

doi:10.3799/dqkx.2017.098

# 渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚段古湖泊环境与 烃源岩发育模式

殷杰<sup>1</sup>, 王权<sup>2</sup>, 郝芳<sup>3,4</sup>, 郭柳汐<sup>2</sup>, 邹华耀<sup>1\*</sup>

1. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石油华北油田勘探开发研究院, 河北任丘 062552

3. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 中国石油大学, 山东青岛 266580

**摘要:** 学者们对饶阳凹陷烃源岩的研究已经取得了一些成果, 但针对沙一下亚段烃源岩发育时期的古湖泊环境却缺乏系统的研究, 忽略了湖泊环境这个控制烃源岩地球化学特征和时空展布的重要因素。通过对沙一下亚段烃源岩样品的古生物资料、有机地球化学、微量元素和同位素分析, 恢复其古气候、湖泊古水深、古盐度、氧化还原条件和古生产力, 综合这些影响因素建立了沙一下亚段优质烃源岩的发育模式。结果表明, 沙一段下亚段( $E_{s1}^F$ )的优质烃源岩多发育于湖侵体系域沉积期, 气候正从干旱炎热向温暖潮湿转变, 湖水深度约为2~14 m, 浪基面深度为7.5 m; 古盐度参数如Sr/Ba和B/Ga等都指示了沙一下亚段湖侵体系域沉积期属于咸水环境, 形成了稳定的盐度分层, 从而造成底层水处于稳定的缺氧条件, 有利于有机质的保存; 而稳定碳同位素和营养元素的分布特征都表明此阶段湖泊表层水体有较高的初始生产力。这样的古湖泊环境造成强还原咸水半深湖沉积的有机相分布较广, 有利于优质烃源岩的发育。

**关键词:** 饶阳凹陷; 沙一下亚段; 古湖泊; 优质烃源岩; 发育模式; 石油地质。

**中图分类号:** P618.12

**文章编号:** 1000-2383(2017)07-1209-14

**收稿日期:** 2017-01-04

## Palaeolake Environment and Depositional Model of Source Rocks of the Lower Submember of Sha1 in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

Yin Jie<sup>1</sup>, Wang Quan<sup>2</sup>, Hao Fang<sup>3,4</sup>, Guo Liuxi<sup>2</sup>, Zou Huayao<sup>1\*</sup>

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

2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China

3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

**Abstract:** Despite successful studies on source rocks of Raoyang sag, existing studies on the ancient lake environment during lower submember of Sha1 source rocks development period are not systematic, an important factor controlling the geochemical characteristics and temporal and spatial distribution of source rocks, is often ignored. In this study, samples of source rocks in the lower submember of Sha1 were analyzed with palaeontological material, organic geochemistry, trace element and isotopic geochemistry to reveal the paleolake environment including the paleoclimate, water depth, salinity, organic matter preservation and productivity, and to construct depositional model for high-quality source rocks of the lower submember of Sha1. Results show that the high-quality source rocks mainly formed in the transgressive system tracts period. Meantime, the climate was in the transition from arid to humid, and the water depth of the paleolake was about 2-14 meters, wave base depth was 7.5 meters. Paleosalinity parameters such as Sr/Ba and B/Ga indicate the lower submember of Sha1 belonged to the saline environ-

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(No.41690134); 国家自然科学基金项目(No.U1663210); 中国石油华北油田科技项目(No.HBYT-YJY-2014-JS)。  
**作者简介:** 殷杰(1987-), 男, 博士研究生, 从事石油地质研究。ORCID: 0000-0002-8939-2439. E-mail: yayazai1115@163.com

\* **通讯作者:** 邹华耀, ORCID: 0000-0002-8435-9488. E-mail: huayazou@cup.edu.cn

**引用格式:** 殷杰, 王权, 郝芳, 等, 2017. 渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚段古湖泊环境与烃源岩发育模式. 地球科学, 42(7): 1209-1222.

ment due to the effect of water evaporation. High salinity was favorable to stable halocline formation, resulting in the bottom water in an anoxic condition for the preservation of organic matter. And the stable carbon isotope and nutrient elements distribution characteristics display that the surface water had high initial productivity in the stage of the lower submember of Shal. Such paleolake environment caused wide distribution of strong reducing salt water semi-deep lake organic facies, beneficial to the growth of high-quality hydrocarbon source rocks.

**Key words:** Raoyang sag; the lower submember of Shal; paleolake; high-quality source rock; development model; petroleum geology.

## 0 引言

烃源岩的时空分布是控制油气资源分布的重要因素,但是古湖泊的环境变化往往造成烃源岩沉积有机相的差异分布,使烃源岩在纵横向发育存在很强的非均质性,也影响到资源潜力的落实及勘探方向的选择.所以关于湖泊环境的重建和有机质富集机制的研究受到了学者们的普遍关注.烃源岩的生物标志化合物分析是一种恢复古湖泊环境的有效手段,但是由于深埋和成岩作用会对生物标志化合物的稳定性造成一定影响,所以近年来微量元素、碳氧稳定同位素和粘土矿物含量这些参数也被陆续运用到古湖泊环境的反演中. Talbot (1990)、刘传联等 (2001) 利用碳氧稳定同位素探讨了古湖泊的类型; Kump and Arthur (1999)、Gonçalves (2002) 和 Laurent *et al.* (2015) 通过稳定碳同位素表现了古生产力的变化特征; Piper (1994)、Crusius *et al.* (1996) 和陈慧等 (2010) 利用氧化还原敏感微量元素研究了有机质的保存条件; 曹珂等 (2008) 和王粉丽等 (2010) 利用粘土矿物特征来恢复古气候变化. 笔者认为借用不同类型参数的相互耦合能更准确地反映古湖泊环境. 前人对饶阳凹陷烃源岩的研究已经取得了一些成果 (王建等, 2009; 金涛等, 2010; 易士威等, 2010), 主要集中在烃源岩分布特征和油源对比这两方面, 认为饶阳凹陷沙一下亚段发育了一套厚度大、分布面积广且有机质丰度高的优质烃源岩. 但是针对沙一下亚段烃源岩发育时期的古湖泊环境却缺乏系统的研究, 忽略了湖泊环境这个控制烃源岩地球化学特征和时空展布的重要因素. 本文从饶阳凹陷靠近洼槽中心的西 63 井和阳探 1 井沙一下亚段采集到 91 个烃源岩样品, 开展了热解、微量元素、稳定碳同位素和粘土矿物 X 衍射等实验, 结合前人的古生物资料从古气候、水体性质、古水深、古生产力和保存条件 5 个方面全面分析, 通过多种参数多层次的耦合对沙一下亚段的古湖泊环境进行恢复, 并选取典型剖面总结出优质烃源岩的发育模式.

## 1 地质背景

饶阳凹陷位于冀中拗陷中部, 为一个 NNE 走向、东断西超的新生代箕状凹陷, 面积约 5 280 km<sup>2</sup>. 饶阳凹陷以安新一文安横向调节带与北部的霸县凹陷相隔, 包含 14 个二级构造带, 发育任西、马西、河间—肃宁、留西和饶南 5 个生烃洼槽 (梁狄刚等, 2001; 张文朝等, 2011; 图 1). 其沙一下亚段发育一套覆盖面积广、厚度大而稳定的烃源岩, 有机质丰度高, TOC 普遍大于 2%, 在中北部洼槽内甚至高达 11%, 有机质类型以 I 型和 II<sub>1</sub> 型为主 (王建等, 2009; 金涛等, 2010). 笔者对比渤海湾几个典型富烃凹陷的主力烃源岩发育层段 (沙三下亚段、沙四

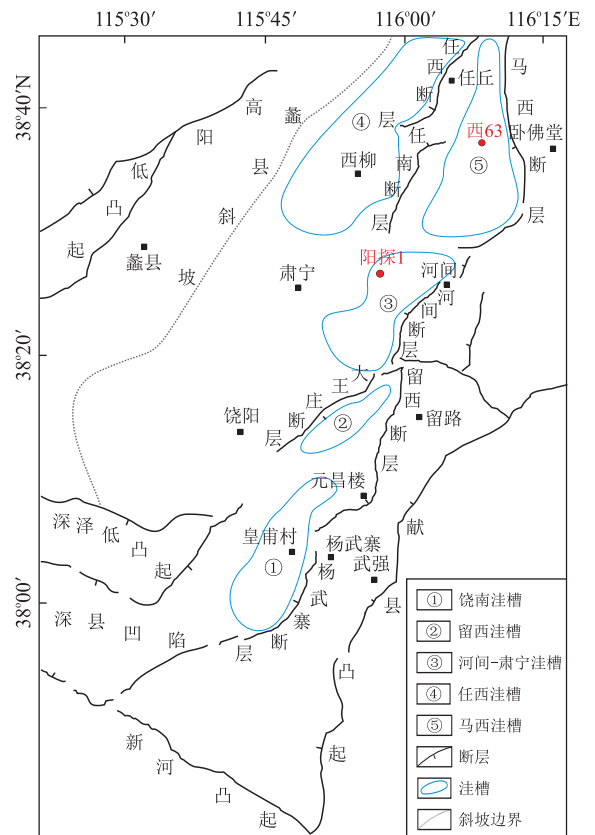


图 1 饶阳凹陷构造简图及研究井位

Fig. 1 Regional tectonics of Raoyang sag and location of selected wells

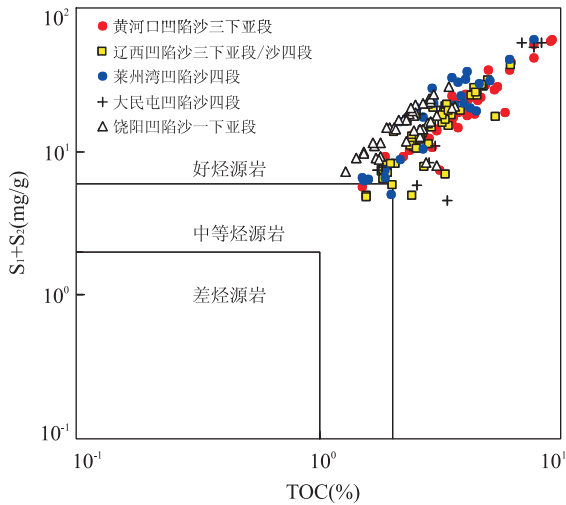


图 2 渤海湾盆地优质烃源岩 TOC 与 (S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub>) 关系

Fig.2 Relationship between TOC and (S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub>) of source rocks in Bohai Bay basin

地层				层序		厚度 (m)	标志层特征	颜色	岩性剖面	构造演化	
系	组	段	亚段	二级	三级						
古近系	东营组	沙一段	上亚段	第三层序	SQ7	100 / 320	棕褐 / 稳定泥岩	浅灰 / 棕褐	断拗拾升期		
			下亚段			50 / 350	特殊岩性段			深灰	断拗扩展期
		沙二段	上亚段	第一层序	SQ6	100 / 400	砂岩尾巴	浅灰 / 紫红 / 浅灰	断陷萎缩期		
			下亚段								

图 3 饶阳凹陷沙一段层序单元划分

Fig.3 Sequence unit classification of the Sha1 member in Raoyang sag

段)的样品数据,发现沙一下亚段的烃源岩品质与大民屯凹陷、黄河口凹陷及辽西凹陷的主力烃源岩相当,属于渤海湾盆地最优质烃源岩层系之一(图 2)。

张文朝等(2008)认为饶阳凹陷古近纪被划分为 5 个构造—沉积演化阶段,分别是:断陷分割充填期(孔店组—沙四段末期)、断陷扩张深陷期(沙三段下亚段—中亚段)、断陷萎缩期(沙三段上亚段—沙二段)、断拗扩展期(沙一段下亚段)和断拗拾升消亡期(沙一段上亚段—东营组)。渐新世晚期,经沙二段回返后,沙一段下亚段进入断拗扩展期(图 3)。由于受到沙二段沉积末期构造运动的影响,沙一段早期如马西断裂、河间断裂等,活动性增强,造成凹陷沉降中心向东和向北迁移(图 4)。沙一段沉积期形成的构造主要有留楚、留西挤压背斜,大王庄、留路、肃宁、

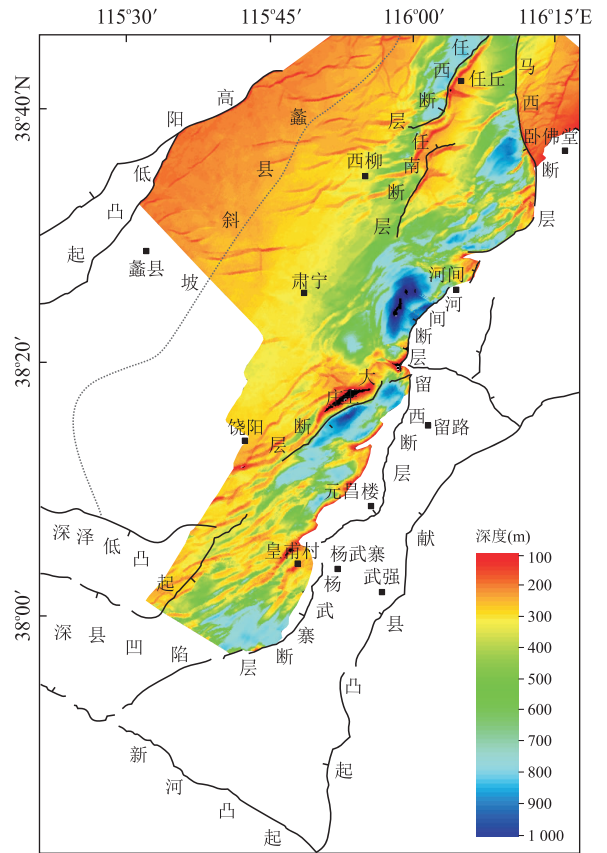


图 4 饶阳凹陷沙一段残余地层厚度

Fig.4 Residual thickness map of the Sha1 member in Raoyang sag

八里庄披覆背斜等(张文朝等,2008, 2011);随着留楚断层和大王庄断层的活动,在留楚和大王庄东洼槽形成了新的沉降中心,最大沉积厚度达 1 000 m 以上,马西、河间、任西 3 个洼槽的最大沉积厚度都大于 500 m(图 4),控制着沙一段烃源岩的分布。饶阳凹陷沙一下亚段沉积时期主物源方向来自蠡县斜坡的西南方向,其中部分单井沙一下亚段砂岩含量达到了 40%,斜坡主要以辫状河三角洲沉积为主;东部大型断层的下降盘为次物源方向,如马西断层、河间断层,水下扇沉积比较发育,靠近断层下降盘的井沙一下亚段砂岩含量明显增大。沙一下亚段沉积期湖泊面积分布较广,延伸到高阳低凸起北部(崔周旗等, 2005),半深湖分布在马西、任西、河间、留西和武强地区。沙一上亚段时期,西部太行山隆起、北部燕山运动抬升较快,进一步使整个凹陷成为西高东低的“箕状”地形,除继承沙一下亚段沉积期的特征外,高阳、大百尺断层活动开始加强,形成了一些中小型构造,如高阳—大百尺断鼻带、博士庄构造带等;受气候和沉积速率的影响,整个湖盆收缩,湖水收缩到肃宁—任丘一带,其余地区则多以河流相以

及辫状河三角洲平原亚相沉积为主(张文朝等, 2001; 纪友亮等, 2009).

## 2 古气候特征与水体性质

### 2.1 古湖泊发育气候特征

陶明华等(2001)对冀中拗陷古近纪孢粉组合研究认为,整个沙一段垂向上有明显的分带特征.唐领余等(2013)主要利用蕨类孢子、裸子类和被子类花粉的生长环境来判断气候特征,蕨类植物喜好温暖阴湿的林下环境,是森林植被中草本层的重要组成;裸子类花粉中的杉粉属与双束松粉属是典型的热带亚热带分子,而麻黄粉属更是旱生植物的代表;被子类花粉中的胡桃粉属、桦粉属和栎粉属是温带的代表,其中桦粉属喜湿润土壤、栎粉属是温带阔叶林优势树种,都代表温湿环境(马玉贞等, 1996; 陈雯等, 2013; 崔莹等, 2015).沙一下亚段主要以栎粉属(20%~40%)为优势,而桦粉属和胡桃粉属等典型阔叶落叶组分也以一定含量出现,说明气候在往湿润的条件转变,但是沙二段沉积期早生成分麻黄粉属高度发育,温湿环境植物成分含量极低,具有干旱气候特征,对沙一段早期的气候有一定的影响,所以沙一下亚段同时出现较高含量的麻黄粉属,其含量普遍为10%~15%,另外蕨类孢子很少,形成了一种较为特殊的过渡型气候特征;而沙一上亚段被子类花粉相对裸子类在含量上有明显优势,且以喜爱温湿条件的栎粉属、桦粉属等为主,麻黄粉属基本不发育,气候环境完全转变为温暖湿润(图5).因此,笔者认为沙一下亚段沉积期还保留了偏干旱气候,而沙一上亚段沉积期才是典型的温湿气候.

粘土矿物 X 衍射结果从另一个方面也佐证了沙一段沉积时期气候的变化特点,因为气候条件是控制粘土矿物形成和转化的关键因素.阳探1井和西63井的粘土矿物分析结果显示,粘土矿物组合为伊/蒙混层—伊利石—高岭石—绿泥石组合,其中伊/蒙混层矿物含量具有绝对优势,阳探1井伊/蒙混层矿物平均含量为69%,而西63井伊/蒙混层矿物平均含量为83%,但是伊利石、高岭石和绿泥石的含量在纵向上有明显的分带特点.阳探1井在3900 m以上高岭石和绿泥石含量较高,平均值分别是7.5%和9.5%,而在3900 m以下,高岭石和绿泥石含量迅速减少至2.2%和2.3%;而伊利石的含量变化正好相反,在3900 m以上伊利石含量较低,平均值为12.2%,3900 m以下其含量迅速增加,平

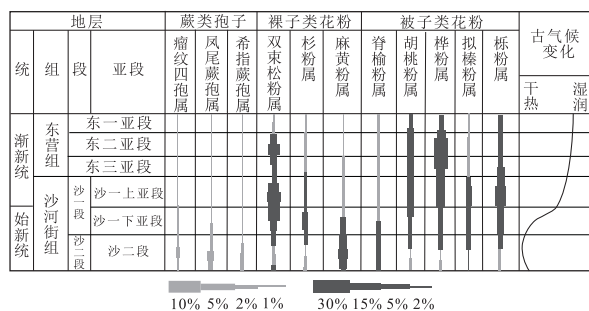


图5 饶阳凹陷孢粉化石分布特征

Fig.5 Sporopollen fossil distribution of Raoyang sag  
据陶明华等(2001)修改

均值达到27.8%(图6a).西63井与阳探1井有相同的变化特征,3种粘土矿物含量在3100 m左右发生突变;3100 m以上高岭石和绿泥石平均含量分别为3.7%和3.8%,伊利石平均含量为7.1%,3100 m以下高岭石和绿泥石平均含量下降至1.1%和1.5%,伊利石含量上升至10%(图6b).这种粘土矿物含量分带的特征也说明了沙一上、下两个亚段沉积期具有明显不同的气候条件,因为一般来说高岭石是在热带、亚热带降雨量大的酸性介质条件下强烈风化形成的;伊利石多在温和一半干旱气候下风化形成,自生伊利石常与富K<sup>+</sup>的碱性介质有关;而绿泥石的形成需要同沉积的富铁沉积物,而河流会带来丰富的溶解铁,所以三角洲前缘环境极易富集绿泥石(汤艳杰等, 2002; 曹珂等, 2008; 王粉丽等, 2010).这两口关键井的变化特征与古生物特征相互对应:沙一下亚段沉积期处于沙二段沉积期的干旱气候向温湿气候转变的过渡时期,即沙一下亚段沉积期早期对沙二期干热气候有所继承,并开始向温湿气候转变,所以伊利石含量较高,高岭石含量比较少,水介质呈碱性;沙一上亚段气候变为温和湿润,高岭石含量占优势而绿泥石总体含量不是很高,原因是该时期三角洲前缘相较为发育.

### 2.2 湖泊古盐度特征

越来越多的研究表明湖相烃源岩的发育与湖泊古盐度有密不可分的关系,这是因为古盐度能直接影响古湖泊底部水体的分层特征,从而造成有机质保存条件的差异.本文通过主量和微量元素实验,用盐度变化敏感元素的比值特征来指示古盐度的变化规律.

锶(Sr)的丰度和锶/钡比值(Sr/Ba)是常用的反映古盐度变化的指标,因为在自然界水体中Sr的迁移能力比Ba强,水介质矿化度很低时,Sr、Ba均以重碳酸盐的形式出现;当水体盐度逐渐加大时,Ba



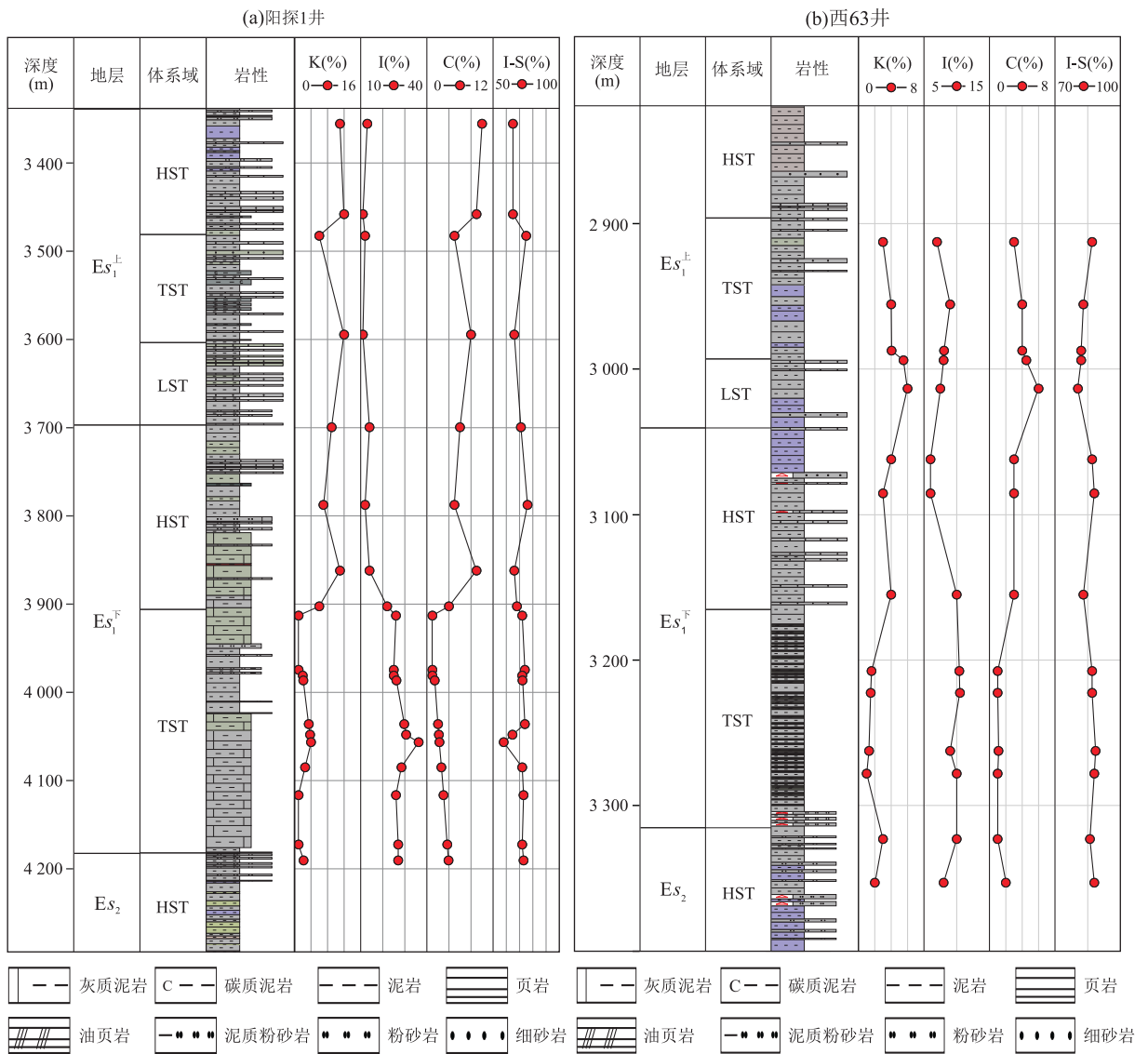


图 6 饶阳凹陷沙一段粘土矿物分布特征

Fig.6 Clay minerals distribution characteristics of the Sha1 member in Raoyang sag

以  $BaSO_4$  的形式首先沉淀, 留在水体中的 Sr 相对 Ba 趋于富集; 当水体的盐度加大到一定程度时 Sr 才会产生硫酸锶的沉淀(李成风和肖继风, 1988; 钱焕菊等, 2009; 田杨等, 2016). 以马西洼槽的西 63 井沙一段为例, Sr/Ba 值范围为 0.25~2.49, 但是分带性很强, 其中沙一上亚段 Sr/Ba 平均值仅为 0.45, 而沙一下亚段平均值高达 1.53, 在沙一下亚段的高位体系域底部发生 Sr/Ba 值的突变(图 7). 沙一下亚段湖侵体系域沉积期的水体盐度要远远高于沙一上亚段.

硼/镓比值(B/Ga)对于古盐度的变化更为灵敏, 因为硼酸盐溶解度很大、迁移距离很远, 只有当水体盐度较大时才能析出, 相比之下镓的活动性很弱, 极易沉淀, B/Ga 值和古盐度有明显正相关的关

系(文华国等, 2008; 伊海生等, 2009). 实验结果表明, 西 63 井沙一下亚段 B 含量为  $31 \times 10^{-6} \sim 76 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $48.2 \times 10^{-6}$ , 含量明显高于沙一上亚段; B/Ga 比值为 1.79~5.20, 平均值为 4.20(图 7). 按照王益友等(1979)提出的陆相环境划分方法, 沙一下亚段湖侵体系域所指示的古盐度接近海水盐度, 而沙一上亚段盐度迅速降低, 表现为典型的淡水特征.

除了以上 2 种常用的古盐度指标, Fe/Mn 值在本次研究中也表现出非常明显的特征. Mn 在湖水中常以  $Mn^{2+}$  稳定存在, 只有当湖水强烈蒸发而使  $Mn^{2+}$  浓度饱和时, 它才会大量沉淀从而在岩石中显示高值.  $Mn^{2+}$  高值是较干热气候的标志, 另外 Fe 在湖水中易形成  $Fe(OH)_3$  胶体快速沉淀, 因此 Fe/

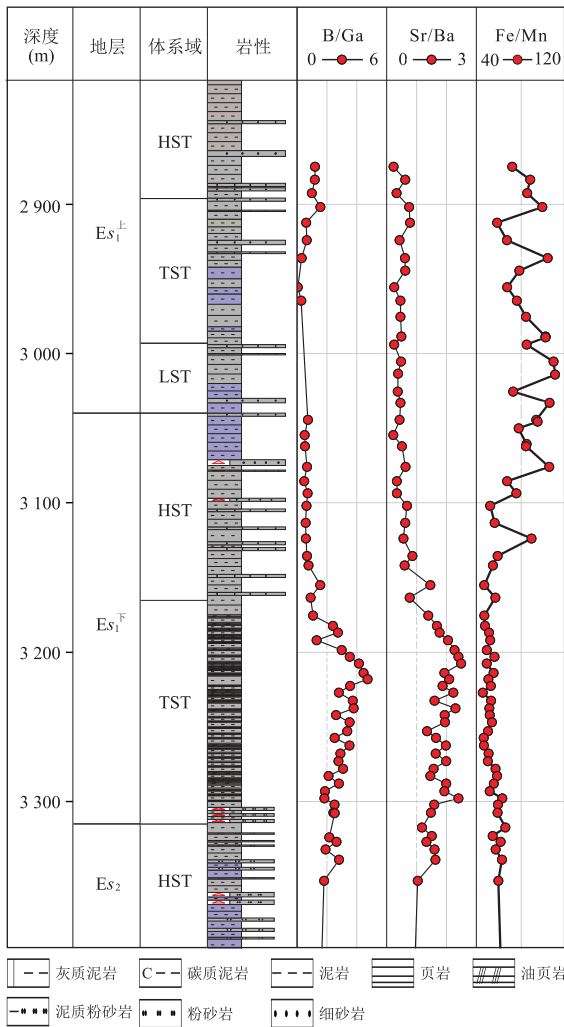


图 7 饶阳凹陷西 63 井沙一段古盐度变化特征

Fig.7 The variation of palaeosalinity of the Sha1 member in well Xi 63 of Raoyang sag

Mn 值可以指示气候的温湿或干热(王随继等, 1997; 钱焕菊等, 2009), 也能验证古盐度的变化。单井图显示西 63 井的 Fe/Mn 值突变深度与前面 2 种参数几乎一致(图 7), 反映了沙一下亚段湖侵体系域沉积期偏干旱气候到沙一上亚段沉积期温湿气候的转变, 也从另一角度佐证了沙一下亚段到沙一上亚段是个湖水盐度下降的过程。

### 3 古水深恢复

优质烃源岩普遍发育在半深湖和深湖相带之中, 而古水深与浪基面的变化直接控制了半深湖、深湖相带的发育分布, 所以曾有学者研究得出有机碳的含量与水深呈一定的正相关(Mann and Stein, 1997)。笔者对研究区沙一下亚段的古水深进行了恢

复, 用古水深配合浪基面将其沉积环境分成浅湖和半深湖—深湖的沉积相带。利用大量具有水深意义的古生物标志来恢复古水深是目前较为可靠的方法, 主要参考李守军等(2005)和苏新等(2012)在研究东营凹陷古水深时提出的思路: 通过总结不同古生物类别所代表的深度范围, 针对沙一下亚段样品进行多门类深度叠合处理, 得到的深度范围再结合古生物丰度特征、岩性特征等加权综合确定单井所指示的大致古水深并投点到研究区, 编制古水深等值线图。根据研究区的古生物资料收集情况, 本次研究主要采用了微体藻类, 因为它们在水底营光合作用, 受太阳光入水强弱变化控制, 不同类别有其适宜的生存深度, 对水深变化敏感; 而浪基面的恢复主要利用底栖生物在浪基面附近最为繁盛的特点, 通过对介形虫优势分异度的计算, 可将分异度最大位置对应的古水深值作为浪基面的深度(李守军等, 2005; 苏新等, 2012)。

通过对饶阳凹陷 61 口单井的沙一下亚段古生物资料整理, 笔者确定了沙一下亚段标志性藻类有盘星藻、光面球藻、粒面球藻、网面球藻、副渤海藻和渤海藻, 利用多门类生物叠合深度和加权分析综合计算出单井的古水深, 并结合 14 口井的介形虫优势分异度计算结果及其对应的古水深, 恢复了该沉积时期的湖泊水体深度和浪基面。饶阳凹陷沙一下亚段沉积期湖泊面积非常大, 向西一直延伸到高阳低凸起附近(图 8a), 浪基面对应的水深约为 7.5 m(图 8b), 大于 7.5 m 的较深水区域主要分布在马西断层、河间断层、任西断层和留西断层附近, 深度最大为 14 m(图 8a)。

## 4 湖泊古生产力和沉积有机质的保存环境

### 4.1 湖泊古生产力特征

近年来不少学者通过对国内外不同盆地优质烃源岩地球化学分析成果的研究, 发现优质烃源岩的形成必须具备一定的古生产力, 比如松辽盆地晚白垩世的青山口组一段及嫩江组一段发育两套湖侵期形成的深湖相黑色页岩夹油页岩, 为盆地最重要的烃源岩, 生产力最高达 3 000 g/(m<sup>2</sup>·a)(宁维坤等, 2010); 东营凹陷沙河街组三段下亚段和沙河街组四段上亚段两套主力烃源岩中常见藻类勃发现象(朱光有和金强, 2003)以及西非 Congo 盆地白垩统

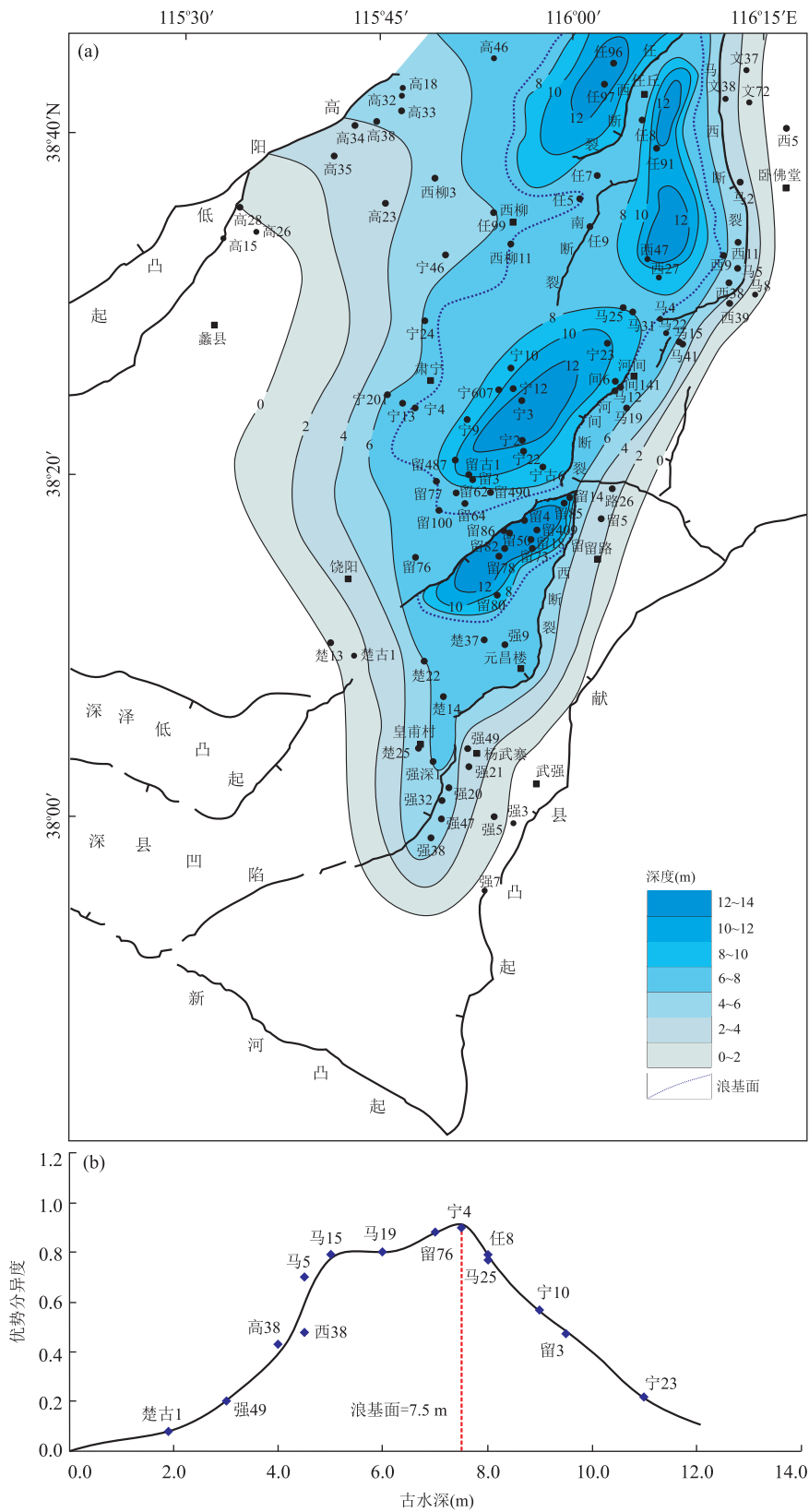


图 8 饶阳凹陷沙一下亚段古水深(a)和浪基面(b)分布

Fig.8 The distribution of water depth (a) and wave base (b) of the lower submember of Sha1 in Raoyang sag

深湖相页岩有机质的碳同位素特征(Harris *et al.*, 2004)都指示了高的古生产力能为优质烃源岩提供

物质条件.综合国内外古生产力的研究方法,本文主要通过营养元素磷(P)和稳定碳同位素特征来总结

沙一下亚段的古生产力变化。

营养元素 P 的输入是限制湖泊生产力的重要因素之一。Schindler(1977)通过全湖实验证实 P 是藻类勃发的限制性营养元素,几乎所有的 P 都来源于母岩的化学风化。由于元素成因主要有生物成因和陆源成因,而生物成因才能反演湖泊的古生产力,所以一般不直接用 P 的绝对含量而用 P/Al 来表征古生产力状况(沈俊等,2011),因为 Al 被认为是陆源物质输入的代表元素。西 63 井和阳探 1 井 P/Al 值的变化显示沙一上亚段 P/Al 值总体较低,且变化范围较大,古湖泊营养水平低且不稳定;而到沙一下亚段湖侵体系域 P/Al 值明显增加,变化幅度小,反映古湖泊水体营养性增强且非常稳定(图 9 和图 10)。较高的湖泊营养水平是高生产力的保证。

稳定碳同位素也已经成为古生产力恢复的一个重要参数。碳在自然界中表现为碳酸盐碳( $C_{carb}$ )和有机碳( $C_{om}$ )两种基本形式,主要集中在碳酸盐及生物圈两大碳储库内(Talbot, 1990; Leng and Marshall, 2004; 蔡观强等,2009)。碳酸盐碳同位素的正向偏移与有机碳的埋藏量呈正相关,因此碳同位素值增大可作为生产力升高的一种可靠标志,当表层水生产力较高时,生物通过光合作用吸收较多的

$^{12}C$ ,使得表层水体碳库中的 $^{13}C$ 升高,从而造成湖相原生碳酸盐岩中 $^{13}C$ 相对富集(Talbot, 1990; 刘传联等, 2001; Gonçalves, 2002)。据 Fry and Sherr (1989)对有机质碳同位素的研究,浮游藻类的有机质碳同位素值远低于陆源高等植物,藻类光合作用会形成多种脂类化合物,其 $\delta^{13}C$ 值普遍在 $-30.0\%$ 左右,而沙一下亚段沉积时期属于湖侵期,藻类对湖泊生产力起重要作用,所以高生产力引起脂类化合物的高贡献率在一定程度上会使得 $\delta^{13}C_{om}$ 偏轻。图 9 和 10 显示沙一下亚段有机质碳同位素明显偏轻:阳探 1 井 $\delta^{13}C_{om}$ 平均值为 $-27.1\%$ ,西 63 井 $\delta^{13}C_{om}$ 平均值为 $-26.5\%$ ,无机碳同位素明显偏重,且为正值;阳探 1 井 $\delta^{13}C_{carb}$ 平均值为 $2.5\%$ ,西 63 井 $\delta^{13}C_{carb}$ 平均值为 $4.1\%$ ,两条曲线呈明显的镜像特征。而沙一上亚段却没有这样的特征, $\delta^{13}C_{om}$ 值普遍偏重, $\delta^{13}C_{carb}$ 值明显偏轻,且都为负值。结合之前的微量元素特征,表明沙一下亚段湖侵体系域沉积期湖泊古生产力较突出,而沙一上亚段沉积期生产力明显降低。

#### 4.2 湖泊水体保存条件

湖泊中有了一定的初始生产力条件,并不代表其沉积物中的有机质丰度就高,从湖水所含有机质转化为沉积物中的有机质,要经历一个沉积—聚

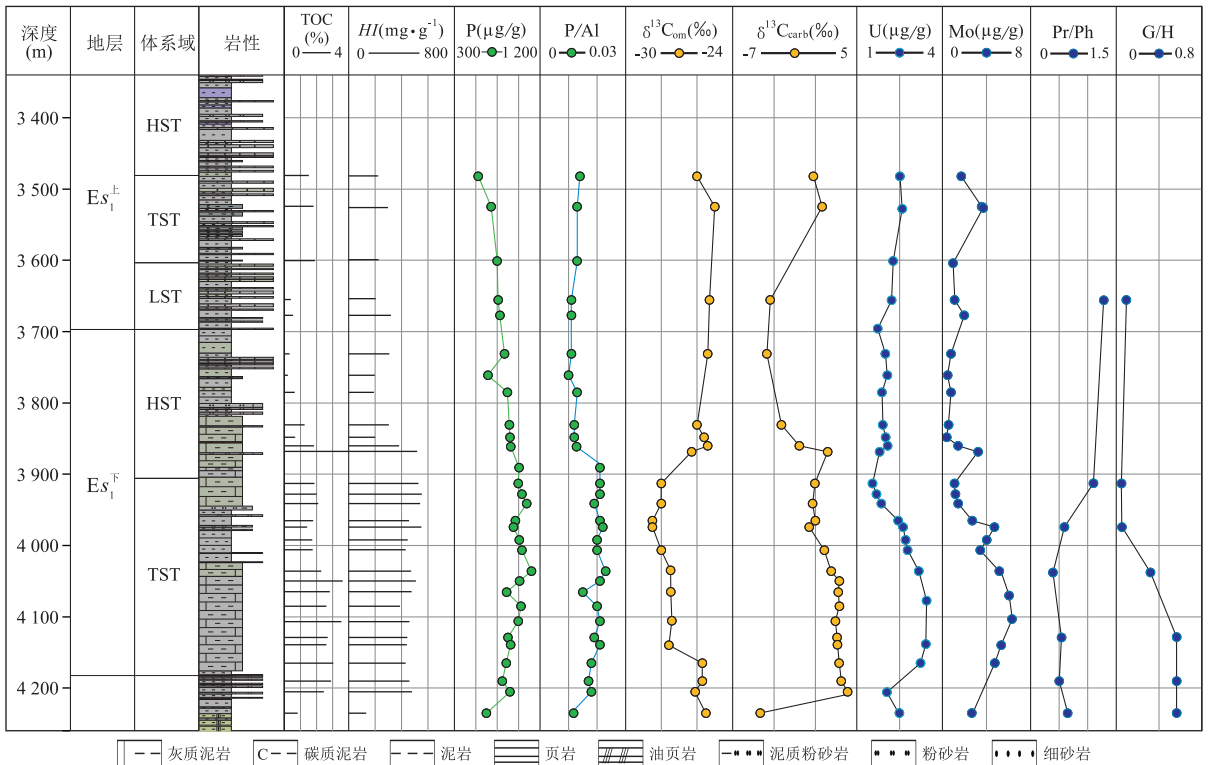


图 9 河间洼槽阳探 1 井沙一下亚段古生产力和保存条件

Fig.9 The paleoproductivity and preservation conditions of the lower submember of Shal in well Yangtan 1 in Hejian trough



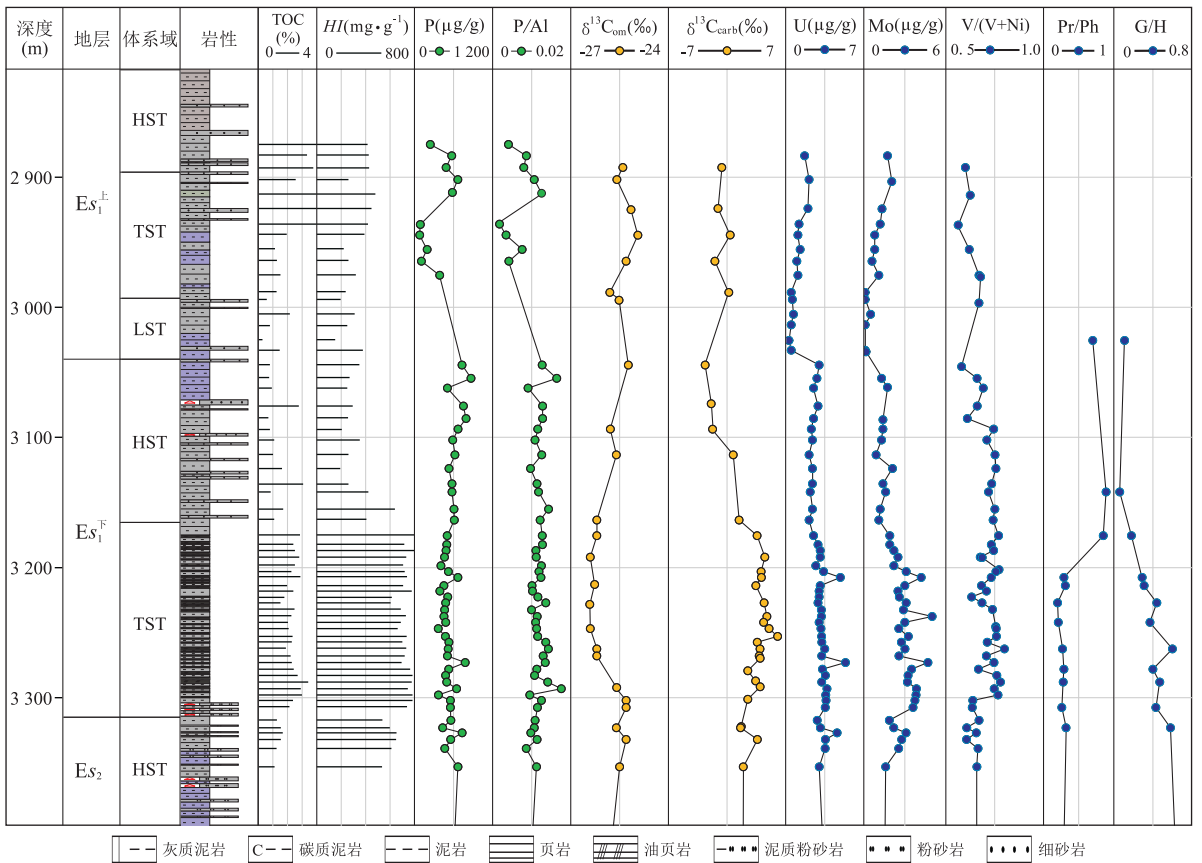


图 10 马西洼槽西 63 井沙一下亚段古生产力和保存条件

Fig.10 The paleoproductivity and preservation conditions of the lower submember of Sha1 in well Xi 63 in Maxi trough

集—消耗—保存的过程,有机质的保存条件对烃源岩的形成至关重要,本文主要通过钼(Mo)、铀(U)、钒(V)以及姥鲛烷/植烷(Pr/Ph)这几个典型的氧化还原敏感参数来分析饶阳凹陷沙一段的保存条件变化特征。

铀(U)在氧化性质的水体中常以  $UO_2(CO_3)_3^{4-}$  存在并具有高溶解度,还原环境中  $UO_2(CO_3)_3^{4-}$  以扩散方式进入沉积物并被还原成  $UO_2$ 、 $U_3O_7$  或  $U_3O_8$  固定在其中,造成沉积物中 U 的富集(Sundby *et al.*, 2004; 腾格尔等, 2005; 丁修建等, 2016)。对于 Mo 来说,有一种重要的富集机制就是在富含  $H_2S$  的缺氧环境中形成硫化物沉淀,大量自生 Mo 的出现可以指示强还原环境(Piper, 1994; Crusius *et al.*, 1996)。而 Hatch and Leventhal(1992)和李广之等(2008)研究认为,  $V/(V+Ni) > 0.54$  表示厌氧环境,  $V/(V+Ni)$  为  $0.45 \sim 0.60$  表示贫氧环境,  $V/(V+Ni) < 0.45$  表示富氧环境。生物标志物中的姥鲛烷/植烷(Pr/Ph)与还原环境也有很强的相关性,Pr/Ph 低值能指示缺氧条件;另外伽马蜡烷指数(G/H)能指示水体的分层特征,

因为伽马蜡烷通常来源于还原环境下的四膜虫醇,且丰富的伽马蜡烷在高盐度环境下才能发现(Piper, 1994)。

西 63 井的单井分析表明,沙一下亚段湖侵体系域的 U、Mo 和  $V/(V+Ni)$  值明显高于沙一上亚段,且 Pr/Ph 值极低,平均值仅为 0.27,反映了强还原环境的特征;G/H 值在沙一下亚段湖侵体系域有绝对优势,普遍大于 0.40,而沙一上亚段 G/H 值仅在 0.10 左右,说明沙一下亚段湖侵体系域沉积期形成了稳定的水体分层(图 10)。阳探 1 井沙一下亚段湖侵体系域也指示了高 U、Mo、G/H 值和低 Pr/Ph 值的具有稳定水体分层的强还原环境(图 9)。所以,沙一段并不都是具备了良好的保存条件,强还原环境集中在沙一下亚段湖侵体系域中,经过沙一下亚段高位体系域的过渡,演化成沙一上亚段弱氧化或富氧的沉积环境。

### 5 烃源岩发育模式

Carroll *et al.*(2001)总结了古湖泊沉积物的三

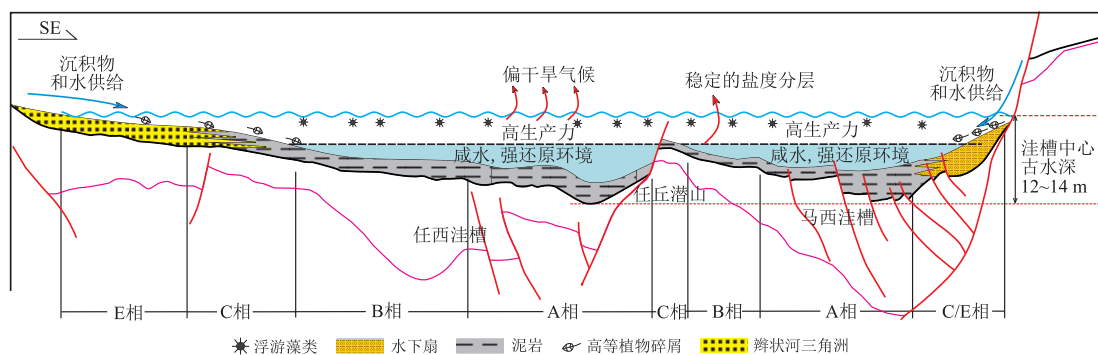


图 11 饶阳凹陷沙一下亚段优质烃源岩发育模式

Fig.11 Development model of high-quality source rocks of the lower submember of Sha1 in Raoyang sag

种组合,即冲积—湖泊相组合、波动性深湖相组合及蒸发相组合,认为三种不同的相组合反映了不同的湖泊类型,并提出了主要的控制因素为构造沉降控制的容纳空间变化和气候变化控制的水及沉积物供给.在此基础上,很多学者通过对一系列现代湖泊和古湖泊沉积物的对比研究,把主控因素集中在有机质的生产力和保存条件上,总结出了不同类型的烃源岩发育模式,比如湿润气候下的淡水湖盆、干旱气候下的咸水湖盆和大型深水缺氧湖盆等(Demaison and Moore, 1980; Kirkland and Evans, 1981; Hao *et al.*, 2011; 刁帆等, 2014).而不同的盆地,气候条件和构造演化也有差异,固定的烃源岩发育模式不可能适用于所有湖盆.饶阳凹陷沙一下亚段高有机碳含量、高氢指数的优质烃源岩主要集中发育在湖侵体系域,本文以过任西和马西 2 个重点洼槽的主干剖面为例,阐述该套优质烃源岩的发育模式.

饶阳凹陷的沙一下亚段湖侵体系域沉积期处于断陷湖盆的第二个扩张期,也是饶阳凹陷最大的一次成湖期,继承了沙二段的干旱炎热气候并向温暖潮湿气候转变的过渡时期.剖面横穿任西洼槽北部和马西洼槽中部 2 个沉降中心,任丘潜山将两洼槽隔开,由于主要物源供给来自蠡县斜坡西南方向,所以任西洼槽西面的斜坡带物源供给较小,任西洼槽内受物源影响不大;而此时期任丘潜山在湖面下接受沉积,在物源供给方面贡献也不大,对马西洼槽内构成影响的仅是来自马西断层附近的水下扇沉积.湖泊水体的浪基面深度约为 7.5 m,洼槽内部湖水深度为 8~14 m,斜坡带水深较浅普遍低于 6.0 m.湖侵体系域沉积期湖泊表层水体初始生产力较高,而在偏干旱气候条件下,蒸发作用对水体盐度增加有一定影响,古盐度参数如 B/Ga、Sr/Ba 等都指示了沙一下亚段湖侵体系域形成于咸水环境,使得湖

泊水体有了稳定的盐度分层,形成了强还原环境,洼槽内部的氧化还原敏感参数也证实了这一点,显示湖泊中心区域底层水普遍具有稳定的强还原条件.而参考沉积有机相的划分标准(郝芳等, 1994),洼槽内部基本达到有机相 B 的标准,洼槽中心半深湖—深湖区域甚至达到了有机相 A 的标准;而蠡县斜坡中下部浅湖区域有机碳含量和 HI 有所降低,有机质保存条件变差,属于有机相 C 的标准;蠡县斜坡上部靠近物源的位置,烃源岩质量明显下降,多发育有机相 E,而东部靠近马西断裂处,由于水下扇的干扰,砂质含量较高,不具备良好的保存条件,烃源岩的有机碳含量也较低,属于有机相 C 和有机相 E 混合带(图 11).综上所述,沙一下亚段优质烃源岩形成于咸水,具有稳定水体分层的强还原沉积环境和较高湖泊初始生产力的发育模式.而反观沙一上亚段,湖侵明显减弱,湖泊水体深度变浅,沉积物容纳空间迅速减小;气候过渡到温暖湿润气候,水体酸碱性变化很快,成为淡水环境,水体盐度分层消失,难以形成稳定的还原环境,所以沙一上亚段并不发育优质烃源岩.

## 6 结论

(1) 饶阳凹陷沙一下亚段沉积时期处于断坳扩展期,湖侵速度快、面积广,容纳空间迅速增加,古水深较深区域受沉降中心控制多分布在任西、马西、河间和留西断层下降盘附近,最深处达到 12~14 m;主物源来自蠡县斜坡带的西南部,多以辫状河三角洲为主,次物源为东部大型断层附近的水下扇沉积;气候属于干热环境向温湿环境转变的过渡气候,即沙一下亚段沉积早期仍有偏干旱气候的特征但到了晚期逐渐转变为温湿气候,所以沙一下亚段沉积期

早期水体古盐度很高,有咸水环境的特征。

(2)沙一下亚段湖侵体系域时期湖泊的古生产力较高,藻类较为富集;湖泊底层水体由于高盐度产生盐跃层,从而形成了稳定的强还原环境,具备了良好的有机质保存条件,形成了湖域广、水体盐度高、古生产力高且保存条件优越的优质烃源岩发育模式。

致谢:两位匿名审稿专家对文章提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢!

## References

- Cai, G. Q., Guo, F., Liu, X. T., et al., 2009. Carbon and Oxygen Isotope Characteristics and Palaeoenvironmental Implications of Lacustrine Carbonate Rocks from the Shahejie Formation in the Dongying Sag. *Earth and Environment*, 37(4): 347–354 (in Chinese with English abstract).
- Cao, K., Li, X. H., Wang, C. S., 2008. The Cretaceous Clay Minerals and Paleoclimate in Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 115–123 (in Chinese with English abstract).
- Carroll, A. R., Bohacs, K. M., 2001. Lake-Type Controls on Petroleum Source Rock Potential in Nonmarine Basins. *AAPG Bulletin*, 85: 1033–1053. doi: 10.1306/8626ca5f-173b-11d7-8645000102c1865d
- Chen, H., Xie, X. N., Li, H. J., et al., 2010. Evaluation of the Permian Marine Hydrocarbon Source Rocks at Shangsi Section in Sichuan Province Using Multi-Proxies of Paleoproductivity and Paleoredox. *Journal of Palaeogeography*, 12(3): 324–333 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W., Zhang, Y. T., Shi, S., et al., 2013. The East-West Zonal Distribution of Gymnosperm Floras in China and Relationship with the Main Climatic Factors. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 52(5): 130–139 (in Chinese with English abstract).
- Crusius, J., Calvert, S., Pedersen, T., et al., 1996. Rhenium and Molybdenum Enrichments in Sediments as Indicators of Oxidic, Suboxic and Sulfidic Conditions of Deposition. *Earth and Planetary Science Letters*, 145(1–4): 65–78. doi: 10.1016/s0012-821x(96)00204-x
- Cui, Y., Gong, E. P., Wang, T. H., et al., 2015. Palynomorph Assemblages and Paleoclimate Records from the Zhuanchengzi Bed of the Yixian Formation, Western Liaoning Province, China. *Science in China (Series D)*, 45(8): 1138–1152 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Z. Q., Li, W. H., Li, L., et al., 2005. Sedimentary Facies and Subtle Petroleum Reservoir of the Member 2 and Lower Submember of Member 1 of Shahejie Formation of Paleogene on Lixian Slope of Raoyang Sag, Central Hebei Province. *Journal of Palaeogeography*, 7(3): 373–381 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Diao, F., Zou, H. Y., Hao, F., et al., 2014. Characteristics and Depositional Models of Source Rocks in Langgu Sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 35(3): 326–335 (in Chinese with English abstract).
- Ding, X. J., Liu, G. D., Huang, Z. L., et al., 2016. Controlling Function of Organic Matter Supply and Preservation on Formation of Source Rocks. *Earth Science*, 41(5): 832–842 (in Chinese with English abstract).
- Fry, B., Sherr, E. B., 1989.  $\delta^{13}\text{C}$  Measurements as Indicators of Carbon Flow in Marine and Freshwater Ecosystems. In: Rundel, P. W., Ehleringer, J. R., Nagy, K. A., eds., *Stable Isotopes in Ecological Research*. Springer New York. doi: 10.1007/978-1-4612-3498-2\_12
- Gonçalves, F. T. T., 2002. Organic and Isotope Geochemistry of the Early Cretaceous Rift Sequence in the Camamu Basin, Brazil: Paleolimnological Inferences and Source Rock Models. *Organic Geochemistry*, 33(1): 67–80. doi: 10.1016/s0146-6380(01)00128-0
- Hao, F., Chen, J. Y., Sun, Y. C., et al., 1994. Organic Facies Studies and Their Use in Sedimentary Basin Analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(4): 77–86 (in Chinese with English abstract).
- 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.orggeochem.2011.01.010
- Harris, N. B., Freeman, K. H., Pancost, R. D., et al., 2004. The Character and Origin of Lacustrine Source Rocks in the Lower Cretaceous Synrift Section, Congo Basin, West Africa. *AAPG Bulletin*, 88(8): 1163–1184. doi: 10.1306/02260403069
- 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.. *Chemical Geology*, 99(1–3): 65–82. doi: 10.1016/0009-2541(92)90031-y
- Ji, Y. L., Zhao, X. Z., Shan, J. F., et al., 2009. Depositional Architecture of Paleogene System Tectonic Sequences and Evolution of Sedimentary System in Jizhong Depres-

- sion. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(1): 48—56 (in Chinese with English abstract).
- Jin, T., Gao, R. S., Gao, C. X., et al., 2010. Suggestion of Exploration Prospect in Raoyang Sag of Jizhong Depression from the Logging Evaluation Results of Source Rock. *Natural Gas Geoscience*, 21(3): 406—412 (in Chinese with English abstract).
- Kirkland, D. W., Evans, R., 1981. Source-Rock Potential of Evaporitic Environment. *AAPG Bulletin*, 65(2): 733. doi: 10.1306/2f91979c-16ce-11d7-8645000102c1865d
- Kump, L. R., Arthur, M. A., 1999. Interpreting Carbon-Isotope Excursions: Carbonates and Organic Matter. *Chemical Geology*, 161(1—3): 181—198. doi: 10.1016/s0009-2541(99)00086-8
- Laurent, D., de Kaenel, E. D., Spangenberg, J. E., et al., 2015. A Sedimentological Model of Organic-Matter Preservation and Phosphogenesis in the Miocene Monterey Formation at Haskells Beach, Goleta (Central California). *Sedimentary Geology*, 326: 16—32. doi: 10.1016/j.sedgeo.2015.06.008
- Leng, M. J., Marshall, J. D., 2004. Palaeoclimate Interpretation of Stable Isotope Data from Lake Sediment Archives. *Quaternary Science Reviews*, 23(7—8): 811—831. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.06.012
- Li, C. F., Xiao, J. F., 1988. The Application of Trace Element to the Study on Paleosalinities in Shahejie Formation of Dongying Basin Shengli Oilfield. *Acta Sedimentologica Sinica*, 6(4): 100—107 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. J., Zheng, D. S., Jiang, Z. X., et al., 2005. Water Depth of Palaeo-Lacustrine Basin Recovered by Dominance Diversity of Ostracoda: An Example from Sedimentary Period of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 7(3): 399—404 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. Z., Hu, B., Deng, T. L., et al., 2008. Petroleum Geological Significance of Microelements V and Ni. *Natural Gas Geoscience*, 19(1): 13—17 (in Chinese with English abstract).
- Liang, D. G., Zeng, X. Z., Wang, X. P., et al., 2001. Hydrocarbon Generation in Jizhong Depression. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, C. L., Zhao, Q. H., Wang, P. X., 2001. Correlation between Carbon and Oxygen Isotopic Ratios of Lacustrine Carbonates and Types of Oil-Producing Paleolakes. *Geochimica*, 30(4): 363—367 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. Z., Tao, M. X., Chen, F. Y., 1996. The Red Bed Sporopollen Assemblages Geological Age and Ecological Environment from Siwangou-Tandonggou of Yaojie, Gansu. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(1): 93—102 (in Chinese with English abstract).
- Ning, W. K., Fu, L., Huo, Q. L., 2010. Productivity of Paleosongliao Lake during the Late Cretaceous in Well Songke-1, Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(5): 1020—1026, 1034 (in Chinese with English abstract).
- Piper, D. Z., 1994. Seawater as the Source of Minor Elements in Black Shales, Phosphorites and Other Sedimentary Rocks. *Chemical Geology*, 114(1—2): 95—114. doi: 10.1016/0009-2541(94)90044-2
- Qian, H. J., Lu, X. C., Zhang, X. F., et al., 2009. Spatial Paleosalinity Distribution and Element Geochemistry of Argillaceous Source Rocks in the Upper Part of 4th Member of Tertiary Shahejie Formation in Dongying Sag. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(2): 161—168 (in Chinese with English abstract).
- Schindler, D. W., 1977. Evolution of Phosphorus Limitation in Lakes. *Science*, 195(4275): 260—262. doi: 10.1126/science.195.4275.260
- Shen, J., Shi, Z. Y., Feng, Q. L., 2011. Review on Geochemical Proxies in Paleo-Productivity Studies. *Geological Science and Technology Information*, 30(2): 69—77 (in Chinese with English abstract).
- Mann, U., Stein, R., 1997. Organic Facies Variations, Source Rock Potential, and Sea Level Changes in Cretaceous Black Shales of the Quebrada Ocal, Upper Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 81(4): 556—576. doi: 10.1306/522b43cf-1727-11d7-8645000102c1865d
- Su, X., Ding, X., Jiang, Z. X., et al., 2012. Using of Multi-Microfossil Proxies for Reconstructing Quantitative Paleowater Depth during the Deposit Period of LST of Es<sub>4</sub> in Dongying Depression. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 188—199 (in Chinese with English abstract).
- Sundby, B., Martinez, P., Gobeil, C., 2004. Comparative Geochemistry of Cadmium, Rhenium, Uranium, and Molybdenum in Continental Margin Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(11): 2485—2493. doi: 10.1016/j.gca.2003.08.011
- Talbot, M. R., 1990. A Review of the Palaeohydrological Interpretation of Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in Primary Lacustrine Carbonates. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 80(4): 261—279. doi: 10.1016/0168-9622(90)90009-2
- Tang, L. Y., Mao, L. M., Lü, X. M., et al., 2013. Palaeoecological and Palaeoenvironmental Significance of Some Important Spores and Micro-Algae in Quaternary Depos-



- its. *Chinese Science Bulletin*, 58(20): 1969—1983 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. J., Jia, J. Y., Xie, X. D., 2002. Environment Significance of Clay Minerals. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 337—344 (in Chinese with English abstract).
- Tao, M. H., Wang, K. F., Zheng, G. G., et al., 2001. Early Tertiary Sporopollen Assemblages from Jizhong Depression and Their Stratigraphic Implication. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 18(3): 274—292 (in Chinese with English abstract).
- Tenger, Liu, W. H., Xu, Y. C., et al., 2005. Study on Relation between Inorganic Parameters in Marine Deposits and Developmental Environment of Hydrocarbon Source Rocks: Taking Ordos Basin as an Example. *Oil & Gas Geology*, 26(4): 411—421 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Ye, J. R., Lei, C., et al., 2016. Development Controlling Factors and Forming Model for Source Rock of Yuefufeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag, the East China Sea Continental Shelf Basin. *Earth Sciences*, 41(9): 1561—1571 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. L., Hong, H. L., Yin, K., et al., 2010. Clay Mineralogy and Its Paleoclimatic Indicator of the Miocene Sediments of Xunhua Basin. *Earth Science*, 35(5): 828—838 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Ma, S. P., Luo, Q., et al., 2009. Recognition and Resource Potential of Source Rocks in Raoyang Sag of Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 51—55 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. J., Huang, X. Z., Tuo, J. C., et al., 1997. Evolutional Characteristics and Their Paleoclimate Significance of Trace Elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(1): 66—71 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Y., Guo, W. Y., Zhang, G. D., 1979. Application of some Geochemical Indicators in Determining of Sedimentary Environment of the Funing Group (Paleogene), Jin-Hu Depression, Kiangsu Province. *Journal of Tongji University*, (2): 51—60 (in Chinese with English abstract).
- Wen, H. G., Zheng, R. C., Tang, F., et al., 2008. Reconstruction and Analysis of Paleosalinity and Paleoenvironment of the Chang 6 Member in the Gengwan Region, Ordos Basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1): 114—120 (in Chinese with English abstract).
- Yi, H. S., Shi, Z. Q., Zhu, Y. T., et al., 2009. Reconstruction of Paleo-Salinity and Lake-Level Fluctuation History by Using Boron Concentration in Lacustrine Mudstones. *Journal of Lake Sciences*, 21(1): 77—83 (in Chinese with English abstract).
- Yi, S. W., Jiang, Y. L., Fan, B. D., et al., 2010. Neogene Petroleum Source and Characteristic of Paleogene Hydrocarbon Source Rock in the Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 32(5): 475—479 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. C., Cui, Z. Q., Han, C. Y., et al., 2001. Evolution of Palaeogene Lacustrine Basins and Oil and Gas Potentials in the Central Hebei Depression. *Journal of Palaeogeography*, 3(1): 45—54 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. C., Cui, Z. Q., Jiang, S. Q., et al., 2011. Deposition, Reservoir and Hydrocarbon of Palaeogene in Jizhong Depression. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, W. C., Yang, D. X., Chen, Y. J., et al., 2008. Sedimentary Structural Characteristics and Hydrocarbon Distributed Rules of Jizhong Depression. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1103—1112 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., 2003. Geochemical Characteristics of Two Sets of Excellent Source Rocks in Dongying Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 506—512 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 蔡观强, 郭锋, 刘显太, 等, 2009. 东营凹陷沙河街组沉积岩碳氧同位素组成的古环境记录. *地球与环境*, 37(4): 347—354.
- 曹珂, 李祥辉, 王成善, 2008. 四川盆地白垩系粘土矿物特征及古气候探讨. *地质学报*, 82(1): 115—123.
- 陈慧, 解习农, 李红敬, 等, 2010. 利用古氧相和古生产力替代指标评价四川上寺剖面二叠系海相烃源岩. *古地理学报*, 12(3): 324—333.
- 陈雯, 张裕婷, 施诗, 等, 2013. 中国裸子植物的东西地带性分布及其与气候因子的相关性. *中山大学学报(自然科学版)*, 52(5): 130—139.
- 崔莹, 巩恩普, 王铁晖, 等, 2015. 辽西义县组砖城子层孢粉组合时代及古气候记录. *中国科学(D辑)*, 45(8): 1138—1152.
- 崔周旗, 李文厚, 李莉, 等, 2005. 冀中饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙河街组沙二段及沙一段下亚段沉积相与隐蔽油藏. *古地理学报*, 7(3): 373—381.
- 刁帆, 邹华耀, 郝芳, 等, 2014. 渤海湾盆地廊固凹陷烃源岩特征及其发育模式. *石油与天然气地质*, 35(3): 326—335.
- 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.
- 郝芳, 陈建渝, 孙永传, 等, 1994. 有机相研究及其在盆地分析中的应用. *沉积学报*, 12(4): 77—86.

- 纪友亮,赵贤正,单敬福,等,2009.冀中坳陷古近系沉积层序特征及其沉积体系的演化.沉积学报,27(1): 48-56.
- 金涛,高日胜,高彩霞,等,2010.从烃源岩测井评价结果看冀中坳陷饶阳凹陷勘探前景.天然气地球科学,21(3): 406-412.
- 梁刚刚,曾宪章,王雪平,等,2001.冀中坳陷油气的生成.北京:石油工业出版社.
- 李成凤,肖继凤,1988.用微量元素研究胜利油田东营盆地沙河街组的古盐度.沉积学报,6(4): 100-107.
- 李广之,胡斌,邓天龙,等,2008.微量元素 V 和 Ni 的油气地质意义.天然气地球科学,19(1): 13-17.
- 李守军,郑德顺,姜在兴,等,2005.用介形类优势分异度恢复古湖盆的水深——以山东东营凹陷古近系沙河街组沙三段湖盆为例.古地理学报,7(3): 399-404.
- 刘传联,赵泉鸿,汪品先,2001.湖相碳酸盐氧碳同位素的相关性与生油古湖泊类型.地球化学,30(4): 363-367.
- 马玉贞,陶明信,陈发源,1996.甘肃窑街寺湾沟一炭洞沟红层孢粉组合、地质时代与生态环境.沉积学报,14(1): 93-102.
- 宁维坤,付丽,霍秋立,2010.松辽盆地松科 1 井晚白垩世沉积时期古湖泊生产力.吉林大学学报(地球科学版),40(5): 1020-1026, 1034.
- 钱焕菊,陆现彩,张雪芬,等,2009.东营凹陷沙四段上部泥质烃源岩元素地球化学及其古盐度的空间差异性.岩石矿物学杂志,28(2): 161-168.
- 沈俊,施张燕,冯庆来,2011.古海洋生产力地球化学指标的研究.地质科技情报,30(2): 69-77.
- 苏新,丁旋,姜在兴,等,2012.用微体古生物定量水深法对东营凹陷沙四上亚段沉积早期湖泊水深再造.地学前缘,19(1): 188-199.
- 唐领余,毛礼米,吕新苗,等,2013.第四纪沉积物中重要蕨类孢子和微体藻类的古生态环境指示意义.科学通报,58(20): 1969-1983.
- 汤艳杰,贾建业,谢先德,2002.粘土矿物的环境意义.地学前缘,9(2): 337-344.
- 陶明华,王开发,郑国光,等,2001.冀中坳陷早第三纪孢粉组合及地质时代讨论.微体古生物学报,18(3): 274-292.
- 腾格尔,刘文汇,徐永昌,等,2005.海相地层无机参数与烃源岩发育环境的相关研究——以鄂尔多斯盆地为例.石油与天然气地质,26(4): 411-421.
- 田杨,叶加仁,雷闯,等,2016.东海陆架盆地丽水—椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育控制因素及形成模式.地球科学,41(9): 1561-1571.
- 王粉丽,洪汉烈,殷科,等,2010.循化盆地中新世沉积物粘土矿物的特征及其古气候指示.地球科学,35(5): 828-838.
- 王建,马顺平,罗强,等,2009.渤海湾盆地饶阳凹陷烃源岩再认识与资源潜力分析.石油学报,30(1): 51-55.
- 王随继,黄杏珍,妥进才,等,1997.泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义.沉积学报,15(1): 66-71.
- 王益友,郭文莹,张国栋,1979.几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用.同济大学学报,(2): 51-60.
- 文华国,郑荣才,唐飞,等,2008.鄂尔多斯盆地耿湾地区长 6 段古盐度恢复与古环境分析.矿物岩石,28(1): 114-120.
- 伊海生,时志强,朱迎堂,等,2009.利用泥质岩硼含量重建过去湖泊古盐度和湖面变化历史.湖泊科学,21(1): 77-83.
- 易士威,蒋有录,范炳达,等,2010.渤海湾盆地饶阳凹陷古近系源岩特征与新近系油气来源.石油实验地质,32(5): 475-479.
- 张文朝,崔周旗,韩春元,等,2001.冀中坳陷老第三纪湖盆演化与油气.古地理学报,3(1): 45-54.
- 张文朝,崔周旗,降栓奇,等,2011.冀中坳陷古近系沉积、储层与油气.北京:石油工业出版社.
- 张文朝,杨德相,陈彦均,等,2008.冀中坳陷古近系沉积构造特征与油气分布规律.地质学报,82(8): 1103-1112.
- 朱光有,金强,2003.东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究.沉积学报,21(3): 506-512.