

文章编号: 1009-3850(2007)01-0092-05

淮北凹陷压力体系分布特征及成因分析

李建军¹, 朱天高¹, 李政², 朱日房²

(1. 中石化胜利油田 东胜公司, 山东 东营 257000; 2. 中石化胜利油田 地质科学研究院, 山东 东营 257000)

摘要: 淮北凹陷分为两个压力体系, 北部洼陷带发育异常低压体系, 实测的地层压力梯度为 0.005~0.009 MPa/m; 南部地区为常压体系, 压力梯度为 0.0094~0.01 MPa/m。研究表明, 淮北凹陷异常低压力体系的形成既与古近纪的地层抬升和剥蚀作用有关, 又与地温梯度的降低有关。地层水的浓差作用和流体的供排不平衡是形成淮北凹陷南北地区压力体系差异的主要原因。淮北凹陷地层压力系统演化经历了从异常高压至异常低压, 再至压力分异的演化过程。

关键词: 淮北凹陷; 压力体系; 成因; 山东

中图分类号: TE121 文献标识码: A

近年来人们已认识到沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用密切相关, 盆地流体活动可能是控制盆地中物质演变和能量再分配的主导因素。地层压力作为盆地流体流动的主驱动力, 控制着盆地内流体的流动方向及循环样式^[1,2]。因此, 盆地压力系统研究成为人们十分关心的热点问题。本文通过对淮北凹陷压力体系特征及成因机制分析, 研究其压力体系的演化过程, 旨在为该地区下一步油气深化勘探与开发提供较可靠的科学依据。

1 地质背景

淮北凹陷为昌潍拗陷内的次一级凹陷, 东部与鲁东隆起相连, 西部与昌北凸起、侯镇凹陷相接, 北与昌北凸起分隔, 南界与潍县凸起毗邻, 面积 880 km², 是一个以始新统孔店组为主的北断南超的不对称箕状凹陷。按断层发育和地层沉积特征, 可将淮北凹陷划分为 4 个二级构造带——北部洼陷带、西部瓦城断阶带、东部灶户断鼻带、南部斜坡带(图 1)。

淮北凹陷钻井揭露的最老地层为白垩系王氏组, 古近系始新统孔店组和沙河街组下部地层构成了其主要的盆地沉积。受始新世末期构造的影响, 盆地整体抬升, 缺失了渐新世地层沉积, 并遭受长期的风化剥蚀; 沙河街组残缺不全, 仅保留部分第四段地层; 之后区域性沉降, 沉积了新近系馆陶组、明化镇组和第四系平原组。该区主要含油层系为孔店组(一段—三段), 其中孔二段不仅是主要的储集层, 也是目前主要的烃源岩层系。

2 淮北凹陷压力体系分布特征

地层压力是指作用于孔隙流体的压力。在任何地质背景中, 正常地层压力都将等于静水压力; 凡不符合静水压力的统称为异常地层压力, 其中超过静水压力的地层压力称为高异常压力, 低于静水压力的地层压力称为低异常压力。压力梯度是单位深度的压力值, 而压力系数是压力实测值与理论静水压力值的比。异常低压的分类, 各种分类标准意见不

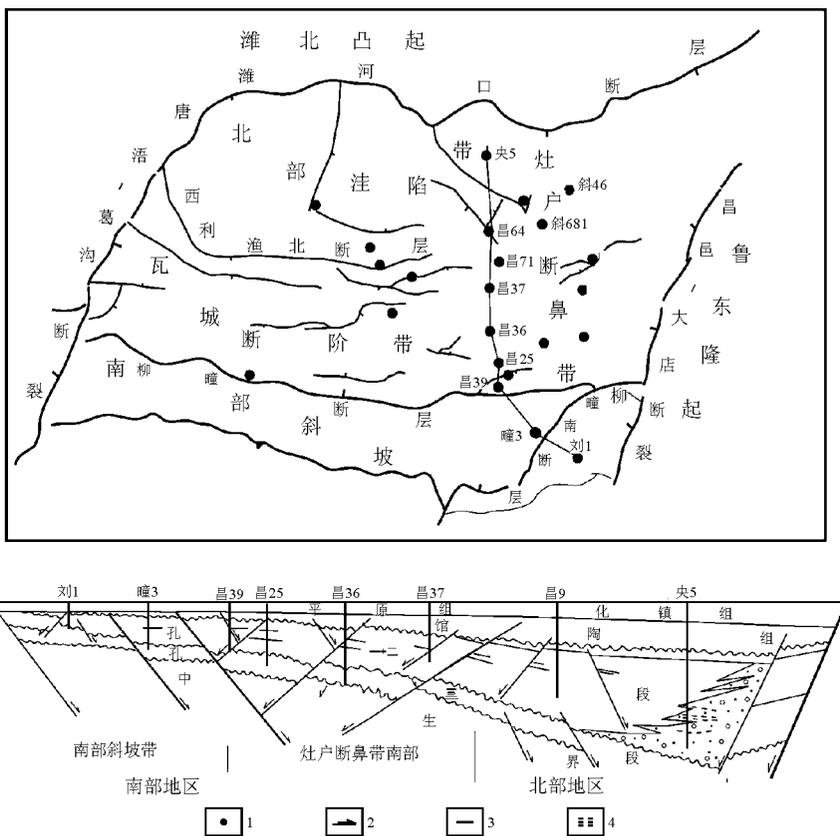


图1 潍北凹陷构造单元划分及南北向油藏剖面图
1. 井位; 2. 断层; 3. 油藏; 4. 气藏

Fig. 1 Division of the structural units and NS-trending oil pool sections in the North Weifang depression
1= well site; 2= fault; 3= oil pool; 4= gas pool

一。在国外,美国 EXXON 公司以压力系数小于0.96为低压异常;前苏联以压力系数小于 1.0 的为低压异常,小于0.8为异常低压。国内目前常以0.9为界限,小于0.9称为低压,小于0.75为超低压^[3]。本次研究采用国内提出的地层压力分类方案。

含油气盆地地层压力体系识别的最直接有效的办法,是钻杆地层测试(DST)和重复地层测试(RFT)。本次研究收集了30余口井DST测试数据,数据为埋深在450~4660m的孔店组储层。

从地层压力测试数据表(表1)可以看出,南部的瓦城断阶带、柳疃单斜带和灶户鼻状构造带南部(统称为“南部地区”),压力系数在0.97~1.12之间,大部分接近于1.00,主要为接近于静水压力的常压系统;北部洼陷带和灶户鼻状构造带的北部(统称为北部地区),压力系数一般低于0.90,分布于0.57~0.84之间,最低为0.51,主要为异常低压系统。从纵向上看(图2),南、北地区地层压力都有随深度逐渐增加的趋势,但北部地区不同深度储层中地层压力均低于静水压力,南部地区不同深度地层压力与静

水压力相当。

从地层水化学特征也可以看出,北部异常低压体系中的地层水以氯化钙型高矿化度地层水为主,表明异常低压体系为不受大气水渗入影响的地下水停滞带,具有良好的封闭条件。而南部常压体系地层水为碳酸氢钠-氯化钙水型,由南向北由碳酸氢钠型过渡为氯化钙型。

3 潍北凹陷压力体系成因分析

关于不同类型地层压力体系的形成机制,前人作过大量的研究。异常低压的成因机制也存在多种解释,如抬升和上覆地层的剥蚀^[4-9]、不同热效应^[7]、地下水流动的不平衡^[8,9]、封闭层的渗流作用^[10]、岩石扩容作用^[11]和浓差作用^[12]等。通过对潍北凹陷压力分布特征的分析,笔者认为形成潍北凹陷现今压力分布的成因与以下主要因素有关。

3.1 抬升剥蚀作用

潍北凹陷在沙河街组沉积末期的构造运动,造成了沙四段—东营组的大量剥蚀,使沙河街组在凹

表 1 淮北凹陷不同地区孔店组二段地层压力及压力系数表

Table 1 Formation pressures and pressure coefficients in the 2nd member of the Kongdian Formation in different parts of the North Weifang depression

地区	井号	深度 m	地层压力	压力系数	水型	地区	井号	深度 m	地层压力	压力系数	水型
北 部 地 区	昌 1	3506.4	23.41	0.67	CaCl ₂	南 部 地 区	昌 323	1343.0	14	1.04	NaHCO ₃ -CaCl ₂
	昌 1	3884.6	23.33	0.60			昌 324	1307.0	14	1.07	
	昌 1	4415.2	33.48	0.76			昌 40	1599.0	16	1.00	
	昌 14	2644.0	19	0.72			昌 42	2237.0	22	0.98	
	昌 14	2960.0	17	0.57			昌 43	2577.0	25	0.97	
	昌 14	2943.0	17	0.58			昌 53	2022.0	22	1.09	
	昌 14	2976.0	17	0.57			昌 66	1200.0	13	1.08	
	昌 67	2719.0	14	0.51			昌 78	2482.0	24	0.97	
	昌 67	3392.0	27	0.80			昌 80	2415.0	27	1.12	
	昌 64	2532.0	20	0.79			昌 83	1784.0	18	1.01	
	昌 69	2269.0	20	0.88			昌 86	2269.0	22	1.00	
	昌 71	2248.0	15	0.67			昌 86	2265.0	22	0.97	
	昌 68	2545.0	27	1.06			昌 94	2009.0	20	1.00	
	昌斜 46	2769.0	23	0.83			瞳 3	816.0	8	0.98	
	昌 681	2749.0	23	0.84			瞳 3	937.0	10	1.07	
央 5	3337.7	25.4	0.76	瞳 4	951 ~ 967.4	9.22	0.97				

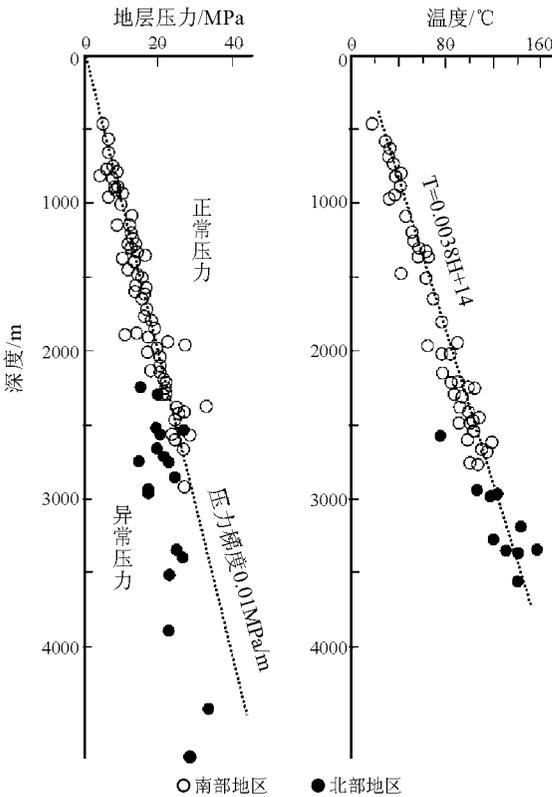


图 2 淮北凹陷地层压力、温度与深度关系

Fig. 2 Relationship between formation pressures, temperatures and depths

○ Southern part; ● Northern part

陷南部广泛缺失,盆地中北部仅残存沙四段。沙四段残存厚度呈北厚南薄的趋势,北部洼陷最大残存厚度达1000m,南部仅几十米,甚至缺失。前人根据镜质体反射率、孔隙度曲线、盆地模拟等多种方法,计算淮北凹陷沙河街组地层遭受了大量的剥蚀,可达千米以上,由北到南剥蚀厚度逐渐加大^[13, 14]。众所周知,岩石孔隙的压实作用是不可逆过程,但岩石的卸载仍可导致孔隙空间 1/10 的反弹。在沉积盆地发生大幅度抬升剥蚀的地区,由于构造抬升地层升高引起的流体向下倾方向泄露、负荷减少而引起的孔隙反弹,特别是后期沉降幅度不足以弥补剥蚀厚度的情况下,由于剥蚀卸载后的弹性回返,使得地层和岩石的孔隙度增大导致低压异常(李延钧等,1999),同时由于岩石冷却造成的气相收缩或凝结也起到一定的加速低压产生的作用。解习农^[19]等进行卸载速率与异常低压之间的相关分析表明:当卸载速度从 5m/Ma 增加到 50m/Ma, 剩余压力可减少 4MPa, 异常低压与卸载速率成正比, 卸载速率越大, 则异常低压越明显。因此, 淮北凹陷沙河街组沉积末期的构造作用, 使地壳抬升遭受剥蚀是使淮北凹陷形成低压的一个原因。

3.2 地温梯度降低

淮北凹陷内测温井较少,且测温深度大都浅于 3000m, 仅在央 5 井、昌 67 井和昌 14 井有大于 3000m 深

度的测温数据。根据现今 DST 资料, 计算地温与深度关系式为 $T=0.038H+14$ (图 2), 说明现今地温梯度为 $38\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 地表温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这一结论与淮北地区的现今地温梯度和地表温度基本吻合。李晓清等(2002)利用包裹体均一温度分析认为, 淮北凹陷古地温梯度高于现今地温梯度的结论^[13]。邱楠生利用镜质体反射率热降解的化学动力学方法和磷灰石裂变痕迹退火模型计算了淮北凹陷 6 口井的热演化历史认为, 在孔店组沉积时期的古地温梯度较高, 可达 $4.4\sim 5.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 随后地温梯度逐渐降低; 沙河街组四段沉积时期为 $4.2\sim 4.9\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$; 馆陶组沉积时期为 $4.0\sim 4.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 现今为 $3.8\sim 4.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ^[14]。显然, 淮北凹陷具有古地温梯度随时间而明显降低的特点。Barker 证实在良好封闭条件下温度降低可导致地层压力低于静水压力^[7]。Bradley 提出在封闭系统中每 1K 温度的变化可导致压力从 1.39MPa 变为 1.58MPa ^[19]。解习农等假定了一个理想模型检验不同古热流对异常低压形成的影响, 结果表明对于砂泥岩层, 随泥岩层的热流值减小时, 剩余压力出现明显减小^[15]。因此, 淮北凹陷地温梯度的降低是形成低压的另一个重要原因。

3.3 浓差作用

淮北凹陷地层水化学特征表明, 处于异常低压体系中的地层水以氯化钙型高矿化度地层水为主, 而南部常压体系地层水化学以碳酸氢钠-氯化钙型, 矿化度远低于北部洼陷带。如果一个封隔区中水的含盐度存在一定差异, 毛细管力作用将使得高盐度封隔体中的水穿过渗透膜流入到低盐度区, 那么在高盐度封隔体由于水的渗漏而形成低压, 而低盐度封隔体由于水的增加而形成超压。一般情况下, 由于浓差作用导致低压值可能较小(小于 3MPa)。研究区异常低压带往往是高盐度区, 而过渡压力带和常压带为低盐度区。从淮北凹陷地层水矿化度的分布来看, 地层水的浓差作用对淮北凹陷南北压力体系差异的形成具有一定的影响。

3.4 流体的供排不平衡

从淮北凹陷油气赋存情况来看, 位于北部异常低压体系内的油气藏相互分隔, 自成体系, 如位于洼陷带和灶户鼻状构造带的油气田被东西向、南北向断裂分隔成多个断块, 每个断块具有不同的气-油-水界面和气油比, 即使是同一构造不同断块之间, 气层也具有不同气水界面, 反映异常低压体系内气藏连通性很差, 北部地区地层水以氯化钙型高矿化度地层水为主也表明异常低压体系为不受大气水渗入

影响的地下水停滞带, 具有良好的封闭条件。大量研究表明, 地层中流体(石油、水和天然气等)从地层中排出后, 会引起的地层压力的减小, 而形成异常低压^[17]。同时由于生烃率的下降, 在烃类散失率大于烃类生成率情况下, 因非渗透性隔挡层的阻隔使流体无法充注到地层中, 地下水下渗在深部受阻、减弱和消失, 也会形成异常低压。

因此, 地层抬升和剥蚀作用、地温梯度降低是形成低压的主要原因, 而地层水的浓差作用及流体的供排不平衡导致目前淮北凹陷南北压力体系存在差异。

4 淮北凹陷压力体系的演化

通过以上分析, 结合淮北凹陷构造演化-埋藏史分析认为, 淮北凹陷压力体系的演化大致可划分为 3 个阶段:

(1)生成高压阶段: 淮北凹陷主要烃源岩为孔二段沼泽-湖相泥岩, 由于古地温梯度高, 烃源岩成烃时间早, 大多数烃源岩在埋深约 2000m 孔一段沉积中期进入低成熟门限, 沙四段早期进入成熟门限, 局部地区已进入生气阶段^[14]。因此, 孔二段在孔家店组一沙四段早期由于生烃作用和压实作用, 形成异常高压。

(2)泄压阶段: 沙四段沉积后, 随着地温梯度降低和地层抬升剥蚀导致淮北凹陷孔二段泄压, 使异常超压体系向异常低压或正常压力体系演变。

(3)压力体系分异阶段: 由于泄压作用, 导致油气藏的破坏, 但是新近纪之后的淮北凹陷发生整体沉降, 并且南北地区沉降速率及产生的断裂发育不同。北部地区由于在遭受剥蚀后, 盆地迅速沉降, 上覆层位沉积厚层或巨厚层的泥岩起到封闭作用, 断裂较少, 一般在发育孔店组-馆陶组, 剥蚀面上、下形成两个独立的系统, 彼此间不能进行物质交换和流体的流动, 形成的低压得以保存; 而南部瓦城断阶带及柳疃斜坡带新近系地层盆地沉降缓慢, 粗碎屑大量供应和沉积下来, 断裂发育, 并有深大断裂切至平原组, 剥蚀面上、下互为开放系统, 流体可以进行物质交换和流动, 这样下伏地层中的低压就难以维持和保存下来, 从而形成目前的常压体系(图 1)。

5 结 论

淮北凹陷异常低压系统主要分布于北部的洼陷带和灶户鼻状构造带的北部, 南部地区为常压系统。古地温梯度的降低、上覆地层的抬升剥蚀作用、地层

水的浓差作用及流体的供排关系是导致淮北凹陷南北压力体系存在差异的主要原因。结合淮北凹陷构造演化史分析认为, 淮北凹陷压力体系大致可分为生成高压、泄压、压力分异 3 个阶段。

参考文献:

[1] BETHKE C M, REED J D, OLTZ D F. Long-range petroleum migration in the Illinois Basin [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(5): 925—945.

[2] GVINZMAN H, STANISLAVSKY E. Palaeohydrology of hydrocarbon maturation migration and accumulation in the Dead Sea rift [J]. Basin Research, 2000, 12(1): 79—93.

[3] 金博, 刘震, 张荣新, 等. 沉积盆地异常低压(负压)与油气分布[J]. 地球学报, 2004, 25(3): 351—356.

[4] 夏新宇, 宋岩. 沉降及抬升过程中温度对流体压力的影响[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(3): 8—21.

[5] BACHU S, UNDERSCHULTZ J R. Large-scale underpressuring in the Mississippian—Cretaceous succession, southwestern Alberta Basin [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(7): 989—1004.

[6] JIAO J J, ZHENG C. Abnormal fluid pressures caused by erosion and subsidence of sedimentary basins [J]. Journal of Hydrology, 1998, 204: 124—137.

[7] BARKER C. Aquathermal pressuring; role of temperature in development of abnormal-pressure zones [J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(10): 2068—2071.

[8] BELITZ K R, BREDEHOEFT J D. Hydrodynamics of Denver Basin: explanation of subnormal fluid pressures [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(11): 1334—1359.

[9] TOTH J, MILLAR R F. Possible effects of erosional changes of topographic relief on pore pressures at depth [J]. Water Resources Research, 1983, 19: 1585—1597.

[10] LAW B E, DICKINSON W W. Conceptual model for origin of abnormally pressured gas accumulation in low-permeability reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(8): 1295—1304.

[11] NEUZIL C E, FOLLOCK D W. Erosional unloading and fluid pressures in hydraulically “tight” rocks [J]. Journal of Geology, 1983, 91: 179—193.

[12] SWARBRICK R E, OSBORNE M J. Mechanisms that generate abnormal pressures: an overview [A]. Law B E, Ulmishek G F, Slavin V I. Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments [C]. Tulsa: AAPG Housing Bureau, 1998, 70: 13—34.

[13] 李晓清, 汪泽成, 程有义, 等. 拉分盆地分析与含油气性——以淮北盆地为例[M]. 东营: 石油大学出版社, 2003.

[14] 邱楠生, 蔡进功, 李善鹏. 昌潍坳陷淮北凹陷热历史和油气成藏期次[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 413—424.

[15] 解习农, 焦赳赳, 等. 松辽盆地十屋断陷异常低压体系及其成因机制[J]. 地球科学, 2003, 28(1): 61—66.

[16] BRADLEY J S. Abnormal formation pressure [J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6): 957—973.

[17] 杜栩, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. 地质前缘, 1995, 2(4): 137—148.

The pressure systems and their genesis in the North Weifang depression, Shandong

LI Jian-jun¹, ZHU Tian-gao¹, LI Zheng², ZHU Ri-fang²

(1. Dongsheng Corporation, Shengli Oil Field, SINOPEC, Dongying 257000, Shandong, China; 2. Research Institute of Geological Sciences, Shengli Oil Field, SINOPEC, Dongying 257000, Shandong, China)

Abstract: Two pressure systems are recognized in the North Weifang depression, Shandong. The abnormal underpressure system appears in the northern part of the depression, where the measured formation pressure gradients range between 0.005 and 0.009 MPa/m. The normal pressure system is developed in the southern part of the depression, where the measured formation pressure gradients range between 0.0094 and 0.011 MPa/m. These data have revealed that the formation of the abnormal underpressure system is related to both the uplift and erosion of the Paleogene strata and the decrease of geothermal gradients in the northern part of the depression. The concentration differences and disequilibrium of supply and discharge of the formation water are responsible for the differences in the pressure systems in the northern and southern parts of the depression. These pressure systems have experienced evolutionary processes from overpressures to underpressures and finally to pressure differentiation.

Key words: North Weifang depression; pressure system; genesis; Shandong