

[引著格式] 郭海峰. 中东地区生物碎屑灰岩储层渗透率预测方法研究 [J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2015, 37 (11+12): 26~30, 48.

中东地区生物碎屑灰岩储层渗透率预测方法研究

郭海峰 (中石油长城钻探工程有限公司解释研究中心, 北京 100101)

[摘要] 中东地区生物碎屑灰岩储层由于孔隙结构复杂、非均质性强, 造成同等孔隙度下渗透率相差多个数量级, 准确预测渗透率一直是一个难点。以伊拉克 H 油田 M 层为例, 提出一种基于岩心数据和常规测井资料渗透率精细预测方法。在储层分类的基础上, 以“分层分类”原则作为指导建立多个渗透率模型, 将孔隙结构评价转换为模型选择问题。分析发现, 常规测井的孔隙度、电阻率和自然伽马对孔隙结构较为敏感, 可用于渗透率计算时的模型选择。该方法的计算结果与岩心数据一致, 提高了常规测井渗透率的预测精度。

[关键词] 生物碎屑灰岩; 渗透率预测; 孔隙结构; 储层分类; 常规测井; 模型选择

[中图分类号] P631.84

[文献标志码] A

[文章编号] 1000-9752 (2015) 11+12-0026-05

中生界白垩系 M 层在中东地区广泛分布, 是中东地区重要的碳酸盐岩油藏之一^[1]。M 层为一套形成于碳酸盐岩台地边缘的礁滩复合体储层, 岩性为富含厚壳蛤碎屑的各种颗粒灰岩。储集空间以孔隙为主, 孔隙类型多样, 包括溶蚀孔、铸模孔、粒间孔、晶间孔、微孔等。伊拉克 H 油田为一北西-南东走向的长轴背斜, 形成于古近系末期, 背斜构造形态比较完整, 自下而上背斜高点位置一致, 没有发现明显的断层发育。M 层碳酸盐岩也是 H 油田的主要储集单元, 埋深 2800~3300m, 整套地层厚度平均 400m, 根据岩性组合特征, 分为 A、B1、B2、C 等 4 个段。M 地层孔隙度为 8%~28%, 渗透率变化范围较大, 集中于 0.1~50mD, 整体上属于中孔-低渗类型, 在该背景下发育有高渗条带 (渗透率 $\geq 500\text{mD}$), 受沉积和成岩作用影响, 储层非均质性强, 采出程度也较低。

渗透率作为地层的动态属性, 影响因素众多, 并非只受孔隙度控制, 还与孔隙结构有关^[2]。计算渗透率的方法通常是受 Kozeny-Carman 公式启发建立渗透率与孔隙度、孔隙和颗粒特征 (通常是尺寸) 或束缚水饱和度之间的关系^[3]。该方法适用于颗粒分选好、孔隙结构简单的砂泥岩储层, 并不能简单地推广到碳酸盐岩储层。碳酸盐岩储层渗透率可以通过岩心分析 (实验室条件下) 或地层测试、试井 (油藏条件下) 获得, 非取心或测试段的渗透率主要通过测井资料, 特别是对孔隙结构敏感的测井方法如核磁共振测井完成, 但是却充满挑战。主要是由于复杂的成岩作用造成储层孔隙结构异常复杂和非均质性较强, 孔隙度和渗透率之间并不呈现简单的分布关系; 同时, 测井资料如何表征微观孔隙系统的特征以及如何整合到渗透率预测模型都是难以回避的问题。为了提高碳酸盐岩储层渗透率的预测精度, 主要有 2 类改进方法: 第 1 种与核磁共振测井有关, 如采用孔隙空间划分的方法, 不同孔隙结构的地层采用不同的渗透率模型^[4,5], 该方法可以改善预测精度, 但是, 不是每口井均会采集相应的测井资料; 第 2 种是采用多元线性回归^[3]、神经网络^[6,7]等源自统计学、机器学习或人工智能的方法, 该类方法存在模型推广的问题, 因此需要大量取心, 并且由于是“黑盒”模型, 无法直观理解模型所表达的知识。为此, 笔者以伊拉克 H 油田 M 层为例, 介绍一种利用岩心数据和常规测井资料计算渗透率的方法, 该方法针对 M 层的储层特点, 基于“分层分类”思路建立多个精细渗透率模型, 将孔隙结构评价问题转换为模型选择问题, 实际应用效果良好, 可以逐井计算, 为油田的储量计算和地质建模提供了可靠的输入参数。

[收稿日期] 2015-07-20

[基金项目] 中国石油天然气集团公司科学研究院与技术开发项目 (2014D-0907)。

[作者简介] 郭海峰 (1976-), 男, 博士, 工程师, 现主要从事油气田测井资料解释及油气藏综合研究工作, guohaifeng@cnlc.cn。

1 总体思路

利用岩心数据和常规测井资料计算渗透率方法的总体思路是基于“岩心刻度测井”，以岩心孔隙度和渗透率回归模型作为起点，但是由于单个模型预测精度太低，为了捕捉储层孔隙结构的变化，采用“分层分类”原则针对不同地层和不同类别建立多个模型，从而把孔隙结构表征问题转换为模型选择问题，即在实际计算渗透率时如何准确选择采用哪个模型。因此，需要首先利用岩心资料进行储层分类，不同种类储层代表不同孔隙结构，再重点寻找每类储层常规测井的响应特征，在获得了不同类别的储层响应特征之后，就可以用来进行模型选择。渗透率建模流程见图1。

2 储层分类与测井响应特征

储层分类是后续评价的基础，碳酸盐岩的分类依据有多种，如地质成因、孔隙类型等。M层分类面向测井岩石物理评价，以孔隙度、渗透率、毛细管压力曲线为基础，参照岩石薄片、相渗曲线和岩电参数，重点兼顾测井响应特征的可区分性。依据该原则，M层分为4大类（见图2），各类储层参数见到表1。其中，I-II类为好储层，III类可细分为III-A（次好）和III-B（差储层）2个亚类，IV类为非储层。

从岩心数据可知，M层呈现如下特点：铸模孔、溶孔等比较发育，孔隙度较高，I~III类孔隙度范围重叠，但孔隙受溶蚀、胶结等成岩作用的影响，孔隙连通性差异很大，渗透率差别可达3倍。从I到III类储层，孔隙连通性由好变差，排驱压力(p_d)、中值压力(p_{50})、油柱高度(H_{50})由小变大，而中值半径(R_{50})由大变小。I-II类对应于地层中的高渗条带，孔隙主要由溶孔和连通铸模孔组成，孔喉半径可达 $5\sim10\mu\text{m}$ ，渗透率可达500mD以上。M层大部分储层都是III类，虽然铸模孔发育但连通性较弱，因此储层品质不高。M层喉道半径分布多呈双峰非单模分布，表明孔隙尺寸变化较大，整个孔隙网络形态复杂，孔隙结构层面非均质性较强。对于渗透率影响较大的是第2峰的位置和占比，对应的是大孔喉孔隙。这部分孔隙在核磁共振横向弛豫时间(τ_2)谱上有明显特征，其 $\tau_2 \geq 1000\text{ms}$ 。在成像测井图像上，高渗储层段表现为暗色背景下有较多的黑斑，即暗示溶孔密集发育。但该次研究主要研究利用常规测井表征孔隙结构，而中子、密度和声波曲线计算的总孔隙度对于I~III类储层的孔隙结构变化不敏感，这也是利用常规测井评价该类储层的难点所在，笔者将专门讨论如何解决该问题。

3 渗透率建模与模型选择

从孔隙度和渗透率关系特征上看，简单地回归一个模型相关系数较低，无法全面表征孔渗规律。在逐层分析孔渗关系特征和储层分类后，分别针对M层的4个段A、B1、B2、C建立4大类6亚类模型（图3），上述模型的相关系数约在0.69~0.8之间，可以满足储层评价的要求。

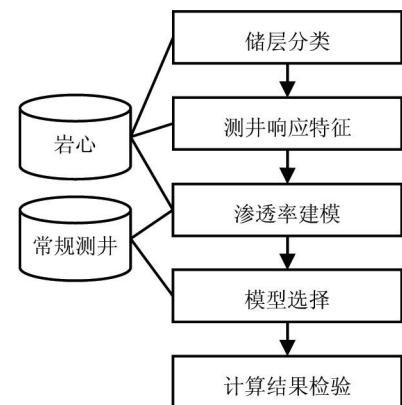


图1 渗透率建模流程

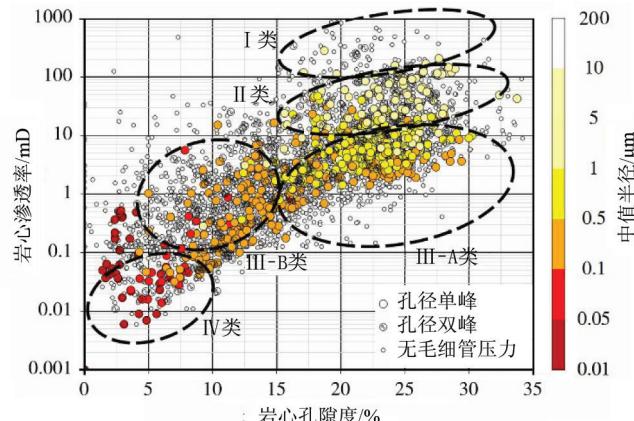
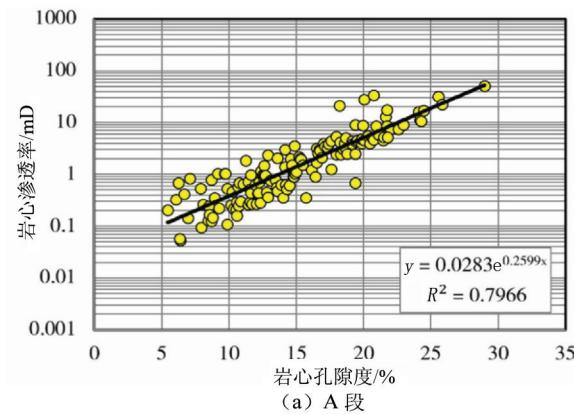


图2 M层储层分类

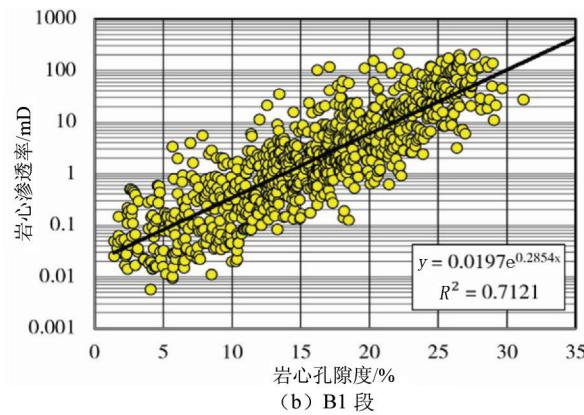
表 1 M 层储层分类参数表

Dunham 分类	I类	II类	III-A类	III-B类
孔渗 分级	颗粒灰岩 $\phi: 15\% \sim 28\%, K \geq 100 \text{mD}$ 中孔-中高渗	泥粒灰岩 $\phi: 15\% \sim 28\%, K: 10 \sim 100 \text{mD}$ 中孔-中低渗	泥粒灰岩-粒泥灰岩 $\phi: 15\% \sim 28\%, K: 0.5 \sim 10 \text{mD}$ 中孔-低渗	$\phi: 10\% \sim 15\%, K: 0.9 \sim 10 \text{mD}$ 中低孔-低渗
孔隙 类型	溶孔、连通铸模孔、粒间孔隙	铸模孔、粒内孔、微孔	孤立铸模孔、粒内孔、微孔	孤立铸模孔、粒内孔、微孔
铸体 薄片 图像				
毛细管 压力 参数	$p_d < 0.1 \text{Mpa}, p_{50} < 0.6 \text{Mpa}$ $R_{50}: 5 \sim 10 \mu\text{m}, H_{50}: 3 \sim 10 \text{m}$	$p_d: 0.01 \sim 0.3 \text{Mpa}, p_{50}: 0.1 \sim 2 \text{Mpa}$ $R_{50}: 1 \sim 5 \mu\text{m}, H_{50}: 3 \sim 30 \text{m}$	$p_d: 0.1 \sim 0.6 \text{Mpa}, p_{50}: 0.5 \sim 5 \text{Mpa}$ $R_{50}: 0.5 \sim 1 \mu\text{m}, H_{50}: 10 \sim 60 \text{m}$	$p_d: 0.2 \sim 2 \text{Mpa}, p_{50}: 1 \sim 8 \text{Mpa}$ $R_{50}: 0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}, H_{50}: 30 \sim 150 \text{m}$
孔喉半径 分布				
常规 测井 特征	q_{API} 极低, ρ_d 很高, ρ_d 与 ρ_{xo} 正差 异明显	q_{API} 低, ρ_d 高, ρ_d 与 ρ_{xo} 有正差异	q_{API} 中等, $\rho_d/\rho_s/\rho_{xo}$ 比较接近	q_{API} 中等

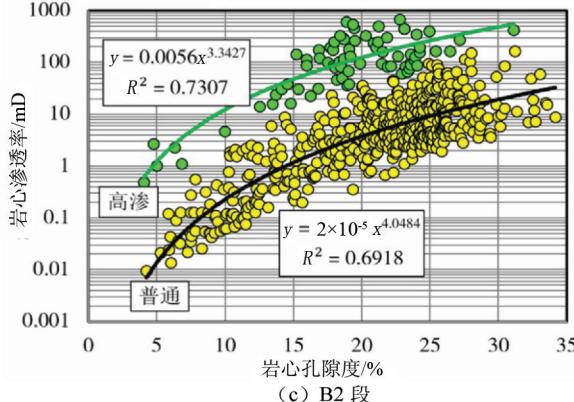
注: ϕ 为孔隙度; K 为渗透率; q_{API} 为自然伽马; ρ_d 、 ρ_s 、 ρ_{xo} 分别为深、浅和冲洗带电阻率。



(a) A段



(b) B1段



(c) B2段

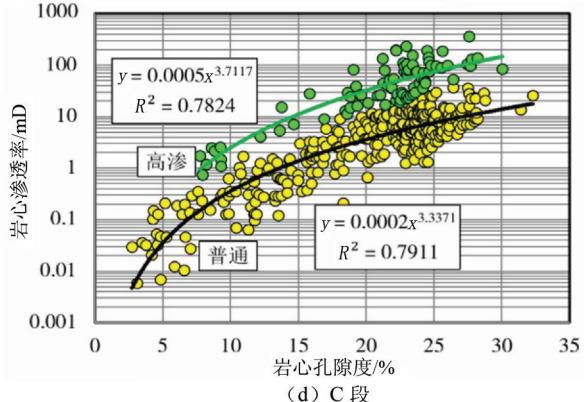


图 3 M 层渗透率模型

1) A段 岩性以浅滩泥粒灰岩为主, 储层主要为Ⅲ-A类, 孔渗分布基本呈线性关系, 建立单个渗透率模型。

2) B1段 岩性为滩后骨屑泥粒灰岩夹泻湖粒泥灰岩, 储层主要为Ⅲ-A类和Ⅲ-B类, 纵向非均质性极强, 孔渗分布相对分散但仍呈线性趋势。

3) B2段 该段发育有I-II类储层, 岩性以浅滩厚壳蛤碎屑颗粒灰岩为主, 其他岩性还有骨屑泥粒灰岩, 溶蚀程度较高, 孔渗关系上呈明显的2条规律线, 因此建立2个渗透率模型, 其中高渗模型捕捉I类和II类储层, 普通模型捕捉剩余的储层。

4) C段 以泥粒灰岩为主, 含部分颗粒灰岩, 和B2段一样, 建立2个渗透率模型, 需要注意的是, C段微孔含量较高, I-II类好储层的发育程度不如B2段, 因此2个模型的渗透率均低于B2段。

将测井计算孔隙度代入上述模型就可以计算出渗透率, 但关键是如何选择使用哪个模型? 模型选择的实质就是利用常规测井资料划分储层类别。通过综合分析, 对于孔隙结构敏感的常规测井曲线是 q_{API} 和电阻率(ρ_t), q_{API} 和 ρ_t 与岩心渗透率与岩心孔隙度交会图见图4。实际计算中, 当满足如下条件时采用高渗模型(图4圆圈区域对应于高渗岩样点)计算渗透率: ①B2段: $\phi \geq 15\%$ 、 $q_{API} < 10 API$ 、 $\rho_t \geq 100 \Omega \cdot m$; ②C段: $\phi \geq 15\%$ 、 $q_{API} < 15 API$ 、 $\rho_t \geq 2 \Omega \cdot m$ 。总的来说, 储层品质越高、渗透率越高, 那么对应的孔隙度越大、 q_{API} 越低、 ρ_t 越高。M层黏土矿物含量极低, q_{API} 变化对比度远不如砂泥岩高, 而且其变化并不代表泥质的变化, 但从交会图(图4(a))来看, 高渗储层的 q_{API} 是比较低的。 ρ_t 是对孔隙结构最为敏感的曲线, 在中东地区很多油田均可观察到该种现象^[8]。影响 ρ_t 变化的因素很多, 除了孔隙结构, 还受含油饱和度(S_o)的影响, 而 S_o 主要受构造位置即油柱高度的影响。相对于B2段, C段位置较低, 并且储层微孔含量较多, 束缚水含量较高, 因此同样是I-II类储层, ρ_t 的判断界限要低于B2段(图4(c))。B2段储层 ρ_t 同样受到构造位置的影响, 实际计算时构造边部位的井需要做特别处理, 如图4(b)所示, A区数据点来自于构造高部位取心段, B区数据点则来自于低部位取心段, 需要采用 $\rho_t \geq 2 \Omega \cdot m$ 的标准来选择高渗模型。

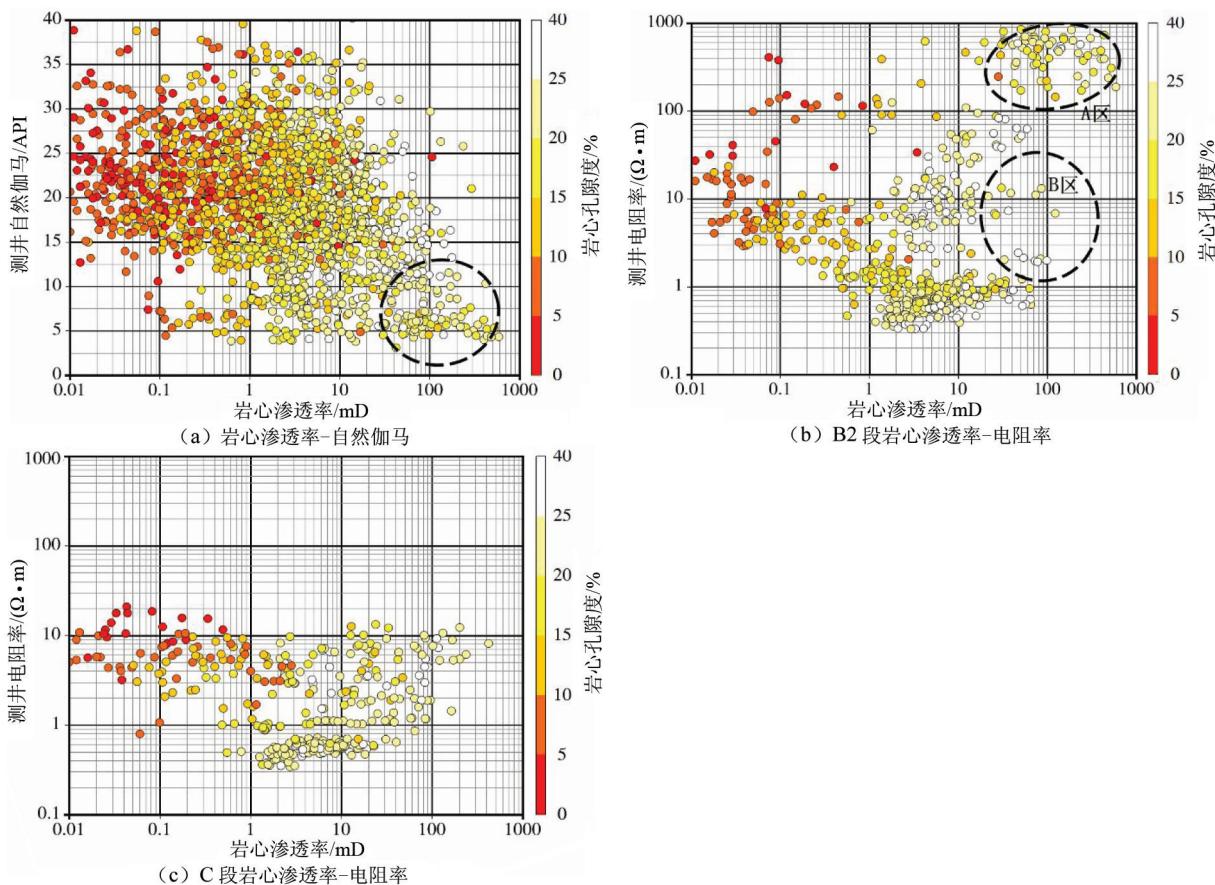
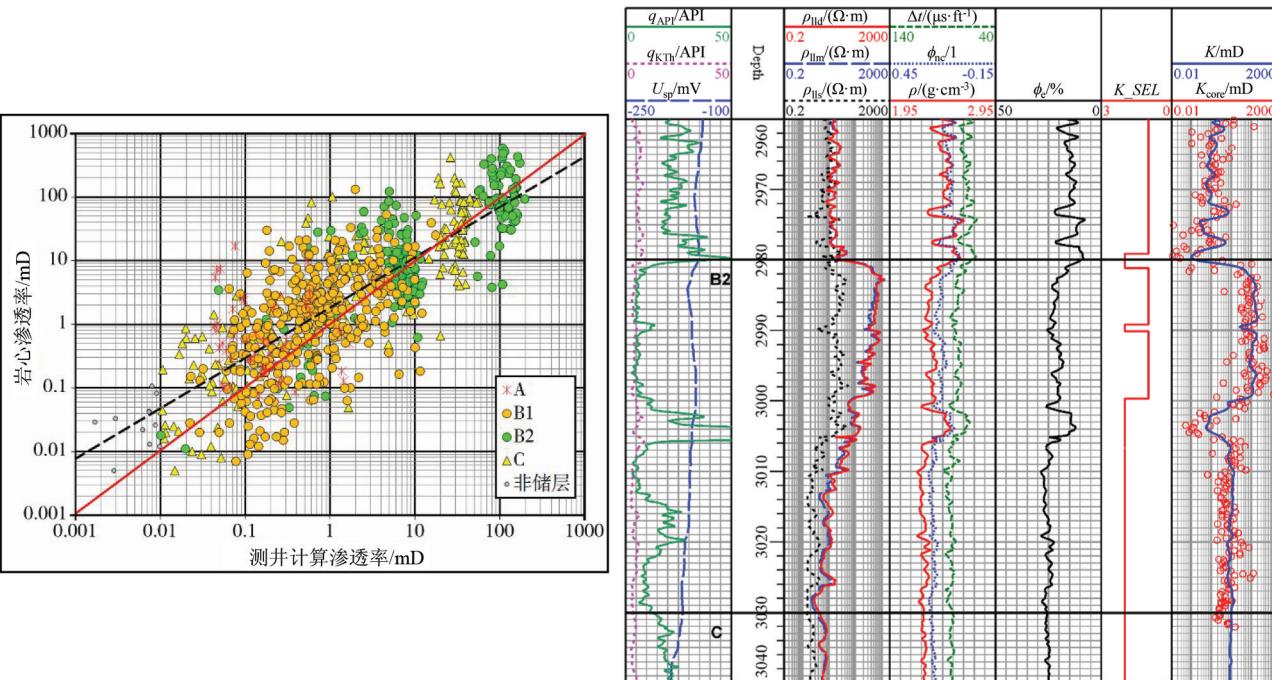


图4 M层I-II类储层测井响应特征交会图

4 计算结果检验

利用岩心数据对上述方法进行检验, 测井计算渗透率与岩心渗透率交会图见图 5 (a), 可以看出, 两者比较一致。某取心井 B2 段处理结果曲线见图 5 (b), 其中 K_{SEL} 为渗透率计算模型选择曲线, 数值 1 对应于高渗模型, 数值 2 对应于普通模型, 可以看出, 高渗储层采用了高渗模型。该方法计算的渗透率精度可以满足储量计算和后续地质建模的输入要求。



(a) 取心井测井计算渗透率与岩心渗透率

(b) 某井测井曲线

注: q_{KTh} 为无铀伽马; U_{sp} 为自然电位; ρ_{lld} 、 ρ_{lim} 、 ρ_{lls} 分别为深、中、浅侧向电阻率; Δt 为声波时差; ϕ_{nc} 为补偿中子孔隙度; ρ 为密度; ϕ_e 为有效孔隙度; K_{core} 为岩心渗透率。

图 5 M 层渗透率计算结果检验

5 结论与讨论

笔者采用“分层分类”和模型选择的思路解决了伊拉克 H 油田 M 层的渗透率预测问题, 并且取得了与岩心非常一致的结果: ①M 层分为四类, I ~ III 类为储层, 其特点是孔隙度接近, 但是由于孔隙结构差别大造成渗透率差异明显。②根据各段储层特征建 4 大类 6 亚类渗透率模型, 以此捕捉孔隙结构的变化, B2 和 C 段有高渗和普通 2 个模型, 前者对应于 I - II 类储层。③测井曲线中以 ρ_t 和 q_{API} 对孔隙结构变化较为敏感, 因此联合 ϕ 、 ρ_t 和 q_{API} 进行模型选择, 实际计算时还要考虑构造位置的影响。

该方法的优点是能充分利用常规测井资料去计算每口井的渗透率, 成本较低而且精度可以满足储层评价的要求。总的来说, 准确预测碳酸岩渗透率难度很大, 特别是利用常规测井资料, 笔者提出的方法之所以取得较好的效果, 是与 H 油田特点分不开的。该油田构造简单, 无断层发育, 储层以孔隙型为主, 孔隙度较大, 裂缝不发育, 孔隙结构的变化主要体现在孔隙尺寸变化上, 微孔中的束缚水含量很高, 加上地层水矿化度很高, 可达 200000mg/L, 因此孔隙结构变化的影响在 ρ_t 上体现的很明显, 与 q_{API} 和 ϕ 相结合, 常规测井能粗略地将 I - II 类储层区分开来, 这就为该方法的使用提供了可能性。但是, I ~ III 类水层 ρ_t 均特别低, 也就是说单靠 ρ_t 无法区分出好水层和差水层, 均会选择普通模型计算渗透率, 可能会低估好水层的渗透率, 对于储量计算来说, 主要关注的是油层, 因此计算结果是可以接受的。