

水文地球化学

(第三版)

李学礼 孙占学 刘金辉 编著



原子能出版社

东华理工大学核特色系列教材

水文地球化学

(第三版)

李学礼 孙占学 刘金辉 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

水文地球化学(第三版)/李学礼,孙占学,刘金辉编著. —北京:原子能出版社,2010. 11
ISBN 978-7-5022-5087-4

I. ①水… II. ①李… ②孙… ③刘… III. ①水文化学:地球化学—高等学校—教材
IV. ①P641.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 198945 号

水文地球化学

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 谭俊

技术编辑 丁怀兰

责任印制 潘玉玲

印刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

经销 全国新华书店

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 21.25 字数 530 千字

版次 2010 年 11 月第 3 版 2010 年 11 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5022-5087-4 定价 58.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail:atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

总 序

东华理工大学(原华东地质学院)创建于1956年,经过50多年的办学历程,该校形成了以本科教育为主体,以研究生教育为先导,以高职、专科、成人教育为补充的多层次办学格局,发展成为一所以工为主,理工结合,文、管、经、法兼备的多科性普通高等学校。

在光荣而曲折的办学历程中,东华理工大学始终牢记办学使命,形成、保持、发展了鲜明的“东华理工特色”:**艰苦奋斗,为国奉献,构建核军工学科群优势**。伴随着祖国核工业前进的步伐,学校自力更生,艰苦奋斗,励精图治,勤俭办学,成为我国核工业开路先锋——核燃料循环工程人才培养的摇篮,为我国国防科技工业和社会经济发展做出了重大贡献。面对新的挑战 and 机遇,学校紧抓住发展这个第一要务,牢记“两个务必”,以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导,与时俱进,开拓创新,以质量求生存,以特色求发展,以社会需求为导向,主动适应高等教育由精英式教育向大众化教育的转变,稳定外延,注重内涵拓展和可持续发展,为早日实现“省内一流,全国知名,部分优势学科进入国际先进行列”而不懈努力。

东华理工大学被联合国国际原子能机构指定为铀矿地质和同位素水文学高级培训中心以及东亚地区同位素水文数据库主办单位,学校的国家级“分析测试研究中心”被国际原子能机构指定为参比实验室。依托“核设施数字工程实验中心”和“地理信息与数字影像技术研究中心”建设的“江西省空间信息与数字国土实验室”,于2004年2月被确定为省级重点实验室。2005年,“核资源与环境”实验室获批为省、部共建

教育部重点实验室,该实验室最近又被科技部批准为国家重点实验室培育基地。

为了系统地总结东华理工大学在核科学技术相关学科教学和科研中积累的知识和经验,更好地培养核科技人才,促进我国核科技事业的发展,我校决定组织出版《东华理工大学核特色系列教材》,并选定《应用水文地球化学》、《水文地球化学》、《场论》、《场论解题指南》、《核辐射测量原理》、《水文地质学》、《环境水文地质学》、《铀矿石的化学分析》、《同位素水文学导论》和《应用地球物理仪器》等 10 本教材首批出版,今后还将组织撰写更多的特色教材纳入本教材系列。

《东华理工大学核特色系列教材》出版委员会

第三版前言

水文地球化学是在水文地质学、地球化学及水化学基础上发展起来的一门新兴学科,它研究地下水化学组分的形成及分布规律,既是水文地球化学找矿方法及某些矿床成矿理论研究的基础,也是金属湿法冶金(堆浸、池浸、地浸)工艺技术方法和地下水、地表水环境污染研究与治理的理论基础。本书作为我国第一部高等院校的水文地球化学教材,自1982年第一版面世以来已有28年的历史,距1988年再版也已有22年。该书自出版以来,得到了许多教学、科研和生产单位的学者与科技人员的引用和良好反映,也提出了不少宝贵的修改意见,这对普及、提高和推广水文地球化学知识及其应用和改进本书的质量起到了积极作用。本书不仅可作为水文地质及其他有关专业的本科教材,也可被有关专业作为研究生教育的教材和主要参考书。

本书第三版在保持原书的结构和内容的基础上,增加了部分章节,并对原书进行了勘误与更新。增加的章节有:第一章水溶液的物理化学基础(孙占学编写),第十章地球化学模式简介(刘金辉、陈功新编写),第三章地下水中的有机物质中的第一节天然有机物质(刘金辉编写),第四章水及水中元素的同位素成分中的第一节概述和第二节同位素基础知识(孙占学编写),第十二章水文地球化学的应用中的第三节水文地球化学在地下水高矿化度条件下地浸采铀中的应用——以新疆吐哈盆地十红滩砂岩铀矿为例(李学礼编写),该节是应用水文地球化学理论解决干旱地区高矿化度地下水条件下地浸采铀的典型实例,有重要的理论意义和实用价值。此外,为方便读者进行有关的热力学计算,由孙占学、周仲魁根据有关资料,补充了热力学数据表和化学元素周期表作为本书的附录。

孙占学、刘金辉对本书第三版的出版起到了积极的推动作用,并编写了部分章节。本书由东华理工大学史维浚教授主审,张卫民、高柏、陈功新、张文、周仲魁、周义朋、王巧焕、曾华、阎政等老师及研究生对该书的校对、文字编辑、图件绘制等做了大量工作。本书的出版得到了江西省重点建设学科“地质工程”建设经费的资助。在此一并表示衷心感谢!

李学礼

2010年2月于东华理工大学

目 录

绪 论	1
一、水文地球化学的主要内容及其与其他学科的关系	1
二、水文地球化学在国民经济建设中的意义	2
三、水文地球化学的发展简史	3

第一篇 水溶液的物理化学基础和地下水的化学成分

第一章 水溶液的物理化学基础	9
第一节 水的结构与性质	9
一、水的结构	9
(一) 水分子的种类	9
(二) 水分子的结构和水分子间的联结与排布	10
二、水的性质	10
(一) 水的特异性质	10
(二) 温度、压力条件对水的性质的影响	12
第二节 物质在水中的溶解	13
一、气体在水中的溶解	13
二、液体物质的互溶	14
三、固体物质在水中的溶解	14
第三节 天然水化学成分浓度单位与常用术语	15
一、浓度与单位转换	15
二、常用术语	17
第四节 地下水化学成分的数据处理	20
一、水分析数据可靠性检验	20
二、水质组分比例系数的应用	22
三、地下水化学成分的图示法	23

第五节 热力学在水文地球化学中的应用	26
一、热力学基本原理简要复习	26
二、热力学在水文地球化学中的应用	28
第二章 地下水的无机化学成分	37
第一节 地下水中的大量组分	37
一、氯离子	37
二、硫酸根离子	38
三、重碳酸根和碳酸根离子	39
四、硅酸	40
五、氮的化合物	41
六、钠离子	41
七、钾离子	42
八、钙离子	42
九、镁离子	42
十、氢离子	43
十一、铁和铝	44
第二节 地下水中的微量组分	45
一、溴	46
二、碘	46
三、氟	46
四、硼	47
五、钨	47
六、铜	48
七、铅	49
八、锌	50
九、磷	50
十、砷	51
十一、锂	51
十二、锶	51
十三、钡	52
十四、镍	52
十五、钴	53
十六、银	53
十七、铍	54
十八、汞	54
十九、铊	55

二十、铋	55
二十一、钒	55
二十二、钨	56
二十三、铬	56
二十四、锰	57
第三节 地下水中的放射性组分	57
一、铀	57
二、镭	60
三、氡	60
四、钍	61
第四节 地下水中的主要气体成分	61
一、氧	62
二、氮	63
三、硫化氢	63
四、二氧化碳	64
五、甲烷	65
六、氢(H ₂)	65
第三章 地下水中的有机物质及其地球化学意义	66
第一节 天然有机物质	67
一、有机物质的种类	67
(一) 蛋白质	68
(二) 糖(碳水化合物)	69
(三) 脂类化合物	69
(四) 核酸	69
(五) 木质素	69
二、有机污染物	70
第二节 地下水中有有机物质的来源	73
第三节 地下水中有有机物质形成过程、形成条件和形成因素	74
第四节 不同类型地下水中有有机物质的含量和成分	76
一、淡潜水和层间淡水中的有机物质	76
二、医疗矿泉水的有机物质	76
三、热水中的有机物质	77
四、油气田地下水中的有机物质	78
第五节 地下水中的有机物质在地球化学过程中的作用	81
一、地下水中的有机物质在油气形成中的作用	81
二、地下水中的水溶性有机物质对化学元素迁移和富集的影响	82

三、铀和有机物质的关系·····	83
四、水中微生物及作用·····	85
第四章 水及水中元素的同位素成分 ·····	88
第一节 概述 ·····	88
一、同位素技术发展历史及现状·····	88
二、同位素水文地质学的研究意义·····	88
第二节 同位素基础知识 ·····	89
一、同位素及其分类·····	89
二、同位素组成的表示方法和标准·····	90
三、同位素分馏与同位素效应·····	91
四、自然条件下同位素的分离·····	92
第三节 氢氧稳定同位素 ·····	94
一、氢氧稳定同位素的分馏·····	94
二、天然水的氢、氧稳定同位素组成·····	96
第四节 硫的同位素成分 ·····	99
一、硫的同位素丰度和组成标准·····	99
二、硫同位素的分馏·····	100
三、地表水的硫同位素组成·····	101
四、地下水的硫同位素组成·····	101
第五节 碳的同位素成分 ·····	102
一、碳的同位素丰度和组成标准·····	102
二、碳同位素分馏·····	104
三、大气圈中的碳同位素组成·····	105
四、地表水和地下水中的碳同位素组成·····	105
第六节 放射性同位素成分 ·····	106
一、氡的成因及其在天然水中的分布·····	106
二、天然 ¹⁴ C的产生及其循环·····	108

第二篇 地下水中元素迁移及沉淀的 影响因素和地下水化学成分的形成机理

第五章 元素在地下水中的迁移和沉淀 ·····	113
第一节 元素在水中的存在形式及水溶液的类型 ·····	113
一、元素在水中的存在形式·····	113
二、水溶液的类型·····	114

第二节 影响元素在水中迁移的内在因素	116
一、化学键类型与矿物晶格结构	116
二、原子价	119
三、离子和原子的半径	119
四、离子电位(离子势)	122
五、元素化合物的溶解度	122
第三节 元素在地下水中迁移的一般特征	123
一、弥散作用	124
二、标型元素和元素的水迁移环境	126
三、元素的水迁移强度	130
第四节 元素在水中迁移的某些化学规律	132
一、复分解反应(离子交换反应)	132
二、溶度积对元素迁移的影响	133
三、天然水中离子强度对元素迁移的影响	133
四、天然水中元素浓度对矿物形成的作用	135
五、酸碱反应和 pH 的作用	135
六、氧化还原反应	136
第五节 地球化学垒——元素地下水中沉淀的特殊环境	143
一、机械垒	143
二、物理-化学垒	143
三、生物垒	147
第六章 地下水化学成分的形成及其影响因素	148
第一节 地下水化学成分形成过程中的几个主要作用	148
一、溶滤作用	148
二、阳离子交替吸附作用	150
三、氧化作用	152
四、还原作用(生物化学作用)	152
五、水的混合作用	153
六、脱碳酸作用	156
七、浓缩作用	156
第二节 影响地下水化学成分形成的基本因素	156
一、自然地理因素	157
(一) 地形	157
(二) 水文网(水文因素)	157
(三) 气候	158
(四) 风化作用	160

(五) 土壤	161
二、地质因素和水文地质因素	161
(一) 地质构造	161
(二) 构造运动	162
(三) 地静压力	162
(四) 地貌	163
(五) 岩石的矿物成分和化学特征	163
(六) 岩石的离子-盐类综合体	164
(七) 表生矿物的形成作用	164
(八) 岩浆作用	166
(九) 水动力因素	166
三、物理化学因素	167
(一) 扩散作用	167
(二) 渗透作用	168
(三) 重力分异作用	169
四、物理因素	169
(一) 温度的变化	169
(二) 压力	170
(三) 土石内的蒸发	171
(四) 时间	172
(五) 循环路程的长度或空间	172
五、生物因素	172
(一) 植物	173
(二) 微生物	173
六、人为因素	174
(一) 开采地下水对地下水化学成分的影响	174
(二) 工业污染对地下水化学成分的影响	175
(三) 水工建筑对地下水化学成分的影响	175
(四) 人工灌溉对地下水化学成分的影响	176
第三节 潜水化学成分的形成	176
一、在潮湿气候区	176
二、在温暖潮湿气候区	177
三、在干旱气候区	177
第四节 承压水盆地地下水化学成分的形成过程	177
一、概述	177
二、海成封存水化学成分的形成	178

三、承压水盆地地下水化学成分的形成过程	179
---------------------------	-----

第三篇 地下水化学成分分布的区域性规律

第七章 地下水的水文地球化学分带	187
第一节 潜水的纬度分带	187
第二节 承压水盆地的水文地质动力分带和深层地下水的地质动力学	188
一、水文地质动力分带	189
(一) 水强烈交替带(上部带)	189
(二) 水缓慢交替带(中部带)	189
(三) 水消极交替带(下部带)	189
二、深层地下水的地质动力学	189
第三节 承压水盆地的水文地球化学分带	192
一、按矿化度分带	192
二、各种承压水盆地中,地下水化学成分的水平 and 垂直分带类型及其决定因素	195
(一) 水平分带类型(是指一个含水层中水化学成分的分带规律)	195
(二) 垂直分带类型	202
(三) 结论	209
第四节 承压水盆地地下水的气体(气体地球化学)分带	209
第五节 山区基岩裂隙水的高程分带性	210
第六节 地下水分带中的异常	212
一、潜水的纬度分带异常	212
二、承压水垂直分带异常	212
(一) 古老的排泄源	212
(二) 现代的排泄源	212
第八章 地下热水的水化学特征	216
第一节 我国地下热水分布概况	216
一、火山和近期岩浆活动型地下水	216
二、隆起带断裂构造型地下水	217
三、沉降带盆地型地下水	218
第二节 地下热水的水化学特征	219
一、火山和近期岩浆活动型地下水	219
二、隆起带断裂构造型地下水	220
三、沉降带盆地型地下水	223
第九章 地下水水文地球化学分类	225

第一节 地下水的化学成分分类概述	225
第二节 地下水水文地球化学分类的基本原则	226
一、地下水水文地球化学分组	226
二、地下水水文地球化学分类	230
三、地下水水文地球化学分类的表示方法	231
第三节 地下水化学成分的一些水文地球化学规律	232
一、地下水化学成分、矿化度与水文地球化学环境的关系	232
二、地下水中的二氧化硅及硅酸水的形成	238
三、几种在自然界不能形成的水化学类型	241
四、水的 pH	242
第四节 地下水水文地球化学分类的意义	242

第四篇 水文地球化学的研究方法及应用

第十章 水文地球化学的研究方法	247
第一节 地质学方法	248
一、野外调查方法	248
二、室内资料综合分析整理与水文地球图件的编制	248
第二节 同位素方法	250
一、利用氢、氧稳定同位素(D, ^{18}O)确定含水层的补给区或补给区高度	250
二、利用硫同位素研究火山地区热水中硫酸根离子的成因问题	252
三、利用 ^{13}C 解决水文地质的某些问题	252
四、放射性同位素方法	253
第三节 热力学方法	256
第四节 古水文地质方法	256
一、构造古水文地质分析	257
二、古地下水动力条件分析	257
三、古水文地球化学分析	257
四、确定古地下热水的温度	259
第五节 实验室研究方法	259
一、压出液分析法	259
二、岩石矿物气—液包裹体分析鉴定法	260
三、模拟实验法	260
第十一章 地球化学模式简介	263
第一节 概述	263

第二节 常用地球化学模式程序简介	263
一、地球化学模式的主要功能	263
二、地球化学模式程序简介	265
第三节 地球化学模式的基本类型及原理	266
一、质量平衡模式	266
二、质量转化模式	266
三、质量迁移模式	268
第四节 地球化学模式的应用	268
一、计算和判定水中各种化学组分的存在形式与饱和指数的计算(以海水为例)	269
(一) 水中各种化学组分存在形式计算	270
(二) 计算水溶液中矿物饱和指数(以海水为例)	273
二、矿物在水中的溶解量计算(以石膏溶解为例)	273
三、确定矿体的分布范围(以铀为例)	276
四、确定含水层中氧化还原势与 pH 势	277
五、成矿地段的确定(以砂岩型铀矿为例)	278
(一) 地质背景	278
(二) 地球化学模式计算结果	279
(三) 铀矿化地段的预测	281
六、确定水中元素溶解、沉淀范围(以铀为例)	282
(一) 研究区概况	282
(二) 水中铀溶解、沉淀范围	283
第十二章 水文地球化学的应用	288
第一节 水文地球化学在找矿中的应用	288
一、水文地球化学找矿标志	288
二、水文地球化学间接找矿标志的应用	289
第二节 水文地球化学在成矿作用研究中的应用	292
一、概述	292
二、地下水与成矿物质的迁移	293
第三节 水文地球化学在地下水高矿化度条件下地浸采铀中的应用(以新疆吐哈盆地十红滩砂岩铀矿为例)	296
一、十红滩矿床水文地质条件与地浸中存在的主要问题简介	296
二、溶浸过程中产生 CaCO_3 、 CaSO_4 沉淀的水文地球化学原理	297
三、酸法、碱法不适用于高矿化度条件地浸采铀分析	297
四、淡化少试剂浸铀工艺	299
第四节 水文地球化学资料在地热勘探中的应用	300
一、一般原理	300

二、地球化学地热温标估算地下温度所需要的基本假设	301
三、地球化学地热温标	301
第五节 矿水	303
一、饮料矿泉水	303
二、医疗矿水的化学成分特征及分类	305
三、矿水的分布	306
第六节 环境保护	306
一、地下水质与地方病	306
二、地下水污染	308
第七节 灌溉用水的水质评价	309
一、水温	309
二、总矿化度与溶解盐类的成分	309
三、灌溉系数	310
主要参考文献	311
附录 1 标准状态 (298.15 K, 25 °C ; 100 kPa, 0.986 9 atm) 下常见组分的热力学数据表	314
附录 2 25 °C 下的平衡常数和反应焓	318
附录 3 化学元素周期表	324

绪 论

一、水文地球化学的主要内容及其与其他学科的关系

水文地球化学是建立在水文地质学、地球化学及水化学基础上的一门新兴学科。它以地下水的化学成分及其形成规律为主要研究对象,因此,有的学者称它为地下水的地球化学。但更严格地说,水文地球化学是研究水与地壳岩石、气体和有机物质相互作用的学科,是研究地下水圈中化学元素及其同位素的分布、分配、集中、分散及迁移循环的形式、规律和历史的学科。因为无论是外生循环还是内生循环的地质作用都有水的参与,水文地球化学不仅研究地下水的化学成分及其形成作用与途径,而且探索地下水在地球壳层中所起的地球化学作用。这样,除地下水本身外,水文地球化学研究的对象有因地下水活动而形成的各种产物(包括固体与气体)及地下水对地质作用的影响。随着生产的发展和资料的积累,这一学科的研究内容和领域还将不断地扩大。

目前,水文地球化学的主要研究内容有:

- (1) 地下水的化学成分及其来源;
- (2) 水的结构与物理性质和地下水化学成分之间的关系;
- (3) 元素在地下水中的迁移和沉淀;
- (4) 地下水化学成分的形成及其影响因素;
- (5) 各类地下水(包括热水)的水文地球化学特征及区域性变化规律;
- (6) 地下水水文地球化学分类;
- (7) 水文地球化学在国民经济建设中的应用;
- (8) 水文地球化学的研究方法与应用。

作为一门新兴的发展中的边缘学科,水文地球化学同相邻学科之间的关系是比较复杂的。

首先谈谈水文地球化学与水化学之间的关系。一部分水化学工作者认为,水化学是一门很广泛的学科,它研究所有的天然水,即大气水、河水、海水和地下水的化学。观察到的大气水、河水、海水和地下水之间水化学过程的统一性表明,没有理由将水化学的研究局限在地表水范围内,也没有必要分出只研究地下水化学成分的学科——水文地球化学。而大部分水文地质工作者则认为,水化学的研究对象不应超出地表水的范围,而由于地下水具有特殊的存在和形成条件,它的化学成分及形成条件应当由另一门与水文地质学紧密相连的学科,即水文地球化学来研究。事实上,水化学工作者主要的研究对象一直是地表水。目前,随着生产和科学的发展,这个争论的问题实际上已经解决,水文地球化学已经建立起来。在许多地质科研和生产单位,已经建立了专门研究水文地球化学的实验室和其他机构。国际上已组织了水文地球化学协会,召开过多次水文地球化学座谈会,并出版了一系列专著。这