

东濮凹陷地下水动力环境探讨

杨 绪 充

(石油大学)

该区的地层压力在纵向上可明显地划分为三带,即浅部的正常压力带,中部的过渡压力带,深部的超压带。在平面上,过剩压力的高值区位于东部洼陷带。地层水运动的总趋势是由各洼陷中心的中、深部位指向凹陷的浅部和边缘,构成了典型的离心状渗流体系。凹陷边缘的地表水渗入较次要。文中对本区的地下水动力环境进行了纵向分带和横向分区。

为了探讨盆地的地下水动力环境,了解地层水的运动状况,需先查明盆地区域地层压力的分布特征。本文试图在研究东濮凹陷(即东明凹陷)下第三系地层压力的纵向变化和平面展布的基础上,对地下水动力环境进行分带、分区,在揭示本区地下水动力环境的基本特征方面作一初步尝试。

一、地层压力的纵向变化

压实机理的研究表明,沉积物可处于孔隙流体排出畅通的正常压实状态,亦可处于排出不畅的欠压实状态^[1,2]。处于正常压实状态的地层具有正常的地层压力,它通常与其相应深度的静水压力相当,是由于静水柱重量造成的。处于欠压实状态的地层则往往具有高异常地层压力,或简称“超压”,它通常明显地高于其相应深度的静水压力,因为这时它受到了上覆地层重量造成的地静压力的影响。由于孔隙流体排出不畅,地静压力可以部分甚至全部作用于孔隙流体,从而导致超压现象的产生。

为了探讨东濮凹陷区域地层压力的纵向变化特征,本文根据各油田打开油层的第一批探井的大量试油测压数据作成了下第三系原始地层压力与深度的关系图(图1)。图中画出了表示静水压力梯度和地静压力梯度的两条斜线,前者的压力梯度为 $1\text{atm}/10\text{m}$,后者为 $2.3\text{atm}/10\text{m}$ (按本区湿岩石平均比重2.3计)。

由图1可知,东濮凹陷浅部(约2000m深度以内)下第三系的地层压力基本上具有正常压力的特征,各压力点多位于表示静水压力梯度的斜线附近,说明浅部基本上应属正常压力带。但也有部分压力点略微偏向了表示静水压力梯度的斜线的左侧,因此不排除本区浅部在局部范围内有略显低压异常的可能。

本区中部(约2000—3500m)的地层压力除部分仍属于正常压力外,已有部分压力值明显地向右偏离了表示静水压力梯度的斜线,具有高异常压力的特征。从纵向变化看,其上部以正常压力为主,向下则高异常压力值逐渐增多,因此这是一个由正常压力向

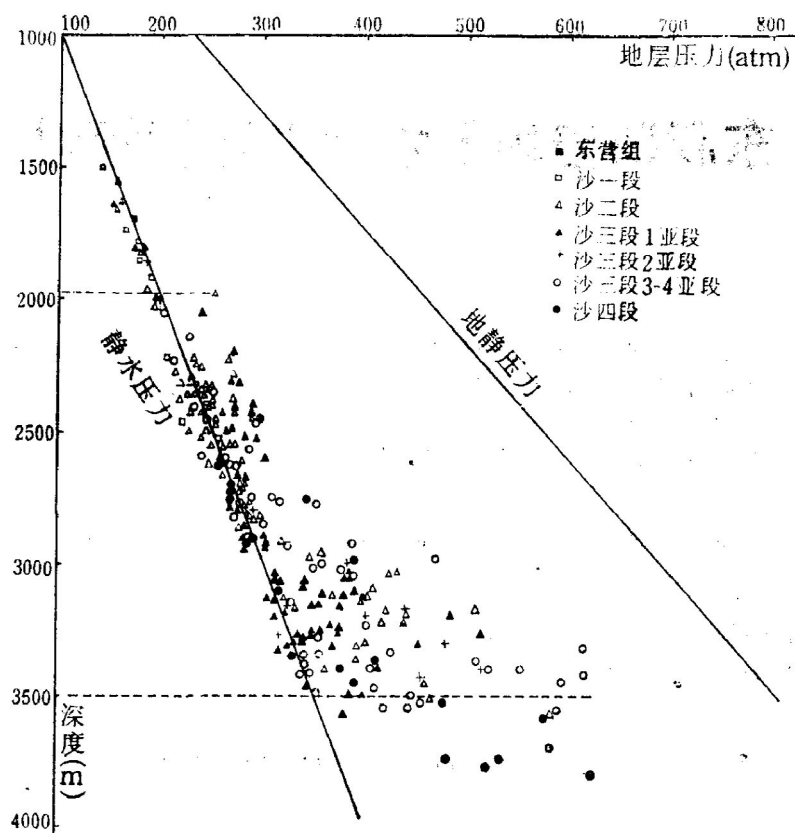


图1 东濮凹陷下第三系实测原始地层压力的纵向变化

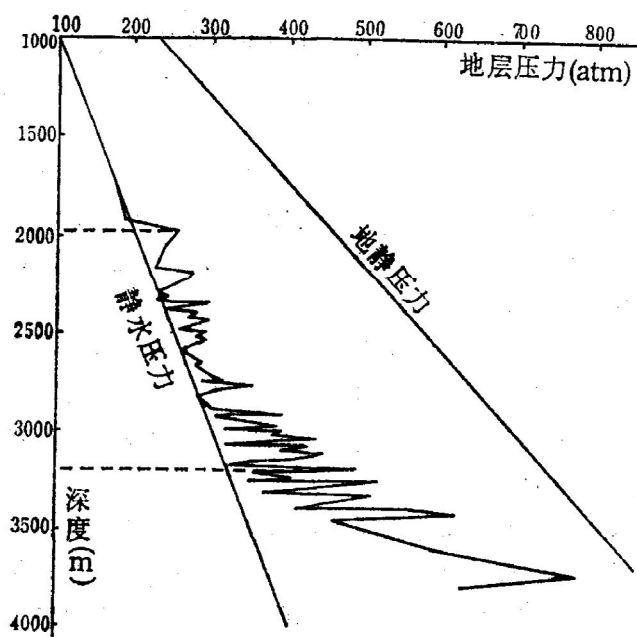


图2 文留油田下第三系实测原始地层压力的纵向变化

高异常压力转变的过渡压力带。

本区深部(约3500m深度以下)的地层压力一般均属高异常压力,最高的压力值已比较接近表示地静压力梯度的斜线,且基本上无正常压力层存在(图1),估计这里已进入典型的超压带。

对于具体油田来说,本区下第三系原始地层压力的上述纵向分带性更为明显。图2绘出了文留油田下第三系实测原始地层压力与深度的关系。该图是根据文留油田打开不同含油气层的第一批探井的试油测压资料作出的。由图2可知2000 m 深度以内基本上具有正常压力特征(亦略显低压

异常)。2000—3200 m 深度范围内正常压力与超压层间互并存,且异常高压值向下愈加增高。当深度大致超过3200 m 时,便无正常压力层存在,地层均具超压特征。

原始地层压力的上述纵向分带性特别是超压现象并不是本区所独有的特征,研究结果表明,国内外许多地区都具有这种情况。例如与本区毗邻的济阳坳陷就具有十分典型的超压现象^[3,4]。北美的墨西哥湾岸地区和马更些三角洲^[5],欧洲的北海,非洲的尼日利亚等地区亦存在超压现象。

前已述及,超压现象是由于孔隙流体排出不畅,沉积物呈现欠压实状态的结果而形成的。至于为什么会出现欠压实状态,根据国内外研究成果和东濮凹陷的具体条件,估计其主要原因是沉积物的快速沉积。东濮凹陷下第三系的沉积速度达 $0.26\text{mm/a}^{[1]}$,与济阳坳陷相当($0.1\text{—}0.4\text{mm/a}^{[3]}$)。快速沉积导致的快速压实在沉积物中造成了一个相对封闭的环境,从而导致了孔隙水的滞留,这是本区产生超压现象的主要原因。以此为前提,粘土矿物和石膏的脱水,烃类的生成,水热增压效应等都是造成超压现象的重要原因。此外,对本区来说,膏盐层的封闭作用也是不容忽视的重要原因之一。钻井实践表明,膏盐层段之下往往是本区超压层大量集中分布的地带。

上述情况主要是针对细粒沉积物(如泥页岩)而言。但在砂泥岩间互成层分布的条件下(本区即如此),泥岩层中的异常高压往往会波及到与其相邻的砂岩层,使砂岩层通常也具有超压特征。也即是说,砂岩层中的异常高压与相邻泥岩层的异常高压往往同步出现。这是因为泥岩的压实率远大于砂岩,泥岩中的孔隙水将排向相邻的砂岩(砂岩本身的孔隙水也有一部分要排出),但由于前面分析的快速沉积等原因,砂岩中的孔隙水的排出也并不十分畅通,故砂岩孔隙水的压力便会升高,从而导致砂岩超压层的出现。由此可以推测,超压泥岩的异常压力值应比与其相邻的砂岩更高,或二者接近,但前者绝不会低于后者。这样,图1、2虽系按砂岩储集层原始地层压力数据作出,然而也完全可以反映与其相邻的泥岩层的地层压力的纵向分布特征。

二、地层压力的平面展布

为了探讨东濮凹陷下第三系区域地层压力的平面展布状况,本文分别统计和计算了沙二段、沙三段1亚段、沙三段2—4亚段和沙四段共4个单元的实测原始地层压力和折算压力,列于表1中。折算压力用相对于折算基准面(本文取海平面)的折算水位(m)表示。水位高于基准面为正,低于基准面为负。本区地处华北平原腹地,地面基本水平且接近于海平面,故各井原始地层压力相应的水柱高度与井深之差即为折算水位(m)。同时,本文还根据表1的数据分别作出了上述各段的折算水位等值线图(图3—6)。众所周知,折算水位等值线图反映了地下水势的大小及分布状况,可借以分析判断地层水渗流的方向。

本区地面标高近于折算基准面(海平面),故与各井的正常静水压力值相当的折算水位值为0。当折算水位为正值时,表明其地层压力大于该井的正常静水压力,属高异常压力,也即具有压力过剩特征;当折算水位为负值时,表明其地层压力小于该井的正

1) 张晋仁, 1985, 东濮凹陷石油地质主要特征。中原油气田地质, 第1期。

表1 东濮凹陷下第三系沙河街组各段折算水位数据表

层位	井号	井深 (m)	原始压力 (atm)	折算水位 (m)	层位	井号	井深 (m)	原始压力 (atm)	折算水位 (m)
沙	文30	2257.2	239.5	137.8	沙三段 1亚段	濮67	3273.7	341.3	139.3
	文65	2351.7	244.2	90.3		卫气1	2371.1	245.1	79.9
	文83	2914.4	320.7	292.6		明6	1962.0	179.8	-164.0
	文85	3126.8	403.1	904.2		明7	1792.0	175.8	-34.0
	文96	2525.2	262.8	102.8		明18	1844.5	177.9	-65.5
	文114	2669.0	283.9	170.0		白10	3070.9	385.0	779.1
	文134	2978.5	346.1	482.5	沙三段 2—4亚段	文38	2751.9	290.0	148.1
	文135	3228.2	414.4	915.8		新文401	2988.9	361.4	625.1
	文137	3448.7	457.1	1122.3		濮31	3540.0	420.6	666.0
	文207	2301.9	231.5	13.1		濮35	3321.3	427.6	954.7
	濮气1	2345.2	240.6	60.8		濮62	3462.5	413.6	673.5
	濮气3	2370.5	242.8	57.5		卫4	2394.0	240.2	8.0
	濮7	2418.9	243.4	15.1		卫21	2780.8	282.1	40.2
	濮38	2474.8	254.5	70.2		卫27	2731.0	280.3	72.0
	濮56	2545.7	261.8	72.3		明7	2048.1	204.7	-1.1
	明1	1651.1	153.6	-115.1	沙四段	文94	3290.0	423.6	946.0
段	白3	2695.9	287.0	174.1		文104	3003.3	352.6	522.7
	文13	2391.1	291.4	522.9		文108	3104.8	359.2	487.2
	文32	2046.2	241.9	372.8		濮63	3373.6	411.6	742.4
	文84	3251.6	358.5	333.4		卫25	2614.7	275.9	144.3
	文110	3116.5	408.0	963.5		白8	3387.1	377.0	382.9
	濮45	3034.1	312.5	90.9					
	濮61	3051.4	318.0	128.6					

常静水压力, 属低异常压力, 也即具有压力亏空特征。

在我们对图3至图6逐一进行观察之后便会发现:

1. 所有四个地层单元折算水位的高值区都位于本区的东部地区, 并以前梨园和濮城两洼陷折算水位值最高。这表明本区的压力过剩地区亦位于东部地区, 并以前梨园和濮城两洼陷压力过剩值为最大。

2. 各地层单元的折算水位均由东部洼陷带向西逐渐降低。由于东部洼陷带东侧缺乏探井测压资料, 等水位线无法闭合, 但推测等水位线有围绕前梨园和濮城两洼陷分布的趋势。

3. 在本区西部洼陷带西侧, 原始折算水位已下降为0。这表明本区东部的广大地区四个作图单元均具有高异常压力特征(即具有压力过剩特征), 向西由于地层埋深变浅, 则逐渐过渡到以正常压力为主。

4. 在本区的西部斜坡带, 由于下第三系地层(特别是位于上部的沙二、沙三段)深度较浅(一般约在2000 m以内), 折算水位已出现负值(表1), 表明其原始地层压力已略显低压异常(即压力亏空)特征。这与本区地层压力的纵向分布情况大体相符。由此可以推测, 本区西部斜坡带有浅层水向下第三系渗入的可能。

本区折算水位的平面展布在下第三系沙河街组的四个单元中无一例外地均具有上述

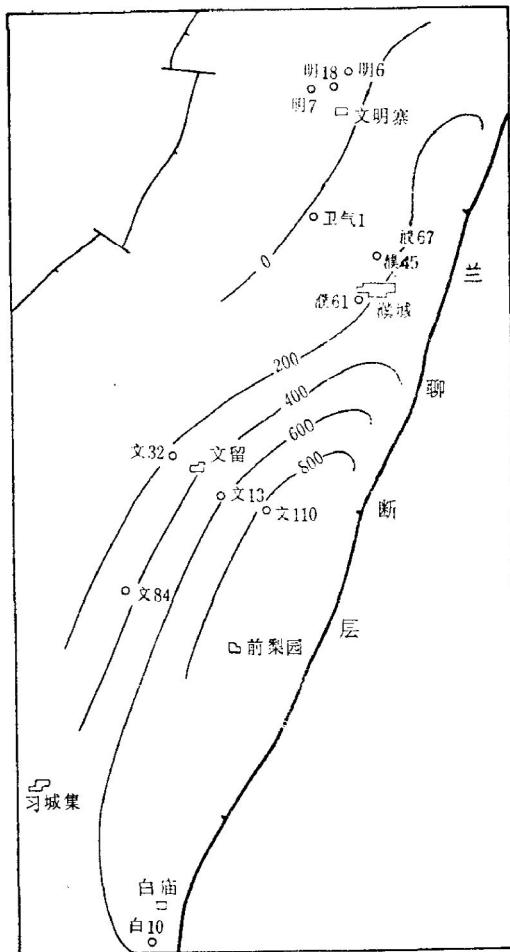
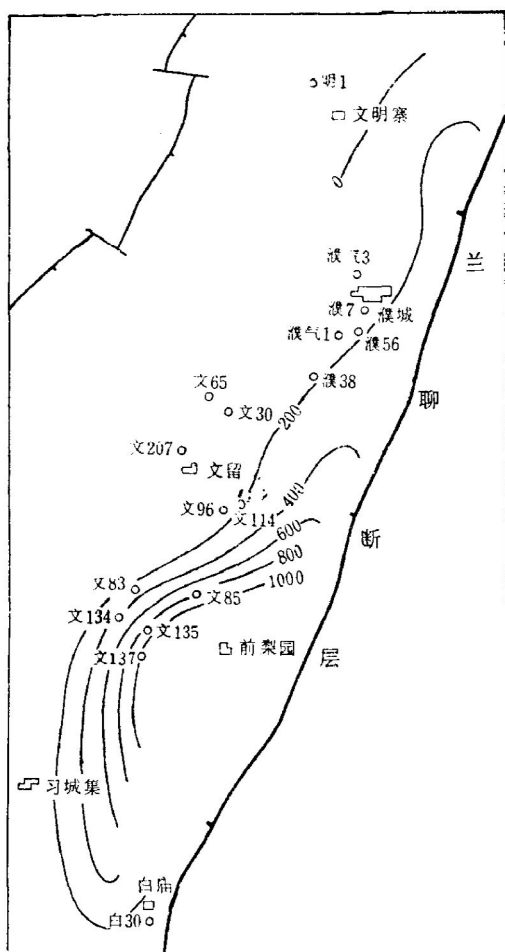


图3 东濮凹陷沙二段原始折算压力等值线图

图4 东濮凹陷沙三段1亚段原始折算水位等值线图

特征,表明这不是偶然的巧合,可以认为是本区下第三系地层压力平面展布的内在规律性的反映。

三、地层水运动状况

在区域地层压力的纵向变化和平面展布已经基本清楚的情况下,地层水的运动状况也就不辩自明了。

如前所述,本区下第三系地层压力自上而下可划分为正常压力、过渡压力和超压三个压力带,表明地层压力由浅部向深部具有比正常静水压力梯度更大的递增速度,也即垂向压力梯度大于静水压力梯度,地层埋深愈大,过剩压力值也愈大。因此,由深部流向中部再流向浅部乃是本区地层水在纵向上运动的基本趋势。地层水将首先由超压泥岩层排入相邻的砂岩层,然后再进一步向上运动。

但是,穿层运动在本区是比较困难的。这首先是由于本区的膏盐层十分发育,膏盐层具有极强的不透水性。内外,泥岩的透水性也是很差的。而超压泥岩除具毛细管封闭性外还具压力封闭性,故透水性更差。看来,比较长距离的纵向运动主要是通过开启性

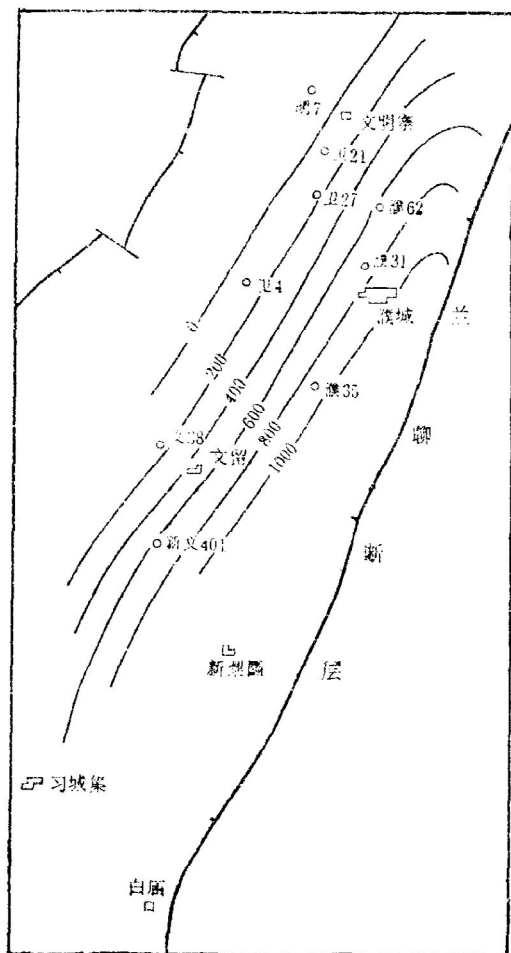


图5 东濮凹陷沙三段2—4亚段原始折算水位等值线图

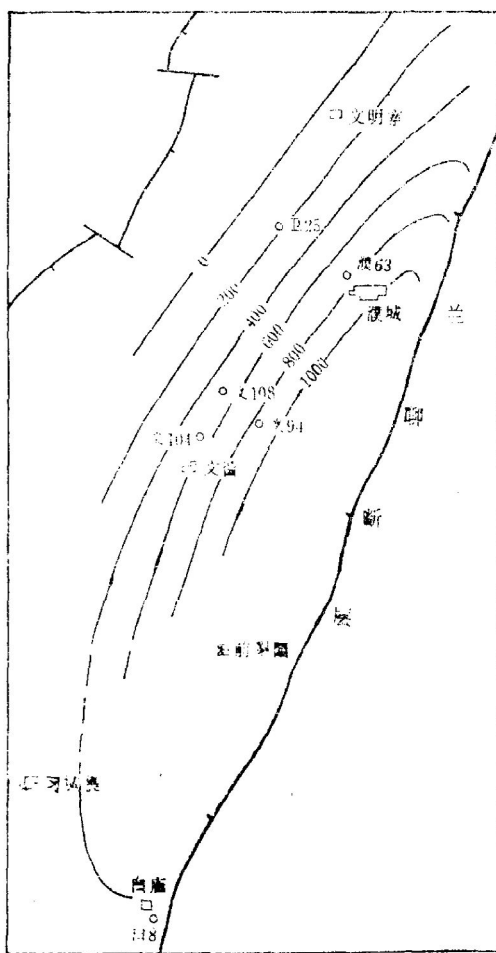


图6 东濮凹陷沙四段原始折算水位等值线图

断层进行的。由于开启性断层可以沟通不同的组段，而且在其发育过程中往往具有一定的延续时间，这对于中、深部地层水的向上运动无疑将起重要作用。本区东营组虽无生油条件，但井下油气显示并不罕见，这也许可以作为地层水纵向运动的一个佐证。然而东营组中工业性油气藏目前尚不多见，这又表明本区油气水的纵向运动是比较困难的。如前所述，我们不能忘记膏盐层和超压泥岩层在本区盖层条件中的重要作用。

图3至图6表明的本区下第三系诸地层的折算水位在平面上的分布特征告诉我们，下第三系地层的过剩压力位于本区的东部，东部洼陷带具有最大的过剩压力值。因此可以推测，地层水除在东部洼陷带东侧具东流特征外，基本流向是自东向西。总的看来，本区下第三系地层水在平面上运动的主要特点是由洼陷中心指向边缘。但因构造背景的影响，这种运动方式是极不对称的，表现为向东部边缘的运动是短途的，而向西部边缘的运动则是大范围的，是主流。

综上所述，本区下第三系地层水在纵向上表现为由中、深部位向浅部运动，在平面上具有自各洼陷中心向边缘运动的特征，这样，东濮凹陷下第三系地层水运动的总趋势乃是由各洼陷中心的中、深部位指向凹陷的浅部和边缘，构成了典型的离心状地下水渗

流体系。

本区下第三系生油层成熟门限深度约为2500 m。据东营凹陷泥岩压实特征研究¹⁾，当深度达2700 m以后便进入泥岩的紧密压实阶段，正常压实泥岩的压实率已经很小，泥岩的孔隙水也已不多；当深度达3500 m时，正常压实泥岩实际上已经进入压实极限状态，基本上不再继续被压实，孔隙水的排出便告停止。这对油气的初次运移是极为不利的。但这时泥岩超压层异军突起。泥岩超压层中因欠压实作用而滞留的孔隙水可作为油气初次运移的良好载体，泥岩超压层所具有的高异常压力乃是油气初次运移的巨大动力。超压是一种不稳定状态，超压层总是力图排出自己多余的孔隙流体，从而减压卸载，向稳定状态转变。如前所述，泥岩超压层的过剩压力一般均高于其相邻的砂岩层，这样，泥岩超压层中的孔隙水（如为生油层时则还携带着油气）逐渐向紧邻的连通性较好的砂岩储集层排出便是一种必然的趋势。由此可知，超压现象对本区油气的初次运移具有极其重要的意义。

一般情况下，作为油气载体的地层水运动的方向便是油气运移的方向。本区下第三系地层水具有离心状运动特征，故由超压泥岩生油层进入相邻储集层的油气亦以离心状运移为特征。在地层水运载、携带着油气进行二次运移的路途中遇到适宜的圈闭时，油气便逐渐聚集起来形成油气藏，水则继续向前排驱，直至上、下第三系之间的不整合面处泄出，形成潜伏上升泉或湿地。

应当提到的是，在东濮凹陷边缘下第三系埋藏较浅部位，地层水有淡化的显示，估计这可能是由于地表水通过上第三系向下渗入的结果。本文前面在讨论地层压力的纵向变化和平面展布时都曾谈到本区下第三系在凹陷边缘较浅部位有低压异常显示，这表明地表水和上第三系浅层水在这里向下渗入是有可能的。不过总的说来渗入范围有限，影响不大。

四、地下水动力环境划分

根据本区的地层压力及压实特征，可将下第三系的地下水动力环境大致划分为相对开启和相对封闭两种基本类型。前者一般具有基本正常的地层压力，处于正常压实状态，孔隙水的排出基本上是畅通的。同时，也不排出在某些情况下亦可略显低压异常。后者一般具有超压特征，处于欠压实状态，孔隙水的排出受到了一定程度的阻碍，但并未停止。

前已述及，本区下第三系的地层压力在纵向上可划分为三带，因此，本区下第三系的地下水动力环境在纵向上也可相应地划分为三带，即浅部的相对开启带，深部的相对封闭带，中部的过渡带（图7）。相对开启带中的地下水与地表水有一定联系，水交替作用比较活跃。相对封闭带中的地下水处于比较闭塞的环境，水的运动是相当缓慢的，并且深度愈大，水的运动愈加困难，已不再受地表水和上第三系浅层水的影响。中部过渡带的水动力环境介于深浅两带之间。

1) 张敦祥，1979，东营凹陷泥岩压实实验——油气初次运移的初步探讨。胜利油田勘探开发研究报告集，第5集。

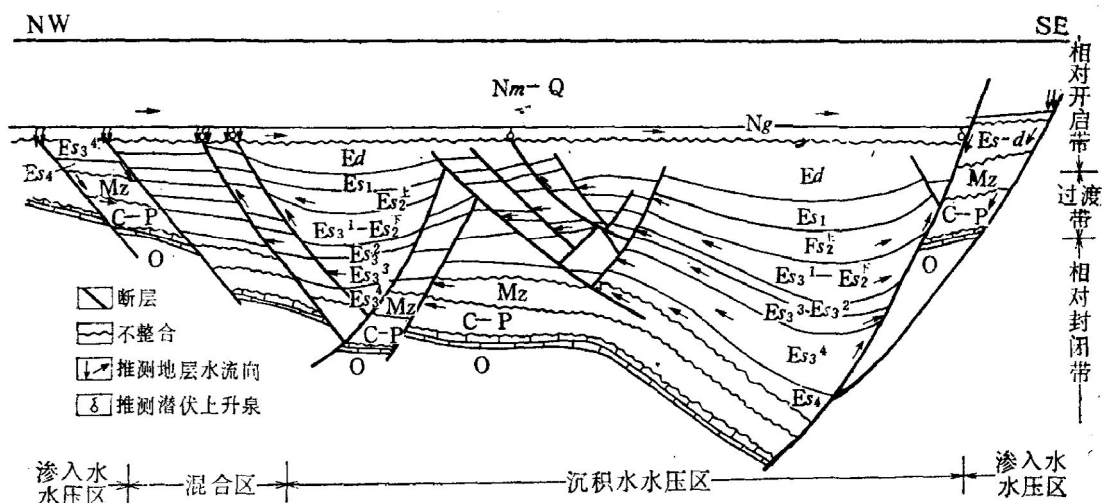


图7 东濮凹陷地下水动力环境划分示意图

在平面上,根据下第三系的水动力特征可将东濮凹陷划分为若干个水动力环境区(图7)。凹陷主要部分的广大地区,包括东部洼陷带、中央隆起带和西部洼陷带,下第三系中的原生沉积水主要表现为在过剩压力作用下由泥岩超压层被挤入相邻的砂岩层,然后再沿砂岩输导层和开启性断层向四外排驱(指向凹陷边缘和浅部),具有典型的离心流特征,可将该区称为沉积水水压区。在东濮凹陷的西部边缘和东部的兰聊断裂带,地表水和上第三系浅层水可沿断层向下第三系渗入,因此本区的东西两边缘应属渗入水水压区。在东濮凹陷西部洼陷带的西侧和凹陷的西部斜坡带,既有来自东部的沉积水,又有来自地表和上第三系的浅层淡水,因此这是一个沉积水和渗入水的交汇地区,应属混合水水压区,或简称混合区。在该区馆陶组与东营组之间的不整合面上,沿断层线一带有可能断续地出现潜伏的沉积水上升泉或湿地。同时,断层线又是渗入水的主要入口。因此,沉积水的挤出和浅层水的渗入将在断层线上同时相间并存。

如前所述,本区地下水动力环境的纵向分带和平面分区主要是针对下第三系而言。上第三系和第四系亦可划归纵向上的相对开启带(图7),其地下水与大气水,地表水关系比较密切。据推测,本区上第三系及第四系地下水主要接受来自位于本区西部的太行山麓的渗入水的补给,向东逐渐渗流泄入渤海。由此可知,本区下第三系地下水具压实流特征,上第三系和第四系地下水具重力流特征,故本区的地下水动力环境在纵向上表现为两套性质不同的水动力系统的叠合(图7)。

相对开启带埋藏较浅,有机质一般尚未成熟,而且相对开启的水动力环境对油气的保存也是不利的,因此相对开启带在本区一般不是油气聚集的有利地带。在水动力过渡带和相对封闭带,本区下第三系沙河街组(特别是沙三段主力生油层)有机质已进入成熟和高成熟阶段,生烃条件是良好的。另外,由于泥岩超压层的存在,油气的初次运移(即排烃)条件和盖层条件也是良好的。因此本区的过渡带和相对封闭带是油气生成、移聚和油气藏形成、保存的有利地带。由于有机质演化程度的差异,本区水动力环境过渡带以富集石油为主,随着深度的加大,地温的增高,在相对封闭带则多富集凝析气、湿气甚至干气。

在平面上，本区下第三系沉积水水压区无疑是最有利的油气生成和富集区，混合区次之，渗入水水压区远景较差。

勘探结果表明，绝大部分石油、凝析气、天然气都集中分布在本区沉积水水压区的中、深部位，西部的混合区也有油气藏存在，但凹陷东西边缘的渗入水水压区迄今尚未发现任何油气聚集。显然，油气的这种分布状况是与本区的地下水动力环境特征密切相关的。

感谢中原油田同志们的诸多帮助。

参 考 文 献

- [1] 真柄钦次，1978，压实与流体运移。陈荷立等译，1981，石油工业出版社。
- [2] 瓦尔特 H. 费持尔，1976，异常地层压力。宋秀珍等译，1982，石油工业出版社。
- [3] 杨绪充，1985，石油勘探与开发，第12卷，第4期。
- [4] 杨绪充，1985，华东石油学院学报，第9卷，第4期。
- [5] Evans, C. R., Melver, D. K. and Magara, K., 1975, In: Proceedings of the 9th World Petroleum Congress.

HYDRODYNAMIC ENVIRONMENT IN DONGPU DEPRESSION

Yang Xuchong

(*Petroleum University*)

Abstract

The formation pressure in the Dongpu Depression falls into three zones in vertical direction; the normal hydrostatic pressure zone, the transitional pressure zone and overpressure zone. The area of highest excess pressure is situated in the east sag zone. Formation water flows generally from medium-deep level of the centers of the sags to the marginal zones of the depression, thus forming a typical centrifugal percolation system. The zones and areas of hydrodynamic environment in this region are discussed.