

一种页岩气井连通性评价的新型示踪剂应用研究

申宝剑^{1,2,3}, 潘安阳^{1,2,3}, 张俊⁴, 卢龙飞^{1,2,3}, 钱门辉^{1,2,3}, 陆双龙⁵, 杜明亮⁵

(1. 中国石化 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

4. 中国石化 科技部, 北京 100728;

5. 江南大学 化学与材料工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:选取了 3 种在地层和压裂液中含有低、环保、稳定的稀土元素 Pr、Yb、Sm 与乙二胺四乙酸和吡啶二羧酸形成络合物, 然后将其作为示踪剂应用于页岩气井连通性评价。在中国石化涪陵页岩气田焦页 66 号扩平台井组的中部气层两口井(焦页 66-Z1HF 和焦页 66-Z2HF)中注入微量元素示踪剂, 通过监测注入示踪剂及其邻井返排液中是否有微量元素示踪剂来评估焦页 66 号扩平台压后连通性, 进而探讨涪陵页岩气田下部、中部、上部气层立体开发的可行性。返排液监测结果显示, 焦页 66-Z1HF 井偶见高含量 Sm 元素示踪剂(焦页 66-Z2HF 井注入剂), 表明两口中部气层井间可能存在连通; 下部气层监测井未见 Pr、Yb、Sm 浓度异常, 说明其与中部气层未发生连通; 上部气层监测井焦页 5-S2 井和焦页 5-S3 井返排液混样中监测到了高浓度 Sm 元素示踪剂, 表明其与中部气层存在连通。研究初步验证了微量元素示踪技术是一项简单、有效的页岩气井连通性评价的示踪技术, 可以方便、高效地判断页岩气井的井间连通情况, 具有广阔的应用前景。

关键词:微量元素; 示踪剂; 页岩气井; 连通性

中图分类号: TE311

文献标识码: A

Evaluating the connectivity of shale gas wells by new rare element tracers

SHEN Baojian^{1,2,3}, PAN Anyang^{1,2,3}, ZHANG Jun⁴, LU Longfei^{1,2,3},

QIAN Menhui^{1,2,3}, LU Shuanglong⁵, DU Mingliang⁵

(1. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

4. Science and Technology Department of SINOPEC, Beijing 100728, China;

5. School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Three types of rare earth elements, Pr, Yb and Sm, in shale gas well and fracturing fluid, which showed a low content and are environmentally friendly and chemically stable, formed complexes with ethylenediamine tetra-acetic acid and di-picolinic acid, both of which were applied as tracers in the determination of the connectivity of shale gas wells. A case study was made in two shale gas wells (Jiaoye 66-Z1HF and Jiaoye 66-Z2HF) of the middle gas reservoir in the Jiaoye No. 66 extended platform well group in the Fuling shale gas field of SINOPEC. We first injected rare element tracer into the wells, and then evaluated the connectivity of the Jiaoye No. 66 extended platform after fracturing by monitoring whether there was rare element tracer in the tracer-injected wells and the flow-back fluid from adjacent wells, and finally discussed the feasibility of three-dimensional development of the lower, middle and upper gas layers of the Fuling shale gas field. The results of flow-back fluid monitoring showed that a high content of Sm tracer, which had been injected into well Jiaoye 66-Z2HF, was occasionally found in well Jiaoye 66-Z1HF, indicating that there might be a connection between the middle gas layers of the two wells. There is no abnormal Pr, Yb or Sm concentrations in the monitoring wells of the lower gas layers, indicating that they were not connected with the central gas layers. A high concentration of Sm tracer was detected in the mixed back-flow fluid samples of wells Jiaoye 5-S2 and Jiaoye 5-S3 in the upper gas layer, indicating

收稿日期: 2021-05-13; 修订日期: 2021-08-31。

作者简介: 申宝剑(1978—), 男, 博士, 研究员, 从事非常规页岩油气地质评价研究。E-mail: shenbj.syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技部项目(P20059-8)资助。

that they were connected to the central gas layers. The present investigation has verified that rare element tracer technology is a facile and effective method for the connection determination between shale gas wells and has broad application prospects.

Key words: rare elements; tracer; shale gas well; connectivity

井间示踪技术是将示踪剂注入油气开发井中,通过测试取样中示踪剂含量来监控油藏和油井间的信息,通过示踪剂产出曲线的变化分析并判断地层参数的分布规律,进而对油藏和油井进行动态监控和描述^[1-8]。井间示踪技术最初采用用量大、精度低的无机盐等作为示踪剂,其后历经放射性同位素和稳定性同位素示踪剂两阶段,发展到当前的用量少、精度高的微量元素示踪剂^[9-14]。相对于无机盐、放射性同位素和稳定性同位素示踪剂,微量元素示踪剂具有明显优势:一是种类多,彼此无干扰,可以满足单井组、多个相邻井组或区块整体同步测试以及分层测试要求;二是微量元素示踪剂无毒、无放射性,无环境及安全隐患,注剂、取样无需专业授权,油田工人即可独立完成;三是微量元素具有优异的热稳定性和生物稳定性,满足长时间、大井距、高温等复杂油藏条件监测要求,而且用量少,测样仪器及相关配套技术日臻完善^[2,10]。

近年来,微量元素示踪剂井间示踪监测技术,尤其是利用地层水中含量极少的稀土元素络合物作为示踪剂的示踪检测技术得到了广泛应用^[15-20]。目前,已在致密砂岩油气藏领域中的水平井体积压裂效果、裂缝形态评价方面广泛应用,但在页岩气田水平压裂评价中应用不多,原因在于黑色页岩不仅本身含有大量的微量元素,而且还易吸附大量微量元素,使得示踪检测的效果差,因此,需要对微量元素进行综合筛选,并对筛选出的微量元素进行络合保护。

1 试验前准备

1.1 试验井准备

中国石化涪陵页岩气田焦页坝主体区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组开发层系分上部、中部、下部3套气层,下部和上部气层采用2套独立井网实现了规模有效开发,中部气层能否再部署一套独立井网实现涪陵页岩气田立体开发需要进一步论证。为了查明涪陵页岩气田立体开发的可行性,首次针对中部气层在焦页66号扩平台实施了两口评价井(焦页66-Z1HF井和焦页66-Z2HF井),新型绿色示踪剂在这两口井中进行了应用。

1.1.1 焦页66-Z1HF井

根据焦页66-Z1HF井与邻井水平段空间展布(图1),空间位置距离较近的生产井主要包括:焦页12-4HF、焦页66-3HF、焦页66-4HF、焦页5-2HF、焦页6-1HF、焦页66-Z2HF、焦页5-S2HF、焦页5-S3HF等井。结合焦页66-Z1HF井轨迹穿行层位和压裂施工方案,选择在焦页66-Z1HF井的第2、9、17、24段注入微量元素示踪剂。本次研究过程中,对焦页66-Z1HF井压裂返排液进行取样监测的井有8口(表1)。

1.1.2 焦页66-Z2HF井

根据焦页66-Z2HF井与邻井水平段空间展布(图1),空间位置距离较近的生产井主要包括:焦页12-4HF、焦页66-3HF、焦页66-4HF、焦页5-2HF、焦页6-1HF、焦页66-Z1HF、焦页5-S2HF、焦页5-S3HF等井。结合焦页66-Z2HF井轨迹穿行层位和压裂施工方案,选择在焦页66-Z2HF井的第2、7、12、18、25段注入微量元素示踪剂。本次研究过程中,对焦页66-Z2HF井压裂返排液进行

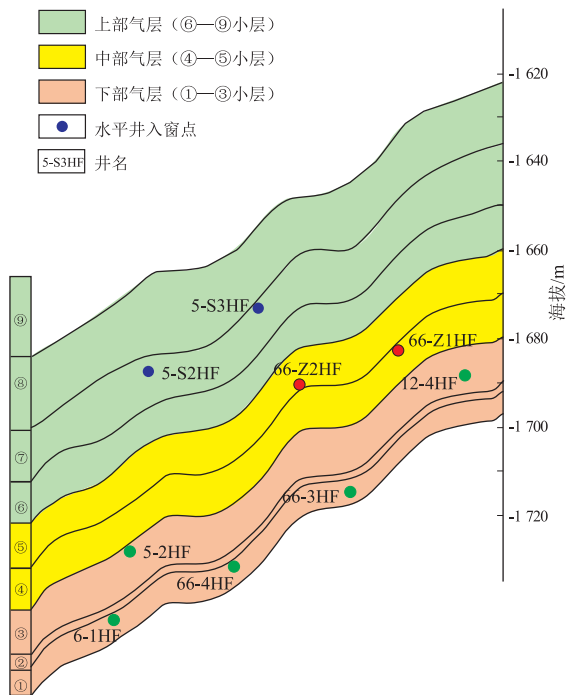


图1 重庆涪陵页岩气田焦页66-Z1HF、焦页66-Z2HF井与邻井空间关系示意

Fig.1 Spatial relationship among wells Jiaoye 66-Z1HF, Jiaoye 66-Z2HF and their neighboring wells, Fuling shale gas field, Chongqing

表 1 重庆涪陵页岩气田焦页 66-Z1HF 井和焦页 66-Z2HF 井与邻井空间距离

Table 1 Distance between wells Jiaoye 66-Z1HF and Jiaoye 66-Z2HF and their neighboring wells, Fuling shale gas field, Chongqing

注入井	空间位置	取样监测井	井距/m
焦页 66-Z1HF	上部气层	焦页 5-S3HF	443
		焦页 5-S2HF	722
	中部气层	焦页 66-Z2HF	304
	下部气层	焦页 66-3HF	153
		焦页 66-4HF	501
		焦页 12-4HF	170
		焦页 5-2HF	775
焦页 6-1HF	781		
焦页 66-Z2HF	上部气层	焦页 5-S3HF	119
		焦页 5-S2HF	471
	中部气层	焦页 66-Z1HF	304
	下部气层	焦页 66-3HF	151
		焦页 66-4HF	201
		焦页 12-4HF	474
		焦页 5-2HF	471
焦页 6-1HF	477		

取样监测的井有 8 口(表 1)。

1.2 试剂准备

对焦页 66 号扩平台及其周边多口井的返排液、压裂液、清水进行取样,测试了压裂液和返排液中 30 余种微量元素的含量,优选了 3 种含量低、安全稳定的微量元素 Pr、Sm、Yb,并采用络合剂与微量元素形成络合物,从而保证微量元素在注入地层后不会被黑色页岩吸附而影响检测精度。所采用的微量元素化合物为六水合硝酸镨[Pr(NO₃)₃·6H₂O]、六水合氯化镱(YbCl₃·6H₂O)和六水合硝酸钐[Sm(NO₃)₃·6H₂O]。所采用的络合剂为乙二胺四乙酸和吡啶二羧酸。

结合监测时间、压裂液用量和示踪剂的检测精度,计算各段用量,确保邻本井监测时间满足 1 个月以上的监测要求。焦页 66-Z1HF 井选用 AL、BL

型示踪剂(含 A 型、B 型微量元素),总用量 4.3 m³左右,焦页 66-Z2HF 井选用 CL 型示踪剂(含 C 型微量元素),总用量 2.5 m³(表 2)。

1.3 监测井基值的确定

检测其中微量元素的含量,以确定监测井中微量元素示踪剂的基值。焦页 5-S2-S3(混样)、焦页 6-1-4-6(混样)、12#1 分离器(混样)、12#2 分离器(混样)的返排液 Pr 浓度与滑溜水、清水中的 Pr 浓度基本相当,均介于 0~1 ng/g(图 2)。焦页 5-S2-S3(合)返排液 Yb 浓度最高,约 1.3 ng/g;焦页 6-1-4-6(合)、焦页 5-S2-S3(合)、12#2 分离器(合)、12#1 分离器(合)的返排液 Yb 浓度与滑溜水、清水相当,介于 0.2~0.6 ng/g(图 2),说明在监测井中微量元素 Pr 和 Yb 的浓度非常低。

焦页 6-1-4-6(合)、焦页 5-S2-S3(合)、12#1 分离器(合)、12#2 分离器(合)返排液 Sm 浓度基本相当,介于 2~4 ng/g;滑溜水和清水 Sm 浓度最低,小于 1 ng/g(图 3),说明在监测井中微量元素 Sm 的浓度非常低。

综上所述可以看出,清水和滑溜水的 Pr、Yb、

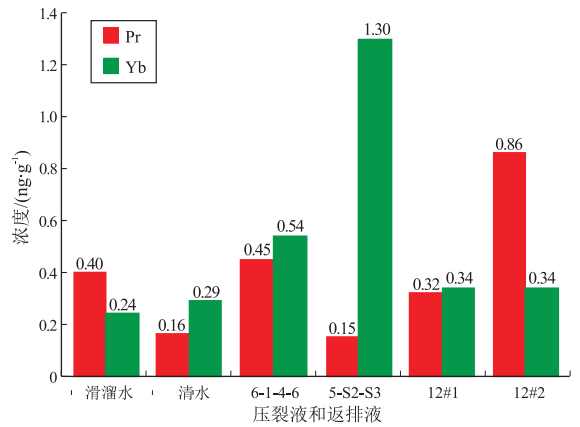


图 2 重庆涪陵页岩气田监测井压裂液和返排液 Pr 和 Yb 浓度基值

Fig.2 Base values of Pr and Yb tracer concentration in fracturing and flowback fluid from monitoring wells, Fuling shale gas field, Chongqing

表 2 重庆涪陵页岩气田焦页 66-Z1HF 井和焦页 66-Z2HF 井微量示踪剂注入段号及用量

Table 2 Rare element tracers used in wells Jiaoye 66-Z1HF and Jiaoye 66-Z2HF, Fuling shale gas field, Chongqing

井号	焦页 66-Z1HF				焦页 66-Z2HF				
	注入段号	2	9	17	24	2	7	12	18
起始井深/m	4 481	3 969	3 463	3 022	4 321	4 021	3 661	3 301	2 885
终止井深/m	4 523	4 033	3 526	3 085	4 354	4 081	3 721	3 361	2 945
穿行层位	⑤下	④上	⑤下	⑤下	⑤下	⑤下	④上	⑤下	⑤上
示踪剂类型	AL	AL	BL	BL	CL	CL	CL	CL	CL
用量/m ³	1.0	1.0	1.0	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
实际浓度/(mg·L ⁻¹)	9.31	11.66	17.64	21.70	28.46	26.16	28.66	29.54	31.14

注:A,B,C 分别代表 Pr,Yb,Sm;L 代表乙二胺四乙酸+吡啶二羧酸。

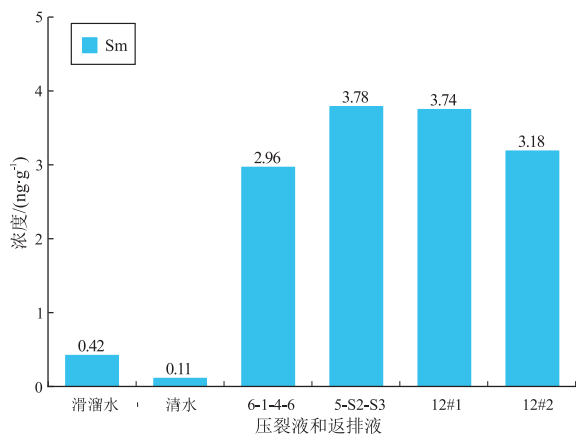


图 3 重庆涪陵页岩气田监测井压裂液和返排液 Sm 浓度基值

Fig.3 Base values of Sm tracer concentration in fracturing and flowback fluid from monitoring wells, Fuling shale gas field, Chongqing

Sm 浓度均较低,基值最高为 3.78 ng/g (Sm),说明本研究采用的微量元素示踪剂在监测井中含量非常低,如果监测井中该微量元素异常增加,则说明监测井与注入井之间存在连通。

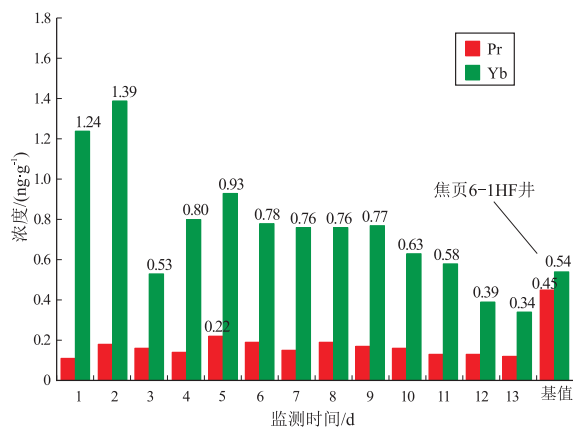


图 4 重庆涪陵页岩气田焦页 6-1HF 井返排液样品 Pr、Yb、Sm 浓度分布

Fig.4 Concentrations of Pr, Yb and Sm tracers in flowback fluid from well Jiaoye 6-1HF, Fuling shale gas field, Chongqing

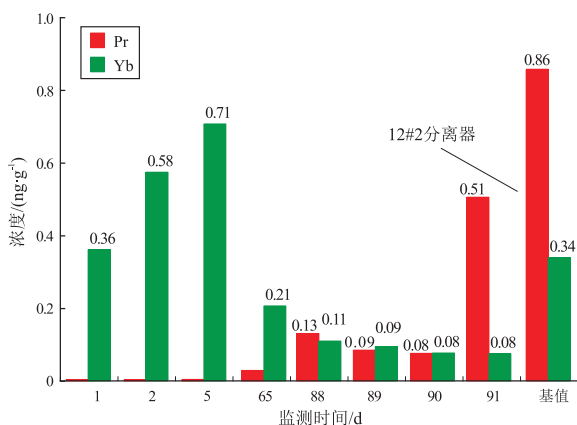


图 5 重庆涪陵页岩气田焦页 12-4HF 井返排液样品 Pr、Yb、Sm 浓度分布

Fig.5 Concentrations of Pr, Yb and Sm tracers in flowback fluid from well Jiaoye 12-4HF, Fuling shale gas field, Chongqing

2 监测数据分析

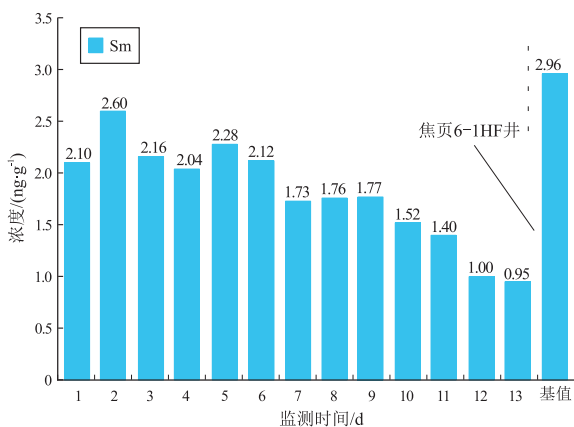
2.1 中部气层井与下部气层老井连通情况判别

(1) 焦页 6-1HF 井共采集返排液样品 27 个,检测到的 3 种微量元素 Pr, Yb, Sm 浓度最大值依次为:0.22,1.39,2.60 ng/g。由图 4 可以直观地看出,焦页 6-1HF 井返排液样品 Pr, Yb, Sm 浓度均低于或与基值相当,判定焦页 66-Z1HF、焦页 66-Z2HF 两口中部气层井与焦页 6-1HF 井未连通。

(2) 焦页 12-4HF 井采集返排液样品 54 个,检测到的 3 种微量元素 Pr, Yb, Sm 浓度最大值依次为:0.51,0.71,6.64 ng/g。由图 5 可以清晰地看出,焦页 12-4HF 井所有返排液样品 Pr、Yb、Sm 浓度均低于或与基值相当,且未见明显波动,判定焦页 66-Z1HF、焦页 66-Z2HF 两口中部气层井与焦页 12-4HF 井未连通。

2.2 中部气层井与上部气层井连通情况判别

上部气层 2 口监测井(焦页 5-S2HF 井、焦页 5-S3HF 井)共采集焦页 5-S2-S3(合)返排液混样



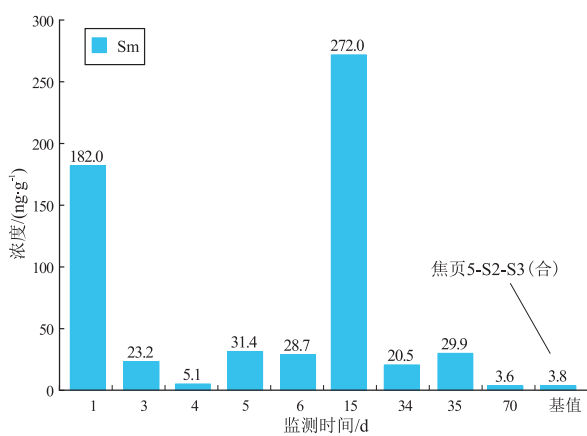
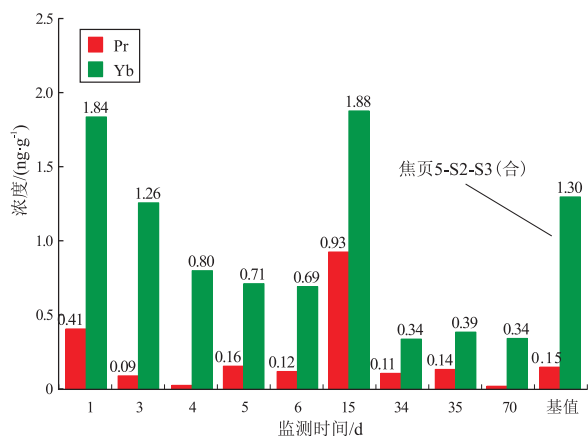


图 6 重庆涪陵页岩气田焦页 5-S2-S3(合)返排液样品 Pr、Yb、Sm 浓度分布

Fig.6 Concentrations of Pr, Yb and Sm tracers in flowback fluid from well Jiaoye 5-S2-S3 (mixed), Fuling shale gas field, Chongqing

56 个;检测到的 3 种微量元素 Pr, Yb, Sm 浓度最大值依次为:0.93, 1.88, 272.0 ng/g。由图 6 可以直观地看出,焦页 5-S2-S3 返排液混样中 Sm 浓度存在明显波动,部分样品检测值明显高于基值(3.8 ng/g),推测焦页 66-Z2HF 与上部气层井发生了连通,而焦页 66-Z1HF 与上部气层未连通。

2.3 中部气层井与下部气层加密井连通情况判别

(1)下部气层 2 口加密监测井(焦页 66-3HF、焦页 66-4HF)共采集返排液样品 106 个。焦页 66-Z1-3(合)共采集返排液混样 45 个,检测到 3 种微量元素 Pr, Yb, Sm 浓度最大值依次为:0.69, 6.40, 20.71 ng/g。由图 7 可以直观地看出,焦页 66-Z1-3 个别返排液混样 Pr、Yb 浓度略高于焦页 5-S2-S3(合)、焦页 6-1-4-6(合)、12#2 分离器浓度基值,仍处于同一数量级,且焦页 66-Z1HF 为 Pr、Yb 注入井,初步判定焦页 66-Z1HF 与焦页 66-3HF 未连通。

然而,从 Sm 元素来看,由于仅在 66-Z2HF 井中注入该元素,而且 66-3HF 中 Sm 基值也不高,因此在焦页 66-Z1-3(合)返排液中间断性地检测到高含量的 Sm,两口中部气层井间存在一定的连通。

(2)焦页 66-Z2-4(合)共采集返排液混样 49 个,检测到的 3 种微量元素 Pr, Yb, Sm 浓度最大值为:0.11, 0.58, 11.87 ng/g。由图 8 可以直观地看出,焦页 66-Z2-4(合)返排液混样 Pr, Yb, Sm 浓度与焦页 5-S2-S3(合)、焦页 6-1-4-6(合)、12#2 分离器浓度基值相当,推测焦页 66-Z2HF 井与焦页 66-4HF 井未连通。

(3)焦页 66-3-4(合)共采集返排液混样 12 个,检测到的 3 种微量元素 Pr, Yb, Sm 浓度最大值为:0.10, 0.10, 0.67 ng/g。由图 9 可以直观地看出,焦页 66-3-4(合)返排液混样 Pr, Yb, Sm 浓度与焦页 5-S2-S3(合)、焦页 6-1-4-6(合)、12#2 分离器浓度基值相当,判定焦页 66-Z1HF、焦页

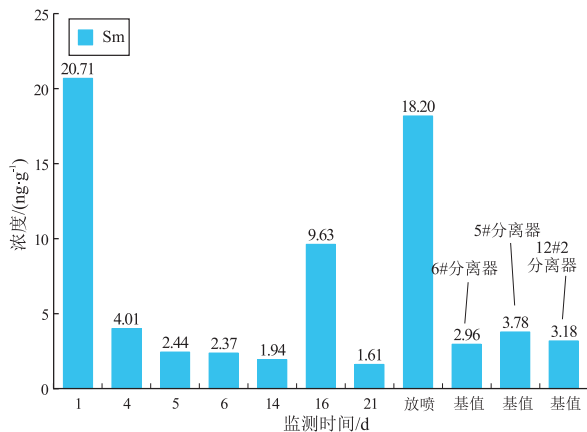
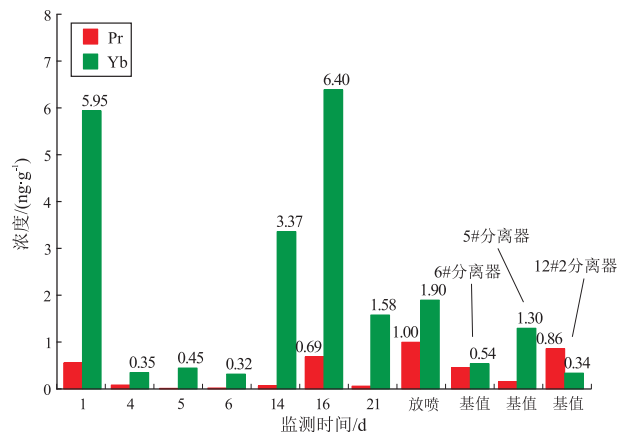


图 7 重庆涪陵页岩气田焦页 66-Z1-3(合)返排液样品 Pr、Yb、Sm 浓度分布

Fig.7 Concentrations of Pr, Yb and Sm tracers in flowback fluid from well Jiaoye 66-Z1-3 (mixed), Fuling shale gas field, Chongqing

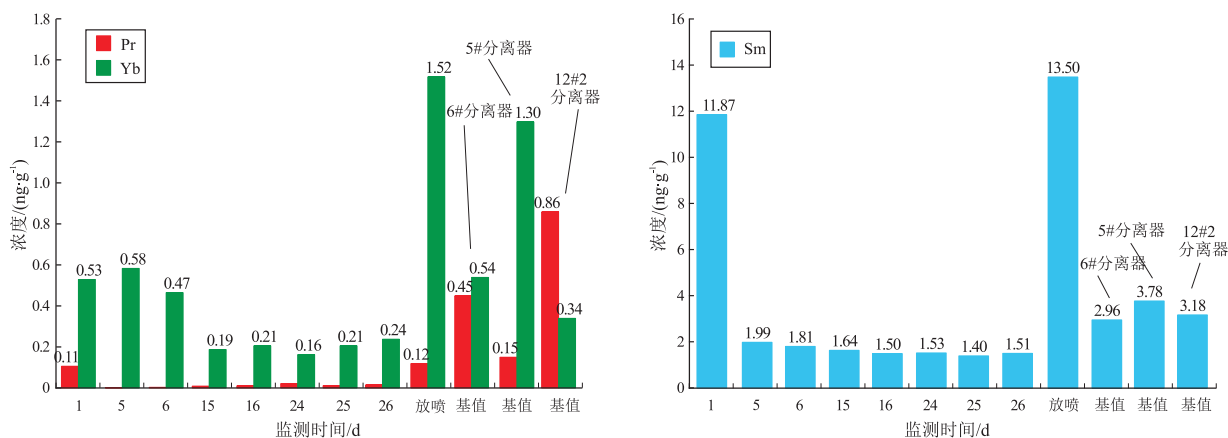


图 8 重庆涪陵页岩气田焦页 66-Z2-4(合)返排液样品 Pr、Yb、Sm 浓度分布

Fig.8 Concentrations of Pr, Yb and Sm tracers in flowback fluid from well Jiaoye 66-Z2-4 (mixed), Fuling shale gas field, Chongqing

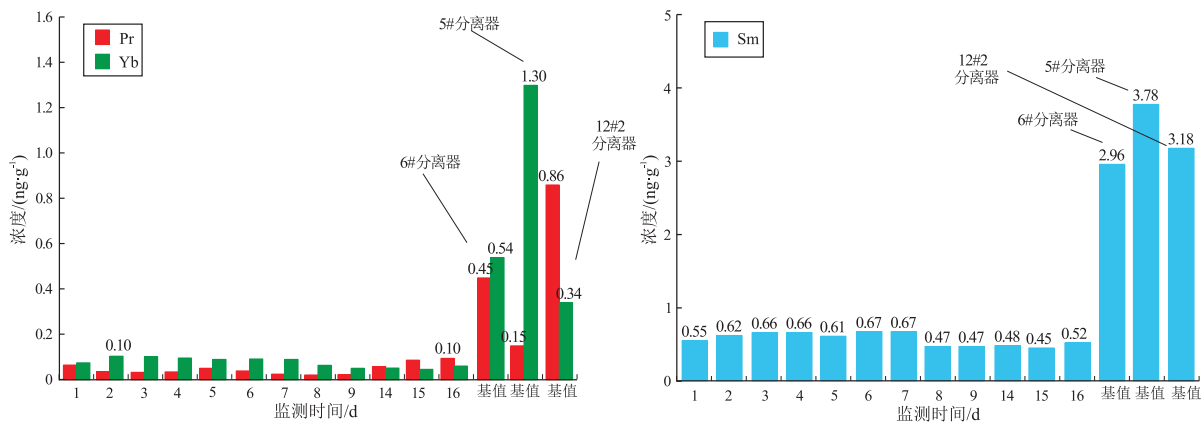


图 9 重庆涪陵页岩气田焦页 66-3-4(合)返排液样品 Pr、Yb、Sm 浓度分布

Fig.9 Concentrations of Pr, Yb and Sm tracers in flowback fluid from well Jiaoye 66-3-4 (mixed), Fuling shale gas field, Chongqing

66-Z2HF两口中部气层井与焦页 66-3HF、焦页 66-4HF 并未连通。

3 结论

(1)通过多口井水样分析,进一步说明优选的 3 种轻稀土元素示踪剂在涪陵页岩气田的应用实践中是稳定、可靠的,保证了示踪检测的效果。

(2)涪陵页岩气田焦页 66 号扩平台示踪剂监测结果表明:两口中部气层井间存在连通;5 口下部气层井与中部气层未发生连通;中部气层井与上部气层井有连通,但连通程度不高。3 套独立井网实现涪陵页岩气田立体开发可行。

(3)本研究初步验证了微量元素示踪技术是一项简单、有效的页岩气井连通性评价技术,目前仅用于评价中部气层与上部、下部气层之间的压后连通情况,将来可以筛选更多种类微量元素,并将其用于判别是否含有地层水,同时可以定量计算地

层水与压裂液的比例,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 马云,池晓明,黄东安,等.用于多段压裂的微量物质示踪剂与压裂液的配伍性研究[J].精细石油化工,2016,33(2):50-52. MA Yun, CHI Xiaoming, HUANG Dongan, et al. Compatibility for trace substances of multi-stage fracturing and fracturing fluid[J].Peciality Petrochemicals,2016,33(2):50-52.
- [2] 张宏.微量物质井间示踪剂在长庆油田的应用[D].青岛:中国石油大学(华东),2017. ZHANG Hong.Application of microsubstance tracer in Changqing Oilfield[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China),2017.
- [3] 陈岩,黄佳.井间示踪剂技术在海上油田的研究与探索[J].化工设计通讯,2021,47(7):11-12,16. CHEN Yan, HUANG Jia. Research and exploration of inter-well tracer technology in offshore oilfield[J].Chemical Engineering Design Communications,2021,47(7):11-12,16.
- [4] 徐玉霞,沈明.井间示踪剂监测技术在海上注水油田中的应

- 用[J].能源化工,2020,41(4):51-54.
- XU Yuxia, SHEN Ming. Application of tracer monitoring technology in offshore oilfields with water-flooding [J]. Energy Chemical Industry, 2020, 41(4): 51-54.
- [5] 罗娜,孙超,张君,等.示踪剂监测技术在青海油田的应用[J].石化技术,2020,27(1):341-342.
- LUO Na, SUN Chao, ZHANG Jun, et al. Application of tracer monitoring technology in qinghai oilfield [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(1): 341-342.
- [6] 张新宝,李留仁.碳酸盐岩缝洞型油藏井间连通性的示踪剂监测:以塔河油田T402注采井组为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2019,34(6):55-59.
- ZHANG Xinbao, LI Liuren. Tracer monitoring of inter-well connectivity in fracture-vuggy carbonate reservoir: a case study of T402 injection-production well group in Tahe Oilfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019, 34(6): 55-59.
- [7] 李刚,张影.井间示踪剂监测技术在三类薄差储层压裂改造中的应用[J].采油工程,2019(02):32-37,84.
- LI Gang, ZHANG Ying. Application of interwell tracer monitoring technology in fracturing stimulation for third type of thin and poor reservoirs [J]. Oil Production Engineering, 2019(2): 32-37, 84.
- [8] 梁顺,彭茜,李旖旎,等.水平井分段压裂示踪剂监测技术应用研究[J].能源化工,2017,38(04):32-36.
- LIANG Shun, PENG Qian, LI Yini, et al. Study on application of tracer monitoring technology in horizontal well staged fracturing [J]. Energy Chemical Industry, 2017, 38(4): 32-36.
- [9] 周晶晶,黄春华,沈斌,等.新型水溶性微量物质示踪剂研究[J].精细石油化工,2020,37(1):23-26.
- ZHOU Jingjing, HUANG Chunhua, SHEN Bin, et al. The research based on the new water-solubility micro substance tracers [J]. Peciality Petrochemicals, 2020, 37(1): 23-26.
- [10] 王跃宽,陈维余,温守国,等.新型微量物质示踪剂的评价及应用[J].精细与专用化学品,2019,27(8):27-29.
- WANG Yuekuan, CHEN Weiyu, WEN Shouguo, et al. Evaluation and application of new type trace substance tracer [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2019, 27(8): 27-29.
- [11] 池晓明,李旭航,张世虎,等.瓜胶压裂液体系示踪剂的筛选[J].钻井液与完井液,2015,32(5):83-85.
- CHI Xiaoming, LI Xuhang, ZHANG Shihu, et al. Selection of tracers used in guar gum fracturing fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015, 32(5): 83-85.
- [12] 刘琦,刁素,栗铁锋.胭脂红示踪剂在评价压裂液返排中的应用[J].复杂油气藏,2016,9(3):65-68.
- LIU Qi, DIAO Su, LI Tiefeng. Carmine tracer for evaluating flowback of fracturing fluid [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 9(3): 65-68.
- [13] 邬传威,梁金慧,高利平,等.微量元素示踪剂在压裂示踪监测中的运用[J].化工管理,2021(14):96-97.
- WU Chuanwei, LIANG Jinhui, GAO Liping, et al. Application of trace element tracer in fracturing tracing monitoring [J]. Chemical Enterprise Management, 2021(14): 96-97.
- [14] 杨化光,谈改生,熊龙强,等.微量元素示踪剂在薄砂层油藏开发中的应用研究[J].石化技术,2018,25(12):333.
- YANG Huaguang, TAN Gaisheng, XIONG Longqiang, et al. Application of trace element tracer in the development of thin sand reservoir [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(12): 333.
- [15] WARNER N R, DARRAH T H, JACKSON R B. New tracers identify hydraulic fracturing fluids and accidental releases from oil and gas operations [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21): 12552-12560.
- [16] NYE M, KNUCKLES T, YAN Beizhan, et al. Use of tracer elements for estimating community exposure to marcellus shale development operations [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(6): 1837.
- [17] 曹焯,李景喜,俞晶晶,等.电感耦合等离子体质谱法测定井间示踪剂中稀土元素[J].岩矿测试,2009,28(2):91-96.
- CAO Xuan, LI Jingxi, YU Jingjing, et al. Determination of rare earth elements in inter-well tracers by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(2): 91-96.
- [18] MUKHOPADHYAY S, LIU H H, SPYCHER N, et al. Impact of fluid-rock chemical interactions on tracer transport in fractured rocks [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2013 154, 42-52.
- [19] JOHANNESSON K H, STETZENBACH K J, HODGE V F. Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(17): 3605-3618.
- [20] OSSELINA F, NIGHTINGALEA M, HEARN G, et al. Quantifying the extent of flowback of hydraulic fracturing fluids using chemical and isotopic tracer approaches [J]. Applied Geochemistry, 2018, 93: 20-29.