

文章编号: 1671-1505(2024)05-1058-14 DOI: 10.7605/gdxb.2024.05.080

鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组火山凝灰岩发育特征及其对页岩有机质富集的影响*

罗 凡¹ 段 轲^{1,3} 张 号² 许露露¹ 王 亿¹ 陈 威¹ 杨 洁¹

1 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034

2 湖北煤炭地质勘查院, 湖北武汉 430070

3 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430205

摘 要 鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组富有机质泥页岩中含多层火山凝灰岩, 但前人对火山活动与海相页岩有机质富集的内在关联缺乏系统的研究。依托咸丰地区鄂咸页 1 井岩心及露头资料对五峰组—龙马溪组富有机质泥页岩及火山凝灰岩系统采样, 开展岩矿鉴定、微量元素、稀土元素及有机碳含量 (TOC) 测试, 阐明了五峰组—龙马溪组火山凝灰岩分布特征、源岩成分、构造背景及成因机制, 探讨了该沉积时期火山活动及其对页岩有机质富集的影响。结果表明, 五峰组—龙马溪组可分为火山凝灰岩密集段、次密集段和不发育段, 火山凝灰岩原始岩浆性质以中性安山岩为主, 火山灰来源于扬子北缘与古秦岭洋的碰撞闭合形成岛弧的火山喷发事件。火山灰是晚奥陶世—早志留世陆源碎屑补给不足的中扬子滞留海盆重要的物质来源, 一方面为海洋微生物生长提供了丰富的营养元素, 提高了海洋古生产力; 另一方面火山作用促使海洋形成缺氧环境, 利于有机质的埋藏与保存。研究成果可为鄂西地区五峰组—龙马溪组页岩气进一步勘探提供基础地质资料。

关键词 鄂西地区 五峰组—龙马溪组 火山凝灰岩 物源 有机质富集

第一作者简介 罗凡, 男, 1988 年生, 工程师, 硕士, 长期从事基础地质、页岩气地质调查工作。E-mail: 179961510@qq.com。

通讯作者简介 段轲, 男, 1989 年生, 高级工程师, 硕士, 长期从事页岩气地质调查研究。E-mail: 359597913@qq.com。张号, 男, 1989 年生, 高级工程师, 主要从事基础地质、矿产地质、油气地质工作。E-mail: zhang_haocug@163.com。

中图分类号: P531 文献标志码: A

Development characteristics of volcanic tuff of the Wufeng–Longmaxi Formations in Xianfeng area of western Hubei and its influence on enrichment of organic matter in shale

LUO Fan¹ DUAN Ke^{1,3} ZHANG Hao² XU Lulu¹ WANG Yi¹ CHEN Wei¹ YANG Jie¹

1 Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China

2 Hubei Coal Geological Exploration Institute, Wuhan 430070, China

3 Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution of Hubei Province, Wuhan 430205, China

* 湖北省地质局“鄂西地区中浅层页岩气资源潜力调查评价”项目 (编号: KCDZ2024-34) 和古生物与地质环境演化湖北省重点实验室开放研究基金项目 (编号: PEL-202005) 联合资助。[Co-funded by “The investigation and evaluation of middle-shallow shale gas resource potential in western Hubei” Project of Hubei Geological Bureau (No. KCDZ2024-34) and the Open Research Fund of the Key Laboratory of Paleontology and Geoenvironmental Evolution of Hubei Province (编号: PEL-202005)]

收稿日期: 2024-02-22 改回日期: 2024-05-09

Abstract The organic-rich shale of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Xianfeng area of western Hubei Province contains multilayer volcanic tuff, but the internal relationship between volcanic activity and organic matter enrichment in marine shales has not been systematically studied. Based on the core and outcrop data of Well XY 1 in Xianfeng area, the organic-rich mud shale and volcanic tuff of Wufeng–Longmaxi Formations were systematically sampled, rock and ore identification, trace element, rare earth element and organic carbon content (TOC) tests were carried out, and the distribution characteristics, source rock composition, tectonic setting and genetic mechanism of volcanic tuff of Wufeng–Longmaxi Formations were expounded. The volcanic activity in this sedimentary period and its influence on the enrichment of organic matter in shale are discussed. The results show that the Wufeng–Longmaxi Formations can be divided into dense, sub-dense and undeveloped tuff segments. The primary magmatic properties of the tuff were mainly neutral andesite, and the volcanic ash originates from the volcanic eruption event of the island arc formed by the collision between the northern margin of the Yangtze and the ancient Qinling Ocean. Volcanic ash was an important material source in the Middle Yangtze Retention Basin where terrigenous detritus supply was insufficient in Late Ordovician and Early Silurian. On one hand, volcanic ash provided abundant nutrients for the growth of marine microorganisms and improved the marine palaeoproductivity. On the other hand, volcanism promoted the formation of anoxic environment in the ocean, which was conducive to the burial and preservation of organic matter. The results can provide basic geological data for further exploration of shale gas in the Wufeng–Longmaxi Formations in western Hubei Province.

Key words western Hubei Province, Wufeng–Longmaxi Formations, volcanic tuff, provenance, organic matter enrichment

About the first author LUO Fan, born in 1988, is an engineer with his masteral degree. He is mainly engaged in basic geology and shale gas geological survey. E-mail: 179961510@qq.com.

About the corresponding authors DUAN Ke, born in 1989, is a senior engineer. He is mainly engaged in shale gas geological investigation and research. E-mail: 359597913@qq.com. ZHANG Hao, born in 1989, is a senior engineer. He is mainly engaged in basic geology, mineral geology, oil and gas geology. E-mail: zhang_haocug@163.com.

鄂西咸丰地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组富有机质细粒沉积岩中发育大量薄层火山凝灰岩，前人对该套火山凝灰岩的岩石结构特征、构造背景及火山灰形成年代做了较深入的研究（谢尚克等，2012；王玉满等，2018）。该套火山凝灰岩分布范围大，层数多，揭示了奥陶纪—志留纪之交的扬子地区发生过的连续大规模火山喷发活动（Yang *et al.*, 2019；Du *et al.*, 2021），但对形成此套火山凝灰岩对应的火山活动与鄂西地区五峰组—龙马溪海相页岩有机质富集的内在关联缺乏系统的研究，且存在争议。部分学者认为形成火山凝灰岩的母质火山灰给海洋带来丰富的营养元素，提高了海洋古生产力，利于有机质的富集（王书荣等，2013；韩载华等，2020），而部分学者认为火山凝灰岩沉积与页岩有机质富集两者关联度并不大

（Shen *et al.*, 2012；王玉满等，2019）。

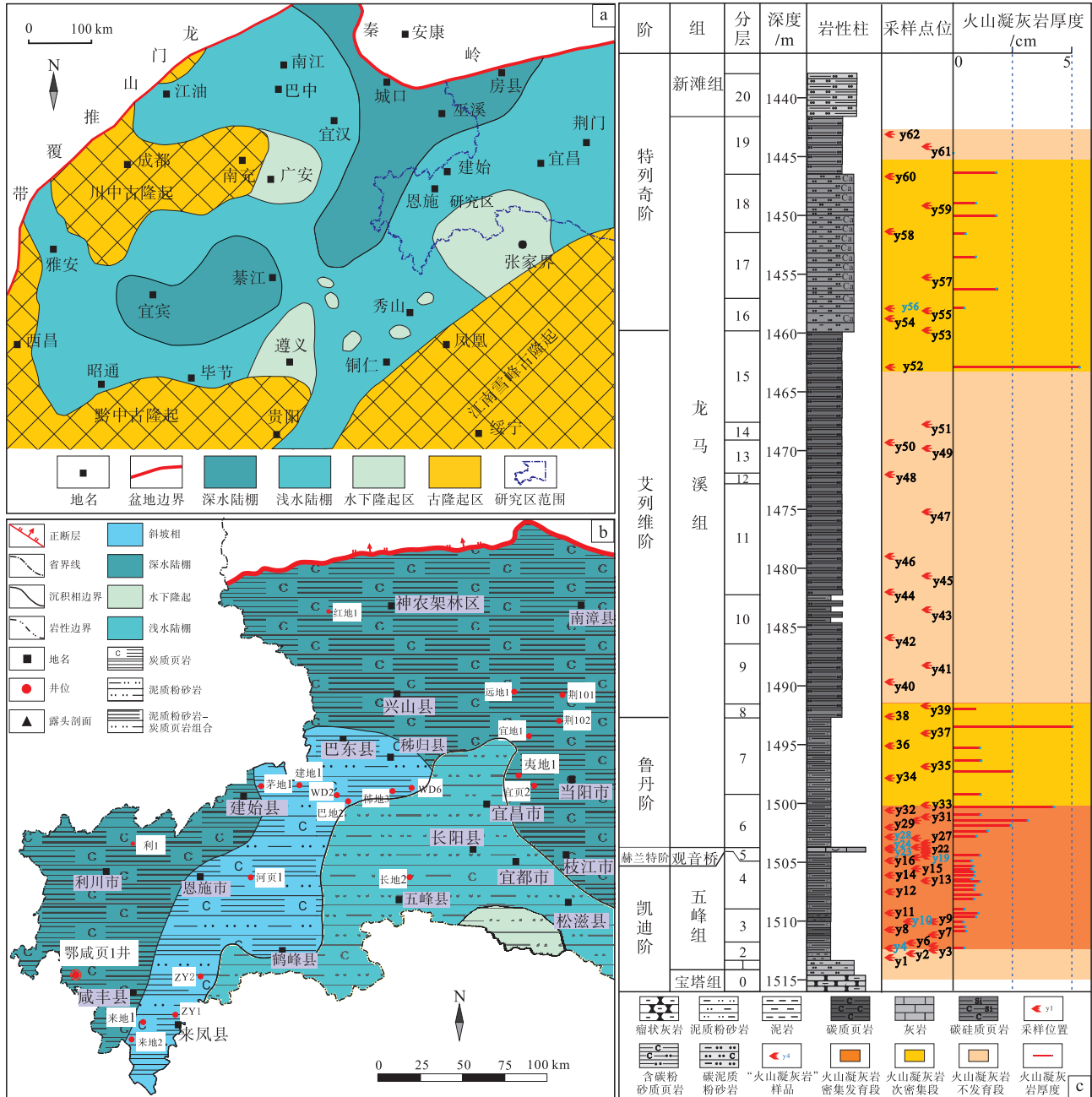
因此，笔者以鄂西咸丰地区鄂咸页 1 井及周边剖面露头资料为研究对象，阐明五峰组—龙马溪组火山凝灰岩发育的岩石学特征及垂向分异性，分析与火山凝灰岩发育段相对应的富有机质页岩的地球化学特性，探讨了鄂西咸丰地区晚奥陶世—早志留世火山活动强度差异及其对页岩有机质富集的影响，为鄂西地区油气勘探提供了依据。

1 地质背景

鄂西地区位于中扬子湘鄂西褶皱带内，北与秦岭—大别造山带相接，西与四川盆地毗邻，东南邻近江南—雪峰逆冲推覆带。奥陶纪与志留纪转折时期，扬子板块与华夏板块汇聚作用不断增强，致使湖南雪峰山、黔中以及川中地区持续隆升，鄂西

地区由台地相转为陆棚相，成为被川中古隆起、黔中古隆起和江南雪峰古隆起等古陆所围限的隆后滞留盆地(图 1-a)，与此同时，板块碰撞引发频繁的火山活动形成多期次的火山灰沉积(牟传龙等，2014；聂海宽等，2017)。受湘鄂西水下隆起的影响，鄂西地区五峰组—龙马溪组沉积环境变化较大，地层的岩石组合、元素地球化学特征、岩相、

沉积厚度也因此有较大的不同(图 1-b)。鄂西咸丰地区靠近隆后滞留盆地中心，地层处于连续沉积，是研究五峰组—龙马溪组火山凝灰岩发育特征及沉积期火山活动的有利区域。鄂咸页 1 井五峰组岩性为灰黑色含碳硅质岩、碳硅质页岩，属滞留盆地相沉积，顶部发育 30 cm 的灰色含生物介壳泥灰岩(观音桥层)与上覆龙马溪组区分开。龙马溪



a—上扬子板块五峰组—龙马溪组沉积期岩相古地理图(引自聂海宽等, 2017; 有修改); b—鄂西地区五峰组—龙马溪组沉积期岩相古地理图; c—鄂咸页 1 井地层及采样位置图

图 1 鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组综合研究

Fig. 1 Comprehensive study of the Wufeng-Longmaxi Formations in Xianfeng area, western Hubei Province

组岩性由灰黑色含碳硅质页岩、粉砂质页岩、泥岩及泥质粉砂岩等组成,属浅水碎屑岩陆棚相沉积。

2 样品采集与分析方法

样品采自于鄂西咸丰地区的鄂咸页 1 井,该井获取了新滩组底部至宝塔组顶部的岩心 83.35 m,其中五峰组厚度为 10.50 m,龙马溪组厚约 61.77 m。依据鄂咸页 1 井岩石组合特征,按照一定间距共采集新鲜岩石样品 62 件(图 1-c),样品岩性主要为含碳硅质页岩、碳质泥页岩及火山凝灰岩等,开展总有机碳含量(TOC)、薄片鉴定、微量及稀土元素分析,样品实验均在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成。薄片鉴定采用偏光显微镜观察鉴定。地化分析样品在实验前进行破碎、研磨、过筛制成 200 目的岩粉,其中 TOC 采用 Multi EA4000 碳硫分析仪测试完成,主量元素使用原子吸收分光仪采用化学滴定法完成测试。微量元素及稀土元素则采用酸溶法,实验仪器为电感耦合等离子质谱仪,具体实验测试方法参考许露露等(2022)文章。

3 火山凝灰岩发育特征

3.1 岩石学特征

鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组黑色页岩内均发育颜色十分醒目的火山凝灰岩层(图 2),野外露头上,火山凝灰岩在潮湿的情况下通常可以有各种不同的颜色,主要呈现为蓝灰色(图 2-a)、灰黄色和灰白色(图 2-b),但风化后的颜色通常是黄色或灰白色,在黑色岩系地层中非常醒目,并且容易辨认,厚度分布在 0.5~60 mm 之间,由于火山凝灰岩内富含黏土矿物,可塑性也很强,常发生滑脱变形,致使火山凝灰岩局部呈透镜状。野外常见纹理厚度为 1~2 mm 不等,发育富含黏土矿物的水平层理。

实验测试发现,火山凝灰岩内通常含有黄铁矿条带或结核(图 2-a)。通过火山凝灰岩在显微镜下观察,火山凝灰岩具泥岩结构,主要由黏土矿物以及一些斑晶矿物组成,斑晶矿物主要为石英和长石等,含量一般小于 10%,同时还可见到火山玻璃、磷灰石、石榴子石、锆石等矿物,黏土矿物沿着斑晶颗粒的边缘生长(图 2-e)。鄂咸页 1 井五

峰组硅质岩薄片鉴定表明,硅质岩中亦可见少量火山作用形成的火山凝灰岩纹层(图 2-f)。X 衍射分析结果表明,五峰组—龙马溪组火山凝灰岩主要由黏土矿物和非黏土矿物组成,黏土矿物主要为伊利石和伊蒙混层,其中,伊利石(I)相对含量为 55%~84%,伊蒙混层(I/S)相对含量为 13%~37%,非黏土矿物主要有石英、长石以及黄铁矿等(表 1)。

3.2 垂向分布特征

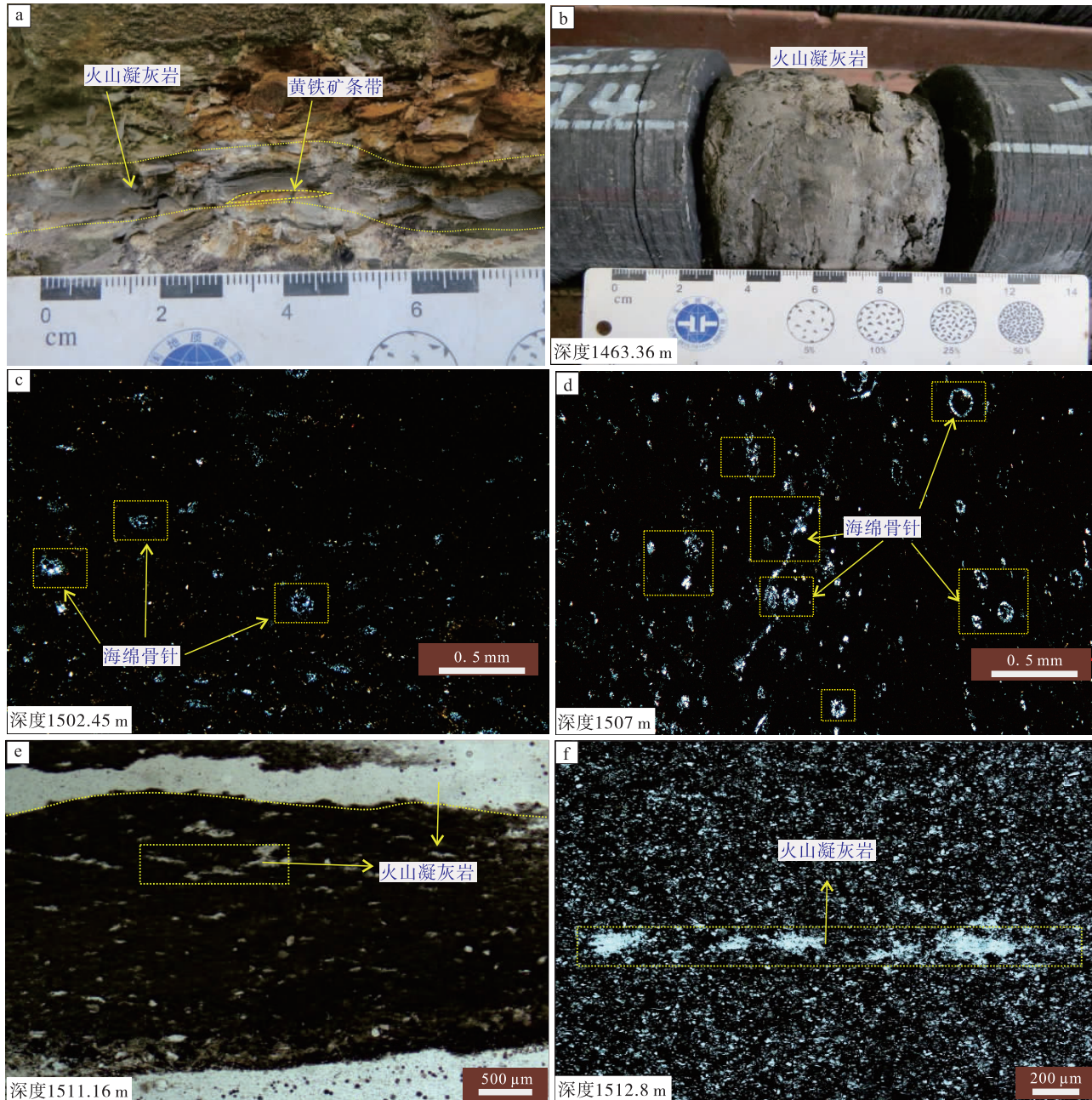
依据火山凝灰岩特有颜色(灰色)及矿物成分对鄂咸页 1 井岩心中的五峰组—龙马溪组火山凝灰岩展开识别,将火山凝灰岩出现的位置标定于相应的沉积柱状图(图 1-c)上。在该剖面凯迪阶—埃隆阶中部(厚约 72.7 m)观察到单层厚度在 0.3 cm 以上的火山凝灰岩 39 层(表 2),不均匀分布于五峰组中上部及龙马溪组上部。

从火山凝灰岩发育频次和规模看,五峰组—龙马溪组共计有 3 个火山凝灰岩发育段(图 1-c)。(1) 1500.4~1511.65 m 处为火山凝灰岩密集段 I,共识别出 25 层火山凝灰岩层,火山凝灰岩频率为 2.22 条/m,其中,在凯迪阶页岩序列底部存在 7 层厚度小于 5 cm 的火山凝灰岩层。上凯迪阶层段的 5 个火山凝灰岩层显示出厚度从 1507.5 m 处的 2 cm 增加到 1504.5 m 处的 5 cm 的趋势。最下部鲁丹阶层段(1504~1502 m)的沉积物中存在 7 个火山凝灰岩层,值得注意的是,这些层的厚度通常超过 1 cm。(2) 1491.25~1500.4 m 处为火山凝灰岩次密集段 II,共发育 6 层火山凝灰岩,火山凝灰岩频率为 0.67 条/m。(3) 1445.75~1463.75 m 处为火山凝灰岩次密集段 III,火山凝灰岩频率为 0.29 条/m,由 8 层火山凝灰岩组成,位于埃隆阶的 15 小层页岩中火山凝灰岩厚度最大达 6.5 cm,往上部火山凝灰岩厚度为 0.4~1.4 cm,火山凝灰岩的厚度及频率均低于密集段 I。

火山灰层的频率和厚度是火山作用的持续时间和强度的直接反映(王玉满等,2019)。因此,五峰组—龙马溪组火山凝灰岩的垂直分布特征提供了从凯迪阶到特列奇阶时期的连续火山喷发记录,在鲁丹阶早期发生了更频繁和更强烈的火山喷发事件。

3.3 源岩属性及构造背景

火山凝灰岩中的 Nb、Ti、Zr、Y 等元素组合



a—咸丰活龙坪乡五峰组底部火山凝灰岩；b—鄂咸页1井龙马溪组上部火山凝灰岩，样品编号 y52，深度 1463.36 m；c—鄂咸页1井含碳硅质岩中海绵骨针薄片镜下特征，样品编号 y29，深度 1502.45 m；d—鄂咸页1井含碳含泥硅质岩含碳硅质岩中海绵骨针化石，样品编号 y13，深度 1507 m；e—鄂咸页1井五峰组下部火山凝灰岩镜下特征，样品编号 y8，深度 1511.16 m；f—鄂咸页1井五峰组硅质岩中火山凝灰岩纹层镜下特征，样品编号 y6，深度 1512.8 m

图 2 鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组火山凝灰岩野外露头、岩心及镜下特征

Fig. 2 Outcrop, core and microscopic characteristics of volcanic tuff of the Wufeng-Longmaxi Formations in Xianfeng area, western Hubei Province

常被用作判别原岩属性。将在鄂西咸丰地区所采集到的 8 个火山凝灰岩样品(图 1-c 标记为蓝色样品)投入到 Nb/Y—Zr/TiO₂ 判别图(图 3)中，结果表明绝大多数的样品落在了流纹安山岩、粗面安

山岩和安山岩范围内。

利用 La/Th—Hf 源岩判别图解对五峰组—龙马溪组火山凝灰岩样品进行投点(图 3-b)。大多数火山凝灰岩样品比较集中的分布在安山岩岛弧物源

表 1 鄂西咸丰地区鄂咸页 1 井五峰组—龙马溪组火山凝灰岩 X 射线衍射分析结果

Table 1 X-ray diffraction analysis results of volcanic tuff of the Wufeng and Longmaxi Formations in Well XY1 in Xianfeng area, western Hubei Province

编号	岩性	全岩定量分析/%									
		K	C	I	S	I/S	黏土总量	石英	钾长石	斜长石	黄铁矿
Y4	火山凝灰岩		3	84		13	67	27.8	1.3	2.2	1.7
Y10	火山凝灰岩			68		32	58	33.6	2.1	4.8	1.5
Y19	火山凝灰岩		13	55		34	63	31.7	1.4	3.1	0.8

表 2 鄂西咸丰地区鄂咸页 1 井五峰组—龙马溪组火山凝灰岩发育特征

Table 2 Development characteristics of volcanic tuff in the Wufeng and Longmaxi Formations of Well XY1 in Xianfeng area, western Hubei Province

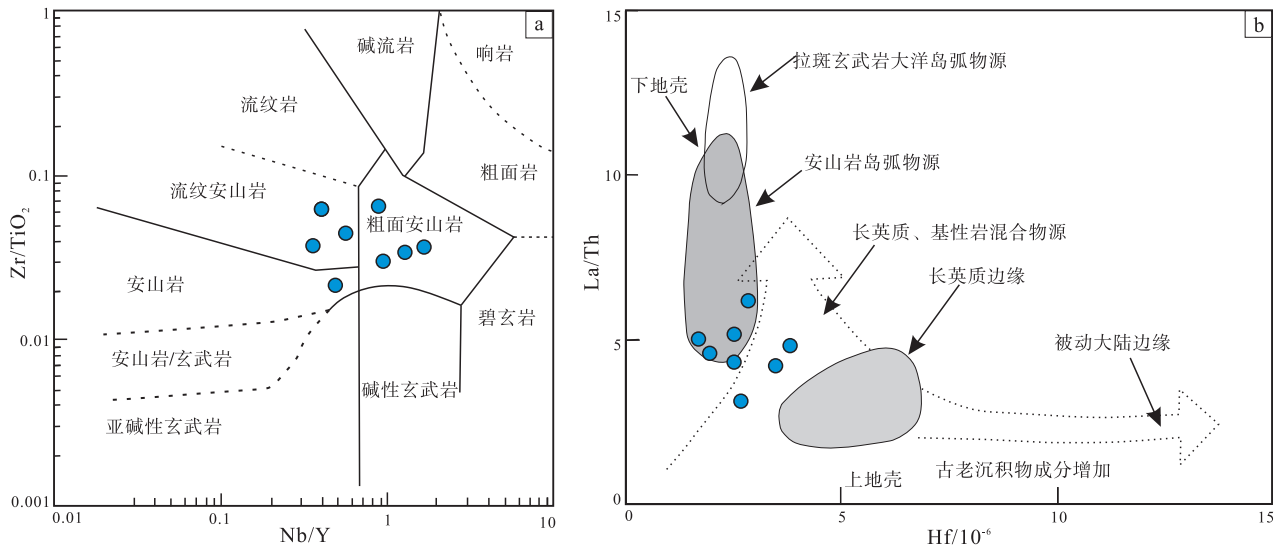
阶	组	层号	深度/m	层厚/m	岩性	TOC/%	火山凝灰岩发育情况
特 列 奇 阶	新 滩 组	20	1441.50~1441.81	0.31	泥质粉砂岩		/
		19	1441.81~1441.86	0.05	含碳粉砂质页岩	0.15~1.32(0.74)	/
		18	1441.86~1452.14	10.28	含碳粉砂质泥岩	1.1~2.12(1.45)	发育 3 层火山凝灰岩,厚度为0.9~1.4 cm
		17	1452.14~1457.66	5.52	含碳粉砂质页岩	2.38	发育3层火山凝灰岩,厚度为0.5~1.4 cm
		16	1457.66~1460.23	2.57	含碳泥质粉砂岩	1.68~1.9(1.8)	中部夹 1 层厚0.45 cm 的火山凝灰岩
艾 隆 阶	龙 马 溪 组	15	1460.23~1468.16	7.93	碳质页岩	1.64	中部发育1层厚约6.5 cm 的火山凝灰岩
		14	1468.16~1469.63	1.47	含碳粉砂质页岩	2.15	/
		13	1469.63~1472.43	2.80	黑色碳质页岩	1.89~2.1(2.01)	/
		12	1472.43~1473.34	0.91	含碳粉砂质页岩	1.23	/
		11	1473.34~1485.62	12.28	碳质页岩	0.41~1.33(0.88)	/
		10	1485.62~1487.39	1.77	碳质页岩	0.79~1.74(1.26)	/
		9	1487.39~1491.87	4.48	含碳粉砂质泥岩	1.25~1.62(1.43)	/
		8	1491.87~1493.57	1.70	含碳粉砂质泥岩	1~1.58(1.29)	顶部见1层厚2 cm 的火山凝灰岩
鲁 丹 阶		7	1493.57~1499.65	6.08	碳质页岩	1.82~2.01(1.89)	夹4层火山凝灰岩,厚度为1.2~5 cm
		6	1499.65~1504.15	4.50	含碳硅质泥岩	1.74~3.08(3.9)	夹7层火山凝灰岩,厚度为0.8~1.3 cm
赫 兰 特 阶		5	1504.15~1504.45	0.30	泥质灰岩	2.76~8.2(6.64)	/
凯 迪 阶	五 峰 组	4	1504.45~1509.35	4.90	含碳硅质泥岩	3.65~8.84(5.2)	夹12层火山凝灰岩,厚度为0.8~1.3 cm
		3	1509.35~1511.75	2.40	碳质页岩	3.13~4.37(3.7)	夹6层火山凝灰岩,厚0.3~1.2 cm
		2	1511.75~1513.23	1.48	含碳硅质页岩	0.2~4.47(3.17)	/
		1	1513.23~1514.08	0.85	含碳泥岩		/
宝 塔 组		0	1514.08~1516.36	2.28	泥质瘤状灰岩		/

区, 部分样品落入长英质、基性混合物源区, 这与 Nb/Y—Zr/TiO₂ 判别图解结论近乎一致。该结果与宜昌王家湾剖面 (胡艳华等, 2009a)、湖南桃源、新化、江苏句容等地剖面 (Su *et al.*, 2009) 及其他国内外大量奥陶—志留系钾质火山凝灰岩 (周明忠等, 2007) 统计结果基本一致, 表明鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组火山凝灰岩的原始岩浆性质以中性成分的安山岩为主。

火山凝灰岩的源岩大地构造背景研究常用

Pearce 等确立的 Nb-Y、Rb-(Y+Nb)、Zr-TiO₂ 和 Nb/Yb—Th/Yb 等元素地球化学判别图解完成 (Pearce and Norry, 1979; Pearce *et al.*, 1984; Pearce and Peate, 1995)。

Y-Nb 图解 (图 4-a) 显示, 大多数样品落入岛弧花岗岩和同碰撞花岗岩内。在 Zr-TiO₂ 图解 (图 4-b) 中, 多数样品集中在岛弧花岗岩+同碰撞花岗岩与板内花岗岩之间, Rb-(Y+Nb) 图解 (图 4-c) 显示所有样品均落在岛弧型花岗岩和板



a—Nb/Y—Zr/TiO₂ 判别图解，底图据 Winchester 和 Floyd (1977)；b—La/Th—Hf 判别图解，底图据 Floyd 和 Leveridge (1987)

图 3 鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组火山凝灰岩 Nb/Y—Zr/TiO₂ 及 La/Th—Hf 源岩判别图解

Fig. 3 Identification diagram of Nb/Y—Zr/TiO₂ and La/Th—Hf source rocks in volcanic tuff of the Wufeng and Longmaxi Formations, Xianfeng area, western Hubei Province

内花岗岩的交界线上以及接近岛弧花岗岩一侧。在 Nb/Yb—Th/Yb 图解(图 4-d) 中, 所有样品均落入大陆弧和大洋弧以及两者重合处。基于上述多维度的元素地球化学图解分析可知, 鄂西地区五峰组—龙马溪组内发育的火山凝灰岩其原火山构造背景应属岛弧环境, 这与前人对奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩的研究结果一致(胡艳华等, 2009b)。

现阶段关于五峰组—龙马溪组火山凝灰岩的来源主要有 2 种观点: 一是来自于扬子北缘与秦岭洋碰撞形成的岛弧(熊国庆等, 2019), 二是来自于南部扬子与华夏板块碰撞产生的岛弧(Su *et al.*, 2009)。针对中国华南问题现阶段得出的比较一致的观点是在晚奥陶—早志留世时期残留的华南洋已经关闭, 而扬子和华夏当时已经拼合完全(舒良树等, 2012), 证据如下: (1) 早古生代扬子与华夏陆块之间没有消失的洋壳残存记录, 没有早古生代蛇绿岩以及相关的火山岩浆活动记录。(2) 在前人划定的扬子与华夏陆块之间的分界线江绍、萍乡—郴州分界线两侧, 其沉积相和古地理分布是连续过渡的, 不存在沉积相跳相之说(牟传龙等, 2016; 葛祥英, 2020)。(3) 华南大陆东部早古生代岩浆活动呈面状分布, 不具板块俯冲碰撞的带状性质(舒良树, 2012), 扬子和华夏陆块在晚奥陶世—早志留世时期其实为一个统一的大陆块, 所谓

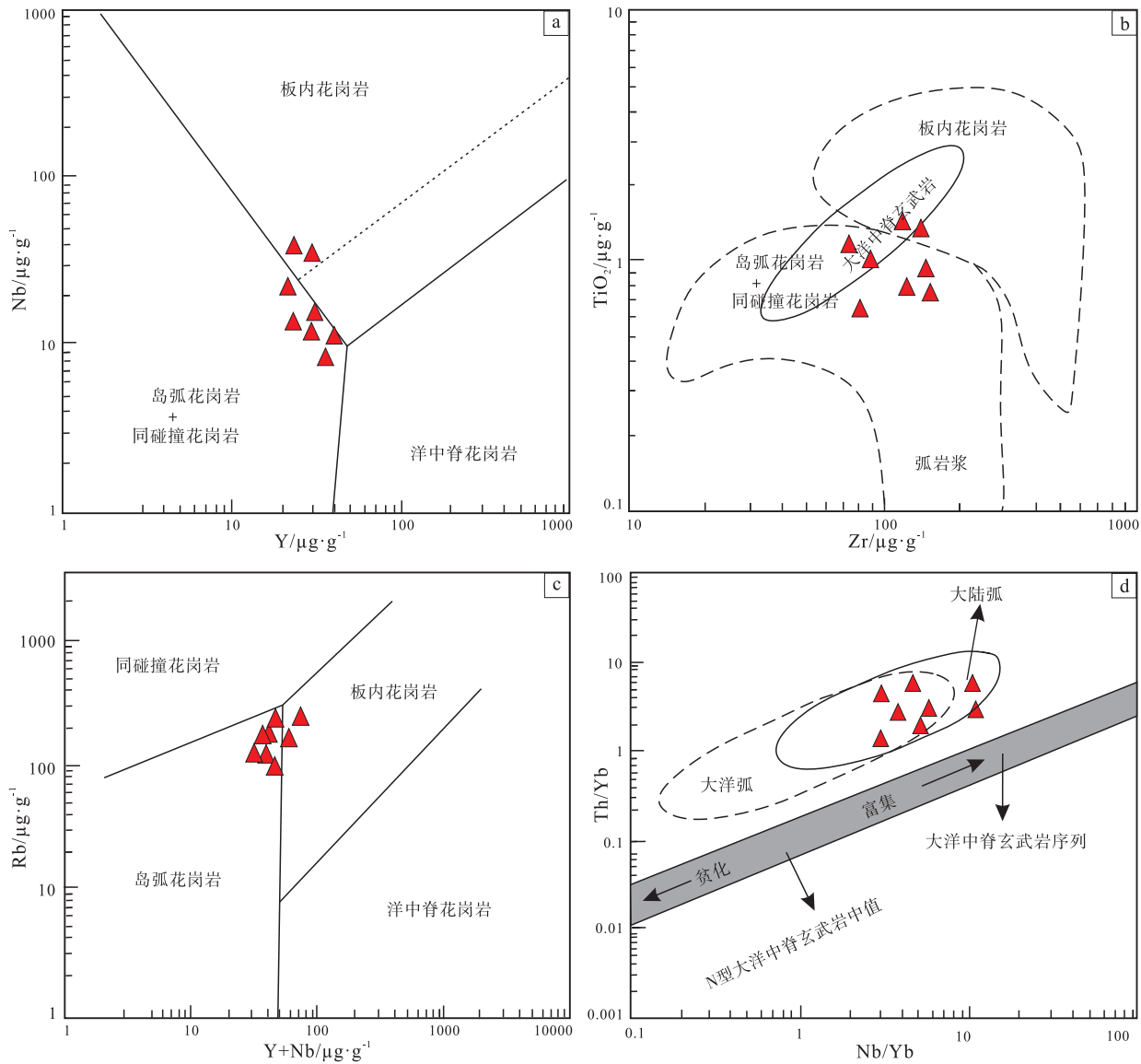
的碰撞挤压活动也仅仅是陆内板块揉皱挤压过程, 没有相应的火山岛弧活动。因此, 五峰组—龙马溪组火山灰极可能来自扬子北缘与秦岭洋碰撞形成的岛弧。

另外, 收集和实测五峰组—龙马溪组火山凝灰岩的厚度及分布规律的统计显示, 靠近扬子北缘的镇巴五星村及梁白 2 个剖面火山凝灰岩的层数均超过 60 层, 且厚度最厚者达到近 50 cm(葛祥英, 2020), 向南到四川盆地中部武隆黄草及黄莺乡等地, 火山凝灰岩最厚者近 10~20 cm, 再往南至贵州桐梓南坝子一带火山凝灰岩最厚仅 5 cm, 且层数也逐渐减少, 火山灰在飘落过程中一半会在就近的地方沉积较厚且较多, 越往远离火山口的地方火山灰厚度和层数均会相应减薄, 这也从侧面证明了火山灰应该来源于北部。

再结合咸丰地区的火山凝灰岩元素地球化学特征, 表明鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组火山凝灰岩来源于扬子北缘与秦岭洋的碰撞闭合产生岛弧的火山喷发事件。

4 火山活动对页岩有机质富集的影响

有机质的富集是一个复杂的物理化学过程, 主要涉及碎屑(营养)物质的供给、古海洋初级生产力和海水古氧相等因素(何龙等, 2019; 葛祥



a、c—Nb-Y 和 Rb-(Y+Nb) 图解，底图据 Pearce 等 (1984)；b—Zr-TiO₂ 图解，底图据 Pearce 和 Norry (1979)；
d—Nb/Yb-Th/Yb 图解，底图据 Pearce 和 Peat (1995)

图 4 鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组内火山凝灰岩构造背景判别图解

Fig. 4 Identification diagram of volcanic tuff tectonic background in the Wufeng and Longmaxi Formations, Xianfeng area, western Hubei Province

英等, 2021)。然而, 晚奥陶世—早志留世之交的鄂西地区, 受构造活动和全球气候的剧烈影响, 盆地性质、沉积物类型、古海洋生产力、海洋古氧相、沉积速率、碎屑 (营养) 物质的供给量等因素发生快速转变, 使五峰组和龙马溪组有机质富集机制非常复杂。

4.1 火山灰发育程度与 TOC 相关性

纵向上, 鄂咸页 1 井页岩中有机质含量呈现较

大变化, 自下而上, 五峰组—龙马溪组页岩有机质含量 (TOC) 具先逐渐增加后缓慢降低的趋势, 其中峰值段位于五峰组顶部与龙马溪组底部 (观音桥段附近) (图 5)。对鄂咸页 1 井火山凝灰岩发育段的 TOC 展开分段统计。火山凝灰岩密集段 I 页岩 TOC 含量介于 1.76%~9.68% 之间, 均值为 4.6%; 火山凝灰岩次密集段 II 的页岩 TOC 含量介于 1.04%~2.05% 之间, 均值为 1.72%; 火山凝灰岩次密集段 III 的页岩 TOC 含量介于 1.11%~2.37%

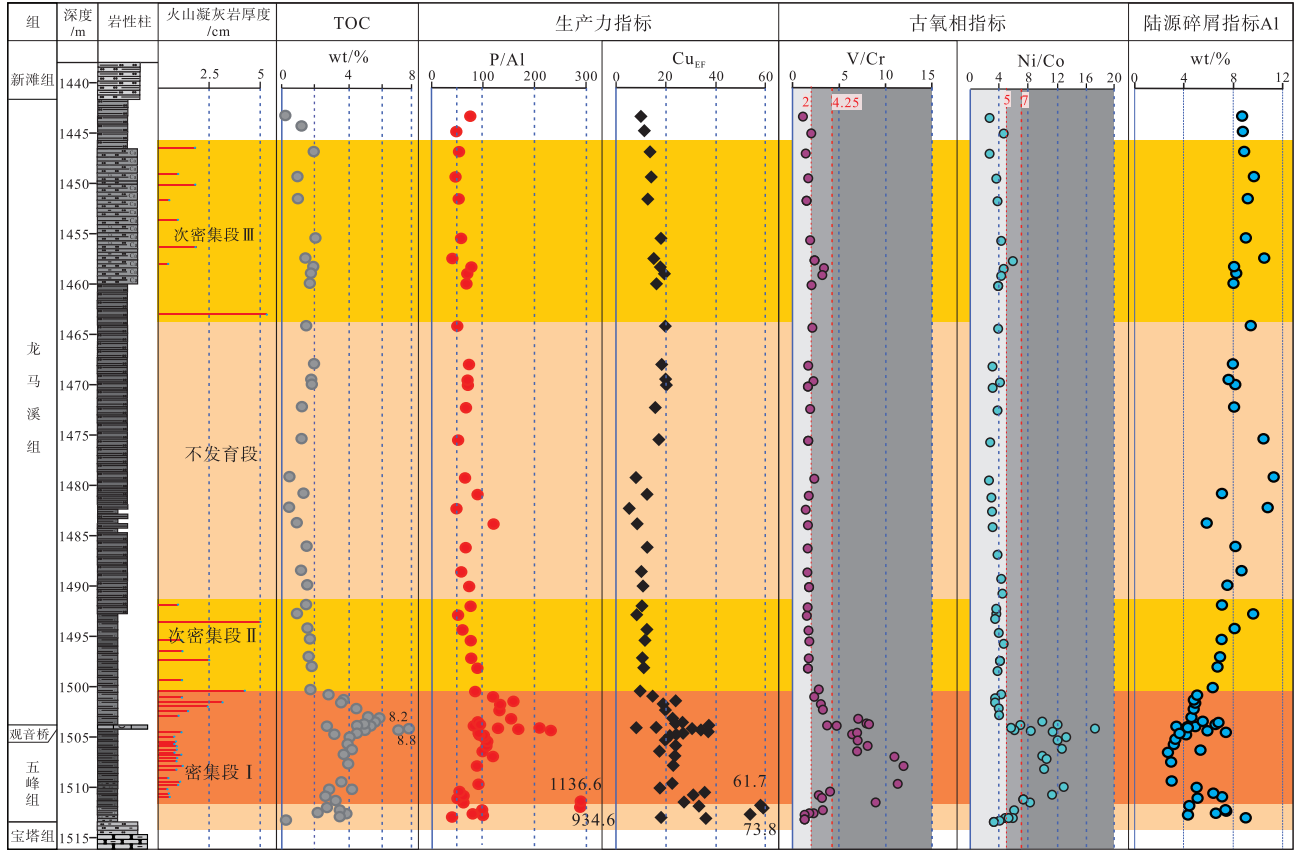


图 5 鄂西咸丰地区鄂咸页 1 井火山凝灰岩发育与各项沉积指标垂向关系图
 Fig. 5 Vertical relationship between volcanic tuff development and various sedimentary indicators in Well XY1 in Xianfeng area, western Hubei Province

之间，均值为 1.71%；火山凝灰岩不发育段页岩 TOC 含量介于 0.41% ~ 2.15% 之间，均值为 1.35%。统计表明，火山凝灰岩密集段的页岩层与正常沉积的页岩层段有机质差异富集明显，火山凝灰岩的发育密集程度与其页岩中 TOC 呈明显的正相关(图 5；表 3)，TOC 含量在火山凝灰岩密集发育段最高，而在火山凝灰岩稀疏发育段和不发育段相对较低，说明间接的火山活动对页岩有机质的富集存在促进作用。

4.2 火山活动对物质供给影响

沉积岩盆地物质供给主要来自 3 个方面，一是

物理成因的，来自盆外剥蚀区，经过长时间搬运剥蚀的陆源碎屑；二是化学成因的，在沉积和成岩过程中经过复杂化学反应沉淀的矿物；三是生物成因的，由浮游生物骨架及碎屑构成(邓卜铭, 2023)。其中陆源碎屑是沉积物最主要的来源，陆源输入对于沉积物的沉积环境有非常大的影响。Al 元素主要源于铝硅酸盐黏土矿物中，很少受风化或成岩过程的影响，常被用作随陆源碎屑的有用指标(Tribovillard *et al.*, 2006)。鄂咸页 1 井五峰组—龙马溪组 Al 元素的垂向变化趋势表明(图 5)，在火山凝灰岩密集段 I (1500.4~1511.65 m) 的 Al 逐渐降低显示陆源输入处于相对低值，而后伴随火山

表 3 鄂西咸丰地区鄂咸页 1 井火山凝灰岩不同发育程度段页岩有机质含量

Table 3 Organic matter content of shale in different volcanic tuff sections of Well XY1 in Xianfeng area, western Hubei Province

火山灰发育程度	密集发育段 I	次密集段 II	次密集段 III	不发育段
深度范围/m	1500.40~1511.65	1491.25~1500.40	1445.75~1463.75	1463.75~1491.25
有机质含量/%	1.76~9.68(4.6)	1.04~2.05(1.72)	1.11~2.37(1.71)	0.41~2.15(1.35)
火山灰发育频率/条·m ⁻¹	2.20	0.67	0.29	/

活动的减弱, Al 元素含量处于相对高值, 表明其陆源碎屑的输入量是不断增加的。

依据鄂咸页 1 井页岩中有机质含量与陆源碎屑指标元素 Al 的关系图(图 6) 可看出, 页岩有机质含量与 Al 元素呈明显的负相关, 火山凝灰岩密集发育段呈现相对高 TOC、低铝, 火山凝灰岩不发育段呈现相对低 TOC、高铝的特征。表明大量陆源碎屑的汇入稀释了盆地页岩有机质含量, 不利页岩有机质的富集。

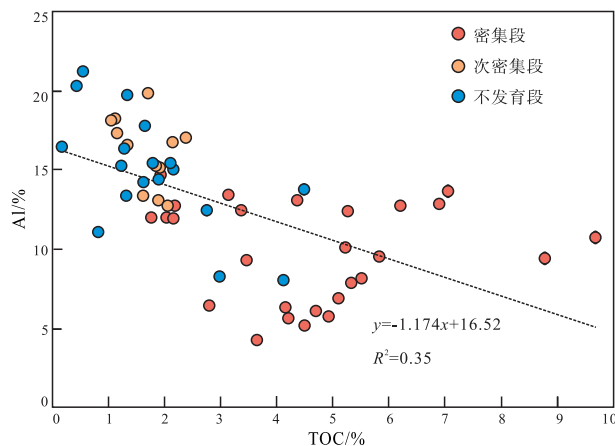


图 6 鄂咸页 1 井有机碳含量与陆源碎屑指标 Al 元素关系
Fig. 6 Crossplots of TOC vs. terrigenous input proxy Al of Well XY1

五峰组沉积时期, 扬子陆表海经历了由碳酸盐岩台地至浅水陆棚再到深水坳陷的快速转变, 海平面快速上升, 陆源碎屑指标元素 Al 的相对低值表明海洋外来物质匮乏, 沉积速率慢, 盆地物质供给由化学沉积及生物沉积作用占主导因素。

火山活动形成的火山灰在大气环流过程中被重新分配沉降于海洋中, 火山灰溶解并释放出磷酸盐、二氧化硅、铁和锰等离子, 直接改变了海水的理化性质, 促进了盆地化学沉积作用。与研究区相近的川南长宁五峰组—龙马溪组的页岩中含有大量的化学成因硅质组分, 大部分为自生微晶石英或者隐晶质的石英基质(邓卜铭, 2023)。

试验数据表明, 单层厚度为 1 mm、面积为 1 dm² 的火山灰(约 20 g) 沉降在相同面积的 50 m 高度(相当于透光层厚度)的水柱中, 可大幅度增加其营养物质的浓度, 其中 Fe 离子浓度会增加 0.4 ~ 2.4 nmol/L, Zn 离子浓度则增加 0.1 ~ 1.1 nmol/L, 然而正常的海水中 Fe 和 Zn 的平均含

量通常要小于 0.5 nmol/L (Duggen *et al.*, 2007)。同样的, 如果火山灰的厚度为 1 cm, 那么所有营养物质的浓度值将会增加约 10 倍。也就是说距离火山口的距离越近, 其火山灰沉积的厚度越大, 这样海洋盆地内得到的营养物质浓度也会相应增高, 生物沉积作用速率会增大很多。

针对五峰组—龙马溪组硅质页岩段的岩石学分析, 硅质岩中大部分含少量的火山凝灰岩、海绵骨针和放射虫等(图 2-c 到 2-f), 依据火山凝灰岩密集发育段、次密集段与无火山凝灰岩段岩石组合特征对比可看出, 火山事件规模较大的火山凝灰岩密集发育段往往以生物成因的含放射虫、海绵骨针碳硅质页岩和薄层硅质岩为主, 硅质含量较高, 这也间接说明火山凝灰岩的存在促进了海洋盆地内的化学和生物沉积作用。

综上所述, 扬子北缘与秦岭洋壳的碰撞闭合产生岛弧的火山喷发致使火山灰向南部飘移并沉降于扬子陆表海中。火山灰水解形成大量富硅流体及其他营养元素, 造成了放射虫、海绵骨针等喜硅生物的繁盛, 促进了陆源碎屑补给不足的扬子滞留海盆中的生物化学沉积作用, 火山活动是当时盆地重要的物质供给来源之一(图 7)。

4.3 火山活动对古生产力的影响

海洋中 Cu 离子可以和水体有机质结合形成相应的络合物发生沉淀而固定下来, 高的 Cu 含量往往代表了高的有机碳输入, 反映较高的古生物生产力(葛祥英等, 2021)。采用铜元素富集系数指标 Cu_{EF}来消除陆源碎屑的影响(即进行 Al 校正, Cu_{EF} = (Cu/Al)_{样品} / (Cu/Al)_{PAAS})更能反映海洋初始生产力(Xu *et al.*, 2023)。P 是海洋生物体的基础元素, 消除陆源碎屑影响后的 P/Al 值更能真实反映海洋古生产力(周国晓等, 2020)。

五峰组—龙马溪组火山凝灰岩密集发育段 Cu_{EF} 介于 0.85 ~ 3.3 之间, 均值为 1.76; P/Al 值介于 61.8 × 10⁻⁴ ~ 279.49 × 10⁻⁴ 之间, 均值为 124.29 × 10⁻⁴, 海洋古生产力总体较高。火山凝灰岩次密集段 Cu_{EF} 介于 0.67 ~ 1.22 之间, 均值为 1.06; P/Al 值介于 59.07 × 10⁻⁴ ~ 108.32 × 10⁻⁴ 之间, 均值为 76.92 × 10⁻⁴, 火山凝灰岩稀疏段海洋古生产力总体较明显低于密集发育段。而处于火山凝灰岩不发育段的古生产力则明显偏低, Cu_{EF} 介于 0.18 ~

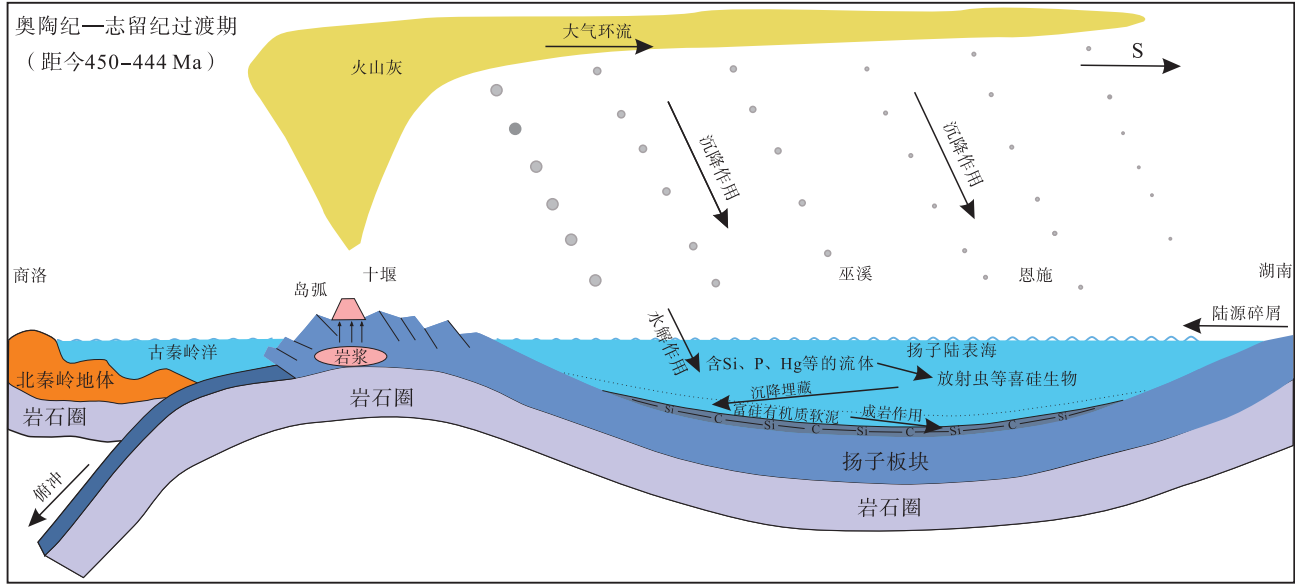


图 7 鄂西地区五峰组—龙马溪组沉积时期火山灰物质迁移示意图

Fig. 7 Schematic diagram of volcanic ash material migration during the Wufeng-Longmaxi Formations sedimentary period in western Hubei Province

2.41 之间，均值为 0.87；P/Al 值介于 49.35×10^{-4} ~ 146.08×10^{-4} 之间，均值为 67.86×10^{-4} 。综合上述，火山凝灰岩发育段，古生产力指标 Cu_{EF} 和 P/Al 指标明显较高，海洋古生产力相对较强。

鄂咸页 1 井火山凝灰岩发育规模与古生产力指标铜元素富集系数 Cu_{EF} 、P/Al 值及 TOC 丰度变化曲线，在纵向上具有相似的变化趋势(图 5)：即五峰组下部含量低，中上部含量快速上升并达峰值，至龙马溪组伴随海洋古生产力的下降，TOC 含量亦相对减少。古生产力指标 Cu_{EF} 、P/Al 高值主要集中于火山凝灰岩发育密集段，火山凝灰岩沉积规模与其富含营养物质含量呈明显正相关。

依据鄂咸页 1 井页岩中 TOC 含量与海洋古生产力指标关系图(图 8) 可看出，页岩中有机质含量与古生产力指标 (Cu_{EF} 和 P/Al 值) 呈明显正相关，在火山凝灰岩密集段绝大多样品的铜富集系数 (Cu_{EF}) 大于 1，表明铜元素相对富集，古生产力水平明显高于正常沉积段。

从龙马溪组下部硅质岩薄片(图 2-d) 可看出，碎屑石英比例明显较五峰组硅质岩(图 2-c) 高，海绵骨针等硅质生物比例也相对较少，龙马溪组沉积期陆源碎屑的沉积比例相对增多，盆地中的化学沉积作用及生物沉积作用相对减弱，火山灰对页岩有机质富集的影响相对减弱，不再是主控因素。

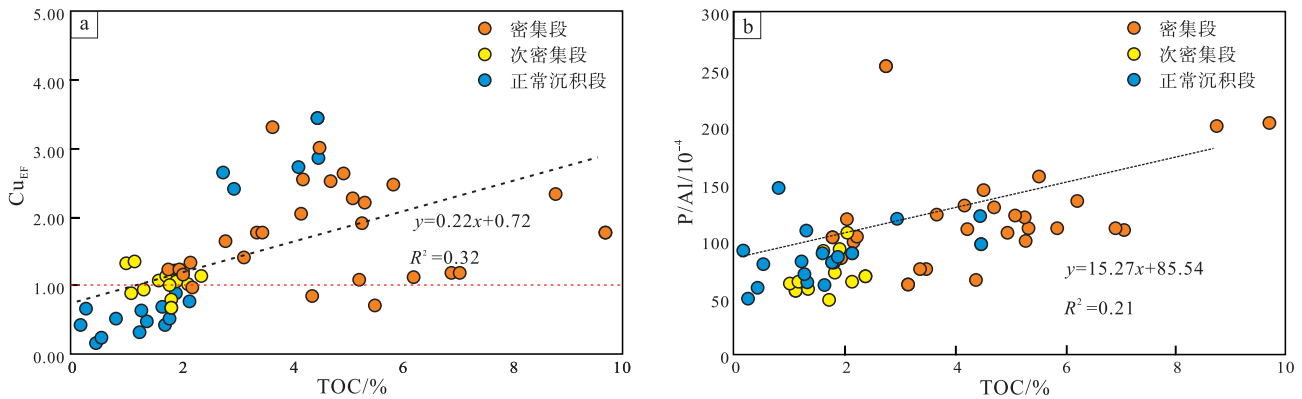


图 8 鄂西咸丰地区鄂咸页 1 井 TOC 与海洋古生产力关系

Fig. 8 Relationship between TOC and marine palaeoproductivity of Well XY1 in Xianfeng area, western Hubei Province

综上所述认为,在物质来源相对匮乏的五峰组沉积时期滞留盆地内,密集发育的火山灰沉积是该时期海洋营养元素的重要来源,火山灰水解带来 Si、P、Cu、Fe 等营养元素提高了海洋古生产力,从而促进了有机质富集。

4.4 火山活动对氧化还原条件的影响

海洋往往在缺氧或贫氧的条件下才利于页岩有机质的保存。氧化还原敏感元素 Cr、V、Ni、Co 等在富氧水体中均呈可溶状态,而缺氧条件被还原为难溶价态保存在沉积物中,这些微量元素的含量或比值可以用来指示古沉积海水的氧化还原状态(郑爱维等, 2023)。Ni/Co 值和 V/Cr 值分别在大于 7 和 4.25 时代表缺氧环境,介于 5~7 之间和 2~4.25 之间时代表贫氧环境,在富氧条件下则分别小于 5 和 2 (Ross and Bustin, 2009)。

火山凝灰岩发育密集段代表着高频率且规模较大的火山活动, V/Cr 值介于 1.48~11.91 之间,均值为 5.37; Ni/Co 值介于 2.59~13.07 之间,均值为 8.77,整体表现为缺氧—贫氧的沉积环境。火山凝灰岩发育次密集段代表火山活动的减弱,其 V/Cr 值介于 1.43~3.38 之间,均值为 3.97; Ni/Co 值介于 2.63~5.8 之间,均值为 4.01,整体表现为贫氧—氧化的沉积环境。在火山凝灰岩不发育段属火山活动间歇期,火山凝灰岩发育稀疏段表明火山活动的减弱,其 V/Cr 值介于 1.16~9.56 之间,均值为 2.17; Ni/Co 值介于 2.5~8.49 之间,均值为 3.85,整体表现为弱氧化的沉积环境(图 5)。

鄂咸页 1 井不同火山凝灰岩发育程度页岩段

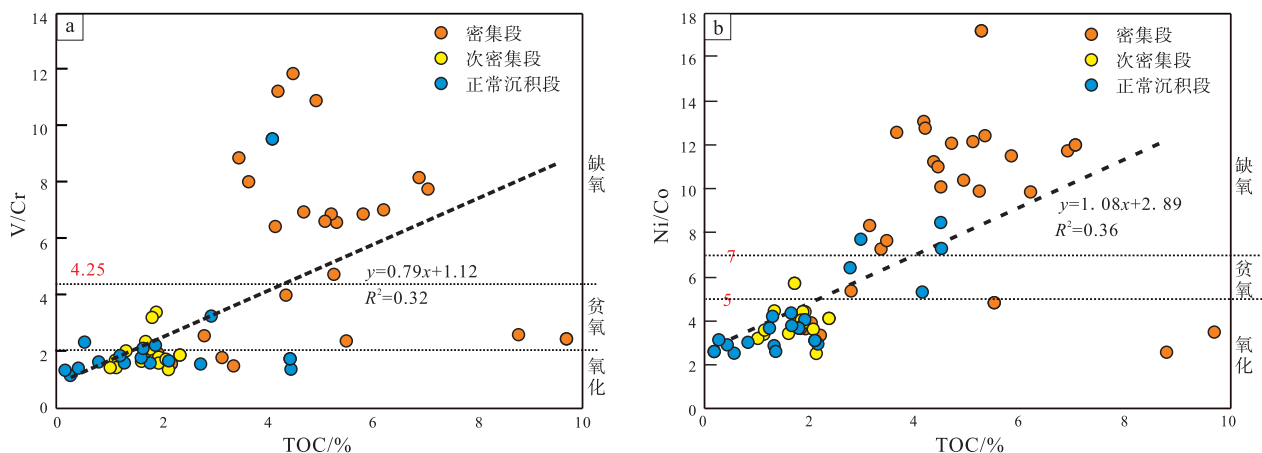


图 9 鄂西咸丰地区鄂咸页 1 井不同火山凝灰岩发育程度页岩段 TOC 含量与氧化还原指标 V/Cr 值和 Ni/Co 值关系

Fig. 9 Relationship between TOC content and REDOX indexes V/Cr and Ni/Co in shale sections with different development degrees of volcanic tuff in Well XY1 in Xianfeng area, western Hubei Province

TOC 含量与氧化还原指标 V/Cr 值和 Ni/Co 值关系表明(图 9),氧化还原指标 V/Cr 值和 Ni/Co 值与 TOC 含量有良好的正相关性,指示着氧化还原条件与页岩有机质的富集关系密切,火山灰密集段缺氧的海洋底水环境,有利于生物死亡后保存下来,从而使得硅质页岩沉积物中有机质富集。

研究表明,火山凝灰岩密集发育层段沉积环境相对缺氧,水体还原性更强。往上伴随火山喷发频次逐渐降低,五峰组中部密集发育段至龙马溪组一段较发育段,沉积环境演变为贫氧—缺氧环境,而随火山喷发强度减弱,至欠发育段沉积环境逐渐过渡为贫氧—氧化环境。火山凝灰岩层段指示的火山活动持续周期和发育频次同沉积期氧化还原环境有良好的一致性,揭示出间发性的火山喷发活动是导致五峰组—龙马溪组沉积时期氧化还原环境变化的重要原因之一。此外,现代海洋活动研究也证实,海洋水体营养物质间歇性的过剩,造成浮游生物的大量勃发,形成藻华等现象,大量消耗了水体中的氧,造成了海洋水体暂时性缺氧(谢浩然等, 2023)。同时,生物的大量聚集及火山灰使海洋水体浑浊,进一步抑制了光合作用,海洋透光带的生物因得不到足够的阳光而不断死亡,从而海底缺氧环境加剧,利于生物遗体落入海底作为有机质埋藏保存,一定程度上促进了海洋有机质的富集(郑爱维等, 2023)。

5 结论

1) 鄂西咸丰地区五峰组—龙马溪组依据火山

凝灰岩发育程度可分为密集段、次密集段和不发育段,火山凝灰岩的垂向分布特征提供了从凯迪阶到特列奇阶的连续火山喷发记录,其中凯迪阶和鲁丹阶早期火山喷发事件更为频繁。火山凝灰岩源岩以中性安山岩为主,其物源来自扬子北缘与古秦岭洋的碰撞闭合形成岛弧的火山喷发事件。

2) 火山凝灰岩密集段与正常沉积的页岩层有机质差异富集明显,TOC 含量在火山凝灰岩密集段更高。火山灰是晚奥陶世—早志留世中扬子盆地重要的物质供给来源,火山灰水解形成大量富硅流体及其他营养元素,造成了放射虫、海绵骨针等喜硅生物的繁盛,促进了当时陆源碎屑补给不足的中扬子滞留海盆的生物化学沉积作用。

3) 火山活动促进有机质富集体现在 2 个方面: 其一是火山灰为海洋表层带来大量营养物质,促使浮游生物爆发,有机质在短时间内大量聚积。其二是浮游生物的大量发育,快速消耗了沉积水体中的氧,而间歇性的缺氧环境促使生物遗体(有机质)在氧化分解前快速埋藏富集。

参考文献 (References)

- 邓卜铭. 2023. 川南五峰—龙马溪组页岩的硅质成因分析. 石化技术, 30(2): 155-157. [Deng B M. 2023. Genetic analysis of siliceous shale in Wufeng-Longmaxi Formation, southern Sichuan. Petrochemical Technology, 30(2): 155-157]
- 葛祥英. 2020. 四川盆地东部奥陶—志留纪交替时期事件沉积与有机质富集. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Ge X Y. 2020. Event deposition and organic matter enrichment during Ordovician Silurian alternations in eastern Sichuan Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 葛祥英, 牟传龙, 余谦, 刘伟, 门欣, 何江林, 郑斌嵩, 梁薇. 2021. 四川盆地东部五峰组—龙马溪组黑色页岩有机质富集规律探讨. 沉积与特提斯地质, 41(3): 418-435. [Ge X Y, Mou C L, Yu Q, Liu W, Men X, He J L, Zheng B S, Liang W. 2021. Organic matter enrichment in black shale of Wufeng-Longmaxi Formation, eastern Sichuan Basin. Sedimentary and Tethian Geology, 41(3): 418-435]
- 胡艳华, 刘健, 周明忠, 汪方跃, 丁兴, 凌明星, 孙卫东. 2009a. 奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩研究评述. 地球化学, 38(4): 393-404. [Hu Y H, Liu J, Zhou M Z, Wang F Y, Ding X, Ling M X, Sun W D. 2009a. A review on the study of Ordovician and Silurian potassic porphyry. Geochemistry, 38(4): 393-404]
- 胡艳华, 孙卫东, 丁兴, 汪方跃, 凌明星, 刘健. 2009b. 奥陶纪—志留纪边界附近火山活动记录: 来华南周缘钾质斑脱岩的信息. 岩石学报, 25(12): 3298-3308. [Hu Y H, Sun W D, Ding X, Wang F Y, Ling M X, Liu J. 2009b. Volcanic activity records near the Ordovician-Silurian boundary: information on the potassic porphyry in the periphery of South China. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3298-3308]
- 韩载华, 赵靖舟, 孟选刚, 沈振振, 杨荣国, 张恒, 高飞龙. 2020. 鄂尔多斯盆地三叠纪湖盆东部“边缘”长 7 段烃源岩的发现及其地球化学特征. 石油实验地质, 42(6): 991-1000. [Han Z H, Zhao J Z, Meng X G, Shen Z Z, Yang R G, Zhang H, Gao F L. 2020. Discovery and geochemical characteristics of source rocks in Chang 7 Member of the eastern “margin” of the Triassic lake Basin, Ordos Basin. Petroleum Geology & Experiment, 42(6): 991-1000]
- 何龙, 王云鹏, 陈多福, 王钦贤, 王成. 2019. 重庆南川地区五峰组—龙马溪组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系. 天然气地球科学, 30(2): 203-218. [He L, Wang Y P, Chen D F, Wang Q X, Wang C. 2019. Relationship between sedimentary environment and organic matter enrichment of black shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Nanchuan area, Chongqing. Natural Gas Geoscience, 30(2): 203-218]
- 牟传龙, 葛祥英, 许效松, 周恳恳, 梁薇, 王秀平. 2014. 中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义. 古地理学报, 16(4): 427-440. [Mou C L, Ge X Y, Xu X S, Zhou K K, Liang W, Wang X P. 2014. Late Ordovician lithofacies paleogeography and its oil-gas geological significance in the Middle and Upper Yangtze region. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 16(4): 427-440]
- 牟传龙, 王秀平, 王启宇, 周恳恳, 梁薇. 2016. 川南及邻区下志留统龙马溪组下段沉积相与页岩气地质条件的关系. 古地理学报, 18(3): 457-472. [Mou C L, Wang X P, Wang Q Y, Zhou K K, Liang W. 2016. Relationship between sedimentary facies and shale gas geological conditions of Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan and adjacent areas. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 18(3): 457-472]
- 聂海宽, 金之钧, 马鑫, 刘忠宝, 林柘, 杨振恒. 2017. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征. 石油学报, 38(2): 160-174. [Nie H K, Jin Z J, Ma X, Liu Z B, Lin T, Yang Z H. 2017. Graptolite belt and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation and Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and adjacent areas. Acta Petrologica Sinica, 38(2): 160-174]
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035-1053. [Shu L S. 2012. Basic characteristics of tectonic evolution in South China. Geological Bulletin of China, 31(7): 1035-1053]
- 王书荣, 宋到福, 何登发. 2013. 三塘湖盆地火山灰对沉积有机质的富集效应及凝灰质烃源岩发育模式. 石油学报, 34(6): 1077-1087. [Wang S R, Song D F, He D F. 2013. Enrichment effect of volcanic ash on sedimentary organic matter and development model of tuffaceous source rock in Santanghu Basin. Acta Petrologica Sinica, 34(6): 1077-1087]
- 王玉满, 李新景, 陈波, 韩京, 张家铭, 袁飞, 马杰, 代兵, 王浩, 蒋珊. 2018. 中上扬子地区埃隆阶最厚斑脱岩层分布特征及地质意义. 天然气地球科学, 29(1): 42-54. [Wang Y M, Li X J, Chen B, Han J, Zhang J M, Yuan F, Ma J, Dai B, Wang H, Jiang S. 2018. Distribution characteristics and geological significance of the thickest porphyroclastic strata of Ellonian stage in the middle and upper Yangtze region. Natural Gas Geoscience, 29(1): 42-54]
- 王玉满, 李新景, 王皓, 蒋珊, 陈波, 马杰, 代兵. 2019. 四川盆地东部

- 上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组斑脱岩发育特征及地质意义. 石油勘探与开发, 46(4): 653-665. [Wang Y M, Li X J, Wang H, Jiang S, Chen B, Ma J, Dai B. 2019. Development characteristics and geological significance of porphyry in Upper Ordovician Wufeng Formation and Lower Silurian Longmaxi Formation, eastern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 46(4): 653-665]
- 谢浩然, 梁超, 吴靖, 籍士超. 2023. 火山活动对沉积古环境及有机质富集的影响. 古地理学报, 25(4): 768-787. [Xie H R, Liang C, Wu J, Ji S C. 2019. Effects of volcanic activity on sedimentary palaeoenvironment and organic matter enrichment. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 768-787]
- 谢尚克, 汪正江, 王剑, 卓皆文. 2012. 湖南桃源郝坪奥陶系五峰组顶部火山凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. 沉积与特提斯地质, 32(4): 65-69. [Xie S K, Wang Z J, Wang J, Zhuo J W. 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb age of volcanic tuff at the top of Ordovician Wufeng Formation, Taoyuan, Hunan Province. *Sedimentation and Tethys Geology*, 32(4): 65-69]
- 熊国庆, 王剑, 李园园, 余谦, 门玉澎, 周小琳, 熊小辉, 周业鑫, 杨潇. 2019. 南大巴山东段上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组钾质斑脱岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地质学报, 93(4): 843-864. [Xiong G Q, Wang J, Li Y Y, Yu Q, Men Y P, Zhou X L, Xiong X H, Zhou Y X, Yang X. 2019. Zircon U-Pb age of Upper Ordovician Wufeng Formation and Lower Silurian Longmaxi Formation potassic porphyry in the eastern part of the Southern Daba Mountains and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 93(4): 843-864]
- 许露露, 温雅茹, 周向辉, 居宇龙, 陈威, 杨洁, 任志军, 文建航. 2022. 鄂西黄陵背斜南缘下寒武统牛蹄塘组一段古沉积环境演化特征: 以秭地 1 井为例. 石油实验地质, 44(3): 456-465. [Xu L L, Wen Y R, Zhou X H, Ju Z L, Chen W, Yang J, Ren Z J, Wen J H. 2022. Paleosedimentary environment evolution characteristics of the first member of the Lower Cambrian Niutitang Formation, southern margin of Huangling anticline, western Hubei: a case study of well ZD1. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(3): 456-465]
- 郑爱维, 孟志勇, 李凯, 刘莉, 柳筠, 彭国红, 易雨昊, 蔡进. 2023. 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩储层纵向非均质性特征及其发育主控因素. 天然气地球科学, 34(9): 1500-1514. [Zheng A W, Meng Z Y, Li K, Liu L, Liu J, Peng G H, Yi Y H, Cai J. 2023. Longitudinal heterogeneity of Permian Wujiaping Formation shale reservoir in Hongxing area, eastern Sichuan and its main controlling factors. *Natural Gas Geoscience*, 34(9): 1500-1514]
- 周明忠, 罗泰义, 黄智龙, 龙汉生, 杨勇. 2007. 钾质斑脱岩的研究进展. 矿物学报, 27(3-4): 351-359. [Zhou M Z, Luo T Y, Huang Z L, Long H S, Yang Y. 2007. Research progress of potassic porphyry. *Acta Minerologica Sinica*, 27(3-4): 351-359]
- 周国晓, 魏国齐, 胡国艺, 武赛军, 田亚杰, 董才源. 2020. 四川盆地早寒武世裂陷槽西部页岩发育背景与有机质富集. 天然气地球科学, 31(4): 498-506. [Zhou G X, Wei G Q, Hu G Y, Wu S J, Tian Y J, Dong C Y. 2020. Shale development background and organic matter enrichment in western Early Cambrian rift trough, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(4): 498-506]
- Du X B, Jia J X, Zhao K, Shi J C, Shu Y, Liu Z H, Duan D. 2021. Was the volcanism during the Ordovician: Silurian transition in South China actually global in extent? Evidence from the distribution of volcanic ash beds in black shales. *Marine and Petroleum Geology*, 123: 104721.
- Duggen S, Croot P, Schacht U, Hoffmann L. 2007. Subduction zone volcanic ash can fertilize the surface ocean and stimulate phytoplankton growth: evidence from biogeochemical experiments and satellite data. *Geophysical Research Letters*, 34(1): L01612.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall; framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531-542.
- Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33-47.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251-286.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- Ross D J K, Bustin R M. 2009. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin. *Chemical Geology*, 260(1/2): 1-19.
- Shen J, Algeo T J, Hu Q, Zhang N, Zhou L, Xia W C, Xie S C, Feng Q L. 2012. Negative C-isotope excursions at the Permian-Triassic boundary linked to volcanism. *Geology*, 40(11): 963-966.
- Su W B, Huff W D, Etensohn F R, Liu X M, Zhang J E, Li Z M. 2009. K-bentonite, black-shale and flysch successions at the Ordovician: Silurian transition, South China; possible sedimentary responses to the accretion of Cathaysia to the Yangtze Block and its implications for the evolution of Gondwana. *Gondwana Research*, 15(1): 111-130.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 232(1/2): 12-32.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20(4): 325-343.
- Xu L L, Huang S P, Wang Y, Zhou X H, Liu Z X, Wen Y R, Zhang Y L, Sun M D. 2023. Palaeoenvironment evolution and organic matter enrichment mechanisms of the Wufeng-Longmaxi shales of Yuan'an block in western Hubei, middle Yangtze: implications for shale gas accumulation potential. *Marine and Petroleum Geology*, 152: 106242.
- Yang S C, Hu W X, Wang X L, Jiang B Y, Yao S P, Sun F N, Huang Z C, Zhu F. 2019. Duration, evolution, and implications of volcanic activity across the Ordovician Silurian transition in the Lower Yangtze region, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 518: 13-25.

(责任编辑 郑秀娟)