

刘振坤,王 晖,王盘根,等.加拿大油砂 SAGD 开发储量品质评价关键参数研究[J].海洋地质前沿,2019,35(12):55-61.

# 加拿大油砂 SAGD 开发储量品质评价关键参数研究

刘振坤,王 晖,王盘根,郭 晓,武 静,张雨晴,郑 强,胡晓庆

(中海油研究总院有限责任公司,北京 100028)

**摘要:**笔者立足于油砂 SAGD 开发的实际效果,分析影响油砂 SAGD 开发的主要地质因素,确定油砂储量品质评价的关键地质参数。研究表明 HPVH、Facies1 比例和  $S_{w3}$  3 项参数是决定油砂 SAGD 开发储量品质的关键参数。明确了关键参数的界限:  $HPVH > 6 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , Facies1 比例  $> 70\%$  作为 I 类储量划分界限;  $HPVH < 4 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , Facies1 比例  $< 70\%$  作为 III 类储量划分界限; II 类储量划分界限介于上述二者参数之间。依据含水饱和度和累积汽油比的关系将 I 类储量进一步细分为 I-1 和 I-2。储量品质评价关键参数研究结果为油砂 SAGD 开发储量品质评价奠定了基础,也为 SAGD 开发水平井井位部署提供了依据。

**关键词:**油砂;SAGD 开发;储量品质;关键参数

中图分类号:TE155 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.12007

## 0 引言

油砂是富含天然沥青的沉积砂,也称为“沥青砂”。油砂实质上是一种沥青、沙、富矿黏土和水的混合物。加拿大油砂资源丰富,约占世界油砂资源的 85% 以上,其沥青原油地质储量约为  $17\,000 \times 10^8 \text{ bbl}$ ,可采储量约为  $1\,680 \times 10^8 \text{ bbl}$  (2013 年 12 月)<sup>[1]</sup>(图 1)。油砂资源主要分布在加拿大阿尔伯塔省的阿萨巴斯卡地区、冷湖地区、和平河地区<sup>[2]</sup>(图 2),分布面积分别为  $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.73 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $0.97 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

收稿日期:2018-11-06

基金项目:“十三五”国家科技重大专项课题“油砂 SAGD 开发地质油藏评价及方案优化技术”(2016ZX05031003);中海石油(中国)有限公司综合科研项目“Nexen 油砂有效开发地质油藏关键技术研究”(YXKY-2018-ZY-04)

作者简介:刘振坤(1980—),男,高级工程师,主要从事开发地质与油藏描述研究工作.E-mail:Liuzhk2@cnooc.com.cn



图 1 世界各主要产油国石油储量统计图  
(据 Oil & Gas Journal Dec.2013 and AER)

Fig.1 Oil reserve statistical result for major oil producers in the world(According to Oil & Gas Journal Dec.2013 and AER)

加拿大阿萨巴斯卡地区油砂矿埋藏一般比较浅<sup>[3]</sup>(约  $0 \sim 1\,000 \text{ m}$ ),含油层段为下白垩统的 McMurray 段<sup>[4]</sup>(图 3),属河口湾背景下受潮汐影响的曲流河沉积储层<sup>[5]</sup>,在前陆盆地 EW 向挤压作用下,相对海平面不断上升过程中形成的多期相互切叠的河道砂岩<sup>[6]</sup>。储层成岩作用弱,胶结差,平均厚度  $30 \sim 40 \text{ m}$ ,平均孔隙度  $33\%$ ,平均渗



图2 加拿大阿尔伯塔盆地油砂矿分布图

Fig.2 Distribution of oil sands in Alberta Basin, Canada

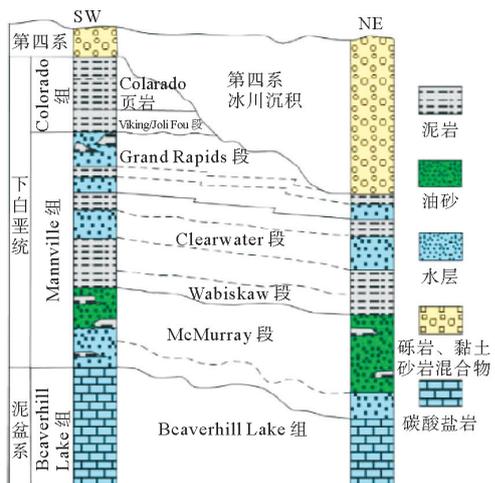


图3 阿萨巴斯卡地区地层柱状图

Fig.3 Stratigraphic column of Athabasca region

透率  $2\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。油藏温度下沥青黏度  $(10 \sim 800) \times 10^4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ，密度  $1.007\,1 \sim 1.036\,6 \text{ g/cm}^3$ ，密度比水大。

油砂的开采分为露天开采和原位开采。露天开采法适用于埋深  $< 75 \text{ m}$  的油砂矿；原位开采法适用于埋深  $75 \sim 1\,000 \text{ m}$  的油砂矿。原位开采包括循环蒸汽强化法 (CSS)；蒸汽辅助重力泄油法 (SAGD)；出砂冷采技术；地下水平井注气体溶剂萃取技术 (VAPEX)；井下就地催化改质开采技术；水热裂解开采技术。原位开采是主要的油砂开采方式<sup>[7-9]</sup>。统计显示 (表 1)，截至 2015 年底，阿尔伯塔省采用 SAGD 开发的油砂项目达到 56 个，SAGD 是油砂开发的主要方式<sup>[10]</sup>。

SADG 技术理论最早由罗杰·巴特勒博士于 1978 年提出，后被广泛应用于油砂开发工业领域<sup>[11-13]</sup>。其主要机理是向油藏注入高温蒸汽，在注采井对间形成热连通，注入的蒸汽向上扩散，在油藏中形成蒸汽腔，蒸汽腔向外扩展，与沥青油发

生热交换，使固体沥青变为可流动的原油，与蒸汽冷凝水一起流入采油井中被采出 (图 4)。

表 1 加拿大油砂露天开采、CSS 及 SAGD 方式开发的项目个数统计表

Table 1 Statistics for oil sand mines in Canada

开采方式	开发项目个数			合计
	阿萨巴斯卡	冷湖	和平河	
露天开采区	9			9
CSS		4	8	12
SAGD	48	5	3	56

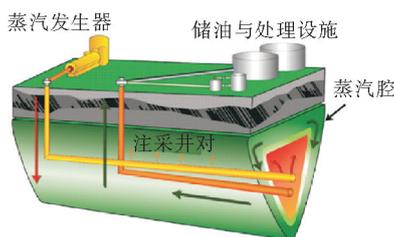
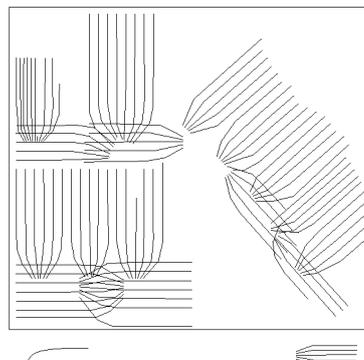


图4 油砂 SAGD 开发示意图

Fig.4 A Scheme showing SAGD development of oil sands

SAGD 的主要布井方式为双水平井<sup>[14-17]</sup> (图 4)，在靠近油层底部钻一对上下平行的水平井，上部水平井注蒸汽，下部水平井采油，水平井对的垂直距离约  $5 \text{ m}$ ，下部水平采油井距离油层底的垂直距离  $5 \text{ m}$ 。形成的蒸汽腔平面波及半径约  $40 \text{ m}$ 。平面上，单个水平井长度一般在  $500 \sim 1\,200 \text{ m}$ ，多个井对 (Pair) 组成 1 个泄油区，地面上组成 1 个井场 (Pad)，共用 1 套井口集输设备 (图 5)。纵向上，选择连续油层厚度最大的单元作为 1 个开发动用层段 (单个泥岩层  $< 2 \text{ m}$ ，累计泥岩层厚度  $< 4 \text{ m}$  的储层段)，蒸汽腔在其中扩散。



SAGD水平生产井(Pair) SAGD对平生产井组(Pad)

图5 A油田 SAGD 开发井井位分布图

Fig.5 Well location map for Oilfield A under SAGD development

## 1 油砂 SAGD 开发效果分类

油砂 SAGD 开发生产动态显示,单井高峰日产量 30~400 m<sup>3</sup>/d,平均累积汽油比(消耗的蒸汽量与生产的沥青油的体积比,该蒸汽量为折算到单位体积液态水的体积计量)3.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。单井产量和汽油比的高低是决定油砂开发效益的关键指标。以 A 油田为例,该油田主力储层平均埋深 260 m,储层属受潮汐影响的曲流河点坝砂体<sup>[18-22]</sup>,储层平均厚度 30 m,孔隙度 28.9%,水平渗透率 4 545×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,垂向渗透率 3 500×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均含水饱和度 36%。该油田已开发 10 年以上,共有开发井对 93 个,平均水平井段长度 800 m,平均井距 75 m。根据生产动态将生产井开发效果分为 3 类(表 2、图 6):①单井日产量 < 60 m<sup>3</sup>/d(约为 8 (m<sup>3</sup>/d)/100 m)、汽油比 > 6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 的井的数量占比超过了 1/3,此类井产油量低、生产单位体积沥青油消耗的蒸汽量大、生产效果差,被认为是低产低效井;②介于高产井和低产低效井参数范围之间的井被认为是生产效果中等的井;③单井日产量 > 120 m<sup>3</sup>/d(约为 16(m<sup>3</sup>/d)/100 m)、平均汽油比 < 4 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 的井被界定为高产井,高产井单井日产量高、生产单位体积沥青油消耗的蒸汽量小、生产效果好。

表 2 A 油田生产井开发效果分类表

Table 2 Classification of development status for Oilfield A

类型	单井高峰日产量/ (m <sup>3</sup> /d)/100 m)	累积汽油比/ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
好	≥16	≤4
中	8~16	4~6
差	≤8	≥6

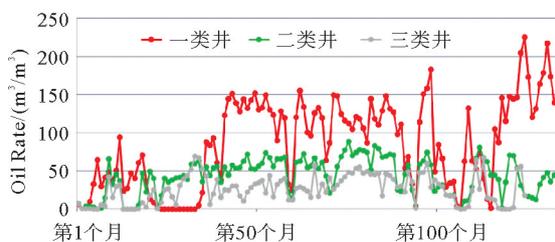


图 6 A 油田 SAGD 开发不同开发效果典型井生产曲线

Fig.6 Wells production curves for Oilfield A

除生产作业和操作等因素外,低产低效井产生的主要原因是储层因素。SAGD 开发单井产油量的高低受控于储层厚度和净毛比等参数,而汽油比的高低则受控于储层含水饱和度的高低。

与常规油气资源开发相比,油砂 SAGD 开发效果主要决定于蒸汽腔在空间扩展的范围。理想条件下,蒸汽腔在均质介质中扩展的范围呈下部略窄上部略宽型的腔体,但实际地质条件下,储层内部非均质性强<sup>[23]</sup>,隔夹层和层间高含水饱和度层(油砂储层内部发育含水饱和度 > 50% 的层内高含水层)广泛发育,蒸汽腔的扩展形态受到影响(图 7)。蒸汽腔发育形态决定了 SAGD 开发的效果,分析影响蒸汽腔发育的地质因素及关键参数的界限是油砂 SAGD 开发研究的关键。

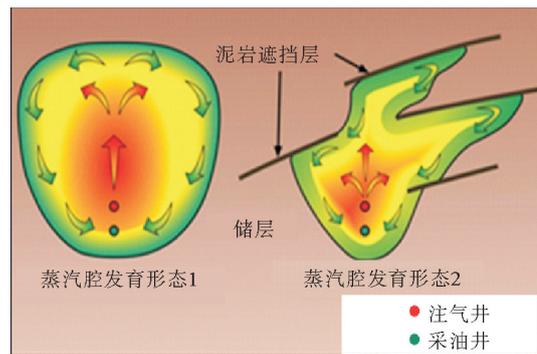


图 7 SAGD 开发蒸汽腔空间扩展示意图

Fig.7 Steam chamber expansion in SAGD development

## 2 储量品质研究与应用

油砂 SAGD 开发过程中,蒸汽腔发育的形态受多种地质因素综合影响。基于开发效果的分类结果表明单井高峰日产量和累积汽油比是决定分类的主要动态指标。通过单因素分析和多因素综合分析相结合的方法,建立各主要地质参数与单井高峰日产油、累积汽油比的关系。根据各地质参数与生产动态参数的关系,确定影响开发效果的关键地质参数。经过数据统计和地质分析,影响油砂 SAGD 开发效果的关键地质参数分别是 HPVH(储量丰度参数)、Facies1 比例(纯砂岩比例)、Sw(含水饱和度)。

HPVH 是计算 SAGD 动用层段(EBIP 段)

储量丰度的参数,计算方法由公式(1)得到。在单井上计算 HPVH 的大小,HPVH 数值决定于 SAGD 动用层段的厚度、孔隙度和含油饱和度的大小;在平面上通过井间插值得到 HPVH 平面分布图。一般情况不动用 HPVH < 3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> 区域的储量<sup>[1]</sup>。HPVH 数值越高,储量丰度越高,单井高峰产油量越高。如图 8,HPVH 与平均单井高峰产量的关系相关性较好(平均单井高峰日

产量是 A 油田实际生产数据,受各方面因素影响),SAGD 井位一般部署在 HPVH > 3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> 的区域。

$$HPVH = \sum PHIE \times So \times 0.1m(\text{采样间隔}) \tag{1}$$

式中:HPVH 为储量丰度;  
PHIE 为孔隙度;  
So 为含油饱和度。

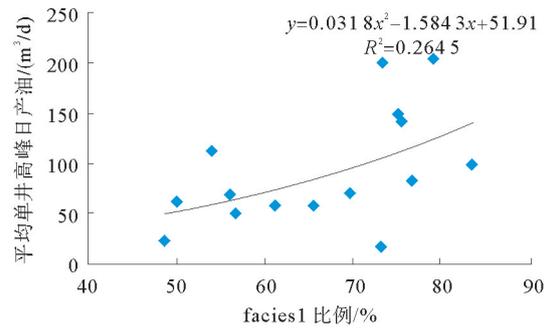
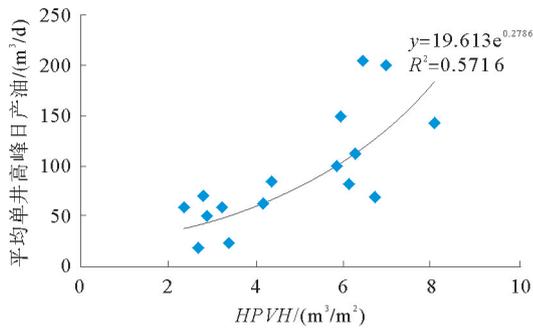


图 8 HPVH、Facies1 参数与高峰产量的关系图

Fig.8 Correlation between HPVH , Facies1 and average oil peak

Facies1 比例为 SAGD 动用层段纯砂岩的厚度比例,纯砂岩定义为岩心上为分选磨圆好的细砂岩或粉砂岩(图 9),测井特征为泥质含量 < 10%的砂岩段。井点计算 SAGD 动用层段的 Facies1 比例的大小,井间进行插值,得到 Facies1 比例平面分布图。Facies1 比例越高表示该层段的泥岩隔夹层厚度比例越小,蒸汽腔在其中扩展的

速度越快,蒸汽腔形态越完整;相反,Facies1 比例越小,该层段的泥岩隔夹层厚度比例越大,蒸汽腔在其中扩展的速度就会越慢,蒸汽腔形态越复杂。统计结果表明,Facies1 比例与平均单井高峰日产量具有一定的正相关性(图 8),研究结果表明,Facies1 比例的数值 > 70% 的区域储层质量好,有利于蒸汽腔发育。

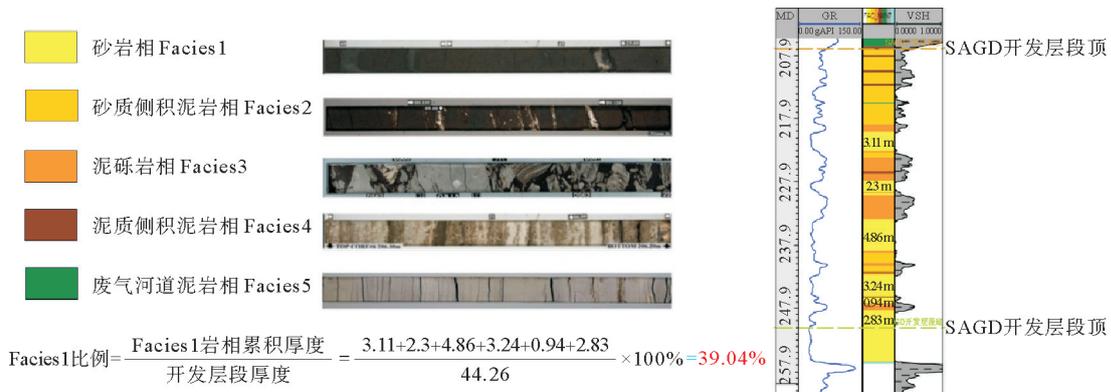


图 9 砂岩相 Facies1 岩心与测井特征图

Fig.9 Core and logging features for Facies1 sandstone

Sw 为 SAGD 动用层段含水饱和度,该参数与常规油气资源的含水饱和度概念一致。SAGD 动用层段含水饱和度越高,同等条件下加热该层

段需要的蒸汽量就越大,汽油比越高。因此含水饱和度越高的层段,其 SAGD 开发过程中的累积汽油比则越大(图 10),开发效果越差。

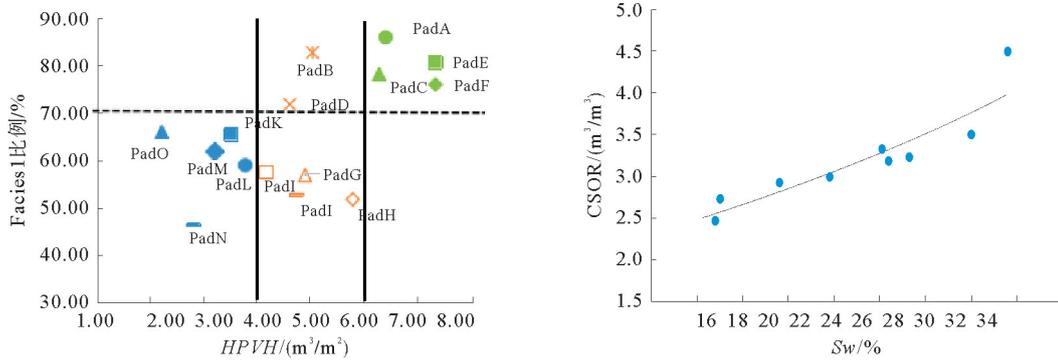


图 10 储量品质分类关键参数界限图板

Fig.10 Criteria of key parameters for reserve classification

在开发效果分类的基础上,通过单因素和多因素敏感性分析,明确了影响 SAGD 开发效果的关键地质因素,确定了不同品质储量类型评价的关键参数,建立了关键参数的定量界限(图 10)。I 类品质储量的参数界限为  $HPVH \geq 6 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , Faci-

es1 比例  $\geq 70\%$ , 该类储量开发效果最好(表 3); III 类品质储量的参数界限为  $HPVH < 4 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , Facies1 比例  $< 70\%$ , 该类储量开发效果最差(表 3); 介于二者间的储量为 II 类品质的储量, 该类储量开发效果中等(表 3)。

表 3 油砂储量品质类型参数界限划分表

Table 3 Oil sands reserve quality classification

类型	Facies1 比例	HPVH/ ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ )	$S_w$	单井每百米高峰日产 油量/ $((\text{m}^3/\text{d})/100 \text{ m})$	累积汽油 比 CSOR	分类
I 类	$\geq 70\%$	$\geq 6$	$< 30\%$	$> 16$	$< 3.5$	I-1
			$> 30\%$		$> 3.5$	I-2
II 类	—	4~6	—	8~16	4~6	II
III 类	$< 70\%$	$< 4$	—	$< 8$	$> 6$	III

累积汽油比与含水饱和度呈正相关关系(图 10),随着含水饱和度的增加,汽油比增大。油砂 SAGD 开发行业把累积汽油比作为评价开发效果的重要参数。通常情况累积汽油比的平均值为  $3.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $> 3.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  时开发效益较差。累积汽油比  $3.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  对应的含水饱和度是 0.3。将上述 I 类品质储量进一步划分为累积汽油比  $< 3.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  和  $> 3.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  两类,分别是 I-1、I-2 类,其对应的 SAGD 动用层段的平均含水饱和度分别是  $< 30\%$  和  $> 30\%$ 。

依据上述关键参数,将油砂 SAGD 开发储量品质类型划分为 3 类,其中 I 类可进一步细分为 I-1、I-2 类,各类的动静态参数界限如表 3 所示。

将上述关键参数划分结果应用于 B 区块,得到各关键参数平面分布图,根据关键参数界限确定不同品质类型的储量分布平面范围,为 SAGD 开发井的部署提供依据。以探井测井解释的 EBIP 层段 HPVH、Facies1 比例和  $S_w$  参数为基础,通过井间插值方法(一般是收敛的插值算法)得到各参数平面分布图(图 11)。以表 3 中储量不同品质类型划分界限确定平面范围内不同位置所属的类型(图 12),图 12 中绿颜色区域属于 I-1 类储量分布区、粉颜色区域属于 I-2 类储量分布区、黄颜色区域属于 II 类储量分布区、粉颜色区域属于 III 类储量分布区。选择储量品质最优的 I-1、I-2 类分布区域优先部署 SAGD 开发井对。

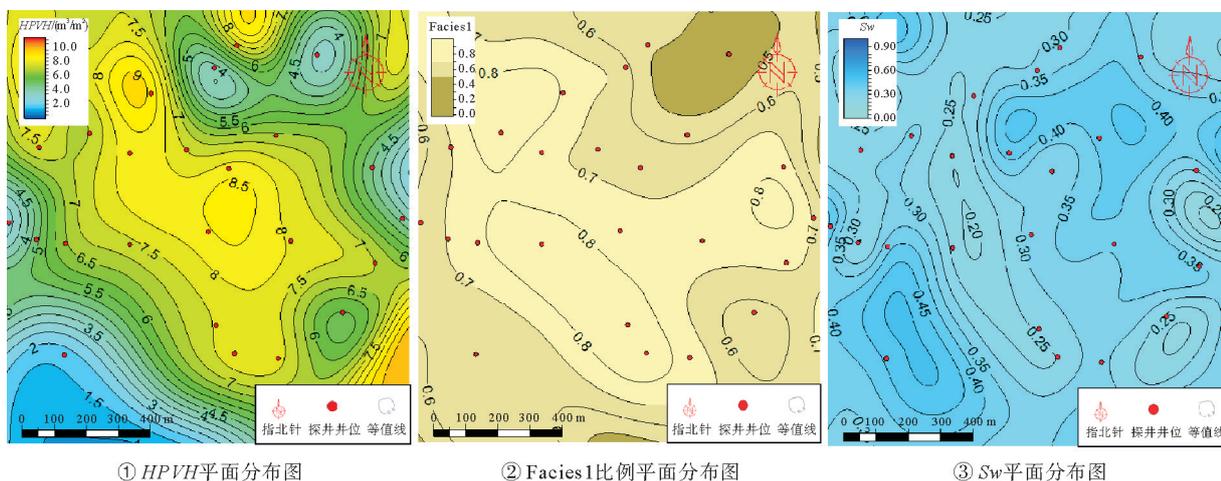


图 11 B 区块关键参数平面分布图

Fig.11 The key parameters distribution map for Oilfield B

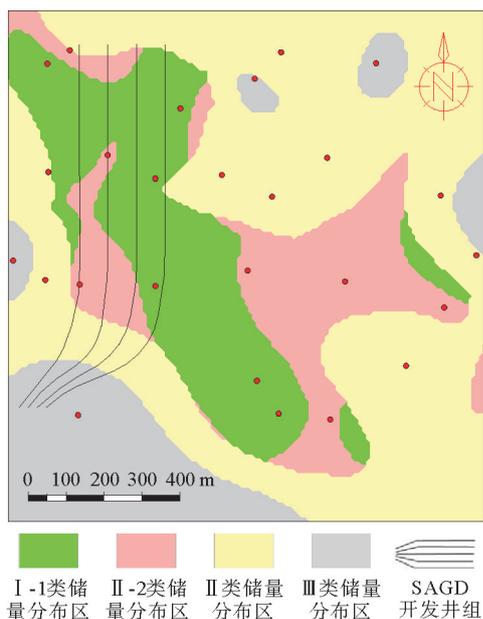


图 12 B 区块不同品质类型储量平面分布范围图

Fig.12 The distribution map of different type of reserve quality for Oilfield B

### 3 结论

(1)立足动静态参数对油砂储量品质进行综合评价是进行油砂 SAGD 开发井位部署和指标预测的基础和关键。

(2) HPVH、Facies1 比例和  $S_w$  是油砂 SAGD 开发储量品质评价的 3 个关键参数。

(3)根据单井高峰日产量和累积汽油比参数可将油砂 SAGD 开发生产井开发效果划分为 3

类。单井高峰日产  $>16$  ( $\text{m}^3/\text{d}$ )/100 m, 累积汽油比  $<4$   $\text{m}^3/\text{m}^3$  的井开发效果最好, 效益最好; 单井高峰日产  $<8$   $\text{m}^3/\text{d}/100$  m, 累积汽油比  $>6$   $\text{m}^3/\text{m}^3$  的井开发效果最差, 效益最差; 介于二者之间的井开发效果中等。

(4)动静结合确定关键地质参数的类型和界限。HPVH  $\geq 6$   $\text{m}^3/\text{m}^2$ , Facies1 比例  $\geq 70\%$  作为 I 类储量划分界限; HPVH  $< 4$   $\text{m}^3/\text{m}^2$ , Facies1 比例  $< 70\%$  作为 III 类储量划分界限; II 类储量划分界限介于上述二者参数之间。依据含水饱和度和累积汽油比的关系将 I 类储量进一步细分为 I-1 和 I-2。

(5)储量品质类型与开发效果具有很好的对应关系。一类开发效果的井对应于 I 类储量, 二类和三类开发效果的井分别对应于 II 类和 III 类储量。

#### 参考文献:

- [1] McDaniel & Associates Consultants Ltd. Evaluation of bitumen and synthetic oil reserves and contingent resources based on forecast prices and costs as of December 31, 2010 [R]. Canada Alberta Province[S.1.]; McDaniel & Associates Consultants Ltd, 2011.
- [2] Strobel R, Ray S, Shang R Y, et al. The value of dipmeters and borehole images in oil sand deposits-A Canadian study[J]. Frontiers Innovation, 2009, 26(1):197-203.
- [3] Hubbard S M, Smith D G, Nielsen H, et al. Seismic geomorphology and sedimentology of a tidally influenced river deposit [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(7):1123-1145.
- [4] Alberta Energy and Utilities Board. Athabasca Wabiskaw-

- McMurray Regional Geological Study[R]. Canada Alberta Province 2003-A; Alberta Znergy and Utilities Board, 2003.
- [5] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学(第二版)[M].北京:石油工业出版社,2008.
- [6] 胡元现,Chan M, Bharatha S, et al. 西加拿大盆地油砂储层中的泥夹层特征[J].中国地质大学学报,2004,9(5):550-554.
- [7] 单玄龙,车长波,李 剑,等.国内外油砂资源研究现状[J].世界地质,2007,26(4):459-464.
- [8] 贾承造,刘希俭,雷 群.油砂资源状况与储量评估方法[M].北京:石油工业出版社,2007.
- [9] 孙桂华,邱 燕,彭学超,等.加拿大油砂资源油气地质特征及投资前景分析[J].国外油田工程,2009,25(3):1-2.
- [10] 霍 进,樊玉新,桑林翔,等.浅层超稠油蒸汽辅助重力泄油开发理论与实践[M].北京:石油工业出版社,2014:141-150.
- [11] 魏 强,刘 灵,关志刚,等.新疆油田油砂矿开采技术现状分析[J].新疆石油天然气,2012,8(3):60-65.
- [12] 赵庆辉.蒸汽辅助重力泄油蒸汽腔发育特征研究[J].西南石油大学学报,2008,30(4):123-126.
- [13] 霍 进,桑林翔.凤城超稠油双水平井蒸汽辅助重力泄油开发试验[J].新疆石油地质,2012,33(5):570-573.
- [14] 薛 成,冯 乔,田 华.中国油砂资源分布及勘探开发前景[J].新疆石油地质,2011,32(4):348-350.
- [15] 曹 鹏,邹伟宏,戴传瑞,等.油砂研究概述[J].新疆石油地质,2012,33(6):747-750.
- [16] 李术元,王剑秋,钱家麟.世界油砂资源的研究及开发利用[J].中外能源,2011,16(5):10-22.
- [17] 赵鹏飞,王 勇,李志明,等.加拿大阿尔伯达盆地油砂开发状况和评价实践[J].地质科技情报,2013,32(1):155-162.
- [18] 张昌民. IHS—河流沉积学中具有划时代意义的新名词[J].地球科学进展,1989(2):47-52.
- [19] 朱凌霄,吴志强,祁江豪.地震测井联合反演技术在南黄海盆地北部坳陷中生代储层预测中的应用[J].海洋地质前沿,2018,34(6):66-71.
- [20] 刘子玉,吕 明.加拿大 Athabasca 地区下白垩统 McMurray 组沉积特征分析[J].四川地质学报,2012,32(1):1-5.
- [21] 姜在兴.沉积学[M].北京:石油工业出版社,2003.
- [22] 齐永安.河口湾相模式研究[J].地质科技情报,1999,18(1):45-49.
- [23] 王润怀,齐永安,潘结南.河口湾沉积学及层序地层学研究[J].焦作工学院学报,2000,19(3):188-191.

## KEY PARAMETERS OF RESERVE QUALITY EVALUATION FOR OIL SAND SAGD DEVELOPMENT IN CANADA

LIU Zhenkun, WANG Hui, WANG Pangen, GUO Xiao, WU Jing,  
ZHANG Yuqing, ZHENG Qiang, HU Xiaoqing  
(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** This paper is devoted to the study of main geological factors affecting SAGD development of oil sand in Canada and defining key geological parameters for reserve quality evaluation based on the performance in SAGD development. It is revealed that the key parameters for reserve quality evaluation include *HPVH*, Facies1 percentage and  $S_w$ . Criteria are established for defining each parameter mentioned above. There are three types of reserves. The type I is the reserve with *HPVH* higher than  $6 \text{ m}^3/\text{m}^2$  and Facies1 percentage more than 70%, the type III is that with *HPVH* less than  $4 \text{ m}^3/\text{m}^2$  and Facies1 percentage less than 70%, and the type II are those having the parameters between the type I and type III. The type I could be further divided into 2 sub-types based on  $S_w$ . The results mentioned above can be taken as the foundation of reserve quality evaluation, and used as the basis for well placement in un-development areas during SAGD production.

**Key words:** oil sand; SAGD development; reserve quality; key parameters