

文章编号: 0253-2697(2024)09-1349-23 DOI:10.7623/syxb202409004

准噶尔盆地中一下二叠统构造-岩相古地理特征 与烃源岩分布

曹正林¹ 周川闽^{1,2} 龚德瑜¹ 王瑞菊¹ 丁立华^{1,2} 杨 春¹ 张志杰^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 提高石油采收率国家重点实验室 北京 100083)

摘要:晚古生代,伴随着欧亚板块的形成与古亚洲洋的关闭,哈萨克斯坦板块(山弯构造)得以形成。早一中二叠世,因受准噶尔—巴尔喀什洋关闭及炎热干旱古气候影响,位于哈萨克斯坦板块东缘的准噶尔盆地沿洋陆闭合带形成了一系列残余洋与近海陆缘咸化湖盆。岩性、沉积相、地球化学、地震地层和地震岩性综合分析表明:①准噶尔盆地中一下二叠统的风城组、芦草沟组、红雁池组和平地泉组以咸化沉积(包括残余洋和咸化湖沉积)为主,其中,风城组主要沿西准噶尔残余洋和北天山残余洋的闭合带分布于玛湖凹陷—盆 1 井西凹陷—沙湾凹陷—阜康凹陷一线,芦草沟组和红雁池组主要沿北天山—索伦克残余洋分布于阜康凹陷—博格达山一带,平地泉组主要沿卡拉麦里残余洋分布于五彩湾凹陷—石树沟凹陷—石钱滩凹陷一带;②咸化沉积的分布规律明显,在早二叠世—中二叠世逐渐呈自西向东、自下向上迁移;③风城组、芦草沟组和平地泉组是准噶尔盆地二叠系最主要的烃源岩,富含菌藻类有机质,具有典型的咸化湖沉积特征;④准噶尔盆地早一中二叠世残余洋和咸化湖盆的形成与迁移控制了沉积相与优质烃源岩的分布。勘探实践揭示,盆地西部玛湖凹陷和东部吉木萨尔凹陷优质咸化湖相烃源岩控制了十亿至数十亿吨级规模储量聚集区的形成,这预示着在盆 1 井西凹陷、沙湾凹陷、南缘—阜康凹陷一带等咸化沉积烃源岩分布中心可能有巨大的油气资源潜力,尽管目前尚无深井钻揭,但其勘探前景值得期待。

关键词:准噶尔盆地;二叠纪;咸化湖盆;菌藻;古亚洲洋

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Tectono-lithofacies paleogeographic characteristics and source rock distribution of the Middle-Lower Permian in Junggar Basin

Cao Zhenglin¹ Zhou Chuanmin^{1,2} Gong Deyu¹ Wang Ruiju¹ Ding Lihua^{1,2} Yang Chun¹ Zhang Zhijie^{1,2}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China)

Abstract: Following the formation of Eurasian Plate and the closure of Paleo-Asian Ocean, the Kazakhstan Plate (Orocline) was formed in the late Paleozoic. As influenced by the closure of the Junggar-Balkhash Ocean and the hot and arid paleoclimate, a series of residual oceanic and coastal continental margin saline lacustrine basins were formed during the Early to Middle Permian along the oceanic-continental closure zone in Junggar Basin located at the eastern margin of Kazakhstan Plate. The comprehensive analyses of lithology, sedimentary facies, geochemistry, seismic stratigraphy, and seismic lithology show the following. (1) The Lower-Middle Permian Fengcheng Formation, Lucaogou Formation, Hongyanchi Formation and Pingdiquan Formation in Junggar Basin are mainly composed of saline sediments (including residual oceanic and saline lacustrine sediments). Specifically, Fengcheng Formation is mainly distributed in Mahu sag, Penyijingxi sag, Shawan sag and Fukang sag along the closure zone of the western Junggar residual ocean and northern Tianshan residual ocean, Lucaogou Formation and Hongyanchi Formation are mainly distributed in Fukang sag and Bogda Mountain region along the northern Tianshan-Solunke residual ocean, and Pingdiquan Formation is mainly distributed in Wucaiwan sag, Shishugou sag and Shiqiantan sag along the Kalamaili residual ocean. (2) The saline sediments are distributed regularly, and gradually migrated from west to east and from bottom to top from Early to Middle Permian. (3) Fengcheng Formation, Lucaogou Formation and Pingdiquan Formation are the main source rocks of Permian in Junggar Basin, which contain bacteria-rich algal organic matter and are typically characterized by saline lacustrine sediments. (4) The formation and migration of the Early to Middle Permian residual oceans and saline lacustrine basins in Junggar Basin controlled the distribution of sedimentary facies and high-quality source rocks. Petroleum exploration practices reveal that the high-quality saline lacustrine source rocks in Mahu sag in

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41802177, No. 42272188)、中国石油天然气股份有限公司科技项目(2021DJ0204, 2021DJ0401, 2023ZZ0202)和中国石油天然气集团有限公司直属院所基础科学研究和战略储备技术研究基金项目(2020D-5008-04)资助。

第一作者:曹正林,男,1970年12月生,2001年获石油大学(北京)博士学位,现为中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师,主要从事含油气盆地评价、储层地质及油藏描述研究。Email:caozl@petrochina.com.cn

通信作者:周川闽,男,1982年1月生,2007年获中国石油勘探开发研究院硕士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事沉积学与储层地质研究。Email:zhouchuanmin@petrochina.com.cn

the west and Jimusaer sag in the east of the basin control the formation of hydrocarbon accumulation areas with 1 billion to billions of tons reserves, indicating that there may be great oil-gas resource potential in the distribution centers of saline sedimentary source rocks in Penyijingxi Sag, Shawan sag, the southern margin area of the basin and Fukang sag. Although there is no deep drilling to confirm those at present, their exploration prospects are worth looking forward to.

Key words: Junggar Basin; Permian; saline lacustrine basin; bacteria and algae; Paleo-Asian Ocean

引用:曹正林,周川闽,龚德瑜,王瑞菊,丁立华,杨春,张志杰.准噶尔盆地中一下二叠统构造-岩相古地理特征与烃源岩分布[J].石油学报,2024,45(9):1349-1371.

Cite: CAO Zhenglin, ZHOU Chuanmin, GONG Deyu, WANG Ruiju, DING Lihua, YANG Chun, ZHANG Zhijie. Tectono-lithofacies paleogeographic characteristics and source rock distribution of the Middle-Lower Permian in Junggar Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2024, 45(9): 1349-1371.

地处古亚洲洋构造域南部的准噶尔盆地是发育在前寒武纪结晶基底与古生代褶皱基底之上的中生代、新生代的大陆板内含油气叠合盆地^[1-6],是中亚造山带的重要组成部分^[7-11]。准噶尔盆地沉积环境的演化与中亚造山带(尤其是哈萨克斯坦板块)的形成及古亚洲洋的闭合密切相关^[12-13]。准噶尔盆地在石炭纪之前的基底形成期整体处于多岛洋格局;在石炭纪一二叠纪的洋陆过渡期整体处于海陆过渡带,其边缘或有残余洋或陆表海分布^[12,14-16];至早一中二叠世基本转变成内陆盆地,仅在残余洋盆的闭合带发育一些相对闭塞的近海陆缘湖泊^[17];随后,在晚二叠世完全转变成内陆湖盆。在此期间,准噶尔盆地依次沉积了与古亚洲洋演化密切相关的石炭系^[18-19]和二叠系两套优质烃源岩^[20-23]。其中,二叠系烃源岩被证实是准噶尔盆地的主力烃源岩^[20-25],也是90%以上已发现大—中型油气田(藏)的烃源岩,如克拉玛依、石西、石南、陆梁、玛湖和吉木萨尔等油气田^[26-27]。该二叠系烃源岩多为互层状富有机质泥岩、泥灰岩、钙质/白云质泥岩和油页岩^[20-23],是典型的咸化沉积(包括残余洋和咸化湖沉积),即在细粒的泥页岩地层序列中普遍含有中层—薄层状的灰岩、钙质/白云质泥岩,甚至钠碳酸盐岩^[28-29]。咸化湖相烃源岩通常具有较佳品质,这主要是由于咸化水体的分层结构有利于形成还原环境,且较高的盐度可抑制微生物繁殖与生长,有利于菌藻类有机质保存^[30-31],其形成通常与古气候及古地理密切相关^[32-33]。无独有偶,同处于古亚洲洋构造域的楚-萨雷苏盆地、伊犁盆地、塔城盆地、斋桑盆地、三塘湖盆地和吐哈盆地等亦发育优质的二叠系咸化沉积烃源岩^[14-15,34-40]。在古亚洲洋构造域内,二叠系咸化沉积烃源岩的形成除受控于炎热干旱的古气候外^[41],或还受古亚洲洋关闭影响。因此,研究准噶尔盆地二叠纪的构造-岩相古地理特征及沉积演化特征将有助于揭示二叠系优质烃源岩的形成与分布规律,尤其是在目前尚无深井钻达中一下二叠统的盆地深凹区(沉积中心),如盆1井西凹陷、沙湾凹陷、南缘冲断带—阜康凹

陷一带等,研究认识对于分析这些地区的油气地质条件及勘探潜力意义重大。

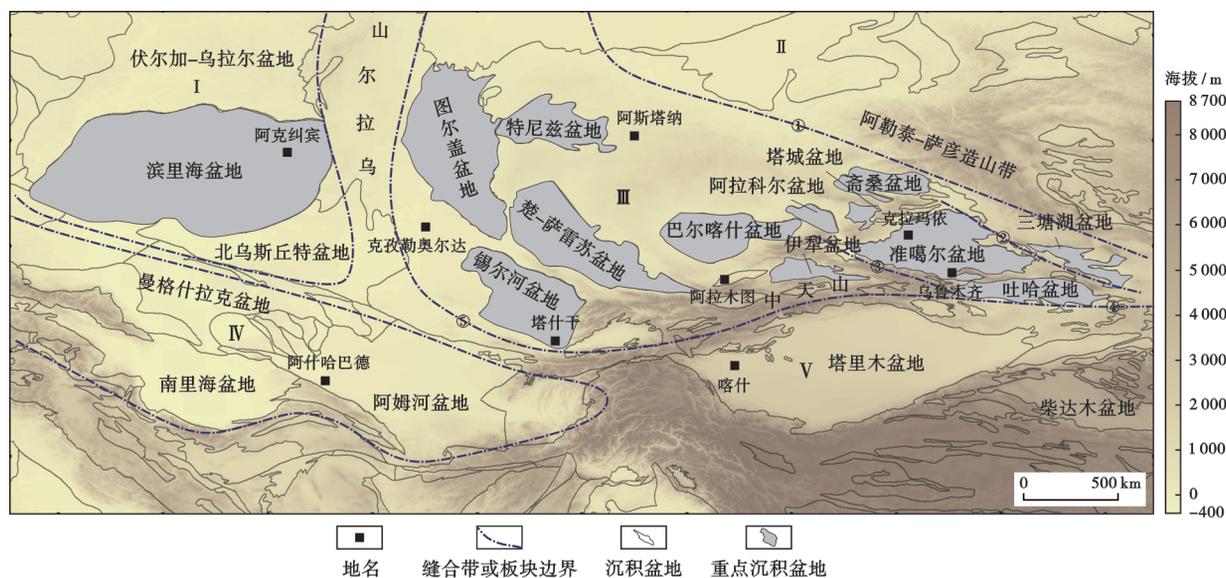
前人开展了大量针对新疆北部地区及准噶尔盆地晚古生代构造-古地理与烃源岩发育关系方面的研究^[17,42-43],但鲜有从古亚洲洋演化的角度探讨准噶尔盆地的构造-古地理与咸化湖盆演化的关系及其对优质烃源岩分布的控制作用。笔者在前人研究的基础上,从分析哈萨克斯坦板块的演化着手,基于构造-岩相古地理、古气候和烃源岩分布等开展了准噶尔盆地二叠纪构造-岩相古地理特征及优质烃源岩形成与分布规律研究,以期更全面、深入地认识准噶尔盆地的油气勘探潜力。

1 哈萨克斯坦板块二叠纪盆地群的构造-岩相古地理及烃源岩发育特征

哈萨克斯坦板块在构造上位于中亚造山带的中部。其中,中亚造山带位于东欧(波罗地)克拉通、西伯利亚克拉通、塔里木克拉通和华北克拉通之间,在地理上西起里海,东邻西太平洋北部,横跨俄罗斯、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、蒙古和中国北方,被认为是全球规模最大、历时最久的显生宙增生型构造带^[9,44-49]。中亚造山带的形成是古亚洲洋(Paleo-Asian Ocean)长期俯冲消减的产物,又称古亚洲构造域^[49-51],其形成过程有两大主流观点:一种认为该构造域由一系列微板块/陆块和岛弧于早古生代末期拼贴而成,该过程伴随着哈萨克斯坦板块形成;另一种认为该构造域由单一的早古生代岛弧经过多期走滑变形而形成,该过程伴随着一系列“山弯构造”形成^[14]。在地质上,可将中亚造山带划分成东北部的阿尔泰造山带、南部的天山造山带和中部的哈萨克斯坦山弯3部分^[52]。其中,在哈萨克斯坦山弯/板块上发育了一系列沉积盆地,包括图尔盖、楚-萨雷苏、特尼兹、锡尔河、巴尔喀什、阿拉科尔、斋桑、伊犁、准噶尔、吐哈和三塘湖等盆地(图1),这些盆地不乏富油气者。例如:在哈萨克斯坦东部油气区,南图尔盖盆地、楚-萨

雷苏盆地和斋桑盆地等已获得工业油气,北图尔盖盆地和东伊犁盆地等有良好的油气显示^[14,35,38-40,53-54];中国的准噶尔盆地^[55-57]、伊犁盆地^[58-60]、吐哈盆地^[61-62]和三塘湖盆地^[34,62-63]也已获得丰富的工业油气或见到

良好的油气显示。这些含油气盆地的共同点是不同程度地发育二叠系烃源岩。这些烃源岩的沉积与分布或受控于古亚洲洋关闭,与哈萨克斯坦板块二叠纪的古地理变迁密切相关。



注: I—东欧克拉通; II—西伯利亚板块; III—哈萨克斯坦板块; IV—特提斯构造域; V—塔里木克拉通; ①—斋桑—额尔齐斯缝合带; ②—卡拉麦里缝合带; ③—北天山缝合带; ④—索伦克缝合带; ⑤—乌拉尔—突厥斯坦—南天山缝合带。

图1 哈萨克斯坦板块及其周边地区构造纲要和盆地分布(据文献^[15,53]修改)

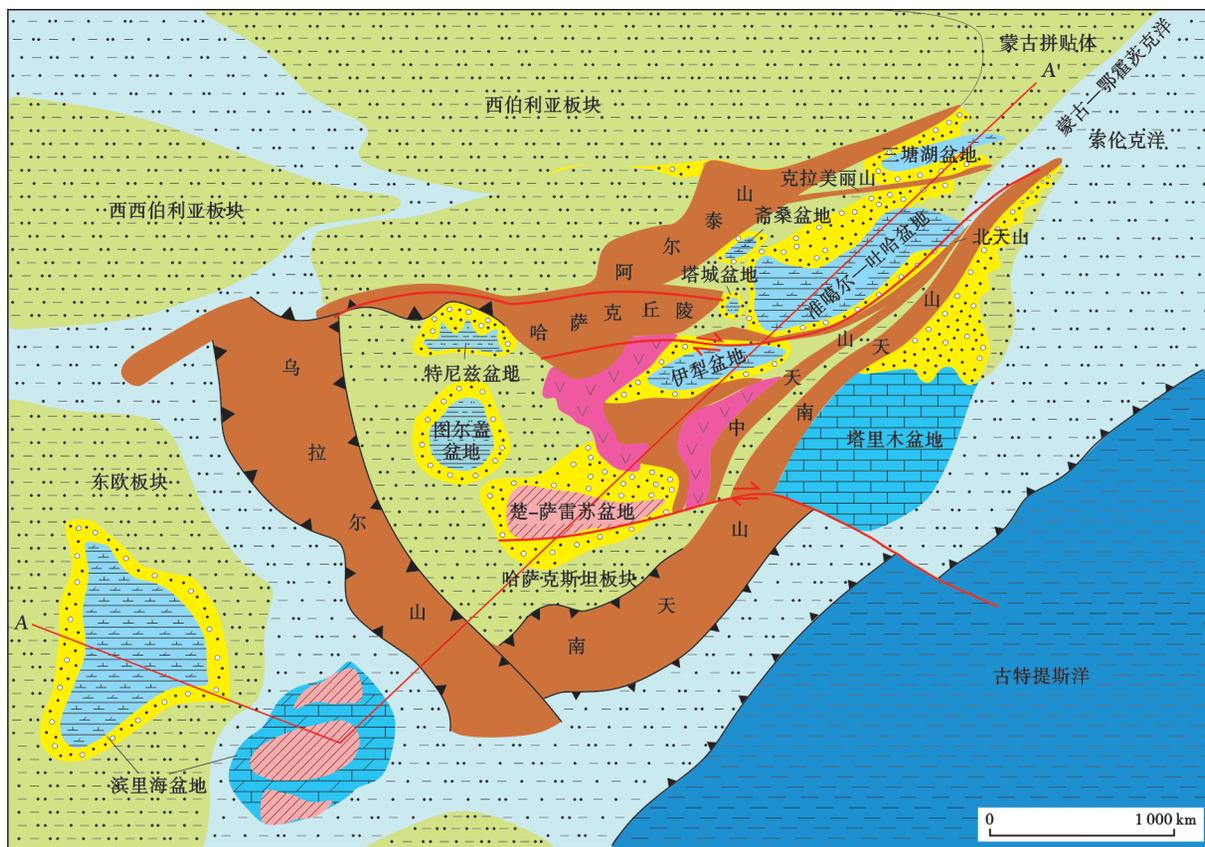
Fig. 1 Tectonic outline and basin distribution of Kazakhstan Plate and its surrounding areas

1.1 哈萨克斯坦板块二叠纪构造-岩相古地理特征

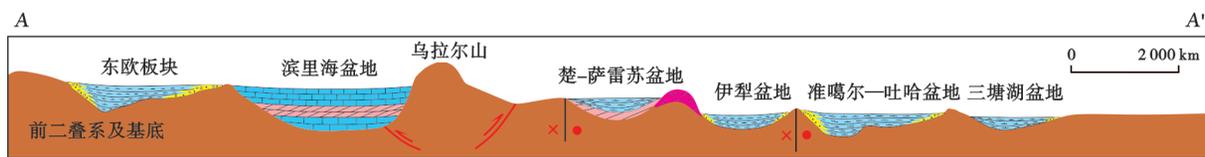
尽管存在单岛弧与多岛弧增生机制的争议,但研究者普遍认为中亚造山带源于早古生代形成的哈萨克斯坦板块,并在晚古生代的陆陆碰撞过程中进一步褶皱成山^[8,14]。哈萨克斯坦板块的古地理演化可追溯至晚奥陶世^[12,14]。此时,裂离自冈瓦纳大陆和西伯利亚大陆的微陆块及岛弧在周边扩张洋脊的推动下初步拼贴形成哈萨克斯坦地体。该地体大致位于南纬 0° — 24° ,西邻古亚洲洋,南邻古特提斯洋、东邻塔里木板块^[14],其内部微陆块与岛弧在乌拉尔洋、突厥斯坦洋、斋桑洋和准噶尔—巴尔喀什洋扩张洋脊的推动下进一步汇聚,而边缘则在洋壳俯冲下不断增生发展^[14]。至二叠纪,伴随着乌拉尔洋、突厥斯坦洋和斋桑洋洋壳的俯冲消亡与造山,以及西伯利亚板块、东欧板块和塔里木板块等的差异旋转和漂移,准噶尔—巴尔喀什洋最终被围限,哈萨克斯坦板块基本成形(图2),所处纬度在 16° — 44° 。至此,伴随着乌拉尔洋、斋桑洋和突厥斯坦洋的闭合及准噶尔—巴尔喀什洋被围限,哈萨克斯坦板块基本完成从海洋向陆地的转变。此时,哈萨克斯坦板块的中—西部仅在洋陆闭合带保留了一些深水残余洋盆,其东部可能还保留着被围限充填的残余准

噶尔洋(图2),东部末端的准噶尔盆地东部、三塘湖盆地和吐哈盆地仍有可能在海平面上升期与索伦克洋相连接(图2)。

早二叠世,伴随着东欧板块、高加索地体和哈萨克斯坦板块持续北移并发生数度的顺时针旋转,乌拉尔洋、斋桑洋和突厥斯坦洋彻底关闭,准噶尔—巴尔喀什洋逐渐向东退却。此时,哈萨克斯坦板块大致漂移至北纬 16° — 40° ,整体呈“西高东低、北高南低”的地理格局,其西侧与东欧洲板块以浅海相连,东侧以残余的准噶尔洋与索伦克洋相连^[11],北侧与西伯利亚板块以斋桑褶皱带相隔,南侧与帕米尔火山弧和塔里木板块以天山褶皱带相隔,其内部沉积环境主要为河流—湖泊及残余洋盆^[12,14,64](图2)。板块内主要发育地台内盆地、陆内盆地、褶皱带间/山间盆地^[53]及残余洋盆地和前陆盆地等,包括图尔盖盆地、楚—萨雷苏盆地、兹涅茨克盆地、博罗塔林斯基盆地、准噶尔盆地和吐哈盆地等^[12,14]。因板块整体处于气候干旱带^[41]且可能受海侵影响,这些盆地的水体通常具有较高的盐度^[4],普遍沉积了指示水体咸化的岩相(如碳酸盐岩和钙质/白云质泥岩),如楚—萨雷苏盆地下二叠统发育碳酸盐岩、蒸发岩、泥灰岩、白云岩和钙质/白云



(a) 哈萨克斯坦山弯及邻区二叠纪构造-岩相古地理



(b) 哈萨克斯坦山弯及邻区二叠纪构造-岩相剖面

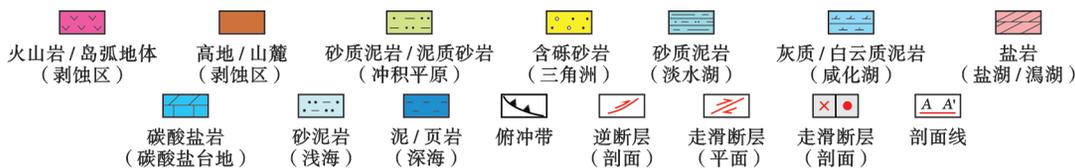


图2 哈萨克斯坦板块及其邻区二叠纪构造-岩相古地理模式(据文献[15,64]修改)

Fig. 2 Permian tectonic-lithofacies paleogeographic model of Kazakhstan orocline and its adjacent areas

质泥岩等岩相^[65](图3),准噶尔盆地下二叠统风城组发育钠碳酸盐岩、钙质/白云质泥岩等岩相^[29](图3),斋桑盆地下二叠统肯杰尔雷克组发育灰岩等岩相^[35]。

中一晚二叠世,由于欧亚板块整体北移,哈萨克斯坦板块进一步聚敛抬升并发生逆时针旋转,最终整体向北漂移至纬度20°—44°处^[14]。至此,尽管板块“西高东低、北高南低”的格局没有明显改变,但随着早期山间残余洋盆消失,以及海水从准噶尔盆地向东退至索伦克洋^[12,14],哈萨克斯坦板块整体完成了从海陆过渡环境向内陆环境的变迁。在这一时期,除了消亡的山间残余洋盆,板块内的盆地基本继承了早期格局,但其古气候逐渐从干旱转变为干旱—温湿过渡^[41],湖盆广泛发生湖侵,水体盐度也相应明显下降,其中,咸化

湖(或受海侵影响的湖盆)主要分布于板块东缘,如三塘湖和吉木萨尔湖(凹陷)等^[34]。

1.2 哈萨克斯坦盆地群的二叠系烃源岩特征

石炭纪—二叠纪是地质历史时期最主要的碳埋藏期^[71],也是烃源岩沉积的一个重要时期,沉积于晚石炭世—早二叠世的烃源岩约占全球所有烃源岩的8%^[72]。哈萨克斯坦板块内部及邻区的石炭系—二叠系盆地也分布着丰富的烃源岩,与之相关的富油气盆地群横跨东哈萨克斯坦油气区^[53-54]和中国西部油气区^[73]。在这些盆地中,石炭系烃源岩因埋深较大导致其研究程度较低,而研究者对二叠系烃源岩的研究则较深入,尤其对于准噶尔盆地、吐哈盆地和三塘湖盆地等。分析表明,这些盆地中的二叠系烃源岩特征显著。

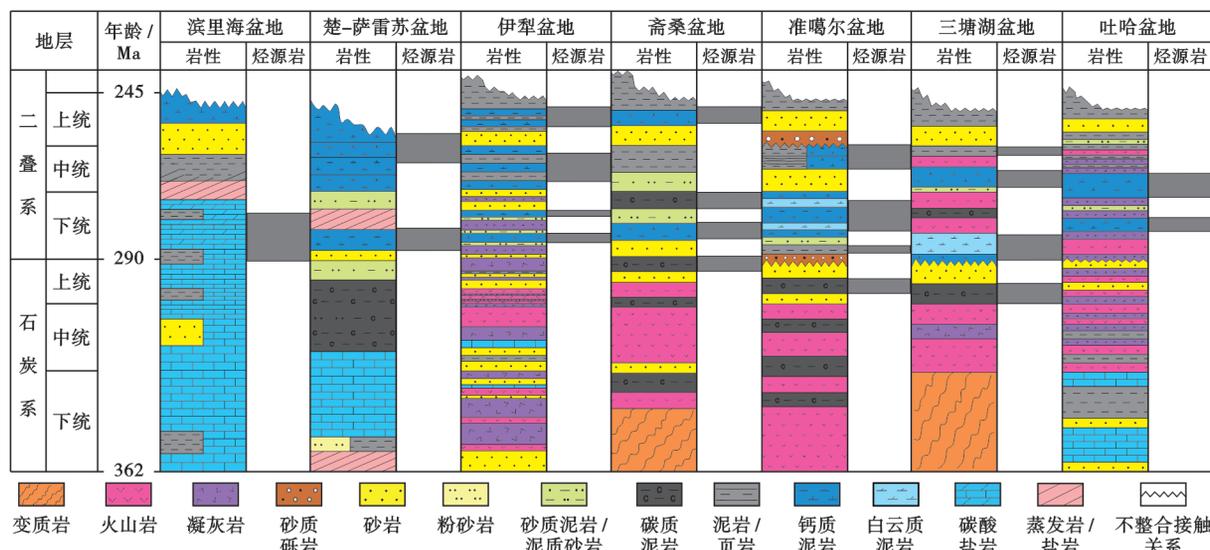


图 3 哈萨克斯坦板块及其邻区盆地群的石炭系—二叠系岩性地层及烃源岩对比剖面(据文献[15,38,66-70]修改)

Fig. 3 Correlation profile of Carboniferous-Permian lithostratigraphy and source rocks in Kazakhstan Plate and its adjacent basins

哈萨克斯坦板块盆地群的二叠系烃源岩可划分成海相—海陆过渡相(或残余洋相)、咸化湖相(或受海侵影响的沉积相)和淡水湖相 3 大类。前者的岩性特征是在深灰色泥页岩中普遍含有层状泥晶灰岩;后者的岩性特征是颜色偏浅,以发育灰色泥岩/页岩为主,通常不含钙质/白云质,但常见碳质;两者之间的咸化湖相的岩

性特征是在深灰色泥页岩中普遍含有钙质/白云质夹层,或者含钙质/白云质夹层,甚至蒸发岩夹层(图 3)。其中,咸化湖相可能在全球海平面上升期受海侵影响,有时很难将其与海陆过渡相区分开。

3 类烃源岩的时空分布特征明显。海相—海陆过渡相烃源岩主要分布在下二叠统(表 1)。烃源岩在平

表 1 哈萨克斯坦板块及其邻区盆地群重点盆地的二叠系烃源岩对比

Table 1 Comparison of Permian source rocks in major basins of Kazakhstan Plate and its adjacent basins

盆地	地层		岩性	数据来源
	统	阶/组		
滨里海	中—上统	鞑靼阶 Severodvinian 组 Urzhumian 组	咸化湖(间歇湖)相绿灰色泥岩、灰色泥灰岩;非烃源岩	文献[74-75]
	下统	丁斯克阶	海相深灰色页岩、泥质泥晶灰岩;TOC 含量为 0.7%~6.4%	文献[39]
楚-萨雷苏	上统	图兹科尔组	盐湖相深灰色页岩与灰色泥晶灰岩夹蒸发岩;TOC 含量为 1.0%~4.5%	文献[39,74]
	下统	卡拉基尔组、索尔基尔组	海相—海陆过渡相钙质泥岩和钙质页岩夹泥晶灰岩;TOC 含量为 0.8%~5.0%	文献[39,74]
伊犁	中—上统	巴斯尔干组	咸化湖相深灰色泥岩夹泥灰岩;TOC 含量为 0.79~1.24%,平均为 0.88%	文献[36-37]
		塔姆其萨依组	咸化湖相深灰色泥岩、深灰色页岩、深灰色钙质泥岩,夹膏岩层;TOC 含量为 0.34%~4.79%,平均为 1.05%	文献[36-37,58]
	下统	晓山萨依组 道列提汗萨依组、 恰勒德河组	残余洋—咸化湖相暗色泥岩;TOC 含量为 0.59%~1.62%,平均为 1.26%	文献[76]
塔城	中—上统		剥蚀或无沉积	钻井资料
	下统	哈尔加乌组 卡拉岗组	咸化湖相黑色页岩、黑色凝灰质泥岩;TOC 含量为 0.3%~2.8% 淡水湖相暗色碳质泥岩;TOC 含量为 0.72%~1.16%,平均 0.97%	文献[78] 文献[79]
斋桑	上统	阿考尔康组 麦恰特组	淡水湖相碳质泥岩;TOC 含量为较高,可达 10% 咸化湖相黑色油页岩;无 TOC 数据	文献[35] 文献[79]
	下统	卡拉岗组/阿坎赛组 下乌尔禾组	淡水湖相暗色碳质泥岩;TOC 含量为 0.30%~4.32%,平均 1.01% 淡水湖相灰色碳质页岩;TOC 含量为 0.2%~19.0%	文献[79] 实测数据
准噶尔	中统	平地泉组	咸化湖相深灰色钙质/白云质泥岩、深色泥岩;TOC 含量为 0.23%~20.19%,平均为 3.44%	文献[26-27]
	下统	芦苇沟组	咸化湖相深灰色页岩、钙质/白云质页岩、凝灰质—粉砂质泥岩;TOC 含量为 0.50%~34.27%,平均为 5.78%	文献[26-27]
		风城组 佳木河组	咸化湖相白云质页岩、钙质页岩;TOC 含量为 0.05%~2.55% 微咸水湖相深灰色碳质泥岩;TOC 含量为 1.1%~14.0%	文献[26-27,80] 据新疆油田数据
三塘湖	中统	条湖组	淡水湖相深灰色凝灰质泥岩;TOC 含量为 0.01%~4.77%	文献[62-63]
	下统	芦苇沟组 卡拉岗组 (或属于上石炭统)	咸化湖相深灰色白云质页岩、油页岩;TOC 含量为 2.87%~15.60% 近海咸化湖相深灰色白云质泥岩、钙质泥岩、深灰色凝灰质泥岩;TOC 含量为 0.3%~4.8%,平均为 2.1%	文献[34] 文献[81]
		中—上统	塔尔朗组	微咸水湖相深灰色泥岩,夹泥晶灰岩;TOC 含量为 1.6%~7.7%
吐哈	下统	依尔希土组/艾丁湖组	残留洋深灰色泥岩、泥晶灰岩;TOC 含量为 0.05%~4.80%	文献[83]

面上主要沿着斋桑—额尔齐斯缝合带、北天山缝合带、乌拉尔—突厥斯坦—南天山缝合带、索伦克缝合带分布(图1),分别沉积于残余的斋桑洋、残余的准噶尔—巴尔喀什洋和残余的乌拉尔洋—南天山洋等,明显受古亚洲洋自西向东、自北向南关闭的古地理变迁特征影响。目前已发现的海相—海陆过渡相烃源岩主要分布于哈萨克斯坦板块南部的楚-萨雷苏盆地、伊犁盆地、准噶尔盆地和吐哈盆地(图1、图3、表1),其厚度变化较大,主要受局部地壳挠曲变形产生的可容纳空间的大小控制。滨里海盆地也有优质厚层下二叠统海相烃源岩分布(图3、表1),但其更多地受控于东欧板块,笔者仅将其作为对比对象。

咸化湖相烃源岩多分布于中一下二叠统,少数分布于上二叠统。前者广泛分布于哈萨克斯坦板块内的各类盆地中,后者主要分布于哈萨克斯坦境内的盆地及伊犁盆地和斋桑盆地(图1、图3、表1)。咸化湖相烃源岩在平面上具有“南多北少、西多东少”的分布特征,在楚-萨雷苏盆地和斋桑盆地等盆地可能主要沉积于受古气候控制的闭塞内流湖,在其他盆地则可能主要沉积于受古亚洲洋影响的近海湖盆,即间或与广海及残余洋相联接的咸化湖盆。

淡水湖相烃源岩主要分布于中—上二叠统,在平面上主要分布于中国境内的北侧(图1、图3、表1)。淡水湖相烃源岩主要沉积于中—晚二叠世偏温湿古气候条件、通常不受海侵影响且有充足淡水补给的湖盆或湖区,如准噶尔盆地的玛湖凹陷。

3类烃源岩的品质差异显著,以咸化湖相烃源岩品质最佳。海相—海陆过渡相烃源岩尽管其总有机碳(TOC)含量最高可达6.4%(如滨里海盆地的丁斯克阶,表1),但因其对油气的贡献很难评价,通常被认为是次要或潜在烃源岩^[39]。咸化湖相烃源岩具有最高的TOC含量且生烃潜力大,通常被认为是主力烃源岩^[30-31],这已得到勘探证实,如准噶尔盆地的风城组、芦苇沟组和平地泉组,三塘湖盆地的芦苇沟组以及吐哈盆地的塔尔朗组(表1)。淡水湖相烃源岩的TOC含量差异较大且平均含量偏低,TOC含量仅在碳质较多时偏高,且因生烃潜力较小通常被认为是次要或潜在烃源岩,如准噶尔盆地的下乌尔禾组、三塘湖盆地的条湖组和斋桑盆地的卡拉岗组(表1)。

综合分析图3和表1的数据可得出,在哈萨克斯坦板块盆地群内,二叠系烃源岩的基本特征主要受古亚洲洋关闭的时序及古气候变化控制。在EW向上,沿滨里海盆地、楚-萨雷苏盆地、伊犁盆地、准噶尔盆地至吐哈盆地,西段烃源岩依次从海相—海陆过渡相变化为咸化湖相,东段烃源岩则依次从海相—海陆过渡相、咸化湖相过渡为淡水湖相,其中,以东段咸化湖相

烃源岩的品质为佳;在SN向上,沿斋桑盆地、准噶尔盆地至吐哈盆地,北段烃源岩从淡水湖相变化为间歇性干涸的咸化湖相,南段则依次从海相—海陆过渡相、咸化湖相变化至淡水湖相,其中,以南段咸化湖相烃源岩的品质为佳(图3、表1)。咸化湖相烃源岩品质佳的原因或与水体分层的形成有关。一般认为,分层水体中盐度偏低的上层有利于微生物繁盛(主要为特定的嗜盐性微生物),从而提高生态环境的初级生产力;盐度偏高的下层有利于还原环境形成,从而抑制有机质的氧化分解,有利于有机质保存^[30-31,84-85]。此外,菌藻类微生物的繁盛^[86]及广泛发生的絮凝作用^[87]可能也是造成咸化湖相烃源岩品质佳的原因之一,前者增加了生源,后者则促进有机质沉积。

2 准噶尔盆地二叠纪岩相古地理及烃源岩分布特征

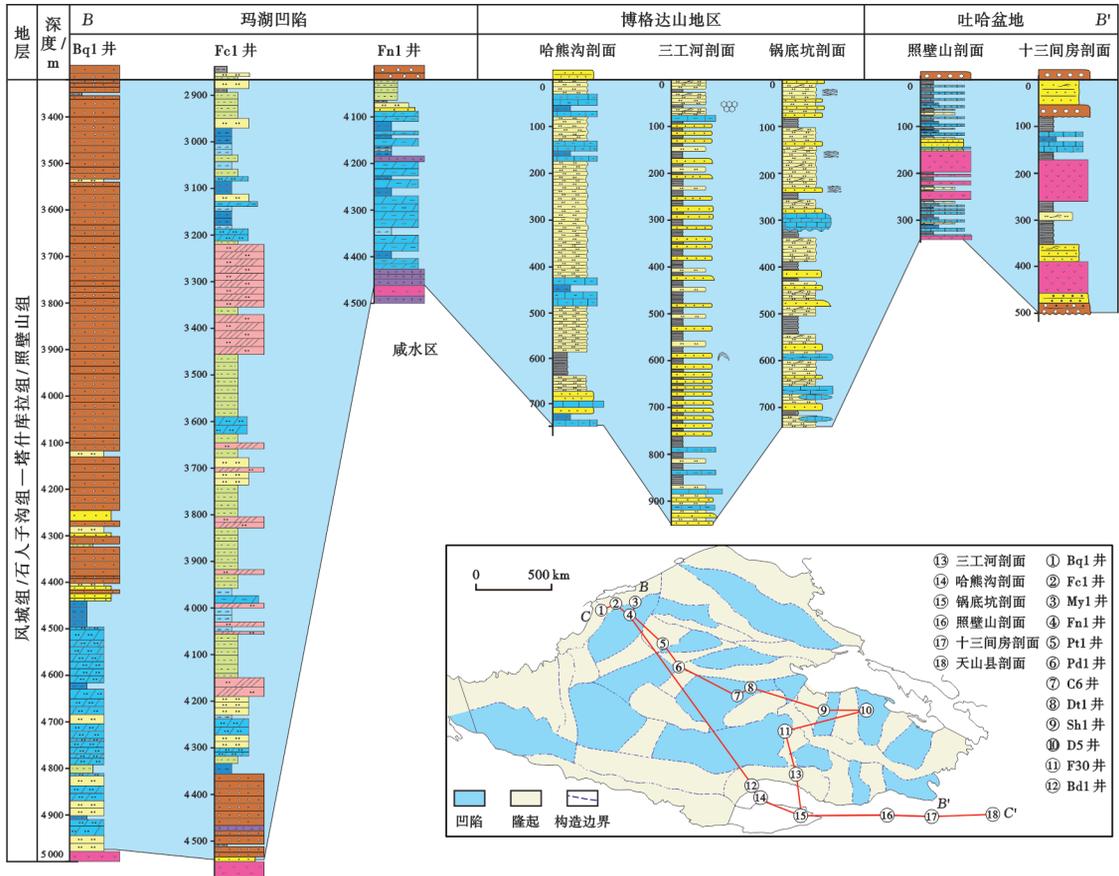
2.1 准噶尔盆地中一下二叠统岩相古地理

受哈萨克斯坦板块形成与古亚洲洋关闭时序控制,准噶尔盆地在晚石炭世—早二叠世整体处于由洋向陆转换的构造-岩相古地理环境。期间,准噶尔地体周缘的残余洋盆渐次关闭并反转隆升成山,依次关闭的是东北缘的卡拉麦里洋(349~323 Ma)、西北缘的西准噶尔洋(336~310 Ma)以及南缘的北天山洋(325~316 Ma)和博格达洋(316~278 Ma)^[88-89]。伴随着洋盆的关闭和海水的逐渐退却,沿洋陆闭合带形成一系列相对闭塞的近海陆缘湖盆(在海平面上升期或有海侵),如博格达残余洋(或陆缘海)。这些湖盆因受海平面周期性上升引起的海水倒灌及偏炎热干旱古气候^[90-91]导致的强蒸发作用影响,其水体通常发生不同程度的咸化,甚至演化成半咸水—咸水湖。这种咸化特征充分体现在准噶尔盆地中一下二叠统的岩性、岩石地球化学和有机地球化学指标上。

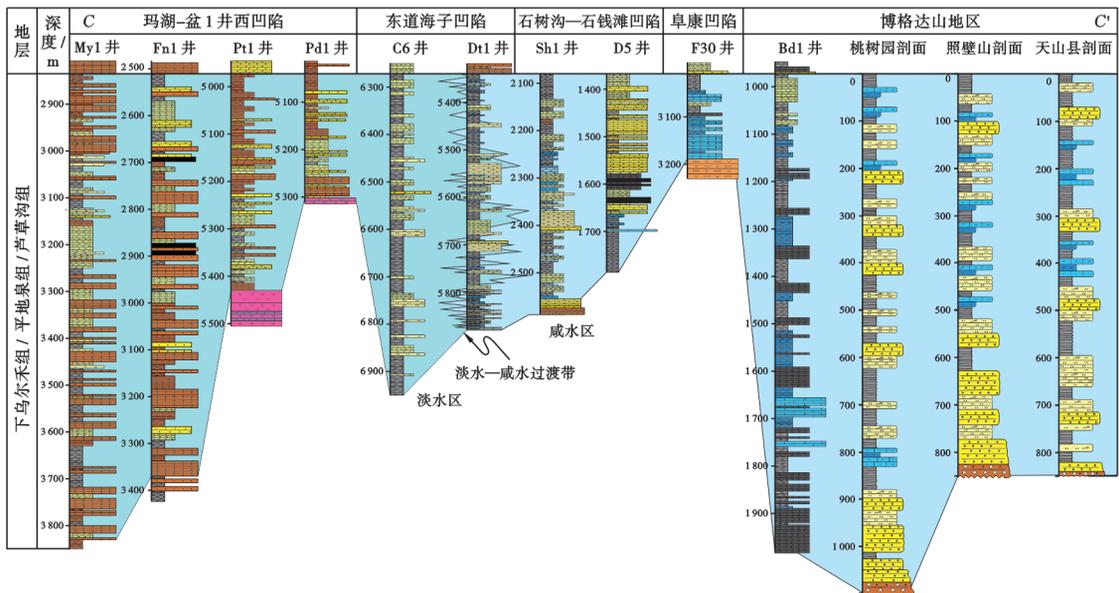
2.1.1 岩性特征及沉积环境解释

钻井及野外露头的岩性和沉积环境分析表明,准噶尔盆地在早—中二叠世普遍发育残余洋和咸化湖,但在时序上,从早二叠世至中二叠世,其范围明显收缩。

下二叠统大量的录井岩性资料及岩心与露头沉积相分析资料揭示:准噶尔盆地西北缘的玛湖凹陷广泛发育指示水体咸化的钙质泥岩、泥质白云岩和蒸发岩等,其沉积环境解释为可能受海侵影响的咸化湖;准噶尔盆地东南部的博格达山—吐哈盆地北缘地区普遍发育海相碳酸盐岩(含生屑灰岩)和钙质泥岩,并可见指示风暴流沉积的丘状交错层理及指示深海环境的动藻迹和丽线迹,其沉积环境解释为滨海—远滨过渡带—远滨[图4(a)]。这样的岩性分布特征及沉积环境解



(a) 下二叠统 Bq1 井—Fe1 井—Fn1 井—哈熊沟剖面—三工河剖面—锅底坑剖面—照壁山剖面—十三间房剖面岩性对比



(b) 中二叠统 My1 井—Fn1 井—Pt1 井—Pd1 井—C6 井—Dt1 井—Sh1 井—D5 井—F30 井—Bd1 井—桃园园剖面—照壁山剖面—天山县剖面岩性对比

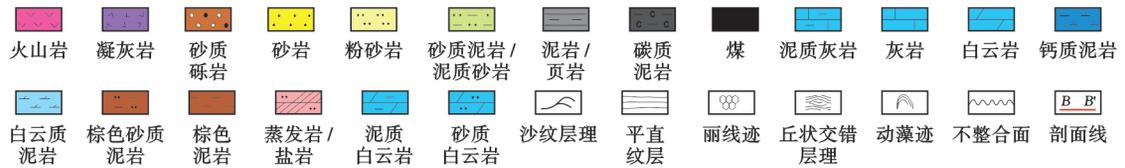


图 4 准噶尔盆地及其周缘中一下二叠统岩性对比

Fig. 4 Lithology correlation of Middle and Lower Permian in Junggar Basin and its periphery

释结果结合准噶尔盆地的“岛—洋”拼贴成盆机制^[12,14,46],可认为准噶尔盆地的下二叠统可能以咸化沉积为主,即准噶尔地体及其周缘在早二叠世沿准噶尔—巴尔喀什洋周缘的俯冲带/缝合带可能分布着咸化湖或残余洋。在现今的克拉美丽山前、准噶尔盆地西北缘和北天山山前一带可能分布着残余洋或咸化湖沉积(或受海侵影响的沉积),而在现今的博格达山—吐哈盆地北缘一带可能分布残余洋沉积。

中二叠统更丰富的录井岩性资料及岩心与露头沉积相分析资料揭示:在准噶尔盆地西侧的玛湖凹陷—盆1井西凹陷—东道海子凹陷西侧一带,广泛分布着灰色—浅灰色泥岩,但无指示水体咸化特征的钙质泥岩和泥灰岩等分布,其沉积环境解释为淡水湖;在准噶尔盆地中部、东部及东南部的东道海子凹陷东侧、五彩湾凹陷—石树沟凹陷—石浅滩凹陷以及阜康凹陷—吉木萨尔凹陷—博格达山一带,广泛分布着指示水体咸化特征的灰岩、钙质泥岩和鲕粒灰岩等,其沉积环境解释为咸化湖(或受海侵影响)[图4(b)]。这样的岩性分布特征及沉积环境解释结果结合准噶尔盆地的“岛—洋”拼贴成盆机制^[12,14,46],可认为准噶尔盆地的中二叠统具有淡水沉积与咸化沉积并存的特点,即准噶尔地体及其周缘在中二叠世已基本脱离古亚洲洋的影响,并逐渐转变为内陆淡水盆地,仅在沿准噶尔—巴尔喀什洋南侧的俯冲消亡带(北天山一带)仍有咸化湖沉积(或受海侵影响的沉积)分布。在现今的玛湖凹陷—盆1井西凹陷—沙湾凹陷一带应有淡水湖沉积分布,而在现今的克拉美丽山前、阜康凹陷—博格达山—吐哈盆地北缘一带应有咸化湖沉积分布。综合中一下二叠统的岩相分布及沉积环境解释认为,准噶尔盆地内尚无钻井钻揭的、广阔的中一下二叠统分布区可能广泛分布着咸化沉积,尤其在沙湾凹陷、南缘冲断带—阜康凹陷一带。

2.1.2 地球化学特征及沉积环境解释

岩心与野外露头样品的岩石地球化学检测数据也指示准噶尔盆地在早—中二叠世普遍发育残余洋和咸化湖沉积。水体咸化程度的定性计算可依据 Sr/Ba 与 B/Ga 比值;而水体咸化程度的定量计算可依据 B 元素^[92-93] 计算的古盐度值(SP)^[94];水体咸化的级别依据湖泊学标准^[95] 划分,按盐度从低到高依次可划分为淡水(SP<0.5‰)、微咸水(SP为0.5‰~3.0‰)、低咸水(SP为3‰~20‰)、中咸水(SP为20‰~50‰)和超咸水(SP>50‰)。

在准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷风城组,烃源岩的 Sr/Ba 平均为 1.49~2.37, B/Ga 平均为 19.23~44.51(表2),根据咸水的 Sr/Ba 特征^[96-97] 和 B/Ga 特征^[98] 将其沉积环

境解释为“可能受海侵影响的咸化湖”。基于 B 元素的定量计算,玛湖凹陷风城组沉积环境的平均盐度为 6.6‰~27.6‰(表2),属于低咸水—中咸水湖,其中以风城组二段沉积期的盐度最高,达到中咸水或超咸水。在盆地东南缘博格达山一带的芦苇沟组中,烃源岩的 Sr/Ba 平均为 1.97, B/Ga 平均为 9.00(表2),同样将其沉积环境解释为“可能受海侵影响的咸化湖”。基于 B 元素的定量计算,博格达山一带芦苇沟组沉积环境的平均盐度为 12.86‰(表2),属于低咸水湖。这些岩石地球化学指标的解释结果与前述的构造-古地理的分析结果高度吻合,进一步佐证了准噶尔盆地在早—中二叠世广泛发育咸化沉积。

表2 准噶尔盆地二叠系风城组、芦苇沟组泥岩 Sr/Ba、B/Ga 比值及古盐度

Table 2 Sr/Ba ratio, B/Ga ratio and paleosalinity of mudstones in Permian Fengcheng and Lusaogou formations of Junggar Basin

地层	Sr/Ba	B/Ga	盐度/‰
风城组三段	0.289~5.741/1.490	0.64~204.15/19.23	2.9~13.3/6.6
风城组二段	0.275~8.780/2.370	2.05~180.35/44.51	7.3~90.2/27.6
风城组一段	0.449~3.717/1.510	0.71~196.04/21.56	2.9~13.3/6.6
芦苇沟组	0.720~2.850/1.970	2.00~9.90/9.00	12.8

注:“/”后为平均值。

岩心样品的有机地球化学检测数据(生物标志化合物)也指示准噶尔盆地在早—中二叠世普遍发育咸化湖沉积。生物标志化合物可用于指示沉积环境^[99-100];通常认为 β 胡萝卜素富集于咸水环境,可将其作为海洋或湖泊的盐度指标^[101-102];伽马蜡烷也是判断古盐度的良好指标,尤其是超咸水环境^[103-104]。检测数据表明(图5),无论是在准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷的风城组,还是在盆地东南缘博格达山前一带(吉木萨尔凹陷)的芦苇沟组,烃源岩均检出较多的、指示咸水环境的 β 胡萝卜素和伽马蜡烷。这些数据与前人的检测结果^[23,105-106] 高度一致,所指示的咸化环境也与前述的构造-古地理的分析结果吻合,进一步说明准噶尔盆地在早—中二叠世广泛发育咸化沉积。

2.1.3 岩相古地理特征

综合上述单井/露头剖面的岩性、地球化学资料、沉积环境解释,以及更多钻井的录井岩性资料与测井沉积相解释成果、全盆地地震岩性和地层(厚度)解释成果(图6、图7),结合前述哈萨克斯坦板块二叠纪盆地的构造-古地理格局与演化特征,笔者对准噶尔盆地早—中二叠世的岩相古地理进行了恢复(图8、图9)。

早二叠世,伴随着准噶尔盆地北部青格里底山—克拉美丽山(卡拉麦里缝合带)、西部扎依尔山—哈山—德伦山(西准噶尔弧)的持续隆升,以及海水从准噶尔残余洋自北向南、自西向东逐渐退却,准噶尔盆地

沿洋陆闭合带发育了玛湖凹陷、盆 1 井西凹陷和沙湾凹陷等咸化湖盆(图 8),并在其中沉积了厚层的深灰色泥岩、钙质/白云质泥岩、泥质灰岩/白云岩以及中

层一薄层状钠碳酸盐层^[28-29](含有天然碱、碳氢钠石、碳酸钠钙石、氯碳钠镁石、丝硅镁石等)(图 4)。然而,由于北天山缝合带的形成时间偏晚,且此时卡拉麦里

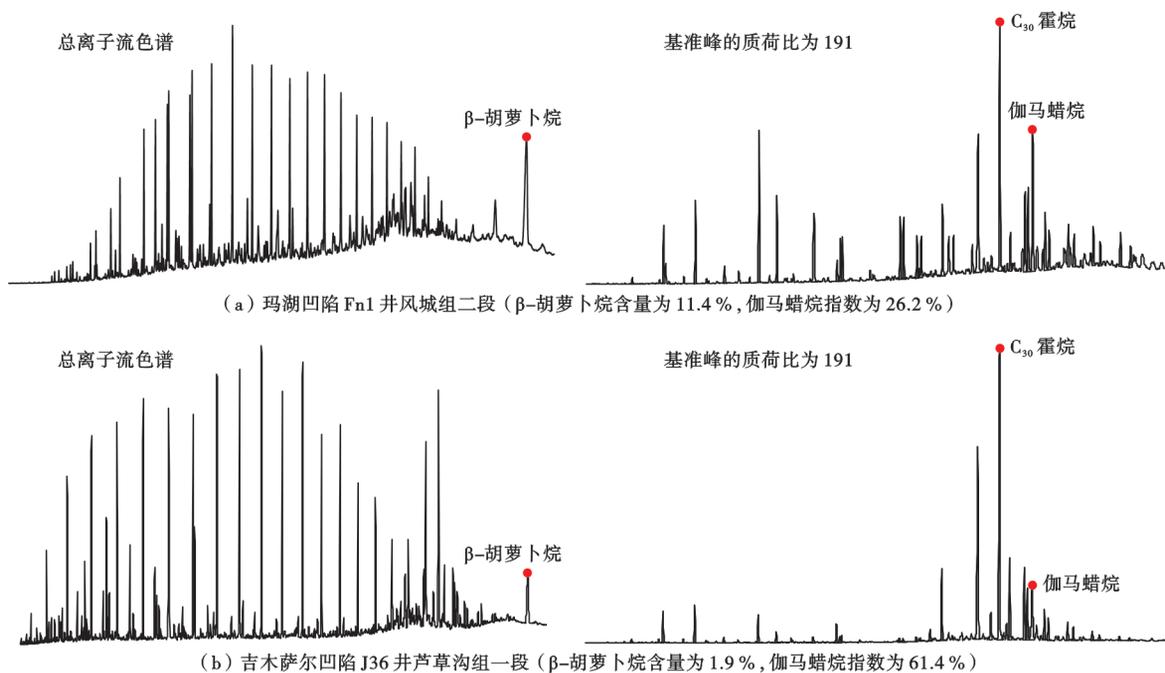


图 5 玛湖凹陷风城组和吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩的典型生物标志物分布特征

Fig. 5 Typical biomarker distribution characteristics of source rocks from Fengcheng Formation in Mahu sag and Lucaogou Formation in Jimsar sag

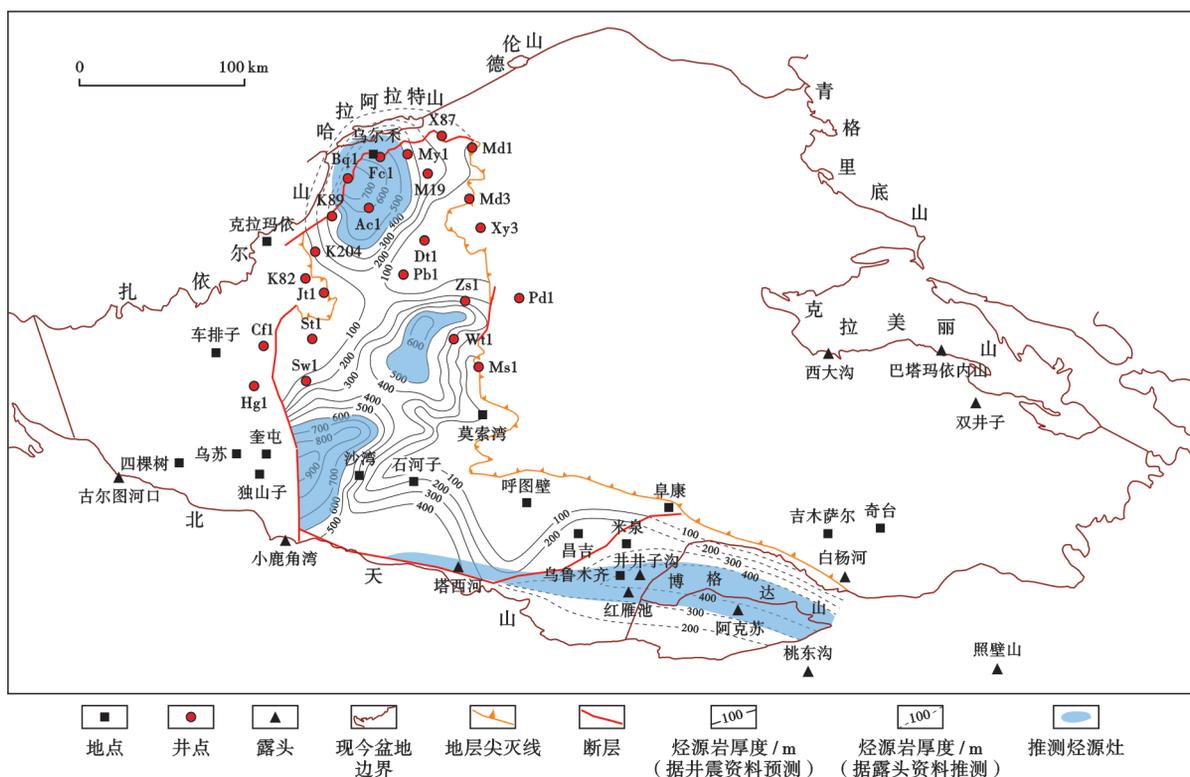


图 6 准噶尔盆地地下二叠统风城组(或同时代地层)的泥岩/烃源岩厚度及烃源灶分布预测

Fig. 6 Prediction of mudstone/source rock thickness and source kitchen distribution in Lower Permian Fengcheng Formation(or contemporaneous strata), Junggar Basin

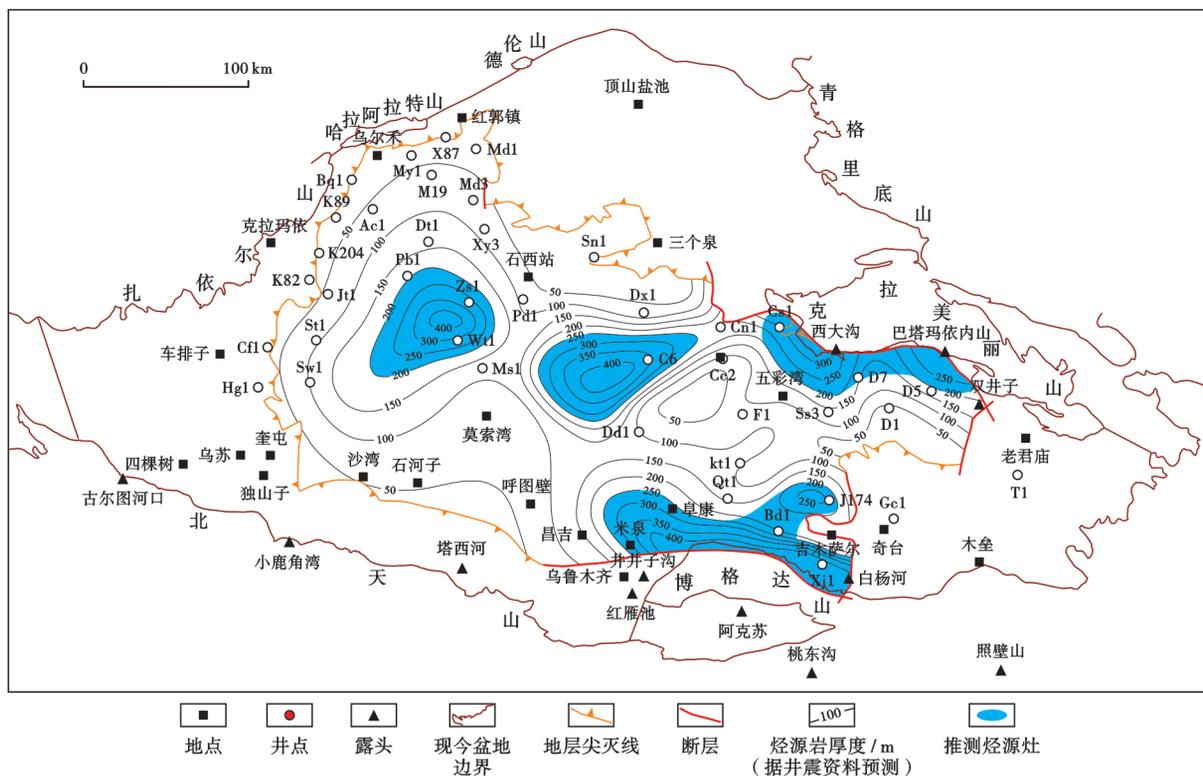


图7 准噶尔盆地中二叠统下乌尔禾组(或同时代地层)泥岩/烃源岩厚度及烃源灶分布预测

Fig. 7 Prediction of mudstone/source rock thickness and source kitchen distribution in Middle Permian Xiawuerhe Formation(or contemporaneous strata), Junggar Basin

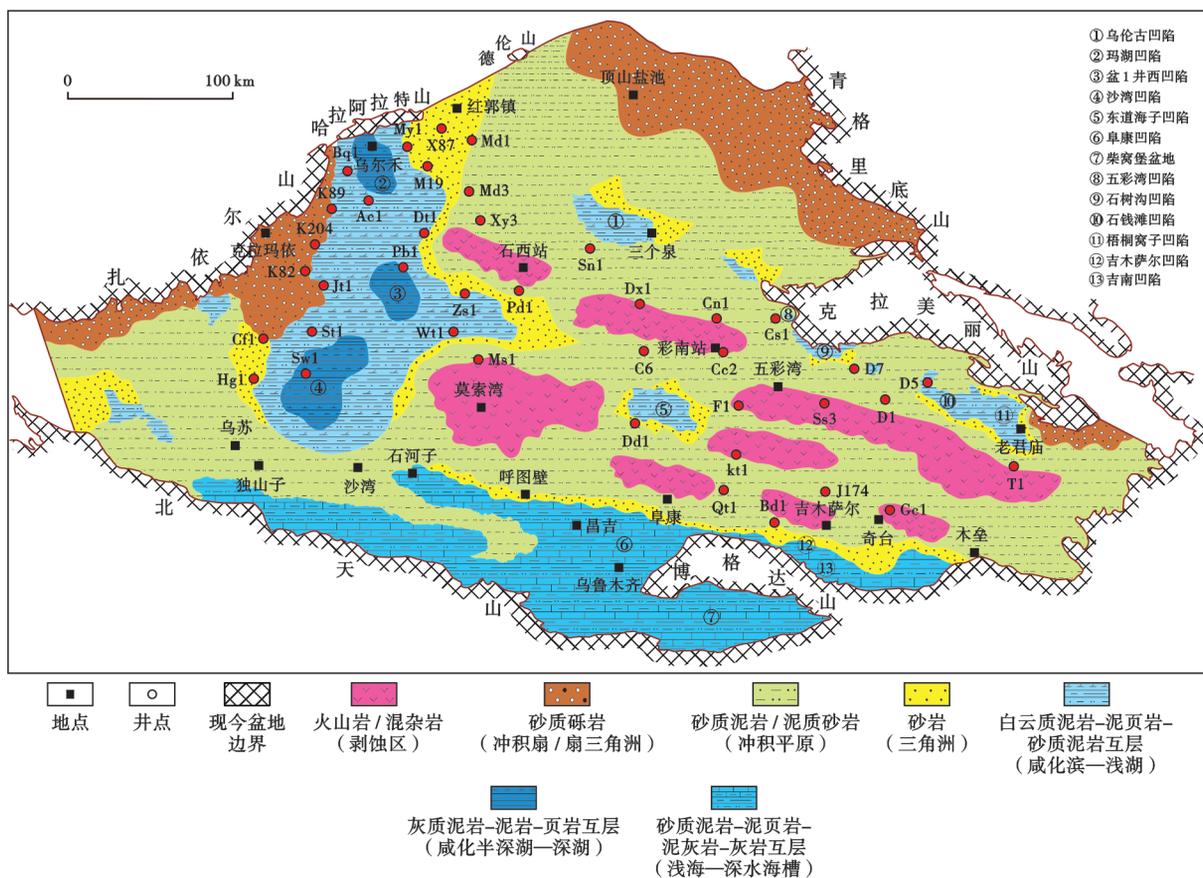


图8 准噶尔盆地早二叠世岩相古地理

Fig. 8 Lithofacies paleogeography of Early Permian in Junggar Basin

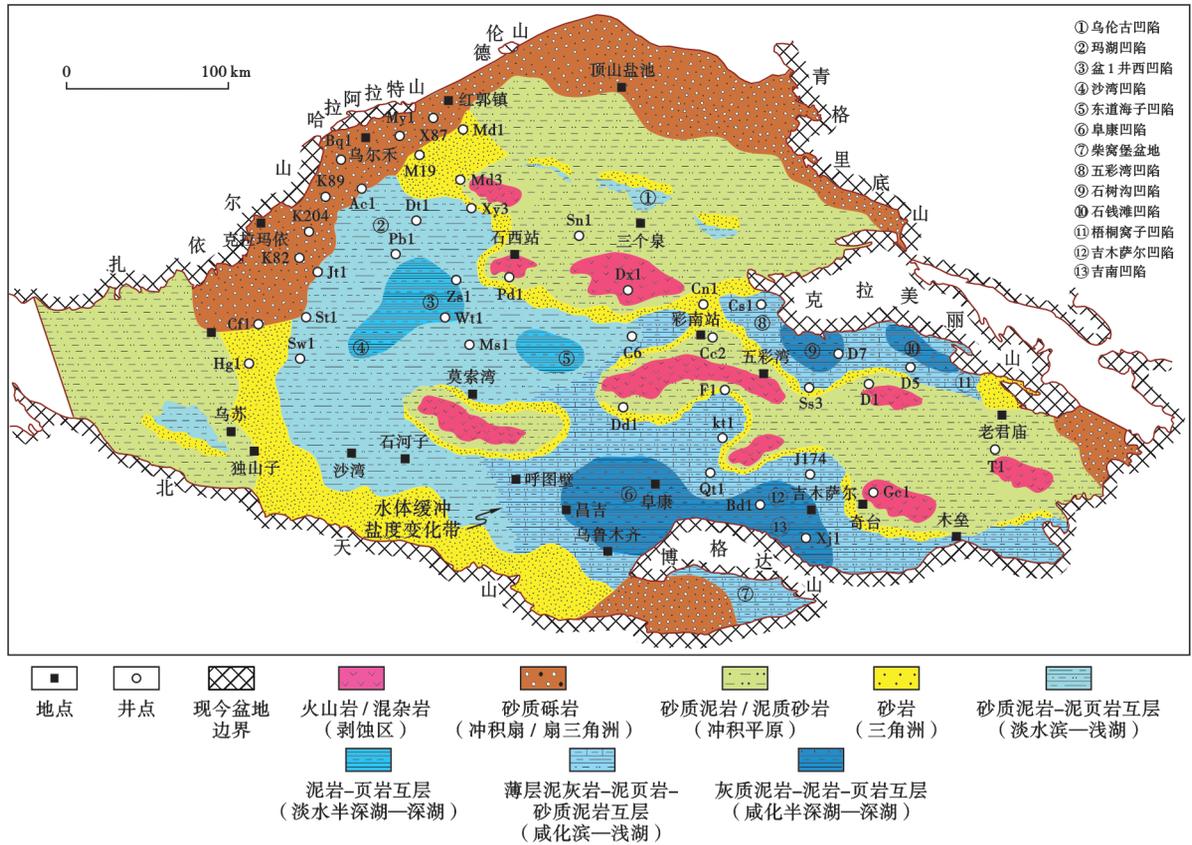


图9 准噶尔盆地中二叠世岩相古地理

Fig. 9 Lithofacies paleogeography of Middle Permian in Junggar Basin

缝合带东段^[107]可能也未完全形成,海水尚未完全向东退出现今盆地边界,在准噶尔盆地南侧的北天山山前(如阜康凹陷—柴窝堡盆地)、博格达山、吐哈盆地北部以及在盆地东部的石树沟凹陷—石钱滩凹陷—梧桐窝子凹陷一带,可能仍发育残余洋或受海侵影响的咸化湖(图8)。其中,残余洋的证据主要来自博格达山一带出露于三工河、锅底坑和照壁山等剖面的下二叠统海相藻灰岩、叠层石灰岩(图4)以及指示深水环境的丽线迹和动藻迹等遗迹化石^[108-109]。该阶段准噶尔盆地的宏观古地理格局整体呈“北山南海(残余洋)、西凹(湖)东隆”;盆地边缘发育以古生代碰撞造山带(如阿尔曼太缝合带^[107])或火山弧(如野马泉地区的泥盆纪岛弧、西准噶尔弧^[107,110])为物源区的长度不等的流域;盆地内部围绕风化残余火山岛弧地体^[111]或地垒发育小型流域,广泛分布冲积平原—河流—三角洲—湖泊体系、扇三角洲—湖泊体系、三角洲—浅海沉积体系以及广阔冲积平原中的小型间歇性湖泊^[112-113](图8)。在盆地西部玛湖凹陷—盆1井西凹陷—沙湾凹陷一带发育三角洲/扇三角洲—咸化湖体系;在盆地东南部北天山山前—阜康凹陷—博格达山一带发育三角洲—残余洋体系;在盆地东北部克拉美丽山前石树沟—石钱

滩—梧桐窝子凹陷一带发育三角洲—咸化湖体系。这些三角洲体系所对应的地层在现今大多已遭受剥蚀或未被钻揭,其沉积相的刻画难度大,主要依据有限的钻井资料、地震地层趋势以及构造-古地理背景推测,其中,以玛湖凹陷—盆1井西凹陷—沙湾凹陷一带的三角洲/扇三角洲—湖泊体系的刻画相对准确。在该体系内,三角洲/扇三角洲的分布范围最为广阔,主要发育在凹陷西侧扎依尔山—德伦山一带的山前;而在与之相对的凹陷东侧,推测发育小型的曲流河三角洲(图8)。

中二叠世,伴随着微陆块与岛弧地体的进一步汇聚,哈萨克斯坦板块进一步成型,海水进一步从残余洋(主要是北天山洋)向东退却至索伦克洋或蒙古—鄂霍次克洋^[11],板块内的残余洋逐渐消亡。在这一时期,准噶尔盆地的宏观古地理格局变化较大。首先,在宏观上,尽管整个区域仍呈“北高南低、西凹东隆”的格局,但因盆地南侧的北天山缝合带基本形成,区域在地貌上具有“C”字形轮廓,整体转变成内陆湖盆,仅在“C”字形开口一侧即盆地东南缘的博格达山—吐哈盆地北缘一带以及盆地东北缘的五彩湾凹陷—石树沟凹陷—石钱滩凹陷—梧桐窝子凹陷一带发育可能受海侵影响的咸化湖(图9)。其次,盆地内部的沉积格局受

可容纳空间与古气候影响发生了显著的变化:①盆缘山系的进一步隆升和围限所引起的可容纳空间增大与古气候向温湿气候的转变^[41]使得湖泊的分布范围显著扩大,具坳陷特征的泛湖初步形成;②古气候转向温湿气候加剧了风化作用,使得盆内的先存岛弧地体或地垒逐渐被夷平,相应地,源自盆地内部的小型流域的范围有所收缩;③古气候向温湿气候转变引起的降水与地表径流增加,使得湖水发生明显淡化,即在盆地西部的玛湖凹陷—盆1井西凹陷—沙湾凹陷一带,因来自山区水系充足淡水的补给,其水体已转变为淡水,仅在盆地东南缘的阜康凹陷—博格达山一带以及盆地东北缘的五彩湾—石树沟—石钱滩凹陷一带仍维持着咸化环境(图9)。由于气候趋于温湿且区域上发生了广泛的湖侵,与早二叠世相比,中二叠世的盆内三角洲/扇三角洲—湖泊体系的分布范围明显增大。盆地西部玛湖凹陷周边发育三角洲/扇三角洲—淡水湖体系;盆地南缘北天山山前一带发育三角洲—淡水湖/咸化湖体系;盆地东南部阜康凹陷北侧发育三角洲—咸化湖体系;盆地东北部克拉美丽山前五彩湾—石树沟—石钱滩凹陷一带发育三角洲—咸化湖体系。目前,对于这些三角洲/扇三角洲—湖泊体系在平面上的展布特征的刻画仍然主要依据有限的钻井资料、地震地层趋势及构造-古地理背景推测(尤其是在盆地南缘与腹部地区):首先,在北天山缝合带基本形成后,北天山开始隆升,准噶尔盆地南缘山前得以广泛发育三角洲沉积,这些三角洲沉积有可能在山前侧接,形成连片分布;其次,盆地可能受地壳拆沉作用影响,玛湖凹陷—沙湾凹陷西侧的岛弧地体隆升明显,从而导致扎依尔山—德伦山一带山前的三角洲/扇三角洲不但没发生退积,反而明显发生了进积;最后,可能因盆地的坳陷作用叠加了湖侵作用,玛湖凹陷东侧的三角洲退积明显,其分布范围明显收缩(图9)。

2.2 准噶尔盆地早—中二叠世咸化沉积的迁移与变化规律

基于哈萨克斯坦板块构造-古地理变迁及准噶尔盆地早—中二叠世的岩相古地理恢复(图8、图9),结合钻、测井及地震地层/岩性解释成果(图6、图7),可总结出准噶尔盆地早—中二叠世咸化沉积的迁移规律。平面上,从下二叠统至中二叠统,咸化沉积的迁移与变化明显受古亚洲洋关闭及古气候变化控制,其迁移与变化方向与准噶尔—巴尔喀什洋的关闭方向一致,均为从北往南、从西向东。早二叠世,咸化沉积在全盆地广泛分布。咸化沉积在盆地北部沉积于主要受干旱气候控制的间歇性咸化湖,如乌伦古凹陷;在盆地西部则沉积于同时受干旱气候和海侵控制的咸化湖,

包括玛湖凹陷、盆1井西凹陷和沙湾凹陷;在盆地南部、东南部沉积于残余洋及受海侵影响的陆表海,包括阜康凹陷、柴窝堡盆地及博格达山一带等;在盆地东北部沉积于受海侵影响的咸化湖,包括石树沟凹陷、石钱滩凹陷和梧桐窝子凹陷等[图4(a)、图8]。中二叠世,伴随着古气候转向温湿条件引起的淡水补给增加与广泛的湖侵,咸化沉积在盆地内的分布范围明显向南、向东迁移,主要沉积于莫索湾以东区域,即在盆地东南部沉积于或受海侵影响的咸化湖,包括阜康凹陷、柴窝堡盆地及博格达山一带等,在盆地东北部沉积于或受海侵影响的咸化湖,包括五彩湾凹陷、石树沟凹陷、石钱滩凹陷和梧桐窝子凹陷等[图4(b)、图9]。而在此期间,盆地北部的乌伦古凹陷及西部玛湖凹陷、盆1井西凹陷、沙湾凹陷的主体均已转变为淡水环境(图9)。

纵向上,从下二叠统至中二叠统,咸化沉积的迁移与变化也明显受古亚洲洋的东向退却及古气候变化控制,整体表现为咸化沉积向上逐渐减少,直至完全转变为淡水沉积。受古地理差异控制,盆地不同区域内的咸化沉积在纵向上的迁移与变化存在差异。在盆地西北缘玛湖凹陷,咸化沉积(甚至是碱湖沉积)在下二叠统的顶部向上快速过渡为淡水沉积,这既反映巴尔喀什洋的东向退却,也反映古气候趋向温湿条件所导致的地表径流增大及相伴随的三角洲进积,如图4中的Fn1井;在盆地东南部博格达山一带,咸化沉积从下二叠统的海相碳酸盐岩、钙质泥岩等向上逐渐过渡为受海侵影响的中二叠统咸化湖沉积,这主要反映了来自海洋的影响逐渐减弱,直至消失;在流域入湖的三角洲波及区域,常见咸化沉积向上快速过渡为淡水沉积,这种变化在下二叠统和中二叠统中均可见到,通常反映入湖的河流发生侧向迁移,或古气候趋向温湿条件后导致的地表径流增大及相伴随的三角洲进积,前者如图4(a)中的Bq1井,后者如图4(b)中的D5井。

2.3 准噶尔盆地中—下二叠统优质烃源岩特征及分布预测

油气勘探揭示准噶尔盆地发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近系等多套烃源岩^[26-27,56]。二叠系烃源岩以分布广、厚度大、有机质丰度高和类型好为特征^[26-27],被认为是盆地最主要的烃源岩之一。该主力烃源岩主要发育于中—下二叠统,包括下二叠统的风城组^[80,114-115]和佳木河组^[116],以及中二叠统的芦苇沟组^[116-119]、红雁池组^[120]、平地泉组^[116,121]和下乌尔禾组^[115,122]等。其中,下乌尔禾组主要分布于盆地西北缘—腹部,层位上相当于分布于准东地区(克拉美丽山前)的平地泉组,或相当于分布于东南缘(博格达山及其周缘)的芦苇沟组及其上覆的红雁池组^[123](表3)。

表3 准噶尔盆地二叠系不同地层组烃源岩的基本地球化学特征

Table 3 Basic geochemical characteristics of source rocks from different strata of Permian in Junggar Basin

地层	烃源岩	构造带	地区/ 凹陷	总有机碳 均值/%	氯仿沥青 “A” 均值/%	生烃潜力均 值/(mg/g)	氢指数均 值/(mg/g)	总烃含量/ 10 ⁻⁶	有机质 类型	T _{max} 均值/ °C	沉积环境 水体特征	有机质 丰度评价	资料来源	
中二叠统	下乌尔禾组	西北缘—腹部	盆1井西凹陷	0.71		1.40	79.18	约562	Ⅲ	437.3	淡水	中等	文献 [115]	
			哈山	1.37	0.28	0.51	37.20	约509	Ⅱ—Ⅲ	462.0	淡水	中等偏好	文献 [124]	
	红雁池组	东南缘(博格达山及周缘)	博格达山西段及周缘	2.75		8.87	129.40	约3558	Ⅱ	443.0	咸水	好—最好	文献 [120]	
			阜康凹陷	1.90		4.30	184.40	约3769	Ⅰ—Ⅱ	439.7	咸水	好—最好	文献 [125]	
			吉木萨尔凹陷	2.03~6.11	0.16~7.10	7.10~20.00	287~391	5821~7937	Ⅰ—Ⅱ	418.0~460.0	咸水	最好	文献 [126]	
			博格达山周缘	1.90~17.83	0.06~0.60	37.6~113.5	341~840	6400~15960	Ⅰ—Ⅱ	432.0~480.0	咸水	最好	文献 [118,126]	
	平地泉组	准东地区(克拉美丽山前)	石树沟凹陷	2.99	1.19	13.72	318	约9508	Ⅰ—Ⅱ	441.0	咸水	好—最好	文献 [127]	
			东道海子凹陷	7.80~10.50	0.61~0.90	56.70~67.63	601~681	约57600	Ⅰ—Ⅱ	438.0~439.0	咸水	最好	文献 [116]	
	下二叠统	风城组	西北缘—腹部	哈山	1.44	0.15	6.40	352.70	约5078	Ⅱ	420.0	咸水	好—最好	文献 [128]
				玛湖凹陷	0.64~1.04	3.55~5.43	1.10~5.20	240~362	约2700	Ⅰ—Ⅲ	421.7~438.0	碱性咸水	中等偏好	文献 [129]
玛东				0.45		1.58	175.26	约788	Ⅱ—Ⅲ	423.0	咸水	中等偏差	文献 [122]	
佳木河组				0.56~1.62	0.03~0.05	0.25~0.55	24.00	约240	Ⅱ—Ⅲ	491.0	微咸水	中等偏差	文献 [116,124]	

注: T_{max}—最高热解峰温。

受盆地构造、古地理、古气候、古生产力和保存条件及其变化影响,准噶尔盆地二叠系不同地层组中的烃源岩通常分布于不同区域,且其有机质丰度差别较大。依据陆相烃源岩的地球化学评价方法(SY/T 5735—1995^[130]),这些地层组的露头或钻井岩心(或岩屑)烃源岩样品的有机质丰度从差到最好均有分布(表3)。下二叠统佳木河组烃源岩主要钻揭于盆地西部的玛湖凹陷—沙湾凹陷一带,因其 TOC 含量、生烃潜力(S₁ + S₂)和总烃含量均为中等偏差,属于中等偏差生油岩(表3),通常被认为是该地区潜在的烃源岩^[116,124]。下二叠统风城组烃源岩主要钻揭于盆地西部的哈山地区—玛湖凹陷一带,尽管其 TOC 含量和生烃潜力偏中等,但因总烃含量偏好^[80,114-115],属于中等偏好烃源岩(表3),通常被认为是该地区最重要的烃源岩之一^[26-27,80,114-116,123-124,126,128,131]。中二叠统平地泉组烃源岩主要钻揭(或出露)于盆地东北部的克拉美丽山前地区一带,因其 TOC 含量和生烃潜力均偏好,且总烃含量达到最好(表3),属于好—最好烃源岩,被认为是该地区最重要的烃源岩之一^[26-27,123]。中二叠统芦草沟组(相当于平地泉组中一下部^[123])烃源岩主要钻揭(或出露)于盆地东南部的博格达山及其周缘地区,因其 TOC 含量和生烃潜力偏好,且总烃含量达最好,属于好—最好烃源岩(表3),被认为是该地区最重要的烃源岩之一^[26-27,118-119,123,125]。中二叠统红雁池组烃源岩主要出露于乌鲁木齐及其周边地区,因其 TOC 含量和生烃潜力均偏好(表3),且总烃含量达到最好,

属于好—最好烃源岩,被认为是该地区最重要的烃源岩之一^[120],其典型特征是在露头产出为油页岩。中二叠统下乌尔禾组烃源岩广泛钻揭示于盆地西北缘—腹部,包括玛湖凹陷、盆1井西凹陷、东道海子凹陷和阜康凹陷等;该套烃源岩的 TOC 含量和生烃潜力为中等偏差,总烃含量达到好,属于中等烃源岩(表3),一般被认为是准噶尔盆地的主力烃源岩之一^[115,122]。

对比总结不同地层组烃源岩的基本地球化学特征(表3)可知,准噶尔盆地二叠系烃源岩特征明显。首先,烃源岩的品质与沉积环境水体的属性密切相关,沉积于淡水环境的烃源岩的有机质丰度普遍偏低,通常属于中等或中等偏差烃源岩,如下乌尔禾组烃源岩;反之则相反,如风城组和红雁池组等烃源岩(表3)。究其原因有三:①适度咸化的水体有利于菌藻类生物(主要是特定的嗜盐性微生物)在其上层繁盛,如杜氏藻^[132],从而提高生态系统的初级生产力;②咸化水体的分层结构(可抑制水体对流)有利于在下层水体形成良好的还原环境,且高盐度(可抑制微生物繁殖与生长)可抑制有机质分解,从而促进有机质的保存^[30-31];③咸化水体有利于有机质与黏土矿物等发生广泛的絮凝作用并快速沉降^[87],从而缩短有机质暴露于氧化环境的时间,促进有机质保存。其中,嗜盐类菌藻生物以富含类脂化合物为特征,其繁盛可能是准噶尔盆地中一下二叠统咸化湖相烃源岩氢指数普遍偏高的原因^[133-134]。其次,下二叠统烃源岩的品质与其沉积位置到洋陆闭合带的距离呈负相关关系,即沉积位置越靠近残余洋

闭合带, 烃源岩的品质越佳。例如, 风城组烃源岩由远及近, 从玛东地区经玛湖凹陷至哈山地区(图 8), 其有机质丰度从中等偏差转变至好—最好(表 3), 究其原因有二: ①洋陆闭合带俯冲一侧的地壳在仰冲一侧地壳或(和)增生楔的重荷作用下易挠曲变形产生较大的可容纳空间, 从而形成有利于有机质保存的深水闭塞环境; ②洋陆闭合带残留的海水与海侵注入的海水可导致水体咸化, 从而有利于优质生烃母质生成与保存。最后, 中二叠统烃源岩的品质与其沉积位置到沉积中心的距离相关(呈负相关关系), 即沉积位置越靠近沉积中心, 其烃源岩的有机质丰度越高。例如, 芦苇沟组烃源岩从阜康凹陷或吉木萨尔凹陷至博格达山一带(图 9), 其厚度显著增厚(图 7), 相应烃源岩的有机质丰度尽管都属于好—最好, 但生烃潜量和氢指数增大明显(表 3), 究其原因主要是由于沉积中心深水区安静的水体(或叠加水体分层)有利于形成还原环境, 从而促进有机质保存。

综合岩相古地理及烃源岩基本特征, 基于钻井岩心的烃源岩实测数据与测井数据(声波时差和自然伽马)约束的全盆地二叠系烃源岩反演结果(图 6、图 7、图 10、图 11), 可对准噶尔盆地中一下二叠统主力烃源岩的生烃中心分布做出预测。下二叠统主力烃源岩风城组(或同时代地层)主要围绕 4 个沉积中心(烃源灶)分布, 包括玛湖凹陷、盆 1 井西凹陷、沙湾凹陷以及南

缘—阜康凹陷—博格达山一带(图 6)。据构造-古地理背景推测, 这 4 个烃源灶主要沿西准噶尔洋和北天山洋呈狭长条带状的洋陆闭合带及后碰撞伸展断陷分布。玛湖凹陷的烃源灶可能大致呈条带状沿海西期缝合带(大致为现今西北缘冲断带)分布; 受残余地层控制, 该烃源灶整体沿 NE—SW 向呈椭圆状展布, 推测其烃源岩厚度向西北缘冲断带方向增厚, 在哈山地区一带可达 700 m(图 6)。盆 1 井西凹陷的烃源灶可能沉积于后碰撞伸展断陷^[135]或岛弧地体间凹地, 推测其在平面上沿 NE—SW 向呈“豆荚”状分布, 其烃源岩厚度中心夹持于达巴松凸起、中拐凸起和莫索湾凸起之间, 最大厚度可达 600 m(图 6)。南缘—阜康凹陷—博格达山一带的烃源灶可能大致沿北天山—索伦克缝合带^[136]—博格达山一带分布(在盆地内大致为现今北天山北侧山前带), 推测其烃源岩厚度在平面上大致沿 EW 向呈楔形(尖角朝西)展布, 自西向东逐渐增厚, 在盆地南缘山前带可达 400 m, 在博格达山一带大于 400 m(图 6)。沙湾凹陷烃源灶的形成可能同时受北天山洋的闭合和后碰撞伸展作用影响, 推测其烃源岩的残余厚度在平面上呈反“C”字形分布, 厚度中心位于沙湾凹陷西侧 SN 向断层(红车断裂)的下盘, 厚度大于 700 m(图 6)。尽管现有钻井岩心与岩屑样品的检测结果显示风城组烃源岩的有机质丰度多数属于中等烃源岩^[26-27, 80, 114-116, 122-123, 128, 131], 但玛湖凹陷及其

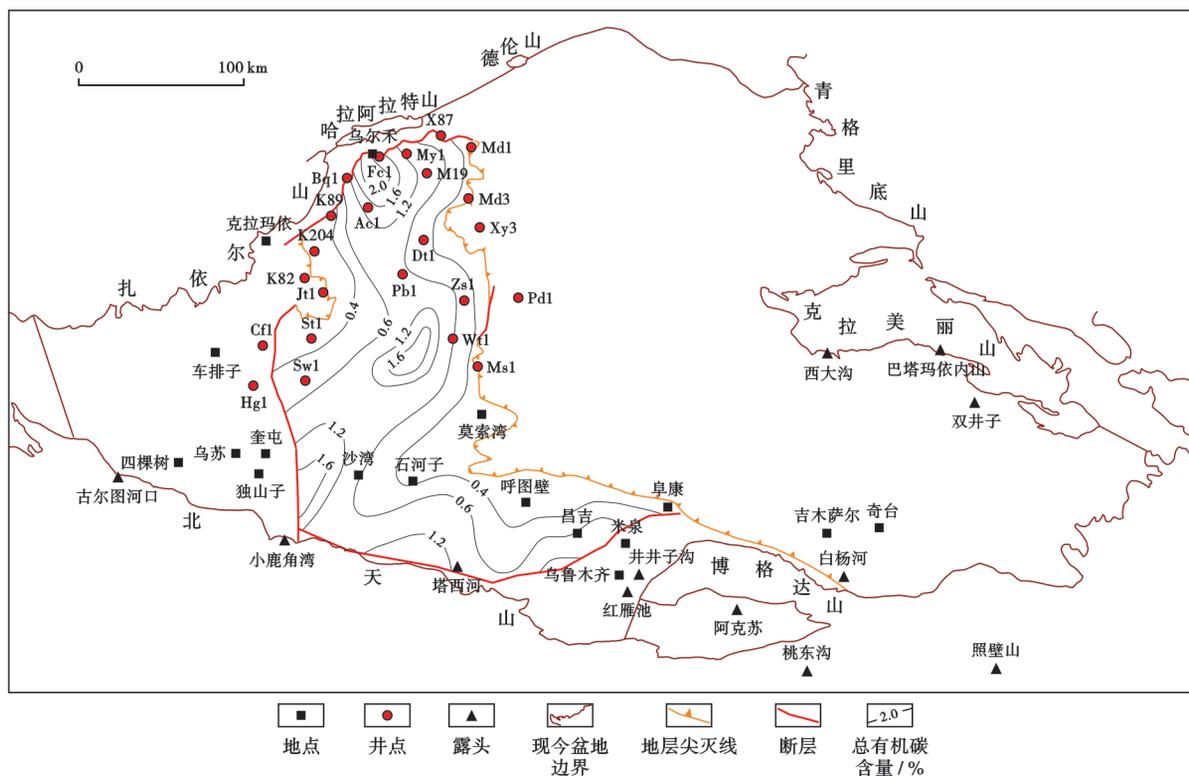


图 10 准噶尔盆地地下二叠统风城组烃源岩的总有机碳含量分布(据岩心和测井数据约束的地震反演数据)

Fig. 10 Distribution of total organic carbon contents of Lower Permian Fengcheng Formation source rocks in Junggar Basin

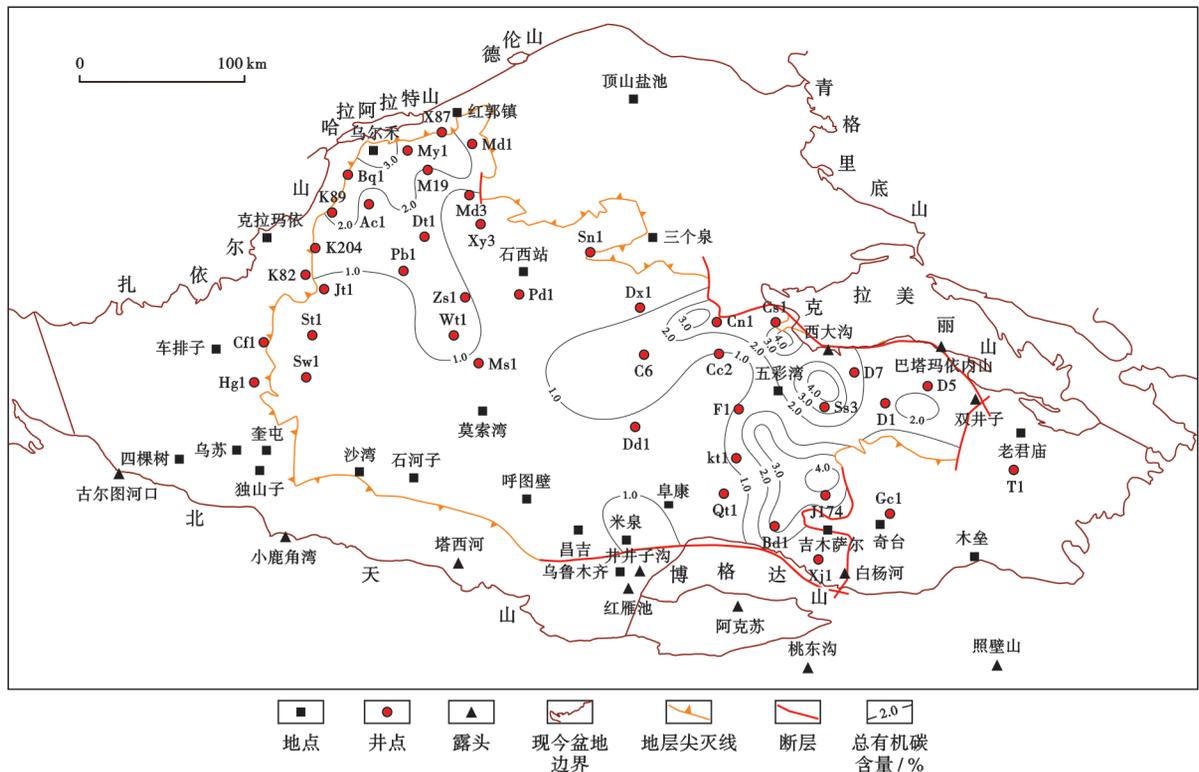


图 11 准噶尔盆地中二叠统下乌尔禾组烃源岩的总有机碳含量分布(据岩心和测井数据约束的地震反演数据)

Fig. 11 Distribution of total organic carbon contents of Middle Permian Xiawuerhe Formation source rocks in Junggar Basin

周边常规油、致密油和页岩油全油气系统的成功勘探^[128,137-139]也是不争的事实。此外,气源对比也揭示二叠系湖相烃源岩是准噶尔盆地南缘重要的气源岩之一^[140-141]。因此,结合准噶尔盆地构造-古地理演化及已钻井揭示的烃源岩特征认为,玛湖凹陷、盆1井西凹陷、沙湾凹陷和南缘—阜康凹陷一带的深凹区应有较大面积的、有机质丰度更高的风城组咸化湖相烃源岩分布,只是由于埋藏深度过大尚未被钻揭,推测其厚度大于150 m的面积超过 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图6)。

中二叠统下乌尔禾组(或同时代地层)主力烃源岩主要围绕4个沉积中心(烃源灶)分布,包括玛湖凹陷—盆1井西凹陷—沙湾凹陷一带、东道海子凹陷、五彩湾凹陷—石树沟凹陷—石钱滩凹陷一带、吉木萨尔凹陷—阜康凹陷—博格达山一带(图7)。据构造-古地理背景推测,这4个烃源灶主要分布于盆地中西部的“准”坳陷及盆地东部博格达洋和卡拉麦里洋的洋陆闭合带。玛湖凹陷—盆1井西凹陷—沙湾凹陷一带的烃源灶烃源岩连片沉积于断陷—坳陷转换期^[135]盆地中西部的“准”坳陷内,整体沿NE—SW向呈椭圆形展布,推测其烃源岩厚度中心位于盆1井西凹陷周边,最大厚度大于400 m(图7);东道海子凹陷的烃源灶可能形成于盆地中西部“准”坳陷的东部,整体沿NE—SW向呈梨形(梨柄朝向NE向)展布,推测其烃源岩厚度

中心位于C6井的西南侧,最大厚度大于400 m(图7);五彩湾凹陷—石树沟凹陷—石钱滩凹陷一带的烃源灶可能大致围绕卡拉麦里缝合带^[107]分布(在盆地内大致位于现今克拉美丽山前),受残余地层控制在平面上大致呈串珠状展布,其烃源岩厚度向克拉美丽山前逐渐增厚,在五彩湾凹陷与石树沟凹陷均可达到300 m,在石钱滩凹陷可达250 m(图7);吉木萨尔凹陷—阜康凹陷—博格达山一带的烃源灶可能大致围绕博格达洋的闭合带分布(在盆地内大致为现今博格达山及其周缘),推测其烃源岩在平面上大致沿EW向呈指状(指尖朝西)展布,其厚度在阜康凹陷一带可达300 m,在吉木萨尔南侧的吉南凹陷一带可大于400 m(图7)。在这4个中二叠统主力烃源岩烃源灶中,前两者主要发育下乌尔禾组淡水湖相烃源岩,后两者分别主要发育平地泉组和芦苇沟组+红雁池组咸化湖相烃源岩。对于下乌尔禾组淡水湖相烃源岩,尽管现有岩心与岩屑样品的检测结果显示其有机质丰度多数属中等^[115,122],但依据油气源对比^[122,142]和构造-古地理分析认为,在尚无深井钻揭的盆地中西部“准”坳陷区沉积中心,即盆1井西凹陷及东道海子凹陷的深凹区,应有优质烃源岩分布,推测其厚度大于150 m的面积可达 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图7)。对于平地泉组咸化湖相烃源岩,其重要性已由五彩湾凹陷—石树沟凹陷平地泉组

页岩油的规模发现^[143]及帐北构造油源对比证实^[144],结合构造-古地理及已钻井揭示的烃源岩特征可知,其在五彩湾凹陷-石树沟凹陷-石钱滩凹陷一带分布较广,厚度大于150 m的面积可达 $0.37 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图7),具有较大的页岩油勘探潜力。对于芦苇沟组和红雁池组咸化湖相烃源岩,其重要性已由吉木萨尔国家级页岩油示范区的建成^[145]及康探1井的突破^[125]证实,结合构造-古地理及已钻井揭示的烃源岩特征可知,其在阜康凹陷-博格达山周缘的分布范围可能很大,推测其厚度大于150 m的面积可达 $0.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图7),仍具有巨大的勘探潜力^[146]。

源控论^[147]是中国油气勘探的指导思想之一,上述根据构造-古地理、烃源岩特征及地震地层/岩性分布预测出的烃源灶对于准噶尔盆地下一步的油气勘探部署具有重要的指导意义,可同时为常规油气勘探区带优选和非常规页岩油“甜点区”评价^[148]提供依据,尤其是残余洋或咸化湖相烃源灶。围绕这些烃源灶所开展的油气勘探已取得了巨大的成功,例如,玛湖油田已发现的石油储量超过 $30 \times 10^8 \text{ t}$,吉木萨尔凹陷已形成十亿吨级页岩油储量规模区^[146]并在双吉构造获得常规油气工业油流^[149]。尽管如此,无论是玛湖凹陷,还是吉木萨尔凹陷,仍具有巨大的勘探潜力。据估算,前者在风南地区风城组的页岩油“甜点”资源量($8.25 \times 10^8 \text{ t}$)^[134]仅占玛湖凹陷总地质资源量($46.66 \times 10^8 \text{ t}$)的17.7%^[134],后者探明的芦苇沟组页岩油“甜点”资源量(15.80×10^8)仅占总地质资源量(25.5×10^8)的61.9%。此外,估算五彩湾凹陷-石树沟凹陷平地泉组页岩油“甜点”资源量达 $3.20 \times 10^8 \text{ t}$ ^[146]。这些均指示准噶尔盆地预测的中一下二叠统烃源灶有(或仍有)巨大的勘探潜力,尤其是在广泛分布着咸化湖相烃源岩的下二叠统玛湖凹陷、盆1井西凹陷、沙湾凹陷和南缘-阜康凹陷一带,以及中二叠统阜康凹陷-博格达山一带。其中,若分布于沙湾凹陷-阜康凹陷一带的潜在残余洋或咸化湖相优质烃源岩得到证实,盆地深层与南缘前陆盆地的油气规模高效勘探将迎来全新局面。

3 结论与认识

(1) 哈萨克斯坦板块由裂离自冈瓦纳大陆和西伯利亚大陆的微陆块及岛弧在周边扩张洋脊的推动下拼贴形成。二叠纪,伴随着乌拉尔洋、斋桑洋和突厥斯坦洋的闭合及准噶尔-巴尔喀什洋被围限,哈萨克斯坦板块基本完成了从海相向陆相转变,仅在洋陆闭合带保留了一些深水残余洋盆,其东部可能还保留着被围限的、充填残余的准噶尔洋,其东部末端的准噶尔盆地

东部、三塘湖盆地及吐哈盆地仍有可能受海侵影响。

(2) 哈萨克斯坦板块盆地群内烃源岩的基本特征及分布主要受古亚洲洋的关闭时序及古气候变化控制,在EW向,沿滨里海盆地、楚-萨雷苏盆地、伊犁盆地、准噶尔盆地至吐哈盆地,西段烃源岩依次从海相逐渐过渡为咸化湖相,东段从海相先过渡为咸化湖相、后过渡为淡水湖相,以东段烃源岩品质为佳;在SN向,沿斋桑盆地、准噶尔盆地至吐哈盆地,北段烃源岩从淡水湖相过渡为间歇湖相,南段从海陆过渡相先过渡为咸化湖相、后过渡为淡水湖相,以南段烃源岩品质为佳。

(3) 准噶尔盆地晚古生代的岩相古地理特征明显受哈萨克斯坦板块的形成与古亚洲洋的关闭控制。早二叠世,盆地的宏观古地理格局整体呈“北山南海(残余洋)、西凹(湖)东陆”;盆地边缘发育以古生代碰撞造山带或火山弧作为物源区的长度不等的流域;盆地内部有围绕风化残余火山岛弧地体或地垒发育的小型流域,广泛分布冲积平原-河流-三角洲-湖泊体系、扇三角洲-湖泊体系和三角洲-浅海沉积体系,以及广阔冲积平原中的小型间歇性湖泊。中二叠世,盆地的宏观古地理格局整体仍呈“北高南低、西凹东隆”,但因盆地南侧的北天山缝合带基本形成,盆地在地貌上具有“C”字形轮廓,整体转变成内陆湖盆,仅在“C”字形开口一侧的盆地东南缘及东北缘一带发育可能受海侵影响的咸化湖。

(4) 受构造-古地理与古气候控制,准噶尔盆地中一下二叠统发育咸水和淡水沉积两类烃源岩。前者以有机质丰度高为特征,主要沉积于早一中二叠世残余洋和咸化湖,以及中二叠世咸化湖;后者以有机质丰度偏低为特征,主要沉积于中二叠世盆地中西部的“准”拗陷内。咸水沉积烃源岩在越靠近洋陆闭合带及沉积中心处品质越优;淡水沉积烃源岩在越靠近沉积中心深水处品质越优。

(5) 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组和吉木萨尔凹陷芦苇沟组的油气勘探均已获得十亿吨级场面,且仍有巨大潜力,这预示着所预测的中一下二叠统烃源灶有(或仍有)巨大的勘探潜力,尤其是在广泛分布咸化湖相烃源岩的下二叠统玛湖凹陷、盆1井西凹陷、沙湾凹陷、南缘-阜康凹陷一带,以及中二叠统阜康凹陷-博格达山一带。其中,若分布于沙湾凹陷-阜康凹陷一带的潜在残余洋和咸化湖相优质烃源岩得到证实,盆地深层与南缘前陆盆地的油气规模高效勘探将迎来全新局面。

参 考 文 献

- [1] 成守德,徐新.新疆及邻区大地构造编图研究[J].新疆地质,2001,19(1):33-37.

- CHENG Shoude, XU Xin. On compiling of map of tectonics of Xinjiang and neighbouring areas[J]. *Xinjiang Geology*, 2001, 19(1): 33-37.
- [2] 何登发, 翟光明, 况军, 等. 准噶尔盆地古隆起的分布与基本特征[J]. *地质科学*, 2005, 40(2): 248-261.
HE Dengfa, ZHAI Guangming, KUANG Jun, et al. Distribution and tectonic features of paleo-uplifts in the Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(2): 248-261.
- [3] 何登发, 周路, 吴晓智. 准噶尔盆地古隆起形成演化与油气聚集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
HE Dengfa, ZHOU Lu, WU Xiaozhi. Formation and evolution and hydrocarbon accumulation of paleo-uplifts in Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [4] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994.
HE Guoqi, LI Maosong, LIU Dequan, et al. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China[M]. Urumuqi: Xinjiang People's Publishing House, 1994.
- [5] 李国玉, 吕鸣岗. 中国含油气盆地图集[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2002.
LI Guoyu, LYU Minggang. Atlas of China's petroliferous basins[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [6] 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 basins in Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2006, 11(1): 47-58.
- [7] JAHN B M, WINDLEY B, NATAL'IN B A, et al. Phanerozoic continental growth in central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 599-603.
- [8] ŞENGÖER A M C, NATAL'IN B A. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis[M]// YIN A, HARRISON T M. The tectonic evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486-640.
- [9] ŞENGÖR A M C, NATAL'IN B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299-307.
- [10] XIAO Wenjiao, HAN Chunming, YUAN Chao, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China; implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2/4): 102-117.
- [11] XIAO Wenjiao, WINDLEY B F, HUANG Baochun, et al. End-Permian to Mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1189-1217.
- [12] FILIPPOVA I B, BUSH V A, DIDENKO A N. Middle Paleozoic subduction belts: the leading factor in the formation of the central Asian fold-and-thrust belt[J]. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2002, 3(6): 405-426.
- [13] ZHANG Donghai, HUANG Baochun, ZHAO Guochun, et al. Quantifying the extent of the paleo-Asian Ocean during the Late Carboniferous to Early Permian[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(15): e2021GL094498.
- [14] BYKADOROV V A, BUSH V A, FEDORENKO O A, et al. Ordovician-Permian palaeogeography of central Eurasia: development of Palaeozoic petroleum-bearing basins[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2003, 26(3): 325-350.
- [15] 马昌明, 李江海, 曹正林, 等. 中亚盆地群石炭一二叠纪岩相古地理恢复及演化[J]. *岩石学报*, 2020, 36(11): 3510-3522.
MA Changming, LI Jianghai, CAO Zhenglin, et al. Lithofacies paleogeographic reconstruction and evolution of the Carboniferous-Permian basin group in central Asia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(11): 3510-3522.
- [16] 新疆地质矿产局地质矿产研究所. 新疆古地理研究图集[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1988.
Institute of Geology and Mineral Resources, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang. Atlas of the palaeogeography of Xinjiang[M]. Urumuqi: Xinjiang People's Publishing House, 1988.
- [17] 张义杰, 齐雪峰, 程显胜, 等. 准噶尔盆地晚石炭世和二叠纪沉积环境[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(6): 673-675.
ZHANG Yijie, QI Xuefeng, CHENG Xiansheng, et al. Approach to sedimentary environment of Late Carboniferous-Permian in Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(6): 673-675.
- [18] 龚德瑜, 王绪龙, 周川闽, 等. 准噶尔盆地东南部石炭系规模烃源岩的发现及天然气勘探潜力[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 836-852.
GONG Deyu, WANG Xulong, ZHOU Chuanmin, et al. Discovery of large-scale Carboniferous source rocks and natural gas exploration potential in the southeast of Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 42(7): 836-852.
- [19] 李林, 陈世加, 杨迪生, 等. 准噶尔盆地滴水泉凹陷石炭系烃源岩生烃能力分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(4): 52-58.
LI Lin, CHEN Shijia, YANG Disheng, et al. Hydrocarbon generation capacity analysis of Carboniferous source rocks in Dishuiquan sag of Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2013, 37(4): 52-58.
- [20] CARROLL A R. Upper Permian lacustrine organic facies evolution, southern Junggar Basin, NW China[J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 28(11): 649-667.
- [21] MA Ling, ZHANG Yang, ZHANG Zhihuan, et al. The geochemical characteristics of the Fengcheng Formation source rocks from the Halaalate area, Junggar Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 184: 106561.
- [22] MENG Ziyuan, LIU Yiqun, JIAO Xin, et al. Petrological and organic geochemical characteristics of the Permian Lucaogou Formation in the Jimsar sag, Junggar Basin, NW China: implications on the relationship between hydrocarbon accumulation and volcanic-hydrothermal activities[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210: 110078.
- [23] TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. Discovery of shale oil in alkaline lacustrine basins: the Late Paleozoic Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(5): 1281-1293.
- [24] 张宸嘉, 曹剑, 王俞策, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油富集规律[J]. *石油学报*, 2022, 43(9): 1253-1268.
ZHANG Chenjia, CAO Jian, WANG Yuce, et al. Enrichment law of shale oil of Lucaogou Formation in Jimusar sag, Junggar

- Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(9): 1253-1268.
- [25] 匡立春, 支东明, 王小军, 等. 准噶尔盆地上二叠统上乌尔禾组大面积岩性-地层油气藏形成条件及勘探方向[J]. *石油学报*, 2022, 43(3): 325-340.
- KUANG Lichun, ZHI Dongming, WANG Xiaojun, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration directions of large-scale lithologic-stratigraphic oil and gas reservoirs in Upper Wuerhe Formation of Upper Permian in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(3): 325-340.
- [26] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地烃源岩与原油地球化学特征[J]. *地质学报*, 2016, 90(1): 37-67.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Geochemical features of source rocks and crude oil in the Junggar Basin, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(1): 37-67.
- [27] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. *地质学报*, 2016, 90(3): 421-450.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(3): 421-450.
- [28] WANG Tingting, CAO Jian, CARROLL A R, et al. Oldest preserved sodium carbonate evaporite, Late Paleozoic Fengcheng Formation, Junggar Basin, NW China[J]. *GSA Bulletin*, 2021, 133(7/8): 1465-1482.
- [29] 张志杰, 袁选俊, 汪梦诗, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖沉积特征与古环境演化[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 972-984.
- ZHANG Zhijie, YUAN Xuanjun, WANG Mengshi, et al. Alkaline-lacustrine deposition and paleoenvironmental evolution in Permian Fengcheng Formation at the Mahu sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 972-984.
- [30] 金强, 朱光有. 中国中生代咸化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 483-492.
- JIN Qiang, ZHU Guangyou. Progress in research of deposition of oil source rocks in saline lakes and their hydrocarbon generation[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(4): 483-492.
- [31] 金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(4): 19-23.
- JIN Qiang, ZHU Guangyou, WANG Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2008, 32(4): 19-23.
- [32] SMITH M E, CARROLL A R. Introduction to the Green River Formation[M] // SMITH M E, CARROLL A R. *Stratigraphy and paleolimnology of the Green River Formation, Western USA*. Dordrecht: Springer, 2015: 1-12.
- [33] YU Kuanhong, CAO Yingchang, QIU Longwei, et al. Geochemical characteristics and origin of sodium carbonates in a closed alkaline basin: the Lower Permian Fengcheng Formation in the Mahu sag, northwestern Junggar Basin, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 511: 506-531.
- [34] 范谭广, 徐雄飞, 范亮, 等. 三塘湖盆地二叠系芦苇沟组页岩油地质特征与勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(4): 125-136.
- FAN Tanguang, XU Xiongfei, FAN Liang, et al. Geological characteristics and exploration prospect of shale oil in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(4): 125-136.
- [35] 冯杨伟, 任艳, 屈红军, 等. 中哈边境吉木乃—斋桑盆地二叠系油气成藏要素[J]. *地质学报*, 2021, 95(6): 1935-1948.
- FENG Yangwei, REN Yan, QU Hongjun, et al. Permian hydrocarbon accumulation factors in the Jimunai-Zaysan Basin, China-Kazakhstan border[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1935-1948.
- [36] 苗建宇, 周立发, 邓昆, 等. 伊犁盆地二叠系烃源岩沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(3): 294-299.
- MIAO Jianyu, ZHOU Lifa, DENG Kun, et al. Sedimentary environment of Permian source rocks in Yili Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(3): 294-299.
- [37] 苗建宇, 周立发, 邓昆, 等. 伊犁盆地中二叠统烃源岩有机质地球化学特征[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(5): 596-600.
- MIAO Jianyu, ZHOU Lifa, DENG Kun, et al. The relationship between the organic matters and source rocks geochemistry characteristics of Middle Permian series in Yili Basin[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2004, 34(5): 596-600.
- [38] 塔斯肯, 李江海, 李洪林, 等. 中亚与邻区盆地群构造演化及含油性[J]. *现代地质*, 2014, 28(3): 573-584.
- TASKYN A, LI Jianghai, LI Honglin, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon potential of basins in central Asia and its adjacent regions[J]. *Geoscience*, 2014, 28(3): 573-584.
- [39] 田杰. 楚-萨雷苏盆地含油气系统分析与油气资源评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- TIAN Jie. *Petroleum system analysis and resource assessment of Chu-Sarysu Basin*[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [40] 朱祥峰, 沈传波, 赵斌, 等. 斋桑盆地与准噶尔盆地西北缘二叠系成藏条件对比[J]. *地球科学*, 2017, 42(3): 435-446.
- ZHU Xiangfeng, SHEN Chuanbo, ZHAO Bin, et al. Comparison of Permian petroleum accumulation conditions between the Zaysan Basin and the northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(3): 435-446.
- [41] CHEN Xu, BOUCOT A J, SCOTese C R, et al. Pangaeen aggregation and disaggregation with evidence from global climate belts[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 1(1): 5-13.
- [42] 毛小妮. 准噶尔盆地北部石炭纪—早二叠世构造岩相古地貌与烃源岩特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- MAO Xiaoni. *Research on tectonic lithofacies paleogeography and source rocks characteristics of the Carboniferous-Early Permian in the northern part of Junggar Basin*[D]. Xi'an: Northwest University, 2012.
- [43] 苗建宇. 新疆北部主要盆地二叠系烃源岩沉积环境与生烃特征[D]. 西安: 西北大学, 2001.
- MIAO Jianyu. *The depositional environment of Permian system hydrocarbon source rocks and its potential hydrocarbon generating characteristics in major basins in north Xinjiang*[D]. Xi'an: Northwest University, 2001.
- [44] WINDLEY B F, ALEXEIEV D, XIAO Wenjiao, et al. Tectonic models for accretion of the central Asian orogenic belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 31-47.

- [45] XIAO Wenjiao, WINDLEY B F, HAN Chunming, et al. Late Paleozoic to Early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in central Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 94-128.
- [46] XIAO Wenjiao, WINDLEY B F, SUN Shu, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in central Asia: oroclinal sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 477-507.
- [47] ZHAO Guochun, WANG Yuejun, HUANG Baochun, et al. Geological reconstructions of the east Asian blocks: from the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 262-286.
- [48] ZHOU Hai, ZHAO Guochun, HAN Yigui, et al. Carboniferous slab-retreating subduction of backarc oceans: the final large-scale lateral accretion of the southern central Asian orogenic belt[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(13): 1388-1398.
- [49] 肖文交, 宋东方, WINDLEY B F, 等. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(10): 1512-1545.
- XIAO Wenjiao, SONG Dongfang, WINDLEY B F, et al. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(10): 1512-1545.
- [50] DOBRETSOV N L, BERZIN N A, BUSLOV M M. Opening and tectonic evolution of the paleo-Asian ocean[J]. *International Geology Review*, 1995, 37(4): 335-360.
- [51] KHROMYKH S V, KOTLER P D, IZOKH A E, et al. A review of Early Permian (300-270 Ma) magmatism in eastern Kazakhstan and implications for plate tectonics and plume interplay[J]. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2019, 10(1): 79-99.
- [52] 杨高学, 李永军, 司国浩, 等. 中亚造山带西段俯冲起始时限及机制探讨[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(2): 244-261.
- YANG Gaoxue, LI Yongjun, SI Guohao, et al. Discussion on time and mechanism of subduction initiation in the western central Asian orogenic belt[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(2): 244-261.
- [53] PARAGULGOV T K, PARAGULGOV K K. Classifying of east Kazakhstan sedimentary basins and their oil and gas potential[C]// 1st EAGE International Geosciences Conference on Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan; European Association of Geoscientists & Engineers, 2010.
- [54] BLACKBOURN G. The petroleum geology of Kazakhstan[R/OL]. AAPG, 2015. https://www.searchanddiscovery.com/documents/2015/10711blackbourn/ndx_blackbourn.pdf.
- [55] 李勇, 路俊刚, 刘向君, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷烃源岩地球化学特征及天然气勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(8): 1319-1331.
- LI Yong, LU Jungang, LIU Xiangjun, et al. Geochemical characteristics of source rocks and gas exploration direction in Shawan sag, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(8): 1319-1331.
- [56] 余琪祥, 程建. 中国石化准噶尔盆地油气勘探成果回顾[J]. *西安石油大学学报(社会科学版)*, 2022, 31(5): 65-71.
- YU Qixiang, CHENG Jian. Retrospection of oil-gas exploration achievements in the Junggar Basin of Sinopec[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Social Sciences)*, 2022, 31(5): 65-71.
- [57] 张仲培, 张宇, 张明利, 等. 准噶尔盆地中部凹陷区二叠系—三叠系油气成藏主控因素与勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(4): 559-568.
- ZHANG Zhongpei, ZHANG Yu, ZHANG Mingli, et al. Main controlling factors and exploration direction of Permian to Triassic reservoir in the central sag of Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(4): 559-568.
- [58] 顾超, 曹建康, 李杭兵, 等. 伊犁盆地伊宁凹陷塔姆其萨依组烃源岩评价[J]. *石化技术*, 2020, 27(5): 99-100.
- GU Chao, CAO Jiankang, LI Hangbing, et al. Source rock evaluation of Tamqisayi Formation in Yining sag, Yili Basin[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(5): 99-100.
- [59] 姜亭, 陈高潮, 史冀忠, 等. 新疆伊宁盆地石炭系—二叠系油气调查发现两套烃源岩[J]. *中国地质调查*, 2015, 2(5): 8-13.
- JIANG Ting, CHEN Gaochao, SHI Jizhong, et al. Two sets of source rocks are found for Carboniferous-Permian petroleum survey in Yining Basin, Xinjiang[J]. *Geological Survey of China*, 2015, 2(5): 8-13.
- [60] 马永东, 杨涛, 邓伟, 等. 伊犁盆地伊宁凹陷二叠系与三叠系主要烃源岩特征对比研究[J]. *甘肃地质*, 2016, 25(4): 44-49.
- MA Yongdong, YANG Tao, DENG Wei, et al. Characteristics of Permian and Triassic source rocks in Yining sag of Yili Basin[J]. *Gansu Geology*, 2016, 25(4): 44-49.
- [61] 李成明, 刘俊田, 倪联斌, 等. 吐哈盆地深层地质结构特征及油气勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(4): 44-57.
- LI Chengming, LIU Juntian, NI Lianbin, et al. Characteristics of deep geological structure and petroleum exploration prospect in Turpan-Hami Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(4): 44-57.
- [62] 梁世君. 吐哈探区油气勘探成果及潜力[J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(6): 631-641.
- LIANG Shijun. Achievements and potential of petroleum exploration in Tuha oil and gas province[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(6): 631-641.
- [63] 隋阳, 郭旭东, 叶生林, 等. 三塘湖盆地条湖组烃源岩地化特征及致密油油源对比[J]. *新疆地质*, 2016, 34(4): 510-517.
- SUI Yang, GUO Xudong, YE Shenglin, et al. Geochemical characteristics of hydrocarbon source rock and oil-source correlation of tight oil in Tiaohu Formation, Santanghu Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2016, 34(4): 510-517.
- [64] KOROBIKIN V V, BUSLOV M M. Tectonics and geodynamics of the western central Asian fold belt (Kazakhstan Paleozoides)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, 52(12): 1600-1618.
- [65] IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database: Chu-Sarysu Basin[R]. Englewood, Colorado: IHS Energy Group, 2016.
- [66] 《中国地层典》编委会. 中国地层典(二叠系)[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- Editorial Committee of Chinese Stratigraphic Lexicon. Stratigraphical lexicon of China: Permian[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [67] 《中国地层典》编委会. 中国地层典(石炭系)[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- Editorial Committee of Chinese Stratigraphic Lexicon. Stratigraphical lexicon of China: Carboniferous[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [68] WARTES M A, CARROLL A R, GREENE T J. Permian sedi-

- mentary record of the Turpan-Hami Basin and adjacent regions, northwest China; constraints on postamalgamation tectonic evolution[J]. *GSA Bulletin*, 2002, 114(2): 131-152.
- [69] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 845-861.
HE Dengfa, ZHANG Lei, WU Songtao, et al. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 845-861.
- [70] 何登发, 童晓光, 杨福忠, 等. 中亚含油气区构造演化与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
HE Dengfa, TONG Xiaoguang, YANG Fuzhong, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation of central Asia oil & gas region[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [71] BERNER R A, CANFIELD D E. A new model for atmospheric oxygen over Phanerozoic time[J]. *American Journal of Science*, 1989, 289(4): 333-361.
- [72] KLEMME H D, ULMISHEK G F. Effective petroleum source rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors[J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(12): 1809-1851.
- [73] 邱中建, 龚再升. 中国油气勘探(第2卷): 西部油气区[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
QIU Zhongjian, GONG Zaisheng. Petroleum exploration in China (Volume 2): the western oil and gas area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- [74] IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database: Pre-Caspian Basin[R]. Englewood, Colorado: IHS Energy Group, 2016.
- [75] CRASQUIN-SOLEAU S. Middle and Late Permian stratigraphic correlations on the Russian platform; significance of ostracodes[J]. *Revue de Micropaléontologie*, 2003, 46(1): 23-33.
- [76] 张林, 杜小弟. 新疆伊犁盆地二叠系主力烃源岩与勘探方向新认识[J]. *中国矿业*, 2017, 26(增刊2): 202-206.
ZHANG Lin, DU Xiaodi. A new understanding of Permian hydrocarbon source rocks and exploration direction for Yili Basin in Xinjiang[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(S2): 202-206.
- [77] 郝继鹏. 伊犁盆地二叠纪沉积相及古地理特征[J]. *新疆石油地质*, 1991, 12(3): 190-197.
HAO Jipeng. Permian sedimentary facies and palaeogeography in Ili Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1991, 12(3): 190-197.
- [78] 孙相灿, 杜小弟, 张林, 等. 塔城盆地烃源岩特征及勘探潜力分析[J]. *中国矿业*, 2017, 26(增刊2): 162-169.
SUN Xiangcan, DU Xiaodi, ZHANG Lin, et al. Analysis of the characteristics and exploration potential of source rocks in Tacheng Basin[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(S2): 162-169.
- [79] 王云. 中哈边境布尔津-斋桑地区二叠系沉积充填与油气地质条件研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.
WANG Yun. The Sedimentary characteristic and hydrocarbon geologic condition of Permian in Buerjin-Zaysan area, China-Kazakhstan border[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [80] 唐勇, 郑孟林, 王霞田, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组烃源岩沉积古环境[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(5): 677-692.
TANG Yong, ZHENG Menglin, WANG Xiatian, et al. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(5): 677-692.
- [81] 殷越, 贾鹏飞, 黄志龙, 等. 三塘湖盆地马东地区卡拉岗组烃源岩特征与致密油意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(1): 26-37.
YIN Yue, JIA Pengfei, HUANG Zhilong, et al. Characteristics of Kalagang Formation source rock and its significance of tight oil reservoir in Madong area of Santanghu Basin, NW China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2022, 52(1): 26-37.
- [82] 韩祥磊. 吐哈盆地塔尔朗组沉积特征及烃源岩潜力分析[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(3): 18-22.
HAN Xianglei. Sedimentary pattern and source-rock potential of Taerlang Formation in Turpan-Hami Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(3): 18-22.
- [83] 高岗, 梁浩, 李华明, 等. 吐哈盆地石炭系一下二叠统烃源岩地球化学特征[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(5): 583-592.
GAO Gang, LIANG Hao, LI Huaming, et al. Organic geochemistry of Carboniferous and Lower Permian source rocks, Turpan-Hami Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(5): 583-592.
- [84] DEGENS E T, STOFFERS P. Stratified waters as a key to the past[J]. *Nature*, 1976, 263(5572): 22-27.
- [85] GUO Pei, LIU Chiyang, GIBERT L, et al. How to find high-quality petroleum source rocks in saline lacustrine basins: a case study from the Cenozoic Qaidam Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 603-623.
- [86] POWELL T G. Petroleum geochemistry and depositional setting of lacustrine source rocks[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1986, 3(3): 200-219.
- [87] 周川闽, 张志杰, 邱振, 等. 细粒沉积物物理模拟研究进展与展望[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 253-267.
ZHOU Chuanmin, ZHANG Zhijie, QIU Zhen, et al. Laboratory experiments on sedimentation of fine-grained sediment: a prospect review[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 253-267.
- [88] 李超. 中亚地区区域构造与主要含油气组合分布特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
LI Chao. Regional structure of central Asia and distribution characteristics of main petroleum-bearing combinations [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [89] 李涤. 准噶尔盆地及邻区石炭纪构造格架与沉积充填演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
LI Di. Carboniferous tectonic framework and sedimentary filling evolution in the Junggar Basin and adjacent area, NW China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [90] 李强, 吴绍祖, 屈迅, 等. 试论准噶尔石炭纪—三叠纪重要气候事件[J]. *新疆地质*, 2002, 20(3): 192-195.
LI Qiang, WU Shaoyu, QU Xun, et al. Key climatic events during Carboniferous-Triassic in Junggar[J]. *Xin Jiang Geology*, 2002, 20(3): 192-195.
- [91] 吴绍祖. 从古气候探讨新疆北部石炭—二叠纪生油层位[J]. *新疆地质*, 1998, 16(1): 58-68.
WU Shaoyu. Paleoclimatic discussion on Carboniferous-Permian oil-generating strata in the northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 1998, 16(1): 58-68.
- [92] KULIŃSKI K, SCHNEIDER B, SZYMZYCHA B, et al. Structure and functioning of the acid-base system in the Baltic Sea [J]. *Earth System Dynamics*, 2017, 8(4): 1107-1120.
- [93] LEE K, KIM T W, BYRNE R H, et al. The universal ratio of boron

- to chlorinity for the north Pacific and north Atlantic oceans[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(6): 1801-1811.
- [94] COUCH E L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. *AAPG Bulletin*, 1971, 55(10): 1829-1837.
- [95] HAMMER U T. Saline lake ecosystems of the world[M]. Dordrecht; Springer, 1986.
- [96] DASHTGARD S E, WANG A H, POSPELOVA V, et al. Salinity indicators in sediment through the fluvial-to-marine transition (Fraser River, Canada)[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 14303.
- [97] WANG Aihua, WANG Zhanghua, LIU Jiankun, et al. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta[J]. *Chemical Geology*, 2021, 559: 119923.
- [98] WEI Wei, ALGEO T J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 341-366.
- [99] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood; Prentice Hall, 1993: 1-363.
- [100] SIMONEIT B R T. Molecular indicators (biomarkers) of past life[J]. *The Anatomical Record*, 2002, 268(3): 186-195.
- [101] HALL P B, DOUGLAS A G. The distribution of cyclic alkanes in two lacustrine deposits[M]//BJØRØY M. *Advances in organic geochemistry*. New York; Wiley and Sons, 1981: 576-587.
- [102] MELLO M R, GAGLIANONE P C, BRASSELL S C, et al. Geochemical and biological marker assessment of depositional environments using Brazilian offshore oils[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1988, 5(3): 205-223.
- [103] TEN HAVEN H L, RULLKÖTTER J, DAMSTÉ J S, et al. Distribution of organic sulfur compounds in Mesozoic and Cenozoic sediments from the Atlantic and Pacific oceans and the Gulf of Mexico[M]//ORR W L, WHITE C M. *Geochemistry of sulfur in fossil fuels*. Washington: American Chemical Society, 1990: 613-632.
- [104] PHILIP R P. Formation and geochemistry of oil and gas[J]. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 2014, 9: 223-256.
- [105] CAO Jian, XIA Liuwen, WANG Tingting, et al. An alkaline lake in the Late Paleozoic ice age (LPIA): a review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103091.
- [106] DING Xiujian, GAO Changhai, ZHA M, et al. Depositional environment and factors controlling β -carotane accumulation: a case study from the Jimsar sag, Junggar Basin, northwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 833-842.
- [107] 李锦轶. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. *地质论评*, 2004, 50(3): 304-322.
- LI Jinyi. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China[J]. *Geological Review*, 2004, 50(3): 304-322.
- [108] CARROLL A R, WARTES M A. Organic carbon burial by large Permian lakes, Northwest China[M]//CHAN M A, ARCHER A W. *Extreme depositional environments: mega end members in geologic time*. Boulder; Geological Society of America, 2003: 91-104.
- [109] WANG Jian, CAO Yingchang, WANG Xintong, et al. Sedimentological constraints on the initial uplift of the west Bogda Mountains in Mid-Permian[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1453.
- [110] HAN Yigui, ZHAO Guochun. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern central Asian orogenic belt: constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 129-152.
- [111] YANG Xusong, TIAN Xiaobo, WINDLEY B F, et al. The role of multiple trapped oceanic basins in continental growth: seismic evidence from the southern Altai[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(11): e2022GL098548.
- [112] CRAWFORD C S. *Biology of desert invertebrates*[M]. Berlin; Springer, 1981.
- [113] EUGSTER H P, HARDIE L A. *Saline lakes*[M]//LERMAN A. *Lakes: chemistry, geology, physics*. New York; Springer, 1978: 237-293.
- [114] 胡涛, 庞雄奇, 于飒, 等. 准噶尔盆地风城地区风城组烃源岩生排烃特征及致密油资源潜力[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(2): 427-439.
- HU Tao, PANG Xiongqi, YU Sa, et al. Hydrocarbon generation and expulsion characteristics of P_1f source rocks and tight oil accumulation potential of Fengcheng area on northwest margin of Junggar Basin, northwest China[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2017, 48(2): 427-439.
- [115] 江梦雅, 王江涛, 刘龙松, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷石炭系一二叠系天然气特征及成藏主控因素[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 138-151.
- JIANG Mengya, WANG Jiangtao, LIU Longsong, et al. Characteristics and main controlling factors of natural gas of Carboniferous-Permian in western well Pen-1 sag, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 138-151.
- [116] 巩书华, 周世新, 李靖, 等. 准噶尔盆地石炭系与二叠系主力烃源岩地球化学特征对比研究[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 1005-1015.
- GONG Shuhua, ZHOU Shixin, LI Jing, et al. Comparisons of geochemical characteristics of Carboniferous and Permian main source rocks in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 1005-1015.
- [117] 柳忠泉, 赵乐强, 曾治平, 等. 准噶尔盆地阜康断裂带二叠系芦草沟组页岩油成藏条件[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 126-137.
- LIU Zhongquan, ZHAO Leqiang, ZENG Zhiping, et al. Shale oil accumulation conditions of Permian Lucaogou Formation in Fukang fault zone, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 126-137.
- [118] 张韩静, 李素梅, 高永进, 等. 准噶尔盆地东南缘二叠系芦草沟组烃源岩有机地球化学特征[J]. *现代地质*, 2022, 36(6): 1538-1550.
- ZHANG Hanjing, LI Sumei, GAO Yongjin, et al. Organic geochemical characteristics of source rocks of Permian Lucaogou Formation in southeastern of Junggar Basin[J]. *Geoscience*, 2022, 36(6): 1538-1550.
- [119] 张林, 张敏, 高永进, 等. 准噶尔盆地南缘博格达山前带二叠系芦草沟组烃源岩地球化学特征及生烃潜力研究[J]. *中国矿业*, 2021, 30(12): 183-188.
- ZHANG Lin, ZHANG Min, GAO Yongjin, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of Permian Lucaogou Formation source rocks in Bogda piedmont belt, the southern margin of Junggar Basin[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(12): 183-188.
- [120] 金宵. 淮南环博格达山中二叠统有机质富集机制与生烃演化特

- 征[D].北京:中国石油大学(北京),2021.
- JIN Xiao. The mechanism for the accumulation of organic matter in sediments of Permian and its evolution for hydrocarbon generation around Bogda Mountain in southern Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2021.
- [121] 樊妍,王绪龙,向才富,等.准噶尔盆地东部二叠系平地泉组烃源岩富集规律与主控因素[J].现代地质,2022,36(4):1105-1117.
- FAN Yan, WANG Xulong, XIANG Caifu, et al. Enrichment patterns and main controlling factors of source rocks in the Permian Pingdiqian Formation, eastern Junggar Basin[J]. Geoscience, 2022, 36(4): 1105-1117.
- [122] 李建忠,王小军,杨帆,等.准噶尔盆地中央拗陷西部下组合油气成藏模式及勘探前景[J].石油与天然气地质,2022,43(5):1059-1072.
- LI Jianzhong, WANG Xiaojun, YANG Fan, et al. Hydrocarbon accumulation pattern and exploration prospect of the structural traps in lower play of the western central depression in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1059-1072.
- [123] 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. Source rocks and oil-gas geochemistry in Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [124] 李开元.哈山东地区二叠系源岩发育期原型盆地恢复[D].西安:西安石油大学,2020.
- LI Kaiyuan. Restoration of prototype basins in Permian source rocks in eastern Hashan area[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.
- [125] 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.
- [126] 李建忠,陈旋,杨润泽,等.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[J].石油勘探与开发,2023,50(3):491-503.
- LI Jianzhong, CHEN Xuan, YANG Runze, et al. Petroleum geology and sub-source hydrocarbon accumulation of Permian reservoirs in Jinan sag, eastern Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 491-503.
- [127] 张志杰,成大伟,周川闽,等.准噶尔盆地石树沟凹陷平地泉组细粒岩特征及其对准东北地区页岩油勘探的指示意义[J].天然气地球科学,2021,32(4):562-576.
- ZHANG Zhijie, CHENG Dawei, ZHOU Chuanmin, et al. Characteristics of fine-grained rocks in the Pingdiqian Formation in Well Shishu 1 and their significances for shale oil explorations in northeastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(4): 562-576.
- [128] 曾治平,柳忠泉,赵乐强,等.准噶尔盆地西北缘哈山地区二叠系风城组页岩油储层特征及其控制因素[J].岩性油气藏,2023,35(1):25-35.
- ZENG Zhiping, LIU Zhongquan, ZHAO Leqiang, et al. Shale oil reservoir characteristics and controlling factors of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, northwestern margin of Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(1): 25-35.
- [129] 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.
- [130] 中国石油天然气总公司.陆相烃源岩地球化学评价方法:SY/T 5735—1995[S].北京:石油工业出版社,1996.
- China National Petroleum Corporation. Geochemical evaluation method of terrestrial hydrocarbon source rocks: SY/T 5735-1994[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [131] 王绪龙,高岗,杨海波,等.准噶尔盆地西北缘五八开发区二叠系原油特征与成藏关系探讨[J].高校地质学报,2008,14(2):256-261.
- WANG Xulong, GAO Gang, YANG Haibo, et al. Research on relation between oil properties and petroleum pool formation of Permian in the 5th & 8th districts, northwestern margin of Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(2): 256-261.
- [132] 夏刘文,曹剑,边立曾,等.准噶尔盆地玛湖大油区二叠纪碱湖生物-环境协同演化及油源差异性[J].中国科学:地球科学,2022,52(4):732-746.
- XIA Liuwen, CAO Jian, BIAN Lizeng, et al. Co-evolution of paleo-environment and bio-precursors in a Permian alkaline lake, Mahu mega-oil province, Junggar Basin: implications for oil sources [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(3): 462-476.
- [133] 曹剑,雷德文,李玉文,等.古老碱湖优质烃源岩:准噶尔盆地二叠统风城组[J].石油学报,2015,36(7):781-790.
- CAO Jian, LEI Dewen, LI Yuwen, et al. Ancient high quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 781-790.
- [134] 支东明,曹剑,向宝力,等.玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩生烃机理及资源量新认识[J].新疆石油地质,2016,37(5):499-506.
- ZHI Dongming, CAO Jian, XIANG Baoli, et al. Fengcheng alkaline lacustrine source rocks of Lower Permian in Mahu sag in Junggar Basin: hydrocarbon generation mechanism and petroleum resources reestimation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(5): 499-506.
- [135] TANG Wenbin, ZHANG Yuanyuan, PE-PIPER G, et al. Permian rifting processes in the NW Junggar Basin, China: implications for the post-accretionary successor basins[J]. Gondwana Research, 2021, 98: 107-124.
- [136] 李皓东,周建波,李功宇,等.南天山—北山—索伦—长春缝合带的性质与演化[J].地质论评,2022,68(3):797-816.
- LI Haodong, ZHOU Jianbo, LI Gongyu, et al. Nature and evolution of the South Tianshan Mountains-Beishan Mountains-Solonker-Changchun suture[J]. Geological Review, 2022, 68(3): 797-816.
- [137] 何文军,宋永,汤诗棋,等.玛湖凹陷二叠系风城组全油气系统成藏机理[J].新疆石油地质,2022,43(6):663-673.
- HE Wenjun, SONG Yong, TANG Shiqi, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of total petroleum system in Permian Fengcheng Formation, Mahu sag[J]. Xinjiang Petroleum Geolo-

- gy, 2022, 43(6): 663-673.
- [138] 宋永, 杨智峰, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖型页岩油勘探进展[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 60-72. SONG Yong, YANG Zhifeng, HE Wenjun, et al. Exploration progress of alkaline lake type shale oil of the Permian Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 60-72.
- [139] 唐勇, 宋永, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷上致密砾岩富集的主控因素[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 192-206. TANG Yong, SONG Yong, GUO Xuguang, et al. Main controlling factors of tight conglomerate oil enrichment above source kitchen in Mahu sag, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 192-206.
- [140] 陈建平, 王绪龙, 倪云燕, 等. 准噶尔盆地南缘天然气成藏及勘探方向[J]. 地质学报, 2019, 93(5): 1002-1019. CHEN Jianping, WANG Xulong, NI Yunyan, et al. The accumulation of natural gas and potential exploration regions in the southern margin of the Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(5): 1002-1019.
- [141] 陈建平, 王绪龙, 倪云燕, 等. 准噶尔盆地南缘天然气成因类型与气源[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 461-473. CHEN Jianping, WANG Xulong, NI Yunyan, et al. Genetic type and source of natural gas in the southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 461-473.
- [142] 伍新和, 向宝力, 刘桂凤. 准噶尔盆地石西油田油气藏地球化学研究[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(1): 35-37. WU Xinhe, XIANG Baoli, LIU Guifeng. Geochemical study for oil-gas pools of Shixi oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(1): 35-37.
- [143] 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相页岩油气富集条件与勘探方向[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 125-143. TANG Yong, HE Wenjun, JIANG Yiyang, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 125-143.
- [144] 聂礼尚, 马静辉, 唐小飞, 等. 准噶尔盆地东部帐篷沟地区中新世构造事件及其油气地质意义[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(5): 81-91. NIE Lishang, MA Jinghui, TANG Xiaofei, et al. Meso-Cenozoic tectonic events and their petroleum geological significance in Zhangpenggou area, eastern Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(5): 81-91.
- [145] 蔚远江, 王红岩, 刘德勋, 等. 中国陆相页岩油示范区发展现状及建设可行性评价指标体系[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 191-205. YU Yuanjiang, WANG Hongyan, LIU Dexun, et al. Development status and feasibility evaluation index system of continental shale oil demonstration area in China[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 191-205.
- [146] 支东明, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔盆地中一下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(4): 389-401. ZHI Dongming, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of shale oil in Middle-Lower Permian, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(4): 389-401.
- [147] 胡朝元. 生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 9-13. HU Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, East China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(2): 9-13.
- [148] 杨智, 邹才能, 陈建军, 等. “进(近)源找油”: 油气地质理论创新与重点领域勘探思考[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1310-1324. YANG Zhi, ZOU Caineng, CHEN Jianjun, et al. “Exploring petroleum inside or near the source kitchen”: innovations in petroleum geology theory and reflections on hydrocarbon exploration in key fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(10): 1310-1324.
- [149] 支东明, 李建忠, 张伟, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷双吉构造带井子沟组勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1383-1394. ZHI Dongming, LI Jianzhong, ZHANG Wei, et al. Exploration breakthrough and its significance of Jingjingzigou Formation in Shuangji tectonic zone of Jimsar sag in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1383-1394.

(收稿日期 2023-03-16 改回日期 2023-08-29 编辑 雷永良)