

·油气采收率·

油藏数值模拟历史拟合分析方法

于金彪

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要:油藏数值模拟历史拟合是为了验证和修正数值模拟模型,从而提高数值模拟模型的可靠性以及油田开发指标预测的准确性。目前常用的历史拟合方法缺乏系统性和规范性,从而导致了数值模拟模型的修正具有一定的随机性和随意性。在数值模拟模型建立和初始化检查的基础上,提出了一套系统的历史拟合分析方法。从分析拟合现象入手,根据拟合曲线的形态,将动、静态拟合矛盾分为5种类型,同时指出了3个关键拟合点;然后针对不同类型的拟合矛盾,进行拟合指标的影响因素分析,列出造成拟合矛盾的可能原因;再结合实际区块的动、静态资料及认识,分析数值模拟模型的不确定性,采用排除法,快速找出造成拟合矛盾的具体原因,反复修正数值模拟模型,直到满足历史拟合的精度要求。实例应用结果表明,使用该方法极大地减少了油藏数值模拟的次数,提高了历史拟合的效率和精度,也证明了该方法的实用性和有效性。

关键词:油藏数值模拟 历史拟合 拟合曲线 拟合矛盾 拟合方法

中图分类号:TE319

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)03-0066-05

History matching analysis method on reservoir numerical simulation

Yu Jinbiao

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: The purpose of history matching of reservoir numerical simulation is to verify and modify the numerical simulation model, so as to improve the reliability of numerical simulation model and the prediction accuracy of oilfield development indexes. At present the common methods of history matching lack systematicness and normativity, which introduces a certain randomness and arbitrary to the modification of the numerical simulation model. A set of systematic analysis method of history matching was put forward based on numerical simulation model building and initialization inspection. Starting with the analysis of matching phenomenon, matching contradictions between dynamic and static data can be divided into five types and three key matching points were also pointed out based on matching curve shape. According to the different types of matching contradictions, influence factors on matching indexes were analyzed and the possible causes of matching contradiction were listed. Combined with the dynamic and static data and understanding of the actual block, the uncertainty of the numerical simulation model was analyzed. Exclusive method was used to quickly determine the specific reasons for matching contradictions. The numerical simulation model was repeatedly modified until the accuracy of history matching was attained. The case showed that the number of times of the numerical simulation is greatly reduced, and the efficiency and accuracy of the history matching are improved using the method. The practicability and validity of the method are proved.

Key words: reservoir numerical simulation; history matching; matching curve; matching contradiction; matching method

目前,油藏数值模拟技术在油气田开发中的应用越来越广泛,解决了诸多实际矿场问题^[1-8],但是如何提高数值模拟历史拟合的精度一直是一个难题^[9-13]。常用的历史拟合方法缺乏系统性和规范

性,导致数值模拟模型的修正具有一定的随机性和随意性。由于数值模拟理论本身的局限性,以及网格化的数值模拟模型不能完全反映出实际油藏的非均质性,因此拟合指标的计算值与实际值不可能

收稿日期:2017-01-06。

作者简介:于金彪(1970—),男,河北故城人,高级工程师,博士,从事油藏地质建模及数值模拟方面的研究。联系电话:13854609586, E-mail: yjb0920@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“特高含水后期整装油田延长经济寿命期开发技术”(2016ZX05011-001)。

完全吻合,存在误差;同时,数值模拟也具有多解性,拟合指标受多个参数影响,有时虽然通过调整参数达到了拟合的精度,但修正后的数值模拟模型可能与实际油藏相差甚远。为此,笔者在数值模拟模型建立和初始化检查的基础上,从分析拟合现象入手,提出了一套系统、实用的历史拟合分析方法。

1 油藏数值模拟历史拟合流程及模型建立

1.1 数值模拟历史拟合流程

油藏数值模拟的历史拟合流程主要包括:①基础资料的准备与检查。收集数值模拟所涉及的动、静态基础资料,进行核实、整理、筛选和处理,生成相关软件需要的格式。②数值模拟模型建立。利用数值模拟软件的前处理功能建立反映油藏地质特征、岩石渗流特性、流体性质及生产过程的数值模拟模型。③模型初始化。数值模拟模型建立之后,进行初运算,初步检查数值模拟模型的合理性。④拟合现象与矛盾类型分析。根据拟合现象确定拟合矛盾的类型。⑤分析造成拟合矛盾的原因。通过分析拟合指标的影响因素,列出造成拟合矛盾的可能性原因,再采用排除法快速确定造成拟合矛盾的真正原因。⑥调整参数、修正模型。不断地修正数值模拟模型,反复模拟运算,直到满足油藏数值模拟历史拟合的精度要求。

1.2 数值模拟模型建立

在动、静态基础资料准备与检查的基础上,建立数值模拟模型。数值模拟模型主要包括:①地质模型。如果已经建立了三维地质模型,则直接将地质模型集成到数值模拟模型,若地质模型的网格规模超出了模拟能力,必须进行网格优化,既要保留精细的地质信息,又要控制网格模型的规模。②岩石渗流特性模型。用于描述油藏岩石-流体的渗流特征,以油、气、水三相相对渗透率以及毛管压力和岩石压缩系数来表征。相对渗透率用来描述不同流体相的相对渗流能力,影响油、气、水的流动和分布;毛管压力表征不同流体分子间的作用力以及与岩石表面作用力的关系,影响油、气、水原始饱和度的分布、过渡带的大小和压力梯度的计算;岩石压缩系数反映岩石的弹性或压缩性,影响油藏压力的变化。油、气、水三相相对渗透率和毛管压力实验数据必须经过筛选、变换、分类、归一化、平均化和还原处理,再根据不同岩石类型,建立反映不同渗流特性的分区,同时还要考虑拟函数、饱和度标定

和滞后的问题。③流体模型。用于描述油藏流体的分布和性质,通过描述油气、油水、气水之间的界面,建立平衡系统,或通过直接指定流体初始饱和度和压力分布,划分油区、气区、水区和过渡带,对于特殊水体,数值模拟软件以关键字的形式进行描述。根据流体性质的非均质性,建立反映不同流体性质的分区。④动态模型。用于表征油藏开发历史过程,详细描述井轨迹、油井和水井生产动态数据、射孔及封堵情况,对于合注合采井可能会涉及到产量劈分的问题。

1.3 数值模拟模型初始化检查

以数值模拟模型为基础,进行初始化运算,建立原始压力和饱和度分布,从零平衡检查、储量检查和流体高压物性分区检查等6个方面初步检查数值模拟模型的合理性(表1),同时计算地质储量,若发现明显的问题,及时进行修正。

表1 模型初始化检查与分析

序号	检查项目	分析内容
1	零平衡检查	在产液量、注入量均为0的情况下,是否有流动发生,是否处于平衡状态
2	储量检查	计算储量与地质储量是否接近
3	流体高压物性分区检查	是否反映流体性质的变化
4	渗流特性分区检查	是否反映相对渗透率和毛管压力的变化
5	射孔数据与模型匹配性检查	射孔层位是否有效、准确
6	连通性检查	是否反映砂体连通性以及隔夹层、断层的分割性

2 油藏数值模拟历史拟合现象及矛盾类型分析

油藏数值模拟历史拟合的目的是通过修正模型拟合生产动态数据,得到可靠的数值模拟模型。因此,首先分析历史拟合现象,也就是分析历史拟合曲线的形态以及计算值与实际值的拟合误差,确定拟合矛盾类型。针对不同的矛盾类型,再分析造成拟合矛盾的可能原因;由于数值模拟的多解性,需要结合地质认识进一步核实动、静态资料,采用排除法快速找出造成拟合矛盾的真正原因,从而修正数值模拟模型,排除的过程也是一个将可能性分析逐步变为确定性认识的过程。

2.1 拟合曲线形态及矛盾类型分析

根据拟合曲线形态将拟合矛盾划分为5种类型:①整体偏高型。在整个拟合过程中,修正前计

算值整体高于实际值(图1);②整体偏低型。在整个拟合过程中,修正前计算值整体低于实际值(图2);③前高后低型。在整个拟合过程中,修正前前期计算值高于实际值,后期计算值低于实际值(图3);④前低后高型。与前高后低型相反,在整个拟合过程中,修正前前期计算值低于实际值,后期计算值高于实际值;⑤环绕型。在整个拟合过程中,修正前计算值围绕着实际值上下波动(图4)。如果波动范围小,拟合误差满足“拟合上”的标准,则认为该指标“拟合上”^[14]。

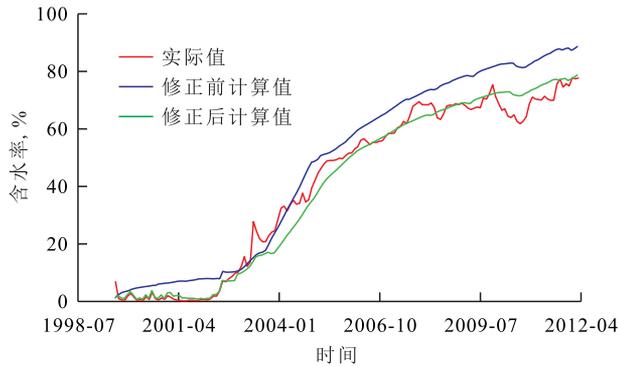


图1 埕岛油田12A-8井含水率拟合曲线

Fig.1 Matching curve of water cut of Well12A-8 in Chengdao oilfield

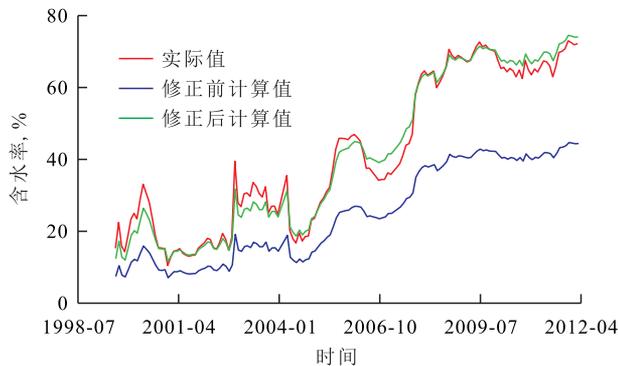


图2 埕岛油田12A-1井含水率拟合曲线

Fig.2 Matching curve of water cut of Well12A-1 in Chengdao oilfield

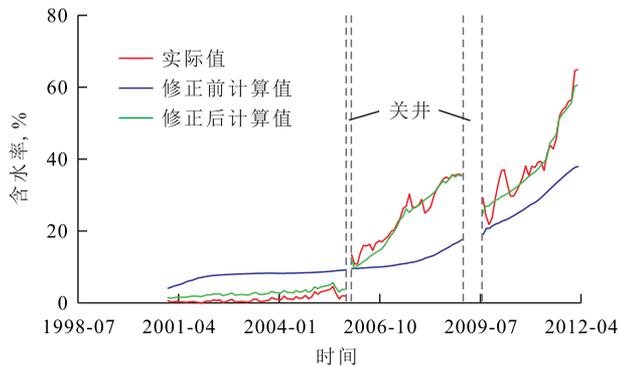


图3 埕岛油田12B-3井含水率拟合曲线

Fig.3 Matching curve of water cut of Well12B-3 in Chengdao oilfield

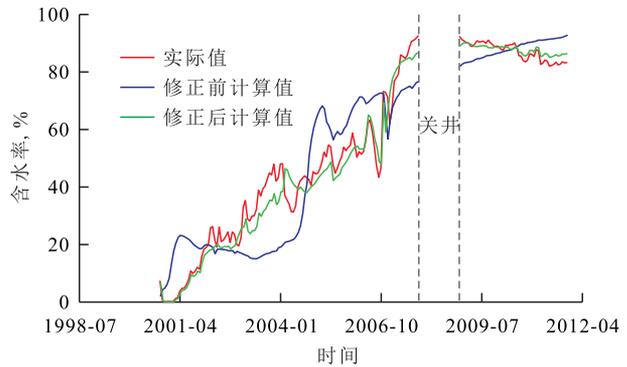


图4 埕岛油田11D-2井含水率拟合曲线

Fig.4 Matching curve of water cut of Well11D-2 in Chengdao oilfield

在历史拟合的过程中,还要把握好3个关键点的拟合:①见水时间。指油井第1次产水的时间,表明边底水或注入水前缘波及到井底。②含水率漏斗。指含水率突然下降或上升,一般认为是由补孔改层或水驱前缘突破造成的。③最终累积产量。指油藏或油井最终的累积产出量,反映了油藏或单井泄油范围内的供液能力。

2.2 拟合指标影响因素分析

按照历史拟合的区域范围,将历史拟合指标分为油藏、分区、分层、单井和井层指标等,分别反映整个油藏及各个分区、小层、井点、井层的历史拟合指标变化。按照拟合的数据内容,历史拟合指标主要有:压力指标,包括静压和流压,反映能量和压差变化;累积产量(或采出程度)指标,包括累积产液量、产水量、产油量和产气量,反映累积产出状况;含水率指标,包括见水时间和含水率变化,反映含水饱和度分布和水相流动能力;气油比指标,反映含气饱和度分布和气相流动能力,一般对于凝析气藏和挥发性油藏需要重点拟合气油比指标。

以含水率拟合指标为例,分析影响含水率变化的因素。水源和油、气、水的流动能力是影响含水率变化的主要因素,一般与油水界面、水体大小、水侵能力、油水同层、注采井之间的局部连通性、渗透性、原油粘度以及油、气、水三相相对渗透率有关。油水界面、水体大小和水侵能力影响边底水附近油井的见水时间和含水率变化;油水井之间的注采对应性、局部连通性、渗透性、大孔道分布影响流体的流动方向和流动能力,原油粘度以及油、气、水三相相对渗透率反映了流体的流动阻力和相对流动能力。如果油井投产即见水,也可能是该井处于油水同层或油水过渡带。

2.3 常见的拟合矛盾及其原因分析

以单井含水率的拟合矛盾为例进行分析。首

先分析水源,确定来水方向,再根据拟合矛盾类型,分析造成拟合矛盾的可能原因。

见水时间偏早或偏晚 对于水体附近的油井,见水时间一般受水体大小、水侵能力和油水界面的控制。如果见水时间偏早,即计算的见水时间早于实际的见水时间,可能是因模型的水体偏大、油水界面偏高、水侵能力偏大,造成了边底水前缘推进速度快。如果见水时间偏晚,可能是因模型的水体偏小、油水界面偏低、水侵能力偏小,造成了边底水前缘推进速度慢,需要结合压力指标的拟合,进一步落实油水界面、水体及水侵能力,同时原油粘度和油、气、水的相对渗透率也会影响边底水前缘的推进。对于远离水体的油井,见水时间受注入水的控制。通过分析注采井网,确定注采对应关系。如果见水时间偏早,说明注入水的推进速度快,可能是由模型注采井之间的渗透率偏大、水相相对渗透率偏大、原油粘度偏大而造成的。如果见水时间偏晚,则说明注入水的推进速度慢,可能是由模型注采井之间的渗透率偏小、水相相对渗透率偏小、原油粘度偏小造成的,也可能是实际油藏本身存在着大孔道或者油水同层。

含水率漏斗 含水率漏斗一般是由生产制度的改变或水驱前缘突破引起的。含水率突然降低,可能是油井采取了补孔改层措施,改变了生产层位;含水率突然上升,可能是油井射开了水层或注入水波及到井底,具体原因需要进一步核实。

整体偏低型 对于水体附近的油井,含水率偏低,可能是因模型的水体偏小、油水界面偏低、水侵能力偏小,而造成了边底水前缘推进速度慢,需要进一步结合压力指标的拟合,落实油水界面、水体及水侵能力,也有可能是原油粘度偏小、水相相对渗透率偏小而造成的。对于远离水体的油井,含水率受注入水的控制。含水率偏低,说明注入水的推进速度慢,可能是由模型注采井之间的渗透率偏小、水相相对渗透率偏小、原油粘度偏小造成的,也可能是实际油藏本身存在着大孔道或者油水同层。

整体偏高型 对于水体附近的油井,含水率偏高,可能是因模型的水体偏大、油水界面偏高、水侵能力偏大,而造成了边底水前缘推进速度快,需要进一步结合压力指标的拟合,落实油水界面、水体及水侵能力,也有可能是原油粘度偏大、水相相对渗透率偏大而造成的。对于远离水体的油井,含水率偏高,说明注入水的推进速度快,可能是由模型注采井之间的渗透率偏大、水相相对渗透率偏大、原油粘度偏大造成的。

前低后高型 前期弹性开采阶段含水率偏低,后期注水开采阶段含水率偏高。对于水体附近的油井,前期含水率偏低,可能是由于模型的水体偏小、油水界面偏低、水侵能力偏小而造成的;后期含水率偏高,可能受注入井的影响,需要分析注采井之间的连通性、渗透性及水相相对渗透率。对于远离水体的油井,前期含水率偏低,可能是因模型注采井之间的渗透率偏小、水相相对渗透率偏小,造成了注入水推进速度慢;后期含水率偏高,可能是油井多向受效或多井干扰引起的,需要进一步分析对应到注采层位的井网,落实注采对应关系。

前高后低型 前期弹性开采阶段含水率偏高,后期注水开采阶段含水率偏低。对于水体附近的油井,前期含水率偏高,可能是由于模型的水体偏大、油水界面偏高、水侵能力偏大造成的;后期含水率偏低,可能是补孔改层、卡封水层等生产制度改变而引起的。对于远离水体的油井,前期含水率偏高,可能是因模型注采井之间的渗透率偏大、水相相对渗透率偏大,造成了注入水推进速度快;后期含水率偏低,同样可能是补孔改层、卡封水层等生产制度改变引起的,需进一步落实注采对应关系。

3 油藏数值模拟模型修正及应用

3.1 模型修正

造成拟合矛盾的原因可能有多种,在分析资料的可靠性程度、地质认识以及拟合误差的基础上,通过数值模拟试运算和参数敏感性分析,采用排除法,快速确定造成拟合矛盾的真正原因,反复修正模型,逐步缩小拟合误差,直到满足拟合精度要求,使数值模拟模型不断逼近油藏真实模型。

3.2 实例应用

以埕岛油田12A-1井的含水率拟合为例。修正前12A-1井含水率的计算值整体偏低(图2),首先分析水源,找出实际含水率偏高的原因。该井于1999年8月投入开发,尚处于弹性开采阶段,投产即见水,井区附近不存在明显的边底水,说明产出水既不来自边底水,也不来自注入水。通过重新检查、分析该井及相邻的2口井12A-2和12A-4井的测井曲线,发现馆陶组上段4¹和5²小层的电阻率测井曲线明显反映出含水饱和度较高,通过进一步分析认为该区域属于局部岩性尖灭的油水同层,初始状态下即存在可动水,因此,认为12A-1井初期的实际产水主要受油水同层的控制,后期还受到注入井12A-7的影响。结合生产动态,重新解释该井及

邻井的初始含水饱和度,更新地质模型,经过大约10次模拟运算,12A-1井的含水率即满足了拟合精度要求(图2),极大地减少了模拟运算的次数,提高了历史拟合的效率和精度。渗流特性和流体性质具有区域特征,因此,对于单井含水率的拟合,一般不建议调整相对渗透率和原油粘度,是否调整相对渗透率和原油粘度,需要结合同一区域内其他井的拟合情况而定。

4 结论

油藏数值模拟历史拟合是有一定技巧和方法的。齐全,可靠的动、静态资料是数值模拟研究基础,尽可能建立准确的初始数值模拟模型,尤其是必须保证生产动态数据的可靠性;模型初始化检查是历史拟合、模型修正的第1步,是从整体上验证模型的合理性;通过分析拟合曲线形态及拟合矛盾类型,分析造成拟合矛盾的可能原因;再结合动、静态资料和地质认识,采用排除法能快速确定造成拟合矛盾的真正原因,极大地减少了模拟运算的次数。实例应用结果证明了该方法的实用性和有效性。

参考文献:

- [1] 刘雅馨,吕古贤,张用德,等.数值模拟在低渗透缝性砂岩油藏调剖中的应用[J].吐哈油气,2011,16(1):52-54.
Liu Yaxin, Lv Guxian, Zhang Yongde, et al. Application of numerical simulation technique in profile control of fractured low-permeability reservoir[J]. Tuha Oil & Gas, 2011, 16(1): 52-54.
- [2] 徐路生,尹太举,代盈营,等.油藏数值模拟技术在大庆高含水油田的应用[J].长江大学学报:自然科学版,2012,9(5):105-108.
Xu Lusheng, Yin Taiju, Dai Yingying, et al. Application of reservoir numerical simulation technology at the high-water-cut stage of Daqing Oilfield[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2012, 9(5): 105-108.
- [3] 康志江,赵艳艳,张允,等.缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术与应用[J].石油与天然气地质,2014,35(6):944-948.
Kang Zhijiang, Zhao Yanyan, Zhang Yun, et al. Numerical simulation technology and its application to fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 944-948.
- [4] 刘晨,孟立新,黄芳,等.油藏数值模拟技术在复杂断块油藏开发后期的应用[J].录井工程,2011,22(2):65-69.
Liu Chen, Meng Lixin, Huang Fang, et al. Application of the reservoir numerical simulating technique in the later development stage of complex fault block oil and gas pool[J]. Mud Logging Engineering, 2011, 22(2): 65-69.
- [5] 张远弟,喻高明,赵辉,等.油藏数值模拟技术在页岩气藏开发中的应用[J].新疆石油地质,2012,33(6):736-740.
Zhang Yuandi, Yu Gaoming, Zhao Hui, et al. Application of reservoir numerical simulation technology to shale gas development[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(6): 736-740.
- [6] 张戈,王端平,孙国,等.复杂断块油藏人工边水驱影响因素敏感性[J].油气地质与采收率,2015,22(2):103-106,111.
Zhang Ge, Wang Duanping, Sun Guo, et al. Sensibility study on influencing factors of artificial edge water flooding in complex fault-block reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 103-106, 111.
- [7] 杨戩,李相方,张晓林,等.预测蒸汽驱后期接替方式时机的新方法[J].油气地质与采收率,2015,22(2):83-87.
Yang Jian, Li Xiangfang, Zhang Xiaolin, et al. A novel method to predict converting time in later steam flooding period[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 83-87.
- [8] 桑林翔,杨果,成永强,等.SAGD微压差泄油阶段启动压力优化研究[J].特种油气藏,2015,22(4):98-100.
Sang Linxiang, Yang Guo, Cheng Yongqiang, et al. Optimization of starting pressure during SAGD micro-differential pressure drainage[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(4): 98-100.
- [9] Kazemi Alireza, Stephen Karl D. 油藏数值模拟自动历史拟合方法——以Nelson油田为例[J].石油勘探与开发,2012,39(3):326-337.
Kazemi Alireza, Stephen Karl D. Schemes for automatic history matching of reservoir modeling: A case of Nelson oilfield in the UK[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 326-337.
- [10] 李玉梅,陈开远,赵玉欣.提高油藏数值模拟精度的对策研究[J].石油天然气学报,2010,32(3):350-352.
Li Yumei, Chen Kaiyuan, Zhao Yuxin. Countermeasures for improving the accuracy of reservoir numerical simulation[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(3): 350-352.
- [11] 朱焱,谢进庄,杨为华,等.提高油藏数值模拟历史拟合精度的方法[J].石油勘探与开发,2008,35(2):225-229.
Zhu Yan, Xie Jinzhuang, Yang Weihua, et al. Method for improving history matching precision of reservoir numerical simulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 225-229.
- [12] 李淑霞,盖英杰,张俨彬.油藏数值模拟效果的定量评价方法[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(6):58-60.
Li Shuxia, Gai Yingjie, Zhang Yanbin. A method for evaluating the results of numerical reservoir simulation[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2001, 25(6): 58-60.
- [13] 陆熠,张原平,梁芹.油藏数值模拟技术的误差分析[J].西安石油学院学报:自然科学版,2001,16(2):13-16.
Lu Yi, Zhang Yuanping, Liang Qin. Error analysis of reservoir numerical simulation[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2001, 16(2): 13-16.
- [14] 于金彪.一种计算油藏数值模拟历史拟合精度的新方法[J].新疆石油地质,2015,36(3):304-307.
Yu Jinbiao. A new method for calculating history matching precision of reservoir numerical simulation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(3): 304-307.