

# 平面压降梯度计算原则及其应用

冯月琳<sup>1</sup>, 刘 华<sup>1,2</sup>, 宋国奇<sup>1,3</sup>, 袁飞飞<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 海洋矿产资源评价与探测技术国家功能实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257001)

**摘要:** 超压作为油气运移的动力条件, 其变化速率与油气运移方式存在一定的关系。为定量判识超压盆地中油气运移方式, 建立了应用地层压降梯度分析的计算思路与方法, 并以渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷为例进行了应用和探讨。以实测压力与单井预测压力为基础, 对油气主要运移层系进行了压力分布特征分析, 结合超压成因机制分区、沉积相变以及断层发育特征, 分别对压力均匀降低区、沉积相变非均匀降低区和断层分割非均匀降低区采用不同的压降梯度计算思路进行计算。渤南洼陷深洼带的压降梯度最高, 其次为断阶带、陡坡带以及缓坡带, 且垂向连通的断层附近压降梯度较高, 定量地解释了在超压控制下油气运移方式的变化特征, 从而有效判识油气优势富集的位置。

**关键词:** 压降梯度; 运移动力; 油气运移方式; 渤南洼陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## Calculation and application of plane pressure decrease gradient

FENG Yuejin<sup>1</sup>, LIU Hua<sup>1,2</sup>, SONG Guoqi<sup>1,3</sup>, YUAN Feifei<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Function Laboratory of Marine Geo-Resource Evaluation and Exploration Technology, Qingdao, Shandong 266071, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying, 257001)

**Abstract:** As a driving force for oil and gas migration, the overpressure change rate has a relationship with oil and gas migration mode. In order to quantitatively identify the hydrocarbon migration modes in overpressure basins, some calculation ideas and methods of the application of formation pressure decrease gradient were established, and were applied in the Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin. Based on measured pressure and single well predicted pressure, the pressure distribution characteristics of the main hydrocarbon migration layer were analyzed. According to the characteristics of overpressure genesis, sedimentary facies and faults, different pressure drop gradient calculation methods were applied to the uniform pressure attenuation zone, the inhomogeneous pressure decrease zone of sedimentary facies transformation and the inhomogeneous pressure decrease zone of the faulted zone. The results show that the pressure decrease gradient is the highest in the deep sag of Bonan Subsag, followed by the fault step, steep slope and gentle slope zones, and the pressure decrease gradient near the vertically connected faults is higher. The variation characteristics of oil and gas migration mode under overpressure control were quantitatively explained so that the location of hydrocarbon enrichment can be effectively judged.

**Key words:** pressure decrease gradient; driving force; hydrocarbon migration mode; Bonan Subsag; Bohai Bay Basin

超压作为含油气盆地中油气运移主要动力来源<sup>[1]</sup>, 影响着含油气盆地中油气的运移指向和空间分布<sup>[2-5]</sup>。目前用来表征油气运移动力强弱的参数主要有压力系数、剩余压力和压力梯度<sup>[6-9]</sup>, 压力系数和剩余压力均表征的是某一点相对于静水压力的大小, 是判别地层压力异常程度的一个主

要参数, 提供了认识超压盆地油气富集规律的思路。随着研究的深入, 人们逐渐发现油气在超压盆地中的运移过程是一个极不均匀的过程, 即便是均一介质, 油气一般也只沿有限路径发生运移, 这一认识, 为超压控制下油气优势运移研究提出了新的挑战, 地层压力梯度也应运而生。“地层压力梯度”

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2019-03-19。

作者简介: 冯月琳(1990—), 女, 博士研究生, 从事油气藏形成与分布研究。E-mail: violinfyl@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05006-003)和中国石化胜利油田项目“渤南洼陷古近系压力梯度与油气运聚”(05N17011480)联合资助。

是指单位深度或某一方向单位距离内地层流体压力的变化幅度,即把大尺度流体势、剩余压力研究微分化。压降梯度则是指以超压中心为起点,压力在某方向减小的速率,可以反映超压流体的流动方向及运移过程中流速变化,并对油气分布最终规律进行定量的动力解释。传统压降梯度计算公式为沿流体流动方向单位路程长度上压力的变化<sup>[9]</sup>,该计算方法仅考虑初始点压力和终点压力,计算出的结果也为起始点和终点间平均压降梯度,忽视了油气运移介质不同导致的不均一现象<sup>[10-12]</sup>。因此对于压降梯度的计算尺度选择极为重要,不同的计算尺度可能会得出截然不同的结果。针对这一问题,本文试图在压力梯度定义的基础上,充分考虑平面上压力降低的多种影响因素,建立复杂地质介质条件下的压降梯度计算原则,为油气运移方式解释提供理论依据。

## 1 压降梯度计算原则

合理的计算井位和计算尺度选择是压降梯度计算的关键。实际地质体中油气运移是一个极不均一的过程,油气运移通道的宏观非均质性导致在不同方向压力分配的不均一,尤其在沉积相边界以及断层附近,砂体物性及油气运移方式改变的临界点,常出现压力的快速递变即压降梯度的变化区。但是沉积相边界和断层对于压降梯度的影响范围

在边界很难直接确定,压力等值线的疏密变化恰好可以较为直观地反映压力的变化速率;等间距的压力等值线表示在一定范围内油气输导通道物性较为均匀,该区域范围内压力均匀降低;非等间距的压力等值线则反映在该区域内油气输导通道存在一定的非均质性,该区域内压力非均匀降低。压力等值线越密,压降梯度越高;而等值线分布越疏,压降梯度越低。因此可以根据等值线分布的特征,分情况进行压降梯度的计算。

### 1.1 压力均匀降低区带

压力均匀降低区内,压力一直以同一速率降低,因此沿着压力降低方向或垂直于压力系数等值线的方向,任意两点的压降梯度可以代表该区域内的压降梯度。沿压力降低方向,垂直于压力等值线分别在超压中心和边部选择计算点(图1a)计算压降梯度,具体公式如下:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{P_1 - P_2}{L_{12}} = \frac{P_1 - P_2}{\sqrt{X_{12}^2 + H_{12}^2}} \quad (1)$$

式中:  $P_1$ 、 $P_2$  为井1、井2 计算深度处油气藏流体压力,MPa;  $L_{12}$  为井1、井2 计算点间的空间距离,km;  $X_{12}$  为井1、井2 计算点间的水平距离,km;  $H_{12}$  为井1、井2 计算点间的垂直距离,km。

### 1.2 压力非均匀降低区带

沉积相的变化导致砂体物性的变化以及断层

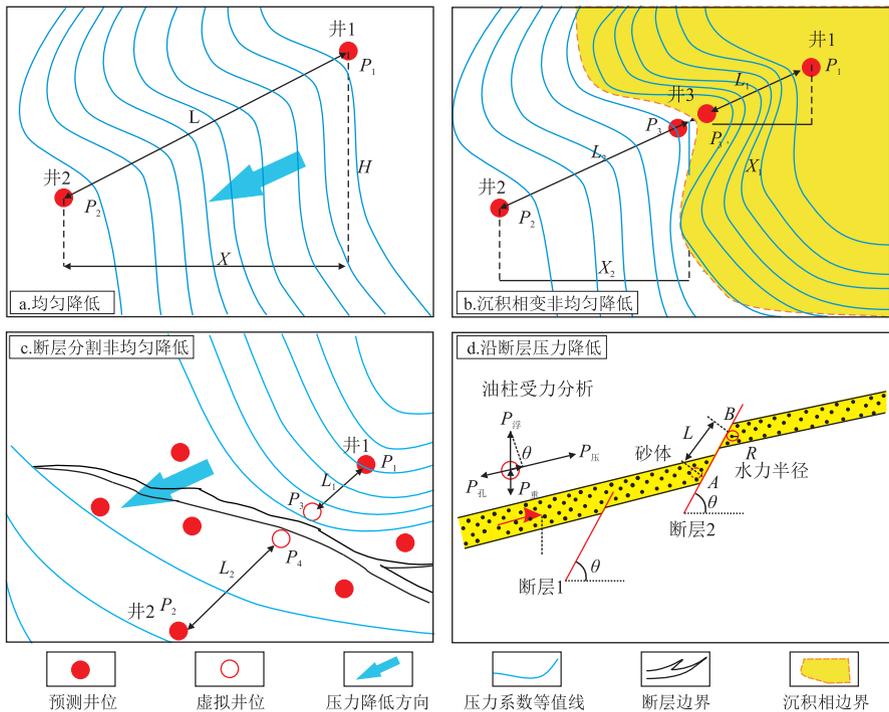


图1 压降梯度计算参数示意

Fig.1 Calculation parameters of pressure decrease gradient

的分割会造成压力的非均匀降低,顺沿压力降低方向可以将不均匀压力等值线分为多个均匀降低的等值线,分段进行压降梯度计算。

### 1.2.1 沉积相变区

沉积相变化必然会引起沉积砂体物性的改变,因此常常在沉积相变化的边界附近,会出现压降梯度的改变。在计算压降梯度时,在紧邻沉积相边界处,分别在两沉积相内补充点  $P_3'$  和  $P_3$  对具有相同压降梯度的区域(图 1b)进行计算:

$$G_{13'} = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta P_{13'}}{L_{13'}} = \frac{P_1 - P_3'}{\sqrt{X_{13'}^2 + H_{13'}^2}} \quad (2)$$

$$G_{32} = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta P_{32}}{L_{32}} = \frac{P_3 - P_2}{\sqrt{X_{32}^2 + H_{32}^2}} \quad (3)$$

式中: $G_{13'}$ 、 $G_{32}$ 为井 1 和井 3'、井 2 和井 3 计算点间压降梯度,MPa/km; $P_1$ 、 $P_3'$ 、 $P_3$ 、 $P_2$ 为井 1、井 3、井 3'和井 2 计算深度处油气藏流体压力,MPa; $L_{13'}$ 、 $L_{32}$ 为井 1 和井 3'、井 3 和井 2 计算点间的空间距离,km; $X_{13'}$ 、 $X_{32}$ 为井 1 和井 3',井 3 和井 2 计算点间的水平距离,km; $H_{13'}$ 、 $H_{32}$ 为井 1 和井 3'、井 3 和井 2 计算点间的垂直距离,km。

### 1.2.2 断层分割区

断层两侧压力系数存在明显差异,计算压降梯度时,需加密断层两侧压力预测井位,沿着压力降低方向,分别计算断层上盘、断层下盘以及沿断层的压降梯度。图 1c 为断层附近平面压降梯度计算方法示意,断层控制下,计算井 1、井 2 间的压降梯度时,沿着压降方向,在断层上盘补充压力预测井 3、下盘补充压力预测井 4,分别计算断层上盘(井 1、井 3)、断层下盘(井 2、井 4)以及沿断层(井 3、井 4)的压降梯度,分段表征压降梯度变化特征,具体公式为(4)和(5)。

$$G_{13} = \frac{dP}{dL_1} = \frac{P_1 - P_3}{L_1} \quad (4)$$

$$G_{24} = \frac{dP}{dL_2} = \frac{P_2 - P_4}{L_2} \quad (5)$$

断层两侧压降梯度计算可以按照沉积相边界两侧压降梯度计算方法进行处理,而沿断层的压降梯度计算要根据断层的断距、侧向封堵性和断层的活动性进行讨论。

断层对压力降低的影响分为 2 种:一种是未切断砂体(图 1d 的断层 1);另一种是切断连通砂体(图 1d 的断层 2)。断层 1 情况较为简单,断层断

距较小,断层两侧仍存在砂体对接,对于油气侧向运移影响不大,超压流体主要通过断层两侧对接砂体进行运移,因此沿断层压降梯度可以忽略不计。在计算断层 2 压降梯度时,首先考虑断层侧向封闭性,评价参数主要为断层泥比(SGR),当 SGR 小于研究区断层封闭临界值时,断层两侧对接砂体侧向连通,断层与沉积相边界作用类似,在断层的影响下断层两侧压降梯度会有所改变,因此在计算压降梯度时,以断层为分割点,在断层两侧压降梯度依据公式(1)~(3)进行分段计算。

SGR 大于断层封闭临界值时,断层侧向连通性降低,通过断层进行垂向压力输导的超压流体占绝大部分。若此时断层在油气运移期活动,活动的断层为超压流体提供了一个高渗透的通道<sup>[13]</sup>,则沿断层压降梯度计算公式为:

$$G_p = \frac{G_A - G_B}{L} \quad (6)$$

若断层在油气运移期不活动时,由于无法判断沿断层压力降低是否均匀,可通过超压流体能量守恒来计算沿断层压降梯度<sup>[14-16]</sup>。通过公式(3)算出的压降梯度为所有能量分配完之后的平均压降梯度(图 1d),能量分配公式遵从公式(7):

$$G_{总} = G_{压力} + G_{浮力} - G_{重力} - G_{毛细管力} \quad (7)$$

式中: $G_{总}$ 为断层中流体总压降梯度,MPa/km; $G_{压力}$ 为沿断层实际压降梯度,MPa/km; $G_{重力}$ 为重力梯度,MPa/km; $G_{毛细管力}$ 为毛细管力梯度,MPa/km; $G_{浮力}$ 为浮力梯度,MPa/km。

因此实际压降梯度为:

$$G_{总} = G_{压力} - G_{浮力} + G_{重力} + G_{毛细管力} \quad (8)$$

实际运移过程中油滴的浮力和重力可忽略不计,因此根据图 4 模型中各参数意义,公式(8)具体为:

$$G = \frac{G_A - G_B}{L} + \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (9)$$

式中: $\sigma$ 为油、水界面张力,N/m; $\theta$ 为断层倾角,(°)。

## 2 地质应用

### 2.1 地质概况

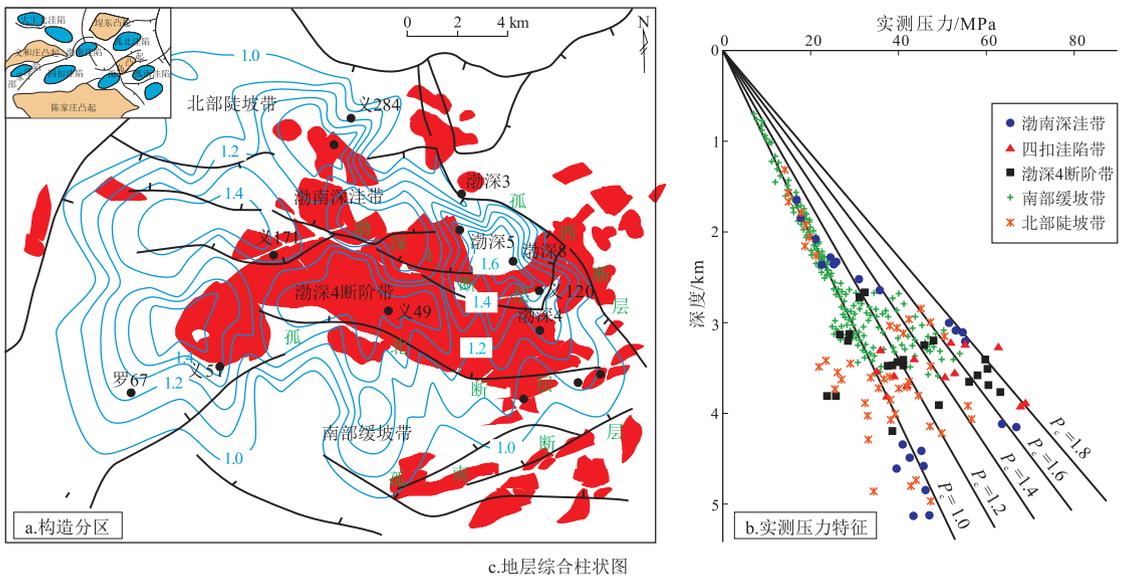
渤南洼陷作为沾化凹陷内埋深最大的次级负向构造单元,从南向北依次发育缓坡带、断阶带、

深洼带以及陡坡带 4 个构造带,具有北陡南缓、东陡西缓的断陷湖盆特征(图 2a) [17-19]。研究区共发育沙一、沙三和沙四 3 套主力烃源岩 [20],从已发现油气分布来看,油气分布范围、油气富集程度在缓坡带、洼陷带、陡坡带存在一定差异 [21]。同时,渤南洼陷广泛发育超压,超压的分布格局与研究区的构造沉降中心相匹配 [22-23]。靠近洼陷沉降中心位置,地层压力明显增高,随地势向周围变缓,地层压力也逐渐降低,但压力向四周降低的幅度并不相同,即使沿同一方向,超压也并不是以同一速率进行降低。因此,本文以渤南洼陷沙三中亚段为例,开展压降梯度的计算,从而为渤南洼陷油气不同运移方式下油气的分布规律进行定量解释。

渤南洼陷古近系沙三沉积时期主要发育 3 类沉积相,即三角洲、湖泊及近岸水下扇 [24-26]。Es<sup>3</sup>中沉积时期湖平面较低,物源方向来自于孤北凸起的三角洲沉积相大面积发育,顺延物源方向,由于沉

积相演变,压力等值线出现非均匀变化,压降梯度不均匀降低(图 3),尤其在两类沉积相边界,井点加密按照公式(2)、(3)进行压降梯度的计算。

渤南洼陷主要发育四级断层 [27]。一级断层为控凹断层,渤南洼陷仅有一条,即北部埕南断层。二级断层为控洼断层,同时也是主要的油源断层,断距可在 1 km 以上,自南向北为孤南断层、孤北断层、渤深 4 断层和义东断层,二级断层的侧向封堵性、垂向封堵性以及成藏期的活动性,会影响深部超压流体的分布,进而影响研究区超压的分布。三、四级断层为一、二级断层的派生和次生断层,在渤南洼陷约有 110 条。三级断层延伸不长,断距为十米到几十米不等,对压力分布具有一定调节作用。从以上分析来看,主要考虑二级断层对于压降梯度的影响作用。根据罗文生 [28] 等对于渤南洼陷断裂活动与油气成藏关系研究可知,孤南、孤北等断层 Es<sup>3</sup> 沉积期的 SGR 以及断层在成藏期活动性



地层			地质年龄/Ma	岩性	沉积环境	构造演化阶段		
系	组	段				热沉降阶段	拗陷阶段	
新近系	上新统	明化镇组	12	[岩性符号]	河流	收敛幕	裂陷充填	
	中新统	馆陶组						
古近系	渐新统	东营组	32.8	[岩性符号]	湖泊—三角洲 半深湖—深湖	收敛幕	裂陷充填	
			35.8					
	始新统	沙河街组	沙一段	上	38	河流—三角洲 湖泊—三角洲 半深湖—深湖 半深湖—盐湖 河流—浅湖	裂陷伸展幕	裂陷充填
			沙二段	上	40			
			沙二段	下	41			
			沙四段	下	42			

图 2 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷区域概况

Fig.2 Comprehensive geological setting of Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

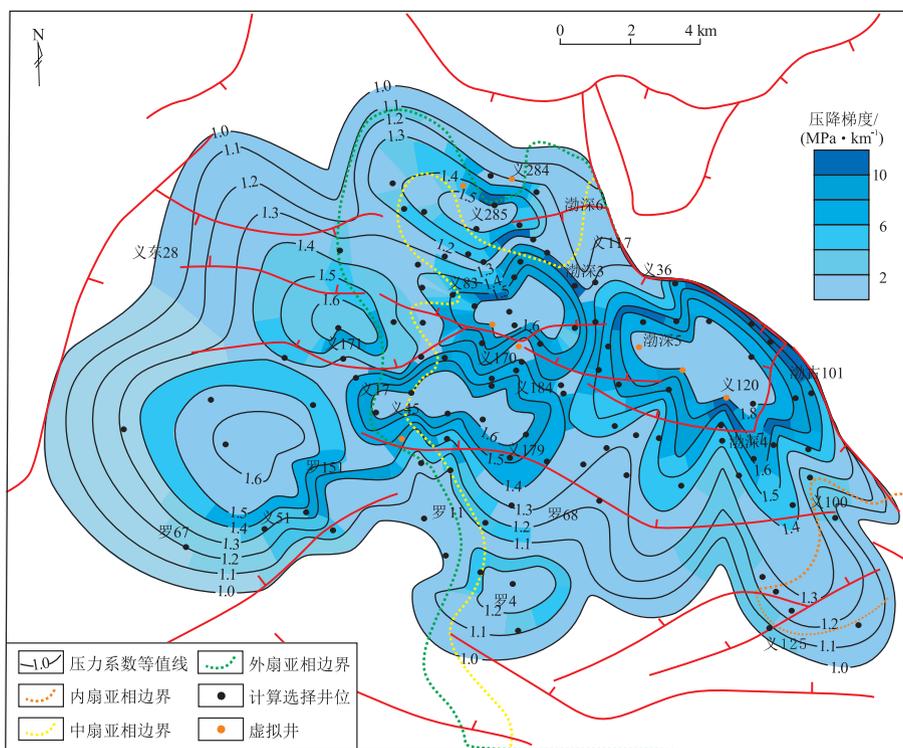


图 3 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷沙三中压降梯度计算井位及压降梯度平面分布规律

Fig.3 Well locations in different pressure decrease gradient regions and plane distribution of pressure decrease gradient in the middle section of the third member of Shahejie Formation in Bonan Sub sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

表 1 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷成藏期断层封堵性及活动性统计

Table 1 Fault sealing and activity during hydrocarbon accumulation, Bonan Sub sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

断层特征	断层名称					
	渤深 4 断层东段	渤深 4 断层中段	渤深 4 断层西段	孤北断层	孤南断层	孤西断层
SGR	2.39	3.5	1.5	0.32	0.2	0.47
断层活动性/ (m · Ma <sup>-1</sup> )	14.8	13.6	2.8	3.4	43.3	64.7
Ng—Nm	2.0	2.7	3.4	1.6	1.9	0

见表 1。

当 SGR 大于 0.4 时,断层具有良好的封闭性,渤南洼陷除孤南、孤北断层外,其他断层均侧向封堵;并且侧向封堵的断层在东营期活动性大于 3.4 m/Ma,馆陶期活动性大于 1.9 m/Ma,断层垂向开启,可以作为油气运移通道。两期成藏中,渤深 4 断层东侧、孤南断层和孤北断层在成藏期活动性较强,渤深 4 断层中段和西段活动较弱。因此渤深 4 断层东段附近压降梯度按照公式(3)计算,渤深 4 断层中段按照公式(4)~(6)进行压降梯度计算,渤深 4 断层西段、孤南断层以及孤北断层可按照公式(2)进行计算。

### 2.2 压降梯度计算结果

在不同压降梯度区利用公式(1)~(6)进行压降梯度计算,由于数据井数量及分布限制,不能完

全覆盖研究区求取压降梯度,考虑到实际操作可行性,不能无限密集地求取压降梯度,因此一般计算疏密相等压力系数等值线降低速率,且代表一定范围内压降梯度范围。图 3 为计算压降梯度值所代表的范围,颜色越深代表压降梯度越高,深蓝色多位于深洼带和断阶带的断层附近,并且越靠近超压中心,断层侧向封堵性越好,断层在成藏期活动速率越大,压降梯度越高。例如虽然渤深 4 断层东段和孤西断层均紧邻深洼中心且侧向封堵,但由于渤深 4 断层东段活动性(14.8 m/Ma)低于孤西断层活动性(64.7 m/Ma),孤西断层附近压降梯度(渤深 5 向渤深 3 方向压降梯度为 11.25 MPa/km)远高于渤深 4 断层东段附近压降梯度。

计算结果共 48 组数据(表 2)。深洼带压降梯度最高,平均压降梯度为 7.46 MPa/km;其次为断

表 2 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷压降梯度计算结果

Table 2 Calculation results of pressure decrease gradient in Bonan Sub sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

序号	构造单元	井区	压降梯度/ (MPa · km <sup>-1</sup> )	序号	构造单元	井区	压降梯度/ (MPa · km <sup>-1</sup> )
1	深洼带	渤深 8	7.06	25	断阶带	义 170	7.25
2	深洼带	义 115	12.12	26	断阶带	义 61	6.12
3	深洼带	虚拟井 2	7.45	27	断阶带	虚拟井 4	4.66
4	深洼带	义 185	4.48	28	断阶带	义 171	5.34
5	深洼带	义 123	10.60	29	陡坡带	义 10	7.83
6	深洼带	虚拟井 3	11.19	30	陡坡带	义 283	7.33
7	深洼带	义 80-1	6.97	31	陡坡带	义 601	5.77
8	深洼带	义 83	5.25	32	陡坡带	义 10	6.98
9	深洼带	义 85	5.41	33	陡坡带	义 107	5.14
10	深洼带	义 121	9.09	34	陡坡带	义 26	3.92
11	深洼带	义 85-3	5.98	35	陡坡带	义 107	2.42
12	深洼带	义 173	6.65	36	陡坡带	义 88	2.54
13	深洼带	义 53	4.78	37	陡坡带	新义 12	3.47
14	断阶带	义 102	3.91	38	缓坡带	义 65	3.70
15	断阶带	虚拟井 8	3.45	39	缓坡带	义 52	1.96
16	断阶带	义 172	5.92	40	缓坡带	罗 14	4.44
17	断阶带	义 70	5.97	41	缓坡带	罗 16	2.76
18	断阶带	义 43	9.68	42	缓坡带	虚拟井 9	3.50
19	断阶带	义 170	7.89	43	缓坡带	罗 1	3.13
20	断阶带	义 47	4.15	44	缓坡带	虚井 10	4.20
21	断阶带	义 46	2.19	45	缓坡带	罗 1	3.46
22	断阶带	义 49	4.48	46	缓坡带	罗 354	3.06
23	断阶带	义 70	3.46	47	缓坡带	义 100	3.08
24	断阶带	义 18	5.08	48	缓坡带	义 128	1.72

阶带,平均压降梯度为 5.30 MPa/km;陡坡带平均压降梯度为 3.18 MPa/km(图 4a)。同时,深洼带和断阶带压降梯度最大值和最小值间差值最大,分别为 7.64 MPa/km 和 7.49 MPa/km,其次为陡坡带 5.41 MPa/km,缓坡带数值较为平均,最大值和最小值间差值为 2.72 MPa/km(图 4a)。

### 3 油气地质意义

选择距超压中心具有相似距离的沉积相边界

及断层附近压降梯度进行统计(图 4b),统计结果表明:断层分割影响下的压降梯度要远大于沉积相边界附近的压降梯度,并且断层下盘的压降梯度要高于断层上盘的压降梯度。在洼陷区高压降梯度指示油气运移过程中具有较大动力,因此通过压降梯度的计算可以明确油气从超压中心排出后的优势运移方向。渤南洼陷压降梯度最高值(12.12 MPa/km)位于孤西断层附近,该方向上油气生成后直接通过孤西断层运移至浅部,但由于孤西断层断面呈

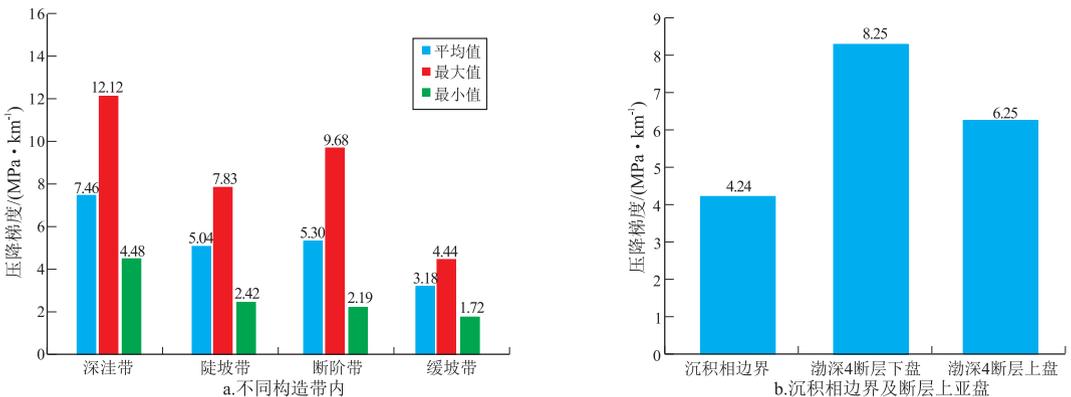


图 4 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷压降梯度特征

Fig.4 Characteristics of pressure decrease gradient in Bonan Sub sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

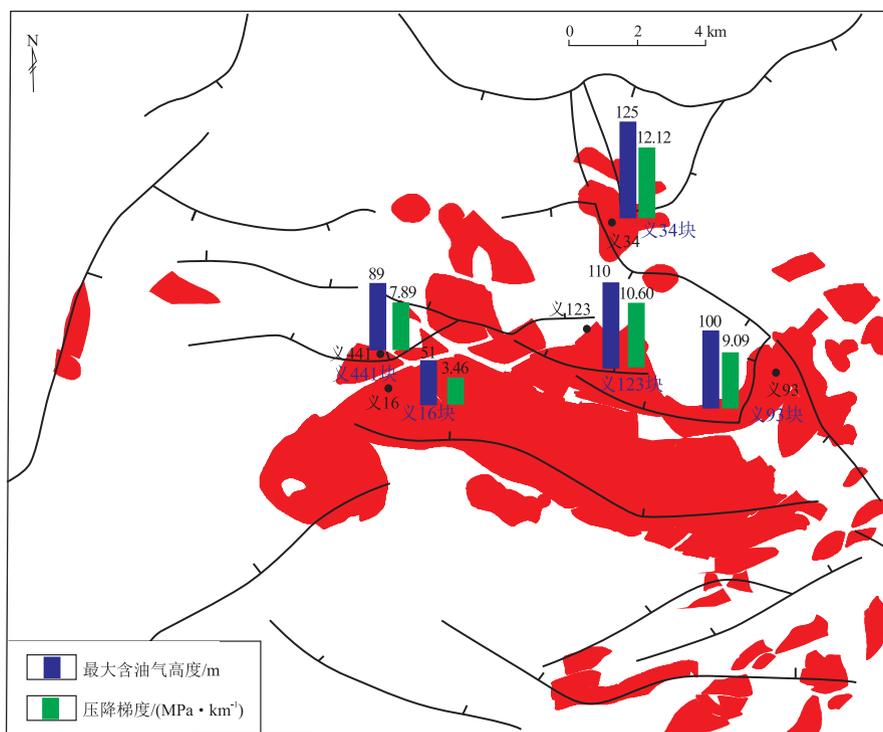


图 5 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷不同油气藏最大含油气高度及其对应的压降梯度

Fig.5 Maximum hydrocarbon-bearing height and corresponding pressure decrease gradient in different reservoirs in Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

凹型,油气发散式运移至洼陷北部义 34 井附近成藏,通过对于油气藏含油高度统计发现,该油气藏含油高度最高为 125 m。而在洼陷区围绕的断阶带,压降梯度可以反映油气藏的充注特征,压降梯度越大的位置油气充注受阻力越大,而压降梯度越小的位置油气藏充注度越高,因此可以通过压降梯度大小明确油气的主要富集区。

### 4 结论

(1)均匀压力降低区压降梯度计算可利用传统公式进行直接结算;非均匀降低区则需要在沉积相边界及断层附近进行分段计算。其中,过断层压降梯度计算需要考虑断层侧向封堵及断层的活动性,分情况进行计算。

(2)压降梯度计算结果发现,渤南洼陷中心深洼带压降梯度最高,其次为断阶带和陡坡带,缓坡带压降梯度最低,高压降梯度一般在断层附近发育。

(3)断层附近平面压降梯度要高于沉积相边界附近平面压降梯度。洼陷高压降梯度方向指示油气优势运移方向,断阶带低压降梯度位置反映油气富集位置。

致谢:审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见。胜利油田勘探开发研究院的刘雅利首席专家、林红梅主任以及刘鹏高级工程师等对本项研究提供

了很多的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

### 参考文献:

[1] 李明诚.石油与天然气运移[M].3版.北京:石油工业出版社,2004.  
LI Mingcheng.Petroleum migration[M].3rd ed.Beijing;Petroleum Industry Press,2004.

[2] 郝芳.超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M].北京:科学出版社,2005.  
HAO Fang.Kinetics of hydrocarbon generation and mechanisms of petroleum accumulation in overpressured basins[M].Beijing: Science Press,2005.

[3] 解习农,李思田,刘晓峰.异常压力盆地流体动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,2006.  
XIE Xinong, LI Sitian, LIU Xiaofeng.Basin fluid dynamics in abnormally pressured environments[M].Wuhan:China University of Geoscience Press,2006.

[4] 解习农,刘晓峰.超压盆地流体动力系统与油气运聚关系[J].矿物岩石地球化学通报,2000,19(2):103-108.  
XIE Xinong, LIU Xiaofeng.Related to black shale series fluid dynamic system and relationship with accumulation of hydrocarbon in overpressured basin[J].Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry,2000,19(2):103-108.

[5] YAN Jianzhao,LUO Xiaorong,WANG Weimin,et al.An experimental study of secondary oil migration in a three-dimensional tilted porous medium[J].AAPG Bulletin,2012,96(5):773-788.

[6] 郝芳,蔡东升,邹华耀,等.渤中坳陷超压—构造活动联控型流体流动与油气快速成藏[J].地球科学(中国地质大学学报

- 报), 2004, 29(5): 518-524.
- HAO Fang, CAI Dongsheng, ZOU Huayao, et al. Overpressure-tectonic activity controlled fluid flow and rapid petroleum accumulation in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2004, 29(5): 518-524.
- [7] WANG Chiyuen, XIE Xinong. Hydrofracturing and episodic fluid flow in shale-rich basins: a numerical study [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(10): 1857-1869.
- [8] 李淮莲, 刘震, 夏庆龙, 等. 辽东湾凝析气田超压成因及向传递机制初探 [J]. 地质科学, 2008, 43(2): 377-388.
- LI Weilian, LIU Zhen, XIA Qinglong, et al. A preliminary study on origin and transmissive mechanisms of overpressure in the JZ20-2 condensate field in the Liaodong Bay [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(2): 377-388.
- [9] 蒋有录, 查明. 石油天然气地质与勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- JIANG Youlu, ZHA Ming. Petroleum & gas geology and exploration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [10] SCHOWALTER T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(5): 723-760.
- [11] MCNEAL R P. Hydrodynamic entrapment of oil and gas in Bisti Field, San Juan County, New Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1961, 45(3): 315-329.
- [12] HUNT J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
- [13] 谢启超, 刘震, 李亮, 等. 渤海凹陷构造演化与超压形成及演化过程的关系分析 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2004, 19(5): 6-10.
- XIE Qichao, LIU Zhen, LI Liang, et al. Analysis of the relationship between tectonic evolution and the formation and evolution of overpressure in Bonan Sag [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2004, 19(5): 6-10.
- [14] SMITH D A. Theoretical considerations of sealing and non-sealing faults [J]. AAPG Bulletin, 1966, 50(2): 363-374.
- [15] BERG R R. Capillary pressures in stratigraphic traps [J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6): 939-956.
- [16] 刘新社, 席胜利, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地中生界石油二次运移动力条件 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 143-147.
- LIU Xinshe, XI Shengli, HUANG Daojun, et al. Dynamic conditions of Mesozoic petroleum secondary migration, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 143-147.
- [17] 宋国奇, 刘华, 蒋有录, 等. 沾化凹陷渤海湾沙三段沙河街组原油成因类型及分布特征 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(1): 33-38.
- SONG Guoqi, LIU Hua, JIANG Youlu, et al. Genetic types and distribution characteristics of crude oils from Shahejie Formation in Bonan Subbasin, Zhanhua Sag, Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 33-38.
- [18] 刘鹏, 宋国奇, 刘雅利, 等. 渤海湾沙三段沙河街组多类型沉积体系形成机制 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014, 45(9): 3234-3243.
- LIU Peng, SONG Guoqi, LIU Yali, et al. Mechanism of depositional system in upper fourth member of Shahejie Formation in Bonan Sag [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9): 3234-3243.
- [19] 程桂玲. 渤海湾沙三段中亚段 9 砂组储层特征及分布规律 [J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(3): 54-55.
- CHENG Guiling. Reservoir characteristics and distribution of the ninth sand group in the middle Sha3 in Bonan Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(3): 54-55.
- [20] 刘华, 蒋有录, 谷国翠, 等. 沾化凹陷渤海湾沙三段沙河街组原油成因机制探讨 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2013, 37(4): 46-51.
- LIU Hua, JIANG Youlu, GU Guocui, et al. Pressure characteristics and formation mechanisms of Paleogene in Bonan Sag, Zhanhua Depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(4): 46-51.
- [21] 罗胜元. 沾化凹陷渤海湾超压系统与油气成藏研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- LUO Shengyuan. Study on the overpressure characteristic and hydrocarbon accumulation in Bonan Depression, Zhanhua Subbasin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [22] 罗胜元, 何生, 金秋月, 等. 渤海湾超压系统划分及结构特征 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2015, 45(1): 37-51.
- LUO Shengyuan, HE Sheng, JIN Qiuyue, et al. Overpressure system classification and structure characteristic in Bonan Sag [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(1): 37-51.
- [23] LIU Hua, JIANG Youlu, SONG Guoqi, et al. Overpressure characteristics and effects on hydrocarbon distribution in the Bonan Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 811-821.
- [24] 康仁华, 刘魁元, 赵翠霞, 等. 济阳拗陷渤海湾沙三段沙河街组沉积相 [J]. 古地理学报, 2002, 4(4): 19-29.
- KANG Renhua, LIU Kuiyuan, ZHAO Cuixia, et al. The sedimentary facies of the Shahejie Formation of Paleogene in Bonan Sag of Jiyang Depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(4): 19-29.
- [25] 董春梅, 宋春刚. 渤海湾盆地渤海油田沙三段沉积微相研究 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 375-380.
- DONG Chunmei, SONG Chungang. Study on the sedimentary microfacies of the Sha-3 member in Bonan Oilfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(4): 375-380.
- [26] 董春梅. 渤海湾盆地第三系沙三段高分辨率层序地层学研究 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2002, 26(2): 11-14.
- DONG Chunmei. High resolution sequence stratigraphy in third member of Shahejie Formation of the Lower Tertiary in Bonan Depression [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2002, 26(2): 11-14.
- [27] 罗文生. 渤海湾断裂活动与油气成藏关系研究 [D]. 东营: 中国石油大学 (华东), 2007.
- LUO Wensheng. Study on the relation between fault activity and hydrocarbon accumulation in Bonan Depression [F]. Dongying: China University of Petroleum, 2007.
- [28] 罗文生, 张善文, 王永诗, 等. 渤海湾沙三段—新近系断层活动与油气成藏 [J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 34-37.
- LUO Wensheng, ZHANG Shanwen, WANG Yongshi, et al. Fault activity and hydrocarbon accumulation in Tertiary of Bonan Subbasin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(3): 34-37.