

上扬子地区早寒武世麦地坪组-筇竹寺组沉积相模式及其构造-海平面耦合响应

郑马嘉^{1,2}, 施振生^{2,3}, 李熙喆², 张晓伟^{2,3}, 赵群^{2,3}, 操旭^{2,3}, 武瑾^{2,3}, 陈渝川^{2,3}, 王龙熠^{2,3},
周天琪^{2,3}, 汪鹏飞^{2,3}

[1. 中国石油西南油气田分公司开发事业部, 四川成都 610051; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北廊坊 065007]

摘要:早寒武世是罗迪尼亚超大陆裂解与全球性海侵的关键时期,然而该时期被动大陆边缘从同生裂陷向裂后拗陷转换过程中的沉积响应及其地质意义尚不明确。研究综合利用上扬子地区17口钻井及2条露头剖面数据,对麦地坪组-筇竹寺组开展了沉积相模式及演化分析。结果表明:研究区发育潮坪相、三角洲相、裂陷槽相、浅海陆棚相和浊积相5种沉积相类型,其时-空演化受“从裂陷到拗陷”的构造序列控制。裂陷期(麦地坪组—筇竹寺组6小层),沉积作用主要局限于德阳-安岳裂陷槽内,呈现“构造控盆”特征;拗陷期(筇竹寺组7-8小层),沉积范围扩大,转变为“海平面控相”的潮坪-陆棚广覆沉积。研究进一步通过沉积学证据对关键古海洋事件的成因进行了有效约束:麦地坪组底部磷块岩与寒武纪早期生物灭绝事件(BACE)的耦合关系,支持了“火山与热液活动-营养盐输入-生产力提升-缺氧环境形成”的综合模型;筇竹寺组内部高频的氧化-还原韵律,则为“动荡海洋”假说提供了直接证据。该研究不仅为“从裂陷到拗陷”的经典模式提供了早古生代的沉积学实例,也为早寒武世海洋氧化-还原界面的动态变化补充了沉积学证据,同时为超深层页岩气“甜点”预测提供了关键地质依据。

关键词:海平面变化;沉积相模式;页岩气勘探;早寒武世;上扬子地区

中图分类号:TE121.3 文献标识码:A

Sedimentary facies model of the Early Cambrian Maidiping-Qiongzhusi formations and its responses to the coupling of tectonics and sea-level changes in the Upper Yangtze region

ZHENG Majia^{1,2}, SHI Zhensheng^{2,3}, LI Xizhe², ZHANG Xiaowei^{2,3}, ZHAO Qun^{2,3}, CAO Xu^{2,3}, WU Jin^{2,3},
CHEN Yuchuan^{2,3}, WANG Longyi^{2,3}, ZHOU Tianqi^{2,3}, WANG Pengfei^{2,3}

[1. Petroleum Development Division, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. National Energy Shale Gas R&D (Experiment) Center, Langfang, Hebei 065007, China]

Abstract: The Early Cambrian represents a critical period marked by the Rodinia supercontinent breakup and global marine transgressions. However, the sedimentary responses associated with the syn-rift to post-rift-depression transition along passive continental margins during this period, as well as their geological significance, remain poorly understood. In this study, we investigate the sedimentary facies model of the Maidiping-Qiongzhusi formations and its evolution within the Upper Yangtze region by fully utilizing data from 17 wells and 2 outcrop sections. The results indicate the presence of 5 sedimentary facies types in the study area, i. e., tidal flat, deltaic, rift trough, neritic shelf, and turbidite facies, whose spatiotemporal evolution was governed by the rifting-to-depression tectonic sequence. During the rifting stage (i. e., the deposition of the Maidiping Formation to the 6th sub-member of the Qiongzhusi Formation),

收稿日期:2025-10-30;修回日期:2025-12-11。

第一作者简介:郑马嘉(1988—),男,博士、高级工程师,非常规油气勘探开发理论及技术。E-mail: majiaz_cq@petrochina.com.cn。

通信作者简介:施振生(1976—),男,博士、高级工程师,细粒储层地质学理论及技术。E-mail: shizs69@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技管理部项目(2024DJ8703)。

sedimentation was primarily confined within the Deyang-Anyue rift trough, characterized by the technically controlled basin architecture. During the depression stage (i. e., the deposition of the 7th and 8th sub-members of the Qiongzhusi Formation), sedimentation expanded laterally, transitioning into the widespread deposition of tidal flat and shelf facies, which is characterized by sea-level change-controlled sedimentary facies. On this basis, the origins of several critical paleoceanographic events are effectively constrained by sedimentological evidence. Specifically, the coupling relationship between phosphorites at the base of the Maidiping Formation and the Basal Cambrian Carbon Isotope Excursion (BACE) supports the integrated model involving volcanic/hydrothermal activity, nutrient salt inputs, increased productivity, and the formation of an anoxic environment. Furthermore, the high-frequency redox fluctuations recorded within the Qiongzhusi Formation provide direct evidence supporting the turbulent ocean hypothesis. Overall, this study provides an Early Paleozoic sedimentological example for the classical rifting-to-depression transition model while also supplementing sedimentological evidence for the dynamic changes in the oceanic redox interface during the Early Cambrian. Besides, the results of this study offer a critical geological basis for the prediction of ultra-deep shale gas sweet spots.

Key words: sea-level change, sedimentary facies model, shale gas exploration, Early Cambrian, Upper Yangtze region

引用格式:郑马嘉,施振生,李熙喆等. 上扬子地区早寒武世麦地坪组-筇竹寺组沉积相模式及其构造-海平面耦合响应[J]. 石油与天然气地质, DOI: 10. 11743/oggXXXXXX01.

ZHENG Majia, SHI Zhensheng, LI Xizhe, et al. Sedimentary facies model of the Early Cambrian Maidiping-Qiongzhusi formations and its responses to the coupling of tectonics and sea-level changes in the Upper Yangtze region[J]. Oil & Gas Geology, DOI: 10. 11743/oggXXXXXX01.

寒武纪早期是地球系统演化的关键转折期,经历了罗迪尼亚(Rodinia)超大陆最终裂解^[1-2]、全球性海平面显著上升^[3-4]、显著的碳同位素负漂移^[5-7],以及寒武纪生命大爆发^[8-9]等一系列重大事件。在此期间,全球古构造、古气候及海洋生态系统发生了剧烈变化^[12-13]。被动大陆边缘是记录全球构造-气候耦合过程理想载体,其地层结构受控于构造沉降与海平面变化之间的动态平衡^[14-16]。经典的“从裂陷到坳陷”盆地演化模式描述了从同生断裂控制的快速沉降向热沉降主导的广泛沉积的转变,该模式在现代及中-新生代被动大陆边缘中已得到广泛验证^[17]。然而,在早古生代,特别是寒武纪初期,关于同生裂陷作用与全球海平面波动如何共同控制沉积序列发育的研究仍相对薄弱,限制了对这一时期“构造-海平面”耦合机制的深入理解。

上扬子地区寒武纪早期发育德阳-安岳克拉通内裂陷^[18-19],为研究同生裂陷向裂后坳陷转换过程的沉积响应提供了理想场所。该区域在寒武纪纽芬兰统幸运阶—第二统第三阶沉积期经历了大规模海侵,形成了麦地坪组-筇竹寺组连续沉积序列,其中蕴含了构造活动与海平面变化的双重信号^[20]。前人已在该区域建立了良好的生物地层、化学地层^[7, 20-21]及旋回地层格架^[22-25],并在裂陷构造识别与页岩气勘探方面取得重要进展^[22-25]。然而,目前仍缺乏将沉积相、构造演化与高精度年代格架系统整合的研究,制约了对“构

造-海平面”多因素耦合控沉积机理的深入理解。

基于此,本研究综合利用上扬子地区17口钻井及3条露头剖面的岩性、测井-录井及地球化学数据,聚焦下寒武统麦地坪组-筇竹寺组,主要目标包括:①建立高精度沉积相模式,刻画从同生裂陷到裂后坳陷阶段沉积体系的时-空演变历程;②结合相对海平面变化分析,定量揭示从“构造控盆”到“海平面控相”的转换过程;③深入探讨沉积体系转换过程的全球海洋环境变化的响应机制,以及其在页岩气勘探开发方面的重要意义。本研究不仅为理解寒武纪早期被动大陆边缘演化研究提供了新的沉积学证据,也为探索显生宙早期全球古构造及早期生命演化提供了素材。

1 地质背景

1.1 上扬子地区早寒武世古地理与构造背景

华南板块在寒武纪早期位于一个关键的构造-古地理位置。全球古地理重建表明,寒武纪早期的华南板块是一个位于赤道附近、毗邻西冈瓦纳大陆的孤立地块^[26](图1a)。该板块由西北部的扬子地块和东南部的华夏地块在新元古代末期拼合而成^[27]。扬子地区是指以四川盆地为中心、面积约 $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的大区域。

新元古代,全球构造格局经历了从罗迪尼亚超大陆聚合到裂解的重大变革。中元古代末期(约1300~

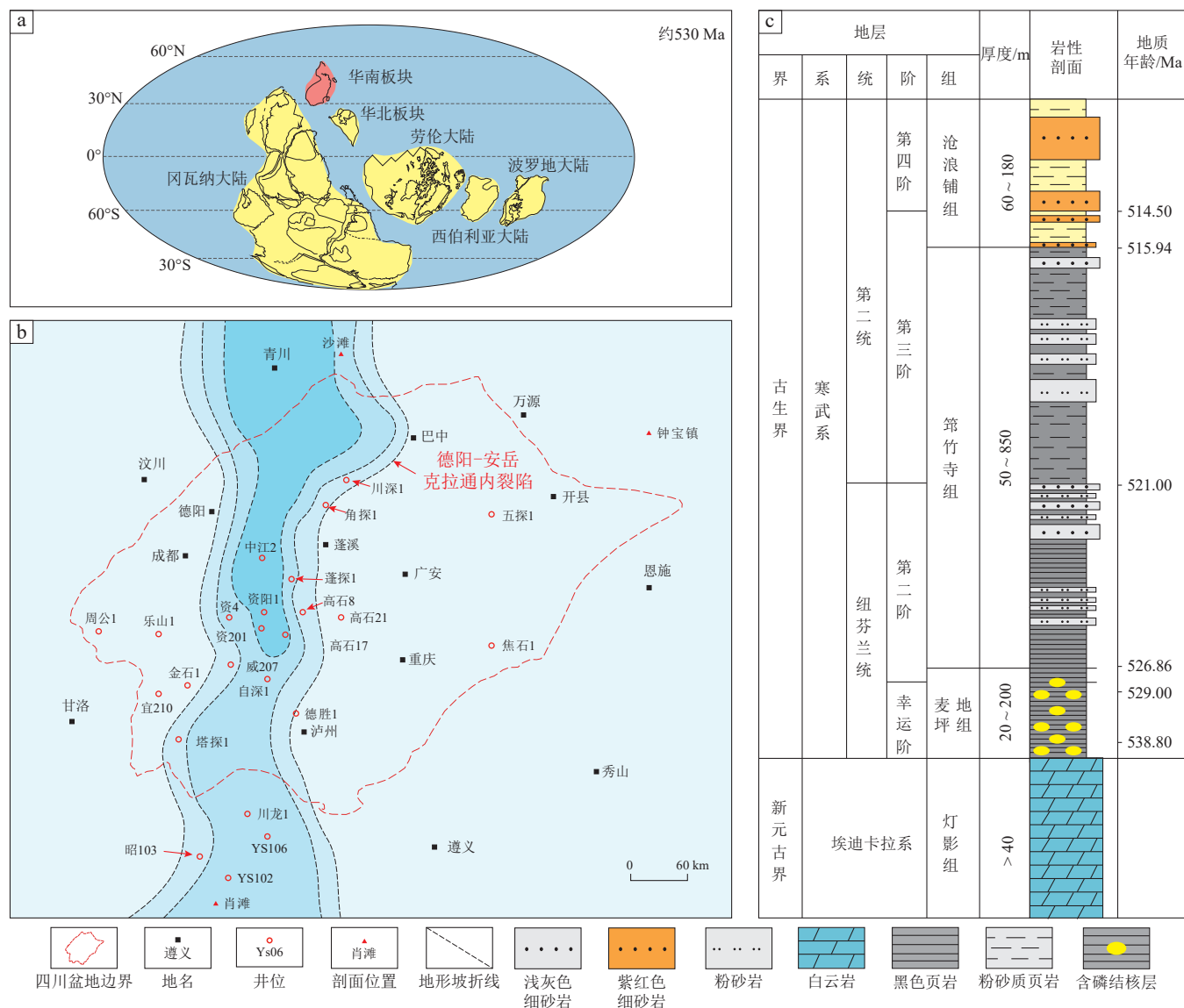


图1 上扬子地区麦坪组-筇竹寺组构造地质及沉积简况

Fig. 1 Structural geology and sedimentological overview of the Maidiping-Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

a. 早寒武世华南板块位置^[40]; b. 上扬子地区早寒武世古地貌及研究点分布; c. 上扬子地区前寒武纪—寒武纪地层综合柱状图

900 Ma), 全球大陆块体汇聚形成罗迪尼亚超大陆^[1]。自约 860 Ma 开始, 该超大陆在长期的地幔柱活动等机制驱动下发生裂解^[28]。此次裂解事件导致包括华南在内的多个陆块发生漂移, 并伴随有两次全球性的“雪球地球”冰川事件, 即斯图尔特冰期(约 717 ~ 659 Ma)^[29]和马里诺冰期(约 645 ~ 635 Ma)^[30]。至埃迪卡拉纪末期, 这些陆块围绕南半球重组, 最终在约 540 ~ 530 Ma 形成冈瓦纳超大陆^[31]。在此全球构造框架下, 华南板块在整个早古生代始终与冈瓦纳大陆保持分离的状态^[1]。

响应于罗迪尼亚超大陆的裂解, 扬子地区从同生裂谷盆地系统逐渐转变为成熟的被动大陆边缘盆地^[27]。这一构造背景严格控制了寒武世早期的古地理格局, 形成了自西北向东南展布的碳酸盐岩台地、斜

坡—深水盆地的沉积体系^[32]。

本研究聚焦的上扬子地区位于该被动大陆边缘的西北部(图 1b)。在寒武纪纽芬兰统(Terreneuvian)幸运阶(Fortunian)沉积期—第二阶(Stage 2)沉积早期, 全球海平面处于相对低位, 扬子地区大部分暴露遭受剥蚀^[33]。此时, 沉积作用主要局限在德阳—安岳克拉通内裂陷^[18], 该裂陷在晚埃迪卡拉世—寒武纪早期发育, 沉积了厚度达 500 ~ 1 000 m 的页岩, 为优质烃源岩及页岩气储层的形成提供了有利场所(图 1c)。进入第二阶沉积晚期—第二统(Series 2)第三阶(Stage 3)沉积期, 一次大规模海侵事件席卷上扬子地区, 导致上扬子地区被广泛淹没, 形成广阔的浅水陆表海环境; 而位于东南部的江南盆地则持续沉积了一套富含有机质的深

水黑色页岩与硅质岩,反映了缺氧的沉积环境^[34-35]。这种由裂陷构造和全球海平面变化共同控制的沉积格局,为开展构造-海平面耦合机制研究提供了理想条件。

1.2 研究区地层序列

本研究聚焦上扬子地区寒武统下部层位麦地坪组与筇竹寺组。该区域(特别是德阳-安岳克拉通内裂陷及其周缘)近年来钻探了多口页岩气井(如资201井、资阳2井和威207井等),提供了取心完整、测井-录井及地球化学资料齐全连续沉积记录,为解析寒武纪早期沉积演化提供了理想素材^[25, 36]。该区寒武系下部地层序列主要有麦地坪组(朱家箐组)和筇竹寺组(图1c)。

麦地坪组(朱家箐组)底界与下伏埃迪卡拉系灯影组呈不整合接触,底界地质年龄约为538.80 Ma,该界面在全区可对比^[18]。云南肖滩剖面上,该层段厚度约为200 m,由下至上发育暗色硅质泥晶白云岩、磷块岩和含磷灰岩^[20]。克拉通内裂陷区宁1井厚约30 m^[36-37],岩性主要为颗粒磷块岩组合和含磷白云岩^[36]。该层段以小壳动物化石为主,典型组合为*Anabarites trisulcatus*-*Protohertzina anabarica*-*Watsonella crosbyi*组合^[20]。在国际年代地层对比上,该层段大致对应纽芬兰统幸运阶-第二阶下部^[38]。高精度CA-ID-TIMS 锆石U-Pb同位素定年显示,麦地坪组与筇竹寺组界线(即小壳化石SSFA-3带*Watsonella crosbyi*最后出现位置)地质年龄为526.86 Ma $\pm$ 0.16 Ma^[21, 25]。

筇竹寺组是本研究的重点层系,该组与下伏麦地

坪组在裂陷中心为整合接触,在隆起区为不整合接触。筇竹寺组厚度受古地理格局控制,在克拉通内裂陷区(如资阳地区高石17井)可达527 m,而在低隆起区(如威远地区威207井)则减薄至253 m^[25]。岩性以黑色、灰黑色炭质页岩和硅质页岩为主,夹有薄层粉砂岩和细砂岩,是上扬子地区最重要的烃源岩和页岩气产层之一^[39]。筇竹寺组底部普遍存在一个自然伽马(GR)高值段,可作为区域对比标志层^[40]。化石组合以三叶虫(如*Eoredlichia*)和海绵骨针为代表。基于新的年代学数据,筇竹寺组的沉积时代被限定在526.86 ~ 515.94 Ma,对应于国际年代地层单位的第二阶中、上部-第三阶沉积期^[25]。

2 沉积相类型及特征

综合岩性、沉积构造、遗迹化石和沉积层序特征,在麦地坪组和筇竹寺组识别出潮坪相、三角洲相、海槽相、浅海陆棚相和浊积相5种沉积相类型(图2;表1)。

2.1 潮坪相

潮坪相位于最高涨潮线与正常浪基面之间(图2),以潮流作用为主要沉积动力。该相带地形坡降小,水体含氧量高,总有机碳含量(TOC)低。潮坪相可细分出潮上带、潮间带和潮下带。汉源轿顶山剖面发育潮上带沉积,峨边葛村剖面上段发育潮间带沉积、下段发育潮下带沉积。

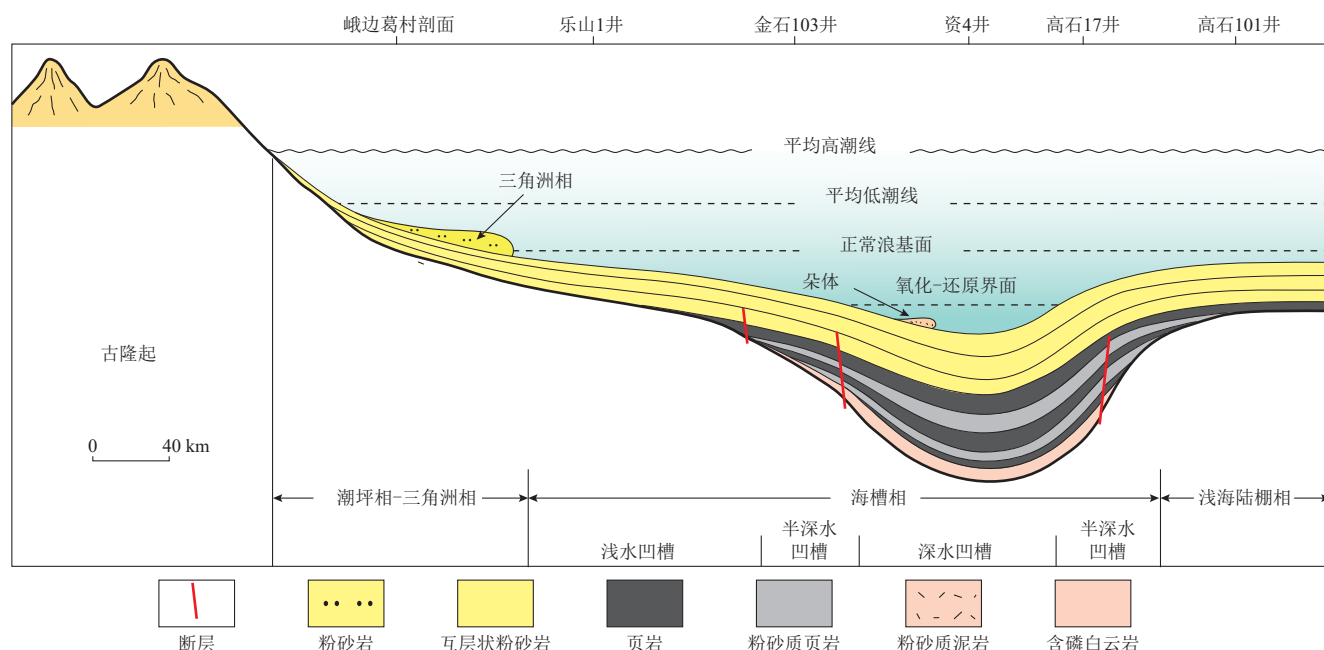


图2 上扬子地区麦地坪组-筇竹寺组沉积相模式

Fig. 2 Schematic diagram showing sedimentary facies in the Maidiping-Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

表1 上扬子地区筇竹寺组沉积相类型及细分
Table 1 Sedimentary facies types and their subdivision in the Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region

相组	沉积相	亚相	分布位置	水动力条件	微相	岩性组合	沉积构造	分布层位
海-陆过渡相组	潮坪相	潮上带	最高涨潮线—平均高潮线	悬浮沉降为主,偶尔受到潮流作用	滞留水湾	黑色薄层泥岩、炭质泥岩	水平层理、透镜状层理	7 小层、8 小层
					潮上坪	粉砂质泥岩	泥裂、微生物诱导成因构造	
		潮间带	平均高潮线—平均低潮线	潮流作用与悬浮沉降作用交互	泥坪	薄层状泥岩、粉砂质泥岩	水平层理和透镜状层理	
					混合坪	粉砂岩、泥质粉砂岩	脉状层理、波状层理	
					砂坪	泥质粉砂岩和粉砂质泥岩互层	波状层理和透镜状层理	
		潮下带	平均低潮线—正常浪基面	潮汐作用为主,波浪作用为辅	潮汐水道	细砂岩、粉砂岩	平行层理、小型交错层理,整体正粒序	
					水下砂坝	粉砂岩、泥质粉砂岩	脉状层理、砂-纹交错层理,整体反粒序	
					砂滩	粉砂质泥岩与泥岩互层	透镜状层理	
	三角洲相	三角洲前缘	平均高潮线—氧化-还原界面	河流作用为主,潮汐作用和波浪作用较弱	水下分流河道	细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩	冲刷-充填构造、撕裂屑、板状交错层理、槽状交错层理、波状层理、重荷模构造、液化砂岩脉	麦地坪组、7 小层、8 小层
					分流间湾	泥岩、粉砂质泥岩	书页型水平纹理、透镜状层理、砂-泥互层型水平层理	
					远端砂坝	泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩为主	砂-泥互层层理、波状层理、透镜状层理,整体反粒序	
海相组	海槽相	浅水凹槽	德阳-安岳裂陷槽分布区域	底流活动强烈,波浪作用微弱	底流沉积	粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩的频繁互层	交互型水平纹理、粉砂型水平纹理、层纹型水平纹理	1 小层、3 小层、5 小层、7 小层
		半深水凹槽		底流活动减弱	底流沉积、半远洋沉积	泥岩为主,夹有薄层泥质粉砂岩和粉砂岩	交互型水平纹理	
		深水凹槽		悬浮沉降为主	远洋沉积	薄层状或块状黑色泥岩、炭质泥岩	书页型水平纹理、复合递变型水平纹理	
	浅海陆棚相	浅水陆棚	正常浪基面—氧化-还原界面	悬浮沉降为主	陆棚洼地	薄层状或块状黑色泥岩、炭质泥岩	书页型水平纹理、复合递变型水平纹理	7 小层、8 小层
				风暴浪作用为主	风暴滩	细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	块状层理、平行层理、丘状交错层理段,整体正粒序	
				潮流作用为主	滩间海	粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩互层	波状层理、透镜状层理	
	浊积相	朵体	氧化-还原界面之下	浊流作用为主	朵轴	中-厚层状的中、细粒砂岩为主	块状层理、正粒序层理	2 小层、4 小层、6 小层
					朵体离轴	中-薄层的细砂岩、粉砂岩与灰黑色泥岩的频繁互层	粒序层理、平行层理、砂-纹交错层理及水平纹层	
					朵缘	薄层、极薄层的粉砂岩、泥质粉砂岩为主,与暗色泥岩呈不等厚互层	砂-纹交错层理、水平纹层	
					朵缘远端	块状泥岩或页岩	透镜状层理、爬升砂-纹交错层理	

潮上带发育潮上坪和滞留水湾微相(图 3a)。滞留水湾为潮上带地形相对低洼地带,一般都发育滞留水体;潮上坪为潮上带地形相对高且平坦的地带,平时都出露于地表,只有在最大涨潮时期才接受沉积。滞留水湾微相以黑色薄层泥岩和炭质泥岩为主,发育水平层理和透镜状层理。潮上坪微相以粉砂质泥岩为主,发育泥裂和微生物诱导成因构造(图 4a)。

潮间带发育泥坪、混合坪和砂坪微相。泥坪位于平均高潮线附近,是一个低能环境,岩性以薄层状泥岩、粉砂质泥岩为主(图 3a),沉积构造发育水平层理

和透镜状层理。砂坪位于平均低潮线附近,水体能量相对较高,岩性以粉砂岩和泥质粉砂岩为主,发育脉状层理和波状层理。泥坪和砂坪之间的过渡地带发育混合坪,岩性以泥质粉砂岩和粉砂质泥岩互层为主,发育波状层理和透镜状层理。潮间坪发育遗迹化石 *Palaeophycus* (古藻迹)(图 4b)、*Rusophycus* (皱饰迹)(图 4c)、*Lockeia* (洛克迹)(图 4d)和 *Cruziana* (二叶石迹)(图 4e)等,丰度和分异度高,生物扰动强烈。

潮下带潮流作用强烈,发育潮汐水道、水下砂坝和砂滩等微相。潮汐水道内潮流作用最强,岩性以细砂



图3 上扬子地区不同沉积相带典型沉积序列

Fig. 3 Columns showing representative sedimentary sequences across varying sedimentary facies zones in the Upper Yangtze region

a. 潮坪相,峨边葛村剖面;b. 三角洲相,资201井;c. 海槽相,资202井;d. 浊积相,资215井

岩和粉砂岩为主,可见平行层理和小型交错层理,整体发育正粒序(图3a)。水下砂坝岩性以灰绿色中厚层粉

砂岩与灰色中层状泥质粉砂质互层为主,发育脉状层理和砂纹层理,夹有少量薄层状泥岩,整体发育反粒序。

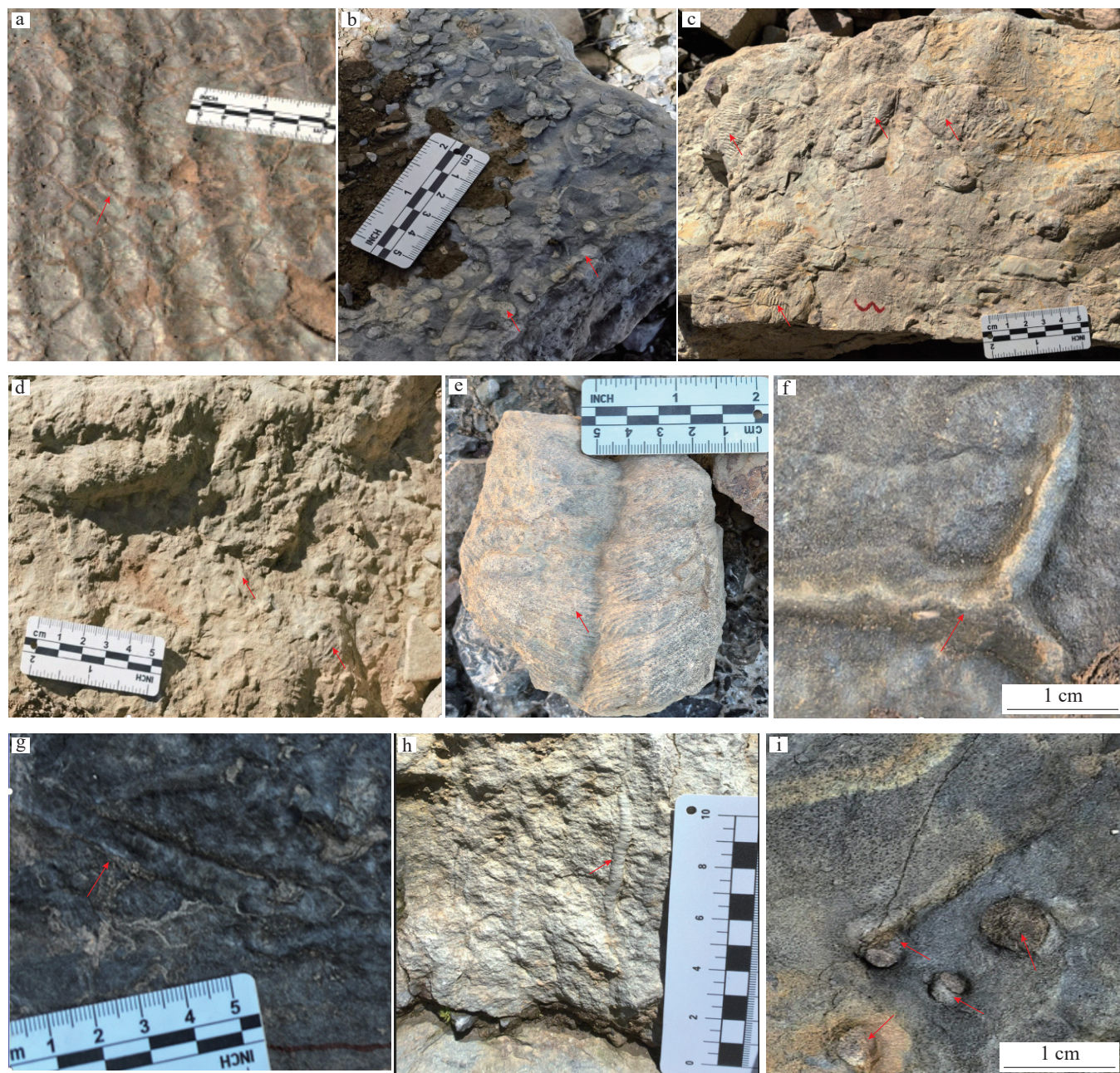


图4 上扬子地区轿顶山剖面筇竹寺组潮坪相典型沉积特征野外照片

Fig. 4 Photos showing typical sedimentary characteristics of tidal flat facies in the Qiongzhusi Formation along the Jiaodingshan outcrop section, Upper Yangtze region

a. 泥裂和微生物诱导成因构造; b. *Palaeophycus* (古藻迹); c. *Rusophycus* (皱饰迹); d. *Lockeia* (洛克迹); e. *Cruziana* (二叶石迹); f. *Thalassinoides* (海生迹); g. *Rhizocorallium* (根珊瑚迹); h. *Diplocraterion* (双杯迹); i. *Skolithos* (石针迹)

沙滩岩性以粉砂质泥岩与泥岩互层为主,发育透镜状层理。潮下带发育遗迹化石 *Thalassinoides* (海生迹) (图4f)、*Rhizocorallium* (根珊瑚迹) (图4g)、*Diplocraterion* (双杯迹) (图4h) 和 *Skolithos* (石针迹) (图4i)。

水下分流河道微相水动力最强,岩性以灰色至灰黑色细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩为主,由下至上整体构成正粒序(图3b)。河道沉积底部发育冲刷-充填构造,冲刷面形态凹凸不平(图5a),冲刷面之上富集泥

质撕裂屑和砂质撕裂屑(图5b),这些砾屑是水流冲刷并撕裂未固结或半固结的邻近沉积物而形成的滞留沉积。细砂岩中常发育小型板状交错层理和槽状交错层理,粉砂岩和泥质粉砂岩中常发育波状层理(图5c)、重荷模构造(图5c)和砂质液化(图5d)等现象,局部可见变形构造。



图5 上扬子地区麦地坪组和筇竹寺组三角洲相典型沉积特征

Fig. 5 Photos showing the sedimentary characteristics of deltaic facies in the Maidiping-Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region
a. 水下分流河道沉积, 冲刷-充填构造, 资201井, 埋深4 867.11 m, 岩心照片; b. 水下分流河道沉积, 泥质撕裂屑和砂质撕裂屑, 资201井, 埋深4 868.45 m, 岩心照片; c. 水下分流河道沉积, 重荷模构造, 资201井, 埋深4 871.33 m, 岩心照片; d. 水下分流河道沉积, 砂质液化现象, 资201井, 埋深4 871.20 m, 岩心照片; e. 河道间湾沉积, 资201井, 埋深4 882.08 ~ 4 886.00 m, 岩心照片; g. 远端砂坝沉积, 汉源桥顶山剖面, 野外照片

2.2 三角洲相

三角洲相位于平均高潮线—氧化—还原界面之间(图2), 以河流作用为主要沉积动力。研究区发育三角洲前缘亚相, 可细分出水下分流河道、远端砂坝和分流间湾3个微相(表1)。三角洲前缘处于富氧环境中, 受陆源影响大, 沉积物粒度粗、陆源碎屑含量高、TOC含量低。

分流间湾微相岩性以灰黑色—深灰色泥岩及粉砂质泥岩为主, 夹杂有少量薄层粉砂岩和细砂岩(图5e)。常见的沉积构造有书页型水平纹理、透镜状层理和砂、泥互层型水平层理, 局部可见生物扰动构造。

远端砂坝微相岩性以灰黑色泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩为主, 由下至上构成反粒序(图3b, 图5f)。远端砂坝底部泥岩发育水平层理和透镜状层理, 中部粉砂质泥岩发育砂、泥互层层理和波状层理, 上部的粉砂岩发育平行层理、包卷层理和交错层理等。

2.3 海槽相

麦地坪组和筇竹寺组沉积时期, 上扬子地区发育德阳—安岳裂陷槽^[18, 41, 42], 因此可以独立划分出海槽相。海槽相因构造沉降速率快, 形成了相对局限的深水环境, 水体循环不畅, 水动力条件总体微弱, 有利于有机质保存。根据水体深度、氧化—还原条件以及底流改造作用的强度差异, 海槽相可进一步划分为浅水凹槽、半深水凹槽和深水凹槽3个亚相。

浅水凹槽亚相分布于正常浪基面与风暴浪基面之间, 水深相对较浅。该区域受到深水潮汐底流影响较强^[43, 44], 岩性组合以粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩的频繁互层为特征, 其中泥纹层含量较低。主要的沉积构造包括由粉砂质纹层(占比超过70%)和泥质纹层构成的交互型水平纹理(图6a)、反映较强底流筛选作用和较高沉积速率的粉砂型水平纹理(图6b)以及由

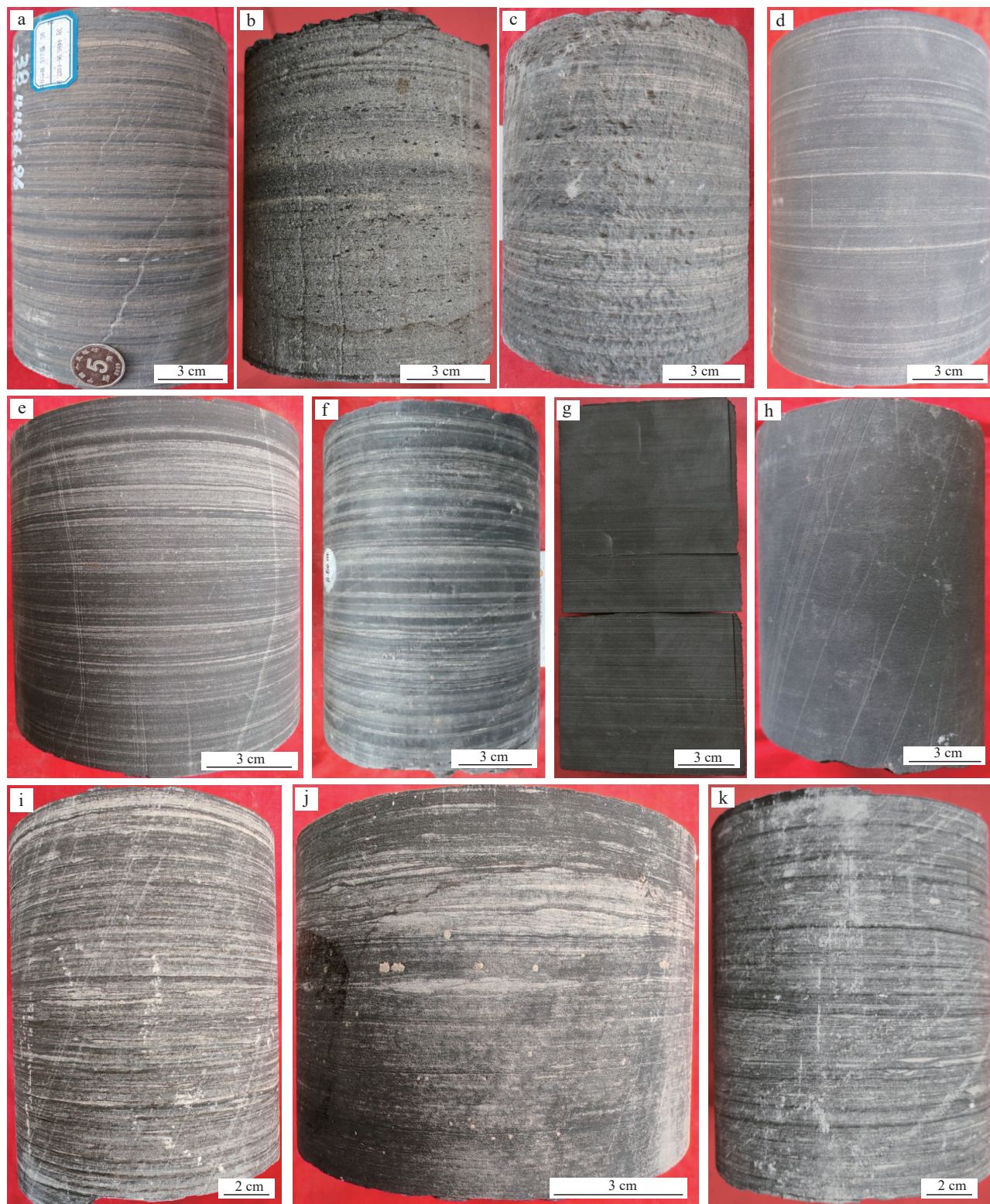


图6 上扬子地区麦地坪组和筇竹寺组海槽相和浅海陆棚相典型沉积特征岩心照片

Fig. 6 Core photos showing typical sedimentary characteristics of trough facies and neritic shelf facies in the Maidiping-Qiongzhusi formations,

Upper Yangtze region

a. 浅水凹槽沉积,交互型水平纹理,资204井,埋深4 030.17 m;b. 浅水凹槽沉积,粉砂型水平纹理,资204井,埋深4 221.11 m;c. 浅水凹槽沉积,层纹型水平纹理,资201井,埋深4 452.74 m;d. 半深水凹槽沉积,稀疏交互型水平纹理,资203井,埋深3 336.31 m;e. 半深水凹槽沉积,相间交互型水平纹理,资203井,埋深3 328.52 m;f. 半深水凹槽沉积,紧密交互型水平纹理,资201井,埋深4 457.43 m;g. 深水凹槽沉积,书页型水平纹理,资202井,埋深5 222.10 m;h. 深水凹槽沉积,复合递变型水平纹理,资203井,埋深3 302.89 m;i. 滩间海沉积,波状层理、透镜状层理,资203井,埋深3 197.04 m;j. 滩间海沉积,波状层理、透镜状层理,资203井,埋深3 238.39 m;k. 滩间海沉积,波状层理、透镜状层理,资215井,埋深4 465.63 m

较强底流筛选和较低沉积速率形成的层纹型水平纹理(图6c)^[45, 46]。此外,波状层理和小型交错层理也较为常见,指示了波浪作用影响。在浅水凹槽亚相中,随着水深增加、水动力减弱,沉积物中泥质组分相应增加,表现为泥质纹层含量增多,而粉砂质纹层含量则逐渐减少。

半深水凹槽亚相位于风暴浪基面与水体氧化-还原界面之间。该地区潮汐底流影响减弱,泥纹层含量增加。岩性以灰黑色泥岩为主,夹杂有薄层泥质粉砂岩和粉砂岩,典型沉积构造为交互型水平纹理。与浅水凹槽沉积相比,半深水凹槽沉积粉砂纹层占比明显降低(通常不足30%)。随着水深持续增大,底流作用进一步减弱,交互型水平纹理呈现出稀-疏交互型(图6d)、相间交互型(图6e)和紧密交互型(图6f)的有序演变序列。

深水凹槽亚相位于位于氧化-还原界面之下,代表了陆棚凹槽中最深、最安静的沉积环境。在这里,水动力作用极为微弱,沉积物几乎完全通过垂直沉降的方式堆积,形成了缺氧的底水环境。岩性主要为富含有机质的薄层状或块状黑色泥岩和炭质泥岩(图3c),内部仅含极少量分散的粉砂质条带或透镜体。沉积构造以发育良好的水平层理为特征,典型类型包括纹层极薄、明暗相间、状如书页的书页型水平纹理(图6g),以及反映了远源、低密度浊流或碎屑流沉积事件的复合递变型水平纹理(图6h)。

2.4 浅海陆棚相

浅海陆棚相位于正常浪基面之下(图2),波浪作用有限,主要受风暴作用和潮流作用的影响。研究区主要发育浅水陆棚亚相,进一步细分出陆棚洼地、风暴滩和滩间海3个微相(表1)。

陆棚洼地是指浅水陆棚位置地势相对低洼、水深相对较深的区域,以悬浮沉积作用为主。陆棚洼地沉积岩性以灰黑色泥岩为主,夹有薄层粉砂质泥岩和泥质粉砂岩。沉积构造发育书页型水平层理和复合递变型水平层理。

风暴滩和滩间海位于浅水陆棚内地势较高、水体较浅的部位^[47, 48]。与陆棚洼地相比,风暴滩和滩间海受海平面升降和风暴事件的影响更为频繁和显著,潮汐底流对沉积物具有强烈的筛选和搬运作用,水体含氧量高。

风暴滩微相是指陆棚台地环境中受风暴作用控制的区域。岩性以灰色、灰绿色细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩为主。单个风暴事件沉积层在垂向上构成一个完整的正粒序序列^[49]。序列底部常发育一个明显的侵

蚀冲刷面,其上为粒度最粗的滞留沉积物(如泥砾或生物碎屑),向上则依次过渡为块状层理和平行层理,并最终以后悬浮沉积的泥岩盖层结束^[50]。根据风暴强度和水深,风暴沉积层可分为薄层、中层和厚层风暴岩。

滩间海微相是指分布于风暴滩之间相对低洼的区域。该地区以潮流底流沉积为主,岩性组合为灰色、灰绿色的粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩互层。与风暴滩的“突变式”沉积序列不同,滩间海的岩性变化更为渐进和有规律,体现了潮汐周期的韵律性。典型沉积构造见波状层理(图6i)和透镜状层理(图6j)。与三角洲沉积形成的复合层理相比,滩间海微相形成的复合层理界面平直,单个透镜体内纹层界面较为清晰(图6k)。

2.5 浊积相

上扬子地区麦地坪组和筇竹寺组岩心中浊积体发育,主要为朵体沉积,可划分出朵轴、朵体离轴、朵缘及朵缘远端4个微相。

朵轴位于浊流主体冲出限制性水道后,能量最集中、流速最快的主流道区域。此区域是朵体中沉积物最粗、砂体最厚的骨架部分。岩性以灰色、深灰色中-厚层状的中-细粒砂岩为主,岩层常呈“叠瓦状”或“席状”相互叠置,泥岩夹层极为稀少且极薄,砂/地比通常高于80%(图3d)。朵轴底部普遍发育大型槽模、沟模和冲刷面等底模构造,内部以块状层理(图7a)和发育清晰的正粒序层理(图7b)为主,显示了高密度浊流快速堆积的特征。完整的鲍马序列罕见,通常仅保留A段或A-B段。

朵体离轴分布于朵轴两侧或顺流方向的前缘,是浊流能量开始衰减、流体发生侧向扩散与分流的过渡区域。岩性组合表现为中-薄层的细砂岩、粉砂岩与灰黑色泥岩的频繁互层。砂/地比中等,一般介于40%~70%。该区域是完整鲍马序列最发育的典型部位(图7c),粒序层理、平行层理、砂-纹交错层理及水平纹层均十分常见,构成经典的A-B-C-D序列。

朵缘构成浊积朵体的外围边界,代表浊流能量已显著衰减,沉积作用由牵引流主导转变为悬浮沉降为主导的区域。岩性以薄层、极薄层的粉砂岩和泥质粉砂岩为主,与暗色泥岩呈不等厚互层。泥岩在垂向上占绝对优势,砂/地比显著降低,通常在20%~40%(图7d)。鲍马序列常不完整,多缺失底部的A段和B段,以发育砂-纹交错层理(C段)和水平纹层(D段)为典型特征,即C-D或C-D-E序列。垂向上常呈现典型的“泥包砂”结构,薄层砂岩或粉砂岩被厚层泥岩所包围。

朵缘远端标志着浊流沉积的最终末端,流体能量

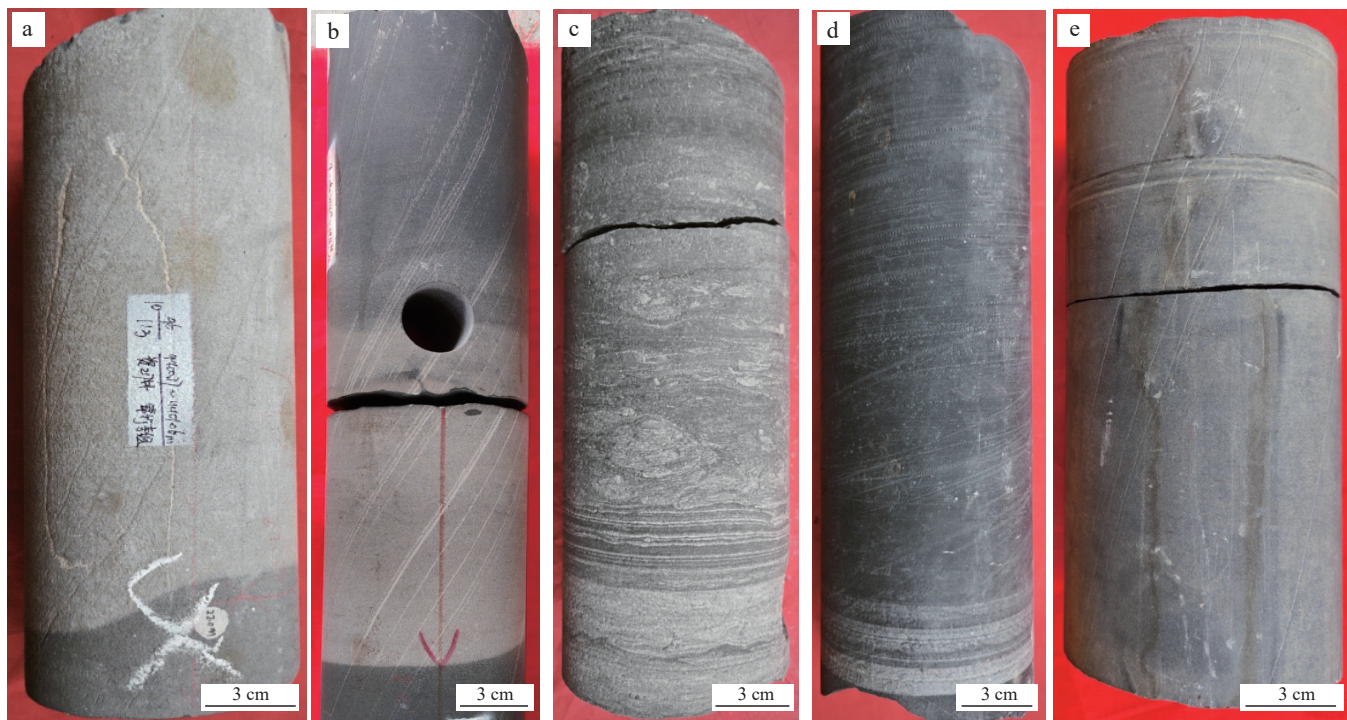


图7 上扬子地区麦地坪组和筇竹寺组朵体亚相典型沉积特征岩心照片

Fig. 7 Core photos showing typical sedimentary characteristics of lobe subfacies in the Maidiping-Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

a. 块状构造, 资217井, 埋深4 400.77 m; b. 正粒序层理, 资203井, 埋深4 416.33 m; c. 典型鲍马序列, 资215井, 埋深4 905.05 m; d. 砂、泥不等厚互层, 资217井, 埋深4 519.64 m; e. 块状构造泥岩, 资203井, 埋深4 413.08 m

已近乎耗尽, 只剩下最细的悬浮颗粒缓慢沉降。此区域也接收了大量的盆地背景泥质沉积。岩性主体为深灰色至黑色的块状泥岩或页岩(图7e), 其间仅夹有极薄的粉砂岩质或钙质纹层、条带。砂/地比极低, 通常不足10%。原生沉积构造以鲍马序列的D段(水平纹层状粉砂质泥岩)和E段(深海泥岩)为主。可见透镜状层理、发育不完整的爬升砂-纹交错层理。

3 沉积相分布与纵向演化

3.1 单井沉积相及海平面变化

单井相分析是沉积相研究的基础, 也是开展连井对比与平面相分析的前提。本文以资阳地区资215井为例, 开展系统的单井沉积相分析(图8)。

资215井钻遇麦地坪组-筇竹寺组, 厚度约688.5 m(埋深4 300.5 ~ 4 989.0 m井段)。麦地坪组与筇竹寺组之间为整合接触关系。

麦地坪组(埋深4 945.5 ~ 4 989.0 m井段, 厚度43.5 m)岩性自下而上为灰黑色页岩、砂质页岩、灰质页岩和泥灰岩, 整体呈向上变细的序列。沉积构造发

育脉状、波状及透镜状层理, 并普遍见软沉积物变形构造。麦地坪组属于三角洲前缘远端砂坝沉积, 指示水体相对动荡且向上变浅的沉积环境。

筇竹寺组可进一步划分为8个小层, 其沉积演化如下:

1) 第1小层(埋深4 924.5 ~ 4 945.5 m, 厚度21.0 m)直接覆于麦地坪组泥质灰岩之上, GR值显著增大。岩性以黑色、灰黑色页岩为主, 向上粒度变粗。下部发育书页型水平层理, 上部见复合递变型水平层理, 局部可见透镜状层理及垂直层面的粉砂条带。1小层整体反映深水凹槽沉积环境, 水深向上变浅。

2) 第2小层(埋深4 860.0 ~ 4 924.5 m, 厚度64.5 m)与下伏地层整合接触, GR值明显降低。下部岩性为浅灰色与灰黑色页岩互层, 上部为薄层泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩互层。页岩中发育书页型水平层理与复合递变层理, 粉砂岩中见爬升波痕纹理、透镜状层理和正递变层理, 泥岩则以块状构造为主。2小层下部属半深水凹槽沉积, 向上过渡为朵缘远端沉积。

3) 第3小层(埋深4 791.0 ~ 4 860.0 m, 厚度69.0 m)与下伏地层呈渐变接触, GR值逐渐增大。岩性以黑色页岩为主, 局部夹薄层粉砂条带。页岩主要

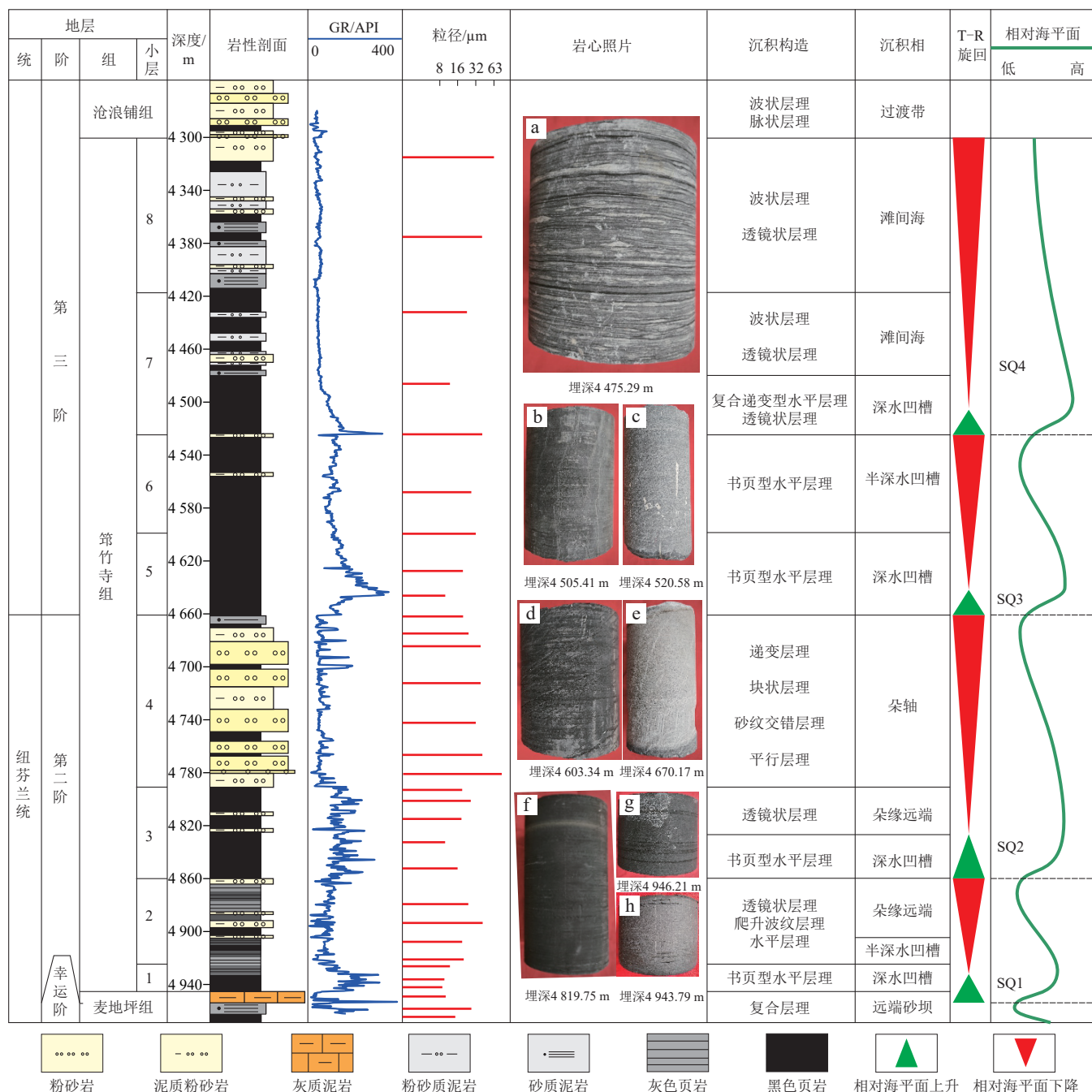


图8 上扬子地区资215井麦地坪组-筇竹寺组沉积微相综合柱状图

Fig. 8 Column showing the sedimentary microfacies in the Maidiping-Qiongzhusi formations, well Z215, Upper Yangtze region

发育书页型水平层理,偶见饼状、椭圆状黄铁矿结核。3小层整体为深水凹槽环境下的原地沉积。

4) 第4小层(埋深4 661.0 ~ 4 791.0 m,厚度130.0 m)以灰色、深灰色中-厚层状粉砂岩为主,夹薄层泥岩和泥质粉砂岩,砂/地比普遍高于80%。粉砂岩和细砂岩中发育大型槽模、沟模及冲刷面等底模构造,并见块状层理、平行层理及正粒序结构。该小层底界面为突变面,之上GR值骤然降低,碎屑颗粒粒度增大,颜色变浅。这些特征指示其为朵叶体朵轴沉积,浊

流作用强烈。

5) 第5小层(埋深4 599.00 ~ 4 661.00 m,厚度62.0 m)为黑色厚层状页岩,局部夹薄层粉砂条带。沉积构造以书页型水平层理为主,局部见饼状、椭圆状黄铁矿结核。该小层底界面之上GR值快速增大后又迅速降低,呈“V”字形结构。整体属深水凹槽环境的原地沉积。

6) 第6小层(埋深4 525.0 ~ 4 599.0 m,厚度74.0 m)以黑色页岩为主,局部夹薄层粉砂条带。发育

书页型水平层理,常见饼状、椭圆状黄铁矿结核。其岩性特征与5小层相似,但页岩粒度相对较粗,指示半深水凹槽沉积环境。

7) 第7小层(埋深4 417.0 ~ 4 524.5 m,厚度107.5 m)下部为灰黑色泥岩,发育复合递变型水平层理,属深水凹槽环境;上部转为泥质粉砂岩、粉砂质泥岩与泥岩互层,发育透镜状层理和波状层理,且层系界面平直,反映滩间海沉积特征。

8) 第8小层(埋深4 300.5 ~ 4 417.0 m,厚度116.5 m)以灰色-灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、砂质泥岩与黑色页岩互层为主,发育波状与透镜状层理,粉砂纹层清晰并常见叠置现象。该层仍属滩间海沉积,但与第7亚段相比,粉砂含量增高、颗粒粒度增大,表明水动力增强,水体进一步变浅。

综合沉积微相旋回、自然伽马曲线形态及粒度变化特征,资215井筇竹寺组可识别出4个完整的沉积旋

回:第1小层和第2小层构成旋回1(SQ1),第3-4小层构成旋回2(SQ2),第5-6小层构成旋回3(SQ3),第7-8小层构成旋回4(SQ4)。

3.2 连井沉积相对比

以单井相分析为基础,利用连井相对比法,综合确定沉积微相规模,分析沉积微相的横向和纵向变化规律。以过汉深1—乐山1—资218—资203—资201—高石17—高石21井连井剖面为例,开展连井相分析(图9)。连井剖面位于研究区中部,由西向南东穿越德阳-安岳裂陷槽,下伏前寒武系灯影组,上覆寒武系第三阶沧浪铺组,对比单元为麦地坪组和筇竹寺组。

麦地坪组-筇竹寺组的形成为裂陷充填和坳陷充填两个阶段。裂陷充填期发育于麦地坪组-筇竹寺组6小层沉积期。该时期沉积局限于德阳-安岳裂陷槽内,裂陷槽之外无沉积。裂陷充填期,地层分布受裂

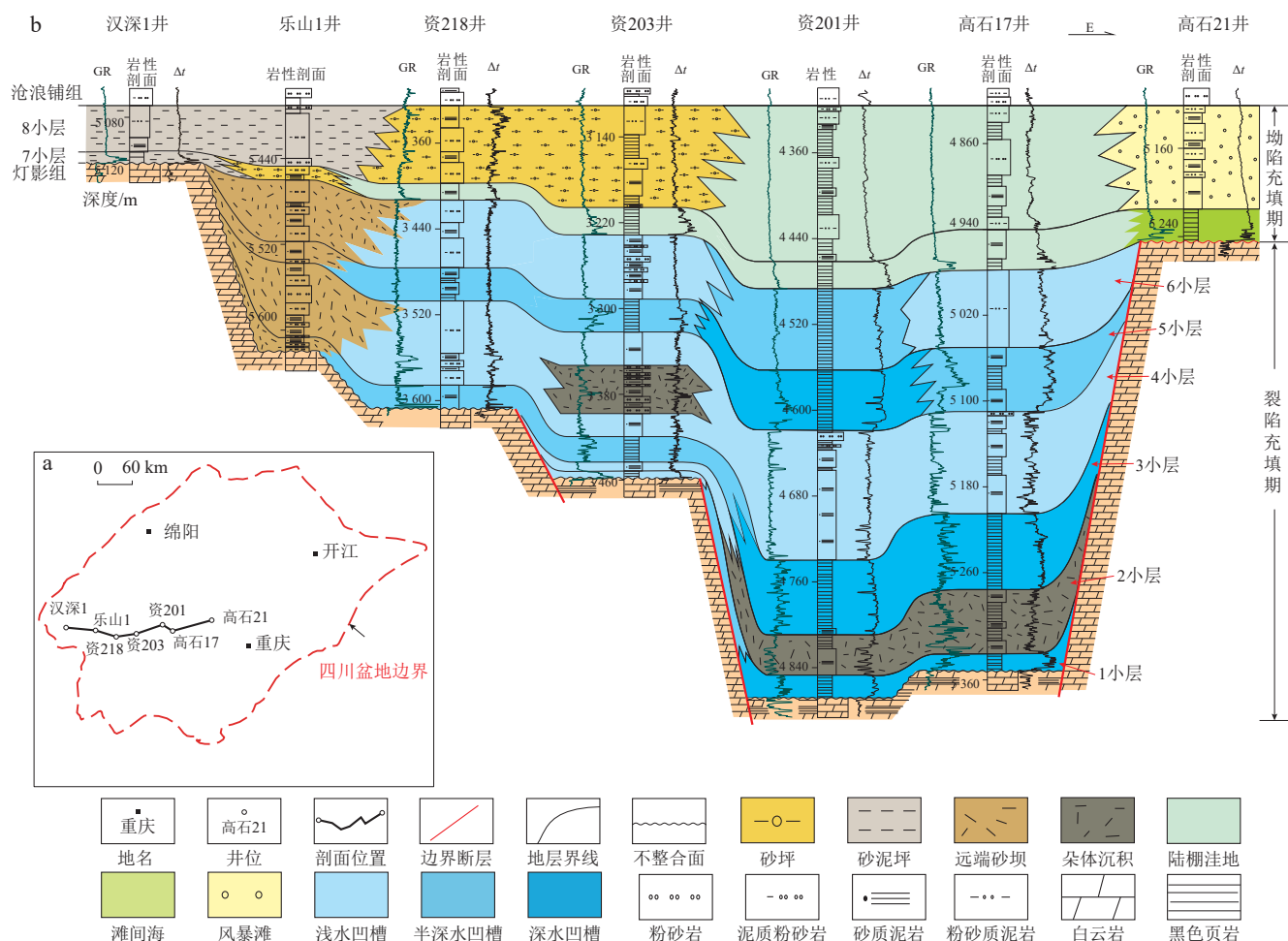


图9 上扬子地区汉深1井—高石21井麦地坪组-筇竹寺组沉积微相连井对比剖面

Fig. 9 Well-correlation section crossing wells HS1 to GS21 showing the comparison of sedimentary microfacies in the Maidiping-Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region
(GR为自然伽马值;Δt为声波时差。)

陷控制,呈现西缓东陡、厚度分异、快速上超的特征。其中,麦地坪组-筇竹寺组2小层仅发育于资203—资201—高石17井区,资203井厚度薄,资201井和高石17井厚度大;3小层—6小层分布范围向西扩大至乐山1井区,由下至上,不同井沉积厚度分异减小。坳陷充填期发育于筇竹寺组7小层—8小层沉积期,该时期德阳-安岳裂陷槽已完全充填,沉积地层在全区分布,沉积中心和非沉积中心地层厚度差异较小。

麦地坪组-筇竹寺组沉积相类型受构造演化阶段和海平面变化共同控制。裂陷充填期,沉积相以三角洲相、海槽相和朵体沉积为主,海平面变化直接影响沉积相类型及展布。1小层、3小层和5小层沉积期为海平面快速上升期,沉积相以深水凹槽和半深水凹槽为主,西侧边缘发育少量三角洲前缘沉积,朵体沉积基本不发育。2小层、4小层和6小层沉积期为海退期,三角洲前缘远端沉积、朵体沉积和浅水凹槽沉积积极发育。坳陷充填期由于地形平缓,潮坪沉积、陆棚洼地沉积、风暴滩沉积和滩间海沉积发育。7小层沉积期,西侧的汉深1井和乐山1井潮坪沉积发育,资218井和资203井发育陆棚洼地沉积,高石21井发育滩间海沉积;8小层沉积期,西侧的汉深1井、乐山1井、资218井和资203井均发育潮坪沉积,资201井和高石17井发育陆棚洼地沉积,高石21井发育风暴滩沉积。

3.3 沉积微相平面分布

系统编制麦地坪组-筇竹寺组的地形坡折分布图、细砂岩含量等值线图、粉砂岩含量等值线图和地层厚度平面分布图。以此为基础,结合单井岩心相分析结果,编制了麦地坪组-筇竹寺组沉积相分布图。

麦地坪组-筇竹寺组沉积相类型及展布分为裂陷充填期和坳陷充填期两个阶段。麦地坪组—6小层沉积期为裂陷充填期,7小层—8小层沉积期为坳陷充填期,两个阶段的沉积相类型、分布规律及沉积特征存在明显差异。

裂陷充填期以裂陷槽相、三角洲相和浊积相为主,相带分布范围窄、相变快。该时期发育南北向展布的德阳-安岳裂陷槽^[18, 42, 51],物源区位于研究区西部及西南部(图10a)。裂陷槽西侧地形相对平缓,物源区向盆地输入大量物质,故三角洲沉积发育,三角洲沉积的前方发育浊积相,浅水凹槽亚相分布面积较广、相变较慢;裂陷槽东侧地形陡峻,物源供给缺乏,故三角洲沉积不发育,浅水凹槽亚相分布范围窄。同时,裂陷槽基底由灰岩和白云岩构成^[42],不容易滑塌,故浊积沉积不发育。裂陷槽中部发育半深水—深水凹槽沉积,沉积物以黑色页岩为主,发育书页型水平层理和复合递变型水平层理。

坳陷充填期以潮坪相和浅海陆棚相沉积为主,裂

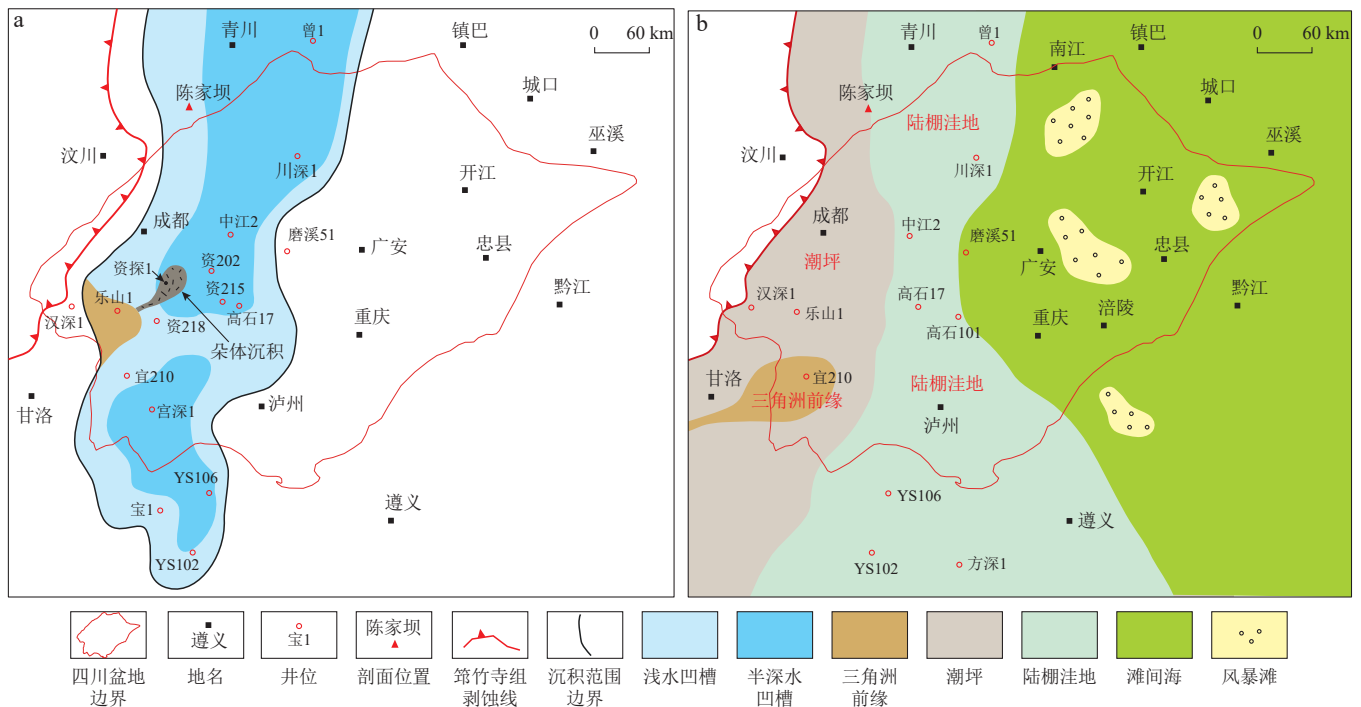


图10 上扬子地区麦地坪组-筇竹寺组裂陷充填期(a)和坳陷充填期(b)沉积相图

Fig. 10 Maps showing the sedimentary facies during the syn-rift filling stage (a) and the post-rift filling stage (b) in the Maidiping-Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

陷槽相和浊积相不发育。该时期德阳-安岳裂陷槽基本闭合(图 10b),地形相对平缓,故潮坪相和浅海陆棚相发育。在物源分布前方,发育小型三角洲沉积。潮坪相发育于研究区西侧,汉深1井、乐山1井和宜210等井均有钻遇,岩性以砂、泥薄互层为主,呈南北向展布;陆棚洼地发育于青川-中江2井-泸州一方深1井一线,岩性以灰黑色泥岩为主,分布位置与早期德阳-安岳裂陷槽基本重合;风暴滩和滩间海分布于研究区西侧,风暴滩分布面积广阔,多呈块

状或点状。

3.4 沉积微相分布模式

上扬子地区麦地坪组-筇竹寺组沉积时期的沉积微相展布,明显受控于构造演化阶段与全球海平面变化的耦合作用,呈现出由裂陷充填向坳陷充填转变的典型演化序列。两个阶段的构造背景、古地形格局、沉积相类型及其空间分布存在显著差异(图 11)。

裂陷充填期(麦地坪组—筇竹寺组6小层沉积期)

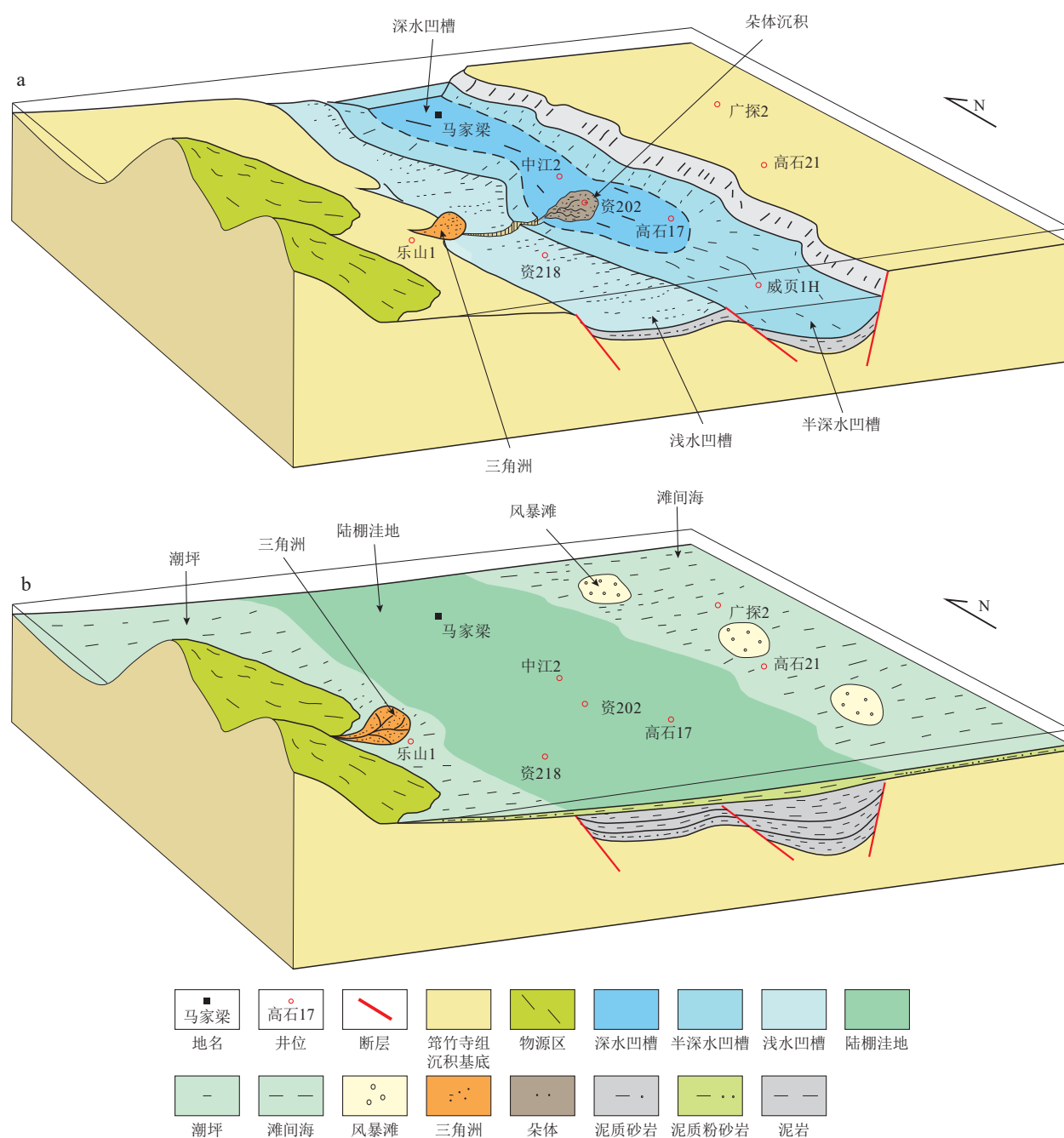


图 11 上扬子地区麦地坪组-筇竹寺组沉积相模式立体示意图

Fig. 11 Schematic diagrams showing the sedimentary facies model of the Maidiping-Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

a. 裂陷充填期; b. 坳陷充填期

以强烈的构造沉降和局限沉积为特征。该阶段沉积主要局限于德阳-安岳裂陷槽内,槽外区域普遍缺失沉积记录。受裂陷槽控制,沉积相类型以裂陷槽相、三角洲相和浊积相为主,潮坪相与浅海陆棚相不发育。裂陷槽相依据水体深度可进一步划分为浅水凹槽、半深水凹槽和深水凹槽3个亚相。浅水凹槽与半深水凹槽亚相沉积物中粉砂质含量较低,发育砂、泥互层型水平层理;深水凹槽亚相则以泥质沉积为主,发育典型的书页型水平层理和复合递变型水平层理,反映了强还原的静水环境。裂陷槽西侧地形相对平缓,物源供给充沛,发育三角洲前缘沉积,其前方常见浊积朵体;而东侧地形陡峻,物源匮乏,三角洲与浊积相均不发育。该阶段沉积相的分布明显受裂陷槽构造格局与海平面变化的共同控制,海平面上升期以深水—半深水凹槽沉积为主,海退期则发育三角洲前缘与浊积朵体。

坳陷充填期(筇竹寺组7小层-8小层沉积期)以构造稳定、地形平缓、沉积范围广泛为特征。随着德阳-安岳裂陷槽的逐渐充填与闭合,沉积环境由局限裂陷转为开阔坳陷,沉积相类型也相应转变为以潮坪相和浅海陆棚相为主,裂陷槽相与浊积相基本不发育。潮坪相主要分布于研究区西侧,呈南北向展布,岩性以砂、泥薄互层为主,发育脉状、波状及透镜状层理。浅海陆棚相进一步划分为陆棚洼地、风暴滩和滩间海3个微相。陆棚洼地分布于早期裂陷槽轴线区域,岩性以灰黑色泥岩为主,发育书页型水平层理;风暴滩与滩间海微相则分布于陆棚相对高能区域,岩性以粉砂岩和泥质粉砂岩为主,发育丘状交错层理和波状层理等。该阶段沉积微相的平面展布受古地形与物源供给控制明显,潮坪相与浅海陆棚相有序分带,反映了海平面高位期沉积物供给速率与可容纳空间变化的动态平衡。

综上所述,上扬子地区麦地坪组-筇竹寺组的沉积微相分布模式,清晰地记录了从裂陷局限沉积向坳陷广覆沉积的构造-沉积演化过程。裂陷充填期以构造控相为主导,沉积相类型复杂、相变快;而坳陷充填期则以海平面变化与物源供给为主要控制因素,沉积相类型相对简单、分布广泛。这一模式不仅揭示了区域沉积响应的内在机制,也为理解全球海平面变化在被动大陆边缘的沉积记录提供了典型实例。

4 讨论

本研究建立的上扬子地区寒武系麦地坪组-筇竹寺组高分辨率沉积相演化模式,不仅再现了早寒武世

被动大陆边缘的沉积场景,更揭示了一个受全球海平面变化调控的、从同生裂陷向裂后坳陷转换的完整构造-沉积动力学过程。

4.1 “构造-海平面”耦合控沉积机制及其时-空演化

被动大陆边缘的沉积架构是构造沉降与全球海平面变化相互作用的产物,但其相对主导性随构造活动周期而动态变化。本研究清晰地刻画了上扬子地区从“构造主导”到“海平面主导”的控沉积机制转换。

在裂陷充填期,德阳-安岳裂陷槽的强烈断陷活动创造了远高于全球海平面上升速率的可容纳空间。这导致沉积物被严格限制在裂陷槽内,形成了“构造控盆”的典型模式:裂陷槽轴部发育深水、缺氧的海槽相泥页岩,而槽缘则发育以三角洲相-浊积相为代表的、向盆地中心推进的粗碎屑沉积体系。这种构造活动对沉积格局的绝对控制,与东非裂谷系现代湖泊^[52]以及北海 Viking 地堑等古代裂谷盆地的早期充填特征^[53]高度相似。此时,尽管全球海平面变化信号(如高频海侵-海退韵律)已被记录,但强烈的局部构造沉降主导了该区的沉积格局,以至于海平面变化对沉积范围的控制作用显得十分微弱^[54]。

进入坳陷充填期,随着裂陷槽被充填和热沉降成为主导,区域地形被夷平,可容纳空间的创造转为缓慢且均一。此时,全球海平面变化取代构造因素,成为沉积相类型与空间展布的首要控制因素,即“海平面控相”。广泛分布的潮坪相-浅海陆棚相及其有序的平面分带,是对海平面波动所引起的可容纳空间变化的经典响应^[15]。这种控制机制的范式转换,不仅是上扬子地区的局部现象,更是全球被动大陆边缘“从裂陷到坳陷”演化过程中的一个普遍规律。

4.2 沉积学证据对古海洋化学模型的约束

本研究的沉积学记录为检验和完善早寒武世古海洋化学模型提供了关键的地质约束,将宏观的岩石组合与微观的地球化学过程紧密联系。

早寒武世碳循环的剧烈扰动,特别是基底碳同位素负漂移事件,其成因机制一直存在争议,主要分为“甲烷渗漏”和“有机碳埋藏”两种端元模型^[55]。本研究揭示的沉积序列为后者提供了强有力的支持。麦地坪组底部磷块岩与 BACE 事件的精确耦合,指向了一个由营养盐输入驱动生产力的综合模型。裂陷阶段广泛的火山与热液活动,如同期基性岩墙的侵入,为海洋带来了丰富的磷和铁等生命必需营养元素^[56]。这些营养盐通过上升流被输送至透光带,极大地刺激了初

级生产力的勃发(“生物泵”效应)。随后,大量有机质在沉降和降解过程中消耗氧气,加剧了水体分层和底层水的缺氧状态,并通过硫酸盐细菌还原作用释放轻碳(^{12}C),导致海水的稳定碳同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)发生全球性的负漂移。本研究观察到的磷块岩(营养盐富集的直接产物)到黑色硅质页岩(高生产力与缺氧保存)的沉积序列,完美地记录了这一连锁反应,从而有力地支持了“火山与热液活动-营养盐输入-生产力提升-缺氧环境形成”的古海洋模型。

此外,筇竹寺组内部高频的“黑色页岩(纹层状,缺氧)-粉砂质泥岩(生物扰动或弱氧化)”沉积韵律,是早寒武世海洋氧化-还原状态高度动态变化的直接沉积学证据。该韵律可能是华南板块幕式活动的结果。构造活跃期,大陆向海盆输入大量陆源物质,形成三角洲沉积。同时,大陆边缘受到地震等事件影响,形成大量浊积岩;构造平静期,大陆物源供给较少,以深水原地沉积原地,浊积岩不发育。这种韵律性旋回与同期碳、硫同位素的高频振荡记录相吻合,共同揭示了当时海洋化学条件的极端不稳定性^[34, 57, 58]。氧化-还原界面的频繁波动,造成了有机碳埋藏通量的周期性变化,这很可能是导致早寒武世多次碳同位素剧烈波动的根本原因之一。

4.3 页岩气勘探意义

本研究建立的“构造-沉积相”耦合模型,为四川盆地筇竹寺组页岩气的勘探部署与“甜点”预测提供了全新的地质理论和实践依据。首先,研究明确了优质烃源岩与页岩储层的发育严格受控于构造-沉积阶段。裂陷充填期形成的深水海槽相黑色页岩,因其持续的缺氧环境、高的初级生产力以及快速的沉积埋藏速率,是有机质富集和保存的最理想场所。这些页岩通常具有高总有机碳含量、高硅质含量和发育良好的纳米级有机质孔隙,构成了页岩气藏的“物质基础”和核心储集空间^[59]。因此,勘探靶区应优先围绕裂陷槽的沉积中心,即深水-半深水凹槽亚相的分布区展开。

其次,沉积相对页岩的非均质性和工程可压裂性具有决定性影响。裂陷期的海槽相页岩岩相单一,连续性好,利于形成大规模的人工裂缝网络。而坳陷充填期广泛发育的潮坪相-浅海陆棚相体系,其页岩中频繁夹有粉砂岩和细砂岩夹层(如风暴岩和潮汐砂席),并伴随强烈的生物扰动。这些因素显著增强了储层的力学非均质性,在压裂过程中会阻碍裂缝的纵向延伸,并可能导致施工压力异常升高。因此,精确刻画

沉积相的平面分布是预测“工程甜点”和优化压裂设计的关键。

最后,本模型为地层压力预测提供了地质框架。裂陷槽内快速堆积的厚层富有机质泥页岩,易于在早期形成有效的压力封存箱,从而发育超压系统,这是实现高产、稳产的重要保障。相比之下,坳陷期相对均衡的沉积和可能更频繁的海平面波动,则可能导致形成常压或欠压系统。因此,对构造-沉积阶段的清晰划分,结合埋藏史分析,有助于建立更准确的地层压力预测模型,从而降低钻井风险、指导井身结构和完井方式的选择。

5 结论

1) 明确了上扬子地区早寒武世麦地坪组和筇竹寺组沉积相类型及特征。该层段主要发育潮坪相、三角洲相、海槽相、浅海陆棚相和浊积相,潮坪相可分为潮上带、潮间带和潮下带3个亚相,三角洲相发育三角洲前缘亚相,海槽相细分为浅水凹槽、半深水凹槽和深水凹槽3个亚相,浅海陆棚相发育浅水陆棚亚相,浊积相发育朵体亚相。

2) 揭示了上扬子地区早寒武世存在两个明确的构造-沉积阶段:同生裂陷期(麦地坪组—筇竹寺组6小层沉积期),沉积受德阳-安岳裂陷槽严格控制,呈现“构造控盆”特征;裂后坳陷期(筇竹寺组7-8小层沉积期),随着地形夷平,沉积转为受“海平面控相”的潮坪-陆棚广覆沉积。

3) 以沉积学证据有效约束了关键古海洋事件成因。麦地坪组底部磷块岩与BACE事件的耦合,支持了“火山与热液活动-营养盐输入-生产力提升-缺氧环境形成”综合模型;筇竹寺组内部高频氧化-还原韵律,为“动荡海洋”假说提供了直接证据。

4) 明确裂陷槽控制的深水海槽相是优质页岩发育的核心区,而坳陷期潮坪-陆棚相的强非均质性控制储层可压裂性。该“构造-沉积相”耦合模型为超深层页岩气“甜点”预测提供了关键地质依据。

参 考 文 献

- [1] CAWOOD P A, WANG Yuejun, XU Yajun, et al. Locating South China in rodonia and gondwana: A fragment of greater India lithosphere?[J]. *Geology*, 2013, 41(8): 903-906.
- [2] LI Da, LING Hongfei, SHIELDS-ZHOU G A, et al. Carbon and strontium isotope evolution of seawater across the Ediacaran-Cambrian transition: Evidence from the Xiaotan section, NE

- Yunnan, South China [J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 128–147.
- [3] HAQ B U, SCHUTTER S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. *Science*, 2008, 322(5898): 64–68.
- [4] PETERS S E, GAINES R R. Formation of the ‘great unconformity’ as a trigger for the Cambrian explosion [J]. *Nature*, 2012, 484 (7394): 363–366.
- [5] FENG Lianjun, LI Chao, HUANG Jing, et al. A sulfate control on marine mid-depth euxinia on the early Cambrian (ca. 529–521 Ma) Yangtze platform, South China [J]. *Precambrian Research*, 2014, 246: 123–133.
- [6] ISHIKAWA T, UENO Y, SHU Degan, et al. Irreversible change of the oceanic carbon cycle in the earliest Cambrian: High-resolution organic and inorganic carbon chemostratigraphy in the Three Gorges area, South China [J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 190–208.
- [7] CREMONESE L, SHIELDS-ZHOU G, STRUCK U, et al. Marine biogeochemical cycling during the early Cambrian constrained by a nitrogen and organic carbon isotope study of the Xiaotan section, South China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 148–165.
- [8] ERWIN D H, LAFLAMME M, TWEEDT S M, et al. The Cambrian conundrum: Early divergence and later ecological success in the early history of animals [J]. *Science*, 2011, 334 (6059): 1091–1097.
- [9] 朱茂炎, 赵方臣, 殷宗军, 等. 中国的寒武纪大爆发研究: 进展与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(10): 1455–1490.
- ZHU Maoyan, ZHAO Fangchen, YIN Zongjun, et al. The Cambrian explosion in China: Review and perspective [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(10): 1455–1490.
- [10] BABEOCK L E, PENG Shanchi, GEYEF G, et al. Changing perspectives on Cambrian chronostratigraphy and progress toward subdivision of the Cambrian system [J]. *Geosciences Journal*, 2005, 9(2): 101–106.
- [11] WANG Dan, LING Hongfei, STRUCK U, et al. Coupling of ocean redox and animal evolution during the Ediacaran-Cambrian transition[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2575.
- [12] GRADSTEIN F M, OGG J G, SCHMITZ M D, et al. *Geologic time scale 2020* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- [13] LANDING E, GEYER G, BRASIER M D, et al. Cambrian evolutionary radiation: Context, correlation, and chronostratigraphy-overcoming deficiencies of the first appearance datum (FAD) concept[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 123: 133–172.
- [14] CATUNEANU O, GALLOWAY W E, KENDALL C G S C, et al. Sequence stratigraphy: Methodology and nomenclature [J]. *Newsletters on Stratigraphy*, 2011, 44(3): 173–245.
- [15] VAN WAGONER J C, MITCHUM R M, CAMPION K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1990.
- [16] GOMEZ F J, ASTINI R A. Sedimentology and sequence stratigraphy from a mixed (carbonate-siliciclastic) rift to passive margin transition: The Early to Middle Cambrian of the Argentine Precordillera[J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 316: 39–61.
- [17] PERON-PINVIDIC G, MANATSCHAL G, the “IMAGinING RIFTING” Workshop Participants. Rifted margins: State of the art and future challenges [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 218.
- [18] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用[J]. *石油学报*, 2016, 37 (1): 1–16.
- DU Jinhu, WANG Zecheng, ZOU Caineng, et al. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the formation of Anyue giant gas field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1): 1–16.
- [19] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪一早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J]. *天然气工业*, 2015, 35(1): 24–35.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1): 24–35.
- [20] ZHU Maoyun, ZHANG Junming, YANG Aihua, et al. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow- to deep-water environments of the Yangtze Platform: An integrated approach [J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(12): 951–960.
- [21] YANG Chuan, ZHU Maoyan, CONDON D J, et al. Geochronological constraints on stratigraphic correlation and oceanic oxygenation in Ediacaran-Cambrian transition in South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 140: 75–81.
- [22] ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42 (6): 753–767.
- [23] FANG Jichuang, WU Huaichun, FANG Qiang, et al. Cyclostratigraphy of the global stratotype section and point (GSSP) of the basal Guzhangian Stage of the Cambrian Period[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 540: 109530.
- [24] ZHAO Zhengfu, THIBAUT N R, DAHL T W, et al. Synchronizing rock clocks in the late Cambrian [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1990.
- [25] LIU Sibing, JIN Siding, LIU Yan, et al. Astronomical forced sequence infill of Early Cambrian Qiongzhusi organic-rich shale of Sichuan Basin, South China [J]. *Sedimentary Geology*, 2022, 440: 106261.
- [26] LI Zhengxiang, EVANS D A D, HALVERSON G P. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography

- from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland[J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 294: 219–232.
- [27] WANG Jian, LI Zhengxiang. History of neoproterozoic rift basins in South China: Implications for rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/4): 141–158.
- [28] LI Zx, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1/2): 179–210.
- [29] HOFFMAN P F, KAUFMAN A J, HALVERSON G P, et al. A Neoproterozoic snowball earth[J]. *Science*, 1998, 281(5381): 1342–1346.
- [30] HOFFMAN P F, ABBOT D S, ASHKENAZY Y, et al. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology[J]. *Science Advances*, 2017, 3(11): e1600983.
- [31] MEERT J G. A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana[J]. *Tectonophysics*, 2003, 362(1/4): 1–40.
- [32] XIAO Wenyao, CAO Jian, WANG Xiaomei, et al. Marine chemical structure during the Cambrian explosion[J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 251: 104716.
- [33] GOLDBERG T, STRAUSS H, GUO Qingjun, et al. Reconstructing marine redox conditions for the Early Cambrian Yangtze Platform: Evidence from biogenic sulphur and organic carbon isotopes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(1/2): 175–193.
- [34] JIN Chengsheng, LI Chao, ALGEO T J, et al. A highly redox-heterogeneous ocean in South China during the early Cambrian (~529–514 Ma): Implications for biota-environment co-evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 441: 38–51.
- [35] GAO Ping, LI Shuangjian, LASH G G, et al. Stratigraphic framework, redox history, and organic matter accumulation of an Early Cambrian intraplatform basin on the Yangtze Platform, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 130: 105095.
- [36] ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, HU Qinong, et al. Geological controls on the accumulation of shale gas: A case study of the early Cambrian shale in the Upper Yangtze area[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 423–437.
- [37] OCH L M, SHIELDS-ZHOU G A, POULTON S W, et al. Redox changes in Early Cambrian black shales at Xiaotan section, Yunnan Province, South China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 166–189.
- [38] 朱茂炎, 孙智新, 杨爱华, 等. 中国寒武纪岩石地层划分和对比[J]. *地层学杂志*, 2021, 45(3): 223–249.
- ZHU Maoyan, SUN Zhixin, YANG Aihua, et al. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Cambrian in China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2021, 45(3): 223–249.
- [39] ZOU Caineng, YANG Zhi, DAI Jingxing, et al. The characteristics and significance of conventional and unconventional Sinian-Silurian gas systems in the Sichuan Basin, central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 64: 386–402.
- [40] JIN Chengsheng, LI Chao, ALGEO T J, et al. Controls on organic matter accumulation on the early-Cambrian western Yangtze Platform, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 75–87.
- [41] 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 等. 克拉通内裂陷及周缘大型岩性气藏形成机制、潜力与勘探实践——以四川盆地震旦系-寒武系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(3): 465–477.
- WEI Guoqi, YANG Wei, XIE Wuren, et al. Formation mechanisms, potentials and exploration practices of large lithologic gas reservoirs in and around an intracratonic rift: Taking the Sinian-Cambrian of Sichuan Basin as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3): 465–477.
- [42] 杨威, 魏国齐, 谢武仁, 等. 克拉通内裂陷边缘台缘丘滩体规模储层发育主控因素与成因模式——以四川盆地德阳-安岳克拉通内裂陷东侧灯影组四段为例[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(10): 1541–1553.
- YANG Wei, WEI Guoqi, XIE Wuren, et al. Main controlling factors and genetic mechanism for the development of high-quality reservoirs in the mound-shoal complexes on the platform margin mound-beach body at platform margin of the inner cratonic rift: Case study of the fourth member of Dengying Formation in the east side of the Deyang-Anyue cratonic rifts, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(10): 1541–1553.
- [43] STOW D, SMILLIE Z. Distinguishing between deep-water sediment facies: Turbidites, contourites and hemipelagites[J]. *Geosciences*, 2020, 10(2): 68.
- [44] STOW D A V, FAUGÈRES J C, HOWE J A, et al. Bottom currents, contourites and deep-sea sediment drifts: Current state-of-the-art[J]. *Geological Society, London, Memoirs*, 2002, 22(1): 7–20.
- [45] 施振生, 赵圣贤, 周天琪, 等. 海相含气页岩水平层理类型、成因及其页岩气意义——以川南地区古生界五峰组-龙马溪组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1499–1514.
- SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Types and genesis of horizontal bedding of marine gas-bearing shale and its significance for shale gas: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1499–1514.
- [46] 施振生, 张亚雄, 曾番惠, 等. 海相细粒陆源碎屑岩主要沉积构造类型及页岩气意义[J]. *古地理学报*, 2025, 27(1): 32–54.
- SHI Zhensheng, ZHANG Yaxiong, ZENG Fanhui, et al. Main sedimentary structure types of marine fine-grained terrigenous clastic rocks and their significance for shale gas[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2025, 27(1): 32–54.
- [47] 何骁, 郑马嘉, 刘勇, 等. 四川盆地“槽-隆”控制下的寒武系筇竹寺组页岩储层特征及其差异性成因[J]. *石油与天然气地*

- 质, 2024, 45(2): 420–439.
- HE Xiao, ZHENG Majia, LIU Yong, et al. Characteristics and differential origin of Qiongzhusi Formation shale reservoirs under the “aulacogen-uplift” tectonic setting, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 420–439.
- [48] 郑马嘉, 郭兴午, 伍亚, 等. 四川盆地德阳—安岳裂陷槽寒武系筇竹寺组超深层页岩气地质工程一体化高产井培育实践与勘探突破[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(3): 58–68.
- ZHENG Majia, GUO Xingwu, WU Ya, et al. Cultivation practice and exploration breakthrough of geology and engineering integrated high-yield wells of ultra-deep shale gas in the Cambrian Qiongzhusi Formation in Deyang-Anyue aulacogen, Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(3): 58–68.
- [49] GRUNDTVÅG S A, JELBY M E, OLAUSSEN S, et al. The role of shelf morphology on storm-bed variability and stratigraphic architecture, Lower Cretaceous, Svalbard [J]. Sedimentology, 2021, 68(1): 196–237.
- [50] MACQUAKER J H S, BENTLEY S J, BOHACS K M. Wave-enhanced sediment-gravity flows and mud dispersal across continental shelves: Reappraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions[J]. Geology, 2010, 38(10): 947–950.
- [51] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 257–265.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 257–265.
- [52] NUTZ A, SCHUSTER M, BARBONI D, et al. Plio-Pleistocene sedimentation in West Turkana (Turkana Depression, Kenya, East African Rift System): Paleolake fluctuations, paleolandscapes and controlling factors [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 211: 103415.
- [53] EIDVIN T, RUNDBERG Y. Post-Eocene strata of the southern Viking Graben, northern North Sea; integrated biostratigraphic, strontium isotopic and lithostratigraphic study [J]. Norwegian Journal of Geology, 2007, 87(4): 391–450.
- [54] HEINE C, MÜLLER R D, STEINBERGER B, et al. Integrating deep Earth dynamics in paleogeographic reconstructions of Australia[J]. Tectonophysics, 2010, 483(1/2): 135–150.
- [55] JIANG Ganqing, WANG Xinqiang, SHI Xiaoying, et al. The origin of decoupled carbonate and organic carbon isotope signatures in the Early Cambrian (ca. 542–520 Ma) Yangtze platform [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 317/318: 96–110.
- [56] SANTOSH M, MARUYAMA S, SAWAKI Y, et al. The Cambrian explosion; Plume-driven birth of the second ecosystem on earth[J]. Gondwana Research, 2014, 25(3): 945–965.
- [57] WEI Guangyi, PLANAVSKY N J, TARHAN L G, et al. Marine redox fluctuation as a potential trigger for the Cambrian explosion [J]. Geology, 2018, 46(7): 587–590.
- [58] WEI Guangyi, PLANAVSKY N J, TARHAN L G, et al. Highly dynamic marine redox state through the Cambrian explosion highlighted by authigenic $\delta^{238}\text{U}$ records [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 544: 116361.
- [59] POTTER C J. Paleozoic shale gas resources in the Sichuan Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(6): 987–1009.

(编辑 刘格云)