

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2016.02.005

## 湖北秭归五龙地区五峰组—龙马溪组黑色岩系地球化学特征及其页岩气地质意义

危 凯, 陈孝红, 周 鹏, 张保民

WEI Kai, CHEN Xiao-Hong, ZHOU Peng, ZHANG Bao-Min

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

(Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

**摘要:**对湖北秭归县五龙剖面五峰组—龙马溪组下段黑色岩系的微量元素和有机碳含量进行了系统采样分析,结果表明, U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值等判别指标能够很好的响应各时期氧化还原条件和海平面的变化,对奥陶系—志留系界线附近的地层缺失也有明显的指示作用。另外, U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值与 TOC 值之间表现出良好的正相关关系,表明这些古环境判别指标在一定程度上可用来指示五峰组和龙马溪组的有机碳含量变化。通过对五龙剖面及周边地区富有机质页岩厚度、TOC 值和含气性的对比分析,推断五龙地区和西侧的鼓锣坪地区、东侧的九畹溪地区构成隆凹相间的格局,这一认识对区域内的页岩气有利目标区预测具有一定的指导意义。

**关键词:**湖北秭归县;五龙;五峰组—龙马溪组;黑色岩系;微量元素;页岩气

**中图分类号:** P534.42; P534.43; P618.13

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-3701(2016)-135-07

**Wei K, Chen X H, Zhou P and Zhang B M. Geochemical Characteristics of Black Shale Series from Wufeng-Longmaxi Formation in Wulong area, Zigui County, Hubei Province and its Significance for Shale Gas. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2016, 32(2): 135-141.**

**Abstract:** Trace elements and Total Organic Carbon (TOC) content of black shale in Wufeng-Longmaxi Formation from Wulong section in Zigui County, Hubei Province, are analyzed. The results show that the U/Th, Ni/Co, V/Cr and V/Sc ratios can indicate the variation of redox conditions and sea level, as well as the strata loss at Ordovician-Silurian boundary. In addition, the notable positive correlations between U/Th, Ni/Co, V/Cr, V/Sc ratios and TOC values suggest that these redox-sensitive indexes can indicate the TOC variation of Wufeng-Longmaxi Formation. By comparing the consecutive thickness of organic-rich shale, TOC values and gas-bearing of Wulong section and its adjacent region, we suggest that there exists a paleogeographic framework with alternating uplifts and depressions in Wulong, Guluoping and Jiuwanxi area. This conclusion may be of significance to predict the potential development area of shale gas in the region.

**Key words:** Zigui County, Hubei Province; Wulong; Wufeng-Longmaxi Formation; black shale series; trace element; shale gas

晚奥陶纪至早志留纪的转折期,在扬子板块及 来的诸多研究证明,这套黑色岩系普遍具有有机质其周缘沉积了一套分布广泛的黑色笔石页岩。近年 丰度高、成熟度较好和微裂缝发育等优越条件,因

收稿日期:2015-10-31;修回日期:2016-05-03.

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项“宜昌地区志留系几丁虫与标准剖面数字化研究(201311062)”资助.

第一作者:危凯(1983—),男,博士,助理研究员,从事沉积地球化学研究, E-mail: kaiwei1983@163.com.

而成为我国页岩气勘探的主要目的层位之一<sup>[1]</sup>。2014 年, 武汉地质调查中心在秭归杨林地区实施的页岩气调查井(WZK06)见到明显的气体显示, 进一步揭示了秭归地区五峰—龙马溪组黑色岩系的勘探潜力。下一步的相关研究工作正在逐步推进, 而深入剖析秭归地区黑色岩系的时空展布格局以及探讨其成因是其中重要的命题之一<sup>[2]</sup>。

沉积环境是影响生物生产力和有机质保存的重要因素, 因而也是控制富有机质页岩发育和分布的最重要因素。由于微量元素的富集程度往往与沉积环境密切相关, 因此可以利用地层中微量元素的变化特征来恢复地史时期的沉积环境<sup>[3]</sup>。本文选取宜昌地区秭归五龙剖面上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组黑色岩系为研究对象, 通过微量元素和有机碳含量分析, 对页岩的沉积环境进行了判识与恢复, 同时对富有机质页岩的分布及控制因素做了初步探讨, 以期为区域内页岩气有利区的预测提供基础资料。

1 区域地质概况

五龙剖面位于湖北宜昌市秭归县文化乡南部

(图 1), 构造上位于黄陵隆起南缘, 距仙女山断层以西约 15 km。剖面自下而上分为上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组, 总厚度为 79.6 m。其中, 五峰组以黑—灰黑色薄—中层状含泥质硅质岩和硅质泥岩为主, 夹黑色极薄层状炭质泥岩。龙马溪组为一套深灰—灰黑色薄层含炭质泥岩, 向上渐变为灰色中—薄层状粉砂质泥岩和泥质粉砂岩。受宜昌上升以及湘鄂西水下高地的影响, 五峰组和龙马溪组为平行不整合接触。观音桥层(相当于赫南特层)在本剖面上缺失, 但在距离剖面约 1 km 的一处露头上可见约 0.5 m 厚的透镜状的赫南特灰岩层。从沉积环境上看, 上奥陶统五峰组为滞留盆地沉积, 志留系龙马溪组主要是深水陆棚或者陆棚内盆地沉积, 向上沉积水体变浅。

2 样品采集与分析方法

在秭归五龙剖面的上奥陶统五峰组至下志留统龙马溪组下段之间, 自下而上连续采集了 40 件新鲜的硅质岩和泥岩样品。采样间距 0.5~5 m 不等, 其中在奥陶系—志留系界限附近进行了加密采样。样品经低温烘干和粉碎后送往实验室分析。微



图1 研究区区域背景及剖面位置

Fig. 1 Regional setting and location of section in wulong area,Zigui County,Hubei Province

量元素和总有机碳含量(TOC)的测定均在国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成。其中,微量元素由电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS-X Series II)测定,分析精度优于 5%。TOC 采用高频燃烧红外吸收法用 CS230 型红外碳硫测定仪完成测定。40 件泥岩样品的微量元素和 TOC 分析结果见表 1。

3 结果与讨论

3.1 微量元素对沉积环境的响应

微量元素 U、V 和 Mo 等在海水中具有多种价态,其沉积时受氧化 / 还原环境影响显著,因而可作为重建古海洋氧化还原环境的理想指标<sup>[4-5]</sup>。高的 U/Th 值(大于 1.25)往往指示缺氧环境,低的 U/Th 值(小于 0.75)往往指示氧化环境<sup>[6]</sup>。同样,V/Sc 比值也可以用来反映氧化还原环境,还原态的 V 和 Sc 具有相似的不相容性,沉积物中 V 的含量相对于 Sc 成比例变化而与其他不相容元素(例如 Al 和 Ti)不成比例。此外,沉积岩中较高和较低的 V/Cr、Ni/Co 比值也可指示缺氧和富氧的沉积环境<sup>[7]</sup>。

秭归五龙剖面五峰—龙马溪组的 U/Th、Ni/Co、

V/Cr 和 V/Sc 比值的纵向变化见图 2。总体看来,龙马溪组上段即鲁丹晚期之后,上述各古环境指标无明显变化,说明该时期环境总体趋于稳定。然而五峰组—龙马溪组下段,亦即凯迪晚期—鲁丹早中期,各种指标均表现出剧烈的波动,指示了该时期环境较为动荡。

在五峰组中部和上部,U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值均表现为明显的较高值,这些均指示了凯迪晚期研究区处于缺氧的环境,这与目前学术界关于五峰组沉积于滞留缺氧环境的认识是吻合的。然而值得注意的是,U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值表现为明显的波动,这表明凯迪晚期底层海水并非一直保持稳定的缺氧环境,而这种动荡的环境很可能与扬子地区广泛存在的上升流有关。广泛分布在扬子地区的高有机质丰度的薄层硅质岩则是上升洋流的证据之一。奥陶纪晚期,南半球冈瓦纳大陆冰川的凝聚导致了全球海平面下降,引发了扬子地区强劲的上升洋流,从而为海洋提供了高的有机质生产率<sup>[8]</sup>,最终形成了一个表层水域富氧、底域缺氧的海洋环境,并发育了大量营漂浮方式的笔石以及富有机质的硅质岩<sup>[9]</sup>。

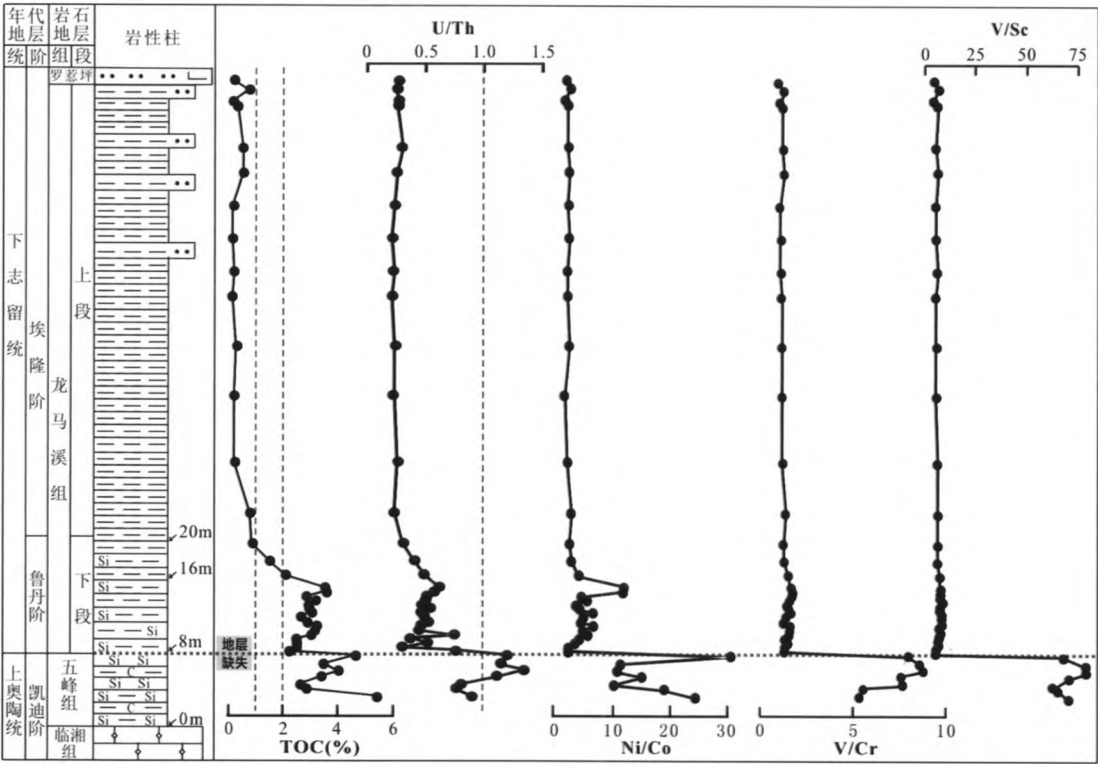


图2 秭归五龙剖面五峰组—龙马溪组U/Th、Ni/Co、V/Cr和V/Sc比值纵向变化图

Fig. 2 Variation of U/Th, Ni/Co, V/Cr, V/Sc and TOC values of Wufeng—Longmaxi Formation from Wulong section, Zigui County

表1 稀归五龙剖面五峰-龙马溪组微量元素( $10^{-6}$ )和TOC( $10^{-2}$ )分析结果

Table 1 Analytical results of trace elements ( $10^{-6}$ ) and TOC ( $10^{-2}$ ) in Wufeng-Longmaxi Formation of Wulong section, Zigui County

| 样品号                      | 岩性   | TOC<br>$10^{-2}$ | Cr<br>$10^{-6}$ | Ni<br>$10^{-6}$ | Co<br>$10^{-6}$ | Rb<br>$10^{-6}$ | Cs<br>$10^{-6}$ | Sr<br>$10^{-6}$ | Ba<br>$10^{-6}$ | V<br>$10^{-6}$ | Sc<br>$10^{-6}$ | Zr<br>$10^{-6}$ | Hf<br>$10^{-6}$ | U<br>$10^{-6}$ | Th<br>$10^{-6}$ | U/Th | Ni/Co | V/Cr | V/Sc  |
|--------------------------|------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|------|-------|------|-------|
| WLO <sub>3</sub> w-1H    | 硅质岩  | 5.43             | 115.0           | 46.3            | 1.9             | 111             | 6.99            | 21.2            | 1100            | 610            | 8.69            | 81.6            | 2.96            | 8.88           | 9.72            | 0.91 | 2.01  | 5.30 | 4.60  |
| WLO <sub>3</sub> w-2H    | 硅质岩  | 2.84             | 44.0            | 21.5            | 1.1             | 41.8            | 2.26            | 19.2            | 714             | 243            | 3.74            | 48.6            | 1.55            | 2.92           | 3.75            | 0.78 | 2.74  | 5.52 | 6.98  |
| WLO <sub>3</sub> w-3H    | 硅质岩  | 2.61             | 29.0            | 24.0            | 2.3             | 41.8            | 3.02            | 17.6            | 804             | 222            | 3.56            | 47.6            | 1.42            | 2.8            | 3.41            | 0.82 | 1.72  | 7.66 | 4.20  |
| WLO <sub>3</sub> w-4H    | 硅质岩  | 3.39             | 37.0            | 37.6            | 2.5             | 45.6            | 2.82            | 19.8            | 756             | 280            | 3.98            | 43.5            | 1.44            | 4.68           | 4.16            | 1.13 | 2.28  | 7.57 | 6.23  |
| WLO <sub>3</sub> w-5H    | 硅质岩  | 4.02             | 43.5            | 52.9            | 4.9             | 52.8            | 3.49            | 22.1            | 824             | 381            | 4.85            | 45.1            | 1.55            | 6.85           | 5.04            | 1.36 | 2.35  | 8.76 | 5.35  |
| WLO <sub>3</sub> w-6H    | 硅质岩  | 3.47             | 42.4            | 46.9            | 4.1             | 52              | 3.39            | 20.9            | 848             | 363            | 4.63            | 44.8            | 1.57            | 5.73           | 4.93            | 1.16 | 2.45  | 8.56 | 6.44  |
| WLO <sub>3</sub> w-7H    | 硅质岩  | 4.65             | 48.1            | 36.0            | 1.2             | 67.7            | 4.36            | 22              | 944             | 383            | 5.66            | 62.9            | 2.38            | 7.42           | 6.11            | 1.21 | 2.40  | 7.96 | 5.40  |
| WLS <sub>1</sub> l-8H    | 硅质泥岩 | 2.20             | 50.0            | 29.3            | 12.0            | 126             | 8.02            | 40.4            | 1190            | 62.8           | 10.7            | 160             | 5.39            | 11             | 14.2            | 0.77 | 2.44  | 1.26 | 5.56  |
| WLS <sub>1</sub> l-8-1H  | 硅质泥岩 | 2.47             | 60.6            | 31.4            | 12.7            | 201             | 13.1            | 40.6            | 1950            | 78.3           | 12.9            | 161             | 6.45            | 7.67           | 24.5            | 0.31 | 2.17  | 1.29 | 6.19  |
| WLS <sub>1</sub> l-8-2H  | 硅质泥岩 | 2.48             | 55.0            | 43.7            | 12.2            | 127             | 7.64            | 38.5            | 1220            | 80.2           | 11.1            | 125             | 4.63            | 7.46           | 14.1            | 0.53 | 2.24  | 1.46 | 5.42  |
| WLS <sub>1</sub> l-9H    | 硅质泥岩 | 2.46             | 68.8            | 64.4            | 14.9            | 186             | 12.7            | 50.9            | 1910            | 88.3           | 12.5            | 174             | 6.99            | 7.75           | 20.3            | 0.38 | 2.50  | 1.28 | 6.11  |
| WLS <sub>1</sub> l-9-1H  | 硅质泥岩 | 3.01             | 55.6            | 24.7            | 4.2             | 145             | 8.64            | 37.7            | 1380            | 84.4           | 11.1            | 175             | 5.77            | 10.6           | 13.9            | 0.76 | 1.68  | 1.52 | 6.00  |
| WLS <sub>1</sub> l-10H   | 硅质泥岩 | 3.14             | 62.0            | 32.8            | 6.6             | 155             | 9.03            | 38.2            | 1420            | 96.6           | 11.7            | 178             | 6.66            | 6.8            | 14.9            | 0.46 | 2.26  | 1.56 | 6.46  |
| WLS <sub>1</sub> l-10-1H | 硅质泥岩 | 3.22             | 60.1            | 27.2            | 4.0             | 155             | 9.13            | 36.2            | 1360            | 95.2           | 12.6            | 181             | 6.78            | 7.25           | 15.3            | 0.47 | 2.89  | 1.58 | 6.85  |
| WLS <sub>1</sub> l-10-2H | 硅质泥岩 | 2.87             | 77.2            | 24.4            | 5.3             | 134             | 7.61            | 47.3            | 1260            | 94.2           | 10.6            | 159             | 5.68            | 7.62           | 14.2            | 0.54 | 2.65  | 1.22 | 6.80  |
| WLS <sub>1</sub> l-11H   | 硅质泥岩 | 2.63             | 67.7            | 68.1            | 13.4            | 129             | 7.74            | 38.2            | 1180            | 91.8           | 10.5            | 147             | 5.42            | 6.87           | 13.7            | 0.50 | 2.94  | 1.36 | 6.58  |
| WLS <sub>1</sub> l-11-1H | 硅质泥岩 | 3.04             | 62.8            | 40.0            | 5.9             | 144             | 8.4             | 36.8            | 1260            | 102            | 11.6            | 166             | 5.79            | 6.95           | 14.6            | 0.48 | 4.27  | 1.62 | 7.82  |
| WLS <sub>1</sub> l-12H   | 硅质泥岩 | 2.94             | 60.8            | 27.0            | 6.1             | 136             | 8.11            | 37.8            | 1190            | 91.6           | 11.7            | 154             | 5.32            | 7.42           | 13.4            | 0.55 | 12.04 | 1.51 | 8.31  |
| WLS <sub>1</sub> l-12-1H | 硅质泥岩 | 2.91             | 67.0            | 28.2            | 7.5             | 138             | 8.09            | 36.7            | 1200            | 93.9           | 11.8            | 150             | 5.68            | 6.79           | 14.1            | 0.48 | 11.90 | 1.40 | 8.11  |
| WLS <sub>1</sub> l-13H   | 硅质泥岩 | 3.18             | 65.3            | 40.1            | 7.0             | 138             | 8.11            | 37.2            | 1300            | 101            | 10.8            | 139             | 5.22            | 7.09           | 13.8            | 0.51 | 4.70  | 1.55 | 8.05  |
| WLS <sub>1</sub> l-13-1H | 硅质泥岩 | 2.83             | 61.9            | 41.1            | 8.8             | 141             | 8.96            | 39.1            | 1180            | 103            | 12.8            | 162             | 5.52            | 8.12           | 15.5            | 0.52 | 5.71  | 1.66 | 9.35  |
| WLS <sub>1</sub> l-14H   | 硅质泥岩 | 3.58             | 59.8            | 15.0            | 1.3             | 158             | 10              | 36.4            | 1330            | 103            | 12.7            | 162             | 5.35            | 8.63           | 14.7            | 0.59 | 3.79  | 1.72 | 7.96  |
| WLS <sub>1</sub> l-15H   | 硅质泥岩 | 3.52             | 66.0            | 21.8            | 1.8             | 172             | 10.5            | 40.6            | 1400            | 108            | 13              | 182             | 6.28            | 10.1           | 16              | 0.63 | 4.40  | 1.64 | 7.83  |
| WLS <sub>1</sub> l-16H   | 含硅泥岩 | 2.07             | 102.0           | 47.8            | 11.2            | 219             | 15.4            | 24.9            | 1520            | 151            | 19.3            | 148             | 4.37            | 8.09           | 16.2            | 0.50 | 6.76  | 1.48 | 8.79  |
| WLS <sub>1</sub> l-17H   | 含硅泥岩 | 1.48             | 98.8            | 59.6            | 20.3            | 220             | 14.9            | 29.4            | 1460            | 123            | 18.7            | 123             | 4.18            | 6.37           | 15.2            | 0.42 | 5.08  | 1.24 | 8.74  |
| WLS <sub>1</sub> l-18H   | 含硅泥岩 | 0.85             | 103.0           | 61.1            | 23.1            | 217             | 14.2            | 29.8            | 1370            | 123            | 18.1            | 122             | 4.03            | 5.04           | 15.6            | 0.32 | 4.63  | 1.19 | 8.89  |
| WLS <sub>1</sub> l-19H   | 泥岩   | 0.75             | 95.9            | 56.3            | 19.5            | 217             | 13.9            | 36.5            | 1430            | 126            | 18.4            | 116             | 3.86            | 3.99           | 16.4            | 0.24 | 6.80  | 1.31 | 7.56  |
| WLS <sub>1</sub> l-20H   | 泥岩   | 0.20             | 106.0           | 46.1            | 20.4            | 207             | 13.2            | 36              | 1080            | 124            | 19.2            | 128             | 4.36            | 3.8            | 13.8            | 0.28 | 4.95  | 1.17 | 8.26  |
| WLS <sub>1</sub> l-21H   | 泥岩   | 0.16             | 105.0           | 52.4            | 31.2            | 216             | 13.7            | 33.7            | 315             | 117            | 19.5            | 123             | 4.2             | 3.57           | 15.5            | 0.23 | 5.83  | 1.11 | 7.60  |
| WLS <sub>1</sub> l-22H   | 泥岩   | 0.26             | 106.0           | 44.2            | 17.7            | 210             | 13.9            | 35.2            | 1430            | 116            | 19              | 126             | 4.25            | 3.86           | 15.3            | 0.25 | 4.32  | 1.09 | 7.06  |
| WLS <sub>1</sub> l-23H   | 泥岩   | 0.08             | 81.1            | 41.7            | 18.6            | 153             | 9.71            | 47.7            | 998             | 86.1           | 15.9            | 139             | 4.36            | 2.86           | 12.8            | 0.22 | 3.58  | 1.06 | 7.23  |
| WLS <sub>1</sub> l-24H   | 泥岩   | 0.15             | 106.0           | 43.0            | 19.8            | 194             | 12.8            | 37.7            | 1370            | 112            | 18.1            | 135             | 4.61            | 3.28           | 14.2            | 0.23 | 2.47  | 1.06 | 6.07  |
| WLS <sub>1</sub> l-25H   | 泥岩   | 0.10             | 104.0           | 40.2            | 16.5            | 200             | 12.6            | 46.2            | 1340            | 110            | 19.8            | 136             | 4.6             | 3.34           | 14.8            | 0.23 | 2.44  | 1.06 | 5.87  |
| WLS <sub>1</sub> l-26H   | 泥岩   | 0.14             | 97.9            | 37.5            | 15.6            | 180             | 10.6            | 44.8            | 1160            | 94             | 17.4            | 148             | 5.04            | 3.34           | 13.6            | 0.25 | 30.51 | 0.96 | 67.67 |
| WLS <sub>1</sub> l-27H   | 泥岩   | 0.49             | 94.9            | 42.7            | 17.4            | 201             | 12.3            | 45.3            | 1160            | 114            | 17.7            | 127             | 4.54            | 3.87           | 14.8            | 0.26 | 11.50 | 1.20 | 78.40 |
| WLS <sub>1</sub> l-28H   | 泥岩   | 0.47             | 72.0            | 34.8            | 14.8            | 158             | 9.5             | 151             | 1110            | 84             | 15.7            | 142             | 4.61            | 3.8            | 12.5            | 0.30 | 10.91 | 1.17 | 78.56 |
| WLS <sub>1</sub> l-29H   | 泥岩   | 0.27             | 101.0           | 42.6            | 18.7            | 220             | 14.1            | 40              | 948             | 114            | 18.3            | 118             | 3.89            | 4.2            | 15.2            | 0.28 | 15.16 | 1.13 | 70.35 |
| WLS <sub>1</sub> l-30H   | 泥岩   | 0.11             | 60.6            | 23.8            | 13.8            | 114             | 6.12            | 97.2            | 812             | 58             | 13.8            | 186             | 5.8             | 2.89           | 10.4            | 0.28 | 10.34 | 0.96 | 62.36 |
| WLS <sub>1</sub> l-31H   | 泥岩   | 0.71             | 100.0           | 47.6            | 17.4            | 214             | 14.1            | 47.8            | 1380            | 118            | 16.9            | 119             | 4.36            | 4.37           | 16.5            | 0.26 | 19.03 | 1.18 | 64.97 |
| WLS <sub>1</sub> l-32H   | 泥岩   | 0.16             | 56.9            | 22.3            | 11.1            | 89              | 5.33            | 205             | 738             | 49.7           | 10.8            | 164             | 5.05            | 2.53           | 9.05            | 0.28 | 24.37 | 0.87 | 70.20 |



在五峰组顶部, V/Sc、V/Cr、U/Th 和 Ni/Co 比值均表现为骤然减小, 表明底层海水突然从缺氧环境变为富氧环境。与此同时, 有机质丰度(TOC)同样也出现了突然降低, 从 4.65 骤然降低至 2.20。这些突然的变化极有可能指示了该地区奥陶系—志留系界线附近存在的地层缺失。这与该剖面赫兰特层和笔石带的缺失是相吻合的。这一地层缺失可能与发生在奥陶纪晚期的宜昌上升有关, 此次上升运动导致中扬子中部沿兴山古夫、南漳鲁家台, 南部沿五峰红渔坪、松滋刘家场等地区抬升, 并造成在上述地区奥陶系—志留系界线附近出现了不同程度的地层缺失<sup>[10-11]</sup>。

自龙马溪组底部开始往上, U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值开始逐渐增大, 这些变化指示了底层海水迅速从富氧的浅水环境变为缺氧的深水环境。在赫南特晚期—鲁丹早期, 伴随着全球温度的迅速回升, 大陆冰盖也快速融化, 导致了全球海平面快速回升和底域缺氧的环境, 并造成 Hirnantia 动物群的整体灭绝和下志留统黑色笔石页岩的沉积。在龙马溪组下段的中上部, U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值达到最高值后开始逐渐减小, 直到龙马溪组上段才降到最低值并保持稳定, 这指示了此轮海侵一直持续到鲁丹中晚期, 而后开始逐渐海退。伴随着海侵后期的逐渐减弱和海退的开始, 深层海水和表层海水逐渐混合, 致使底部缺氧环境遭受破坏, 因而有机质保存条件变差。这一分析与岩性变化完全吻合。从龙马溪上段的底部开始, 岩性由深灰薄层泥岩向上渐变为灰色中—薄层状泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩。

一般认为, 有机质生产力和水体的缺氧环境是黑色页岩形成的主要因素。从秭归五龙五峰组—龙马溪组剖面的岩石序列来看, 富有机质页岩主要分布在两个层段, 分别是五峰组和龙马溪组下段的下部。结合前文对古海洋环境演化的判别和认识, 可初步推断这两套富有机质页岩的成因和主控因素存在一定的差别。五峰组富有机质页岩形成主要与冰期的上升洋流有关, 而龙马溪组富有机质泥岩发育的主要控制因素则是冰期之后的海平面快速上升。

通过上述分析可以看出, 微量元素中的 U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值对五峰组和龙马溪组的沉积环境变化, 特别是氧化 / 还原环境和海平面升降

变化具有很好的响应, 对奥陶系—志留系界线附近的地层缺失也有较好的指示作用。

### 3.2 微量元素与 TOC 的关系

通过比较 TOC 值和微量元素指标的纵向变化趋势(图 2), 不难发现, U/Th、Ni/Co、V/Cr、V/Sc 比值和 TOC 值在各个层位的变化极为相似。(1)在五峰组中部和上部, U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值为明显的较高值, 指示凯迪晚期处于缺氧的环境, TOC 值也表现为较高值(2.61 % ~ 5.43 % )。(2)在五峰组顶部, V/Sc、V/Cr、U/Th 和 Ni/Co 比值表现为骤然减小, 指示底层海水突然从缺氧环境变为富氧环境。TOC 值也同样出现了突然降低, 从 4.65 % 骤然降低至 2.20 %。(3)自龙马溪组底部往上, U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值开始逐渐增大, 指示了随着海侵的开始底层海水迅速从富氧的浅水环境变为缺氧的深水环境。这一阶段的 TOC 值同样表现为逐渐增大。(4)在龙马溪组下段的中上部, U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值达到最高值后开始逐渐减小, 至龙马溪组上段降到最低值然后保持相对稳定, 指示了此轮海侵持续至鲁丹中晚期后开始逐渐海退。与之对应, TOC 值逐渐升高至最大值 3.58 %, 然后逐渐下降至 1 % 以下。

从 TOC 值与各微量元素指标的相关性分析来看(图 3), U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值与 TOC 值之间均具有很明显的相关性。这表明 U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值等微量元素指标对五峰组和龙马溪组的 TOC 具有较好的指示作用。这一现象并非偶然, 两者之间存在必然的联系。沉积岩中某些微量元素的富集程度往往与沉积环境, 特别是氧化 / 还原条件密切相关, 而氧化 / 还原条件是影响生物生产力和有机质保存的重要因素, 因而也是富有机质页岩发育的重要控制因素<sup>[4,12-13]</sup>。

### 3.3 富有机质页岩的厚度和区域分布

对于页岩气而言, 有机碳含量(TOC)的高低是一项重要指标, 它决定了页岩地层的生气能力及吸附气体的能力。关于形成有利页岩气藏泥页岩的 TOC 下限值, 很多学者都进行过研究, 国外常用 6.0 % 作为页岩气有利层段的取值标准, 国内研究结构认为对于有机质类型好, 热演化程度较高的泥页岩, 页岩气有机碳含量下限值可以适当降低, 一般将有机碳含量大于 2.0 % 作为页岩气有利值。

从秭归五龙剖面 TOC 值得纵向变化可以看出

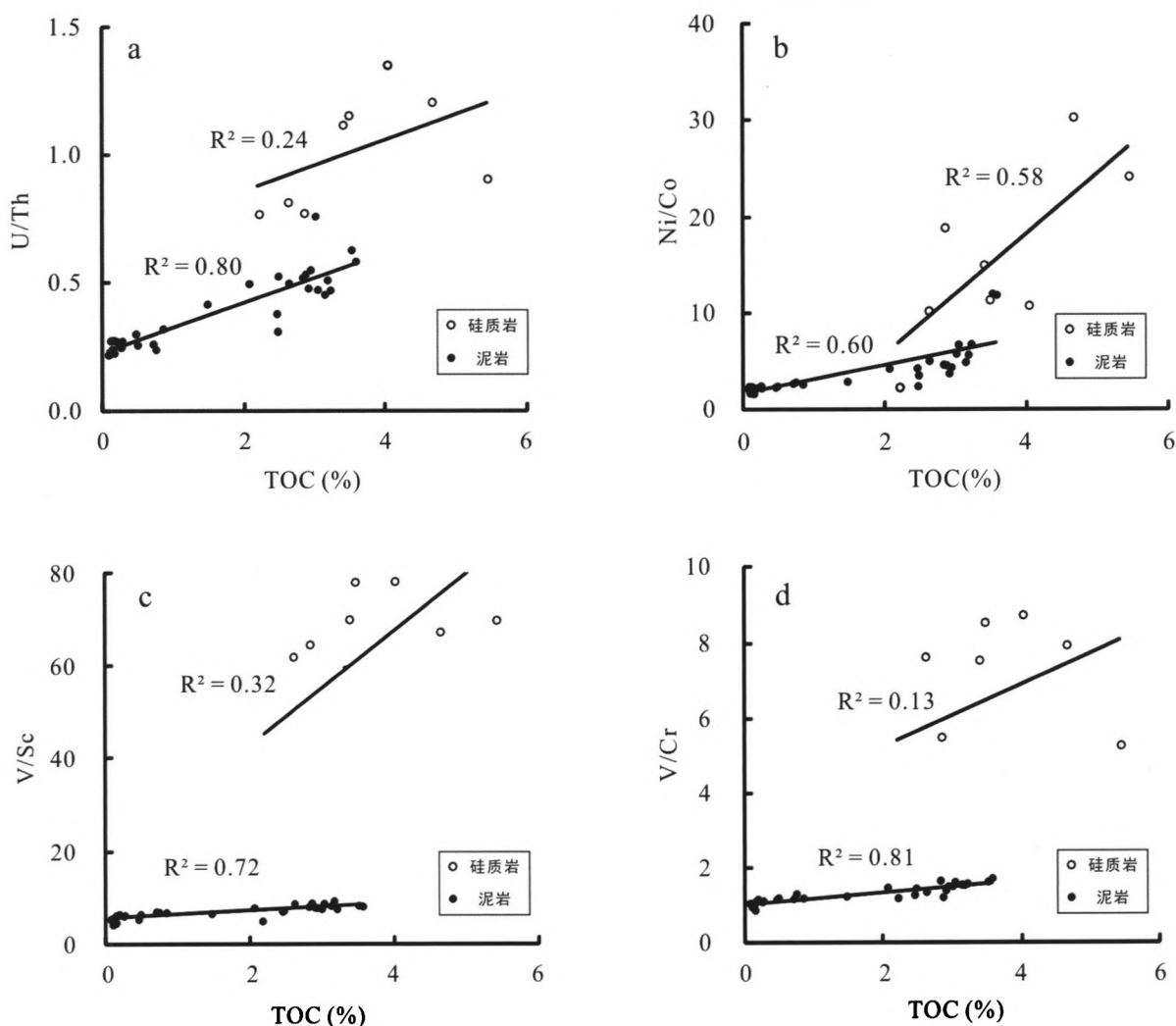


图3 总有机碳含量(TOC)与氧化还原判别指标之间的相关性分析

Fig. 3 Correlations between TOC and redox-sensitive indexes

(图2), TOC 值大于 2% 的页岩连续厚度仅为 16 m, 主要分布在五峰组和龙马溪组下段, TOC 值介于 2.07% ~ 5.43% 之间, 平均值为 3.12%。在秭归五龙剖面以西约 10 km 的两河口鼓锣坪地区(图1), 五峰组—龙马溪组的黑色页岩厚度显著增加, 特别是在 8 m 厚的中—厚层状粉砂岩之上, 发育了连续厚度大于 30 m 的黑色笔石页岩。而在五龙剖面以东约 15 km 的秭归九畹溪地区, 由武汉地质调查中心于 2014 年实施的 WZK6 井显示该地区五峰组—龙马溪组下段的第一套黑色页岩的连续厚度为 24.5 m, 其中五峰组硅质岩厚度达 13.5 m, TOC 值多在 2% 以上, 并且该井在钻遇黑色页岩段后有良好的气体显示。

近年来的研究表明, 中扬子地区奥陶志留之交隆坳相间的古地理格局控制了五峰组—龙马溪组

富有机质页岩的厚度和分布。对鄂西地区而言, 富有机质页岩在鄂西水下高地所夹持的拗陷带最为发育。通过上文关于富有机质页岩厚度、TOC 值和含气性的对比, 可以推断五龙地区和西侧的鼓锣坪地区、东侧的九畹溪地区构成隆凹相间的格局(图1), 前者位于水下隆起, 后两者位于水下凹陷。这一结论对区域内上奥陶统—下志留统页岩气有利目标区的预测可能具有一定的指导意义。

## 4 结论

通过对湖北秭归五龙剖面五峰组—龙马溪组下段黑色岩系的微量元素和有机碳含量的分析, 获得了以下认识:

(1) 微量元素中的 U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比

值等指标对五峰组和龙马溪组古氧化/还原环境和海平面升降变化具有很好的响应,对奥陶系—志留系界线附近的地层缺失也有明显的指示。

(2)U/Th、Ni/Co、V/Cr 和 V/Sc 比值与 TOC 值之间表现为良好的正相关关系,表明这些古环境判别指标在一定程度上可用于指示和推测五峰组和龙马溪组的有机碳含量变化。

(3)通过对五龙剖面及周边地区的富有机质页岩厚度、TOC 值和含气性进行对比,推断五龙地区和西侧的鼓锣坪地区、东侧的九畹溪地区构成隆凹相间的格局,前者位于水下隆起,后两者位于水下凹陷,这一认识对区域内页岩气有利目标区预测具有一定的指导意义。

武汉地质调查中心王传尚研究员、李志宏副研究员和彭中勤助理研究员等人在野外剖面测量和样品采集中给予了很大的帮助,在此表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 陈旭,樊隽轩,张元动,王红岩,陈清,王文卉,梁峰,郭伟,赵群,聂海宽,文治东,孙宗元.五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J].地层学杂志,2015,39(4):351-358.
- [2] 陈代钊,汪建国,严德天,韦恒叶,遇昊,王清晨.扬子地区古生代主要烃源岩有机质富集的环境动力学机制与差异[J].地质科学,2011,46(1):5-26.
- [3] 陈衍景,邓健,胡桂兴.环境对沉积物微量元素含量和配分型式的制约[J].地质地球化学,1996,(3):97-105.
- [4] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. Chemical Geology, 2006, 232: 12-32.
- [5] 常华进,储雪蕾,冯连君,黄晶,张启锐.氧化还原敏感元素对古海洋沉积环境的指示意义[J].地质论评,2009,55(1):91-99.
- [6] Jones B J, Manning A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111: 111-129.
- [7] Rimmer S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA) [J]. Chemical Geology, 2004, 206: 373-391.
- [8] 李双建,肖开华,沃玉进,龙胜祥,蔡立国.南海相上奥陶统一志留统优质烃源岩发育的控制因素[J].沉积学报,2008,26(5):872-880.
- [9] 戎嘉余,詹仁斌.华南奥陶、志留纪腕足动物群的更替兼论奥陶纪末冰川活动的影响[J].现代地质,1999,13(4):390-394.
- [10] 汪啸风,倪世钊,曾庆奎,徐光洪,周天梅,李志宏,项礼文,赖才根.长江三峡生物地层学(2)早古生代部分[M].北京:地质出版社,1987:1-641.
- [11] 陈旭,戎嘉余,樊隽轩,詹仁斌,张元动,王志浩,王宗哲,李荣玉,王铎,米切尔,哈帕尔.扬子区奥陶纪末赫南特亚阶的生物地层学研究[J].地层学杂志,2000,24(3):169-175.
- [12] 腾格尔,刘文汇,徐永昌,陈践发.缺氧环境及地球化学判识标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例[J].沉积学报,2004,22(2):365-372.
- [13] 严德天,陈代钊,王清晨,汪建国.扬子地区奥陶系—志留系界线附近地球化学研究[J].中国科学(D辑),2009,39(3):285-299.