黔北地区奥陶纪—志留纪之交黑色页岩地球化学特征及意义

——以贵州道真道页1井为例

Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

安亚运[1)],杨忠琴[1)],向坤鹏[1)],黄艺[2)],陈厚国[1)],贺永忠[1)],刘伟[3)],余谦[3)]

1) 贵州省地质调查院,贵阳,550081; 2) 贵州省土地矿产资源储备局,贵阳,550008;
3) 中国地质调查局成都地质调查中心,成都,610081

内容提要:奥陶纪—志留纪之交是华南被动大陆边缘盆地向前陆盆地演化的重要转折时期,形成广泛分布的五峰组—龙马溪组黑色页岩。为进一步探讨该套黑色页岩的形成背景,以黔北地区道页1井为例,开展沉积序列和地球化学研究。研究结果表明:五峰组及龙马溪组底部主要为硅质碳质页岩,夹多层斑脱岩,U/Th为0.2~2.90,V/Cr为1.18~14.34,Ni/Co为2.31~11.59,*TOC*为0.68%~5.91%,平均3.76%,稀土配分曲线为平坦型,δEu以弱正异常为主、个别为弱负异常;龙马溪上部及新滩组主要由泥岩及钙质泥岩组成,U/Th为0.16~0.23,V/Cr为0.88~1.79,Ni/Co为1.77~3.91,*TOC*为0.1%~0.84%,δEu以明显负异常为主,表现出低斜率右倾型稀土配分曲线。以上特征表明五峰组及龙马溪组底部形成于间歇性缺氧的还原环境,龙马溪组上部及新滩组为富氧环境。结合斑脱岩的分布特征综合分析认为,五峰组及龙马溪组底部页岩是汇聚背景下前陆盆地早期沉积的产物,强烈火山作用给大陆边缘海带来营养元素,刺激初级生产力的增加,造成水体迅速缺氧,可能是造成同期海底缺氧的主要诱因。

关键词:黔北地区;道页1井;奥陶纪—志留纪之交;黑色页岩;地球化学特征;沉积构造演化

事件地层通常是盆地演化转折时期的产物,它不仅对应一期重要的构造—沉积事件,同时也常伴随有生物灭绝事件的发生。深入研究事件地层的沉积序列和地球化学特征,对理解大陆裂解与拼贴、盆地形成与消亡、生物爆发与灭绝及全球生物地球化学循环及环境演化等重大科学问题均具有重要指示意义。

中上扬子地区奥陶纪—志留纪之交是华南被动大陆边缘盆地向前陆盆地演化的重要转折时期,发生了显生宙严重的生物灭绝事件。同期形成的黑色页岩分布广泛,不仅记录了古环境、古气候和古生物等的演变特点,也是有机质、油气和多种金属矿床的载体。不少学者对其进行了相关研究,主要集中在古气候及海平面变化(苏文博,1999;陈旭等,2001,梅冥相等,2005)、古生物灭绝事件和缺氧事件(苏文博等,2002;胡艳华等,2009;刘树根等,2013;王淑芳等,2014;龚清,2018)以及油气地质(牟传龙等,2011;张廷山等,2014;张鹏等,2015,2016;张茜等,2018;王超等,2018;康建威等,2018;史树勇等,2019;梁兴等,2019)等,提出了各自的见解。目前,国内学者对中上扬子地区黑色页岩沉积环境的研究主要集中在渝东南(何龙等,2019)、滇东北(张娣等,2020)、川南宜宾长宁(王淑芳等,2014)、川南马边(何利等,2018)、川东南焦石坝(林婉等,2015)、川西南永善—绥江地区(拜文华等,2019;张娣等,2020)、滇东北昭通(王鹏万等,2017)等,其中王鹏万等(2017)、何利等(2018)还对其有机质富集的机制进行了研究。而对于黔北地区黑色页岩沉积环境相关研究较少,有机质富集的机制仍不清楚,可能的原因是控制有机质富集的因素多,且各种因素相互关联。此外,黑色页岩质软、易风化,难以找到新鲜的露头和剖面,进一步制约了相关研究的开展。但是,岩芯样品弥补了这些不足,成为有机质富集控制因素研究的重要对象(夏鹏等,2020)。作者等以黔

注:本文为贵州省页岩气资源调查评价项目(编号:GZSYYQZYDC2012)、贵州省务正道地区页岩气资源潜力及有利区块分析(编号:黔科合基础[2016]1409)、黔北地区石牛栏组岩相古地理与页岩气有利储集相带研究(编号:黔地矿科合[2019]24)和贵州省地质调查院院士工作站(编号:黔科合平台人才[2018]5626)的成果。

收稿日期:2020-05-28;改回日期:2021-02-22;网络首发:2021-03-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.051

作者简介:安亚运,男,1982年生,高级工程师,主要从事区域地质和矿产地质调查研究工作;Email:123245693@qq.com。通讯作者:杨忠琴,女,1982年生,硕士,高级工程师,主要从事岩石学及矿产地质调查研究工作;Email:84878019@qq.com。

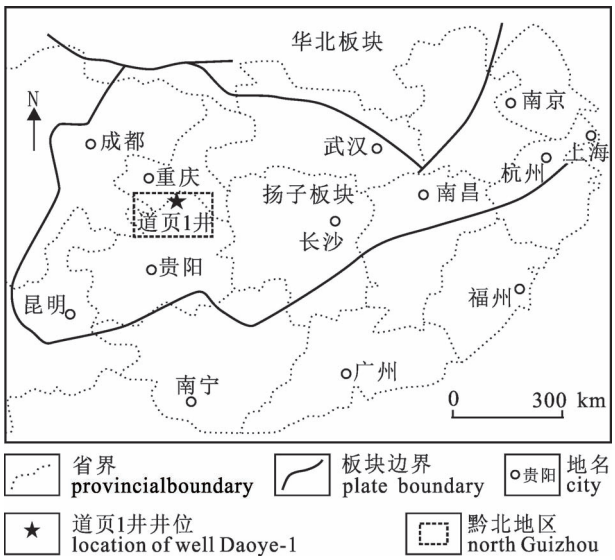


图 1 研究区范围及黔北地区道页 1 井位置示意图
(据王朋飞等,2018 修改)

Fig. 1 The study area and the location of the Well Daoye-1 in Northern Guizhou(modified from Wang Pengfei et al., 2018&)

北地区道页 1 井为例,开展系统的沉积学和地球化学研究,并结合斑脱岩的分布特征综合分析了有机质富集的机制。

1 区域地质背景

区域地质调查资料表明,受沉积构造古地理背景控制,上扬子地区奥陶纪—志留纪之交主要发育一套黑色页岩[1]。黔北地区位于上扬子陆块中部(图 1),奥陶纪—志留纪之交可划分成 3 种类型的沉积序列:开阔台地相区厚层生物灰岩型、滞留陆棚相含硅质碳质页岩—碳质页岩型、潮坪相区钙质泥岩—泥灰岩型,是区内重要的烃源岩层和页岩气目标层。

道页 1 井是由贵州省国土资源厅组织实施的一口页岩气调查井,位于贵州省道真县玉溪镇大路坪村(井口坐标:28°52′0.7″N,107°39′40.4″E,H=742 m)。钻井深度为 633.33 m,五峰组—龙马溪组的厚度为 351.16 m。自上而下钻揭下志留统石牛栏组、新滩组、龙马溪组、上奥陶系统五峰组、宝塔组,地层序列见图 2。上奥陶统宝塔组主要由中层状富含角石"龟裂纹"灰岩组成,顶部层次变薄。宝塔组之上以钾质斑脱岩的出现为标志划分为五峰组,岩性主要为薄层黑色硅质碳质页岩与斑脱岩互层,其中斑脱岩多达 20 余层。区域上,在五峰组顶部有一层厚度约 20 cm 的富含赫南特贝生物组合的灰岩,作为划分龙马溪组的岩性标志。遗憾的是,道页 1 井岩芯显示该灰岩层在此处并未沉积。但根据前人研究显示,五峰组中含有 19 层斑脱岩,龙马溪组底部含有 6 层斑脱岩,即由一系列薄层状班脱岩与灰黑色页岩互层组成的"千层饼"式沉积(苏文博等,2002)。因此,斑脱岩出现的频率大致也可以指示五峰组—龙马溪组底部的界线。故将底部斑脱岩密集分布的岩段划分为五峰组—龙马溪组底部。并以碳质泥页岩消失、钙质泥岩和粉砂质页岩的大量出现划分为龙马溪组上部—新滩组,顶部则以生物碎屑灰岩的出现划分为石牛栏组。

前人研究显示,五峰组及龙马溪组底部分布的钾质斑脱岩,其原岩为中酸性火山岩,具有岛弧火山岩特征,可能与北面的早古生带秦岭洋的闭合过程中的板块俯冲有关,也可能与早古生带南缘外侧存在的古老洋壳向华南板块的俯冲有关(胡艳华等,2009)。因此,可以认为奥陶纪—志留纪之交强烈的火山作用与区域构造活动密切相关,所形成的火山沉积是该期构造活动的远程沉积响应,沉积转换表现为上奥陶统灰岩与上奥陶统—下志留统火山沉积+黑色岩系的截然转变。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

道页 1 井岩芯显示,五峰组与龙马溪组下部主要由硅质碳质页岩,夹多层斑脱岩组成;龙马溪上部及新滩组主要由含碳质泥岩及钙质泥岩组成。对该井上奥陶统—下志留统系统采集了 44 件岩石地球化学样品(采集位置见图 2),其中五峰组及龙马溪组底部黑色硅质碳质页岩 23 件,龙马溪组上部及新滩组页岩 21 件。

2.2 分析方法

全岩的主、微量元素分析由国土资源部西南矿产资源监督检测中心完成,其中常量测试用 X 荧光光谱法测试,所用仪器为 PANalytical 生产的 AXIOS 荧光光谱仪,相对误差小于 5%。微量和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法,依据 DZ/T0223-2001 流程规范,分析仪器为德国 Finnigan MAT 的 HR-ICP-MS(Element I),分辨率为 300~10000,短期(10 min)RSD(相对标准偏差)<1%,长期(4 h)RSD<5%。对于有机碳含量测定,先用 7%的 HCl 在 40℃情况下处理 24 h 把碳酸盐去除,再通过管式燃烧法测定,*TOC*<0.5%时相对误差

<10%,*TOC*>1%时相对误差<5%。

3　主、微量元素特征

3.1　主量元素

道页 1 井奥陶纪—志留纪之交黑色页岩主量元素和有机碳分析结果见表 1,五峰组及龙马溪组底部页岩 23 个样品的 SiO_2 含量为 57.24%~78.82%,平均 65.66%;Al_2O_3 含量为 5.54%~16.86%,平均 11.65%;二者呈明显的负相关关系,相关系数-0.780。相对上地壳(Wedepohl,1995)而言,CaO、

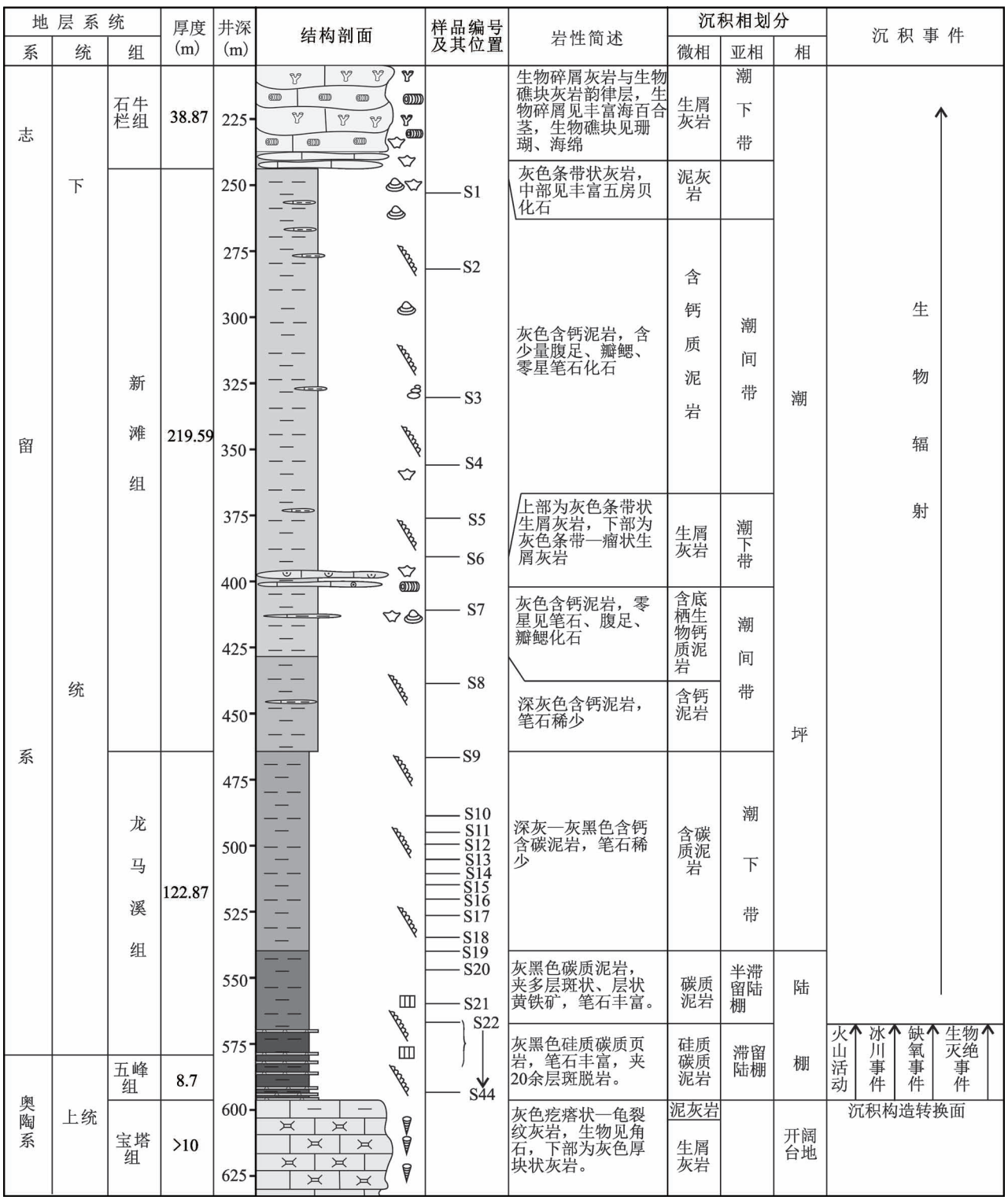


图 2 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交沉积序列特征

Fig. 2 The Ordovician-Silurian sedimentary sequence of the Well Daoye-1 in northern Guizhou

表 1 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交页岩主量元素含量(%)及 *TOC* 变化

Table 1 The content of the major elements (%) and the *TOC* of the Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

地层位	样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	LOL	*TOC*
龙马溪组上部及新滩组	S1	56.10	15.34	2.03	3.56	4.98	2.72	3.76	1.08	0.70	0.14	0.10	7.98	0.11
	S2	57.37	17.26	3.54	2.98	2.39	2.94	4.30	0.97	0.70	0.12	0.16	6.62	0.11
	S3	58.97	18.25	3.90	2.70	1.51	3.03	4.53	0.93	0.73	0.13	0.07	5.92	0.10
	S4	57.54	18.53	3.27	3.21	1.81	3.21	4.68	0.88	0.71	0.12	0.06	5.94	0.13
	S5	58.27	18.29	2.77	3.68	1.66	3.12	4.62	0.97	0.73	0.12	0.06	6.21	0.23
	S6	59.52	16.43	3.08	2.32	3.15	2.71	3.85	1.14	0.68	0.12	0.05	7.39	0.32
	S7	55.22	17.42	3.58	2.66	4.34	3.11	4.31	0.96	0.70	0.11	0.06	7.91	0.12
	S8	46.74	14.47	2.87	2.19	11.63	2.92	3.53	0.78	0.56	0.10	0.06	12.79	0.16
	S9	53.01	17.20	4.28	1.68	5.52	3.47	4.28	0.86	0.67	0.10	0.06	9.53	0.22
	S10	53.06	16.54	3.46	2.68	5.01	3.08	4.00	0.80	0.65	0.09	0.04	10.03	0.57
	S11	52.02	16.24	4.15	1.84	6.04	3.24	4.00	0.79	0.66	0.10	0.05	11.14	0.33
	S12	51.00	14.90	2.19	3.08	7.70	2.99	3.67	0.88	0.62	0.10	0.05	10.56	0.50
	S13	53.34	15.64	1.58	4.19	6.58	3.22	3.64	0.90	0.67	0.11	0.05	9.02	0.49
	S14	54.46	16.39	1.75	4.06	4.51	3.18	3.87	0.94	0.70	0.11	0.05	8.15	0.54
	S15	56.93	17.69	2.79	3.29	3.25	3.10	3.77	0.93	0.70	0.09	0.04	7.73	0.48
	S16	56.41	17.53	2.06	3.88	2.62	3.13	4.27	0.87	0.72	0.09	0.03	7.38	0.56
	S17	54.32	16.40	2.27	3.21	4.82	2.94	4.00	0.88	0.72	0.10	0.04	9.20	0.84
	S18	55.86	15.33	2.64	2.81	5.00	2.98	3.65	1.05	0.67	0.12	0.05	8.44	0.63
	S19	56.72	15.53	2.79	2.88	4.24	2.76	3.35	1.16	0.67	0.11	0.04	7.71	0.65
	S20	57.46	16.74	3.05	2.81	2.28	2.84	4.20	0.93	0.70	0.10	0.03	8.20	0.68
	S21	59.21	15.85	2.41	3.21	2.83	2.74	3.73	0.97	0.66	0.10	0.04	7.59	0.78
五峰组及龙马溪组底部	S22	59.43	15.08	2.16	2.69	3.37	2.61	3.69	1.04	0.65	0.11	0.04	8.04	1.06
	S23	62.54	15.68	2.33	1.77	2.28	1.97	3.59	1.52	0.64	0.12	0.02	7.17	1.50
	S24	63.78	12.18	3.59	0.98	2.98	1.71	2.92	0.93	0.58	0.11	0.02	9.49	2.74
	S25	62.56	12.11	2.99	1.64	3.67	1.94	2.86	0.84	0.58	0.11	0.03	10.56	3.07
	S26	63.12	11.56	3.69	0.95	3.63	1.92	2.88	0.81	0.55	0.11	0.03	10.47	2.85
	S27	65.29	11.31	2.88	1.23	3.52	1.68	2.69	0.79	0.50	0.10	0.03	9.49	2.48
	S28	63.27	11.78	2.08	1.83	3.73	1.69	2.80	0.80	0.52	0.12	0.02	9.99	2.70
	S29	62.87	11.51	3.88	0.50	3.59	1.60	2.70	0.94	0.53	0.13	0.02	10.72	3.38
	S30	60.29	10.90	8.17	1.05	1.69	1.26	2.51	0.92	0.50	0.12	0.02	11.77	3.78
	S31	59.70	12.28	2.59	1.73	2.99	1.91	2.90	1.22	0.60	0.13	0.02	10.98	3.71
	S32	69.91	10.12	3.05	0.60	1.88	1.26	2.30	1.03	0.47	0.12	0.02	9.38	3.36
	S33	73.03	8.40	2.59	0.34	2.22	1.09	2.05	0.94	0.41	0.10	0.01	8.19	2.98
	S34	58.54	12.89	4.25	1.15	2.53	1.92	2.83	1.30	0.58	0.12	0.02	13.06	5.34
	S35	59.77	12.88	3.42	1.08	2.38	1.88	2.69	1.34	0.60	0.12	0.02	12.58	5.91
	S36	57.24	16.86	4.02	2.04	2.18	2.86	4.19	0.92	0.71	0.10	0.03	7.16	0.68
	S37	76.71	7.68	2.21	0.48	1.32	0.89	1.60	0.57	0.49	0.09	0.02	8.49	3.34
	S38	78.34	6.30	2.33	0.36	1.30	0.83	1.53	0.47	0.30	0.08	0.01	8.46	4.22
	S39	78.82	5.54	2.00	0.40	1.58	0.92	1.28	0.44	0.26	0.08	0.02	8.30	4.24
	S40	75.98	7.58	2.54	0.35	1.43	1.18	1.85	0.61	0.37	0.09	0.02	8.50	3.79
	S41	72.40	9.50	1.79	0.47	1.64	1.47	2.31	0.59	0.40	0.08	0.03	9.06	3.69
	S42	66.40	13.30	2.03	1.65	1.11	2.10	3.25	0.92	0.63	0.09	0.04	8.65	2.80
	S43	61.23	16.08	3.32	1.10	1.62	2.58	3.68	1.12	0.76	0.10	0.04	7.21	3.92
	S44	59.00	16.48	2.92	1.14	2.01	2.44	4.08	1.11	0.80	0.12	0.04	9.04	3.40
上地壳丰度		66.00	15.20		4.50	4.20	2.20	3.40	3.90	0.65	0.15	0.08		

K_2O、Na_2O、P_2O_5、MnO 亏损较严重(图 3a)。龙马溪组上部及新滩组页岩 21 个样品的 SiO_2 含量为 46.74% ~ 59.52%，平均 55.41%；Al_2O_3 含量为 14.47%~18.53%，平均 16.57%；SiO_2 和 Al_2O_3 呈正相关性，相关系数为 0.324。Fe_2O_3、FeO、CaO、MgO、K_2O、Na_2O 和 TiO_2 在五峰组—新滩组中分布稳定，K2O/Na_2O 为 2.01~5.32，平均 3.66。亏损 Na_2O、P_2O_5、MnO(图 3b)，其 MnO 含量最低，为 0.01%~

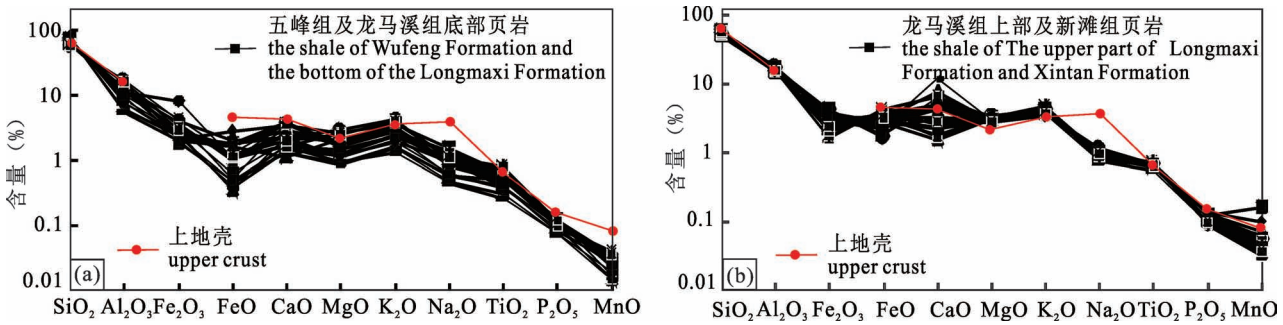


图 3 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交页岩主量元素分布

Fig. 3 The major elements of the Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

0.16%,平均 0.04%,五峰组至新滩组有升高的趋势。烧失量(LOL)均较高,5.92%~13.06%,五峰组至新滩组有降低趋势,这可能是页岩中富含有机质多少所致。

3.2　微量元素

道页 1 井奥陶纪—志留纪之交黑色页岩样品微量元素分析结果见表 2。与上地壳元素丰度(鄢明才等,1997)相比,在五峰组及龙马溪组底部 Mo、U、Ni、V、Cu、Zn、Pb、Cs、Bi 明显富集,Li、Be、Sc、Cr、Co、Rb、Nb、Th 也略有富集,而 Sr 强烈亏损,Zr、Hf 弱亏损;在龙马溪组上部及新滩组 Mo、Cs、Bi、Li、Cr、Ni、Rb、Th、U 明显富集,Be、Sc、V、Co、Cu、Zn、Pb、Ga、Nb、Ta 略有富集,而 Sr 强烈亏损,Zr、Hf 弱亏损。总的来说炭质泥岩中的 Sr 亏损最为强烈,而钙质泥岩、泥岩次之。

3.3　稀土元素

道页 1 井奥陶纪—志留纪之交黑色页岩稀土元素含量见表 3,稀土元素不同层段中含量具有明显差异。五峰组及龙马溪组底部 ∑REE 为 104.43~270.01 μg/g,平均值为 193.63 μg/g,LREE/HREE 为 6.45~11.16,平均 8.81;龙马溪组上部及新滩组 ∑REE 为 128.29~252.60 μg/g,平均值为 214.58 μg/g,LREE/HREE 为 9.96~12.13,平均 10.93。两者稀土总量略微高于北美页岩的平均值(173.21 μg/g),LREE/HREE 较大,平均值高于北美页岩值 7.44(Haskin et al.,1966),表明轻稀土元素相对富集,重稀土元素亏损。

泥岩中 ∑REE 受多种因素的影响,如沉积环境、有机质含量、矿物类型及含量和后期岩浆改造等。前人研究认为沉积物中的 ∑REE 随沉积环境靠近物源而逐渐增高(沈玉林等,2016),而早古生代末受华夏地块向扬子地块推挤,物源区逐渐隆升向盆地推进,导致五峰组到新滩组泥岩中稀土元素含量不断升高。

道页 1 井五峰组及龙马溪组底部与龙马溪组上部及新滩组稀土元素含量及其相关参数特征差异明显(表 3)。五峰组及龙马溪组底部表现出平坦型(图 4a),轻重稀土分馏程度低,δCe 具有明显的负异常,δEu 显示以弱正异常为主、个别为弱负异常;龙马溪组上部及新滩组表现出低斜率右倾型(图 4b),轻重稀土分馏程度低,比前者略高,δCe 具有明显的负异常,δEu 显示以弱负异常为主,也有弱正异常(21 件样品中 18 件负异常,3 件弱正异常)。表明二者稀土来源具有一定差异。北美页岩标准化的五峰组及龙马溪组底部 $[La/Yb]_N$ 值为 1.0~2.1,平均值为 1.54,δEu 值为 0.78~1.12,既显示弱正异常,又显示弱负异常,δCe 变化于 0.7~0.78;龙马溪组上部及新滩组 $[La/Yb]_N$ 值为 1.67~2.26,平均值为 2.03,δEu 值为 0.89~1.09,显示以弱负异常为主,δCe 变化于 0.75~0.78。

4　讨论

4.1　沉积环境

沉积水体氧化还原环境影响各元素在水体中的循环、分异和富集,环境的变化在沉积岩中留下了丰富的地球化学记录,因此岩石中相关元素指标是定性恢复古氧化还原环境的重要证据(林治家等,2008;Meyer et al.,2012;Maslov et al.,2018)。自然状态下,氧化—还原反应对 V、Mo、U 等变价元素的迁移、共生、沉淀有重要的控制作用,氧化条件下,V、Mo、U、Ce、S 等呈高价易迁移;还原条件下呈低价易沉淀。而 Fe、Mn、Cu、Eu 等在氧化条件下呈高价易迁移。在含有 H_2S 的缺氧环境中,Fe、Cu、Zn 等亲

表 2 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交页岩微量元素含量(μg/g)

Table 2 The content of the trace elements (μg/g) of the Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

样号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Ga	Rb	Sr	Nb	Mo	Cs	Ba	Ta	Bi	Th	U	Zr	Hf
S1	46.4	3.0	15.8	156.0	90.0	23.4	41.5	23.8	21.2	91.9	23.4	190.0	96.7	18.0	0.8	11.4	620.0	1.2	0.5	21.7	4.4	148.0	3.9
S2	50.9	3.6	17.8	144.0	98.9	19.9	46.3	25.4	16.6	64.4	23.7	217.0	109.0	18.3	0.9	13.2	603.0	1.2	0.5	22.2	3.7	121.0	3.1
S3	53.8	3.9	19.5	126.0	86.0	18.7	47.4	31.6	18.5	125.0	22.3	230.0	113.0	18.7	0.4	13.9	597.0	1.3	0.6	23.5	3.9	130.0	3.3
S4	52.7	3.8	18.9	121.0	103.0	17.8	52.7	36.7	15.4	125.0	24.8	223.0	110.0	17.4	0.3	13.8	666.0	1.2	0.5	22.6	3.6	107.0	2.7
S5	51.7	3.7	18.5	116.0	82.7	17.7	46.7	29.8	15.6	74.8	21.7	219.0	108.0	18.4	0.3	13.7	585.0	1.2	0.5	22.2	3.7	119.0	3.0
S6	45.0	3.4	16.6	109.0	66.9	14.8	35.6	27.9	15.0	61.8	19.3	195.0	104.0	17.6	0.5	11.8	552.0	1.2	0.5	21.7	3.7	134.0	3.4
S7	51.2	3.4	17.5	116.0	81.1	20.0	41.0	26.3	36.5	122.0	23.6	209.0	108.0	17.2	0.4	12.5	638.0	1.2	0.6	21.6	3.7	108.0	3.0
S8	41.9	3.0	14.7	96.3	78.5	12.9	35.8	17.9	13.2	52.3	18.7	174.0	128.0	14.1	0.7	10.4	576.0	1.0	0.4	17.4	2.8	85.7	2.3
S9	49.8	3.6	17.1	114.0	108.0	16.1	47.0	21.7	13.1	59.5	23.0	210.0	117.0	16.9	1.0	13.2	985.0	1.1	0.4	20.1	3.2	91.0	2.4
S10	46.9	3.4	16.5	129.0	92.0	16.8	46.4	28.6	32.3	55.7	18.8	207.0	113.0	16.8	4.3	13.6	627.0	1.1	0.6	20.6	4.3	104.0	2.7
S11	47.2	3.2	16.6	115.0	95.7	16.8	42.6	27.7	21.0	103.0	23.2	199.0	105.0	16.6	3.2	13.6	644.0	1.1	0.5	19.8	3.7	90.6	2.5
S12	40.6	3.2	15.1	132.0	98.6	14.8	48.5	32.0	20.4	62.9	19.4	186.0	112.0	16.4	3.3	12.6	618.0	1.1	0.6	20.2	4.3	112.0	3.3
S13	46.1	3.2	15.8	116.0	84.6	16.1	46.5	27.2	19.8	56.3	18.9	186.0	107.0	18.1	4.0	12.4	612.0	1.2	0.5	20.2	3.9	106.0	2.8
S14	48.4	3.3	16.8	155.0	177.0	17.5	68.4	29.2	24.4	62.1	24.0	198.0	107.0	18.4	5.8	13.1	634.0	1.2	0.6	21.2	4.0	105.0	2.8
S15	48.4	3.6	17.6	157.0	87.5	18.3	53.2	33.2	24.3	77.2	21.1	212.0	109.0	18.5	3.0	14.7	670.0	1.2	0.6	21.8	4.0	107.0	3.1
S16	49.1	3.8	17.8	134.0	99.5	17.9	49.0	31.9	19.8	70.6	21.7	219.0	110.0	18.5	3.4	15.3	683.0	1.2	0.6	22.5	4.2	113.0	2.9
S17	46.2	3.0	16.6	136.0	98.3	17.0	43.9	38.6	24.6	75.7	26.7	196.0	97.5	17.2	2.7	13.8	634.0	1.2	0.6	21.0	4.8	105.0	2.7
S18	39.5	2.6	14.3	121.0	80.3	16.4	37.7	32.5	26.3	87.1	21.2	168.0	91.9	15.0	2.2	11.6	550.0	1.1	0.5	17.2	3.4	106.0	3.6
S19	35.0	2.3	12.0	102.0	62.7	14.1	35.1	31.1	27.9	130.0	17.7	144.0	78.2	12.9	2.3	9.9	475.0	1.0	0.6	15.5	3.1	94.4	2.6
S20	44.9	3.0	15.8	142.0	94.2	17.4	48.0	33.7	35.6	73.7	24.9	194.0	96.9	15.6	2.8	13.8	612.0	1.2	0.6	18.9	3.7	105.0	3.8
S21	41.6	2.8	14.7	130.0	86.5	16.2	48.1	34.9	28.5	135.0	22.4	180.0	91.7	15.2	4.0	12.6	611.0	1.1	0.5	17.8	3.7	107.0	3.6
S22	37.5	2.8	14.1	98.8	83.7	16.6	38.3	32.2	41.4	63.7	22.8	173.0	89.8	14.9	2.3	12.2	624.0	1.1	0.5	18.1	3.7	123.0	3.8
S23	30.6	2.9	12.1	111.0	57.5	13.0	34.5	28.4	32.4	86.6	21.0	160.0	85.5	17.7	7.1	11.0	627.0	1.4	0.6	23.9	8.2	219.0	8.6
S24	24.5	2.7	11.8	209.0	99.3	30.9	358.0	136.0	37.0	108.0	22.9	162.0	84.5	16.0	13.9	11.6	657.0	1.1	0.6	19.0	11.1	163.0	4.3
S25	24.4	2.6	12.3	260.0	75.4	21.4	95.8	65.0	32.6	158.0	17.6	154.0	76.4	16.4	19.2	11.4	669.0	1.2	0.7	18.0	12.6	135.0	3.9
S26	25.1	2.5	11.7	230.0	66.8	20.9	83.9	59.2	54.6	117.0	17.7	150.0	79.9	14.4	15.6	10.9	656.0	1.1	0.6	17.0	10.6	120.0	3.9
S27	22.5	2.2	10.4	178.0	56.6	18.5	68.6	47.2	41.9	102.0	16.1	130.0	69.6	12.8	11.2	9.3	601.0	1.0	0.5	15.0	7.8	114.0	4.1
S28	23.5	2.7	11.3	176.0	59.1	19.4	59.3	58.8	49.4	113.0	16.9	150.0	79.6	14.0	12.6	10.9	665.0	1.1	0.6	17.4	10.1	114.0	3.4
S29	19.8	3.0	11.6	236.0	60.2	21.0	101.0	52.8	32.5	123.0	17.6	146.0	73.1	14.6	27.0	10.5	692.0	1.0	0.5	16.3	23.8	126.0	3.2
S30	16.4	3.3	10.1	187.0	60.6	21.2	95.2	66.6	54.0	215.0	16.6	133.0	67.3	15.3	29.6	9.6	608.0	1.1	0.5	15.0	23.3	132.0	6.5
S31	23.3	3.8	12.1	271.0	72.9	22.1	113.0	71.5	50.4	187.0	19.4	153.0	80.4	16.0	27.0	10.9	647.0	1.2	0.6	17.6	47.0	149.0	5.5
S32	20.4	2.7	9.5	236.0	50.1	20.7	95.3	59.0	42.4	234.0	14.7	119.0	65.1	15.1	31.3	7.9	620.0	1.0	0.5	14.0	25.9	141.0	4.3
S33	13.0	2.3	7.4	225.0	45.4	13.5	98.6	40.9	33.9	176.0	13.0	95.8	51.6	14.8	30.0	6.3	617.0	0.8	0.4	12.4	23.2	144.0	3.5
S34	23.4	4.0	12.2	544.0	69.8	20.3	179.0	60.6	41.8	258.0	20.8	150.0	79.4	19.3	60.5	10.7	608.0	1.1	0.4	18.3	47.5	196.0	5.3
S35	23.6	4.1	12.8	612.0	78.0	19.8	196.0	80.2	27.9	370.0	22.6	155.0	75.2	19.6	90.8	11.0	683.0	1.1	0.5	18.8	54.6	187.0	18.8
S36	47.7	3.2	17.7	162.0	91.5	19.0	51.3	33.3	29.5	78.0	26.4	213.0	105.0	17.4	3.9	14.8	648.0	1.3	0.6	20.1	4.5	108.0	20.1
S37	12.2	2.4	7.4	334.0	49.4	10.8	93.4	61.0	31.4	243.0	14.4	88.6	45.2	18.0	29.0	5.6	689.0	1.0	0.3	9.4	10.2	122.0	9.4
S38	28.5	1.5	6.2	349.0	41.6	10.9	94.4	72.9	20.1	124.0	8.7	65.8	37.7	7.4	33.0	4.2	523.0	0.4	0.3	7.7	14.4	66.8	7.7
S39	18.2	1.5	6.3	336.0	36.2	10.8	89.9	72.1	16.8	146.0	9.2	63.7	34.6	6.7	36.8	4.0	614.0	0.4	0.3	7.6	16.1	62.2	7.6
S40	19.8	2.3	8.7	484.0	47.1	12.3	114.0	105.0	25.6	437.0	11.8	91.5	47.8	19.1	41.7	5.7	595.0	0.6	0.3	10.3	19.3	144.0	10.3
S41	17.9	2.9	10.3	701.0	48.9	7.1	74.1	98.3	20.5	370.0	13.8	114.0	59.0	16.8	33.9	7.0	670.0	0.9	0.4	13.0	16.0	180.0	13.0
S42	29.9	3.5	14.9	183.0	85.9	7.9	52.6	132.0	22.2	213.0	18.4	151.0	72.2	17.0	1.0	10.2	624.0	1.1	0.5	17.3	4.8	203.0	17.3
S43	36.8	3.7	18.2	154.0	95.7	13.4	63.7	123.0	54.9	134.0	24.0	190.0	91.7	21.5	1.0	12.8	713.0	1.4	0.7	23.7	5.2	178.0	23.7
S44	34.1	3.9	17.6	191.0	98.9	19.3	88.6	171.0	40.4	519.0	23.8	194.0	94.2	20.1	0.7	13.2	715.0	1.4	0.7	23.7	5.5	173.0	23.7
上地壳丰度	20.0	1.9	10.0	70.0	44.0	12.0	21.0	17.0	18.0	63.0	18.0	95.0	300.0	13.0	0.6	3.3	640.0	0.9	0.2	9.5	1.8	170.0	11.6

石元素常形成硫化物沉淀。沉积物的 Fe_T/Al 值可反映陆源输入碎屑物质的 Fe 和自生铁矿物之间的一种平衡关系,利用后太古代澳大利亚平均页岩(PAAS)中的 Fe_T/Al 值(0.5 左右,Lyonset et al.,2006)作为参考标准。若高于平均值,则说明富集自生的铁矿物,即为相对还原的环境;若低于平均

表 3 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交页岩稀土元素含量(μg/g)

Table 3 The content of the REE (μg/g) of the Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

层位	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	北美页岩标准化		
																				$\frac{La}{Yb}_N$	δEu	δCe
龙马溪组上部及新滩组	S1	55.5	93.4	12.2	41.6	7.9	1.6	6.6	1.1	5.4	1.1	3.5	0.6	3.2	0.5	234.2	212.2	22.0	9.7	1.67	0.99	0.78
	S2	58.3	93.9	12.3	40.3	7.7	1.5	6.4	1.1	5.0	1.1	3.3	0.6	3.0	0.5	234.9	214.0	20.8	10.3	1.90	0.95	0.76
	S3	62.6	101.0	13.3	43.5	8.3	1.6	6.8	1.1	5.3	1.2	3.5	0.6	3.2	0.5	252.6	230.3	22.3	10.3	1.88	0.93	0.76
	S4	59.3	95.2	12.3	40.5	7.7	1.5	6.3	1.0	4.8	1.0	3.1	0.5	2.9	0.5	236.6	216.5	20.2	10.7	2.01	0.96	0.76
	S5	60.1	96.2	12.5	40.7	7.4	1.5	6.3	1.0	4.8	1.1	3.2	0.5	2.9	0.5	238.6	218.4	20.2	10.8	2.01	0.93	0.76
	S6	58.9	93.1	12.2	40.1	7.5	1.4	6.3	1.0	4.8	1.0	3.1	0.5	2.9	0.5	233.4	213.2	20.2	10.6	1.96	0.92	0.75
	S7	57.2	94.2	12.2	40.6	7.4	1.5	6.0	1.0	4.8	1.0	3.1	0.5	2.8	0.4	232.7	213.1	19.6	10.9	1.95	1.00	0.77
	S8	48.2	75.3	10.0	33.5	6.6	1.3	5.2	0.9	4.2	0.9	2.6	0.4	2.4	0.4	191.7	174.9	16.8	10.4	1.98	0.99	0.74
	S9	54.0	84.5	11.0	35.7	6.3	1.5	5.3	0.8	4.0	0.9	2.6	0.4	2.4	0.4	209.7	193.0	16.7	11.6	2.22	1.10	0.75
	S10	56.0	87.0	11.2	36.1	6.4	1.3	5.2	0.8	4.1	0.9	2.6	0.4	2.4	0.4	214.9	198.0	16.9	11.8	2.26	0.97	0.75
	S11	53.4	87.0	11.2	37.0	6.5	1.3	5.4	0.8	4.0	0.8	2.6	0.4	2.4	0.4	213.2	196.4	16.8	11.7	2.16	1.00	0.77
	S12	54.7	86.8	11.4	36.7	6.8	1.4	5.6	0.9	4.4	1.0	2.9	0.6	2.6	0.5	216.2	197.8	18.4	10.7	2.01	0.98	0.75
	S13	53.5	84.9	11.2	36.5	6.9	1.4	5.5	1.0	4.5	1.0	2.8	0.5	2.5	0.4	212.5	194.4	18.1	10.8	2.05	0.98	0.75
	S14	56.4	89.6	11.6	37.8	7.0	1.4	5.7	0.9	4.4	1.0	2.8	0.5	2.6	0.4	222.1	203.9	18.3	11.2	2.11	0.98	0.76
	S15	57.2	90.9	11.8	37.8	6.9	1.4	5.5	0.9	4.3	0.9	2.8	0.5	2.6	0.4	223.7	205.9	17.8	11.6	2.16	0.97	0.76
	S16	59.4	95.4	12.3	39.6	7.0	1.3	5.6	0.9	4.2	0.9	2.8	0.4	2.6	0.4	232.7	215.0	17.7	12.1	2.25	0.90	0.77
	S17	55.3	91.1	11.9	40.2	7.1	1.5	5.9	0.9	4.6	0.9	2.9	0.5	2.7	0.4	225.9	207.1	18.9	11.0	1.96	0.99	0.77
	S18	48.1	76.6	10.0	33.9	6.4	1.3	5.2	0.9	4.3	0.9	2.6	0.4	2.5	0.4	193.2	176.2	17.0	10.3	1.90	0.97	0.76
	S19	41.6	67.4	8.8	30.0	5.6	1.1	4.5	0.8	3.7	0.7	2.2	0.4	2.1	0.3	169.2	154.5	14.7	10.5	1.91	0.97	0.77
	S20	53.3	84.4	10.9	36.0	6.6	1.3	5.2	0.9	4.2	0.8	2.5	0.4	2.4	0.4	209.3	192.4	16.9	11.4	2.13	0.96	0.76
	S21	49.3	78.3	10.2	34.0	6.2	1.3	4.9	0.8	4.0	0.8	2.4	0.4	2.3	0.4	195.2	179.2	16.0	11.2	2.06	1.00	0.76
五峰组及龙马溪组底部	S22	48.1	76.3	9.9	33.6	6.2	1.3	5.1	0.9	4.2	0.9	2.5	0.5	2.4	0.4	192.3	175.4	16.9	10.4	1.91	1.00	0.76
	S23	57.0	93.4	12.3	41.2	7.8	1.3	6.6	1.2	6.1	1.3	3.7	0.7	3.7	0.6	236.9	213.1	23.9	8.9	1.48	0.81	0.77
	S24	53.2	84.7	11.2	39.1	7.5	1.4	6.1	1.1	5.2	1.0	3.2	0.5	3.0	0.5	217.6	197.1	20.5	9.6	1.72	0.94	0.75
	S25	46.9	75.8	10.3	35.8	6.9	1.5	5.7	0.9	4.7	1.0	3.0	0.5	2.8	0.4	196.1	177.1	19.0	9.3	1.65	1.02	0.75
	S26	47.2	73.6	9.7	33.4	6.4	1.3	5.3	0.9	4.5	0.9	2.7	0.5	2.6	0.4	189.5	171.7	17.8	9.6	1.76	0.98	0.74
	S27	41.7	65.4	8.7	30.2	5.8	1.2	4.9	0.8	4.1	0.8	2.4	0.4	2.3	0.3	169.0	153.1	16.0	9.6	1.76	0.98	0.74
	S28	48.2	76.9	10.3	35.6	6.9	1.4	5.7	1.0	4.7	1.0	2.8	0.5	2.7	0.4	197.9	179.3	18.6	9.6	1.76	0.97	0.75
	S29	46.2	75.0	10.4	36.6	7.2	1.6	6.0	1.0	5.0	1.0	3.1	0.5	3.0	0.5	197.1	177.0	20.1	8.8	1.52	1.07	0.74
	S30	42.8	69.6	9.4	32.7	6.3	1.2	5.1	0.9	4.5	0.9	2.7	0.5	2.6	0.4	179.6	162.1	17.5	9.3	1.61	0.96	0.75
	S31	50.4	78.2	10.5	35.9	7.1	1.5	5.9	1.1	5.4	1.1	3.3	0.5	3.1	0.5	204.5	183.6	20.9	8.8	1.56	1.01	0.74
	S32	42.1	67.8	9.3	32.7	6.6	1.4	5.4	1.0	4.9	1.0	2.9	0.5	2.7	0.4	178.6	159.8	18.8	8.5	1.50	1.02	0.75
	S33	38.4	60.4	8.2	28.5	5.8	1.2	4.9	0.9	4.5	0.9	2.7	0.5	2.5	0.4	159.7	142.5	17.2	8.3	1.48	1.00	0.74
	S34	57.2	89.9	12.3	43.1	8.6	1.7	7.2	1.3	6.5	1.3	4.0	0.7	3.7	0.6	237.9	212.7	25.2	8.4	1.49	0.94	0.74
	S35	55.8	88.8	12.4	44.2	8.8	1.8	7.6	1.3	6.8	1.4	4.3	0.7	4.0	0.6	238.6	211.8	26.8	7.9	1.34	0.98	0.73
	S36	56.2	88.7	11.2	37.1	6.6	1.4	5.5	0.9	4.5	0.9	2.7	0.5	2.6	0.4	219.2	201.2	18.0	11.2	2.10	0.98	0.77
	S37	42.7	61.1	7.8	26.0	4.9	1.1	4.4	0.8	4.1	0.8	2.6	0.4	2.6	0.4	159.7	143.6	16.1	8.9	1.62	1.02	0.72
	S38	24.6	37.9	5.3	18.8	3.9	0.9	3.5	0.7	3.5	0.7	2.1	0.4	2.0	0.3	104.4	91.4	13.0	7.0	1.22	1.04	0.72
	S39	24.0	39.0	5.6	20.5	4.3	1.0	3.9	0.7	3.8	0.8	2.4	0.4	2.3	0.4	109.0	94.4	14.6	6.4	1.00	1.12	0.73
	S40	34.7	51.1	7.0	24.0	4.9	1.1	4.4	0.8	4.4	0.9	2.8	0.5	2.8	0.5	139.8	122.7	17.1	7.2	1.19	1.04	0.71
	S41	44.8	63.3	8.6	29.2	5.9	1.3	5.2	0.9	5.0	1.1	3.2	0.6	3.2	0.5	172.8	153.2	19.6	7.8	1.34	1.05	0.70
	S42	59.0	85.3	11.3	36.1	6.1	1.1	5.3	1.0	5.4	1.2	3.9	0.7	4.2	0.7	221.2	199.0	22.3	8.9	1.36	0.87	0.71
	S43	64.7	107.0	13.9	47.1	9.0	1.5	7.6	1.3	6.8	1.4	4.1	0.7	4.1	0.7	270.0	243.3	26.7	9.1	1.52	0.81	0.78
	S44	63.3	103.0	13.5	45.7	8.8	1.5	7.5	1.3	6.7	1.3	4.0	0.7	3.9	0.6	261.9	235.7	26.1	9.0	1.56	0.78	0.77

值,则说明主要来源陆源输入的铁,即为相对氧化的环境。道页 1 井奥陶纪—志留纪之交五峰组及龙马溪组底部和龙马溪上部及新滩组的 Fe_T/Al 值分布为(0.33~0.38)、(0.24~0.42),明显低于平均页岩值,说明环境相对氧化。

Th、Sc 等元素一般不受氧化还原条件变化影响,与其共生的变价元素(如 U、V 等)形成鲜明的对照(Kimura et al.,2001)。另外,成岩作用对 REE、Th、U、Ni、Co、Zn、Cd 等大部分过渡元素影响较小,即使在含量上发生一些变化,但相关元素比值和分

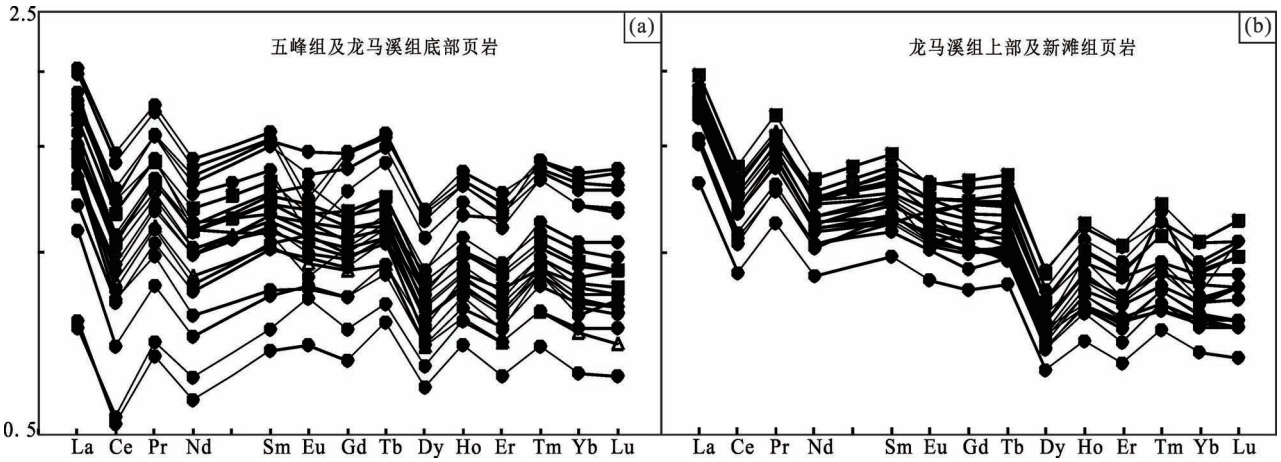


图 4 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交页岩稀土元素北美页岩标准化配分曲线

Fig. 4 The North American shale normalized REE patterns for Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

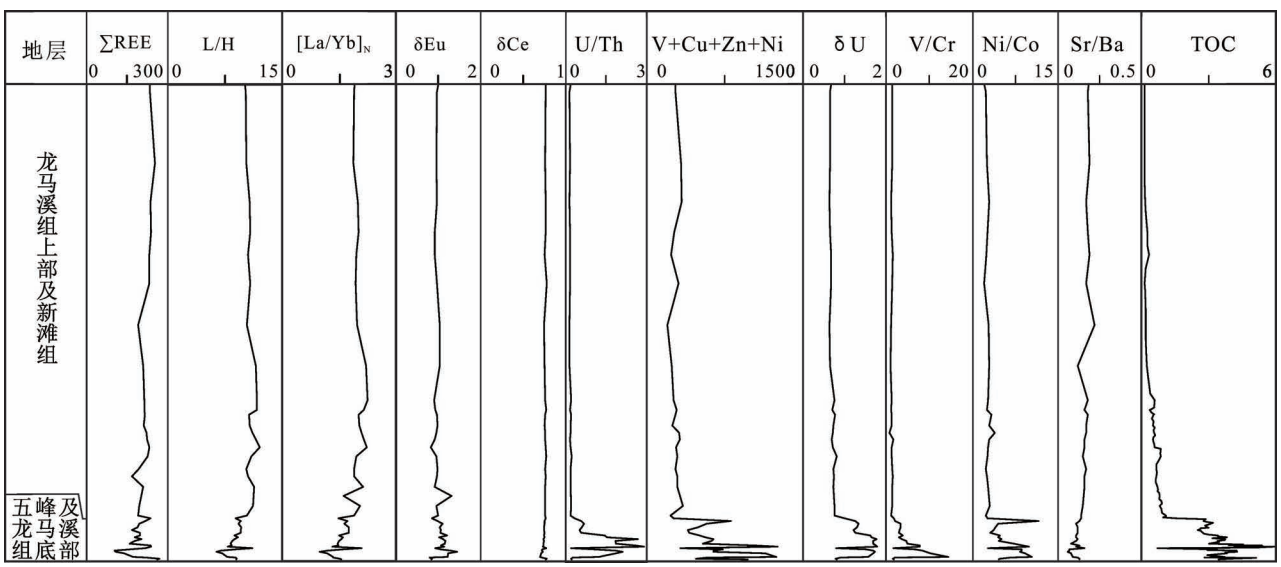


图 5 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交页岩环境参数垂向演化图

Fig. 5 The vertical evolution of environmental parameters of the Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

布形式仍保持平衡,且衡量金属分布与有机质成熟度无关(Mongenot et al. ,1996;Alberdi et al. ,1999)。利用微量元素、稀土元素在不同环境中的行为差异及其成岩演化中的相对稳定性可以很好地反演原始的沉积环境信息,对古地理和古环境重建具有重要意义。

通常 U/Th>1.25 代表缺氧环境,0.75<U/Th<1.25 代表贫氧环境,U/Th<0.75 代表氧化环境(Pattan et al. ,2005);V/Cr 值可指示古水体氧化还原性,V/Cr 值<2 指示富氧环境,2<V/Cr<4.24 指示贫氧环境,比值越大代表水体还原性越强(胡俊杰等,2017)。Ni/Co 值>7 代表厌氧环境。道页 1 井奥陶纪—志留纪之交五峰组及龙马溪组底部 U/Th 值为 0.2~2.90、V/Cr 值为 1.18~14.34、Ni/Co 值为 2.31~11.59(表 4),指示为氧化环境与还原环境间歇性交替的特征。而龙马溪上部及新滩组 U/Th 值为 0.16~0.23,V/Cr 值为 0.88~1.79、Ni/Co 值为 1.77~3.91,指示古水体整体为富氧环境。

沉积环境对高有机质丰度烃源岩的发育具有非常重要的作用,提供了生烃母质生命活动、繁衍、繁盛的环境和埋藏条件,决定了高有机质丰度烃源岩能否形成及其质量优越与否(张春明等,2012),岩

表 4 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交黑色页岩微量元素比值

Table 4 The trace element ratio of the Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

层位	样品	U/Th	δU	V/Cr	Ni/Co	Cu+Pb+Zn+Ni (μg/g)	Sr/Ba
龙马溪组上部及新滩	S1	0.20	0.75	1.73	1.77	313.20	0.16
	S2	0.16	0.66	1.46	2.33	280.10	0.18
	S3	0.17	0.66	1.47	2.53	330.00	0.19
	S4	0.16	0.64	1.17	2.96	335.40	0.17
	S5	0.17	0.66	1.40	2.64	267.30	0.18
	S6	0.17	0.68	1.63	2.41	234.30	0.19
	S7	0.17	0.68	1.43	2.05	305.30	0.17
	S8	0.16	0.64	1.23	2.78	202.30	0.22
	S9	0.16	0.65	1.06	2.92	242.20	0.12
	S10	0.21	0.77	1.40	2.76	259.70	0.18
	S11	0.18	0.71	1.20	2.54	288.30	0.16
	S12	0.21	0.78	1.34	3.28	275.40	0.18
	S13	0.19	0.74	1.37	2.89	246.00	0.17
	S14	0.19	0.72	0.88	3.91	314.70	0.17
	S15	0.18	0.70	1.79	2.91	320.60	0.16
	S16	0.19	0.72	1.35	2.74	285.50	0.16
	S17	0.23	0.82	1.38	2.58	294.20	0.15
	S18	0.20	0.74	1.51	2.30	278.30	0.17
	S19	0.20	0.75	1.63	2.49	298.20	0.16
	S20	0.20	0.74	1.51	2.76	297.40	0.16
	S21	0.21	0.77	1.50	2.97	348.00	0.15
五峰组及龙马溪组底部	S22	0.20	0.76	1.18	2.31	233.00	0.14
	S23	0.34	1.01	1.93	2.65	260.50	0.14
	S24	0.58	1.27	2.10	11.59	811.00	0.13
	S25	0.70	1.35	3.45	4.48	578.80	0.11
	S26	0.62	1.30	3.44	4.01	490.10	0.12
	S27	0.52	1.22	3.14	3.71	395.80	0.12
	S28	0.58	1.27	2.98	3.06	407.10	0.12
	S29	1.46	1.63	3.92	4.81	512.80	0.11
	S30	1.55	1.65	3.09	4.49	563.80	0.11
	S31	2.67	1.78	3.72	5.11	642.50	0.12
	S32	1.85	1.69	4.71	4.60	624.30	0.11
	S33	1.87	1.70	4.96	7.30	540.50	0.08
	S34	2.60	1.77	7.79	8.82	1041.60	0.13
	S35	2.90	1.79	7.85	9.90	1258.20	0.11
	S36	0.22	0.80	1.77	2.70	324.60	0.16
	S37	1.09	1.53	6.76	8.65	731.40	0.07
	S38	1.86	1.70	8.39	8.66	640.30	0.07
	S39	2.12	1.73	9.28	8.32	644.00	0.06
	S40	1.87	1.70	10.28	9.27	1140.00	0.08
	S41	1.23	1.57	14.34	10.39	1243.40	0.09
	S42	0.28	0.91	2.13	6.69	580.60	0.12
	S43	0.22	0.79	1.61	4.75	474.70	0.13
	S44	0.23	0.82	1.93	4.59	969.60	0.13

石有机质具有强烈的不均一性,实际上都与沉积环境密切相关(苗建宇等,2007)。道页 1 井五峰组及龙马溪组底部有机质丰度值范围宽,整体 *TOC* 值高,*TOC* 为 0.68%~5.91%,平均 3.76%;龙马溪组上部—新滩组页岩 *TOC* 为 0.1%~0.84%,平均 0.41%。部分微量元素与稀土元素环境参数与有机质含量密切相关(图 5),相关系数见表 5。页岩样品 *TOC* 与环境参数比值较高的相关性,表明沉积岩的元素地球化学特征与沉积有机质特征均受控于其沉积环境,同时也表明五峰组及龙马溪组底部古水体为间歇性缺氧的还原环境,龙马溪组上部—新滩组为富氧环境。

4.2　沉积转换与火山活动

对于稀土元素而言,在正常海水、大洋沉积物及沉积岩中 Eu 多为+3 价,且随海水加深 δEu 负异常加大。但如有热水流体活动时,δEu 则出现明显的正异常(Michard,1989;于炳松等,2004;常华进等,2009)。另据周永章等(2000)研究,热水沉积硅质岩的稀土元素北美页岩标准化后,其配分曲线呈现平缓的左倾型(即 LREE/HREE<1),而非热水成因硅质岩的稀土元素组成与页岩相似,配分曲线呈现平缓的右倾型。

道页 1 井五峰组及龙马溪组底部页岩样品北美页岩标准化 δEu 既显弱正异常,又显示弱负异常(图 4,表 3),配分曲线为平坦型;而龙马溪组上部—新滩组泥岩 δEu 具有明显的负异常,少有弱正异常,配分曲线为微弱右倾型。

道页 1 井奥陶纪—志留纪之交黑色页岩中的 V、Cu、Zn、Ni 等元素含量较上地壳平均丰度(Wedepohl,1995)明显富集(表 6),其中五峰组及龙马溪组底部是龙马溪组上部及新滩组的两倍多。道页 1 井样品 *TOC* 值 V、Cu、Zn、Ni 之间呈明显的正相关关系(图 6),相关系数达 0.712。结合页岩与斑脱岩的互层关系,指示五峰组及龙马溪组底部页岩沉积有火山喷发的凝灰质物质参与,即火山灰经沉积、蚀变、溶解,其溶解物质参与沉积页岩之中,而龙马溪组上部及新滩组无此特征,这说明火山喷发活动明显影响着有机质的富集程度。

4.3　沉积—构造演化

目前关于扬子地区奥陶纪—志留纪过渡期为缺氧环境沉积的认识已得到广泛认同(万方等,2003;严德天等,2009;张海全等,2013;梁兴等,2019)。那么奥陶纪—志留纪过渡期广泛的缺氧事件形成的构造机制如何?经上述地球化学研究,扬子地区奥陶纪—志留纪之交附近沉积地层非远洋沉积,而是与火山活动有关的大陆边缘沉积序列,广泛发育硅质碳质页岩和多层斑脱岩,应是地壳汇聚过程中,因火山活动伴随的去气作用导致海底缺氧的结果。即火

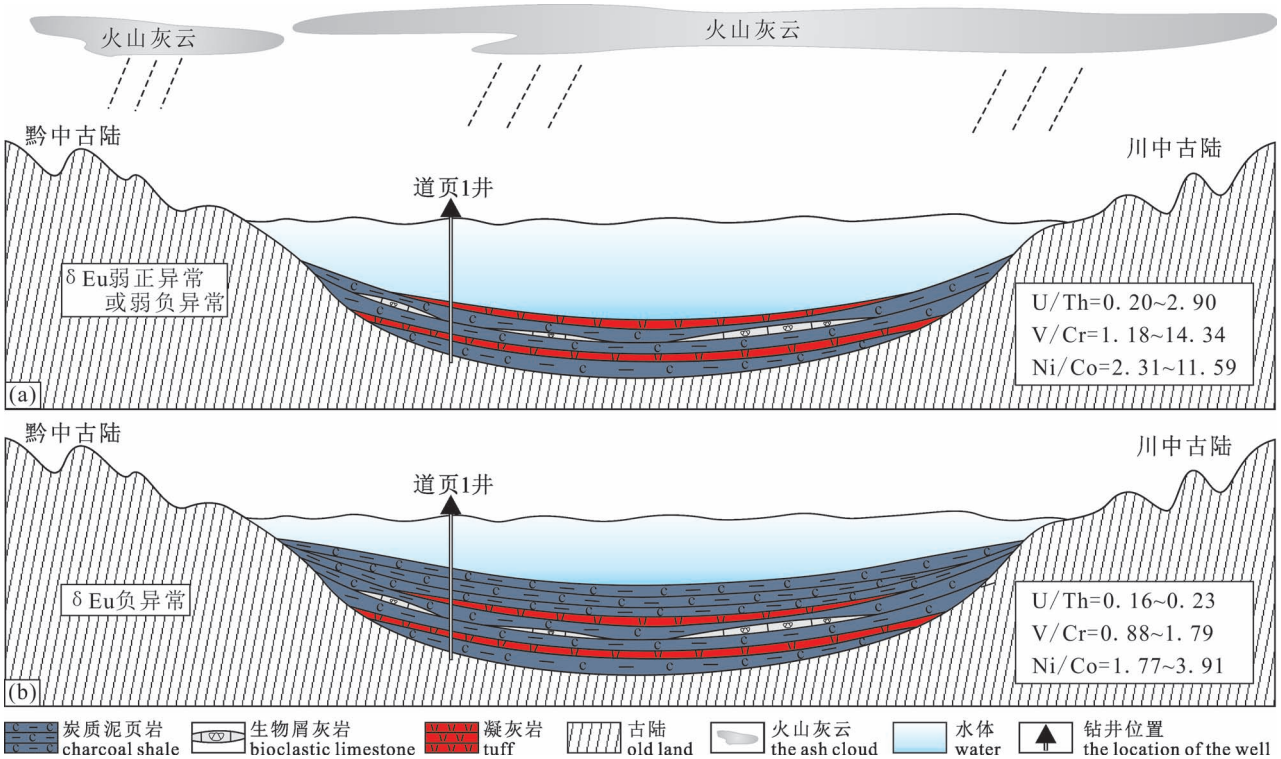


图 6 黔北地区五峰组—龙马溪组底部沉积示意图(a)与龙马溪组上部及新滩组沉积示意图(b;井位仅作为距离古陆远近参考)

Fig. 6 Sedimentation pattern of the upper part of the Longmaxi Formation and the Xintan Formation in northern Guizhou (a) and sedimentation pattern of the Wufeng Formation and the bottom of the the Longmaxi Formation in northern Guizhou (b, The well location is only a reference for distance from ancient land)

山活动给大陆边缘海带来营养元素,刺激初级生产的增加,造成水体迅速缺氧。

岩相古地理研究显示,在奥陶纪—志留纪之交的上扬子陆块沉积相分异明显:广西运动形成前缘增生楔并不断向扬子陆块推进,在卡拉道克晚期到达江南扬子陆块南缘,由于它的推动和华夏古陆的扩增,在上扬子陆块的南缘造成了黔中隆起,奥陶纪末赫南特亚阶的全球海平面下降使得黔中隆起的表现更为明显。受黔中隆起的控制,毕节—遵义—湄潭—铜仁一线以南露出水面并遭受剥蚀(陈旭等,1997,1999,2001)。此线以北海水由北东方向进入,伴随火山活动和边缘海初级生产力激增和有机质埋藏增加,有机质降解消耗水体中大量溶解的氧所,形成厌氧环境沉积了硅质碳质页岩。

综上,奥陶纪—志留纪之交,弧盆相互作用引发大规模岛弧岩浆作用,并导致盆地构造转换和地壳隆升加剧,火山活动很可能是造成海底缺氧的主要诱导因素,五峰组—龙马溪组优质烃源岩是形成于汇聚背景下,属前陆盆地早期沉积的产物(图 6)。

5 结论

(1)道页 1 井奥陶纪—志留纪界线附近沉积序列为开阔台地相区厚层生物灰岩、滞留陆棚相含硅质碳质页岩—碳质页岩、潮坪相区钙质泥岩—泥灰岩组合,上奥陶统灰岩与上奥陶统—下志留统火山沉积+黑色岩系截然的接触,显示出明显的事件沉

表 5 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交页岩有机质丰度与环境参数相关系数

Table 5 The correlation coefficient between *TOC* and environmental parameters of the Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

相关系数	V+Cu+Zn+Ni	U/Th	δU	V/Cr	Ni/Co	Sr/Ba	∑REE	L/H	$[La/Yb]_N$	δEu	δCe
TOC	0.712	0.705	0.799	0.542	0.642	−0.542	−0.125	−0.724	−0.709	0.329	−0.43

积特征。

(2)道页 1 井五峰组及龙马溪组底部有机质丰度高,*TOC* 为 0.68%~5.91%,平均 3.76%;龙马溪组上部—新滩组页岩 *TOC* 为 0.1%~0.84%,平均 0.41%。*TOC* 与 U/Th、δU、V/Cr、Ni/Co 等环境参数比值有较高相关性,表明五峰组及龙马溪组底部古水体为间歇性缺氧的还原环境,龙马溪组上部—新滩组为富氧环境。

表 6 黔北地区道页 1 井奥陶纪—志留纪之交页岩元素富集系数

Table 6 The elements enrichment coefficient of the Ordovician-Silurian shale in the Well Daoye-1 in northern Guizhou

层位	五峰组及龙马溪组底部			龙马溪组上部及新滩组		
元素	元素富集系数			元素富集系数		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
V	8,52	60.43	24.24	8.3	13.53	10.95
Cu	2.03	12.21	5.36	1.28	2.76	2.11
Zn	40.5	370.71	142.09	37.36	96.43	60.07
Ni	0.66	6.88	1.96	0.68	1.32	0.88

(3)微量元素及其比值,以及稀土元素北美页岩标准化五峰组及龙马溪组底部表现出平坦型,轻重稀土分馏程度低,δCe 具有明显的负异常,δEu 显示以弱正异常为主;龙马溪组上部及新滩组表现出低斜率右倾型,轻重稀土分馏程度低,比前者略高,δCe 具有明显的负异常,δEu 具有明显以弱负异常为主,结合页岩与斑脱岩的互层关系,表明五峰组及龙马溪组底部页岩沉积有火山喷发的凝灰质物质参与,即火山灰经沉积、蚀变、溶解,其溶解物质参与沉积页岩之中,而龙马溪组上部及新滩组无此特征,这说明火山喷发活动明显提升了有机质的富集程度。

(4)奥陶纪—志留纪之交,弧盆相互作用引发大规模岛弧岩浆作用,并导致盆地构造转换和地壳隆升加剧,形成间歇性海侵。火山活动引起的初级生产迅速提升和大量有机体下沉、降解和再矿化很可能是造成海底缺氧的主要诱导因素,五峰组—龙马溪组优质烃源岩是形成于汇聚背景下,属前陆盆地形成早期的产物。

致谢:审稿专家为论文的完善和提高提出了建设性宝贵建议,样品采集过程中得到中国地质调查局成都地质调查中心熊国庆工程师的大力帮助,样品测试过程中得到了国土资源部西南矿产资源监督检测中心大力支持,在此一并致以衷心感谢!

注　释　/　Note

❶ 贵州省地质调查院. 2017. 中国区域地质志:贵州志.

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

拜文华, 王强, 孙莎莎, 梁峰, 张琴, 昌燕. 2019. 五峰组—龙马溪组页岩地化特征及沉积环境——以四川盆地西南缘为例. 中国矿业大学学报, 48(6): 1276~1289.

常华进, 储雪蕾, 冯连君, 黄晶, 张启锐. 2009. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义. 地质论评, 55(1): 91~99.

陈旭, 米切尔. 1997. 塔康运动与广西运动的地层学证据. 地层学杂志, 20(4): 305~314.

陈旭, 戎嘉余, 周志毅, 张元动, 詹仁斌, 刘建波, 樊隽轩. 2001. 上扬子区奥陶—志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升. 科学通报, 46(12): 1052~1056.

陈旭, 戎嘉余. 1999. 从古生物学到大地构造学—以华南奥陶系和志留系为例. 现代地质, 13(4): 385~389.

龚清. 2018. 中国华南地区奥陶纪—志留纪之交汞异常沉积对火山作用和灭绝事件关系的指示. 导师:赵来时. 武汉:中国地质大学博士学位论文:1~128.

何利, 宋春彦, 刘建清. 2018. 川南马边地区五峰—龙马溪组页岩地球化学特征及有机质富集机理. 东北石油大学学报, 42(4): 52~65.

何龙, 王云鹏, 陈多福, 王钦贤, 王成. 2019. 重庆南川地区五峰组—龙马溪组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系. 天然气地球科学, 30(2): 203~218.

胡俊杰, 马寅生, 王宗秀, 柳永清, 高万里, 钱涛. 2017. 地球化学记录揭示的柴达木盆地北缘地区中—晚侏罗世古环境与古气候. 古地理学报, 19(3): 480~490.

胡艳华, 刘健, 周明忠, 汪方跃, 丁兴, 凌明星, 孙卫东. 2009. 奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩研究评述. 地球化学, 38(4): 393~404.

康建威, 闫剑飞, 余谦, 田景春, 门玉澎, 孙媛媛. 2018. 黔北绥阳地区五峰—龙马溪组富有机质泥岩特征及意义. 石油实验地质, 40(2):185~199.

梁兴, 陈科洛, 张廷山, 张朝, 张介辉, 舒红林. 2019. 沉积环境对页岩孔隙的控制作用——以滇黔北地区五峰组—龙马溪组下段为例. 天然气地球科学, 30(10): 1393~1405.

林婉, 肖传桃, 石文睿, 梁文君, 李昂, 任元. 2015. 焦石坝页岩气田龙马溪组—五峰组沉积相特征. 四川地质学报, 35(4): 517~521.

林治家, 陈多福, 刘芊. 2008. 海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标. 矿物岩石地球化学通报, 27(1): 72~80.

刘树根, 王世玉, 孙玮, 冉波, 杨迪, 罗超, 叶玥豪, 白志强, 邱嘉文, 张旋. 2013. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩特征. 成都理工大学学报:自然科学版, 40(6): 621~639.

梅冥相, 马永生, 邓军, 张海, 孟晓庆, 陈永红, 聂瑞贞, 张从. 2005. 上扬子区下古生界层序地层格架的初步研究. 现代地质, 19(4): 551~562

苗建宇, 赵建设, 刘池洋, 朱亚军, 王武龙. 2007. 鄂尔多斯盆地二叠系烃源岩地球化学特征与沉积环境的关系. 中国地质, (3): 430~435.

牟传龙, 恳恳, 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. 地质学报, 85(4): 526~532.
沈玉林, 姜波, 谢国梁, 张贵双, 常明华, 魏展航. 2016. 河北平原区泥岩的稀土元素地球化学特征. 煤炭学报, 41(11): 2813~2821.
史树勇, 孙宇, 郭慧娟, 邓 瑞, 陈承声, 王云鹏. 2019. 黔北习水地区五峰—龙马溪组页岩地球化学与热演化特征及页岩气前景展望. 地球化学, 48(6): 567~579.
苏文博, 何龙清, 王永标, 龚淑云, 周湖云. 2002. 华南奥陶—志留系五峰组及龙马溪组底部斑脱岩与高分辨综合地层. 中国科学, 32(3): 207~218.
苏文博. 1999. 华南奥陶—志留系五峰组及龙马溪组底部斑脱岩与高分辨综合地层. 中国科学, 14(1): 1~12.
万方, 许效松. 2003. 川滇黔桂地区志留纪构造—岩相古地理. 古地理学报, 5(2): 180~186.
王超, 张柏桥, 舒志国, 陆永潮, 陆亚秋, 包汉勇, 李争, 刘超. 2018. 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征. 石油与天然气地质, 39(3): 485~497.
王朋飞, 姜振学, 吕鹏, 金璨, 李鑫, 黄璞. 2018. 重庆周缘下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组页岩有机质孔隙发育及演化特征. 天然气地球科学, 29(7): 997~1008.
王鹏万, 张磊, 李昌, 李娴静, 邹辰, 张朝, 李君军, 李庆飞. 2017. 黑色页岩氧化还原条件与有机质富集机制——以昭通页岩气示范区五峰组—龙马溪组下段为例. 石油与天然气地质, 38(5): 933~943.
王淑芳, 董大忠, 王玉满, 黄金亮, 蒲泊伶. 2014. 四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标. 海相油气地质, 19(3): 27~33.
夏鹏, 付勇, 杨镇, 郭川, 黄金强, 黄明勇. 2020. 黔北镇远牛蹄塘组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系. 地质学报, 94(3): 947~956.
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. 中国科学, 39(3): 285~299.
于炳松, 陈建强, 李兴武, 林畅松. 2004. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面下寒武统底部硅质岩微量元素和稀土元素地球化学及其沉积背景. 沉积学报, 22(1): 59~66.
张春明, 张维生, 郭英海. 2012. 川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响. 地学前缘, 19(1): 136~145.
张娣, 余谦, 陆俊泽, 王正和, 赵安坤, 刘伟, 何江林, 雷子慧. 2020. 云南永善—大关地区五峰组—龙马溪组黑色页岩生物地层划分与沉积环境探讨: 以新地 2 井为例. 地球科学, 45(3): 739~751.
张海全, 许效松, 刘伟, 门玉澎. 2013. 中上扬子地区晚奥陶世—早志留世岩相古地理演化与黑色页岩的关系. 沉积与特提斯地质, 33 (2): 17~24.
张鹏, 张金川, 黄宇琪, 吕艳南, 尉菲菲, 邓恩德. 2015. 黔西北上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气聚集条件分析. 地质论评, 61(1): 156~162.
张鹏, 张金川, 刘鸿, 黄宇琪, 吕艳南. 2016. 贵州下志留统龙马溪组页岩气成藏条件分析. 中南大学学报(自然科学版), 47(9): 3086~3092.
张茜, 王剑, 余谦, 肖渊甫, 张彬, 王晓飞, 赵安坤. 2018. 扬子地台西缘盐源盆地下志留统龙马溪组黑色页岩硅质成因及沉积环境. 地质论评, 64(3): 610~622.
张廷山, 杨洋, 龚其森, 梁兴, 魏祥峰. 2014. 四川盆地南部早古生代海相页岩微观孔隙特征及发育控制因素. 地质学报, 88(9): 1728~1740.
周永章, 刘建明, 陈多福. 2000. 华南古海洋热水沉积作用研究概述及若干认识. 矿物岩石地球化学通报, 19(2): 114~118.
Alberdi G M, Tocco R. 1999. Trace metals and organic geochemistry of the Machiques Member (Aptian-Albian) and La Luna Formation (Cenomanian-Campanian), Venezuela. Chemical Geology, 160: 19~38.
Bai Wenhua, Wang Qiang, Sun Shasha, Liang Feng, Zhang Qin, Chang Yan. 2019&. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Wufeng—Longmaxi shales: a case study from southwestern margin of the Sichuan basin. Journal of China University of Mining & Technlogy, 48(6): 1276~1289.
Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, Huang Jing, Zhang Qirui. 2009&. Redox sensitive trace Elements as paleoenvironments proxies. Geological Review, 55(1): 91~99.
Chen Xu, Mitchell. 1997&. Stratigraphic evidence of the Takang movement and the Guangxi movement. Journal of Stratigraphy, 20 (4): 305~314.
Chen Xu, Rong Jiayu, Zhou Zhiyi, Zhang Yuandong, Zhan Renbin, Liu Jianbo, Fan junxuan. 2001&. Central Guizhou Uplift and Yichang rise at the intersection of Ordovician and Silurian in the upper Yangtze Region. Scientific Bulletin, 46(12): 1052~1056.
Chen Xu, Rong Jiayu. 1999&. From biostratigraphy to tectonics—with ordovician, and Silurian of South China as an example. Geoscience, 13(4): 385~389.
Gong Qing. 2018 #. Mercury spikes suggest volcanic driver of the Ordovician-Silurian mass extinction in South China. Supervisor: Zhao Laishi. Wuhan: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for the Doctor Degree of Philosophy: 1~128.
Haskin L A, Wildeman T R, Frey F A, Collins K A, Keedy C R, Haskin M A. 1966. Rare earths in sediments. Journal of Geophysical Research, 71(24): 6091~6105.
He Li, Song Chunyan, Liu Jianqing. 2018&. Shale geochemical characteristics and enrichment mechanism of organic matter of Wufeng-Longmaxi formation in the Mabian area of southeast Sichuan basin. Journal of Northeast Petroleum University, 42(4): 52~65.
He Long, Wang Yunpeng, Chen Duofu, Wang Qinxian, Wang Cheng. 2019&. Relationship between sedimentary environment and organic matter accumulation in the black shale of Wufeng—Longmaxi Formations in Nanchuan area, Chongqing. Natural Gas Geoscience, 30(2): 203~218.
Hu Junjie, Ma Yinsheng, Wang Zongxiu, Liu Yongqing, Gao Wanli, Qian Tao. 2017&. Palaeoenvironment and Palaeoclimate of the Middle to Late Jurassic revealed by geochemical records in northern margin of Qaidam basin. Journal of Palaeogeography, 19(3): 480~490.
Hu Yanhua, Liu Jian, Zhou Mingzhong, Wang Fangyue, Ding Xing, Ling Mingxing, Sun Weidong. 2009&. An overview of Ordovician and Silurian K-bentonites. Geochimica, 38(4): 393~404.
Kang Jianwei, Yan Jianfei, Yu Qian, Tian Jingchun, Men Yupeng, Sun Yuanyuan. 2018. Characteristics of organic-rich shale in Wufeng—Longmaxi formations in Suiyang area of northern Guizhou and its implication to shale gas. Petroleum Geology & Experiment, 40(2): 185~199.
Kimura H, Watanabe Y. 2001. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary. Geology, 29(11): 995~998.
Liang Xing, Chen Keluo, Zhang Tingshan, Zhang Zhao, Zhang Jiehui, Shu Honglin. 2019&. The controlling factors of depositional environment to pores of the shales: Case study of Wufeng Formation -Lower Longmaxi Formation in Dianqianbei area. Natural Gas Geoscience, 30(10): 1393~1405.
Lin Wan, Xiao Chuantao, Shi Wenrui, Liang Wenjun, Li Ang, Ren Yuan. 2015&. Sedimentary fancies of the Longmaxi Formation-

Wufeng Formations in the Jiaoshiba shale gas field. Sichuan Geological Journal, 35(4): 517~521.

Lin Zhijia, Chen Duofu, Liu Qian. 2008&. Geochemical indices for redox conditions of marine sediments. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 27(1): 72~80.

Liu Shugen, Wang Shiyu, Sun Wei, Ran Bo, Yang Di, Luo Chao, Ye Yuehao, Bai Zhiqiang, Qiu Jiawen, Zhang Xuan. 2013&. Characteristics of black shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas. Journal of Chengdu university of Thchnology (Science & Tecgnology Edition), 40(6): 621~639.

Lyons T W, Severmann S. 2006. A critical look at iron paleoredox proxies; New insights from modem euxinic marine basins. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70(23): 5698~5722.

Maslov A V, Podkovyrov V N. 2018. Ocean redox state at 2500~500 Ma: Modern concepts. Lithology and Mineral Resources, 53(3): 190~211.

Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Deng Jun, Zhang Hai, Meng Xiaoqing, Chen Yonghong, Nie Ruizhen, Zhang Cong. 2001&. Sequence stratigraphic framework for the Early Palaeozoic of the Upper Yangtze Region. Geoscience, 19(4): 551~562.

Meyer E E, Quicksall A N, Landis J D, Link P k, Bostick B C. 2012. Trace and rare earth elemental investigation of a Sturtian cap carbonate, Pocatello, Idaho: evidence for ocean redox conditions before and during carbonate deposition. Precambrian Research, 192~195: 89~106.

Miao Jianyu, Zhao Jianshe, Liu Chiyang, Zhu Yajun, Wang Wulong. 2007&. Relationship between the geochemical characteristics and sedimentary environment of Permian hydrocarbon source rocks in Ordos basin. Geology in China, (3): 430~435.

Michard A. 1989. Rare earth elements systematic in hydrothermal fluids. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53: 745~750.

Mongenot T, Tribovillard N, Desprairies A, Elisabeth L V, Fatima L D. 1996. Trace elements as palaeo-environmental markers in strongly mature hydrocarbon source rocks: the Ctetaceous La luna Formation of Venezuela. Sedimentary Geology, 103: 23~27.

Mu Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, Ge Xiangyin. 2011&. Early paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the middle-upper Yangtze region and petroleum and gas exploration. Acta Geologica Sinica, 85(4): 526~532.

Pattan J N, Pearce N J G, Mislankar P G. 2005, Constraints in using Cerium anomaly of bulk sediments as an indicator of paleo bottom water redox envieon ment: a case study from the central Indian Ocean basin. Chemical Geology, 221: 260~278.

Shen Yulin, Jiang Bo, Xie Guoliang, Zhang Guishuang, Chang Minghua, Wei Zhanhang. 2016&. REE geochemical characteristics of mudstone in Hebei Plain. Journal of Coal, 41(11): 2813~2821.

Shi Shuyong, Sun Yu, Guo Huijuan, Deng Rui, Chen Chengsheng, Wang Yunpeng. 2019&. Geochemistry and thermal evolution of Wufeng-Longmaxi shale and its prospect in the Xishui Area, North Guizhou. Geochimica, 48(6): 567~579.

Su Wenbo, He Longqing, Wang yongbiao, Gong Shuyun, Zhou Huyun. 2002&. Porphyry and high resolution comprehensive strata at the bottom of Wufeng Formation and Longmaxi formation of Ordovician Silurian in South China. Chinese Science, 32(3): 207~218.

Su Wenbo. 1999&. On the ordovician-silurian boundary at the viewpoint of sequence stratigraphy. Geology and Mineral Resources of South China, 14(1): 1~12.

Wan Fang, Xu Xiaosong. 2000&. Tectonic-Lithofacies palaeogeography of the Silurian in Sichuan - Yunnan - Guizhou - Guangxi region. Journal of Palaeogeography, 5(2): 180~186.

Wang Chao, Zhang Baiqiao, Shu Zhiguo, Lu Yongchao, Lu Yaqiu, Bao Hanyong, Li Zheng, Liu Chao. 2018&. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 39(3): 485~497.

Wang Pengfei, Jiang Zhenxue, Lü Peng, Jin Can, Li Xin, Huang Pu. 2018#. Organic matter pores and evolution characteristics of shales in the Lower Silurian Longmaxi Formation and the Lower Cambrian Niutitang Formation in periphery of Chongqing. Natural Gas Geoscience, 29(7): 997~1008.

Wang Pengwan, Zhang Lei, Li Chang. 2017&. Redox conditions and organic enrichment mechanisms of black shale: A case from the Wufeng-lower Longmaxi Formations in well A in Zhaotong shale gas demonstration area. Oil & Gas Geology, 38(5): 933~943.

Wang Shufang, Dong Dazhong, Wang Yuman, Huang Jinliang, Pu Boling. 2014&. Geochemitry evaluatuion index of redox-sensitive elements for depositional envi-ronments of silurian Longmaxi organic-rich shale in the south of Sichuan basin. Marione Oil and Gas Geology, 19(3): 27~33.

Wedepoh K H. 1995. The composition of the continental crust. Geochim. Cosmochim. Acta, 59: 1217~1232.

Xia Peng, Fu Yong, Yang Zhen, Guo Chuan, Huang Jinqiang, Huang Mingyong. 2020&. The relationship between sedimentary environment and organic matter accumulation in the Niutitang black shale in Zhenyuan, northern Guizhou. Acta Geologica Sinica, 94(3): 947~956.

Yan Detian, Chen Daizhao, Wang Zao, Wang Jianguo. 2009&. Geochemical study near the Ordovician Silurian boundary in the Yangtze Region. Chinese Science, 39(3): 285~299.

Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Li Xingwu, Lin Changsong. 2004&. Rare earth and trace element patterns in bedded-cherts from the bottom of the lower Cambrian in the northern tarim basin, Northwest China; Imllication for depositional environments. Acta Sedimentologica Sinica, 22(1): 59~66.

Zhang Chunming, Zhang Weisheng, Guo Yinghai. 2012&. Sedimentary environment of Longmaxi formation and its influence on source rocks in Southeast Sichuan North Guizhou area. Geoscience Front, 19(1): 136~145.

Zhang Di, Yu Qian, Lu Junze, Wang Zhenghe, Zhao Ankun, Liu Wei, He Jianglin, Lei Zihui. 2020&. Graptolite biozonation of the Wufeng and Longmaxi Formations and its environmental implications from the Xindi 2 borehole in Yongshan-Daguan area, NE Yunnan. Earth Science, 45(3): 739~751.

Zhang Haiquan, Xu Xiaosong, Liu Wei, Men Yupeng. 2009&. The relationship between the lithofacies paleogeographic evolution of the late Ordovician Early Silurian and the black shale in the middle and upper Yangtze Region. Sedimentation and Tethys Geology, 33(2): 17~24.

Zhang Peng, Zhang Jinchuan, Huang Yuqi, Lü Yannan, Wei Feifei, Deng Ende. 2015&. Shale gas Accumlation conditions of the upper Ordovician Wufeng formation-Lower Silurian Longmaxi formation in northwestern Guizhou. Geological Review, 61(1): 156~162.

Zhang Peng, Zhang Jinchuan, Liu Hong, Huang Yuqi, Lv Yannan. 2016&. Accumulation conditions of shale gas from Lower Silurian Longmaxi Formation in Guizhou. Journal of Central South University (Science and Technology), 47(9): 3086~3092.

Zhang Qian, Wang Jian, Yu Qian, Xiao Yuanfu, Zhang Bin, Wang Xiaofei, Zhao Ankun. 2018&. The silicon source and sedimentary

environment of the lower silurian Longmaxi formation in Yanyuan basin, western edge. Geological Review, 64(3): 610~622.

Zhang Tingshan, Yang Yang, Gong Qisen, Liang Xing, Wei Xiangfeng. 2011&. Characteristics and mechanisms of the micro-pores in the Early Palaeozoic marine shale, Southern Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica, 88(9): 1728~1740.

Zhou Yongzhang, Liu Jianming, Chen Duofu. 2000&. Thread and knowledge to fossil sea-floor hydrothermal sedimentation of south China. Bulletin of Meralogy, Petrology and Geochemistry, 19(2): 114~118.

The geochemical characteristics and significance of the Ordovician-Silurian black shale in northern Guizhou: A case study of well Daoye-1

AN Yayun[1], YANG Zhongqin[1], XIANG Kunpeng[1], HUANG Yi[2], CHEN Houguo[1], HE Yongzhong[1], LIU Wei[3], YU Qian[3]

1) *Guizhou Geological Survey*, *Guiyang*, 550081;

2) *Reserve Bureau of Land and Mineral Resources of Guizhou Province*, *Guiyang*, 550008;

3) *Chengdu Center of China Geological Survey*, *Chengdu*, 610081

Abstract: The South China plate, convert from passive continentaation-Longmaxi Formation black shale. In order to exploring the formation background of the black shal margin basin to foreland basin in Ordovician-Silurian, and deposits widely distributed Wufeng Formle, sedimentary sequence and geochemical study were carried for well Daoye-1 as an example in this study. Results show that the Wufeng Formation and the bottom of the Longmaxi Formation mainly consist of siliceous carbonaceous shale and bentonite, with the U/Th is 0.2~2.90, the V/Cr is 1.18~14.34, the Ni/Co is 2.31~11.59, and the *TOC* is 0.68%~5.91%. The REE patterns curve is flat. The δEu showed weak positive anomalies and individual weak negative anomalies. The upper part of Longmaxi Formation and Xintan Formation mainly consist of mudstone and calcareous mudstone, with the U/Th is 0.16~0.23, the V/Cr is 0.88~1.79, the Ni/Co is 1.77~3.91, the *TOC* is 0.1%~0.84%. The δEu showed obviously negative anomaly, and the REE patterns curve is right type. Such features indicate that the Wufeng Formation and the bottom of the Longmaxi Formation formed in the reductive environment with intermittent hypoxia, the upper part of Longmaxi Formation and Xintan Formation mainly formed in the oxygen-enriched environment. According to the comprehensive analysis based on the distribution characteristics of bentonite, which indicated that the Wufeng Formation and the bottom of the Longmaxi Formation shale formed at the early period of the foreland basin in convergence background, strong volcanism brings nutrients to the Mainland marginal sea, stimulates the increase of primary production, and causes rapid hypoxia in deep water, which may be the main cause of hypoxia in the bottom of the ocean during the same period.

Keywords: northern Guizhou; the Well Daoye-1; Ordovician-Silurian; black shale; geochemical characteristics; sedimentary and tectonic evolution

Acknowledgements: This research is supported by Investigation and Evaluation of Shale Gas Resources in Guizhou Province(No. GZSYYQZYDC2012) and Analysis of Shale Resources Potential and Favorable Block in Wuzhengdao Area of Guizhou Province(No. QKHJC[2016]1409) and Study on Palaeogeography and Favorable Reservoir Zone of Shiniulan Formation in Northern Guizhou(No. QDKKH[2019]24) and Academician Workstation of Guizhou Geological Survey Institute(No. QKHPTRC [2018]5626). Thank the anonymous reviewers for their constructive comments on this research.

First author: AN Yayun, male, born in 1982, senior engineer, mainly engaged in regional geology and mineral geology survey and research work. Email: 123245693@qq.com

Corresponding author: YANG Zhongqin, female, born in 1982, geologist, senior engineer, mainly engaged in petrology and mineral geology investigation and research work. Email: 84878019@qq.com

Manuscript received on: 2020-05-28; Accepted on: 2021-02-22; Network published on: 2021-03-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.051 **Edited by**: LIU Zhiqiang