

板桥凹陷古流体势与油气运移聚集史研究

李延钧¹ 陈又才¹ 杨远聪¹ 朱江¹ 张茂林¹

梅海燕¹ 于志海² 杨池银² 廖前进²

¹ (西南石油学院, 四川南充 637001) ² (大港石油管理局, 天津 300280)

提 要 本文从板桥凹陷出发, 以古流体势动态地描述了油气运移聚集史。建立和讨论了断层在古流体势数值模拟恢复中的处理方法, 对有利油气勘探区进行了级别划分, 并指出自生自储油气常分布于高势区域。阐明类似板桥凹陷的年青盆地具沉积压实离心流的特点, 水流方向与各期流体势方向基本一致。最后作者预测出板桥凹陷一批有利的勘探区。

关键词 古流体势 油气运移 数值模拟 离心流 板桥凹陷

第一作者简介 李延钧 男 29岁 讲师 硕士 油气地球化学

地下流体势与油气运移、聚集具密切关系已为广大石油地质学家所认识。自 Hubbert^[1] 提出流体势概念以来, 人们就将它用于研究油气二次运移和指导油气勘探^[2,3]。目前, 流体势已成为定量研究油气运移问题的理论基础和依据。而地下古流体势的数值模拟恢复, 结合具体地质条件对流体势史的研究与分析则可更深入更客观揭示油气运移聚集历史, 便于动态地研究油气的区域分布与变化。本文即以此角度结合板桥凹陷实例, 应用古流体势概念剖析其与油气运移聚集的关系。

1 地下流体势、势场与古流体势

M. K. Hubbert 早在 50 年代初就把流体势概念引入油气运移和聚集的研究中^[1]。但他所定义的流体势主要考虑了流体的位能和压能, 即主要考虑了作用在流体上的两种力: 重力和弹性力, 没有考虑毛细管力。W. A. England 等 (1987)^[4]引用的流体势概念则考虑到了毛细管力因素, 将流体势定义为: 从基准面传递单位体积的流体到研究点所必须做的功。表达为:

$$\Phi = \rho g Z + \rho \int_0^P \frac{dP}{\rho(P)} + \frac{2\delta \cos\theta}{\gamma} \quad (1)$$

①式中最后一项为界面张力, 由于烃相和水相的润湿角很小, 通常 $\theta < 30^\circ$, $\cos\theta$ 近似取为 1。经简化, 水、油、气势分别表达如下:

$$\Phi_w = -\rho_w g Z + P \quad (2)$$

$$\Phi_o = -\rho_o g Z + P + \frac{2\delta_{o/w}}{\gamma} \quad (3)$$

$$\Phi_g = -\rho_g g Z + \rho_g \int_0^P \frac{dP}{\rho_g(P)} + \frac{2\delta_{g/w}}{\gamma} \quad (4)$$

以上式中: Φ ——高程 Z 处的流体势, Φ_w 、 Φ_o 、 Φ_g 分别为水、油、气相势;

Z ——高程, 即深度 (基准面之上取正, 之下取负);

g ——重力加速度;

P ——高程 Z 处的孔隙流体压力;

ρ ——流体密度, ρ_w 、 ρ_o 、 ρ_g 分别为水、油、气密度;

γ ——毛细管半径, 即岩石孔隙半径;

δ ——界面张力, $\delta_{o/w}$ 、 $\delta_{g/w}$ 分别为油/水、气/水界面张力。

利用②、③和④式可计算地层中每一点的水势、油势及气势值。由于地层中 Φ_w 、 Φ_o 、 Φ_g 的空间分布是连续的, 我们把地下环境中水、油、气的势分布称为势场。因为以上流体势的概念考虑了作用在流体上各种力的作用效果, 因此知道了水相、油相、气相的势场, 就可判断水、油、气在地层中流动与否及流动方向, 预测油气有利聚集区域^[3]。

由于油气的运移与聚集是在地质历史中进行的^[5], 我们把不同地质历史时期, 尤其是烃源岩大量生排烃期以来在各时期的流体势统称为古流体势, 它可反映地下油气运移与聚集的历史, 从而提高了油气勘探有利区带评价的可信度。

2 古流体势数值模拟恢复与结果

2.1 古流体势数值模拟恢复

为了古流体势计算的需要, 首先对板桥凹陷进行了埋藏史与热史恢复, 然后在此基础上利用数值模拟技术对板桥凹陷沙三、沙二、沙一下及沙一中段四个目的层在不同时期的流体势分布进行定量描述与恢复。

埋藏史恢复主要采用“回剥法”技术进行, 热史恢复则以 TTI 法和 R_o 反推法相结合进行。在此基础上, 针对板桥凹陷属于第三纪年青盆地的实际情况, 压实作用排出的流体将通过可渗透砂岩地层以高势区向低势区流动^[5,6], 由此而建立相应的渗流微分方程、补充方程和定解条件; 利用 Fortran 语言编制成 AFP-SIM (古流体势数值模拟恢复) 流体势计算机模型软件。利用这一软件对板桥凹陷地下流体势的计算结果表明, 该软件是完全符合研究区实际的。

2.2 古流体势模拟结果及其特点

板桥凹陷除沙一中段存在自生自储油气外, 其它计算层位主要油气源于沙三段烃源岩。沙三段烃源岩进入生油门限的时期为东营组沉积期, 大量生、排烃期主要为明化镇组沉积

期。因此，四个层段以东营组沉积末期开始恢复至今，对沙三段储层还补作了沙一上末、沙一中末两个时期的流体势模拟计算。这样共绘出 66 幅平面流体势（水、油、气）分布图，24 幅明下末及现今流体势立体图及 2 幅剖面流体势分布图。图 1—6 是沙三段砂岩储层在 Ed 末、Nm 下末及现今油、气相势分布图。

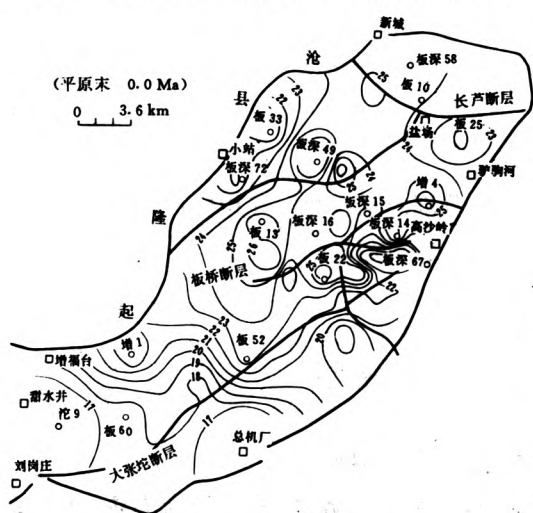


图 1 板桥凹陷沙三段油相势分布图(平原末 0.0 Ma)
Fig. 1 Distribution of the oil potential in the S₃ member of Banqiao Depression (last phase of Pinyuan, 0.0Ma)

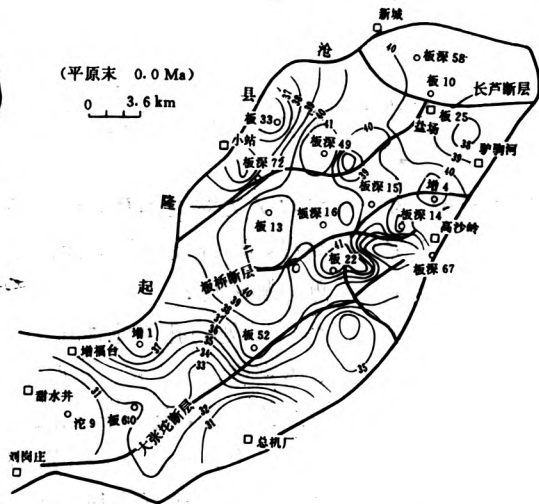


图 2 板桥凹陷沙三段气相势分布图(平原末 0.0 Ma)
Fig. 2 Distribution of the gas potential in the S₃ member of Banqiao Depression (last phase of Pinyuan, 0.0Ma)

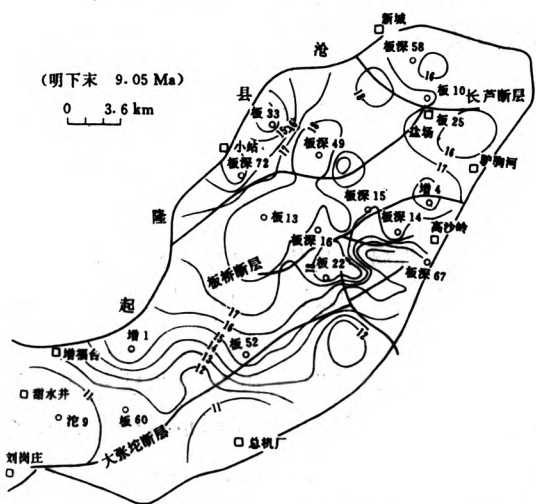


图 3 板桥凹陷沙三段油相势分布图(明下末 -9.05 Ma)
Fig. 3 Distribution of the oil potential in the S₃ member of Banqiao Depression (last phase of the lower Minghuazhen, -9.05Ma)

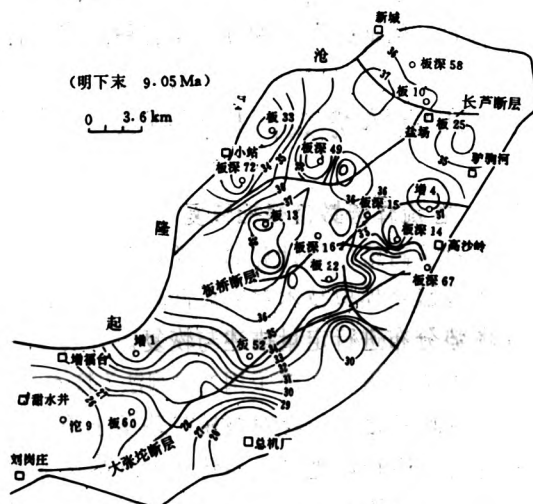


图 4 板桥凹陷沙三段气相势分布图(明下末 -9.05 Ma)
Fig. 4 Distribution of the gas potential in the S₃ member of Banqiao Depression (last phase of the lower Minghuazhen, -9.05Ma)

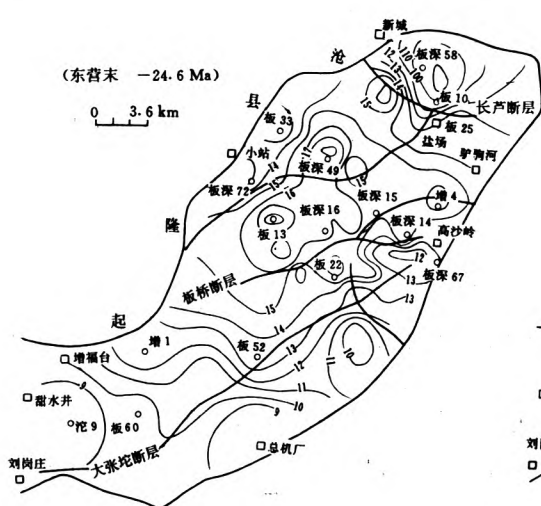


图 5 板桥凹陷沙三段油相势分布图(东营末 -24.6 Ma)

Fig. 5 Distribution of the oil potential in the S_3 member of Banqiao Depression (last phase of Dongying, -24.65Ma)

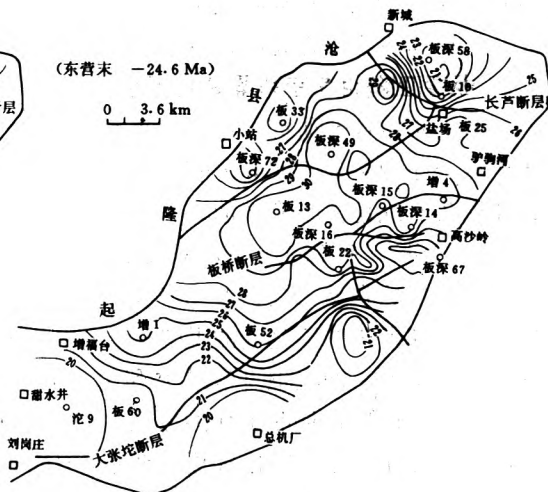


图 6 板桥凹陷沙三段气相势分布图(东营末 -24.6 Ma)

Fig. 6 Distribution of the gas potential in the S_3 member of Banqiao Depression (last phase of Dongying, -24.65Ma)

板桥凹陷古流体势总的特点为:

(1) 从所有的势分布图可以看出, 水相势 < 油相势 < 气相势, 符合水、油、气本身的物理性质。

(2) 高势区多分布于沉积中心及附近, 低势区处于凹陷周缘构造带, 势差幅度不大, 具沉积压实流特点, 即符合沉积压实水从沉积中心缓慢向四周隆起部位流动的规律。

(3) 从古至今各期水、油、气相势逐渐增大, 符合埋藏规律。

(4) 已知油气区处于低势区域, 见图 1—6 所示, 大张坨地区、板桥含油气构造带均为长期低势区域, 符合客观实际, 为已知推未知奠定了基础。

3 古流体势与油气运聚关系及有利区预测

3.1 古流体势与油气运聚关系

负势梯度方向为油气运移方向, 低势区域则可能为油气聚集有利区^(1,2), 这是流体势应用于油气勘探的基础。

古流体势反映的是地质历史时期, 尤其是大量生排烃期以来各时期的油气运移与分布特征, 因此较仅以现今流体势判识油气有利聚集区更为可靠。一般讲, 长期处于低势区域的地区有利于油气聚集, 为油气运移的长期指向区; 而某一个时期或短期的低势区域则油气富集的可能性和规模要小得多。

此外, 在一些高势区域也可存在高压自生自储油气, 这样的油气储集体常为独立的透

镜状砂体或岩性尖灭体, 周缘渗透性差油气不能疏散。如板桥凹陷沙一中段即存在这一特征, 主要为自生自储低熟油气, 多处于高势区范围。

3.2 板桥凹陷油气有利聚集区预测

地下古流体势研究结果表明板桥凹陷大张坨地区、板桥含油气构造带为各层段长期低势区域, 与现今油气实际分布(已发现)基本吻合, 说明以古流体势分布预测油气运移方向和聚集有利地区是有效的, 符合客观实际。

3.2.1 盐场—驴驹河、高沙岭地区

这一地区是沙三段、沙二段和沙一下段各时期油、气低势区。驴驹河、高沙岭为地处板桥凹陷和歧口凹陷之间的低势区, 有利于两凹陷同时供给油气, 油气源丰富(杨远聪等, 1994)。另据歧口凹陷地下流体势研究, 高沙岭以东的滩海区沙一下段亦为一明显低势封闭区, 为一个值得重视的有利勘探区。该区储集条件好, 尤其盖层封堵条件优越, 我们认为其油气勘探前景比长芦地区更为理想, 有希望找到更多的轻质油气。目前已在板深 80 井沙一下段获工业轻质油气流, 为该区进一步展示了良好的前景。

3.2.2 板北中和板中东地区是寻找沙一中低熟油的有利地区

沙一中段各地质历史时期在这一地区多显示为相对低势区, 高势区中心在板深 49 井附近; 高势区中心势梯度大, 而向板北中和板中东地区势梯度变小, 甚至个别地区出现局部明显的高势区域; 油气源分析结果认为沙一中段原油来源于自身, 另据板深 49 井热史恢复, 目前沙一中烃源岩仍处于低熟阶段。以上表明这一地区十分有利于沙一中段油气自生自储, 因此将有希望在板北中和板中东部的板 0、板 I 油组中找到低熟油。

3.2.3 小站地区

该地区沙三段、沙二段和沙一下段在各时期都是低势半封闭区。由流体势分布特点及地质条件分析后认为: 在靠近凹陷的断层下降盘的深层有希望找到油气。该区深部地层不仅油气源丰富, 而且保存条件较好, 受沧县隆起地表水影响也小, 有利于油气聚集和保存。

3.2.4 长芦地区

为海河断裂和长芦断裂夹持的断阶, 面积约 40 km²。据地下古流体势研究结果, 该区沙三段砂岩层在馆陶末及其以前(见图 5、6)是水、油、气的低势区, 势梯度大, 表明板桥凹陷中心烃源岩早期生成的低熟油气向北运移到了这一地区。但在沙三段烃源岩生排烃高峰期及其以后, 地下流体势梯度变小, 甚至无油、气势分布(图 1、2、3、4), 可能为长芦断层后期封闭作用, 油气不能大量通过长芦断层北运所致。另外, 该区本身沙三段泥岩也处于低熟阶段, 因此该区所聚集的油气主要为早期低熟原油, 板深 51 井沙三段储层所产石油即为此类型。所以, 若该区无其它油气来源则油气远景不宜评价过高。

3.2.5 沈东地区

据各期沙三、沙二、沙一下段流体势分布可见, 沈东地区均存在低势区域, 但在其向板桥凹陷方向的大张坨地区的西南侧分布着近 NE—SW 向的等势线, 即势能降低方向发生偏移, 显然不利于板桥凹陷油气运移至本区。但该区沙三本身存在 200 余米厚的低熟暗色泥岩, 沈 1 井沙三顶部产干气 44727 方/日, $\delta^{13}C_1$ 为 -54.6‰ (PDB), 沈 11 井沙三也见干气显示, 表明该区有利于聚集低熟生物甲烷气。

4 问题讨论

4.1 板桥凹陷油气二次运移模式讨论

从古流体势分布图上,我们观察到板桥凹陷油气二次运移方向基本上是从凹陷中心向凹陷边缘进行^(5,7)。这一特征证实,对于象板桥凹陷这类年青的沉积凹陷,原始沉积物的压实不均衡作用,是造成油气定向运移的主要原因。沉积物厚度是凹陷中心厚,边部薄,压实水流呈离心式流动,这正是油气二次运移的推动力。油气浮力与压实水动力方向是一致的,它们促使油气由凹陷中心向周围构造带运移。图7为板桥凹陷油气二次运移模式示意图。

板桥凹陷的压头水主要来自沧县隆起,靠沧东大断层与凹陷各地层接触连通进行流动。其方向与油气浮力和压实水流相反,对油气二次运移起阻止作用。然而压头水动力与压实水动力相比是较小的,对油气影响范围和深度有限。沙三段压头水影响的时期在沙二末期结束,影响深度为2000 m,以后则只受压实水流作用^①。而沙三烃源岩成烃门限深度为2750 m^②,因此进入成烃期以后的各时期压头水流对油气没有影响,压实水动力和油气浮力是油气二次运移的主要动力。

关于油气二次运移的途径和通道,我们认为沿倾斜的砂体并横穿断层进行较长距离的阶梯式侧向运移。断层面作为通道时,油气既可沿断层面垂向运移,也可横穿断面运移⁽⁶⁾,也有一部分沿断裂走向从凹陷中心向边缘运移,但最终总的趋势表现为横向阶梯式的运移并聚集成藏。

4.2 断层在古流体势恢复中的处理

板桥凹陷三大断层:长芦断层、板桥断层及大张坨断层活动时期早,活动强度大,断层距大,对油气运移具有一定的控制作用。但在地质历史时期中断层何时开启?何时关闭?开启程度如何?在盆地模拟中都是十分棘手的问题,而它又直接影响古流体势恢复的精度。为此,我们在板桥凹陷古流体势恢复中对断层的处理进行了初步尝试。

油气横穿断层面进行侧向运移的能力决定于渗透性砂岩地层在断层面两侧的连通性和断面开启情况。为了数模需要,我们把断层面让油气横穿运移的能力大小用连通系数K来表达,即:连通系数可将断层两侧砂岩地层连通性数值量化。该系数K取值范围为“0—1”,“0”表示完全封闭而不连通,“1”表示完全连通而无阻碍,“0—1”之间的值则表示不

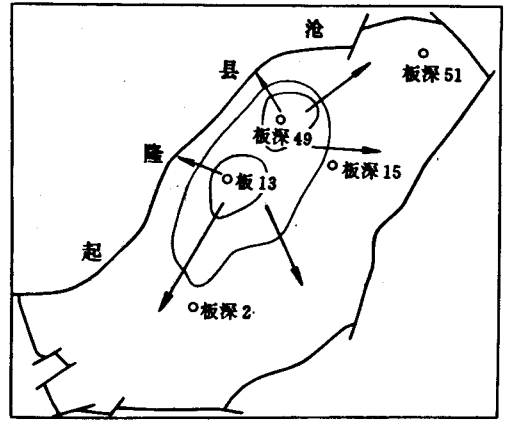


图7 板桥凹陷沙三段油气二次运移模式示意图
Fig. 7 Sketch map of the oil-gas secondary migration model in the S₃ member, Banqiao Depression

① 刘天忠. 板桥凹陷凝析油气藏形成条件研究. 大港油田地质研究院内刊(第五集), 1983.

② 秦若薇. 板桥凹陷烃类资源潜力预测. 大港油田地质研究院内刊(第十二集), 1991.

同连通程度, K 值愈近于“1”则连通性愈好, 愈近于“0”则连通性愈差。因断层活动具历史性, 故对某一目的层而言, 不同地质历史时期具不同的连通系数。确定连通系数 K 值的依据: ① 断层发育史, 遵循“动开静闭”及“渐变”的原则。强烈活动期 K 值大一些, 活动减弱, K 值逐渐变小; ② 其次是断层两侧岩性组合、断距大小、砂层厚度等; ③ 最后参考现今已发现油气分布情况。这三原则相互配合并紧密结合断层发育史可确定出大张坨、板桥及长芦断层在不同地质历史时期的连通系数。

根据我们确定的连通系数 K 值输入计算机计算的结果表明, 这一系数的确定是合理的。但是这样的选择毕竟带有一定的主观性, 若以储层地球化学方法, 即: 对断层两侧油、气、水进行地球化学分析与对比, 则可进一步证实断层两侧流体连通情况, 有待进一步工作。

4.3 有利勘探区的可信度与分级

古流体势的恢复为动态研究油气运移与聚集创造了条件。在不同时期流体势的分布具有不同的特征, 油、气低势区也有一定的变化。因此, 以低势区来确定的油气有利勘探区的可信度有一定的差异。为此, 我们对油气有利勘探区进行分级: ① 长期油、气低势区域应为一类有利勘探区, 可信度高; ② 主要生排烃期及现今油气低势区为二类或一类有利勘探区, 可信度较高; ③ 只有现今或主要生排烃期范围内某一个短暂的地质时期为油气低势区则属三类有利勘探区, 可信度差, 可能为次生油气藏, 油气聚集规模较小。因此仅以现今油气势分布来确定有利油气聚集区显然不一定都可靠。

5 结 语

(1) 板桥凹陷各层段地下水属沉积压实水系统, 油气受压实水控制, 水流方向为离心流, 油、气、水各期流体势方向基本一致。

(2) 断层的处理是古流体势数值模拟恢复中的关键, 也是盆地模拟中的难点。我们所确定的三原则, 即①“动开静闭”及“渐变”原则; ②岩性组合等; ③油气现今分布, 符合该区实际, 是古流体势研究中的初步尝试, 有待进一步以储层地球化学等方法加以检验和补充。

(3) 长期油气低势区为油气运移聚集有利区, 而短期则富集油气可信度低。据此可将油气有利勘探区分为三类不同的级别。

(4) 通过板桥凹陷古流体势研究, 证实沙一中确实存在广泛的自生自储低熟油, 它们常处于高势区域, 且产层压力系数相对较高。

(5) 应用古流体势分布特征, 以已知推未知的原则可预测含油气盆地油气有利聚集区。

参 考 文 献

- [1] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. AAPG Bull, 1953, 37: 1954—2026.
- [2] Dahlberg E C. Applied hydrodynamics in Petroleum exploration. Springer—Verlag, Newyork—Heideberg—Berlin, 1982.
- [3] 华保钦等. 东濮凹陷流体势和天然气运移、聚集. 沉积学报, 1990, 8 (3): 46—57.
- [4] England W A, et al. The movemnet, and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. Journal of the Geological

Society, London, 1987, Vol. 4.

- (5) 李明诚编著. 石油与天然气运移 (第二版). 石油工业出版社, 1994.
(6) 真柄钦次著. 压实与流体运移. 陈荷立译, 石油工业出版社, 1981.
(7) Craig M B, et al. Long-Range Petroleum Migration in the Illinois Basin. AAPG Bull 75 (5): 925—945.

A Study on the Ancient Fluid Potential and the History of Oil—gas Migration and Accumulation in Banqiao Depression

*Li Yanjun*¹ *Chen Youcai*¹ *Yang Yuancong*¹ *Zhu Jiang*¹ *Zhang Maolin*¹
*Mei Haiyan*¹ *Yu Zhihai*² *Yang Chiyong*² and *Liao Qianjin*²

¹ (Southwest Petroleum Institute, Nanchong 637001)

² (Dagang Petroleum Administration Bureau, TianJin 300280)

Abstract

This paper deals with dynamically the history of oil—gas migration and accumulation, especially in Banqiao Depression. In this paper we developed and discussed the processing methods of faults in the ancient fluid potential simulation, graded beneficial exploration areas; and pointed out that self—generated and self—reservoired oil and gas were usually located in high potential areas. Furthermore, It's-illustrated that the younger basin, similar to Banqiao Depression, is the characteristic of sedimentary pressure centrifugal fluid, and the water moving direction is the same with that of fluid potential. At last, the authos predicted that there are series of hopeful areas distributed in Banqiao Depression.

Key words: ancient fluid potential oil—gas migration numerical slmulation centrifugal fluid Banqiao Depression