

松辽盆地青山口组页岩沉积水体环境演变的古生物学证据

吕丹¹,王华建¹,李罡²,张江永³,付秀丽^{1,4},刘畅¹,王晓梅¹,朱如凯¹,张水昌¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国科学院南京地质古生物研究所, 江苏南京 210008; 3. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044; 4. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163412)

摘要:松辽盆地古龙页岩油勘探开发目的层和有利区优选对页岩沉积水体环境恢复提出了新要求。以古生物群落作为古湖泊水体环境演变的示踪指标,对古页8HC井白垩系青山口组古生物组合(包括鱼、叶肢介、介形类、藻类)进行了系统分析。研究发现,满洲鱼和叶肢介仅出现在Q7油层,丰度高但属种单一;介形类在Q7—Q9油层的种属数目和丰度相较于Q1—Q6油层均显著增加;沟鞭藻丰度在Q1、Q2和Q7油层存在3个峰值。古生物组合指示松辽盆地青山口组沉积期整体为淡水—微咸水的古湖泊环境;Q7油层中生物多样性的显著增加和沟鞭藻的峰值丰度,则指示比较明确的海侵事件;Q1和Q2油层的沟鞭藻峰值丰度可能指示了湖平面上升初期的海侵事件。通过与现代马拉开波湖的对比,提出松辽盆地青山口组沉积期虽出现了海洋生物,但海侵可能只是在独特地理位置和气候背景下的暂时性或偶发性湖—海连通,并未显著改变松辽古湖泊整体的水体属性和生态组成。

关键词:古水体环境;海侵事件;古生物;黑色页岩;青山口组;松辽盆地

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Paleobiological evidence of the paleowater environment evolution during deposition of the Qingshankou shale in the Songliao Basin

LYU Dan¹, WANG Huajian¹, LI Gang², ZHANG Jiangyong³, FU Xiuli^{1,4}, LIU Chang¹, WANG Xiaomei¹, ZHU Rukai¹, ZHANG Shuichang¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 3. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China; 4. Petroleum Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163412, China)

Abstract: Identification of target intervals and delineation of favorable areas for exploration and development of the Gulong shale oil require better reconstruction of the paleowater environment during deposition of the shale of interest. Paleontological communities were used as indicators to trace the paleowater environment of ancient lakes to perform a comprehensive analysis of paleontological evidence (including fish, clam shrimp, ostracoda and algae) of the Qingshankou Formation from the Well GY8HC. The results show that *Manchurichthys* and clam shrimp only occur in the Q7 oil layer with large abundance but single species. Compared with the lower Q1—Q6 oil layers, there is a significant increase in the species and abundance of ostracods in the upper Q7—Q9 oil layers. Three abundance peaks of dinoflagellate fossils appear in Q1, Q2 and Q7 oil layers. The biological assemblage indicates a whole freshwater-brackish water feature of the Songliao Basin during the deposition of the Qingshankou Formation. The significant increase in diversity of fossil record and peak abundances of dinoflagellate fossils in Q7 oil layer indicates relatively definite marine transgression events, while the abundance peaks of dinoflagellate fossils in Q1 and Q2 oil layers suggest possible marine transgression event(s) in the early stage of lake-level rising. Through the comparison with the modern Maracaibo Lake, it is proposed that the appearance of marine organisms in the paleo-Songliao Lake during the deposition of the Qingshankou Formation might be the result of temporary or occasional

收稿日期:2023-01-28;修回日期:2023-04-18。

第一作者简介:吕丹(1989—),女,博士、工程师,古生物学与地层学。E-mail: lydan@petrochina.com.cn。

通信作者简介:王华建(1984—),男,博士、高级工程师,地球化学。E-mail: wanghuajian@petrochina.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(72088101);中国石油勘探开发研究院院级项目(2021ycq01,yjkt2019-3);黑龙江省揭榜挂帅项目(2022-JS-1740,2022-JS-1853)。

lake-sea connection under unique paleogeographic and climatic backgrounds. However, the lake-sea connection did not cause any obvious change in the nature of water body and the components of ecosystem.

Key words: paleowater environment, marine transgression event, paleontology, black shale, Qingshankou Formation, Songliao Basin

引用格式: 吕丹, 王华建, 李罡, 等. 松辽盆地青山口组页岩沉积水体环境演变的古生物学证据[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 857–868. DOI: 10. 11743/ogg20230405.

LYU Dan, WANG Huajian, LI Gang, et al. Paleobiological evidence of the paleowater environment evolution during deposition of the Qingshankou shale in the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 857–868. DOI: 10. 11743/ogg20230405.

松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩油资源量达 $100 \times 10^8 \sim 150 \times 10^8$ t, 页岩油勘探开发已取得重大突破, 但页岩非均质性强, 产油效果差异明显^[1-2]。大庆油田现将古龙凹陷内的青山口组一段和二段下部划分为3个箱体9个油层, 其中下箱体含Q1—Q4共4个油层, 中箱体含Q5—Q7共3个油层, 上箱体含Q8和Q9两个油层^[1,3]。目前, 下箱体已提交页岩油预测地质储量 12.68×10^8 t^[3]。沉积古水体环境影响着岩相组合^[4]和烃源岩生烃潜力^[5], 成为古龙页岩油优选勘探有利区和开发目地层时需要考虑的关键因素之一^[1]。

青山口组是松辽盆地在白垩纪中期沉积的一套深湖相以黑色页岩和粉砂质泥岩为主、夹丰度不等的灰岩和白云岩的碎屑岩组合。青山口组页岩与下伏泉头组 and 上覆姚家组的浅湖相贫有机质砂泥岩有着明显差异, 指示三级层序的大范围湖平面上升期沉积^[6]。精细岩相学分析将青山口组湖平面上升期沉积进一步划分为3个完整的四级旋回, 且每个旋回都包含对应快速湖平面升降的体系域^[7], 其中对应于古龙凹陷内Q1—Q9油层的四级旋回有2个, 分别是Q1—Q3的湖平面上升期沉积和Q4—Q6的湖平面下降期沉积, 以及Q7—Q8下部的湖平面上升期沉积和Q8中、上部—Q9的湖平面下降期沉积。

古生物群落是示踪古湖泊水体环境动态演化的有效指标, 可以帮助重建地质历史时期的气候环境演化。前人在松辽盆地青山口组中已发现鱼类^[8-10]、藻类^[11-13]、叶肢介^[14-15]、介形类^[16-18]、有孔虫和钙质超微化石^[19], 还检测出沟鞭藻、甲藻、海生金藻、海绵等的生物标志化合物^[20-22]。已发现的鱼、叶肢介、介形类和藻类等多为淡水—微咸水生物, 证实松辽古湖泊以淡水—微咸水为主^[10, 12, 14, 16]。沟鞭藻、海生金藻、海绵、有孔虫和钙质超微化石等则指示古湖泊中出现海相生物, 被认为与海侵事件有关^[12, 19-22]。但也有学者认为咸水型沟鞭藻的出现可能与湖泊自然咸化有关, 且未发现能证明海侵通道存在的古生物学证据^[13, 23]。另外, 已报道化石证据虽多, 但多以单一门类为主, 缺少古生物群落的综合研究, 且时间分辨率不佳, 难以满足

当前古龙页岩油的精细勘探开发需求^[24]。

本文通过对古页8HC井青山口组古生物化石组合(包括鱼、叶肢介、介形类、藻类)的综合分析, 认为Q1—Q6油层沉积时以淡水—微咸水环境为主, Q7油层沉积时发生了比较明确的海侵事件, Q1和Q2油层沉积时可能也发生了海侵事件。

1 样品和方法

本研究所用样品来自于松辽盆地古龙凹陷古页8HC井(图1a)。根据松科1s井青山口组3层火山灰的高精度铅石U—Pb年龄(91.886 ± 0.033 Ma, 90.974 ± 0.042 Ma, 90.536 ± 0.039 Ma)^[25], 以及古页8HC井中的火山灰层等时对比, Q1—Q9油层沉积时间被限定为91.9 ~ 90.6 Ma(图1b), 为晚白垩世土仑期。

通过Q1—Q9油层取心段的岩心观察描述, 在Q7油层发现鱼化石(深度2 447.0 ~ 2 450.0 m)和叶肢介化石(深度2 448.9 ~ 2 449.0 m)(图1b)。将鱼化石用小毛刷和细针仔细修出轮廓, 去掉周围和覆盖在化石上方的泥岩后, 用光学显微镜观察鉴定。同样, 去除叶肢介化石周围和上覆泥岩, 制成靶样, 用电子显微镜进行观察。

本研究还选取古页8HC井Q1—Q9油层全井段岩屑样品, 每1 m取样200 g, 经去泥浆、过筛、烘干后, 部分岩屑样品用水和5%的双氧水浸泡3 ~ 7 d, 待自然泡开后, 挑选完整的介形类壳体, 利用电子显微镜观察鉴定。部分岩屑样品采用实验室孢粉标准分析方法(SY/T 5915—2018)处理制片, 利用显微镜观察鉴定。

2 化石鉴定结果

2.1 鱼

古页8HC井Q7油层发现的鱼化石均为*Manchurichthys* sp. (图2), 属真骨鱼部(Division Teleostei)

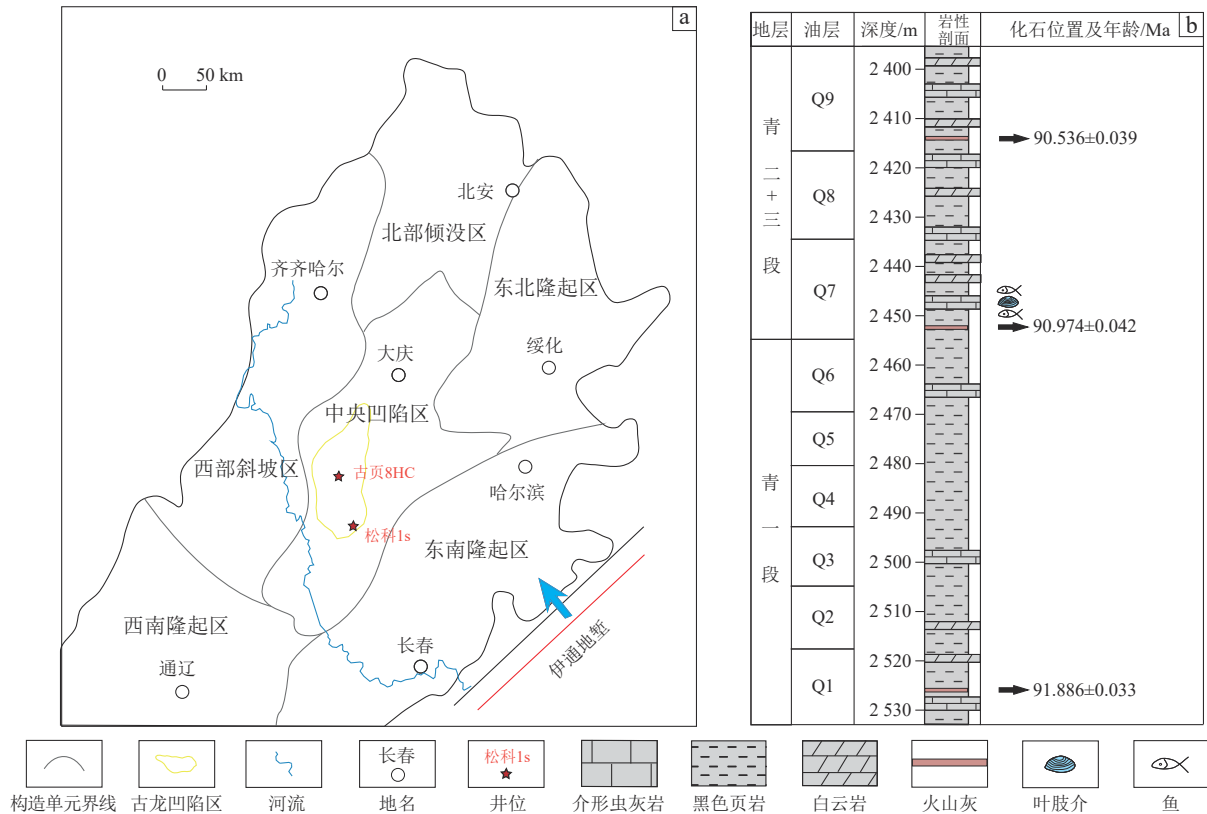


图1 松辽盆地古龙凹陷青山口组沉积古地理(a)和古页8HC井地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Sedimentary paleogeography map (a) of the Qingshankou Formation in the Gulong Sag of Songliao Basin and the composite columnar section of Well GY8HC (b)

(锆石 U-Pb 年龄来自松科 1s 井同层位火山灰, 引自文献[25].)

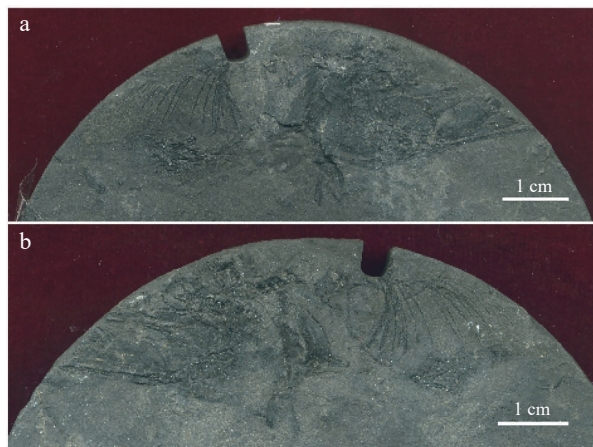


图2 松辽盆地古龙凹陷古页8HC井青山口组Q7油层2446.72 m深度的鱼化石 *Manchurichthys* sp.

Fig. 2 *Manchurichthys* sp. discovered at a depth of 2446.72 m in Q7 oil layer of the Qingshankou Formation in Well GY8HC in the Gulong Sag, Songliao Basin

(a和b为对称面, 标本保存在大庆油田勘探开发研究院岩心库。)

真真骨鱼派(Cohort Euteleostei)原始棘鳍超目(Superorder Protacanthopterygii)鲑形目(Order Salmoniformes)亚目及科未定(Suborder and family incert. sedis)满洲鱼属

(*Manchurichthys* Saito, 1936)^[26]。鉴定特征为: 小鱼; 顶狭长, 翼骨内面无齿; 口裂中等大小, 前上颌骨小, 简单, 无齿, 上颌骨亦无齿, 弯曲, 有两个活动的辅上颌骨, 下颌具有较高的冠状突; 远端角舌骨有孔; 鳃条骨10~11根; 下鳃盖骨不甚扩大; 椎骨约44个, 19个尾椎; 胸鳍长; 腹鳍腹位, 起点略后于背鳍起点; 背鳍基短, 位于背部中点, 鳍条长; 臀鳍小, 靠后。

2.2 叶肢介

所发现叶肢介均为 *Nemestheria qingshankouensis* Chang et Chen^[27](图3), 属双甲目(Diplostraca Gerstaecker, 1866)^[28], 刺尾亚目(Spinicaudata Linder, 1945)^[29]瘤模叶肢介超科(Estheriteoidea Zhang et Chen, 1976)^[30]吉林叶肢介科(Jilinestheriidae Zhang et Chen, 1976)^[30]线叶肢介属(*Nemestheria* Chang et Chen, 1964)^[27], 也有归为瘤模叶肢介亚目(Estheritina Kobayashi, 1972)^[27, 31]。其主要鉴定特征是: 壳面装饰是排列稀疏的长短相间的线脊, 个体中等大小, 背缘短而直, 胎壳窄小, 位于其中点与前端之间; 前、后缘及腹缘均较圆, 后腹缘向斜后方强烈扩大, 前高小于后高, 生长线粗壮, 生长带宽

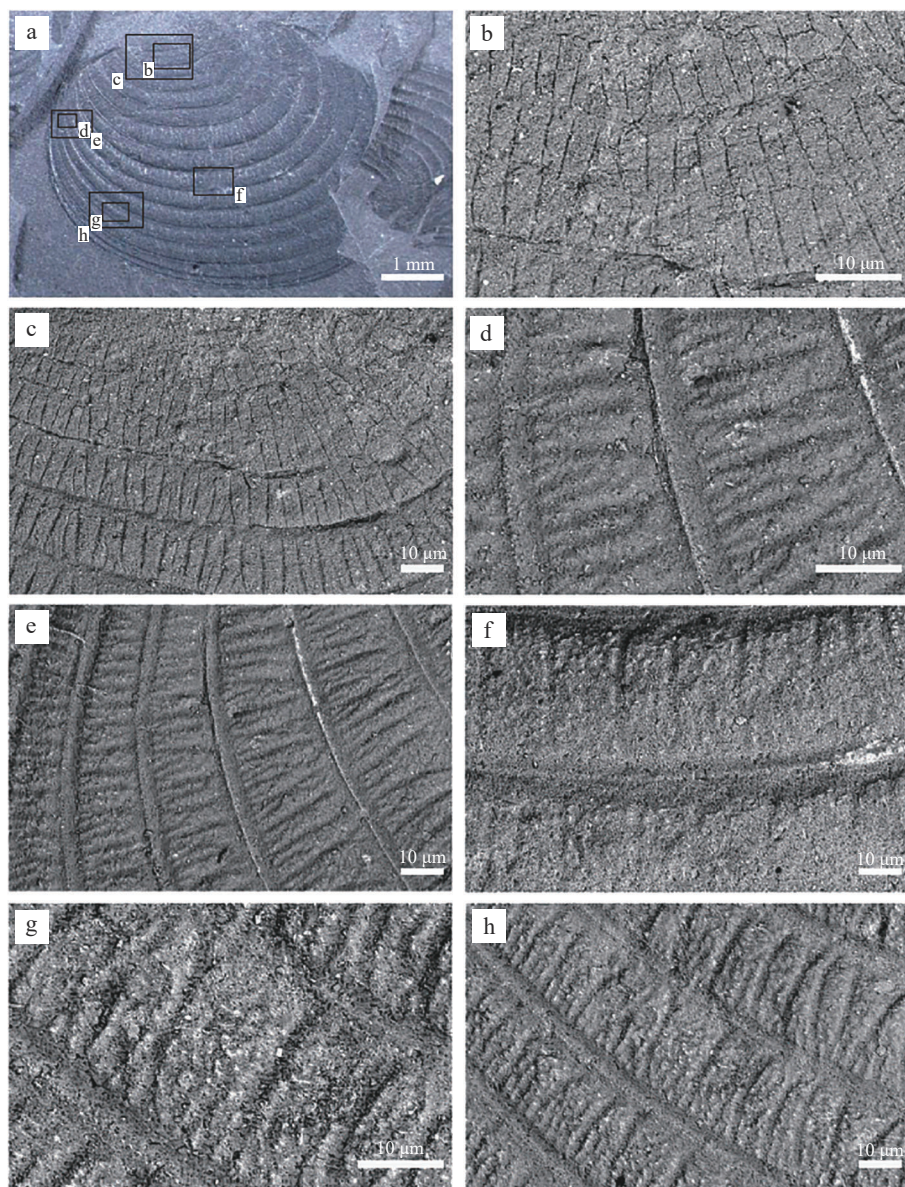


图3 松辽盆地古龙凹陷古页8HC井青山口组Q7油层2 448.9 m深度叶肢介 *Nemestheria qingshankouensis* Chang et Chen, 1964^[27]

Fig. 3 *Nemestheria qingshankouensis* discovered at a depth of 2 448.9 m in Q7 oil layer of the Qingshankou Formation in Well GY8HC in the Gulong Sag, Songliao Basin^[27]

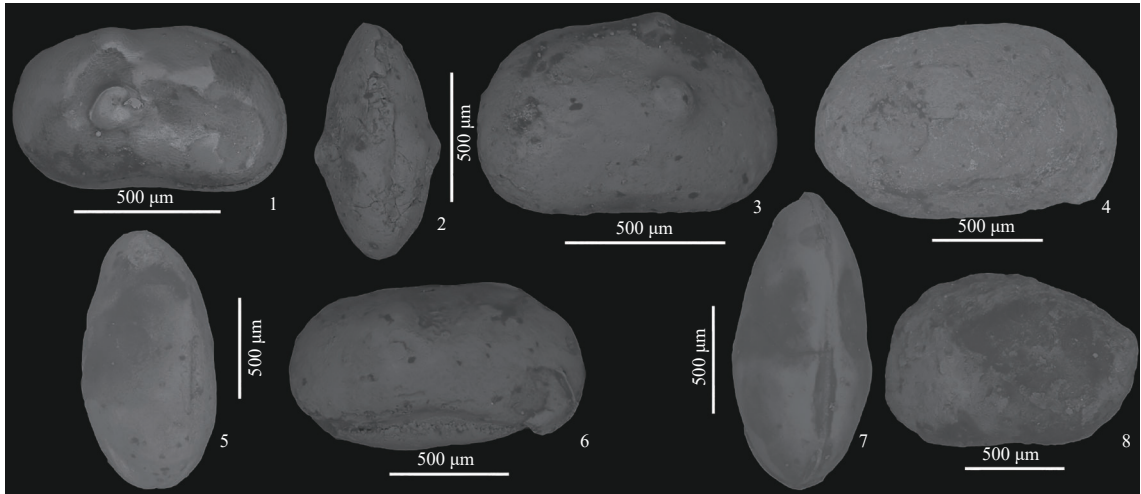
(b—h的具体位置见a;标本均保存在大庆油田勘探开发研究院岩心库。)

而稍向下凹,两端接近背缘时变窄,靠近腹缘的亦变窄;壳瓣前部和中部的生长带上,具有规则长短相间排列的线脊装饰,长线脊粗而直,排列疏松,相邻两根长线脊之间有2~5条短线(图3b—h),短线从生长带的下缘向上分布,仅占据每条生长带的下半部。

2.3 介形类

青山口组页岩发现丰富的介形类(图4),但各油层的种属和丰度差异明显(图5)。介形类多出现在半深湖—浅湖相生物灰岩中,少量分布于半深湖—深湖相黑色页岩和灰色泥岩中。Q1—Q6油层的介形类属种较

少,仅发现 *Cypridea adumbrata*, *Triangulicypris torsuosus*, *Limnocypridea copiosa* 和 *Ziziphocypris regusa*, 壳表多光滑或具浅蜂孔,为深水环境中的底栖生活类型。Q7—Q9油层的介形类种属和丰度都明显增加,出现 *Cypridea fuyunensis*, *Triangulicypris symmetrica*, *Limnocypridea inflata*, *Lycoperocypris flatilis*, *Limnocypridea bucerusa*, *Lycoperocypris angularis* 和 *Cypridea dekhoinensis* 等新种属,以壳表具瘤、刺的类型占据主导地位,代表了浅水环境下,具弱游泳能力的生态组合类群。介形类的具体鉴定特征可参考 Xi等(2012)^[17], Wan等(2013)^[18]和张智礼等(2014)^[32]。



1. *Limnocypridea copiosa* Sou, 1959 整壳右视; 2. *Limnocypridea copiosa* Sou, 1959 整壳背视; 3. *Limnocypridea copiosa* Sou, 1959 整壳左视; 4. *Cypridea nota* Ye, 1976 整壳右视; 5. *Cypridea nota* Ye, 1976 整壳背视; 6. *Cypridea adumbrata* Sou, 1960 整壳右视; 7. *Cypridea adumbrata* Sou, 1960 整壳背视; 8. *Triangulicypris* sp. 整壳右视

图 4 松辽盆地古龙凹陷古页 8HC 井青山口组页岩中发现的代表性介形类

Fig. 4 Representative ostracods discovered in the shale of the Qingshankou Formation in Well GY8HC in the Gulong Sag, Songliao Basin

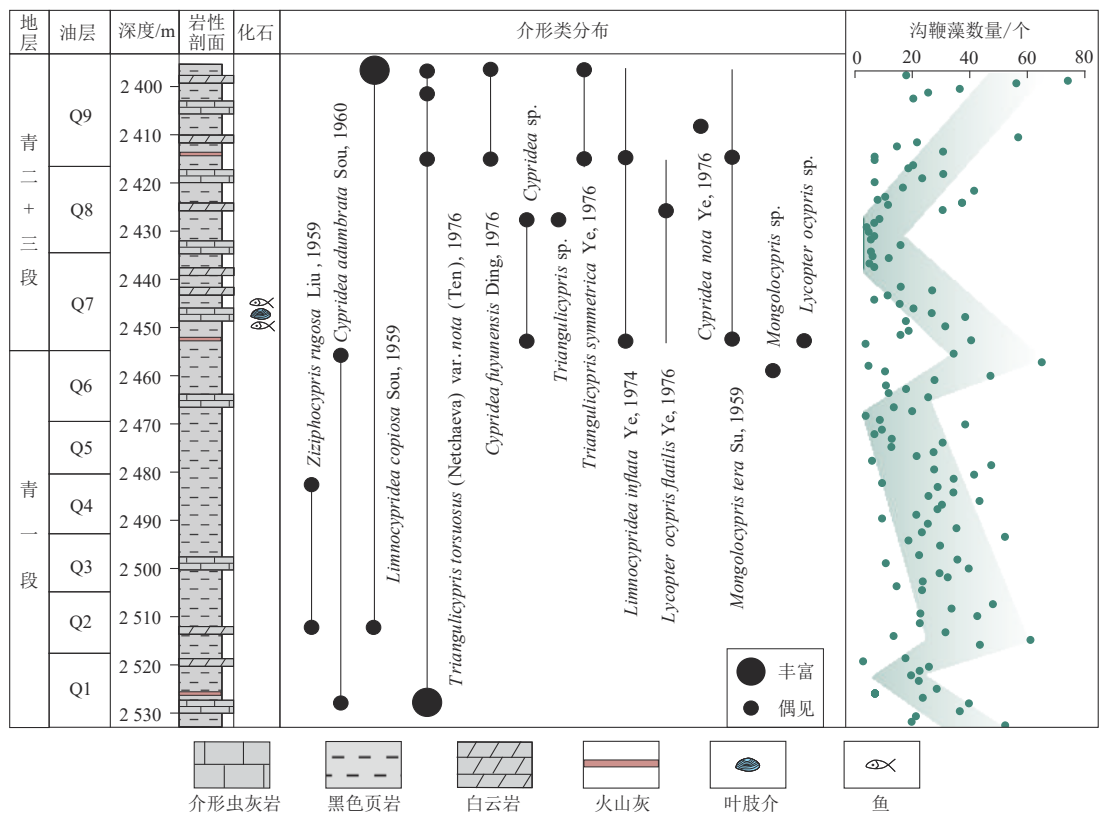


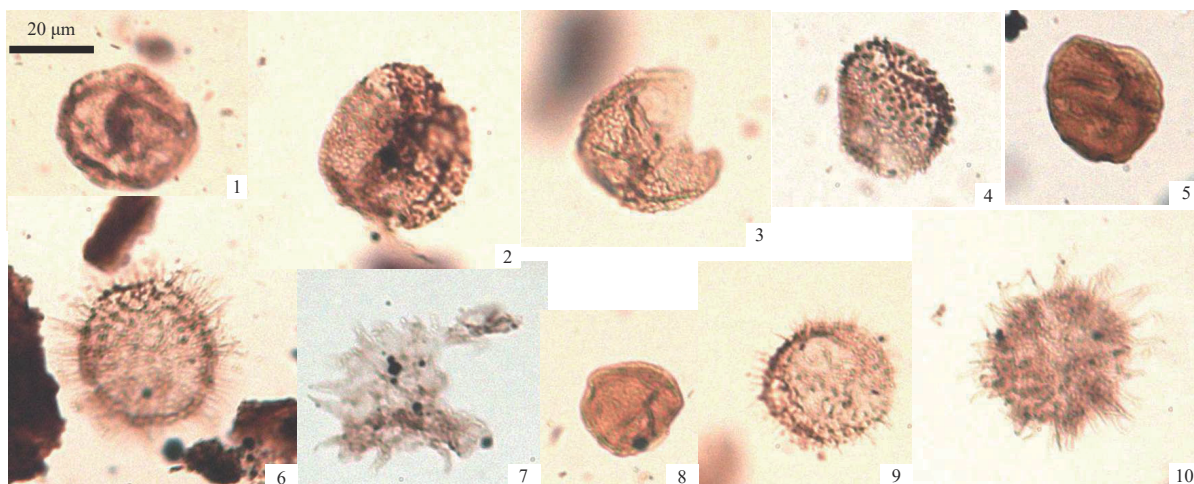
图 5 松辽盆地古龙凹陷古页 8HC 井青山口组介形类与沟鞭藻丰度变化

Fig. 5 Abundance of ostracods and dinoflagellates in the Qingshankou Formation of Well GY8HC in the Gulong Sag, Songliao Basin

2.4 藻类

经鉴定,青山口组 Q1—Q9 油层藻类化石总计 16 属 14 种和部分未定种(图 6)。因藻类化石丰度差异较大,

化石丰富的样品至少统计 200 粒,相对丰富的样品统计 100 粒或 4 片标准薄片,化石稀少的则统计 8 片标准薄片,以此作为所对应层位的化石丰度。对单样品中数量大于 50 粒的化石门类进行百分含量计算。整体来



1. *Leisphaeridia/Granodiscus* spp.; 2. *Verrucosphaera* sp.; 3. *Batiacasphaera hennanensis* He, Zhu et Jin, 1989; 4. *Filisphaeridium* spp.; 5. *Dinogymniopsis daqingensis* Gao, He et Qiao, 1992; 6. *Kiokansium declinatum* Gao, He et Qiao, 1992; 7. *Pediastrum boryanum* (Turpin, 1828) Meneghini, 1840; 8. *Dinogymniopsis minor* Gao, He et Qiao, 1992; 9. *Operculodinium capituliferum* He, Zhu et Jin, 1989; 10. *Cleistosphaeridium baculatum* He et Li, 1981

图6 松辽盆地古龙凹陷古页8HC井青山口组页岩中的疑源类和沟鞭藻类

Fig. 6 Acritarchs and dinoflagellates fossils from the Qingshankou Formation of Well GY8HC in the Gulong Sag, Songliao Basin

看,各油层藻类化石组成特征基本类似,主要表现为:

1) 球形疑源类占绝对优势,含量35.8%~9.6%,平均85.0%;沟鞭藻次之,含量0.4%~64.2%,平均15.0%;绿藻仅个别出现,其平均含量可忽略不计。

2) 球形疑源类中,*Leisphaeridia*和*Granodiscus*含量最高,总占比29.9%~95.7%,平均75.6%;其次为*Filisphaeridium*,占0~29.7%,平均8.5%;其他如*Verrucosphaera*,*Dictyotidium*和*Baltisphaeridium*等少量或个别见及。

3) 沟鞭藻中,*Dinogymniopsis*含量最高,占0~59.7%,平均12.6%,绝大多数都为*D. daqingensis*。*Kiokansium*和*Operculodinium*虽有连续出现,但各自平均含量不高。前者占0~10.3%,平均0.8%,主要为*Kiokansium regulatum*和*Kiokansium declinatum*;后者占0~7.6%,平均1.3%,主要为*Operculodinium capituliferum*。其他如*Batiacasphaera hennanensis*,*Sentusidinium*,*Cleistosphaeridium nenjiangense*和*Bosedinia*等多为零星出现。值得注意的是,沟鞭藻丰度在Q1, Q2, Q7和Q9油层沉积时有所增加(图5)。

4) 绿藻仅发现有水网藻科的*Pediastrum boryanum*。

3 Q1—Q9油层沉积古水体环境演变

3.1 满洲鱼、叶肢介指示Q7油层沉积时的海水入侵

Q7油层虽发现丰富的化石组合,但鱼化石只有*Manchurichthys* sp.。鱼类化石对生命演化溯源、地层

对比和古水体环境判识等具有重要意义,前人对东北地区鱼类化石做过大量工作,但满洲鱼只在吉林省延边地区和吉中蛟河县一带有所发现。青山口组更是以量大、单一的满洲鱼为代表^[10]。满洲鱼不是最原始的真骨鱼类,而是比较进步的真真骨鱼类(euteleosteans)中的原始种类^[10]。原始真真骨鱼全球广布,已发现和描述的类群包括*Avitosaurs*,*Barcarnechthys*,*Erichalcis*,*Gaudryella*,*Gharburia*,*Humbertia*,*Kermichthys*,*Manchurichthys*,*Paravincigurria*和*Stompooria*^[33]。*Manchurichthys*和松花鱼、吉林鱼(嫩江组)与黎巴嫩晚白垩世赛诺曼期海相地层中的*Gaudryella*和*Humbertia*相近,而与后两类鱼相近的一些鱼类也大部分分布在地中海沿岸的海相地层中^[8-9],因此,松辽盆地含满洲鱼的地层和海洋之间很可能存在一定联系。但Q7油层的鱼化石与同时代真正的海生鱼群相比,成分又显得贫乏,推测青山口组Q7油层沉积时并不是海相沉积,而是与海水有某种联系的半咸水或微咸水沉积。张弥曼和周家健(1978)也认为青山口组是一种和海水有一定联系、接受了一定数量海生生物环境下的沉积,或者就是海、陆过渡相沉积^[10]。

叶肢介化石一般出现在陆相地层中,因其数量多、演化快、分布广泛,已成为中国和邻近地区中生代非海相生物地层划分和对比研究的重要手段之一^[15]。崔同翠(1987)对青山口组叶肢介进行了系统研究,认为青山口组化石种类地方性色彩强烈,其中99%的化石是土著种^[14]。本研究发现的*Nemestheria qingshankouensis*属种单一,丰度较大;且仅见于Q7油层,发现层位与*Manchurichthys* sp.有一定交错(图1b)。线叶肢介在

中国白垩系陆相沉积中广泛出现,在西北喀什地区和美国德克萨斯州塞诺曼期的海-陆交互相沉积中也有发现,是实现中国陆相白垩系沉积与国际海相对比的重要证据^[15]。因此,*Nemestheria qingshankouensis*在Q7油层以单一种属出现,可能也指示了存在与海水有一定联系的微咸-半咸水环境。

3.2 介形类组合带指示水进-水退变化

介形类在同一时期或同一地区内可有多個种属,因此可根据介形类的分布范围、丰度大小、分异度等将相近种属进行归类,组建介形类组合带^[16-18],利用不同种属的介壳化石,来限定水体环境变化。单一属种的介形类分布可能受湖水pH值、营养物丰度和氧化-还原程度的影响,种属组合和群落特征则主要反映了沉积相变化^[32, 34-35]。

青山口组是松辽盆地介形类生物繁盛期,*Cypridea*, *Limnocypridea*和*Triangulicypris*等属尤其繁盛,而且对环境变化特别敏感,发育—繁盛—消失的规律明显^[36]。Xi等(2012)和Wan等(2013)将青山口组介形类自下而上划分为6个组合带^[17-18]。本研究发现Q1—Q6油层主要为*Triangulicypris torsuosus*—*Triangulicypris torsuosus nota*组合带,种属少,分布时间长(图5),指示高水位域的深水沉积环境(图7a);Q7—Q9油层的介形类种属显著增多,出现了更多的*Cypridea*和*Limnocypridea*分子(图5),指示低水位域的半深湖-浅湖相沉积环境(图7b)。因此,自Q1—Q6油层至Q7—Q9油层出现了一次大范围湖退,这与前人根据岩相分析所得结果^[6-7]一致。

Q7—Q9油层的介形类多出现在生物灰岩中,这些生物灰岩多质纯、贫陆源碎屑,并可见互层的白云岩。生物灰岩与白云岩的频繁交互一方面说明这些白云岩可能为准同生白云岩,而非次生白云石化的产物;另一方面也指示微咸-半咸水环境,水体pH值高,矿化度高^[32]。青山口组白云岩被认为形成于有氧至缺氧动态演化的古湖泊底水和孔隙水环境^[37],可能与海水入侵有关^[38]。Q7—Q9油层介形类组合带是以壳表具瘤、刺的类型占据主导地位,与Fu等(2022)发现的结果^[39]一致。这类介形类组合也多出现在海相和海陆交互相沉积物中^[24]。因此,Q7—Q9油层的介形类种属增多和碳酸盐沉积增加可能与湖平面下降和海水入侵共同导致的水体咸化有关。

3.3 藻类化石组合指示近海湖泊沉积环境

青山口组藻类化石可称为*Leisphaeridia*/*Granodiscus*-*Filisphaeridium*-*Dinogymniopsis*组合。其中最为丰富的

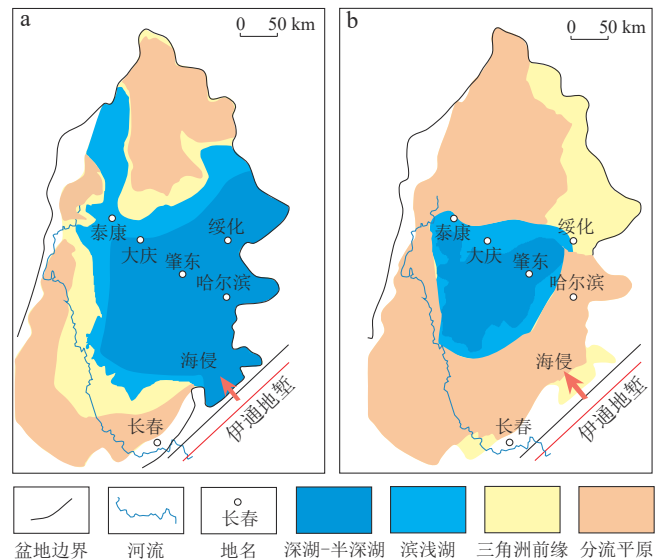


图7 松辽盆地青山口组Q1—Q6油层(a)和Q7—Q9油层(b)沉积古环境对比(据文献[24]修改)

Fig. 7 Comparison of sedimentary environments between Q1—Q6 oil layers (a) and Q7—Q9 oil layers (b) of the Qingshankou Formation, Songliao Basin (modified from [24])

*Leisphaeridia*是非常低等原始的疑源类分子,在1.64 Ga的海相串岭沟组沉积物中就广泛存在^[40]。*Leisphaeridia*的最早出现时代可追溯到古元古代(>1.8 Ga)^[41],早于真核藻类最早出现时代(~1.7 Ga)^[42],这意味着青山口组页岩的有机质来源存在大量的低等疑源类贡献。

沟鞭藻是青山口组页岩中分布最广的真核藻类,其形态特征与水体盐度、温度和离海岸线的远近有密切关系^[43]。现生沟鞭藻在海水、半咸水和淡水湖泊中都能生存^[11],但海生沟鞭藻组合和非海生沟鞭藻组合却有很大区别。前者以丰度和分异度高以及收缩式囊泡发育为主要特征;后者丰度高但分异度低,即使出现收缩式囊泡,其刺一般也较细短^[12]。青山口组全段所含沟鞭藻类化石丰度一般,且分异度低,属于近海湖泊生活的非海生沟鞭藻类组合。所见沟鞭藻组合中*Dinogymniopsis*, *Kiokansium*, *Operculodinium*, *Bosedinia*, *Batiacasphaera*, *Sentusidinium*和*Cleistosphaeridium*等可能都是在半咸水环境下发生了变异,部分具简单的密集刺状突起,更适于生活在微咸-半咸水环境^[12]。它们在Q1, Q2和Q7油层的峰值丰度与Hu等^[22](2015)在松科1s井中识别的海生金藻和海绵等海洋生物出现的层位^[22]具有可对比性(图8),可能也意味着存在海洋来源沟鞭藻的贡献。相反的是,沟鞭藻在Q5, Q6和Q8油层的低丰度(图5)则可能是由于短暂性海侵结束,湖平面上升导致水体变淡,不适于咸水型海洋生物繁盛。

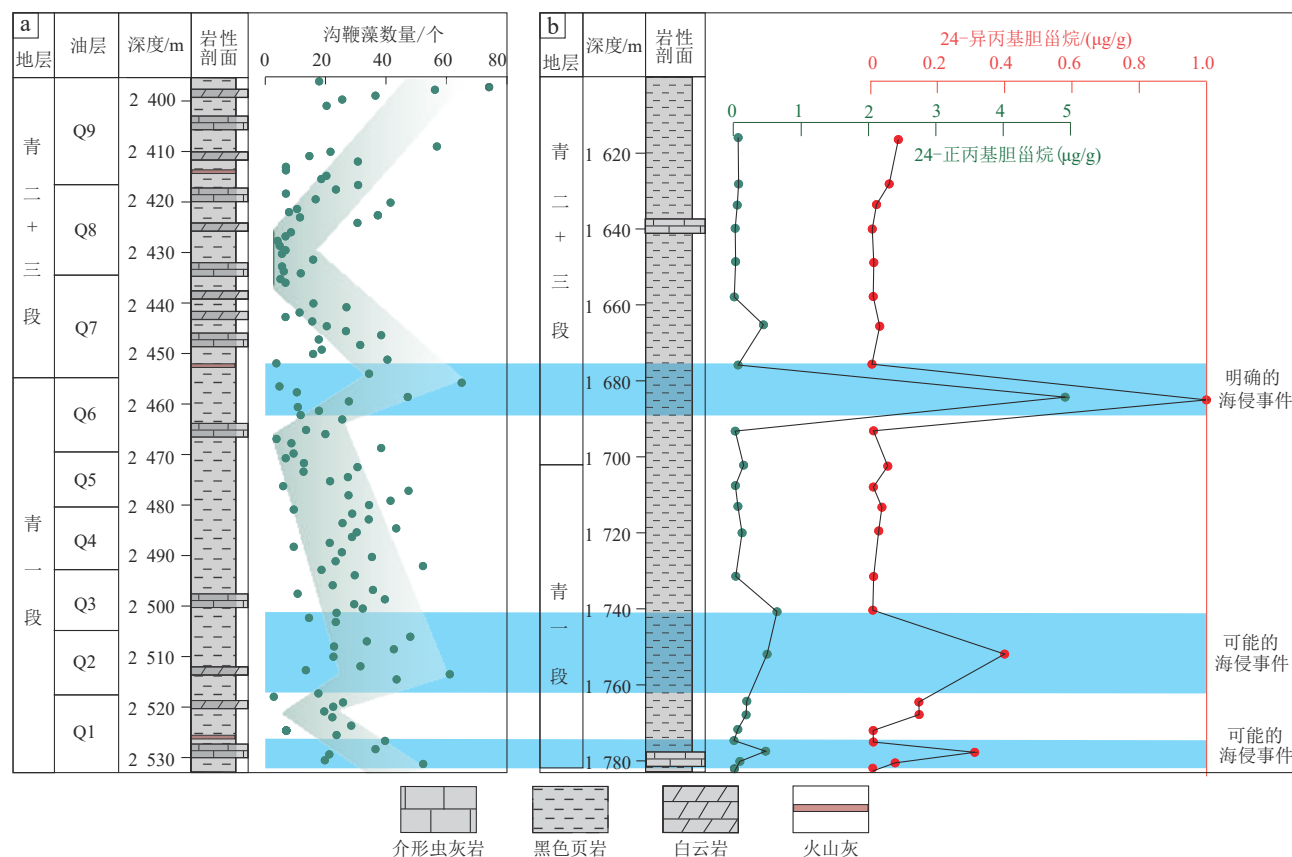


图8 松辽盆地古龙凹陷古页8HC井沟鞭藻丰度(a)和松科1s井海相生物标志物浓度(b)指示的海侵事件

Fig. 8 Marine transgression events indicated by the abundance of diatoms in Well GY8HC (a) and the contents of biomarkers of marine organisms in Well Songke1s (b) in the Gulong Sag, Songliao Basin

(24-异丙基胆甾烷是海绵的专属生标, 24-正丙基胆甾烷是海生金藻的专属生标, 数据引自文献[22]。)

4 松辽古湖泊海侵事件的争议及其地质意义

有关青山口组是否存在海侵事件是一个长达近半个世纪的重大争议问题。虽然从古生物化石^[8-10, 12, 19]、生物标志物^[20-22]、黄铁矿硫同位素^[44]、矿物组成^[37, 45]等多个方面提出了大量证据, 并提出伊通地堑可能是湖海通道^[20-21], 但这一观点一直受到质疑。一个很重要的原因是海侵属于地质事件, 但不同研究之间对比的等时性、系统性和同步性较差, 难以对海侵事件给出准确约束^[24]。整体来看, 松辽盆地青山口组的鱼、叶肢介化石数量丰富, 但属种单一, 地方特色强烈^[8-10, 14], 绝大多数介形类也都是地方性分子^[16], 沟鞭藻的种属类型单调、丰度低而优势度高, 孢囊个体普遍小于海生种类^[13], 不支持松辽古湖盆与外海的长期连通。

高精度的古生物学研究发现, 在Q7油层沉积时期, 对应着鱼、介壳类等的同时出现(图1b)和沟鞭藻、介形类的繁盛(图5), 与Q1—Q6油层化石种类稀少的特征有

着很大差异, 指示了一次明显的环境突变和生物多样性事件。一些海相或海陆过渡相生物分子的出现并不能用简单的湖平面下降给予解释, 很可能指示松辽古湖盆并不是完全的封闭体系, 而是与外海存在一定的连通, 至少在Q7油层沉积期发生了比较明确的海侵事件。结合沟鞭藻、海生金藻和海绵等的丰度变化(图8), 笔者推测在Q1和Q2油层沉积期间可能也发生了海侵事件。相比于Q1—Q6油层的湖泊高水位期, Q7油层的海侵信号增强可能与低水位期的半深湖—浅湖相沉积环境有关。

事实上, 海侵事件和湖海连通虽然可以让海洋生物进入湖泊, 但仍然有可能使近海湖泊保持淡水—微咸水属性, 而且并不破坏湖泊中的原生生态系统。比如委内瑞拉北部的马拉开波湖(图9), 虽然与海洋保持连通已超过10 kyr^[46], 但除北方少部分区域的湖水为咸水—半咸水之外, 大部分区域的湖水仍是淡水, 浮游生物分布也随湖水盐度梯度而变化^[47-48]。导致这种情况出现的原因包括: ①湖海通道狭窄, 相连时间较短, 但湖泊面积较大, 使海湖间的水体交换十分缓慢, 海水对湖泊的影响仍然有限^[46]; ②湖泊位于低纬度区($9^{\circ} \sim$

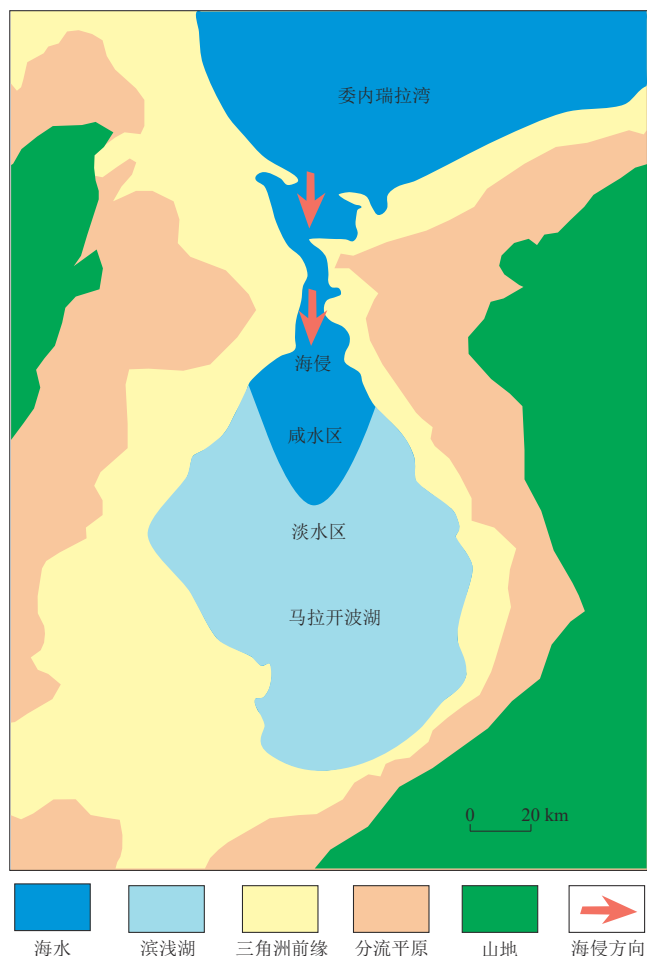


图9 现代马拉开波湖的湖-海连通模式

Fig. 9 Lake-sea connection model of the modern Maracaibo Lake

10°N), 周边年降水量高, 形成数量众多的河流, 向湖泊汇入淡水, 进一步降低海水入侵对湖泊的淡水属性和生态组成的影响程度^[47]。

古松辽盆地与马拉开波湖存在一定程度的可比性。首先, 松辽盆地在白垩纪是一个面积达 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的巨型湖泊^[6], 湖海通道(假设为伊通地堑)距离长、宽度窄。即使发生湖海连通事件, 海水入侵范围也十分有限, 但并不妨碍少量海洋生物进入。其次, 白垩纪是热室气候期, CO_2 浓度高, 气候非常炎热^[49]。受东亚季风影响, 松辽盆地在白垩纪可能多次经历长时间强降雨事件^[50]。湖平面上升期的青山口组Q1—Q6油层和相对高水位的Q8油层沉积期可能因大量淡水注入, 缓冲海侵影响。在相对低水位的Q7油层沉积期, 海侵特征则较为明显。再次, 强海侵事件是海水经地表到达湖泊的水文现象, 一般受控于地球轨道周期变化引发的天文大潮事件, 与太阳和月球对地表海水的引潮力有关^[51]。当淡水河流量不足时, 更容易引发海水倒灌、漫堤, 沿湖海通道进入湖泊。最新研究结果显示, 在青

山口组沉积的约91 Ma和嫩江组沉积前的约86 Ma各存在一次地球轨道偏心率和斜率周期共振跃迁事件^[52]。嫩江组是松辽盆地在桑托期(85.8 ~ 83.5 Ma)三级湖平面上升期发育的富有机质黑色页岩^[6]。在地球化学和古生物学证据上, 嫩江组具有与青山口组极其一致但更为明显的海侵特征^[8-10, 12, 19, 21-22, 44, 53]。因此, 地球轨道力驱动的气候扰动可能是导致松辽盆地及近海的水文循环发生变化, 进而发生海侵事件的“幕后推手”^[52]。

湖平面上升和海侵事件使松辽盆地古水体环境和生态系统发生明显变化, 促进了湖泊中初级生产力勃发和水体咸化分层, 有利于有机质保存, 最终导致了青山口组和嫩江组两套富有机质黑色页岩的全盆地发育^[6]。这两套黑色页岩不仅成为松辽盆地常规油的主力烃源岩, 也成为当前页岩油勘探的最重要目地层, 尤其是古龙地区的青山口组页岩^[1]。由此来看, 海侵事件对松辽盆地烃源岩发育是有利的, 但对页岩油聚集的影响仍不好判定, 因为后者还受不同岩相的有机质丰度、储集空间大小、运移通道走向及顶底板封闭性等的共同影响^[54-59]。因此, 海侵事件与页岩油聚集的关联性仍有待深入研究。

6 结论

1) 古页8HC井的化石鉴定提供了古龙页岩沉积期存在湖海连通和海水入侵的综合古生物学证据, 证实松辽古湖泊在青山口组Q1—Q6油层沉积期整体以高水位体系的淡水—微咸水环境为主。但鱼、叶肢介、介形类和沟鞭藻等化石证据支持Q7油层沉积时发生了低水位体系的海侵事件。沟鞭藻在Q1—Q9油层的丰度分布进一步指示海侵可能在Q1和Q2油层沉积时已经发生, 对应于湖平面上升初期。

2) 通过与现代马拉开波湖的对比, 提出松辽盆地海侵可能是在独特地理位置和气候环境下的暂时性湖海连通, 虽提供了海洋生物, 但并未显著改变古湖泊整体的水体属性和生态组成。

3) 推测地球轨道偏心率和斜率周期共振跃迁事件可能导致了当时的气候扰动和天文大潮, 使松辽盆地在土仑期湖平面上升时, 发生了海侵事件, 形成青山口组优质烃源岩。因此, 海侵事件有利于松辽盆地黑色页岩发育, 但与页岩油聚集的关联性仍有待深入研究。

致谢: 中国石油勘探开发研究院的刘合院士为本研究的实施提供了大量帮助, 并对文章修改提供了宝贵建议; 中国地质大学(北京)万晓樵教授、席党鹏副教授和中国科学院南京地质古生物研究所的季兴开副研

究员在介形类、藻类化石鉴定和文章修改方面提供了指导性意见;大庆油田页岩油勘探开发指挥部于洪波高级工程师和李东旭高级工程师、中国石油集团渤海钻探工程有限公司第一钻井分公司副经理吴墨染、70565 钻井队队长杨巍,渤海钻探泥浆技术服务公司陈铭在油田现场岩屑打捞清洗过程中给予了诸多关心和帮助,在此一并表示特别感谢。

参 考 文 献

- [1] 孙龙德,刘合,何文渊,等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 453-463.
SUN Longde, LIU He, HE Wenyuan, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 453-463.
- [2] 朱国文,王小军,张金友,等. 松辽盆地陆相页岩油富集条件及勘探开发有利区[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 110-124.
ZHU Guowen, WANG Xiaojun, ZHANG Jinyou, et al. Enrichment conditions and favorable zones for exploration and development of continental shale oil in Songliao Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 110-124.
- [3] 崔宝文,赵莹,张革,等. 松辽盆地古龙页岩油地质储量估算方法及其应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(3): 14-23.
CUI Baowen, ZHAO Ying, ZHANG Ge, et al. Estimation method and application for OOIP of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(3): 14-23.
- [4] 黎茂稳,马晓潇,金之钧,等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 1-25.
- [5] 王晓梅,张水昌,何坤,等. 最小含氧带和硫化环境控制14亿年前有机质生烃能力[J]. 科学通报, 2021, 66(23): 3005-3017.
WANG Xiaomei, ZHANG Shuichang, HE Kun, et al. OMZ and euxinic sulfidic environments dominating hydrocarbon generation potential of organic matter 1.4 billion years ago [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(23): 3005-3017.
- [6] WANG Chengshan, FENG Zhiqiang, ZHANG Laiming, et al. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, Northeast China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 385: 17-30.
- [7] LIU Bo, WANG Haoli, FU Xiaofei, et al. Lithofacies and depositional setting of a highly prospective lacustrine shale oil succession from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the Gulong Sag, northern Songliao Basin, Northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(2): 405-432.
- [8] 张弥曼,刘智成. 两个原始的真真骨鱼(Euteleostei)——满洲鱼和松花鱼——东北白垩纪鱼化石之三[J]. 古脊椎动物与古人类, 1977, 15(3): 184-193, 235.
ZHANG Miman, LIU Zhicheng. Cretaceous fishes from Northeast China. 3. Two primitive euteleosts-Manchurichthys and Sungarichthys [J]. Vertebrata Palasiatica, 1977, 15(3): 184-193, 235.
- [9] 张弥曼,周家健,刘智成. 东北白垩纪含鱼化石地层的时代和沉积环境——东北白垩纪鱼化石之四[J]. 古脊椎动物与古人类, 1977, 15(3): 194-197, 236.
ZHANG Miman, ZHOU Jiajian, LIU Zhicheng. Cretaceous fishes from Northeast China. 4. The age and depositional environment of Cretaceous fish-bearing strata of Northeast China [J]. Vertebrata Palasiatica, 1977, 15(3): 194-197, 236.
- [10] 张弥曼,周家健. 我国东部中、新生代含油地层中的鱼化石及有关沉积环境的讨论[J]. 古脊椎动物与古人类, 1978, 16(4): 229-237, 297.
ZHANG Miman, ZHOU Jiajian. On the fossil fishes in Mesozoic and Cenozoic oil-bearing strata from East China and their sedimentary environment [J]. Vertebrata Palasiatica, 1978, 16(4): 229-237, 297.
- [11] 高瑞祺,乔秀云. 松辽盆地非海相沟鞭藻化石的发现及其对陆相生油环境的新解释[J]. 大庆石油地质与开发, 1989, 8(3): 35-41, 103-106.
GAO Ruiqi, QIAO Xiuyun. Discovery of non-marine dinoflagellate fossils in Songliao Basin and its contribution to renewing the interpretation of continental oil generation environment [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1989, 8(3): 35-41, 103-106.
- [12] 高瑞祺,何承全,乔秀云. 松辽盆地白垩纪两次海侵的沟鞭藻类新属种[J]. 古生物学报, 1992, 31(1): 17-18, 20-29, 133-136.
GAO Ruiqi, HE Chengquan, QIAO Xiuyun. A new genus and species of Cretaceous dinoflagellates from two transgressive beds in Songliao Basin, NE China [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1992, 31(1): 17-18, 20-29, 133-136.
- [13] 李杰,茅绍智,徐钰林,等. 松辽盆地北部晚白垩世陆相沟鞭藻及疑源类特征与沉积环境研究[J]. 现代地质, 2000, 14(3): 267-272.
LI Jie, MAO Shaozhi, XU Yulin, et al. The Late Cretaceous nonmarine dinoflagellates, acritarchs and sedimentary environment in the northern Songliao Basin [J]. Geoscience, 2000, 14(3): 267-272.
- [14] 崔同翠. 松辽盆地白垩纪叶肢介化石[M]. 北京:石油工业出版社, 1987.
CUI Tongcui. Cretaceous Conchostraca in the Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987.
- [15] 陈丕基. 中国白垩纪叶肢介生物地层学[J]. 地层学杂志, 2012, 36(2): 300-313.
CHEN Piji. Cretaceous Conchostracan biostratigraphy of China [J]. Journal of Stratigraphy, 2012, 36(2): 300-313.
- [16] 叶得泉,黄清华,张莹,等. 松辽盆地白垩纪介形类生物地层学[M]. 北京:石油工业出版社, 2002.

- YE Dequan, HAUNG Qinghua, ZHANG Ying, et al. Cretaceous Ostracoda biostratigraphy in Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [17] XI Dangpeng, LI Shun, WAN Xiaoqiao, et al. Late Cretaceous biostratigraphy and paleoenvironmental reconstruction based on non-marine ostracodes from Well SK1 (South), Songliao Basin, Northeast China[J]. *Hydrobiologia*, 2012, 688(1): 113-123.
- [18] WAN Xiaoqiao, ZHAO Jing, SCOTT R W, et al. Late Cretaceous stratigraphy, Songliao Basin, NE China: SK1 cores [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 385: 31-43.
- [19] XI Dangpeng, CAO Wenxin, HUANG Qinghua, et al. Late Cretaceous marine fossils and seawater incursion events in the Songliao Basin, NE China[J]. *Cretaceous Research*, 2016, 62: 172-182.
- [20] 侯读杰, 黄清华, 黄福堂, 等. 松辽盆地海侵地层的分子地球化学特征[J]. *石油学报*, 1999, 20(2): 30-34.
- HOU Dujie, HUANG Qinghua, HUANG Futang, et al. The characteristics of molecular geochemistry of marine transgression strata in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20(2): 30-34.
- [21] 冯子辉, 方伟, 王雪, 等. 松辽盆地海侵制约油页岩形成的微体古生物和分子化石证据[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2009, 39(10): 1375-1386.
- FENG Zihui, FANG Wei, WANG Xue, et al. Microfossils and molecular records in oil shales of the Songliao Basin and implications for paleo-depositional environment [J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 2009, 39(10): 1375-1386.
- [22] HU J F, PENG P A, LIU M Y, et al. Seawater incursion events in a Cretaceous paleo-lake revealed by specific marine biological markers[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 9508.
- [23] 黄福堂, 迟元林, 黄清华. 松辽盆地中白垩世海侵事件质疑[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(3): 104-107.
- HUANG Futang, CHI Yuanlin, HUANG Qinghua. Doubts about the validity of the middle cretaceous transgression in Songliao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(3): 104-107.
- [24] 张顺. 松辽盆地晚白垩世“海侵”事件争论及其解决建议[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(3): 1-12.
- ZHANG Shun. Arguments and solutions on the transgression event in the Late Cretaceous of Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(3): 1-12.
- [25] WANG Tiantian, RAMEZANI J, WANG Chengshan, et al. High-precision U-Pb geochronologic constraints on the Late Cretaceous terrestrial cyclostratigraphy and geomagnetic polarity from the Songliao Basin, Northeast China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 446: 37-44.
- [26] SAITO K, ENDO S, MATSUZAWA I, et al. Mesozoic leptolepid fishes from Jehol and Chientao, Manchuria[M]. [S. l.]: Office of the Scientific Expedition to Manchoukuo, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, 1936.
- [27] 张文堂, 陈丕基. 吉林及黑龙江白垩纪新叶肢介化石[J]. *古生物学报*, 1964, 12(1): 1-25.
- ZHANG Wentang, CHEN Piji. New Cretaceous Conchostraca from Jilin and Heilongjiang [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1964, 12(1): 1-25.
- [28] GERSTAECKER A. Crustacea (ErsteHalfe)[M]//BRONN H G. Die Klassen und Ordnungen der Thier-Reichs, 5 (Part 1 Arthropoda). Leipzig: C. F. Winter, 1866: 1320.
- [29] LINDER F. Affinities within the Branchiopoda, with notes on some dubious fossils[J]. *Arkiv for Zoologi Utgivet av K. Svenska Vetenskapsakademien*, 1945, 37A(4): 1-28.
- [30] 张文堂, 陈丕基, 沈炎彬. 中国各门类化石——中国的叶肢介化石[M]. 北京: 科学出版社, 1976: 1-325.
- ZHANG Wentang, CHEN Piji, SHEN Yanbin. The categories of Chinese fossils-Conchostracan fossils of China [M]. Beijing: Science Press, 1976: 1-325.
- [31] KOBAYASHI T. On the two discontinuities in the history of the order Conchostraca [J]. *Proceedings of the Japan Academy*, 1972, 48(10): 725-729.
- [32] 张智礼, 蔡习尧, 张铭, 等. 松辽盆地晚白垩世青山口组—嫩江组一段介形类壳饰、壳形类型与环境关系分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(1): 135-147.
- ZHANG Zhili, CAI Xiyao, ZHANG Ming, et al. An analysis of the relationship between types of Ostracoda shell ornaments and shell shapes and the environment from Late Cretaceous Qingshankou Formation to 1st Member of Nenjiang Formation in Songliao Basin[J]. *Geology in China*, 2014, 41(1): 135-147.
- [33] FIELITZ C. A new Late Cretaceous (Turonian) basal euteleostean fish from Lac des Bois of the Northwest Territories of Canada[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2002, 39(11): 1579-1590.
- [34] 禹娜, 陈立侨, 赵泉鸿. 太湖介形虫分布与水环境因子间关系的典范对应分析[J]. *微体古生物学报*, 2007, 24(1): 53-60.
- YU Na, CHEN Liqiao, ZHAO Quanhong. CCA of ostracod distribution and environmental factors in the Taihu Lake[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2007, 24(1): 53-60.
- [35] 赵泉鸿, 翦知潜, 张在秀, 等. 东海陆架泥质沉积区全新世有孔虫和介形虫及其古环境应用[J]. *微体古生物学报*, 2009, 26(2): 117-128.
- ZHAO Quanhong, JIAN Zhimin, ZHANG Zaixiu, et al. Holocene benthic foraminifera and Ostracoda from the shelf mud area of the East China Sea and their paleoenvironmental implications [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2009, 26(2): 117-128.
- [36] 叶得泉, 徐静慧. 松辽盆地白垩纪介形类生物地层学特征[J]. *微体古生物学报*, 1994, 11(4): 429-438.
- YE Dequan, XU Jinghui. Biostratigraphic characteristics of Cretaceous Ostracoda from the Songliao Basin [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1994, 11(4): 429-438.
- [37] LIU Yuke, WANG Huajian, ZHANG Jinyou, et al. Rare earth elemental and Sr isotopic evidence for seawater intrusion event of the Songliao Basin 91 million years ago[J/OL]. *Petroleum Science*: [1-15, Available online 24 November 2022]. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.11.015>.
- [38] LIU Yuke, HE Wenyuan, ZHANG Jinyou, et al. Multielement imaging reveals the diagenetic features and varied water redox

- conditions of a lacustrine dolomite nodule [J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 9019061.
- [39] FU Xiuli, MENG Qian, BAI Yue, et al. Quantitative analysis of paleoenvironment of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin, Northeastern China [J]. *Interpretation*, 2022, 10 (3): SD75–SD87.
- [40] LYU Dan, DENG Yan, WANG Xiaomei, et al. New chronological and paleontological evidence for Paleoproterozoic eukaryote distribution and stratigraphic correlation between the Yanliao and Xiong'er basins, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2022, 371: 106577.
- [41] JAVAUX E J, LEPOT K. The paleoproterozoic fossil record: Implications for the evolution of the biosphere during earth's middle-age [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 176: 68–86.
- [42] AGIĆ H, MOCZYDŁOWSKA M, YIN Leiming. Diversity of organic-walled microfossils from the early Mesoproterozoic Ruyang Group, North China Craton—a window into the early eukaryote evolution [J]. *Precambrian Research*, 2017, 297: 101–130.
- [43] 袁德艳, 陈德辉, 乔秀云. 松辽盆地南部白垩纪非海相微体浮游藻类组合 [J]. *大庆石油地质与开发*, 1999, 18(4): 15–16.
- YUAN Deyan, CHEN Dehui, QIAO Xiuyun. Cretaceous non-marine microbial planktonic algae assemblage in southern Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1999, 18(4): 15–16.
- [44] CAO Hansheng, HE Wentong, CHEN Fajin, et al. Integrated chemostratigraphy ($\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{15}\text{N}$) constrains Cretaceous lacustrine anoxic events triggered by marine sulfate input [J]. *Chemical Geology*, 2021, 559: 119912.
- [45] 陈瑞君. 我国某些地区的海绿石特征及其对相环境分析的意义 [J]. *地质科学*, 1980, 15(1): 65–75, 99–102.
- CHEN Ruijun. Characteristics of glauconites from some regions and their significance in analyzing the facies environment [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1980, 15(1): 65–75, 99–102.
- [46] RODRÍGUEZ G. The Maracaibo system, Venezuela [M]// SEELIGER U, KJERFVE B. *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. Berlin: Springer, 2001: 47–60.
- [47] LAVAL B E, IMBERGER J, FINDIKAKIS A N. Dynamics of a large tropical lake: Lake Maracaibo [J]. *Aquatic Sciences*, 2005, 67(3): 337–349.
- [48] PLOTNIKOV I S, ALADIN N V. An overview of hybrid marine and lacustrine seas and saline lakes of the world [J]. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2011, 16(2): 97–108.
- [49] WANG Yongdong, HUANG Chengmin, SUN Bainian, et al. Paleo- CO_2 variation trends and the Cretaceous greenhouse climate [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 129: 136–147.
- [50] WANG Li, TIAN Yankuan, ZHAO Jiaju. A rapid hydroclimate change and its influence on the Songliao Basin during the Santonian-Campanian transition as recorded by compound-specific isotopes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 546: 109674.
- [51] PUGH D. *Changing sea levels: Effects of tides, weather, and climate* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [52] WU Huaichun, HINNOV L A, ZHANG Shihong, et al. Continental geological evidence for Solar System chaotic behavior in the Late Cretaceous [J]. *GSA Bulletin*, 2023, 135(3/4): 712–724.
- [53] 曹怀仁. 松辽盆地烃源岩形成环境与页岩油地质评价研究 [D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2017.
- CAO Huairen. The paleo-environment of source rock formation and geological evaluation of shale oil in the Songliao Basin [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [54] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 828–838.
- LIU Bo, SHI Jiaxin, FU Xiaofei, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 828–838.
- [55] 何文渊, 蒙启安, 张金友. 松辽盆地古龙页岩油富集主控因素及分类评价 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(5): 1–12.
- HE Wenyan, MENG Qi'an, ZHANG Jinyou. Controlling factors and their classification-evaluation of Gulong shale oil enrichment in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 1–12.
- [56] 王跃文, 陈百军, 陈均亮, 等. 松辽盆地古龙页岩油层顶底板断层封闭性及油气聚集有利区优选 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(3): 53–67.
- WANG Yuewen, CHEN Baijun, CHEN Junliang, et al. Roof and floor faults seal of Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin and optimization of favorable areas for oil and gas accumulation [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(3): 53–67.
- [57] 张冰. 松辽盆地北部页岩储层地质评价及关键技术研究 [J]. *特种油气藏*, 2022, 29(5): 72–79.
- ZHANG Bing. Study on Geological Evaluation and Key Technologies for Shale Reservoirs in Northern Songliao Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(5): 72–79.
- [58] 何文渊, 冯子辉, 张金友, 等. 松辽盆地北部古龙凹陷古页8HC井地质剖面特征 [J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(1): 1–9.
- HE Wenyan, FENG Zihui, ZHANG Jinyou, et al. Characteristics of geological section of Well-GY8HC in Gulong Sag, Northern Songliao Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(1): 1–9.
- [59] 丁聪, 孙平昌, 热西提·亚力坤, 等. 松辽盆地青山口乡青山口组细粒沉积岩分类及其成因 [J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(4): 418–427.
- DING Cong, SUN Pingchang, Rexiti·YALIKUN, et al. Classification and genesis of fine-grained sedimentary rocks of Qingshankou formation in Songliao basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(4): 418–427.