

页岩层系油气资源有序共生及其勘探意义 ——以鄂尔多斯盆地延长组长7页岩层系为例

崔景伟¹, 朱如凯¹, 范春怡², 李士祥³, 毛治国¹, 李森¹, 张忠义²
CUI Jingwei¹, ZHU Rukai¹, FAN Chunyi², LI Shixiang³, MAO Zhiguo¹,
LI Sen¹, ZHANG Zhongyi²

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
 2. 中国石油测井有限公司新疆分公司, 新疆 克拉玛依 834000;
 3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018
1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;*
2. *CNPC Logging, Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang, China;*
3. *Changqing Oilfield Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Xi'an 710018, Shaanxi, China*

摘要:页岩层系内的非常规油气已成为全球油气勘探开发的热点,这些资源的形成与富有机质页岩密切相关,形成演化有序、空间分布上共生。目前的研究通常按非常规油气类型单独进行,尚未从页岩层系整体角度考虑各类油气资源的分布规律。在大量调研国内外页岩层系油气资源分布规律的基础上,提出页岩层系油气资源有序共生,并以鄂尔多斯盆地长7页岩系为例进行解剖,按照成熟度阶段、埋藏深度和有机质丰度,将长7页岩层系油气资源分成露头-浅埋藏油页岩区、中等成熟-中等埋深压裂页岩油区、中等成熟-中等埋深原位改质页岩油区、高成熟度-深埋页岩气区和紧邻-夹层致密砂岩油五大区域。基于页岩系统油气资源有序共生关系,提出页岩层系油气资源立体勘探开发的观点,以期对页岩层系非常规油气资源有效利用提供新思路。

关键词:页岩层系;非常规油气;有序共生;立体勘探开发

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2019)06-1052-10

Cui J W, Zhu R K, Fan C Y, Li S X, Mao Z G, Li S, Zhang Z Y. Oil and gas resources of shale formation orderly accumulation and coexistence as well as its prospecting significance: A case study of Chang 7 shale formation in Ordos Basin. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(6):1052-1061

Abstract: Shale system contains abundant unconventional oil and gas resources and has become a hot area of exploration and production. This system includes such resources as shale oil and gas, tight oil and gas, and oil shale. These unconventional resources are related to the organic-rich shale and are in orderly accumulation along with the maturity and coexistence in space. However, there is a blank in the systematic study of unconventional resources. Based on the shale system, the authors studied the world's oil and gas resources distribution and put forward the argument of the shale oil and gas resources orderly accumulation and coexistence in the shale system. Taking Chang 7 shale formation of Ordos basin system as an example, the authors used the shale oil and gas resources orderly accumulation method and divided the Chang 7 shale system resources into outcrop oil shale, moderate buried depth fracturing shale oil, moderate buried depth ICP shale oil, large buried depth shale gas and tight oil areas. Based on this understanding, the authors suggest stereoscopic exploration and development in the shale system, which will provide guidance for oil and gas resources exploration and development in the shale system.

收稿日期:2017-03-30; 修订日期:2017-05-20

资助项目:国家油气重大专项(编号:ZX201705001-01-004)和国家重点基础研究发展计划(973)项目《中国陆相致密油(页岩油)形成机理与富集规律》(编号:2014CB239000)

作者简介:崔景伟(1980-),男,高级工程师,从事非常规油气地质和成藏地球化学研究工作。E-mail:cuijingwei@petrochina.com.cn

Key words: shale formation; unconventional oil and gas resources; orderly accumulation and coexistence; stereoscopic exploration and development

页岩层系内的非常规油气已成为全球油气勘探开发的亮点,特别是在北美地区已经形成 Marcellus, Haynesville, Eagle ford, Fayetteville, Barnett, Woodford, Utica, Bakken 八大页岩气产区(年产量超过 $172 \times 10^8 \text{ m}^3$),以及 Eagle ford, Bakken, Wolfcamp, Niobrara 四大致密油生产区(年产量超过 $2000 \times 10^4 \text{ t}$),使美国二叠纪盆地、西墨西哥湾东德克萨斯等常规油气产区油气产量下滑后重上高位^[1-3]。尽管美国2016年致密油产量有递减,但仍占美国原油总产量的47%;页岩气产量占美国天然气总产量的57%^[4]。经过10年的探索,中国已经成为除北美之外页岩油气勘探获得重大突破的地区,已经在四川盆地志留系五峰-龙马溪组页岩、鄂尔多斯盆地陆相页岩中等获得页岩气突破,致密油和页岩油也在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、柴达木盆地获得突破,2016年页岩气产量达到 $75 \times 10^8 \text{ m}^3$,致密油页岩油年产量超过 $100 \times 10^4 \text{ t}$ 。

目前,非常规油气地质理论研究主要集中在细粒沉积领域富有机质页岩形成机理、非常规储层表征领域的致密储层微-纳米级孔喉刻画、页岩层系油气资源“甜点区”的优选等领域^[5-10],对于页岩层系非常规油气资源的系统研究相对薄弱。事实上,页岩层系内非常规油气资源为自生自储、近距离或原地滞留聚集,而基于常规油气藏建立的“从源到汇”含油气系统及“从藏到源再到藏”成藏油气系统都主要考虑生油岩、储层、盖层(封隔层)、圈闭、运移路径等成藏要素及其时空匹配关系^[11-14]。因此,需要从页岩层系整体角度研究页岩层系内非常规油气资源的地质演化和空间上的分布关系,为综合勘探开发页岩层系内非常规油气资源提供支持。

1 页岩层系内非常规油气资源类型及厘定

页岩层系蕴含丰富的非常规油气资源,目前已经证实的油气资源包括泥岩裂缝油藏、致密油、页岩油、页岩气、致密气和油页岩^[15-17]。根据页岩层系内各类非常规油气资源的认识过程、赋存状态、储集位置、资源类型及开采配套工艺差异对各类油气资源进行厘定,并列举了国内外典型的实例(图1)。

裂缝油气藏属于非常规油气的范畴,是构造运动、异常高压作用等机制下,在源内开启裂缝聚集

的油气。该类资源早在19世纪50—80年代就被国内外学者认识并定义,原油以游离态为主,油质较轻,储集空间为裂缝,初始产量较高,油藏边界明显、源内聚集、开发技术和预测技术成熟,如松辽盆地哈14井青山口泥岩裂缝油,属于非连续型聚集资源^[18-19]。

致密油气是泥页岩层上、下或内部致密储层中形成的油气聚集。致密气早在1971年就在四川盆地川西地区发现,20世纪90年代在鄂尔多斯盆地石炭系一二叠系发现大量致密气资源,致密储层通常与烃源岩紧邻。2000年后,大规模使用水平井和水力压裂开采的致密油是当前勘探的热点^[20],已经在鄂尔多斯盆地长7油层组、松辽盆地扶余油层、柴达木盆地地下沟组等获得重大突破。

页岩油有广义和狭义之分,狭义是指页岩内部的成熟油,广义等同于致密油。页岩油气是在页岩内部由于生排烃作用、沉淀-分异作用及地层色层效应,残存在页岩内部有机质、层理面或纳米级基质孔隙内的油气聚集,按照储集空间差异可进一步分为微裂缝型、含渗透性砂岩夹层型及基质孔隙型^[21-23]。值得注意的是,勘探界所称页岩油(Shale hosted oil)本质是赋存在含油页岩(Oil-bearing shale)中的成熟原油,不同于未熟油页岩(Oil shale)加热蒸馏生成的人造页岩油(Shale oil)。页岩油(Shale hosted oil)目前尚未在陆相地层开发^[24]。

油页岩是一种高灰分的固体可燃有机矿产,低温干馏可获得页岩油,含油量大于3.5%,有机质含量较高,主要是腐泥质、腐殖质或混合型,其发热量一般大于4187J/g。20世纪50年代中国已经在广州茂名加工油页岩^[25]。

按照石油地质理论和干酪根生烃理论,认为传统的构造油藏、岩性和地层油气藏均经过二次运移,为常规油气,属源外体系;致密油气、页岩油气、泥岩裂缝油气仅发生源内或者近源聚集,仅发生初次运移,为非常规油气,属于源内体系;油页岩加热蒸馏生成的人造页岩油,为原地裂解型非常规油气资源,属干酪根体系(图1)。

2 页岩层系油气资源演化有序、空间共生内涵

页岩层系油气演化有序指在页岩发育区,有机

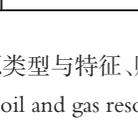
油气类型	油气体系	主赋存态	示意图	资源类型	国外例子	国内例子	开采方式
常规油气	源外体系	游离态		构造油气藏	西伯利亚 乌连戈伊	松辽盆地 大庆长垣	常规 直井
		游离态		岩性油气藏	阿巴拉契亚 “百尺砂岩”	鄂尔多斯 盆地长8	常规 直井
		游离态		地层油气藏	阿拉斯加 普罗德霍湾	塔里木盆地 塔北-塔中	常规 直井
非常规油气	源内体系	游离态		裂缝油气藏	西伯利亚 萨姆累油田	松辽盆地 青山口页岩 哈14井	常规 直井
		游离+吸附		致密油气	威利斯盆地 巴肯页岩	准噶尔盆地 芦草沟页岩 上下甜点区	压裂 水平井
		吸附态		页岩油气	福特沃斯 巴奈特页岩	鄂尔多斯盆地 长7页岩 四川盆地 龙马溪页岩	压裂 水平井 加热 水平井
	干酪根体系	未裂解态		人造油 页岩油	美国 绿河页岩	茂名页岩 抚顺页岩	加热 地表转化

图1 油气资源类型与特征、赋存状态及开采方式

Fig. 1 Types and characteristics of oil and gas resources, occurrence and exploitation model

质热演化过程中生排烃-滞留烃及其页岩系统内储集空间随埋藏深度(热演化)有序变化^[1],即低成熟阶段为生物气和油页岩,成熟阶段为页岩油和致密油,高过成熟度阶段为致密气和页岩气(图2)。页岩层系内油气资源的演化有序、空间共生体现在时间演化、形成次序、聚集机理、空间分布、找油思想等多个层次。

油气相态类型、油气生成量、油气滞留量、油气组分差异受热演化(时间)控制,呈现有序演化;有机-无机储集空间在成因上互相联系,受地层压力、成岩作用及生烃作用中的有机和无机作用呈现有序演化。低成熟阶段,非常规油气类型为生物气和未发生位移的固体油页岩;进入成熟阶段,储集空间受压实和成岩逐渐致密,非常规油气类型为致密油和页岩油,聚集的动力为生烃增压;高过成熟阶段,有机质孔隙生成会产生增孔效应,非常规油气类型为页岩气,原地滞留聚集。空间上,从盆地边

缘低成熟区油页岩,过渡到斜坡中等埋藏区致密油和页岩油,以及盆地中心的深埋藏区页岩气。找油思想而言,常规-非常规油气有序聚集实现了从只关注常规油气资源的源外找油进入生油层系“进源找油”。页岩层系油气有序聚集则体现的是“进源找油”之后如何“源内找油”,是对常规-非常规油气有序聚集的进一步完善。

事实上,不管是陆相湖盆还是海相地层,页岩层系内油气资源均存在演化有序。受区域构造和热演化差异影响,页岩层系内有机质成熟度跨度大决定了非常规油气资源类型多样,例如松辽盆地青山口组陆相页岩层系包含油页岩、页岩油和页岩气资源^[25]。判定页岩层系非常规油气资源的类型和潜力,首先要判定页岩所处热演化阶段,如美国鹰滩海相页岩区带油页岩、页岩气和页岩油勘探选区主要依据页岩成熟度^[8]。

页岩层系油气资源类型空间共生关系取决于

沉积建造。源岩成熟度决定油气类型,有机质丰度决定了资源量,有机质类型决定了油气产状,而沉积建造则决定了非常规油气类型。页岩层系内油气资源空间共生是不同类型油气资源在空间上的分布关系(图3)。

页岩层系内油气资源空间共生关系揭示非常规油气资源存在“非均质性”及“甜点区”,共生位置基于层系内非常规油气资源的形成条件和主控因素,即在生烃机理、滞留机理、排烃机理基础上,解释油气资源类型、富集与贫化、不同资源的差异性与主控因素(表1)。对不同油气资源进行分级评价,优选“甜点区”,采取针对性政策,对页岩层系油气资源的实际勘探具有重要意义。

3 长7页岩层系油气资源有序共生及针对技术

本文以鄂尔多斯盆地长7层系为例,解剖页岩层系非常规油气资源的分布特征和聚集规律。长7页岩层系内非常规油气资源涵盖了油页岩、页岩油、致密油、页岩气资源,且具有有序聚集的特征。长7致密砂岩油平面上主要分在东北体系的三角洲

前缘砂体和西南体系的重力流砂体,致密砂岩油地质资源量约 $9 \times 10^8 \text{t}$,推测可采资源量超过 $3 \times 10^8 \text{t}$ ^[16,26]。在深湖区发育了巨厚的湖相暗色泥质沉积,主要由深灰色-灰黑色炭质泥岩、灰黑色泥岩、黑色页岩和油页岩组成,总体呈西薄东厚、北薄南厚的特征。研究页岩层系非常规油气资源有序共生关系首先要细化各类非常规油气资源的控制因素。

笔者通过大量泥页岩含油量、孔隙度等分析测试,细化出压裂型页岩油和ICP页岩油区域“甜点区”的主要控制因素,提出TOC>6%的油页岩,因干酪根网络排烃导致排烃效率高于非页岩油有利区, $R_o < 0.9\%$ 的区域适合开展原位改质;TOC<6%的暗色泥岩中等 R_o (0.9%~1.2%)区域是页岩油勘探的“甜点区”,该结论得到现场勘探钻井结果的支持^[27-28]。成熟度 $R_o < 0.8\%$ 的页岩区域适合开展露头加热页岩生产页岩油,特别是在盆地南缘铜川地区和彬县发育高含油率油页岩。高成熟 $R_o > 1.0\%$ 的区域能开展陆相页岩气勘探,也获得勘探效果支持^[15]。致密油形成条件和控制为靠近成熟源岩、孔隙度和渗透率较高的厚层砂岩分布区^[8]。

长7页岩层系内油气资源按照演化有序、空间

表1 页岩层系油气资源形成条件与甜点区

Table 1 Formation conditions and sweet areas of oil and gas resources in shale strata

资源类型	形成条件与主控因素	形成机理	甜点区	针对性技术
油页岩	形成环境为高生产力湖湾、深湖或者陆棚上升洋流缺氧带,未经过深埋和异常热事件。高生产力、还原环境及低成熟为控制因素	低成熟度富有机质页岩,原地型资源	低成熟度,浅埋藏,富有机质,高含油率(>3.5%)页岩区	露天开采回旋炉加热生产或者半地下开采技术
裂缝油	形成条件为成熟阶段泥页岩中的构造裂缝发育区带。构造及应力释放区,成熟阶段源岩内时期主控因素	裂缝为储集空间,近源聚集型	成熟的泥页岩中,构造裂缝相对发育带	裂缝预测技术,地应力分析与成像测井技术
页岩油	形成于富有机质页岩内,矿物孔和有机质孔隙共生,成熟度和运移距离控制油的品质。主控因素为成熟度、有机质丰度及孔隙度	矿物基质和有机质孔内,源内滞留型	中等成熟阶段泥页岩中,厚度大,脆性矿物含量高	暗色泥岩开展水力压裂,高有机质的页岩利用ICP技术
致密油	形成条件为大面积致密岩层、临近生油阶段的烃源岩,裂缝发育区及相对高孔渗区富集。孔隙度和源储配置关系为形成的主控因素	无机矿物粒间、粒内和溶蚀孔及裂缝,近源聚集	孔隙度和渗透率相对较大区域,厚度大,脆性矿物含量高	利用水平井、体积压裂、无水压裂等技术开采
页岩气	形成条件富有机质页岩内,矿物孔和有机质孔隙共生,微裂缝发育带页岩气相对高产。有机质丰度、孔隙度及矿物组成是主控因素	有机质孔、无机矿物粒间、粒内和溶蚀孔及裂缝,近源聚集	孔隙度和渗透率相对较大区域,厚度大,脆性矿物含量高	利用水平井和体积压裂以及无水压裂等技术开采
致密气	形成条件为大面积致密岩层、临近处于生气阶段的气源岩,裂缝发育区及相对高孔渗区富集。孔隙度及源储配置关系为形成的主控因素	无机矿物粒间、粒内和溶蚀孔及裂缝,近源聚集	孔隙度和渗透率相对较大区域,厚度大,脆性矿物含量高	利用水平井、体积压裂、无水压裂等技术开采

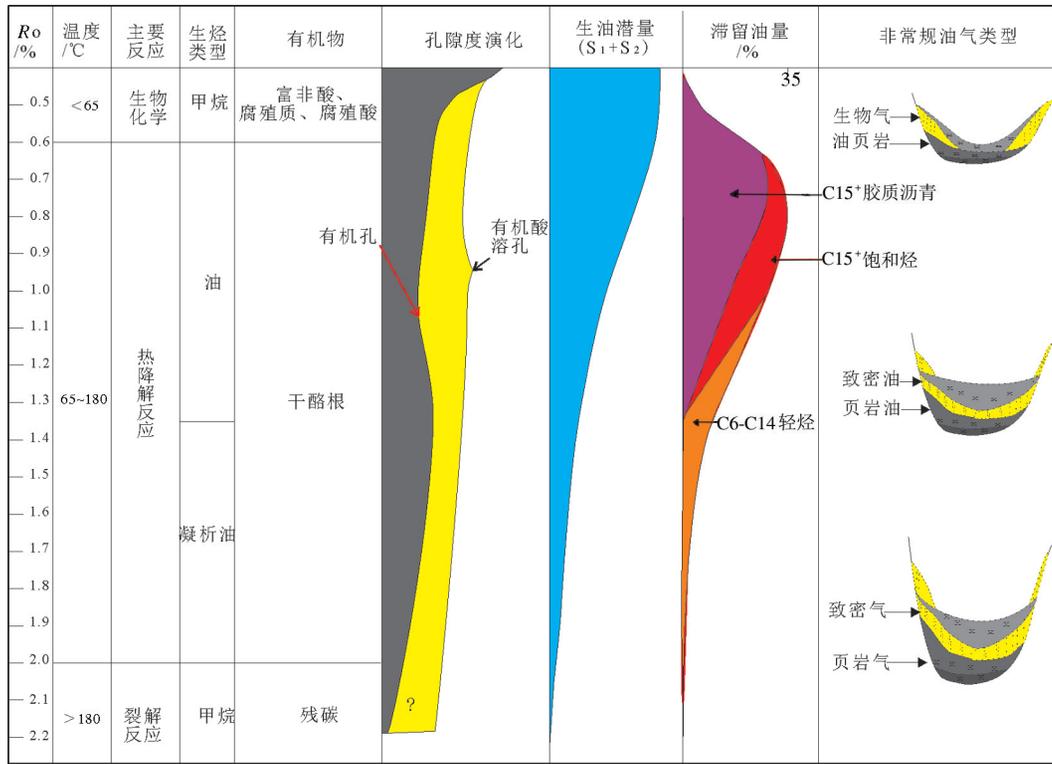


图2 页岩层系非常规油气资源类型有序演化

Fig. 2 Orderly evolution of unconventional hydrocarbon resource types in shale strata

共生认识,依据页岩层系埋藏深度、有机质丰度(TOC)和成熟度(R_o)参数,划分成露头-浅埋藏低成熟度油页岩区、中等埋深-中等成熟度且TOC<6%

的压裂页岩油区、中等埋深-中等成熟度且TOC>6%的原位改质页岩油区、高成熟度-深埋页岩气区和紧邻-夹层致密砂岩油分布区五大区域(图4)。

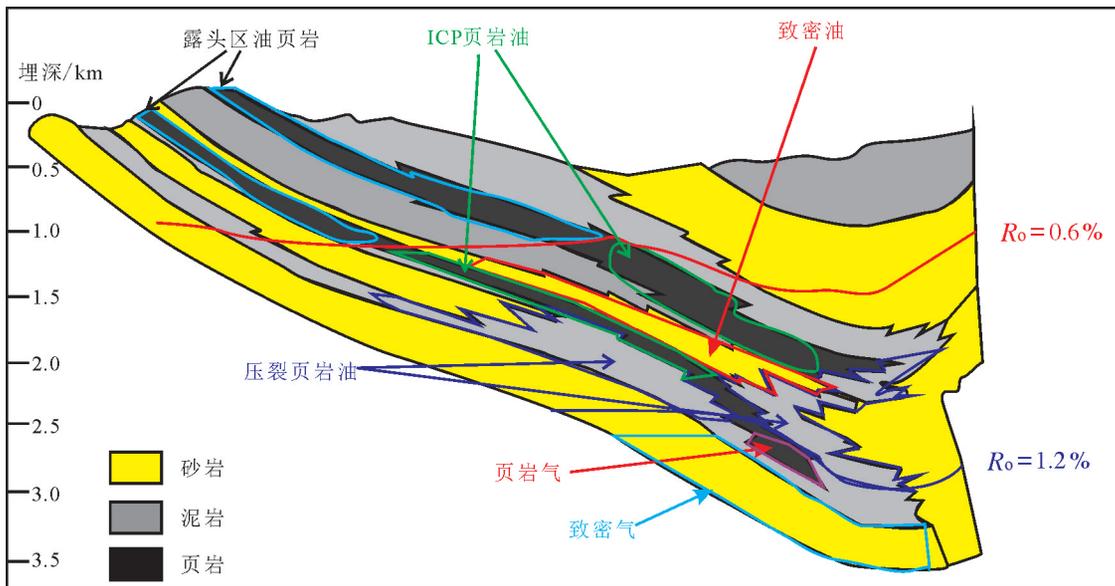


图3 页岩层系非常规油气资源空间共生图

Fig. 3 Spatial association map of unconventional oil and gas resources in shale strata

针对不同的非常规油气资源,提出针对性的开发技术(图5)。

第一类为露头-浅埋藏油页岩区,位于露头区和浅埋藏区(埋藏深度小于1000m),为中-低成熟度($R_o < 0.8\%$)、高含油率($> 3.5\%$)的油页岩(图4-A)。该类资源目前可采用古老的露天开采法,该方

法已在爱沙尼亚、巴西和中国广泛使用。除中国抚顺采用的炉法、巴西石油公司的PetroSix法、爱沙尼亚的Kiviter法和Galoter法、APT法(Albert Taciuk Process)外,当前国际上最新的技术是EcoShale方法。EcoShale方法是利用地下与地表相结合的方法,表面开采油页岩粉碎后再次埋藏到地下,进行

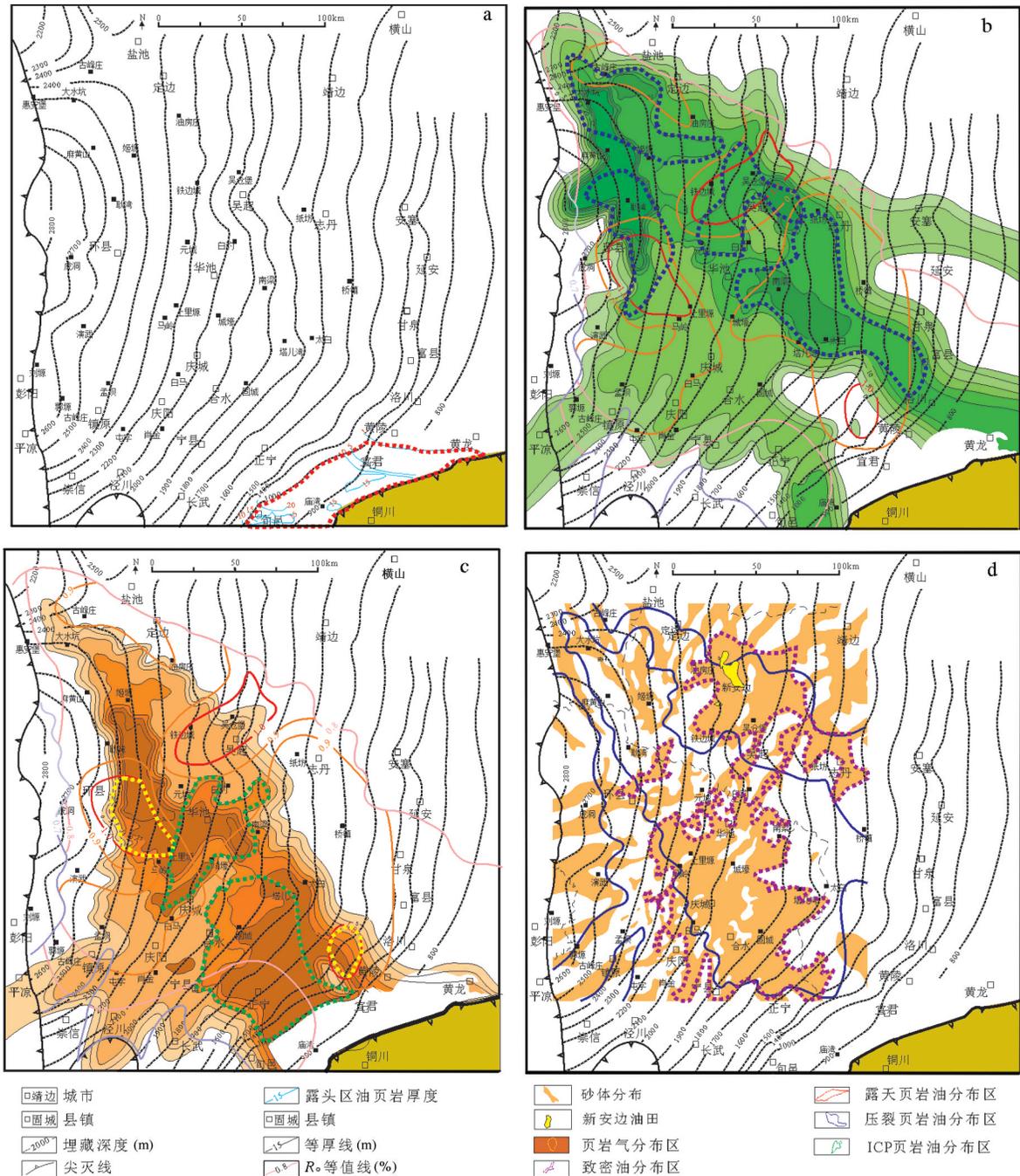


图4 鄂尔多斯盆地长7页岩层系油气资源有序聚集

Fig. 4 Orderly accumulation of oil and gas resources in Chang 7 shale strata of Ordos Basin

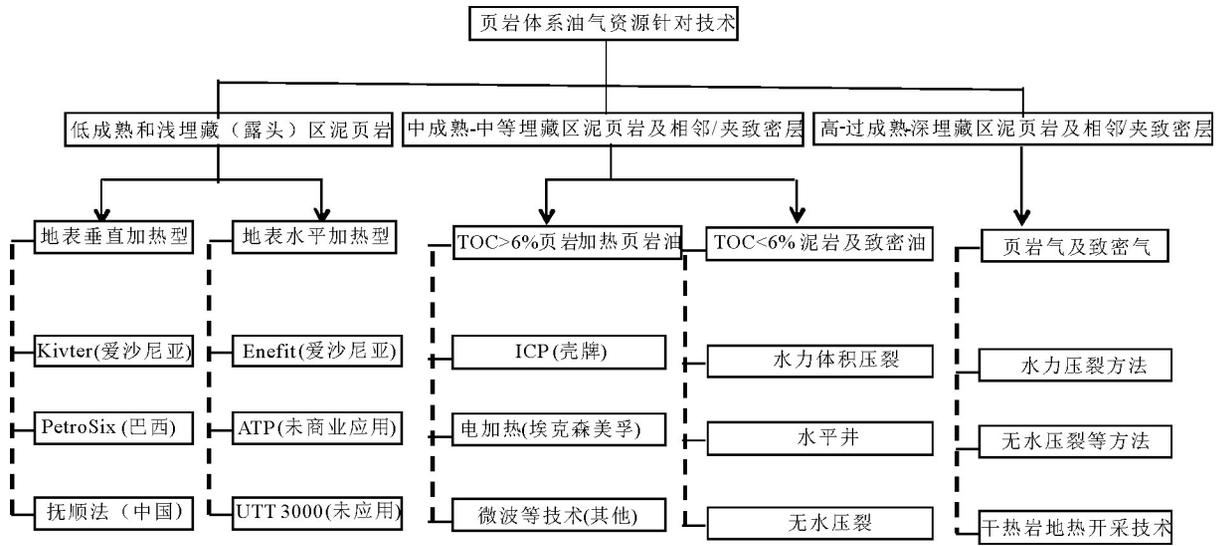


图5 页岩层系油气资源针对性技术系列

Fig. 5 Specific technical series of oil and gas resources in shale strata

蒸汽加热(蒸汽温度 370℃),该方法可以获得富轻烃的烃类,目前还没有真正投入商业使用。

第二类为中等成熟-中等埋深压裂页岩油区,该区 2%<TOC<6%,位于埋藏深度为 1500~2500m、成熟度范围内(0.9%<R_o<1.2%)的暗色泥岩区(图 4-B 蓝色虚线区)。综合分析含油性、脆性、应力、源岩特性等,认为适合开展页岩油压裂勘探,该技术已经在国内外页岩区带使用。

第三类为中等成熟-中等埋深原位改质页岩油区,位于盆地内埋藏深度为 1000~2200m、中等成熟度(R_o<0.9%)、高有机质含量(TOC>6%)的油页岩区(图 4-C,绿色虚线区)。国际上已经研发出原位改质法(In-Situ Conversion Process),Shell是目前该领域的引导者。除此技术外,ExxonMobil、AMSO、IEI(以色列能源公司)也在发展不同的页岩油原位开采方法。原位开采方法的主要缺点是加热周期长、能量需求大、需要适度的封隔层;主要优点是在较低的温度下可以裂解成为轻页岩油(富含气体),便于二次处理。

第四类为高成熟度-深埋页岩气区,为成熟度 R_o>1.0%、有机质丰度 TOC>6%的富有机质页岩区。鄂尔多斯盆地长 7 页岩层系内一个区域埋藏深度大于 1400m,另一个区域为 2200~2500m(图 4-c,黄色虚线区)。目前已经在陆相富有机质页岩中开采页岩气(见延长油田,这里不再叙赘),使用方法是大型水平井和体积压裂技术。

第五类为紧邻-夹层致密砂岩油区,该区垂向上紧邻富有机质成熟泥页岩(R_o>0.8%)、大面积分布的砂体区。该区域已发现新安边致密油田,并在陇东地区发现大量高产致密油井,形成几个亿吨级致密油区(图 4-d,紫色虚线区)。针对致密油富集区,目前普遍使用大型水平井和体积压裂技术。

总之,目前页岩层系内,页岩层系油气资源可以根据泥页岩的埋藏深度、成熟度及有机质丰度,形成地表处理和地下原位处理 2 种针对性技术(图 5)。鄂尔多斯盆地页岩成熟度尚未达到过成熟,处于页岩层系油气资源演化的中间阶段,目前勘探对象主要是致密油和页岩油(图 2)。

4 页岩层系油气资源立体勘探开发

页岩层系油气资源立体勘探开发基于页岩层系油气资源有序共生的认识,针对各种类型非常规油气资源特点与互补性,对盆地内页岩层系各种非常规油气类型进行立体勘探和开发,特别是对平面上成熟度跨度大、纵向上沉积建造复杂的页岩层系系统进行整体规划。立体勘探与开发的内涵为:平面上对同一层系不同位置油气资源进行统一研究、统一评价、统一勘探;纵向上对不同层系油气资源开展立体勘探、整体评价、协同开发(图 6)。

汇总中国陆上页岩层系(表 2)源岩特征可知,中国南方以古生界海相页岩为主,发育上震旦统陡山沱组页岩、下寒武统筇竹寺组页岩、上奥陶统五

峰组页岩、下志留统龙马溪组页岩等多套海相黑色硅质富有机质页岩,成熟度(R_o)普遍高于2.0%,上述层系演化阶段决定其适合寻找页岩气;北方以中新界湖相泥页岩为主,发育渤海湾盆地古近系、松辽盆地白垩系、鄂尔多斯盆地三叠系、四川盆地侏罗系、准噶尔盆地二叠系等湖相页岩, R_o 普遍低于1.2%,源岩特征与沉积建造决定适合寻找油页岩、泥岩裂缝油、页岩油、致密油。此外,鄂尔多斯盆地石炭系本溪组及下二叠统山西组-太原组、准噶尔盆地石炭系发育海陆过渡相形成的煤系页岩,成熟度为高过成熟度,适合寻找致密气、煤层气。

值得注意的是,页岩层系微裂缝和高渗储层段的定量评价和有利区预测是页岩层系非常规油气勘探的难点,是非常规油气资源分布的“甜点区”。

表 2 中国页岩层系源岩特征、演化阶段及非常规油气资源类型

Table 2 Source rock characteristics, evolution stages and unconventional hydrocarbon resource types of shale strata in China

发育环境	盆地地区	时代地层	面积/10 ⁴ km ²	厚度/m	有机碳/%	成熟度/%	非常规油气资源类型
海相页岩	塔里木	寒武系玉尔吐斯组	9.2	20~180	0.5~3.5	1.4~3.8	页岩气、致密气
		奥陶系萨尔干-印干组	7.5	20~120	0.5~2.5	1.2~3.0	页岩气、致密气
	华北	串岭沟-下马岭组	4.3	30~70	0.19~20	1.0~1.45	页岩油、页岩气、致密气
		平凉组-府君山组	3.5	35~200	0.15~4.4	0.6~3.1	油页岩、页岩油、页岩气
	扬子地台	奥陶系五峰组-龙马溪组	42	20~700	0.5~25.7	2.4~4.3	页岩气、致密气
		德坞组-大塘组	6	50~150	0.65~3.07	2.2~3.0	页岩气、致密气
		罗富组	13	100~600	0.27~2.33	1.8~3.5	页岩气、致密气
		寒武系筇竹寺组	50	50~700	0.5~22	2.33~5.12	页岩气、致密气
		陡山沱组	15	10~100	0.19~2.04	2.67~4.5	页岩气、致密气
		大乘寺组	3	20~100	0.42~6.0	1.7~4.6	页岩气、致密气
羌塘	夏里组	4	20~850	0.8~15.17	0.93~1.3	页岩油、页岩气、致密气	
	肖茶卡组	6	50~728	0.1~13.45	2.62~4.35	页岩气、致密气	
松辽	白垩系嫩江组	7.5	100~150	0.7~10	0.4~1.1	油页岩、页岩油、致密油	
	白垩系青山口组	9.2	50~609	0.5~5.4	0.4~1.3	油页岩、页岩油、致密油	
渤海湾	古近系沙河街组	2.3	400~1200	0.8~33	0.3~1.8	油页岩、页岩油、致密油	
	古近系孔店组	0.61	200~800	0.3~7.0	0.63~2.2	油页岩、页岩油气、致密油气	
鄂尔多斯	三叠系延长组	7.5	10~160	1.18~22	0.50~1.16	油页岩、页岩油、致密油	
陆相页岩	四川	侏罗系自流井-沙溪庙组	15.2	40~180	0.4~1.6	1.0~1.87	页岩油气、致密油气
		三叠系须家河组	14	50~1000	1.0~4.5	1.0~2.2	页岩油气、致密油气
	柴达木	新近系	1.0	200~560	0.29~1.81	0.45~0.6	油页岩、页岩油气、致密油气
		古近系	0.92	300~600	0.4~3.85	0.8~0.9	油页岩、页岩油、致密油
准噶尔-吐哈	二叠系凤城/芦草沟	6.4	200~1250	1.73~34.4	0.54~1.8	油页岩、页岩油气、致密油气	
	水溪沟群	10	300~850	0.8~40	0.4~1.36	油页岩、页岩油气、致密油气	
	白碱滩组	7.5	40~300	1.0~5.14	0.52~1.4	油页岩、页岩油气、致密油气	
塔里木	中下侏罗统康苏-杨叶组	10.2	42~795	0.42~6.33	0.8~2.0	页岩油气、致密油气	
	三叠系黄山-塔里奇克组	12.5	50~800	0.4~7.9	0.8~2.25	页岩油气、致密油气	
渤海湾	山西组	5	40~160	0.9~23.2	0.56~2.96	油页岩、页岩油气、致密油气	
	太原组	5	30~180	0.61~19.6	0.74~2.52	油页岩、页岩油气、致密油气	
扬子	龙潭组	20~50	20~260	0.5~12.6	1.2~3.2	页岩油气、致密油气	
	梁山组	10~30	5~20	1.0~7.0	1.8~3.2	页岩油气、致密油气	
海陆过渡相页岩	山西组	山西组	12.5	50~220	2.25~19.29	0.5~3.0	油页岩、煤层气、页岩油气、致密油气
		鄂尔多斯	太原组	12	20~60	3.33~23.38	0.5~2.6
	本溪组	10	10~50	0.54~11.71	0.7~2.8	煤层气、页岩油气、致密油气	
	准噶尔	巴山组	7.4	60~250	0.4~28.94	0.55~1.72	油页岩、页岩油气、致密油气
		滴水泉组	10	100~300	0.17~26.76	0.93~1.86	页岩油气、致密油气

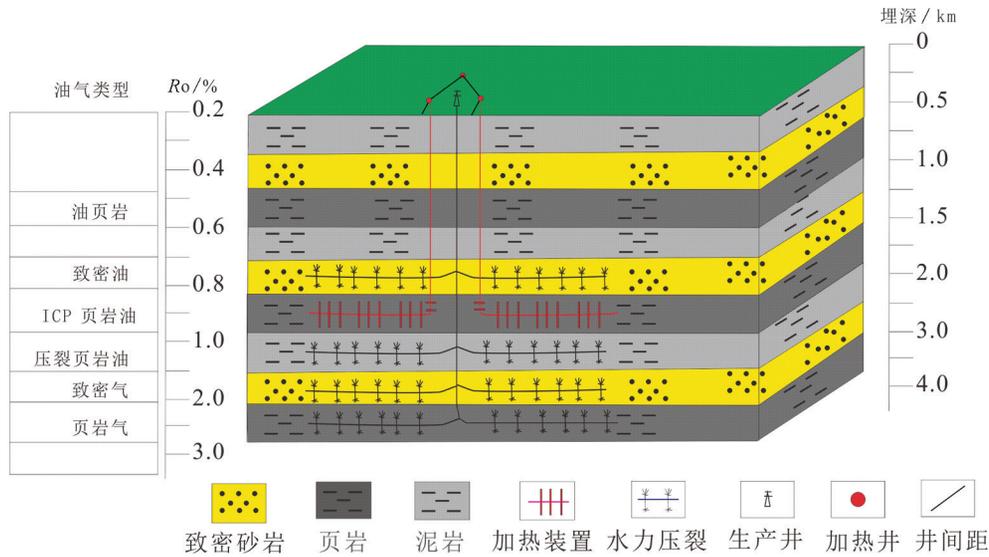


图6 页岩层系非常规油气资源立体勘探示意图

Fig. 6 Stereoscopic exploration sketch diagram of unconventional oil and gas resources in shale strata

在开采这些“甜点区”油气资源的同时,可引入ICP转化技术,对附近的泥页岩进行ICP原地转化,将干酪根裂解生成人造页岩油,通过上述甜点区裂缝通道或高渗储层进行导流,不仅可以生产页岩油,生成的气体和轻烃还可以降低致密油的粘度和流动性,提高致密油的开采效率,在实现对页岩体系最底端干酪根油气资源转化的同时,立体开采致密油。因此,建议在开展页岩层系内干酪根原位转化研究的同时,在思想上树立整体观、在对油气资源“吃干榨净”开展“干酪根革命”的同时,也考虑页岩层系内其他非常规油气资源,做到立体勘探、协同开发、整体部署、一体化推进。

5 结论

(1)在大量调研国内外页岩层系非常规油气勘探开发进展的基础上,根据页岩层系内各类非常规油气资源的认识过程、赋存状态、储集位置、资源类型及开采配套工艺差异对各类油气资源进行厘定。明确页岩系统油气资源有序共生的内涵,指出页岩层系油气演化有序受源岩成熟度控制,而资源空间共生受沉积建造控制。

(2)根据各类非常规油气资源形成的主控因素和“甜点区”筛选参数,以鄂尔多斯盆地长7页岩系统为例进行解剖,按照成熟度阶段、埋藏深度和有机质丰度,将长7页岩层系油气资源分成露头-浅埋

藏油页岩区、中等成熟-中等埋深压裂页岩油区、中等成熟-中等埋深原位改质页岩油区、高成熟度-深埋页岩气区和紧邻-夹层致密砂岩油五大区域。针对上述分布区油气资源类型和特点给出原地转化等针对性技术。

(3)基于页岩系统的有序共生关系,针对各种类型非常规油气资源的特点与互补性,对盆地内页岩层系各种非常规油气类型进行立体勘探和开发,对平面上成熟度跨度大、纵向上沉积建造复杂的页岩层系统进行整体规划。即平面上对同一层系不同位置油气资源进行统一研究、统一评价、统一勘探,纵向上对不同层系油气资源开展立体勘探、整体评价、协同开发。

致谢:感谢邹才能院士为首席的国家973项目组及长庆油田研究院油探室成员的支持,感谢审稿专家提出的建设性意见。

参考文献

- [1]Jarvie D M. Shale resource system for oil and gas: Part2-shale oil resource systems[J]. AAPG Memoir, 2012, 97:89-119.
- [2]崔景伟,邹才能,朱如凯,等.页岩孔隙研究新进展[J].地球科学进展,2012,27(12): 1319-1325.
- [3]Charlez P A. Conditions for an economical and acceptable development if unconventional resources out of North America[C]//11th Middle East Geosciences Conference and Exhibition.2014.
- [4]崔景伟,朱如凯,侯连华,等.页岩原位改质技术现状、挑战和机

- 遇[J]. 非常规油气, 2018,5(6):103-114.
- [5]袁选俊,林森虎,刘群,等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 34-43.
- [6]邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制, 地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发,2013, 40(1): 14-26.
- [7]朱如凯,白斌,崔景伟,等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展[J]. 古地理学报,2013, 15(5): 615-623.
- [8]崔景伟,朱如凯,杨智,等. 国外页岩层系石油勘探开发进展及启示[J]. 非常规油气, 2015, 2(4): 68-82.
- [9]邹才能,杨智,朱如凯,等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报,2015, 89(6): 979-1007.
- [10]邹才能,陶士振,袁选俊. “连续型”油气藏及其在全球的重要性、成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-682.
- [11]邹才能,杨智,张国生,等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.
- [12]赵文智,何登发,范士芝. 含油气系统术语, 研究流程与核心内容之我见[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 1-7.
- [13]刘静江,刘池洋,王震亮. 从含油气系统到成藏油气系统油气系统研究新动向[J]. 地质论评, 2008, 54(6): 801-806.
- [14]刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 1-23.
- [15]王香增,张金川,曹金舟,等. 陆相页岩气资源评价初探: 以延长直罗-下寺湾区中生界长 7 段为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 192-197.
- [16]杨华,李士祥,刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油, 页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.
- [17]杨伟利,王毅,王传刚,等. 鄂尔多斯盆地多种能源矿产分布特征与协同勘探[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 579-586.
- [18]徐福刚,李琦,康仁华,等. 沾化凹陷泥岩裂缝油气藏研究[J]. 矿物岩石,2003, 23(1):74-76
- [19]Curtis J B. Fracture shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938
- [20]Bustin R M. Shale gas and shale oil petrology and petrophysics[J]. International Journal of coal geology.2012,103:1-2
- [21]Bohacs K M, Passey Q R, Rudnicki M, et al. The Spectrum of Fine- Grained Reservoirs from ‘Shale Gas’ to ‘Shale Oil’/Tight Liquids: Essential Attributes, Key Controls, Practical Characterization[C]//IPTC 2013: International Petroleum Technology Conference. 2013.
- [22]周庆凡,杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质,2012, 33(4):541-544,570.
- [23]崔景伟,朱如凯,吴松涛,等. 致密砂岩层内非均质性及含油下限——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段为例[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 877-882.
- [24]崔景伟. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 页岩油和致密油储层表征与石油聚集机制[D]. 中国石油勘探开发研究院, 2013.
- [25]刘招君,孙平昌,柳蓉,等. 页岩能源共生矿产成矿(藏)地质条件研究[J]. 沉积学报, 2014, 32(3):593-600.
- [26]崔景伟,朱如凯,李士祥,等. 致密砂岩油可动量及其主控因素——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 为例[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 536-542.
- [27]崔景伟,朱如凯,吴松涛,等. 鄂尔多斯盆地长 7 页岩油“甜点区”优选与分布[J]. 中国矿物岩石地球化学学会第 15 届学术年会论文摘要集(4), 2015.
- [28]杨华,牛小兵,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 511-520.