

[引著格式] 毕曼, 马占国, 史华, 等. 多元回归分析苏里格致密气藏水平井产能的敏感参数 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (5+6): 43~49.

多元回归分析苏里格致密气藏水平井产能的敏感参数

毕曼, 马占国, 史华, 郝瑞芬

(中石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710021)

叶亮, 何明航, 胡阳明

杨映洲 (中石油长庆油田分公司第三采气厂, 陕西 西安 710021)

[摘要] 针对鄂尔多斯盆地苏里格致密气藏已投产水平井的历史产量, 回归分析影响水平井产量的敏感参数及其影响权重, 为进一步提高水平井单井产量而优化地质及工程参数提供思路。通过水平井地质和工程参数特征分析, 确定影响产量的敏感参数, 并对各敏感参数进行一元线性回归分析, 建立多元线性回归模型, 通过标准化回归系数检验各敏感参数的影响权重。研究表明, 苏里格气田水平井储层横向连续性差, 随钻气测全烃值作为地质参数能较准确地评价储层优劣, 6 个参数与水平井产量线性相关, 各敏感参数对产量的交互影响权重为有效储层长度 > 含气砂岩全烃均值 > 水平段长度 > 段数 > 液量 > 支撑剂量。通过多元回归分析得出的水平井产量敏感参数的交互影响及权重关系较合理准确, 进一步提高致密气藏水平井产量的发展趋势应以提高有效储层钻遇率、增大储层接触面积、提高储层改造体积为目标。

[关键词] 多元线性回归; 苏里格致密气藏; 水平井产量; 敏感参数; 线性相关

[中图分类号] TE332

[文献标志码] A

[文章编号] 1000-9752 (2015) 05+06-0043-07

鄂尔多斯盆地苏里格气田是典型的致密气藏, 水平井技术作为有效提高单井产量的重要措施, 近年来得到了规模应用^[1,2]。从 2006 年开发至 2015 年初, 苏里格气田投产水平井已近 400 口, 初期产量呈偏态分布, 产量低于平均值的井占总井数的 52.4%。前期对压裂水平井产量的影响因素分析主要基于气藏工程产能预测理论模型, 通过数值模拟分析地质参数、裂缝形态、裂缝参数等对产能的影响以确定影响水平井产量的主控因素^[3~5]。由于储层非均质性、压裂工艺和施工参数等不同因素导致产能预测模型与实际产量存在一定偏差^[6~8], 为此, 笔者通过分析苏里格气田水平井地质参数和工程参数的特征, 确定了影响产量的敏感参数, 并对各敏感参数与产量进行一元线性回归分析, 各敏感参数对产量交互影响进行多元线性回归分析并检验各参数对产量的影响权重, 对苏里格气田水平井发展及提高水平井产量有一定参考意义。

1 苏里格气田水平井地质参数特征

苏里格气田水平井目的层主要为二叠系下石盒子组, 由砂体多期叠置而成, 非均质性强, 有效厚度薄, 变化快, 单井储层空间展布特征和有效砂体分布预测难度大, 导致水平井钻遇有效储层横向连续性差^[9] (如图 1)。钻遇连续砂体的水平井占总井数约 15%, 孔隙度、渗透率、含气饱和度等地质参数变化快, 因此对单井产量的相关性分析相当复杂。

随钻气测全烃值^[10,11]是发现油气层最直观的现场资料, 也是评价油气层优劣的重要指标, 且评价标准基本一致, 是影响水平井产量的重要地质因素。数据统计显示, 苏里格气田水平井含气砂岩全烃均值主要分布在 5%~20%之间, 占总井数的 64.3%。

[收稿日期] 2015-02-15

[基金项目] 国家科技重大专项 (2001ZX05044)。

[作者简介] 毕曼 (1983-), 女, 硕士, 工程师, 现主要从事天然气井压裂和增产技术方面的研究工作, 29102759@qq.com。

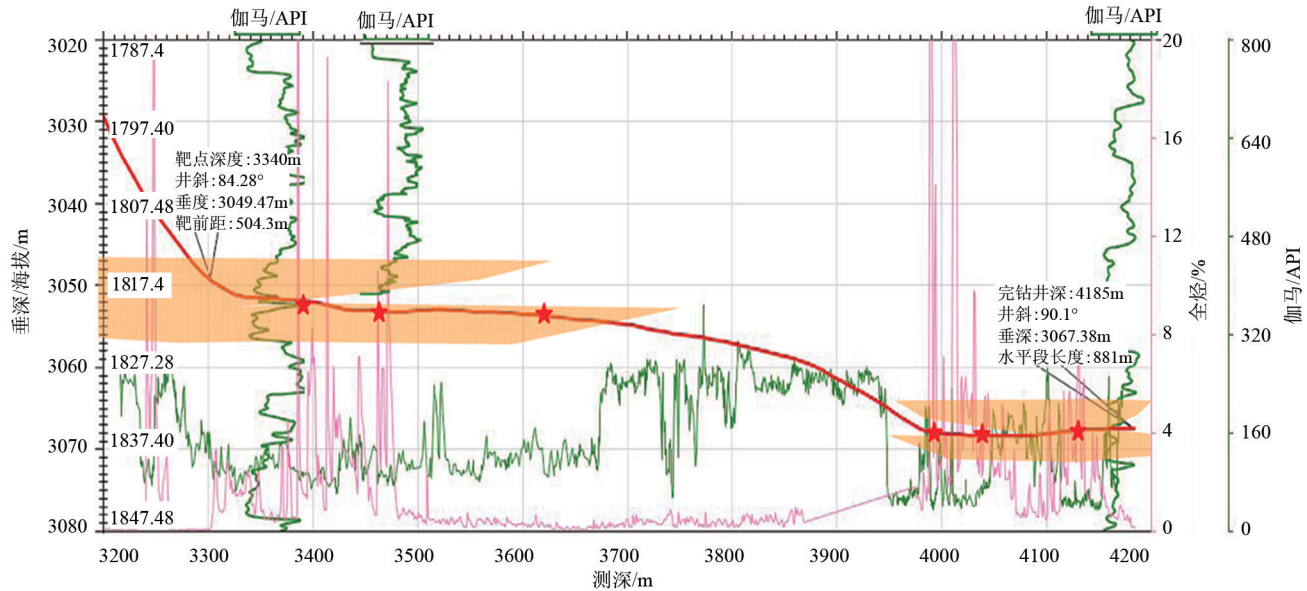


图1 苏里格气田水平井随钻示意图

2 苏里格气田水平井工程参数特征

随着水平井快速钻井^[12]、分段压裂技术^[13]的进步以及国外非常规油气水平井体积压裂理念^[14,15]的启发,苏里格气田水平井工程参数指标不断提高。通过理论研究及井下微地震裂缝^[14]监测评价分析,认为水平段长度、有效储层长度、施工排量、支撑剂量、液量等工程参数是影响水平井产量的敏感性参数。因此有效的扩大储层接触面积、提高储层改造体积,从而获得更高的单井产量。

苏里格气田水平井工程参数的发展特征如图2所示。

- 1) 水平段长度: 平均水平段长度 1033m, 最长水平段长度 2525m。
- 2) 有效储层段长度: 由前期的 500m 上升至 680~700m 左右。
- 3) 改造段数: 平均改造段数 7.5 段, 仅为北美水平井的 1/4。
- 4) 压裂工艺、排量: 主体应用水力喷射分段压裂工艺, 施工排量 3~4m³/min; 裸眼封隔器分段压裂工艺施工排量 4~6m³/min; 体积压裂工艺施工排量 8~12m³/min。
- 5) 支撑剂量: 平均单井支撑剂量 320m³, 单段支撑剂强度与北美水平井改造参数接近。
- 6) 液量: 平均单井液量 4000m³, 最大液量 12877m³, 远低于国外气田改造规模^[16]。

3 多元线性回归分析法

多元线性回归分析^[17,18]是指在线性相关条件下, 2个和2个以上自变量对1个因变量的数量变化关系。表现这一数量关系的数学公式称为多元线性回归模型, 比一元线性回归模型中只用1个自变量进行预测或估计因变量更有效, 更符合实际。

多元线性回归分析的步骤如下: ①建立自变量 x_n 与因变量 y 的一元线性模型。②建立自变量 x_1, x_2, \dots, x_m 与因变量 y 的多元线性回归模型。③验证多元线性回归模型。④用标准化回归系数检验自变量 x_1, x_2, \dots, x_m 的敏感程度。

3.1 一元线性回归模型

$$y = b_0 + b_1 \times x_n + u_n \quad (1)$$

根据 n 对数据在直角坐标系中做散点图, 若两变量具有直线关系时, 才能建立一元线性回归模型。依据 2 个变量之间的数据关系, 采用最小二乘法构建式 (1), 表现了因变量 y 与 1 个自变量 x_n 之间的线

性关系; u_n 为随机误差项; b_0 、 b_1 为回归系数。

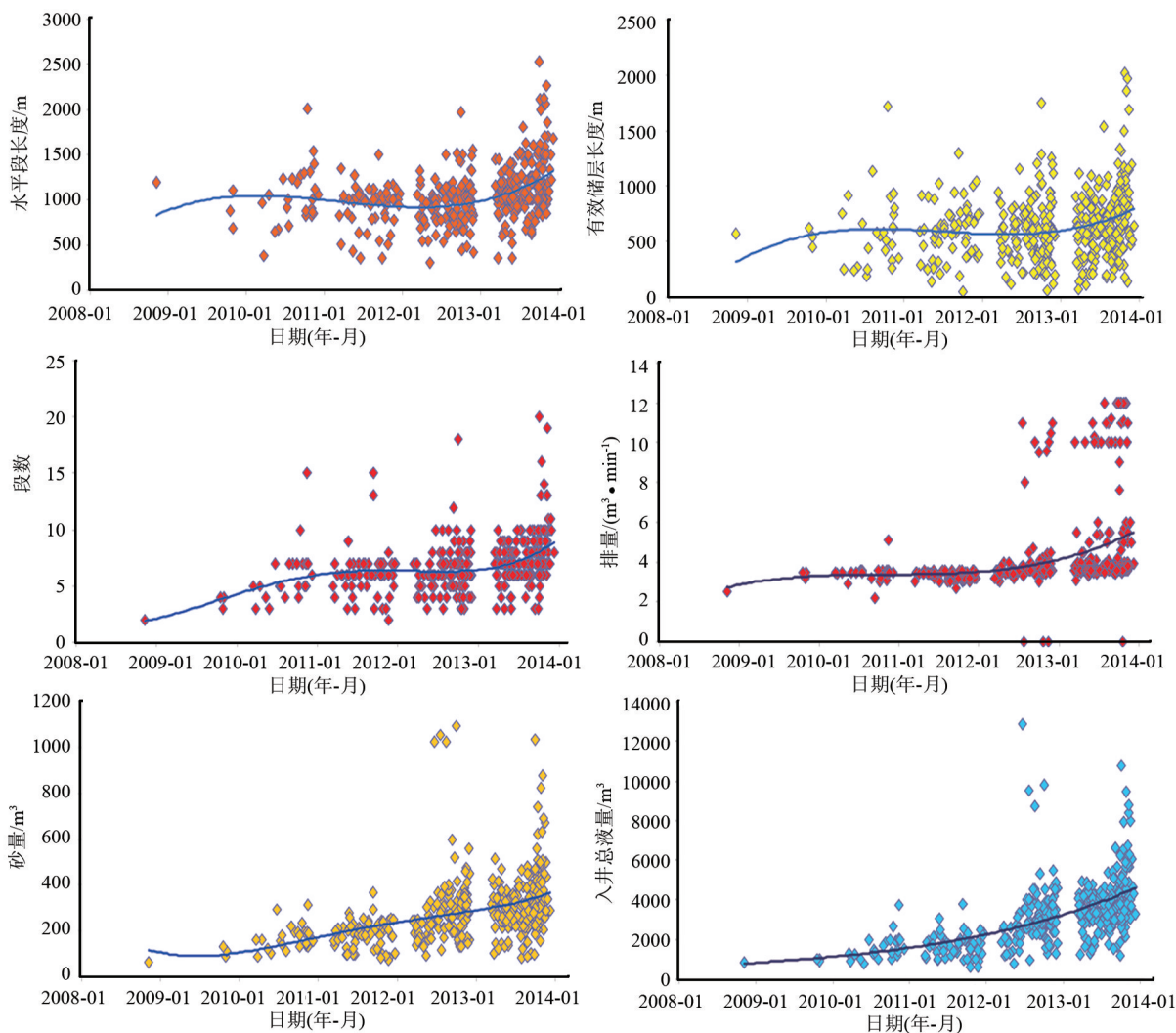


图 2 苏里格气田水平井各参数发展趋势图

3.2 多元线性回归模型

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + u_m \tag{2}$$

多元线性回归模型是一元线性回归模型的扩展，其基本原理相似。如式 (2) 表示数据中因变量 Y 可以近似地表示为自变量 X_1, X_2, \dots, X_m 的线性函数; β_0 为常数项, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 为偏回归系数, 表示在其他自变量保持不变时, X_m 增加或减少一个单位时 Y 的平均变化量。要求误差平方和为最小的前提下, 用最小二乘法求解参数。

$$\sum (Y - \hat{Y})^2 = \sum [Y - (\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m)]^2$$

↓ 求偏导数

$$\begin{cases} l_{11}\beta_1 + l_{12}\beta_2 + \dots + l_{1m}\beta_m = l_{1Y} \\ l_{21}\beta_1 + l_{22}\beta_2 + \dots + l_{2m}\beta_m = l_{2Y} \\ \dots \\ l_{m1}\beta_1 + l_{m2}\beta_2 + \dots + l_{mm}\beta_m = l_{mY} \end{cases}$$

$$\beta_0 = Y - (\beta_1 \bar{X}_1 + \beta_2 \bar{X}_2 + \dots + \beta_m \bar{X}_m) \tag{3}$$

其中 $l_{ij} = \sum (X_i - \bar{X}_j)(X_i - \bar{X}_j) = \sum X_i X_j - \frac{\sum X_i \sum X_j}{n} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m)$

$$l_{jY} = \sum (X_j - \bar{X}_j)(Y - \bar{Y}) = \sum X_j Y - \frac{\sum X_j \sum Y}{n} \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

3.3 多元线性回归方程检验

3.3.1 方程拟合优度检验

$$R^2 = \frac{S_{sh}}{S_{sz}} = 1 - \frac{S_{sc}}{S_{sz}} \tag{4}$$

式中： R^2 为确定系数； S_{sh} 为回归误差平方和； S_{sc} 为残差平方和； S_{sz} 为总体平方和。

$0 \leq R^2 \leq 1$ ，说明自变量 X_1, X_2, \dots, X_m 能够解释 Y 变化的百分比，其值愈接近于 1，说明模型对数据的拟合程度愈好。

3.3.2 方程总体线性显著性检验 (F 检验)

方程显著性 F 检验计算如式 (2)，检验方法步骤如下：

1) 假设总体回归方程不显著，即有 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0$ ； H_1 ：各 $\beta_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 不全为 0 (H_0, H_1 是一对互相对立的假设)。

2) 进行方差分析，求 $S_{sz}, S_{sh}, S_{sc}, m, n - m - 1$ 。

3) 根据方差分析的结果求 F 统计量

$$F = \frac{S_{sh}/m}{S_{sc}/(n - m - 1)} = \frac{M_{sh}}{M_{sc}} \tag{6}$$

式中： M_{sh} 为回归误差平均平方和； M_{sc} 为残差平均平方和。

4) 根据自由度和预先给定的显著性水平 α ，查 F 分布表中的理论临界值 F_α ，当 $F > F_\alpha$ ，拒绝原假设，即认为总体回归函数中各自变量与因变量的线性回归关系显著。当 $F < F_\alpha$ ，接受原假设，即认为总体回归函数中各自变量与因变量的线性回归关系不显著，所建立的回归模型无意义。

3.4 标准化回归系数检验敏感参数

标准化回归系数是指消除了因变量 Y 和自变量 X_1, X_2, \dots, X_m 所取单位的影响之后的回归系数，用来比较各自变量 X 对因变量 Y 的影响大小，通常在有统计学意义的前提下，标准化回归系数的绝对值越大说明相应自变量对 Y 的影响越大。

变量标准化是将原始数据减去相应变量的均数，然后再除以该变量的标准差。

$$X'_j = \frac{(X_j - \bar{X}_j)}{S_j} \quad \beta'_j = \beta_j \left(\frac{S_j}{S_Y} \right) \tag{7}$$

计算得到的回归方程称作标准化回归方程，相应的回归系数即为标准化回归系数。

4 苏里格气田水平井敏感参数多元线性回归分析

4.1 一元线性回归分析

对苏里格气田 370 口水平井的水平段长度、有效储层段长度、含气砂岩全烃均值、改造段数、支撑剂量、液量、排量与 3 个月累计产量进行一元相关散点分析。以水平段长度为例，图 3 中数据点分散，趋势线拟合程度差， $R^2 = 0.00004$ ，两者相关性差，与理论研究水平井产量和水平段长度正相关不符。

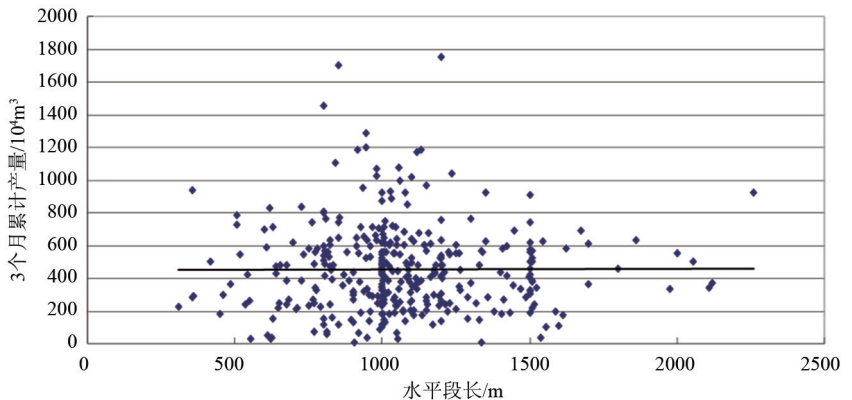


图 3 水平段长度与 370 口井 3 个月累计产量的一元相关分析

若将某一敏感参数分类平均，以弱化其他参数影响。以水平段长度为例，将水平段长度以 100m 划分区间，对该区间内水平井产量取均值进行一元线性回归，图 4 中水平井产量随着水平段长度的增加而增加， $R^2 = 0.7654$ ，呈正相关，因此水平段长度是影响单井产量的重要参数之一。将其它敏感参数按此方法分析，表 1 所示各敏感参数的线性方程拟合优度较好且 R^2 趋近于 1。

另外，水力喷射分段压裂工艺井数多，各敏感参数线性方程拟合优度更好且 R^2 接更近于 1，因此仅选取水力喷射分段压裂水平井进行多元线性回归分析。

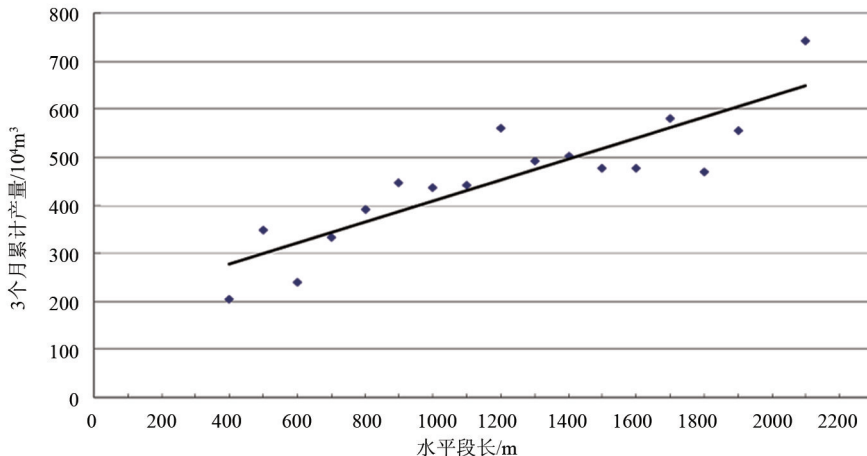


图 4 分类水平段长度与 370 口井 3 个月累计产量的一元相关分析

4.2 多元线性回归分析

基于水力喷射分段压裂水平井 6 个敏感参数与累计产量的线性关系，即多元线性回归分析才有意义。首先将自变量定义如下： X_L 、 X_{YL} 、 X_{QT} 、 X_{DS} 、 X_S 、 X_V 分别代表水平段长度 (L)、水平段有效储层长度 (YL)、水平段含气砂岩全烃均值 (QT)、改造段数 (DS)、支撑剂量 (S)、液量 (V)。

表 1 各敏感参数与 3 个月累计产量的线性拟合方程

敏感参数	总井数(370 口)		仅水力喷砂井 (排量 3~4m ³ /min)(253 口)	
	公式	R ²	公式	R ²
水平段长	$y=0.218x+189.9$	0.7654	$y=0.2674x+136.15$	0.7789
有效储层长	$y=0.3342x+217.13$	0.6913	$y=0.391x+155.48$	0.9064
含气砂岩全烃均值	$y=56.28x+273.9$	0.8479	$y=47.7x+297.5$	0.8247
段数	$y=19.944x+314.2$	0.3673	$y=41.12x+190.07$	0.7442
总砂量	$y=0.3386x+329$	0.5493	$y=0.3834x+324.1$	0.7121
总液量	$y=0.0244x+380.92$	0.556	$y=0.0306x+331.81$	0.748
排量	$y=24.78x+326.4$	0.9994	—	—
敏感参数	仅裸眼封隔器井 (排量 5~6m ³ /min)(80 口)		仅体积压裂井 (排量 10~12m ³ /min)(37 口)	
	公式	R ²	公式	R ²
水平段长	$y=0.1748x+267.62$	0.259	$y=0.0442x+518.6$	0.7557
有效储层长	$y=0.391x+217.77$	0.6517	$y=0.0789x+502.8$	0.3203
含气砂岩全烃均值	$y=76.9x+181.3$	0.7847	$y=35.1x+416.9$	0.2743
段数	$y=17.79x+296.6$	0.144	$y=4.8033x+628.2$	0.0271
总砂量	$y=0.2686x+325$	0.1376	$y=0.1866x+472.64$	0.6825
总液量	$y=0.0019x+450.56$	0.0007	$y=0.0189x+481.97$	0.1793
排量	—	—	—	—

另外, G. Voneiff 等^[19]对比了水平井各因素在多元回归时常数 $\neq 0$ 和常数 $= 0$ 的两种情况, 分析发现常数 $= 0$ 时, 多元线性回归模型的 R^2 和调整 R^2 改变较大, 调整 R^2 在常数 $= 0$ 后从提高0.16至0.79, 而自变量系数却变化不大。另外, 常数 $= 0$ 的多元线性回归模型更符合实际的生产情况, 当水平井各敏感参数都为0时, 气体没有有效通道流出, 无自然产量。因此, 常数 $= 0$ 对分析各敏感参数对产量的影响不大。

根据多元线性回归模型计算得出的多元线性回归方程如下:

$$Y = 0.127739942X_L + 0.245583034X_{YL} + 12.76256756X_{DS} + 6.332693781X_{QT} + 0.018974163X_S - 0.006617888X_V(\text{常数} = 0)。$$

4.3 多元线性回归方程检验

方程拟合优度检验, 计算得 $R^2 = 0.7911$, 该模型具有统计学意义, 并且表明苏里格水平井3个月累计产量在不考虑地质参数变化条件下的79%可由水平段长度、有效储层长度、水平段含气砂岩全烃均值、改造段数、支撑剂量和液量的变化来解释。

方程总体线性显著性检验(F 检验), 查 F 界值表查得 $F_{0.05(6,247)} = 2.10$; $F > 2.10$, F 显著值 < 0.01 , 在 $\alpha = 0.05$ 水平上拒绝 H_0 , 接受 H_1 认为所建回归方程具有统计学意义, 从253口井观测值检验模型总体的线性关系是显著的。

4.4 标准化回归系数检验敏感参数

根据上述公式计算得到表2所示的标准化回归系数。其中, S 代表各变量的标准差, β 代表各变量的回归系数, β' 代表各变量的标准化回归系数。结果显示, $|\beta_{YL}'| > |\beta_{QT}'| > |\beta_L'| > |\beta_{DS}'| > |\beta_V'| > |\beta_S'|$, 对水平井的产量影响大小的顺序依次为: 有效储层长度 $>$ 含气砂岩全烃均值 $>$ 水平段长度 $>$ 段数 $>$ 液量 $>$ 支撑剂量。

表2 标准化回归系数

S_L	S_{YL}	S_{DS}	S_{QT}	S_S	S_V	S_Y
267.898115	265.88663	1.7175564	7.25327512	87.8404804	1157.78205	238.346785
β_L	β_{YL}	β_{DS}	β_{QT}	β_S	β_V	
0.12773994	0.24558303	12.7625676	6.33269378	0.01897416	-0.0066179	
$ \beta_L' $	$ \beta_{YL}' $	$ \beta_{DS}' $	$ \beta_{QT}' $	$ \beta_S' $	$ \beta_V' $	
0.14357772	0.27395898	0.09196863	0.19271402	0.00699275	0.03214674	

5 结论与建议

1) 通过分析苏里格气田已投产水平井地质参数和工程参数的特征, 确定含气砂岩全烃均值为影响产量的敏感地质参数, 水平段长度、有效储层长度、改造段数、支撑剂量、液量和排量为敏感工程参数。

2) 对已确定的敏感参数与水平井产量进行一元线性回归分析, 发现将各参数分类统计后得到的线性方程相关性明显提高。

3) 建立了水平井敏感参数与产量的多元线性回归模型, 通过方程拟合优度和 F 检验验证了所建回归方程是具有统计学意义的。并将变量标准化回归以检验各参数对水平井产量的影响权重, 其结果为: 水平段有效储层长度 $>$ 含气砂岩全烃均值 $>$ 水平段长度 $>$ 段数 $>$ 液量 $>$ 支撑剂量。

4) 多元线性回归方法分析水平井产量敏感参数的交互影响及权重关系较合理准确, 对进一步提高致密气藏水平井产量有一定指导作用。应以不断提高水平井的长度、有效储层钻遇率作为基础, 提高分段数 and 施工规模以形成复杂缝网、扩大储层接触面积、提高储层改造体积为目标。

[参考文献]

- [1] 杨志伦, 赵伟兰, 陈启文, 等. 苏里格气田水平井高效建产技术 [J]. 天然气工业, 2013, 33 (8): 44~48.
- [2] 冯朋鑫, 李进步, 陆利平, 等. 水平井技术在苏里格气田低渗气藏中的应用 [J]. 石油化工应用, 2010, 29 (8): 37~42.
- [3] 余林瑶. 苏里格气田水平井产能评价研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- [4] 袁彬, 古永红, 李红英, 等. 苏里格东区致密气藏压裂水平井产能影响因素及其优化设计 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2013, 28 (2): 46~48.
- [5] 任俊杰, 郭平, 王德龙, 等. 页岩气藏压裂水平井产能模型及影响因素 [J]. 东北石油大学学报, 2012, 36 (6): 76~81.
- [6] 隋先富, 吴晓东, 张明江, 郑建军, 韩国庆. 水平井产能预测模型在冀东油田的应用与评价 [J]. 石油钻探技术, 2010, 38 (2): 72~75.
- [7] 李祖友, 杨筱璧, 严小勇, 等. 低渗透致密气藏压裂水平井不稳定产能研究 [J]. 钻采工艺, 2013, 36 (3): 66~67, 70.
- [8] 张茂林, 梅海燕, 刘尧文, 等. 水平气井产量公式对比及影响因素分析 [J]. 钻采工艺, 2013, 36 (3): 52~54, 73.
- [9] 费世祥, 王勇, 王心敏, 等. 苏里格气田东区南部上古生界水平井地质导向技术方法与应用 [J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36 (1): 54~57.
- [10] 谢元军. 随钻气测录井全烃值标准化方法探讨 [J]. 录井工程, 2007, 18 (4): 13~16.
- [11] 杨占山, 李言强, 孙文库. 对气测录井全烃检测值的进一步认识 [J]. 录井工程, 2006, 17 (4): 26~28.
- [12] 周文军, 欧阳勇, 黄占盈, 等. 苏里格气田水平井快速钻井技术 [J]. 天然气工业, 2013, 33 (8): 77~82.
- [13] 李宪文, 凌云, 马旭, 等. 长庆气区低渗透砂岩气藏压裂工艺技术新进展——以苏里格气田为例 [J]. 天然气工业, 2011, 31 (2): 20~24.
- [14] 马旭, 郝瑞芬, 来轩昂, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏水平井体积压裂矿场试验 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41 (5): 1~6.
- [15] 苏玉亮, 袁彬, 李硕轩, 等. 盒 8 致密气储层水平井体积压裂增产影响因素 [J]. 科技导报, 2013, 31 (9): 20~25.
- [16] Pearson C M, Griffin L, Wright C, et al. Liberty Oilfield Services, Breaking up is hard to do: Creating hydraulic fracture complexity in the Bakken Central Basin [J]. SPE163827, 2013.
- [17] 克雷鲍姆. 应用回归分析和其他多元方法 (英文版) [M]. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [18] 李文学, 马新仿, 王妍. 水力压裂效果影响因素的多元线性回归分析 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (29): 7245~7248.
- [19] Voneiff G, Sadeghi S, Bastian P, et al. A well performance model based on multivariate analysis of completion and production data from horizontal wells in the Montney Formation in British Columbia [J]. SPE167154, 2013.

[编辑] 黄鹏