

中上扬子地区上奥陶统一志留统烃源岩发育的古环境恢复

李双建, 肖开华, 沃玉进, 周雁, 龙胜祥

(中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 上奥陶统一志留统烃源岩是中国南方海相 4 套主力区域烃源岩之一, 有关它形成与发育环境的研究是南方海相油气成藏理论的基础性问题。本文选择中上扬子南缘 2 条代表性剖面, 对上奥陶统一志留统沉积岩进行了详细的地球化学分析, 提取其中对沉积古环境有指示意义的地化指标, 对该段地层的古环境进行了恢复。研究表明, 优质烃源岩段主要集中在上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组底部, $V/(V+Ni)$ 、 Ni/Co 、 $C_{e_{anom}}$ 、 δEu 和 $\delta^{13}C_{org}$ 等地球化学指标与有机碳含量均有较好的相关性, 这些指标的异常均表明优质烃源岩发育于缺氧环境。而龙马溪组上部地层的有机碳含量较低, 各种地球化学指标也显示, 此时缺氧环境遭到了破坏, 这与当时的沉积环境多为高能环境、不利于烃源岩发育是一致的。

关键词: 中上扬子; 上奥陶统一志留统; 烃源岩; 古环境; 地球化学

中图分类号: P588.2; P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)05-0450-09

Palaeo-environment restoration of Upper Ordovician-Lower Silurian hydrocarbon source rock in Middle-Upper Yangtze area

LI Shuang-jian, XIAO Kai-hua, WO Yu-jin, ZHOU Yan and LONG Sheng-xiang

(Exploration & Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The hydrocarbon source rock in Upper Ordovician-Lower Silurian strata is one of the four kinds of regional marine source rocks in southern China, and the researches on the palaeo-environment for its formation and development constitute one of the basic problems concerning the marine hydrocarbon accumulation theories of southern China. Two typical sections were selected in this study, and a detailed geochemical analysis of Upper Ordovician-Lower Silurian sedimentary rocks was conducted along these sections. Environment indicators were chosen to restore the palaeo-environment. The results show that the high-quality source rocks are concentrated in Upper Ordovician Wufeng Formation and at the bottom of Lower Silurian Longmaxi Formation. Such indicators as $V/(V+Ni)$, Ni/Co , $C_{e_{anom}}$, δEu and $\delta^{13}C_{org}$ have good relations with TOC in these formations, suggesting that good quality hydrocarbon source rocks are developed in an anoxic environment. Geochemical indicators in the upper part of Longmaxi Formation show that the anoxic environment had been destroyed, which was accordant with the high-energy sedimentary environment at that time and was disadvantageous to the formation of hydrocarbon source rocks.

Key words: Middle-Upper Yangtze valley; Upper Ordovician- Lower Silurian; hydrocarbon source rock; palaeo-environment; geochemistry

收稿日期: 2009-02-19; 修订日期: 2009-03-30

基金项目: 石油化工联合基金资助项目(40739904); 国家大型油气田及煤层气开发科技重大专项资助项目(2008ZX05005-001-001)

作者简介: 李双建(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事沉积学与石油地质学研究, E-mail: lishuangjian@pepris.com。

沉积环境既控制有机质丰度,又影响有机质质量,是控制海相烃源岩发育和分布的最重要因素。沉积环境演化在时间上具有明显的等时性和同步性特征,体现出它们在地质演化中具有相互促进、相互制约的辩证关系。因此,环境演化没有单因素的控制机制,而是多因素综合影响的结果,生物繁盛、有机质和微量元素富集或贫化、碳同位素值偏移以及烃源岩发育是各项环境参数的综合效应,在空间上明显呈相互对应、共生组合特点,表现出相互作用、相互反馈的因果关系(张水昌等 2005)。

海相有效烃源岩作为一种特殊的富有机质层段,其发育明显受沉积环境控制,如古生产力及氧化还原条件等,而这些因素可体现在化学元素、同位素等无机参数组合上,这就为从古环境角度研究烃源岩的有效性开辟了一条新途径。当前已经建立了包括微量元素、稳定同位素和有机地球化学在内的多种古环境恢复指标(腾格尔等 2004)。

上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组烃源岩,分布几乎遍及上、中、下扬子区,有机质以腐泥型为主,成烃潜力大。有关它形成与发育的古环境恢复研究是优质烃源岩分布预测的基础,也是南方海相油气成藏理论的基础性问题。前人对南方志留系的研究集中在奥陶纪末期与志留纪早期古气候变化、海平面变化、古生物灭绝事件等问题上,而对该套地层的烃源岩发育环境研究较少(汪啸风等,1989;王成源等,1994;张廷山等,1998)。本文选取中上扬子地区2条完整的上奥陶统一下志留统剖面,进行了细致的沉积物全岩地球化学分析,从中选出特征的指标和参数,对该套地层沉积时的古环境做了分析和讨论。

1 地质背景

扬子地区奥陶系—志留系分布广泛,滇东、川、鄂、湘、黔一带露头非常发育。受加里东早期运动的影响,华南的东南区在寒武纪末期已有隆起趋势,黔中南及江南雪峰地区在加里东晚期亦已上升为陆,与华夏古陆连成一片,成为扬子地区通海的屏障;而川南、黔北、湘西以及中、下扬子长江沿线地区的下志留统龙马溪组大多与下伏上奥陶统平行不整合接触。晚奥陶世至早志留世,扬子地区的海域一度为半封闭滞留海,中志留世后,除黔南、滇东外的扬子地区逐渐抬升,志留纪末的广西运动结束了早古生

代的沉积史(周明魁等,1993;文玲等,2002)。

本次研究选取的剖面位于扬子地区南缘(图1),靠近雪峰古隆起和黔中古隆起。湖南石门磺厂剖面,奥陶系五峰组(O_3w)厚7.8 m,为一套黑色薄层炭质页岩间夹薄层炭硅质沉积,底部发育中厚层深灰色泥岩。志留系自下而上发育下统龙马溪组(S_{1l})、罗惹坪组(S_{1lr})和中统纱帽组(S_{2s})。龙马溪组厚650 m,主要为一套灰黑色、灰绿色质页岩和泥质砂岩沉积,向上砂质增多;罗惹坪组厚839 m,以灰绿色岩、粉砂质泥岩和含粉砂质页岩为主,少为泥质粉砂岩及粉砂岩。纱帽组厚298 m,主要为浅绿灰色、绿灰色粉砂岩少夹砂质泥岩、泥质粉砂岩薄层或条带。从沉积环境上看,上奥陶统五峰组为滞留盆地沉积,志留系龙马溪组主要是深水陆棚或者陆棚内盆地沉积,向上沉积水体变浅,罗惹坪组和纱帽组主要为浅水陆棚和滨岸相沉积为主。贵州习水喉滩剖面,奥陶系五峰组(O_3w)厚5.83 m,岩性为黑色炭质泥岩,底部0.3 m显中层状,含少量砂质及黄铁矿晶粒。志留系自下而上发育下统龙马溪组(S_{1l})、石牛栏组(S_{1sh})和中统韩家店组(S_{2h})。龙马溪组厚102 m,主要为灰黑色中层状泥岩夹同色中层状泥质粉砂岩,水平层理发育;石牛栏组厚308 m,下部为灰、暗灰色中、薄层状泥灰岩夹褐灰色薄层状灰质泥岩,上部为灰色、浅灰色厚层状泥质条带亮晶砂屑灰岩及亮晶生物屑灰岩;韩家店组厚248 m,主要为深灰色泥岩(不显层状)夹灰色中、薄层状亮晶生物屑灰岩及生物泥灰岩。该剖面的沉积环境演变与石门磺厂剖面类似,上奥陶统五峰组为滞留盆地相沉积,

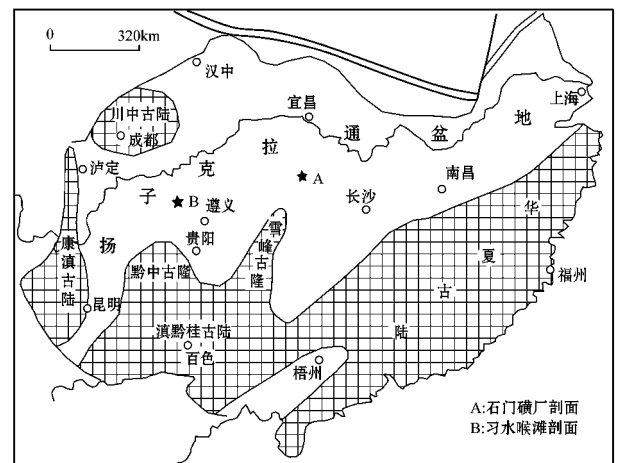


图1 取样剖面位置

Fig. 1 The location of sampling sections

龙马溪组底部为深水陆棚沉积,向上水体变浅,沉积相转变为浅水陆棚沉积,由于远离物源区,沉积物以清水碳酸盐岩为主。

2 样品采集与处理

为了对中国南方上奥陶统一志留统优质烃源岩的发育环境进行深入研究,笔者对石门磺厂和习水喉滩2个剖面进行了系统的观察与取样,共获得了37个泥质岩样品,对这些样品做了详细的地球化学分析。微量、稀土元素测试采用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)方法完成,分析误差小于5%,由中国科学院地质与地球物理研究所地球化学实验室完成。有机碳同位素用MAT-252稳定同位素质谱仪测定,采用PDB标准,分析精度 $\pm 2\%$,由中石化无锡石油地质实验中心测试完成。样品分析结果见表1、表2。

3 烃源岩地球化学特征与古环境恢复

3.1 有机碳含量

有机碳含量(TOC)是评价烃源岩优越和丰度的重要指标,它既反映了有机质生产力的高低,也反映了沉积水体的氧化还原条件,因为有机质主要在缺氧条件下才得以最好地保存。如果沉积物中有机质含量丰富,本身就指示了处于较强的还原环境。研究区石门磺厂剖面有机碳含量(TOC)范围为0.05%~4.94%,且由下向上逐渐降低,高有机碳样品主要分布在上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组底部(图2),有效烃源岩丰度范围为0.59%~4.94%,均值为2.76%,有效厚度20m左右。习水喉滩剖面有机碳含量范围为0.07%~4.44%,由下向上有机质丰度降低,有效烃源岩厚度80m左右(图3),有效烃源岩丰度范围为0.57%~4.44%,平均值为2.64%。

3.2 Ba含量与古生产力

营养型元素如C、N、O、Si、P、Cd、Ba等在海洋中的分布均受生物化学反应控制,但各元素对古生产力的反映程度有所不同。海洋学研究表明,Ba积累率与有机碳通量、生物生产力呈正相关,Ba富集指示上层水体的高生产力,可用Ba/Al或Ba/Ca的比值来计算古生产力。大量的重晶石在地中海底部淤泥中富集是生产力提高的一个显著证据。叶连俊等

(1998)提出表层海水的高生产率和底部的缺氧都是Ba富集的必要条件。显然,海相沉积中Ba富集与烃源岩发育条件相似,二者时空分布上必然存在着联系,利用Ba丰度对古生产力的指示可进一步表征有效烃源岩的发育。

根据磺厂剖面和喉滩剖面统计结果(表3)可以看出,当TOC大于0.5%时,2条剖面Ba含量均值大于 803×10^{-6} ;当TOC在0.1%~0.5%之间时,2条剖面Ba含量均值在 $426.68 \times 10^{-6} \sim 546.88 \times 10^{-6}$ 之间;当TOC小于0.1%时,Ba均值小于 45.37×10^{-6} 。由统计数据所反映的规律可见,有机碳含量高的层位Ba含量也较高,两者有较好的正相关关系,表明古生产力对有机碳含量的影响很大。

3.3 氧化还原条件

缺氧环境,由于直接涉及到某些金属富集成矿、烃源岩发育以及环境污染等众多领域,故对其深入研究,探索判识标志一直是地学界中经久不衰的研究课题。实质上,缺氧环境就是溶解氧缺乏而有机质、还原态元素等还原性物质稳定存在甚至富集的还原环境,其微迹化石、纹层、黄铁矿及特殊的岩性组合既是基本地质特征,也是当前普遍认同的宏观判识标志。但此特征不止是缺氧环境的体现,它是沉积速率和水动力条件等的综合反映,尤其弱氧化—弱还原条件下存在着复杂的过渡过程,微迹化石和层理构造等变化较大,易受后期保存程度等影响,故仅依据沉积学、古生物学标准来判断缺氧程度是不够的,还需获取广泛的地球化学证据。地球化学示踪是反映缺氧环境形成演化的有效而敏感的手段。随着测试水平的提高,微量元素、稳定同位素和有机地球化学在古环境研究中优势更为突出,相关的氧化还原条件判识指标日益多样化和量化。

3.4 微量元素指标

20世纪90年代以来,众多学者利用过渡金属、U、S含量及其相关比值对缺氧环境进行了广泛的研究,并提出了相应的判识标准。Hatch和Leventhal(1992)由北美黑色页岩的研究中得出,高的金属(Cd、Mo、V、Zn等)含量,高的硫含量,DOP(黄铁矿化程度) ≥ 0.67 , $V/(V+Ni) \geq 0.54$,指示含 H_2S 的厌氧环境;低的金属含量, $V/(V+Ni)$ 为0.46~0.60,指示贫氧环境。Jones和Manning(1994)认为DOP、U/Th、V/Cr和Ni/Co值及自生铀($AU = U_{total} - Th/3$)含量是古缺氧环境的有效判断标志,并提出相关标准。

表 1 上扬子磺厂剖面上奥陶统一下志留统地球化学数据
 Table 1 Geochemical data of Upper Ordovician-Lower Silurian strata from Huangchang section, Upper Yangtze area

地层	样品号	TOC /%	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ /‰	微量元素($\mu\text{g/g}$)														稀土元素($\mu\text{g/g}$)													
				V	Cr	Co	Ni	Ba	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
S ₁ r	HC46	0.05	-26.80	112.16	78.83	17.22	106.49	375.02	13.18	2.35	34.03	59.60	9.04	34.47	6.16	1.19	5.23	0.84	4.99	1.04	2.84	0.43	2.77	0.42							
	HC44	0.07	-23.74	118.45	79.11	17.29	38.60	431.76	14.55	2.48	31.08	60.48	8.42	30.78	4.82	0.84	3.34	0.54	3.35	0.72	2.12	0.33	2.24	0.33							
	HC38	0.08	-25.13	61.84	121.19	12.36	117.91	387.78	13.51	2.30	31.78	61.68	7.69	29.02	6.00	1.20	5.70	0.86	4.80	0.96	2.56	0.38	2.40	0.37							
	HC34	0.08	-27.22	99.39	77.04	17.27	69.58	420.27	15.45	2.71	45.07	85.28	10.38	36.92	7.00	1.33	5.97	0.94	5.33	1.11	3.04	0.45	2.91	0.44							
S ₁ l	HC-32	0.07	-26.37	95.65	73.17	14.61	43.59	315.37	14.38	2.16	43.85	68.89	10.29	38.71	6.85	1.36	6.22	0.92	5.14	1.03	2.82	0.42	2.64	0.41							
	HC-30	0.07	-26.75	97.34	74.68	14.66	48.93	314.37	11.40	2.25	34.88	63.14	8.48	31.38	5.47	1.07	4.90	0.73	4.12	0.84	2.30	0.34	2.16	0.35							
	HC-28	0.07	-27.83	103.86	78.40	15.64	71.63	328.26	10.78	2.36	33.98	55.49	8.52	32.26	5.74	1.11	5.03	0.77	4.28	0.88	2.41	0.37	2.29	0.36							
	HC-26	0.07	-26.24	102.78	75.47	12.49	79.13	333.09	11.26	2.47	31.34	62.62	8.31	32.67	6.53	1.35	6.03	0.93	5.07	1.00	2.66	0.40	2.43	0.36							
	HC-22	0.08	-26.58	96.02	71.98	14.25	29.34	280.02	9.31	2.29	30.54	53.85	7.45	27.65	4.83	0.92	4.17	0.64	3.58	0.72	1.97	0.30	1.92	0.29							
	HC-18	0.10	-25.08	105.95	75.67	13.15	33.69	273.61	5.02	1.89	17.62	36.55	4.17	14.60	2.71	0.51	2.44	0.38	2.07	0.41	1.15	0.19	1.23	0.19							
	HC-16	0.11	-25.71	115.67	82.47	15.47	53.06	417.66	10.16	2.44	29.98	35.95	7.53	28.50	4.91	0.91	3.90	0.62	3.53	0.72	2.00	0.30	1.93	0.29							
	HC-14	0.08	-26.29	97.76	70.96	10.80	35.06	467.53	8.49	2.05	26.59	42.35	6.83	26.67	4.94	1.04	4.62	0.70	3.79	0.76	2.01	0.29	1.81	0.27							
	HC-12	0.13	-25.24	109.34	78.74	8.83	32.88	371.35	6.42	1.94	22.21	38.79	5.49	19.24	3.38	0.65	2.80	0.44	2.39	0.48	1.33	0.22	1.35	0.20							
	HC-11	0.18	-25.88	92.25	77.19	7.74	286.39	446.36	7.83	2.02	28.09	46.92	6.74	23.96	4.21	0.82	3.46	0.53	3.02	0.62	1.69	0.26	1.64	0.24							
O ₃ w	HC-8	0.14	-28.42	120.06	81.54	11.94	31.30	301.92	4.92	1.78	22.30	34.11	5.23	19.34	3.20	0.62	2.75	0.41	2.15	0.43	1.17	0.18	1.18	0.18							
	HC-7	0.17	-27.98	115.11	79.96	10.77	25.64	457.54	7.19	2.05	27.10	40.53	7.13	26.70	4.78	0.94	4.05	0.63	3.55	0.71	1.96	0.29	1.85	0.28							
	HC-6	0.12	-28.21	118.74	86.18	10.09	33.82	503.82	7.30	1.86	27.98	40.01	7.20	26.63	4.76	0.93	3.99	0.60	3.28	0.67	1.81	0.27	1.68	0.25							
	HC-5	0.48	-28.19	126.39	85.47	10.63	30.35	680.08	8.79	2.83	31.50	41.83	7.81	29.05	4.92	1.00	4.13	0.63	3.57	0.73	1.99	0.30	1.92	0.28							
	HC-4	5.25	-29.23	856.76	71.62	2.21	121.02	1383.67	17.74	16.25	59.90	113.48	13.39	47.69	8.82	1.60	7.98	1.23	6.90	1.45	4.00	0.59	3.73	0.56							
	HC-3	2.14	-29.07	218.53	39.80	1.53	31.94	1137.07	5.70	3.40	15.93	29.09	3.95	14.91	3.16	0.69	3.08	0.47	2.53	0.49	1.27	0.19	1.25	0.18							
	HC-2	2.93	-29.67	413.22	66.29	3.35	30.10	1582.49	13.45	7.41	47.16	77.78	8.93	30.28	5.87	1.07	5.47	0.81	4.32	0.88	2.48	0.39	2.50	0.40							
HC-1	1.78	-28.98	162.96	95.65	7.78	50.57	1326.90	17.15	4.30	48.12	83.40	12.64	49.29	9.73	1.70	9.02	1.43	7.98	1.58	4.11	0.58	3.63	0.56								

表 2 上扬子喉滩剖面上奥陶统—下志留统地球化学数据

地层	样品号	TOC /%	微量元素($w_B/10^{-6}$)														稀土元素($w_B/10^{-6}$)													
			V	Cr	Co	Ni	Ba	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
S_1^{sh}	XHT-28	0.07	13.00	10.64	2.78	9.79	45.37	1.62	0.44	7.59	14.97	2.00	8.10	1.73	0.35	1.81	0.29	1.63	0.32	0.84	0.13	0.78	0.11							
	XHT-7	0.19	19.79	23.35	4.00	29.72	149.12	4.47	0.81	15.75	30.17	4.16	16.70	3.72	0.66	3.25	0.50	2.84	0.57	1.50	0.22	1.35	0.19							
	XHT-5	0.22	81.42	67.56	12.06	35.85	674.96	13.64	2.58	39.50	71.31	8.49	29.18	5.39	1.06	4.74	0.70	3.92	0.78	2.12	0.31	2.00	0.28							
	XHT-3	0.38	105.19	76.02	12.86	31.45	601.08	15.90	2.78	45.52	83.78	9.70	32.60	5.28	1.00	4.59	0.67	3.82	0.76	2.11	0.32	2.08	0.30							
S_1^l	HT-24	0.10	91.04	78.03	14.77	40.12	762.37	15.53	2.60	45.20	81.00	9.60	33.00	5.70	1.13	4.93	0.73	4.10	0.84	2.25	0.33	2.16	0.32							
	HT-21	0.57	123.80	89.10	9.76	47.16	571.22	11.47	2.92	35.70	66.58	7.95	27.49	5.04	0.92	4.33	0.62	3.49	0.69	1.92	0.29	1.87	0.27							
	HT-18	1.00	188.38	81.03	21.56	76.09	734.61	17.17	11.79	46.57	85.29	10.41	36.10	5.95	1.08	5.07	0.77	4.53	0.93	2.57	0.39	2.53	0.38							
	HT-15	3.18	214.90	47.37	6.18	69.84	771.27	10.95	12.20	35.08	61.76	7.06	24.32	4.27	0.85	3.80	0.57	3.23	0.67	1.84	0.29	1.88	0.28							
	HT-13	4.80	267.95	50.67	8.01	114.10	956.76	11.89	16.12	34.32	62.04	7.50	26.21	4.66	0.92	4.14	0.63	3.65	0.77	2.14	0.32	2.09	0.32							
	HT-11	2.34	510.89	64.20	11.79	170.54	842.70	14.80	22.70	43.71	78.35	9.98	38.10	7.52	1.52	7.17	1.09	6.49	1.37	3.86	0.56	3.62	0.55							
	HT-10	4.44	597.14	54.31	2.47	97.70	779.58	11.40	30.76	32.65	59.35	7.51	27.20	4.92	0.96	4.48	0.72	4.37	0.94	2.66	0.40	2.54	0.39							
O_3^{rw}	XHT-1	4.04	242.74	49.25	4.48	61.01	883.66	10.67	10.49	33.65	62.73	7.29	23.75	4.07	0.86	3.64	0.56	3.26	0.70	1.96	0.29	1.86	0.29							
	HT-7	0.99	483.15	56.66	2.84	71.99	731.60	9.37	15.90	30.92	57.37	6.83	23.75	4.33	0.69	4.07	0.70	4.37	0.96	2.68	0.40	2.55	0.38							
	HT-5	3.16	823.10	75.42	3.52	86.78	755.97	13.14	20.76	40.99	71.26	8.95	32.13	5.83	0.97	5.60	0.88	5.28	1.10	3.00	0.45	2.92	0.42							
	HT-3	1.91	168.99	92.32	14.33	78.44	1002.92	23.82	4.83	55.31	110.53	12.61	44.24	7.25	0.82	6.16	0.96	5.76	1.17	3.27	0.49	3.17	0.50							

表 3 有机碳与 Ba 含量统计表 $\omega_B/10^{-6}$

Table 3 Statistics of TOC and Ba content

	TOC \geq 0.5%	0.1% \leq TOC<0.5%	TOC<0.1%
磺厂剖面	1 137.07~ 1 582.49/1 357.53	273.61~680.08 /426.68	280.02~467.53 /362.85
喉滩剖面	571.22~1 002.92 /803.03	149.12~762.37 /546.88	45.37

表 4 磺厂和喉滩剖面微量元素判别指标统计表

Table 4 Trace element indicators along Huangchang and Houtan sections

指标	TOC \geq 0.5%		0.1% \leq TOC<0.5%		TOC<0.1%	
	磺厂	喉滩	磺厂	喉滩	磺厂	喉滩
V/(V+Ni)	0.76~0.93 /0.86	0.68~0.90 /0.78	0.24~0.82 /0.67	0.40~0.77 /0.64	0.51~0.77 /0.65	0.57
V/Cr	1.7~11.96 /6.35	1.39~10.99 /5.87	0.51~1.48 /1.30	0.85~1.38 /1.15	1.29~1.5 /1.36	1.22
Ni/Co	6.5~54.86 /22.81	1.39~10.99 /15.70	2.38~37 /7.5	2.45~7.42 /3.89	2.06~6.34 /3.89	3.52
U/Th	0.25~0.92 /0.58	0.2~2.7 /1.21	0.17~0.38 /0.29	0.17~0.19 /0.18	0.15~0.25 /0.20	0.27

本次研究选取了 V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Th 几个参数作为缺氧环境的判别指标来分析有效烃源岩的发育环境。通过对磺厂和喉滩两条剖面的微量元素的统计分析(表 4)可见,V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Th 这 4 项判别指标与有机碳含量相关性强,由这些指标的纵向变化(图 2、图 3)可见指标在层位上的异常段与有机碳含量较高的层段有明显的对应关系。

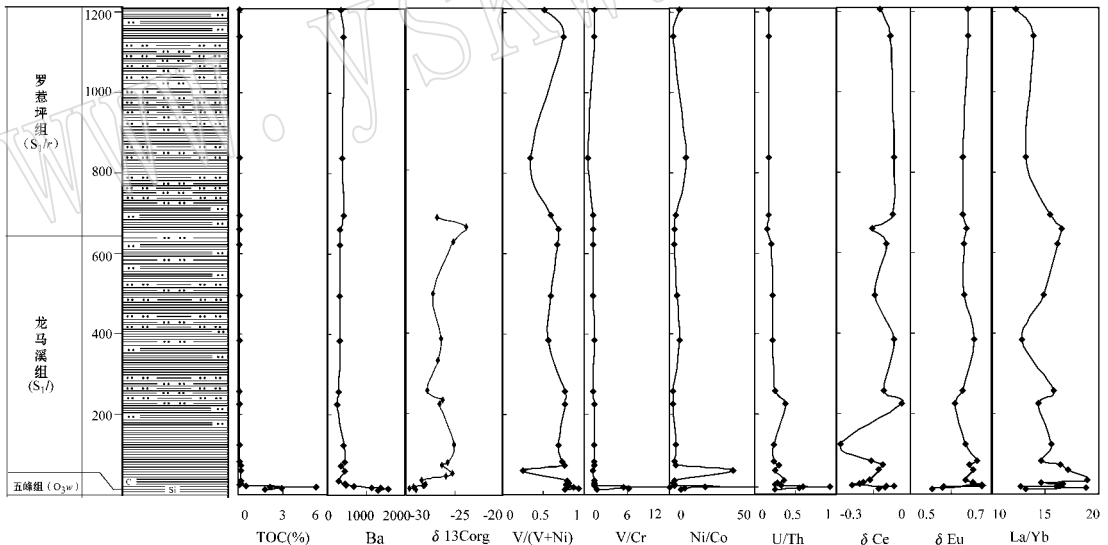


图 2 石门磺厂剖面地球化学指标纵向变化特征

Fig. 2 Vertical changes of geochemical indicators along Huangchang section

腾格尔等(2004)总结了这些指标对缺氧环境的指示与判别标准,V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co 和 U/Th 在缺氧与富氧环境中的界限值分别为 0.45、2.0、5.0 和 0.75,大于这些值,指示缺氧或厌氧环境,利于有机质保存,小于这些界限值,指示富氧环境,不利于有机质的保存。经过对比可以看出,在 TOC \geq 0.5% 时,地化指标基本都显示缺氧环境,而在 0.1% \leq

TOC<0.5% 和 TOC \leq 0.1% 时,这些指标大部分显示为氧化环境。

3.4 稀土元素

稀土元素(REE)因具特有的地球化学行为、对沉积环境变化又十分敏感而广泛应用于古环境研究。Wright 和 Holser(1987)把 Ce 与邻近的 La 和 Nd 元素的相关变化称为铈异常(Ce_{anom}), $Ce_{anom} =$

$\log 3C_{eN}/(2La_n + Nd_n)$ (n 为北美页岩标准化值) 并用作判识古缺氧环境的标志, $C_{e_{anom}} > -0.1$ 为正异常, 还原环境; $C_{e_{anom}} < -0.1$ 为负异常, 氧化环境。铈异常 (Ce/Ce^* 或 δCe) 的另一计算公式为 $\delta Ce =$

$C_{eN}/(La_N \times Pr_N)^{1/2}$, N 为球粒陨石标准化值, $\delta Ce > 1$ 为正异常, < 0.95 为负异常。陈衍景等 (1996) 研究表明, 缺氧条件下 ΣREE 低, δEu 和 La/Yb 高, 氧化条件下则相反。

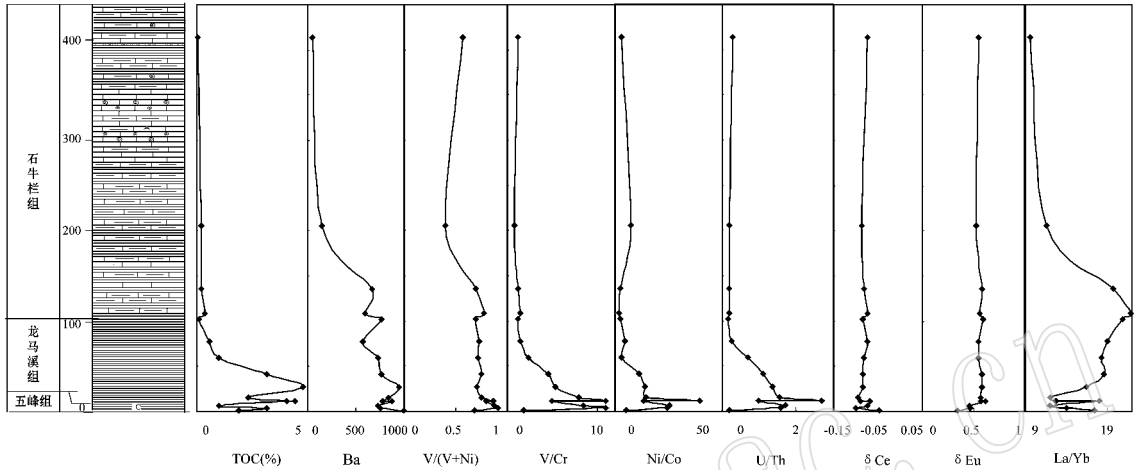


图 3 习水喉滩剖面地球化学指标纵向变化特征

Fig. 3 Vertical changes of geochemical indicators along Houtan section

本次研究选用了 $C_{e_{anom}}$ 、 δEu 和 La/Yb 这 3 个稀土元素指标来评价古环境。通过对磺厂和喉滩两条剖面的稀土元素统计分析可见 (表 5), 这些指标显示

其变化与有机碳含量具有正相关性, 它们的异常代表了沉积时的缺氧环境。这 3 个指标在不同剖面上的变化趋势见图 2、图 3。

表 5 磺厂和喉滩剖面稀土元素判识指标统计表

Table 5 REE element indicators along Huangchang and Houtan sections

指标	TOC ≥ 0.5%		0.1% ≤ TOC < 0.5%		TOC < 0.1%	
	磺厂	喉滩	磺厂	喉滩	磺厂	喉滩
$C_{e_{anom}}$	-0.13 ~ -0.07 /-0.10	-0.1 ~ -0.05/ -0.08	-0.28 ~ -0.04 /-0.16	-0.09 ~ -0.07 /-0.08	-0.07 ~ -0.16 /-0.11	-0.07
δEu	0.5 ~ 0.61 /0.54	0.34 ~ 0.62/ 0.53	0.55 ~ 0.61 /0.58	0.54 ~ 0.6 /0.57	0.57 ~ 0.6 /0.58	0.55
La/Yb	1.24 ~ 1.55 /1.48	1.17 ~ 1.85 /1.54	1.28 ~ 1.84 /0.58	1.47 ~ 1.93 /1.74	1.19 ~ 1.61 /1.43	0.94

3.5 有机碳同位素

沉积有机质的 $\delta^{13}C_{org}$ 值主要与原始有机质的来源及沉积环境有关, 其变化在多数情况下反映了原始 $\delta^{13}C_{org}$ 同位素组成的变化, 而热成熟作用并不会明显改变碳的同位素组成, 因而 $\delta^{13}C_{org}$ 在油气领域中作为有机质类型的划分指标已被广泛应用 (黄第藩等, 1984; 曾凡刚等, 1998)。同时, 缺氧环境的广泛分布严重影响了 $\delta^{13}C_{org}$ 的原始同位素平衡, 当缺氧条件占优势时, $\delta^{13}C_{org}$ 有偏轻的趋势 (Freudenthal

et al., 2001; Lehmann et al., 2002)。

本次研究系统测试了磺厂剖面的有机碳同位素值, 其变化趋势见图 2。由统计结果 (表 6) 可以看出, 有机碳含量较高的样品, 其 $\delta^{13}C_{org}$ 值较低, 普遍

表 6 磺厂剖面有机碳同位素统计表

$\delta^{13}C_{org}/\text{‰}$

Table 6 Statistics of $\delta^{13}C_{org}$ along Huangchang section

TOC ≥ 0.5	0.1% ≤ TOC < 0.5	TOC < 0.1
-29.67 ~ -28.98 /-29.24	-28.42 ~ -25.08 /-27.08	-27.83 ~ -23.74 /-26.10

小于 -28% 表明其有机质保存条件较好,处于缺氧环境。随着有机碳含量的降低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值增大,表明沉积水体的还原性降低。

4 讨论与结论

晚奥陶世—早志留世是一个非常特殊的地质转折时期,在该时期发生了生物集群灭绝事件,为显生宙五大生物集群灭绝事件之一。生物灭绝分为两幕,分别与晚奥陶世末期冈瓦纳古陆冰期的开始与结束期对应,亦即与海平面的下降与上升期相对应。看起来,生物的灭绝似乎与冈瓦纳冰盖增生和消融有关,而其中真正的原因与奥陶纪—志留纪转折期海洋氧化还原环境变化有关,Yan等(2009)通过对有机碳同位素和黄铁矿硫同位素的研究,论证了该时期气候与海洋缺氧环境的协同演化是导致生物灭绝的一个重要因素。就油气地质而言,缺氧环境往往有利于大套烃源岩发育,如最著名的白垩纪缺氧事件在中东地区形成厚层黑色页岩,成为诸多大型油气田的物质基础。

晚奥陶世—早志留世的缺氧事件在世界上很多地区都有表现(Dabard & Paris, 1986; Jeppsson, 1990; Aldridge *et al.*, 1993; Jeppsson *et al.*, 1995),其中不少都发育了优质的烃源岩,如北非地区,该地区发育的优质烃源岩有机碳含量最高可达17%。除了缺氧环境,北非地区烃源岩的发育还与上升洋流的发育密切相关(Parrish, 1982; Finney & Berry, 1997)。

通过对微量、稀土元素和碳同位素分析可以知道,上奥陶统一志留统优质烃源岩发育层段限于五峰组和龙马溪组底部,发育环境为缺氧环境,并且具有较高的生物生产率,自龙马溪组向上,缺氧环境遭到破坏,有机碳含量降低。

尽管缺氧环境是形成优质烃源岩的有利因素,但是还有许多因素可以影响烃源岩的发育,如上升洋流、海平面变化和沉积环境等等,同时缺氧环境的形成也受古构造和古气候等多种因素的控制。因此,针对晚奥陶世—早志留世扬子地区缺氧环境的形成背景与控制因素仍需要进一步研究。

References

Aldridge R J, Jeppsson L and Dorning K J. 1993. Early Silurian oceanic

- episodes and events[J]. *J. Geol. Soc. London.*, 150: 501~513.
- Chen Yanjing, Deng Jian and Hu Guixing. 1996. The control over of the environments on content and distribution types of trace element in sediment[J]. *Geology-Geochemistry*, (3): 97~105 (in Chinese with English abstract).
- Dabard M P and Paris F. 1986. Palaeontological and geochemical characteristics of Silurian black shale formations from the central Brittany domain of the Armorican Massif, Northwest France[J]. *Chem. Geol.*, 55: 17~29.
- Finney S C and Berry W B N. 1997. New perspectives on graptolite distributions and their use as indicators of platform margin dynamics [J]. *Geology*, 25: 919~922.
- Freudenthal T, Wagner T, Wenzhfer F, *et al.* 2001. Early diagenesis of organic matter from sediments of the eastern subtropical Atlantic: Evidence from stable nitrogen and carbon isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(11): 1795~1808.
- Hatch J R and Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian Stark Shale Member of Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A [J]. *Chemical Geology*, 99: 65~82.
- Huang Difan, Li Jinchao and Zhang Dajiang. 1984. Kerogen types and study on effectiveness, limitation and interrelation of their identification[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2(3): 18~33 (in Chinese with English abstract).
- Jeppsson L. 1990. An oceanic model for lithological and faunal changes tested on the Silurian record[J]. *J. Geol. Soc.-London.*, 147: 663~674.
- Jeppsson L, Aldridge R J and Dorning K J. 1995. Wenlock Silurian. oceanic episodes and event[J]. *J. Geol. Soc. London.*, 152: 487~498.
- Jones B and Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstone[J]. *Chemical Geology*, 111: 111~129.
- Lehmann M F, Bernasconi S M, Barlieri A, *et al.* 2002. Preservation of organic matter and alteration of its carbon and nitrogen isotope composition during simulated and in situ early sedimentary diagenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(20): 3573~3584.
- Parrish J T. 1982. Upwelling and petroleum source beds, with reference to Paleozoic[J]. *AAPG Bull.*, 66: 750~774.
- Tenger, Liu Wenhui, Xu Yongchang, *et al.* 2004. The discussion on anoxic environments and its geochemistry identifying indices[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 365~372 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengyuan and Lennart Jeppsson. 1994. Application of Jeppsson's ocean model to early Silurian of South China platform [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 11(1): 71~85 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofeng and Chai Zhifang. 1989. Terminal Ordovician mass extinction and its relationship to iridium and carbon isotope anomalies [J]. *Acta Geologica Sinica*, 3: 255~264 (in Chinese with English

abstract).

Wen Ling, Hu Shuyi and Tian Haiqin. 2002. Lithofacies paleogeography and petroleum geology of the Silurian in Yangtze area [J]. Petroleum Exploration and Development, 29(6): 11~14 (in Chinese with English abstract).

Wright J and Holser W T. 1987. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51: 631~644.

Yan Detian, Chen Daizhao, Wang Qingchen, et al. 2009. Carbon and sulfur isotopic anomalies across the Ordovician-Silurian boundary on the Yangtze platform, South China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. DOI: 10.1016/j.palaeo.2008.12.016.

Ye Lianjun, Chen Qiying, Li Renwei, et al. 1998. Biomineralization and Its Metallogenic Background [M]. Beijing: Oceanological Publishing House, 335~352 (in Chinese).

Zeng Fangang and Cheng Keming. 1998. Geochemical methods and research status on Lower Palaeozoic marine carbonate hydrocarbon-generating rock [J]. Geology-Geochemistry, 26(3): 1~8 (in Chinese with English abstract).

Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Bian Lizeng, et al. 2005. Development constraints of marine source rocks in China [J]. Earth Science Frontiers, 12(3): 39~48 (in Chinese with English abstract).

Zhang Tingshan, Yu Jianhua and Bian Lizeng. 1998. Strontium, carbon and oxygen isotopic compositions and their geological significance: the Silurian strata on the northern and southern margins of the Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 18(3): 41~49 (in Chinese with English abstract).

Zhou Mingkui, Wang Ruzhi and Li Zhiming. 1993. Silurian Lithofacies

Palaeogeography and Mineralization in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

附中文参考文献

陈衍景, 邓健, 胡桂兴. 1996. 环境对沉积物微量元素含量和分配型式的制约 [J]. 地质地球化学, (3): 97~105.

黄第藩, 李晋超, 张大江. 1984. 干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性 [J]. 沉积学报, 2(3): 18~33.

腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 2004. 缺氧环境及地球化学判别标志的探讨 [J]. 沉积学报, 22(2): 365~372.

王成源, 列·杰普森. 1994. 杰普森大洋模式及其在华南志留纪的应用 [J]. 微生物古生物学报, 11(1): 71~85.

汪啸风, 柴之芳. 1989. 奥陶系与志留系界线处生物绝灭事件及其与铀和碳同位素异常的关系 [J]. 地质学报, 3: 255~264.

文玲, 胡书毅, 田海芹. 2002. 扬子地区志留纪岩相古地理与石油地质条件研究 [J]. 石油勘探与开发, 29(6): 11~14.

叶连俊, 陈其英, 李任伟, 等. 1998. 生物有机质成矿作用和成矿背景 [M]. 北京: 海洋出版社, 335~352.

曾凡刚, 程克明. 1998. 下古生界海相碳酸盐烃源岩地球化学的研究现状 [J]. 地质地球化学, 26(3): 1~8.

张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 2005. 中国海相烃源岩发育控制因素 [J]. 地学前缘, 12(3): 39~48.

张廷山, 俞剑华, 边立曾, 等. 1998. 四川盆地南北缘志留系的铍和碳、氧同位素演化及其地质意义 [J]. 岩相古地理, 18(3): 41~49.

周名魁, 王汝植, 李志明. 1993. 中国南方奥陶—志留纪岩相古地理与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社.