

doi:10.3799/dqkx.2016.070

有机质供给和保存在烃源岩形成中的控制作用

丁修建^{1,2}, 柳广弟², 黄志龙², 卢学军³, 陈哲龙², 谷峰⁴

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

3. 中国石油华北油田分公司, 河北任丘 062550

4. 中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心, 北京 100027

摘要: 烃源岩形成研究一直集中于海相盆地的“生产力模式”和“保存模式”之争, 湖相盆地研究较少. 利用二连盆地烃源岩有机碳、碳酸盐碳同位素、热解参数、还原硫等地球化学分析数据, 表征了湖盆古生产力和陆源有机质输入, 研究了有机质供给和保存在烃源岩形成中的控制作用, 发现不同的湖盆中有机质供给和保存对烃源岩形成的控制作用明显不同. 有机质供给量大的湖盆原始有机质含量高, 烃源岩形成主要受有机质供给控制, 受有机质保存条件影响小, 即使在含氧的水底也会有部分有机质来不及氧化而富集形成烃源岩; 有机质供给量小的湖盆原始有机质含量低, 氧化环境中大部分有机质被降解难以形成烃源岩, 只有还原环境下有机质才能得到较好的保存, 有机质保存是控制烃源岩形成的主要因素.

关键词: 有机质供给; 有机质保存; 古生产力; 陆源有机质输入; 二连盆地; 石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2016)05-0832-11

收稿日期: 2015-08-25

Controlling Function of Organic Matter Supply and Preservation on Formation of Source Rocks

Ding Xiujian^{1,2}, Liu Guangdi², Huang Zhilong², Lu Xuejun³, Chen Zhelong², Gu Feng⁴

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062550, China

4. Research and Development Center of Gas and Power Group, CNOOC Ltd., Beijing 100027, China

Abstract: The debate on formation of source rocks has been focused on “productivity mode” and “preservation mode” in marine sediments for many years. Based on the datasets of total organic carbon, carbonate carbon isotope, pyrolysis parameters and reduced sulfur of source rocks of Erlian basin, the productivity and terrigenous organic matter input are characterized and then the role of organic matter supply and preservation in the formation of source rocks are discussed. For the lacustrine basin with high organic matter supply, organic matter supply is the main factor controlling the formation on source rocks because there are still source rocks formed by accumulation of residual organic matter even in the oxidizing sedimentary environment. For the lacustrine basin with low organic matter supply, preservation is the main factor controlling the formation on source rocks because the organic matter can only be preserved in reducing environment since it is too rare to be preserved from oxidation.

Key words: organic matter supply; organic matter preservation; paleo-productivity; terrigenous organic matter input; Erlian basin; petroleum geology.

烃源岩是油气生成的物质基础, 烃源岩研究在油气勘探和资源评价中都具有重要的意义, 其形成机理

一直都是国内外学者研究的热点 (Calvert and Pedersen, 1990; Parrish, 1995; Katz, 2005; Hao *et al.*, 2011;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(No.2014CB239005); 国家科技重大专项项目(No.2011ZX05001-001).

作者简介: 丁修建(1986—), 男, 博士后, 主要从事油气藏形成与分布规律研究. E-mail: dingxj129@foxmail.com

引用格式: 丁修建, 柳广弟, 黄志龙, 等, 2016. 有机质供给和保存在烃源岩形成中的控制作用. 地球科学, 41(5): 832-842.

Adegoke *et al.*, 2014; Hollis *et al.*, 2014; 李松峰等, 2013; 姚永坚等, 2013)。烃源岩的形成过程也是有机质富集的过程, 国内外学者关于有机质的富集和烃源岩形成长期集中于“生产力模式”和“保存模式”之争 (Tyson, 1987; Tyson and Pearson, 1991; Zonneveld *et al.*, 2010; van Bentum *et al.*, 2012)。

“生产力模式”下烃源岩形成主要受控于生产力大小, 受有机质保存影响较小, Parrish (1995) 对比分析了全球烃源岩的分布和生产力的大小关系, 发现 93% 的烃源岩分布于高生产力区域。Stein (1986) 通过研究大西洋中生代黑色页岩的形成过程, 认为烃源岩主要形成于高生产力区域, 此外, Clavert and Pedersen (1990) 研究认为白垩纪黑色页岩和第四纪富有机质沉积物也是高生产力的结果。现代海洋中富有机质沉积均位于高生产力区域, 由于上升洋流和充足的阳光导致沿海盆地东部 (大陆西侧) 亚热带海岸水体中海洋生物大量繁盛, 生产力高, 如秘鲁式海岸上升洋流和东太平洋赤道式上升洋流都可形成高生产力带, 这些地区有机质富集明显, 而在深海范围中生产力低, 从而有机质富集程度低 (Calvert, 1987; Calvert *et al.*, 1995)。加利福尼亚海湾中 Saanich 和 Jervis 峡湾距离很近, 其中 Saanich 峡湾入口处为一周期性缺氧盆地, 沉积物中有机碳含量为 4%, 而 Jervis 峡湾为一个完全氧化的峡湾, 生产力高于 Saanich 峡湾, 沉积物中有机碳含量约为 6%, 可见生产力较高时在含氧的水底也会有部分有机质来不及氧化而富集形成有效烃源岩 (Gucluer and Gross, 1964; Calvert *et al.*, 1992)。

“保存模式”下有机质保存条件是控制烃源岩发育的主要因素, 烃源岩主要形成于缺氧环境。统计表明全球绝大多数的有机质在沉降过程中被降解, 保存下来的有机质占原始有机质的比例不足 0.5%, 因此有机质能否有效保存是影响有机质富集程度和烃源岩形成的关键因素 (Arthur and Dean, 1998; Hedges and Keil, 1995)。Demaison and Moore (1980) 统计了全球海洋的生产力分布和海底沉积表层总有机碳含量的分布, 发现了很多地区生产力与烃源岩分布的关系并不明显, 而是受水体的氧化还原程度影响明显。除此以外, 大西洋与太平洋深海中一下白垩统发育的富有机质黑色页岩也是还原环境利于有机质保存的最佳证据 (de Graciansky *et al.*, 1984), 黑海 (Mazzini *et al.*, 2008)、非洲东部的坦噶尼喀湖 (Degens *et al.*, 1971) 和基伏湖 (Degens *et al.*, 1973) 以及中国南部的珠江口盆地 (吴国瑄等, 1999) 和东部的渤海湾盆地

(金强等, 2008) 均显示保存条件是控制烃源岩形成的主要因素。在现代沉积水体中氧化还原程度同样是控制有机质富集的主要因素, 含氧水体中有机碳分布范围一般为 0.2%~4.0%, 而还原环境中有机碳含量值较高, 分布范围为 1.0%~20.0% (Demaison and Moore, 1980)。又如东非裂谷西段 4 个湖泊中 Albert 湖生产力最高, 但表层沉积中的有机碳含量却是最低的, 其原因是 Albert 湖水深度小, 水体动荡, 富含氧, 有机质降解严重难以保存 (Katz, 1990)。

海相沉积中陆源有机质输入少, 古生产力的基本反映了原始有机质总量, 决定了湖盆底部的有机质供给量, 而湖相盆地中陆源有机质输入量大, 生产力和陆源有机质输入共同决定了有机质供给量, 为了研究对于烃源岩形成究竟是有机质供给量为首要因素还是保存条件为首要因素, 本文以二连盆地为例, 利用烃源岩有机质丰度、碳酸盐碳同位素、烃源岩热解参数及还原 S 含量等分析化验资料, 表征了湖盆内部古生产力和陆源有机质输入, 探讨了有机质供给和保存在烃源岩形成中的作用。

1 研究区概况

二连盆地位于中朝板块和西伯利亚板块的缝合线上, 盆地西北方向以东北向展布的巴彦宝力格隆起为边界, 南部以西东向展布的温都尔庙隆起为边界, 西部以索伦山隆起为边界, 是我国北部重要的含油气盆地 (王同和, 1986; 于英太, 1990)。本文研究对象为盆地东部的阿尔凹陷和乌里雅斯太凹陷及西部的额仁淖尔凹陷和赛汉塔拉凹陷, 具体位置如图 1 所示。二连盆地内凹陷多达 53 个, 均具有明显的断陷结构 (赵贤正等, 2010a, 2010b; 肖阳等, 2010), 如图 2 所示。

二连盆地主要发育地层为二叠系、侏罗系、白垩系和第四系, 其中下白垩统巴彦花群是本区主要发育的地层, 也是油气勘探的主要目的层, 厚度可达 2 000 m 以上。下白垩统主要为湖相沉积, 由下到上分别为阿尔善组、腾格尔组和赛汉塔拉组, 其中腾格尔组一段是本文研究的主要目的层 (图 3)。腾格尔组一段 (K_1bt^1) 下部为灰色、灰绿色泥岩和砂砾岩, 向上为深灰色泥岩、粉砂质泥岩, 与灰褐色砂岩呈不等厚互层, 上部为大套灰色泥岩, 仅夹少量泥质粉砂岩, 是主要烃源岩层 (马立桥, 2005; 王权, 2010)。二连盆地是由许多小型断陷湖盆构成的湖盆群, 在白垩纪湖盆发展过程中, 凸凹相间的构造背景贯穿始终, 具有多物源、近物源、粗碎屑、湖域小、水体浅等

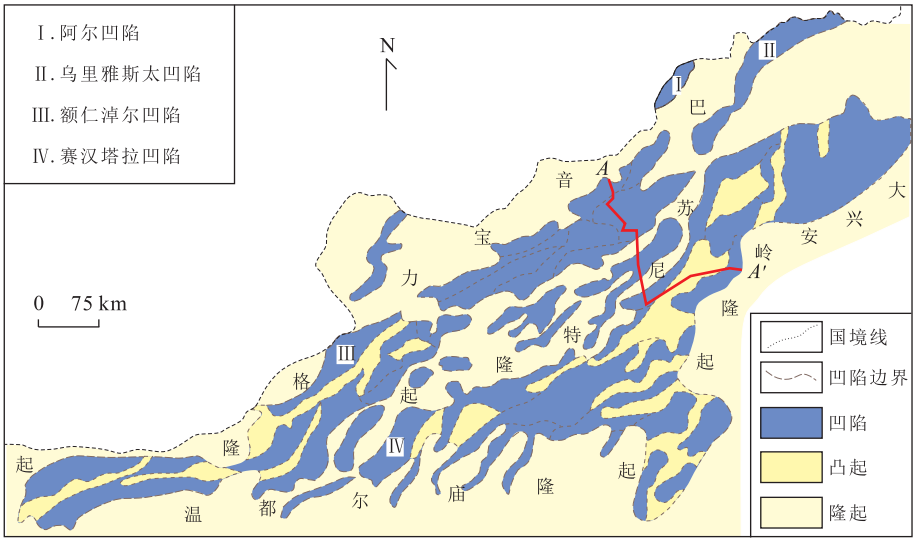


图 1 二连盆地构造单元划分及研究区位置

Fig.1 Tectonic units of Erlian basin and the location of study area

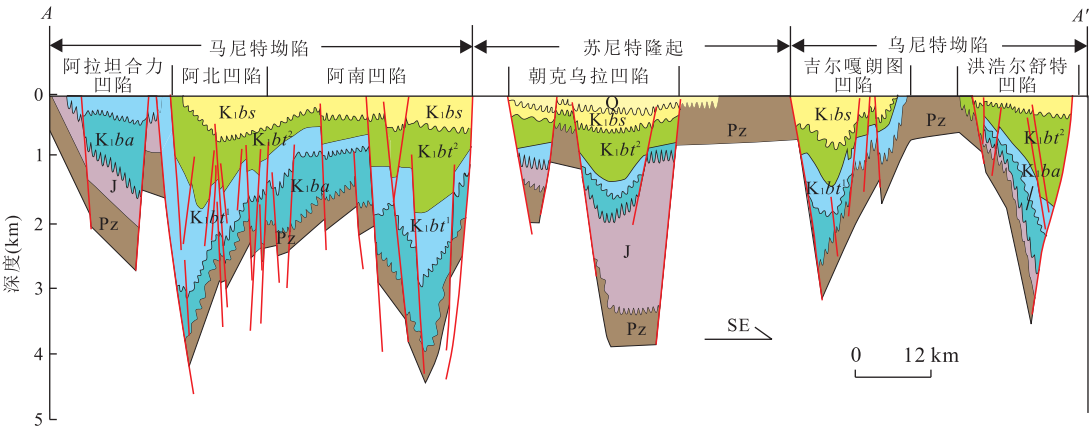


图 2 二连盆地典型地质剖面

Fig.2 Representative section showing the structural framework of Erlian basin

剖面位置见图 1

特点.腾一段沉积时期,气候炎热、潮湿,植被茂盛,水生生物繁殖快速,湖水较深,各凹陷均发生了大规模湖侵,暗色泥岩沉积较厚,形成了良好的烃源岩(祝玉衡和张文朝,2000).

二连盆地烃源岩有机质丰度高,有机碳平均含量为 2.69%,与周围盆地相比仅低于松辽盆地,明显高于我国中生代其他盆地(田福清,2008;张志琳等,2008);有机质主要来源于高等植物,原地浮游生物较少,干酪根类型主要为Ⅱ型和Ⅲ型,Ⅰ型干酪根发育较少(方杰等,1998b;任战利等,2000);受大范围抬升影响,有机质成熟度较低, K_1bt^2 处于未熟阶段,尚未进入生油气阶段; K_1bt^1 下段已经成熟,上段尚未成熟; K_1ba 组烃源岩大部分处于成熟阶段,

已经开始生油(方杰等,1998a).前人对二连盆地烃源岩的研究主要集中于烃源岩评价方面,尚未涉及烃源岩的成因研究.

2 数据和方法

烃源岩样品取自阿尔、乌里雅斯太、额仁淖尔和赛汉塔拉 4 个凹陷下白垩统腾格尔组一段,岩性为灰色、深灰色泥岩,主要为浅湖相沉积.测定了全部样品的有机碳含量(TOC)、还原 S 含量和部分样品的碳酸盐碳同位素及全岩微量元素.

有机碳含量测定在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成,采用仪器为美国

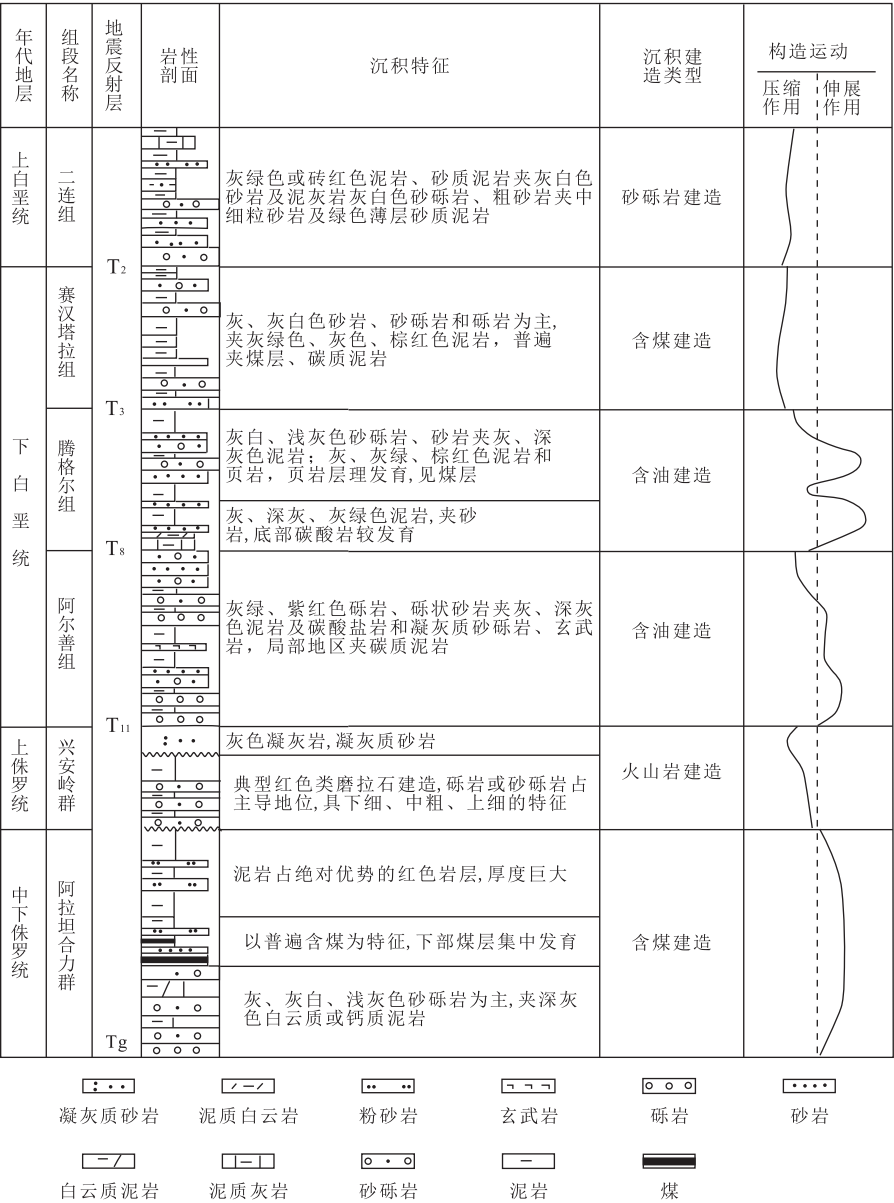


图 3 二连盆地地层综合柱状图

Fig.3 Generalized stratigraphic column of Erlian basin

据华北油田内部资料(2009)修改

LECO 公司 WR-112 碳测定仪;还原 S 含量在中国石油天然气集团华北油田分公司测定,方法如下:岩样经稀盐酸处理,酸洗石棉过滤、洗涤,残渣转入瓷舟中,烘干后置于通氧的 1 000 ℃管炉的石英管中,将岩样中还原 S 氧化成二氧化硫.二氧化硫经双氧水吸收而成硫酸,用标准氢氧化钠滴定从而测定硫酸的含量,从而求取还原 S 的含量.

烃源岩中碳酸盐¹³C 丰度测定采用传统的磷酸溶解法,样品与磷酸在 25 ℃恒温下反应 8 h,测量仪器为 Thermo-Finngan MAT253 气体同位素比值质谱仪,采用双录进样法,在中国石油大学(北京)油气

资源与探测国家重点实验室完成测试.全岩微量元素的测定执行国家标准 GB/T 14506.30-2010,测量仪器型号为 ELEMENT XR 等离子体质谱分析仪,检测温度为 20 ℃,相对湿度 30%,在核工业部微量元素实验室完成测试.

3 结果和讨论

3.1 有机质供给

陆相湖盆中有机质来源于原地水生生物和陆源有机质输入,有机质供给由古生产力和陆源有机质输

入共同决定.古生产力是指地质历史时期单位面积、单位时间内所产生的有机质的总量(汪品先,1989).

水体中浮游植物在光合作用过程中会优先吸收¹²C,从而导致水体中¹³C相对富集,当浮游植物勃发,即生产力较高时,水体中¹³C富集,故一般认为烃源岩中所含碳酸盐的δ¹³C含量的高低可以反映原地古生产力,碳酸盐的δ¹³C值越大,古生产力越大(Oana and Deevey,1960;Mckenzie,1982,1985).为了表征古生产力大小,测定了二连盆地阿尔凹陷、乌里雅斯太凹陷、额仁淖尔凹陷和赛汉塔拉凹陷的31块烃源岩样品碳酸盐的¹³C丰度.¹³C丰度测定采用传统的磷酸溶解法,将样品与磷酸在25℃恒温下反应8h获得足够的CO₂,测量仪器为Thermo-Finngan MAT253气体同位素比值质谱仪,同位素值测量采用双录进样法(dual-inlet method).δ¹³C值由下式计算:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\left(\text{C}^{13} / \text{C}^{12} \right)_{\text{样品}} - \left(\text{C}^{13} / \text{C}^{12} \right)_{\text{标准}} \right] / \left(\text{C}^{13} / \text{C}^{12} \right)_{\text{标准}} \times 1\,000\text{‰}, \tag{1}$$

式中:(C¹³/C¹²)_{标准}采用国际PDB标准,即(C¹³/C¹²)_{标准}=1 123.7×10⁻⁵.为了表征湖盆内部古生产力的大小,定义了原地有机质生产指数表征湖盆内原始有机质生产能力:

$$\text{原地有机质生产指数} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{实测值}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{min}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{max}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{min}}), \tag{2}$$

式中:δ¹³C实测值为样品碳酸盐¹³C相对丰度;δ¹³C_{min}为所有样品δ¹³C的最小值;δ¹³C_{max}为所有样品δ¹³C的最大值.

原地有机质生产指数分布范围为0~1,通过原地有机质指数可以半定量恢复湖盆古生产力,其值越高,湖盆古生产力越大.为了表征有机质供给程度,研究人员定义了总有机质供给指数和陆源有机质输入指数,其中总有机质供给指数表征了湖盆内部有机质供给总量,陆源有机质输入指数表征了陆源有机质输入程度,那么总有机质供给指数为原地有机质生产指数与陆源有机质输入指数的和.陆源有机质输入指数难以直接求取,可以通过原地有机质和陆源有机质的比例间接求取.

烃源岩中干酪根类型反映了原地有机质和陆源有机质比例,一般认为Ⅰ型干酪根中主要为原地有机质,有机质主要来源于湖泊中的水生生物,例如藻类和细菌;Ⅱ型有机质来自水生生物和陆源高等植物;Ⅲ型有机质主要来自陆源高等植物.利用烃源岩热解参数T_{max}和HI(S₂/TOC)可以确定烃源岩干酪根类型.热演化程度相同的情况下烃源岩HI越

高,有机质类型越好,即原地有机质的比例越高,因此可以假定氢指数最高的样品中有机质全部来源于湖盆水生生物,即原地有机质比例为100%;热演化程度相同的情况下烃源岩HI越低,有机质的类型越差,即原地有机质的比例越低,因此可以假定氢指数最低的样品有机质全部来源于陆源高等植物,即原地有机质比例为0.参考干酪根类型分界线趋势便可以确定有机质比例100%和0的界限,通过等间距内插便可确定所有样品的原地有机质比例,从而建立湖盆原地有机质比例判识图版,识别二连盆地原地有机质比例,如图4所示.

根据烃源岩中碳酸盐δ¹³C值,笔者计算了所有样品的原地有机质指数,通过原地有机质比例判识图版可以确定原地有机质比例,从而求得陆源有机质输入指数,最终确定总有机质供给指数,各样品原地有机质指数、原地有机质比例、陆源有机质输入指数和总有机质供给指数如表1所示.二连盆地不同位置的凹陷有机质供给差异较大,盆地东北部凹陷有机质供给量大,阿尔凹陷总有机质供给指数平均值为2.33,乌里雅斯太凹陷总有机质供给指数平均值为2.84;西部凹陷有机质供给量小,额仁淖尔凹陷总有机质供给指数平均值为1.74,赛汉塔拉凹陷总有机质供给指数平均值为1.72.

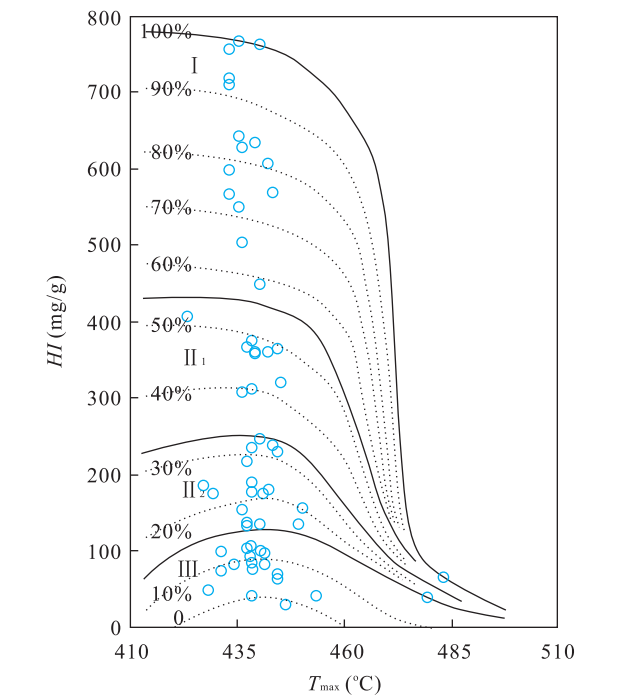


图 4 烃源岩原地有机质比例判识

Fig. 4 Identification for in-situ organic matter ratio of source rock

表 1 二连盆地有机质供给指数

Table 1 Organic matter supply index in Erlian basin

凹陷	井号	深度(m)	$\delta^{13}\text{C(PDB,‰)}$	原地有机质 生产指数	原地有机 质比例	陆源有机质 输入指数	总有机质 供给指数	TOC(%)
阿尔	阿尔 1	1 467.4	4.551	0.69	0.65	0.37	1.07	1.27
	阿尔 1	1 798.0	-1.667	0.38	0.35	0.70	1.08	0.83
	阿尔 5	1 912.4	4.885	0.71	0.70	0.30	1.02	0.79
	阿尔 6	1 652.1	7.714	0.86	0.35	1.59	2.45	1.80
	阿尔 3	1 640.8	5.130	0.72	0.15	4.10	4.83	1.48
	阿尔 2	1 910.6	-2.566	0.33	0.20	1.33	1.66	0.44
	阿尔 21	1 495.5	-5.343	0.19	0.10	1.71	1.90	0.90
	阿尔 5	1 928.4	4.591	0.70	0.15	3.95	4.64	2.43
乌里雅斯太	太 11	1 587.3	6.934	0.82	0.15	4.62	5.44	3.30
	太 3	1 399.1	2.697	0.60	0.30	1.40	2.00	1.95
	太 65	2 455.5	-0.699	0.43	0.10	3.84	4.27	2.24
	太 75	1 269.5	-6.193	0.15	0.10	1.32	1.46	0.53
	太 87	553.3	-6.087	0.15	0.15	0.86	1.01	0.09
额仁淖尔	淖 120	1 674.0	0.015	0.46	0.25	1.39	1.85	1.02
	淖 16	1 799.7	3.235	0.63	0.26	1.79	2.41	0.42
	淖 3	736.7	-1.459	0.39	0.25	1.16	1.55	0.43
	淖 6	1 428.3	2.022	0.57	0.45	0.69	1.26	0.89
	淖 6	1 426.7	2.616	0.60	0.35	1.11	1.70	1.47
	淖 68	1 733.3	-0.148	0.45	0.25	1.36	1.82	0.65
	淖 81	887.2	-4.455	0.23	0.15	1.33	1.57	0.15
赛汉塔拉	赛 27	1 660.5	6.690	0.80	0.50	0.80	1.61	1.97
	赛 80	2 200.0	1.171	0.52	0.25	1.57	2.09	1.19
	赛 20	917.2	-2.674	0.33	0.25	0.98	1.30	1.11
	赛 27	2 220.3	-4.124	0.25	0.15	1.43	1.68	0.08
	赛 4	1 011.9	-3.336	0.29	0.12	2.14	2.43	0.49
	赛 4	949.7	-2.711	0.32	0.60	0.22	0.54	0.10
	赛 4	829.1	0.722	0.50	0.25	1.50	2.00	0.33
	赛 52	1 444.3	-3.584	0.28	0.15	1.58	1.86	0.11
	赛 56	1 479.5	0.048	0.46	0.25	1.39	1.86	1.14
	赛 63	1 329.5	0.829	0.50	0.32	1.07	1.58	2.02
	赛 69	1 428.6	0.790	0.50	0.25	1.51	2.01	0.44

为了研究有机质供给在烃源岩形成中的控制作用,笔者分别拟合了阿尔凹陷、乌里雅斯太凹陷、额仁淖尔凹陷和赛汉塔拉凹陷烃源岩总有机质供给指数与 TOC 的关系,如图 5 所示.二连盆地不同凹陷总有机质供给指数与 TOC 的相关性明显不同,盆地东部的阿尔凹陷和乌里雅斯太凹陷总有机质供给指数与 TOC 拟合关系好,相关系数大,分别为 0.54 和 0.85,烃源岩 TOC 随着总有机质供给指数的增大而明显增大,表明有机质供给程度是控制烃源岩形成的主要因素;盆地西部的额仁淖尔和赛汉塔拉凹陷总有机质指数与 TOC 拟合关系差,相关系数低,分别为 0.019 0 和 0.000 3,烃源岩 TOC 随着总有机质供给指数的增大没有增大的趋势,表明有机质供给程度不是控制烃源岩形成的主要因素.

3.2 有机质保存

沉积环境的氧化还原程度是影响有机质保存的

主要因素(Hedges and Keil,1995),一般认为还原环境有利于有机质保存和烃源岩形成,氧化环境中有机质降解严重不利于烃源岩形成(Richards and Vaccaro,1956;Mazzini *et al.*,2008).

自然界中部分微量元素的含量受氧化还原程度影响明显,可以用来表征沉积环境的氧化还原程度.钍(Th)在地表环境中是不易发生迁移的元素,多富集在抗风化矿物中,因此在氧化环境中含量较高;而铀(U)抗氧化能力较弱,通常在还原环境中保存下来,因此 U/Th 值可以反映沉积水体的氧化还原程度,一般认为 U/Th 值越大,沉积环境的还原性越强(Kimura and Watanber,2001;Morford *et al.*,2001;McManus *et al.*,2005).前人研究表明富氧环境中 U/Th 值小于 0.75,贫氧环境中 U/Th 值范围为 0.75~1.25,厌氧环境中 U/Th 值大于1.25(Wignalland Twitchett,1996).二连盆地 U/Th 值分布

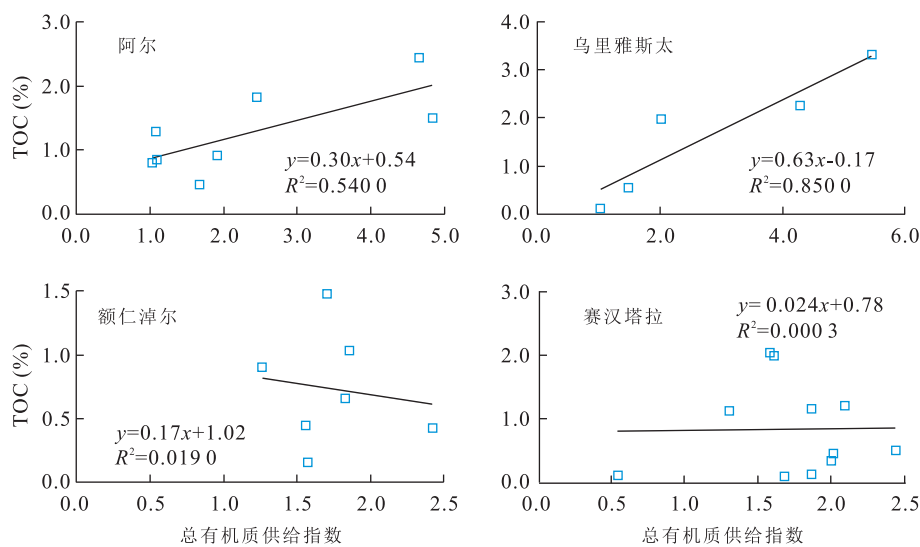


图 5 二连盆地总有机质供给指数与有机碳含量关系

Fig.5 Relationship between total organic matter supply index and total organic carbon content in Erlian basin

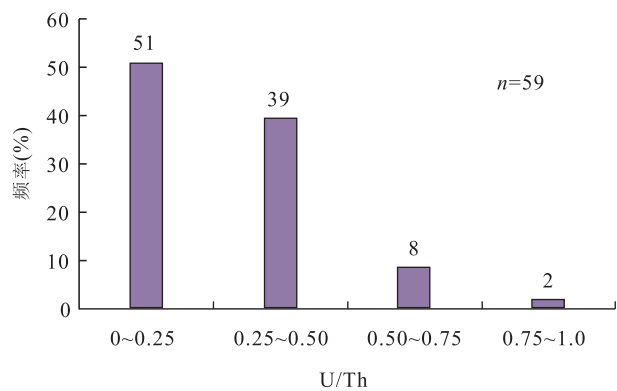


图 6 二连盆地烃源岩 U/Th 分布频率直方图

Fig.6 U/Th values in source rocks, Erlian basin

范围为 0~1.0, 其中 98% 的样品 U/Th 值小于 0.75, 属于富氧环境, 2% 的样品 U/Th 值分布于 0.75~1.00, 属于贫氧环境 (图 6). 这与二连盆地整体上近物源、水体浅的特征是相对应的.

沉积环境中硫 (S) 是一种非常活泼的变价元素, 在不同的氧化还原程度下呈现不同的价态, 主要呈现的价态有 S^{2-} 、 S^{2+} 、 S^{4+} 和 S^{6+} , 其中价态最低的 S^{2-} (俗称还原 S) 的含量受氧化还原程度影响明显, 一般认为还原 S 含量越高, 沉积环境的还原程度越强. 氧化环境中还原 S 含量小于 0.2%, 弱还原环境和还原环境还原 S 含量分别为 0.2%~0.4% 和 0.4%~0.8%, 强还原环境中还原 S 含量大于 0.8%

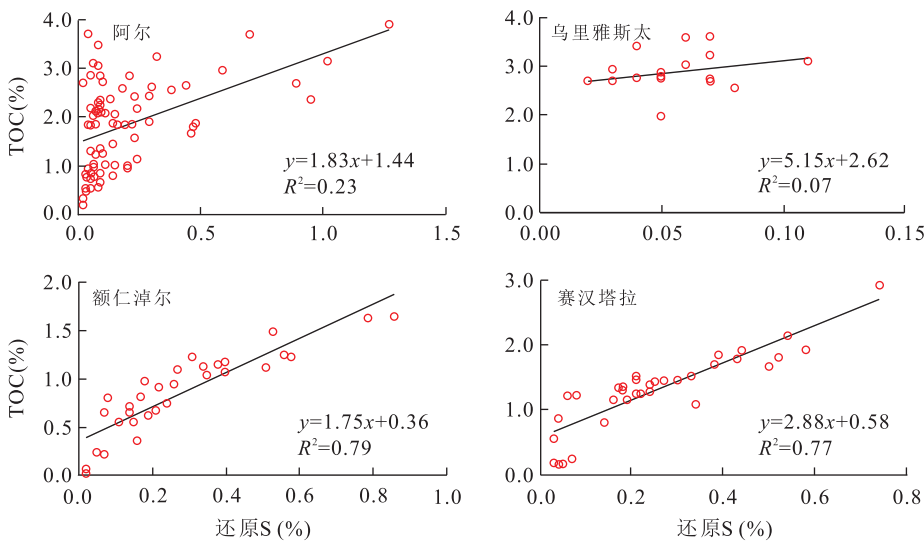


图 7 二连盆地还原 S 与烃源岩有机碳含量关系

Fig.7 Relationships between reducing S content and total organic carbon content in Erlian basin

(黄第藩, 1979; Stein, 1990; 梁狄刚, 2001; 王显东等, 2003)。为了研究氧化还原程度在烃源岩形成中的控制作用, 拟合了二连盆地烃源岩还原 S 与烃源岩 TOC 的关系, 如图 7 所示。

二连盆地不同凹陷还原 S 与 TOC 的相关性明显不同, 东部的阿尔凹陷和乌里雅斯太凹陷沉积环境偏氧化, 大部分还原 S 含量低于 0.2%, 还原 S 与 TOC 相关性差, 相关系数分别为 0.23 和 0.07, 随着还原 S 含量的增加有机碳含量几乎没有变化趋势, 表明氧化还原程度在烃源岩形成中控制作用较小; 西部的额仁淖尔凹陷和赛汉塔拉凹陷沉积环境为弱还原环境和还原环境, 还原 S 含量主要分布于 0.2%~0.8%, 还原 S 与 TOC 相关性好, 相关系数分别为 0.79 和 0.77, 随着还原 S 含量的增加有机碳含量明显增加, 表明氧化还原程度是烃源岩形成中的主要控制因素。

二连盆地东部和西部凹陷的烃源岩形成的主控因素明显不同, 东部的阿尔和乌里雅斯太凹陷有机质供给指数大, 有机质供给量大, 沉积环境偏氧化, 有机质保存条件差, 烃源岩的形成受控于有机质的供给, 受沉积环境的氧化还原程度影响较小, 有机质供给指数越大越有利于烃源岩的形成; 西部的额仁淖尔和赛汉塔拉凹陷沉积环境明显不同于东部凹陷, 沉积环境偏还原, 有机质保存条件好, 有机质供应量小, 烃源岩的形成受控于有机质的保存, 还原程度越强越有利于烃源岩的形成。

4 结论

有机质供给和保存在烃源岩的形成过程中具有一定的“互补”作用。有机质供给多的湖盆中原始有机质含量高, 烃源岩形成主要受有机质供给控制, 受有机质保存条件影响小, 即使沉积环境为氧化环境, 也会有部分有机质来不及氧化而富集形成烃源岩; 有机质供给少的湖盆原始有机质含量低, 有机质保存是控制烃源岩形成的主要因素, 如果沉积环境为氧化环境, 则大部分有机质被降解难以形成烃源岩, 只有在还原环境中有机质才能得到较好保存形成烃源岩。

References

Adegoke, A.K., Abdullah, W.H., Hakimi, M.H., et al., 2014. Geochemical Characterisation of Fika Formation in the Chad (Bornu) Basin, Northeastern Nigeria: Implications

for Depositional Environment and Tectonic Setting. *Applied Geochemistry*, 43: 1–12. doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.01.008

Arthur, M.A., Dean, W.E., 1998. Organic-Matter Production and Preservation and Evolution of Anoxia in the Holocene Black Sea. *Paleoceanography*, 13(4): 395–411. doi:10.1029/98pa01161

Calvert, S.E., 1987. Oceanographic Controls on the Accumulation of Organic Matter in Marine Sediments. *Geological Society, London, Special Publications*, 26(1): 137–151. doi:10.1144/gsl.sp.1987.026.01.08

Calvert, S.E., Bustin, R.M., Pedersen, T.F., 1992. Lack of Evidence for Enhanced Preservation of Sedimentary Organic Matter in the Oxygen Minimum of the Gulf of California. *Geology*, 20(8): 757. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0757:loefep>2.3.co;2

Calvert, S.E., Pedersen, T.F., Naidu, P.D., et al., 1995. On the Organic Carbon Maximum on the Continental Slope of the Eastern Arabian Sea. *Journal of Marine Research*, 53(2): 269–296. doi:10.1357/0022240953213232

Calvert, S.E., Pedersen, T.F., 1990. Anoxia vs. Productivity: What Controls the Formation of Organic-Carbon-Rich Sediments and Sedimentary Rocks? (1). *AAPG Bulletin*, 74: 454–466. doi: 10.1306/0c9b232b-1710-11d7-8645000102c1865d

de Graciansky, P.C., Deroo, G., Herbin, J.P., et al., 1984. Ocean-Wide Stagnation Episode in the Late Cretaceous. *Nature*, 308(5957): 346–349. doi:10.1038/308346a0

Degens, E.T., von Herzen, R.P.V., Wong, H.K., 1971. Lake Tanganyika: Water Chemistry, Sediments, Geological Structure. *Naturwissenschaften*, 58(5): 229–241. doi: 10.1007/bf00602986

Degens, E.T., von Herzen, R.P.V., Wong, H.K., et al., 1973. Lake Kivu: Structure, Chemistry and Biology of an East African Rift Lake. *Geologische Rundschau*, 62(1): 245–277. doi:10.1007/bf01826830

Demaison, G.J., Moore, G.T., 1980. Anoxic Environments and Oil Source Bed Genesis. *Organic Geochemistry*, 2(1): 9–31. doi:10.1016/0146-6380(80)90017-0

Fang, J., Hou, F.X., Sun, T.T., et al., 1998a. Thermal Evolution Characteristic of Organic Matter of Lower Cretaceous Source Rock in Erlian Rift System. *Xinjiang Petroleum Geology*, 19(6): 476–479 (in Chinese with English abstract).

Fang, J., Yu Z.W., Shen J.M., 1998b. Organic Matter Types and Organic Facies of Hydrocarbon Source Rock in Erlian Basin. *Journal of Xi'an Petroleum Institute*, 13(5): 11–16 (in Chinese with English abstract).

- Gucluer, S. M., Gross, M. G., 1964. Recent Marine Sediments in Saanich Inlet, a Stagnant Marine Basin. *Limnology and Oceanography*, 9 (3): 359 — 376. doi: 10.4319/lo.1964.9.3.0359
- Hao, F., Zhou, X. H., Zhu, Y. M., et al., 2011. Lacustrine Source Rock Deposition in Response to Co-Evolution of Environments and Organisms Controlled by Tectonic Subsidence and Climate, Bohai Bay Basin, China. *Organic Geochemistry*, 42 (4): 323 — 339. doi: 10.1016/j.org-geochem.2011.01.010
- Hedges, J. I., Keil, R. G., 1995. Sedimentary Organic Matter Preservation: An Assessment and Speculative Synthesis. *Marine Chemistry*, 49 (2 — 3): 81 — 115. doi: 10.1016/0304-4203(95)00008-f
- Hollis, C. J., Tayler, M. J. S., Andrew, B., et al., 2014. Organic-Rich Sedimentation in the South Pacific Ocean Associated with Late Paleocene Climatic Cooling. *Earth-Science Reviews*, 134: 81 — 97. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.03.006
- Huang, D. F., 1979. A Comprehensive Survey Report on the Qinghai Lake. Science Press, Beijing 152 — 156 (in Chinese).
- Jin, Q., Zhu, G. Y., Wang, J., 2008. Deposition and Distribution of High-Potential Source Rocks in Saline Lacustrine Environments. *Journal of China University of Petroleum*, 32 (4): 19 — 23 (in Chinese with English abstract).
- Katz, B. J., 1990. Controls on Distribution of Lacustrine Source Rocks through Time and Space. In: Katz, B. J., ed., Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs, AAPG Memoir 50. AAPG, Tulsa, 61 — 76.
- Katz, B. J., 2005. Controlling Factors on Source Rock Development—A Review of Productivity, Preservation, and Sedimentation Rate. *Deposition of Organic-Carbon-Rich Sediments; Models*, 74: 7 — 16. doi: 10.2110/pec.05.82.0007
- Kimura, H., Watanabe, Y., 2001. Oceanic Anoxia at the Precambrian-Cambrian Boundary. *Geology*, 29 (11): 995. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0995:oaatpc>2.0.co;2
- Li, S. F., Xu, S. H., Shi, H. S., et al., 2013. Characteristics of Paleogene Source Rocks and Prediction of Petroleum Resources in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 38 (1): 112 — 120 (in Chinese with English abstract).
- Liang, D. G., 2001. Petroleum Generation of Jizhong Depression. Petroleum Industry Press, Beijing 111 — 112 (in Chinese).
- Ma, L. Q., 2005. Sequence Stratigraphy Research and Stratigraphic/Lithologic Reservoirs Prediction on Lower Cretaceous in A'nan-Abei Sag, Erlian Basin, China (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese with English abstract).
- Mazzini, A., Ivanov, M. K., Nermoen, A., et al., 2008. Complex Plumbing Systems in the near Subsurface: Geometries of Authigenic Carbonates from Dolgovskoy Mound (Black Sea) Constrained by Analogue Experiments. *Marine and Petroleum Geology*, 25 (6): 457 — 472. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2007.10.002
- McKenzie, J. A., 1982. Carbon-13 Cycle in Lake Greifen: A Model for Restricted Ocean Basins. In: Schlanger, S. O., Cita, M. B., eds., Nature and Origin of Cretaceous Carbon Rich Facies. Academic Press, London, 197 — 207.
- McKenzie, J. A., 1985. Carbon Isotopes and Productivity in the Lacustrine and Marine Environment. In: Stumm, W., ed., Chemical Processes in Lakes. Wiley, New York, 99 — 118.
- McManus, J., Berelson, W. M., Klinkhammer, G. P., et al., 2005. Authigenic Uranium: Relationship to Oxygen Penetration Depth and Organic Carbon Rain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69 (1): 95 — 108. doi: 10.1016/j.gca.2004.06.023
- Morford, J. L., Russell, A. D., Emerson, S., 2001. Trace Metal Evidence for Changes in the Redox Environment Associated with the Transition from Terrigenous Clay to Diatomaceous Sediment, Saanich Inlet, BC. *Marine Geology*, 174 (1 — 4): 355 — 369. doi: 10.1016/s0025-3227(00)00160-2
- Oana, S., Deevey, E. S., 1960. Carbon 13 in Lake Waters and Its Possible Bearing on Paleolimnology. *American Journal of Science*, 258: 253 — 272.
- Parrish, J. T., 1995. Paleogeography of Corg-Rich Rocks and the Preservation versus Production Controversy. In: Huc, A. Y., ed., Paleogeography, Paleoclimate, and Source Rock: American Association of Petroleum Geologists. *Studies in Geology*, 40: 1 — 20.
- Ren, Z. L., Feng, J. H., Liu, C. Y., et al., 2000. Organic Geochemical Feature of Lower Cretaceous Source Rock in Bayindulan Depression of Erlian Basin. *Journal of Northwest University (Nature Science Edition)*, 30 (4): 328 — 331 (in Chinese with English abstract).
- Richards, F. A., Vaccaro, R. F., 1956. The Cariaco Trench, an Anaerobic Basin in the Caribbean Sea. *Deep Sea Research* (1953), 3 (3): 214 — 228. doi: 10.1016/0146-6313(56)90005-3
- Stein, R., 1986. Organic Carbon and Sedimentation Rate—

- Further Evidence for Anoxic Deep-Water Conditions in the Cenomanian/Turonian Atlantic Ocean. *Marine Geology*, 72(3-4): 199-209. doi: 10.1016/0025-3227(86)90119-2
- Stein, R., 1990. Organic Carbon Content/Sedimentation Rate Relationship and Its Paleoenvironmental Significance for Marine Sediments. *Geo-Marine Letters*, 10(1): 37-44. doi: 10.1007/bf02431020
- Tian, F.Q., 2008. Source Rocks and Oil-Source Rock Correlation in the Bayindulan Sag of Erlian Basin. *Natural Gas Geoscience*, 19(4): 541-543, 565 (in Chinese with English abstract).
- Tyson, R.V., 1987. The Genesis and Palynofacies Characteristics of Marine Petroleum Source Rocks. *Geological Society, London, Special Publications*, 26(1): 47-67. doi: 10.1144/gsl.sp.1987.026.01.03
- Tyson, R.V., Pearson, T.H., 1991. Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia: An Overview. In: Tyson, R.V., Pearson, T.H., eds., *Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia*. *Geological Society, London, Special Publication*, 58: 1-24.
- van Bentum, E.C.V., Reichart, G.J., Damsté, J.S.S., 2012. Organic Matter Provenance, Palaeoproductivity and Bottom Water Anoxia during the Cenomanian/Turonian Oceanic Anoxic Event in the Newfoundland Basin (Northern Proto North Atlantic Ocean). *Organic Geochemistry*, 50: 11-18. doi: 10.1016/j.orggeochem.2012.05.013
- Wang, P.X., 1989. Introduction to Paleooceanography. Tongji University Press, Shanghai, 17 (in Chinese).
- Wang, Q., 2010. The Main Distribution Zone and Reservoir Forming Mechanism of Lithologic Reservoirs in Oil-Bearing Fault Sags, Erlian Basin (Dissertation). China University of geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, T.H., 1986. A Preliminary Study on the Erlian Basin Characteristics for Structural Petroleum Geological. *Experimental Petroleum Geology*, 8(4): 313-324 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.D., Jiang, Z.X., Pang, X.Q., 2003. Summarization of the Paleohydrocarbon-Water Contact Restoring Methods. *Advance in Earth Sciences*, 18(3): 412-419 (in Chinese with English abstract).
- Wignall, P.B., Twitchett, R.J., 1996. Oceanic Anoxia and the End Permian Mass Extinction. *Science*, 272(5265): 1155-1158. doi: 10.1126/science.272.5265.1155
- Wu, G.X., Zhu, W.L., Li, M.B., et al., 1999. Important Factor Controlling the Development of Rich Oil Kitchen Sags: Anoxic Conditions—Evidences from the Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 13(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Y., Tang, J., Sun, C.H., et al., 2010. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Reservoir Types of Aer Sag in Erlian Basin. *China Petroleum Exploration*, 15(2): 41-44 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2010.02.008
- Yao, Y.J., Lü, C.L., Kang, Y.S., et al., 2013. Characteristics of Hydrocarbon Source Rocks and Their Main Controlling Factors in Southeast Asia. *Earth Science*, 38(2): 365-378 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y.T., 1990. Evolution Characteristics of Erlian Basin and the Distribution of Oil and Gas Deposits. *Acta Petrolei Sinica*, 11(3): 12-20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.L., Miao, W.D., Chen, K.Y., 2008. Hydrocarbon Genesis in Honghao'ershu Depression of Erlian Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 30(2): 178-181 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Z., Jiang, S.Q., Dan, W.N., et al., 2010a. Petroleum Geologic Characteristics of Artala Sag in Erlian Basin. *Lithologic Reservoirs*, 22(1): 12-17 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1673-8926.2010.01.003
- Zhao, X.Z., Shi, Y.P., Jiang, S.Q., et al., 2010b. Scientific, Fast, and Efficient Exploration in Aer Sag of Erlian Basin. *China Petroleum Exploration*, 15(1): 1-5 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2010.01.001
- Zhu, Y.H., Zhang, W.C., 2000. Sedimentary Facies and Hydrocarbon-Bearing of Lower Cretaceous Strata in Erlian Basin. Science Press, Beijing, 81-162 (in Chinese).
- Zonneveld, K.A.F., Versteegh, G.J.M., Kasten, S., et al., 2010. Selective Preservation of Organic Matter in Marine Environments: Processes and Impact on the Sedimentary Record. *Biogeosciences*, 7(2): 483-511. doi: 10.5194/bg-7-483-2010

附中文参考文献

- 方杰, 侯凤香, 孙彤彤, 等, 1998a. 二连裂谷系下白垩统烃源岩有机质热演化特征. *新疆石油地质*, 19(6): 476-479.
- 方杰, 鱼占文, 沈敬茂, 1998b. 二连盆地烃源岩有机质类型及有机相. *西安石油学院学报: 自然科学版*, 13(5): 11-16.
- 黄第藩, 1979. 青海湖综合考察报告. 北京: 科学出版社, 152-156.
- 金强, 朱光有, 王娟, 2008. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分

- 布.中国石油大学学报,32(4):19—23.
- 李松峰,徐思煌,施和生,等,2013.珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测.地球科学,38(1):112—120.
- 梁狄刚,2001.冀中坳陷油气的生成.北京:石油工业出版社,111—112.
- 马立桥,2005.二连盆地阿南—阿北凹陷下白垩统层序发育特征与岩性地层油气藏预测(博士学位论文).杭州:浙江大学.
- 任战利,冯建辉,刘池洋,等,2000.巴音都兰凹陷烃源岩有机地球化学特征.西北大学学报:自然科学版,30(4):328—331.
- 田福清,2008.二连盆地巴音都兰凹陷烃源岩评价及油源研究.天然气地球科学,19(4):541—543,565.
- 汪品先,1989.古海洋学概论.上海:同济大学出版社,17.
- 王权,2010.二连盆地含油断陷岩性油藏主要发育区带与成藏机制研究(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 王同和,1986.二连盆地石油地质构造特征初探.石油实验地质,8(4):313—324.
- 王显东,姜振学,庞雄奇,2003.古油气水界面恢复方法综述.地球科学进展,18(3):412—419.
- 吴国瑄,朱伟林,黎明碧,等,1999.古湖缺氧条件是控制富生油凹陷形成的重要因素——来自珠江口盆地的证据.中国海上油气(地质),13(1):1—6.
- 肖阳,唐谨,孙朝辉,等,2010.二连盆地阿尔凹陷油气成藏条件及油藏类型.中国石油勘探,15(2):41—44.
- 姚永坚,吕彩丽,康永尚,等,2013.东南亚地区烃源岩特征与主控因素.地球科学,38(2):367—378.
- 于英太,1990.二连盆地演化特征及油气分布.石油学报,11(3):12—20.
- 张志琳,缪卫东,陈开远,2008.二连盆地洪浩尔舒特凹陷油气生成.石油天然气学报,30(2):178—181.
- 赵贤正,降栓奇,淡伟宁,等,2010a.二连盆地阿尔凹陷石油地质特征研究.岩性油气藏,22(1):12—17.
- 赵贤正,史原鹏,降栓奇,等,2010b.二连盆地阿尔凹陷科学、快速、高效勘探实践和认识.中国石油勘探,15(1):1—5.
- 祝玉衡,张文朝,2000.二连盆地下白垩统沉积相及含油性.北京:科学出版社,81—162.