

油田水文地质学

邱世祥 编

西北大学出版社

油田水文地质学

邸世祥 编

西北大学出版社

内 容 简 介

本书着重论述了与油气勘探和开发有密切关系的古水文地质与现代水文地质的有关内容，另外，从学习这两部分内容及扩大知识面的需要出发，在之前又专门介绍了一部分有关的水文地质基础知识。

本书以高等院校石油地质学专业本科生为主要阅读对象，同时也适用于该专业研究生及油田开发专业本科生学习，并可供生产、科研部门从事石油勘探和开发工作的技术人员参考。

油 田 水 文 地 质 学

邸世祥 编

*

责任编辑 雷援朝

西北大学出版社出版发行

(西安市太白路)

新华书店经销 西安地图出版社印刷厂印刷

850×1168毫米 1/32开本 5.125印张 字数：140千

1991年2月第1版 1991年2月第1次印刷

印数：1—1000

ISBN 7-5604-0228-3/P·12 定价：3.50元

前 言

水文地质学是地质学的一个分支，它是研究地下水的形成条件、运动规律、埋藏和分布状况、动态变化特征以及用这方面的理论去寻找地下水和与其有关的矿产资源，并和地下水有害的一面进行斗争的一门学科。有关这方面知识的全面论述是水文地质专业有关课程的任务。本课程限于教学时数及专业要求，只围绕着与油气藏形成、保存和寻找等有关的一些主要水文地质问题加以论述。拟介绍以下三方面的内容：

一、水文地质基础知识。目的是使学生了解地下水形成和分布的一般规律，从而为从事地下水资源的寻找及进行有关地下水水害的防治工作，以及为学习本课程后两章的内容打下一定的业务基础。

二、古水文地质及其在油气勘探中的应用。着重介绍如何恢复水文地质发育历史与重建各发育阶段的水文地质条件，以及用它来判断油气的生成、运移、聚集和保存条件。

三、现代水文地质特征。着重介绍目前与油气有关的地下水，即油田水的水化学和水动力特征，并论述如何利用这些特征为油气藏的调查、勘探和开发服务。

目 录

前 言

第一章	水文地质基础知识	(1)
一、	地下水的起源	(1)
	1、 渗入水	(1)
	2、 凝结水	(1)
	3、 沉积埋藏水	(2)
	4、 初生水	(2)
二、	地下水的分类	(2)
三、	地下水的循环, 即地下水的运动状态	(4)
四、	地下水的物理性质和化学成分	(6)
	1、 物理性质	(6)
	2、 化学成分	(7)
五、	地下水分布的一般规律	(17)
	1、 洪积物(包括没入平原的部分)中地下水分布 的一般规律	(17)
	2、 冲积物中地下水分布的一般规律	(19)
	3、 湖积物中地下水分布的一般规律	(20)
	4、 滨海三角洲沉积物中地下水分布的一般规律	(20)
	5、 黄土中地下水分布的一般规律	(21)
	6、 裂隙水分布的一般规律	(22)
	7、 岩溶水分布的一般规律	(23)
	8、 热水分布的一般规律	(24)
六、	地下水的调查方法	(26)
	1、 水文地质测绘	(26)
	2、 水文地质勘探	(27)
	3、 水文地质试验	(27)
	4、 地下水的动态观测	(28)
	5、 其他新技术	(28)

第二章	古水文地质及其在油气勘探中的应用	(30)
一、	古水文地质研究的目的和主要内容	(30)
1、	目的	(30)
2、	主要内容	(30)
二、	水文地质历史的恢复和各水文地质旋回的划分	(30)
三、	古水文地质条件的研究	(34)
1、	古水动力条件	(34)
2、	古水化学条件	(53)
3、	地下水的年令	(59)
4、	古地温条件	(62)
四、	古水文地质条件与油气的关系	(79)
1、	与油气生成的关系	(79)
2、	与油气运移的关系	(80)
3、	与油气聚集的关系	(81)
4、	与油气藏保存的关系	(82)
第三章	现代水文地质特征	(83)
一、	现代水化学条件	(84)
1、	油田水的水化学分类	(86)
2、	油田水的地球化学作用	(98)
3、	油田水的水化学特征	(100)
4、	海、陆相油田水问题	(113)
5、	油田水水化学特征研究在油气勘探中的 实际意义	(116)
二、	现代水动力条件	(125)
1、	内循环式水动力条件	(125)
2、	外循环式水动力条件	(133)
结束语		(152)
参考文献		(153)
后记		(158)

第一章 水文地质基础知识

一、地下水的起源

地下水是指存在于地表之下组成岩石圈的岩石孔隙或裂隙中的水体。这种水体的起源可以是单一的，也可以是多成因的。就目前认为，主要有以下几种起源：

1. 渗入水

主要是指大气降水、地表水及人工水体渗入所形成的地下水。大气降水的渗入具有区域性特征，在时间上又具季节性分配特点。一般地讲，当含水层之上无稳定隔水层覆盖，大气降水又比较充沛时，这种补给方式具有较普遍的意义。地表水和人工水体的渗入，常只对其周围出露的含水层有作用，如河流下游淤积了大量砂体，使河床高出了地表，往往形成河水向两侧渗入的现象。十分清楚，渗入水对潜水和浅层层间水的形成有重要意义。当深部含水层出露地表时，在露头附近也可能受到补给，当然若这类含水层渗透性很好时，也可影响到较大的范围。

2. 凝结水

包气带沉积物中常含有一定量水汽，当温度不变时，水汽常从湿度高处向低处流动，湿度一定时，常从温度高处向温度低处流动。在水汽移动过程中，当水汽含量达到饱和或温度降低至小于“露点”温度时，水汽就会凝结成液滴，在重力作用下补给地下水。据研究，这种作用在高山、沙漠等昼夜温差大的地方非常明显。这是因为白天大气和沙土都吸热增温，夜间要降温，而沙土比大气散热快。因之，在夜间水汽必然向沙土中流动，使沙土中水汽含量达到饱和，凝结为水滴。据调查，我国内蒙沙丘中常存

在这种凝结成因的地下水。显然这种水一般只对饱气带水和潜水的形成有一定作用。

3. 沉积埋藏水

指跟沉积物一起堆积形成的水体。据观察，这种水体在淤泥中的量可达其体积的 40—50%，有时可达 80%，在砂中的量可达砂体积的 15—30%。这些水埋藏在地下后，遭受了复杂的变化而改变了原有的化学成分。深部层间水，包括油层水在内，主要属这种成因的水。

4. 初生水

这种水体主要包括两部分。一部分是在温度、压力增高的情况下，组成岩石的矿物发生变化时，从矿物晶格中脱出的水体，如蒙脱石向伊利石转化时，即可脱出水。据青柳宏一、浅川忠和巴斯特等研究，在相当于正常压实带的早成岩和中成岩早期阶段，主要靠机械压实作用，蒙脱石可脱出其中的 60% 水体（孔隙水及晶格中的第三、四两层结合水）。在相当于混合压实带的中成岩晚期阶段，主要因温度升高作用，又可脱出其中 30% 的水体（主要是第二层结合水）。在相当于紧密压实带的晚成岩作用阶段，最后脱出所剩的 10% 结合水（第一层结合水）。另一部分是岩浆水。它是一种高温高矿化度的饱气的活性热水溶液，是上地幔软流圈中挥发组分及易溶组分随岩浆上溢过程中分异出来的。它在地球深部层圈发生的一系列地质作用（花岗岩化作用、区域变质作用、火山喷发与热液成矿作用等）过程中均参与并起着重要作用。

从对油气藏形成所起作用大小而言，上述四种水体中，沉积埋藏水及脱出水起作用最大，渗透水在一定条件下也能起到促进或破坏的作用。这方面的内容将在后续部分中论述。

二、地下水的分类

实践说明，只有对一个地区地下水的埋藏条件、运动规律、

化学成分等进行系统整理和综合研究后，才有可能比较准确地了解其水文地质总貌，从而也才能比较好的开发和利用其地下水资源，比较好地利用这些资料寻找有关矿产，也才能比较有效地防止地下水水害。而地下水分类就是系统整理这些资料的方法之一。在分类时，必须考虑到地下水的各种特征，同时应使分类尽可能简单明了。目前比较好的分类是根据埋藏条件所作的分类，这是因为它常决定着水化学成分、补给迳流条件等一系列水文地质特征。把它作为分类的依据，实际也反映了其它方面的特征。

这里值得推荐的是 A·M·奥弗琴尼科夫 1949 年提出的分类。他根据埋藏条件首先把地下水分为上层滞水、潜水和自流水三个基本类型，进而考虑了含水介质条件又将每一类型水划分为孔隙水与裂隙水两个亚类。另外，他还分出了埋藏在多年冻土区与新火山区的几种特殊类型的地下水。

我们认为按埋藏条件，奥氏分类中的自流水似乎改为层间水更为恰当。另外，他在包气带水、潜水及自流水中都进一步分出孔隙水与裂隙水，这不仅显得繁琐，而更重要的是三类裂隙水的埋藏条件、分布规律基本相同，似乎作为一种特殊类型的水单独列出更符合实际一些。这样，地下水的类型比较科学地应先分为基本与特征两大类，前者进一步分为包气带水、潜水及层间水，后者可包括裂隙水、岩溶水、热水等（图 1）。

包气带水——指存在于包气带中局部隔水层之上的重力水。一般分布范围不广，补给区与分布区一致。由于最靠近地表，受气象和水文因素的影响明显。主要由凝结水和渗入水补给。包括土壤水、上层滞水等。

潜水——埋藏在地表之下第一个稳定隔水层之上的重力水。由于它无隔水顶板，因此受气象和水文因素的影响也比较明显。主要由渗入水补给，局部地区凝结水亦可补给。

层间水——潜水之下两个稳定隔水层之间的地下水。按埋藏深度，即它跟渗入水的联系程度，进一步分为浅层层间水和深层

层间水两部分。前者跟渗入水关系比较密切，沉积埋藏水与渗入水发生比较强烈的交替；后者则主要由沉积埋藏水与矿物脱出水所构成。油层水主要应属深层层间水。

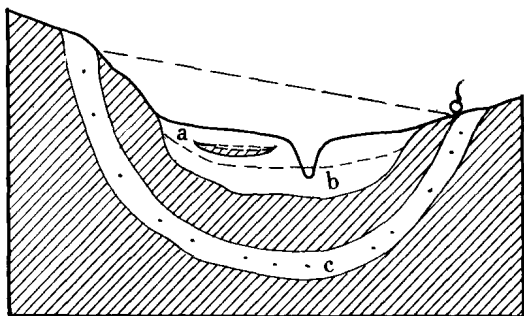


图 1. 地下水基本类型示意图(据王大纯等, 1980, 略有修改)

a—包气带水、b—潜水、c—层间水

裂隙水、岩溶水及热水等特殊类型地下水的埋藏分布状况，后面第五节中将要叙述，这里不再重复。

三、地下水的循环，即地下水的运动状态

跟地表水、大气水一样，地下水也处在运动循环之中。所不同者只是由于它处在岩石的孔隙或裂隙之中，通道细小，流速一般非常缓慢。对补给区与泄水区高差接近的含水盆地，特别是其凹陷深部地区更是这样。这一方面是因为所具势差很小，另一方面是其中的含水层经受了高负荷、长时期的压实及其他成岩作用的影响，孔隙更为细小，以及其中的渗透水还将受到相反方向沉积水的抵挡作用所致。正因为如此，故在凹陷地区，地下水往往处于停滞状态。

据研究，地下水的运动常为渗流运动，其运动规律一般均服从于达西层流定律。这个定律是 19 世纪首先由法国水力学家达西通过多次渗滤试验得出的。他是根据图 2 装置先由下向上用水

将其中置入的沙子饱和，再由上向下进行渗滤试验的。

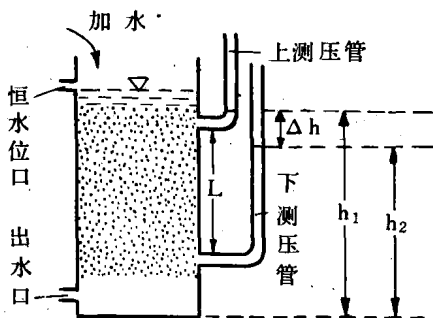


图 2. 达西定律试验装置示意图

试验结果得出：

渗滤速度 v 与水力坡度 I 及水的密度 d 成正比，与水的粘度 μ 成反比，即

$$v \propto I \frac{d}{\mu}$$

所以 $v = KI \frac{d}{\mu}$

$$\text{已知 } I = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

把 h_1 、 h_2 换算为压力，则 $P_1 = h_1 d$ ， $P_2 = h_2 d$ ，即

$h_1 = \frac{P_1}{d}$ ， $h_2 = \frac{P_2}{d}$ ，将这些代入以上公式，则

$$I = \frac{P_1 - P_2}{Ld}$$

$$v = K \frac{P_1 - P_2}{L\mu}$$

因为 $Q = vFt$

$$\text{所以 } Q = K \frac{(P_1 - P_2)Ft}{L\mu}$$

$$K = \frac{Q\mu L}{(P_1 - P_2)Ft}$$

式中: K —比例系数, 即渗透率; h_1 —岩样前测压面高度; h_2 —岩样后测压面高度; Δh —渗滤 L 距离的水头损失; P_1 —岩样前压力; P_2 —岩样后压力; Q —流量; F —岩样横截面积; t —渗流时间。

正是由于这一定律是达西首先通过试验发现的, 故人们称之为达西定律, 并将渗透率的单位规定为达西(d)。其含义是: 粘度为 $0.001\text{Pa} \cdot \text{s}$ 的 1cm^3 的流体, 通过横截面为 1cm^2 的孔隙介质, 在压力差为 0.098MPa , 1s 钟内流体通过的距离恰为 1cm , 此时, 该孔隙介质的渗透率为 1d 。由于这个单位较大, 常使用千分之一 d , 即 md 。换算为当前规定使用的单位, $1\text{md} = 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

上述公式即石油地质学教材中液体通过岩样渗滤时计算渗透率公式。

前面提到, 岩石最初沉积时其孔隙中同时会有水体保存下来, 这些水体在埋藏过程中及埋藏之后, 还将受到其他水体的影响。对含水砂层来说, 在埋藏过程中, 因其与上、下相邻的泥质岩层在岩性上有明显差异, 决定了泥质岩压实的厉害, 其中较多的水体被压出后势必向上、下相邻的含水砂层中排替。这些含水砂层如果因构造变动升起并出露地表时, 则在露头点将会受到大气降水或地表水的排替。人们把这种水体之间的相互排替, 称为水的交替。

四、地下水的物理性质和化学成分

1. 物理性质

包括比重、粘度、透明度、颜色、导电性等。对一般天然水来说, 正如大家所知的, 纯水在 4C 时的比重为 1 , 粘度为 0.001

Pa·s,透明,无色,不导电。值得注意的是油田水,特别是其中的油层水,由于常比纯水有较高的含盐量,因而比重常大于1,粘度大于0.001 Pa·s,透明度不好,稍带些颜色,可以导电。

2. 化学成分

分两部分介绍,第一部分介绍主要化学成分,第二部分介绍影响化学成分变化的一些主要作用。

(1) 主要化学成分

地下水的化学成分十分复杂。据研究自然界已发现的100多种元素,有一半以上都在地下水中分析出过。归纳起来,主要有以下五组成分:

1) 盐类离子成分——其中含量比较高者有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Na^+ (常包含 K^+ 在内)、 Ca^{++} 、 Mg^{++} 等离子。

Cl^- ——由于自然界的简单氯化物一般溶解度很高,所以其在地下水中的含量可以变化很大。这种变化常与矿化度的大小相对应。在高矿化水中,其含量是所有阴离子中最高的。 Cl^- 在地下水中的含量增高,常跟氯盐丰富的地层(如盐岩矿床、海相与泻湖相含盐沉积)或气候干旱的内陆地区及地下水迳流条件很差有联系。有时人工污染也可提高地下水的 Cl^- 含量。

SO_4^{2-} ——自然界中硫酸盐的溶解度相差较大,其中石膏(CaSO_4)的溶解度很小,而硫酸钠、硫酸镁的溶解度却比较大。因此,在阳离子以 Ca 为主的水中, SO_4^{2-} 离子的含量通常不大,但在以 Na^+ 、 Mg^{++} 为主的水中, SO_4^{2-} 离子可以比较高。在高矿化水中, SO_4^{2-} 根离子含量仅次于 Cl^- 离子。在硫酸盐沉积地区、硫化物矿床氧化带和火山活动地区,地下水中富含 SO_4^{2-} 根离子。人工污染也可以提高 SO_4^{2-} 根离子含量。在油田水中,由于生物化学作用及碳氢化合物的参与反应,使 SO_4^{2-} 根离子还原成 H_2S 而失去,因此,一般情况下,含 SO_4^{2-} 根离子不多。

HCO_3^- 及 CO_3^{2-} ——碳酸盐在岩石中分布甚广,地下水中的 HCO_3^- 及 CO_3^{2-} 离子也普遍存在,但一般含量都不大,这主要是

因为 Ca^{++} 、 Mg^{++} 碳酸盐的溶解度都比较小，只有在富含 Na^+ 的地下水中，由于 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 的溶解度比较大，故 HCO_3^- 和 CO_3^{--} 根离子才可能有较大的含量。因之，在低矿化淡水中， HCO_3^- 及 CO_3^{--} 根离子的含量，相对于其它阴离子才可能占优势。地下水中 HCO_3^- 、 CO_3^{--} 的相对含量与水的酸碱性质关系密切。在阴离子中它们的含量占优势时，水常为中性至弱碱性 (PH7-9)，甚至可成为碱性。一般把 HCO_3^- 与 CO_3^{--} 根离子的总量称为碱度，常用 mg 当量 / l 表示。

Na^+ (常包含 K^+ 在内) —— 在地下水中， Na^+ 分布很广，含量变化甚大，一般其大小与矿化度大小有一致关系。在富含碱性长石岩石分布地区，它可以有较高的相对含量。此外，在干旱内陆盆地及海相含盐沉积层的地下水中，以及高矿化的油田水中， Na^+ 含量在阳离子中一般都占绝对优势。由于水中 K^+ 比 Na^+ 常少很多 (K^+ 易参与次生矿物的形成，又常为植物及土壤所吸收)，分析时又常合在一起，因之，通常都以 Na^+ 含量表示，严格说来，是 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量。

Ca^{++} 、 Mg^{++} —— 在低矿化水中，它们有相对较高的含量，尤其是 Ca^{++} 。在沉积岩区，特别是石灰岩、白云岩分布地区， Ca^{++} 、 Mg^{++} 含量丰富。

总矿化度 —— 指地下水中各种离子、分子和化合物的总量，常以 g / l 表示。通常用在 110℃ 下把水蒸干所剩残渣的量来计量。应该指出：这只是一个大致相当的量，因为水中有挥发性物质时，蒸干过程中会使矿化度减小，若干涸残渣含结晶水时，又会使矿化度加大。由于蒸干过程中 $2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{--} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ ，说明两个 HCO_3^- 离子，在蒸干中只生成一个 CO_3^{--} 离子。故在用所有离子量计算总矿化度时， HCO_3^- 的量一般只取其所测数值的二分之一。

油田水，特别是其中的油层水一般属高矿化度水。

2) 有机质成分 —— 包括自然界生物遗体分解进入水中的成分及越来越多的人为因素 (污水、有机农药的使用等) 进入水

中的成分。与油气有联系的油田水中，其有机质主要为前一种原因引起的。因此，从找油角度出发，这一部分有机质对我们将更直接一些。据研究，由自然界生物遗体分解进入水中，且与找油有较大关系的有机质成分主要有苯、酚、环烷酸、脂肪酸及铵等。有关具体内容将在第三部分中叙述。

3) 气体成分——溶解于地下水中的气体，常有 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 H_2S 、烃类气体(包括 CH_4 与重烃气体)及 He 等。它们可以来自各种成因，通常 O_2 、 CO_2 和 N_2 主要来自大气，是跟降水与地表水一起渗入地下的。因之，其含量高时，一般反映处于氧化环境。含有 H_2S 、生物成因的 N_2 、重烃及 He 气的水，往往处于深部还原环境。主要含干气甲烷的水，很可能与经受生物化学作用的浅层环境有关系，也可能与煤成气或高温裂解的生气环境有关。而大量 CO_2 气的存在，可能与变质环境有关。

油田水中一般富含 H_2S 及重烃气体，有时生物成因的 N_2 气及放射性 He 气的含量也可以比较高。有关这方面的内容后面还要介绍。

4) 同位素成分——人所共知，每一种元素，其原子核中的质子数是一定的，此质子数即为它的原子序数。原子的原子量以其核中质子数及中子数的总和表示。具有相同原子序数但原子量不同的某一元素的几种原子就是该元素的同位素。自然界，包括地下水中的元素常有多种同位素，而目前研究比较深入的是 H、O、C 等元素的同位素。据研究，H 同位素有三种，其中 H^1 与 H^2 属稳定同位素， H^3 是放射性同位素。有关它们的原子量及在地球物质中的相对丰度等资料见表 1。

表 1. H 同位素的性质(据 N·E·Holden 等, 1972)

名称	符号	原子量	同位素相对丰度(%)	半衰期(a)
氢	H	1.00787522	99.985	稳定
氘	D	2.0141022	0.015	稳定
氚	T	3.01700	10^{-18}	12.33

O 同位素亦有三种，即 O^{16} 、 O^{17} 与 O^{18} ，它们的原子量分别为 15.9994、16.999133、17.99916，相对丰度分别为 99.756、0.039、0.205。

H、O 同位素的相对含量一般是以海洋水的 D/H 和 O^{18}/O^{16} 的平均比值作为标准(即 SMOW)而得到的千分率偏差表示之。前者用 δD ，后者用 δO^{18} 表示它们的相对含量，即

$$\delta D (\%) = \frac{(D/H)_{\text{样品}} - (D/H)_{\text{标准}}}{(D/H)_{\text{标准}}} \times 1000$$

$$\delta O^{18} (\%) = \frac{(O^{18}/O^{16})_{\text{样品}} - (O^{18}/O^{16})_{\text{标准}}}{(O^{18}/O^{16})_{\text{标准}}} \times 1000$$

C 同位素也是 3 个，其中 C^{12} 、 C^{13} 为稳定同位素， C^{14} 为放射性同位素。稳定同位素 C^{12} 的原子量为 12， C^{13} 的为 13.0033551，二者的相对丰度分别为 98、89、1.11。天然物质中碳同位素组成通常用 δC^{13} 表示，即

$$\delta C^{13} (\%) = \frac{(C^{13}/C^{12})_{\text{样品}} - (C^{13}/C^{12})_{\text{标准}}}{(C^{13}/C^{12})_{\text{标准}}} \times 1000$$

式中 $(C^{13}/C^{12})_{\text{标准}}$ 采用美国南 Carolina 州白垩系 Pee Dee 组美洲拟箭石化石的测定值作为标准(即 PDB 标准)。

实践证明，根据稳定同位素资料，可以比较有效地确定地下水的起源与形成过程。据测定，凡是与海洋环境有关的有机物，重同位素 C^{13} 都比较富集，而与陆相环境有关者则相对要低一些。如海相生物、海相类脂物及海相原油的 δC^{13} 分别为 $-22 \sim -8$ 、 $-22 \sim -17$ 及 $-30 \sim -20$ ，而陆生植物、陆相类脂物及陆相原油的 δC^{13} 分别为 $-32 \sim -22$ 、 $-32 \sim -27$ 及 $-33 \sim -25$ 。同样，与海洋环境有关的地下水中含重同位素 C^{13} 比陆相环境地下水中也相对要高一些。另外，据测定，在与油田无关的潜水、油田上方的地下水、油田水及凝析油田水中，甲烷的碳同位素含量也有明

显不同 (表 2)。据此也可判断地下水跟油气有无联系。

表 2 水中 δC_{13} 变化范围值(据刘崇鑫, 1987)

地下水类型	与油气无关的潜水	油田上方的地下水	油田水	凝析油田水
δC_{13} (%)	-86~-62	-58~-47	-49~-28	-25~-15

对于大气降水来说, δD 与 δO^{18} 之间的座标关系式为 $\delta D = 8\delta O^{18} + 10\%$ (此直线关系式是以 SMOW 为标准的), 所绘的关系线如图 3。

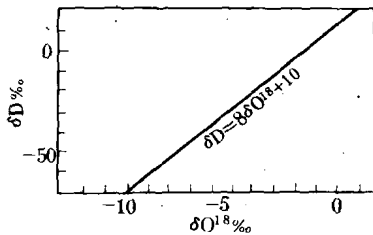


图 3 大气降水中 δD 与 δO^{18} 关系图(据克雷格, 引自杨成田, 1981)

图 3 是克雷格根据大量资料绘制的, 文献中称该直线为克雷格直线。若测出地下水中 δD 与 δO^{18} 的比值在此线附近, 则说明此水为大气降水成因。

几种同位素化合可构成同位素分子, 如 H、O 同位素结合可构成 H 的同位素水分子 (O 的同位素相同) 与 O 的同位素水分子 (H 的同位素相同)。尽管都是水分子, 但它们之间的物化性质并不完全相同。如 H_2O^{16} 、 HDO^{16} 及 D_2O^{16} 三个 H 同位素水分子中的 H_2O (普通水) 与 D_2O (重水), 其物理性质就不相同 (表 3)。当水蒸发时, D_2O 相对不易蒸发逸散, 因此, 强烈蒸发作用的水中, 含 D 较多。天然水中, 降水与河水含 D 量最少,