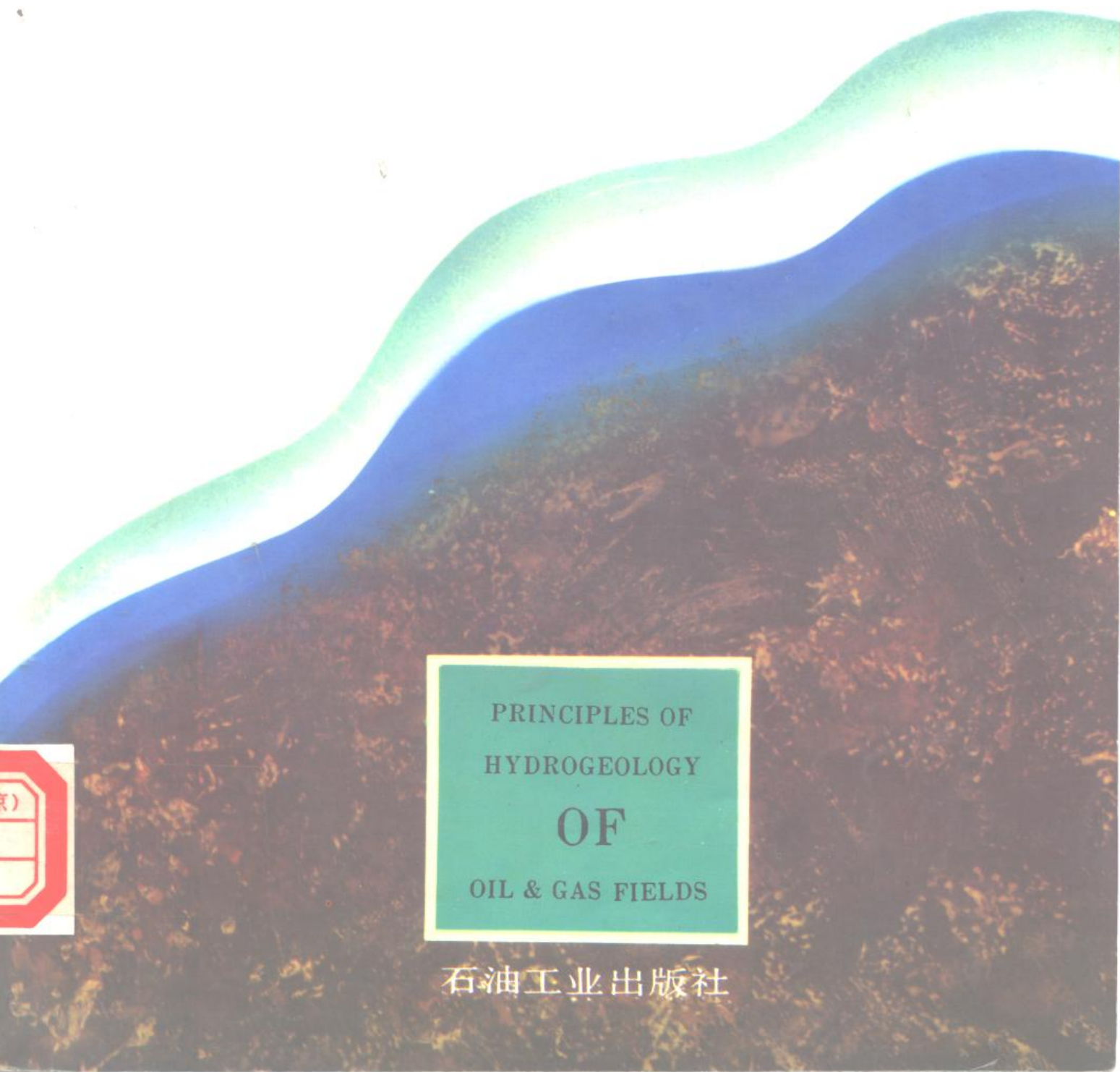


油气田水文地质学原理

刘方槐 颜婉荪 编著



PRINCIPLES OF
HYDROGEOLOGY
OF
OIL & GAS FIELDS

石油工业出版社

070474

油气田水文地质学原理

刘方槐 颜婉荪 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书在介绍了一般水文地质学原理和水化学原理的基础上,着重阐述了古水文地质分析方法,水文地质条件对油气运移及油气藏形成、保存和破坏的影响、油气调查勘探和开发时水文地质资料的搜集和应用以及今后需要进一步研究的问题等。

本书可作为高等院校石油地质专业的教材,也可供水文地质、地球物理勘探、测井、油田开发、油藏工程等有关专业的师生以及从事水文地质和石油地质科研、生产的技术人员参考。

油气田水文地质学原理

刘方槐·颜婉荪 编著

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京海淀昊海印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16开本17¹/₂印张423千字 印1—1,500

1991年4月北京第1版 1991年4月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0506-9/TE·484

定价: 5.70元

前 言

本书编写大纲主要根据刘方槐1983和1984年分别受聘在华东石油学院和西南石油学院讲授《油气水文地质学》一课的教学大纲，并参阅了苏联和美国70年代以来出版的油气水文地质方面的书籍和刊物，特别是近20年来我国有关这方面的资料写成的。

为了使《油气田水文地质学原理》理论更好地结合我国实际，在编写过程中注意了搜集我国实例，因此，对了解我国油气田水文地质特征有很大帮助。

书中仅涉及一个非法定单位——当量。它等于法定单位 mol 除以离子价数。由于当量在水化学和水文地质研究中使用极其广泛，而且短期内还不可能完全杜绝，故本书仍继续援用。

本书第一章、第二章由西南石油学院勘探系副教授颜婉荪编著，其余均为四川石油管理局地质勘探开发研究院高级工程师刘方槐所编著。全书插图由陈瑞芬完成，特此致谢。

由于编者水平所限，书中会存在一些缺点和问题，恳请读者批评指正。

目 录

绪论	(1)
参考文献	(8)
第一章 水文地质学基础	(9)
第1节 地下水存在的形式及其分布	(9)
第2节 地下水的起源	(10)
第3节 地下水的分类	(13)
第4节 潜水	(13)
第5节 层间水	(19)
参考文献	(28)
第二章 水化学基础	(29)
第1节 天然水的物理性质及化学成分	(29)
第2节 地下水化学成分的形成作用	(34)
第3节 水化学分析及其表示方法	(40)
第4节 水的化学分类	(46)
参考文献	(54)
第三章 古水文地质研究方法	(55)
第1节 概述	(55)
第2节 水文地质旋回的划分	(55)
第3节 水交替次数计算	(60)
第4节 古水动力条件的数学模拟研究	(66)
第5节 按给水系数定量评价古水动力条件	(74)
第6节 碳酸盐岩地层古水动力条件的研究	(78)
第7节 古水化学条件的研究方法	(81)
第8节 古水文地质条件与油气运聚	(88)
第9节 古水文地质研究中存在的问题	(91)
参考文献	(94)
第四章 油气运移、聚集及油气藏形成、保存和破坏的水文地质条件	(96)
第1节 引言	(96)
第2节 甲烷在水中的溶解度	(96)
第3节 烃类运移的方式和相态	(99)
第4节 天然气自地层水中析出的条件	(105)
第5节 水动力条件与油气运聚	(115)
第6节 水动力圈闭油气藏	(127)
第7节 油气藏保存和破坏的水文地质条件	(138)
参考文献	(145)
第五章 调查勘探油气田时水文地质资料的搜集和应用	(147)

第1节	水文地质调查方法	(147)
第2节	油气田钻探时水文地质资料的搜集	(150)
第3节	水化学指标	(151)
第4节	水中溶解气	(162)
第5节	水溶性有机质	(171)
第6节	温度指标	(178)
第7节	含油气远景评价	(182)
参考文献		(197)

第六章 开发油气田时水文地质资料的搜集和应用 (200)

第1节	油气田开发设计时水文地质资料的搜集和应用	(200)
第2节	按水文地质资料对生产井水淹进行监测	(206)
第3节	油藏注水开发时水文地质资料的应用	(214)
第4节	在人为因素影响下油气藏的移动和再形成	(223)
第5节	油气藏中的凝析水	(229)
参考文献		(239)

第七章 我国油气田水文地质学中需要进一步研究的问题 (241)

第1节	在油气田水文地质研究中数学地质方法的应用	(241)
第2节	含油气盆地中的异常地层压力	(247)
第3节	关于区域性地下水流动的托斯观点简介	(258)
参考文献		(270)

绪 论

一、油气田水文地质学的涵义, 内容、和其他学科的关系

油气田水文地质学是研究含油气地区地下水的科学, 即研究该地区地下水的形成条件、运动规律、分布及埋藏条件、动态变化规律, 以及研究地下水在油气运聚、油气藏形成、保存和破坏、油气勘探和开发过程中的作用等。因此, 油气水文地质学研究的范围极其广泛, 所以它与其他学科的关系也是非常密切的^[1]。

油气田水文地质学是水文地质学、更是地质学的一部分, 与地质学的发展有着密切的联系; 尤其是与地貌学、第四纪地质学、构造地质学、矿物岩石学及矿床学等学科的关系非常密切。在地壳上部进行着风化、冲刷、淋滤、成壤、岩溶、成岩、成盐、表生成矿等作用; 在地壳深部进行着岩浆、变质、内生成矿、成岩等作用。在这些作用中都有地下水参与, 并对这些作用产生各种不同的影响^①。因为地下水是埋藏在地壳中的水, 即埋藏在地下岩石空隙之中, 显然, 岩石空隙的多少、大小、矿物成分、形成年代以及所经历的构造变动等等, 都对水质、水量有着巨大影响。尤其是水的化学成分更和岩石的成分有关。经常循环在岩石孔隙和裂缝中的地下水, 由于长期与岩石相互作用, 不仅改变了岩石的性质, 同时也改变了地下水本身的物理性质和化学成分^[1]。水是自然界中物理、化学及生物等性质非常独特的物质, 不可能在实验室人工合成。例如, 不少矿泉能治病, 人们多次尝试人造矿水均以失败告终^[2]。所有这一切说明天然水(包括地下水)的性质是非常复杂的, 是在特定的地质环境中形成的。因此, 解决有关油气田水文地质问题时, 必须很好应用上述学科知识, 必须考虑到地下水所处的周围环境, 即构造、岩性和地貌等条件, 决不能脱离周围的地质环境而孤立地去解决水文地质问题^[1]。

由于地下水也属于整个天然水系中的一部分, 因而它与地表水、大气水有着密切的联系。据统计, 地下水约占地表水(海洋、湖泊、沼泽、河流、冰川等)的万分之一, 大约为 $14 \times 10^4 \text{ km}^3$, 是水圈的组成部分, 并参与自然界中水的循环。所以油气田水文地质学与研究地表水的水文学及研究大气水的气象学有关。

油气田水文地质学是水文地质学的一部分, 是利用水文地质学的基本原理解决油气地质学方面的问题, 故在本书的第一章和第二章中分别对水文地质基础和水化学基础作了一些介绍, 目的在于为后面讲解油气田水文地质学原理打下基础。

今天在地下发现的油气藏, 实际上是在地质历史发展过程中, 经过若干变化的最终结果。要追溯其演变过程, 就必须研究促使其演变的古代的水文地质条件, 即古水文地质条件。本书也将这部分内容列入。古水文地质条件的研究是建立在岩相古地理, 古构造和古气候研究的基础上的, 故同这些学科的关系也很密切。

研究地下水在油、气藏形成、保存和破坏过程中的作用, 在勘探、开发油气田时合理利用地下水以及消除地下水给油气勘探、开发工作带来的影响, 都会涉及到石油地质学、油气

①沈照理等, “水文地球化学基础”, 武汉地质学院试用教材, 1983年。

田调查和勘探以及油气田地下地质学等学科的原理和方法。

油气田水文地质学与数学地质的关系也很密切。要使油气田水文地质研究从定性走向定量,必须应用数学地质方法。

另外,油气田水文地质学与水力学、地下水力学、钻井工程、采油工程、测井、物探等学科也都有一定联系。

二、油气田水文地质学的发展简史及目前国内外的研究进展情况

油气田水文地质学是水文地质学的一个分支学科,是在水文地质学发展的基础上发展并独立而成的,因此,在研究油气田水文地质学的发展历史时,必须从研究水文地质学的发展历史开始。

水文地质学是研究地下水的科学,是劳动人民与地下水进行斗争(包括利用地下水和排除其危害)的经验总结。水文地质学形成一门独立的科学是比较晚的。但关于地下水方面的知识,在国外和我国很早以前就有了。约在公元前5~4世纪期间成书的、我国也是世界上最老、内容相当丰富的矿产地质文献——《山海经》中,就有了关于地下水的记载。例如经中写道“又东五百八十里曰南禺之山。其上多金玉,其下多水。有穴焉,水出。辄又夏乃出,冬则闭”(《南山经》);“积石之山,其下有石门,河水冒以西流”(《西山经》)^[1]。经中还记载了其他许多丰富的科学材料。所有这些关于利用自然的思想,都远远超出了同时期其他国家的水平。这些思想在欧洲几乎在文艺复兴时期,才陆续出现^[1]。

据报道^[2],很早以前美洲大陆上的印第安人就将已知的几处含油气的泉水告诉了早期的美国移民。早期美国移民的村落通常都靠近易取得盐的盐泉沼泽地。这些泉水常被石油污染,当时人们为了挖井以获取更多的盐,但结果却发现了人们不期望得到的油和气。在阿巴拉契亚山地区,许多盐水泉沿背斜顶部出现。这说明在美洲大陆发现以前,当地的印第安人就已发现地下水同油气密切相关。

由于人们生活和生产的迫切需要,促使人们在探寻地下水方面的技能不断发展。特别是在缺少地表水的干旱地区,取水技能的发展更快。例如在我国西北新疆地区,据记载至少在公元前300~200年间,就能开凿每个长达数十公里的“坎儿井”,将天山山麓地区靠高山冰雪融化补给形成的地下水引向盆地内部用水地点和农业耕作区。我国新疆的劳动人民就是靠这种办法把干旱的沙漠变成了绿洲。

我国四川自贡地区的劳动人民,很早以前就发现了盐水泉,并以此作为依据,采用简陋的竹木工具凿井、汲卤和制盐,井深可达数百米。据南王象之《舆地纪胜·富顺县古迹》记载:“梅(泽)本夷(彝)人,在晋太康元年(公元280年)因猎,见石上有泉,饮之而咸,遂凿石至三百尺,咸泉涌出,煎之成盐,居人赖焉”。《富顺县志》中说:“自流古井在今富义厂荣溪水滨,相传井水自然流出。”吴鼎立在《自流井风物名实说》中考证古自流井遗址在“新桥下,下桥上,名为火井沱。河岸有井,自流盐水,故曰自流”。看来,自贡地区原名“自流井”这一名称的由来可能与自流古井有关^[3]。另外,《川盐记要》中记有“西蜀去海远,而凿井求盐,人无淡食之忧”^[4]。

清朝时期钻井取卤的深度发展较快,乾隆三十年(公元1756年)井深超过530m,已钻到了香溪群下部的地层。1820年左右,盐井加深至800~900m,开始生产中、下三叠统嘉陵江组五段以上的黑卤,1835年盐井深度已突破千米大关,大安区的兴海井井深达到1001.4m。在钻取盐卤的同时,还获得了天然气,而且气产量随深度增加而显著加大。1000多年以来,

在自流井气田上钻了数以万计的盐水井和气井,据《川盐记要》所载,至1915年废井就有11800口。根据历年来天然气煎盐锅口数资料不完全统计,嘉三段以上各气层累计采气量已达 $300 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上^[4]。

所有这些说明了我们的祖先在很久以前就懂得了如何利用地下水,并在钻井、采气等方面走在世界各国的前面。法国和意大利在12世纪才相继钻成自流井,至少比我国晚1000多年^[5]。可惜这些光辉的成就未能在以后继续得到提高和发展。其原因主要是由于我国科学技术的发展,其中包括地下水科学的发展,长期在封建主义的统治下,再加上近百年帝国主义的侵略和压迫,因而大大地落后了。只有在解放后,我国摆脱了封建主义和帝国主义的侵略和压迫之后,才给水文地质学的发展创造了良好的条件^[1]。

随着国民经济建设的需要,各部门都先后建立了专门机构从事水文地质工作,到1982年为止,全国总计约有水文地质技术人员(包括科研、生产和教学)10000人左右^[5]。

据阎锡屿等(1982年)研究^[5],解放30多年来,我国水文地质科学的发展,大致经历了以下三个阶段:

第一阶段(50年代)。主要是学习国外的经验,从无到有的建立我国的水文地质事业,主要是配合一些铁路和大、中型水库建设进行了水文地质工程地质勘察研究,并在广大地区先后开展了中比例尺的区域水文地质普查和一些其他专门性的水文地质工作,如工矿企业和大、中城市供水水文地质调查工作。

第二阶段(60年代)。由于我国自然环境和地质、水文地质条件错综复杂,生产建设中新的问题不断出现。为了发展农业,在我国东部的几个大平原,如黄淮海平原等,陆续开展了与农田灌溉有关的农田水文地质和改良盐渍化土壤的水文地质工作。为了发展牧业、消灭缺水草场,60年代初期曾以生产、科研和教学三结合的方式在内蒙古进行过大规模找水工作。以后为了配合内地建设需要,广泛开展了在山区基岩中寻找水源的供水水文地质工作,解决了部分缺水山区人畜饮用水困难问题。

第三阶段(70年代以后)。在区域水文地质方面完成了 $1:200000 \sim 1:500000$ 的水文地质普查约 $350 \times 10^4 \text{km}^2$,填补了很多空白地区,在过去一直认为干旱缺水的地区(如河西走廊北山地区)找到了一定数量的地下水源。目前我国除青藏高原、沙漠腹地、大片森林覆盖地区和部分高山地区约 $260 \times 10^4 \text{km}^2$ 面积尚未开展工作外,其他地区基本上都有了系统的区域水文地质资料。全国大部分省(市、区)都编制出版了该省(市、区)的综合水文地质图件。特别是《中华人民共和国水文地质图集》和说明书的正式编制出版,标志着中国区域水文地质研究已达到了一个新的水平,为今后的水文地质区划和研究工作打下了良好的基础。

由于不合理的使用和过量开采地下水资源,70年代以后一些地区相继出现了较大面积的区域地下水位下降,不少大、中城市地下水供水水源不足,华北一些著名的大泉,如济南的趵突泉和太原的晋祠泉涌水量日益减少。

据报道^①,我国水资源年均总量为 $28000 \times 10^8 \text{m}^3$,枯水年份还要少,约 $24600 \times 10^8 \text{m}^3$,人均占有水量才 2380m^3 ,约为世界人均占有量的1/5。目前,全国一年大致缺水 $500 \times 10^8 \text{m}^3$ 。建国以来,全国城市人口增长很快,城市供水总量增长了7倍,达到 $3223 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。对232个城市的调查表明,有156个城市存在不同程度的缺水,日缺水量达 $880 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

①《人民日报》,1986年4月29日。

另外,还有地面下沉问题、地下水污染问题等,都引起了有关部门的极大重视,目前已经或正在研究解决。

解放后完成的上述大量水文地质工作,对我国国民经济建设和科学研究,具有极为重大的意义,对促使我国水文地质科学的进一步发展起了很大作用。

在国外,例如苏联,十月革命后,由于社会主义建设的需要,水文地质学发展也很快,目前已经发展成为若干门独立的实用学科。油气水文地质学就是其中之一。60年代及其以后,苏联公开出版有关油气水文地质学方面的专著和文章都是比较多的,说明油气水文地质学在苏联发展较快。在这方面,B.A.苏林、A.A.卡尔采夫、Г.М.苏哈列夫等的贡献较大。苏林在1935年著了《苏联油田水》一书,书中对苏联大量油田地下水资料进行了第一次系统的整理,为以后继续研究苏联油田水,打下了良好的基础。在他后来的著作,如《天然水系中的油田水》、《油田水文地质学》中,也阐述了很多关于油田水的重要理论。这些理论在研究油田地下水方面具有很大意义,对我国也有一定影响。尤其是苏林关于油田水的化学分类,更是广泛地被我国油气水文地质工作者所采用。

1976年,地质科学研究院水文地质工程地质研究所汪蕴璞等发表了“评苏林油田水理论中的几个问题”^[6],对苏林水化学分类方法作了一些评击。苏林分类中的确存在一些问题,是需要进一步研究的。但就现在国内外提出的有关油田水化学分类来说,也都具有这样和那样的缺点和不足,换句话说,目前尚找不出能代替苏林油田水化学分类的其他分类方法。苏林分类发表半个世纪以来,已在世界各国广为使用,表明其仍具有一定的科学性和实用性。因此,本书仍采用苏林分类方法。

在欧美,有关油气水文地质方面的研究工作,多与油气田勘探和开发研究工作一并进行,所以这方面的专著较少。1975年,A.G.柯林斯发表的《油田水地球化学》一书,可以说是这方面的代表性著作。

我国对含油气区地下水的研究工作,是在解放以后才开始的。解放前的旧中国,石油工业是极端落后的。全国只有两个地质调查队,几十个地质勘探人员,90%以上的面积没有进行过石油地质调查工作,石油产量极少,从1904~1949年的46年间,全国只有几个小油田,石油累计产量不足 $310 \times 10^4 \text{t}$ ^[7]。在这种情况下,根本谈不上对油田水的研究。

解放后,在党中央和毛主席的正确领导下,我国石油工业有了飞速的发展,除石油工业部、地质矿产部石油局外,全国各省、市、自治区都相应地设立了有关的机构来管理石油和天然的调查勘探工作。50年代在全国广大领土上进行了油、气藏的调查勘探,发现了很多蕴藏量极其丰富的油、气田。与此同时,石油工业部也在酒泉盆地、柴达木盆地、四川盆地等处组织进行了地质-水文地质的调查,对这些地区的地表水和地下水进行了系统的研究,对评价区域含油气远景,更加合理地组织开发油、气田,起了很大作用。

1959年9月松辽盆地松基3井喷油,使我国石油勘探工作进入了一个崭新的阶段,石油勘探重点从西部转向了东部大平原,自60年代初探明大庆油田始,接着于1963年发现山东胜利油田,1964年发现天津的大港油田等,石油年产量迅速提高,从根本上改变了我国石油工业落后的面貌。1963年周恩来总理向全世界庄严宣告:“我国石油基本自给,中国人民使用‘洋油’的时代已经一去不复返!”多么巨大的变化!

1975年任丘古潜山油田的发现,首次在古老的元古界白云岩中找到了巨大的地层油藏,打开了石油勘探的新领域。1977年,四川盆地第一次在相国寺气田的石炭系中发现了高产工

业气流,这一发现进一步扩大了川东的勘探领域,增加了新的目的层。1978年,我国石油年产量首次突破一亿吨,达到 $1.04 \times 10^8 \text{ t}$,产气量 $140 \times 10^8 \text{ m}^3$,以后石油年产量均保持一亿吨以上,天然气 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右。

随着我国石油天然气工业的不断发展,我国油气田水文地质学的理论研究也取得了很大的成就。石油工业部所属各石油局和油田的研究院、所从事油气田水文地质研究的同志们,在配合完成油气勘探和开发任务时,也都进行了大量油气田水文地质方面的工作,并取得了不少研究成果。例如,70年代初,笔者在从事四川盆地水文地质研究时^①,从四川盆地内部异常高地层压力普遍存在及盆地四周特别是川东高背斜上升泉大量分布这些情况出发,认为地层水是由盆地内部移向盆地四周及川东高背斜的,从而改变了盆地四周供水、内部泄水的传统看法。这一论点不仅具有理论意义,而且具有重大的实际意义。四川盆地边缘构造和川东高陡背斜的勘探结果证明了这一点。另外,地矿部石油地质综合大队101队以张金来,刘崇禧为代表的同志们,在油田水地球化学、特别是我国东部陆相油田水地球化学研究方面是有成就的。油田水地球化学理论方面的研究涉及的内容有:油田水的起源、油田水化学成分形成的地质、地球化学作用、油田水分类、垂直分带、油田水特征及评价区域含油气性的指标等^{〔8〕}。

所有这些研究成果都极大地丰富了油气田水文地质学的内容。可以肯定,随着我国石油工业的进一步发展,研究在油、气藏调查、勘探、开发和开采中具有很大意义的油气田水文地质学,必然会迅速地向前发展。

三、在油气藏调查、勘探、开发和开采过程中研究油气田水文地质学的意义

在油气调查勘探工作中,国内外都在广泛地应用水文地质资料(包括水动力、水化学、水中溶解气等资料)进行区域含油气远景评价。苏联在这方面进行的工作较多,目前已出版了很多专著。我国目前也正在开展这方面的工作,并有一定的测试手段和技术力量,已取得了不少成果。例如,近年来,对油田水中有机组分的研究普遍受到重视,苯、酚指标得到了比较广泛的应用,研究表明,松辽盆地南部油田内苯、酚的含量普遍高于油田外围;在苏北盆地也是一个重要的含油气标志;在冀中坳陷把酚含量大于0.1ppm作为油层水和非油层水的界限;在鄂尔多斯地区也是区别油层与水层的重要标志。另外,烃类气体是油田水特有的气体成分,油田水中常见的有甲、乙、丙、丁烷等,初步研究表明,指示油气存在的特点是组分全、重烃高、不含非饱和烃^{〔8〕}。

总之,目前我国已在油气调查勘探中广泛使用各种含油气标志进行含油气远景评价,并见到了一些效果。为了正确地应用这些标志,还有必要进一步研究各类标志在评价含油气远景方面的作用,以及如何进行定性和定量评价等。

油气井钻探过程中也会经常遇到含水层,因此要求我们必须事先查清含水层的埋藏深度、压力大小、水的物理性质和化学成分。只有这样才能保证油气井的正常钻进。高压含水层对钻井影响很大,往往会引起井喷,影响进尺,严重时还会使得整个井报废。四川盆地特别是川东地区这个问题显得比较突出,已成为生产中亟待解决的问题。这种情况就要求我们根据区域水文地质资料对地层压力进行预报,以便采取相应措施,防止事故的发生。

在油藏开发时,必须首先确定油藏的驱动类型。自喷采油当然是非常有利的,但只有查明了石油和水之间的水力联系,即对该区水文地质情况了解以后,才能更加合理地利用和维

①刘方槐“川中、川西南一带香溪统水文地质条件和油气聚集关系的初步分析”,1974年。

护这种天然动力源。

为了保持地层压力,防止油藏过早出现溶解气驱动,油田开发中常采用早期注水以提高油藏采收率。注水时,采油地质工作者就必须很好考虑油层的水文地质条件。比如水质,要求在注水前查清油层中地下水的化学成分,以防止注入水与之混合发生化学沉淀,堵塞油层,从而收不到预期的效果。当油层水中含有大量 Ca^{2+} 时,则不能与含有大量碳酸盐的水混合,否则就会形成碳酸钙的沉淀,给注水工作带来困难。

其次注水时需要大量用水,水从何来?也必须查清当地水文地质条件以后才能解决。生产实践告诉我们,在很多情况下都是采用地下水作注水用的。但如何正确地采用地下水,也是一个值得很好研究的问题。冀中坳陷的任丘油田就是这方面的实例。

据报道^[9],任丘油田为了适应油田开发早期注水的需要,也是为了解决油田其他工业、农业及生活用水,在未经水文地质勘探的情况下,先后建立了十余处水源基地。1976—1982年间采水总量已超过 $25000 \times 10^4 \text{m}^3$ 。由于井的密度过大,强力开采结果,以任丘水源地为中心的地下水位下降漏斗在开采后不久便迅速形成,波及范围超过 2000km^2 ,平均静水位埋深由原来的近地面下降到地面以下 $46 \sim 55 \text{m}$,动水位埋深普遍达 $60 \sim 70 \text{m}$ 。因此,水产量大幅度下降,单井产量锐减约40%^[9]。生产成本增加,消耗大量电能。这是由于井距太小,井间干扰结果造成的。

相反,位于任丘水源北部的霸县水源,有霸1站和霸2站,两站相距 10km ,有6口井生产,开采深度与任丘水源相同,年产水量 $>200 \times 10^4 \text{m}^3$ 。几年来地下水位一直保持在井深 $8 \sim 14 \text{m}$ 之间,年水位降为零。这是一个成功的例子^[9]。

以上说明,只有在查清当地水文地质条件的情况下,才能稳定供应油田注水所需要的水量,取得事半功倍的良好效果。

另外,在油气开采时,辨别侵入水的来源,设计盐水处理方案以及防止腐蚀等问题,水化学分析资料、水层压力和水温等资料都是非常有用的。

四、油气田地下水的利用

高矿化度的油气田水是提取有用矿物的工业原料,其中各种盐类的含量是极其丰富的。据计算,苏联塔干斯坦油田上,如果按涌水量 $70000 \text{m}^3/\text{d}$ 计,在一年中从地下带到地面的矿物原料可达 157558t ^[11]。

在日本,开发水溶性天然气时采出的地下水中,碘的含量较高,以千叶县九十九里气田的气田水为例,可达 $90 \sim 120 \text{mg/l}$ 。日本一直从水中提碘,获得了巨大收益。日本碘输出量较大,可以占到世界市场的70%以上。70年代每年输出碘量达 $6000 \sim 7000 \text{t}$ 。1978年靠输出碘及碘化物,获外汇 3115.5×10^4 美元,是日本一笔不小的收入[●]。

据报道[●],四川盆地油气田水中各种盐类的含量极其丰富。以威远气田震旦系气藏水为例, 1m^3 地层水中容易提取的一般产品,价值75元左右,其中国防工业的重要原料——锂,价值51元,其次是食盐、氯化钾、三氧化二硼。至于较难提取的铯、铷和镭,含量较低,但经济价值极高, 1m^3 威基井地层水中仅铯和铷两项即达189元。这三种组分中,除镭具单独开采品位外,铯、铷含量均不够开采品位。但随着科学技术的发展,特别是有些组分在国防工业中具有重大意义,虽不够开采品位的矿产,也可升级到综合利用品位甚至单独开采品位。

●刘方槐等,“四川油气科技发展预测”,1984年。

截至1984年6月底，威远气田震旦系气藏共产水 $324.4 \times 10^4 \text{m}^3$ ，按不完全统计的 1m^3 威基井地层水价值264.42元计，可获 85000×10^4 元，与同期威远震旦系气藏总采气量的价值 90000×10^4 元相当。这是多么巨大的一笔财富！但过去综合利用不够，使国家财富白白浪费，还毁坏了庄稼，造成环境污染，给当地人民带来危害。这种情况是不能再继续下去了，应该走综合利用的道路，变废为宝。

另外，油田水一般采自很深的地层，温度较高，常达 $80 \sim 90^\circ\text{C}$ ，可作为医疗用水和油矿上厂房取暖之用，也可用来调配泥浆和作为注水水源。例如冀中坳陷任丘油田和雁翎油田上的油井，随采油带至井口的水温约为 $70 \sim 120^\circ\text{C}$ ，经过集输、处理系统后，最终平均温度仍可达 75°C 。两个油田合计的产水量为 $345.8 \text{m}^3/\text{h}$ ，水量巨大，所含热量也是相当可观的。如果水循环系统中进水流量 $340 \text{m}^3/\text{h}$ 、进水温度 75°C ，按回水温度 45°C 即温差 30°C 计算的热量值可满足 $10 \sim 15 \times 10^4 \text{m}^2$ 建筑面积的供暖需要^[9]。目前已用于沐浴和冬季采暖、温室种植，取得了很好的经济效益^[10]。

无疑，油气田区淡的地下水，往往也是居民生活用水和灌溉用水的主要来源。

由此不难看出，油气田地下水的用途是十分广泛的，应引起我们极大的注意。

参 考 文 献

- [1] 北京石油学院石油地质教研室(刘方槐等),《油田水文地质学》,中国工业出版社,1961年。
- [2] Collins, A.G., "Geochemistry of Oilfield Waters (Development in Petroleum Science, I)", Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 1975。
- [3] 申力生,《古代的石油与天然气》,中国石油工业发展史,第一卷,石油工业出版社,1984年。
- [4] 张继铭等,“四川盆地碳酸盐岩油气田”,天然气勘探与开发,第4期,1984年。
- [5] 中国地质学会水文地质专业委员会(阎锡屿执笔),“中国水文地质科学的进展”,地质论评,第4期,1982年。
- [6] 汪蕴璞等,“评苏联油田水理论中的几个问题”,地质学报,第1期,1976年。
- [7] 张万选等,《石油地质学》,石油工业出版社,1981年。
- [8] 张金来,“我国油田水地球化学的研究现状与发展趋向简述”,石油与天然气地质,第2期,1982年。
- [9] 王仰之等,“冀中平原深层地下水的开发与利用”,古潜山,第4期,1983年。
- [10] 肖笃宁,“任丘油田的地热资源及其利用”,古潜山,第4期,1981年。

第一章 水文地质学基础

水文地质学的一些基本概念,作为油气水文地质学的基础知识来说,是必不可少的。

油气田水是自然界中一种特殊类型的地下水,属天然水系的一部分,是油气田水文地质学的主要研究对象。

地下水与自然界中分布的其他类型的水有非常密切的关系。自然界中的水分布很广泛,它存在于大气圈、岩石圈以及生物圈中,我们将包含在大气圈中的水称为大气水;存在于地球表面海洋、河流、湖泊中的水以及地球两极和高山区的冰雪称为地表水,其中汇集于海洋中的水又称海洋水,除此而外的地表水统称为陆地水;而埋藏于岩石和土壤空隙中的水,即地球内部岩石圈中的水,称为地下水。本书仅着重讨论与油气关系密切的地下水。

第1节 地下水存在的形式及其分布

一、地下水存在的形式^{〔1〕}

地下水赋存于岩石的空隙空间中,其存在形式多种多样,按其物理性质可分为气态水、结合水、液态水(又称自由水)以及固态水等,见图1-1。

1. 气态水

气态水充满在未被水饱和的岩石空隙的空气中。气态水分子之间相互联系紧密,并可以随空气的流动而运动,它由绝对湿度大的地方向绝对湿度小的地方移动。气态水与大气中的水蒸汽处于动态平衡之中,通过蒸发和凝结作用,与液态水互相转化。气态水对岩石中水的重新分配有一定的影响。

2. 结合水

由于分子引力及静电引力作用,岩石的颗粒表面被赋予表面能,这种表面能对作为偶极体的水分子具有吸附力,当水分子被吸附后,即形成结合水。按结合力的强弱,又可分为强结合水及弱结合水。与岩石颗粒表面结合非常紧密,其吸附力超过10000atm,只有加热时才能排出的水称为强结合水(又叫吸着水);在其外围以薄膜形式增厚形成的是弱结合水(又称薄膜水),因岩石颗粒表面与水分子之间的距离加大,其吸引力大大减弱。虽然吸引力大小不同,但是强结合水与弱结合水都是由于分子力而被吸附在岩石颗粒表面的,其数量主要取决于岩石颗粒表面的吸附能。结合水不受重力作用影响,也不传递静水压力。

3. 重力水

岩石的全部空隙为水饱和时,其中能在重力作用下自由运动的水称为重力水。重力水属

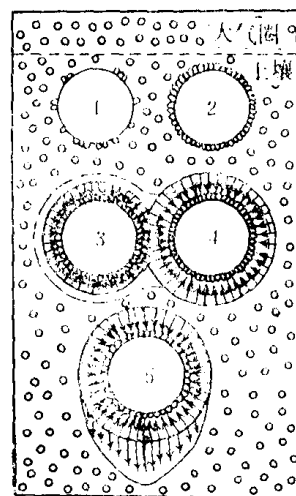


图1-1 岩石中水的各种形态示意图(图中小圆圈代表水分子)(据列别捷夫,1936年)^{〔1〕}

1—具有不完全吸着水量的土粒;2—具有最大吸着水量的土粒;3、4—具有薄膜水的土粒;土粒4被最大薄膜层包围,土粒3包围着较薄的水层,水自土粒4向土粒3运动;5—具有重力水的土粒

自由水类，它是一种重要的液态水，是水文地质学研究的主要对象。重力水不受分子引力的影响，只受重力作用，可以传递静水压力，对岩石能起冲刷、侵蚀和溶解作用，能为人们广泛地应用。

4. 毛细管水

毛细管水是一种储存于岩石毛细空隙中的自由水。它受毛细管力和重力作用，并可传递静水压力，毛细管水与重力水密切相关，多分布在重力水面之上，与重力水直接相连，并随重力水面的升降而升降。

5. 固态水

最常见的固态水为重力水。当岩石的温度在 0°C 以下时，以冰的形态出现的重力水称为固态水。我国黑龙江、青藏高原等某些永久冻土带分布地区的地下水都是固态水。

除岩石空隙中存在有各种形态的地下水外，还有与矿物结合形成的沸石水、结晶水、结构水等，它们统称为矿物水。

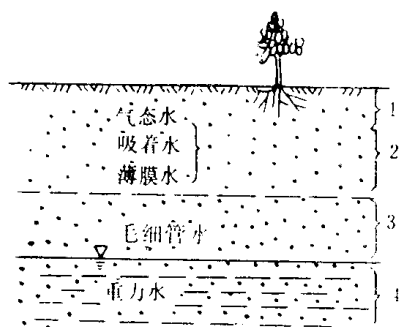


图1-2 各种形态的水在地壳中的分布（据李正根，1980年）〔2〕

1—土壤水亚带；2—中间过渡带；3—毛细管水亚带；1、2、3总称为包气带；4—饱水带

二、各种形态的水在地壳中的分布

各种形态的水在地壳中的分布很有规律。在地表附近岩石的垂直剖面上依次可见到气态水、吸着水、薄膜水、毛细管水和重力水，如图1-2所示。

当人们挖井时，最上部的岩石看起来是干燥的，但实际上已有气态水和结合水存在，继续往下挖时，发现岩石的颜色变暗，并有潮湿感觉，但未见到水滴，说明已有毛细管水存在，再往下，就会出现渗水现象，有水流入井中，并逐渐形成一个水面，这就是重力水。在重力水面以上，岩石的空隙未被水饱和，包含大量的空气，称为包气带；重力水面以下为饱水带（或重力水带），岩石空隙全部为水所饱和。包气带又可分为三个亚带，即土壤水亚带、中间过渡带以及毛细管水亚带〔2〕，如图1-2所示。

第2节 地下水的起源

地下水，尤其是深部地下水的成因问题，是现代水文地质学研究的重要课题。为了更好地利用和开发地下水资源，研究地下水的成因有重大的现实意义，而且又因为油、气与水有着非常密切的关系，因此，研究地下水和深部地下水的成因具有相当重要的理论和实际意义。

国内外学者对地下水（主要是卤水）的成因做过大量的专门性研究工作，但目前提出的各种假说大都建立在科学推论的基础之上，对于地下水成因的解释还不够完善。

国内外学者提出的有关卤水的成因主要有渗入溶滤说、沉积成因说、重力分异说、蒸发说、岩浆说、物理化学说及岩石渗滤薄膜效应说（即薄膜说）七种。

随着生产实践的不断发展，关于地下水起源的假说日趋成熟，下面介绍目前对于地下水起源的几种主要假说。

一、原生成因说

邬斯早在1902年就提出“初生水”的理论^[3]，他认为直接由岩浆冷凝时分逸出来的水是初生水，这种观点在一段时期内，曾十分流行。

但是，奥弗琴尼柯夫（1940年）^[3]指出：①这种初生水在现代热水中未被发现，②近期火山作用地区，在高温条件下矿物和岩石中呈结合状态的水（结构水、结晶水、沸石水等），转变为游离状态析出而转入现代地下水圈，这种水不应称为初生水，而称为再生水更合适。

1975年加弗里连科^[3]在承认初生水的基础上，提出了“深成水”概念，他认为深成水包括自深部向地壳层和地表运移的初生水。从岩浆源离析出来的水和在变质作用过程中产生的变质水，有人统称为内生水。

现在一般认为，含有大量气态物的原生岩浆，在冷却过程中将气态物分离出来，当气态物进入温度较低地带时，其中的水蒸汽凝结而成地下水，这种水称为初生水，又称原生水或岩浆水。至于因火山喷发作用形成的水，也称为初生水。

根据实验证明^[4]，岩浆中含有大量的水分，并且其含水量随埋深有所增加，如酸性岩浆在900℃时，于2km深处可含水3.75%，当进入15km时，可含水9.4%，因此说明，饱和水的岩浆在其冷凝过程中，可以释放出大量的水，但是，初生水在地下运动过程中就与其他类型的水发生混合了。

对于这类水的化学成分、形成条件以及参与地下水储量的作用等众说纷纭，研究较少，虽然初生水参与地下水资源储量是有限的，但是，对地下水成分的形成、地下水成矿作用仍具有重要的水文地球化学意义。

二、渗滤成因说

普遍认为在自然界中广泛地进行着大气降水的渗入作用，此外，还有地表水的渗入作用。大气降水和地表水的渗入成了地下水的补给来源，或者说地下水可以起源于大气降水和地表水。

水的渗入机理目前尚未完全弄清，现在一般认为，大气降水的入渗经历了薄膜下渗—毛细下渗—重力水的连续下渗等几个过程^[4]。大气降水到达地面以后，便向岩石、土壤的空隙中渗入，入渗到岩石、土壤中的那部分降水并不是全部都能补给成地下水，当降雨强度大于入渗强度时，来不及渗入的水分则形成地表径流。降雨初期，如果土壤相当干燥，则在颗粒表面的吸附力以及毛细管力的作用下，促使水分渗入土壤，首先形成薄膜水（称为薄膜下渗），继续入渗的水被吸入毛细空隙，形成悬挂毛细水（称为毛细下渗），因此，在降雨初期，几乎全都保留在包气带中，很少甚至根本不补给地下水。只有当降雨过程继续，包气带中的结合水和悬挂毛细水达到极限后，降水在重力作用下，才能形成重力水的连续下渗，通过静水压力传递，而不断补给地下水，结果使地下水位升高。

在入渗初期，土壤中降水的下渗强度（以mm/h表示）很大，由于水分子引力和毛细管力作用，迅速被表层吸收，随后水分子主要在重力作用下运动，下渗强度逐渐降低，趋于稳定。淮河瓦屋下渗曲线可清楚表明大气降水的下渗过程^[5]，见图1-3。

大气降水补给地下水的数量与下渗强度、降水性质、包气带湿度、岩性及其厚度与分布面积以及地形、植被等有关。一般岩石渗透性好、厚度不大，空气湿度较大，地形平缓，植被覆盖好，大气降水补给的数量较大时，入渗强度较大，反之，则小。

地表水也可成为地下水的渗入补给来源。地表水中主要是河、湖、海、水库等的补