

doi: 10.3799/dqkx.2010.012

板桥凹陷沙三段油气生成、运移和聚集数值模拟

郭小文, 何生*, 侯宇光

中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 板桥凹陷主要烃源岩为沙三段地层暗色泥岩, 而沙三段砂岩为板桥凹陷主要储层之一. 在恢复板桥凹陷埋藏史、热史和成熟史的基础上, 定量模拟沙三段油气生成、运移和聚集特征, 模拟结果利用实测镜质体反射率(R_o)、地层温度和 63 口井钻探结果验证. 模拟结果表明: (1) 板桥凹陷现今的热流值在 59.8~61.7 mW/m² 之间, 古热流演化经历了早期(65~50.4 Ma)持续升高和晚期(50.4~0 Ma)逐渐降低两个阶段, 在距今 50.4 Ma 达到最高; (2) 东营组沉积末期, 板桥凹陷沙三段烃源岩成熟度(R_o)大约在 0.5%~1.25% 之间, 现今成熟度(R_o)范围大约在 0.5%~1.8% 之间, 在距今大约 35 Ma 开始生烃, 距今 30 Ma 开始达到生烃高峰; (3) 沙三段烃源岩在距今大约 31 Ma 开始排烃, 距今 31~26 Ma 为主要排烃阶段, 距今 26~0 Ma 为少量排烃阶段; (4) 板桥凹陷油气主要运移路径主要受控于古构造面, 凹陷区以发散流为主, 北部陡坡带以平行流为主, 汇聚流主要存在板桥凹陷南部缓坡带. 在板桥凹陷沙三段存在 6 个有利油气聚集区, 其中以聚集区 I 和 II 最有利, 主要是因为近源、油气运移动力强和运移距离短.

关键词: 板桥凹陷; 沙三段; 盆地模拟; 油气生成; 油气运移和聚集; 石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2010)01-0115-10

收稿日期: 2009-09-10

Numerical Simulation of Petroleum Generation, Migration and Accumulation of the Es₃ Formation in Banqiao Depression

GUO Xiao-wen, HE Sheng*, HOU Yu-guang

Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The mudstones of the Es₃ formation in Banqiao depression are the dominant source rocks for the major hydrocarbon accumulations and the sandstones of Es₃ formation are major reservoir rocks. Petroleum generation, migration and accumulation history of the Es₃ formation in Banqiao depression are modelled based on reconstruction of the burial, thermal and maturity history in this paper. The Modelling results are calibrated with measured vitrinite reflectance (R_o), borehole temperatures and drilling results of 63 wells. The modelling results indicate that: (1) the present-day heat flow in Banqiao depression varies from 59.8 to 61.7 mW/m² and that the paleoheat flow increased from 65 to 50.4 Ma, reaching peak heat flow values at 50.4 Ma then decreased with from 50.4 to 0 Ma; (2) the source rocks maturity of Es₃ formation ranges from 0.75% to 1.8% R_o at present day and from 0.5% to 1.25% R_o at the end of the Ed formation deposition (26 Ma). Oil generation (0.5% R_o) in Es₃ formation began from around 35 Ma and peak hydrocarbon generation (1.0% R_o) occurred from 30 Ma; (3) the timing of hydrocarbon expulsion from Es₃ formation source rocks began from 31 Ma, the predominant phase of hydrocarbon expulsion is from 31 to 26 Ma and the phase of less hydrocarbon expulsion is from 26 to 0 Ma; (4) secondary petroleum migration pathways of Es₃ formation of Banqiao depression at present and 26 Ma are controlled by the paleo-structure surface and the spreading flowing, confluence flowing and the planar flowing occur in depression zone, the gentle slope zone and the steep slope zone respectively. Six favorable zones of oil accumulations in the Es₃ formation of Banqiao depression are identified, especially the oil accumulations zone I and II, due to their location being close to the generative kitchens, short oil migration distance and powerful drive force.

Key words: Banqiao depression; Es₃ formation; basin modelling; hydrocarbon generation; hydrocarbon migration and accumulation; petroleum geology.

基金项目: 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放基金(No. TPR-2009-07); 国家科技重大专项基金(No. 2008ZX05000-006).

作者简介: 郭小文(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事油气地质研究. E-mail: cugxw@163.com

* 通讯作者: 何生, E-mail: shenghe@cug.edu.cn

0 引言

盆地模拟是定量研究油气生成、运移和聚集的重要手段,可以帮助石油地质学家理解石油系统(Wendebourg, 2003).过去盆地模拟主要通过模拟地层温度而定量模拟油气生成,因为油气生成率和时间都取决于温度,因此模拟沉积盆地烃源岩成熟度、油气生成和运移首先要研究埋藏史和热史,模拟结果利用实测镜质体反射率(R_o)和地层温度校正.近年来,盆地模拟技术开始用于模拟油气运移路径(石广仁等, 1996, 2003; Burrus, 1998; 张英利等, 2006),并确定油气聚集区.油田水(楼章华等, 2001)、含氮化合物(王铁冠等, 2000)和生物标志化合物(Seifert and Moldowan, 1981, 1986)等地球化学指标可以用于追踪油气运移路径.但这些地球化学指标只能用于研究现今的油气运移路径,而大多数含油气盆地油气发生大规模运移和聚集都是在古地史时期.因此,利用盆地模拟的方法研究油气运移对油气成藏具有重要作用,是减小油气勘探风险的有效工具(Sylta, 1991; Hermans *et al.*, 1992; Hindle, 1997, 1999).油气二次运移的动力主要是浮力和水动力,束缚力主要是毛细管力(Hindle, 1997),油气运移的路径主要受控于古构造面(Gussow, 1968; Momper, 1978, 1984; Pratsch, 1994; Hao *et al.*, 2007).板桥凹陷已有探井和开发井 500 多口,在沙二段和沙一段均有比较好的发现,但在沙三段却没有大的突破.在钻到沙三段的 60 多口井中,只有 10 口井发现油层,1 口井存在油气显示.沙三

段地层暗色泥岩是板桥凹陷主要烃源岩,平均有机碳可达 1.08%. 沙三段砂岩为板桥凹陷储层,孔隙度为 3.60%~32.35%,渗透率范围为 0.01~3 283.70 md,相对于沙二段砂岩(孔隙度: 3.6%~27.4%; 渗透率: 0.01~3 283.70 md)稍微偏高.油源对比结果表明沙三段油源为沙三段地层暗色泥岩,因此很有必要研究板桥凹陷油气运移和聚集规律.本文主要利用 Basinmod 盆地模拟软件在恢复板桥凹陷沙三段烃源岩埋藏史、热史和成熟生烃史的基础上,定量模拟三维古构造格架控制下的古流体势特征,明确油气运移方向和路径,为板桥凹陷油气藏勘探确定有利的靶区.

1 区域地质概况

板桥凹陷位于渤海湾盆地黄骅拗陷中段的西部(图 1),是黄骅拗陷的一个重要的负向构造单元.西北侧为沧县隆起,东南侧以北大港潜山构造带与歧口凹陷相隔,东北侧以海河断层与塘沽—新港潜山构造带相邻,西南侧与沈青庄潜山构造带相接.其内部可以进一步划分为北部断裂陡坡带、中部凹陷区、南部斜坡区和潜山构造带 4 个次级构造单元,面积约 540 km²,为 NW 向箕状凹陷.构造演化经历了渐新世早期(沙三段—沙二段沉积时期)断陷 I 幕、渐新世中期(沙一段沉积时期)断陷 II 幕、渐新世晚期(东营组沉积时期)断陷 II 幕、中—上新世(馆陶—明化镇沉积时期)拗陷期.自下而上发育有渐新统沙河街组(E_s)和东营组(E_d)、上一中新统馆陶组(N_g)和明化镇组(N_m)以及第四系平原组(Q_p) 5 套地

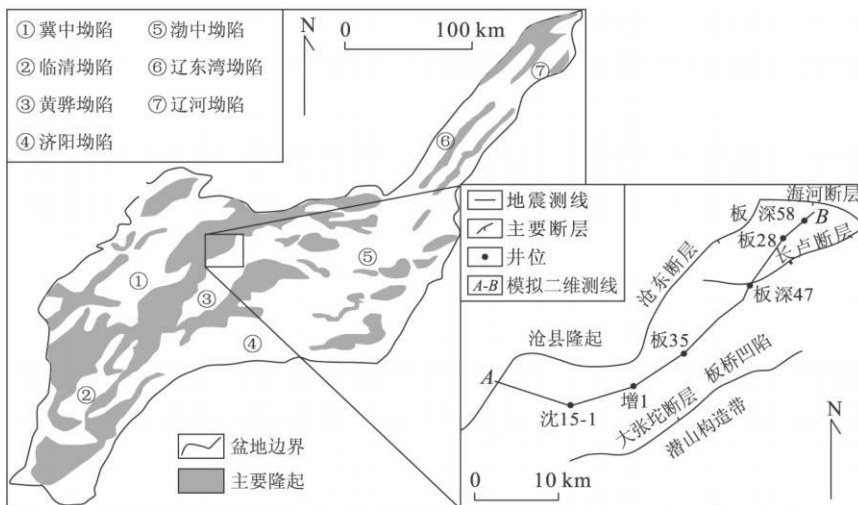


图 1 板桥凹陷构造位置与模拟井位和测线位置

Fig. 1 Map showing the modeling seismic line, well positions and location of Banqiao depression

层.沙河街组可进一步划分为沙三段、沙二段、沙一段,均为板桥凹陷主要勘探目的层段.沙三段地层岩性主要为深灰色、灰褐色泥岩与浅灰色砂岩、砂砾岩不等厚互层,中下部见灰褐色油页岩.烃源岩地球化学特征和油源对比研究结果表明沙三段泥岩有机质丰度高,类型主要为II₂和III型,生烃潜力大,平均有机碳含量在1%以上,氯仿沥青“A”含量在0.13%以上,为板桥凹陷主要烃源岩.同时沙三段地层也是板桥凹陷主要储层,油气源为沙三段烃源岩,属于自生自储型的含油气系统,其油气主要在沙三段地层中由高势区向低势区运移.因此,可以在恢复板桥凹陷古流体势的基础上,采用流线法模拟油气运移方向和路径(乔永富等,2005).本次研究选取板桥凹陷过测线AB的增1井、板35井、板深47井和板深28井开展一维埋藏史、热史和成熟生烃史模拟并且选取二维测线AB模拟板桥凹陷沙三段烃源岩成熟度分布特征,最后在三维古构造格架控制下模拟烃源岩平面成熟史和油气运移史.

2 主要模型与参数

2.1 埋藏史模型

地层埋藏史研究是利用计算机恢复地层古厚度,也是地层压实校正.本文埋藏史的恢复采用按照时间顺序回剥现今的地层厚度的方法,同时考虑压实校正.地层具有随深度增大孔隙度有规律地逐渐减小的特征,基于此原理Athy(1930)首次提出了指数模型,认为孔隙度与埋深呈指数关系,但此模型对于地层埋深较浅时则不适用(Falvey and Middleton, 1981).因此,Falvey and Middleton(1981)提出了倒数模型,认为孔隙度的减少是上覆层负载的函数,假设孔隙度的增量与负载变化和排出率乘积成比例关系,其表达式为:

$$(1/\varphi) = (1/\varphi_0) + kz, \quad (1)$$

式(1)中 φ 为与深度 z 对应的孔隙度; φ_0 为初始孔隙度; k 为压实因子.纯岩性初始孔隙度采用模拟软件中的默认值,其中泥岩初始孔隙度取60%、砂岩取45%、粉砂岩取55%.混合岩性由纯岩性按照不同的百分比混合而成,同时软件将自动按照算术平均或者几何平均的方法计算混合岩性的各种参数,二维剖面和平面的岩性由单井结合沉积相综合定义.大约在距今26Ma,板桥凹陷全面抬升促使东营组地层遭受剥蚀.因此东营组地层剥蚀厚度的计算是恢复板桥凹陷埋藏史的基础,前人对板桥凹陷单

井地层剥蚀厚度已经计算过(姜平,2000; Li *et al.*, 2004),本文在此基础上选取13条二维地质剖面利用地层对比法恢复整个板桥凹陷东营组地层剥蚀厚度.研究结果表明板桥凹陷东营组地层沉积末期地层剥蚀厚度大部分地区在200m左右,西部地区剥蚀厚度高于东部,东部地区剥蚀厚度均小于240m,西部钱圈地区剥蚀厚度相对比较大,均在300m以上.

2.2 热史恢复

热史对油气生成的时间、数量和组分都有重要影响(Ungerer, 1993).现今热流主要取决于岩石热导率和地温梯度,地温梯度主要由实测地温决定.板桥凹陷实测地层温度与深度关系显示现今的地温梯度为3.26 °C/km,平均地表温度为10 °C(图2).岩石热导率是岩石骨架热导率和孔隙中的流体热导率综合反映的结果.由此利用Basinmod模拟软件中的瞬态热流模型计算板桥凹陷过测线AB的增1井、板35井、板深47井和板深28井现今的热流值分别为61.7、59.8、61和61.4 mW/m².根据板桥凹陷构造演化特征,采用McKenzie(1978)提出瞬时均匀伸展模型恢复其古热流,模拟结果采用实测地层温度和镜质体反射率(R_0)校正.模拟的地层温度和成熟度曲线与实测资料相当吻合(图3),反映了所选的模型和参数适合计算研究区热史.古热流模拟结果显示板桥凹陷古热流演化经历了早期持续升高和晚期逐渐降低两个阶段(图4).在盆地初始断陷期(65~50.2 Ma),由于拉张作用使地壳减薄,岩浆上涌热流值持续升高.在距今50.2 Ma,热流值达到

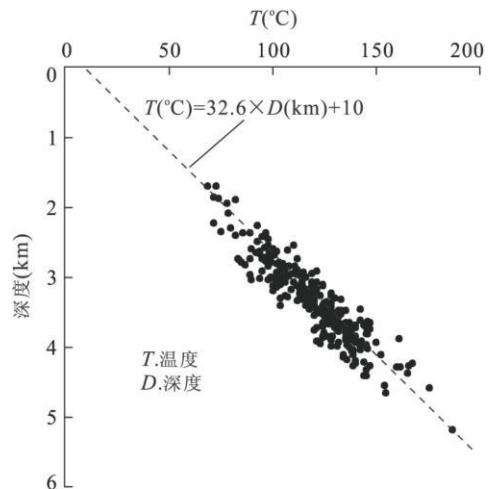


图2 板桥凹陷实测地温与深度关系

Fig. 2 Plot of measured temperatures versus depth in Banqiao depression

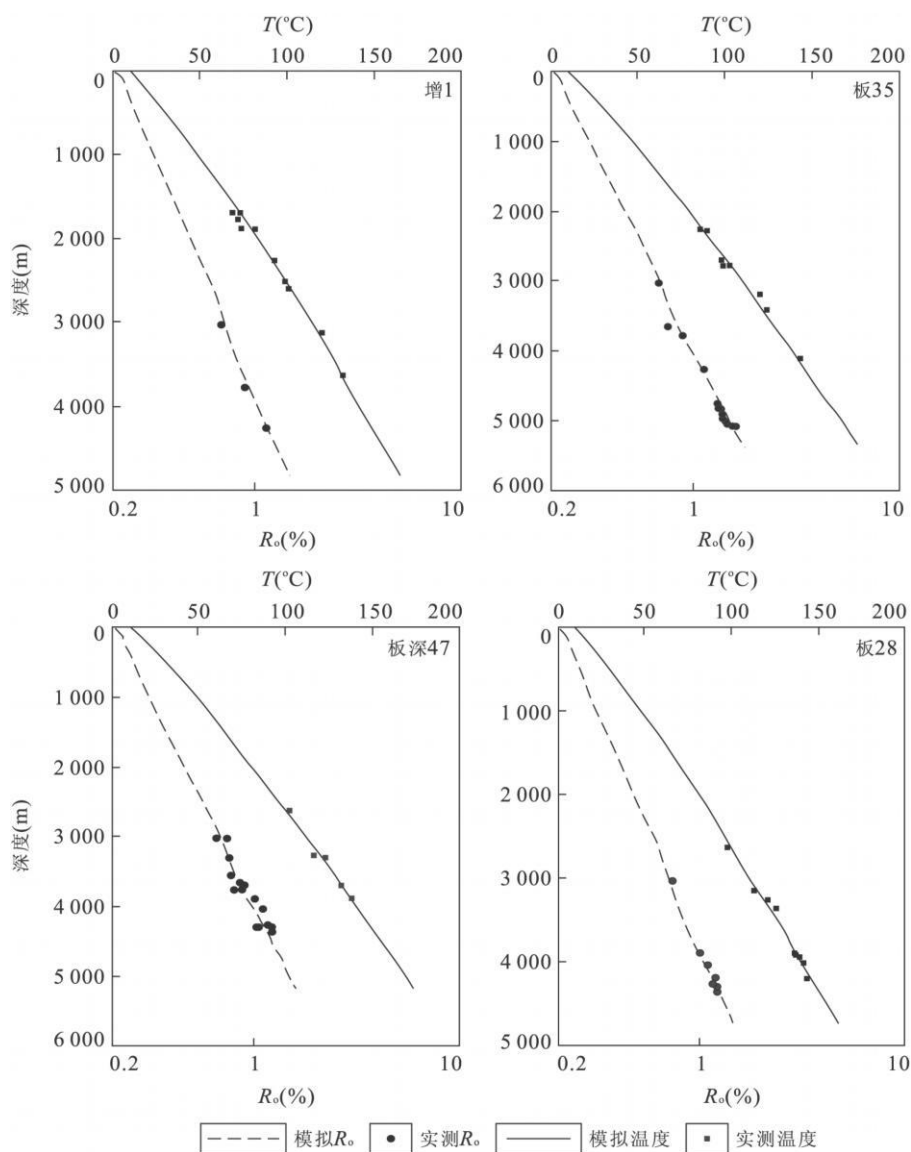


图 3 板桥凹陷增 1 井、板 35 井、板深 47 井和板深 28 井模拟温度和成熟度与实测值之间的关系

Fig. 3 Relationship between modelling temperatures, maturity and measured data for Wells Zeng1, Ban35, Banshen47 and Banshen28 in Banqiao depression

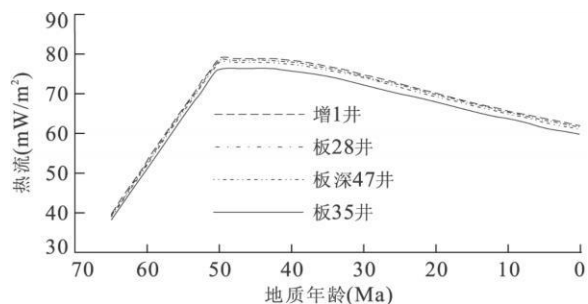


图 4 板桥凹陷增 1 井、板 35 井、板深 47 井和板深 28 井模拟古热流随时间变化关系

Fig. 4 Heat flow of wells Zeng1, Ban35, Banshen47 and Banshen28 versus geology age in Banqiao depression

最大, 自 50.2 Ma 以来, 盆地进入热沉降阶段, 热状态表现为持续的冷却, 热流值逐渐降低。

2.3 成熟生烃史模拟

在所有成熟度模型中, Sweeney and Burnham (1990)提出的 EASY% R_o 成熟史模型是目前较完善且使用最广泛的一种成熟度模型。该模型是根据镜质组的组分随时间和温度变化的规律, 在大量而广泛的样品分析基础之上提出来的。模型中反应的活化能采用频带分布, 将镜质体的成熟过程视作 4 个具有相同频率因子和不同活化能的平行化学动力学反应过程。通过将时间和温度史分解成一系列等温段或恒定加热速率段, 计算出镜质组的反映程度。

不仅考虑了众多一级平行化学反应及其相应反应的活化能, 而且还考虑了加热速率, 适用范围广 (R_o 值在 0.3% ~ 4.5% 之间), 能比较精确地模拟地质过程中有机质成熟度演化. 模拟的成熟度趋势与实测 R_o 之间的关系 (图 3) 说明 EASY% R_o 成熟史模型适合于板桥凹陷. 生烃史模拟采用 NULL 干酪根生烃动力学模型 (Braun and Burnham, 1987; Burnham *et al.*, 1987; Sweeney *et al.*, 1987), 设置有机质类型为 III 型, 生烃动力学参数使用软件中提供的默认值. 排烃模型采用含烃饱和度方法, 即当含烃量超过孔隙度的 20% 时就开始排烃.

2.4 油气运移模型

油气运移史模型是采用基于古流体势恢复的油气运移聚集的流线法模拟, 认为烃类总是从高烃势能区向低烃势能区运移, 其运移路径垂直于烃类势能面上的等值线, 并在动能为零, 势能相对最小的封闭低势区形成烃类聚集. 流体势的计算主要考虑了影响烃类运移的净浮力、水动力以及毛细管压力 3 个物理参数. 即:

$$H_{hc} = H_{buoy} + H_{hydro} + H_{cap}, \quad (2)$$

式(2)中: H_{hc} 为流体势; H_{buoy} 为净浮力; H_{hydro} 为水动力; H_{cap} 为毛细管力; 净浮力的计算可以表述为:

$$H_{buoy} = - [(\rho_w - \rho_{hc}) / \rho_{hc}] \times z_{carrier}, \quad (3)$$

式(3)中: ρ_w 为水密度, 取 1.03 g/cm³; ρ_{hc} 为烃类密度; $z_{carrier}$ 为储层海拔; 水动力计算公式为:

$$H_{hydro} = [z_{carrier} + P_{pore} / (\rho_w \times G)] \times (\rho_w / \rho_{hc}), \quad (4)$$

式(4)中: P_{pore} 为孔隙压力; G 为重力加速度, 取 9.81; 毛细管力可以写成:

$$H_{cap} = 2\gamma_{hc-w} / r_t / (\rho_{hc} \times G), \quad (5)$$

式(5)中: γ_{hc-w} 为表面张力; r_t 为孔隙喉道直径.

3 模拟结果分析

3.1 烃源岩成熟史

为了揭示板桥凹陷沙三段烃源岩成熟史, 开展了单井一维, 剖面 AB 二维以及三维古构造格架控制下的三维烃源岩成熟度模拟. 单井一维模拟结果用实测地温和 R_o (%) 校正, 剖面 AB 二维模拟结果用一维模拟结果约束. 三维古构造格架是在现今构造格架的基础上采用回剥技术并对现今地层进行压实校正得到的. 利用 EASY% R_o 模型计算得到板桥凹陷剖面 AB 现今成熟度如图 5 所示. 从图 5 可以看出板桥凹陷沙三段烃源岩现今成熟度 (R_o) 在 0.5% ~ 1.8% 之间, 为主要生烃阶段. 以板桥凹陷西南部偏低, 成熟度 (R_o) 在 0.5% ~ 0.8% 之间, 对应的沙三段地层深度为 2 200 ~ 3 400 m, 其他地区成熟度均在 0.75% 以上. 现今板桥凹陷门限深度为 2 200 m ($R_o = 0.5\%$), 大约在 4 000 m 达到生烃高峰 ($R_o = 1.0\%$), 开始生成凝析油或者湿气 ($R_o = 1.3\%$) 的深度大约为 4 500 m.

板桥凹陷沙三段顶界和底界现今成熟度 (R_o) 平面变化趋势反映沙三段底界现今的成熟度 (R_o) 在 0.75% 到 1.8% 之间, 从凹陷边缘向凹陷中心由于地层埋藏深度逐渐增加以至成熟度 (R_o) 逐渐增大. 在板桥凹陷沉降中心, 沙三段底界成熟度 (R_o) 均超过 1.5%, 主要处以生凝析油或者湿气阶段. 沙三段顶界现今成熟度 (R_o) 在 0.5% ~ 1.5% 之间, 西南部成熟度 (R_o) 在 0.5% ~ 0.75% 之间, 主要为早期生烃阶段, 在板桥凹陷沉降中心成熟度 (R_o) 均在 0.75% 以上. 在东营组沉积末期 (26 Ma), 板桥凹陷沙三段底界烃源岩均已成熟, 成熟度 (R_o) 在 0.5% 以上, 而且在板桥凹陷中心地区, 烃源岩已经达到生烃高

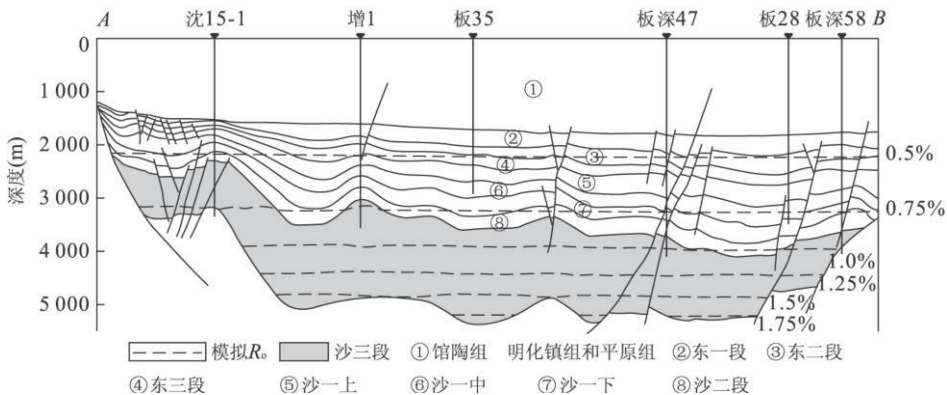


图 5 板桥凹陷剖面 AB 现今成熟度模拟结果

Fig. 5 Section AB of the Banqiao depression showing the present-day modelling maturity

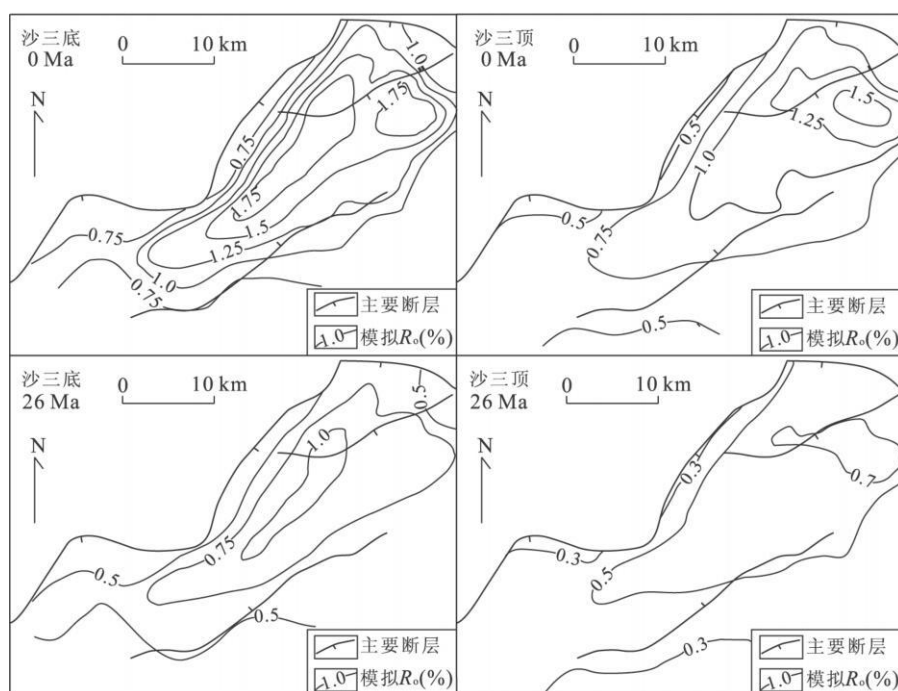


图 6 板桥凹陷沙三段顶界和底界成熟度在现今和 26 Ma 等值线

Fig. 6 Modeled maturity of the top and bottom Es₃ formation at present day and 26 Ma in Banqiao depression

峰,成熟度(R_o)最大可达 1.25%。板桥凹陷西南部沙三段顶界烃源岩在距今 26 Ma 还未成熟,成熟度(R_o)小于 0.5%,其他地区均成熟度(R_o)在 0.5%~0.7%之间,为早期生烃阶段(图 6)。

位于板桥凹陷中心的板 35 井埋藏史、热史和成熟史模拟结果(图 7a)反映板桥凹陷沙三段烃源岩在距今大约 35 Ma 开始生烃($R_o=0.5\%$),生烃门限温度大约为 100℃,门限深度大约为 2 400 m;在距今大约 33 Ma 开始大量生烃($R_o=0.7\%$),对应的地层温度大约为 130℃,深度大约为 3 100 m;在距今 30 Ma 达到生烃高峰,对应的深度为 3 600 m,温度为 150℃;距今 23 Ma,沙三段烃源岩底界成熟度(R_o)达到 1.3%,所对应的古埋深为 4 000 m。沙三段烃源岩顶界开始生烃的时间大约为距今 30 Ma,开始大量生烃的时间大约为距今 14 Ma,对应的古埋深为 2 700 m。由于板桥凹陷不同地区热流史相差不大,因此沙三段烃源岩的埋藏深度的差异导致不同地区的成熟史也不尽相同,从凹陷边缘到中心,随着埋藏深度的增加,生烃时间逐渐变早。

3.2 油气生成和排出时间

板桥凹陷沙三段烃源岩平均碳含量可达 1.08%,成熟度(R_o)在 0.75%~1.80%之间,应该具有足够的排烃能力。从板 35 井沙三段烃源岩生排烃史模拟结果(图 7b 和图 7c),可以将沙三段烃源

岩生排烃演化划分为 3 个阶段。第 1 阶段为油气主要生成阶段而没有排烃,时间距今 35~31 Ma。在这个阶段,烃源岩达到生烃门限并开始生烃,并在距今 32.5 Ma 生烃率达到最大,大约为 40 mg/g TOC,烃源岩转化率从 0 增加到 40%。但没有烃类排出,生成的烃存在于烃源岩孔隙中;第 2 阶段为主要排烃阶段,时间为距今 31~26 Ma。在距今 31 Ma,烃源岩中含烃量超过孔隙度的 20%开始排烃,排出的烃以气为主,排烃的同时也伴随有烃类生成,烃源岩转化率从 40%增加到 65%,但生烃率相对第一阶段明显偏低;第 3 阶段为少量生排烃阶段,时间为距今 26~0 Ma。在此阶段由于地层沉积速率变慢,热流值也变小,烃源岩成熟度增加缓慢,因此生烃率比较低、生烃量小,在此阶段烃源岩转化率从 65%只增加到 78%。

3.3 油气运移与聚集

板桥凹陷沙三段油气主要来源于沙三段烃源岩,沙三段烃源岩排烃时间大约为 31~0 Ma,距今 26 Ma 为大量排烃阶段末期,而且是板桥凹陷地层开始发生抬升剥蚀时间,因此本次研究模拟了在距今 26 Ma 和 0 Ma 板桥凹陷沙三段油气主要运移路径和聚集区,并用钻井结果进行验证,其模拟结果如图 8 所示。通过对比油井、油气显示井、干井与主要运移路径和聚集区的关系可以看出油气运移模拟结

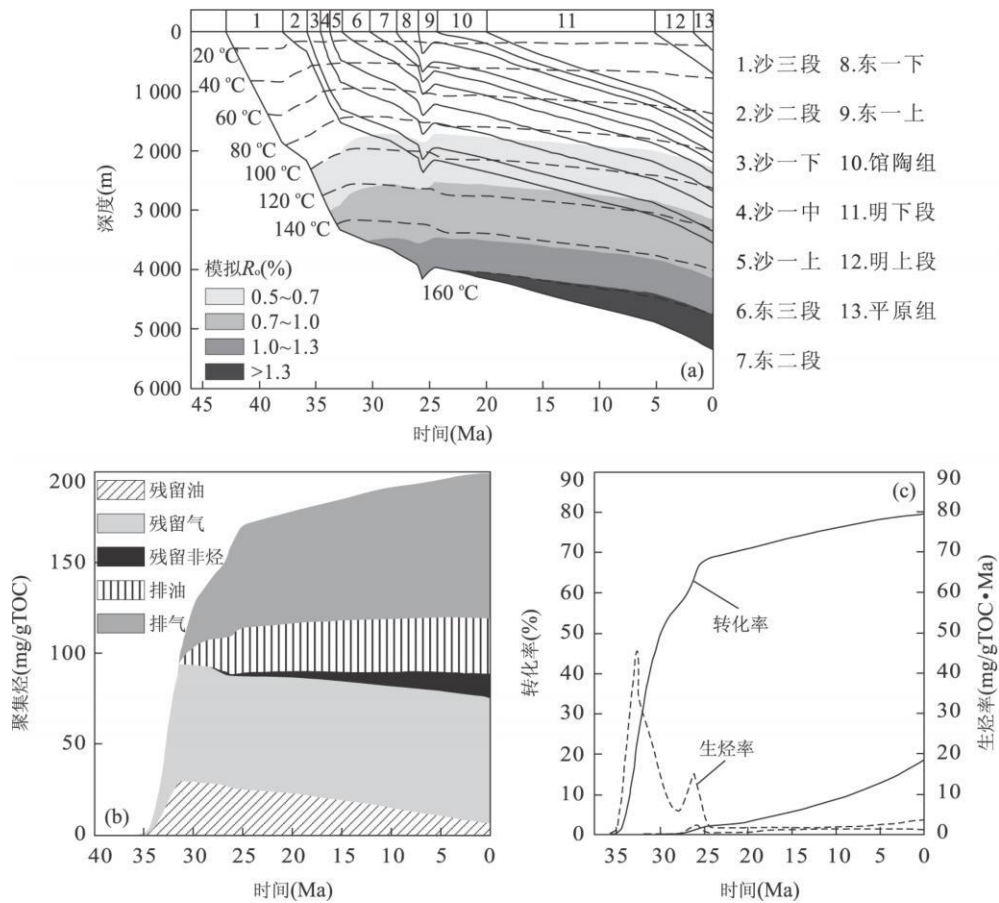


图 7 板桥凹陷板 35 井热史、成熟史以及沙三段烃源岩生排烃史

Fig. 7 Thermal, maturity and hydrocarbon generation and expulsion histories in E₃ formation source rocks of well Ban35 in Banqiao depression

果的可靠性,说明板桥凹陷油气运移路径主要受古构造面的控制. 10 口油井均位于距今 26 Ma 和 0 Ma 的油气主要运移路径上或者油气聚集区内. 52 口干井中只有一口位于油气聚集区内, 其他干井既不在油气主要运移路径上也不在油气聚集区内. 1 口油气显示井位于油气聚集区边缘, 可能是因为抬升剥蚀作用使油气藏遭受破坏, 因为在东营组沉积末期, 板桥凹陷西南部东营地层被剥蚀厚度可超过 400 m, 或者是凹陷生烃量不够而使圈闭没有被完全充注.

板桥凹陷沙三段现今的流体势明显高于东营组沉积末期, 高势区均位于板桥凹陷沉降中心, 油气的优势运移方向为垂直于流体势等值线的流体势能降低梯度最大的方向, 由高势区向低势区运移, 且具体方向受输导层内流体势空间分布形态的控制. 凹陷区流体势平面等值线为外凸形, 势能等值线法线向外呈分散状态, 油气从小面积向大面积发散运移形成发散流, 北部陡坡带流体势平面等值线近似平行,

油气主要以平行流方式运移. 汇聚流主要存在板桥凹陷南部缓坡带, 流体势平面等值线为内凹形, 平面等值线法线向一处汇聚收敛, 油气从大面积向小面积汇聚运移, 有利于油气大规模聚集成藏.

油气运移和聚集模拟结果还显示在板桥凹陷沙三段存在 6 个有利油气聚集区 (图 8). 聚集区 I 和 II 由于近源、油气运移动力强, 运移距离短, 是 6 个油气聚集区中最有利的油气聚集区; 聚集区 III 由于烃源岩生烃强度不是很大, 可能会造成圈闭充注不完全, 而且在东营组沉积末期地层剥蚀比较严重, 也可能使其保存条件不是很好, 因此存在一定的勘探风险. 聚集区 IV、V 和 VI 受控于大张坨断层, 大张坨断层侧向封闭性直接决定这 3 个聚集区是否存在勘探风险. 本次研究虽然没有对大张坨断层侧向封闭性进行分析, 但在大张坨断层南部存在一口油井位于油气主要运移路径上, 而且板桥凹陷到现在为止发现最大的油田位于在潜山构造带奥陶系地层中, 可能说明大张坨断层在油气主要运移时期侧向上是

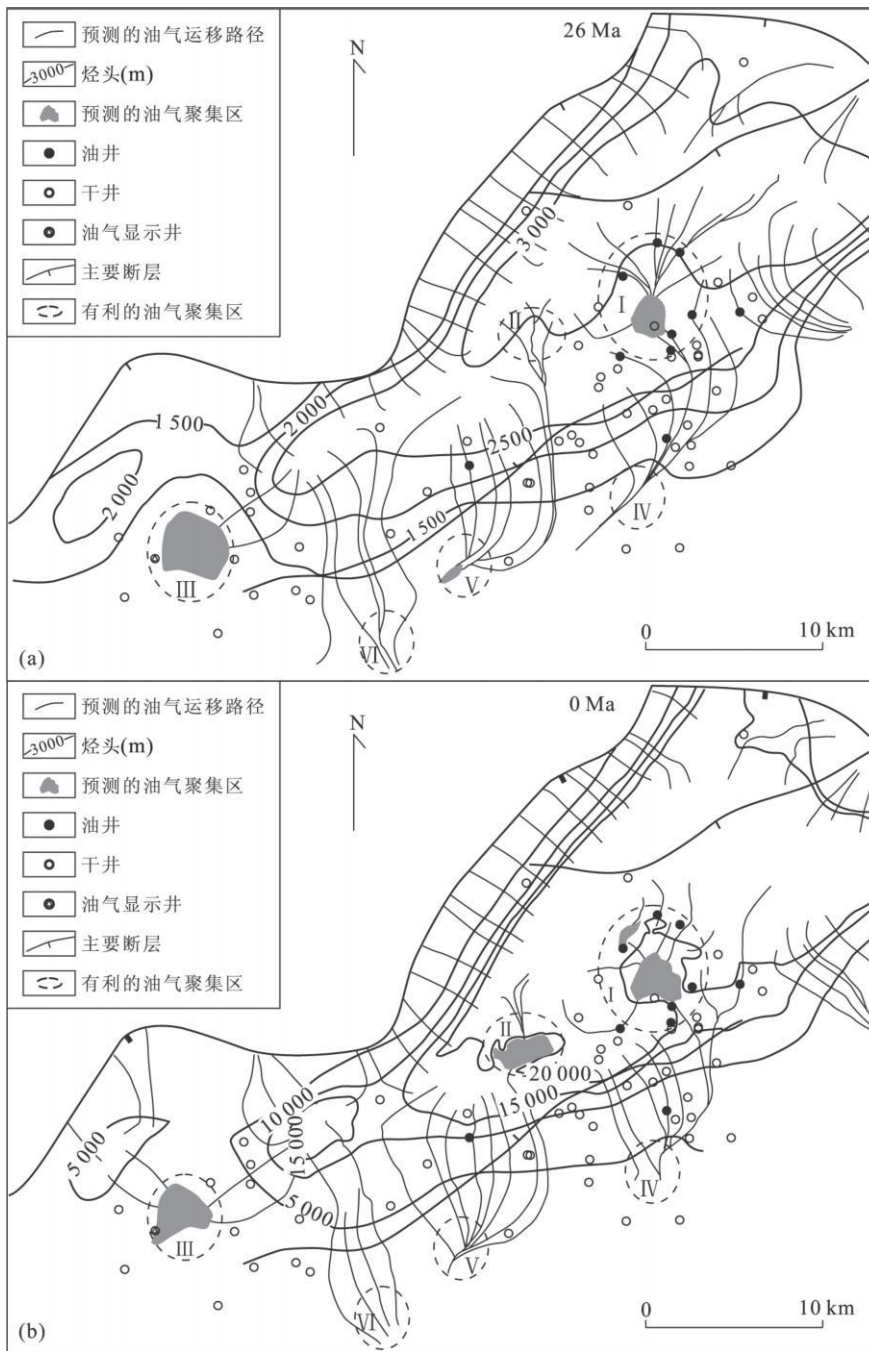


图 8 板桥凹陷沙三段油气运移路径平面图

Fig. 8 Modelling results at 0 and 26 Ma showing the Es₃ formation petroleum migration pathways in Banqiao depression

开启的。

4 结论与认识

(1)在恢复地层埋藏史的基础上,对板桥凹陷热史研究表明:板桥凹陷现今的热流值在 59.8 ~ 61.7 mW/m² 之间,古热流演化经历了早期(65 ~ 50.4 Ma)持续升高和晚期(50.4 ~ 0 Ma)逐渐降低

两个阶段,在距今 50.4 Ma 达到最大值。

(2)板桥凹陷沙三段烃源岩现今成熟度(R_o)大约在 0.5% ~ 1.8% 之间,在东营组沉积末期,沙三段烃源岩成熟度(R_o)大约在 0.5% ~ 1.25% 之间。沙三段烃源岩在距今大约 35 Ma,开始生烃;在距今大约 30 Ma,开始达到生烃高峰;在距今大约 23 Ma,开始生成凝析油和湿气。

(3)沙三段烃源岩生排烃演化划分为 3 个阶段:

第1阶段为油气主要生成阶段而没有排烃;第2阶段为主要排烃阶段;第3阶段为少量生排烃阶段。

(4)钻探结果与板桥凹陷油气主要运移路径和聚集区的关系反映板桥凹陷油气运移路径主要受控于古构造面。凹陷区以发散流为主,北部陡坡带以平行流为主,汇聚流主要存在板桥凹陷南部缓坡带。油气主运移和聚集模拟结果显示在板桥凹陷沙三段存在6个有利油气聚集区,其中以聚集区I和II最有利,主要是因为近源、油气运移动力强、运移距离短。

References

- Athy, L. F., 1930. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *AAPG Bulletin*, 14(1): 1—24. doi: 10.1306/3D93289E-16B1-11D7-8645000102C1865D
- Braun, R. L., Burnham, A. K., 1987. Analysis of chemical reaction kinetics using a distribution of activation energies and simpler models. *Energy & Fuels*, 1(2): 153—161. doi: 10.1021/ef00002a003
- Burnham, A. K., Braun, R. L., Gregg, H. R., et al., 1987. Comparison of methods for measuring kerogen pyrolysis rates and fitting kinetic parameters. *Energy & Fuels*, 1(6): 452—458. doi: 10.1021/ef00006a001
- Burrus, J., 1998. Overpressure models for clastic rocks, their relation to hydrocarbon expulsion: a critical reevaluation. In: Law, B. E., Ulmishek, G. F., Slavin, V. L., eds., *Abnormal pressures in hydrocarbon environments*. *AAPG Memoir*, 70: 35—63.
- Falvey, D. A., Middleton, M. F., 1981. Passive continental margins; evidence for a prebreakup deep crustal metamorphic subsidence mechanism. *Oceanologica Acta*, 4(Suppl.): 103—114.
- Gussov, W. C., 1968. Migration of reservoir fluids. *Journal of Petroleum Technology*, 20(4): 353—365. doi: 10.2118/1870-PA
- Hao, F., Zou, H. Y., Gong, Z. S., 2007. Petroleum migration and accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai bay basin, China; significance of preferential petroleum migration pathways (PPMP) for the formation of large oilfields in lacustrine fault basins. *Marine and Petroleum Geology*, 24(1): 1—13. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2006.10.007
- Hermans, L., Van Kuyk, A. D., Lehner, F. K., et al., 1992. Modeling secondary hydrocarbon migration on Haltenbanken, Norway. In: Larsen, R. M., Brekke, H., Larsen, B. J., eds., *Structural and tectonic modeling and its applications to petroleum geology*. *Norwegian Petroleum Society (Special Publication)*, 1: 305—323.
- Hindle, A. D., 1997. Petroleum migration pathways and charge concentration; a three-dimensional model. *AAPG Bulletin*, 81(9): 1451—1481.
- Hindle, A. D., 1999. Petroleum migration pathways and charge concentration; a three-dimensional model-reply. *AAPG Bulletin*, 83(6): 1020—1023.
- Li, H. J., Wu, T. R., Ma, Z. J., et al., 2004. Pressure retardation of organic maturation in clastic reservoirs; a case study from the Banqiao sag, eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 21(9): 1083—1093. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2004.07.005
- Lou, Z. H., Jin, A. M., Zhu, R., et al., 2001. Formation and evolution of the hydrodynamic field in the Songliao basin. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 111—120 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, P., 2000. A pool formation analysis for Qianmiqiao buried hill structure. *Petroleum Exploration and Development*, 27(3): 14—16 (in Chinese with English abstract).
- McKenzie, D., 1978. Some remarks on the development of sedimentary basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1): 25—32. doi: 10.1016/0012-821X(78)90071-7
- Momper, J. A., 1978. Oil migration limitations suggested by geological and geochemical considerations; physical and chemical constraints on petroleum migration. *AAPG Continuing Education Course Note Series*, 8: B1—B60.
- Momper, J. A., 1984. Geochemical exploration in the Powder river basin. In: Demaison, G. D., Murriss, R. J., eds., *Petroleum geochemistry and basin evaluation*. *AAPG Memoir*, 35: 181—191.
- Pratsch, J. C., 1994. The location of major oil and gas fields; examples from the Andean foreland. *Journal of Petroleum Geology*, 17(3): 327—338. doi: 10.1111/j.1747-5457.1994.tb00138
- Qiao, Y. F., Mao, X. P., Xin, G. Z., 2005. Quantitative simulation of hydrocarbon migration. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 617—622 (in Chinese with English abstract).
- Seifert, W. K., Moldovan, J. M., 1981. Paleoreconstruction by biological marks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(6): 783—794. doi: 10.1016/0016-7037(81)90108-3
- Seifert, W. K., Moldovan, J. M., 1986. Use of biological markers in petroleum exploration. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 24: 261—290. doi: 10.1016/0016-7037(78)90219-3
- Shi, G. R., Guo, Q. L., Mi, S. Y., et al., 1996. Basin inte-

- grated modeling system "BASIMS". *Acta Petrolei Sinica*, 17(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Shi, G. R., Zhang Q. C., Ma J. S., et al., 2003. 3-D and 3-phase model for secondary migration of hydrocarbon. *Acta Petrolei Sinica*, 24(2): 38—42 (in Chinese with English abstract).
- Sylvta, P., 1991. Modeling of secondary migration and entrapment of a multi-component hydrocarbon mixture using equation of state and ray-tracing modeling techniques. *Geological Society (Special Publication)*, 59: 111—122. doi: 10.1144/GSL.SP.1991.059.01.07
- Sweeney, J. J., Burnham, A. K., Braun, R. L., 1987. A model of hydrocarbon generation from Type I kerogen: application to Uinta basin, Utah. *AAPG Bulletin*, 71(8): 967—985. doi: 10.1306/4C6C221F-1416-12C7-8442003101D1367C
- Sweeney, J. J., Burnham, A. K., 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bulletin*, 74(10): 1559—1570. doi: 10.1306/0C9B251F-1710-11D7-8645000102C1865D
- Ungerer, P., 1993. Modelling of petroleum generation and expulsion—an update to recent reviews. In: Doé, A. G., Augustson, J. H., Hermanrud C., eds., *Basin modelling: advances and applications*. Elsevier, Amsterdam, 219—232.
- Wang T. G., Li, S. M., Zhang A. Y., et al., 2000. A discussion on petroleum migration in the Lunan oilfield of Xinjiang based on nitrogen compounds. *Acta Geologica Sinica*, 74(1): 85—93 (in Chinese with English abstract).
- Wendebourg, J., 2003. Uncertainty of petroleum generation using methods of experimental design and response surface modeling: application to the Gippsland basin, Australia. In: penbecker, S. D., Marzi, R., eds., *Multidimensional basin modeling. AAPG/ Datapages Discovery Series* 7: 295—307.
- Zhang Y. L., Zhao, C. Y., Meng, Y. L., et al., 2006. Numerical simulation of Upper Paleozoic pool-forming history in Huanghua depression. *Acta Petrolei Sinica*, 27(1): 24—29 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 楼章华, 金爱民, 朱蓉, 等, 2001. 论松辽盆地地下水动力场的形成与演化. *地质学报*, 75(1): 111—120.
- 姜平, 2000. 千米桥潜山构造油气藏成藏分析. *石油勘探与开发*, 27(3): 14—16.
- 乔永富, 毛小平, 辛广柱, 2005. 油气运移聚集定量化模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(5): 617—622.
- 石广仁, 郭秋麟, 米石云, 等, 1996. 盆地综合模拟系统 BASIMS. *石油学报*, 17(1): 1—9.
- 石广仁, 张庆春, 马进山, 等, 2003. 三维三相烃类二次运移模型. *石油学报*, 24(2): 38—42.
- 王铁冠, 李素梅, 张爱云, 等, 2000. 应用含氮化合物探讨新疆轮南油田油气运移. *地质学报*, 74(1): 85—93.
- 张英利, 赵长毅, 孟元林, 等, 2006. 黄骅坳陷上古生界油气成藏史数值模拟. *石油学报*, 27(1): 24—29.