

·油气采收率·

注气辅助重力泄油开发油藏采收率预测方法

吴克柳¹,李相方¹,王 星²,罗银富²,甘云雁²,羊新州¹,李 娜³

(1.中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249; 2.中海石油研究总院,北京 100027; 3.陕西延长石油(集团)有限责任公司 研究院,陕西 西安 710075)

摘要:注气辅助重力泄油已成为油藏提高采收率的最新开发方式,可解决常规连续注气和水气交替注入体积波及系数低的主要问题,大幅度提高最终采收率,然而还未有相对应有效的采收率预测方法。通过对注气辅助重力泄油开发机理研究,利用量纲分析方法,对毛管数、邦德数及重力数进行分析,评价其对采收率影响的相对作用,然后通过考虑储层润湿性、油气密度差与粘度比,重新修正重力数和重力泄油数,利用实验及现场数据,确定其与采收率的关系,最后建立了注气辅助重力泄油开发油藏采收率预测方法。非混相驱替时,重力泄油数与采收率具有很好的相关性,修正重力泄油数与采收率的相关性更好;混相驱替时,重力泄油数与采收率的相关性差一些,但修正重力泄油数与采收率的相关性较好。实例应用表明,经过修正的采收率预测方法计算的结果更接近实际采收率。

关键词:注气辅助重力泄油 采收率 预测方法 量纲分析 重力泄油数

中图分类号:TE347

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2012)06-0061-05

近年来,注气辅助重力泄油开发技术在美国迅猛发展,它克服了常规连续注气开发的局限性,如连续注气开发和水气交替注入开发体积波及系数低,注入能力减弱等^[1]。注气辅助重力泄油开发是在产油带打水平井作为生产井,在顶部打直井作为注气井。注入气由于重力分异在顶部形成气带,驱替原油与水泄入底部水平井^[2]。理论、实验及现场应用表明,注气开发,尤其是注气辅助重力泄油开发体积波及系数大,微观驱油效率高,采收率提升幅度大^[3-9]。然而还未有与之相对应的采收率预测方法^[10-14]。对于注气辅助重力泄油开发油藏,增加毛管数可以提高微观驱油效率,增加油气流度比和邦德数可以提高宏观波及效率。为了使采收率最大化,应增大毛管数、邦德数和油气流度比^[14]。影响毛管数的因素有储层润湿性、注入气粘度及注气速度等,影响邦德数的因素有储层孔隙度、渗透率和油气密度差等。笔者通过量纲分析,分别评估毛管数、邦德数及重力泄油数对油气采收率的相对作用^[6],通过考虑储层润湿性、油气密度差及粘度比,对重力数和重力泄油数进行修正,并利用室内实验及现场数据,寻找其与采收率的关系,最后建立了注气辅助重力泄油开发油藏采收率的预测方法。

1 影响因素

注气辅助重力泄油开发过程中,油、气、水在储层多孔介质中的分布及微观驱替机理影响油藏的采收率^[14-15]。Oren等指出,在多孔介质中三相流体的分布情况及微观驱替机理是由岩石与流体、流体与流体之间一些物理现象的相互作用决定的,包括储层非均质性、岩石润湿性、铺展系数、重力分异和流体粘度等^[16]。

1.1 储层非均质性

储层非均质性决定注气能力及气驱波及类型,对油藏采收率具有重要影响。对于常规连续注气和水气交替注入,储层非均质性强将导致气体过早突破、波及体积效率低。

储层垂直渗透率与水平渗透率的比值(K_z/K_H)是衡量其非均质性的主要指标之一, K_z/K_H 值较大,则注入气在层与层之间窜流明显^[15]。在水平方向驱替过程中,窜流主要受重力、毛管力和粘滞力的共同作用。尽管窜流增加了垂向波及体积,但其也加剧了气体重力超覆,降低了流动速率和低渗透层的波及体积。当采用注气辅助重力泄油开发时, K_z/K_H

收稿日期:2012-09-24。

作者简介:吴克柳,男,在读博士研究生,从事挥发油藏和凝析气藏开发方面的研究。联系电话:(010)89732193,E-mail:wukeliu19850109@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“西非深水油田注采参数优化及单井产能预测研究”(2011ZX05030-005-04)和国家自然科学基金“凝析气藏相变渗流机理及其试井方法研究”(50974128)。

K_{ri} 值较大则能够延缓气体突破,减弱气体在高渗透层的窜流^[14]。研究表明:相对于水平注气驱替,储层非均质性对注气辅助重力泄油开发影响不大,甚至还有利于采收率的提高^[17-20]。

1.2 储层润湿性

Grattoni等研究表明储层润湿性影响注气辅助重力泄油开发油藏采收率。亲油储层,油以油膜形式赋存在岩石颗粒表面,形成连续相,更易流动,即使注气量很小时,也有大量油产出;而亲水储层,油以点滴状分布,很难形成连续相,只能通过气体驱替时才能产出,产油量小^[21]。Mahmoud等利用物理模型实验也验证了储层润湿性对油气采收率的影响,结果表明,油湿储层与水湿储层相比,具有较高的采收率^[9,22]。许多油田的储层是混合润湿,连续油和水在多孔介质中共存。Morrow等通过室内实验和网络模型研究都表明,相比水湿储层,混合润湿储层具有较低的残余油饱和度^[23-26]。

1.3 铺展系数

注气辅助重力泄油开发,铺展系数影响油、气、水在储层中的分布^[14]。它是描述油、气、水三相系统中3个界面张力互相平衡的指标^[14]。其定义为

$$\delta_l = \sigma_{gw} - \sigma_{go} - \sigma_{ow} \quad (1)$$

式中: δ_l 为储层流体铺展系数,N/m; σ_{gw} 为气水界面张力,N/m; σ_{go} 为气油界面张力,N/m; σ_{ow} 为油水界面张力,N/m。

铺展系数可能是正也可能是负,受储层流体组分、油藏温度及压力影响。铺展系数为正值时,储层原油以连续相油膜形式铺展在水层上,气体驱替时,油膜易流动,残余油饱和度低,采收率高。铺展系数为负值时,原油很难形成连续油膜,以点滴状存在,不易流动^[27]。所以,在注气开发过程中,应提高水、气接触角,降低残余油饱和度。

1.4 重力分异

流体重力分异影响常规连续注气的开发效果,水气交替注入开发虽然减弱了重力分异的影响,但是由于注入气比储层原油轻,容易形成超覆,注入水比原油密度大,容易形成底覆,波及系数仍然较低,现场应用表明采收率提高幅度不大,仅为5%~10%^[14-15]。注气辅助重力泄油开发不但不需抑制而且应充分利用重力分异,以提高体积波及系数、抑制粘度指进和延缓气体过早突破。

1.5 流体粘度

油气粘度和粘度比影响注气辅助重力泄油开发过程中驱替前缘的稳定性。可通过改变气体粘

度来改善油气流度比,防止气体过早突破^[15]。Lenormand等通过不同实验和模拟的结果,做出判断驱替前缘流动类型的相图,相图包含毛管数和邦德数,依据主要流动特征分为稳定驱替区、粘度指进区和毛管力指进区等不同典型区域。对于注气辅助重力泄油开发,若注入气在储层中的渗流速度过大,则毛管数过大,不稳定驱替促使粘度指进发生,气体波及系数小,原油采收率低;反之,当储层的流体流动类型属于稳定区时,驱替前缘稳定,气体波及系数大,原油采收率高^[28]。

2 量纲分析

目前,量纲分析应用到注气辅助重力泄油开发设计的研究很少。Geertsma等通过目测分析推导无因次群组,不仅产生适合注气开发的无因次群组,还建立了储层多孔介质流动中与其他学科(化学、数学、工程等)无因次群组的关系^[29]。许多学者研究注气辅助重力泄油开发油藏储层润湿性、非均质性、含水饱和度等对油、气、水三相流动的影响,运用无因次群组对结果进行分析,定义了重力、粘滞力和毛管力相结合的新无因次群组。研究表明:相对于毛管数和邦德数,重力数能够更好地刻画注气辅助重力泄油开发中流体的流动特征^[21]。

毛管数描述粘滞力与毛管力的平衡关系,邦德数描述重力和毛管力的相对强度,重力数是毛管数与邦德数的结合,其表达式分别为

$$N_c = \frac{v\mu}{\sigma} \quad (2)$$

$$N_B = \frac{\Delta\rho g \left(\frac{K}{\phi}\right)}{\sigma} \quad (3)$$

$$N_G = \frac{\Delta\rho g \left(\frac{K}{\phi}\right)}{\mu v} \quad (4)$$

式中: N_c 为毛管数; v 为渗流速度,m/s; μ 为气体粘度,mPa·s; σ 为界面张力,N/m; N_B 为邦德数; $\Delta\rho$ 为气油密度差,g/cm³; g 为重力加速度,m/s²; K 为渗透率,10⁻³ μm²; ϕ 为孔隙度; N_G 为重力数。

由PI定理获得无因次群组并进行目测分析表明,注气辅助重力泄油开发关键的4个无因次群组为毛管数、邦德数、重力数和微观邦德数^[30]。

3 采收率预测方法

3.1 邦德数对采收率的影响

Sharma等利用物理模拟实验确定邦德数对注

气辅助重力泄油开发油藏采收率的影响。实验结果表明,邦德数越大,采收率越高^[15]。对于注气辅助重力泄油开发,重力占主导地位控制流体流动,更有利于提高采收率。值得注意的是,邦德数相同时,注入气体类型对采收率影响不大,仅相差3%。

3.2 毛管数对采收率的影响

Sharma 等通过物理模拟实验利用不同注入速度获得不同的毛管数,进而确定毛管数对注气辅助重力泄油开发油藏采收率的影响^[15]。结果表明,最终采收率随着毛管数的增大而增加,但由于注入速度的限制,毛管数的增加是有限的。另外,注入速度过大时,气体驱替前缘不能保持稳态驱替,发生粘度指进,气体过早突破,采收率反而下降。

3.3 采收率预测方法

3.3.1 重力泄油数与采收率的关系

注气辅助重力泄油开发,尤其在混相驱替时,重力数、毛管数和邦德数与采收率的相关性都较差,可以推断重力数、毛管数和邦德数等都不能够完全代表注气开发。而毛管数、邦德数及重力数的数学关系结合指标却与采收率具有较好的相关性^[14,31-32]。Kulkarni 等^[17]考虑油气密度差对采收率的影响,定义重力泄油数为

$$N_{GD} = N_G + \frac{\rho_g}{\rho_o}(N_C + N_B) \quad (5)$$

式中: N_{GD} 为重力泄油数; ρ_g 为地层气体密度, g/cm^3 ; ρ_o 为地层原油密度, g/cm^3 。

将非混相驱替和混相驱替的物理模拟实验结果、岩心驱替实验结果和现场测试数据^[14],分别做采收率与重力泄油数的关系曲线(图1),得到非混相驱替和混相驱替采收率与重力泄油数的关系式分别为

$$E_{Ri} = 4.591 \ln N_{GD} + 33.905 \quad R^2=0.9473 \quad (6)$$

$$E_{Rm} = 4.760 \ln N_{GD} + 55.219 \quad R^2=0.5215 \quad (7)$$

式中: E_{Ri} 为非混相驱替的油藏采收率,%; E_{Rm} 为混相驱替的油藏采收率,%。

3.3.2 修正重力泄油数与采收率的关系

重力数是毛管数与邦德数的比值,衡量注气辅助重力泄油开发驱替时重力与粘滞力对采收率的相对作用^[14-15]。为了考虑储层润湿性对采收率的影响,修正重力数的表达式为

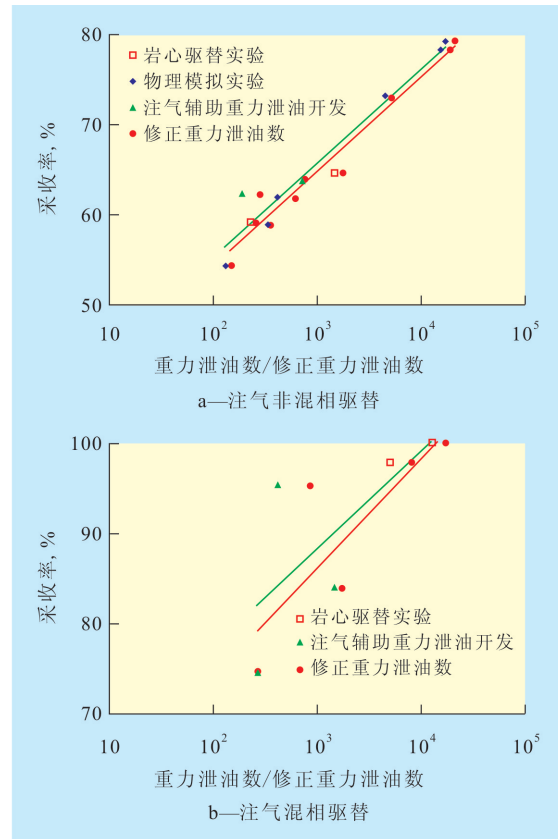


图1 注气非混相和混相驱替采收率与重力泄油数和修正重力泄油数的关系

$$N'_G = \frac{\Delta\rho g \left(\frac{K}{\phi}\right)}{\mu v} (1 - \cos \theta) \quad (8)$$

式中: N'_G 为修正重力数; θ 为润湿角, ($^\circ$)。

油气粘度与粘度比影响油气驱替前缘的稳定性,油气粘度比很大,注入气容易过早突破,对采收率影响也很大,基于此,修正重力泄油数,并将修正重力数代入可得

$$N'_{GD} = N'_G \left(1 + \frac{\mu_g}{\mu_o}\right) + \frac{\rho_g}{\rho_o}(N_C + N_B) \quad (9)$$

式中: N'_{GD} 为修正重力泄油数。

将非混相驱替和混相驱替的物理模拟实验结果、岩心驱替实验结果和现场测试数据^[14],分别做采收率与修正重力泄油数的关系曲线(图1)。得到非混相驱替和混相驱替采收率与修正重力泄油数的关系式分别为

$$E_{Ri} = 4.6104 \ln N'_{GD} + 32.885 \quad R^2=0.9622 \quad (10)$$

$$E_{Rm} = 5.2949 \ln N'_{GD} + 49.531 \quad R^2=0.6816 \quad (11)$$

从图1可知,注气非混相驱替的采收率与重力泄油数具有很好的相关性,且考虑储层润湿性、油气粘度比的修正重力泄油数与采收率相关性更好,反过来表明储层润湿性和油气粘度比对采收率有影响。注气混相驱替,采收率与重力泄油数相关,但与非混相驱替相比,相关性差一些。混相驱替影响采收率因素较多,如界面张力等,重力泄油数还不能完全表达其物理现象。同样地,考虑储层润湿性和油气粘度比的修正重力泄油数与采收率的相关性也好些,预测注气辅助重力泄油开发油藏采收率将更加准确。

4 实例应用

以加拿大垂向注气开发油田为例^[17],验证笔者所建立采收率预测方法的有效性。计算该油田无因次群组所需资料包括:不同测井资料(储层厚度、净毛比、油水界面、气水界面和颗粒大小)、油田区域图(达西速率),岩石颗粒大小分布图(邦德数),注采数据、井底流压及注采流体属性等^[14,17,21]。运用采收率预测方法计算采收率,与标定采收率进行对比分析。

从图2可看出,与未修正的采收率计算方法相比,经过修正的采收率预测方法计算的结果更接近实际采收率,误差更小,预测更准确。其中 Pembina Nisku F Pool 油田预测结果误差较大,可能是基础资料代表性差造成的。

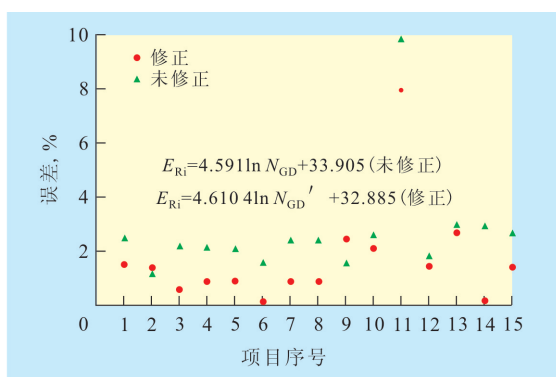


图2 加拿大垂向注气开发油田采收率计算误差对比

5 结论

注气辅助重力泄油开发机理影响因素包括储层非均质性、岩石润湿性、铺展系数、流体密度、粘度等;通过量纲分析,注气辅助重力泄油开发生产特征能够用邦德数、毛管数、重力数及重力泄油数

进行有效刻画。通过分析邦德数和毛管数对采收率的影响,建立了重力泄油数和修正重力泄油数与采收率的关系式。对于注气辅助重力泄油开发,非混相驱替时重力泄油数与采收率具有很好的相关性,修正重力泄油数与采收率相关性更好,能够更加准确地预测油藏采收率;混相驱替时,重力泄油数与采收率有关,但与非混相驱替时相比,相关性差一些,同样地,修正重力泄油数与采收率的相关性也好些。加拿大垂向注气开发油田的计算结果验证了所建立采收率预测方法的有效性。与未修正的采收率计算方法相比,经过修正的采收率预测方法计算的结果更接近实际采收率,误差更小,预测更准确。

参考文献:

- [1] Norollah K, Bashiri A. Gas-assisted gravity drainage (GAGD) process for improved oil recovery [C]. Paper 13244 presented at International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 2009.
- [2] Rao D N, Ayirala S C, Kulkarni M M, et al. Development of the gas assisted gravity drainage (GAGD) process for improved light oil recovery [C]. SPE 89357, 2004.
- [3] 沈平平, 袁士义, 韩冬, 等. 中国陆上油田提高采收率潜力评价及发展战略研究 [J]. 石油学报, 2001, 22(1): 45-48.
- [4] 任韶然, 于洪敏, 左景栾, 等. 中原油田空气泡沫调驱提高采收率技术 [J]. 石油学报, 2009, 30(3): 414-416.
- [5] 俞启泰. 论提高油田采收率的战略与方法 [J]. 石油学报, 1996, 17(2): 53-61.
- [6] 林波, 蒲万芬, 赵金洲, 等. 利用就地 CO₂ 技术提高原油采收率 [J]. 石油学报, 2007, 28(2): 98-101.
- [7] 李莉, 庞彦明, 雷友忠, 等. 特低渗透油藏合理注气能力和开发效果分析 [J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 118-121.
- [8] 张友奎, 孔繁益, 程信芳. 正韵律厚油层注气提高上部层段采收率的试验研究 [J]. 石油学报, 1989, 10(4): 46-51.
- [9] Mahmoud T N, Rao D N. Range of operability of gas-assisted gravity drainage process [C]. SPE 113474, 2008.
- [10] 许增福, 吴贵生, 王宏伟. 基于量子神经网络的分子沉积膜驱原油采收率预测方法 [J]. 石油学报, 2008, 29(1): 84-88.
- [11] 牛彦良, 李莉, 韩德金, 等. 低渗透油藏水驱采收率计算新方法 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 77-84.
- [12] 魏兴华, 朱家俊, 夏冰. 一种计算预测采收率的方法 [J]. 油气采收率技术, 1999, 6(1): 57-60.
- [13] Rao D N. Gas injection EOR - a new meaning in the new millennium [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2001, 40(2): 11-18.
- [14] Kulkarni M M, Rao D N. Characterization of operative mechanisms in gravity drainage field projects through dimensional analysis [C]. SPE 103230, 2006.
- [15] Sharma A P, Rao D N. Scaled physical model experiments to characterize the gas-assisted gravity drainage EOR process [C]. SPE 113424, 2008.

- [16] Oren P E, Pinczewski W V. The effect of wettability and spreading coefficients on the recovery of waterflood residual oil by miscible gas flooding[J]. SPE Formation Evaluation, 1994, 9(2): 149–156.
- [17] Kulkarni M M. Multiphase mechanisms and fluid dynamics in gas injection enhanced oil recovery processes [D]. Louisiana: Louisiana State University, 2005.
- [18] Schramm L L, Isaacs E, Singhal A K, et al. Technology development for conventional petroleum reservoirs [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2000, 39(3): 31–46.
- [19] Henriquez A, Jourdan C A. Management of sweep-efficiency by gas-based IOR methods [C]. SPE 36843, 1996.
- [20] Krijn W, Clemens T, Rijkels L. Simulation of gas/oil gravity drainage in a stack of interacting blocks: Pseudo relations for a limited number of gridblocks [C]. SPE 77722, 2002.
- [21] Grattoni C A, Jing X D, Dawe R A. Dimensionless groups for three phase gravity drainage flow in porous media [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001, 29 (1): 53–65.
- [22] Paidin W R, Rao D N. Physical model experiments to evaluate the effect of wettability and fractures on the performance of the gas assisted gravity drainage (GAGD) process [C]. Paper reviewed and accepted for proceedings of the Society of Core Analysts 21st Symposium, Calgary, Canada, 2007.
- [23] Morrow N R, Mason G. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in triangular tubes [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1991, 141 (1): 262–274.
- [24] Rao D N, Girard M G, Sayegh S G. The influence of reservoir wettability on waterflood and miscible flood performance [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1992, 31 (6): 47–54.
- [25] Salatheil R A. Oil recovery by surface film drainage in mixed wettability rocks [J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25(10): 1 216–1 224.
- [26] Kovscek A R, Wong H, Radke C J. A pore-level scenario for the development of mixed wettability in oil reservoirs [J]. AIChE Journal, 1993, 39(6): 1 072–1 085.
- [27] Mani V, Mohanty K K. Effect of spreading coefficient on three-phase flow in porous media [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 187(1): 45–56.
- [28] Lenormand R, Touboul E, Zarcone C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189: 165–187.
- [29] Geertsma J, Croes G A, Schwarz N. Theory of dimensionally scaled models of petroleum reservoirs [J]. Trans. AIME, 1956, 207: 118–127.
- [30] Shook M, Li D, Lake L W. Scaling immiscible flow through permeable porous media by inspectional analysis [J]. In Situ, 1992, 16 (4): 311–350.
- [31] Sharma A P. Physical model experiments of gas assisted gravity drainage [D]. Louisiana: Louisiana State University, 2005.
- [32] Xu W. Experimental investigation of dynamic interfacial interactions at reservoir conditions [D]. Louisiana: Louisiana State University, 2005.

编辑 经雅丽

(上接第60页)

参考文献:

- [1] 高永进. 砂砾岩体沉积旋回划分及对比方法 [J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(6): 6–11.
- [2] 徐敬领, 王贵文. 利用小波时频分析方法研究地层沉积旋回 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(5): 1–5.
- [3] 刘振峰, 郝天珧, 范国章. 沉积旋回的地球物理研究 [J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 258–262.
- [4] 石万忠, 李举子, 李梦溪, 等. 时—频分析在高分辨率层序地层学中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 234–237.
- [5] 雷克辉, 朱广生, 毛宁波, 等. 在小波时频域中研究沉积旋回 [J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(增刊1): 72–78.
- [6] 周强, 朱仕军, 文中平, 等. S变换在高分辨率层序地层学中的应用分析 [J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2009, 31(2): 259–262.
- [7] 王培茂. 地震信号的时频特征表示方法及应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [8] 李振春, 刁瑞, 韩文功, 等. 线性时频分析方法综述 [J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(4): 239–246.
- [9] 侯树杰. 时频分析方法对比及S变换在地震数据处理中的应用 [J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 44–46.
- [10] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [M]. Proceedings of the Royal Society, 1998: 903–995.
- [11] 张郁山. 希尔伯特-黄变换(HHT)与地震动时程的希尔伯特谱 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2003.
- [12] 李新虎, 罗杰, 刘东. 测井曲线的沉积旋回划分方法及应用 [J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(6): 702–705.
- [13] 夏竹, 张震生, 孙长虹. 利用频率属性识别和划分陆相盆地多期时频层序 [J]. 石油地球物理勘探, 2004, 38(6): 730–738.

编辑 裴磊