

文章编号: 1671-1505(2024)05-1017-20 DOI: 10.7605/gdxb.2024.05.095

## 准噶尔盆地西北缘哈山地区风城组 碱湖页岩油地质特征与勘探展望\*

刘惠民<sup>1</sup> 文华国<sup>2,3</sup> 张奎华<sup>1</sup> 郭佩<sup>2,3</sup> 张关龙<sup>4</sup> 于洪洲<sup>4</sup>  
熊伟<sup>4</sup> 周健<sup>4</sup> 徐文礼<sup>2,3</sup> 宋梅远<sup>4</sup> 李长志<sup>2,3</sup>

- 1 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 山东东营 257001  
2 成都理工大学自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 四川成都 610059  
3 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川成都 610059  
4 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015

**摘要** 玛湖凹陷二叠系风城组是准噶尔盆地近年来页岩油勘探开发和增储上产的重点层位。哈拉阿拉特山地区(简称哈山地区)位于玛湖凹陷北缘, 由于位于逆冲带附近且处于勘探早期, 该区风城组的沉积背景、古地理位置及页岩油勘探潜力尚不明确。根据哈山地区风城组页岩油近 10 年的勘探开发基础资料和成果, 系统梳理了该区页岩的沉积环境、岩相划分、源岩品质、含油性和储集性, 探讨了哈山地区页岩油的“甜点”发育规律和勘探前景。结果表明: 玛湖主体洼陷之外, 哈山地区中部风城组发育另一个碱湖沉积沉降中心, 其火山喷发、沉积演化和成碱阶段与南部乌夏地区具有很好的可比性, 为风城组另一富烃凹陷; 提出了风城组碱湖页岩四端元对三角页岩划分方案, 将风城组页岩划分为含盐和非含盐 8 种页岩岩相; 整体上, 哈山地区风城组黏土质页岩和钙质页岩有机质丰度最高, 云质页岩和盐质页岩含油性相对较好, 云质页岩和粉砂岩储集性最好, 提出了云质页岩为 I 类甜点, 粉砂岩为 II 类甜点。哈山地区风城组页岩在源岩和储集层品质方面与乌夏地区风城组相当, 具有较好的页岩油勘探前景。

**关键词** 碱湖 逆冲带 页岩岩相划分 富烃凹陷 页岩甜点 风城组 准噶尔盆地

**第一作者简介** 刘惠民, 男, 1969 年生, 2005 年博士毕业于中国石油大学(华东), 现为教授级高级工程师, 主要从事油气勘探研究与管理工作。E-mail: hmliu@vip.163.com。

中图分类号: P588.2 文献标志码: A

## Geological characteristics and exploration prospects of alkaline lake shale oil of the Fengcheng Formation, Hashan area, NW Junggar Basin

LIU Huimin<sup>1</sup> WEN Huaguo<sup>2,3</sup> ZHANG Kuihua<sup>1</sup> GUO Pei<sup>2,3</sup> ZHANG Guanlong<sup>4</sup> YU Hongzhou<sup>4</sup>  
XIONG Wei<sup>4</sup> ZHOU Jian<sup>4</sup> XU Wenli<sup>2,3</sup> SONG Meiyuan<sup>4</sup> LI Changzhi<sup>2,3</sup>

- 1 Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257001, China  
2 Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China  
3 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China  
4 Exploration and Development Institute of Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257015, China

\* 中石化胜利油田科研项目(编号: 30203569-22-ZC0613-0080)资助。[Financially supported by the Project of Sinopec Shengli Oilfield Company (No. 30203569-22-ZC0613-0080)]

收稿日期: 2024-06-19 改回日期: 2024-07-22

**Abstract** In recent years, the Permian Fengcheng Formation of the Mahu sag has become an important interval for shale oil exploration and newly discovered hydrocarbon reserves in the Junggar Basin. The Halaalate Mountain area (Hashan area) is located on the northern margin of the Mahu sag. Due to its proximity to the thrust belt and in the early stage of exploration, the sedimentary background, palaeogeographical location and shale oil exploration potential of the Fengcheng Formation of the Hashan area are still unclear. Based on the exploration and development practice of shale oil in the Hasan area during the past decade, the sedimentary environment, shale facies, source rock quality, oil content and reservoir quality of the Fengcheng Formation shale oil in this area were studied systematically. The results show that besides the main sag in the Mahu sag, there was another alkaline lake center of developed in the central part of the Hashan area, which is another hydrocarbon rich depression for the Fengcheng Formation. The volcanic eruption, sedimentary evolution and alkaline salts forming stage of the Hashan area bear a strong resemblance to that of the Wuxia area to the south. A four end-member classification scheme is proposed here for the alkaline lake shale in the Fengcheng Formation. The shale of the Fengcheng Formation can be divided into eight lithofacies, including four salty lithofacies and four non-salty lithofacies. On the whole, the clayey shale and calcareous shale of the Fengcheng Formation in the Hashan area have the highest organic matter abundance, the dolomitic shale and salty shale have relatively good oil content, and the dolomitic shale and siltstone have the best reservoir property. It is proposed that the dolomitic shale comprises the class-I sweet spot and the siltstone comprises the class-II sweet spot for shale exploration. For the Fengcheng Formation, shale in the Hashan area is similar to that of in the Wuxia area in terms of source rock and reservoir quality, both of which have high shale oil exploration potential.

**Key words** alkaline lake, thrust zone, shale lithofacies classification, hydrocarbon-rich sag, shale sweet spots, Fengcheng Formation, Junggar Basin

**About the first author** LIU Huimin, born in 1969, obtained Ph.D. from the China University of Petroleum (East China) in 2005. He is a professor level senior engineer who is mainly engaged in oil and gas exploration research and management. E-mail: hmliu@vip.163.com.

准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统风城组发育世界著名的碱湖优质烃源岩,是盆地西北缘百里油区的源岩基础(曹剑等,2015;Guo *et al.*,2021a;夏刘文等,2022),也是盆地近几年来继吉木萨尔凹陷芦苇沟组页岩油勘探的重点接替层位(何海清等,2022;姜福杰等,2023;李长志等,2024),具有巨大的页岩油气勘探前景(唐勇等,2023,2024)。哈拉阿拉特山(简称哈山)地区位于玛湖凹陷北缘,该区常被划分为玛湖凹陷风城组沉积的北部边界,沉积相以扇三角洲和河流系统沉积为主(何海清等,2022)。随着中石化哈浅6、哈山1、哈深斜1以及哈山5等多口井在哈山地区风城组钻遇细粒沉积物和碱盐岩沉积,并显示具有较好的生烃潜力和油气显示(张善文,2013;王圣柱等,2014;李振明等,2023;张奎华等,2023),揭示玛湖凹陷北部边界在哈山地区之北,并说明哈山地区风城组具有较好的

页岩油气勘探前景(薛雁等,2015;于洪洲等,2022;曾治平等,2023)。构造上,哈山地区隶属于准噶尔盆地北缘哈-德(哈山—德伦山)构造带的西端,南邻玛湖富烃凹陷,有利勘探面积逾1000 km<sup>2</sup>。

由于哈山构造带处于哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块拼合造山的重要部位,构造活动强烈,风城组发育于多个逆冲构造台阶之上(王圣柱等,2017),造成地层对比困难、原始沉积展布及演化规律认识不清。此外,哈山地区碱湖页岩缺乏精细岩矿学及成因研究,页岩岩相系统分类及成因研究薄弱,优势页岩岩相尚未明确,并且缺乏区域烃源岩系统对比,哈山地区烃源岩与玛湖凹陷北区其他地区缺乏系统对比研究。基于此,综合哈山地区风城组近10年来积累的基础资料和勘探成果,对该区风城组的基础地质特征进行了总结,并对页岩进行了岩相划分和评价,提出了哈山地区风城组甜点发育模式。

## 1 区域地质背景

哈山地区位于准噶尔盆地西北缘(图 1-a), 为哈山—德伦山构造带西端, 呈北东—南西向展布, 向北与达尔布特断裂及和什托洛盖盆地相接, 南部紧邻乌夏断裂带、玛湖凹陷。风城组沉积时期, 哈山逆冲带尚未造山, 该区属于玛湖凹陷沉积区的一部分(于洪洲等, 2022)。哈山主要形成于中晚二叠世—三叠纪强烈逆冲推覆构造阶段(王圣柱等, 2017), 后期经历了侏罗纪—白垩纪弱挤压逆冲和新生代隆升兼走滑调整(薛雁等, 2017)。现今哈山构造带平面上呈条带状展布, 整体呈东北高、西南低的特征。哈山地区断裂发育, 北东向的逆断裂体系控制研究区的主要构造形态, 由北向南逐期挤压, 南缘冲断, 北缘推覆叠加, 构成了现今的哈山主体。

哈山地区自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和新生界, 其中二叠系划分为下二叠统佳木河组( $P_{1j}$ )和风城组( $P_{1f}$ ), 上二叠统夏子街组( $P_{2x}$ )和乌尔禾组( $P_{2w}$ )(图 1-b)。根据最新同位素年龄测定, 佳木河组已划分为石炭系, 风城组则跨上石炭统和下二叠统(Wang *et al.*, 2021; 唐勇等, 2022a; 龚德瑜等, 2024), 但年龄仍存在争议。风城组沉积时期盆地整体处于伸展背景(张元元等, 2021), 发育多个彼此间隔的断陷(张志杰等, 2023), 控制着沉积中心和碱盐岩、烃源岩的分布(何海清等, 2022)。哈山地区风城组包括逆冲带之下的准原地风城组和逆冲带内的异地风城组(周健等, 2024), 位于哈山西部的哈深斜 1 井风城组以准原地沉积为主, 附近的哈山 1、哈山 11、哈浅 6、哈浅 101 和哈山斜 4 井以异地沉积为主(图 1-b)。位于哈山中部的哈山 5 井既包括准原地沉积风城组, 又包括异地沉积风城组(图 1-c)。

## 2 沉积环境与演化特征

### 2.1 沉积环境划分

哈山地区风城组岩相组合复杂, 既包括以陆源碎屑为主的砂砾岩、不同粒级砂岩和页岩, 也包括以内源沉积为主的碳酸盐岩和碱盐岩, 还包括外源—内源混杂的混积岩以及火山碎屑岩和火山岩。砂砾岩主要发育于扇三角洲沉积环境, 包括玛湖凹陷西部、北部和东部山前地带, 西部扎伊尔山在风城

组沉积时期持续供源(张志杰等, 2023), 其山前形成的扇三角洲扇体向凹陷内持续进积。哈山地区北部风城组沉积边界及扇体发育位置存在较大推测性, 从东部边界物源供给强度远小于扎伊尔山, 零星发育扇三角洲沉积相。整体上, 扇三角洲以发育砾岩(图 2-a)、中粗砂岩和扇间页岩为主, 目前仅在哈深斜 1 井风三段观察到。哈山地区风城组亦发育薄层粉砂岩、细砂岩和中砂岩, 含量较少, 主要夹杂于页岩中, 根据沉积背景可划分为浊积砂体和滩坝砂体。浊积砂体主要夹于半深湖页岩中, 厚度一般小于 1 m, 在哈山 5 井第 3 筒、第 7 筒和第 8 筒岩心中可见, 普遍被白云石胶结。滩坝砂体(图 2-b)主要发育于浅湖页岩(图 2-c)中, 厚度一般小于 2 m。

哈山地区风城组发育多种类型湖泊沉积相, 根据湖水深度可划分为滨浅湖和半深湖, 根据湖水盐度可划分微咸水碱湖、咸水碱湖和盐碱湖。结合哈山地区实际情况, 将风城组湖相环境划分为微咸水滨浅湖、微咸水半深湖、咸水半深湖和盐碱湖。微咸水半深湖指湖水盐度达到钙镁碳酸盐(白云石和方解石)沉淀的盐度, 但并未达到含钠碳酸盐沉淀的盐度, 主要发育于近物源沉积中心地带, 以哈深斜 1 井风二段上部为代表。该沉积环境以发育含钙页岩(图 2-d)、钙质页岩(图 2-e)、含云页岩(图 2-f)、云质页岩(图 2-g)为主。咸水半深湖指湖水盐度已达到含钠碳酸盐(Na-Ca 碳酸盐和 Na-Mg 碳酸盐)沉淀的盐度, 但尚未达到纯碱(苏打石、天然碱等)沉淀的盐度。该环境以发育盐质页岩(图 2-h)和含盐云质页岩(图 2-i)为主, 如哈深斜 1 井风一段、哈山 5 井准原地风一段和风二段底部地层。盐碱湖指湖水盐度已达到纯碱(苏打石、天然碱等)沉淀的盐度, 主要发育泥质碱盐岩(图 2-j, 2-k)和纯碱盐岩(图 2-l), 泥质碱盐岩以层状为主, 碱盐矿物主要为碳钠镁石, 纯碱盐岩以碳酸氢钠石和天然碱为主。

### 2.2 单井综合分析

目前哈山地区钻遇风城组的井数较少, 主要分布于哈山西部和哈山中部。根据离物源区(扎伊尔山)的距离和受淡水输入的影响, 将哈山西部划分为近物源沉积中心, 将哈山中部划分为远物源沉积中心(图 3-a)。近物源沉积中心发育于扎伊

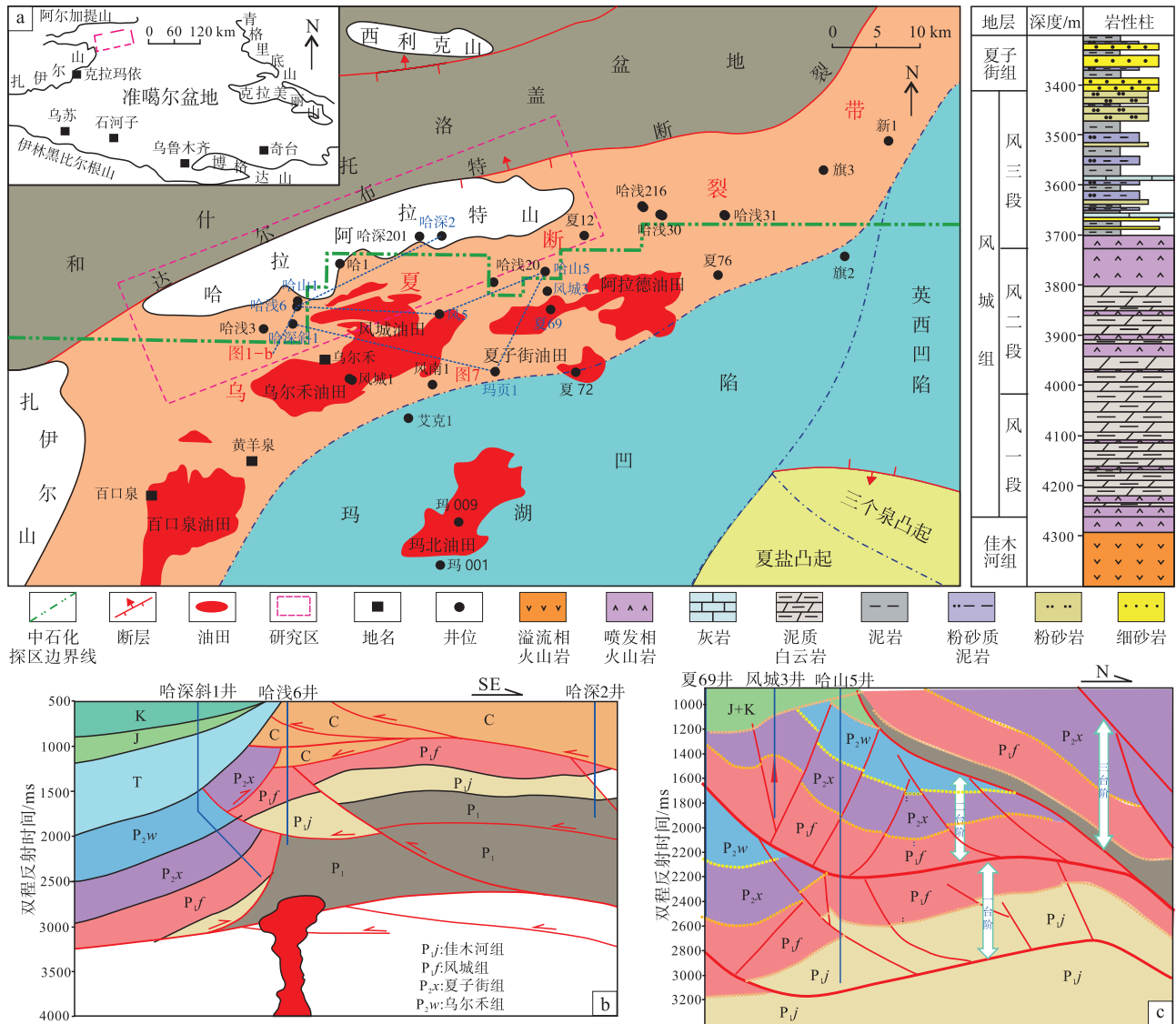


图 1 a—准噶尔盆地哈山地区所处的区域构造位置 (据曾治平等, 2023; 有修改); b—哈山地区西部构造图 (据周健等, 2024); c—哈山地区哈山 5 井区构造图

Fig. 1 a—Tectonic location of Hashan area, Junggar Basin (modified by Zeng *et al.*, 2023); b—Structural map of the western Hashan area (after Zhou *et al.*, 2024); c—Structural map of the Well Hashan 5 area

尔山造山带前渊凹陷, 扇三角洲附近, 长期受高山河流淡水的输入影响, 盐度较远物源沉积中心湖水低。远物源沉积中心远离造山带和扇三角洲河流淡水输入, 盐度较高。两类沉积中心盐度演化和岩相组合差异较大。

近物源沉积中心沉积以哈深斜 1 井风城组为代表, 风一段主要发育盐质页岩、云质页岩和硅质页岩, 页岩中分散有大量碱盐矿物 (主要为碳钠钙石和碳钠镁石), 部分被白云石和石英交代 (图 3-b), 说明原始沉积环境盐度较高, 达到咸

水条件。风二段下部页岩发育含盐云质页岩, 碱盐主要分布于泄水构造或者裂缝中, 大部分被白云石交代, 说明该阶段达到微咸水条件, 风二段上部发育钙质页岩和钙质粉砂岩, 盐度较下部云质页岩进一步降低, 说明代表浅湖环境。至风三段沉积时期, 西部扎伊尔山扇三角洲砂体已前进至哈深斜 1 井附近, 以沉积砂砾岩、砂岩、粉砂质页岩和钙质页岩为主。整体上, 哈深斜 1 井风城组盐度逐渐降低, 与扎伊尔山扇三角洲沉积逐渐向东进积有关。

远物源沉积中心以哈山 5 井准原地沉积风城组

表 1 准噶尔盆地哈山地区风城组不同沉积环境特征对比

沉积环境	发育位置及层段	岩性	沉积构造
扇三角洲	近物源沉积中心的原地风三段	砾岩、中粗粒砂岩和扇间泥岩	块状层理、板状交错层理、平行层理、小型交错层理及冲刷面构造,含植物化石
滩坝	远物源沉积中心的异地风二段、风三段	粉砂岩、云质粉砂岩、云质细砂岩	沙纹交错层理、波状层理、亚平行层理、爬升沙纹层理、脉状及透镜状层理等
重力流	远物源沉积中心的准原地风一段上部和风二段下部	盐质粉砂岩、云质粉砂岩	正递变层理,水平层理、波状纹层,冲刷面
微咸水滨浅湖	近物源沉积中心原地和异地风二段上部、远物源沉积中心的异地风三段和风二段上部	黏土质页岩、黏土岩、泥质粉砂岩	以块状层理为主,纹层不发育;局部发育燧石条带;裂缝发育;发育大量充填、未充填微断裂缝,及少量撕裂缝
微咸水半深湖	近物源沉积中心的原地风二段;远物源沉积中心的准原地风一段上部和风二段下部	含盐页岩、云质页岩和云质粉砂岩	块状和纹层层理交替发育;泄水构造、白云石条带发育;发育少量燧石团块及砂岩透镜体
咸水半深湖	近物源沉积中心原地—异地风一段;远物源沉积中心准原地风一段和风二段下部、异地风二段下部	盐质页岩和(含盐)云质页岩	纹层层理发育;发育大量泄水、晶体生长和卷曲变形等同沉积变形构造
盐碱湖	远物源沉积中心的准原地风二段上部	泥质碱盐岩和盐质页岩交替发育	纹层和层状层理发育;发育晶体生长构造;泥质角砾及撕裂缝发育

为代表,风一段与哈深斜 1 井一致,发育盐质页岩和含盐页岩,该阶段盐度已达到咸水阶段(图 3-c)。该咸水环境持续至风二段下部,期间经历了短暂的盐碱湖沉积。至风二段上部盐度增加,进入盐碱湖时期,沉积有层状碱岩。由于哈山 5 井处于哈山逆冲带内,4500 m 以上地层为异地沉积,将盐碱湖斜坡区地层推覆至哈山 5 井处,以第 3 筒岩心为代表,主要发育碳钠钙石质页岩和硅硼钠石质页岩。异地沉积风二段和风一段盐度明显较原地风城组低,以沉积含云页岩、粉砂质页岩为主,夹泥质粉砂岩和云质细砂岩,代表浅湖相和滩坝沉积。整体上,哈山 5 井盐度经历了由咸水至盐水再至微咸水的演化过程。

### 2.3 风城组沉积环境演化

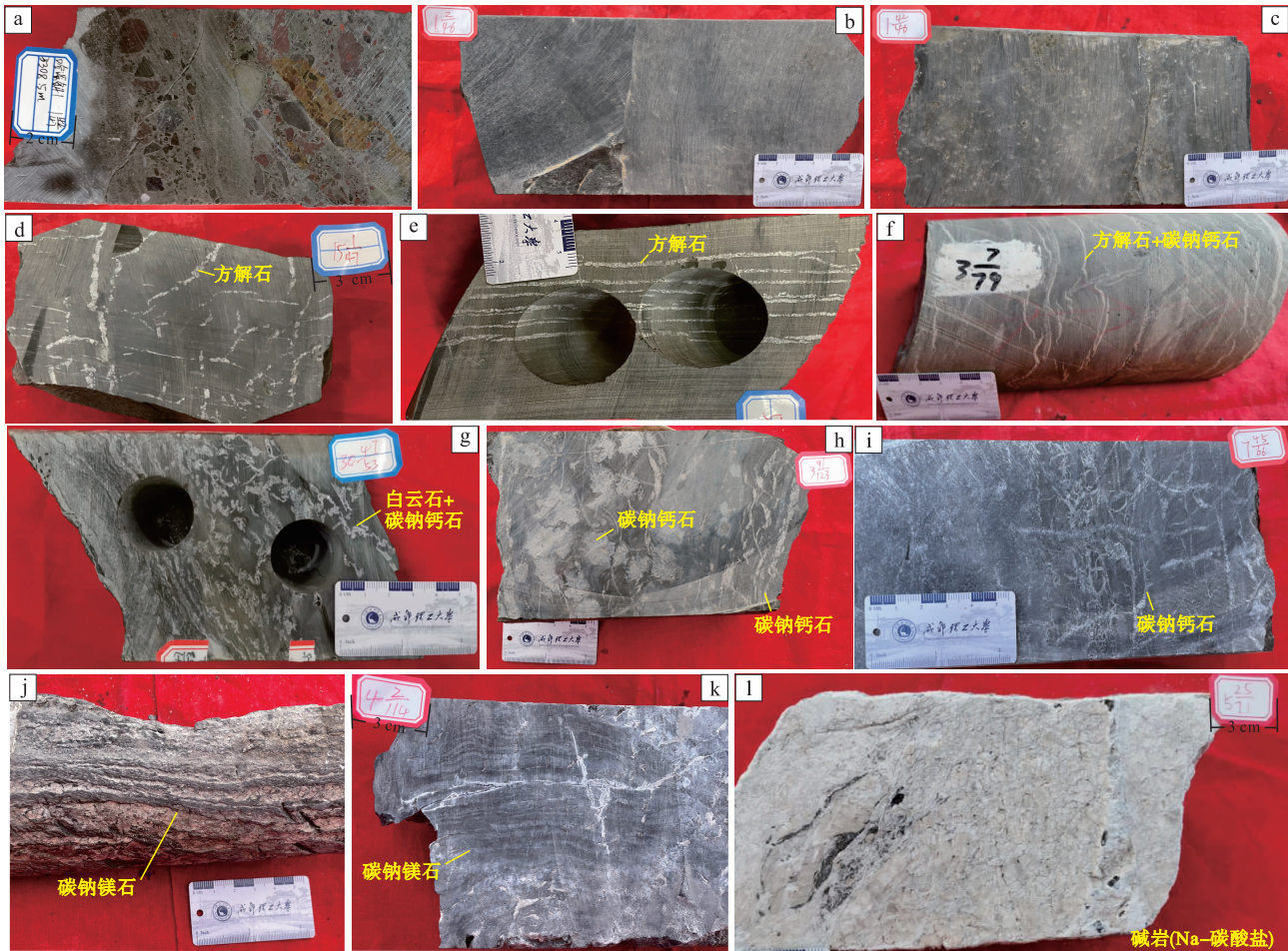
由于哈山地区处于玛湖凹陷北部边缘,钻遇风城组的井数较少,结合整个玛湖凹陷北部的钻井和已有沉积环境研究成果(何海清等,2022;唐勇等,2022b;倪敏婕等,2023;张志杰等,2023),借以恢复哈山地区风城组不同时期的沉积环境。早二叠世为准噶尔盆地扭张期,构造活动强烈,盆地西北缘抬升导致古特提斯洋逐渐向东南方向退出,除博格达地区发育残留海沉积外盆地其他地区以陆相沉积为主(张志杰等,2023)。风城组主要发育于准噶尔盆地中央拗陷带西部,沿西准噶尔残余洋和北天山残余洋的闭合带分布于玛湖凹陷—盆 1 井西

凹陷—沙湾凹陷—阜康凹陷一线,发育多个碱湖中心(何海清等,2022)。

风一段沉积时期处于晚石炭世冰期,气候整体较为干旱(Wang *et al.*, 2021)。玛湖凹陷北部火山活动强烈,北部、西部和东部的物源供应不强,以近源堆积为主,为湖盆欠补偿阶段(图 4-a)。该时期在玛湖凹陷北部发育艾克 1 井—哈深斜 1 井和哈山 5 井 2 个咸水碱湖区,之间以水下低隆相隔。该阶段主要为碱湖预备期,盐度并未达到大规模沉积碱盐的程度,但在沉积中心发育盐质页岩和含盐云质页岩。该阶段在乌—夏地区发育火山岩带,此外哈山 5 井同样发育玄武岩和凝灰质砂砾岩。

风二段沉积时期亦处于晚石炭世冰期,气候仍整体较为干旱(Wang *et al.*, 2021)。该时期哈山地区北部和西部物源供应增强,为湖盆平衡补偿期(图 4-b)。哈深斜 1 井所处的沉积中心受西—北部物源供应增强的影响,水体盐度降低,以沉积钙质、云质和粉砂质页岩为主。艾克 1 井—哈深斜 1 井碱湖向南迁移并扩大,在南部沉积有大量层状碱盐和盐质页岩。哈山 5 井所处的沉积中心亦处于主要成碱期,成碱阶段对比性好。此阶段乌夏地区火山喷发停止,仅在东北部有火山喷发。

风三段沉积时期处于早二叠世大冰期(Wang *et al.*, 2021),气候变得寒冷潮湿。该时期降水增多,北部和西部物源供应进一步增强,盆地边缘三



a—扇三角洲前缘砾岩，哈深斜 1 井，井深 3308.5 m，风三段；b—滩坝细砂岩，哈山 5 井，井深 3924.52 m，风三段；c—浅湖页岩，哈山 5 井，井深 3931.79 m，风三段；d—微咸水半深湖含钙页岩，哈浅 101 井，井深 2236.01 m，风三段；e—微咸水半深湖钙质页岩，哈山 1 井，井深 2099.5 m，风二段；f—微咸水半深湖含云粉砂质页岩，哈山斜 4 井，井深 2172.33 m，风二段；g—咸水半深湖云质页岩，哈浅 6 井，井深 2703.25 m，风一段；h—咸水半深湖盐质页岩，哈山 5 井，井深 4466.79 m，风二段；i—咸水半深湖含盐云质页岩，哈山 5 井，井深 5135.57 m；j—盐碱湖泥质碱盐岩，哈山 5 井，井深 4640.9 m，风二段；k—盐碱湖泥质碱盐岩，哈山 5 井，井深 4635.2 m，风二段；l—盐碱湖碱盐岩，哈山 5 井，井深 4797.32 m，风二段

图 2 准噶尔盆地哈山地区风城组不同沉积环境典型岩相特征

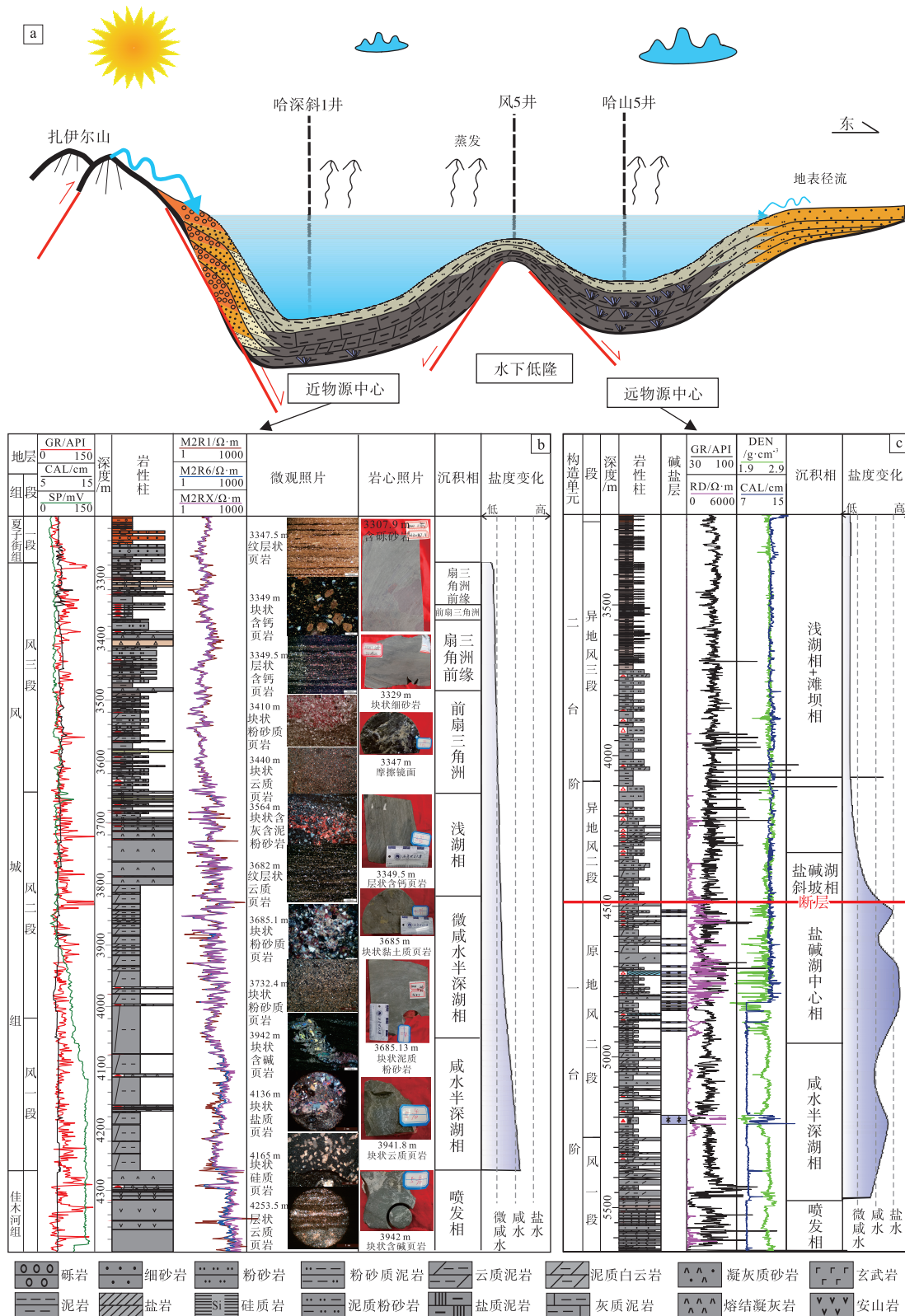
Fig. 2 Typical lithofacies of different sedimentary environments in the Fengcheng Formation of Hashan area, Junggar Basin

角洲砂体从北部和西部向湖盆中心推进，砂砾岩发育至哈深斜 1 井附近，晚期发育至艾克 1 井附近，东部三角洲扇体沉积终止。风城组整体砂质含量增加，为湖盆过补偿阶段(图 4-c)。碱湖水体整体变浅，盐度降低，层状碱盐沉积终止。深湖环境缩至风南 5 井附近，以沉积云质页岩为主。浅湖范围扩大，在三角洲前缘附近发育大量滩坝砂体。该阶段火山仍活跃在湖盆东北部。

### 3 碱湖页岩岩相划分

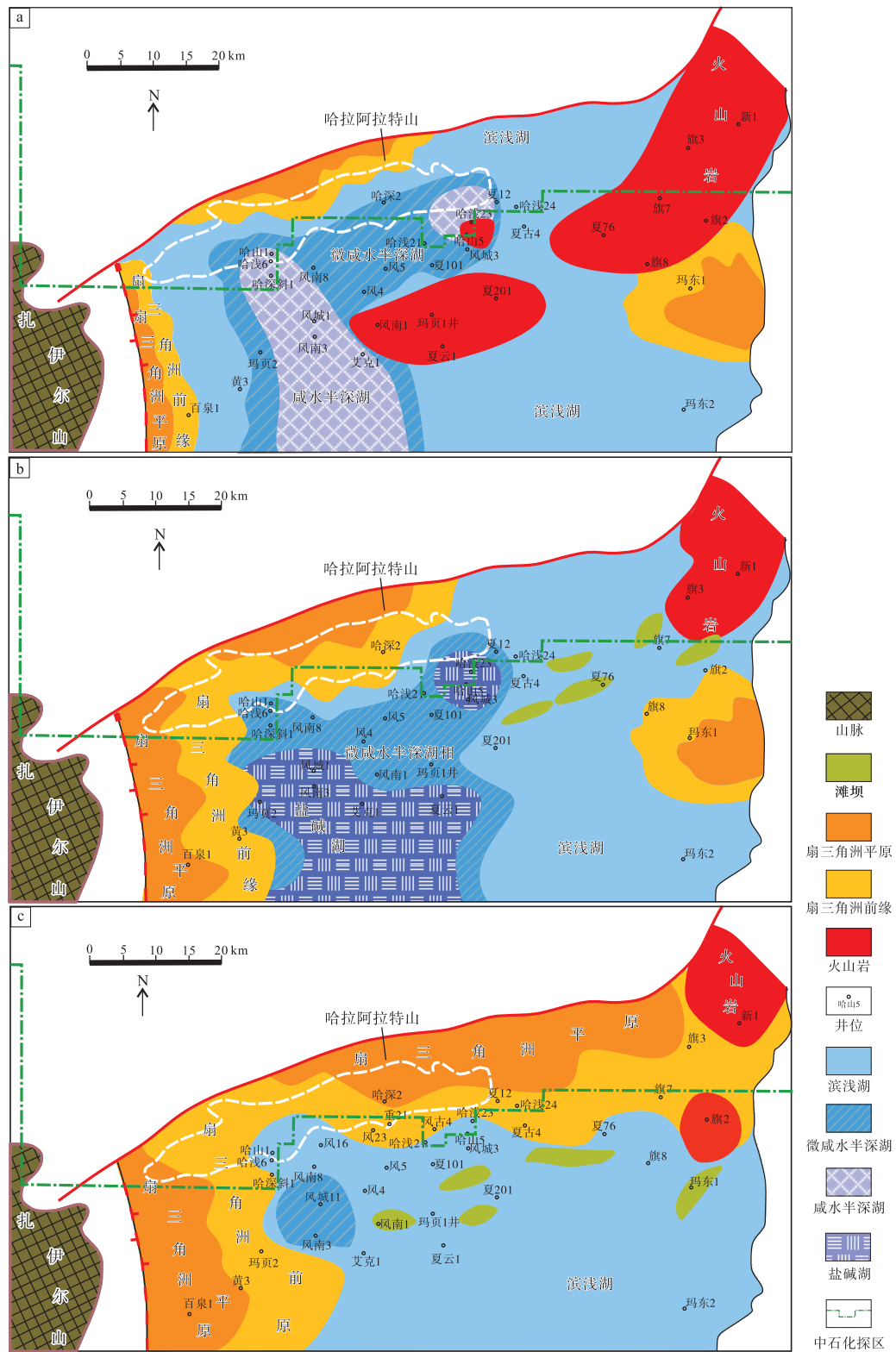
风城组为典型的盐碱湖沉积，其页岩的矿物组

成复杂，碱盐（碳钠钙石、碳钠镁石、氯碳钠镁石、苏打石、碳氢钠石等）和硼酸盐矿物（硅硼钠石和水硅硼钠石）发育（Guo *et al.*, 2021b），黏土矿物含量较少，自生钾长石、钠长石和石英发育（郭佩等，2023；Li *et al.*, 2023；李长志等，2024）。根据传统的三端元（黏土质、长英质和碳酸盐质）划分方案，风城组页岩主要归于长英质页岩端元（黄玉越等，2022；钱门辉等，2022；杨帆等，2022）。三端元划分方案一方面未考虑风城组碱盐和硼酸盐矿物的发育和富集，另一方面难以满足风城组页岩精细研究和空间预测的需求。



a—哈山地区 2 种类型沉积中心；b—哈深斜 1 井原地沉积风城组综合柱状图；c—哈山 5 井准原地（断裂之下）和异地（断裂之下）沉积风城组综合柱状图

图 3 准噶尔盆地哈山地区风城组近物源和远物源沉积中心沉积环境及盐度演化对比  
Fig. 3 Comparison of sedimentary environment and salinity between proximal depocenter and distal depocenter of the Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin



a—风一段沉积时期，湖盆欠补偿阶段；b—风二段沉积时期，湖盆平衡补偿阶段；c—风三段沉积时期，湖盆过补偿阶段

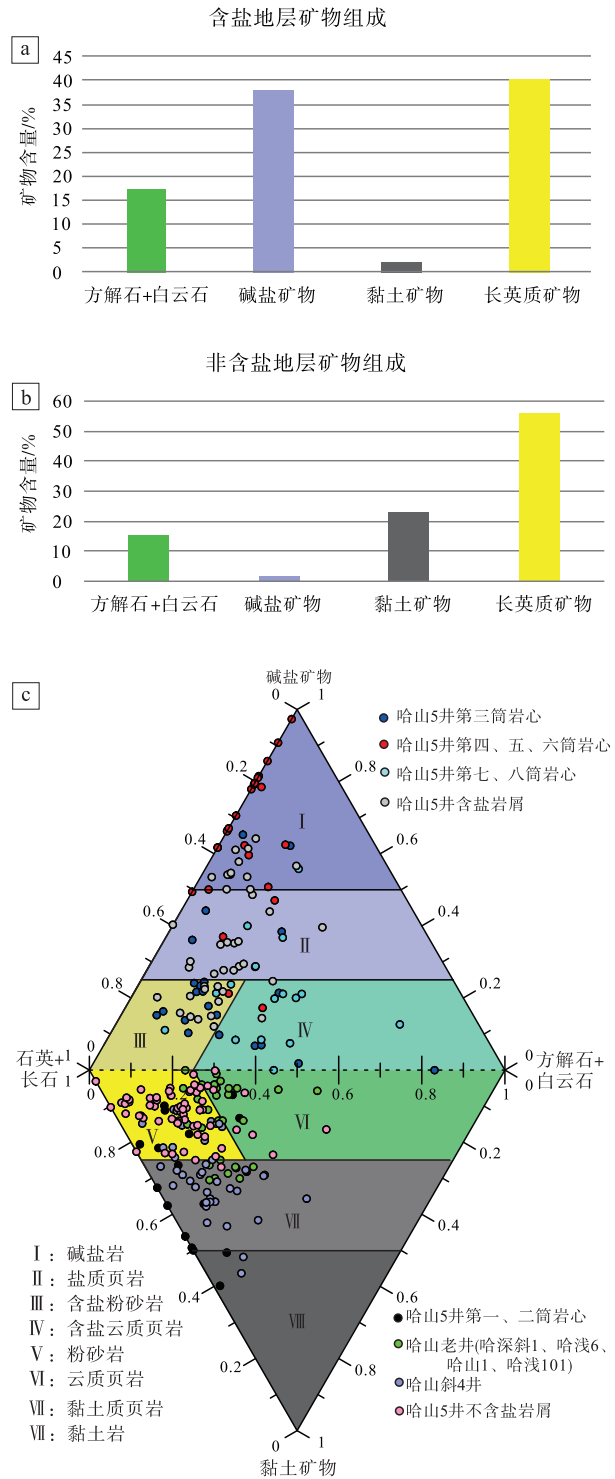
图 4 准噶尔盆地玛湖凹陷北部风城组沉积相展布特征 (综合何海清等, 2022; 唐勇等, 2022b; 倪敏婕等, 2023; 张志杰等, 2023; 有修改)

Fig. 4 Distribution of sedimentary facies of the Fengcheng Formation in northern Mahu sag, Junggar Basin (modified from He *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2022b; Ni *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023)

针对哈山地区风城组 2 口最新钻井（哈山 5 井和哈深斜 4 井）的岩心和岩屑共 231 个样品进行 XRD 解释，重点识别和分析碱盐、硼酸盐、含镁黏土矿物等罕见矿物的含量。由此得到了风城组页岩的 4 个矿物组合：碱盐矿物（包括 Na-碳酸盐和 Na-硼酸盐）、长英质矿物（长石和石英）、碳酸盐矿物（方解石和白云石）和黏土矿物，其中碱盐矿物在含盐地层中平均含量高于 35%（图 5-a），说明传统的三端元页岩划分方案不适合盐度较大的咸化湖盆页岩。

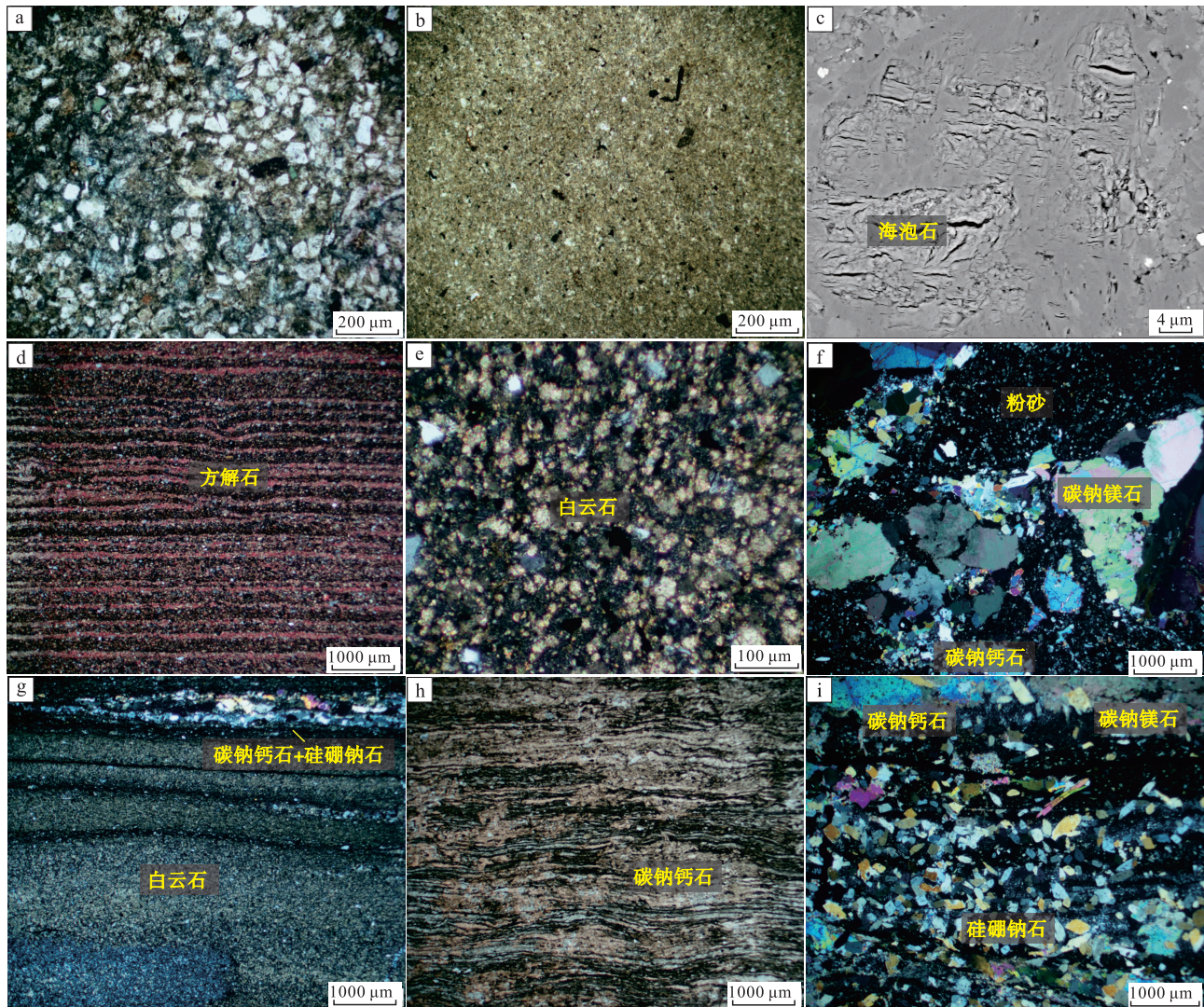
风城组四端元矿物的发育对比发现，风城组页岩中碱盐矿物和黏土矿物具有“相斥性”，在碱湖中心含盐地层中，黏土矿物缺失或者含量很少（<3%）（图 5-a），而在湖盆斜坡和边缘非含盐地层中，黏土矿物平均含量超过 20%（图 5-b）。长英质矿物和碳酸盐矿物在含盐和非含盐地层中具有含量（>15%），可以同时参与含盐和非含盐页岩的命名。造成黏土矿物在碱湖含盐地层中贫乏的主要原因，在于碎屑黏土矿物在高碱、高盐水体中不稳定，易转化为沸石、水硅硼钠石、钾长石、钠长石等自生硅酸盐矿物（郭佩等，2023；Li *et al.*, 2023），在进一步埋藏和升温过程中沸石进一步转化为长石。因此，鉴于碱湖沉积中碱盐矿物和黏土矿物的“相斥性”，以及二者均是“塑性矿物”的特点，作者创新性地建立了对三角图解，以长英质矿物和碳酸盐矿物为共享二端元（图 5-c）。由于碳酸盐矿物（方解石+白云石）的含量主要分布于 5%~35% 之间，很少发育白云岩（白云石含量大于 50%）和灰岩。考虑到“云质岩”在油田实际生产中应用的普遍性，为更好地区分云质岩（白云石含量大于 25%）和非云质岩，进一步划分出 25% 的线。由此得出如图 5-c 的对三角图，包含 8 个岩相：碱盐岩、盐质页岩、含盐粉砂岩、含盐云质页岩、粉砂岩、云（钙）质页岩、黏土质页岩和黏土岩，其中“含”代表含量在 15%~25% 之间，“质”代表含量在 25%~50% 之间。该页岩岩相划分方案从风城组自身的矿物组成特点出发，不仅弥补了传统三端元法未包含盐类矿物的缺陷，而且充分考虑了实际生产研究中常用的岩性术语。

不同页岩岩相代表的沉积环境和盐碱度条件不同，可以很好地进行页岩空间预测。其中粉砂岩在风城组最为常见，以碎屑长石和石英为主（图 6-a），



a—含盐地层矿物组成；b—非含盐地层矿物组成；c—哈山地区风城组页岩划分图示

图 5 准噶尔盆地哈山地区风城组页岩岩相划分  
Fig. 5 Classification of shale lithofacies in the Fengcheng Formation of Hashan area, Junggar Basin



a—泥质粉砂岩, 哈山 5 井, 井深 4182.45 m; b—黏土岩, 哈山 5 井, 井深 4186.49 m; c—黏土质页岩, 哈山斜 4 井, 井深 2174.71 m; d—钙质页岩, 哈山 1 井, 井深 2099.55 m; e—云质页岩, 哈浅 6 井, 井深 2544.5 m; f—含盐粉砂岩, 哈山 5 井, 井深 4438.5 m; g—含盐云质页岩, 哈山 5 井, 井深 4466.79 m; h—盐质页岩, 哈山 5 井, 井深 4457.03 m; i—泥质碱盐岩, 哈山 5 井, 井深 4644.8 m

图 6 准噶尔盆地哈山地区风城组不同页岩岩相微观特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of different shale lithofacies in the Fengcheng Formation of Hashan area, Junggar Basin

主要发育于浅湖环境的滩坝中。哈山地区滩坝粉砂岩主要发育于近物源沉积中心风三段和远物源沉积中心异地风三段(图 7)。黏土岩(黏土矿物含量大于 50%)在风城组较为罕见(6-b), 目前主要发现于哈山 5 井异地风三段的第一、二筒心(图 7)和哈山斜 4 井岩心中, 以富集海泡石为特点, 代表湖泊边缘的湖沼环境。黏土质页岩主要发育于近物源沉积中心, 代表微咸水湖泊沉积, 以哈山斜 4 井为代表(图 5-c), 黏土矿物仍以海泡石(图 6-c)为主, 其次是蒙脱石和伊利石。钙质页岩发育环境的盐度略高于黏土质页岩和黏土岩的沉积环境, 方

解石保存较好, 未被白云石交代, 主要呈纹层状(图 6-d)、条带状、斑晶状或者团块状, 主要发育于近物源沉积中心浅湖或者微咸水半深湖页岩中(图 7)。云质页岩盐度较钙质页岩高(图 6-e), 主要发育于咸水半深湖相和咸水浅湖相中, 如风 5 井和玛页 1 井等(图 7)。

含盐粉砂岩和含盐云质页岩发育于碱湖中心的预备成碱期, 盐类矿物含量低于 25%, 以碳钠钙石、碳钠镁石和硅硼钠石为主。含盐粉砂岩主要发育于哈山 5 井异地沉积风二段下部和准原地沉积风一段(图 7), 属于碱湖中心的细粒重力流沉积

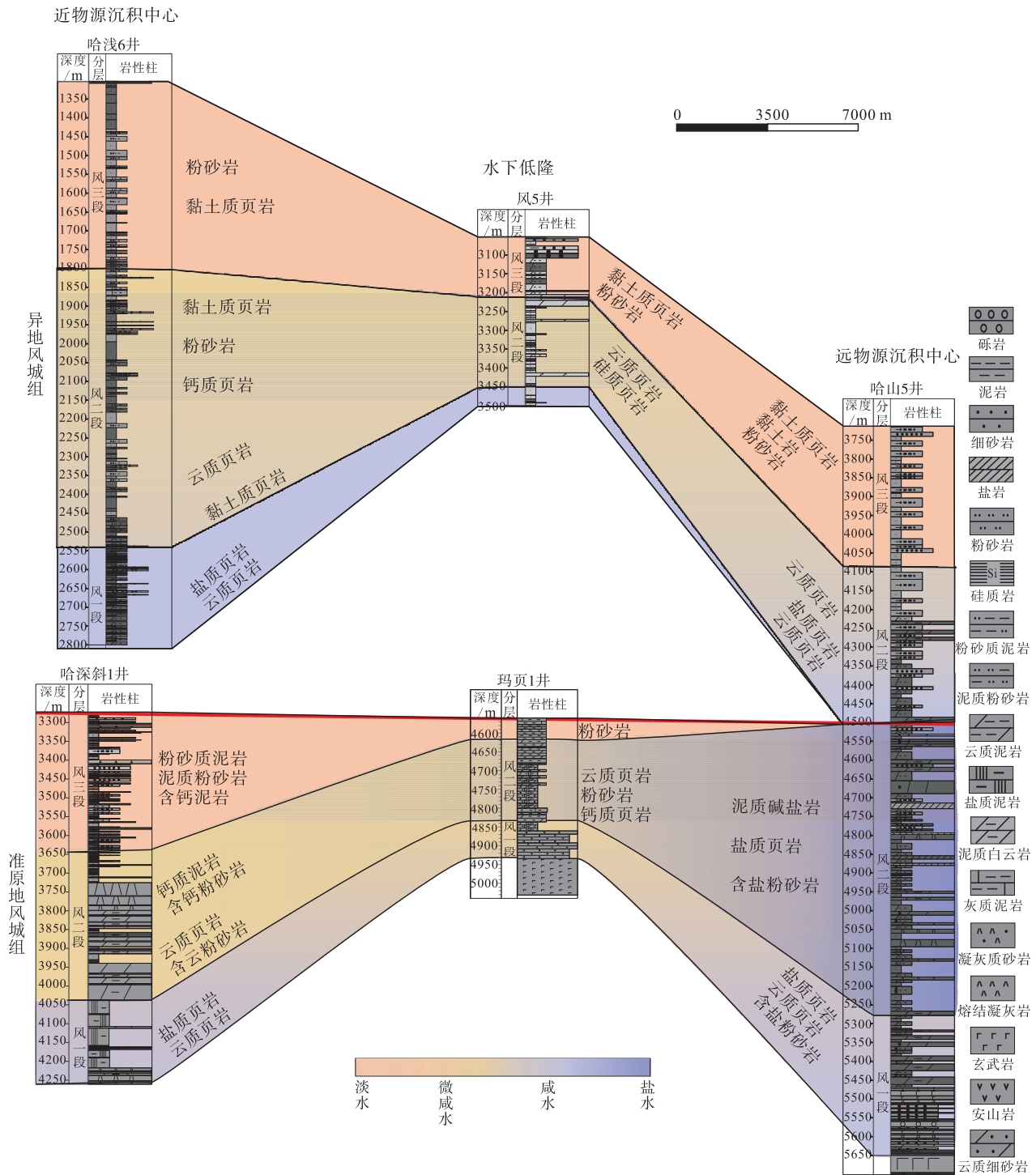


图 7 准噶尔盆地哈山地区不同岩相页岩分布特征 (剖面位置见图 1-a)

Fig. 7 Distribution of different shale lithofacies in the Fengcheng Formation of Hashan area, Junggar Basin (profile location is referred to Fig. 1-a)

(冯有良等, 2023), 在高盐碱条件下粉砂岩被碱盐胶结或者发育自生碱盐。因此, 尽管粉砂岩和含盐粉砂岩主要矿物均为碎屑石英和长石, 但二者的沉积环境和形成过程差异较大。含盐云质页岩主要

发育于远物源沉积中心准原地沉积风二段和风一段 (图 7), 沉积于大规模成碱前期。盐质页岩 (图 6-h) 和泥质碱盐 (图 6-i), 主要为泥质层和盐质层互层形成, 或盐类矿物大量分散于页岩基质

中, 主要分布于盐碱湖中心和斜坡区, 发育于远物源沉积中心准原地沉积风二段和风一段(图 7)。

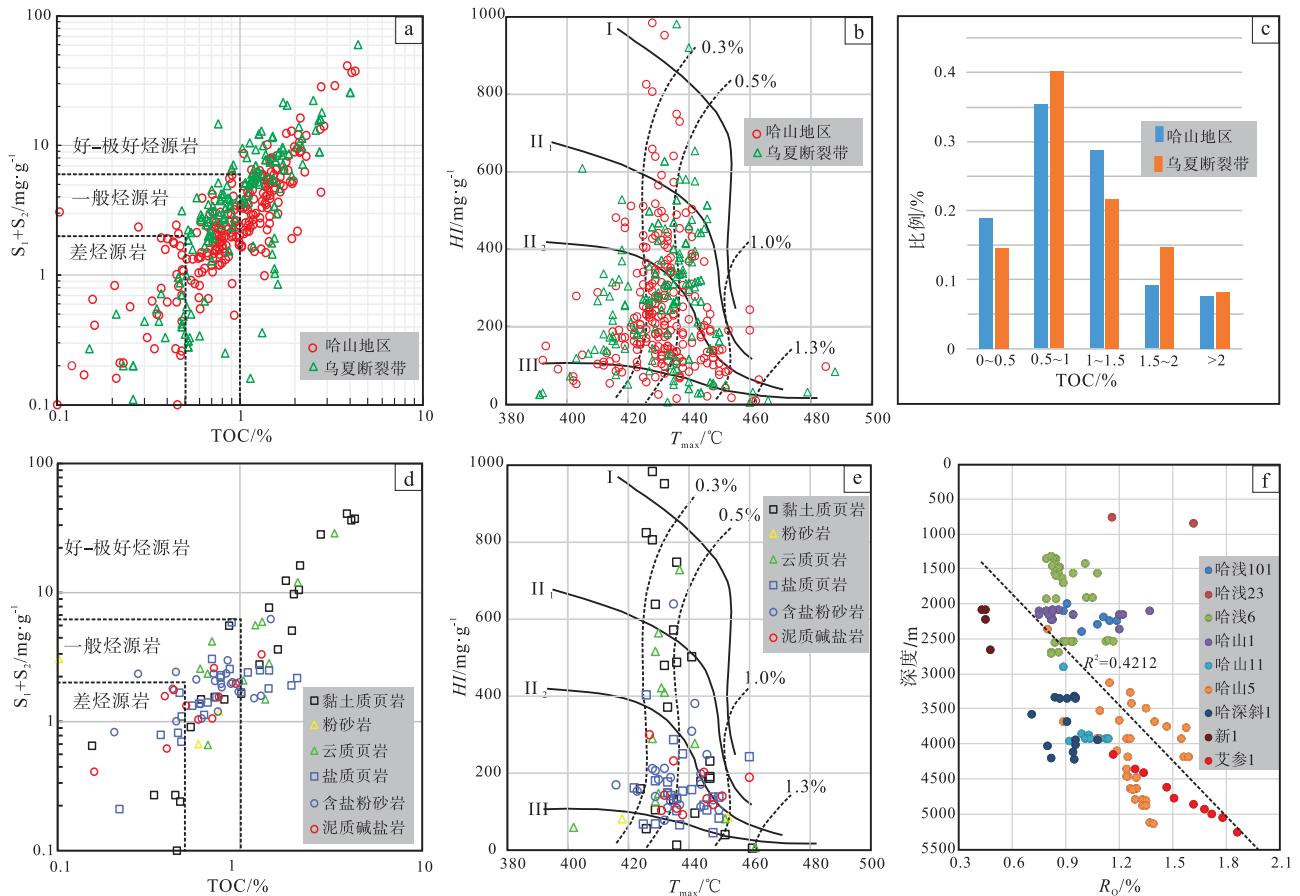
## 4 不同页岩岩相评价

### 4.1 页岩生烃潜力

页岩的生烃潜力直接影响页岩中的油气含量, 是进行页岩油气评价必须研究的内容。页岩的生烃潜力评价通常需要考虑有机质丰度、类型和成熟度等几个指标 (Jarvie, 2014; 金芸芸等, 2024)。鉴于哈山地区之南的乌夏断裂带内风城组页岩油的勘探已取得较大突破 (唐勇等, 2022b, 2023, 2024), 将哈山地区风城组与乌夏断裂带的风城组进行对比, 有助于整体评价哈山地区风城组的页岩油勘探前景。通过对比 2 个地区风城组的 TOC、生烃潜力 ( $S_1+S_2$ )、岩石热解  $T_{max}$  和氢指数 ( $HI$ ),

发现哈山地区风城组在有机质丰度、类型和成熟度 3 个方面与南部乌夏地区的风城组均相当(图 8-a, 8-b, 8-c)。哈山地区风城组烃源岩主要处于一般至好烃源岩的范畴(图 8-a), 以  $II_1$  和  $II_2$  型干酪根为主(图 8-b), 整体已达到成熟阶段(图 8-c)。

哈山地区不同页岩岩相有机质丰度差异较大, 黏土质页岩有机质丰度最高, 其次是云质页岩, 盐质页岩、含盐粉砂岩和泥质碱盐有机质丰度最低(图 8-d), 且黏土质页岩的有机质类型较其他岩相好, 以 I 型和  $II_1$  型为主(图 8-e)。这表明沉积于低盐碱度环境的页岩具有相对较高的有机质丰度和较好的有机质类型, 前者可能与高盐度水体的古生产力较低有关, 而后者可能与不同盐碱度水体生物类型不同有关 (Hou *et al.*, 2022)。乌夏地区风城组高碱盐水体环境沉积的页岩有机质丰度同样低于低碱盐水体环境沉积的页岩 (Guo *et al.*,



a—哈山地区与乌夏地区风城组有机质丰度对比 (乌夏地区数据来源于 Guo *et al.*, 2021a); b—哈山地区与乌夏地区风城组有机质类型和成熟度对比 (乌夏地区数据来源于 Guo *et al.*, 2021a); c—哈山地区与乌夏地区风城组 TOC 分布频率对比; d—哈山地区风城组不同页岩岩相有机质丰度对比; e—哈山地区风城组不同页岩岩相有机质类型和成熟度对比; f—哈山地区有机质  $R_o$  随深度变化趋势

图 8 准噶尔盆地风城组有机质丰度及类型评价

Fig. 8 Abundance and type evaluation of organic matter in the Fengcheng Formation, Junggar Basin

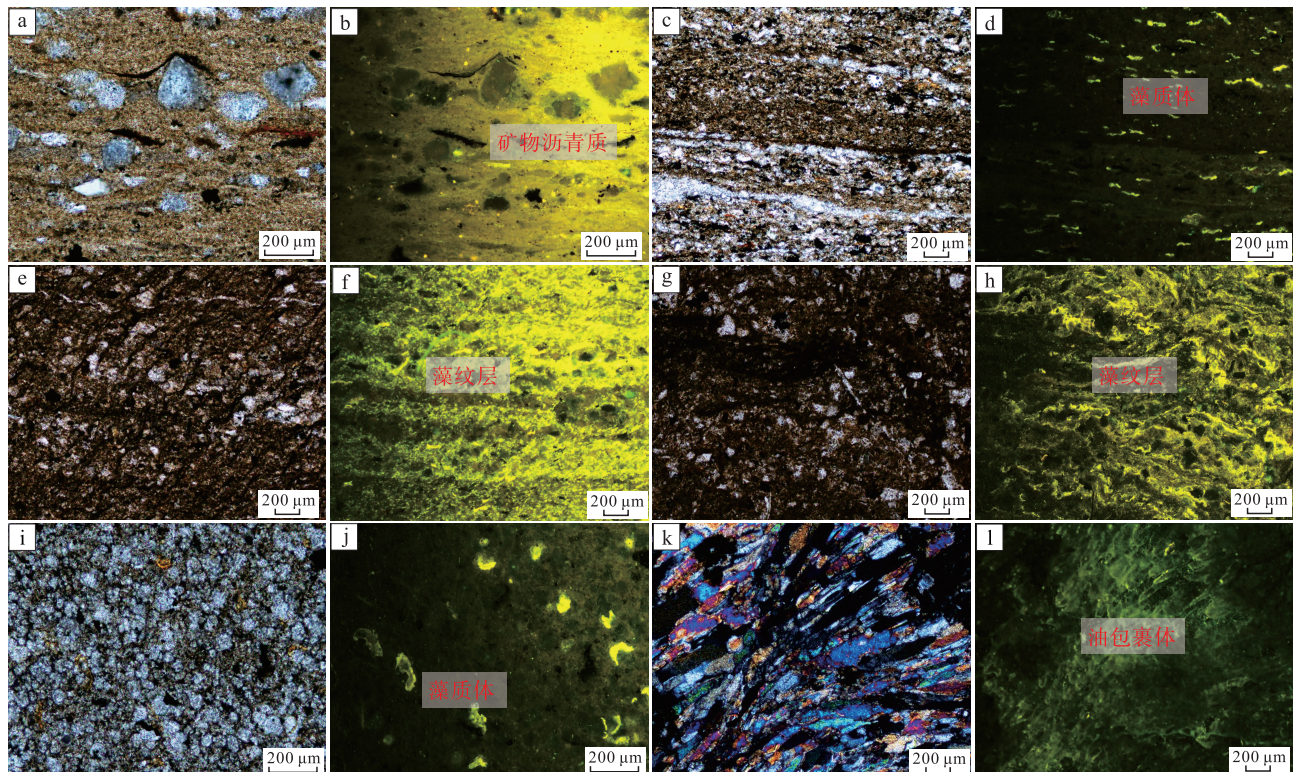
2021a)。哈山地区异地沉积和准原地沉积风城组干酪根  $R_o$  整体大于 0.6%，其中近物源沉积中心风城组  $R_o$  介于 0.8%~1.2% 之间，表明有机质已成熟。哈山 5 井风城组原地沉积和准原地沉积风城组有机质  $R_o$  绝大部分大于 1.2%，有机质已达到过成熟(图 8-f)。由此可知，哈山地区风城组页岩有机质已成熟，且具有较好的生烃潜力。

#### 4.2 页岩含油性

页岩的含油性是辨别页岩是否具有商业性开采价值的重要参数(金芸芸等, 2024)，常利用岩石荧光、岩石热解参数  $S_1$ 、含油饱和度指数 ( $OSI = S_1/TOC$ ) 分析对页岩含油性进行评价(蒋启贵等, 2016; 李志明等, 2019; 钱门辉等, 2022)。荧光分析结果表明，近物源沉积中心风城组页岩荧光相对较高(图 9-a 至 9-j)，以哈山斜 4 井为代表，页岩基质发强烈荧光(图 9-e 至 9-h)，而远物源沉积中心哈山 5 井风城组不同页岩岩相均几乎不发荧光(图 9-k, 9-l)。一般而言，具有强荧光的页岩

含油性比弱荧光页岩好。然而，风城组强荧光页岩的  $S_1$  和 TOC 值反而低于较强荧光甚至弱荧光页岩(图 10-a)，反映哈山地区风城组页岩的荧光强度与含油性关系没有明显关系，并且与有机质丰度也同样相关性弱。进一步分析页岩的荧光强度与成熟度的联系发现前者受控于后者，表现在相对高成熟度的页岩荧光弱，而相对低成熟度的页岩具有较强的荧光(图 10-b)。

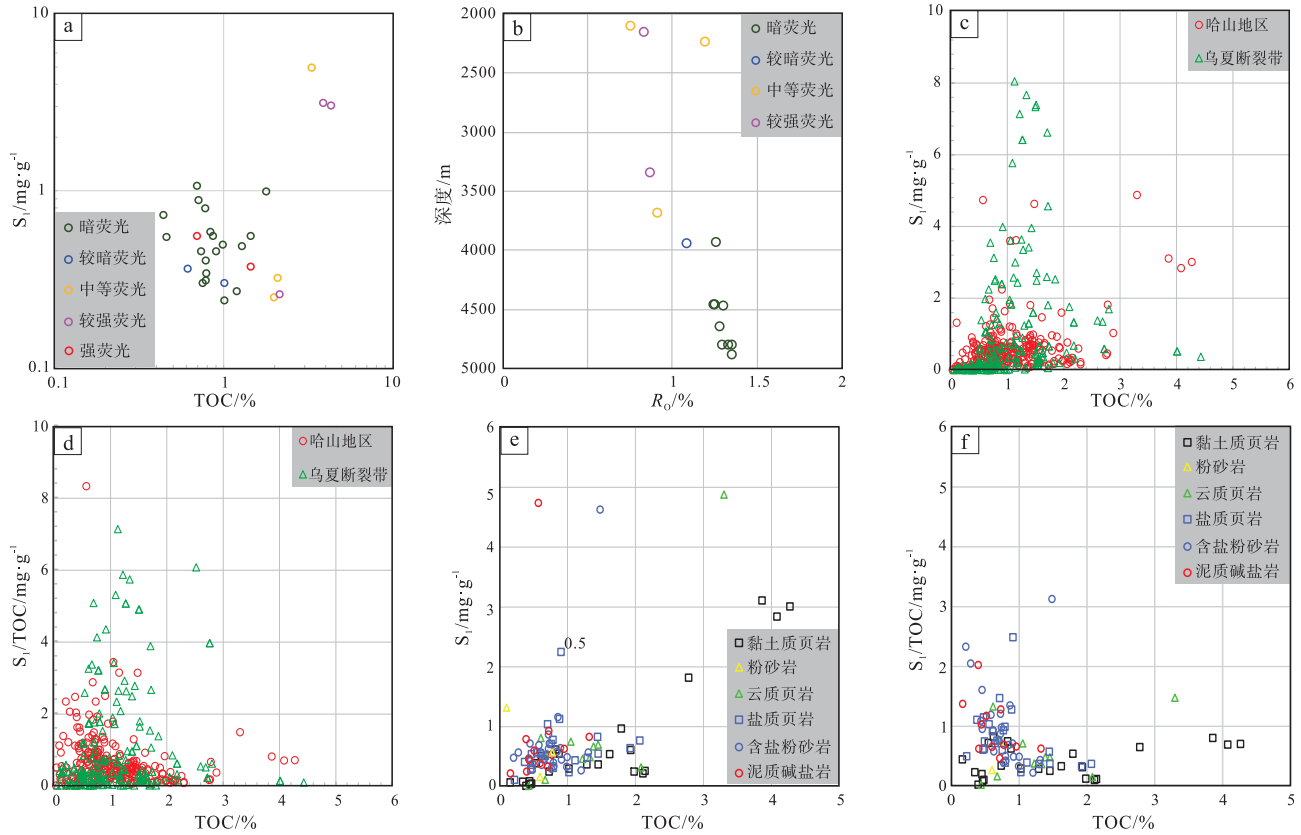
哈山地区风城组页岩与乌夏地区风城组页岩有机质丰度相似，但前者含油性相对较差， $S_1$  和  $S_1/TOC$  均小于后者(图 10-c, 10-d)。进一步对比分析不同岩相页岩的含油性发现，云质页岩、盐质页岩的  $S_1$  和  $S_1/TOC$  较泥质页岩和粉砂质页岩高(图 10-e, 10-f)，表明沉积于高盐碱水体的页岩含油性好于沉积于低盐碱水体的页岩。高盐碱页岩相的含油性相对较好，可能与盐类矿物对油气的生成有催化作用相关(王娟, 2009)，也可能与生存于高碱盐水体环境的生物母质具有更高的转化率有关(Hou *et al.*, 2022)。乌夏地区风城组页岩也存在



a-b—含钙页岩基质发强烈黄色荧光，哈深斜 1 井，井深 3349 m；c-d—含钙页岩含有零星藻质体，哈山 1 井，井深 2099.8 m；e-f—含云页岩基质发强烈黄色荧光，哈山斜 4 井，井深 2171.85 m；g-h—页岩基质发强烈黄色荧光，哈山斜 4 井，井深 2174.23 m；i-j—泥质白云岩含有零星藻质体，哈浅 6 井，井深 2541.6 m；k-l—泥质碱盐岩发绿色荧光，哈山 5 井，井深 5131.84 m

图 9 准噶尔盆地哈山地区风城组不同岩相页岩荧光特征

Fig. 9 Fluorescence characteristics of different shale lithofacies in the Fengcheng Formation of Hashan area, Junggar Basin



a—哈山地区风城组不同有机质丰度和含油性页岩有机质荧光强度；b—哈山地区风城组不同成熟度页岩有机质荧光强度；c—哈山地区与乌夏地区风城组  $S_1$  对比（乌夏地区数据来源于 Guo *et al.*, 2021a）；d—哈山地区与乌夏地区风城组  $S_1/TOC$  对比（乌夏地区数据来源于 Guo *et al.*, 2021a）；e—哈山地区风城组不同页岩岩相  $S_1$  对比；f—哈山地区风城组不同页岩岩相  $S_1/TOC$  对比

图 10 准噶尔盆地哈山地区风城组页岩含油性评价

Fig. 10 Evaluation of oil contents of the Fengcheng Formation shale in Hashan area, Junggar Basin

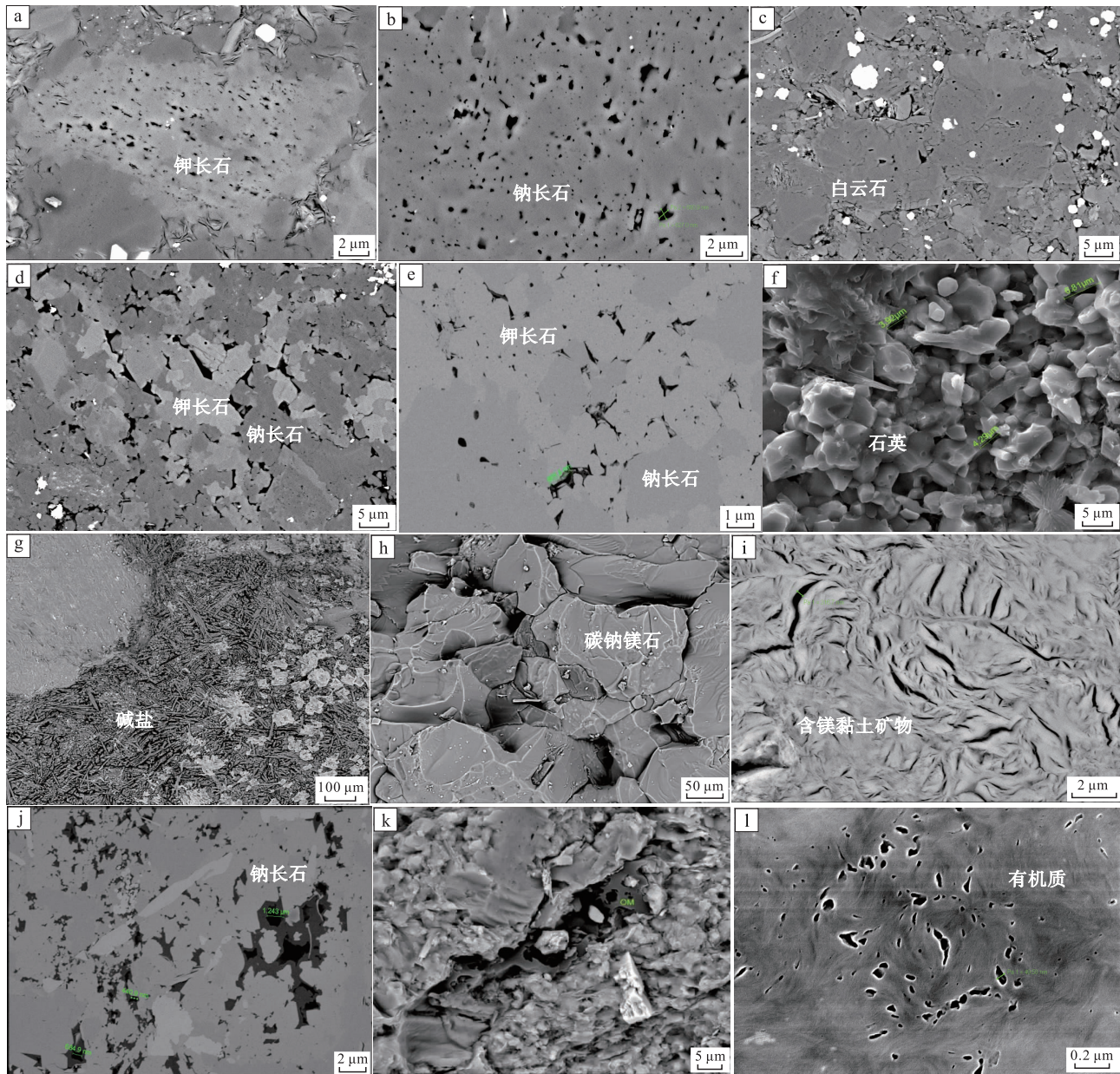
类似的情况，高碱盐水体环境沉积的页岩含油性好于低碱盐水体环境沉积的页岩含油性 (Guo *et al.*, 2021a)。

### 4.3 页岩储集性

哈山地区风城组页岩发育多种类型的储集空间，包括 (1) 颗粒溶孔，主要是碎屑钾长石 (图 11-a)、钠长石 (图 11-b) 和微晶白云石 (图 11-c) 发育较多溶孔，多为大于 50 nm 的宏孔；(2) 晶间孔，包括自生钾长石 (图 11-d)、钠长石 (图 11-e)、石英 (图 11-f)、Na-碳酸盐 (图 11-g)、Na-Ca/Mg-碳酸盐 (图 11-h) 和黏土矿物的晶间孔 (图 11-i)，亦多为大于 50 nm 的宏孔；(3) 有机质孔，包括充填于孔隙中沥青的残余孔 (图 11-j) 和干酪根内部的孔隙 (图 11-k, 11-l)；(4) 裂缝。不同类型页岩岩相发育的主要孔隙不同，其中粉砂岩和泥质粉砂岩以长石溶蚀孔、

碳酸盐矿物溶蚀孔、有机质内孔和黏土矿物晶间孔缝为主；黏土质页岩和钙质页岩以收缩缝、粒缘缝和长石、碳酸盐矿物晶间孔和溶蚀孔，云质页岩以收缩缝、粒缘缝和长石、碳酸盐矿物晶间孔和溶蚀孔为主；盐质页岩和泥质碱盐岩以盐类矿物发育微裂缝，碳酸盐、石英、长石矿物晶间孔、有机质内孔及缝为主。总体上，形成于盐度较低的粉砂岩和黏土质页岩以长石和碳酸盐矿物溶孔、有机质内孔和黏土矿物晶间孔缝为主；形成于盐度较高的云质页岩、盐质页岩和泥质碱盐岩以自生矿物晶间孔和有机质内孔为主。

哈山地区风城组页岩除发育微孔和中孔外，还发育有大量裂缝和伴生的溶孔 (张奎华等, 2023)。裂缝充填多种类型矿物，包括方解石、白云石、碳钠钙石、石英或碳酸氢钠石。早成岩阶段形成的裂缝形状弯曲不规则，宽度变化较大，方向不固定，



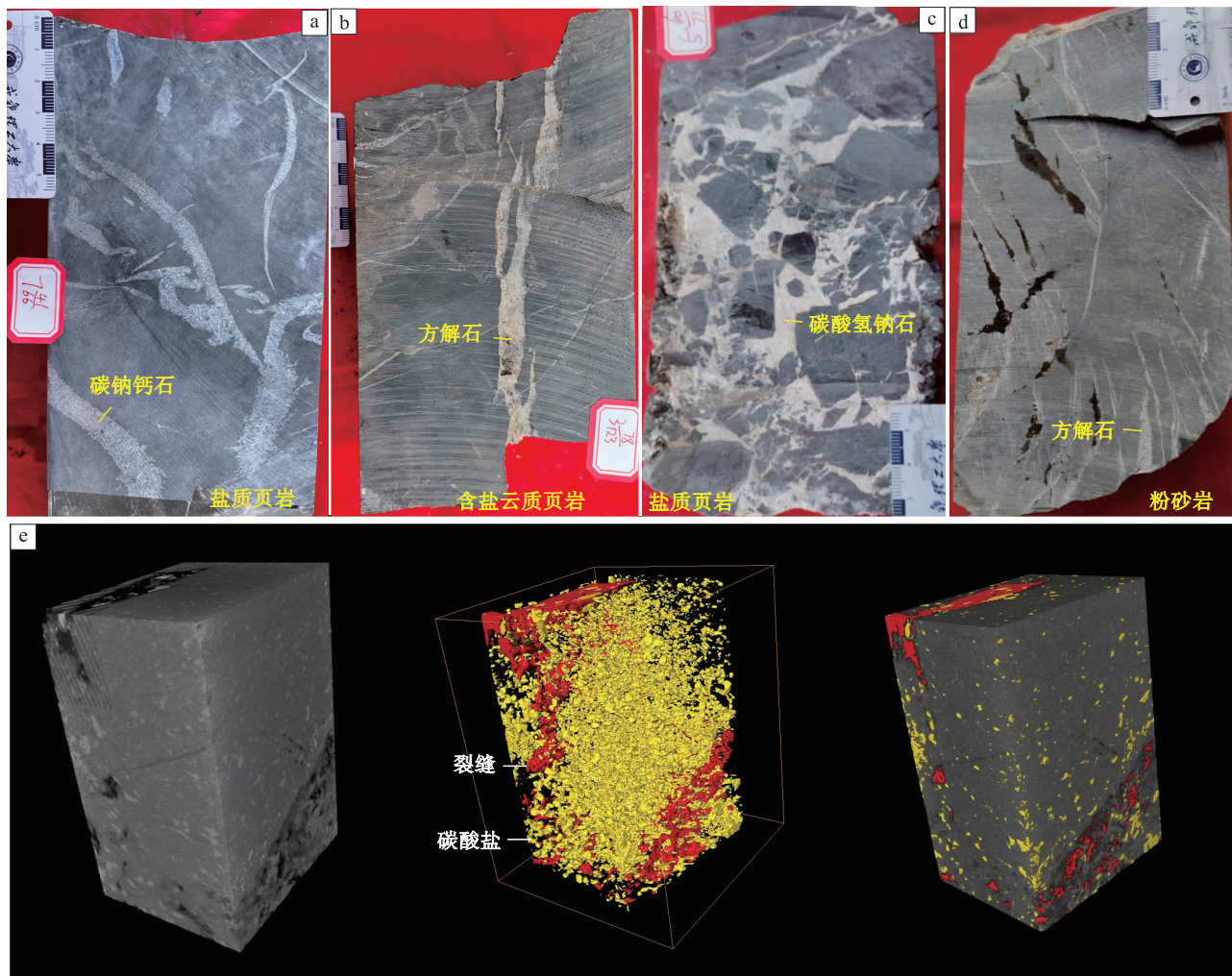
a—粉砂岩，微粒状条纹长石发育溶蚀孔，哈山 1 井，井深 2094.5 m；b—粉砂岩，钠长石溶蚀孔发育，哈浅 6 井，井深 2703.55 m；c—含云粉砂岩，白云石发育少量溶蚀孔、微裂缝，哈山斜 4 井，井深 2174.71 m；d—黏土质页岩，微粒状方解石、钠长石相间分布，发育少量溶蚀孔，哈深斜 1 井，井深 3685.8 m；e—盐质页岩，沥青边缘少量收缩孔隙发育，哈山 5 井，井深 4799.5 m；f—含盐粉砂岩，沥青边缘少量收缩孔隙发育，哈山 5 井，井深 4462.42 m；g—泥质碱盐岩，碳钠钙石与碳钠镁石颗粒间缝隙较发育，哈山 5 井，井深 4649.88 m；h—充填的有机质放大，部分有机质内见残余的孔洞，哈山 5 井，井深 3928.5 m；i—含钙页岩，片状滑石集合体发育晶间孔隙，哈深斜 1 井，井深 3346.2 m；j—泥质粉砂岩，有机质内残余孔洞，哈山 5 井，井深 3928.5 m；k—云质页岩，有机质碎片内孔隙发育良好，哈山 5 井，井深 4642.8 m；l—云质页岩，有机质发育稀疏状孔隙，哈浅 101 井，井深 2241.5 m

图 11 准噶尔盆地哈山地区风城组不同页岩岩相主要孔隙类型

Fig. 11 Main pore types of different shale lithofacies of the Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin

长度不超过 1 m，主要充填碳钠钙石(图 12-a)，后期局部被方解石交代。这种类型的裂缝可能为与地震相关的泄水缝。中晚成岩阶段形成的裂缝一般较为笔直，位于断裂带附近的裂缝多为三角破裂

缝，与后期构造作用有关，在低盐度沉积地层中以充填方解石为主(图 12-b)，在高盐度沉积地层中以充填碳酸氢钠石为主(图 12-c)。其中哈山斜 4 井风城组页岩中裂缝油气显示较好，充填大量稠油



a—碳钠钙石充填的泄水缝, 哈山 5 井, 井深 5134.82 m; b—方解石充填的构造缝, 哈山 5 井, 井深 4464.93 m; c—碳酸氢钠石充填的破裂缝, 哈山 5 井, 井深 4081.75 m; d—泥质粉砂岩构造缝中充填稠油, 哈山斜 4 井, 井深 2173.10 m; e—岩心 CT 扫描, 孔隙的发育程度与基质中碳酸盐矿物分布关系较小, 与裂缝关系较大, 哈浅 6 井, 井深 2698.2 m

图 12 准噶尔盆地哈山地区风城组页岩中的裂缝

Fig. 12 Fractures in the Fengcheng Formation shale of Hashan area, Junggar Basin

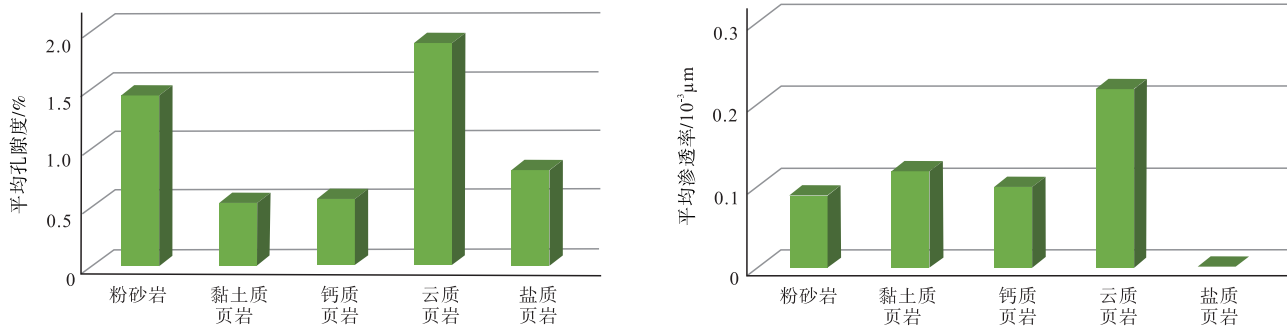
(图 12-d)。通过岩石 CT 扫描技术观察, 页岩的主要宏孔与碳酸盐矿物的分布关系较小, 而与裂缝的发育有关(图 12-e)。

哈山地区风城组不同页岩岩相的孔渗特征有所差别(图 13)。风城组页岩孔隙度主要介于 0.2%~5%之间, 平均孔隙度以黏土质页岩和钙质页岩最低, 云质页岩和粉砂岩最高, 但整体差别不大, 整体小于 2%(图 13-a)。页岩渗透率主要介于  $0.002 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间, 平均渗透率以云质页岩最高, 其余岩相均较低, 其中盐质页岩的渗透率接近于 0(图 13-b)。通过低温液氮吸附实验得知, 哈山地区风城组页岩孔径在 9~27 nm 之间,

中孔以 2~25  $\mu\text{m}$  为主, 不同页岩岩相的孔径不同, 以粉砂岩孔径最高。

## 5 哈山地区页岩“甜点”发育规律

通过上述不同页岩岩相的生烃潜力、含油性和储集性的对比, 发现不同页岩岩相在源岩品质、含油性和储集层品质有所差别(表 2)。综合 3 个方面的条件, 将云质页岩划分为哈山地区风城组的 I 类甜点, 该页岩岩相的有机质丰度较高、含油性好, 且平均孔隙度和渗透率最高, 为自生自储的甜点类型。I 类甜点主要分布在微咸水半深湖环境中, 位



a—平均孔隙度对比；b—平均渗透率对比

图 13 准噶尔盆地哈山地区不同页岩岩相孔渗特征

Fig. 13 Porosity, permeability characteristics of different shale facies in the Fengcheng Formation of Hashan area, Junggar Basin

于碱湖中心和边缘区的过渡地带，风城组各个层段均有发育，以风二段最为发育(图 4)；同时盐碱湖中心成碱预备期亦发育 I 类甜点，如远物源沉积中心的风一段(图 7)。粉砂岩为 II 类甜点，该页岩岩相的有机质丰度虽然较低，但是储集层品质较好，孔隙度较高，可由相邻的富有机质页岩运输油气。II 类甜点主要为分布于沉积中心周缘的滩坝粉砂岩(图 4)和位于沉积中心的重力流粉砂岩，其中滩坝粉砂岩以风三段最为发育(图 7)。其余页岩岩相，如钙质页岩和黏土质页岩，虽然源岩品质较高，但储集层品质较差，可作为较好的烃源岩。盐质页岩的源岩品质最差，储集层品质尤其是渗透率很差，且塑性矿物含量较高，为非甜点页岩岩相。哈山地区风城组页岩的甜点岩相，与乌夏地区风城组页岩具有很大的相似性，如玛页 1 井的页岩油甜点主要分布在风三段粉砂岩和风二段云质页岩中(金之钧等，2022)。

此外，受逆冲构造运动的影响，哈山地区风城组埋藏深度变化较大，逆冲带内的异地沉积风城组普遍埋藏较浅(<3000 m)，准原地沉积风城组埋藏较深(>3000 m)(图 1-b, 1-c)。不同构造部位风城组有机质成熟度不同，影响了页岩油的资源类型。以哈山 5 井为代表的远物源中心沉积，虽然盐湖演化特征与乌夏地区盐碱湖区一致，但哈山 5 井准原地沉积风城组有机质成熟度已达到高成熟阶段( $R_o > 1.2\%$ )，有机质不发荧光(图 10-b)。准原地沉积风城组(含盐)云质和盐质页岩的氯仿沥青“A”高于异地沉积风城组云质页岩、黏土质页岩和粉砂岩，说明碱盐矿物的存在易堵塞孔缝，有利于滞留已生成的烃类物质。哈山 5 井风一段的成碱预备期以沉积(含盐)云质页岩和盐质页岩为主，并夹杂重力作用形成的含盐粉砂岩，云质页岩和粉砂岩为页岩甜点。目前，哈山 5 井在风一段页岩油的试油成功，证实了成碱预备期(含

表 2 准噶尔盆地哈山地区风城组不同页岩岩相特征对比

Table 2 Comparison of different shale lithofacies in the Fengcheng Formation of Hashan area, Junggar Basin

评价内容	源岩品质			含油性			储集层品质			
	TOC /%	S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> / mg·g <sup>-1</sup>	R <sub>0</sub> /%	S <sub>1</sub> / mg·g <sup>-1</sup>	S <sub>1</sub> /TOC / mg·g <sup>-1</sup>	荧光性	储集空间	孔隙度 /%	渗透率 /10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	裂缝
(含盐)粉砂岩	0.10~1.93 0.78	0.03~3.07 1.6 1	1.24~1.35 1.28	0.04~1.32 0.38	8~75 34	较强	粒内溶孔	0.1~6.94 1.46	0~2.58 0.09	裂缝、粒缘缝
黏土质页岩	0.34~4.27 2.14	0.27~41.2 17.63	\	0.08~3.11 1.28	12~82 0.52	暗	粒内溶孔、有机质孔、晶间孔	0.1~11.95 0.54	0~9.84 0.12	裂缝、层理缝、粒缘缝
钙质页岩	0.15~2.11 1.59	0.65~12.4 8.33	\	0.07~0.97 0.37	10~54 30	中等—较强	粒内溶孔	0.1~5.79 0.58	0~0.15 0.10	裂缝、层理缝、粒缘缝
(含盐)云质页岩	0.43~3.30 1.42	0.66~29.3 6.52	\	0.01~9.14 1.55	22~554 110	暗—中等	粒内溶孔、晶间孔	0.1~7.92 1.90	0~32.15 0.22	裂缝、层理缝、粒缘缝
盐质页岩	0.16~2.06 0.75	0.21~6.26 1.86	1.28~1.39 1.31	0.11~4.74 0.74	23~831 109	暗	粒内溶孔、有机质孔	0.1~2.45 0.82	0~0.02 0.002	裂缝、粒缘缝

盐)云质页岩作为甜点的较大潜力。准原地沉积风二段以碱盐岩和盐质页岩为主,甜点岩相发育较少。

与远物源沉积中心不同,近物源沉积中心的准原地沉积和异地沉积风城组岩相组合特征较为相似,具有纵向上相似的演化特征(图7),说明该区异地沉积风城组搬运距离较近。原地沉积和异地沉积风城组有机质成熟度相当( $0.8\% < R_0 < 1.2\%$ ),均处于成熟阶段,以生油为主。页岩有机质丰度普遍高于远物源沉积中心云质和盐质页岩,部分样品有机质发强烈荧光。热解 $S_1$ 较低与岩心放置时间过长,轻烃逸散有关。总体上,风三段微咸水阶段和风二段咸水阶段的云质页岩和泥质粉砂岩有机质丰度高于风一段咸水半深湖环境的盐质页岩,且页岩储集空间以中孔为主,且裂缝发育,为页岩的优势岩相。

## 6 结论

1) 准噶尔盆地西北缘哈山地区哈山5井风城组原始碱盐沉积的钻遇,不仅证实了哈山地区非风城组的原始沉积边界,而且揭示了哈山之下隐藏着风城组的另一碱湖中心和富烃凹陷,其湖泊演化和成碱阶段与南部的乌夏地区碱湖中心具有很好的可比性。

2) 提出了针对风城组独特的盐碱湖性质的四端元对三角形页岩划分方案,划分了含盐和非含盐的8类页岩岩相,该划分方案从风城组“碱盐矿物丰富”、“碱盐与黏土矿物互斥性”以及“方解石—白云石总含量普遍小于35%”的实际出发,既达到了量化的要求,也满足了风城组实际研究的需要。

3) 风城组不同页岩岩相的源岩品质、含油性和储集性差异较大,整体上黏土质页岩和钙质页岩有机质最丰富,云质页岩和盐质页岩含油性最高,粉砂岩和云质页岩储集性能最好,由此将云质页岩划为风城组的I类甜点岩相,粉砂岩划为II类甜点岩相。

4) 哈山地区风城组页岩在源岩品质和储集层品质方面均与乌夏地区风城组具有很好的可比性,说明哈山地区页岩油具有很好的勘探前景。其中碱湖中心成碱预备期的(含盐)云质页岩和重力流沉积的含盐粉砂岩、斜坡过渡区的云质页岩以及围

绕碱湖中心外围的滩坝粉砂岩,是哈山地区页岩油勘探的目标甜点。

## 参考文献 (References)

- 曹剑,雷德文,李玉文,唐勇,阿布力米提,常秋生,王婷婷. 2015. 古老碱湖优质烃源岩:准噶尔盆地下二叠统风城组. 石油学报,36(7): 781-790. [Cao J, Lei D W, Li Y W, Tang Y, Abulimit, Chang Q S, Wang T T. 2015. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(7): 781-790]
- 冯有良,杨智,张洪,张天舒,李攀,侯鸣秋,蒋文琦,王小妮,朱吉昌,李嘉蕊. 2023. 威化湖盆细粒重力流沉积特征及其页岩油勘探意义:以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例. 地质学报,97(3): 839-863. [Feng Y L, Yang Z, Zhang H, Zhang T S, Li P, Hou M Q, Jiang W Q, Wang X N, Zhu J C, Li J R. 2023. Fine-grained gravity flow sedimentary features and their petroleum significance within saline lacustrine basins: a case study of the Fengcheng Formation in Mahu depression, Junggar Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 97(3): 839-863]
- 龚德瑜,刘泽阳,何文军,周川闽,秦志军,卫延召,杨春. 2024. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组有机质多元富集机制. 石油勘探与开发,51(2): 260-272. [Gong D Y, Liu Z Y, He W J, Zhou C M, Qin Z J, Wei Y Z, Yang C. 2024. Multiple enrichment mechanisms of organic matter in the Fengcheng Formation of Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(2): 260-272]
- 郭佩,柏淑英,李长志,雷海艳,徐文礼,张锡婷,文华国. 2023. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩自生长英质矿物的成因机理及其储层改造意义. 地质学报,97(7): 2311-2331. [Guo P, Bai S Y, Li C Z, Lei H Y, Xu W L, Zhang X T, Wen H G. 2023. Formation of authigenic quartz and feldspars in the Fengcheng Formation of the Mahu sag, Junggar Basin, and their reservoir modification significance. *Acta Geologica Sinica*, 97(7): 2311-2331]
- 何海清,唐勇,邹志文,郭华军,徐洋,李亚哲. 2022. 准噶尔盆地中央拗陷西部风城组岩相古地理及油气勘探. 新疆石油地质,43(6): 640-653. [He H Q, Tang Y, Zhou Z W, Guo H J, Xu Y, Li Y Z. 2022. Lithofacies paleogeography and petroleum exploration of Fengcheng Formation in western central depression of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 43(6): 640-653]
- 黄玉越,王贵文,宋连腾,王松,张益鄰,黄立良,赖锦. 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩储集层裂缝测井识别与有效性分析. 古地理学报,24(3): 540-555. [Huang Y Y, Wang G W, Song L T, Wang S, Zhang Y L, Huang L L, Lai J. 2022. Fracture logging identification and effectiveness analysis of shale reservoir of the Permian Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(3): 540-555]
- 姜福杰,胡美玲,胡涛,吕佳豪,黄立良,刘成林,姜振学,黄任达,张晨曦,吴冠昀,吴育平. 2023. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油富集主控因素与模式. 石油勘探与开发,50(4): 706-718.

- [Jiang F J, Hu M L, Hu T, Lü J H, Huang L L, Liu C L, Jiang Z X, Huang R D, Zhang C X, Wu G Y, Wu Y P. 2023. Controlling factors and models of shale oil enrichment in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(4): 706-718]
- 金芸芸, 李楚雄, 王勇, 严永新, 罗曦, 黄帅博, 李志明, 周圆圆, 孙中良, 刘雅慧, 贾梦瑶, 冷筠滢. 2024. 南襄盆地泌阳凹陷古近系核桃园组页岩含油性及烃类赋存特征. *石油实验地质*, 46(2): 354-365. [Jin Y Y, Li C X, Wang Y, Yan Y X, Luo X, Huang S B, Li Z M, Zhou Y Y, Sun Z L, Liu Y H, Jia M Y, Leng J Y. 2024. Oil-bearing potential and hydrocarbon occurrence characteristics of shale in Paleogene Hetaoyuan Formation in Biyang Sag, Nanxiang Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(2): 354-365]
- 金之钧, 梁新平, 王小军, 朱如凯, 张元元, 刘国平, 高嘉洪. 2022. 玛湖凹陷风城组页岩油富集机制与甜点段优选. *新疆石油地质*, 43(6): 631-639. [Jin Z J, Liang X P, Wang X J, Zhu R K, Zhang Y Y, Liu G P, Gao J H. 2022. Shale oil enrichment mechanism and sweet spot selection of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 43(6): 631-639]
- 李长志, 郭佩, 许景红, 钟凯, 文华国. 2024. 碱湖页岩酸碱性差异对页岩成岩演化及储集层的影响. *石油勘探与开发*, 51(1): 88-101. [Li C Z, Guo P, Xu J H, Zhong K, Wen H G. 2024. Influences of different alkaline and acidic diagenetic environments on diagenetic evolution and reservoir quality of alkaline lake shales. *Petroleum Exploration and Development*, 51(1): 88-101]
- 李振明, 熊伟, 王斌, 宋振响, 宋梅远, 孙中良, 于洪洲, 周健, 吴小奇. 2023. 准噶尔盆地哈山地区二叠系风城组细粒沉积特征与演化模式. *石油实验地质*, 45(4): 693-704. [Li Z M, Xiong W, Wang B, Song Z X, Song M Y, Song Z L, Yu H Z, Zhou J, Wu X Q. 2023. Fine-grained sedimentary characteristics and evolution model of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(4): 693-704]
- 李志明, 陶国亮, 黎茂稳, 钱门辉, 谢小敏, 蒋启贵, 刘鹏, 鲍云杰, 夏东领. 2019. 鄂尔多斯盆地西南部彬长区块三叠系延长组7段3亚段页岩油勘探前景探讨. *石油与天然气地质*, 40(3): 558-570. [Li Z M, Tao G L, Li M W, Qian M H, Xie X M, Jiang Q G, Liu P, Bao Y J, Xia D L. 2019. Discussion on prospecting potential of shale oil in the 3<sup>rd</sup> sub-member of the Triassic Chang 7 member in Binchang block, southwestern Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(3): 558-570]
- 倪敏婕, 祝贺暄, 何文军, 杨森, 邹阳, 张元元. 2023. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组沉积环境与沉积模式分析. *现代地质*, 37(5): 1194-1207. [Ni M J, Zhu H X, He W J, Yang S, Zhou Y, Zhang Y Y. 2023. Depositional environment and sedimentary model of the Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Geoscience*, 37(5): 1194-1207]
- 钱门辉, 王绪龙, 黎茂稳, 李志明, 冷筠莹, 孙中良. 2022. 玛页1井风城组页岩含油性及烃类赋存状态. *新疆石油地质*, 43(6): 693-703. [Qian M H, Wang X L, Li M W, Li Z M, Leng J Y, Sun Z L. 2022. Oil-bearing properties and hydrocarbon occurrence states of Fengcheng Formation shale in Well Maye-1, Mahu sag. *Xinjiang Petroleum Geology*, 43(6): 693-703]
- 唐勇, 侯章帅, 王霞田, 王韬, 吴琼, 申博恒, 王文倩, 张华, 曹剑, 张水昌, 张斌, 王向东, 沈树忠. 2022a. 准噶尔盆地石炭纪—二叠纪地层对比框架新进展. *地质论评*, 68(2): 385-407. [Tang Y, Hou Z S, Wang X T, Wang T, Wu Q, Shen B H, Wang W Q, Zhang H, Cao J, Zhang S C, Zhang B, Wang X D, Shen S Z. 2022a. Progress of the Carboniferous and Permian stratigraphic framework and correlation of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwest China. *Geological Review*, 68(2): 385-407]
- 唐勇, 郑孟林, 王霞田, 王韬, 谢再波, 秦臻, 黑晨露, 成虎, 高远, 陶辉飞. 2022b. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组烃源岩沉积古环境. *天然气地球科学*, 33(5): 677-692. [Tang Y, Zheng M L, Wang X T, Wang T, Xie Z B, Qin Z, Hei C L, Cheng L, Gao Y, Tao H F. 2022b. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(5): 677-692]
- 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 费李莹, 单祥, 赵毅, 郑孟林, 曹剑, 秦志军, 杨森, 王然, 朱涛, 高岗. 2023. 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. *石油学报*, 44(1): 125-143. [Tang Y, He W J, Jiang Y Y, Fei L Y, Shan X, Zhao Y, Zheng M L, Cao J, Qin Z J, Yang S, Wang R, Zhu T, Gao G. 2023. Enrichment conditions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 125-143]
- 唐勇, 白雨, 高岗, 何文军, 尤新才, 党文龙, 张磊, 焦小冰, 李梦瑶, 晏奇, 余兴. 2024. 玛湖凹陷风云1井陆相深层页岩气勘探突破及其油气地质意义. *中国石油勘探*, 29(1): 106-118. [Tang Y, Bai Y, Gao G, He W J, You X C, Dang W L, Zhang L, Jiao X B, Li M Y, Yan Q, Yu X. 2024. Exploration breakthrough and geological significance of continental deep shale gas in Well Fengyun 1 in Mahu Sag. *China Petroleum Exploration*, 29(1): 106-118]
- 王娟. 2009. 咸化环境盐类物质与有机质相互作用研究. 中国石油大学(华东)博士学位论文. [Wang J. 2009. A study on interaction of source rock and oil with evaporites in saline-lake facies. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (East China)]
- 王圣柱, 张奎华, 金强. 2014. 准噶尔盆地哈拉阿拉特山地区原油成因类型及风城组烃源岩的发现意义. *天然气地球科学*, 25(4): 595-602. [Wang S Z, Zhang K H, Jin Q. 2014. The genetic types of crude oils and the petroleum geological significance of the Fengcheng Formation source rock in Hashan area, Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(4): 595-602]
- 王圣柱, 吴倩倩, 程世伟, 薛雁, 陈平. 2017. 准噶尔盆地北缘哈山构造带油气输导系统与运聚规律. *沉积学报*, 35(2): 405-412. [Wang S Z, Wu Q Q, Cheng S W, Xue W, Chen P. 2017. Hydrocarbon transmission system and accumulation in Hala'alat Mountain structural belt in the northern margin of Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 405-412]
- 夏刘文, 曹剑, 边立曾, 胡文瑄, 王婷婷, 支东明, 唐勇, 李二庭. 2022. 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. *中国科学: 地球科学*, 52(4): 732-746. [Xia L W, Cao

- J, Bian L Z, Hu W X, Wang T T, Zhi D M, Tang Y, Li E T. 2022. Co-evolution of paleo-environment and bio-precursors in a Permian alkaline lake, Mahu mega-oil province, Junggar Basin: implications for oil sources. *Scientia Sinica(Terrae)*, 52(4): 732-746]
- 薛雁, 张奎华, 王艺豪, 王圣柱, 程世伟, 宋梅远. 2015. 哈拉阿拉特山地区构造演化及其石油地质意义. *新疆石油地质*, 36(6): 687-692. [Xue Y, Zhang K H, Wang Y H, Wang S Z, Cheng S W, Song M Y. 2015. Tectonic Evolution of Hala'alate Mountain Area and Implications in Petroleum Geology. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(6): 687-692]
- 薛雁, 林会喜, 张奎华, 聂文龙. 2017. 哈拉阿拉特山地区构造特征及成因机制模拟. *大地构造与成矿学*, 41(5): 843-852. [Xue Y, Lin H X, Zhang K H, Nie W L. 2017. Tectonic characteristics and genetic simulation of Hala'alate Mountain area. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(5): 843-852]
- 杨帆, 孟鑫, 王先虎, 余佩蓉, 邵广辉, 陈火红. 2022. 玛页1井风城组页岩微观孔隙特征及其影响因素. *新疆石油地质*, 43(1): 1-10. [Yang F, Meng X, Wang X H, Yu P R, Shao G H, Chen H H. 2022. Micro-pore characteristics and influencing factors of Fengcheng Formation shale in Well Maye-1. *Xinjiang Petroleum Geology*, 43(1): 1-10]
- 于洪洲, 王越, 周健, 薛雁. 2022. 准噶尔盆地西北缘哈山地区二叠系风城组沉积体系. *新疆石油地质*, 43(4): 396-403. [Yu H Z, Wang Y, Zhou J, Xue Y. 2022. Sedimentary system of Permian Fengcheng Formation in Hashan area in northwestern margin of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 43(4): 396-403]
- 曾治平, 柳忠泉, 赵乐强, 李艳丽, 王超, 高平. 2023. 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. *岩性油气藏*, 35(1): 25-35. [Zeng Z P, Liu Z Q, Zhao L Q, Li Y L, Wang C, Gao P. 2023. Shale oil reservoir characteristics and controlling factors of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, northwestern margin of Junggar Basin. *Lithologic Reservoirs*, 35(1): 25-35]
- 张奎华, 孙中良, 张关龙, 宋振响, 于洪洲, 周健, 曹婷婷, 宋梅远, 王斌, 李志明. 2023. 准噶尔盆地哈山地区下二叠统风城组泥页岩优势岩相与页岩油富集模式. *石油实验地质*, 45(4): 593-605. [Zhang K H, Sun Z L, Zhang G L, Song Z X, Yu H Z, Zhou J, Cao T T, Song M Y, Wang B, Li Z M. 2023. Shale dominant lithofacies and shale oil enrichment model of Lower Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(4): 593-605]
- 张善文. 2013. 准噶尔盆地哈拉阿拉特山地区风城组烃源岩的发现及石油地质意义. *石油与天然气地质*, 34(2): 145-152. [Zhang S W. 2013. Identification and its petroleum geologic significance of the Fengcheng Formation source rocks in Hala'alt area, the northern margin of Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 34(2): 145-152]
- 张元元, 曾宇轲, 唐文斌. 2021. 准噶尔盆地西北缘二叠纪原型盆地分析. *石油科学通报*, 6(3): 333-343. [Zhang Y Y, Zeng Y K, Tang W B. 2021. Permian attributes and tectonic evolution of the west Junggar Basin. *Petroleum Science Bulletin*, 6(3): 333-343]
- 张志杰, 周川闽, 袁选俊, 曹正林, 陈星渝, 万力, 成大伟. 2023. 准噶尔盆地二叠系源-汇系统与古地理重建. *地质学报*, 97(9): 3006-3023. [Zhang Z J, Zhou C M, Yuan X J, Cao Z L, Chen X Y, Wan L, Cheng D W. 2023. Source-to-sink system and palaeogeographic reconstruction of Permian in the Junggar Basin, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3006-3023]
- 周健, 林承焰, 刘惠民, 张奎华, 张关龙, 王千军, 于洪洲, 倪胜利, 牛花朋, 焦小芹, 刘姗. 2024. 准噶尔盆地哈山地区石炭系一二叠系火山岩储层发育机制研究. *地学前缘*, 31(2): 327-342. [Zhou J, Lin C Y, Liu H M, Zhang K H, Zhang G L, Wang Q J, Yu H Z, Ni S L, Niu H P, Jiao X Q, Liu S. 2024. Mechanism of reservoir development in the Carboniferous-Permian volcanic rock reservoirs in Hala'alate Mountain area, Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 31(2): 327-342]
- Guo P, Wen H G, Gibert L, Jin J, Jiang Y Q, Wang G Z. 2021a. Controlling factors of high-quality hydrocarbon source rocks developed in lacustrine shallow-water zone of the Junggar Basin, northwestern China. *AAPG Bulletin*, 10: 2063-2092.
- Guo P, Wen H, Li C, Jin J, Lei H. 2021b. Origin and enrichment of borates in a Late Paleozoic alkaline lake-playa deposit, Junggar Basin, NW China. *Ore Geology Reviews*, 138: 104389.
- Hou M G, Qu J X, Zha M, Swennen R, Ding X J, Imin A, Liu H L, Bian B L. 2022. Significant contribution of haloalkaliphilic cyanobacteria to organic matter in an ancient alkaline lacustrine source rock: a case study from the Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 138: 105546.
- Jarvie D M. 2014. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems. *Geologica Acta*, 12(4): 307-325.
- Li C Z, Guo P, Zhong K, Xu J H, Wen H G. 2023. Formation and diagenesis of authigenic silicates in the Late Paleozoic alkaline lake deposits, Junggar Basin, NW China. *Global and Planetary Change*, 458: 106531.
- Wang T T, Cao J, Xia L W, Zhi D M, Tang Y, He W J. 2021. Revised age of the Fengcheng Formation, Junggar Basin, China: global implications for the late Paleozoic ice age. *Global and Planetary Change*, 208: 103725.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 李攀)