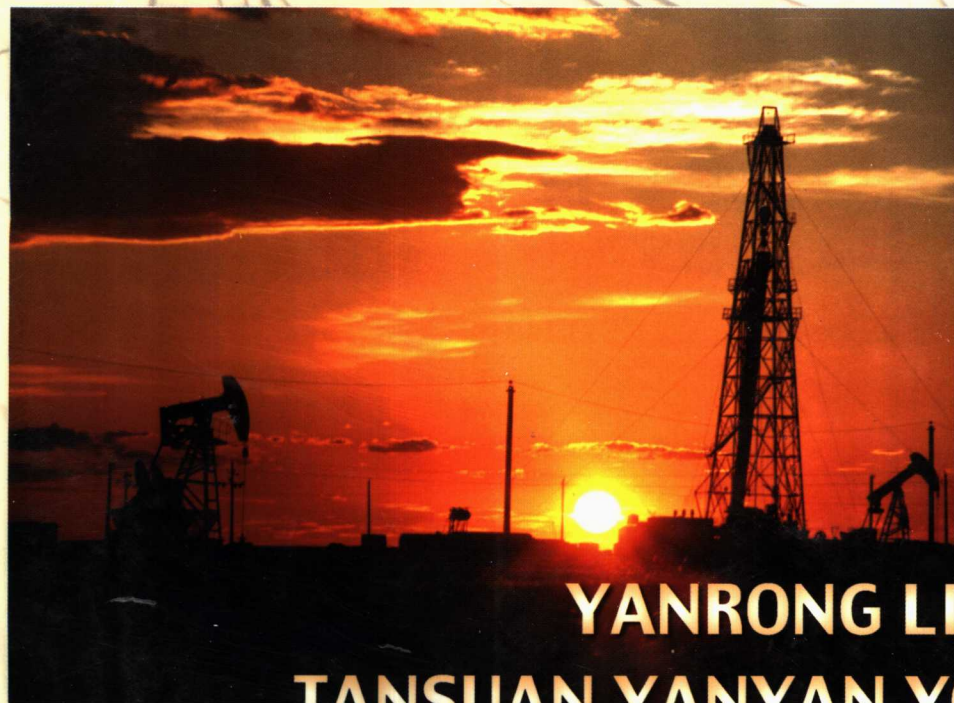


岩溶理论在 碳酸盐岩油藏开发中的应用

——以任丘油田为例

袁建国 罗承建 于俊吉 著
韩宝平 冯启言 毛 琼



YANRONG LILUN ZAI
TANSUAN YANYAN YOU CANG
KAIFAZHONG DE YINGYONG

中国矿业大学出版社

岩溶理论在碳酸盐岩油藏
开发中的应用
——以任丘油田为例

袁建国 罗承建 于俊吉 著
韩宝平 冯启言 毛 琼

中国矿业大学出版社

责任编辑 宋党育
责任校对 崔永春

图书在版编目(CIP)数据

岩溶理论在碳酸盐岩油藏开发中的应用:以任丘油田
为例 / 袁建国等著. —徐州:中国矿业大学出版社,
2001. 6

ISBN 7 - 81070 - 260 - 2

I. 岩… II. 袁… III. 岩溶-应用-碳酸岩油气田-
油田开发 IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 53806 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 215 千字

2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

印数 1~1000 册 定价 38.00 元

前 言

世界油气勘探与生产的资料表明,石油天然气储量和产量的50%来自碳酸盐岩地层,而碳酸盐岩地层中油气储量的80%又是由层状白云岩中产出的。世界上日产量超万吨的油井其储集层均为碳酸盐岩。大量勘探开发资料表明,碳酸盐岩油藏的储集空间主要为岩溶作用所形成的次生孔隙,由于受构造、岩性、古地貌条件等多种因素的综合控制,岩溶作用不均一性较强,从而导致碳酸盐岩油藏不同块段储集特征的差异性较大。利用岩溶理论研究岩溶作用规律,从而探讨碳酸盐岩储集层赋存特征具有重要的理论意义和经济价值。

任丘油田是我国发现的第一个大型碳酸盐岩古潜山油藏,1975年7月因任4井裸眼井段试油获千吨高产油流而发现,自1975年9月投入开发以来,一直以岩溶理论为指导,取得了巨大的经济效益。在开发早期,我们运用岩溶理论,根据不同块段岩溶发育特征进行分块治理,主要寻找大缝、大洞发育的强岩溶带。当时的认识是放空、大漏井必高产,这种开发方式对于油藏早期的高产、稳产起到了至关重要的作用;在中后期开发过程中,随着注水的进行,大缝、大洞由于连通性好,水侵速度快,致使储层中大缝、大洞为主的油井见水早,含水率上升快,产量递减明显。此时,我们仍根据岩溶理论对古潜山储集特征进行了深入分析,以寻找弱岩溶带为主要目标,它们以溶孔、溶隙为主,连通性不很好,渗透性较低,因此在注水后仍有大量剩余油分布,针对这种情况采取不同的工艺措施,减缓了中后期原油产量下降的速度,取得巨大的经济效益。这项成果经专家鉴定为国内领先水平。

本书就是在对上述开发成果进行系统总结的基础上完成的,是集体劳动的结晶。编写过程中的分工如下:前言、第一章,全书章节框架和总体思路,袁建国;第二、第六章,韩宝平;第三章、第五章,罗承建;第四章、第七章,于俊吉、毛琼;第八章,冯启言;最后由袁建国统稿完成。参加本项工作的还有张洪茂、赵书怀、李炉明等同志。

书中不当之处,请专家和同行们批评指正。

作 者

2000年12月于华北油田

目 录

前言	
第一章 任丘油田雾迷山组油藏开发过程.....	(1)
第二章 深部热水岩溶发育理论.....	(4)
一、深部热水岩溶发育理论	(4)
二、任丘古潜山油田岩溶的独特性	(11)
三、研究方法	(11)
第三章 雾迷山组岩石物质组成及其对岩溶的控制作用	(13)
一、雾迷山组地层结构	(13)
二、雾迷山组岩石成分特征	(14)
三、雾迷山组白云岩的孔隙结构	(30)
四、任丘油田雾迷山组储集层渗透特征	(37)
五、岩性对溶蚀特征影响的实验研究	(39)
六、白云岩岩性及结构对岩溶和剩余油的控制作用	(43)
第四章 任丘油田构造分布特征及其对岩溶的控制作用	(49)
一、构造分布特征	(49)
二、构造复杂程度评价	(50)
三、构造对岩溶的控制作用	(52)
第五章 古潜山地貌及其对岩溶与剩余油的控制作用	(53)
一、任丘雾迷山组古潜山的形态特征	(53)
二、构造和岩性对古潜山地貌的影响	(53)
三、古地貌对岩溶发育的影响	(55)
四、古潜山地貌对剩余油的控制作用	(56)
第六章 任丘油田雾迷山组水化学场演化与岩溶的关系	(60)
一、开发前任丘油田雾迷山组古潜山水化学场演化	(60)
二、雾迷山组油藏开发时期水化学场演化	(66)
三、雾迷山组油田水同位素特征	(71)
四、雾迷山组油藏开发过程中的新岩溶作用	(75)

第七章 任丘油田雾迷山组岩溶发育规律与低渗透区剩余油分布	(79)
一、雾迷山组岩溶总体发育规律	(79)
二、雾迷山组低渗透区划分	(84)
三、低渗透区剩余油分布与布井建议	(88)
第八章 任丘油田电泵结垢机理专题研究	(91)
一、任丘雾迷山组油藏开发过程中结垢情况	(91)
二、结垢物成分分析	(91)
三、436 井结垢物的扫描电镜观察	(93)
四、结垢机理分析	(95)
五、结垢防治对策	(98)
参考文献.....	(101)

第一章 任丘油田雾迷山组油藏开发过程

任丘油田是我国第一个大型碳酸盐岩古潜山油藏,1975 年 7 月因任 4 井裸眼井段试油获千吨高产油流而发现。该油田位于河北省任丘市城关镇至辛中驿一带,构造上处于冀中拗陷饶阳凹陷之中(图 1-1、图 1-2),储集层属于中元古界蓟县系雾迷山组,被 2587.5~3510 m

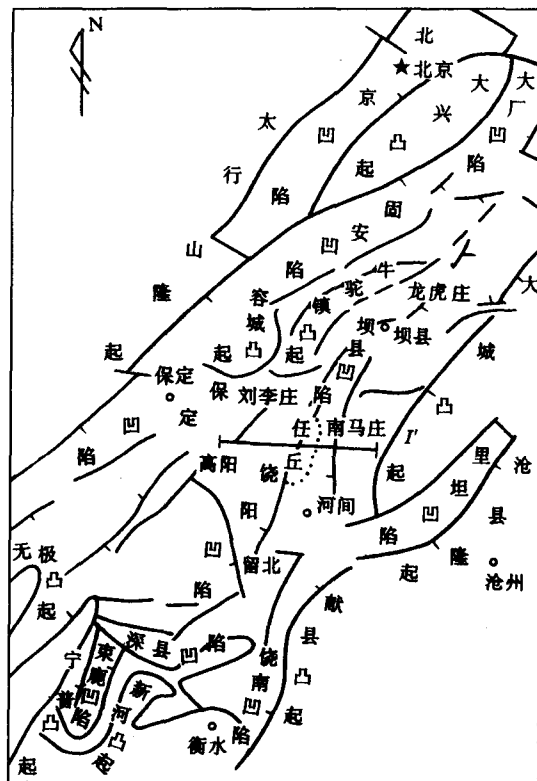


图 1-1 任丘油田构造位置图

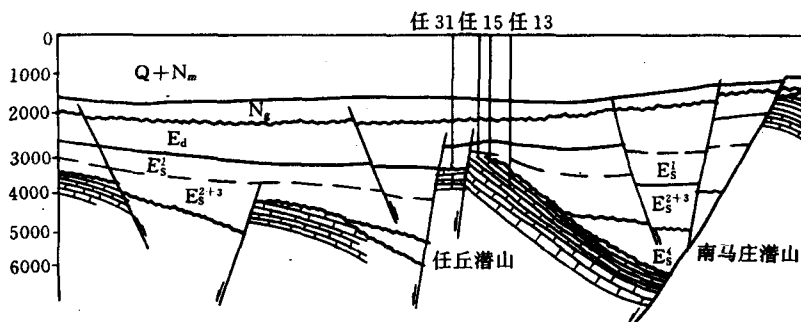


图 1-2 任丘油田古潜山剖面图

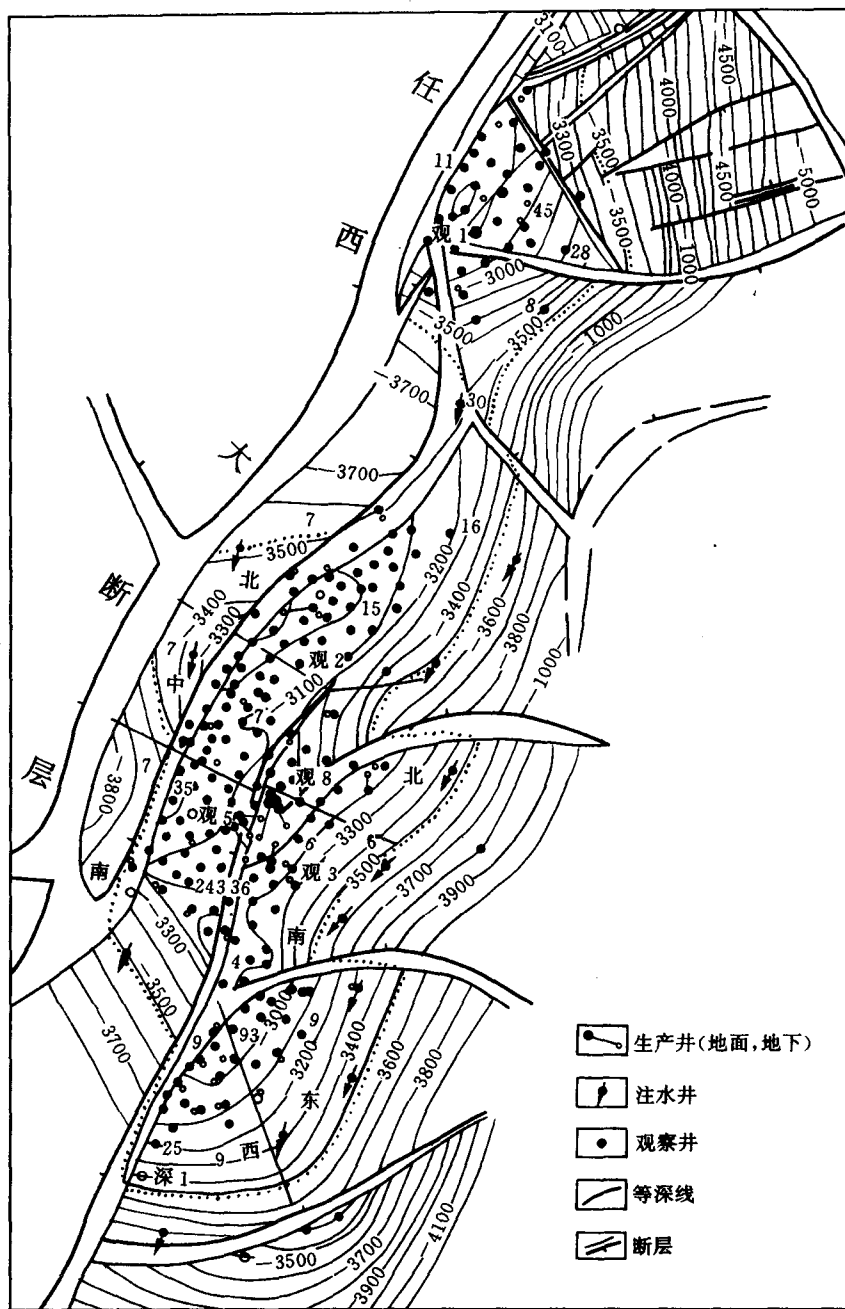


图 1-3 任丘雾迷山组油藏平面图

厚的新生代地层所覆盖。任丘油田雾迷山组古潜山西侧被断距为 1000~2600 m 的任西大断层切割形成断层崖,峰顶沿断棱延伸,东侧呈缓坡状倾伏于凹陷之中,古潜山地形为一西陡东缓的单面山,被近东西向断层横切形成高低不同的任十一井、任七井、任六井、任九井和任五十七井 5 个山头(图 1-3),潜山走向 $NE20^\circ$,南北长 18 km,东西宽 4 km,含油面积 56.9

km²,原始地质储量为 37606×10^4 t,可采储量 11978.7×10^4 t。

任丘雾迷山组油藏从 1975 年 7 月被发现,9 月投入试产,至 1976 年 10 月共布 17 口井正式生产,日产达到 30000 t 以上水平,单井日产最高 5435 t(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。1976 年 12 月 10 日在任 13 井首先开始注水补充开发能量,随后其他 16 口井也相继开始注水。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,油田大规模见水后则利用油水分离后的污水进行回注,直至 1994 年 4 月开始停注降压试验。累计注入清水 74988958 m³,污水 105782173 m³。

油田开发经历了增产、高产稳产、产量迅速递减和缓慢递减 4 个阶段(图 1-4),共采出原油 1.15×10^8 t。在开发过程中含水率不断上升,目前全油田综合含水率 90% 左右,自油藏开发以来地层压力已下降了约 7 MPa(图 1-5)。经过一系列措施,目前油藏内油水关系复杂,后期挖潜开发难度很大,需要新的理论来指导后期挖潜工作。

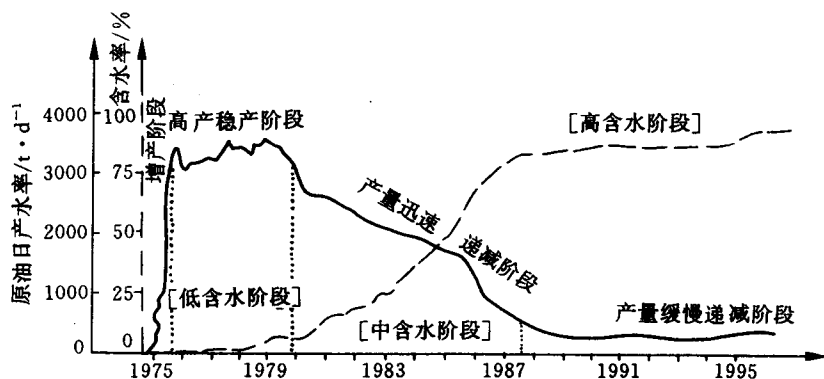


图 1-4 任丘油田开发阶段曲线

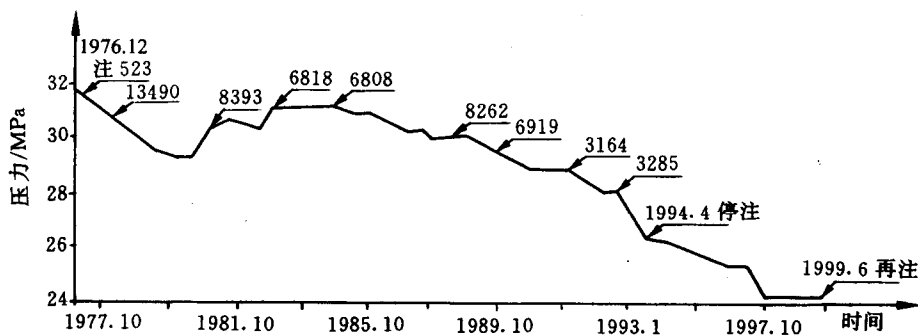


图 1-5 任观 1 井油层压力历时曲线

第二章 深部热水岩溶发育理论

碳酸盐岩油气藏在世界油气田的分布中占有重要地位,据初步统计,世界上已有 40 个国家和地区在 57 个沉积盆地中发现和开发了碳酸盐岩油气田;其油气储量分别占世界油气总储量的 48% 和 28%;油气产量分别约占世界总产量的 60% 和 30%。特大型油气田均为碳酸盐岩油气田,世界上单井产量最高的井(万吨井)也均是碳酸盐岩油井;在北美,白云岩储集层中的油气储量占全部碳酸盐岩油气可采储量的 80%。据统计,可采储量超过 7000 万吨的大油田共有 199 个,其储量占世界总储量的 67.5%,这 199 个大油田中,碳酸盐岩油田为 75 个,占大油田总储量的 50%,而且碳酸盐岩大油田的平均可采储量为 5.6 亿吨,比砂岩大油田可采储量高近一倍(砂岩大油田平均可采储量为 2.9 亿吨),由此可以看出碳酸盐岩油藏的重要性。

碳酸盐岩储集层中的油气主要储存于岩溶孔隙中,溶蚀孔隙的形成主要受古岩溶和深部热水岩溶控制,因此,首先对深部热水岩溶发育原理作一简要阐述。

一、深部热水岩溶发育理论

(一) 深岩溶与古岩溶

1. 深岩溶

国内对深岩溶的看法不下 20 种,综合起来可分为以下四类:

- (1) 深岩溶是指当地侵蚀基准面以下发育的岩溶现象;
- (2) 深岩溶是指当地侵蚀基准面以下一定深度的岩溶现象(李茂秋认为是侵蚀基准面以下 100 m 范围内的岩溶现象,段志昌仅笼统地认为“一定深度下”);
- (3) 以化学指标划分,如胡宽容、曹玉清认为:“深岩溶现象是指在岩溶水中 CaSO_4 饱和指数大于 1 的地带出现的岩溶现象”;
- (4) 以深度划分,某一深度(有些生产单位定为 300 m)以下的岩溶现象为深岩溶。

由于对深岩溶持有不同认识,研究者们各根据自己的认识进行工作,缺少协同、持续的研究,因此进展不大。我们认为(2)、(3)、(4)种提法虽有一定的道理,但有很大的局限性;其一人为性明显,深度指标为人为界限,很难反映岩溶发育的客观规律;其二化学指标并没有稳定性,因为饱和指数是根据钻孔水化学分析数据计算所得,由于地下水处于运动中,加之目前人为活动干扰变化更大,即使同一钻孔内不同时期的水质也不尽相同,如按饱和指数则可得出不同划分深度,导致混乱。我们倾向于第一种说法,即“当地侵蚀基准面以下的岩溶现象为深岩溶”,因为对于一个地区来说,侵蚀基准面在一定的地质时期内是相对稳定的,它的高度也反映了该区地下水侵蚀、运动营力的基面,因此作为深岩溶的稳定上限是较为合适的。

2. 古岩溶

目前国内外对古岩溶的时代划分有两种认识:一种认为第四纪以来发育的各种岩溶现象属于现代岩溶,而第四纪之前碳酸盐岩中发育形成的各种溶蚀空间为古岩溶;另一种则认为新生代以来形成的岩溶为现代岩溶,而新生代以前形成的岩溶则称为古岩溶。

鉴于第三纪与第四纪的气候差别较大,而且第三纪时形成的岩溶现象被后期改造较大,无法正确确定其特征,因此大多数岩溶研究者将古岩溶的时代界线定为第四纪之前,我们也认为这一时代界线较为合理。

3. 深岩溶与古岩溶的关系

前已述及,深岩溶是埋藏较深而目前仍在发育着的岩溶过程及其形成的各种空间,而古岩溶则是其主要岩溶作用过程和形成的空间是在古代形成,而目前作用十分滞缓或停止的现象。

深岩溶可以是现代岩溶也可以是古岩溶,而古岩溶却不一定是深岩溶。在现场这两类岩溶现象又往往互相叠置在一起,很难明确地将它们区分开,只有通过同位素测试和矿物包裹体分析等现代化的测试手段才能揭示其形成年代。

4. 岩溶发育的优势方位

① 厚层质纯灰岩分布区;② 断裂及其交汇部位;③ 可溶岩与非可溶岩交界面附近;④ 硫化矿床氧化带;⑤ 河谷区混合深岩溶区。

5. 岩溶的垂直分带性

在一个构造相对稳定的岩溶发育期中,厚层缓倾斜碳酸盐岩地区在垂向上岩溶发育受水动力条件的影响,一般可分为四个带(图 2-1),在这四个带中岩溶作用的强度和作用特征是不同的:

(1) 垂直入渗带,位于最高地下水位以上,地下水以垂直运动为主,岩溶形态以垂直形态为主,其深度取决于地形地貌条件,在平原地区只有几米至几十米,在高山峡谷地区可达数百米;在低洼地区,由于充填埋藏作用,岩溶不发育。

(2) 垂直水平交替带,位于地下水高水位和低水位之间,地下水既有垂直流又有水平流,既有水平岩溶现象又有垂直岩溶现象,水位变化幅度决定了本带的厚度。

(3) 水平循环带,该带内地下水受当地侵蚀基准面控制作水平运动,尤其在浅部由于水力坡度大,径流条件好,加之不断接受上部垂直入渗的水流补给,溶蚀作用强烈,大部分水平岩溶形态均发育在此带。在本带中岩溶发育强度和水循环强度均随深度而减弱,并逐渐过渡到深循环带。

(4) 深循环带,位于当地侵蚀基准面以下,地下水参与区域水循环,径流缓慢,溶蚀作用微弱,岩溶形态以小溶孔小孔隙为主,在水流滞流区可出现沉淀充填现象。

(二) 深部热水岩溶发育理论

1. 热水岩溶的分类

深部热水岩溶是指在较大深度上(一般深于 500 m)由于热水溶蚀碳酸盐岩而形成的岩溶现象,按照其侵蚀性组分可分为两类:一类为来自浅部的岩溶水在深大断裂处深循环,受热后对储水空间进行溶蚀作用过程和由此形成的结果,称为外生深岩溶,如法国沿断裂发育的让·贝尔纳洞穴深达 1535 m,即为此成因;另一类为含有深源 CO_2 、 H_2S (包括无机的岩浆

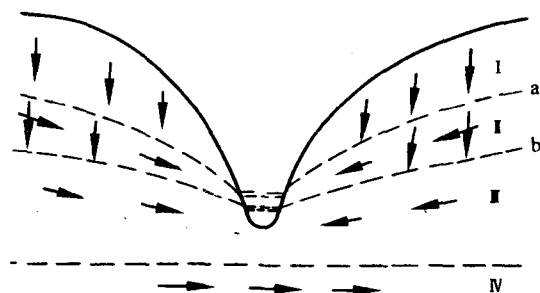


图 2-1 岩溶垂向分带示意图

I —— 垂直入渗带; II —— 垂直水平交替带;

III —— 水平循环带; IV —— 深循环带

a —— 雨季时地下水位; b —— 旱季时地下水位

分异来源或深部油气体分解的有机来源)等侵蚀性组分的热液在上升运动的过程中溶蚀含水介质的作用过程及其结果,称为内生深岩溶,如美国著名的卡尔斯巴德洞穴就主要受深部的天然气 H_2S 和 CO_2 溶蚀而成(图 2-2);而我国汾渭地堑来自于地壳深部的热水不仅形成如骊山华清池等著名温泉,也形成了许多深岩溶现象(图 2-3)。

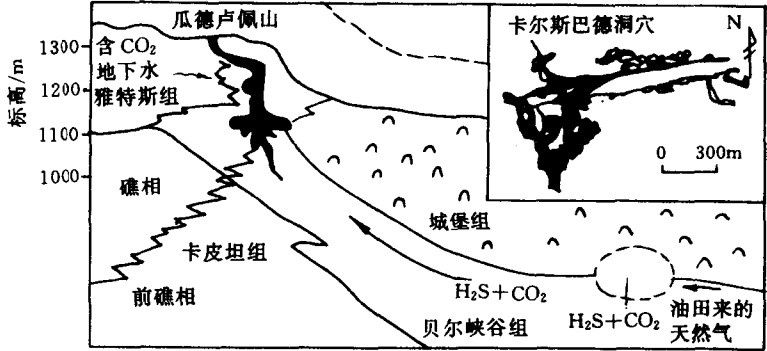


图 2-2 美国卡尔斯巴德洞穴成因示意图

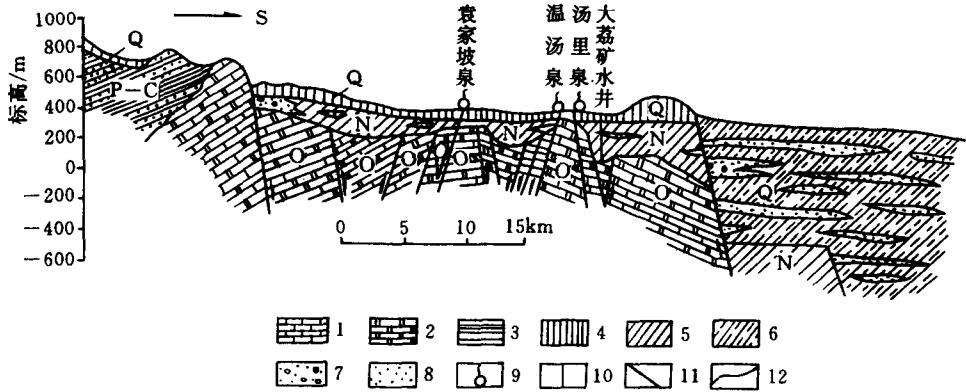
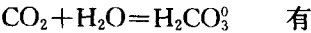


图 2-3 汾渭地堑中深岩溶剖面

1——灰岩; 2——白云岩; 3——砂页岩夹煤层; 4——黄土; 5——粘土岩; 6——亚粘土;
7——砂卵砾石; 8——砂岩; 9——温泉; 10——矿泉水; 11——断层; 12——地层界线

2. 混合溶蚀作用

冷却溶蚀的原理可从碳酸的形成及其离解反应的平衡常数随温度而变化的规律中得到解释。根据质量作用定律,其反应式



$$K' = \frac{(H_2CO_3^0)}{(CO_2 \text{ 平衡})} \quad \text{或} \quad H_2CO_3^0 = K' \cdot (CO_2 \text{ 平衡})$$

式中 K' 为平衡常数,圆括号分别表示有关分子(或离子)的活度,水的活度近似地等于常数。同样,对于反应式 $H_2CO_3 = H^+ + HCO_3^-$ 有

$$K'' = \frac{(H^+) \cdot (HCO_3^-)}{K' \cdot K''}$$

平衡常数 K' 及 K'' 随温度变化情况见表 2-1, 表中 PK 值为平衡常数 K 以 10 为底的负对数(类似 pH 值的表达法)。表中可见 $P(K' \cdot K'')$ 值随温度的升高而增大, 即乘积 ($K' \cdot K''$) 随温度升高而减小, 故当 $(H^+) \cdot (HCO_3^-)$ 保持不变时, 为平衡一定量的 (HCO_3^-) 所需的 (CO_2) 平衡) 亦将随温度升高而增加, 随温度下降而减小。这样, 当温度下降时将从平衡状态下的溶液中出现剩余的游离 CO_2 , 从而具有附加的侵蚀能力, 温度不同的地下水相混合后, 亦将产生附加的侵蚀性, 其原理和 CO_2 含量不同的地下水混合时相类似。

表 2-1 平衡常数 K 值随温度变化情况表(PK 值根据 John Thraikill)

温度/°C	0	5	10	15	20	25
PK'	1.1144	1.1938	1.2695	1.3412	1.4063	1.4635
PK''	6.5773	6.5171	6.4647	6.4200	6.3823	6.3514
$PK' + PK'' = P(K' \cdot K'')$	7.6917	7.7109	7.7342	7.7612	7.7886	7.8149

A. 伯格里在 1965 年提出, 形成深部洞穴的基本动力是混合溶蚀作用。它是基于 $CaCO_3$ 及 CO_2 平衡曲线为一非线性函数这一简单的实验(图 2-4)。从图上可知, 平衡曲线是向下凹的, 曲线以上是过饱和区, 曲线以下是未饱和区, 如果饱和水 W_1 与 W_2 混合后, 产生不饱和的水, 混合比例不同则混合水不饱和的程度各异。如果混合比 $W_1 : W_2$ 为 30 : 1 时, 其不饱和程度比 1 : 1 混合时更高, 饱和的水和过饱和的水混合时, 如果饱和水所占比例较大, 则仍产生侵蚀性, 如图中所示, W_1 与 W_2 以 3 : 1 相混合, 仍落在不饱和区。

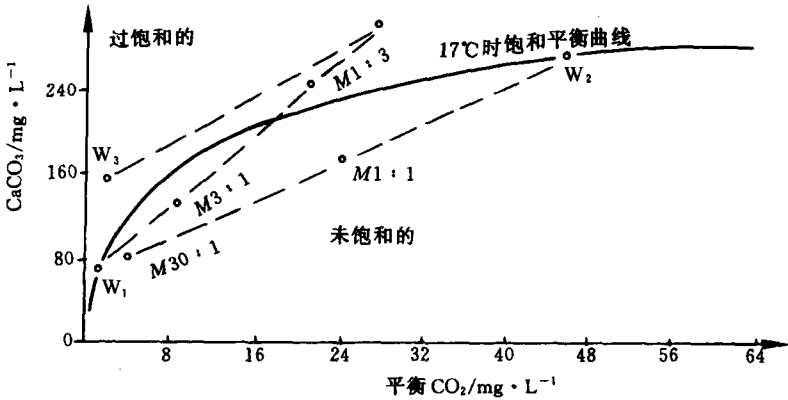


图 2-4 混合溶蚀作用图(据伯格里 1965, 思雷尔基尔 1968)

冷却溶蚀及热混合溶蚀在地壳上部的季节变温带能起较大作用, 特别是在温暖季节, 地表及上层的温度高于变温带下部, 从上往下入渗的水流将会降温, 从而增加其侵蚀性。在恒温带中, 由于地热增温, 因而可能发生相反的过程。但是, 从地壳深部向上运动的含 CO_2 的温泉, 则由于降温而不断产生附加的溶蚀能力, 特别是在它到达浅部与较低温的水相混合后, 它的溶蚀能力将有显著的增加。因此, 对这类温泉来说, 即使没有新的 CO_2 补充, 也会由于冷却和热混合作用而长时间地保持其侵蚀性。

(1) 深部冷水与热水的(温度)混合溶液作用

两股温度不同而饱和度相同的水相混合,或一股水的温度由高温变为低温时,也可以产生新的侵蚀性 CO_2 ,继续加强溶蚀作用,这种温度和 CaCO_3 溶蚀间的反比关系,称为温度混合溶蚀作用。如两股饱和度相同、温度不同的水相混合,表现出温度的降低,溶解相同 CaCO_3 所需的 CO_2 量可以减少,就有相应的 CO_2 变成游离的 CO_2 ,其中一部分成为侵蚀 CO_2 ,就有溶解 CaCO_3 的能力。

美国东部佛罗里达灰岩高原,在海面以下 768.7~796.1 m 深处发现一个 27.4 m 的溶洞,往下又在 -1066.8~-1079.3 m 处遇到高 12.5 m 的洞穴。同时在海平面以下 914.4 m 左右地方发现地热梯度是负的(向下变冷),地下水温度在接近深海水体边缘地区为 21°C ,到佛罗里达高原中轴地区上升到 42.2°C 。温度梯度的水平和垂直分布表明,地热梯度逆温是由于冷的、高密度的深海海水,通过含水层深部有孔洞的白云岩流入内部(图 2-4),与佛罗里达中部地区深层的淡水相汇合,大致在 -700~-823 m 深度的地方,也正是“巨砾带”(深部洞穴因顶部塌陷,在洞底堆积巨大块石而得名)的位置,是“巨砾”和“浓盐水流”交织的地方。这种高温和低温、高密度和低密度、高盐分和低盐分水的混合,是生成这个地区大溶洞的水化学因素。这与两种温度不同的饱和水、含盐不同的饱和水因混合后变成不饱和而增强溶蚀作用的理论一致。

(2) 碳酸盐岩与卤水的混合溶蚀作用

如把一定量的卤水加入水中,那么原来的水由于有 NaCl 加入而大量增强其溶解能力。灰岩在纯水水中的溶解度是较低的(约 15 mg/L),当存在有产生 HCO_3^- 离子的盐类时,由于生成更容易溶解的重碳酸钙,其溶解度随着 HCO_3^- 离子浓度的增加而显著增加。据实验数据,当溶液中加入 NaCl 或卤水时, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的溶解数量的增加是变化不定的,它取决于两个因素:① 随 CO_2 含量的增加而增加,有时喀斯特水中含有较多的化合状态的 CO_2 时, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的溶解数量会达到 1 g/L 或更高,这样的溶解度是相当大的;② 溶液本身的稀释程度,较低浓度的水溶液中 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的溶解度要大,反之则小。在浓度低于 300 mg/L 的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 饱和溶液内,加入浓度为 1% 的 NaCl 溶液时,所引起的溶解度的增大超过 15%。

上述情况说明盐对洞穴生成有不可忽视的重要意义,特别是对海滨及盐泉地区的喀斯特作用具有重要影响。在封闭系统条件下进行的实验表明,当混合物中含有 15% 的海水时(正常浓度海水),pH 值最小,其溶解 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的能力增大;若海水浓度超过 15% 时,则 pH 值增大,溶蚀作用就会减弱。

图 2-5 就是喀斯特水与海水的混合所产生的溶蚀现象。美国佛罗里达半岛伸入墨西哥湾内,海水通过白云岩体中的裂隙进入半岛内部,在海平面以下 823 m 处形成地下水与海水混合,并产生地下水降温现象,同时也发生溶蚀作用,“巨砾带”就是它的产物。盐水与淡水混合,使地下水中盐分升高 15.59%。这些大洞穴和巨砾带的出现,与海水的入侵有关;因海水入侵导致温度的降低和盐分的增加,从而产生混合溶蚀作用,其混合点也正是盐水与地下水相混之处。

(3) 与油气伴生的酸性组分

在烃类聚集过程中, CO_2 、 H_2S 等酸性组分是其重要的伴生成分,一般含量百分之几至 20% 以上。其主要来源如下:

① 有机质的脱羧降解作用,有机质在热化学生油期间,由于脱羧降解作用产生大量的

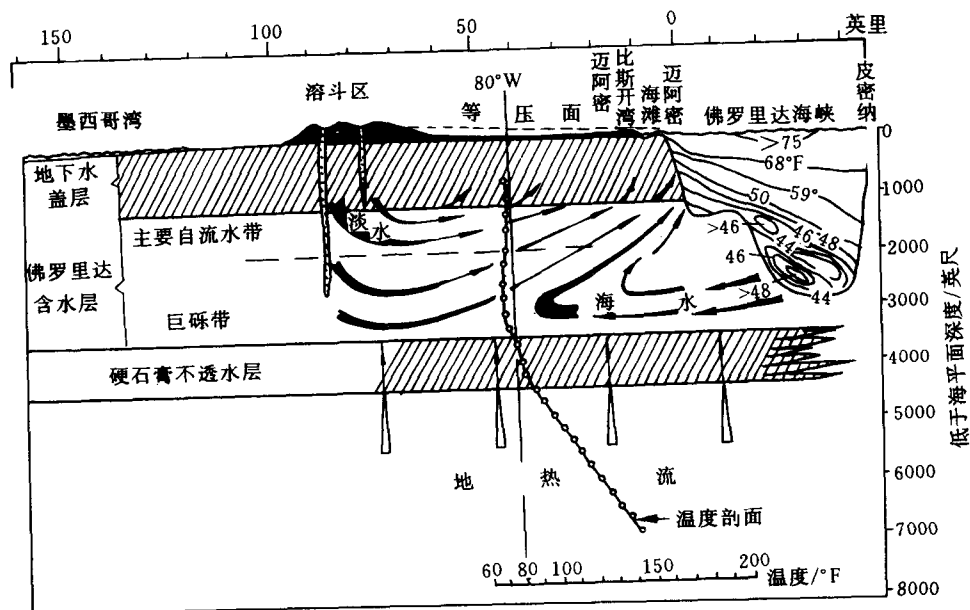
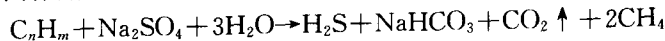


图 2-5 由于地热增温而产生的海水环流的理想剖面(美国迈阿密)

CO₂。Momper 的实验证明,在上述过程中,标准生油有机质重量的 5% 将转化为 CO₂。

② 在脱硫细菌作用下,油田水中的硫酸盐岩与烃类(C_nH_m)反应而产生,反应式为:



上述反应导致油田水中 SO₄²⁻ 含量大大降低,这在任丘油田、大港、胜利油田都得到了证实。C H Moore 等人(1981)曾指出:“深部次生孔隙的形成可能与细菌参与下的有机质成熟有关。”

③ 原油伴生液中的各类脂肪酸,上述各类成因的酸性组分溶解于油田水中,使其具有很大的侵蚀性,可以强烈地改造油气储集层,形成较大洞穴。牛驼镇突起为任丘油田的主要油气上升区,浅牛 1 井地温梯度达到 11°C/100 m,而坝 8 井在碳酸盐岩古潜山面以下 1326.4 m 处,钻孔遇一高 6.46 m 的大溶隙(或溶洞),可能为内生热水岩溶现象。

3. 深部碳酸盐岩的热解作用

干燥碳酸盐岩的分解温度约为 500~600°C,但如果有水参与,从 75°C 开始它就可以产生离解。基辛和帕霍莫夫所做的实验表明:由于水对含有碳酸盐矿物岩石的作用,在形成油气的温度条件下,可生成大量的 CO₂。保加利亚和希腊之间的罗波多山脉的阿尔玛河地区,在太古代的大理岩内发育了世界上稀有的洞穴,它就是在热液作用下形成的深部洞穴。石油勘探在深部遇洞穴而发现 CO₂ 气藏的实例很多,如广东“水深 9 号井”于孔深 1429~1432 m 处遇洞穴(高 3.5 m),内藏大量 CO₂ 气体而发生井喷,气柱冲出井口高达百余米,喷气量达 500 m³/日,经分析其中 99.55% 为 CO₂。这类 CO₂ 气井在美国、墨西哥、澳大利亚、新西兰、罗马尼亚、前苏联等地均有记录。据统计,CO₂ 含量达 80%~100% 的天然气藏占世界总气藏的 0.2%,可见深部 CO₂ 的蕴藏量是相当可观的。这些赋存于深处的 CO₂ 沿断裂和裂隙向地层上部扩散、运移,供给深层承压水。J. 科倍尔 1957 年曾报导西北欧地下 2000 m 深处的洞穴就是由这类承压水作用形成的。冀中拗陷赵兰庄构造上的赵 2 井在 E_{4s}—E_k 泥质白云

岩中,日产 H_2S 气 $33945 \sim 110182 \text{ m}^3$,气中含 H_2S 高达 73%,表明该地区内生成因的 CO_2 、 H_2S 比较活跃。

韩宝平(1991)对冀中拗陷任丘油田的热液溶蚀作用做了深入研究,并提出了有关“近代深部洞穴形成机理”的新认识。

在局部地层超压作用下,冀中拗陷新生代地层中酸性油水混合液沿着大断层及古洞穴进入古潜山。由于温度、压力突然降低,油水产生分离形成古潜山次生油气藏。同时,由于油水混合液的进入,也必然打破原来古潜山古淋滤变质水内部的化学平衡,产生油田热水混合溶蚀作用。由于在深部条件下,水和岩石的化学作用受温度、压力和溶液离子强度的综合控制,再根据任丘的地质条件(韩宝平,1991),利用 Oddo-Tomson 公式,采用 $T=80^\circ\text{C}$ 、 $P=300 \times 10^5 \text{ Pa}$,计算了任丘古潜山部分井中油田水的 CaCO_3 饱和指数 SI_c ,计算结果表明:除少数矿化度高、pH 值大的水样外,大部分水样对 CaCO_3 都是不饱和的,这就必然导致油田热水喀斯特作用的发生。

为了验证理论分析的结果,韩宝平曾利用 DF-05 型高压釜封闭反应系统模拟了任丘油田条件下水—岩作用的机理。实验结果表明,油田条件下可以发育喀斯特作用,而且:① 在温度、 P_{CO_2} 和反应时间固定的条件下,岩石的溶蚀量与岩石成分和油田水化学成分密切相关;② 与常温常压开放系统相比,白云岩在油田热水封闭体系中的比溶蚀度和比溶解度均提高。这表明在深部温度较高、地层压力和 P_{CO_2} 较大的环境中,白云岩的溶解速度和强度相对提高,而灰岩和大理岩则相对降低。因此,前者在深部可以遭受强烈溶蚀而形成良好储集层。正是由于这个原因,才造成世界上埋深大于 3 km 的碳酸盐岩油气藏中,白云岩储集层远多于灰岩储集层的实例。

据对北京房山、河北省曲阳县、完县和满城县等地裸露喀斯特区的调查,马家沟灰岩的总体溶蚀强度大于震旦系雾迷山组白云岩,大型洞穴多发育在灰岩中。但在深部条件下,雾迷山组白云岩却为拗陷中的主力油层,溶蚀强度远大于灰岩。如任丘油田,雾迷山组白云岩的总孔隙度为 4.98%,洞穴率为 0.66%,在南部区最高洞穴率可达 10%,扩径率占 87.3%,最大漏失率达 88.2%;而在马家沟灰岩中总孔隙率仅为 2.31%,洞穴率为 0.38%,放空、漏失和扩径率总体为 38.24%,远小于前者。这只能说明,在深部油田环境中,白云岩遭受了强烈的溶蚀作用,发育了新的溶孔、洞穴,导致其内部连通性变好,才能形成块状油藏。

4. 深部封闭体系中地下水运动的动力

深部地下水如果处于静止状态,水—岩作用很快达到平衡,也就不能发育洞穴。近年来许多深钻孔资料揭示,地下水运移的深度远比前人所认为的深度大,只要深部存在孔隙、裂隙等运移通道及压力梯度,地下水将产生流动。在深部煤矿中,地下水可从有效孔径只有 $0.5 \mu\text{m}$ 的灰岩裂隙中渗出来(Ford D C, 1992)。匈牙利许多研究者的工作表明(Bocker J, 1969),只要有大于 $10 \mu\text{m}$ 的孔径,就可引起洞穴的发育;White W B(1979)的模拟实验证明,大多数洞穴可能是通过孔径为 $20 \mu\text{m}$ 至 1 mm 的裂隙诱发形成的。

深部地下水运动的动力主要表现在四个方面:

① 水热增压效应,随着埋深增加而不断增高的地温,会使孔隙流体(水、油气)产生膨胀而造成增压;不同地点由于地温梯度不同,导致增压率不同,地下水可在此压力梯度影响下运移。

② 在油气田区伴随油、气的初次和二次运移而运移(受地层沉积压实的局部超压

作用)。

③ 深部热液上升运移过程中,导致围岩中地下水的冷、热对流。

④ 局部深大断裂处的深径流作用。

5. 深部封闭系统水—岩作用方式及特征

在深部环境中,不像浅部那样溶蚀作用的产物可以被水流搬运至暗河(或泉)的泉口呈钙华沉淀。在深部反应系统中,化学反应仅能以局部物质调整方式进行,即在局部溶蚀拓宽溶隙,而在系统内的另一处沉淀,胶结充填溶隙。

深部溶蚀作用导致:① 对前期孔隙、裂隙和孔洞进行改造,拓宽或使之受充填;② 产生新的溶孔。国内外的研究已证明:粗晶粒状铁方解石是在地下深处环境中形成的,我们在研究任丘地下 3200 m 处岩样时,发现铁方解石受到强烈的溶蚀,并形成溶孔,这应是深部溶蚀作用的直接证据。

深部溶蚀作用形成的洞穴与浅层洞穴的赋存特征不同,前者不受侵蚀基准面控制,只与侵蚀性流体的赋存、运移特征有关,并在其运移通道上发育洞穴。徐州利国铁矿 ZKd27 号钻孔曾钻遇 20 个洞穴,它们不像浅部那样“随深度减弱”;由于受侵入体伴生的酸性组分影响,越向深处洞穴反而逐渐增大。国内许多金属矿区,沿侵入体围岩中的洞穴呈环带状发育即为另一特征。例如江苏韦岗铁矿,铁矿体埋深一般为 300~500 m,施工的 601、603 孔在深度为 397.18 m 和 395.52 m 处,水温 45~47.2℃,在其矿体周围的大理岩中沿断裂带发育有多个直径为 0.7~1.3 m 的洞穴。

二、任丘古潜山油田岩溶的独特性

任丘油田震旦系碳酸盐岩古潜山深埋于地下约 3000 m 处,震旦系白云岩自沉积成岩后经历了 7 次大的构造运动及多次升降变化和沉积间断,发育了多期古岩溶现象;在中新生沉降埋藏以来,又受到了深部热水岩溶的改造,尤其油田热水的渗入,使岩溶作用更加复杂。从 1976 年开发以来,随着油层压力降低,注水、酸化、化学解堵等人工措施的不断实施,又出现新的岩溶现象,因此古潜山岩溶是热水溶岩溶、古岩溶、现代人工岩溶相互叠加作用的结果,对其研究必须以深岩溶和古岩溶理论为指导,并运用多种手段、多种方法才能达到预期目的。

三、研究方法

鉴于任丘油田岩溶的独特性与复杂性,为达到本课题研究的目的,采用了实验模拟、计算机模拟、多因素综合分析等方法,对任丘雾迷山组油藏古潜山岩溶发育特征进行了深入研究,在此基础上进行了低渗透区划分,探讨了低渗透区剩余油分布与开发。具体思路见图 2-6。