

天然水化学

申献辰 主编

中国环境科学出版社

天然水化学

主持编写单位：水利部水质试验研究中心

主编：申献辰

编写：申献辰 刘玲花 赵炳成 张忠龙

编写组成员 (按姓氏笔划为序)

王敦春	申献辰	刘玲花	张忠龙
金传良	赵炳成	胡建和	翁建华

参加编写工作的还有

冯惠华	唐克旺	王风荣	韩素华
张民	张强		

(京)新登字089号

内 容 简 介

本书较全面系统地介绍了参与地球水循环的地表水,地下水和降水的化学性质和近期研究成果。阐述了多种天然水体的化学组成、分布及其与环境条件的联系;讨论了有关化学原理在天然水循环过程中的应用和各种天然水体的形成机制;总结了天然水的取材、实验室的分析、测定的经验及各组分的特性、赋存形态和变化;详细论述了水质数据的处理方法和程序,水质和水文的关系、水质研究、水质评价和水资源调查中的技术方法和实践,并给出了许多实例。

可供水文、水环境工作者和有较深专业知识的工作人员查阅,同时可用作大专院校水文、水资源、地理和水质水环境专业的教学参考书。

天 然 水 化 学

申献辰主编

申献辰 刘玲花 赵炳成 张忠龙等编著

责任编辑 吴淑岱

中国环境科学出版社出版

北京崇文区北岗子街8号

水力印刷厂 印刷

新华书店科技总店发行所发行 各地新华书店经售

1994年2月第一版 开本 787×1092 1/16

1994年2月第一次印刷 印张 27 插页 5

印数 1500 字数 700千字

ISBN 7-80093-527-2/X.792

定价: 28.00元

前 言

随着世界人口的增长和产业活动的增加，地球环境日趋恶化。这已经引起世界各国政治家和学者们的严重关注。现在有不少领域的科学家和工程师已把自己的目光转到环境上来。由于世界水资源的紧缺和水质污染的加剧，水环境的研究已成为当前环境研究的热点之一。在专业和非专业人员、水质领域和非水质领域的研究人员越来越关心与自己切身利益密切相关的水资源质量的变化，及其对人类健康和社会发展的影响的情况下，普及天然水化学的知识已成为当务之急。本书的目的就是为社会各界，尤其是那些把研究重点转移到水质水化学领域的科技工作者提供一些常温水环境化学和理论水化学的入门知识和应用指南，它也可以帮助从事水质评价和与水化学有关的水资源调查的水文学家和水文地质学家开展更深入的研究。

天然水化学与应用化学的其它学科相比，仍是一门年轻学科。在50年代末期，水化学几乎还没有被承认为一门学科。随后的几年里，在理论和实践中，随着地球化学、环境科学以及水和废水处理学科的发展，极大地丰富了水化学。很久以前，水文学的定义是含糊的，它主要讨论水的物理性质，并不关心水中的溶解质。描述性的地球化学把水圈定义为包括水、冰、水蒸气等各相的水，并且对其含有的杂质分类。但大多数地球化学家仍只对固体岩石和它们的变化感兴趣，水化学在低温的、稀释条件下的应用长期没有受到应有的重视。但是，60年代之后，情况发生了很大的变化，由于天然水的污染和评价以及水净化等研究的需要，使得研究院、工业和政府部门都对这一领域发生了广泛的兴趣，并进行了充分的研究。天然水化学已逐步形成了一个崭新的学科。

天然水化学是应用化学的一个分支。它主要研究天然水体系，其中包括湖泊、海洋、河流、河口、地下水和大气降水等存在于自然界的天然溶液的化学行为。本书对天然水化学的阐述偏重于实际应用方面，从这个意义上说本书也可称之为天然水化学性质的研究，它着重阐述对“天然水”体系的研究方法、实践和研究成果，尤其是世界上近几十年在天然水化学领域研究的最新进展和技术方法。至于天然水化学的平衡原理、化学热力学和动力学的阐述是为其应用服务的。从这个角度讲，本书更适合那些从事水资源、水质研究的、没有受过化学专业研究生教育的专业科技人员阅读。如果读者希望从理论上对水化学进行更深入的研究，可以参阅斯塔姆 (Stumm) 和摩根 (J.J.Morgan) 写的水化学 (aquatic chemistry) 一书 (已由汤鸿霄译出)。斯塔姆和摩根教授的水化学是偏重于应用物理化学的基本原理，专门从化学平衡的角度来阐述“水化学”的。

本书的书名之所以使用《天然水化学》，是指其水化学的研究对象不同于实验室配制的合成溶液，而是“天然水”。所谓“天然水”，它是指发生在“真实世界”环境中的水，即存在于河流、湖泊、水库、地下含水层中的水及大气降水。这种水不仅包括了未受人类活动影响的原始的水，也包括了受到人类影响的天然水体。实际上，在当今地球上很难找到未受人类活动影响的水了。考虑到目前世界上对天然水化学的研究重点已部分转移到酸雨和地下水污染上来，作者特意增加了有关这两个主题的最新进展。

由于我国对天然水化学性质的研究起步较晚，还没有积累起丰富的资料，本书主要的素材取自于美国内务部地质调查局在近几十年的研究成果。参考的书目有 Hem. J.D. 的《天然水化学性质的研究》(Study and Interpretation of the Chemical

Characteristics of Natural Water) 及《**国家水资源年报(1986)-水文过程和地下水水质**》(**National Water Summary 1986-Hydrologic Events and Ground-Water Quality**); 《**地下水的化学性质及其对井的侵蚀和结垢的影响**》(**Chemical Properties of Ground Water and Their Corrosion and Encrustation Effects on Wells**); 《**美国大陆的降水化学的分布和变化性**》(**Distribution and Variability of Precipitation chemistry in the conterminous United states, 1983**); 《**亚基马流域地表水质评价**》(**Surface Water Quality Assessment of the Yakima River Basin, Washington: Analysis of Available Water Quality Data Through 1985 Water Year**); 《**矿物溶解平衡计算**》(**Solution-Mineral Equilibrium Computations**)等。考虑到读者检索本书涉及的国外文献的需要, 本书中的人名、地名、水域名等保留了原文, 对世界知名学者的名字和美国州以上的地名在随后的括号内予以注明, 以方便读者。

本书的出版得到了水利部水质试验研究中心和水文司水质处的大力支持, 也得到了美国地质调查局的帮助。美国地质调查局的**S.W. Mckenzie**、**C.T. Chiou**和**I. Barnes**博士在编写过程中提供了他们的最新研究成果和建议, 美国地质调查局西北流域办公室(**Portland**)、研究部(**Denver**)以及其总部(**Virginia**)在提供技术资料方面给予了方便和支持。在此一并表示感谢。

由于编者水平有限, 书中的不足之处, 望读者不吝赐教。

编者

1993年于北京

目 录

绪论

一、天然水化学的概念及研究内容	1
二、天然水的化学组成及研究方法	1
三、水的分子结构和特性	2
四、地壳的结构	3
五、水圈	8
六、大气圈	11
第一篇 制约天然水组成的物理化学原理和过程	13
第一章 天然水体系的化学热力学	13
第二章 化学反应原理	15
第一节 天然水化学中的可逆和不可逆反应	15
第二节 化学平衡-质量作用定律	17
第三节 离子活度	19
第四节 温度和压力对化学平衡的影响	22
第五节 方解石的溶解	23
第六节 自由能和平衡常数	24
第七节 电化学平衡	25
第八节 非平衡指数	27
第九节 非平衡系统的化学热力学	28
第十节 化学反应速率	28
第十一节 化学动力学和质量作用定律	31
第十二节 溶解度的概念	31
第十三节 界面反应	32
第十四节 膜效应	36
第三章 天然水组成与环境的关系	37
第一节 气候影响	37
第二节 地质影响	38
第三节 生化因素对天然水的影响	39
第四节 天然水的水循环	42
第五节 大气中的溶质来源	42
第六节 大气层凝聚物的成分	43
第七节 人类活动的影响	45

第四章	应用于天然水的化学热力学模型	46
第五章	地下水系统的某些特性	48
第六章	地表水系——河流	49
第七章	湖泊和水库	49
第八章	河口	50
第九章	非饱和区的水化学和水运动	51
第十章	地球化学循环	51
第二篇	水质数据的获得和表示方法	54
第一章	水样的采集	54
第一节	河水采样	54
第二节	数据的可比性	60
第三节	湖泊和水库采样	61
第四节	地下水采样	61
第五节	样品的代表性	64
第二章	水样的分析	64
第一节	水的现场检测	65
第二节	地下水的地球物理指示	65
第三节	实验室分析方法	66
第四节	分析项目	66
第三章	水质分析结果的表达	67
第一节	分析结果的表示方法	67
第二节	水质分析结果所采用的单位	68
一.	摩尔浓度和质量摩尔浓度	68
二.	习惯采用的水化学分析结果的浓度表示法	69
三.	常用的分析结果的表示法	70
第四章	可溶物质的络合物、离子对和聚和物形式	76
第三篇	天然水中各组分及其特性	77
第一章	天然水体的组成及其物理性质测定	77
第一节	溶解态物质的特性	77
第二节	悬浮颗粒物的特性	78
第三节	电导率	80
第四节	氧化还原电位	84
第五节	天然水的密度	86
第六节	天然水的颜色	86
第二章	天然水的主要组分	87

第一节	氢离子的活度 pH	87
第二节	硅	93
第三节	铝	98
第四节	铁	103
第五节	锰	114
第六节	钙	119
第七节	镁	127
第八节	钠	131
第九节	钾	135
第十节	酸度和碱度	137
第十一节	硫	144
第十二节	氯化物	151
第十三节	氟化物	155
第十四节	氮	159
第十五节	磷	162
第十六节	硼	165
第三章	天然水的微量和痕量元素	166
第一节	总论	166
第二节	碱金属	171
第三节	碱土金属	172
第四节	过渡金属	175
第五节	其它金属元素	180
第六节	非金属元素	185
第七节	放射性元素	188
第四章	天然水中的有机组分	194
第一节	可溶性有机碳及总有机碳	194
第二节	DOC对水质的影响	195
第三节	人工合成有机物	195
第四节	人工合成有机试样的采集和研究方法	196
第五节	需氧量和其它有机污染负荷的评估方法	198
第五章	天然水中的溶解气体	199
第六章	天然水中与化学有关的其它参数	201
第一节	蒸发残量	201
第二节	硬度	203
第三节	钠的吸收比率	205

第七章 天然水中的稳定同位素	205
第四篇 水质分析数据的整理和研究方法	207
第一章 水分析数据的评价	207
第一节 准确度和精密度	208
第二节 准确度检查	209
第三节 有效数字	211
第二章 区域水质的一般评估方法	211
第一节 区域水质数据的检查和比较	212
第二节 离子比率和水的类型	212
第三节 水质数据的统计处理	214
第三章 表示分析结果的图示方法	221
第一节 离子浓度图	221
第二节 三线式图示系统	227
第四章 化学分析数据的归纳方法	230
第一节 水质水文图	230
第二节 河流水质数据与流量的关系	231
第三节 水质地图法	237
第四节 水质剖面图	241
第五章 水质和岩性的关系	243
第一节 火成岩	244
第二节 沉积岩	249
第三节 变质岩	256
第六章 人类活动对水质的影响	258
第七章 水质数据在定量水文学中的应用	263
第一节 水流速度测定及流量估算	263
第二节 水质模型	267
第八章 水的质量与用途的关系	269
第一节 生活用水和公共水源	270
第二节 农业灌溉用水	273
第三节 工业用水	279
第四节 娱乐和美化环境用水	282
第九章 水质管理和水质评价	283
第一节 水质管理的概念和问题	283
第二节 水质评价的概念和方法	287
第五篇 地下水的基本特征及其污染	300

第一章 地下水流及地下水组成的基本特征	300
第一节 地下水流的基本特征	300
第二节 地下水的物理性质和化学环境	303
第三节 地下水化学组成的特征	305
第二章 影响地下水水质的主要因素	307
第一节 间接影响	307
第二节 直接影响	308
第三节 物理化学因素	309
第四节 人类活动的影响	311
第三章 地下水污染	311
第一节 地下水的污染源	311
第二节 污染物在地下水中的迁移、转化	314
第四章 地下水污染的治理措施	319
第一节 污染土壤的治理方法	319
第二节 受污染含水层的治理	320
第六篇 大气降水的化学特性及研究方法	322
第一章 大气降水的组成及特点	322
第一节 大气降水的主要组分及离子总量	322
第二节 地域和大气污染对降水成分的影响	322
第三节 大气降水的稳定同位素组成	323
第二章 酸雨	325
第一节 世界酸雨情况以及形成原因和危害	325
第二节 美国酸雨研究站网及活动	328
第三章 降水化学及其研究方法	329
第一节 降水数据的获取	329
第二节 降水数据的数学分析方法	330
第三节 降水化学的图形表达法	334
第四章 美国降水化学研究进展及实例	339
第一节 美国降水化学组分的地区分布和变化性	339
第二节 由化学分组描述降水化学的地区分布和变化	347
第三节 降水化学组成与降水量的关系	362
参考文献	371
插图 1	416
插图 2a	417
插图 2b	418

绪 论

一、天然水化学的概念及研究内容

天然水化学作为应用化学的一个分支，主要研究影响天然水体中化合物分布和循环的各种化学过程。也就是用应用化学的基本原理来阐明存在于海洋、河口、河流、湖泊、地下水和土壤水等体系中的物质的化学行为。本书研究的天然水体系涉及到天然水循环的各个环节，其中主要集中于阐述地表水、地下水及降水的化学组成及其变化规律。

本书中水化学讨论的范围不局限于任何特定的溶质浓度范围。但由于水中溶质的多数实用信息与水资源的利用和开发有关，因此，本书的某些章节相对更关心稀溶液。

虽然适于饮用的天然水比多数化学家研究的化学溶液要稀，但溶液化学的一般原理基本上适用于天然水。这些原理是本书给出的资料的基本依据，对天然水化学的实际研究，本书尽可能通过引用和讨论实例来阐述其理论。

在水的规划利用和处理中，各方面都用到水化学的知识。天然水化学的研究也涉及到其他学科，包括地质、水文、生物科学。本书可作为天然水化学领域的一本指南，尤其强调无机地球化学，书中的内容对这一领域里的科学家和工程师是容易理解的，也可帮助其它领域里的有关的技术人员。应用书中给出的化学原理需要具备一定的化学知识。但大部分内容并不是按照仅为化学家的使用要求来编排的。

由于天然水的化学组成受到许多过程的控制，为了达到控制和改善水质的目的，了解这些控制过程是必要的。本书希望能够促进或加深对这一主题的理解。本书的主要目标之一是帮助人们简单明确地应用理论概念来理解供水水质和水资源评价中大量的观测资料。

本书所述的资料处理方法有助于水文学家、地质学家和其它化学知识较少的技术人员理解水质分析数据，包括分析数据的分类、图示、简单的统计相关和数据外推等技术。特意给出了水的组成和地质间的相互关系。水质的定量模型也是近几年里很活跃的研究对象，本书增加了大量这方面的内容来加以讨论。简略地论述了水质和水的利用之间的关系以及人类活动对水质的影响。

本书大量地应用了美国地质调查局的出版物，主要由于他们实用，也由于基础资料和其中的实例都来源于那里。引用的多数参考文献都是用英文撰写的，或已被翻译成英文，这并不意味着这一领域里的重要工作都局限于英语国家。全世界对天然水化学的研究都很活跃，许多国家都做出了重要的贡献。

二、天然水的化学组成及研究方法

天然水的化学组成包括许多来源不同的溶质，其中包括大气圈中的气体和气溶胶、岩石和土壤的风化和侵蚀的产物、地表面下发生的溶解或沉淀反应的产物，以及土地耕作等人类活动引起的影响等。应用化学热力学原理来阐述这些过程间的相互关系及它们的影响；应用质量作用定律和能斯特 (Nernst) 方程来说明矿物的溶解或沉淀的某些过程；应用化学

动力学原理研究可逆过程的反应机理和速率，这些构成了天然水化学的基本研究内容，也是它的基本研究方法。搞清地球地壳岩石的化学组成、海洋及大气组成，这一切对评价天然水溶质的来源有重要意义。

溶质的吸附、沉淀方式及其在溶液中存在的量受到许多环境因素的影响。从微观及宏观上考虑，尤其是气候、岩石层的结构和位置，以及与动植物生活周期有关的生化作用对天然水的影响，化学原理的制约和环境因素及水循环过程中对水质造成的影响等，形成了天然水化学研究的基础。

通过实验室中水样的化学分析或现场对其化学特性的感观描述来获得水质的基础资料。由于流水组成的变化及悬浮物的影响而导致取样过程是复杂的。其中某些成分是不稳定的，因而要求对这些组分在现场测定或对样品加保存剂加以保护。测定的多数成分使用质(重)量--体积单位来表达，通常用的单位是 mg/L 或 meq/L 。

本书介绍的水分析结果中分析出的60多种成分及其特性，足以能够解释水中溶质的来源。这些特性包括溶液中元素及离子的最可能的存在形式，其溶解度的控制机制，它们的平均浓度范围和其它化学因素。控制含量小于十几毫克/升元素的浓度的机理还没有得到充分认识，但据目前的资料认为，多数受它们的氢氧化物或碳酸盐的溶解度或在固体颗粒上吸附特性的制约。现已在水中测定出许多溶解性的有机化合物，尤其是具有生物毒性的痕量有机物。

将分析数据分类，用均值、中位数、频率分布或离子相关关系进行统计分析得出了大量的数据。将这些数据关系用图形表示有助于说明水中组分间的化学关系、溶质的来源、区域水质状况，及其在时间和空间上的变化并能对水资源进行评价。根据测定的化学组成、离子间的关系及水中的各组离子用图示法表示可对水进行分类。水质与水文地质特征的关系，河流流量或地下水流类型，也可用数学方程、图示和地图来表示。

三、水的分子结构和特性

水是氢和氧的化合物。至少在气态下它具有分子式为 H_2O 的结构。尽管液体水和冰的组成也表示成与气态相同的分子式，但从结构上讲这两种形式的分子式是缔合的，而且，认为这些冷凝相是缔合方式而不是简单的分子聚集的想法是切合实际的。由于在自然界存在着三种氢的同位素和三种氧的同位素，存在18种不同的水分子是可能的。在本书后面的章节将给出同位素组成的某些水文应用。

水的物理性质在许多方面是很独特的，并且这些与所谓化合物的正常的性质相背离的性质是非常重要的。这种重要性表现在对那些生命形式的诞生和延续以及对地壳的变化过程和组成这两个方面，水的沸点和凝固点(冰点)远高于那些具有与水相似的低分子量的化合物所应具有的值，并且水的表面张力和液体的介电常数也远大于预计值。当水结冰时，它的密度减少。实际上在一个大气压下水的最大密度出现于近 4°C 之时。尽管这种行为在液-固转换中不是独一无二的，但是水的这种属性却给所有的生命形式带来了最大的幸运。

液体水的物理性质从考虑水的分子结构入手是最好理解的。在 O^{2-} 和 H^+ 离子之间形成了两个化学键并相互成 105° 的夹角。其结果是两个 H^+ 在水分子的同侧，使分子具有极性。

由于简单的静电效应，该极性的特性使氢离子保持着一种吸引并与负电性离子进行特殊反应的能力。这种效应称之为氢键，它出现于水的液体和固体两种形式中并导致冰的很规则的晶体结构。在液体水中虽不象固体那么有序，但是分子间的吸引力是氢键存在的一个有力的证明，水的高蒸发热和它的高表面张力都表明要分离水分子需要能量。液体水具有某些聚合性质。

水中出现的可溶性离子改变了水的某些物理性质，尤其是它的导电能力。然而，水分子的极性对溶质离子以及溶剂的特性都是一个很重要的因素。液体水的详细结构到现在仍然没有完全弄清，Stillinger(1980)在最近的一篇评论文章中总结了已有的关于水存在形态的知识。由Drost-Hansen(1967)和Key(1968)出版的关于纯水性质和关于含可溶离子的水的早期评论仍然有参考价值。

极性的水分子能强烈地吸引在大多数矿物表面上，形成由许多可溶离子围绕的一个井然有序水的外壳格局，并使这些离子上的电荷与其它荷电物质相隔离。水作为溶剂的影响涉及到许多活动，它在岩石风化中的作用也由于水的这种能粘聚液体到湿的矿物表面能力而增强，而且水能够渗入到很小的孔隙中。

四、地壳的结构

地球化学家多年来一直对地壳中物质元素的相对丰度的课题有很大兴趣。虽然天然水化学的主题仅是间接地与元素的平均含量有关，但是岩石组成的知识对了解天然水化学组成也是必备的，因而，简单的讨论一下这一主题是有益的。

一般认为地球是由富铁的地核构成，该地核由一个由镁和富铁硅酸盐组成的厚的地幔包围着，并且外层有一个由分布十分广泛的次生硅酸岩和其它矿物组成的薄壳。这一暴露于海平面上的外壳，它对天然的陆地水的组成有直接的影响。尽管人们对该外壳的研究比那些很少接触的部分要更多一些，但是该外壳的大部分的组成仍必须使用勘探方法来进行估算，该外壳的底部认为是在大多数大陆板块的深为30—50km之下的Mohorovicic不连续地带。在地表几公里之下的物质对水文循环中水组成的影响是很小的。

地壳的平均组成的估算现在仍引用由克拉克(Clarke)(1924b)和由克拉克、华盛顿(Washington)(1924)提出的估值，尽管对少数次要组分的最近的估算具有分析数据更多和数值更好的优点。在已知的更新的估计值和补充值当中较好的是Fleischer(1953、1954)、Turekian和Wedepohl(1961)、Taylor(1964)、Parker(1967)和Wedepohl(1969)提出和收集的那些值。然而，某些稀有元素浓度方面的数据仍不够完全，并且随着更好的分析结果的取得，预期某些元素的丰度估值会得到进一步的修订。明显的是需要大量的数据外推和推理判断，以把分析结果推广到那些不可能采到样品的大体积的岩石。

普通的参考书的作者通常都使用最新研究文章中刊布的各种元素的平均值和早期收集编辑的数据相结合的方法。以这种处理风格汇集于表1的数据基本上是取自于Horn和Adams(1966)编辑的数据，它是依次由电子计算机人工合成的，所刊布的估值是由Clarke时代直到作者研究的日期为止的全部数据。表1给出了65个元素的值，它包括了由Horn和Adams提出的全部数据，另外补充了两个他们遗漏的两个元素碳和氮，这是两个天然水化

学中最感兴趣的元素。

表 1 中这两个元素的值是取自 Parker (1967) 的表列数据。在岩石壳全部元素中最丰的元素是氧。根据 Goldschmidt 的数据 (1954, p. 512), 氧的组成是 466000ppm, 即岩石圈重量的 46.6%。氧不包括在表 1 之内。其它漏缺的元素包括由铀和钍放射衰变的产物, 在核反应中人工制造的元素、惰性气体、氢和少数由于数据缺乏而不足以估计其丰度的元素。Horn 和 Adams 的值是由计算机程序人为处理成三位有效数字的。表 1 中, 所有低于 100ppm 浓度的值都被处理成两位有效数字。由于计算的不确定度, 对许多元素他们很难准确到预期的两位有效数字, 而且读者看起来也不一定把这些有效数字当成准确度来理解, 对许多非常规元素 (出现不普遍的元素), 尤其是当其出现于沉积岩时, 其估算值的不准确程度可能比一个数量级更大。

表 1 火成岩和某种形式的沉积岩的平均组成

元 素	沉 积 岩			
	火成岩	碎屑岩	粘土岩	化学岩生物化学岩
Si	285000	359000	260000	34
Al	79500	32100	80100	8970
Fe	42200	18600	38800	8190
Ca	36200	22400	22500	272000
Na	28100	3870	4850	393
K	25700	13200	24900	2390
Mg	17600	8100	16400	45300
Ti	4830	1950	4440	377
P	1100	539	733	281
Mn	937	392	575	842
F	715	220	560	112
Ba	595	193	250	30
S	410	945	1850	4550
Sr	368	28	290	617
C	320	13800	15300	113500
Cl	305	15	170	305
Cr	198	120	423	7.1
Rb	166	197	243	46
Zr	160	204	142	18
V	149	20	101	13
Ce	130	55	45	11

元素	沉积岩			
	火成岩	碎屑岩	粘土岩	化学岩生物化学岩
Cu	97	15	45	4.4
Ni	94	2.6	29	13
Zn	80	16	130	16
Nd	56	24	18	8.0
La	48	19	28	9.4
N	46	—	600	—
Y	41	16	20	15
Li	32	15	46	5.2
Co	23	0.33	8.1	0.12
Nb	20	0.096	20	0.44
Ga	18	5.9	23	2.7
Pr	17	7.0	5.5	1.3
Pb	16	14	80	16
Sm	16	6.6	5.0	1.1
Sc	15	0.73	10	0.68
Th	11	3.9	13	0.20
Gd	9.9	4.4	4.1	0.77
Dy	9.8	3.1	4.2	0.53
B	7.5	90	14	16
Yb	4.8	1.6	1.6	0.20
Cs	4.3	2.2	6.2	0.77
Hf	3.9	3.0	3.1	0.23
Be	3.6	0.26	2.1	0.18
Er	3.6	0.88	1.8	0.45
U	2.8	1.0	4.5	2.2
Sn	2.5	0.12	4.1	0.17
Ho	2.4	1.1	0.82	0.18
Br	2.4	1.0	4.3	6.6
Eu	2.3	0.94	1.1	0.19
Ta	2.0	0.10	3.5	0.10
Tb	1.8	0.74	0.54	0.14
As	1.8	1.0	9.0	1.8
W	1.4	1.6	1.9	0.56

元素	沉积岩			
	火成岩	碎屑岩	粘土岩	化学岩生物化学岩
Ge	1.4	0.88	1.3	0.036
Mo	1.2	0.50	4.2	0.75
Lu	1.1	0.30	0.28	0.11
Tl	1.1	1.5	1.6	0.065
Tm	0.94	0.30	0.29	0.075
Sb	0.51	0.014	0.81	0.20
I	0.45	4.4	3.8	1.6
Hg	0.33	0.057	0.27	0.046
Cd	0.19	0.020	0.18	0.048
In	0.19	0.13	0.22	0.068
Ag	0.15	0.12	0.27	0.19
Se	0.050	0.52	0.60	0.32
Au	0.0036	0.0046	0.0034	0.0018

After Horn 和 Adams(1966).

根据 Clarke 和 Washington(1924) 的研究, 95% 的深到 16km (10 英里) 的地壳的组成是火成岩。因此, 16km 地壳的平均组成近于火成岩的平均组成。然而, 在天然水的组成中以及天然水和岩石组成的关系中, 火成岩的支配作用不是最重要的, 大多数可(回收)利用的地下水出现在地表以下深度小于 2km 的地方, 在近地表的地壳之中, 沉积岩比火成岩更普遍(占优势)。按一般规律, 火成岩是水的贫含量地层, 所以它们仅输移少量的水, 也就是它们不存在大面积的活跃矿物表面和相对小体积的水的接触, 就象多孔的岩石那样。在许多山区河流的源头, 火成岩在地表, 它们可以直接地或通过覆盖土壤中的部分分解的矿物质的淋沥这两种方式给地表径流提供溶质。这种火成岩暴露于地表并与地表河流接触的地方在地球表面上不占多数。因而, 沉积岩和土壤作为由地下水和地表水循环中河流获取溶质的来源是最主要的。然而, 火成岩的矿物与水之间的反应在研究地球化学过程中是个重要的基础, 这些过程将在本书的后面给予某些讨论。

在表 1 中把沉积岩分成三类是采用了 Goldschmidt(1933) 以及 Rankama 和 Sahama(1950, p. 189) 的分类法。这种分类法是根据岩石的化学组成和矿物质的蚀变程度。这种分类比一般的按矿物性质、晶体结构和地层方法对沉积岩的地球化学分类更适合对化学组成的研究。根据本书的这一目的, 采用以下定义:

抗蚀产物(碎屑岩) 岩石的组成基本上是在母岩的风化中, 在化学上不蚀变的抗蚀的矿物质。

水解产物(粘土岩) 岩石的组成基本上是在母岩的风化过程中产生的相对难溶的矿物