

陆相页岩沉积学：岩相古地理研究的思考*

朱如凯^{1,2,3} 张天舒¹ 万 力^{1,3}1 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2 怀柔实验室新疆基地, 新疆乌鲁木齐 830013
3 中国石油油气储层重点实验室, 北京 100083

摘 要 全球 116 个盆地 157 套富有机质页岩层系页岩油技术可采资源量约为 2512 亿吨, 国外以海相页岩层系为主, 国内以湖相页岩层系为主。页岩油富集层评价与岩相古地理分布密切相关, 基于露头、岩心和地球物理的量化数据是湖相页岩层系岩相古地理编图的基础; 时空尺度、单因素、理论模式是湖相页岩层系岩相古地理编图的核心要素。页岩纹层研究新进展为岩相古地理研究提供反映沉积环境的单因素及其表征方法, 不同页岩纹层储集性和页岩油赋存状态差异大, 以纹层组合和页岩微相进行编图是发展趋势。未来研究应针对湖相页岩层系岩相与有机质分布的非均质性特点, 重点关注等时格架下的富有机质页岩分布规律、矿物—有机质复合颗粒的表征、标准化微相模式和沉积过程模拟与智能化编图等研究方向; 需结合现代沉积、沉积过程物理和数值模拟、有机岩石学和生物标志物等研究成果, 重新认识湖相页岩层系沉积微相和有机质富集机理, 建立符合细粒沉积物搬运—沉积规律、古地貌、生物演化特点的新沉积模式; 综合“反演”和“正演”方法, 运用人工智能技术, 结合页岩油甜点评价关键参数, 开展不同类型纹层组合时空分布规律的量化评价预测和智能化分析编图, 精细刻画湖相页岩层系岩相古地理分布, 指导页岩油富集区/段优选。

关键词 湖相页岩层系 细粒沉积岩 岩相古地理 陆相页岩沉积学 页岩油

第一作者简介 朱如凯, 男, 1968 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事沉积储集层与非常规油气地质研究。E-mail: zrk@petroChina.com.cn。

通讯作者简介 张天舒, 女, 1982 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事层序地层学与细粒沉积学研究。E-mail: zhangtianshu@petroChina.com.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

Non-marine shale sedimentology: perspectives
on lithofacies palaeogeography researchZHU Rukai^{1,2,3} ZHANG Tianshu¹ WAN Li^{1,3}

1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

2 Xinjiang Base of Huairou Laboratory, Urumqi 830013, China

3 CNPC Key Laboratory of Oil and Gas Reservoirs, Beijing 100083, China

Abstract The global technically recoverable resources of shale oil are estimated at approximately

* 国家自然科学基金企业创新发展联合基金集成项目(编号: U24B6004)与中国石油天然气股份有限公司科技项目(编号: 2024DJ87)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China Corporate Innovation and Development Joint Fund Integration Project (No. U24B6004) and the Science and Technology Project of China National Petroleum Corporation Limited (No. 2024DJ87)]

收稿日期: 2025-10-29 改回日期: 2025-11-24

251.2 billion metric tons, derived from 157 organic-rich shale units across 116 basins. Internationally, shale oil exploration has largely focused on marine shale successions, whereas in China, lacustrine shales represent the primary target. The assessment of shale oil enrichment intervals is fundamentally governed by lithofacies palaeogeography. Lithofacies palaeogeographic reconstruction of lacustrine shale strata relies on quantitative datasets derived from outcrop, core, and geophysical analyses. Critical aspects of such reconstructions include considerations of temporal and spatial scales, single-factor analysis, and the application of conceptual depositional models. Recent progress in the study of shale laminae offers valuable single factors and diagnostic methods for interpreting depositional environments in palaeogeographic studies. Significant variations in reservoir properties and shale oil occurrence are observed among different lamina types. Consequently, palaeogeographic mapping based on lamina combinations and shale microfacies analysis represents an emerging research trend. Future research should aim to address the heterogeneous characteristics of lithofacies and organic matter distribution in lacustrine shale strata. Future studies should aim to resolve the heterogeneous distribution of lithofacies and organic matter in lacustrine shales, with priority given to: (1) delineating the spatial architecture of organic-rich shales within high-resolution chronostratigraphic frameworks, (2) characterizing mineral-organic composite structures, (3) establishing standardized microfacies classifications, and (4) developing depositional process simulations integrated with intelligent mapping techniques. An integrated approach combining modern sedimentological observations, sedimentary process simulations (both physical and numerical), organic petrology, and biomarker analysis is essential to reassess the sedimentary microfacies and organic enrichment mechanisms in lacustrine shale strata. This will facilitate the development of revised depositional models that accurately reflect the transport-deposition dynamics of fine-grained sediments, palaeotopographic constraints, and bioevolutionary context. By combining “inversion” and “forward modeling” methods and leveraging artificial intelligence technology, and incorporating key sweet-spot evaluation parameters, it is possible to quantitatively predict and intelligently map the spatiotemporal distribution of different lamina combinations. This methodology will allow for precise lithofacies palaeogeographic characterization of lacustrine shale strata and provide scientific guidance for the optimization of shale oil enrichment areas/layers.

Key words lacustrine shale strata, fine-grained sedimentary rocks, lithofacies palaeogeography, non-marine shale sedimentology, shale oil

About the first author ZHU Rukai, born in 1968, is a Ph.D. and research professor. He is engaged in sedimentary reservoirs and unconventional oil and gas geology. E-mail: zrk@petroChina.com.cn.

About the corresponding author ZHANG Tianshu, born in 1982, is a Ph.D. and senior engineer. Her main research focuses on sequence stratigraphy and fine-grained sedimentology. E-mail: zhangtianshu@petroChina.com.cn.

页岩层系 (shale strata) 是页岩及其互邻共生或夹持其中的薄层粉砂岩、细砂岩、碳酸盐岩、混积岩等构成的一套地层, 其中粉砂岩、细砂岩、碳酸盐岩等夹层厚度不大于 5 m (NB/T 11611—2024, 3.1)。页岩层系以细粒沉积岩为主, 是主要的页岩油气产层。全球 116 个盆地 157 套富含有机质页岩层系页岩油技术可采资源量约为 2512 亿吨, 国外页岩油以海相页岩层系为主, 国内页岩油以湖

相页岩层系为主 (邹才能等, 2023); 在构造、沉积特征和技术可采资源量等方面差异较大, 改造体积是页岩油高效开发的核心问题。美国海相页岩油气开发规模持续增大、效率持续提升、产量快速增长, 2023 年美国页岩油、气产量分别为 4.69 亿吨和 8369 亿方, 在油气总产量中占比分别为 73% 和 78% (McMahon *et al.*, 2024)。加拿大西加盆地页岩油技术可采资源量约 12.06 亿吨, 预计到 2050

年将达 1.8 万桶/天 (Canada Energy Regulator, 2021); 阿根廷 Neuquén Basin Vaca Muerta (内乌肯盆地瓦卡穆埃尔塔组) 页岩油 2023 年产量 1600 万吨, 预计到 2030 年达 5500 万吨/年 (李峻, 2023)。中国陆相页岩油资源丰富, 是目前现实可靠的石油接替资源, 其储集层大致可划分为夹层型、混积纹层型和纯页岩型 3 类 (焦方正等, 2020; 赵文智等, 2023)。通过勘探评价、先导试验和规模建产等探索实践, 先后在准噶尔、鄂尔多斯、三塘湖、松辽、渤海湾、柴达木等盆地取得重大突破, 2024 年页岩油产量快速提升至 600 万吨以上, 同比增长 35%^①。尽管中国陆相页岩油勘探开发取得了显著进展, 但理论技术体系尚不完善, 页岩油开发效率仍未达到经济规模化水平 (郭旭升等, 2025)。由于不同类型页岩油地质特征差异大, 富有机质岩相非均质性强, 分布规律不清, 井控区甜点边界和少井区甜点对比评价难落实, 制约建产开发。为增储上产满足页岩油精细开发的要求, 湖相页岩层系岩相和沉积相分布的地质规律有待深入研究, 工业化地质编图的精度亟需提高。因此, 湖相页岩层系岩相古地理研究及编图, 对陆相页岩油资源潜力评价、预测页岩油富集区/段具有重要的指导意义。

近年来, 在页岩的岩石学分类及岩相划分、纹层的成因机制及含油性、有机质富集机理、天文旋回与有机质分布、沉积正演模拟等方面取得了新的认识, 国内典型盆地重点页岩层系岩相古地理研究也取得了重要进展, 为湖相页岩层系岩相古地理研究带来了新的思路和启示。为此, 孙龙德等 (2024) 提出融合沉积岩石学、石油地质学、纳米科学等多学科建立“陆相页岩沉积学”。陆相页岩沉积学应用数字化新技术方法, 建立不同学科知识体系和实验技术的交叉联网, 系统分析细粒沉积物的搬运、沉积、水生、成岩、演化等过程中的物理、化学和生物作用方式。此外, 陆相页岩沉积学从矿物、有机质、孔隙、流体与相态等静态和动态演化过程入手, 开展陆相页岩层系的岩相、纹层组合和有机质的平面分布预测等领域的技术研发及应用, 服务于页岩油气勘探开发实践。

然而, 由于湖相页岩层系与海相页岩层系、湖相粗粒沉积体系的搬运—沉积机制差异较大, 目前编绘的典型盆地页岩层系岩相古地理图, 在湖盆中心区往往以笼统的半深湖—深湖相区为主, 不能有效指导有利区的评价预测。从现状看, “反演”思路下湖相页岩层系岩相古地理编图的技术难点主要包括以下主要方面: 一是等时性, 湖相沉积变化快、时间尺度小、界面识别难, 传统层序地层学不适用湖相页岩层系编图精度; 二是跨尺度规律性, 陆相页岩粒度小, 跨空间尺度耦合及测井解释编图是否符合沉积地质规律存疑; 三是沉积模式需变革, 传统湖相沉积模式缺少深湖区沉积微相细化, 无法指导岩相古地理编图。在综合分析前期研究进展的基础上, 基于不同页岩油区勘探开发实践的需求, 提出陆相页岩沉积学的发展要针对湖相页岩层系岩相与有机质分布的非均质性特点, 结合现代沉积、沉积过程物理和数值模拟、有机岩石学和生物标志物等研究成果, 重新认识湖相页岩层系沉积微相和有机质富集机理, 建立符合细粒沉积物搬运—沉积规律、古地貌、生物演化特点的新沉积模式; 综合“反演”和“正演”方法, 运用人工智能技术, 结合页岩油甜点评价关键参数, 开展不同类型纹层组合时空分布规律的定量化评价预测和智能化分析编图, 重建湖相页岩层系岩相古地理, 指导页岩油富集区/段优选。

1 岩相古地理研究与页岩油勘探

1.1 沉积盆地与页岩油

古地质时期的盆地类型对生储盖等成藏要素的形成至关重要, 不同原型盆地形成独特的沉积—构造体系, 决定了不同的含油气条件 (童晓光 and 何登发, 2001; 窦立荣 and 温志新, 2021)。构造控制了沉积盆地富有机质岩相的沉积充填序列和沉积样式, 控制了烃源岩的发育与分布 (牟传龙等, 2016)。因此, 构造—岩相古地理研究以构造为主线, 恢复海陆和盆山格局的变化, 明确盆地发育、沉积演化及其关键地质事件对烃源岩分布的控制作用, 对于综合对比不同类型沉积盆地的页岩油形成

^① 国家能源局石油天然气司, 国家油气战略研究中心, 中国石油勘探开发研究院, 中国石化石油勘探开发研究院, 中国海油勘探开发部. 2025. 中国油气勘探开发发展报告. 10.

的地质条件及资源潜力评价具有指导意义（窦立荣和温志新，2021；李增学等，2021）。根据解剖全球典型沉积盆地的类型、叠加演化、沉积充填模式和烃源岩特征等，认为富有机质页岩层系主要沉积在劳亚构造域和特提斯构造域的被动大陆边缘、前陆盆地、内克拉通盆地、走滑拉分盆地和陆内裂谷等构造活动稳定或较弱的保存完整的沉积盆地（牟传龙等，2016；窦立荣和温志新，2021）。页岩油主要富集在上侏罗统、渐新统一中新统、白垩系和上泥盆统 4 套页岩层系，低熟页岩油和中高熟页岩油技术可采资源量分别为 2099 亿吨和 413 亿吨（邹才能等，2023）。其中，陆相页岩油主要分布在中国、美国、阿根廷、澳大利亚和乍得等国家的断陷湖盆、拗陷湖盆、前陆盆地前渊等负向构造单元中心及其周缘斜坡中心（李梦莹等，2022）。

1.2 沉积环境与页岩油

沉积环境决定了有机质的类型和含量、岩石的矿物组成和厚度（牟传龙等，2016）。页岩层系的有机质富集机理较为复杂，受到天文旋回驱动下的气候变化、火山喷发、重力流沉积、海水缺氧、海侵作用、深部热源活动和藻类勃发等诸多因素的控制（邱振和邹才能，2020；朱如凯等，2022，2025）。陆相页岩层系的分布受长周期构造演化和中短期气候变化旋回控制，一般形成于二叠纪一新近纪气候湿润的暖室期，靠近海洋的盆地易受间歇海侵影响，形成海陆过渡相沉积，但在陆内干旱气候带发育蒸发咸化湖盆沉积（邹才能等，2023）。

淡水和咸化湖盆均可形成高有机质含量的优质烃源岩，且受沉积作用和成岩作用的共同控制，发育（粉）砂岩、碳酸盐岩、页岩、泥岩和混积岩等多种类型储集体，以源储一体、近源聚集为特征，发育多个甜点段（李梦莹等，2022）。由于不同页岩岩相类型的非均质性差异明显，“甜点区/段”的评价和预测是陆相页岩油勘探开发的重点和难点，应根据盆地沉积背景和地质资料，基于地质工程一体化基础研究，遴选关键参数并确定其阈值，分析各参数之间的时空耦合关系，优选富集层（孙龙德等，2023）。页岩油富集层评价参数，如含油性、储集性、可动性、可压性和可采性，与岩相古地理特征密切相关（表 1），因此，通过精细岩相古地理编图，可以明确富有机质岩相的时空分布，并叠加关键评价参数，预测富集区/段。

2 湖相页岩层系岩相古地理研究的技术难点

在定量岩相古地理学研究中，岩相和古地理单元的划分和确定基于定量的资料和基础图件，应用单因素分析多因素综合作图法，厘定沉积、层控矿床和油气地质条件的有利相带，为地质找矿和油气勘探提供科学依据（冯增昭，2004，2005）。湖相页岩层系岩相古地理研究的目的是针对湖相页岩层系岩相与有机质分布的非均质性，创新建立半深湖区—深湖区沉积模式，形成符合沉积学原理、钻井准确率高，不同尺度、量化预测和智能化的编图

表 1 北美和中国页岩油富集层评价参数与相关岩相古地理特征（据孙龙德等，2023；有修改）
Table 1 Evaluation parameters and associated lithofacies palaeogeographic characteristics of shale oil enrichment layers in North America and China (modified from Sun *et al.*, 2023)

核心要素	评价参数	岩相古地理特征	北美	中国
含油性	TOC 含量, 氢指数, S_1	岩相、沉积相、古地貌、古生态等	TOC > 2%, 氢指数大于 400 mg/g, 处于生油窗—凝析气窗期(理想值 $R_o > 1.0\%$) 等	TOC > 1%, $S_1 > 2$ mg/g, $R_o > 1.0\%$ 等
	成熟度 (R_o)	构造演化、热事件等		
储集性	厚度	岩相、沉积相、物源、构造沉降、古地貌等	厚度大于 25 ~ 30 m (理想值大于 50 m), 平均孔隙度大于 6% ~ 12%, 发育天然裂缝等	厚度大于 10 m, 孔隙度大于 3%, 裂缝发育
	孔隙度	岩相、沉积相等		
	裂缝	构造演化等		
可动性	显示及产量、地层压力	构造演化等	页岩段具有气显示和测试产量, 地层超压等	地层压力系数大于 1.0, 地层超压
可压性	脆性矿物含量	岩相、沉积相、物源、古地貌等	硅/钙质等脆性矿物含量大于 45%, 蒙脱石等黏土矿化含量低	脆性矿物含量大于 30%, 黏土矿物含量小于 35%
	黏土矿物含量	岩相、沉积相、物源、古地貌等		
可采性	埋深	构造演化等	现今埋深小于 4100 m	现今埋深小于 4500 m

技术,指导页岩油富集区/段优选及开发地质建模落实甜点。湖相页岩层系岩相古地理研究是大比例尺的应用性研究,露头、岩心和地球物理的量化数据是岩相古地理编图的基础。湖相页岩层系岩相古地理编图的主要步骤是:(1)确定区域范围和等时界面;(2)建立特殊分析指标/参数,即:单因素;(3)获取定量数据,编制基础图件;(4)明确主控因素,如:古物源、古地貌、古气候等;(5)建立沉积模式,划分沉积微相;(6)按编图单元编制岩相古地理图。时空尺度、单因素和理论模式是湖相页岩层系岩相古地理研究的核心要素。然而,由于湖相页岩层系自身的特点,“反演”思路指导下以地质统计学和插值为主要方法的岩相古地理研究,面临等时性及编图精度、跨尺度规律性和沉积模式重建等技术难点。

2.1 等时性及编图精度

层序—岩相古地理研究以层序及其单元内界面为等时面,通常将体系域作为成图单元,采用体系域内的岩相压缩法编制岩相古地理图,由于反映了具体地质体的相对等时性,对油气勘探目标评选和远景预测具有指导意义(马永生等,2009)。湖相页岩层系的沉积构造和组成成分对于小尺度的气候、湖平面和物源变化更为敏感,无法用常规地球物理资料和生物标志层识别等时界面,传统层序地层学的应用受到限制(张天舒等,2023)。“层序等级”理论认为不同等级的层序具有不同的时间尺度,驱动力、主控因素及其体现的规律性存在差异(Catuneanu, 2019)。高频层序厚度一般为1~10 m,时间跨度一般为 $10^2 \sim 10^5$ 年,驱动力主要为天文周期和气候变化,以及火山、地震、洪水、风暴和滑塌等事件(Catuneanu, 2019; Rohais *et al.*, 2021)。湖相页岩层系的沉积特征受高频层序控制,可以根据地层叠置方式横向对比,但对于井间表征,常规地球物理技术面临挑战,平面成图难度较大,需要在研究精度和平面成图之间找到合适的平衡点。

国外针对海相页岩层系的层序—岩相古地理研究,主要采用三级层序格架下的体系域或海侵—海退(T-R)层序理论,以体系域(10^6 年时间尺度)为编图单元,利用岩心和常规测井资料做地层叠置样式或关键层序界面的横向对比,编制精度

为40~60 m,并不能满足国内陆相页岩油勘探开发要求的10~20 m编图精度(表2)。国内针对湖相页岩层系的层序—岩相古地理研究,主要采用三分体系域、T-R层序和旋回地层学理论,以体系域(10^6 年时间尺度)或准层序组(10^5 年时间尺度)为编图单元,利用岩心、薄片、测井、地球化学和古生物等数据开展定量统计、函数分析和滤波调谐等,编图精度20~60 m,纵向和平面成图精度和准确度差异较大,无法推广应用于国内陆相页岩油勘探开发实践(表2)。

2.2 跨尺度规律性

湖相页岩层系以细粒沉积岩为主,细粒沉积岩中粒级小于 $62.5 \mu\text{m}$ 的颗粒含量大于50%(Picard, 1971; 姜在兴等, 2013)。细粒沉积岩的“沉积微结构”复杂,包括纹层结构、非纹层结构(镜下视域尺度为结构,岩心尺度则为沉积构造)以及黏土颗粒接触关系等(吴冬等, 2025)。纹层是层理中厚度小于1 cm且不可再分的最基本单元(蔡毅等, 2022)。传统观点认为,页岩的沉积特征是“均质的”,是静水条件下悬浮沉积的产物,纹层由沉积间断形成(Schimmelmann *et al.*, 2016)。水槽实验、海洋沉积观测及泥页岩扫描电镜的精细观察显示,在底流、异重流、风暴流及浪控沉积物重力流等多种搬运和沉积机制下,细粒沉积物质可以形成毫米—微米级厚度的纹层类型(王铭乾等, 2025)。此外,细粒沉积物中的黏土颗粒之间具有静电吸附、絮凝等电化学作用,其形成的絮凝物可以作为高密度流或浊流的成分在海底进行搬运(Schieber *et al.*, 2007; Yawar and Schieber, 2017)。细粒沉积岩粒度小,纹层结构复杂,且横向变化快,在不同岩心或露头的薄片之间进行厘米级以下尺度的岩相对比极为困难(Plint, 2014)。湖相页岩层系岩相古地理的研究难点,在于将微观尺度下的颗粒间作用、介观尺度下的沉积层理和宏观尺度下的地层叠置样式等跨尺度的规律耦合在一起,并充分论证样品代表性、实验条件和方法的误差问题,以及静态参数和动态演化过程之间的内在联系,实现纵向和平面编图。近年来,非常规油气测井地质学发展迅速,通过应用新技术测井(Litho-Scanner测井)评价TOC和矿物组分,成像测井识别沉积构造,实现岩相测井评价与预测(赖锦等, 2023)。此外,不同的机器学习方法被广泛运用至

表 2 国内外细粒沉积层序地层主流研究思路和方法

Table 2 Main research approaches and methods for sequence stratigraphy of fine-grained sedimentary systems: a global perspective

层序 级别	沉积 环境	层序内划分体系	层序对比方法	编图单元	代表文献
三级 层序	海相	三分体系域 (LST,TST,HST) 准层序组、准层序	地层叠置样式,露头/岩心/薄片定量统计沉积特征、常规测井(自然伽马,电阻率,声波,中子,密度)	体系域	Bohacs <i>et al.</i> , 2022
		四分体系域 (FSST, LST, TST,HST) 准层序组、准层序	陆架边缘迁移地层叠置样式,露头/岩心/薄片定量统计沉积特征、常规测井(自然伽马,电阻率,声波,中子,密度)		Catuneanu, 2020
		海侵—海退(T-R)	关键界面识别,露头/岩心/薄片定量统计沉积特征、常规测井(自然伽马,电阻率,声波,中子,密度)		Zhang <i>et al.</i> , 2022
		三分体系域 (LST,TST,HST) 准层序组、准层序	地层叠置样式,露头/岩心/薄片定量统计沉积特征、常规测井(自然伽马,电阻率,声波,中子,密度)		陈亮等, 2020; 杨悠然, 2021; 胡宗全等, 2022; 匡明志等, 2023
		高分辨率层序 长期、中期和短期基准面旋回	转换面识别,测井,砂泥比曲线法、R/S分析法、活度函数分析法、小波分析法、化学地层学	中期旋回	王茜等, 2021; 赵迪斐等, 2021
	湖相及海陆过渡相	三分体系域 (LST,TST,HST) 准层序组、准层序	地层叠置样式,地震、露头/岩心/薄片定量统计沉积特征、常规测井(自然伽马,电阻率,声波,中子,密度)	体系域、准层序组	施振生等, 2021; 王丹君, 2021; 金磊, 2022; 李汶恒, 2022
		四分体系域 (FSST, LST, TST,HST,RST) 准层序组、准层序	陆架边缘迁移地层叠置样式,露头/岩心/薄片定量统计沉积特征、常规测井(自然伽马,电阻率,声波,中子,密度)		李元吉, 2022; 徐小涛, 2022
		高分辨率层序 长期、中期和短期基准面旋回	地震、测井,砂泥比曲线法、R/S分析法、活度函数分析法和 小波分析法	中期旋回	张自力, 2020; 魏小松, 2021; 冯烁等, 2022; 于金巧, 2022; 向晋秦, 2023
		湖侵—湖退(T-R)	关键界面识别,露头/岩心/薄片定量统计沉积特征、地球化学、常规测井(自然伽马,电阻率,声波,中子,密度)	四—五级T-R旋回	Zhang <i>et al.</i> , 2021; 冯有良等, 2023; 张天舒等, 2023; 赵贤正等, 2023
		天文旋回	测井自然伽马,通过滤波与调谐,建立天文年代标尺,计算沉积速率,得出长偏心率、短偏心率、斜率和岁差沉积旋回周期	偏心率—斜率	张若琳和金思丁, 2021; 石巨业等, 2023; 盛军等, 2025

岩相预测和储集层评价(石玉江等, 2021; Hou *et al.*, 2023; 王鑫锐, 2024; 唐佰强等, 2025)。

然而, 这些先进技术在湖相页岩层系中的应用仍面临显著的局限性与多解性。由于测井数据分辨率的限制, 对于 LithoScanner 等新技术测井, 其在复杂矿物组合条件下的解释精度存在不确定性, 矿物组分计算的模型误差会直接传递给依赖其划分的岩相类型。成像测井对毫米级纹层的识别能力受井眼条件和分辨率限制, 对于非典型或遭受成岩改造的沉积构造, 解释均易产生多解性。机器学习方法的有效性强烈依赖于训练样本的数量与代表性。在勘探初期或地质条件复杂的少样本区, 模型泛化能

力不足, 难以准确预测未知的岩相类型, 导致平面预测的准确度存在争议。当前基于机器学习的岩相预测模型, 多适用于矿物成分相对单一、沉积构造相对简单、且研究区内样本数据较为充足的页岩层系。对于沉积机制多变、岩相构成复杂的湖相页岩层系, 其应用效果具有不确定性。因此, 总体而言, 当前以静态参数的地质统计为基础建立常规测井评价模型, 并通过横向对比成图的技术路径, 由于上述方法在精度、适用性上的固有局限, 其是否能够真实反映实际的沉积地质规律仍面临严峻挑战。

2.3 沉积模式创新

前人根据洪水面、枯水面和浪基面将湖泊划分

为半深湖—深湖、滨浅湖和扩张湖（吴崇筠和薛叔浩，1993）。湖盆地形变化引起水动力条件的变化，对沉积物的分选和分布起着主导作用，理想的陆源碎屑湖盆中，沉积物按粒度粗细呈有规律的同心圆或带状分布；而古湖泊沉积时期，受到古物源、古地貌和古气候等诸多因素的控制，沉积物的物质组成和分布更为复杂（金相灿，1995；朱筱敏，2008）。传统研究根据陆架—深海源汇系统理论建立古湖盆沉积模式和岩相古地理，重点关注断陷湖盆扇三角洲—浊积扇粗碎屑沉积，而在拗陷期湖盆深湖区缺少微相细化，模式单一，无法指导湖相页岩层系岩相古地理编图（朱筱敏等，2022；龚承林等，2023；张志杰等，2023）。细粒沉积物富含黏土矿物和有机质，其搬运过程及分布规律与粗粒沉积物之间存在明显差异。随着细粒沉积物搬运机制的深入研究，异重流、碎屑流、泥流、浓缩密度流和过渡流等细粒重力流沉积类型被定义，进而明确了深水细粒沉积物分布的沉积动力学机制（Mulder and Alexander, 2001；Baas *et al.*, 2011；Zavala and Arcuri, 2016；Baker and Baas, 2020）。目前，亟需依据细粒沉积物的不同搬运机制，在半深湖—深湖区进一步细分岩相、沉积微相，建立符合细粒沉积物搬运—沉积规律的新沉积模式，指导湖相页岩层系岩相古地理重建。

3 陆相页岩沉积学研究进展及其对岩相古地理研究的启示

3.1 页岩的岩石学分类和岩相划分

不同单位和学者对于页岩的岩石学分类的研究目的和侧重点不同，研究型单位强调物质来源和成因，如：陆源及火山颗粒、钙质异化颗粒和自生硅质异化颗粒三端元分类（Milliken, 2014），基于粒度、矿物成分、组分来源和生物改造程度的分类（Lazar *et al.*, 2015），基于物质来源及成因的“四组分三端元”分类（操应长等，2023），以及基于粒度、成分和结构的分类（Biddle *et al.*, 2025）。油气产业单位采用成分分类，强调实用性，突出储集层品质与可压性，如：黏土、（石英、长石）、碳酸盐含量三端元分类（孙龙德等，2024）。然而，黏土矿物、长英质矿物和碳酸盐矿物含量三端元分类不能客观反映页岩的生烃潜力、储集性、可压性

等。页岩样品由刚性颗粒（石英、长石、碳酸盐矿物、黄铁矿等）、塑性组分（黏土矿物、有机质及有机黏土复合物等）、储集空间（孔、缝、有机黏土复合孔缝）组成，基于上述三端元的页岩岩石学分类，适用于页岩油的地质工程一体化应用，科学指导了古龙页岩油 Q1—Q9 油层的富集段评价（图 1）（孙龙德等，2024）。

岩相（沉积岩相）为反映一定沉积环境的岩性特征，包括所有物理的、化学的（矿物和岩石的）及生物的特征（冯增昭，2022）。湖相页岩主要发育在半深湖—深湖环境，其物质组成、粒度、层理和有机质丰度的差异反映了沉积物形成—搬运—沉积过程中的物理、化学和生物作用。页岩中的有机组分控制页岩的生烃能力，无机矿物和有机组分之间的产状关系与成因联系决定了页岩中的源和储的耦合关系，控制页岩油气的赋存能力（胡宗全等，2020）。因此，需建立既符合沉积规律的科学性，又能指导页岩油富集层评价和高效开发的页岩岩相划分方案。为适应国内页岩油气勘探开发新形势，基于沉积学理论技术进展和油田应用实践，国家能源局于 2024 年 9 月发布《页岩层系岩相划分与编图规范》行业标准（NB/T 11611—2024），并于 2025 年 3 月实施。标准规定，页岩岩相是具有相同或相似岩石矿物组成、颗粒粒径、层理类型、总有机碳含量的页岩或页岩组合，其划分命名为“TOC”+“层理类型”+“颗粒粒径”+“岩石矿物类型”页岩；需按照页岩岩相厚度、旋回及成因组合关系，确定页岩岩相组合类型，且页岩岩相的组合类型划分应在常规测井曲线上可表征。页岩的

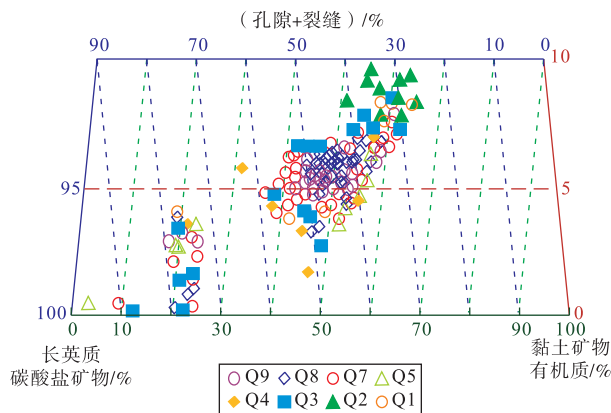


图 1 大庆油田古龙页岩的岩石学分类（据孙龙德等，2024）

Fig. 1 Petrological classification of the Gulong Shale of Daqing Oilfield (after Sun *et al.*, 2024)

岩石学和岩相分类新进展进一步明确了湖相页岩层系关于“岩相”的定义和划分方案，强调了湖相页岩层系岩相古地理研究的科学性和应用性。

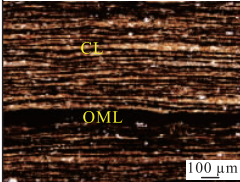
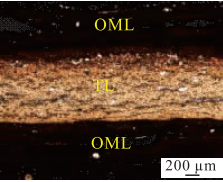
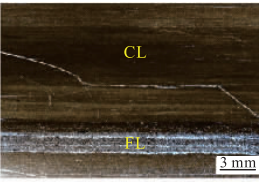
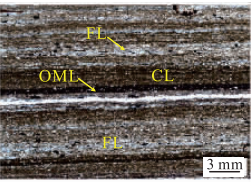
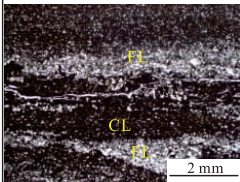
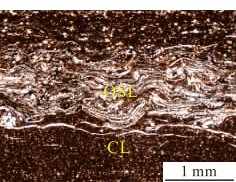
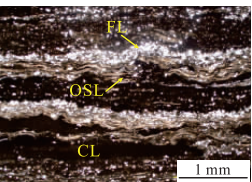
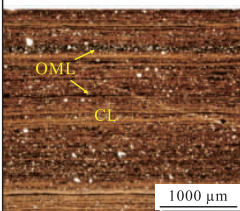
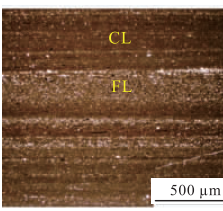
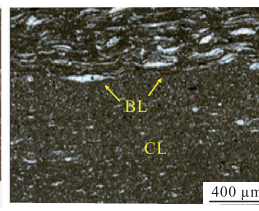
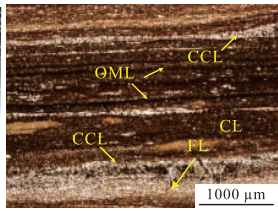
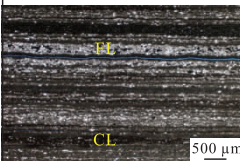
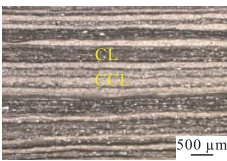
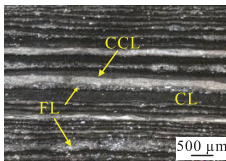
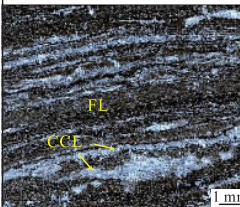
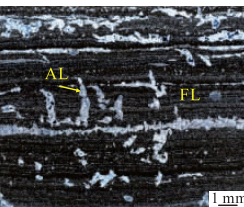
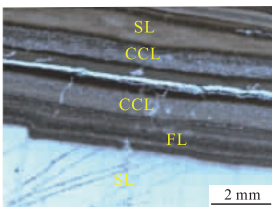
3.2 纹层的成因机制及含油性

纹层是沉积岩中可分辨的最小或最薄的原始沉积层，是基于成因解释定义的沉积单元。大量研究表明，湖相页岩中发育黏土矿物纹层、碳酸盐纹

层、砂质纹层、凝灰质纹层、混合纹层、有机质纹层等丰富的纹层类型，其组合样式影响着有机质富集程度、含油性及力学性质，对页岩油富集起着重要作用（吴松涛等，2022；李军亮等，2025；牛小兵等，2025）。对比不同盐度湖盆页岩纹层发育特征差异，揭示纹层形态及其成因机制，分析纹层组合与有机质富集、页岩油赋存和运移之间的内在联

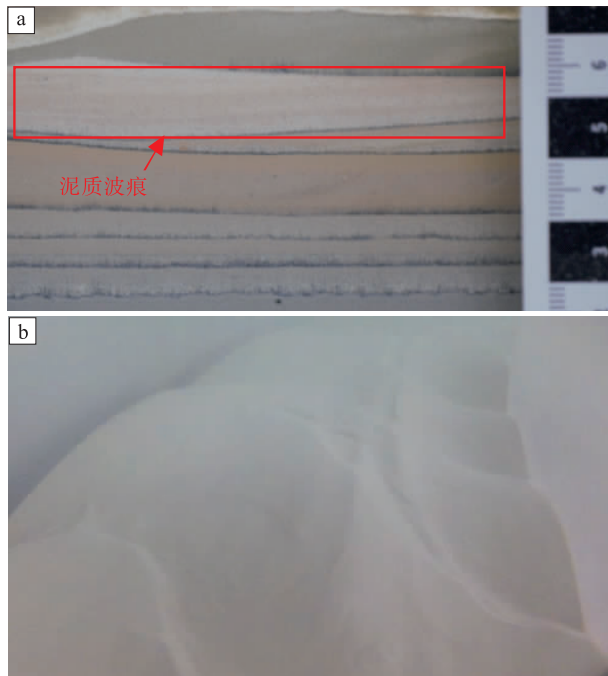
表 3 中国不同盐度湖盆页岩的典型纹层组合类型

Table 3 Typical lamina combination types in shales from lacustrine basins with various salinities in China

盆地及层系	湖盆类型	页岩的纹层组合类型			
鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段	淡水				
		黏土+有机质纹层	凝灰质+有机质纹层	长英质+黏土纹层	长英质+黏土+有机质纹层
松辽盆地白垩系青山口组	淡水—微咸水				
		长英质+黏土纹层	介形虫+黏土纹层	长英质+介形虫+黏土纹层	
渤海湾盆地古近系孔店组二段 (Li et al., 2021a)	咸水				
		黏土+有机质纹层	长英质+黏土纹层	生物碎屑+黏土纹层	长英质+黏土+碳酸盐+有机质纹层
柴达木盆地古近系下干柴沟组上段	咸水				
		长英质+黏土纹层	碳酸盐+黏土纹层	长英质+碳酸盐+黏土纹层	
准噶尔盆地二叠系风城组二段	碱性				
		长英质+碳酸盐纹层	长英质+碱性矿物纹层	长英质+碳酸盐+燧石纹层	

注：CL：黏土矿物纹层；FL：长英质纹层；OML：有机质纹层；CCL：碳酸盐矿物纹层；OSL：介形虫纹层；AL：碱性矿物纹层；SL：燧石纹层；BL：生物碎屑纹层。

系,成为研究热点和重点。研究表明,随盐度增加黏土矿物纹层发育程度降低,碳酸盐纹层和碱性矿物纹层增加,纹层组合类型主要为二元、三元和四元组合(表3)。不同盐度湖盆页岩纹层的形成均可归于如下成因机制:悬浮沉降(季节性纹泥和羽状流沉积)、重力流远端(滑塌浊流、异重流、浪控沉积物重力流、混合事件层)、底流和火山、热液及微生物作用(王铭乾等,2025)。近期,开展针对松辽盆地青山口组页岩纹层形成机制的水槽物理模拟实验,依据实际样品数据配置细粒沉积物组成,模拟不同流速条件下细粒物质的差异沉降,实验结果揭示,低速牵引流作用下,受控于沉积物类型及絮凝程度,细粒物质可由絮凝作用形成规律性的泥质波痕(图2)。



a—泥质波痕剖面特征; b—泥质波痕底形特征

图2 低速牵引流作用下由黏土矿物形成的
泥质波痕剖面特征

Fig. 2 Profile characteristics of argillaceous wave ripples formed
by clay minerals under low-velocity tractive currents

页岩油的赋存状态和可动性是页岩油地质资源量评价和页岩油有效开发的关键要素。在原位的页岩油体系中,原油的赋存状态以游离油和吸附油为主(朱如凯等,2023)。游离油以轻烃组分为主,赋存于页理缝、微裂缝、层间隙以及孔喉直径相对较大的基质孔隙中(Jarvie, 2012)。吸附油以中—

大分子组分为主,流动性较差,主要存在于有机孔、黄铁矿晶间孔和黏土矿物晶间孔中(Carlson and Chamberlain, 1986)。矿物的吸附能力和润湿性存在差异,黏土矿物对油的吸附能力强,长英质矿物对油的吸附能力弱,碳酸盐矿物对于吸附油、可动油具有正向作用。同时,孔径大小、总孔隙体积和比表面积也控制了吸附油量(Zhang *et al.*, 2023)。研究表明,不同页岩纹层的储集性和页岩油赋存状态差异大,且存在微运移。松辽盆地青一段页岩黏土质纹层孔隙数量、孔隙度、孔隙直径、孔体积和比表面积最大,其次为长英质纹层,碳酸盐纹层最小(华柑霖, 2023)。溶剂分步抽提法和激光共聚焦实验,揭示松辽盆地青一段页岩不同纹层中不同极性原油在孔隙中的聚集和不同烃类分布特征差异(朱如凯等, 2023)。在富有机质的黏土质纹层中,有机质生成的烃类优先滞留在尺寸较小的有机质孔和黏土晶间孔中,部分可动烃运移至非黏土质纹层中;长英质纹层和混合质纹层接受临近黏土质纹层供烃,在原生碳酸盐矿物发育的混合质纹层中,溶蚀孔发育,弱极性烃可大量运移充注;在长英质纹层中,碳酸盐矿物、黄铁矿和黏土矿物胶结较强,孔隙不发育,可动烃难以运移充注(刘畅等, 2025)。因此,纹层的有机质含量、孔径分布和成岩作用的差异性,导致页岩油在纹层组合内部和纹层组合之间以微纳米至米级的范围发生垂向运移。综上所述,页岩纹层的成因机制及含油性的研究新进展,为湖相页岩层系岩相古地理研究提供了反映沉积环境的单因素及其表征方法,也提出了以纹层组合为编图单元的新要求。

3.3 有机质富集机理

前人的普遍观点认为,细粒沉积岩中有机质含量高是缓慢的半远洋悬浮沉降,加上持续缺氧/硫化底层水体共同作用的结果(Pratt, 1984; Canfield, 1989; Pedersen and Calvert, 1990)。然而,细粒沉积岩具有成分的非均质性和沉积过程的动态性,因此,有机质富集的机制较为复杂。Bohacs等(2005)认为有机质富集是由“生产力、破坏和稀释”模型中众多复杂因素之间复杂的相互作用所决定的,并且每个因素的相对贡献在一个沉积单元的沉积生命周期内具有波动性。大量针对海相细粒沉积开展的有机质富集研究,认为存在高生产力和强保存2种解释模式(邱振等, 2021)。高生

产力解释模式认为高有机质含量造成了水体缺氧，而非缺氧造成有机质含量升高，如：“上升洋流”模式、“氧含量最低值区”模式和“近岸透光带缺氧”模式；强保存解释模式认为，在初级生产力不高的情况水体缺氧也可造成有机质富集，如：“受限盆地”模式、“改进的受限盆地”模式、“不规则底形”模式、“水洼扩张”模式、“海侵化变层”模式和“近岸海侵”模式（施振生和周天琪，2024）。对于陆相页岩层系，不同构造类型湖盆或沉积区域的有机质富集模式存在差异，拗陷湖盆为湖侵—水体分层模式，断陷湖盆为洼陷区高门槛—水体分层模式，前陆湖盆为拗陷区高门槛—水体分层模式，斜坡区沼泽环境为煤系页岩门槛模式（邹才能等，2013）。精细的地球化学分析和微观实验进一步表明，异常高有机质页岩需具有高初级生产力（光合作用碳合成速率、火山灰营养元素补给）、周期性水体循环（早期底水稳定“贫氧”、中—晚期底水“氧化—贫氧”状态）、低沉积速率（低陆源碎屑输入水平、火山活动及碳循环驱动）等条件（刘翰林等，2023）。与海洋不同，湖泊的水体和沉积物总量较小、距离物源区较近，易受构造和气候的双重影响，沉积速率更高、盐度变化频繁，有机质富集受到古环境、古水介质和古地理演化的影响（周杰等，2025）。水槽模拟实验表明，细粒沉积物极易与有机质黏结形成絮团，从而提高有机质的沉速并使其脱离水体，且不同盐度的水体环境中有机质富集区存在差异（周川闽等，2021）。通过对比典型淡水（鄂尔多斯盆地长7段）与咸化碱湖（准噶尔盆地玛湖凹陷风城组）沉积与地球化学特征，证实淡水与咸化湖盆水体盐度都具有动态变化的特征，不同的古水介质特征影响了陆相有机质差异富集。陆相湖盆有机质多形成于缺氧含铁的水体环境，淡水湖盆咸化层段比咸化碱湖有机质保存效果更好（梁新平等，2025）。综上所述，有机质富集机理新进展为湖相页岩层系岩相古地理研究提供了沉积环境演化的科学依据。

3.4 天文旋回与有机质分布

旋回地层学将天文理论与地质学结合，通过识别和分析沉积地层中记录的周期性天文轨道信号，利用时间序列分析等数学方法，结合已有的精确定年数据，可以建立高精度的天文年代标尺，提供等时地层格架（吴怀春等，2011）。由于传统层序地

层学不适用于湖相页岩层系，将旋回地层学和层序地层学的优势相互结合和补充，可以实现湖相页岩层系的高频层序划分。Wu 等（2007）在松辽盆地上白垩统青山口组一段和嫩江组一段，通过对自然伽马测井曲线能谱分析，揭示了受米兰科维奇气候周期控制的沉积旋回作用，证明米氏旋回可以为高分辨率地层划分和对比提供帮助。随着松辽盆地松科1井北孔、松科1井南孔、松科2井和松科3井的完钻，运用高精度锆石 U-Pb 定年厘定火山灰沉积年龄，定年精度和准确度得到极大优化，在岩石地层学、生物地层学、同位素年代学和磁性地层学的约束下，旋回地层学建立了松辽盆地陆相白垩纪高精度年代地层格架（吴怀春等，2024）。在高精度年代地层格架下，探讨天文旋回与有机质分布之间的关系成为研究热点。吴怀春等（2008）基于松科1井南孔的旋回地层学研究，提出天文轨道力通过影响古气候和沉积过程控制了有机质富集的旋回性。Huang 等（2021）根据松科1井南孔总有机碳含量（TOC）和埋藏有机碳碳同位素比值（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ）进行天文调谐，发现了约 173 ka 的斜率调制周期，认为其影响中高纬度水循环，引起湖泊生产力和湖底氧化还原环境周期性变化，进而导致有机碳埋藏产生周期性变化。石巨业等（2019）及彭军等（2022）对渤海湾盆地东营凹陷页岩层系开展天文旋回和高分辨率层序对比，指出斜率周期与高产层段具有一定耦合关系。天文周期驱动下的湖相页岩层系有机质富集模式研究认为，在偏心率极大值附近有利于有机质富集，为突破泥页岩地层划分瓶颈，预测页岩油气甜点层段提供了新方法（王淳等，2025）。

3.5 沉积过程正演模拟

沉积过程正演模拟是一种基于沉积物侵蚀、搬运和沉积物理规律的计算机模拟技术，旨在定量预测沉积体系的空间展布（Paola and Martin, 2012）。该方法以源汇系统理论为参数依据，在高精度年代地层格架的约束下，通过顺时间轴正向模拟，系统表征源汇系统的动态过程，进而预测不同时间尺度下的砂体分布（杜威等，2020；万力等，2023）。当前的研究前沿在于将地质统计学建模与沉积过程正演模拟相结合，构建既符合实际数据约束、又能反映沉积动力学机制的综合模型（万力等，2023）。例如，张志杰等（2023）综合运用构造—地层层序分

析、物源体系演化研究与沉积过程模拟,通过“反演”与“正演”相结合的方法,重建了准噶尔盆地二叠系的岩相古地理,有效支撑了湖相优质烃源岩与储集体的预测及有利区带优选。然而,目前的沉积过程正演模拟研究多集中于时间尺度大(>百万年)、控制因素相对单一、物理过程简化的沉积体系,如海相碳酸盐岩和陆相粗碎屑沉积体系,而针对湖相页岩层系的研究则较为匮乏(刘迎亚, 2017; 何文军等, 2018; 杜威等, 2021; 黄渊等, 2022; 张志杰等, 2023; 朱如凯等, 2025)。将正演模拟应用于湖相页岩层系时,其适用性、精度和多解性面临挑战,主要存在以下3个核心难点:(1)高精度年代地层格架下的沉积供给量的计算:如何在精确的时间单元内,量化沉积物的供给通量。(2)多物源混合时空分布的定量表征:如何精确模拟多个物源体系的沉积物贡献及其在盆地内的混合与分布。(3)细粒沉积物搬运—沉积过程地质参数厘定及模型建立:这是正演模拟技术在湖相页岩层系应用中最大的瓶颈。首先,控制细粒沉积物(特别是黏土颗粒)搬运与沉积的关键地质参数,如絮凝作用效率、有效沉降速率、低流速底流的强度与持续时间等,细粒沉积岩中极难准确厘定。这些参数微小的变化会导致模拟结果(如纹层类型、厚度和空间叠置样式)产生巨大差异,使得模拟具有显著的“多解性”。其次,现有模型的物理定律多源于对砂级颗粒的观察和简化水槽实验,其能否准确描述细粒沉积物在复杂湖盆水体中的多种搬运机制(如悬浮、絮凝、异重流等)仍存在疑问,导致在毫米—微米级纹层尺度的模拟精度不足。因此,尽管沉积正演模拟潜力巨大,但当前基于存在不确定性的参数和简化物理过程所获得的湖相页岩层系模拟结果,其可靠性和预测能力仍需审慎评估。针对湖相页岩层系岩相与有机质的强非均质性,岩相古地理研究亟需发展“反演—正演”一体化的研究模式。即综合运用传统地质反演与过程正演模拟,并融合人工智能技术,结合页岩油甜点评价的关键参数,最终实现对不同类型纹层组合时空分布规律的定量化预测与智能化编图,从而为页岩油富集区/段的精准优选提供科学依据。

4 思考与展望

针对湖相页岩层系岩相古地理研究的技术难

点,未来陆相页岩沉积学研究重点关注以下几个方面:

4.1 等时格架下的有机质分布规律

基于跨学科(如:沉积学、地球化学、生物地层学、旋回地层学、地球物理学等)团队的紧密协作,构建“多学科数据融合与年代锚定”技术体系。首先,系统性开展锆石 U-Pb 同位素测年,建立高精度年代“锚点”。关键在于整合岩心描述、高分辨率地球化学扫描、元素测井、地震属性以及微体古生物和孢粉学数据,利用云计算或专用数据平台进行多源数据交汇分析,厘定地层等时对比标志层,从而实现在井间可靠追溯和对比高频层序界面(崔景伟等, 2019; 张天舒等, 2023)。在此基础上,通过古生产力与氧化还原指标的定量耦合(如:有机质生产力、破坏和稀释因素的动态组合),分析高频层序格架下有机质富集的主控因素。在此基础上通过对比不同构造类型和水体环境的古湖盆在不同沉积演化阶段的富有机质页岩时空分布规律,进一步指导页岩油气甜点区/段评价和优选(朱如凯等, 2022; Biddle *et al.*, 2025)。

4.2 矿物—有机质复合颗粒的表征

研究的目的是尺度决定了岩相分类术语的相对性,因此,需对细粒沉积岩的矿物学、粒度、宏观和微观原生沉积构造以及微古生物学有详细的认知,根据所要解答的科学问题和已有数据的数量和质量,选择合适的研究尺度和岩相分类表征方法(Biddle *et al.*, 2025)。高分辨率成像(例如,扫描电子显微镜)揭示了宏观尺度无法识别的成分、结构和组构特征。Li 等(2021a)运用扫描电镜和 ImageJ 图像处理软件等方法识别出三角洲及滨外细粒沉积物中的复合颗粒,认为黏土颗粒在压实前大部分是通过粗粉砂级到砂级颗粒集合体以底部荷载的形式从近源搬运到远源滨外。因此,对于细粒沉积岩的粒度表征,要注意“相对粒度”的概念,即:矿物学粒度(如:粉砂指骨架硅酸盐、石英和长石矿物)、表观粒度(如:黏土级石英颗粒)和功能性沉积粒度(如:砂级和粉砂级复合颗粒)(Li and Schieber, 2018; Percy and Pedersen, 2020; Li *et al.*, 2021b)。其中,反映水动力条件的功能性沉积粒度至关重要。水槽实验和海相泥岩中观察到的泥质复合颗粒这一结构在湖泊中也存在。

因此，在湖相页岩层系的岩相分类中，需明确定义和表征絮凝体、有机—矿物集合体、粪团粒和内碎屑，因其决定了细粒沉积物的来源、搬运和沉降方式，且有利于有机质保存富集（周川闽等，2021；Biddle *et al.*, 2025）。未来需建立从宏观岩心到纳米尺度的标准化成像与识别流程。重点发展基于扫描电镜（SEM）与微米 CT 的自动矿物识别与图像分析技术，实现对絮凝体、粪球粒、有机质—黏土集合体等复合颗粒的定量统计。需配套建设系统的现代沉积与水槽实验样本库，通过物理模拟直接观察复合颗粒的形成与水动力响应，为细粒沉积岩复合颗粒表征提供标尺。需高分辨率成像设备的稳定投入，并开发智能岩心分析技术（如基于机器学习的颗粒成分、形态和结构自动识别）（朱如凯等，2025）。实验模拟与岩石观测必须形成闭环的验证—反馈机制。

4.3 标准化微相模式

微相分析涉及对沉积单元的组分、结构和遗迹学特征进行岩石学分类。微相分析对恢复古环境和古水深，重建沉积物—水界面附近的物理化学条件波动具有重要作用（Macquaker *et al.*, 2007）。Wilson（1975）提出一个理想化的碳酸盐岩综合相模式，归纳了陆棚上碳酸盐岩台地和边缘温暖浅水环境中碳酸盐沉积类型的地理分布规律，把碳酸盐岩划分为 3 大沉积区、9 个相带和 24 个标准微相。Schieber 和 Zimmerle 于 1998 年最早提出建立泥岩的微相标准和相模式，类似于碳酸盐岩和粗碎屑沉积岩已建立的体系（Biddle *et al.*, 2025）。有学者通过页岩层系的微相分析，发现 TOC 最高值出现在最靠近物源、生物扰动强烈、沉积能量高且粒度最粗的沉积物中，并且 TOC 值向盆地方向稳定降低，因此，建立从近源—远源的标准微相组合有助于识别和预测页岩层系高 TOC 值“甜点”区（Borcovsky *et al.*, 2017；Biddle *et al.*, 2021）。相比海相页岩层系，湖相页岩层系的微相类型和分布，宏观受到古物源、古地貌和古气候等诸多因素的控制，微观又与水动力条件、生物有机相、生物扰动、纹层成因等因素密切相关。对准噶尔盆地玛湖中下二叠统风城组烃源岩的生物组成及其成藏贡献的研究结果表明，烃源岩时代和沉积水体盐度的联合控制了咸化湖盆烃源岩生烃母质组成和分布，是不同区域油源差异性的重要影响因素（夏刘文等，

2022）。因此，未来需系统采集不同构造背景、古气候带的典型湖盆的页岩层系岩心样本，集成沉积构造、矿物成分、生物标志化合物及遗迹学特征，定义基础微相类型；结合现代沉积、沉积过程物理和数值模拟、有机岩石学和生物标志物等研究成果，利用数据库技术（如云数据库）构建开放的“湖相页岩层系沉积微相数据库”，积累并共享数据；制定统一的描述标准与数据格式，将人工智能技术应用于微相图像识别划分；建立综合古地貌、水动力条件、生物有机相、遗迹学和纹层结构等多因素的湖相页岩层系标准化微相模式，实现不同地区和地质时代的页岩层系岩相与有机质分布预测。

4.4 沉积过程模拟与智能化编图

用于捕捉水槽实验结果的高速慢动作摄像机以及分析基质成分的扫描电镜成像，揭示了细粒沉积物在沉积过程中形成复合颗粒和细粒低密度浊流（Baas *et al.*, 2009；Sumner *et al.*, 2009；Schieber *et al.*, 2010）。Lu 等（2022）通过物理模拟实验，建立了密度参数，模拟细粒沉积物在表层流（异轻流）、层间流（等密度流）和下潜底流（异重流）条件的沉积过程。深水实时监测研究技术和沉积过程数值模拟的应用，直观展示了浊流的搬运、侵蚀和沉积演化的全过程（Abd El-Gawad *et al.*, 2012；Talling *et al.*, 2023）。如何将沉积过程物理和数值模拟结果应用于湖相页岩层系的沉积相和岩相三维定量表征与预测，是未来重要的发展方向。随着人工智能（AI）技术和大数据方法在沉积学领域的全面应用，基于机器学习的岩相和沉积环境识别、虚拟三维建模，以及物源体系和现代沉积物数据库的云平台构建等新技术迅速发展，岩相古地理重建进入新的发展阶段（侯明才等，2023；朱筱敏等，2025）。未来基于量化的“甜点”参数，结合现代沉积、水槽物理模拟与沉积过程正演数值模拟研究成果，深度融合机器学习模型，并运用不确定性评价方法，开展不同类型纹层组合时空分布规律的定量化评价预测和智能化分析编图，实现模拟和数据互相验证的定量岩相古地理重建，指导页岩油富集区/段优选。

5 结论

1) 全球页岩油技术可采资源量巨大，沉积—

构造体系和沉积环境控制了页岩油资源的富集与分布。湖相页岩层系岩相古地理研究及编图,对陆相页岩油资源潜力评价、预测页岩油富集区/段具有重要的指导意义。

2) 由于湖相页岩层系与海相页岩层系、湖相粗粒沉积体系的搬运—沉积机制差异较大,湖相页岩层系岩相古地理研究面临等时性及编图精度、跨尺度规律性和沉积模式重建等技术难点。

3) 近期,陆相页岩沉积学在岩石学分类和岩相划分、纹层成因机制及含油性、有机质富集机理、天文旋回与有机质分布和沉积过程正演模拟等方面取得的研究进展,对湖相页岩层系岩相古地理研究提供理论和技术支撑。

4) 未来陆相页岩沉积学研究重点关注等时格架下的有机质分布规律、矿物—有机质复合颗粒表征、标准化微相模式和沉积过程模拟与智能化编图等研究方向,重建湖相页岩层系岩相古地理,指导页岩油富集区/段优选。

致谢 感谢编辑和审稿人给予的修改意见。感谢河海大学谈明轩团队提供环形水槽实验支撑及合作研究。

参考文献 (References)

- McMahon T P, Larson T E, Zhang T, Shuster M. 2024. 美国页岩油气地质特征及勘探开发进展. 石油勘探与开发, 51(4): 807–828. [McMahon T P, Larson T E, Zhang T, Shuster M. 2024. Geologic characteristics, exploration and production progress of shale oil and gas in the United States: an overview. *Petroleum Exploration and Development*, 51(4): 807–828]
- 蔡毅, 朱如凯, 吴松涛, 刘畅. 2022. 泥岩与页岩特征辨析. 地质科技通报, 41(3): 96–107. [Cai Y, Zhu R K, Wu S T, Liu C. 2022. Discussion on characteristics of mudstone and shale. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(3): 96–107]
- 操应长, 梁超, 韩豫, 意克来, 王俊然, 籍士超, 梅俊芳. 2023. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨. 古地理学报, 25(4): 729–741. [Cao Y C, Liang C, Han Y, Xi K L, Wang J R, Ji S C, Mei J F. 2023. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 729–741]
- 陈亮, 冯轩, 韩晋阳, 王家豪. 2020. 白云凹陷 SQ13.8 层序细粒深水扇沉积模式. 中国海上油气, 32(5): 36–43. [Chen L, Feng X, Han J Y, Wang J H. 2020. Deep-water fine-grained fan sedimentary model of SQ13.8 sequence in the Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 32(5): 36–43]
- 崔景伟, 朱如凯, 李森, 齐亚林, 时晓章, 毛治国. 2019. 拗陷湖盆烃源

岩发育样式及其对石油聚集的控制: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 油层组为例. 天然气地球科学, 30(7): 982–996. [Cui J W, Zhu R K, Li S, Qi Y L, Shi X Z, Mao Z G. 2019. Development patterns of source rocks in depression lake basin and its controlling effect on oil accumulation: a case study of the Chang 7 shale of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 30(7): 982–996]

窦立荣, 温志新. 2021. 从原型盆地叠加演化过程讨论沉积盆地分类及含油气性. 石油勘探与开发, 48(6): 1100–1113. [Dou L R, Wen Z X. 2021. Classification and exploration potential of sedimentary basins based on the superposition and evolution process of prototype basins. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1100–1113]

杜威, 纪友亮, 李其海, 王子涵, 席家辉, 唐林, 高星星. 2020. 不同沉积过程尺度下正演数值模拟研究进展及油气地质意义. 油气地质与采收率, 27(2): 62–71. [Du W, Ji Y L, Li Q H, Wang Z H, Xi J H, Tang L, Gao X X. 2020. Sedimentary forward numerical modeling at different sedimentary scales: progress and hydrocarbon significance. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 27(2): 62–71]

杜威, 纪友亮, 张艺楼, 周淋, 吕文睿, 杨佳奇, 罗妮娜, 张宸赫. 2021. 湖泊缓坡带细粒河控三角洲沉积演化和形态特征: 沉积正演数值模拟和现代沉积实例的启示. 石油学报, 42(1): 33–44. [Du W, Ji Y L, Zhang Y L, Zhou L, Lyu W R, Yang J Q, Luo N N, Zhang C H. 2021. Depositional evolution and geometrical features of lacustrine fine-grained river-dominated deltas at the gentle slope zone: insights from sedimentary forward numerical modeling and modern case analyses. *Acta Petrolei Sinica*, 42(1): 33–44]

冯烁, 李胜利, 于兴河, 何发岐, 李顺利, 齐荣. 2022. 四级层序格架内浊流沉积特征及演化模式: 以鄂尔多斯盆地镇泾地区三叠系延长组 7 段为例. 石油与天然气地质, 43(4): 859–876. [Feng S, Li S L, Yu X H, He F Q, Li S L, Qi R. 2022. Sedimentary characteristics and evolution model of turbidites within a fourth-order sequence stratigraphic framework: a case study of the Triassic Chang 7 Member in Zhenjing area, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 859–876]

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]

冯增昭. 2022. 沉积相的一些术语定义的新思考: 基于迈尔 (Miall, 1985) 的文章. 古地理学报, 24(2): 1–8. [Feng Z Z. 2022. Some new thoughts on definitions of terms of sedimentary facies: based on Miall's paper (1985). *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(2): 1–8]

冯增昭. 2004. 单因素分析多因素综合作图法: 定量岩相古地理重建. 古地理学报, 6(1): 3–19. [Feng Z Z. 2004. Single factor analysis and multifactor comprehensive mapping method: reconstruction

- tion of quantitative lithofacies palaeogeography. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 6(1): 3-19]
- 冯增昭. 2005. 从定量岩相古地理学谈华南地区海相地层油气勘探. *古地学报*, 7(1): 1-11. [Feng Z Z. 2005. Discussion on petroleum exploration of marine strata in South China from quantitative lithofacies palaeogeography. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 7(1): 1-11]
- 龚承林, 徐长贵, 官大勇, 王启明, 李东伟. 2023. 渤中凹陷断拗转换期湖扩—湖退型层序及其对规模湖底扇发育展布的控制. *古地学报*, 25(5): 992-1010. [Gong C L, Xu C G, Guan D Y, Wang Q M, Li D W. 2023. Sequence stratigraphic model of Bozhong subbasin during a syn-rift to post-rift transition and its controls on regionally extensive sublacustrine fans. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 25(5): 992-1010]
- 国家能源局. 2024. 页岩层系岩相划分与编图规范. NB/T 11611—2024, 1, 3. 1. [National Energy Administration. 2024. Specification for Lithofacies Classifying and Mapping of Shale Strata. NB/T 11611—2024, 1, 3. 1]
- 郭旭升, 申宝剑, 黎茂稳, 刘惠民, 李志明, 张士诚, 杨勇, 郭静怡, 刘雅利, 李鹏, 马晓潇, 赵梦云, 李沛, 张宸嘉, 王子涵. 2025. 陆相断陷湖盆页岩油研究进展与重点攻关方向. *石油勘探与开发*, 52(5): 983-996. [Guo X S, Shen B J, Li M W, Liu H M, Li Z M, Zhang S C, Yang Y, Guo J Y, Liu Y L, Li P, Ma X X, Zhao M Y, Li P, Zhang C J, Wang Z H. 2025. Research progress and key research directions of shale oil in lacustrine rift basins. *Petroleum Exploration and Development*, 52(5): 983-996]
- 何文军, 刘敏珠, 吴俊军, 杨彤远, 朱卡, 李啸, 姚同云. 2018. 准噶尔盆地阜东斜坡阜19井区三叠系韭菜园子组沉积正演模拟. *油气地质与采收率*, 25(6): 7-15. [He W J, Liu M Z, Wu J J, Yang T Y, Zhu K, Li X, Yao T Y. 2018. Forward modeling of sedimentation in the Triassic Jiucaiyuanzi Formation in Well Fu19 area of the Fudong slope, Junggar Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 25(6): 7-15]
- 侯明才, 陈安清, 任强, 钟瀚霆, 李志林, 刘少峰, 肖倚天, 李海鹏, 伍新明, 姜莉莉, 马超, 林成发, 郑栋宇, 尤加春, 孙晓明, 逆鹏, 王瀚, 张蕾, 程汉. 2023. 综合古地理重建的数字智能化趋势与方法进展. *地质学报*, 97(9): 2956-2974. [Hou M C, Chen A Q, Ren Q, Zhong H T, Li Z L, Liu S F, Xiao Y T, Li H P, Wu X M, Jiang L L, Ma C, Lin C F, Zheng D Y, You J C, Sun X M, Ti P, Wang H, Zhang L, Cheng H. 2023. The progress and perspective of digital intelligence in comprehensive paleogeographic reconstruction. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2956-2974]
- 胡宗全, 朱彤, 杜伟, 吴靖, 王冠平. 2020. 细粒沉积研究与页岩岩相编图. 北京: 地质出版社, 25-41. [Hu Z Q, Zhu T, Du W, Wu J, Wang G P. 2020. Fine-grained Sedimentary Research and Shale Lithofacies Mapping. Beijing: Geological Publishing House, 25-41]
- 胡宗全, 杜伟, 朱彤, 刘曾勤. 2022. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组细粒沉积的层序地层与岩相特征. *石油与天然气地质*, 43(5): 1024-1038. [Hu Z Q, Du W, Zhu T, Liu Z Q. 2022. Sequence stratigraphy and lithofacies characteristics of fine-grained deposits of Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and on its periphery. *Oil & Gas Geology*, 43(5): 1024-1038]
- 华柑霖. 2023. 陆相页岩纹层结构与源内石油运聚过程: 以松辽盆地青一段和鄂尔多斯盆地长7段为例. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 25-98. [Hua G L. 2023. Laminar structure development and continental shale oil intrasource accumulation process: case studies of Member 1 of the Qingshankou Formation in the Songliao Basin and Member 7 of the Yanchang Formation in the Ordos Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 25-98]
- 黄渊, 段太忠, 樊太亮, 刘彦锋, 沈禄银, 张文彪, 李蒙, 张德民. 2022. 塔河地区寒武纪碳酸盐岩台地沉积演化史与成因机制: 来自地层沉积正演模拟的启示. *石油学报*, 43(5): 617-636. [Huang Y, Duan T Z, Fan T L, Liu Y F, Shen L Y, Zhang W B, Li M, Zhang D M. 2022. Depositional evolution history and formation mechanism of Cambrian carbonate platform in Tahe area: insights from stratigraphic forward modelling. *Acta Petrolei Sinica*, 43(5): 617-636]
- 姜在兴, 梁超, 吴靖, 张建国, 张文昭, 王永诗, 刘惠民, 陈祥. 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题. *石油学报*, 34(6): 1031-1039. [Jiang Z X, Liang C, Wu J, Zhang J G, Zhang W Z, Wang Y S, Liu H M, Chen X. 2013. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks. *Acta Petrolei Sinica*, 34(6): 1031-1039]
- 焦方正, 邹才能, 杨智. 2020. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践. *石油勘探与开发*, 47(6): 1067-1078. [Jiao F Z, Zou C N, Yang Z. 2020. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens. *Petroleum Exploration and Development*, 47(6): 1067-1078]
- 金磊. 2022. 沾化凹陷渤南洼陷沙四下亚段源—汇系统研究. 中国石油大学(北京)硕士学位论文: 12-27. [Jin L. 2022. "Source-to-Sink" system analysis of the Lower Fourth Member of Shahejie Formation in Bonan0 sag, Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin. Masteral dissertation of China University of Petroleum (Beijing): 12-27]
- 金相灿. 1995. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 142-266. [Jin X C. 1995. Lake Environment in China. Beijing: China Ocean Press, 142-266]
- 匡明志, 李一凡, 樊太亮, 张坦, 刘旺威, 刘楠. 2023. 高精度层序地层学在海相细粒沉积岩中的应用: 以川北陡山沱组为例. *地学前缘*, 30(4): 164-181. [Kuang M Z, Li Y F, Fan T L, Zhang T, Liu W W, Liu N. 2023. Application of high-precision sequencestratigraphy in marine fine-grained sedimentary rocks: a case study of the Doushantuo Formation in northern Sichuan. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 164-181]
- 赖锦, 李红斌, 张梅, 白梅梅, 赵仪迪, 范旗轩, 庞小娇, 王贵文. 2023. 非常规油气时代测井地质学研究进展. *古地学报*, 25(5): 1118-1138. [Lai J, Li H B, Zhang M, Bai M M, Zhao Y D, Fan Q X, Pang X J, Wang G W. 2023. Advances in well logging geology in the era of unconventional hydrocarbon resources. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 25(5): 1118-1138]
- 李军亮, 王民, 秦峰, 王勇, 魏晓亮, 孟伟, 沈安超, 宋兆京, 余昌琦, 李俊乾, 刘嘉祺. 2025. 陆相富碳酸盐页岩纹层组合对页岩油富集的控制作用: 以渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组页岩为例. *石油与天然气地质*, 46(2): 392-406. [Li J L, Wang M, Qin F, Wang Y, Wei X L, Meng W, Shen A C, Song Z J, Yu C Q, Li J Q,

- Liu J Q. 2025. Controlling effects of lamina assemblages on shale oil enrichment for lacustrine carbonate-rich shales: a case study of shales in the Paleogene Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(2): 392-406]
- 李峻. 2023. 阿根廷能否实现油气出口雄心. *中国石化报*, 2023-06-30. <https://www.cppei.org.cn/syshsc/detail.asp?categoryId=1813&articleId=215650>. [Li J. 2023. Can Argentina Realize Its Ambition of Oil and Gas Exports. *China Petrochemical News*, 30th July 2023. <https://www.cppei.org.cn/syshsc/detail.asp?categoryId=1813&articleId=215650>]
- 李梦莹, 朱如凯, 胡素云. 2022. 海外陆相页岩油地质特征与资源潜力. *岩性油气藏*, 34(1): 163-174. [Li M Y, Zhu R K, Hu S Y. 2022. Geological characteristics and resource potential of overseas terrestrial shale oil. *Lithologic Reservoirs*, 34(1): 163-174]
- 李汶恒. 2022. 柴达木盆地北缘渐新统下干柴沟组沉积体系与储层特征研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 26-44. [Li W H. 2022. Sedimentary system and reservoir characteristics of the Oligocene Lower Ganchaigou Formation in the Northern margin of Qaidam Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 26-44]
- 李元吉. 2022. 抚顺盆地古近纪古环境演化与有机质富集机制研究. 吉林大学博士学位论文: 93-106. [Li Y J. 2022. Paleogene paleoenvironmental evolution and organic matter accumulation mechanisms, Fushun Basin. Doctoral dissertation of Jilin University: 93-106]
- 李增学, 李莹, 刘海燕, 王东东, 王平丽, 宋广增, 李晓静, 贾强, 赵洪刚. 2021. 岩相古地理优势相方法及应用: 兼谈“广义”与“狭义”岩相古地理及若干新的研究方向. *古地理学报*, 23(3): 489-506. [Li Z X, Li Y, Liu H Y, Wang D D, Wang P L, Song G Z, Li X J, Jia Q, Zhao H G. 2021. Method and application of lithofacies palaeogeographic dominant facies: also discuss the lithofacies palaeogeography in broad and narrow sense and some new research directions. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(3): 489-506]
- 梁新平, 金之钧, 刘全有, 朱如凯, 张旺, 高嘉洪, 王淳, 张钧翔, 王治纲. 2025. 陆相淡水与咸化湖盆页岩有机质差异富集机理. *科学通报*, 70(2): 262-274. [Liang X P, Jin Z J, Liu Q Y, Zhu R K, Zhang W, Gao J H, Wang B, Zhang J X, Wang Z G. 2025. Differential enrichment mechanism of organic matter in freshwater and salty alkaline lake basins. *Chinese Science Bulletin*, 70(2): 262-274]
- 刘畅, 朱如凯, 李斌会, 张金友, 张婧雅, 白斌. 2025. 松辽盆地青山口组深湖区古龙页岩油微观差异分布特征与聚集机理. *中国石油勘探*, 30(5): 86-99. [Liu C, Zhu R K, Li B H, Zhang J Y, Zhang J Y, Bai B. 2025. Microscopic differential distribution characteristics and accumulation mechanism of Gulong shale oil in Qingshankou Formation in the deep lake area, Songliao Basin. *China Petroleum Exploration*, 30(5): 86-99]
- 刘翰林, 邹才能, 邱振, 尹帅, 杨智, 吴松涛, 张国生, 陈艳鹏, 马锋, 李士祥, 张岩. 2023. 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. *沉积学报*, 41(6): 1810-1829. [Liu H L, Zou C N, Qiu Z, Yin S, Yang Z, Wu S T, Zhang G S, Chen Y P, Ma F, Li S X, Zhang Y. 2023. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment mechanism of lacustrine black shales: a case study of the Chang 7 member in the Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1810-1829]
- 刘迎亚. 2017. 沙特阿拉伯 Shaybah 油田 Shu'aiba 组碳酸盐岩沉积正演模拟研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 46-63. [Liu Y Y. 2017. Depositional forward modelling of Carbonate: a case from Shu'aiba Formation of Shaybah Field, Saudi Arabia. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 46-63]
- 马永生, 陈洪德, 王国力. 2009. 中国南方构造-层序岩相古地理图集. 北京: 科学出版社, 1. [Ma Y S, Chen H D, Wang G L. 2009. Atlas of Tectonic-sequence Lithofacies Paleogeography in South China. Beijing: Science Press, 1]
- 牟传龙, 王启宇, 王秀平, 周恩恩, 梁薇, 葛祥英. 2016. 岩相古地理研究可作为页岩气地质调查之指南. *地质通报*, 35(1): 10-19. [Mou C L, Wang Q Y, Wang X P, Zhou K K, Liang W, Ge X Y. 2016. A study of lithofacies-palaeogeography as a guide to geological survey of shale gas. *Geological Bulletin of China*, 35(1): 10-19]
- 牛小兵, 吕成福, 冯胜斌, 周钱山, 辛红刚, 肖月也, 李成, 谈卫东. 2025. 陆相富有机质页岩纹层组合特征与页岩油差异富集机理: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段为例. *石油勘探与开发*, 52(2): 279-291. [Niu X B, Lyu C F, Feng S B, Zhou Q S, Xin H G, Xiao Y Y, Li C, Dan W D. 2025. Lamina combination characteristics and differential shale oil enrichment mechanisms of continental organic-rich shale: a case study of Triassic Yanchang Formation Chang 7₃ sub-member, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(2): 279-291]
- 彭军, 于乐丹, 许天宇, 韩浩东, 杨一茗, 曾垚, 王瑜斌. 2022. 湖相泥页岩地层米氏旋回测井识别及环境响应特征: 以渤海湾盆地济阳凹陷东营凹陷樊页1井 Es^{4scs} 为例. *石油与天然气地质*, 43(4): 957-969. [Peng J, Yu L D, Xu T Y, Han H D, Yang Y M, Zeng Y, Wang Y B. 2022. Logging identification of Milankovitch cycle and environmental response characteristics of lacustrine shale: a case study on Es^{4scs} in Well Fanye 1, Dongying sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 957-969]
- 邱振, 邹才能. 2020. 非常规油气沉积学: 内涵与展望. *沉积学报*, 38(1): 1-29. [Qiu Z, Zou C N. 2020. Unconventional petroleum sedimentology: connotation and prospect. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 1-29]
- 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 邵男, 王玉满, 张磊夫, 张琴. 2021. 异常高有机质沉积富集过程与元素地球化学特征. *石油与天然气地质*, 42(4): 931-948. [Qiu Z, Wei H Y, Liu H L, Shao N, Wang Y M, Zhang L F, Zhang Q. 2021. Accumulation of sediments with extraordinary high organic matter content: insight gained through geochemical characterization of indicative elements. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 931-948]
- 盛军, 薛世团, 吕思锦, 张彩燕, 杨晓菁, 李雅楠, 郭笑, 王转转. 2025. 柴达木盆地西部英雄岭页岩天文旋回识别与高沉积速率下的沉积充填响应特征. *地质科技通报*, 44(1): 48-63. [Sheng J, Xue S T, Lyu S J, Zhang C Y, Yang X J, Li Y N, Guo X, Wang Z Z. 2025. Astrocycle identification and high sedimentation rates sedimentary filling response characteristics in the Yingxiongling shale of western Qaidam Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(1): 48-63]
- 施振生, 朱筱敏, 张亚雄, 金惠. 2021. 四川盆地上三叠统沉积储层研

- 究进展与热点分析. 石油与天然气地质, 42(4): 784–800. [Shi Z S, Zhu X M, Zhang Y X, Jin H. 2021. Advances and trending topics in sedimentary reservoir research of the upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 784–800]
- 施振生, 周天琪. 2024. 海相细粒沉积成因机制与有机质富集模式研究进展. 石油与天然气地质, 45(4): 910–928. [Shi Z S, Zhou T Q. 2024. Advances and perspectives in the study of the genetic mechanism and organic matter enrichment models of marine fine-grained sediment. *Oil & Gas Geology*, 45(4): 910–928]
- 石巨业, 金之钧, 刘全有, 黄振凯, 张瑞. 2019. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分. 石油与天然气地质, 40(6): 1205–1214. [Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, Huang Z K, Zhang R. 2019. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory. *Oil & Gas Geology*, 40(6): 1205–1214]
- 石巨业, 金之钧, 刘全有, 樊太亮, 高志前, 王宏语. 2023. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用. 地学前缘, 30(4): 142–151. [Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, Fan T L, Gao Z Q, Wang H Y. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and in high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 142–151]
- 石玉江, 刘国强, 钟吉彬, 王娟, 张文静. 2021. 基于大数据的测井智能解释系统开发与应用. 中国石油勘探, 26(2): 113–126. [Shi Y J, Liu G Q, Zhong J B, Wang J, Zhang W J. 2021. Development and application of intelligent logging interpretation system based on big data. *China Petroleum Exploration*, 26(2): 113–126]
- 孙龙德, 赵文智, 刘合, 朱如凯, 白斌, 康缘, 张婧雅, 吴松涛. 2023. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论. 石油学报, 44(1): 1–13. [Sun L D, Zhao W Z, Liu H, Zhu R K, Bai B, Kang Y, Zhang J Y, Wu S T. 2023. Concept and application of “sweet spot” for shale oil. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 1–13]
- 孙龙德, 朱如凯, 张天舒, 蔡毅, 冯子辉, 白斌, 江航, 王淳. 2024. 陆相页岩沉积学研究进展与发展方向: 以大庆古龙页岩为例. 石油勘探与开发, 51(6): 1183–1198. [Sun L D, Zhu R K, Zhang T S, Cai Y, Feng Z H, Bai B, Jiang H, Wang B. 2024. Advances and trends of non-marine shale sedimentology: a case study from Gulong Shale of Daqing Oilfield, Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1183–1198]
- 唐佰强, 孟庆涛, 杨亮, 胡菲, 谭悦, 邢济麟, 刘招君, 张恩威, 董秦玮. 2025. 基于BSMOTE-SVM的细粒沉积岩岩相智能预测: 以松辽盆地青山口组一段为例. 古地学报, 27(4): 937–949. [Tang B Q, Meng Q T, Yang L, Hu F, Tan Y, Xing J L, Liu Z J, Zhang E W, Dong Q W. 2025. Intelligent prediction of fine-grained sedimentary lithofacies based on BSMOTE-SVM: a case study of the Member 1 of Qingshankou Formation in Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(4): 937–949]
- 童晓光, 何登发. 2001. 油气勘探原理和方法. 北京: 石油工业出版社, 8–10. [Tong X G, He D F. 2001. *Petroleum Exploration Principle and Method*. Beijing: Petroleum Industry Press, 8–10]
- 万力, 黄秀, 张志杰, 袁选俊, 陈星渝. 2023. 碎屑岩系不同沉积体系的沉积正演方法综述. 地质科技通报, 42(3): 153–162. [Wan L, Huang X, Zhang Z J, Yuan X J, Chen X Y. 2023. A review of sedimentary forward modeling methods for different sedimentary systems of clastic rock series. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(3): 153–162]
- 王淳, 石巨业, 朱如凯, 梁新平. 2025. 天文周期驱动下湖相细粒沉积岩有机质富集模式: 以东营凹陷LY1井沙三下—沙四上亚段为例. 沉积学报, 43(2): 750–768. [Wang B, Shi J Y, Zhu R K, Liang X P. 2025. Organic matter enrichment model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks driven by astronomical cycles: a case study of the lower Es3 and upper Es4 sub-member in well LY1, Dongying Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(2): 750–768]
- 王丹君. 2021. 冀中坳陷束鹿凹陷沙三上亚段层序地层与沉积体系研究. 昆明理工大学硕士学位论文: 20–32. [Wang D J. 2021. Sequence stratigraphy and depositional system of Es₃ in Shulu sag, Jizhong depression. Masteral dissertation of Kunming University of Science and Technology: 20–32]
- 王铭乾, 张元元, 朱如凯, 郭召杰, 李志扬, 王俊峰. 2025. 湖泊细粒沉积岩纹层特征与形成机制研究进展及展望. 沉积学报, 43(6): 1897–1918. [Wang M Q, Zhang Y Y, Zhu R K, Guo S J, Li Z Y, Wang J F. 2025. Progress and perspective on the characteristics and formation mechanism of laminae in lacustrine fine-grained sedimentary rocks. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(6): 1897–1918]
- 王茜, 黄永建, 张治锋, 王长红, 李祥, 刘伟. 2021. 高分辨率化学层序地层学在深水细粒沉积中的应用: 以上扬子地区六塘露头五峰组—龙马溪组下段为例. 现代地质, 35(1): 281–292. [Wang Q, Huang Y J, Zhang Z F, Wang C H, Li X, Liu W. 2021. Application of high-resolution chemical sequence stratigraphy to deep-water fine-grained sediments: a case study of Wufeng Formation and Lower Member of Longmaxi Formation in Liutang Outcrop, Upper Yangtze Area. *Geoscience*, 35(1): 281–292]
- 王鑫锐. 2024. 松辽盆地南部大情字井地区青一段细粒沉积优质储层特征及控制因素分析. 东北石油大学博士学位论文: 103–131. [Wang X R. 2024. Analysis of characteristics and control factors of fine-grained sedimentary high-quality reservoirs in the First Section of Qingshankou Formation in the Daqingzijing Area, Southern Songliao Basin. Doctoral dissertation of Northeast Petroleum University: 103–131]
- 魏小松. 2021. 涪西南凹陷始新世沉积环境演化与烃源岩发育机制. 中国地质大学(武汉)博士学位论文: 22–39. [Wei X S. 2021. Evolution of the Eocene sedimentary environment and formation mechanism of hydrocarbon source rocks in the Weixinan sag. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Wuhan): 22–39]
- 吴崇筠, 薛叔浩. 1993. 中国含油气盆地沉积学. 北京: 石油工业出版社, 32–110. [Wu C Y, Xue S H. 1993. *Sedimentology of Petroliferous Basins in China*. Beijing: Petroleum Industry Press, 32–110]
- 吴冬, 邓虎成, 解馨慧, 刘慧, 曹凯旋. 2025. 黏土沉积微结构特征及其沉积环境. 沉积学报, 43(2): 376–386. [Wu D, Deng H C, Xie X H, Liu H, Cao K X. 2025. Microstructure characteristics and sedimentary environments of clay sediments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(2): 376–386]
- 吴怀春, 张世红, 黄清华. 2008. 中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立. 地学前缘, 15(4): 159–169. [Wu H C, Zhang S H, Huang Q H. 2008. Establishment of floating astro-

- nomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin of Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 159–169]
- 吴怀春, 张世红, 冯庆来, 方念乔, 杨天水, 李海燕. 2011. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望. *地球科学*, 36(3): 409–428. [Wu H C, Zhang S H, Feng Q L, Fang N Q, Yang T S, Li H Y. 2011. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy. *Earth Science*, 36(3): 409–428]
- 吴怀春, 李山, 王成善, 褚润健, 王璞珺, 高远, 万晓樵, 贺怀宇, 邓成龙, 杨光, 黄永建, 高有峰, 席党鹏, 王天天, 房强, 杨天水, 张世红. 2024. 松辽盆地白垩纪综合年代地层格架. *地质前缘*, 31(1): 431–445. [Wu H C, Li S, Wang C S, Chu R J, Wang P J, Gao Y, Wan X Q, He H Y, Deng C L, Yang G, Huang Y J, Gao Y F, Xi D P, Wang T T, Fang Q, Yang T S, Zhang S H. 2024. Integrated chronostratigraphic framework for Cretaceous strata in the Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 31(1): 431–445]
- 吴松涛, 朱如凯, 罗忠, 杨智, 姜晓华, 林敏捷, 苏玲. 2022. 中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价. *中国石油勘探*, 27(5): 62–72. [Wu S T, Zhu R K, Luo Z, Yang Z, Jiang X H, Lin M J, Su L. 2022. Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central-western basins in China. *China Petroleum Exploration*, 27(5): 62–72]
- 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田二叠纪碱湖生物—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. *Science China: Earth Sciences*, 52(4): 732–746]
- 向晋豪. 2023. 陇东地区延长组斜坡区古地貌及其沉积充填演化. 长江大学硕士学位论文: 18–39. [Xiang J Q. 2023. Palaeogeomorphology and sedimentary filling evolution of slope area of Yanchang Formation in Longdong area. Masteral dissertation of Yangtze University: 18–39]
- 徐小涛. 2022. 阜新盆地早白垩世湖相沉积及其对大洋缺氧事件的响应. 中国矿业大学(北京)博士学位论文: 42–66. [Xu X T. 2022. Lacustrine deposits and their response to Oceanic Anoxic Events in the early Cretaceous Fuxin Basin, NE China. Doctoral dissertation of China University of Mining & Technology (Beijing): 42–66]
- 杨悠然. 2021. 下刚果盆地白垩系海相烃源岩发育特征与形成机理. 中国地质大学(武汉)博士学位论文: 59–70. [Yang Y R. 2021. Development characteristics and formation mechanism of Cretaceous marine source rocks in lower Congo Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Wuhan): 59–70]
- 于金巧. 2022. 巴彦淖尔凹陷白垩系—古近系高分辨率层序地层划分、对比与成因控制研究. 中国矿业大学硕士论文: 39–63. [Yu J Q. 2022. Research on Cretaceous-Paleogene high-resolution sequence stratigraphic division, correlation and genetic control in the Bayannaoer sag. Masteral dissertation of China University of Mining & Technology: 39–63]
- 张若琳, 金思丁. 2021. 渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井沙三下亚段旋回地层学研究. *中南大学学报(自然科学版)*, 52(5): 1516–1531. [Zhang R L, Jin S D. 2021. Cyclostratigraphy research on lower Member 3 of Shahejie Formation in Well Luo 69 in Zhanhua sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 52(5): 1516–1531]
- 张天舒, 朱如凯, 蔡毅, 王华建, 吕丹, 周海燕, 付秀丽, 刘畅, 崔坤宁, 张素荣, 王淳, 吴松涛, 张婧雅, 姜晓华, 冯有良, 刘合. 2023. 松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩层序等时格架下的有机质分布规律. *石油与天然气地质*, 44(4): 869–886. [Zhang T S, Zhu R K, Cai Y, Wang H J, Lyu D, Zhou H Y, Fu X L, Liu C, Cui K N, Zhang S R, Wang B, Wu S T, Zhang J Y, Jiang X H, Feng Y L, Liu H. 2023. Distribution of organic matter in the Qingshankou Formation Shale, Gulong Sag, Songliao Basin observed within an isochronous sequence stratigraphic framework. *Oil & Gas Geology*, 44(4): 869–886]
- 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 paleogeographic reconstruction of Permian in the Junggar Basin, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3006–3023]
- 张自力. 2020. 大型坳陷湖盆层序地层表征与岩性圈闭分布: 以鄂尔多斯盆地陇东三叠系延长组为例. 中国石油大学(北京)博士学位论文: 15–67. [Zhang Z L. 2020. Sequence stratigraphic characterization and lithologic trap distribution in large depression lake basin taking the Triassic Yanchang Formation in Longdong of Ordos Basin as an example. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(Beijing): 15–67]
- 赵迪斐, 郭英海, 曾春林, 焦伟伟, 任呈瑶, 王玉杰, 于金巧. 2021. 海相沉积环境与沉积层序对页岩储层含气性的影响: 以黔北 1 井五峰组—龙马溪组为例. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 40(1): 30–42. [Zhao D F, Guo Y H, Zeng C L, Jiao W W, Ren C Y, Wang Y J, Yu J Q. 2021. Influences of marine sedimentary environment and sedimentary sequence on gas-bearing property of shale reservoir: taking Wufeng-Longmaxi formations of Qianqian well-1 as an example. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 40(1): 30–42]
- 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 卞从胜, 王坤. 2023. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征. *地质前缘*, 30(1): 116–127. [Zhao W Z, Zhu R K, Liu W, Bian C S, Wang K. 2023. Lacustrine medium-high maturity shale oil in onshore China: enrichment conditions and occurrence features. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 116–127]
- 赵贤正, 蒲秀刚, 鄢继华, 金凤鸣, 时战楠, 柴公权, 韩文中, 刘岩, 姜文亚, 陈长伟, 张伟, 方正, 解德录. 2023. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒沉积旋回及其对有机质分布的影响. *石油勘探与开发*, 50(3): 468–480. [Zhao X Z, Pu X G, Yan J H, Jin F M, Shi Z N, Chai G Q, Han W Z, Liu Y, Jiang W Y, Chen C W, Zhang W, Fang Z, Xie D L. 2023. Cycles of fine-grained sedimentation and their influences on organic matter distribution in the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(3): 468–480]
- 周川闽, 张志杰, 邱振, 成大伟, 袁选俊, 刘银河, 黄秀. 2021. 细粒沉积物理模拟研究进展与展望. *沉积学报*, 39(1): 253–267.

- [Zhou C M, Zhang Z J, Qiu Z, Cheng D W, Yuan X J, Liu Y H, Huang X. 2021. Laboratory experiments on sedimentation of fine-grained sediment: a prospect review. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 253–267]
- 周杰, 孙雨, 吴科睿, 闫百泉, 杨大明, 于涛, 徐梓轩, 白仕鑫. 2025. 陆相湖盆细粒沉积岩有机质富集影响因素与模式研究进展. *地质评论*, 71(2): 421–438. [Zhou J, Sun Y, Wu K R, Yan B Q, Yang D M, Yu T, Xu Z X, Bai S X. 2025. Influence factors and models of organic matter enrichment in fine-grained sedimentary rocks of lacustrine basin. *Geological Review*, 71(2): 421–438]
- 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 张素荣, 蔡毅, 曹琰, 康缘. 2022. 细粒沉积学研究进展与发展方向. *石油与天然气地质*, 43(2): 251–264. [Zhu R K, Li M Y, Yang J R, Zhang S R, Cai Y, Cao Y, Kang Y. 2022. Advances and trends of fine-grained sedimentology. *Oil & Gas Geology*, 43(2): 251–264]
- 朱如凯, 张婧雅, 李梦莹, 蔡毅, 吴松涛, 刘畅, 张素荣, 康缘. 2023. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题. *地质学报*, 97(9): 2874–2895. [Zhu R K, Zhang J Y, Li M Y, Cai Y, Wu S T, Liu C, Zhang S R, Kang Y. 2023. Advances and key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2874–2895]
- 朱如凯, 孙龙德, 张天舒, 张志杰, 沈安江, 毛治国, 王兆明, 任义丽, 江航, 张素荣, 万力. 2025. 中国油气勘探开发中的沉积学研究新进展与发展方向. *沉积学报*, 43(1): 1–19. [Zhu R K, Sun L D, Zhang T S, Zhang Z J, Shen A J, Mao Z G, Wang Z M, Ren Y L, Jiang H, Zhang S R, Wan L. 2025. Advances and trends in sedimentological research in oil and gas exploration and development in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(1): 1–19]
- 朱筱敏. 2008. *沉积岩石学* (第四版). 北京: 石油工业出版社, 280–281. [Zhu X M. 2008. *Sedimentary Petrology* (4th Edition). Beijing: Petroleum Industry Press, 280–281]
- 朱筱敏, 陈贺贺, 葛家旺, 谈明轩, 刘强虎, 张自力, 张亚雄. 2022. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征. *石油与天然气地质*, 43(4): 746–762. [Zhu X M, Chen H H, Ge J W, Tan M X, Liu Q H, Zhang Z L, Zhang Y X. 2022. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 746–762]
- 朱筱敏, 王晓琳, 胡鑫, 王祥, 高子颖. 2025. 国际沉积学研究前沿和发展讨论: 第37次国际沉积学家年会述评. *石油与天然气地质*, 46(3): 685–704. [Zhu X M, Wang X L, Hu X, Wang X, Gao Z J. 2025. Frontiers and future prospects of international sedimentological research: review on the 37th International Meeting of Sedimentology. *Oil & Gas Geology*, 46(3): 685–704]
- 邹才能, 杨智, 崔景伟, 朱如凯, 侯连华, 陶士振, 袁选俊, 吴松涛, 林森虎, 王岚, 白斌, 姚涇利. 2013. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策. *石油勘探与开发*, 40(1): 14–26. [Zou C N, Yang Z, Cui J W, Zhu R K, Hou L H, Tao S Z, Yuan X J, Wu S T, Lin S H, Wang L, Bai B, Yao J L. 2013. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1): 14–26]
- 邹才能, 马锋, 潘松圻, 张新顺, 吴松涛, 傅国友, 王红军, 杨智. 2023. 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. *地学前缘*, 30(1): 128–142. [Zou C N, Ma F, Pan S Q, Zhang X S, Wu S T, Fu G Y, Wang H J, Yang Z. 2023. Formation and distribution potential of global shale oil and developments of continental shale oil theory and technology in China. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 128–142]
- Abd El-Gawad S M, Pirmez C, Cantelli A, Minisini D, Sylvester Z, Imran J. 2012. 3-D numerical simulation of turbidity currents in submarine canyons off the Niger Delta. *Marine Geology*, 326–328: 55–66.
- Baas J H, Best J L, Peakall J, Wang M. 2009. A phase diagram for turbulent, transitional, and laminar clay suspension flows. *Journal of Sedimentary Research*, 79(4): 162–183.
- Baas J H, Best J L, Peakall J. 2011. Depositional processes, bedform development and hybrid bed formation in rapidly decelerated cohesive (mud-sand) sediment flows. *Sedimentology*, 58(7): 1953–1987.
- Baker M L, Baas J H. 2020. Mixed sand-mud bedforms produced by transient turbulent flows in the fringe of submarine fans: indicators of flow transformation. *Sedimentology*, 67(5): 2645–2671.
- Biddle S K, LaGrange M T, Harris B S, Fiess K, Terlaky V, Gingras M K. 2021. A fine detail physico-chemical depositional model for Devonian organic-rich mudstones: a petrographic study of the Hare Indian and Canol Formations, Central Mackenzie Valley, Northwest Territories. *Sedimentary Geology*, 414: 105838.
- Biddle S K, LaGrange M T, Harris B S, Egenhoff S, Gingras M K. 2025. Current concepts in mudstone description and deposition: a synthesis for mudstone initiates. *Sedimentologica*, 3(1): 1–36.
- Bohacs K M, Grabowski G J, Carroll A R, Mankiewicz P J, Miskell-Gerhard K, Schwalbach J R, Wegner M B, Simo J A. 2005. Production, destruction, and dilution: the many paths to source-rock development. In: harris N B (ed). *Deposition of organic-carbon-rich sediments: models, mechanisms, and consequences*. Society for Sedimentary Geology Special Publication, 82: 61–101.
- Bohacs K M, Lazar O R, Demko T M. 2022. Parasequences. In: Bohacs K M, Lazar O R (eds). *Sequence stratigraphy: applications to fine-grained rocks*. AAPG Memoir, 126: 107–148.
- Borcovsky D, Egenhoff S, Fishman N S, Maletz J, Boehlke A, Lowers H. 2017. Sedimentology, facies architecture, and sequence stratigraphy of a Mississippian black mudstone succession-the upper member of the Bakken Formation, North Dakota, United States. *AAPG Bulletin*, 101(10): 1625–1673.
- Canada Energy Regulator (CER). 2021. Conventional, Tight, and Shale Oil Production. *Canada's Energy Future*: 1–2.
- Canfield D E. 1989. Sulfate reduction and oxic respiration in marine sediments: implications for organic carbon preservation in euxinic environments. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 36(1): 121–138.
- Carlson R M K, Chamberlain D E. 1986. Steroid biomarker-clay mineral adsorption free energies: implications to petroleum migration indices. *Organic Geochemistry*, 10: 163–180.
- Catuneanu O. 2019. Scale in sequence stratigraphy. *Marine Petroleum Geology*, 106: 128–159.
- Catuneanu O. 2020. Sequence stratigraphy of deep-water systems. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104238.

- Hou M Q, Xiao Y X, Lei Z D, Yang Z, Lou Y H, Liu Y M. 2023. Article machine learning algorithms for lithofacies classification of the Gulong Shale from the Songliao Basin, China. *Energies*, 16: 2581.
- Huang H, Gao Y, Ma C, Jones M M, Zeeden C, Ibarra D E, Wu H C, Wang C S. 2021. Organic carbon burial is paced by a ~173-ka obliquity cycle in the middle to high latitudes. *Science Advances*, 7: eabf9489.
- Jarvie D M. 2012. Shale resource systems for oil and gas: part 2: shale-oil resource systems. Shale reservoirs-giant resources for the 21st century. AAPG Memoir, 97: 89-119.
- Lazar O R, Bohacs K M, Macquaker J H S, Schieber J, Demko T M. 2015. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: nomenclature and description guidelines. *Journal of Sedimentary Research*, 85(3): 230-246.
- Li Z Y, Schieber J. 2018. Composite particles in mudstones: examples from the Late Cretaceous Tununk Shale Member of the Mancos Shale Formation. *Journal of Sedimentary Research*, 88(12): 1319-1344.
- Li M Y, Wu S T, Hu S Y, Zhu R K, Meng S W, Yang J R. 2021a. Lamination texture and its effects on reservoir and geochemical properties of the Palaeogene Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China. *Minerals*, 11(1360): 1-16.
- Li Z Y, Schieber J, Pedersen P K. 2021b. On the origin and significance of composite particles in mudstones: examples from the Cenomanian Dunvegan Formation. *Sedimentology*, 68: 737-754.
- Lu G, Wells M, Starygen I V, Hecky R E. 2022. Intrusions of sediment laden rivers into density stratified water columns could be an unrecognized source of mixing in many lakes and coastal oceans. *Sedimentology*, 69: 2228-2245.
- Macquaker J H S, Taylor K, Gawthorpe R. 2007. High resolution facies analyses of mudstones: implications for paleoenvironmental and sequence stratigraphic interpretations of offshore ancient mud-dominated successions. *Journal of Sedimentary Research*, 77: 324-339.
- Milliken K. 2014. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 84(12): 1185-1199.
- Mulder T, Alexander J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48(2): 269-299.
- Paola C, Martin J M. 2012. Mass-balance effects in depositional systems. *Journal of Sedimentary Research*, 82(6): 435-450.
- Pedersen T F, Calvert S E. 1990. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? AAPG Bulletin, 74(4): 454-466.
- Percy E L, Pedersen P K. 2020. Detailed facies analysis of Cenomanian-Turonian organic-rich mudstones: implications for depositional controls on source rocks. *Depositional Record*, 6(2): 409-430.
- Picard M D. 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 41(1): 179-195.
- Pratt L M. 1984. Influence of paleoenvironmental factors on preservation of organic matter in Middle Cretaceous Greenhorn Formation, Pueblo, Colorado. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 9: 1146-1159.
- Plint A G. 2014. Mud dispersal across a Cretaceous prodelta: storm-generated, wave-enhanced sediment gravity flows inferred from mudstone microtexture and microfacies. *Sedimentology*, 61(3): 609-647.
- Rohais S, Lovecchio J P, Abreu V, Miguez M, Paulin S. 2021. High-resolution sedimentary budget quantification-Example from the Cenozoic deposits in the Pelotas Basin, South Atlantic. *Basin Research*, 33: 2252-2280.
- Schieber J, Southard J, Thaisen K. 2007. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples. *Science*, 318(5857): 1760-1763.
- Schieber J, Southard J B, Schimmelmänn A. 2010. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds-interpreting the rock record in the light of recent flume experiments. *Journal of Sedimentary Research*, 80: 119-128.
- Schimmelmänn A, Lange C B, Schieber J, Francus P, Ojala A E K, Zolitschka B. 2016. Varves in marine sediments: a review. *Earth-Science Reviews*, 159: 215-246.
- Sumner E J, Talling P J, Amy L A. 2009. Deposits of flows transitional between turbidity current and debris flow. *Geology*, 37(11): 991-994.
- Talling P J, Cartigny M J B, Pope E, Baker M, Clare M A, Heijnen M, Hage S, Parsons D R, Simmons S M, Paull C K, Gwiazda R, Lintern G, Clarke J E H, Xu J P, Jacinto R S, Maier K L. 2023. Detailed monitoring reveals the nature of submarine turbidity currents. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(9): 642-658.
- Wilson J L. 1975. Carbonate Facies in Geologic History. Berlin: Springer, 348-375.
- Wu H C, Zhang S H, Sui S W, Huan Q H. 2007. Recognition of Milankovitch cycles in the natural gamma-ray logging of Upper Cretaceous terrestrial strata in the Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 996-1001.
- Yawar Z, Schieber J. 2017. On the origin of silt laminae in laminated shales. *Sedimentary Geology*, 360: 22-34.
- Zavala C, Arcuri M. 2016. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: origin and distinctive characteristics. *Sedimentary Geology*, 337: 36-54.
- Zhang J Y, Ambrose W, Steel R, Chen S. 2022. Long cores through the Wilcox Group, Gulf of Mexico, show process variability across different time scales. AAPG Bulletin, 106(7): 1403-1429.
- Zhang J Y, Zhu R K, Wu S T, Jiang X H, Liu C, Cai Y, Zhang S R, Zhang T S. 2023. Microscopic oil occurrence in high-maturity lacustrine shales: Qingshankou Formation, Gulong sag, Songliao Basin. *Petroleum Science*, 20: 2726-2746.
- Zhang T S, Hu S Y, Bu Q Y, Bai B, Tao S Z, Chen Y Y, Pan Z J, Lin S H, Pang Z L, Xu W L, Yuan M, Fan J W, Sun Y S, Feng X. 2021. Effects of lacustrine depositional sequences on organic matter enrichment in the Chang 7 Shale, Ordos Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 124: 104778.

(责任编辑 郑秀娟)