

doi: 10.12029/gc20180202

白忠凯, 谢李, 韩淼, 吕修祥, 孙智超, 李清瑶, 杨有星, 张金虎. 2018. 塔里木盆地柯坪地区寒武系肖尔布拉克组下段古生产力研究[J]. 中国地质, 45(2): 227–236.

Bai Zhongkai, Xie Li, Han Miao, Lü Xiuxiang, Sun Zhichao, Li Qingyao, Yang Youxing, Zhang Jinhu. 2018. Paleoproductivity conditions of lower member of Cambrian Xiaoerbulak Formation in Kalpin thrust belt, Tarim Basin[J]. Geology in China, 45(2): 227–236(in Chinese with English abstract).

塔里木盆地柯坪地区寒武系肖尔布拉克组下段 古生产力研究

白忠凯¹ 谢李^{2,3} 韩淼¹ 吕修祥^{2,3} 孙智超¹ 李清瑶¹ 杨有星¹ 张金虎¹

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 基于塔里木盆地柯坪地区寒武系地质剖面观测和 75 个样品分析测试的基础上, 研究了柯坪冲断带下寒武统肖尔布拉克组下段碳酸盐岩古生产力。利用 Ti 扣除样品中来自陆源部分而得出生源元素的含量, Ba_{ss}、Cu_{ss} 和 Zn_{ss} 三种营养元素测量和数据处理结果表明它们相对自生富集, 具备一定的古生产力水平, 个别层段值较高, 有较高古生产力水平。发育光面具缘藻(*Leiomarginata*)、粒面具缘藻(*Granomarginata*)、网面球藻(*Dictyotidium*)等疑源类生烃母质, 为有机质沉积和烃源岩发育提供了物质基础。Pr/Ph、V/(V+Ni)、U/Th 比值和 δCe 值判定该区下寒武统肖尔布拉克组下段为还原沉积环境, 为烃源岩有机质的赋存提供了有利条件。有机质类型为 I–II 型, 达到了高成熟阶段, 具备生烃潜力。研究区寒武系下统肖尔布拉克组下段发育优质潜在烃源岩。

关键词: 柯坪冲断带; 肖尔布拉克组; 古生产力

中图分类号: P618.13; P588.24*5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2018)02–0227–10

Paleoproductivity conditions of lower member of Cambrian Xiaoerbulak Formation in Kalpin thrust belt, Tarim Basin

BAI Zhongkai¹, XIE Li^{2,3}, HAN Miao¹, LÜ Xiuxiang^{2,3}, SUN Zhichao¹, LI Qingyao¹,
YANG Youxing¹, ZHANG Jinhu¹

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. School of Earth Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Key Hydrocarbon Accumulation of Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on geological investigation of several outcrops, the analyses of 75 samples and the previous achievements, the authors studied the paleoproductivity conditions of lower member of Cambrian Xiaoerbulak Formation in Kalpin thrust belt. In order to get the reliable content of biogenic elements, the authors used the Ti element to deduce the terrigenous elemental content of Ba,

收稿日期: 2018–03–05; 改回日期: 2018–03–12

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160169、12120115001801、12120115001901)资助。

作者简介: 白忠凯, 男, 1979 年生, 高级工程师, 主要从事石油地质研究工作; E-mail: baizk@126.com。

Cu and Zn and obtain the corrected values of the biogenic elements Ba_{xs} , Cu_{xs} and Zn_{xs} . According to the results, it can be concluded that the lower member of Cambrian Xiaoerbulake Formation has a high level of paleoproductivity. The values of the biogenic elements Ba_{xs} , Cu_{xs} and Zn_{xs} of individual layers are higher, and this indicates that individual layers have higher paleoproductivity. The acritarchs microfossils such as *Leiomarginata* sp., *Granomarginata squamacea* Volkova, *Dictyotidium priscum* Kirjanov and Volkova and *Lophosphaeridium* sp. were found in the Cambrian Xiaoerbulak Formation, and all these factors provided a good material basis for the deposition of organic matter. The identifying indices such as Pr/Ph , $V/(V+Ni)$, U/Th and δCe indicate that the lower member of Cambrian Xiaoerbulak Formation source rocks were developed under a favorable condition with an anaerobic sedimentary environment. The type of organic matter is Type I-II, and the organic matter has the characteristics of high maturity stage and potential of hydrocarbon generation. In summary, the lower member of Cambrian Xiaoerbulak Formation can be regarded as the potential source rock.

Key words: Kalpin thrust belt; Cambrian Xiaoerbulak Formation; paleoproductivity

About the first author: BAI Zhongkai, male, born in 1979, doctor, senior engineer, mainly engages in the basic geological survey of oil and gas; E-mail: baizk@126.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160169, 12120115001801 and 12120115001901).

1 引言

塔里木盆地油气资源丰富,下古生界发育中下寒武统和中上奥陶统两套有效烃源岩(张水昌等, 2001),其中海相中下寒武统为高-过成熟烃源岩,分布在塔里木盆地东部欠补偿盆地相和西部蒸发潟湖相带(梁狄刚等, 2000)。王飞宇等(2001, 2003)通过对盆地内古生界烃源岩的地化分析和综合研究,亦认为发育了高过成熟寒武系和中等成熟的中上奥陶统烃源岩。

结合塔里木盆地海相烃源岩的研究现状,特别是盆地内中下寒武统烃源岩发育特征,可以看出以往对于肖尔布拉克组碳酸盐岩烃源岩并没有引起关注,研究程度相对较低。近年来,中国地质调查局实施了天山—兴蒙构造带油气基础地质调查工程,针对塔里木盆地的相关基础地质问题开展了研究工作。笔者通过对塔里木盆地柯坪冲断带肖尔布拉克、苏盖特布拉克、东沟、西沟等野外剖面进行观测和取样,在纵向和横向上对寒武系烃源岩特征有了更加深入和新的认识,除证实了下寒武统玉尔吐斯组泥岩具有很大的生烃潜力外,地化数据表明其上覆的肖尔布拉克组下段深黑色白云岩也具备良好烃源岩的条件。古沉积环境是影响沉积物地球化学特征的重要因素(张春明等 2013),而古生产力的特征对于烃源岩评价具有重要的意义且有系列评价指标(胡超涌等, 2007;严德天等, 2009;陈慧等, 2010;罗情勇等, 2013;向宇等, 2013)。基于此,

本文在柯坪野外剖面观测和采样的基础上,立足于微量元素分析测试结果,研究下寒武统肖尔布拉克组碳酸盐岩烃源岩古生产力,以期对研究塔里木盆地寒武统烃源岩特征有所裨益。

2 地质概况

柯坪冲断带位于塔里木盆地西北缘,北以乌恰—阿合奇断裂为界与南天山相邻,南以柯坪塔格断裂与巴楚隆起和阿瓦提凹陷分界,东为库车前陆褶皱带和塔北隆起,西至喀什凹陷,面积约 2×10^4 km²。按照板块构造区划该区属于三级构造单元(刘训等, 2015;王宗秀等, 2017),其古块体是从7亿年以来,通过拼贴作用与塔里木克拉通聚合在一起(舒良树等, 2013),以发育正断层及走滑断裂为特点。而柯坪冲断带地面是新近纪以来新构造运动形成的冲断带(傅碧宏, 1995)。印干和皮羌两条大型走滑断裂将柯坪冲断带分3个区,自东向西为阿克苏区、柯坪区和西克尔区(图1)。野外出露的地层与塔里木盆地内部具有很好的可比性,也正因如此,柯坪地区成为研究盆地内覆盖区地层、沉积、储层、烃源岩等油气成藏条件的天然实验室,也是塔里木盆地西北缘有利油气勘探前景区(吕修祥等, 1996, 2014)。

研究区古生界出露地层齐全,其中寒武系岩性以碳酸盐岩为主,从老到新发育下统玉尔吐斯组(ϵ_{1y})、肖尔布拉克组(ϵ_{1x})和吾松格组(ϵ_{1w});中统沙依里克组(ϵ_{2s})和阿瓦塔格组(ϵ_{2a});上统下丘里塔格

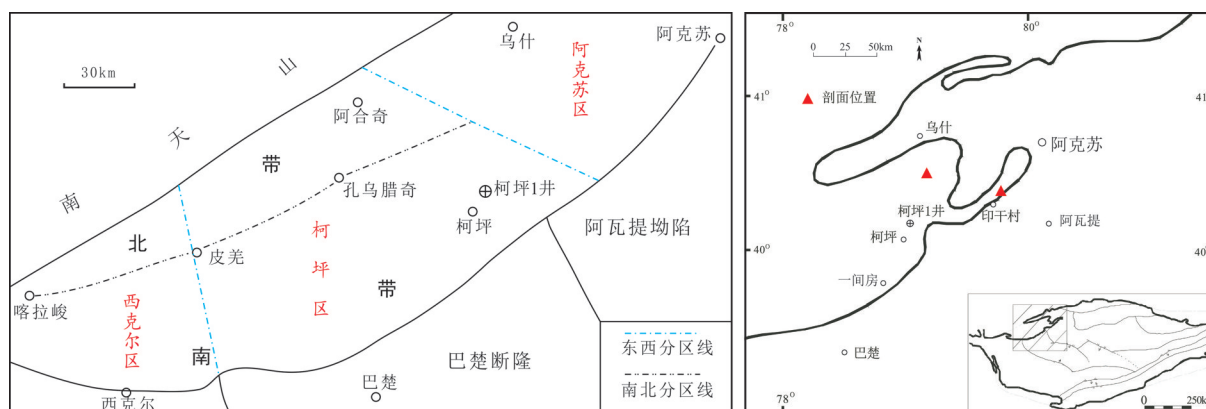


图1 柯坪冲断带区、带划分图(修改自李曰俊等,1999)和剖面位置

Fig. 1 Regional divisions of Kalpin area(modified from Li Yuejun et al., 1999)and the location of outcrops

组(ϵ_{3xq})。本文主要研究对象肖尔布拉克组(ϵ_{3x})岩性主要为灰色、浅灰色、深灰色、褐灰色白云岩,在整个柯坪—巴楚地区,厚度变化大,分布稳定,与下伏玉尔吐斯组 and 上覆吾松格尔组均为整合接触。

3 样品采集及分析测试

本文研究过程中进行了3次野外剖面地质观测和取样,针对塔里木盆地西北缘柯坪冲断带肖尔布拉克、苏盖特布拉克、东沟、西沟等4条地质剖面开展了相关工作,文中所用样品均取自以上剖面之中。针对寒武系肖尔布拉克组共采集了75个岩石样品进行微量元素测试和有机碳测试。其中,微量元素相关测试分析在北京大学科技开发部实验室完成。微量和稀土元素的测试仪器为电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),测试误差在5%以内,重复样品测试分析结果吻合,质量可靠。疑源类化石由中国科学院南京地质古生物研究所鉴定。

4 古生产力分析

海洋古生产力是研究全球变化和古海洋环境的重要内容,也是评价烃源岩好坏的重要参数之一。其中,高生产力强调的是生烃母质的生存、繁衍环境,是烃源岩形成的物质基础。Ba作为一种惰性元素,在海水中保存时间长和保存率高的特征,因此,利用Ba来研究古生产力,可将其作为揭示上层海洋初级生产力演化历史的工具和标志(Dymond et al.,1992;严德天等,2009;张春明等,2013)。国内外学者利用Ba来反映古生产力的水

平,而且提出了与此相关的古生产力计算模型(Dymond et al.,1992;Francois et al.,1995;田正隆等,2004;倪建宇等,2004),而国内学者利用Dymond et al.(1992)、Francois et al.(1995)提出的模型来研究烃源岩古生产力的变化,取得了较好的效果(沈俊等,2010)。

除了Ba之外,与生物生长发育相关的营养元素,例如Cu和Zn等元素的强烈富集暗示曾有较高含量的有机质将其大量带到沉积物中,随后在还原条件下沉积物中的Cu、Zn等被保存下来,因此,它们可作为指示古生产力水平高低的元素替代指标(陈慧等,2010;韦恒叶,2012)。另外,由于它们的含量相对也较高,检测难度小,受物源影响较小,使得生物成因的元素含量相对较高(Piper et al.,2004),也是常用的辅助评价元素。

研究发现只有生源元素才能够反映古生产力的变化,因此在元素测定结果中要首先扣除陆源沉积的影响。自然元素中Ti的水溶度很小,其主要来自陆源沉积物,因此可利用Ti来扣除样品中来自陆源部分而得出生源元素的含量(Timothy et al.,1998),具体公式如下:

$$X_{xs} = X_{total} - Ti_{total} \times (X/Ti)_{PAAS}$$

其中, X_{xs} 代表某生源元素的校正含量, X_{total} 表示实际测定的元素总含量, Ti_{total} 表示实测样品中Ti元素的总含量, $(X/Ti)_{PAAS}$ 则表示新太古代澳大利亚页岩中需要校正的元素X与Ti元素平均含量的比值,根据Taylor和McLennan等研究(Taylor et al.,1985),Ba、Zn、Cu、Ti的PAAS值分别为 650×10^{-6} 、 50×10^{-6} 、

85×10^{-6} 和 6000×10^{-6} 。X_{ss} 为正表明样品中该元素相对 PAAS 呈海相自生富集, 为负表明该元素含量主要为陆源沉积贡献 (Algeo et al., 2004)。

4.1 肖尔布拉克剖面

本剖面下寒武统肖尔布拉克组下段岩性主要为深灰色泥质白云岩、泥晶白云岩及粉晶白云岩。通过对寒武系肖尔布拉克组 23 块样品进行有机碳 (TOC) 含量测试, 其最小值 0.06%, 最大值达 3.63%, 平均值 0.51%。有机质类型为 I 型- II 型。

元素测试结果如表 1 和图 2 所示, 主要目的是通过常量、微量元素测定, 判断肖尔布拉克组下段烃源岩元素特征, 从元素的角度研究烃源岩, 评价其生烃潜力。通过微量元素处理后的结果, 可以看出肖尔布拉克组 Ba_{ss} 均值 8.20×10^{-6} 、Cu_{ss} 均值 3.27×10^{-6} 及 Zn_{ss} 均值 9.28×10^{-6} , 除了 Ba_{ss} 个别值和 1 个 Zn_{ss} 值为负外, 其余均为正。整体来看, 通过 Ba、Zn 及 Cu 三种营养元素测量和数据处理结果可以说明它们相对自生富集, 具备一定的古生产力水平; 个别层段值较高, 古生产力水平较高。

4.2 苏盖特布拉克剖面

本剖面肖尔布拉克组厚约 150.7 m, 共分 12 小层, 岩性主要为灰黑色、灰色粉晶白云岩, 灰色泥-粉晶白云岩, 深灰色泥晶白云岩, 黑色泥晶灰岩, 深灰色泥、粉晶白云岩, 与下伏玉尔吐斯组 and 上覆吾松格尔组均呈整合接触。结合野外及室内分析发现, 该组又分为上下“黑白”两段, 上段主要为浅灰色粉晶白云岩, 下部主要为深灰色、灰色泥、粉晶白云岩。本次研究主要为下段的深灰色、灰色泥、粉晶白云岩, 岩石样品新鲜面有臭味, 厚度约为 45.7 m。对该剖面取样主要是从肖尔布拉克组底部每米逐一取样, 共计 43 个样品, 主要集中在该组下段。

43 个样品有机碳 (TOC) 含量测试结果显示, 其最小值 0.086%, 最大值 5.24% (表 2), 平均值 1.95%, 大部分样品达到了较好-好烃源岩的标准。有机质类型为 I 型- II 型, 等效镜质体反射率 1.27%~1.53%。

从该剖面下寒武统肖尔布拉克组下段 43 个样品的 Ba、Zn 及 Cu 三种营养元素测试和数据处理后得出的生源元素含量。从结果可以看出 (表 2): Ba_{ss} 最值可达 745.73×10^{-6} , 均值 39.58×10^{-6} ; Cu_{ss} 最值 923.83×10^{-6} , 均值 24.75×10^{-6} ; Zn_{ss} 值相对来说没有特别高的异常值, 但均值也可达 12.66×10^{-6} 。从 Ba、

Zn 及 Cu 这三种指标可以得出, 苏盖特布拉克剖面肖尔布拉克组整体古生产力水平较高, 具有烃源岩条件。同时, 从图 3 可以看出, 个别层段 Ba、Zn 及 Cu 生源元素的含量都很高, 表明古生产力水平高。

总的来说, 从野外肖尔布拉克和苏盖特布拉克剖面测试和数据处理结果可以看出, Ba、Zn 及 Cu 三种营养元素反映了肖尔布拉克组下段具备较高的古生产力水平, 为烃源岩的发育提供了良好的物质基础。

5 生烃母质和保存

本次对野外 14 件样品进行了微古生物鉴定, 样品来自苏盖特布拉克剖面肖尔布拉克组下段, 经常规化石孢粉分析, 从 11 件样品中收集到疑源类及其他微体植物化石。鉴定结果中主要以如光面具缘藻 (*Leiomarginata*) (图 4a, b), 粒面具缘藻 (*Granomarginata*) (图 4c, d), 网面球藻 (*Dictyotidium*) (图 4e, f, g), 翼环藻 (*Pterospermella*) (图 4h), 瘤面球藻 (*Lophosphaeridium*) (图 4i, j, k, l) 为主 (图 4), 可见底栖藻类碎片。而作为海相烃源岩中主要生烃生物体的疑源类, 肖尔布拉克组烃源岩生物包含大量的此类生烃生物, 具备很好的生烃母质和潜力。

此外, 结合肖尔布拉克和苏盖特布拉克剖面下寒武统肖尔布拉克组下段野外样品微量 (稀土) 元素的分布特征, 分析了该段古氧相特征 (白忠凯等, 2017)。由于微量元素会受到陆源组分的影响, 简单的利用微量元素绝对含量来判断水体的氧化还原条件并不准确, 因此, V/(V+Ni)、U/Th、V/Cr、Ni/Co 等微量元素比值经常用来作为氧化还原环境的示踪和识别 (Jones et al., 1994; 腾格尔等, 2004; 韦恒叶, 2012), 而铈异常 δCe 亦可作为氧化还原条件的一个重要指标来使用 (程岳宏等, 2010)。此外, 姥鲛烷 (Pr) 和植烷 (Ph) 形成的沉积环境不同, 姥/植比 (Pr/Ph) 可反映其形成时氧化还原状态, Pr/Ph<1 (植烷优势), 为缺氧环境, Pr/Ph>1 (姥鲛烷优势) 为氧化环境, Pr/Ph 值接近 1 被认为出现于氧化与缺氧条件交替变化时期 (腾格尔等, 2004)。具体判别指标如表 3 所示。V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Th 和 δCe 等数值结果表明 (表 1, 表 2), 75 个样品中 79% 的 V/(V+Ni) 比值均大于 0.45, U/Th 比值所有统计数据值均大于 0.75, δCe 值大部分小于 1, 且纵向上分布稳定。本次测试样品中 Pr/Ph 的分布范围为 0.06~0.34。

表1 肖尔布拉克剖面寒武系肖尔布拉克组下段元素含量(10^{-6})统计
 Table 1 Statistics of paleo-productivity element values of lower member of Cambrian Xiaerbulak Formation in Xiaerbulak outcrop (10^{-6})

编号	层号	Ba	Cu	Zn	Ti	Ba _{ss}	Cu _{ss}	Zn _{ss}	U	V	Mo	V/(V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	U/Th	δ Ce
XX01		3.41	4.12	5.22	24.9	0.71	3.91	4.87	1.16	5.55	0.29	0.50	4.66	32.32	11.24	0.96
XX02		4.65	1.96	5.74	46.65	-0.4	1.57	5.08	1.12	21.66	1.17	0.92	11.26	7.77	4.16	0.96
XX03		5.74	2.31	9.46	33.69	2.09	2.03	8.98	0.90	11.23	0.18	0.88	1.85	8.64	6.05	0.98
XX04	12	4.33	2.29	2.18	28.66	1.22	2.05	1.77	0.72	6.84	0.00	0.87	2.00	6.31	6.44	0.93
XX05		18.07	2.44	7.53	28.82	14.95	2.2	7.12	0.92	4.85	0.02	0.82	30.94	3.31	7.32	0.95
XX06		4.78	4.11	8.76	50.48	-0.69	3.69	8.04	0.90	5.36	0.28	0.77	0.62	3.38	4.71	0.92
XX07		5.72	33.32	17.98	26.7	2.83	33.1	17.6	1.07	12.85	0.02	0.91	0.86	4.22	9.24	0.98
XX08	13	4.85	3.62	25.85	19.01	2.79	3.47	25.58	0.82	4.04	0.11	0.73	0.49	5.07	10.07	1.01
XX09		3.08	3.81	9.15	33.8	-0.59	3.53	8.67	0.93	10.69	0.24	0.86	2.16	6.56	8.31	1.03
XX10		4.16	2.32	2.66	21.64	1.82	2.14	2.36	0.70	6.10	0.01	0.85	0.61	8.62	7.07	1.00
XX11	14	6.07	2.55	22.42	22.65	3.62	2.36	22.1	0.89	3.71	0.09	0.79	0.63	2.44	10.15	0.97
XX12		3.96	2.5	6.49	24.44	1.31	2.3	6.15	0.83	5.41	0.13	0.82	9.95	5.70	8.68	0.95
XX13	15	4.8	1.44	4.58	15.81	3.09	1.3	4.36	0.56	15.64	0.39	0.98	0.84	0.39	10.07	0.94
XX14		9.02	1.75	0.28	21.65	6.67	1.57	-0.02	0.64	0.99	0.19	0.62	1.24	4.64	9.34	1.01
XX15		12.17	2.31	0.6	11.34	10.94	2.22	0.44	0.57	0.17	0.33	0.08	0.36	7.05	17.09	0.99
XX16	16	6.94	1.75	1.01	18.97	4.88	1.59	0.74	0.59	6.79	0.26	0.93	1.44	3.67	9.12	0.98
XX17		5.6	2.96	12.91	22.01	3.21	2.77	12.6	0.83	17.10	0.06	0.93	1.38	3.07	11.14	0.97
XX18		10.13	2.77	5.04	7.53	9.31	2.71	4.94	0.52	0.84	0.35	0.48	2.76	8.77	35.09	0.97
XX19	17	4.88	2.35	4.33	20.96	2.61	2.18	4.03	0.65	9.51	0.23	0.90	3.57	4.89	9.65	0.97
XX20		3.58	2.58	23.08	10.69	2.42	2.49	22.93	0.57	1.31	0.19	0.20	1.03	44.55	19.55	0.95
XX21		13.55	1.8	2.21	6.54	12.84	1.74	2.12	0.86	7.17	0.38	0.93	0.84	3.84	54.16	0.98
XX22	18	5.31	2.19	46.61	7.89	4.46	2.13	46.5	0.61	8.33	0.40	0.94	3.57	2.38	63.51	0.96
XX23		4.36	1.66	7.66	7.86	3.51	1.59	7.55	0.56	2.05	0.44	0.87	3.48	0.63	10.53	0.98
XX24		3.38	2.23	2.36	16.28	1.62	2.1	2.13	1.04	0.41	0.39	0.29	0.66	4.55	15.50	1.00
XX25	19	3.52	1.64	4.06	4.44	3.04	1.61	4	0.43	6.65	0.47	0.91	0.75	1.28	86.29	0.90
XX26	20	62.79	1.93	3.1	14.85	61.18	1.81	2.89	0.54	9.84	0.41	0.94	0.67	3.50	13.24	1.01
XX27		5.77	1.99	3.95	17.85	3.83	1.84	3.69	0.57	2.23	0.27	0.77	0.89	3.68	7.46	0.97
XX28		83.34	2.4	8.09	14.58	81.76	2.28	7.88	0.52	3.61	0.34	0.80	12.74	2.24	11.85	1.02
XX29	21	5.49	4.08	14.75	30.51	2.19	3.83	14.32	0.73	5.63	0.03	0.57	4.86	19.66	5.53	1.02
XX30		5.41	1.95	2.49	15.84	3.69	1.82	2.27	0.65	5.01	0.36	0.83	1.34	11.61	12.79	1.02
XX31	22	10.55	2.12	3.18	17.73	8.63	1.98	2.93	0.99	5.08	0.34	0.78	8.42	9.38	13.53	1.02
XX32	23	4.24	2.93	32.61	12.45	2.89	2.82	32.43	0.49	3.43	0.45	0.78	0.64	3.79	18.20	0.96

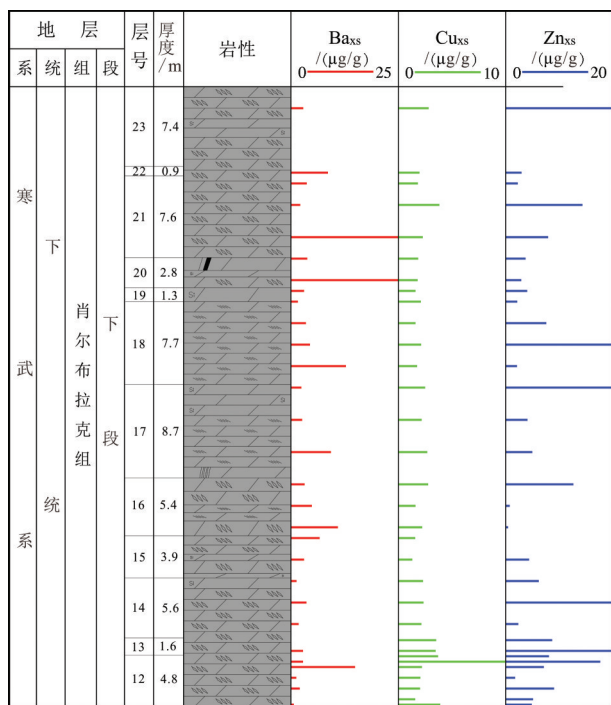


图2 肖尔布拉克剖面寒武系肖尔布拉克组下段元素含量分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of paleo-productivity element values of lower member of Cambrian Xiaerbulak Formation in Xiaerbulak outcrop

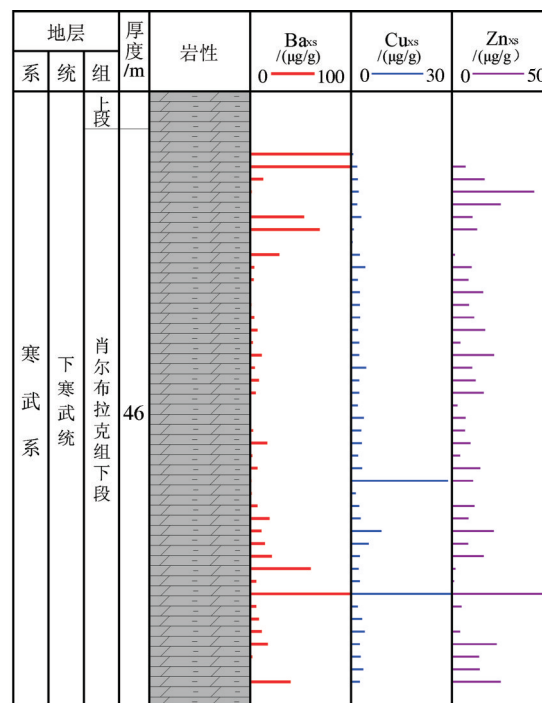


图3 苏盖特布拉克剖面寒武系肖尔布拉克组下段元素含量分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of paleo-productivity element values of lower member of Cambrian Xiaerbulak Formation in Sugaitebulak outcrop

据 Pr/Ph、V/(V+Ni)、U/Th 比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值综合判定柯坪冲断带下寒武统肖尔布拉克组下段沉积时为缺氧的还原沉积环境,此对于烃源岩有机质的保存具有重要的意义。

6 讨 论

利用干酪根碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{干酪根}}$ (‰) 进行类型划分时,寒武系肖尔布拉克组下段有机质干酪根碳同位素全部小于 -29.5‰ (表4),均为 I 型干酪根。利用 C、H 和 O 三种元素对烃源岩样品对其进行干酪根有机元素分析,并将样品 H/C 和 O/C 比值在 D.W. Van Krevelen 图解中投点,主要表现为 I—II 型。等效镜质体反射率 $1.27\% \sim 1.53\%$ (表4),均值 1.41% ,达到了高成熟演化阶段。

总的来说,运用不同的方法判定出柯坪地区寒武系肖尔布拉克组下段有机质类型的结果并不统一,存在一定的差异。究其原因,一方面可能与样品的质量相关,样品均来自野外露头,受风化等多种因素的影响;另一方面,也与干酪根本身的属性

及演化程度有关,导致了某些参数的失真。所以,结合所有方法的判定结果,通过不同分析测试手段相互补充、相互验证,排除某些因素的影响,本文判定塔里木盆地柯坪冲断带寒武系肖尔布拉克组下段碳酸盐岩烃源岩有机质类型为 I 型—II 型,属较好的有机质类型,为其成为优质烃源岩提供了必要的先决条件。

数据分析表明肖尔布拉克组下段具备较高的古生产力水平,奠定了良好的烃源岩物质基础。肖尔布拉克组上段发育优质白云岩储集层,其与玉尔吐斯组和肖尔布拉克组下段组成有利生储配置关系,肖尔布拉克组上段可作为塔里木盆地寒武系盐下有利的油气勘探目的层系。

7 结 论

(1) 研究区寒武系肖尔布拉克组下段沉积时期, Ba、Cu、Zn 等营养元素指示其古生产力水平较高,为有机质沉积提供了良好的物质基础; Pr/Ph、V/(V+Ni)、U/Th 和 $\delta^{13}\text{C}$ 等参数指示其为缺氧的沉积环

表2 苏盖特布拉克剖面寒武系肖尔布拉克组下段元素含量(10^{-6})统计Table 2 Statistics of paleo-productivity element values of lower member of Cambrian Xiaerbulak Formation in Sugaitebulak outcrop (10^{-6})

编号	Ba	Cu	Zn	Ti	Ba _{xs}	Cu _{xs}	Zn _{xs}	U	V	Mo	V/(V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	U/Th	δ Ce	TOC/%
SX01	42.61	2.74	24.62	22.77	40.14	2.55	24.3	1.05	14.66	0.52	0.92	0.70	2.02	7.88	0.95	0.852
SX02	4.24	3.94	14.35	37.04	0.22	3.63	13.83	1.18	7.07	0.64	0.67	7.22	16.13	6.37	0.96	4.95
SX03	5.07	3.1	13.85	26.95	2.15	2.88	13.47	0.87	5.01	0.16	0.85	24.85	12.10	7.00	0.97	0.249
SX04	21.32	2.88	22.67	36.02	17.42	2.58	22.16	1.21	10.07	0.61	0.88	1.15	6.53	8.06	0.98	5.14
SX05	14.02	4.24	4.22	23.66	11.46	4.04	3.89	1.03	0.84	0.11	0.45	2.16	2.75	14.43	1.01	1.85
SX06	10.47	3.47	0.48	17.88	8.53	3.32	0.23	0.97	0.40	0.28	0.22	1.11	111.55	16.32	0.96	0.876
SX07	7.85	2.12	4.96	17.72	5.93	1.98	4.71	0.91	0.46	0.00	0.43	0.93	2.57	13.93	0.98	2.19
SX08	244.54924.03	97.26	24.08	241.94923.83	96.92	1.32	13.68	0.80	0.91	5.34	2.88	12.96	1.01	5.24		
SX09	8.3	2.67	1.36	20.93	6.03	2.49	1.06	1.11	1.72	0.15	0.42	2.38	43.40	11.94	1.03	2.42
SX10	62.13	2.49	2.09	19.61	60.01	2.32	1.81	0.81	14.77	0.31	0.95	0.42	4.87	13.79	1.01	1.13
SX11	24.04	2.68	16.15	23.61	21.48	2.48	15.82	0.79	0.37	0.27	0.35	18.00	1.05	13.71	0.97	2.36
SX12	16.64	5.39	8.26	20.95	14.37	5.22	7.96	1.13	0.03	0.04	0.01	0.66	27.21	14.23	0.96	2.21
SX13	13.96	9.14	21.09	26.04	11.14	8.93	20.72	0.91	0.98	0.01	0.42	3.43	4.11	8.21	1.00	4.56
SX14	22.07	3.13	8.52	26	19.25	2.91	8.15	0.88	1.44	0.18	0.61	2.86	6.79	11.27	0.92	2.27
SX15	8.9	2.58	11.45	18.33	6.91	2.43	11.19	0.75	6.69	0.26	0.89	0.80	6.87	18.18	0.98	0.985
SX16	2.97	1.47	0.47	12.02	1.66	1.37	0.3	0.51	0.67	0.32	0.57	1.05	6.52	5.33	0.99	1.01
SX17	2.17	28.95	10.57	12.79	0.79	28.84	10.39	0.68	0.56	0.51	0.36	1.44	48.61	10.33	0.99	1.73
SX18	8.53	3.44	14.25	12.16	7.21	3.34	14.07	0.68	0.94	0.37	0.46	1.56	3.32	30.47	1.01	3.74
SX19	3.04	2.21	4.03	10.63	1.88	2.12	3.88	0.56	3.09	0.43	0.76	14.32	31.49	35.98	0.96	4.26
SX20	19.12	3.28	9.61	19.21	17.03	3.12	9.33	0.57	6.86	0.02	0.82	0.69	5.45	7.48	0.96	3.32
SX21	4	3.16	6.61	11.25	2.78	3.07	6.45	0.90	11.80	0.14	0.89	0.99	1.76	24.98	0.96	2.54
SX22	4.39	4.05	7.29	35.25	0.58	3.76	6.79	1.38	0.75	0.09	0.27	1.99	5.82	14.35	0.94	2
SX23	1.36	2.02	2.84	6.37	0.67	1.96	2.75	0.47	9.09	0.44	0.95	0.73	5.26	57.47	0.94	2.51
SX24	6.62	2.48	15.85	9.28	5.61	2.41	15.72	0.60	5.61	0.40	0.87	0.70	13.63	26.54	0.90	1.31
SX25	9.21	2.47	11.88	8.58	8.28	2.4	11.76	0.78	3.17	0.44	0.82	2.63	1.53	172.15	0.92	2.17
SX26	6.79	4.66	10.36	20.34	4.59	4.49	10.08	0.79	12.04	0.14	0.92	0.90	5.31	7.82	0.94	2.09
SX27	12.92	2.54	21.32	14.26	11.38	2.42	21.12	0.82	6.54	0.34	0.92	0.58	4.51	6.80	0.99	2.2
SX28	4.45	2.51	4.57	16.25	2.69	2.38	4.34	0.69	1.05	0.33	0.57	5.26	1.61	7.70	0.93	3.18
SX29	8.16	2.24	16.58	12.88	6.76	2.14	16.4	0.77	1.72	0.33	0.66	2.23	232.15	16.48	0.97	2.68
SX30	5.81	2.82	11.17	17.48	3.92	2.67	10.92	1.50	0.91	0.04	0.14	2.70	282.73	20.38	0.92	3.49
SX31	2.1	2.64	8.7	10.7	0.94	2.55	8.55	3.07	0.58	10.90	0.26	14.58	27.61	65.02	0.98	2.47
SX32	8.57	3.38	16.78	91.27	-1.32	2.62	15.48	0.78	4.57	0.24	0.76	1.63	2.21	2.56	1.01	1.85
SX33	9.34	2.37	8.96	53.77	3.51	1.92	8.2	0.38	16.53	0.07	0.93	0.65	10.13	2.25	0.97	1.01
SX34	11.96	4.79	10.86	72.89	4.07	4.18	9.82	0.90	0.40	0.06	0.15	0.58	5.08	3.32	0.96	0.917
SX35	31.97	2.7	1.96	25.53	29.2	2.49	1.6	0.62	2.26	0.41	0.80	3.11	20.76	10.58	0.93	0.205
SX36	11.2	1.25	1.45	103.47	-0.01	0.38	-0.02	0.73	1.06	0.30	0.42	6.95	1.85	2.00	0.88	0.19
SX37	78.23	1.48	13.81	84.13	69.11	0.78	12.62	1.43	1.98	1.62	0.50	18.80	4.39	4.71	1.00	0.471
SX38-1	112.21	7.56	17.81	540.41	53.67	3.06	10.16	1.88	9.06	1.00	0.56	16.95	2.56	0.81	0.97	0.398
SX38-2	48.56	6.94	32.98	614.22	-17.98	1.82	24.28	3.77	19.23	7.45	0.68	49.99	3.61	1.62	1.04	0.379
SX39	11.02	2.93	41.92	89.66	1.3	2.18	40.65	0.55	0.04	0.19	0.02	0.03	5.19	1.62	0.99	0.112
SX40	17.44	2.27	16.78	41.08	12.98	1.93	16.2	0.45	8.40	0.17	0.88	0.59	12.26	3.17	0.98	0.0864
SX41	272.99	2.92	8.69	135.44	258.31	1.79	6.77	1.55	23.15	6.10	0.92	13.55	2.72	3.73	1.04	0.14
SX42	760.17	1.65	1.49	133.29	745.73	0.54	-0.4	4.65	31.53	5.90	0.94	1.78	5.72	9.19	1.00	0.14

注:据 Jones et al.,1994;腾格尔等,2004;张春明等,2013。

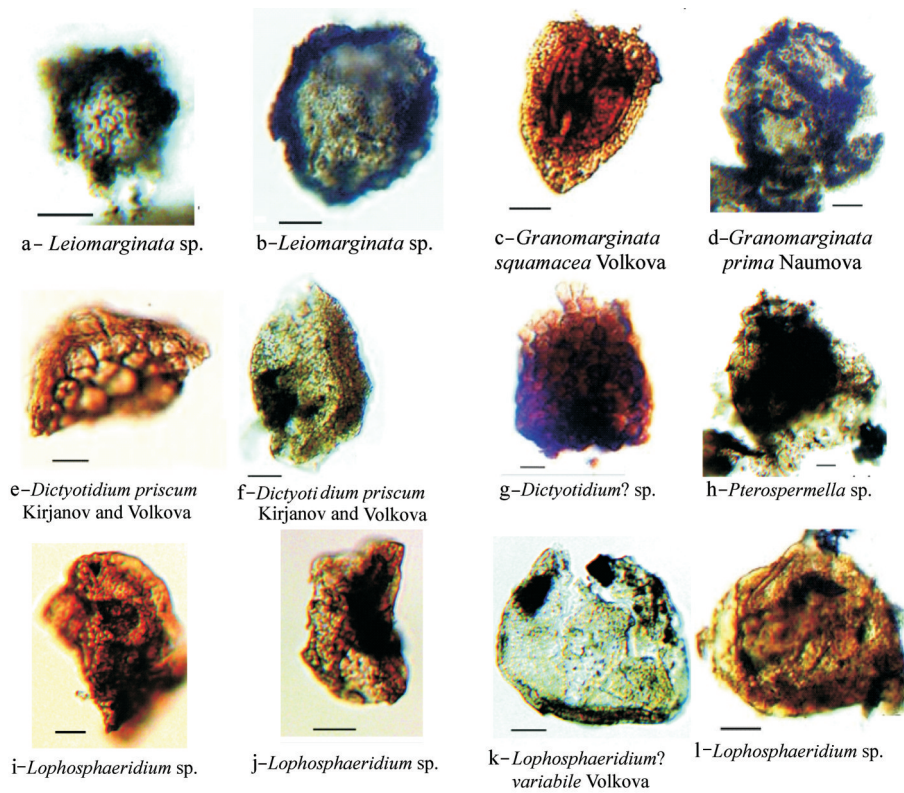


图4 微体古生物鉴定图
(图中线段比例尺皆为 10μm,样品均采自于苏盖特布拉克剖面,层位:寒武系肖尔布拉克组)
Fig.4 Identification diagram of microbial paleontology
(The scale is 10 μm. Location: Sugaitebulak. Lower Cambrian Xiaerbulak Formation)

表3 沉积环境判别指标				
Table 3 Identifying indices of depositional environment				
类型	指标	缺氧环境		富氧环境
		厌氧	贫氧	
微量元素	V/(V+Ni)	>0.60	0.45~0.60	<0.45
	V/Cr	>4.25	2.00~4.25	<2.00
	Ni/Co	>7.00	5.00~7.00	<5.00
	U/Th	>1.25	0.75~1.25	<0.75
稀土元素	铈异常(δCe)	<1(负异常)		>1(正异常)
生物标志化合物	姥/植比(Pr/Ph)	Pr/Ph<1(植烷优势)		Pr/Ph>1(姥鲛烷优势)

注:据 Jones et al.,1994; 腾格尔等,2004; 张春明等,2013。

表4 干酪根碳同位素和沥青反射率测定结果					
Table 4 Results of carbon isotope of kerogen and vitrinite-like reflectance					
样品编号	δ ¹³ C/‰ (PDB)	R _b /%			R _o /%
		最小值	最大值	平均值	
XR-1	-29.8	1.62	1.92	1.77	1.53
XR-2	-34.0	1.31	1.48	1.38	1.27
XR-3	-33.4	1.29	1.54	1.4	1.28
XR-4	-33.4	1.68	1.78	1.74	1.51
XR-5	-31.0	1.59	1.88	1.70	1.48

境,为有机质的保存提供了有利的条件。

(2)寒武系肖尔布拉克组下段中发育光面具缘藻(*Leiomarginata*)、粒面具缘藻(*Granomarginata*)、网面球藻(*Dictyotidium*)、翼环藻(*Pterospermella*)、瘤面球藻(*Lophosphaeridium*)等,且可见底栖藻类碎片。肖尔布拉克组烃源岩生物包含大量的疑源类生烃生物,具备很好的生烃母质和潜力。

(3)寒武系肖尔布拉克组下段碳酸盐岩有机质

碳含量较高,有机质类型为Ⅰ-Ⅱ型,达到了高成熟阶段。肖尔布拉克组下段发育潜在烃源岩。

致谢:两位评审专家和编辑部老师针对本文提出了宝贵意见,在此致以诚挚的谢意。

References

Algeo T J, Maynard J B. 2004. Trace element behavior and redox

- facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems[J]. *Chemical Geology*, 206: 289–318.
- Bai Zhongkai, Han Miao, Qiu Haijun, LÜ Xiuxiang, Xie Li, Yang Youxing, Sun Zhichao. 2017. Paleo-oxygen facies conditions of lower member of Cambrian Xiaerbulak formation in Kalpin thrust belt, Tarim Basin[J]. *China Mining Magazine*, 26(S2): 213–217(in Chinese with English abstract).
- Chen Hui, Xie Xinong, Li Hongjing, Su Ming, Peng Wei, Hu Chaoyong. 2010. Evaluation of the Permian marine hydrocarbon source rocks at Shangsi section in Sichuan Province using multi-proxies of paleoproductivity and paleoredox[J]. *Journal of Palaeogeography*, 12(3): 324–333(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yuehong, Yu Xinghe, Han Baoqing, Du Haifeng, Bai Zhenhua. 2010. Geochemical characteristics of the 3rd Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Depression and their geological implications[J]. *Geology in China*, 37(2): 357–366 (in Chinese with English abstract).
- Dymond J, Erwin Suess, Mith Lyle. 1992. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity[J]. *Paleoceanography*, 7(2): 163–181.
- Francois R, Honjo S, Manganini S J. 1995. Biogenic barium fluxes to the deep sea: Implications for paleoproductivity reconstruction[J]. *Global Biogeochemical Cycle*, 9(2): 289–303.
- Fu Bihong. 1995. Neotectonic deformation satellite imageries of Kalpin uplift in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 13 (3): 283–290(in Chinese with English abstract).
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A[J]. *Chemical Geology*, 99(1/3): 65–82.
- Hu Chaoyong, Pan Hanxiang, Ma Zhongwu, Shen Erbu, Yan Jiaxin. 2007. Iron abundance in the marine carbonate as a proxy of the paleoproductivity in hydrocarbon source rocks[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 755–758(in Chinese with English abstract).
- Jones B J, Manning A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 111(1/4): 111–129.
- Liang Digang, Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Wang Feiyu. 2000. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 534–547(in Chinese with English abstract).
- Li Yuejun, Peng Gengxin, Huang Zhibin. 1999. Petroleum geology and exploration direction of Kalpin uplift[R]. 1–100(in Chinese).
- Liu Xun, You Guoqing. 2015. Tectonic regional subdivision of China in the light of plate theory[J]. *Geology in China*, 42(1): 1–17(in Chinese with English abstract).
- LÜ Xiuxiang, Bai Zhongkai, Xie Yuquan, Yang Xianmao. 2014. Reconsideration on petroleum exploration prospects in the Kalpin thrust belt of northwestern Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(4): 766–775(in Chinese with English abstract).
- LÜ Xiuxiang, Yan Junjun. 1996. Hydrocarbon prospects of Keping area on the northwestern margin of Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(3): 30–37(in Chinese with English abstract).
- Luo Qingyong, Zhong Ningning, Zhu Lei, Wang Yannian, Qin Jing, Qin Lin, Zhang Yi, Ma Yong. 2013. Correlation of burial organic carbon and paleoproductivity in the Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation, northern North China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58: 1036–1047(in Chinese).
- Ni Jianyu, Yao Xuying. 2004. Method to study ancient oceanic productivity[J]. *Marine Geology Letters*, 20(3): 30–39(in Chinese with English abstract).
- Piper D Z, Perkins R B. 2004. A modern vs Permian black shale: The hydrograph, primary productivity, and water-column chemistry of deposition[J]. *Chemical Geology*, 206(3/4): 177–197.
- Shen Jun, Feng Qinglai. 2010. Paleoproductivity evolution across the Permian–Triassic boundary of Dongpan section at Fusui in Guangxi[J]. *Journal of Palaeogeography*, 12(3): 291–300(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, Wu Changzhi, Ma Dongsheng, Ma Xuxuan, Ding Haifeng. 2013. The formation and evolution of ancient blocks in Xinjiang[J]. *Geology in China*, 40(1): 43–60(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[J]. Blackwell, Oxford: 28.
- Tian Zhenglong, Chen Shaoyong, Long Aimin. 2004. A review on Barium as a geochemical proxy to reconstruct paleoproductivity[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 23(3): 78–86(in Chinese with English abstract).
- Timothy D A, Calvert S E. 1998. Systematics of variations in excess Al and Al/Ti in sediment from the central equatorial Pacific[J]. *Paleoceanography*, 13(2): 127–130.
- Tonger, Liu Wenhui, Xu Yongchang, Chen Jianfa. 2004. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying indices[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 365–372(in Chinese with English abstract).
- Wang Feiyu, Bian Lizeng, Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Liang Digang. 2001. Two groups of organic material in Ordovician source rocks in Tarim Basin[J]. *Science China(D)*, 31(2): 96–102(in Chinese).
- Wang Feiyu, Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Xiao Zhongyao, Liu Changwei. 2003. Maturity and its history of Cambrian marine source rocks in the Tarim Basin[J]. *Geochimica*, 32(5): 461–468(in Chinese with English abstract).
- Wang Zongxiu, Li Chunlin, Pak Nikolai, Ivleva Elena, Yu Xinqi, Zhou

- Gaozhi, Xiao Weifeng, Han Shuqin, Halilov Zailabidin, Takenov Nurgazy, Yan Xili. 2017. Tectonic division and Paleozoic ocean-continent transition in Western Tianshan Orogen[J]. *Geology in China*, 44(4): 623–641(in Chinese with English abstract).
- Wei Hengye. 2012. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: An overview of elementary geochemistry[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(2):76–88(in Chinese with English abstract).
- Xiang Yu, Feng Qinglai, Shen Jun, Zhangning. 2013. Changhsingian radiolarian fauna from Anshun, Guizhou, and its relationship to TOC and paleoproductivity[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43: 1047–1056(in Chinese).
- Yan Detian, Wang Jianguo, Wang Zhuozhuo. 2009. Biogenetic barium distribution from the Upper Ordovician to Lower Silurian in the Yangtze area and its significance to paleoproductivity[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 24 (4):16–19 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiaxin, Zhang Haiqing. 1996. Paleooxygenation facies: A new research field in sedimentology[J]. *Geological Science and Technology Information*, 15 (3): 7–13(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunming, Jiang Zaixing, Guo Yinghai, Zhang Weisheng. 2013. Geochemical characteristics and paleoenvironment reconstruction of the Longmaxi formation in southeast Sichuan and northern Guizhou[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(2): 124–130(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guotao, Peng Zhongqin, Wang Chuanshang, Li Zhihong. 2016. Geochemical characteristics of the Lower Permian Liangshan Formation in Dushan area of Guizhou Province and their implications for the paleoenvironment[J]. *Geology in China*, 43(4): 1291–1303(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Wang Feiyu, Liang Digang, He Zhonghua, Zhao Mengjun, Bian Lizeng. 2001. Two sets of marine effluential source rock in Tarim Basin——Organic properties, formation environment and their controlling factors[J]. *Progress in Natural Science*, 11(3):261–268(in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 白忠凯, 韩森, 邱海峻, 吕修祥, 谢李, 杨有星, 孙智超. 2017. 塔里木盆地柯坪冲断带寒武系肖尔布拉克组下段古氧相研究[J]. *中国矿业*, 26(S2):213–217.
- 陈慧, 解习农, 李红敬, 苏明, 彭伟, 胡超涌. 2010. 利用古氧相和古生产力替代指标评价四川上志留统二叠系海相烃源岩[J]. *古地理学报*, 12(3):324–333.
- 程岳宏, 于兴河, 韩宝清, 杜海峰, 白振华. 2010. 东濮凹陷北部古近系沙三段地球化学特征及地质意义[J]. *中国地质*, 37(2):357–366.
- 傅碧宏. 1995. 柯坪隆起的新构造运动变形及其卫星影像特征研究[J]. *新疆地质*, 13 (3):283–290.
- 胡超涌, 潘涵香, 马仲武, 沈尔卜, 颜佳新. 2007. 海相碳酸盐岩中的铁: 烃源岩古生产力评估的新指标[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(6):755–758.
- 李曰俊, 彭更新, 黄智斌. 1999. 柯坪断隆石油地质概况与勘探方向[R]. 1–100.
- 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 王飞宇. 2000. 从塔里木盆地看中国海相石油问题[J]. *地学前缘*, 7(4): 534–547.
- 刘训, 游国庆. 2015. 中国的板块构造区划[J]. *中国地质*, 42(1): 1–17.
- 罗情勇, 钟宁宁, 朱雷, 王延年, 秦婧, 齐琳, 张毅, 马勇. 2013. 华北北部中元古界洪水庄组埋藏有机碳与古生产力的相关性[J]. *科学通报*, 58: 1036–1047.
- 吕修祥, 白忠凯, 谢玉权, 杨先茂. 2014. 塔里木盆地西北缘柯坪地区油气勘探前景再认识[J]. *沉积学报*, 32(4):766–775.
- 吕修祥, 严俊君. 1996. 塔里木盆地西北缘柯坪地区油气前景[J]. *沉积学报*, 14 (3):30–37.
- 倪建宇, 姚旭莹. 2004. 古海洋生产力的研究方法[J]. *海洋地质动态*, 20 (3):30–39.
- 沈俊, 冯庆来. 2010. 广西扶绥东攀剖面二叠纪—三叠纪之交古生产力演化[J]. *古地理论*, 12(3):291–300.
- 舒良树, 朱文斌, 王博, 吴昌志, 马东升, 马绪宣, 丁海峰. 2013. 新疆古块体的形成与演化[J]. *中国地质*, 40(1): 43–60.
- 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 陈践发. 2004. 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*, 22(2): 365–372.
- 田正隆, 陈绍勇, 龙爱民. 2004. 以Ba为指标反演海洋古生产力的研究进展[J]. *热带海洋学报*, 23(3):78–86.
- 王飞宇, 边立曾, 张水昌, 张宝民, 梁狄刚. 2001. 塔里木盆地奥陶系海相源岩中两类生烃母质[J]. *中国科学(D)*, 31(2): 96–102.
- 王飞宇, 张水昌, 张宝民, 肖中尧, 刘长伟. 2003. 塔里木盆地寒武系海相烃源岩有机成熟度及演化史[J]. *地球化学*, 32(5):461–468.
- 王宗秀, 李春麟, Pak Nikolai, Ivleva Elena, 余心起, 周高誌, 肖伟峰, 韩淑琴, Halilov Zailabidin, Takenov Nurgazy, 鄢犀利. 2017. 西天山造山带构造单元划分及古生代洋陆转换过程[J]. *中国地质*, 44(4): 623–641.
- 韦恒叶. 2012. 古海洋生产力与氧化还原指标——元素地球化学综述[J]. *沉积与特提斯地质*, 32(2):76–88.
- 向宇, 冯庆来, 沈俊, 张宁. 2013. 贵州安顺长兴阶放射虫动物群及其与 TOC 和古生产力的关系[J]. *中国科学: 地球科学*, 43: 1047–1056.
- 严德天, 汪建国, 王卓卓. 2009. 扬子地区上奥陶—下志留统生物锕特征及其古生产力意义[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 24 (4):16–19.
- 颜佳新, 张海清. 1996. 古氧相: 一个新的沉积学研究领域[J]. *地质科技情报*, 15 (3):7–13.
- 张春明, 姜在兴, 郭英海, 张维生. 2013. 川东南—黔北地区龙马溪组地球化学特征与古环境恢复[J]. *地质科技情报*, 32(2):124–130.
- 张国涛, 彭中勤, 王传尚, 李志宏. 2016. 贵州独山二叠统梁山组地球化学特征及其沉积环境意义[J]. *中国地质*, 43(4): 1291–1303.
- 张水昌, 张保民, 王飞宇, 梁狄刚, 何忠华, 赵孟军, 边立曾. 2001. 塔里木盆地两套海相有效烃源层——I. 有机质性质、发育环境及控制因素[J]. *自然科学进展*, 11(3):261–268.