

引用: 梁世君, 罗劝生, 康积伦, 等. 准噶尔盆地吉南凹陷萨探 1 井风险勘探突破及意义 [J]. 中国石油勘探, 2021,26(4):72-83.

Liang Shijun, Luo Quansheng, Kang Jilun, et al. Breakthrough and significance of risk exploration in Well Satan 1 in Jinan Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(4):72-83.

# 准噶尔盆地吉南凹陷萨探 1 井风险勘探突破及意义

梁世君<sup>1</sup> 罗劝生<sup>2</sup> 康积伦<sup>1</sup> 李付雷<sup>3</sup> 马强<sup>4</sup> 王雪纯<sup>4</sup> 彭亚中<sup>4</sup> 张伟<sup>4</sup>

(1 中国石油吐哈油田公司; 2 中国石油吐哈油田公司勘探事业部; 3 中国石油集团东方地球物理公司研究院乌鲁木齐分院;

4 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院)

**摘要:** 近期中国石油风险探井萨探 1 井在二叠系井井子沟组试油获得高产油流, 实现了准噶尔盆地阜康断裂带下盘吉南凹陷岩性油气藏勘探的重大突破。为评价吉南凹陷勘探前景, 基于萨探 1 井的钻探认识, 系统梳理和总结了阜康断裂带东段油气成藏条件, 指明下一步勘探方向。研究表明, 吉南凹陷与吉木萨尔凹陷隔凸相望, 是一个发育巨厚成熟烃源岩、具有较大勘探价值的独立富烃凹陷, 具备规模成藏的雄厚物质基础; 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—地层油气藏的储层条件。综合分析认为吉南凹陷主要发育两类油藏: 一类是以芦草沟组自生自储为核心要素的页岩油气, 其中页岩油主要发育在阜康断裂带下盘相对稳定区, 大面积连片分布, 页岩气主要发育在阜康断裂带上盘早期深埋、后期剧烈抬升区域, 受烃源岩高成熟度和后期破坏调整影响, 现今表现为构造气藏特点; 另一类是以芦草沟组为烃源岩, 以侏罗系八道湾组、三叠系韭菜园子组、二叠系梧桐沟组、井井子沟组为储层相配置的常规砂岩油藏, 纵向形成下生上储和上生下储两种模式, 燕山期断裂对油藏形成起决定性的控制作用, 基本形成断裂沟通、横向调整、岩性为主、断层切割的油气聚集模式。萨探 1 井拉开了阜康断裂带东段立体勘探、多层系接替亿吨级勘探序幕, 对准东地区效益勘探、规模增储具有重要的突破意义。

**关键词:** 准噶尔盆地; 吉南凹陷; 二叠系; 沉积体系; 萨探 1; 成藏模式

**中图分类号:** TE122.14 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.04.006

## Breakthrough and significance of risk exploration in Well Satan 1 in Jinan Sag, Junggar Basin

Liang Shijun<sup>1</sup>, Luo Quansheng<sup>2</sup>, Kang Jilun<sup>1</sup>, Li Fulei<sup>3</sup>, Ma Qiang<sup>4</sup>, Wang Xuechun<sup>4</sup>, Peng Yazhong<sup>4</sup>, Zhang Wei<sup>4</sup>

(1 PetroChina Tuha Oilfield Company; 2 Exploration Department, PetroChina Tuha Oilfield Company; 3 Urumqi Branch, GRI, BGP Inc., CNPC; 4 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Tuha Oilfield Company)

**Abstract:** Recently, Well Satan 1, a risk exploration well of PetroChina, obtained high yield oil flow of the Permian Jingjingzigou Formation during the well test, achieving a major breakthrough in the exploration of lithologic reservoir in Jinan Sag in the footwall of Fukang fault zone, Junggar Basin. Based on the drilling results of Well Satan 1, hydrocarbon accumulation conditions in the east segment of Fukang fault zone are systematically studied and summarized, exploration prospects evaluated, and exploration targets put forward in Jinan Sag. The study shows that Jinan Sag is separated from Jimsar Sag by a bulge, and it is an independent hydrocarbon rich sag with great exploration prospect. The thick mature source rocks are deposited, laying the material basis for large-scale hydrocarbon accumulation. Controlled by ancient landform,

第一作者简介: 梁世君 (1963-), 男, 甘肃山丹人, 1984 年毕业于西南石油学院, 教授级高级工程师, 现主要从事石油地质勘探研究、部署和生产管理工作。地址: 新疆哈密市伊州区吐哈石油基地中国石油吐哈油田公司, 邮政编码: 839009。E-mail: liangshijun@petrochina.com.cn

通信作者简介: 罗劝生 (1966-), 男, 甘肃秦安人, 博士, 2011 年毕业于中国地质大学 (武汉), 高级工程师, 现主要从事油气勘探部署和管理工作。地址: 新疆哈密市伊州区吐哈石油基地中国石油吐哈油田公司, 邮政编码: 839009。E-mail: lqs@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-06-27; 修改日期: 2021-07-07

two sets of large-scale reservoirs of Middle and Upper Permian are developed in the slope and sag area, with similar distribution pattern and large thickness, possessing the reservoir conditions for forming large-scale lithologic-stratigraphic oil and gas reservoirs. The comprehensive analysis indicates that there are mainly two types of oil reservoirs in Jinan Sag: One is shale oil and gas reservoir of self-generation and self-storage type of Lucaogou Formation. Among them, shale oil is mainly accumulated in relatively stable area, and distributed extensively and continuously in the foot wall of Fukang fault zone; The shale gas is mainly accumulated in the upper wall of Fukang fault zone, where was deeply buried in the early stage and uplifted strongly in the late stage. It is characterized by structural gas reservoir at present due to the high-maturity source rocks and affected by the damage and adjustment in the late stage. The other type is conventional sandstone oil reservoir of lower-generation upper-storage or upper-generation lower-storage types configured by source rock of Lucaogou Formation and reservoirs of the Jurassic Badaowan Formation, Triassic Jiuciyuan Formation, and Permian Wutonggou and Jingjingzigou Formations. The Yanshanian faults play a decisive role on the accumulation of oil reservoir, with the pattern of "fault communication, lateral adjustment, lithologic reservoir dominant and fault cutting". Well Satan 1 opens the prelude of stereoscopic exploration in the east segment of Fukang fault zone, and replacement field of multi-layer system with hundred-million-ton-level, which is a major breakthrough for benefit exploration and large-scale reserve increase in the eastern Junggar Basin.

**Key words:** Junggar Basin, Jinan Sag, Permian, Sedimentary system, Well Satan 1, hydrocarbon accumulation

## 0 引言

近年来,随着油气勘探程度的提高和勘探技术的不断进步,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<sup>[1-7]</sup>。在准噶尔盆地东部(以下简称准东),2011年以来在吉木萨尔凹陷发现10亿吨级页岩油规模储量;2020年,在阜康凹陷东斜坡钻探的康探1井在二叠系获得日产百吨高产,展示了该区大型地层—岩性油气藏巨大的勘探潜力<sup>[6-8]</sup>。因此进源勘探逐渐成为当前准东地区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。

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。受前期阜康断裂带烃源岩规模认识不清及以寻找构造油气藏为主的勘探思路限制,近10年围绕阜康断裂带、阜康凹陷周缘构造主体钻探8口井,仅在浅层侏罗系和三叠系获得日产 $2\sim 3\text{m}^3$ 低产油流,未获得工业性突破,油藏规模总体偏小,油气勘探始终未能取得重大突破,阜康断裂带东段油气勘探停止不前、勘探方向亟待转移。

2019年准东矿权流转以后,吐哈油田公司组织开展阜康断裂带东段新一轮地震综合研究,通过系统研究阜康断裂带东段区域地质结构、烃源岩和储层特征,在吉木萨尔凹陷以南发现了吉南凹陷,并认为具备形成大油气区的有利条件。在系统评价基础上部署萨探1风险井,在二叠系井井子沟组获得日产 $26.3\text{m}^3$

高产工业油流,实现了吉南凹陷斜坡区二叠系油气勘探重大突破,开辟吉南凹陷亿吨级勘探新领域。在此基础上,解剖萨探1井重大突破的意义,对未来准东矿权流转区油气勘探具有重要的指导作用。

## 1 区域地质概况

准噶尔盆地是在晚石炭世—第四纪沉积的复合型叠合盆地。晚石炭世—早二叠世,受海西期挤压构造作用的影响,早期表现为典型前陆盆地特征,后期基底快速隆升并遭受剥蚀,为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,由于盆地整体沉降,沉积范围逐渐增大,中、上二叠统向凸起区超覆沉积,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<sup>[1-5]</sup>。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。

阜康断裂带东段位于新疆北天山山脉的博格达山山前,为准噶尔盆地南缘冲断带东部的二级构造单元,北邻阜康凹陷和吉木萨尔凹陷,东接古西凸起(图1)。阜康断裂带是由多条断裂组成的复杂构造带<sup>[9-10]</sup>,由一系列近南东东走向的断裂沿博格达山北缘呈北凸的弧形展布,受海西、燕山、喜马拉雅等多期次构造运动叠加影响,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<sup>[11-12]</sup>。阜康断裂带整体勘探程度低,并且以二维地震资料为主,前期研究划分了上盘冲断带和下盘逆掩带两个构造单元,其中下盘逆掩带“近源区”是寻找二叠系规模岩性油气储量的重要领域。

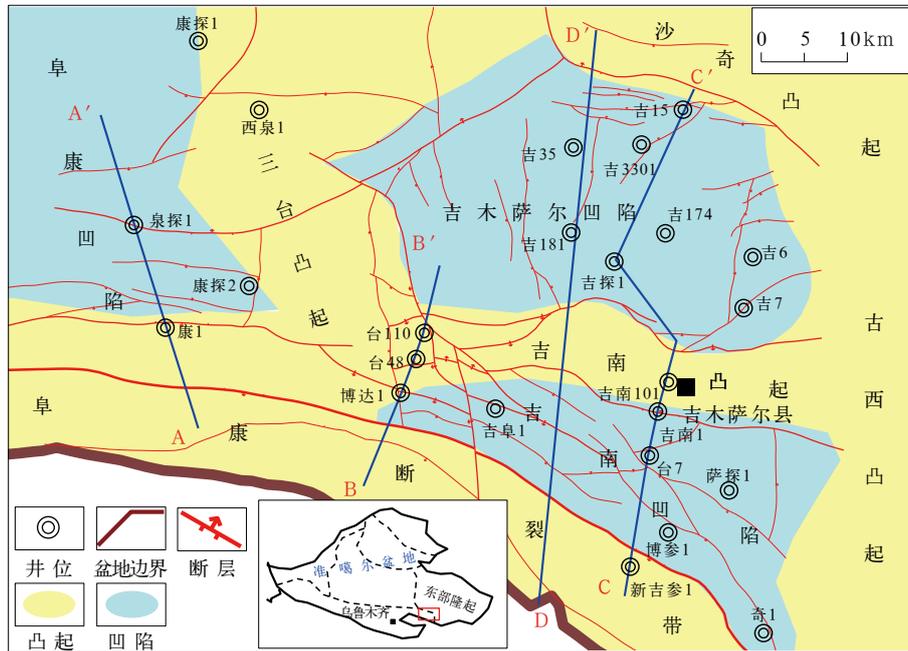


图1 准东地区构造单元划分图

Fig.1 Division of structural units in the eastern Junggar Basin

## 2 地质结构及构造演化特征

二叠系是准东地区的重要勘探层系，阜康断裂带东段勘探认识程度低，特别是无井钻揭中、下二叠统，是寻找规模油气区的重要勘探方向。但山前带勘探面临两大难题：一是阜康断裂带多期冲断，逆掩带下盘地质结构认识不清，二叠系烃源岩未落实，规模有效烃源岩发育不清；二是吉木萨尔凹陷勘探经验表明中、下二叠统储层致密，并且原油黏度、密度随着埋深增加而变轻，逆掩带下盘是否存在有效储层有待落实，是否存在优质稀油油藏存疑。

2019年矿权流转以后，通过近两年持续攻关研究，研究人员重新解剖区域地质结构及演化特征，重新评价二叠系烃源岩资源潜力、重新认识物源沉积体系以及重新构建油气成藏模式，认为阜康断裂带东段发育多层系构造—岩性油气藏的地质条件，具备亿吨级立体勘探潜力，并将风险勘探目标锁定在断裂带逆掩带下盘新发现的吉南凹陷。本文结合钻井、地质露头及地震与非地震资料，重新建立博格达山山前构造模型，逐步厘清了该区区域地质结构、地层展布及其演化特征，为落实烃源岩、沉积储层展布和成藏分析奠定了基础条件。

受博格达山向北逆冲影响，阜康断裂带上盘发育高角度冲断、挤压断层相关复式褶皱构造样式；下盘

主要发育逆冲褶皱变形构造样式。受三台凸起、古西凸起的影响，阜康断裂带东段自西向东呈现差异性构造变形，西部上盘受博格达隆升变形强烈，以高角度冲断为主，二叠系以上地层均抬升地表遭受剥蚀；下盘受北部北三台凸起影响主要发育一排构造带，以逆冲褶皱变形构造为主，局部形成背斜构造，二叠系梧桐沟组向三台凸起呈超覆沉积，缺失芦苇沟组（图2a）。中部上盘发育高角度冲断褶皱，以挤压断层相关复式褶皱为主，三叠系及以上地层剥蚀出露地表；下盘受三台凸起、西地断裂影响，发育一排构造带，以低角度冲断褶皱构造样式为主，地层发育齐全（图2b）。东部上盘发育高角度冲断、挤压相关复式褶皱构造样式，中部隆起区二叠系—三叠系保存较好；下盘吉南凹陷芦苇沟组埋藏较深，向北吉南古凸起芦苇沟组上段缺失，受多期南北逆冲影响发育两排构造带，以叠瓦状逆冲褶皱构造样式为主，往北逆冲规模逐级减少，直至吉南古凸起上形成明显的构造区隔，断背斜、断鼻构造发育，吉南古凸起二叠系芦苇沟组及其以下地层遭受剥蚀；北侧吉木萨尔凹陷地层整体变形较小，构造稳定，断层不发育，地层保存较为完整（图2c）。二叠系新发现的吉南凹陷为北西—南东走向的箕状断陷，北邻吉木萨尔凹陷，南接阜康断裂带东翼，东临古西凸起，西接北三台凸起南翼。

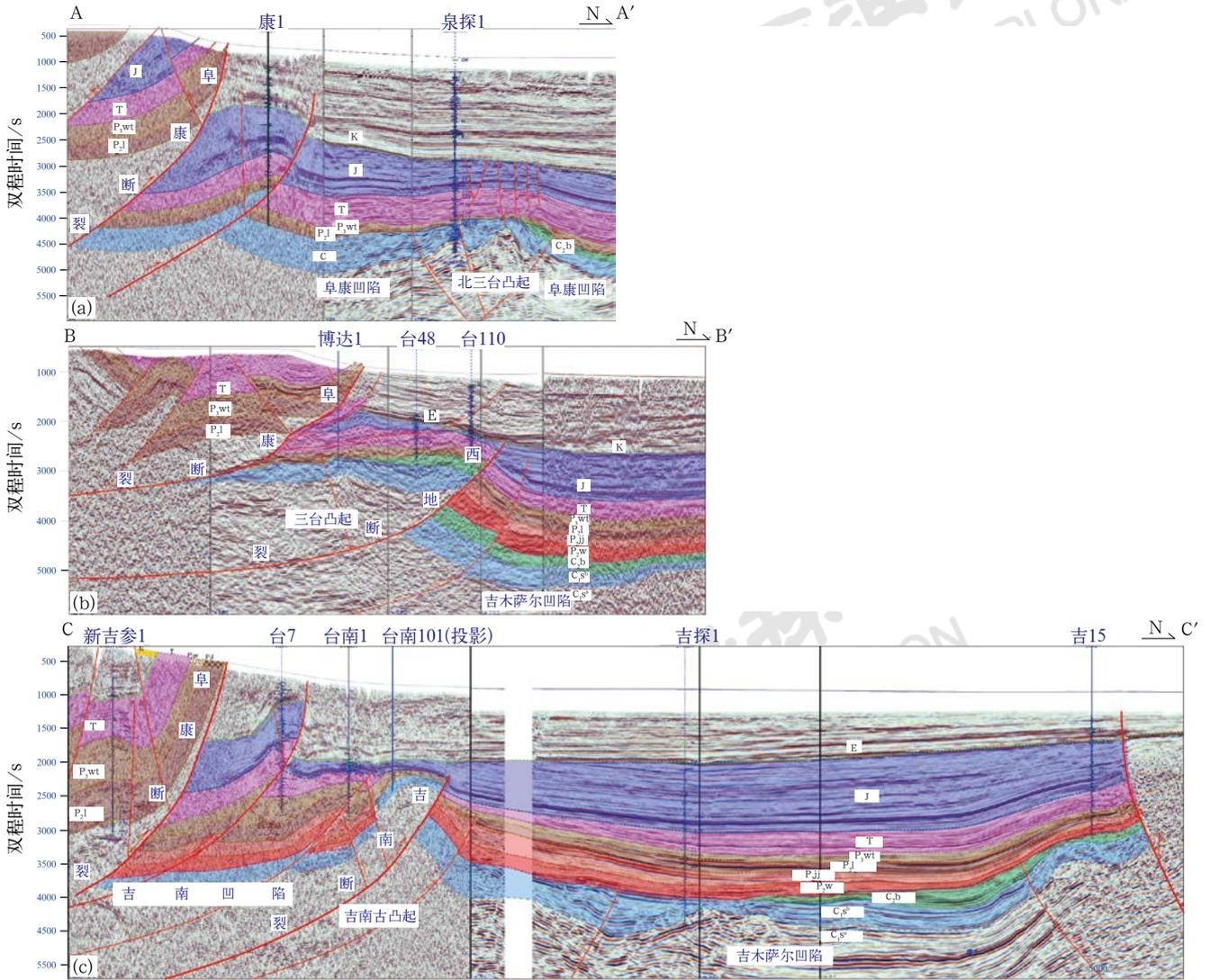


图 2 准噶尔盆地东部地区南北向综合地震剖面（剖面位置见图 1）

Fig.2 N-S direction comprehensive seismic profile in the eastern Junggar Basin (profile location is in Fig.1)

在阜康断裂带东段现今地质结构精细解剖的基础上，利用平衡复原的方法对阜康断裂带及周缘地区构造演化过程进行恢复。构造演化研究表明，阜康断裂带经历了海西、燕山和喜马拉雅 3 期强烈构造运动改造，这 3 期强烈的构造运动不仅影响了该区原型盆地的构造演变，也控制了该区的沉积背景及油气成藏<sup>[10-16]</sup>。在海西期发育多个火山机构控制的隆拗格局，博格达山前海槽褶皱回返时间相对较晚，石炭纪为一个拉张断陷盆地，至石炭纪末阜康断裂带所在位置处于较稳定环境。燕山早期吉南—吉木萨尔地层为统一的凹陷沉积，后期受南部博格达山隆起向北强烈挤压和差异推覆影响，发育北西和南北走向两组断裂，形成一系列向北依次降低的台阶块，为该区重要的油源断裂。同时，受三台古凸起、吉南古凸起的持续隆升影响，芦苇沟组等上覆地层在吉南古凸起逐层剥蚀

减薄，基本形成吉南凹陷和吉木萨尔凹陷隔凸相望的构造格局（图 3）。喜马拉雅期受南部博格达山由南向北强烈推覆运动，阜康断裂带形成并遭受剥蚀，吉南古凸起持续发生隆升，造成上覆侏罗系和白垩系剥蚀，促使北西走向的断层进一步加剧，形成一系列通天断层。三期构造运动的叠合形成了以阜康断裂带为界南北迥异的现今构造格局，上盘为高角度的逆冲推覆带，断层南倾逆冲通天，对油气藏具有较大的破坏作用，显示了新生代强烈活动；下盘吉南凹陷形成一系列向南倾的逆冲断层，往北逆冲规模逐级减少，断背斜、断鼻构造发育，是最重要的油气聚集区域。新生代晚期阜康断裂带发生强烈隆升，阜康古凸起和吉南古凸起之间中、新生界卷入变形，吉南古凸起未发生明显的构造运动。从整体的构造演化特征看，在海西期吉南凹陷与吉木萨尔凹陷连通，后期受吉南凸起

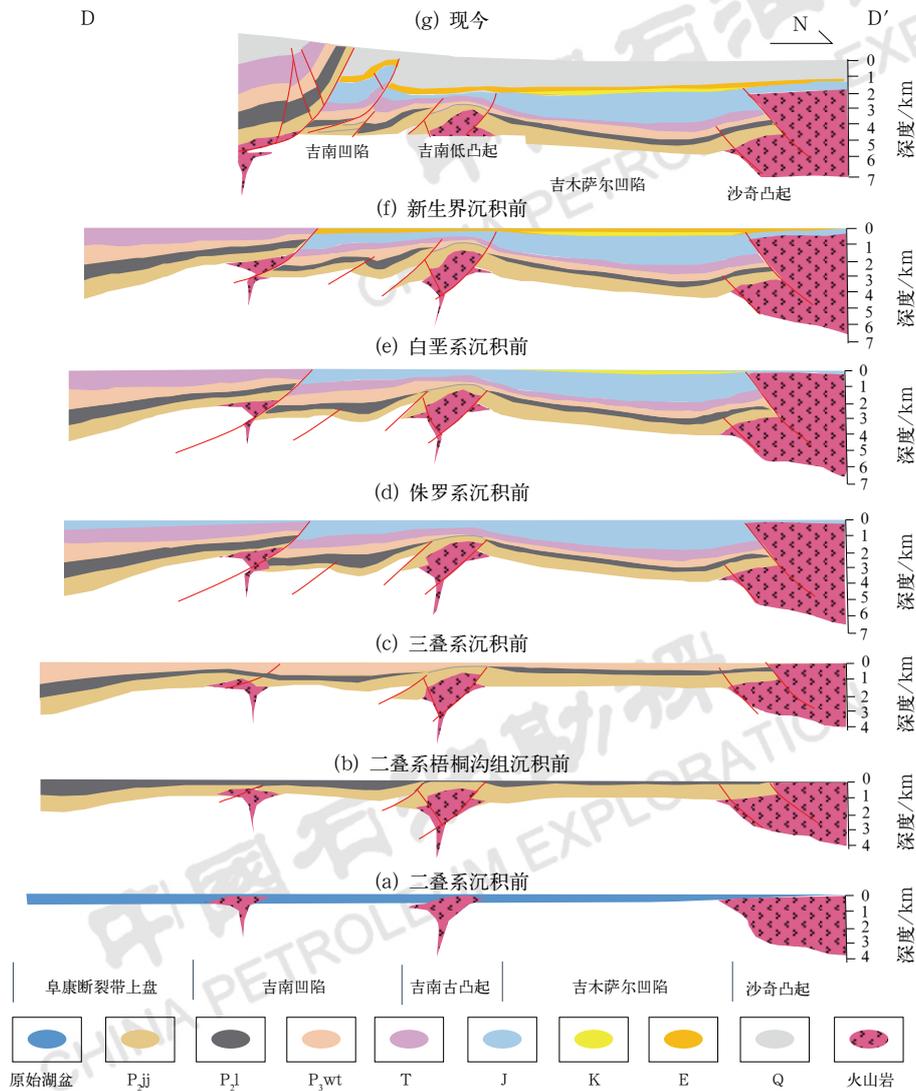


图3 准噶尔盆地东部地区南北向构造演化剖面(剖面位置见图1)

Fig.3 N-S direction structural evolution section in the eastern Junggar Basin (profile location is in Fig.1)

抬升影响,分割成南北两个独立凹陷,两凹陷沉积环境基本一致,后期经历燕山期和喜马拉雅期由南向北推覆的运动形成现今的构造格局。

### 3 萨探1井钻探认识

以推覆体下盘稳定区二叠系页岩油及相关砂岩油藏为目的部署的萨探1井完钻井深3327m,完钻层位为二叠系井井子沟组,钻井揭示二叠系梧桐沟组及以上地层与吉木萨尔凹陷层序相似,但芦草沟组明显加厚,且存在局部变化(图4)。钻探过程中油气显示活跃,在二叠系井井子沟组、芦草沟组、梧桐沟组及三叠系韭菜园组和侏罗系八道湾组均钻遇油气显示。试油第一层在井井子沟组试获高产油流,并取得多项认识。

#### 3.1 芦草沟组是吉南凹陷主要烃源岩,奠定了吉南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,勘探证实阜康凹陷、吉木萨尔凹陷烃源岩较发育,厚度50~250m。阜康断裂带的构造变形过程极为复杂,不仅影响了烃源岩的沉积及发育,同时对圈闭的演化及油气成藏破坏和调整改造起到了重要的影响<sup>[17-18]</sup>。前人研究表明,二叠系芦草沟组沉积时期,准东地区博格达山还未隆起,为统一的沉积凹陷,盆广水深,推测烃源岩厚度大,品质好,资源潜力大<sup>[19-21]</sup>。

萨探1井井井子沟组原油密度为0.8803g/cm<sup>3</sup>,50℃原油黏度为43.87mPa·s。原油物性与周缘井芦

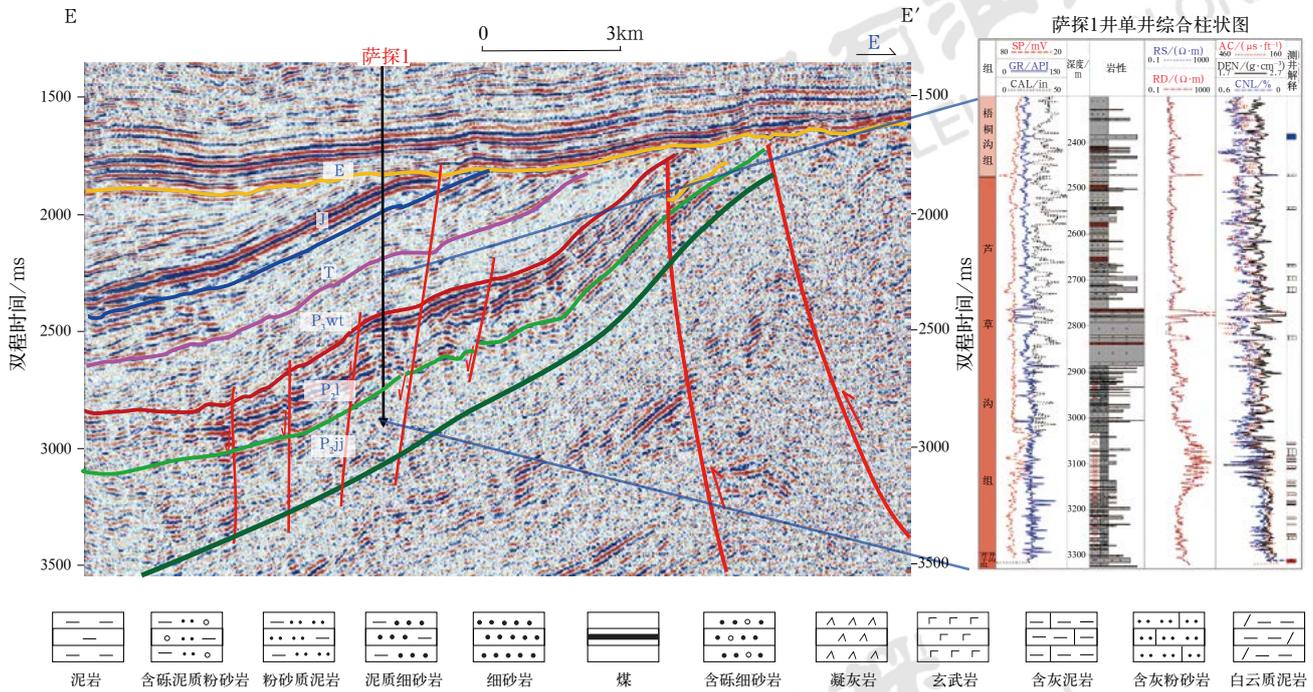


图 4 过萨探 1 井地震剖面及单井柱状图 (剖面位置见图 1)

Fig.4 Seismic profile cross Well Satan 1 and stratigraphic column of Well Satan 1 (profile location is in Fig.1)

草沟组原油相似。原油地球化学指标分析对比表明，萨探 1 井原油 Pr/Ph 约为 1.2、Pr/nC<sub>17</sub> 为 0.68、Ph/nC<sub>18</sub> 为 0.56、异构 / 正构为 0.42、轻重比为 1，与邻井二叠系原油指标相似； $\delta^{13}C$

为 -32.36‰、 $\beta$ -胡萝卜素 / 主峰为 0.32、 $C_{29} \beta\beta / \Sigma(\alpha\alpha + \beta\beta)$  为 0.34，与博参 1 井芦草沟组烃源岩地球化学指标相当，由此可判断，萨探 1 井的油源主要来自二叠系芦草沟组烃源岩 (表 1)。

表 1 萨探 1 井原油地球化学指标表

Table 1 Geochemical index of crude oil in Well Satan 1

| 井号    | 层位                            | 样品类型 | Pr/Ph | Pr/nC <sub>17</sub> | Ph/nC <sub>18</sub> | $\delta^{13}C/\text{‰}$ | 异构 / 正构 | $\beta$ -胡萝卜素 / 主峰 | 轻重比 C <sub>21-</sub> / C <sub>22+</sub> | $C_{29} \beta\beta / \Sigma(\alpha\alpha + \beta\beta)$ |
|-------|-------------------------------|------|-------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|--------------------|---|---|
| 萨探 1  | P <sub>2</sub> ji             | 原油   | 1.26  | 0.68                | 0.56                | -32.36                  | 0.42    | 0.32               | 1                                       | 0.34  |
| 康探 2  | P <sub>2</sub> l              | 原油   | 1.46  | 0.59                | 0.44                | -30.9                   | 0.42    | 0.22               | 1.8                                     | 0.54  |
| 博达 1  | P <sub>3</sub> wt             | 原油   | 1.04  | 0.94                | 0.91                | -31.94                  | 0.72    | 1.39               | 0.75                                    | 0.37  |
| 吉 181 | P <sub>2</sub> l <sub>2</sub> | 原油   | 1.29  | 0.47                | 0.34                | -32.34                  | 0.26    | 0.2                | 0.89                                    | 0.34  |
| 吉 181 | P <sub>2</sub> l <sub>1</sub> | 原油   | 1.28  | 1.05                | 0.95                | -31.31                  | 0.76    | 0.4                | 1.25                                    | 0.38  |
| 博参 1  | P <sub>2</sub> l              | 泥岩   | —     | —                   | —                   | -31.68                  | —       | 0.4                | —                                       | 0.4   |

本文综合利用地面露头、已钻井和地震资料整体刻画了阜康断裂带芦草沟组的烃源岩展布特征，证实吉南凹陷芦草沟组烃源岩有机质丰度高，品质好，成熟度高，具备形成大油气区的物质基础。

### 3.1.1 芦草沟组烃源岩地球化学特征

钻井资料表明断裂带上盘不同构造带均发育优质

烃源岩。20 世纪 90 年代，阜康断裂带北侧上盘高陡带钻探的博参 1 井钻遇 997m 烃源岩，其中 360m 段连续见油迹—富含油显示；在上盘中部鼻隆带钻探的准顶 4 井钻遇 204.2m 烃源岩，地球化学分析有机碳含量为 0.51%~1.97%， $R_0$  为 0.76%~1.24%，干酪根类型为 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub> 型。2019 年，中国地质调查局在

阜康断裂带东侧上盘部署的新吉参1井在芦草沟组钻遇564m 烃源岩, 岩性以灰色泥岩和泥灰岩为主, 有机质类型为 $\Pi_2$ 型,  $S_1+S_2$ 平均为2.16mg/g,  $T_{\max}$ 平均为464℃, 评价为高成熟度烃源岩, 后期试油获得工业气流。

萨探1井在断裂带下盘吉南凹陷芦草沟组钻遇

371m的厚层烃源岩, 岩性以灰黑色的含灰泥岩为主, 有机质类型为I—II型, TOC平均为6.03%,  $S_1+S_2$ 为37.6mg/g,  $T_{\max}$ 平均为441℃, 成熟度高, 烃源岩条件好。对比吉木萨尔凹陷烃源岩(表2), 吉南凹陷烃源岩厚度更大, 有机质丰度更高, 品质更好, 综合评级是一套好生油岩。

表2 吉南凹陷和吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩评价表

Table 2 Evaluation of source rock of Lucaogou Formation in Jinan Sag and Jimsar Sag

| 采样位置   |       | TOC/%                                | $S_1+S_2$ /(mg·g <sup>-1</sup> )     | 氯仿沥青“A”/%                          | 丰度 | $I_H$ /(mg·g <sup>-1</sup> )           | 类型      | $T_{\max}$ /℃                    | 成熟度 |
|--------|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----|--|---------|----------------------------------|-----|
| 吉南凹陷   | 萨探1   | $\frac{1.21 \sim 14.7^*}{6.03 (11)}$ | $\frac{0.16 \sim 118.8}{37.6 (11)}$  | $\frac{0.03 \sim 1.1}{0.5 (9)}$    | 好  | $\frac{17 \sim 949}{379 (11)}$         | $\Pi_1$ | $\frac{436 \sim 450}{441 (11)}$  | 成熟  |
|        | 页岩油露头 | $\frac{0.8 \sim 20.1}{4.9 (128)}$    | $\frac{2.32 \sim 164.4}{28 (130)}$   | $\frac{0.02 \sim 0.19}{0.06 (6)}$  |    | $\frac{30 \sim 805}{463 (130)}$        | $\Pi_1$ | $\frac{427 \sim 490}{440 (130)}$ |     |
| 吉木萨尔凹陷 | 吉3301 | $\frac{0.5 \sim 17.2}{3.8 (79)}$     | $\frac{1.99 \sim 130}{20 (113)}$     | $\frac{0.02 \sim 3.78}{1.15 (15)}$ | 较好 | $\frac{56 \sim 897}{391 (113)}$        | $\Pi_1$ | $\frac{418 \sim 447}{438 (113)}$ |     |
|        | 吉35   | $\frac{0.53 \sim 6.4}{2.03 (30)}$    | $\frac{0.61 \sim 33.04}{7.1 (36)}$   | $\frac{0.61 \sim 33}{7.1 (36)}$    |    | $\frac{41 \sim 1326}{287 (36)}$        | $\Pi_2$ | $\frac{428 \sim 454}{448 (36)}$  |     |
|        | 吉6    | $\frac{1.65 \sim 4.92}{3.16 (13)}$   | $\frac{7.5 \sim 29.32}{20.3 (13)}$   | $\frac{0.01 \sim 0.48}{0.16 (7)}$  |    | $\frac{430 \sim 768}{594 (13)}$        | $\Pi_1$ | $\frac{431 \sim 445}{439 (13)}$  |     |
|        | 吉174  | $\frac{0.57 \sim 15.5}{6.11 (25)}$   | $\frac{2.07 \sim 76.21}{15.23 (25)}$ | $\frac{0.01 \sim 0.48}{0.16 (25)}$ |    | $\frac{47.22 \sim 780.86}{313.7 (25)}$ | $\Pi_1$ | $\frac{436 \sim 460}{455 (13)}$  |     |

\*  $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}(\text{样品数})}$

### 3.1.2 芦草沟组烃源岩平面分布特征

野外地质露头表明断裂带上盘烃源岩分布广、厚度大。新一轮的野外地质调查发现在博格达山山前的妖魔山—井子沟—三工河—吉木萨尔—帐篷沟一带均广泛发育芦草沟组暗色泥岩, 厚度大, 平均厚度为300~900m。另外, 在三工河南芦草沟组上段发现芦草沟组油页岩, 视厚度为100~530m, 纵向上呈书页状叠置, 点火可燃。受逆冲推覆断裂控制, 烃源岩露头在平面上呈带状分布, 东西长约143km, 宽约10km, 分布面积约312km<sup>2</sup>。

井震综合研究证实吉南凹陷是一个独立完整的二叠系生烃凹陷, 具备规模成藏的烃源岩条件。通过井震精细标定, 烃源岩发育段在地震剖面上为中—强振幅较连续反射特征, 具有和吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩类似的地震反射特征。综合地震和钻井资料, 研究发现吉南凹陷为独立的生烃凹陷, 与吉木萨尔凹陷隔凸相望, 具有“南厚北薄”的箕状展布特征, 烃源岩厚度大于200m的面积达370km<sup>2</sup>, 埋藏深度为2000~5000m; 阜康断裂带上盘烃源岩厚度大于200m的面积达1800km<sup>2</sup>, 埋藏深度为

2000~5000m, 已达到生油门限, 具备形成亿吨级油藏的资源基础(图5)。

### 3.2 二叠系发育源内云质砂岩和近源砂岩两类储层, 源储匹配关系优越, 具备形成大面积叠合含油储层条件

通过露头、钻井结合地震资料研究发现, 吉南凹陷发育侏罗系八道湾组、三叠系韭菜园子组、二叠系梧桐沟组、芦草沟组、井子沟组5套储盖组合, 均获得了油气发现, 其中二叠系3套储盖组合紧贴生油岩, 是本区的主力勘探层系。

#### 3.2.1 二叠系井子沟组

井子沟组沉积时盆地处于断凹转换期, 在吉南凹陷和吉木萨尔凹陷均发育三角洲前缘相砂岩储层, 与上覆芦草沟组广覆式泥岩形成有利的储盖组合。吉木萨尔凹陷钻探证实纵向上发育两套砂体, 厚度为10~80m, 孔隙度为5.1%~9.3%, 渗透率为1~12.9mD, 属中低孔低渗储层。萨探1井钻探证实吉南凹陷井子沟组发育砂岩储层, 测井储层物性较好, 密度为2.44g/cm<sup>3</sup>, 核磁有效孔隙度为9.3%,  $T_2$ 谱有明显的大孔和可动流体特征, 综合分析为一套优质储集体。

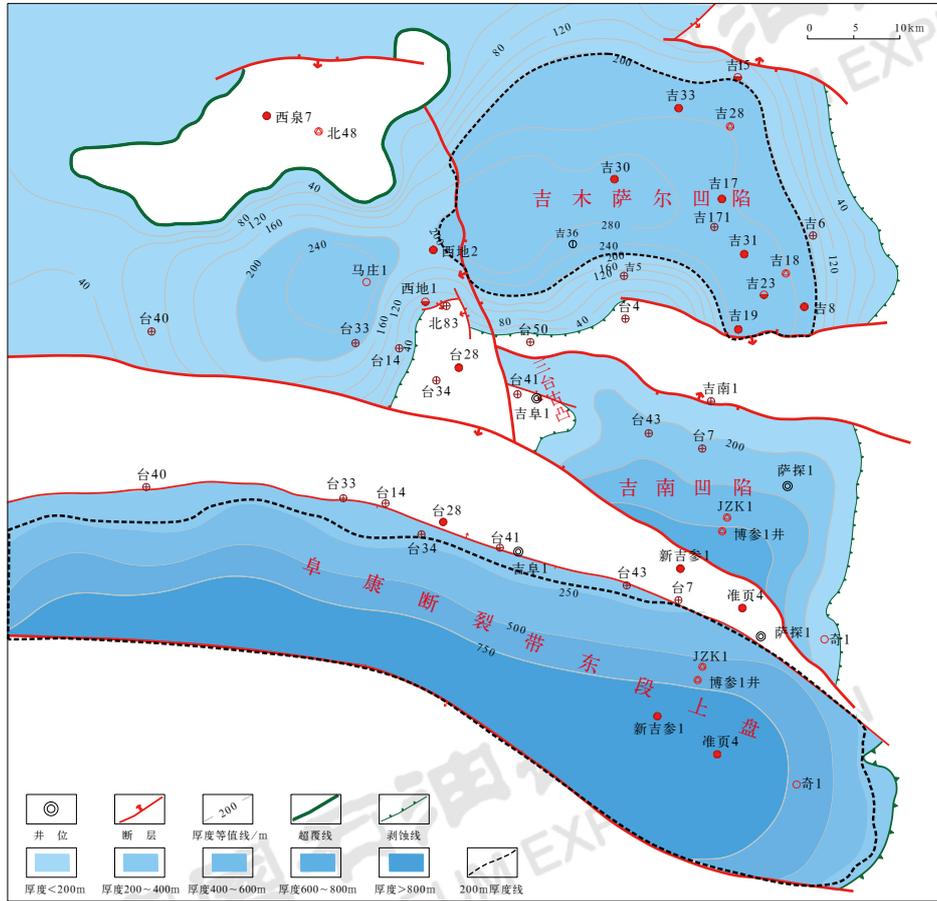


图 5 阜康断裂带东段—吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩厚度图

Fig.5 Thickness map of source rock of Lucaogou Formation in Jimsar Sag, east segment of Fukang fault zone

井震研究表明吉南凹陷井井子沟组厚度为 100~200m，在地震剖面上表现为—组较为连续的中等强度反射，具有西厚东薄的特征；在攻关处理的二维地震测线上表现为逐层超覆沉积的特征，认为发育退积型三角洲沉积体系，三角洲前缘为有利勘探相带。结合沉积期古地貌分析，平面上受吉南凸起、古西凸起两大主物源区控制，井井子沟组主要发育两大沉积体系（图 6a），西侧的吉南 1 井区主要接受吉南低凸起物源供给，东侧的萨探 1 井区物源主要来自古西凸起，均发育北东向的浅湖相—三角洲前缘相—三角洲平原相沉积体系，具备规模勘探的储层条件。

### 3.2.2 二叠系芦草沟组

前期研究认为芦草沟组沉积时，博格达山山前和吉木萨尔地区为统一的凹陷背景，下盘吉南凹陷与吉木萨尔凹陷沉积环境类似，以原地系统的咸化湖盆为主，源储共生；上盘为后期远距离推覆的沉积储层<sup>[5,10]</sup>。上盘钻探的新吉参 1 井芦草沟组取心证实岩屑纹层状含粉砂云质泥岩和泥质云岩发育，下盘钻探的萨探 1 井揭示发育含灰粉砂岩和云质粉砂岩，

核磁测井解释总厚度达 49m/15 层，可动孔隙度为 3.1%~5.7%，渗透率为 0.0031~6.14mD，属典型页岩油储层。

类比吉木萨尔凹陷，在吉南低凸起周边零星发育小规模的三角洲相沉积，吉南凹陷主要发育半深湖—滨浅湖沉积（图 6b），推测南部凹陷区云化岩储层规模发育。井震结合发现，页岩油甜点与吉木萨尔凹陷类似均表现为强振幅较连续反射的地震反射特征，主要分布在吉南凹陷东南部地层厚度较大的浅湖—半深湖区；受二维地震资料品质限制，本文利用波阻抗反演开展甜点储层识别。

### 3.2.3 二叠系梧桐沟组

康探 1 等井钻探证实阜康凹陷和吉木萨尔凹陷在梧桐沟组一段发育一套低位体系域砂砾岩储层，为扇三角洲前缘砂体，厚度大，砂体单层厚度为 16~35m<sup>[8]</sup>，吉南凹陷和吉木萨尔凹陷具有相同的沉积背景，前期钻井证实梧桐沟组一段砂层较发育，厚度为 9~36m，孔隙度为 4%~22.3%，平均为 15.82%，渗透率为 0.0062~344mD，平均为 30.42mD，属中孔

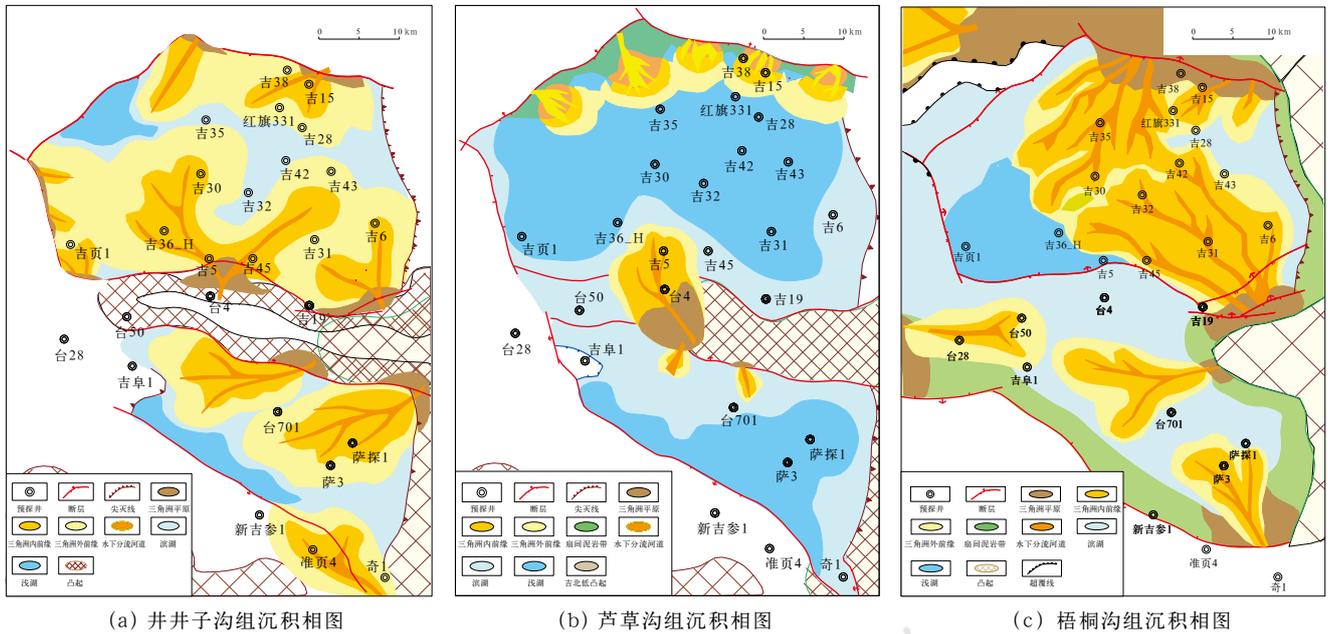


图6 阜康断裂带东段—吉木萨尔凹陷二叠系主要目的层沉积相图

Fig.6 Sedimentary facies map of main target reservoir of Permian in Jimsar Sag, east segment of Fukang fault zone

低渗储层。研究认为梧桐沟组一段砂体直接覆盖在芦苇沟组优质烃源岩之上，与梧桐沟组二段湖侵泥岩和高部位致密平原相遮挡，生一储一盖配置优越，是寻找规模地层—岩性油藏的重要领域（图6c）。

吉南凹陷近南北向地震剖面反射特征分析，南北弱振幅杂乱反射指示三角洲平原相，斜坡区中强振幅较连续反射指示为三角洲前缘相，凹陷区受断裂的破坏总体表现为厚度增大，弱振幅杂乱特征，内部存在多处的强振幅异常区，指示深水浊流沉积。结合地层残余厚度研究，受古西凸起和三台凸起控制，二叠系梧桐沟组发育南北三大扇三角洲—浊流沉积体系，其中扇三角洲前缘带是勘探的主要区带，南侧沉积体系受沟槽控制呈北西向分布，目前无井钻探，北侧的两支沉积体系为近东西西向展布特征，均已发现油气藏，其中近期完钻的吉卓1井在梧桐沟组测井油层16m/4层、差油层2.2m/1层（待试油），展现了巨大勘探潜力。

### 3.3 凹陷稳定区发育早期构造稠油油藏、晚期岩性油藏和页岩油3类油藏，其中晚期油气大面积成藏

#### 3.3.1 页岩油气主要受芦苇沟组烃源岩成熟度、砂质云岩和断裂系统三要素控制，上下盘均有分布

原型盆地及岩相古地理研究表明，芦苇沟组沉积时期吉南凹陷盆广水深，烃源岩厚度大，分布广，品质好，成熟度高，生烃潜力大。萨探1井实钻表明，吉

南凹陷与吉木萨尔凹陷层序格架基本一致，萨探1井芦苇沟组厚度797m，证实芦苇沟组向南具有增厚的特征。同时咸化湖盆背景和少量外来物源共同控制发育以白云岩为主的储集体，形成源储一体就近成藏的页岩油气藏。阜康断裂带整体发育多排断裂系统，对页岩油气藏的保存有较大挑战。阜康断裂带下盘吉南凹陷相对稳定，萨探1井芦苇沟组活跃油气显示，证实保存条件是制约页岩油气勘探的关键要素，相对稳定的下盘凹陷—斜坡区是页岩油藏的主要勘探方向。

#### 3.3.2 常规砂岩油气藏主要受成熟烃源岩、储盖组合、构造背景和油源断层四要素控制，以构造—岩性油气藏为主

晚古生代阜康断裂带东段呈“四凸三凹”的构造格局，即北三台凸起、三台凸起、吉南凸起、古西凸起、阜康凹陷、吉木萨尔凹陷和吉南凹陷。吉南凹陷是夹持于博格达山山前和吉南凸起之间的一个凹陷，早二叠世，博格达山山前的吉南凹陷芦苇沟组湖盆面积大，烃源岩厚度大、平面展布稳定，喜马拉雅期上盘改造强烈，下盘的吉南凹陷改造弱，构造平缓稳定。研究表明，燕山运动东西向挤压形成多条南北向断裂，并初步形成圈闭，为梧桐沟组一侏罗系稠油油藏的早期充注形成基础，喜马拉雅运动不仅形成大型推覆构造，也为吉南凹陷东斜坡进一步抬升，吉南凹陷下盘区构造保持相对稳定，构造—岩性油藏形成和晚期保存创造条件<sup>[22-24]</sup>。三期原盆控制了纵向上二叠系井井子沟组、

梧桐沟组、三叠系韭菜园组和侏罗系八道湾组4套储盖组合沉积，均以退积三角洲为主，圈闭空间配置有利。燕山—喜马拉雅两期构造运动形成多个台阶和鼻隆，既为油气成藏提供了通源断裂，又为油气运聚指示了优势运移方向，形成良好的芦苇沟组烃源岩—油源断裂—井井子沟组砂体储层—构造岩性圈闭—芦苇沟组盖层的成藏体系，为油气持续充注和晚期保存奠定地质基础，具备立体勘探较大规模油藏的储层条件。

### 3.3.3 以芦苇沟组为烃源岩，形成下生上储和上生下储两种成藏模式

根据富烃凹陷三明治成藏结构：源储一体页岩油、紧邻生油岩致密油气藏、远处沿断裂运移上来的

常规油气藏，结合该区二叠系含油气系统原盆、烃源岩、储盖组合、构造运动4个要素的匹配研究，分析该区主要发育两类油藏：一是以芦苇沟组自生自储为核心要素的页岩油气，其中页岩油主要发育在阜康断裂带下盘相对稳定区，大面积连片分布，页岩气主要发育在阜康断裂带上盘早期深埋、后期剧烈抬升区域，受烃源岩成熟度高和后期破坏调整影响，现今表现为构造气藏特点；二是以芦苇沟组为烃源岩，以侏罗系八道湾组、三叠系韭菜园子组、二叠系梧桐沟组、井井子沟组为储盖组合相配置的常规砂岩油藏，纵向形成下生上储和上生下储两种模式，燕山期断裂对油藏形成具有决定性的控制作用，基本形成断裂沟通、横向调整、岩性为主、断层切割的油藏聚集模式（图7）。

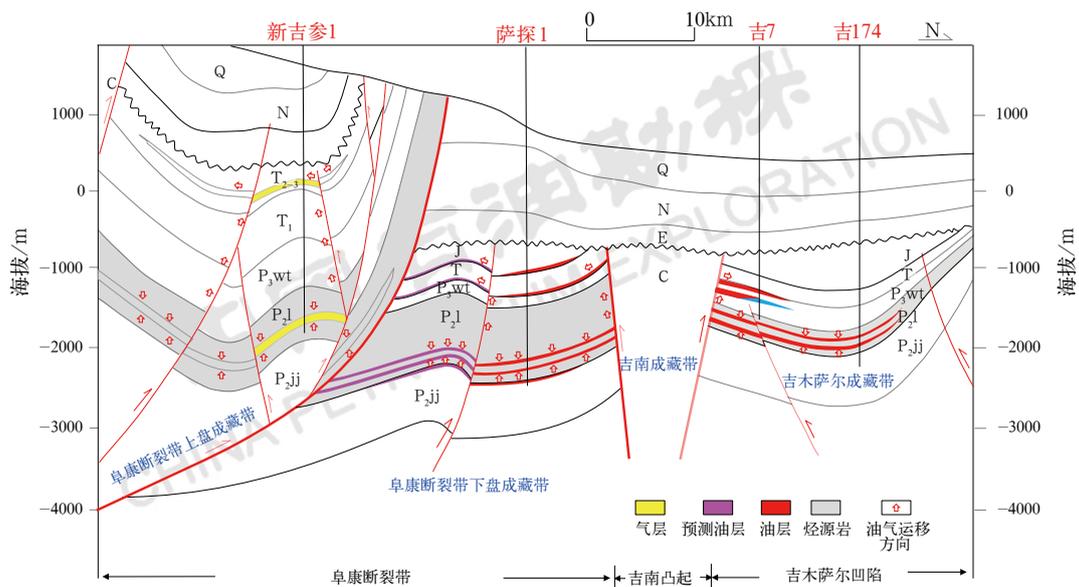


图7 吉南—吉木萨尔凹陷油藏模式图

Fig.7 Oil accumulation pattern in Jinan—Jimsar Sag

## 4 突破意义及有利勘探区带评价

2019年以来，吐哈油田公司跳出吉木萨尔凹陷，先后在准噶尔盆地东部发现石树沟凹陷二叠系页岩油和石钱滩凹陷石炭系天然气藏，风险探井萨探1井在中二叠统井井子沟组、芦苇沟组、梧桐沟组和下三叠统韭菜园组及下侏罗统八道湾组均钻遇油气显示，测井解释5套油层。首次对下二叠统井井子沟组试油获得高产油流。对深化阜康断裂带东段吉南凹陷成藏地质认识、加快勘探节奏、实现多层系突破，乃至推动准东地区效益勘探、规模增储具有重要的战略意义。一是研究表明阜康断裂带东段吉南凹陷发育芦苇沟组规模优质烃源岩，烃源岩厚度大、成熟度高，优于隔

凸相望的吉木萨尔凹陷，具备形成规模成藏的资源基础。芦苇沟组沉积环境以咸化湖盆为主，源储共生，萨探1井揭示储层甜点岩性为含灰粉砂岩和云质粉砂岩，孔隙度为3.1%~5.7%，渗透率为0.0031~6.14mD，具备形成大面积分布的页岩油的条件。二是萨探1井揭示侏罗系八道湾组、三叠系韭菜园子组、二叠系梧桐沟组、井井子沟组4套储层，退覆型三角洲沉积砂体继承性发育，储层薄、横向变化快，物性好，具备形成岩性油气藏的圈闭条件。三是侏罗系、三叠系、二叠系4套储层与芦苇沟组烃源岩通过断裂垂向或者侧向沟通，形成下生上储和上生下储多套常规油气藏，呈现“下油上气、油气并重、常非并举、多层系复式聚集”的特点。四是展现阜康断裂带东段立体

勘探、整体突破的态势，继准噶尔盆地南缘西段、中段上二叠统突破后，东段吉南凹陷再获突破，展现出准噶尔盆地南缘复杂构造带整体突破的良好勘探前景。

通过两类油藏控制要素分析，结合构造解释和地震储层预测，初步圈定吉南凹陷有利勘探面积 1388 km<sup>2</sup>。其中芦苇沟组页岩油有利勘探面积 257km<sup>2</sup>，

构造带下盘稳定区是勘探的有利方向；常规油气有利勘探面积为 1131km<sup>2</sup>，其中井子沟组有利面积 478km<sup>2</sup>，梧桐沟组有利面积 285km<sup>2</sup>，侏罗系—三叠系有利面积 368km<sup>2</sup>（图 8），其中萨探 1 井钻探已经证实该区中二叠统井子沟组储层发育且高产，是规模增储最为现实的领域。

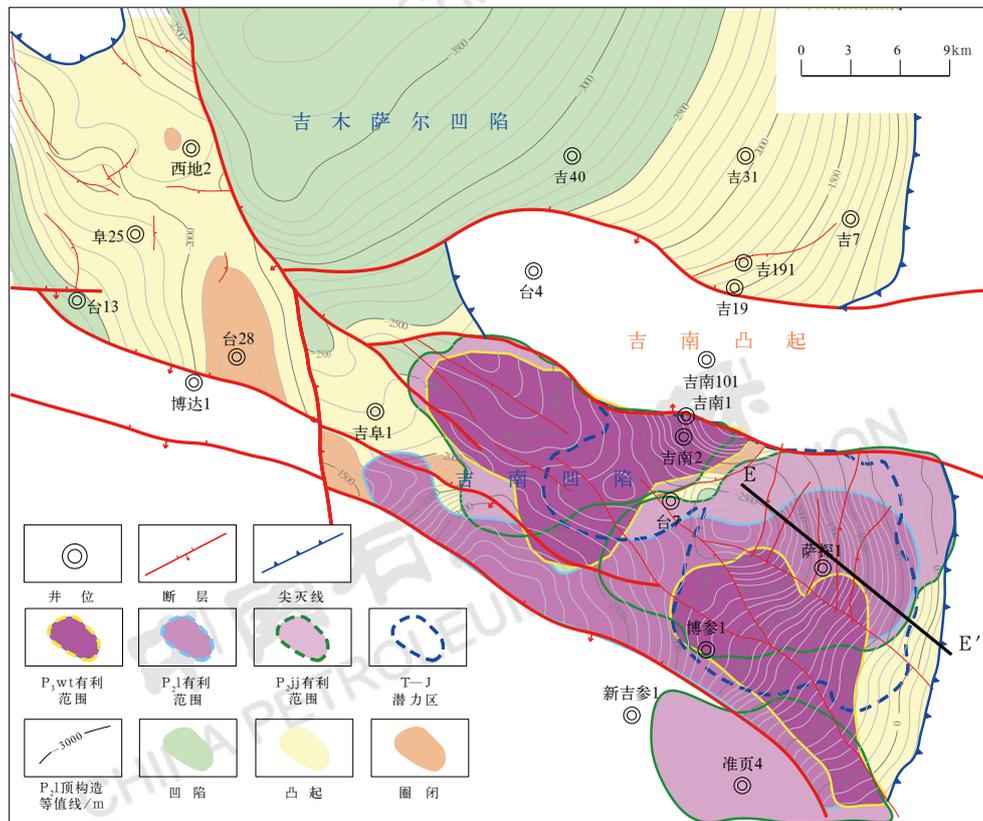


图 8 阜康断裂带东段吉南凹陷有利区带预测图

Fig.8 Prediction of favorable play in Jinan Sag, east segment of Fukang fault zone

## 5 结论

(1) 萨探 1 井首次在吉南凹陷获得工业油流，证实了吉南凹陷具备常非并举、立体勘探潜力，提升了准噶尔盆地东部整体勘探信心，是风险勘探的成功实例。

(2) 阜康断裂带东段海西期断裂控制凹陷形成、烃源岩展布及二叠系储层展布，印支期断裂控制三叠系—侏罗系储层展布和圈闭形成。喜马拉雅期研究区南部博格达山发育大规模逆冲推覆构造，造成侏罗系及下伏地层向东剧烈抬升剥蚀，为吉南凹陷东部多层系叠合成藏奠定基础。

(3) 吉南凹陷芦苇沟组烃源岩广泛发育，厚度大，品质好，整体成熟度较高，纵向上发育多套不同类型储集体，具备油气规模成藏基础；下盘吉南凹陷稳定

区发育早期构造稠油油藏、晚期岩性油藏和页岩油三类油藏，是近期勘探突破的重点领域。

## 参考文献

- [1] 王明明. 准噶尔盆地东部油气藏形成及油气分布规律[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(6):1-8.  
Wang Mingming. Formation of oil-gas pools and distribution of oil-gas in the eastern part of Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1992, 19(6):1-8.
- [2] 薛新克, 李新兵, 王俊槐. 准噶尔盆地东部油气成藏模式及勘探目标[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(6):462-464.  
Xue Xinke, Li Xinbing, Wang Junhuai. Reservoir formation mode and exploration target in the eastern Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(6):462-464.
- [3] 张越迁, 张年富. 准噶尔大型叠合盆地油气富集规律[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(1):59-64.  
Zhang Yueqian, Zhang Nianfu. Oil/gas enrichment of large superimposed basin in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(1):59-64.

- [4] 黄林军, 潘建国, 魏东涛, 等. 准东地区油气成藏条件及聚集规律[J]. 石油天然气学报, 2012,34(9):42-48.  
Huang Linjun, Pan Jianguo, Wei Dongtao, *et al.* Reservoir-forming condition and accumulation rules of the eastern Junggar Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012,34(9):42-48.
- [5] 郑孟林, 田爱军, 杨彤远, 等. 准噶尔盆地东部地区构造演化与油气聚集[J]. 石油与天然气地质, 2018,39(5):907-917.  
Zheng Menglin, Tian Aijun, Yang Tongyuan, *et al.* Structural evolution and hydrocarbon accumulation in the eastern Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018,39(5):907-917.
- [6] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规—非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2021,48(1):38-51.  
Zhi Dongming, Tang Yong, He Wenjun, *et al.* Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1):38-51.
- [7] 高阳, 叶义平, 何吉祥, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油开发实践[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):133-141.  
Gao Yang, Ye Yiping, He Jixiang, *et al.* Development practice of continental shale oil in Jimsar Sag in the Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):133-141.
- [8] 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.
- [9] 张朝军, 何登发, 吴晓智, 等. 准噶尔多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 中国石油勘探, 2006,11(1):47-58.  
Zhang Chaojun, He Dengfa, Wu Xiaozhi, *et al.* Formation and evolution of multicycle superimposed basin in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006,11(1):47-58.
- [10] 宋凯越. 阜康断裂带的构造演化及油气成藏特征[D]. 北京: 中国石油大学, 2019.  
Song Kaiyue. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation characteristics of Fukang Fault Zone[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [11] 李涛, 张进, 卢苗安. 准噶尔盆地南缘东段、东北缘盆山耦合研究[J]. 新疆石油地质, 2008,29(6):680-686.  
Li Tao, Zhang Jin, Lu Miao'an. Study on basin-mountain coupling in east segment of southern margin and northeastern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008,29(6):680-686.
- [12] 吴俊军, 游利萍, 杨和山. 准噶尔盆地阜康断裂带构造演化与油气成藏[J]. 新疆石油地质, 2013,34(1):36-40.  
Wu Junjun, You Liping, Yang Heshan. Structural evolution and hydrocarbon accumulation of Fukang Fault Zone in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013,34(1):36-40.
- [13] 潘秀清, 杨成美, 况军. 准噶尔盆地南缘构造型式及构造评价[J]. 新疆石油地质, 1986,7(1):13-21.  
Pan Xiuqing, Yang Chengmei, Kuang Jun. Structural types and structural evaluation of the southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1986,7(1):13-21.
- [14] 吴晓智, 王立宏, 郭建刚, 等. 准噶尔盆地南缘油气勘探难点与对策[J]. 中国石油勘探, 2006,11(5):1-7.  
Wu Xiaozhi, Wang Lihong, Guo Jiangan, *et al.* Difficulties and solution of oil and gas exploration in south margin of Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006,11(5):1-7.
- [15] 魏东涛, 赵应成, 张虎权, 等. 博格达山北麓新生代前陆冲断带构造解析[J]. 天然气工业, 2005,25(增刊B):83-87.  
Wei Dongtao, Zhao Yingcheng, Zhang Huquan, *et al.* Structure analysis on Foreland thrust belt of cenozoic in north foothill of Bogeda Mountain[J]. Natural Gas Industry, 2005,25(SB):83-87.
- [16] 梅文科. 准噶尔盆地东缘地区二维地震解释方案研究[J]. 中国石油勘探, 2014,19(2):46-52.  
Mei Wenke. Study of 2D seismic interpretation plan for eastern periphery of Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014,19(2):46-52.
- [17] 陈新发, 张义杰, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地陆梁隆起西部次生油气藏勘探经验及前景[C] // 中国工程院, 环太平洋能源与矿产资源理事会, 中国石油学会. 21世纪暨国际油气勘探展望. 北京: 中国石化出版社, 2003:158-162.  
Chen Xinfu, Zhang Yijie, Wang Xulong, *et al.* Exploration experience and prospects of secondary oil and gas reservoirs in the western Luliang Uplift of Junggar Basin[C] // Chinese Academy of Engineering, Pacific Rim Energy and Mineral Resources Council, China Petroleum Institute. Prospects for China and international oil and gas exploration in the 21<sup>st</sup> Century. Beijing: China Petrochemical Press, 2003:158-162.
- [18] 刘海磊, 李卉, 向辉, 等. 准噶尔盆地东南缘阜康断裂带及其周缘原油地球化学特征和成因[J]. 天然气地球科学, 2020,31(2):258-267.  
Liu Hailei, Li Hui, Xiang Hui, *et al.* Geochemistry, genesis and distribution of crude oils in the Fukang fault zones and their periphery in Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020,31(2):258-267.
- [19] 王越, 张关龙, 王圣柱, 等. 博格达山东北缘上二叠统沉积特征与沉积演化模式[J]. 沉积学报, 2019,37(3):579-588.  
Wang Yue, Zhang Guanlong, Wang Shengzhu, *et al.* Sedimentary characteristics and evolution model of the upper Permian on the northeast periphery of Bogda Mountain[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019,37(3):579-588.
- [20] 王东营, 汤达祯, 苟明福, 等. 准噶尔南缘阜康地区芦草沟组油页岩地质特征[J]. 中国石油勘探, 2007,12(6):18-22.  
Wang Dongying, Tang Dazhen, Gou Mingfu, *et al.* Oil-shale geology of Lucaogou Formation in Fukang Area on southern margin of Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2007,12(6):18-22.
- [21] 丁超, 王佳玮. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系梧桐沟组沉积演化规律[J]. 中国石油勘探, 2015,20(3):22-29.  
Ding Chao, Wang Jiawei. Sedimentary development law of Permian Wutonggou Formation in Jimsar Sag of Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(3):22-29.
- [22] 周峰, 梅廉夫, 刘麟, 等. 准噶尔盆地南缘喜马拉雅运动构造应力场模拟[J]. 新疆石油地质, 2005,26(6):641-643.  
Zhou Feng, Mei Lianfu, Liu Lin, *et al.* Numerical simulation of tectonic stress field during Himalayan Movement in southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005,26(6): 641-643.
- [23] 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]. 地球学报, 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.
- [24] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. 地质前缘, 2000,7(4):431-440.  
Cai Zhongxian, Chen Fajing, Jia Zhenyuan. Types and tectonic evolution of Junger Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4):431-440.