

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.02.001

准噶尔盆地阜康凹陷康探1井重大突破及意义

何海清¹ 支东明² 唐勇² 刘超威² 陈洪² 郭旭光² 王泽胜²

(1 中国石油勘探与生产分公司; 2 中国石油新疆油田公司)

摘要: 近期中国石油风险探井康探1井在二叠系两层连获百吨高产, 实现了准噶尔盆地阜康凹陷斜坡区岩性油气藏的重大突破。为评价阜康凹陷勘探前景, 基于康探1井钻探认识, 系统梳理和总结阜康凹陷大油区有利成藏条件, 指明下一步勘探方向。研究表明, 阜康凹陷发育石炭系和二叠系两套规模有效烃源岩; 受古地貌控制, 在斜坡区和凹陷区发育中、上二叠统两套规模储集体, 分布格局相似, 厚度大, 具备形成大型岩性地层油气藏的条件; 烃源岩演化与构造演化时空匹配, 晚期上倾方向封堵条件的形成造就了两期油气的差异聚集和有序分布, 凹陷区为晚期油气规模勘探领域。阜康凹陷坡下三大凹槽区是有利的勘探方向, 展现了斜坡区和凹陷区岩性油气藏规模勘探潜力。

关键词: 准噶尔盆地; 阜康凹陷; 二叠系; 重大突破; 成藏条件; 勘探潜力

中图分类号: TE122

文献标识码: A

A great discovery of Well Kangtan 1 in the Fukang Sag in the Junggar Basin and its significance

He Haiqing¹, Zhi Dongming², Tang Yong², Liu Chaowei², Chen Hong², Guo Xuguang², Wang Zesheng²

(1 PetroChina Exploration & Production Company; 2 PetroChina Xinjiang Oilfield Company)

Abstract: Recently, a major breakthrough has been achieved in lithologic reservoirs in the east slope of Fukang Sag from Well Kangtan 1, a risk exploration well of PetroChina, which obtained high yield oil flow of more than hundred tons from the Permian. In order to evaluate the exploration potential and targets in the Fukang Sag, favorable conditions for hydrocarbon accumulation were systematically discussed on the basis of the understandings from Well Kangtan 1. The results show that two sets of large-scale source rocks of Permian and Carboniferous are developed in the Fukang Sag, promising a favorable source potential. Controlled by the paleo-geomorphology, two sets of thick reservoirs of Middle and Upper Permian are developed in the east slope and sag areas with similar distribution pattern, which provide favorable conditions for the formation of lithologic-stratigraphic reservoirs. The spatial and temporal matching relation of source rock thermal evolution and tectonic evolution, and the late sealing conditions in the updip direction result in the differential accumulation and orderly distribution of two-stage oil and gas reservoirs. The sag area is the main exploration field for late accumulation of oil and gas. The three sub-sags in the slope are favorable exploration targets in the Fukang Sag, which show great potential of large-scale exploration of lithologic reservoir in slope and sag area.

Key words: Junggar Basin, Fukang Sag, Permian, major breakthrough, hydrocarbon accumulation condition, exploration potential

引用: 何海清, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷康探1井重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 1-11.

He Haiqing, Zhi Dongming, Tang Yong, *et al.* A great discovery of Well Kangtan 1 in the Fukang Sag in the Junggar Basin and its significance[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 1-11.

基金项目: 国家科技重大专项“准噶尔盆地岩性地层油气藏富集规律与目标评价”(2017ZX05001-004); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“准噶尔盆地油藏富集规律及勘探技术研究与应用”(2017E-04-01)。

第一作者简介: 何海清(1966-), 男, 甘肃临洮人, 博士, 1995年毕业于中国科学院, 教授级高级工程师, 现从事油气勘探研究及管理工作。地址: 北京市东城区东直门北大街9号石油大厦, 邮政编码: 100007。E-mail: hehq@petrochina.com.cn

通信作者简介: 刘超威(1990-), 男, 河南泌阳人, 硕士, 2015年毕业于西南石油大学, 工程师, 现从事油气综合地质研究工作。地址: 新疆克拉玛依市准噶尔路29号新疆油田公司勘探开发研究院, 邮政编码: 834000。E-mail: fclcw@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020-12-28; 修改日期: 2021-01-06

0 引言

近年来,随着油气勘探程度的增高和勘探技术的进步,油气勘探对象逐渐由构造油气藏向岩性油气藏、致密油气和页岩油气转变,非常规油气资源在油气勘探中的地位逐渐凸显^[1-4];为此,“近源勘探”^[5-7]“进源找油”^[8]逐渐成为当前油气勘探的重要方向,展现出近源区(凹陷区)是未来油气勘探的重要领域。

2012年至今,准噶尔盆地在近源区油气勘探成果斐然,玛湖^[9]及沙湾^[10]等富烃凹陷连获重大突破,开启了准噶尔盆地西部凹陷油气勘探发现的新高潮。准东地区大规模的油气勘探始于20世纪80年代,会战十年围绕阜康凹陷周缘的白家海凸起、北三台凸起以及阜康断裂带三大正向构造单元,先后发现了北三台、三台、甘河、彩南、沙南以及沙北油田。受前期阜康凹陷周缘二叠系为南北向物源、沉积砂体沿凸起带南北向展布认识的局限^[11],准东大油区发现后的近30年始终围绕阜康凹陷周缘凸起区精细勘探,虽然也发现了西地2、西泉1、西泉3及阜东5等多个油气藏和油气显示井,但油藏规模总体偏小;作为准噶尔盆地最大生烃凹陷的阜康凹陷^[12]周缘的油气勘探始终未能取得重大突破,准东地区油气勘探方向亟须转移。

借鉴其他富烃凹陷勘探成功经验,立足多块高分辨率三维地震资料,2015年以来,围绕阜康凹陷开展新一轮整体综合地质研究,认为阜康凹陷具备形成大油气区的有利条件,并于2019年7月部署风险探井——康探1井。2020年9月19日,康探1井在二叠系上乌尔禾组试油获日产油158m³、日产气11190m³,实现了阜康凹陷斜坡区二叠系油气勘探重大突破,开启了准东地区规模勘探的新篇章。解剖康探1井战略突破的意义,对未来阜康凹陷油气勘探具有重要的指导作用。

1 区域地质概况

准噶尔盆地是晚石炭世—第四纪沉积的复合型叠合盆地^[13-14]。晚石炭世—早二叠世,受海西挤压构造作用的影响,早期前陆盆地形成,同时在陆—陆碰撞过程中,造山带快速高隆并遭受剥蚀,为后期地层沉积提供充足的物源;中、晚二叠世,造山作用减弱,进入内陆盆地整体拗陷阶段,由于盆地的沉降,沉积范围逐渐增大,中、上二叠统向分割各拗陷的凸起区

超覆沉积,多期砂体叠置连片,广覆式分布;三叠纪至今为继承性统一拗陷形成的湖盆沉积^[15];总之,中、晚二叠世为断拗转换期,物源条件充足,可为凹陷区提供大量沉积碎屑,地层沉积厚度大,分布范围广。

阜康凹陷位于准噶尔盆地中央拗陷东南部,东邻北三台凸起,西接莫南凸起,南抵淮南山前冲断带,北至白家海凸起和莫索湾凸起(图1),其构造演化特征与周缘凸起带的形成和演化密切相关,向凸起带发育多期地层超覆,勘探面积约10000km²,勘探程度低,是“近源区”寻找规模油气储量的重要领域。

2 二叠系油气地质研究新进展

二叠系是准东地区的重要勘探层系,凸起区勘探程度高,斜坡区、凹陷区勘探认识程度低,是准东寻找规模油气区的重要勘探方向。但下凹勘探面临两大难题困扰:一是前期物源沉积体系研究认为,北三台凸起二叠系为南北向物源,沉积砂体主要沿凸起带南北向展布^[11],下斜坡区和凹陷区缺乏规模储集体;二是上斜坡区沙丘11、沙丘12、沙丘13以及沙丘14井二叠系砂岩致密,储层孔隙度明显降低(图2),凹陷区埋深更大,深层是否存在有效储层有待落实。

经过2015—2019年近5年持续攻关和研究,重新认识凹陷区资源潜力、重新梳理层序结构以及重新认识物源沉积体系,认为阜康凹陷斜坡区和凹陷区具备形成规模岩性地层油气藏的地质条件,是潜在的重大战略方向,并将风险勘探目标锁定在沙南油田下倾方向的阜中凹槽区(图3)。

(1) 重新认识资源潜力及已发现油藏分布,明确下凹勘探方向。阜康凹陷有效烃源岩面积约10000km²,四次资源评价阜康凹陷生烃量近千万吨^①,而目前阜康凹陷周缘凸起及断裂带勘探程度虽较高,但石油探明储量尚不足2×10⁸t,天然气探明储量仅54.2×10⁸m³。即使按照准噶尔盆地平均运聚系数2.47%^①计算,已落实储量规模与阜康凹陷上千万吨的生烃量也是极度不匹配的。此外,目前凸起区已发现油藏原油密度为0.843~0.894g/cm³,尚未发现高一过成熟阶段的轻质油气。相对于凸起区,阜康凹陷源、储匹配(高熟烃源岩与规模储层时空匹配),具备形成大油气区的关键成藏要素。为此明确提出,由源边凸起带勘探到近源凹陷区勘探是准东地区实现规模发现与跨越式发展的必然选择。

(2) 重新梳理上二叠统地震、地质资料,构建新

① 贾希玉、杨海波、黄芸等,准噶尔盆地第四次油气资源评价,内部报告,2015。

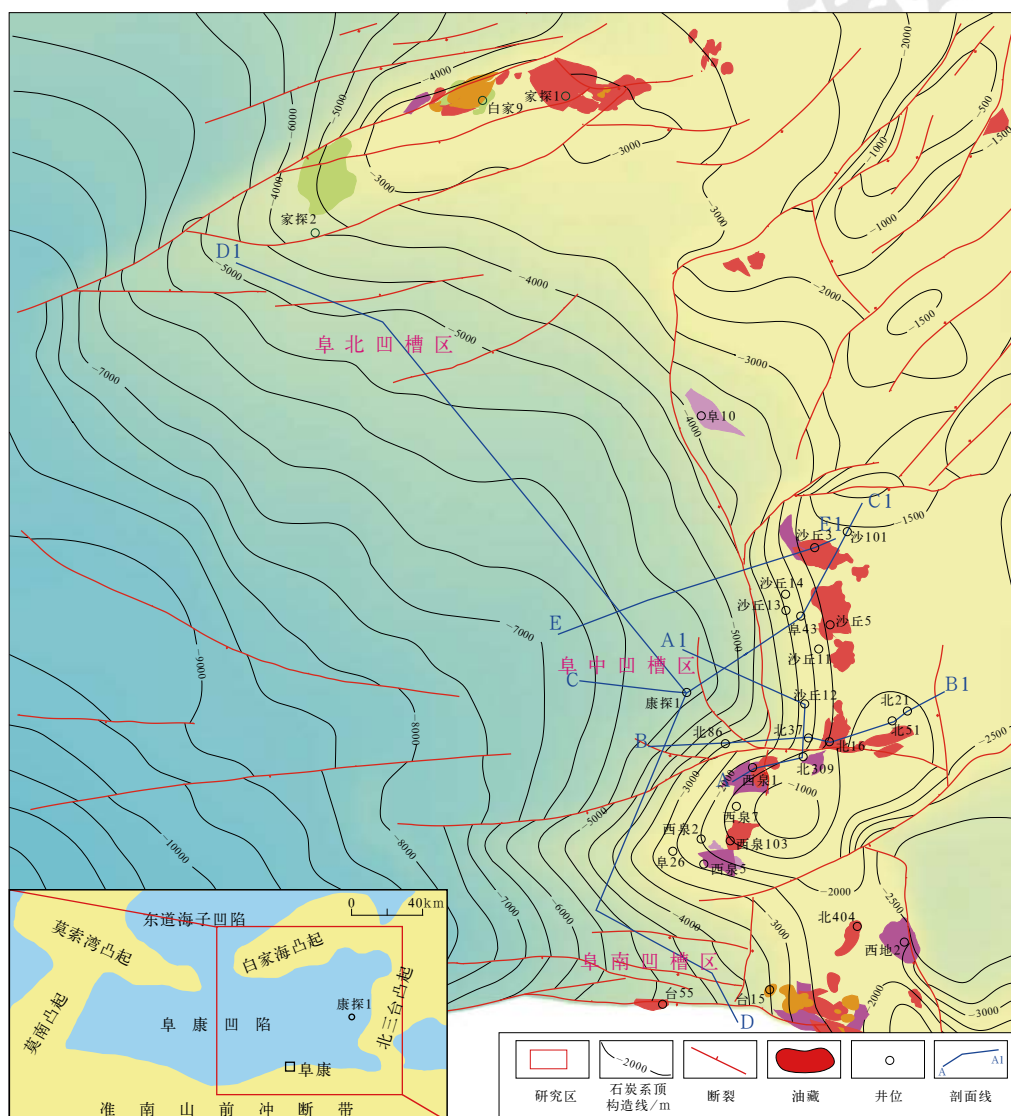


图1 准噶尔盆地阜康凹陷边缘勘探成果图

Fig.1 Exploration achievements around Fukang Sag in the Junggar Basin

的分层方案，明确上乌尔禾组一段发育在阜康凹陷斜坡区和凹陷区。基于地质露头、钻井及新部署的高分辨率三维地震资料，以层序观点重新梳理准东地区上二叠统，在以往地层二分结构（上乌尔禾组划分为一段和二段，一段以砂岩为主，二段以泥岩为主）（图4a）的基础上^[16]，构建了阜康凹陷上二叠统三分地层结构（上乌尔禾组划分为一段、二段和三段，一段为块状砾岩，二段为砂泥岩互层，三段以泥岩为主）（图4b），明确二叠系上乌尔禾组一段主要发育在阜康凹陷斜坡区和凹陷区，向凸起带超覆尖灭（图3）。

（3）重新认识阜康凹陷二叠系物源沉积体系，明确阜中凹槽存在东部物源。在层序地层新认识的基础上，结合古地貌和重矿物特征系统开展阜康凹陷二叠

系上乌尔禾组沉积体系再认识，突破前期凸起带沉积砂体南北向展布的认知^[11]，首次提出受北东向克拉美丽山物源、东部沙奇凸起物源以及南东向博格达山物源的影响，上乌尔禾组发育阜北扇、沙丘扇和双泉扇三大退积型扇体，坡下凹槽区发育低位体系域规模砂体（图5），向白家海凸起、沙丘次凸、西泉鼻隆超覆尖灭，坡下凹槽区是规模勘探的全新领域。

综合以上分析认为，阜康凹陷三面环凸，具备形成大型地层油气藏的背景；凹陷区三大凹槽紧邻生烃中心，源储配置关系良好，且发育上乌尔禾组一段低位体系域规模砂体，是近源勘探的突破口。在领域优选及目标精细刻画的基础上，优选阜康凹陷阜中凹槽区确定康探1井井位，作为风险目标实施钻探。

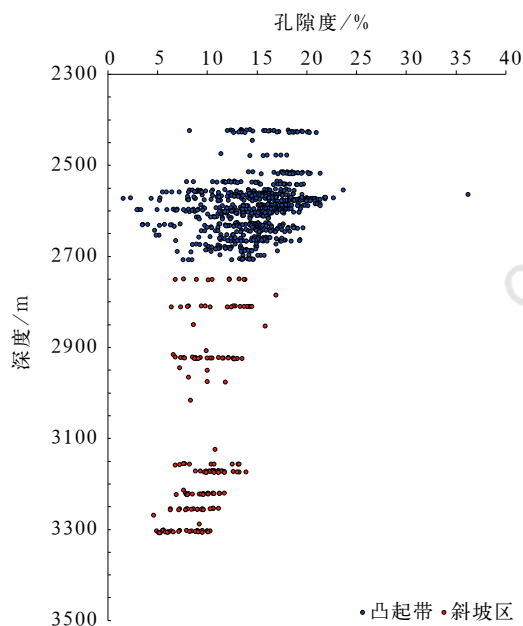


图2 储层孔隙度与埋深交会图

Fig.2 Crossplot of porosity and burial depth

3 康探1井重大突破及发现意义

按照退覆式沉积和大面积成藏的勘探思路部署的康探1井完钻井深5550m,完钻层位为石炭系巴山组,钻揭石炭系160m。钻探过程中,在二叠系钻遇多套规模储层,油气显示活跃,试油在中二叠统芦草沟组一段、上二叠统上乌尔禾组一段和二叠系相继获高产油气流(图6)。

康探1井中、上二叠统油气地球化学特征分析表明,二叠系芦草沟组原油碳同位素重、姥植比大,天然气乙烷碳同位素较重,油气来自石炭系煤系偏腐殖型烃源岩;上乌尔禾组原油碳同位素轻、姥植比小,天然气乙烷碳同位素较轻,油气来自二叠系芦草沟组湖相偏腐泥型烃源岩(图7);中、上二叠统均获重大突破进一步证实了阜康凹陷石炭系和二叠系两套烃源岩的供烃能力强,具备形成大油气田的资源基础。

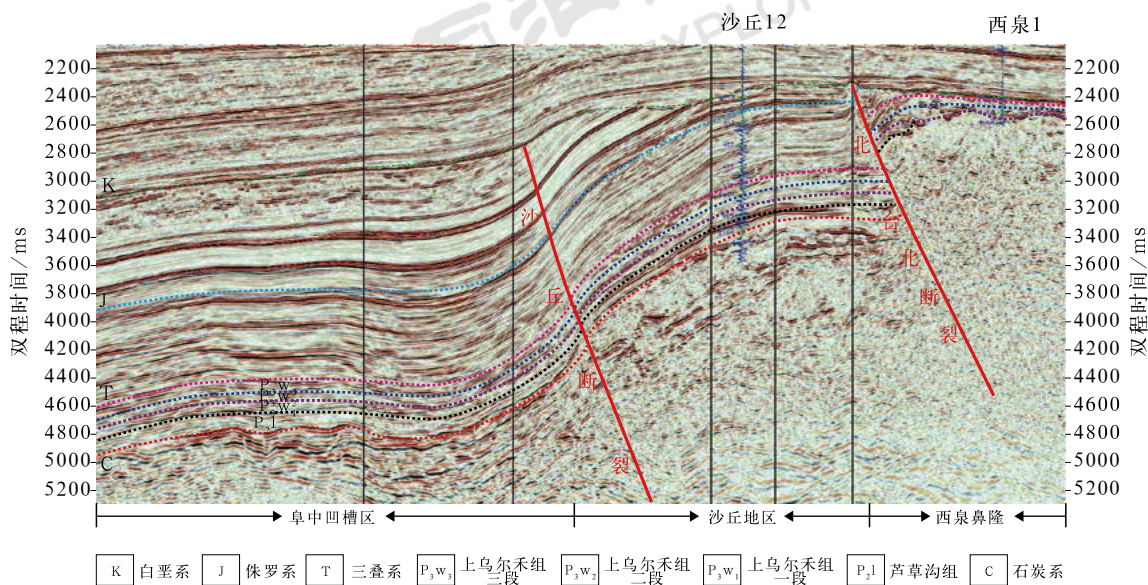


图3 过阜中凹槽—沙丘地区—西泉鼻隆地震剖面(剖面线A1—A见图1)

Fig.3 Seismic profile cross Fuzhong Sub-sag-Shaqiu-Xiquan nose (location of A1-A in Fig.1)

3.1 发育二叠系、石炭系两套有效烃源岩,奠定了阜康凹陷大面积成藏的资源基础

二叠系芦草沟组烃源岩是准东地区的主力烃源岩,分布范围广泛,沉积中心在南部的乌鲁木齐一带^[12],厚度为50~250m。阜康凹陷周缘已有多口井钻遇二叠系芦草沟组烃源岩,有机碳含量为0.65%~

6.72%,平均为2.16%;生烃潜量 S_1+S_2 为0.36~26.28mg/g,平均7.0mg/g,有机质类型主体为 II_1 — II_2 型,为一套中等—好的规模油源岩(图8);康探1井芦草沟组钻遇厚层灰黑色泥岩,与凸起区芦草沟组烃源岩相比,其烃源岩有机质丰度更高,类型更倾向于 II_1 型,推测阜康凹陷区芦草沟组烃源岩生烃潜力更大。

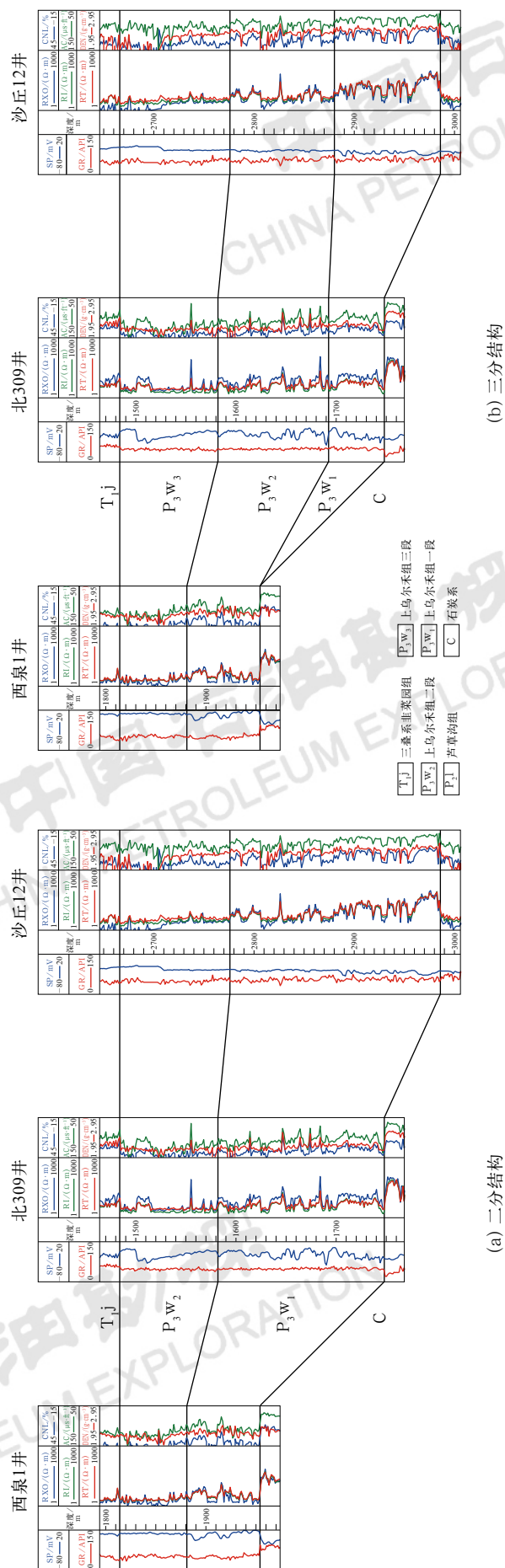


图 4 阜康凹陷周缘二叠系上乌尔禾组地层序列划分方案对比图 (剖面线 A—A1 见图 1)

Fig.4 Comparison of stratigraphic sequence division of Shangwuerhe Formation in the periphery of Fukang Sag (location A—A1 in Fig.1)

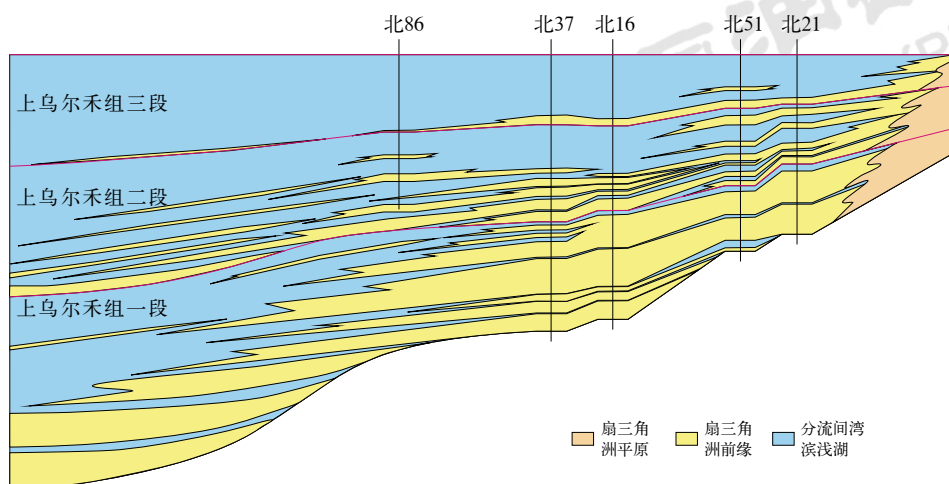


图5 阜康凹陷二叠系上乌尔禾组沉积模式图(剖面线B—B1见图1)

Fig.5 Deposition pattern of Shangwuerhe Formation around Fukang Sag (location B—B1 in Fig.1)

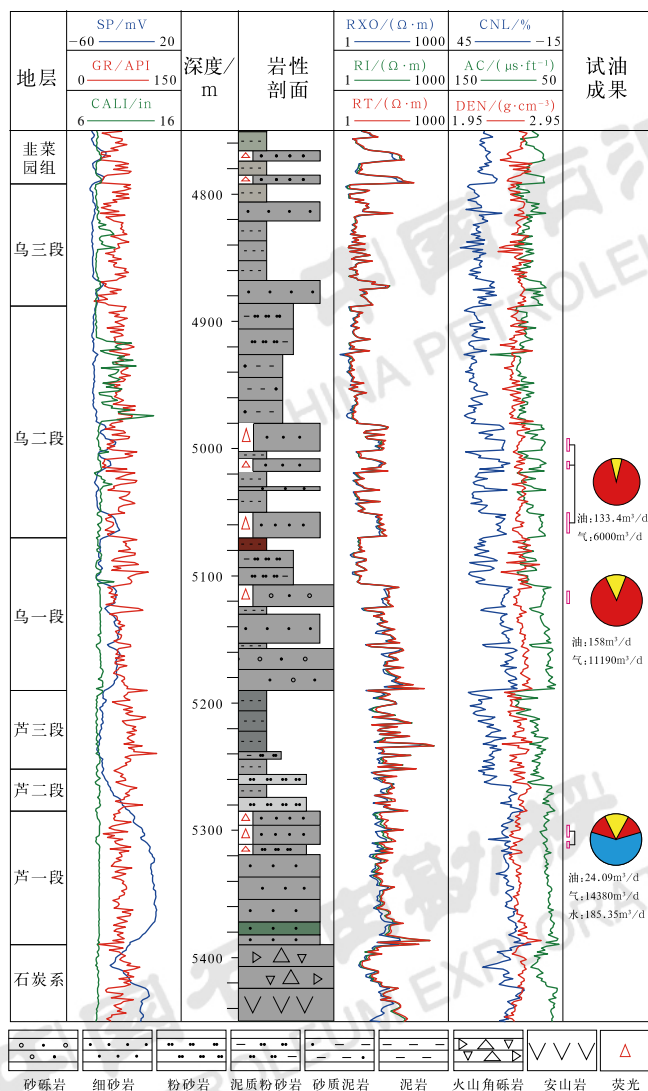


图6 康探1井二叠系综合柱状图

Fig.6 Comprehensive stratigraphic column of Permian in Well Kangtan 1

下石炭统松喀尔苏组也是准东地区一套重要的烃源岩层, 目前已在凹陷周缘多井多层见石炭系来源的天然气^[17-18]。康探1井钻揭石炭系浅, 但阜康凹陷周缘凸起带多口井钻遇石炭系烃源岩, 累计厚度为50~200m, 发育多个次级凹槽^[18-19], 岩性为煤系泥岩与碳质泥岩, 煤系泥岩有机碳含量为0.54%~5.83%, 平均2.12%, 生烃潜量 S_1+S_2 为0.21~20.30mg/g, 平均为2.83mg/g; 碳质泥岩有机碳含量为8.74%~28.32%, 平均为13.50%, 生烃潜量 S_1+S_2 为9.06~71.58mg/g, 平均为38.10mg/g; 有机质类型为 II_2 — III 型, 是一套丰度中等一好的规模气源岩(图9)。

3.2 二叠系发育两套厚层储集体, 储盖配置优越, 具备形成大油气区的基本条件

康探1井钻探证实, 阜康凹陷中、上二叠统下部均发育一套低位体系域砂砾岩储层, 厚度大, 上乌尔禾组一段砂体单层厚度为16~35m, 芦草沟组一段砂体单层厚度约100m, 且两套低位体系域沉积规模储集体紧邻(图6)。上乌尔禾组一段岩性为砂砾岩, 为扇三角洲前缘砂体, 储集空间以残余粒间孔和粒内溶孔为主(图10a), 储层中微裂缝发育(图10b), 孔喉间连通性较好; 芦草沟组一段岩性为砂岩和砂砾岩, 同样为扇三角洲前缘砂体, 受方解石胶结作用影响, 芦草沟组一段储层相对致密, 储集空间以粒内溶孔和粒间溶孔为主(图10c、d)。

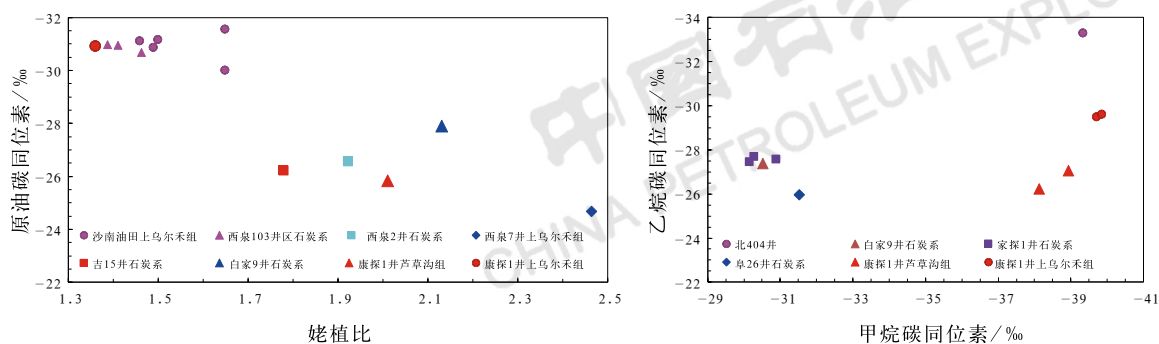


图7 康探1井中、上二叠统油气源分析

Fig.7 Analysis of oil and gas source in Well Kangtan1

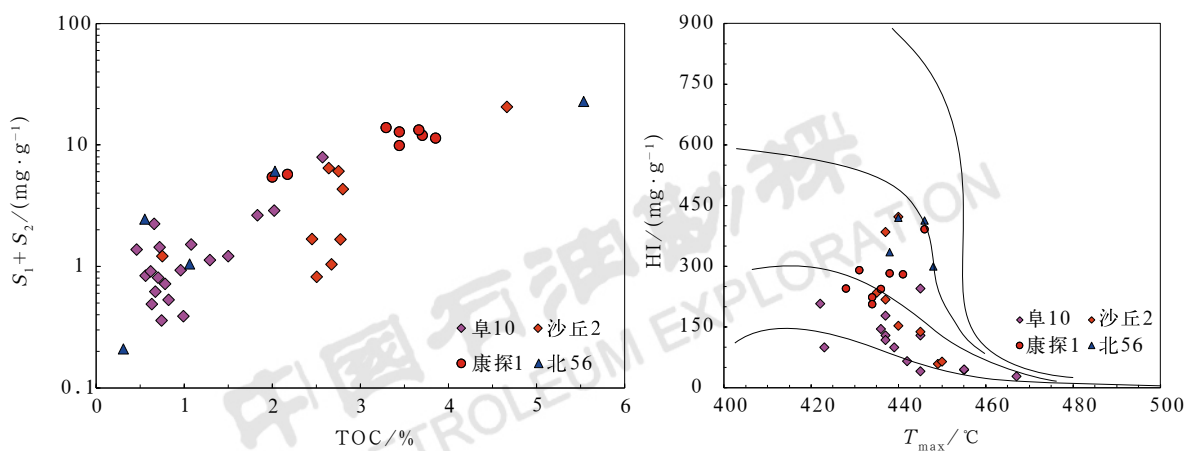


图8 阜康凹陷周缘二叠系芦草沟组烃源岩评价

Fig.8 Source rock characteristics of Lucaogou Formation around Fukang Sag

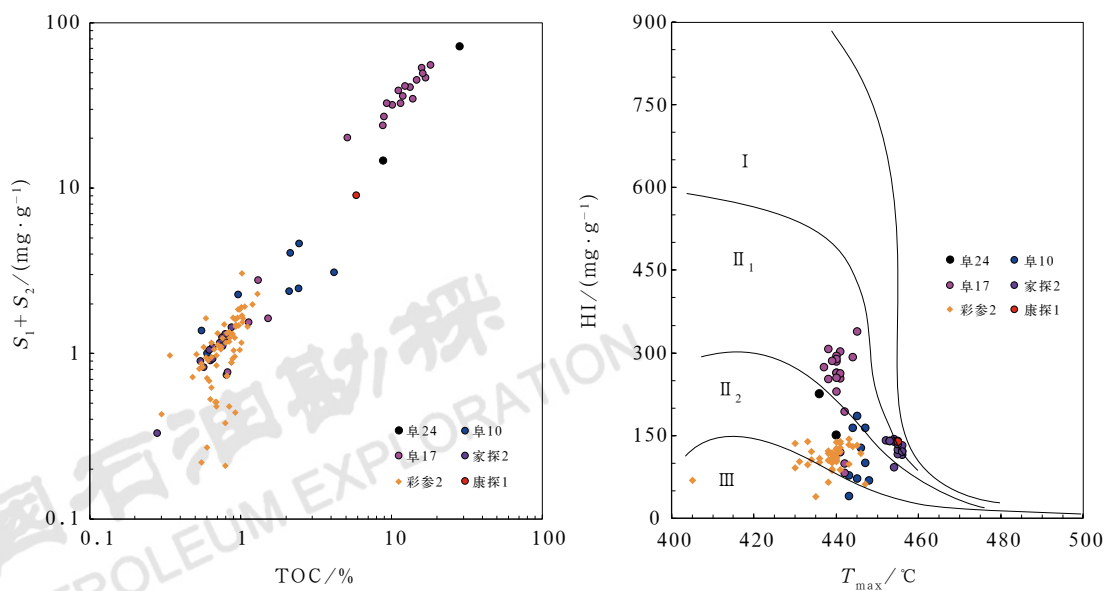


图9 阜康凹陷周缘石炭系松喀尔苏组烃源岩评价

Fig.9 Source rock characteristics of Songkaersu Formation around Fukang Sag

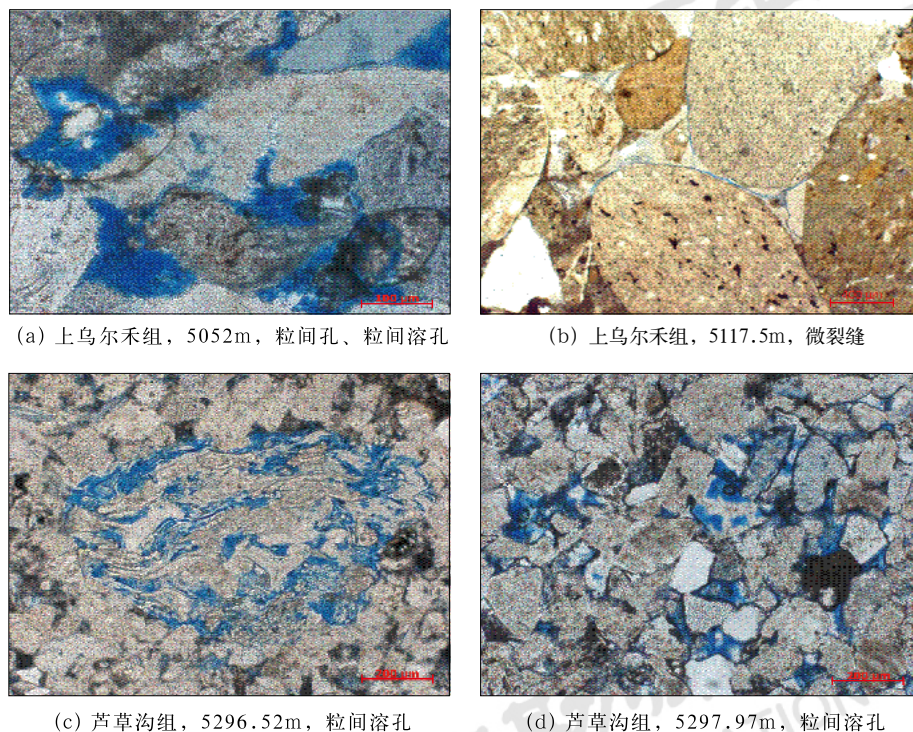


图10 康探1井中、上二叠统储层铸体薄片

Fig.10 Reservoir casting thin-section of Middle and Upper Permian in Well Kangtan1

根据康探1井实钻结果, 基于二叠系上乌尔禾组三分层序划分方案, 井震结合, 从凹陷区向凸起带二叠系顶界拉平地震剖面(图11)可以看出, 二叠系

上乌尔禾组层序界面清楚, 一段向凸起带超覆尖灭, 超覆特征明显, 进一步证实了上乌尔禾组一段主体分布在阜康凹陷斜坡区和凹陷区。

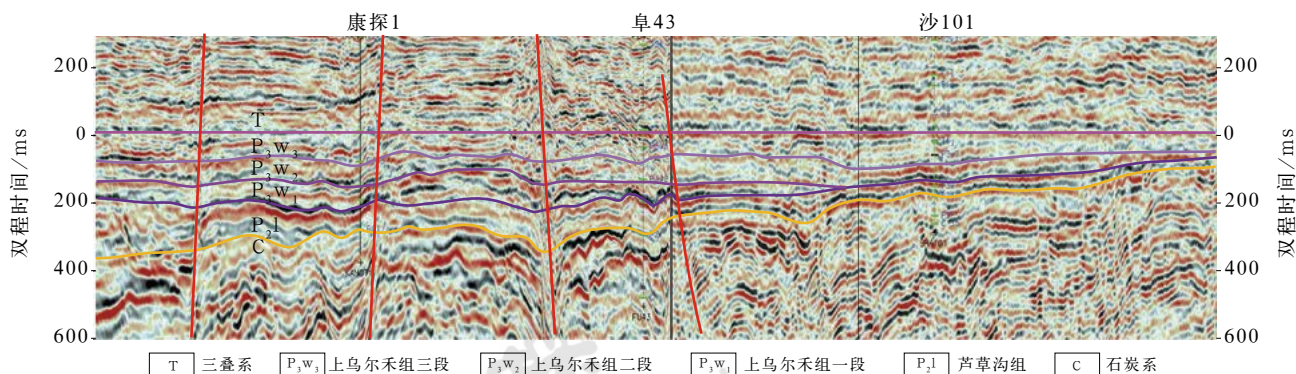


图11 过康探1—阜43—沙101井地震地质解释剖面(剖面线C—C1见图1)

Fig.11 Seismic profile cross Well Kangtan 1—Well Fu 43—Well Sha 101
(location C—C1 in Fig.1)

从过阜康凹陷南北向地震剖面还可以看出, 受白家海凸起、北三台凸起西泉鼻隆以及阜康断裂带的控制, 阜康凹陷自南至北进一步划分为阜南、阜中及阜北3个次级凹槽(图12)。受古凹槽控制, 上二叠

统早期沉积的低位体系域砂体充填于坡下凹槽区, 与上部上乌尔禾组三段广覆分布的湖侵泥岩形成良好的储盖组合, 并在芦草沟组优质烃源岩协同封堵下, 形成大型地层岩性圈闭。

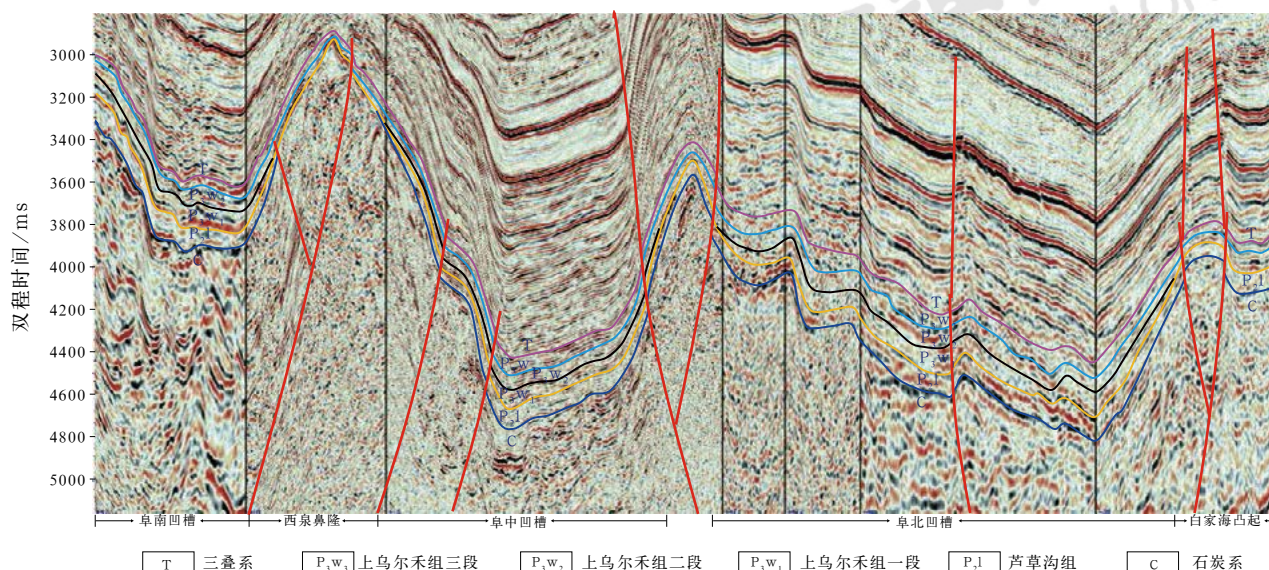


图12 准噶尔盆地阜康凹陷地震地质解释剖面(剖面线D—D1见图1)

Fig.12 Seismic profile and geological interpretation cross Fukang Sag in the Junggar Basin (location D—D1 in Fig.1)

综合分析认为,在退覆式扇三角洲沉积的背景下,阜康凹陷中、上二叠统两套低位体系域砂体均在坡下凹槽区卸载沉积,受较长距离搬运作用的影响,早期沉积的低位体系域前缘砂体泥质含量低,孔隙结构好。同时,两套规模储集砂体与后期泥岩覆盖遮挡形成良好的储盖组合。因此,3个凹槽区是寻找二叠系规模油藏的重大勘探领域。

3.3 源储时空匹配,造就了两期油气差异聚集,凹陷区晚期油气大面积成藏

康探1井二叠系油气特征与凹陷周缘凸起区二叠系油气特征存在差异,凸起区二叠系上乌尔禾组原油密度较大,达 $0.843\sim 0.894\text{g}/\text{cm}^3$,基本不含气或含少量天然气;康探1井中、上二叠统两层原油均为轻质油,原油密度为 $0.815\sim 0.836\text{g}/\text{cm}^3$,最高日产气超过 10000m^3 ;油气特征的差异指示两者成藏过程的差异。

根据Radke等建立的原油成熟度与甲基菲指数之间的关系^[20-21],利用阜康凹陷周缘凸起区及凹陷区康探1井原油芳香烃参数,初步计算凸起区原油 R_o 为 $0.76\%\sim 0.77\%$,康探1井原油 R_o 为 0.98% 。阜康凹陷二叠系芦苇沟组烃源岩晚三叠—早侏罗世开始进入生烃门限,晚侏罗—早白垩世进入生烃高峰^[22],结合准东地区构造演化史^[15],建立了阜康凹陷及其周缘二叠系成藏模式:①晚三叠—早侏罗世,阜康凹陷二叠系芦苇沟组进入生烃门限,此时成熟阶段早期的油气可沿上乌尔禾组一段规模毯砂向凸起区运移,

并在凸起区聚集成藏(形成沙南油田和北三台油田)(图13a),但由于此阶段烃源岩演化程度低且生烃量小,故凸起区油藏规模小且油质略重。②晚侏罗世末—早白垩世,阜康凹陷快速沉降、北三台凸起大幅隆升,沙丘断裂形成,断距大;白垩系沉积前形成的沙丘断裂不仅造成了凸起区中、上侏罗统大量剥蚀,同时对阜康凹陷晚期油气大面积成藏发挥了截流而聚的关键作用,致使凹陷区烃源岩生成的成熟阶段中—晚期油气在凹陷区聚集成藏(康探1井区)(图13b),此阶段生烃量大,故凹陷区油藏规模大且油质轻。

康探1井中、上二叠统的突破,对准东地区油气勘探的战略转移具有里程碑意义:一是在凹陷区二叠系芦苇沟组和上乌尔禾组首次发现厚层规模储集体,突破了阜康凹陷斜坡区和凹陷区缺乏规模储层和砂体的传统认识;二是证实了深层发育规模优质储层,中、上二叠统三层均获高产,并且原油品质好;三是坚定了下凹勘探的信心,实现了源边向近源和源内的重大转移;四是展现出二叠系盆地级重大领域整体突破的态势,继玛湖、沙湾以及东道海子凹陷上二叠统突破后,阜康凹陷上二叠统再获突破,准噶尔盆地中央坳陷环带四大富烃凹陷均已获突破。

综合评价分析认为:阜康凹陷三大凹槽区为二叠系重点勘探领域,拓展有利勘探面积近 3000km^2 ,预测资源量为 $(10\sim 15)\times 10^8\text{t}$ 。①阜中凹槽区,康探1井钻探已经证实该区中、上二叠统储层发育且高产,预测有利勘探面积 1060km^2 ,是规模增储最为现实的

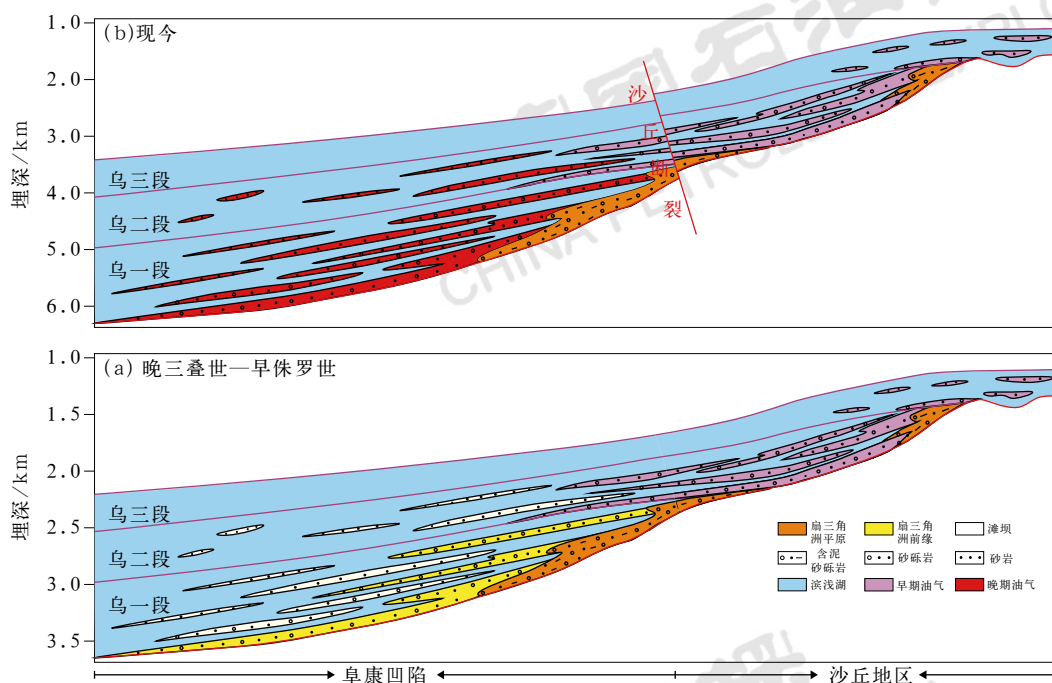


图13 阜康凹陷及周缘二叠系成藏模式图(剖面线E—E1见图1)

Fig.13 Hydrocarbon accumulation model of Permian in Fukang Sag
(location E—E1 in Fig.1)

领域。②阜南凹槽区,紧邻南部博格达山物源区,地震预测发育大型丘状反射扇体,康探2井见良好油气显示,预测有利勘探面积 800km^2 ,是下凹勘探的重点目标区。③阜北凹槽区,周缘凸起区多井见油气,凸起带上乌尔禾组三段泥包砂及斜坡带上乌尔禾组二段互层砂体均已成藏,预测有利勘探面积 1150km^2 ,是风险勘探的有利领域。

4 结论

阜康凹陷周缘以往的油气勘探领域以凸起区为主,凹陷区勘探程度低。康探1井首次在凹陷区获得重大突破,证实了阜康凹陷巨大的勘探潜力,实现了准东地区油气勘探的战略转移,拉开了下凹勘探的序幕。

康探1井钻探证实阜康凹陷中、上二叠统发育两套低位体系域沉积砂体,与石炭系烃源岩和二叠系芦草沟组烃源岩紧邻,具有近源成藏的特点;且受古凹陷、上乌尔禾组三段泥岩及芦草沟组烃源岩的协同控制形成大型地层圈闭背景,成藏条件优越。

康探1井的突破证实阜康凹陷区勘探条件有利,阜南凹槽、阜中凹槽以及阜北凹槽是凹陷区三大有利勘探区,有利区带面积近 3000km^2 ,预测资源量为 $(10\sim 15)\times 10^8\text{t}$,是准噶尔盆地增储上产的潜在接替区块。

参考文献

- [1] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2016, 1(1): 2-23.
Jia Chengzao, Pang Xiongqi, Jiang Fujie. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 2-23.
- [2] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏地质理论与勘探技术[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 257-272.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Geological theory and exploration technology for lithostratigraphic hydrocarbon reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 257-272.
- [3] 杜金虎, 杨涛, 李欣. 中国石油天然气股份有限公司“十二五”油气勘探发现与“十三五”展望[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(2): 1-15.
Du Jinhu, Yang Tao, Li Xin. Oil and gas exploration and discovery of PetroChina Company Limited during the 12th Five-Year Plan and the prospect during the 13th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(2): 1-15.
- [4] 何海清, 李建忠. 中国石油“十一五”以来油气勘探成果、地质新认识与技术进展[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 1-13.
He Haiqing, Li Jianzhong. PetroChina's oil and gas exploration results, new geological theories and technological achievements since 11th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(6): 1-13.
- [5] 周兴熙. 成藏要素的时空结构与油气富集——兼论近源富集成藏[J]. 石油与天然气地质, 2005(6): 711-716.
Zhou Xingxi. Time-space structure of reservoiring elements and hydrocarbon enrichment—concurrently discussing near-source reservoiring[J]. Oil & Gas Geology, 2005(6): 711-716.
- [6] 邹才能, 陶士振, 朱如凯, 等. “连续型”气藏及其大气区形成机制

- 与分布——以四川盆地上三叠统须家河组煤系大气区为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 307–319.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhu Rukai, *et al.* Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant gas province: A case from the Upper Triassic Xujiache Formation giant gas province, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 307–319.
- [7] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(1): 1–9.
- Du Jinhui, He Haiqing, Yang Tao, *et al.* Progress in China’s tight oil exploration and challenges[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(1): 1–9.
- [8] 杨智, 邹才能. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 173–184.
- Yang Zhi, Zou Caineng. Exploring petroleum inside source kitchen: Connotation and prospects of source rock oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 173–184.
- [9] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 127–137.
- Tang Yong, Guo Wenjian, Wang Xiatian, *et al.* A new breakthrough in exploration of large conglomerate oil province in Mahu Sag and its implications[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 127–137.
- [10] 杜金虎, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地上二叠统风险领域分析与沙湾凹陷战略发现[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 24–35.
- Du Jinhui, Zhi Dongming, Tang Yong, *et al.* Prospects in Upper Permian and strategic discovery in Shawan Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 24–35.
- [11] 张丽丽. 准噶尔盆地北三台地区二叠系梧桐沟组沉积相[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- Zhang Lili. Sedimentary facies of Wutonggou Formation in Beisantai area in Junggar Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [12] 王绪龙, 支东明, 王屿涛, 等. 准噶尔盆地烃源岩与油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- Wang Xulong, Zhi Dongming, Wang Yutao, *et al.* Geochemistry of source rock and petroleum in the Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [13] 吴孔友, 查明, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识[J]. 地球科学, 2005, 26(3): 217–222.
- Wu Kongyou, Zha Ming, Wang Xulong, *et al.* Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(3): 217–222.
- [14] 吴晓智, 赵永德, 李策. 准噶尔东北缘前陆盆地构造演化与油气关系[J]. 新疆地质, 1996, 14(4): 297–305.
- Wu Xiaozhi, Zhao Yongde, Li Ce. Tectonic evolution of foreland basin at northeastern margin of Junggar Basin and its relation with oil-gas[J]. Xinjiang Geology, 1996, 14(4): 297–305.
- [15] 吴晓智, 周路, 杨迪生, 等. 准噶尔盆地北三台凸起构造演化与油气成藏[J]. 地质科学, 2012, 47(3): 653–668.
- Wu Xiaozhi, Zhou Lu, Yang Disheng, *et al.* Structure evolution and hydrocarbon accumulation the Beisantai Uplift in Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2012, 47(3): 653–668.
- [16] 张塞, 董雪梅, 胡婷婷, 等. 准噶尔盆地沙南油田二叠系梧桐沟组高分辨率层序地层学应用研究[J]. 天然气工业, 2007(S1): 483–485.
- Zhang Sai, Dong Xuemei, Hu Tingting, *et al.* Application of high-resolution sequence stratigraphy in the Permian Wutonggou Formation, Sha’nan Oilfield, Junggar Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007(S1): 483–485.
- [17] 龚德瑜, 蓝文芳, 向辉, 等. 准噶尔盆地东部地区天然气地化特征与成因来源[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 1–11.
- Gong Deyu, Lan Wenfang, Xiang Hui, *et al.* Genetic types and origins of natural gases from the eastern Junggar Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 1–11.
- [18] Gong Deyu, Song Yong, Wei Yanzhao, *et al.* Geochemical characteristics of Carboniferous coaly source rocks and natural gases in the southeastern Junggar Basin, NW China: Implications for new hydrocarbon explorations[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 202: 171–189.
- [19] 陈军, 陈静, 李娜, 等. 准噶尔盆地东部石炭系天然气勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(7): 952–961.
- Chen Jun, Chen Jing, Li Na, *et al.* The exploration potential of Carboniferous natural gas in the eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(7): 952–961.
- [20] Radke M, Welte D H. The methylphenanthrene index (MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbons[A]. Bjorøy M. Advances in organic geochemistry 1981[C]. Chichester: John Wiley and Sons Incorporation, 1983: 504–512.
- [21] Radke M, Welte D H, Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type[A]. Leythaeuser D, Rullkötter J. Advances in organic geochemistry 1985 [C]. Oxford: Pergamon Press, 1986: 51–63.
- [22] 蒋春雪. 准噶尔盆地阜康凹陷东部及周缘地区侏罗系原油来源研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- Jiang Chunxue. Origins of the Jurassic oils in the east and peripheral areas of Fukang Sag in the Junggar Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.