

# 中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征

朱筱敏, 王晓琳, 张美洲, 林兴悦, 张 琴

[中国石油大学(北京), 北京 102249]

**摘要:** 细粒沉积环境和岩相时空分布规律是控制页岩油富集高产的主要因素。在前人细粒沉积环境和岩相研究的基础上, 分析研究了松辽、渤海湾、鄂尔多斯和准噶尔等中国典型陆相盆地的细粒沉积环境及主要特征。研究认为: ①淡水-微咸水湖盆发育粉砂质纹层、黏土质纹层、有机质纹层的黏土岩、粉砂岩以及二者之间过渡岩性, 咸水湖和盐湖多发育具方解石(白云石)纹层及黏土级灰泥纹层的细粒碳酸盐岩和细粒混积岩。②陆相湖盆不同演化阶段发育不同细粒岩相组合。裂陷期细粒沉积岩以富碳酸盐矿物的岩相组合发育为特征, 拗陷期形成的富有机质页岩层系则以长英质+黏土质沉积岩相组合为主。③湖盆泥页岩沉积机制主要为悬浮沉降、风成输入、浊流、异重流和泥质碎屑流。④中国陆相页岩油类型多样且资源丰富, 松辽、鄂尔多斯、准噶尔、渤海湾等中生代-新生代陆相盆地是中国页岩油勘探开发的重要领域。⑤未来细粒沉积环境和岩相研究重点发展方向: 开展天文旋回研究, 建立系统有效的沉积古环境判识参数及标准; 建立陆相湖盆页岩型、夹层型和混合型细粒沉积岩岩相分类和沉积模式, 有效地预测细粒沉积岩岩相时空分布; 开展细粒沉积成因过程物理和数值模拟, 研究细粒沉积物物理、化学和生物沉积耦合过程和形成发育机理; 关注数据集成与深度挖掘、人工智能大数据与计算机辅助技术, 研究细粒沉积物分布规律。

**关键词:** 沉积模式; 岩相特征; 沉积环境; 细粒沉积; 页岩油; 中国陆相湖盆

**中图分类号:** TE121.3

**文献标识码:** A

## Sedimentary environments and lithofacies characteristics of fine-grained sediments in typical continental basins in China

ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, ZHANG Meizhou, LIN Xingyue, ZHANG Qin

[China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

**Abstract:** The sedimentary environments of fine-grained sediments and the spatio-temporal distribution patterns of the fine-grained lithofacies are identified as primary factors governing the enrichment and high yield of shale oil. Starting from previous relevant studies, we investigate the sedimentary environments and primary characteristics of fine-grained sediments in typical continental basins in China, including the Songliao, Bohai Bay, Ordos, and Junggar basins. The findings suggest that: (1) Fresh-to-brackish-water lacustrine basins typically contain claystones, siltstones, and transitional lithologies between them, showing the presence of silty, clayey, and organic laminae. In contrast, the lagoon and saline lakes mostly develop fine-grained carbonate rocks and mixed fine-grained sedimentary rocks, characterized by calcite (dolomite) laminae and the laminae of clayey marls. (2) Different evolutionary stages of continental basins developed the occurrence of varying assemblages of fine-grained lithofacies. Fine-grained sedimentary rocks formed during rifting are characterized by lithofacies assemblages rich in carbonate minerals, while organic-rich shale layers formed during depression are dominated by the assemblage of feldspathic and clayey sedimentary rocks. (3) Primary mechanisms for shale deposition in lacustrine basins include suspension settling, aeolian input, turbidity flows, hyperpycnal plumes, and muddy debris flows. (4) Continental shale oil in China exhibits diverse types. It boasts abundant resources in the Mesozoic-Cenozoic continental basins such as Songliao, Ordos, Junggar, and Bohai Bay basins serving as important targets for shale oil exploration and exploitation. (5) Future research on the sedimentary settings and lithofacies of fine-grained sediments should be focused on astronomical cycles to establish systematic and

收稿日期: 2024-05-30; 修回日期: 2024-07-10。

第一作者简介: 朱筱敏(1960—), 男, 教授、博士生导师, 沉积地质学和层序地层学。E-mail: xmzhu@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272133)。

effective parameters and criteria for identifying paleosedimentary environments. Furthermore, it is essential to develop classification schemes and sedimentary models for the fine-grained sedimentary lithofacies of shale, interbedded, and mixed types in continental basins to effectively predict the spatio-temporal distributions of these lithofacies. Physical and numerical simulations of the sedimentary origin and processes of fine-grained sediments are recommended to examine the sediments' coupled physical, chemical, and biological depositional processes, as well as its formation and development mechanisms. Additionally, it is necessary to pay attention to data integration, in-depth data mining, artificial intelligence (AI), big data, and computer aided technology to investigate the distribution patterns of fine-grained sediments.

**Key words:** sedimentary pattern, lithofacies characteristics, sedimentary environments, fine-grained sediment, shale oil, continental lacustrine basin in China

引用格式:朱筱敏,王晓琳,张美洲,等. 中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 873–892. DOI: 10. 11743/ogg20240401.

ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, ZHANG Meizhou, et al. Sedimentary environments and lithofacies characteristics of fine-grained sediments in typical continental basins in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 873–892. DOI: 10. 11743/ogg20240401.

细粒沉积物(岩)研究历史较长。早在18世纪中叶, Hoosen就提出了泥岩的概念, 后来Farey进一步定义了泥页岩。实际上, 细粒沉积物(fine-grained sediments)最早由Krumbein提出, 是指粒径小于0.062 5 mm且颗粒含量大于50%的碎屑沉积岩, 主要由黏土(粒径<0.003 9 mm)和粉砂(粒径在0.003 9~0.062 5 mm)等细粒物质组成, 可包含有机质、内生碳酸盐矿物、生物硅质和磷酸盐等多种组分<sup>[1-2]</sup>。

细粒沉积学是研究细粒沉积物(岩)的物质成分、结构构造、分类和成因、沉积过程与分布模式的基础学科<sup>[3]</sup>。研究重点包括细粒沉积层序地层分析、沉积环境、岩相及其组合方式、沉积构造与沉积动力学条件、有机质富集因素、沉积机制和沉积模式、细粒沉积水槽实验等, 其中细粒沉积环境和岩相是研究的基础。

细粒沉积物(岩)形成机理复杂且沉积环境多变, 在矿物组成、沉积构造、混积样式与垂向序列等方面具有多样性。细粒沉积物的沉积水体常存在多种复杂的流体类型, 如底流、泥流、碎屑流和浊流等, 不同类型流体可以对碎屑物质等进行搬运、改造、剥蚀或再搬运, 来自陆源的碎屑物质与水体或其他来源的物质组分经不同水动力作用, 在沉积盆地不同位置沉积形成细粒沉积物岩相组合或层系。古地理格局、古气候条件、水体性质(水体盐度、滞留程度、水体分层、氧化还原条件等)、事件性地质作用以及生物作用等沉积环境要素是影响细粒沉积的重要因素, 沉积机理是其研究的难点。

国外细粒沉积学的研究, 主要集中在海相层系, 在盆地构造背景、层序地层、岩石学特征、沉积环境与沉积动力、古生物特征与有机质富集机理、细粒沉积成因模式、成岩作用与孔隙演化、实验细粒沉积学和地球物理

学等方面取得了系列进展。对于陆相细粒沉积研究, 根据含盐度常将陆相湖盆类型划分为淡水湖盆、半咸水湖盆和干盐湖盆等<sup>[1]</sup>, 指出湖平面变化、构造作用、物源和盆地底形影响了湖盆细粒沉积类型和分布。陆相泥页岩层序地层与时空分布、富有机质泥页岩沉积环境、岩性/岩相/微相分类体系、泥页岩沉积过程和沉积动力学(多种过程相互作用)、有机絮凝作用、泥质超重流体、混积作用过程、火山活动和热液事件与有机质富集、泥页岩实验沉积学和研究方法体系以及细粒沉积主控因素等内容成为当今细粒沉积研究热点<sup>[3-4]</sup>。近10多年来, 中国不仅关注四川盆地及其周缘海相页岩气勘探, 还在鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段(长7段)、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组和玛湖凹陷二叠系风城组、渤海湾盆地古近系孔店组和沙河街组、松辽盆地白垩系青山口组一段(青一段)等陆相细粒沉积层系获得了重要油气勘探突破。

在对新疆吉木萨尔、大庆古龙、胜利济阳等国家级陆相页岩油示范区研究的基础上, 认为中国陆相湖盆沉积类型多样, 不同构造演化阶段具有不同岩相组合特征。陆相盆地拗陷期淡水-微咸水湖泊页岩层系以贫碳酸盐矿物的黏土质-长英质页岩岩相组合为主; 裂陷期咸化或碱化湖泊沉积以碳酸盐质页岩岩相组合和含碳酸盐的黏土质-长英质页岩岩相组合为主, 各种陆相细粒沉积体系均以相带变化快、岩性-岩相复杂、储-盖组合样式多变为特征<sup>[5-7]</sup>。显然, 确定不同沉积环境有机质形成和保存机理、岩相或沉积构造成因类型及沉积动力条件、沉积模式是阐明上述特点的关键科学问题。

陆相盆地页岩油气勘探开发实践表明, 脆性矿物含量和总有机碳含量(TOC)较高、储集性能较好、裂缝

相对发育的岩相(组合)是页岩油气勘探开发的“甜点”。因此,要基于古环境重建,开展中国页岩油资源最为丰富的鄂尔多斯、松辽、渤海湾和准噶尔等不同陆相沉积盆地、不同沉积环境和岩相组合及其时-空分布研究,为高效勘探开发陆相页岩油资源提供重要科学依据。

## 1 中国典型陆相湖盆细粒沉积环境特征

中国中-新生代发育陆相湖盆沉积体系。东部松辽盆地和渤海湾盆地的陆相富有机质页岩分别分布于白垩系和古近系,中部鄂尔多斯盆地和四川盆地的陆相富有机质页岩分别分布于三叠系和侏罗系,西部准噶尔盆地、三塘湖盆地和柴达木盆地的陆相富有机质页岩分别分布于二叠系、侏罗系和古近系<sup>[8]</sup>。

陆相盆地细粒沉积岩具有岩相类型复杂、时空变

化大和沉积机制多样的特点,湖盆沉积易受物源、沉积环境和水动力条件等因素控制,水体含盐度、有机质丰度和品质差异较大<sup>[6,9]</sup>。陆相湖盆古环境(古水深、古盐度、古生产力、古氧化-还原条件等)对细粒沉积与有机质富集和油气分布具有控制性作用。比如,较高盐度湖泊的生产力普遍高于淡水湖泊;盐度的变化会影响有机质的保存,湖水适度咸化有利于水底有机质保存<sup>[10]</sup>。

陆相湖盆细粒沉积古环境研究方法多样,常用的方法包括:岩石类型及颜色、特殊岩石矿物、地球化学指标、自生矿物组合、古生物化石、同位素(碳、氧同位素)和古地磁等(表1)<sup>[11]</sup>。

古气候演化对母岩风化、沉积物搬运和改造、地表径流、生物类型和繁殖程度以及保存均有重要影响<sup>[12]</sup>。古气候的变迁控制了沉积时期岩石的矿物组成和化学成分,所以可利用岩石化学成分的差异特征表征古气候变化。化学蚀变指数 *CIA* (chemical index

表1 陆相盆地细粒沉积古环境恢复方法和环境特征

Table 1 Reconstruction methods and characteristics of paleosedimentary environments of fine-grained sediments in Chinese continental basins

| 岩相组合<br>类型 | 典型<br>实例        | 研究方法和环境特征                                                         |                                               |                                        |                                                                   |                                        | 文献来源                                                   |
|------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|            |                 | 古气候                                                               | 古盐度                                           | 氧化-还原条件                                | 古水深                                                               | 古生产力                                   |                                                        |
| 夹层型        | 鄂尔多斯盆地长7段       | 孢粉化石、 <i>CIA</i> 、 <i>C</i> 值,润湿、多雨气候                             | Sr/Ba、Rb/K <sub>2</sub> O、鱼类化石,微咸水-淡水湖盆       | V/Cr、Mo <sub>EF</sub> ,缺氧环境            | Sr/Cu、Rb/Sr、CaO/MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,温暖湿润的温带-亚热带气候 | Al、Ti/Al、P/Ti,古生产力较高,火山活动频发            | 刘翰林等, 2023 <sup>[18]</sup>                             |
|            |                 | Sr/Cu、Rb/Sr、CaO/MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,温暖湿润的温带-亚热带气候 | Sr/Ba、B含量、Rb/K <sub>2</sub> O、Th/U,陆相微咸水-淡水环境 | V/(V+Ni)、Th/U,强还原条件                    | 沉积构造、介形虫化石,半深水                                                    | —                                      | 付金华等, 2018 <sup>[37]</sup>                             |
| 混积型        | 渤海湾盆地沙河街组       | Sr/Mg、Mg/Ca、Sr/Ca、Ba/Sr、孢粉,干燥-半干燥-半潮湿                             | Couch公式,主要为咸水,少部分半咸水和盐水环境                     | Pr/Ph、Th/U,强还原-还原环境                    | Fe/Co,水深10~60 m,半水深-水深                                            | —                                      | 杨万芹等, 2015 <sup>[40]</sup>                             |
|            |                 | <i>C</i> 值、孢粉,整体由干旱向潮湿转化                                          | Sr/Ba、B/Ga,自下而上为盐水、咸化和半咸水环境                   | Ce异常、Ce/La、Ni/Co、Pr/Ph,缺氧还原环境          | Th/U、Rb/K、Zr/Al,自下而上为浅湖、半深湖和深湖环境                                  | 生源元素埋藏通量MAR值( <i>P<sub>bio</sub></i> ) | 刘惠民等, 2018 <sup>[41]</sup> ; 段玮等, 2022 <sup>[42]</sup> |
|            | 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组 | <i>C</i> 值、Sr/Cu,半干旱-半湿润                                          | Sr/Ba、Sr/Cu、K/Na,半咸水环境                        | V/Cr、Cu/Zn、V/(V+Ni)、Ce异常,还原性较强,贫氧的还原环境 | —                                                                 | P/Ti,中-高古生产力                           | 林晓慧等, 2019 <sup>[20]</sup>                             |
|            |                 | <i>CIA</i> ,半干旱-半湿润                                               | Sr/Ba、B/Ga,中等-强分层、底部高盐度                       | V/Cr、V/(V+Ni),贫氧-厌氧环境                  | —                                                                 | Cu/Al、Ni/Al,古生产力较高                     | 张逊等, 2018 <sup>[43]</sup>                              |
| 纯页岩型       | 松辽盆地青山口组        | <i>CIA</i> 、 <i>C</i> 值,温暖湿润气候                                    | Sr/Ba、B/Ga,淡水-微咸水环境                           | V/(V+Ni),还原环境                          | Co、La含量,半深湖-深湖沉积                                                  | P/Ti,青一段比青二段具有更高的古生产力                  | 何文渊等, 2022 <sup>[32]</sup>                             |
|            |                 | —                                                                 | Sr/Ba、B/Ga,大部分为微咸水-半咸水环境                      | Mo含量、Th/U、Rb/K,贫氧-氧化环境                 | —                                                                 | —                                      | 王岚等, 2019 <sup>[27]</sup>                              |

注:“—”表示无数据。



of alteration)和古气候指数  $C$  值是恢复古气候的有效指标<sup>[13]</sup>。一般情况下,  $CIA$  值与古气候温湿程度呈正比,  $CIA$  值介于 60 ~ 65, 65 ~ 85 和大于 85 分别指示低风化条件的干旱寒冷气候、中等风化条件的暖湿气候和强风化条件的湿热气候。古气候指数  $C$  值越大, 表明气候越温暖湿润<sup>[14-15]</sup>。松辽盆地古龙凹陷青山口组细粒沉积岩样品的  $CIA$  值分布在 63 ~ 74, 平均 70,  $C$  值介于 0.10 ~ 0.40, 平均 0.30, 均指示为中等化学风化条件的暖湿型气候<sup>[16]</sup>。孢粉组合特征是表征古气候最直接的证据。鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段细粒沉积岩发育分布于温带-亚热带潮湿气候的孢子化石类型, 其中以 *Asseretospora-Wal-chiites* 为代表的裸子植物花粉占大多数, 反映暖湿气候特点<sup>[17-18]</sup>。干热型元素  $Sr$  和温湿型元素  $Cu$  的含量比值 ( $Sr/Cu$ ) 也是反映古气候演化的重要指标,  $Sr/Cu$  比值在 1.5 ~ 5.0 为温湿气候, 大于 5.0 表明以干热气候为主<sup>[19]</sup>。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组样品  $Sr/Cu$  平均值为 7.81, 反映主体为半干旱-半湿润的古气候特征<sup>[20-21]</sup>。

盐度变化控制了沉积环境的演化和有机质的保存, 其与地质历史时期湖平面升降和沉积旋回密切相关。研究表明, 高盐度的湖盆生产力普遍高于淡水湖泊, 且生烃量更高<sup>[22-23]</sup>。通常可以利用无机元素及有机地球化学方法有效恢复湖盆古盐度, 元素含量比值  $Sr/Ba$  和  $B/Ga$  及伽马蜡烷指数等地球化学指标常被用做表征古盐度<sup>[24-25]</sup>。松辽盆地白垩纪和鄂尔多斯盆地三叠纪主要发育淡水沉积环境, 局部为咸水环境; 准噶尔盆地二叠纪和东部渤海湾盆地古近纪主要发育咸水湖泊沉积环境, 比如济阳坳陷渤南洼陷沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)岩心样品  $Sr/Ba$  平均值为 2.76, 表明当时湖泊水体盐度较高, 为咸水环境。另外, 在岩心和薄片观察中可见石膏假晶、黄铁矿、古鲕鱼化石等咸化湖盆还原标志<sup>[6,26]</sup>。鄂尔多斯盆地长 7 段页岩  $Sr/Ba$  比值大多数低于 0.5 (部分样品可达 0.7 以上),  $B$  元素含量也比较低, 指示该时期为淡水-微咸水沉积环境<sup>[18]</sup>。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组  $Sr/Ba$  比值大多小于 1, 平均值为 0.79, 伽马蜡烷指数在 0.03 ~ 0.19, 总体属于半咸水环境<sup>[26]</sup>。松辽盆地青山口组样品  $Sr/Ba$  均值为 0.90,  $B/Ga$  值分布在 0.60 ~ 4.30, 均指示为淡水、微咸水到半咸水环境<sup>[27-28]</sup>。

厌氧环境可减缓有机质降解速率, 有助于有机质保存, 显然强还原条件是富有机质页岩保存的必要条件。常用元素含量比值  $V/Ni$ ,  $V/(V+Ni)$ ,  $Ni/Co$ ,  $Th/U$  和  $V/Cr$ ,  $U-Mo$  元素协变模式图以及生物标志化合物的伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷含量比值)等来反映氧化-还原

条件<sup>[29-30]</sup>。松辽盆地青山口组页岩、鄂尔多斯盆地长 7 段页岩、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组页岩和渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组页岩整体形成于偏还原环境<sup>[17-18,31]</sup>。例如, 济阳坳陷渤南洼陷沙三下亚段样品  $V/(V+Ni)$  平均值为 0.73, 反映水体分层中等-强烈, 为厌氧-还原环境; 微量元素和生物标志化合物(姥鲛烷和植烷含量比值  $Pr/Ph$ ) 综合表明准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组整体处于弱还原-还原环境,  $V/(V+Ni)$  均值约为 0.77,  $V/Ni$  值为 3.20,  $Pr/Ph$  值在 0.64 ~ 1.00<sup>[31]</sup>; 松辽盆地青山口组样品的  $V/(V+Ni)$  值主要分布在 0.60 ~ 0.90, 表明其形成于还原环境<sup>[32]</sup>。

常用沉积学、古生物标志、地球物理和地球化学等资料来定性或定量判断盆地相对古水深<sup>[1,33]</sup>。沉积学方法主要利用沉积构造来表征古水深, 如干裂、雨痕和其他层面构造指示沉积水体很浅, 而槽模、沟模及复理石构造等指示深水环境; 古生物标志法主要依据底栖生物有孔虫数量变化和遗迹化石的种属判断水深; 地球物理法主要利用自然伽马能谱曲线获得垂向连续的钍、铀数据, 结合沉积背景和氧化还原评价来定量恢复古水深; 地球化学法通常运用元素地球化学指标和碳、氧同位素判断海(湖)平面升降变化, 元素的聚集和分散与水深(离岸距离)有一定的相关性, 从滨岸带到深水盆地, 沉积物中富集元素由  $Fe$  族元素( $Fe, Cr, V, Ge$ )最终过渡到  $Mn$  族元素( $Mn, Co, Ni, Mo$ ), 这些元素含量比值可间接指示古水深信息, 比如  $Fe/Mn$  比值和  $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$  比值等可侧面推测沉积时期水体的相对深浅<sup>[34]</sup>。中国典型陆相富有机质页岩主要发育于深湖-半深湖环境中。例如, 渤南洼陷沙三下亚段从下至上  $V/Ni$  比值逐渐减小, 表明渤南洼陷沙三下亚段沉积早期湖盆水体较浅, 沉积晚期气候由干旱向暖湿转化, 湖盆水体变深。通过生物标志、遗迹化石和沉积构造(浊积岩沟模、槽模、重荷模发育)及元素组法定性恢复了鄂尔多斯盆地长 7 段古水深, 推测认为长 7 段沉积时期最大水深至少大于 50 m, 再利用钴元素和放射性测井进行定量恢复, 结果表明最大古水深应在 50 ~ 120 m<sup>[34-35]</sup>。通过  $Co$  和  $La$  元素含量以及自然伽马曲线定量计算松辽盆地古龙页岩古水深, 结果显示纵向上从青一段向青二段古水深不断变浅, 由深湖-半深湖沉积逐渐转变为滨浅湖沉积<sup>[36]</sup>。

古生产力是优质烃源岩形成的物质基础, 其与有机质的富集程度和沉积速率有一定的联系, 通常利用有机质丰度( $TOC$ )、常-微量元素(稀土元素)和生物标志化合物等资料来评价沉积时期古生产力的高低。 $P$  元素作为生物活动中重要的营养元素之一, 参与了

生物代谢全过程,还是生物结构和功能的重要组成部分,可随着生物体消亡进入沉积物中,因此元素含量比值  $P/Ti$  ( $P/Ti > 0.79$  为高生产力;  $P/Ti = 0.34 \sim 0.79$  为中等生产力;  $P/Ti < 0.34$  为低生产力)被广泛应用于判别古生产力水平。鄂尔多斯盆地长7段沉积时期温暖潮湿的亚热带气候为生物的繁盛提供了有利条件,营养物质来源可能与湖底热液活动密切相关,热液中富含  $P, N, Cu$  和  $Fe$  等营养元素并提高了水体温度,促进了生物的繁殖生长<sup>[36-37]</sup>。利用有机碳和孔隙度分析对松辽盆地古龙页岩进行古生产力恢复,结果表明古龙页岩沉积时期古生产力介于  $500 \sim 2\,360\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,整体属于高生产力,且青一段比青二段的古生产力更高<sup>[32]</sup>。济阳坳陷沙四上亚段-沙三下亚段沉积时期古生产力受古气候影响,沉积早期气候寒冷,沉积过程以缓慢的悬浮沉积为主,因此有机质生成和保存的速度较慢;沉积末期气候炎热多雨,洪水导致重力流频繁发生,重力流将盆地边缘大量碎屑营养物质输送到深水湖盆,沉积速率增加,古生产力快速上升<sup>[38-39]</sup>。渤南洼陷沙三下亚段细粒沉积样品的  $P/Ti$  比值主要分布在  $0.33 \sim 2.27$ ,平均达  $0.72$ ,初级生产力处于中高等水平。

总之,以纯页岩为主的松辽盆地青山口组沉积时期,气候温暖湿润,对应淡水-半咸水较深湖环境,具有较高古生产力;以混积泥页岩为主的准噶尔盆地芦草沟组和渤海湾盆地沙河街组形成于半干燥-半潮湿、半咸水-盐水较深湖缺氧环境,古生产力较高;以夹有薄层粉-细砂岩的夹层型为特征的鄂尔多斯盆地长7段泥页岩,形成于温暖湿润的温带-亚热带气候背

景,为缺氧强还原的微咸水-淡水湖盆深水环境,古生产力高(表1)。

## 2 中国典型陆相细粒沉积岩相

### 2.1 细粒沉积岩的岩相划分

岩相是指一定沉积环境中形成具有特有沉积特征的岩石,岩相组合是指按照一定叠置顺序构成的、能够反映沉积环境演化并存在一定成因联系的岩相序列。在陆相湖盆不同环境中形成的岩相及其组合(序列)是细粒沉积岩沉积过程和储层评价以及工程压裂的重点地质单元,其划分应该重点考虑反映沉积和埋藏过程的矿物组成、反映沉积水动力和沉积环境的沉积构造以及反映初始生产率和保存条件的有机质含量。本文倡导将矿物组成和沉积构造作为核心指标、将  $TOC$  作为重要参考指标开展泥页岩岩相划分<sup>[23, 27, 38-40, 44-45]</sup>。

#### 2.1.1 矿物组成

矿物组成能反映物质来源和水介质条件,是细粒沉积岩岩相划分的基础。细粒沉积岩的矿物组成主要包括:黏土矿物(伊/蒙混层、伊利石、绿泥石等)、长英质矿物(石英、斜长石、钾长石等)、碳酸盐矿物(方解石、白云石、菱铁矿等)、硫酸盐矿物(石膏、硬石膏)、磷酸盐矿物(磷灰石、胶磷矿等)、硫化物(黄铁矿)等。以最常见的长英质矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物为三端元,可将细粒沉积岩分为4大类:黏土岩、粉砂岩(细粒碎屑岩)、细粒碳酸盐岩和细粒混积岩(图1)。

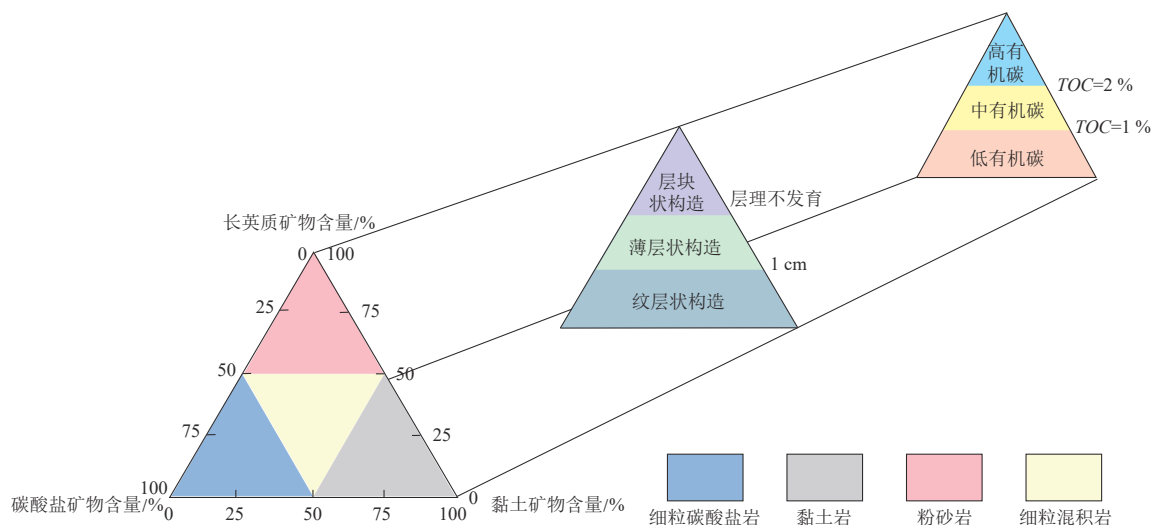


图1 济阳坳陷沾化凹陷沙三下亚段细粒沉积岩岩相划分方案

Fig. 1 Lithofacies classification scheme for fine-grained sedimentary rocks of the lower sub-member of the 3<sup>rd</sup> member of the Shahejie Formation, Zhanhua Sag, Jiyang Depression

细粒沉积岩的矿物组成受到湖泊水体性质的控制。在现代沉积中,按湖水矿化度(含盐度)的大小,将湖泊划分为淡水湖、微咸水湖、咸水湖及盐湖4类。不同盐度的湖盆形成的细粒沉积岩的矿物组成差异较大,一般淡水湖和微咸水湖发育富粉砂的细粒沉积,咸水湖和盐湖发育富碳酸盐的细粒沉积。

淡水湖和微咸水湖细粒沉积的矿物主要包括黏土矿物、石英、长石和黄铁矿等,例如鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段、松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组青一段和四川盆地侏罗系自流井组东岳庙段和大安寨段等。具体以松辽盆地古龙凹陷青一段为例,其矿物组成以石英(含量19%~43%,平均为34%)、斜长石(含量8%~65%,平均为31%)和黏土矿物(含量2%~52%,平均为23%)为主,发育黏土岩、粉砂岩和介形虫灰岩<sup>[44,46]</sup>。总之,淡水湖和微咸水湖细粒沉积以黏土岩、粉砂岩以及二者过渡岩性为主要特征,不发育自生沉淀的碳酸盐岩,但可发育介形虫和淡水双壳类等动物壳体颗粒为主的细粒碳酸盐岩。

咸水湖和盐湖水体中富含无机盐离子,主要包含 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等阳离子以及 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等阴离子。在适当的矿化度和温度条件下,这些离子从水体中析出发生自生沉淀,形成的矿物主要包括碳酸盐矿物(方解石、白云石等)、硫酸盐矿物(石膏、硬石膏等)、氯化物(石盐)等。比如,济阳拗陷沙三下亚段以方解石(含量34.2%~53.2%,平均为42.0%)为主,石英(含量18.9%~23.9%,平均为21.0%)和黏土矿物(含量18.9%~23.9%,平均为19.0%)次之,岩性以细粒碳酸盐岩和细粒混积岩为主<sup>[47]</sup>;准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组以白云石(含量0~91.5%,平均为26.6%)、石英(含量4.6%~52.0%,平均为20.8%)和长石(含量10.0%~35.0%,平均为24.6%)为主,方解石(含量0~20.0%,平均为10.3%)和黏土矿物(含量0~15.0%,平均为11.9%)次之,岩性以粉砂岩、细粒碳酸盐岩以及细粒混积岩为主<sup>[48]</sup>。

### 2.1.2 沉积构造

沉积构造是判断沉积环境和沉积成因、开展页岩岩相划分的重要依据。细粒沉积岩发育的主要沉积构造包括水平层理、交错层理、递变层理、块状构造和变形构造等(图2a—f)。

纹层是构成层理的基本单元,不同的湖盆细粒纹层类型存在较大差异。淡水-微咸水湖盆发育粉砂质纹层、黏土质纹层和有机质纹层,如鄂尔多斯盆地长7段(图2g);也可见介形虫、淡水双壳类等生物碎屑纹层与

黏土质纹层交互发育,如松辽盆地古龙凹陷青一段(图2h,i)<sup>[49]</sup>。咸水湖盆和盐湖湖盆可见方解石纹层、黏土级灰泥纹层,如渤海湾盆地济阳拗陷沙三下亚段(图2j);也可见白云石纹层与黏土质纹层交互发育(图2k)<sup>[50]</sup>。在火山活动较为强烈的湖盆中,可见粉砂级的凝灰质纹层与泥晶白云石纹层交互发育,如准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组(图2l)<sup>[51]</sup>。本文考虑理论分析和生产实际应用相结合,倡导根据纹层厚度命名层状构造:厚度小于1 cm称纹层状,1~10 cm称薄层状,大于10 cm称层块状(图1)。

### 2.1.3 有机质含量

有机质含量既可反映页岩油气的资源潜力,还可反映烃类的富集程度,因此也成为岩相划分的重要依据。鉴于有机质是页岩油气富集高产的重要控制因素,研究认为页岩中TOC大于2%时即具备工业可采能力,故以TOC在0.5%、1.0%、2.0%和4.0%分别作为含有机碳、低有机碳、中有机碳、高有机碳和富有机碳的岩相分级界线,并作为岩相定名前缀(图1)<sup>[5]</sup>。

## 2.2 陆相湖盆主要岩相(组合)特征

中国陆相沉积湖盆构造类型多(拗陷、断陷及前陆盆地)、面积相对较小、分割性强、沉积环境多样,发育了淡水湖泊、半咸化-咸化湖泊和碱化湖泊等环境<sup>[5]</sup>。淡水湖盆形成的泥页岩层系多由长英质-黏土质页岩构成主要岩相,以松辽盆地青一段和鄂尔多斯盆地长7段为典型代表(黏土质页岩、互层/夹层型岩相组合);咸水湖盆陆相页岩以富碳酸盐-蒸发岩类岩相为主,济阳拗陷古近系沙河街组是其典型实例;碱化湖泊多发育混积岩相(混积页岩岩相组合),以准噶尔盆地二叠系风城组和芦草沟组为典型代表。岩相组合控制了陆相富有机质泥页岩的源-储耦合特征、烃类差异演化和流体性质多样性<sup>[6]</sup>。

中国陆相盆地裂陷期和拗陷期的富有机质细粒沉积岩相组合存在明显差异。湖盆裂陷期多对应发育半咸化-咸化湖泊或碱化湖泊等环境,细粒沉积岩以富碳酸盐矿物的岩相组合发育为特征,拗陷期多对应发育微咸化-淡水湖泊环境,形成的富有机质页岩层系则以长英质+黏土质沉积岩相组合为主,碳酸盐矿物的含量普遍较低(表2)。

松辽盆地青山口组沉积时期古气候温暖潮湿,发育大型富营养淡水-微咸水湖泊,TOC普遍大于2.0%,最高可达9%<sup>[16]</sup>。青一段和青二段下部页岩层厚度为90~270 m,整体含油。盆地北部齐家-古龙



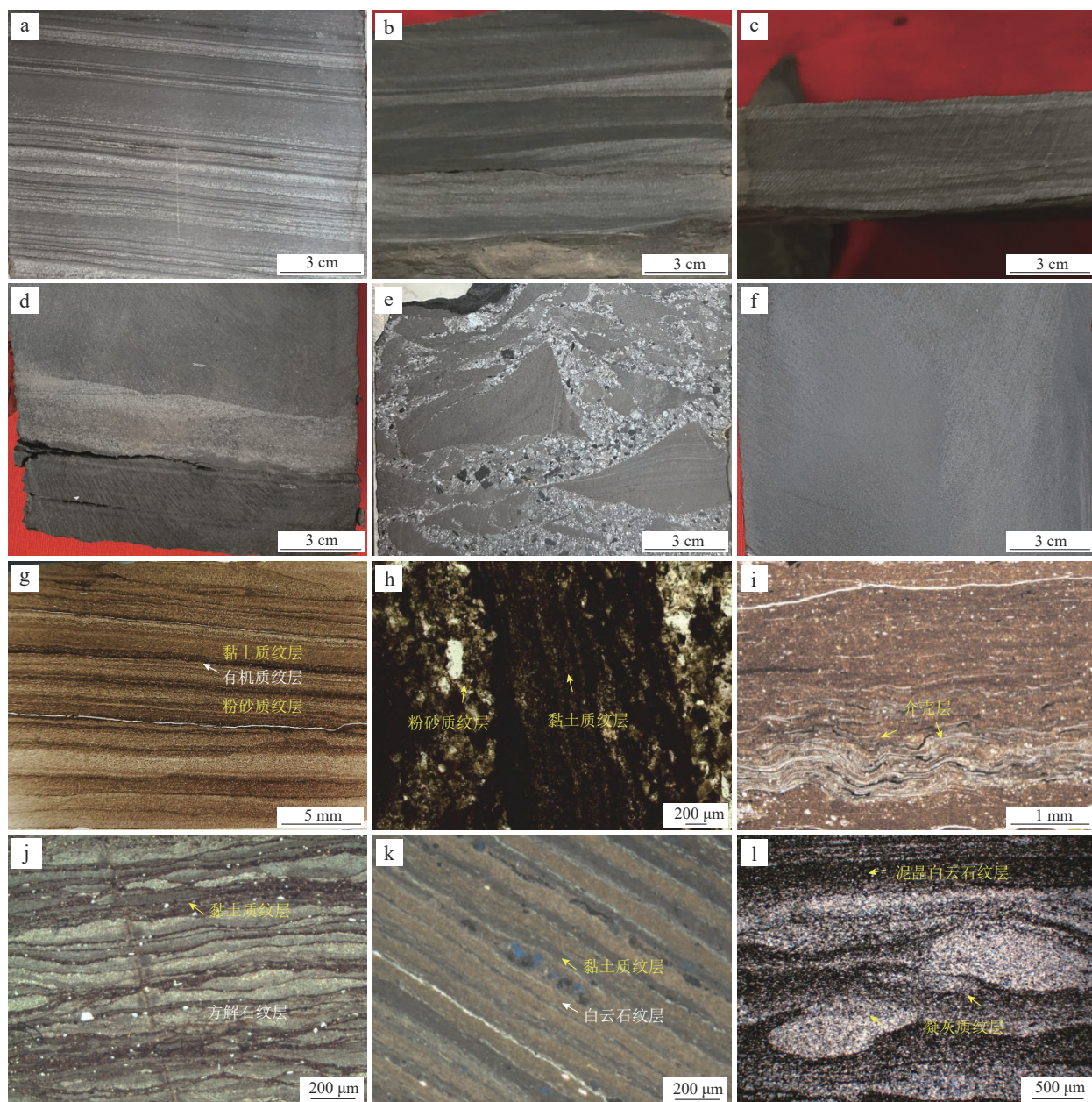


图2 中国典型陆相湖盆细粒沉积岩沉积构造类型

Fig. 2 Sedimentary structure types of fine-grained sedimentary rocks in typical continental basins in China

a. 水平层理, YY1-1井, 埋深4 991.2 m, 渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段; b. 交错层理, X28井, 埋深1 922.4 m, 鄂尔多斯盆地长7段; c. 波状交错层理, Y66井, 埋深2 329.3 m, 鄂尔多斯盆地长7段; d. 递变层理, YY1-1井, 埋深4 611.5 m, 渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段; e. 含泥砾块状层理, YY1-1井, 埋深4 739.7 m, 渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段; f. 块状构造, BY5-1井, 埋深3 910.7 m, 渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段; g. 黏土质纹层、有机质纹层与黏土质纹层, H269井, 埋深2 496.2 m, 鄂尔多斯盆地长7段; h. 粉砂质纹层与黏土质纹层, H53井, 埋深2 184.4 m, 松辽盆地古龙凹陷青一段<sup>[44]</sup>; i. 介壳层, H14井, 埋深2 065.2 m, 松辽盆地古龙凹陷青一段<sup>[27]</sup>; j. 方解石纹层, L69井, 埋深3 103.4 m, 渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段; k. 白云石纹层, G108-8井, 埋深3 224.6 m, 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段<sup>[46]</sup>; l. 凝灰质纹层, J174井, 埋深3 264.6 m, 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组<sup>[51]</sup>

(a—f为岩心照片; g—l为薄片显微照片。)

凹陷青山口组泥页岩层段以缺氧条件下的深水细粒沉积为主, 发育暗色泥页岩和泥质粉砂岩, 夹薄层粉砂岩、介形虫灰岩, 局部含厚层块状深水重力流砂岩沉积。主要岩相为富碳长英质泥页岩相、富碳层状/纹层状粉砂岩相、泥质粉砂岩相和泥质粉砂质页岩相<sup>[3]</sup>。

鄂尔多斯盆地发育淡水-微咸水湖泊沉积体系。在长7段沉积时期处于最大湖泛期, 半深湖-深湖区面积达  $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 发育了在矿物组成、有机质丰度和生烃强度方面具有显著特征的富有机质黑色页岩和暗色泥岩。黑色页岩沉积厚度为 10 ~ 35 m, TOC 在



表2 中国典型陆相盆地细粒沉积岩岩相划分和岩相特征

Table 2 Classification and characteristics of the lithofacies of fine-grained sedimentary rocks in typical continental basins in China

| 研究层位                   | 盆地类型     | 划分依据                | 岩相类型                                                                               |
|------------------------|----------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 鄂尔多斯盆地<br>三叠系长7段       | 淡水湖盆     | 矿物组成、有机质含量          | 6种岩相:中有机质断续纹层泥岩、中有机质粒序层理粉砂质泥岩、富有机质模糊纹层含粉砂页岩、富有机质变形-微波页岩、富有机质凝灰质页岩等 <sup>[55]</sup> |
| 松辽盆地古龙凹陷<br>白垩系青一段     | 淡水-微咸水湖盆 | 矿物组成、沉积构造、<br>有机质含量 | 7种岩相:高有机质页理黏土质泥岩、高有机质块状长英质泥岩、中有机质块状长英质泥岩等 <sup>[44]</sup>                          |
| 渤海湾盆地东营凹陷<br>古近系沙四上亚段  | 咸水湖盆     | 矿物组成、有机质含量          | 8种岩相:油页岩、高TOC钙质页岩、含碳酸盐粉砂质页岩、含白云石粉砂质页岩等 <sup>[56]</sup>                             |
| 渤海湾盆地沧东凹陷<br>古近系孔二段    | 咸水湖盆     | 矿物组成、沉积构造           | 5种岩相:层状细粒长英沉积岩相、块状细粒混积岩相、纹层状细粒混积岩相、纹层状白云岩相和块状白云岩相 <sup>[47]</sup>                  |
| 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷<br>二叠系芦草沟组 | 咸水-盐水湖盆  | 矿物组成、沉积构造、<br>有机质含量 | 4种岩相:高碳块状粉砂质砂屑云岩、高碳纹层状粉砂质泥页岩、高碳块状粉砂质砂屑云岩和高碳块状泥质粉砂岩 <sup>[57]</sup>                 |

6.0%~16.0%,平均为13.8%。暗色泥岩厚度多为10~50 m, TOC为2.0%~6.0%,平均为3.8%。相较于暗色泥岩,黑色页岩具有更高的TOC、游离油含量和较好的储集性能,主要岩相类型为富碳厚层状、薄层状和纹层状长英质泥页岩相、混合页岩相夹薄层状粉-细砂岩相。频繁的构造事件、较陡的湖盆底形和广阔的可容纳空间导致湖盆深水区大面积发育重力流沉积,在长7段烃源岩内部形成了多期叠置的、平均厚度为3.5 m的砂质储层。长7段泥页岩发育有富凝灰质纹层、富有机质纹层、粉砂级长英质纹层和黏土纹层,组合形成了“富有机质+粉砂级长英质”和“富有机质+富凝灰质”2类岩相组合<sup>[52]</sup>。

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷为一个中二叠世的前陆型箕状凹陷,在陆内裂谷背景下形成了芦草沟组半深湖-深湖咸化湖盆细粒混合沉积。凹陷主体富有机质页岩厚度100~240 m, TOC平均为4.6%,并且受到了火山喷发作用及热液活动的影响<sup>[53]</sup>。芦草沟组页岩主要发育高碳-富碳的块状泥晶云岩岩相、块状粉砂质砂屑云岩岩相、块状凝灰质粉砂岩岩相、条带状含凝灰云岩岩相、纹层状粉砂质/泥质沉凝灰岩和纹层状云质泥岩岩相等<sup>[54]</sup>。

渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组处于微咸水-咸水湖泊环境,主要发育沙三下亚段-沙四上亚段富有机质泥页岩层系,沉积厚度可达1 000 m, TOC在1.5%~10.0%。比如渤南洼陷沙三下亚段沉积时期水体较封闭,盐度较高,气候由早期相对干旱变为晚期相对湿润,为还原环境下的深湖-半深湖沉积。细粒沉积岩相主要有富有机质纹层状灰质细粒混积岩(LF1)、富有机质纹层状长英质细粒碳酸盐岩(LF2)、富有机质层状灰质细粒混积岩(LF3)、富有机质层状/块状长

英质细粒碳酸盐岩(LF4)、富有机质层状含长英细粒碳酸盐岩(LF5)和含有机质块状含长英细粒碳酸盐岩岩相(LF6)。岩相类型及其组合受控于气候变化,沙三下亚段沉积早期,气候整体干旱,水体相对较浅,主要发生悬浮沉积,形成富有机质纹层状长英质细粒碳酸盐岩岩相,夏季偶尔洪水入湖形成低密度浊流、沉积递变层理粉砂岩和粉砂级别长英质矿物含量较多的、富有机质层状长英质细粒碳酸盐岩相;在沙三下亚段沉积晚期,气候变得较为暖湿,水体深度增大,河流输入作用增强,导致浊流沉积频繁发生,浊流所携带的粉砂与黏土等沉积分异不彻底,各类矿物快速混杂堆积,形成层块状细粒混积岩相。浊流在向前搬运过程中,粉砂级别的长英质矿物逐渐下降沉淀或者侵蚀泥质基底(富含碳酸盐矿物),逐渐演化为泥质碎屑流,沉积富有机质层状含长英细粒碳酸盐岩岩相,与正常悬浮沉积的富有机质纹层状灰质细粒混积岩和富有机质纹层状长英质细粒碳酸盐岩组合而成特有的岩相组合(图3)。

### 3 中国典型陆相细粒沉积机制与模式

细粒沉积岩可形成于多种环境,其沉积环境和沉积机制研究,对优势岩相和优质储层的预测具有重要意义。

#### 3.1 物质来源

湖盆细粒沉积物根据其物质来源可划分为:陆地来源、火山-热液来源和盆地内源<sup>[58]</sup>。其中,陆地来源的物质主要是通过河流注入、风力搬运方式进入湖盆,其母岩可能是沉积岩、变质岩或岩浆岩。火山-热液来源的物质主要是火山喷发形成的火山灰以及湖盆底



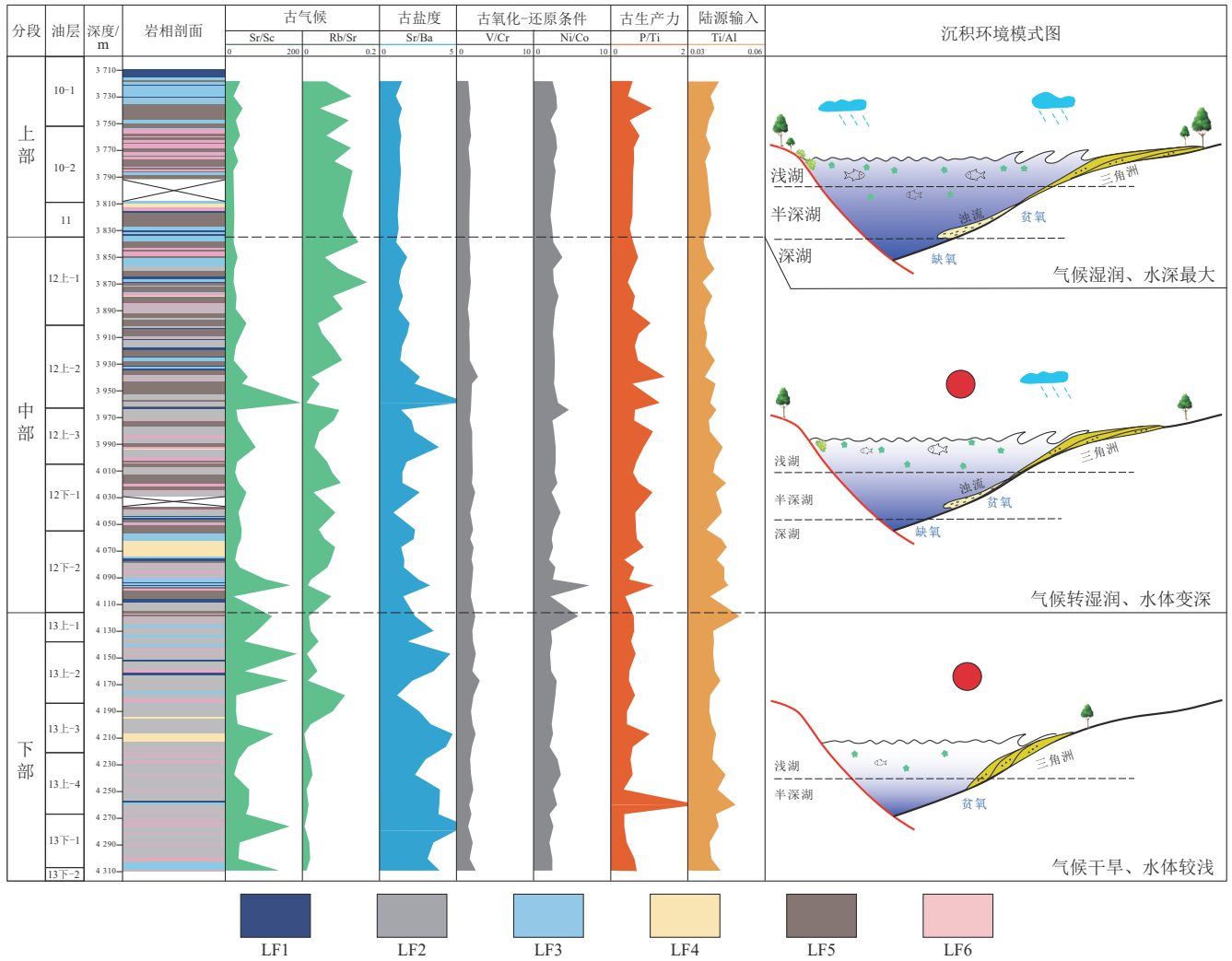


图3 济阳拗陷沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段沉积环境和不同岩相特征

Fig. 3 Diagram showing the sedimentary environments and characteristics of different lithofacies of the lower sub-member of the 3<sup>rd</sup> member of the Shahejie Formation, Bonan Sub-sag, Zhanhua Sag, Jiyang Depression

LF1. 富含有机质纹层状灰质细粒混积岩; LF2. 富含有机质纹层状长英质细粒碳酸盐岩; LF3. 富含有机质层状灰质细粒混积岩; LF4. 富含有机质层状长英质细粒碳酸盐岩; LF5. 富含有机质层状含长英质细粒碳酸盐岩; LF6. 含有机质块状含长英质细粒碳酸盐岩

部沿着断层进入到湖盆的热液沉淀。盆内来源物质主要是湖盆水体中的无机或有机溶质,经过化学作用或生物-化学作用发生沉积(图4;表3)。

物质来源与细粒沉积岩物质组成密切相关,细粒沉积岩的矿物组分及组合可以一定程度反映其物质来源<sup>[58]</sup>。伴随着不同盆地细粒沉积岩岩石组分研究的深入,不同盆地水体咸化程度不同,细粒沉积岩岩石学特征差异极大,表明细粒沉积岩物质来源存在差异(表3)<sup>[59-60]</sup>。渤海湾盆地沙河街组作为典型的咸化湖盆,由碳酸盐矿物、石英、长石和黏土矿物组成,是陆源碎屑输入和(生物)化学沉积共同作用的结果<sup>[59]</sup>。作为微咸水-淡水湖盆的鄂尔多斯盆地和松辽盆地,矿物组成以黏土矿物、石英、长石、黄铁矿为主,少见盆内

自生的生物及化学沉淀物<sup>[61]</sup>,物质来源主要为陆源输入。

### 3.2 沉积机制

传统观点认为,细粒物质都是深水低能水体中的悬浮沉积产物。近年来,水槽实验证实,富含水的半固结泥质沉积物可以在水流侵蚀作用下,絮凝后形成达到砂级粒径的颗粒。当黏土以絮凝体形式发生沉积时,主要存在2种方式:① 悬浮沉降模式,主要发生在湖盆中心,形成无特殊纹层状构造的块状泥岩<sup>[61-64]</sup>;② 黏土矿物与陆源碎屑物质共同组成絮凝体团,在底面推移过程中,由于水动力减弱和流速降低等形成长英质纹层,而较细的黏土则继续以絮凝体迁移<sup>[65]</sup>,后

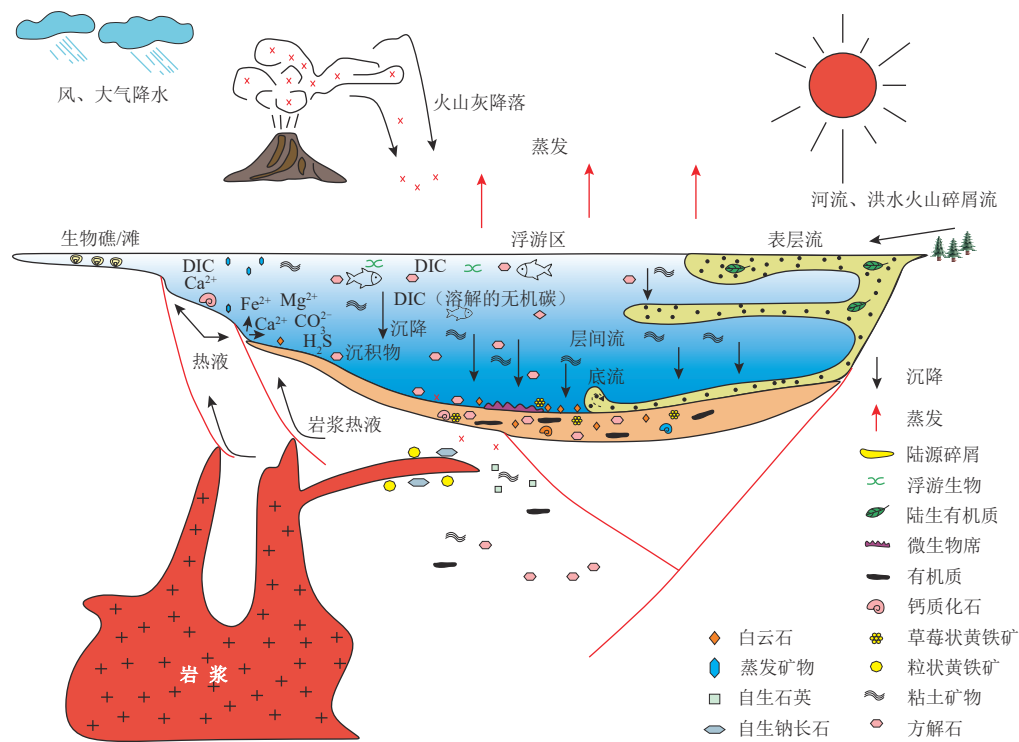


图4 中国典型陆相盆地细粒沉积多源成因模式<sup>[58]</sup>

Fig. 4 Diagram showing the multi-source genesis of fine-grained sediments in typical continental basins in China<sup>[58]</sup>

表3 中国典型陆相沉积盆地细粒沉积物质来源<sup>[44,47-48]</sup>

Table 3 Sources of fine-grained sediment in typical continental basins in China<sup>[44,47-48]</sup>

| 盆地及次级构造 |      | 地层          | 盆地类型 | 组分含量/%               |                      |                    |                 |        |        |
|---------|------|-------------|------|----------------------|----------------------|--------------------|-----------------|--------|--------|
|         |      |             |      | 陆源碎屑物质               |                      | 盆内化学沉淀物质           |                 | 火山碎屑物质 | 生物源物质  |
|         |      |             |      | 黏土矿物                 | 长英质矿物                | 碳酸盐矿物              | 黄铁矿             |        |        |
| 渤海湾盆地   | 沧东凹陷 | 孔二段         | 咸水盆地 | 1 ~ 41(15.90)        | 0 ~ 100(35.70)       | 0 ~ 100(34.70)     | 0 ~ 17(0.60)    | 1 ~ 10 | (3.26) |
|         | 济阳拗陷 | 沙三下亚段-沙四上亚段 | 咸水盆地 | 2 ~ 59(21.07)        | 3 ~ 100(27.19)       | 1 ~ 97(49.60)      | 1 ~ 34(3.20)    | —      | 2 ~ 4  |
| 准噶尔盆地   | 玛湖凹陷 | 风城组         | 咸水盆地 | 22.80 ~ 66.20(37.88) | 33.33 ~ 99.18(57.40) | 0 ~ 29.43(4.40)    | 0 ~ 3.11(0.24)  | 5 ~ 25 | (2.20) |
| 鄂尔多斯盆地  |      | 长7段         | 淡水盆地 | 12.37 ~ 61.50(40.57) | 19.28 ~ 90.52(50.21) | 0 ~ 14.43(5.84)    | —               | 5 ~ 30 | 3 ~ 16 |
| 松辽盆地    | 古龙凹陷 | 青一段         | 淡水盆地 | 6.10 ~ 39.30(23.50)  | 16 ~ 90.20(62.90)    | 1.10 ~ 72.50(7.20) | 1 ~ 12.80(5.90) | —      | 2.67   |

注:表中数据为最小值~最大值(平均值)。“—”表示无数据。

期由于气候、温度、盐度、生物作用等条件改变沉降形成黏土纹层,最终形成长英质纹层和黏土纹层的互层结构泥页岩(图5)。

湖盆中细粒沉积物的沉积机制除悬浮沉降形成纹层或块状构造外,还包括风成输入、浊流、异重流和泥质碎屑流等。济阳拗陷古近系沙三下亚段-沙四上亚段沉积时期,湖盆深水区除了发育悬浮沉降成因的纹层状泥质岩外,还发育大量泥质块体搬运和浊流成因的块状泥质岩<sup>[66]</sup>。其中泥质块体搬运过程又包括泥

质块体的滑动、滑塌和泥质碎屑流。泥质碎屑流的典型标志为岩石发育块状层理,与上、下岩石呈现突变接触,且可见大小不一、分选性差的漂浮状泥砾(图2e)。浊流的典型标志为发育递变层理的粉砂岩或泥质粉砂岩,向上可过渡为均质泥岩或纹层状泥岩,为不完整的鲍马序列的“AE”段(图2d)。相比之下,浊积成因的泥质岩含有更多的浮游生物等有机质,其生烃潜力和含油性总体优于泥质碎屑流成因的泥质岩,是更为有利的页岩油勘探目标。



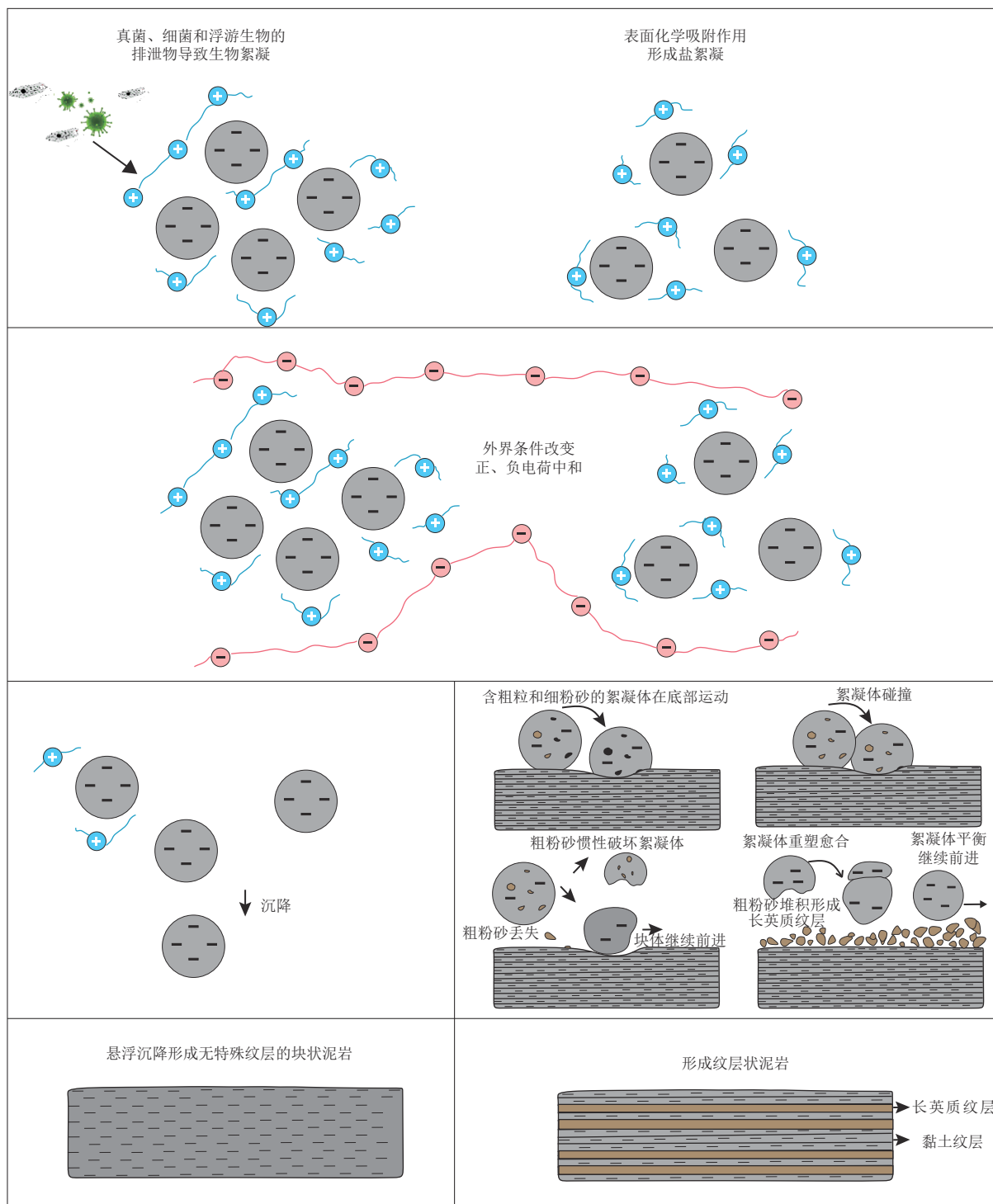


图5 细粒沉积絮凝作用示意模型

Fig. 5 Schematic model illustrating the fine-grained sediment flocculation

### 3.3 沉积模式

在岩相划分和沉积机制解释的基础上,根据岩相的垂向叠置序列,可以划分出岩相组合。沉积微相控制了岩相组合的时空分布,也进一步控制了优质烃源岩和储集体的发育与分布。

#### 3.3.1 淡水湖盆沉积模式

鄂尔多斯盆地南部长7段发育了一套淡水湖盆细粒沉积体系,主要包括6种岩相类型:叠覆冲刷正粒序粉砂细砂岩岩相、块状层理粉砂细砂岩岩相、软沉积变形砂泥混杂岩相、块状泥岩岩相、水平纹层泥页岩岩相和凝

灰岩岩相(图6)。岩相组合包括泥质沉积、凝灰岩与重力流沉积的垂向组合、滑动滑塌与暗色泥页岩互层叠置、重力流沉积砂岩、泥页岩垂向组合。湖盆重力流在搬运过程中与泥质基底相互作用,将湖盆边缘的有机质搬向深水区,导致湖盆深水区沉积发育的细粒沉积物富集区域成为有机质和页岩油富集的有力部位<sup>[67]</sup>。

### 3.3.2 咸水湖盆沉积模式

#### 1) 半咸水-咸水湖盆

渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段下部沉积时期水体较浅,气候较干冷,盐度很高,利于碳酸盐矿物的化学沉淀,重力流发育相对较弱,主要以悬浮沉积为主,形成岩相LF2,夏季偶发事件沉积形成递变层理粉砂岩和LF4,组成底部为递变层理粉砂岩、中部为LF4、顶部为LF2的岩相组合(图7c)。在沙三下亚段中部和上部沉积时期,气候变得较为暖湿,水体深度相对较大,河流输入作用增强,导致浊流沉积频繁发生,浊流所携带的粉砂与黏土等沉积分异不彻底,各类矿物快速混杂堆积,形成递变层理粉砂岩和岩相LF3,在向前搬运过程中粉砂级别的长英质矿物逐渐下降沉淀或者侵蚀泥质基底(富含碳酸盐矿物),浊流逐渐演化为泥质碎屑流,沉积形成岩相LF5和LF6,与正常悬浮沉积的LF1和LF2结合,组合成底部为递变层理粉砂岩和LF3、中部为LF5和LF6、顶部为LF1和LF2的岩

相组合(图7a,b)。

#### 2) 碱性湖盆

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组发育了一套咸水湖盆细粒混积沉积体系。根据半深湖-深湖、混合浅湖和碎屑浅湖亚相的岩相组合差异,可进一步划分出半深湖泥、云坪、混合滩坝、混合浅湖泥、浅湖砂坝和碎屑浅湖泥等6个沉积微相(图8)<sup>[68]</sup>。其中,混合滩坝的岩相组合为中-厚层白云质粉砂岩与薄层粉砂质白云岩互层,浅湖砂坝微相的岩相组合为泥岩夹泥晶/粉晶白云岩、白云质粉砂岩和粉砂质白云岩。这2类微相溶蚀孔隙发育,孔隙结构好,是咸水湖盆细粒沉积层系中的优质储集体。

## 4 中国典型陆相盆地页岩油气分布

中国陆相页岩油类型多样且资源丰富,页岩油地质资源量主要分布在松辽、鄂尔多斯、准噶尔、渤海湾等中生代-新生代陆相盆地,是中国页岩油勘探开发的重要领域,具有累计厚度大、有机质含量高和成熟度偏低的特点<sup>[8,69-71]</sup>。

松辽盆地青山口组主要发育纯页岩型页岩油,富有机质页岩厚度较大,分布面积 $1.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,估算页岩油地质资源量超过 $98.00 \times 10^8 \text{ t}$ ,预测地质储量 $12.68 \times 10^8 \text{ t}$ ,勘探开发的核心区主要分布在齐家-古

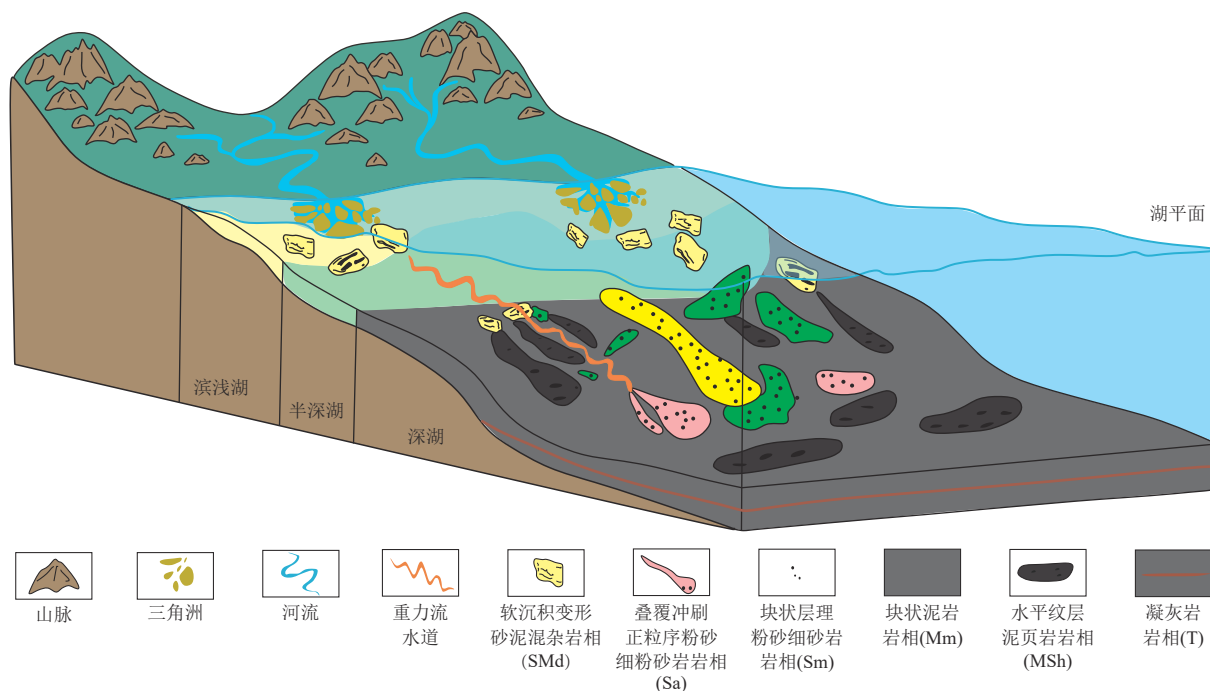


图6 鄂尔多斯盆地铜川地区长7段细粒沉积模式<sup>[67]</sup>

Fig. 6 Sedimentary pattern of fine-grained sediments in the 7<sup>th</sup> member of the Yanchang Formation, Tongchuan area, Ordos Basin<sup>[67]</sup>

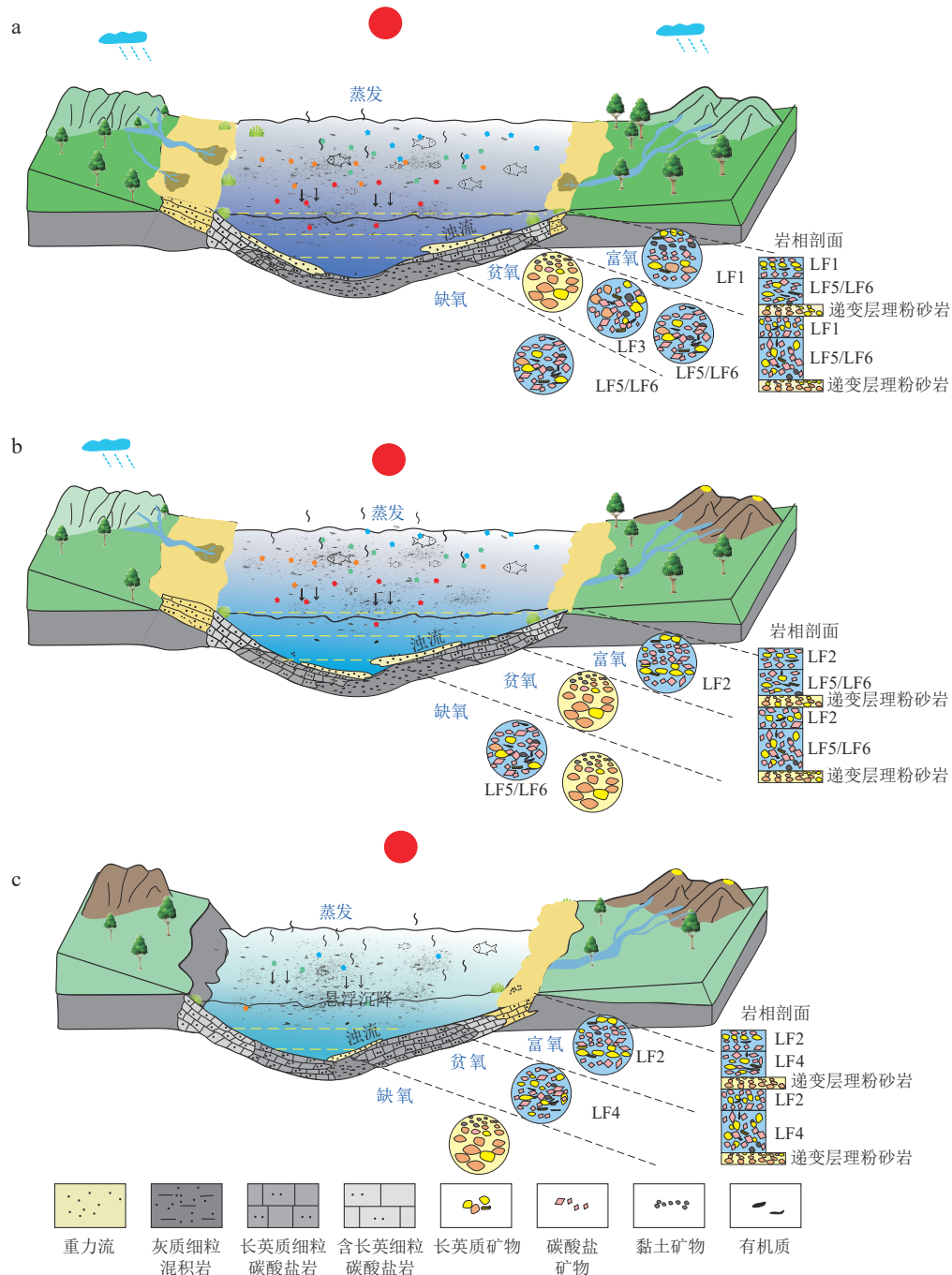


图7 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段细粒沉积模式

Fig. 7 Sedimentary pattern of fine-grained sediments in the lower sub-member of the 3<sup>rd</sup> member of the Shahejie Formation, Bonan Sub-sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

a. 沙三下亚段上部沉积时期; b. 沙三下亚段中部沉积时期; c. 沙三下亚段下部沉积时期  
(LF1—LF6符号说明见图3。)

龙、三肇和长岭等重要凹陷区<sup>[9,72]</sup>。页岩油富集层主要集中在青一段和青二段下部,厚度30~80 m,有利区厚度大于60 m。优质的烃源岩和较强生烃潜力为页岩油气形成奠定了良好的基础,TOC约为3.0%,有机质类型以I型为主,部分为II<sub>1</sub>型,镜质体反射率( $R_o$ )为0.90%~1.80%,主体处于高成熟度演化阶

段<sup>[5,72]</sup>。富集发育的微米-纳米级孔隙、水平层理缝和局部高角度裂缝为页岩油气的运移提供了有利通道,提高了渗流能力和可动性<sup>[73-74]</sup>。受到物源的方向和距离、沉积环境、米兰科维奇旋回等共同作用,页岩岩相在平面上具有环带状分布的特点,纵向上具有明显的旋回性和序列性,不同尺度的偏心率旋回控制着有机



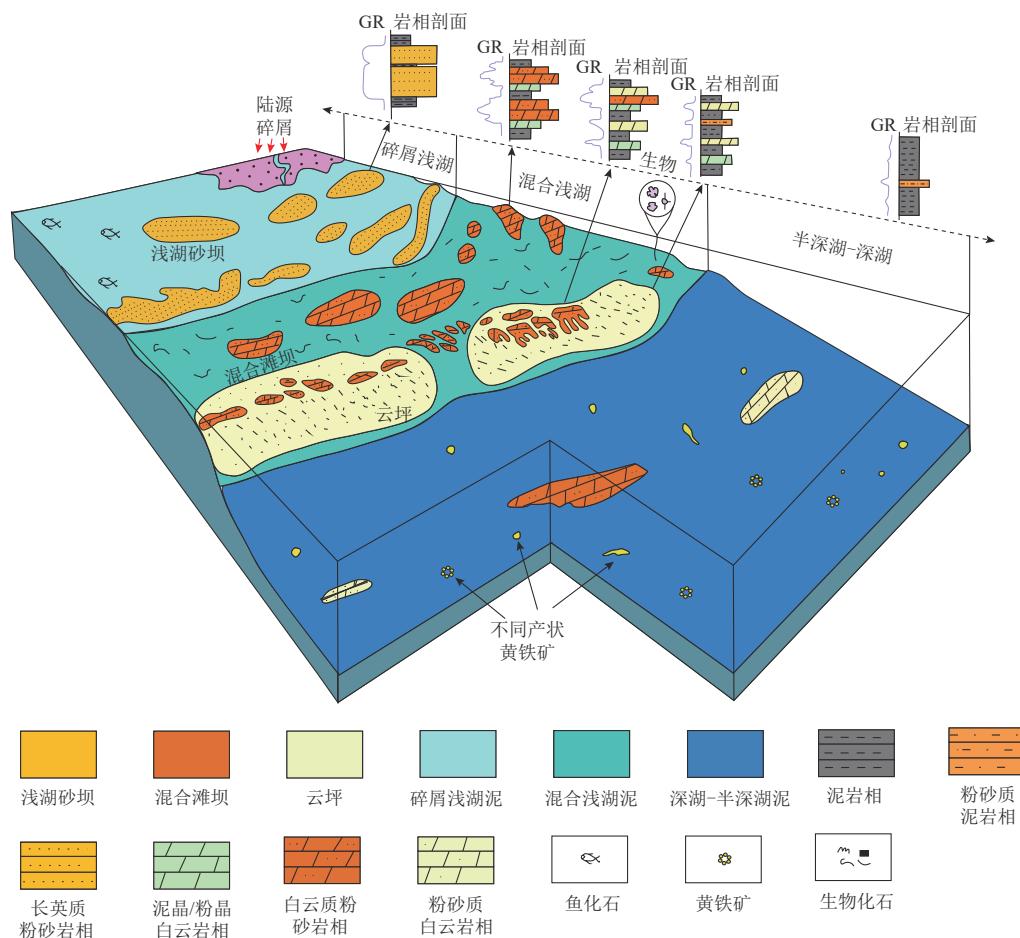


图8 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积模式<sup>[64]</sup>

Fig. 8 Sedimentary pattern of fine-grained sediments in the Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin<sup>[64]</sup>

质的富集程度<sup>[44]</sup>。不同岩相和不同层位的页岩生油潜力、储集性能及含油性具有较大的差异,其中有机质纹层状泥岩岩相生烃潜力高,孔径结构好,异常压力大,资源潜力价值较高。根据地质-工程综合评价标准,认为古龙凹陷页岩厚度大于60 m,  $TOC$  大于1.0%,  $R_o$  大于0.75%,是页岩油有利勘探目标<sup>[74]</sup>。

鄂尔多斯盆地长7段发育夹层型页岩油,估算资源量约为  $60 \times 10^8$  t,探明地质储量  $11.53 \times 10^8$  t,资源总量巨大,勘探开发前景十分广阔<sup>[9,75]</sup>。长7段沉积时期对应最大湖泛期,湖盆面积可达  $6.50 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,富有机质黑色页岩和泥岩厚度达百米以上。岩相以黑色页岩、含粉砂质纹层黑色页岩、暗色泥岩、含粉砂质纹层暗色泥岩和粉砂岩为主,其中含粉砂质纹层黑色页岩是赋存页岩油的最优岩相<sup>[76]</sup>。长7沉积时期气候温暖湿润,水体为微咸水-淡水,湖盆中央发育砂质碎屑流和浊流沉积。湖盆频繁的火山活动和深部热液活动提供了丰富的营养物质,高生产力和强还原条件为有机质富集保存奠定良好基础<sup>[77]</sup>。泥页岩有机质类型为I型和

II<sub>1</sub>型,  $TOC$  平均值高达13.0%以上,  $R_o$  主要在0.70%~1.20%,平均最高热解峰温( $T_{max}$ )达447℃<sup>[17-18]</sup>。泥页岩与薄层粉-细砂岩组合规模巨大,储层质量和含油性好,是长7段有利的勘探类型<sup>[78-79]</sup>。

准噶尔盆地页岩油预测总地质资源量  $12.40 \times 10^8$  t,其中吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油地质资源量可达  $11.12 \times 10^8$  t,发育典型的混积型页岩油,目前已探明页岩油地质储量  $1.53 \times 10^8$  t<sup>[9,54]</sup>。吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部,面积约为1278 km<sup>2</sup>,混积泥页岩分布范围广泛,累计厚度数百米,具有多源混积、源-储一体和“甜点”整体分散、局部集中的特点,“甜点”主要发育在滨浅湖和三角洲前缘粉-细砂岩和云质粉砂岩中<sup>[26,80]</sup>。优质烃源岩厚度大,有机质类型为I型和II<sub>1</sub>型,  $TOC$  平均值为4.6%,生烃潜量( $S_1+S_2$ )多大于6.0 mg/g,  $T_{max}$  值分布在428~459℃,  $R_o$  介于0.80%~1.10%,处于低成熟-成熟演化阶段<sup>[80-82]</sup>。粉砂岩储层物性较好,储层孔隙度平均值为13.8%,发育微米-纳米级孔隙,水平层理缝和构造缝为页岩油提供有利输送通道,具

有很好的页岩油勘探潜力<sup>[5]</sup>。

渤海湾盆地济阳坳陷牛庄、利津、博兴和渤南等主力生烃洼陷的3大主力生烃层系(古近系沙四上亚段、沙三下亚段及沙一段)内广泛分布多类型页岩油资源<sup>[41,83]</sup>。经历复杂的构造演化,泥页岩沉积厚度大、分布范围广泛,油藏类型多样且复杂,勘探潜力巨大。资源评估结果表明,济阳坳陷页岩油地质资源量超过 $100.00 \times 10^8$  t,已探明储量 $6.00 \times 10^8$  t,预测地质储量 $4.58 \times 10^8$  t<sup>[84]</sup>。沙四上亚段、沙三下亚段和沙一段是主力烃源岩,厚度可达300~500 m,广泛分布于东营、沾化及车镇等凹陷,其形成与分布受岩相类型、油源条件、构造作用和压实类型控制<sup>[41,85-86]</sup>。有机质类型以I型和II<sub>1</sub>型为主,TOC普遍大于2.0%, $R_o$ 多数大于0.80%,主要储集孔隙类型为粒间孔、晶间孔、溶蚀孔、有机质演化孔、构造缝、层理缝和生烃增压缝<sup>[87-88]</sup>。储层类型可分为基质型、夹层型和裂缝型三大类,基质型主要分布于深洼区,分布面积广,是油气勘探的重点方向。但是主要分布于盆地斜坡断裂褶皱发育区的夹层型和裂缝型页岩油储层质量更好,也易于开采,产能更高,埋藏浅,投资低收益大,应加大斜坡区的勘探开发力度<sup>[89]</sup>。

## 5 结论与发展讨论

中国陆相沉积盆地泥页岩沉积环境复杂多样,泥页岩可形成于淡水、咸水和碱化湖盆,沉积充填泥页岩、粉细砂岩和碳酸盐岩等,构成纯页岩型、夹层型和混积型岩相组合。

倡导将矿物组成和沉积构造作为核心指标、将TOC作为重要参考指标开展泥页岩岩相划分。淡水湖盆形成的泥页岩层系以长英质-黏土质页岩为主要岩相,咸水湖盆陆相页岩发育富碳酸盐-蒸发岩类岩相,碱化湖泊多发育混积岩相(混积页岩岩相组合)。岩相组合控制了陆相富有机质泥页岩的源-储耦合特征、烃类差异演化和流体性质多样性。

湖盆细粒沉积物主要来源于陆地、火山-热液或盆地化学-生物沉积作用。湖盆泥页岩沉积机制主要包括悬浮沉降、风成输入、浊流、异重流、泥质碎屑流。湖盆深水區除了发育悬浮沉降成因的纹层状泥页岩外,还发育大量泥质块体搬运和浊流成因的块状泥页岩。因此,应考虑沉积环境(湖水含盐度)建立反映不同沉积机制和岩相分布的沉积模式。

陆相湖盆细粒沉积成分、结构、构造和沉积序列复杂,未来细粒沉积环境和岩相研究应加强下面工作:

1) 在原型盆地恢复、岩相古地理重建、富有机质页岩层系形成条件等系统研究的基础上,开展天文旋回研究,建立系统有效的沉积古环境判识参数及标准,明确气候和环境变化与湖盆细粒沉积过程之间耦合关系。

2) 在层序地层格架中,基于源-汇系统理论,建立陆相湖盆页岩型、夹层型和混合型细粒沉积岩岩相分类和沉积模式,有效地预测细粒沉积岩岩相时空分布。

3) 陆相湖盆细粒沉积过程和动力学机制非常复杂,应开展细粒沉积成因过程物理和数值模拟研究,考虑湖盆沉积环境、水体性质、物质组成、沉积速率、有机质生产力、藻类勃发以及火山-热液作用等要素,阐明细粒沉积物物理、化学和生物沉积耦合过程和形成发育机理以及陆相湖盆沉积环境-生物协同演化机制。

4) 纹层结构与有机质丰度和储层质量之间关系密切,应加强受沉积环境控制的细粒沉积物纹层类型和纹层结构品质评价。基于岩心、镜下资料、元素测井、成像测井识别矿物成分、纹层结构和特征,建立测井尺度细粒沉积岩的纹层结构划分方案和图版;建立不同环境发育的细粒沉积岩的纹层结构测井识别方法;揭示不同环境下纹层结构与优质储层发育耦合关系,预测有利烃源岩和储层分布区。

5) 建立能够反映烃源岩品质、储层品质、页岩油流动品质和工程品质及其耦合关系的有利岩相(组合)评价预测体系,预测不同类型陆相湖盆和构造单元有利岩相分布和“甜点”发育区带。

6) 细粒沉积物沉积环境恢复和岩相识别方法多样,但适用性存在差异,应关注数据集成与深度挖掘、人工智能大数据与计算机辅助技术,阐明细粒沉积物分布规律,为有效指导页岩油勘探开发与评价预测提供岩相依据。

## 参 考 文 献

- [1] 朱筱敏. 沉积岩石学: 富媒体[M]. 5版. 北京: 石油工业出版社, 2020.  
ZHU Xiaomin. Sedimentary petrology: Rich media[M]. 5th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [2] 姜在兴, 张建国, 孔祥鑫, 等. 中国陆相页岩油气沉积储层研究进展及发展方向[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 45-71.  
JIANG Zaixing, ZHANG Jianguo, KONG Xiangxin, et al. Research progress and development direction of continental shale oil and gas deposition and reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 45-71.
- [3] 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 251-264.  
ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and

- trends of fine-grained sedimentology [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 251–264.
- [4] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 1–10.  
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2014, 35(1): 1–10.
- [5] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 1–25.  
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 1–25.
- [6] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1333–1349.  
GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1333–1349.
- [7] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 128–142.  
ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi, et al. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 128–142.
- [8] 王建, 郭秋麟, 赵晨蕾, 等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2033–2044.  
WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2023, 44(12): 2033–2044.
- [9] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 116–127.  
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, LIU Wei, et al. Lacustrine medium-high maturity shale oil in onshore China: Enrichment conditions and occurrence features [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 116–127.
- [10] KRLTS K. Environments of deposition of lacustrine petroleum source rocks: An introduction [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1988, 40(1): 3–26.
- [11] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 2版. 青岛: 中国石油大学出版社, 2023.  
ZHU Xiaomin. *Sequence stratigraphy* [M]. 2nd ed. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2023.
- [12] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 39–48.  
ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 39–48.
- [13] NESBITT H W, YOUNG G M. Formation and diagenesis of weathering profiles [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(2): 129–147.
- [14] LIANG Haoran, XU Guosheng, XU Fanghao, et al. Paleoenvironmental evolution and organic matter accumulation in an oxygen-enriched lacustrine basin: A case study from the Laizhou Bay Sag, southern Bohai Sea (China) [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 217: 103318.
- [15] WU Zhuoya, ZHAO Xianzheng, WANG Enze, et al. Sedimentary environment and organic enrichment mechanisms of lacustrine shale: A case study of the Paleogene Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 573: 110404.
- [16] 何文渊, 柳波, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油地质特征及关键科学问题探索[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 49–62.  
HE Wenyuan, LIU Bo, ZHANG Jinyou, et al. Geological characteristics and key scientific and technological problems of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 49–62.
- [17] 王岚, 李文厚, 刘群, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7黑色页岩岩相分类与沉积环境恢复[J]. *古地学报*, 2023, 25(3): 598–613.  
WANG Lan, LI Wenhui, LIU Qun, et al. Lithofacies characteristics and sedimentary environment of Chang 7 black shale in the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(3): 598–613.
- [18] 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制——以鄂尔多斯盆地长7段为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(6): 1810–1829.  
LIU Hanlin, ZOU Caineng, QIU Zhen, et al. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment mechanism of lacustrine black shales: A case study of the Chang 7 member in the Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(6): 1810–1829.
- [19] LERMAN A. *Lakes: chemistry, geology, physics* [M]. New York: Springer, 1978.
- [20] 林晓慧, 詹兆文, 邹艳荣, 等. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境意义[J]. *地球化学*, 2019, 48(1): 67–78.  
LIN Xiaohui, ZHAN Zhaowen, ZOU Yanrong, et al. Elemental geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern Junggar Basin and its depositional environmental implications [J]. *Geochimica*, 2019, 48(1): 67–78.
- [21] 张奎华, 孙中良, 张关龙, 等. 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[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(4): 593–605.  
ZHANG Kuihua, SUN Zhongliang, ZHANG Guanlong, et al. Shale dominant lithofacies and shale oil enrichment model of Lower Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(4): 593–605.
- [22] 孙焕泉. 济阳坳陷页岩油勘探实践与认识[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(4): 1–14.  
SUN Huanquan. Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang Depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(4): 1–14.
- [23] 朱如凯, 张婧雅, 李梦莹, 等. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题[J]. *地质学报*, 2023, 97(9): 2874–2895.  
ZHU Rukai, ZHANG Jingya, LI Mengying, et al. Advances and



- key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(9): 2874–2895.
- [24] PETERS K E, MOLDOWAN J M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum [J]. *Organic Geochemistry*, 1991, 17(1): 47–61.
- [25] WEI Wei, ALGEO T J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 341–366.
- [26] 王小军, 杨智峰, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油勘探实践与展望 [J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(4): 402–413.
- WANG Xiaojun, YANG Zhifeng, GUO Xuguang, et al. Practices and prospects of shale oil exploration in Jimsar Sag of Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(4): 402–413.
- [27] 王岚, 曾雯婷, 夏晓敏, 等. 松辽盆地齐家—古龙凹陷青山口组黑色页岩岩相类型与沉积环境 [J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(8): 1125–1133.
- WANG Lan, ZENG Wenting, XIA Xiaomin, et al. Study on lithofacies types and sedimentary environment of black shale of Qingshankou Formation in Qijia-Gulong Depression, Songliao Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(8): 1125–1133.
- [28] 赵晨旭, 李忠诚, 郭世超, 等. 松辽盆地南部长岭断陷青一段陆相页岩地球化学和沉积环境特征 [J]. *特种油气藏*, 2023, 30(6): 55–61.
- ZHAO Chenxu, LI Zhongcheng, GUO Shichao, et al. Characteristics of geochemistry and depositional environment of terrestrial shales in the first member of Qingshankou Formation of Changling faulted depression in the southern Songliao Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(6): 55–61.
- [29] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/3): 65–82.
- [30] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111–129.
- [31] 刘兵兵, 马东正, 秦臻, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔南部中上二叠统沉积古环境分析——来自泥页岩生物标志化合物和元素地球化学方面的证据 [J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(10): 1571–1584.
- LIU Bingbing, MA Dongzheng, QIN Zhen, et al. Analysis of sedimentary paleoenvironment of Middle and Upper Permian in southern Jimsar, Junggar Basin: Evidence from biomarkers and elemental geochemistry of mudstone [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(10): 1571–1584.
- [32] 何文渊, 蒙启安, 付秀丽, 等. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩沉积环境特征及其有机质富集机理 [J/OL]. *沉积学报*: 1–21. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.128>.
- HE Wenyuan, MENG Qi'an, FU Xiuli, et al. Geochemical study of the sedimentary environment and its organic matter enrichment mechanism in Qingshankou Formation shale, Gulong Sag, Songliao Basin [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1–21. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.128>.
- [33] 张涛, 王琳霖, 廖慧鸿, 等. 沉积盆地古水深恢复方法与研究进展 [J/OL]. *沉积与特提斯地质*: 1–28. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.11003>.
- ZHANG Tao, WANG Linlin, LIAO Huihong, et al. Methods and research progress of paleo-water depth reconstruction in sedimentary basins [J/OL]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*: 1–28. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.11003>.
- [34] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪 [J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 405–414.
- XIONG Xiaohui, XIAO Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments-A summary [J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 405–414.
- [35] 王学军, 王志欣, 刘显阳, 等. 利用铀的测井响应恢复鄂尔多斯盆地古水深 [J]. *天然气工业*, 2008, 28(7): 46–48.
- WANG Xuejun, WANG Zhixin, LIU Xianyang, et al. Restoring palaeo-depth of the Ordos basin by using uranium response from GR logging [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(7): 46–48.
- [36] 张文正, 杨华, 解丽琴, 等. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响——以鄂尔多斯盆地长7烃源岩为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(4): 424–429.
- ZHANG Wenzheng, YANG Hua, XIE Liqin, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(4): 424–429.
- [37] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 936–946.
- FU Jinhua, LI Shixiang, XU Liming, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 936–946.
- [38] 张建国, 姜在兴, 刘立安, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组三段下亚段细粒沉积岩岩相特征与沉积演化 [J]. *石油学报*, 2021, 42(3): 293–306.
- ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIU Li'an, et al. Lithofacies and depositional evolution of fine-grained sedimentary rocks in the lower submember of the member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(3): 293–306.
- [39] 刘惠民, 于炳松, 谢忠怀, 等. 陆相湖盆富有机质页岩微相特征及对页岩油富集的指示意义——以渤海湾盆地济阳拗陷为例 [J]. *石油学报*, 2018, 39(12): 1328–1343.
- LIU Huimin, YU Bingsong, XIE Zhonghuai, et al. Characteristics and implications of micro-lithofacies in lacustrine-basin organic-rich shale: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(12): 1328–1343.
- [40] 杨万芹, 蒋有录, 王勇. 东营凹陷沙三下-沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(4): 19–26.
- YANG Wanqin, JIANG Youlu, WANG Yong. Study on shale facies sedimentary environment of Lower Es<sub>3</sub>-Upper Es<sub>4</sub> in

- Dongying Sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 19–26.
- [41] 刘惠民, 王勇, 李军亮, 等. 济阳坳陷始新统页岩相发育主控因素及分布特征[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 752–767.
- LIU Huimin, WANG Yong, LI Junliang, et al. Main controlling factors and distribution characteristics of shale lithofacies in the Eocene of Jiyang Depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(4): 752–767.
- [42] 段玮, 曾翔, 蔡进功, 等. 渤海湾盆地东营凹陷沉积环境和古生产力对优质烃源岩形成的控制——以牛庄洼陷沙河街组为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(11): 1754–1767.
- DUAN Wei, ZENG Xiang, CAI Jingong, et al. Control of sedimentary environment and paleoproductivity on the formation of high-quality hydrocarbon source rocks in Dongying Sag, Bohai Bay Basin: Case study of the Shahejie Formation in Niuzhuang Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(11): 1754–1767.
- [43] 张逊, 庄新国, 涂其军, 等. 准噶尔盆地南缘芦草沟组页岩的沉积过程及有机质富集机理[J]. 地球科学, 2018, 43(2): 538–550.
- ZHANG Xun, ZHUANG Xinguo, TU Qijun, et al. Depositional process and mechanism of organic matter accumulation of Lucaogou shale in southern Junggar Basin, northwest China [J]. Earth Science, 2018, 43(2): 538–550.
- [44] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 828–838.
- LIU Bo, SHI Jiaxin, FU Xiaofei, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 828–838.
- [45] 熊亮, 曹勤明, 张玲, 等. 细粒沉积岩岩相划分类型及其油气勘探意义——以四川盆地川西坳陷须家河组五段为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(5): 548–558.
- XIONG Liang, CAO Qinming, ZHANG Ling, et al. Types of fine-grained sedimentary rocks assemblage and its significance for shale oil exploration: A case study of the fifth member of Xujiache Formation in western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(5): 548–558.
- [46] 孟庆涛, 胡菲, 刘招君, 等. 陆相坳陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及成因——以松辽盆地晚白垩世青山口组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 20–37.
- MENG Qingtao, HU Fei, LIU Zhaojun, et al. Lithofacies types and genesis of fine-grained sediments in terrestrial depression lake basin: Taking Upper Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 20–37.
- [47] 邓远, 陈世悦, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段细粒沉积岩形成机理与环境演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 811–823, 890.
- DENG Yuan, CHEN Shiyue, PU Xiugang, et al. Formation mechanism and environmental evolution of fine-grained sedimentary rocks from the second member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 811–823, 890.
- [48] 杨智, 侯连华, 林森虎, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油、页岩油地质特征与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(4): 76–85.
- YANG Zhi, HOU Lianhua, LIN Senhu, et al. Geologic characteristics and exploration potential of tight oil and shale oil in Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(4): 76–85.
- [49] 王岚, 周海燕, 毕赫, 等. 松辽盆地北部青山口组黑色页岩的地质特征与海水侵入的成因模式[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 725–736.
- WANG Lan, ZHOU Haiyan, BI He, et al. Geological characteristics of black shale of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin and genetic model of marion transgression [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(4): 725–736.
- [50] ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Typical geological characteristics and exploration practices of lacustrine shale oil: A case study of the Kong-2 member strata of the Cangdong Sag in the Bohai Bay Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 103999.
- [51] 张少敏, 操应长, 朱如凯, 等. 湖相细粒混合沉积岩岩石类型划分: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 地质前缘, 2018, 25(4): 198–209.
- ZHANG Shaomin, CAO Yingchang, ZHU Rukai, et al. Lithofacies classification of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag, Junggar Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 198–209.
- [52] 付金华, 李士祥, 郭茂恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1702–1716.
- FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1702–1716.
- [53] 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.
- [54] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 524–534.
- ZHI Dongming, TANG Yong, YANG Zhifeng, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 524–534.
- [55] 徐明慧, 王峰, 田景春, 等. 湖相富有机质泥页岩岩相划分及沉积环境——以鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>亚段为例[J]. 沉积学

- 报: 1-24. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.076>.  
XU Minghui, WANG Feng, TIAN Jingchun, et al. Classification of lacustrine organic-rich mud shale petrography and the depositional environment: An example from the Chang 7<sub>3</sub> sub-member in the Ordos Basin[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1-24. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.076>.
- [56] LIANG Chao, WU Jing, JIANG Zaixing, et al. Sedimentary environmental controls on petrology and organic matter accumulation in the upper fourth member of the Shahejie Formation (Paleogene, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 186: 1-13.
- [57] 贺小标, 罗群, 李鑫, 等. 陆相混积页岩不同岩相孔隙差异特征及影响机制——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(1): 141-157, 210.  
HE Xiaobiao, LUO Qun, LI Xin, et al. Characteristics of pore differences between different lithofacies of continental mixed shale and the influencing mechanism: An example from the Premian Lucaogou Formatin in the Jimsar Depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(1): 141-157, 210.
- [58] 姜在兴, 王运增, 王力, 等. 陆相细粒沉积岩物质来源-搬运-沉积机制及多源油气甜点[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1039-1048.  
JIANG Zaixing, WANG Yunzeng, WANG Li, et al. Review on provenance, transport-sedimentation dynamics and multi-source hydrocarbon sweet spots of continental fine-grained sedimentary rocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1039-1048.
- [59] 王鑫锐, 孙雨, 刘如昊, 等. 陆相湖盆细粒沉积岩特征及形成机理研究进展[J]. *沉积学报*, 2023, 41(2): 349-377.  
WANG Xinrui, SUN Yu, LIU Ruhao, et al. Research progress into fine-grained sedimentary rock characteristics and formation in a continental lake basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(2): 349-377.
- [60] 操应长, 梁超, 韩豫, 等. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 729-741.  
CAO Yingchang, LIANG Chao, HAN Yu, et al. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(4): 729-741.
- [61] TOURTELOT H A. The use of the word "shale"[J]. *American Journal of Science*, 1960, 258: 335-343.
- [62] 黄建维. 粘性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J]. *泥沙研究*, 1981, 6(2): 30-41.  
HUANG Jianwei. Experimental study on settlement characteristics of cohesive sediment in still water[J]. *Journal of Sediment Research*, 1981, 6(2): 30-41.
- [63] 谢奎奎. 柴达木台南地区第四系细粒沉积岩相与沉积模式研究[J]. *地学前缘*, 2009, 16(5): 245-250.  
XIE Zongkui. Research on the Quaternary fine-fraction lithofacies and sedimentation model in Tainan area, Qaidam basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5): 245-250.
- [64] ARTHUR M A, SAGEMAN B B. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1994, 22: 499-551.
- [65] TRAN D, STROM K. Suspended clays and silts: Are they independent or dependent fractions when it comes to settling in a turbulent suspension? [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 138: 81-94.
- [66] ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIANG Chao, et al. Lacustrine massive mudrock in the Eocene Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China: Nature, origin and significance [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 1042-1055.
- [67] 黄军平, 杨田, 张艳, 等. 湖相细粒沉积岩沉积动力学机制与沉积模式——以鄂尔多斯盆地铜川地区延长组长7油层组露头为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(4): 1227-1239.  
HUANG Junping, YANG Tian, ZHANG Yan, et al. Sedimentary dynamics and deposition model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: A case study of the Chang 7 oil member from the Yanchang Formation in the Ordos Basin, Tongchuan area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(4): 1227-1239.
- [68] 朱柏宇, 印森林, 郭海平, 等. 陆相混合细粒岩沉积微相及其对甜点的控制作用——以吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(3): 839-856.  
ZHU Baiyu, YIN Senlin, GUO Haiping, et al. Continental sedimentary microfacies distribution of mixed fine-grained rocks and its controlling effect on sweet spots[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3): 839-856.
- [69] 韩文中, 赵贤正, 金凤鸣, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩油甜点评价与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 777-786.  
HAN Wenzhong, ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, et al. Sweet spots evaluation and exploration of lacustrine shale oil of the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 777-786.
- [70] 邓长生, 张毅, 谢小飞, 等. 鄂尔多斯盆地延长油气区延长组长7段陆相页岩含气性分析[J]. *石油地质与工程*, 2020, 34(1): 20-25, 32.  
DENG Changsheng, ZHANG Yi, XIE Xiaofei, et al. Gas bearing analysis of continental shale of Chang 7 member of Yanchang Formation in Yanchang oil & gas region of Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2020, 34(1): 20-25, 32.
- [71] 赵文智, 卞从胜, 蒲秀刚, 等. 中国典型成化湖盆页岩油富集与流动特征及在“甜点”评价中的意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(5): 25-37.  
ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, PU Xiugang, et al. Enrichment and flow characteristics of shale oil in typical salinized lake basins in China and its significance for "sweet spot" evaluation [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(5): 25-37.
- [72] 孙龙德, 崔宝文, 朱如凯, 等. 古龙页岩油富集因素评价与生产规律研究[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 441-454.  
SUN Longde, CUI Baowen, ZHU Rukai, et al. Shale oil enrichment evaluation and production law in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 441-454.
- [73] 张君峰, 徐兴友, 白静, 等. 松辽盆地南部白垩系青一段深湖



- 相页岩油富集模式及勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 637-652.
- ZHANG Junfeng, XU Xingyou, BAI Jing, et al. Enrichment and exploration of deep lacustrine shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation, southern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 637-652.
- [74] 朱国文, 王小军, 张金友, 等. 松辽盆地陆相页岩油富集条件及勘探开发有利区[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 110-124.
- ZHU Guowen, WANG Xiaojun, ZHANG Jinyou, et al. Enrichment conditions and favorable zones for exploration and development of continental shale oil in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 110-124.
- [75] 付金华, 王龙, 陈修, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油勘探开发新进展及前景展望[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(5): 1-14.
- FU Jinhua, WANG Long, CHEN Xiu, et al. Progress and prospects of shale oil exploration and development in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(5): 1-14.
- [76] 孙建博, 孙兵华, 赵谦平, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组长7湖相页岩油地质特征及勘探潜力评价[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(6): 29-37.
- SUN Jianbo, SUN Binghua, ZHAO Qianping, et al. Geological characteristics and exploration potential evaluation of Chang 7 lacustrine shale oil in Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(6): 29-37.
- [77] 刘显阳, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7<sub>3</sub>亚段泥页岩层系岩石类型特征及勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1177-1189.
- LIU Xianyang, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Characteristics of rock types and exploration significance of the shale strata in the Chang 7<sub>3</sub> sub-member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1177-1189.
- [78] SHI Jun, ZOU Yanrong, CAI Yulan, et al. Organic matter enrichment of the Chang 7 member in the Ordos Basin: Insights from chemometrics and element geochemistry[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 135: 105404.
- [79] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 561-569.
- FU Suotang, JIN Zhijun, FU Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 561-569.
- [80] 陈轩, 陶鑫, 覃建华, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷及周缘二叠系芦草沟组异重流沉积[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1530-1545.
- CHEN Xuan, TAO Xin, QIN Jianhua, et al. Hyperpycnal flow deposits of the Permian Lucaogou Formation in the Jimsar Sag and its peripheries, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1530-1545.
- [81] 康积伦, 王家豪, 马强, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组细粒湖底扇沉积及其页岩油储层意义[J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 82-93.
- KANG Jilun, WANG Jiahao, MA Qiang, et al. Fine-grained sublacustrine fan deposits and their significance in shale oil reservoirs in the Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 82-93.
- [82] ZHANG Chen, LIU Dongdong, JIANG Zhenxue, et al. Mechanism for the formation of natural fractures and their effects on shale oil accumulation in Junggar Basin, NW China[J]. International Journal of Coal Geology, 2022, 254: 103973.
- [83] MA Lichi, SONG Mingshui, WANG Yongshi, et al. Exploration progress of the Paleogene in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Energy Geoscience, 2023, 4(1): 42-50.
- [84] CHEN Zhonghong, JIANG Wenbo, ZHANG Linze, et al. Organic matter, mineral composition, pore size, and gas sorption capacity of lacustrine mudstones: Implications for the shale oil and gas exploration in the Dongying Depression, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(8): 1565-1600.
- [85] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
- JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [86] 张顺, 刘惠民, 刘雅利, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷页岩油地质甜点类型划分[J]. 地质论评, 2021, 67(增刊1): 237-238.
- ZHANG Shun, LIU Huimin, LIU Yali, et al. Classification of shale oil geological types of sweet spots in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geological Review, 2021, 67(S1): 237-238.
- [87] 周新锐, 王喜鑫, 李少华, 等. 陆相混积型页岩储集层孔隙结构特征及其控制因素[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(4): 411-420.
- ZHOU Xinrui, WANG Xixin, LI Shaohua, et al. Pore structure characteristics and controlling factors of continental mixed shale reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(4): 411-420.
- [88] 秦德超, 汤济广, 胡美玲, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷沙河街组一段泥页岩微观孔隙特征及其主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(5): 47-56.
- QIN Dechao, TANG Jiguang, HU Meiling, et al. Micro-pore characteristics and its main controlling factors of shale in Sha 1 Member of Shahejie Formation in Nanpu Sag of Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(5): 47-56.
- [89] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 225-235.
- SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 225-235.