中国石化报

2023年7月17日
每周一出版
责任编辑：秦紫函　电话：59964339
邮箱：qinzih@sinopec.com
审校：张春燕　版式设计：王强 赵博

中国科学院院士、中国石油大学（华东）校长郝芳，中国工程院院士、中国石化石油勘探开发研究院院长郭旭升深度解读

深化页岩认识 推动页岩革命

核心阅读

加大页岩油勘探开发力度，推动中国页岩革命，对立足国内保障国家能源安全意义重大。不同于北美稳定的海相页岩，中国主要是陆相页岩，在湖泊环境沉积形成，储集性、含油性、流动性、可压性都变化较大。什么样的页岩才优质？在7月8日中国石化举办的科技创新未来发展论坛上，中国科学院院士、中国石油大学（华东）校长郝芳，中国工程院院士、中国石化石油勘探开发研究院院长郭旭升，分别进行详细剖析，并提出诸多新观点、新认识。

近年来名声大噪的页岩油，就是赋存于页岩及其夹层中的原油。页岩，主要由黏土沉积形成，具有薄页状或薄片层状的节理。

中国科学院院士、中国石油大学（华东）校长郝芳说，全球石油和天然气绝大部分是由富有机质页岩形成的。

目前，全球21个国家75个盆地发现页岩油，据统计可采资源量在700亿~800亿吨。美国的页岩油资源量占全球的18.7%，我国占7.7%。理论技术创新推动美国页岩油产量快速增长，2022年产量达到3.99亿吨，实现能源独立。我国页岩油勘探开发尚处于起步阶段，全国探明页岩油储量超13亿吨，2022年页岩油产量突破300万吨。

不同于北美稳定的海相页岩，中国主要是陆相页岩，在湖泊环境沉积形成，储集性、含油性、流动性、可压性都变化较大。

那么，什么样的页岩才优质？

1 既要富含油，又要易压裂

郝芳说，优质页岩，就是富含脆性矿物的纹层状富有机质页岩，具有好的物性、含油性及可压性。

富含有机质，才能生成油；富含脆性矿物，才易于压裂。

而纹层，就像页岩的年轮。据郝芳团队的研究，1米页岩需要0.91万~1.39万年沉积形成，1米页岩中有1.21万条纹层偶，1条纹层偶平均厚度在82微米，需要0.75~1.15年沉积形成。

郭旭升则详细剖析了中国陆相优质页岩的评价标准，并提出诸多新观点、新认识。

郭旭升说，富有机质泥页岩主要发育在半深湖-深湖相区，因为半深湖和深湖相区是一个缺氧的环境，古生产力比较高，泥页岩面积广、厚度大、有机质类型好、有机碳含量较高。

根据页岩的矿物组成、沉积构造、颗粒粒级、有机碳含量，我国陆相页岩相分为八大类。受物源和古地貌控制，页岩岩相组合在平面上呈环带状分布。其中，碳酸盐纹层状页岩主要分布在盆地中心和缓坡，长英质页岩主要分布在盆缘。

一般来说脆性矿物含量高，就有利于压裂。但据统计，不同地区页岩中的石英和长石等脆性矿物的含量占比差不多，但压裂效果差异非常大，有的页岩压裂后很容易形成复杂缝网，有的则不行。为什么会出现这样的问题？

郭旭升指出，页理结构的合理性很关键。如果石英脆性颗粒是呈悬浮状赋存于有机质与黏土复合体中，则不能形成刚性岩石骨架结构。部分页岩，有机质和脆性矿物含量都很高，但因为页理结构不合理，压裂效果不佳。相比之下，济阳坳陷的纹层状富碳酸盐混积页岩则能形成刚性骨架结构，因此取得突破。

2 湖是咸水好还是淡水好？

中国陆相页岩油主要是湖泊相。远古时代的湖泊有咸水湖泊，也有淡水湖泊，哪种更有潜力？

在咸水湖盆，主要发育富碳酸盐-蒸发岩类细粒沉积，以富硫有机相为主，古生产力低，有机质保存条件优越。而在淡水湖盆，主要发育长英质-黏土质页岩，以贫硫有机相为主，古生产力高，微生物改造作用强。

郭旭升说，硫的加入能够降低页岩生烃活化能，所以咸水湖盆的生烃量比较高。

镜质体反射率Ro，是最重要的有机质成熟度指标，可以反映有机质热演化的程度。在济阳坳陷咸水湖盆，Ro在0.7%左右就可以大量生烃了，而在一些盆地的淡水湖盆，Ro要在0.95%才能生烃。

有机质热演化程度增加，烃类产物气油比就增大，流体性质就越好。渤海湾盆地济阳坳陷古近系Ro在0.7%~1.0%，产出的就是高密度的黑油；四川盆地复兴地区侏罗系Ro在1.2%~1.7%，产出的就是低密度的凝析油。

我国陆相页岩主要有三种组合类型。第一种是互层/夹层型，以鄂尔多斯盆地长7段、四川盆地侏罗系为主，特点是源储共存、页岩层系整体含油，薄层砂岩或灰岩夹层近源捕获石油形成“甜点”，往往分布在淡水湖盆里。

第二种是混积页岩纹层型，典型代表就是胜利油田沙三-沙四段，特点是源储共存或源储一体，页岩层系整体含油，宏观上看是自生自储，但细分之后里面有不同的纹理结构，富有机质泥质纹层是生油层，富碳酸盐纹层是储层，二者结合形成微观源-储组合。这种类型主要分布在咸化湖盆。

第三种黑色页岩基质型，典型代表就是松辽盆地湖盆中部青山口组青一段，是标准的源储一体类型，纹层状页岩整体含油，砂质、钙质页岩是有利储层，石油原地滞留形成“甜点”，具有高总有机碳含量、高演化程度、地层超压等特点，更多分布在淡水湖盆。

中美页岩油地质条件对比

中国	对比因素	美国
断陷盆地、内陆坳陷盆地	盆地类型	稳定克拉通盆地前陆盆地
陆相 非均质性强	流动性	海相 稳定
中-低成熟为主 局部高成熟	储集性	高-过成熟
含蜡量高 黏度和流动性变化大	含油性	黏度低 气油比高，流动性好
黏土含量多变 可压性变化大	可压性	黏土矿物含量低 可压性好

3 孔是无机好还是有机好？

页岩的储集空间包括孔隙和微裂缝，其中孔隙从成因上可分为有机孔和无机孔。郭旭升团队创新提出，无机孔是页岩油最有利的储集空间类型。

有机孔，包括原生孔隙和次生孔隙。如古生物壳壁就是原生孔隙。这些古生物沉积的有机质在地层中经历了复杂的生物化学及化学变化，会形成干酪根，就生成了干酪根次生孔隙。干酪根经热演化会生成油，油在高温下会裂解为气，并残余沥青，就生成了沥青次生孔隙。

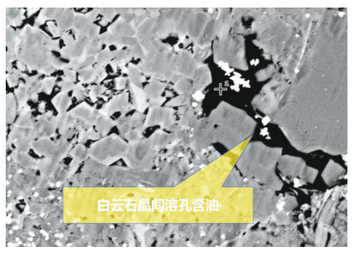
因此，热演化成熟度是有机孔形成演化的基本条件。但很多页岩并没有大量的有机孔，因为这些孔隙没有得到保护。可以为有机孔发育和保持提供保护的，是能够抵抗强大压力的刚性矿物或内部流体有超高压力。

有机孔作为页岩油的“老家”，按理说应该是“甜点”储层。但这个“孔”和人们肉眼可见的孔是两回事——它是纳米级别的。

四川盆地海相页岩有机孔的孔径大部分10纳米左右，大庆古龙页岩有机孔的孔径也普遍小于30纳米。而科研人员通过大量核磁共振发现，当孔径大于30纳米时，游离油才可以流动。因此，有机孔的流动性很差，需要上改造手段。相比之下，无机孔孔径成百上千纳米，是微米级别，有很好的流动性。

事实也印证了无机孔更有利于储集。

在荧光下观察纹层状页岩发现，暗色黏土质纹层中游离烃比例低，亮色碳酸盐岩纹层中游离烃比例高，表明油主要储存在无机孔隙中。



无机孔是页岩油最有利储集空间类型。

在电子显微镜下观察济阳坳陷纹层状页岩发现，在泥页岩成岩过程中，碳酸盐成分重新结晶，形成了方解石晶体和白云石晶体，形成大量的晶间孔，后来泥质层形成的油进入这些碳酸盐纹层的储集空间就形成富集。

在晶体形成的过程中还会形成一些层理缝、构造缝、成岩缝，是非常好的渗流通道和储集空间。

苏北盆地的阜二段页岩，有效储集空间类型就很多样，既有高角度缝、层理缝，也有基质孔，孔以碳酸盐岩晶间孔、粉砂岩纹层中长英质粒间孔、黏土矿物粒间孔等无机孔为主，局部也有有机孔。

科研人员又对北美的页岩油气进行解剖，发现北美页岩油主产层也以无机孔为主，储层多为碳酸盐岩纹层或夹层，更加印证无机孔更有利于储集。

4 页岩成百上千米厚，哪里才“甜”？

一套页岩通常厚达几百米、上千米，这就带来另一个重要问题——哪里是“甜点”层？

郭旭升说，既然页岩油在生成后，会从页岩中运移出去进入常规储层，那么页岩层系中的孔隙应该“近水楼台先得月”，页岩油先把页岩层系中的孔隙充满再运移出去，因此，找“甜点”应该重视孔隙的作用。

油田通常用自然伽马测井来检测泥岩含量。在胜利油田页岩油突破井樊页平1井，科研人员发现，高伽马值的井段，产量并不一定高，低伽马值的井段，也就是碳酸盐岩纹层比较多的页岩井段，产量比较高。

胜利油田的统计结果表明，页岩层系的孔隙度与页岩油产量呈正相关关系。

郭旭升说，这就带来一个重要启示：过去打页岩油水平井，都要用伽马指标实时追踪页岩，用旋转导向技术实时控制井下钻进方向，如果采用“孔隙甜点”评价方法，就可以按几何轨迹来设计井身轨迹，只要用常规导向技术钻井即可，不用再频繁调整井身轨迹，这就彻底解放了页岩油钻井工程，可以大幅降低工程成本。

此外，页岩油保存条件也很重要。在胜利油田牛庄洼陷，邻近的砂岩储层经过多年开采，地层早都欠压，需要注水补充能量，而页岩层系中的压力系数最高可达1.9，说明陆相页岩层系强非均质性和泥岩涂抹作用形成良好的自封闭性，即使有大规模断层切割，也没有破坏陆相页岩层系的自封闭性，因此才有济阳页岩油的高产。

综上所述，郭旭升认为，页岩油“甜点”具有三要素：

一是良好的源-储耦合关系。有机碳含量要高，无机孔要发育，脆性好。

二是Ro进入生油窗即可。

三是要有良好的保存条件，地层超压。

过去评价页岩油，Ro要大于0.9%，页岩油才可以流动，而我国东部大部分页岩Ro偏低，评价资源量较低。现在认为页岩压力系数高，可以增强页岩油流动性，这和注水开发补能同样道理。因此，Ro进入生油窗即可，地层超压就可以保证页岩油流动性。这个新认识，解放了一大批Ro偏低的页岩油资源，可以大幅增加页岩油资源量。

5 中国陆相页岩油潜力巨大

目前，我国陆相页岩油在鄂尔多斯盆地延长组、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组、松辽盆地青山口组、济阳坳陷沙河街组、黄骅坳陷孔店组、四川盆地侏罗系、苏北盆地古近系等领域取得了多点突破，全国探明页岩油储量超13亿吨，2022年页岩油产量突破300万吨。

其中，胜利油田对济阳坳陷不同类型的页岩油进行分层系、分类型勘探，8口专探井测试日产油超百吨，5口井累产油超万吨，丰页1-1井最高日产页岩油263吨。

胜利油田在高、中、低成熟度富碳酸盐类页岩油均取得产能突破。其中，牛页2HF井挑战了Ro仅0.6%的极限，成功突破工业油流关。

胜利油田选择在樊页平1井区开展3层楼8口井的立体开发试验，均获得商业产能。

据原国土资源部2016年预测，全国页岩油资源量超过400亿吨，技术可采资源量超过37亿吨，是美国的42%，而美国2022年页岩油产量已达3.99亿吨，占原油总产量的2/3，实现能源独立。

“有这么好的基础，我国页岩油肯定大有作为！”郭旭升信心满满。

为此，郭旭升建议，一要加大勘探力度，落实资源潜力，开展资源分级精细评价，根据油价选择开发策略。

二要加快迭代创新步伐，设立国家重大攻关项目，围绕陆相页岩油富集理论、开发机理、工程技术和重大装备等关键问题持续开展攻关。

三要攻关CCUS等大幅提高采收率技术。北美鹰滩油区开展注天然气吞吐试验，补充地层能量，维持地层压力，7个试验区200余口生产2~5年的井，采出程度提高了30%~50%。二叠纪盆地大规模应用二氧化碳驱油技术，年注入二氧化碳2200万吨，预测采收率从12%提高到19%。

四要创新建立油公司与服务公司一体化工作机制，实现双赢。

本版文字由 本报记者程 强 通讯员 翟常博 整理

胜利油田牛页一区试验井组电驱压裂现场。　李佳 摄