

文章编号:1009-2722(2018)01-0055-10

广义物质平衡算法在沙南凹陷 BZ 油田滚动勘探开发中的应用

孙藏军¹, 别旭伟¹, 许赛男¹, 吴浩君¹, 何小波², 刘 婧³

(1 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459; 2 大港油田原油运销公司, 天津 300280;
3 中国石油渤海钻探工程有限公司测井分公司, 天津 300280)

摘 要:渤海湾盆地沙南凹陷 BZ 油田沙一段生屑云岩主力含油储层投产后,发现实际生产特征与初始地质认识吻合度差,部分区块可能具有增储上产的潜力。通过利用油田生产动态资料,主要包括压力、产量及 PVT 实验等数据,采用广义物质平衡算法识别出 A4 井区滚动勘探潜力最大。在此基础上,精细刻画生屑云岩沉积期古地貌和古生态环境特征并结合生屑云岩发育规律,预测了 A4 井区生屑云岩储层新的空间展布范围。实际钻探结果证实了储层预测的准确性,新增探明储量近 400 万 t,保障了 BZ 油田的可持续发展 and 投资效益。该套方案对国内海上相似地质条件油田的滚动勘探开发具有借鉴意义。

关键词:渤海湾盆地;沙南凹陷;生屑云岩;广义物质平衡法;滚动挖潜

中图分类号:TE319 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.01009

1 问题的提出

沙南凹陷 BZ 油田位于渤海湾盆地沙东南构造带上,紧邻沙南和渤中 2 个生烃凹陷(图 1)。油田主力储层为沙一段湖相生屑云岩,埋深大,厚度薄,溶蚀孔隙发育,为优质储层。

按照勘探阶段预测的储层沉积特征和厚度展布特征(图 2a,b),BZ 油田进行了储量申报、ODP (油田总体开发方案)设计与实施。然而通过近 7 年的生产实践,发现各井生产特征与 ODP 明显不符,为提升油田经济效益,维护油田的稳定发展,滚动勘探开发势在必行。由于 BZ 油田主力油层单一,为沙一段生屑云岩储层,其他层系挖潜潜力

小。因此,要实现在 BZ 油田周缘获得增储上产,寻找油田外缘未发现的生屑云岩储层不仅具有最佳经济效益,也最切合油田的实际地质特征。然而,由于 BZ 油田为典型的深层薄储层湖相碳酸盐岩油藏,储层预测难度大,主要存在以下问题和挑战。

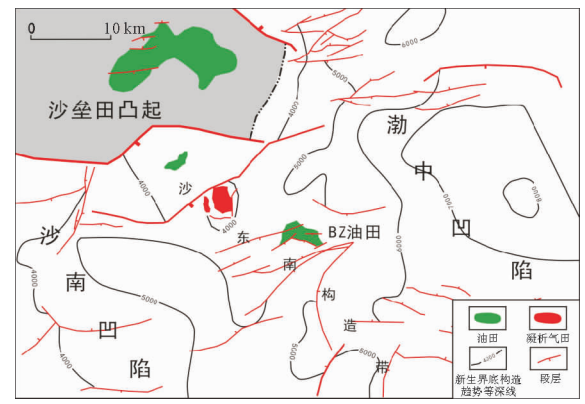


图 1 BZ 油田区域位置

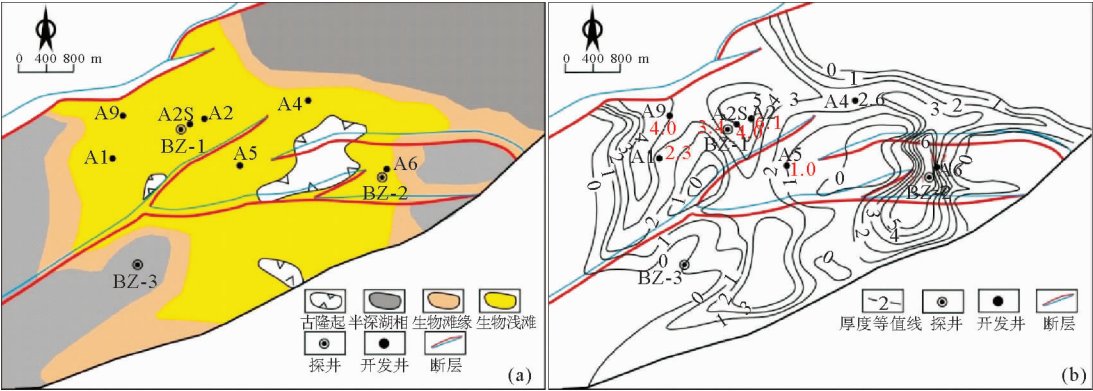
Fig. 1 Regional location of the BZ Oilfield

收稿日期:2017-09-14
基金项目:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)
作者简介:孙藏军(1988—),男,硕士,工程师,主要从事海上油气田开发地质与评价研究工作。E-mail:suncj2@cnooc.com.cn

1.1 地震资料识别储层难度大

沙一段生屑云岩储层埋深大,埋深主要介于 3 900~4 100 m,单层厚度薄,层厚主要介于 1~5 m,单井储层累积厚度<9 m。因此,在现有地震资料基础上不能有效识别此类深层薄层湖相碳酸

盐岩储层^[1-6]。同时 BZ 油田为海上油田,具有井少(共 10 口)、井间距大的特点(图 2),难以开展陆上常采用的以精细构造解释为基础,以精细沉积微相研究和高精度储层反演为核心的滚动勘探开发技术方案^[7-9]。



(a)沙一段沉积相分布;(b)生屑云岩储层等厚度

图 2 沙南凹陷 BZ 油田开发井钻后生屑云岩储层平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of the bioclastic dolostone after drilling the development wells, BZ Oilfield in the Shanan Sag

1.2 探索油藏动态数据应用于海上油田滚动勘探开发

当前由于低成本勘探开发的现实要求,很难在 BZ 油田开展新的地震资料采集和处理解释工作,而积累的丰富油藏生产动态数据能很好反映油田的实际地质情况。因此,探索将油田生产动态数据与静态地质分析相结合,先搜索潜力目标区,再开展综合评价,最后进行井位部署的方案,不仅适应当前低油价的勘探开发背景,也切合 BZ 油田实际状况,为类似海上油田的低成本滚动勘探开发提供借鉴。

2 滚动勘探开发技术思路与流程

沙南凹陷 BZ 油田沙一段湖相生屑云岩主力储层识别难度大,利用现有的地震资料不易预测油田周缘储层的展布范围,给油田滚动勘探开发带来了挑战。为此,探索利用油田丰富的生产动态资料,主要包括压力、产量及 PVT 实验等数据,结合油田静态地质数据,利用广义物质平衡计算法开展有利区块筛选,然后对目标区开展储层

预测和综合评价,最后进行井位部署与开发实践,从而实现在油田周缘取得储量和产量的贡献,具体研究思路及流程见图 3。

广义物质平衡计算方法由 Walsh^[5]于 1995 年提出,该方法适用于各类油气藏,诸如稠油油藏、干气藏、挥发油气藏和凝析气藏等,在埕岛等油田取得了较好的应用效果^[10,11]。其优势在于,广义物质平衡法是利用油气田开发一段时间后的动态生产资料计算获得的动态储量,可以和勘探期用容积法计算的储量结果进行对照,为寻找潜力区提供线索。该广义物质平衡方程式为:

$$N[B_{oi}(1-R_vR_s)-(B_g-R_vB_o)R_{si}-(B_o-R_sB_g)]+N_p[B_o(1-R_vR_{ps})+(R_{ps}-R_s)B_g]=0$$

- 式中: N 为原油原始地质储量, m^3 ;
 B_{oi} 为原油原始地层体积系数, m^3/m^3 ;
 R_v 为挥发油气比, m^3/m^3 ;
 R_s 为溶解气油比, m^3/m^3 ;
 B_g 为天然气地层体积系数, m^3/m^3 ;
 B_o 为原油地层体积系数, m^3/m^3 ;
 R_{si} 为原始溶解气油比, m^3/m^3 ;
 N_p 为原油产量, m^3 ;
 R_{ps} 为累积生产气油比, m^3/m^3 。

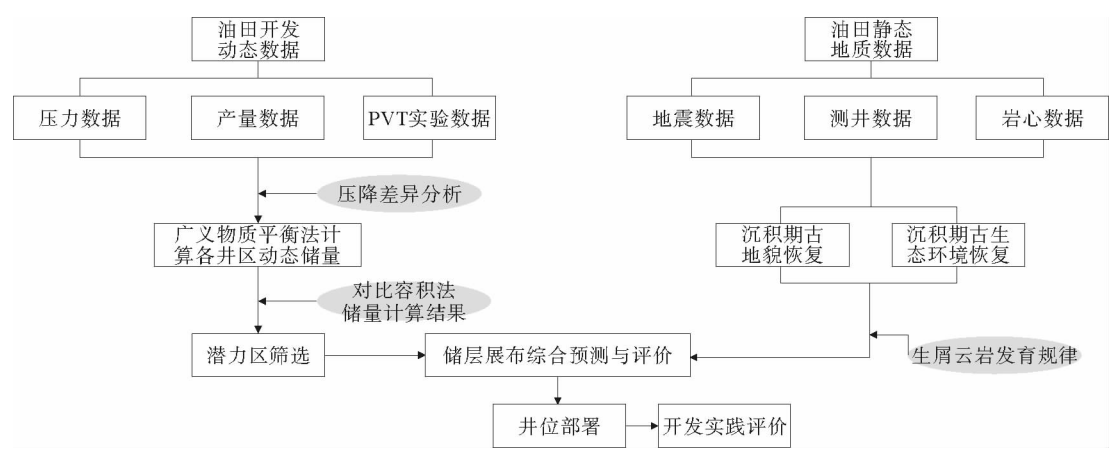


图 3 沙南凹陷 BZ 油田油藏动态数据与静态地质分析相结合的滚动勘探开发研究流程

Fig. 3 Research process of progressing exploration and development in combination with reservoir dynamic and static geological data analysis ,BZ Oilfield in the Shanan Sag

3 BZ 油田沙一段生屑云岩储层岩石学特征

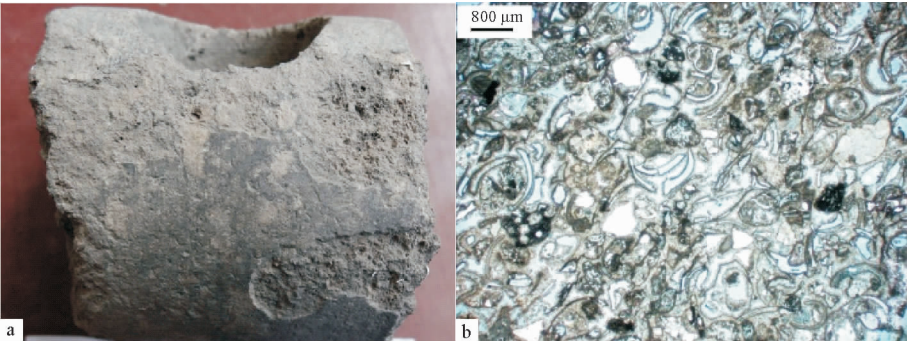
BZ 油田生屑云岩主要为生物和化学沉积,分布于滨浅湖缓坡带,表现为泥—粉晶碳酸盐胶结腹足类螺碎屑颗粒沉积而成,是典型的高能生物滩沉积。根据研究区 BZ-2 井的岩心和薄片资料(图 4),生屑云岩为浅灰—灰色,具有颗粒支撑结构,颗粒主要为腹足类螺屑,大小多为几毫米到 1.0 cm,含量>65%,大多较破碎,少见介形虫、内碎屑和陆源碎屑。粒间填隙物多为粉晶白云石,少见泥晶白云石,粒径主要为 0.05~0.15 mm,呈栉壳状、马牙状胶结于螺壳壳壁及粒间,次为

自生石英、黏土矿物。生屑云岩普遍见白云化,薄片鉴定白云石含量可高达 87%~97%之间,平均为 92.42%。岩石沉积构造相对简单,呈块状构造,岩心上明显可见螺壳堆积而成的蜂窝状。这类生物碎屑含量高的颗粒云岩是高能浅滩的沉积物。

4 广义物质平衡计算法适用性分析及滚动勘探潜力区筛选

4.1 广义物质平衡计算法的适用性

对于定容封闭油藏,油井投产初期压降程度较小,压力波传播未达到油藏边界,处于不稳定流



(a)生屑云岩,生物体腔孔隙发育,块状构造,2井;(b)生屑云岩,颗粒支撑,溶蚀孔隙发育,多为亮晶白云石胶结,2井,单偏光(b为a的薄片照片)

图 4 BZ 油田沙一段生屑云岩储层岩心照片及薄片显微照片

Fig. 4 Reservoir core photos and thin section micrograph of the bioclastic dolostone in the first member of the Shahejie Formation of BZ Oilfield in the Shanan Sag

动阶段,计算动态储量反映的为压力传播范围内的
的储层规模。随着采出程度的增加,压力波达到
油藏边界,达到拟稳定流动阶段,即压力随时间的
变化率为常数。故随着累计产量的增加,计算动
态储量逐渐增大,并最终趋于稳定(图 5)。因此,
广义物质平衡算法适用于当前阶段研究区的动
态储量计算,计算结果趋于恒值。

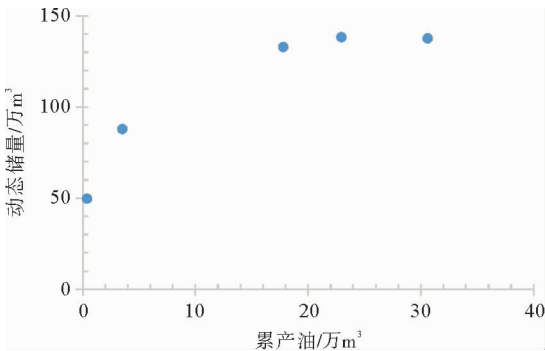


图 5 A9 井不同阶段累产油与动态储量的关系
Fig. 5 Relationship between accumulated oil production
and dynamic reserves of well A9 in different stages

4.2 滚动勘探潜力区筛选

根据 BZ 油田各开发井压降的差异性(图
6a),并结合沙一段生屑云岩顶面构造图,油田可
分为 5 个井区(图 6b)。其中 A2S 井在关井时监
测地层压力仍持续下降,且与 A9 井压力下降趋
势一致,表明其生屑云岩储层连通为同一井区,其
余 4 口开发井均为独立的储量单元。在此基础
上,利用广义物质平衡方法计算了不同时间阶段
各井区的动态储量,并与容积法计算的储量结果
作一对比(表 1)。可以看出,A1、A5、A6、A2S/
A9 等 4 个井区 2 种计算结果的相对误差均在
0.9%以内,表明广义物质平衡法在研究区是适用
的,但 A4 井区相对误差大,预示 A4 井区具有较
大的潜力。根据广义物质平衡法计算的 582 万 t
的动态储量反推计算,将 A4 井实钻油底海拔由
-4 003 m 下推 397 m,取油水界面为-4 400 m,
新圈定了 A4 井区的含油面积(图 7),从而反向预
测出 A4 井区生屑云岩储层的发育规模比早期研
究成果扩大 7.37 km²。在此基础上,为落实预测
结果的可靠性,重点对 A4 井区生屑云岩储层空
间展布特征进行了精细表征。

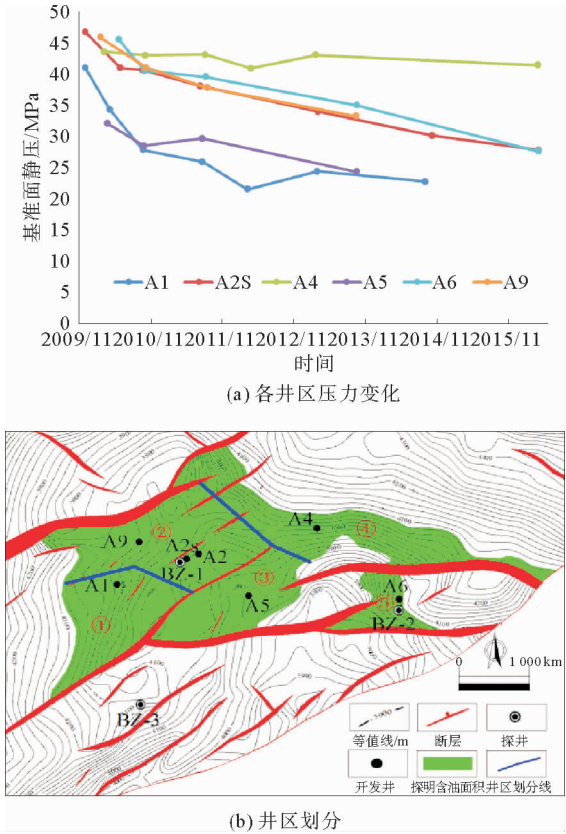


图 6 利用压降差异性预测沙南凹陷 BZ 油田各井区分
Fig. 6 Prediction of the division of wells in BZ Oilfield by
difference of pressure drawdown

表 1 沙南凹陷 BZ 油田容积法与不同
时间段广义物质平衡计算结果

井区	容积法/ ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	广义物质平衡计算/($\times 10^4 \text{ m}^3$)		相对误 差/%
		2014 年	2016 年	
A1	23	23	23	0.00
A5	39	45	48	0.23
A6	32	59	60	0.88
A2S/A9	132	130	130	-0.02
A4	31	554	582	17.77

5 生屑云岩储层展布特征综合预测
与评价

为落实 A4 井区生屑云岩储层预测展布范围
的可靠性,通过对研究区的古地貌和古生态环境
的恢复并结合生屑云岩发育规律,在垂向和平面
上,对 A4 井区生屑云岩储层进行精细解剖,并通
过调整井实施,进行实钻验证。

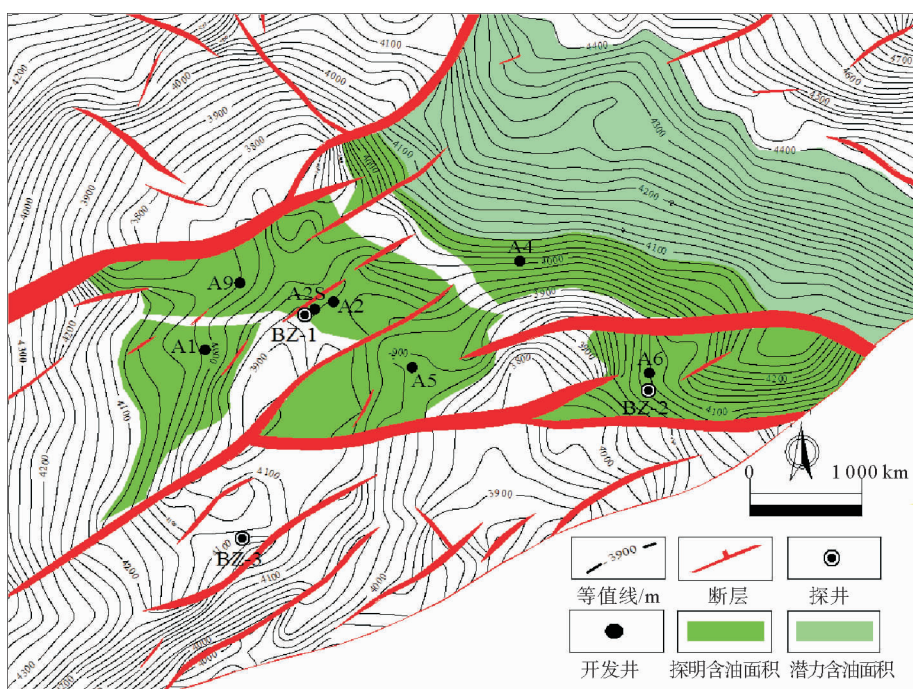


图 7 利用广义物质平衡方法新绘的沙南凹陷 BZ 油田含油面积图

Fig. 7 New oil area using generalized material balance, BZ Oilfield in the Shan'an Sag

5.1 生屑云岩储层垂向演化特征

BZ 油田钻井揭示发育生屑云岩的古地貌最大高程差为 85 m,且压力资料显示古地貌高程差 60 m 的 A2S 与 A9 井生屑云岩具有连通性(图 8)。而适合底栖腹足螺类生物生存的水深在 15 m 左右^[12-15],因此,笔者认为研究区沙一段底部沉积期,水体环境对螺类生物繁殖有利,此时区域构造稳定且古隆起并未完全淹没于水下,随着湖盆水体在持续稳定扩张的过程中^[16-18],生屑滩沿古隆起带呈退积—超覆模式(图 9),从而造成研究区在古地貌缓坡带高程差较大范围内,均有生屑云岩发育且存在叠合连通。

5.2 生屑云岩储层平面展布特征

BZ 油田沙一段生屑云岩沉积期的古地貌特征可以划分为缓坡、构造脊、陡坡、凸起与深凹槽等 5 种地貌类型(图 10)。受古地貌形态影响,生屑滩在平面上呈现以下分布特征(图 11)。

(1) 生屑滩主要发育区

位于开阔湖盆的古地貌缓坡带,该区域沙一段地层厚度为 100~240 m,坡度为 7°~12°。在

湖盆水体持续扩张的过程中,该区域始终保持宽缓斜坡的古地形,湖盆水体开阔,水体循环通畅,水动力强,适合螺类生物的生存且长期繁盛,比如 A4 井区东北方向的缓坡带(图 10),动态资料证实此区域压力下降幅度最小。

(2) 生屑滩次发育区

分古地貌局限湖湾区和在局限湖盆背景下的缓坡带 2 种情况(图 10),该区域沙一段地层厚度为 60~240 m,坡度为 5°~14°。①局限湖湾的 A5 井区,古地貌上四面皆高,螺类死亡后,螺壳被湖流搬运后更易在湖湾区堆积,这也造成了平面上不易与其他缓坡带生屑滩体之间的连通。②区域在局限湖盆背景下的缓坡带,如 A1 和 A6 井区,湖盆水体能量相对较弱,循环较差,所以螺类生物相对欠发育,动态资料证实地层压力下降较大。此外,缓坡带内构造脊的存在会造成湖盆岸线性质的不同,从而影响着螺壳的最终分布。早期螺类生物沿湖岸线呈带状分布,死亡之后由于受到湖浪及沿岸流的改造,会沿着构造脊两边凹型地带堆积,如研究区 A1 和 A9 井区储层古地貌同在一个缓坡带上,但是中间存在构造脊的影响而造成不连通,并且通过动态资料证实是不连通的。

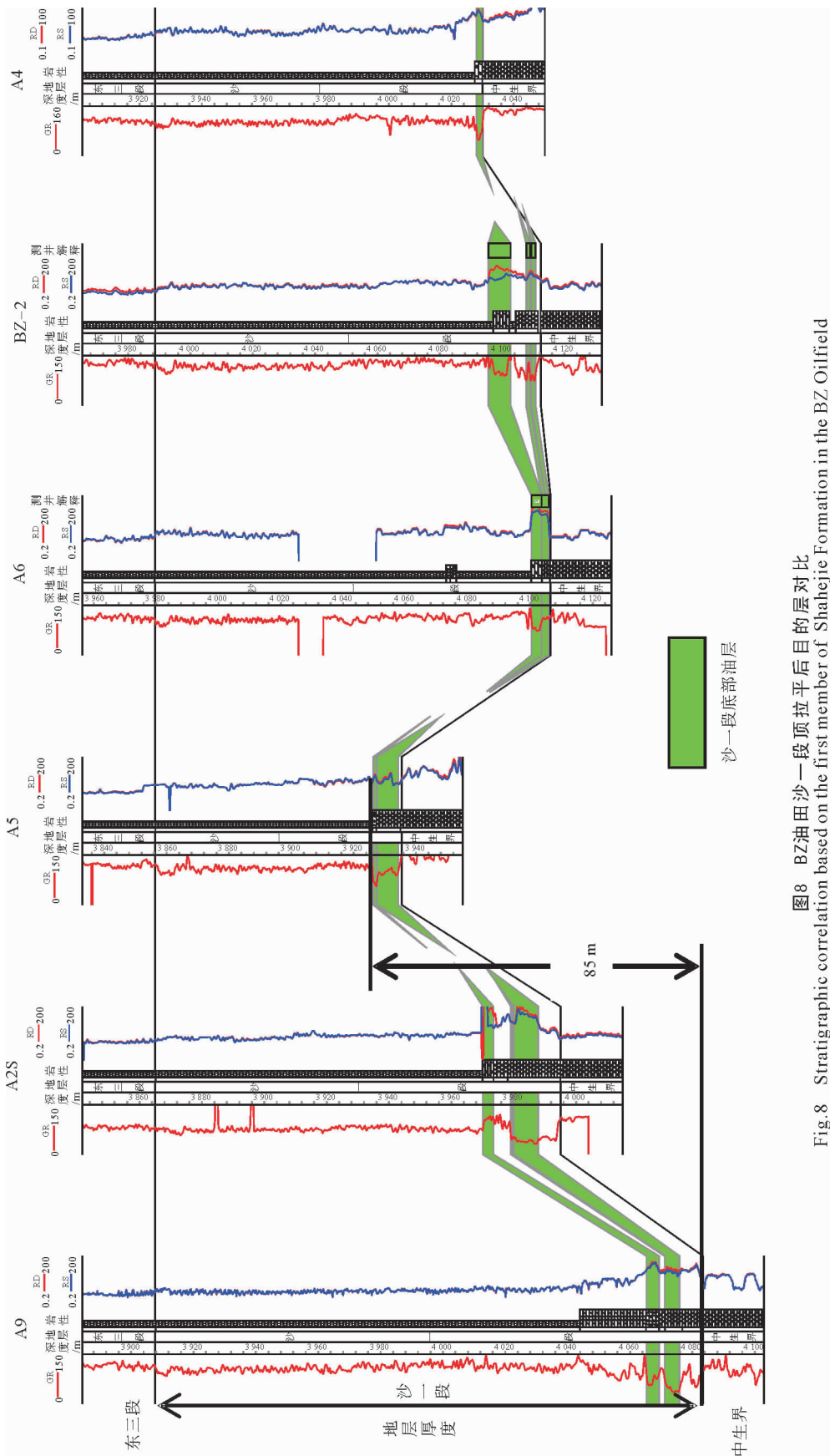


图8 BZ油田沙一段顶拉平后目的层对比
Fig.8 Stratigraphic correlation based on the first member of Shahejie Formation in the BZ Oilfield

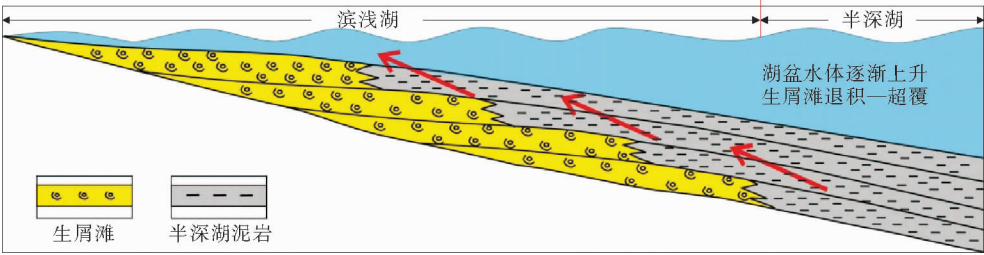


图 9 BZ 油田沙一段底部生屑滩沿缓坡带沉积机理模式

Fig. 9 Sedimentary pattern of the bioclastic dolostone along gentle slope belt on the bottom of first member of Shahejie Formation in BZ Oilfield

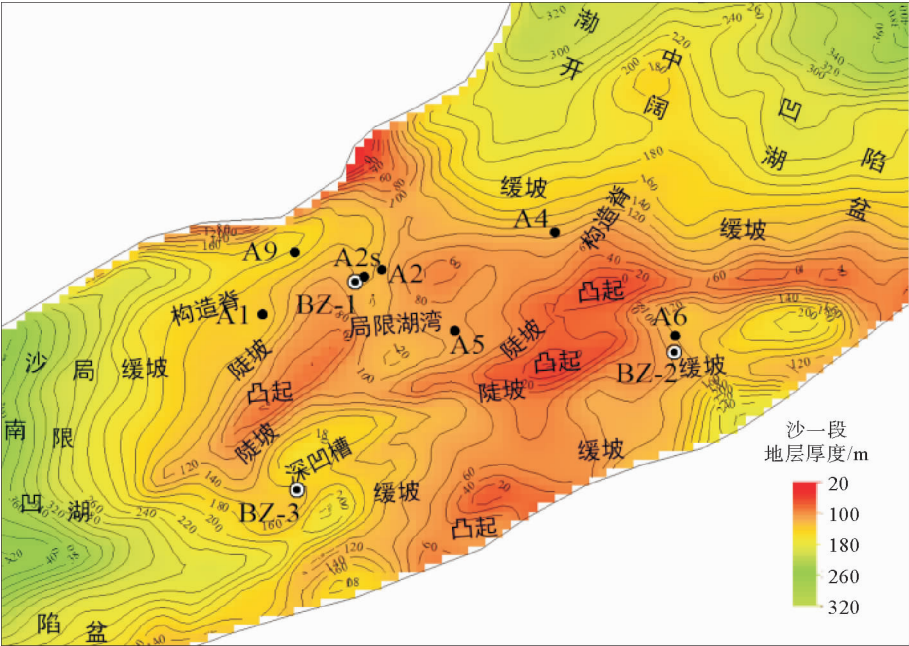


图 10 BZ 油田沙一段沉积期古地貌

Fig. 10 Geomorphological map of the first member of Shahejie Formation in BZ Oilfield

(3)生屑滩不发育区

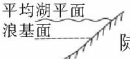
位于古地貌陡坡、凸起及深凹槽区。这些区域的坡度为 $15^{\circ}\sim 22^{\circ}$ 。凸起陡坡带由于易暴露地表,局部可以提供物源导致水体不清澈而影响到生物繁殖,从而造成这些区域都不利于螺类生物的生存聚集。凹槽区由于坡陡的原因,随着湖盆水体逐渐加深,底栖生物赖以附着的基底容易被快速淹没,如深凹槽陡坡的 3 井区,该区域沙一段地层厚度为 160~240 m,在水体扩张过程中,该区域水体循环较差,水动力较弱,以沉积滩间泥质灰岩、泥岩为主(图 10)。

以上研究结果表明,研究区生屑滩由于受到古地貌影响,主要发育于水进过程中的古地貌缓

坡带,且储层平面展布受到古地貌凸起带、构造脊的分割而呈片状且不连通分布模式。通过上述综合评价与分析,重新绘制了研究区沙一段生屑云岩沉积微相平面图(图 12),特别是 A4 井区的生屑云岩储层展布范围远超之前的认识。

5.3 实钻验证

上述研究成果表明,A4 井区处于渤中凹陷开阔湖盆边缘西南端,具有大范围宽缓斜坡带的古地貌背景,为底栖螺类生物的生存繁盛提供了有利条件,并且随着湖盆水体的持续扩张,水体循环通畅,氧气充分,适合生物的生存繁盛,因而生屑云岩储层发育,滚动扩边潜力大。2016 年,于 A4

项目	井区	古地貌微构造	水动力	水体环境	生物	沙一段地层厚度/m	坡角度/°	是否经常暴露水面	岩性	微相
主发育	A4/A8/A3	平均湖平面 浪基面  缓坡	强/高能	开阔	发育 螺类 介形虫	100~240	7~12	偶尔	生屑云岩	生屑滩
次发育	A1/A9/A2S /A5/A6	平均湖平面 浪基面  缓坡	强/高能	较开阔	发育 螺类 介形虫	60~240	5~14	偶尔	生屑云岩	生屑滩
不发育	—	 凸起	弱/低能	开阔	不发育	—	18~22	经常	—	—
	—	平均湖平面 浪基面  陡坡	弱/低能	局限	少量 螺类	0~60	18~20	偶尔	浅湖泥岩 为主	泥晶滩
	3	 深凹槽	弱/低能	局限	不发育	160~240	15~22	否	泥岩 泥灰岩	滩间 洼地
	—	 构造脊	强/高能	—	少量 螺类	—	16~18	偶尔	—	—

注：①沙一段地层厚度值据古地貌读取；②古地形坡度由古地貌图通过三角函数计算求取

图 11 BZ 油田沙一段不同古地貌微构造控制下的储层发育模式

Fig. 11 Reservoir development model under controlling of different micro-tectonics in the first member of Shahejie Formation in BZ Oilfield

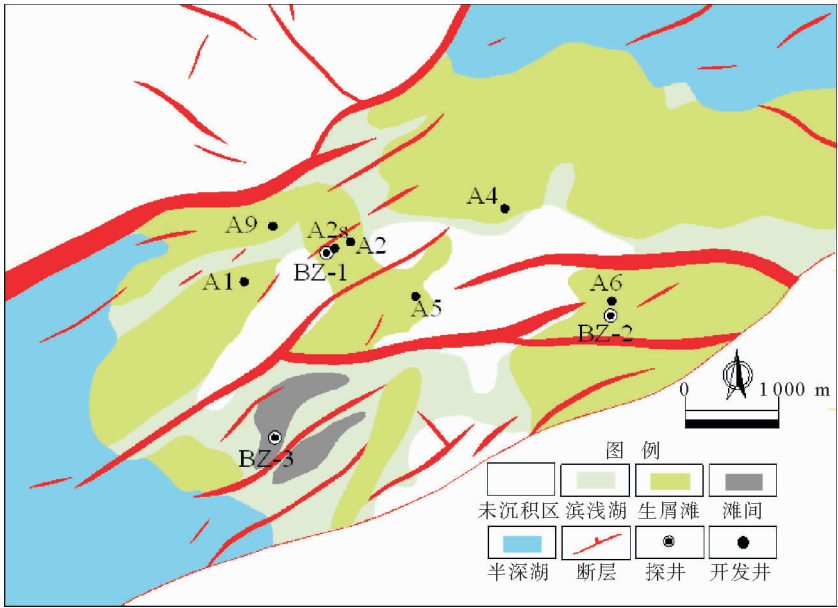


图 12 BZ 油田沙一段生屑云岩储层平面沉积相新图

Fig. 12 New sedimentary facies map of bioclastic dolostone in the first member of Shahejie Formation in BZ Oilfield

井区东侧构造低部位，分别部署 2 口调整井 A3 和 A8 井。2 口井实际钻遇生屑云岩储层厚度分别为 1.0 m 和 7.6 m(图 13)，验证了 A4 井区沙一段生屑云岩储层展布范围预测结果的准确性，使沙一段生屑云岩新增探明储量近 400 万 t，为油田稳定生产提供了坚实的物质基础。

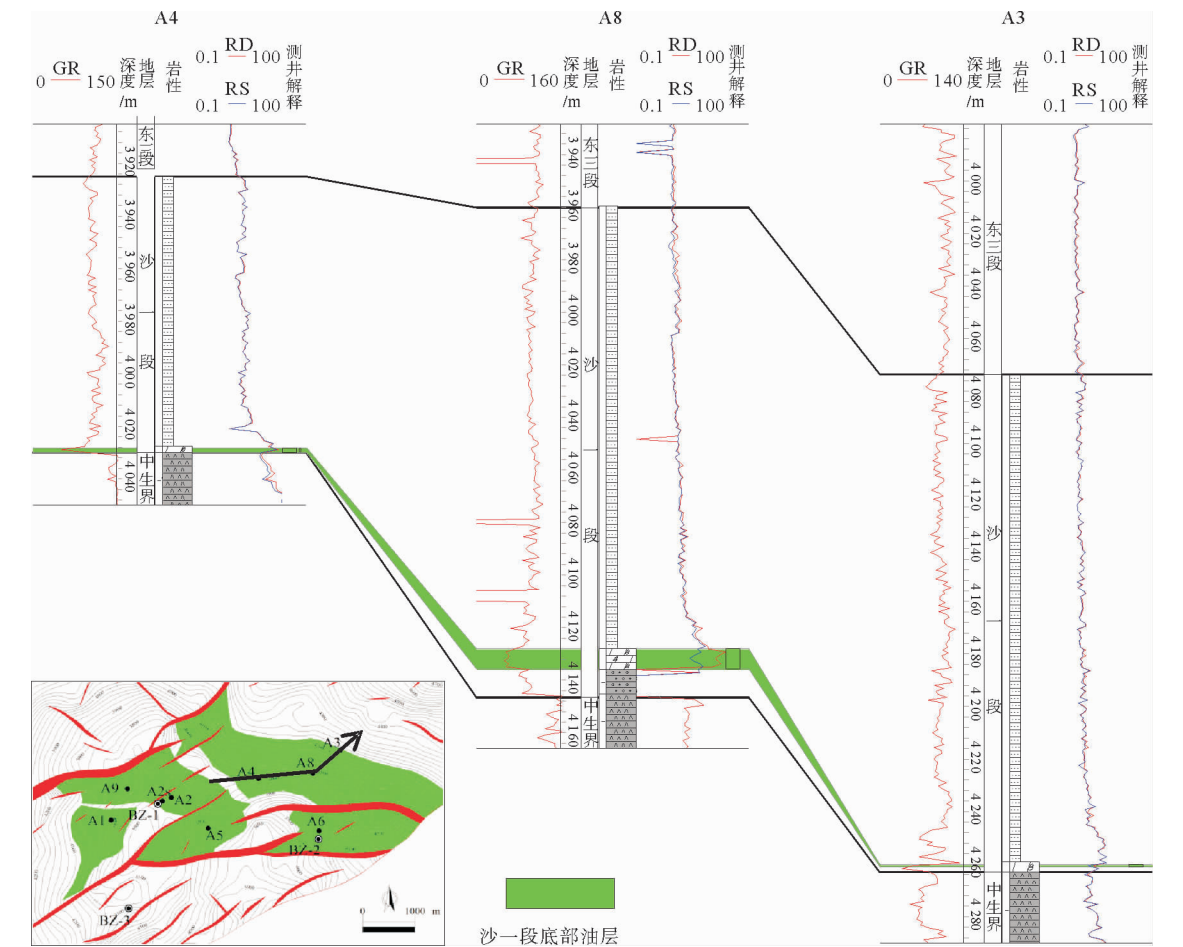


图 13 BZ 油田 A4 井与新部署的 A3 井与 A8 井的连井对比

Fig. 13 Combination with A4 well、A3 well and A8 well in BZ Oilfield

6 结论

利用油田开发动态资料,通过广义物质平衡法筛选出沙南凹陷 BZ 油田 A4 井区具有滚动勘探潜力。在此基础上,利用静态地质资料开展 A4 井区沙一段生屑云岩沉积期古地貌和古生态环境的恢复并结合生屑云岩发育规律,对沙一段生屑云岩储层展布范围和储层特征进行综合预测与评价。利用调整井成功评价 A4 井区低部位潜力,新增探明储量近 400 万 t,为确保油田稳定生产提供了较好的物质基础。该套方案的成功实施,对海上类似油田的滚动勘探开发提供了很好的借鉴意义。

参考文献:

[1] 倪军娥,孙立春,古 丽,等. 渤海海域石臼坨凸起 Q 油田

沙二段储层沉积模式[J]. 石油与天然气地质,2013,34(4): 491-498.

[2] 王洪宝,王书宝,李 勇,等. 东辛油田沙一段碳酸盐岩储集层研究[J]. 石油勘探与开发,2004,31(5):38-43.

[3] 宋章强,赖维成,牛成民,等. 渤海海域湖相碳酸盐岩地震—地质综合预测方法及应用[J]. 石油与天然气地质,2009,30(4):444-449.

[4] 王文荣,高印军,冷继川,等. 王徐庄油田生物灰岩储集层综合研究[J]. 石油勘探与开发,2002,29(5):47-49.

[5] 姜 超,邓爱居,田小川,等. 歧口凹陷西南缘沙一段下部碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. 东北石油大学学报,2013,37(1):32-36.

[6] 杨有星,金振奎,高白水. 歧口凹陷缓坡区湖泊碳酸盐岩优质储层特征及成因[J]. 石油学报,2012,33(6):978-986.

[7] 刘 磊. 准噶尔盆地车排子地区滚动勘探开发技术[J]. 石油勘探与开发,2009,36(5):569-574.

[8] 于正军,韩宏伟,王福永. 东营凹陷滚动勘探开发技术研究与应用[J]. 石油勘探与开发,2003,30(2):46-48.

[9] 谷维成,莫小国,贾志滨. 东濮凹陷滚动勘探开发效果及潜力分析[J]. 石油大学学报:自然科学版,2002,26(6):25-

- 28.
- [10] Walsh P M. A generalized approach to reservoir material balance calculations[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1995,34(1): 55-63.
- [11] 生如岩,丁良成,张伟伟. 广义物质平衡计算在凝析气藏开采动态预测中的应用[J]. 中国海上油气(地质),2002,16(2):132-136.
- [12] 杨勇强,邱隆伟,陈世悦. 半咸水湖盆碳酸盐岩层序地层分析——以东营凹陷南坡中段沙四上亚段为例[J]. 地层学杂志,2011,3(35):288-294.
- [13] 杜疆华. 渤海湾地区下第三系湖相碳酸盐岩及沉积模式[J]. 石油与天然气地质,1990,11(4):376-391.
- [14] 张 娣,侯中健,王亚辉,等. 板桥—北大港地区沙河街组沙一段湖相碳酸盐岩沉积特征[J]. 岩性油气藏,2008,20(4):92-97.
- [15] 夏青松,田景春,倪新锋. 湖相碳酸盐岩研究现状及意义[J]. 沉积与特提斯地质,2003,23(1):21-30.
- [16] 陈绍周,高兴辰,丘东洲. 中国早第三纪海陆过渡相[J]. 石油与天然气地质,1982,3(4):342-350.
- [17] 周书欣,王建国. 湖相碳酸盐岩的石油地质意义[J]. 石油实验地质,1993,15(4):361-368.
- [18] 曾德铭,赵 敏,石 新,等. 黄骀坳陷古近系沙一段下部湖相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. 新疆地质,2010,28(2):186-190.

APPLICATION OF GENERALIZED MATERIAL BALANCE CALCULATION TO PROGRESSING EXPLORATION AND DEVELOPMENT IN BZ OILFIELD, SHANAN SAG

SUN Cangjun¹, BIE Xuwei¹, XU Sainan¹, WU Haojun¹, HE Xiaobo², LIU Jing³

(1 Tianjin Branch of CNOOC (China) Co Ltd, Tianjin 300459, China; 2 Oil Transmission and Sale Company of Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China; 3 Logging Branch of CNPC Bohai Drilling Engineering Co Ltd, Tianjin 300280, China)

Abstract: Since the major oil reservoir of the BZ Oilfield in the Shan'an Sag, the bioclastic dolostone in the 1st Member of the Shahejie Formation, was put into production, there has been large contradiction between the actual production and the initial geological estimation. In some of the well areas, there is large potential to increase oil reserve and production. Based on the data from oil production performance, such as the data of pressure, output and PVT experiment, using the method of general material balance calculation, we found that the A4 well block has the largest rolling exploration potential. Through detailed description of palaeogeomorphology and paleo-ecological environment of the bioclastic dolostone in combination of the distribution pattern of the bioclastic dolostone reservoir, a new reservoir space distribution pattern of the bioclastic dolostone of A4 well block was established. The prediction is proved by the actual drilling results, and a newly proved reserve of nearly 4 million tons is identified, which will certainly ensure the sustainable development and investment profit of the BZ Oilfield. The solution is expected to be an example to be referred in progressing exploration and development in both the domestic and offshore oilfields under similar geological conditions.

Key words: Bohai Bay Basin; Shan'an Sag; bioclastic dolostone; generalized material balance calculation; progressive development