

# 川北地区旺 1 井灯影组四段元素地球化学特征 及其古环境意义\*

周 刚<sup>1</sup> 张本健<sup>1</sup> 阎泽昊<sup>2</sup> 马华灵<sup>3</sup> 严 威<sup>1</sup> 李 琦<sup>2</sup>  
钟 原<sup>1</sup> 王文之<sup>1</sup> 张 亚<sup>1</sup> 张自力<sup>1,2</sup> 兰才俊<sup>1</sup>

1 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

2 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

3 中国石油西南油气田分公司, 四川成都 610051

**摘 要** 震旦系灯影组是四川盆地深层-超深层油气勘探的重要层系, 其中微生物丘滩体是关键储集体, 但丘滩体快速建造的控制因素尚不明确, 制约了有利储集层预测。本研究基于川北地区旺 1 井灯影组四段(简称“灯四段”)全取心资料, 结合薄片观察、地球化学测试等分析手段, 对灯四段开展沉积学与地球化学研究, 揭示其岩性特征、古环境演化及其耦合关系。结果表明: (1) 灯四段以台地相碳酸盐岩为主, 主要岩性为微生物白云岩, 自下而上可分为 4 段, 其中 DS1 和 DS4 段富藻, DS2 段贫藻, DS3 段以厚层砾屑白云岩为特征; (2) 灯四段沉积时期, 古水深演化表现为低位震荡(DS1)→快速上升(DS2)→快速下降(DS3)→整体下降(DS4)的趋势, 气候整体湿冷, 仅在 DS1 段沉积中后期和 DS3 段沉积初期偏干热; (3) 在正向古地貌背景下, 当古水深增长速率与微生物丘建造速率相当且气候温暖时, 微生物丘快速发育, 而古水深快速下降则导致丘滩两侧发育砾屑白云岩。综上, 旺 1 井灯四段顶部和中下部具有形成规模丘滩的古环境背景, 对其开展古地貌分析、追踪论证有利丘滩体分布是进一步勘探的基础。

**关键词** 地球化学特征 沉积环境 灯影组 四川盆地

**第一作者简介** 周刚, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事油气地质综合研究工作。E-mail: zhougang29@petrochina.com.cn。

**通讯作者简介** 阎泽昊, 男, 1998 年生, 博士生, 主要从事碳酸盐岩综合研究及勘探开发。E-mail: Yan\_Zehao@email.cugb.edu.cn。

中图分类号: P595 文献标志码: A

## Geochemical characteristics and palaeoenvironmental implications of the Member 4 of Dengying Formation in Well Wang-1, northern Sichuan Basin

ZHOU Gang<sup>1</sup> ZHANG Benjian<sup>1</sup> YAN Zehao<sup>2</sup> MA Hualing<sup>3</sup> YAN Wei<sup>1</sup> LI Qi<sup>2</sup>  
ZHONG Yuan<sup>1</sup> WANG Wenzhi<sup>1</sup> ZHANG Ya<sup>1</sup> ZHANG Zili<sup>1,2</sup> LAN Caijun<sup>1</sup>

\* 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(编号: 2023ZZ16YJ01), 国家自然科学基金项目(编号: U2344209), 国家自然科学基金重点基金项目(编号: 42230816)共同资助。[Co-funded by PetroChina Major Science and Technology Project (No. 2023ZZ16YJ01), National Natural Science Foundation of China (No. U2344209), Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 42230816)]

收稿日期: 2025-07-28 改回日期: 2025-12-10

1 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, China

2 College of Marine Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3 PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China

**Abstract** The Sinian Dengying Formation serves as a critical stratigraphic interval for deep to ultra-deep oil and gas exploration in the Sichuan Basin, with microbial mound-shoal complexes representing primary reservoir targets. However, the environmental factors controlling the rapid development of these complexes remain insufficiently understood, thereby limiting the accurate prediction of favorable reservoirs zones. This study conducts sedimentological and geochemical analyses of the Member 4 of Dengying Formation based on whole-core data from the Well Wang-1 in northern Sichuan Basin, supplemented by thin-section petrography and geochemical characterization, to systematically investigate lithological characteristics, paleoenvironmental evolution, and their coupling relationships. The results indicate: (1) the Member 4 of Dengying Formation is predominantly composed of platform-facies carbonate rocks, chiefly microbial dolostones, which can be subdivided into four vertically successive units—DS1 and DS4 are characterized by abundant algal remains, DS2 exhibits sparse algal content, and DS3 is defined by thick-bedded intraclast dolostones; (2) paleowater depthfluctuated through a sequence of low-amplitude oscillations (DS1), rapid transgression (DS2), abrupt regression (DS3), and overall gradual shallowing (DS4), under predominantly cool and humid climatic conditions, punctuated by relatively warm and arid phases during mid-late DS1 and early DS3; (3) under positive paleo-topographic configurations, microbial mounds developed rapidly when the rate of paleo-water-depth increase commensurates with microbial growth rates under warm climatic conditions, whereas rapid relative sea-level fall led to the formation of intraclast dolostones along the flanks of mound-shoal systems. To conclude, the upper and middle-lower intervals of the Member 4 of Dengying Formation from Well Wang-1 exhibit paleoenvironmental conditions favorable for large-scale mound-shoal development. Therefore, paleogeomorphic analysis and precise identification of prospective microbial reservoirs are essential for guiding future exploration efforts.

**Key words** geochemical characteristics, sedimentary environment, Dengying Formation, Sichuan Basin

**About the first author** ZHOU Gang, born in 1984, is a senior engineer with Ph.D. degree. He is mainly engaged in comprehensive research on petroleum geology. E-mail: zhougang29@petroChina.com.cn.

**About the corresponding author** YAN Zehao, born in 1998, Ph.D. candidate. He is mainly engaged in the comprehensive researches on carbonate rocks and hydrocarbon exploration and development. E-mail: Yan\_Zehao@email.cugb.edu.cn.

## 0 引言

随着全球对油气资源需求的日益增加,寻找更深层的资源已成为当前油气勘探的重要趋势(贾承造和庞雄奇, 2015; 杨雨等, 2022)。近年来,伴随着油气勘探开发理论和技术的不断进步,中国深层—超深层碳酸盐岩层系勘探相继在塔河—轮南、顺北—富满和四川安岳等地取得突破,使深层古老含油气系统备受关注(赵文智等, 2022)。

震旦系灯影组碳酸盐岩分布广泛,资源潜力巨大,一直是四川盆地超深层油气研究的热点和勘探重点(邹才能等, 2023)。前人针对四川盆地安岳、蓬莱等地区高产超深层灯影组气藏的储集层开展了系列研究,认为四川盆地灯影组碳酸盐岩储集层主要受沉积相带、成岩作用、构造作用和海平面升降等控制(斯春松等, 2014; 郭旭升等, 2020; 杨雨等, 2020; 赵路子等, 2020; 杨志波等,

2024)。微生物藻丘是利储集体，其建造受古环境与古地貌协同控制。目前针对灯影组古海洋环境的研究主要集中在新元古代氧化事件（Neoproterozoic Oxidation Event, NOE）后海水的氧化还原性质方面，但重建的灯影组海水氧化还原环境存在较大差异，从富氧至硫化缺氧不等（陈雅丽等，2015；Zhang *et al.*, 2018；郑德顺等，2018），因此灯影组的古海洋环境仍存争议。另外，将岩性与古环境结合的研究相对更少，对四川盆地内部深层一超深层有利丘滩体刻画多依靠地震资料和有限取心段钻揭，存在多解性问题。旺 1 井作为地表浅钻，完整取心和配套地球化学数据可用以还原灯影组沉积期古环境变化，为有利丘滩体预测提供证据。

2022 年，成都地质调查中心受中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司勘探开发研究院委托，在川北米仓山穹窿西缘开展旺 1 井钻探工作，2023 年 8 月完钻，完钻深度 115.7 m，岩心整体收获率超 90%，钻获完整灯影组三段和四段，未钻穿完整灯一段至灯二段，获得了宝贵的资料。旺 1 井所拥有的连续取心及配套地球化学数据有助于真实可靠的古环境恢复，建立灯影组沉积时期完整古环境演化序列，为四川盆地微生物丘滩体刻画提供新的理论依据。本研究选取旺 1 井灯影组四段（以下简称灯四段）取心资料为研究对象，综合利用显微薄片、全岩主微量元素、碳氧同位素等手段对灯四段储集层进行沉积学与地球化学研究。在旺 1 井灯四段岩石类型和岩相组合基础上，通过地球化学指标分析古环境参数变化，建立灯四段沉积演化模式，探讨沉积环境驱动下微生物丘滩体发育特征。

## 1 区域地质背景

四川盆地是发育于扬子克拉通西缘的沉积盆地，盆地边界呈菱形结构，被龙门山、大凉山、大娄山、齐岳山、大巴山和米仓山环绕，受多个造山带强烈挤压，同时受到澄江、桐湾、加里东、云南、东吴、印支、燕山和喜马拉雅等多期次构造运动的叠加影响，最终造成了不同地区的差异性演化（张岳桥等，2011；郭旭升等，2020）。川北地区位于四川盆地北部米仓山构造带，西邻龙门山冲断带，东部与大巴山构造带相接。

灯影组是继陡山沱组沉积之后发育的一套海侵退积式沉积序列，以浅水碳酸盐台地沉积为主

（图 1-A）。自下而上可划分为 4 段（李英强等，2013；金民东等，2020）：灯一段是晚震旦世海侵产物，微生物不发育，岩性以浅灰色—深灰色层状粉晶白云岩、砂屑白云岩和微生物（藻）白云岩为主，局部含有硅质条带和燧石条带；灯二段主要以浅灰色—灰色藻白云岩、粉晶白云岩为主，藻类繁盛；灯三段沉积时期经历了一次海平面快速升降旋回，随着海平面升高，盆地内部以深灰色泥页岩和碎屑岩沉积为主；随后海平面快速下降，灯四段继续发育稳定碳酸盐岩台地沉积，岩性主要为浅灰色—深灰色泥晶白云岩、颗粒白云岩、微生物（藻）白云岩，局部发育硅质条带和燧石条带（图 1-B）。其中，灯二段沉积末期，桐湾运动一幕使得地层抬升风化剥蚀，造成了灯二段和灯三段之间的不整合，同时形成大量风化壳岩溶缝洞型储集层。

## 2 样品及测试

本研究基础数据（岩心、薄片等资料）来源于中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院旺 1 井数据库，包括岩心照片 700 余张，铸体、薄片照片 600 余张，主、微量元素测试样品 42 个，碳、氧同位素测试样品 49 个。地球化学测试项目均由中国石油天然气集团公司油藏描述重点实验室完成。

所有的样品均被抛光磨制成 0.03 mm 的薄片，并用茜素红半染色来区别方解石和白云石，再通过显微镜进行单偏光、正交偏光和阴极发光观察，明确微观结构和岩石类型。碳、氧同位素分析使用 ThermoFisher MAT 253 稳定同位素质谱仪，测试方法为常规磷酸法，分析误差为  $\pm 0.5\text{‰}$ ，测试结果以 PDB 为标准。主要测试流程为：将新鲜粉末加入到预热 50~60 °C 的磷酸中，同时将其密封并抽真空，在 75 °C 恒温装置下反应 16 h，将收集的气体输送到稳定同位素质谱仪 ThermoFisher MAT253 中进行碳、氧同位素分析。主量元素检测采用 X 射线荧光光谱法（XRF），实验仪器为理学 ZSX Primus II 型。微量元素测试通过 SF-ICP-MS 仪器进行，测试结果采用 AGV-2、BHVO-2、BCR-2 共 3 种国际标准物质进行检测，相对误差都小于 5%。

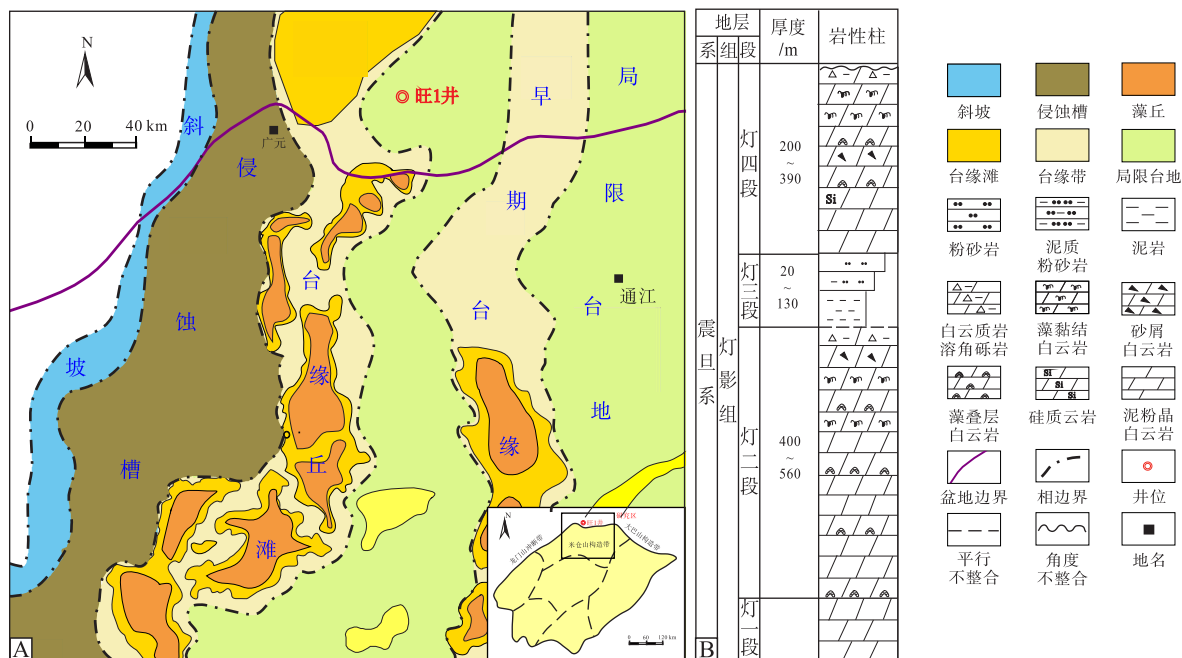


图 1 四川盆地北部灯影组四段沉积相 (A) 及灯影组地层柱状图 (B)

(据文龙等, 2021; 张自力等, 2024; 有修改)

Fig. 1 Sedimentary facies map of the Member 4 of Dengying Formation (A) and stratigraphic column of the Dengying Formation (B) in northern Sichuan Basin (modified from Wen *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024)

### 3 岩石学特征

#### 3.1 岩石类型

旺 1 井灯四段岩性以白云岩为主, 可进一步分为 4 类: 微生物 (藻) 白云岩, 颗粒白云岩, 泥晶白云岩和塌积角砾白云岩。

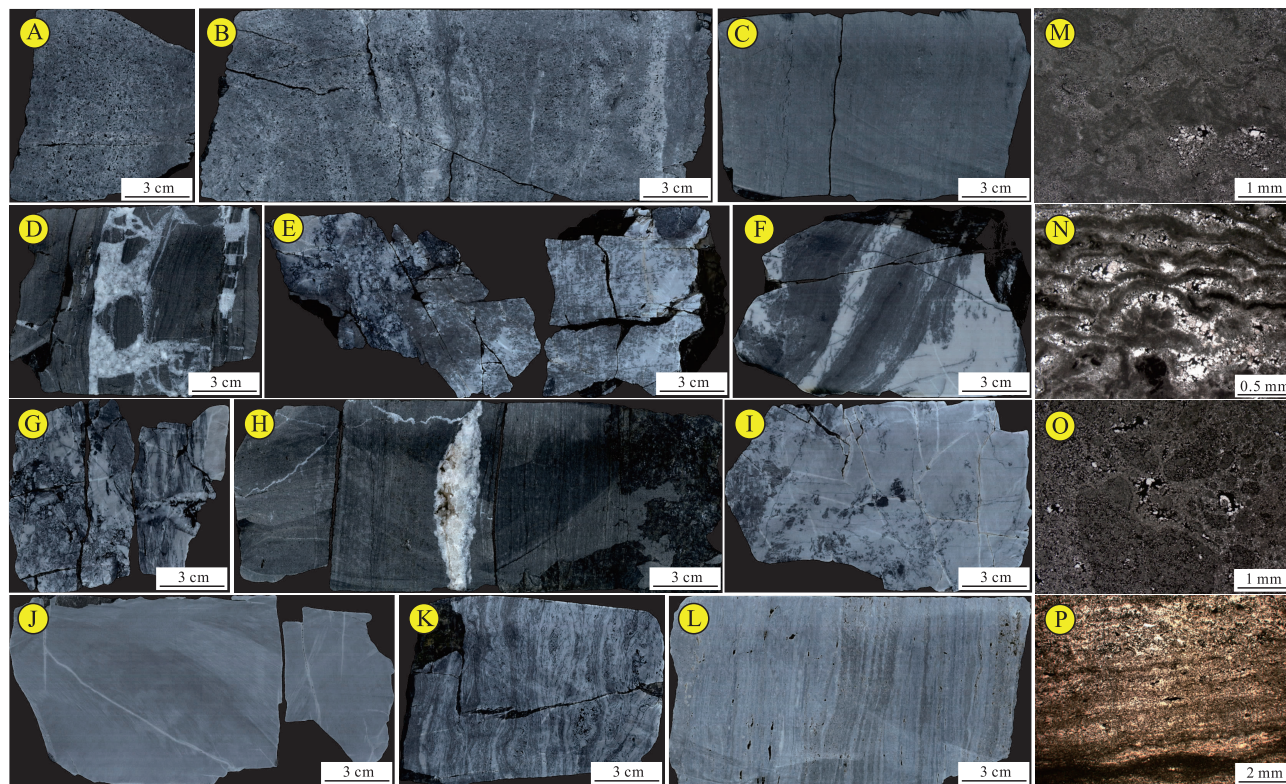
微生物 (藻) 白云岩是藻丘建造的主体, 研究区微生物 (藻) 白云岩主要包括藻叠层白云岩、藻纹层白云岩和藻凝块白云岩 3 类 (图 2)。藻叠层白云岩中藻丝多呈起伏、包卷状特征 (图 2-K), 藻丝宽度为 200  $\mu\text{m}$  左右, 排列紧密, 受沉积速率影响呈现疏松—密集韵律性分布; 镜下可见暗色纹层由泥质晶粒包裹藻遗迹组成, 亮色纹层由细晶白云岩和后期胶结物构成 (图 2-N)。藻纹层白云岩具平直纹层结构 (图 2-H, 2-L), 纹层平直、有粗细变化、具细微起伏且不完全连续, 镜下纹层同样呈平直状、边缘较模糊 (图 2-P)。藻凝块白云岩呈凝块、团块等非成层藻形态, 分散分布于岩心之上 (图 2-E, 2-F, 2-I), 而岩心基质颜色较浅, 呈均一块状; 镜下藻丝呈分散状分布 (图 2-M), 暗色团块泥质含量较高, 亮色基质由泥晶—细晶白

云石组成, 晶体大小为 30  $\mu\text{m}$  左右, 排列紧密。

颗粒白云岩包括砂屑白云岩和砾屑白云岩。砂屑白云岩粒径在 200 ~ 2000  $\mu\text{m}$  之间, 以白云岩内碎屑颗粒为主, 具有较好的磨圆度 (图 2-A, 2-B, 2-O), 通常沉积于晴天浪基面至平均低潮线之间, 常见粒序层理、冲刷面等构造。砾屑白云岩粒径通常超过 2 mm, 以角砾白云岩内碎屑颗粒为主, 分选和磨圆较差, 角砾间被白云石泥质碎屑充填 (图 2-D, 2-G), 可能为近源垮塌搬运形成。

泥晶白云岩不具有微生物痕迹, 呈纯净的泥—粉晶结构 (图 2-C, 2-J), 常以米级厚度发育于微生物藻丘的顶部, 同时也是下一期微生物藻丘的底部, 通常代表了微生物生长速度的减缓甚至停止以及沉积环境的转变。

塌积角砾白云岩主要由角砾 (>2.000 mm) 组成, 角砾大小在 2 ~ 10 cm 之间。岩溶作用形成的角砾可见明显港湾状溶蚀边界, 发育大量顺层溶孔。构造作用形成的角砾边线平直, 因搬运距离较近, 与周围岩石的可拼接性强。如图 2-D 中的构造角砾白云岩是由晚期热液破裂作用造成, 充填有热液伴生方解石。



A—井深 174.67~174.77 m, 砂屑白云岩, 颗粒结构; B—井深 174.77~174.99 m, 砂屑白云岩, 颗粒结构; C—井深 212.47~212.59 m, 泥晶白云岩, 均质块状结构; D—井深 321.82~321.92 m, 塌积角砾白云岩, 具棱角状边缘; E—井深 173.03~174.24 m, 藻凝块白云岩, 具雪花状、絮状不规则藻团块结构; F—井深 219.00~219.14 m, 藻凝块白云岩, 雪花状藻团块整体呈水平条带状发育; G—井深 244.43~244.49 m, 砾屑白云岩, 具一定磨圆特征; H—井深 303.86~303.98 m, 藻纹层白云岩, 呈水平层状藻丝特征; I—井深 167.13~167.31 m, 藻凝块白云岩, 具雪花状、斑状不规则藻团块特征; J—井深 256.16~259.36 m, 泥晶白云岩, 均质块状结构; K—井深 193.24~193.42 m, 藻叠层白云岩, 具起伏、包卷状藻丝特征; L—井深 285.82~286.00 m, 藻纹层白云岩, 呈水平层状藻丝特征; M—井深 167 m, 藻凝块白云岩, 具雪花状、斑状不规则藻团块特征, 单偏光; N—井深 150 m, 藻叠层白云岩, 具起伏、包卷状藻丝特征, 单偏光; O—井深 174.5 m, 砂屑白云岩, 颗粒磨圆较好, 单偏光; P—井深 213 m, 藻纹层白云岩, 呈水平层状藻丝特征, 单偏光

图 2 川北地区旺 1 井灯影组四段岩心识别图版

Fig. 2 Core identification chart of the Member 4 of Dengying Formation from Well Wang-1 in northern Sichuan Basin

### 3.2 岩性组合

旺 1 井灯四段主要发育碳酸盐岩台地边缘相带沉积 (文龙等, 2021), 厚度为 215.21 m。依据岩性组合变化, 将旺 1 井灯四段自下而上分为 4 段 (图 3): DS1 段 (353.71~274.50 m), 发育厚层藻纹层白云岩和藻叠层白云岩, 夹薄层泥晶白云岩, 垂向上表现为泥晶白云岩→藻叠层白云岩→藻纹层白云岩的叠置序列; DS2 段 (274.50~221.82 m), 泥晶白云岩发育稳定 (单层沉积厚度大于 10 m), 薄层藻纹层、藻叠层白云岩和藻凝块白云岩发育, 垂向上表现为厚层泥晶白云岩顶部发育薄层微生物 (藻) 白云岩; DS3 段 (221.82~175.70 m), 发育多层砾屑白云岩, 藻含量增加,

垂向上表现为藻叠层白云岩→藻凝块白云岩→砾屑白云岩的沉积韵律; DS4 段 (175.70~138.50 m), 以微生物 (藻) 白云岩为特征, 夹薄层泥晶白云岩和砾屑白云岩, 形成以藻叠层白云岩—藻凝块白云岩为主的垂向藻丘建造序列。

## 4 地球化学特征

### 4.1 数据有效性验证

碳酸盐沉积后可能受到不同程度的成岩改造, 从而改变其岩石地球化学特征, 因此对样品数据有效性进行检验很有必要 (Derry *et al.*, 1994)。前人在进行数据有效性验证过程中通常使用 3 种评判标准: (1) 若  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  不具有明显的相关性, 说明

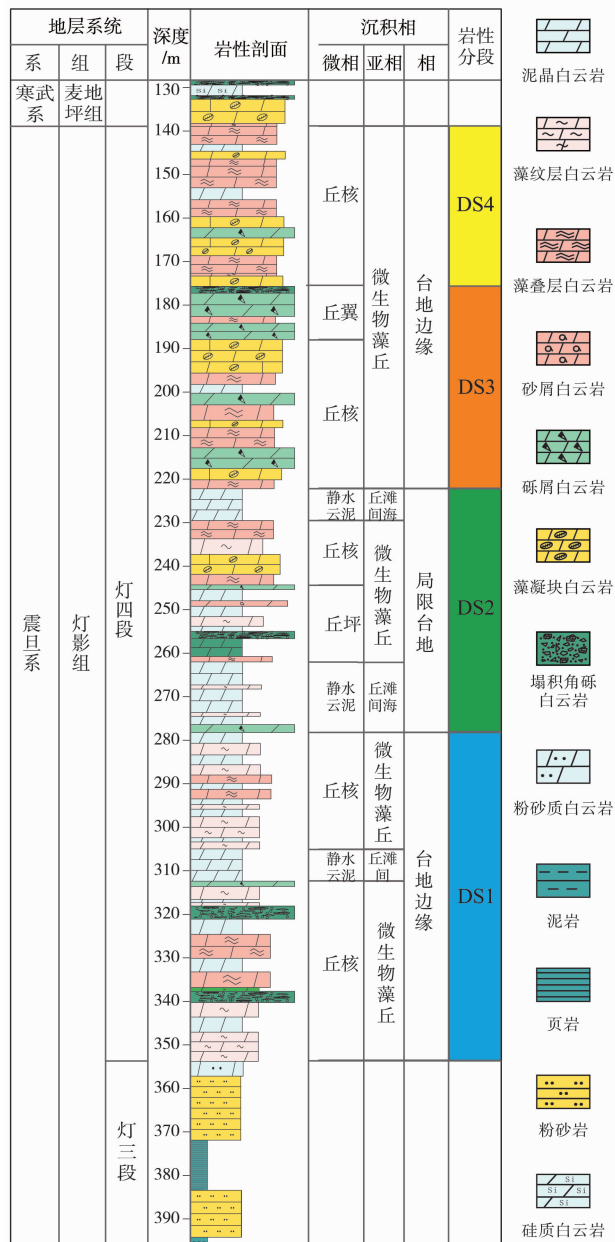


图 3 川北地区旺 1 井灯影组四段岩性-沉积相柱状图  
Fig. 3 Lithology-sedimentary facies column of the Member 4  
of Dengying Formation from Well Wang-1  
in northern Sichuan Basin

其保存了沉积期的地球化学信息（郝松立等，2011）。（2）若  $\delta^{18}\text{O} < -10\text{‰}$ ，说明样品受到强烈的成岩改造，已经不能代表原始地层的沉积环境特征，应当从地球化学分析中剔除。（3）当  $\text{Mn}/\text{Sr} < 2$  时，表示样品对原始地层沉积环境指示性良好；当  $\text{Mn}/\text{Sr}$  值介于  $2 \sim 10$  之间时，表示样品具有一定的代表性；当  $\text{Mn}/\text{Sr} > 10$  时，说明其已经发生较强成岩蚀变。

综合上述 3 种数据有效性验证方法, 首先对旺 1 井灯四段样品  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  的相关关系进行分析。结果表明研究区样品基本不具有相关关系 ( $R^2 = 0.054$ ), 且  $\delta^{18}\text{O}$  值都大于  $-10\text{‰}$  (表 1), 表明这些样品受到后期成岩蚀变作用影响较小, 可以反映沉积期古环境信息。其次, 研究区灯四段碳酸盐岩样品的  $\text{Mn}/\text{Sr}$  值均小于 10 (平均值 0.92, 最大值 2.59) (表 2)。上述参数均说明, 旺 1 井灯四段碳酸盐岩样品未受到成岩蚀变作用的明显改造, 可以较好地反映沉积期古环境信息。

## 4.2 主量元素特征

旺 1 井灯四段碳酸盐岩的  $\text{CaO}$  含量介于 21.09%~32.79% 之间, 均值为 28.65%;  $\text{MgO}$  含量介于 9.78%~22.65% 之间, 均值为 19.02%,  $\Sigma(\text{CaO}+\text{MgO})$  在 31.50%~54.12% 之间, 均值为 47.67%。垂向上,  $\Sigma(\text{CaO}+\text{MgO})$  在灯影组全井段均较为稳定, 变化幅度较小, 在 DS1 和 DS2 段内均有负异常跳点, 在 DS3 段内出现大段负异常, DS4 段则较为稳定。

在陆源指示元素 ( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 中,  $\text{SiO}_2$  含量介于 0.01% ~ 34.12% 之间, 平均值为 7.96%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在 0.01% ~ 9.97% 之间, 平均值为 0.43%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量在 0.17% ~ 1.93% 之间, 平均值为 0.39%; 陆源元素  $\Sigma$  ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 含量介于 0.25% ~ 35.22% 之间, 平均值为 8.78%。三者变化范围较广, 垂向上变化特征与  $\Sigma$  ( $\text{CaO} + \text{MgO}$ ) 镜像特征明显, 存在良好的对应关系(图 4)。

### 4.3 微量元素特征

旺 1 井灯四段碳酸盐岩样品中, Sr 含量介于 20.00~114.36  $\mu\text{g/g}$  之间, 呈一定的波动, 平均值为 53.79  $\mu\text{g/g}$ 。Rb 含量介于 0.15~32.97  $\mu\text{g/g}$  之间, 平均值为 1.60  $\mu\text{g/g}$ 。Ba 含量介于 4.09~270.28  $\mu\text{g/g}$  之间, 平均值为 42.16  $\mu\text{g/g}$ 。垂向上, Sr 含量在 DS1 段内逐渐降低, 并在 DS2、DS3 段内持续下降, 在 DS4 段内快速上升, 且 Sr 含量可见多个负异常点, 与  $\Sigma(\text{CaO}+\text{MgO})$  负异常具有明显的对应关系(图 4)。

#### 4.4 碳、氧同位素特征

旺 1 井灯四段碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-0.74\text{‰} \sim 3.26\text{‰}$ 之间变化, 平均值为 $0.92\text{‰}$ 、为中低值到

表 1 川北地区旺 1 井灯影组四段碳、氧同位素数据表

Table 1 Data table of carbon and oxygen isotopes of the Member 4 of Dengying Formation from Well Wang-1 in northern Sichuan Basin

| 样品编号  | 深度<br>/m | 岩性段 | $\delta^{13}\text{C}$<br>/‰ | $\delta^{18}\text{O}$<br>/‰ | 古盐度<br>(Z 值) | 古温度<br>(T 值)/℃ |
|-------|----------|-----|-----------------------------|-----------------------------|--------------|----------------|
| W1-43 | 142.45   | DS4 | 0.29                        | -6.30                       | 124.75       | 19.61          |
| W1-44 | 154.64   | DS4 | 0.83                        | -5.54                       | 126.25       | 16.35          |
| W1-45 | 158.53   | DS4 | 0.80                        | -6.31                       | 125.79       | 19.63          |
| W1-46 | 162.59   | DS4 | 0.76                        | -5.79                       | 125.98       | 17.41          |
| W1-47 | 166.40   | DS4 | 1.18                        | -6.28                       | 126.59       | 19.53          |
| W1-48 | 170.49   | DS4 | 1.19                        | -6.65                       | 126.42       | 21.16          |
| W1-49 | 178.16   | DS3 | 0.28                        | -8.14                       | 123.82       | 28.09          |
| W1-50 | 182.46   | DS3 | 0.37                        | -5.89                       | 125.13       | 17.85          |
| W1-51 | 186.58   | DS3 | 0.15                        | -6.66                       | 124.30       | 21.19          |
| W1-52 | 190.50   | DS3 | 0.26                        | -6.56                       | 124.56       | 20.75          |
| W1-53 | 194.45   | DS3 | 0.30                        | -6.66                       | 124.59       | 21.18          |
| W1-54 | 198.50   | DS3 | 0.31                        | -7.04                       | 124.42       | 22.90          |
| W1-55 | 202.51   | DS3 | 0.37                        | -6.14                       | 124.99       | 18.92          |
| W1-56 | 206.70   | DS3 | -0.21                       | -9.56                       | 122.11       | 35.21          |
| W1-57 | 210.54   | DS3 | 0.15                        | -7.49                       | 123.88       | 24.97          |
| W1-58 | 214.54   | DS3 | -0.05                       | -7.37                       | 123.54       | 24.43          |
| W1-59 | 218.56   | DS3 | 0.02                        | -7.30                       | 123.71       | 24.07          |
| W1-60 | 222.47   | DS2 | 0.84                        | -6.71                       | 125.68       | 21.40          |
| W1-61 | 226.45   | DS2 | 3.26                        | -5.38                       | 131.30       | 15.69          |
| W1-62 | 230.60   | DS2 | 2.78                        | -5.87                       | 130.06       | 17.72          |
| W1-63 | 234.56   | DS2 | 2.15                        | -6.82                       | 128.30       | 21.92          |
| W1-64 | 238.68   | DS2 | 1.90                        | -7.44                       | 127.49       | 24.76          |
| W1-65 | 242.47   | DS2 | 2.30                        | -5.44                       | 129.30       | 15.95          |
| W1-66 | 246.36   | DS2 | 2.38                        | -5.87                       | 129.24       | 17.76          |
| W1-67 | 250.58   | DS2 | 1.87                        | -7.54                       | 127.38       | 25.22          |
| W1-68 | 254.50   | DS2 | 2.04                        | -6.96                       | 128.02       | 22.51          |
| W1-69 | 258.50   | DS2 | 1.92                        | -6.05                       | 128.21       | 18.53          |
| W1-70 | 262.57   | DS2 | 1.13                        | -6.24                       | 126.50       | 19.35          |
| W1-71 | 266.50   | DS2 | 1.31                        | -6.94                       | 126.53       | 22.45          |
| W1-72 | 270.38   | DS2 | 0.96                        | -7.01                       | 125.77       | 22.75          |
| W1-73 | 274.50   | DS2 | 1.88                        | -6.97                       | 127.68       | 22.58          |
| W1-74 | 278.54   | DS1 | 1.83                        | -6.57                       | 127.78       | 20.78          |
| W1-75 | 282.59   | DS1 | 0.72                        | -7.70                       | 124.94       | 25.95          |
| W1-76 | 286.47   | DS1 | 1.08                        | -7.77                       | 125.65       | 26.27          |
| W1-77 | 290.53   | DS1 | 1.66                        | -8.16                       | 126.63       | 28.16          |
| W1-78 | 294.50   | DS1 | -0.71                       | -6.33                       | 122.70       | 19.73          |
| W1-79 | 298.55   | DS1 | 1.34                        | -6.97                       | 126.58       | 22.58          |
| W1-80 | 302.41   | DS1 | 0.78                        | -7.43                       | 125.20       | 24.69          |
| W1-81 | 305.99   | DS1 | 0.54                        | -7.93                       | 124.47       | 27.04          |
| W1-82 | 310.50   | DS1 | -0.55                       | -8.01                       | 122.17       | 27.46          |
| W1-83 | 314.52   | DS1 | -0.74                       | -6.12                       | 122.74       | 18.80          |
| W1-84 | 318.50   | DS1 | 0.85                        | -4.80                       | 126.66       | 13.35          |
| W1-85 | 322.50   | DS1 | 0.16                        | -5.82                       | 124.72       | 17.53          |
| W1-86 | 326.42   | DS1 | 0.02                        | -4.80                       | 124.95       | 13.34          |
| W1-87 | 330.42   | DS1 | 1.45                        | -4.90                       | 127.84       | 13.76          |
| W1-88 | 338.48   | DS1 | -0.47                       | -6.21                       | 123.25       | 19.21          |
| W1-89 | 342.41   | DS1 | 0.95                        | -6.46                       | 126.03       | 20.31          |
| W1-90 | 346.43   | DS1 | 0.91                        | -5.90                       | 126.22       | 17.87          |
| W1-91 | 350.44   | DS1 | 1.75                        | -4.82                       | 128.48       | 13.40          |

低正值。 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-9.56\text{‰}$ ~ $-4.80\text{‰}$ 之间,均值为 $-6.65\text{‰}$ ,为中负值。碳、氧同位素整体均较为平稳。碳同位素在 DS1、DS2 段内逐渐上升,其中在 DS1 段波动幅度较大,DS2 段保持平稳,DS3 段内突然降低,并维持在一个较低水平,DS4 段内则略有上升。氧同位素在 DS1 段逐渐下降,并在 DS2-DS4 段整体保持增加趋势(图 4)。

## 5 讨论

### 5.1 古海水深度

碳酸盐岩中 Sr 的含量和  $1000\times\text{Sr}/\text{Ca}$  值可以指示沉积时期水体的深度变化。在碳酸盐岩沉积从浅水向深水过渡的过程中, Sr 含量呈明显增加趋势 (Veizer and Compston, 1974; 邱家骧和林景仟, 1993; 汪凯明和罗顺社, 2009)。DS1 段 Sr 和  $1000\times\text{Sr}/\text{Ca}$  具有多次快速下降特征,反映灯四段沉积初期,水深整体较浅,推测当海平面下降时,台地发生暴露,大气淡水淋滤造成 Sr 含量的快速下降。DS1 段沉积早期异常高的 Sr 含量可能是由于热液活动造成的 (冯子辉等, 2022), 岩心中可见方解石等热液伴生矿物(图 2-D)。

碳同位素能够很好地保存原始沉积环境的特征,对于碳酸盐岩沉积古水深有良好的指示意义。当气候温暖、海平面上升、海洋生产力较大时,较高的生物量使得海水中有有机碳的氧化减少、相对埋藏速率增大,海水中  $^{12}\text{C}$  被生物体吸收,而  $^{13}\text{C}$  则更容易残留在海水中,这种碳同位素分馏作用导致海水中  $^{12}\text{C}$  含量相对减少,而  $^{13}\text{C}$  含量相对增加,因此碳酸盐岩的  $\delta^{13}\text{C}$  值正偏,反之亦然 (杨剑萍等, 2015)。旺 1 井灯四段碳同位素垂向上指示古水体呈现先变深后逐渐变浅的演化特征。碳同位素所指示的海平面在 DS1 段先下降后上升,在 DS2 段上升到最高值,在 DS3 段快速下降后维持低位,DS4 段小幅上升后持续下降。从整体特征来看,碳同位素所指示的海平面在 DS1 段整体较低,DS2 段沉积初期已经达到相对较高水平,DS3 段整体最低,变化幅度也最小,DS4 段略有上升,但整体呈下降趋势,维持在相对较低水平。

Fischer 曲线基于岩相变化与沉积水深的耦合关系,可以用来反映海平面的周期性变化 (Yang *et al.*, 2021), 其值增加表示海平面上升,减小表

表 2 川北地区旺 1 井灯影组四段主、微量元素地球化学数据表  
Table 2 Geochemical data of major and trace elements of the Member 4 of Dengying Formation  
from Well Wang-1 in northern Sichuan Basin

| 样品编号  | 深度<br>/m | 岩性<br>分段 | 氧化物含量/%           |       |                                |                  |                  |       |                                | 微量元素含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ |       |        |
|-------|----------|----------|-------------------|-------|--------------------------------|------------------|------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------------|-------|--------|
|       |          |          | Na <sub>2</sub> O | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Sr                                      | Rb    | Ba     |
| W1-01 | 142.45   | DS4      | 0.15              | 21.54 | 0.02                           | 0.02             | 0.01             | 30.80 | 0.23                           | 106.26                                  | 0.21  | 10.30  |
| W1-02 | 146.65   | DS4      | 0.16              | 21.02 | 0.01                           | 0.01             | 0.01             | 30.29 | 0.43                           | 112.22                                  | 0.20  | 42.95  |
| W1-03 | 158.53   | DS4      | 0.13              | 20.84 | 0.01                           | 2.94             | 0.01             | 29.99 | 0.35                           | 38.75                                   | 0.26  | 6.28   |
| W1-04 | 162.59   | DS4      | 0.16              | 21.51 | 0.03                           | 0.33             | 0.03             | 30.59 | 0.28                           | 51.78                                   | 0.69  | 9.04   |
| W1-05 | 170.49   | DS4      | 0.14              | 22.06 | 0.02                           | 0.02             | 0.01             | 30.59 | 0.30                           | 53.34                                   | 0.15  | 16.78  |
| W1-06 | 178.16   | DS3      | 0.12              | 12.08 | 0.01                           | 26.06            | 0.01             | 22.27 | 0.30                           | 24.05                                   | 0.34  | 12.66  |
| W1-07 | 182.46   | DS3      | 0.13              | 19.39 | 0.01                           | 6.71             | 0.01             | 28.40 | 0.32                           | 30.69                                   | 0.18  | 9.96   |
| W1-08 | 186.58   | DS3      | 0.13              | 22.45 | 0.02                           | 0.01             | 0.01             | 30.83 | 0.22                           | 23.38                                   | 0.23  | 5.60   |
| W1-09 | 194.45   | DS3      | 0.14              | 20.82 | 0.01                           | 4.11             | 0.01             | 29.78 | 0.27                           | 31.80                                   | 0.19  | 7.38   |
| W1-10 | 198.50   | DS3      | 0.12              | 20.66 | 0.01                           | 3.44             | 0.02             | 29.81 | 0.21                           | 22.11                                   | 0.26  | 5.48   |
| W1-11 | 202.51   | DS3      | 0.14              | 22.51 | 0.01                           | 0.02             | 0.02             | 31.18 | 0.36                           | 30.73                                   | 0.27  | 4.55   |
| W1-12 | 206.70   | DS3      | 0.11              | 13.47 | 0.02                           | 24.24            | 0.01             | 23.33 | 0.23                           | 20.00                                   | 0.30  | 7.59   |
| W1-13 | 210.54   | DS3      | 0.13              | 17.20 | 0.01                           | 13.74            | 0.01             | 26.18 | 0.67                           | 25.13                                   | 0.17  | 11.22  |
| W1-14 | 214.54   | DS3      | 0.13              | 11.41 | 0.02                           | 30.62            | 0.01             | 22.65 | 0.17                           | 70.50                                   | 0.18  | 114.29 |
| W1-15 | 218.56   | DS3      | 0.13              | 12.19 | 0.02                           | 25.63            | 0.01             | 24.18 | 0.17                           | 32.09                                   | 0.19  | 9.30   |
| W1-16 | 222.47   | DS2      | 0.17              | 15.24 | 9.97                           | 23.32            | 1.98             | 21.09 | 1.93                           | 50.37                                   | 32.97 | 71.13  |
| W1-17 | 226.45   | DS2      | 0.13              | 20.75 | 0.01                           | 3.03             | 0.02             | 30.26 | 0.21                           | 41.11                                   | 0.37  | 18.07  |
| W1-18 | 230.60   | DS2      | 0.12              | 21.78 | 0.01                           | 0.04             | 0.03             | 30.95 | 0.28                           | 41.99                                   | 0.55  | 7.49   |
| W1-19 | 238.68   | DS2      | 0.15              | 19.48 | 0.01                           | 0.02             | 0.01             | 28.92 | 0.27                           | 40.71                                   | 0.19  | 9.06   |
| W1-20 | 242.47   | DS2      | 0.16              | 22.06 | 0.24                           | 1.40             | 0.11             | 30.54 | 0.36                           | 56.22                                   | 1.72  | 8.66   |
| W1-21 | 250.58   | DS2      | 0.12              | 22.65 | 0.01                           | 0.04             | 0.03             | 31.11 | 0.39                           | 32.63                                   | 0.45  | 4.74   |
| W1-22 | 254.50   | DS2      | 0.12              | 13.39 | 0.01                           | 24.09            | 0.01             | 24.13 | 0.18                           | 22.99                                   | 0.23  | 4.09   |
| W1-23 | 258.50   | DS2      | 0.13              | 21.62 | 0.01                           | 1.42             | 0.04             | 30.78 | 0.29                           | 51.84                                   | 0.67  | 14.68  |
| W1-24 | 262.57   | DS2      | 0.15              | 22.07 | 0.15                           | 0.62             | 0.12             | 30.55 | 0.39                           | 65.90                                   | 1.82  | 8.06   |
| W1-25 | 266.50   | DS2      | 0.14              | 16.81 | 2.23                           | 12.74            | 0.52             | 27.38 | 0.67                           | 51.63                                   | 6.54  | 230.43 |
| W1-26 | 270.38   | DS2      | 0.14              | 22.13 | 0.01                           | 0.64             | 0.03             | 30.66 | 0.33                           | 51.97                                   | 0.23  | 10.18  |
| W1-27 | 278.54   | DS1      | 0.15              | 22.41 | 0.01                           | 0.03             | 0.01             | 31.15 | 0.35                           | 55.18                                   | 0.33  | 35.32  |
| W1-28 | 282.59   | DS1      | 0.15              | 11.22 | 0.01                           | 31.45            | 0.01             | 22.00 | 0.25                           | 24.36                                   | 0.19  | 58.42  |
| W1-29 | 286.47   | DS1      | 0.14              | 21.78 | 0.01                           | 0.13             | 0.02             | 30.81 | 0.17                           | 48.19                                   | 0.31  | 7.81   |
| W1-30 | 290.53   | DS1      | 0.14              | 21.75 | 0.02                           | 0.03             | 0.02             | 31.19 | 0.26                           | 56.97                                   | 0.28  | 175.95 |
| W1-31 | 294.50   | DS1      | 0.14              | 21.33 | 0.02                           | 0.05             | 0.03             | 32.79 | 0.48                           | 68.96                                   | 0.47  | 114.56 |
| W1-32 | 298.55   | DS1      | 0.19              | 9.78  | 0.03                           | 34.12            | 0.02             | 21.72 | 0.23                           | 47.53                                   | 0.41  | 195.52 |
| W1-33 | 302.41   | DS1      | 0.15              | 19.43 | 0.02                           | 5.55             | 0.02             | 29.78 | 0.26                           | 66.36                                   | 0.34  | 83.69  |
| W1-34 | 305.99   | DS1      | 0.13              | 18.96 | 0.01                           | 9.11             | 0.01             | 28.97 | 0.26                           | 44.23                                   | 0.22  | 38.64  |
| W1-35 | 310.50   | DS1      | 0.13              | 13.01 | 0.02                           | 22.65            | 0.02             | 25.91 | 0.21                           | 41.71                                   | 0.46  | 17.02  |
| W1-36 | 314.52   | DS1      | 0.15              | 20.96 | 0.01                           | 1.19             | 0.02             | 31.25 | 0.23                           | 75.27                                   | 0.24  | 25.04  |
| W1-37 | 322.50   | DS1      | 0.17              | 20.24 | 0.01                           | 2.30             | 0.03             | 30.62 | 0.28                           | 95.00                                   | 0.46  | 24.98  |
| W1-38 | 326.42   | DS1      | 0.15              | 20.41 | 1.28                           | 3.41             | 0.04             | 29.94 | 0.67                           | 95.00                                   | 0.83  | 10.24  |
| W1-39 | 338.48   | DS1      | 0.16              | 18.22 | 0.40                           | 6.59             | 0.03             | 30.41 | 0.35                           | 114.36                                  | 0.62  | 6.92   |
| W1-40 | 342.41   | DS1      | 0.18              | 20.18 | 0.23                           | 1.69             | 0.02             | 31.56 | 0.38                           | 88.22                                   | 0.57  | 270.28 |
| W1-41 | 346.43   | DS1      | 0.16              | 21.16 | 0.27                           | 1.82             | 0.08             | 30.90 | 0.50                           | 83.85                                   | 1.30  | 9.02   |
| W1-42 | 350.44   | DS1      | 0.19              | 20.91 | 2.72                           | 8.86             | 0.90             | 27.09 | 1.81                           | 73.72                                   | 10.48 | 37.20  |

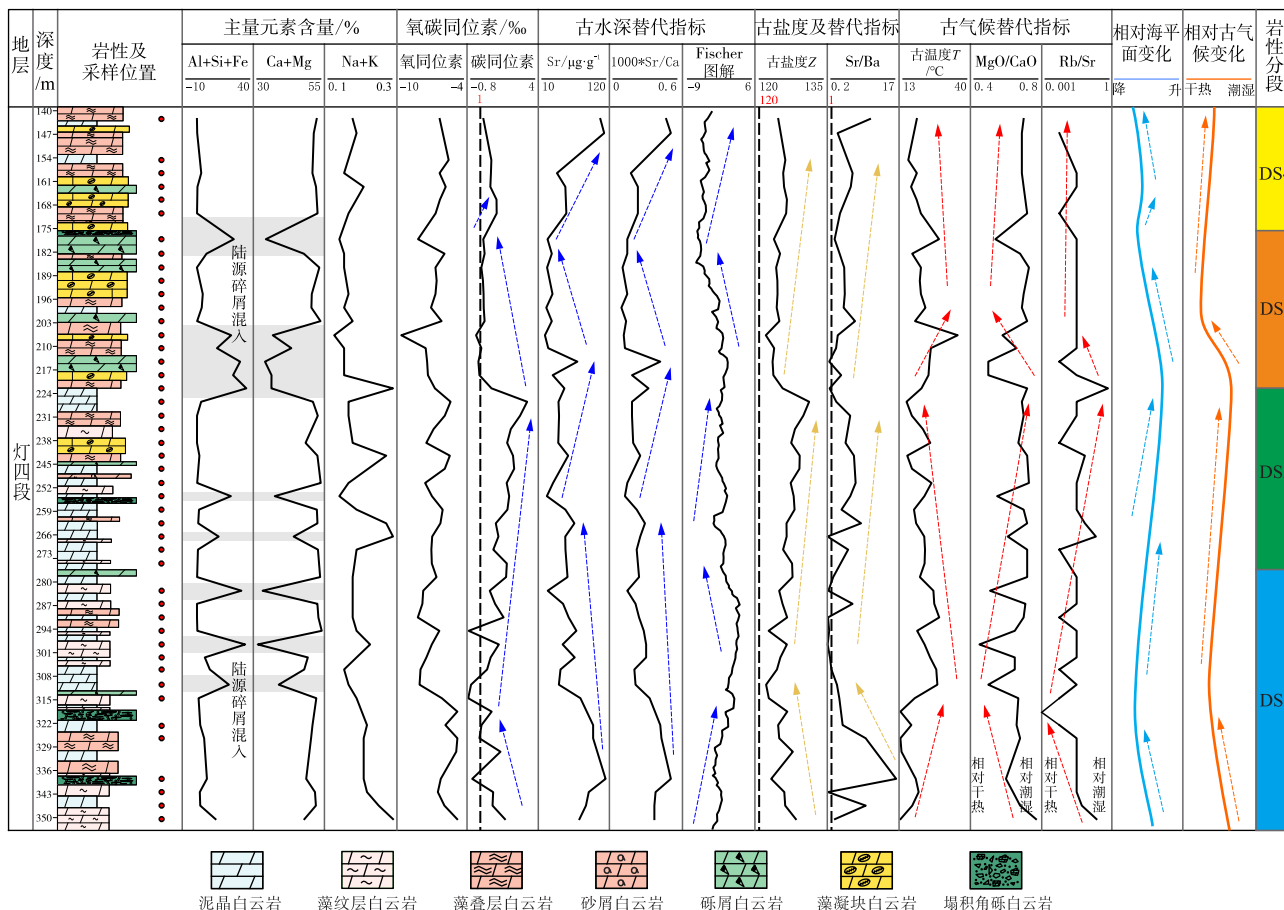


图 4 川北地区旺 1 井灯影组四段古环境参数综合柱状图

Fig. 4 Composite columnar chart of palaeoenvironmental parameters of the Member 4 of Dengying Formation from Well Wang-1 in northern Sichuan Basin

示海平面下降。本研究利用“PyFISCHERPLOT”的开源 Python 代码，通过绘制沉积厚度随沉积周期数的线性变化得到研究区灯四段 Fischer 曲线。由于 DS1 段海平面过低，造成多次沉积间断，使得 Fischer 曲线在 DS1 段计算不准确，其他层段变化特征与碳同位素等地球化学数据的正相关性明显（图 4）。

综上所述，DS1 段沉积时期古海平面以低位震荡为主，保持先下降后上升趋势；DS2 段沉积时期古海平面持续上升，沉积水体较深，以深水碳酸盐沉积为主；DS3 段沉积时期古海平面快速下降，发育大量颗粒白云岩；DS4 段沉积时期古海平面小幅上升后小幅下降、整体维持下降趋势，微生物（藻）白云岩十分发育。

## 5.2 古海水盐度

根据碳氧同位素组成与海水盐度关系建立的  $Z$

值 ( $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$ )，是沉积环境古盐度分析的一个有效指标，其中  $Z < 120$  为淡水相， $Z > 120$  为海水相（Keith and Weber, 1964）。研究区灯四段  $Z$  值介于 122.11 ~ 131.30 之间，均值为 125.90，表明样品均为海相碳酸盐沉积。垂向上  $Z$  值曲线呈先增大后减小再缓慢增加趋势，表现出与古水深变化曲线协同变化的趋势。

$\text{Sr}/\text{Ba}$  值也是衡量自然界水体古盐度的重要指标。 $\text{Sr}$  与  $\text{Ba}$  元素在理化性质上接近，但在富集与迁移条件上存在明显差别（邱家骧和林景仟，1993），其中  $\text{Sr}$  通常在较深海水中富集， $\text{Ba}$  则主要在近岸水体中富集，故通常认为  $\text{Sr}/\text{Ba} > 1$  时为海相沉积， $\text{Sr}/\text{Ba} < 1$  时为陆相沉积， $\text{Sr}/\text{Ba}$  值介于 0.5 ~ 1.0 之间为半咸水环境（米利曼，1978）。旺 1 井灯四段样品的  $\text{Sr}/\text{Ba}$  值介于 0.22 ~ 16.53 之间，

平均值为 4.01。Sr/Ba 值在 DS1、DS3 段部分比值小于 1, 反映其沉积水体较浅, 沉积期有较多大气淡水混入(图 4)。

### 5.3 古气候变化

由于在海水中碳酸钙的溶解度一般随着温度升高而下降, 因此 MgO/CaO 值可以作为反映沉积期古气候的替代指标。MgO/CaO 高值指示潮湿气候, 低值显示为干旱气候(杨振宇等, 2009; 孟昊等, 2016)。研究区灯四段碳酸盐岩样品的 MgO/CaO 值在 0.45~0.77 之间, 均值为 0.66。MgO/CaO 值变化曲线显示(图 4), 灯四段沉积初期 MgO/CaO 值较高, 在 DS1 段内小幅度下降后逐渐上升, 在 DS1 段沉积末期数值仍较低, 同时在 DS1 段沉积末期和 DS2 沉积初期拥有较多负异常值, DS3 段沉积初期也存在负异常区间, DS4 段整体维持较高值, 说明灯四段沉积时期整体以潮湿气候为主, DS1 段沉积中期和 DS3 段沉积初期气候向干旱方向转变。

岩石中 Rb 元素含量较低且较为稳定, Sr 元素含量受碳酸盐岩中  $\text{Ca}^{2+}$  含量控制(刘英俊等, 1984), 在干旱气候背景下, 随着 CaO 的含量增加, Sr 元素浓度也增加, Sr 置换  $\text{Ca}^{2+}$  的程度增大, 形成的岩石中 Sr 含量就增大, 因此, Rb/Sr 高值可以指示古气候相对潮湿, Rb/Sr 低值指示古气候相对干旱(王琳霖等, 2018)。研究区样品的 Rb/Sr 值介于 0~0.65 之间, 均值为 0.03, 负异常跳点也出现在 DS1 段中部及 DS3 段底部, 与 MgO/CaO 值变化曲线特征基本一致。

为进一步查明研究区灯四段沉积时期古气候特征, 本研究尝试利用样品氧同位素组成恢复沉积期古海水温度。根据前人提出的经验公式(侯明才等, 2020):  $T(^{\circ}\text{C}) = 15.976 - 4.2 \times \delta^{18}\text{O} + 0.13 \times (\delta^{18}\text{O} + 0.22)^2$ , 代入样品  $\delta^{18}\text{O}$  的校正值(侯恩刚等, 2013), 结果显示研究区古海水温度介于 13.34~35.21  $^{\circ}\text{C}$  之间, 平均值为 21.06  $^{\circ}\text{C}$ 。纵向上,  $T$  与 MgO/CaO、Rb/Sr 值的变化具有良好的对应关系, 共同指示古气候在 DS1 段沉积期以干热环境为主, DS2 段沉积期向湿冷方向过渡, DS3 段沉积期出现温度最高值, 环境向干热方向转换, DS4 段沉积期环境稳定, 小幅度向湿冷偏移(图 4)。

### 5.4 古环境要素之间的耦合关系

古环境变化为一个统一整体, 古气候、古盐度、古温度和古水深通常协同变化, 展现出较强的耦合关系(Fairbridge, 1981; 严兆彬等, 2005; 王珊珊等, 2010; 王鹏万等, 2016; 姚升阳等, 2020)。基于旺 1 井灯四段的高分辨率地球化学数据, 深入剖析古气候、古海水性质与相对海平面变化之间的内在耦合关系, 以揭示控制微生物碳酸盐岩沉积的地球化学动力学机制。

DS1 段的古环境以频繁波动为特征。 $\delta^{13}\text{C}$  值在底部出现显著的负偏, 这通常与海平面下降导致的台地暴露、富含轻碳( $^{13}\text{C}$ )的大气淡水淋滤以及有机质氧化作用的增强有关。此时, 较低的  $Z$  值和 Sr/Ba 值共同指示了海平面低位期间海水盐度的降低和大气淡水影响的加强。这种海平面震荡与由 Mg/Ca 值和 Rb/Sr 值所指示的古气候变化紧密耦合: 在  $\delta^{13}\text{C}$  负偏、 $Z$  值较低的层段, 往往伴随较低的 Mg/Ca 值和较高的 Rb/Sr 值, 反映了“海平面下降—气候干热—淡水影响增强”的耦合模式。

DS2 段记录了一次显著的古环境转变。 $\delta^{13}\text{C}$  值出现强烈正偏, 最高达 3.26‰, 这通常解释为海平面快速上升(海侵)导致有机质埋藏速率增加, 使得海水中  $^{13}\text{C}$  相对富集。Fischer 曲线和 Sr 含量的变化也支持海平面快速上升的解释。与此耦合的是古气候指标的显著变化: Mg/Ca 值升高, Rb/Sr 值降低, 这表明此次海侵事件可能与一次区域性的冷湿气候事件相耦合。较寒冷的气候条件可能抑制了微生物的新陈代谢和繁殖速率, 而海平面上升导致的水体加深进一步削弱了透光带强度, 共同导致了 DS2 段微生物活动的显著减弱, 表现为厚层贫藻的泥晶白云岩沉积。

DS3 段是古环境演化的另一个转折点, 表现为急剧海退与干热气候下的环境剧变。 $\delta^{13}\text{C}$  值从 DS2 段顶部的高值迅速负偏, 在 DS3 段内部维持低值, 清晰地指示了海平面的快速下降(海退)。与此同时, 地球化学指标揭示了环境向干热方向的急剧转变: Mg/Ca 值出现低值, Rb/Sr 值出现高值。急剧海退还导致台地大规模暴露, 陆源输入增强( $\Sigma(\text{Al}+\text{Si}+\text{Fe})$  含量显著增高)。急剧的海平面变化也引发了先期沉积物的垮塌, 形成了 DS3 段特征的砾屑白云岩。

DS4 段表现为环境趋于稳定与微生物繁盛的耦

合,  $\delta^{13}\text{C}$  值在一个相对狭窄的范围内波动, 表明海平面结束了 DS3 段沉积期的剧烈下降, 趋于稳定。古气候指标 ( $\text{Mg}/\text{Ca}$ ,  $\text{Rb}/\text{Sr}$ ) 显示气候从 DS3 段沉积期的极端干热向温暖湿润回调并趋于稳定, 古温度计算值回落并保持在适宜区间 (平均约  $19^\circ\text{C}$ )。这种“海平面高位稳定缓慢下降—气候温暖湿润”的耦合背景, 造就了水体清澈、盐度正常、光照充足且稳定的理想环境, 极大地促进了微生物的繁盛和碳酸盐的快速沉淀, 从而形成了 DS4 段厚层、连续的微生物丘滩沉积。这种稳定的环境可能标志着研究区在经历了震旦纪末期的多次气候—海平面协同波动后, 进入了一个相对短暂的构造宁静期和气候适宜期。

旺 1 井灯四段记录的古环境要素耦合关系, 特别是 DS2 段的“冷湿”事件和 DS3 段的“干热”事件, 为理解华南海域在震旦纪末期的古气候演化

提供了新的线索。这些高频波动可能超越了米兰科维奇旋回的尺度, 更可能响应了区域性构造活动 (如桐湾运动) 或全球性古海洋变化。

### 5.5 地质意义

古环境对沉积过程具有控制作用 (He *et al.*, 2025)。古气候、古盐度、古海水温度、古水深及古海平面等古环境要素的改变会影响沉积环境和在该环境下形成沉积物特征, 导致不同的古环境要素特征对应发育不同的岩相组合 (金民东等, 2020)。

DS1 段整体沉积水体较浅, 有利于藻类生物的繁殖, 发育由藻纹层白云岩和藻叠层白云岩组成的藻丘和泥晶白云岩形成的丘滩间沉积 (图 5-D)。

DS2 段沉积期, 海平面快速上升, 台地边缘继续向陆一侧移动, 旺 1 井所处位置水深增加, 古环

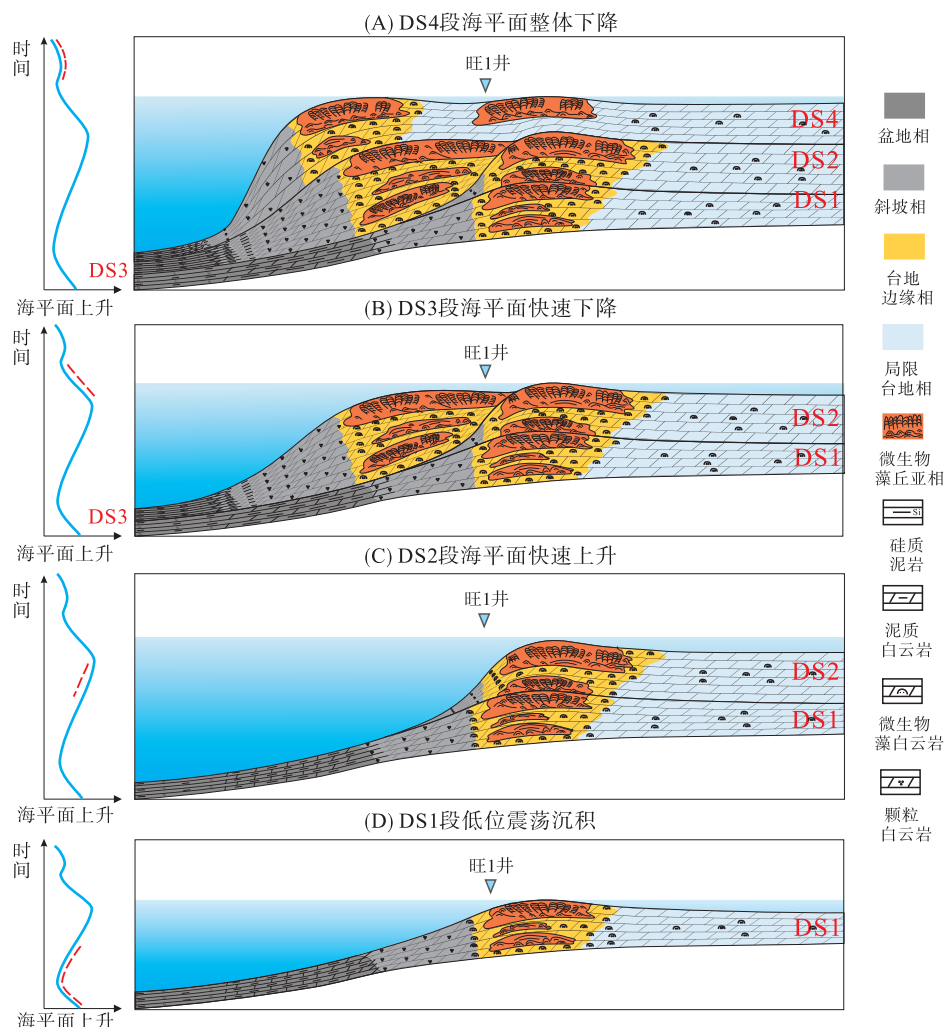


图 5 川北地区旺 1 井灯影组四段沉积充填演化模式

Fig. 5 Sedimentary filling model of the Member 4 of Dengying Formation from Well Wang-1 in northern Sichuan Basin

境向湿冷方向偏移,导致藻丘发育减少(图 5-C)。

DS3 段沉积期,古环境演化曲线显示海平面快速下降。古海水盐度  $Z$  值同时呈现急剧下降, $Sr/Ba$  值处于低值,古盐度显著降低,显示沉积古环境受到大气降水的显著影响。DS3 段沉积初期沉积大量砾屑白云岩,同时铝硅酸盐正异常明显,可能是海平面快速下降期古陆风化加强,造成更多的  $Al$ 、 $Sr$ 、 $Fe$  等陆源碎屑元素随地表径流输送加强。在向上变浅的旋回中,沉积环境受间歇性波浪作用控制,具有静水环境、强水动力环境间歇发育的特征。同期古气候向偏干热方向转变,古海水温度出现一个高值区间,此时研究区具有相对的正地貌背景、较强的水动力条件、较多的营养组分和适宜藻类生物繁衍的温度,开始发育代表藻丘快速建造的藻叠层白云岩—砂屑白云岩—藻凝块白云岩组合,整体上微生物藻丘发育最为迅速(图 5-B)。

DS4 段沉积初期继承了上一阶段的古环境面貌,初始水深小幅上升,但整体呈下降趋势,环境稳定。随着海平面的升降与微生物藻丘的建造速率相匹配,微生物藻丘进入快速建造阶段,微生物(藻)白云岩成为沉积主体。在沉积环境的周期性影响之下,微生物藻丘的岩性发育也呈现出受水动力条件、沉积水深等环境因素影响的韵律性发育特征,形成泥晶白云岩→藻叠层白云岩→藻凝块白云岩的向上变浅序列(图 5-A)。

从微生物碳酸盐岩与对古环境的响应角度来看,川北地区震旦系灯影组微生物藻丘、颗粒滩及丘滩间海的叠置发育明显受到沉积古地貌、次级海平面波动和古气候的共同控制,在相对正向的古地貌背景下,当古水深增长速率与微生物藻丘建造速度相匹配且环境温暖适宜微生物生长时,微生物藻丘将进入快速建造阶段。旺 1 井微生物(藻)白云岩在灯四段顶、底更为发育,整体形成 2 套微生物丘滩体沉积。综上所述,四川盆地震旦系灯影组顶部和中下部都具有微生物藻丘建造的古环境背景,在台地边缘及局限台地隆凹相间的古地貌背景下,寻找继承发育的高部位,是追踪有利丘滩体及对已经刻画的优势相带做进一步论证的关键因素。

## 6 结论

1) 川北旺 1 井灯影组四段白云岩以台地相沉积为主,主要岩性为微生物(藻)白云岩、颗粒

白云岩、角砾白云岩和晶粒白云岩。按照岩性组合的差异将灯四段分为 4 段,其中顶、底 2 段(DS4、DS1 段)为富藻段,DS2 段为贫藻段,主要以厚层泥晶白云岩为特征,DS3 段以厚层砾屑沉积为特征。

2) 灯四段沉积时期的水深变化分为低位震荡(DS1)、快速上升(DS2)、快速下降(DS3)、整体下降(DS4)4 个阶段,相对古气候变化基本与古海平面升降相耦合,海平面下降时更偏向干热环境。

3) 微生物藻丘及其内部的岩性发育也呈现出受古环境、古地貌等综合因素控制之下的韵律性发育特征,在相对正向古地貌背景下,当古水深增长速率与微生物藻丘建造速度相匹配且环境温暖时,微生物藻丘将快速建造,沉积厚层微生物(藻)白云岩。当古水深快速下降,微生物丘滩顶端暴露易形成大量砾屑白云岩沉积于丘滩两侧。微生物(藻)白云岩与颗粒白云岩都是优质储集层发育段,旺 1 井灯四段顶部和中下部都具有形成规模丘滩的古环境背景,因此在台地隆凹相间的古地貌背景下寻找其高部位,是追踪有利丘滩体及对已经刻画的优势相带做进一步论证的关键手段。

## 参考文献 (References)

- 陈雅丽,储雪雷,张兴亮,翟明国. 2015. 陕南镇巴地区灯影组白云岩的碳、硫同位素和微量元素指示: 埃迪卡拉纪末期浅海的氧化还原环境. 中国科学(D 辑): 地球科学, 45(7): 963-981. [Chen Y L, Chu X L, Zhang X L, Zhai M G. 2015. Carbon isotopes, sulfur isotopes, and trace elements of the dolomites from the Dengying Formation in Zhenba area, southern Shaanxi: implications for shallow water redox conditions during the terminal Ediacaran. *Scientia Sinica(Terrae)*, 45(7): 963-981]
- 冯子辉,邵红梅,刘云苗,卢曦,赵威,白雪晶,许智禹. 2022. 塔里木盆地古城地区奥陶系成岩流体与碳酸盐岩储层形成关系研究. 中国石油勘探, 27(4): 47-60. [Feng Z H, Shao H M, Liu Y M, Lu X, Zhao W, Bai X J, Xu Z Y. 2022. Study on the relationship between the Ordovician diagenetic fluid and carbonate reservoir development in Gucheng area, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 47-60]
- 郭旭升,胡东风,黄仁春,段金宝,姜智利,朱祥. 2020. 川东北地区胡家坝震旦系灯影组古油藏特征及其油气勘探意义. 石油与天然气地质, 41(4): 673-683. [Guo X S, Hu D F, Huang R C, Duan J B, Jiang Z L, Zhu X. 2020. Feature of paleo-oil pools in the Sinian Dengying Formation, northeastern Sichuan Basin, and its significance to exploration. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 673-683]
- 郝松立,李文厚,刘建平,陈强,李莹,朱静,谭晨曦,张慧元. 2011. 鄂

- 尔多斯南缘奥陶系生物礁相碳酸盐岩碳氧同位素地球化学特征. 地质科技情报, 30(2): 52-56. [ Hao S L, Li W H, Liu J P, Chen Q, Li Y, Zhu J, Tan C X, Zhang H Y. 2011. Characteristics of carbon and oxygen isotopes geochemistry of organic reef facies carbonates of Ordovician in southern margin of Ordos. Geological Science and Technology Information, 30(2): 52-56 ]
- 侯恩刚, 高金汉, 王训练, 王根厚, 胡歆睿, 马占川. 2013. 西藏改则热那错地区上三叠统日干配错组碳酸盐岩 C、O 同位素特征及其地质意义. 现代地质, 27(6): 1332-1339. [ Hou E G, Gao J H, Wang X L, Wang G H, Hu X R, Ma Z, C. 2013. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of carbonate rocks in Riganpeicuo Formation of Upper Triassic in Renacuo area of Gaize, Tibet and its geological significance. Geoscience, 27(6): 1332-1339 ]
- 侯明才, 何亮, 徐胜林, 汤智江. 2020. 镇巴地区灯影组岩石微相研究与沉积环境分析. 西南石油大学学报(自然科学版), 42(3): 31-42. [ Hou M C, He L, Xu S L, Tang Z J. 2020. Analysis of rock types and sedimentary environment of Dengying Formation, Zhenba area. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 42(3): 31-42 ]
- 贾承造, 庞雄奇. 2015. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向. 石油学报, 36(12): 1457-1469. [ Jia C Z, Pang X Q. 2015. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories. Acta Petrolei Sinica, 36(12): 1457-1469 ]
- 金民东, 李毕松, 朱祥, 代林呈, 姜智利, 吴浩, 李辉, 杨佩芸. 2020. 四川盆地东北部元坝地区及周缘震旦系灯影组四段储集层特征及主控因素. 石油勘探与开发, 47(6): 1090-1099. [ Jin M D, Li B S, Zhu X, Dai L C, Jiang Z L, Wu H, Li H, Yang P Y. 2020. Characteristics and main controlling factors of reservoirs in the Fourth Member of Sinian Dengying Formation in Yuanba and its peripheral area, northeastern Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 47(6): 1090-1099 ]
- 李英强, 何登发, 文竹. 2013. 四川盆地及邻区晚震旦世古地理与构造-沉积环境演化. 古地理论, 15(2): 231-245. [ Li Y Q, He D F, Wen Z. 2013. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Late Sinian in Sichuan Basin and adjacent areas. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 15(2): 231-245 ]
- 刘英俊, 等. 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社. [ Liu Y J, et al. 1984. Elemental Geochemistry. Beijing: Science Press ]
- 孟昊, 任影, 钟大康, 高崇龙, 高宙, 王点, 姜杨锦丰, 李谨杰. 2016. 四川盆地东部寒武系龙王庙组地球化学特征及其古环境意义. 天然气地球科学, 27(7): 1299-1311. [ Meng H, Ren Y, Zhong D K, Gao C L, Gao Z, Wang D, Jiang Y J F, Li J J. 2016. Geochemical characteristic and its paleoenvironmental implication of Cambrian Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin, China. Natural Gas Geoscience, 27(7): 1299-1311 ]
- 米利曼 J D. 1978. 海洋碳酸盐. 中国科学院地质研究所译. 北京: 科学出版社, 115-128. [ Miliman J D. 1978. Marine Carbonate. Beijing: Science Press, 115-128 ]
- 邱家骧, 林景仟. 1993. 岩石化学. 北京: 地质出版社. [ Qiu J X, Lin J Q. 1993. Rock Chemistry. Beijing: Geological Publishing House ]
- 斯春松, 郝毅, 周进高, 倪超, 潘立银. 2014. 四川盆地灯影组储层特征及主控因素. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(3): 266-273. [ Si C S, Hao Y, Zhou J G, Ni C, Pan L Y. 2014. Characteristics and controlling factors of reservoir in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 41(3): 266-273 ]
- 王琳霖, 浮昀, 方诗杰. 2018. 鄂尔多斯盆地东缘马家沟组元素地球化学特征及古沉积环境. 石油实验地质, 40(4): 519-525. [ Wang L L, Fu Y, Fang S J. 2018. Elemental geochemical characteristics and geological significance of Majiagou Formation, eastern Ordos Basin. Petroleum Geology & Experiment, 40(4): 519-525 ]
- 王鹏万, 斯春松, 张润合, 李娴静, 马立桥, 黄羚, 徐云俊, 鲁慧丽. 2016. 滇黔北坳陷寒武系碳酸盐岩古海洋环境特征及地质意义. 沉积学报, 34(5): 811-818. [ Wang P W, Si C S, Zhang R H, Li X J, Ma L Q, Huang L, Xu Y J, Lu H L. 2016. Characteristic of the Cambrian carbonate paleo-ocean environment in the Dianqianbei Depression and its geological significance. Acta Sedimentologica Sinica, 34(5): 811-818 ]
- 王珊珊, 曹志敏, 兰东兆, 郑志昌. 2010. 珠江口沉积地球化学特征与古环境演化过程. 地球科学, 35(2): 261-267. [ Wang S S, Cao Z M, Lan D Z, Zheng Z C. 2010. Geochemical characteristics of sediment of Pearl River Estuary and its paleoenvironmental evolution. Earth Science, 35(2): 261-267 ]
- 汪凯明, 罗顺社. 2009. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义: 以冀北坳陷长城系高于庄组为例. 石油与天然气地质, 30(3): 343-349. [ Wang K M, Luo S S. 2009. Geochemical characters of carbonates and indicative significance of sedimentary environment: an example from the Gaoyuzhuang Formation of the Changcheng System in the northern Hebei Depression. Oil & Gas Geology, 30(3): 343-349 ]
- 文龙, 罗冰, 钟原, 马奎, 严威, 张玺华, 李勇, 彭瀚霖, 李堃宇, 周红飞. 2021. 四川盆地灯影期沉积特征及槽-台体系成因模式. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(5): 513-524, 590. [ Wen L, Luo B, Zhong Y, Ma K, Yan W, Zhang X H, Li Y, Peng H L, Li K Y, Zhou H F. 2021. Sedimentary characteristics and genetic model of trough-platform system during the Dengying period in Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 48(5): 513-524, 590 ]
- 严兆彬, 郭福生, 潘家永, 郭国林, 张曰静. 2005. 碳酸盐岩 C、O、Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用. 地质找矿论丛, 20(1): 53-56, 65. [ Yan Z B, Guo F S, Pan J Y, Guo G L, Zhang Y J. 2005. Application of C、O and Sr isotope composition of carbonates in the research of paleoclimate and paleoceanic environment. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(1): 53-56, 65 ]
- 杨剑萍, 晋同杰, 姜超, 于作刚. 2015. 歧口凹陷西南缘沙一下亚段碳酸盐岩沉积模式. 新疆石油地质, 36(2): 134-139. [ Yang J P, Jin T J, Jiang C, Yu Z G. 2015. Sedimentary model for lacustrine carbonate rocks in lower Sha-1 Member of Shahejie Formation in southwestern margin of Qikou sag. Xinjiang Petroleum Geology, 36(2): 134-139 ]
- 杨雨, 文龙, 谢继容, 罗冰, 黄平辉, 冉崎, 周刚, 张玺华, 汪华, 田兴旺, 张亚, 陈聪. 2020. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探进展与方向. 中国石油勘探, 25(3): 44-55. [ Yang Y, Wen L, Xie J R, Luo

- B, Huang P H, Ran Q, Zhou G, Zhang X H, Wang H, Tian X W, Zhang Y, Chen C. 2020. Progress and direction of marine carbonate gas exploration in Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(3): 44–55]
- 杨雨, 汪泽成, 文龙, 谢武仁, 付小东, 李文正. 2022. 扬子克拉通西北缘震旦系油气成藏条件及勘探潜力. *石油勘探与开发*, 49(2): 238–248. [Yang Y, Wang Z C, Wen L, Xie W R, Fu X D, Li W Z. 2022. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 238–248]
- 杨振宇, 沈渭洲, 郑连弟. 2009. 广西来宾蓬莱滩二叠纪瓜德普统一乐平统界线剖面元素和同位素地球化学研究及地质意义. *地质学报*, 83(1): 1–15. [Yang Z Y, Shen W Z, Zheng L D. 2009. Elements and isotopic geochemistry of Guadalupian-Lopingian boundary profile at the penglaitan section of Laibin, Guangxi Province, and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 1–15]
- 杨志波, 季汉成, 鲍志东, 史燕青, 赵雅静, 向鹏飞. 2024. 白云石晶体结构和地球化学特征对沉积环境响应: 以扬子地台晚埃迪卡拉纪灯影组白云岩为例. *地质前缘*, 31(3): 68–79. [Yang Z B, Ji H C, Bao Z D, Si Y Q, Zhao Y J, Xiang P F. 2024. Dolomite crystal structure and geochemical characteristics in response to depositional environment: an example of dolomite from the Late Ediacaran Dengying Formation of the Yangzi Plateau. *Earth Science Frontiers*, 31(3): 68–79]
- 姚升阳, 牟传龙, 周刚, 王启宇, 王秀平. 2020. 四川盆地东北部镇巴地区二叠系 C-O-Sr 同位素组成及沉积演化特征. *地球科学与环境学报*, 42(5): 637–653. [Yao S Y, Mou C L, Zhou G, Wang Q Y, Wang X P. 2020. Characteristics of C-O-Sr isotope composition of Permian and their sedimentary evolution in Zhenba area of the northeastern Sichuan Basin, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 42(5): 637–653]
- 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]
- 张自力, 乔艳萍, 豆霜, 李堃宇, 钟原, 武鲁亚, 张宝收, 戴鑫, 金鑫, 王斌, 宋金民. 2024. 四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组二段岩溶古地貌与控储模式. *石油与天然气地质*, 45(1): 200–214. [Zhang Z L, Qiao Y P, Dou S, Li K Y, Zhong Y, Wu L Y, Zhang B S, Dai X, Jin X, Wang B, Song J M. 2024. Karst paleogeomorphology and reservoir control model of the 2<sup>nd</sup> Member of Dengying Formation in Penglai gas area, Sichuan Basin, China. *Oil & Gas Geology*, 45(1): 200–214]
- 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 段书府, 魏国齐, 罗冰, 文龙, 马石玉, 冯庆付, 刘静江, 孙夕平, 谢武仁. 2020. 四川盆地蓬莱 1 井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义. *中国石油勘探*, 25(3): 1–12. [Zhao L Z, Wang Z C, Yang Y, Duan S F, Wei G Q, Luo B, Wen L, Ma S Y, Feng Q F, Liu J J, Sun X P, Xie W R. 2020. Important discovery in the Second Member of the Dengying Formation in Well Pengtan 1 and its significance, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(3): 1–12]
- 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 张建勇, 倪新锋. 2022. 中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与海相大油气田发现. *中国石油勘探*, 27(4): 1–15. [Zhao W Z, Shen A J, Qiao Z F, Zhang J Y, Ni X F. 2022. Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 1–15]
- 郑德顺, 刘思聪, 徐江红, 王振江, 李雨. 2018. 豫西南浙川地区灯影组白云岩地球化学特征及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 38(4): 112–122. [Zheng D S, Liu S C, Xu J H, Wang Z J, Li Y. 2018. Geochemistry of the dolomite from Dengying Formation in Xichuan, southwest Henan Province: implications for paleoenvironment. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(4): 112–122]
- 邹才能, 谢增业, 李剑, 张璐, 杨春龙, 崔会英, 王晓波, 郭泽清, 潘松圻. 2023. 典型碳酸盐岩大气田规模聚集差异性及其主控因素: 以四川盆地安岳气田和鄂尔多斯盆地靖边气田为例. *石油与天然气地质*, 44(1): 1–15. [Zou C N, Xie Z Y, Li J, Zhang L, Yang C L, Cui H Y, Wang X B, Guo Z Q, Pan S Q. 2023. Differences and main controlling factors of large-scale gas accumulations in typical giant carbonate gas fields: a case study on Anyue gas field in the Sichuan Basin and Jingbian gas field in the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(1): 1–15]
- Derry L A, Brasier M D, Corfield R M, Rozanov A Y, Zhuravlev A Y. 1994. Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton: a paleoenvironmental record during the ‘Cambrian explosion’. *Earth and Planetary Science Letters*, 128: 671–681.
- Fairbridge R W. 1981. Holocene climate changes. *Nature*, 292: 670–671.
- He Q, Shi K B, Ma Y S, Liu B, Han J, Li J, Bai X Y, Wu C, McArthur A D, Mountney N P. 2025. Evolution of rimmed carbonate platform architecture controlled by sea-level change: insights from the Lower-Middle Cambrian of the northern Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 171: 107215.
- Keith M L, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10): 1787–1816.
- Veizer J, Compston W. 1974. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr composition of seawater during the Phanerozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(9): 1461–1484.
- Yang D M, Huang Y J, Chen Z Y, Huang Q H, Ren Y G, Wang C S. 2021. A Python code for automatic construction of Fischer plots using proxy data. *Scientific Reports*, 11(1): 10518.
- Zhang F F, Xiao S H, Kendall B, Romaniello S J, Cui H, Meyer M, Gilleaudeau G J, Kaufman A J, Anbar A D. 2018. Extensive marine anoxia during the terminal Ediacaran period. *Science Advances*, 4(6): ean8983.

(责任编辑 张西娟)