

龙女寺龙王庙组气藏气井初期产能主控因素分析

肖 寒,周莲莲,周旻昊,罗 弘,查家豪
(中国石油西南油气田公司川中油气矿,四川 遂宁 629000)

摘要:川中龙女寺区块龙王庙组气藏作为磨溪主体区重要的产能接替区,具有较大勘探开发潜力。气藏处于试采阶段,表现出气井初期产能差异较大的特征,亟需开展初期产能主控因素分析,摸清高产井控制因素,指导下步勘探开发部署工作。在对龙王庙组气藏54口已测试气井进行产能分类后,通过对气井优质储层厚度、中部海拔、裂缝密度、孔隙度及沥青含量5个地质参数和泵压、排量2个工程参数与无阻流量进行相关性研究,研究表明各单因素与产能具有一定正相关或负相关性,但相关性不明显;运用灰色关联分析方法,得到7个地质、工程影响因素与无阻流量的关联度,从而明确了气井初期产能的主控因素,并根据主控因素关联度,建立了适用于龙女寺龙王庙组气藏的产能综合指标评价方法,可以在气藏早期评价阶段快速定性地对气井产能进行评价,指导下步勘探开发部署工作。

关键词:初期产能;灰色关联;主控因素;快速产能评价;龙王庙;龙女寺

中图分类号:TE122 文献标志码:A

Analysis of main controlling factors of initial productivity of gas wells in the Longwangmiao Formation Gas reservoir of Longnvsi Block

XIAO Han, ZHOU Lianlian, ZHOU Minhao, LUO Hong, ZHA Jiahao

(Central Sichuan Oil and Gas District, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Suining 629000, China)

Abstract: The gas reservoir of Longwangmiao Formation in Longnvsi Block in central Sichuan as an important productivity replacement area of Moxi main area, has a large exploration and development potential. The gas reservoir is in the trial production stage, showing the characteristics of the large difference in the initial production capacity of gas wells. It is urgent to carry out the analysis of the main controlling factors of the initial production capacity, to find out the controlling factors of high-yielding wells, and to guide the next step of the deployment of the exploration and development. After classifying the production capacity of 54 tested gas wells in the Longwangmiao Formation gas reservoir, the correlation study was carried out on 5 geological parameters of gas wells, namely high-quality reservoir thickness, central elevation, fracture density, porosity, and bitumen content, as well as 2 engineering parameters, namely, pumping pressure and displacement with open flow rate. The study shows that each single factor has a certain positive or negative correlation with the production capacity, but the correlation is not obvious. Using the grey correlation analysis method, the correlation degree of 7 geological and engineering influencing factors with the open flow rate was obtained, to define the main controlling factors of the initial productivity of the gas wells. According to the correlation degree of the main controlling factors, a comprehensive productivity index evaluation method suitable for the Longwangmiao Formation gas reservoir in Longnvsi Block was established, which can quickly and qualitatively evaluate the gas well productivity in the early gas reservoir evaluation stage, and guide the next step of exploration and development deployment.

Key words: initial well productivity; grey correlation; main controlling factors; rapid productivity evaluation; Longwangmiao Formation; Longnvsi Block

引用格式:肖寒,周莲莲,周旻昊,等.龙女寺龙王庙组气藏气井初期产能主控因素分析[J].复杂油气藏,2023,16(3):335-342.

XIAO Han, ZHOU Lianlian, ZHOU Minhao, et al. Analysis of main controlling factors of initial productivity of gas wells in the Longwangmiao Formation Gas reservoir of Longnvsi Block [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(3): 335-342.

我国海相碳酸盐岩分布面积广,与国外成熟盆地天然气探明率(一般介于30%~60%之间)相比^[1],天然气资源丰富但探明率低,待勘探领域非常广阔^[2]。碳酸盐岩气藏的储渗系统主要由大小不等的

孔、缝、洞等单元组成,埋深多数大于4 500 m,为超

收稿日期:2022-12-04;改回日期:2023-02-17。

第一作者简介:肖寒(1986—),硕士,主要从事气藏动态分析研究工作。E-mail: xh123.gwde@cnpc.com.cn。

深层气藏^[3],普遍具有非均质性强的典型地质特征,因此,开发早期阶段的气井产能差异悬殊,变化规律复杂,目前尚未形成系统的初期产能主控因素的清晰认识^[4-24]。川中龙女寺区块是磨溪主体区之外最具勘探开发潜力的地区。目前,气藏处于试采阶段,气井初期产能差异较大,高产井控制因素尚不完全清楚,对该区下步整体开发和产能建设工作带来一定不确定性。结合气井初期无阻流量与各地质、工程因素相关性分析,运用灰色关联分析确定气井初期产能主控因素,根据主控因素关联度,建立气井初期产能指标评价方法,能够在气藏初期试采阶段或未取得气井产能试井等测试数据的情况下快速评价气井产能,指导气藏下步勘探开发部署工作。

1 气藏概况

龙女寺龙王庙组气藏2014年部署了M47井,试油获得 $110.83\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的高产气流,随后部署的7口井均获得良好油气显示,2015年至今,相继投入4口试采井,日产气 $58.3\times10^4\text{ m}^3$,累产气 $7.5\times10^8\text{ m}^3$ 。

气藏构造轴向呈北东东延伸,构造总体平缓,闭合度100 m,圈闭面积273.7 km²,埋深在4 700~5 300 m左右,地层厚度范围在80~100 m,变化不大,具有中间薄,向两边逐渐增厚的特征。主要发育颗粒滩相,是储层主要发育相带,厚度薄,横向连续性不好。储集岩岩石主要为粉—细晶白云岩、残余砂屑云岩和少量含砂质、泥质云岩,储集空间以宏观溶蚀孔洞为主。储层以低孔、低渗为主,裂缝、孔洞普遍发育,储层类型为裂缝—孔洞(孔隙)型。平均孔隙度为4.2%,平均渗透率 $0.35\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。气藏高温、高压,中含H₂S,中含CO₂,水型为CaCl₂。

2 产能影响因素分析

气井产能评价是气田开发的核心工作,落实气井产能,是为开发技术对策的制订及气藏优化配产提供依据的重要保障,目前一般用无阻流量描述气井产能。产能主控因素研究是气井产能评价工作的深化,是对已测试井产能变化规律深层次原因的总结^[25]。对气藏不同开发阶段,产能影响因素研究的对象和侧重点不同。针对龙女寺龙王庙组气藏,进行了前期评价阶段产能影响因素研究,根据气井无阻流量差异特征,研究初期产能的影响因素。

2.1 气井初期产能特征及分类

龙女寺区块龙王庙组气藏初期单井产能差异

明显,主要表现为气井测试产量、无阻流量高低悬殊,测试产量范围介于 $(3.73\sim110.8)\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,无阻流量范围介于 $(4.3\sim280.24)\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。行业标准GBn270-88《天然气储量规范》中规定,依据千米井深稳定天然气产量判断气井产能的高低,千米井深稳定产量是指每千米井深的气井稳定产量,而根据Q/SY TZ0026-2000《油(气)层工业油气流标准及试油结论规定》,确定气井稳定产量一般以无阻流量的1/4计算。千米井深稳定产量 $\geq10\times10^4\text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ 属于高产井; $(3\sim10)\times10^4\text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ 属于中产井;千米井深稳定产量 $\leq3\times10^4\text{ m}^3/(\text{km}\cdot\text{d})$ 属于低—特低产井。根据标准,龙女寺区块12口气井中,高产井2口,中产井3口,低产井7口。龙王庙组气藏构造平缓,根据磨溪主体区42口、龙女寺区块12口、合计54口气井无阻流量与千米井深稳定产量统计分析,无阻流量与千米井深稳定产量相关性很好(见图1),因此,无阻流量也可以表示龙王庙组气藏产能的高低,因其不用中部垂深参数,较千米井深稳定产量计算更为简便,将其引入气藏产能分类标准(见表1),后续也将分析无阻流量与各影响因素关系,从而确定初期产能主控因素。

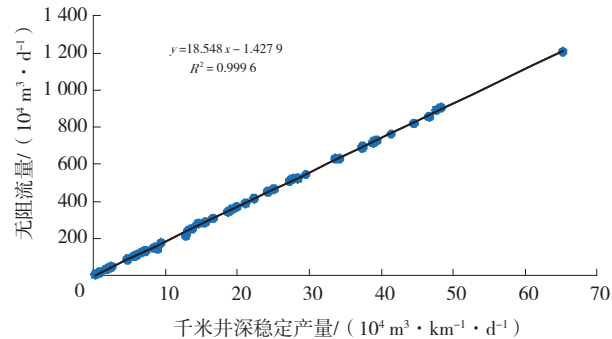


图1 龙王庙组气藏千米井深稳定产量和无阻流量关系

表1 龙女寺龙王庙组气藏气井产能分类统计

产能分类	千米井深 稳定产量/ (10 ⁴ m ³ ·km ⁻¹ ·d ⁻¹)	无阻流量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	井数/口
高产	≥10	≥184	2
中产	3~10	54~184	3
低—特低产	≤3	≤54	7

2.2 产能影响单因素分析

气井初期产能的变化规律主要受地质、工程因素的影响,储层特征及储层改造后裂缝搭配对气井初期产能贡献程度较大。从构造、储层物性、裂缝发育程度等地质特征和酸压改造工艺手段两方面分析与无阻流量的关系,从而研究影响产能的因

素。将磨溪主体区与龙女寺区块龙王庙组气藏54口气井初期产能及地质、工程数据统一分析统计,进行产能影响因素的研究。

2.2.1 构造

龙王庙组气藏为构造背景下的岩性圈闭气藏,构造高部位有利于油气的富集,含气性较好,往构造斜坡区含气性整体较差,构造位置高的气井产能相对较高。无阻流量与中部海拔具有一定的正相关性(见图2),相关系数为0.1973。

2.2.2 储层物性

优质储层是指赋存天然气储量的优质碳酸盐岩储集层段,优质储层的发育是气井产能大小的地质基础。优质储层厚度、孔隙度是衡量优质储层发育及物性的主要参数。通过相关性分析,无阻流量

与优质储层厚度呈明显正相关(见图3a),相关性较好,相关系数为0.7817;与孔隙度相关性不大(见图3b);储能系数是优质储层厚度与孔隙度的乘积,可以表征储层储集能力,受优质储层厚度影响,无阻流量与储能系数呈明显正相关(见图4),相关系数为0.6805。

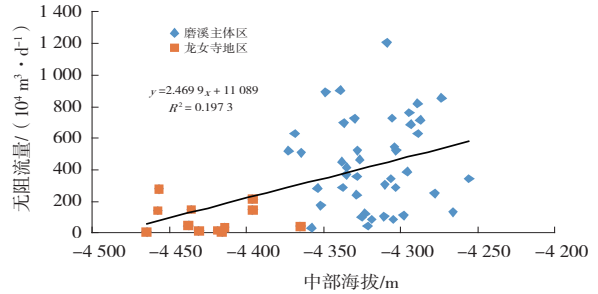


图2 龙王庙组气藏单井无阻流量与中部海拔关系

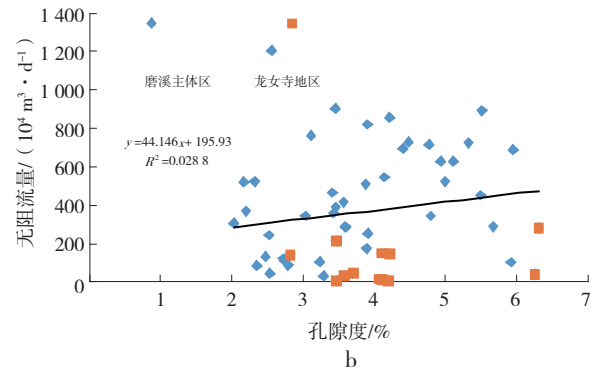
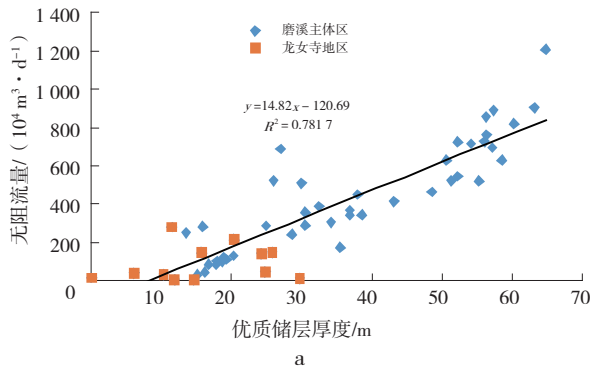


图3 龙王庙组气藏单井无阻流量与储层厚度及孔隙度关系

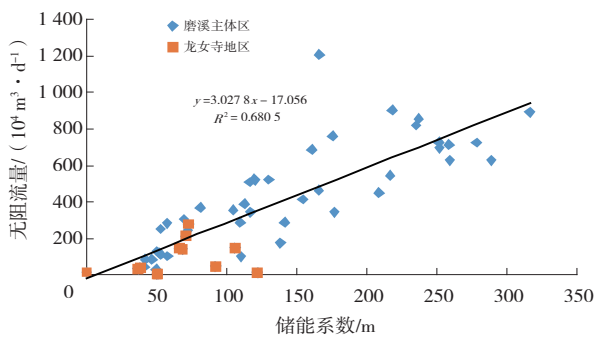


图4 龙王庙组气藏单井无阻流量与储能系数关系

2.2.3 裂缝密度

低渗储层中裂缝发育程度对气井的产能有直接影响,裂缝增大了低渗储层的渗流能力,当储层裂缝十分发育并与井筒直接连通时,气井一般具有较大的产能^[26]。通过相关性分析,无阻流量与裂缝密度之间存在一定正向相关性(见图5),相关系数为0.1812。

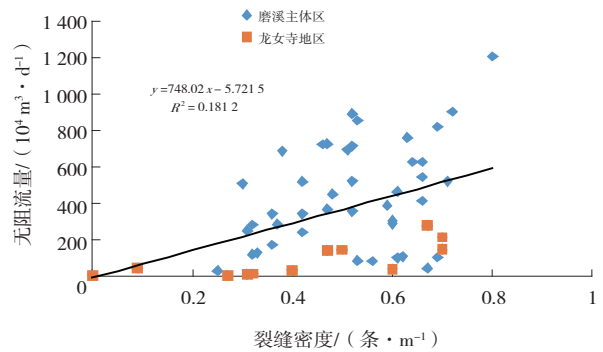


图5 龙王庙组气藏单井无阻流量与裂缝密度关系

2.2.4 沥青含量

龙女寺龙王庙组气藏较磨溪主体区沥青含量高,单井平均0.1%~1.2%,平均0.5%,沥青厚度平均19 m。沥青以碳质沥青为主,主要充填于孔隙和微裂缝中,随着沥青含量的升高,储层导流能力变差。无阻流量与沥青含量呈现一定的负向相关性(见图6),但相关性不明显,相关系数0.0225。

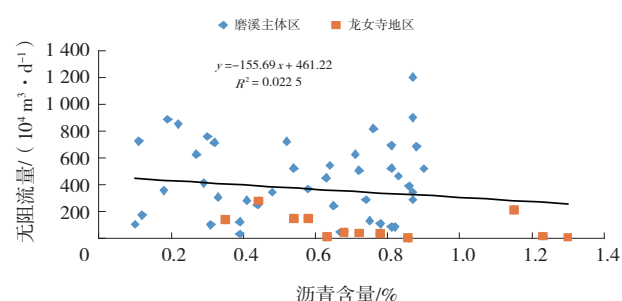


图6 龙王庙组气藏单井无阻流量与沥青含量关系

2.2.5 储层改造及工艺井的实施

气井增产改造是低渗气藏得以高效开发的必要手段,通过酸化压裂形成裂缝,连通孔洞,提高渗

流能力。目前获得高产的井均进行了压裂改造,钻井、录井等显示裂缝发育的单井,如果未经过储层改造,自然产能也相对较低^[27]。

统计显示龙王庙组气藏气井无阻流量与压裂参数泵压和排量相关性不大(见图7),但水平井可有效提高优质储层的钻遇率,从而提高无阻流量8~13倍。如M46井直井钻遇储层53.4 m,平均孔隙度5.4%,测试获气 $10.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,无阻流量 $15.53 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,M53井在M46井原井眼开窗侧钻,钻遇储层815 m,平均孔隙度4.9%,测试获气 $109.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,无阻流量 $215 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,较M46井提高了13倍。

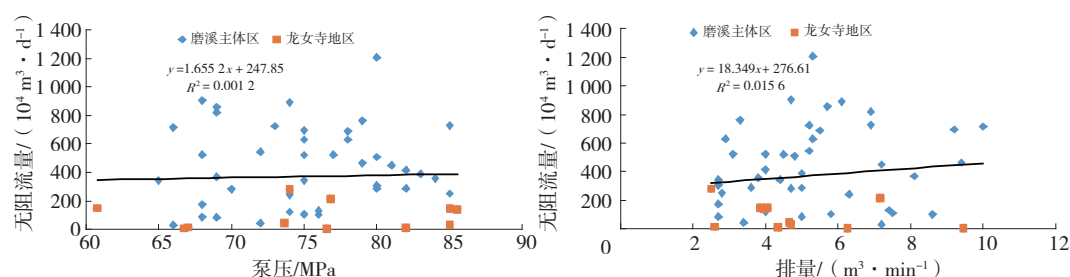


图7 龙王庙组气藏单井无阻流量与泵压和排量关系

3 灰色关联分析

灰色关联分析法是一种多因素统计分析方法,它以各种要素的样品数据为依据,表现要素间关系的强弱、大小和顺序,如样品数据反映的两个因素变化趋势基本一致,则二者的关联性较大,反之,关联性较小^[28]。

选取了磨溪主体区和龙女寺地区龙王庙组气藏54口已测试气井的优质储层厚度、中部海拔、裂缝密度、孔隙度及沥青含量5个地质参数和泵压、排量2个工程参数,共计7个参数进行灰色关联分析,54口井中高产井34口,中产井9口,低产井11口,分布于气藏西、中、东不同区域,具有代表性。

将54口井无阻流量作为参考序列,7个地质工程参数形成的指标序列作为比较序列,形成了 8×54 矩阵。为便于各个参数之间进行比较,运用公式

(1)对各参数进行处理变成无量纲数据。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min\{a_{ij}\}}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}} \quad (1)$$

式中, b_{ij} 为无量纲数据; a_{ij} 为比较序列数据; $\min\{a_{ij}\}$ 和 $\max\{a_{ij}\}$ 分别为比较序列的最小值和最大值, $i=(1,2,\dots,8)$, $j=(1,2,\dots,53,54)$ 。

根据公式(2)和公式(3),计算7个比较序列对参考序列的关联系数,见表2。

$$\varepsilon_{oi}(k) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta_{oi}(k) + \Delta \max} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_{oi}(k)$ 为第 k 个比较序列对参考序列的关联系数; $\Delta \min$ 和 $\Delta \max$ 分别为序列绝对差中的最大值与最小值; ρ 为分辨系数, $\rho \in (0,1)$,一般取0.5; $\Delta_{oi}(k)$ 为比较序列与参考序列的绝对值差,即:

$$\Delta_{oi}(k) = |x_o(k) - x_i(k)| \quad (3)$$

表2 产能影响因素关联系数统计

井号	初期无阻流量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	优质储层 厚度	中部海拔	裂缝密度	孔隙度	沥青含量	泵压	排量
M1	904	0.541 9	0.642 5	0.824 3	0.732 1	0.711 3	0.503 4	0.969 9
M2	521	0.553 9	0.980 0	0.678 1	0.815 1	0.981 6	0.350 6	0.552 9
M3	344	0.576 8	0.994 8	0.936 4	0.628 7	0.333 3	0.444 2	0.535 4
M4	891	0.875 5	0.803 9	0.429 5	0.827 0	0.664 3	0.609 5	0.841 6

续表 2 产能影响因素关联系数统计

井号	初期无阻流量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	优质储层 厚度	中部海拔	裂缝密度	孔隙度	沥青含量	泵压	排量
M5	123	0.896 9	0.623 8	0.777 5	0.576 0	0.383 2	0.544 0	0.411 7
M6	509	0.988 3	0.906 4	0.837 7	0.906 3	0.863 1	0.848 0	0.515 0
M7	524	0.575 4	0.811 2	0.884 3	0.472 6	0.621 4	0.388 2	0.540 7
M8	284	0.791 8	0.680 0	0.951 5	0.711 6	0.548 1	0.956 2	0.481 2
M9	132	0.358 1	0.512 1	0.582 4	1.007 8	0.586 7	1.009 8	0.938 6
M10	1 206	1.007 1	0.436 3	0.533 9	0.571 9	0.298 1	0.526 2	0.406 5
M11	32	0.646 8	0.412 7	0.695 4	0.585 8	0.423 5	0.522 6	0.417 6
M12	288	0.443 6	0.655 4	0.551 5	0.644 6	0.401 2	0.609 1	0.435 0
M13	629	0.762 1	0.687 2	0.978 6	0.593 8	0.528 8	0.373 0	0.587 4
M14	820	0.673 8	0.997 8	0.795 6	0.691 6	0.692 9	0.476 8	0.840 7
M15	87	0.826 1	0.716 4	0.484 2	0.406 8	0.340 2	0.549 2	0.425 4
M16	523	0.656 6	0.957 4	0.757 0	0.653 0	0.512 7	0.889 7	0.607 3
M17	45	0.864 2	0.619 9	0.530 7	0.335 9	0.355 1	0.515 3	0.398 5
M18	111	0.873 2	0.425 7	0.510 7	0.372 2	0.336 3	0.523 7	0.404 7
M19	86	1.000 0	0.533 6	0.487 8	0.391 7	0.362 6	0.526 6	0.421 0
M20	451	0.529 7	0.588 0	0.877 1	0.642 7	0.607 9	0.517 0	0.485 9
M21	715	0.919 6	0.547 8	0.550 2	0.879 6	0.583 6	0.483 7	0.774 6
M22	389	0.985 0	0.739 8	0.614 2	0.494 3	0.424 0	0.559 3	0.453 8
M23	856	0.716 1	0.789 6	0.450 5	0.903 8	0.638 1	0.590 3	0.883 9
M24	252	0.681 5	0.883 4	0.866 2	0.694 4	0.342 8	1.000 0	0.404 8
M25	175	0.629 0	0.803 8	0.799 5	0.570 5	0.475 2	0.360 4	0.452 7
M26	545	0.929 9	0.889 6	1.000 0	0.521 3	0.531 0	0.390 5	0.587 6
M27	629	0.714 8	1.000 0	0.569 0	0.572 8	0.861 0	0.466 3	0.611 9
M28	465	0.900 0	0.469 0	0.689 1	0.518 5	0.564 9	0.384 3	0.502 5
M29	344	0.920 2	0.766 3	0.581 4	0.711 5	0.430 6	0.422 6	0.477 4
M30	725	0.748 8	0.874 0	0.666 8	0.949 4	0.894 8	0.525 8	0.697 5
M31	728	0.955 5	0.861 5	0.456 6	0.972 2	0.696 5	0.465 4	0.587 8
M32	357	0.947 3	0.863 4	0.687 7	0.534 0	0.501 1	0.565 2	0.439 0
M33	688	0.587 3	0.982 1	0.860 1	0.816 8	0.590 6	0.602 5	0.622 3
M34	762	0.566 4	0.624 4	0.518 3	0.724 7	0.664 0	0.489 1	0.662 2
M35	370	0.652 9	0.493 4	0.839 2	0.591 2	0.533 4	0.463 8	0.521 8
M36	307	0.664 3	0.983 8	0.892 9	0.450 0	0.424 7	0.453 9	0.440 9
M37	103	0.371 4	0.386 0	0.843 3	0.374 2	0.380 3	0.528 8	0.402 6
M38	415	0.976 9	0.909 4	0.731 5	0.457 5	0.564 1	0.413 4	0.467 5
M39	243	0.862 6	0.534 0	0.657 6	0.556 1	0.442 9	0.486 0	0.447 4
M40	696	0.970 7	0.590 8	0.968 7	0.873 3	0.914 7	0.427 3	0.655 3
M41	105	0.718 5	0.498 2	0.856 6	0.343 0	0.354 6	0.544 6	0.399 4
M42	289	0.800 3	0.810 4	0.627 2	0.442 6	0.492 8	0.495 5	0.426 9
M43	4.3	0.594 8	0.340 5	0.441 7	0.547 7	0.607 4	0.504 4	0.373 3

续表2 产能影响因素关联系数统计

井号	初期无阻流量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	优质储层 厚度	中部海拔	裂缝密度	孔隙度	沥青含量	泵压	排量
M44	14.65	0.508 6	0.536 9	0.534 3	0.518 7	0.704 8	0.336 6	0.359 0
M45	142.32	0.884 6	0.641 3	0.843 1	0.463 1	0.821 2	0.468 6	0.376 1
M46	15.73	0.512 0	0.667 6	0.348 3	0.511 1	0.631 8	0.968 9	0.409 3
M47	280.24	0.388 4	0.979 3	0.899 4	0.401 1	0.654 1	0.818 9	0.459 8
M48	8.07	0.493 7	0.440 6	0.333 5	1.000 0	1.000 0	0.561 1	0.408 1
M49	150	0.576 7	0.655 6	0.641 5	0.350 4	0.962 5	0.453 0	0.479 4
M50	41.13	0.338 1	0.959 3	0.506 5	0.361 2	0.446 2	0.787 8	1.000 0
M51	34.68	0.595 1	0.526 2	0.479 5	0.462 0	0.625 4	0.634 3	0.354 4
M52	132.3	0.557 9	0.636 3	0.668 2	0.446 0	0.633 6	0.653 0	0.378 8
M53	214.85	0.757 6	0.476 8	0.416 2	0.367 6	0.704 0	0.625 5	0.426 6
M54	46.54	0.582 0	0.535 0	0.526 9	0.845 5	0.796 5	0.397 3	0.393 1

各单井关联系数较高的因素,其数值的高低决定单井无阻流量的高低。如M10井无阻流量最大,为1 206×10⁴ m³/d,关联系数高的因素为优质储层厚度,是其他因素2倍左右,而M10井优质储层厚度也是54口井中最大值,为64.8 m,因此,优质储层厚度大决定了M10井的无阻流量较高;M43井无阻流量最小,为4.3×10⁴ m³/d,关联系数较高的因素为沥青质含量和优质储层厚度,其沥青质含量高达到0.9%,优质储层厚度仅为14.6 m,决定了M43井无阻流量较低。

因关联系数值存在多个,所以取各参考序列关联系数的平均值表示参考序列的关联度,即:

$$r_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{oi}(k)$$

(4)

式中, r_{oi} 为比较序列与参考序列的关联度, $n=1, 2, \cdots, 53, 54$ 。

由各影响因素关联度可以看出,优质储层厚度、裂缝密度和气井中部海拔是决定气井初期为高产井的关键因素(见表3)。

表3 龙王庙组气藏产能影响因素关联度排序

影响因素	关联度	关联度排序
优质储层厚度	0.712 0	1
裂缝密度	0.697 8	2
中部海拔	0.675 4	3
泵压	0.607 3	4
孔隙度	0.582 3	5
排量	0.555 8	6
沥青含量	0.528 8	7

4 产能快速综合评价

根据所计算3个主控因素的关联度,建立了适用于龙女寺龙王庙组气藏产能综合评价指标公式(5)。

$$I = \sum r_{oi} \times b_{ij}$$

(5)

式中, I 为气井综合产能指标; r_{oi} 为主控因素与无阻流量的关联度。

通过计算的综合产能指标与千米井深稳定产量关系图建立了气井初期产能指标评价综合图版(见图8),得到运用综合产能指标快速评价初期产能的定量标准: $I \leq 0.3$ 属于低-特低产井, $0.3 < I < 0.65$ 为中产井, $I \geq 0.65$ 为高产井。

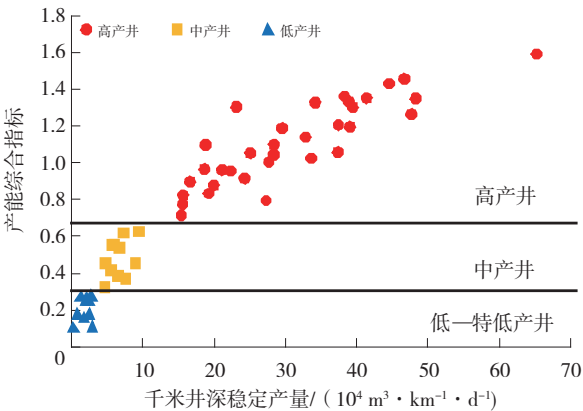
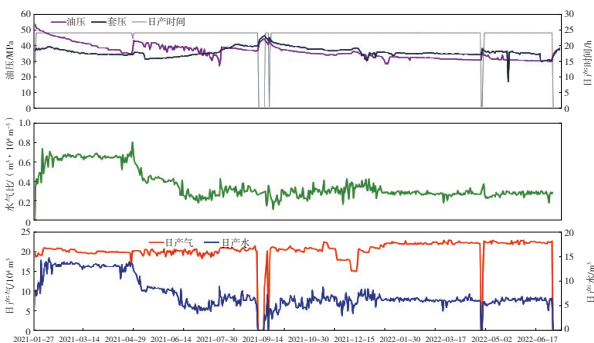


图8 龙王庙组气藏综合产能指标评价初期产能评价图版

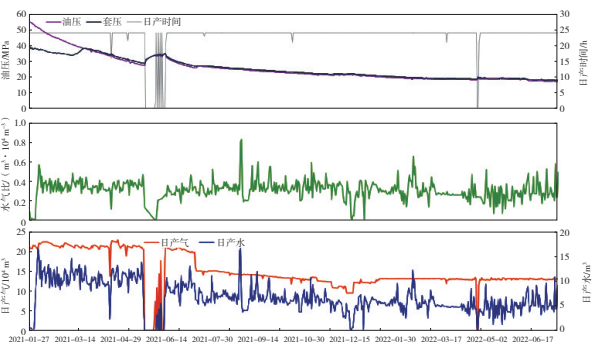
运用所建立的综合产能指标快速评价初期产能方法,对2口2021年新投产气井(M55井和M56井)和1口2022年新测试气井(M57井)进行初期产能评价,通过对比实际无阻流量和千米井深稳定产

量,验证方法的适用性。评价结果表明气井综合产能指标与初期产能具备良好相关性(见表4),已投产2口气井能够在一定产量下稳定生产(见图9),其中综合产能指标最高的高产井M56井在 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 产量下已稳产2年,且油压相对较高($\geq 20\text{ MPa}$)、递减缓慢,生产效果较好。



a.M56井

表4 新投产气井初期产能与综合产能评价				
井号	无阻流量/ ($10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	千米井深稳定产量/ ($10^4\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	气井 分类	产能综 合指标
M55	146.20	6.82	中产井	0.47
M56	204.90	13.27	高产井	1.56
M57	48.83	2.47	低产井	0.27



b.M55井

图9 M56井和M55井采气曲线

5 结论

- (1)受地质及工程因素影响,龙女寺龙王庙组气藏单井测试产量和无阻流量差异较大。
- (2)优质储层厚度、裂缝发育程度及构造是龙女寺龙王庙组气藏气井成为高产井的关键因素,与产能成正向相关性,同时,水平井可提高储层的钻遇率,增大优质储层厚度,也是获得高产井的重要工艺手段。
- (3)建立的适用于龙女寺龙王庙组气藏产能综合评价指标公式能够在气藏早期评价阶段生产资料较少的情况下,对气井产能进行快速定性评价,指导气藏下步勘探开发部署工作。该产能快速评价方法对其他处于早期开发评价阶段,地质、开发资料较少的油气藏单井产能评价具有一定借鉴价值。

参考文献:

[1] 马新华.四川盆地天然气发展进入黄金时代[J].天然气工业,2017,37(2):1-10.

[2] 沈安江,寿建峰,张宝民,等.中国海相碳酸盐岩储层特征、成因和分布[M].北京:石油工业出版社,2016.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.天然气藏分类:GB/T26979—2011[S].北京:中国标准出版社,2012.

[4] 马新华,李熙喆,梁峰,等.威远页岩气田单井产能主控因素与开发优化技术对策[J].石油勘探与开发,2020,

47(3):555-563.

[5] 冯建伟,赵力彬,王焰东.库车坳陷克深气田超深层致密储层产能控制因素[J].石油学报,2020,41(4):478-488.

[6] 蒙晓灵,兰义飞,张宏波,等.鄂尔多斯盆地南部深层致密砂岩气藏成藏特点及产能主控因素[J].西安石油大学学报(自然科学版),2020,35(5):9-13,23.

[7] 郑超,魏林芳,王贤成,等.川东石炭系气藏气井产能影响因素分析及产能预测[J].天然气工业,2002,22(4):106-107.

[8] 谢军,赵圣贤,石学文,等.四川盆地页岩气水平井高产的地质主控因素[J].天然气工业,2017,37(7):1-12.

[9] 朱讯,肖富森,洪海涛,等.四川盆地中部地区致密河道砂岩气藏高产井地震模式及井轨迹设计[J].天然气勘探与开发,2020,43(3):86-93.

[10] 谷一凡,周路,蒋裕强,等.四川盆地高石梯区块震旦系灯影组四段储层类型及气井产能模式[J].石油学报,2020,41(5):574-583.

[11] 朱讯,谷一凡,蒋裕强,等.川中高石梯区块震旦系灯影组岩溶储层特征与储渗体分类评价[J].天然气工业,2019,39(3):38-46.

[12] 李晓平,刘启国,赵必荣.水平气井产能影响因素分析[J].天然气工业,1998,18(2):53-56.

[13] 杨胜来,肖香娇,王小强,等.异常高压气藏岩石应力敏感性及其对产能的影响[J].天然气工业,2005,25(5):94-95.

[14] 胥洪俊,范明国,康征,等.考虑渗透率应力敏感的低渗气藏产能预测公式[J].天然气地球科学,2008,19

- (1):145-147.
- [15] 宋传真,郑荣臣.致密低渗气藏储层应力敏感性及其对单井产能的影响[J].大庆石油地质与开发,2006,25(6):47-49.
- [16] 王宇航,程时清,符浩,等.考虑应力敏感性的低渗透气藏气井产能分析[J].油气井测试,2017,26(1):6-9,75.
- [17] 张小龙,杨志兴.启动压力梯度对低渗气藏不稳定渗流特征的影响[J].油气井测试,2018,27(3):7-13.
- [18] 张烈辉,梁斌,刘启国,等.考虑滑脱效应的低渗低压气藏的气井产能方程[J].天然气工业,2009,29(1):76-78.
- [19] 王德龙,王宪文,闫娟,等.非达西效应对低渗气藏气井产能影响研究[J].特种油气藏,2012,19(5):97-99.
- [20] 唐林,郭肖,苗彦平,等.非达西渗流效应对低渗气藏水平井产能的影响[J].断块油气田,2013,20(5):607-610.
- [21] 张烈辉,李成勇,刘启国,等.高含硫气藏气井产能试井解释理论[J].天然气工业,2008,28(4):86-88.
- [22] 张睿,孙兵,秦凌嵩,等.气井见水后产能评价研究进展[J].断块油气田,2018,25(1):62-65.
- [23] 吕栋梁,唐海,吕浙江,等.气井产水时产能方程的确定[J].岩性油气藏,2010,22(4):112-115.
- [24] 张合文,冯其红,鄢雪梅.气水两相流二项式产能方程研究[J].断块油气田,2008,15(6):62-64.
- [25] 蔡珺君,彭先,李骞,等.超深层强非均质性气藏早中期产能主控因素及开发优化技术对策——以四川盆地中部安岳气田震旦系气藏为例[J].天然气地球科学,2021,32(11):1622-1633.
- [26] 贺伟,冯曦,王阳.低渗气藏气井产能影响因素分析[J].天然气勘探与开发,2000,23(2):23-26.
- [27] 黄小琼,张连进,郑伟,等.安岳地区上三叠统须二上亚段致密砂岩气藏气井产能控制因素[J].天然气工业,2012,32(3):65-69.
- [28] 曹海涛,詹国卫,余小群,等.深层页岩气井产能的主要影响因素——以四川盆地南部永川区块为例[J].天然气工业,2019,39(S1):118-122.

(编辑 卞 炜)

(上接第334页)

参考文献:

- [1] 邹志文,郭华军,牛志杰,等.河控型扇三角洲沉积特征及控制因素:以准噶尔盆地玛湖凹陷上乌尔禾组为例[J].古地理学报,2021,23(4):756-770.
- [2] 马永平,张献文,朱卡,等.玛湖凹陷二叠系上乌尔禾组扇三角洲沉积特征及控制因素[J].岩性油气藏,2021,33(1):57-70.
- [3] 邹妞妞,史基安,张大权,等.准噶尔盆地西北缘玛北地区百口泉组扇三角洲沉积模式[J].沉积学报,2015,33(3):607-615.
- [4] 蔡全升,胡明毅,陈孝红,等.小型断陷湖盆扇三角洲沉积特征与发育模式——以徐家围子断陷北部沙河子组为例[J].岩性油气藏,2018,30(1):86-96.
- [5] 唐韵.陈堡油田泰一段三砂组扇三角洲构型研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.
- [6] 屈宏.陈堡油田陈3断块泰州组一段油藏地质研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.
- [7] 高丽敏.陈堡油田 $K_2t_1^3$ 砂组扇三角洲储层构型研究[D].成都:西南石油大学,2017.
- [8] MIAL L A D. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology[M]. Berlin: Springer, 1996: 57-98.
- [9] SCHUMM S A. Fluvial paleochannels[M]//RIGBY J K, HAMBLIN W K. Recognition of ancient sedimentary environments. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1972: 98-107.

(编辑 卞 炜)