

论地学幸存者效应

——以中上扬子五峰组—龙马溪组页岩沉积环境为例

毛小平¹⁾, 陈修蓉²⁾

1)中国地质大学(北京), 北京 100083; 2)清华大学, 北京 100084

摘 要: 黑色页岩记录了大量古环境信息, 与伴生的各种成矿元素、地质现象之间可能存在密切的成因和空间关系。以黑色页岩为切入点, 准确分析其沉积环境和有机质的富集规律, 将有助于寻找大矿、富矿, 并能对一些重大地质事件进行更为合理的解读。因此本文研究具有重要意义。通过分析现代沉积固碳规律, 结合古代环境的研究, 探讨了五峰组—龙马溪组黑色页岩的沉积环境及其伴生元素的相关性, 提出了地学幸存者效应。结果表明, 较封闭的水体环境是有机质及伴生矿物质聚集的场所, 富集后成为地质历史的幸存者保存至今, 而较开阔的水体环境因稀释和分解等原因无法有效富集。沉积物中有机质的分解效率对温度的敏感性远大于氧化还原条件。在寒温带, 低分解效率更易保存和富集有机质。因此得出结论, 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩发育于冷湿气候和海退过程下的较封闭的潟湖环境; 气候和水体封闭性是影响页岩沉积时期有机质富集的两个主要因素; 富有机质的页岩与其伴生元素之间不存在因果关系, 符合地学幸存者效应。本研究将为我们提供一个新的视角, 帮助理解页岩有机质的富集环境。

关键词: 黑色页岩; 沉积环境; 古气候; 局限环境; 幸存者偏差

中图分类号: P618 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.111511

The Survivor Effect of Geoscience: A Case Study of the Shale Sedimentary Environment of the Wufeng–Longmaxi Formation in the Middle–Upper Yangtze Region

MAO Xiaoping¹⁾, CHEN Xiurong²⁾

1) China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

2) Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: Black shale serves as a significant repository of paleoenvironmental information, exhibiting a close genetic and spatial relationship with various associated mineralization elements and geological phenomena. By focusing on black shale and accurately analyzing its depositional environment and the mechanisms governing organic matter enrichment, researchers can identify large ore deposits and rich ore bodies, thereby offering a more nuanced interpretation of major geological events. Consequently, this research holds substantial significance. This study discusses the correlation between the depositional environment of the Wufeng Formation–Longmaxi Formation black shale and its associated elements by analyzing the principles of modern sedimentary carbon sequestration and integrating them with ancient environmental studies. Furthermore, the concept of the geoscientific survivor effect is proposed. The findings suggest that relatively closed water environments serve as focal points for the accumulation of organic matter and associated minerals. Following enrichment, these materials become remnants of geological history, preserved to the present day, whereas more open water environments are less effective at enrichment due to dilution and decomposition. Notably, the efficiency of organic matter decomposition in sediments is significantly more sensitive to temperature variations than to redox conditions. In cold temperate

本文由国家能源碳酸盐岩油气重点实验室开放基金课题“基于浅陆封寒思路的深层-超深层古老烃源岩有机质富集机制”(编号: 33550000-24-ZC0613-0105)和贵州省科技计划项目“矿产资源数字化勘查开发技术推广”(编号: 黔科合成果[2022]重点 003)联合资助。

收稿日期: 2024-07-13; 改回日期: 2024-10-21; 网络首发日期: 2024-11-18。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 毛小平, 男, 1965 年生。博士, 教授。主要从事矿产普查与勘探研究。E-mail: maoxp9@163.com。

zones, low decomposition efficiency facilitates the preservation and enrichment of organic matter. It can be concluded that the Wufeng Formation–Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin developed in a relatively closed lagoon environment characterized by a cold and humid climate, alongside a marine regression; climate and water closure are the two primary factors influencing organic matter enrichment during the shale deposition period. Importantly, there is no causal relationship between organic-rich shale and its associated elements, which aligns with the geological survivor effect. This study offers a novel perspective that enhances our understanding of the enrichment environment of shale organic matter.

Key words: black shale; sedimentary environment; paleoclimate; limited environment; survivor bias

随着我国页岩油气的大规模勘探与开发,页岩油气的富集机理成为新的研究热点,尤其是其沉积环境的研究。由于黑色页岩的发育涉及多个领域,许多地学问题、地学现象以及黑色页岩容矿型矿床等均与页岩相关。多达 25 种矿产与黑色岩系存在密切的成因和空间关系(李治兴等, 2022)。黑色页岩通常被认为是在缺氧环境中形成,因此一些学者提出了缺氧成矿模式(范德廉等, 1998)。在多数黑色泥页岩中铀元素的富集也被观察到,这可能与有机质对铀元素的强吸附作用有关(秦艳等, 2009)。因此,深入解剖黑色页岩的发育,以其沉积环境为突破口,将有利于正确把握这些矿产的富集环境及一些地质现象的解译。

目前几乎一致认为,在暖湿气候条件下,深水缺氧环境更有利于有机质的富集(柳蓉等, 2021; 王红岩等, 2023); 层序地层学提出,最大洪泛期密集段或高海平面有利于有机质的富集(邹才能等, 2013); 大洋缺氧事件在地质记录中通常被识别为广泛存在的黑色页岩,对应于碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)的正偏移(Schlanger et al., 2010); 火山活动驱动了大洋缺氧,并促进了黑色页岩的发育(Walker-Trivett et al., 2024); 大洋缺氧导致黑色页岩的广泛分布,并引发生物快速灭绝(沈树忠等, 2017)。这些涵盖多个学科的经典理论互为印证,形成了一个与黑色页岩有关的完美闭环。

然而,这个闭环存在两个严重的冲突:空间冲突和气候冲突亟待解决。黑色页岩及其伴生的多金属元素中,这些金属元素显然并非在本地产生,除了热液来源外,主要来自异地,并且只能在相对封闭或体量较小的水体中富集,以避免被稀释。这与黑色页岩有机质富集的环境产生了空间冲突:黑色页岩有机质主要来源于内源,盆地中心深水强还原环境(深水陆棚)。环境科学认为,土壤、湿地和水体的碳储会随着气温升高而释放出来,从而导致碳储降低(Chen et al., 2024)。简而言之,全球气温升高,并不利于固碳,这与黑色页岩有机质富集于暖湿气候存在矛盾,即第二个冲突:气候冲突。

如果这两个冲突能被证实,将会影响整个闭环。为此,本文提出两个科学问题:(1)水体封闭性

对富有机质页岩的影响,页岩与伴生元素、伴生的地质现象之间存在相关性,但是否存在因果联系;(2)气候波动对有机质和成矿元素的富集是否有影响。

拟进行的研究思路如图 1 所示,主要围绕水体封闭性和气候两个方面展开;数据来源于实地考察、实测以及一些公开的文献和国际公开的数据库。

1 黑色页岩与其它成矿元素或地质现象伴生现象

勘探实践证实,富有机质的页岩大多数发育于局限环境(刘树根等, 2011; 王玉满等, 2017)。在这种环境下,除了有机质的富集,还伴随着多种成矿元素的异常富集,或与煤、大量动植物化石、火山灰、铀等伴生。多数学者认为它们之间存在成因联系,是一种共生关系,主要包括三种类型。

(1)黑色页岩与火山活动的关系

黑色页岩地层往往能发现大量火山活动的证据。一般认为,火山活动可以导致水体缺氧(Walker-Trivett et al., 2024),从而促进生产力和有机质的保存。中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩(WLS)内部发育了多层斑脱岩,有机质丰度与斑脱岩发育的频次呈现相关关系,这被解读为火山灰促进了生产力(Frogner et al., 2001; Lin et al., 2011; 谢浩然等, 2023)。火山灰物质促进了笔石与藻类等富硅富钙生物勃发(王红岩等, 2022)。

(2)黑色页岩与煤、膏盐层等地层伴生现象

陕南紫阳蒿坪煤矿、大竹园矿区早志留世大贵坪组和梅子垭组的黑色页岩内含煤和笔石,为半咸水环境(邓宝, 1984)。安康南部奥陶系上统至志留系下统斑鸠关组的页岩含煤,有机物总量为 66.3%(王峰等, 2019)。黔西毕节大方背斜上二叠统龙潭组页岩与煤层频繁互层(贾立龙等, 2021)。北美志留纪与笔石页岩分布区相邻的沉积区可见大量的生物礁、膏盐(刘本培等, 1986); 塔里木盆地巴楚隆起西段的中下寒武统烃源岩是蒸发潟湖相, TOC 含量高,并与膏盐共生(崔海峰等, 2016)。这种伴生现象说明黑色页岩与这些浅水发育的地层存在关联,而非截然不同的沉积环境。

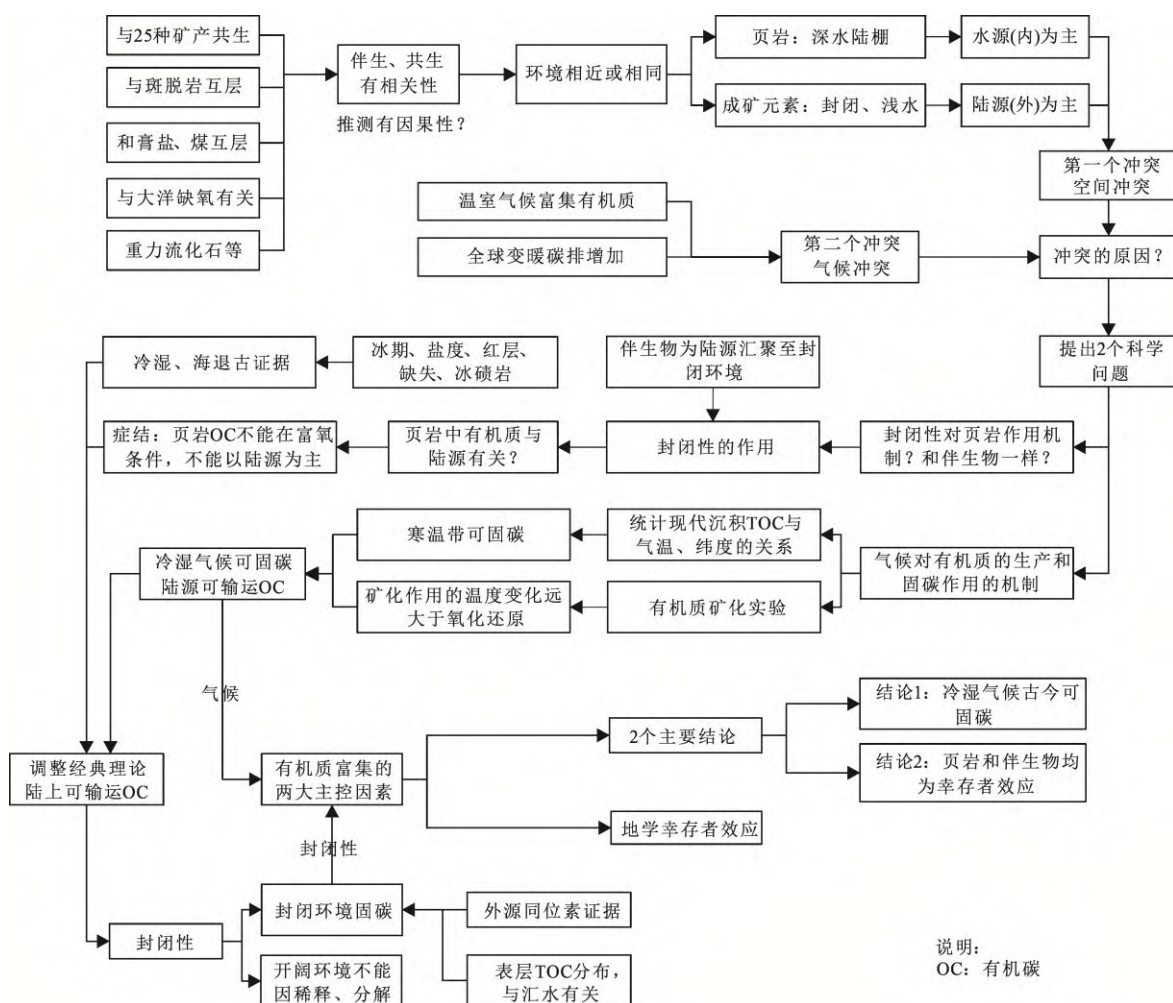


图 1 基于黑色页岩的地学幸存者效应研究思路
Fig. 1 Research ideas on the geological survivor effect

(3)与沉积型矿产有关

多数超大型沉积型矿产,如锰矿、磷矿、重晶石矿等与富有机质页岩伴生(范德廉等, 1998; 秦艳等, 2009; 李治兴等, 2022)。

在地质研究中,常进行两个因素间的相关性分析,以掌握规律。从逻辑上讲,相关性不一定有因果性;但有因果性,必须具备相关性,同时,还需具备时序性、排他性。时序性指的是先因后果,排他性指无其它原因。富有机质页岩的这些伴生现象表面上具有相关性,但它们之间可能没有因果联系,只是在封闭条件下洼地作为一个沉积可容纳空间,让它们大量聚集成矿。为此,下面有必要分析封闭性环境对有机质和成矿元素的影响。

2 水体封闭性对成矿元素富集的影响

沉积环境可以粗略地分为两种：面积相对较小的封闭水体环境、开阔水体环境。

2.1 开阔水体的水动力与有机质的富集特征

开阔水体环境主要包括无障壁的陆缘海、大陆架、大陆坡和大洋。其水动力强度较大, 主要体现

在波浪、潮汐和洋流。栾锡武等(2009)分析了南海北部陆架陆丰滩水深 190 m 的海底洋流,发现平均流速为 15 cm/s,最大 48 cm/s。在南海 159 m 深处,潮波引发的最大流速可达 75 cm/s(王文介, 2000)。在 Porcupine 深海平原深海底边界层(BBL)内,水深超过 4 800 m 的悬浮物浓度显示出明显的大小潮周期(Turnewitsch et al., 2017),深海海底流速达到 ± 0.15 m/s。在开阔大陆架和大陆坡上,主要发育细、粉砂,有较强的水动力。在浪基面之下,洋流的影响深度可达 300 m,发育大量沙波,在西太平洋某处海山,水深 2 000 m 处仍可观察到大量微型沙波(毛小平等, 2025b)。

面积较大的湖泊或内海, 从外形上看是封闭的, 但仍被视为开阔水体环境。比如地中海、黑海、贝加尔湖、兴凯湖等仍受波浪和一定量潮汐的影响。同时, 这些水体与陆地接触的面积小, 陆源补给少, 其表层沉积物总有机碳含量 $\text{TOC} < 0.5\%$ (表 1)。

开阔水体对有机质、矿物质和火山灰起到稀释作用。黄岩岛附近深海区域表层沉积物 TOC 小于 0.5%(夏志颖等, 2022)。在更深的洋壳表层, 沉积物

中的有机质大多<0.5%(Arculus et al., 2015)。古今大洋均无法富集有机质,李丽等(2008)在南海北部 3 428 m 水深处取样显示,代表现代环境的表层沉积物 TOC 为 0.56%;在 23.3 ka 时(大理盛冰期)TOC 较高,但也只有 1.5%。

目前,富有机质页岩的发育需要低能、局限环境的观点已基本达成共识,但均偏向于开阔的深水环境。孙省利等(2004)利用硅质岩地球化学手段证明,富有机质黑色岩系可发育于深海。更多学者认为,深水陆棚环境更有利于富有机质页岩的发育

(金之钧等, 2016)。水体越深越还原(即水体深度增加导致溶解氧减少)的观点已被地质学各个领域所接受。然而,最新研究证实,大多数现代湖泊的湖底的溶解氧含量并非处于缺氧状态,且随季节会出现周期性的氧含量变化,冬季水体整体呈富氧状态(毛小平等, 2025a);现代深水陆棚既非低能环境,也不具备页岩发育的条件,而是处于富氧环境,其表层沉积物贫有机质(表 1),以粉砂和细砂为主(毛小平等, 2025),水深大于 2 000 m 的大洋底均处于富氧状态(毛小平等, 2025a)。

表 1 不同水体环境表层沉积物中有机碳含量
Table 1 Organic carbon content in surface sediments of different water environments

井号、位置	经度/°	纬度/°	位置	面积/km ²	水深/m	TOC/%	地理环境	航次/文献
1. 大洋深钻								
U1437	139.02	31.79	日本南		2 115.9	0.26	大洋	350/IODP
U1450	87.67	8.00	孟加拉湾		3 655.3	0.40		354/IODP
U1451	88.74	8.00			3 607.2	0.30		
U1469	73.00	4.91	印度洋北		426.9	0.15		359/IODP
U1334	−132.00	8.00	太平洋东		4 799.0	0.18		320/IODP
U1527A	179.10	−34.86	太平洋		1 700.0	0.03		376/IODP
U1332	−139.00	11.00	太平洋东		2 700.0	0.18		320/IODP
U1438	134.20	27.22	日本南		6 400.0	0.25		351/IODP
	134.32	27.38			4 700.1	0.52		351
U1473A	57.27	−32.70	印度洋南		580.0	0.50		360/IODP
U1475	25.26	−41.43	非洲南		2 680.8	0.41		361/IODP
U1453	86.79	8.00	孟加拉湾		3 690.5	0.70		354/IODP
南海	118.00	15.00	黄岩岛附近		4 000.0	0.30	蔡观强等, 2018	
	115.00	12.00	南沙群岛北		4 100.0	0.80		
U1476	41.77	−15.82	非洲东南		2 176.7	0.25	大陆架	361/IODP
U1477	54.89	−19.35	印度洋		440.5	0.60		
U1478	34.77	−25.82	非洲东南		500.4	0.56		
U1381C	−84.16	8.43	中美洲		2 064.6	2.00		
C0023A	134.97	32.37	日本南		4 775.5	0.50		370/IODP
	134.95	32.37			600.0	0.84		370
U1534	−58.63	−53.20	大西洋南		646.9	0.90		382/IODP
南海	111.00	18.00	海南岛东南		1 000.0	1.00		曹梦莉等, 2017
	114.00	21.00	南海北部		80.0	0.30		
2. 半封闭海湾/陆表海								
海湾	120.19	35.94	唐岛湾	10.0	4.5	1.10	海湾	蒋增杰等, 2007
	119.70	26.40	罗源湾	161.0	6.0	1.26		高文华等, 2012
	122.18	37.50	威海湾	56.0	8.0	1.62		程波, 1989
	114.92	22.74	考洲洋	29.0	2.0	0.40		甘居利等, 2002
3. 外形封闭的开阔环境								
湖泊	132.40	45.30	兴凯湖	4 380.0	10.0	1.00	开阔湖泊	孙黛茜等, 2023
	102.89	24.59	抚仙湖	216.0	180.0	2.20		宋以龙等, 2016
	34.40	42.00	黑海南	436 402.0	1 500.0	1.20		Fulya et al., 1992
	28.00	41.80	黑海西南	436 402.0	600.0	1.50		
	105.00	51.70	贝加尔湖南	31 500.0	1 400.0	3.00		Sobek et al., 2009
	108.30	3.70	贝加尔湖北	31 500.0	5.4	1.30		
4. 封闭水体								
湖泊	8.98	45.99	意大利卢加诺	37.4	3.0	5.40	封闭湖泊	Sobek et al., 2009
	15.26	59.89	瑞典 Svarttjärn	7.8	6.0	31.00		
	132.40	45.37	小兴凯湖	176.0	3.0	5.00		孙黛茜等, 2023
	102.79	24.35	星云湖	34.7	7.0	21.00		田洋洋, 2020
	102.77	24.16	杞麓湖	36.7	4.0	28.00		尹鹏飞等, 2023
	104.24	26.85	草海	31.0	2.0	23.00		李林蔚等, 2022

矿物质和火山灰在开阔环境中会被稀释。1991 年, 菲律宾皮纳图博火山的火山灰沉降物进入南海。在距离火山口 200 km 的南海洋底表层沉积物中, 火山玻璃的含量从 2005 年的 41%(陈忠等, 2005), 下降至 2022 年的 20%(李学杰等, 2022)。抚仙湖及相邻的星云湖的重金属元素丰度是南海北部海域的 2~32 倍(表 2)。可以看出, 这些元素与有机质的丰度之间呈数学上的正相关, 但没有成因联系。

2.2 封闭的水体环境与有机质的富集

封闭的水体环境对于有机质和矿物质的富集至关重要, 面积越小越有利。Ferland et al.(2012)统计得出, 湖泊沉积碳储量与面积呈反相关关系。陆源有机质的贡献在有机质富集中扮演着更为重要的角色(毛小平等, 2025b)。现代沉积只能在较封闭的水体环境中富含有机质。青岛市唐岛湾为半封闭的海湾, 其水体本身的生产力并不高(林志裕等, 2011)。但由于有周围陆地有机碳源的供给, 海滩及

水下表层沉积物均富含有机质, TOC>1%(图 2)。海湾外为较开阔的黄海, 主要发育粉砂(王中波等, 2016), TOC<0.5%(陈彬等, 2011)。

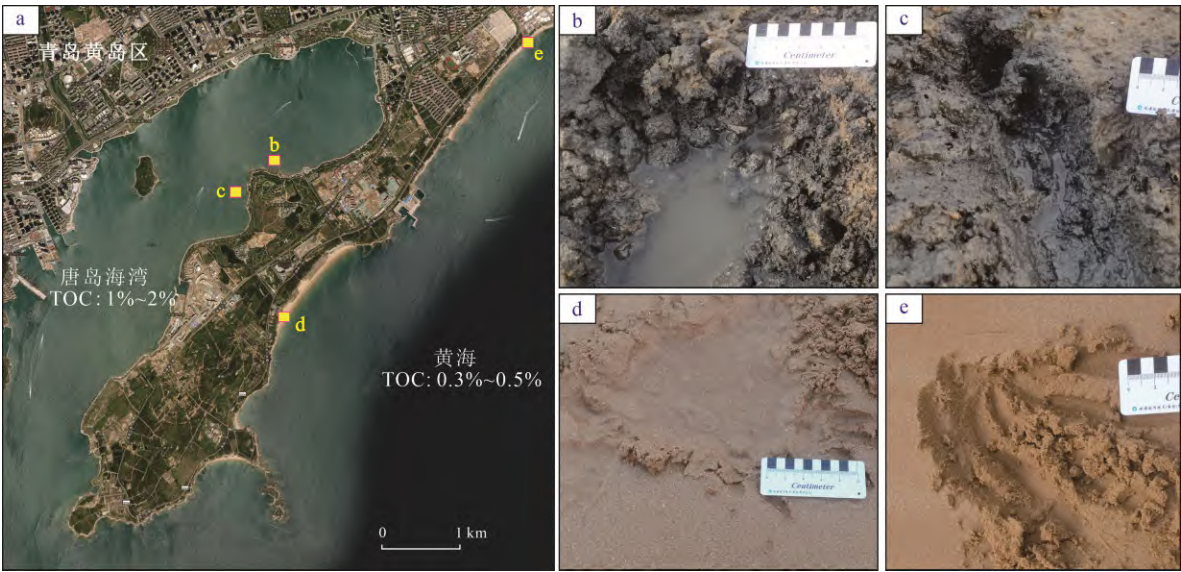
古环境也基本类似。许多学者在进行盆地分析后往往得出一个结论, 富有机质的烃源岩发育于局限或受限环境中(刘树根等, 2011; 王玉满等, 2017; 陈旭等, 2018)。澳大利亚 Bonaparte 盆地页岩发育于局限海环境(侯宇光等, 2015); 美国 Midland 盆地上宾夕法尼亚统晚石炭世 Cline 页岩发育于一高度受限的封闭环境(彭俊文, 2022); 大高加索盆地在侏罗纪为受限的半封闭海盆, 发育了黑色页岩(Blackbourn et al., 2021)。局限洼地在波斯湾盆地烃源岩形成的过程中起到了关键作用(杨泽光等, 2022)。

由此看来, 富有机质页岩和其他成矿物质主要发育于较封闭、面积相对较小的水体环境。这涉及到前述第一个冲突, 空间冲突。在同一地层中, 有机质与其伴生元素来自截然不同的环境。伴生元素(成矿

表 2 封闭环境与开阔环境元素对比
Table 2 Comparison of elements in closed and open environments

地点	w _B /(mg/kg)								TOC/%	文献来源
	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg		
星云湖	123.82	42.14	85.69	177.13	1.06	113.34	17.70	2.50	21.0	夏建东等, 2020
抚仙湖	87.31	46.52	78.94	142.18	1.67	62.23	18.72	87.48	2.2	白广一等, 2023
南海北部	38.74	17.69	8.36	55.73	0.05	17.84	4.56	47.01	0.6	王喻鸣等, 2022
东海	77.20	—	20.00	78.40	0.21	21.80	—	—	0.4	李龙强等, 2020
冲绳陆架	48.00	24.67	13.00	49.00	—	83.00	—	—	—	蒋富清等, 2002
冲绳陆坡	60.00	38.86	21.00	86.00	—	90.00	—	—	—	
冲绳槽底	74.00	56.09	46.00	108.00	—	88.00	—	—	—	

注: —表示无数据。



a—采样点位平面图; b, c—唐岛海湾内半封闭环境(点位见 a); d, e—海湾外黄海开阔环境(点位见图 a)。
a—sampling point location plan; b, c—semi-enclosed environment within Tangdao bay (locations refer to Fig. a);
d, e—open environment of the Yellow Sea beyond the bay (locations refer to Fig. a).

图 2 青岛唐岛湾内及湾外表层沉积物有机质富集程度特征

Fig. 2 Characteristics of organic matter enrichment in sediments from the inner and outer surfaces of Tangdao Bay, Qingdao

物质)主要来自于陆地;而唯独其中的有机质主要来自内源。本文前期提出海相页岩有机质的富集需浅陆封寒四要素(毛小平等, 2025b), 陆即近陆远水及陆源有机质的补给。从表 1 也能看出来, 离陆地越远 TOC 越低, 和 Hartnett et al.(1998)提出的海洋中 90%以上的有机碳埋藏在大陆边缘沉积物中是相吻合的。

但有机质是如何输运到水体中的, 就存在疑惑。经典理论认为, 有机质几乎无法在富氧条件下存在, 暴露在富氧环境则会被分解。这是有机质不能异地搬运的症结所在。为此, 必须提到有机质富集的另一个重要的控制因素——温度, 即第二个科学问题: 气候对有机质的生产和固碳作用的机制。

3 固碳作用与气候、氧化还原条件的关系

从两个方面来论述: 一是现代沉积有机质富集与气候的统计关系; 二是有机质矿化实验与温度、氧化还原条件的关系。

3.1 现代有机质的富集特征

在现代沉积中, 气候对有机质的富集(固碳)影响较大。在寒温带地区, 由于气温低且分解作用较弱, 有机质几乎没有消耗或没有足够的时间被分解。全球湿地高碳储主要分布在北半球寒温带, 纬度为 48°至 72°之间。我国资源量大于 1 000 万 t 的特大泥炭矿床中, 位于高原寒温带(青藏高原和云贵高原)有 41 个, 占全国千万吨级泥炭矿床数的 95%(尹善春, 1991)。湛江南部湖光岩景区是一个完全封闭的火山口湖——玛珥湖, 其表层沉积物 TOC 含量为 5%, 但在大理冰期最高达 35%(40~50 ka)(刘强等, 2005), 相当于古寒温带。

因此, 从现代沉积有机质富集统计规律看, 冷湿气候更有利于碳埋藏(Mao et al., 2025)。

3.2 有机质矿化与温度、氧化还原条件的关系

针对温度和氧化还原条件对固碳的定量影响, 魏权等(2014)对某湖泊硬毛藻暴发区域表层沉积物进行了分解速度实验研究。设定了富氧和缺氧两组、温度从 10 °C到 30 °C共设计了 5 组。实验得出富氧组在不同温度下比缺氧组仅多分解 3%~9%; 而实验温度 30 °C条件下有机质的分解速度比 10 °C条件下高 4 倍。这说明氧化还原条件因素相对于温度因素来说, 可以忽略不计。陈默等(2020)研究了纤维素与 TOC 在 4 °C、25 °C条件下, 湖泊水体沉水植物的分解速率, 发现在 4 °C条件下沉积物中纤维素和 TOC 没有显著降解, 而在较高温度(25 °C)实验组条件下, 纤维素几乎完全分解, TOC 的去除率也高达 43.47%。

前述统计和这些实验表明, 低气温条件下土壤

和水中的植物残体几乎能够完整地保存下来。因而, 在冷湿气候条件下, 陆源有机质完全有可能进入水体, 并成为洼地有机质的主要贡献者。

3.3 陆源有机质供给的可能性

结合气候条件, 第一个冲突——空间冲突就能解决了。黑色页岩中的伴生元素几乎来自外源, 而唯独其中的有机质被认为是本地的内源有机质, 其症结“有机质从陆地到水体过程因富氧环境会被分解”就可以解除了。下面列出一些直接或间接证据, 以说明外源有机质不可忽视。

(1)通过碳、氧同位素分析有机质的来源, 得出水体表层沉积物中陆源有机质占比很高。呼伦湖表层沉积物中 TOC 为 1.25%~6.25%(宋文杰等, 2018), 其中陆源有机质占 80%(王雯雯等, 2021)。呼伦湖附近的草原土壤虽为富氧环境, 因其地处寒温带, 实测的土壤有机碳(SOC)也能达到 0.89%~4.55%(表 3), 可为湖泊提供丰富的外源有机质。呼伦湖西部为山区, 汇水面积大, 可接纳的陆源有机碎屑多, 导致湖泊内西部湖底表层沉积物的 TOC 高达 4%~6.25%; 而东部地区地形平缓, 陆源供给缓慢, 致使东部湖内表层沉积物 TOC 仅为 1.25%~3.0%。由于地形差异引发的侵蚀-汇水区土壤养分的搬运及在湖泊中的再分布现象普遍存在(祁志等, 2020)。

(2)SOC 在山区存在显著的侧向迁移, 使局部土壤富有机质。位于寒温带的三江平原内部, 地形平缓的地区, SOC 仅为 1.2%~2.0%; 而 SOC 高值均出现在山区: 鹤岗北部青黑山、七台河至双鸭山山区、虎林北部布开山等山地, 高达 4.6%~7.1%(杨亦恂等, 2022)。在东北地区相同纬度带内, 小兴安岭山地和长白山地的泥炭覆盖度(0.46%和 0.19%)及积累强度(433 t/km² 和 547 t/km²)均远大于相邻的松辽

表 3 表层土壤样品采样地点及有机碳含量测试结果表
Table 3 Sampling locations and organic carbon content test results of surface soil samples

样品编号	经纬度(N, E)	采样地点	TOC /%
H1	49.637°, 120.063°	海拉尔朝格牧人之家	4.55
H3	51.266°, 120.817°	莫尔道嘎森林内	2.61
H4	51.348°, 120.652°	森林公园第三站河滩	3.24
H5	51.399°, 119.966°	室韦口岸	2.78
H6	50.205°, 119.610°	黑山头	1.54
H9	49.287°, 118.050°	磴岗镇西路边草地	1.71
H10	49.336°, 118.986°	满州里—海拉尔旅行驿站草地	1.49
D01	43.873°, 124.455°	公主岭市裕顺北村	0.88
D03	42.670°, 126.045°	辉南县朝阳镇	1.70
K01	48.621°, 87.049°	喀纳斯湖卧龙湾	6.47

平原(0.11%和 386 t/km²)。从本文实测的 SOC 数据可见(表 3), 北部森林覆盖地区的三个点 H3~H5 高, >2.6%, 其它草原地区<1.7%。

(3)小型水体固碳率高, 表明陆源具有补给量大的特点。王馨平等(2023)研究了重庆丘陵山区池塘沉积物有机碳埋藏速率, 得出 TOC 总体呈现随水深增加而逐渐降低的趋势。在距离很近的星云湖和抚仙湖之间, 前者面积小 6 倍, 为重度富营养湖泊; 而后者面积大, 为贫营养湖泊。这一特点和小兴凯湖与兴凯湖完全类似(表 1)。Downing et al.(2008)对美国爱荷华州 40 个小型农业池塘的研究表明, 富营养化的农业池塘有机碳埋藏速率很高, 比自然湖泊或大型水库的有机碳埋藏速率高一到两个数量级, 推测全球池塘的有机碳埋藏量比海洋还大。

综上所述, 若将经典沉积学中的温室气候藻类勃发更有利于页岩富集有机质, 更正为冷湿气候(毛小平等, 2024a), 冲突二气候冲突(科学问题二)就解决了。

4 地学幸存者效应初探

较封闭的沉积环境, 对有机质和矿物质的富集具有关键作用, 类似于一个特殊的容器。然而, 要形成较封闭的水体环境条件较为苛刻。由构造或气候引起海平面升、降时, 会在新的大陆边缘形成新的较封闭环境。每个时期这种环境的面积相对于整个地球表面而言要小得多。能够进入这种较封闭环境的有机质、矿物质以及火山灰等便就是地质历史中的幸存者。有机质能够进入并保存下来, 成矿元素能够汇聚成矿, 而不被稀释。若进入较开阔的环境, 如大陆架、陆坡和大洋, 这些物质则会被分解或稀释, 而未成“幸存者”。从这个角度, 本文提出了“地学幸存者效应”的概念。

地学幸存者效应也称为地质学中的幸存者偏差。原概念“幸存者偏差”源自于统计学, 指当采集数据的渠道仅来自幸存者时, 该数据可能与实际情况存在偏差。在按概率统计的术语中, 观察或测量的样本若有偏向性, 就不具代表性, 导致统计结果失真。偏差有两种类型: 保存偏差和采样偏差。保存偏差是指某些数据或信息更容易被保存或更容易被获取。

地质过程也存在类似的偏差。翟裕生等(2001)提出, 已知的地表和近地表的许多矿床都是经历了众多地质事件磨难后的“幸存者”, 一个区域中矿床的“幸存者”越多, 找矿的潜力就越大。在沉积过程中, 本质上是一种筛选和分选过程。一些现象和物质能较集中地保存下来, 可被观察到; 而另一些物质暴露在地表, 或进入大洋开阔水体,

通常会被分解、吸收或稀释, 无沉积记录或记录被破坏而观察不到, 但地质事件发生过。最后观察到的, 是幸存下来的较集中的物质和现象, 这就是保存偏差。采样偏差则是地质家对研究对象的采样不具代表性。本文提出的地学幸存者效应仅指保存偏差。

从前述来看, 有机质及其伴生矿物质或地质现象, 是由于较封闭的洼地环境而同时被保存或富集成矿, 它们之间存在一定的相关性, 但却没有因果性。下面将提出一些典型的幸存者现象。

4.1 火山活动与黑色页岩

火山灰主要发育在黑色页岩和煤层中, 极少量在碳酸盐岩和砂岩中。这一现象表明火山灰的保存需要相对封闭的环境。如果附近缺乏这种封闭环境, 火山喷发的记录就无法在地质历史中保存下来。在封闭环境中, 有机质和火山灰能同时被保存下来, 且越封闭、越安静的水体环境, 有机质的丰度越高, 每次火山活动都能完整地、精细地保存下来。因而页岩 TOC 含量与斑脱岩夹层发育的密集度, 具有数学上的相关性, 但它们之间没有因果联系。

陈宣谕等(2022)的研究为此提供了有力支持。他们建立了东亚全新世火山灰地层框架, 并厘定出 22 层全新世火山灰。在广东湛江湖光岩玛珉湖的记录中显示了数次全新世火山活动事件, 其中甚至包括远在 3 000 km 外的日本中部水月湖的一次火山活动, 时间精度很高。然而, 与之毗邻的北海、琼州海峡海底沉积物中却没有相关记录。

对于开阔水体, 夏志颖等(2022)分析了 1991 年皮纳图博火山灰沉降物对南海海洋环境及硅藻生长的影响, 进行了火山喷发前、后一年时间做对比发现, 硅藻、放射虫、硅鞭藻和海绵骨针的丰度显著下降, 生产力降低。如前所述, 该火山喷发至开阔海域内, 火山玻璃含量在 17 年内稀释了一半, 说明开阔环境难以有效保存火山灰。

WLS 沉积期因为水体封闭性较好, 任一次小的火山活动, 均有地质记录。其底部宝塔组和临湘组灰岩沉积期的上扬子处于开阔的水体环境无法记录到火山活动。但在鄂尔多斯盆地南缘, 此时发育了平凉组 and 背锅山组, 出现了多次封闭环境而发育页岩, 并记录到了多层凝灰岩、重力流沉积和笔石(王振涛等, 2015)。显然, 我们不能因为在上扬子地区没有记录到斑脱岩条带, 或条带少, 就肯定地说, 上扬子此时无火山喷发; 反之, 在 WLS 记录到多个斑脱岩夹层, 也不能说明此时火山活动强烈。不同封闭性水体环境会干扰我们的判断。

因此, 富有机质页岩与火山活动之间的相关性不能轻易上升为因果性。

4.2 化石发育

化石的发育也具有幸存者效应。在暴露环境和开阔大陆架环境中,特别是热带气候环境,化石较难保存。南海开阔海域水体中硅藻细胞丰度较近岸的珠江口附近海域低 2~3 个数量级(梁宇钊等, 2021)。在保存条件不佳时,并不意味着没有藻类勃发的高古生产力。在贵州习水地区龙马溪组底部观察到了笔石普遍发育,如图 4a、b 所示,完整且未变形的笔石显示出其保存于封闭的静水环境。

胡维芬等(2015)研究了南海多个不同水深地点的活体放射虫发育,结果表明,放射虫的丰度与水深有关,水深越浅丰度越高(图 4c、d)。放射虫 *Didymocyrtis tetrathalamus tetrathalamus* 和 *Acanthodesmia vinculata* 的个数在 0~25 m 水深最多; *Pterocorys hertwigii* 和 *Botryocyrtis scutum* 的个数在 25~50 m 最多, 75 m 以深急剧减少; *Tetrapyle octacantha* 和 *Siphonosphaera polysiphonia* 在 50~75 m 水深数量最多。在 75~150 m 水深段,个体数降至最大值的 1/4~1/10。

黄岩岛附近海域表层沉积物中放射虫大量发育,的确得益于皮纳图博火山火山带来的硅和磷。其遗壳数量超过 200 000 个/克干样,为南海平均值

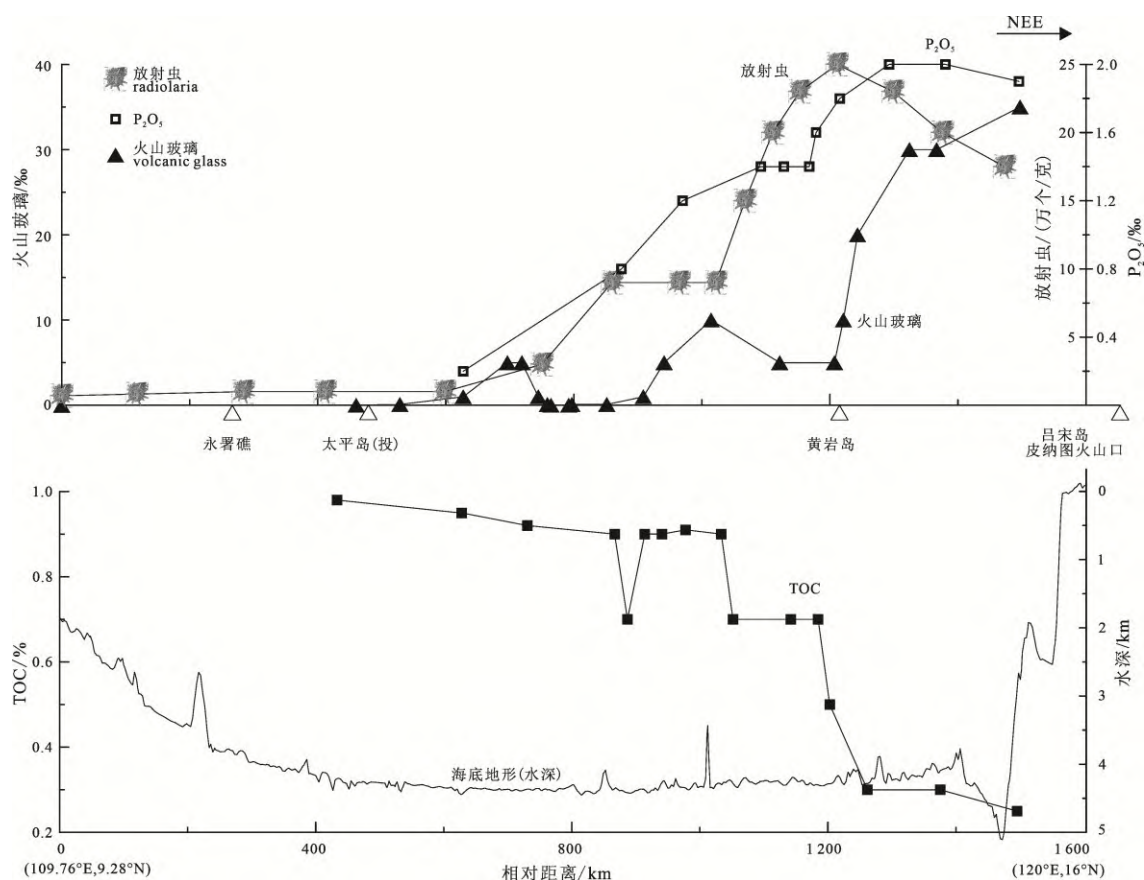
的 20 倍(陈木宏等, 2008)。虽然放射虫含量高,但海底表层沉积物中有机碳含量 TOC 则呈现相反的规律。在离火山口较近的黄岩岛附近, TOC 仅为 0.3%; 而向南南西方向远离火山口时, TOC 呈增加趋势, 达到 1.0%(蔡观强等, 2018), 如图 3 所示。这说明化石含量高,并不等于 TOC 高。

因此,当观察到地层中含有丰富的化石,特别是含硅的笔石与放射虫时,并不意味着此时为深海环境或具有高固碳速率。与笔石共生的放射虫丰度与初级生产力一致,仍是越浅越高。

4.3 伴生矿产的富集

我国大多数沉积型矿产均与黑色岩系具有伴生关系,形成黑色页岩容矿型矿床。由前面论述可知,有机质和这些沉积型矿产,均属于幸存者。

和有机质伴生的其他沉积型矿产主要也属于外源供给。这些物质主体部分并非原地生产,而是由该封闭环境所在水系上游,通过强风化、剥蚀和搬运而来。黔北正安东早二叠世发育的大竹园组铝土矿层存在重力流现象,其底部有一层铁矿层,显然为温暖气候下的产物。成矿范围十分局限,常被称为“鸡窝矿”,反映当时为一个局限的、面积较小的洼地。

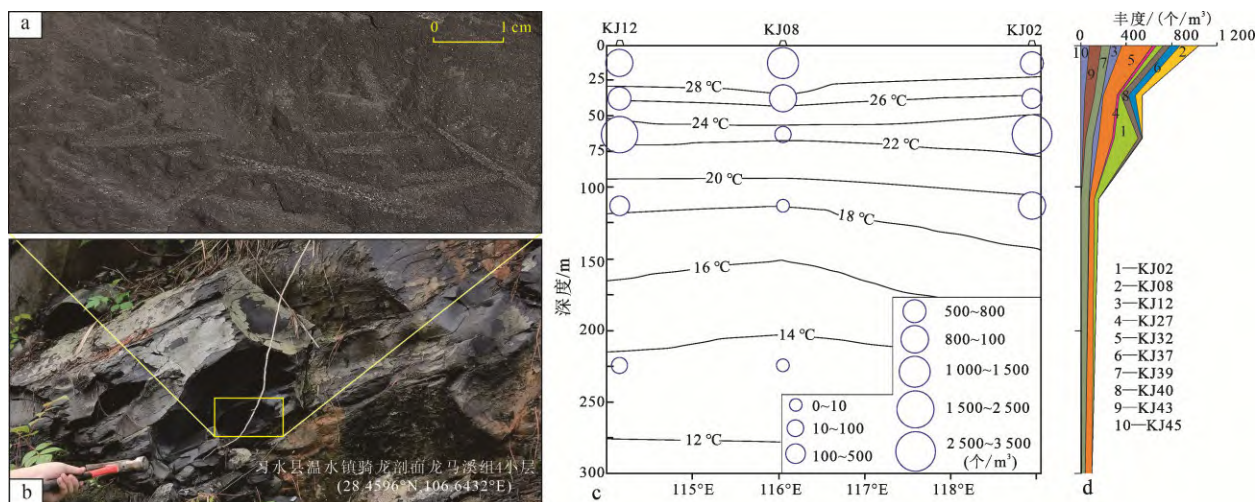


主要数据来自夏志颖等(2022), 海底地形来自全球地形数据库。

The primary data are sourced from XIA et al.(2022), with the seabed topography derived from the Global Topographic Database.

图3 放射虫火山玻璃与有机碳含量的关系

Fig. 3 Relationship between radiolarian volcanic glass and organic carbon content



a—含笔石页岩; b—采样点; c—南海活体放射虫丰度及水温(8°N); d—各站放射虫丰度堆积面积图; c、d 据胡维芬等(2015)。
a—graphite-bearing shale; b—sampling locations; c—the abundance of living radiolarians and water temperatures in the South China Sea (8°N);
d—an accumulated area diagram depicting radiolarian abundance at various sampling stations; c and d are based on HU et al.(2015).

图 4 化石的发育与深度的关系

Fig. 4 Relationship between fossil development and depth

锰矿、重晶石等沉积型矿产, 均表现出相似特征, 其赋矿岩石为黑色页岩, 并赋存于富有机质的黑色页岩中。贵州铜仁大塘坡组富锰碳质页岩 TOC 高达 3.7%(裴浩翔等, 2020), 表明锰的富集也是在封闭环境下的“幸存者”。

4.4 一些沉积现象的保存

在绝大多数页岩中都能发现重力流、火山灰等沉积。鄂尔多斯南缘平凉组和背锅山组页岩可见重力流、凝灰岩沉积(王振涛等, 2015); 在上扬子地区 WLS 内仍可见重力流(王红岩等, 2023)和斑脱岩(谢浩然等, 2023)。四川盆地三叠系飞仙关组和须家河组的页岩段也均可见重力流和凝灰岩等。其中, 飞仙关组发育巨厚红层, 表现为热带雨林气候, 在川南地区为有障壁环境, 发育砂页岩型铜矿床(文俊等, 2023); 而须家河组发育黑色页岩, 属冷湿气候。

对于非页岩段, 主要发育于开阔环境, 在三角

洲前缘的斜坡等部位也会存在滑塌现象, 但因开阔海域会因洋流和潮汐作用而被再次改造。

综上所述, 黑色页岩的发育与火山喷发、热液、重力流、多金属矿产成矿、生物大灭绝等事件之间存在相关性, 但并非成因联系(共生关系)。在这一过程中, 各元素的丰度以及各地质现象的密集度均同步增加, 它们之间存在数学上的相关性, 但没有因果关系。这些地质现象仅作为幸存下来的沉积现象、成矿元素则被保存在特定的聚集地。为了更直观地说明这些地质现象之间的关系, 本文将其总结成一个地学幸存者效应模式图, 如图 5 所示。图中的表层沉积物 TOC 主要基于表 1。

5 五峰组—龙马溪组页岩(WLS)有机质富集的主控因素

基于地学幸存者效应, 可以客观地进行分析 WLS 的主控因素。

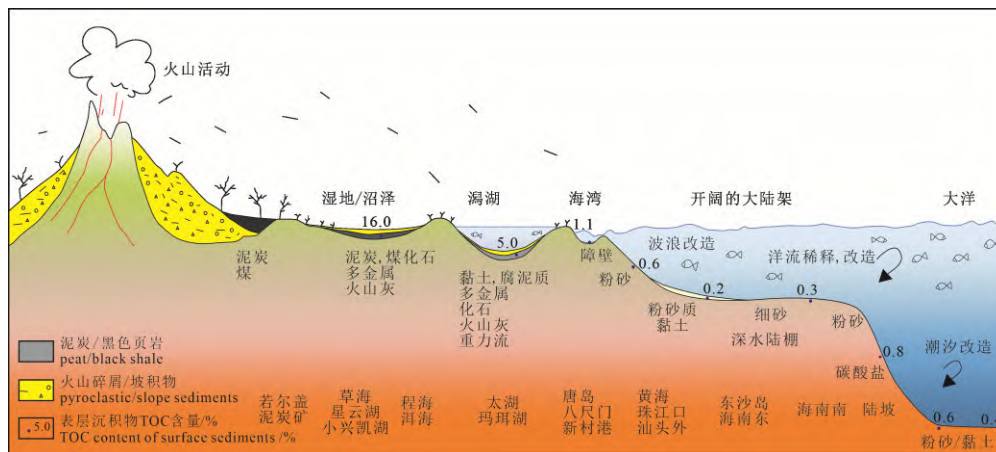


图 5 地学幸存者效应模式图

Fig. 5 Geoscience survivor effect pattern

5.1 气候因素

下面将从地层发育、特殊岩性、不整合面等角度进行分析,可以得出 WLS 形成于气候变冷引起的海退环境(毛小平等, 2024a)。

纵向上, WLS 底部宝塔组灰岩沉积时多地发育红层(徐锦龙, 2024)。重庆武隆黄上草剖面湘组发育紫红色灰岩(牟传龙等, 2014), 中、下扬子发育厚层红层。红层和高岭石是中低纬度热带雨林气候的产物(毛小平等, 2024b), 如第四纪高岭土矿主要产于长江以南的亚热带、热带地区(吴宇杰等, 2021)。在华南的下镇组(相当于宝塔组)顶部发育红层或高岭石风化壳, 显示为湿热气候条件下的特征(李越等, 2008)。在页岩顶部特列奇阶发育了两套红层(戎嘉余等, 2012)。页岩段与其顶底相比, 应为气候变冷、海退。

平面上, 多个地区的横向对比更能厘清海平面的相对升降, 按两个阶段来分析:

阶段 1 晚奥陶世桑比阶—凯特阶四川盆地为开阔的碳酸盐台地, 发育紫红色白云岩、灰岩, 贫有机质; 宜昌地区远安真金剖面发育了庙坡组含笔石页岩(毛颖颜等, 2021)和宝塔组紫红色地层; 鄂尔多斯南缘平凉组和背锅山组发育烃源岩, 并出现多层凝灰岩夹层和多次重力流事件(王振涛等, 2015), TOC 低, <1.4%(邓昆等, 2013); 塔里木盆地印干组顶部阿日苏组(与临湘组时代相近)发育紫红色泥岩(唐鹏等, 2023), 柯坪大湾沟印干组页岩 TOC 平均只有 0.7%, 最大仅 1.2%(高志勇等, 2012)。

阶段 2 四川盆地发育含笔石页岩, TOC 高达 5.5%, 伴有多层斑脱岩和多次重力流事件, 而宜昌

抬升, 部分笔石带缺失(陈孝红等, 2018)、鄂尔多斯南缘此时也无沉积记录、塔里木盆地地层部分缺失。

若用经典地质理论解释, 认为快速海进深水缺氧环境(深水陆棚)富集有机质(施振生等, 2023)(图 6b), 则无法解释宜昌、鄂尔多斯的地层缺失(图 6d), 得出同一时期只有上扬子地区为海进, 而其他地区在海退的矛盾现象(图 6b)。虽然华南被认为此时与华北不在同一大陆, 但这样的矛盾是无法解释的。为此, 将黑色页岩的发育归因于较封闭的浅水环境可以更合理地解释: 阶段 1 发育红层表征其为温室气候, 上扬子为较深水环境, 海平面较高, 发育紫红色灰岩, 而宜昌、鄂尔多斯为较封闭的浅水环境, 海平面较低, 发育贫有机质页岩(图 6c); 到阶段 2 气候变冷, 海平面全球性下降, 导致上扬子地区由深水环境转变为浅水环境, 形成一个有障壁的陆表海或潟湖, 并在部分地区形成了更封闭的湖湾, 发育富有机质的 WLS。而宜昌、鄂尔多斯南部、塔里木盆地则由局限浅水环境转变为完全暴露环境, 导致地层缺失(图 6d)。牟传龙等(2014)研究得出, 上扬子地区在阶段 2 凯迪晚期—赫南特期相对于阶段一隆起面积继续扩大, 等效于海退。塔里木盆地阶段 1 印干组顶部阿日苏组发育紫红色泥岩, 指示暖湿气候; 在阶段 2 存在地层缺失(唐鹏等, 2023)。

5.2 封闭性因素

晚奥陶世上扬子地区气温较低、海退背景下形成了潟湖环境, 封闭性较好。然而, 因面积较大, 仍只有更局限的湖湾环境才能形成优质 WLS。例如, 长宁地区内部呈现出多级隆洼相间的格局, 古隆起

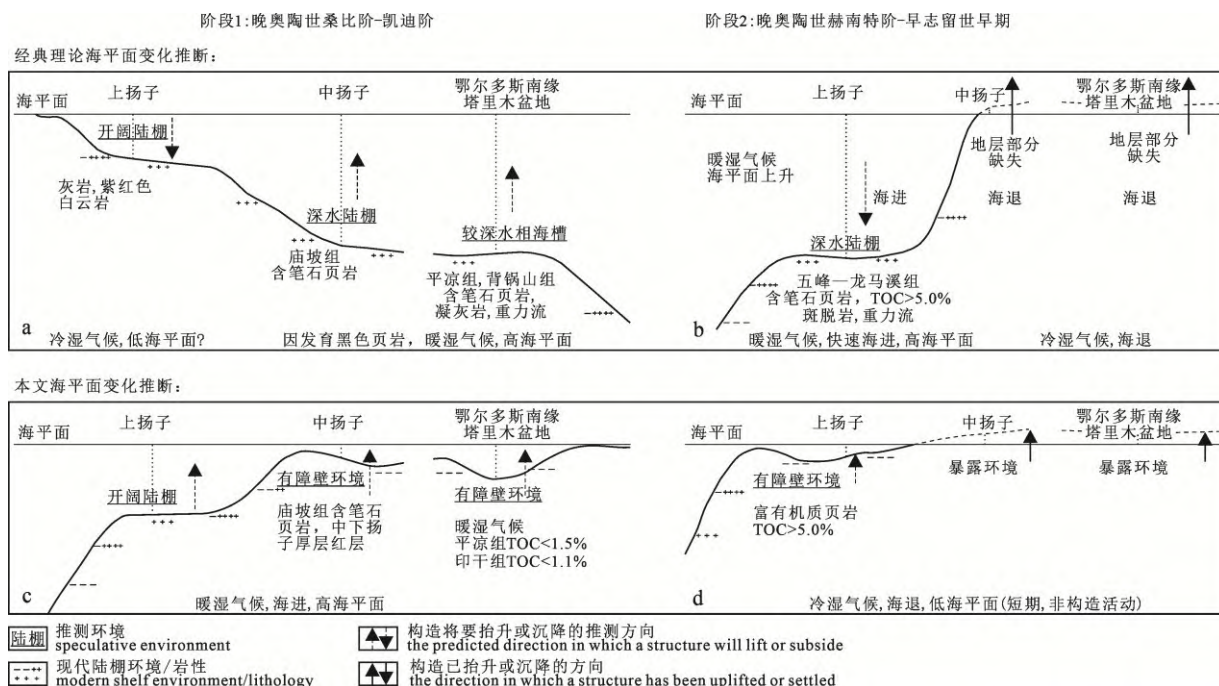


图 6 晚奥陶世至早志留世早期气候与海平面变化推测模式

Fig. 6 Hypothetical model of climate and sea-level changes from Late Ordovician to Early Silurian

区相对于古沟谷区具有更多的陆源营养物质供给,导致高产能区域仅局限于古隆起区(韦国栋等, 2022)。尽管没有直接证据说明有机质来自于陆源,但与陆地有关是显而易见的。因此,封闭性对页岩有机质的富集程度和气候条件同样至关重要。封闭性主要体现在 3 个方面。

(1)WLS 为低盐度环境,与陆源淡水供给有关,推测中上扬子地区为一个较封闭的低盐度潟湖环境(毛小平等, 2025b)。

(2)如前述, WLS 沉积期除了上扬子地区外,其它地区均存在地层缺失或笔石带缺失现象(王振涛等, 2015),上扬子地区南部、西部、东部三面被古陆环绕(聂海宽等, 2017);在鄂西南五峰县观察到含铁帽风化壳和“宜昌上升”(王怿等, 2013)。

(3)川南 WLS 多口井钻遇重力流沉积(王红岩等, 2023);内部发育多套斑脱岩夹层(谢浩然等, 2023),表现为静水低能环境,可记录古环境、古事件。

综上所述,在有机质富集的浅陆封寒四要素中,封闭水体环境-“封”是其必要条件,WLS 有机质的富集特征符合地学幸存者效应;只有用冷湿气候-“寒”才能完美地诠释黑色页岩的发育和海平面升降。

6 结论

本文充分研究了现代沉积环境、有机质的矿化作用机制及固碳规律等,得出以下主要结论:

(1)较封闭环境是矿物质、化石、火山灰及一些沉积现象在地质历史中的“幸存者”的聚集和保存场所。

(2)气候变化对固碳的影响远大于氧化还原条件。

(3)在冷湿气候条件下,较封闭的水体环境更有利于发育富含有机质的页岩。有机质与其他成矿元素及沉积现象作为幸存者保存下来,它们之间存在统计学相关性,但没有因果关系。

(4)WLS 的发育是地学幸存者效应的一个实例。

本研究将有助于我们重新认识页岩有机质的富集环境以及火山喷发等与黑色页岩的关系。

Acknowledgements:

This study was supported by the Open Fund Project of the State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas (No. 33550000-24-ZC0613-0105), and Guizhou Provincial Science and Technology Plan Project (No. QianKeHeChengGuo [2022] ZD 003).

参考文献:

白广一, 赵克良, 刘恩峰, 等, 2023. 抚仙湖沉积物重金属累积特征与风险评价[J]. 中国环境科学, 43(7): 3625-3633.
蔡观强, 李顺, 赵利, 等, 2018. 南海海盆中部表层沉积物地球化学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 38(5): 90-101.

曹梦莉, 马倩倩, 吴莹, 等, 2017. 南海北部和海南岛附近海域表层沉积物中有机质的分布和降解状态的差异[J]. 海洋与湖沼, 48(2): 258-265.
陈彬, 胡利民, 邓声贵, 等, 2011. 渤海湾表层沉积物中有机碳的分布与物源贡献估算[J]. 海洋地质与第四纪地质, 31(5): 37-42.
陈默, 张雅庆, 李家轩, 等, 2020. 温度对湖泊沉积物中沉水植物残体厌氧分解的影响[J]. 环境科学学报, 40(8): 3013-3019.
陈木宏, 张兰兰, 张丽丽, 等, 2008. 南海表层沉积物中放射虫多样性与丰度的分布与环境[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 33(4): 431-442.
陈孝红, 张保民, 陈林, 等, 2018. 鄂西宜昌地区晚奥陶世—早志留世页岩气藏的主控地质因素与富集模式[J]. 地球学报, 39(3): 257-268.
陈旭, 陈清, 甄勇毅, 等, 2018. 志留纪初宜昌上升及其周缘龙马溪组黑色笔石页岩的圈层展布模式[J]. 中国科学: 地球科学, 48(9): 1198-1206.
陈宣谕, 黄小龙, 徐义刚, 2022. 东亚全新世火山灰地层框架的初步构建及其对古气候研究的意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 41(4): 695-710.
陈忠, 夏斌, 颜文, 等, 2005. 南海火山玻璃的分布特征、化学成分及源区探讨[J]. 海洋学报, 27(5): 73-81.
程波, 1989. 威海湾表层沉积物地球化学[J]. 海洋科学, 13(6): 42-46.
崔海峰, 田雷, 张年春, 等, 2016. 塔西南坳陷寒武系玉尔吐斯组烃源岩分布特征[J]. 天然气地球科学, 27(4): 577-583.
邓宝, 1984. 东秦岭地区笔石地层及有关矿产[J]. 西安矿业学院学报, 4(2): 20-26.
邓昆, 周文, 邓虎成, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地平凉组页岩气富集地质条件[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(5): 595-602.
翟裕生, 彭润民, 邓军, 等, 2001. 区域成矿学与找矿新思路[J]. 现代地质, 15(2): 151-156.
范德廉, 张焘, 叶杰, 1998. 缺氧环境与超大矿床的形成[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), (S2): 57-62.
甘居利, 林钦, 李纯厚, 等, 2002. 考洲洋表层沉积物的重金属含量及其污染分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 21(3): 242-246.
高文华, 杜永芬, 王丹丹, 等, 2012. 福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响[J]. 环境科学, 33(9): 3097-3103.
高志勇, 张水昌, 刘烨, 等, 2012. 新疆柯坪大湾沟剖面中-上奥陶统烃源岩高频海平面变化与有机质的关系[J]. 石油学报, 33(2): 232-240.
侯宇光, 何生, 杨香华, 等, 2015. 澳大利亚 Bonaparte 盆地大陆边缘裂陷期局限海相页岩发育特征与模式[J]. 现代地质, 29(1): 109-118.
胡维芬, 张兰兰, 陈木宏, 等, 2015. 南海断面春季活体放射虫生态分布及其对环境的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 45(1): 83-98.
贾立龙, 舒建生, 姜在炳, 等, 2021. 黔西海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征研究[J]. 煤炭科学技术, 49(10): 201-207.
蒋富清, 李安春, 2002. 冲绳海槽南部表层沉积物地球化学特征及其物源和环境指示意义[J]. 沉积学报, 20(4): 680-686.
蒋增杰, 崔毅, 陈碧鹃, 2007. 唐岛湾网箱养殖对水环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 26(3): 1190-1194.

- 李丽, 王慧, 罗布次仁, 等, 2008. 南海北部 4 万年以来有机碳和碳酸盐含量变化及古海洋学意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 28(6): 79-85.
- 李林蔚, 吴攀, 曹星星, 等, 2022. 贵州威宁草海湿地表层沉积物有机质时空分布及其来源辨析[J]. 农业环境科学学报, 41(1): 153-161.
- 李龙强, 胡泓, 吕向梨, 等, 2020. 渤海中部和黄海北部表层沉积物重金属含量及生态风险评价[J]. 海洋湖沼通报, 42(1): 84-92.
- 李学杰, 廖志良, 田成静, 等, 2022. 南海表层沉积物火山玻璃分布特征与源区分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 42(3): 1-8.
- 李越, 王建坡, 张园园, 等, 2008. 华南奥陶—志留纪之交的碳酸盐岩对古气候事件的诠释[J]. 自然科学进展, 18(10): 122-128.
- 李治兴, 秦明宽, 刘鑫扬, 等, 2022. 黑色岩系多元素富集层特征、成因和研究意义[J]. 世界核地质科学, 39(1): 14-26.
- 梁宇钊, 冉莉华, 张兰兰, 2021. 中国海表层沉积生物硅含量与硅藻丰度空间分布规律[J]. 微体古生物学报, 38(1): 112-130.
- 林志裕, 童金炉, 陈敏, 等, 2011. 夏季黄、东海初级生产力的分布及其变化[J]. 同位素, 24(S1): 95-101.
- 刘本培, 陈芬, 王五立, 1986. 从事件地层学角度探讨东亚陆相侏罗、白垩系界线[J]. 地球科学, 11(5): 465-472.
- 刘强, 顾兆炎, 刘嘉麒, 等, 2005. 62kaBP 以来湖光岩玛珥湖沉积物有机碳同位素记录及古气候环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 25(2): 115-126.
- 刘树根, 马文辛, JANSALB, 等, 2011. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 27(8): 2239-2252.
- 柳蓉, 张坤, 刘招君, 等, 2021. 中国油页岩富集与地质事件研究[J]. 沉积学报, 39(1): 10-28.
- 毛小平, 陈修蓉, 陈永进, 等, 2024a. 以初级生产力与固碳规律为线索探讨陆相页岩中有机质的富集规律[J]. 地球科学, 49(4): 1224-1244.
- 毛小平, 陈修蓉, 王志京, 等, 2024b. 黑色页岩有机质富集程度与古气候的关系: 以中上扬子五峰—龙马溪组页岩为例[J]. 地质科学, 59(5): 1151-1172.
- 毛小平, 陈修蓉, 李书现, 等, 2025a. 局限环境下水体深度对有机质富集的控制作用[J]. 地质学报, 99(4): 1353-1368.
- 毛小平, 陈修蓉, 李振, 等, 2025b. 浅议四川盆地五峰组—龙马溪组页岩沉积模式与有机质富集规律[J]. 沉积学报, 43(2): 701-733.
- 毛颖颜, 方翔, 于深洋, 等, 2021. 鄂西奥陶系庙坡组海林螭 *Cheirocrinus penniger* (Eichwald, 1842) 的发现[J]. 古生物学报, 60(2): 215-223.
- 牟传龙, 葛祥英, 许效松, 等, 2014. 中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义[J]. 古地理论, 16(4): 427-440.
- 聂海宽, 金之钧, 马鑫, 等, 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, 32(2): 160-174.
- 裴浩翔, 李延河, 付勇, 等, 2020. 贵州铜仁高地“大塘坡式”锰矿的成矿机制——硫、碳同位素制约[J]. 地球学报, 41(5): 651-662.
- 彭俊文, 2022. 氧化还原敏感元素在海相沉积物中富集的其他控制因素——海平面波动[J]. 中国科学: 地球科学, 52(11): 2254-2274.
- 祁志, 丁超, 韩兴, 等, 2020. 沟坡侵蚀汇水区黑土水分和养分的空间异质性[J]. 水土保持通报, 40(5): 79-87, 96.
- 秦艳, 张文正, 彭平安, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 段富铀烃源岩的铀赋存状态与富集机理[J]. 岩石学报, 25(10): 469-2476.
- 戎嘉余, 王怿, 张小乐, 2012. 追踪地质时期的浅海红层——以上扬子区志留系下红层为例[J]. 中国科学: 地球科学, 42(6): 862-878.
- 沈树忠, 张华, 2017. 什么引起五次生物大灭绝?[J]. 科学通报, 62(11): 1119-1135.
- 施振生, 王红岩, 赵圣贤, 等, 2023. 川南地区上奥陶统一下志留统五峰组—龙马溪组快速海进页岩特征及有机质分布[J]. 古地理论, 25(4): 788-805.
- 宋文杰, 张瑾, 郭晶晶, 2018. 呼伦湖沉积物中有机碳无机碳分布特征研究[J]. 环境与发展, 30(6): 97-100, 102.
- 宋以龙, 陈敬安, 杨海全, 等, 2016. 云南抚仙湖沉积物有机质来源与时空变化特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(4): 607, 618-624.
- 孙黛茜, 谢自建, 汪洋, 等, 2023. 兴凯湖沉积物营养盐分布特征及来源解析[J]. 环境工程技术学报, 13(6): 1976-1986.
- 孙省利, 陈践发, 刘文汇, 等, 2004. 塔里木盆地寒武统硅质岩地球化学特征及其形成环境[J]. 石油勘探与开发, 31(3): 45-48.
- 唐鹏, 张雨晨, 王怿, 等, 2023. 塔里木盆地柯坪—伽师地区晚奥陶世凯迪期—赫南特期地层序列[J]. 地层学杂志, 47(4): 363-395.
- 田洋洋, 2020. 星云湖表层沉积物有机质空间分布特征及其环境指示意义[D]. 昆明: 云南师范大学.
- 王峰, 陈娅鑫, 贾志刚, 2019. 安康市南部石煤成矿地质条件分析[J]. 煤炭加工与综合利用, (1): 65-68.
- 王红岩, 刘德勋, 蔚远江, 等, 2022. 大面积高丰度海相页岩气富集理论及地质评价技术进展与应用[J]. 煤田地质与勘探, 50(3): 69-81.
- 王红岩, 施振生, 孙莎莎, 等, 2023. 陆表海页岩沉积微相类型及微相分布模式——以川南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发, 50(1): 51-64.
- 王文介, 2000. 南海北部的潮波传播与海底沙脊和沙波发育[J]. 热带海洋, 19(1): 1-7.
- 王雯雯, 陈俊伊, 姜霞, 等, 2021. 呼伦湖表层沉积物有机质的释放效应分析[J]. 环境科学研究, 34(4): 812-823.
- 王馨平, 吕明权, 文雯, 等, 2023. 重庆丘陵山区池塘沉积物有机碳埋藏速率及其影响因素[J]. 生态学报, 43(24): 10216-10227.
- 王怿, 戎嘉余, 詹仁斌, 等, 2013. 鄂西南奥陶系—志留系交界地层研究兼论宜昌上升[J]. 地层学杂志, 37(3): 264-274.
- 王玉满, 李新景, 董大忠, 等, 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.
- 王喻鸣, 王玉琨, 陈晓宏, 2022. 南海北部海域表层沉积物重金属含量分布及来源[J]. 中山大学学报(自然科学版), 61(1): 139-150.
- 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶纪地质事件群耦合作用[J]. 地质学报, 89(11): 1987-2001.
- 王中波, 李日辉, 张志珣, 等, 2016. 渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(6): 101-109.
- 韦国栋, 谭秀成, 刘睿, 等, 2024. 长宁地区龙马溪组页岩沉积古地貌与页岩气差异富集的耦合机制[J]. 沉积与特提斯地质, 44(2): 253-266.

- 魏权, 宋鹏鹏, 邵雪琳, 等, 2014. 温度、曝气和沉积物对绿潮硬毛藻分解的影响[J]. 环境科学学报, 34(9): 2329-2336.
- 文俊, 张航飞, 刘治成, 等, 2023. 川南早三叠世砂页岩型铜矿床沉积环境、成矿模式及对峨眉山地区幔柱成矿系统的补充[J]. 矿床地质, 42(3): 598-617.
- 吴宇杰, 陈从喜, 袁峰, 2021. 中国高岭土矿床时空分布规律[J]. 地球学报, 42(5): 628-640.
- 夏建东, 朱韻洁, 高亚萍, 等, 2020. 基于双模型的星云湖沉积物重金属溯源及风险评价[J]. 环境科学研究, 33(9): 2103-2109.
- 夏志颖, 冉莉华, MARTIN G W, 等, 2022. 1991 年皮纳图博火山灰沉降物对南海海洋环境及硅藻生长的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 42(2): 28-35.
- 谢富泰, 周翔, 陶醉, 等, 2021. 基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集(2003–2018)[J]. 全球变化数据学报, 5(1): 11-18.
- 谢浩然, 梁超, 吴靖, 等, 2023. 火山活动对沉积古环境及有机质富集的影响[J]. 古地理学报, 25(4): 768-787.
- 徐锦龙, 2024. 安徽南部地区奥陶纪海相红层的分布及时代[J]. 地质科学, 59(1): 210-223.
- 杨亦恂, 姜晓旭, 李名升, 等, 2022. 三江平原土壤有机碳含量及其密度的空间变异特征分析[J]. 土壤通报, 53(6): 1313-1319.
- 杨泽光, 冯志强, 王爱国, 等, 2022. 波斯湾盆地主力烃源岩特征及成因主控因素[J]. 海洋石油, 42(1): 1-12.
- 尹鹏飞, 熊静, 贾雨欣, 等, 2023. 杞麓湖表层沉积物营养盐和粒度空间分布及评价[J]. 环境科学与技术, 46(10): 32-41.
- 尹善春, 1991. 中国泥炭资源及其开发利用[M]. 北京: 地质出版社: 19.
- 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等, 2013. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 40(1): 14-26.

References:

- ARCULUS R J, ISHIZUKA O, BOGUS K, et al., 2015. Expedition 351 summary[M]//Proceedings of the International Ocean Discovery Program. 351: International Ocean Discovery Program.
- BAI Guangyi, ZHAO Keliang, LIU Enfeng, et al., 2023. Spatio-temporal variations of heavy metals in sediment of Fuxian Lake and pollution assessment[J]. China Environmental Science, 43(7): 3625-3633(in Chinese with English abstract).
- BLACKBOURN G A, TEVZADZE N, JANIASHVILI A, et al., 2021. South Caucasus Palaeogeography and prospectivity: Elements of petroleum systems from the black sea to the caspian[J]. Journal of Petroleum Geology, 44(3): 237-257.
- CAI Guanyang, LI Shun, ZHAO Li, et al., 2018. Geochemical characteristics of surface sediments from the middle deep-sea basin of South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 38(5): 90-101(in Chinese with English abstract).
- CAO Mengli, MA Qianqian, WU Ying, et al., 2017. Difference in organic matter distribution and degradation in surface sediment between northern South China Sea and Hainan island[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 48(2): 258-265(in Chinese with English abstract).
- CHEN Bin, HU Limin, DENG Shenggui, et al., 2011. Organic carbon in surface sediments of the Bohai bay, China and its contribution to sedimentation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 31(5): 37-42(in Chinese with English abstract).
- CHEN Mo, ZHANG Yaqing, LI Jiaxuan, et al., 2020. The effect of temperature on anaerobic decomposition of submerged plant residues in lake sediments[J]. Journal of Environmental Science, 40(8): 3013-3019(in Chinese with English abstract).
- CHEN Muhong, ZHANG Lanlan, ZHANG Lili, et al., 2008. Distribution and Environment of Radiolarian Diversity and Abundance in Surface Sediments of the South China Sea[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 33(4): 431-442(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xiaohong, ZHANG Baomin, CHEN Lin, et al., 2018. Main geological controlling factors and enrichment pattern of shale gas reservoirs in the late Ordovician–early Silurian strata of Yichang, western Hubei Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(3): 257-268(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xu, CHEN Qing, ZHEN Yongyi, et al., 2018. The stratigraphic distribution pattern of black graptolite shale in the early Silurian uplift of Yichang and its surrounding Longmaxi Formation[J]. Chinese Science: Earth Science, 48(9): 1198-1206(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xuanyu, HUANG Xiaolong, XU Yigang, 2022. Preliminary construction of the Holocene volcanic ash stratigraphic framework in East Asia and its significance for paleoclimate research[J]. Mineral and Rock Geochemical Bulletin, 41(4): 695-710(in Chinese with English abstract).
- CHEN Ying, QIN Wenkuan, ZHANG Qiufang, et al., 2024. Whole-soil warming leads to substantial soil carbon emission in an alpine grassland[J]. Nature Communications, 15: 4489.
- CHEN Zhong, XIA Bin, YAN Wen, et al., 2005. Distribution characteristics, chemical composition, and source area exploration of volcanic glass in the South China Sea[J]. Journal of Oceanography, 27(5): 73-81(in Chinese with English abstract).
- CHENG Bo, 1989. Geochemistry of Weihai bay surface sediment and its development[J]. Marine Sciences, 13(6): 42-46(in Chinese with English abstract).
- CUI Haifeng, TIAN Lei, ZHANG Nianchun, et al., 2016. Distribution characteristics of hydrocarbon source rocks in the Cambrian Yuertusi Formation of the Taxinan Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 27(4): 577-583(in Chinese with English abstract).
- DENG Bao, 1984. Grape stone strata and related minerals in the East Qinling Mountains region[J]. Journal of Xi'an Institute of Mining and Technology, (2): 20-26(in Chinese with English abstract).
- DENG Kun, ZHOU Wen, DENG Hucheng, et al., 2013. Geological conditions for accumulation of shale gas in Middle Ordovician Pingliang Formation of Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 40(5): 595-602(in Chinese with English abstract).
- DOWNING J A, COLE J J, MIDDELBURG J J, et al., 2008. Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century[J]. Global Biogeochemical Cycles, 22(1): GB1018-1.
- FAN Delian, ZHANG Tao, YE Jie, 1998. Hypoxic environment and the formation of super large mineral deposits[J]. Chinese

- Science (Series D: Earth Science), (S2): 57-62(in Chinese).
- FERLAND M E, DEL GIORGIO P A, TEODORU C R, et al., 2012. Long-term C accumulation and total C stocks in boreal lakes in northern Quebec[J]. *Glob. Biogeochem. Cycle*, 26: 1-10. doi: Gb0e04 10.1029/2011gb004241.
- FROGNER P, GÍSLASON S R, ÓSKARSSON N, 2001. Fertilizing potential of volcanic ash in ocean surface water[J]. *Geology*, 29(6): 487-490.
- GAN Juli, LIN Qin, LI Chunhou, et al., 2002. Analysis of heavy metal contents in the surficial sediments and their pollution in Kaohzhou bay[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University*, 21(3): 242-246(in Chinese with English abstract).
- GAO Wenhua, DU Yongfen, WANG Dandan, et al., 2012. Distribution patterns of heavy metals in surficial sediment and their influence on the environment quality of the intertidal flat of Luoyuan Bay, Fujian coast[J]. *Environmental Science*, 33(9): 3097-3103(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhiyong, ZHANG Shuichang, LIU Ye, et al., 2012. Relationship between high-frequency sea-level changes and organic matter of Middle-Upper Ordovician marine source rocks from the Dawangou section in the Keping area, Xinjiang[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2): 232-240(in Chinese with English abstract).
- HARTNETT H E, KEIL R G, HEDGES J I, et al., 1998. Influence of oxygen exposure time on organic carbon preservation in continental margin sediments[J]. *Nature*, 391: 572-575.
- HOU Yuguang, HE Sheng, YANG Xianghua, et al., 2015. Characteristics and patterns of limited marine shale development during the continental margin rift period in the Bonaparte Basin, Australia[J]. *Modern Geology*, 29(1): 109-118(in Chinese with English abstract).
- HU Weifen, ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, et al., 2015. Distribution of living radiolarians in spring in the South China Sea and its responses to environmental factors[J]. *Science China: Earth Sciences*, 58(2): 270-285(in Chinese with English abstract).
- JIA Lilong, SHU Jiansheng, JIANG Zaibing, et al., 2021. Study on formation conditions and reservoir characteristics of marine-terigenous facies coal measures shale gas in western Guizhou[J]. *Coal Science and Technology*, 49(10): 201-207(in Chinese with English abstract).
- JIANG Fuqing, LI Anchun, 2002. Geochemical characteristics and their implications to provenance and environment of surface sediments from the South Okinawa Trough[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 680-686(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zengjie, CUI Yi, CHEN Bijuan, 2007. Effect of net-cage culture on water environment in Tangdao Bay[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 26(3): 1190-1194(in Chinese with English abstract).
- LI Li, WANG Hui, LUOBU Ciren, et al., 2008. Characterizations and paleoceanographic significances of organic and inorganic carbon in northern south China sea during past 40 ka marine[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(6): 79-85(in Chinese with English abstract).
- LI Linwei, WU Pan, CAO Xingxing, et al., 2022. Spatial-temporal distribution of organic matter in surface sediments of Caohai wetland in Weining, Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 41(1): 153-161.
- LI Longqiang, HU Hong, LÜ Xiangli, et al., 2020. Contents and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Central Bohai Sea and the Northern Yellow Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 42(1): 84-92(in Chinese with English abstract).
- LI Xuejie, LIAO Zhiliang, TIAN Chengjing, et al., 2022. Distribution pattern of volcanic glasses in the surficial sediments of the South China Sea and their provenance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 42(3): 1-8(in Chinese with English abstract).
- LI Yue, WANG Jianpo, ZHANG Yuanyuan, et al., 2008. Perspective of carbonates during the Ordovician-Silurian transition in South China: Implications of their palaeo-climate response[J]. *Progression on Natural Sciences*, 18(10): 122-128(in Chinese with English abstract).
- LI Zhixing, QIN Mingkuan, LIU Xinyang, et al., 2022. Characteristics, genesis and research significances of multi-elements enrichment layer of black series[J]. *World Nuclear Geoscience*, 39(1): 14-26(in Chinese with English abstract).
- LIANG Yuzhao, RAN Lihua, ZHANG Lanlan, 2021. The spatial distribution of biogenic silica content and diatom abundance in the surface sediments of the China Seas[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 38(1): 112-130(in Chinese with English abstract).
- LIN I I, HU C M, LI Y H, et al., 2011. Fertilization potential of volcanic dust in the low-nutrient low-chlorophyll Western North Pacific subtropical gyre: Satellite vidence and laboratory study[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(1): GB1006.
- LIN Zhiyu, TONG Jinlu, CHEN Min, et al., 2011. Distribution and variation isotope of primary productivity in the Yellow Sea and the East China Sea in summer[J]. *Journal of Isotopes*, 24(S1): 95-101(in Chinese with English abstract).
- LIU Benpei, CHEN Fen, WANG Wuli, 1986. On the non-marine juro-cretaceous boundary in eastern Asia in the light of event stratigraphy[J]. *Earth Science*, 11(5): 465-472(in Chinese with English abstract).
- LIU Qiang, GU Zhaoyan, LIU Jiaqi, et al., 2005 Organic carbon isotope records and paleoclimatic environmental significance of sediments from Lake Ma'er in Huguangyan since 62 ka BP Marine[J]. *Geology and Quaternary Geology*, 25(2): 115-126(in Chinese with English abstract).
- LIU Rong, ZHANG Kun, LIU Zhaojun, et al., 2021. Research on Oil Shale Enrichment and Geological Events in China[J]. *Journal of Sedimentology*, 39(1): 10-28(in Chinese with English abstract).
- LIU Shugen, MA Wenxin, JANSAN L B, et al., 2011. Characteristics of shale reservoirs in the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in the eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Rock Sciences*, 27(8): 2239-2252(in Chinese with English abstract).
- MAO Xiaoping, CHEN Xiurong, CHEN Yongjin, et al., 2024a. exploring the enrichment law of organic matter in terrestrial shale based on primary productivity and carbon sequestration laws[J]. *Earth Science*, 49(4): 1224-1244(in Chinese with English abstract).

- MAO Xiaoping, CHEN Xiurong, WANG Zhijing, et al., 2024b. Relationship between organic matter enrichment degree of black shale and paleoclimate: Taking the shale of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze region as an example[J]. Chinese Journal of Geology, 59(5): 1151-1172(in Chinese with English abstract).
- MAO Xiaoping, CHEN Xiurong, LI Shuxian, et al., 2025a. The control of water depth on organic matter enrichment in confined environment[J]. Acta Geologica Sinica, 99(4): 1353-1368(in Chinese with English abstract).
- MAO Xiaoping, CHEN Xiurong, LI Zhen, et al., 2025b. Shale sedimentary patterns and organic matter enrichment patterns of the Wufeng Longmaxi Formation in the Sichuan Basin[J]. Journal of Sedimentology, 43(2): 701-733(in Chinese with English abstract).
- MAO Xiaoping, CHEN Xiurong, WANG Zhijing, et al., 2025. Constraints of weathering intensity in different climate zones on coal accumulation environment[J]. Scientific Reports, 15: 8231. doi: 10.1038/s41598-025-92546-z.
- AO Yingyan, FANG Xiang, YU Shenyang, et al., 2021. First Record of Cheirocrinus penniger (Eichwald, 1842) (Cystoidea) from the Ordovician Miaopo Formation in Western Hubei, China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 60(2): 215-223(in Chinese with English abstract).
- MOU Chuanlong, GE Xiangying, XU Xiaosong, et al., 2014. Lithofacies Palaeogeography of the Late Ordovician and its petroleum geological significance in Middle-Upper Yangtze Region[J]. Journal of Palaeogeography, 16(4): 427-440(in Chinese with English abstract).
- MUHONG C, LANLAN Z, LILI Z, et al., 2008. Preservation of radiolarian diversity and abundance in surface sediments of the South China Sea and its environmental implication[J]. Journal of China University of Geosciences, 19(3): 217-229.
- NIE Haikuan, JIN Zhijun, MA Xin, et al., 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).
- PEI Haoxiang, LI Yanhe, FU Yong, et al., 2020. Metallogenic mechanism of "Datangpo type" manganese deposits in Gaodi, Guizhou province: Constrains from sulfur and carbon isotopes[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(5): 651-662(in Chinese with English abstract).
- PENG Junwen, 2022. Other controlling factors for the enrichment of redox sensitive elements in marine sediments-sea level fluctuations[J]. Chinese Science: Earth Science, 52(11): 2254-2274(in Chinese with English abstract).
- QI Zhi, DING Chao, HAN Xing, et al., 2020. Spatial heterogeneity of black soil moisture and nutrients in gully slope erosion catchment areas[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 40(5): 79-87(in Chinese with English abstract).
- QIN Yan, ZHANG Wenzheng, PENG Ping'an, et al., 2009. Uranium occurrence status and enrichment mechanism of uranium rich source rocks in the Yanchang Formation of the Ordos Basin[J]. Journal of Rock Sciences, 25(10): 469-2476(in Chinese with English abstract).
- RONG Jiayu, WANG Yi, ZHANG Xiaole, 2012. Tracking shallow marine red beds through geological time as exemplified by the lower Telychian (Silurian) in the Upper Yangtze Region, South China[J]. Science China: Earth Science, 42(6): 862-878(in Chinese with English abstract).
- SCHLANGER S O, JENKYN S H C, 1976. Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences[J]. Geologie en Mijnbouw, 55(3/4): 179-184.
- SHEN Shuzhong, ZHANG Hua, 2017. What caused the five mass extinctions?[J]. Chinese Science Bulletin, 62(11): 1119-1135(in Chinese with English abstract).
- SHI Zhensheng, WANG Hongyan, ZHAO Shengxian, et al., 2023. Rapid transgressive shale characteristics and organic matter distribution of the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi Formations in southern Sichuan Basin, China[J]. Journal of Palaeogeography, 25(4): 788-805(in Chinese with English abstract).
- SOBEK S, DURISCH-KAISER E, ZURBRÜGG R, et al., 2009. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source[J]. Limnology and Oceanography, 54(6): 2243-2254.
- SONG Wenjie, ZHANG Jin, GUO Jingjing, 2018. Distribution characteristics of organic carbon and inorganic carbon in Hulun Lake sediments[J]. Northern Environment, 30(6): 97-100(in Chinese with English abstract).
- SONG Yilong, CHEN Jingan, YANG Haiquan, et al., 2016. Sources and spatial and temporal variability characteristics of organic matter in sediments of Fuxian Lake, Yunnan[J]. Bulletin of Mineral Rock Geochemistry, 35(4): 607, 618-624(in Chinese with English abstract).
- SUN Daixi, XIE Zijian, WANG Yang, et al., 2023. Distribution characteristics and source analysis of nutrients in sediments of Xingkai Lake[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 13(6): 1976-1986(in Chinese with English abstract).
- SUN Xingli, CHEN Jianfa, LIU Wenhui, et al., 2004. Geochemical characteristics of cherts of Lower Cambrian in the Tarim Basin and its implication for environment[J]. Petroleum Exploration and Development, 31(3): 45-48(in Chinese with English abstract).
- TANG Peng, ZHANG Yuchen, WANG Yi, et al., 2023. Katian-hirnantian(late Ordovician) stratigraphic sequences in the kalpin-Jiashi area, northwestern Tarim basin, NW China[J]. Journal of Stratigraphy, 47(4): 363-395(in Chinese with English abstract).
- TIAN Yangyang, 2020. Spatial Distribution Characteristics and Environmental Indications of Organic Matter in Surface Sediment of Xingyun Lake[D]. Kunming: Yunnan Normal University(in Chinese with English abstract).
- TURNWITSCH R, DALE A, LAHAJNAR N, et al., 2017. Can neap-spring tidal cycles modulate biogeochemical fluxes in the abyssal near-seafloor water column?[J]. Progress in Oceanography, 154: 1-24.
- WALKER-TRIVETT C A, KENDER S, BOGUS K A, et al., 2024. Oceanic anoxic event 2 triggered by Kerguelen volcanism[J]. Nature Communications, 15(1): 5124.
- WANG Feng, CHEN Yaxin, JIA Zhigang, 2019. Analysis of Geological Conditions for Stone Coal Mineralization in Southern Ankang City[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, (1): 65-68(in Chinese with English abstract).

- WANG Hongyan, LIU Dexun, WEI Yuanjiang, et al., 2022. Progress and Application of Theory and Geological Evaluation Technology for Large Area and High Abundance Marine Shale Gas Enrichment[J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 50(3): 69-81(in Chinese with English abstract).
- WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al., 2023. Microfacies types and distribution of epicontinental shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 50(1): 51-64(in Chinese with English abstract).
- WANG Wenjie, 2000. Propagation of Tidal Waves and Development of Sea-Bottom Sand Ridges and Sand Ripples in Northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 19(1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WANG Wenwen, CHEN Junyi, JIANG Xia, et al., 2021. Release effect analysis of organic matter in surface sediments of Hulun[J]. *Lake Environmental Science Research*, 34(4): 812-823(in Chinese with English abstract).
- WANG Xinping, LÜ Mingquan, WEN Wen, et al., 2023. Organic carbon burial rate and its influencing factors in pond sediments in hilly and mountainous area of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 43(24): 10216-10227(in Chinese with English abstract).
- WANG Yi, RONG Jiayu, ZHAN Renbin, et al., 2013. On the Ordovician-Silurian boundary strata in southwestern Hubei, and the Yichang uplift[J]. *Journal of Stratigraphy*, 37(3): 264-274(in Chinese with English abstract).
- WANG Yuman, LI Xinjing, DONG Dazhong, et al., 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 Yuming, WANG Yukun, CHEN Xiaohong, 2022. Spatial patten and provenance of heavy metal elements in the surface sediments in the northern South China Sea shelf[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 61(1): 139-150(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhentao, ZHOU Hongrui, WANG Xunlian, et al., 2015. Ordovician geological events group in the west and south Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1990-2004(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhongbo, LI Rihui, ZHANG Zhijun, et al., 2016. Grain size composition and sedimentary zoning of surface sediments in the Bohai Sea and adjacent coastal areas[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 36(6): 101-109(in Chinese with English abstract).
- WEI Guodong, TAN Xiucheng, LIU Rui, et al., 2024. The coupling mechanism between geomorphology of shale sedimentary and differential enrichment of shale gas in Longmaxi Formation in Changning area[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(2): 253-266(in Chinese with English abstract).
- WEI Quan, SONG Pengpeng, SHAO Xuelin, et al., 2014. Influence of temperature, aeration and sediment on decomposition of Chaetomorpha sp[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(9): 2329-2336(in Chinese with English abstract).
- WEN Jun, ZHANG Hangfei, LIU Zhicheng, et al., 2023. Sedimentary environment and metallogenic model of Early Triassic sandstone-shale-hosted copper deposits in southern Sichuan and its supplement to Emeishan mantle plume metallogenic system[J]. *Mineral Deposits*, 42(3): 598-617(in Chinese with English abstract).
- WU Yujie, CHEN Congxi, YUAN Feng, 2021. Temporal-spatial Distribution Regularities of Kaolin Deposits in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 42(5): 628-640(in Chinese with English abstract).
- XIA Jiandong, ZHU Yunjie, GAO Yaping, et al., 2020. Risk assessment and pollution source analysis based on double models for heavy metal pollution in xingyun lake sediment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 33(9): 2103-2109(in Chinese with English abstract).
- XIA Zhiying, RAN Lihua, MARTIN G W, et al., 2022. The impact of Pinatubo volcanic ash deposition on the marine environment and diatom growth in the South China Sea in 1991[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 42(2): 28-35(in Chinese with English abstract).
- XIE Futai, ZHOU Xiang, TAO Zui, et al., 2021. MODIS-based Monthly Dataset of Particulate Organic Carbon Flux in the Bottom of the Global Ocean Euphotic Layer (2003-2018)[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 5(1): 11-18(in Chinese with English abstract).
- XIE Haoran, LIANG Chao, WU Jing, et al., 2023. The impact of volcanic activity on sedimentary paleoenvironments and organic matter enrichment[J]. *Journal of Paleogeography*, 25(4): 768-787(in Chinese with English abstract).
- XU Jinlong, 2024. Distribution and age of the Ordovician marine red beds in southern Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 59(1): 210-223(in Chinese with English abstract).
- YANG Yixun, JIANG Xiaoxu, LI Mingsheng, et al., 2022. Analysis of spatial variation characteristics of soil organic carbon content and density in the Sanjiang Plain[J]. *Soil Bulletin*, 53(6): 1313-1319(in Chinese with English abstract).
- YANG Zeguangu, FENG Zhiqiang, WANG Aiguo, et al., 2022. Characteristics and Genetic Control Factors of Main Source Rocks in the Persian Gulf Basin[J]. *Offshore Oil*, 42(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- YIN Pengfei, XIONG Jing, JIA Yuxin, et al., 2023. Spatial distribution and evaluation of nutrients and grain size in surface sediments of Qilu Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 46(10): 32-41(in Chinese with English abstract).
- YIN Shanchun, 1991. Chinese peat resources and their development and utilization[M]. Beijing: Geological Publishing House: 19(in Chinese).
- YÜCESOY F, ERGIN M, 1992. Heavy-metal geochemistry of surface sediments from the southern Black Sea shelf and upper slope[J]. *Chemical Geology*, 99(4): 265-287.
- ZHAI Yusheng, PENG Runming, DENG Jun, et al., 2001. Regional metallogeny and exploratory thinking[J]. *Geoscience*, 15(2): 151-156(in Chinese with English abstract).
- ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al., 2013. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1): 14-26(in Chinese with English abstract).