

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

朱筱敏¹, 王晓琳¹, 胡鑫¹, 王祥¹, 高子颀²

[1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 美国堪萨斯大学, 堪萨斯州 劳伦斯 66045]

摘要:2024年6月在英国阿伯丁召开的第37次国际沉积学家年会聚焦沉积学前沿领域,重点讨论了地球、生命与气候、前寒武纪环境、源-汇系统、河流与湖泊沉积、潮汐作用与浅海沉积、深水沉积、硅质碎屑成岩作用与储层表征、碳酸盐岩与蒸发岩、遗迹化石学、火山与地球化学、行星沉积学、地热和能源转型、地震沉积学、人工智能和沉积学研究新方法与技术等学术前沿问题。会议强调了古气候研究在深-时全球变化中的重要性,提出高分辨率沉积记录重建古气候的新思路;强调构造活动、气候变化和沉积过程之间的耦合关系,依据多尺度地貌重建和沉积物通量模拟,揭示源-汇区搬运机制;强调细粒沉积物在深水环境中的搬运和沉积机制,提出基于机器学习的沉积相自动识别、储层预测和沉积过程模拟新方法等。基于这次年会的前沿动态综合分析,未来沉积学研究应关注和推进古气候与深-时全球变化、古地貌学与源-汇系统、深水沉积与细粒沉积学、大数据与人工智能新技术等发展,服务国家能源战略目标,创建具有中国区域地质特色的沉积学理论体系。

关键词:大数据与人工智能技术;深-时全球气候;古地貌学与源-汇系统;深水沉积与细粒沉积学;国际沉积学家年会

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Frontiers and future prospects of international sedimentological research : Review on the 37th International Meeting of Sedimentology

ZHU Xiaomin¹, WANG Xiaolin¹, HU Xin¹, WANG Xiang¹, GAO Zijie²

[1. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. University of Kansas, Lawrence, Kansas 66045, USA]

Abstract: The 37th International Meeting of Sedimentology (also referred to as the 37th IMS) was held in June 2024 in Aberdeen, UK, focusing on the frontiers of sedimentology. Specifically, this meeting highlighted cutting-edge academic issues including the interactions between the Earth, life, and climate, Precambrian environments, source-to-sink systems, fluvial and lacustrine sedimentation, tidal action and neritic sedimentation, deep-water sedimentation, and the diagenesis and reservoir characterization of siliceous clastic rocks. Additional focal areas included carbonate rocks and evaporites, ichnology, volcanoes and geochemistry, planetary sedimentology, geothermal resources and energy transition, seismic sedimentology, and AI-based new methodologies and technologies for sedimentological research. This meeting emphasized the importance of paleoclimate research in deciphering deep-time global changes, presenting a novel approach to reconstruct paleoclimate using high-resolution sedimentary records. It underscored the coupling relationships among tectonic activities, climate change, and sedimentary processes, positing that elucidating source-to-sink transport mechanisms necessitates multi-scale geomorphological reconstruction and sediment flux simulations. Furthermore, this meeting underlined the transport and deposition mechanisms of fine-grained sediments in deep-water environments, and introduced novel machine learning-based methods for automatic sedimentary facies identification, reservoir prediction, and sedimentary process simulation. A comprehensive analysis of the cutting edge obtained from the 37th IMS reveals that future sedimentological research in China should prioritize research on paleoclimate and deep-time global changes, paleogeomorphology and source-to-sink systems, deep-water sedimentation and fine-grained sedimentology, and new technologies such as big data and AI. The purpose is to achieve the national energy strategic objectives and establish a

收稿日期:2024-12-12;修回日期:2025-03-16。

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

sedimentological theoretical system that reflects the regional geological characteristics of China.

Key words: big data and artificial intelligence (AI) technology, deep-time global climate, paleogeomorphology and source-to-sink system, deep-water sedimentation and fine-grained sedimentology, International Meeting of Sedimentology (IMS)

引用格式:朱筱敏,王晓琳,胡鑫,等. 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[J]. 石油与天然气地质,2025,46(3):685–704. DOI:10. 11743/ogg20250301.
ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, HU Xin, et al. Frontiers and future prospects of international sedimentological research: Review on the 37th International Meeting of Sedimentology[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3):685–704. DOI: 10. 11743/ogg20250301.

1 会议主题及论文分布情况

1.1 会议主题设置

第37次国际沉积学家年会(IMS 2024)于2024年6月下旬在英国阿伯丁召开,会期3天,主要围绕国际沉积学研究热点科学问题展开深入探讨,旨在增进沉积科学家相互了解,推动沉积学理论与方法技术创新。大会共设置了16个科学主题(表1),具体包括:碳酸盐岩,蒸发岩,浅海碎屑岩,潮汐作用,能源转型,源-汇系统,河流与湖泊,遗迹化石,地球、生命与气候,碎屑岩成岩作用,储层表征,地震沉积学,人工智能(AI)方法与技术,地热与火山,深水沉积以及其他主题。大会

期间,4名知名沉积学家受邀做了大会主旨发言,其主要内容涉及到地球多圈层相互作用、定量古地理和古生态过程、地球与火星表面古今环境演变、能源转型和地球科学面临的挑战等。大会还提供了涉及前寒武系沉积、风成和冰川沉积、河流沉积、潮汐三角洲、潟湖与浅海沉积、重力流沉积、珊瑚礁灰岩及北海裂谷系统等8条野外考察路线。

1.2 会议论文分布

依据本次国际沉积学家年会的16个科学主题及其下属的44个专题设置情况(表1),统计分析了各个主题和专题中的论文发表情况(图1)。

大会共接收了口头报告和展板交流摘要共423篇,其中气候驱动沉积变化、古环境演化、环境与生物

表1 第37次国际沉积学家年会主题及专题设置情况
Table 1 Themes and related sessions set for the 37th IMS

序号	主题	代号	专题名称	序号	主题	代号	专题名称
1	碳酸盐岩	1.1	微生物碳酸盐岩沉积环境	9	地球、生命与气候	9.1	事件沉积记录
		1.2	白云石化作用			9.2	气候驱动沉积变化
		1.3	碳酸盐岩层序地层学			9.3	古环境演化
		1.4	碳酸盐岩岩相古地理			9.4	环境与生物群落
		1.5	碳酸盐岩储层评价			9.5	环境灾害沉积学
2	蒸发岩	2.1	蒸发岩古气候与沉积	10	碎屑岩成岩作用	10.1	人类活动对岩石圈影响
		2.2	蒸发岩同位素记录			10.2	成岩作用与孔隙发育
3	浅海碎屑岩	3.1	浅海沉积过程与沉积环境	11	储层表征	11.1	储层形成与评价
		3.2	古气候与古环境重建			11.2	储层预测与流体识别
		3.3	浅水三角洲	12	地震沉积学	12.1	精细刻画及储层预测
4	潮汐作用	4.1	现代潮汐沉积作用			12.2	薄储层地震成像
		4.2	地质历史的潮控三角洲	13	AI方法与技术	13.1	机器学习预测环境岩相及甜点
5	能源转型	5.1	CCUS			13.2	虚拟三维建模技术
		5.2	地热			13.3	沉积学数据库云平台构建
6	源-汇系统	6.1	物源分析	14	地热与火山	14.1	热液沉积与生物保存机制
		6.2	源-汇过程			14.2	古环境与火山作用
7	河流与湖泊	7.1	河流沉积与构造演化			14.3	火山沉积结构
		7.2	河流相储层勘探	15	深水沉积	15.1	水槽实验和现代浊流监测
		7.3	储层成因机制			15.2	混合事件层
		7.4	气候对河流沉积的影响			15.3	陆架到盆地的沉积物输送
8	遗迹化石	8.1	遗迹学与沉积环境	16	其他	16.1	科学钻探探索地球:IODP
		8.2	遗迹化石根源及保存			16.2	其他沉积学专题

注:CCUS为碳捕集、利用与封存;IODP为国际大洋发现计划。

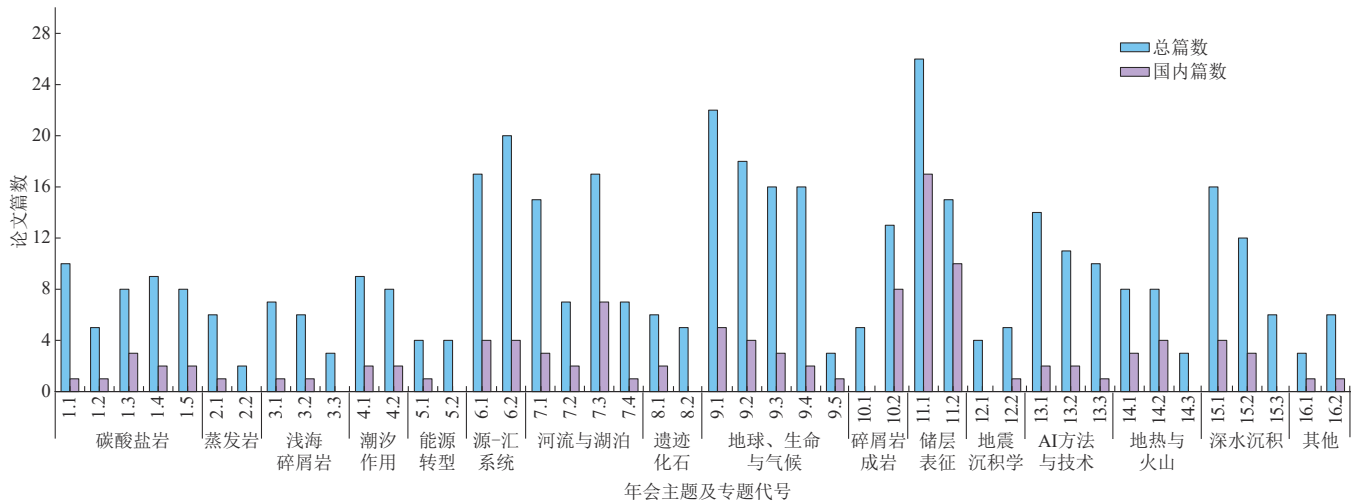


图1 第37次国际沉积学家年会主题和专题论文分布及中国学者发表论文摘要统计柱状图

Fig. 1 Histogram showing the summary statistics of all and Chinese research papers on the themes and related sessions of the 37th IMS

群落、物源分析和源-汇过程、陆架到盆地的沉积物输送、河流沉积与构造演化、浅海沉积过程与沉积环境、事件沉积记录、混合事件层、微生物碳酸盐岩沉积环境、碳酸盐岩层序地层学、碳酸盐岩岩相古地理、碳酸盐岩储层评价、成岩作用与孔隙发育、储层表征预测与流体识别、机器学习预测沉积环境均是大家关注的热点科学问题。在全部的423篇摘要中,以中国机构为第一作者单位的摘要共112篇,约占总数的26%。中国学者的研究主要聚焦于气候驱动沉积变化、源-汇系统、古环境演化、碳酸盐岩层序地层学、河流与湖泊、事件沉积记录、成岩作用与孔隙发育、储层形成与评价、储层预测与流体识别、热液沉积与生物保存机制、古环境与火山作用、水槽实验和现代浊流监测及混合事件层等,但在微生物碳酸盐岩沉积环境、潮汐沉积作用和潮控三角洲、浅海沉积过程与沉积环境、蒸发岩古气候与沉积、遗迹化石与环境、AI方法和技术等方面与国外学者关注点存在差异。国内参会学生的研究主要集中在古环境重建与演化、源-汇系统、事件沉积、储层评价、地震沉积学、人工智能等领域,研究领域涉及沉积岩石学、储层地质学和石油地质学等方向。鉴于各专题接收论文数量有较大差异,下面将44个专题归纳为18个重点研究专题来展开讨论。

2 国际沉积学研究前沿

2.1 地球、生命与气候

地球、生命与气候之间存在着密切的相互依存关系。地球环境与气候变化是一个复杂的系统,通过多

种途径影响生态系统、沉积过程、能源矿产形成和生物宜居性,了解这些因素有助于更好地预测和管理环境变化带来的挑战,以及制定相应的环境保护和气候变化应对策略^[1]。

2.1.1 “深-时”古气候研究

“深-时”古气候研究主要关注地球历史上较长时间尺度内的气候变化及其对生物演化、生态系统结构和地球表面等方面的影响,研究方法主要包括地质记录分析(如岩石、化石、冰芯及树轮等)、同位素分析(碳、氧同位素等地球化学指标)及古气候数值模拟。在全球气候变暖和海洋环境多变的背景下,生态系统受到挑战,大多数学者更加关注地球历史上曾经发生的极端气候事件,尤其是温室气候下的极热和缺氧事件。这些研究对于理解地球系统、生物多样性和人类文明的发展具有重要意义。

极热事件通常与火山活动、全球变暖、水文循环增强以及碳循环扰动密切相关。国外学者利用多种手段(孢粉学、介形虫、同位素与主微量元素、总有机碳和黏土矿物分析等)重建了沉积历史和古环境演化,研究表明,随着风化程度增加,湿生植物群落扩张,三角洲和沼泽沉积体系扩张至最大规模^[2]。以古新世—始新世极热事件(PETM)为例,该事件导致新生代早期强烈的全球变暖,与大气圈和水圈中二氧化碳急剧升高相关,并在陆地和海洋生态系统中均记录到明显的碳同位素负偏移现象^[3]。PETM期间,陆相地层中的碳同位素偏移过程可分为快速负偏、保持低值和缓慢恢复3个阶段。值得注意的是,陆地植物和哺乳动物在该事件中并未发生大规模灭绝,而是通过进化、迁徙和局部灭绝

等方式适应了快速变化的环境。

天文旋回是沉积学领域的研究热点,它可以通过调控全球和区域气候变化,间接影响古环境演变与水循环过程。具体表现为:天文轨道参数(偏心率、斜率和岁差)的周期性变化通过改变太阳辐射,进而影响区域降水分布,最终调控径流量和海洋沉积物的输送过程,并触发浊流事件。比如,基于孢粉和地球化学指标分析,在深-时极热事件期间,英国北海盆地和西班牙 Basque 盆地的浊积岩分布规律显示出明显的天文旋回信号,证实了年平均降水量对轨道参数变化的响应关系^[4-5]。此外,可通过天文旋回阶段评估区域气候变化背景下的沉积相迁移规律和化学风化强度演变特征^[6]。

缺氧事件对全球快速变暖、海洋酸化、海平面上升及海洋生态系统演变具有深远影响,其研究对理解当今气候变化具有重要启示意义。白垩纪古海洋中多次发生“大洋缺氧事件”(Oceanic Anoxic Events, OAEs),这几次 OAEs 的成因虽不尽相同,但依据全球多个地区实例分析推测,其成因机制可能与该时期大规模的海底火山活动引起的气温升高、碳水化合物大量分解、水文循环增强以及海洋生物生产力提高等一系列连锁反应密切相关。例如,过量的二氧化碳排放导致缺氧事件发生,影响了初级生产力和有机质埋藏,从而间接控制了黑色富有机质页岩的形成与分布(图2)^[7]。天文旋回研究表明,短偏心率、斜率和岁差旋回对 OAEs 有明显影响,天文轨道周期驱动的季风强度变化,通过影响陆源物质剥蚀、火山喷发物质搬运以及水体分层程度等过程,最终控制着缺氧事件的起始和结束^[8]。中国学者在阜新盆地中成功识别出阿尔必期早期 OAE 1b 的陆相沉积记录,该套泥质岩中的高含量惰质组和多环芳烃为同期广泛的野火事件提供了直接证据,据此建立了大火成岩省火山活动、陆地化学风化及野火燃烧三者协同控制 OAE 1b 缺氧事件的机制模型^[9-10]。

缺氧事件与能源矿产的形成息息相关,其中黑色页岩沉积就是最典型的产物之一。多次全球性的大洋底水贫氧-缺氧环境,促使富有机质黑色页岩在各大洋盆地广泛发育。值得注意的是,缺氧事件期间有机碳埋藏量激增,往往引发显著的气候波动。随着碳同位素地层学和古生物学研究工作的深入,发现黑色页岩大规模发育期一般对应于全球海相碳酸盐碳同位素正偏和浮游生物大幅度更替,这一规律在波斯湾盆地、墨西哥湾盆地和松辽盆地均得到验证。基于碳、氧同位素分析认为,松辽盆地上白垩统青山口组页岩不仅在形成时代上与白垩纪古海洋 Cenomanian-

Turonian 界线附近的缺氧事件高度吻合,其有机碳同位素地球化学特征也与 OAEs 的黑色页岩特征相似,充分证实了缺氧事件对页岩分布的显著控制作用(图2)^[11]。

2.1.2 古环境演化与生物群兴衰

古环境演化对生物圈的控制是一个综合而复杂的过程,涉及到多种因素,如气候变化、地质事件、海洋变迁、生态系统的相互作用等都会影响生物群落的兴衰。研究这些因素及其相互作用有助于更好地认识地球历史上的生物演化过程^[12]。气候的变化直接影响生物的栖息环境,温度升高或降低会改变物种的分布范围,影响其生存和繁殖。例如,寒武纪和泥盆纪的温暖气候促进了生物多样性增加,而冰期则导致大量物种的灭绝。此外,干旱、洪水和风暴等极端天气事件会破坏生态系统的稳定性,直接影响生物群落的生存适应能力。

火山活动在古环境和生物演化中扮演着重要角色,且具有两面性。一方面,大规模的火山喷发会释放大量的火山灰和有毒气体,直接破坏气候和生态环境,导致生物的灭绝。例如,Deccan 火山活动与生物消亡的时间吻合,沉积记录中汞(Hg)和碲(Te)元素的异常富集证实火山活动导致大气中 CO₂ 和 SO₂ 浓度的升高,从而引发全球气候变暖和海洋酸化,增加了生物繁殖生长的压力,在短期内导致生物大规模灭绝^[13]。另一方面,火山活动释放的营养元素导致海洋生物勃发,初级生产力上升,利于有机质的积累,且随着时间的推移,可能会形成耐旱和耐贫瘠的新型植物群落,为其他生物提供栖息地,并逐渐恢复生物多样性^[14]。

古环境演化与海平面变化密切相关,海平面升降可间接改变沿海生态系统和海洋生物栖息地。当海平面上升时,可能会淹没低洼湿地和沿海生物栖息地,并向陆地扩展,创造新的海洋环境,促进海洋生物多样性;当海平面下降时,暴露的陆地可能成为新的生物栖息地。例如,根据沉积学和古生物学资料研究意大利北部多洛米蒂山脉的植物群,发现其丰度和形态多样性在海侵期呈现显著增长趋势,同时海平面变化对植物遗骸和四足动物足迹的保存具有深远影响^[15]。

2.1.3 人类活动对沉积成岩的影响

人类活动对岩石圈的影响是多方面的,包括采矿活动、工程建设、土地结构改变和水资源开发等。现代工业文明导致大量自然物质被人工开采并重新沉积于地表系统,通过沉积学记录结合 X 射线衍射、稳定同位

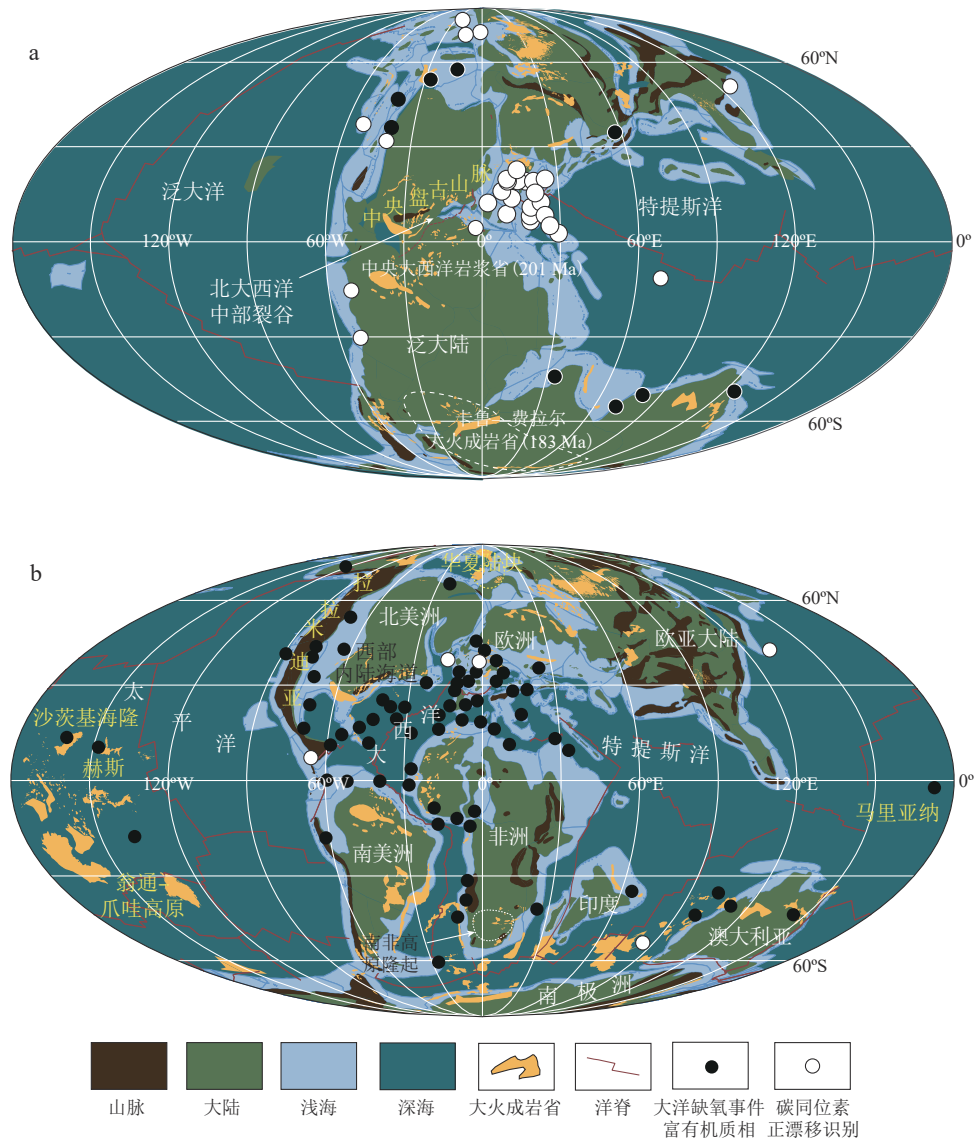


图2 全球白垩纪板块分布和托阿尔期(Toarcian)缺氧事件沉积^[7]

Fig. 2 Global plate distribution during the Cretaceous and deposition associated with the Toarcian Oceanic Anoxic Event^[7]

a. 183 ~ 182 Ma ; b. 约90 Ma

素、相分析和扫描电镜观察等综合技术手段,已证实人为地质材料在大气 CO₂ 的参与下发生了胶结岩化作用^[16-17]。具体而言,建筑垃圾和工业废弃物等人为地质材料被大量倾倒入海洋或海岸区域后,经过海洋物理、化学和生物作用的长期改造,最终与海洋天然沉积物发生混合沉积并逐步固结成岩。海平面波动与地表构造升降等自然因素与人工河流改道、海砂开采等人为活动的复合作用,可加速海岸沉积物的岩化进程,同时引起生物多样性和碳捕集与封存(CCS)效率改变等环境效应^[18]。

2.2 源-汇系统复杂性和定量表征

源-汇系统分析旨在揭示沉积物生成、搬运和沉

积的多尺度或变尺度的完整动力学过程。亚洲大陆边缘河流系统贡献了全球 2/3 的人海陆源碎屑物质,是研究沉积过程和源-汇系统的理想场所。当前源-汇系统研究的热点地区集中在青藏高原、南海珠江口盆地和印度洋孟加拉扇。以喜马拉雅山脉为源头的恒河-布拉马普特拉河(GB)河流系统与深海孟加拉扇共同构成了全球最大的沉积物“源-汇”传输体系。孟加拉扇浊积岩层序完整记录了与 GB 河流系统相关的强烈构造活动和气候变化信号。经过约 4 000 km 的河流和浊流沉积物搬运后,碎屑锆石 U-Pb 同位素测年指示了喜马拉雅和西藏源区,尤其是西藏冈底斯弧的小于 300 Ma 的母岩风化产物。研究还揭示了浊积岩的发育程度和富砂性与海平面升降、寒冷气候事件及冰川

作用等存在相关性^[19]。

陆相盆地“源-汇”复杂性主要体现在临近复杂物源、构造活动强烈、流域短小、气候多变和控制因素多样等方面。陆相湖盆深-时源-汇系统研究不仅提供了沉积物从源区到汇区的构造和环境信息,而且有利于盆地沉积砂体的有效预测。研究表明,大型轴向三角洲沉积体系往往具有多源供给特征,即由不同物源区贡献的沉积物经多水系汇聚作用共同塑造。多源汇聚作用形成大型古水系,造就面积广阔的大型三角洲。源-汇系统的定量化分析有助于预测大型砂体或油藏分布。

碎屑矿物年代学示踪是有效、可靠的重建深-时源-汇系统的方法。碎屑U-Pb 锆石形态特征和热年代学年龄被广泛应用于表征河流沉积物的母岩和源区构造演化阶段。目前,综合半自动拉曼光谱重矿物分析方法(HMA)、锆石U-Pb-He地质年代学和微探针石榴石地球化学分析方法以及Nd-Hf同位素分析方法可定量表征沉积物的来源和时间。在源-汇系统研究中,针对河流搬运通道中的碎屑矿物进行年代学示踪采样需要考虑以下关键因素:样品粒度、采样时间、采样地点和样本数量等。母岩组成和搬运水动力造成沉积物粒度差异,窄粒度沉积物样品时-空变异性小^[20]。

沉积物通量定量估算是沉积区定量表征的重要内容,对于重建深-时源-汇系统的信号传输过程具有重要意义。目前,BQART模型及其若干改进模型已被广泛应用于深-时源-汇系统的沉积物通量估算分析中,能够定量表征底床载荷和悬移载荷及其变化^[21]。地层正演模拟(SFM)是开展现代沉积与深-时源-汇系统对比的有效方法。洪水流量的变化会改变地层叠置样式和汇体沉积形态,高功率水流对长距离输送砾石具有很高的效率,高坡度和高降水均能提高侵蚀速率、增加沉积通量和增大河道网络发育密度。其中,高降水对沉积物运移的促进作用更显著,而高坡度则对侵蚀作用更加有利,剥蚀速率与降水量呈正相关关系。显然,基于收支平衡模型,明确源-汇系统不同构成要素的耦合关系,可预测砂体规模和有利储层分布^[22]。

2.3 湖泊与海洋碎屑岩沉积

2.3.1 河流与湖泊

河流沉积体系研究主要关注河流类型划分、河型转化、河流砂体结构组成、分支河流体系、不同类型河流沉积模式,以及不同的流动模式及其时间变化对曲流河沉积物堆积和保存的影响;在高精度层序格架中,

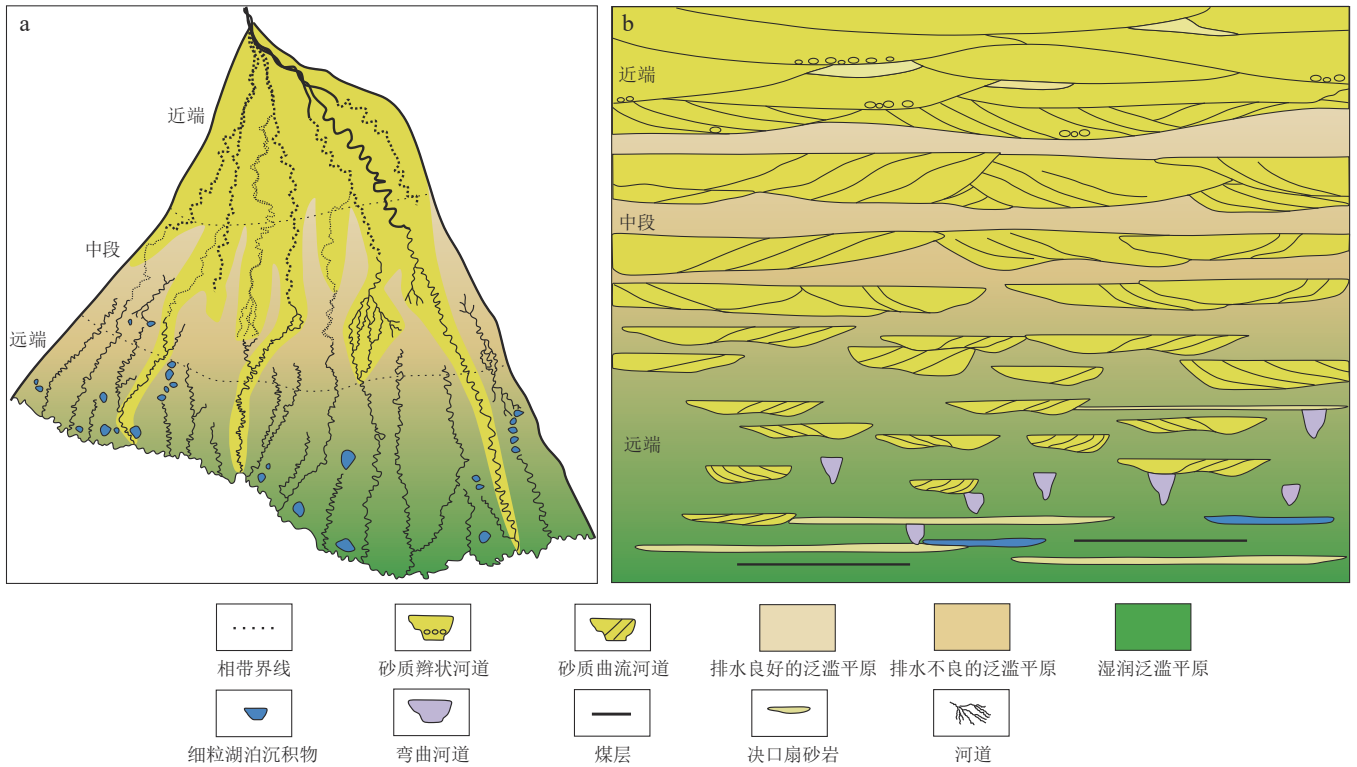
重点探索河流沉积序列变化与海侵和海退过程的响应关系,以及潮汐-波浪与河流的相互作用机制;了解河流水文特征与沉积特征之间的关联性,着重分析河道体系结构、水文变异性以及河道平面几何形态与演化之间的内在联系。受相对海平面振荡、局部构造以及气候、地貌因素的综合影响,河流沉积序列可表现为向上变细、向上变粗或无明显粒度变化,形成不同的岩相组合特征^[23]。

分支河流体系是河流从某一顶点进入盆地后呈放射状展布的沉积体系,是大陆沉积盆地填充序列的重要组成部分,其特征表现为多类型河道共生发育。构建分支河流体系识别标志与沉积模式、建立沉积储层数据库、开发河网体系和河型演变定量预测模型、定量表征河流系统构型以及定量预测储层是当今需要解决的问题^[24]。该体系具有典型的径向分布特征,表现为河流向下游消散,并呈现一系列独特且可量化的空间变化趋势(图3)。具体表现为:向下游方向河道规模递减、丰度降低、沉积物混合程度减弱、沉积物粒度变细,同时洪泛平原和溢岸沉积增加。Adrian Hartley等学者以美国犹他州峡谷地Chinle组为研究对象,通过探槽观测和无人机航测综合分析,精细刻画了河道带和泛滥平原的分布特征,发现河道带宽度超过5.6 km,点坝满岸流深度达13 m,宽/厚比介于1:520~1:260^[25]。

河流沉积与盐运动的响应关系受到人们关注。在河流沉积过程中,盐构造运动可改变微盆地的可容空间分布,同时影响沉积作用的时-空特征,并可能通过盐构造高地控制沉积物输运系统的侵蚀程度和连通性。盐构造运动对河流沉积分布具有显著的控制作用:河道发育通常仅限于紧邻盐体的地形低处,而细粒沉积则发育于盐体上方地形高处^[26]。

浅水三角洲及其定量沉积模型是当今沉积学研究热点。中国鄱阳湖现代赣江浅水三角洲的卫星图像分析、浅层岩心和探地雷达(GPR)剖面研究以及“Delft3D”沉积数值模拟表明,赣江三角洲主要由指状砂坝组成,不发育席状砂,其形成受控于稳定的低弯度分支河道对河口坝的下切改造与向前推进。湿润气候条件下的细粒沉积物供应和高流量水源有利于该类三角洲的发育^[27]。

重力流(异重流)是湖盆中重要的沉积机制。洪水时期河流搬运能力增强,形成的重力流(异重流)可携带高密度的水-沙混合物,在远离岸边的较深水域中形成形态为板状至不规则状的、规模较大的厚层砂体。断陷湖盆中同沉积断层及其组合(构造转换带)控制了重力流(异重流)发育分布,重力流水道易于流过同沉

图3 分支河流水系沉积环境(a)和砂体结构模式(b)^[24]Fig. 3 Sedimentary environment (a) and sand body architecture models (b) of distributive fluvial systems^[24]

积断层活动性较弱的部位,而在同沉积断层活动性较强的部位发生偏转或受限制。

陆相湖盆分布范围小、水体较浅,易受陆源碎屑输入、气候变化、构造运动以及热液活动等因素的影响,有利于发育陆源碎屑与碳酸盐矿物组成的混积岩。混积岩的岩相组成和沉积微相分布受控于盆地结构、古地貌、湖平面变化、母岩成分和水体盐度等多种因素。水体较咸、有一定陆源碎屑注入的平缓斜坡环境有利于混积岩的发育。混积岩的纹层结构会影响储层质量,纹层状或层状混积岩储层的孔隙度和可动油含量通常偏高。湖盆白云石常常出现在湖相富有机质页岩中,并表现为不同的晶体大小和形状,往往形成于高古盐度和温暖条件下的早期埋藏阶段。此外,低温富Mg硅酸盐矿物可有效反映河流-湖泊环境的古气候,常见于水体封闭的碱性或高古盐度蒸发盆地^[28]。湖泊可容空间的增大、温暖湿润的气候条件、充足的陆源有机质来源以及火山活动提供的营养物质,共同促进了裂谷型湖泊中有机质初级生产力的提高。

2.3.2 潮汐沉积和浅海碎屑岩

潮汐沉积过程是由月球和太阳引力作用产生的周期性海洋水位变化(即潮汐波动)所驱动的。在潮汐作用下,水体运动会导致不同来源、成分和粒度的沉积物

进行搬运和堆积。潮汐强度、频率及其沉积环境对揭示古环境演化、沉积物来源和潮汐动力模式具有重要意义^[29]。潮汐作用可形成潮汐韵律层、交错层理、双黏土层和浮泥沉积等多种沉积构造。

现代潮汐沉积作用和潮汐三角洲处于研究前沿。学者们关注到了河流-海洋过渡带、河流与潮汐、波浪的混合沉积作用以及潮汐对沉积砂体形态的控制作用。通过取样分析、定点冲淤观测和沉积动力学分析,有学者研究了中小型河流河口潮滩季节性冲淤变化过程和控制机理^[30];也有学者采用形态学分析、无人机测量、高精度层序地层学、地球化学、微体古生物和岩心观测等方法对韩国加洛林湾、韩国西南部晚第四纪潮坪的地层结构和层序地层格架,以及英吉利海峡的潮坪沉积和形态学特征进行了系统分析^[31-32]。研究表明,周期性出现的潮汐韵律层不仅可以用来重建古地理和沉积环境,还可估算古潮差和建立潮汐模式^[33]。对于潮控三角洲,学者们主要关注三角洲的形态学分析和沉积模式建立等方面^[34-35]。

浅海沉积主要是由砾、砂、泥沉积组成,沉积物粒度与波浪作用强度相关。人们应用岩心分析、高分辨率三维地震和测井资料、三维数值模拟、放射性同位素和有机地球化学分析方法,研究浅海沉积物搬运机制、风暴沉积过程和保存条件以及浅海碎屑岩储层特征^[36-38],探讨

人类迁徙、降水与湿度等全球气候变化因素对海岸和浅海沉积的影响,以及海啸沉积物的形成与保存机制^[39-40]。

2.4 深水沉积

深水盆地常是源-汇系统中沉积物的终端赋存场所,在源区物质的搬运和保存过程中起着至关重要的作用。人们通常利用露头岩心、测井和三维地震资料以及实验手段,研究深水沉积类型、流动特性、水道充填与构型、水道-天然堤体系及其控制因素。

2.4.1 现代浊流监测和水槽实验

目前,研究人员越来越多地采用实验方法、浊流实时监测和数值模拟探究深水沉积机制。杜伦大学的Peter Talling研究团队在浊流监测和实验设计方面处于领先地位,旨在揭示浊流的触发机制、加速过程和长距离移动动态特征以及对有机碳转移效率、海底电缆安全的影响。研究发现,高频率发生的浊流对陆源有机碳的埋藏效率非常高(60%~100%)^[41-43]。浊流与地形相互作用的水槽实验研究对于预测颗粒物质(含微塑料)的分布以及重建深水盆地地貌、理解古代深水储层和砂质沉积物的分布至关重要^[44]。

2.4.2 混合事件层

Haughton(2009)提出混合事件层(HEB)概念来描

述由湍流和碎屑流组合形成的重力流沉积物,当前研究重点是混合事件层(H1—H5)的流动机制、相变和厚度变化以及在深海沉积中的分布规律^[45]。形成混合事件层的流体运动不符合简单的渐进稀释模型,它们可能涉及侵蚀过程和流体配分,从而形成浊流与层状碎屑流相互作用的复合流。经典浊流具有典型的鲍马序列特征,而碎屑流则由于具有非牛顿流体特性,能够携带大量碎屑物质,常表现出软变形和脱水结构,并可包含泥砾或者假砂质结核。区分经典浊积岩和混合事件层有助于推断沉积地点与重力流触发地之间的距离(图4)。

2.4.3 陆架到盆地的沉积物输送

陆源物质向深海可能的输送机制包括季节性洪水、极端洪水事件、地震活动以及三角洲前缘或斜坡的失稳现象。其中,气候变化引起的海平面升降对陆源碎屑向深海输送过程的影响一直是学术界关注的重点研究课题。研究表明,全球海平面变化与两极冰川体积及气候变化存在明显的耦合关系。气候变冷会导致冰川体积增加,引起全球海平面下降,增强河流系统与深海峡谷的连通性,从而使陆源物质能够直接输送至深海平原^[46]。全球深海水道数据显示,高达92%的深海水道形成于冰期,且该时期浊积岩中有机碳埋藏效率显著提高^[47-48]。然而Burton(2023)认为,在温暖气候条件下,降水量的增加会导致风化作用加强,充足的

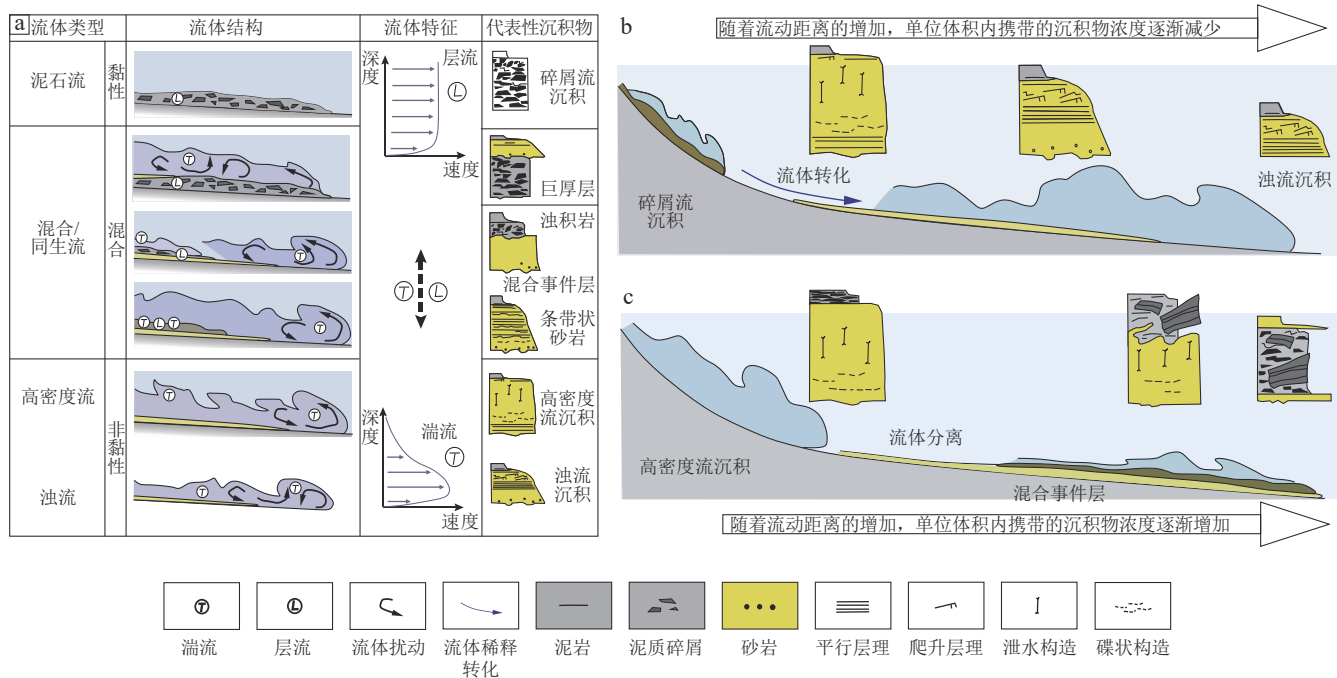


图4 重力流混合事件沉积过程及沉积序列^[45]

Fig. 4 Sedimentary process and sequence of a hybrid gravity-flow event^[45]

a. 不同流体类型综合特征;b. 碎屑流体转换及沉积序列特征;c. 高密度流体转换及沉积序列特征

陆源供给使得即使在海平面高位期,也能促进砂质浊积岩的形成^[49]。

目前,研究者在孟加拉扇、南海盆地、新西兰 Southern Taranaki 盆地和日本 Kikai 盆地等持续开展调查研究,主要包括:①识别不同外部因素(如气候、构造活动)和内部自生因素(如负载过重导致的滑坡)触发的深海重力流沉积物;②探究洪水和地震的规模,以及与其触发的重力流沉积构造和厚度特征之间的关联性;③研究河流系统与海底峡谷之间的连通性对陆源物质向深海输送过程的影响及其验证方法。

2.5 碳酸盐岩与蒸发岩

碳酸盐岩沉积学是研究碳酸盐岩(如石灰岩和白云岩)形成、沉积环境、沉积构造以及成岩作用的重要学科^[50-52]。通过碳酸盐岩的物理和化学特性、沉积成因和储层特征研究,有助于重建古环境与古气候、揭示古生态系统结构和功能、评估地质灾害、提高油气田勘探成功率和优化开发方案。

近期碳酸盐岩的主要研究热点包括形成机制、碳酸盐岩工厂、白云石化作用、微生物岩沉积环境演化、岩相古地理、碳酸盐岩成岩作用和储层评价、古气候重建等方面^[53-54]。三维地震数据、测井资料、团簇同位素定温、碳酸盐矿物 U-Pb 同位素定年及 Mg 同位素追踪流体来源等一些先进技术手段也被广泛应用于碳酸盐岩沉积储层研究^[55]。

珊瑚礁生长模式、繁殖机制以及与其他海洋生物的相互作用,会影响其在海洋生态系统中的重要性,同时气候变化(特别是海洋酸化、温度变化、营养水平变化)等均会对珊瑚生长和健康产生影响^[56]。珊瑚-层孔虫-苔藓虫礁与奥陶纪生物多样性事件研究表明,在“寒武纪生命大爆发”与“奥陶纪生物多样性大事件”之间,地球温度升高、海洋含氧量降低以及珊瑚礁长期持续的多样性状态,共同导致了造礁生物种类和数量的显著差异,并最终形成了具有差异特征的碳酸盐岩沉积^[57-58]。

白云石化成因机制、环境条件及其对岩石孔隙结构的影响成为学术界的研究热点。同位素地质学和分子生物学的综合研究表明,白云石化通常与温度、盐度、水动力条件、流体化学成分以及微生物活动等密切相关。在海洋环境下,白云石化对于碳酸盐矿物成分、台地演化、孔隙结构和储集性能具有重要影响^[59-60]。

碳酸盐岩工厂通常是指在特定环境下,通过物理、化学和生物作用形成碳酸盐矿物(主要是方解石和白云石)沉积和富集的区域。其中,珊瑚礁和潟湖沉积是

典型的碳酸盐岩工厂,它们为全球碳汇、海洋生物多样性和油气储层的形成提供了重要支撑。利用生物和地球化学方法开展研究,发现微生物活动影响了碳酸盐沉积作用及其碳循环。

碳酸盐岩层序研究不仅对理解古环境、古气候和沉积演化有重要意义,也对油气勘探具有深远影响,目前最新的研究结合了高分辨率地震层序地层学、天文旋回、数字岩心分析以及微观孔隙结构等方法。基于菊石、有孔虫等古生物地层学证据以及碳同位素示踪结果,可有效揭示海平面变化与碳酸盐岩层序地层及沉积模式之间的关系^[61-62]。通过地质学、地球物理学和地球化学等多学科融合,结合人工智能与大数据分析,研究碳酸盐岩成岩作用规律,实现储层的精准评价^[63]。

微生物碳酸盐岩是由底栖的微生物生长和活动形成的生物沉积岩,包括叠层石、核形石、树枝石和凝块石,以及某些鲕粒、团粒、球粒和泥晶。广泛存在于古代地质记录中,并在现代环境中发挥着重要作用。微生物碳酸盐岩的成因主要涉及微生物的代谢作用,通常在温暖、浅水的潮间带或湖泊环境中形成;非生物碳酸盐岩形成主要依赖于物理和化学作用过程,常见于广阔的浅海、干旱的蒸发环境及湖泊等地区^[64-65]。比如,四川盆地灯影组不同尺度微生物岩沉积旋回、岩相特征和沉积模型,为微生物碳酸盐岩储层评价提供了岩相依据^[66]。

蒸发岩形成于干旱或半干旱气候条件下的封闭-半封闭盆地、潟湖、内陆盐湖以及潮上、潮间和潮下带等海相和陆相沉积环境,不仅赋存锂盐和石膏等多种矿床资源,也可作为含油气系统中的优质盖层和 CO₂ 地质封存的理想场所。学者们利用层序地层学、元素和同位素地球化学等研究方法,探讨了蒸发岩沉积古气候、古环境和沉积成因^[67-69]。

2.6 碎屑岩成岩作用与储层表征

成岩作用与生物圈、岩石圈和大气圈之间存在着复杂的相互作用,共同维持着地球系统的平衡和稳定。生物圈通过生物的生命活动和有机质的分解,影响岩石圈中的沉积物组成和成岩过程;岩石圈通过提供沉积物和形成新的岩石组分,为生物圈提供栖息环境,同时通过成岩作用影响大气圈的成分;大气圈通过风化作用和气候条件,影响岩石圈的风化和侵蚀,以及生物圈的环境条件。成岩作用作为连接这些圈层的桥梁,将生物圈中的有机质转化为岩石,同时影响岩石圈和大气圈的物质循环。

2.6.1 成岩作用与储层质量

准确识别关键成岩事件是理解储层孔隙演化过程的核心,它直接影响了储层评价和预测。成岩作用通过压实、胶结、溶蚀和交代等多种地质过程,对孔隙空间的发育进行控制。这些过程相互影响,共同决定了岩石的孔隙度、孔隙大小与连通性、孔隙类型和分布,进而影响岩石的物理和化学性质,控制了有利储层的分布和质量。

有学者发现,奥地利莫拉斯盆地储层孔隙空间主要受硅质胶结程度控制,主要孔隙类型为相互连通的粒内孔隙、孤立的铸模大孔隙和微孔隙,无定形硅质沉积物化学性质不稳定,在逐渐埋藏过程中,无定形 SiO_2 向玉髓或石英等更稳定的物质转变,导致孔隙空间降低^[70]。又如,中国四川盆地五峰组-龙马溪组页岩孔隙发育受控于沉积成岩阶段(图5),其中硅质页岩中

富含石英,有效抑制了压实的强度,保护了孔隙空间,而混合页岩压实程度高于硅质页岩,导致残余孔隙较少。早成岩和中成岩阶段,硅质页岩的主要成岩作用是自生石英胶结作用,富黏土页岩主要发生蒙脱石压实和伊利石化作用;中-晚期成岩阶段,干酪根生烃和二次裂解促进不同页岩岩相发生溶蚀作用^[71]。此外,致密砂岩储层质量也受成岩作用控制,例如鄂尔多斯盆地华庆地区延长组石英等脆性矿物的存在以及溶蚀作用的发生有利于提高储层质量,胶结作用会破坏储集空间,成岩作用通过控制微孔和中孔的发育改善储层质量^[72]。

随着新兴技术逐渐更替创新,成岩作用的研究方法也在不断发展。例如,高分辨率成像(X射线扫描CT)、同位素分析(稳定同位素和放射性同位素分析)、数值模拟与建模(地质建模和流体动力学模拟)、成岩相与测井相、地球物理探测技术(地震反演技术和电磁

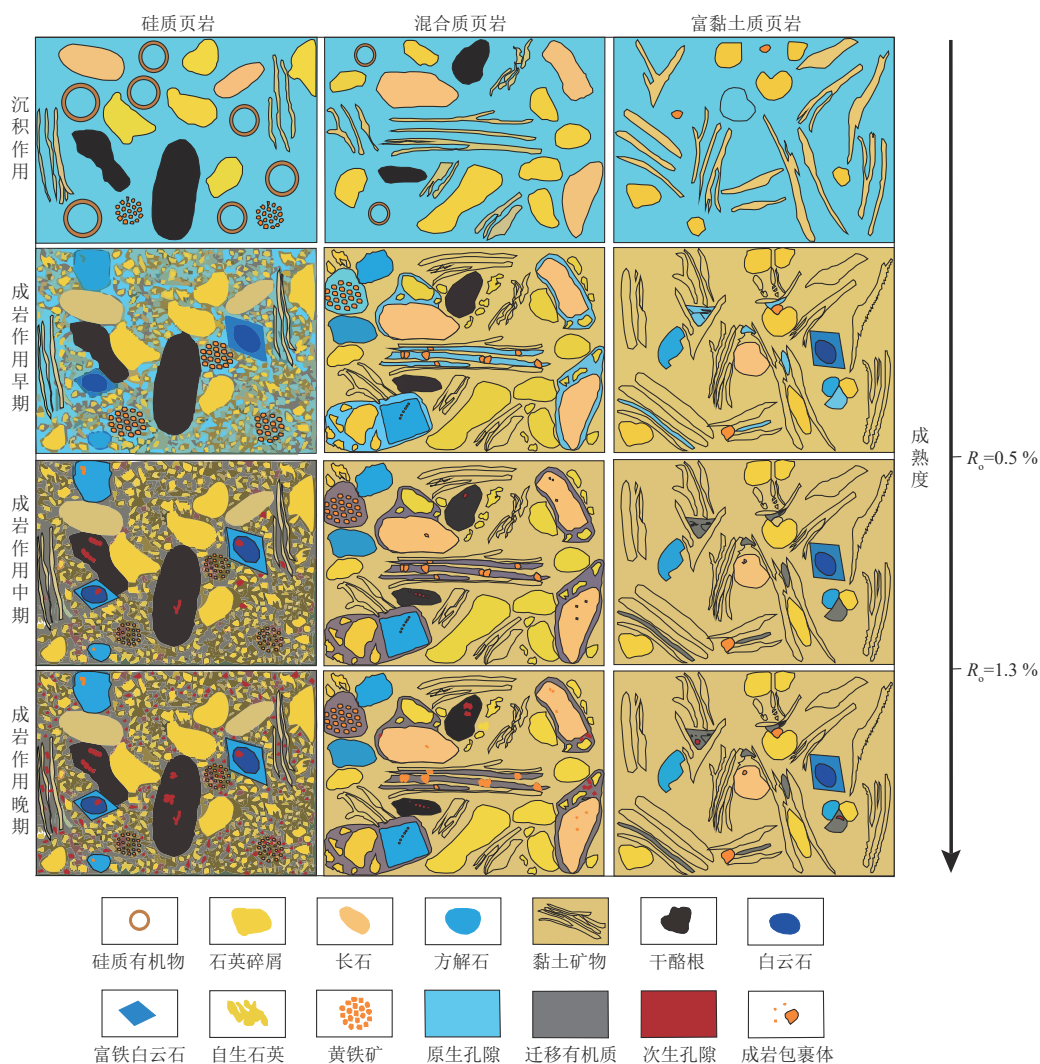


图5 硅质页岩、混合质页岩和富黏土质页岩成岩及孔隙演化模型^[71]

Fig. 5 Diagenesis and pore evolution models of siliceous, mixed, and clay-rich shales^[71]

探测)及机器学习(算法学习和大数据分析)等新技术,可以全面地分析成岩过程及其对孔隙空间和储层质量的影响,建立储层质量预测模型,为能源勘探提供科学依据^[73-74]。

2.6.2 储层形成机制及控制因素

储层类型通常包括具有较高孔隙度和渗透率的碎屑岩储层,具有复杂孔隙结构的碳酸盐岩和火山岩、变质岩等储层。储层形成机制涉及构造、沉积和成岩多个地质因素,物质来源、沉积环境、沉积过程、成岩流体、生物作用和构造活动之间的相互作用直接或间接影响着储层的形成和分布。

致密砂岩储层成因主要受构造活动、沉积相和成岩作用的影响。构造活动和沉积相在宏观上决定了砂体的形态和规模,控制了储层分布,而成岩作用则控制储层的微观孔隙发育特征。一般情况下,成岩阶段早期的压实作用和胶结作用是储层致密化的主因,中成岩阶段的溶蚀作用有效改善了孔隙。例如,埃及西部深层致密砂岩储层发育是沉积相、成岩作用和构造活动“三元控制”的结果,河流-海岸相有利于厚层砂岩储层形成,埋藏过程中胶结作用和压实作用降低了孔隙度和渗透率,而有机酸溶蚀作用提高了储集性能,多期次的构造运动有利于断层和裂缝的发育,改善了储层的渗流能力^[75]。

细粒沉积储层中蕴含丰富的页岩油资源,不同成因的细粒沉积岩有机质含量、物性、含油性和脆性等储层质量参数存在明显差异。研究表明,内源生物残骸型和生物化学沉积型为优质页岩油储层,是页岩油气勘探应重点关注的岩相类型^[76]。泥页岩储层的形成主要受控于沉积作用和成岩作用,以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例,细粒重力流沉积作用保障了丰富的陆源沉积物向深湖输送,碱湖环境中的硅质溶蚀、重结晶与造缝作用形成了孔-缝优质储集空间,沉积和成岩共同作用形成了风城组以长英质粉砂颗粒为主的层状含云粉砂岩页岩油储层优势岩相^[77]。天文轨道周期驱动的海平面波动影响了陆源输入、氧化还原条件、有机质堆积以及储层形成与发育。例如,华南上扬子地区下志留统龙马溪组页岩沉积期,冰川消退导致海平面迅速上升,在深水缺氧环境中沉积了富有机质的页岩,陆源输入有限,促进了有机质积累并增加了孔隙度,海平面的下降造成上扬子地区转变为半封闭的缺氧-氧化深水陆架,陆源输入增加和古生产力下降直接导致孔隙减少^[78]。超深层白云岩储层经历了多期成岩流体改造,非均质性强烈。例如,塔里木盆地寒武

系走滑断层、成岩流体和早期大气淡水溶解是碳酸盐岩台地储层形成的主要机制,次生孔隙和裂缝为主要的储层空间,断层和不规则裂缝的发育增强了储层的非均质性^[79-80]。

火山碎屑岩储层也是重要的油气勘探目标。例如,岩相、裂缝、风化淋滤和深部热液流体是准噶尔盆地石炭系-二叠系火山碎屑岩优质储层形成的关键因素,岩相差异分布控制了储层非均质性,断层增加了储层的连通性,深部热液及地表的大气淡水沿断裂运移,促使自生矿物溶蚀改造,改善了储层物性^[81-82]。

2.6.3 储层建模及流体识别预测

储层建模是通过对地下储层地质特征进行定量表征和分析来构建地质模型,旨在提高油气藏开发效率、优化生产策略并促进环境保护。有学者采用多种地质成因约束、多概率融合及多信息约束的建模方法,建立了鄂尔多斯盆地南缘延长组8段的储层断层控制模型。该模型巧妙地结合了断层控制储层的分布及内部结构特征,其数值模拟结果与油田动态生产数据高度吻合,为调整开发策略提供了可靠依据^[83]。有学者基于储层非均质性,综合考虑地质因素、脆性指数、岩石力学性质和工程参数研究裂缝的分布,采用UFM模拟水平井中的裂缝空间分布特点,建立了复杂的裂缝网络形态。该方法不仅可以模拟裂缝扩展机理和支撑剂运移过程,而且可以有效地模拟水力裂缝与天然裂缝之间的相互作用^[84]。

在沉积相和地震相的双重约束下,运用相控反演方法,结合正演模拟和流体替换技术,通过AVO岩石物理参数优化,实现了桑托斯盆地盐下碳酸盐岩储层流体类型和分布的定量预测,将预测准确率从60%显著提升至85%^[85]。

2.7 沉积学研究新方法和新技术

2.7.1 地震沉积学

地震沉积学是通过综合分析地震岩性学(岩性、厚度、物性及流体特征)和地震地貌学(古沉积地貌、古侵蚀地貌、地貌单元之间相互关系及其演变),研究岩性、沉积成因、沉积体系以及盆地充填历史的一门科学^[86]。核心是揭示沉积物时-空分布特征、沉积环境演变过程及沉积体物性特征,特别是在精细刻画薄层砂体、表征储层和预测岩性圈闭等方面能够展现出独特的优势。

1) 储层精细刻画与预测

储层精细刻画与预测是地震沉积学的核心任务。由于储层具有复杂的内部结构及非均质性,尤其在薄层河道砂体、三角洲沉积和深水前积斜坡储层预测中,地震信号叠加与分辨率限制使储层精细预测变得尤为困难。因此,解决这一问题的关键在于发展多尺度、高分辨率的地震沉积学技术,结合层序地层学、岩性分析及机器学习等方法,实现储层构型与物性特征的精细表征。

近年来,在层序地层框架、沉积体系建模及高分辨率地震技术的推动下,储层预测取得了显著进展。例如,在北阿拉斯加 Colville 盆地 Brookian 层序研究中,结合高分辨率三维地震数据与岩心分析,揭示了前积斜坡的复杂构型及沉积物输送规律,发现不同时期沉积物供给及水动力条件直接决定了斜坡体坡度及几何形态,斜坡边缘滑塌和碎屑流沉积物成为预测深水储层的关键^[87]。

多波联合技术在储层物性预测中的应用也取得了突破性进展。有学者采用 PP 波与 PS 波联合分析方法,通过 PS 波的高分辨率反射特性克服了单一纵波分辨率的限制。结果表明,PS 波可以准确捕捉砂体顶部界面的变化,其横波阻抗的稳定性在揭示砂体孔隙度与渗透率变化方面表现出明显优势,显著提升了储层横向和纵向非均质性的预测精度^[88]。

此外,频率融合技术与机器学习的结合为复杂沉积单元的解析提供了新方法。通过高频数据融合及叠后处理,研究者在湖相沉积体系中成功识别了厚度 4~30 m 的薄层砂体及其沉积构型^[89]。这种方法不仅显著提升了地震沉积学技术对储层精细刻画的空间分辨率,也为薄储层预测提供了可靠的技术支撑。

2) 薄储层地震成像

随着油气勘探对象日趋复杂,薄储层识别和成像成为地震沉积学面临的一大挑战。由于薄储层通常厚度较小且反射强度较弱,其地震信号容易被相邻地层的叠加反射所掩盖,造成传统地震成像方法在细节解析上不足。然而,薄储层的精确成像对于油气储层的准确评估与开发至关重要。近年来,薄储层地震成像技术取得显著进展,通过频谱分解和高分辨率成像等技术显著提升了薄储层的识别精度与成像能力。

频谱分解技术是提升薄储层成像分辨率的核心手段。有研究者利用该技术成功重建了北海中侏罗统河道和潮汐通道等复杂薄层沉积单元的几何形态^[89],突破了传统地震成像的频率限制,使沉积单元的细节得以清晰展现,为薄储层的成像奠定了坚实基础。

现代地震成像技术的垂向分辨率可达 1 m,水平分辨率可达 15 m,能够清晰展示薄储层的沉积细节。例如,在北大西洋法罗-设得兰海峡研究中,高分辨率地震数据揭示了晚始新世—更新世深水扇系统的内部构型^[90]。这项技术不仅提升了对区域沉积环境的认识,也为薄储层成像技术在油气田开发中的应用提供了直接支持。

2.7.2 AI 方法与技术

近年来,人工智能(AI)技术在沉积学领域的应用得以迅速发展,极大地提升了沉积环境分析、地质建模及数据集成的能力。随着沉积学研究对象复杂性的不断增加,传统分析方法往往难以捕捉沉积体系的细微差异。通过引入机器学习、虚拟建模和云平台技术,研究者不仅可以更高效地探索沉积学中的关键科学问题,还能够整合全球数据资源,开辟崭新的研究方向。

1) 机器学习预测沉积环境

传统的沉积环境分析通常依赖于野外露头观察和实验室样品测试。然而,面对复杂多变的地质条件和非均质性,单一方法往往难以全面表征沉积环境特征。机器学习为解决这一问题提供了强有力的工具,通过算法优化和多源数据融合显著提高了沉积环境预测的精度与效率。例如,在意大利 Ravenglass Estuary 研究中,研究者结合激光粒度分析与便携式 X 射线荧光技术,通过优化机器学习工作流程,筛选出最具指示意义的地球化学元素作为模型变量,实现了亚沉积环境与河口分区的智能分类(图 6)。该研究不仅突破了未固结沉积物缺乏结构性信息的限制,还通过校准模型对地质岩心的古环境进行解释,充分展现了机器学习在沉积演化研究中的潜力^[91]。

此外,高光谱成像结合机器学习模型在页岩油地球化学建模中的应用也证明了其卓越性。通过短波红外光谱数据处理,研发了一种高效的总有机碳含量(TOC)预测模型,其结果在精度和效率上均优于传统方法,为非常规油气资源估算提供了全新的途径^[92]。研究者通过主成分分析(PCA)、K 均值聚类和地球化学趋势分析,识别出渤海湾盆地东营组湖相页岩化学相,精确定位了具有高 TOC 和优良脆性特征的甜点区,为页岩油勘探提供了重要参考^[93]。这些研究成果充分表明机器学习方法能够高效处理海量、多维度地质数据,在复杂沉积环境预测领域展现出显著的应用潜力。

2) 虚拟三维建模技术

虚拟三维建模技术通过整合高精度数据与数字化工具,为沉积体系的几何特征解析与动态演化模拟提

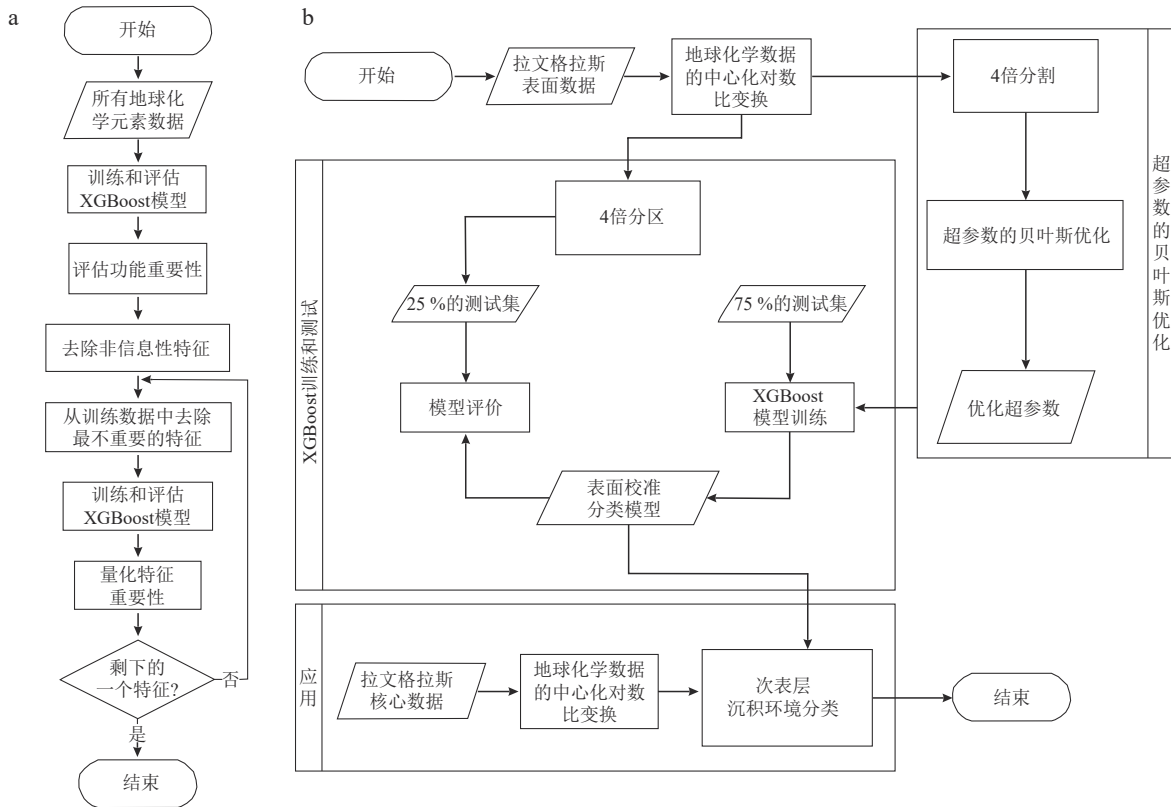


图6 地球化学元素递归特征消除(a)和用于生成地表校准分类模型(b)机器学习工作流程^[91]

Fig. 6 Machine learning workflow of the recursive feature elimination of geochemical elements (a) and the production of surface-calibrated classification models (b)^[91]

供了全新视角。相较于传统储层和含水层建模方法受限于井孔数据的离散性,虚拟建模技术能够从露头类比中提取详细的几何数据,为地质统计建模提供关键参数。例如,X射线计算机断层扫描(XCT)技术应用于黏土颗粒包壳三维量化分析,生成了砂粒与黏土颗粒包壳的空间分布模型,为预测储层质量提供了新方法^[94]。此外,虚拟露头技术已广泛用于复杂沉积体系的三维建模。通过多点统计分析,研究者能够捕捉沉积体内部的横向与垂向差异性;还可结合高光谱成像,成功预测沉积物组分空间分布,为储层异质性分析和资源评价提供不可替代的技术支撑^[95]。

2.7.3 沉积学数据库云平台构建

在大数据时代,数据标准化与共享已成为沉积学研究的重要推动力。OneSediment数据库作为深-时数字地球(DDE)计划的一部分,通过整合云计算与大数据技术,成功构建了全球沉积学数据的动态集成平台,极大地推动了沉积学数据的数字化与标准化。目前,该平台已整合包括全球碎屑钻石数据库、现代河流沉积物组成数据库等在内的25个专题数据库,数据总量突破160万条。通过统一的OneID系统,可以高效实

现数据检索、可视化及模拟分析,大幅提升研究效率。平台还采用FAIR原则,确保数据的可查找性、可访问性、可互操作性及可重复使用性,为全球沉积学界提供了开放、协作的桥梁。OneSediment数据库的构建不仅实现了沉积学数据服务的现代化转型,也为解决深-时地球演化的重大科学问题提供了重要工具。该数据库系统的成功运行标志着未来沉积学研究将更多地依赖于全球数据的共享与协作,利于推动学科的整体创新发展^[96]。

2.8 火山活动、热液沉积与能源转型

地热与火山研究是地质学、沉积学和行星探索中极具交叉性的重要领域。火山活动及其相关的热液系统不仅影响了地表和地下环境的长期演化,还在全球气候变化、生物起源与保存机制以及矿产资源富集方面起到至关重要的作用。

2.8.1 热液沉积与生物保存机制

热液沉积系统为地热活动的物质迁移和生物保存提供了关键环境。在腾冲热泉和印度洋西南部海底热液研究中,科学家发现复杂有机分子(如多环芳烃和杂

环化合物)通过地热流体保存下来,其分布与距离热源远近显著相关。在这些热液沉积环境中,含硅热液岩成为保存原始有机物的理想载体,为火星硅质岩(如Nilipatera地区)中的潜在生命痕迹研究提供了重要类比^[97]。苏格兰莱尼埃燧石层中的古代热泉沉积记录显示,热液条件下的碳质有机物呈现出复杂的矿化和保存形态。通过X射线衍射(XRD)和显微分析等技术手段,研究人员揭示了热液活动通过温度和流体组成控制有机分子的保存和演化过程的作用机制。此外,热液活动还可以提高生物生产力,并增强底水的还原能力,利于有机质的保存,如扬子板块与华夏板块交界处热液活动区已被证实为页岩气勘探有利区^[98]。这些发现不仅深化了人们对地球早期生命保存机制的理解,也为未来行星样本返回任务(MSR)等提供了重要的理论依据。然而,热液沉积的长期保存性仍受到后期成岩作用改造的影响,其微观尺度上的保存机制仍需借助更高精度的矿物学分析和地球化学手段进行深入探讨。

2.8.2 古环境与火山作用

火山活动是地球古环境变化的主要驱动力之一,通过火山气体释放和沉积物运输重塑了气候与地质记录。英格兰圣奥德里湾的研究表明,汞(Hg)异常是示踪古火山活动的可靠指标。然而,沉积环境的复杂变化会显著影响Hg信号的保真性,例如在蒸发湖、浅海和缺氧海洋等不同沉积相带中汞赋存相的变迁尤为明显^[99]。在罗马尼亚喀尔巴阡山脉,研究揭示了海底火山活动通过低密度浊流和远洋沉积共同塑造了深海沉积平原的沉积物分布模式。利用稀土元素(REE)和微量元素含量比值分析,研究人员揭示了洋脊扩张速率与沉积环境之间的强耦合关系^[100]。四川盆地侏罗系自流井组大安寨段湖泊沉积物显示,碳同位素漂移与全球气候变化存在显著关联,表明大规模火山喷发释放的温室气体是扰动全球碳循环和气候变暖的主导因素^[101]。上述研究为构建火山活动与古气候变化的多尺度耦合模型提供了坚实基础。未来研究需整合多尺度的地球化学和同位素分析方法,系统评估火山活动对沉积环境塑造的多样性以及对气候和沉积动力学的综合影响。

2.8.3 火山沉积结构多样性

火山沉积结构是解读火山活动动力学及其与沉积环境耦合的重要思路。在沙特胡塔伊马火山场研究中,发现火山口内的火山碎屑密度流(PDC)沉积物展示了多样化的沉积特征,包括高浓度颗粒流和沙丘状

沉积层,这些沉积物记录了火山喷发初期的高能量过程及其对火山口周围沉积物的重塑作用。通过三维地震建模与地球化学分析,揭示了火山碎屑密度流空间快速扩散及其内部分异的动力学机制^[102]。意大利埃特纳火山研究进一步揭示了水-熔岩相互作用形成的玻屑岩层的沉积模式,结合岩石显微分析和三维GIS建模,发现熔岩与海水交互作用形成的玻屑岩呈现复杂的微观结构,如松散晶体包裹在玻璃质基质中。通过对这些沉积结构的精细刻画,研究展示了喷发模式和环境交互作用对火山沉积特征的综合影响^[103]。火山沉积结构的多样性不仅对火山动力学模型构建具有重要意义,还在地质灾害预测和资源勘探等方面具有潜在应用价值。

2.8.4 能源转型与沉积科学

能源行业正加速向清洁、低碳、高效及多元化方向转型,平衡能源多维转型、构建可持续未来已成为大势所趋和核心方略。

沉积学在绿色低碳能源转型中发挥了关键作用,尤其是在全球气候变化评估、CO₂封存过程中的储层条件评价以及地热储层岩性和分布特征表征等方面。英国阿伯丁大学John Underhill教授的大会主题报告“沉积学在能源转型中的重要作用”涉及了传统能源、风能、CCUS(碳捕获、利用与封存)以及英国在能源转型方面采取的措施^[104]。他的研究还包括北海裂谷盆地作为CO₂和氢能储存场所、利物浦湾枯竭油田作为CO₂封存试验场所涉及的碳封存深度、地层温度-压力、油藏流体性质以及盖层封闭能力等问题^[105]。综合利用地球物理与岩石物理分析数据也是评估CCUS潜力的关键技术手段,包括评估圈闭几何形态和封存量、储层岩石物理性质和物性等^[106-107]。

哈萨克斯坦沉积盆地地热潜力研究发现,走滑断层形成的地垒和拉张背景下的地壳减薄作用共同控制了地温梯度变化,热异常与沿断层向上流动的地层水和靠近铀矿或盐底辟(能够储存高温)有关,若与太阳能、风能和水力发电等结合,应用前景将更加广阔^[108]。

3 发展讨论

沉积学与地球系统及环境效应、源-汇系统、事件沉积学、碳酸盐生产工厂、微生物岩与白云岩、大地构造沉积学、深-时数字沉积学、细粒沉积学及其资源效应、矿产与资源沉积学,以及大数据与人工智能技术应用等应为未来沉积学发展的重点研究方向。

另外,将于2026年1月在新西兰惠灵顿召开的第22届国际沉积学大会的13个主题也预示着近期沉积学的主要发展方向:①构造地貌与沉积作用;②火山沉积过程与沉积物;③构造活动与海平面变化相互作用下的沉积记录;④现代沉积过程和沉积物(岩石记录的对比);⑤冰川与河流沉积;⑥湖泊沉积及地震和火山的影响;⑦深海顺坡和沿坡沉积过程;⑧热带碳酸盐沉积与成岩作用;⑨非热带碳酸盐沉积和成岩作用;⑩社会活动对沉积体系和地质灾害及海平面变化的影响;⑪极地冰原边缘的沉积作用、沉积物与古生物生态演化及其相互作用;⑫可持续沉积资源和能源转型;⑬沉积学新方法和新技术等。

3.1 古气候与深-时全球变化

研究全新世温度变化趋势具有双重科学价值:为理解地球系统的大规模气候变化机制和时间尺度提供关键依据;在自然气候变化的长期背景下,为评估当前以全球变暖为主要特征的气候环境问题(特别是人为活动的影响)、制定气候变化应对策略提供重要的科学依据。

国际上主要通过深海钻探和实地考察对深海和极地地区的古气候进行研究,并重点探究温室气体效应、冰盖变化及海平面上升等关键问题。中国在地球化学分析、同位素测年和遥感技术等方面的显著进步为古气候和深-时全球变化研究提供了支持。众多学者对海、陆及海-陆过渡地区开展了大量的古气候研究,利用湖泊沉积、黄土、冰芯等地质记录重建了数千至数百万年的气候变化历史,尤其在青藏高原的冰芯研究中取得了显著成果,揭示了过去千年尺度上的气候旋回变化特征。此外,中国学者对华北克拉通和扬子克拉通等地区进行了地质年代学和地球化学研究,探讨了地球历史上的大规模环境变化事件。未来,中国需要加强深海和极地沉积环境以及气候模型构建和技术装备等领域的投入和研究。

3.2 古地貌学与源-汇系统

地表过程与构造地质的相互作用以及固体地球的构造变形是地球各圈层相互作用以及地表构造地貌形成的驱动力。近年来,国外学者更注重源-汇系统与气候学、生态学、地貌学等多学科的交叉融合,并建立了较完善的数据共享平台。中国主要应用地球化学、碎屑锆石年代学、遥感技术、地理信息系统(GIS)和地质勘探等现代技术对青藏高原东缘、黄土高原、长江流域、珠江三角洲及陆相盆地等地区的古地貌演变开展

研究,在高分辨率地层学和沉积学分析方面取得重要进展。未来源-汇系统研究发展重点方向应包括:海相和陆相沉积盆地(深-时)源-汇系统、源-汇系统与层序地层格架关系、源-汇系统要素耦合及表征新技术新方法、源-汇过程级次重建及其构造气候响应、源-汇系统控砂控储理论(模型)与油气勘探实践、多学科与多方法交叉融合的源-汇系统,以及深-时源-汇系统大数据系统多要素构建等。

3.3 细粒沉积学与非常规油气

随着非常规油气勘探开发的持续推进,细粒沉积岩受到了广泛的关注,目前已经在细粒沉积岩层序地层划分、沉积环境、岩相及其组合方式、有机质富集、储集特征及成岩演化等方面取得一系列重要进展。国际上,细粒沉积学研究注重沉积过程的动态模拟、沉积物源追踪和沉积环境变化对油气成藏的影响,主要应用深海钻探、高分辨率地震勘探和数值模拟等技术对北美、加拿大和欧洲等国家的细粒沉积岩岩相、沉积环境、沉积过程及成因、储层评价及甜点分布等方面进行研究。中国学者主要运用岩心描述、地球化学分析、储层物性分析和地球物理技术等对陆相和海相盆地的细粒沉积物沉积环境重建、有机质富集机制、储层特征、成藏机理及资源评价等方面展开研究,同时在水平井和水力压裂等非常规油气开发技术方面也取得了重要突破。

未来研究除了传统的岩心和薄片观察,应开展细粒沉积成因过程物理和数值模拟,综合考虑细粒沉积岩沉积环境、水体性质、沉积速率及特殊沉积事件,阐明细粒沉积物物理-化学-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。甜点分析要结合烃源岩、储层及工程品质综合预测有利油气分布区域,并利用人工智能、机器学习及神经网络等计算机技术等手段,剖析细粒沉积岩岩相及甜点展布规律,为非常规油气的勘探开发与评价提供理论基础。

3.4 深水沉积与混合事件层

重力流理论的形成发展是沉积学研究的一场革命,在重力流类型划分、形成机制和沉积过程、沉积模式、构型表征、地球物理响应特征和指导油气勘探开发等方面取得了显著进展。国际上的研究主要通过深海钻探和高分辨率地震勘探获取深水沉积记录,通过同位素地球化学分析、实验测量和数值模拟揭示浊流和碎屑流等混合事件层的动力学机制,分析深水沉积与

全球气候变化(如冰期-间冰期旋回)的密切关系。中国在地震勘探、岩心分析和数值模拟等技术方面逐步与国际接轨,研究地区集中在南海和东海等海域以及多个陆相盆地,通过数值模拟和物理实验研究了深水沉积物的搬运和沉积过程。目前,中国还应加强深水沉积与混合事件层的定量化研究、多学科交叉和数值模拟等方面的研究。

未来要加强重力流沉积作用机制、超临界流体与亚临界流体转换、混合事件沉积序列及不同流体组合方式、深水沉积与混合事件现代沉积观察、水力跳跃作用域控制下的重力流类型转换、细粒重力流发育机制和演化特征、重力流物理和数值模拟、不同成因类型重力流沉积识别标志、精细层序地层格架下的海相和陆相沉积盆地重力流沉积类型和分布模式、不同构型单元定量表征,以及岩性圈闭的预测与综合评价等。

3.5 白云石化与作用机制

国际上通常结合地质学、地球化学和生物学等学科进行综合研究,广泛应用同位素地球化学、纳米CT扫描及原位微区分析技术,形成了较完善的白云石化理论体系,涵盖了白云石化的触发机制和作用机制等。中国学者主要利用地球化学手段,如稳定同位素和微量元素分析等方法来研究四川盆地、塔里木盆地和鄂尔多斯盆地等地区的白云石化机制、沉积环境和分布特征。

未来研究将借助扫描电镜、同位素分析和生物学等技术,研究微观尺度的白云石化机制,揭示水-岩相互作用微观演变过程;深入探讨微生物在白云石化中的作用机制;加强全球气候变化对白云石化作用的影响研究,尤其是随着全球气候变化,海洋化学成分、温度和盐度的变化对白云石化作用的影响可能更加显著。白云石化作用与现代气候变化和沉积环境分析的有机结合,是未来研究的关键方向。

3.6 大数据与人工智能技术

国外多个发达国家已建立了多种沉积类型的数据库和完善的数据共享机制,推动了沉积学的多学科交叉与创新。人工智能(AI)技术在沉积物识别、沉积过程模拟及生态环境影响评估等方面的应用,已显著提升了研究的科学性与实用性。在国内,AI技术与大数据方法在沉积学领域的应用逐渐显现出重要价值(如DDE大科学项目)。近年来,国内研究主要通过机器学习和深度学习技术,成功实现了沉积物特征的分类与预测,显著提高了对复杂沉积环境的理解。同时,结

合遥感与地震数据在沉积体系空间分布与动态演变方面开展的研究也取得了进展。未来中国还要提升高质量数据的标准化与共享,加强AI与大数据领域人才培养、深化国际合作,吸收国际先进经验,提升大数据平台的互操作性和多学科协同能力,进一步推动学科创新与发展。

参 考 文 献

- [1] 朱筱敏,陈贺贺,谈明轩,等. 从太平洋到喜马拉雅的沉积学新航程——21届国际沉积学大会研究热点分析[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 126-149.
ZHU Xiaomin, CHEN Hehe, TAN Mingxuan, et al. A new journey in sedimentology from the pacific to the Himalayas: Analysis of research hotspots from the 21st international sedimentological congress [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 126-149.
- [2] BARANYI V. Tuvallian. Late Triassic environments and climate in the Western Tethys (Transdanubian Range, NW Hungary)-the aftermath of the Carnian Pluvial Episode: a sedimentological, palaeontological and geochemical approach [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [3] ALI M. Paleocene-Eocene thermal maximum and its impact on shallow marine benthic communities: A multi proxies approach [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [4] PICKERING K T, BAYLISS N J. Deconvolving tectono-climatic signals in deep-marine siliciclastics, Eocene Ainsa Basin, Spanish Pyrenees: Seesaw tectonics versus eustasy[J]. Geology, 2009, 37(3): 203-206.
- [5] JIN Simin, KEMP D B, JOLLEY D W, et al. Large-scale, astronomically paced sediment input to the North Sea Basin during the Paleocene Eocene Thermal Maximum[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2022, 579: 117340.
- [6] ZHANG Xiaoyue. Paleoenvironmental evolution of the Gonjo Basin (Tibet) through the late Cretaceous to early Paleocene [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [7] GERNON T M, MILLS B J W, HINCKS T K, et al. Solid Earth forcing of Mesozoic oceanic anoxic events[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(9): 926-935.
- [8] DE VLEESCHOUWER D, PERCIVAL L M E, WICHERN N M A, et al. Pre-Cenozoic cyclostratigraphy and palaeoclimate responses to astronomical forcing [J]. NATURE REVIEWS EARTH & ENVIRONMENT, 2024, 5(1): 59-74.
- [9] XU Xiaotao, SHAO Longyi, ERIKSSON K A, et al. Widespread wildfires linked to early Albian Ocean Anoxic Event 1b: Evidence from the Fuxin lacustrine basin, NE China [J]. Global and Planetary Change, 2022, 215: 103858.
- [10] XU Xiaotao, SHAO Longyi, ERIKSSON K A, et al. Terrestrial records of the early Albian Ocean Anoxic Event: Evidence from the Fuxin lacustrine basin, NE China [J]. Geoscience Frontiers,

- 2022, 13(1): 101275.
- [11] MCARTHUR J M. Early Toarcian black shales: A response to an oceanic anoxic event or anoxia in marginal basins? [J]. *Chemical Geology*, 2019, 522: 71–83.
- [12] DING Zhongzhao, MA Zhixin, HU Shixue, et al. Paleoclimate evolution of the Middle Triassic Guanling Formation from South China and its significance for the preservation of the Luoping biota [J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 242: 104588.
- [13] ADATTE T. Coupling timing and tempo of Deccan volcanism with the KPg Extinction through Mercury and Tellurium Anomalies [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [14] 高嘉洪, 金之钧, 梁新平, 等. 火山活动对鄂尔多斯盆地三叠系长7段淡水湖盆富营养化与沉积水体介质环境的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 887–898.
- GAO Jiahong, JIN Zhijun, LIANG Xinping, et al. The impact of volcanism on eutrophication and water column in a freshwater lacustrine basin: A case study of Triassic Chang 7 Member in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 887–898.
- [15] KUSTATSCHER E, BERNARDI M, PETTI F M, et al. Sea-level changes in the Lopingian (Late Permian) of the northwestern Tethys and their effects on the terrestrial palaeoenvironments, biota and fossil preservation [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 148: 166–180.
- [16] MACDONALD J M, BROLLY C V, SLAYMARK C, et al. The mechanisms and drivers of lithification in slag-dominated artificial ground [J]. *The Depositional Record*, 2023, 9(4): 810–819.
- [17] MACDONALD J. Lithification of anthropogenic geomaterials into sedimentary rocks [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [18] OWEN A. A new sedimentary cycle: Interactions of anthropogenic geomaterials and marine processes resulting in the rapid lithification of coastlines [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [19] BLUM M. Fingerprints of tectonics and climate change in the detrital-zircon U–Pb record of the deep-sea Bengal Fan [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [20] STUTENBECKER L. Temporal variability of fluvial sediment composition: An annual time series from four rivers in SW Germany [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [21] NYBERG B, HELLAND-HANSEN W, GAWTHORPE R, et al. Assessing first-order BQART estimates for ancient source-to-sink mass budget calculations [J]. *Basin Research*, 2021, 33(4): 2435–2452.
- [22] YADAV A, CHATTERJEE S, EQUEENUDDIN S M. Suspended sediment yield estimation using genetic algorithm-based artificial intelligence models: Case study of Mahanadi River, India [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, 63(8): 1162–1182.
- [23] WAKSMUNDZKA M I. Depositional architecture of the Carboniferous fluvial deposits with accompanying deltaic and marine lithofacies in the Lublin Basin, SE Poland: Selected examples from completely cored borehole sections [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [24] 张昌民, 张祥辉, 朱锐, 等. 分支河流体系研究进展及应用前景展望 [J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(5): 11–25.
- ZHANG Changmin, ZHANG Xianghui, ZHU Rui, et al. Research progress and application prospect of distributive fluvial system [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(5): 11–25.
- [25] HARTLEY A. Architecture of a continental scale axial fluvial channel-belt-Chinle Formation, Canyonlands, Utah [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [26] DI LAURO L. Salt movement during Minibasin development has minimal influence on fluvial facies distributions in the Triassic of the Central North Sea [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [27] XU Zhenhua. The bar-finger-type lobate delta: Formative processes and depositional architecture [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [28] MERCEDES-MARTÍN R. Testing the origins of the Mg-silicates formed in the intertidal sediments of Lake Clifton (Australia): environmental versus microbiological divers [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [29] 彭畅, STEEL R J, 龚承林, 等. 潮汐沉积过程及沉积特征研究综述 [J]. *古地理学报*, 2023, 25(5): 1069–1089.
- PENG Yang, STEEL R J, GONG Chenglin, et al. A review on tidal depositional processes and characteristics [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(5): 1069–1089.
- [30] 王爱军, 李海琪, 叶翔, 等. 闽江河口潮滩季节性冲淤变化格局及其控制机制 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(6): 1–13.
- WANG Aijun, LI Haiqi, YE Xiang, et al. Patterns and controlling factors of seasonal erosion and accretion of estuarine tidal flat in the Minjiang River estuary [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(6): 1–13.
- [31] SOHN S. Seasonal controls on the morphodynamics of the tidal flats in a macrotidal embayment (Garolim Bay), west coast of Korea [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [32] LORTIE T. Morphosedimentary behaviour over the last two centuries of hypertidal river mouths. A multi-proxy comparison study of estuaries in the English Channel (NW France) [C]// Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [33] CHEN S, KVALE E P, STEEL R J, et al. Estimating paleotidal constituents from Pliocene “tidal gauges”—an example from the paleo-Orinoco Delta, Trinidad [J]. *GSA Bulletin*, 2024, 136(1/2): 57–81.
- [34] LONGHITANO S G. A facies-based depositional model for ancient and modern, tectonically-confined tidal straits [J]. *Terra Nova*, 2013, 25(6): 446–452.
- [35] ALAIN L. Sedimentology of a heterolithic tidally-influenced

- deltaic succession and implications for chlorite coating-Tilje Formation, Halten and Dønna Terraces, Offshore Mid-Norway [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [36] OBASUYI F O. sedimentological analysis of the middle Jurassic Garn Formation, Maria and Lavrans fields (Halten Terrace, Norwegian Sea) [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [37] ARIF J. High-resolution 3D outcrop model-based characterization of shoreface sequence architectures on an uplifting interbasinal relay zone: The Late Quaternary Corinth Isthmus, Greece [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [38] MAS P. Study of an outcropping deltaic reservoir analogue: From digital outcrops to 3D reservoir model (Roda Sandstones, Graustrempp Basin) [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [39] LAKSONO A T. The challenge of exploring tsunami deposits in zones vulnerable to multiple extreme sea wave events [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [40] JELBY M E. Coastal consequences of a warming world: Insights from the Paleocene Greenhouse of Arctic Svalbard [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [41] TALLING P J, BAKER M L, POPE E L, et al. Longest sediment flows yet measured show how major rivers connect efficiently to deep sea [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4193.
- [42] TALLING P J, CARTIGNY M J B, POPE E, et al. Detailed monitoring reveals the nature of submarine turbidity currents [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(9): 642-658.
- [43] TALLING P J, HAGE S, BAKER M L, et al. The global turbidity current pump and its implications for organic carbon cycling [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2024, 16: 105-133.
- [44] KEAVNEY E, PEAKALL J, WANG R, et al. Unconfined gravity current interactions with orthogonal topography: Implications for combined-flow processes and the depositional record [J]. *Sedimentology*, 2025, 72(1): 67-99.
- [45] HAUGHTON P, DAVIS C, MCCAFFREY W, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits-Classification, origin and significance [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1900-1918.
- [46] BLUM M, MARTIN J, MILLIKEN K, et al. Paleovalley systems: Insights from Quaternary analogs and experiments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 116: 128-169.
- [47] GONG Chenglin, STEEL R J, QI Kun, et al. Deep-water channel morphologies, architectures, and population densities in relation to stacking trajectories and climate states [J]. *GSA Bulletin*, 2021, 133(1/2): 287-306.
- [48] JIN Lina, SHAN Xin, VAUCHER R, et al. Sea-level changes control coastal organic carbon burial in the southern East China Sea during the late MIS 3 [J]. *Global and Planetary Change*, 2023, 229: 104225.
- [49] BURTON Z F M, MCHARGUE T, KREMER C H, et al. Peak Cenozoic warmth enabled deep-sea sand deposition [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 1276.
- [50] 李妍蓉, 李靖, 苏文杰, 等. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡太原组碳酸盐岩气藏富集规律 [J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(5): 509-516.
- LI Yanrong, LI Jing, SU Wenjie, et al. Natural gas enrichment in carbonate gas reservoirs of Taiyuan Formation in Yishan slope, Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(5): 509-516.
- [51] 朱筱敏, 钟大康, 袁选俊, 等. 中国含油气盆地沉积地质学进展 [J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 820-829.
- ZHU Xiaomin, ZHONG Dakang, YUAN Xuanjun, et al. Development of sedimentary geology of petroliferous basins in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 820-829.
- [52] 周进高, 徐哲航, 黄世伟, 等. 碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向 [J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 929-953.
- ZHOU Jingao, XU Zhehang, HUANG Shiwei, et al. Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 929-953.
- [53] KARGARPOUR M A. Carbonate reservoir characterization: An integrated approach [J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, 10(7): 2655-2667.
- [54] 耿洁, 乐平, 杨文明, 等. 断控型碳酸盐岩油藏动态储量计算方法 [J]. *新疆石油地质*, 2024, 45(4): 499-504.
- GENG Jie, YUE Ping, YANG Wenming, et al. Dynamic reserves calculation method for fault-controlled carbonate reservoirs [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2024, 45(4): 499-504.
- [55] GODEAU N, DESCHAMPS P, GUIHOU A, et al. U-Pb dating of calcite cement and diagenetic history in microporous carbonate reservoirs: Case of the Urgonian Limestone, France [J]. *Geology*, 2018, 46(3): 247-250.
- [56] NARAYAN G R, REYMOND C E, STUHR M, et al. Response of large benthic foraminifera to climate and local changes: Implications for future carbonate production [J]. *Sedimentology*, 2022, 69(1): 121-161.
- [57] LEE J H, LEE D J. Mid-late Ordovician tetradiid-calcimicrobial-cement reef: A new, peculiar reef-building consortium recording global cooling [J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 200: 103462.
- [58] MCAULEY C. Muddy coral bioherms from the Late Devonian of South Devon: The toleration limits of Carbonate buildups as evidenced by the type Devonian [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [59] KELL-DUIVESTEIN I J, BALDERMANN A, MAVROMATIS V, et al. Controls of temperature, alkalinity and calcium carbonate reactant on the evolution of dolomite and magnesite stoichiometry and dolomite cation ordering degree-An experimental approach [J]. *Chemical Geology*, 2019, 529: 119292.
- [60] IMMENHAUSER A. Some thoughts on the elusive concept of early marine-diagenetic dolomite and its bearing on seawater properties [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.

- [61] HUSINEC A, READ J F, PRTOLJAN B. Middle and Late Jurassic record of sea-level, sequence development, and carbon-isotope fluctuations, Tethyan Adriatic Carbonate Platform, Croatia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 599: 111030.
- [62] HUSINEC A, READ J F. Assessing Milankovitch forcing in disconformity-prone cyclic shallow-water carbonates, Upper Jurassic (Kimmeridgian), Adriatic Platform, Croatia [J]. *Sedimentology*, 2022, 69(4): 1789–1815.
- [63] YANG Mingyu, FRANK T D, FIELDING C R, et al. Spatiotemporal variations in formation conditions of cryogenic brines: Insights from aragonite cements in New Harbor, western Ross Sea, Antarctica [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2024, 632: 118641.
- [64] BALCI N, DEMIREL C, AKCER ÖN S, et al. Evaluating abiotic and microbial factors on carbonate precipitation in Lake Acigöl, a hypersaline lake in Southwestern Turkey [J]. *Quaternary International*, 2018, 486: 116–128.
- [65] ARIZTEGUI D. Biotic vs. abiotic carbonate precipitation in Lake Kournas (Crete) [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [66] XU Zhehang, LAN Caijun, ZHANG Benjian, et al. Impact of diagenesis on the microbial reservoirs of the terminal Ediacaran Dengying Formation from the Central to Northern Sichuan Basin, SW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 146: 105924.
- [67] MARTEGANI L. Late Quaternary lake-groundwater interactions in Laguna de Fuente de Piedra (southern Iberian Peninsula) recorded by stable isotopes of gypsum hydration water [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [68] GHOSH P. Stable isotopic compositions of sedimentary sulphates in the Lower Jurassic syn-rift strata of a continental rift basin of India [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [69] PINEDA V, GIBERT L, SORIA J M, et al. Interevaporitic deposits of Las Minas Gypsum Unit: A record of Late Tortonian marine incursions and dolomite precipitation in Las Minas Basin (eastern Betic Cordillera, SE Spain) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 564: 110171.
- [70] VRŠIČ A. Diagenetic controls on pore space development in a Middle to Late Jurassic spiculitic cherts; eExample from Austrian Mollase Basin [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [71] CHEN Kefei, YANG Rui, BAO Hanyong, et al. Depositional-diagenetic process and their implications for pore development of Wufeng-Longmaxi shales in the Jiangdong block, Fuling shale gas field, SW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 151: 106177.
- [72] LIU Jipeng, MISCH D, JIANG Zhenxue, et al. Diagenetic controls on tight sandstone reservoir quality: A case study from the Huaqing Oilfield, Ordos Basin [J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38 (12): 10926–10944.
- [73] LAI Jin, WANG Guiwen, WANG Song, et al. Review of diagenetic facies in tight sandstones: Diagenesis, diagenetic minerals, and prediction via well logs [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 234–258.
- [74] BASSO M, SOUZA J P P, HONÓRIO B C Z, et al. Acoustic image log facies and well log petrophysical evaluation of the Barra Velha Formation carbonate reservoir from the Santos Basin, offshore Brazil [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2022, 37(3): 50.
- [75] ZHANG Hong, HU Yongjie, LIU Hongxia, et al. The sediment source and formation mechanism of the Paleozoic reservoirs in Western Desert, Egypt [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2024, 43(2): 587–607.
- [76] 张建国, 姜在兴, 刘鹏, 等. 陆相超细粒页岩油储层沉积机制与地质评价 [J]. *石油学报*, 2022, 43(2): 234–249.
- ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIU Peng, et al. Deposition mechanism and geological assessment of continental ultrafine-grained shale oil reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43 (2): 234–249.
- [77] 钱永新, 赵毅, 刘新龙, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及高产主控因素 [J]. *岩性油气藏*, 2025, 37(1): 115–125.
- QIAN Yongxin, ZHAO Yi, LIU Xinlong, et al. Reservoir characteristics and high yield control factors of Permian Fengcheng Formation shale oil reservoir in Mahu Sag [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2025, 37(1): 115–125.
- [78] MIN Xiong. Coupling mechanism between sea level changes and pore heterogeneity of marine shale reservoirs driven by astronomical orbital cycles: Lower Silurian Longmaxi shale in the Upper Yangtze area, South China [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [79] ZHANG Haowei. Fault-controlled reservoir modeling method based on multiple information fusion constraints: A case study of tight sandstone reservoir in the southern margin of Ordos Basin [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [80] WANG Jiuyuan, TARHAN L G, JACOBSON A D, et al. The evolution of the marine carbonate factory [J]. *Nature*, 2023, 615 (7951): 265–269.
- [81] ZHANG Yang, MA Benben, JIANG Shu, et al. Formation mechanisms of anomalously high reservoir quality in deep-buried volcanoclastic sandstones, central Junggar Basin, northwestern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 163: 106772.
- [82] 赵耀, 潘虹, 骆飞飞, 等. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层特征及质量控制因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44 (5): 1129–1140.
- ZHAO Yao, PAN Hong, LUO Feifei, et al. Characteristics and quality determinants of Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche Fault Zone, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1129–1140.
- [83] ZHANG You. Research on the formation and pore preservation mechanism of the Cambrian ultra-deep dolomite reservoir in the Tarim Basin [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [84] QI Chen. Three dimensional simulation of hydraulic fracture propagation based on reservoir heterogeneity [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen,

- UK, 2024.
- [85] ZUO Guoping. Pre-salt carbonate reservoir prediction and fluid identification techniques and applications in Santos Basin [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [86] 曾洪流. 地震沉积学在中国: 回顾和展望[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 417-426.
- ZENG Hongliu. Seismic sedimentology in China: A review [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 417-426.
- [87] ANELL I. The sS-shape in sedimentology: What controls of shape and slope of clinoforms [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [88] DAI J. Multi-wave seismic sedimentology study in characterization of channel sand, example from Middle Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin, China [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [89] POLONIO I. Mid Jurassic estuary revealed by spectral decomposition on the Sele High (Norwegian North Sea) [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [90] CARUSO S. Seismic geomorphology of two basin fan systems offshore west of Shetland revealing contrasting paleoenvironments and sedimentary processes: Eocene versus Pleistocene [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [91] NICHOLS T E, WORDEN R H, HOUGHTON J E, et al. Sediment texture and geochemistry as predictors of sub-depositional environment in a modern estuary using machine learning: A framework for investigating clay-coated sand grains [J]. *Sedimentary Geology*, 2023, 458: 106530.
- [92] FILHO C S. Hyperspectral imaging and evaluation of predictive models for total organic carbon content estimation in bituminous shales [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [93] LI G. Chemofacies characterization of lacustrine shale based on machine learning classification: A case study from the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [94] HOUGHTON J. Quantifying porosity and permeability enhancing grain-coating clays in 3D using X-ray computed tomography (XCT): An example from the Tilje Formation, Norwegian North Sea [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [95] HOWELL J. Extracting geometric data from virtual outcrops for reservoir and aquifer modelling [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [96] HU X. DDE OneSediment: A future sedimentological database and research platform [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [97] XU H. Terrigenous hot spring sinters and submarine hydrothermal smokers record changes of organic molecules: Implication for the search for biomolecules on Mars [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [98] ZHANG Kun. Effect of the hydrothermal activity in the Lower Yangtze region on marine shale gas enrichment: A case study of Lower Cambrian and Upper Ordovician-Lower Silurian shales in Jiangye-1 well [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [99] XIA H. Sedimentary mercury enrichments as a paleovolcanism proxy: Depositional biases and a robust quantification approach [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [100] ROBAN R D. Deciphering the early-stage evolution of relict marine basins: The case of the Ceahlău-Severin Ocean of the Romanian Carpathians [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [101] CHENG Dawei. Negative carbon isotope excursions (CIEs) in the early Jurassic: Lacustrine perspective on paleoclimate effects and possible mechanisms [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [102] NEMETH K. Pyroclastic density current deposits of phreatomagmatic monogenetic volcanoes of the Quaternary Hutaymah Volcanic Field in the Kingdom of Saudi Arabia as a unique assemblage of volcanic geodiversity [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [103] CAPUA A D. Exploring emplacement mechanisms of hyaloclastite beds: the Aci Castello case study [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [104] UNDERHILL J R. Vital role of sedimentology in the energy transition [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.
- [105] CHEDBURN L, UNDERHILL J R, HEAD S, et al. The critical evaluation of carbon dioxide subsurface storage sites: Geological challenges in the depleted fields of Liverpool Bay [J]. *AAPG Bulletin*, 2022, 106(9): 1753-1789.
- [106] 薛振乾, 谢祥, 马浩铭, 等. CO₂捕集、利用和封存在能源行业的应用: 全球案例分析和启示 [J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(1): 14-21.
- XUE Zhenqian, XIE Xiang, MA Haoming, et al. Applications of CO₂ capture, utilization and storage in energy industry: Global cases review and insights [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(1): 14-21.
- [107] 王光付, 李阳, 王锐, 等. 二氧化碳地质封存与利用新进展 [J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1168-1179.
- WANG Guangfu, LI Yang, WANG Rui, et al. Recent advances in geological carbon dioxide storage and utilization [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 1168-1179.
- [108] FUSTIC M. Geothermal play concepts of Kazakhstan sedimentary basins: Current status and future directions-needles in Hhaystacks or elephants? [C]//Abstract of the 37th International Meeting of Sedimentologists (IMS), Aberdeen, UK, 2024.