

特种油气藏

Special Oil & Gas Reservoirs

ISSN 1006-6535, CN 21-1357/TE

《特种油气藏》网络首发论文

题目：低渗油藏注入水构成岭回归量化评价方法
作者：郑宪宝，王宏伟，苗志国，李美芳
收稿日期：2021-07-13
网络首发日期：2022-05-13
引用格式：郑宪宝，王宏伟，苗志国，李美芳. 低渗油藏注入水构成岭回归量化评价方法[J/OL]. 特种油气藏.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1357.TE.20220513.1334.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

低渗油藏注入水构成岭回归量化评价方法

郑宪宝^{1,2}, 王宏伟^{1,2}, 苗志国^{1,2}, 李美芳^{1,2}

(1.中国石油大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163712;

2.黑龙江省油层物理与渗流力学重点实验室, 黑龙江 大庆 163712)

摘要：针对大庆油田朝 5 区块葡萄花油层存在大量无效注水，常规数值模拟计算效率低下、评价流程复杂的问题，分析了注入水构成，建立了全地层地质模型，首先利用数值模拟方法量化了注入水的构成，然后基于影响注入水的地质开发因素，通过岭回归方法构建了高注采比区块注水构成量化评价模型，并将模型预测结果与数值模拟计算的结果进行了对比验证，证明岭回归构建的模型较为可靠。研究表明：目前朝 5 区块储层吸水占比 55%，未划储层段吸水 28%，泥页岩吸水 8%，外溢水量 12%，建立的注水构成量化评价模型能准确表征朝 5 区块的注入水构成，岭回归模型相比数值模拟可以在计算精度相差不大的情况下对评价效率有极大的提升。研究成果对于提高油田注水开发水平，保证油田开发具有一定的指导意义。

关键词：低渗油藏；高注采比；注水构成量化评价；无效注水；机器学习；大庆油田

中图分类号：TE348

文献标识码：A

0 引言

朝 5 区块位于松辽盆地中央坳陷区东部朝阳沟阶地朝阳沟背斜构造轴部，区块构造平缓，构造内断层发育，均为正断层。储层孔隙度为 8%~20%，渗透率为 0.05~50.00 mD，属低渗透储层^[1-3]。区块于 1988 年 8 月投入开发，初期采用反九点井网，平均单井日产油为 6.0t/d。1989 年 4 月转注水开发，1993 年 8 月开始调整注采系统，逐步实现线性注水，2007 年采用“对角线交点”方式进行加密，多年的高强度注水使得区块注采比普遍较高（在 1.2 以上），部分井区达到 3.0 左右。如此高强度的注水下，产油量并未得到有效的提升，严重影响油田下一步开发^[4-6]。困惑研究人员的主要问题在于注入水去向和无效注水的定量表征。需要找到一个合适有效的方法来量化注入水构成。

国内学者在无效注水领域进行了大量的研究工作，研究方向主要为无效注水的识别和调控^[7-9]。前者研究主要集中在优势渗流通道的识别，常用的方法有试井法、测井法、油水监测法等。郝金克^[10]利用无因次压力指数识别优势渗流通道，并且认为无因次压力指数越小，地层无效注水的可能性越大。徐志涛等人^[11]利用物质平衡原理与 Logistic 旋回理论推导了无效注水比例的理论计算方法。钟睿鸿^[12]在油水两相渗流规律实验基础上，利用油水井注采动态

收稿日期：20210713；**改回日期：**20220330

基金项目：国家科技重大专项“低渗、特低渗复杂油藏规模有效动用关键技术”（2017ZX05013-006）

作者简介：郑宪宝（1978—），男，高级工程师，2003 年毕业于大庆石油学院石油工程专业，2006 年毕业于大庆石油学院油气田开发工程专业，获硕士学位，现从事低渗透油田水驱开发及提高采收率方面的研究。

特征，划分油藏无效注水区域。由文献调研情况可知，目前还没有一套成熟的理论和方法对注水构成进行定量化评价^[13-16]。常规数值模拟评价方法存在计算求解过程复杂和拟合难度大的问题，为了实现水驱开发油田的有效注水，提高油田的注水开发水平，通过岭回归方法建立高注采比区块注水构成量化评价模型来代替数值模拟，进而量化油田注水构成。研究成果能够为油田注水开发技术提供有力支撑。

1 注入水构成分析

朝 5 区块低渗透油藏累计注采比为 1.5~2.0，往往存在“注不进、采不出”的问题。水注入地层后主要有 4 个去向（如图 1 所示）：①油藏天然能量枯竭，注入的水进入储层孔隙，对孔隙中的剩余油进行驱替，从而提高油井产量和采收率，这部分水为二次采油过程中的有效注水，也称储层吸水；②低渗透油藏纵向储层非均质性强，在储层附近存在大段的泥质粉砂岩，其地层渗透率低，地层厚度大，吸水能力强。这部分地层最开始并未被划分为储层，但后来由于开发技术的提高，其中的油也能够采出，被称为未划储层段。部分注入水进入未划储层段，在长期高注采比注水过程中存在未划储层段吸水现象。③地层砂岩泥岩交互，厚度较大的泥岩也吸收了大量的注入水。④由于低渗透油藏一般采用接近地层破裂压力注水，隔夹层在长期水化过程中，存在抗张强度下降趋势，因此注入水沿隔夹层外溢，进入上部或下部地层。此外，低渗透油藏天然裂缝发育、局部存在一定规模的断层，长期注水过程中，天然裂缝和断层开启，存在注入水外溢。这 4 部分构成了高注采比区块的注水去向，后续将对这 4 种情况开展定量化表征。

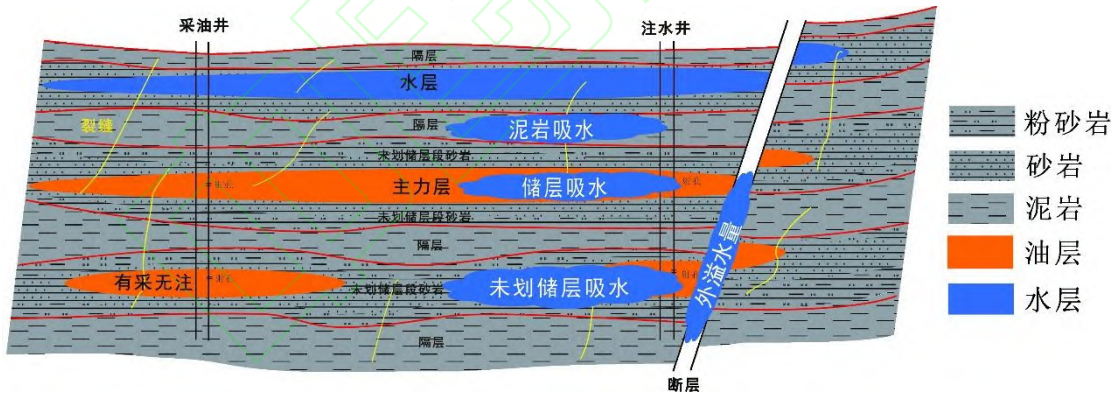


图 1 注入水去向构成分析

2 全地层地质模型建立及数值模拟研究

2.1 地质模型的建立

根据上文分析，对测井资料进行二次解释，根据储层测井岩性-物性交会图（图 2），划分了泥岩段、未划储层段、储层的范围。储层段孔隙度大于 10%，渗透率大于 0.2mD。未划储层孔隙度为 4%~10%，渗透率为 0.04~0.2 mD。泥岩段孔隙度低于 4%，渗透率低于 0.04mD。朝 5 区块地层厚度约为 50m，平均储层厚度约为 10m，以划定的储层、未划储层和泥岩段的界限，建立考虑 3 种不同地层的全地层地质模型，模型连井剖面如图 3 所示。建立的模型

中，新增未划储层段约为 7m，泥岩段约为 30m。

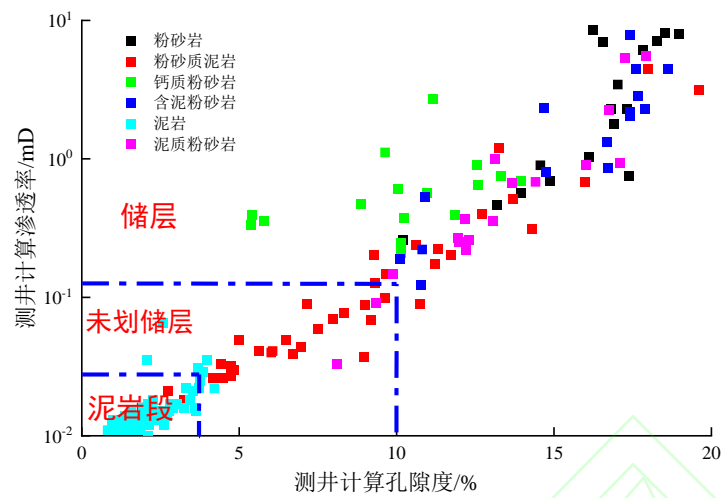


图 2 测井岩性-物性交会图

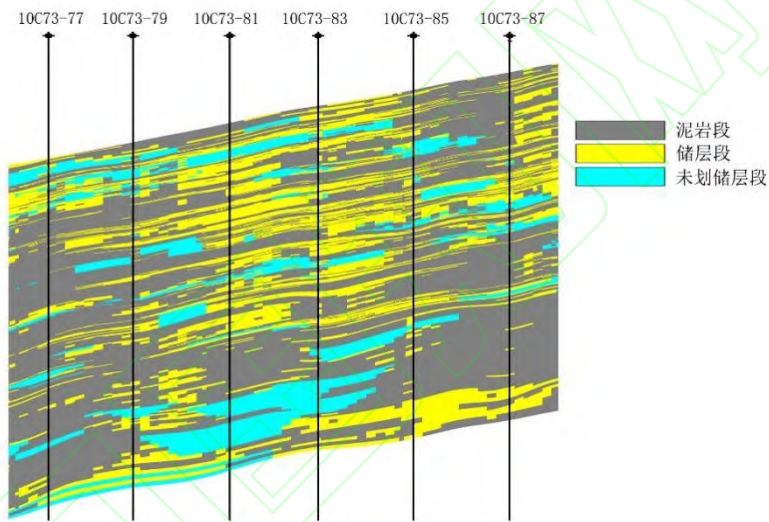


图 3 朝 5 区块全地层连井剖面

2.2 数值模拟量化研究

基于上述地质模型，网格粗化建立数值模型，平面上，采取非均匀网格，井间网格数在 5 个以上；纵向上，根据朝 5 井区的地层对比、储层划分及物性解释，将油藏细分为 46 个单层，各层纵向采用不等距网格。将油藏参数、流体参数输入油藏数值模拟器 Eclipse 中，建立全地层注水数值模拟模型，如图 4 所示。为了验证模型的可靠性，采用定日产液量拟合进行历史拟合（表 1）。由表 1 可知，储量拟合误差为 0.36%，日产油量拟合误差为 0.59%，含水率拟合误差为 1.28%，拟合效果好，说明数值模拟模型较为可靠。

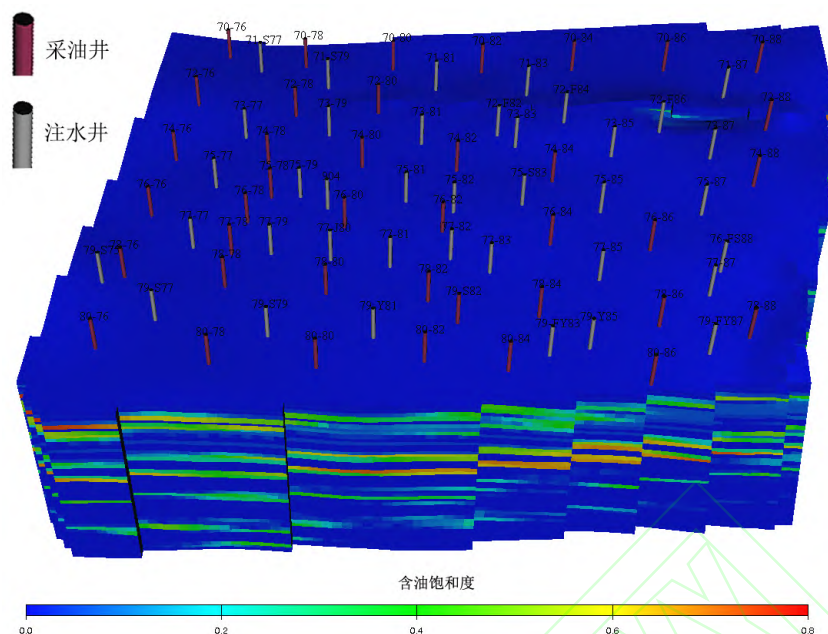


图 4 朝 5 井区全地层数值模拟模型

表 1 数值模拟拟合结果

参数	拟合值	实际值	相对误差/%
储量/ 10^4m^3	381.24	379.89	0.36
累计产液/ 10^4m^3	165.64	166.64	0
累计产油/ 10^4m^3	91.73	91.19	0.59
累计产水/ 10^4m^3	73.91	74.87	-1.28

根据模型中储层、未划储层和泥页岩的地层的厚度情况，分别对 3 种地层吸水比例进行劈分。各历史生产时间的劈分结果如图 5 所示。根据劈分结果可知，2019 年朝 5 区块储层吸水比例为 52%，未划储层段吸水比例为 28%，泥页岩吸水比例为 8%，外溢水量比例为 12%。利用这种方法，对每口注水井在不同层位的注水量进行劈分，得到每口井的注水量量化构成，再结合每口井的其他参数，就构成了注水量评价模型的基础数据。

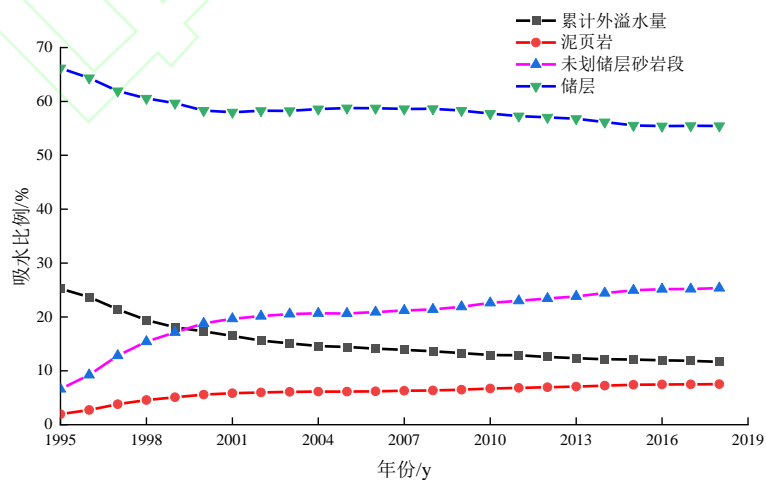


图 5 朝 5 区块不同类型地层吸水比例变化曲线

3 岭回归模型量化研究

影响注入水去向的因素众多,且多因素之间存在相互影响,不能以简单的线性函数来拟合注水量和各因素之间的关系,采用常规油藏工程方法也无法定量评价注入水量。针对上述问题,采用机器学习的方法,机器学习中的岭回归分析是一种专用于共线性数据分析的有偏估计回归方法,放弃最小二乘法的无偏性,以损失部分信息、降低精度为代价,最大程度找到因变量与非线性自变量之间的关系。因此,岭回归分析方法更符合实际、更可靠,大大提高了病态数据的耐受性。将朝5区块注水的影响因素作为岭回归模型的输入变量,通过回归学习训练岭回归模型,从而获得适用于朝5区块的岭回归注水量化分析模型,指导后期注水构成评价过程。

3.1 岭回归分析数学模型

岭回归是为了约束自变量来解决数据集之间具有的多重共线性的问题,即预测变量之间具有相关性的问题。其通过在损失函数中引入正则化项来达到目的。一般的线性回归方程如下:

$$Y = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \beta_0 \quad (1)$$

式中: Y 为因变量,是训练集中的样本; p 为样本点总数; β_i 为待求系数; X_i 为自变量; β_0 为偏差。

求解上述回归问题的常规方法是最小二乘法最小化偏差,得到式(2)。而岭回归要在上述最小化目标中加上一个惩罚项 $\lambda \sum_{i=1}^p \beta_j^2$,来消除数据间的共线性,如式(3)所示,式(3)为一个凸函数,当 $\partial \hat{\beta} / \partial \beta = 0$ 时,函数取最小值,即式(4):

$$\hat{\beta} = \min \sum_{i=1}^p \left(Y_i - \beta_0 - \sum_{i=1}^p \beta_i X_i \right)^2 \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = \min \left[\sum_{i=1}^p \left(Y_i - \beta_0 - \sum_{i=1}^p \beta_i X_i \right)^2 + \lambda \sum_{i=1}^p \beta_j^2 \right] \quad (3)$$

$$\beta_{\min} = \left(X^T X + \lambda I \right)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

式中: $\hat{\beta}$ 为目标偏差; Y_i 为样本点的目标值; λ 为岭系数; β_j 为损失函数; X^T 为 X 的转置; I 为单位矩阵。

3.2 注水量化模型

选择注水含水率、产液强度、油水井数比、注水强度、平均单井年产液量、平均单井年

注水量、年注采比、年平均压力、累计亏空量这些影响地层吸水的参数作为分析的基础参数。

从数据分析角度上讲,上述参数存在一些问题:同一工区内同一口井不同年份的储层厚度、渗透率是相同的,这些高度一致的变量,会降低注水量量化模型的预测精度。为了消除这种不利影响,我们重新定义参数:产液强度为产液量和地层系数(地层厚度和地层渗透率的乘积)的比值、注水强度为注水量和地层系数的比值。将地层压力(A1)、含水率(A2)、注采比(A3)、孔隙度(A4),渗透率(A5)、储层产液强度(A6)、未划储层产液强度(A7),平均产液强度(A8)、泥岩产液强度(A9)、储层注入强度(A10)、未划储层注入强度(A11)、泥岩注入强度(A12)以及平均注入强度(A13)作为模型输入的自变量,以数值模拟中劈分所得到的储层吸水比例(B1)、未划储层吸水比例(B2)、泥岩吸水比例(B3)、外溢水量(B4)作为模型的因变量,来拟合岭回归模型,各参数值如表2所示。

表2 注水量化构成岭回归分析模型学习参数

A1/ MPa	A2/ %	A3	A4	A5/ mD	A6/ m ³ /(m·mD)	A7/ m ³ /(m·mD)	A8/ m ³ /(m·mD)	A9/ m ³ /(m·mD)	A10/ m ³ /(m·mD)	A11/ m ³ /(m·mD)	A12/ m ³ /(m·mD)	A13/ m ³ /(m·mD)	B1	B2	B3	B4
11.8	0.0484	0.1006	1581.8	8112.3	4201.8	2835.1	11704.6	189.4	4992.8	2835.1	11704.6	1566.3	0.0	12.1	40.9	47.0
12.1	0.0367	0.0436	1428.6	7637.2	3905.4	2635.1	10879.0	176.0	4640.6	2635.1	10879.0	1455.8	0.7	12.3	41.3	45.7
12.3	0.0521	0.1437	1250.2	6869.3	3486.9	2352.7	9713.1	157.2	4143.3	2352.7	9713.1	1299.8	2.5	12.1	40.9	44.4
10.4	0.0789	2.8962	1444.1	6857.6	3378.3	2279.5	9410.8	152.3	4014.4	2279.5	9410.8	1259.4	4.3	11.9	40.2	43.6
12.2	0.0621	1.0541	1096.9	4638.4	3024.3	2040.6	8424.7	136.3	3593.7	2040.6	8424.7	1127.4	5.4	11.8	39.6	43.2
13.3	0.0544	0.5194	1072.7	4668.2	3224.0	2175.4	8981.0	145.3	3831.0	2175.4	8981.0	1201.8	6.4	11.6	39.2	42.8
13.1	0.0536	0.2838	1143.2	4683.4	3385.5	2284.3	9430.8	152.6	4022.9	2284.3	9430.8	1262.0	7.1	11.5	38.9	42.5
...
12.3	0.0297	0.1173	1169.2	4767.6	3257.0	2197.6	9072.9	146.8	3870.2	2197.6	9072.9	1214.1	7.3	11.5	38.8	42.4
11.4	0.0302	0.0569	1625.4	5882.6	4174.1	2816.4	11627.6	188.2	4960.0	2816.4	11627.6	1556.0	7.9	11.4	38.4	42.3
10.8	0.0404	0.1036	1946.3	6913.1	4747.6	3203.4	13225.1	214.0	5641.4	3203.4	13225.1	1769.8	8.0	11.4	38.3	42.3
10.4	0.1001	3.0016	1733.2	5689.9	4075.1	2749.6	11351.8	183.7	4842.3	2749.6	11351.8	1519.1	8.9	11.2	37.6	42.2
10.9	0.0289	0.3962	1237.5	5395.0	3054.9	2061.3	8509.9	137.7	3630.1	2061.3	8509.9	1138.8	9.6	11.1	37.3	41.9
11.0	0.0406	0.1202	1110.4	4560.4	2748.8	1854.7	7657.3	123.9	3266.4	1854.7	7657.3	1024.7	10.2	11.0	37.0	41.7
10.4	0.0283	0.0239	1022.9	5186.0	2391.2	1613.5	6661.1	107.8	2841.4	1613.5	6661.1	891.4	11.4	10.8	36.5	41.3
9.2	0.0257	0.0425	1238.1	6262.9	2583.8	1743.4	7197.7	116.5	3070.3	1743.4	7197.7	963.2	11.8	10.8	36.4	41.0

通过岭回归模型最终得到的外溢水量评价模型的矩阵形式如式(5)所示,泥岩吸水评价模型的矩阵形式如式(6)所示,未划储层砂岩段吸水评价模型的矩阵形式如式(7)所示,储层段吸水评价模型的矩阵形式如式(8)所示:

$$\frac{y_1-0.018}{46.42-0.018} = \frac{\bar{x}-\bar{v}_{\min}}{\bar{v}_{\max}-\bar{v}_{\min}} \times \begin{bmatrix} -0.32 & -0.15 & -0.23 \\ -0.35 & -0.17 & -0.026 \\ 0.025 & -0.339 & 0.095 \\ 0.74 & 0.025 & -0.34 \\ & -0.12 & \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\frac{y_2-0.47}{24.37-0.47} = \frac{\bar{x}-\bar{v}_{\min}}{\bar{v}_{\max}-\bar{v}_{\min}} \times \begin{bmatrix} 0.073 & 0.058 & 0.12 \\ 0.005 & 0.014 & -0.18 \\ -0.045 & 0.17 & -0.21 \\ -0.19 & -0.045 & 0.17 \\ & -0.008 & \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\frac{y_3-3.11}{41.23-3.11} = \frac{\bar{x}-\bar{v}_{\min}}{\bar{v}_{\max}-\bar{v}_{\min}} \times \begin{bmatrix} 0.23 & 0.34 & 0.28 \\ 0.43 & 0.19 & 0.29 \\ -0.14 & 0.083 & 0.094 \\ -0.78 & -0.14 & 0.083 \\ & -0.057 & \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\frac{y_4 - 40.35}{68.10 - 40.35} = \frac{\bar{x} - \bar{v}_{\min}}{\bar{v}_{\max} - \bar{v}_{\min}} \times \begin{bmatrix} 0.098 & -0.27 & -0.13 \\ 0.001 & 0.003 & -0.23 \\ 0.17 & 0.26 & -0.13 \\ 0.12 & 0.17 & 0.26 \\ & 0.23 & \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

式中： y_1 为外溢水量比例； \bar{x} 为影响因素； \bar{v}_{\min} 为特征值的最小值； \bar{v}_{\max} 为特征值的最大值； y_2 为泥岩吸水比例； y_3 为泥岩吸水比例； y_4 为储层吸水比例。

3.3 注水量化模型检验

为了检验模型的可靠性，将通过输入参数计算所得的外溢水量比例、泥页岩吸水比例、储层吸水比例、未划储层吸水比例四个参数的计算值与通过数值模拟得到真实值之间的关系（图6）。由图6可知，除泥页岩吸水占比外，其他3个变量的平均相对误差均小于10%，说明注水量化构成模型对累计外溢水量占比、未划储层段砂岩吸水占比以及储层吸水占比解释良好。对泥岩吸水量预测效果较差，这说明输入参数对泥岩吸水影响较小，这与实际认识也是相符的，泥岩吸水主要与泥岩中的黏土含量有关，黏土含量越多，泥岩吸水越多，而储层和未划储层中黏土含量极少，因此输入参数中并没有黏土含量这个参数。

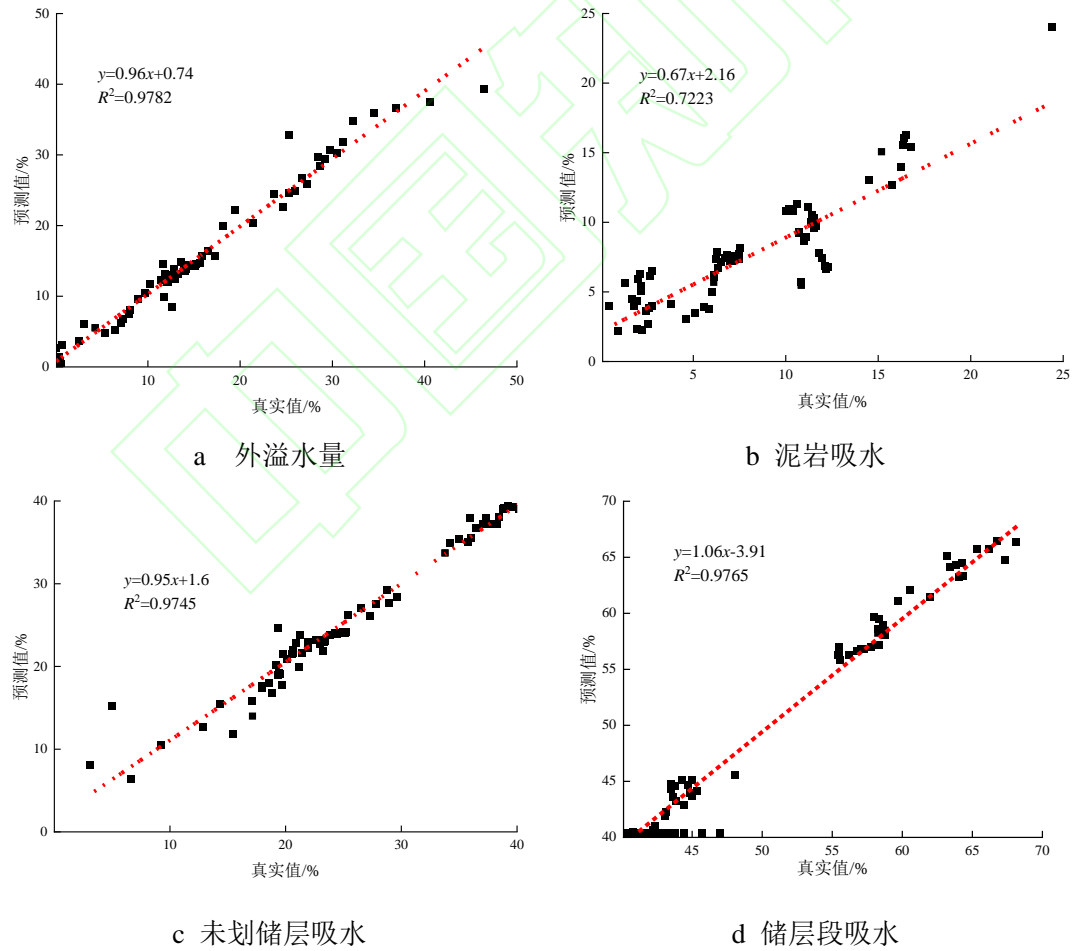


图6 模型验证散点图

4 结 论

(1) 根据储层物性将朝 5 区块注水类型划分为储层吸水 and 无效注水, 无效注水分为未划储层吸水、泥岩吸水以及外溢水量。

(2) 根据全地层数值模拟模型获得了不同类型无效注水量, 利用岭回归方法建立外溢水量比例评价模型、泥岩吸水比例评价模型、未划储层砂岩段吸水比例评价模型、储层段吸水比例评价模型。

(3) 注入水量化构成岭回归分析模型对累计外溢水量占比、未划储层段砂岩吸水占比以及储层吸水占比解释良好, 可用于其他类似油田的注入水量化构成评价。

参考文献:

- [1]李玉梅.朝阳沟油田朝 5 北井区裂缝性储层建模与剩余油定量评价[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
- [2]赵一飞.超前注水技术在朝阳沟油田的应用及效果分析[D].大庆:东北石油大学,2016.
- [3]王菲.大庆葡萄花油田扶余油层储层特征研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [4]赵国忠,李美芳,郑宪宝,等.低渗透油田注水开发外流量评估方法[J].大庆石油地质与开发,2020,39(4):48-52.
- [5]李贺.大庆长垣油田特高含水后期水驱控水提效试验区开发效果[J].大庆石油地质与开发,2021,40(4):94-100.
- [6]徐德奎,金岩松,王凤山,等.大庆油田分层注水工艺技术的发展及现状[J].高科技与产业化,2021,27(6):80-81.
- [7]徐龙虹.A 区块无效注水成因分析及治理措施[J].中国石油和化工标准与质量,2013, 33(1):179-179.
- [8]高冬梅.朝 5-朝 45 区块综合调整技术提高了水驱开发效果[J].石油石化节能,2003,19(7):5-6.
- [9]朱丽红,王海涛,魏丽影,等.基于容量阻力模型的低效无效循环场定量识别[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):239-245.
- [10]郝金克.利用无因次压力指数定性识别优势通道[J].特种油气藏,2014,21(4):123-125,157.
- [11]赵欢,尹洪军,王龙,等.低渗透油田周期注水方案优选[J].当代化工,2015,44(3):564-566.
- [12]钟睿鸿.注水无效循环识别及优势渗流通道定量表征方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- [13]柳涵,石成方,王继强,等.特高含水期油藏动用状况评价方法[J].大庆石油地质与开发,2019,38(3):73-79.
- [14]周志佳.葡萄花油田葡萄花油层产量递减规律及调整方法研究[D].大庆:东北石油大学,2017.
- [15]徐启.朝阳沟油田二类区块加密技术研究[D].成都:西南石油学院,2005.

[16] 肖波.雅达低渗透油藏注烃气可行性及注采参数优化研究[D].成都:西南石油大学,2012.

编辑 张耀星

