

A New Method to Identify Dominant Channel Based on Principal Component Analysis

Cunliang Chen*, Fen He, Meijia Liu, Qiongyuan Wu, Chao Liu

CNOOC Ltd., Tianjin Branch, Tianjin
Email: *shidacunliang@126.com

Received: Jun. 7th, 2019; accepted: Jun. 21st, 2019; published: Jun. 28th, 2019

Abstract

In order to effectively identify the dominant channel and improve oil recovery in medium and high water cut oilfields, a new method of dominant channel identification based on principal component analysis is proposed. This method can solve the problems of fewer factors and difficult processing in the dominant channel identification method. Thirteen evaluation indicators are selected from the causes of the dominant channel and the dynamic response after the formation of the dominant channel, thus constituting the evaluation index system for identifying the dominant channel. Then, the scattered indicators are integrated into comprehensive indicators by principal component analysis method. Finally, the dominant channel is identified according to the relative size of the comprehensive indicators. This method has been applied in an oilfield block and successfully guided the profile control operation of injection wells. After profile control, the water cut has decreased by 1.20%, and the cumulative oil increase is 11,000 square meters, which provides technical support for further enhancing oil recovery in the oilfield.

Keywords

Principal Component Analysis, Heavy Oil, Dominant Channel, Recovery Yield, Middle and High Water Cut Period

基于主成分分析法的优势通道识别新方法

陈存良*, 何 芬, 刘美佳, 吴穹嫫, 刘 超

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津
Email: *shidacunliang@126.com

*通讯作者。

文章引用: 陈存良, 何芬, 刘美佳, 吴穹嫫, 刘超. 基于主成分分析法的优势通道识别新方法[J]. 渗流力学进展, 2019, 9(1): 1-7. DOI: 10.12677/apf.2019.91001

摘要

为了有效识别优势通道、提高中高含水期油田的采收率，针对优势通道识别方法中考虑因素较少、处理难度大的问题，基于主成分分析法提出了一种优势通道识别新方法。从优势通道的成因和优势通道形成后的动态响应两个方面出发，筛选出13个评价指标，从而构成了识别优势通道的评价指标体系，进而利用主成分分析法将零散指标整合形成综合指标，最后根据综合指标的相对大小进行优势通道的识别。该方法在某油田区块进行了应用，成功指导了注水井调剖作业，调剖后含水下降1.20%，累计增油1.10万方，对油田后续进一步提高采收率提供了技术支持。

关键词

主成分分析法，稠油，优势通道，采收率，中高含水期

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长期注水开发导致疏松砂岩油藏极易发育优势通道[1] [2] [3]。优势通道的发育会加剧储层的非均质性，使注入水直接由采油井产出，造成注入水大量低效或者无效循环，降低注入水的波及范围，不但增加了注水成本及处理成本，而且使油田的开发效果变差[4] [5] [6]。因此，加强对优势通道的识别与治理，有助于油田的高效合理开发。现有的优势通道识别方法虽然很多，孟凡顺[7]根据测井曲线运用费歇准则建立了优势通道的识别方法，史有刚[8]利用试井理论建立了优势通道识别方法，窦之林[9]利用油藏工程理论建立了优势通道的定量估算方法，王森[10]利用吸水剖面资料建立了优势通道识别的图版方法，王利美[11]利用示踪剂资料建立了优势通道的识别方法，但是由于识别优势通道的问题极其复杂，单独靠一种资料进行优势通道识别得到的结果可靠性不强，而且不同指标的评价结果可能是相反的，因此基于多种资料综合识别优势通道的方法受到科研人员的重视，模糊综合评判方法作为其中的代表应用较为广泛[12] [13] [14]，但是不同研究人员之间选用的指标差距较大，而且指标个数相对较少，这是因为不同研究人员对指标的理解不同，另外指标过多将造成指标权重确定时难度加大，受人干扰较大，造成评判的客观性和科学性降低。为此，本文以注水井组为研究对象，在筛选构建评价指标体系的基础上，利用主成分分析法进行了优势通道的识别，方法考虑因素全面，而且增强了评判的客观性。

2. 评价指标体系的建立

优势通道识别的评价指标体系包括成因因素集和动态响应因素集两方面，见图 1。成因因素是优势通道演化及形成的原因，动态响应因素是优势通道形成后生产动态上的特征表现。本着物理意义明确、资料获取方便的原则，通过大量文献调研及 SZ 油田的流体分布特性确定了成因因素 7 个，包括平均渗透

率(K)、渗透率级差(α)、储层有效厚度(h)、原油粘度(μ)、注水强度(q)、视吸水指数(J)和单位厚度储层的累积注水量(Q)等指标。通过对油田生产动态分析发现优势通道形成后生产特征明显,例如井组含水高、含水上升快,吸水剖面异常等,因此根据生产动态表现并结合文献调研确定了动态响应因素 6 个,分别为注水强度增加程度(β)、视吸水指数增加程度(γ)、吸水剖面变异系数(δ)、井组平均含水率(f_w)、压力指数(PI) [15]及无因次压力指数(DPI) [16] [17] [18],其中无因次压力指数(Dimensionless Pressure Index, DPI)反映优势通道形成前后储层渗透率的动态变化,弥补了压力指数仅能反映目前渗流规律的不足,优势通道发育越明显,储层渗透率的动态变化越明显, DPI 越小。

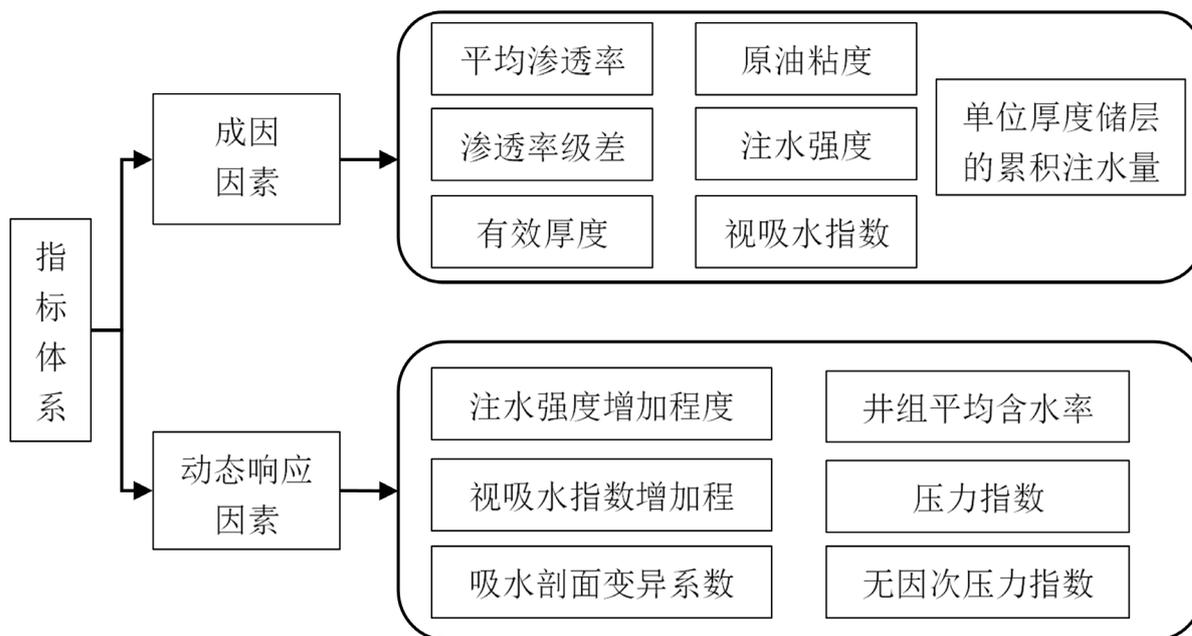


Figure 1. Indicator system diagram of dominant channel recognition

图 1. 优势通道识别的指标体系图

3. 主成分分析法的基本原理

主成分分析法[19] [20] [21]是一种降维统计方法,其基本原理为:利用相对较少的指标代替原有较多的指标来进行综合评价,这些指标仍然保留了原有指标的信息,保证了评价的客观性与可靠性,同时避免了模糊综合评判方法在因素较多时权重赋值有失客观性的缺点。主要计算步骤有:数据无量纲化及同趋势化、特征值与特征向量计算、方差贡献率和累计贡献率计算、综合评价指标的计算。详细的原理及步骤可参考相关文献。

4. 实例计算

SZ 油田位于渤海辽东湾海域,为湖相三角洲沉积,是典型的高孔、高渗稠油油藏,与一般稠油油藏不同,除了渗透率非均质性突出外,该油田平面流体分布差异也较大。经历了多年的注水开发后,截至 2018 年底,综合含水已达 80%,而采出程度不足 30%,优势通道普遍发育,开展优势通道的识别及治理对油田进一步提高采收率意义重大。

以 SZ 油田 F 区为靶区进行了计算应用,该井区共有注水井 7 口,采油井 31 口,通过对测井资料、吸水剖面资料、压力测试资料及生产动态数据等整理得到各井组评价指标的基础数据,见表 1。

Table 1. Basic data table for each well group
表 1. 各井组基础数据表

指标	F6	F8	F10	F17	F19	F26	F28
K/mD	1885	2050	1858	1552	2050	1863	2119
a/f	15	23	16	14	7	3	15
h/m	51.2	27.0	18.0	36.4	39.8	48.4	40.0
$\mu/mPa\cdot s$	65	65	63	63	63	61	61
$q/[(m^3\cdot d^{-1})\cdot m^{-1}]$	7	23	20	15	18	10	5
$J/[(m^3\cdot d^{-1})\cdot MPa]$	100	105	51	52	98	90	36
$Q/10^4 m^3\cdot m^{-1}$	31,943	62,094	72,318	52,366	36,900	26,762	46,066
β/f	2.27	1.92	1.54	2.61	2.60	1.38	3.33
γ/f	2.22	2.22	1.75	1.94	2.00	1.00	1.50
δ/f	0.92	0.38	2.76	0.64	1.00	2.25	0.59
f_w/f	0.82	0.78	0.85	0.79	0.79	0.75	0.72
PI/MPa	2.65	2.95	5.02	3.02	4.43	6.01	23.37
DPI/f	198.20	429.52	566.73	244.66	821.87	681.02	306.16

4.1. 数据无量纲化、同趋势化

从表 1 中可以看出各指标由于量纲不同, 数值的数量级存在较大差距, 为了消除量纲对结果的影响, 选用标准值法进行了无量纲处理, 另外区别于其他指标, PI 和 DPI 属于越小越优型数据, 即该数据值越小, 优势通道的发育可能性越大, 而其他数据属于越大越优型数据, 因此需要将数据同趋势化, 这里将 PI 和 DPI 取倒数处理, 处理后的结果见表 2 所示。

Table 2. Basic data processing tables for each well group
表 2. 各井组基础数据处理结果表

指标	F6	F8	F10	F17	F19	F26	F28
K	-0.1368	0.7316	-0.2790	-1.8896	0.7316	-0.2526	1.0948
α	0.2638	1.4947	0.4176	0.1099	-0.9672	-1.5826	0.2638
h	1.2005	-0.8832	-1.6581	-0.0738	0.2189	0.9594	0.2362
μ	1.2247	1.2247	0	0	0	-1.2247	-1.2247
q	-1.0247	1.3175	0.8783	0.1464	0.5855	-0.5855	-1.3175
J	0.8400	1.0150	-0.8750	-0.8400	0.7700	0.4900	-1.4000
Q	-0.9069	0.9186	1.5377	0.3297	-0.6067	-1.2206	-0.0518
β	0.0503	-0.4632	-1.0207	0.5491	0.5345	-1.2555	1.6055
γ	0.9517	0.9517	-0.1243	0.3107	0.4481	-1.8413	-0.6966
δ	-0.3283	-0.9193	1.6853	-0.6347	-0.2408	1.1272	-0.6895
f_w	0.8018	-0.1336	1.5033	0.1002	0.1002	-0.8352	-1.5368
PI	1.0735	0.7509	-0.4238	0.6849	0.3523	-0.6995	-1.7383
DPI	1.5998	-0.2854	-0.6765	0.935	-1.0565	-0.8819	0.3654

4.2. 特征值与特征向量计算

表 2 数据即组成了标准化评价指标矩阵, 在转置矩阵的基础上, 求取该矩阵的所有特征值, 并按照特征值的大小顺序记录其值及对应的特征向量, 见表 3。

Table 3. Eigenvalues and characteristic vector tables of evaluation matrix
表 3. 评价矩阵的特征值及特征向量表

特征值	特征向量
4.6216	(-0.36 0.39 0.37 0.37 -0.51 -0.15 -0.12 0.42 0.42 -0.50 0.08 0.34 1.00)
3.2108	(-0.37 0.27 0.05 0.87 0.42 0.64 0.00 -0.20 0.78 -0.31 0.58 1.00 0.34)
2.4212	(-0.37 0.25 -0.43 0.62 0.49 0.16 0.42 -0.46 0.52 0.40 1.00 0.58 0.08)
1.6389	(-0.19 -0.43 -0.24 -0.34 0.10 -0.14 0.11 -0.72 -0.55 1.00 0.40 -0.31 -0.50)
0.6519	(0.01 0.66 -0.22 0.91 0.41 0.34 0.32 0.22 1.00 -0.55 0.52 0.78 0.42)
0.4556	(0.23 0.14 0.24 -0.16 -0.42 -0.41 -0.12 1.00 0.22 -0.72 -0.46 -0.20 0.42)

4.3. 综合评价指标的计算

设方差贡献率和累计贡献率分别为:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (1)$$

$$A = \sum_{i=1}^m \alpha_i \quad (2)$$

式中: α_i 为方差贡献率, f; λ_i 为特征值, f; p 为特征值总数, 整数; A 为累计贡献率, f; m 为主成分个数, 整数。

当累计贡献率达到一定的数值时, 则主成分为 m 个, 主成分函数式为:

$$F_z = b_{z1}Y_1 + b_{z2}Y_2 + \cdots + b_{zp}Y_p \quad (z=1, 2, \cdots, m) \quad (3)$$

式中: F_z 为主成分, f。

进而得到综合评价指标的计算公式为:

$$F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \cdots + \alpha_z F_z + \cdots + \alpha_m F_m \quad (4)$$

式中: F 为综合评价指标, f。

将表 3 中的特征值代入公式(1)~(2), 以累计贡献率达到 0.85 为阈值, 得到主成分个数为 4 个, 分别为特征值 4.6216、3.2108、2.4212、1.6389 及对应的特征向量, 各主成分对应的贡献率分别为 0.36、0.25、0.19、0.13。

将特征向量和表 2 中的基础数据代入到公式(3)~(4)即可得到各研究对象的综合评价指标, 见表 4。取所有研究对象的综合评判指标的平均值为评价标准, 当井组综合评判指标大于平均值时, 认为该井组发育有优势通道。根据综合评判指标 F6、F8、F10 和 F19 井发育优势通道, 建议后期采取调剖调驱或部署调整井挖潜剩余油。

Table 4. The channel recognition result table
表 4. 优势通道识别结果表

井组	综合评价指标/f	是否发育优势通道
F6	0.7234	是
F8	1.3874	是
F10	0.0268	是
F17	-0.3416	否
F19	0.3395	是
F26	-1.9103	否
F28	-0.2253	否

根据上述评价结果对 F6 井组已经开展了调剖试验作业，并在后期对 F8、F10 和 F19 井开展调剖。**图 2** 为调剖前后注水井的注水指示曲线，可以看出调剖后注水井吸水能力下降，调剖是有效的。另外，经过调剖后，井组增油降水效果显著，含水下降 1.20%，考虑区块综合递减率情况下，累计增油 1.10 万方，充分证明了该方法决策的可靠性。

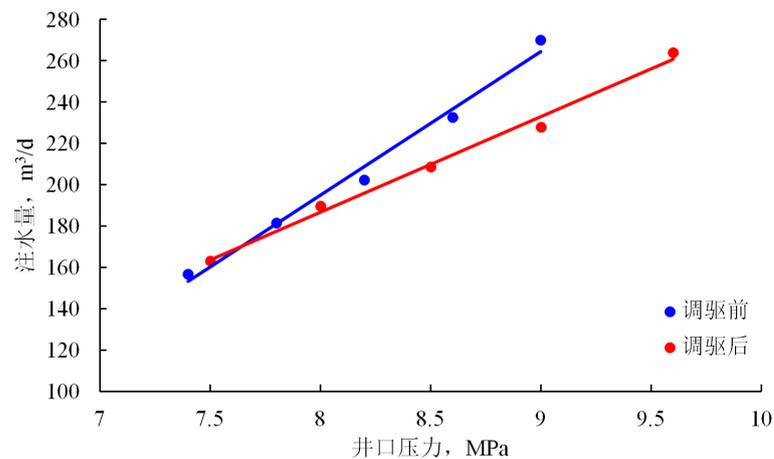


Figure 2. Contrast diagram of indicating curve before and after driving control in well F6

图 2. F6 井调驱前后指示曲线对比图

5. 结论

1) 从优势通道的成因和优势通道形成后的动态响应两个方面出发，筛选构成了识别优势通道的评价指标体系。

2) 利用主成分分析法建立了综合识别优势通道的方法，取所有研究对象的综合评判指标的平均值为评价标准，当井组综合评判指标大于平均值时，认为该井组发育有优势通道。

3) 本文方法在矿场进行了应用，对油田后续进一步提高采收率提供了技术支持。

参考文献

- [1] 曾流芳, 赵国景, 张子海, 等. 疏松砂岩油藏大孔道形成机理及判别方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(3): 268-275.
- [2] 白振强. 河流-三角洲储层大孔道形成机理研究[J]. 断块油气田, 2007, 14(4): 7-9.

- [3] 陈存良, 王振, 牛伟, 等. 基于最小二乘支持向量机的大孔道定量计算方法[J]. 断块油气田, 2015, 22(1): 74-77.
- [4] 胡书勇, 张烈辉, 罗建新, 等. 砂岩油藏大孔道的研究——回顾与展望[J]. 特种油气藏, 2006, 13(6): 10-14.
- [5] 何长, 李平. 大孔道的表现特征及调剖对策[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(5): 63-66.
- [6] 陈存良, 韩晓冬, 赵汉卿, 等. 低渗透油藏井间动态连通性研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(2): 106-110.
- [7] 孟凡顺, 黄伏生, 宋德才, 等. 费歇判别法识别大孔道[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(1): 121-124.
- [8] 史有刚, 曾庆辉, 周晓俊. 大孔道试井理论解释模型[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(3): 48-50.
- [9] 窦之林, 曾流芳, 张志海, 等. 大孔道诊断和描述技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 75-77.
- [10] 王森, 冯其红, 宋玉龙, 等. 基于吸水剖面资料的优势通道分类方法——以孤东油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(5): 99-102.
- [11] 王利美, 张国萍, 胡艳霞, 等. 井间示踪剂大孔道识别及剩余油饱和度分布技术[J]. 断块油气田, 2003, 10(4): 72-73.
- [12] 刘月田, 孙保利, 于永生. 大孔道模糊识别与定量计算方法[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 54-59.
- [13] 何增军, 宋成立, 鲁宁, 等. 模糊综合评判法快速识别低效无效循环井层——以扶余油田西 10-2 区块为例[J]. 非常规油气, 2016, 3(1): 41-46.
- [14] 彭仕宓, 史彦尧, 韩涛, 等. 油田高含水期窜流通道定量描述方法[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 79-84.
- [15] 黄晓东, 唐晓旭, 刘义刚, 等. 新型在线深部调剖技术在海上稠油油田的研究与应用[J]. 非常规油气, 2016, 3(4): 58-64.
- [16] Feng, Q., Wang, S., Wang, S., *et al.* (2011) Identification of Thief Zones by Dimensionless Pressure Index in Waterfloods. *SPE Enhanced Oil Recovery Conference*.
- [17] 冯其红, 王森, 陈存良, 等. 低渗透裂缝性油藏调剖选井无因次压力指数决策方法[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 932-937.
- [18] 孟祥海, 刘义刚, 邹剑, 等. 海上稠油油田深部调驱选井决策方法研究[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(3): 87-90.
- [19] 宋东锋. 东营凹陷南坡湖相碳酸盐岩储层评价方法研究[J]. 非常规油气, 2018, 5(2): 20-27+34.
- [20] 王敏, 陈民锋, 刘广为, 等. 主成分分析法确定海上油田水驱效果评价关键指标[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(2): 112-116.
- [21] 曲占庆, 张杰, 刘少军, 等. 基于主成分分析法提高有杆抽油系统效率[J]. 断块油气田, 2012, 19(3): 389-392.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5639, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: apf@hanspub.org