

doi: 10.12029/gc20210120

冯伟明, 李嵘, 赵瞻, 余谦, 杨瀚, 谢渊, 叶定南. 2021. 滇东北 DD1 井五峰组—龙马溪组地层界线划分及沉积环境演变[J]. 中国地质, 48(1): 297–308.

Feng Weiming, Li Rong, Zhao Zhan, Yu Qian, Yang Han, Xie Yuan, Ye Dingnan. 2021. Boundary definition of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in well DD1 and sedimentary environment evolution of Northeastern Yunnan[J]. *Geology in China*, 48(1): 297–308(in Chinese with English abstract).

## 滇东北 DD1 井五峰组—龙马溪组地层界线划分 及沉积环境演变

冯伟明<sup>1,2</sup>, 李嵘<sup>1,2</sup>, 赵瞻<sup>1,2</sup>, 余谦<sup>1,2</sup>, 杨瀚<sup>3</sup>, 谢渊<sup>1,2</sup>, 叶定南<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081; 3. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042; 4. 四川省地质矿产勘查开发局一一三地质队, 四川 泸州 646000)

**摘要:** DD1 井上奥陶统临湘组泥灰岩之上发育大套粉砂质泥岩, 笔石化石缺乏, 也未发现观音桥段含赫南特贝灰岩标志层, O-S 界线通过生物地层和岩石地层方法难以确定。微量、稀土元素分析表明, 粉砂质泥岩中部(1288.3 m)的 Th、Sr、Y、Th/U 以及 Ce<sub>n</sub>、Eu<sub>n</sub>、 $\delta$ Ce、 $\delta$ Eu 曲线均呈现尖锐的异常峰, 该处  $\Sigma$ REE 含量显著高于上下地层, REE 分布曲线右倾斜率更大。将 DD1 井与扬子地区其他 O-S 界线剖面的元素地球化学特征进行对比分析, 可判断 DD1 井存在五峰组观音桥段, 该标志层的厚度也小于 1 m。微量元素地球化学氧化-还原判别图还表明, 五峰期—龙马溪期早期沉积水介质主要处于弱氧化环境, 观音桥期氧化性达到最强; 根据沉积学标志分析, O-S 之交沉积相演变过程为: 潮下→潮间→潮上→潮间, 在观音桥期水体最浅, 为潮上带沉积。

**关键词:** 五峰组; 观音桥段; 奥陶系—志留系界线; 化学地层; 滇东北; 油气地质调查工程

中图分类号: P534.42-43; P512.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)01-0297-12

### Boundary definition of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in well DD1 and sedimentary environment evolution of Northeastern Yunnan

FENG Weiming<sup>1,2</sup>, LI Rong<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhan<sup>1,2</sup>, YU Qian<sup>1,2</sup>, YANG Han<sup>3</sup>, XIE Yuan<sup>1,2</sup>, YE Dingnan<sup>4</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan China; 2. Key Laboratory Sedimentary Basins Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610081 Sichuan China; 3. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042 China; 4. No. 113 Geological party, Sichuan Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Luzhou 646000, Sichuan China)

**Abstract:** Although the Upper Ordovician Linxiang Formation marl in DD1 well is covered with thick silty mudstone, there is a lack of graptolite fossil, and no Hirnantia limestone marker stratum of the Guanyinqiao Member. Therefore, it is difficult to determine the boundary between Ordovician System and Silurian System by biostratigraphic and petrostratigraphic methods. The analysis of trace

收稿日期: 2018-08-06; 改回日期: 2018-09-30

基金项目: 国家科技重大专项“页岩气勘查评价技术试验与应用推广”(2016ZX05034-004)、中国地质调查局地质调查二级项目“四川盆地地下古生界海相页岩气基础地质调查”(DD20160176)、“滇东北地区页岩气地质调查”(DD20190080)联合资助。

作者简介: 冯伟明, 男, 1986年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事沉积学与石油天然气地质学方面研究; E-mail: fengweiming009@163.com。

通讯作者: 李嵘, 男, 1967年生, 教授级高级工程师, 主要从事石油天然气地质学方面研究; E-mail: 545210420@qq.com。

elements and REE of silty mudstone in the well DD1 shows that Th, Sr, Y, Th/U, Ce, Eu,  $\delta\text{Ce}$  and  $\delta\text{Eu}$  curves at the middle part of silty mudstone (1288.3m) present sharp abnormal peaks with significantly higher  $\Sigma\text{REE}$  content of silty mudstone (1288.3m) than its upper and lower silty mudstone and great right slope of the REE distribution curve. By comparing the elemental geochemistry characteristics of the well DD1 with other O-S boundary in the Yangtze Region, it can be concluded that there exists Guanyinqiao Member of Wufeng Formation in the well DD1, and the thickness of this marker layer is also less than 1 m. The geochemical redox discriminant graph shows that the sedimentary water medium mainly was in weak oxidation environment from the Wufeng period to the early Longmaxi period, and its oxidation was the strongest in the Guanyinqiao period. According to the analysis of sedimentary markers, the evolution process of the sedimentary facies at the O-S transition is as follows: subtidal  $\rightarrow$  intertidal  $\rightarrow$  supertidal  $\rightarrow$  intertidal; in the Guanyinqiao period, the water was the shallowest, and there existed supertidal deposits.

**Key words:** Wufeng Formation; Guanyinqiao Member; Ordovician-Silurian boundary; chemostratigraphy; Northeastern Yunnan Province; oil-gas geological survey engineering

**About the first author:** FENG Weiming, male, born in 1986, master, senior engineer, engaged in sedimentology and oil & gas geological survey and research; E-mail: fengweiming009@163.com.

**About the corresponding author:** LI Rong, male, born in 1967, bachelor, senior engineer, engaged in oil and gas geological research; E-mail: 545210420@qq.com.

**Fund support:** Supported by National Science and Technology Major Project (No.2016ZX05034-004) and the project of China Geology Survey(No.DD20160176, No.DD20190080).

## 1 引 言

近年来,涪陵和长宁页岩气田对于上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组页岩气的成功勘探与开发,上扬子地区这套极具工业价值的黑色页岩引起了国内外地质学界和石油天然气学界广泛关注(郭旭升等,2014;聂海宽等,2017;马永生等,2018)。过去几十年,前人对上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组进行大量的沉积学、地层学、石油天然气地质学等多方面研究(牟传龙等,2011;何江林等,2017;王玉满等,2017;Zhai et al., 2018;高莉等,2019;杨平等,2019;冯伟明等,2020),也取得了不少进展。奥陶纪赫南特阶的全球标准层型剖面 and 点位(GSSP)在湖北宜昌王家湾,而中上扬子地区奥陶系一志留系界线剖面也较多,笔石带的建立及其全球对比为划分该套沉积地层提供了精准的时间标尺(穆恩之等,1983;陈旭等,1990,2000,2001,2017;樊隽轩等,2012)。

前人对南方上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组的地质研究,是在丰富的笔石带划分以及观音桥段含赫南特动物群标志层识别的基础之上(戎嘉余等,1979,2000,2010;詹仁斌,2010;王玉满等,2016)(图1a)进行的。中国地质调查局成都地质调查中心在上扬子西南部滇东北彝良县钟鸣乡部署的页岩气调查井DD1井,钻穿了上奥陶统临湘组灰

白色泥质灰岩,临湘组之上的大套含粉砂质泥岩,未发现观音桥段含介壳泥灰岩,缺乏笔石化石。

化学地层学方法广泛应用在全球高分辨率地层对比研究、全球古海洋环境变化及全球地质事件研究等方面,较多利用C、O、S等稳定同位素比值异常进行对比(Goodfellow et al., 1992; Wang et al., 1993; Underwood et al., 1998; 冯洪真等,2000; Zhang et al., 2000; Kimura et al., 2001; Munnecke et al., 2010; Melchin et al., 2013; Yang et al., 2016)。应用化学地层学方法(特别是微量元素和稀土元素)在中国华南和塔里木地区古生代地层研究中取得了重大进展,证明该方法在解决缺乏标准化石的疑难地层划分对比和古沉积水体环境变化等方面是有效的(王传尚等,2002;皮学军,2007)。本文对该井上奥陶统一下志留统地层进行了高分辨率的地球化学样品测试,系统阐明了奥陶系一志留系界线的元素地球化学证据,并分析该井奥陶系一志留系界线附近地层的沉积古水介质条件及沉积相意义。

## 2 地质背景及实验条件

### 2.1 O-S界线划分地质背景

晚奥陶世一早志留世,中国大陆主体的扬子地块、华夏地块和华北地块相互分隔,扬子地块大部分区域广泛发育上奥陶统一下志留统的地层。晚奥陶世一早志留世,由于加里东运动导致中上扬子

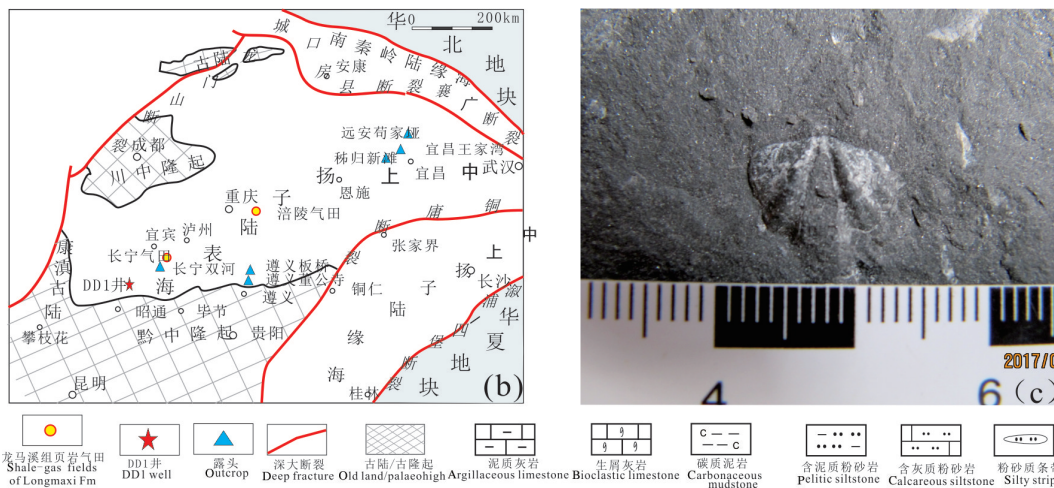
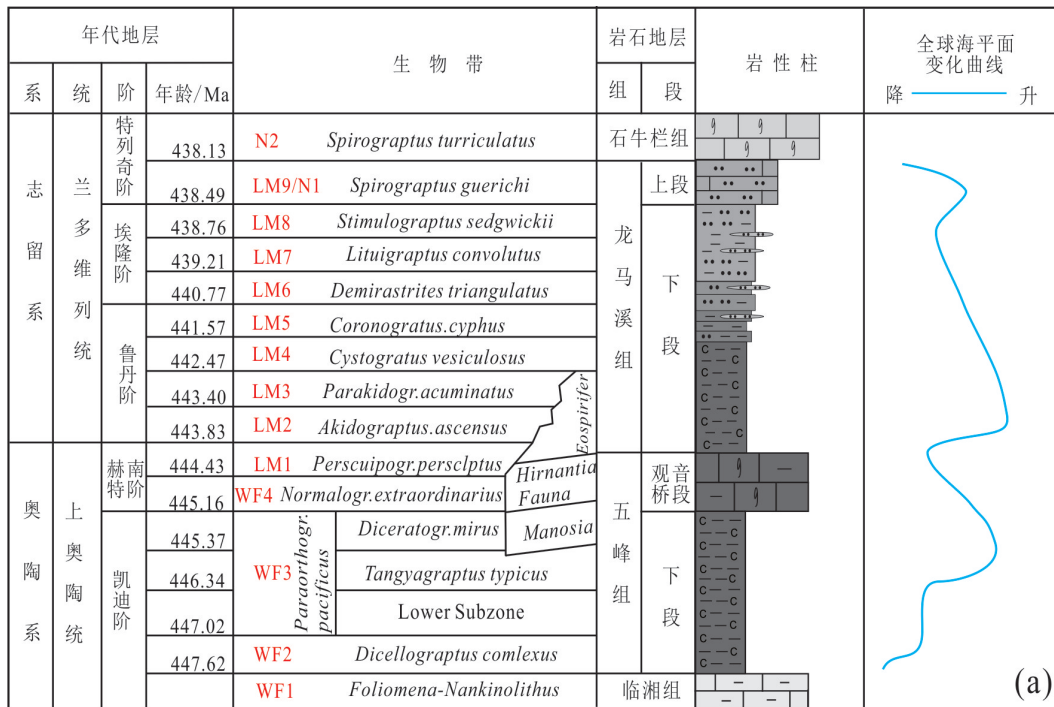


图1 DD1井地质背景图

a—中上扬子地区奥陶系—志留系界线附近年代地层、岩石地层及生物地层划分(据陈旭等,1987,2017;聂海宽等,2011;略有修改);b—中上扬子晚奥陶世赫南特期(五峰期)DD1井所处古地理与大地构造背景(据戎嘉余等,1987;牟传龙等,2011;略有修改);c—DD1井龙马溪组中部(井深1205.5 m处)粉—细砂岩中的腕足化石

Fig.1 Geological background of the well DD1

a—division of chronostratigraphy, lithostratigraphy and biostratigraphy near the Ordovician–Silurian boundary in the upper and middle Yangtze plate (modified from Chen Xu et al., 1987,2017;Nie Haikuan et al., 2011); b—paleogeography and geotectonic setting of DD1 well in Hirnantian (Wufeng period) in the middle and upper Yangtze plate (modified from Rong Jiayu et al., 1987, Mou Chuanlong et al., 2011); c—brachiopod fossils from siltstone in the middle of Longmaxi Formation (1205.5 m) of DD1 well

地区古陆和古隆起的隆升和扩张,中上扬子陆表海一定程度上被古陆和古隆起所封闭,形成滞流、低能和缺氧的海洋环境(方一亭等,1993;牟传龙等,2011;聂海宽等,2017;王玉满等,2017)。从大地构造位置和古地理背景来看,DD1井位于扬子地块的西南部,向南与黔中古隆起紧邻(图1b)。从晚奥陶

世五峰期开始,中上扬子地区碳酸盐台地沉积结束并演化成了滞留浅海盆地沉积,整个志留纪中上扬子大部分地区广泛沉积了一套以碎屑岩为主的海相地层,其中奥陶纪末期和志留纪早期的黑色页岩也是优质的烃源岩(牟传龙等,2011;聂海宽等,2017;王玉满等,2017)。

中上扬子地区奥陶系—志留系界线附近地层,根据地层岩性的差别自下而上可划分为3个岩石地层单元:上奥陶统五峰组下段、观音桥段以及下志留统龙马溪组下段,岩相在纵向序列上的变化反映了沉积期海平面的升降变化(图1a)。扬子地块大部分区域,五峰组和龙马溪组下部主要由黑色含炭质泥页岩组成,五峰组厚度一般为3~8 m;观音桥段以介壳泥灰岩夹黑色泥页岩为主,厚度一般为0.3~1.0 m;龙马溪组下段厚度一般为50~120 m(方一亭等,1993;牟传龙等,2011;聂海宽等,2017;王玉满等,2017)。

扬子地区奥陶系—志留系界线附近的生物化石,除了观音桥段富含底栖的赫南特贝动物群外,五峰组下段和龙马溪组下段的标准化石都以笔石为主。按照地层学的多重划分概念,即岩石有多少种特征,就有多少种不同的地层单位划分方法,而一种特征变化不一定与另一种特征变化相一致(陈孝红等,1999)。目前中国华南五峰组—龙马溪组地层界线划分主要有两种:①根据笔石带动物群的分异度、丰度的差异,陈旭等(2017)对中上扬子地区晚奥陶世—早志留世(447.62~438.49 Ma)的笔石地层进行了划分,建立了可进行全球对比的笔石带,将上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组划分为12个笔石带(WF2-LM9)(图1a);②根据观音桥段壳相(赫南特动物群)泥灰岩来把五峰组黑色页岩的和龙马溪组黑色页岩划分开(戎嘉余等,1979,2000,2010;詹仁斌,2010;王玉满等,2016),这也是目前页岩气地质勘探实际工作中常用的、易操作的方法。

根据区域岩石地层对比,临湘组与上覆五峰组之间的界面为岩性突变面(王玉满等,2016;聂海宽等,2017)(图1a),从层序地层角度来看,其为三级层序内的海侵面。DD1井上奥陶统临湘组泥质灰岩与上覆深灰色粉砂质泥岩也存在明显的岩性突变面。临湘组之上粉砂质泥岩中偶见的笔石均缺少始端,无法确定种属;在井深1205.5 m处(奥陶系临湘组顶界之上96.9 m)见腕足化石,经鉴定为*Eospirifer* sp.,时代归属为志留纪兰多维列世埃隆期<sup>①</sup>(图1c);且志留系龙马溪组含灰质泥岩与上覆黄葛溪组(相当于石牛栏组)生物灰岩界线易于识别,因此DD1井存在下志留统龙马溪组地层是确定无疑的。

DD1井未发现观音桥段含介壳泥灰岩,临湘组之上的深灰色含粉砂质泥岩内缺乏笔石化石;而且部分岩芯较破碎,这些方面问题导致该井岩芯O-S界线划分较为困难。从岩心观察出发,笔者推断DD1井O-S界线划分存在以下几种可能:①断层破坏导致五峰组和观音桥段地层缺失;②存在沉积间断导致五峰组或观音桥段地层缺失;③该井从下往上依次为上奥陶统五峰组下段→观音桥段→下志留统龙马溪组下段,为连续沉积,而O-S界线附近地层缺乏古生物及岩性变化。本文在前人奥陶系—志留系地层学研究的基础上,对DD1井进行了详细的元素地球化学样品测试,分析临湘组之上的29.4 m厚含粉砂质泥岩的地球化学特征差异,探讨奥陶系—志留系界线的划分。

## 2.2 样品测试分析

对DD1井O-S界线附近的上奥陶统宝塔组、临湘组,以及临湘组之上的暗色泥岩进行了系统的地球化学采样,暗色泥岩样品间距一般在0.5~1 m,共对54个样品进行了主量、微量和稀土元素测试分析,均在核工业北京地质分析测试中心完成。主量元素测试采用AxiosmAX X射线荧光光谱仪,分析误差小于5%;微量和稀土元素测试采用ELEMENT XR等离子体质谱仪完成,分析误差小于10%。部分测试数据见表1(主量元素还包括MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等,其含量较低,且纵向上数值变化较小,因此未列出)。

## 3 O-S界线划分的元素地球化学证据

### 3.1 微量元素

从DD1井微量、稀土元素的测试结果总体来看,奥陶系—志留系界线附近地层的Th、U、Pb、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Mo、Cs、Ba和Y等微量元素含量波动较大,其中以Th、Sr和Y三种微量元素最为敏感(表1),临湘组顶界Y和Th明显亏损、Sr显著富集;临湘组泥质灰岩与上覆的粉砂质泥岩的岩性界面,与Th、Sr、Y和Th/U曲线突变点基本完全吻合(图2a)。

临湘组上覆的粉砂质泥岩的Y、Th、Sr含量分别在14.7~71.7、9.59~33.0、116~671(单位μg/g),平均值分别为24.01、17.39、240.09( $n=45$ );Th/U比值为1.85~9.48,平均值为5.61( $n=45$ )。在临湘组上覆

的粉砂质泥岩中, Y、Th、Sr 和 Th/U 值在 1288.3 m 处 (DD-34 号样品) 呈现为尖锐的最强峰; 而 1288.3 m 处上下两段粉砂质泥岩的 Th、Sr 含量变化范围较小, 曲线比较平缓, 为正常波动段 (图 2a)。

观音桥期 (赫南特期 445.16~443.83 Ma), 发生了全球性冰川事件, 极地冰盖增生, 导致全球海平面下降 (Goodfellow et al., 1992; Zhang et al., 2000; Kimura et al., 2001; Munnecke et al., 2010; Melchin et al., 2013; Yang et al., 2016) (图 1a), 这也使 O-S 界线附近地层的某些敏感化学元素出现突变, 例如湖北远安苟家垭奥陶系—志留系界线剖面, 五峰组观音桥段 (EO 至 HK 化石带, 共 0.65 m) 的 Sr、V、Co、Ni 等微量元素波动剧烈, 并出现异常峰; 而五峰组下段 (EO 化石带以下) 和龙马溪组下段 (v-p 化石带) 的各种微量元素的曲线都很平缓 (Wang et al., 1993; 王传尚等, 2002) (图 2b)。

安苟家垭剖面同处于扬子板块, 两者在奥陶系—志留系界线附近地层的微量元素变化趋势具有一定相似性, 特别是异常波动段显示了在冰川事件导致的全球海平面下降具有良好的可对比性, 需指出一点, 两者所处古地理背景不同, 其碎屑来源也不同, 导致 O-S 界线附近敏感的微量元素也不一定相同。另一方面, 这种化学地层的相似性也指示 DD1 井存在五峰组以及观音桥段, 而 Th、Sr、Y 和 Th/U 曲线的异常波动段对应于观音桥段。

### 3.2 稀土元素

稀土元素 Ce 异常和 Eu 异常分别按 Taylor 和 McClelland 的公式计算, 即:  $\delta Ce = Ce/Ce^* = Ce_n / (La_n \times Pr_n)^{1/2}$ ,  $\delta Eu = Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n \times Gd_n)^{1/2}$ 。

DD1 井奥陶系—志留系界线附近的地层的  $\Sigma REE$  在 62.06~1384.09  $\mu g/g$  变化, 临湘组顶界 (DD-7 号) 为最小值 62.06  $\mu g/g$  ( $n=47$ ); 临湘组之上

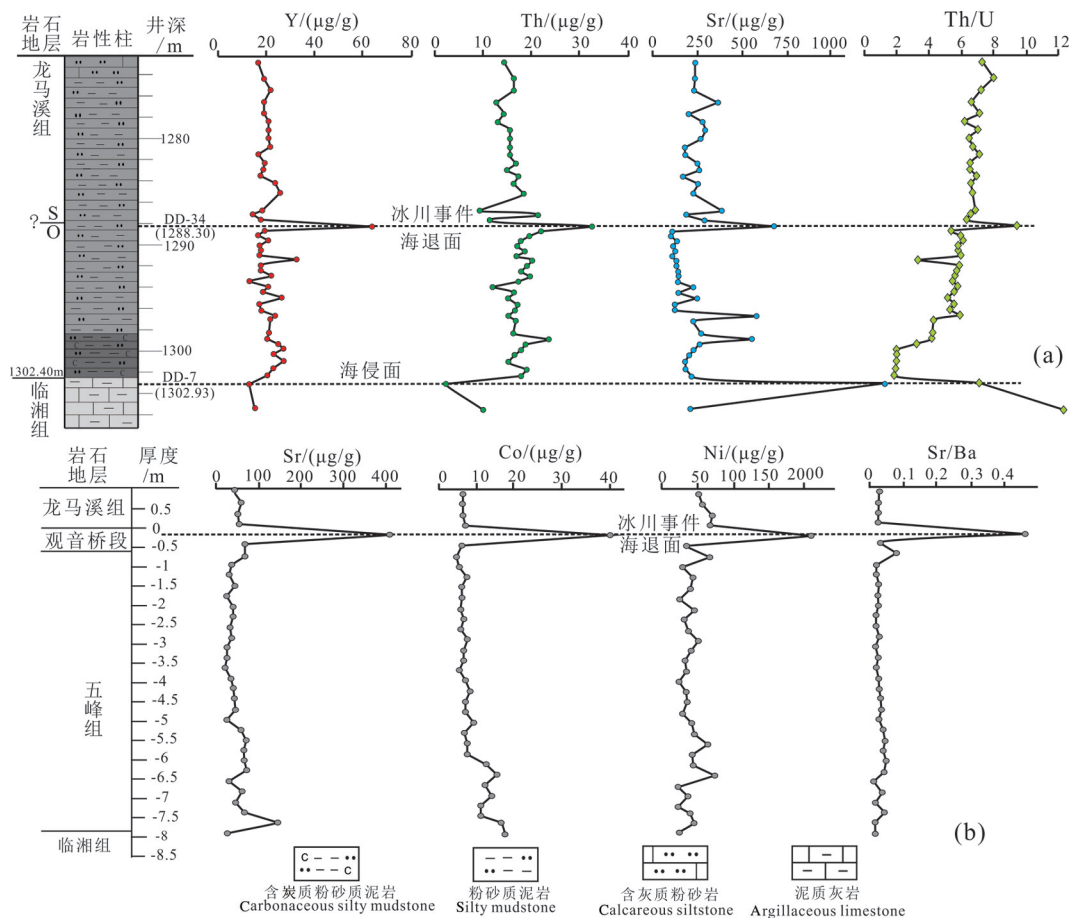


图2 奥陶系—志留系界线附近敏感微量元素地球化学异常分布曲线对比图  
a—滇东北DD1井; b—湖北省远安县苟家垭剖面 (据王传尚等, 2002)

Fig.2 Sensitive trace elements curves near Ordovician-Silurian boundary  
a-DD1 well in Northwest Yunnan; b-Goujiaya section, Yuan'an County, Hubei Province (after Wang Chuanshang et al., 2002)

的粉砂质泥岩的 $\Sigma\text{REE}$ 在138.11~1384.09  $\mu\text{g/g}$  (平均值215.08  $\mu\text{g/g}$ ,  $n=45$ ), 最大值(1384.09  $\mu\text{g/g}$ )位于粉砂质泥岩中部(DD-34号)(表1, 图3)。

DD1井剖面的 $\text{Ce}_n$ 和 $\text{Eu}_n$ (球粒陨石标准化)曲线变化幅度大, 分别在21.82~591.19和6.33~137.41变化(表1)。 $\text{Ce}_n$ 和 $\text{Eu}_n$ 均在临湘组顶界(DD-7号样品)出现尖锐的异常峰; 在粉砂质泥岩中部(DD-34号)处出现尖锐的最强峰, 除此点之外其他粉砂质泥岩的 $\text{Ce}_n$ 和 $\text{Eu}_n$ 曲线平缓, 波动很小(图4)。 $\delta\text{Ce}$ 和 $\delta\text{Eu}$ 分别在0.76~0.98、0.50~0.73变化, 平均值分别为0.91和0.61( $n=47$ )。 $\delta\text{Ce}$ 和 $\delta\text{Eu}$ 曲线纵向上波动明显, 从总体上来看, DD1井Ce含量和Eu含量在奥陶系—志留系界线附近均亏损, 特别是 $\delta\text{Ce}$ 曲线纵向上的变化规律性更强, 与 $\text{Ce}_n$ 和 $\text{Eu}_n$ 曲线类似, 在临湘组顶界(DD-7号)和粉砂质泥岩中部(DD-34号)分别出现的异常弱峰和强峰, 在1288.3 m处(DD-34号) $\delta\text{Ce}$ 值接近于1, 为Ce最弱亏损(图3)。

沉积岩的稀土元素Ce异常真实记录了沉积水体的氧化还原性质, 而且这一特征在随后的埋藏和成岩过程中也得以保持, 因此Ce异常可作为化学地层划分对比的重要依据(Goodfellow et al., 1992; 冯洪真等, 2000; 王传尚等, 2002; 皮学军, 2007)。观音桥期(赫南特阶), 极地冰盖增生导致全球海平面下降(Goodfellow et al., 1992; Zhang et al., 2000; Kimura et al., 2001; Munnecke et al., 2010; Melchin et al., 2013; Yang et al., 2016)(图1a), 这也使O-S界线附近地层的Ce或Eu元素出现显著异常, 例如在湖北秭归县新滩O-S界线剖面, 在五峰组观音桥段出现 $\text{Ce}_n$ 和 $\text{Eu}_n$ 的尖锐的最强峰, 该段 $\delta\text{Ce}$ 接近于1, 为Ce最弱亏损(王传尚等, 2002)。另外, 塔里木柯坪大湾沟O-S界线之下地层的 $\text{Ce}_n$ 也呈现尖锐的最强峰(皮学军, 2007)。

稀土元素的分布型式也是沉积水体环境的客观反映(王传尚等, 2002; 李双建等, 2008; 严德天等, 2009)。DD1井临湘组顶界(DD-7号)的 $\Sigma\text{REE}$ 显著亏损, 分布型式呈现弱右倾特征, 轻稀土略富集特征。DD1井1288.3 m(DD-34号)上下的粉砂质泥岩的稀土元素分布型式极其类似,  $\Sigma\text{REE}$ 含量差别极小, 均呈现弱右倾特征, 轻稀土略富集特征; 但1288.3 m处粉砂质泥岩的稀土元素分布型式则呈现明显右倾特征,  $\Sigma\text{REE}$ 含量显著富集, 轻稀土显著富集(图4)。

湖北秭归县新滩剖面五峰组观音桥段(王传尚等, 2002)的 $\Sigma\text{REE}$ 含量也显著高于五峰组下段, 稀土元素分布型式也呈现右倾型, 轻稀土富集。

滇东北DD1井和湖北秭归县新滩剖面同处于扬子板块(图1b), 两者所处的古海洋环境基本一致, 两者在奥陶系—志留系界线附近地层的稀土元素 $\text{Ce}_n$ ,  $\text{Eu}_n$ 和 $\delta\text{Ce}$ ,  $\delta\text{Eu}$ 曲线变化趋势以及分布型式也具有相似性, 特别是异常峰值点对应于观音桥段, 指示了全球冰川事件导致的全球海平面下降。反过来, 这些化学地层学特征的相似性也表明DD1井存在五峰组以及观音桥段,  $\text{Ce}_n$ 、 $\text{Eu}_n$ 、 $\delta\text{Ce}$ 曲线的异常强峰以及稀土元素分布型式异常点均对应于观音桥段。

## 4 沉积环境演变

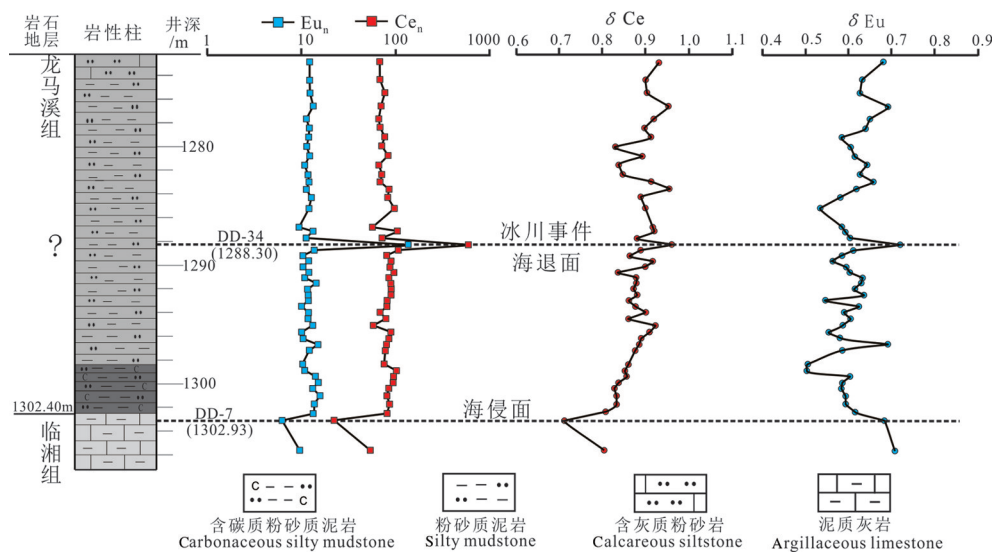
DD1井未见典型的五峰组观音桥段含介壳泥灰岩, 但通过对该井奥陶系—志留系界线附近地层的微量元素和稀土元素异常分析与对比表明, 该井存在五峰组观音桥段位于29.4 m厚粉砂质泥岩中部, 观音桥段(1288.80~1287.90 m)地层厚度约1 m, DD1井与邻区长宁气田的N211井(王玉满等, 2016)以及长宁双河剖面(穆恩之等, 1983)的观音桥段地层厚度基本相同。根据中上扬子大量钻井和露头资料统计, 观音桥段地层厚度大部分为1 m左右(王玉满等, 2016; 聂海宽等, 2017), 指示观音桥段厚度在区域上的可对比性较好, 而这也与DD1井观音桥段地层厚度吻合。在DD1井化学地层划分的基础之上, 对该井上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组下段进行沉积环境分析。

### 4.1 氧化-还原环境

微量元素和稀土元素的异常程度与古沉积水体环境密切相关(Wang et al., 1993; Jones et al., 1994; Wignall et al., 1996; Algeo et al., 2004; Sugitani et al., 2006; 严德天等, 2009; Yan et al., 2015)。Th/U比值常被用作沉积水介质氧化还原条件的判别指标。Th不受氧化还原条件的影响, 常以不溶解的 $\text{Th}^{4+}$ 形式存在, 但U在还原条件下以不溶解的 $\text{U}^{4+}$ 形式存在, 使得U在沉积物中富集; 在氧化条件下以可溶性的 $\text{U}^{6+}$ 存在, 导致U在沉积物中亏损。Th/U比值在缺氧环境中为0~2; 在氧化环境中为2~8; 在强氧化环境中可达8以上(Jones et al., 1994; Kimura et al., 2001; 严德天等, 2009)。

表1 DD1井部分代表性样品主量、微量和稀土元素含量及比值(主量元素单位为%;其他元素为 $\mu\text{g/g}$ )  
 Table 1 Contents and ratios of trace elements, REE( $\mu\text{g/g}$ ) and major elements(%) in some samples of well DD1

样品编号 井深/m	DD-6 1305.80	DD-7 1302.93	DD-8 1302.20	DD-9 1301.70	DD-27 1291.80	DD-32 1289.30	DD-33 1288.80	DD-34 1288.30	DD-35 1287.67	DD-36 1287.17
Si	24.95	8.91	52.24	52.4	49.33	53.19	53.74	48.81	41.59	46.42
CaO	31.07	33.41	5.31	4.65	6.18	4.75	3.67	8.43	14.67	7.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.69	1.70	15.56	16.22	15.42	17.35	18.52	12.78	9.81	17.01
B	87.9	26	181	200	152	192	178	146	142	196
Li	16.7	5.82	67.2	61.9	10.9	12.9	13.7	27.6	16	14.6
Be	3.02	0.41	3.76	4.13	3.66	3.91	4.08	2.38	1.94	3.81
Sc	9.54	3.21	14.6	15.7	13	14.7	17.4	12.9	9.29	16.1
V	60.4	24.4	142	145	82.7	91.3	112	75.5	55.6	98.7
Cr	50.6	8.94	88.6	93.9	58.5	85.1	98.3	66.5	50.4	89.4
Co	7.04	1.58	23.8	22.8	26.4	14.1	15.9	12.9	13.2	18.3
Ni	37.7	18.9	80.5	79.2	73	37.3	36.1	33.7	28.7	36.5
Cu	59.9	19.5	62.2	57.6	64.6	30.4	26.2	17.9	10.2	24.6
Zn	29.8	49.9	45.9	50.6	658	65.2	66.3	321	35.4	51.7
Ga	12.9	3.29	22.2	23.4	22	23.9	26.9	29.4	13.7	25.4
Rb	122	21.1	210	228	196	237	251	167	119	239
Sr	227	2672	232	189	146	116	117	671	294	193
Y	17.3	14.3	23.1	25.7	36.5	18.8	22.1	71.7	19.8	16.2
Mo	0.248	0.312	21.4	21.8	37.6	1.23	1.49	0.373	0.278	0.417
Cd	0.094	0.061	0.21	0.252	1.3	0.133	0.163	0.977	0.061	0.096
In	0.064	0.022	0.116	0.116	0.575	0.085	0.096	0.092	0.058	0.075
Sb	0.624	0.985	6.01	5.47	7.42	2.36	1.89	3.48	1.94	2.9
Cs	15.3	1.68	28.1	28.8	18.5	17.6	17.7	11.4	7.15	17.8
Ba	626	82216	1143	1259	1213	1448	1667	5862	493	1095
La	32.8	15.4	49.8	51	46.8	46.2	58.7	272	39.2	53.5
Ce	51.3	21.3	78.6	84.5	87.2	78.3	104	577	70.3	99.2
Pr	6.08	2.83	9.34	10.1	11	8.8	11.7	70.9	8.3	11
Nd	21.9	11.9	34.1	36.3	41.6	31.7	42.7	314	31.4	37.5
Sm	3.78	2.43	6.24	6.62	6.57	5.2	6.51	57.2	5.32	6.64
Eu	0.828	0.548	1.15	1.17	1.24	0.889	1.17	11.9	0.973	1.13
Gd	3.47	2.61	5.37	5.61	5.63	4.2	5.3	44	4.7	5.12
Tb	0.556	0.378	0.86	0.941	1.05	0.705	0.837	5.65	0.77	0.737
Dy	2.98	2.01	4.32	4.7	6.33	3.65	4.24	20.2	3.81	3.36
Ho	0.564	0.386	0.812	0.9	1.36	0.739	0.798	2.51	0.713	0.639
Er	1.61	1.03	2.14	2.44	4.19	1.98	2.31	4.94	2.2	1.77
Tm	0.281	0.161	0.376	0.428	0.799	0.385	0.415	0.546	0.372	0.312
Yb	1.67	0.949	2.25	2.59	5.17	2.48	2.65	2.89	2.58	2.31
Lu	0.223	0.129	0.322	0.363	0.723	0.343	0.366	0.352	0.376	0.348
Pb	4.66	2.31	65.7	64.2	117	25	30.5	612	17.8	27.2
Bi	0.161	0.119	0.388	0.409	0.36	0.402	0.379	0.231	0.221	0.392
Th	10.3	2.62	18.1	19.3	20.6	19.9	22.3	33	11.8	21.7
U	0.837	0.364	9.79	10.2	6.25	3.34	4.13	3.48	1.84	3.27
$\Sigma\text{REE}$	128.04	62.06	195.68	207.66	219.66	185.57	241.70	1384.09	171.01	223.57
$\delta\text{Ce}$	0.85	0.76	0.85	0.87	0.90	0.91	0.93	0.97	0.91	0.96
$\delta\text{Eu}$	0.71	0.67	0.61	0.59	0.63	0.59	0.62	0.73	0.60	0.60
Th/U	12.31	7.20	1.85	1.89	3.30	5.96	5.40	9.48	6.41	6.64
V/Sc	6.33	7.60	9.73	9.24	6.36	6.21	6.44	5.85	5.98	6.13
V/Cr	1.19	2.73	1.60	1.54	1.41	1.07	1.14	1.14	1.10	1.10

图3 DD1井奥陶系—志留系界线附近 $Ce_n, Eu_n$ 和 $\delta Ce, \delta Eu$ 曲线对比Fig.3  $Ce_n, Eu_n$  and  $\delta Ce, \delta Eu$  curves of near Ordovician-Silurian boundary in the well DD1

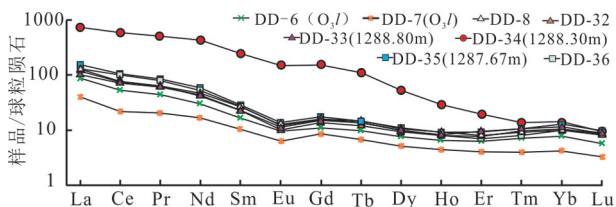
V也是一种对氧化还原条件敏感的元素,在缺氧或贫氧水体的下伏沉积物中富集。V/Sc和V/Cr也都被用作沉积环境的判别指标,V/Sc在缺氧环境下大于7.75,而在氧化环境下小于7.75;V/Cr在缺氧环境下大于4.25,在富氧环境下小于2,而在贫氧环境下为2~4.25(Kimura et al., 2001; 严德天等,2009; Yan et al.,2015)。

DD1井五峰组Th/U、V/Sc、V/Cr分别在1.85~9.48、4.71~10.20和0.93~1.67;龙马溪组Th/U、V/Sc和V/Cr分别在6.23~8.00、5.42~7.36和0.99~1.34。综合分析三者比值特征,从下往上可将这套厚29.4m的粉砂质泥岩划分为5个小段:上奥陶统五峰组下段包括①~③小段,观音桥段为④小段,下志留统龙马溪组下段为⑤小段(图5)。

五峰组下段下部①小段(1302.4~1300.4 m)Th/U比值为2左右,V/Sc比值均大于8,指示五峰期初期为弱还原环境;②小段(1300.4~1297.7 m)Th/U比值为3~4.5,V/Sc比值在6~8,指示其为弱氧化环境;

③小段(1297.7~1288.6 m)Th/U比值在5~6.5,V/Sc比值在4.5~7.5,指示其为弱—中等氧化环境;观音桥段(④小段,1288.6~1287.9 m)Th/U比值达到最大值(9.48),指示其为强氧化环境。从整体上来看,Th/U比值绝大多数小于2;V/Sc比值多数小于7.75;V/Cr比值均小于2;指示了五峰组的沉积古水介质主要为氧化环境;3种微量元素判别指标表明五峰期沉积环境主要为氧化环境,并具有氧化程度逐渐增强趋势(图5)。龙马溪组下段(⑤小段,1287.9~1273.0 m)的Th/U均大于2;V/Sc和V/Cr也均小于7.75和2,指示了龙马溪组沉积环境为氧化环境。另外,在微量元素判别图(图5)上,龙马溪组下段投点比较集中,表明该期沉积环境变化幅度相对较小。

与湖北宜昌王家湾奥陶系—志留系界线剖面相比,DD1井的五峰组—龙马溪组下段Th/U比值更高、V/Sc和V/Cr比值更低,指示王家湾剖面处于相对深水的缺氧环境,而DD1井则处于相对浅水的氧化环境。微量元素判别指标表明,DD1井的五峰组—龙马溪组下段的沉积古水介质均处于氧化环境,而前人普遍认为扬子地区五峰组—龙马溪组下段的黑色页岩处于还原环境(方—亭等,1993;Wang et al.,1993;李双建等,2008;严德天等,2009;牟传龙等,2011;聂海宽等,2017;王玉满等,2017),这种差异的原因可能在于DD1井沉积相的特殊性。

图4 DD1井奥陶系—志留系界线附近稀土元素分配模式图  
Fig.4 Chondrite-normalized REE abundance pattern of near Ordovician-Silurian boundary in the well DD1

#### 4.2 沉积相分析

DD1井五峰组下段(1302.45~1288.80 m),地层



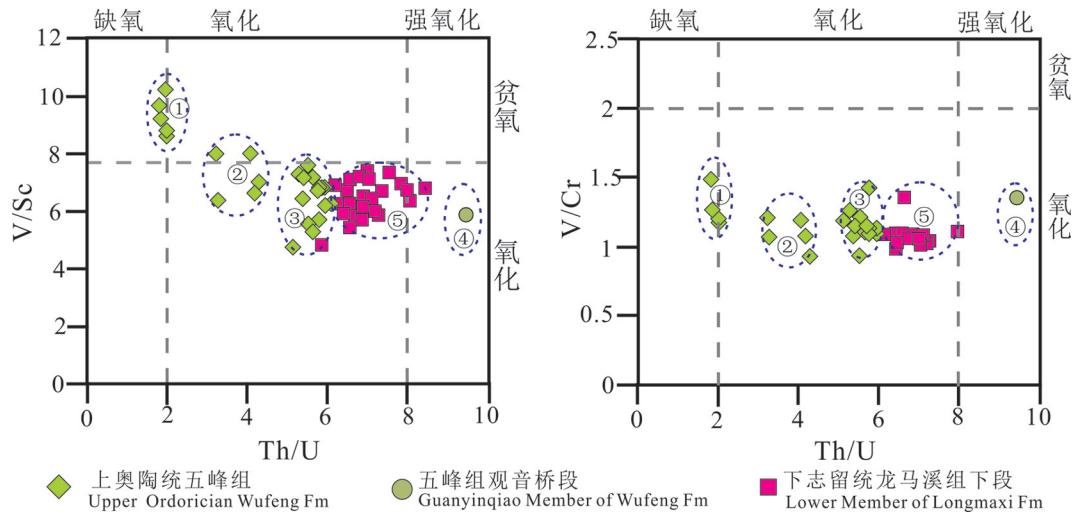


图5 DD1井上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组下段氧化还原环境的微量元素判别指标(①~⑤分别代表①小段~⑤小段)  
Fig.5 Discriminant index of trace elements for redox environment from Wufeng Formation to Lower Member of Longmaxi Formation in the well DD1 (①~⑤ represents No.1~No.5 small members)

真厚度约13 m,岩性为灰黑色—深灰色含粉砂质泥岩,中上部普遍夹灰白色粉砂质条带,粉砂质条带宽1~8 cm(图6a);中上部发育波状层理、脉状层理;中下部含粉砂质泥岩中局部可见晶体较好的黄铁矿集合体(图6b)。根据上述沉积相标志分析,五峰组下段沉积初期沉积水体较安静,水动力较弱,为潮下带沉积;五峰组下段沉积晚期,沉积水体较动荡,水动力条件有所增强,为潮间带沉积。

DD1井五峰组观音桥段(1288.80~1287.90 m),地层真厚度约90 cm,岩心较破碎,未见古生物化石,沉积构造不发育,岩性为深灰色粉砂质泥岩,该段高Th/U比值,低V/Sc和V/Cr比值均指示沉积古水体强氧化性,认为该段属于浅水潮上带强氧化环境沉积。

DD1井龙马溪组下段,岩性为灰色粉砂质泥岩夹灰白色粉砂质、钙质条带,条带宽1~10 cm,向上钙质明显含量增加,发育水平层理、透镜状层理(图6c)。根据上述沉积相岩石学标志和地球化学标志分析,龙马溪组下段沉积期水体较动荡,海水氧化性较强,为潮间带沉积。

在距离古隆起较远的区域,如涪陵气田、长宁气田大量钻井和中扬子峡区多条剖面的五峰组下段和龙马溪组下段的岩性为深水陆棚相黑色硅质炭质页岩,黑色页岩厚度一般为30 m左右(方一亭等,1993; Wang et al.,1993; 李双建等,2008; 严德天等,2009; 牟传龙等,2011; 聂海宽等,2017; 王玉满等,

2017)。但在靠近黔中古隆起的剖面其沉积相则有所差异,例如遵义董公寺和板桥剖面发育近岸浅水潮坪相粉砂质页岩、粉砂岩和细砂岩(陈旭等,2001,2017;戎嘉余等,1979,2000)。DD1井与遵义董公寺和板桥剖面,同处于黔中古隆起北缘,五峰组—龙马溪组下段沉积相具有可对比性,均为浅水潮坪相沉积。另外,该期浅水碎屑岩潮坪相带在平面上分布狭窄(牟传龙等,2011;陈旭等,2001,2017;聂海宽等,2017;王玉满等,2017;冯伟明等,2020)。

DD1井五峰组—龙马溪组下段整体上具有炭质和泥质含量低、粉砂质含量高的特征,该井在O-S之交主要处于浅水潮坪环境,其与涪陵气田、长宁气田大量钻井和中扬子峡区多条剖面迥异。造成这种差异的原因是,DD1井距离黔中古隆起较近,由于受加里东运动影响,黔中古隆起隆升(陈旭等,2001;戎嘉余等,2011),在五峰期中晚期DD1井已明显受到构造隆升的波及,黔中古隆起北缘构造隆升速度大于海平面上升速度,沉积水体变浅,沉积水介质为氧化环境,造成在黔中隆起北部边缘发育近岸浅水碎屑岩相。

## 5 结论

(1)DD1井的O-S界线通过生物地层和岩石地层方法难以确定。但DD1井临湘组泥灰岩之上大套粉砂质泥岩中部(1288.3 m)的Th、Sr、Ba、Th/U以及 $\delta^{137}\text{Ce}$ 、 $\delta^{152}\text{Eu}$ 曲线均呈现尖锐的最强峰,同时1288.3

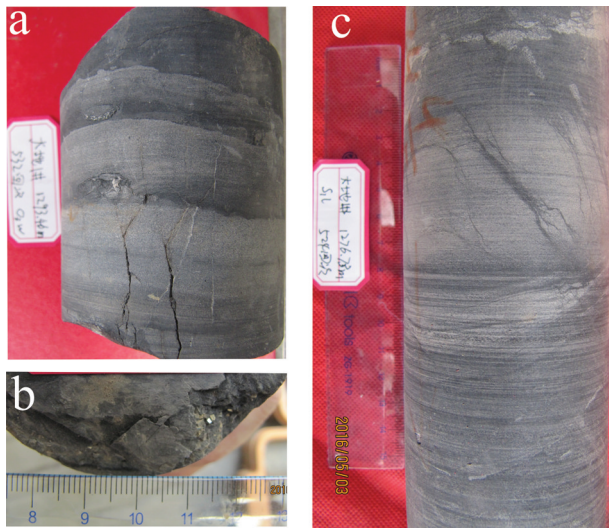


图6 DD1井奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组下段发育的沉积标志

a—波状层理、脉状层理,五峰组下段,1293.46 m; b—菱形自形黄铁矿,五峰组下段,1291.51m; c—透镜状层理、粉砂质条带,龙马溪组下段底部,1276.78 m

Fig.6 Sedimentological markers from Wufeng Formation to Lower Member of Longmaxi Formation in the well DD1

a—Wavy bedding, vein bedding, Lower member of Wufeng Formation, 1293.46 m; b—Rhombic euhedral pyrite, Lower member of Wufeng Formation, 1291.51m; c—Lenticular bedding and silty belt, the bottom of Lower Longmaxi Formation, 1276.78 m

m处的 $\Sigma$ REE含量显著高于上下地层,REE分布曲线右倾斜率更大。将DD1井与扬子地区其他O-S界线剖面的元素地球化学特征进行对比分析,该井1288.3 m处粉砂质泥岩的与上奥陶统观音桥段类似,微量、稀土元素异常波动段均指示了观音桥期全球海平面下降,因此,判断DD1井存在五峰组观音桥段。中上扬子观音桥段厚度一般为1 m左右,DD1井的观音桥段厚度也与之吻合。

(2)通过对DD1井的O/S界线附近地层的(Th/U)-(V/Sc)和(Th/U)-(V/Cr)地球化学氧化-还原判别图版分析,表明五峰期-龙马溪期早期沉积水介质主要属于弱氧化环境,观音桥期沉积水体氧化性达到最强。DD1井在O-S之交沉积相演变过程为:潮下→潮间→潮上→潮间,在观音桥期水体最浅,为潮上带沉积。O-S之交,滇东北DD1井缺乏深水陆棚相黑色页岩沉积,该井沉积相的特殊性主要受到黔中隆起隆升作用控制。

**致谢:**本文在古生物鉴定方面得到了中国科学院南京地质古生物研究所詹仁斌研究员和樊隽轩研究

员的帮助,成文过程中与中国地质调查局成都地质调查中心刘伟高工、陆俊泽工程师进行有益的讨论,审稿专家也提出了宝贵的意见,在此一并表示感谢!

#### 注释:

①腕足动物化石经过中国科学院南京地质古生物研究所詹仁斌研究员鉴定。

#### References

- Algeo T J, Maynard J B. 2004. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems[J]. *Chemical Geology*, 206:289-318.
- Chen Xiaohong, Wang Xiaofeng. 1999. Multiple stratigraphic subdivision and sea level changes of the early Paleozoic in Yangtze Gorges area[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 15(3):1-11(in Chinese with English abstract).
- Chen X, Rong J Y, Mitchell C E, Harper D A T, Fan J X, Zhan R B, Zhang Y D, Li R Y, Wang Y. 2000. Late Ordovician to earliest Silurian graptolite and brachiopod biozonation from the Yangtze region, South China, with a global correlation[J]. *Geological Magazine*, 137: 623-650.
- Chen Xu, Fan junxuan, Wang Wenhui, Wang Hongyan, Nie Haikuan, Shi Xuewen, wenzhidong, Chen Dongyang, Li Wenjie. 2017. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, Central China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 60:1133-1146(in Chinese).
- Fan junxuan, Melchin M J, Chen Xu, Wang Yi, Zhang Yuandong, Chen Qing, Chi Zhaoli, Chen Feng. 2011. Biostratigraphy and geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 54:1854-1863(in Chinese).
- Fang Yiting, Bian Lizeng, Yu Jianhua, Feng Hongzhen. 1993. Sedimentary environment pattern of Yangtze plate in Wufeng age of Late Ordovician[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 11(3):7-12(in Chinese with English abstract).
- Feng Hongzhen, Erdtmann B D, Wang Haifeng. 2000. Anomaly of whole-rock Ce and sea level variation in Early Paleozoic in the upper Yangtze plate[J]. *Science China: Earth Sciences*, 30(1):66-72 (in Chinese).
- Feng Weiming, Zhao Zhan, Li Rong, Yu Qian, Ye Dingnan. 2020. Geological characteristics of shale gas of the Wufeng Fm - Longmaxi Fm in DD1 well in Northeast Yunnan and their exploration significances[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(4):17-24(in Chinese with English abstract).
- Gao Li, Wang Zongxiu, Liang Mingliang, Zhang Linyan, Li Huijun, Li Chunlin, Gao Wanli. 2019. Material composition and hydrocarbon potential of the shale of Wufeng-Longmaxi Formation in northwestern Hunan[J]. *Geology in China*, 46(2): 407-418(in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wen Zhidong, Liu Ruobing. 2014. Major

- factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng– Longmaxi Formation of Jiaoshiba area[J]. *Geology in China*, 41(3):893– 901(in Chinese with English abstract).
- Goodfellow W D, Nowlan G S, McCracken A D, Lenz A C. 1992. Geochemical anomalies near the Ordovician– Silurian boundary, northern Yukon Territory, Canada[J]. *Historical Biology*, 6:1–23.
- He Jianglin, Liu Wei, Yang Ping, Yu Qian, Wang Jian, Wang Zhengjiang, Lu Junze, Qin Chuan. 2017. Genetic conditions of the shale gas and delineation of the favourable areas in the Wufeng Formation– Longmaxi Formation on the southwestern margin of the Sichuan Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(3):50–58 (in Chinese with English abstract).
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111: 111–129.
- Kimura H , Watanabe Y . 2001.Ocean anoxia at the Precambrian– Cambrian boundary[J].*Geology*, 29 :995–998.
- Li Shuangjian, Xiao Kaihua, Wo Yujin, Long Shengxiang, Cai Ligu. 2008. REE geochemical characteristics and their geological significance in Silurian, west of Hunan Province and north of Guizhou Province[J]. *Geoscience*, 22(2): 273–280(in Chinese with English abstract).
- Lin Jiashan, Liu Jianqing, Feng Weiming, Jing Xiaoyan. 2014. Organic geochemical signatures and palaeo–environmental implications for the source rocks from the Lower Silurian Longmaxi Formation in northern Guizhou[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 34(2):79–85 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. 2018. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 561– 574(in Chinese with English abstract).
- Melchin M J, Mitchell C E, Holmden C, Štorch P. 2013. Environmental changes in the Late Ordovician– early Silurian: Review and new insights from black shales and nitrogen isotopes[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 125(11/12):1635–1670.
- Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, Ge Xiangying. 2011. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the Middle– Upper Yangtze region and petroleum and gas exploration[J]. *Acta Geological Sinica*, 85(4):526–532 (in Chinese with English abstract).
- Mu Enzhi, Zhu Zhaoling, Chen Junyuan, Rong Jiayu. 1983. Silurian in Shuanghe Section, Changning County, Sichuan Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 7(3):208–215(in Chinese).
- Munnecke A, Calner M, Harper D, Servais T. 2010. Ordovician and Silurian sea–water chemistry, sea level, and climate: A synopsis[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 296(4):389–413.
- Nie Haikuan, Jin Zhijun, Ma Xin, Liu Zhongbao, Lin Tuo, Yang Zhenheng. 2017. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation– Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 38(2):160– 174 (in Chinese with English abstract).
- Pi Xuejun, Liu Chuxiong, Chen Ying, Sun Zuoyu, Hao Weicheng. 2007. Discussion on chemo– stratigraphic characteristics of boundary bed between the top part of the Ordovician and the basal part of the Silurian at Dawangou Section, Keping, Xinjiang[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 43(2):183–189 (in Chinese with English abstract).
- Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi, Zhan Renbin, Liu Jianbo, Huang Bing, Tang Peng, Wu Rongchang, Wang Guangxu. 2011. Northward expansion of Central Guizhou oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications[J]. *Sci. Sin. Terrae*, 41:1407–14151(in Chinese).
- Rong Jiayu, Chen Xu, Zhan Renbin, Fan Junxuan, Wang Yi, Zhang Yuandong, Li Yue, Huang Bing, Wu Rongchang, Wang Guangxu. 2010. New observation on Ordovician–Silurian boundary strata of Southern Tongzi County, Northern Guizhou, Southwest China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 34(4): 337– 348(in Chinese with English abstract).
- Sugitani K, Yamashita F, Nagaoka T, Yamamoto K, Minamie M, Mimura K , Suzuki K. 2006. Geochemistry and sedimentary petrology of Archean clastic sedimentary rocks at Mt. Goldsworthy, Pilbara Craton, Western Australia: Evidence for the early evolution of continental crust and hydrothermal alteration[J]. *Precambrian Research*, 147: 124–147.
- Underwood C J, Deynoux M, Ghiene J F. 1998. High palaeolatitude (Hodh, Mauritania) recovery of graptolite faunas after the Hirnantian (end Ordovician) extinction event[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 142: 91– 105.
- Wang K, Orth C J. 1993. The great latest Ordovician extinction on the South China Plate: Chemostratigraphic studies of the Ordovician– Silurian boundary interval on the Yangtze Platform[J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 104: 61–79.
- Wang Chuanshang, Chen Xiaohong, Wang Xiaofeng. 2002. Late Ordovician chemical anomaly and the environmental changes across the Ordovician – Silurian Boundary in Yangtze Gorges[J]. *Journal of Stratigraphy*, 26(4): 272–279(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuman, Dong Dazhong, Huang Jinliang, LI Xinjing, Wang Shufang.2016. Guanyinqiao Member lithofacies of the Upper Ordovician Wufeng Formation around the Sichuan Basin and the significance to shale gas plays, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(1):42– 50(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuman, Li Xinjing, Dong Dazhong, Zhang Chenchen, Wang Shufang. 2017. Main factors controlling the sedimentation of high–quality shale in Wufeng–Longmaxi Fm, Upper Yangtze region[J]. *Natural Gas Industry*, 37(4):9– 20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengjiang, Yu Qian, Yang Ping, Liu Wei, Yang Fei, Liu Jiahong, Xong Guoqing, He Jianglin, Deng Qi. 2018. The main controlling factors of shale gas enrichment and exploration

- prospect areas in the Sichuan–Yunnan–Guizhou border areas, southwestern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 38(3):1–15(in Chinese with English abstract).
- Wignall P B, Twitchett R J. 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. *Science*, 272:1155–1158.
- Yan Detian, Chen Daizhao, Wang Zao, Wang Jianguo. 2009. Geochemical changes across the Ordovician–Silurian transition on the yangtze platform, South China[J]. *Science China Earth Sciences*, (Ser. D), 39(3):38–54 (in Chinese).
- Yang D T, Wang H, Fu Q, Chen Z H, He J, Gao Z. 2015. Geochemical characteristics in the Longmaxi Formation (Early Silurian) of South China: Implications for organic matter accumulation[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 65:290–301.
- Yang R, He S, Hu Q H, Hu D F, Yi J Z. 2016. Paleo–ocean redox environments of the Upper Ordovician Wufeng and the first member in Lower Silurian Longmaxi Formations in the Jiaoshiha area, Sichuan Basin[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(4) 426–440.
- Yang Ping, Wang Zhengjiang, Yu Qian, Liu Wei, Liu Jiahong, Xiong Guoqing, He Jianglin, Yang Fei. 2019. An resources potential analysis of Wufeng– Longmaxi Formation shale gas in the southwestern margin of Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 46(3): 601–614(in Chinese with English abstract).
- Zhan Renbin, Liu Jianbo, Percival I G, Jin Jisuo, Li Guipeng. 2010. Biodiversification of Late Ordovician Hirnantia Fauna on the Upper Yangtze Platform, South China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 40(9):1154–1163(in Chinese).
- Zhang T S, Kershaw S, Wan Y, Lan G Z. 2000. Geochemical and facies evidence for palaeoenvironmental change during the Late Ordovician Hirnantian glaciation in South Sichuan Province, China[J]. *Glob Planet Change*, 24: 133–152.
- 北地区五峰—龙马溪组页岩物质组成特征与页岩气潜力分析[J]. *中国地质*, 46(2): 407–418.
- 何江林, 刘伟, 杨平, 余谦, 王剑, 汪正江, 陆俊泽, 秦川. 2017. 四川盆地西南缘五峰组—龙马溪组页岩气形成条件与有利区优选[J]. *沉积与特提斯地质*, 37(3):50–58.
- 郭旭升, 胡东风, 文治东, 刘若冰. 2014. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素——以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. *中国地质*, 41(3):893–901.
- 李双建, 肖开华, 沃玉进, 龙胜祥, 蔡立国. 2008. 湘西、黔北地区志留系稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 22(2): 273–280.
- 林家善, 刘建清, 冯伟明, 景小燕. 2014. 黔北下志留统龙马溪组烃源岩有机地球化学特征及其古环境意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 34(2):79–85.
- 马永生, 蔡勤育, 赵培荣. 2018. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. *石油勘探与开发*, 45(4):561–574.
- 穆恩之, 朱兆玲, 陈均远, 戎嘉余. 1983. 四川长宁双河的志留系[J]. *地层学杂志*, 7(3):208–215.
- 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 葛祥英. 2011. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. *地质学报*, 85(4):526–532.
- 聂海宽, 金之钧, 马鑫, 刘忠宝, 林拓, 杨振恒. 2017. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征[J]. *石油学报*, 38(2):160–174.
- 皮学军, 刘楚雄, 陈颖, 孙作玉, 郝维城. 2007. 新疆柯坪大湾沟奥陶系顶部—志留系底部化学地层特征讨论[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 43(2):183–189.
- 戎嘉余, 陈旭, 王怿, 詹仁斌, 刘建波, 黄冰, 唐鹏, 吴荣昌, 王光旭. 2011. 奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁:证据与启示[J]. *中国科学:地球科学*, 41(10):1407–1415.
- 戎嘉余, 陈旭, 詹仁斌, 樊隽轩, 王怿, 张元动, 李越, 黄冰, 吴荣昌, 王光旭. 2010. 贵州桐梓县境南部奥陶系—志留系界线地层新认识[J]. *地层学杂志*, 34(4):337–348.
- 王传尚, 陈孝红, 汪啸风. 2002. 峡区晚奥陶世地球化学异常与奥陶系—志留系之交环境变迁[J]. *地层学杂志*, 26(4):272–279.
- 王玉满, 董大忠, 黄金亮, 李新景, 王淑芳. 2016. 四川盆地及周边上奥陶统五峰组观音桥段岩相特征及对页岩气选区意义[J]. *石油勘探与开发*, 43(1):42–50.
- 王玉满, 李新景, 董大忠, 张晨晨, 王淑芳. 2017. 上扬子地区五峰组—龙马溪组优质页岩沉积主控因素[J]. *天然气工业*, 37(4):9–20.
- 汪正江, 余谦, 杨平, 刘伟, 杨菲, 刘家洪, 熊国庆, 何江林, 邓奇. 2018. 川滇黔邻区龙马溪组页岩气富集主控因素与勘探方向[J]. *沉积与特提斯地质*, 38(3):1–15.
- 严德天, 陈代钊, 王清晨, 汪建国. 2009. 扬子地区奥陶系—志留系界线附近地球化学研究[J]. *中国科学:地球科学*, 39(3):285–299.
- 杨平, 汪正江, 余谦, 刘伟, 刘家洪, 熊国庆, 何江林, 杨菲. 2019. 四川盆地西南缘五峰—龙马溪组页岩气资源潜力分析[J]. *中国地质*, 46(3): 601–614.
- 詹仁斌, 刘建波, Ian G. Percival, 靳吉锁, 李贵鹏. 2010. 华南上扬子区晚奥陶世赫南特贝动物群的时空演变[J]. *中国科学:地球科学*, 40(9):1154–1163.

## 附中文参考文献

- 陈孝红, 汪啸风. 1999. 长江三峡地区早古生代多重地层划分与海平面升降事件[J]. *华南地质与矿产*, 15(3):1–11.
- 陈旭, 樊隽轩, 王文卉, 王红岩, 聂海宽, 石学文, 文治东, 陈冬阳, 李文杰. 2017. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式[J]. *中国科学:地球科学*, 47(6):720–732.
- 樊隽轩, Michael J. Melchin, 陈旭, 王怿, 张元动, 陈清, 迟昭利, 陈峰. 2012. 华南奥陶—志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学[J]. *中国科学:地球科学*, 42(1):130–139.
- 方一亭, 边立曾, 俞剑华, 冯洪真. 1993. 晚奥陶世五峰期扬子板块沉积模式[J]. *沉积学报*, 11(3):7–12.
- 冯洪真, Bernd-D. Erdtmann, 王海峰. 2000. 上扬子区早古生代全岩 Ce 异常与海平面长缓变化[J]. *中国科学:地球科学*, 30(1): 66–72.
- 冯伟明, 赵瞻, 李嵘, 余谦, 叶定南. 2020. 滇东北 DD1 井五峰—龙马溪组页岩气地质特征及其勘探启示[J]. *沉积与特提斯地质*, 40(4):17–24.
- 高莉, 王宗秀, 梁明亮, 张林炎, 李会军, 李春麟, 高万里. 2019. 湘西