

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019086

引用格式: 王文之, 肖文摇, 和源, 左兆喜, 邓思思, 曹剑. 2019. 四川盆地震旦系陡山沱组烃源岩地球化学特征与有机质富集机制[J]. 高校地质学报, 25 (6): 860-870

四川盆地震旦系陡山沱组烃源岩地球化学特征与有机质富集机制

王文之¹, 肖文摇², 和源¹, 左兆喜², 邓思思¹, 曹剑²

1. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610051;

2. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

摘要: 深层古老层系在油气勘探中的重要性正越来越受到重视, 四川盆地震旦系陡山沱组是中国南方这一领域的潜在烃源岩层系, 但过去因关注少而研究程度低。为加深对其理解, 文章以样品条件较好的四川盆地东北缘城口明月乡剖面为例, 采用岩石学、主、微量及稀土元素等综合分析的方法, 系统探讨了陡山沱组泥页岩的地球化学特征和有机质富集机制。结果表明, 陡山沱组发育了一套富有机质的泥页岩, 主体沉积于次氧化—还原水体环境, 显著的Eu正异常表明沉积时受热液活动影响明显。烃源岩有机质富集显著受控于沉积环境, 同时由于沉积时整体处于较低的沉积速率, 使得自下而上随沉积速率增大, 有机质逐渐富集。此外, 热液活动促进了有机质富集。陡山沱组具有资源潜力, 但非均质性发育, 可能与冰期—间冰期的海平面升降有关。

关键词: 古老含油气系统; 深层; 元素地球化学; 有机质富集; 陡山沱组; 四川盆地

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2019) 06-860-11

Geochemical Characteristics of the Sinian Doushantuo Formation Source Rocks of the Sichuan Basin: Implications for the Organic Matter Accumulation

WANG Wenzhi¹, XIAO Wenya², HE Yuan¹, ZUO Zhaoxi², DENG Sisi¹, CAO Jian²

1. Exploration and Development Research Institute of Southwest Oil and Gas Field Company (CNPC), Chengdu 610051, China;

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

Abstract: Deep ancient strata system is getting more and more attention in the field of hydrocarbon exploration, among which the Sinian Doushantuo Formation of the Sichuan Basin is considered as one of the most potential source rock. During the past decades, few work aimed at this formation had been taken. To deepen understanding of the Doushantuo Formation as a set of potential source rock, taking well-sampled Minyuexiang Section of Chengkou County of northeastern of Sichuan Basin as a case, the geochemical characteristics and organic matter accumulation mechanism of Doushantuo shale are systematically discussed by means of comprehensive analysis of petrology, major, trace and rare earth elements. The results show that the organic-rich black shale developed in the Doushantuo Formation was mainly deposited in suboxic-anoxic environment, and significant positive Eu anomalies indicate that the Doushantuo Formation was influenced by hydrothermal activity during the sedimentation process. The organic matter accumulation is strongly controlled by the anoxic sedimentary environment. Due to the low sedimentation rate, the organic matter gradually enriched with the increase of deposition rate from bottom to top. In addition, hydrothermal activity led to the elevated accumulation and burial of organic

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-11-12

基金项目: “十三五” 国家科技重大专项 (2016ZX05004-005); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项 (2016E-0602) 联合资助

作者简介: 王文之, 男, 1984年生, 高级工程师, 博士, 从事石油地质综合研究工作; E-mail: wangwenzhi@petrochina.com.cn

matter. Further, the Doushantuo Formation has certain oil and gas potential, but its heterogeneity is developed, which may be related to the eustatic change during the glacial–interglacial period.

Key words: ancient petroleum system; deep strata; element geochemistry; organic matter accumulation; Doushantuo Formation; Sichuan Basin

First author: WANG Wenzhi, Senior Engineer; E-mail: wangwenzhi@petrochina.com.cn

1 引言

21 世纪全球油气勘探随理论与技术的进步, 正逐步向深层—超深层、古老含油气系统领域拓展 (Bechstadt et al., 2009; Craig et al., 2009; 赵文智等, 2018, 2019), 如近年来在中国西南部四川盆地中部 (川中) 高石梯—磨溪地区, 就发现了万亿方级的震旦系—寒武系安岳特大气田 (邹才能等, 2014; 魏国齐等, 2017)。这使得古老富有机质泥页岩近年来得到了石油地质学家越来越多的关注, 特别是位于当前普遍公认的下寒武统筇竹寺组优质烃源岩之下的震旦系陡山沱组泥页岩, 有观点就认为其对安岳气田有成烃贡献 (Zou et al., 2014; 魏国齐等, 2017)。因此, 明确陡山沱组泥页岩的烃源特征及其成藏贡献是当前区域油气成藏亟待解决的关键问题, 可望打开新的勘探领域, 深化成藏规律认识, 而且鉴于陡山沱组属于间冰期沉积, 因此相关研究结果还有助于认识冰期—间冰期有机质的聚集机制, 对下伏另一套间冰期沉积 (大塘坡组) 也有参考意义, 因而具有重要的基础理论与实践应用研究意义。

前人对陡山沱组的研究鲜有烃源岩方面的工作, 已有研究主要集中在地层划分与对比 (杨爱华等, 2015; 邓胜徽等, 2015), 岩相古地理刻画 (刘静江等, 2015; 王泽成等, 2019), 古海洋环境变化与生物协同演化 (Mcfadden et al., 2008; Shi et al., 2018), 页岩气的潜力 (李旭兵等, 2014; 单长安等, 2015; 彭波, 2017) 等。究其原因是一套泥页岩过去因古老、高演化而不被关注, 加之又埋藏深, 所以也缺乏样品。

有鉴于此, 为加深对这套古老海相潜在烃源岩的认识, 为下步油气勘探部署提供参考, 本文选择样品条件较好的盆地东北缘城口明月乡剖面, 力图采用岩石学、主、微量及稀土元素的综合研究, 系统探讨这套泥页岩的地球化学特征和有机质富集机制。

2 地质背景

四川盆地位于中国西南部, 扬子准地台西北侧, 为发育于前震旦纪基底之上的一个多旋回叠合盆地 (图 1a)。新元古代早期 (900~700 Ma, 相当于青白口纪—南华纪), 全球罗迪尼亚超级大陆解体, 中国华南古陆也开始发生相应的裂解 (Li et al., 1999)。随后南华纪时期发生了著名的全球性冰期事件——雪球地球, 这一全球性冰期事件主要包括约 720 Ma 的斯图特冰期和 635 Ma 的马里诺冰期 (Hoffman et al., 2017)。在这两次冰期之后, 在中国华南分别沉积了大塘坡组和陡山沱组两套间冰期泥页岩 (图 1b), 是潜在的富有机质烃源层系 (Zou et al., 2014; 魏国齐等, 2017)。

四川盆地及周缘陡山沱组直接上覆于南沱冰碛含砾砂岩之上 (图 1b)。以三峡地区陡山沱组层型剖面为例, 自下而上依次沉积: 南沱冰期之后盖帽白云岩段、黑色泥页岩与白云岩互层, 白云岩层段以及黑色页岩层段 (周传明等, 2019)。陡山沱组沉积时期古构造格局主要由古隆起和边缘凹陷组成, 四川古隆起控制了四川盆地及其周缘陡山沱组沉积, 使得陡山沱组底部盖帽白云岩层段在该区基本缺失 (汪泽成等, 2019)。本次工作的研究剖面城口明月乡剖面位于四川盆地, 陡山沱组厚度约 26 m, 以黑色碳质页岩为主, 剖面缺失最底部盖帽白云岩段, 未见顶。

3 样品及分析方法

对城口明月乡剖面陡山沱组泥岩自下至上间隔~0.5 m 进行系统采样, 共计 40 个样品。所有样品磨制岩石薄片进行显微镜下岩石学观察, 再完成地球化学分析测试, 包括有机碳、主微量及稀土元素分析。有机碳测定采用 ECS 4024 CHNSO 元素分析仪, 测试误差小于 5%。主量元素采用 Thermo Scientific iCAP 6300 series ICP-OES 测定,

含量总体分布在0.81%~2.27%,平均值1.66%。在剖面上,下部(0~5 m)以较低TOC为特征(含量为0.81%~1.32%,均值1.12%),往上部层段(5~26 m)以相对较高TOC为特征(含量为1.51%~2.27%,均值1.82%)。

主量元素以 Al_2O_3 和 K_2O 含量高为特征,分别为1.9%~15.8%(均值10.5%)和1.8%~3.6%(均值2.6%)。其次为 Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 和 TiO_2 ,含量分别为0.2%~6.7%(均值3.6%),0.1%~2.2%(均值1.2%),0.4%~1.0%(均值0.7%)和0.4%~0.7%(均值0.5%)。相比而言, CaO 、 MnO 和 P_2O_5 含量低,分别为0.02%~2.2%(均值0.14%),0~0.14%(均值0.02%)和0.01%~0.05%(均值0.02%)。

城口明月乡剖面陡山沱组泥页岩微量元素特征见图3。对比澳大利亚后太古代平均页岩(PAAS),陡山沱组泥页岩V、Mo、Ba、Pb、Bi元素相对富集,元素与PAAS之间比值分别为1.7~2.9(均值2.1),1.2~3.3(均值2.2),4.5~13.2(均值6.0),0.6~4.1(均值2.3),1.2~2.7(均值1.7)。相比而言,其它微量元素如Co、Ni、Cu、Sr、Zr、Th等元素明显亏损(图4)。

稀土元素Eu异常基于公式 $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N^{2*}\text{Tb}_N)^{1/3}$ (Lawrence et al., 2006)计算,Ce异常基于公式 $\text{Ce}/\text{Ce}^* = \text{Ce}_N / (\text{La}_N * \text{Pr}_N)^{1/2}$ 计算。结果表明,城口明月乡陡山沱组泥岩页岩稀土元素Eu异常值为1.1~3.1,均值为1.4,表明Eu具有较为明显正异常。Ce异常值为0.7~0.9,均值为0.79,表明Ce呈轻微负异常。

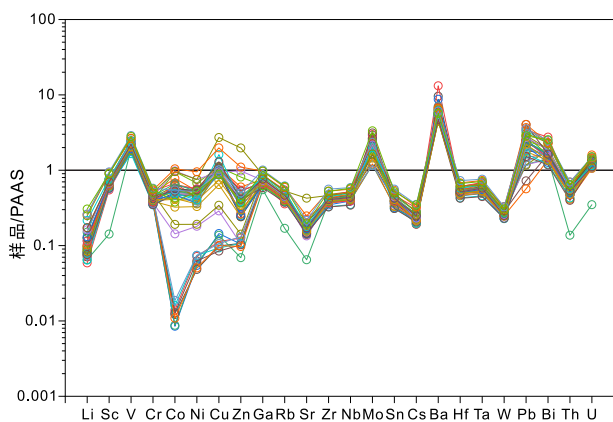


图3 城口明月乡剖面陡山沱组微量元素分布特征

Fig. 3 Trace elements characteristics of the Doushantuo Formation shales

5 讨论

5.1 古生产力

有机质的古生产力是决定其能否富集的重要因素,显然二者呈正相关,若不相关,则说明有机质的富集有其他因素控制,常见判识指标包括铜(Cu)、镍(Ni)和锌(Zn)等营养和生物供给元素(Brumsack, 2006),它们在古海洋中通常以不溶态硫化物相或吡咯形式被有机质带入到沉积物中(Tribovillard et al., 2006)。因此,这些营养元素可以作为反映海洋古生产力水平的指标。需要注意的是,使用时通常还要进行Al均一化校正以去除陆源碎屑的影响,用元素含量除以Al的含量。还有一种常见方法是使用元素过剩量进行计算,公式为 $X_{xs} = X_{total} - \text{Al}_{sample} * (X/\text{Al})_{\text{PAAS}}$ 。其中, X_{xs} 代表元素过剩量, X_{total} 指样品元素含量, Al_{sample} 指样品Al含量, $(X/\text{Al})_{\text{PAAS}}$ 指后太古代澳大利亚平均页岩PAAS的元素与Al含量的比值(PAAS数据引自Taylor and McLennan, 1985)。P作为海洋浮游植物生长重要的营养元素,是生物重要的结构和功能组成(Redfield, 1958)。因此,P/Al也通常用作泥页岩沉积时古生产力水平的指标。

据此,选取 Cu/Al 、 Cu_{xs} 、 Ni/Al 、 Ni_{xs} 、 Zn/Al 、 Zn_{xs} 和 P/Al 作为反映古生产力的指标,发现均一化Al和过剩公式所得的结果在纵向上变化趋势大致相同,表明公式和指标的可靠性(图4)。具体而言,下部(0~5 m)和上部层段(5~26 m) Cu/Al 值分别为5.2~19.3(均值为 10.3×10^{-4})和0.8~10.8(均值为 6.4×10^{-4}), Ni/Al 值分别为3.2~7.1(均值为 4.77×10^{-4})和0.5~7.26(均值为 3.5×10^{-4}), Zn/Al 值分别为13.4~29(均值为 21.8×10^{-4})和9.9~55.2(均值为 19×10^{-4})。下部(0~5 m)和上部层段(5~26 m) P/Al 含量分别为13.4~29(均值为 21.8×10^{-4})和9.9~35.3(均值为 17.8×10^{-4})。从古生产力指标来看,下部层段(0~5 m)古生产力相对较高,而上部层段(5~26 m)古生产力水平相对较低。对比TOC含量,可见城口明月乡剖面陡山沱组下部层段相对低的TOC具有相对高的古生产力水平,而上部层段相对高的TOC层段古生产力水平却较低,如此表明城口明月乡剖面有机质聚集与古生产力的关系不明显。

5.2 沉积环境

有机质的沉积环境是决定其能否富集的另一

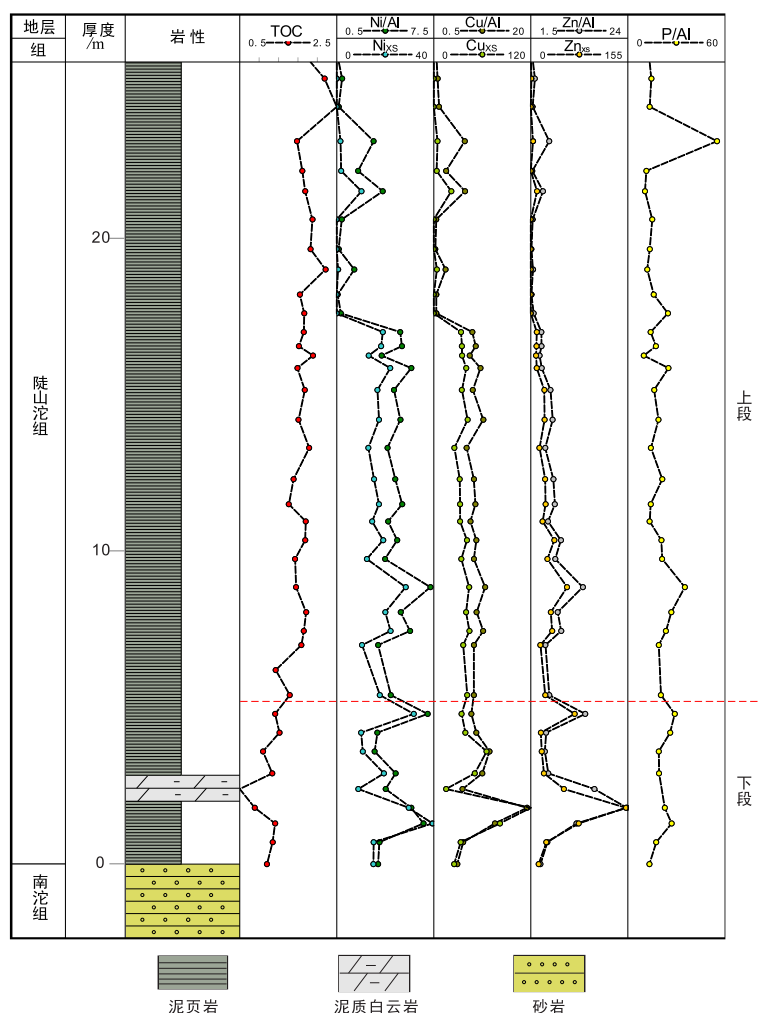


图4 城口明月乡剖面陡山沱组有机碳含量与古生产力纵向变化

Fig. 4 Stratigraphic distribution of TOC and paleoproductivity of the Doushantuo Formation

重要因素, 通常认为还原环境更有利于有机质富集, 常见判识指标是Th/U, 这是因为还原条件下U以不溶态 U^{4+} 形式进入沉积物中富集, 而Th几乎不受氧化还原条件的影响, 因此二者比值可以反映沉积环境 (Wignall and Twitchett, 1996)。具体而言, 还原条件下Th/U一般 <2 , 氧化条件下Th/U值在2~7之间, 而强烈的(陆相)氧化条件Th/U可以大于7 (Wignall and Twitchett, 1996)。同时, 氧化还原敏感元素V、Mo等也可用于反映沉积环境, 这是因为其通常在还原或者硫化水体的沉积物中富集 (Ross and Bustin, 2009; Algeo and Tribovillard, 2009)。此外, Ce异常也可用作指示氧化还原条件的指标, 这是因为氧化条件下Ce易被Fe、Mn的氧化物吸附在海水中亏损而呈负异常 (Tostevin et al., 2016)。

为了去除陆源影响, 通常采用富集因子计算微量元素富集程度 (Tribovillard et al., 2006), 公式为 $X_{EF} = (X/Al)_{\text{sample}} / (X/Al)_{\text{PAAS}}$, $X_{EF} < 1$ 表示亏损, $X_{EF} > 1$ 显示轻微富集, $X_{EF} > 3$ 明显富集, $X_{EF} > 10$ 属于中—强烈富集 (Tribovillard et al., 2006; Algeo and Tribovillard, 2009)。或者与古生产力表征类似, 也均一化Al含量来表征水体氧化还原条件。

据此, 选取Th/U、V/Sc、U/Al、 U_{EF} 、Mo/Al、 Mo_{EF} 、Ce异常等参数来评价城口明月乡剖面陡山沱组沉积时期水体的氧化还原条件 (图5)。发现下部(0~5 m)和上部层段(5~26 m) Th/U值分别为2.0~2.47 (均值2.23) 和1.49~2.23 (均值1.88), V/Sc值分别为26.9~32.6 (均值28.99) 和25.9~125.9 (均值32.9); U/Al值分别为0.52~0.59 (0.57×10^{-4}) 和0.57~1.06 (均值 0.75×10^{-4}); U_{EF} 值

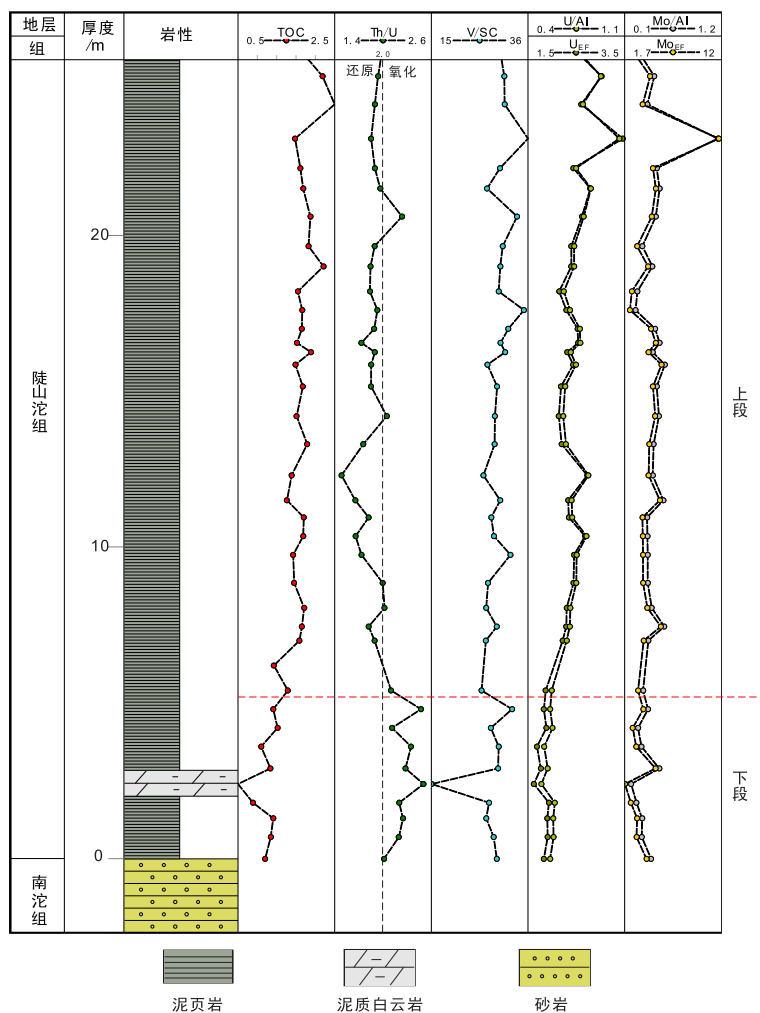


图5 城口明月乡剖面陡山沱组有机碳含量与沉积环境纵向变化

Fig. 5 Stratigraphic distribution of TOC and redox condition of the Doushantuo Formation

分别为 1.68~1.93 (均值 1.84) 和 1.86~3.46 (均值 2.45); Mo/Al 值分别为 0.23~0.49 (均值 0.33) 和 0.22~1.16 (均值 0.43); Mo_{EF} 值分别为 2.4~5.0 (均值 3.32) 和 2.26~11.7 (均值 4.39); Ce 异常值分别为 0.77~0.83 (均值 0.8) 和 0.7~0.83 (均值 0.78), 呈轻微负异常。从以上氧化还原指标可以看出, 下部层段低 TOC 层段处于次氧化-次还原的水体条件下, 上部相对高 TOC 层段处于还原水体条件, 这表明沉积环境与有机质聚集有一定关系, 还原环境有利于有机质的富集。

5.3 沉积速率

有机质的沉积速率和富集之间的关系比较复杂, 前人认为存在一个临界值, 过高和过低的速率实际上都不利于有机质的富集, 因为过高会导致陆源输入的增加而产生有机质的稀释效应, 而

过低会导致有机质的氧化降解效应。一般来说, 陆源碎屑的沉积速率与颗粒粒度呈正相关关系, 据此可以推测沉积速率的相对大小 (Murphy et al., 2000)。由于 Al 主要存在于黏土矿物、长石等矿物中, 而 Ti 主要赋存于粉砂级颗粒的重矿物中 (Rimmer, 2004), 因此, Ti/Al 可以用来反映铝硅酸盐岩颗粒大小, 高的 Ti/Al 值伴随着大的碎屑颗粒和高的沉积速率 (Murphy et al., 2000)。

从城口明月乡剖面陡山沱组 Ti/Al 值纵向剖面图可以看出, 下部层段 (0~5 m) Ti/Al 含量较低, 为 490.5~539.4 (均值为 512.8×10^{-4}); 上部层段 (5~26 m) Ti/Al 含量有所升高, 为 463.6~711.3 (均值为 552.2×10^{-4}) (图 6)。对比 TOC 含量的变化, 可以看出, TOC 含量与 Ti/Al 值有着较好的协同变化关系, 表明沉积速率与有机质输入有一定关

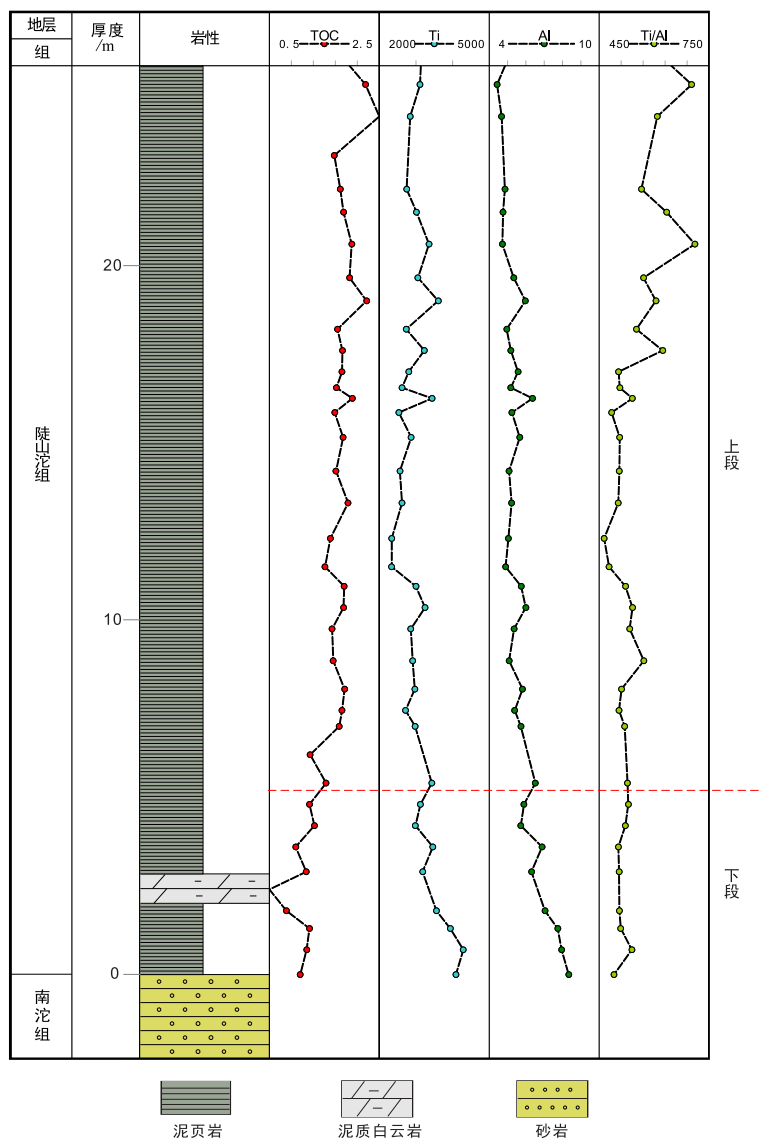


图6 城口明月乡剖面陡山沱组有机碳含量与沉积速率纵向变化

Fig. 6 Stratigraphic distribution of TOC and sedimentation rate of the Doushantuo Formation

系,二者呈正相关,这也说明整体沉积速率并不太高,否则如前所述,会产生有机质的稀释效应。

5.4 热液活动

热液活动对有机质富集的影响已有公认,热液通常可以通过稀土配分模式及Eu异常值来判断,这是因为高温热液容易从地下超镁铁/镁铁岩中淋滤出 Eu^{2+} ,使得在不同构造背景下的热液流体稀土配分模式中通常具有显著的正Eu异常(Klinkhammer et al., 1994; Tostevin et al., 2016)。

对城口明月乡剖面陡山沱组泥页岩进行稀土元素特征分析,从稀土配分模式可以看出,城口明月乡剖面陡山沱组泥页岩的Eu正异常明显(图

7),计算的Eu异常值在1.14~3.1之间,均值为1.4,反映陡山沱组沉积时受较强的热液活动影响。在纵向上,可以看到陡山沱组下部层段低TOC层段Eu正异常值较低,上部层段高TOC层段Eu正异常值整体较高,在剖面顶部高TOC段具有异常高的Eu异常值,表明热液活动对陡山沱组烃源岩有机质聚集具有一定促进作用(图8)。

5.5 有机质富集机制

综合上述结果和分析,可以讨论研究区陡山沱组的有机质富集机制,这是查明优质烃源岩形成分布的基础。烃源岩的有机质聚集机制一直存在古生产力与保存环境模型之争(Pedersen and

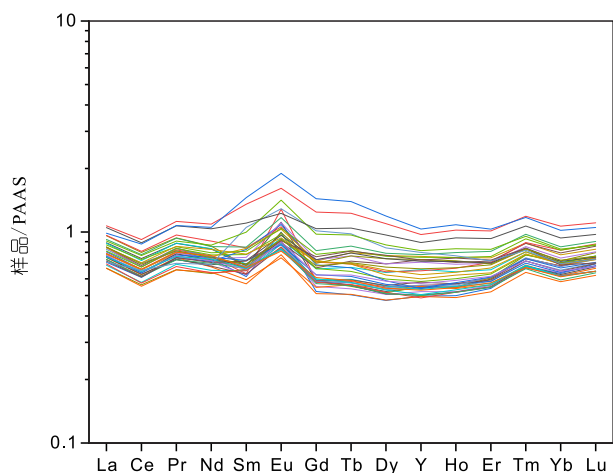


图7 城口明月乡剖面陡山沱组 REY 稀土配分模式
Fig. 7 PAAS-normalized REY patterns of the Doushantuo Formation shales

Calvert, 1990; Tyson, 2005)。然而越来越多的研究表明，单一的模型并不能很好解释烃源岩形成机制，有机质聚集应该是受多种不同因素控制的，包括古生产力、保存条件、沉积速率、降解活动和热液活动等 (Werne et al., 2002; Rimmer et al., 2004; Lash and Blood, 2014)。

在前述分析研究区有机质聚集各项基本条件的基础上，进一步选取反映古生产力水平的指标 P/Al ，反映沉积环境的指标 U_{EF} ，反映热液活动强度的 Eu 异常值 (Eu/Eu^*)，以及反映沉积速率的指标 Ti/Al ，与 TOC 作相关性分析，以查明有机质的富集因素 (图9)。结果表明，城口明月乡剖面陡山沱组 TOC 与反映氧化还原条件的指标 U_{EF} 呈明显的正相关关系，相关关系为 0.5844；与沉积速率指标 Ti/Al 也具有较好的正相关关系，相关系数为 0.2683；与热液活动指标 Eu/Eu^* 具有一定的正相关关系，相关系数为 0.1693；与古生产力指标 P/Al 呈微弱相关性，相关系数为 0.1437。

据此，可以认为城口明月乡陡山沱组有机质富集显著受控于保存条件，沉积速率促进有机质聚集。前人研究表明，在相对较低的沉积速率，有机质沉积速率与沉积物总有机碳含量变化通常呈正相关 (Ibach, 1982)，这是由于快速埋藏能够减少有机质沉积过程中的氧化分解。然而，当处于非常高的沉积速率下，由于大量碎屑物对有机质的稀释作用，沉积物的有机质含量反而与沉积速率呈负相关 (Arthur and Dean, 1998)。陡山沱组处于相对较低的

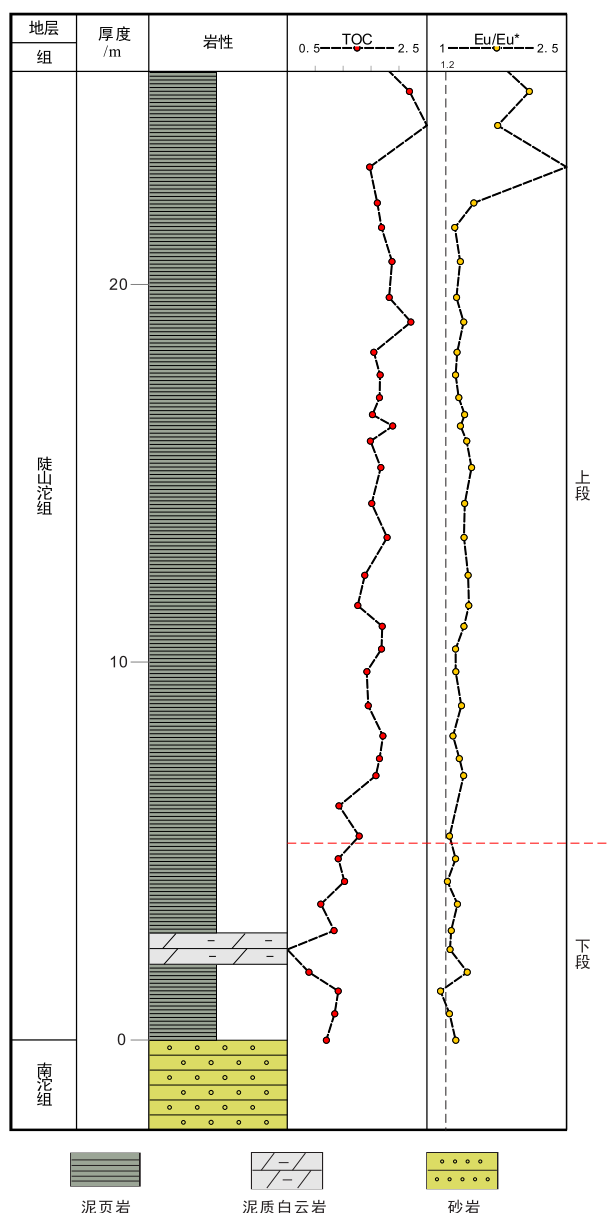


图8 城口明月乡剖面陡山沱组有机碳和 Eu 异常值纵向演化

Fig. 8 Stratigraphic distribution of TOC and Eu anomalies value of the Doushantuo Formation

沉积速率 (Ti/Al 均值为 541×10^{-4})，其沉积速率未达到碎屑物质对有机质稀释门限，因此，随着沉积速率的增高，TOC 逐渐升高。此外，热液活动也在一定程度上促进了陡山沱组有机质聚集，热液带来的营养元素促进了生产力提高，以及有利的保存条件 (Liu et al., 2019)。

5.6 勘探意义

综合上述分析，结合前人在中—上扬子地区震旦系陡山沱组的地层展布资料，可以探讨勘探

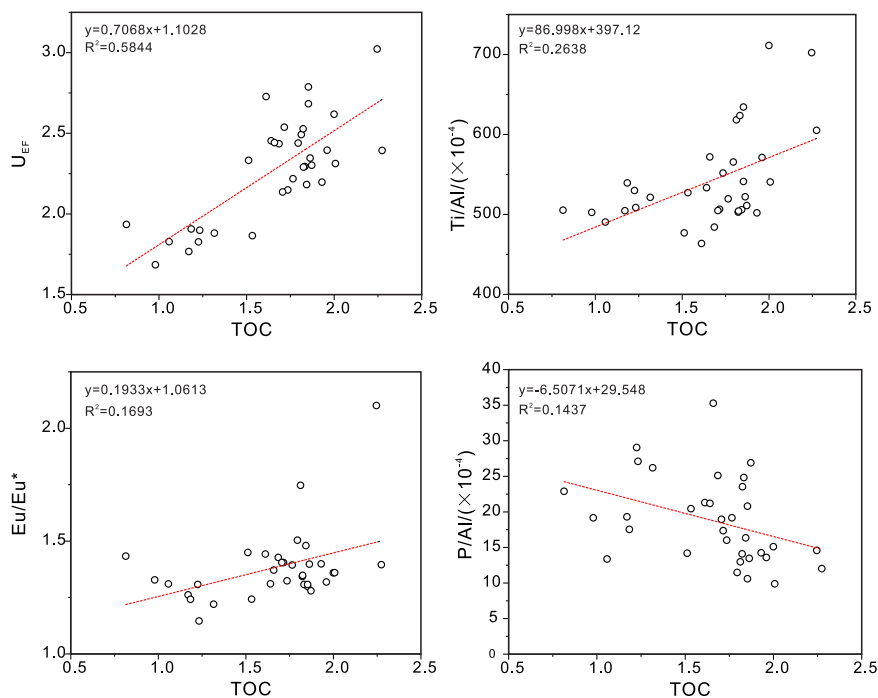


图9 城口明月乡剖面陡山沱组 TOC 与 U_{EF} 、 $Ti/Al (\times 10^{-4})$ 、 Eu/Eu^* 和 P/Al 交会图

Fig. 9 The relationship of TOC and U_{EF} , $Ti/Al (\times 10^{-4})$, Eu/Eu^* and P/Al of the Doushantuo Formation

意义。研究区陡山沱组以陡二段泥页岩为潜在优质烃源岩层段 (图10)。然而, 这一泥页岩层段在四川盆地周缘分布不甚均匀, 例如, 在宜昌地区 (宜地2井) 和川东北镇巴小洋坝剖面厚度较大, 分别为153.5 m和143.3 m; 而秀山地区和本文研究剖面其厚度相对较薄, 仅为37.6 m和28.2 m。由此可见, 本区油气勘探应充分考虑陡山沱组泥页岩

层段沉积非均质性这一特征。

这一非均质性在垂向上也有体现, 以本次研究的剖面为例, 下部层段 (0~5 m) 为中等-高古生产力水平, 沉积时水体处于次氧化-次还原条件, 相对较低的沉积速率, 限制了有机质聚集, 因此表现为较低有机碳含量。而上部层段 (5~26 m) 沉积时处于中等古生产力水平, 保存环境为还原

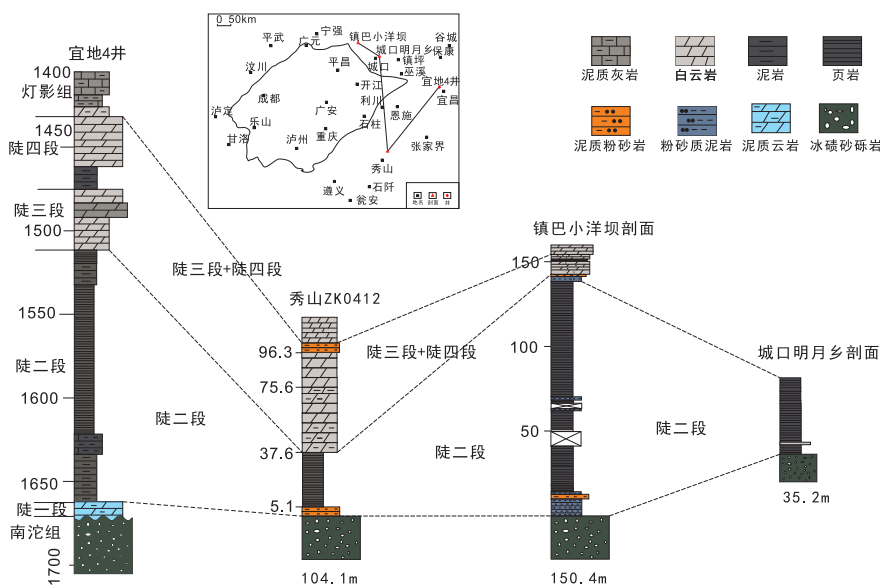


图10 四川盆地及周缘陡山沱组地层对比 (底图及宜地4井数据据汪泽成等, 2019修改)

Fig. 10 Stratigraphic comparison of Doushantuo Formation in Sichuan Basin and adjacent area

条件,较强的热液活动和逐渐升高的沉积速率使得有机质富集,以高TOC为特征。该因素可能与冰期—间冰期的海平面升降有关(Jin et al., 2020),未来需要进一步研究。

此外,本次研究发现四川盆地周缘陡山沱组烃源岩的发育与热液关系密切,这与前人报道的高燕寨子岩剖面陡山沱组具有相似的特征(Liu et al., 2019)。此外,研究剖面在纵向上总体呈现热液作用越强,烃源质量越优质的特征。热液活动对陡山沱组烃源岩具有极大的促进作用,因此在区域勘探中厘清陡山沱组热液活动影响范围,这是寻找优质陡山沱组烃源岩的另一重要因素。

6 结论

四川盆地城口明月乡剖面陡山沱组烃源岩以碳质泥页岩为主,有机碳含量高(均值1.8%),矿物组成以黏土矿物为主,碳酸盐岩矿物含量较低。其沉积时具中等—较高的古生产力水平,沉积水体为次氧化—还原水体条件,整体处于较低沉积速率,受热液活动影响较强,具有资源潜力。

陡山沱组有机质富集强烈受控于保存条件,受古生产力影响不明显;由于整体较低的沉积速率,随着沉积速率的增高,有机质逐渐富集;同时,热液活动促进了有机质的富集。

陡山沱组有机质富集无论在平面还是在垂向上都具有非均质性,以及受热液影响显著,这在今后的烃源岩评价中应加以重视。

参考文献 (References):

- 单长安,张廷山,郭军杰,等. 2015. 中扬子北部震旦统陡山沱组地质特征及页岩气资源潜力分析[J]. 中国地质, 42(6): 1944–1958.
- 邓胜徽,樊茹,李鑫,等. 2015. 四川盆地及周缘地区震旦(埃迪卡拉)系划分与对比[J]. 地层学杂志, 39(3): 239–254.
- 高剑峰,陆建军,赖鸣远,等. 2003. 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), 6: 844–850.
- 李旭兵,陈绵琨,刘安,等. 2014. 雪峰山西侧埃迪卡拉系陡山沱组页岩气成藏体系评价[J]. 石油实验地质, 36(2): 188–193.
- 刘静江,李伟,张宝民,等. 2015. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. 古地理学报, 17(6): 735–753.
- 彭波,刘羽琛,漆富成,等. 2017. 鄂西地区陡山沱组页岩气成藏地质条件研究[J]. 地质论评, 63(5): 1293–1305.
- 四川油气区石油地质志编写组. 1989. 中国石油地质志(卷十): 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社: 82–86.
- 汪泽成,刘静江,姜华,等. 2019. 中—上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积期岩相古地理及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 46(1): 39–51.
- 魏国齐,王志宏,李剑,等. 2017. 四川盆地震旦系—寒武系烃源岩特征、资源潜力与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 28: 1–13.

- 杨爱华,朱茂茨,张俊明,等. 2015. 扬子板块埃迪卡拉系(震旦系)陡山沱组层序地层划分与对比[J]. 古地理学报, 17(1): 1–20.
- 赵文智,胡素云,汪泽成,等. 2018. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. 石油勘探与开发, 45(1): 1–13.
- 赵文智,魏国齐,杨威,等. 2017. 四川盆地万源—达州克拉通内裂陷的发现及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 44(5): 659–669.
- 赵文智,王晓梅,胡素云,等. 2019. 中国元古宇烃源岩成烃特征及勘探前景[J]. 中国科学: 地球科学, 49: 939–964.
- 周传明,袁训来,肖书海,等. 2019. 中国埃迪卡拉纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 49: 7–25.
- 邹才能,杜金虎,徐春春,等. 2014. 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, 41(3): 278–293.
- Hoffman P F. 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth [J]. Science, 281: 1342–1346.
- Algeo T J and Tribouillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum—uranium covariation [J]. Chemical Geology, 268: 211–225.
- Arthur M A and Dean W E. 1998. Organic-matter production and preservation and evolution of anoxia in the holocene black sea [J]. Paleogeography, 13(4): 395–411.
- Bechstadt T, Jager H, Spence G, et al. 2009. Late Cryogenian (Neoproterozoic) glacial and post-glacial successions at the southern margin of the Congo Craton, northern Namibia: facies, palaeogeography and hydrocarbon perspective [J]. Geological Society London Special Publications, 326: 255–287.
- Brumsack H J. 2006. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: implications for cretaceous black shale formation [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 232 (2–4): 344–361.
- Craig J, Thurow J, Thusu B, et al. 2009. Global Neoproterozoic petroleum systems: The emerging potential in North Africa [J]. Geological Society London Special Publications, 326: 1–25.
- Hoffman P F. 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth [J]. Science, 281: 1342–1346.
- Ibach L E J. 1982. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments [J]. AAPG Bulletin, 66: 170–183.
- Jin C, Li C, Algeo T J, et al. 2020. Controls on organic matter accumulation on the early-Cambrian western Yangtze Platform, South China [J]. Marine and Petroleum Geology, 111: 75–87.
- Klinkhammer G P, Elderfield H, Edmond J M, et al. 1994. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from midocean ridges [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58: 5105–5113.
- Lash G G and Blood D R. 2014. Organic matter accumulation, redox, and diagenetic history of the Marcellus formation, southwestern Pennsylvania, Appalachian basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 57: 244–263.
- Lawrence M G, Greig A, Collerson K D, et al. 2006. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways [J]. Aquat. Geochem, 12: 39–72.
- Li Z, Li X, Kinny P D, et al. 1999. The breakup of rodonia: did it start with a mantle plume beneath south china? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 173(3): 171–181.
- Liu, Q, Zhu D, Jin Z, et al. 2019. Influence of volcanic activities on redox chemistry changes linked to the enhancement of the ancient Sinian source rocks in the yangtze craton [J]. Precambrian Research, 327: 1–13.

- Mcfadden K A, Huang J, Chu X, et al. 2008. Pulsed oxidation and bioical evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(9): 3197–3202.
- Murphy A E, Sageman B B, Hollander D J, et al. 2000. Black shale deposition and faunal overturn in the Devonian Appalachian Basin: clastic starvation, seasonal water-column mixing, and efficient biolimiting nutrient recycling [J]. *Paleoceanography*, 15: 280–291.
- Nozaki Y, Lerche D, Alibo D S, et al. 2000. The estuarine geochemistry of rare earth elements and indium in the Chao Phraya River, Thailand [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 3983–3994.
- Pedersen T F and Calvert S E. 1990. Anoxia vs productivity; what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks?[J]. *AAPG Bulletin*, 74 (4): 454–466.
- Rimmer S M, Thompson J A and Goodnight S A. 2004. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian–Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 215: 125–154.
- Ross D J K and Bustin R M. 2009. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: Examples from the Devonian–Mississippian shale, western Canadian Sedimentary Basin [J]. *Chemical Geology*, 260: 1–19.
- Shi W, Li C, Luo G, et al. 2018. Sulfur isotope evidence for transient marine-shelf oxidation during the Ediacaran Shuram Excursion [J]. *Geology*, 46 (3): 267–270.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford, United Kingdom, Blackwell Scientific Publications, 312.
- Tostevin R, Shields G A, Tarbuck G M, et al. 2016. Effective use of cerium anomalies as a redox proxy in carbonate-dominated marine settings [J]. *Chemical Geology*, 438: 146–162.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T W, et al. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update [J]. *Chemical Geology*, 232: 12–32.
- Tyson R V. 2005. The “productivity versus preservation” controversy: cause, flaws, and resolution [J]. *Spec. Publ. –SEPM*, 82: 17–33.
- Werne J P, Sageman B B, Lyons T W, et al. 2002. An integrated assessment of a “type euxinic” deposit: evidence for multiple controls on black shale deposition in the middle Devonian Oatka Creek formation [J]. *American Journal of Science*, 302 (2): 110–143.
- Wignall P B and Twitchett R J. 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. *Science*, 272: 1155–1158.
- Zou C N, Wei G Q, Xu C C, et al. 2014. Geochemistry of the Sinian–Cambrian gas system in the Sichuan Basin, China [J]. *Organic Geochemistry*, 74: 13–21.