

# 四川盆地下寒武统筇竹寺组烃源岩有机质 差异富集机制与天然气勘探领域

杨雨<sup>1</sup>, 罗冰<sup>1</sup>, 张本健<sup>1</sup>, 肖笛<sup>2,3</sup>, 肖文摇<sup>2</sup>, 曹剑<sup>2</sup>

(1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 成都 610041;

2. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;

3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500)

**摘要:**四川盆地以下寒武统筇竹寺组为烃源岩的海相高演化天然气系统是全球这一领域的一个典范,为进一步深化地质理论认识,拓展勘探领域,针对当前川中、川东北 2 个热点勘探区块,通过地球化学方法,从古生产力、氧化还原条件、陆源输入三方面入手,对不同区域该套烃源岩质量及其有机质富集机制展开了差异对比研究,探讨了天然气勘探领域。结果表明:川中 GS17 井、ZJ2 井所在的裂陷槽内深水陆棚相烃源岩有机碳含量整体高于川东北小洋坝浅水陆棚相烃源岩,两者有机质富集均主要受控于氧化还原环境;川中烃源岩形成于缺氧环境,相较于川东北烃源岩所形成的贫氧环境更有利于有机质的保存;川东北烃源岩形成过程中陆源输入对有机质的稀释作用尤为显著,烃源岩质量不如川中烃源岩。筇竹寺组天然气系统的勘探仍需围绕裂陷槽及周缘展开,同时盆地周缘的深水陆棚地区也值得加以重视,且常规与非常规天然气资源并重。

**关键词:**天然气;氧化还原环境;有机质富集机制;裂陷槽;深水陆棚;筇竹寺组;下寒武统;四川盆地

中图分类号: TE122.113

文献标识码: A

## Differential mechanisms of organic matter accumulation of source rocks in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation and implications for gas exploration fields in Sichuan Basin

YANG Yu<sup>1</sup>, LUO Bing<sup>1</sup>, ZHANG Benjian<sup>1</sup>, XIAO Di<sup>2,3</sup>, XIAO Wenyao<sup>2</sup>, CAO Jian<sup>2</sup>

(1. PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

3. School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** The marine facies highly mature natural gas system with the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation as the source rock in the Sichuan Basin is a global model in this field. To deepen the geological understanding of high quality source rocks and the natural gas exploration areas in the Sichuan Basin, taking two hot exploration blocks in the central and northeastern parts of Sichuan Basin as examples, the differential mechanisms of organic matter accumulation in source rocks of the Qiongzhusi Formation were studied, and some gas exploration areas were identified by the means of geochemical methods from three perspectives, including paleoproductivity, redox conditions and input of terrestrial organic matters. The TOC of source rocks within deep-water shelf in the intracratonic rift sampled from the Gaoshi 17 and Zhongjiang 2 wells in the central Sichuan were higher than that of source rocks within the shallow-water shelf sampled from the Xiaoyangba outcrop, northeastern Sichuan. The organic matter accumulations of both sample sets were mainly controlled by redox condition, but in comparison, the source rocks in the central Sichuan Basin were formed in relative anoxic environment, which was more conducive for the preservation of organic matter than the suboxic environment in northeastern Sichuan Basin. In addition, the dilution effect by terrestrial organic matter input was particularly significant during the formation of source rocks in the northeastern Sichuan Basin, leading to poorer source rock quality. The exploration of natural gas system in the Qiongzhusi Formation still needs to be carried out closely around the intracratonic rift and its

收稿日期: 2021-03-03; 修订日期: 2021-06-28。

作者简介: 杨雨(1972—), 男, 高级工程师, 从事油气地质勘探与管理。E-mail: yangyu@petrochina.com.cn。

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41802147)、国家自然科学基金重点项目(41830425)和中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX010300)资助。

surrounding margin in the future, and the deep-water shelf area around the basin also deserves attention. Both conventional and unconventional natural gas resources should be considered.

**Key words:** natural gas; redox conditions; mechanism of organic matter accumulation; intracratonic rift; deep water shelf; Qiongzhusi Formation; Lower Cambrian; Sichuan Basin

四川盆地中部近年来接连取得勘探突破,在安岳地区发现了万亿立方米级规模储量的震旦系—寒武系特大型气田,这是近年来中国海相油气勘探的亮点,成为了全球古老油气藏的重要勘探目标和经典研究范例<sup>[1-3]</sup>。研究表明,大气田中的天然气主要来源于下寒武统筇竹寺组<sup>[4]</sup>,且近期在盆地西部筇竹寺组还获得了页岩气勘探发现<sup>[5-6]</sup>,这使得该套泥页岩层系受到越来越多石油地质学家的关注。然而,受制于种种因素(如形成时代老、热演化程度高、埋深大导致取心有限等),筇竹寺组综合研究程度远远低于当前页岩气主力勘探层系志留系龙马溪组,现阶段只在沉积厚度、古地理环境以及成藏贡献等方面取得了一定的认识<sup>[4,7-8]</sup>,鲜有关于有机质富集机制的对比分析,尤其针对不同区域、不同环境背景下的烃源岩差异性成因认识不清,这在很大程度上限制了古老天然气藏,包括该层系页岩气的勘探开发步伐。本文基于当前川中和川东北 2 个热点勘探区块,选取 GS17 井、ZJ2 井以及镇巴小洋坝剖面样品,通过地球化学方法,定量评估不同沉积环境下筇竹寺组烃源岩的质量,并从古生产力、氧化还原条件以及陆源输入三方面

入手,对比分析有机质差异富集因素及形成机制,探讨天然气勘探领域,以期加深对古老海相烃源岩成因以及天然气富集规律的认识,为该区油气勘探部署提供参考。

## 1 地质背景

四川盆地是一个四面被造山带围限的菱形叠合盆地,总面积约为  $18 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 1),可划分为 5 个二级构造区域,其中,本文所聚焦的新元古界—下古生界勘探区域主要位于川中平缓带以及川东高陡带(图 1)。

受新元古代早期超大陆裂解地质背景的影响,四川盆地所属的上扬子板块在该时期整体处于拉张构造环境之下,并一直持续到新元古代晚期<sup>[9]</sup>。上扬子地区在震旦系灯影组至下寒武统麦地坪组沉积时期发生了以区域性隆升与剥蚀为特征的桐湾运动<sup>[10]</sup>。具体而言,受桐湾运动 I 幕与 II 幕的影响,灯影组二段与四段顶部发育不整合暴露面<sup>[11]</sup>,受桐湾运动 III 幕的影响,下寒武统麦地坪组仅在绵阳—安岳地区局部残留<sup>[12]</sup>。随后受全球海平面快速上升的影响,整个上扬子地区稳定沉积了

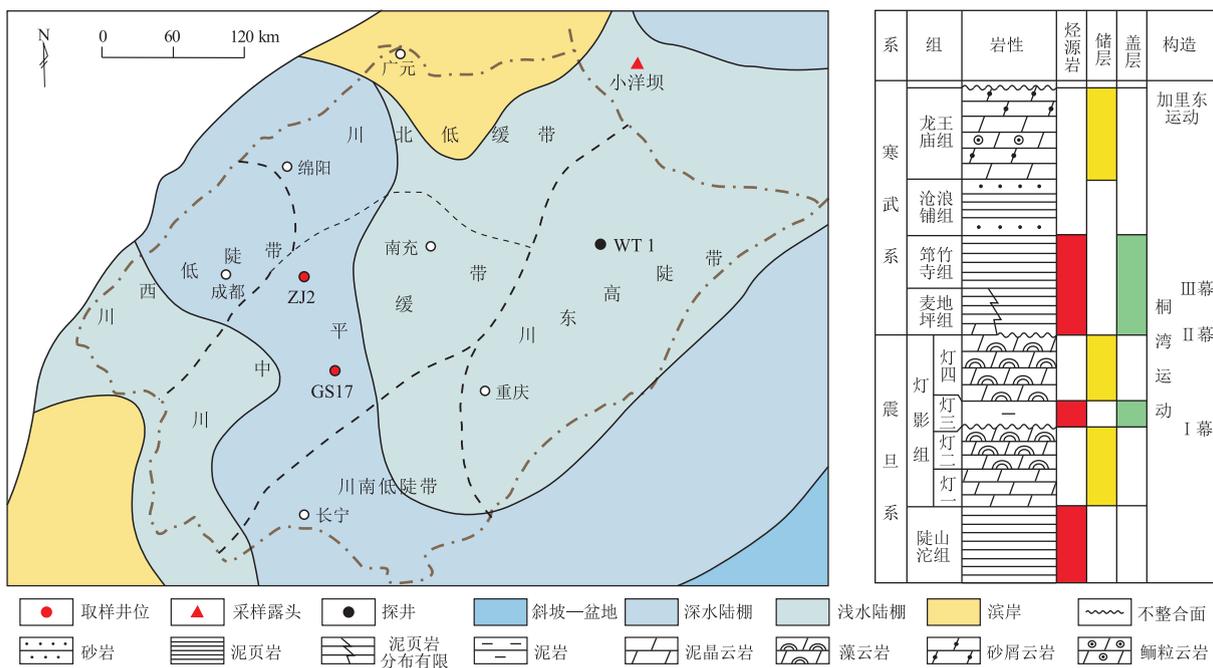


图 1 四川盆地及缘下寒武统筇竹寺组沉积期古地理分布及震旦系—寒武系生储盖组合

Fig.1 Paleogeographic distribution of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation and source-reservoir-cap assemblage of Sinian and Cambrian in Sichuan Basin and its periphery

一套下寒武统的暗色页岩<sup>[13]</sup>,并不整合覆盖于灯影组碳酸盐岩台地层系之上,仅在局部裂陷以及盆地区域为整合连续沉积,大致可划分出浅水陆棚、深水陆棚以及斜坡—盆地 3 个沉积相区<sup>[7]</sup>(图 1)。已有研究表明,盆地中部德阳—安岳地区在晚震旦世—早寒武世发育大型拉张裂陷槽,内部充填上百甚至上千米巨厚的深水陆棚相泥页岩,成为盆地范围内优质烃源岩最为发育的区带<sup>[14-15]</sup>,直到沧浪铺组沉积期才逐渐填平补齐。

## 2 样品与方法

四川盆地及周缘地区的下寒武统可进一步划分为纽芬兰统和黔东统,各地区有不同的地层命名方案,本文采用刘忠宝等<sup>[6]</sup>2016 年建立的该套地层对比方案,川西地区 GS17 井、ZJ2 井筇竹寺组与川东北小洋坝剖面水井沱组对应。样品取自盆地西部的 GS17 井、ZJ2 井和盆地东北缘的小洋坝剖面,其中,GS17 井和 ZJ2 井分别采样 12 件和 16 件,均位于绵阳—长宁裂陷槽核部,是典型的裂陷

槽内深水陆棚烃源岩样品;小洋坝剖面采样 11 件,是典型的浅水陆棚烃源岩样品(图 1a)。以上采样点分别代表不同古地理环境的同时,也代表了目前川中、川东北 2 个热点勘探区块的主要端元类型。

所有样品均完成了主微量元素与有机碳(TOC)含量的地球化学分析测试。其中,采用 Thermo Scientific iCAP 6300 series ICP-OES 和 Finnigan Element II ICP-MS 仪器分别对样品的主量和微量元素含量进行了测试,误差控制在 10% 以下;有机碳含量测定采用 ECS 4024 CHNSO 元素分析仪,误差小于 5%。实验步骤详见参考文献<sup>[16]</sup>。

## 3 烃源岩特征及形成环境

### 3.1 烃源岩有机碳含量

实验样品均为黑色泥页岩,GS17 井筇竹寺组泥页岩 TOC 含量为 0.88%~4.06%,平均 1.78%(图 2a);ZJ2 井筇竹寺组泥页岩 TOC 含量为 1.86%~5.46%,平均 2.93%(图 2b);小洋坝剖面水

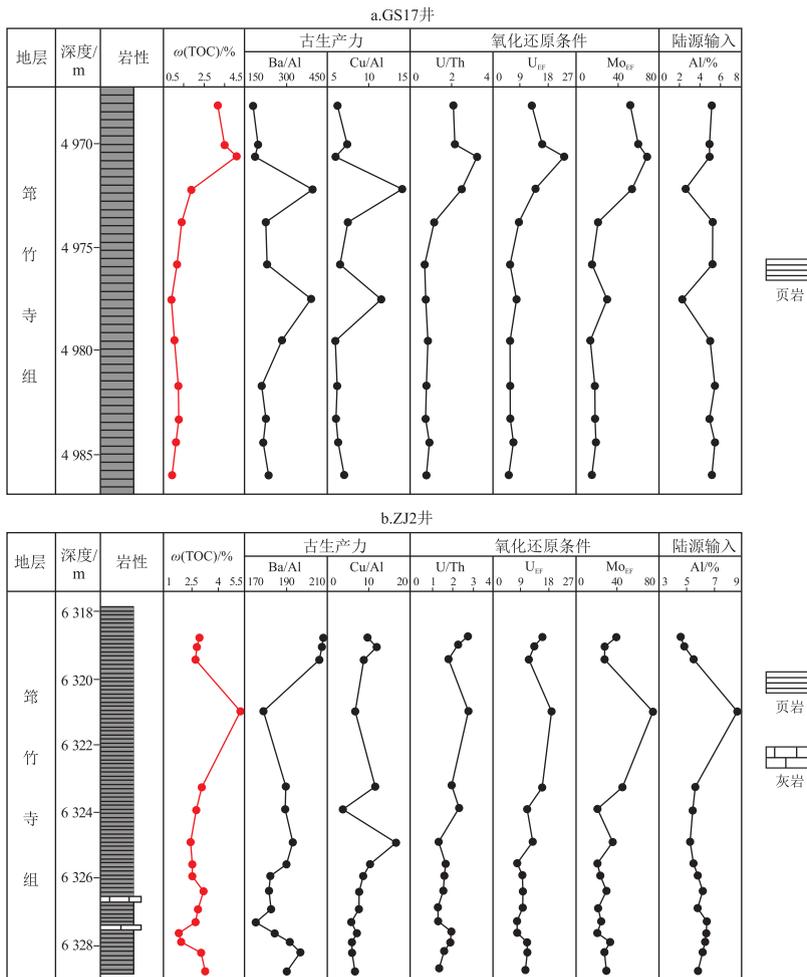


图 2 四川盆地寒武统筇竹寺组深水陆棚烃源岩地球化学综合柱状图

Fig.2 Geochemical column of deep-shelf source rocks of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin

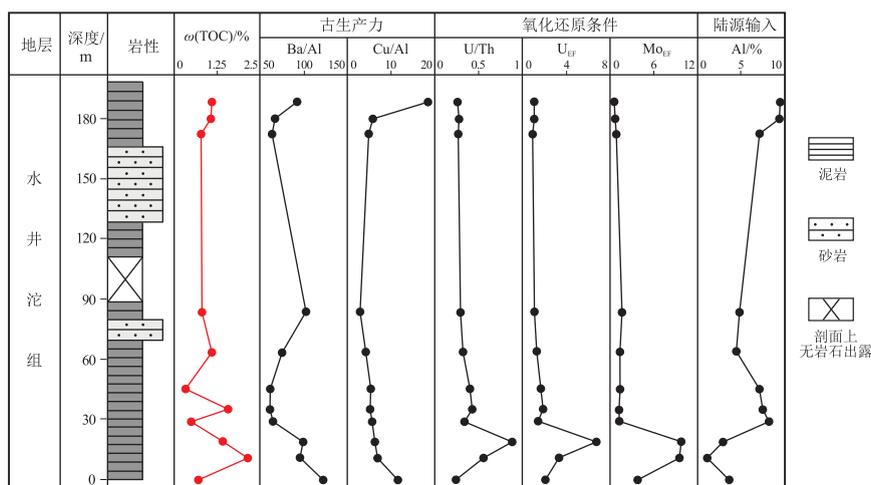


图 3 四川盆地小洋坝下寒武统水井沱组浅水陆棚烃源岩地球化学综合柱状图

Fig.3 Geochemical column of shallow-shelf source rocks of Lower Cambrian Shuijingtuo Formation in Xiaoyangba outcrop, Sichuan Basin

井沱组泥页岩 TOC 含量为 0.32%~2.13%，平均 1.03% (图 3)。由此可见，GS17 井与 ZJ2 井泥页岩 TOC 含量整体高于小洋坝剖面。

### 3.2 古生产力

考虑到元素 Ba 与上升流、表层生产力的良好关联性，以及具有在海水中停留时间长、保存率高（高达 30%）的特点<sup>[17-18]</sup>，Ba 成为使用最早且最为广泛的代表古海洋生产力的微量元素之一。此外，Cu 也通常与有机金属复合物一起被输送到沉积物中<sup>[19-20]</sup>，因此也可作为古生产力的有效恢复指标。一般而言，古生产力的恢复指标通常采用 Ba/Al 和 Cu/Al 比值<sup>[21]</sup>，以消除陆源碎屑物质可能带来的误差。

川中 GS17 井筇竹寺组泥页岩 Ba/Al 与 Cu/Al 值分别在 178.5~395.4 和 5.95~14.05，平均值分别为 248.10 和 7.56；ZJ2 井筇竹寺组泥页岩 Ba/Al 值为 175.5~208.1，平均 190.64，Cu/Al 值为 5.39~16.77，平均 9.53 (图 2)。川东北小洋坝剖面水井沱组泥页岩 Ba/Al 值为 61.2~120.7，平均 82.03；Cu/Al 值为 2.85~18.43，平均 6.98 (图 3)。比较发现，川中裂陷槽深水陆棚相区有机质的古生产力整体略高于川东北浅水陆棚相区。

### 3.3 氧化还原条件

古海水的氧化还原条件可通过氧化还原敏感元素进行定量评价，常见指标包括 U/Th 和  $Mo_{EF}$ 、 $U_{EF}$  (采用富集因子计算得到的 Mo、U 富集程度指标) 等<sup>[21-22]</sup>。其中，U/Th 值 < 0.125，0.125~0.5，> 0.5，分别代表有氧、贫氧以及缺氧环境。GS17 井和 ZJ2 井筇竹寺组泥页岩 U/Th 值分别为 0.69~3.20 和 1.31~3.62，平均值则分别为 1.37 和 1.99

(图 2)，表明形成于缺氧环境；小洋坝水井沱组泥页岩 U/Th 值为 0.23~0.88，其中仅 2 个数据点大于 0.5 (图 3)，平均值 0.38，表明总体形成于贫氧环境。

U 和 Mo 元素在还原条件下的富集速率更快，但在富集过程中往往表现出不同的地球化学作用过程。自生 U 优先富集于  $Fe^{2+}$  与  $Fe^{3+}$  氧化还原界面的贫氧环境<sup>[23]</sup>，而自生 Mo 的富集相对较晚，需要  $H_2S$  的参与<sup>[24]</sup>。与此同时，一定水动力条件下的颗粒搬运、沉积过程可以加速 Mo 向沉积物的转移，而 U 不受这一过程的影响<sup>[25]</sup>。因此，U-Mo 协变是一个恢复海底氧化还原状态的重要指标<sup>[21]</sup>。基于需要消除陆源碎屑输入的影响，通常采用富集因子计算微量元素富集程度<sup>[21]</sup>，计算公式为： $X_{EF} = (X/Al)_{\text{样品}} / (X/Al)_{\text{PAAS}}$ <sup>[21,26]</sup>。GS17 井筇竹寺组泥页岩  $U_{EF}$  值为 5.42~23.96，平均值 9.90， $Mo_{EF}$  值为 13.48~67.74，平均值 31.31 (图 2a)；类似的，ZJ2 井筇竹寺组泥页岩  $U_{EF}$  值为 5.89~18.26，平均值 9.11， $Mo_{EF}$  值为 35.79~133.48，平均值 54.81 (图 2b)。可见，GS17 井与 ZJ2 井的  $U_{EF}$  与  $Mo_{EF}$  值均大于 3，表现出强烈的富集特征。然而，小洋坝剖面水井沱组泥页岩  $U_{EF}$  值为 0.99~6.97，平均值 2.13， $Mo_{EF}$  值为 0.46~9.62，平均值 2.78 (图 3)，整体大于 1 而小于 3，表现为轻微的富集特征，富集程度不及 GS17 井与 ZJ2 井。进一步分析如图 4 所示，小洋坝剖面数据点整体分布于贫氧区域，而 GS17 井与 ZJ2 井数据点则分布于缺氧区域，该结果与上述 U/Th 分析结果一致。综上所述，川西裂陷槽深水陆棚相区泥页岩形成环境较川东北浅水陆棚相区更加缺氧。

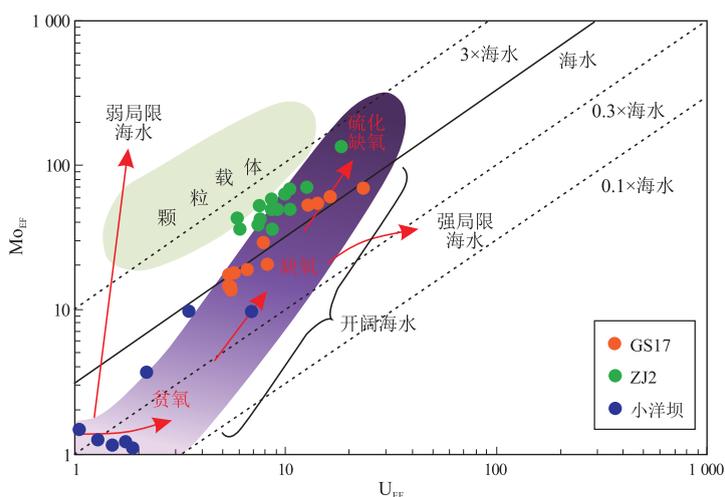


图 4 四川盆地及周缘下寒武统筇竹寺组烃源岩 U-Mo 协变关系  
底图修改自文献[26]。

Fig.4 Covariation of  $U_{EF}$  and  $Mo_{EF}$  for Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and its periphery

### 3.4 陆源输入

已有研究表明,Al 主要来源于铝硅酸盐黏土矿物<sup>[22]</sup>,且在成岩过程中相对稳定,从而常常被用来指示陆源输入<sup>[21]</sup>。如图 2 和图 3 所示,GS17 井与 ZJ2 井筇竹寺组泥页岩 Al 含量分别为 2.21%~5.38% 和 4.60%~8.64%,平均值分别为 4.63% 和 5.89%;小洋坝剖面水井沱组泥页岩 Al 含量为 1.03%~9.40%,平均值 5.96%。比较发现,小洋坝剖面泥页岩 Al 含量变化范围明显较 GS17 井和 ZJ2 井更大,暗示浅水陆棚区域受海平面升降变化引起的风化作用以及陆源输入影响更大。与此同时,小洋坝剖面 Al 含量较 GS17 井与 ZJ2 井更高,表明川东北浅水陆棚相区陆源输入较川西裂陷

槽深水陆棚相区整体更强。

## 4 有机质富集规律

有机质的富集受沉积环境的控制,主要包括古生产力、氧化还原环境、陆源碎屑输入以及沉积速率等因素。结合本次分析结果发现,GS17 井筇竹寺组泥页岩古生产力指标 Ba/Al、Cu/Al 与有机质含量的相关系数分别为 0.177 和 0.013,指示这两者之间关联度较低;且陆源碎屑输入指标与有机质含量相关系数仅为 0.005,表明两者几乎不存在相关性(图 5a, b, f)。但是,3 个氧化还原指标(U/Th、 $U_{EF}$  和  $Mo_{EF}$ ) 则与有机质含量之间具有较高的关联度,相关系数分别为 0.809, 0.858, 0.839

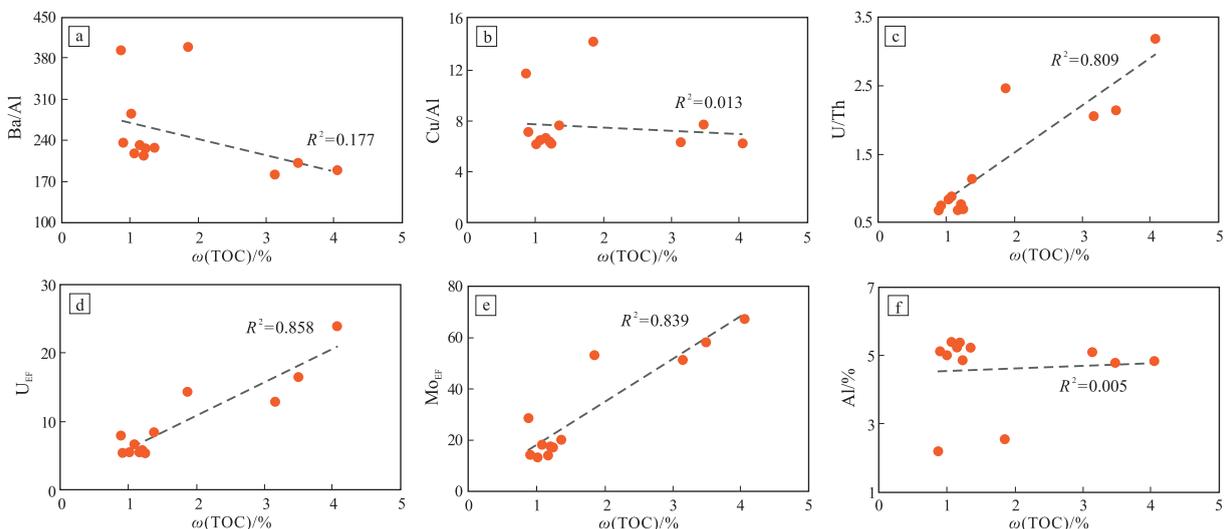


图 5 四川盆地 GS17 井下寒武统筇竹寺组 TOC 含量与古生产力(a, b)、氧化还原条件(c-e)、陆源输入(f)的相关性

Fig.5 Correlation between TOC contents and paleoproductivity (a, b), redox condition (c-e) and terrigenous inputs (f) for Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, well GS 17, Sichuan Basin

(图 5c-e)。类似地,ZJ2 井筇竹寺组泥页岩古生产力指标 Ba/Al、Cu/Al 与有机质含量相关系数分别为 0.040 和 0.014, 指示关联度较低(图 6a, b); 陆源碎屑输入指标与有机质含量相关系数为 0.368, 具有一定的正相关性(图 6f); 而氧化还原指标(U/Th、 $U_{EF}$  和  $Mo_{EF}$ ) 与有机质含量相关系数分别达到 0.588、0.624、0.684, 表明具有强烈的正相关性(图 6c-e)。

相比而言,小洋坝剖面水井沱组泥页岩古生产力指标 Ba/Al、Cu/Al 与有机质含量相关系数分别仅为 0.039 和 0.002, 指示相关性较差(图 7a, b); 陆源碎屑输入指标(Al) 与有机质含量相关系数为

0.220, 以具有一定的负相关性为特征(图 7f); 而氧化还原指标(U/Th、 $U_{EF}$  和  $Mo_{EF}$ ) 与有机质含量相关系数分别为 0.260、0.212、0.399, 具有相对较好的正相关特征(图 7c-e)。

对比发现,GS17 井与 ZJ2 井有机质的富集与氧化还原条件关系密切,而受古生产力与陆源输入的影响相对较小,这表明裂隙槽深水陆棚相区沉积水底缺氧环境是有机质保存与富集的关键。小洋坝剖面有机质富集因素与 GS17 井、ZJ2 井有所不同,除了受古生产力影响较小外,氧化还原环境与陆源输入对有机质的富集都具有一定的影响。具体而言,小洋坝剖面所处的浅水陆棚相区沉积水底

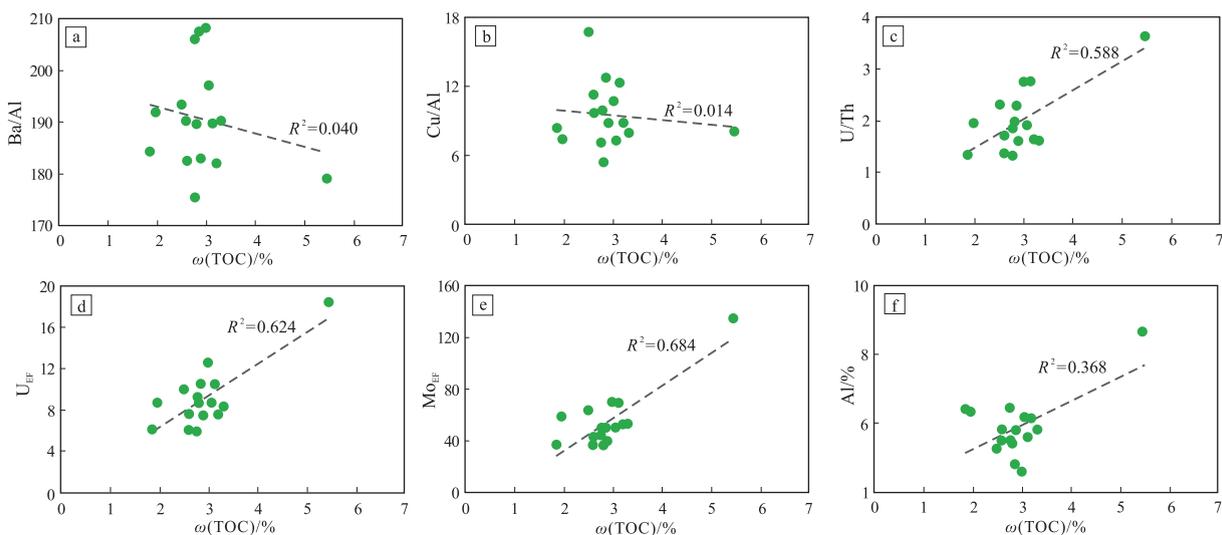


图 6 四川盆地 ZJ2 井下寒武统筇竹寺组 TOC 含量与古生产力(a, b)、氧化还原条件(c-e)、陆源输入(f)的相关性

Fig.6 Correlation between TOC contents and paleoproductivity (a, b), redox condition (c-e) and terrigenous inputs (f) for Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, well ZJ 2, Sichuan Basin

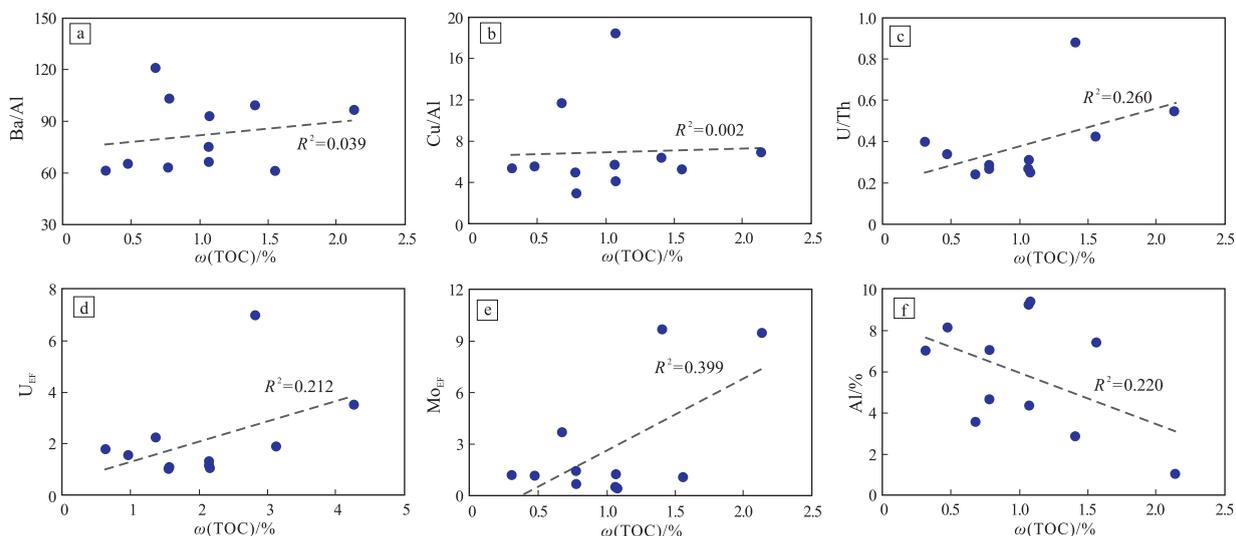


图 7 四川盆地小洋坝下寒武统水井沱组 TOC 含量与古生产力(a, b)、氧化还原条件(c-e)、陆源输入(f)的相关性

Fig.7 Correlation between TOC contents and paleoproductivity (a, b), redox condition (c-e) and terrigenous inputs (f) for Lower Cambrian Shuijingtuo Formation, Xiaoyangba outcrop, Sichuan Basin

以贫氧环境为主,有利于有机质的保存,对于有机质的富集具有建设性作用。但其氧化还原参数与 TOC 的正相关系数明显低于 GS17 井与 ZJ2 井,暗示了裂隙槽内深水陆棚环境下缺氧环境较浅水陆棚环境下贫氧环境更有利于有机质的保存,不同沉积相带与环境下的缺氧程度差异可能是导致相关系数差异性的主要原因。

需要注意的是陆源碎屑输入对有机质的富集既有有利的一面,也有不利的一面。不利的方面表现在陆源输入不仅会破坏水体分层以及低氧环境的形成,还会稀释原始生产力;有利的方面则表现为陆源碎屑中具有较大表面积的黏土矿物往往吸附有机质,从而以更快的速度穿过表层水体并沉积,该过程很大程度减小了有机质沉积过程中的分解与破坏,有利于有机质的快速埋藏与保存。已有研究表明,陆源碎屑的输入量与沉积速率(SR)呈正相关,即陆源碎屑输入越多,沉积速率越快;在可容空间充足的情况下,浮游生物沉积物(有机质)的沉积速率极慢,仅大约 1~20 m/Ma,而富黏土碎屑的沉积速率可达到  $10^3 \sim 10^4$  m/Ma<sup>[27]</sup>。然而,沉积速率与 TOC 含量之间并非线性关系,具体而言,当沉积速率小于临界值(大约 32 m/Ma)时,沉积物快速通过具有强有机降解作用的表层水体,从而 TOC 与沉积速率正相关;当沉积速率大于临界值时,碎屑物质将对有机质产生稀释效应,从而 TOC 与沉积速率负相关。由此分析推断,小洋坝剖面水井沱组沉积期陆源输入较强,对有机质具有稀释作用,从而造成陆源输入与有机质含量呈负相关性特征,这很可能与该区域距离滨岸相比较近有关(图 1)。

综上,虽然 GS17 井、ZJ2 井筇竹寺组与小洋坝水井沱组有机质富集均受古生产力影响较小,但筇竹寺组有机质古生产力水平大于水井沱组,加之沉积水体更为还原,以缺氧环境为特征,以及适量的陆源输入,导致裂隙槽深水陆棚相区泥页岩有机质较浅水陆棚相区更加富集。

### 5 天然气勘探领域

基于上述分析表明,四川盆地及周缘筇竹寺组沉积期不同沉积相带背景下有机质富集程度具有差异性,表现为深水陆棚相区泥页岩有机质较浅水陆棚相区更为富集,且这很大程度决定于深水陆棚沉积水体的缺氧环境。这意味着相对深水沉积环境具有更好的有机质富集条件,从而有利于优质烃源岩的形成。该规律在整个四川盆地及周缘可能具有普遍性意义。

针对筇竹寺组页岩气勘探方向,以上扬子地区筇竹寺组沉积相为基础(图 1,图 8),可以预测盆地范围内优质页岩气勘探区主要分布在绵阳—长宁裂隙槽区域,而盆地周缘东南方向的深水陆棚以及斜坡—盆地相区也是极为有利的勘探区带。

针对震旦系—寒武系常规天然气藏的勘探方向,鉴于近期在川东北 WT1 井勘探效果一般,结合本次烃源岩对比结果,拟从烃源岩、储层以及生储盖组合三方面对川西、川东北震旦系—寒武系天然气成藏因素进行对比分析。(1)烃源岩方面,川西绵阳—长宁凹陷烃源岩累计厚度达到上千米,加之沉积基底长期处于深水缺氧环境,有利于优质烃源岩的形成。相比而言,川东北烃源岩沉积厚度薄,且有机质富集程度相对较低,从而该区域烃源岩质

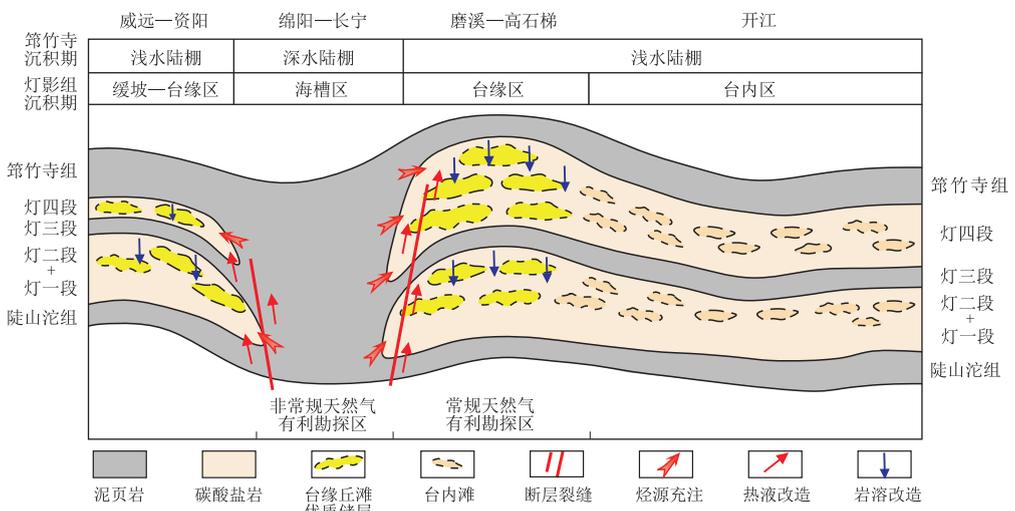


图 8 四川盆地震旦系—寒武系天然气成藏模式与有利勘探区

Fig.8 Accumulation model and exploration targets for natural gas in Simian and Cambrian, Sichuan Basin

量整体不如川西地区(图 8)。(2) 储层方面, 川西拉张裂陷槽中心与两侧的差异升降导致沉积分异十分突出, 除了槽内沉积厚度巨大的优质烃源岩外, 台缘带浅水区域高能水体环境有利于厚层高孔渗碳酸盐岩的沉积<sup>[28]</sup>。与此同时, 裂陷槽演化过程中伴随大量建设性成岩作用的改造, 比如热液随深部断裂上涌发生热液云化、溶蚀作用<sup>[29]</sup>, 台缘带差异升降遭受暴露并演化为岩溶高地与斜坡, 成为岩溶作用最为有利的改造区<sup>[30]</sup>, 这些很大程度上均促进了优质储层的形成。相比而言, 川东缺乏槽内槽缘沉积分异机制, 灯影组以相对平坦的台内沉积环境为特征, 储集岩规模、质量显然很难优于台缘带。(3) 生储盖组合方面, 川西裂陷槽及其周缘, 陡山沱组烃源岩、灯影组储层以及筇竹寺组盖层自下而上依次发育, 形成了典型的三明治结构。此外, 凹陷中心巨厚的筇竹寺组烃源岩可向两侧的灯影组储集岩进行大面积的侧向供烃, 进而形成了“下生上储”与“上生下储”的双供烃模式, 这样的生储盖时空分布与匹配关系, 为该区域大型气藏的形成提供了良好的条件。相比而言, 川东虽然也具有类似的三明治结构以及“下生上储”供烃模式, 但缺乏筇竹寺组“上生下储”侧向供烃模式, 烃源总量也大大减少(图 8)。因此, 川中拉张裂陷槽两侧的台缘带隆起区依然是震旦系—寒武系常规天然气勘探的最有利区带。

综上, 可以推测震旦系—寒武系常规天然气最有利的勘探区分布于拉张裂陷槽两侧的台缘带, 结合目前勘探现状, 可继续以磨溪—高石梯地区为中心, 沿着台缘带展布方向, 继续向南、北拓展; 而针对川东的下一步勘探部署则需谨慎。非常规天然气有利勘探区分布在绵阳—长宁裂陷槽区域, 而在盆地周缘东南方向的深水陆棚以及斜坡—盆地相区值得加以重视。

## 6 结论

(1) 川中裂陷槽内深水陆棚相区筇竹寺组泥页岩形成于高古生产力、缺氧以及低陆源输入环境, 而川东浅水陆棚相区水井沱组泥页岩则形成于低古生产力、贫氧以及高陆源输入环境。

(2) 不同的沉积环境有机质富集机制不同。川中裂陷槽内深水陆棚相区泥页岩有机质富集主要受缺氧环境的影响; 而川东浅水陆棚相区泥页岩有机质富集过程受贫氧环境影响的同时, 还受到了陆源输入稀释作用的影响, 从而导致前者烃源质量优于后者。

(3) 盆地范围内优质页岩气勘探区主要分布在绵阳—长宁裂陷槽区域, 盆地周缘东南方向的深

水陆棚以及斜坡—盆地相区也是极为有利的勘探区带; 而震旦系—寒武系常规天然气最有利的勘探区域位于川西拉张裂陷槽两侧的台缘带隆起区, 针对川东的下一步勘探部署则需谨慎。

致谢: 本文得到中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 特别是区域地质研究所诸多专家的指导与帮助, 诚致谢忱。

## 参考文献:

- [1] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268-277.  
DU Jinhu, ZOU Caineng, XU Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268-277.
- [2] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293.  
ZOU Caineng, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.
- [3] 马新华, 杨雨, 文龙, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 1-13.  
MA Xinhua, YANG Yu, WEN Long, et al. Distribution and exploration direction of medium- and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 1-13.
- [4] SHI Chunhua, CAO Jian, TAN Xiucheng, et al. Hydrocarbon generation capability of Sinian-Lower Cambrian shale, mudstone, and carbonate rocks in the Sichuan Basin, southwestern China: implications for contributions to the giant Sinian Dengying natural gas accumulation [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(5): 817-853.
- [5] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10.  
JIN Zhijun, HU Zongquan, GAO Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [6] 刘忠宝, 高波, 张钰莹, 等. 上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 21-31.  
LIU Zhongbao, GAO Bo, ZHANG Yuying, et al. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 21-31.
- [7] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪—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.
- [8] 杨跃明, 文龙, 罗冰, 等. 四川盆地达州—开江古隆起沉积构造演化及油气成藏条件分析[J]. 天然气工业, 2016, 36(8):

- 1-10.  
YANG Yueming, WEN Long, LUO Bing, et al. Sedimentary tectonic evolution and reservoir-forming conditions of the Dazhou-Kaijiang paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(8): 1-10.
- [9] 管树巍, 吴林, 任荣, 等. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 9-22.  
GUAN Shuwei, WU Lin, REN Rong, et al. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 9-22.
- [10] 武赛军, 魏国齐, 杨威, 等. 四川盆地桐湾运动及其油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 60-70.  
WU Saijun, WEI Guoqi, YANG Wei, et al. Tongwan Movement and its geologic significances in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 60-70.
- [11] 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 等. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布[J]. *石油学报*, 2015, 36(4): 416-426.  
LUO Bing, YANG Yueming, LUO Wenjun, et al. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(4): 416-426.
- [12] 刘树根, 刘殊, 孙玮, 等. 绵阳—长宁拉张槽北段构造—沉积特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(1): 1-13.  
LIU Shugen, LIU Shu, SUN Wei, et al. Tectonic and sedimentary features of the northern Mianyang—Changning intracratonic sag, Sichuan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(1): 1-13.
- [13] 赵建华, 金之钧, 林畅松, 等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 701-715.  
ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, LIN Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 701-715.
- [14] 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 Jinhui, WANG Zecheng, ZOU Caineng, et al. Discovery of intracratonic 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.
- [15] 刘树根, 王一刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(1): 1-23.  
LIU Shugen, WANG Yigang, SUN Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2016, 43(1): 1-23.
- [16] 高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 等. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(6): 844-850.  
GAO Jianfeng, LU Jianjun, LAI Minyuan, et al. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2003, 39(6): 844-850.
- [17] DYMOND J, SUESS E, LYLE M. Barium in deep-sea sediment: a geochemical proxy for paleoproductivity [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 1992, 7(2): 163-181.
- [18] PFEIFER K, KASTEN S, HENSEN C, et al. Reconstruction of primary productivity from the barium contents in surface sediments of the South Atlantic Ocean [J]. *Marine Geology*, 2001, 177(1/2): 13-24.
- [19] NAMEROFF T J, BALISTRERI L S, MURRAY J W. Suboxic trace metal geochemistry in the eastern tropical north pacific [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(7): 1139-1158.
- [20] PIPER D Z, PERKINS R B. A modern vs. Permian black shale: the hydrography, primary productivity, and water-column chemistry of deposition [J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3/4): 177-197.
- [21] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update [J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [22] CALVERT S E, PEDERSEN T F. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record [J]. *Marine Geology*, 1993, 113(1/2): 67-88.
- [23] MORFORD J L, EMERSON S R, BRECKEL E J, et al. Diagenesis of oxyanions (V, U, Re, and Mo) in pore waters and sediments from a continental margin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(21): 5021-5032.
- [24] HELZ G R, MILLER C V, CHARNOCK J M, et al. Mechanism of molybdenum removal from the sea and its concentration in black shales: EXAFS evidence [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(19): 3631-3642.
- [25] CRUSIUS J, CALVERT S, PEDERSEN T, et al. Rhenium and molybdenum enrichments in sediments as indicators of oxic, suboxic and sulfidic conditions of deposition [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 145(1/4): 65-78.
- [26] ALGEO T J, TRIBOVILLARD N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation [J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(3/4): 211-225.
- [27] EINSELE G. Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2000: 463.
- [28] 兰才俊, 徐哲航, 马肖琳, 等. 四川盆地震旦系灯影组丘滩体发育分布及对储层的控制[J]. *石油学报*, 2019, 40(9): 1069-1084.  
LAN Juncai, XU Zhehang, MA Xiaolin, et al. Development and distribution of mound-shoal complex in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin and its control on reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(9): 1069-1084.
- [29] 冯明友, 强子同, 沈平, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系灯影组热液白云岩证据[J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 587-598.  
FENG Mingyou, QIANG Zitong, SHEN Ping, et al. Evidences for hydrothermal dolomite of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(5): 587-598.
- [30] 金民东, 谭秀成, 董明胜, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区灯影组岩溶古地貌恢复及地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 58-68.  
JIN Mindong, TAN Xiucheng, TONG Mingsheng, et al. Karst paleogeomorphology of the fourth member of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China: restoration and geological significance [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 58-68.