

尹 观 主编

同位素 水文地球化学



成都科技大学出版社

ISBN 7-5616-0285-5/P · 3(课)

定价 3.50元

同位素水文地球化学

尹 观 主编

成都科技大学出版社

内容提要

本书阐明了有关同位素基本理论，水和水溶物资的同位素分馏机理，并联系实例分别介绍了雨水、冰雪、海洋、湖泊、河流、地下水（含岩溶水）和地热水等水体的同位素组成特征和实际应用中的原理和方法。

全书共有九章、21万字、附图43幅，具有简明、扼要、资料新等特点。

它可作水文、工程地质及水利电力工程、环境、石油、海洋、矿产地质等专业本科生、研究生教材，也可供从事上述专业及气象等科技人员参考。

同位素水文地球化学

尹 观 主编

成都科技大学出版社出版、发行

西南冶金地质印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 9.375

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数 1—2000

字数 211000

ISBN 7-5616-0285-5 / P · 3(课)

定价：3.50元

代 序

在我国，对同位素地球化学的广泛研究始于本世纪的50年代，经过广大同位素地质工作者30多年的艰苦奋斗，现已建立和形成手段齐全、方法完备、装备精良的实验体系，从业队伍也具有一定规模。然而，很长时间内，同位素地球化学多偏重结合区域地质和金属矿产进行研究，应用范围比较狭窄。

近年来，不少单位已开始运用同位素地球化学原理与沉积地质、环境地质和水文地质等学科进行嫁接，从而拓宽了同位素地球化学的应用范围并取得了可喜的成绩，这是我国同位素地球化学事业的一大转变。成都地质学院从事同位素地质工作的研究人员，在这个转变的形势下，积极参加有关研究工作，《同位素水文地球化学》的出版，也许可以说就是这种努力的一个标志。

为了编写本书，作者用了数年时间，广泛地搜集和整理了国内外发表的最新成果和自己的工作实践。在编写中，力求方便阅读和突出重点，在简明、扼要介绍同位素基本原理的基础上，重点和较系统地介绍了各种水体（雨水、冰雪、海洋、湖泊、河流、地下水和地热水等）的同位素组成特征以及利用氢氧同位素及水溶物质同位素手段，探索各种水体的成因、赋存、运移规律和定年等方面的问题。书的内容，理论联系实际，着眼于普及和实用。

同位素水文地球化学是一门具有良好前景、发展迅速的新兴学科。在目前国内还未见有此类书籍单行本问世的情况下，我坚信此书一定可使读者耳目一新，大有裨益。

最后，我祝愿此书能在同位素地球化学与水文地质学的

渗透和结合上作出贡献，为推动我国同位素水文地球化学这门学科的发展起到推波助澜的作用。

董宜宝

1988年9月7日

前 言

早在美国亚利桑那大学进修期间，我有机会接触到同位素水文地球化学这门学科大量的专著和文献资料，加之从事同位素工作十余年来也有一些实际体会，于是产生了一个念头，即进行一次大胆的尝试，将这许多国外的新鲜资料 and 在实际工作中所获得的一些零碎的经验和体会整理成册。回国后，在一些前辈和同行鼓励和支持下，先编成讲稿在研究生中进行讲授，然后又经过一年多的努力，这个愿望终于实现了。

编写之初，曾打算介绍得详细一些，但由于经费拮据，不得不多次压缩内容。现在奉献给读者的只是一小本子，大约只有原先设想的一半，不过，主要内容没有削弱。

全书共九章，其中第一章由卢武长（稳定同位素）、杨绍全（放射性同位素）合写，第三、五章和第二章第一节的第三部分由卢武长执笔，定稿时经过适当的修改和删节。

此外，为这本小册子的成书和出版，董宜宝教授给予了热情的指导并为本书写了代序，卢奇勋、袁顺生先生和刘明斌副研究员竭尽了全力，在此谨表示深切的谢意。

出版这本小册子，实在是无经验可循，困难不少，且限于水平和经验，加之时间仓促，错误之处定多，殷切期望读者不吝赐教。

尹 观

1988年7月于成都地质学院

目 录

概述	1
第一章 同位素的基本概念及理论基础	5
第一节 同位素的基本概念	5
一、稳定同位素	5
二、放射性同位素	7
第二节 自然界稳定同位素的分馏效应	8
一、动力同位素分馏效应	8
二、同位素交换反应	15
第三节 同位素的放射性衰变及水体的同位素定年	21
一、同位素的放射性衰变	21
二、水体的氡和碳-14定年	24
第二章 水和水溶物质的同位素分馏特征	38
第一节 水的同位素分馏	38
一、水的天然同位素组成	38
二、水的同位素效应的主要特征	41
三、水在蒸发和凝结过程中的同位素分馏	44
第二节 水溶物质的同位素分馏	53
一、环境碳、硫源的同位素组成	54
二、水溶碳、硫物质的同位素分馏特征	59
第三节 水/岩的相互作用	68
一、岩石、矿物中氢氧同位素的分布	69
二、水/岩相互作用的实验模型	78
第三章 雨水的同位素组成	84
第一节 雨水的同位素组成	85
一、雨水的平均同位素组成	85

二、雨水氢氧同位素组成的相关变化	87
三、雨水同位素组成的分布规律	91
四、大气降雨模式及同位素分馏机理	96
第二节 雨水的氘含量及其硫同位素组成	100
一、雨水的氘含量及其分布特征	100
二、雨水的硫同位素组成	102
第三节 估计古雨水的同位素组成	102
第四章 冰雪的同位素组成	104
第一节 冰雪的同位素组成	104
一、雪的同位素分布特征	104
二、冰川的同位素组成	107
三、冰雪排泄水的同位素变化及水组成的定量计算	118
第二节 同位素在冰川研究中的实际应用	121
一、测定堆积速度	121
二、冰岩心定年	121
三、追溯古气候的变化	122
四、建立冰流模型	125
第五章 海水的同位素组成	126
第一节 海水的氢氧同位素组成	126
一、海水的氢氧同位素组成	126
二、影响海水氢氧同位素组成的因素	132
三、海洋水和大气降水的关系	135
四、地下水与海水的关系	138
第二节 海水溶解化合物的同位素组成	139
一、海水中溶解硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值及其变化	139
二、海水中含碳化合物的碳同位素组成	142
三、海水中的铍同位素演化	143

第六章 湖泊的同位素组成	145
第一节 湖泊的同位素组成特点	145
一、湖水的同位素组成.....	145
二、湖泊水溶物质的同位素组成.....	148
第二节 有关湖泊水平衡定量研究的讨论	158
一、干涸水体.....	154
二、终碛湖.....	157
三、吞吐湖泊.....	160
第三节 同位素在湖泊研究中的应用	161
一、湖泊水平衡的分析.....	161
二、盐湖的研究.....	162
三、测定古气候.....	164
第七章 河流水系的同位素特征	166
第一节 河流水的同位素组成	166
一、小溪流水的氢氧同位素.....	166
二、大河水系水的氢氧同位素.....	169
三、河流水中的硫同位素组成.....	173
第二节 支流水混合比的定量计算	175
一、支流水混合中的同位素均一化.....	175
二、支流混合比的定量计算.....	177
第三节 同位素在河水研究中的实际应用	179
一、洪水组成的研究.....	179
二、河水的蒸发.....	180
第八章 地下水的同位素组成	184
第一节 非饱和地带水的补给及其同位素特征	184
一、包气带中水的补给.....	184
二、干旱地带水的补给.....	189

第二节 地下含水层水的同位素组成.....	191
一、雨水的补给.....	192
二、河流的补给.....	197
三、湖泊对地下水的补给.....	202
四、承压含水层水的相互补给.....	206
第三节 裂隙岩溶水的同位素组成.....	207
一、裂隙水.....	208
二、岩溶水.....	210
第四节 古水的同位素研究.....	223
一、承压和非承压含水层的古水.....	223
二、建造水.....	228
第五节 地下水盐度源的研究.....	233
一、盐化的机理.....	233
二、氯同位素的研究.....	239
第六节 硫同位素在区域水文地质研究中的应用	245
一、Florida含水层.....	245
二、Edwards含水层	249
第九章 地热水的同位素组成.....	253
第一节 地热水的氢氧同位素特征.....	253
一、水/岩的相互作用	253
二、地热水的蒸发效应.....	256
三、地热水和冷水的混合.....	260
第二节 地热水中水溶矿物质的同位素组成	263
一、地热水中的碳同位素及其组成的变化.....	263
二、地热水中的硫同位素及其组成的变化.....	268
第三节 地热系统中的同位素地质温度计.....	277

一、同位素地质温度计的基本原理.....	277
二、碳同位素地质温度计.....	278
三、氢同位素地质温度计.....	281
四、氧同位素地质温度计.....	281

主要参考文献.....	288
-------------	-----

概 述

同位素水文地球化学是应用同位素的理论和技术专门研究各种水文地质问题的学科。具体地说，它是直接或间接地应用水和水溶物质中保存的与水体来源、形成环境和演化历史有关的天然同位素信息，去揭示各种水体的成因、赋存条件及演化规律，为查明水和水力资源服务的学科。

同位素水文地球化学现已发展成为以先进理论和技术为基础的、有独立体系的、有特定研究对象的学科了。但它是在同位素地质学（或环境同位素地球化学）的基础上发展起来的，所以，与同位素地质学（或环境同位素地球化学）有许多共同之处。与此同时，它与核物理化学、地质学、生物学等也关系密切，特别是与水文地质、工程地质、水利和气象学等关系更为密切、更为直接。

同位素水文地球化学十分重视研究各种水体的水和水溶物质的同位素分馏机理和实验方法，十分强调应用理论和实验资料去科学地揭示和阐明各种问题。在实际工作中，一定要在常规的地质工作基础之上，合理而准确地实施同位素研究方案，细致搜集各种资料并加以综合分析，才可能得出合理的结论。也必须明确，任何一门学科都只能在一定条件下才能发挥最大作用，取得最好效果。对同位素水文地球化学来说也是如此，如果离开它本身的条件和一定的适应范围，就可能得出错误的结论。因此，透彻地了解它的基本理论，熟练掌握有关方法，注意判断条件的可行性等问题，就能获得最优成果。

第二次世界大战期间，对同位素水文地球化学的有关研究开始兴起。经过近半个世纪的酝酿、探索和积累资料，特

别是技术方法上的迅速发展和突破，它已能在解决下列一些重要实际问题中发挥重要作用。

1. 探讨各类水体的成因

天然水体有各种各样的存在方式。如有雨水（降雨、冰、雪）、地表水（江河、湖泊、海洋）和地下水（包括地热水、古代水）等存在方式。在地壳深部还存在地壳下部或上地幔的初生水、岩浆分离及地壳物质混熔后形成的岩浆水以及变质作用形成的变质水。

不同水体的同位素组成均有一定的变化范围。例如，所有大气降雨的氢氧同位素组成原则上都遵循 Craig 雨水方程并呈线性变化。在 δD - $\delta^{18}O$ 构成的图形中，寒冷、纬度高地区的雨水，其氢氧同位素数据均落在雨水线的左下端；而温和、纬度低地区的雨水则出现在这条线的右上端。不同来源的地表水，其情况不同，干旱地带的地表水，一般将偏离雨水线，这主要是由于蒸发作用的影响造成的。地下水的同位素组成，主要受补给源和多源混合的实际情况所支配，而地热水大都在氧同位素组成上变化较大。可现代海水的氢氧同位素组成却相当恒定，绝大部分的 $\delta D = 0 \pm 10\%$ 和 $\delta^{18}O = 0 \pm 1\%$ 。初生水的估计值为 $\delta D = -65 \pm 20\%$ 和 $\delta^{18}O = 6 \pm 1\%$ 。岩浆水的 δD 在 $-20 \sim -65\%$ ， $\delta^{18}O$ 在 $5 \sim 25\%$ 的范围内。它们的氢氧同位素特征在一定程度上可反映各自的成因，因此，通过测定其氢氧同位素组成，一定可为探讨各类水体的成因提供有用信息。

2. 研究循环中的雨水、地表水、地下水三者间的关系

在自然水的循环中，雨水是地表水和地下水的主要来源。但雨水的形成又与地表的江河、湖、海的蒸发有关，地表水和地下水相互之间又存在不断的补给和排泄关系。于是

它们三者很自然地构成为水的动态循环。利用同位素的方法，估计每一局部地区三种水体之间相互转换的数量关系，这在半干旱和干旱地带的研究中是特别有效的。

3. 确定江河、湖泊和地下水的来源及组成

江河、湖泊和地下水的来源及组成是水文学研究中的重要问题，测定它们的同位素组成就可以确定补给的源区、补给的数量以及各种来源水的混合比等。例如，在对江河、湖泊的研究中，可以鉴别出不同时间、空间、雨水、雪溶、冰川溶融及地下水贡献的数量关系，不同支流的混合比以及洪水的形成和洪峰遭遇规律等。在地下水的调查中，还可以准确地确定水的补给位置、高度和各含水层之间的水力联系等。

4. 判断水体的运动规律

水体和运动涉及到两方面：一是雨水和地下水的入渗；二是深部承压含水层的地下水的流动。通过测定氡的含量，可以了解雨水或地表水对地面的入渗速率及入渗量等；对深部含水层地下水的水溶物质同位素组成的调查，可有助于了解深部地下水运动的方向和途径；还可以通过测定油田卤水的同位素组成探讨油气的运移规律。

5. 提供古气候的信息

在一定条件下，地表水和地下水的同位素信息可反映古气候的变化。如通过对极地冰川岩心和埋藏很深的古地下水的同位素研究，已经推论出自更新世以来全球性的气候变化特点。

6. 指示热源位置及深度

在地热水的勘探开发中，同位素方法也能发挥重要作用。如依据地热水的氧同位素变化特征去指示深部热源的位置、热源的范围和大小；依据热水水溶物质的同位素组成变

化，去查明深部热水的温度。

7. 研究工程地质中的问题，如研究坝基的渗漏、矿坑水的形成等问题。

8. 对水体定年，如利用半衰期较短的放射性同位素进行水体定年，估计水体的滞留时间并进而算出水的流动速度等。

我国开展同位素水文地球化学的研究工作，始于本世纪的50年代，虽然经历的时间不长，但已在雨水、地下水、地热水等领域中取得了良好的效果，特别是近几年来，广大的水文地质工作者越来越意识到它的重要作用，并陆续建起了一批装备精良的同位素测试实验室。展望未来，同位素水文地球化学这门年青的学科必将在我国得到更广泛、深入的应用和发展。

第一章 同位素的基本概念及理论基础

第一节 同位素的基本概念

同位素是指原子核内质子数相同中子数不同的一些原子，它们具有基本相同的化学性质并在化学元素周期表中占据同一位置。

由人工核反应产生的同位素称为人工同位素，而存在于自然界的则称为天然同位素。

一、稳定同位素

1. 稳定同位素

指目前尚未发现存在放射性衰变的同位素。如氢的同位素 ^1H 、 D ；氧的同位素 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O ；碳的同位素 ^{12}C 和 ^{13}C ；硫的同位素 ^{32}S 和 ^{34}S 等均称为该元素的稳定同位素。

2. 同位素丰度

指一种元素的各种同位素在原子中占的百分比。如表1-1所示。

表 1-1 H、O、C、S的同位素丰度

同 位 素	平均丰度(%)	同 位 素	平均丰度(%)
H	99.9844	^{12}C	98.89
D	0.0156	^{13}C	1.11
^{18}O	0.1995	^{32}S	95.0
^{17}O	0.0375	^{33}S	0.76
^{16}O	99.763	^{34}S	4.22
		^{36}S	0.074