

doi: 10.12029/gc20200118

白静, 徐兴友, 陈珊, 刘卫彬, 刘畅, 张昌盛. 2020. 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段沉积相特征与古环境恢复——以吉页油 1 井为例[J]. 中国地质, 47(1): 220–235.

Bai Jing, Xu Xingyou, Chen Shan, Liu Weibin, Liu Chang, Zhang Changsheng. 2020. Sedimentary characteristics and paleo-environment restoration of the first member of Qingshankou Formation in Qian'an area, Changling sag, Songliao Basin: A case study of Jiyeou 1 Well[J]. Geology in China, 47(1):220–235(in Chinese with English abstract).

松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段沉积相特征与古环境恢复——以吉页油 1 井为例

白静^{1,2}, 徐兴友¹, 陈珊¹, 刘卫彬¹, 刘畅¹, 张昌盛³

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国石油天然气股份公司石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油天然气股份公司吉林油田分公司勘探开发研究院, 吉林 松原 138000)

摘要: 松辽盆地上白垩统青山口组一段富有机质泥页岩发育, 层系内部滞留烃富集, 具有可观的页岩油资源潜力。沉积古环境控制了泥页岩的分布、有机质发育特征及滞留烃富集程度。因此, 恢复青一段泥页岩沉积古环境, 明确沉积特征, 对揭示青一段泥页岩中页岩油富集规律具有重要意义。本文基于长岭凹陷乾安地区青一段取心井——吉页油 1 井的岩心观察及测井曲线组合特征, 划分了青一段泥页岩沉积微相, 应用自然伽马能谱测井、岩性扫描测井数据, 选取环境评价参数, 对青一段沉积古环境及其演化过程进行了恢复, 分析了古环境参数与泥页岩中滞留烃含量的相关性。结果表明: 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青一段泥页岩是在三角洲外前缘—浅湖—半深湖—深湖沉积体系中形成的, 主要发育半深湖—深湖泥、浅湖泥沉积微相。青一段泥页岩沉积古环境经历了水深由浅变深, 气候由半潮湿到潮湿, 水体由淡水—微咸水, 还原性由弱到强, 水动力条件由中等到弱的演化, 在青一段地层中存在明显的沉积环境变化界面, 上下层段沉积环境不同。青一段泥页岩中滞留烃含量主要受沉积古气候、古氧化还原条件控制, 潮湿气候还原条件下形成的泥页岩有机质类型好, 以腐泥质为主, 生油能力强, 滞留烃含量高。

关键词: 页岩油; 长岭凹陷; 青一段; 泥页岩; 沉积相; 古环境恢复; 油气勘查工程; 松辽盆地

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)01-0220-25

Sedimentary characteristics and paleo-environment restoration of the first member of Qingshankou Formation in Qian'an area, Changling sag, Songliao Basin: A case study of Jiyeou 1 Well

BAI Jing^{1,2}, XU Xingyou¹, CHEN Shan¹, LIU Weibin¹, LIU Chang¹, ZHANG Changsheng³

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC Jilin Branch, Songyuan 13800, Jilin, China)

Abstract: The first member of Upper Cretaceous Qingshankou Formation (K_2qn_1) in Songliao Basin has considerable shale oil

收稿日期: 2018-08-17; 改回日期: 2019-01-09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160202、DD20190115)资助。

作者简介: 白静, 女, 1989 年生, 博士生, 工程师, 主要从事非常规油气资源分布规律与资源潜力评价研究; E-mail: baijing311@sina.com。

通讯作者: 徐兴友, 男, 1968 年生, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为油气成藏机理与评价研究; E-mail: 925932678@qq.com。

resource potential because of the wide development of dark mudstone and high residual hydrocarbons. The paleo-sedimentary environment directly controls the dark mudstone distribution, organic matter development, and residual hydrocarbon content. Therefore, analyzing the sedimentary features and restoring the paleo-environment of K_2qn_1 are of great significance for revealing the regularity of shale oil enrichment. Based on the core observation and logging data of well Jishanyou 1 in Qian'an area of Changling Sag, the authors analyzed the sedimentary characteristics of K_2qn_1 . According to the element data obtained by natural gamma ray spectrometry logging and lithologic scanning logging, the evolution of the paleo-environment of K_2qn_1 was restored by using suitable parameters. Furthermore, the correlation of paleo-environment parameters and residual hydrocarbon content in mudstone shale was also studied. The results show that the dark mudstone of K_2qn_1 in the study area was developed in the outer Delta front to shallow lake-semi-deep lake sedimentary system. The palaeo-environment of K_2qn_1 underwent a change of water depth from shallow to deep, climate from semi-humid to humid, salinity from fresh to brackish, reduction conditions from weak to strong, and sedimentary hydrodynamics from moderate to weak. There is an obvious interface of sedimentary environment within K_2qn_1 . The content of residual hydrocarbon in the mudstone is mainly controlled by paleo-climate and paleo-reduction conditions. The oil-bearing organic matter was formed in a wet and reducing environment, with strong oil-generating capability and high content of residual hydrocarbon.

Key words: shale oil; Changling Sag; Qingshankou Formation; mudstone; sedimentary facies; paleo-environment restoration; oil-gas exploration engineering; Songliao Basin

About the first author: BAI Jing, female, born in 1989, doctor candidate, engineer, mainly engages in geological survey and study of unconventional petroleum resource, especially shale oil resources; E-mail: baijing311@sina.com.

About the corresponding author: XU Xingyou, male, born in 1968, doctor, professor, mainly engages in oil and gas accumulation mechanism study and evaluation; E-mail: 925932678@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. DD20160202, No. DD20190115).

1 引言

松辽盆地上白垩统青山口组一段泥页岩分布广泛,有机质丰度高,母质类型好,成熟程度高,是松辽盆地最主要的烃源岩(高瑞祺,1997;张君峰,2018)。该套烃源岩中滞留烃含量高,油气显示丰富,具备了良好的页岩油勘探潜力(柳波,2014;黄文彪,2014),但滞留烃的富集规律尚不明确,有利分布区预测难度大,制约了页岩油勘探。泥页岩的岩石学特征及有机质富集程度受古气候、古水深、古氧化还原条件及古水体盐度等古沉积环境控制,泥页岩内部滞留烃的含量受岩性特征及有机质富集程度控制,进而指示滞留烃的含量与古环境因素具有一定的相关性(卢双舫等,2008;张小龙,2013;罗曦,2015)。因此,查明青一段泥页岩形成时期的沉积体系类型及古环境特征,对查明泥页岩中滞留烃富集层段及其宏观分布特征具有重要的指导意义。

前人针对长岭凹陷青一段烃源岩有机地球化学特征及生烃潜力等进行了详尽的研究(霍秋立,2012;冯子辉等,2015),尤其是近年来,由于页岩油、页岩气等非常规资源的勘探热潮,部分学者针

对青一段泥页岩储层特征及页岩油形成条件进行了分析(卢双舫等,2012;黄振凯等,2013;刘招君等,2014;李占东等,2015;白静等,2017)。但是从宏观角度详细分析青一段沉积相类型及其古沉积环境演化过程,尤其是沉积古环境对滞留烃富集的影响等方面的研究鲜有开展。因此,本文应用青一段系统取心井-吉页油1井的岩心及测井资料对青一段沉积相进行了划分,确定了研究区青一段泥页岩发育的沉积体系;基于该井自然伽马能谱测井、岩性扫描测井(Litho Scanner)方法测得的元素含量数据,通过元素及元素组合的变化特征建立了青一段地球化学剖面,依据环境指示参数,对长岭凹陷乾安地区青一段泥页岩形成的沉积环境及其演化过程进行了恢复;结合有机地化分析测试数据,分析了泥页岩中滞留烃的含量与反映沉积环境的各参数的相关性,明确了控制泥页岩滞留烃富集程度的沉积环境因素,为研究页岩油富集规律及有利区评价预测提供了可靠依据。

2 研究区概况

长岭凹陷位于松辽盆地中央坳陷南部,凹陷整体呈大型宽缓凹陷,面积约6500 km²,向北与古龙凹

陷相接,西北和东南分别被红岗阶地、华字井阶地所夹持,向东过渡到扶新隆起带。长岭凹陷内部发育黑帝庙、乾安两个次级洼陷。研究区乾安地区位于长岭凹陷乾安次洼东北部(图1)。青山口组沉积期是该区主要的湖盆扩张期,青一段沉积一套暗色泥页岩,厚度为50~100 m,是该区主力生油岩,主要沉积相带为三角洲外前缘-半深湖-深湖相。吉页油1井位于长岭凹陷大情字井构造带东北部,为该区第一口页岩油参数井,获取了青一段完整岩心,在青一段泥页岩中见到了良好的页岩油显示。

3 样品与数据

本文应用的铀(U)、钍(Th)、钾(K)元素数据来源于自然伽马能谱测井,取样间距为0.125 m,应用的Fe、Al、Ca、Mg、Ti等元素数据来源于斯伦贝谢公司的岩性扫描测井(LithoScanner),取样间距为0.125 m。LithoScanner高精度岩性扫描工具可以同时在地层中元素的俘获谱和非弹谱进行测量分析,从而精确测定地层中主要元素的含量。LithoScanner高精度岩性扫描可以测量Al、Ba、C、

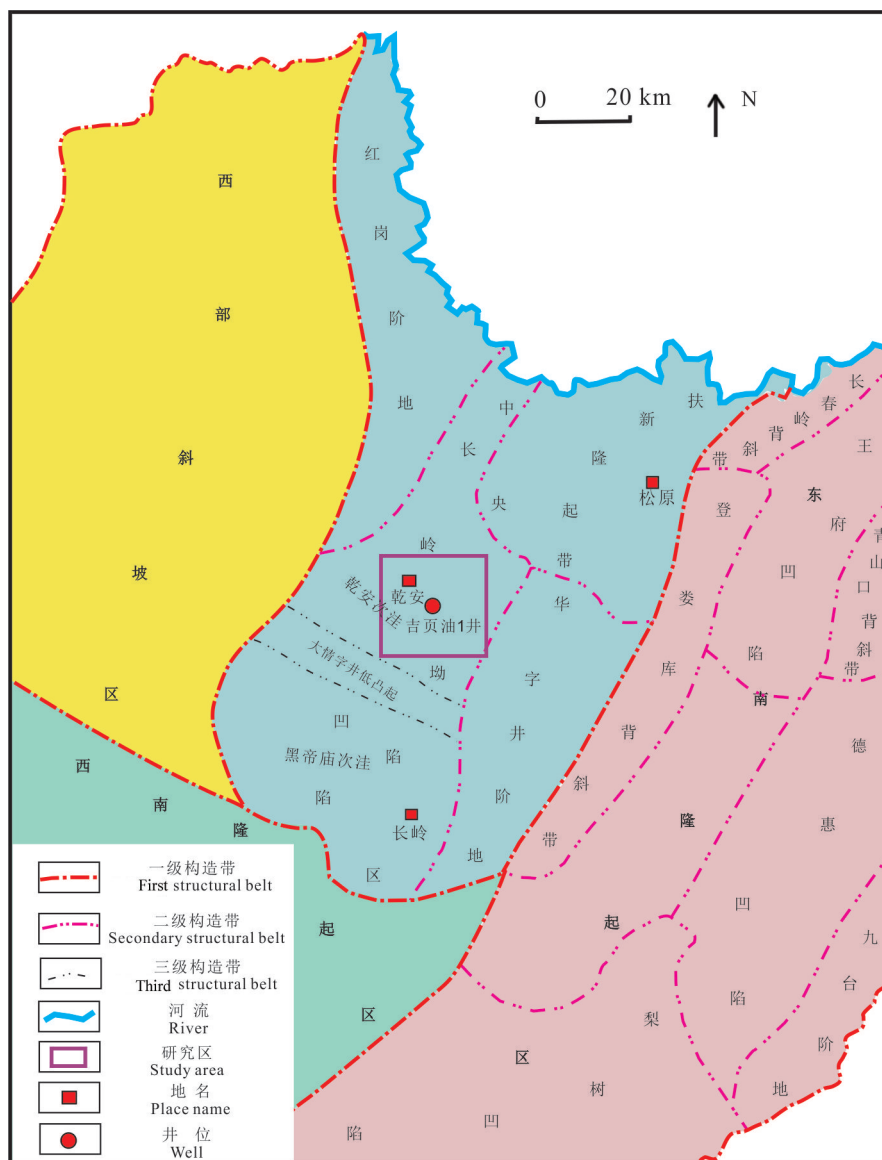


图1 研究区构造单元划分图

Fig.1 Structural map of southern Songliao Basin

Ca、Cl、Cu、Fe、Gd、H、K、Mg、Mn、Na、Ni、O、S、Si、Ti 等元素含量。岩心样品有机碳测试采用仪器为美国 LECO 公司的 CS-200 碳硫分析仪,依据 GB/T19145-2003《沉积岩中总有机碳的测定》获得,岩心样品热解数据采用 Rock-Eval 仪器,依据 GB/T18602-2012《岩石热解分析方法》获得,以上测试均由长江大学地球化学重点实验室完成。

4 青一段沉积相特征

通过对吉页油 1 井及邻井岩心观察分析表明,乾安地区青一段地层主要发育泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩等 4 种岩性,同时还有少量介形虫层,整体来看,青一段主要以泥岩为主。吉页油 1 井青一段泥岩含量为 56.64%,粉砂质泥岩含量为 21.44%,泥质粉砂岩和粉砂岩含量为 11.92%。青一段地层在 2453 m 附近显示明显的岩性组合变化界面,根据这一岩性组合变化界面可将吉页油 1 井青一段划分为两个层组—上层组(2416~2453 m)、下层组(2453~2525 m)。吉页油 1 井上层组地层岩性为泥岩(相对含量为 78.27%)、泥质粉砂岩(相对含量为 21.73%),不含粉砂岩,颜色主要深灰色、灰黑色和黑色,反映为潮湿环境深水还原条件下沉积的产物;下层组地层岩性为泥岩(相对含量为 45.31%)、粉砂质泥岩(相对含量为 36.53%)、泥质粉砂岩(相对含量为 5.86%)和粉砂岩(相对含量为 12.31%)的组合,泥质粉砂岩和粉砂岩的含量较上层组显著增加,颜色主要为浅灰色、灰色和灰褐色,

粉砂岩分选好,磨圆度较好,泥质含量偏高(图 2),表明在青一段下层组沉积时期,水体较浅,且略动荡,局部出现砂泥交互沉积。可见,青一段地层沉积经历了沉积水体不断加深的过程,在岩性组合变化界面之上沉积水体较深且稳定,界面之下水体较浅且动荡。

通过对吉页油 1 井及邻井岩心的详细观察,结合测井相的分析,研究区青一段主要识别出半深湖-深湖、浅湖和三角洲外前缘三类沉积亚相,可细分为三角洲外前缘水下分流河道、分流间湾、席状砂、河口坝、浅湖泥及半深湖-深湖泥五种沉积微相。

4.1 三角洲外前缘

4.1.1 水下分流河道

水下分流河道是三角洲陆上分支河道向下延伸的部分,沉积物以砂质为主,泥质含量很少。研究区青一段三角洲前缘水下分流河道由灰色粉砂岩及少量灰色、深灰色泥岩组成,主要反映水下的沉积环境,单砂层厚度一般 1~3 m,呈现向上变细的正韵律粒序特征。吉页油 1 井水下分流河道分布非常局限,只在青一段中下部发育一个薄层,岩性为灰色粉砂岩,厚度 1.94 m,由于水体能量较低,主要发育水平层理(图 3a),伽马测井曲线形态呈向上变细的齿化钟型状(图 4)。

4.1.2 分流间湾

分流间湾是水下分流河道之间相对低洼的泥质沉积区,水动力较弱,岩性主要为泥岩和泥质粉砂岩,含少量的粉砂岩和细砂。分流间湾微相主要

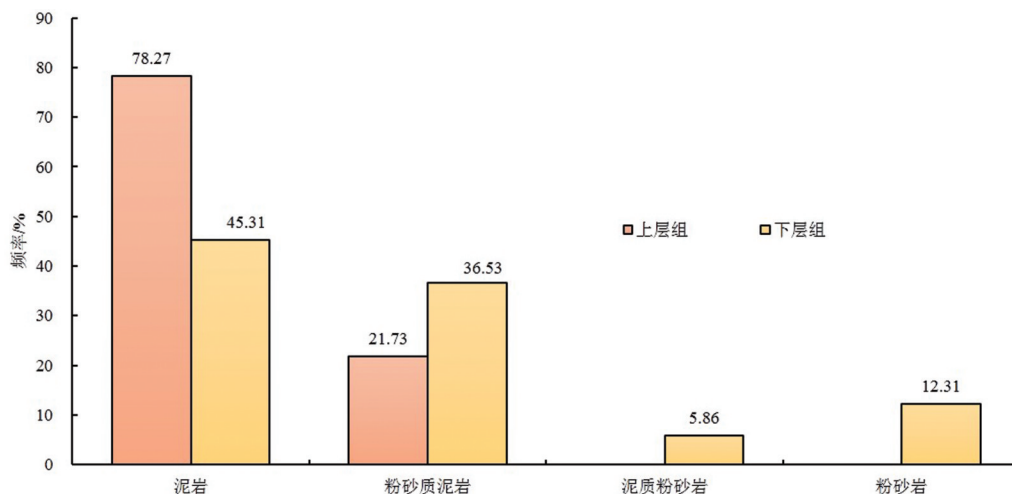


图2 吉页油 1 井青一段岩性分布直方图

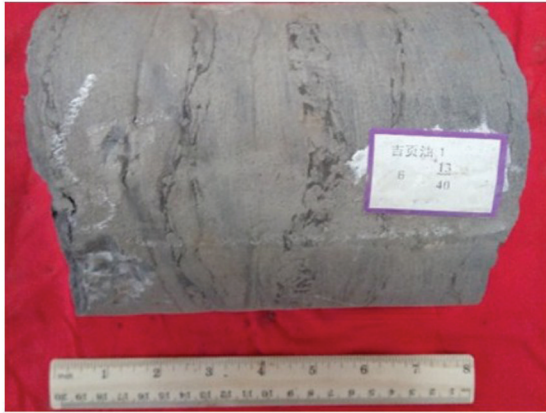
Fig.2 The statistical histogram of lithologic distribution of K₂qm₁ in Well JYY1



(a) 2481.7m, 灰色粉砂岩, 发育平行层理, 水下分流河道微相



(b) 2508.38m, 灰色粉砂岩, 发育块状层理, 河口坝微相



(c) 2470.3m, 灰色粉砂岩, 见泥质条纹, 发育平行层理、透镜状层理, 席状砂微相



(d) 2469.23m, 灰黑色含粉砂质泥岩, 波状-透镜状层理, 分流间湾微相



(e) 2460.2m, 灰黑色泥岩, 整体较纯, 局部发育砂质薄夹层, 发育水平层理 浅湖泥微相



(f) 2442.5m, 灰黑色泥岩, 黄铁矿发育, 层理缝发育, 半深湖-深湖泥微相

图3 吉页油1井青一段不同沉积微相岩心特征

Fig.3 Cores characteristics of different sedimentary micro-facies of K_2qn_1 in Well JYY1

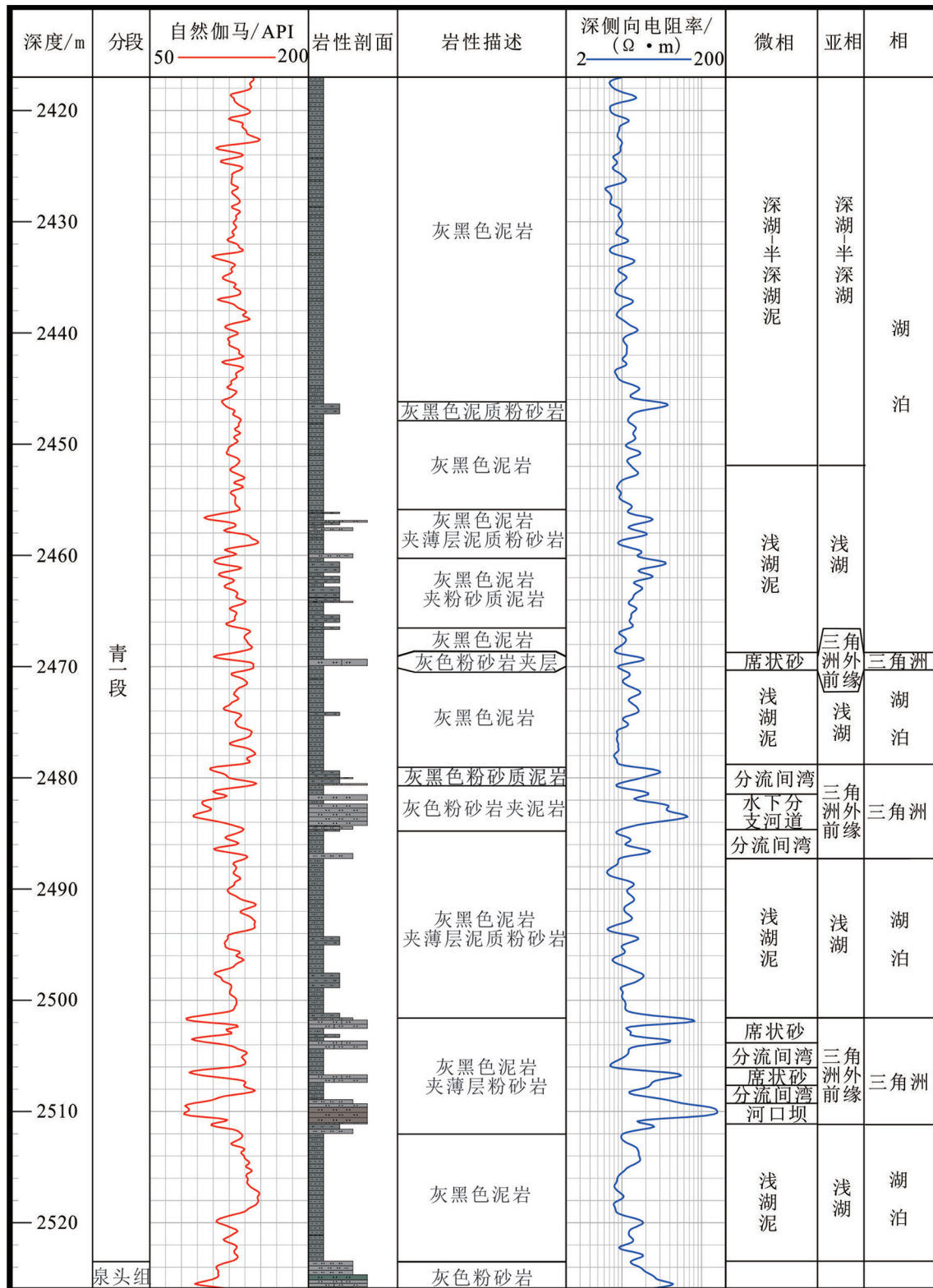


图4 吉页油1井青一段沉积相划分图

Fig.4 The sedimentary facies classification of K₂qn₁ in Well JYY1

发育在吉页油1井青一段下层组地层中,岩性以灰色、灰黑色泥岩、粉砂质泥岩为主,见砂质条纹,砂质条纹厚3~10 cm,不均匀分布,发育水平层理、波状-透镜状层理(图3d),泥岩中可见炭化的植物碎片,伽马测井曲线平缓仅有小幅波动。

4.1.3 河口坝

河口坝位于三角洲前缘水下分流河道的河口前方,由于流速骤减,水流携带的负载物质快速沉降堆积,在河口处形成一系列的沙坝砂体。河口坝沉积微相只在青一段底部发育,岩性组合为下部泥质粉砂岩,粒度向上变粗为粉砂岩,再向上变为泥质粉砂岩,呈现先向上变粗再变细的复合韵律层序,内部发育块状层理、透镜状层理、平行层理(图3b),伽马测井曲线组合形态呈平滑漏斗状。

4.1.4 席状砂

席状砂是河口坝和部分水下分流河道砂体受波浪淘洗和筛选后,沉积物发生侧向迁移,重新沉积于河口沙坝前方或侧翼的薄层状砂体(包括河口沙坝侧翼沉积和远沙坝沉积),呈席状分布于三角洲前缘的前端。吉页油1井中青一段中下部席状砂沉积微相发育,岩性主要为灰色泥质粉砂岩,发育平行层理、透镜状层理,泥质条纹发育(图3c),片状的席状砂与暗色的浅湖-半深湖泥岩互层,顶底多为突变接触,粒度韵律性不明显或略呈反韵律。测井曲线组合以指状形态为特征。

4.2 浅湖-半深湖-深湖相

4.2.1 浅湖泥

浅湖泥是指在浅湖中的泥质沉积,多为深灰色泥岩,偶尔可见夹于暗色泥岩中的砂质透镜体。浅湖泥相在吉页油1井青一段比较发育,尤其是在青一段中下部发育浅湖泥相,岩性为厚层泥岩,泥质较纯,局部见砂质条带,局部见介形虫等化石,发育水平层理层理、波状层理,见黄铁矿,部分层里面见植物碎屑(图3e)。

4.2.2 半深湖-深湖泥

半深湖-深湖泥是指在浪基面以下半深湖-深湖还原环境沉积的泥岩。半深湖-深湖相泥岩主要发育在青一段顶部,岩性为灰黑色厚层泥岩,泥质较纯,局部见砂质条带,发育水平层理及波状层理,黄铁矿发育(图3f)。

综合分析可见,吉页油1井青一段主要发育沉

积相类型为三角洲外前缘席状砂和浅湖泥微相,纵向上可分为两个层组,下层组以浅湖泥,三角洲外前缘支流间湾泥、席状砂为主,上层组以半深湖-深湖泥岩为主,从下到上沉积水体逐渐加深,沉积相由三角洲外前缘过渡到浅湖-半深湖-深湖相(图4)。

5 吉页油1井青一段古沉积环境恢复

古气候、古水体盐度、古氧化还原条件及古水体深度和水体能量直接影响了沉积物中矿物元素的分异,从而造成了不同沉积环境矿物元素分布的差异,为元素地球化学特征恢复古沉积环境提供了依据(Jones et al., 1994; Yan et al., 2015; 袁选俊等, 2015)。基于吉页油1井元素扫描测井及自然伽马能谱测井获得的元素数据,本文建立了青一段连续的地球化学剖面(图5),对沉积时期的古气候、古盐度、古氧化还原条件、古水深及水体能量进行了分析。

5.1 古气候

前人研究认识到,在潮湿气候条件下,沉积岩中Fe、Al、V、Vi、Ba、Zn、Co等元素含量较高;干燥气候条件下由于水分的蒸发,水介质的碱性增强,Na、Ca、Mg、Cu、Sr、Mn被大量析出形成各种盐类沉积在水底,所以它们的含量相对增高,对应为低湖面期,反映的气候则为暖干或干寒期(王良忱和张金亮,1996)。Al/Ti、Mg/Ca可作为判别古气候的有效指标,低Al/Ti值、低Mg/Ca值表示潮湿环境,高Al/Ti值、高Mg/Ca值表示干旱环境(宋明水,2005; Ratcliffe, 2010; 熊小辉,2011)。

吉页油1井青一段Al/Ti值主要分布在2~15,平均值为5.8,Mg/Ca值较低,主要分布在0.5~2.5,平均值0.9,表明研究区青一段地层整体沉积时处于潮湿环境(图5)。从青一段纵向分布来看,由下到上气候潮湿程度逐渐增加,在2453 m出现变化界面(图6),与沉积相组合变化界面一致,上层组(2417~2453 m)Al/Ti、Mg/Ca值低且稳定,Al/Ti值稳定在3.0附近,Mg/Ca值稳定在0.6附近,显示古气候条件为相对稳定的潮湿环境;下层组(2453~2516 m)Al/Ti、Mg/Ca值相对较高且波动明显,Al/Ti总体在4~15波动,偶超过30,平均值7.8,Mg/Ca总体在0.5~2.5波动,偶超过5,平均值1.1,显示古气候条件整体潮湿,但在短期内出现半潮湿-干旱气候波动(表1)。可见,在青一段沉积时期,从早期到晚期气候

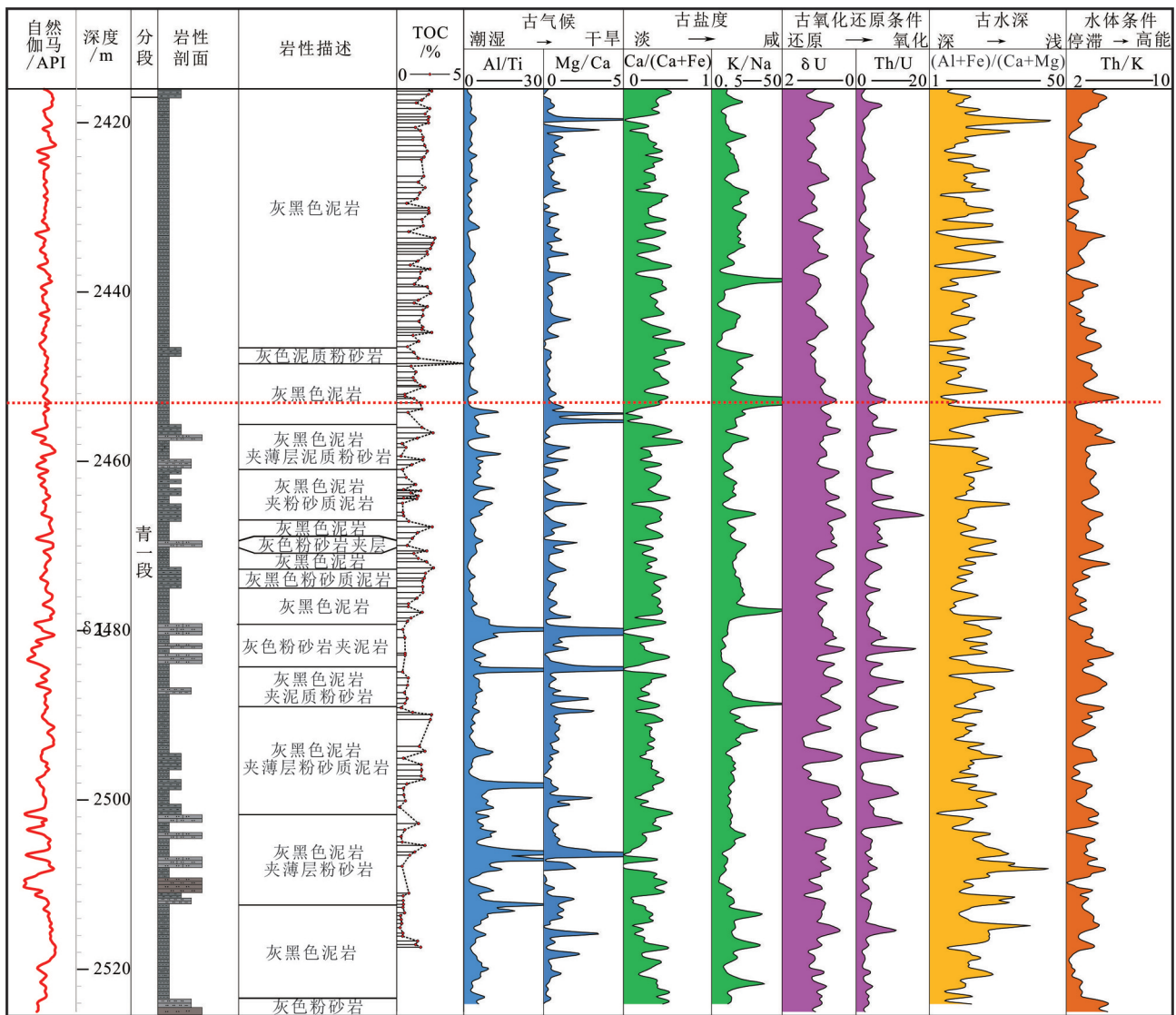


图5 吉页油1井青一段古环境演化剖面图

Fig.5 The evolution section of paleo-environment of K_2qm_1 in Well JYY1

逐渐潮湿,青一段晚期潮湿气候较稳定。

5.2 盐度

沉积水体盐度影响生物种类与繁殖程度,进而影响优质烃源岩的形成(Couch,1971; Roy et al., 2013)。一般通过Sr/Ba、Ca/(Fe+Ca)、K/Na比值判别水体盐度(赵俊青,2004)。Ca/(Fe+Ca)判断水体盐度的原理主要是基于元素Fe和Ca在水中迁移习性不同(Nelson,1967),Ca/(Ca+Fe)值越高,指示水体盐度越高,一般Ca/(Ca+Fe)<0.4为淡水环境,Ca/(Ca+Fe)>0.6为咸水环境(蓝先洪,1987;文国华等,2008)。K/Na值越大,介质盐度越高,主要原理是水体盐度越高,钾和钠就越易被黏土吸附或进入伊利

石晶格,且钾相对钠的吸附量亦越大(焦养泉,2004)。本文主要通过Ca/(Ca+Fe)、K/Na值作为青一段沉积古盐度的分析参数。

吉页油1井青一段Ca/(Ca+Fe)值总体介于0.15~0.82,平均0.41,K/Na值总体介于0.9~6.4,平均3.7,表明青一段沉积时期水体环境以微咸水-淡水环境为主。与古气候变化趋势相同,Ca/(Ca+Fe)值在2453 m处存在分界面,青一段下层组Ca/(Ca+Fe)值相对较稳定,在0.3~0.5波动变化,平均为0.36;青一段上层组Ca/(Ca+Fe)值自下而上逐渐变小,从0.52下降到0.3,平均值为0.43,青一段上层组水体盐度相对下层组略微升高(图7)。K/Na值同样存在

表1 青一段上下层组反映古环境参数对比

层组	数值	古气候		古盐度		古水深	古氧化还原条件		古水动力
		Al/Ti	Mg/Ca	Ca/(Fe+Ca)	K/Na	(Al+Fe)/(Ca+Mg)	δU	Th/U	Th/K
青一段	分布区间	1.4~13	0.5~1.3	0.1~0.82	0.8~5.0	0.8~32	0.6~1.6	0.87~7.0	2.0~5.0
上层组	平均值	3	0.6	0.43	4.1	3.3	1.1	2.8	3.3
青一段	分布区间	1.4~54	4~5	0.15~0.68	0.9~6.4	0.85~30	0.3~1.5	1.1~18.5	2.0~6.0
下层组	平均值	7.8	1.1	0.36	3.4	4.1	0.83	5.0	3.7

相似变化趋势。

5.3 古氧化-还原条件

研究证实, Th/U、V/Cr、Ni/Co 是对介质氧化还原条件判别的可靠指标 (Jones and Manning, 1994; Nicolas, 2006)。当 Th/U 值大于 30 为氧化环境, Th/U 值大于 10, 小于 30 为弱氧化-弱还原环境, Th/U 值大于 4, 小于 10 为还原环境, Th/U 值小于 4 为强还原环境 (代大经, 1995)。Wignall (1994, 1996) 应用 U 和 Th 的关系建立 δU 指数评价古氧化-还原条件, 关系式为 $\delta U = 2 \times U / (U + Th/3)$, 其中 δU 大于 1 代表还原环境, 小于 1 代表氧化环境。

吉页油 1 井青一段 Th/U 值分布在 0.87~18, 平均 4.2, 主要介于 1.9~10, δU 值介于 0.3~1.5, 平均值为 0.92, 指示青一段为还原-弱氧化环境 (图 5)。Th/U 值、 δU 值在 2453 m 处也存在明显的界面, 青一段下层组 Th/U 值整体较高, 平均值为 5.1, 在纵向上变化频繁, δU 值较低, 小于 1.0, 平均值为 0.83, 指示为弱氧化沉积环境。研究区的乾 262 井在青一段下层组 25 个岩心样品实验室 U、Th、K 元素测量结果

显示 Th/U 值介于 4~10, 平均值为 5.6, δU 值分布在 0.4~1.0, 平均值为 0.89, 也指示下层组为弱氧化的环境; 青一段上层组 Th/U 值较低, 且纵向上变化不大, 在 2.0 附近小幅波动, δU 值相对较高, 大于 1, 平均为 1.1, 表明沉积环境变为弱还原-还原环境, 在青一段上层组浅湖相-半深湖相泥岩中可见黄铁矿发育, 也证实了青一段沉积晚期主要以弱还原-还原环境。综合来看, 青一段地层从沉积早期到晚期环境条件逐渐由弱氧化变为还原环境, 有利于有机质保存。

5.4 古水深

近年来现代沉积研究表明, 金属元素的地球化学特征与湖盆水体深度以及离岸距离具有一定的相关性, 在古代大型湖泊沉积中, 这种相关性尤为明显 (李浩, 2017)。一般应用 (Al+Fe)/(Ca+Mg) 值作为指示古水深参数 (张永生等, 2003; 王春连等, 2012), 原理为金属元素 Ca 和 Mg 主要赋存于碳酸盐岩中, 碳酸盐岩含量的增多表明陆源物质的缺乏以及离岸距离的增大。因此, 随着离岸距离的增大和水深的增加, 金属元素含量比 (Al+Fe)/(Ca+Mg) 呈

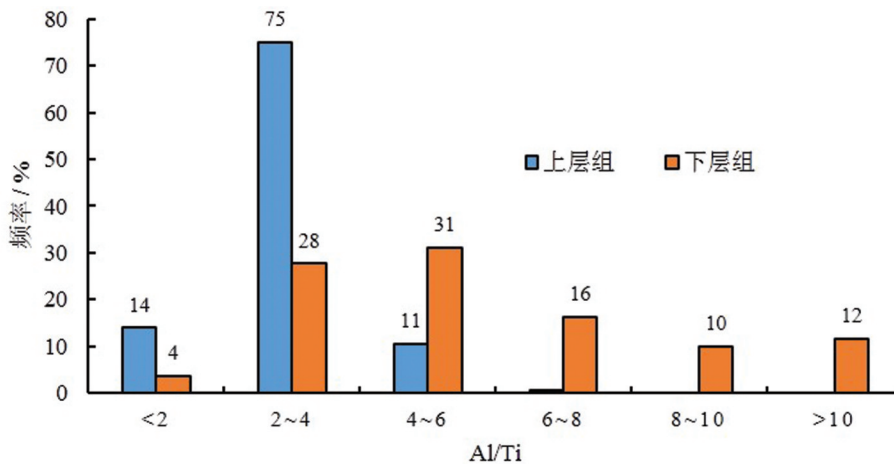


图6 青一段上下层组 Al/Ti 值分布对比图

Fig. 6 The comparative histogram of Al/Ti of the upper and lower bed sets of K_2qn_1

现逐渐减小的趋势。

通过吉页油1井岩性扫描测井测量得到的Fe、Ca、Mg、Al元素含量分析,青一段 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 值介于0.8~26,主体介于2~10,平均值为3.8。在纵向分布上 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 值在2453 m依然存在变化界面,上层组 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 值相对较小,均值为3.3,分布较稳定;下层组 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 值整体偏高,且存在波动,均值为4.1(图8)。表明从青一段下层组到上层组,沉积水体不断加深,上层组水体较深且稳定。

5.5 古水动力条件

钍钾比(Th/K)可作为评价水动力条件的参数, $Th/K > 6$ 代表高能环境, $Th/K < 6$ 代表低能环境(代大经,1995;刘泽纯等,2000;陈中红,2004)。本文通过吉页油1井自然伽马能谱测井测量的K、Th含量及 Th/K 分析青一段泥页岩沉积时期的古水体动力条件。

青一段整体 Th/K 分布在2~6,平均值为3.5,表明青一段地层沉积时期整体水动力条件为低能环境,水体较平静。在2453 m附近,出现较明显的水动力变化界面,上层组水动力条件变得更加低能, Th/K 平均值变为3.3;下层组 Th/K 平均值为3.7,水动力条件较界面之上增强。

6 青一段泥页岩滞留烃含量与古环境相关性分析

青一段泥页岩是研究区主力烃源岩,有机质丰

度较高,TOC分布在0.2%~5.1%,平均值为1.5%,热解 S_1 值分布在0.1~3.5 mg/g,平均值为1.8 mg/g,整体属于中等-好烃源岩;青一段泥页岩有机质类型以I、II₁型为主,含部分II₂型。青一段上下层组泥页岩有机质丰度存在差异,青一段上层组有机质丰度高于下层组,上层组以较好-好品质型烃源岩,下层组属于中等-较好型烃源岩,且有部分属于差烃源岩(图9)。青一段上下层组泥页岩有机质类型也具有差异,上层组有机质类型以I型为主,偶有II₁型;下层组泥页岩I、II₁、II₂型有机质类型均有(图10),吉页油1井青一段下层组底部(2500 m以深)泥页岩有机质类型以II₂型为主,占比72.73%;下层组中部(2480~2500 m)有机质类型以II₁型为主,占比66.67%;下层组上部(2453~2480 m)有机质类型以I型为主,占比69.44%(图11)。

烃源岩已生成的烃除了一部分排出源岩层系,还有一部分由于干酪根的溶胀、干酪根的吸附、干酪根孔隙的容留、无机矿物的吸附以及无机孔隙的容留等滞留在源岩内部,这一部分滞留的油气将是页岩油气富集的物质基础。一般应用地球化学参数(氯仿沥青“A”和热解 S_1 值)来衡量页岩中的滞留烃量,一般氯仿沥青“A”超过0.5%、热解 S_1 含量超过2 mg/g指示为高滞留烃含量(Jarviel,2012;卢双舫等,2012;邹才能等,2013)。泥页岩中不同有机质类型滞留烃含量不同(图12),I型有机质泥岩滞留烃含量高, S_1 主要分布在1~4 mg/g,平均2.0 mg/g;II₁

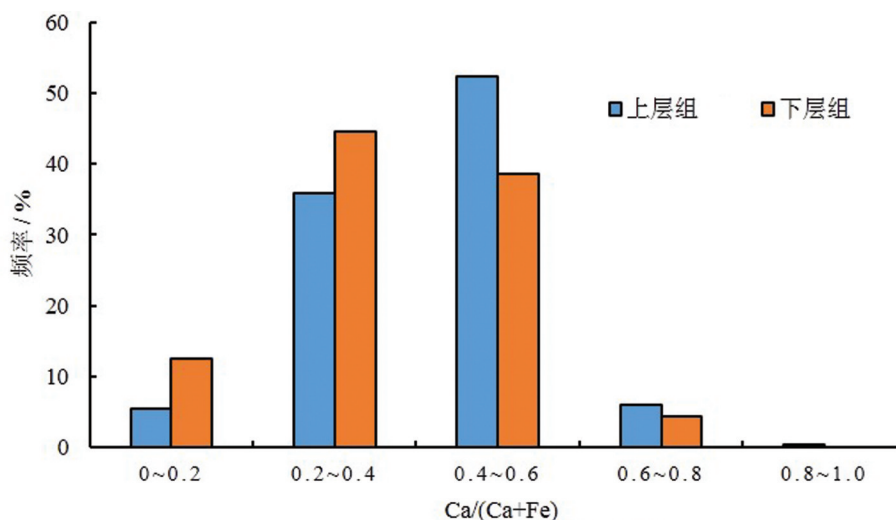


图7 青一段上下层组 $Ca/(Ca+Fe)$ 值分布对比图

Fig.7 The comparative histogram of $Ca/(Ca+Fe)$ of the upper and lower bed sets of K_2qm_1

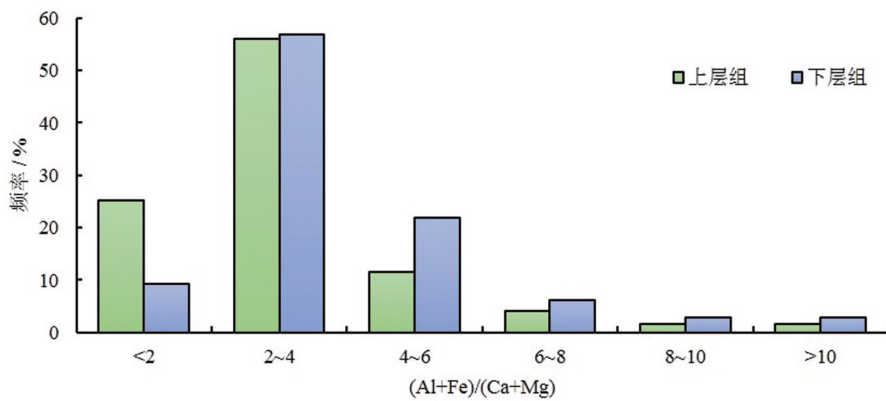
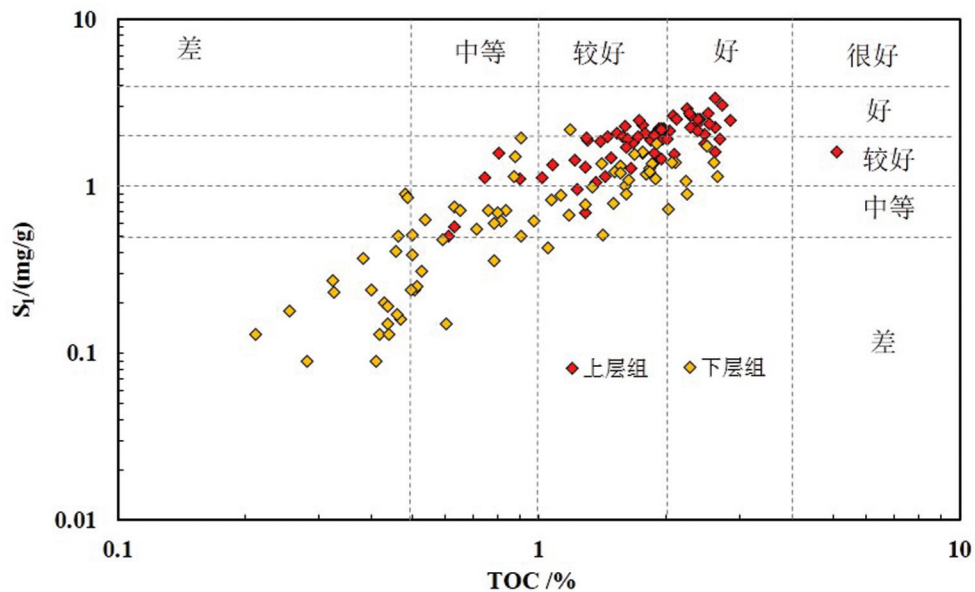
图8 青一段上下层组 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 值分布对比图Fig.8 The comparative histogram of $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ of the upper and lower bed sets of K_2qn_1 

图9 青一段泥岩有机质丰度评价图

Fig.9 The diagram of the organic content of the mudstone of K_2qn_1

型有机质泥岩滞留烃含量中等, S_1 主要分布在 1~2 mg/g, 平均 0.95 mg/g; II₂ 型有机质泥岩滞留烃含量较低, S_1 主要小于 1 mg/g, 平均 0.39 mg/g, 表明有机质类型越好, 残留烃含量越高。

泥页岩有机质丰度及类型等受沉积时期的古气候、湖泊水体的古水深、氧化还原条件、古盐度等环境因素控制(卢双舫等, 2008; 张小龙, 2013; 罗曦, 2015), 进而影响泥页岩的滞留烃富集程度。笔者应用热解 S_1 值表征滞留烃含量, 对吉页油 1 井青一段 172 个泥页岩样品热解 S_1 值与表征古环境元素参数进行相关性分析。结果显示:(1)青一段泥页岩滞留烃含量与表征古氧化还原条件参数 δU 正相

关(图 13a), 与表征古氧化还原条件参数 Th/U 负相关(图 13b), 相关性明显, 表明在还原条件下形成的泥页岩有利于滞留烃富集;(2)青一段泥页岩滞留烃含量与表征古气候参数 Al/Ti 负相关(图 13c), 相关性明显, 表明潮湿环境下形成的泥页岩有利于滞留烃富集;(3)青一段泥页岩滞留烃含量与表征古水体盐度参数 $Ca/(Ca+Fe)$ 正相关(图 13d), 但相关性不明显, 表明咸化水体环境下形成的泥页岩有利于滞留烃富集;(4)青一段泥页岩滞留烃含量与表征古水深参数 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 负相关(图 13e), 但相关性不明显, 表明深水环境下形成的泥页岩有利于滞留烃富集;(5)青一段泥页岩含油性与表征古

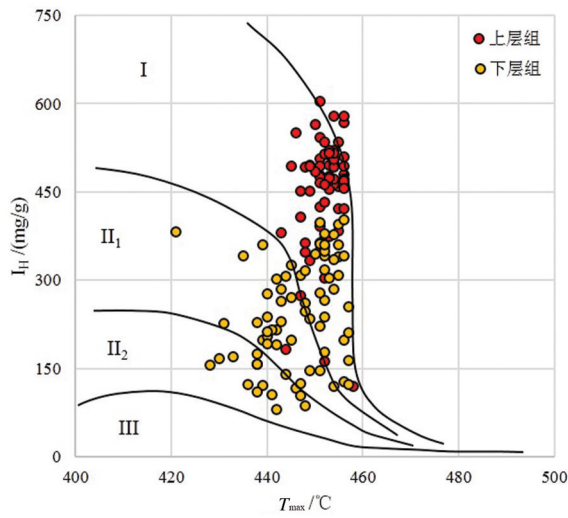


图10 青一段泥岩有机质类型判别图

Fig.10 The discrimination diagram of organic matter type of the mudstone of K_2qn_1

水体能量条件参数 Th/K 负相关(图 13f),但相关性不明显,表明安静的水体形成的泥页岩有利于滞留烃富集。综合相关性分析结果表明,青一段泥页岩滞留烃含量与反映古氧化还原参数及与反映古气候参数相关性较高,与反映古水体盐度、古水深及水体能量的参数相关性较差,由此可见,泥页岩的含油性主要受控于古气候和古氧化还原条件的影响,滞留烃含量高的泥页岩($S_1 > 2 \text{ mg/g}$)层段中指示古氧化还原条件参数 $\delta U > 0.8$, $Th/U < 6$,反映古气候的参数 $Al/Ti < 6$,表明潮湿性还原环境形成的泥页岩

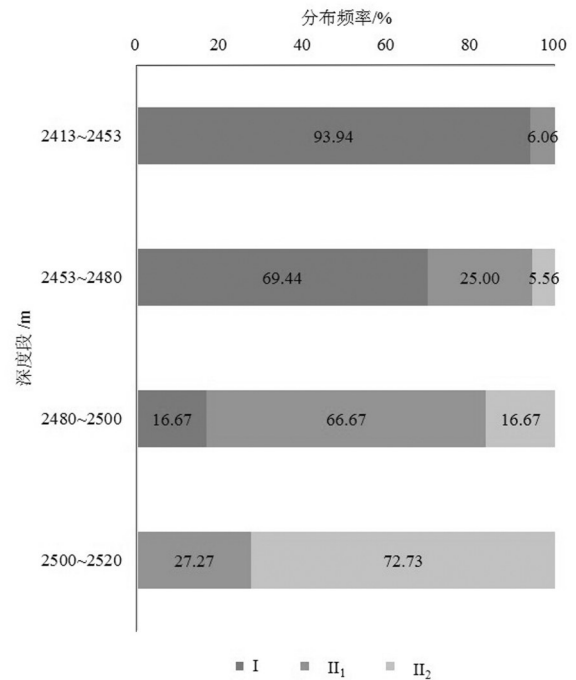


图11 青一段不同层段泥岩有机质类型分布图
Fig.11 The distribution diagram of organic matter types of diagram different bed sets of K_2qn_1

有机质富集,有机质类型好,以I、II₁型为主,生烃能力强,保存条件好,易于滞留烃富集,页岩油资源潜力大。

7 结论

(1) 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段

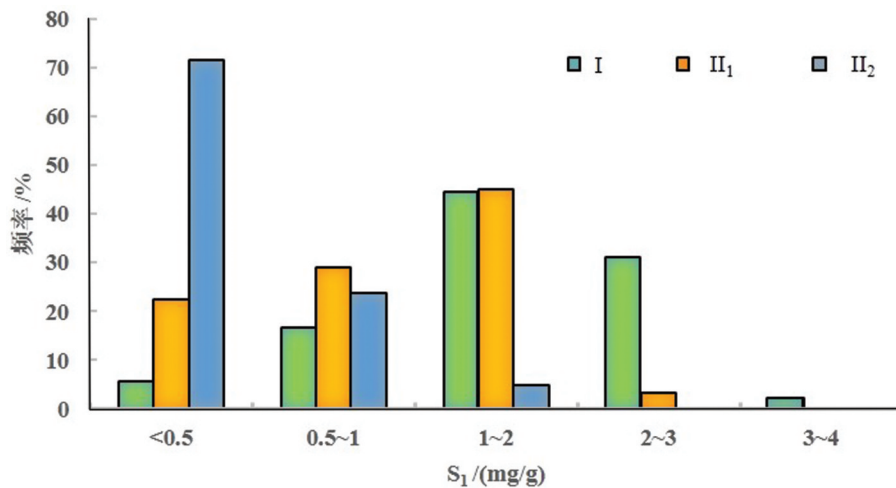


图12 不同有机质类型泥岩 S_1 含量分布

Fig.12 The S_1 content of different organic matter types of K_2qn_1

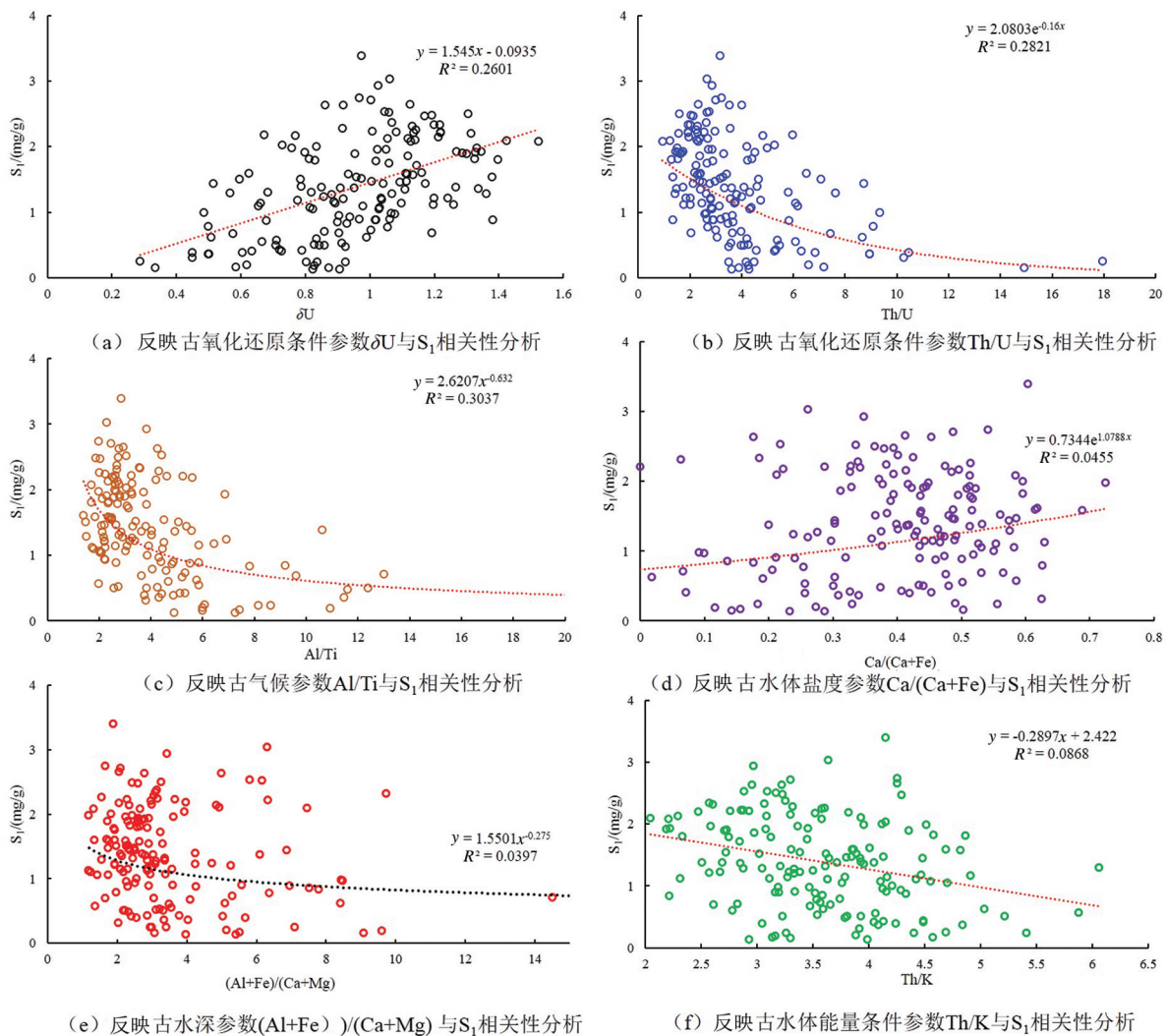


图13 青一段泥页岩表征古环境参数与泥页岩滞留烃含量(S_1)相关性分析
 Fig.13 The charts of the correlation between the content of the residual hydrocarbon (S_1) and the parameters of paleo-environment of K_2qn_1

地层主要发育三角洲外前缘及浅湖-半深湖相沉积,具体可划分出水下分流河道、分流间湾、席状砂、河口坝、浅湖泥及半深湖泥五种沉积微相,按沉积相组合特征青一段可划分为两个层组,下层组以浅湖泥、三角洲外前缘席状砂、支流间湾泥夹及河口坝砂和河道砂为主,上层组以浅湖-半深湖泥岩为主。

(2)青山口组一段地层沉积时古环境为潮湿型、淡水-微咸水、弱氧化-还原、低能浅水-半深水环境,经历古水深由浅变深,古气候由半潮湿到潮湿,古水体盐度由淡水-微咸水,湖泊水体由弱氧化到还原,水动力条件由中到弱的古环境演化过程。

青一段内部存在明显的环境变化界面,与沉积相组合变化界面一致。

(3)青一段泥页岩滞留烃含量与反映古氧化还原参数及与反映古气候参数相关性较高,与反映古水体盐度、古水深及水体能量的参数相关性较差,古气候和古氧化还原条件是控制泥页岩的滞留烃富集的主要环境控制因素,在潮湿性还原环境形成的泥页岩有机质类型好,生油量大,滞留烃含量高。

Reference

Bai Jing, Xu Xingyou, Chen Shan. 2017. Analysis of controlling factors of shale oil enrichment and recoverable capacity in

- continental shale, a case study from Qingshankou Formation [J]. *Geological Review*, 63 (Supp.): 117–118 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhonghong, Cha Ming, Jin Qiang. 2004. Application of natural gamma ray logging and natural gamma spectrometry logging to recovering paleo– environment of sedimentary basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(6):1145–1150 (in Chinese with English abstract).
- Couch E L. 1971 Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. *AAPG Bulletin*, 55(10):1829–1837.
- Feng Zihui, Huo Qiuli, Wang Xue, Zeng Huasen, Fu Li. 2015. Organic geochemical characteristics and paleosedimentary environments of the source rocks in member 1 of Qingshankou Formation [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 34(4):1–7 (in Chinese with English abstract).
- Gao Ruiqi, Cai Xiyuan. 1997. Formation Conditions and Distribution Rules of Oil and Gas Fields in Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 10–23 (in Chinese).
- Hou Qijun, Feng Zhiqiang, Feng Zihui. 2009. Continental petroleum geology in Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 25–80 (in Chinese with English abstract).
- Hou qiuli, Zeng Huaseng, Zhang Xiaochang, Fu Li. 2012. An evaluation diagram of effective source rocks in the first member of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin and its implication [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3):379–384 (in Chinese with English abstract).
- Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, Yu Ling, Hu Shuo, Zhang Ju. 2014. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation—a case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 35(5):704–711 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhenkai, Chen Jianping, Wang Yijun, Xue Haitao, Deng Chunping, Wang Min. 2013. Characteristics of micropore in shales from the first member of Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*. 34(1):30–36 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhenkai, Chen Jianping, Xue Haitao, Wang Yijun, Wang Min, Deng Chunping. 2013. Microstructural characteristics of shale from the first member of Cretaceous Qingshankou formation, Songliao basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1): 58–65(in Chinese with English abstract).
- Jarvie D M. 2012. Shale resource systems for oil and gas: Part 2—Shale—oil resource systems[G]//Breyer J A. Shale reservoirs—Giant resources for the 21st century. AAPG Memoir 97, 89–119.
- Jiao Yangquan, Lv Xinbiao, Wang Zhenghai, Wang Minfang. 2004. Two distinct geological environments from sedimentary to diagenesis stages: Examples from sandstone– type uranium deposits, Turpan–Hami Basin [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 29 (5): 615–620 (in Chinese with English abstract).
- Jones B, Manning A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation paleoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 111(1/4):111–129.
- Lan Xianhong, Ma Daoxiu, Xu Mingguang, Zhou Qingwei, Zhang Guangwei. 1987. Some geochemical indicators of the Pearl River Delta and their facies significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 7(1):39–49 (in Chinese with English abstract).
- Li Hao, Lu Jianlin, Li Ruilei, Wang Baohua, Xu Wen, Zuo Zongxin, Wang Miao, Liu Yazhao. 2017. Generation paleoenvironment and its controlling factors of Lower Cretaceous Lacustrine hydrocarbon source rocks in Changling Depression, south Songliao Basin [J]. *Earth Science*, 42 (10):1774–1786 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhandong, Wang Yijun, Hu Huiting, Wang Haisheng, Zhang Haixiang, Li Yang, Zhu Xiaomeng. 2015. Shale reservoir characteristics of Qing–1 member of Cretaceous Qingshankou Formation in northern Songliao Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(1):20–24 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Lv Yanfang, Ran Qingchang, Dai Chunlei, Li Mei, Wang Meng. 2014. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 35(2): 280–285(in Chinese with English abstract).
- Liu Zechun, Chen Ye, Yuang Linwang, Zhou Chunlin, Wang Yongjin. 2000. Inversion of 2.85Ma B.P Paleoclimate changes using natural gamma ray logs [J]. *Science in China(Series D)*, 30(6):609–618 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhaojun, Sun Pingchang, Liu Rong, Meng Qingtao, Bai Yueyue, Xu Yinbo. 2014. Research on geological conditions of shale coexistent energy mineralization (accumulation): Take the Qingshankou Formation in Upper Cretaceous, Songliao Basin for example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(3): 583–600 (in Chinese with English abstract).
- Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, Li Jijun, Wang Min, Xue Haitao, Wang Weiming, Cai Xiyuan. 2012. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application [J]. *Petroleum exploration and development*, 39(2): 249–256 (in Chinese with English abstract).
- Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, Li Jijun, Wang Min, Xue Haitao, Wang Weiming, Cai Xiyuan. 2012. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2): 249–256.
- Lu Shuangfang, Zhang Min. 2008. *Petroleum Geochemistry* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 50–59 (in Chinese).
- Luo Xi, Liu Zisheng, Xu Ling, Tan Jingjuan, Yin An. 2015. Continental shale organic matter characteristics and enrichment factors analysis of Biyang Sag [J]. *Petroleum geology and*

- engineering, 29(6):11–15 (in Chinese with English abstract).
- Nelson B W. 1967. Sedimentary phosphate method for estimation paleosalinities [J]. *Science*, 158 (3803):917–920.
- Nicolas T, Thomas J A, Timothy L, et al. 2006. Trace metals as palaeoredox and palaeoproductivity proxies: An update [J]. *Chemical Geology*, 232: 12–32.
- Ratcliffe K T, Wright A M, Montgomery P. 2010. Application of chemostratigraphy to the Mungaroo Formation, the Gorgon field, offshore northwest Australia [J]. *Australian Petroleum Production and Exploration Association Journal*, 50(1): 371–388.
- Roy D K, Roser B P. 2013. Climate control on the composition of Carboniferous–Permian Gondwana sediments, Khalaspir basin, Bangladesh[J]. *Gondwana Research*, 23(3): 1163–1171.
- Smol J P, Cumming B F. 2000. Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments [J]. *Journal of Phycology*, 36:986–1011.
- Song Mingshui.2005. Sedimentary environment geochemistry in the Shashi section of Southern ramp Dongying depression [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(1):67–73.
- Tenger, Liu Wenhui, Xu Yongchang, Chen Jiangfa. 2004. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying indices, a case study from Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2):365–372 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Hu Haibing, Mao Jinsong, Shen Lijian, Zhao Haitong. 2012. Sedimentary characteristics and its environmental significance of salt-bearing strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in southern margin of Jiangling Depression, Jiangnan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 14 (2): 165–175(in Chinese with English abstract).
- Wang Liangchen, Zhang Jinliang.1996. *Sedimentary Environment and Sedimentary Facies* [M].Beijing: Petroleum Industry Press:24–30.
- Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Tang Fei, Zheng Aiping, Song Tingyuan, Chen Shouchun, Li Guili, Li Lianxin. 2008. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 Member in the Gengwan Region, Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1): 114–120 (in Chinese with English abstract).
- Wignall P B. 1994. *Black Shales* [M]. Oxford: Clarendon Press, 46.
- Wignall P B, Twitchett R J. 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. *Science*, 272:1155–1158.
- Xiong Xiaohui, Xiao Jiafei. 2011. Geochemical indicators of sedimentary environments——A summary [J]. *Earth and Environment*, 39(3):405–414.
- Yan L J, Zhang M P. 2015. The response of lake variations to climate change in the past forty years: A case study of the northeastern Tibetan Plateau and adjacent areas, China [J]. *Quaternary International*, 371: 31–48 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, Yao Jingli, Wang Lan, Guo Hao, Deng Xiuqin, Cheng Dawei. 2015. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42(1):34–43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Junfeng, Xu Hao, Zhao Junlong, Ren Pengfei. 2018. Geological characteristics and exploration potential of oil and gas in the northeast area of China[J]. *Geology in China*, 45(2): 260–273 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaolong, Li Yanfang, Lü Haigang, Yan Jianping, Tuo Jincui, Zhang Tongwei. 2013. Relationship between organic matter characteristics and depositional environment in the Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin [J]. *Journal of China coal society*, 38 (5):851–856 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongsheng, Yang Yuqing, Qi Zhixian, Qiao Yuedong, Yuan Heran. 2003. Sedimentary characteristics and environments of the salt-nearing series of Qianjiang Formation of the Paleogene in Qianjiang Sag of Jiangnan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 5 (1):29–35 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junqing, Ji Youliang, Zhang Shiqi, Xia Bin. 2004. Geochemical methods of boundary identification in terrigenous high-resolution sequence [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1):79–86 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, Zhu Rukai, Hou Lianhua, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Wu Songtao, Lin Senhu, Wang Lan, Bai Bin, Yao Jingli. 2013. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of non-marine shale oil in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1):14–26.

附中文参考文献

- 白静,徐兴友,陈珊. 2017. 陆相页岩油富集可采主控因素分析——以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例[J].*地质论评*, 63(S):117–118.
- 陈中红,查明,金强. 2004. 自然伽玛及自然伽玛能谱测井在沉积盆地古环境反演中的应用[J].*地球物理学报*, 47(6):1145–1150.
- 冯子辉,霍秋立,王雪,增华森,付丽. 2015. 青山口组一段烃源岩有机地球化学特征及古沉积环境[J].*大庆石油地质与开发*, 34(4):1–7.
- 高瑞祺,蔡希源. 1997. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M].北京:石油工业出版社,10–23.
- 侯启军,冯志强,冯子辉. 2009. 松辽盆地陆相石油地质学[M].北京:石油工业出版社,25–80.
- 黄文彪,邓守伟,卢双舫. 2014. 泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以松辽盆地南部青山口组为例[J].*石油与天然气地质*, 35(5):704–711.
- 黄振凯,陈建平,王义军,薛海涛,邓春萍,王民. 2013. 松辽盆地白垩系青山口组泥岩微观孔隙特征[J].*石油学报*, 34(1): 30–36.
- 黄振凯,陈建平,薛海涛,王义军,王民,邓春萍. 2013. 松辽盆地白垩系青山口组泥岩孔隙结构特征[J].*石油勘探与开发*, 40(1):58–65.
- 霍秋立,增华森,张晓畅,付丽. 2012. 松辽盆地北部青山口组一段有效烃源岩评价图版的建立及意义[J].*石油学报*, 33(3):379–384.

- 焦养泉,吕新彪,王正海,王敏芳. 2004. 从沉积到成岩两种截然不同的地质环境——吐哈盆地砂岩型铀矿研究实例[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 29(5):615-620.
- 蓝先洪,马道修,徐明广,周清伟,张光威. 1987. 珠江三角洲若干地球化学标志及指相意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 7(1):39-49.
- 李浩,陆建林,李瑞磊. 2017. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 地球科学, 42(10):1774-1786.
- 李占东,王义军,胡慧婷,王海生,张海翔,李阳,朱晓萌. 2015. 松辽盆地北部青山口组一段泥页岩储集层特征[J]. 新疆石油地质, 36(1): 20-24.
- 刘泽纯,陈晔,袁林旺,周春林,汪永进. 2000. 应用自然伽玛测井曲线反演 2.85Ma B.P. 古气候变化[J]. 中国科学(D辑), 30(6):609-618.
- 刘招君,孙平昌,柳蓉,孟庆涛,白悦悦,徐银波. 2014. 页岩能源共生矿产成矿(藏)地质条件研究——以松辽盆地上白垩统青山口组为例[J]. 沉积学报, 32(3):583-600.
- 柳波,吕延防,冉清昌,戴春雷,李梅,王猛. 2014. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 35(2):280-285.
- 卢双舫,黄文彪,陈方文,李吉君,王民,薛海涛,王伟明,蔡希源. 2012. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 39(2): 249-256.
- 卢双舫,张敏. 2008. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社, 50-59.
- 罗曦,刘子胜,胥玲,谭静娟,伊安. 2015. 泌阳凹陷陆相页岩有机质特征及富集因素分析[J]. 石油地质与工程, 29(6):11-15.
- 宋明水. 2005. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 25(1):67-73.
- 腾格尔,刘文汇,徐永昌,陈践发. 2004. 缺氧环境及地球化学判别标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报, 22(2): 365-372.
- 王春连,刘成林,湖海兵,毛劲松,沈立建,赵海彤. 2012. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 14(2):165-175.
- 王良忱,张金亮. 1996. 沉积环境与沉积相[M]. 北京:石油工业出版社, 24-30.
- 文华国,郑荣才,唐飞,郑爱萍,桑廷元,陈守春,李瑰丽,李联新. 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[J]. 矿物岩石, 28(1):114-120.
- 熊小辉,肖加飞. 2011. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境, 39(3): 405-414.
- 袁选俊,林森虎,刘群,姚泾利,王岚,郭浩,邓秀芹,成大伟. 2015. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 42(1): 34-43.
- 张君峰,许浩,赵俊龙,任鹏飞. 2018. 中国东北地区油气地质特征与勘探潜力展望[J]. 中国地质, 45(2): 260-273.
- 张小龙,李艳芳,吕海刚,闫建萍,妥进才,张同伟. 2013. 四川盆地志留系龙马溪组有机质特征与沉积环境的关系[J]. 煤炭学报, 38(5): 851-856.
- 张永生,杨玉卿,漆智先,乔悦东,袁鹤然. 2003. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境. 古地理学报, 5(1): 29-35.
- 赵俊青,纪友亮,张世奇,夏斌. 2004. 陆相高分辨率层序界面识别的地球化学方法[J]. 沉积学报, 22(1): 79-86.
- 邹才能,杨智,崔景伟. 2013. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 40(1):14-26.