

济阳坳陷中浅层天然气运聚模拟试验*

宋国奇^{1,2}

(1. 胜利油田有限公司地质科学研究院, 山东东营 257015; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101)

摘要: 济阳坳陷沙河街组三段中下亚段和四段上亚段为主力气源岩层, 其埋深一般小于 3 000 m。采用从德国引进的油-气-水三相运聚盆地模拟软件(IES Petroflow)进行运聚规律模拟, 结果表明, 该区浅层天然气可呈多相态运移, 但初次运移以溶解相为主, 二次运移主要为游离相态, 形成浅层次生气藏; 平方王潜山及其附近地区天然气的主要运移期在明化镇组和第四系沉积时期, 运聚方向受古地形控制, 以侧向运移为主。东辛-永安镇地区由于断裂系统发育, 天然气以垂向运移为主, 主要成藏期仍为明化镇期和第四纪。整个济阳坳陷的中浅层天然气藏可分为双断式凸起带、单断式凸起带、断裂带及斜坡带 4 种运聚型式。

关键词: 天然气; 模拟软件; 运聚模型; 运聚规律; 成藏型式; 济阳坳陷

作者简介: 宋国奇, 男, 44 岁, 高级工程师(博士生), 地震与地质

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

济阳坳陷现已发现的 70 个油气田中有 33 个为纯气藏, 除少量幔源成因的 CO₂ 气藏外, 其他气藏的气源岩均为下第三系沙河街组, 主力生气层(沙河街组三段中下亚段及四段上亚段)埋深一般小于 3 000 m^{* *}。为了进一步探索天然气的聚集规律, 1998 年胜利油田从德国引进了油-气-水三相运聚盆地模拟软件(IES Petroflow), 笔者依此针对陆相盆地的特点进行了一些补充, 探讨了济阳坳陷中浅层天然气的运聚规律。

1 运聚模型

1.1 压实

压实作用除控制地史模拟的可靠性和烃类的排出量外, 还决定了渗透率、毛管压力、岩石的热导率、热容等与孔隙性质相关的参数的选取^[1]。传统的压实模型是通过建立工区的孔隙度与渗透率关系曲线^[2]来实现的, 这种统计方法未考虑地层压力的作用, 对一些欠压实和构造复杂的地区精度不够, 为此 IES Petroflow 采用了考虑有效应力的压实模型^[3]:

$$\partial \Phi / \partial t = - (1 - \Phi) C \partial (P_s - P_f) / \partial t \quad (1)$$

式中 Φ 为孔隙度, C 为岩石骨架的压缩系数, P_s 为上覆岩层压力, P_f 为孔隙流体压力, $P_s - P_f$ 即有效应力, t 为地质时间。

1.2 渗透率和相渗透率

渗透率模型是根据不同岩石的渗透率与岩性和孔隙度的关系曲线建立的(图 1)。在实际研究中, 可以根据工区的实测数据建立本地区的渗透率模型。但要注意的是, 虽然渗透率可以直接测量,

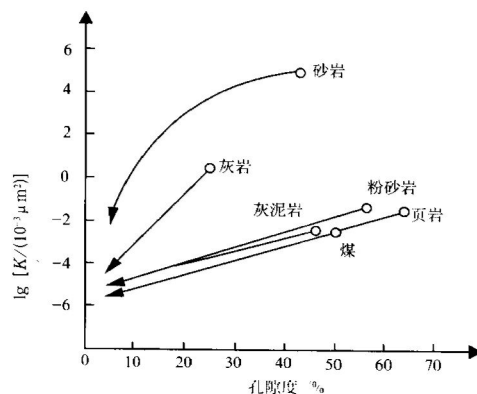


图 1 不同岩石渗透率与孔隙度关系

Fig. 1 Relationship between porosity and permeability of different rocks

但测量结果往往只能反映某一点的数据, 不能反映某一套模拟地层的平均渗透率, 因此需要统计大量的数据才能合理的建立; 另外, 对于济阳坳陷这类陆相盆地, 一个模拟地层单元的砂泥岩是难以准确划分的, 实际应用中可采取“混合岩”的方法, 即通过砂泥比统计进行加权计算渗透率, 如某一地层的砂岩层含量为 20%, 泥岩层为 70%, 粉砂岩为 10%, 则渗透率的取值为:

$$K = (K_{\text{砂岩}} \times 20\% + K_{\text{泥岩}} \times 70\% + K_{\text{粉砂岩}} \times 10\%) \eta \quad (2)$$

* 本文为中国石化集团“九五”重点攻关项目(99-01)资助

** 程有义, 王和平, 宋来亮, 等. 济阳坳陷中浅层天然气藏成藏条件及勘探目标研究, 1994

收稿日期: 2001-08-21

η 为校正系数, 对于泥岩较发育的地区, 少量连续性好的砂岩层往往能很好的改善一套地层的渗透率, 因此需要用 $\eta > 1$ 的校正系数进行校正。校正系数的取值要考虑砂岩的连通性以及渗透率的各向异性。这种“混合岩”的参数选取方法同样适用于岩石的热导率、热容、毛管压力、扩散系数等与岩性有关的参数的标定。

油、气、水的相对渗透率模型可采用油-气饱和度与相对渗透率及油-水饱和度与相对渗透率等关系曲线^[1]。

1.3 微裂缝

岩层中分布了大量微裂隙, 当流体压力达到或超过临界裂缝压力时, 这些微裂隙会张开而使渗透率提高, 可采用指数增长模型^[3]。

$$k = \begin{cases} k_0 & \dots\dots\dots u \leq u_f \\ k_0 e^{5 \frac{P - P_f}{u_f}} & \dots\dots\dots u > u_f \end{cases} \quad (3)$$

式中 P 为上覆压力; P_f 为临界裂缝压力; k_0 为正常渗透率值。

临界裂缝压力一般取值在 $0.5 \times$ 地层静压 $\sim 0.8 \times$ 地层静压。

济阳坳陷断裂系统发育, 岩层中必然发育有较多的微裂隙, 特别是类似沙河街组三段下亚段和沙河街组四段上亚段等埋深较深的暗色泥岩, 应用微裂隙模型取得了较好的模拟效果。

1.4 流体势

流体势模型是运移聚集研究的关键, 模型中考虑了毛管压力这一影响因素^[3]:

$$u_o = gZ + \frac{p}{\rho_o} + P_{C_o} \quad (4)$$

$$u_g = gZ + \int_0^p \frac{dp}{\rho_g(p)} + P_{C_g} \quad (5)$$

$$u_w = gZ + \frac{p}{\rho_w} \quad (6)$$

式中, u_o , u_g , u_w 为油气水的流体势, p 为深度为 Z 时的孔隙流体压力; ρ_o , ρ_g , ρ_w 分别为油气水的密度; P_{C_o} , P_{C_g} 为油和气在岩石中的毛管压力, 毛管压力与孔隙大小和喉道性质有关, 实际模拟中根据实测数据确定砂岩的平均毛管压力(约 0.2 MPa)和泥岩的平均毛管压力(约 4 MPa), 对于砂泥岩互层的地层, 采用“混合岩”的方法, 统计砂层和泥层的比率进行加权平均。

1.5 饱和度

饱和度模型根据物质平衡原理建立^[3]:

$$\frac{\partial(\rho_f V_{xf})}{\partial x} + S_f \frac{\partial(\rho_f \Phi)}{\partial t} + \Phi \frac{\partial(\rho_f S_f)}{\partial t} = - \Phi \frac{\partial(\rho_f S_{add})}{\partial t} \quad (7)$$

$$S_{add} = \Delta Q \frac{(1 - \Phi) \rho}{\Phi \rho_f} \quad (8)$$

(f 为流体)

式中 Φ 为孔隙度, S_f 为流体饱和度, S_{add} 为 t 时刻由于烃类生成产生的饱和度增加值, ρ 为岩石密度, ρ_f 为流体密度, ΔQ 为 t 时刻油气的生成量, x 为沿 x 方向模拟网格间距。

1.6 扩散模型

模拟天然气的运聚必须进行扩散作用的研究, 模型采用费克定律计算扩散量^[3]:

$$J = - \Phi D_T \text{grad}(C_w) \quad (9)$$

式中 D_T 为气体在岩石中的扩散系数, $\text{grad}(C_w)$ 为天然气在水中的浓度梯度, J 为由分子扩散引起的气组分流动的摩尔通量 ($\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。扩散系数与温度有关, 可以建立扩散系数的经验公式:

$$D(T) = D_{150} e^{R \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{150} \right)}$$

$$R = 8.314 \text{ J}(\text{mol}/\text{K})^{-1}$$

$$E = 50 \text{ J/mol}$$

式中, E 为活化能, R 为气体常数, D_{150} 为温度 150 °C 时岩石的扩散系数。

2 模拟结果

2.1 运移相态

济阳坳陷沙河街组四段上亚段和三段中-下亚段烃源岩以 I 型干酪根为主, 埋深较浅(最大埋深小于 4 400 m, 一般小于 4 000 m), 热演化程度低 (R_o 小于 1.0)^[4]。模拟结果表明, 天然气可以游离相、溶解相和扩散相运移, 但初次运移以油溶解相为主。对于 I 型干酪根, 深度大于 3 900 m 或 4 000 m, $R_o > 1.0$ 时才开始进入游离气生气区(图 2), 生气区以上以生油和伴生的溶解气为主, 此时的天然气

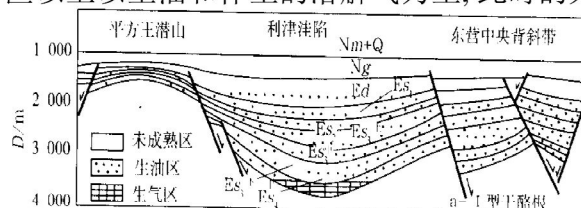


图 2 济阳坳陷 xxx 测线生烃模拟剖面

Fig. 2 Simulated section of hydrocarbon generation in a certain measure line from Jiyang Depression

以溶解相态排出为主;进入游离气生气区,随着气体生成量增大,逐渐高于液态烃溶解天然气的的能力,气体才主要以游离相态排出。在二次运移过程中,与液态烃一起运移的部分油溶天然气随地层压力的降低而析出,这部分油溶释放气开始以游离相态运移,形成浅层次生气藏,这与目前济阳坳陷探明的天然气以溶解气为主是一致的,这也是富油盆地的特点之一^[5]。

在纵向上,从深层到浅层天然气组分逐渐变轻,CH₄含量也随之逐渐增加,2 000 m 以上,CH₄含量普遍高于 90% (图 3)。多年来,人们对济阳坳

陷在疑问,我们研究认为这主要是由于扩散作用和油溶释放等作用造成的。以游离相排出的气体,主要以扩散作用运移,而气体中甲烷的扩散系数最高^[6],扩散速度最快,导致轻组分的 CH₄ 可作长距离运移,造成了这种纵向上的分异;另外,依据相似相容的原理(天然气分子量越大的重烃组分在油中的溶解度越高^[2]),以油溶相排出的天然气在随液相运移过程中,由于地层压力的下降和原油密度的增大,导致较轻的气体优先析出,即油溶释放作用也会在浅层形成以 CH₄ 为主的浅层次生气藏^[3,6]。

2.2 运移方向

首先选择了构造条件较为有利的平方王潜山及其周围地区进行模拟。该潜山紧邻利津洼陷,气源丰富,构造为一相对简单的穹隆背斜,第三系披覆其上。目前已在多套层系中发现了天然气藏,其中沙河街组四段和一段是胜利油气区天然气探明储量最大、整装天然气富集区(层系)。现今和距今 5 Ma 时刻平方王潜山及其周围地区天然气相同深度的流体势并不相同,致使天然气从流体势高的洼陷地区向流体势低的边部和凸起方向运移,即从流体势高的利津洼陷向流体势低的平方王潜山运移,主要运移期发生在小于 5 Ma 的明化镇组和第四系沉积时期(也是主要的成藏期),明化镇组沉积前(> 5 Ma),烃源岩埋藏较浅(尚未达到最大生气门限),仅生成少量天然气,同时,由于缺乏区域性良好盖层,生成的少量气体多散失,而不利于聚集成藏(图 4)。

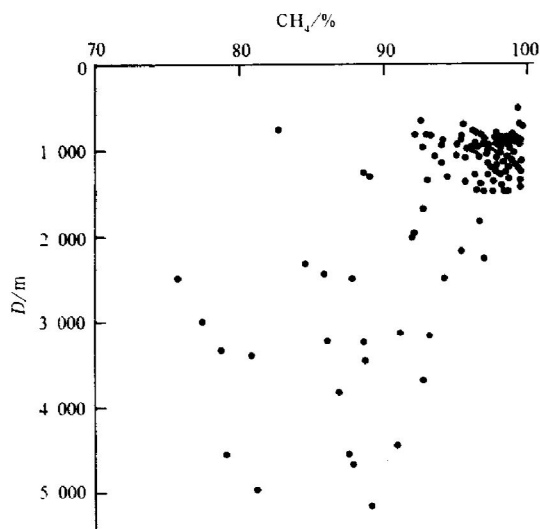


图 3 济阳坳陷 CH₄ 含量与深度关系

Fig. 3 Relationship between CH₄ contents and burial depth of Jiyang Depression

陷这类非高成熟盆地但气藏多为“干气”的特征存

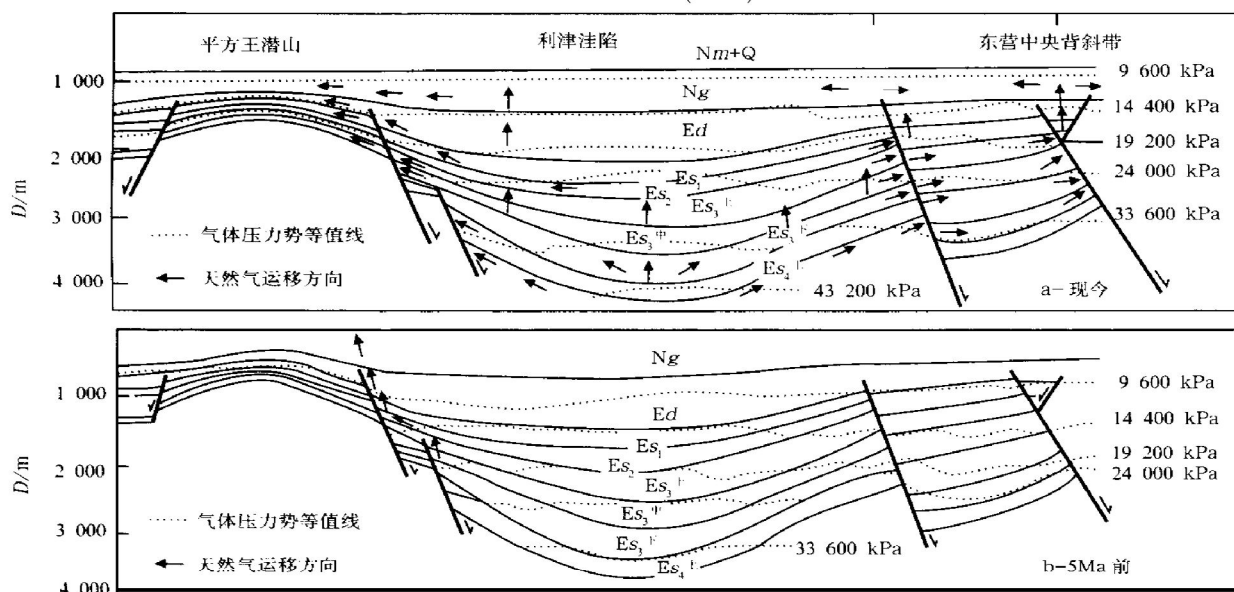


图 4 济阳坳陷 xxx 测线不同地质时期气体势分布与运移指向模拟剖面

Fig. 4 Simulated section Showing gas potential distribution and migration direction of different geological times in a certain measure line of Jiyang Depression

对断裂系统极其复杂的东辛-永安镇地区进行的运聚模拟也取得了很好的效果。东辛-永安镇地区位于东营中央隆起带及周缘, 断层极其发育, 目前的天然气藏主要集中在小于 1 500 m 的浅层岩性圈闭中。该区天然气以垂向运移为主, 断层是其运移的主要通道; 成藏期为晚第三纪明化镇期和第四纪; 成藏层位为上第三系馆陶组、明化镇组以及下第三系的沙河街组二段、一段和东营

组; 平面上盐家、永安镇、东辛、王家岗、八面河地区均是天然气聚集成藏的有利地区 (图 5), 以上结果与目前实际勘探结果在深度和层位上吻合均较好 (上述地区除王家岗外均已发现气藏)。根据模拟结果部署的丰气 1 井和丰气斜 101 井均获工业气流, 其中, 丰气 1 井是胜利探区第一口以中层气为专探目标并获得成功的井, 拓宽了该区天然气勘探的领域。

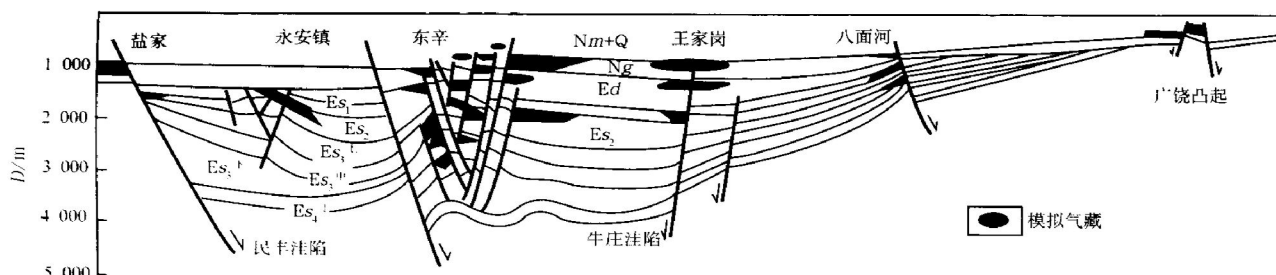


图 5 济阳坳陷 xxx 测线成藏模拟剖面

Fig. 5 Section of pool-forming simulated in a certain measure line of Jiyang Depression

3 成藏类型

依据上述模型和模拟成果, 2000 年度在济阳全区开展了运聚模拟工作, 在此基础上, 结合勘探实践, 总结出了 4 种中浅层天然气成藏类型。

3.1 双断式凸起带

此类为在前第三系基岩背景上发育的双断式第三系披覆构造, 如孤岛、孤东地区天然气气藏。天然气成藏主要取决于断层和不整合面的运移通道 (图 6a)。在下第三系形成的披覆构造背景下, 两边以陡倾断层与生烃洼陷相连, 油气沿断层同

时垂向运移, 因温压降低, 轻质组分开始分离, 继续向上运移, 而重质组分则在较低的圈闭中聚集, 形成上部气藏、下部稠油的油气分布格局; 储盖组合以馆陶组一段和明化镇组下部泛滥平原相泥岩为盖层, 同期或前期河流相砂岩为储层; 气藏类型以砂岩透镜体气藏为主。

3.2 单断式凸起带

此类为在前第三系基岩背景上发育的单断式第三系披覆构造, 一边为陡倾断层, 一边为斜坡带, 如陈家庄、单家寺等气藏 (图 6b)。陡坡带天然气以垂向运移为主, 斜坡带则以侧向运移为

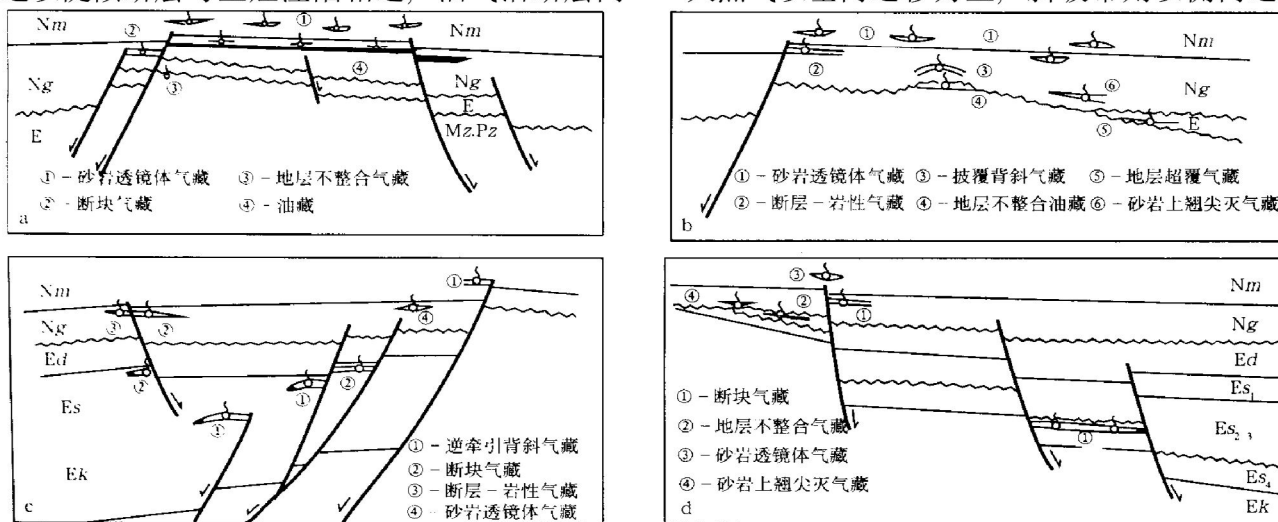


图 6 济阳坳陷中浅层天然气成藏类型

Fig. 6 Pool-forming types of mid-shallow burial gases in Jiyang Depression

a—双断式凸起天然气成藏剖面; b—单断式凸起天然气成藏剖面; c—断裂带天然气成藏剖面; d—斜坡带天然气成藏剖面

主; 储层除馆陶组一段和明化镇组下部曲流河砂岩外, 还有馆陶组二段和馆陶组三段辫状河砂岩及太古界花岗片麻岩等; 盖层为明化镇组下部和馆陶组一段泛滥平原相泥岩; 气藏类型有砂岩透镜体气藏、断层-岩性气藏、披覆背斜气藏、地层不整合气藏和砂岩上翘尖灭气藏。

3.3 断裂带

目前已在断裂带中发现了花沟、高青、胜坨、永安镇、邵家等一系列气藏, 由于断裂发育, 并切割多套烃源岩系, 因而具有良好的运移条件, 多种储层类型形成多套储盖组合, 气藏主要受圈闭条件控制, 气藏类型以断块、逆牵引背斜等气藏为主(图 6c)。

3.4 斜坡带

这类气藏包括金家、草桥、八面河、飞雁滩等气藏, 油气沿地层作长距离的横向运移, 由于构造走

向线与地层超覆线、尖灭线平行, 气藏容易沿不整合面和地层层面向上翘方向运移散失, 因而, 斜坡带多形成小规模、低产能的气藏(图 6d)。

参 考 文 献

- 1 王英明, 邓林, 贺小苏, 等. 海相残余盆地成藏动力学过程模拟理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1998
- 2 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994
- 3 Welte D H, Horsfield B, Baker D R. Petroleum and basin evolution [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997
- 4 王秉海, 钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 北京: 石油大学出版社, 1991
- 5 宋国奇, 穆星, 车燕, 等. 济阳坳陷溶解气运移释放成藏机理与模式[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 555~560
- 6 穆星, 车燕, 姜慧超, 等. 济阳凹陷油溶释放作用与有利含气区带预测[J]. 天然气勘探与开发, 2001, 24(1): 9~15

SIMULATION TESTS ON MIGRATION AND ACCUMULATION OF MIDDLE-SHALLOW BURIED GASES IN JIYANG DEPRESSION

Song Guoqi^{1,2}

(1. Geological Research Institute, Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong;

2. Research Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing)

Abstract: The middle and lower submembers of Sha₃ member and the upper submember of Sha₄ member in Jiyang Depression are the main gas source rocks. The burial depth is generally less than 3 000 m. A german developed oil-gas-water phase simulation software(IES Petroflow) was used to simulate the gas migration and accumulation regularities of the depression. The result suggests that the gas could migrate in different phases. The primary migration was in solution phase; the second migration was in free phase and resulted in shallow secondary gas pools. The gas in Pingfangwang buried hill and its neighbouring areas as well as Dongxing-Yonganzhen migrated in Minghuazhen Formation and Quaternary depositional stages. The migration types could be divided into double faulted uplift zone type, single fault uplift zone type, fracture zone and slope zone types.

Key words: natural gas; simulation software; migration accumulation model; migration accumulation regularity; pool forming type; Jiyang Depression