

# 新一代油藏数值模拟核心技术与软件平台

## 公示信息

一、项目名称：新一代油藏数值模拟核心技术与软件平台

二、推荐单位：中国地质大学（北京）

三、项目简介：

油藏数值模拟是油气田科学开发的基础，是油田生产指标计算、剩余油分布预测、开发方案优选的必备技术，也是油气田开发方案设计和投资决策的重要依据。

长期以来，国外商业油藏数值模拟软件垄断中国市场。为改变这一现状，打破国外垄断，2006年，在国家油气重大专项中设立了“新一代油藏数值模拟软件系统”课题，由中国地质大学（北京）牵头，联合中国石油大学（北京）、中国科学技术大学、北京大学、陕西延长油田五家单位攻关，主要解决新一代油藏数值模拟计算中的核心算法和软件平台开发问题，形成具有自主知识产权核心计算方法和软件。经过近十年的研究，形成了如下创新成果：

1) 提出了新一代油藏数值模拟数学模型的统一建模方法，即质量守恒、动量守恒、能量守恒下的统一建模方式，建立了多维空间、多种相态、多组分、多种流动方式等为一体的渗流数学模型，实现了不同物理现象油藏的模拟计算，同时实现了同一油藏不同区域开发方式多变的区域分解整体计算。

2) 创建了油藏数值模拟软件平台的新型模式，设计和开发了具有插拔模块的多组合开放的数值模拟软件框架和平台，实现了多功能、多时空下的模拟运算能力，解决了软件升级换代和油田开发方式转变等模拟计算的功能，从根本上改变了油藏数值模拟软件开发的思路。

3) 针对中国油藏断层复杂、边界复杂、井型多变及增产措施多样化的情况，建立基于流线形态的变PEBI网格智能划分方法，开发了只按一键就能根据流线形态划分不同尺度PEBI网格的智能划分模，提出了基于小波分析的多重网格方法和大型稀疏矩阵在GPU下的求解方法，提高了计算速度20%以上。

4) 针对油藏数值模拟历史拟合速度慢、调整参数困难的问题，提出了油藏数值模拟快速智能历史拟合计算方法。根据油藏生产数据分析和模拟计算，建立一个替代模型，得到了概率配点的智能历史拟合新算法，开发了相应的计算模块。经应用表明，拟合速度提高了50%以上。

5) 针对我国致密油气藏、高含水油田化学驱采油等情况、开发了五个特殊油气藏模拟计算模块。主要有：考虑致密油藏渗吸、非达西流、应力敏感等因素下的致密油藏数值模拟模型和计算模块；可动凝胶、表面活性剂驱、化学复合驱存在堵塞效应、粘弹性效应、扩散效应的数值模拟模型和计算模块；高含硫存在硫沉积的数值模拟模型模块等共五个模块，为我国特殊油气藏开发提供了高效快速的模拟计算工具。

本成果获发明专利申请 18 件，授权 9 件，软件著作权 25 件，发表论文 79 篇，其中 SCI 收录 43 篇、出版专著 6 部、培养博士 41 名、硕士 65 名、推出了具有自主知识产权的软件平台 2.0 版本，并在中石油大庆、中石化华北、延长石油等 23 个区块均有应用。研究期间课题组有 5 人晋升教授、5 人晋升副教授，引进了两名“千人”，经济和社会效益显著。2018 年 7 月，中国石油与化学工业联合会组织的专家对成果进行了鉴定，认为成果总体达到国际先进水平，其中，新一代油藏数值模拟数学模型的统一建模方法已达到国际领先水平。

#### 四、主要完成单位及创新推广贡献：

完成单位	排序	主要贡献
中国地质大学（北京）	1	项目第一负责单位，完成了新一代油藏数值模拟一体化建模的方法及软件平台的总体设计，致密油藏高含硫气藏模拟模块的开发、负责软件平台的集成等
中国石油大学（北京）	2	可动凝胶、表面活性剂驱、化学复合驱下的堵塞效应、粘弹性效应、扩散效应的数值模拟模型和计算模块开发
中国科学技术大学	3	建立基于流线形态的变 PEBI 网格智能划分方法，开发了只按一键就能根据流线形态划分不同尺度 PEBI 网格的智能划分模块。提出了基于小波分析的多重网格方法和大型稀疏矩阵在 GPU 下的求解方法
北京大学	4	提出了油藏数值模拟快速智能历史拟合计算方法。根据油藏生产数据分析和模拟计算，建立一个替代模型，形成了概率配点的智能历史拟合新算法，开发了相应的计算模块
陕西延长石油（集团）有限公司	5	对延长油田特低渗油藏的地质特征和渗流机理进行了研究，组织了理论成果在延长五个区块的矿场试验与应用，形成了产学研一体化的研发模式

#### 五、推广应用情况：

在“十一.五”期间,该成果完成了新一代油藏数值模拟核心算法和软件平台的 1.0 版本，主要完成了基于黑油模型的功能，“十二.五”期间，在原来平台的基础上，进一步添加覆盖组分和化学驱、区域分解算法等功能，形成了软件平台 2.0 版本，成果于 2010 年开始在油田推广应用，在应用过程中不断完善平台开发。先后在中石大庆油田采油一厂、采油二厂、采油五厂、采油八厂、采油 9 厂，中石油长庆油田采油五厂、西峰油田、采气一厂、采气二

厂；中石油华北油田、新疆油田、西南油气田，中石化中原油田、胜利油田、华北油田、陕西延长石油等推广应用，先后推广应用于 23 个区块，为这些油田的老区块开发调整、剩余油分布预测提供了基础。

从 2010 年到目前为止，该成果有效解决了中国油田储层复杂、断层多、致密、开发井网多次加密、井型多、开发方式多变、压裂裂缝分布不规则等区块的数值模拟问题。通过本成果前期不同区块、不同开发方式的油藏数值模拟，制定不同区块科学的开发调整方案，提高了产量和采收率，有效降低可开发成本，创造了数以亿计的经济效益。未来，我国油气工业的主战场将继续老区挖潜，非常规油气田开发等方面，因此，本成果具有广阔的市场前景和重大的经济和社会效益。

#### 六、曾获科技奖励情况：

获奖项目名称	获奖年度	奖项名称	奖励等级	授奖部门（单位）
无				

#### 七、主要知识产权证明目录：

##### 1、发明专利授权 9 件（代表性发明专利 5 件）

序号	专利名称	申请号
1	一种用于超临界 CO <sub>2</sub> 岩心伤害的高温高压反应釜	201520595551.7
2	一种新型黑油、组分一体化混合数值模拟方法及装置	201210575347.X
3	油藏数值模拟的边界处理方法及装置	20120575346.5
4	含硫天然气中元素硫溶解度的预测方法	ZL201210461816.5
5	一种网格划分方法及系统	ZL201110204796.9

##### 2、软件著作权 25 项（其中核心软件著作权 18 项）

序号	软件名称	登记号
1	基于 CRM 和 EnKF 的油-水两相油藏地质特征描述软件 V1.0	2014SR138538
2	EnKF 油藏历史拟合软件	2013SR142123
3	新一代组份型油藏数值模拟软件[简称：组分模拟器]V2.0	2012SR128731
4	变形孔隙介质油藏数值模拟软件	2012SR039582
5	新一代组份型油藏数值模拟软件	2012SR128731
6	碎屑岩储层压裂效果评价数据支持系统	2015SR046841
7	煤层气井动态分析模拟计算软件	2015SR048696
8	低渗气藏单井压裂产能评价软件	2015SR024522
9	高含硫气藏动态分析软件	2014SR069538
10	复杂介质煤层气储层数值模拟软件	2014SR015333
11	碳酸盐岩气藏数值模拟软件	2011SR001280
12	页岩气离散裂缝数值模拟软件	2015SR143773

13	化学驱数值模拟软件	2015SR136332
14	聚合物驱数值试井软件	2015SR136327
15	油藏数值模拟可变 PEBI 网格生成软件	2015SR135978
16	新型可动凝胶数值模拟软件	2012SR131676
17	交联聚合物模拟软件	2011SR099677
18	稀油油藏精细数值模拟软件	2011SR099653

4、论文 79 篇（其中 SCI 收录 43 篇），代表论文如下：

- [1] Lai F, Li Z, Wei Q, et al. Experimental Investigation of Spontaneous Imbibition in Tight Reservoir with Nuclear Magnetic Resonance Testing[J]. Energy & Fuels, 2016, 30.
- [2] Lai F, Li Z, Wu W, et al. Study on the replacement time of velocity string in production process in tight gas reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 28(2-3):254-261.
- [3] Lai F, Li Z, Meng Y, et al. Dynamic prediction of coalbed methane well considering pseudo-steady state diffusion[J]. International Journal of Oil Gas & Coal Technology, 2016, 11(3):264.
- [4] Lai F, Li Z, Wang Y, et al. Coalbed methane reservoir dynamic prediction model by combination of material balance equation and crossflow-diffusion[J]. Energy Sources, 2016, 38(2):257-263.
- [5] Lai F, Li Z, Fu Y, et al. A simulation research on evaluation of development in shale oil reservoirs by near-miscible CO<sub>2</sub> flooding[J]. Journal of Geophysics & Engineering, 2015, 12(4).
- [6] Fengpeng L, Zhiping L, et al. A simulation research on evaluation of development in shale oil reservoirs by near miscible CO<sub>2</sub> flooding [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2015.
- [7] Wang C, Li Z P, Li H, et al. A new method to calculate the productivity of fractured horizontal gas wells considering non-Darcy flow in the fractures[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 26:981-991.
- [8] Ju B. MATHEMATICAL MODEL AND ANALYTICAL SOLUTIONS FOR UNSTEADY FLOW IN NATURAL GAS RESERVOIRS[J]. Journal of Porous Media, 2014, 17(4):279-285.
- [9] Ju B. Mathematical model and numerical simulation of multiphase-flow in permeable Rocks considering diverse deformation[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2014, 119(5):149-155.
- [10] Lai F, Li Z, Li Z, et al. Shale Gas Pseudo Two-Dimensional Unsteady Seepage Pressure

- Simulation Analysis in Capillary Model[J]. *Oil & Gas Science & Technology*, 2014, 69(7):1191-1199.
- [11] Lai F P, Li Z P, Yang Z H, et al. The study of components mass transfer mechanism and the rules of fluid phase alteration in the process of hydrocarbon gas drive[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2014, 21:411-416.
- [12] Wang C, Li Z P, Lai F P. A novel binomial deliverability equation for fractured gas well considering non-Darcy effects[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2014, 20(2):27-37.
- [13] Ju B, Wu Y S, Qin J. Computer Modeling of the Displacement Behavior of Carbon Dioxide in Undersaturated Oil Reservoirs[J]. *Oil & Gas Science & Technology*, 2013.
- [14] Hu J, Yang X, He S L, et al. Distribution of sulfur deposition near a wellbore in a sour gas reservoir[J]. *Journal of Geophysics & Engineering*, 2013, 10(10):015005.
- [15] Hu J H, He S L, Wang X D, et al. The Modeling of Sulfur Deposition Damage in the Presence of Natural Fracture[J]. *Liquid Fuels Technology*, 2013, 31(1):80-87.
- [16] Hu J, He S, Zhao J, et al. Modeling of sulfur plugging in a sour gas reservoir[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2013, 11(11):18-22.
- [17] Ju B, Fan T, Jiang Z. Modeling asphaltene precipitation and flow behavior in the processes of CO<sub>2</sub> flood for enhanced oil recovery[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2013, 109(9):144-154.
- [18] Lai F, Li Z, Yingkun F, et al. Experimental study of enhanced oil recovery of different gas injection methods in low permeability reservoir at high water-cut stage [J]. *Energy Education Science and Technology Part A. Energy Science and Research*, 2013.
- [19] Lai F, Li Z, Wang Y, et al. Theoretical method for calculating porosity and permeability under self-regulating effect[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, 23(5):637-641.
- [20] Lai F, Li Z, Fu Y, et al. A drainage data-based calculation method for coalbed permeability[J]. *Journal of Geophysics & Engineering*, 2013, 10(6):5005.
- [21] Ju B, Fan T, Li Z. Improving water injectivity and enhancing oil recovery by wettability control using nanopowders[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2012, s 86–87(s 86–87):206-216.

- [22] Ju B, Fan T. Wettability Alteration and Its Effects on Production in Water Flooding[J]. *Liquid Fuels Technology*, 2012, 30(16):1692-1703.
- [23] Ju B, Wu Y S, Qin J, et al. Modeling CO<sub>2</sub> miscible flooding for enhanced oil recovery[J]. *Petroleum Science*, 2012, 9(2):192-198.
- [24] Zhang L, Li D, Lu D. Effect of distinguishing apparent permeability for different components on BHP and produced gas composition in tight- and shale-gas reservoir[J]. *Journal of Unconventional Oil & Gas Resources*, 2015, 11:53-59.
- [25] Li D, Zhang L, Lu D. Effect of distinguishing apparent permeability on flowing gas composition, composition change and composition derivative in tight- and shale-gas reservoir[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2015, 128:107-114.
- [26] Zhang L, Li D, Lu D, et al. A new formulation of apparent permeability for gas transport in shale[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, 23:221-226.
- [27] Jia Z, Li D, Yang J, et al. Numerical Well Test Analysis for Polymer Flooding considering the Non-Newtonian Behavior[J]. *Journal of Chemistry*, 2015, (2015-9-27), 2015, 2015(10).
- [28] Zhang L, Li D, Wang L, et al. Simulation of Gas Transport in Tight/Shale Gas Reservoirs by a Multicomponent Model Based on PEBI Grid[J]. *Journal of Chemistry*, 2015, (2015-9-29), 2015, 2015(8):1-9.
- [29] Li X, Huang T, Lu D T, et al. Accelerating experimental high-order spatial statistics calculations using GPUs[J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 70(C):128-137.
- [30] Li S, Zhang D, Li X. A New Approach to the Modeling of Hydraulic-Fracturing Treatments in Naturally Fractured Reservoirs[C]// SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference. 2016.
- [31] Li S, Li X, Zhang D. A fully coupled thermo-hydro-mechanical, three-dimensional model for hydraulic stimulation treatments[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 34:64-84.
- [32] Liao Q, Zhang D. Data Assimilation for Strongly Nonlinear Problems by Transformed Ensemble Kalman Filter[J]. *Spe Journal*, 2015, 20(1):202-221.
- [33] Yang T, Li X, Zhang D. Quantitative dynamic analysis of gas desorption contribution to production in shale gas reservoirs[J]. *Journal of Unconventional Oil & Gas Resources*, 2015, 9:18-30.
- [34] Zhang Z, Li H, Zhang D. Water flooding performance prediction by multi-layer capacitance-

- resistive models combined with the ensemble Kalman filter[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2015, 127:1-19.
- [35] Liao Q, Zhang D. Constrained probabilistic collocation method for uncertainty quantification of geophysical models[J]. *Computational Geosciences*, 2015, 19(2):311-326.
- [36] Li H. Conditional Simulation of Flow in Heterogeneous Porous Media with the Probabilistic Collocation Method[J]. *Communications in Computational Physics*, 2014, 16(4):1010-1030.
- [37] Dai C, Li H, Zhang D. Efficient and accurate global sensitivity analysis for reservoir simulations using probabilistic collocation method[J]. *Spe Journal*, 2014, 19(4):621-635.
- [38] Ping J, Zhang D. History Matching of Channelized Reservoirs with Vector-based Level Set Parameterization[J]. *Spe Journal*, 2014, 19(19):514-529.
- [39] Ping J, Zhang D. History matching of fracture distributions by ensemble Kalman filter combined with vector based level set parameterization[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2013, 108(15):288-303.
- [40] Li H, Zhang D. Stochastic representation and dimension reduction for non-Gaussian random fields: review and reflection[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2013, 27(7):1621-1635.
- [41] Song J, Zhang D. Comprehensive review of caprock-sealing mechanisms for geologic carbon sequestration.[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(1):9-22.
- [42] Liao Q, Zhang D. Probabilistic collocation method for strongly nonlinear problems: 1. Transform by location[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(12):7911–7928.
- [43] Jahangiri H R, Zhang D. Ensemble based co-optimization of carbon dioxide sequestration and enhanced oil recovery[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 8(5):22-33.

八、主要完成人情况表:

姓名	排名	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献	曾获科技奖励情况
李治平	1	教授	中国地质大学（北京）	中国地质大学（北京）	创新成果 1、2、5	国家科技进步二等奖 1 项、省部科技进一步 1 等奖 5 项，二等奖 4 项
王香增	2	教授级高工	延长石油（集团）有限责任公司	延长石油（集团）有限责任公司	创新成果 1、2、5	国家科技进步二等奖 3 项，省部级奖励 11 项
姜汉桥	3	教授	中国石油大学（北京）	中国石油大学（北京）	创新成果 2、5	国家科技进步二等奖 1 项，省部级奖励 2 项
卢德唐	4	教授	中国科学技术大学	中国科学技术大学	创新成果 2、3	省部级科技进步奖 4 项
李 恒	5	研究员	北京大学	北京大学	创新成果 2、4	
赖枫鹏	6	副教授	中国地质大学（北京）	中国地质大学（北京）	创新成果 1、2、5	省部级科技进步一等奖 2 项
党海龙	7	高级工程师	延长石油（集团）有限责任公司	延长石油（集团）有限责任公司	创新成果 1、2、5	省部级科技进步奖 3 项
刘同敬	8	副研究员	中国石油大学（北京）	中国石油大学（北京）	创新成果 5	省部级科技进步奖 3 项
李道伦	9	教授	合肥工业大学	中国科学技术大学	创新成果 3	省部级科技进步奖 1 项
常海滨	10	副研究员	北京大学	北京大学	创新成果 4	
李俊键	11	副教授	中国石油大学（北京）	中国石油大学（北京）	创新成果 5	
鞠斌山	12	教授	中国地质大学（北京）	中国地质大学（北京）	创新成果 1、2	
胡景宏	13	副教授	中国地质大学（北京）	中国地质大学（北京）	创新成果 1、2	省部级科技进步奖 2 项
王硕亮	14	讲师	中国地质大学（北京）	中国地质大学（北京）	创新成果 1、2	
李剑	15	高级工程师	延长石油（集团）有限责任公司	延长石油（集团）有限责任公司	创新成果 1、2、5	