

页岩气“甜点”地震预测研究

—以鄂尔多斯盆地西缘中上奥陶统为例

王志伟¹, 赵永刚¹, 阴钰毅², 郭庆², 余小雷²

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065;

2. 中国石油东方地球物理公司研究院长庆分院, 陕西西安 710021)

摘要: 为寻找页岩气勘探开发的“甜点”区, 以鄂尔多斯盆地西缘中上奥陶统为研究对象, 首先建立研究区优质页岩与各种岩石物理参数之间的对应关系, 然后运用地震预测技术预测页岩气地质“甜点”和工程“甜点”, 最后对预测结果进行综合分析及评价。结果表明, 鄂尔多斯盆地西缘中上奥陶统乌拉克组孔隙度、脆性指数、总有机碳含量较高, 裂缝较为发育, 为页岩气勘探的“甜点”区。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 页岩气; 地震预测; 烃源岩

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

Seismic prediction of “sweet spots” for shale gas

WANG Zhiwei¹, ZHAO Yonggang¹, YIN Yuyi², GUO Qing², YU Xiaolei²

(1. School of Earth Resource Sciences and Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Changqing Branch, Research Institute of Geophysical Prospecting Incorporated, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: In order to find the “sweet spots” area for shale gas exploration and development, the middle and upper Ordovician in the western margin of Ordos basin is taken as the research object. Firstly, the corresponding relationship between high-quality shale and various rock physical parameters in the study area is established. Then, the “geological sweet spots” and “engineering sweet spots” of shale gas are predicted by using seismic prediction technology. Finally, the prediction results are comprehensively analyzed and evaluated. The results show that the porosity, brittleness index and total organic carbon content of the middle upper Ordovician Ulalik formation in the western margin of Ordos basin are relatively high, and the fractures are relatively developed, which is the “sweet spots” area for shale gas exploration.

Key words: Ordos basin; shale gas; seismic prediction; source rock

页岩是一种广泛存在于地壳中的沉积岩, 而页岩气是指以吸附态和游离态赋存于富有机质页岩和纳米孔径的页岩地层系统中的天然气^[1]。页岩气作为一种蕴藏量丰富、开采潜力巨大的非常规天然气资源, 其勘探与开发成为世界关注的焦点。在页岩气勘探开发实践中, 由于很多地区的页岩气原始产能较低, 影响了其开采的经济效益, 因此, 为了提高页岩气产能, 页岩气“甜点”勘探技术的应用和突破是实现其经济开采的关键^[2-3]。页岩气“甜点”

可细分为地质“甜点”和工程“甜点”, 前者对生烃能力、储气条件进行评价, 后者对易开采性进行评价。在页岩气勘探开发的初期, 地质资料较少, 钻探程度低, 利用地震资料开展页岩气“甜点”区预测就成为关键。

利用国内外页岩气勘探开发的成功经验, 以东方地球物理公司自主研发的Geoeast软件为工具, 结合地质和地震资料进行叠前地震资料处理解释, 从而进一步综合运用地震属性分析、地震反演、裂缝

收稿日期: 2019-07-04; 修订日期: 2019-10-15。

第一作者简介: 王志伟(1993—), 男, 在读硕士研究生, 现从事油气田开发研究工作。E-mail: 1536727818@qq.com。

预测等技术,对鄂尔多斯盆地西缘地区中上奥陶统页岩气储层的分布、厚度、含气性、裂缝发育程度以及岩石力学特征等方面进行研究,进而预测页岩气富集的“甜点”区,对该区块页岩气勘探开发井位部署提供依据,大大地降低了非常规储层钻探的风险。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地西缘地表山峦起伏,高程变化大,是多期次构造运动的强烈活动区,复杂的大地构造环境决定了盆地西缘的地质构造复杂多样、分段变化的构造特征。研究区下古生界奥陶系乌拉力克组发育一套分布广、厚度大的泥页岩和泥质碳酸盐岩沉积,目前有多口井在中奥陶统获低产气流,其中2017年钻探的忠4井在乌拉力克组试气获 $4.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系地层发育齐全,中北段自下而上发育三道坎组、桌子山组、克里摩里组、乌拉力克组、拉什仲组、公乌素组和蛇山组。其中部分地区缺失拉什仲组、公乌素组和蛇山组,西缘南段自下而上发育麻川组、水泉岭组、三道沟组和平凉组。本次研究的层位为奥陶系乌拉力克组,主要为一套广海盆地相沉积,岩性为深灰-灰黑色泥页岩,分布范围广泛且相对稳定。目前中上奥陶统发育的有效海相烃源岩总有机碳(TOC)含量多为0.3%~1.5%,含量大于0.5%的占45.8%;烃源岩厚度一般为60~200 m,分布面积达 $2.80 \times 10^4 \text{ km}^2$,横向分布较稳定,为有利的“甜点”预测段^[4]。80年代以来在鄂尔多斯盆地西缘勘探开发的同时,奥陶系没有发现有利的海相烃源岩,因而众多学者^[5-6]认为:下古生界海相烃源岩有机质丰度低、生烃潜力差、储层相对致密,不能形成规模化油气聚集。近年来,随着下古生界勘探力度的不断加大,盆地西部有4口井在中奥陶统获低产气流,甲烷碳同位素-38.92‰~-36.47‰,具海相烃源岩的同位素特征,表明奥陶系仍具有良好的勘探潜力。

2 测井资料及岩石物理分析

地震反演是利用已知的地质规律和钻井、测井资料进行约束,对地下岩层空间结构和物理性质进行成像的过程,是地震预测中的重要方法,而岩石物理分析是地震反演的基础。叠后波阻抗反演是利用储层与围岩之间的波阻抗差异来进行储层预测,

叠前反演是利用不同岩石物理参数的交会进行储层及其所含流体性质的预测。

通过对研究区Z2井的测井曲线分析,页岩储层与围岩在纵波阻抗、密度、纵横波速度比、自然伽马等具有明显差异。页岩储层具有自然伽马值高、脆性较好、有机碳含量高、孔渗条件好、低含水饱和度等特征,说明研究区乌拉力克组具有一定的勘探潜力^[7]。地震岩石物理分析是建立岩石物理性质与地震响应之间联系的桥梁,通过对各种岩心、测井和地震资料进行综合分析,建立岩石物理性质与岩石地球物理特征的关系,可以有效提高地震岩性识别、储层预测和流体检测的精度。通过对研究区乌拉力克组开展岩石物理分析发现,孔隙度与纵波速度呈负相关关系,TOC与密度也具有很好的负相关关系,即纵波速度越高、孔隙度越低;密度越高、TOC含量越低。

3 页岩气“甜点”地震预测

地质“甜点”是重点评价页岩段构造、断裂特征和储层的指标,即落实页岩段基本构造特征、储层特征、含气能力,优选地质有利区。工程“甜点”是重点关注页岩段与钻井、压裂相关的评价参数,旨在优选钻井工程、规模储层改造的有利区。本次研究主要从有机碳含量、裂缝、岩石脆性等方面综合评价页岩气的地质“甜点”和工程“甜点”。

3.1 裂缝预测

构造作用是裂缝形成的关键因素,而裂缝可为页岩层中的游离气提供储集空间,连接孔隙和喉道,提高储层的渗透性。因此,天然裂缝在页岩气勘探开发中有着至关重要的作用。裂缝是页岩气勘探开发的“双刃剑”,一般裂缝发育地区易于压裂,但裂缝过多地区,钻井风险较大。本次研究中裂缝预测主要采用叠后地震敏感属性分析,寻找裂缝预测的敏感属性,主要包括相干属性、方差体属性、倾角、方位角、曲率、蚂蚁体追踪等技术手段,通过这些手段预测断裂、微断裂、大中尺度裂缝等。

曲率属性是应用曲率方法计算地质体在集合空间的分布形态,地层受力变形越大、破裂程度越大、曲率值也越高,从而有效识别断层、裂缝、弯曲和褶皱等几何构造。曲率分为构造类曲率和振幅类曲率两类,构造类曲率反映地层受构造应力挤压时层面的弯曲程度,利用线性构造异常进行断层预测,构造曲率越大就越弯曲,裂缝也就越发育。振幅类曲

率是对地震数据振幅进行横向二阶求导得到, 像构造类曲率一样, 振幅类曲率也能提供有用信息应用于解释, 比如预测碳酸盐岩溶洞、溶蚀孔和微断裂的分布规律。与其他属性相比, 曲率体能够反映地震分辨率无法分辨的微小断裂及裂缝特征, 所以利用地震曲率体技术, 可以预测和评价页岩裂缝的发育情况。图 1 为运用曲率属性方法提取的乌拉力克组曲率分析平面图, 可知主体部位裂缝、微裂缝较为发育, 裂缝方向主要为 NW - SE 向, 在后期压裂作用下可形成一定的裂缝体系, 有易于页岩气的勘探开发。

3.2 TOC 含量预测

TOC 含量是评价页岩具有生烃能力的主要参数之一, 可表征含气量大小, TOC 的平均含量达到一定的门限值时, 才能获得有工业价值的页岩气藏。TOC 含量与纵横波速度交会分析表明, 两者具有明显的负相关关系, 可通过地震反演对 TOC 进行预测。图 2 为有机碳含量反演剖面, 乌拉力克组 TOC 含量具有一定的非均质性, 乌拉力克组中段 TOC 含量大于 2.0%, 根据 TOC 地震解释成果认为, 乌拉力克组底部 TOC 含量较低。结合研究区乌拉力克组 TOC 含

量平均预测结果 (图 3) 可知, 研究区平均 TOC 含量为 1.2%~1.4%, 属于较好烃源岩。ZP2 井附近 TOC 含量分布较为稳定, 是页岩优质储层的发育区, 揭示了该区乌拉力克组具有一定的勘探前景^[8-9]。

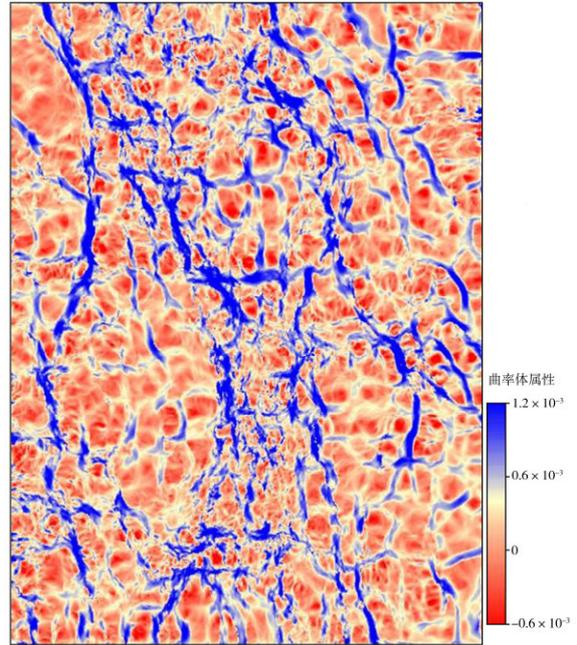


图 1 乌拉力克组底部曲率体属性特征

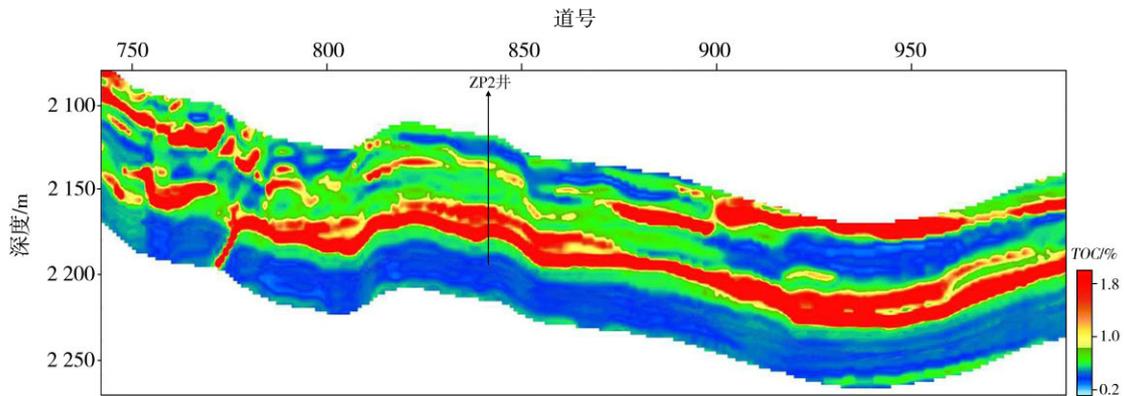


图 2 乌拉力克组有机碳含量反演剖面特征

3.3 脆性预测

预测页岩气储层脆性对寻找“甜点”分布非常关键。在体积压裂过程中, 脆性较高的页岩易产生大范围的网状裂缝, 从而显著提高页岩气产量。页岩脆性由矿物成分决定, 石英、长石、方解石和白云石等脆性矿物含量越高、黏土矿物含量越低、则页岩脆性越高; 反之则页岩脆性越低。研究发现海相的硅质页岩、灰质页岩和云质页岩的脆性较高, 陆相页岩的脆性较低, 一般脆性矿物含量为 30%~80% 时才适宜开展体积压裂。利用杨氏模量与泊松比, 通过岩石力学法计算脆性指数, 并对其脆性指数反演, 通过脆性指数反演平面图 (图 4) 及剖面图 (图

5) 可以直观地看出, 研究区内乌拉力克组泥页岩脆性指数为 40%~70%, 脆性指数大于 55% 的面积为 150 km², 占研究区面积的 40%; ZP2 井区脆性指数为 60%~65%, 有利于工程改造^[10-11]。

4 “甜点”区综合评价

通过借鉴国内外页岩气勘探开发的成功经验, 结合中国页岩气勘探开发的实际情况, 综合考虑裂缝、TOC、脆性等关键参数, 建立一套适合于研究区“甜点”的评价参数 (表 1)^[12-13]。其中 I 类“甜点”区 TOC 含量不小于 1.0%, 有效孔隙度不小于 5%,

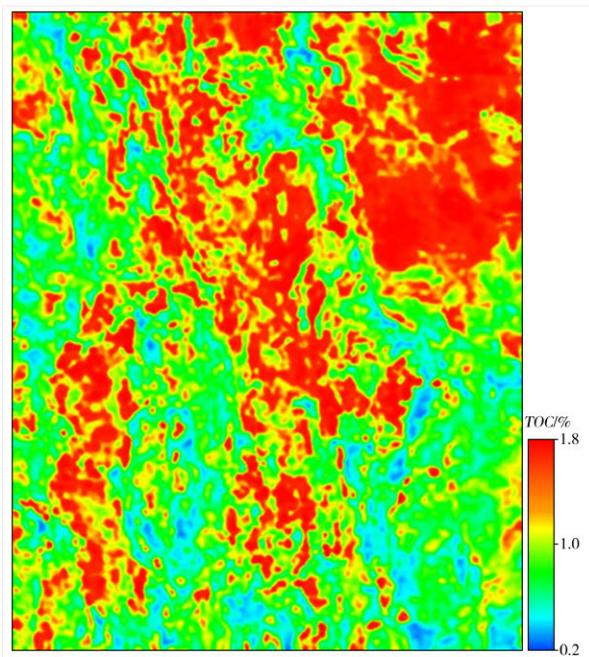


图3 乌拉力克组有机碳含量反演平面分布

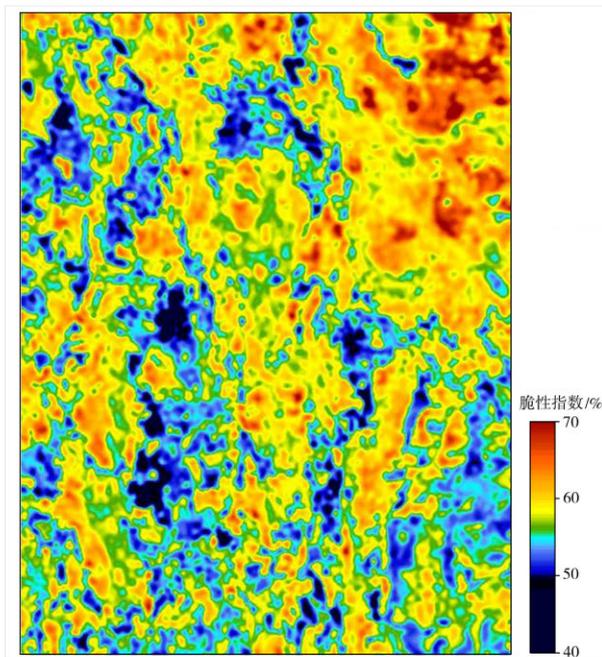


图4 乌拉力克组脆性指数反演平面分布

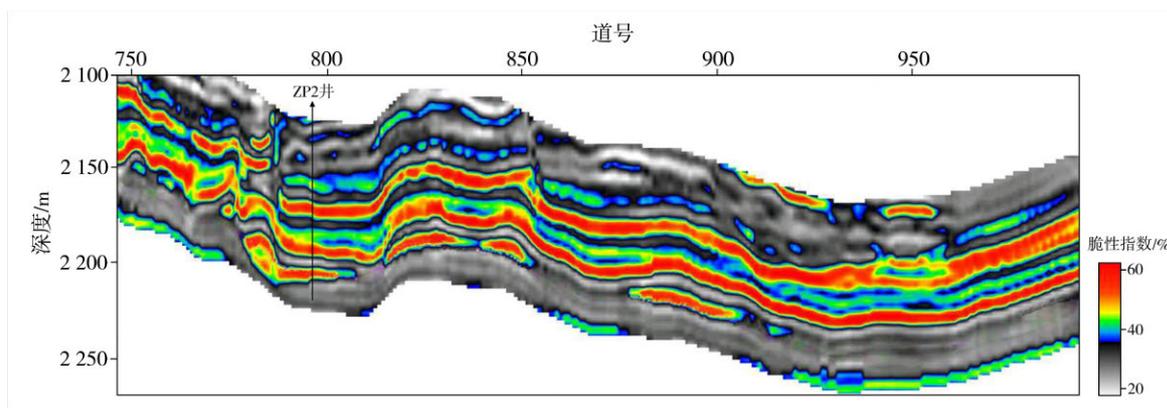


图5 乌拉力克组脆性指数反演剖面特征

表1 “甜点”区评价参数

		I类	II类	III类
地质甜点	构造样式	宽缓	较宽缓	较紧闭
	断裂发育情况	断裂不发育	断裂较少	断裂较发育
	TOC/%	≥1.0	0.5~1.0	<0.5
	有效孔隙度/%	≥5	3~5	2~3
	总含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	≥3	2~3	1~2
优质页岩储层厚度/m		≥15	10~15	5~10
工程甜点	埋深/m	3 500 ~ 4 000	4 000 ~ 4 500	>4 500
	地层倾角/(°)	0~15	15~30	>30
	脆性指数/%	≥55	45~55	30~45
	裂缝	发育	较发育	欠发育
	压力系数	≥1.4	1.2~1.4	1.0~1.2
	地应力	垂直或大角度斜交水平最大主应力、应力差值小	小角度斜交水平最大主应力、应力差值中等	平行水平最大主应力、应力差值大

且断裂不发育并远离大断层，但裂缝及微裂缝较为发育，脆性指数不小于 55%。而 II 类和 III 类“甜点”区有效孔隙度为 2%~5%，且断裂较少，裂缝、微裂缝较为发育，II 类“甜点”区 TOC 含量为 0.5%~1.0%，III 类“甜点”区 TOC 含量小于 0.5%。结合该评价标

准及各参数反演平面图可以总结出该区块 I 类“甜点”区主要分布在西缘冲断带东部。

5 结论

(1)通过地震岩石物理分析及页岩储层测井响应特征对岩石物理参数进行分析发现,孔隙度与纵波速度具有很好的负相关性,TOC含量与密度也具有很好的负相关性,即纵波速度越高、孔隙度越低;密度越高、TOC含量越低。

(2)鄂尔多斯盆地西缘东北部地区孔隙度、有机质丰度和裂缝发育区成藏条件较好,TOC含量、脆性指数较高。中上奥陶统地层较厚,有利于烃源岩发育,埋深约4300m;该区远离断裂,油气保存条件较好,为页岩气勘探开发的“甜点”区。

参考文献

[1] 邹才能.非常规油气地质学[M].北京:地质出版社,2014.
 [2] 祝彦贺,陈桂华,梁建设.页岩油气甜点识别的综合评价方法[J].中国矿业大学学报,2016,45(2):301-309.
 [3] 周德华,焦方正.页岩气“甜点”评价与预测——以四川盆地建南地区侏罗系为例[J].石油实验地质,2012,34(2):109-114.
 [4] 武春英,贾亚妮,韩会平.鄂尔多斯盆地西缘探区奥陶系烃源岩评价[J].新疆石油地质,2015,36(2):180-185.
 [5] 罗星,叶超,雷迅.鄂尔多斯西缘奥陶系储层特征及主控因素研究[J].长江大学学报(自科科学版),2013,10

(4): 52-55.

[6] 张月巧,郭彦如,侯伟,等.鄂尔多斯盆地西南缘中上奥陶统烃源岩特征及勘探潜力[J].天然气地球科学,2013,24(5):894-904.
 [7] 邓昆,周文,周立发,等.鄂尔多斯盆地奥陶系平凉组笔石页岩微孔隙特征及其影响因素[J].石油勘探与开发,2016,43(3):378-385.
 [8] 邹才能,赵群,董大忠,等.页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J].天然气地球科学,2017,28(12):1781-1796.
 [9] 张道锋,刘新社,高星,等.鄂尔多斯盆地西部奥陶系海相碳酸盐岩地质特征与成藏模式研究[J].天然气地球科学,2016,27(1):92-101.
 [10] 湛小红.涪陵页岩气田合理配产方法对比优选研究[J].石油地质与工程,2019,33(1):67-71.
 [11] 张武,王鑫,万应明,等.鄂西地区JS区块页岩气二维地震勘探研究[J].石油地质与工程,2018,32(5):34-36.
 [12] 孙永豪,袁青松,李中明,等.河南中牟页岩气区块页岩储层压裂改造实践与认识[J].石油地质与工程,2018,32(5):110-112.
 [13] 吕金龙,卢祥国,王威,等.裂缝对致密储层渗流能力影响实验研究[J].特种油气藏,2019,26(2):141-146.

(编辑 蒲洪果)

(上接第36页)

双域双面联合解释进行相控储层精细预测是进行复杂岩相带预测的一套行之有效的办法。

(2)沙三下沉积时期,西部形成局部高地,受物源影响较小,发育湖相碳酸盐岩,东部后期局部高地发育湖相碳酸盐岩。预测沙三下亚段储层主要发育于该构造西部地区,西部碳酸盐岩发育区将是下步勘探有利区域。

参考文献

[1] 薛永安,柴永波,周园园.近期渤海海域油气勘探的新突破[J].中国海上油气,2015,27(1):1-9.
 [2] 牛成民.渤海南部海域莱州湾凹陷构造演化与油气成藏[J].石油与天然气地质,2012,33(3):424-431.
 [3] 辛云路,任建业,李建平,等.构造-古地貌对沉积的控制作用——以渤海南部莱州湾凹陷沙三段为例[J].石油勘探与开发,2013,40(3):302-308.
 [4] 王改卫,杜晓峰,加东辉,等.莱州湾凹陷沙三中段高

精度层序地层格架及沉积体系演化[J].沉积与特提斯地质,2015,35(4):17-24.

[5] 李金磊,陈祖庆,王良军,等.相控技术在低勘探区生屑滩相储层预测中的应用[J].岩性油气藏,2017,29(3):110-117.
 [6] 刘力辉,王绪本,陈雪菲.地震地貌学在L区堆积砂体预测中的应用[J].石油物探,2015,50(3):266-269.
 [7] 印兴耀,周静毅.地震属性优化方法综述[J].石油地球物理勘探,2005,40(4):482-489.
 [8] 马承杰.伪熵分析技术在储层预测中的应用[J].油气地质与采收率,2006,13(5):41-43.
 [9] 李婷婷,王钊,马世忠,等.地震属性融合方法综述[J].地球物理学进展,2015,30(1):378-385.
 [10] 刘力辉,王绪本.双域、双面沉积体解释方法在L区的应用[J].石油物探,2011,50(2):155-159.
 [11] 陈贤良,纪友亮,杨克明.川西中段上沙溪庙组层序格架下成岩相及储层评价[J].断块油气田,2019,26(5):550-554.

(编辑 赵川喜)