

第一章 研究基础

第一节 国内外研究现状

本书的研究内容主要涉及油田水文地球化学理论和水-岩作用理论。在过去的 20 多年里 众多学者从不同角度进行了大量而系统的研究并取得了一些重要成果 同时也有许多问题仍未解决。

一、油田水文地球化学研究进展

油藏地球化学 (Reservoir Geochemistry) 是 80 年代中后期在国际上新兴的一门石油地球化学分支学科, 是地质学与石油工程等之间的边缘交叉学科 (王铁冠, 1997)。它的主要研究内容有油藏地球化学描述、油藏内流体充注与混合作用、油藏内非烃和高分子量化合物地球化学、储层流体与岩石相互作用等。与本项研究密切相关的为储层流体与岩石的相互作用 这方面国外的研究以 Surdam 为代表, 他研究了干酪根和酚类对砂岩孔隙度的影响以及砂岩孔隙度的预测问题, 并提供了油田水中有机酸阴离子浓度的一些实测数据 (Surdam, 1989)。Jensenis (1990) 等研究了卤水运移过程中, 烃-水之间的相互作用。梅博文等人 (1992) 翻译出版的《储层地球化学》一书 收录了国外重要论文 18 篇 基本上反映了国外 80 年代油藏地球化学研究的现状。90 年代以来, 国内油藏地球化学研究进展很快。马立祥、万静萍 (1992) 研究了聚烃期储集空间特征 陈传平等 (1995) 研究了储层中有机酸的成因。蔡春芳、梅博文等 (1995) 对烃-水-岩相互作用方面进行了探讨, 朱抱荃等 (1996) 研究了有机酸对砂岩储层次孔隙的影响。在实验方面, 韩宝平利用高压釜, 采用任丘油田水样与岩心相互作用的方式, 模拟了封闭条件下油田中水-岩作用特征 (韩宝平, 1988, 1991, 1993)。杨俊杰、张文正等人 (1995) 用乙酸对白云岩进行了溶蚀实验, 结果表明白云岩溶蚀速度最大的温压区是 75 °C、20 MPa ~ 100 °C、25 MPa。水-岩作用的另一重要方面是沉淀与结垢, 前苏联学者对结垢机理有较深入的研究, Oddo, Todd 等人提出了结垢预测方法 在国内 巨全义 (1987) 进行了油田水中硫酸钡结垢的研究, 王立 (1994)、朱义琰 (1995)、王香增 (1999) 在不同油田进行了地层结垢、井筒结垢方面的研究, 取得了一些进展。纵观国内外研究的现状可以看出: 在对油田储集层中水-岩作用的研究中, 以砂岩储集层为主, 较少涉及碳酸盐岩储集层, 白云岩储集层更少。过去石油地质工作者总认为, 碳酸盐岩储集空间主要是由古岩溶形成的, 而忽略了油气储层形成后的水-岩作用研究, 而注水条件下的水-岩作用及水文地球演化更少有人研究。在对任丘油田的研究中, 华北石油勘探开发研究院做了大量工作 并出版了多本专著 余家仁 (1993) 柏松章 (1996、1997) 赵树栋 (1997) 从生产的角度总结了任丘油田的开发过程; 《油田古水文地质与水文地球化学》探讨了冀中拗陷的水文地球化学演化过程 但对油田后期, 尤其是注水开发后的水-岩作用过程、水化学场演化及其对储集空间的影响基本上没有涉及。

二、水—岩作用研究现状

从地表到地幔流体无处不在，无时不在，因此，水—岩作用是自然界最普遍的地球化学过程。这方面的研究涉及到岩石学、矿物学、材料科学、海洋地质、工程地质、环境保护及自然灾害防治、核废料处理等众多领域。在国际上一直处于地学的前缘。在国内一直是国家自然科学基金重点资助领域。自 1974 年“第一届国际水—岩作用学术讨论会”召开以来，本方向的研究获得了飞速发展。目前已召开了八届国际学术讨论会。综观国内外资料，这方面的研究主要集中在两个方向：水—岩作用的实验模拟研究和水—岩作用的计算机模拟研究。

水—岩反应实验研究在 70 年代以后发展较快，尤其在玄武岩—海水相互作用方面取得了一系列成果。如 Dickson 和 Bischoff 等(1975)用 Dickson 热液设备在 200 °C 和 500×10^5 Pa 条件下，进行了玄武岩—海水反应实验；Hajash(1980)用 Tuttle 冷封式高温高压设备，在 200 ~ 500 °C 和 $(500 \sim 800) \times 10^5$ Pa 条件下，研究了玄武岩—海水反应；Mottle 和 Holland 等，在 200 ~ 500 °C 和 $(500 \sim 1000) \times 10^5$ Pa 条件下，进行了不同结晶程度的玄武岩与海水和 Na—K—Ca—Cl 溶液的反应实验；Sayfried 和 Bischoff(1979)在 70 °C、10 MPa 和 150 °C、 500×10^5 Pa 条件下，研究了天然玄武岩玻璃和辉绿岩与海水的反应；Crovisier 等(1983)利用 X 射线光电子能谱、透射电子显微镜等先进的固体表面分析技术研究了 3 ~ 90 °C 时海水与玄武岩玻璃相互作用的蚀变相。国内曾贻善等(1984)在 300 °C、 500×10^5 Pa、水/岩为 10 的条件下用 Dickson 和 Tuttle 水热设备研究了玄武岩玻璃与水和钠碳酸盐溶液相互作用下次生矿物的形成和反应溶液的变化。上述实验都是在封闭体系和静态条件下完成的。80 年代初开始出现开放体系、流动条件下的水—岩反应实验。如 Dibble 和 Potter(1982)曾在 300 °C 和 200×10^5 Pa 流速为 0.1 和 100 mL/d 的条件下研究了 2% NaCl 溶液与流纹岩玻璃的反应。流动反应持续了 10 天，发现玻璃的溶解速率随流速的增加而增高，且流速有利于平衡矿物组合的形成。Pohl 和 Liou(1983)曾在 300 °C 和 200 °C、 250×10^5 Pa、流速为 2.5 mL/s 条件下，进行了玄武岩玻璃与海水的流动反应实验，反应持续了 30 d，证实了通过控制流速可增加反应速率，乃至能在低温水溶液—岩石体中达到稳定的矿物平衡。

除玄武岩外，国内外学者对碳酸盐矿物也进行了较深入研究，尤其方解石和白云石获得了很多热力学数据。在 80 年代早期，大多数碳酸盐矿物溶解实验是在温度小于 80 °C、 CO_2 分压在 0 ~ 1 atm 的条件下进行的(Busenbergl, 1982; Morse, 1983, 1974, 1979, 1980; Plummer, 1974, 1976, 1978, 1979, 1982; Sjöberg, 1976, 1983, 1984, 1985)。他们用旋转盘法、静态 pH 法和自由飘移对方解石、白云石在温度小于 100 °C、 $P_{\text{CO}_2} < 1$ atm 的电解质溶液中溶解过程进行了大量研究。其中尤以 Plummer 的工作最为突出，他建立的溶解动力学方程，考虑了 CO_2 分压、温度和 pH 值等因素。张荣华(1984)在美国普林斯顿大学进行了 550 °C、100 atm 条件下连续流动电解质溶液中的方解石反应的实验研究(杨荣兴, 1995)，1992 年出版了《矿物在热液内化学动力学和物质迁移》，在方解石、萤石和长石水—岩作用方面取得了较高水平的成果。近几年来，水—岩反应实验的研究迅猛发展，发表和出版了大量的论文和专著：1986 年美国化学协会出版了《矿物表面的地球化学》；1990 年美国地球化学协会出版了论文专集《流体—矿物反应》；同年美国矿物学协会出版了专集《矿物—水界面地球化学》；1992 年美国出版了《水—岩反应 WRI-7》论文集，其第一部分是矿物流体界面地球化学。上述研究成果证实：自然界面在化学上的定向性和不均匀性、矿物表面和整体之间在化学上和物理上的差异性。Whitely 和 Peterson 指出矿物表面的溶解速度是水溶液接触部

位的矿物表面积的函数 (Rustad, 1994), 并非所有矿物总表面积都参与表面反应控制的溶解过程。在矿物表面存在着一些活化场, 在那里最先发生溶解作用和形成刻蚀坑。所以, 有效表面积是矿物总表面积的一部分, 通常为 50% ~ 90% (Made, 1993)。

随着水-岩作用实验模拟研究进展, 积累了大量的水化学分析数据和热力学数据, 从而促进了计算机数值模拟研究。从研究方法来说, 计算机模拟可分为“正演模拟”和“反演模拟”两大类。正演地球化学模型主要包括离子-络合模型和特殊反应模型 (Pitzer 模型)。自从 Helgson 及其合作者 1968, 1969, 1970 最初介绍 PATHI 以来已经出现了一系列正演模拟程序。EQ3/6 程序系列 (Wolery, 1979, 1983, 1986, 1990) 和 PHREEQM 是正演地球化学模拟程序中较先进的, 可模拟封闭或开放体系矿物、岩石-水之间的物质交换过程。目前国际上通用的正演模拟程序还有 WATEQ 系列、REDEQL - MINEQL 系列、SOLVEQ 系列、CHILLER 系列、SUPCRT92 等离子-络合模型模拟程序, 其中 CHILLER 程序 (Mark, 1984, 1988, 1989) 具有计算沸腾、冷却、围岩蚀变、地下水与热水混合以及蒸发等功能, 适合于模拟热水矿床成因, 还可以解决气-固-水系统中与平衡或部分平衡态有关的大部分问题。陈宗宇运用 CHILLER 软件模拟分析了天津塘沽低温 (35 ~ 95 °C) 热储回灌过程中的水-岩作用; 毕二平应用 SOLVEQ 和 CHILLER 程序模拟了冰岛 Langaland 95 °C 热田回灌中的地球化学作用。

反演模拟最常见的有 BALANCE 和 NETPATH 等计算机软件包, 且多适用于稳态区域含水层 (水-岩反应系统), 尤其是与同位素数据结合, 可以很好地再现水-岩反应的历史。王焰新、马腾等人 1997 利用 Plummer 博士提供的 NETPATH 2.0 模拟软件分析了柳林地表水渗漏影响岩溶水系统的地球化学作用。

国外虽然开展了大量数值模拟工作, 但化学平衡模型总是存在着一些局限性, 往往受动力学、热力学数据库的不完整等因素的限制 (Nordstorm, 1979) 因此计算机模拟技术还需进一步完善。国内学者更多地利用上述模拟软件, 结合不同的水化学场、水动力场进行水-岩作用模拟研究, 如曹玉清、胡宽容等人运用化学热力学、化学动力学理论, 研究喀斯特地下水系统中水-岩作用特征, 建立了一些地区的地质-水文地质-水文地球化学的综合概化模型。华仁民、沈照理、石平方等人曾对水-岩相互作用研究情况进行过综述 (石平方, 1986, 华仁民, 1994, 沈照理, 1994), 指出了计算机模拟研究中的问题, 对促进国内本方向的研究具有重要的意义。

从上述研究可以看出, 过去的实验模拟, 主要采用标准矿物与人工配置的电解质进行反应, 探讨不同条件下的反应机理, 与实际的水-岩作用有较大的差异, 而本次研究则采用油田含水介质与油田注入水在油藏条件下进行模拟, 其结论更反映实际情况。

第二节 研究思路

任丘油田经过 20 多年的开发, 目前已进入后期挖潜阶段。注水开发使其水化学场、水动力场发生了复杂的变化。在水-岩作用中储层的物质组成与结构是水-岩作用的基础, 而水化学场的变化既是水-岩作用的条件又是水-岩作用的结果, 因此, 本书首先研究雾迷山组物质组成、孔隙结构及开发前的水化学背景, 然后根据 20 多年的含水率及水质监测资料, 研究注水开发过程中油水运移规律及水化学场的时空演化特征; 最后, 运用高压釜模拟

了油田注水条件下的水—岩作用过程 运用 PHREEQM 程序进行水—岩作用的数值模拟 以揭示注水 注清水、注污水、注酸性水 条件下的水—岩作用机理 在上述工作基础上 重点探讨结垢 沉淀 机理及其对储层、井筒、电泵的影响 为油田的后期开发提供理论依据。整体思路如图 1-1。

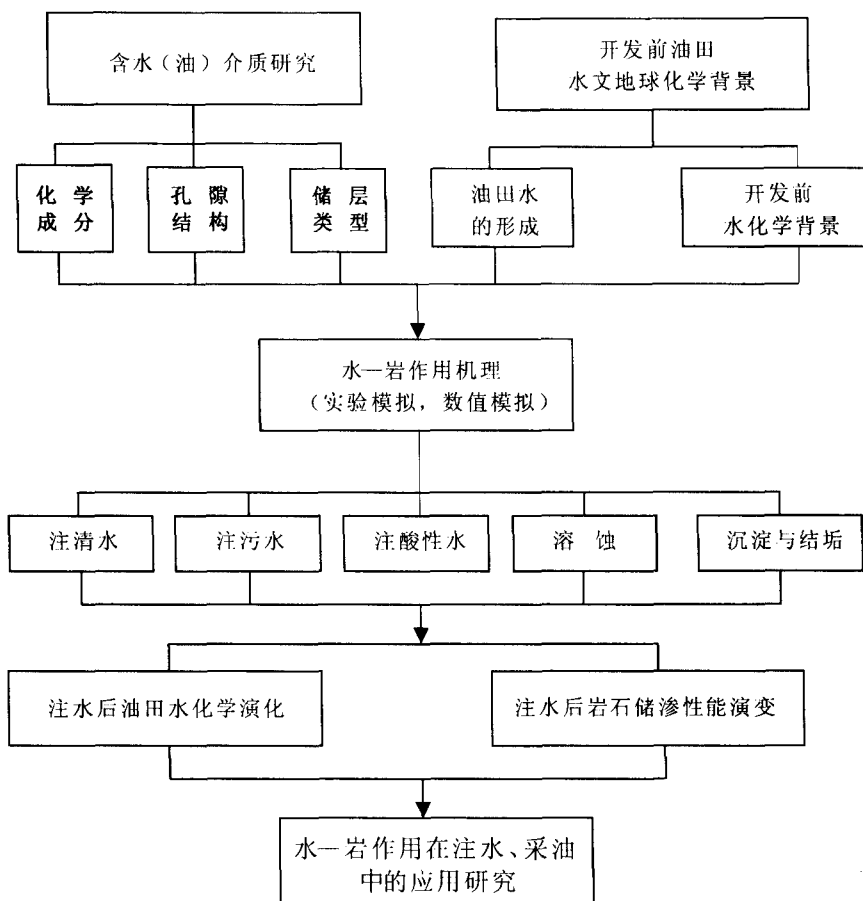


图 1-1 研究思路框图

第三节 研究内容与工作量

一、含水(油)介质研究

水—岩作用涉及水和岩石两种相态的物质，因此本书首先对雾迷山组碳酸盐岩的物质组成、孔隙结构特征进行了研究；强岩溶带或强渗透带是水—岩作用活跃的场所以，根据钻探过程中的放空、漏失资料、注水淡化方向及含水率演变资料进行岩溶发育程度分区，为深入研究水—岩作用机理奠定基础。

二、任丘油田注水条件下水化学特征及其演化

根据 100 余口井 20 余年的监测资料，研究了不同开发阶段水质演化特征，重点对注水开发后储层中的水—岩作用导致的水化学演变机理进行了研究。

三、注水条件下水—岩作用机理研究

任丘油田在注水的早期注水水源多取自埋深约 800 ~ 1000 m 的第三系明化镇组砂层中的地下水，后期改用油水分离的污水，清水与污水的注入改变了原来的水化学场、温度场，其水—岩作用过程也不同于原生碳酸盐岩油气藏，为了研究其水—岩作用机理，本书采用 GD-05 型高压釜并利用油田注入水和雾迷山组岩心模拟了深部环境下（温度 90 °C, CO₂ 分压 2.0 MPa）的水—岩作用特征。

四、酸化条件下水—岩作用实验模拟研究

采用不同初始 pH 值对不同岩性试样进行了酸化，探讨了雾迷山组主要岩类的酸蚀行为。考虑到有机酸在水岩作用中的意义，采用乙酸进行了油田条件下的实验模拟。

五、注水条件下水—岩作用的数值模拟研究

利用 PHREEQM 水化学模拟程序，模拟了注清水、注污水和注酸性水的水—岩作用机理，探讨了岩石—水—结垢中的微量元素及其演化。

六、水—岩作用应用研究

根据扫描电镜资料及水质演化资料探讨了注水后储层中的溶蚀作用与沉淀作用，深入研究了井筒、电泵结垢机理。研究工作量详见表 1-1

表 1-1 主要工作量简表

| 工 作 内 容 | | 工 作 量 |
|-----------|-------|--|
| 资料分析与数据处理 | | 岩溶分区图,古潜山立体图,100 余口井的水化学资料整理,30 口井水质演化曲线,不同时期含水率等值线,不同时期 Cl ⁻ 等值线 |
| 岩心测试 | 化学成分 | 76 组 |
| | 矿物成分 | 48 组 |
| | 微量元素 | 55 组 |
| | 扫描电镜 | 40 块,照片 120 张 |
| | 孔隙度 | 20 组 |
| 水样 | 现场取样 | 28 |
| | 水化学分析 | 28 |
| | 同位素 | 14 |
| | 微量元素 | 19 |
| 电泵结垢 | 化学成分 | 426 井 |
| | 矿物成分 | 能谱,X 衍射各 4 组 |
| | 微量元素 | 任 436 井 |
| | 包裹体 | 20 个测点 |
| 实验模拟 | 注清水 | 任三联回注水 |
| | 注污水 | 任一联回注水 |
| | 盐酸酸化 | pH ₀ = 0.94, 油田酸化配方 |
| | 有机酸 | 乙酸 |
| 数值模拟 | 注清水 | 任 69 井 |
| | 注污水 | 任 69 井,任 54 井 |
| | 注酸性水 | 25 °C, 90 °C |
| | 结垢 | 任 54 井,任 436 井 |

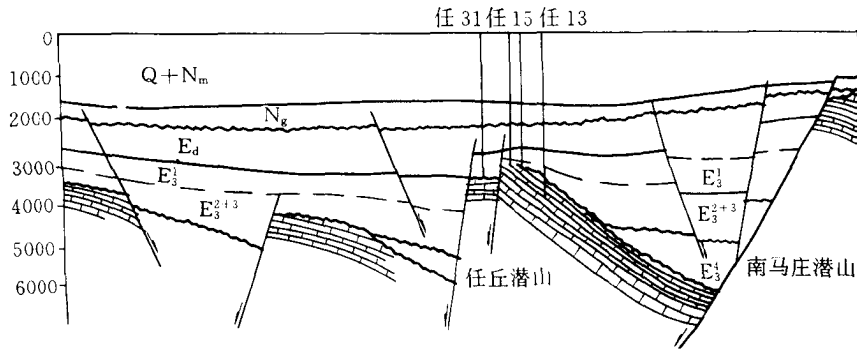


图 2-2 任丘古潜山剖面图

头(图 2-3 图 2-4)。油藏南北长 18 km 东西宽 4 km 含油面积 58 km²，原始地质储量 37605 × 10⁴t 油层有效厚度 167.1 m 平均含油高度 272 m 初始油水界面为 -3510 m 具有统一的压力系统。

油藏的构造发展史包括以下几个阶段：

太古代—早元古代 至少经历了阜平、五台、吕梁三次运动 使太古界—下元古界褶皱变质形成了一套复杂的变质岩系。早元古代末的吕梁运动使地壳下沉接受了一套以海相碳酸盐岩为主的沉积。

中晚元古代—古生代，地壳处于相对稳定的发展阶段，铁岭运动和蓟县运动使地壳上升 遭受剥蚀 早古生代开始 海侵广泛 古地理环境为广阔浅海。加里东运动 地壳再度上升遭受剥蚀，普遍缺失晚奥陶世、志留纪、泥盆纪和早石炭世沉积。中石炭世开始广泛沉积了一套海陆交互相碎屑岩。由此可见，加里东运动以前，古潜山地层水是以沉积作用为主的海相同生沉积水，在铁岭运动和蓟县运动之后，地壳上升，接受大气降水的淡化作用，而加里东运动之后，中上元古界可溶岩遭受了 1.3 亿 ~ 1.8 亿年的风化剥蚀，形成了岩溶孔隙型淡水。而中石炭世开始，华北地台整体下降，古潜山进入封闭埋藏作用阶段，地层水向盐化方向转化。

中生代，本区进入一个新的发展时期，由相对稳定区转化为活动区。构造活动强烈，印支运动可视为这一强烈构造活动的序幕，燕山运动表现为褶皱、断裂和岩浆活动，致使中晚元古代—古生代碳酸盐岩地层产生褶皱、断裂。而任丘雾迷山组古潜山地层水由于印支—燕山运动经受了约 1.2 亿年大气降水淋滤、溶蚀、交替作用而再次淡化。

新生代，喜马拉雅运动表现为强烈的断块差异运动，进一步改造了前期构造形迹。其构造运动以拉张作用为主，形成了以张性正断层为主要特点的断裂系统。由于正断层活动造成的块体大幅度陷落的一侧接受了巨厚的早第三纪湖、河相为主的沉积物，最大厚度可达 6000 余米，生物繁盛，有机质丰富，为油气生成奠定了良好的物质基础。而块体上升的一侧亦逐渐被淹没覆盖成为潜山，构成了凹陷、断裂、潜山三者空间上的有效配置关系，非常有利于生油成藏。

晚第三纪至今 构造运动表现为区域性的沉降 接受了冲积相、洪积相、湖沼相沉积 厚度达 700 ~ 2500 m，发展成为现今的冀中平原。

任丘雾迷山组古潜山油藏的形成与其独特的地质、构造地质条件是分不开的：燕山期翘

断运动形成断层山脊，凹陷中的生油岩为石油的形成创造了条件；燕山—喜山期风化淋滤作用改造了碳酸盐岩的储渗条件 使其成为孔、洞、缝发育的良好的储层 生油凹陷与古潜山侧向对接，油气形成后通过断裂、裂隙运移聚集成藏。华北石油研究院的刘宝泉等人曾对任丘古潜山的油源进行了系统的研究，用甾烷、萜烷、正异构烷烃和¹³C 同位素作为对比指标 证明任丘雾迷山组油藏原油主要来自下第三系沙河街组生油岩，故为“新生古储型”油藏。

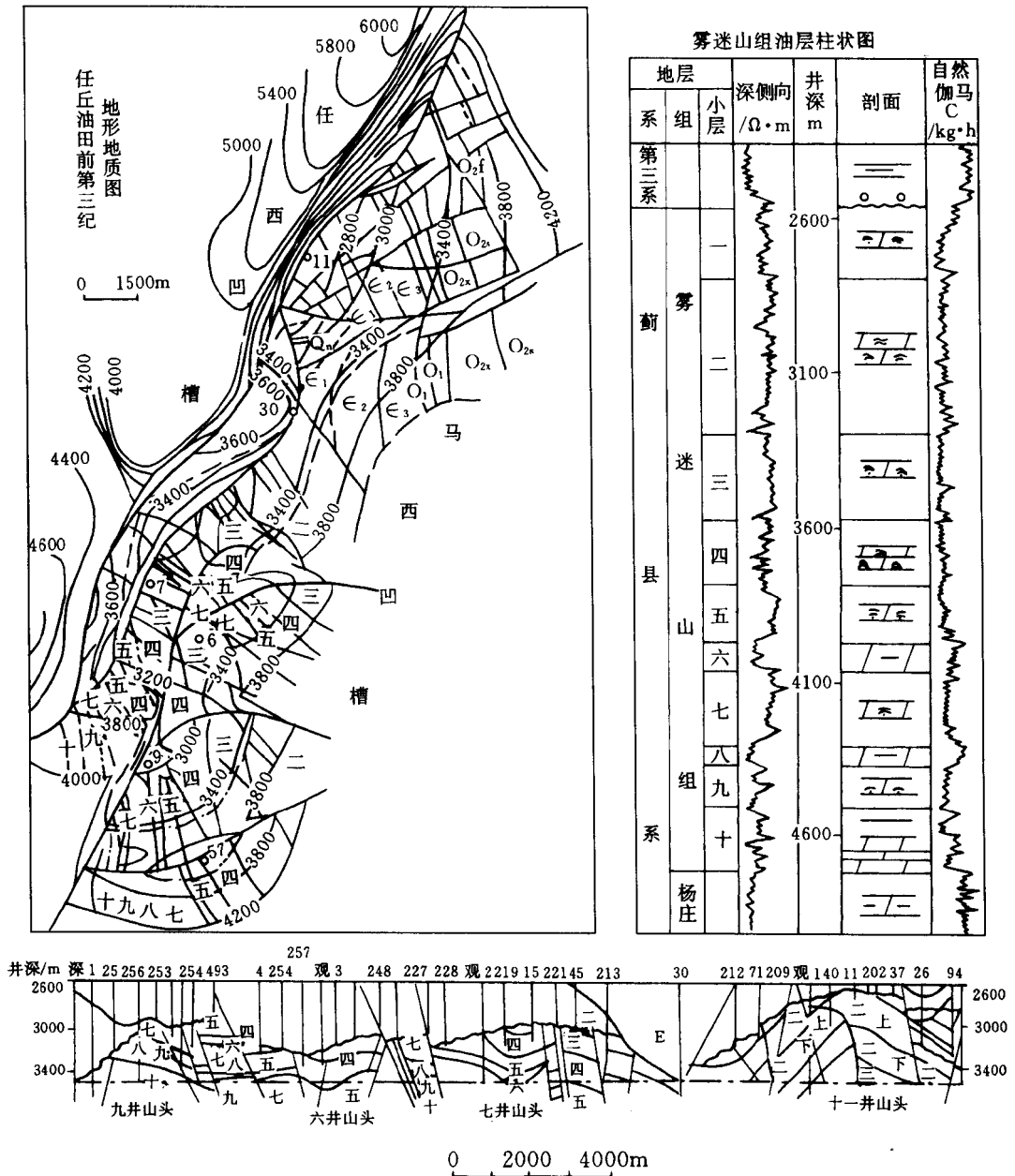


图 2-3 任丘雾迷山古潜山油藏综合图 (柏松章, 1997)

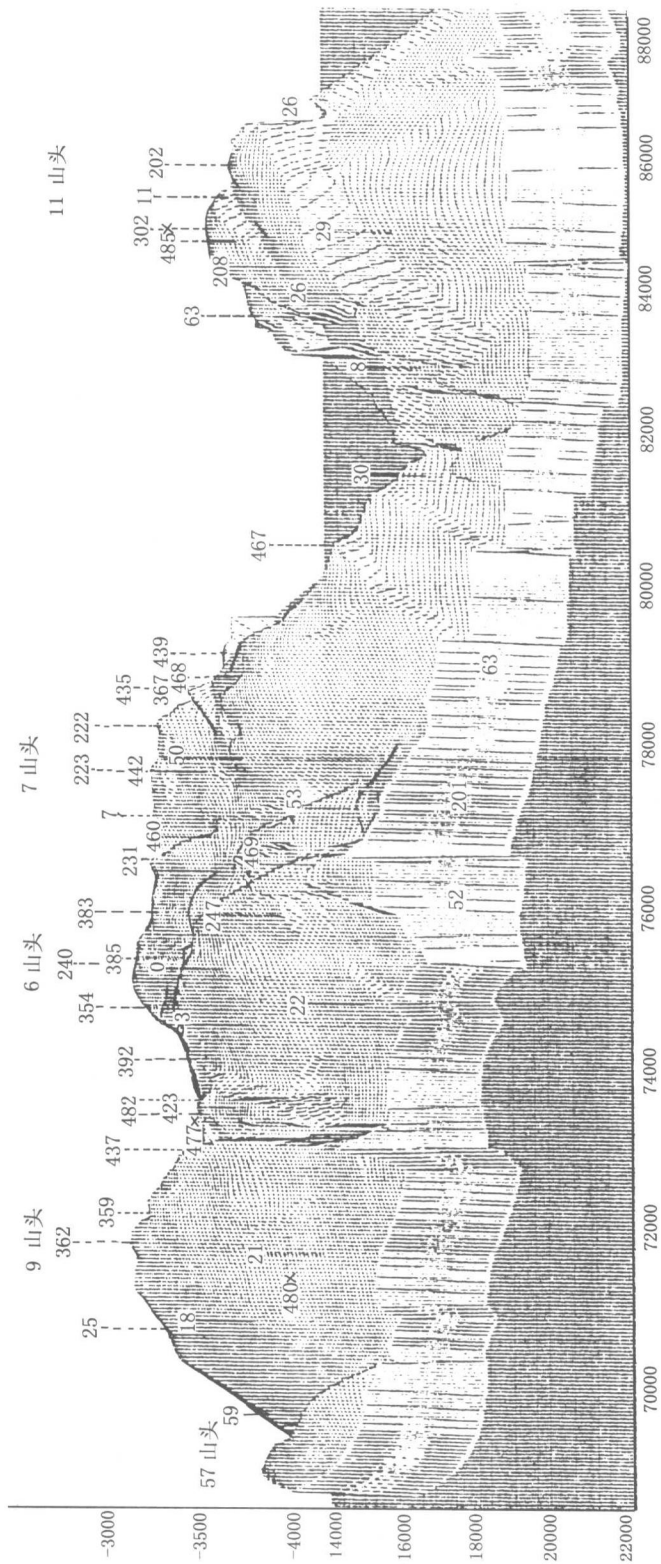


图2-4 任丘油田古潜山立体图

第二节 任丘油田雾迷山组含水油介质特征

一、岩性组合

任丘雾迷山组油藏储集层属于中元古界蓟县系雾迷山组，厚约 2300 余米。雾迷山组是一套隐藻白云岩夹泥质和硅质白云岩的海相碳酸盐岩。根据其储渗特征，华北石油开发研究院将其从上至下、由新到老划分为 10 个油组 68 个小层。其中雾一、雾二组为硅质白云岩，雾三~雾五组、雾七组和雾十组为藻屑白云岩和块状白云岩，而雾六、雾八组和雾九组下部为泥质白云岩集中段。在平面上其分布由南向北逐渐变新，南部 9 井山头任深 1 井附近潜山面出露雾十油组，至北部 11 井山头顶出露雾一油组。由于岩性的影响，岩溶发育具有极大的差异性，导致剖面上好储层、差储层、致密层和泥质隔层交互叠置。核形石白云岩、锥状叠层石白云岩为好储层，约占 20%~40%；层纹石白云岩、小波纹状白云岩为差储层（主要为裂隙含油），占 15%~30% 左右；泥一细粉晶白云岩、砂砾屑白云岩结构细，为致密层，基本不含油，占 30%；含泥质白云岩为油藏中的隔层，占 15%。从岩心物性分析数据和缝洞统计资料也可看出，雾二、雾五、雾七组储集条件最好，雾六、雾八为相对隔层，雾九为非储层。

二、雾迷山组岩石的化学成分特征

任 28 井、239 井和 266 井三口井岩心基本上可以将雾迷山组十个油组地层接齐。本次研究中对三口井的 76 块岩样进行了化学成分和能谱矿物成分测试，其结果见表 2-1。不同油组成分变化曲线见图 2-5。测试结果表明，主要化学元素有 Ca、Mg、C、O，其次为 K、Al、S。主要矿物为白云石，另有少许燧石、伊利石。此外，裂隙壁充填有一些重晶石、天青石、毒重石、萤石、黄铁矿、铁方解石、铁白云石等次生矿物（见图版 II）。其中雾迷山组白云岩化学成分复杂，成岩后期硅化现象明显。岩心分析 SiO_2 含量为 0.001%~92.84%。其他主要成分：CaO 为 2.09%~32.15%，MgO 为 1.0%~22.84%， Al_2O_3 为 0~37.17%。能谱测试表明组成岩石的主要矿物为白云石和燧石。从图 2-5 可以看出，雾六、雾八组 SiO_2 含量较高，主要岩性为泥质白云岩和硅质岩，这与以往的资料是吻合的。本次岩样分析还揭示几个泥质层段，雾四组第 3 小层泥质白云岩中 Al_2O_3 含量达 37.17%；雾五组第 1 小层泥质、硅质白云岩中 Al_2O_3 含量达 10.21%， SiO_2 含量达 37%；雾六组顶部泥质白云岩中 Al_2O_3 含量达 29.7%， SiO_2 含量达 20.5%；雾十组第 2 小层泥质白云岩中 Al_2O_3 为 15.86%， SiO_2 为 25.85%。这些泥质层均将影响岩石的溶蚀特征，只要具有一定的厚度就会形成相对隔层，从而对油水运移起到封隔作用。

三、含水油介质的孔隙结构

孔隙通常是岩石中直径小于 2 mm 的空隙，但并非所有的孔隙对渗流都有意义。姚宝魁等（1993）认为“孔径大于 10 μm 的孔隙对流体的渗流作用最大”；Bocker 等（1992）认为只要碳酸盐岩中赋存有大于 10 μm 的孔隙就可以渗流并发育洞穴；华北石油开发研究院根据大量古潜山油田开发实践，认为大于 10 μm 的孔隙才具有较好的储渗性能。本次研究中，利用微孔结构分析仪对 28 井、239 井、266 井岩心进行了测试，根据测试结果并考虑孔隙成因及其对渗流的意义，将雾迷山组白云岩划分为以下几种类型（相应的压汞曲线见图 2-6）：

表 2-1

任丘雾迷山组岩石化学成分(%)

| 井号 | 岩样编号 | 层段 | 深度/m | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | 酸不溶物 |
|-----------|----------------|----------------|----------------|--------|-------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------|
| 28 井 | 2 10/14 | 2 ³ | 3215.6 | 6.76 | 4.27 | | | 1.59 | 0.01 | 77.32 | 77.81 |
| | 9 9/9 | 2 ³ | 3224.9 | 30.17 | 22.12 | 0.48 | 0.01 | 0.1 | 0.16 | 0.2 | |
| | 13 2/12 | 2 ³ | 3228.1 | 22.89 | 15.88 | | | 1.43 | | | 24.68 |
| | 16 9/10 | 2 ⁴ | 3234.5 | 29.76 | 20.3 | 0.15 | 0.03 | | 0.07 | 2.33 | |
| | 20 1/18 | 2 ⁴ | 3244.5 | 12.35 | 8.963 | 0.065 | 0.0232 | | 0.1242 | 57.53 | |
| | 22 6/15 | 2 ⁴ | 3249.1 | 30.03 | 21.02 | 0.33 | 0.03 | | 0.2 | 0.7 | |
| | 22 9/15 | 2 ⁴ | 3249.9 | 29.83 | 20.83 | 0.15 | 0.03 | | 0.08 | 1.53 | |
| | 30 7/9 | 2 ⁴ | 3269 | 31.15 | 19.98 | 0.56 | 0.1 | 0.02 | 0.22 | 0.001 | |
| | 39 3/5 | 2 ⁴ | 3286.8 | 2.09 | 1 | | | 1.49 | 0.1 | 92.84 | 93.35 |
| 28 井 | 41 9/12 | 2 ⁴ | 3291.2 | 30.63 | 22.03 | | | | | | 0.17 |
| | 44 6/12 | 2 ⁴ | 3299.9 | 29.96 | 21.21 | 0.18 | 0.03 | | 0.15 | 0.3 | |
| | 64 10/11 | 2 ⁵ | 3341.6 | 29.52 | 20.34 | 0.0737 | 0.0039 | | 0.0771 | 4.07 | |
| | 69 9/11 | 2 ⁵ | 3348 | 29.08 | 20.06 | 0.2465 | <0.001 | | 0.1056 | 4.9 | |
| | 73 5/7 | 2 ⁵ | 3360.2 | 29.29 | 20.05 | 0.2559 | 0.0016 | | 0.1213 | 4.16 | |
| | 76 7/8 | 2 ⁵ | 3364.3 | 24.73 | 18.58 | 0.0792 | 0.0098 | | 0.086 | 16.19 | |
| | 78 3/6 | 2 ⁵ | 3366.5 | 29.38 | 20.03 | 0.0734 | 0.0036 | | 0.0602 | 4.29 | |
| | 84 10/11 | 2 ⁵ | 3377.7 | 14.53 | 10.7 | 0.0645 | 0.0115 | | 0.0758 | 51.35 | |
| | 85 4/5 | 2 ⁵ | 3378.4 | 28.8 | 20.86 | 0.0706 | 0.0091 | | 0.0693 | 4.24 | |
| | 92 2/8 | 2 ⁵ | 3385.2 | 2.515 | 1.817 | 0.0783 | 0.0163 | | 0.0714 | 90.99 | |
| | 98 5/6 | 2 ⁶ | 3459.6 | 24.49 | 18.44 | 0.1003 | 0.0055 | | 0.0785 | 17.54 | |
| | 100 2/3 | 2 ⁶ | 3512.8 | 23.72 | 17.51 | 0.3814 | 0.6857 | | 1.622 | 17.99 | |
| | 239 井 | 3 2/7 | 4 ³ | 3108.5 | 28.33 | 20.09 | 0.0607 | 0.052 | | 0.2179 | 4.97 |
| 8 1/5 | | 4 ³ | 3112 | 21.93 | 15.24 | | | 1.99 | | | 27.87 |
| 14 4/9 | | 4 ³ | 3112.2 | 20.62 | 15.02 | 0.53 | 0.54 | 0.2 | 1.26 | 24.5 | |
| 23 6/10 | | 4 ³ | 3126.1 | 20.55 | 13.92 | 0.07 | 0.03 | | 0.08 | 32.32 | 32.53 |
| 26 4/9 | | 4 ³ | 3128.8 | 30.47 | 21.84 | | | | | | 0.43 |
| 29 5/8 | | 4 ³ | 3133.2 | 29.96 | 21.02 | 0.15 | 0.05 | | 0.06 | 0.37 | |
| 32 6/13 | | 4 ³ | 3136.9 | 25.55 | 18.34 | | | 0.95 | | | 14.61 |
| 40 1/6 | | 4 ³ | 3145.7 | 4.44 | 3.23 | | | | | 3.14 | 81.41 |
| 47 4/9 | | 4 ⁴ | 3153.9 | 29.29 | 20.57 | 0.0765 | 0.0178 | | 0.0847 | 3.65 | |
| 49 1/5 | | 4 ⁴ | 3155.5 | 29.94 | 20.54 | | | | | 0.85 | 4.69 |
| 66 47/70 | | 4 ⁴ | 3188 | 23.23 | 15.84 | | | 0.49 | 1.8 | 21.22 | 23.75 |
| 76 3/6 | | 5 ¹ | 3242.2 | 27.96 | 22.43 | 0.91 | 0.13 | 0.05 | 0.45 | 2.4 | |
| 78 3/10 | | 5 ¹ | 3246 | 12.93 | 10.04 | | | 2.49 | 37 | 0.4 | 50.42 |
| 84 3/5 | | 5 ¹ | 3255.8 | 17.25 | 12.56 | | | 1.32 | | | 39.94 |
| 85 8/10 | | 5 ¹ | 3256.7 | 19.18 | 14.75 | 0.58 | 0.34 | 0.22 | 0.72 | 31.8 | |
| 92 7/10 | | 5 ² | 3275.5 | 16.31 | 11.38 | | | 0.89 | 0.05 | 46.52 | 46.84 |
| 99 1/9 | | 5 ² | 3301.7 | 29.96 | 20.83 | 0.33 | 0.33 | 0.1 | <0.001 | 0.27 | 47.86 |
| 104 10/10 | | 5 ² | 3311 | 30.15 | 21.76 | | | | | | 47.077 |
| 120 1/7 | | 5 ² | 3328.5 | 18.35 | 12.73 | | | 0.84 | 2.2 | 35.94 | 39.55 |
| 124 20/21 | | 6 | 3393.1 | 17.48 | 11.46 | 1.15 | 0.1 | 0.41 | 2.71 | 38.37 | |
| 129 1/3 | | 7 ¹ | 3418.5 | 24.04 | 15.33 | 0.12 | 0.15 | | 0.3 | 23.37 | |
| 132 4/9 | | 7 ¹ | 3424.6 | 29.55 | 20.8 | 0.0481 | 0.0298 | | 0.0988 | 3.79 | |
| 137 1/4 | | 7 ¹ | 3458.3 | 22.02 | 14.77 | 0.12 | 0.09 | 0.15 | 0.25 | 27.67 | |
| 139 1/1 | 7 ¹ | 3460.6 | 22.02 | 14.62 | 0.1 | 0.09 | 0.15 | 0.23 | 28 | | |

续表

| 井号 | 岩样编号 | 层段 | 深度/m | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | 酸不溶物 |
|-------|-----------|-----------------|--------|-------|-------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|
| 266 井 | 6 1/4 | 7 ² | 3090.3 | 26.66 | 18.07 | 0.35 | 0.41 | 0.1 | 0.88 | 13.33 | |
| | 24 5/10 | 8 | 3121.5 | 5.708 | 2.887 | 0.0948 | 0.0892 | | 0.3942 | 83.36 | |
| | 41 1/2 | 8 | 3142.9 | 19.76 | 13.38 | 0.31 | 1.21 | 0.35 | 2.84 | 32.5 | |
| | 46 1/2 | 8 | 3151 | 5.23 | 3.84 | 0.001 | 0.02 | 0.22 | 0.12 | 81 | |
| | 48 20/20 | 8 | 3156.2 | 22.88 | 17.15 | 0.74 | 0.67 | 0.2 | 1.59 | 16.8 | |
| | 52 3/4 | 8 | 3168.4 | 18.62 | 13.61 | 0.53 | 0.55 | 0.2 | 1.06 | 34.8 | |
| | 68 8/8 | 9 ¹ | 3185.0 | 29.86 | 20.52 | 0.0823 | 0.0237 | | 0.111 | 2.16 | |
| | 74 1/7 | 9 ¹ | 3190.0 | 29.35 | 21.26 | 0.0945 | 0.0262 | | 0.0967 | 2.03 | |
| | 94 3/4 | 9 ¹ | 3214 | 6.488 | 4.822 | 0.1479 | 0.2705 | | 0.7394 | 77.33 | |
| | 105 10/10 | 10 ² | 3297 | 11.87 | 8.648 | 0.0869 | 0.014 | | 0.0858 | 61.11 | |
| | 127 2/5 | 10 ² | 3320.7 | 8.232 | 6.012 | 0.0537 | 0.011 | | 0.0633 | 73.38 | |
| | 134 8/8 | 10 ² | 3336.3 | 24.13 | 17.87 | 0.6187 | 0.687 | 0.25 | 1.804 | 15.45 | |
| | 151 5/5 | 10 ² | 3495.5 | 28.05 | 20.1 | 0.0512 | 0.093 | | 0.2489 | 5.42 | |
| | 1581/18 | 10 ² | 3503.8 | 24.19 | 18.09 | 0.259 | 0.2373 | | 0.5876 | 17.31 | |
| | 161 6/6 | 10 ² | 3528.7 | 7.05 | 5.213 | 0.1662 | 0.5258 | 0.25 | 0.9858 | 74.11 | |

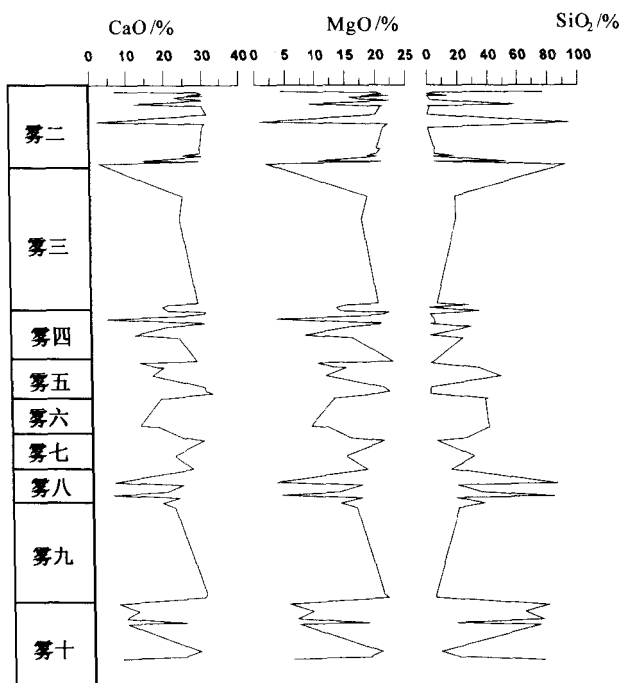


图 2-5 雾迷山组岩石主要化学成分变化曲线

(1)超微孔隙型 主要为致密泥晶、微晶灰岩、白云岩的晶间隙和晶内隙 孔隙度多小于 1.0% 在阶段进汞量曲线上 进汞峰值主要位于孔径小于 $1\mu\text{m}$ 区间内 液体一般无法在其中渗流 水-岩作用微弱；

(2)裂隙型 孔隙度为 1.31% ~2.51% 孔喉均值为 $0.046\sim 0.45\mu\text{m}$ 阶段进汞曲线表现为孤立的峰值，累计进汞曲线表现为相对均匀的阶梯状，表明是由不同宽度的裂隙相互连通组成的储集空间，渗透性较好；

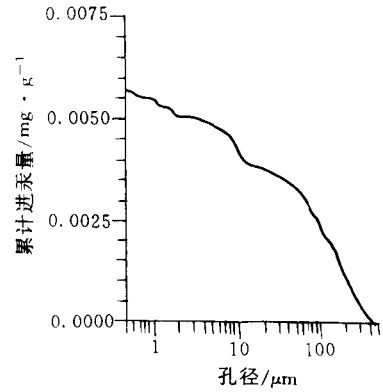
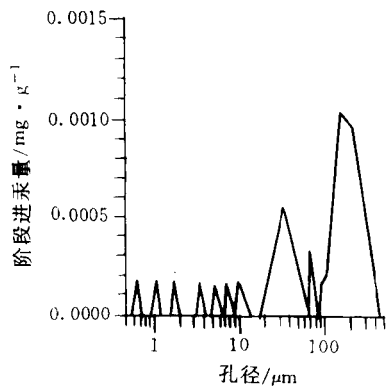
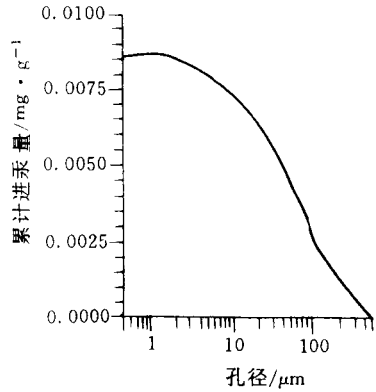
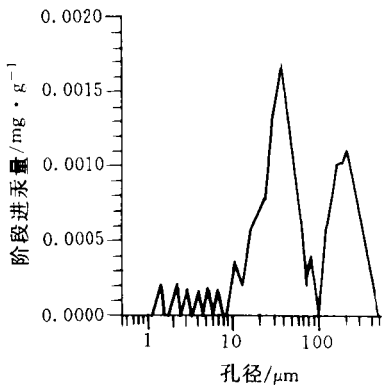
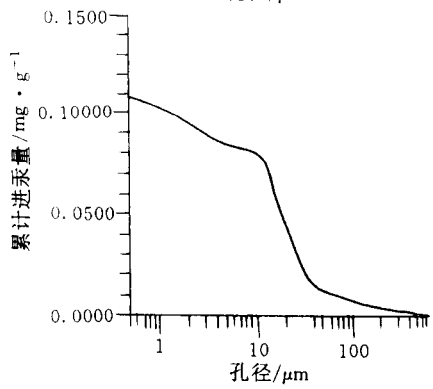
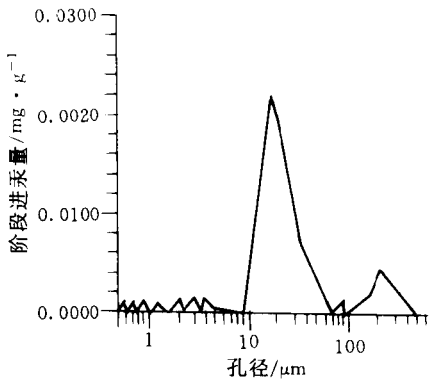
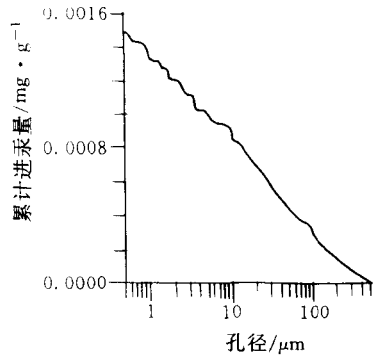
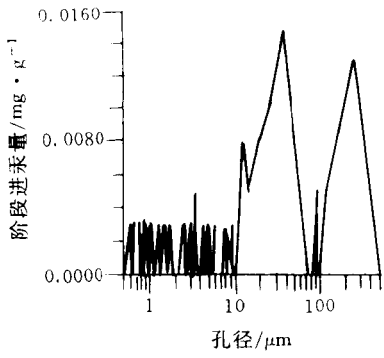


图 2-6 任丘油田碳酸盐岩压汞曲线类型

(3) 孔隙型 孔隙度为 2.51% ~ 8.46% 孔喉均值为 0.58 ~ 8.36 μm 储集空间由溶孔组成 进汞峰值主要位于大于 10 μm 区间内 储渗性能好。

(4) 孔隙—裂隙复合型 孔隙度为 2.33% ~ 5.14% 孔喉均值为 0.36 ~ 4.57 μm 储集空间由溶孔及与之连通的裂隙组成 阶段进汞曲线表现为多峰值 累计进汞曲线几乎为一直线, 说明孔隙发育且连通性好。

孔隙结构决定了储渗性能, 在很大程度上决定了水—岩作用的强弱。在小孔隙(孔径小于 10 μm) 中 液体一般无法在其中渗流 水—岩作用微弱 水溶液易饱和 往往产生沉淀; 大的孔隙或裂隙是主要的出油段 连通性好 渗透性强 油层采出后见水早 水—岩作用强烈 并以溶蚀作用为主。

第三节 岩溶发育特征

岩溶洞穴及大溶缝表现为放空、漏失和测井中的扩径现象, 其形成与分布受岩性、构造等因素控制。

雾迷山组白云岩由于受岩性影响 岩溶发育差异性较强 雾一、雾二组为硅质白云岩 坚硬性脆、溶蚀较弱 但经受多期构造运动 裂隙发育 漏失率高而漏失量少 而雾三至雾五组、雾七组和雾十组 主要为藻屑白云岩和块状白云岩 溶蚀作用较强 放空量大 漏失率高 雾六、雾八组和雾九组下部泥质白云岩因其成分的原因岩溶发育微弱, 在钻进过程中该层段的漏失现象多为上下岩性段漏失而造成的假象。由于受差异溶蚀作用的影响, 在与泥质白云岩接触的白云岩段岩溶发育, 形成顺层岩溶带, 如九井山头, 由于受到雾九组下部泥质白云岩的阻隔 钻遇雾十组顶部的任 9 井放空两次 总长 1.72 m 漏失泥浆 356 m^3 任 25 井放空 3 次 总长 1.02 m, 漏失泥浆 306 m^3 。

放空、扩径情况反映了地下溶蚀空间的特征 据 27 口放空井统计 放空 37 次 放空长度最小 0.17 m 最大 2.01 m 扩径 60 处 最小 0.4 m 最大 5.6 m 它们主分布在三个区间内, 其中以 0.2 ~ 1.0 m 区间最多 共有 55 次 占总次数的 65.4% 其次是 1.4 ~ 2.01 m 区间 共有 13 次 占 15.5% 最小的是 2.4 ~ 3.0 m 区间仅 5 次 占 6% 说明溶蚀孔洞不仅大小悬殊 而且分布不均。溶蚀孔洞纵向上主要分布在四、五、八油组内(图 2-7)。

钻井过程中的泥浆漏失量不仅是溶蚀孔洞的反映, 而且在一定程度上也说明裂缝的发育程度。据早期的 121 口井不完全统计, 历年来雾迷山组共漏失泥浆 45000 m^3 未漏失井 29 口 占 24% 漏失强度小于 1.0 m^3/m 者 39 口 占 32.20%。

在漏失井中, 有些是通过潜山面、断裂带和大型溶洞而产生严重漏失, 甚至有进无出。为更好地反映裂隙、岩溶与岩性的关系 将这些漏失点扣除 则各油组的漏失率是四、五、七油组最高 漏失强度在 1.18 ~ 1.33 m^3/m 间 其他各油组均小于 1 m^3/m (表 2-2)。

断层部位由于受到构造应力破坏 是地下水循环运移的良好通道 通常情况下 构造是控制岩溶洞穴形成与分布的重要因素, 但不同时期的断层对岩溶的控制作用是不同的。

在任丘油田 大的内幕断层由于形成时代较早 经受了多期岩溶作用 在长期裸露的过程中断棱被剥蚀夷平, 但对古岩溶的控制是十分明显的。如沿 381 井 ~ 350 井 ~ 49 井 ~ 248 井北西向的正断层上盘, 岩溶十分发育。33 口井中有 19 口井漏失 达 63.33% 放空井 3 口 任 22 井最大放空量达 2.0 m。在这一带内 岩溶的层控特征不明显 雾六 ~ 雾九均有放

空、漏失现象。

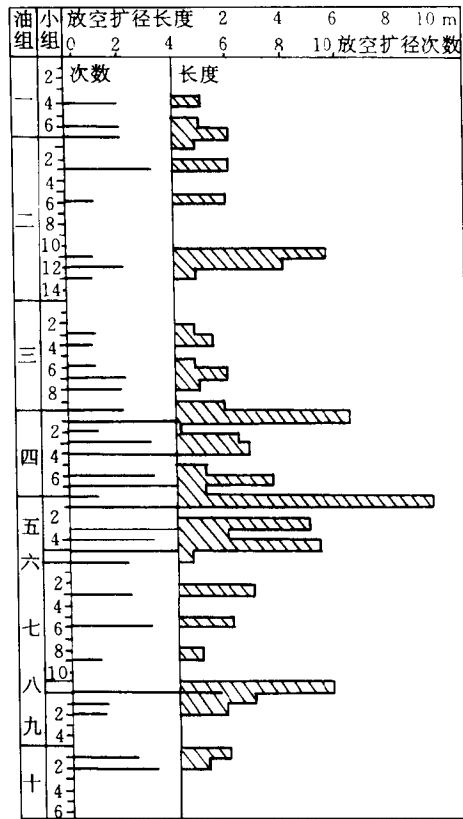


图 2-7 放空扩径与层位关系图

表 2-2

开发早期各油组泥浆漏失表

| 油组 | 漏失井数 | | 漏失率 | | 扣除部分井严重漏失 | | |
|------|------|-------|--------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|---------|
| | 井数 | 占总数/% | 漏失量/m ³ | 漏失率/m ³ ·m ⁻¹ | 漏失量/m ³ | 漏失率/m ³ ·m ⁻¹ | 扣除井号 |
| 一 | 13 | 10.7 | 5074 | 3.27 | 1527.0 | 0.99 | 202,205 |
| 二 | 13 | 10.7 | 1538.2 | 0.36 | 1100.8 | 0.25 | 16 |
| 三 | 15 | 12.4 | 6062.2 | 2.73 | 2741.9 | 1.23 | 204,214 |
| 四 | 31 | 25.1 | 5009.0 | 1.76 | 4503.7 | 1.59 | 20 |
| 五 | 18 | 14.9 | 4821.2 | 1.95 | 3861.1 | 1.56 | 17,33 |
| 六 | 9 | 7.4 | 1703.8 | 1.68 | 877.3 | 0.87 | 216,223 |
| 七 | 22 | 18.2 | 11085.3 | 2.79 | 7407.3 | 1.86 | 观 8,238 |
| 八 | 5 | 4.1 | 1007.3 | 1.18 | 1007.3 | 1.18 | |
| 九 | 7 | 5.8 | 3967 | 3.45 | 724.0 | 0.63 | 观 8,检 1 |
| 十 | 9 | 7.4 | 4731.9 | 3.94 | 1593.5 | 1.33 | 观 8 |
| 小计油田 | 121 | | 45000.4 | 2.08 | 25343.9 | 1.17 | |

近东西向多期活动的断层对岩溶的控制也比较明显，例如在 8 号断层带中，32 口井中有 15 口井有放空、漏失现象，占 46.88%。其中有 7 口井放空，总放空量达 4.59 m³，任 9 井两次放空，分别为 0.36 m³ 和 1.40 m³，最大放空入山深度达 497.52 m。在这一带中岩性、层位控制作用也不明显，从雾四到雾十均有放空、漏失现象。

北东向和北北东向断层主要形成于第三纪潜山被埋藏以后，对古岩溶的发育控制作用较小。

以往的研究认为，任丘油田存在三个水平溶蚀带和风化淋滤带，在同一溶蚀带内溶蚀作用受岩性和断层裂隙发育程度控制，原生孔隙和裂隙越发育，越有利于溶蚀作用的进行。从统计资料看七井山头南部、六井山头南部岩溶最发育，见洞率为 44%，平均溶洞率分别为 1.06% 和 0.75%，均为全区最高值。十一井山头、九井山头东部、七井山头北部岩溶不发育，见洞率均小于 30%，溶洞率为 0.31%~0.36%。其他地段见洞率、溶洞率居中。

构造裂隙是油田水渗流的通道，也是岩溶发育的主要场所，溶洞率大于 3% 的井点，多数分布在断层附近。在第二岩溶带中，它们充当了第三系油水混合液入侵古潜山的途径，因而沿裂隙溶蚀明显，以溶蚀为主，很少见到晶体充填。经过重结晶的白云岩，由于晶体粗大，晶间隙发育，便于油田水渗流，加之晶体内解理发育，当不饱和的油田水与之接触时，首先沿解理及其交汇处形成微溶孔溶隙，并不断被扩大，因此，在雾迷山组粗结构的白云岩中，溶蚀孔洞最发育，多为良好含油段。

根据放空、漏失资料将任丘油田雾迷山组划分为三个区，即强岩溶发育区（放空或漏失强度大于 25 m³/m）、中等岩溶发育区（漏失强度在 10~25 m³/m 之间）和弱岩溶发育区（漏失强度小于 10 m³/m）。一般情况下，强岩溶带是初期开发的主要出油段，开采后见水早，渗流速度快，注水条件下水-岩作用强烈；弱岩溶区也就是低渗透区，是油田后期开发的主要对象，低渗透区内油水运移速度慢，水-岩作用弱。

第四节 小结

水-岩作用过程中，岩石的成分特征起着重要的作用。本项研究对任 28 井、任 239 井和任 266 井三口井的 76 块岩心进行了化学成分、矿物成分测试。综合以往的结果表明，雾迷山组白云岩化学成分复杂，后期硅化强烈，其矿物成分主要以白云石和燧石为主。不同的岩性决定了岩溶发育程度和渗透性的差异，其中雾六、雾八组为区域性的相对隔层，在雾三、雾五、雾十油组中也有薄的隔层，它们对油水的运移产生封隔作用，加上构造的作用可形成圈闭，圈闭内受注水及采油影响小，渗流缓慢，水-岩作用微弱。根据放空、漏失等资料对雾迷山组岩溶发育强度进行了分区，在强岩溶带或强渗透带见水早，水流速度快，水-岩作用以溶蚀为主，而在低渗透带水流滞缓，水-岩作用以沉淀为主，因此，岩溶发育强度和渗透性在很大程度上决定了水-岩作用的强度和性质。

第三章 油藏开发过程中的油水运移特征

第一节 油藏开发过程

任丘雾迷山组油藏是我国第一个大型碳酸盐岩古潜山油藏，1975年9月因任4井裸眼井段试油获千吨高产油流而发现。该油藏于1975年7月被发现，9月投入试产，至1976年10月共布井17口，日产达到30000t以上水平，单井日产最高5435t(任9井)，投产速度快，初始产量高，经济效益好，实现了当年收回成本，开创了我国碳酸盐岩古潜山油藏开发的新阶段。油藏开发经历了增产、高产稳产、产量迅速递减和缓慢递减4个阶段(图3-1)共采出原油 1.15×10^8 t，各项指标见表3-1。

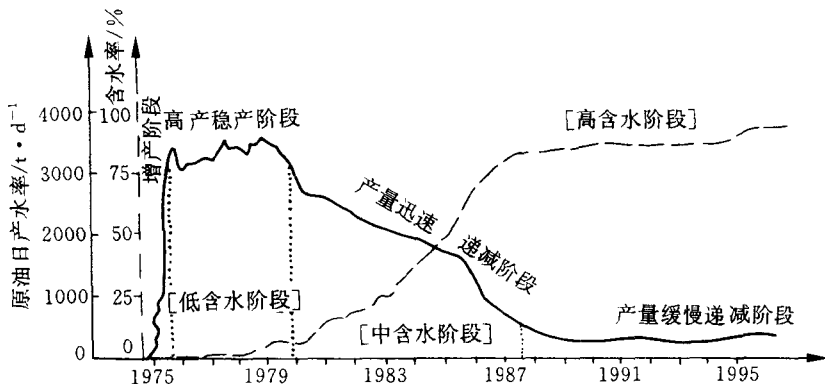


图 3-1 任丘油田开发阶段曲线

表 3-1 任丘雾迷山组油藏历年开发综合数据表

| 时间 年月 | 采油 总井数 (口) | 产 油 量 | | | 采出 程度 /% | 年底综 合含水 /% | 注 水 | | 注水量 | | 累积 注采比 |
|----------|------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------|------------------|------------|------------|--|--------------------------|-----------|
| | | 平均单 井日产 /t·d ⁻¹ | 年产量 /10 ⁴ t | 累计 产量 /10 ⁴ t | | | 总井数 (口) | 开井数 (口) | 年底日 注水平 /m ³ ·d ⁻¹ | 累注 /10 ⁴ t | |
| 1976.12 | 22 | 1805.7 | 598.0 | 609.7 | 1.62 | 0.26 | 3 | 3 | 2122 | 6.6 | |
| 1977.12 | 27 | 1200.3 | 1146.7 | 1756.4 | 4.68 | 1.64 | 10 | 10 | 32589 | 794.9 | 0.37 |
| 1978.12 | 34 | 1117.4 | 1220.2 | 2976.6 | 7.93 | 0.33 | 10 | 10 | 40718 | 2119.1 | 0.58 |
| 1979.12 | 52 | 765.8 | 1284.7 | 4261.3 | 11.35 | 3.60 | 13 | 13 | 45738 | 3664.1 | 0.70 |
| 1980.12 | 69 | 550.5 | 1151.2 | 5412.5 | 14.42 | 7.26 | 14 | 14 | 44990 | 5349.6 | 0.78 |
| 1981.12 | 82 | 347.3 | 978.6 | 6391.1 | 17.02 | 13.30 | 15 | 15 | 37023 | 6753.0 | 0.82 |
| 1982.12 | 101 | 266.4 | 904.5 | 7295.6 | 19.43 | 18.60 | 15 | 15 | 35394 | 8055.0 | 0.85 |