

文章编号: 1000-0550(2020)05-1111-12

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.102

中国华南渝东北城口地区下寒武统烃源岩发育环境与形成机制

赵坤^{1,2}, 李婷婷², 朱光有², 张志遥², 李婧菲^{1,2}, 王鹏举^{1,2}, 闫慧慧^{1,2}, 陈永进¹

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 上扬子地台北缘发育下寒武统黑色页岩, 沉积厚度大、有机碳含量高, 是一套重要的烃源岩, 具有重要的勘探价值。恢复其发育环境和碎屑物源, 对烃源岩分布预测具有重要意义。通过对华南渝东北城口地区野外露头系统取样并开展地球化学测试, 研究了黑色页岩的形成环境与物源供应, 探讨气候变化与陆源输入对黑色页岩形成的控制作用, 重建优质烃源岩的形成过程。分析结果表明, 黑色页岩具有高的 Al_2O_3 含量(7.38%~13.90%)、 K_2O 含量(1.01%~2.93%)、 Na_2O 含量(1.98%~2.88%)和总 Fe_2O_3 含量(2.35%~5.36%), 富集 V(平均值为 242 $\mu g/g$)、Cr(平均值为 83 $\mu g/g$)、Ni(平均值为 58 $\mu g/g$) 等微量元素。CIA、K/Al 和 Rb/Al 指示黑色页岩沉积期气候为温暖湿润, V/Cr、U/Th、Ce/Ce*、 $Mo_{EF}-U_{EF}$ 指沉积水体经历缺氧→次氧化→缺氧→次氧化四个阶段, 正 Eu/Eu* 异常指示早期存在海底热水活动, Th/Sc-Zr/Sc 图表明黑色页岩沉积组分未经历再循环过程, 可以有效判别源区; Co/Th-La/Sc 图和 La/Th-Hf 图确定黑色页岩存在长英质和铁镁质两种源岩类型, 并且汉南古陆是有效物源区。

关键词 烃源岩; 下寒武统; 发育环境; 中国华南

第一作者简介 赵坤, 男, 1996 年出生, 硕士研究生, 地球化学, E-mail: geozhaokun@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

早寒武世是生物大爆发之初的地球关键时期, 这一时期发生海平面快速升降, 气候剧烈变化、碳同位素异常等重要地质事件^[1-2], 特别是沉积的富有机质黑色页岩是目前页岩气勘探的重点层位, 已引起石油地质学家的重视^[3-6]。烃源岩是大型油气田形成的基础^[7-8], 当前对早寒武世这套黑色页岩的研究包括古海洋环境^[9-11]、生物地层学^[12]及地质年代学^[13-15]等, 认为早寒武世海水保持高度氧化还原分层结构, 硫化和铁化水体共存^[16], 直到中寒武世深水地区才逐渐开始氧化^[17-18]。“雪球地球”假设认为自新元古代冰期事件至寒武纪生物大爆发, 地球气候由极端寒冷转变为温暖湿润^[19], 高的大气氧含量^[20]和 CO_2 浓度^[21]影响大陆铝硅酸盐物质的风化程度。而大陆风化对海水营养物质的输入有显著影响^[22], 高的营养物输入通量能有效增强初级生产力, 提供充足的有机质来源, 影响富有机质页岩的形成。

渝东北城口地区位于上扬子地台北缘, 紧邻四川盆地(图 1b)。城口地区在早寒武世处于深水陆棚边缘盆地^[23], 沉积一套碎屑岩组合, 从下往上依次沉积水井沱组、石牌组、天河板组地层, 水井沱组与下伏震旦系灯影组低角度不整合接触(图 2a), 灯影组在城口地区为白云岩地层(图 2a, d, g), 水井沱组为一套黑色页岩地层, 且黑色页岩在城口地区出露厚度大于 100 m(图 2b, c, e, f, h, i), 分布稳定。特别的, 水井沱组黑色页岩底部出现泥质碳酸盐结核(图 2f), 与华南地区广泛沉积的含磷层属于异相沉积。而当前对这套黑色页岩的研究集中在页岩储集层^[24]、PGE 元素异常^[25]等方向, 而对黑色页岩的沉积环境分析和有效源区判定缺乏系统研究。本次研究对下寒武统水井沱组黑色页岩系统野外取样, 通过多种地球化学手段重建黑色页岩沉积环境和物源。

1 样品实验与方法

TOC 测试分析在中国石油大学(北京)地球科学

收稿日期: 2019-06-10; 收修改稿日期: 2019-12-03

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2019B-04, 2018A-0102)[**Foundation:** China National Petroleum Corporation (CNPC) Scientific Research and Technology Development Project, No.2019B-04, 2018A-0102]

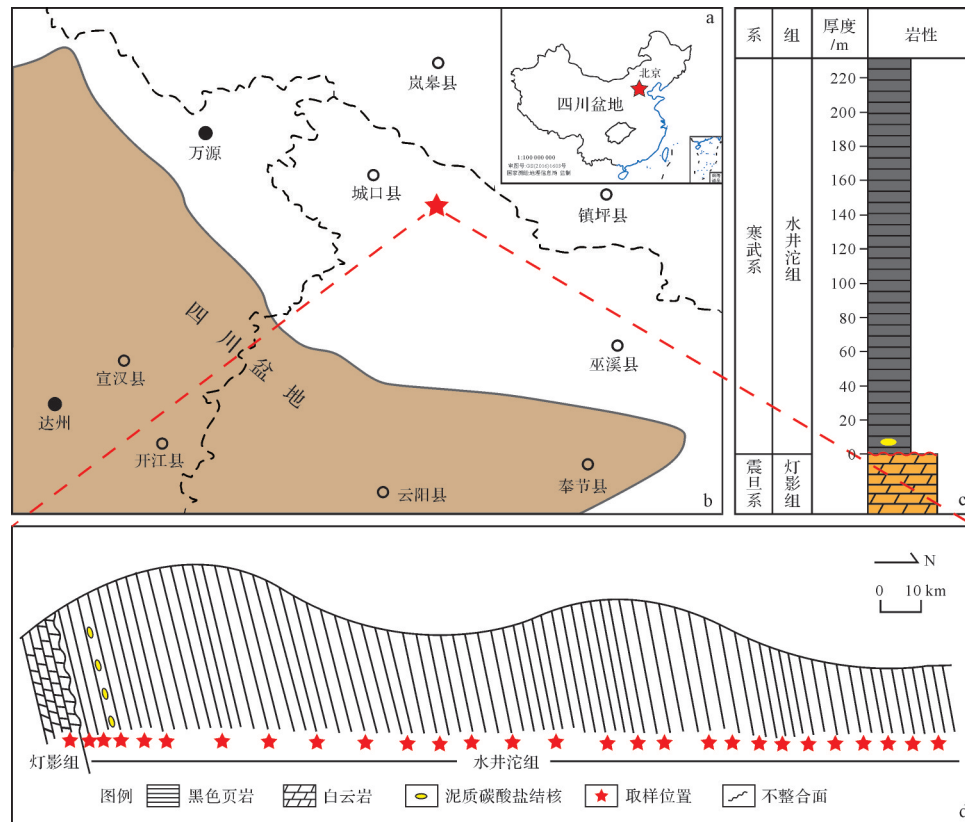


图1 华南渝东北城口地区地理位置、研究剖面及下寒武统地层柱状简图
(a)四川盆地位置图;(b)研究区地理位置图;(c)研究区下寒武统岩性柱状图;(d)野外露头手剖面图

Fig.1 The geographical location, study profile and columnar diagram of Lower Cambrian strata in the Chengkou area of Northeast Chongqing, South China

(a) location of Sichuan Basin; (b) geographical location map of the study area; (c) Lower Cambrian lithologic histogram in the study area; (d) sketch of field outcrop profile

学院石油地质实验室完成。样品经粉碎后用小于0.2 mm的筛子过筛,以1:7(体积比)盐酸浸泡2 h以上以消除碳酸盐组分,确认无残留碳酸盐组分后将样品放入恒温(70 °C~80 °C)干燥箱中烘干待用,所有待测样品使用美国LECO公司CS-230碳硫测定仪完成测试。

主量元素测定采用熔片X荧光光谱法(XRF),仪器型号为岛津XRF-1800,测试精度优于5%,在北京科荟测试技术有限公司完成。全岩微量元素含量采用溶样法利用Analyticjena PQMS elite ICP-MS分析仪在北京科荟测试技术有限公司完成。ICP-MS分析的样品前处理步骤如下:1)将200目样品置于105 °C烘箱中12 h,烘干;2)准确称取25 mg粉末样品,置于特氟龙溶样弹中;3)先后依次缓慢加入1 mL高纯度硝酸和1 mL高纯度氢氟酸;4)将特氟龙溶样弹放入钢套,拧紧后置于190 °C烘箱中加热24 h以上;5)待溶样弹冷却,开盖后置于140 °C电热板上蒸干,然后加入1 mL硝酸并再次蒸干;6)加入1 mL高纯度硝酸、

1 mL超纯水和0.5 mL浓度为1 mg/L的In元素内标,再次将特氟龙溶样弹放入钢套,拧紧后置于190 °C烘箱中加热12 h以上;7)将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用2%浓度硝酸稀释至100 g以备ICP-MS测试。

2 结果

2.1 有机碳含量

所有样品的TOC测试结果见表1。寒武系水井沱组黑色页岩TOC值分布在0.8%~1.8%,平均为1.0%,在垂向序列上表现为“两高两低”的趋势,即底部和上部TOC高,中部和顶部TOC低,反映有机质沉积环境的差异性。下覆震旦系灯影组灰岩TOC值较低,为0.1%。

2.2 主量元素与微量元素

主量元素测试结果见表1。主量元素分析表明水井沱组黑色页岩中 Al_2O_3 含量(7.38%~13.90%,平均值为12.23%)、 SiO_2 含量(36.38%~66.23%,平均值为



图2 城口地区下寒武统水井沱组野外露头照片和室内样品照片

(a)震旦系灯影组和寒武系水井沱组接触界线;(b)水井沱组黑色页岩宏观露头;(c)水井沱组黑色页岩;(d)灯影组白云岩;(e)水井沱组底部黑色页岩;(f)水井沱组底部泥质碳酸盐结核;(g)白云岩样品;(h)(i)黑色页岩样品

Fig.2 Photographs of outcrop and samples from Shuijingtuo Formation in the Lower Cambrian, Chengkou area

(a) unconformable contact between Sinian Dengying Formation and Cambrian Shuijingtuo Formation; (b) macro outcrop of Shuijingtuo Formation; (c) black shale in Shuijingtuo Formation; (d) dolomite in Dengying Formation; (e) black shale at base of Shuijingtuo Formation; (f) argillaceous carbonate nodules; (g) dolomite; (h)(i) black shale

为 58.51%)、 K_2O 含量 (1.01%~2.93%, 平均值为 2.45%)、 Na_2O 含量 (1.98%~2.88%, 平均值为 2.50%)、总 Fe_2O_3 含量 (2.35%~5.36%, 平均值为 4.13%) 很高, 而 MnO (平均值为 0.06%)、 TiO_2 (0.73%) 和 P_2O_5 (0.22%) 含量很低。在水井沱组底部一个黑色页岩样品(样品编号为 B6)的 CaO 含量呈现高值(26.1%), 其余主量元素较低。

微量元素测试结果见表 2。黑色页岩中富集 V、Cr、Ni、Ba 等微量元素, 其他元素含量较低。黑色页岩样品的 Mo 含量为 5.7~30.2 $\mu g/g$, 平均值为 13.3 $\mu g/g$, U 含量为 6.7~17.1 $\mu g/g$, 平均值为 9.4 $\mu g/g$; V 含量为 82.7~478 $\mu g/g$, 平均值为 258 $\mu g/g$ (表 2)。其中 Mo、U 和 V 的含量均高于后澳大利亚太古代页岩(PAAS)的值^[26]。

2.3 稀土元素

稀土元素结果见表 3。黑色页岩稀土总量 ($\sum REE$) 为 144.3~202.4 $\mu g/g$, 平均值为 172.1 $\mu g/g$, 大部分样品的 REE 值低于 PAAS (后澳大利亚太古代页岩)。其中, 轻稀土 (LREE) 为 127.9~178.6, 平均值为 153.4; 重稀土 (MREE) 为 15.4~23.8, 平均值为 18.7; 轻重稀土比值 (LREE/MREE) 介于 7.3~9.6, 平均为 8.2, 指示轻稀土 (LREE) 相对富集。黑色页岩稀土

元素分配模式曲线表现为从左至右相对平坦, 中度的 Ce 亏损。

3 黑色页岩地球化学特征讨论

3.1 氧化还原情况分析

黑色页岩的沉积时期水体的氧化还原情况反映在一些微量元素的含量中。特别的, Mo、U、V 是典型的指示氧化还原情况的微量元素, 其富集程度与水体的环境有关, 被广泛用来示踪沉积岩的古氧化还原环境^[27-28]。微量元素的富集程度可以用富集系数(EF)来表征。元素富集系数计算公式为: $X_{EF} = [(X/Al)_{\text{sample}} / (X/Al)_{\text{PAAS}}]$, 其中 PAAS 数据来自 Taylor *et al.*^[29]。

城口地区水井沱组黑色页岩的 Mo_{EF} 和 U_{EF} 在垂向序列上与反映水体环境变化的微量元素比值 U/Th 趋势一致(图 3), 指示 Mo 和 U 的富集明显受限于水体的氧化还原情况。通常认为缺氧环境的沉积物中 $U/Th > 1.25$, $V/Cr > 4.25$; 而氧化环境中 $U/Th < 0.75$, $V/Cr < 2$ ^[30]。根据微量元素变化趋势, 城口地区黑色页岩的水体环境变化大致可以分为四个阶段(图 3), 并分别进行讨论。

第 I 阶段的黑色页岩典型的野外特征是出现

表1 城口地区下寒武统水井沱组 TOC 和主量元素分析数据

Table 1 Data for TOC and major elements in Lower Cambrian Shuijingtu Formation, Chengkou area

时代	地层	编号	岩性	厚度	TOC	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	TFe ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	MgO	CaO	L.O.I
				/m	wt/%	wt/%	wt/%	wt/%	wt/%	wt/%	wt/%	wt/%	wt/%	wt/%	wt/%	
寒武系	水井沱组	B93	页岩	1.0	0.8	9.6	51.7	0.5	2.0	2.1	2.4	0.06	0.16	1.9	14.6	15.0
寒武系	水井沱组	B90	页岩	4.0	1.0	11.6	57.3	0.7	2.3	2.5	3.9	0.06	0.16	2.4	8.2	11.0
寒武系	水井沱组	B88	页岩	6.0	0.8	11.2	53.9	0.6	2.1	2.5	4.1	0.07	0.14	3.2	9.5	12.8
寒武系	水井沱组	B87	页岩	8.0	1.0	10.9	51.4	0.6	2.0	2.4	3.9	0.07	0.14	2.8	11.6	14.2
寒武系	水井沱组	B83	页岩	12.0	0.9	11.1	53.1	0.6	2.0	2.6	4.0	0.07	0.14	2.9	10.8	12.6
寒武系	水井沱组	B80	页岩	15.0	0.7	13.4	60.3	0.8	2.8	2.9	4.8	0.05	0.18	2.7	3.9	8.2
寒武系	水井沱组	B77	页岩	18.0	1.3	12.3	55.4	0.7	2.4	2.8	4.3	0.06	0.15	2.8	7.6	11.5
寒武系	水井沱组	B73	页岩	22.0	1.2	12.7	59.6	0.8	2.7	2.3	4.8	0.05	0.31	2.8	5.1	9.0
寒武系	水井沱组	B71	页岩	24.0	1.3	13.2	59.0	0.8	2.8	2.2	4.8	0.06	0.27	2.9	5.3	8.7
寒武系	水井沱组	B68	页岩	28.0	0.9	11.3	53.0	0.7	1.9	2.8	4.0	0.06	0.16	2.5	10.7	12.9
寒武系	水井沱组	B67	页岩	30.0	1.1	13.0	61.2	0.8	2.6	2.5	4.1	0.05	0.18	2.6	4.7	8.2
寒武系	水井沱组	B65	页岩	34.0	0.9	12.0	56.0	0.7	2.5	2.3	5.4	0.05	0.15	2.2	8.6	10.2
寒武系	水井沱组	B63	页岩	37.7	0.8	12.4	54.8	0.7	2.6	2.7	2.9	0.05	0.20	2.4	9.8	11.5
寒武系	水井沱组	B58	页岩	42.5	1.3	12.6	59.2	0.8	2.8	2.0	4.7	0.06	0.26	2.8	5.5	9.3
寒武系	水井沱组	B52	页岩	78.0	1.8	13.5	62.5	0.8	2.9	2.4	4.6	0.05	0.27	2.7	3.0	7.4
寒武系	水井沱组	B45	页岩	93.7	0.7	13.0	66.2	0.8	2.7	2.5	4.2	0.05	0.24	2.2	2.8	5.4
寒武系	水井沱组	B39	页岩	104.5	0.7	13.4	65.9	0.8	2.7	2.7	4.4	0.04	0.23	2.2	2.1	5.5
寒武系	水井沱组	B38	页岩	107.0	0.7	14.0	65.6	0.8	3.0	2.7	4.6	0.04	0.25	2.3	1.6	5.1
寒武系	水井沱组	B37	页岩	109.0	0.9	12.0	61.8	0.7	2.4	2.5	4.2	0.07	0.23	2.7	6.3	7.1
寒武系	水井沱组	B35	页岩	113.6	1.0	11.3	58.1	0.7	2.2	2.4	3.7	0.07	0.21	2.4	8.5	10.4
寒武系	水井沱组	B30	页岩	126.0	0.9	13.1	64.5	0.8	2.7	2.6	4.3	0.05	0.27	2.4	2.8	6.5
寒武系	水井沱组	B26	页岩	149.0	0.8	13.9	64.5	0.9	2.9	2.7	4.4	0.04	0.29	2.4	2.2	5.8
寒武系	水井沱组	B22	页岩	165.2	0.9	13.5	65.0	0.9	2.8	2.7	4.1	0.04	0.27	2.4	2.6	5.7
寒武系	水井沱组	B16	页岩	193.0	1.3	12.7	62.7	0.8	2.6	2.5	4.0	0.04	0.25	2.1	4.5	7.9
寒武系	水井沱组	B11	页岩	209.8	0.8	13.2	65.8	0.8	2.8	2.6	4.0	0.05	0.29	2.3	2.6	5.4
寒武系	水井沱组	B6	页岩	222.4	0.9	7.4	36.4	0.4	1.0	2.1	2.7	0.09	0.23	1.8	26.1	21.8
寒武系	水井沱组	B3	页岩	227.0	1.6	11.9	54.8	0.7	2.2	2.6	4.3	0.07	0.24	2.7	8.7	11.8
震旦系	灯影组	B2	灰岩	228.0	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

泥质碳酸盐结核(图2f),根据微量元素变化趋势,此阶段出现 Mo_{EF} (最高为 $17.5 \mu g/g$)和 U_{EF} (最高为 $7.6 \mu g/g$)的小峰值(图3),样品数据在 Mo_{EF} - U_{EF} 交会图上落在缺氧沉积区域,指示沉积水体为缺氧环境;黑色页岩的有机碳含量较高(TOC最高为1.6%), U/Th 值为1.23~1.95(平均值为1.60), V/Cr 值为2.14~4.58(平均值为3.36),指示还原的水体环境。此外,经PAAS标准化后的 Eu/Eu^* 出现显著正异常,表明这一阶段存在海底热水活动^[25],容易造成缺氧的底水环境。第II阶段黑色页岩的 U/Th 和 V/Cr 值在氧化和缺氧界线中间变动,指示水体处于次氧化环境。同时, Eu/Eu^* 在1值附近摆动,与正常海水值一致,表明这一阶段沉积水体相对稳定。此外,在第II阶段中部出现两个异常点,其 Mo_{EF} 平均值为14.5, U_{EF} 平均值为4.6,而 Ce/Ce^* 未见显著负异常, U/Th 值和 V/Cr 值仍然指示正常的次氧化环境,因此其 Mo_{EF} 和 U_{EF} 的异

常可能是沉积孔隙水缺氧导致的。第III阶段的黑色页岩出现 U/Th 值逐渐增大,而 V/Cr 值却呈现降低趋势,结合黑色页岩的有机碳含量变化,认为这一阶段水体处于缺氧环境。特别的,第III阶段 Mo_{EF} 和 U_{EF} 值逐渐增大,并达到峰值,其 Mo_{EF} - U_{EF} 交会图(图4)指示水体环境变为缺氧环境。第IV阶段黑色页岩的 U/Th 和 V/Cr 值指示整体处于次氧化环境,此外,在第IV阶段中部和顶部出现异常样品点,其 Mo_{EF} 和 U_{EF} / U/Th 均处于相对高值,说明这中部和顶部曾出现过短暂的缺氧时期,可以认为第IV阶段黑色页岩沉积时期水体环境以次氧化为主,夹有短暂的缺氧环境。从整个黑色页岩的沉积序列看,城口地区黑色页岩沉积环境经历了多期缺氧一次氧化旋回,可能与早寒武世海水的脉动式上升下降有关。

除微量元素比值可以反映水体古环境外,作为稀土元素,其独特的元素特征可以用来指示氧化还

表2 城口地区下寒武统水井沱组部分微量元素数据($\mu\text{g/g}$)Table 2 Data for trace elements in Lower Cambrian Shuijingtuo Formation, Chengkou area($\mu\text{g/g}$)

编号	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Mo	Ba	Tl	Th	U	Zr	Hf
B2	1.02	60.2	13.5	2.74	19.6	3.99	10.7	14.7	155	5.51	0.569	60.9	0.053	1.44	1.09	11	0.29
B3	10.4	160	74.8	13.3	54.4	35.7	96.5	90.5	424	37.6	20.5	750	1.61	9.62	11.8	134	3.54
B6	6.71	208	45.4	7.86	45.2	19.6	80.9	42.8	1 502	46.3	12	10 715	1.01	5.32	10.4	79.1	2.07
B11	12.9	310	92.3	14	64	33	116	110	230	32.7	10.2	832	1.48	9.94	7.23	163	3.86
B16	12.4	385	98.1	14	73.8	40.4	167	109	340	31.8	20.1	1 058	2.03	9.78	9.37	155	3.64
B22	12.4	422	98.1	14	60.5	30.6	136	109	234	30.1	6.63	657	1.59	9.82	6.82	159	3.68
B26	13.6	457	102	15.5	73.7	36.7	142	121	218	35.4	15.6	934	2.17	10.4	10.1	168	4.12
B30	11.9	422	93.2	14.3	77.2	37.6	167	104	256	33.8	15.7	825	2.03	9.71	9.1	165	4.04
B35	10.1	311	76.7	12	56	31.5	130	85.4	585	34.6	8.1	1 511	1.65	8.64	8.73	136	3.49
B37	10.8	337	82.4	13.4	68.1	31.7	124	95.5	461	34.1	17.4	1 328	2.12	8.8	10.4	139	3.47
B38	13.1	478	104	17.1	79.2	42.1	162	121	215	35.4	20.2	1 242	2.86	10.5	11.1	199	4.86
B39	13.3	272	104	17.5	75.9	37.7	111	113	238	32.5	13.4	951	1.94	10.1	9.84	211	5.06
B45	12.3	252	94.8	14.6	60.8	34.5	115	107	223	33.8	10.2	950	1.53	8.94	7.03	192	4.51
B52	12.3	375	107	17	79.2	41.9	198	117	231	33.5	17.5	1 098	2.14	10.1	11.2	187	4.59
B58	12.8	224	94	16.3	62.2	39.9	137	115	448	40.7	30.2	2 168	1.87	10	17.1	178	4.69
B63	8.84	374	70.8	11.8	46.8	21.3	85.9	99.5	419	25.7	12.1	1 101	1.69	10.3	7.49	164	4.55
B65	10.4	110	75.4	13.4	58.7	33.3	46.6	99.9	595	28.2	7.21	1 681	0.974	10.2	6.49	157	4.38
B67	11.8	165	85	15	57	31.5	57	111	345	42.3	6.93	1 151	1.63	11.7	9.27	211	5.59
B68	9.73	82.7	66.4	12.9	43.6	25.9	61.7	83.5	672	34.5	7.47	1 996	1.09	11	7.53	167	4.77
B71	13.5	187	104	18.5	68.1	43.2	114	124	385	36.1	27.4	1 875	1.56	10.7	14.4	187	4.79
B73	12.3	202	92.5	18.1	79.7	38.4	156	114	366	35.9	21.2	1 345	2.6	9.92	13.1	162	4.16
B77	11.6	117	80.5	14.6	47.8	29	75.2	99.9	502	33.6	6.34	1 691	1.25	10.4	6.7	167	4.3
B80	11.7	132	83.3	15.9	46.2	37	81.4	111	291	26.8	10.1	1 261	1.16	11.1	7.43	179	4.71
B83	10.4	107	69.8	12.5	35.1	27.6	62	84.7	674	33.4	9.89	1 863	0.886	10.3	8.12	163	4.61
B87	10.2	99.4	67.7	12.2	42.4	25.2	66.8	83.9	708	32.7	5.71	1 775	1.1	9.72	6.7	159	4.41
B88	12.5	149	81.2	14.2	48.3	28.8	75	99.6	651	39.4	8.3	2 234	1.37	9.81	7.92	169	4.27
B90	12.4	156	84.1	14.3	51.6	33.2	56.6	99.1	571	41.1	7.62	1 881	1.33	10	7.41	185	4.66
B93	8.97	476	70.3	9.47	49.9	22.1	349	82.8	903	33.6	13.5	2 736	1.3	7.81	11.8	145	3.58

原环境。Ce存在正三价和正四价两种价态,在氧化环境中,Ce³⁺易被氧化成Ce⁴⁺,而Ce⁴⁺容易水解被Fe、Mn氢氧化物胶体吸附,造成海水Ce的强烈亏损;在还原环境中,Ce⁴⁺易被还原成Ce³⁺,造成海水Ce的强烈富集,因此,沉积岩的Ce异常可以反映古海水的氧化还原环境。城口地区黑色页岩样品的稀土元素数据见表3,所有样品的Ce异常采用后澳大利亚太古代页岩(PAAS)进行标准化。此外,黑色页岩中La异常可能引起Ce异常变化^[31],不能真实反映黑色页岩沉积时的古海水Ce特征,通过样品的Ce/Ce*与Pr/Pr*交会图(图5a),所有黑色页岩样品均落在了III_b区内,表明黑色页岩样品受到La的影响程度低,Ce异常能够反映真实的沉积海水特征。从表3和图5b可以看出,城口地区水井沱组黑色页岩呈现弱的Ce异常,Ce/Ce*值介于0.76~0.82,平均值为0.79。特别的,黑色页岩的第I和III阶段出现Ce/Ce*的两个较低值(图3),指示沉积水体还原性较强。

3.2 沉积物源分析

微量元素和稀土元素诸如Al、Ti、Sc、Th和Zr等由于其在风化、迁移、成岩、变质作用过程中的稳定性,使得它们被广泛用来示踪沉积物源^[32]。TiO₂与Zr的比值可以用来区分三种不同的源岩类型,分别是长英质、中性、铁镁质火成岩。当TiO₂/Zr的值大于200指示源岩类型为铁镁质火成岩,TiO₂/Zr的值小于55指示源岩类型为长英质火成岩,而TiO₂/Zr的值介于55和195之间指示源岩类型为中性火成岩^[33]。城口地区水井沱组黑色页岩的TiO₂-Zr图解(图6a)显示黑色页岩样品均落在了长英质火成岩源区内,指示黑色页岩的源岩类型可能是长英质的。考虑到沉积岩的再分选与再循环过程会影响沉积物的成分变化,进而影响对源区的判定,因此需要判定黑色页岩样品是否经历了沉积分选与再循环过程。由于Th一般存在酸性岩中,而Sc在基性岩中赋存,且Th/Sc值不会受到沉积再循环的影

表3 城口地区下寒武统水井沱组稀土元素数据(μg/g)

Table 3 Data for rare earth elements in Lower Cambrian Shuijingtuo Formation, Chengkou area(μg/g)

编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	LREE	MREE	L/M
B3	41.8	64.7	8.5	33.7	6.3	1.1	5.7	0.9	5.3	1.0	3.2	0.4	3.0	0.4	176.0	156.2	19.8	7.9
B6	39.2	57.8	7.9	31.6	5.9	2.7	5.6	0.9	5.4	1.0	3.2	0.4	2.9	0.4	164.9	145.1	19.8	7.3
B11	43.6	67.9	8.7	33.4	6.0	1.1	5.3	0.8	4.4	0.8	2.6	0.3	2.6	0.3	177.9	160.7	17.2	9.3
B16	39.1	60.6	8.0	30.6	5.6	1.0	5.1	0.8	4.5	0.8	2.5	0.3	2.5	0.3	161.8	144.9	16.8	8.6
B22	41.5	65.2	8.4	31.5	5.6	1.0	4.9	0.7	4.1	0.8	2.5	0.3	2.3	0.3	169.1	153.1	16.0	9.6
B26	46.0	71.2	9.3	36.0	6.6	1.1	6.0	0.9	5.1	0.9	2.9	0.4	2.8	0.4	189.6	170.2	19.4	8.8
B30	40.0	61.8	8.2	31.6	5.8	1.1	5.3	0.8	4.6	0.9	2.8	0.4	2.7	0.3	166.2	148.5	17.7	8.4
B35	36.3	59.0	7.9	31.7	5.9	1.3	5.5	0.8	4.8	0.9	2.8	0.4	2.6	0.3	160.1	142.1	17.9	7.9
B37	37.5	59.4	7.9	31.0	5.8	1.2	5.1	0.8	4.8	0.9	2.8	0.4	2.7	0.3	160.4	142.7	17.6	8.1
B38	43.3	68.3	9.0	35.4	6.6	1.3	6.1	0.9	5.4	0.9	3.1	0.4	2.9	0.4	183.9	163.9	20.1	8.2
B39	43.0	67.0	8.6	32.8	5.7	1.0	5.2	0.8	4.7	0.9	2.9	0.4	2.8	0.4	176.2	158.1	18.1	8.7
B45	38.2	60.4	7.8	30.4	5.6	1.0	5.1	0.8	4.7	0.9	2.8	0.4	2.8	0.4	161.1	143.4	17.7	8.1
B52	38.1	56.5	7.7	30.4	5.5	1.0	5.1	0.8	4.8	0.9	2.8	0.4	2.8	0.3	157.1	139.3	17.8	7.8
B58	46.0	71.6	9.4	37.9	7.0	1.4	6.4	1.0	5.8	1.1	3.5	0.4	3.3	0.4	195.3	173.4	21.9	7.9
B63	38.3	56.1	7.1	27.7	4.9	0.9	4.4	0.7	4.1	0.8	2.5	0.3	2.4	0.3	150.5	135.1	15.4	8.7
B65	38.9	61.0	7.7	29.8	5.3	1.2	4.9	0.7	4.5	0.8	2.7	0.4	2.6	0.3	160.7	143.9	16.9	8.5
B67	46.6	74.0	9.9	39.5	7.4	1.3	6.8	1.1	6.5	1.2	3.8	0.5	3.5	0.5	202.4	178.6	23.8	7.5
B68	41.5	66.0	8.6	33.3	6.3	1.3	5.8	0.9	5.3	1.0	3.3	0.4	3.1	0.4	177.2	157.0	20.2	7.8
B71	46.8	71.2	9.2	35.9	6.8	1.3	6.1	0.9	5.4	1.0	3.2	0.4	3.1	0.4	191.7	171.2	20.5	8.4
B73	42.8	65.2	8.5	33.3	6.1	1.2	5.4	0.9	5.0	0.9	3.0	0.4	2.9	0.4	175.8	157.1	18.7	8.4
B77	42.0	65.6	8.5	33.0	6.1	1.1	5.4	0.9	5.2	0.9	3.0	0.4	2.9	0.4	175.2	156.3	19.0	8.2
B80	41.4	62.9	7.8	29.8	5.1	0.9	4.7	0.7	4.3	0.8	2.6	0.4	2.7	0.3	164.4	147.9	16.5	9.0
B83	39.7	64.6	8.3	32.9	6.1	1.3	5.4	0.9	5.2	1.0	3.1	0.4	3.0	0.4	172.2	152.9	19.3	7.9
B87	40.3	63.8	8.3	32.3	6.1	1.3	5.3	0.9	5.2	0.9	3.0	0.4	2.9	0.4	171.0	152.1	18.9	8.0
B88	41.8	66.4	8.7	35.8	6.6	1.4	5.9	0.9	5.7	1.0	3.3	0.4	3.1	0.4	181.4	160.6	20.8	7.7
B90	40.5	66.0	9.0	35.5	6.8	1.5	6.2	1.0	5.7	1.0	3.3	0.4	3.1	0.4	180.4	159.3	21.1	7.5
B93	33.7	52.2	7.1	28.1	5.2	1.6	4.9	0.7	4.4	0.8	2.6	0.3	2.4	0.3	144.3	127.9	16.4	7.8
Ave.	41.0	63.9	8.4	32.8	6.0	1.2	5.5	0.8	5.0	0.9	2.9	0.4	2.8	0.4	172.1	153.4	18.7	8.2

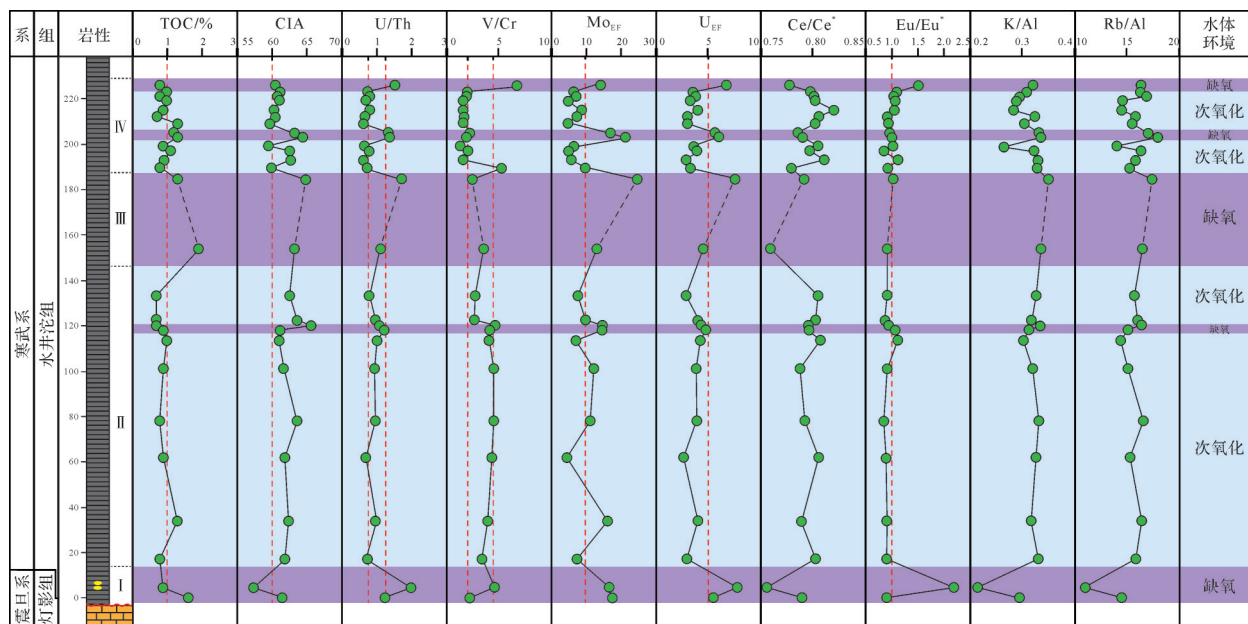


图3 城口地区下寒武统水井沱组黑色页岩TOC、CIA和微量元素比值图

Fig.3 Vertical distribution of TOC, CIA and trace elements in Shuijingtuo Formation, Lower Cambrian

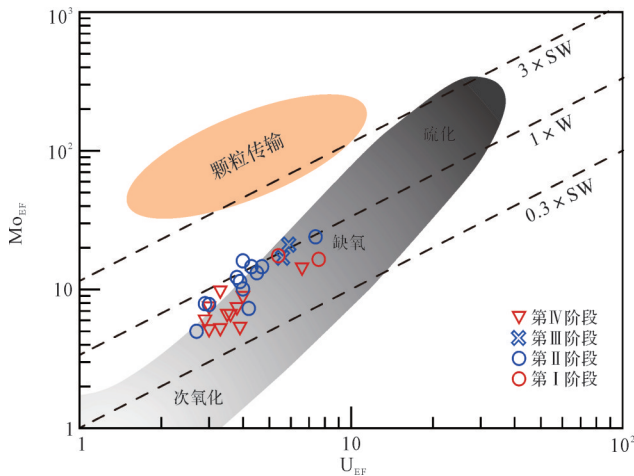


图4 城口地区下寒武统水井沱组黑色页岩 Mo_{EF} - U_{EF} 图
Fig.4 Mo_{EF} vs. U_{EF} plot for Shuijingtuo Formation in Chengkou area
dotted lines show Mo/U molar ratios equal to the seawater values of $3 \times SW$, $1 \times SW$, $0.3 \times SW$

响,因此常被用来判定沉积物源组分变化情况^[34]。Zr主要富集在锆石中,锆石的稳定性决定其会随着沉积再循环赋存在沉积物中,而不改变其原始的沉积物源特征,因此Zr/Sc值能够作为反映沉积物的成分变化的指标^[34]。水井沱组黑色页岩样品大部分落在了成分演化线上(图6b),且更靠近长英质岩石端元,经PAAS标准化后的REE分布模式(图5b)也指示黑色页岩样品的稀土元素特征接近上地壳(UCC),说明黑色页岩样品没有经历沉积再循环,其沉积组分受源岩成分控制,表现为近源沉积。同时,根据Th/Sc-Zr/Sc图解,黑色页岩样品靠近长英质

岩石端元,指示城口地区水井沱组源岩类型为长英质岩石(图6b)。

Co作为过渡金属元素被认为是沉积过程中最稳定的元素,根据前述讨论可以排除城口地区水井沱组沉积组分经历再循环过程,黑色页岩中保留的原始源岩信息可以准确的指示源岩类型。黑色页岩样品在Co/Th-La/Sc图解中分布集中(图7a),除了一个黑色页岩样品远离之外,大部分黑色页岩样品表现出更靠近UCC的趋势,并且相对于花岗岩类型,黑色页岩更接近长英质火山岩类型,这与TiO₂-Zr图解指示的源岩类型一致(图6a)。La/Th-Hf图解可以对不同构造环境沉积物的源区进行有效判定^[35],在图7b上清晰的展示出黑色页岩样品落在了长英质物源和长英质/铁镁质混源区域,只有一个黑色页岩样品落在了安山岩岛弧物源区域,可能是样品风化引起测试结果误差,可以排除掉。结合前面对黑色页岩源岩的分析,认为城口地区水井沱组黑色页岩存在两种源岩类型,分别是长英质和铁镁质两种源岩类型,结合岩相古地理资料(图8),震旦系晚期—寒武系早期,距离城口较近的宣汉—开江古陆由水上隆起演变成水下隆起^[37],无法提供风化碎屑物质,而汉南古陆在早寒武世由于构造抬升处于构造高部位,为水上古隆起,而资料证实汉南古陆缺失灯影组沉积地层,极有可能在寒武纪早期被风化剥蚀掉,加之城口地区受早寒武世大面积海侵影响,汉南古陆作为距城口地区最近的古陆,能够提供大量的陆源碎屑物质。

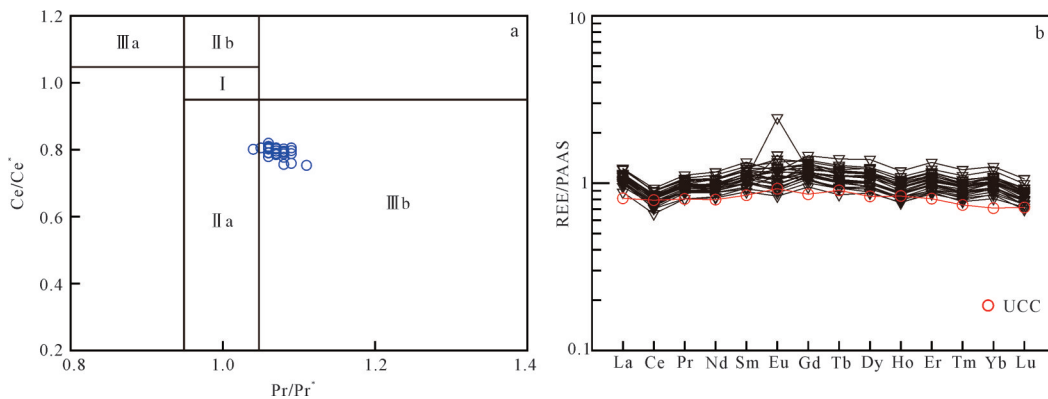


图5 (a)城口地区水井沱组黑色页岩 Ce/Ce^* 与 Pr/Pr^* 交会图 (I 表示无异常, II_a 表示正的 La 异常引起负的 Ce 异常, III_a 表示负的 La 异常引起正的 Ce 异常, III_b 表示原始的负 Ce 异常^[31]);

(b) 黑色页岩经 PAAS 标准化后的 REE 模式

Fig.5 (a) Cross-plots of Ce/Ce^* vs. Pr/Pr^* for black shale (Field I . no anomaly, II_a. positive La anomaly causing an apparent negative Ce anomaly, III_a. negative La anomaly causing an apparent positive Ce anomaly, III_b. actual negative Ce anomaly^[31]); (b) PAAS-normalized REE distribution patterns of black shale

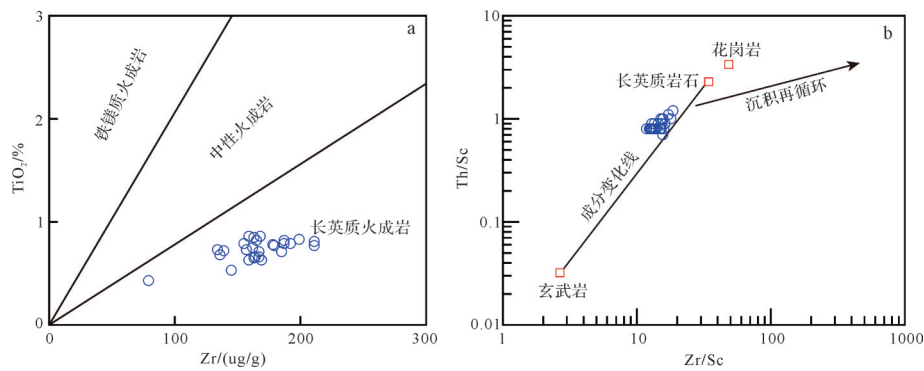


图6 黑色页岩源岩组分和再循环过程判识图

(a) TiO₂ vs. Zr图解^[34]; (b) Th/Sc vs. Zr/Sc图解^[35]

Fig.6 Discrimination diagrams illustrating sedimentary provenance

(a) TiO₂ vs. Zr^[34]; (b) Th/Sc vs. Zr/Sc^[35]

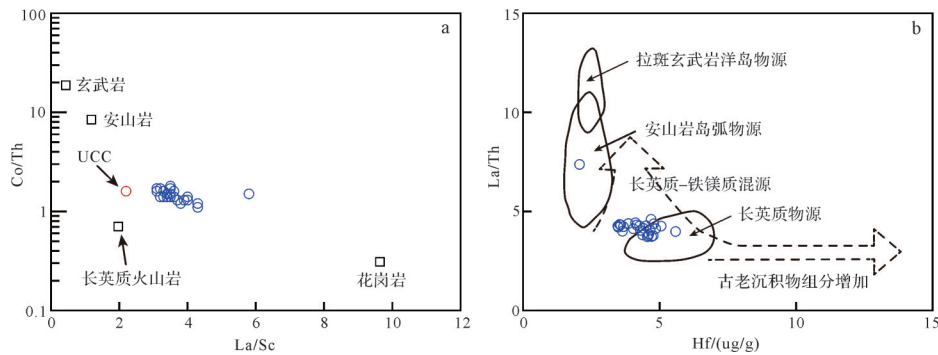


图7 黑色页沉积物源判识

(a) Co/Th vs. La/Sc图解^[36]; (b) La/Th vs. Hf图解^[35]

Fig.7 Discrimination diagrams illustrating sedimentary provenance

(a) Co/Th vs. La/Sc^[36]; (b) La/Th vs. Hf^[35]

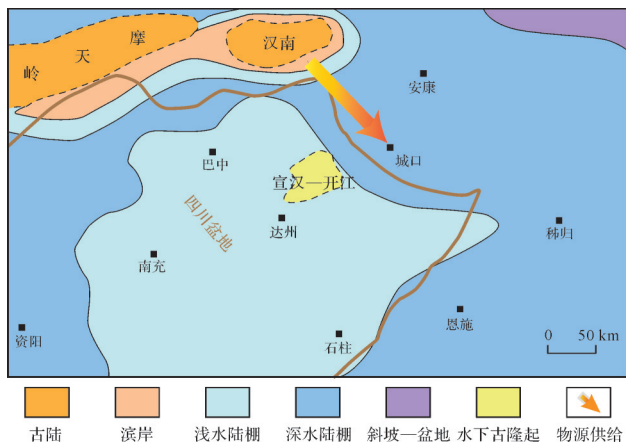


图8 城口及邻区下寒武统水井沱组沉积相分布图^[37-38]

Fig.8 Distribution of sedimentary facies, Lower Cambrian Shuijingtuo Formation, Chengkou, and adjacent area^[37-38]

3.3 古气候与陆源输入

沉积岩中的陆源输入情况反映在黏土矿物的含量中, Ca、Na、K等碱金属容易从长石中迁移形成黏土

矿物, 而其中 Al₂O₃ 的比率通常随着风化产物的形成而增加^[39]。因此化学风化指数 CIA 可以定量表征源区的化学风化程度, 广泛被用于重建古气候变化^[40], $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$, 式中各元素采用摩尔分数, 其中 CaO* 含量仅代表硅酸盐矿物中的 CaO 含量^[40], 根据 Bock *et al.*^[41] 提出的方法对泥岩中 CaO* 的含量进行校正: 当 $CaO > Na_2O$, $CaO^* = Na_2O$, 当 $CaO \leq Na_2O$, $CaO^* = CaO$ 。计算结果见表 1。

由于不同的气候条件下化学风化程度的不同, 当 CIA 值为 80~100 反映炎热潮湿气候条件下的强烈风化; CIA 值为 60~80 反映温暖湿润气候条件下的中等风化; CIA 值为 50~60 反映含量干燥气候条件下的低等程度风化^[40,42]。城口地区水井沱组黑色页岩样品的 CIA 值介于 58.2~65.8, 平均为 62.3, 垂向序列 CIA 值分布稳定, 指示源区中等程度的化学风化和稳定的陆源输入, 反映黑色页岩沉积时期温暖湿润的气候条件。寒武纪是生物演化和气候变化的重大历

史时期,小壳化石^[12,43]在牛蹄塘组黑色页岩的发现表明这一时期大气氧含量较高,气候逐渐回暖,化学风化程度增加。Th/Sc-Zr/Sc图解表明黑色页岩未经历沉积再循环过程(图6b),因此CIA值可以准确的反映源区的气候变化。

Al、K、Rb是典型的用于指示陆源输入的化学元素,以铝硅酸盐矿物形式经河流或者风力作用搬运至沉积盆地中,被广泛用来重建沉积岩的陆源输入情况^[44]。在城口地区水井沱组黑色页岩样品中,K/Al和Rb/Al表现出一致的趋势(图3),其平均值分别为 3.12×10^{-1} 和15.54。K/Al和Rb/Al在黑色页岩从底部到顶部的微弱变化趋势,反映黑色页岩中黏土矿物成分的变化趋势,指示黑色页岩沉积时期气候相对稳定,没有较大的变动,使得城口地区的陆源输入通量保持稳定。CIA值和K/Al与Rb/Al表现出一致的变化趋势(图3),表明城口地区黑色页岩沉积时期温暖湿润的气候带来更多的淡水和细粒黏土矿物输入。然而,黑色页岩的TOC-K/Al图和TOC-Rb/Al图(图9)并未表现出明显的相关性,反映陆源黏土矿物的输入对城口地区水井沱组黑色页岩的有机质贡献不大,可能与城口地区海水中较低的溶解氧含量导致生产力过低有关。

4 结论

(1) 渝东北城口地区发育下寒武统水井沱组厚层黑色页岩,厚度超过100 m,TOC分布在0.66%~1.82%之间,平均值为1.01%,是一套重要的烃源岩。

主量元素分析表明黑色页岩富集 Al_2O_3 (7.38%~13.90%,平均值为12.23%)、 SiO_2 (36.38%~66.23%,平均值为58.51%)、 K_2O (1.01%~2.93%,平均值为2.45%)、 Na_2O (1.98%~2.88%,平均值为2.50%)、总 Fe_2O_3 (2.35~5.36%,平均值为4.13%),微量元素分析表明黑色页岩具有较高的V(82.7~478 $\mu\text{g/g}$,平均值为258 $\mu\text{g/g}$)、Cr(45.4~104 $\mu\text{g/g}$,平均值为85 $\mu\text{g/g}$)、U(6.7~17.1 $\mu\text{g/g}$,平均值为9.4 $\mu\text{g/g}$)、Mo(5.7~30.2 $\mu\text{g/g}$,平均值为13.3 $\mu\text{g/g}$)含量。稀土总量较高(144.3~202.4,平均值为172.1),轻重稀土比值(LREE/MREE)介于7.3~9.6,平均为8.2,指示稀土分馏程度较高,轻稀土明显富集。

(2) 黑色页岩的CIA值表明城口地区在早寒武世以温暖湿润的气候为主,V/Cr和U/Th值指示黑色页岩沉积水体环境变化经历了四个阶段:缺氧→次氧化→缺氧→次氧化,并且在次氧化阶段夹有多期缺氧事件沉积。底部黑色页岩的正Eu/Eu*异常和同期异相沉积的泥质碳酸盐结核指示城口地区水井沱组沉积时期存在海底热水活动。Th/Sc-Zr/Sc交会图表明黑色页岩碎屑组分未经历再分选循环过程,La/Th-Hf图和 TiO_2 -Zr图指示黑色页岩存在长英质和铁镁质两种源岩类型,且汉南古陆在早寒武世时期为城口地区提供风化碎屑物质来源。

(3) 通过野外露头踏勘取样和多种地球化学手段分析,重建了城口地区早寒武世沉积环境变化和主要的物源供应类型,对恢复上扬子北缘寒武系早期古海水环境和周缘古隆起演化具有重要意义,对城口地区页岩气勘探提供参考依据。

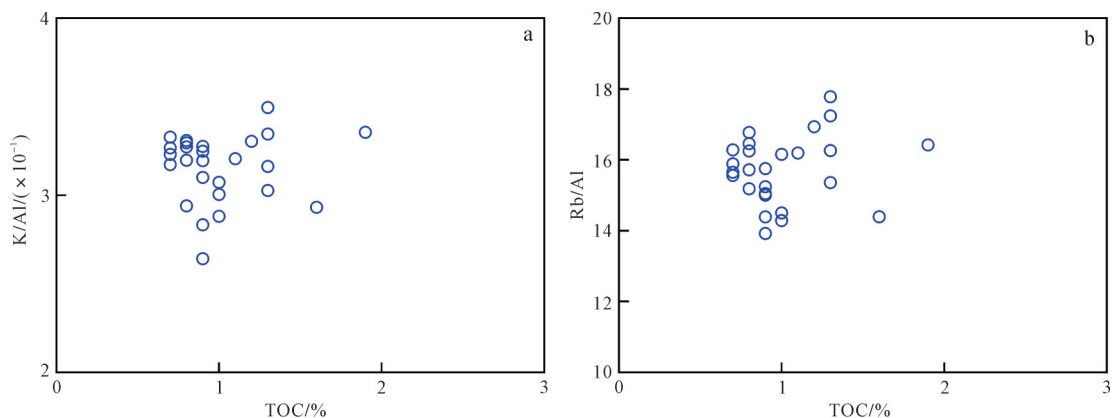


图9 有机碳与陆源输入参数相关性

(a) K/Al vs. TOC图解; (b) Rb/Al vs. TOC图解

Fig.9 Correlation between TOC and terrestrial input parameters

(a) K/Al vs. TOC; (b) Rb/Al vs. TOC

参考文献 (References)

- [1] Ishikawa T, Ueno Y, Komiya T, et al. Carbon isotope chemostratigraphy of a Precambrian/Cambrian boundary section in the Three Gorge area, South China: Prominent global-scale isotope excursions just before the Cambrian Explosion[J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(1/2): 193-208.
- [2] Magaritz M, Kirschvink J L, Latham A J, et al. Precambrian/Cambrian boundary problem: Carbon isotope correlations for Vendian and Tommotian time between Siberia and Morocco[J]. *Geology*, 1991, 19(8): 847-850.
- [3] Zhu G Y, Chen F R, Wang M, et al. Discovery of the Lower Cambrian high-quality source rocks and deep oil and gas exploration potential in the Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(10): 2123-2151.
- [4] 朱光有, 杜德道, 陈玮岩, 等. 塔里木盆地西南缘古老层系巨厚黑色泥岩的发现及勘探意义[J]. *石油学报*, 2017, 38(12): 1335-1342, 1370. [Zhu Guangyou, Du Dedao, Chen Weiyan, et al. The discovery and exploration significance of the old thick black mudstones in the southwest margin of Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(12): 1335-1342, 1370.]
- [5] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 8-21. [Zhu Guangyou, Chen Feiran, Chen Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 8-21.]
- [6] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 1-13. [Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 1-13.]
- [7] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规—非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 13-25. [Zou Caineng, Zhai Guangming, Zhang Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 13-25.]
- [8] Zhu G Y, Zhang Z Y, Zhou X X, et al. The complexity, secondary geochemical process, genetic mechanism and distribution prediction of deep marine oil and gas in the Tarim Basin, China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 198: 102930, doi: 10.1016/j.earscirev.2019.102930.
- [9] Zhu G Y, Milkov A V, Zhang Z Y, et al. Formation and preservation of a giant petroleum accumulation in superdeep carbonate reservoirs in the southern Halahatang oil field area, Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(7): 1703-1743.
- [10] Li C, Jin C S, Planavsky N J, et al. Coupled oceanic oxygenation and metazoan diversification during the early-middle Cambrian? [J]. *Geology*, 2017, 45(8): 743-746.
- [11] Wang D, Ling H F, Struck U, et al. Coupling of ocean redox and animal evolution during the Ediacaran-Cambrian transition [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2575.
- [12] Wille M, Nägler T F, Lehmann B, et al. Hydrogen sulphide release to surface waters at the Precambrian/Cambrian boundary [J]. *Nature*, 2008, 453(7196): 767-769.
- [13] Steiner M, Li G X, Qian Y, et al. Neoproterozoic to Early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(1/2): 67-99.
- [14] Jiang S Y, Pi D H, Heubeck C, et al. Early Cambrian ocean anoxia in South China [J]. *Nature*, 2009, 459(7248): E5-E6.
- [15] Xu L G, Lehmann B, Mao J W, et al. Re-Os age of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Early Cambrian black Shales of South China-A reassessment [J]. *Economic Geology*, 2011, 106(3): 511-522.
- [16] Jin C S, Li C, Algeo T J, et al. A highly redox-heterogeneous ocean in South China during the Early Cambrian (~529-514 Ma): Implications for biota-environment co-evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 441: 38-51.
- [17] Goldberg T, Strauss H, Guo Q J, et al. Reconstructing marine redox conditions for the Early Cambrian Yangtze Platform: Evidence from biogenic sulphur and organic carbon isotopes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(1/2): 175-193.
- [18] Guo Q J, Shields G A, Liu C Q, et al. Trace element chemostratigraphy of two Ediacaran-Cambrian successions in South China: Implications for organosedimentary metal enrichment and silicification in the Early Cambrian [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(1/2): 194-216.
- [19] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic snowball earth [J]. *Science*, 1998, 281(5381): 1342-1346.
- [20] Blamey N J F, Brand U, Parnell J, et al. Paradigm shift in determining Neoproterozoic atmospheric oxygen [J]. *Geology*, 2016, 44(8): 651-654.
- [21] Crowley T J, Berner R A. CO₂ and climate change [J]. *Science*, 2001, 292(5518): 870-872.
- [22] Shields G A. Earth system transition during the Tonian-Cambrian interval of biological innovation: Nutrients, climate, oxygen and the marine organic carbon capacitor [M]//Brasier A T, McIlroy D, McLoughlin N. Earth system evolution and early life: A celebration of the work of martin brasier. Geological Society, London, Special Publications, 2017.
- [23] 刘忠宝, 高波, 张钰莹, 等. 上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 21-31. [Liu Zhongbao, Gao Bo, Zhang Yuying, et al. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in

- Upper Yangtze area, South China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 21-31.]
- [24] 崔楠,张焯,陆朝晖. 渝东北城口北相区寒武系页岩储集层特征研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(9): 120-127. [Cui Nan, Zhang Ye, Lu Zhaohui. Features of shale Reservoir of Cambrian System in Chengkou North face of northeastern Chongqing[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(9): 120-127.]
- [25] 朱正杰,张斌臣,唐清敏,等. 城口地区早寒武世黑色岩系铂族元素地球化学特征与来源[J]. *矿物学报*, 2017, 37(4): 495-506. [Zhu Zhengjie, Zhang Binchen, Tang Qingmin, et al. Sources and geochemistry of Platinum Group Elements (PGE) in the Early Cambrian black rock series in Chengkou district, northern Dabashan, southwestern China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(4): 495-506.]
- [26] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes [M]//Lipin B R, McKay G A. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*. Washington: Mineralogical Society of America, 1989.
- [27] Algeo T J, Maynard J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclotheams[J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3/4): 289-318.
- [28] Calvert S E, Pedersen T F. Geochemistry of Recent Oxidic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record [J]. *Marine Geology*, 1993, 113(1/2): 67-88.
- [29] Taylor S R, McLennan S M. *The continental crust: Its composition and evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 312.
- [30] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111 (1/2/3/4): 111-129.
- [31] Bau M, Dulski P. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa[J]. *Precambrian Research*, 1996, 79(1/2): 37-55.
- [32] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. *Journal of Geology*, 1991, 99(1): 1-21.
- [33] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(19): 4115-4137.
- [34] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [M]//Johnsson M J, Basu A. *Processes controlling the composition of clastic sediments*. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 1993: 21-40.
- [35] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [36] Condie K C, Wronkiewicz D J. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97 (3/4): 256-267.
- [37] 谷志东,殷积峰,姜华,等. 四川盆地宣汉—开江古隆起的发现及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 893-904. [Gu Zhidong, Yin Jifeng, Jiang Hua, et al. Discovery of Xuanhan-Kaijiang Paleouplift and its significance in the Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 893-904.]
- [38] 赵建华,金之钧,林畅松,等. 上扬子地区下寒武统筲竹寺组页岩沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 701-715. [Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Lin Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 701-715.]
- [39] 齐靓,余文超,杜远生,等. 黔东南华纪铁丝坳期—大塘坡期古气候的演变:来自CIA的证据[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(6): 47-57. [Qi Liang, Yu Wenchao, Du Yuansheng, et al. Paleoclimate evolution of the Cryogenian Tiesi'ao Formation - Datangpo Formation in eastern Guizhou province: Evidence from the chemical index of alteration [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(6): 47-57.]
- [40] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [41] Bock B, McLennan S M, Hanson G N. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England[J]. *Sedimentology*, 1998, 45(4): 635-655.
- [42] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [43] 赵元龙,Steiner M,杨瑞东,等. 贵州遵义下寒武统牛蹄塘组早期后生生物群的发现及重要意义[J]. *古生物学报*, 1999, 38(增刊1): 132-144. [Zhao Yuanlong, Steiner M, Yang Ruidong, et al. Discovery and significance of the early metazoan biotas from the Lower Cambrian Niutitang formation Zunyi, Guizhou, China [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1999, 38 (Suppl. 1): 132-144.]
- [44] Murphy A E, Sageman B B, Hollander D J, et al. Black shale deposition and faunal overturn in the Devonian Appalachian Basin: Clastic starvation, seasonal water-column mixing, and efficient biolimiting nutrient recycling [J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(3): 280-291.

Development Environment and Formation Mechanism of Lower Cambrian Source Rocks in the Chengkou Area, Northeast Chongqing, South China

ZHAO Kun^{1,2}, LI TingTing², ZHU GuangYou², ZHANG ZhiYao², LI JingFei^{1,2}, WANG PengJu^{1,2}, YAN HuiHui^{1,2}, CHEN YongJin¹

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract: The Lower Cambrian black shale at the northern margin of the Upper Yangtze Platform is an important source rock with large sedimentary thickness and high organic carbon content, which gives it important oil and gas exploration value. Restoring its developmental environment and clastic provenance is of great significance for the prediction of hydrocarbon source rock distribution. By systematic field outcrop sampling in the Chengkou area, South China, and geochemical testing, this study investigated the formation environment and source supply of the black shale and discusses the effect of climate change and terrigenous input on the formation of the black shale. It also reconstructs the process by which these excellent-quality hydrocarbon source rocks were formed. The results showed that the black shale has high Al_2O_3 content (7.38-13.90%), K_2O content (1.01-2.93%), Na_2O content (1.98-2.88%) and total Fe_2O_3 content (2.35-5.36%), and is enriched by trace elements such as V (average 242 $\mu\text{g/g}$), Cr (average 83 $\mu\text{g/g}$) and Ni (average 58 $\mu\text{g/g}$). CIA, K/Al and Rb/Al ratios indicate that the climate was warm and humid during the period of black shale deposition. V/Cr, U/Th, Ce/Ce* and MoEF-UEF indicate that the sedimentary waterbody underwent an anoxic \rightarrow suboxic \rightarrow anoxic \rightarrow suboxic cycle. A positive Eu/Eu* anomaly also suggests the occurrence of early submarine hydrothermal activity. The Th/Sc - Zr/Sc chart indicates that the sedimentary components of the black shale did not undergo a recycling process, and it is therefore possible to effectively identify the location of the source. The Co/Th-La/Sc and La/Th-Hf diagrams confirm the presence of both felsic and mafic source rocks in the black shale. The Hannan paleo-uplift may have been an effective source area.

Key words: source rocks; Lower Cambrian; development environment; South China