

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.04.005

湘中涟源地区下石炭统天鹅坪组–陡岭坳组沉积环境与 有机质富集机理

王 平^{1,2}, 陈孝红^{1*}, 田 巍¹, 李培军¹, 刘 安¹

WANG Ping^{1,2}, CHEN Xiao-Hong^{1*}, TIAN Wei¹, LI Pei-Jun¹, LIU An¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

摘要:湘中涟源地区下石炭统天鹅坪组–陡岭坳组是华南地区海相页岩气勘查新层系之一。为了探讨湘中涟源地区下石炭统天鹅坪组–陡岭坳组钙质页岩沉积环境与有机质富集机理, 本文对该套页岩开展了有机碳含量、主量元素、微量元素与稀土元素等含量测试和地球化学特征分析。结果表明: $V/(V+Ni)$ 、 Cu/Zn 均指示天鹅坪组–陡岭坳组页岩发育于贫氧环境, 生源 Ba 含量显示天鹅坪组–陡岭坳组沉积时期海水生产力水平较低, $Al-Co-Mn$ 反映了水体滞留程度呈现出季节性变化。对比气候、海平面变化趋势, 发现古生产力、陆源碎屑物质输送、水体滞留程度受到气候波动驱使海平面变化的影响。综合对比沉积环境指标与 TOC 相关关系发现: 陆源碎屑含量变化是天鹅坪组–陡岭坳组页岩有机质富集的主要控制因素。

关键词: 下石炭统; 天鹅坪组–陡岭坳组; 海平面变化; 沉积环境; 有机质富集; 涟源凹陷

中图分类号: P618.130.2; P534.45

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2022)04-0626-12

Wang P, Chen X H, Tian W, Li P J and Liu A. 2022. Sedimentary Environment and Organic Matter Enrichment Mechanism from the Lower Carboniferous Tianeping Formation–Doulingao Formations in Lianyuan area, central Hunan Province. *South China Geology*, 38(4): 626–637.

Abstract: The Lower Carboniferous Tianeping–Doulingao Formation in Lianyuan, central Hunan Province, is one of the new shale gas exploration target beds in South China. In order to discuss the organic matter enrichment mechanism and the sedimentary environment of the calcareous shale rocks in the Tianeping–Doulingao Formation, the total carbon content, major and trace elements contents, as well as rare earth elements of calcareous shale samples have been analyzed systematically. Based on the results of the ratio of $V/(V+Ni)$ and Cu/Zn , the Tianeping–Doulingao shale has been deposited in a poor-oxygen environment. The Ba_{bio} content suggested a lower paleo-productivity level. The $Al-Co-Mn$ data reflected that the degree of water retention showed seasonal changes. Comparing the climate and the sea level trends, it is suggested that the paleo-productivity, terrigenous detrital transport and water retention have been affected by the sea level changes driven by climate fluctuations. The correlation of TOC and sedimentary environment index also indicates that the terrigenous detrital input has been a major controlling factor for Tianeping–Doulingao shale organic matter enrichment.

收稿日期: 2022-7-30; 修回日期: 2022-10-12

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20190558)

第一作者: 王平 (1998—), 男, 硕士研究生, 古生物学与地层学专业, 主要研究方向为沉积地球化学, E-mail: 2214213620@qq.com

通讯作者: 陈孝红 (1964—), 男, 研究员, 主要从事地层古生物学研究与页岩气地质调查工作, E-mail: yccxiaohong@163.com

Key words: Low Carboniferous; Tianeping-Doulingao Formations; sea-level change; sedimentary environment; organic matter enrichment; Lianyuan sag

我国南方地区古生界富有机质页岩发育,热演化程度高(张金川等, 2008; 聂海宽等, 2009),是页岩气资源勘探的重要目标层系。湘中涟源地区下石炭统天鹅坪组-陡岭坳组黑色页岩层系是新近发现的页岩气资源勘查的新层系之一(田巍等, 2021; 陈孝红等, 2022)。全球早石炭世杜内中期处于冰期,而杜内晚期-维宪早期处于间冰期,由于有机碳埋藏率改变影响了大气二氧化碳浓度,导致气温发生波动,南半球冈瓦纳冰盖消融(Buggisch et al., 2008),引起华南板块海面急速上升。与海平面上升相伴,洋流作用带来了大量的营养物质(Yao L et al., 2015),为湘中地区下石炭统黑色页岩形成及有机质富集提供了良好的条件。

陈孝红等(2022)认为涟源凹陷天鹅坪组页岩气富集是凹陷盆地相、岩浆热作用以及滑脱构造共同作用的结果。田巍等(2021)认为湘中坳陷天鹅坪组页岩气成藏主要受控于泥页岩热演化程度及构造保存条件。湘中涟源地区天鹅坪组-陡岭坳组沉积环境变化及有机质富集机理在页岩气富集成藏中的作用和地位研究尚显不足。虽然海相页岩有机质富集是一个复杂的生物地球化学过程,但它对页岩气资源的勘查具有重要意义。根据不同的主控因素,国内外学者将有机质富集分为“生产力模式”(Sage-man et al., 2003; Gallego-Torres et al., 2007)、“保存模式”(Mort et al., 2007)及“稀释模式”(Kevin et al., 2005)。生产力模式下的有机质富集主要受控于海平面较高的初级生产力。保存模式主要受控于有机质还原、硫化的保存环境。较高的陆源碎屑输入被认为可以稀释有机质(Tan Z Z et al., 2019)。因此,探讨天鹅坪组-陡岭坳组沉积环境与有机质富集机理,对于湘中地区页岩气资源潜力评价具有重要意义。

本文以湘中涟源凹陷白马地区下石炭统天鹅坪组-陡岭坳组黑色页岩为研究对象,开展系统的沉积环境分析,利用地球化学手段对不同的沉积环境条件进行恢复,通过相关性分析,揭示该地区天鹅坪组-陡岭坳组页岩有机质富集的控制因素,以期对湘中地区下石炭统天鹅坪组页岩气成藏机理

研究提供理论依据。

1 地质概况

湘中坳陷区位于华南板块中部。南邻华南褶皱系,北、西接雪峰-江南隆起,东连衡山隆起。湘中坳陷区是在早古生代浅变质基底的基础上发展起来的陆表海沉积坳陷区。湘中坳陷经过多期构造活动改造,形成了如今的“三凹两凸”格局(涟源凹陷、邵阳凹陷、零陵凹陷、龙山凸起和关帝庙凸起)(图1)。区内元古界至第四系均有出露,古生代至中生代沉积了多套页岩层系(敬乐等, 2012)。涟源凹陷内下石炭统由海相沉积向上变为海陆过渡相沉积,按照岩石组合特征依次为天鹅坪组、陡岭坳组、石磴子组及测水组,其中天鹅坪组页岩主要由钙质页岩、泥岩、泥质灰岩组成,并见有腕足化石与海百合化石;陡岭坳组为灰黑色中-厚层生物碎屑灰岩、泥质灰岩,夹泥灰岩和页岩,并伴有珊瑚与腕足化石。

2 样品采集和测试分析方法

本次研究以湘中地区涟源凹陷白马水库剖面下石炭统天鹅坪组上部、陡岭坳组为研究对象(剖面位置详见图1),系统采集了15件样品,其中天鹅坪组11件,陡岭坳组4件。将所有样品洗净、干燥并研磨至200目的粉末进行主量、微量、稀土元素及TOC测试,所有测试由自然资源部中南矿产监督检测中心完成。有机碳含量使用LECO-CS600碳硫分析仪完成测试;主量元素采用X射线荧光光谱分析法测试;微量、稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成测试,其精度均优于5%。

3 测试结果

3.1 TOC、主量元素

天鹅坪组、陡岭坳组样品主量元素及TOC分析测试结果见表1。样品中TOC含量0.30%~1.90%

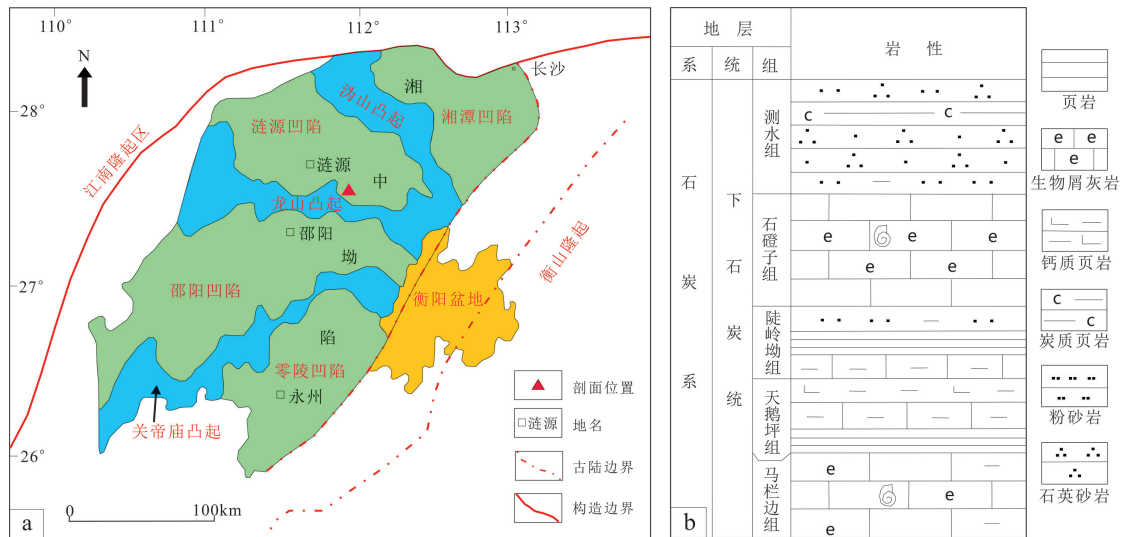


图1 湘中坳陷构造划分(a)及下石炭统主要地层(b)(据陈林等,2021;田巍等,2021 修改)

Fig.1 Tectonic division of Xiangzhong Depression (a) and main stratigraphic of Lower Carboniferous (b)(Modified from Chen L et al., 2021; Tian W et al., 2021)

之间,均值为0.79%。主量元素中CaO含量为2.63%~43.14%,均值为23.28%,SiO₂含量为15.44%~60.39%,均值为38.62%;Al₂O₃含量在3.45%~18.50%之间,均值为9.52%;FeO含量在1.33%~4.42%之间,均值为2.64%;K₂O含量在0.62%~3.40%之间,均值为1.48%;MgO均值为1.39%;Fe₂O₃均值为1.23%,其余主量元素含量平均值均不超过1.0%(表1)。

3.2 微量元素

天鹅坪组、陡岭组样品微量元素分析测试结果见表2,其中天鹅坪组钒、铬、钼元素含量高于陡岭组,而锶、铷的含量要低于陡岭组,其他元素含量差别不大。微量元素的富集系数可以反映某种元素相对富集程度,通过计算得出部分元素的富集系数。

3.3 稀土元素特征

样品稀土元素测试结果见表3。湘中涟源地区

表1 涟源地区下石炭统黑色页岩主量元素及TOC含量(%)

Table 1 Content of TOC and major elements from black shale of Lower Carboniferous in Lianyuan area(%)

样品号	层位	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	CIA*	TOC
LY-15	陡岭组	17.44	3.45	0.87	1.84	41.48	0.87	0.62	0.18	0.14	0.03	73.23	0.93
LY-14	陡岭组	15.75	3.81	1.03	1.33	43.14	0.97	0.68	0.15	0.11	0.03	75.47	0.68
LY-13	陡岭组	37.36	11.63	2.51	3.11	20.62	1.47	2.31	0.41	0.40	0.05	75.10	1.17
LY-12	陡岭组	51.89	10.57	1.56	2.56	14.77	1.45	1.59	0.78	0.44	0.08	71.08	1.06
LY-11	天鹅坪组	43.74	9.22	0.74	1.98	20.84	1.24	1.60	0.67	0.35	0.03	70.03	1.66
LY-10	天鹅坪组	41.95	5.90	0.38	1.82	24.40	1.10	1.01	0.78	0.22	0.03	61.72	1.90
LY-9	天鹅坪组	49.74	10.76	1.27	2.81	15.58	1.28	1.39	0.71	0.45	0.06	73.71	0.34
LY-8	天鹅坪组	59.77	15.50	0.47	3.81	4.79	1.75	2.00	0.85	0.68	0.04	75.74	0.48
LY-7	天鹅坪组	56.68	15.02	1.77	3.60	7.65	1.91	1.88	0.88	0.67	0.05	75.29	0.30
LY-6	天鹅坪组	60.20	18.50	0.95	4.42	2.63	2.06	2.12	1.09	0.84	0.02	75.88	0.40
LY-5	天鹅坪组	15.53	4.23	1.55	2.76	40.88	1.22	0.69	0.21	0.15	0.10	74.49	0.64
LY-4	天鹅坪组	28.82	7.74	1.25	2.91	30.51	1.22	1.23	0.45	0.29	0.07	73.44	0.59
LY-3	天鹅坪组	15.44	4.39	1.26	1.76	41.91	1.11	0.80	0.15	0.14	0.06	76.18	0.54
LY-2	天鹅坪组	60.39	16.77	1.72	2.84	4.26	1.89	3.40	0.31	0.62	0.02	78.11	0.46
LY-1	天鹅坪组	24.57	5.28	1.17	2.00	35.71	1.30	0.93	0.32	0.15	0.04	71.93	0.75

*:CIA无量纲。

表 2 涟源地区下石炭统黑色页岩微量元素含量及比值
Table 2 Trace elements content and ratio from black shale of Lower Carboniferous in Lianyuna area

样品号	层位	微量元素浓度/×10 ⁻⁶											V/(V+Ni)				Sr/Ba	Ba _{Bio}	Sr/Cu	Co _{EF}
		Cr	Ni	Co	Rb	Mo	Sr	Ba	V	Zr	U	Th	Cu/Zn	Mn _{EF}						
LY-15	陡岭坳组	38.20	11.30	3.60	45.20	3.38	952.00	40.60	27.80	50.00	2.52	3.80	0.71	0.20	3.63	10.19	40.59	88.15	0.99	
LY-14	陡岭坳组	32.90	12.80	4.13	48.00	1.88	856.00	47.60	28.30	32.90	1.51	4.13	0.69	0.48	2.77	0.56	47.58	107.67	1.02	
LY-13	陡岭坳组	81.30	24.20	9.49	132.00	0.94	470.00	155.00	79.20	108.00	1.76	7.60	0.77	0.59	0.80	14.09	154.95	23.38	0.77	
LY-12	陡岭坳组	64.10	18.00	9.02	100.00	0.59	303.00	135.00	51.50	131.00	1.56	9.28	0.74	0.40	0.56	6.64	134.96	24.24	0.81	
LY-11	天鹅坪组	83.60	24.20	8.86	102.00	0.98	460.00	130.00	47.30	63.90	1.79	6.04	0.66	0.31	0.59	13.52	129.96	27.06	0.91	
LY-10	天鹅坪组	64.30	22.80	4.64	63.80	1.28	552.00	93.80	37.20	44.80	1.48	4.06	0.62	0.51	0.67	0.91	93.78	35.16	0.74	
LY-9	天鹅坪组	66.60	20.60	8.85	78.00	0.70	389.00	136.00	54.80	137.00	1.45	8.51	0.73	0.35	2.06	1.67	135.96	26.64	0.78	
LY-8	天鹅坪组	105.00	18.20	8.27	51.80	0.52	223.00	189.00	80.10	184.00	1.74	12.60	0.81	0.36	1.09	1.18	188.94	15.17	0.50	
LY-7	天鹅坪组	90.20	23.80	14.30	73.80	0.46	302.00	181.00	74.00	217.00	2.05	10.90	0.76	0.35	1.52	2.86	180.94	20.13	0.90	
LY-6	天鹅坪组	111.00	24.40	12.30	53.50	0.49	201.00	221.00	105.00	233.00	2.11	14.30	0.81	0.46	1.23	5.88	220.92	10.00	0.63	
LY-5	天鹅坪组	38.20	14.00	5.38	43.40	0.97	903.00	66.80	24.70	38.20	1.72	2.78	0.64	0.28	1.53	3.54	66.78	93.67	1.20	
LY-4	天鹅坪组	47.00	12.20	7.20	79.50	1.08	671.00	101.00	42.20	86.70	1.37	6.59	0.78	0.43	1.83	2.24	100.97	52.83	0.88	
LY-3	天鹅坪组	32.50	7.74	5.97	53.20	1.55	889.00	63.10	28.90	43.90	2.08	3.37	0.79	0.44	2.88	3.03	63.08	92.12	1.29	
LY-2	天鹅坪组	97.40	22.60	12.10	137.00	0.60	156.00	281.00	101.00	152.00	1.97	11.30	0.82	0.45	1.29	17.98	280.93	9.51	0.68	
LY-1	天鹅坪组	40.50	10.40	5.79	61.10	1.17	714.00	70.10	30.10	32.40	1.43	2.09	0.74	0.73	1.56	23.45	70.08	47.92	1.04	

表 3 湘中涟源地区下石炭统黑色页岩稀土元素含量
Table 3 Rare elements content from black shae of Lower Carboniferous in Lianyuan area

样品号	层位	稀土元素含量/ $\times 10^{-6}$														δCe	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	
LY-15	陡岭坳组	26.59	21.53	17.37	13.22	8.66	4.14	5.23	4.66	4.28	3.88	3.61	3.93	3.83	3.67	50.46	1.00
LY-14	陡岭坳组	70.03	57.99	43.43	30.38	12.77	4.94	7.52	6.90	7.06	7.17	7.51	9.27	9.31	8.92	122.98	1.04
LY-13	陡岭坳组	26.98	23.62	17.81	13.42	8.35	5.86	5.29	4.48	4.25	3.76	3.53	3.93	3.87	3.41	52.85	1.08
LY-12	陡岭坳组	44.41	37.51	28.32	21.24	13.20	7.82	8.53	7.24	6.85	6.11	5.78	6.74	6.49	5.77	84.58	1.05
LY-11	天鹅坪组	34.88	30.72	24.09	18.57	12.90	9.20	8.59	7.24	6.56	5.64	5.06	5.06	4.84	4.20	71.31	1.06
LY-10	天鹅坪组	112.81	90.39	64.38	45.57	24.11	11.61	14.80	13.10	12.78	11.99	11.41	13.48	12.86	11.55	193.83	1.04
LY-9	天鹅坪组	108.99	88.82	65.26	48.24	27.88	13.79	17.61	14.83	13.65	12.22	11.29	12.64	12.02	10.76	195.02	1.04
LY-8	天鹅坪组	101.63	81.71	58.98	42.48	22.25	10.92	13.99	11.90	11.39	10.58	10.04	11.24	10.97	9.97	176.08	1.04
LY-7	天鹅坪组	74.66	63.01	46.86	34.74	19.74	10.00	12.22	10.34	9.40	8.58	7.75	8.71	8.39	7.35	137.5	1.06
LY-6	天鹅坪组	22.62	14.84	10.66	7.40	4.42	2.30	3.14	2.76	2.89	2.82	2.85	3.37	3.23	3.15	34.65	0.91
LY-5	天鹅坪组	41.96	32.39	24.53	17.44	10.04	4.48	6.27	5.00	4.75	4.23	4.18	4.78	4.72	4.20	71.79	0.99
LY-4	天鹅坪组	65.94	52.56	38.25	28.13	16.62	7.93	10.36	8.97	8.32	7.52	6.99	7.87	7.30	6.30	115.84	1.03
LY-3	天鹅坪组	60.76	51.20	38.32	28.13	16.41	7.82	10.36	8.97	8.29	7.76	7.39	8.71	8.43	7.61	113.06	1.05
LY-2	天鹅坪组	25.97	23.20	17.81	13.92	8.70	5.40	5.49	4.48	3.86	3.41	3.01	3.09	2.98	2.89	51.96	1.08
LY-1	天鹅坪组	27.52	20.27	14.31	10.34	6.32	4.60	4.18	3.45	3.20	2.94	2.77	3.37	3.02	2.89	45.29	0.99

天鹅坪组、陡岭坳组稀土元素总量(ΣREE)为 $34.65 \times 10^{-6} \sim 195.02 \times 10^{-6}$,均值为 101.15×10^{-6} ,明显低于后太古代澳大利亚页岩(Post-Archaean Australian Shale, PAAS)的稀土元素总量平均值 173.21×10^{-6} 和上地壳(Upper Continental Crust, UCC)的稀土总量 146.37×10^{-6} (Mort et al., 2007)。

4 沉积环境分析

4.1 古气候

古气候影响着母岩的风化搬运,在特定的地质时间内也制约着水体分层、盐度以及海相烃源岩的形成(陈践发等,2006)。古气候在一定程度上影响着沉积环境,同时也会影响有机质累积。CIA(化学风化系数)可以表征母岩的化学风化程度(郑琪, 2021; 李绪龙等, 2022),是评价古气候的重要参数之一。

$$\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO}^* + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100 \quad (1)$$

式中所计算均采用摩尔数, CaO^* 为硅酸盐中摩尔含量。由于CaO的来源不仅有陆壳风化,同时也有海水沉积,因此在计算式中要扣除化学沉积的CaO。Mclennan et al.(1993)提出了公式 $\text{CaO}^* = \text{CaO} - (10/3 \times \text{P}_2\text{O}_5)$, 对其进行扣除,当CaO的摩尔数小于 Na_2O 时,则采用校正过的CaO进行计算,反之则采用 Na_2O 的摩尔数计算。此外,由于硅酸盐矿物风化时对K进行吸附,因此,要使用公式(2)(Panahi et al., 2000)对K进行校正。

$$\text{K}_2\text{O}_{\text{校正}} = (m \times \text{Al}_2\text{O}_3 + m \times (\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})) / (1 - m) \quad (2)$$

式中 $\text{K}_2\text{O}_{\text{校正}}$ 代表校正后的钾含量, $m = \text{K}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为母岩元素组分。研究表明, CIA 在 50~65 之间为干冷气候, 65~85 之间为暖湿气候, 85~100 之间为热湿气候(Bai Y Y et al., 2015)。天鹅坪组-陡岭坳组页岩(CaO 小于 40% 的样品)整体 CIA 值处于 70~80 之间, 为暖湿气候。但天鹅坪组中部页岩的 CIA 值约为 61, 显示为干冷气候, 应代表杜内中期冰期在本区的反映(鄧文昆等, 2007; 陈孝红等 2022)。

4.2 海平面变化

在氧化条件下, Ce^{4+} 很难溶解于海水, 在氧化的水体中体现为 Ce 的负异常($\delta\text{Ce} > 1$), 相对应在沉

积物中表现为 Ce 元素的正异常; 相反在还原的水体中, Ce^{3+} 溶解度增加, 海水中的 Ce 元素相对较高, 造成了沉积物中 Ce 元素的负异常。随着海水深度不断加深, 氧气浓度越来越低, 沉积物中 Ce 元素逐渐减少, δCe 表现出负异常, 因此利用 Ce 元素异常可以间接判断海平面变化。Wilde et al.(1996)根据这一原理研究了苏格兰奥陶纪-志留纪古海平面变化, 发现 δCe 曲线变化与海平面升降相反。研究区内 δCe 在天鹅坪组下部自下而上逐步下降, 至中部以后转为上升, 在 CIA 较小处 δCe 较高(表 3), 反映了研究区的海平面变化受气候影响, 在气候较冷时期, 海平面较低(图 2)。

4.3 碎屑物质输送

陆源碎屑的输送对有机质的富集具有多重影响, 可以稀释有机质的含量, 也可以夹带有机质沉积到海底增加有机质的丰度(Canfield, 1994)。Al、Zr、Ti 被广泛应用于表征陆源碎屑输入的强弱(李浩等, 2017; 方朝刚等, 2022)。天鹅坪组页岩中 Al、Zr、Ti 含量总体表现为较高水平, 指示陆源碎屑输入较多; 陡岭坳组的值变化不明显, 但陆源碎屑物质输入明显低于天鹅坪组。结合海平面变化曲线发现, 在海平面较高时陆源碎屑物质较多, 在海平面低时陆源物质较少。造成这种变化的原因可能为湘中坳陷区毗邻雪峰隆起, 自中泥盆世雪峰隆起已隆升为剥蚀区, 气候变暖导致风化作用加剧进而增加了陆源碎屑的供给。

4.4 古生产力

海洋古生产力是评价水体产生有机质能力的重要指标, 也是影响有机质富集的重要因素(Mort et al., 2007)。Ba 元素在海水中主要以稳定的 BaSO_4 形式存在, 被广泛用来评价海洋古生产力(沈俊等, 2011; Chen C et al., 2016; 祝庆敏等, 2021)。沉积物中 Ba 元素的来源有很多, 一般有生物来源钡(生源钡)、陆源铝硅酸盐中钡、海底热液成因钡、底栖生物分泌钡(Dymond et al., 1992), 其中只有生源钡(Ba_{bio})能够反映生产力, 为此要使用公式(3)(Dymond, 1992)扣除陆源钡。

$$\text{Ba}_{\text{Bio}} = \text{Ba}_{\text{total}} - (\text{Al} \times \text{Ba} / \text{Al}_{\text{aluminum}}) \quad (3)$$

生源钡含量 $1000 \times 10^{-6} \sim 5000 \times 10^{-6}$ 指示环境较高的生产力水平, $200 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 指示中等生产

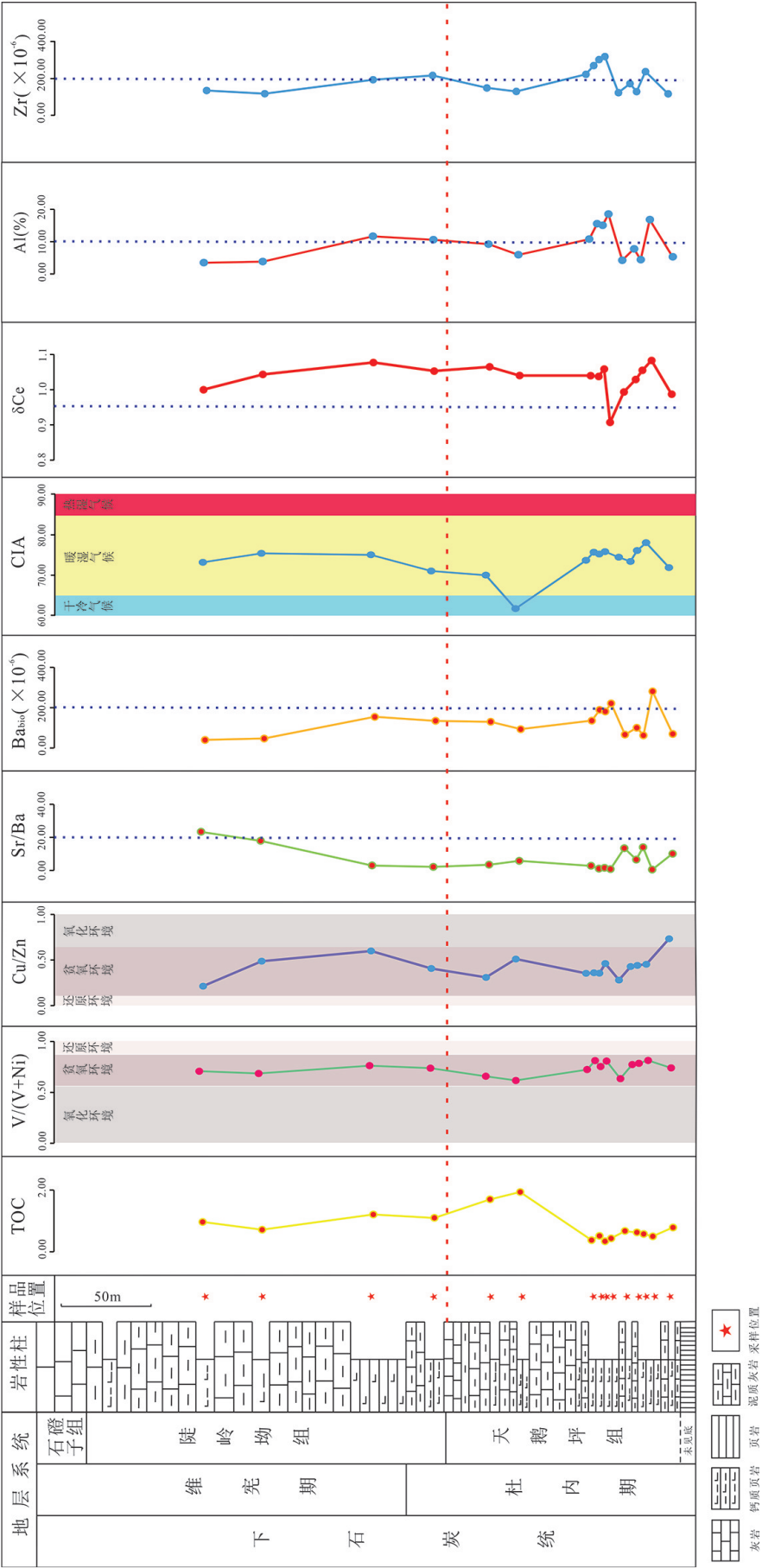


图2 涟源地区下石炭统黑色页岩氧化还原环境及沉积环境综合分析柱状图

Fig. 2 Comprehensive analysis column showing redox indicators and sedimentary environment of black shale of Lower Carboniferous in the Lianyuan area

力水平。根据计算,天鹅坪组生源 Ba 在 $63.08 \times 10^{-6} \sim 220.92 \times 10^{-6}$ 之间,均值 139.30×10^{-6} ;陡岭坳组为 $40.95 \times 10^{-6} \sim 154.95 \times 10^{-6}$,均值为 94.52×10^{-6} ,整体古生产力处于较低的水平。

早石炭世华南板块位于赤道附近,当时对华南板块具有影响的洋流都是自东向西的暖流,结合杜内期华南板块古地理特征与自华南板块西南方向发生海侵的证据(邵龙义, 1997)表明,大量淡水、营养物质及携带有机质的碎屑物质随洋流作用输送至湘中涟源地区,在途中受到古陆阻挡,携带有机质的碎屑物质、营养物质等可能随着洋流运移途中动能的不断减小,逐步发生沉降,使大部分有机质及营养物质在途中消耗,从而导致涟源凹陷内水体古生产力相对较低。区内 Ba_{bio} 自天鹅坪组从下到上先上升后下降,在 δCe 最小值(即海平面最高处)达到较大约为 221×10^{-6} ,然后随海平面下降,古生产力逐渐降低,证明该时期内海平面的升降变化影响着水体的古生产力。

4.5 氧化还原环境

氧化还原条件对有机质的累积具有重要的影响。泥页岩中部分化学元素对沉积过程中氧化还原条件变化相对敏感,其表现出的特征具有一定的环境指示意义,是定性恢复氧化还原环境的重要指标。因此,使用微量元素、稀土元素判别沉积水体的氧化还原条件是相对可靠的(Tribovillard et al., 2006; Chen L et al., 2021)。目前许多指标可以表征页岩的氧化还原条件, $V/(V+Ni)$ 、 Cu/Zn (熊小辉和肖加飞, 2011)等指标(表 4)是判断沉积水体氧化还原环境良好的指示标志。

天鹅坪组-陡岭坳组页岩中 $V/(V+Ni)$ 在 0.62~0.82 之间(表 2),指示页岩沉积于贫氧环境; Cu/Zn 的值在 0.20~0.73 之间(表 2),整体上也反映了贫氧环境。

表 4 氧化还原环境元素的判别指标(据熊小辉和肖加飞, 2011)

Table 4 Element discrimination parameters in redox condition (After Xiong X H and Xiao J F, 2011)			
	还原环境	贫氧环境	氧化环境
$V/(V+Ni)$	>0.84	0.60~0.84	<0.60
Cu/Zn	<0.21	0.21~0.63	>0.63

4.6 水体滞留程度

水体滞留程度与相对海平面变化相联系,水体滞留程度高表明盆地内相对闭塞,微量元素无法随底部海水与外界交换(Rowe et al., 2008)。相对封闭水体中氧气浓度较低,而在不同氧化还原环境中微量元素的行为不同,Mo、U 元素在缺氧、还原的环境中富集,据此可以使用其判断水体滞留程度(Algeo and Lyons, 2006; Algeo and Tribovillard, 2009)。但是,Mo、U 元素的使用相对具有一定的局限性,含有 Mn 和 Fe 的颗粒物质可以吸附海水中的 Mo,使沉积物中的 Mo 元素相对富集,破坏了指示滞留水体环境的准确性。为了排除碎屑物质的影响与稀释效应, Sweere et al. (2016) 根据 $Al-Co \times Mn$ 来判断水体滞留环境。Co 与 Mn 元素富集因子乘积大于 2 则代表了滞留的水体环境,小于 0.5 则代表了开放的上升流环境。

Mn 与 Co 元素富集系数利用公式(4) (Nance et al., 1976) 计算:

$$X_{EF} = (X/Al)_{\text{latol}} / (X/Al)_{\text{PASS}} \quad (4)$$

其中 X_{EF} 为样品中某一元素的富集系数, PASS 为后太古代澳大利亚页岩 (Taylor and McLennan, 1985) 数据。经过计算,天鹅坪组 $Co_{EF} \times Mn_{EF}$ 有大于 2 的,也有小于 0.5 的(图 3),表明天鹅坪组页岩的沉积环境变化较大,有学者认为这种分布模式可能是由于季节性洋流所导致的(肖斌等, 2021),结合 CIA 变化曲线(图 2),该时期内气候出现冷热交替与季节性变化相似,证明了涟源凹陷水体滞留程度变化与气候相关。结合海平面变化曲线发现,在海平面高值时水体滞留程度增加,而海平面较低时水体滞留程度也相对较低。海平面在大量淡水的注入下升高,而与此同时由于上层海水的盐度、温度与底水不均一而导致了在凹陷内上层水体与底水发生了分层,底水无法与上部淡水交换使得底水相对较为封闭;气候变冷,海洋中淡水形成冰川,造成全球海平面下降,使得涟源地区表层水体的温度下降、盐度升高逐渐与底水趋于相似,使得水体分层减弱,底水与表层水体交换,滞留程度减小。

4.7 TOC 与氧化还原环境和古生产力关系

利用天鹅坪组-陡岭坳组的有机碳质量分数与氧化还原参数、古生产力参数等沉积环境指标的

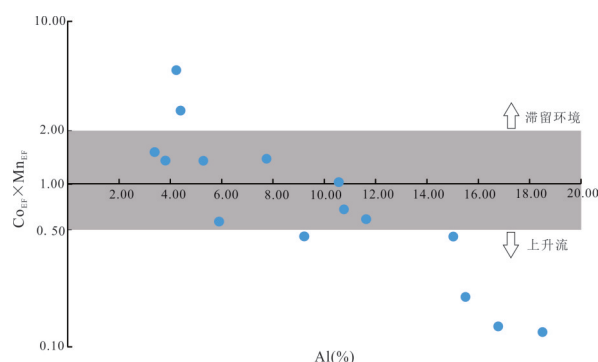


图3 涟源地区下石炭统黑色页岩水体滞留程度分析

Fig.3 Analysis of water mass restricted degree of black shale of Lower Carboniferous in the Lianyuan area

相关性关系,分析天鹅坪组-陡岭坳组页岩有机质富集机理。图4中展示了天鹅坪组-陡岭坳组TOC与氧化还原环境($V/(V+Ni)$)、 Cu/Zn 、古生产力(生源Ba)和陆源碎屑(Al 、 Zr 、 Ti)指标的相关关系。

天鹅坪组-陡岭坳组页岩中TOC与指示氧化还原条件的 Cu/Zn (相关系数为0.0168)呈现微弱的正相关关系,与 $V/(V+Ni)$ 具有负相关关系(相关系数为0.6716)。TOC与古生产力指标生源 Ba_{bio} 无直接相关性,说明古生产力也不是直接控制有机质富集的因素。TOC与可指示陆源碎屑物质 Al 、 Zr 、 Ti 元素呈现一

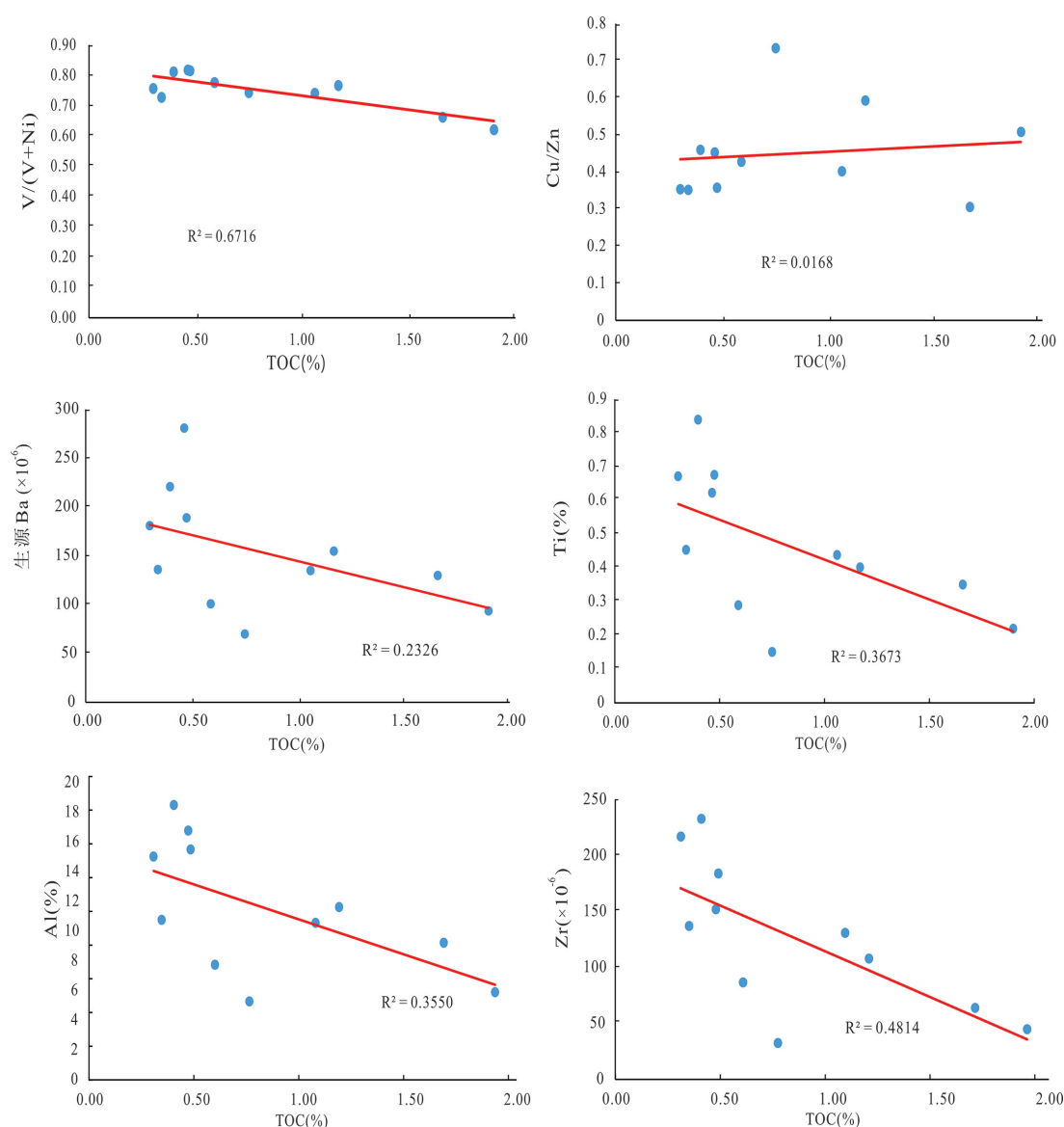


图4 天鹅坪组-陡岭坳组页岩TOC与 $V/(V+Ni)$ 、 Cu/Zn 、生源Ba、Ti、Al、Zr相关性

Fig.4 Cross plots of $V/(V+Ni)$, Cu/Zn , Ba_{bio} , Ti , Al and Zr versus TOC of Tianeping and Doulingao Formation

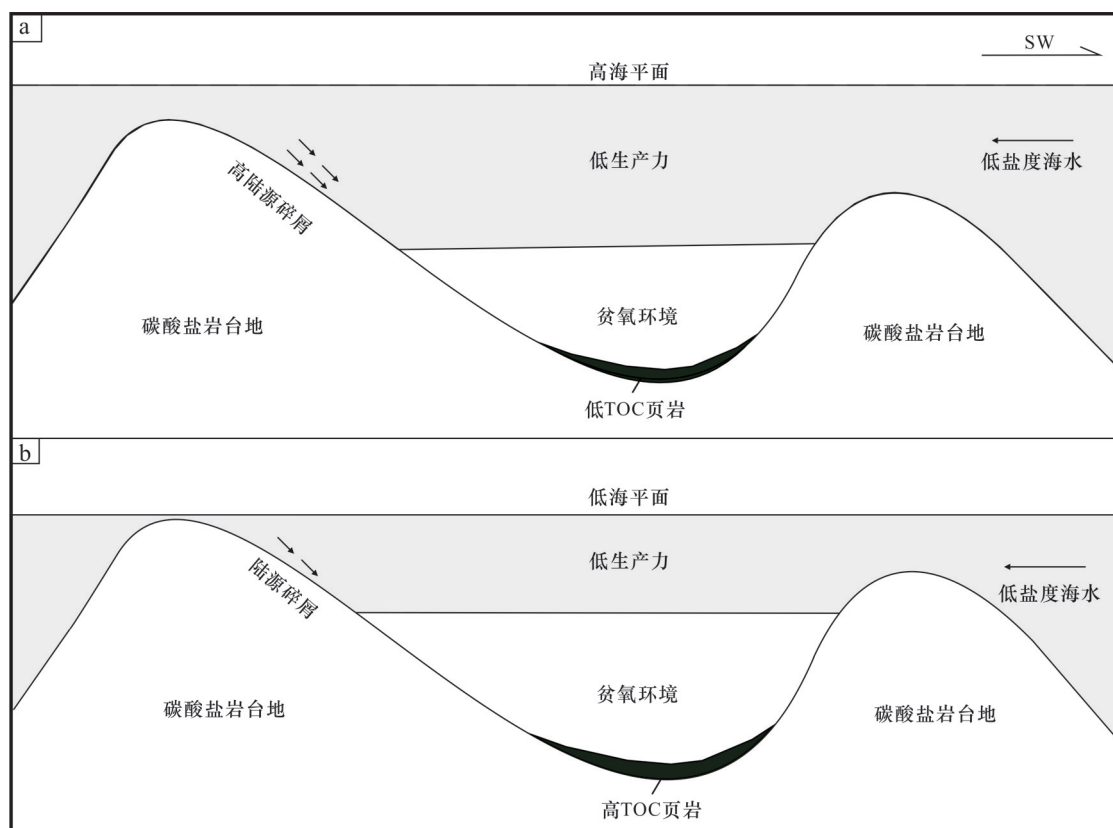


图5 涟源地区黑色页岩有机质富集模式(a为高海平面时期; b为低海平面时期)

Fig. 5 Organic matter enrichment model of black shale in the Lianyuan area(a. High sea-level stage; b. Low sea-level stage)

定的相关关系,在一定程度上表明,TOC随着陆源碎屑输入量的增大而减小,说明页岩有机质富集是由陆源碎屑控制的。

5 有机质富集模式

根据湘中涟源地区 TOC 值与元素分析对比,结合区域沉积构造背景,总结归纳出了湘中地区下石炭统天鹅坪组、陡岭坳组页岩有机质的富集模式图(图5)。

早石炭世湘中坳陷区继承了晚泥盆世的古地理格局,受气候波动影响全球海平面在此期间发生频繁变化。但涟源凹陷内水体一直处于较深的贫氧环境,这为页岩形成及有机质富集提供了场所,而淡化海水携带营养物质涌入涟源凹陷,为天鹅坪组-陡岭坳组黑色页岩形成提供了物质基础。一般来说,水体较深、古生产力高,更有利于有机质的富集,通过各项沉积环境指标的对比分析(图2),发

现经历了杜内中期成冰事件后,气候整体上变冷、低海平面变低,页岩的 TOC 变高。

杜内早期有机碳埋藏率下降,大气二氧化碳浓度上升,气候变暖导致南冈瓦纳冰川融化,涟源地区海平面相对较高(图5a),大量带有营养物质的淡水涌入涟源凹陷,增强了上层透光带细菌、生物的生命活动,使得海洋表层的生产力略高于低海平面时期,但与此同时,温暖气候可能导致雪峰隆起风化程度加强,加大了陆源碎屑的输入,极大地稀释了页岩中的有机质形成低 TOC 页岩。杜内中期成冰事件导致海平面处于较低状态(图5b),相较于高海平面时期水体表层营养物质减少、表层海水温度较低,透光带生物活动强度减小,生产力低下。周围古陆由于气候变冷,风化作用降低,对涟源凹陷内的碎屑供应略有减少,对有机质的稀释作用减弱,页岩中保存下来的 TOC 高于高海平面状态形成高 TOC 页岩。气候的冷热交替导致海水滞留程度呈现出与现代海洋季节性变化相同的趋势,但凹陷内

水体一直为贫氧、弱分层环境。虽然水体透光带的生物活动以及底水的贫氧环境为有机质的累积提供了良好的基础,但陆源碎屑的输入不断稀释沉积物中的有机质,形成了贫氧、低生产力条件下以陆源碎屑供应为主导的有机质富集模式,即“稀释模式”。

6 结论

(1)地球化学特征表明湘中涟源地区下石炭统天鹅坪组-陡岭坳组形成于气候波动、海平面振荡变化背景下,凹陷内水体为贫氧环境,水体滞留程度随气候、海平面变化呈现出现代海洋季节性变化的特点。

(2)湘中涟源凹陷早石炭世水体生产力、陆源输送与滞留程度等沉积环境与气候波动所驱使的海平面变化相关。

(3)天鹅坪组-陡岭坳组页岩沉积时期为贫氧、低生产力背景,且与氧化还原环境、古生产力指标无明显相关性,和陆源碎屑具有一定相关性,表明天鹅坪组-陡岭坳组页岩有机质富集主要受控于陆源碎屑的输入。

参考文献:

- 陈践发, 张水昌, 鲍志东, 孙省利, 吴庆余. 2006. 海相优质烃源岩发育的主要影响因素及沉积环境 [J]. 海相油气地质, 11(3):49-54.
- 陈林, 张保民, 陈孝红, 蒋恕, 张国涛, 李海, 陈平, 林卫兵. 2021. 湘中坳陷邵阳凹陷余田桥组泥岩岩相及其成因演化 [J]. 地球科学, 46(4):1282-1294.
- 陈孝红, 石万钟, 田巍, 何红生, 李海. 2022. 湘中坳陷石炭系天鹅坪组富有机质页岩的形成与页岩气富集机理 [J]. 中国地质, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220111.1730.003.html>
- 方朝刚, 章诚诚, 林洪, 韩瑾, 滕龙, 周道荣, 李建青. 2022. 下扬子西南部前渊带晚奥陶世—早志留世黑色页岩沉积环境与有机质富集机理——以 WDD1 井为例 [J]. 地球科学与环境学报, 44(2):312-326.
- 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 王保华, 徐文, 左宗鑫, 王苗, 刘娅昭. 2017. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素 [J]. 地球科学, 42(10):1774-1786.

- 李绪龙, 张霞, 林春明, 黄舒雅, 李鑫. 2022. 常用化学风化指标综述:应用与展望 [J]. 高校地质学报, 28(1):51-63.
- 沈俊, 施张燕, 冯庆来. 2011. 古海洋生产力地球化学指标的研究 [J]. 地质科技情报, 30(2):69-77.
- 熊小辉, 肖加飞. 2011. 沉积环境的地球化学示踪 [J]. 地球与环境, 39(3):405-414.
- 敬乐, 潘继平, 徐国盛, 马若龙, 袁海锋, 罗小平, 吴昌荣. 2012. 湘中拗陷海相页岩层系岩相古地理特征 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 39(2):215-222.
- 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 2009. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测 [J]. 石油学报, 30(4):484-491.
- 鄢文昆, 张雄华, 蔡雄飞, 张扬. 2007. 华南地区石炭纪-早二叠世早期成冰期的地球生物学过程与烃源岩的形成 [J]. 地球科学, 32(6):803-810.
- 邵龙义. 1997. 湘中早石炭世沉积学及层序地层学 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 6-7.
- 田巍, 陈孝红, 李旭兵, 岳勇, 李海, 刘安. 2021. 湘中涟源凹陷下石炭统天鹅坪组页岩气成藏条件及主控因素 [J]. 地质科技通报, 40(5):54-63.
- 肖斌, 刘树根, 冉波, 李智武, 叶叶豪, 韩雨樾. 2021. 四川盆地北缘五峰组和龙马溪组沉积构造格局研究 [J]. 地球科学, 46(7):2449-2465.
- 张金川, 徐波, 聂海宽, 汪宗余, 林拓. 2008. 中国页岩气资源勘探潜力 [J]. 天然气工业, (6):136-140+159-160.
- 郑淇. 2021. 河南浙川滔河盆地白垩纪古环境演变 [D]. 兰州大学硕士学位论文, 62-64.
- 祝庆敏, 卢龙飞, 潘安阳, 陶金雨, 丁江辉, 刘旺威, 黎茂稳. 2021. 湘西地区下寒武统牛蹄塘组页岩沉积环境与有机质富集 [J]. 石油实验地质, 43(5):797-809.
- Algeo T J, Lyons T W. 2006. Mo-total Organic Carbon Covariation in Modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions [J]. Paleoclimatology, 21(1):1-23.
- Algeo T J, Tribovillard N. 2009. Environmental analysis of paleoclimatic systems based on Molybdenum-Uranium covariation [J]. Chemical Geology, 268(3): 211-225.
- Bai Y Y, Liu Z J, Sun P C, Liu R, Hu X F, Zhao H Q, Xu Y B. 2015. Rare earth and major element geochemistry of Eocene Fine-grained Sediments in oil shale- and coal-bearing layers of the Meihe basin, northeast China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 97: 89-101.
- Buggisch W, Joachimski M M, Sevastopulo G, Morrow J R. 2008. Mississippian $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and conodont apatite $\delta^{18}\text{O}$

- records — Their relation to the Late Palaeozoic Glaciation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 268(3-4): 273-292.
- Canfield D E. 1994. Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments [J]. *Chemical Geology*, 114: 315-329.
- Chen C, Mu C L, Zhou K K, Liang W, Ge X Y, Wang X P, Wang Q Y, Zheng B S. 2016. The geochemical characteristics and factors controlling the organic matter accumulation of the Late Ordovician-Early Silurian black shale in the Upper Yangtze Basin, South China [J]. *Marine And Petroleum Geology*, 76: 159-175.
- Chen L, Jiang S, Chen P, Chen X H, Zhang B M, Zhang G T, Lin W B, Lu Yong-chao. 2021. Relative sea-level changes and organic matter enrichment in the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi Formations in the Central Yangtze area, China [J]. *Marine And Petroleum Geology*, 124: 104809.
- Dymond J, Suess E, Lyle M. 1992. Barium in deep sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity [J]. *Paleoceanography*, 7:163-181.
- Gallego-Torres D, Martínez-Ruiz F, Paytan A, Jiménez-Espejo F J, Ortega-Huertas M. 2007. Pliocene-Holocene evolution of depositional conditions in the eastern Mediterranean: Role of anoxia vs. productivity at time of sapropel deposition [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 246(2-4): 424-439.
- Kevin M B, George J G, ALAN R C, Paul J M, Toni J A S. 2005. Production, Destruction, and Dilution—The Many Paths to Source-Rock Development [M]. *SEPM Special Publications*, 82:61-101.
- Mort H, Jacquat O, Adatte T, Steinmann P, Föllmi K, Matera V, Berner Z, Stüben D. 2007. The Cenomanian/Turonian anoxic event at the Bonarelli Level in Italy and Spain: enhanced productivity and/or better preservation [J]? *Cretaceous Research*, 28(4): 597-612.
- Nance W B, Taylor S R. 1976. Rare earth element patterns and crustal evolution—I. Australian post-Archean sedimentary rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40 (12): 1539-1551.
- Panahi A, Rainbird R H, Young R H. 2000. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Quebec, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(13): 2199-2220.
- Rowe H D, Loucks R G, Ruppel S C, Rimmer S M. 2008. Mississippian Barnett Formation, Fort Worth Basin, Texas: Bulk geochemical inferences and Mo-TOC constraints on the severity of hydrographic restriction [J]. *Chemical Geology*, 257(1-2): 16-25.
- Sageman B B, Murphy A E, Werne J P, Ver Straeten C A, Hollander D J, Lyons T W. 2003. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian basin [J]. *Chemical Geology*, 195 (1-4): 229-273.
- Sweere T, van den Boorn S, Dickson A J, Reichart G J. 2016. Definition of new trace-metal proxies for the controls on organic matter enrichment in marine sediments based on Mn, Co, Mo and Cd concentrations [J]. *Chemical Geology*, 441:235-245.
- Tan Z Z, Lu S F, Li W H, Zhang Y Y, He T H, Jia W L, Peng P A. 2019. Climate-driven variations in the depositional environment and organicmatter accumulation of lacustrine mudstones: Evidence from organic and inorganic geochemistry in the Biyang Depression, Nanxiang Basin, China [J]. *Energy & Fuels*, 33(8): 6946-6960.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford, Britain: Blackwell Scientific Publication, 117-140.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. *Chemical Geology*, 232(1-2): 12-32.
- Wilde P, Quinby-hunt M S, Erdtmann B. 1996. The whole-rock cerium anomaly: a potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of the anoxic facies [J]. *Sedimentary Geology*, 101: 43-53.
- Yao L, Qie W K, Luo G M, Liu J S, Algeo T J, Bai X, Yang B, Wang X D. 2015. The TICE event: Perturbation of carbon-nitrogen cycles during the mid-Tournaisian (Early Carboniferous) greenhouse-icehouse transition [J]. *Chemical Geology*, 401: 1-14.