

# 中国东部超深超高温碳酸盐岩潜山油气藏的发现及关键技术

## ——以渤海湾盆地冀中坳陷牛东1潜山油气藏为例

赵贤正<sup>1</sup>, 金凤鸣<sup>1</sup>, 王权<sup>1</sup>, 李勖<sup>2</sup>, 康如坤<sup>1</sup>, 常建华<sup>1</sup>, 袁胜辉<sup>2</sup>

(1 中国石油华北油田公司; 2 中国石油集团东方地球物理公司)

**摘要** 冀中坳陷霸县凹陷牛东1并于2011年1月钻探发现了超深层蓟县系雾迷山组碳酸盐岩潜山油气藏,油气藏底部钻达深度6027m尚未见油水界面,温度已达201℃,酸压测试获日产油642.9m<sup>3</sup>和气56.3×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,为渤海湾盆地乃至中国东部目前发现的深度最大、温度最高的特高产油气藏。回顾了油气藏初战失利、再战搁浅、重燃希望、重大突破等四个阶段30余年的探索历程。描述了勘探突破中的三项关键技术以及它们所发挥的重要作用:高精度重磁力勘探为超深潜山的发现提供了重要线索,高精度二次三维地震勘探实现了超深潜山圈闭的准确落实,抗高温深度体积酸压改造为超深超高温潜山油气藏试获高产提供了有力的技术保障。

**关键词** 碳酸盐岩油气藏; 潜山油气藏; 高温油气藏; 深部油气藏; 油气勘探; 勘探技术; 霸县凹陷; 渤海湾盆地  
**中图分类号**: TE122.1 **文献标识码**: A

2011年1月13日,冀中坳陷霸县凹陷风险钻探的牛东1并于井深5639m钻遇了蓟县系雾迷山组碳酸盐岩潜山。钻至6027m完钻后,对5641.5~6027m进行大型深度酸化压裂改造,采用16mm油嘴、63.5mm孔板放喷求产,日产原油642.9m<sup>3</sup>、天然气56.3×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,井底温度201℃,从而发现了渤海湾盆地乃至中国东部目前深度最大、温度最高的潜山油气藏。它的发现,是超深潜山油气成藏地质认识不断深化和勘探工程技术不断进步的结果,这一发现对于推动渤海湾盆地超深层潜山油气勘探意义重大。

### 1 勘探概况

牛东1潜山位于河北省雄县境内,构造位置处于渤海湾盆地冀中坳陷霸县凹陷陡侧边界断层——牛东断层下降盘(图1)。霸县凹陷是冀中坳陷中北部的一个新生代箕状断陷,北东走向,西断东超,西和北以牛驼镇凸起为邻,东南以文安斜坡向大城凸起过渡,西南与饶阳凹陷相接(图1),面积约2400km<sup>2</sup>,

最大沉积厚度近10000m。主要勘探目的层为新近系馆陶组,古近系东营组、沙河街组,以及基底的奥陶系、寒武系和蓟县系雾迷山组。

霸县凹陷钻探工作始于1969年3月的郑1井(位置见图1)。截至2010年底,全区完成了电法概查和重力、磁力普查,局部开展了高精度详查,地震勘探已基本三维满覆盖,局部完成了高精度二次三维地震覆盖,钻各类探井584口,获工业油气流井247口,发现了新近系、古近系、潜山(奥陶系、寒武系,蓟县系雾迷山组)油气田10个,资源转化率达到50%,已经属于高勘探程度的成熟探区。

潜山油气藏是霸县凹陷的主要油气藏类型之一,但是,随着勘探程度的不断提高,埋深小于5000m的潜山油气藏基本上都被钻探,发现难度越来越大,继续寻找埋深大于5000m的超深层潜山油气藏已是深化勘探的主要方向。然而,埋深超过5000m的深潜山,一是隐蔽性强,发现和落实的难度大;二是油气成藏认识不清,钻探风险高。正因为如此,牛东1潜

收稿日期: 2011-09-26; 改回日期: 2011-10-09

基金项目: 本文受中国石油天然气股份有限公司科技项目(2008B-0303)资助

赵贤正: 1962年生,教授级高级工程师。1986年获华东石油学院学士学位,1989年获石油大学(北京)硕士学位,2005年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油华北油田公司副总经理,主要从事石油地质综合研究与勘探管理工作。通讯地址: 062552 河北省任丘市

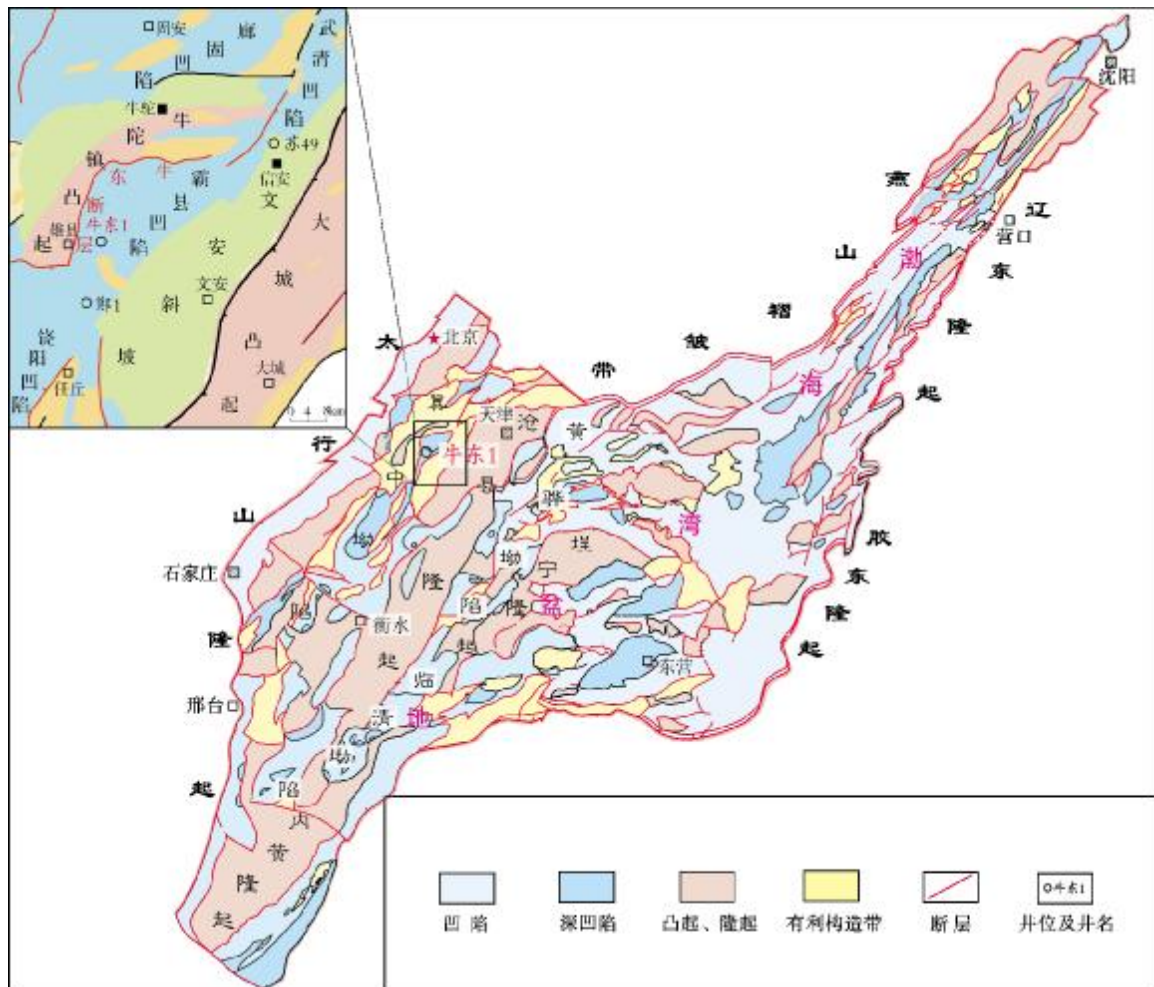


图1 渤海湾盆地牛东1潜山构造位置示意图

山(图2、图3)历经了30余年的艰难探索,才最终取得了突破。

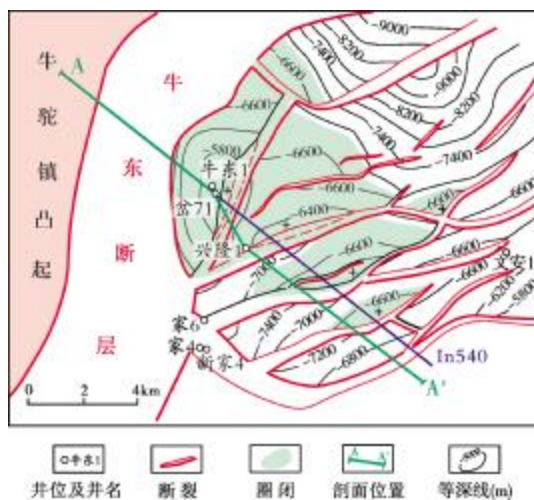


图2 霸县凹陷牛东地区潜山顶面构造图  
A-A'剖面见图3

## 2 勘探发现历程

牛东1潜山油气藏因其埋深大、隐蔽性强,勘探发现经历了较为漫长的探索历程,大体可分为四个阶段。

### 2.1 初战失利

渤海湾盆地冀中坳陷以发育“新生古储”碳酸盐岩古潜山油气田(藏)而著称<sup>[1]</sup>。1975年,冀中坳陷发现了我国第一个中元古界海相碳酸盐岩潜山高产大油田——任丘油田,从而开创了潜山找油的新领域,并创建了“新生古储”潜山成藏理论,为潜山油气藏勘探开发奠定了实践和理论基础<sup>[2]</sup>。继任丘油田发现之后,战果迅速扩大,在不到十年间相继又发现了南孟、龙虎庄、八里庄、薛庄、雁翎、河间、留北、苏桥等一批潜山油气田,形成了冀中坳陷潜山勘探的第



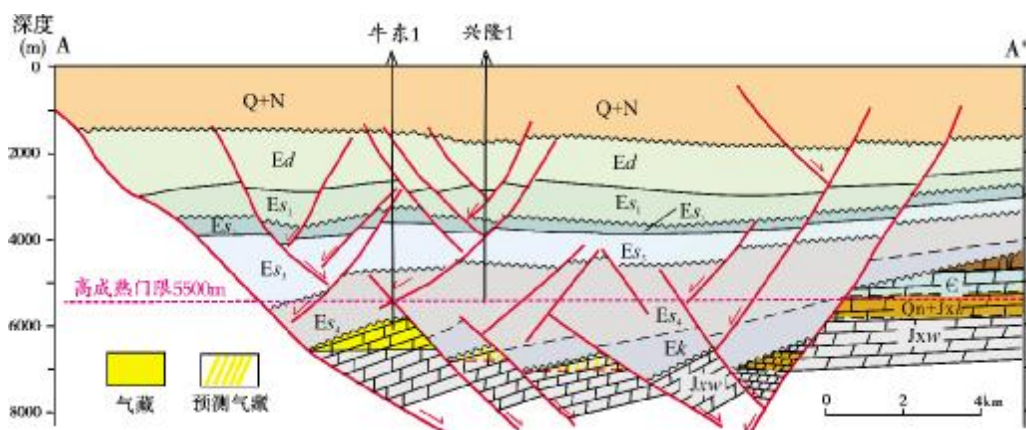


图3 霸县凹陷牛东地区过牛东1潜山油气藏剖面图

A-A'剖面位置见图2。

Ed 东营组; Es 沙河街组; Ek 孔店组; Qn 青白口系; Jxh 蓟县系洪水庄组; Jxw 蓟县系雾迷山组

一次高峰。

期间,霸县凹陷牛东地区也是当时潜山勘探的主攻区带之一。根据1:10万重力勘探发现的剩余重力异常高和二维地震勘探的构造解释,1977年到1978年间,先后在牛东地区设计钻探了家4井、家6井和新家4井三口潜山探井(图2),结果家4、家6两口井都因工程事故未钻达设计井深,新家4井钻达井深5109.84m(设计进入潜山深度4800m)仍未钻遇潜山,因钻机负荷能力不足被迫完钻。该区首次潜山勘探失利而暂停,原因是当时的重磁力资料和地震资料精度不够,深层潜山高点落实不准。之后,该区的潜山勘探长期处于停滞状态达20余年之久。

## 2.2 再战搁浅

进入上世纪90年代,三维地震和高精度重、磁、电勘探技术的发展,给深潜山勘探提供了新的技术支持<sup>[3-4]</sup>。1997—1998年,在霸县凹陷信安镇地区,利用高精度重、磁、电资料和三维地震资料联合解释,发现了埋深达4743.5m的苏49潜山凝析气藏(图1),试油获日产原油50.1t、天然气 $16.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,使沉寂了多年的深潜山勘探重新焕发了生机活力。借鉴苏49潜山勘探的成功经验,1998—2002年在牛东地区(当时称为兴隆宫地区)重新部署了1:5万高精度重、磁勘探,面积343.25 km<sup>2</sup>,同时还配合完成了3条41km的连续电磁阵列CEMP剖面,1条23.4km的宽线二维地震剖面等。新一轮的勘探研究表明,牛东地区确实有潜山圈闭存在的可能性,但由于该区靠近牛驼镇凸起,重力场、电磁力场和地震波

场受凸起的屏蔽或干扰严重,而且潜山深度又远远超过苏49潜山,因此出现了埋深5500~6500m的断阶山解释方案(在此称为“深方案”)和埋深4500~5000m的断阶山解释方案(在此称为“浅方案”)两种解释方案,且争议较大,给勘探决策带来了较大困难。

为进一步落实潜山圈闭,2002年针对该区的三维地震空白区部署采集了87.6 km<sup>2</sup>的常规三维地震资料,并与周边已有老三维地震资料进行连片处理,形成了完全覆盖潜山可能发育区的520 km<sup>2</sup>连片三维地震资料。资料处理的重点突出深层反射,利用新的连片资料开展解释,认识到“深方案”断阶山的可能性较大,但同时也认识到“深方案”的潜山是被沙四段—孔店组的地层所覆盖。作为断陷早期形成的一套沉积,沙四段—孔店组烃源层在冀中坳陷全区总体上质量较差,且分布不稳定,霸县凹陷周边已揭示的该套地层多为红层或红黑间互,为差烃源层到非烃源层,这又直接导致了该区“深方案”潜山的油气源条件的不确定性,加之“深方案”潜山的钻探投资巨大,使得钻探工作又再次搁浅。

## 2.3 重燃希望

2000年以来,华北探区地层-岩性油气藏勘探取得重大突破,先后发现了大王庄、留西、巴音都兰等一系列地层-岩性油藏,开辟了油气勘探的新局面<sup>[5-10]</sup>。此时,通过积极落实霸县凹陷的地层-岩性圈闭,2005年在霸县凹陷牛东地区以沙三段地层-岩性圈闭为钻探目标,部署了风险探井兴隆1井(位置见图2、图3)。当兴隆1井钻达4780m完钻时,鉴于该井

未钻遇设计时认为存在的膏盐岩层,钻井工艺、套管程序得到简化,从而得以加深钻探了当时认为可能存在的“浅方案”潜山。钻探结果证实“浅方案”的潜山并不存在,但是该井却发现了沙四段—孔店组巨厚的中等—好烃源岩(图4)。兴隆1井钻遇的沙四段—孔店组厚1071m(未穿,据地震资料,推测厚度可达2500m),全部为湖相地层,暗色泥岩及碳质泥岩厚

574m,有机碳平均为2.05%,生烃潜量为3.74mg/g,氯仿沥青“A”为0.1389%,有机质类型属较好的Ⅱ<sub>2</sub>型,已进入成熟—高成熟阶段。兴隆1井的钻探改变了以往人们认为深层可能缺乏油气源的认识,确立了沙四段—孔店组可作为深层主力烃源岩的地位,证实了霸县凹陷深层油气资源十分丰富,从而给该区的超深潜山勘探重新带来了希望。

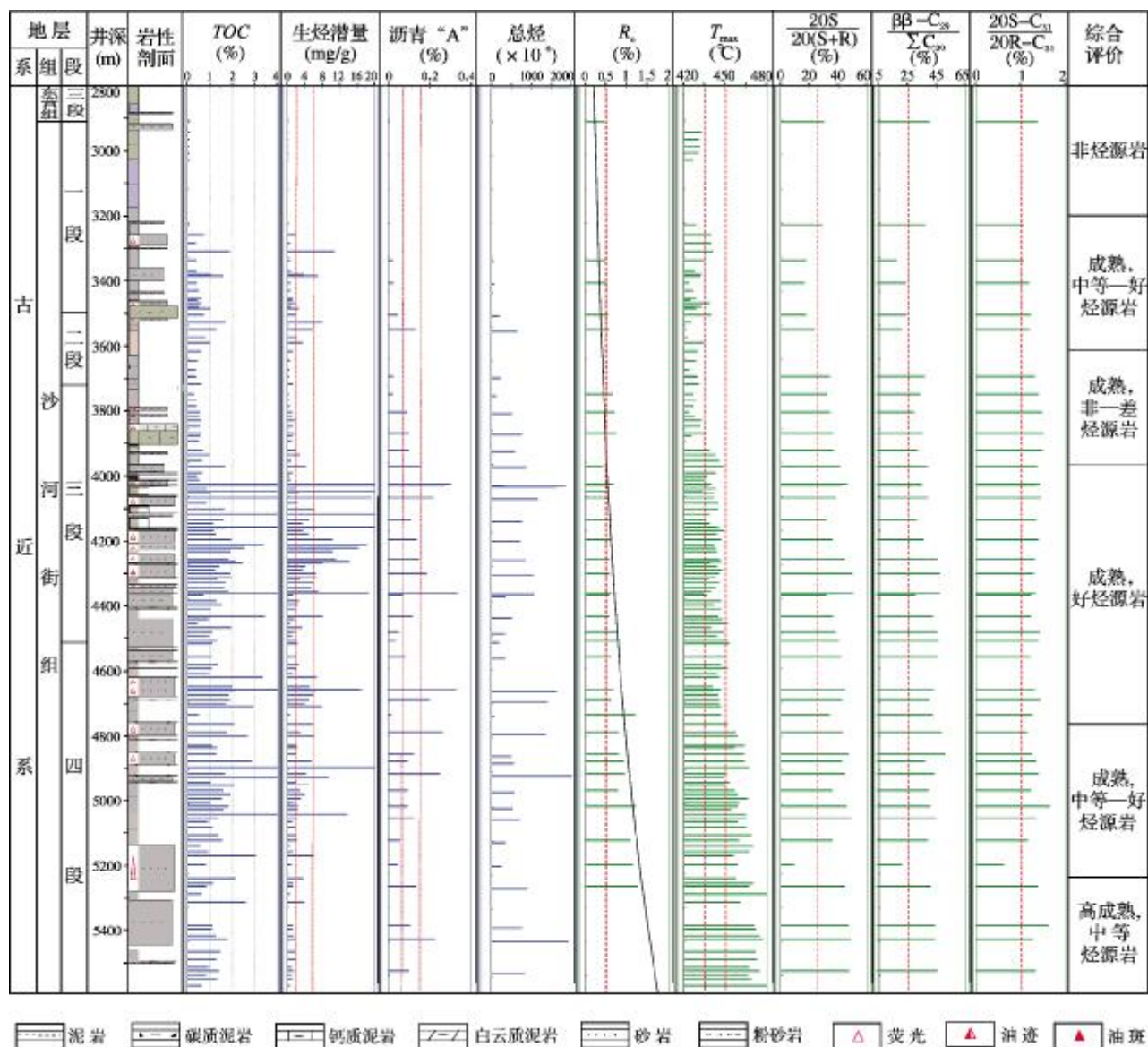


图4 霸县凹陷牛东地区兴隆1井烃源岩综合评价图

## 2.4 重大突破

2006年以来,冀中拗陷针对一些富油凹陷大力实施了以高精度二次三维地震勘探为标志的精细二

次勘探工程,并确定了包括深潜山及潜山内幕为重点领域的勘探战略<sup>[11-13]</sup>。通过高精度二次三维地震资料采集和大规模连片资料处理,大力开展精细地层对比、精细构造解释、精细储层评价、精细油源分



析和创新成藏模式的“四精细一创新”研究,提出了“古储古堵”、“红盖侧运”、“坡腹层状”、“大山—峰聚”等一系列隐蔽型深潜山及潜山内幕成藏新模式,发现了长洋淀、肃宁、文安、孙虎等一批高产的隐蔽型潜山油气藏<sup>[14-17]</sup>。这些隐蔽潜山油气藏的勘探发现,不仅取得了油气成藏的地质新认识,更极大地鼓舞了继续向超深隐蔽潜山油气藏进军的信心。

2009年在牛东地区重新部署实施了满覆盖(面积218 km<sup>2</sup>)高精度二次三维地震资料采集,并对牛东潜山目标区进行了125 km<sup>2</sup>的叠前深度偏移处理。新采集和处理的数据品质得到大幅提高,牛东深潜山反射波组特征清晰,不再存在多解性,并呈现断阶山结构。通过地震资料的精细构造解释,落实了牛东潜山构造带由三个断阶型潜山组成,总面积58 km<sup>2</sup>,规模较大(图2)。其中岔71潜山头埋藏相对最浅,高点-5 640 m(图2),与高精度重磁力勘探提示的潜山高点位置及埋深基本一致(图5),综合评价该潜山具有早隆早埋早稳定的特征,被沙四段—孔店组优质烃源岩直接覆盖,油气源及保存条件有利,据此部署的风险探井牛东1井,最终取得了重大突破。

### 3 关键勘探技术

牛东1超深隐蔽潜山油气藏的发现,是解放思想、创新认识、锲而不舍、坚持勘探的结果,也是勘探技术不断进步的结果。在牛东1油气藏的发现过程中,多项勘探技术都发挥了重要作用,其中高精度重磁力勘探技术为超深潜山的发现提供了重要线索,高精度二次三维地震勘探技术为超深潜山的圈闭准确落实发挥了关键作用,抗高温深度体积酸压改造技术为超深超高温潜山试油获得高产提供了强有力的保障。

#### 3.1 高精度重力、磁力勘探发现了重要线索

重力、磁力勘探一般是盆地早期勘探阶段的主要手段,它对于划分盆地单元和凹陷轮廓、发现较明显的潜山地质体作用明显。随着勘探程度的加深,精度较低的重磁力勘探对于继续发现埋藏深度大、隐蔽性强的潜山圈闭,难度越来越大,准确性也很低。然而,随着高精度重磁力勘探技术的发展,重磁力又在超深隐蔽型潜山的勘探中发挥出了重要作用<sup>[18-20]</sup>。

#### 3.1.1 早期重力勘探发现了异常,但精度低、误差大

早在1978年完成的冀中坳陷1:10万重力勘探,就发现了牛东地区剩余重力异常高(图5a),与其南部相邻的、已钻探证实埋深为4 500 m的郑州潜山对比,两者剩余重力异常值均为0 mGal,据此推断牛东地区也应存在潜山,并与郑州潜山埋深相当。之后结合二维地震勘探资料,围绕该剩余重力异常高,先后以3 600 m和4 800 m的潜山顶面设计钻探了家4、家6和新家4三口探井,结果前两口井都因工程事故未钻达设计井深,而新家4井虽钻至5 109.84 m完钻,但仍未钻到潜山。

勘探实践表明,早期重力勘探虽然发现了异常,但因精度低,加之二维地震勘探的深层反射资料品质差,对潜山的平面位置和埋藏深度预测误差较大,因而导致了该区潜山勘探的失败。

#### 3.1.2 高精度重磁力勘探准确提示了深潜山位置和深度

牛东潜山为超深埋潜山,潜山本身引起的重力、磁力异常十分微弱,而且它又紧邻牛驼镇凸起,重力、磁力的背景场为变化强烈的梯级带,场的背景复杂,有效信号的分离难度大。随着技术的进步,2000年在牛东地区重新部署的1:5万高精度重磁力勘探,较为准确地提示了牛东超深潜山的高点位置和深度。

本次高精度测量的基本网距为500 m×250 m,精测剖面点距125 m。全区测点点位精度±0.15 m,高程精度±0.08 m。布格重力异常实测总精度为±0.027 mGal。磁测测点与重力测点同位,磁异常总精度实际为±2.0 nT。

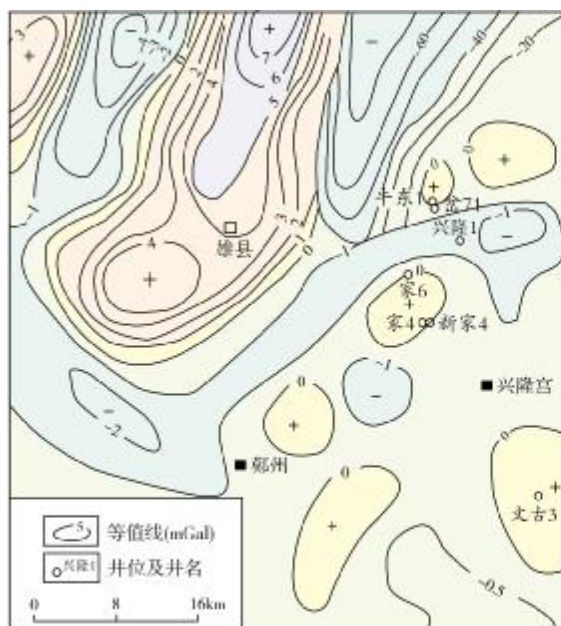
在重磁力资料的处理过程中,为消除测区受牛驼镇凸起梯级带所引起的边界效应,利用测区外围老资料进行了扩充,扩充范围10 km,并为了数据规则化处理,将实测点位规则化为250 m×250 m的网格。同时,针对测区属于勘探老区的特点,充分利用测区及其周边已知的地质结构、岩石物性特征等条件进行约束,实现了高精度、高准确度重磁力异常场的分离处理,减少了多解性。

测区布格重力异常等值线总体呈近南北走向,由工区西部的-10 mGal逐步降低至东北角的-32.6 mGal,即宏观上表现为由西向东的单边下降趋势。通过剩余重力异常分离,圈出了4个局部剩余重力异常高

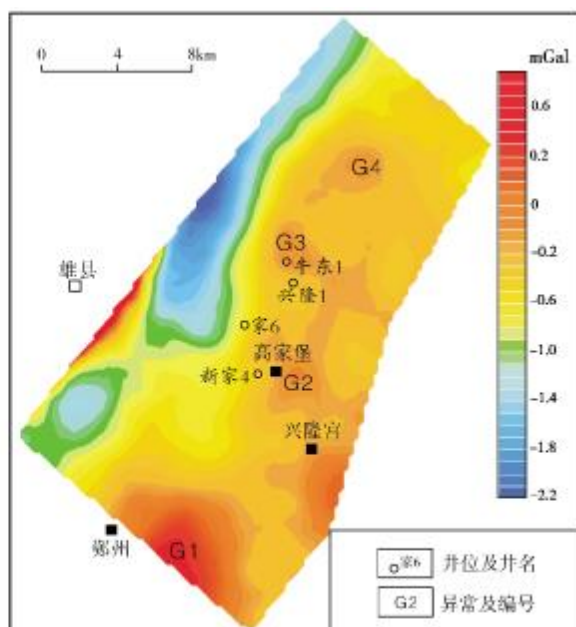
(图 5b)。其中,处于测区南部边界附近的 G1 剩余重力异常高,面积  $16 \text{ km}^2$ ,强度  $0.65 \text{ mGal}$ ,为已知埋深  $4500 \text{ m}$  的郑州潜山的反映;测区中—北部的 G2、G3、G4 剩余重力异常高呈北东走向带状分布,面积分别为  $10\sim 14 \text{ km}^2$ ,异常强度均在  $0.2 \text{ mGal}$  左右,较已知的郑州潜山异常面积小、强度弱。这一方面预示

着潜山是存在的,但另一方面也预示着潜山的深度可能较大。

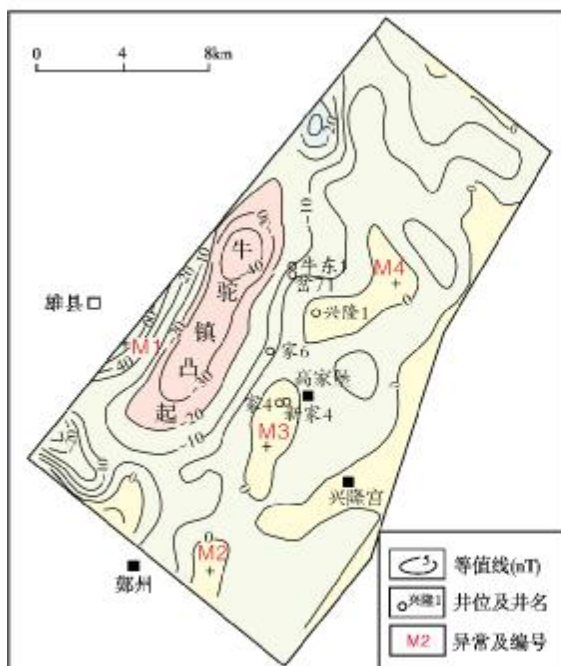
测区地磁  $\Delta T$  化极剩余异常(图 5c)除牛驼镇凸起的异常值较高外,牛东地区总体磁异常强度较弱,仅为  $10 \text{ nT}$  左右,这说明该区没有大的火山岩体,而且磁异常的位置、走向、范围及形态与剩



(a) 1:10万剩余重力异常图(1978年)



(b) 1:5万剩余重力异常图(2000年)



(c) 磁力  $\Delta T$  化极剩余异常图(2000年)



(d) 重力反演潜山顶面构造图(2000年)

图 5 霸县凹陷牛东地区重力、磁力勘探成果图



余重力异常均有相似之处,这不是一种偶然现象,而是重力、磁力异常均是由基底抬升(潜山)所引起的结果,两者具有一致性,则进一步表明了潜山的存在。

此时,同样地利用勘探老区已有地质资料丰富、对地质结构和岩石物性等特征认识程度相对较高的优势,进一步开展了密度、磁性界面的剥皮法三维拟合和剖面的重磁力正反演计算,验证了所有重力异常高均是由基底潜山构造所引起,并预测了潜山高点位于牛东 1 井处,深度为 5 700 m(图 5d)。这一结论与后期利用高精度二次三维地震所落实的牛东潜山高点位置十分一致,与牛东 1 井钻遇潜山的深度 5 639 m 也十分接近。

尽管在重磁力资料的处理解释中还有着另外一种后被勘探证实是错误的解释方案(“浅方案”),并一度出现两种解释方案的争论。但最终勘探实践表明,在复杂的重力场区、磁力场区(如紧邻大型凸起的梯级变化带),借力于老区已知地质条件的帮助,高精度的重磁力勘探同样能够为超深潜山圈闭的发现提供可靠线索,这一点对于老区超深潜山圈闭的发现具有十分重要的作用。

### 3.2 高精度二次三维地震实现了深潜山圈闭准确落实

牛东潜山带地震资料采集面临三大技术难题:一是埋藏深,牛东潜山带最大埋深超过 7 000 m,深层反射的吸收衰减严重,吸收衰减量达 85%以上,潜山的地震反射能量十分微弱;二是紧邻牛驼镇凸起,地震反射波场受干扰和屏蔽严重;三是牛东潜山上覆古近系中的断层十分发育,断块破碎,也使得潜山地震反射波场变得异常复杂。正是由于存在着这些技术难题,因此该区先后完成的常规二维地震勘探、宽线二维地震勘探以及常规三维地震勘探,均未能准确落实潜山的形态,潜山圈闭的落实始终存在着多解性,并由此导致了多口潜山井的勘探失利。随着高精度三维地震勘探技术的进步<sup>[21]</sup>,实施了高精度二次三维地震勘探,才最终实现了牛东 1 超深隐蔽潜山圈闭的准确落实,为上钻提供了可靠依据。

#### 3.2.1 常规二维地震勘探

20 世纪 80 年代,牛东地区完成了 1 km×1 km

测网的常规二维地震勘探。当时资料采集的观测系统是 25 m 线元、30 次覆盖、3 000 m 排列长度,深层的反射能量弱,波组特征不清。2000 年采用叠前双角时间偏移处理技术对资料进行了重新处理,结果由于资料的先天不足,处理效果依然不好,深层潜山落实不清。

#### 3.2.2 常规三维地震勘探

上世纪 90 年代到本世纪初,在牛东地区开展了常规三维地震勘探,野外采集采用 25 m×50 m 面元,20~24 次覆盖,3 200 m 最大炮检距,横纵比 0.2 窄方位观测,24 m 固定井深激发,48 m 大组合基距接收。在资料处理方面,采用球面扩散补偿、地表一致性预测反褶积、DMO、一步法叠后时间偏移等,结果还是深层反射能量弱,深层潜山圈闭无法落实。

#### 3.2.3 宽线二维地震勘探

2004 年,在该区进行了以深层潜山为目的层的 3 条宽线二维地震勘探。资料采集采用 10 m 线元、140 次覆盖、7 000 m 最大炮检距、2 线 1 炮。资料处理采用了各向异性偏移、叠前深度偏移等技术,同时为了压制干扰、增强有效信号,还开展了“面元叠加”方法试验,形成了多种不同覆盖次数的地震剖面。宽线二维地震勘探成果剖面的深层反射能量得到了一定程度的加强,波组对比解释基本可以确定该区有潜山的存在,但潜山反射信噪比较低,画弧干扰严重,波组特征不清晰,成像质量较差,潜山圈闭仍难以准确落实。

#### 3.2.4 高精度二次三维地震勘探

2008 年,在该区进行了高精度二次三维地震勘探。针对潜山埋藏深、高频信息吸收和衰减严重的难点,应用了“高覆盖宽方位均匀观测—拓展低频激发—宽档接收”技术,资料采集采用了“小面元(20 m×20 m)、高覆盖(96 次)、较宽方位横纵比(0.6)、高密度炮道(89 炮/km<sup>2</sup>和 10 000 道/km<sup>2</sup>)”的观测系统,并采取可增强低频信号的潜水面下 9 m、井深 15~30 m 的深井激发和 6~8 kg 的大药量激发技术,以及 1 口/km<sup>2</sup>微测井的高密度表层结构调查等方法。与常规三维地震勘探相比,高精度二次三维地震勘探增强了波的下传能力,提高了深层反射能量,深层的反射信号强度和信噪比得到了较大程度的提高(图 6)。

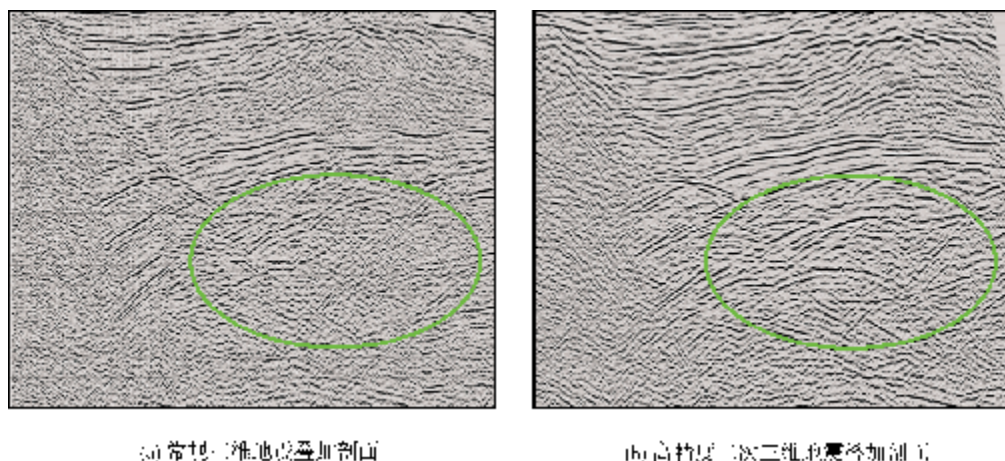


图6 霸县凹陷过牛东1井地震勘探效果对比图

在此基础上,资料处理采用了综合静校正、叠前精细系列去噪、地表一致性振幅补偿、串联反褶积、叠前能量调整、精细速度分析、各向异性叠前时间偏移等技术,资料品质较常规三维地震有大幅度的提高,深层能量强,牛东断裂的断面、基底波组特征得到了改善。随后对目标区进一步开展叠前深度偏移处理,处理中通过层位精细解释和测井速度控制准确构建层速度模型,并形成层速度随深度合理梯度变化的函数,采用克希霍夫叠前深度偏移算法进行偏移归位。处理的结果是:深潜山反射波组特征明显、断阶结构清晰,潜山的构造形态具有了唯一性(图7),从而准确落实了牛东潜山带的圈闭特征。

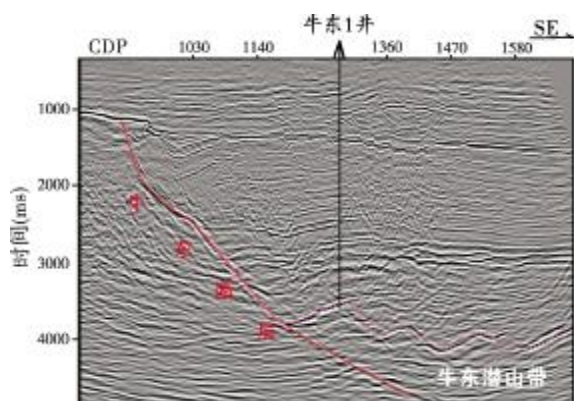


图7 霸县凹陷过牛东1潜山高精度三次三维地震  
叠前深度偏移处理成果剖面(In540)  
地震剖面位置见图2

### 3.3 抗高温深度体积酸压改造实现了高产

对于中高温碳酸盐岩储层的酸压改造,国内外

已经形成了一系列以盐酸为反应酸的稠化酸、胶凝酸、乳化酸、活性酸和变黏酸等酸液体系及配套酸压工艺<sup>[22-23]</sup>。牛东1井井底深度6027m,折算温度达到201℃,属于超深、超高温。如此深度和温度下的潜山地层酸化压裂改造,难度和风险极大,以往鲜有成功的实例。超深井的施工压力高,安全风险大;超高温会导致酸-岩反应过快,穿透能力变弱,改造作用距离缩短。因此,选择合适的施工工艺和酸化压裂液体系,确保施工顺利安全,抑制酸-岩反应速度,增大酸液穿透作用距离,是保障酸化压裂成功和取得良好效果的关键。

#### 3.3.1 抗高温、耐腐蚀、造长缝的深度改造液体系

牛东1井潜山地层温度高,酸-岩反应速度快,要达到造长缝深度改造的目的,包括压裂液、主体酸、闭合酸的改造液体系选择必须满足两方面要求:一是在酸压过程中要能够有效降低地层温度、抑制酸-岩反应速度;二是要具有抗温保黏、减少滤失、增强穿透的能力。

压裂液的选择一般可采用速溶瓜胶、特级瓜胶或羧甲基瓜胶三种。通过压裂液耐温耐剪切试验和不同用量的降温效果模拟,速溶瓜胶压裂液用量大于250m<sup>3</sup>时即可基本达到地层的最大降温效果,并在150℃温度下剪切2h仍能保持100mPa·s以上的黏度,适合于牛东1井压裂减少滤失、增强穿透、造长缝的目的要求。

主体酸采用了“15%HCl+5%VES-T+4.5%缓蚀剂+2%铁离子稳定剂”配方。通过盐酸浓度分别为



20%、15%、10%、5%配方的主体酸液与岩屑反应后的黏度、耐温性测试,盐酸浓度15%配方的主体酸液黏度保持率最高,且当与地层反应残酸浓度降低到5%时,主体酸液黏度发生转向而由低升高,最高可达70 mPa·s。酸液黏度的升高有利于减少酸液滤失和沟通更多更远的裂缝。

闭合酸采用了“20%HCl+4.5%缓蚀剂+2%铁离子稳定剂”的配方。该配方具有较高的有效酸蚀导流能力,通过岩心酸蚀实验,其酸化深度比常规酸化增加50~200倍。

### 3.3.2 深度体积酸压改造工艺

以酸蚀裂缝规模为划分标准,酸压技术可分为普通酸压和深度酸压两大类<sup>[24]</sup>。国内外针对中高温储层在提高酸蚀深度上多采用高黏度前置液降温探缝、多级注入提高裂缝导流能力的酸压技术。牛东1井针对超深、超高温以及近井地带裂缝欠发育的特点,探索了深度体积酸压改造新工艺——“前置探缝、固液转向、四级注入、闭合酸化”。

**前置探缝** 利用260 m<sup>3</sup>的高黏压裂液,降低缝壁温度,减少酸液滤失,压开储层,形成一定长尺寸的较宽的裂缝,最大限度地提高酸液的有效作用距离。

**固液转向** 利用支撑剂和酸液反应后黏度自升高的特点,对前置探缝沟通到的微细裂缝封堵,实现酸液转向,沟通更远的裂缝,达到沟通裂缝体积最大化的目的。

**四级注入** 将压裂液与酸液分四次交替注入,一级注入压裂液260 m<sup>3</sup>、酸液150 m<sup>3</sup>,二级注入压裂液180 m<sup>3</sup>、酸液113 m<sup>3</sup>,三级注入压裂液30 m<sup>3</sup>、酸液100 m<sup>3</sup>,四级注入压裂液197 m<sup>3</sup>、酸液113 m<sup>3</sup>。通过四级注入方式,提高压裂液与酸液综合作用效果及距离,进一步实现提高沟通体积的目的。

**闭合酸化** 用20%的高浓度盐酸酸液80 m<sup>3</sup>最后注入地层,提高近井酸蚀裂缝的导流能力。全井共注入液体1461 m<sup>3</sup>,其中压裂液763 m<sup>3</sup>、酸液618 m<sup>3</sup>,加砂5 m<sup>3</sup>。

另外,牛东1井为五开井身结构,目的层深度大且为裸眼段,因此优化管柱结构、提高施工排量也是一个决定成败的关键环节。通过套管抗内压、抗挤压强度分析和模拟管柱不同下入深度施工排量和井口压力的变化情况,牛东1井优选采用了3½ in的

P110 油管下深4200 m、安全系数1.43的施工方,施工压力27~81.5 MPa,施工排量2.8~6.0 m<sup>3</sup>/min,成功实现了大排量、带封隔器7 h连续酸压施工及13d的测试求产,整个作业安全顺利。

## 4 结 论

(1) 在大型凸起重磁力场梯级变化带上,借助于勘探老区已知地质条件的约束,高精度重力、磁力勘探仍然能够为超深潜山圈闭的发现提供可靠线索。

(2) 运用“高覆盖宽方位均匀观测—拓展低频激发—宽档接收”的高精度二次三维地震采集,并充分利用老区资料丰富和中浅层速度已知的优势,开展精细速度建模的叠前深度偏移处理,是准确落实超深潜山圈闭的关键。

(3) 运用速溶瓜胶压裂液和转向酸液,采取“前置探缝、固液转向、四级注入、闭合酸化”施工工艺,有利于实现超高温、超深井碳酸盐岩储层的深度体积酸压改造和获得高产。

### 参 考 文 献

- [1] 赵贤正,金凤鸣,张以明,等. 富油凹陷隐蔽型潜山油气藏精细勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2010.
- [2] 费宝生,汪建红. 中国海相油气田勘探实例之三:渤海湾盆地任丘古潜山大油田的发现与勘探[J]. 海相油气地质,2005,10(3):43-50.
- [3] 王懋基,蔡鑫,涂承林. 中国重力勘探的发展与展望[J]. 地球物理学报,1997,40(增刊1):292-297.
- [4] 曾华霖. 石油重磁勘探的进展[J]. 石油地球物理勘探,1999,34(增刊1):115-123.
- [5] 金凤鸣,张锐锋,杨彩虹,等. 冀中坳陷饶阳凹陷大王庄断层下降盘岩性油藏勘探[J]. 中国石油勘探,2004,9(3):58-61.
- [6] 金凤鸣,张锐锋,田建章,等. 冀中坳陷饶阳凹陷留西沙三段岩性油藏勘探思路[J]. 中国石油勘探,2004,9(3):62-66.
- [7] 杜金虎,易士威,雷怀玉,等. 二连盆地岩性地层油藏形成条件与油气分布规律[J]. 中国石油勘探,2004,9(3):1-5.
- [8] 王权,赵贤正,金凤鸣,等. 陆相盆地断陷洼槽区典型油藏成藏模式——以冀中坳陷和二连盆地为例[J]. 中国石油勘探,2008,13(2):9-12.
- [9] 赵贤正,卢学军,王权. 华北油田地层-岩性油藏勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质,2007,28(5):597-604.
- [10] 金凤鸣,赵贤正,王权,等. 饶阳凹陷地层岩性油气藏的形成与勘探[C]//世界石油工业编辑部. 中国油气论坛——油气勘探新领域与新技术专题论文. 2008:97-103.
- [11] 赵贤正,吴兆徽,闫宝义. 冀中坳陷潜山内幕油气藏类型与分布规律[J]. 新疆石油地质,2010,31(1):4-6.
- [12] 赵贤正,卢学军,王权. 富油凹陷的二次勘探[J]. 中国石

- 油勘探, 2010, 15(2): 1-7.
- [13] 赵文智, 邹才能, 汪泽成, 等. 富油气凹陷“满凹含油”论——内涵与意义[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 5-13.
- [14] 赵贤正, 张以明, 唐传章, 等. 高精度三维地震采集处理解释一体化勘探技术与管理[J]. 中国石油勘探, 2008, 13(2): 74-82.
- [15] 赵贤正, 金凤鸣, 王余泉, 等. 冀中坳陷长洋淀地区“古储古堵”潜山成藏模式[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 489-498.
- [16] 赵贤正, 金凤鸣, 赵志刚, 等. 二连盆地基底石炭系碳酸盐岩油藏的发现及地质特征[J]. 海相油气地质, 2008, 13(4): 12-18.
- [17] 田世峰, 查明, 吴孔友, 等. 饶阳凹陷潜山油气分布特征及富集规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 143-150.
- [18] 陈海云, 林春明, 阎汉杰, 等. 重力资料在济阳坳陷石油勘探中的应用[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 46-51.
- [19] 冀连胜, 史付生. 重、磁力方法在石油勘探中的应用效果[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(3): 326-333.
- [20] 马立驰. 济阳坳陷碳酸盐岩潜山油气藏勘探技术综述[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 44-47.
- [21] 邱毅, 魏振乾, 刘章造. 华北油田高精度三维地震采集技术[J]. 中国石油勘探, 2008, 13(2): 21-28.
- [22] 李爱山, 鞠玉芹, 孙秀芳, 等. 高温高粘胶凝酸体系合成及性能评价[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 90-93.
- [23] 陈志海. 深层碳酸盐岩储层酸压工艺技术现状与展望[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1): 58-62.
- [24] 刘合, 张劲, 张士诚. 多功能清洁酸性压裂液的设计[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 427-429.

编辑: 张跃平

## A Superdeep and Superhigh Temperature Carbonate Buried-hill Reservoir in Eastern China: Discovery and the Key Exploration Technology of Nudong-1 Buried-hill Oil and Gas Reservoir in Jizhong Depression, Bohaiwan Basin

Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Quan, Li Xu, Kang Rukun,  
Chang Jianhua, Yuan Shenghui

**Abstract:** A superdeep Middle Proterozoic Wumishan carbonate buried hill oil and gas reservoir, which is deep buried within Baxian Sag, Jizhong Depression, was discovered in Well ND-1 in January, 2011. The drilled depth reached to 6027m at the bottom of the Niudong-1 buried-hill reservoir where no oil/water interface was met and the temperature is at 201°C(about 394°F) at the well bottom. The acid-fracturing well test gave the high output rate of 642.9 m<sup>3</sup> oil and 563×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup> natural gas per day. It is the oil and gas reservoir with the greatest well depth, the highest output and the highest well-bottom temperature that has discovered up to now in Bohaiwan Basin, even in the eastern part of China. The exploration history for more than 30 years that has undergone from failure, through putting-aside and reviving to success is reviewed. Three key technology and their important actions playing in exploration are described. The first technology is the "high-precision gravimetric and magnetic survey" that supplied important clue for the discovery of the superdeep buried hill, the second one is the "secondary 3-D seismic survey" that achieved the accurate orientation for the buried hill trap, and the third one is the "high-T-resisting, deepening and voluminous acid-fracturing" that supplied the effective technology ensure for well testing to obtain high oil and gas output in the superdeep and superhigh T reservoir.

**Key words:** Middle Proterozoic; Carbonate reservoir; Buried-hill Reservoir; High temperature reservoir; Deep reservoir; Petroleum exploration; Exploration technique; Jidong Depression; Bohaiwan Basin

**Zhao Xianzhen:** male, Reseach Professor. Add: PetroChina Huabei Oilfield Compang, Renqiu, Hebei 062552, China