

文章编号: 1000-0747(2020)05-0000-11 DOI: 10.11698/PED.2020.05.00

# 凝析气藏露点压力计算方法

ALAROUJ Mutlaq, ALOMAIR Osamah, ELSHARKAWY Adel

(科威特大学石油工程系, 萨法特 13060, 科威特)

基金项目: 科威特大学石油流体研究中心 (PFRC) 科研基金 (GE 01/17)

**摘要:** 基于实验测量和文献调研建立了包含 700 多个样本的凝析气藏数据集, 对常用的计算露点压力的经验关系式和状态方程进行了评估, 并新建了一个经验关系式, 对各种关系式及 Peng-Robinson 状态方程进行了对比评估和参数敏感性分析。研究表明, 目前常用的凝析气判别标准不够准确; Peng-Robinson 状态方程不具有唯一解, 受  $C_{7+}$  组分的表征关系式和分割方案等多种因素的影响; 应用于建立的数据集时, Nemeth-Kennedy 关系式准确度最高, 其次为 Elsharkawy 关系式和 Godwin 关系式, Shokir 关系式由于无法用于不含  $C_{7+}$  组分的样本, 准确度最低; 新建关系式的平均绝对误差、均方根误差和决定系数分别为 7.6%, 588 和 0.87, 在统计学意义上优于前人 4 种关系式。通过与实验数据和 Peng-Robinson 状态方程模拟结果进行对比验证了新建关系式的准确性和有效性。图 13 表 16 参 36

**关键词:** 凝析气藏; 露点压力; 经验关系式; 状态方程

中图分类号: TE372 文献标识码: A

## A calculation method of dew-point pressure of gas condensate reservoir

ALAROUJ Mutlaq, ALOMAIR Osamah, ELSHARKAWY Adel

*(Petroleum Engineering Department, College of Engineering & Petroleum, Kuwait University, PO Box 5956, Safat 13060, Kuwait)*

**Abstract:** A large data bank of more than 700 gas-condensate samples covering a wide range of gas compositions, pressures, and temperatures collected from literatures and experiments was established. On this basis, empirical correlations commonly used to calculate dew-point pressure (DDP) and state equation were evaluated, a new model for estimating DPP based on compositional reservoir fluid composition was proposed, all the empirical correlations and Peng-Robinson state equation were compared, and sensitivity of parameters was analyzed. The study shows that the current standard used to identify gas condensate isn't accurate enough; the Peng-Robinson state equation has no unique solution and is affected by multiple factors such as the characterization relation of  $C_{7+}$  components and the splitting scheme; Nemeth-Kennedy correlation has the highest accuracy when applied to the data bank established in this study, followed by Elsharkawy correlation and Godwin correlation, Shokir correlation can't be used to samples without  $C_{7+}$  components and thus is lowest in accuracy. The newly proposed model has an average absolute error, root mean square error and coefficient of determination of 7.5%, 588, and 0.87, respectively, and is better than the above four correlations statistically. The proposed model was proved accurate and valid by comparing its results with experimental data and the results of simulation with Peng-Robinson state equation.

**Key words:** gas condensate reservoir; dew-point pressure; empirical relation; equation of state

引用: ALAROUJ M, ALOMAIR O, ELSHARKAWY A, 等. 凝析气藏露点压力计算方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 1-11.

ALAROUJ M, ALOMAIR O, ELSHARKAWY A, et al. A calculation method of dew-point pressure of gas condensate reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1-11.

## 0 引言

在凝析气藏中,当地层压力下降至低于露点压力时就会出现反凝析现象,形成凝析油并聚集于近井带。聚集的凝析油阻碍天然气的流动,导致天然气的有效渗透率降低。在地层压力低于露点压力的情况下,天然气的产量会迅速下降<sup>[1]</sup>。同时,储集层中仍存在大量凝析油,难以开采。因此,准确计算露点压力对于凝

析气藏的高效开发十分重要。

开展等组分膨胀实验测量凝析气藏露点压力,可以得到最准确的值。但实验花费高、耗时长,实验效果取决于是否有足够的样本,并且在对采自分离器的油、气样本进行重组时容易出现人为失误。因此,需要寻找一个简单、准确的露点压力计算方法。前人曾提出过一些数学模型,用于在无法获取可靠样本或难以进行压力-体积-温度(PVT)实验时进行露点压力预

测<sup>[1-2]</sup>，主要包括状态方程和经验关系式。为将状态方程应用于凝析气藏流体特性表征，前人进行了大量研究<sup>[3-7]</sup>。其中 Peng-Robinson 状态方程(简称 PR 状态方程)<sup>[5]</sup>以及 Soave 状态方程<sup>[7]</sup>被认为是最可靠的计算储集层流体性质的方法<sup>[8-9]</sup>。由于受到选用的状态方程、“+”馏分的分割方案、“+”馏分的表征方法以及二元相互作用系数等多种因素的影响，使用状态方程预测出的露点压力值并不唯一<sup>[1]</sup>。经验关系式的应用受限于建立关系式时所使用的数据范围。两种常用的经验关系式中，一种取决于 C<sub>7+</sub>馏分的组分和性质，另一种则依赖生产数据。第 1 种关系式中，露点压力为流体组分和地层温度的函数<sup>[1, 10-15]</sup>，而在第 2 种关系式中，露点压力为生产数据和地层温度的函数<sup>[16-20]</sup>。

本文对前人多种凝析气藏露点压力计算方法的精度和适用范围进行了评估，并建立了一个新的露点压力计算模型，将新建模型与前人关系式和状态方程进行对比。

## 1 方法和数据

### 1.1 工作流程

本文收集了大量不同来源的数据，建立了一个大

型数据库。在此基础上，对状态方程和前人经验关系式进行评估，还提出了一种新的关系式，用于在缺乏可靠样本或实验工作无法进行的情况下估算露点压力。

### 1.2 样本露点压力的实验室测定

本文用科威特大学石油流体研究中心的全自动无汞 PVT 细胞液评价分析仪(VINCI)对 6 个凝析气样本的露点压力进行了测定，这些样本部分在井底采集，部分在地面分离器采集。利用恒组分膨胀(即恒重衰竭(CMD))测试和零压闪蒸法测定井底样本的露点压力、初始组分和气油比。根据初始气油比对采自分离器的油、气样本进行重组，并与井底样本进行组分核对。使用 Macro 软件进行 CMD 测试，在地层温度下，将压力调整至初始地层压力。随后逐渐降低压力，直到反凝析液形成，此时测定露点压力。利用气相色谱仪(Agilent 7890B)测定用于重组的采自分离器的油、气样本的组分，并结合现场的气油比，计算储集层流体组分。并筒流体组分及其摩尔分数、C<sub>7+</sub>相对分子质量、C<sub>7+</sub>相对密度和露点压力的测定结果如表 1 所示。

表 1 6 个凝析气样本的实验室测定数据

样本 编号	各组分摩尔分数/%										储集层 温度/℃	C <sub>7+</sub> 相对 分子质量	C <sub>7+</sub> 相对 密度	露点压力/ MPa
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7+</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S				
a	73.40	9.40	3.72	1.92	0.85	0.84	1.62	0.80	7.44	0	137	147.55	0.765 87	31.7
b	69.05	6.36	6.22	4.41	1.90	2.47	8.32	0.27	1.00	0	113	142.84	0.757 90	37.3
c	87.10	6.52	2.02	1.09	0.48	0.46	1.23	0.51	0.59	0	99	128.90	0.768 58	23.8
d	70.89	7.71	4.32	3.35	2.96	4.81	4.92	0.59	0.45	0	80	118.61	0.762 28	18.3
e	71.45	10.85	5.07	2.59	1.35	1.37	3.29	0.17	3.67	0	154	135.58	0.768 10	42.9
f	78.00	8.69	5.42	2.88	1.13	0.93	1.47	1.12	0.36	0	81	126.76	0.763 10	13.9

## 2 数据采集与筛选

本文数据主要来自于文献。从前人的研究中一共收集到了 925 个样本，包括 Nemeth 和 Kennedy<sup>[13]</sup>的 579 个样本和 Elsharkawy<sup>[1]</sup>的 340 个样本。另外，笔者在科威特大学石油流体研究中心对 6 个样本进行了实验测量。对采集的数据进行筛选，去除重复和有缺陷的样本。在筛选过程中需要注意检查样本的摩尔分数总和(应为 1)、相对分子质量、C<sub>7+</sub>摩尔分数和 C<sub>1</sub>摩尔分数。

### 2.1 凝析气判别

对于凝析气的判别，目前还没有达成共识。McCain<sup>[21]</sup>、Danesh<sup>[22]</sup>、Lake 和 Holstein<sup>[23]</sup>、Beggs<sup>[24]</sup>以及 Ahmed<sup>[25]</sup>提出了不同的凝析气判别标准，如表 2、表 3 所示。

从表 2 可以看出，不同学者提出的判别标准中，气油比和相对密度有明显差异。而根据 Lake 和

表 2 基于气油比、API 度、C<sub>7+</sub>摩尔分数的凝析气判别标准

作者	GOR/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	相对密度	C <sub>7+</sub> 摩尔分数/%
McCain <sup>[21]</sup>	587~8 900	0.739~0.825	<12.5
Danesh <sup>[22]</sup>	570~8 900	0.739~0.825	<12.5 (特殊情况下, >15.5%)
Beggs <sup>[24]</sup>	1 068~2 670 (特殊情况下, <356)		
Ahmed <sup>[25]</sup>	1 424~12 469	>0.780	<12.5 (特殊情况下, >12.0%)

表 3 基于相对分子质量和 C<sub>7+</sub>摩尔分数的流体判别标准<sup>[23]</sup>

判别标准	初始相对分子质量	C <sub>7+</sub> 摩尔分数/%
重油和焦油	>210	>50
黑油	70~210	35~50
挥发油	40~70	10~30
凝析气	23~40	1~6
湿气和干气	<23	0~1

Holstein<sup>[23]</sup>提出的基于组分和相对分子质量的判别方案(见表 3)，表 2 中的判别标准可能会将其他类型储集层流体错误地判定为凝析气。需要指出的是，大多

数已发表文献数据中没有气油比和相对密度数据。

## 2.2 重复及错误样本剔除

首先，剔除重复的样本，然后，剔除摩尔分数总和不等1的样本。这些异常的样本可能是前人测量错误或输入错误导致的。

## 2.3 相对分子质量检查

根据表3，典型凝析气相对分子质量在23~40。使用PVTi软件绘制每个样本的相包络线，发现相对分

子质量大于40的样本都表现出挥发油特征，所以被剔除。然后，逐个检查相对分子质量小于40的样本的相包络线，发现相对分子质量在35~40的样本有的表现出凝析气特征，有的表现出挥发油特征。因此，对于相对分子质量在23~40的样本，如果其相包络线表现出挥发油特征，也应该被剔除。随后用相同的方法检查相对分子质量小于23的样本。按相对分子质量标准及相包络线筛选样本的过程如表4和图1所示。

表4 按相对分子质量标准筛选样本示例

样本编号	储集层温度/℃	各组分摩尔分数/%										相对分子质量	流体类型
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7+</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S		
1	138	55.8	9.3	5.9	3.7	2.6	2.2	17.2	0.5	2.8	0	54	挥发油
2 <sup>[13]</sup>	87	58.5	13.4	7.3	4.0	2.0	1.6	11.9	0.4	0.9	0	42	挥发油
3 <sup>[13]</sup>	140	39.7	9.4	6.6	6.3	4.2	3.4	8.9	10.9	5.1	5.5	39	凝析气
4 <sup>[13]</sup>	96	60.0	14.5	7.6	4.0	2.2	1.4	9.4	0.6	0.3	0	37	挥发油
5	139	68.6	7.3	4.0	2.4	1.5	1.3	8.6	0.9	5.4	0	35	凝析气
6 <sup>[13]</sup>	112	96.7	1.2	0.3	0.2	0.3	0.1	0.6	0	0.6	0	18	凝析气
7 <sup>[13]</sup>	119	95.4	0.8	0.5	0.4	0.2	0.1	1.0	0.3	1.3	0	18	湿气

## 2.4 C<sub>7+</sub>摩尔分数检查

在根据相对分子质量对样本进行筛选、过滤后，再根据C<sub>7+</sub>摩尔分数对样本进行过滤。根据表3，凝析气的C<sub>7+</sub>摩尔分数在1%~6%，而挥发油的C<sub>7+</sub>摩尔分数在10%~30%。而根据表2，凝析气的C<sub>7+</sub>摩尔分数通常小于12.5%，特殊情况下可达15%。由于C<sub>7+</sub>摩尔分数大于11%的样本的相包络线均表现出挥发油的特征，所以被剔除。C<sub>7+</sub>摩尔分数在6%~11%的样本的相包络线有的表现出凝析气特征，有的表现出挥发油特征。当C<sub>7+</sub>摩尔分数小于1%时，大多数样本表现出凝析气的特征，仅有少数样本表现出湿气的特征。例如，样本9的C<sub>7+</sub>摩尔分数为0.4%，在给定的储集层温度下相包络线表现出湿气特征，而样本10中C<sub>7+</sub>摩尔分数为零，其相包络线仍表现出凝析气特征。剔除相包络线不具有凝析气特征的样本。按C<sub>7+</sub>摩尔分数标准及相包络线筛选样本的过程如表5和图2所示。

## 2.5 C<sub>1</sub>摩尔分数检查

最后，根据C<sub>1</sub>摩尔分数对样本进行筛选。气体样本的C<sub>1</sub>含量通常较高，因此，检查C<sub>1</sub>摩尔分数大于90%的样本的相包络线。例如，样本11的C<sub>1</sub>摩尔分数和C<sub>7+</sub>摩尔分数分别为94.5%和1.6%（见表6），储集层温度为104℃，高于临界凝析温度（49℃），该样本相包络线呈现出湿气的特征（见图3）；样本7相包络线亦呈现出湿气的特征。然而，C<sub>1</sub>摩尔分数较低的样本也可表现出凝析气的相态特征。例如，样本10的C<sub>1</sub>摩尔分数为58.3%，C<sub>7+</sub>摩尔分数为零，其相包络线仍具凝析气的特征（见图2c）。

应用上述方法对数据进行筛选、过滤后，样本个数从925个缩减到715个。对715个样本进行了统计分析（见表7）。样本筛选结果表明表2和表3中的数值范围并不一定准确。因此，本文认为储集层流体的分类不应该依据气油比和相对密度等生产数据，也不应该依据C<sub>7+</sub>摩尔分数，而应该依据流体的相包络线。

## 3 前人经验关系式和状态方程评估

本文对以组分数为输入项的经验关系式和未修正的PR状态方程进行评估。常用的此类经验关系式有Elsharkawy关系式<sup>[1]</sup>，Godwin关系式<sup>[11]</sup>，Nemeth-Kennedy关系式<sup>[13]</sup>以及Shokir关系式<sup>[26]</sup>。这些关系式都将C<sub>7+</sub>组分归为一组（即集总C<sub>7+</sub>），所以将这些关系式与未修正的状态方程进行对比具有合理性。

### 3.1 前人经验关系式和状态方程的准确度统计评估

利用平均绝对误差(AAE)、平均相对误差(ARE)、均方根误差(RMSE)和决定系数(R<sup>2</sup>)等对上述关系式和未修正的PR状态方程进行统计评估<sup>[5]</sup>。结果如表8所示，可以看出，在本次评估的所有经验关系式中，Nemeth-Kennedy关系式的准确度最高。这个结论在意料之中，因为本文使用的大部分数据是建立Nemeth-Kennedy关系式时使用的数据。一般来说，Nemeth-Kennedy关系式应适用于输入参数的整个范围。但是，对于一些中间组分（C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>和C<sub>5</sub>）摩尔分数较小的样本，Nemeth-Kennedy关系式预测出的露点压力偏低。样本的中间组分摩尔分数较小则C<sub>1</sub>或非烃组分摩尔分数较大。从统计学的观点看，Elsharkawy关系式

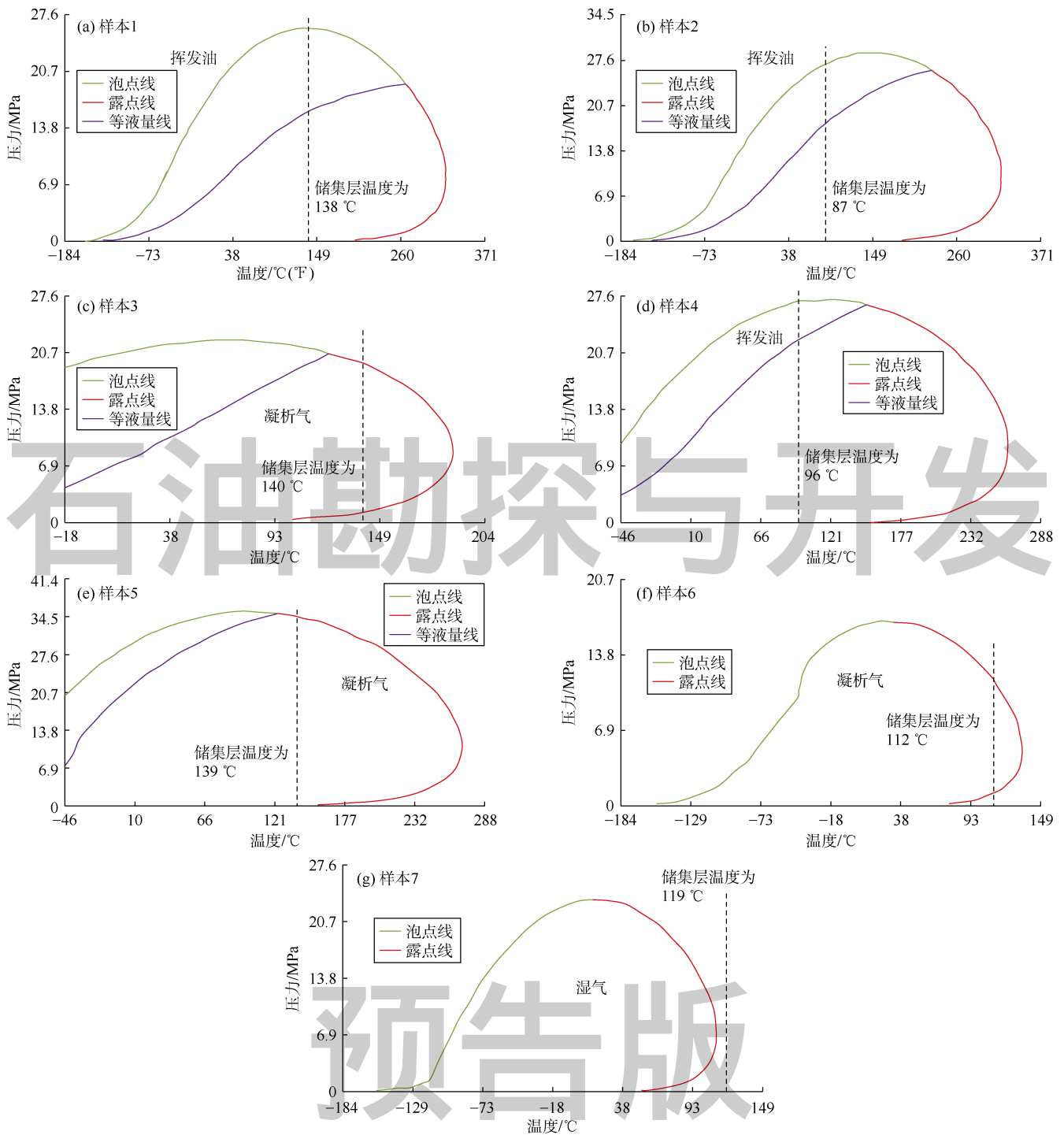


图1 根据相对分子质量筛选的样本的相包络线示例

表5 按 C<sub>7+</sub> 摩尔分数标准筛选样本示例

样本编号	储集层温度/°C	各组分摩尔分数/%										相对分子质量	流体类型
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7+</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S		
8	121	63.4	4.6	3.2	3.8	3.7	4.5	14.5	1.5	0.8	0	43	挥发油
9	169	79.1	1.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.4	11.6	6.5	0.1	20	湿气
10 <sup>[13]</sup>	82	58.3	2.7	1	37.4	0	0	0	0.3	0.3	0	32	凝析气

的准确度位列第2,除 C<sub>1</sub> 摩尔分数极大和极小以及 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 摩尔分数较大的样本外,它能很好地预测大部分样本的露点压力。Godwin 关系式的准确度位列第3,

但对于 C<sub>1</sub> 摩尔分数极小和不含 C<sub>7+</sub> 组分的样本,它估算出的露点压力值会偏低。此外,对于非烃和(或)中间组分摩尔分数较大(同时 C<sub>1</sub> 含量相对较低)的样

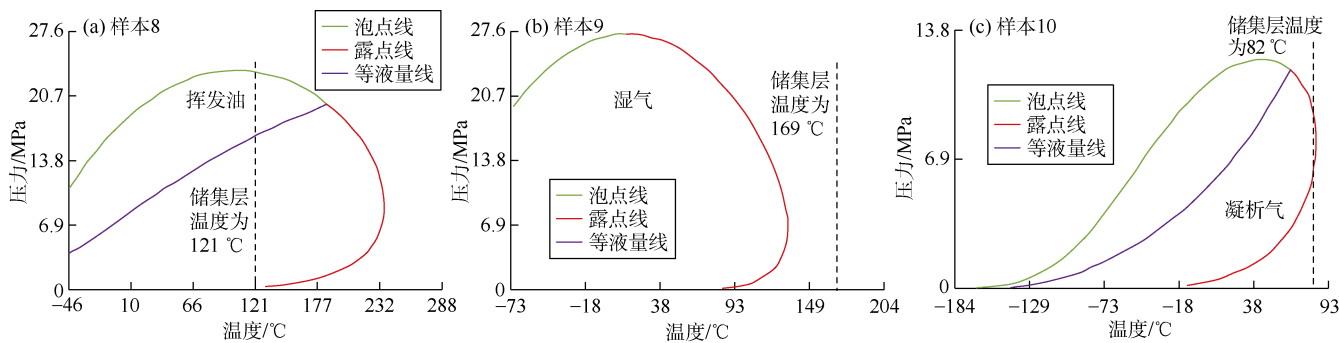


图2 根据 C<sub>7+</sub> 摩尔分数筛选样本的相包络线示例

表6 按 C<sub>1</sub> 摩尔分数标准筛选样本示例

样本编号	储集层温度/°C	各组分摩尔分数/%										相对分子质量	流体类型
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7+</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S		
7 <sup>[13]</sup>	119	95.4	0.3	0.5	0.4	0.2	0.1	1.1	0.3	1.3	0	18	湿气
11	104	94.5	1.7	0.9	0.6	0.3	0.3	1.6	0	0.1	0	20	湿气

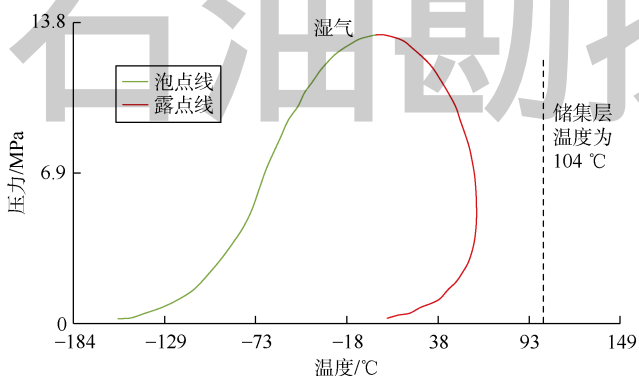


图3 样本11的相包络线

非常不可靠，预测结果无效。本文认为 Shokir 关系式误差较大是因为它不能预测不含 C<sub>7+</sub> 组分的样本的露点压力。对于这类不含 C<sub>7+</sub> 组分的样本，Shokir 关系式计算出的露点压力为负值，与实际不符。除了这 4 种关系式之外，还基于 PVTi 软件利用 PR 状态方程估算露点压力，求解 PR 状态方程时使用的分割方案为集总 C<sub>7+</sub>，使用的临界压力和温度关系式以及偏差因子关系式均为 Kesler-Lee 关系式。从表 8 可以看出，对于本文使用的数据，Nemeth-Kennedy 关系式和 Elsharkawy 关系式比 PR 状态方程的准确度更高。表 8 所示的 6 个统计指标中，平均绝对误差是判断每种方法准确度最有力的指标。

本，Godwin 关系式预测的露点压力误差较大。Shokir 关系式的准确度最差。负的 R<sup>2</sup> 值代表模型的预测结果

表7 本文使用的数据集的统计分析

指标	储集层温度/°C	各组分摩尔分数/%										C <sub>7+</sub> 相对分子质量	C <sub>7+</sub> 相对密度	露点压力/MPa
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7+</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S			
最大值	164	96.6	14.8	12.3	37.5	13.5	6.1	10.8	43.2	16.2	29.9	253.0	0.93	81.6
最小值	4	33.3	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.8
平均值	96	80.2	5.8	2.9	2.3	1.2	0.9	3.6	1.1	1.3	0.6	142.7	0.70	32.4

表8 前人经验关系式与 PR 状态方程的统计评估结果

计算方法	平均绝对误差/%	最大绝对误差/%	最小绝对误差/%	平均相对误差/%	均方根误差	决定系数
Nemeth-Kennedy 关系式	8.79	55	0.03	-4.88	666	0.83
Elsharkawy 关系式	12.53	115	0.00	6.07	791	0.77
Shokir 关系式	27.84	1421	0.02	-3.12	2270	-0.92
Godwin 关系式	19.61	96	0.05	19.61	1100	0.55
PR 状态方程	20.76	80	0.13	19.81	1416	0.26

### 3.2 状态方程应用分析

已有研究表明，状态方程计算的露点压力值并不唯一，与拟组分的数量和划分方式等因素有关。本文将三参数 PR 状态方程应用于样本 12，对此进行分析。可变参数是 C<sub>7+</sub> 组分的表征关系式和分割方案（见表

9），而二元相互作用系数保持不变。除了集总 C<sub>7+</sub> 之外，每种分割方案都考虑在 C<sub>7+</sub> 组分中分割出 C<sub>12+</sub> 组分和 C<sub>16+</sub> 组分这两种情况。用 PVTi 软件运行三参数 PR 状态方程，并考虑软件内置的“+”馏分的表征关系式。样本 12 中 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>5</sub>、C<sub>6</sub>、C<sub>7+</sub>、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、

表9 C<sub>7+</sub>组分的分割方案和表征关系式

分割方案	临界压力和温度关系式	偏差因子关系式
集总 C <sub>7+</sub>	Kesler-Lee 关系式 <sup>[31]</sup>	Kesler-Lee 关系式 <sup>[31]</sup>
Katz 法 <sup>[27]</sup>	Riazi-Daubert 关系式 <sup>[32]</sup>	Pedersen 关系式 <sup>[29]</sup>
Lohrenz 法 <sup>[28]</sup>	Cavett 关系式 <sup>[33]</sup>	Thomassen 关系式 <sup>[35]</sup>
Pedersen 法 <sup>[29]</sup>	Winn 关系式 <sup>[34]</sup>	Edmister 关系式 <sup>[36]</sup>
Ahmed 法 <sup>[30]</sup>	Pedersen 关系式 <sup>[29]</sup>	

H<sub>2</sub>S 的摩尔分数分别为 81.3%，4.8%，2.3%，1.7%，1.3%，1.4%，4.3%，1.9%，1.1%和 0。样本 12 的 C<sub>7+</sub> 相对密度为 0.74，C<sub>7+</sub> 相对分子质量为 139.9，储集层温度为 54 °C，露点压力为 27.0 MPa。

通过改变 C<sub>7+</sub> 组分的表征关系式和分割方案，总共得出 126 个可能的组合，计算出了 126 个露点压力值（见图 4）。每个组合设置 1 个编号。例如，组合 25 是指使用的分割方案为 Katz 法且分割出 C<sub>12+</sub> 组分，使用的临界压力和温度关系式为 Winn 关系式，使用的偏差因子关系式为 Edmister 关系式；组合 121 是指使用的分割方案为 Ahmed 法且分割出 C<sub>16+</sub> 组分，使用的临界压力和温度关系式为 Riazi-Daubert 关系式，使用的偏差因子关系式为 Pedersen 关系式。由图 4 可知，状态方程不具有唯一解，在本算例中有 126 个计算结果。如果再改变二元相互作用系数就更加复杂。此外，为某一调整匹配的状态方程也很复杂、耗时，且计算结果不一定准确。

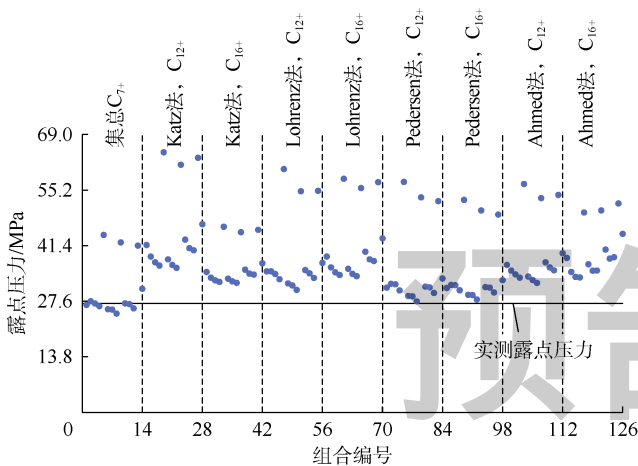


图4 状态方程的计算结果

## 4 新经验关系式建立

首先，通过重新拟合参数对前人经验关系式进行改进。然后，建立一个新的估算凝析气藏露点压力的经验关系式。

### 4.1 前人关系式的改进

Nemeth-Kennedy、Elsharkawy、Shokir 和 Godwin

等关系式中含有多个常系数，这些常系数是根据建立每个关系式时使用的数据库推导出来的。利用本文采集的数据库，通过修改系数、最小化误差来对这 4 种关系式进行改进。

表 10 对比了各关系式改进前与改进后的准确度。改进后的 Nemeth-Kennedy 关系式的准确度提升程度最小，这是因为本文使用的大部分数据是建立 Nemeth-Kennedy 关系式时使用的数据库。改进后的 Elsharkawy 关系式的准确度稍有提升，因为本文使用的部分数据是建立 Elsharkawy 关系式时使用的数据库。Shokir 和 Godwin 关系式经改进后准确度得到了显著提升。

表10 改进前和改进后各关系式的统计参数

关系式	平均绝对误差/%	最大绝对误差/%	均方根误差	决定系数
Nemeth-Kennedy (改进前)	8.79	55	666	0.83
Nemeth-Kennedy (改进后)	7.95	54	611	0.86
Elsharkawy (改进前)	12.53	115	791	0.77
Elsharkawy (改进后)	9.62	83	677	0.83
Shokir (改进前)	27.84	1 421	2 271	-0.92
Shokir (改进后)	14.41	242	890	0.71
Godwin (改进前)	19.61	96	1 100	0.55
Godwin (改进后)	10.75	85	763	0.78

### 4.2 新关系式的建立

首先，对输入和输出参数进行分析，以明确参数间的关系以及对这些参数进行分组的可行性。露点压力与各参数之间的相关系数如表 11 所示。可以看出，露点压力随中间组分摩尔分数的增加而下降，但与 C<sub>7+</sub> 摩尔分数、C<sub>7+</sub> 相对分子质量、C<sub>7+</sub> 相对密度之间呈正相关；与其他参数相比，非烃组分含量的影响较小。这与 Elsharkawy<sup>[1]</sup>和 Shokir<sup>[33]</sup>的观点一致。表 11 中体现的露点压力与 C<sub>1</sub> 摩尔分数的相关性也与 Shokir 关系式相符。

表11 露点压力与各参数之间的相关系数

参数	与露点压力间的相关系数	参数	与露点压力间的相关系数
储集层温度	0.483	C <sub>7+</sub> 摩尔分数	0.283
C <sub>1</sub> 摩尔分数	0.229	N <sub>2</sub> 摩尔分数	-0.124
C <sub>2</sub> 摩尔分数	-0.115	CO <sub>2</sub> 摩尔分数	0.006
C <sub>3</sub> 摩尔分数	-0.195	H <sub>2</sub> S 摩尔分数	-0.105
C <sub>4</sub> 摩尔分数	-0.275	C <sub>7+</sub> 相对密度	0.423
C <sub>5</sub> 摩尔分数	-0.310	C <sub>7+</sub> 相对分子质量	0.776
C <sub>6</sub> 摩尔分数	-0.264		

根据表 11，C<sub>2</sub>—C<sub>6</sub> 摩尔分数均与露点压力呈负相关，因此将 C<sub>2</sub>—C<sub>6</sub> 组分分为一组。将表 11 所示的相关性转化为数学式（见（1）式），该式是一个简单的线性方程，可通过多元线性回归求解。

$$p_d = A_1 + A_2T + A_3F_{C_1} + A_4(F_{C_2} + F_{C_3} + F_{C_4} + F_{C_5} + F_{C_6}) + A_5F_{C_{7+}} + A_6G_{C_{7+}} + A_7M_{C_{7+}} + A_8F_{CO_2} + A_9F_{H_2S} + A_{10}F_{N_2} \quad (1)$$

通过改变组分分组和（或）添加新参数对（1）式进行调整，得到最终关系式，如（2）式所示。

$$p_d = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5) / 145.038 \quad (2)$$

其中

$$I_1 = B_1 + B_2(1.8T + 32)$$

$$I_2 = B_3F_{C_1} + B_4(F_{C_2} + F_{C_3}) + B_5F_{C_4} + B_6(F_{C_5} + F_{C_6})$$

$$I_3 = B_7F_{CO_2} + B_8F_{H_2S} + B_9F_{N_2}$$

$$I_4 = B_{10}(\gamma_{C_{7+}} M_{C_{7+}}) + B_{11}(F_{C_{7+}} \gamma_{C_{7+}} M_{C_{7+}}) + B_{12} \frac{M_{C_{7+}}}{\gamma_{C_{7+}} + 0.00001} + B_{13} \left( \frac{M_{C_{7+}}}{\gamma_{C_{7+}} + 0.00001} \right)^2$$

$$I_5 = B_{14} \frac{F_{C_1}}{F_{C_{7+}} + 0.00001} + B_{15} \frac{F_{C_1}}{I_2 - B_3 F_{C_1}} + B_{16} \frac{M_{C_{7+}}}{F_{C_2} + F_{C_3} + F_{C_5} + F_{C_6}}$$

由图 5 可知，除了一些分散的异常点以外，误差总体上随着相对分子质量的增加而减小；相对分子质量小于 25 以及相对分子质量大于 30 的样本误差分散程度较高。因此，将数据集按照相对分子质量小于 25、相

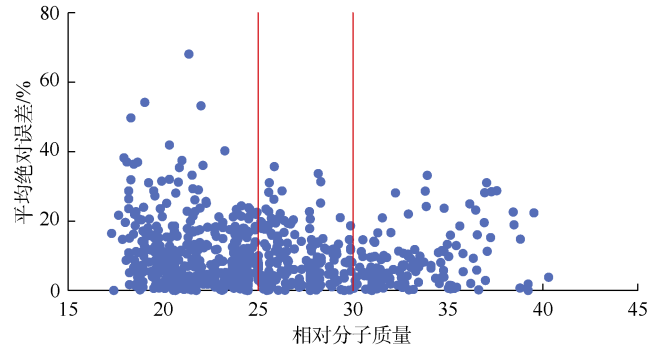


图 5 数据集分组前新关系式平均绝对误差-相对分子质量散点图

对分子质量在 25~30、相对分子质量大于 30 分为 3 组。由表 12 和图 6 可知，将数据集分为 3 组后新建关系式的准确度显著提高。数据集分组后，平均绝对误差从 10.03% 降低到 7.58%，均方根误差从 705 降低到 588，决定系数从 0.81 提高到 0.87。数据集分组后关系式的结构与（2）式相同，只是重新拟合了系数（见表 13）。

表 12 数据集分组前后新建关系式的统计参数

条件	平均绝对误差/%	最大绝对误差/%	最小绝对误差/%	平均相对误差/%	均方根误差	决定系数
分组前	10.03	68.06	0	-0.62	705	0.81
分组后	7.58	48.9	0	-1.31	588	0.87

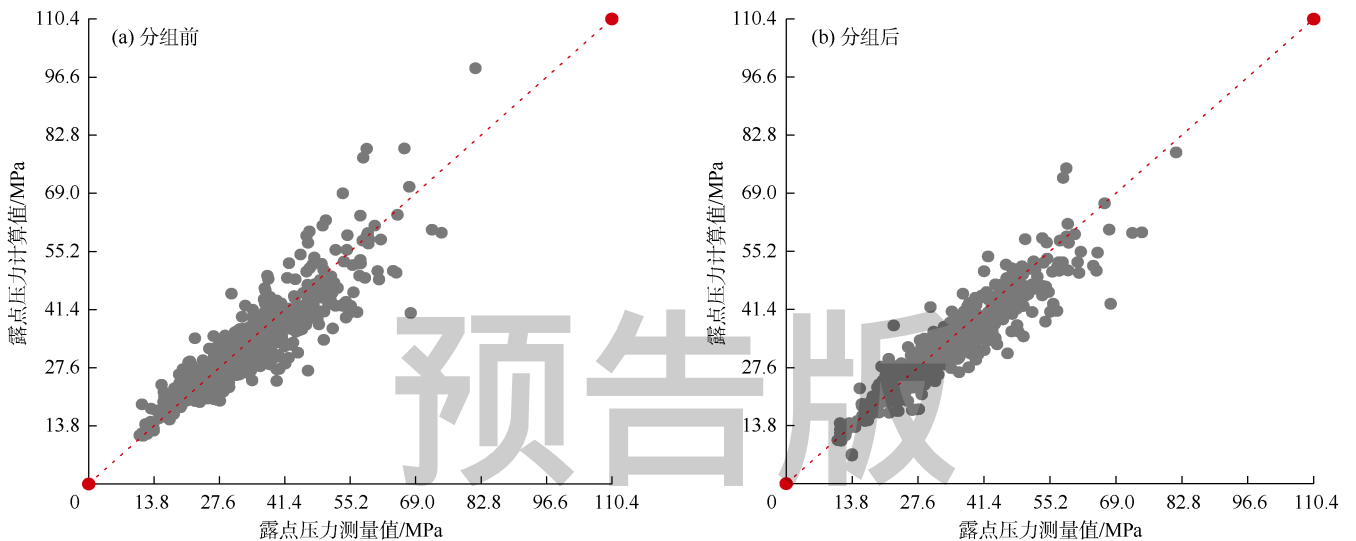


图 6 数据集分组前后露点压力计算值与测量值的交会图

## 5 新建关系式与前人关系式对比

### 5.1 统计对比

将表 10 中前人 4 个关系式的统计参数与表 12 中数据集分组后新建关系式的统计参数进行对比可知，新建关系式的准确度最高。通过绘制露点压力计算值与测量值交会图（见图 7）也可以发现，新建关系式的

计算值与实验测量值吻合度最高。

由于新建关系式根据相对分子质量将数据集分为了 3 组，因此有必要针对每组数据进行新建关系式与前人关系式的统计对比。由表 14 可知，对于第 1 组数据（相对分子质量小于 25），新建关系式的平均绝对误差最低，决定系数最高；对于第 2 组数据（相对分子质量在 25~30），新建关系式的平均绝对误差最低，而

表 13 数据集分组后根据各组数据拟合的新建关系式的系数

系数	系数拟合值		
	相对分子质量 小于 25	相对分子质量 在 25~30	相对分子质量 大于 30
B1	2 089.21	-1 693.97	-898.81
B2	-0.295 4	0.603 4	0.301 3
B3	2 402.75	6 190.56	4 822.22
B4	-407.29	-242.33	-1.43
B5	-26 905.44	1 913.25	-2.26
B6	-2 451.66	6 851.58	-6.71
B7	-607.18	-4 593.62	4 046.66
B8	-2 020.02	2 385.59	3 683.02
B9	2 443.30	10 489.60	7 935.42
B10	79.41	84.71	63.82
B11	428.70	87.66	43.70
B12	-74.98	-77.91	-54.22
B13	0.136 6	0.149 0	0.099 1
B14	-0.014 5	-0.021 5	-0.017 3
B15	206 236.66	95 999.67	-857.83
B16	0.242 8	-0.029 3	-0.766 5

Nemeth-Kennedy 关系式的决定系数最高。对于第 3 组数据(相对分子质量大于 30),新建关系式的平均绝对误差最低,决定系数最高。

## 5.2 参数敏感性分析

完成统计评估之后,对前人关系式和新建关系式进行参数敏感性分析,包括温度、 $C_1$ 摩尔分数、 $C_{7+}$ 摩尔分数和  $C_{7+}$ 相对分子质量。

### 5.2.1 对温度的敏感性

本文使用的数据集中,许多样本在不同温度下进行了实验测定。将关系式和未修正的 PR 状态方程应用于这些样本,并对比计算的露点压力与实验测定的露点压力随温度的变化趋势。选用样本 13 和样本 14 来

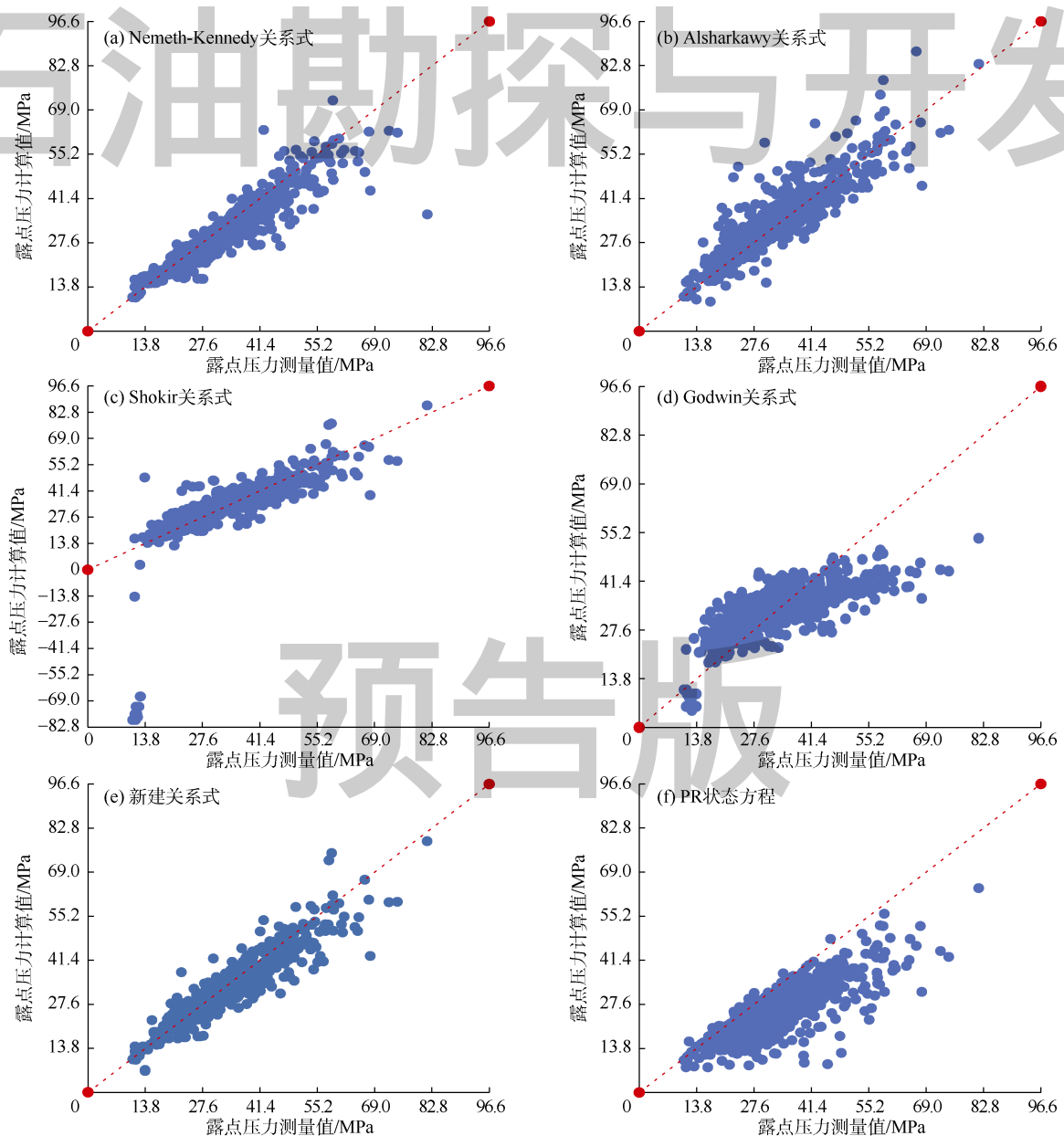


图 7 露点压力计算值与测量值交会图



表 14 数据集分组后新建关系式与前人关系式统计对比

相对分子质量	关系式	平均绝对误差/%	决定系数
<25	Nemeth-Kennedy	9.700	0.810
	Elsharkawy	16.370	0.637
	Shokir	13.605	0.609
	Godwin	20.146	0.514
	新建关系式	8.815	0.847
25~30	Nemeth-Kennedy	8.295	0.890
	Elsharkawy	8.688	0.872
	Shokir	49.812	-2.848
	Godwin	18.858	0.612
	新建关系式	7.209	0.867
>50	Nemeth-Kennedy	6.951	0.782
	Elsharkawy	7.343	0.897
	Shokir	37.055	-1.620
	Godwin	19.180	0.485
	新建关系式	4.769	0.933

说明关系式对温度的敏感性。这两个样本的组成如表 15 所示。

典型的凝析气藏相包络线上，露点压力随着温度的升高而持续升高，在升至临界凝析压力值后开始下降。图 8 中，随着温度的升高，实验测定的露点压力

和未修正的 PR 状态方程计算的露点压力均呈现出明显的下降趋势；新建关系式计算的露点压力略有下降；Nemeth-Kennedy 关系式、Elsharkawy 关系式和 Shokir 关系式计算的露点压力略有升高；Godwin 关系式计算的露点压力显著升高。由此可见，所有的关系式都未能反映露点压力随温度变化的实际趋势。

图 9 中，随着温度的升高，实验测定的露点压力和未修正的 PR 状态方程计算的露点压力先逐渐升高到最大值再开始下降。而所有的关系式都不能反映露点压力随温度变化的实际趋势。因此，不建议使用任何计算露点压力的经验关系式来构建凝析气藏的相包络线。

图 8 和图 9 都显示，新建关系式计算的露点压力随着温度的升高略有下降，这是符合预期的，因为对于某些样本，露点压力与温度可能呈负相关，如 (2) 式和表 13 所示 (B2 为负值)。虽然图中这个下降趋势较微弱，但新建关系式是唯一能反映这一趋势的关系式。

表 15 用于温度敏感性分析的样本

样本编号	各组分摩尔分数/%									C <sub>7+</sub> 相对分子质量	C <sub>7+</sub> 相对密度	相对分子质量	
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7+</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>				H <sub>2</sub> S
13 <sup>[13]</sup>	85.35	4.77	2.39	1.08	0.59	0.46	1.09	4.17	0.10	0	123.0	0.754 9	20.18
14	83.16	4.79	2.22	1.50	1.03	1.06	3.17	1.99	1.08	0	139.9	0.740 0	23.75

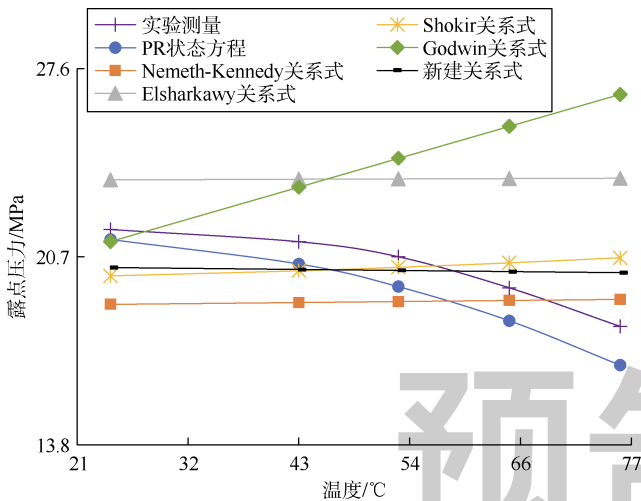


图 8 样本 13 的温度敏感性分析结果

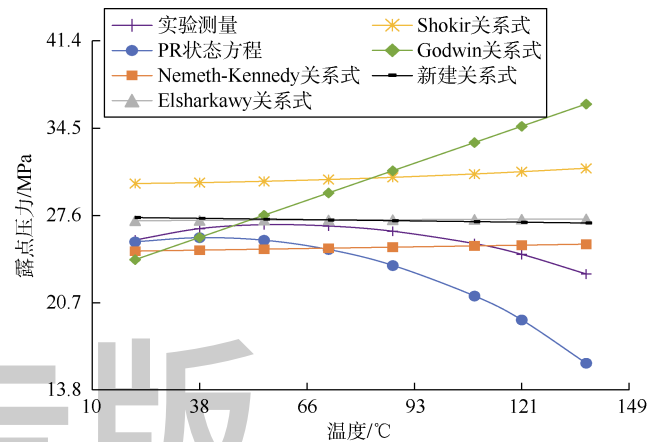


图 9 样本 14 的温度敏感性分析结果

5.2.2 对 C<sub>1</sub> 和 C<sub>7+</sub> 摩尔分数的敏感性

数据集中没有实验数据能够用于分析露点压力对 C<sub>1</sub> 和 C<sub>7+</sub> 摩尔分数的敏感性。本文通过改变 C<sub>1</sub> 与 C<sub>7+</sub> 摩尔分数比值，在原始样本的基础上生成多个合成样本。选择样本 15 来分析关系式对 C<sub>1</sub> 和 C<sub>7+</sub> 摩尔分数的敏感性。表 16 显示了作为原始样本的样本 15 及其合成样本 (样本 15a、15b、15c) 的组成。由于只有原始样本有实验室测定的露点压力值，则将 PR 状态方程预测的露点压力随 C<sub>1</sub> 与 C<sub>7+</sub> 摩尔分数比值的趋势作

为参照。用 PVTi 软件为表 16 中的样本绘了相包络线，这些样本的露点线如图 10 所示。可以看出，储集层温度线与所有样本的露点线相交；随着 C<sub>1</sub> 与 C<sub>7+</sub> 摩尔分数比值的增大，相包络线收缩并向左移动。

图 11 中，随着 C<sub>1</sub> 与 C<sub>7+</sub> 摩尔分数比值的增加，PR 状态方程计算的露点压力下降。Nemeth-Kennedy 关系式、Shokir 关系式和 Godwin 关系式及新建关系式均反映了这种趋势，而 Elsharkawy 关系式则得出相反的趋势。

5.2.3 对 C<sub>7+</sub> 相对分子质量的敏感性

通过改变样本 15 的 C<sub>7+</sub> 相对分子质量 (样本组成

表 16 用于  $C_1$  和  $C_{7+}$  摩尔分数敏感性分析的样本 (标黄的行求和大于 100%)

样本编号	储集层温度/ $^{\circ}C$	各组份摩尔分数/%										$C_{7+}$ 相对密度	$C_{7+}$ 相对分子质量	$C_1$ 与 $C_{7+}$ 摩尔分数比值
		$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_{7+}$	$N_2$	$CO_2$	$H_2S$			
15a	102	84.0	4.8	2.3	1.7	1.3	1.4	1.5	1.9	1.1	0	0.74	139.9	55.336
15b	102	83.0	4.8	2.3	1.7	1.3	1.4	2.5	1.9	1.1	0	0.74	139.9	32.963
15 <sup>[13]</sup>	102	81.2	4.8	2.3	1.7	1.3	1.4	4.3	1.9	1.1	0	0.74	139.9	19.108
15c	102	76.0	4.8	2.3	1.7	1.3	1.4	9.5	1.9	1.1	0	0.74	139.9	7.985

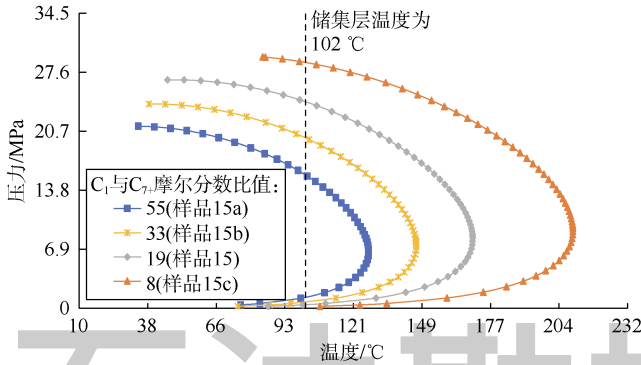


图 10 不同  $C_1$  与  $C_{7+}$  摩尔分数比值样本的露点线

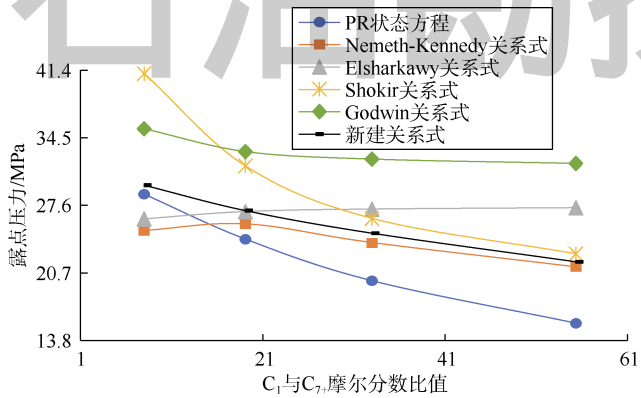


图 11  $C_1$  和  $C_{7+}$  摩尔分数敏感性分析结果

不变)生成 5 个合成样本,各样本的露点线如图 12 所示。可以看出,随着  $C_{7+}$  相对分子质量的增加,相包络线逐渐扩张并向右移动。

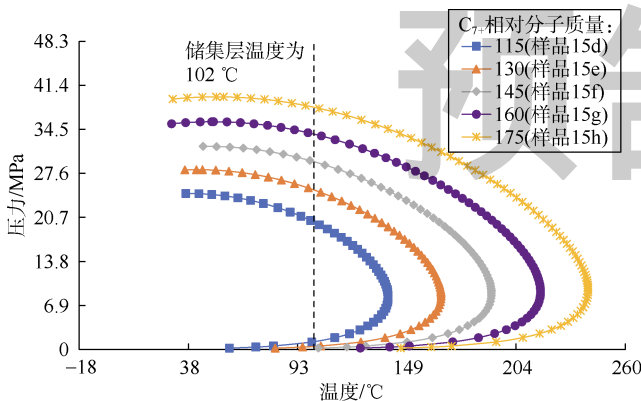


图 12 不同  $C_{7+}$  相对分子质量样本的露点线

图 13 中,前人 4 种关系式、新建关系式和状态方程计算的露点压力均随着  $C_{7+}$  相对分子质量的增加呈上升趋势。

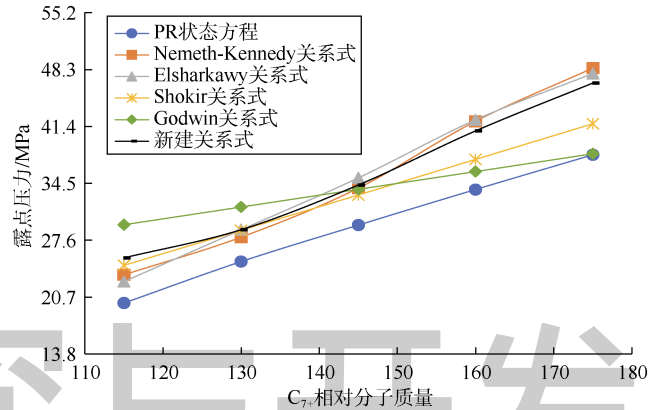


图 13  $C_{7+}$  相对分子质量敏感性分析结果

## 6 结论

通过对实验测定和来自文献的凝析气藏数据样本进行深入过滤和筛选,去除了有缺陷和不可靠的样本。筛选过程中发现基于相对分子质量和  $C_{7+}$  组分含量的凝析气藏判别标准不准确。将 Nemeth-Kennedy, Elsharkawy, Shokir 和 Godwin 这 4 个经验关系式及未修正的 Peng-Robinson 状态方程应用于过滤后的数据集,发现 Nemeth-Kennedy 关系式准确度最高,其次为 Elsharkawy 关系式和 Godwin 关系式,Shokir 关系式由于无法用于不含  $C_{7+}$  组分的样本,准确度最低;状态方程不具有唯一解,且计算结果不一定准确。对前人 4 种关系式进行了改进,并基于收集到的大型数据库新建了一个经验关系式。新建关系式在统计学意义上优于前人 4 种关系式。

参数敏感性分析结果表明,Peng-Robinson 状态方程能反映露点压力随储集层温度的实际变化趋势,而所有关系式都不能;Peng-Robinson 状态方程、Nemeth-Kennedy 关系式、Shokir 关系式和 Godwin 关系式及新建关系式均能反映露点压力随着  $C_1$  与  $C_{7+}$  摩尔分数比值的增加而下降的趋势,而 Elsharkawy 关系式不能;Peng-Robinson 状态方程和所有关系式均能反映露点压力随着  $C_{7+}$  相对分子质量增加而上升的趋势。

符号注释:

$A_1-A_{10}, B_1-B_{16}$ ——系数; $F_{C_1}-F_{C_6}$ —— $C_1-C_6$  的摩尔分数,%; $F_{C_{7+}}$ —— $C_{7+}$  的摩尔分数,%; $F_{CO_2}$ —— $CO_2$  的摩尔

分数, %;  $F_{H_2S}$ — $H_2S$  的摩尔分数, %;  $F_{N_2}$ — $N_2$  的摩尔分数, %;  $M_{C_{7+}}$ — $C_{7+}$  的相对分子质量;  $p_d$ —露点压力, MPa;  $T$ —温度,  $^{\circ}C$ ;  $\gamma_{C_{7+}}$ — $C_{7+}$  的相对密度。

#### 参考文献:

- [1] ELSHARKAWY A. Predicting the dew point pressure for gas condensate reservoirs: Empirical models and equations of state[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2002, 193(1/2): 147-165.
- [2] ELSHARKAWY A M, FODA S G. EOS simulation and GRNN modeling of the constant volume depletion behavior of gas condensate reservoirs[J]. *Energy Fuels*, 1998, 12(2): 353-364.
- [3] ESMAELZADEH F, ROSHANFEKR M. A new cubic equation of state for reservoir fluids[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2006, 239(1): 83-90.
- [4] PATEL N C, TEJA A S. A new cubic equation of state for fluids and fluids mixtures[J]. *Chemical Engineering Science*, 1982, 37(3): 463-473.
- [5] PENG D, ROBINSON D B. A new two constants equation of state[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, 15(1): 59-64.
- [6] REDLICH O, KWONG J N S. On the thermodynamics of solutions. V: An equation of state. Fugacities of gaseous solutions[J]. *Chemical Reviews*, 1949, 44(1): 233-244.
- [7] SOAVE G. Equilibrium constants from a modified Redlich Kwong equation of state[J]. *Chemical Engineering Science*, 1972, 27(6): 1197-1203.
- [8] ASHOUR I, AL-RAWAHI N, FATEMI A, et al. Applications of equations of state in the oil and gas industry[M]//MORENO J C. *Thermodynamics-kinetics of dynamic systems*. London: InTech, 2011.
- [9] BONYADI M, ESMAELZADEH F. Prediction of gas condensate properties by Esmailzadeh-Roshanfekar equation of state[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2007, 260(2): 326-334.
- [10] EILERTS K, SMITH R V. Specific volumes and phase boundary-properties of separator-gas and liquid-hydrocarbon mixtures[R]. BM-RI-3642, 1942.
- [11] GODWIN O N. A new analytical method for predicting dew point pressures for gas condensate reservoirs[R]. SPE 162985, 2012.
- [12] KURATA F, KATZ D L. Critical properties of volatile hydrocarbon mixtures[J]. *Trans. AIChE*, 1942, 38: 995-1021.
- [13] NEMETH L K, KENNEDY H T. A correlation of dewpoint pressures with fluid composition and temperature[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1967, 7(2): 99-104.
- [14] OLDS R H, SAGE B H, LACEY W N. Volumetric and phase behavior of oil and gas from Paloma Field[J]. *Trans. AIME*, 1945, 160(1): 77-99.
- [15] ORGANICK E I, GOLDING B H. Prediction of saturation pressures for condensate-gas and volatile oil mixtures[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1952, 4(5): 135-148.
- [16] HUMOUD A A, AL-MARHOUN M A. A new correlation for gas condensate dew point pressure prediction[R]. SPE 68230, 2001.
- [17] MARRUFFO I, MAITA J, HIM J, et al. Correlations to determine retrograde dew pressure and  $C_{7+}$  percentage of gas condensate reservoirs on basis of production test data of eastern Venezuelan fields[R]. SPE 75686, 2002.
- [18] OLDS R H, SAGE B H, LACEY W N. Volumetric and viscosity studies of oil and gas from a San Joaquin valley Field[J]. *Trans. AIME*, 1949: 179(1): 287-302.
- [19] POTSCH K T, BRAEUER L. A novel graphical method for determining dewpoint pressures of gas condensates[R]. SPE 36919, 1996.
- [20] REAMER H H, SAGE B H. Volumetric behavior of oil and gas from Louisiana Field[J]. *International Journal of Petroleum Technology*, 1950, 2(9): 261-268.
- [21] MCCAIN W. *Properties of petroleum fluids*[M]. Tulsa, Oklahoma: PennWell Publishing Company, 1990.
- [22] DANESH A. *PVT and phase behavior of petroleum reservoir fluids*[M]. London: Elsevier Science B.V., 1998.
- [23] LAKE L W, HOLSTEIN E D. *Petroleum engineering handbook*[M]. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2007.
- [24] BEGGS H D. *Gas production operations*[M]. 5th ed. Tulsa, Oklahoma: Oil and Gas Consultants International, Inc., 2002.
- [25] AHMED T. *Equations of state and PVT analysis: Applications for improved reservoir modeling*[M]. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2016.
- [26] SHOKIR E, EL-M M. Dewpoint pressure model for gas condensate reservoirs based on genetic programming[J]. *Energy Fuels*, 2008, 2(5): 3194-3200.
- [27] KATZ D. Overview of the phase behavior of oil and gas production[R]. SPE 9995-PA, 1983.
- [28] LOHRENZ J, BRAY B G, CLARK C R. Calculating viscosities of reservoir fluids from their compositions[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1964, 16(10): 1171-1176.
- [29] PEDERSEN K, THOMASSEN P, FREDENSLUND A. *Phase equilibria and separation process*[R]. Lyngby, Denmark: Institute for Kemiteknik, Denmark Tekniske Højskole, 1982.
- [30] AHMED T, CADY G, STORY A. A generalized correlation for characterizing the hydrocarbon heavy fraction[R]. SPE 14266, 1985.
- [31] KESLER M G, LEE B I. Improved prediction of enthalpy of fractions[J]. *Hydrocarbon Processing*, 1976, 55(3): 153-158.
- [32] RIAZI M R, DAUBERT T E. Characterization parameters for petroleum fractions[J]. *Industrial and Engineering Chemical Research*, 1987, 26(4): 755-759.
- [33] CAVETT R H. *Physical data for distillation correlations: Vapor-liquid equilibrium*[C]//*Proceedings of the 27th Meeting*. San Francisco, CA: API, 1962.
- [34] WINN F W. Simplified monographic presentation, characterization of petroleum fractions[J]. *Petroleum Refiner*, 1957, 36: 157.
- [35] THOMASSEN P, PEDERSEN K S, FREDENSLUND A. Adjustments of  $C_{7+}$  molecular weights in the characterization of petroleum mixtures containing heavy hydrocarbons[R]. SPE 8617, 1986.
- [36] EDMISTER W C. *Applied hydrocarbon thermodynamics. Part 4. Compressibility factors and equations of state*[J]. *Petroleum Refiner*, 1958, 37: 173-179.

第一作者简介: ALAROUJ Mutlaq (1989-), 男, 科威特人, 博士, 科威特石油公司工程师, 主要从事油藏工程和遥感技术等方面的研究。地址: Petroleum Engineering Department, College of Engineering & Petroleum, Kuwait University, PO Box 5956, Safat 13060, Kuwait, E-mail: mutlaalaroj@gmail.com

联系作者简介: ALOMAIR Osamah (1971-), 男, 科威特人, 博士, 科威特大学石油工程系副教授, 主要从事提高采收率和油气藏工程等方面的研究工作。地址: Petroleum Engineering Department, College of Engineering & Petroleum, Kuwait University, PO Box 5956, Safat 13060, Kuwait. E-mail: dr.alomair@ku.edu.kw

收稿日期: 2020-03-04 修回日期: 2020-08-03

(编辑 胡苇玮)