

四川盆地下奥陶统沉积环境演化及其主控因素*

仲 妍¹ 刘圣乾¹ 罗进雄¹ 张大智²
孙 山² 程 祥¹ 朱雪清³1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100
2 中国石油大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712
3 中国石化胜利油田分公司孤东采油厂, 山东东营 257000

摘 要 四川盆地下奥陶统桐梓组 and 红花园组的沉积演化记录了扬子板块西北缘重大环境转变过程, 厘清其控制因素有助于揭示盆地古环境演变规律。本研究基于岩石学特征、碳氧同位素组成及元素地球化学指标(微量元素、稀土元素), 综合古环境分析及单因素分析—多因素综合作图的方法, 重建了岩相古地理格局, 查明了四川盆地早奥陶世古环境演化规律。结果表明: (1) 四川盆地下奥陶统桐梓组沉积环境以高盐度 (Sr/Ba 均值 1.708)、贫氧环境 ($V/(V+Ni)$ 均值 0.113) 为特征, 整体呈相对封闭的咸化环境; 红花园组则转变为盐度正常、氧化性改善的开阔环境, 古水深及海平面逐渐上升 ($\delta^{18}O$ 负偏 2.2‰)。(2) 四川盆地下奥陶统桐梓组主要发育局限台地相, 以结晶白云岩为主; 红花园组海侵作用增强, 整体过渡为开阔台地相, 石灰岩类(生物碎屑灰岩、泥晶灰岩)含量超过 80%, 瓶筐石生物礁滩复合体及台内滩广泛发育。综合分析认为, 构造-沉积分异、海平面升降及气候的干湿转变共同控制了下奥陶统沉积演化。川中古隆起的持续抬升奠定了“西高东低”的古地理格局, 控制了盆内沉积分异; 特马豆克阶 (Tremadocian) 全球海侵事件驱动了沉积环境由局限台地向开阔台地转变; 区域气候由干旱向湿润转变, 蒸发作用减弱与陆源输入增加导致了海水盐度降低与生物繁盛。该认识有利于深化对多因素协同控制碳酸盐岩台地演化机制的理解, 为四川盆地下奥陶统油气勘探提供地质依据。

关键词 古环境演化 沉积演化 主控因素 下奥陶统 四川盆地

第一作者简介 仲妍, 女, 2001 年生, 硕士研究生, 主要从事沉积学相关研究。E-mail: zy220623@163.com。

通讯作者简介 刘圣乾, 男, 1990 年生, 副教授, 主要从事沉积学方面的教学及科研。E-mail: liusq@yangtzeu.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Sedimentary environment evolution and controlling factors of
the Lower Ordovician in Sichuan BasinZHONG Yan¹ LIU Shengqian¹ LUO Jinxiong¹ ZHANG Dazhi²
SUN Shan² CHENG Xiang¹ ZHU Xueqing³1 School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China
2 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Daqing Oilfield, Heilongjiang Daqing 163712, China
3 Gudong Oil Production Plant, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257000, China

* 国家自然科学基金项目(编号: 41902117)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41902117)]

收稿日期: 2025-08-18 改回日期: 2025-12-01

Abstract Sedimentary evolution of the Lower Ordovician Tongzi – Honghuayuan Formations in Sichuan Basin records a significant environmental transition during the Early Ordovician in northwest margin of the Yangtze Plate. The controlling factors are key to understanding the evolution patterns of the basin’s ancient environment. Based on petrological characteristics, carbon-oxygen isotope compositions, and elemental geochemical indicators (trace elements, rare earth elements), this study employs a combination of paleoenvironmental analysis and the “single-factor analysis-multi-factor comprehensive mapping” method to reconstruct the lithofacies paleogeographic framework and identify the evolutionary patterns of the Early Ordovician paleoenvironment in Sichuan Basin. The results showed that: (1) The sedimentary environment of Tongzi Formation is characterized by high salinity (Sr/Ba average 1.708) and oxygen poor environment ($\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ average 0.113), and overall presents a relatively closed saline environment. The Honghuayuan Formation transitioned to an open environment with normal salinity and significantly improved oxidation, and with a gradual increase in paleowater depth and sea level, as indicated by a 2.2‰ negative deviation of $\delta^{18}\text{O}$. (2) The Tongzi Formation mainly develops restricted platform facies, dominated by crystalline dolomite sedimentation. The marine transgression of the Honghuayuan Formation has intensified, and it has transitioned into an open platform facies as a whole. The content of limestone (bioclastic limestone, mud crystal limestone) exceeds 80%, and the Calathium biogenic reef-beach complex and intra platform beach are widely developed. Comprehensive analysis indicates that tectono-sedimentary differentiation, eustatic sea-level fluctuations, and climate transition from aridity to humidity collectively controlled the sedimentary evolution of the Lower Ordovician. The continuous uplift of the central Sichuan paleouplift shaped the “west-high, east-low” palaeogeographic framework and governed intra-basin sedimentary differentiation; the Tremadocian global marine transgression event drove the transition of sedimentary environments from confined platforms to open platforms; the regional climate has shifted from arid to humid, and the weakening of evaporation and the increase in terrestrial inputs have led to a decrease in seawater salinity and the flourishing of organisms. This understanding enhances the comprehension of the synergistic control and evolutionary mechanisms of multiple factors in carbonate platforms, and provides a geological basis for oil and gas exploration in the Lower Ordovician of Sichuan Basin.

Key words palaeoenvironmental evolution, sedimentary evolution, main controlling factors, Lower Ordovician, Sichuan Basin

About the first author ZHONG Yan, born in 2001, is a master degree candidate. She is mainly engaged in sedimentology. E-mail: zy220623@163.com.

About the corresponding author LIU Shengqian, born in 1990, is an associate professor. He is mainly engaged in research and teaching on sedimentology. E-mail: liusq@yangtzeu.edu.cn.

0 引言

四川盆地奥陶统桐梓组和红花园组的沉积演化,记录了扬子板块西北缘早奥陶世重大环境转变的过程(郝彬等, 2015; 刘伟等, 2017; Hu *et al.*, 2023; 颜宇豪等, 2024)。该时期盆地处于克拉通内浅海台地发育阶段,发育1套广泛的碳酸盐岩沉积,在川中古隆起继承性隆升、全球海平面

周期性波动及区域气候转变的共同作用下,其地球化学与沉积特征具有阶段性演化,对揭示早奥陶世古海洋环境演化规律具有重要意义。

针对四川盆地奥陶统,前人研究主要集中在层序格架、沉积特征、白云岩成因、岩相古地理演化及储集层特征等方面(钟韬, 2009; 胡华蕊等, 2019; 谢环羽等, 2019; 郭炎, 2021; 李文杰等, 2024)。基于露头与钻井岩心观察,主流认识认为

桐梓组主要为局限台地相,红花园组为开阔台地相,整体呈现局限—开阔的演化趋势(杨威等,2012;颜宇豪等,2024)。相应地,地球化学指标表明,从桐梓组至红花园组古盐度逐步降低、氧化还原条件由贫氧向富氧转变(林良彪等,2017;赵凯莉等,2022)。然而,现有研究多侧重宏观演化趋势,将桐梓组乃至桐梓—红花园组作为1个整体分析,或仅划归2个层序讨论(杨威等,2012;胡华蕊等,2019),忽略了对地层内部环境波动的识别。尤其是特马豆克阶最大海侵事件触发全球海平面快速上升,驱动桐梓组局限环境向红花园组开阔环境转变,并促进了瓶筐石生物礁滩复合体的繁盛与生物多样性增加。作者注意到,红花园组下部Sr/Ba值呈上升趋势,与前人提出的持续降低认识不同,可能与生物壳体富铈效应及海水循环增强有关(Iglikowska *et al.*, 2018)。在沉积控制因素方面,Kane等(2023)强调川中古隆起对相带分异的控制及海平面—沉积体系的协同联动。关于沉积模式,有学者认为是浅水陆表海沉积(颜宇豪等,2024),亦有观点提出由台地向缓坡转换(杨威等,2012;李皎等,2015)。目前,对沉积环境演变与生物发育及地球化学响应之间的控制机制研究尚不充分,多因素耦合驱动沉积演化的探讨仍较薄弱。因此,有必要开展构造活动、海平面波动、古气候变化等多因素协同驱动机制的研究,以揭示其对沉积演化的完整调控过程。

本研究以四川盆地地下奥陶统桐梓组和红花园组为重点研究对象,基于野外剖面实测、岩石薄片鉴定、碳氧同位素测试、微量元素及稀土元素分析,聚焦于古环境参数及岩相古地理的重建,揭示其内在波动过程与控制因素,并实现以下研究目标:(1)重建古盐度、氧化还原条件等关键参数的动态变化,阐明其阶段性波动特征,解析特马豆克阶最大海侵事件的地球化学响应;(2)在层序地层格架内,刻画岩相古地理展布格局,揭示从桐梓—红花园组沉积相带的展布规律;(3)分析构造活动、海平面波动及古气候变迁3者之间的关系及其对沉积演化的控制作用,构建“构造—海平面—气候”多因素协同驱动的沉积演化模式。

1 区域地质背景

四川盆地位于扬子板块西北缘,是典型的叠合

盆地,其构造演化经历了多期次叠加改造(朱传庆等,2009)。盆地基底由前震旦系变质岩系组成,经晋宁运动(约850 Ma)后形成统一克拉通基底(张岳桥等,2011)。奥陶纪,四川盆地处于被动大陆边缘向活动大陆边缘转换的关键阶段(杨威等,2012)。

四川盆地早奥陶世主要构造单元包括川中古隆起、米仓山—大巴山前陆带及周缘汉南古陆、广元古隆起、康滇古陆等(刘树根等,2011;陈涛等,2023;汪泽成等,2023)。郁南运动后,川中古隆起作为继承性隆起长期暴露,顶部遭强烈剥蚀、周缘地层减薄,其北邻汉南古陆与广元古隆起,西南接康滇古陆,构成重要物源区与古地理边界。受秦岭洋俯冲作用,米仓山—大巴山前陆带发育逆冲推覆构造,挤压变形强烈。盆地内以川中古隆起为核心,剥蚀强烈、地层保存不完整且厚度偏小,向东剥蚀减弱、厚度逐渐增大,东部沉积厚度明显大于川中古隆起周缘(图1)。

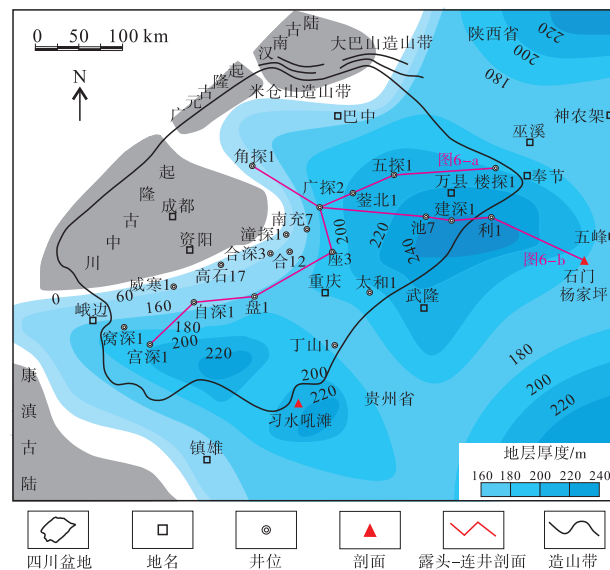


图1 四川盆地早奥陶世地层厚度(m)分布

Fig. 1 Contour map of the Early Ordovician (m) strata thickness in Sichuan Basin

四川盆地下奥陶统主要包括桐梓组和红花园组。桐梓组与下伏地层呈不整合接触关系,川中古隆起周缘地层因剥蚀作用而部分缺失,向东逐渐趋于完整,桐梓组与上覆红花园组呈整合接触关系。区域上,桐梓组的岩性以白云岩为主,其间夹有薄层泥质白云岩及生屑灰岩,为局限台地相。上覆红

花园组以颗粒灰岩和生屑灰岩为主，为开阔台地相。

2 岩石学与古环境特征

2.1 岩石学特征

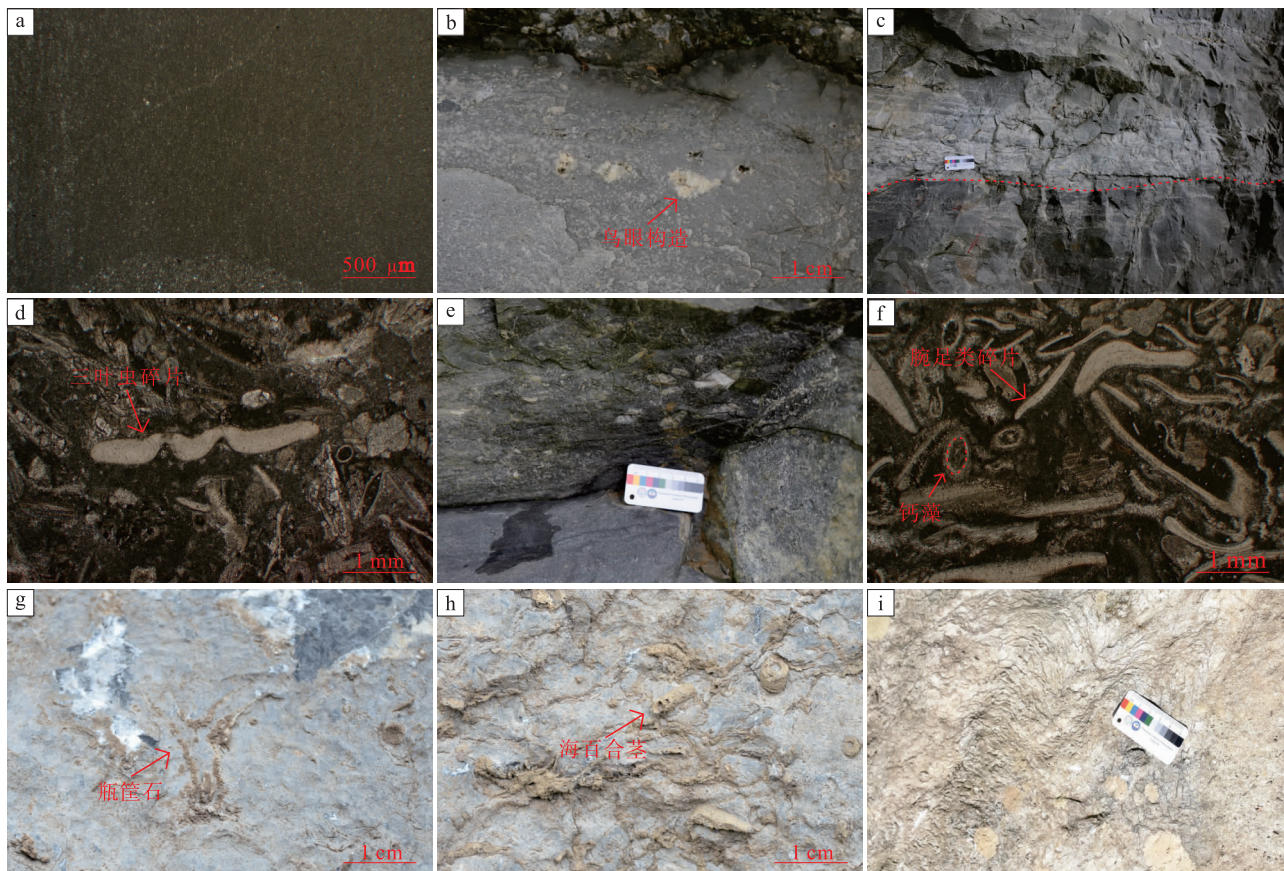
四川盆地下奥陶统桐梓组与红花园组岩石学特征在剖面及钻井间差异显著。习水吼滩剖面桐梓组以厚层一块状粉晶白云岩为主(图 2-a)，发育鸟眼构造(图 2-b)，局部见生屑白云岩及缝合线(图 2-c)，生物化石稀少；红花园组为泥晶生屑灰岩，生物碎屑包括三叶虫、腕足类及钙藻(图 2-d, 2-e, 2-f)。石门杨家坪剖面桐梓组以中一厚层泥晶灰岩为主，夹生屑灰岩；红花园组为泥晶生屑灰岩，含瓶筐石、海百合茎、腕足类及藻类(图 2-g, 2-h, 2-i)，发育交错层理，局部见叠

层构造。

基于 28 口井的岩性统计(图 3)，四川盆地下奥陶统岩性呈现明显区域分异。西部桐梓组以粉晶白云岩为主(占比 70%)，红花园组白云岩含量亦达 67%，其他岩性较少。中部桐梓组白云岩与石灰岩占比相对均衡(分别为 50% 和 5%)，碎屑岩占 26%；红花园组石灰岩升至 12%，白云岩降至 44%。东部桐梓组白云岩占比降至 39%，石灰岩增至 44%；红花园组以颗粒灰岩和生屑灰岩为主，白云岩仅占 5%。南部桐梓组白云岩占 60%，石灰岩占 20%；红花园组石灰岩约占 55%，白云岩占 28%。北部桐梓组白云岩占 60%，碎屑岩占 30%；红花园组碳酸盐岩占 75%，含 25% 陆源碎屑。

2.2 古环境指标

古环境重建是理解沉积演化及其控制机制的基



a—习水吼滩剖面，桐梓组，细晶白云岩，正交偏光；b—习水吼滩剖面，桐梓组，厚层一块状白云岩，见鸟眼构造；c—习水吼滩剖面，桐梓组，厚层一块状白云岩，见缝合线；d—习水吼滩剖面，红花园组，泥晶生屑灰岩，含三叶虫碎片，正交偏光；e—习水吼滩剖面，红花园组，生屑灰岩；f—习水吼滩剖面，红花园组，泥晶生屑灰岩，含三叶虫碎片、腕足类碎片及钙藻，正交偏光；g—石门杨家坪剖面，红花园组，瓶筐石；h—石门杨家坪剖面，红花园组，海百合茎；i—石门杨家坪剖面，红花园组，石灰岩，见叠层构造

图 2 四川盆地下奥陶统碳酸盐岩宏观及微观特征

Fig. 2 Macroscopic and microscopic characteristics of carbonate rocks of the Lower Ordovician in Sichuan Basin

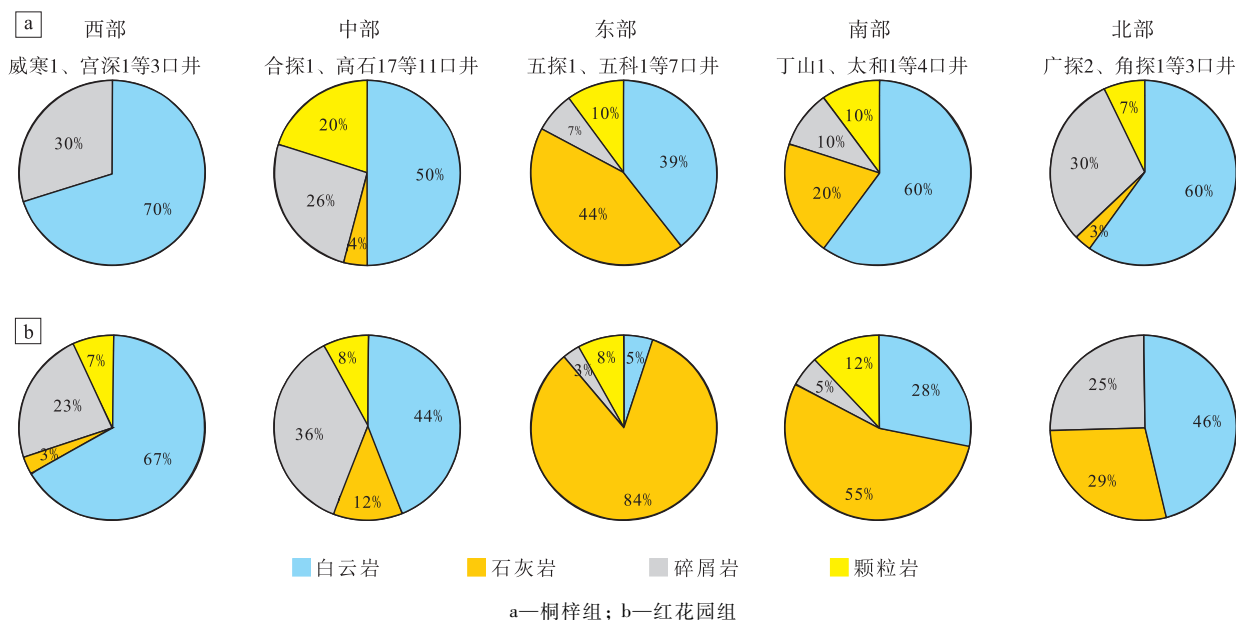


图 3 四川盆地奥陶统各岩性百分含量

Fig. 3 Lithology percentage content of the Lower Ordovician in Sichuan Basin

础 (Fu *et al.*, 2023; 王婷等, 2023; Wang *et al.*, 2023)。通过对碳氧同位素组成、微量元素及稀土元素分析, 可恢复古盐度、氧化还原条件、古水深及古气候演变过程 (熊小辉和肖加飞, 2011; 高红灿等, 2015; 王峰等, 2017; 余平辉等, 2020)。

2.2.1 古水深与海平面

碳、氧同位素分析采用同位素比值质谱法 (IRMS), 使用 DELTA V Advantage 型质谱仪 (编号: SN09017D) 完成。测试过程严格遵循《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法》(SY/T 5238-2019), 并对每批样品使用国际标准物质 (NBS-19、IAEA-CO-1) 进行校准, 以确保数据精度。

碳、氧同位素组成可作为重建古水深及海平面变化的有效指标 (向荣等, 2001; 赵宗举, 2015; Linsley *et al.*, 2019)。桐梓组沉积时期, 习水吼滩剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -0.698‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 均值为 -7.901‰ , 碳、氧同位素呈中等正相关性 ($R^2=0.426$); 石门杨家坪剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -0.573‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 均值为 -8.627‰ , 碳、氧同位素呈弱负相关性 ($R^2=0.272$) (附表 1)。两剖面数据共同指示该时期处于低海平面阶段, 古水深整体较浅, 其中石门杨家坪剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 正偏幅度更大, 反映其水体更浅、水动力条件更强。进入红花园组后, 受特马豆克阶最大海侵事件影响 (孙永超和刘建波, 2017), 海平面显著上升, 古水深增加。习水吼滩剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 均值降

至 -0.966‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 均值降至 -10.121‰ , 碳、氧同位素呈高度正相关性 ($R^2=0.947$) (图 4), $\delta^{18}\text{O}$ 显著负偏指示海侵幅度大、蒸发作用减弱; 石门杨家坪剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -0.749‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 均值为 -8.423‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 负偏幅度相对较小, 水深增加更为缓和。海侵带来的水体稳定与营养输入, 有效促进了三叶虫、腕足类、瓶筐石等生物的繁盛。

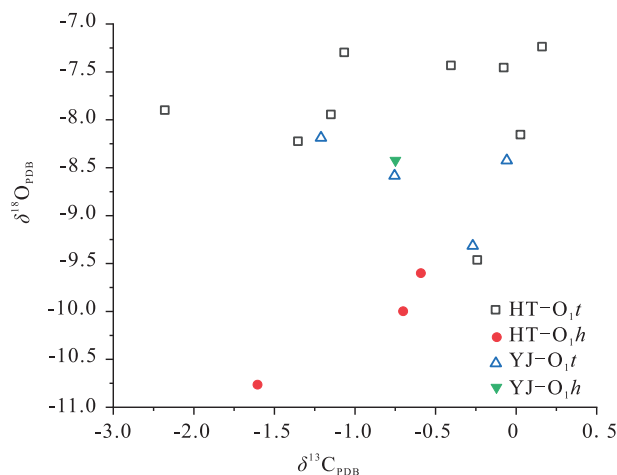


图 4 四川盆地奥陶统碳酸盐岩碳、氧同位素相关性
 Fig. 4 Correlation between carbon and oxygen isotopes of the Lower Ordovician carbonate rocks in Sichuan Basin

2.2.2 古盐度

微量元素及稀土元素分析使用电感耦合等离子

体质谱仪 (ICP-MS 2030) 完成, 样品前处理与测定依据《硅酸盐岩石化学分析方法》系列标准 (GB/T 14506.30-2010) 进行, 分析过程中采用国家标准物质 GBW07107 进行质量监控与数据校准。

Sr/Ba 值与水体盐度呈正相关关系 (范萌萌等, 2019)。桐梓组沉积时期, 习水吼滩剖面 Sr/Ba 值均值达 1.708, 高于正常海水背景值 (现代海洋 Sr/Ba 值通常 <1) (魏巍等, 2021), 指示其处于高盐度环境。

桐梓组习水吼滩剖面 Sr/Ba 均值 1.708, 石门杨家坪剖面为 2.152; 至红花园组, 习水吼滩剖面 Sr/Ba 值整体升至 4.288, 石门杨家坪剖面出现高值 3.53 (附表 1)。红花园组沉积时期 Sr/Ba 值的异常升高主要与生物壳体的富 Sr 效应有关。岩石学观察表明, 该层位富含瓶筐石、腕足类等生物碎屑, 这些壳体在形成过程中优先富集 Sr 元素, 从而提高了沉积物的 Sr/Ba 值; 类似现象也见于石门杨家坪剖面, 其 Sr/Ba 值高达 3.53, 同样与棘皮类、腕足类等生物碎屑的富集密切相关。Iglowski 等 (2018) 对现代极地棘皮动物的研究指出, 骨骼中 Mg/Ca 值和 Sr/Ca 值的分布受生物生理控制显著, 而非单纯受环境因素影响, 表明生物壳体在早期成岩阶段即可显著富集 Sr, 进而削弱 Sr/Ba 值与水体盐度之间的典型相关性。与此同时, $\delta^{18}\text{O}$ 负偏及陆源输入增强指标表明, 四川盆地当时并未出现如局限台地所预期的高盐度环境。因此, 尽管存在局部生物成因的 Sr 异常, 但综合多指标分析显示, 当时水体盐度整体趋于正常。

2.2.3 氧化还原条件

基于 $V/(V+Ni)$ 值和 V/Cr 值分析 (Bennett *et al.*, 2020), 桐梓组沉积时期习水吼滩剖面 $V/(V+Ni)$ 均值 0.113、 V/Cr 均值 0.187, 指示贫氧环境, 而石门杨家坪剖面 $V/(V+Ni)$ 均值 0.493、 V/Cr 均值 0.244, 则呈现氧化条件。进入红花园组后, 受特马豆克阶最大海侵事件影响, 水体混合增强, 两剖面均转为氧化环境 (习水吼滩剖面 $V/(V+Ni)$ 值升至 0.186、 V/Cr 值降至 0.15, 石门杨家坪剖面 $V/(V+Ni)$ 值升至 0.684、 V/Cr 值为 0.171)。

2.2.4 古气候

对稀土元素含量统计表明, 桐梓组 ΣREE 低于北美页岩 (160.12 $\mu\text{g/g}$), 习水吼滩剖面均值为 48.53 $\mu\text{g/g}$, 石门杨家坪剖面为 77.4 $\mu\text{g/g}$; 红花园组中, 习水吼滩 ΣREE 增至 93.85 $\mu\text{g/g}$, 石门杨家坪则降至 36.77 $\mu\text{g/g}$ (附表 2)。轻、重稀土分异明显, 桐梓组 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值 (习水吼滩 12.38, 石门杨家坪 15.49) 普遍高于北美页岩 (7.44), 红花园组该值在习水吼滩升至 15.85, 石门杨家坪为 14.9。 δCe 表现为明显负异常, 桐梓组习水吼滩均值 0.27, 石门杨家坪 0.26 (图 5); 红花园组习水吼滩降至 0.23, 石门杨家坪略升至 0.29, 异常程度减弱。综合古环境指标分析, 桐梓组沉积时期, 习水吼滩剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 均值 -7.901‰ (正偏)、Sr/Ba 均值 1.708, 指示高盐度强蒸发环境, ΣREE 均值 48.53 $\mu\text{g/g}$ 反映陆源输入少、气候干旱; 石门杨家坪剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 均值 -8.627‰ , Sr/Ba 均值 2.152 (受生物富 Sr 影响), ΣREE 均

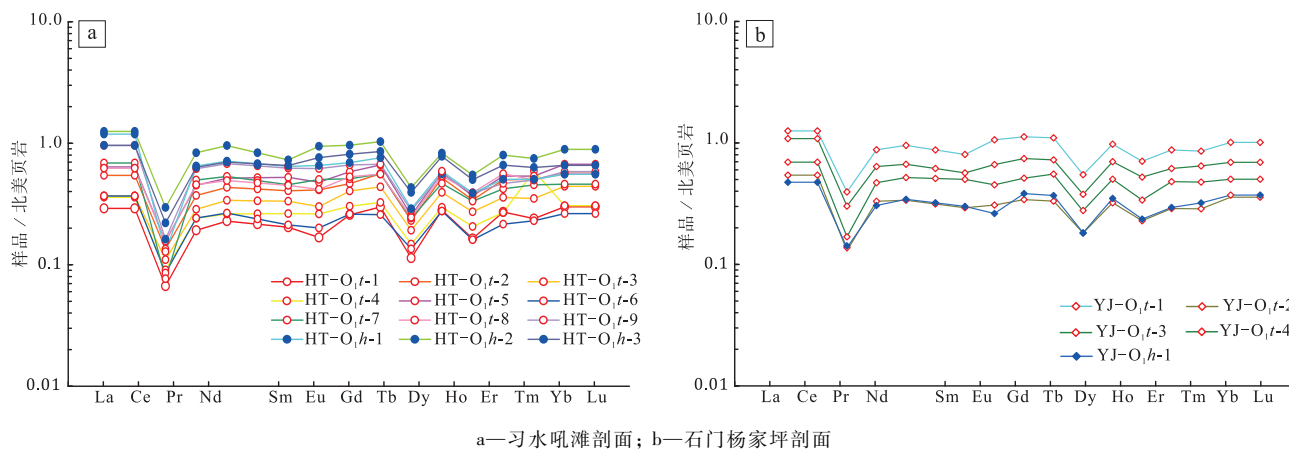


图 5 四川盆地奥陶统稀土元素配分模式

Fig. 5 Distribution pattern of rare earth elements of the Lower Ordovician in Sichuan Basin

值 77.4 $\mu\text{g/g}$, 指示开阔台地背景。至红花园组沉积时期, 习水吼滩 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏至 -10.121‰ (幅度 2.2 ‰), Sr/Ba 升至 4.288, 但盐度因淡水输入及生物富 Sr 效应趋于正常, ΣREE 增至 93.85 $\mu\text{g/g}$ 反映陆源输入增强; 石门杨家坪 $\delta^{18}\text{O}$ 均值 -8.423‰ (负偏 0.5 ‰), Sr/Ba 值为 3.53 (受瓶筐石等生物碎屑富 Sr 影响), ΣREE 降至 36.77 $\mu\text{g/g}$, 生物丰度整体提升, 反映气候由干旱转向湿润。

3 岩相古地理演化

基于岩石学、沉积构造、古生物和地球化学特征, 结合区域构造和海平面变化, 可揭示桐梓组和红花园组的沉积相类型及岩相古地理演化规律。

3.1 沉积相类型

根据野外露头、单井分析及薄片鉴定, 结合古环境分析结果, 下奥陶统沉积相划分为局限台地相和开阔台地相 2 大类, 可进一步识别出台内滩和滩间海 2 个亚相 (表 1)。

3.1.1 局限台地相

局限台地相主要发育于桐梓组, 岩石类型以粉晶白云岩为主, 夹薄层泥质白云岩及少量生屑灰岩, 可识别出台内滩和滩间海亚相。 $\delta^{18}\text{O}$ 均值

-7.901‰ 偏正, 为强蒸发作用; Sr/Ba 值 1.71 和高 Sr 含量为蒸发主导的环境; $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值 0.113 和 δCe 负异常指示为贫氧环境。该时期盆地水体较浅, 受川中古隆起控制, GR 呈叠置低形结构, 发育低能潮缘滩间白云岩, 形成加积或进积白云岩序列。

台内滩亚相以生屑白云岩为特征, 发育交错层理和波痕, 为间接性高能环境, 呈北东—南西向分布。

滩间海亚相分布于台内滩之间的低洼区, 主要为泥质白云岩和粉晶白云岩, 发育毫米级纹层和鸟眼构造, 反映低能潮坪环境。

3.1.2 开阔台地相

开阔台地相主要育于红花园组, 以深灰色—灰黑色颗粒灰岩和生屑灰岩为主, 富含藻类、棘皮动物、腕足类等生物化石, 发育鲕粒结构。测井曲线表现为 GR 值中等偏低, 呈锯齿状特征。 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏至 -10.121‰ , 响应特马豆克阶最大海侵事件, Sr/Ba 值为 4.288, $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值增至 0.186, 指示水体开放的高能环境。

台内滩亚相以颗粒支撑的生屑灰岩和鲕粒灰岩为主, 生物碎屑含量升高, 亮晶方解石胶结物普遍发育, 为波浪和潮汐作用下的高能沉积环境。

滩间海亚相分布于台内滩之间的低洼区域, 以

表 1 四川盆地地下奥陶统沉积相类型及识别特征

Table 1 Sedimentary facies and their identification characteristics of the Lower Ordovician in Sichuan Basin

相类型	岩性	沉积构造	测井响应	地球化学特征	典型井位/剖面
局限台地	台内滩 泥晶白云岩 细晶白云岩 粉晶白云岩 中(粗)晶白云岩 颗粒(质)白云岩	交错层理、波痕、冲刷构造	自然伽马低值(30~50 API)、声波时差高值(50~65 $\mu\text{s}/\text{ft}$)	$\delta^{18}\text{O}$ 偏正($-8\text{‰} \sim -7\text{‰}$)、 Sr/Ba > 1.5、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.2$ 、 ΣREE 较低($< 60 \mu\text{g/g}$)	座 3 井、 五探 1 井、 习水吼滩剖面、 毕节下水剖面
	滩间海 泥质白云岩 泥晶白云岩 细晶白云岩 粉晶白云岩 中(粗)晶白云岩	鸟眼构造、纹层构造、干裂、帐篷构造	自然伽马中高值(60~90 API) 电阻率齿状波动(20~100 $\Omega\cdot\text{m}$) 声波时差偏高(55~65 $\mu\text{s}/\text{ft}$)	δCe 负异常(0.2~0.3)、 Eu 异常不明显(0.8~1.0)、 Sr 含量高(200~500 $\mu\text{g/g}$)	蒙北 1 井、 盘 1 井、 巫溪田坝剖面、 城口厚坪剖面
开阔台地	台内滩 礁石灰岩 叠层石石灰岩 生屑灰岩	交错层理、生物钻孔、生物扰动构造、鲕粒结构	自然伽马极低($< 30 \text{ API}$) 电阻率高阻($> 200 \Omega\cdot\text{m}$) 声波时差低值(45~50 $\mu\text{s}/\text{ft}$)	$\delta^{18}\text{O}$ 负偏($-10\text{‰} \sim -9\text{‰}$)、 Sr/Ba < 1.0、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) > 0.4$ 、 ΣREE 高($> 90 \mu\text{g/g}$)、 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} > 6$	池 7 井、 丁山 1 井、 道真平胜剖面、 石柱漆辽剖面
	滩间海 泥质石灰岩 砂质石灰岩	水平纹层、微波状层理、生物潜穴	自然伽马中等(50~70 API) 电阻率平稳(50~80 $\Omega\cdot\text{m}$)	$\delta^{18}\text{O}$ 负偏($-10\text{‰} \sim -8\text{‰}$)、 Sr/Ba (1.8~2.0)、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ (0.15~0.25)、 ΣREE (80~95 $\mu\text{g/g}$)	建深 1 井、 楼探 1 井、 习水吼滩剖面

灰—深灰色泥晶生屑灰岩为主，夹薄层泥质灰岩，发育水平纹层和微波状层理。

3.2 连井沉积相对比

下奥陶统桐梓组可划分为 OSQ1 与 OSQ2 共 2 个层序，红花园组对应 1 个独立层序 OSQ3。在层序格架内，基于单井沉积相分析与连井对比（图 6），刻画沉积相的平面展布及演化。

在宫深 1 井—楼探 1 井连井剖面上（图 6-a），OSQ1、OSQ2 时期以局限台地为主，仅楼探 1 井为开阔台地；OSQ3 时期，宫深 1 井至自深 1 井为局限台地，盘 1 井至座 3 井过渡为开阔台地，广探 2 井相变为局限台地，五探 1 井至楼探 1 井区则为开阔台地。在角探 1 井—石门杨家坪连井剖面上（图 6-b），OSQ1、OSQ2 时期角探 1 井发育混积潮坪相，向东南至池 7 井、建深 1 井、利 1 井及石门

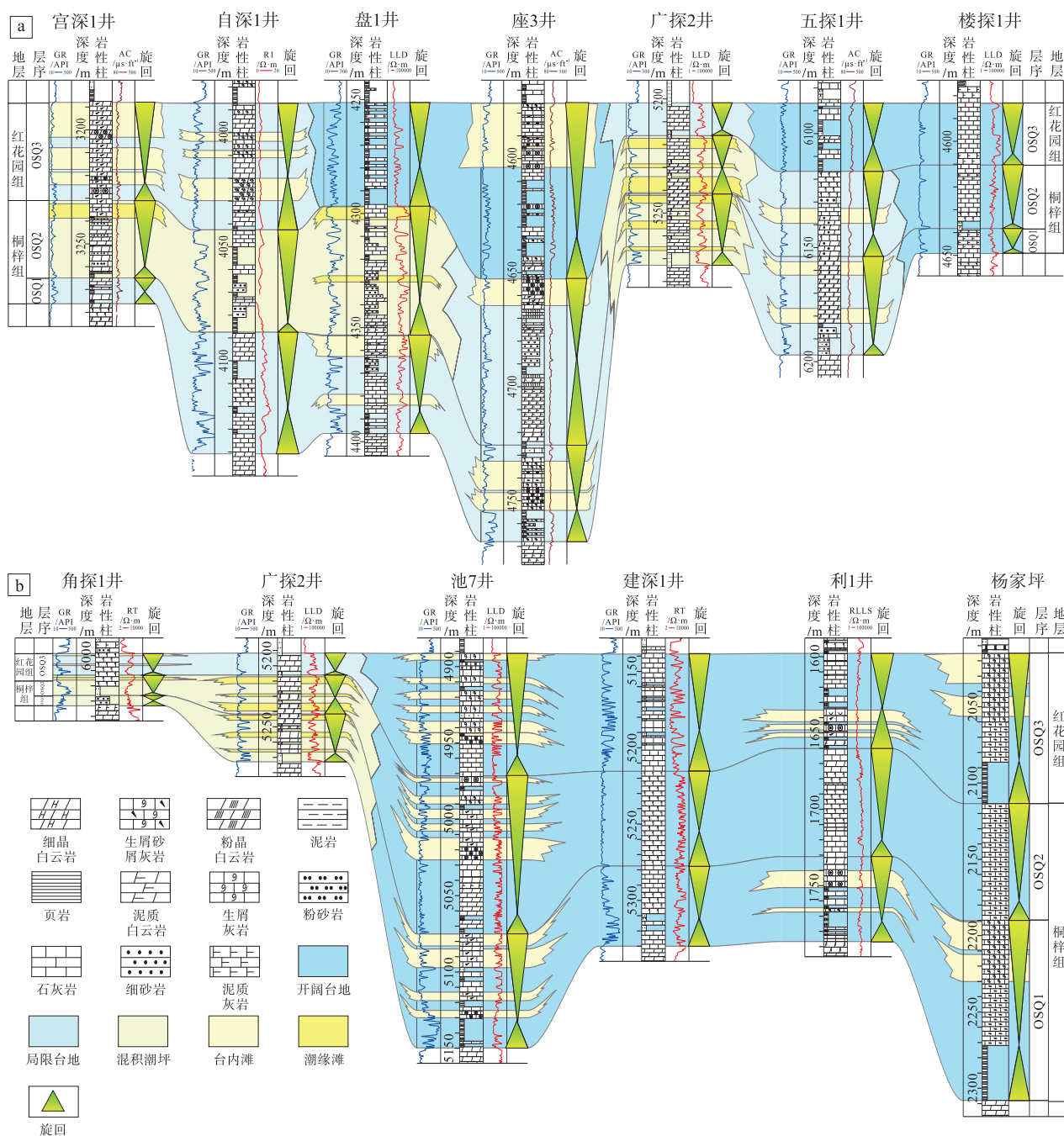


图 6 四川盆地下奥陶统沉积相连井对比（剖面位置见图 1）

Fig. 6 Sedimentary facies correlation of the Lower Ordovician in Sichuan Basin (profile location is shown in Fig. 1)

杨家坪一带均为开阔台地；OSQ3 时期，角探 1 井至广探 2 井转为局限台地，池 7 井至石门杨家坪仍保持开阔台地相。

通过东西和南北 2 个方向的连井沉积相对比，查明了下奥陶统沉积相的时空演化规律。垂向上，呈现从桐梓组局限台地向红花园组开阔台地的连续演化序列；区域上，受川中古隆起控制，西部以白云岩为主，东部石灰岩占比超 90%。

3.3 岩相古地理展布及演化

基于露头观察，本研究采用单因素分析与多因素综合作图法，以层序 OSQ1（桐梓组下段）、OSQ2（桐梓组上段）及 OSQ3（红花园组）为单元编制单因素图件，并结合区域地质资料，完成四川盆地早奥陶世岩相古地理图的编制。共收集 42 条野外剖面 and 20 口钻井数据，选取地层厚度、白云岩含量、石灰岩含量、碎屑岩含量及颗粒岩含量 5 个关键单因素（附表 3），绘制了 OSQ1 时期的系列单因素图及岩相古地理图（图 7-a 至 7-e）。

四川盆地下奥陶统 OSQ1 时期地层厚度呈西薄东厚（图 7-a），川中地区最薄，向东渐增厚。白云岩含量高值区（>80%）主要位于金沙地区（图 7-b），向东逐渐降低，至米仓山前缘一带减少。石灰岩含量在盆地东部普遍高于 60%（图 7-c），川中古隆起附近低于 10%，与白云岩呈互补关系。碎屑岩含量整体较低，仅在剥蚀区、铜仁—怀化地区及谷城栗古庙剖面出现 20%~30% 的高值带（图 7-d）。颗粒岩含量大于 30% 的区域呈条带状展布（图 7-e），局限台地内部普遍低于 20%。

基于 39 条野外剖面 and 24 口钻井数据，对 OSQ2 时期单因素分析（附表 4；图 8-a 至 8-e）。地层厚度仍呈“西薄东厚”格局（图 8-a），川中古隆起较薄，宜昌—五峰地区持续增厚。白云岩含量高值区较 OSQ1 期扩大，覆盖川中古隆起及宣汉—城口地区（图 8-b）；石灰岩分布范围缩小，主体含量 50%~60%（图 8-c），二者互补关系依然存在但格局变化。碎屑岩含量整体较 OSQ1 期上升（图 8-d）。颗粒岩含量普遍降低，高值零星分布，川中古隆起周缘多低于 20%（图 8-e）。

基于 39 条野外剖面 and 22 口钻井数据对 OSQ3 时期的单因素分析（附表 5；图 9-a 至 9-e），地

层厚度整体呈现“西薄东厚”的分布格局（图 9-a），川中古隆起附近厚度普遍小于 50 m。白云岩含量呈现区域性降低（图 9-b）。石灰岩在金沙地区广泛分布，含量普遍高于 80%（图 9-c），白云岩含量和石灰岩含量呈现出互补的关系。碎屑岩含量整体进一步降低（图 9-d），局部存在 15%~20% 的高值带。颗粒岩含量快速升高，达到下奥陶统峰值（图 9-e）。

通过沉积相连井对比及单因素分析，OSQ1 时期，受川中古隆起初始隆升及干旱气候影响，盆地呈现“西高东低”格局，西部发育局限台地，Sr/Ba 均值达 1.71，生物稀少，东部则为开阔台地，石灰岩含量超 60%，颗粒岩呈条带状分布。（图 7-f）。OSQ2 时期，随着古隆起持续隆升与干旱加剧，局限台地范围扩展至最大，蒸发作用增强导致台内滩规模缩小。开阔台地退缩至铜仁—怀化狭窄区域。米仓山前缘陆源输入增强，混积带呈北东向展布（图 8-f）。至 OSQ3 时期，气候转向湿润，东部石灰岩含量超 80%，生物多样性升高，水体氧化条件改善（ $V/(V+Ni)$ 均值 0.186）且 $\delta^{18}O$ 负偏。西部古隆起侧翼白云岩减少，转为薄层石灰岩。米仓山前缘陆源减弱，整体台内滩广布，水体更为开放（图 9-f）。

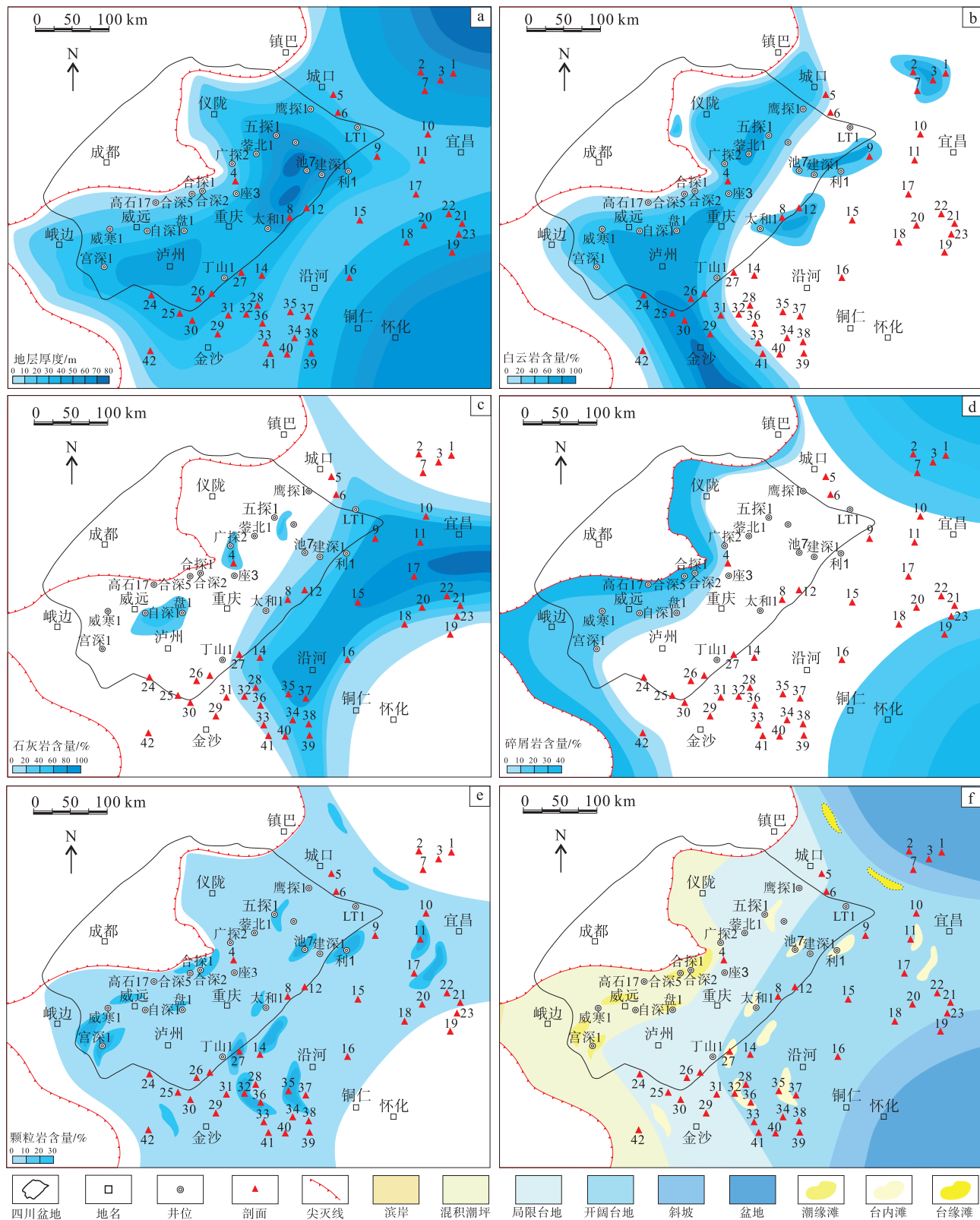
4 讨论

4.1 沉积演化主控因素

四川盆地下奥陶统从桐梓组到红花园组的沉积演化，受构造活动、全球海平面变化及古气候因素的协同控制，形成从局限台地到开阔台地的完整沉积序列。

4.1.1 川中古隆起持续隆升奠定东西向构造沉积分异格局

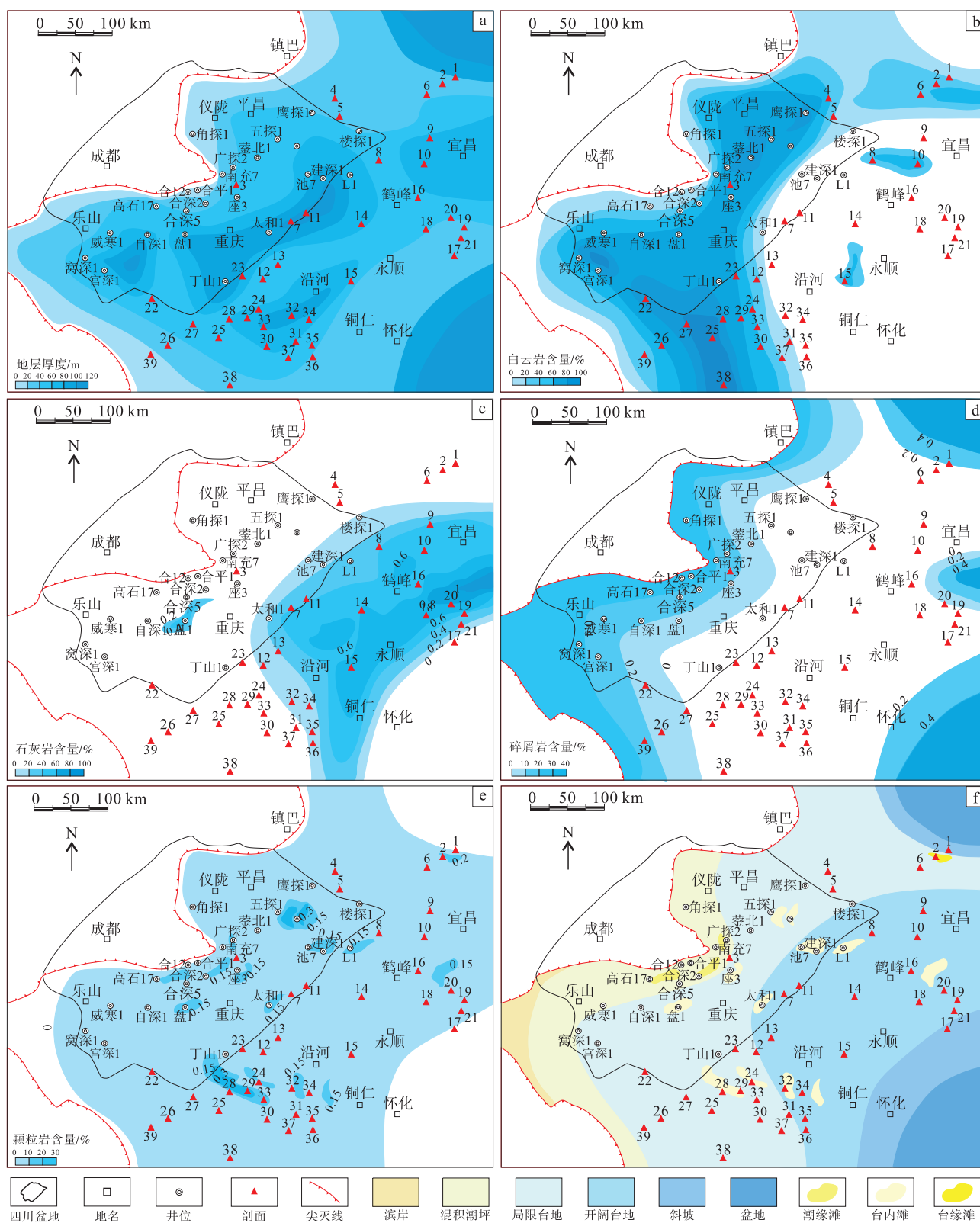
四川盆地早奥陶世的构造沉降呈现显著的东西分异，奠定了“西高东低”的古地理格局。加里东运动早期，川中古隆起持续隆升，沉降速率稳定在 4 m/Ma 以下（以高石 17 井区为代表），长期处于相对高古地貌，发育局限台地相，以潮坪沉积为主，局部见鸟眼构造，Sr/Ba 值较高，反映强蒸发、高盐度环境。东部川东地区（如五探 1 井区）沉降幅度平缓，速率不超过 7 m/Ma（鲁国等，2023），虽持续沉降但幅度有限。桐梓组沉积期，



a—地层厚度等值线图；b—白云岩含量等值线图；c—石灰岩含量等值线图；d—碎屑岩含量等值线图；
e—颗粒岩含量等值线图；f—岩相古地图

图 7 四川盆地 OSQ1 时期单因素图及岩相古地图

Fig. 7 Single factor and lithofacies palaeogeographic map of OSQ1 period in Sichuan Basin

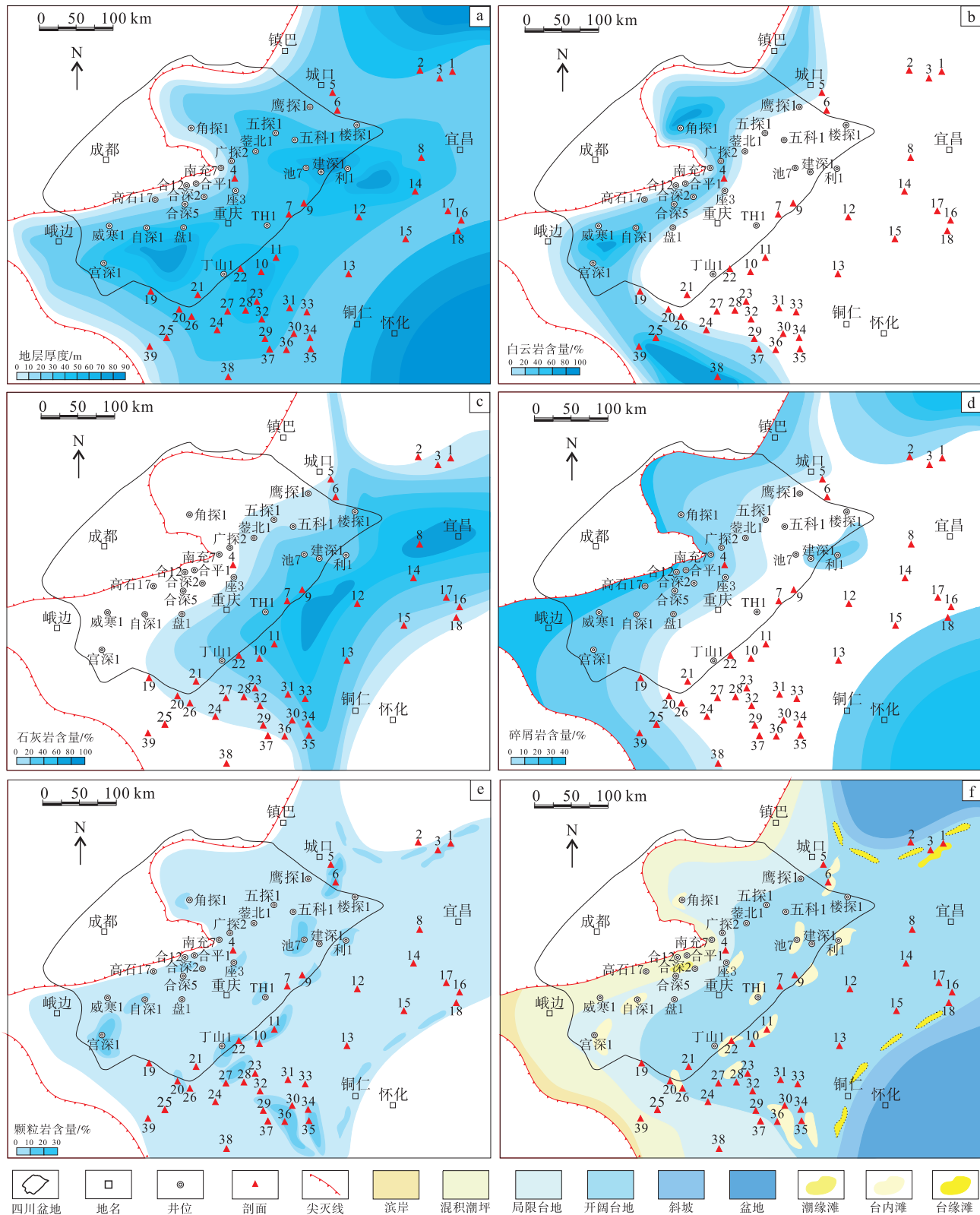


a—地层厚度等值线图；b—白云岩含量等值线图；c—石灰岩含量等值线图；d—碎屑岩含量等值线图；

e—颗粒岩含量等值线图；f—岩相古地理图

图 8 四川盆地 OSQ2 时期单因素图及岩相古地理图

Fig. 8 Single factor and lithofacies palaeogeographic map of OSQ2 period in Sichuan Basin



a—地层厚度等值线图；b—白云岩含量等值线图；c—石灰岩含量等值线图；d—碎屑岩含量等值线图；
e—颗粒岩含量等值线图；f—岩相古地理图

图 9 四川盆地 OSQ3 时期单因素图及岩相古地理图

Fig. 9 Single factor and lithofacies palaeogeographic map of OSQ3 period in Sichuan Basin

相带呈现西侧混积潮坪—局限台地、东侧开阔台地的分异；红花园组沉积期，川中与川东的沉降差（约 5~10 m/Ma）持续存在，古隆起对相带的控制依然显著。相比之下，米仓山—大巴山地区受寒武纪末期构造运动影响发生剥蚀，导致下奥陶统缺失（如马深 1 井），与川中、川东的连续沉积形成鲜明对比。这种由构造沉降速率梯度控制的地貌分异，是下奥陶统相带分布的主要驱动因素（图 10）。

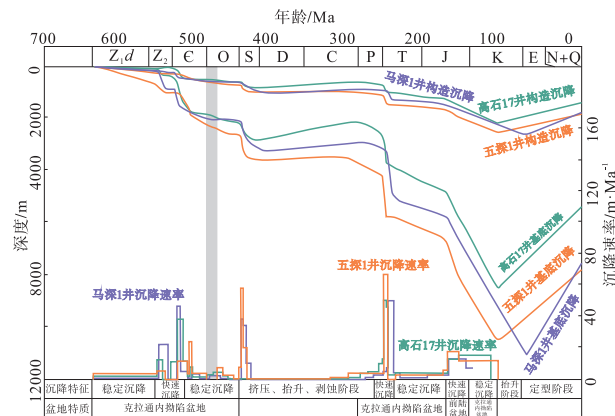


图 10 四川盆地高石 17 井、五探 1 井、马深 1 井构造沉降史（据鲁国等，2023；有修改）

Fig. 10 Structural subsidence history of Well Gaoshi 17, Well Wutan 1 and Well Mashen 1 in Sichuan Basin (modified from Lu *et al.*, 2023)

4.1.2 全球海平面上升驱动局限台地开放化转型

全球海平面变化是沉积演化的关键驱动因素，早奥陶世海平面经历从桐梓组低位到红花园组高位的

变化。桐梓组时期（OSQ1、OSQ2）海平面较低，强化了构造分异效应，川中古隆起周缘大面积暴露，形成潮上带环境并发育准同生白云岩， $\delta^{18}\text{O}$ 正偏反映强烈蒸发。受干旱气候和地形阻隔，陆源物质难以远距离输送，导致局限台地相广泛发育。进入红花园组（OSQ3），海侵事件使习水吼滩剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏至 -10.1‰，标志盆地转为开阔台地环境，水体循环增强、氧化条件改善，同时陆源营养输入增加，驱动沉积环境从高盐贫氧向正常盐度富氧转变。此阶段，习水吼滩、宜昌黄花场及兴山古洞口等剖面生物化石丰富度上升（孙永超和刘建波，2017），三叶虫多样性提高，腕足类也出现辐射演化，反映了海侵对生物繁盛的促进作用。特马豆克阶 1c 早期作为最大海侵事件，在习水吼滩剖面对应层位中，底栖

与浮游生物组合呈现协同繁盛特征。

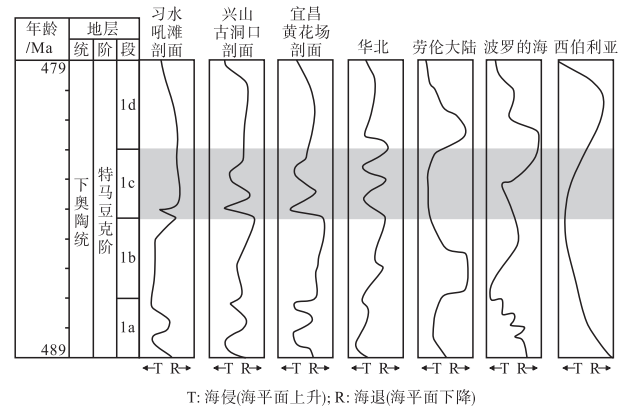


图 11 特马豆克阶上扬子区海平面变化与其他陆块海平面变化曲线的比较（据孙永超和刘建波，2017；有修改）

Fig. 11 Comparison of sea level changes in the Upper Yangtze region and other landmasses during the Tremadocian period (modified from Sun and Liu, 2017)

从全球对比来看，同期海平面上升事件在多个古陆均有记录（图 11）。劳伦大陆海侵使潮坪—局限环境转为开阔陆棚，水体能量与氧含量升高，促使生物碎屑增加、风暴沉积发育，并提升三叶虫和笔石多样性（Holland and Patzkowsky, 1997；Miller *et al.*, 2014）。波罗的海地区特马豆克阶 1c 海侵事件以碳酸盐岩—页岩旋回为界面，记录了从局限向开阔环境的转变，介形虫组合被三叶虫—腕足类群落取代（Nielsen, 2004）。西伯利亚同期黑色页岩则指示水体分层加剧、底层缺氧，反而促进了海绵—笔石组合的繁盛（Kanygin *et al.*, 2010）。上述

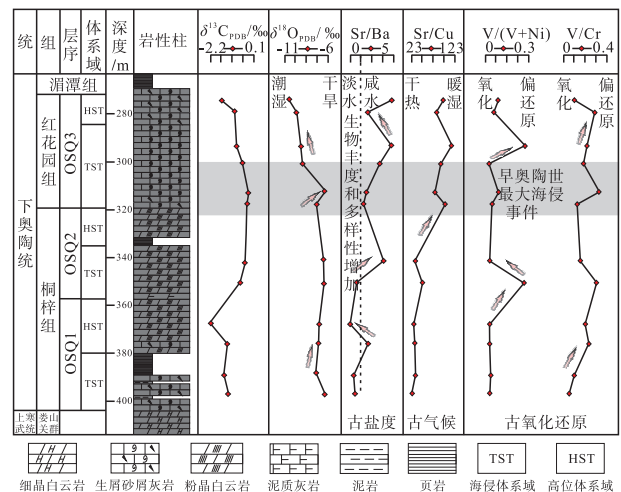


图 12 习水吼滩剖面元素比值变化特征

Fig. 12 Variation characteristics of element ratio in Xishui Houtan section

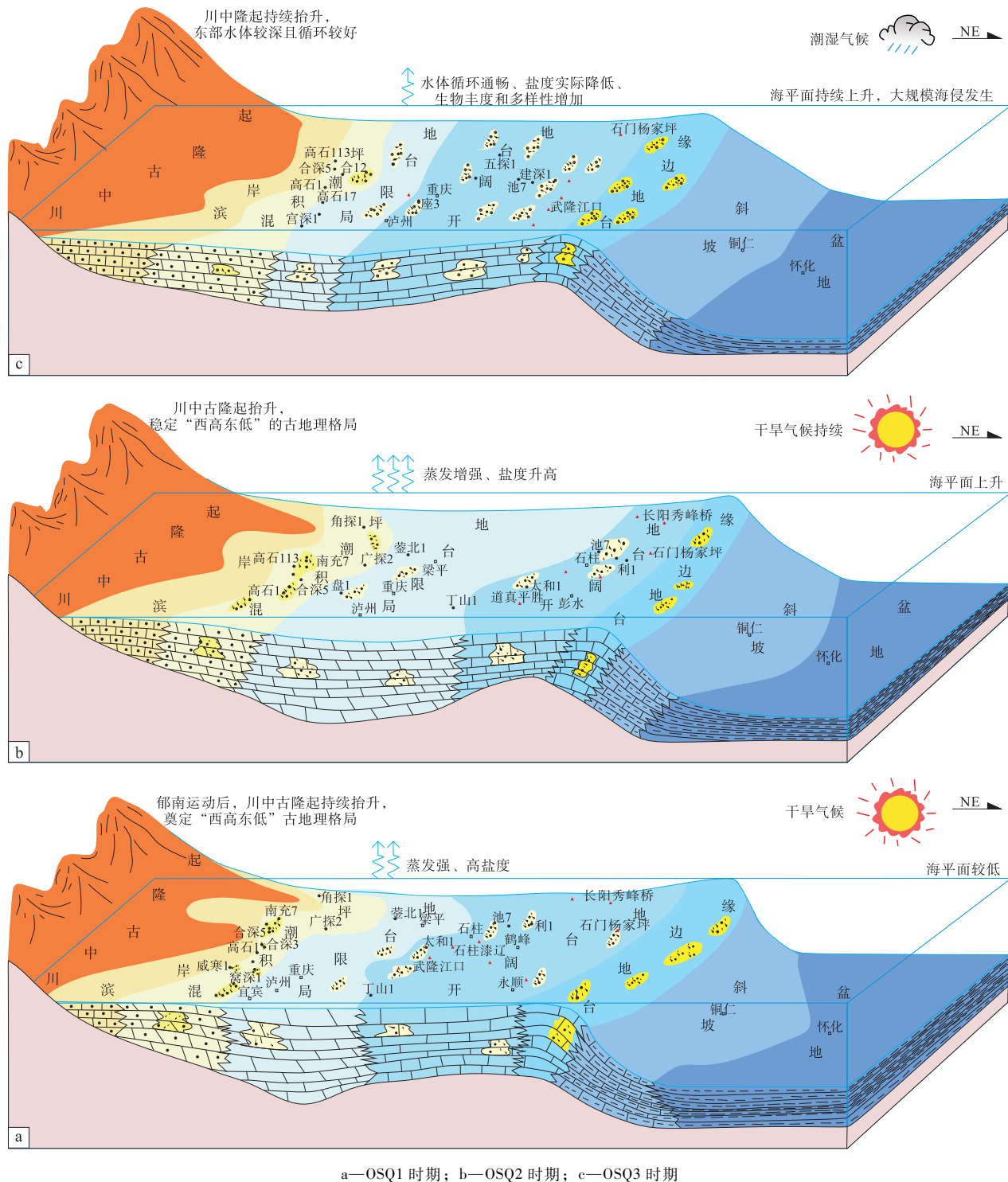


图 13 四川盆地地下奥陶统沉积模式

Fig. 13 Sedimentary model of the Lower Ordovician in Sichuan Basin

案例表明，该时期海侵一方面通过扩展陆表海、改善营养供给为生物提供广阔生态空间，另一方面通过改变沉积与化学环境驱动生物群落重组与多样化，对沉积格局与生物演化产生深远影响。

桐梓组低水位期盆地封闭性强、蒸发显著，发育局限台地高盐贫氧环境；红花园组高水位期海平面上升改善了盆地连通性与水体循环，氧化条件增强，同时陆源营养输入增加，实现了向开阔台地正

常盐度富氧环境的转变。劳伦大陆、波罗的海和西伯利亚等古陆均表现出相似的沉积—生物协同演化模式,证实早奥陶世海侵事件对生物圈演化的全球性控制作用。

4.1.3 干旱—湿润古气候转变调控蒸发—陆源输入与生物响应

古气候通过调控蒸发强度、风化作用及生物活动,深刻影响沉积过程 (Yuan *et al.*, 2022)。早奥陶世气候从桐梓组干旱向红花园组湿润转变,在盆地沉积记录中表现明显(图 12)。桐梓组(OSQ1、OSQ2)气候干旱,蒸发强烈,局限台地盐度持续升高,为准同生粉晶白云岩的形成提供条件(黄昊源等, 2020); ΣREE 均值仅 $48.53 \mu\text{g/g}$, 陆源输入受限,叠加弱循环形成贫氧环境,生物化石稀少。红花园组(OSQ3)气候湿润,蒸发减弱、淡水输入增加,铜仁—怀化地区陆源输入增强,生物丰度和多样性显著提升,瓶筐石礁与台内滩广泛发育,生物碎屑含量超 40%,三叶虫、腕足类等底栖生物繁盛。古气候通过调控蒸发与陆源输入,驱动了从桐梓组向红花园组的沉积转变及生物多样性演化,是构造—海平面—气候协同控制体系的关键环节。

4.2 沉积演化模式

基于沉积相分析、古地理重建及主控因素研究,建立下奥陶统构造—海平面—气候动态耦合驱动的演化模式(图 13)。

OSQ1 时期,海平面较低,加里东早期川中古隆起持续隆升(汪泽成等, 2023),形成“西高东低”格局。沉积环境以强蒸发、高盐度为特征,水体闭塞、氧化性较弱, Sr/Ba 值及 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值偏低,盆地大部发育白云岩及鸟眼构造(图 2-b),东部开始出现开阔台地雏形(图 13-a)。OSQ2 时期,古隆起持续隆升稳定了古地理格局,干旱气候强化使局限台地相向东大幅扩张。海平面仍处低位,蒸发作用较 OSQ1 更强,盐度进一步升高,广泛发育厚层粉晶白云岩,台内滩亚相缩小。东部开阔台地退缩至石柱—宜昌以南,北部米仓山前缘陆源输入激增,混积潮坪相扩大(图 13-b)。OSQ3 时期,特马豆克阶最大海侵事件主导,海平面急剧上升,气候转向湿润,盆地环境发生根本转变,开阔台地相取代局限台地成为主体,北部陆源输入减弱、混积潮坪缩小,水体循

环通畅,盐度趋近正常,氧化性改善,三叶虫、腕足类等生物碎屑丰富,瓶筐石礁与鲕粒广泛发育,生物多样性爆发(图 13-c)。

5 结论

1) 四川盆地地下奥陶统桐梓组和红花园组的沉积环境经历了转变。桐梓组以高 Sr/Ba 值(均值 1.708)、低 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值(均值 0.113)和低 ΣREE 含量(均值 $48.53 \mu\text{g/g}$)为特征,指示高盐度、贫氧环境;红花园组 Sr/Ba 值因生物富 Sr 效应而升高(均值 4.288)、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值上升(均值 0.186)、 ΣREE 含量增加(均值 $93.85 \mu\text{g/g}$),且伴随 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏(幅度达 2.2‰),表明受特马豆克阶最大海侵事件影响,沉积环境转变为盐度正常、氧化性增强的开阔环境。

2) 四川盆地地下奥陶统桐梓组和红花园组主要发育局限台地相和开阔台地相。桐梓组受川中古隆起控制,形成“西高东低”的古地理格局,西部以局限台地(粉晶白云岩为主)占主导,东部局部发育开阔台地(石灰岩占比 >60%);红花园组因海侵范围扩大,台内滩广泛发育,石灰岩占比超过 80%,沉积环境整体开放化。

3) 四川盆地沉积演化受构造—海平面—气候动态耦合控制,三者协同作用控制了从局限台地向开阔台地的完整演化模式,为四川盆地地下奥陶统油气勘探集层预测提供了地质依据。川中古隆起持续抬升奠定“西高东低”格局,主导了桐梓组西侧白云岩发育、东侧石灰岩少量出现的沉积分异。早奥陶世海平面上升是环境转变的关键驱动力,海侵导致 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏、水体连通性增强及氧化条件改善。气候从干旱向湿润转变,通过调控蒸发强度与陆源输入,推动盐度降低和生物多样性升高。

附件: 本文附件(附表 1 至附表 5)详见古地理学报官网(www.gdxb.cn)和中国知网(www.cnki.net)。

参考文献 (References)

- 陈涛,李智武,李金玺,童旭,王自剑,蔡鸿燕,袁梦雨. 2023. 川中—川西北加里东期古隆起对比研究. 沉积与特提斯地质, 43(4): 675–687. [Chen T, Li Z W, Li J X, Tong K, Wang Z J, Cai H Y, Yuan M Y. 2023. A comparative study of the central Sichuan paleo-uplift and the northwest Sichuan paleo-uplift during Caledonian peri-

- od. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(4): 675-687]
- 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 康博, 李文厚, 张卫国. 2019. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义. *西北大学学报(自然科学版)*, 49(4): 633-642. [Fan M M, Bu J, Zhao X Y, Kang B, Li W H, Zhang W G. 2019. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 49(4): 633-642]
- 高红灿, 郑荣才, 肖应凯, 孟凡巍, 陈发亮, 白工, 栾艳春, 谭先锋, 施玉娥. 2015. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组盐岩成因: 来自沉积学和地球化学的证据. *石油学报*, 36(1): 19-32. [Gao H C, Zheng R C, Xiao Y K, Meng F W, Chen F L, Bai G, Luan Y C, Tan X F, Shi Y E. 2015. Origin of the salt rock of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu sag, Bohai Bay Basin: evidences from sedimentology and geochemistry. *Acta Petrolei Sinica*, 36(1): 19-32]
- 郭炎. 2021. 四川盆地及周缘早奥陶世岩相古地理研究. 成都理工大学硕士学位论文. [Guo Y. 2021. Study on lithofacies and palaeogeography of Early Ordovician in Sichuan Basin and its margins. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 郝彬, 刘伟, 汪泽成, 徐安娜, 姜华, 黄士鹏. 2015. 四川盆地奥陶统混合沉积特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 42(5): 579-588. [Hao B, Liu W, Wang Z C, Xu A N, Jiang H, Huang S P. 2015. Mixed sedimentary characteristics of Lower Ordovician in Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 42(5): 579-588]
- 胡华蕊, 邢凤存, 侯明才, 段金宝, 张殿伟. 2019. 上扬子奥陶纪层序岩相古地理重建及油气勘探启示. *地球科学*, 44(3): 798-809. [Hu H R, Xing F C, Hou M C, Duan J B, Zhang D W. 2019. Ordovician sequence and lithofacies paleogeography reconstruction in Upper Yangtze Region and its implications for oil and gas exploration. *Earth Science*, 44(3): 798-809]
- 黄昊源, 田亚铭, 曾韬, 王良军, 施泽进, 李文杰. 2020. 川南地区下奥陶统桐梓组白云岩特征及成因分析. *矿物岩石*, 40(2): 92-103. [Huang H Y, Tian Y M, Zeng T, Wang L J, Shi Z J, Li W J. 2020. Characteristics and genesis of Lower Ordovician Tongzi Formation dolomite in southern Sichuan Basin. *Mineralogy and Petrology*, 40(2): 92-103]
- 李皎, 何登发, 梅庆华. 2015. 四川盆地及邻区奥陶纪构造-沉积环境与原型盆地演化. *石油学报*, 36(4): 427-445. [Li J, He D F, Mei Q H. 2015. Tectonic-depositional environment and proto-type basins evolution of the Ordovician in Sichuan Basin and adjacent areas. *Acta Petrolei Sinica*, 36(4): 427-445]
- 李文杰, 施泽进, 胡东风, 田亚铭, 王勇, 王沧, 肖海龙, 陈钰桦, 谭谦. 2024. 四川盆地东南部下奥陶统桐梓组白云岩储层特征与成因机制. *天然气工业*, 44(12): 34-49. [Li W J, Shi Z J, Hu D F, Tian Y M, Wang Y, Wang C, Xiao H L, Chen Y H, Tan Q. 2024. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of the Lower Ordovician Tongzi Formation dolostone in the southeastern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 44(12): 34-49]
- 林良彪, 余瑜, 黄棋琴, 石和. 2017. 川北旺苍地区奥陶系地球化学特征及沉积环境分析. *岩石学报*, 33(4): 1272-1284. [Lin L B, Yu Y, Huang Q C, Shi H. 2017. The geochemical characteristics and sedimentary environment analysis of Ordovician in Wangcang region, northern Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1272-1284]
- 刘树根, 邓宾, 李智武, 孙玮. 2011. 盆山结构与油气分布: 以四川盆地为例. *岩石学报*, 27(3): 621-635. [Liu S G, Deng B, Li Z W, Sun W. 2011. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: a case study from Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 621-635]
- 刘伟, 洪海涛, 徐安娜, 姜华, 石书缘. 2017. 四川盆地奥陶系岩相古地理与勘探潜力. *海相油气地质*, 22(4): 1-10. [Liu W, Hong H T, Xu A N, Jiang H, Shi S Y. 2017. Lithofacies paleogeography and exploration potential of Ordovician in Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(4): 1-10]
- 鲁国, 何登发, 开百泽. 2023. 四川盆地构造沉降特征及成因机制分析. *地质科学*, 58(1): 86-104. [Lu G, He D F, Kai B Z. 2023. Tectonic subsidence characteristics of Sichuan Basin and its enlightenment to basin genesis. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 58(1): 86-104]
- 孙永超, 刘建波. 2017. 华南上扬子区奥陶纪特马豆克阶的海平面变化. *北京大学学报(自然科学版)*, 53(1): 66-80. [Sun Y C, Liu J B. 2017. Sea-level fluctuations in the tremadocian of the Ordovician in the Upper Yangtze Region of South China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 53(1): 66-80]
- 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 李元昊, 田景春, 李士祥, 尤靖茜. 2017. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义. *沉积学报*, 35(6): 1265-1273. [Wang F, Liu X C, Deng X Q, Li Y H, Tian J C, Li S X, You J Q. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1265-1273]
- 王婷, 张航, 孙有斌. 2023. 渭河盆地南缘早更新世风成相和湖相沉积环境演化. *地质科技通报*, 42(6): 95-105. [Wang T, Zhang H, Sun Y B. 2023. Sedimentary evolution revealed by aeolian and lacustrine depositions in the southern margin of the Weihe Basin during the Early Pleistocene. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(6): 95-105]
- 汪泽成, 谢武仁, 姜华, 苏旺, 黄士鹏, 谷明峰, 马石玉, 施亦做, 江青春. 2023. 四川盆地加里东期构造运动幕次及油气地质意义. *海相油气地质*, 28(4): 349-359. [Wang Z C, Xie W R, Jiang H, Su W, Huang S P, Gu M F, Ma S Y, Shi Y Z, Jiang Q C. 2023. Episodes of Caledonian movement and their significance for hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 28(4): 349-359]
- 魏巍, Thomas J Algeo, 陆永潮, 刘惠民, 张守鹏, 张靖宇, 杜远生. 2021. 古盐度指标与渤海湾盆地古近系海侵事件初探. *沉积学报*, 39(3): 571-592. [Wei W, Algeo T J, Lu Y C, Liu H M, Zhang S P, Zhang J Y, Du Y S. 2021. Paleosalinity proxies and marine incursions into the Paleogene Bohai Bay Basin Lake system, northeastern China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(3): 571-592]
- 向荣, 李铁刚, 阎军. 2001. 冲绳海槽表层沉积物中浮游有孔虫壳体的氧同位素分布特征及其影响因素. *海洋地质与第四纪地质*, 21(3): 11-16. [Xiang R, Li T G, Yan J. 2001. Oxygen isotope distribution characteristics and influencing factors of planktonic foraminiferal tests in surface deposits of the Okinawa trough. *Marine*

- Geology & Quaternary Geology, 21(3): 11–16]
- 谢环羽, 赵靖舟, 王培玺, 谢武仁, 杨雨. 2019. 中—上扬子地区奥陶系层序地层格架. 石油学报, 40(10): 1202–1222. [Xie H Y, Zhao J Z, Wang P X, Xie W R, Yang Y. 2019. Ordovician sequence stratigraphic framework in the Middle–Upper Yangtze area. Acta Petrolei Sinica, 40(10): 1202–1222]
- 熊小辉, 肖加飞. 2011. 沉积环境的地球化学示踪. 地球与环境, 39(3): 405–414. [Xiong X H, Xiao J F. 2011. Geochemical indicators of sedimentary environments: a summary. Earth and Environment, 39(3): 405–414]
- 颜宇豪, 陈安清, 张本健, 杨欧文, 张玺华, 周刚, 杨帅, 孙诗, 陈洪德. 2024. 四川盆地奥陶纪沉积体系演化与古地理格局重建. 沉积与特提斯地质, 44(3): 600–612. [Yan Y H, Chen A Q, Zhang B J, Yang O W, Zhang X H, Zhou G, Yang S, Sun S, Chen H D. 2024. Evolution of the Ordovician sedimentary system and paleogeographic reconstruction in the Sichuan Basin, China. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(3): 600–612]
- 杨威, 谢武仁, 魏国齐, 刘满仓, 曾富英, 谢增业, 金惠. 2012. 四川盆地寒武纪—奥陶纪层序岩相古地理、有利储层展布与勘探区带. 石油学报, 33(S2): 21–34. [Yang W, Xie W R, Wei G Q, Liu M C, Zeng F Y, Xie Z Y, Jin H. 2012. Sequence lithofacies paleogeography, favorable reservoir distribution and exploration zones of the Cambrian and Ordovician in Sichuan Basin, China. Acta Petrolei Sinica, 33(S2): 21–34]
- 余平辉, 马锦龙, 廖建波, 李志勇, 邸俊. 2020. 柴达木盆地昆北地区路乐河组/下干柴沟组泥岩地层地球化学特征及古环境意义. 干旱区地理, 43(3): 679–686. [Yu P H, Ma J L, Liao J B, Li Z Y, Di J. 2020. Geochemistry and paleoenvironment significance of Lulehe Formation/Xiaganchaigou Formation located in the north area of Qaidam Basin. Arid Land Geography, 43(3): 679–686]
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 施炜. 2011. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造. 中国地质, 38(2): 233–250. [Zhang Y Q, Dong S W, Li J H, Shi W. 2011. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan Basin. Geology in China, 38(2): 233–250]
- 赵凯莉, 田亚铭, 曾韬, 李文杰, 夏文谦, 张慧. 2022. 四川盆地地下奥陶统碳酸盐岩碳氧同位素特征及其地质意义. 矿物岩石, 42(1): 68–80. [Zhao K L, Tian Y M, Zeng T, Li W J, Xia W Q, Zhang H. 2022. Carbon and oxygen isotopic characteristics of Lower Ordovician carbonate rocks in Sichuan Basin and their geological significance. Mineralogy and Petrology, 42(1): 68–80]
- 赵宗举. 2015. 全球海平面变化指标及海相构造层序研究方法: 以塔里木盆地奥陶系为例. 石油学报, 36(3): 262–273. [Zhao Z J. 2015. Indicators of global sea-level change and research methods of marine tectonic sequences: take Ordovician of Tarim Basin as an example. Acta Petrolei Sinica, 36(3): 262–273]
- 钟韬. 2009. 黔中隆起及邻区下奥陶统礁滩相储层特征与分布研究. 成都理工大学硕士学位论文. [Zhong T. 2009. Study on characteristics and distribution of reef flat reservoirs of Lower Ordovician in Qianzhong uplift and its adjacent areas. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 朱传庆, 徐明, 单竞男, 袁玉松, 赵永庆, 胡圣标. 2009. 利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量. 中国地质, 36(6): 1268–1277. [Zhu C Q, Xu M, Shan J N, Yuan Y S, Zhao Y Q, Hu S B. 2009. Quantifying the denudations of major tectonic events in Sichuan Basin: constrained by the paleothermal records. Geology in China, 36(6): 1268–1277]
- Bennett W W, Canfield D E. 2020. Redox-sensitive trace metals as paleoredox proxies: a review and analysis of data from modern sediments. Earth-Science Reviews, 204: 103175.
- Fu Z B, Zeng J W, Gu Y S, Li Y, Liu H Y, Rehman H U, Li Y N. 2023. Holocene coastal sedimentary evolution and neolithic human adaption in response to sea level changes in the Palaeo-Taihu valley, East China. Quaternary Science Reviews, 310: 108029.
- Holland S M, Patzkowsky M E. 1997. Distal orogenic effects on peripheral bulge sedimentation: Middle and Upper Ordovician of the Nashville dome. Journal of Sedimentary Research, 67(2): 250–263.
- Hu C L, Qin T Y, Ma J H, Han C C, Wang X L. 2023. Paleo-trade wind directions over the Yangtze carbonate platform during the Cambrian–Ordovician, Southern China. Geological Magazine, 160: 1160–1176.
- Iglikowska A, Borszcz T, Drewnik A, Grabowska M, Humphreys-Williams E, Kedra M, Krzemińska M, Piwoni-Piórewicz A, Kukliński P. 2018. Mg and Sr in Arctic echinoderm calcite: nature or nurture? Journal of Marine Systems, 180: 279–288.
- Kane O I, Hu M Y, Cai Q S, Deng Q J, Yang W J, Zuo M T. 2023. Sedimentary facies, lithofacies paleogeography, and an evaluation of the Ordovician sequences in the Sichuan Basin, southwest China. Marine and Petroleum Geology, 149: 106096.
- Kanygin A, Dronov A, Timokhin A, Gonta T. 2010. Depositional sequences and palaeoceanographic change in the Ordovician of the Siberian craton. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 296: 285–296.
- Linsley B K, Dunbar R B, Dassié E P, Tangri N, Wu H C, Brenner L D, Wellington G M. 2019. Coral carbon isotope sensitivity to growth rate and water depth with paleo-sea level implications. Nature Communications, 10: 2056.
- Miller J F, Evans K R, Freeman R L, Ripperdan R L, Taylor J F. 2014. Sequence-stratigraphic framework of the Ordovician of Laurentia and its petroleum potential. AAPG Bulletin, 98(9): 1705–1732.
- Nielsen A T. 2004. 10. Ordovician Sea Level Changes: a Baltoscandian Perspective. In: Webby B D, Paris F, Droser M L, Percival I G (eds). The Great Ordovician Biodiversification Event. London: Geological Society: 107–124.
- Wang X L, Algeo T J, Li C, Zhu M Y. 2023. Spatial pattern of marine oxygenation set by tectonic and ecological drivers over the Phanerozoic. Nature Geoscience, 16(11): 1020–1026.
- Yuan C S, Liu S A, Chen J T, Fang L H. 2022. Zinc isotopic evidence for enhanced continental weathering and organic carbon burial during the Late Cambrian SPICE event. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 608: 111302.

(责任编辑 王绍华)