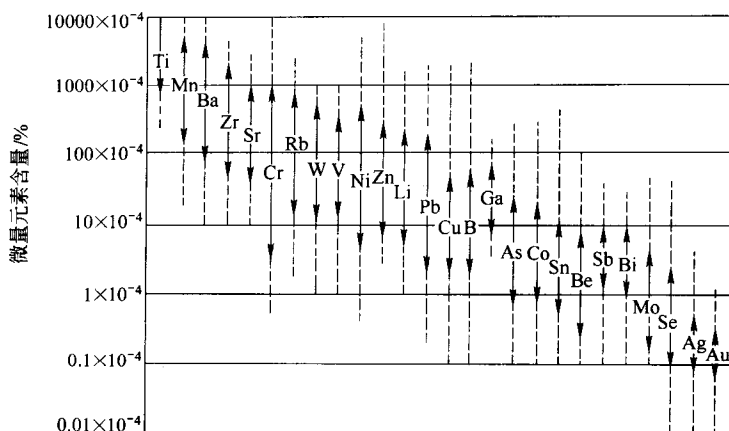


图 1-1 土壤中微量元素含量分布图

三、元素含量的概率分布形式

各元素在岩石、土壤中的含量是有变化的,即使在未受矿化、蚀变等作用影响的地区,也不都是同一数值,而有一定的波动和变化。因此,要全面表示地质体中元素含量特征,除了研究各元素的平均含量外,还必须反映元素含量在地质体中的波动变化,利用数理统计的概率分布能较好地解决上述问题。如正态分布理论公式将随机变量(如元素含量)出现的频率表征为 x 及 p 的函数:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

式中, π 及 e (自然对数的底) 为常数, 分别等于 3.14159 及 2.71828。 σ 及 μ 是参数, 分别代表母体的均方差及数学期望。

这函数的图形呈一钟形曲线(如图 1-2 所示), 其具体形态和极值的位置, 受 σ 及 μ 的控制。在地球化学找矿实际工作中, μ 常表示样品中元素含量的均值(包括算术平均值或几何平均值); σ 常表示样品中元素含量的离散程度。

正态分布的钟形曲线, 其主要特征如下:

- (1) 频率分布曲线呈单峰, 当 $x = \mu$ 达到峰值 $p(x) = p_0 = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$, 峰值的大小与 σ 成反比;
- (2) 对应于 $x = \mu$ 的直线两侧曲线是对称的;

(3) 当 x 趋向正负 σ 时, 曲线以 x 轴为渐近线, 频率趋近于零;

(4) $x = \mu \pm \sigma$ 时, $p(x) = p_0 \cdot e^{-\frac{1}{2}} = 0.607 p_0$ 即在极大值的 0.607 倍处做一平行于 x 轴的横线, 它与曲线的交点对应的 x 值与 μ 的距离即为 σ 。 σ 值愈大, 曲线则愈平缓;

(5) 含量的众值、中位值与平均值相等。

地质体中元素含量的概率分布形式主要是正态分布, 即元素在地质体中各种含量频率的变化显示正态分布特点, 其次是对数正态分布, 即以地质体中各种含量的对数值作随机变量, 其频

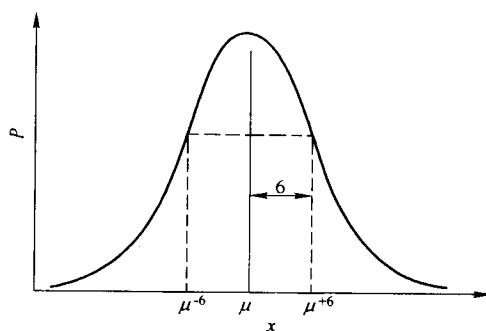


图 1-2 正态分布(密度曲线图)

率的变化显示正态分布特点。至于其他分布形式少见。

从现有研究成果看,不同的分布形式具有不同的地球化学意义。不同的条件下具有不同的分布形式:

(1) 矿物岩石中的常量元素大多服从正态分布,微量元素大多服从对数正态分布。

(2) 当元素近似均匀地分散在各种矿物中时,元素在岩石中呈正态分布,当元素集中在某种矿物中时,元素在岩石中则呈对数正态分布。

(3) 单一地球化学作用下,元素多呈对数正态分布,多次地球化学作用综合产物中元素分布形式趋向于正态分布。如新鲜花岗岩中亲硫元素呈对数正态分布,而在多次表生作用所形成的土壤中则呈正态分布。

需要说明的分布特点方面的差别,既可以是上述分布形式的不同,同时也可以分布形式相同,而参数(μ 、 σ)不同,特别是由于成矿作用叠加,成矿有关元素的加入,使元素分布形式复杂化。某种元素具体分布形式,可用数学方法检验确定。总之,元素在各种地质作用中分布均匀是相对的,分布不均匀是绝对的。各元素在地质体中含量的变化是有规律的,特别是微量元素的这种变化规律正是我们在地球化学找矿中所要重点研究的。

第二节 地壳中元素的存在形式和元素的迁移

元素的存在形式是指元素在一定条件下与周围原子结合的方式和物理化学状态。任何存在形式都是物质运动(元素的迁移)在各历史阶段的表现。元素的迁移除了元素在空间上发生位移外,同时伴随着存在形式的变化。元素存在形式和元素迁移的研究对地球化学找矿有重要意义。

一、地球化学环境

地球化学环境的参数是压力温度与物质成分的反应能力,在任何天然环境,这些参数决定哪些矿物相是稳定的。根据这些参数可以把地球上所有的天然环境分为两大类——原生的和次生的环境。

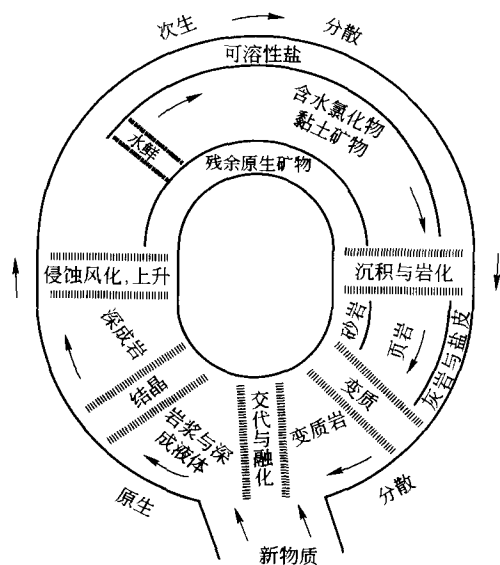


图 1-3 地球化学旋回

原生环境是指从循环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的环境。这是一个高温与高压的环境。在这个环境中,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,压力低且几乎压力不变,溶液可以自由流动,游离氧、水及二氧化碳很丰富。

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地表示出来(参见图 1-3)。从图解的右边开始顺时针方向移动,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。它们最终变成液态,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,风化营力将物质(矿物)中组分的元素主要按其在水中的相对溶解度重新分配。这样就又沉积出一套新的沉积岩,旋回从而“闭合”。图 1-3 中所示的是简化的。实际上,在任何一个具体的天然环境中,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和侵蚀中,而经过再融化,甚至没有发生任何明显的变质,这是很常见的。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、有机物层,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 1-3 中央的水平分界表示地球化学旋回的这两个地球化学环境之间的界限。

二、元素的存在形式

地壳中(岩石及土壤中)元素存在的形式是多种多样的,主要有以下几种。

(一) 独立矿物

独立矿物是元素在宏观的集中状态下的主要存在形式。各种地球化学作用下元素都大量地以独立矿物的形式存在,如与岩浆作用有关的造岩矿物、副矿物,与蚀变矿化作用有关的蚀变矿物、矿石矿物,与风化作用有关的次生矿物等。常量元素可形成“造岩矿物”,微量元素除在岩石中可形成副矿物外,有的由于成矿作用或风化作用,也可形成独立矿物。

(二) 类质同像

类质同像是微量元素重要的存在形式,Ga、In、Ge、Tl、Cd、Se、Ra、Rb、Re、Hf 等元素主要是以类质同像的形式存在的。元素以类质同像混入的寄主矿物,可以是造岩矿物(包括副矿物),也可以是矿石矿物。主要造岩矿物中云母、斜长石、钾长石、角闪石等及副矿物中的楣石、锆石、钛铁矿、磁铁矿等都可成为寄主矿物,特别是黑云母中可以类质同像混入 Li、Cs、Cu、Zn、Nb、Ta、Sn、W 等多种元素。在成矿有关的硫化物中,黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿等都可以是主要的寄主矿物,如闪锌矿中以类质同像混入的可有 Cd、Ga、In、Ge 等多种元素。

(三) 吸附离子

元素以离子形式被吸附于胶体颗粒表面,少数情况下还能结合于胶粒晶格。在表生迁移中有重要的意义。因而,土壤或沉积岩中吸附离子往往是某些元素存在的重要形式之一。

除上述元素的主要存在形式外,尚有气液包裹体、机械混入物、金属有机络合物等。值得提出的是同一样品中,一种元素可以有多种存在形式。因为同一地球化学作用下元素可以形成多种结合形式,而且样品物质本身也可能是多种地球化学作用的结果。

对元素存在形式的研究,在地球化学找矿中无论对样品采取、样品分析、异常与背景的区分、异常的评价等,都有重要作用。有关章节中对这一问题还要讨论。

三、元素的迁移

(一) 元素迁移的方式

元素是通过不同物质运动形式而进行迁移的,根据物质运动的形式将地壳中元素的迁移形式分为以下三类。

(1) 化学及物理化学迁移:

- 1) 硅酸盐熔体迁移;
- 2) 水及水溶液迁移;
- 3) 气体迁移。

(2) 机械迁移。