

# 致密油资源富集区与“甜点区”分布关系研究

——以美国威利斯顿盆地为例

张新顺, 王红军, 马 锋, 孙相灿, 宋志慧

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**通过对美国致密油成熟探区, 威利斯顿盆地巴肯组致密油详细解剖研究, 分析致密油资源富集区与甜点区的分布关系。基于 948 口钻测井数据, 绘制多参数地质平面图, 利用成因法、体积法和递减曲线法分别对盆地的致密油资源丰度进行评价, 对比不同方法下资源丰度的差异, 并结合地质参数平面图分析致密油甜点区的分布特征与规律。研究表明: 威利斯顿盆地巴肯组优质烃源岩是致密油形成的先决条件; 成因法和体积法评价的资源富集区与致密油甜点区分布差异较大, 不能直接单独应用于甜点的预测; 邻近资源富集区的过渡区, 同时具备靠近生烃中心、具有地层超压、较高气油比、有一定构造幅度等多个相对有利的因素, 是致密油甜点发育区; 在构造上, 这些过渡区往往发育在盆地斜坡区或靠近背斜等正向构造的翼部。

**关键词:**致密油; 资源丰度; 甜点; 递减曲线分析; 巴肯组; 威利斯顿盆地

中图分类号: TE132.2

文献标志码: A

## Relationship between resource-rich regions and sweet spots for tight oils:

A case study of the Williston Basin in the USA

Zhang Xinshun, Wang Hongjun, Ma Feng, Sun Xiangcan, Song Zhihui

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Tight oils from the Bakken Formation in the Williston Basin in the USA were studied to find out the relationship between the resource-rich regions and sweet spots for tight oils. Some maps with multiple parameters were drawn based on drilling and logging data from 948 wells. Genetic method, volume method and decline curves were used to evaluate the abundance of tight oils in the study area. The distribution of sweet spots was studied by comparing differences in abundance combined with geological data. The results show that high-quality hydrocarbon source rocks of the Bakken Formation were a prerequisite for the generation of tight oils. The resource-rich regions predicted by the genetic and volume methods clearly varied with the occurrences of tight oils, and could not be used individually in the prediction of sweet spots. The transitional region adjacent to the resource-rich regions had some favorable conditions for tight gas development, such as closeness to the hydrocarbon generation center, formation overpressure, high gas-oil ratio and tectonic setting. These transitional regions often developed in the slope zone of the basin or on positive structures such as anticlines.

**Key words:** tight oil; resource abundance; sweet spot; decline curve analysis; Bakken Formation; Williston Basin

经过近百年的石油工业发展, 常规油气勘探已经进入了深水、超深层和极地等区域, 难度越来越大, 成本也急剧增加。随着水平井、水力压裂等石油技术手段的进步, 曾经无法经济开采的非常规油气却逐步变得可经济开采<sup>[1-2]</sup>。其中致密油是非常规石油中最为“常规”的一种, 目前国内外普遍接受的定义为由一套或多套优质源岩控制, 储集在低孔低渗透(孔隙度小于 12%、覆压基质渗透率小

于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 的页岩、粉砂岩、砂岩或碳酸盐岩等致密层中, 源内或近源成藏石油<sup>[3-5]</sup>。具有大规模连续聚集, 无圈闭界限, 几乎无自然产能等特点<sup>[5-6]</sup>。

2010 年美国致密油革命获得成功, 致密油产量迅速上涨, 到 2014 年美国致密油年产量超过  $2 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[7]</sup>, 这迅速引起全球范围对致密油勘探开发的效仿热潮<sup>[8]</sup>。EIA 对全球致密油的技术可采资源估计为  $487 \times 10^8 \text{ t}$ , 美国为  $79 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[9]</sup>, 但是经过几

收稿日期: 2015-03-23; 修订日期: 2015-08-17。

作者简介: 张新顺(1988—), 男, 博士研究生, 从事石油地质研究。E-mail: vvvzxs@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05028-002)和中国石油重大科技专项(2013E-0501)资助。

年的勘探,目前仅靠近美国的加拿大致密油有突破,而包括中国在内的其他国家致密油则出现了资源量大,产量低的情况<sup>[10-12]</sup>。致密油可采资源富集区并没有与致密油高产区(“甜点区”)完美匹配,因此需要对美国致密油高产区地质条件进行深入剖析,探索致密油高产区分布与常规资源富集区关系,明确致密油高产区的主控因素。

致密油富集区主要是从资源量的角度来衡量,有成因法、体积法、类比法等多种方法可以进行评价<sup>[13-14]</sup>。但致密油甜点区的评价方法仍旧比较少。甜点区通常就是指致密油的高产区<sup>[2]</sup>,表现为储层物性好、裂缝发育、脆性强、含油性好等特点<sup>[15]</sup>。目前致密油甜点的评价指标还得依靠钻井才能确切地表征,但多数国家和地区的致密油勘探尚在初期,缺乏钻井和测试分析的资料,因此很难按照以上标准来进行致密油选区。

本文以美国最大、最为成熟的致密油产区威利斯顿盆地巴肯组致密油为研究对象,通过对 2007 到 2011 年间完钻的 948 口产油井产量特征,以及部分井的测井、地化等多方面资料的分析,利用常规资源评价方法评价该区致密油资源富集区,综合分析了致密油高产区与资源富集区分布特征和控制因素,为其他地区致密油勘探开发提供指导。

### 1 地质背景

威利斯顿盆地面积为  $28.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 沉积厚度在 5 000 m 左右,位于美国与加拿大交界处,横跨美国北达科他州、蒙大拿州、南达科他州和加拿大萨斯喀彻温省及曼尼托巴省(图 1)。盆地靠近北美克拉通西部边缘,是一个大型克拉通内沉积盆地,整个盆地构造变化较少。主要构造有位于北达科他州西部的南北走向的奈森(Nesson)背斜和比临斯(Billings)鼻状构造、蒙大拿东部的北西—南东走向的雪松河(Cedar Creek)背斜和蒙达科(Mondak)单斜。此外,还有羚羊(Antelope)背斜为北西—南东走向,位于奈森背斜南端,是当地最重要的构造。早期的油气发现主要集中于背斜构造上,由于开发工艺的限制,仅有部分被商业开发,产量也不高<sup>[16]</sup>。

威利斯顿盆地致密油主要产层为晚泥盆世—早石炭世沉积的巴肯组(Bakken),与其紧邻的上部黑松组(Lodgepole)和下部三叉组(Three Forks)也有一定发现,三者共同形成了盆地的致密油含油气系统<sup>[17]</sup>。该含油气系统的烃源岩层是巴肯组上部和下部暗色富有机质页岩,储层为整个巴肯组以及黑松组下段和三叉组上段。一般认为巴肯组页岩在晚白垩世到早始新世开始生油,在晚始新世达

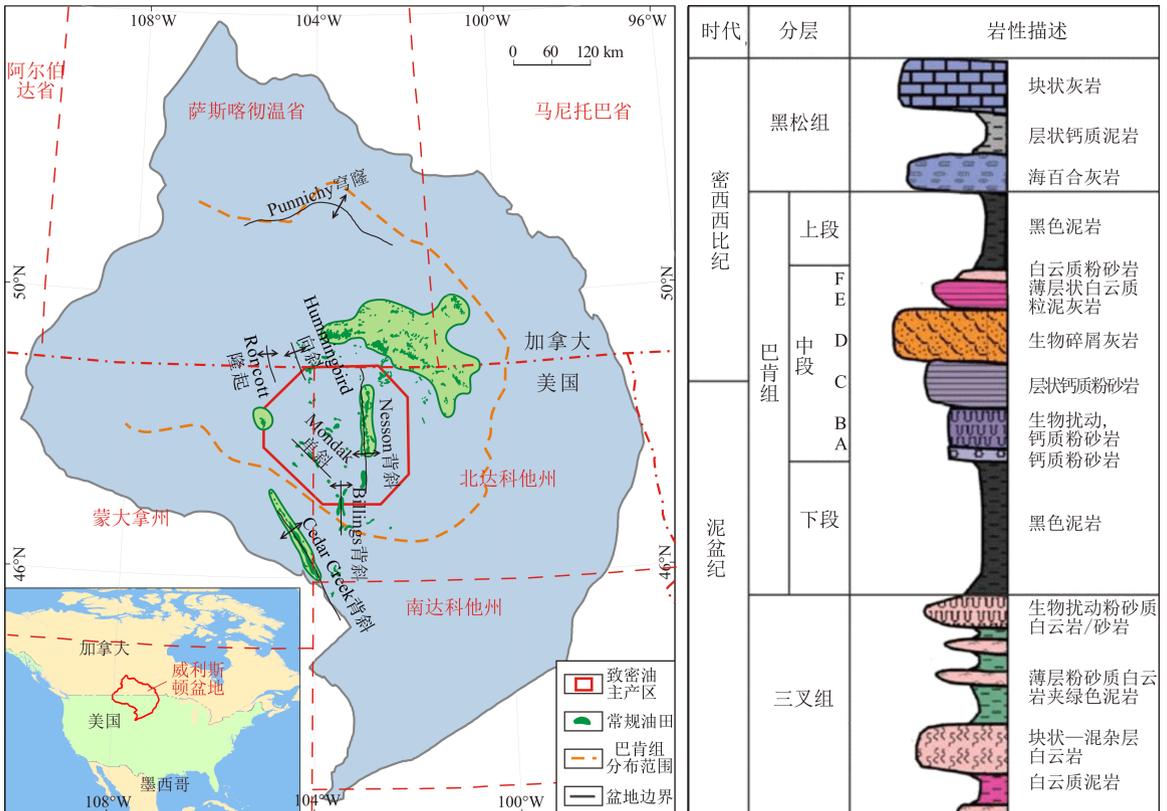


图 1 威利斯顿盆地构造和巴肯组地层柱状图

Fig.1 Tectonic units of the Williston Basin and stratigraphic column of the Bakken Formation

到生油高峰<sup>[18]</sup>。

## 2 致密油地质条件与产能概况

### 2.1 烃源岩条件

巴肯组全段最大厚度 50 m, 上、中、下段平均厚度分别为 6, 12, 10 m。巴肯组上段和下段页岩层沉积于缺氧的陆架环境中, 岩性一致, 均由均匀、无钙、含沥青、易破裂的厚层页岩组成, 但有些地区则由呈平行致密薄层状、蜡状, 质硬、含黄铁矿、具放射性的暗棕—黑色页岩组合。页岩的黑色与丰富的有机质(有机碳平均含量 12%)、与薄条状纹理中常富含丰富的黄铁矿有关。下段页岩厚度一般小于 15 m, 而上段页岩厚度略薄, 一般小于 10 m。巴肯组最厚地区分布在 Nesson 背斜及北部地区。

巴肯组上段和下段烃源岩品质基本相当, 有机质丰度(TOC)非常高, 为 5%~22%, 平均为 13%, 热解 S<sub>2</sub> 主要在 10~100 mg/g, 主要为极好烃源岩(图 2)。氢指数(I<sub>H</sub>)主要为 200~600 mg/g, 氧指数(I<sub>O</sub>)为 50~120 mg/g, 以 II<sub>1</sub> 型干酪根为主。热解峰值温度(T<sub>max</sub>)主要 420~455 °C, 镜质体反射率(R<sub>o</sub>)为 0.5%~1.0%, 主要为低熟—成熟烃源岩, 越靠近盆地中心成熟度越高, 研究区内成熟度主要在 0.7%~1.0%, 处于生油窗内。盆地成熟度最高地区主要位于 Nesson 背斜南侧, Mondak 单斜北部次之。

### 2.2 储集层条件

威利斯顿盆地致密油储层有 3 套, 巴肯组中段、黑松组组下段和三甲组上段。目前, 威利斯顿

盆地致密油井主要是沿钻巴肯组中段, 沿钻黑松组组下段和三甲组上段的钻井相对较少。巴肯组以白云质粉砂岩、粉砂质白云岩为主, 粒度较细, 自下而上可细分为 6 层(A-F)<sup>[19]</sup>(图 1)。非常规储层的非均质性明显, 巴肯组中段的孔隙度为 2%~8%, 中值为 5.8%, 渗透率为 (0.000 1~0.1) × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 中值为 0.02 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 按照国内常用的分类方法<sup>[6]</sup>, I-III 类储层均有分布, 但以 II 类储层为主, 占 47%(图 3)。巴肯组中段厚度中心与巴肯组厚度中心基本一致, 同样是位于 Nesson 背斜及北部地区。

巴肯组微裂缝较为发育<sup>[18]</sup>, 渗透率大于 0.01 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 都可能有微裂缝的发育, 这些裂缝一般沿着泥岩层理发育<sup>[19-20]</sup>, 最大主应力为 NNE 和 ENE 向。在矿物成分上, 巴肯组内脆性矿物高, 泥质含量平均在 15%, 非常有利于水力压裂等增产措施。巴肯组上段和下段页岩中含大量石英, 从而提高了硅质含量。巴肯组中段白云岩含量增加, 使得硅质含量和碳酸盐岩含量基本相当; 下部三甲组则是一套碳酸盐岩。

### 2.3 产能特征

巴肯组超压中心位于 McKenzie 郡东部和 Dunn 郡交界处, 压力梯度最高平均在 0.75 psi/ft (压力系数约 1.6), 向东压力梯度迅速降低, 向西缓慢降低<sup>[21]</sup>。利用累产天然气和石油的比值, 计算出的气油比明显看出在 Nesson 背斜的气油比最高, 在 Mondak 单斜的西部也有高值区, 说明油气分布仍

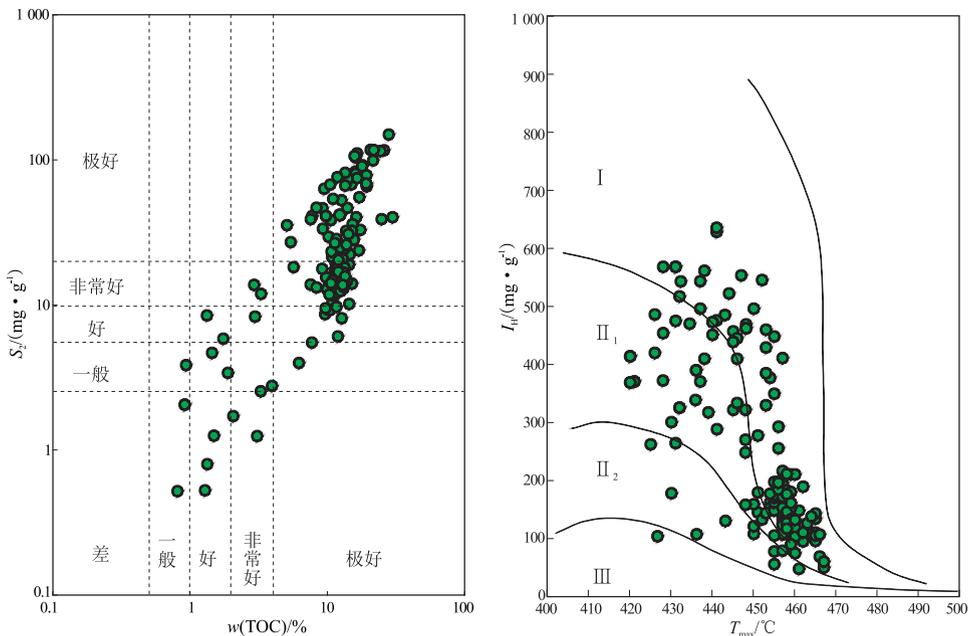


图 2 威利斯顿盆地巴肯组烃源岩地化特征

Fig.2 Geochemical characteristics of source rocks from the Bakken Formation in the Williston Basin

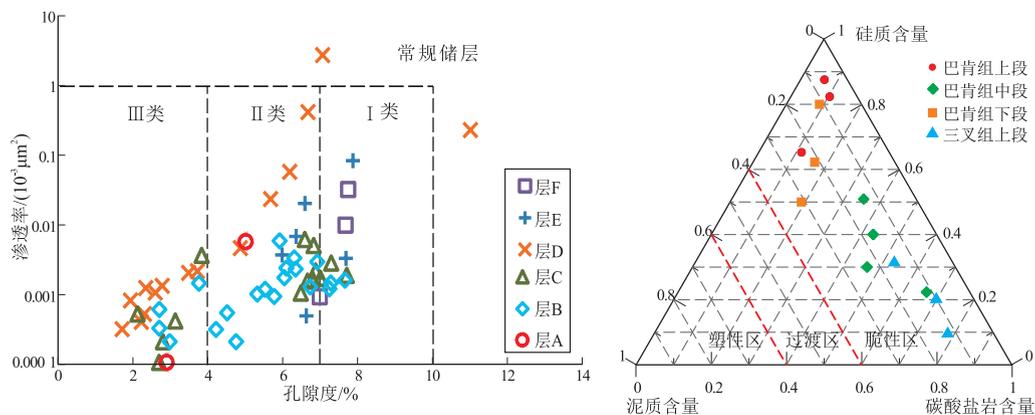


图 3 威利斯顿盆地巴肯组储层物性和矿物成分三角图

Fig.3 Physical properties and mineral compositions of the Bakken Formation in the Williston Basin

受构造控制。原油 API 比重和气油比有非常良好的吻合关系, API 高值区基本对应气油比高值区, API 高值区更靠近盆地中心一些, 很可能受到高成熟度的影响。根据产出油水比值关系, 可以看出油水比高值区主要分布在盆地中心和南部地区, 并在 Mountrail 郡出现了高值区。

目前, 巴肯组致密油主要产出的油田有 Elm Coulee 油田、Sanish 油田和 Parshall 油田等, 分别位于研究区 Mondak 单斜, Nesson 背斜及东侧 (图 4a)。Elm Coulee 油田单井的产能并不高, 但发现得相对较早<sup>[22]</sup>, Sanish 和 Parshall 则是目前威利斯顿盆地致密油生产最好的油田。初始产量 (IP) 显示, 在 Nesson 背斜的西部, 产能也非常好, 但是产能递减较快, 加之刚刚开始开发, 早期井少, 所以累产并不高。

### 3 致密油资源丰度评价

#### 3.1 成因法资源丰度

成因法主要从“生”的角度去考虑, 以物质平衡原理为理论基础, 即烃源岩中的有机质的生烃潜力在生、排烃过程的前后质量不变, 源岩中有机质的总量等于地史中以各种方式排出的烃类与仍残留在源岩中的烃类的总和。本次研究资源丰度 ( $Q_{\text{生}}$ ) 计算的具体公式为:

$$Q_{\text{生}} = S_i H_i \rho_i \times \text{TOC}^0 \text{HI}^0 X_0 \quad (1)$$

式中:  $S_i$  为源岩面积;  $H_i$  为源岩厚度;  $\rho_i$  为烃源岩密度;  $\text{TOC}^0$  为烃源岩的原始有机碳, 通过与  $\text{HI}^0$  的关系获得<sup>[23]</sup>;  $\text{HI}^0$  为单位质量有机质的原始生烃潜力, 通过  $\text{HI}$  与成熟度关系恢复得到<sup>[18]</sup>;  $X_0$  为有机质成油转化率, 由烃源岩埋深对应生烃剖面获得<sup>[24]</sup>。

计算出研究区总生油量  $1450 \times 10^8$  bbl, 生油中心主要集中在盆地中心 McKenzie 郡, 即巴肯组有机质成熟度最高区和巴肯组下段原始 TOC 高值区 (图 4k)。其中巴肯组上段生油量  $560 \times 10^8$  bbl, 巴肯组下段生油量  $890 \times 10^8$  bbl。成因法计算结果明显受控于有机质成熟度, 盆地中心 Nesson 背斜南部为高值区。

#### 3.2 体积法资源丰度

图形体积法基于常规石油资源的体积法计算原理, 根据数据库资料绘制厚度、孔隙度和含油饱和度平面图, 再利用网格化技术将各个图层划分成数个网格, 对每个网格进行单独运算, 形成资源丰度图, 最后相加得出总的资源量。本次研究资源丰度 ( $Q$ ) 的具体公式为:

$$Q = \sum S_i H_i \rho_o \Phi_i S_{oi} \quad (2)$$

式中:  $\rho_o$  为原油密度, 本文取  $0.85 \text{ g/cm}^3$ ;  $\Phi_i$  为孔隙度;  $S_{oi}$  为含油饱和度。计算出研究区巴肯组的含油量为  $986 \times 10^8$  bbl, 如果按照评价可采系数为 5%, 估算出技术可采资源为  $6.75 \times 10^8$  t。体积法计算结果明显受控于巴肯组厚度, 高值区分布在 Nesson 背斜及北部 (图 4l)。结果明显受控于储层厚度, Nesson 背斜及北部为高值区。

### 4 致密油 EUR 平面分布

EUR (最终可采储量) 指已经生产多年以上的开发井, 根据产能递减规律, 运用趋势预测方法评估该井最终可采储量。因此, EUR 基本上是能开采出来的石油, 最能真实反映一个地区致密油实际开采情况。如果是甜点区, EUR 就会明显高于周围地区, 反之亦然。

本次研究主要基于油气可采储量计算方法<sup>[25]</sup>,

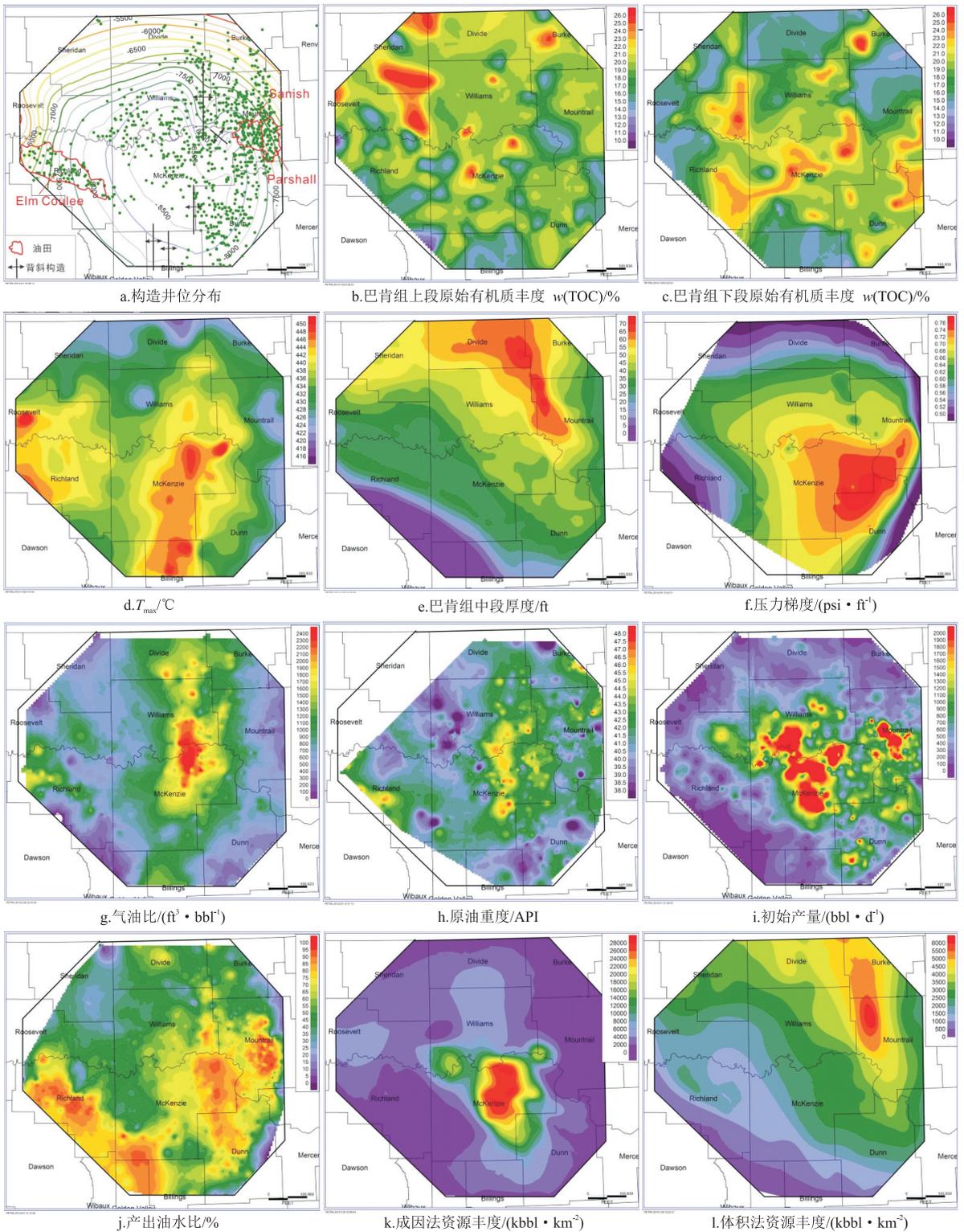


图4 威利斯顿盆地巴肯组致密油地质参数与资源富集区平面分布

Fig.4 Geological parameters and areas of hydrocarbon abundance in the Bakken Formation in the Williston Basin

采用双曲递减模型和指数递减组合模型计算单井EUR(图5),公式为:

$$\text{递减率公式 } D = -\frac{1}{q} \frac{dq}{dt}$$

$$\text{产量公式 } q = q_i (1 + b D_i t)^{-1/b}$$

$$\text{累产公式 } q_{\text{累产}} = \int_0^t \frac{q_i}{(1 + b D_i t)^{1/b}} dt$$

$$\text{EUR 计算公式 } EUR = q_{\text{累产}} = \frac{q_i^b}{D_i(1-b)} [q_i^{(1-b)} - q^{(1-b)}]$$

式中:  $D$ 为递减率;  $D_i$ 为初始递减率;  $q$ 为产

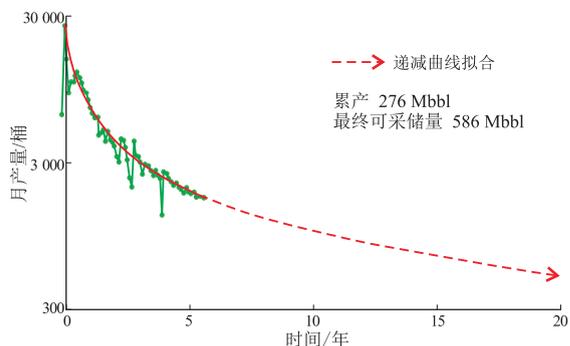


图 5 威利斯顿盆地巴肯组典型水平井产量递减曲线拟合

Fig.5 Production decline of a typical horizontal well of the Bakken Formation in the Williston Basin

量;  $q_i$  为初始产量;  $b$  为递减指数常数,  $b=0$  为指数递减模型,  $0 < b < 1$  是双曲递减模型;  $q_{累产}$  为 0 到  $t$  时间的累积产量。开采时间  $t$  最大值取 25 年, 经济界限取 100 桶/月。

由此, 将计算出的全部井 EUR 进行平面成图, 可见 EUR 高值区主要分布在 Nesson 背斜南部 A 区, 以及东西两侧的 B 区和 C 区, Mondak 单斜也有分布(图 6)。该平面图全部依靠生产井数据计算出的 EUR, 最能反映实际生产的甜点区, 因而其高值区即可认为是致密油甜点区。

## 5 讨论

成因法和体积法评价出的致密油资源富集区, 与实际生产甜点区在平面分布上有一定的对应性, 但两者预测结果和分布特征都具有较大差异(图 4, 6)。不仅仅是因为资源富集区是勘探早期通过一些较粗的手段来预测的, 资料可靠程度低。最重

要的是致密油产层与常规油藏受控因素不同, 成因法主要考虑烃源岩有机质丰度、类型和成熟度, 体积法则主要针对储层厚度和储集空间。实际上, 致密油产层受控的因素更多, 规律性也不够明显, 目前除了钻井实测数据外, 还没有致密油甜点区预测的可靠且普遍的方法。

甜点 A 区位于 Nesson 背斜南部, 盆地的东北斜坡, 其北侧是体积法资源富集区, 西侧是成因法资源富集区, 同时是盆地超压的中心, 压力系数高达 1.6; 紧邻油源, 有一定厚度的储层为其致密油形成提供了基本条件, 而地层超压是其形成甜点的重要原因。

甜点 B 区位于 Nesson 背斜东侧, 完全不属于资源富集区, 但是产能却非常高, 目前累产也明显高于其他地区; 其下伏烃源岩平均  $T_{max}$  在 430 °C 左右, 等效  $R_o$  为 0.5%~0.6%, 成熟度过低, 生烃能力不足, 因此该区致密油是经历过一定的运移而来的, 并不是完全意义的致密油, 而是带有地层油气藏的特征<sup>[26-27]</sup>。该区的 Sanish 和 Parshall 油田巴肯组中段岩心, 可见物性较好的细砂岩和粉砂岩<sup>[28]</sup>。

甜点 C 区位于 Nesson 背斜西侧, 盆地的西北斜坡, 目前多家公司进驻, 是巴肯致密油近期重点发展的地区。其特征与甜点 A 区相似, 处于资源富集区的边缘, 虽然地层超压略低, 压力系数约为 1.4, 但气油比高, 在 1 500 Scf/STb(标准立方英尺/标准桶)以上, API 比重在 42°以上, 油质轻且易于开发。另外该区 IP 产量非常高, 很有可能是因为裂缝较为发育, 初期产量比较高。

甜点 D 区位于 Mondak 单斜, 巴肯组生烃强度一般, 地层超压不明显, 但气油比高、油质轻且产出油水比高, 形成了该区的 Elm Coulee 油田。Elm Coulee 油田发育大量低幅度构造和裂缝<sup>[29]</sup>, 是已被证实的甜点区之一, 其既是致密油藏, 也是典型的裂缝性油藏。由于本次研究中收集到该区的井有限且相对较老, 以 2007—2009 年完钻的开发井为主, 工程技术不够先进, 造成该区 IP 产量和 EUR 值相对偏低。

综合 4 个甜点区的特征, 对比致密油资源富集区与 EUR 平面分布图, 发现传统的致密油资源富集区附近确实发育致密油, 但是不能直接利用其预测致密油的甜点区。在油源充足、储层发育的条件下, 致密油甜点区发育受地层超压、原油 API 重度和构造的综合控制。地层超压、气油比高的资源富集过渡区是致密油甜点的发育区, 这些地区主要是盆地斜坡带或背斜的斜坡区。其原因可能是资源富集区

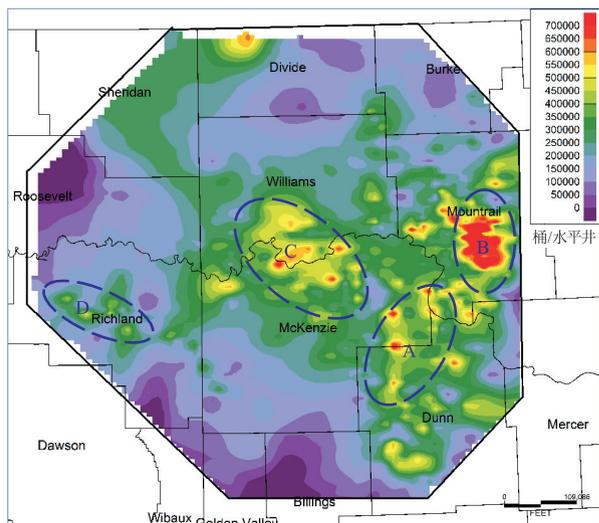


图 6 威利斯顿盆地巴肯组致密油 EUR 与甜点区平面分布

Fig.6 EUR and sweet spot distribution of the Bakken tight oils in the Williston Basin

往往是烃源条件或者储集条件最好的地区,而其过渡区往往具有靠近油源、储集层相对发育、有一定构造幅度、是油气运移优势区等多个致密油富集的相对较好条件,综合在一起形成了致密油甜点区。

## 6 结论

(1)威利斯顿盆地巴肯组极为优质烃源岩是形成大规模致密油区的先决条件,巴肯组上下页岩中间夹白云质粉砂岩、粉砂质白云岩的岩石组合非常有利于致密油形成和压裂开发。

(2)致密油实际生产的甜点区主要分布在资源富集过渡区而非最富集区。成因法评价出的致密油资源富集区位于盆地中心 McKenzie 郡;体积法评价出的资源富集区位于巴肯组最厚的 Nesson 背斜东侧地区;而基于生产井产量数据的 EUR 平面图显示,致密油甜点区位于盆地斜坡带和正向构造的斜坡区。

(3)除源储条件外,致密油甜点区还明显受到了地层超压、原油 API 重度和构造条件的综合控制。成因法和体积法评价结果分别明显受控于烃源岩条件和储层条件,因而在两者评价出的资源富集过渡区具有一定地层超压、气油比较高、位于油气运移方向上等多个较为有利的条件,是致密油甜点的发育区。这些甜点发育区在构造上主要处于盆地斜坡带或背斜等正向构造的斜坡区。

### 参考文献:

- [1] Jarvie M D. Shale resource systems for oil and gas: Part 2. Shale-oil resource systems [M] // Breyer J A. Shale Reservoirs: Giant resources for the 21st century, AAPG memoir 97. Tulsa: AAPG, 2012: 89-119.
- [2] EIA. Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil play [EB/OL]. [2011-07] <http://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/pdf/usshaleplays.pdf>.
- [3] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.  
Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: concept and practical significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [4] 马锋, 王红军, 张光亚, 等. 致密油聚集特征及潜力盆地选择标准 [J]. 新疆石油地质, 2014, 35(2): 243-247.  
Ma Feng, Wang Hongjun, Zhang Guangya, et al. Tight oil accumulation characteristics and selection criteria for potential basins [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(2): 243-247.
- [5] 赵靖舟, 李军, 曹青, 等. 论致密大油气田成藏模式 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 573-583.  
Zhao Jingzhou, Li Jun, Cao Qing, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 573-583.
- [6] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景 [J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.  
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [7] Hartenergy. North American shale quarterly [EB/OL]. [2014-09-01] <http://nasq.hartenergy.com/>.
- [8] EIA. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States [EB/OL]. [2013-05-01] <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas>.
- [9] IHS. Going global: Predicting the next tight oil revolution [EB/OL]. [2014-09-01] <http://www.ihs.com/products/cera>.
- [10] 马洪, 李建忠, 杨涛, 等. 中国陆相湖盆致密油成藏主控因素综述 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 668-677.  
Ma Hong, Li Jianzhong, Yang Tao, et al. Main controlling factors for tight oil accumulation in continental lacustrine basins in China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 668-677.
- [11] 王震亮. 致密岩油的研究进展、存在问题和发展趋势 [J]. 石油实验地质, 2013, 35(6): 587-595.  
Wang Zhenliang. Research progress, existing problem and development trend of tight rock oil [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 587-595.
- [12] 魏海峰, 凡哲元, 袁向春. 致密油藏开发技术研究进展 [J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 62-66.  
Wei Haifeng, Fan Zheyuan, Yuan Xiangchun. Review on new advances in foreign tight oil development technology and their enlightenment [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 62-66.
- [13] 邱振, 邹才能, 李建忠, 等. 非常规油气资源评价进展与未来展望 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 238-246.  
Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Unconventional petroleum resources assessment: progress and future prospects [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 238-246.
- [14] 郭秋麟, 陈宁生, 吴晓智, 等. 致密油资源评价方法研究 [J]. 中国石油勘探, 2013, 18(2): 67-76.  
Guo Qiulin, Chen Ningsheng, Wu Xiaozhi, et al. Method for assessment of tight oil resources [J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(2): 67-76.
- [15] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战 [J]. 中国石油勘探, 2014, 19(1): 1-9.  
Du Jinhu, He Haiqing, Yang Tao, et al. Progress in China's tight oil exploration and challenges [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(1): 1-9.
- [16] Nordeng S H, LeFever J A. Comparing production to structure over the course of Bakken development: the diminishing significance of the “sweet spot” in exploration [C] // Robinson J W, LeFever J A, Gaswirth S B. The Bakken-Three Forks petroleum system in the Williston Basin. Rocky Mountain Association of Geologists Bakken Guidebook, Chapter 13, 2011: 365-376.
- [17] Dechongkit P, Prasad M. Recovery factor and reserves estimation

in the Bakken petroleum system (analysis of the Antelope, Sarnish and Parshall fields) [R].SPE 149471,2011.

[18] Pollastro R M,Roberts L N R,Cook T A.Geologic assessment of technically recoverable oil in the Devonian and Mississippian Bakken Formation [C]//U.S.Geological Survey Williston Basin Province Assessment Team.Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Williston Basin Province of North Dakota, Montana, and South Dakota.USGS Digital Data Series DDS-69-W,2010.

[19] Simenson A L,Sonnenberg S A,Cluff R M.Depositional facies and petrophysical analysis of the Bakken Formation,Parshall Field and surrounding area,Mountrail County,North Dakota[C]//Robinson J W,Le Fever J A,Gaswirth S B.The Bakken-Three Forks petroleum system in the Williston Basin. Rocky Mountain Association of Geologists Bakken Guidebook, Chapter 3,2011:48-101.

[20] Jarvie D M,Coskey R J,Johnson M S,et al.The geology and geochemistry of the Parshall Area, Mountrail County, North Dakota [C]// Robinson J W, LeFever J A, Gaswirth S B. The Bakken-Three Forks petroleum system in the Williston Basin. Rocky Mountain Association of Geologists Bakken Guidebook, Chapter 9, 2011: 229-268.

[21] Theloy C,Sonnenberg S A.Integrating geology and engineering; implications for production in the Bakken Play, Williston Basin [R]. SPE168870,2013.

[22] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9):1127-1153.

[23] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide

[M]//Biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history, Volume 2. Cambridge: Cambridge University Press, 2005:1155.

[24] Jin H,Sonnenberg S A.Source rock potential of the Bakken shales in the Williston Basin,North Dakota and Montana.Search and discovery article #20156 (2012), adapted from presentation at forum [C]//Discovery thinking, at AAPG Annual Convention and Exhibition, Long Beach, California, April 22-25, 2012.

[25] 陈元千. 油田可采储量计算方法 [J]. 新疆石油地质, 2000, 21(2):130-137.  
Chen Yuanqian.Calculation methods of recoverable reserves of oil fields [J].Xinjiang Petroleum Geology, 2000,21(2):130-137.

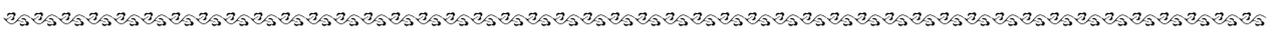
[26] Lillis P G.Review of oil families and their petroleum systems of the Williston Basin [J].Mountain Geologist,2013,50(1):5-31.

[27] Flannery J R.Integrated analysis of the Bakken petroleum system, U.S.Williston Basin [C]//Gilboy C F, Whittaker S G.Saskatchewan and Northern Plains Oil & Gas Symposium 2006,Saskatchewan Geological Society Special Publication 19,2006:138-145.

[28] Simenson A L,Sonnenberg S A,Cluff R M.Depositional facies and petrophysical analysis of the Bakken Formation, Parshall field and surrounding area, Mountrail county, North Dakota [D].Colorado, Golden:Colorado School of Mines,2011.

[29] Sonnenberg S A,Le Fever J A,Hill R J.Fracturing in the Bakken petroleum system, Williston Basin [C]//Robinson J W,Le Fever J A,Gaswirth S B.The Bakken-Three Forks petroleum system in the Williston Basin; Rocky Mountain Association of Geologists Bakken Guidebook, Chapter 15,2011:393-417.

(编辑 徐文明)



(上接第 618 页)

[15] Nagihara S.Three-dimensional inverse modeling of the refractive heat-flow anomaly associated with salt diapirism [J].AAPG Bulletin,2003,87(7):1207-1222.

[16] 熊利平,王骏,殷进垠,等.西非构造演化及其对油气成藏的控制作用 [J].石油与天然气地质,2005,26(5):641-646.  
Xiong Liping, Wang Jun, Yin Jinyin, et al. Tectonic evolution and its control on hydrocarbon accumulation in West Africa [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 641-646.

[17] 倪春华,周小进,包建平,等.西非里奥穆尼盆地油气成藏条件及勘探方向 [J].石油实验地质,2014,36(5):583-588.  
Ni Chunhua, Zhou Xiaojin, Bao Jianping, et al. Petroleum accumulation conditions and exploration direction of Rio Muni Basin, West Africa [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5): 583-588.

[18] 程建,段铁军,倪春华,等.西非科特迪瓦盆地石油地质特征及成藏规律研究 [J].石油实验地质,2013,35(3):291-295.  
Cheng Jian, Duan Tiejun, Ni Chunhua, et al. Petroleum geologic features and accumulation rules of Côte D'Ivoire Basin, West Africa [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3): 291-295.

[19] 熊利平,邬长武,郭永强,等.巴西海上坎波斯与桑托斯盆地油气成藏特征对比研究 [J].石油实验地质,2013,35(4):419-425.  
Xiong Liping, Wu Changwu, Guo Yongqiang, et al. Petroleum accumulation characteristics in Campos and Santos Basins, offshore Brazil [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4): 419-425.

[20] 余一欣,周心怀,彭文绪,等.盐构造研究进展述评 [J].大地构造与成矿学,2011,35(2):169-182.  
Yu Yixin, Zhou Xinhuai, Peng Wenxu, et al. An overview on salt structures [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(2): 169-182.

[21] Schoenherr J,Urai J L,Kukla P A,et al.Limits to the sealing capacity of rock salt: A case study of the infra-Cambrian Ara Salt from the South Oman salt basin [J].AAPG Bulletin,2007,91(11):1541-1557.

[22] 邬长武.巴西桑托斯盆地盐下层序油气地质特征与有利区预测 [J].石油实验地质,2015,37(1):53-56,63.  
Wu Changwu. Petroleum geology characteristics and exploration targets of pre-salt formations in Santos Basin, Brazil [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1): 53-56, 63.

(编辑 黄娟)