

高等学校试用教材

稳定同位素地质

沈渭洲等编

丁梯平 张宗清 主审

原子能出版社

高等学校试用教材

稳定同位素地质

沈渭洲 等 编

丁悌平 张宗清 主审

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了氢、氧、碳、硫、锶、钕和铅同位素的基础理论及其在地质科学领域内的应用。

全书共十章。第一章为绪言。第二章至第四章介绍同位素的基本概念；元素同位素组成的变化机理；稳定同位素样品的制备与质谱分析。第五章至第十章叙述氢、氧、碳、硫、锶、钕和铅同位素在自然界的分布；它们在地质学中的应用的基本原理。重点介绍如何根据稳定同位素在地质体中的分布规律，阐明自然界发生的各种地质作用的特点，即如何根据同位素组成来研究矿物、岩石和矿床的成因。书末的结束语阐述稳定同位素地质研究工作的注意事项及国内外研究工作展望。

本书可作为高等学校地质专业研究生和高年级学生的教学参考书，亦可供地质科研和生产单位的广大地质人员参考。

高等学校试用教材

稳定同位素地质

· 沈渭洲 等编

丁悌平 张宗清 主审

责任编辑 姜利民

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重 庆 印 制 一 厂 印 刷

(重庆枇杷山后街79号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 850×1168 1/32·印张13.5·字数357千字

1987年12月北京第一版 1987年12月北京第一次印刷

印数 1—1,300·统一书号: 15175·846

定价: 2.20元

前 言

稳定同位素地质是地质科学领域内一门新兴的边缘学科，在国外，它已成为研究各种地质作用的一种重要手段；在国内，随着具有先进水平的同位素地质实验室的建立，一个研究稳定同位素在地质上应用的热潮正在兴起。我国已出版过一些稳定同位素地质方面的书。这些书虽然对推动我国稳定同位素地质研究工作的开展起了不小的作用，但其内容都只限于某一种同位素。最近几年来，稳定同位素的地质研究发展极为迅速，新的资料大量涌现，新的研究领域不断开辟。因此，为满足教学需要，编写一本既反映国内外最新研究成就，又综述应用最广、最重要的氢、氧、碳、硫、锶、钆和铅七种同位素地质的教学参考书，势在必行，也符合广大地质工作者的愿望。

本书是根据1984年至1990年高等学校原子能教材编审出版规划以及1984年12月提纲审定会审定的大纲编写的，可作为高等学校地质专业研究生和高年级学生的教学参考书。本书第四章由黄耀生编写，其余各章由沈渭洲编写，由丁悌平和张宗清主审。

郑淑蕙、陈锦石、朱炳泉、周新华、李耀崧、夏毓亮、刘裕庆、陈民扬、张理刚分别审阅了书稿的部分章节，提出了十分宝贵的意见。张祖还、王德滋、周新民和章邦桐对书稿提出了许多宝贵意见。全书插图由高秀英清绘。编者在此表示真诚的谢意。

限于编者水平，书中不足和错误之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编者

1986.4.

目 录

前言

第一章 绪言	(1)
第二章 同位素的基本概念	(4)
第一节 同位素的定义	(4)
第二节 同位素的分类	(4)
一、放射性同位素	(5)
二、稳定同位素	(5)
第三节 同位素的物理性质和化学性质	(10)
第四节 同位素丰度及其变化	(13)
第三章 元素同位素组成的变化机理	(15)
第一节 同位素分馏	(15)
一、同位素热力学分馏	(17)
二、同位素动力学分馏	(23)
第二节 放射性衰变	(32)
一、放射性衰变类型	(32)
二、放射性衰变规律	(33)
三、放射性衰变系列	(37)
第四章 稳定同位素样品制备和质谱分析	(40)
第一节 质谱计的基本原理和分析方法	(40)
一、质谱计的基本原理和结构	(41)
二、质谱计的主要技术指标	(44)
三、同位素比值或同位素丰度测定方法	(45)
四、同位素稀释质谱法	(47)
五、稳定同位素样品质谱分析	(48)
第二节 稳定同位素样品制备	(56)
一、氢同位素	(56)
二、氧同位素	(57)
三、碳同位素	(61)
四、硫同位素	(61)

五、铷、锶同位素	(63)
六、钐、钕同位素	(63)
七、铅同位素	(64)
第三节 同位素标准	(64)
一、氢、氧、碳、硫同位素的标准	(65)
二、锶、钕、铅同位素的标准	(67)
第五章 氢氧同位素	(69)
第一节 概述	(69)
第二节 氢、氧同位素在自然界中的分布	(71)
一、陨石和月岩	(71)
二、天然水	(76)
三、沉积岩	(88)
四、变质岩	(94)
五、火成岩	(102)
第三节 火成岩氢、氧同位素组成的影响因素	(110)
一、源岩的物质成分	(110)
二、岩浆结晶分异作用	(112)
三、同化-混染作用	(115)
四、火成岩与雨水的同位素交换	(117)
第四节 氢、氧同位素地质测温	(121)
一、基本原理	(121)
二、氧同位素地质测温	(122)
三、氢同位素地质测温	(129)
四、注意事项	(130)
第五节 氢、氧同位素与成矿溶液来源	(132)
一、概述	(132)
二、成矿溶液氢、氧同位素组成测定方法	(133)
三、成矿溶液来源实例	(136)
第六章 碳同位素	(145)
第一节 概述	(145)
第二节 碳同位素在自然界中的分布	(146)
一、陨石和月岩	(146)

二、火山气体	(148)
三、金刚石和石墨	(149)
四、沉积碳酸盐岩石	(156)
五、变质岩	(163)
六、火成岩	(165)
第三节 碳同位素地质测温	(168)
第四节 碳同位素在矿床成因研究中的应用	(170)
一、热液矿床的碳同位素组成	(170)
二、斑岩型矿床的碳同位素组成	(179)
三、沉积矿床的碳同位素组成	(179)
四、石油和天然气的碳同位素组成	(180)
第七章 硫同位素	(189)
第一节 概述	(189)
第二节 硫同位素在自然界中的分布	(191)
一、陨石和月岩	(191)
二、海水和大气降水	(194)
三、沉积岩	(199)
四、变质岩	(202)
五、火成岩	(203)
第三节 硫同位素地质测温	(210)
第四节 硫同位素在矿床成因研究中的应用	(214)
一、热液矿床的硫同位素组成	(214)
二、铜镍硫化物矿床的硫同位素组成	(232)
三、斑岩型矿床的硫同位素组成	(234)
四、矽卡岩型矿床的硫同位素组成	(236)
五、火山岩型矿床的硫同位素组成	(238)
六、层控矿床的硫同位素组成	(240)
七、关于硫同位素组成均一化	(243)
第八章 锶同位素	(246)
第一节 概述	(246)
一、铷和锶的地球化学	(246)
二、铷和锶的同位素	(248)

第二节 地球中锶同位素的演化	(249)
一、地球的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	(249)
二、地幔的锶同位素组成及演化	(251)
三、地壳的锶同位素组成及演化	(258)
第三节 锶同位素在岩石成因研究中的应用	(259)
一、基本原理	(259)
二、超基性岩石	(262)
三、火山岩	(264)
四、碳酸岩和碱性岩	(268)
五、花岗岩	(270)
第四节 影响岩石锶同位素组成的因素	(281)
一、源岩的物质成分	(281)
二、放射成因锶混染	(283)
三、岩浆结晶分异作用	(292)
四、其他因素的影响	(296)
第五节 锶同位素在矿床成因研究中的应用	(299)
一、测定成矿年龄	(299)
二、判断成矿物质来源	(301)
第九章 钕同位素	(304)
第一节 概述	(304)
一、研究概况	(304)
二、钕和钆的地球化学	(305)
三、钕和钆的同位素	(306)
第二节 钕同位素的演化	(308)
一、地球的初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	(308)
二、地幔中钕同位素的演化	(310)
三、地壳中钕同位素的演化	(312)
第三节 钕同位素在岩石成因研究中的应用	(313)
一、基本原理	(313)
二、钕-锶同位素的相关关系	(316)
三、各类岩石的钕同位素组成	(327)
第十章 铅同位素	(337)

第一节 概述	(337)
一、铀、钍和铅的地球化学	(337)
二、铀、钍和铅的同位素	(340)
三、自然铅的分类	(342)
第二节 铅同位素的演化	(346)
一、正常铅的演化	(346)
二、异常铅的演化	(355)
三、地幔中铅同位素组成的演化	(363)
第三节 铅同位素在自然界中的分布	(365)
一、陨石铅	(365)
二、地幔铅	(366)
三、地壳铅	(368)
四、矿石铅	(369)
第四节 铅同位素在岩石成因研究中的应用	(371)
第五节 铅同位素在矿床成因研究中的应用	(376)
一、矿床中铅同位素组成的分布特征	(376)
二、普通铅年龄的应用	(380)
三、判断成矿物质来源	(383)
四、划分成矿带	(386)
五、铅同位素在寻找和评价金属矿床中的应用	(390)
第六节 铀-铅同位素体系在铀矿地质研究中的 应用	(392)
一、测定成矿年龄	(392)
二、查明铀的来源	(394)
三、铅同位素地球化学找矿	(398)
结束语	(403)
一、稳定同位素地质研究应注意的几个问题	(403)
二、稳定同位素地质研究展望	(407)
附录：元素的同位素组成	(412)
主要参考文献	(422)

第一章 绪 言

稳定同位素地质是最近二、三十年间才迅速发展和逐渐完善起来的地质科学领域内一门新兴的分支学科。本学科的主要研究内容是稳定同位素在地质体中的分布及在各种地质条件下的运动规律, 以及如何运用这些规律研究矿物、岩石和矿床的成因等地质问题。其研究内容涉及矿物学、岩石学、矿床学与地球化学等各个领域, 已成为研究自然界中各种地质作用的一种强有力的工具。但与其他学科相比, 稳定同位素地质毕竟还是一门很年轻的学科, 在实验方法、理论基础和地质应用上都有待于进一步的完善和提高。此外, 稳定同位素地质只是地质科学的一个分支, 只有和其他学科密切配合才能充分发挥其在地质研究中的独特作用。

虽然W·Crookes(1886*), F. Soddy(1910)等对同位素的概念作过论述, J. J. Thomson在1912年发现了稳定同位素, 但对同位素的研究工作, 是在A. J. Dempster(1918)和F. W. Aston(1919)分别研究成功质谱计之后才正式开始的。人们在研究放射性元素铀和钍的衰变过程中, 发现铅的原子量是变化的, 从而推测其他元素的同位素组成在时间和空间上也可能发生一定的变化。A. Holmes首先提出利用元素的稳定同位素组成来研究地质问题。在1932年, 他建议利用钙同位素组成的变化来研究岩石的成因。随后在1937和1938年, 他又根据铅同位素组成的变化来探讨铅矿石的成因, 开创了稳定同位素的地质研究工作。

三十年代所开展的稳定同位素研究工作除了解决实验室对元素同位素丰度的分析测试技术外, 主要在于查明自然界中各种元

* 表示年份, 全书同。

素同位素组成的一般特征和阐明同位素分馏作用产生的机理。研究的对象仅限于铅、氢、氧和碳等少数几个元素的同位素。由于当时解释分析数据没有联系所研究对象的地质特征，因而得出的结论常与实际情况不相吻合，研究工作进展缓慢。在实践的过程中，随着经验的积累，研究人员逐渐注意将解释分析数据与实际地质特征相结合。特别是A. O. Nier在1939年研究成功同位素比值质谱计，提高了同位素比值的测量精度；此后，H. C. Urey (1947) 发表的《同位素物质热力学性质》奠定了同位素分馏的理论基础，这样，稳定同位素在地质学中的应用才取得突破。不过，稳定同位素的地质研究主要是在最近二、三十年，随着质谱仪器测定精度的提高、化学分离技术的完善以及超净化实验室的建立才获得了迅速的发展。一门新兴的学科——稳定同位素地质已经形成。K. Rankaman的《同位素地质学》(1954)和《同位素地质学进展》(1963)；B. R. Doe的《铅同位素》(1970)；G. Faure和J. L. Powell的《铀同位素地质学》(1972)；B. A. Гриненко和Л. Н. Гриненко的《硫同位素地球化学》(1974)；G. Faure的《同位素地质学原理》(1977)；J. Hoefs的《稳定同位素地球化学》(1973, 1980)；Ю. А. Шуколюков主编的《地球演化早阶段放射成因同位素地球化学》(1983)等专著对稳定同位素地质领域内的研究成果作了较全面、系统的总结，这些标志着稳定同位素地质学作为一门独立的学科已经基本成熟。

我国稳定同位素的研究工作可追溯至三十年代，当时主要研究稳定同位素的性质和分布。稳定同位素的地质研究工作是从五十年代末和六十年代初才开始的，但所研究的同位素仅限于硫和铅。进入七十年代，特别是最近几年，随着引进国外新技术，国内陆续建立了一批具有先进水平的同位素地质实验室。研究成果不断有所发表，已多次(1975, 1982, 1984, 1986)召开了全国性的同位素地球化学学术讨论会，并出版了一些有关稳定同位素地质的专业参考书籍，如宜昌地质矿产研究所同位素地质研究室的《铅同位素地质研究的基本问题》(1979)；丁悌平的《氢氧

同位素地球化学》(1980);陈锦石和陈文正的《碳同位素地质学概论》(1983);张理刚的《稳定同位素在地质科学中的应用》(1985)。所研究的同位素已不仅限于氢、氧、碳、硫、锶和铅,而且对钕和稀有气体同位素,正在进行探索性的研究。但总的看来,我国稳定同位素地质研究程度与国际水平相比还有一定的差距,目前还基本上处于建立和完善分析方法,积累数据和积极进行地质研究的阶段。展望未来,任重道远,许多新的领域正有待我们去研究和探索。

在地质科学领域内,研究最多和在地质上应用最广泛的同位素是氢、氧、碳、硫、锶、钕和铅这七种元素的稳定同位素。氢、氧、碳和硫的同位素(^{14}C , ^3T 除外)通常称轻稳定同位素。锶(^{87}Sr), 钕(^{143}Nd)和铅(^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb)的同位素为放射成因的稳定同位素,它们在地质上的应用是在Rb-Sr, Sm-Nd和U-Pb同位素地质年代学研究的基础上发展起来的。这两类同位素在形成机理和同位素组成变化机理方面存在明显的区别,在地质应用上也有很多不同之处,但在研究成岩、成矿过程等这一些主要地质作用方面,这两类同位素又是密切地联系在一起的,已日益成为不可缺少的有效工具。对它们的综合应用,能够避免应用单一同位素所带来的局限性,使人们对地质作用的认识更深入、更全面、更符合客观实际。因此,本书将这七种元素的稳定同位素放在一起叙述,通过比较,对这些稳定同位素在地质应用上的个性与共性有一较完整的了解,从而更有利于稳定同位素地质研究工作的深入开展。

第二章 同位素的基本概念

第一节 同位素的定义

原子核内质子数相同而中子数不同的一类原子叫做同位素，它们同属于一个元素，在元素周期表中占据同一个位置，例如，硫有4种稳定同位素 ${}^{32}_{16}\text{S}$ ， ${}^{33}_{16}\text{S}$ ， ${}^{34}_{16}\text{S}$ 和 ${}^{36}_{16}\text{S}$ 。硫的四种稳定同位素的原子核都具有16个质子，因而它们都位于元素周期表第三周期第ⅥA族，它们的区别仅仅在于原子核中所含的中子数不同（变化于16—20之间）。同位素的质量数由元素左上角的数字表示，原子序数由左下角的数字表示。在目前的文献资料中，通常只标出左上角的质量数，如 ${}^1\text{H}$ ， ${}^{18}\text{O}$ ， ${}^{13}\text{C}$ 等。

一个元素可以由一种或几种同位素组成。有的元素仅由稳定同位素（如氧、硫等）或仅由放射性同位素（如铀、钍等）组成，有的元素则既含有稳定同位素又含有放射性同位素，如铷的2种天然同位素中， ${}^{86}\text{Rb}$ 是稳定同位素， ${}^{87}\text{Rb}$ 则为放射性同位素。本书的附录列出了目前已知的自然界中各种元素的同位素组成。自然界中仅由一种同位素组成的元素有铍、钠、铝、氟等21个元素，其余元素一般都由2—5种同位素组成，如硫有4种稳定同位素，氧有3种稳定同位素。据N. E. Holden和F. W. Walker (1972)指出，元素同位素数量最多的是锡，它有10种稳定同位素和16种放射性同位素。

第二节 同位素的分类

自然界的同位素按其原子核的稳定性可分为放射性同位素（不稳定的）和稳定同位素（稳定的）两大类。

一、放射性同位素

放射性同位素的原子核是不稳定的，它们能够自发地衰变成其他的同位素，最终转变为稳定的放射成因同位素。

目前已知的放射性同位素达1200种左右。由于大部分放射性同位素的半衰期较短，目前已知自然界中存在的天然放射性同位素只有60种左右。它们包括：①半衰期很长的放射性同位素，如 ^{238}U ， ^{87}Rb ， ^{147}Sm 等；②长寿命放射性同位素的衰变产物，如 ^{234}U ， ^{230}Th ， ^{226}Ra 等；③由自然发生的核反应而形成的放射性同位素，如 ^{14}C ， ^{10}Be ， ^{32}Si 等。大多数天然放射性同位素分别组成3个衰变系列，即铀系、钍系和锕系。有些放射性同位素，如 ^{87}Rb ， ^{147}Sm 等属单程衰变，它们不形成衰变系列。

二、稳定同位素

稳定同位素的原子核是稳定的，迄今还未发现它们能够自发衰变形成其他的同位素，如 ^{18}O ， ^{13}C ， ^{34}S 等都属于稳定同位素。自然界中，目前已知的稳定同位素有274种（其中包括一部分半衰期大于 10^{15}a 的放射性同位素），它们的原子序数都小于83，原子量低于209。

（一）原子核的稳定性

关于原子核的稳定性，可以用两个重要的规则来表征：

1. 对称规则 对称规则是指同位素的原子核中，中子数和质子数有近似的对称关系。除 ^1H 和 ^3He 核的中子数比质子数少以外，所有稳定同位素原子核的中子数都等于或大于质子数，即 N/Z 等于或大于1。在低原子序数稳定同位素的原子核中，中子数与质子数大致相等， N/Z 近于1，它们在图2-1中落在 $N/Z=1$ 这条线附近。在原子序数大于20的稳定同位素的原子核中， N/Z 总是大于1。当 $Z=82$ 时， $N/Z=1.54$ 。中子和质子的比值增加，是因为随着原子序数的升高，原子核中带正电的质子间的库仑斥力迅速加

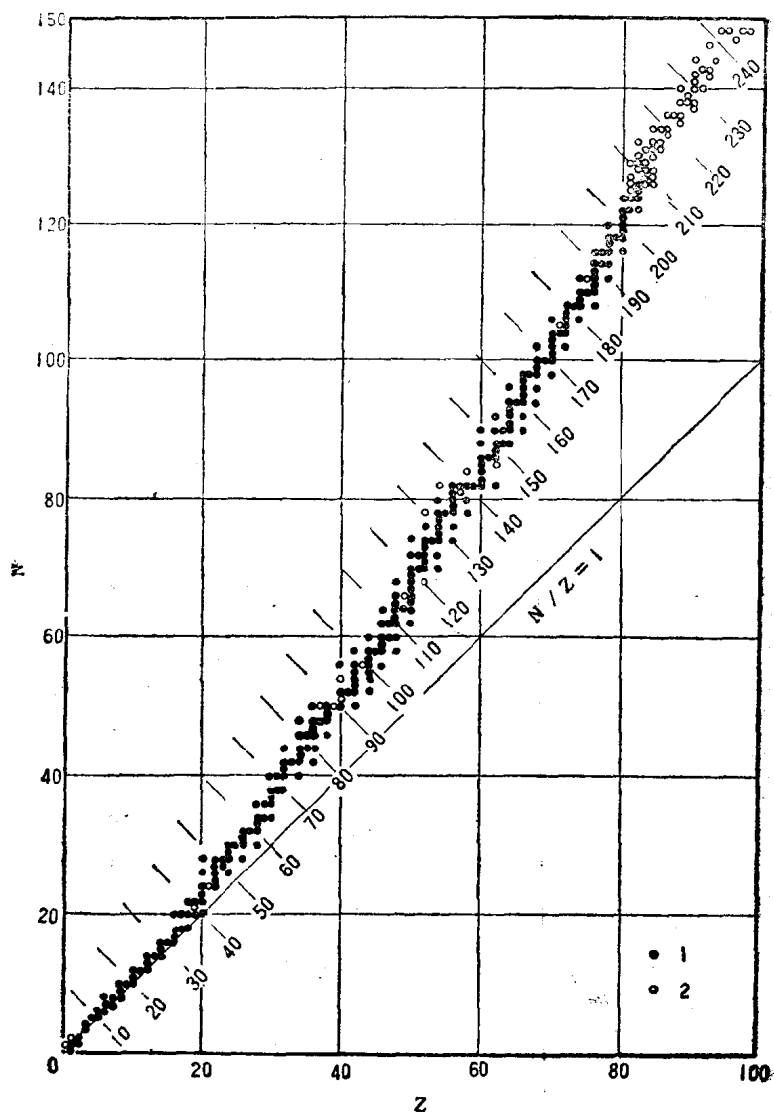


图2-1 同位素原子核中质子数与中子数的关系
(据K. Rankaman, 1954)

1——稳定同位素； 2——放射性同位素

大。为保持原子核的稳定,中性的中子比质子更多地进入原子核,从而愈来愈偏离图2-1中 $N/Z=1$ 这条直线,向N轴靠拢,原子核的稳定性也随之降低。

2. 偶-奇规则 (Oddo-Harkins规则) 偶-奇规则是指在稳定同位素的原子核中,原子序数为偶数的原子核比原子序数为奇数的原子核更为常见(表2-1)。在可能出现的4种组合中,最常见的是偶-偶型,它们特别稳定,最少出现的是奇-奇型。属奇-奇

表2-1 稳定同位素原子核类型及其出现频率
(据《稳定同位素化学》, 1984)

类 型 (Z-N)	质 子 数 (Z)	中 子 数 (N)	质 量 数 (A)	稳定原子 核 数	实际例子
偶-偶	偶数	偶数	偶数	165	$^{16}_8\text{O}$
偶-奇	偶数	奇数	奇数	53	$^{11}_5\text{B}$
奇-偶	奇数	偶数	奇数	50	$^{7}_3\text{Li}$
奇-奇	奇数	奇数	偶数	6	$^{10}_5\text{B}$

型的天然稳定同位素只有 ^2D , ^6Li , ^{10}B , ^{14}N , ^{50}V 和 ^{180}Ta 6种,它们最不稳定。偶-奇型和奇-偶型稳定原子核出现的频率大致相同。

(二) 稳定同位素分类

根据本身的形成机理, 稳定同位素可分为轻稳定同位素和放射成因稳定同位素两类。

1. 轻稳定同位素 在地质上, 应用最广、最重要的轻稳定同位素主要是氢、氧、碳和硫的同位素, 它们的同位素组成对成岩, 尤其是成矿作用的研究来说, 是十分重要的成因信息资料。在自然界的一些重要的地质体中, 这些元素的同位素组成常常变化很大, 变化甚至可达百分之几至几十(图2-2a—d)。同位素组成的明显变化主要是由这些元素在物理作用、化学作用和生物作用过程中产生的同位素分馏造成的(详见第三章)。

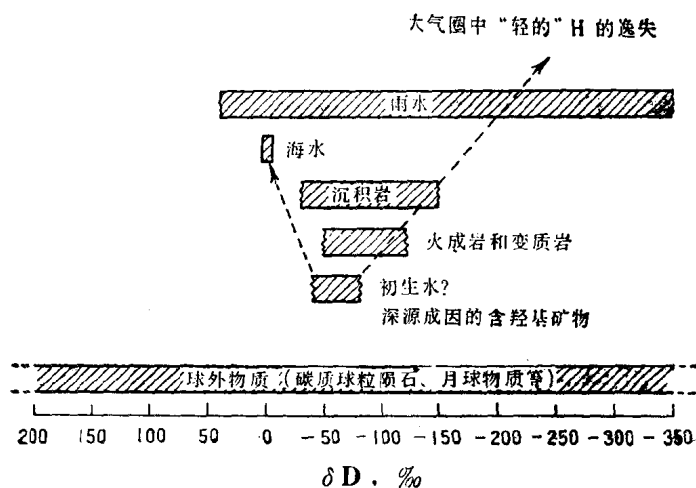


图2-2a 一些重要地质体的氢同位素组成
(据J. Hoefs, 1980)

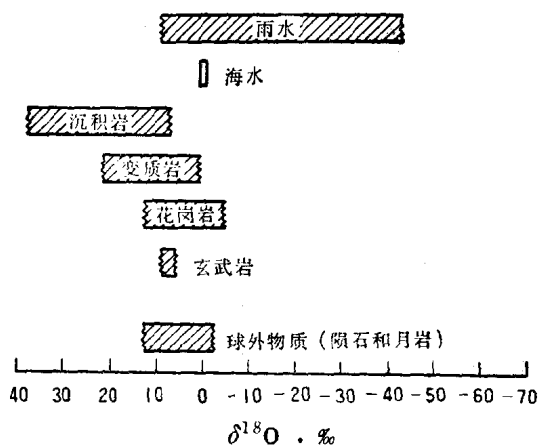


图2-2b 一些重要地质体的氧同位素组成
(据J. Hoefs, 1980)

氢、氧、碳、硫这些轻稳定同位素样品的同位素组成，通常采用 δ 值来表示。 δ 可定义为样品中两种稳定同位素的比值与标准样品中相应同位素比值的千分差，即