

文章编号:1001-6112(2012)06-0659-05

# 数理统计应用于示踪原油运移趋势的探索

——以塔河油田奥陶系原油为例

许锦<sup>1,2</sup>, 席斌斌<sup>1,2</sup>, 饶丹<sup>1,2</sup>, 张美珍<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;  
2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126)

**摘要:**利用数理统计的思想构建了一种综合分析原油运移趋势的方法,该方法能极大地简化数据处理和分析的过程。该方法将样品中用于示踪原油运移趋势的诸多运移指标综合表征为一个参数——运移指数( $I_m$ ), $I_m$ 可以用来判断各取样点距离烃源灶的相对远近;通过比较不同类别 $I_m$ 的标准差,定义了一个可信度参数( $K$ ),用于判断研究结果的可信程度。分别通过对塔河油田奥陶系的22个原油样品的极性化合物的66个浓度数据、13个成熟度参数比值和15个极性化合物异构体比值等3组数据的分析,得到3张 $I_m$ 等值线图;3组数据的 $K$ 值比较后可知极性化合物浓度数据的统计分析更可信。其分析结果表明塔河油田奥陶系原油运移方向是从东向西,从南往北的。

**关键词:**数理统计;运移趋势;奥陶系原油;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1<sup>+</sup>2

文献标识码:A

## Application of mathematic statistics in tracing oil migration trend:

A case study of Ordovician crude oil in Tahe Oil Field

Xu Jin<sup>1,2</sup>, Xi Binbin<sup>1,2</sup>, Rao Dan<sup>1,2</sup>, Zhang Meizhen<sup>1,2</sup>

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;  
2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** A new method, based on the theory of mathematic statistics, is constructed to analyze the crude oil migration trends. A good deal of indices tracing crude oil migration trend are characterized as a parameter: migration index ( $I_m$ ). Contour maps by  $I_m$  can figure the direction of oil migration. A reliability parameter ( $K$ ) which is used to judge the credibility of the results is also defined in this method. Concentration data (66) of polar compounds, maturity parameters (13) and isomer ratios (15) of polar compounds of Ordovician crude oil samples (22) from the Tahe Oil Field were analyzed respectively. The results show that crude oil migration directions are from east to west and from south to north. Compared with the  $K$  values of the three groups of parameters, the  $I_m$  of polar compound concentration can indicate the direction most accurately.

**Key words:** mathematic statistics; migration trend; Ordovician crude oil; Tahe Oil Field; Tarim Basin

## 1 概述

油气二次运移是石油勘探和资源评价中的重要研究内容<sup>[1-2]</sup>,通过对构造特征、地球化学、同位素等研究可以获得油气运移方向等方面的信息<sup>[3-6]</sup>,从而掌握盆地构造中的有利含油远景区,预测油气的分布区域<sup>[7]</sup>。近年来,对油气二次运移的机理、影响及应用方面的研究逐渐增多<sup>[7-9]</sup>。地球化学家常使用极性化合物浓度、异构体比值和成熟度参数来示踪油气运移,并且取得了良好的应

用效果<sup>[6,10-18]</sup>。但是地球化学参数和各种极性化合物数量较多,这些指标所指示的运移方向并不完全相同。如果仅用个别参数或化合物浓度所示的方向,难免会造成偏差<sup>[19-20]</sup>;如果对每个参数或化合物浓度进行作图,工作量大而且存在多解性。为了解决这个矛盾,本文尝试以塔河油田奥陶系22个原油样品为例,对这些可用于示踪油气运移的指标用数理统计的方法进行概括,综合多个数据的指示结果来示踪原油运移方向。

在油气运移过程中,极性化合物与地层之间存

收稿日期:2012-04-26;修订日期:2012-09-04。

作者简介:许锦(1981—),女,硕士,工程师,从事石油地质和有机地球化学、页岩气等方面的研究。E-mail:xujin\_syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技部攻关项目(P07018)资助。

在色层效应。结果往往是使石油的胶质、沥青质、卟啉及钒、镍等重金属减少,轻组分相对增多;在烃类中烷烃增多,芳烃相对减少;烷烃中低分子烃相对增多,高分子烃相对减少。反映到物理性质上,表现为密度变小、颜色变淡、粘度变稀<sup>[7]</sup>。反映到极性化合物表现为极性大的化合物在原油中的绝对浓度相对减少,极性小的化合物相对增加。因此,原油物性、化合物浓度和同分异构体比值等都可以用来示踪油气运移的方向<sup>[10-15]</sup>。另外,一般远离烃源灶的原油排出时间较早,成熟度相对较低,靠近烃源灶的原油排出时间较晚,成熟度相对较高,因此,成熟度参数常用来进行油气运移示踪<sup>[21-22]</sup>。

## 2 原理

在理想情况下,若只考虑运移距离对运移指标的影响,那么随着运移距离的增大,用来指示油气运移方向的指标(原油物性参数、化合物浓度、异构体的比值及成熟度参数值等)在数值上呈现单调递减或单调递增的趋势,这是用来判断油气距离烃源灶远近的基础。为了从整体上把握油气的运移趋势,避免单个指标对结果可能造成的偏差,可以考虑将这些具有示踪意义的运移指标的变化规律用一个参数来表示。首先,如果指标随运移距离单调递增,那么在指标前加一负号,即取其相反数,那么所有指标均随运移距离单调递减。本文通过引入数理统计的思想,定义了一个参数——运移指数( $I_m$ ),表征运移路径上某样品点的所有运移指标与其余样品点相对应指标的相对大小的总体反映结果。利用 $I_m$ 值便可以判断所有指标所表征的油气运移的总趋势。

## 3 运移指数( $I_m$ )以及可信度参数( $K$ )的定义及计算

$I_m$ 值定义为:设定运移途径上某一取样点的 $I_m$ 的初始值为0,将该点的所有示踪原油运移的指标与其余各点指标值的大小分别进行比较,对每次的比较结果进行判断,如果结果表明该点距离油源的距离较近,则 $I_m$ 值加2;距离相同时, $I_m$ 值加1;较远时, $I_m$ 值加0,同理可以分别求得其余各点的 $I_m$ 值。例如,在运移路径上有A、B、C3个点,每个点测定了1,8-二甲基咪唑和1,7-二甲基咪唑2个运移指标,其值分别为5,8,9  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 和2,3,7  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,将A点的2个指标的值分别与B和C进行比较,结果均小于其余两点,说明A点相对于B、C点在原油运移方向的远端, $I_m(A)=0$ ;同理将B和C

的指标值分别与其他两点进行比较,可以得到 $I_m(B)=4$ 以及 $I_m(C)=8$ 。由于 $I_m(C) > I_m(B) > I_m(A)$ ,故C点距离油源的距离最近,B点次之,A点最远。因此,由 $I_m$ 值的定义可知,每个样品点无论是由多少个运移指标组成,每个点均可以用 $I_m$ 值表征各个指标所反映的总的运移趋势。

然而,由于实际地质样品可能受到构造、岩性、保存条件、分析测试精度等的多因素影响,虽然随着运移距离的增加,大部分指标都能随运移距离的增加而单调变化,但是个别取样点的个别数据可能存在异常,有些指标并不能完全表现出单调递减或单调递增的趋势。因此,还需要定义一个参数用于判定实际数据所反映的运移趋势的可信度。据定义知,理想状态下,距离油源最近的点 $I_m$ 值最大,最远的点 $I_m$ 值最小,这种情况下,各点的 $I_m$ 值之间的离散度最大;一旦在运移方向上某点有异常值出现, $I_m$ 值之间的离散度就会变小。在数理统计中,标准差是用来表征数据离散度的参数,因此,可以用这组 $I_m$ 值的标准差来衡量数据的离散程度和出现异常值的情况。本文选取实际地质样品数据点的 $I_m$ 值的标准差( $S_{\text{实际}}$ )与理想情况下 $I_m$ 值标准差( $S_{\text{理想}}$ )的比值来表征实际数据与理想数据的吻合度,即运移趋势可信度参数,用符号K表示。

$$K = S_{\text{实际}} / S_{\text{理想}}$$

因此,K越接近于1,则实际数据与理想情况越吻合,即数据的离散度越大,单调性越强,运移方向上异常点越少,支持该运移趋势的数据越多,该方向就越可信。

## 4 地质应用

塔河油田是20世纪90年代发现的大型海相油气田,其主力产层主要分布在奥陶系,油气具有同一来源,主要来自沙雅隆起东南部的满加尔坳陷<sup>[6]</sup>。前人经过构造<sup>[5]</sup>、同位素<sup>[4]</sup>、成熟度<sup>[22]</sup>、极性化合物浓度<sup>[17,23]</sup>等分析,认为塔河油田奥陶系原油运移方向是从南向北、从东向西。

本文对塔河油田奥陶系的22个样品进行了分析,将用来示踪原油运移的指标分成3组:(1)极性化合物的浓度数值(66个);(2)成熟度参数值(13个);(3)极性化合物异构体比值(15个),分别用上述方法进行统计。将这3组数据求得的 $I_m$ 值(表1)分别记为 $I_{m1}$ 、 $I_{m2}$ 、 $I_{m3}$ ,并分别做等值线图。根据等值线变化的趋势,得到2种不同的运移趋势结果。第1组数据和第2组数据内部数值之间相

表 1 塔河油田奥陶系原油  
采用数理统计方法计算出的 3 组指标  $I_m$  值  
Table 1 Calculated  $I_m$  values of Ordovician crude oil  
from Tahe Oil Field based on mathematic statistics

井号	层位	密度/ ( $g \cdot mL^{-1}$ )	$I_{m1}$	$I_{m2}$	$I_{m3}$
S79	O <sub>2</sub> yj	0.95	1 324	183	249
TK214	O <sub>1</sub>	0.96	1 146	184	335
S73	O <sub>1</sub>	0.82	1 480	330	252
S60	O	0.79	1 879	420	199
T810X(K)	O <sub>2</sub> yj	0.86	1 389	139	520
TK839	O <sub>2</sub> y	0.86	1 822	139	314
T739	O	0.94	2 188	266	555
S112-1	O <sub>1-2</sub> y	0.84	2 047	421	444
TK472CH	O <sub>1-2</sub> y	0.97	547	175	415
S48	O <sub>1-2</sub> y	0.96	794	221	371
TK714	O <sub>1-2</sub> y	0.91	297	205	336
T7-631	O <sub>1-2</sub> y	0.95	760	287	288
S74	O <sub>1-2</sub> y	0.99	752	302	288
TK614	O <sub>1-2</sub> y	0.96	1 188	253	319
S116-2	O <sub>3</sub> l	0.84	1 779	215	330
S117	O <sub>2</sub> y	0.84	2 370	251	327
S14	O <sub>1</sub>	0.83	566	475	122
S106	O <sub>2</sub> yj	0.84	2 134	232	301
S62	O	1 882	495	191	
TK835	O <sub>2</sub> y	0.92	1 883	170	321
S115	O <sub>2</sub> y	2 008	474	223	
TK477	O <sub>1-2</sub> y	266	169	230	

注:  $I_{m1}$  为根据极性化合物的浓度数值(66 个)统计的  $I_m$  值;  
 $I_{m2}$  为根据成熟度参数数值(13 个)统计的  $I_m$  值;  $I_{m3}$  为根据  
极性化合物异构体比值(15 个)统计的  $I_m$  值。

对分散,得到从东向西和从南向北 2 个迁移方向(图 1,2)。而第 3 组数据各点之间的  $I_m$  值比较接近,从等值线图只能勉强看出有微弱的从西向东的迁移趋势(图 3)。从迁移趋势可信度参数  $K$  来看,  $K_1=0.77, K_2=0.68, K_3=0.53$ 。根据  $K$  值定义,第一组数据反映的迁移趋势可信度最高,而第 3 组数据的结果可信度最低。因此,应当采用第 1 组数据的结果,推断出该区域原油迁移方向主要是从东向西和从南向北的。这个分析结果也与前人采用其他方法对该区油气迁移趋势的研究成果相吻合<sup>[6,22-23]</sup>。

### 5 结论

1) 采用迁移指数  $I_m$  值示踪原油迁移趋势,综合了多个迁移指标的信息,无需对单个数据或参数进行分别分析,极大地简化了计算和分析数据过程,排除了人为选择的因素,具有高度的概括性和客观性。

2) 引入可信度参数  $K$  能够比较不同类别指标所示趋势与理想状态的差别大小,从而甄别出最可能的迁移趋势,具有去伪存真的效果。因此,该方法是一种简单高效、高度概括处理大量地质数据的新方法,具有较高的应用价值。

3) 数理统计的方法对塔河油田奥陶系原油的分析结果表明,其原油可能主要来自于东部和南部,迁移方向主要是从东向西,从南向北。

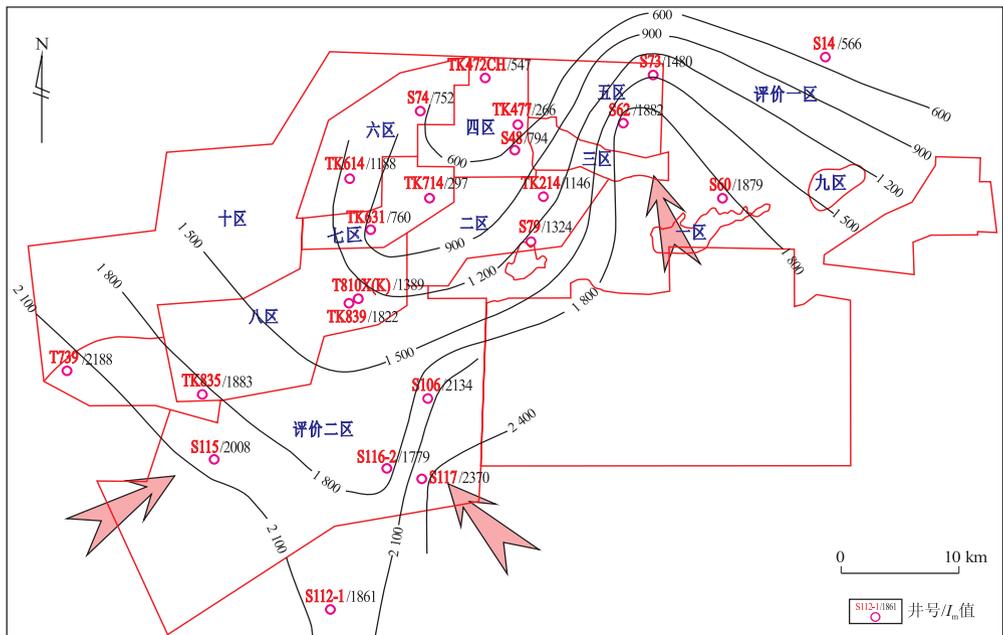


图 1 塔河油田奥陶系原油采用  $I_{m1}$  (极性化合物浓度统计结果) 示踪迁移趋势( $K_1=0.77$ )

Fig. 1 Ordovician crude oil migration trend traced by  $I_{m1}$  (analyzed by concentrations of polar compounds) in Tahe Oil Field

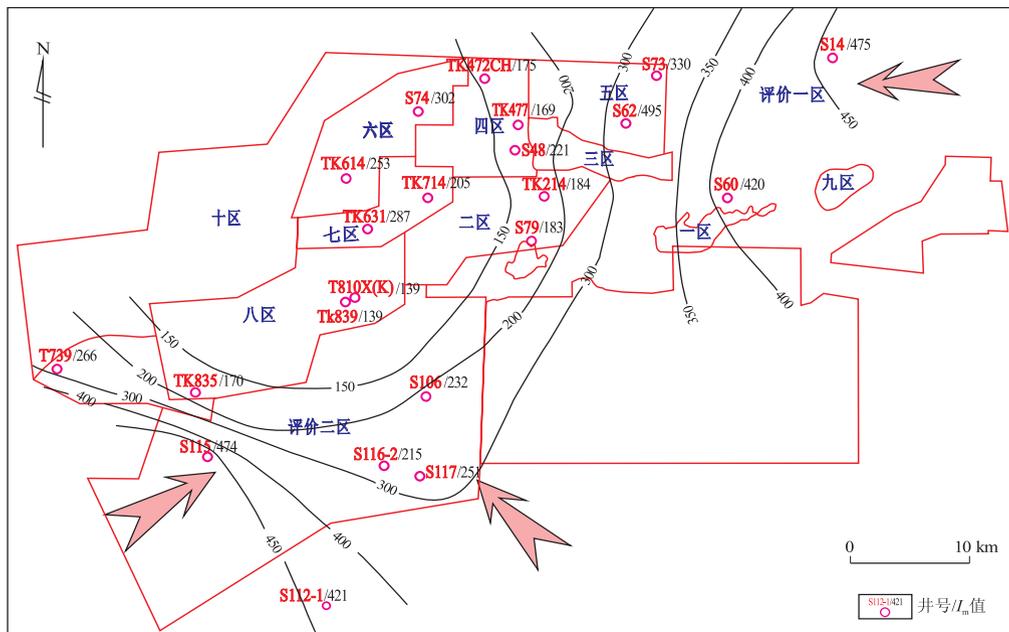


图2 塔河油田奥陶系原油采用  $I_{m2}$  (成熟度参数统计结果) 示踪运移趋势 ( $K_2=0.68$ )

Fig.2 Ordovician crude oil migration trend traced by  $I_{m2}$  (analyzed by maturity parameters) in Tahe Oil Field

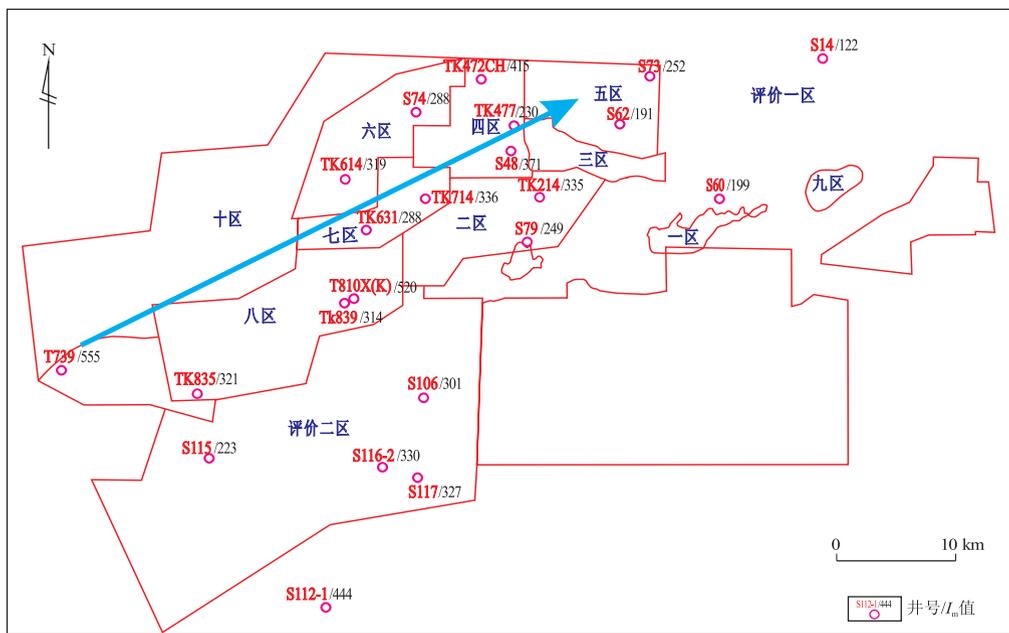


图3 塔河油田奥陶系原油采用  $I_{m3}$  (极性化合物异构体比值统计结果) 示踪运移趋势 ( $K_3=0.53$ )

Fig.3 Ordovician crude oil migration trend traced by  $I_{m3}$  (analyzed by isomer ratios of polar compounds) in Tahe Oil Field

致谢:在成文过程中,得到中国石化无锡石油地质研究所张渝昌、顾忆教授的鼓励和支持,得到中国地质大学(北京)施娘华学士的大力帮助,在此深表感谢!

参考文献:

[1] 陈荷立. 油气运移研究的有效途径[J]. 石油与天然气地质, 1995,16(2):126-131.

[2] 赵文智,何登发,瞿辉,等. 复合含油气系统中油气运移流向

研究的意义[J]. 石油学报,2001,22(4):7-12.

[3] 付立新,王东林,肖玉永. 伸展断层作用对油气二次运移的影响[J]. 石油大学学报:自然科学版,2000,24(4):71-74.

[4] 段毅,郑朝阳,段晓晨,等. 塔河油田油气成因和运移的氮同位素证据[J]. 天然气工业,2007,27(3):28-30.

[5] 徐汉林,江同文,顾乔元,等. 新构造运动对塔里木盆地油气的控制作用[J]. 新疆石油地质,2009,30(2):175-178.

[6] 顾忆,邵志兵,陈强路,等. 塔河油田油气运移与聚集规律[J]. 石油实验地质,2007,29(3):224-230.

[7] 张厚福,方朝亮,张枝焕,等. 石油地质学[M]. 北京:石油工

- 业出版社,1999:148-151.
- [8] 姜林,薄冬梅,柳少波,等. 天然气二次运移组分变化机理研究[J]. 石油实验地质,2010,32(6):578-582.
- [9] 闫建钊,罗晓容,张立宽,等. 原油二次运移过程中的逾渗主脊实验研究[J]. 石油实验地质,2012,34(1):99-103.
- [10] 刘洛夫,康永尚. 运用原油吡咯类含氮化合物研究塔里木盆地塔中地区石油的二次运移[J]. 地球化学,1998,27(5):475-482.
- [11] Li M, You H, Fowler M G, et al. Geochemical constraints on models for secondary petroleum migration along the Upper Devonian Rimbey-Meadowbrook reef trend in central Alberta, Canada[J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29:163-182.
- [12] Li Maowen, Larter S R, Stoddart D et al. Fractionation of pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration: Derivation of migration-related geochemical parameters [C]//Cubitt J M, England W A. *The Geochemistry of Reservoirs*. London: Geological Society, 1995:103-123.
- [13] 王铁冠,何发岐,李美俊,等. 烷基二苯并噻吩类:示踪油藏充注途径的分子标志物[J]. 科学通报,2005,50(2):176-182.
- [14] Wang T G, He F Q, Li M J, et al. Alkyl-dibenzothiophenes: molecular tracers for filling pathway in oil reservoirs[J]. *Chin Sci Bull*, 2004, 49(22):2399-2404.
- [15] 张美珍,曹寅,钱志浩,等. 石油地质样品实验新技术方法及其应用[M]. 北京:石油工业出版社,2007:77-79, 90-96.
- [16] 邵志兵. 塔里木盆地塔河油区奥陶系原油中性含氮化合物特征与运移研究[J]. 石油实验地质,2005,27(5):496-501.
- [17] 李美俊,王铁冠,刘菊,等. 烷基二苯并噻吩总量示踪福山凹陷凝析油藏充注途径[J]. 中国科学:D辑地球科学,2008,38(S1):122-128.
- [18] 蒋兴超,王铁冠,陈践发,等. 松辽盆地王府凹陷扶杨油层原油充注途径示踪[J]. 石油实验地质,2011,33(5):531-535.
- [19] 张美珍,腾格尔,张渠,等. 海相油气生物标志化合物定量技术及应用研究[R]. 北京:中国石化集团公司科技部,2009:164-182.
- [20] 周树青,黄海平,徐旭辉,等. 吡啶、酚类和二苯并噻吩类化合物在油气运移研究中的应用[J]. 石油与天然气地质,2008,29(1):146-150.
- [21] England W, Mackenzie A S, Mann D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface[J]. *J Geol Soc*, 1987, 144:327-347.
- [22] 郑朝阳,段毅,吴宝祥,等. 塔里木盆地塔河油田原油中生物标志化合物成熟度指标特征与石油运移[J]. 沉积学报,2007,25(3):482-486.
- [23] 许锦,饶丹,张美珍,等. 塔河油田奥陶系原油极性化合物浓度分布及运移趋势[J]. 地质科技情报,2012,31(2):55-59.

(编辑 叶德燎)

(上接第 658 页)

- [2] 刘建仪,李士伦,郭平,等. 天然气偏差系数的测定[J]. 天然气工业,2002,22(2):63-65.
- [3] Standing M B, Katz D L. Density of natural gases [J]. *Trans AIME*, 1942, 46:140-149.
- [4] Guo Boyun, Ghalambor A. *Natural gas engineering handbook* [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 2005.
- [5] 史密斯 R V. 实用天然气工程[M]. 北京:石油工业出版社, 1989.
- [6] 布雷德利 H B. 油气藏工程手册(下册)[M]. 童宪章,译. 北京:石油工业出版社,1996.
- [7] 杨继盛. 采气适用计算[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
- [8] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京:石油工业出版社,2000.
- [9] 李相方. 高温高压气井测试技术[M]. 北京:石油工业出版社,2007.
- [10] Hall K R, Yarborough L. How to solve equation of state for Z-factors[J]. *Oil and Gas Journal*, 1974, 72(7):86-88.
- [11] Dranchuk P M, Abu-Kassem J H. Calculation of Z-factors for natural gases using equations of state [J]. *CDN Pet Tech*, 1975, 14(3):34-36.
- [12] Dranchuk P M, Purvis R A, Robinson D B. Computer calculation of natural gas compressibility factors using the Standing and Katz correlation [J]. *Inst of Petr Tech Series*, 1974(1):74-108.
- [13] 李相方,刚涛,庄湘琦,等. 高压天然气偏差系数的高精度解析模型[J]. 石油大学学报:自然科学版,2001,25(6):45-46, 51.
- [14] 李相方,庄湘琦,刚涛,等. 天然气偏差系数模型综合评价与选用[J]. 石油钻采工艺,2001,23(2):42-46.
- [15] 张国东,李敏,柏冬岭. 高压超高压天然气偏差系数实用计算模型: LXF 高压天然气偏差系数的高精度解析模型的修正[J]. 天然气工业,2005,25(8):79-80, 93.
- [16] 江同文,肖香姣,郑希潭,等. 深层超高压气藏气体偏差系数确定方法研究[J]. 天然气地球科学,2006,17(6):743-746.
- [17] 伍勇,杜志敏,郭肖,等. 异常高压气藏偏差因子计算方法[J]. 天然气工业,2008,28(6):105-107.

(编辑 韩 或)