

准噶尔盆地东部二叠系全油气系统 储集层特征及主控因素*

肖冬生¹ 徐雄飞^{1,2,3} 董雨洋⁴ 张亦婷¹
程 伟¹ 宋 兵⁴

1 中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

4 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

摘 要 二叠系作为准噶尔盆地东部油气勘探的主要层系, 围绕芦草沟组烃源岩, 已在源下、源内及源上发现了多种类型油气藏, 呈现全油气系统勘探前景。基于大量钻井、野外露头、测井、地震等资料, 针对二叠系储集层特征及有效储集层控制因素开展研究, 结果表明: (1) 准东地区二叠系发育扇三角洲、辫状河三角洲和咸化滨浅湖 3 类有利沉积相, 以芦草沟组咸化湖相泥页岩和梧桐沟组顶部湖泛泥岩为区域盖层, 与井井子沟组三段、芦草沟组一段和梧桐沟组一段储集层形成 3 套主要的储盖组合; (2) 二叠系发育碎屑岩、碳酸盐岩、细粒混积岩 3 类储集层, 以中—低孔、低渗—特低渗为主, 碎屑岩储集空间主要由剩余粒间孔、粒内及填隙物溶孔构成, 碳酸盐岩发育残余格架孔/鸟眼孔、粒间溶孔、晶间孔等孔隙类型, 细粒混积岩以粒间溶孔、晶间微孔和微裂缝为主; (3) 扇三角洲前缘水下分流河道及滨浅湖灰云坪、滩坝是储集层发育的优势相带, 埋藏期有机酸溶蚀及绿泥石膜改善了碎屑岩储集层物性, 同生期大气淡水淋滤及白云石化是碳酸盐岩优质储集层形成的关键, 多期次破裂作用对细粒混积岩储集性能改善具有建设性作用; (4) 阜康断裂带东段、吉木萨尔凹陷北部、阜康凹陷东斜坡是准东地区规模增储的现实勘探领域, 阜康断裂带中—西段、石树沟凹陷南斜坡是勘探的有利方向。

关键词 主控因素 储集层 全油气系统 二叠系 准噶尔盆地

第一作者简介 肖冬生, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事地震地质综合研究与勘探管理工作。
E-mail: xiaodsyjy@petroChina.com.cn。

通讯作者简介 徐雄飞, 男, 1986 年生, 高级工程师, 主要从事地质综合研究工作。E-mail: xuxfyjy@petroChina.com.cn。

中图分类号: P618.13; TE122.2 文献标志码: A

Reservoir characteristics and controlling factors of the Permian total petroleum system in eastern Junggar Basin

XIAO Dongsheng¹ XU Xiongfei^{1,2,3} DONG Yuyang⁴
ZHANG Yiting¹ CHENG Yi¹ SONG Bing⁴

* 中国石油天然气股份有限公司科技项目(编号: 2023ZZ24YJ01)资助。[Financially supported by the PetroChina Science and Technology Project (No. 2023ZZ24YJ01)]

收稿日期: 2025-12-09 改回日期: 2026-04-27

1 *Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tuha Oilfield Company, Xinjiang Hami 839009, China*

2 *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

3 *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

4 *Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China*

Abstract The Permian strata represent the primary hydrocarbon exploration target in eastern Junggar Basin. A diverse array of oil and gas reservoirs—occurring below, within, and above the source rocks of the Lucaogou Formation—demonstrates the basin’s substantial potential for a fully integrated petroleum system. Drawing upon comprehensive datasets derived from drilling operations, field outcrop observations, well-log interpretations, and seismic surveys, this study systematically characterizes Permian reservoir properties and identifies the principal geological controls governing reservoir effectiveness. Key findings are as follows: (1) Three favorable sedimentary facies belts developed during the Permian in the eastern Junggar region: (i) the fan-delta front, (ii) the braided-river delta front, and (iii) the saline shallow-lacustrine facies. Regional caprocks are provided by the saline lacustrine mudstones and shales of the Lucaogou Formation and the flooding mudstone at the top of the Wutonggou Formation. These caprocks, in conjunction with underlying reservoir units, define three major reservoir-caprock assemblages centered on the third member of the Jingjingzigou Formation, the first member of the Lucaogou Formation, and the first member of the Wutonggou Formation. (2) Permian reservoirs comprise three lithological types: clastic, carbonate, and fine-grained mixed rocks. Collectively, these exhibit medium-to-low porosity and low-to-ultra-low permeability. Pore systems in clastic reservoirs are predominantly composed of residual intergranular pores, intragranular dissolved pores, and interstitial dissolved pores. Carbonate reservoirs feature residual framework pores (including bird’s-eye pores), intergranular dissolved pores, and intercrystalline pores. Fine-grained mixed reservoirs host intergranular dissolved pores, intercrystalline micropores, and microfractures as the dominant pore types. (3) Subaqueous distributary channels within fan-delta fronts, together with lime-dolomite flats and beach-bar deposits in shallow-lacustrine settings, constitute the most prospective facies for high-quality reservoir development. In clastic reservoirs, organic acid dissolution and chlorite grain-coating during burial diagenesis significantly improve reservoir quality. For carbonate reservoirs, syndepositional meteoric water leaching and dolomitization are critical processes in generating high-permeability pore networks. In fine-grained mixed reservoirs, multi-stage hydraulic fracturing substantially enhances storage capacity and flow performance. (4) Integrated geological analysis indicates that the eastern segment of the Fukang Fault Zone, the northern part of the Jimsar Sag, and the eastern flank of the Fukang Sag represent priority areas for near-term reserve growth. Meanwhile, the central-western segment of the Fukang Fault Zone and the southern flank of the Shishugou Sag are identified as promising frontier targets for future exploration.

Key words controlling factors, reservoir, total petroleum system, Permian, Junggar Basin

About the first author XIAO Dongsheng, born in 1982, senior engineer, primarily engaged in integrated seismic geological research and exploration management. E-mail: xiaodsyjy@petroChina.com.cn.

About the corresponding author XU Xiongfei, born in 1986, senior engineer, mainly engaged in integrated geological research. E-mail: xuxfyjy@petroChina.com.cn.

0 引言

准噶尔盆地发育下二叠统风城组、中二叠统芦草沟组 2 套优质烃源岩层系 (赵文智等, 2019; 胡

素云等, 2020), 西部的玛湖凹陷、沙湾凹陷围绕风城组碱湖相烃源岩先后发现了多个油气富集区, 展现了准噶尔盆地二叠系全油气系统良好的油气勘

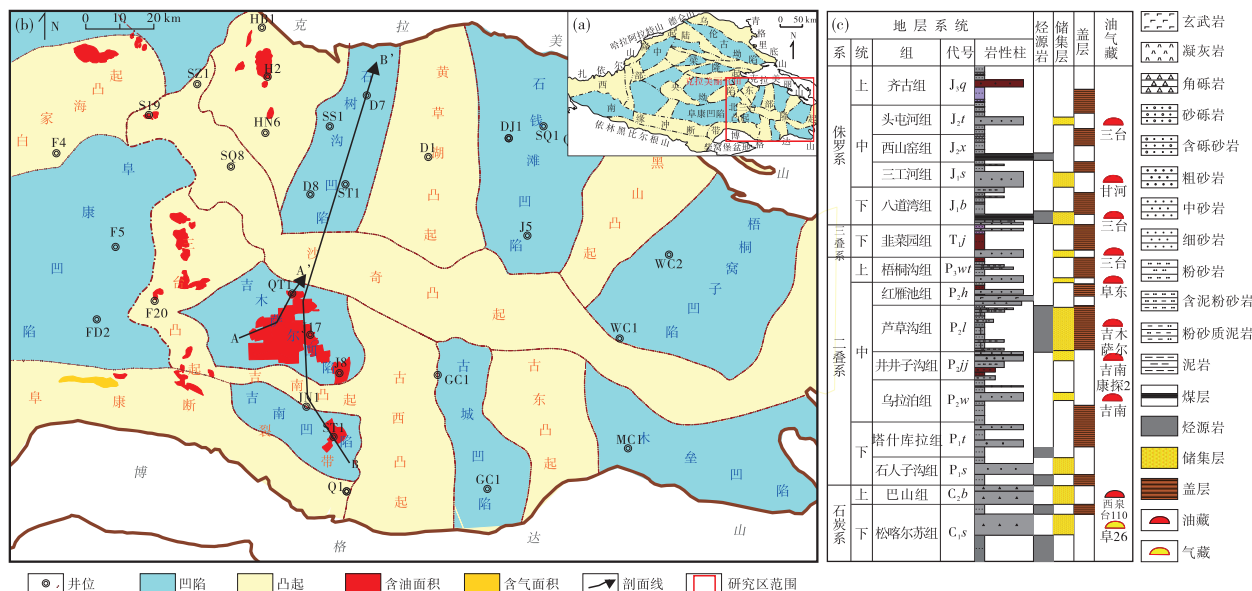
探前景（何文军等，2021；支东明等，2021；唐勇等，2022）。准噶尔盆地东部（以下简称“准东地区”）二叠系经过多期构造叠加改造，以残留凹陷为主，一直被认为难以形成规模油气藏。早期仅在吉木萨尔凹陷东部斜坡区上二叠统梧桐沟组发现吉 7 块常规砂岩油藏（丁超等，2015；谭强等，2018）；2012 年，凹陷区钻探的吉 172-H 井在中二叠统芦草沟组获日产 69.5 t 高产油流，标志着吉木萨尔陆相页岩油勘探取得重大突破，发现了 10 亿吨级的页岩油藏（匡立春等，2015；支东明等，2019），近年来，凹陷北部斜坡区芦草沟组及之下的井井子沟组发现了致密油藏（支东明等，2023；陈旋等，2025）。同时，阜康断裂带的下盘均在梧桐沟组、井井子沟组、芦草沟组获得重大突破，发现了亿吨级规模砂岩油藏（何海清等，2021；梁世君等，2021）；石树沟凹陷芦草沟组石树 1 井、树探 1 井也先后发现非常规油藏。油源对比证实，准东地区梧桐沟组、芦草沟组及井井子沟组的油气均来自芦草沟组暗色泥岩，且纵向上发育下生上储型（常规砂岩—致密砂岩）、自生自储型（页岩—致密砂岩—常规砂岩）及新生古储型（致密砂岩）3 类油藏，具有全油气系统的成藏特点（康积伦等，2025）。早期学者针对准东地区烃源岩、构造演化和源储时空匹配关系等方面已开展了相关研究，在二叠系地质特征、常规—非常规油藏有序共

生的成因机制、资源潜力及勘探前景等方面也取得了一定认识（康积伦等，2023；李建忠等，2023；夏世威等，2024；支东明等，2024）。然而，已有认识侧重于单一凹陷、单一层系的分析，对准东地区同一套沉积地层的全粒序储集层特征、有效储集层控制因素鲜有系统的研究。根据第四次资源评价结果，准东地区二叠系石油资源量为 32.7×10^8 t、探明率仅为 12.3%，表明该领域具备广阔的油气勘探前景。由于该区构造变形复杂，不同凹陷、不同层系的沉积相、储集层特征存在显著差异，优质储集层形成机理及主控因素不明，严重制约了二叠系油气藏的勘探。为明确该区二叠系全油气系统储集层特征及主控因素，依据地质露头、钻井、地震及分析化验等资料，开展重点层段沉积相类型及展布规律、储集层特征及优质储集层主控因素研究，以期明确二叠系含油气系统有利勘探方向。该研究不仅能有效指导准噶尔盆地东部二叠系油气勘探，对其他具有类似构造演化背景的盆地或凹陷油气勘探部署也具有一定的借鉴意义。

1 二叠系全油气系统特征

1.1 地质背景

准东地区位于准噶尔盆地东部隆起带（图 1-a），夹持于克拉美丽山和博格达山之间，



a—研究区地理位置；b—研究区构造单元划分；c—研究区地层柱状图

图 1 准噶尔盆地东部构造位置与地层柱状图

Fig. 1 Tectonic location and stratigraphic column of eastern Junggar Basin

面积约为 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。受海西期、印支期、燕山期、喜马拉雅期等多期构造运动叠加的影响,地质结构复杂、断裂发育,呈凹—凸相间的“棋盘式”构造格局,平面上划分为阜康凹陷、三台凸起、石树沟凹陷、沙奇凸起、吉木萨尔凹陷、吉南凸起等 14 个二级构造单元及阜康断裂带(图 1-b);地层充填序列在古生代褶皱基底之上,自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系(图 1-c)。

准东地区主要经历了早—中二叠世裂陷盆地、晚二叠世及三叠纪挤压拗陷盆地、早侏罗世弱伸展盆地、中—晚侏罗世—白垩纪前陆盆地、新生代再生前陆盆地 5 个发展阶段(鲁智帅等, 2024; 殷树铮等, 2026)。二叠系是在该背景下形成的一套以陆相碎屑为主的沉积建造,自下而上依次发育石人子沟组、塔什库拉组、乌拉泊组、井井子沟组、芦草沟组、红雁池组和梧桐沟组 7 套地层,井井子沟组、芦草沟组及梧桐沟组是二叠系全油气系统储集层发育的主要层段。其中,井井子沟组一段岩性以褐色泥岩、褐色泥质粉砂岩夹灰色粉—细砂岩为主,井井子沟组二段为厚层灰色含砾砂岩、中—细砂岩夹薄层灰色泥岩,砂地比大于 60%、砂层厚度为 150~200 m;芦草沟组厚度为 300~500 m,芦草沟组一段发育陆源碎屑岩、碳酸盐岩及二者混积的细粒沉积岩,芦草沟组二段为厚层深灰色—灰黑色泥岩夹薄层粉砂岩、灰岩、白云岩,是研究区二叠系烃源岩主要的发育段,总有机碳含量为

0.61%~33.69%,平均值为 5.39%,热解生烃潜量为 1.73~238.3 mg/g,平均值为 30.24 mg/g,为“好—极好”烃源岩,热解最高峰为 437~461 ℃,平均值为 447 ℃,镜质组反射率为 0.5%~1.3%,平均值为 0.91%,整体处于低成熟—成熟阶段;梧桐沟组一段岩性为灰色块状砾岩、砂砾岩、砂岩和泥岩组成的正韵律状互层,厚度 120~220 m,梧桐沟组二段下部为含砾砂岩、粉砂岩与泥岩互层,向上变为厚层泥岩,梧桐沟组三段为褐灰色、灰色泥岩夹泥质细砂岩、粉砂岩、泥灰岩透镜体,储集层不发育。平面上,井井子沟组、芦草沟组、梧桐沟组 3 套规模储集体主要分布于吉木萨尔凹陷、阜康凹陷东部斜坡区、石树沟凹陷及阜康断裂带。

1.2 常规—非常规油藏有序分布特征

准东地区二叠系以芦草沟组咸化湖相泥岩为烃源岩,以梧桐沟组顶部、井井子沟组下段泥岩为顶底板,围绕井井子沟组上部、芦草沟组中下部、梧桐沟组下部等储集层发育段形成 3 套主要的储盖组合,空间上常规—非常规油藏有序分布,具有全油气系统的典型特征(支东明等, 2024)。

以吉木萨尔凹陷为例(图 2),纵向上,以芦草沟组烃源岩为中心,自下而上依次发育源下致密油(井井子沟组油层)、源内致密油(芦草沟组油层)和页岩油(芦草沟组油层)、源上常规油藏(梧桐沟组油层)。源下井井子沟组油层位于芦草沟组烃源岩之下,走滑断裂沟通井井子沟组砂岩储集层与

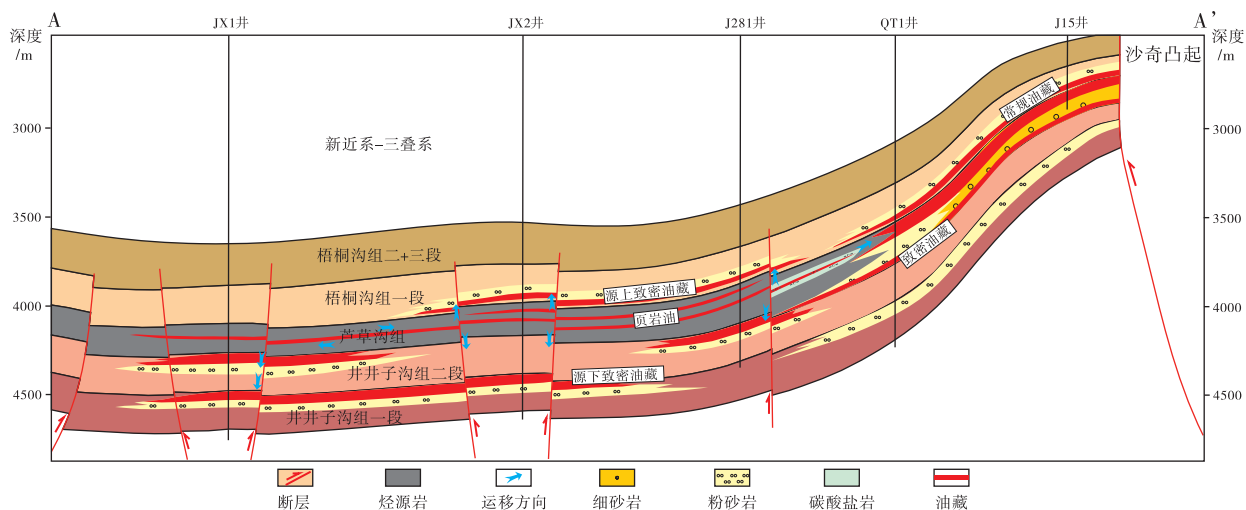


图 2 吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统成藏模式(修改自支东明等, 2023; 剖面位置见图 1)

Fig. 2 Schematic diagram of whole petroleum system of the Permian in Jimsar sag
(modified from Zhi *et al.*, 2023, see profile location in Fig. 1)

芦苇沟组烃源岩，形成上生下储油藏，储集层物性整体偏差，以致密油藏为主，局部近物源、高部位地区发育常规油藏。源上梧桐沟组油层上覆于芦苇沟组烃源岩，广泛发育的断裂作为油气垂向运移通道，断一砂匹配调整油气分布，形成下生上储常规油藏，储集层物性较好，多为构造、构造—岩性油藏，边部受边底水界面控制，局部受地层尖灭、岩性及物性变化控制，物性差的地区发育致密油藏。源内芦苇沟组自下而上多类型油气并存，下段扇三角洲沉积砂体伸入湖盆中心烃源岩区，形成近源油气富集，以致密油为主；上段发育湖侵期巨厚暗色泥岩及陆源碎屑、碳酸盐混积岩，形成源储一体型页岩油。平面上，凹陷区页岩油、斜坡区致密油、高部位常规油藏围绕芦苇沟组烃源岩呈有序分布、差异富集的特点：凹陷区页岩油沿斜坡向洼陷区连续分布，芦苇沟组全井段均有发育，有效储集层以白云质粉砂岩、泥晶白云岩为主，单层厚度为 1~5 m；斜坡区致密油分布范围广，甜点段集中在芦一段，发育粉砂岩、藻灰岩、白云岩等多类型储集层，单层厚度为 3~8 m，含油层横向连续性好，平面分布稳定；高部位常规油藏仅分布于芦一段物性相对较好的扇三角洲前缘沉积砂体，油气富集程度主要受断裂、砂体及盖层共同控制。

2 储集层沉积相特征

2.1 沉积相类型及演化

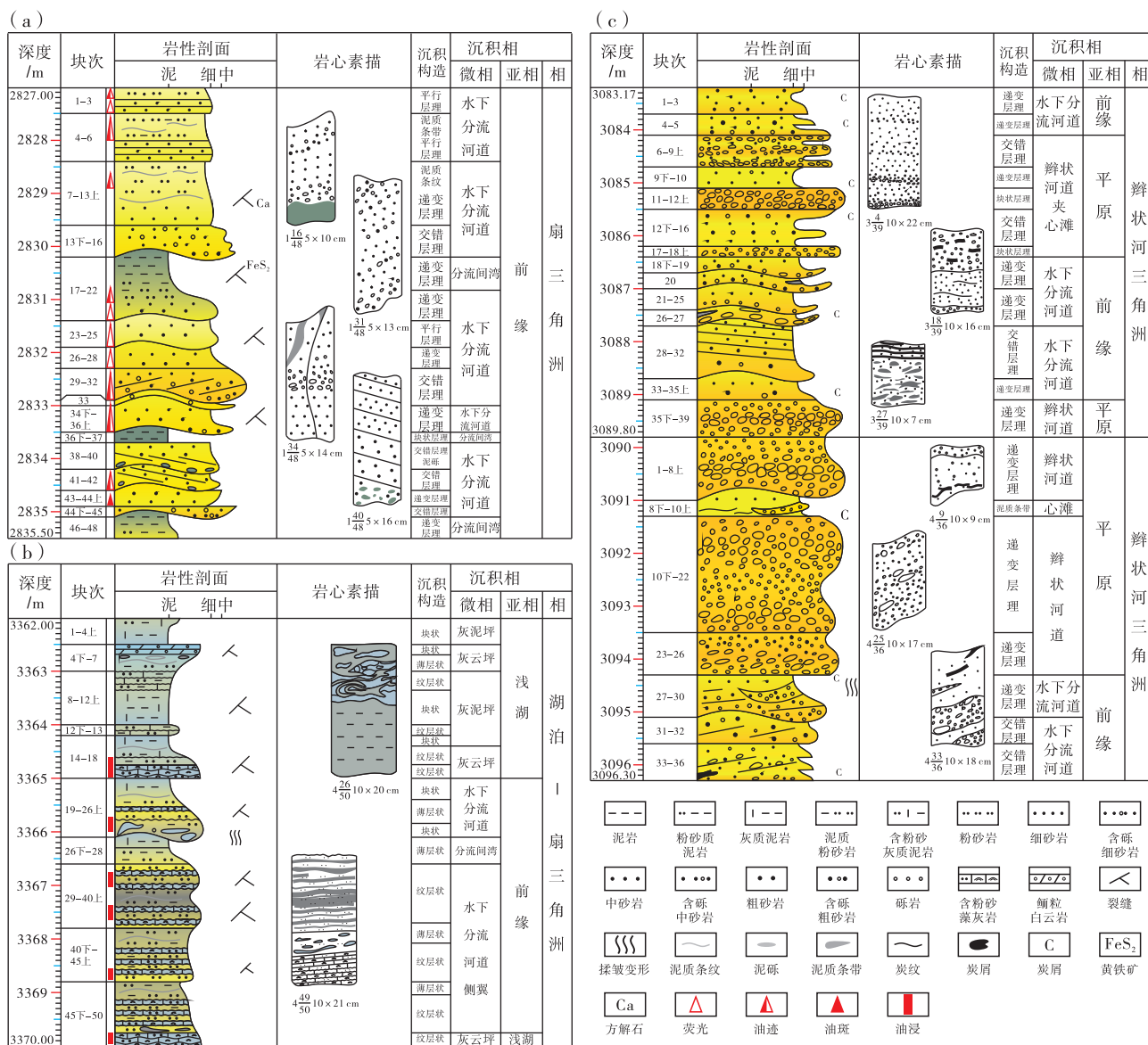
北疆地区二叠纪沉积环境主要为海陆过渡相—陆相（甄宇等，2024）。早二叠世为海—陆过渡相断陷盆地、中二叠世为陆相断陷—坳陷盆地、晚二叠世为前陆盆地，构造应力叠加气候影响使沉积基准面发生改变，导致中—上二叠统沉积相类型在纵向、平面频繁变化（杨有星等，2022；殷树铮等，2026）。受山体隆升的控制，南部的博格达山在晚二叠世开始隆升，其在井井子沟—芦苇沟沉积期不提供物源，仅在梧桐沟组沉积期向北提供物源；吉南凸起在井井子沟组—梧桐沟组沉积早期向南、北向提供物源；沙奇凸起和克拉美丽山在二叠世继承性发育，沙奇凸起南北向双向供源，克拉美丽山向南供源（夏世威等，2024；甄宇等，2024）。

准东地区中—上二叠统发育 2 期完整的三级层序：井井子沟组—芦苇沟组沉积期主要为扇三角洲

—湖泊沉积；梧桐沟组沉积期发育扇（辫状河）三角洲—湖泊沉积。井井子沟组属于三级层序的低位域，主要发育中—厚层粗粒扇三角洲前缘水下分流河道砂体（图 3-a）。芦苇沟组属于三级层序的水进域，其中吉木萨尔凹陷发育半封闭咸化湖盆沉积，广泛发育扇三角洲前缘、滨浅湖碎屑滩坝及灰云坪。近源发育内前缘厚层叠置水道砂（砾）岩、外前缘互层状分支水道、席状砂岩，远源发育外前缘互层状席状砂岩、滨浅湖滩坝纹层状（粉）砂岩。受物源、沉积环境影响，各凹陷湖盆中心发育滨浅湖泥坪、灰云坪（图 3-b）。盆缘发育扇三角洲内前缘厚层粗粒砂体，凹陷中心发育外前缘—滨浅湖砂质/灰云质滩坝。中二叠世晚期发育高位域红雁池组扇三角洲相沉积，受区域抬升影响普遍遭受剥蚀，使得芦苇沟组与上覆梧桐沟组呈不整合接触（夏世威等，2024；殷树铮等，2024）。梧桐沟组属于低位—水进域，广泛发育扇（辫状河）三角洲平原—前缘沉积（图 3-c），盆地南缘发育扇三角洲平原—前缘亚相，盆地北缘发育辫状河三角洲平原亚相（辫状河道微相）。晚二叠世晚期发育高位域锅底坑组河流沉积，末期也遭受区域抬升剥蚀，使得梧桐沟组与上覆三叠统韭菜园组呈角度不整合接触（夏世威等，2024；殷树铮等，2024）。

纵向上，前缘砂体由凹陷区向物源区退积，形成中二叠统井井子沟组—芦苇沟组和上二叠统梧桐沟组 2 套水进旋回（图 4）。中二叠统井井子沟组广泛发育扇三角洲—湖泊沉积，近凸起区（如 J19、J38 等井区）主要发育扇三角洲平原和辫状河三角洲前缘沉积，向上逐渐过渡为内前缘水下分流河道和外前缘席状砂、沙坝；近凹陷区（如 J32-HQ3303 井区），芦苇沟组主要发育前缘水下分流河道砂体，向上水体逐渐加深，砂体逐渐向凸起区退积，逐渐过渡为外前缘席状砂、滨浅湖泥、灰云坪以及半深湖泥。梧桐沟组沉积期，盆地整体经历芦苇沟末期的抬升后，水体逐渐加深：梧一段沉积期近物源区发育扇（辫状河）三角洲平原辫状（分流）河道，凹陷区南北向物源前缘砂体交集聚集，砂体连片；梧二段沉积期，水体急剧加深，砂体迅速退积；梧三段沉积期，滨浅湖亚相广泛发育，主要发育滩坝砂体。

横向上，中下二叠统主要发育扇三角洲沉积，



a—S13井, 扇三角洲沉积, 井井子沟组; b—Q2井, 扇三角洲—咸化湖盆沉积, 芦苇沟组; c—FZ2井, 辫状河三角洲沉积, 梧桐沟组

图 3 准噶尔盆地东部中—上二叠统沉积特征柱状图

Fig. 3 Sedimentary characteristics columns of the Middle–Upper Permian in eastern Junggar Basin

仅在北部克拉美丽山前发育辫状河三角洲沉积。从盆缘和盆内继承性发育的凸起到各凹陷内, 沉积相由三角洲相向湖泊相连续过渡。井井子沟组沉积时期, 吉南凹陷、吉木萨尔凹陷和石树沟凹陷均发育扇三角洲沉积, 各凹陷不同物源的形成的扇体存在交汇; 芦苇沟组沉积时期, 吉木萨尔凹陷扇体主要发育在北部靠近沙奇凸起一侧, 凹陷内则发育灰云坪, 吉南凹陷和石树沟凹陷扇体规模较小; 梧桐沟组沉积早期, 吉木萨尔凹陷扇体规模较大, 在凹陷内扇体交汇叠置, 随着水体加深, 中晚期则发育小规模扇体及滩坝沉积, 石树沟凹陷北部发育规模较

大的辫状河三角洲沉积体系, 吉南凹陷在梧桐沟组沉积期扇体规模相对较小(图 4)。

2.2 重点层段沉积相展布

井井子沟组时期, 盆内古凸起和盆地北缘的克拉美丽山是主要的物源供给区, 主要发育扇三角洲平原亚相和扇三角洲前缘亚相, 平面上以前缘亚相展布范围最广, 具有“满凹富砂”的特征, 是二叠系规模储集体发育的重要层段(图 5-a)。阜康断裂带发育大型扇三角洲沉积, 物源来自三台、吉南、古西凸起, 吉南凹陷扇三角洲横向连片、延伸

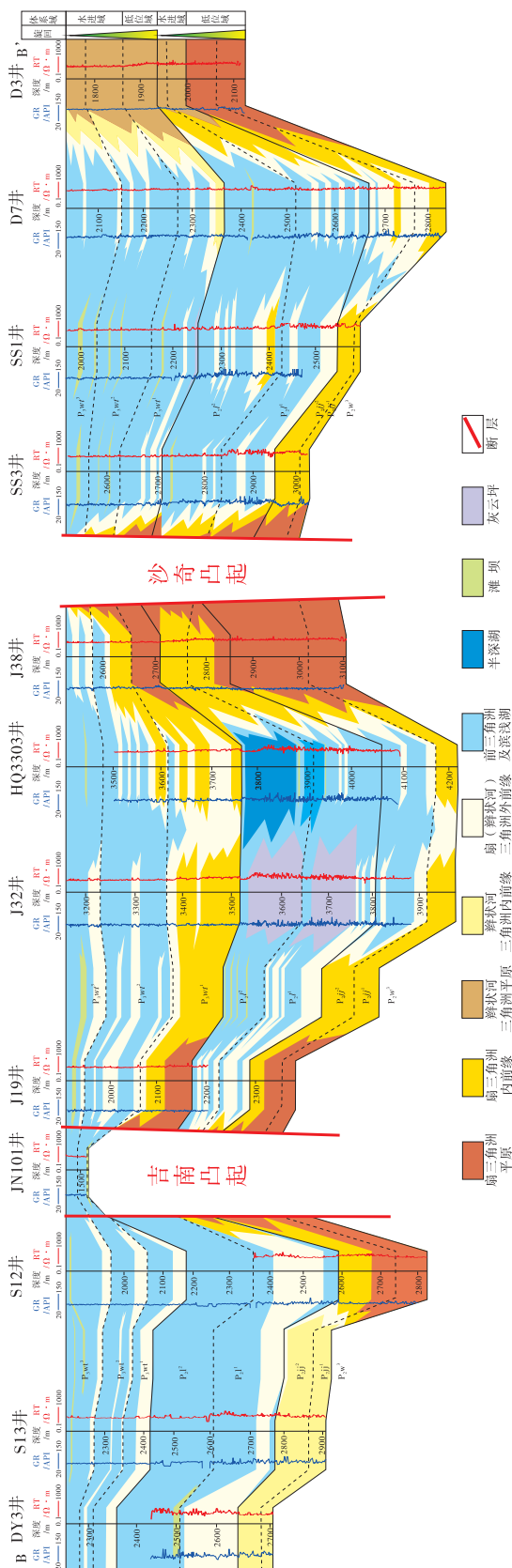


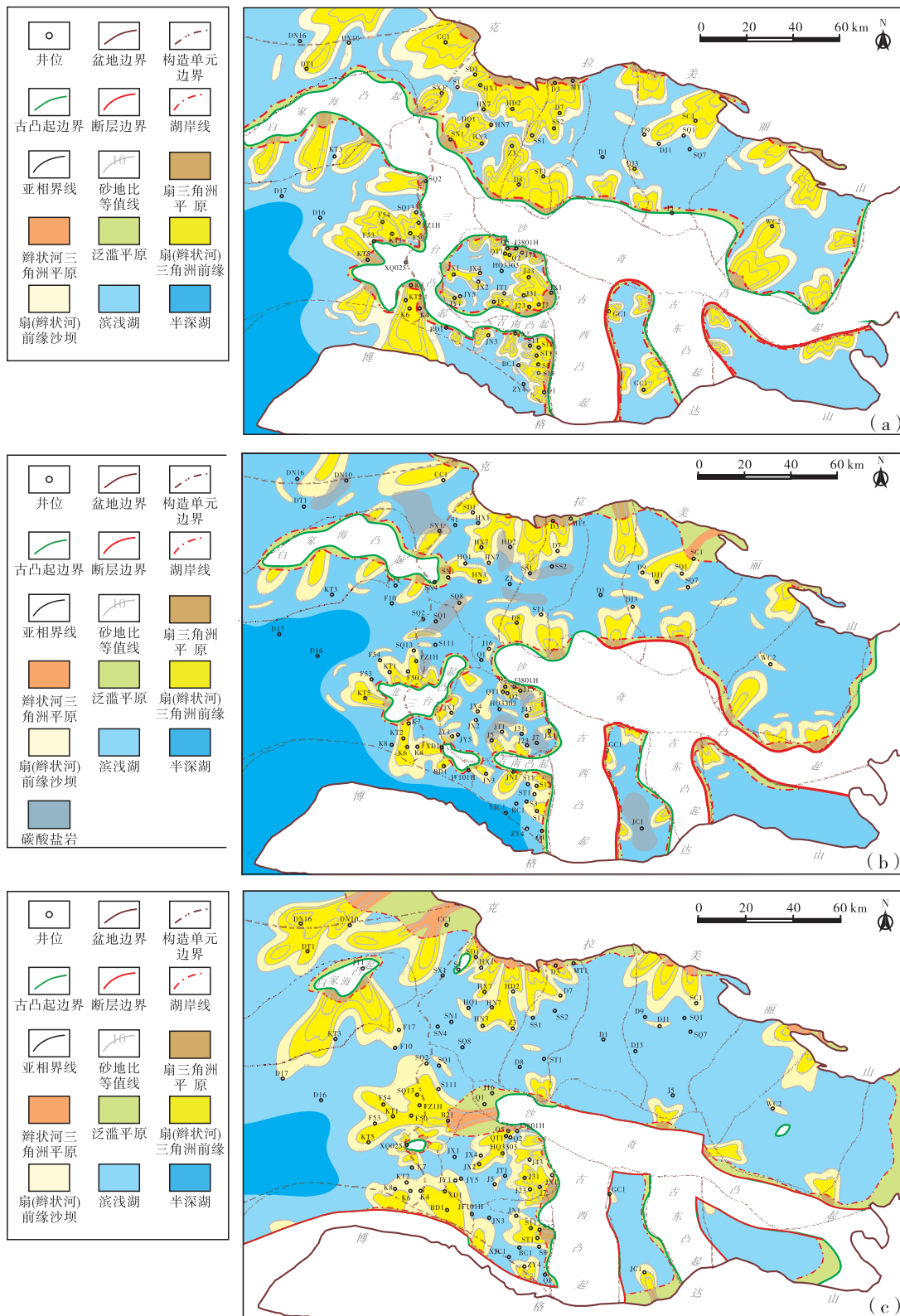
图4 准噶尔盆地东部中—上二叠统南北向连井沉积相剖面(剖面位置见图1)

Fig. 4 Cross-sectional profile of north-south connected well deposits of the Middle-Upper Permian in eastern Junggar Basin (see profile location in Fig. 1)

距离中等, 凹陷中心以前三角洲和滨浅湖沉积为主, 中段甘河子次凹扇三角洲沉积延伸距离远, 前缘亚相向南可达博格达山前, 发育板状、槽状交错层理(图 6-a, 6-b); 受沙奇、吉南、三台凸起控制, 吉木萨尔凹陷周缘都为物源区, 西、南、东物源的扇三角洲延伸较远, 局部发育湖泊相; 阜康凹陷东部斜坡区发育多个北、东物源的扇三角洲朵叶体, 东斜坡扇体相对连片、北斜坡扇体相对孤立, 扇体前缘向洼陷区延伸较远; 沙帐—石树沟凹陷物源供给充足, 发育多个连片分布的大型扇三角洲朵叶体。

芦草沟组为一套水进域沉积, 以湖泊相为主。各凹陷周缘发育扇三角洲沉积, 从斜坡区到凹陷区(图 5-b)。芦一段沉积期, 阜康断裂带位于博格达山前沉积中心, 滨浅湖—半深湖发育(杨有星等, 2022), 大黄山露头发育重力流沉积形成的厚层云质粉砂岩(图 6-c, 6-d), 沿三台、吉南、古西凸起在凹陷周缘发育孤立分布的小型扇三角洲; 吉木萨尔凹陷以滨浅湖沉积为主, 碎屑岩、碳酸盐岩滩坝发育, 周缘扇三角洲延伸距离近; 阜康凹陷东部主体以滨浅湖—半深湖沉积为主, 碎屑岩滩坝发育, 围绕三台凸起发育多个孤立分布的扇三角洲; 沙帐—石树沟凹陷物源供给相对充足, 沿克拉美丽山周缘发育多个连片分布的扇三角洲, 前缘沉积砂体规模大。芦二段沉积期, 湖泊范围扩大, 凹陷中心发育半深湖—深湖相, 滨浅湖相滩坝沉积规模减小; 凹陷周缘的三角洲沉积范围萎缩, 仅在北部发育物源来自克拉美丽山的扇三角洲沉积。

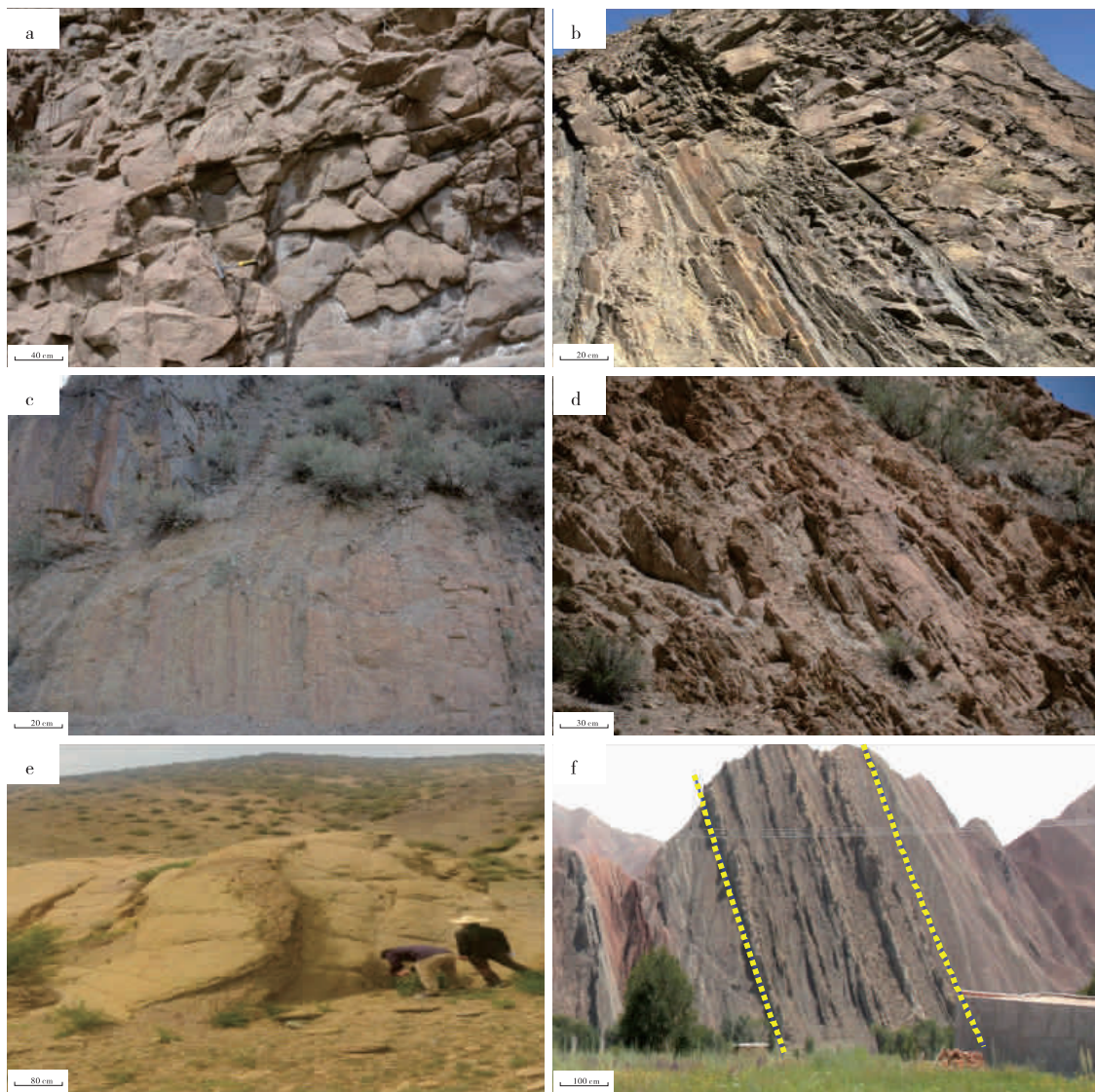
梧桐沟组为一套低位域—水进域的沉积, 盆内古凸起及盆地北缘克拉美丽山物源区继承性发育, 博格达山隆升成为研究区重要的物源供给区(图 5-c)。平面上主要发育辫状河三角洲和滨浅湖 2 类沉积相; 纵向上, 随着水体加深, 辫状河三角洲沉积范围逐渐萎缩、滨浅湖相沉积范围逐渐增大。梧一段沉积期, 南部阜康断裂带发育连片分布的辫状河三角洲前缘沉积, 平原相主要位于博格达山前, 西大龙口野外剖面揭示了完整的正旋回沉积序列, 自下而上为棕褐色厚层砂砾岩、灰色含砾砂岩与泥岩互层、灰色泥岩夹细砂岩(图 6-e, 6-f); 吉南凹陷发育南、东、北物源小型辫状河三角洲朵叶体; 吉木萨尔凹陷东、南、北 3 个物源方向的辫状河三角洲在凹陷区交汇, 形成“满凹富砂”的特



a—井子沟组二段；b—芦苇沟组一段；c—梧桐沟组一段

图 5 准噶尔盆地东部中—上二叠统主要目的层段沉积相平面分布

Fig. 5 Sedimentary facies map of main target layer of the Middle-Upper Permian in eastern Junggar Basin



a—大黄山剖面, P_2j , 灰色槽状交错层理中粗砂岩, 裂缝较发育; b—甘河子剖面, 井井子沟组, 灰色板状交错层理中细砂岩, 单层厚度 3~5 m; c—大黄山剖面, 芦草沟组, 灰色泥页岩与灰色云质粉砂岩互层; d—大黄山剖面, 芦草沟组, 灰色厚层云质粉砂岩; e—二工河剖面, 梧桐沟组, 厚层灰白色细砂岩; f—西大龙口剖面, 梧桐沟组, 下段厚层砂砾岩、中段灰色泥岩及砂岩互层、上段棕灰色泥岩夹砂岩

图 6 准噶尔盆地东部中—上二叠统露头沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of the Middle-Upper Permian outcrops in eastern Junggar Basin

点; 阜康凹陷东部发育辫状河三角洲前缘沉积, 扇体向西可延伸至凹陷区; 沙帐—石树沟凹陷以北物源辫状河三角洲沉积为主, 三角洲朵体连片发育。

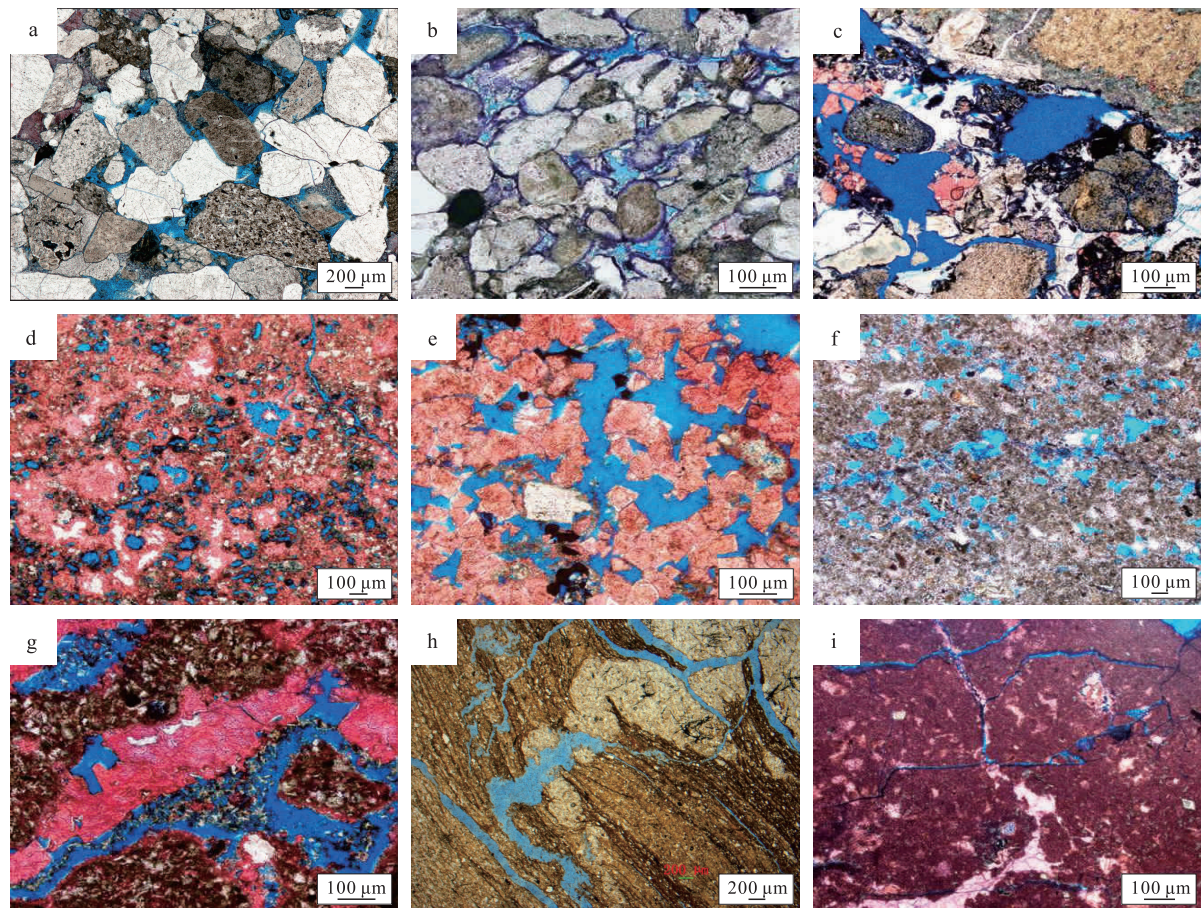
3 二叠系储集层特征及主控因素

3.1 储集层特征

准东地区二叠系全油气系统主要发育碎屑岩、碳酸盐岩、细粒混积岩 3 类储集层, 表现为纵向多期、多类型储集层叠置, 平面常规、非常规储集层

有序共生的特征。

碎屑岩是研究区分布范围最广的储集层, 纵向上井井子沟组、芦草沟组及梧桐沟组均有发育, 单层厚度为 20~50 m, 岩性以成分成熟度偏低的细砂岩、含砾中—粗砂岩为主(图 7-a 至 7-c), 骨架颗粒成分主要为各类岩屑(含量一般大于 60%, 以酸性喷发岩岩屑为主, 少量中—基性火山岩类及浅变质岩屑), 其次见少量长石(含量 10%~43%), 石英含量普遍小于 10%; 填隙物主要为含量不等的泥质、灰质杂基, 浊沸石以及以方解石为



a—KT2 井, 4602 m, 梧桐沟组, 中粗粒长石岩屑砂岩, 粒间孔、粒内溶孔; b—S5 井, 3911 m, 井井子组, 中粒长石岩屑砂岩, 残余粒间孔; c—Q5 井, 3361 m, 芦草沟组, 不等粒长石岩屑砂岩, 粒内孔、粒间溶孔、微裂缝; d—Q2 井, 3422 m, 芦草沟组, 含粉砂颗粒灰岩, 溶模孔; e—Q5 井, 3351 m, 芦草沟组, 粉晶藻灰岩, 晶间孔、晶间溶孔; f—Q105 井, 3721 m, 芦草沟组, 粉晶藻云岩, 粒间溶孔; g—Q6 井, 2294 m, 芦草沟组, 含灰粉砂岩, 粒间溶孔; h—J2801 井, 3057 m, 芦草沟组, 泥晶白云岩, 发育多期构造缝、层间缝、溶蚀缝; i—Q5 井, 3315 m, 芦草沟组, 微晶藻灰岩, 多期裂缝相互切割, 沿裂缝发生溶蚀。a~i 全为正交光

图 7 准噶尔盆地东部中—上二叠统储集层主要孔隙类型

Fig. 7 Main pore types of the Middle–Upper Permian reservoirs in eastern Junggar Basin

主的碳酸盐胶结物。颗粒分选、磨圆均较差, 颗粒间以点—线接触、孔隙式胶结为主; 储集空间主要由剩余粒间孔、粒内 (长石、岩屑、碳酸盐颗粒) 溶孔及填隙物溶孔构成, 构造缝、粒缘缝等微裂缝发育。岩心分析孔隙度为 4.6%~20.8%、渗透率为 $(0.01 \sim 21.8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 纵向上梧桐沟组储集层物性最好, 其次为井井子组。

碳酸盐岩主要发育在芦草沟组, 分为石灰岩、白云岩 2 类 (图 7-d 至 7-f)。灰岩是研究区重要的碳酸盐岩储集层, 包括颗粒灰岩、生物灰岩, 颗粒灰岩中的颗粒以内碎屑、鲕粒及生屑等碳酸盐颗粒为主, 同时含少量陆源碎屑, 分选较好、磨圆较差—中等, 胶结物主要为多期方解石胶结, 可进一步

分为 (含陆屑) 亮晶砂屑灰岩、亮晶鲕粒灰岩以及亮晶生屑灰岩等; 生物灰岩包括藻粘结含陆屑颗粒灰岩、藻凝块灰岩, 前者含较多陆源碎屑以及碳酸盐颗粒, 后者成分以泥晶方解石为主, 窗格/鸟眼构造发育, 多数被多期方解石胶结物全充填或半充填。白云岩包括具残余生物遗迹结构粉晶白云岩、具残余颗粒结构细—粉晶白云岩等类型, 普遍含有含量不等的黏土矿物及长石、石英等组分。石灰岩、白云岩的物性较好, 发育残余格架孔/鸟眼孔、溶模孔、粒间溶孔、晶间孔、晶间溶孔及填隙物溶孔等孔隙类型, 孔隙度 1.8%~21.0%, 渗透率 $(0.01 \sim 3.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为重要的储集岩类型。

细粒混积岩仅分布于芦草沟组, 单层厚度一般

小于 5 m；为粉砂级陆源碎屑与碳酸盐岩颗粒混杂沉积形成(图 7-g)。岩性主要包括泥质、云(灰)质粉砂岩及泥晶灰岩、泥—粉晶白云岩等过渡性岩类。粉砂岩一般与泥岩、泥晶云岩互层，并含有数量不等的生屑、藻颗粒、内碎屑等碳酸盐颗粒等，缝洞常被泥质、铁质以及方解石等矿物充填；泥晶灰岩、泥—粉晶白云岩普遍含有含量不等的黏土矿物及长石、石英等组分，根据陆屑含量及大小又可将其进一步分为含泥/含粉砂、粉砂质/泥质等不同类型及其过渡类型，含陆屑纹层状泥—粉晶白云岩在研究区发育最为普遍，泥晶灰岩仅在芦苇沟组局部层段可见。细粒混积岩发育粒间溶孔、晶间(微)孔、晶间溶孔及收缩缝、层间缝、溶蚀缝等多种类型裂缝(图 7-h, 7-i)，孔隙度 1.2% ~ 14.6%，渗透率 $(0.01 \sim 2.4) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，粒度相对较粗、云质含量较高的粗粉砂岩及含陆屑纹层状泥—粉晶白云岩为主要的细粒混积岩储集层。

3.2 优质储集层发育控制因素

沉积期古地貌、碎屑物(包括陆源、火山碎屑物—供给、湖平面变化以及水动力条件、构造—热流体活动以及埋藏期成岩作用等均可影响到储集层发育(董桂玉等, 2007; 冯进来等, 2011)。二叠系优质储集层的形成主要受沉积作用、成岩作用控制。

3.2.1 扇三角洲前缘水下分流河道及滨浅湖灰云坪、滩坝是储集层发育的优势相带

扇三角洲沉积背景下的碎屑岩中岩屑和泥质杂

基含量高，抗压实性差，埋藏过程中易发生塑性变形，不利于原生粒间孔隙的保存，井井子沟组、芦苇沟组和梧桐沟组砂岩整体上表现为随埋深增大、孔隙度减小的趋势，埋深大于 5000 m 后，孔隙度普遍小于 5% (陈煦等, 2024)。与扇三角洲平原相比，扇三角洲前缘距离物源区较远，长石、石英等刚性颗粒含量较高而泥质杂基含量较低，抗压实性能更好；同一相带范围内，扇三角洲前缘水下分流河道形成于快速卸载、强水动力的沉积环境，岩石颗粒的粒径一般大于 0.1 mm，不仅利于原生粒间孔隙的保存。滨浅湖灰云坪具有适合藻类等微生物繁殖的浅水环境，为藻颗粒灰岩、泥—粉晶白云岩等碳酸盐岩储集层顺层窗格孔、鸟眼孔等原生孔隙的发育提供了有利条件，受潮浪及其所派生沿岸流影响，滨浅湖滩坝微相的粉—细砂岩长石、石英含量较高，颗粒分选、磨圆好，泥质/钙质胶结弱，原生粒间孔隙发育。岩石类型孔隙度定量统计结果(图 8)，扇三角洲前缘亚相水下分流河道微相的砂砾岩、含砾砂岩，浅湖亚相灰云坪微相的藻颗粒灰岩、藻颗粒云岩以及粒度相对较粗由陆源碎屑物、碳酸盐组成的细粒混积岩具有相对较高的平均孔隙度，灰质、泥质组分含量较高的泥质粉砂岩、泥晶云岩等孔隙度则普遍较低。

3.2.2 埋藏期有机酸溶蚀及绿泥石膜是碎屑岩优质储集层形成的主要影响因素

近物源沉积背景下，井井子沟组、梧桐沟组、

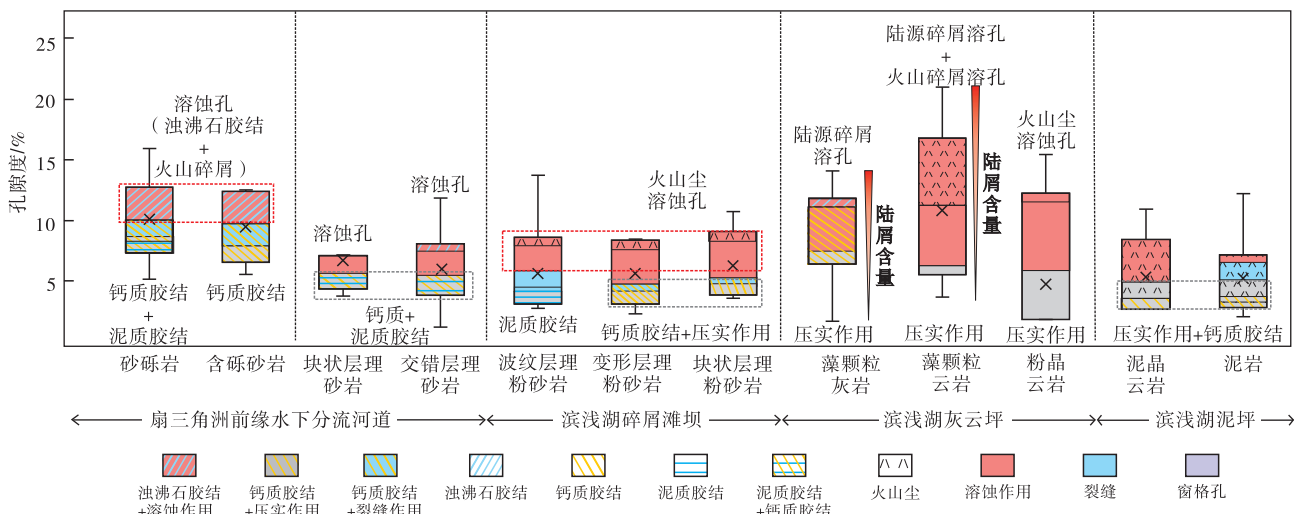


图 8 准噶尔盆地东部中—上二叠统不同类型储集层孔隙发育特征

Fig. 8 Characteristics of pore development in different types of reservoirs of the Middle–Upper Permian in eastern Junggar Basin

芦草沟组碎屑岩储集层中岩屑、长石等不稳定组分的含量较高,且普遍发育方解石、沸石类胶结物。井井子沟组、梧桐沟组碎屑岩通过走滑断裂、逆冲断裂与芦草沟组烃源岩沟通,有机质生烃过程中产生的有机酸和二氧化碳通过断裂输导运移至储集层中,使地层孔隙水酸性增强,长石、岩屑及方解石、方沸石、浊沸石等易溶组分在酸性环境下被溶蚀,形成的粒间溶孔、粒内溶孔等次生孔隙(图 7-a, 7-c)。井井子沟组和梧桐沟组储集层具有近源优势,岩石中的易溶组分在咸化湖相烃源岩生烃过程中发生溶蚀。孔隙度与沸石含量正相关关系表明(图 9),高沸石含量对于储集层物性来说是有利的因素,这与沸石胶结减孔降低储集层孔隙度的一般认识相反,说明后期沸石溶蚀生成的溶蚀孔有效改善了储集层物性。S4 井颗粒间沸石充填(图 10-a, 10-b)及沸石溶蚀(图 10-a),孔隙度从 5.6% 提高到 12.4%,渗透率从 $0.007 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 提高到 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,证明了该认识的正确性。

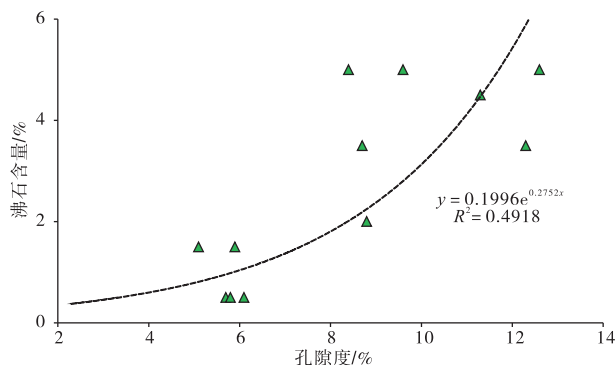


图 9 阜康断裂带东段井井子沟组
砂岩沸石含量-孔隙度交会图

Fig. 9 Porosity versus zeolite content cross-plot of sandstone from Jingjingzigou Formation, eastern segment of Fukang Fault Zone

此外,井井子沟组碎屑岩普遍见到绿泥石膜(图 10-c),绿泥石膜的发育阻止了长石、石英次生加大,并且还具备一定的支撑作用,有效保护了原生粒间孔;而在绿泥石膜不发育的区域,长石、石英次生加大填充粒间孔的现象比较明显(图 10-d),降低了储集层孔隙度。

3.2.3 同生期大气淡水淋滤及白云石化是碳酸盐岩优质储集层形成的关键

前人研究表明,准东地区芦草沟组与梧桐沟组

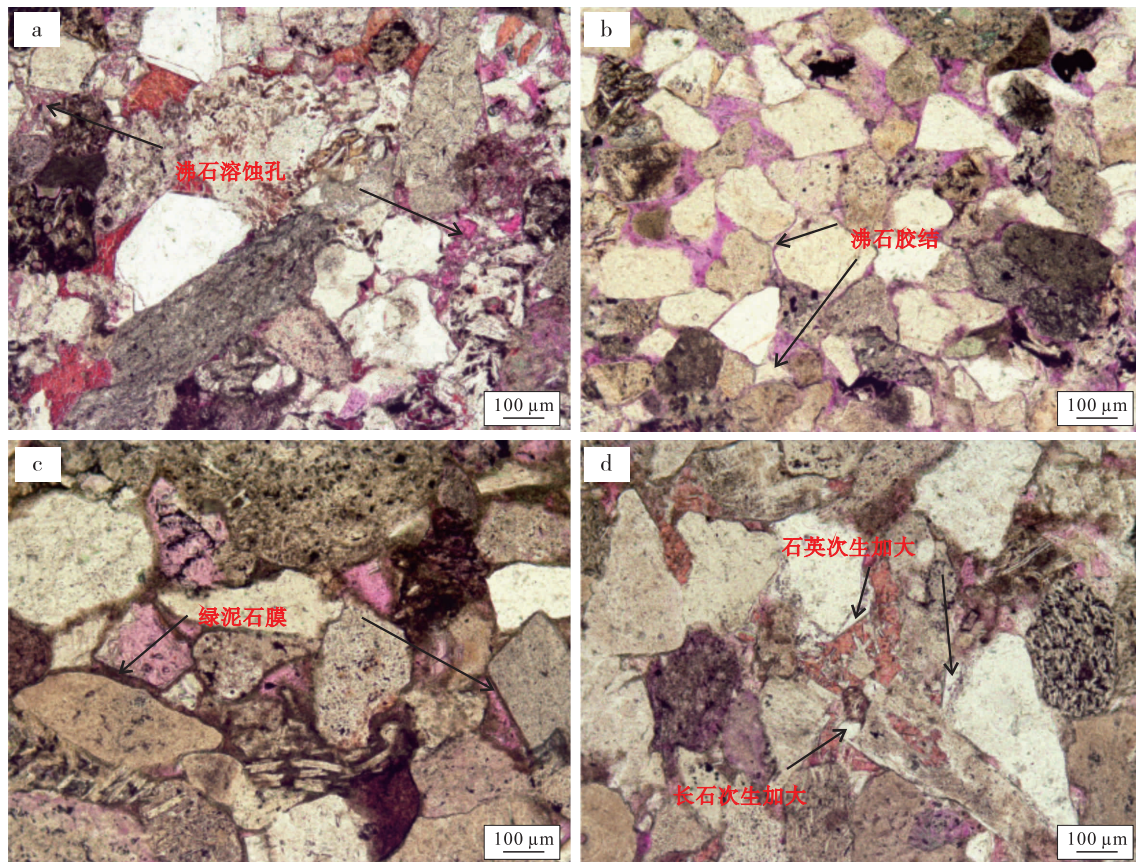
存在区域不整合(夏世威等, 2024; 殷树铮等, 2024),为咸化湖盆背景下的碳酸盐岩岩溶提供了有利条件(蒋中发等, 2020; 王欢等, 2022)。在粒度较粗的含陆屑颗粒灰岩中,伴随同沉积期周期性湖平面暴露,大气淡水通过溶解颗粒灰岩中的不稳定矿物(如陆源长石及岩屑、碳酸盐颗粒、早期碳酸盐胶结物等),形成大量粒内、粒间(晶间)溶蚀孔隙,溶蚀形成的相对较大的洞缝部分再次被因湖平面上升而形成的湖底胶结方解石环边充填,部分则在其保护下被保留下来(图 11-a),为该类灰岩成为芦草沟组最优质储集层奠定了基础,其平均孔隙度、渗透率分别为 17.26% 和 $1.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;在具纹层组构(早期为藻纹层灰岩)的泥—粉晶白云岩中,伴随着暴露期干旱蒸发环境沉积物逐步发生云化,大气淡水通过同沉积断裂形成的微裂缝下渗进入泥晶云岩纹层中,沿微裂缝及顺层沿早期形成的格架孔进行局部扩溶并加速其云化、重结晶作用(图 11-b),形成大量以小孔+微米级—纳米级晶间孔及微溶孔为主的双峰型孔隙结构,成为芦草沟组最为发育的储集层类型之一,其平均孔隙度、渗透率分别为 14.87% 和 $0.080 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.2.4 多期次破裂作用对细粒混积岩储集性能改善具有建设性作用

芦草沟组储集层发育多期次破裂作用,裂缝相互切割,不同时期裂缝对细粒混积岩储集层影响存在差异(图 7-h, 7-i):早成岩期的同沉积断裂缝、风化缝、泄水缝有利于大气淡水渗入岩层,对长石、岩屑、灰质、云质等易溶组分溶蚀,但裂缝多被后期泥质、方解石充填;中成岩期高脆性矿物含量的细粒混积岩易于形成张裂缝、层间缝,为烃源岩生烃过程中生成的有机酸进入岩层内部提供了渗流通道,该阶段方解石胶结物溶蚀形成大量次生孔隙,有利于储集层物性的改善;晚成岩期构造运动产生的裂缝切穿颗粒及胶结物,构造裂缝叠加溶蚀作用可显著改善储集层物性。

4 勘探潜力与有利方向

综合沉积体系演化、储集层特征及有效储集层控制因素,认为吉木萨尔凹陷、阜康断裂带、石树沟凹陷、阜康凹陷东斜坡是准东地区二叠系有利的勘探领域。



a—S4 井, 2405.7 m, 井井子沟组, 细中粒长石岩屑砂岩, 粒间沸石充填、部分溶蚀; b—S4 井, 2916.4 m, 井井子沟组, 中粒长石岩屑砂岩, 粒间沸石胶结; c—S103 井, 3389.1 m, 井井子沟组, 中粒长石岩屑砂岩, 绿泥石膜发育; d—S103 井, 3341.6 m, 井井子沟组, 细中粒岩屑砂岩, 石英、长石次生加大。a~d 全为正交光

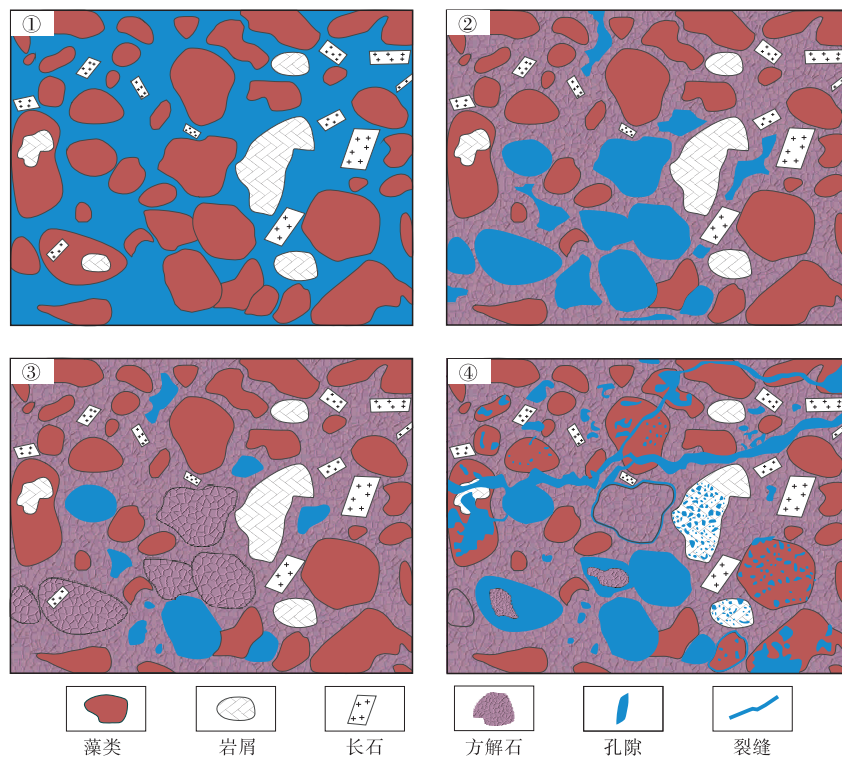
图 10 准噶尔盆地东部中—上二叠统储集层镜下照片

Fig. 10 Microscopic images of the Middle–Upper Permian reservoirs in eastern Junggar Basin

1) 吉木萨尔凹陷。吉木萨尔凹陷是准东地区二叠系构造最稳定、保存条件最好的富烃凹陷(曹正林等, 2024; 支东明等, 2024)。围绕芦草沟组烃源岩, 纵向上发育井井子沟组致密砂岩储集层、芦草沟组混积岩—砂砾岩、梧桐沟组砂砾岩—砂岩储集层, 形成多套储盖组合, 成藏条件非常有利(支东明等, 2023)。近年来, 以全油气系统理论指导下, 北斜坡芦草沟组相继发现了以砂砾岩为储集层的常规油藏和以云质粉砂岩为储集层的致密油, 与凹陷区页岩油对比, 具有单层厚度大、物性好、直井即可获工业油流等特点, 此外, 北斜坡及凹陷区双吉构造带井井子沟组均发现了油源来自芦草沟组的上生下储型致密砂岩油藏, 油层分布稳定。从沉积体系及储集层发育特征来看, 东斜坡紧邻吉南、古西凸起 2 个物源区, 井井子沟组和芦草沟组扇三角洲沉积砂体与芦草沟组烃源灶形成良好

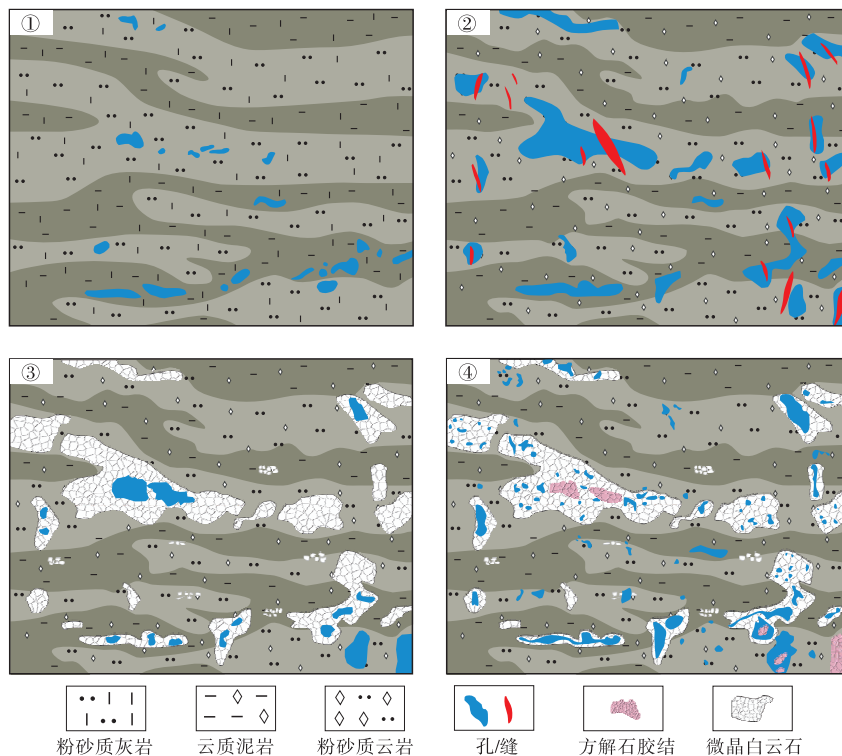
的侧向对接, 具备形成致密油聚集区; 北斜坡梧桐沟组位于构造高部位, 源于沙奇凸起物源的扇三角洲前缘沉积砂体物性好、厚度大, 是常规砂岩油藏的重点勘探方向。

2) 阜康断裂带。阜康断裂带东段部署的 ST1 风险井在井井子沟组钻遇厚层砂岩, 常规试油获 $31 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业油流, 发现了亿吨级“新生古储型”致密砂岩油藏(康积伦等, 2023; 李建忠等, 2023); 此后, 吉南凹陷西斜坡、东南斜坡区相继发现芦草沟组源内致密油、梧桐沟组源上常规砂岩油藏。基于沉积环境分析及烃源岩评价, 吉南凹陷芦草沟组烃源岩成熟度高、厚度大, 优于吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩(支东明等, 2024; 温旺彪等, 2025)。芦草沟组烃源岩在阜康断裂带中、西段也普遍发育, 井井子沟组扇三角洲前缘、梧桐沟组辫状河三角洲前缘有利沉积相带与该套烃



(a)

(b)



① 原生孔隙形成; ② 裂缝形成+孔隙扩溶; ③ 云化及晶间孔; ④ 溶蚀改造

a—颗粒灰岩; b—纹层状泥—粉晶白云岩

图 11 碳酸盐岩储集层形成过程

Fig. 11 Schematic diagram of carbonate reservoir formation process

源岩配置关系好,具备多层系、立体勘探潜力。中段甘河子鼻凸带构造定型早、晚期活动弱,成藏条件有利,是阜康断裂带砂岩油藏勘探突破的主要方向;西段九运街—长山鼻凸带芦草沟组埋深大于7000 m,具备高成熟页岩油及页岩气的勘探潜力。

3) 石树沟凹陷。石树沟凹陷二叠系平地泉组烃源岩品质与吉木萨尔凹陷烃源岩品质相近,具有规模的油气资源基础(支东明等,2024)。勘探早期,按照构造油气藏勘探思路,石树沟凹陷北部部署的火1井在平地泉组上段获高产工业油流,发现了火烧山油藏,近年来,按照页岩油勘探思路,凹陷区部署的石树1井在平地泉组二段发现纹层型云质泥岩、夹层型云质砂岩2类页岩油,石树5H井压后日产油 19.88 m^3 ;南部斜坡区部署的树探1风险井在平地泉组压裂试油获 5.46 m^3 工业油流,证实该区发育浅埋型致密油藏(郑孟林等,2018;马超等,2019),结合古地貌及地震属性,初步预测南部斜坡区扇三角洲前缘有利面积 358 km^2 ,是寻找浅埋、高效常规砂岩油藏的有利方向。

4) 阜康凹陷东部。阜康凹陷东部整体位于二叠系芦草沟组优质烃源岩发育区内,凹槽区断裂发育,与不整合面构成油气运移的良好通道,成藏条件优越,三叠系—侏罗系已探明多个油藏,石炭系—二叠系普遍见显示,多口井试油获突破,展现全油气系统成藏特征,勘探潜力大。上二叠统物源体系为东部沙奇凸起物源和西泉鼻隆物源为主的双物源供给,位于扇三角洲前缘有利相带,砂体纵向叠置、横向连片分布,特别是梧桐沟组一段厚层块状砂体区域稳定分布,发育多个被断裂切割的构造—岩性油藏,三叠系及石炭系也相继取得新的勘探突破,其中,韭菜园组底部发育南北双向物源供给的辫状河三角洲前缘沉积体系,形成断—砂耦合型岩性圈闭群,具备发现规模储量的有利地质条件。

5 结论

1) 准东地区二叠系全油气系统发育碎屑岩、碳酸盐岩、细粒混积岩3类储集层,碎屑岩纵向多期叠置,碳酸盐岩、细粒混积岩主要赋存于芦草沟组;围绕芦草沟组优质烃源岩,以芦草沟组成化湖相泥页岩、梧桐沟组顶部湖泛泥岩为区域盖层,形成井井子沟组上部、芦草沟组中下部、梧桐沟组下部3套主要的生储盖组合。

2) 准东地区二叠系储集层以中—低孔、低渗—特低渗为主,不同岩性的储集性能及控制因素存在差异。扇三角洲前缘水下分流河道及滨浅湖灰云坪、滩坝是储集层发育的优势相带,埋藏期有机酸溶蚀及绿泥石膜能有效改善碎屑岩储集层物性,同生期大气淡水淋滤及白云石化是碳酸盐岩优质储集层形成的关键,多期次破裂作用对细粒混积岩储集性能改善具有建设性作用。

3) 吉木萨尔凹陷、阜康断裂带、石树沟凹陷、阜康凹陷东部是准东地区二叠系勘探的有利区,其中,阜康断裂带东段、吉木萨尔凹陷北部、阜康凹陷东斜坡是规模增储的现实领域,阜康断裂带中—西段、石树沟凹陷南斜坡是战略突破的潜力方向。

参考文献(References)

- 曹正林,周川闽,龚德瑜,王瑞菊,丁立华,杨春,张志杰. 2024. 准噶尔盆地中—下二叠统构造—岩相古地理特征与烃源岩分布. 石油学报,45(9): 1349–1371. [Cao Z L, Zhou C M, Gong D Y, Wang R J, Ding L H, Yang C, Zhang Z J. 2024. Tectono-lithofacies paleogeographic characteristics and source rock distribution of the Middle–Lower Permian in the Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(9): 1349–1371]
- 陈熙,邱波,石湘,白洁,李文霞,陈毓清,何伯斌. 2024. 吉南凹陷二叠系井井子沟组二段致密砂岩储层特征及影响因素. 地质科学,59(5): 1245–1255. [Chen X, Qiu B, Shi X, Bai J, Li W X, Chen Y Q, He B B. 2024. Characteristics and influencing factors of tight sandstone reservoirs in the second member of the Permian Jingjingzigu Formation, Jinan Sag. *Chinese Journal of Geology*, 59(5): 1245–1255]
- 陈旋,苟红光,张有锦,高岗,徐雄飞,林霖,韩猛刚,党文龙,樊柯廷. 2025. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷北部芦草沟组高产页岩油特征及地质意义:以奇探1井为例. 天然气地球科学,36(1): 1–12. [Chen X, Gou H G, Zhang Y J, Gao G, Xu X F, Lin L, Han M G, Dang W L, Fan K T. 2025. Characteristics and geological significance of high-yield shale oil from the Lucaogou Formation in the northern Jimsar Sag of Junggar Basin: a case study of Well Qitan 1. *Natural Gas Geoscience*, 36(1): 1–12]
- 丁超,王佳玮. 2015. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系梧桐沟组沉积演化规律. 中国石油勘探,20(3): 22–29. [Ding C, Wang J W. 2015. Sedimentary development law of Permian Wutonggou Formation in Jimsar sag of Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 20(3): 22–29]
- 董桂玉,陈洪德,何幼斌,秦志勇,罗进雄,辛长静. 2007. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考. 地球科学进展,22(9): 931–939. [Dong G Y, Chen H D, He Y B, Qin Z Y, Luo J X, Xin C J. 2007. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbo-

- nate sediments. *Advances in Earth Science*, 22(9): 931-939]
- 冯进来, 胡凯, 曹剑, 陈琰, 王龙刚, 张英, 王牧, 赵健. 2011. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义. *高校地质学报*, 17(2): 297-307. [Feng J L, Hu K, Cao J, Chen Y, Wang L G, Zhang Y, Wang M, Zhao J. 2011. A review on mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum-gas geological significance. *Geological Journal of China Universities*, 17(2): 297-307]
- 何海清, 支东明, 唐勇, 刘超威, 陈洪, 郭旭光, 王泽胜. 2021. 准噶尔盆地阜康凹陷康探 1 井重大突破及意义. *中国石油勘探*, 26(2): 1-11. [He H Q, Zhi D M, Tang Y, Liu C W, Chen H, Guo X G, Wang Z S. 2021. A great discovery of Well Kangtan 1 in the Fukang Sag in the Junggar Basin and its significance. *China Petroleum Exploration*, 26(2): 1-11]
- 何文军, 钱永新, 赵毅, 李娜, 赵辛楣, 刘国良, 苗刚. 2021. 玛湖凹陷风城组全油气系统勘探启示. *新疆石油地质*, 42(6): 641-655. [He W J, Qian Y X, Zhao Y, Li N, Zhao X M, Liu G L, Miao G. 2021. Exploration implications of total petroleum system in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(6): 641-655]
- 胡素云, 王小军, 曹正林, 李建忠, 龚德瑜, 徐洋. 2020. 准噶尔盆地大中型气田(藏)形成条件与勘探方向. *石油勘探与开发*, 47(2): 247-259. [Hu S Y, Wang X J, Cao Z L, Li J Z, Gong D Y, Xu Y. 2020. Formation conditions and exploration direction of large and medium gas reservoirs in the Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 247-259]
- 蒋中发, 丁修建, 王忠泉, 赵辛楣. 2020. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组烃源岩沉积古环境. 岩性油气藏, 32(6): 109-119. [Jiang Z F, Ding X J, Wang Z Q, Zhao X M. 2020. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag. *Lithologic Reservoirs*, 32(6): 109-119]
- 康积伦, 杨润泽, 马强, 林潼, 杨帆, 卫延召, 苟红光, 李新宁, 林霖. 2023. 准噶尔盆地东部吉南凹陷二叠系油藏形成条件、成藏特征与勘探方向. *科学技术与工程*, 23(32): 13788-13802. [Kang J L, Yang R Z, Ma Q, Lin T, Yang F, Wei Y Z, Gou H G, Li X N, Lin L. 2023. Formation conditions, accumulation characteristics and exploration direction of Permian reservoir in Jinan Sag, eastern Junggar Basin. *Science Technology and Engineering*, 23(32): 13788-13802]
- 康积伦, 焦小冰, 高岗, 樊柯廷, 马强, 张伟, 张紫恒, 于森, 吴晓宁. 2025. 准东石树沟凹陷二叠系平二段源储组合特征及其含油性评价. *天然气地球科学*, 37(2): 295-309. [Kang J L, Jiao X B, Gao G, Fan K T, Ma Q, Zhang W, Zhang Z H, Yu M, Wu X N. 2025. Source-reservoir assemblage characteristics and oil-bearing evaluation of the Ping-2 Member, Permian in Shishugou Sag, Eastern Junggar. *Natural Gas Geoscience*, 37(2): 295-309]
- 匡立春, 王霞田, 郭旭光, 常秋生, 贾希玉. 2015. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地质特征与勘探实践. *新疆石油地质*, 36(6): 629-634. [Kuang L C, Wang X T, Guo X G, Chang Q S, Jia X Y. 2015. Geological characteristics and exploration practice of tight oil of Lucaogou Formation in Jimsar Sag. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(6): 629-634]
- 李建忠, 陈旋, 杨润泽, 林潼, 杨帆, 马强, 苟红光, 卫延召, 林霖. 2023. 准噶尔盆地东部吉南凹陷二叠系油气地质条件与源下成藏特征. *石油勘探与开发*, 50(3): 491-503. [Li J Z, Chen X, Yang R Z, Lin T, Yang F, Ma Q, Gou H G, Wei Y Z, Lin L. 2023. Petroleum geology and sub-source hydrocarbon accumulation of Permian reservoirs in Jinan Sag, eastern Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(3): 491-503]
- 梁世君, 罗劝生, 康积伦, 李付雷, 马强, 王雪纯, 彭亚中, 张伟. 2021. 准噶尔盆地吉南凹陷萨探 1 井风险勘探突破及意义. *中国石油勘探*, 26(4): 72-83. [Liang S J, Luo Q S, Kang J L, Li F L, Ma Q, Wang X C, Peng Y Z, Zhang W. 2021. Breakthrough and significance of risk exploration in Well Satan 1 in Jinan Sag, Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(4): 72-83]
- 鲁智帅, 谢庆宾, 张津宁, 祁利祺, 许涛, 陈佳, 相泓含. 2024. 新疆博格达山北缘二叠纪中—晚期构造运动的沉积响应. *地质论评*, 70(1): 102-122. [Lu Z S, Xie Q B, Zhang J N, Qi L Q, Xu T, Chen J, Xiang H H. 2024. Sedimentary response of tectonic movement in the Middle and Late Permian in the northern margin of Bogda Mountain, Xinjiang. *Geological Review*, 70(1): 102-122]
- 马超, 吴孔友, 裴仰文, 李天然. 2019. 准噶尔盆地东部构造特征及演化定量分析. *地质力学学报*, 25(3): 313-323. [Ma C, Wu K Y, Pei Y W, Li T R. 2019. Quantitative analysis of tectonic characteristics and evolution in the eastern Junggar Basin. *Journal of Geomechanics*, 25(3): 313-323]
- 谭强, 张小红, 岳红星, 王菁, 张金凤. 2018. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷北部二叠系梧桐沟组沉积模式研究. *新疆石油天然气*, 14(4): 1-7, 105. [Tan Q, Zhang X H, Yue H X, Wang J, Zhang J F. 2018. Study on sedimentary model of Permian Wutonggou Formation in northern Jimusaer sag, Junggar Basin. *Xinjiang Oil & Gas*, 14(4): 1-7, 105]
- 唐勇, 雷德文, 曹剑, 刘寅, 黄立良, 李卉. 2022. 准噶尔盆地二叠系全油气系统与源内天然气勘探新领域. *新疆石油地质*, 43(6): 654-662. [Tang Y, Lei D W, Cao J, Liu Y, Huang L L, Li H. 2022. Total petroleum system and inner-source natural gas exploration in Permian strata of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 43(6): 654-662]
- 王欢, 马世忠, 牛东亮, 刘叶, 毕然, 周志国. 2022. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷西区芦草沟组细粒岩元素地球化学特征及古环境意义. *矿物岩石地球化学通报*, 41(1): 143-150. [Wang H, Ma S Z, Niu D L, Liu Y, Bi R, Zhou Z G. 2022. Elemental geochemical characteristics of fine grained sedimentary rocks of the Lucaogou Formation in the western Jimusaer sag of the Junggar Basin and their paleoenvironmental significances. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(1): 143-150]
- 温旺彪, 赵红静, 王志勇, 金颖, 王杰, 甘应星, 刘锋, 郭雅婷. 2025. 准噶尔盆地吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩地球化学特征及油源分析. *地质科技通报*, 44(3): 165-181. [Wen W B, Zhao H J, Wang Z Y, Jin Y, Wang J, Gan Y X, Liu F, Guo Y T. 2025. Oil-source correlations and geochemical characteristics of source rock

- from the Permian Lucaogou Formation in the Jinan Sag, Junggar Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(3): 165–181]
- 夏世威, 马强, 黄传炎, 张伟, 李潇鹏, 张宏, 马江浩, 彭亚中, 聂锋. 2024. 准噶尔盆地东部吉木萨尔—吉南凹陷构造演化及原型盆地恢复. *地质科技通报*, 43(3): 170–179. [Xia S W, Ma Q, Huang C Y, Zhang W, Li X P, Zhang H, Ma J H, Peng Y Z, Nie F. 2024. Tectonic evolution and prototype basin reconstruction in the Jimsar and Jinan depressions, eastern Junggar Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(3): 170–179]
- 杨有星, 张君峰, 张金虎, 高永进, 周新桂, 孙相灿, 文磊, 苗苗青. 2022. 新疆博格达山周缘中上二叠统与中上三叠统沉积特征及其主控因素. *石油勘探与开发*, 49(4): 670–682. [Yang Y X, Zhang J F, Zhang J H, Gao Y J, Zhou X G, Sun X C, Wen L, Miao M Q. 2022. Sedimentary characteristics and main controlling factors of the Middle–Upper Permian and Middle–Upper Triassic around Bogda Mountain of Xinjiang, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 670–682]
- 殷树铮, 何登发, 郭文建. 2024. 准噶尔盆地阜康凹陷二叠纪盆地属性与构造–沉积演化. *地质学报*, 98(12): 3647–3661. [Yin S Z, He D F, Guo W J. 2024. The attribute and tectono-sedimentary evolution of the Fukang sag, Junggar Basin. *Acta Geologica Sinica*, 98(12): 3647–3661]
- 殷树铮, 何登发, 付国斌, 郭文建. 2026. 博格达地区二叠纪原型盆地沉积充填与演化. *石油与天然气地质*, 47(1): 124–142. [Yin S Z, He D F, Fu G B, Guo W J. 2026. Sedimentary filling and evolution of the Permian prototype basin in Bogda area, China. *Oil & Gas Geology*, 47(1): 124–142]
- 赵文智, 胡素云, 郭绪杰, 李建忠, 曹正林. 2019. 油气勘探新理念及其在准噶尔盆地的实践成效. *石油勘探与开发*, 46(5): 811–819. [Zhao W Z, Hu S Y, Guo X J, Li J Z, Cao Z L. 2019. New concepts for deepening hydrocarbon exploration and their application effects in the Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5): 811–819]
- 甄宇, 陈旋, 焦立新, 李新宁, 周志超, 刘文辉, 殷树铮, 李涤, 苟红光, 李成明, 何登发. 2024. 东疆地区石炭纪—二叠纪构造古地理与原型盆地演化. *古地理学报*, 26(1): 78–99. [Zhen Y, Chen X, Jiao L X, Li X N, Zhou Z C, Liu W H, Yin S Z, Li D, Gou H G, Li C M, He D F. 2024. Carboniferous-Permian tectonopaleogeography and prototype basin evolution in eastern Xinjiang, NW China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(1): 78–99]
- 郑孟林, 田爱军, 杨彤远, 何文军, 陈磊, 吴海生, 丁靖. 2018. 准噶尔盆地东部地区构造演化与油气聚集. *石油与天然气地质*, 39(5): 907–917. [Zheng M L, Tian A J, Yang T Y, He W J, Chen L, Wu H S, Ding J. 2018. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in the eastern Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(5): 907–917]
- 支东明, 唐勇, 杨智峰, 郭旭光, 郑孟林, 万敏, 黄立良. 2019. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理. *石油与天然气地质*, 40(3): 524–534. [Zhi D M, Tang Y, Yang Z F, Guo X G, Zheng M L, Wan M, Huang L L. 2019. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer sag, Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(3): 524–534]
- 支东明, 唐勇, 何文军, 郭旭光, 郑孟林, 黄立良. 2021. 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. *石油勘探与开发*, 48(1): 38–51. [Zhi D M, Tang Y, He W J, Guo X G, Zheng M L, Huang L L. 2021. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 48(1): 38–51]
- 支东明, 李建忠, 杨帆, 康积伦, 张伟, 马强, 陶林本. 2023. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统地质特征与勘探开发实践. *中国石油勘探*, 28(4): 14–23. [Zhi D M, Li J Z, Yang F, Kang J L, Zhang W, Ma Q, Tao L B. 2023. Geological characteristics and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar Sag, Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(4): 14–23]
- 支东明, 谢安, 杨帆, 马强, 何昌松, 苟红光. 2024. 准噶尔盆地东部二叠系富烃凹陷全油气系统勘探前景. *地质力学学报*, 30(5): 781–794. [Zhi D M, Xie A, Yang F, Ma Q, He C S, Gou H G. 2024. Exploration prospects of the whole oil and gas system in the Permian hydrocarbon depressions in the Eastern Junggar Basin. *Journal of Geomechanics*, 30(5): 781–794]

(责任编辑 李新坡)