

松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩层序等时格架下的有机质分布规律

张天舒¹,朱如凯¹,蔡毅¹,王华建¹,吕丹¹,周海燕¹,付秀丽²,刘畅¹,崔坤宁²,张素荣¹,王淳³,
吴松涛¹,张婧雅¹,姜晓华¹,冯有良¹,刘合¹

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国石油大庆油田公司,黑龙江大庆 163712;3. 北京大学能源研究院,北京 100871)

摘要:松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组陆相纯页岩型页岩油获得高产突破,但古龙页岩有机质分布的非均质性强,主控因素不清,制约有利区和甜点段预测。通过精细分析岩心、露头、薄片、地震、测井、地球化学和古生物等数据,针对湖相深水页岩特点,基于“层序等级”与“湖侵-湖退(T-R)旋回”理论,结合天文旋回研究进展,建立了深湖区高频层序等时格架。通过类比现代湖泊,建立了古湖泊沉积环境判别指标,分析了古生产力、氧化还原环境及沉积速率的耦合关系,探讨了高频层序格架下有机质富集非均质性的成因。研究认为:①古龙凹陷青山口组可划分为4个三级层序,其中,层序1和层序2识别出2个T-R旋回,由13个准层序组(52个准层序)构成;准层序和准层序组的沉积时长分别为约40 kyr和170 kyr。②层序格架下页岩发育3种岩相、4种纹层、5种组合类型、11种纹层组合模式和3种沉积微相;T-R旋回控制了沉积微相、岩相和纹层组合的纵向分布,其中,深湖相静水沉积和泥流沉积的黏土质页岩为有利岩相。③T-R旋回控制了有机质分布,湖泛面附近是有利部位;有利区/段为古龙凹陷的准层序组2以及三肇凹陷的准层序组1—4。该研究成果能够为页岩油有利区和甜点段预测提供沉积学依据。

关键词:有机质富集;沉积环境;层序地层;古龙页岩;松辽盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Distribution of organic matter in the Qingshankou Formation Shale, Gulong Sag, Songliao Basin observed within an isochronous sequence stratigraphic framework

ZHANG Tianshu¹, ZHU Rukai¹, CAI Yi¹, WANG Huajian¹, LYU Dan¹, ZHOU Haiyan¹, FU Xiuli², LIU Chang¹, CUI Kunning²,
ZHANG Surong¹, WANG Bo³, WU Songtao¹, ZHANG Jingya¹, JIANG Xiaohua¹, FENG Youliang¹, LIU He¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163002, China; 3. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Qingshankou Formation shale, Gulong Sag, Songliao Basin, has been gushing out oil in a rate stunning the Chinese oil industry. However, further prediction of sweet spots in the formation remains a challenge due to the highly uneven distribution of organic matter and confusion in the understanding of controlling factors. This study adopted the concepts of “hierarchy in sequence stratigraphy” and “transgressive-regressive (T-R) sequences”, with updated astronomical cycle research results to determine the accurate duration of sequences and re-establish an isochronous sequence stratigraphic framework specifically for lacustrine deep-water shale based on core, outcrop, and thin section observation, as well as seismic profile, well-logging, geochemical, and paleontological data analyses from a microcosmic to macroscopic scale. Subsequently, using modern lakes sedimentation as an analogy made it possible to propose qualitative and quantitative indexes for identifying paleo-water environment, and probe into the origin of the heterogeneity of organic matter enrichment under the sequence stratigraphic framework on the basis of the coupling relation among paleoproductivity, redox conditions, and sedimentation rate. The main conclusions are as follows: 1)

收稿日期:2023-02-22;修回日期:2023-05-20。

第一作者简介:张天舒(1982—),女,博士、高级工程师,层序地层与沉积地质。E-mail:zhangtianshu@petrochina.com.cn。

通信作者简介:朱如凯(1968—),男,博士、教授级高级工程师,沉积储层与非常规油气地质。E-mail:zrk@petrochina.com.cn。

基金项目:黑龙江省揭榜挂帅项目(RIPED-2022-JS-1740, 2022-N/G-44405)。

There are four third-order sequences in Qingshankou Formation Shale, Gulong Sag, Songliao Basin. Among them, SQ1 and SQ2 consist of two T-R sequences of 13 parasequence sets (made up of 52 parasequences). The durations of parasequence and parasequence set are approximately 40 kyr and 170 kyr, respectively. 2) Three types of lithofacies, four types of laminae, five laminae combinations, eleven laminae combination patterns, and three sedimentary microfacies have been recognized under the sequence stratigraphic framework. T-R cycles control the vertical distribution of laminae combination, lithofacies and sedimentary microfacies. The argillaceous shales deposited in deep-lake stagnant water and mud flow are prospective lithofacies. 3) T-R cycles control the enrichment of organic matter and different orders of flooding surfaces are the favorable locations for organic matter enrichment. Parasequence set 2 in Gulong Sag and parasequence sets 1 to 4 in Sanzhao Sag have been evaluated to be the most promising exploration targets. This study aims to provide sedimentological evidence for shale oil target area and “sweet spots” prediction.

Key words: organic matter enrichment, sedimentary environment, sequence stratigraphy, Gulong Shale, Songliao Basin

引用格式:张天舒,朱如凯,蔡毅,等. 松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩层序等时格架下的有机质分布规律[J]. 石油与天然气地质,2023,44(4):869-886. DOI:10. 11743/ogg20230406.

ZHANG Tianshu, ZHU Rukai, CAI Yi, et al. Distribution of organic matter in the Qingshankou Formation Shale, Gulong Sag, Songliao Basin observed within an isochronous sequence stratigraphic framework[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 869-886. DOI: 10. 11743/ogg20230406.

松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组陆相页岩油主体为纯页岩型页岩油^[1-4]。2021年大庆古龙陆相页岩油国家级示范区成立,古龙页岩油进入地质工程一体化综合勘探开发阶段。然而,古龙页岩的有机质分布非均质性强,有机质富集主控因素不清,制约有利区优选和甜点分布预测^[4-5]。朱如凯等提出,在层序等时格架下剖析细粒沉积的旋回性与有机质富集之间的内在联系,对盆地内富有机质页岩分布预测和页岩油气甜点段/区评价有重要的指导意义^[6]。

吴怀春等基于SK1井南孔的旋回地层学研究,提出天文轨道力通过影响古气候和沉积过程控制了有机质富集的旋回性^[7]。He Huang等根据SK1井南孔总有机碳含量(*TOC*)和埋藏有机碳同位素比值($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)进行天文调谐,认为约173 kyr的斜率调制周期控制了地球中高纬度海、湖相有机碳埋藏过程^[8]。石巨业等^[9]及彭军等^[10]对渤海湾盆地东营凹陷页岩层系开展天文旋回和高分辨率层序对比,指出斜率周期与高产层段具有一定耦合关系。这些研究并没有与岩相等建立联系,且缺少对有机质平面分布的探讨。崔宝文等^[11]和付秀丽^[5]等利用*TOC*和游离烃含量等建立了古龙页岩有机层序地层格架,并认为有机质丰度纵向上具旋回性变化。这些研究利用有机地化参数实现了快速横向对比,但有机质富集受综合因素控制,不具有区域等时性。

本文针对古龙凹陷青山口组湖相深水页岩特点,基于Catuneanu^[12]提出的“层序等级”理论和Embry^[13]

建立的“海侵-海退(T-R)”层序体系,分析岩心、露头、薄片、地震、测井、地球化学和古生物等数据,结合天文旋回研究进展,厘定了高频层序沉积时长,建立了等时格架。通过类比现代湖泊,建立了古湖泊水体环境判识指标,在等时格架下探讨了有机质分布非均质性的成因,为页岩油勘探开发中富油层段划分、有利区和甜点段预测提供科学依据。

1 区域地质概况

松辽盆地位于中国东北部,盆地面积约 $26\times 10^4\text{ km}^2$ ^[14]。根据盆地的构造和沉积特征,划分出6个一级构造单元,其中,古龙凹陷位于盆地北部中央坳陷区(图1a)。松辽盆地在青山口组一段(青一段)和嫩江组一段发生2次大规模的湖泛地质事件^[15-16]。中央坳陷区为青山口组的沉积和沉降中心,青一段和青二段中下部沉积了厚200~500 m的泥岩、页岩,夹薄层介形虫灰岩、泥质粉砂岩和泥质白云岩,有机质类型为I-II₁型,*TOC*整体大于1%,氢指数高,一般为600~800 mg/g,生油潜力大^[4-5,17]。齐家-古龙地区青一段和青二段中下部页岩成熟度(镜质体反射率 R_o)为1.20%~1.67%,是松辽盆地中-高成熟页岩油勘探的重点地区^[4]。大庆油田将青一段划分为Q1—Q6油层组,将青二段中下部划分为Q7—Q9油层组,这9个油层组是古龙页岩油勘探开发的重点层位(图1c)^[4-5,17]。

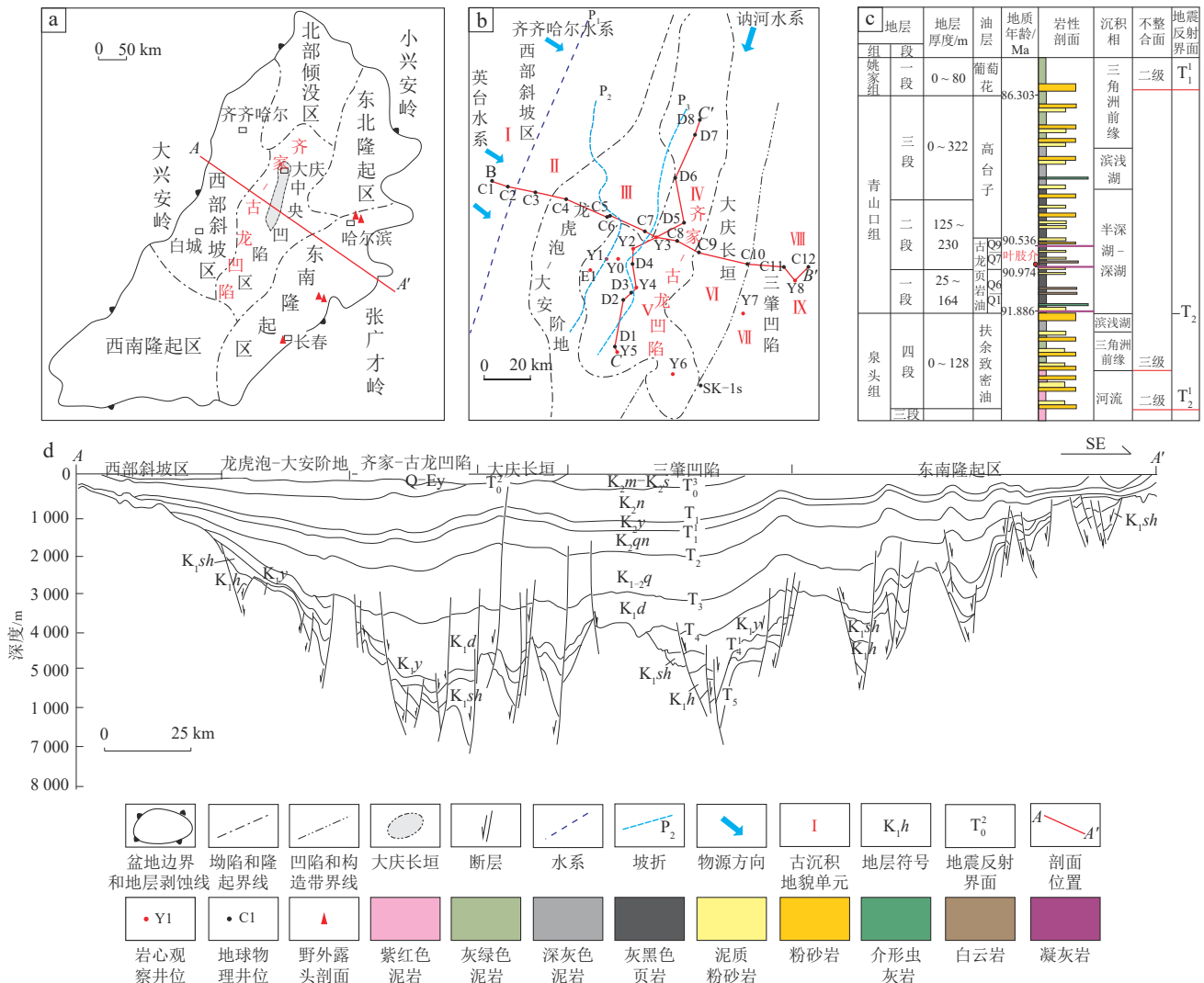


图1 松辽盆地地质概况(修改自参考文献[4-5,15-16])

Fig. 1 Geological setting of Songliao Basin(modified from [4-5,15-16])

a. 松辽盆地构造分区;b. 研究区井位、剖面位置及古沉积地貌单元;c. 松辽盆地青山口组地层柱状图;d. 松辽盆地构造剖面(剖面位置见图1a)

I. 西斜坡英台三角洲—湖湾区(P_1 以西,C1、C2井);II. 龙虎泡—大安阶地英台三角洲—浅湖—半深湖斜坡区(P_2 以西,C3、C4、C5、C6、E1井);III. 龙虎泡—大安阶地—古龙凹陷英台半深湖—深湖区(P_2 和 P_3 之间,C7、Y2、Y0、Y1、D3、D2井);IV. 齐家—古龙凹陷讷河三角洲—浅湖—半深湖斜坡区(P_3 以东,大庆长垣以西,D8、D7、D6、D5、Y3、C8井);V. 齐家—古龙凹陷英台半深湖—深湖区(P_3 以东,大庆长垣以西,D4、Y4、D1、Y5、Y6井);VI. 大庆长垣中央古隆起斜坡半深湖区(大庆长垣,C9、C10、SK-1s井);VII. 三肇凹陷中央古隆起斜坡半深湖区(Y7井);VIII. 三肇凹陷中央古隆起斜坡讷河浅湖—半深湖区(C11、C12井);IX. 三肇凹陷中部讷河半深湖—深湖区(Y8井)

2 研究数据与技术方法

2.1 研究井位与数据来源

本文对中央拗陷区10口钻井及东南隆起区5条野外露头剖面开展岩心描述(比例尺1:50)和采样分析(图1a,b)。研究数据来自721块样品(Y2和Y5井,采样间隔0.5 m),6口井(Y1—Y6井)火山灰追踪和磁化率—元素信息采集(Niton XL2t 950手持矿石XRF分析仪,采样间隔0.2 m),Y2井古生物201块样品处理(质

量约650 kg,采样间隔1 m),地震剖面解释2条,录井/测井64口井,薄片467个,地化测试5 562块次(中国科学院南京地质古生物所,中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心,核工业北京地质研究院)。岩心、地震、测井/录井和部分测试数据来自大庆油田有限责任公司勘探开发研究院。

2.2 湖相深水页岩高频层序地层划分

随着非常规油气勘探开发的不断推进,针对富有机质页岩层系的细粒沉积学研究兴起,层序格架内页岩有机质的时空分布规律引起关注^[6]。然而,三

级层序划分无法满足页岩油甜点段的勘探精度。与海相页岩不同,湖相页岩对构造、气候、湖平面和物源变化更为敏感,由于其粒度小、相变快、岩性复杂,很难用常规地球物理资料识别层序界面,从而限制了传统层序地层学的应用^[18-19]。页岩层系的地化指标对沉积环境变化较为敏感,XRF分析仪被广泛应用于页岩的地化数据获取,进而对比层序地层^[20-22]。然而,Maya T. LaGrange等总结地化参数在海相细粒沉积层序划分中的应用,认为化学地层学不能作为唯一的层序划分依据^[23]。近年来,很多学者利用测井和地化数据,运用曲线频谱属性分析、小波变换及旋回地层学方法综合划分页岩高频层序^[9-10, 24-30]。然而,这些研究侧重于定量技术的应用,缺少对于地质体的解剖^[31-32]。

2019年,Octavian Catuneanu提出“层序等级”概念,认为层序存在不同的级别,比三级层序尺度更小的层序(如:准层序等)被称为“高频层序”,厚度一般为1~10 m,时间跨度为0.1~100 kyr^[12]。1992年,Embry^[13]建立“T-R”层序体系,认为相对海(湖)平面是层序发育的主控因素,在一个层序内部划分出海(湖)侵旋回(T)和海(湖)退旋回(R)。最大海(湖)退面(MRS)和最大海(湖)泛面(MFS)在地震和岩心上较易识别,且T-R过程与气候、物源和生物波动具有较好的旋回性沉积响应,因此,T-R旋回被应用于层序划分^[29, 32]。

3 高频层序地层等时格架

松辽盆地一级层序界面是角度不整合面,可全盆地对比,如:登娄库组和泉头组之间的地震反射界面 T_3 (图1c,d);二级层序界面为角度不整合面,界面之上发育紫红色泥岩、底砾岩、冲刷面,构成向上变细的岩相序列,可全盆地对比,如:泉三段和泉四段之间的地震反射界面 T_2' 、姚家组和青山口组之间的地震反射界面 T_1' (图1c,d);三级层序界面是受二级层序界面限制的局部性不整合或沉积间断面,在斜坡区地震剖面表现为界面之下为顶超或削截,界面之上为上超,向盆地方向变为整合面^[15-16]。前人对青山口组的三级层序界面标定具有统一认识的是地震反射界面 T_1' ,但对于其他三级层序的划分尚不统一^[5, 15-16, 33-37]。

3.1 地震-钻井标定三级层序界面和最大湖泛面

将东西向地震-钻井剖面 $B-B'$ 和南北向地震剖面 $C-C'$ (图1b)以地震反射界面 T_1' 层拉平,识别3个

MRS和1个MFS,测井曲线识别5个三级层序界面和4个MFS,将青山口组划分4个三级层序(图2)。古龙凹陷和三肇凹陷为沉降和沉积中心,古龙凹陷的地层较厚。古龙凹陷受西部和北部三角洲物源影响,三肇凹陷受物源影响较少。层序1与层序2的界面 SB_2 (MRS)在半深湖区表现为地层叠置样式的转换面,准层序组7底界面之下为湖退浊积粉砂质泥岩,界面之上为湖侵黏土质页岩和纹层页岩。赵静根据SK-1s井青山口组孢粉和藻类含量认为,青一段和青二段界面(准层序组6与7的界面)存在气温和湿度从低到高的变化,青一段末期盆地快速沉降,发生快速湖侵,青二段上部湖盆抬升,出现干热的热带气候,湖泊变浅萎缩^[38]。Y1、Y2和Y5井的准层序组7底部发现同种叶肢介*Nemestheria qingshankouensis*,具生物等时地层意义,指示界面上、下水体环境发生变化,界面之上为湖侵水体淡化过程(图3)^[39]。Y2井介形虫化石表明, SB_2 上、下种属多样性差异大,界面之上湖水加深变淡可能是介形虫种属多样化的重要原因(图3)^[39]。地震剖面识别出青山口组底部稳定的强反射轴为二级MFS(地震反射界面 T_2),在岩心上表现为从泉四段三角洲前缘和浅湖砂岩向青山口组半深湖页岩快速变化。三级MFS在测井、地化及岩心上表现为在水体深且静水环境中沉积的黏土质页岩,反映弱物源、沉积速率较小的还原环境(图4)。

3.2 准层序、准层序组及体系域沉积特征

根据10口取心井的沉积特征,建立了3种准层序发育模式。①湖侵退积准层序:粒度向上变细,黏土质页岩为主,反映相对湖平面上升,弱物源,为静水泥质沉积夹浊流末端沉积;②早期湖退加积准层序:纹层页岩和黏土质页岩互层,反映相对湖平面小幅频繁波动,中等物源,为静水泥质沉积与浊流沉积互层;③晚期湖退进积准层序:粒度向上变粗,纹层增多、增厚,反映相对湖平面下降,中等-较强物源,为浊流沉积夹静水泥质沉积。根据10口取心井纵向上黏土矿物含量、陆源输入、水体环境、古气候、岩相及非黏土矿物纹层等变化趋势作为高频层序划分标志,并对比研究区64口井的测井/录井数据,将测井GR和AC曲线作为高频层序连井对比标志曲线。结合准层序发育模式,将青一段和青二段划分为52个准层序,13个准层序组,2个湖侵体系域和2个湖退体系域(分别包括1个早期湖退和1个晚期湖退体系域),并将每个准层序组和准层序划分出1个T-R旋回(图3),准层序组1—9在不同古沉积地貌之间可追踪对比(图2)。

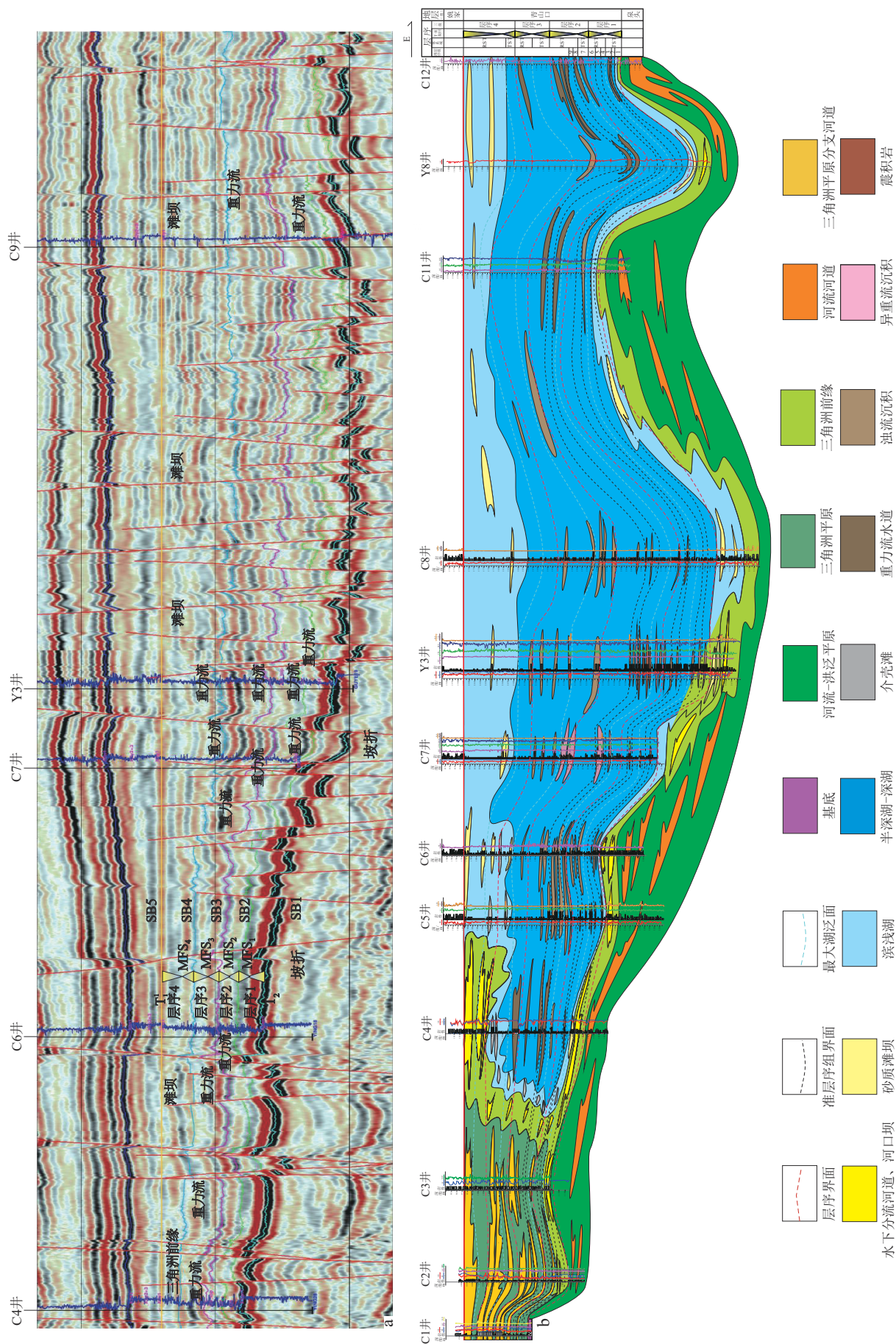


图 2 E-W well-tied seismic section showing sequence stratigraphy and cross-well sedimentary facies correlation, Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin (vertical scale: 1:1 000; horizontal scale: 1:150 000; see Fig. 1b for the location of profile B—B')

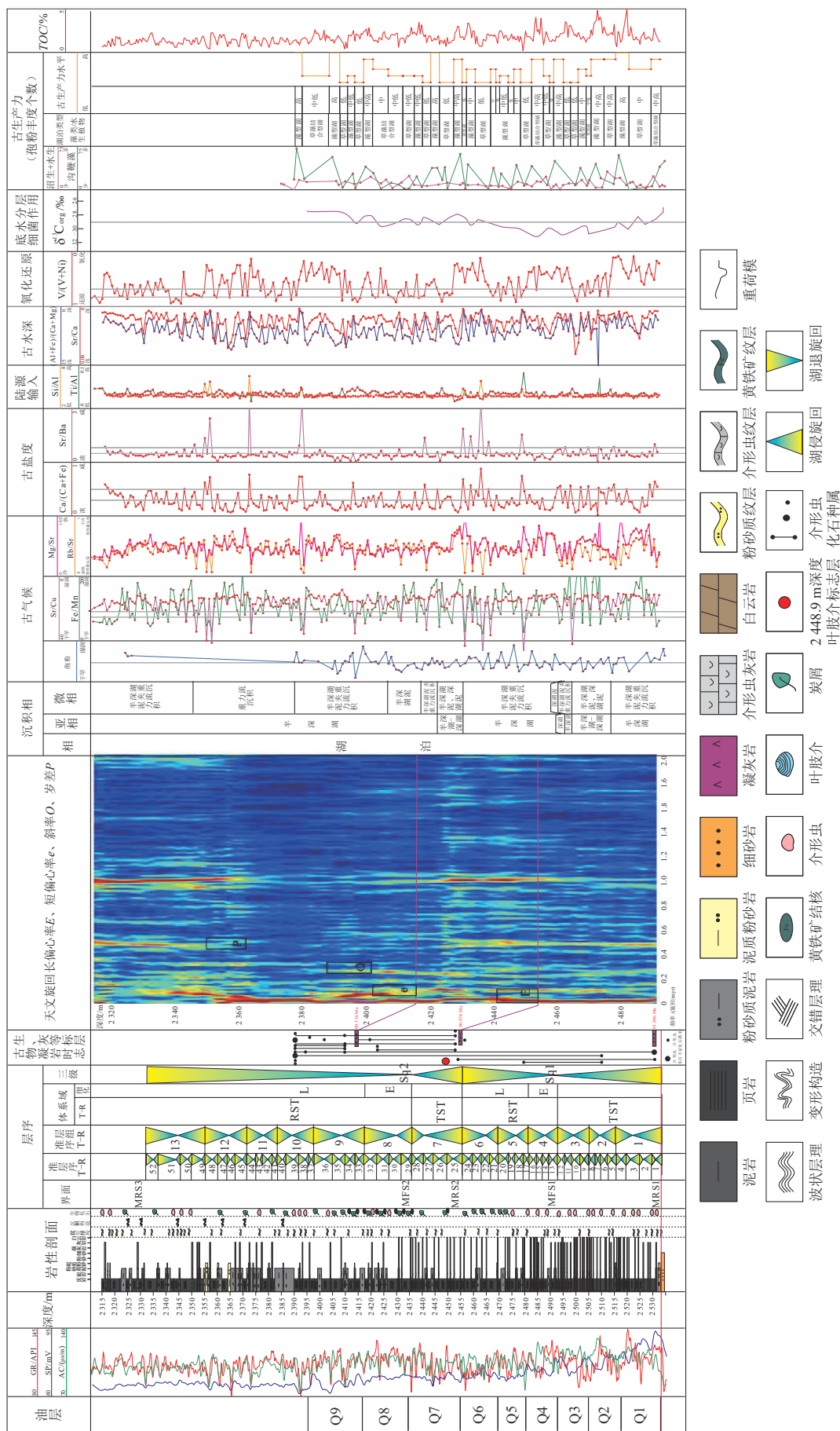


图3 松辽盆地古龙凹陷Y2井青一段和青二段高频沉积层序综合分析剖面(比例尺1:500)(天文旋回数据引自参考文献^[12])

Fig. 3 Column showing the comprehensive analysis of high-order sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of SQ1 and SQ2 in Well Y2, Gulong Sag, Songliao Basin

(vertical scale: 1:500)(astronomic cycle from ^[12])

TST: 湖侵体系域; RST: 湖退体系域; MRS: 最大湖泛面; E: 早期湖退体系域; L: 晚期湖退体系域

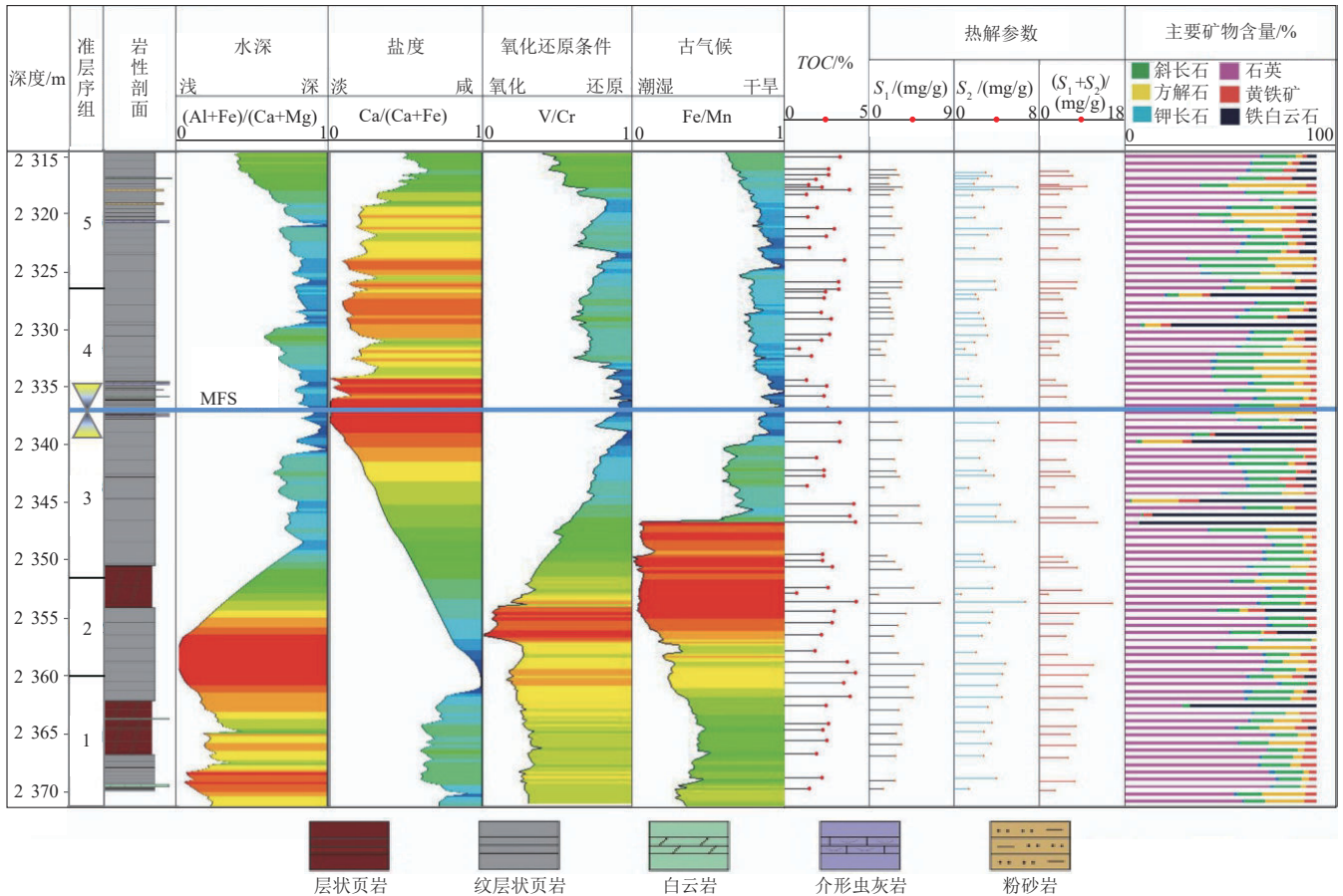


图4 松辽盆地古龙凹陷青山口组三级MFS沉积特征(修改自参考文献[40])

Fig. 4 The sedimentary characteristics of 3rd-order MFS, Qingshankou Formation, Gulong Sag, Songliao Basin(modified from [40])

4 高频层序的沉积时长及沉积速率变化

4.1 高频层序的沉积时长

基于6口井(Y1—Y6)火山灰层段追踪,发现青一段和青二段下部至少存在3次规模性火山喷发事件,与SK1井南孔(SK-1s)发现的3套火山灰(深度1780 m,准层序组1下部,1.5 cm厚;深度1705 m,准层序组7底部,0.5 cm厚;深度1673 m,准层序组9下部,0.5 cm厚)可横向对比^[41](图1c)。根据自下而上3套火山灰的CA-ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄(91.886 Ma±0.110 Ma,90.974 Ma±0.120 Ma,90.536 Ma±0.120 Ma)和旋回地层学研究,Wu等获得了青山口组天文年代标尺,明确青山口组底、顶界面年龄分别为91.816 Ma±0.220 Ma和86.303 Ma±0.220 Ma,沉积时长约为5.50 Myr±0.22 Myr。其中,SK-1s井青一段沉积速率约8~10 cm/kyr^[42]。根据以上结论,准层

序组1下部—准层序组9下部的总沉积时长约1350 kyr,准层序组的沉积时长约170 kyr,准层序的沉积时长约40 kyr。以3套火山灰层作为等时对比标志层,将不同古沉积地貌的取心井通过岩相和无机地化识别的T-R旋回与测井GR值和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 天文调谐周期^[7-8]进行对比(图3),准层序组1—5可以与170 kyr斜率调制周期对应较好,准层序的沉积时长与斜率周期对应较好。

4.2 高频层序格架下的沉积速率变化

前人根据原始地层厚度发现青山口组发育近南北向坡折(一级坡折P₁,二级坡折P₂和P₃)^[15](图1b)。古龙凹陷青山口组沉积时期受NNE向中央断裂带控制^[43-44],整体快速沉降,基底断裂的差异沉降形成了坡折、水下隆起和断凹等古地貌^[45]。本文根据构造、坡折和物源划分9个古沉积地貌单元(图1b I—IX)。

未考虑压实,用准层序组的厚度与其沉积时长比值近似表示准层序组沉积速率的相对变化(表1)。盆

表1 松辽盆地北部青山口组准层序组沉积速率相对变化

Table 1 Relative sedimentary rate changes of parasequence sets in the Qingshankou Formation, northern Songliao Basin

井号	不同准层序组相对沉积速率/(cm/kyr)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
D8	9.96	9.33	8.60	7.81	10.14	15.11	13.21	9.00	11.93	8.66	7.75	6.53	8.79
D7	11.85	6.12	7.83	9.68	7.00	10.97	12.11	7.80	9.08	7.45	6.15	7.42	9.91
D6	9.80	6.72	7.02	9.93	6.70	9.69	12.82	8.89	10.31	9.16	6.25	5.82	9.74
D5	10.75	7.86	8.34	9.27	7.58	13.41	11.57	11.65	13.42	11.02	7.30	6.67	9.46
Y3	8.74	6.75	7.53	9.47	6.79	10.17	12.18	10.06	10.44	9.31	8.17	7.82	9.54
Y2	10.34	6.29	6.81	7.37	6.78	8.28	11.22	11.25	11.82	8.28	6.62	9.85	13.04
Y0	9.64	5.39	8.34	9.40	6.32	7.39	11.62	12.96	9.42	6.39	7.58	9.96	8.80
Y1	7.71	6.24	6.95	7.91	6.52	8.84	11.61	10.40	11.49	9.87	6.28	9.85	11.00
D4	10.79	4.92	8.29	5.97	9.41	9.27	11.16	12.59	12.03	8.05	7.26	11.94	13.41
Y4	10.71	5.08	8.80	6.02	10.95	10.27	10.10	13.46	11.23	8.92	7.45	12.30	13.05
D3	11.48	8.46	8.72	6.49	9.82	8.85	9.89	13.08	9.83	11.68	8.58	11.15	13.15
D2	10.09	7.16	5.60	6.02	9.44	9.13	10.28	12.24	9.75	9.65	6.80	7.55	12.51
D1	8.90	6.51	7.08	7.44	8.81	11.66	9.59	10.50	13.25	7.94	7.26	11.10	11.34
Y5	9.89	6.64	8.37	7.73	6.61	7.41	10.06	12.43	10.88	8.69	8.21	9.52	10.98
Y6	9.95	6.03	8.80	6.51	11.46	7.66	11.50	8.87	11.79	7.63	8.05	12.69	14.48
SK-1s	8.71	6.49	7.31	9.51	6.03	7.64	10.92	7.58	7.95	7.27	6.79	8.51	11.83
C1	2.80	2.39	3.63	3.01	2.78	3.95	2.40	2.00	2.39	1.85	1.80	1.52	2.42
C2	5.40	4.08	4.71	3.94	5.46	3.98	3.00	3.94	4.36	3.88	3.94	4.43	5.05
C3	4.98	3.11	2.80	4.46	4.67	4.46	3.84	3.23	2.91	3.92	4.36	3.84	5.39
C4	5.72	5.31	4.84	3.73	4.07	6.31	7.21	4.33	5.51	6.31	4.34	5.59	6.94
C5	7.99	5.40	5.81	4.77	5.81	8.32	7.16	5.65	6.99	6.58	6.02	5.74	6.97
C6	9.92	5.72	6.10	6.85	5.72	8.44	11.85	8.92	9.82	8.16	6.72	7.03	8.26
Y3	8.74	6.75	7.53	9.47	6.79	10.17	12.18	10.06	10.44	9.31	8.17	7.82	9.54
C7	11.46	5.62	6.46	7.54	5.57	8.13	10.78	15.42	13.41	7.65	9.51	8.44	11.61
C8	11.20	6.33	6.95	6.43	6.02	8.20	9.44	8.09	7.26	6.46	8.11	5.95	7.67
C9	8.47	5.50	6.46	6.58	7.39	7.40	7.33	7.23	8.89	6.32	5.09	6.15	4.64
C10	6.24	4.73	5.09	5.93	6.21	9.84	8.93	8.56	7.77	6.33	4.85	5.87	5.89
Y8	10.06	6.19	6.85	6.43	7.16	8.71	9.31	7.39	8.82	7.47	6.33	8.29	7.47
C11	6.53	4.68	6.23	4.36	7.25	8.71	7.66	8.31	7.16	5.34	4.91	5.50	4.23
Y7	8.55	5.00	8.42	4.43	6.50	5.69	11.03	9.53	10.37	8.66	9.31	11.29	12.96

地气候一致前提下,不同位置沉积速率的差异反映了构造和物源供给的变化。纵向上,层序1准层序组1和6沉积速率较大,准层序组2—5沉积速率较小,层序2准层序组7—9沉积速率较大,反映了青一段至青二段早期物源供给充足,快速沉降和沉积。平面上,西部斜坡区沉积速率较小,中央凹陷区沉积速率较大。存在构造差异沉降,沉降和沉积速率较小处为物源区和水下隆起,而沉降和沉积速率较大处为坡折带及凹陷中心。

5 高频层序格架下的有机质富集条件

5.1 高频层序格架下的沉积环境演化

5.1.1 高频层序格架下的古气候演化

SK-1s井的孢粉组合研究表明,青一段和青二段沉积时期为亚热带半干旱、半湿润气候^[38]。本文依据

CIA(化学蚀变指数)指数^[46]和地化参数(元素含量比值Sr/Cu, Fe/Mn, Sr/Ba, Ca/(Ca+Fe), Rb/Sr, Mg/Sr)等划分各准层序组古气候变化的时间段(表2;图3,图5a)。总体上,准层序组1—13沉积时期气候以湿润为主,层序2较层序1湿润度小、古气温较高,与SK-1s井的孢粉研究结论一致^[38]。从体系域看,湖侵和早期湖退体系域湿润度相对较大,晚期湖退体系域干旱度相对较大(图3,图5a)。高频层序的气候干湿冷暖波动频繁,其中,准层序组1,6,8和11干旱期占比最大(图5a)。

5.1.2 高频层序格架下的古盐度演化

现代湖水的矿化度受陆源输入量和降水的影响而变化^[48]。Y2井的古盐度类型占比表明,淡水+淡水-微咸水占比的变化趋势与古气候湿润度基本一致(图5a,b)。而微咸水+咸水占比的变化趋势与古气候干旱程度及陆源输入量的变化相关,较高的陆源输入量一定程度上淡化了水体盐度(表2;图3),如层序2陆源输入量增大造成层序2的微咸水+咸水占比较层序1低。层序1顶部准层序组6的古盐度出现峰值,结合古水深和古气候变化,认为该时期气候干旱,湖平面下降,水体咸化。一个准层序组内部,顶、底界面各发生一次湖泛,为气候由于干旱向湿润的转换界面,而T旋回顶部和R旋回底部沉积时期为最大湖泛期湿润气候。一个准层序组内部的湿润度为大(底)—小—大

(MFS)—小—大(顶)的变化旋回,盐度为小(底)—大—小(MFS)—大—小(顶)的变化旋回,反映气候控制的T-R过程(图3)。

5.1.3 高频层序格架下的古水深演化

很多学者通过测定沉积岩样品中钴(Co)和镧(La)元素的含量来推算当时岩石的沉积速率,运用公式定量计算样品沉积时的古水体深度^[49-51]。

排除白云岩和粉砂岩的影响后,本文采用Y5井170个Co元素和La元素数据,定量计算出准层序组1—9古水深平均约为36.98 m(图5c),按照现代湖泊水深标准属于深水湖(表2)。湖泊的温跃层一般发育在20~30 m,水深>20 m出现底水分层缺氧,底层水体的矿化度高于表层水体^[48]。准层序组1—9平均古水深呈先增大后减小的趋势,其中,层序1湖侵和早湖退阶段的准层序组1—4古水深最大,以水深>20 m为主,其次为层序2湖侵和早湖退阶段的准层序组7和8,发育底水分层,底层水体的盐度相对较高,为强还原性环境(图3,图5c,d)。

5.2 高频层序格架下的古生产力演化

现代湖泊的初级生产力为浮游植物(藻类)和水生高等植物的总光合作用量^[48]。古湖泊沉积物中的孢粉组合反映陆源有机质输入,其中,水生和沼生孢粉对

表2 松辽盆地北部青山口组古湖泊水体沉积环境判识指标(部分内容修改自参考文献[46-48])

Table 2 Indicators of paleo-water environment of paleo-lake, Qingshankou Formation, northern Songliao Basin (some data modified from [46-48])

古沉积环境	类型	参数	古沉积环境	类型	参数	古沉积环境	类型	参数
古气候	干旱	Sr/Cu>25; Fe/Mn<70; 50<CIA<65	古水深	浅水 (水深0~5 m)	Co和La含量 法定量计算	氧化还原条件	分层较弱, 贫氧-氧化	V/Sc<10; V/(V+Ni)<0.6
	潮湿	Sr/Cu<25; Fe/Mn>70; CIA>65		较深水 (水深5~20 m)			分层较弱, 厌氧还原	10<V/Sc<25; 0.6<V/(V+Ni)<0.84
古盐度	淡水	Sr/Ba<0.6; Ca/(Ca+Fe)<0.3		深水 (水深>20 m)			分层较强的 硫化强还原	V/Sc>25; V/(V+Ni)>0.84
	微咸水	0.6<Sr/Ba<1; 0.3<Ca/(Ca+Fe)<0.5	有机质 母质来源	藻型	藻类/水生植物 孢粉个数>2	古生产力	低	藻类/水生植物 孢粉个数总和<20
	咸水	Sr/Ba>1; Ca/(Ca+Fe)>0.5		草藻型	1<藻类/水生植物 孢粉个数<2		中-低	20<藻类/水生植物 孢粉个数总和<40
陆源输入量	低	Ti/Al<0.03; Si/Al<3; 粒度中值<0.008 mm; 黏土级粒度占比>40%		草型	藻类/水生植物 孢粉个数<1		中	40<藻类/水生植物 孢粉个数总和<60
	高	Ti/Al>0.03; Si/Al>3; 粒度中值>0.008 mm; 黏土级粒度占比<40%		细菌型	干酪根 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} < -29\text{‰}$		中-高	60<藻类/水生植物 孢粉个数总和<80
							高	藻类/水生植物 孢粉个数总和>80

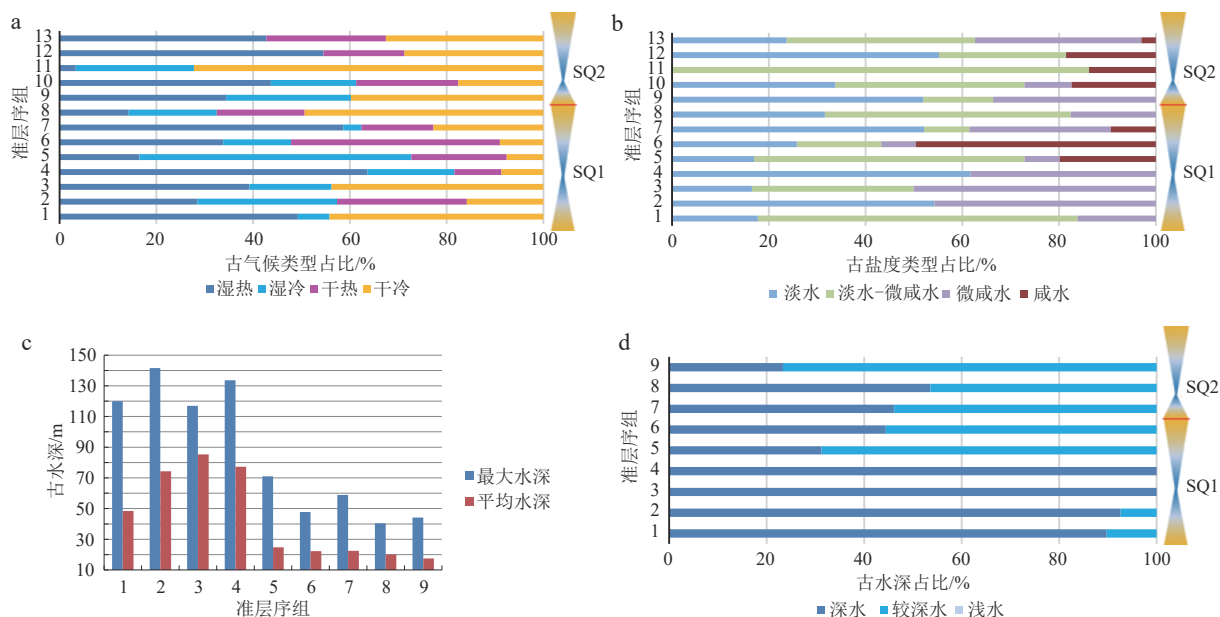


图5 松辽盆地北部古龙凹陷青山口组高频层序格架下的古气候演化

Fig. 5 Paleoclimate evolution under a high-order sequence stratigraphic framework, Qingshankou Formation, Gulong Sag, northern Songliao Basin
a. Y2井准层序组1—13的古气候类型占比分布; b. Y2井准层序组1—13的水体古盐度类型占比分布; c. Y5井准层序组1—9的Co元素含量计算的最大和平均古水深; d. Y5井准层序组1—9的古水深占比分布

应于现代湖泊浅水区的水生高等植物^[48]。这些植物的孢粉经风力或物源搬运并保存在深湖区页岩之内,其丰度个数可反映其繁盛程度。水生高等植物和浮游植物丰度个数差可以近似反映某时期主要的初级生产者,分为“草型湖”(水生高等植物)、“藻型湖”(浮游藻类)和“草藻结合湖”(表2)。其中,“藻型湖”多为具有较高初级生产力的富营养湖,藻类种群结构单一^[48]。Y2井浮游藻类种属识别出球形疑源类占绝对优势(35.8%~99.6%,平均85.0%),其次为沟鞭藻(0.4%~64.2%,平均15.0%)。其中,球形疑源类属种单一,以*Leisphaeridia/Granodiscus*为主(含量29.9%~95.7%,平均75.6%)。沟鞭藻分异度较低,主要为贴近式囊孢*Dinogymniopsis*(0~59.7%,平均12.6%),指示微咸-半咸水体环境。由此判断青山口组沉积时期古湖泊的藻类种属单一,以“富营养湖”为主。沟鞭藻主要富集在水深18~90 m、水温18~25℃的温暖浅水地区,其丰度可为恢复古环境提供依据^[38]。从沟鞭藻、沼生+水生植物丰度个数与古气候和古盐度的匹配关系来看(图3),沟鞭藻的丰度在湿热气候的微咸水环境相对较高。而水生高等植物的丰度受盐度影响更大,在淡水环境丰度较高,与沟鞭藻的丰度此消彼长。依据丰度个数划分各准层序组的古生产力水平(表2;图3,图6b)发现,高-中高生产力阶段在准层序组2持续时间最长,其次为准层序组4,1,7和9,以湿

热的富营养“藻型湖”和“草藻结合型湖”为主,古盐度以淡水-微咸水为主(图5a,图5b,图6a,图6b)。

5.3 高频层序格架下的物源输入、页岩岩相及纹层组合

5.3.1 高频层序格架下的物源输入

统计Y2井436块样品的矿物含量,根据长英质矿物(石英和长石)、黏土矿物和碳酸盐矿物(方解石、白云石和铁白云石)含量以50%为界划分为黏土质页岩、长英质页岩和混合质页岩。根据沉积微构造特征,长英质和混合质页岩的碎屑颗粒以陆源输入为主。页岩的粒度变化(元素含量比值Zr/Nb, Si/Al和Ti/Al)及长英质页岩+混合质页岩占比可近似反映物源强度(表2;图6c)。排除火山物质输入^[23]和白云岩对粒度变化的影响,从层序1到层序2的物源强度和粒度增大,反映层序1到层序2为湖退趋势,三角洲进积增强,同时也说明层序2较粗的碎屑注入可能对有机质的稀释作用增大,使保存条件变差。在三级层序内部,层序1和层序2内粒度由小到大的旋回反映了T-R旋回。其中,准层序组3,4和7的T旋回顶部粒度最小,反映了最大湖泛期的沉积特征。准层序组的顶底界面、T旋回顶部和R旋回底部粒度较小,反映了湖泛期的沉积特征。最大湖泛期准层序组3,4和7陆源碎屑占比较大,但粒度较小,反映了重力流搬运细粒沉积物,即

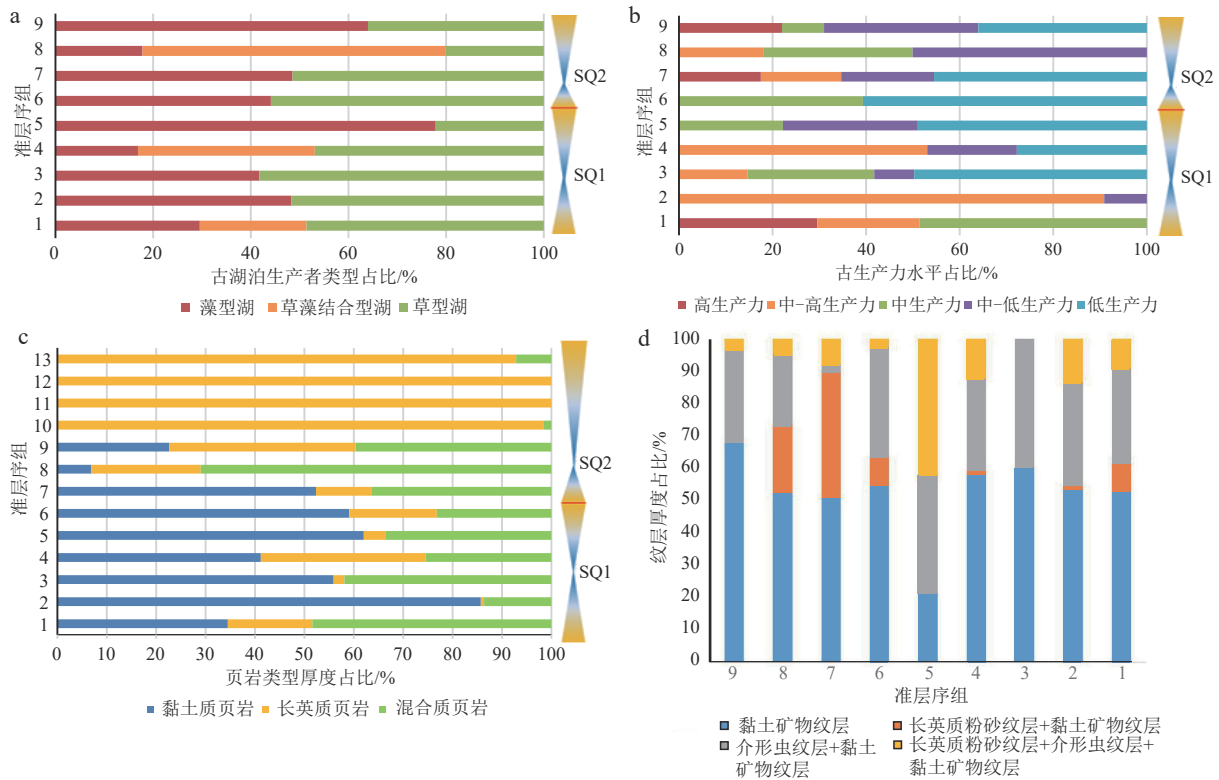


图6 松辽盆地北部古龙凹陷青山口组高频层序格架下的古生产力演化、页岩岩相及纹层组合分布

Fig. 6 Paleoproductivity evolution, shale lithofacies and laminae combination types within a high-order sequence stratigraphic framework, Qingshankou Formation, Gulong Sag, northern Songliao Basin
a. Y2井准层序组1—9的古湖泊生产者类型占比分布; b. Y2井准层序组1—9的古生产力水平占比分布; c. Y2井准层序组1—13的页岩岩相类型占比分布; d. Y5井青山口组准层序组1—9的页岩纹层组合类型占比分布

重力流可以搬运泥级碎屑颗粒(如泥流沉积^[52])。

5.3.2 高频层序格架下的页岩岩相与纹层组合

基于Y5井116个薄片的测量统计,识别3种页岩纹层。黏土矿物纹层(CL)主要由黏土矿物与有机质组成,有机质含量高低形成明暗相间的纹层,地化指标表明其发育在水体较深、气候湿润、静水的还原-强还原环境,为半深湖-深湖静水泥质沉积(图7a,图8)。长英质粉砂纹层(QL)一般呈正粒序或反-正复合粒序,具侵蚀底面或层间侵蚀面,常见生物扰动和泄水构

造,地化指标表明其发育在水体较深、气候湿润、水体动荡的还原-弱还原环境,为半深湖-深湖陆源注入的低密度浊流沉积(图7b,图8)。介形虫纹层(OL)以介形虫壳体碎片为主,多含长英质颗粒,介形虫壳体长轴同向且平行于层面,常具生物扰动和泄水构造,地化指标表明其发育在水体相对较浅、气候相对干旱、水体动荡的弱还原环境,为由浅水区通过重力流搬运到半深湖的低密度浊流沉积(图7c,图8)。东部三肇凹陷Y8井,除以上3种纹层又识别出碳酸盐矿物纹层(CCL),由泥晶方解石或白云石构成,与黏土矿物纹层形成季

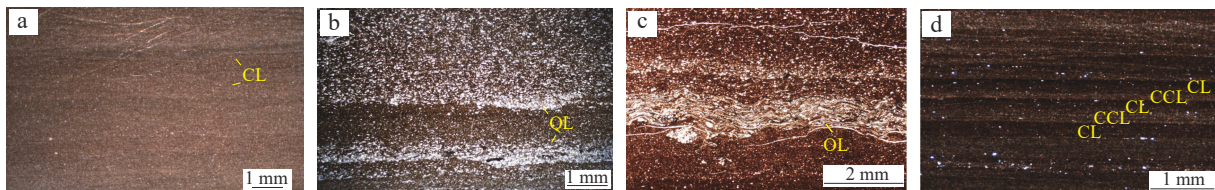


图7 松辽盆地北部青山口组页岩纹层类型显微照片

Fig. 7 Shale laminae types of Qingshankou Formation, northern Songliao Basin

a. Y5井,单偏光,准层序组2,埋深2 485.0 m,黏土矿物纹层(CL); b. Y5井,单偏光,准层序组1,埋深2 506.0 m,长英质粉砂纹层(QL); c. Y5井,单偏光,准层序组1,埋深2 501.3 m,介形虫纹层(OL),含长英质粉砂颗粒; d. Y8井,单偏光,准层序组2,埋深2 035.1 m,黏土矿物纹层(CL)和泥晶白云石纹层(CCL)构成季节纹层

节性层偶结构,反映水体较深的还原环境,为深湖静水泥质沉积(图7d)。

识别出5种页岩纹层组合类型(CL,CL+CCL,QL+CL,QL+CL和QL+OL+CL)及11种组合模式(图8)。古龙凹陷受物源影响,陆源注入的浊流沉积长英质页岩和混合质页岩占比较大(约60%)。黏土质页岩可以细分为两类(图8):①厚层CL为主,发育断续薄层或团块状的QL或OL,为半深湖-深湖浊流沉积过渡到静水环境的泥流沉积(厚度占比约15%);②CL组成的半深湖-深湖静水泥质沉积(厚度占比约25%)。三肇凹陷受物源影响较小,半深湖-深湖区以CL为主,构成CL+CCL组合的黏土质页岩。

各准层序组页岩的纹层组合占比存在差异(图6d)。准层序组1—4以CL和OL+CL为主,准层序组1以QL为主;准层序组5以QL+OL+CL和CL为主;准层序组6以CL和OL+CL为主,QL较发育;准层序组7和8以CL、QL+CL为主,准层序组9以CL和OL+CL为主。准层序组2—4和9的CL占比较高,表明物源输入强度较小。准层序组1,5,6,7和8的QL相对发育,表明物源输入强度较大。层序2相比层序1的QL增多,反映物源输入强度增加。在同一准层序组内Y2井和Y5井的纹层组合占比的差异反映了不同古沉积地貌对物源供给的差异控制。

古龙凹陷青山口组黏土矿物纹层的有机质丰度高,且储集空间类型好,TOC为2.5%~4.0%,面孔率高(平均为3.51%)^[53]。如图8所示,高频层序对沉积微相和岩相的纵向分布具有控制作用,早湖侵和晚湖退发育低密度浊流纹层页岩,即QL,OL和CL组合的长英质页岩或混合质页岩;晚湖侵、早湖退和准层序组顶底界发育泥流和静水沉积黏土质页岩。高频层序控制有机质富集,准层序组顶底界面、晚湖侵及早湖退的TOC较高。静水沉积的TOC最高,泥流沉积次之,低密度浊流沉积最低。

5.4 高频层序格架下的水体氧化还原环境与有机质保存条件

地球上的碳基生命因碳源或固碳方式不同,使得 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 具有明显差异^[54]。其中,以甲烷为碳源的嗜甲烷菌的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 可达-40‰以下,原核细菌生源的有机碳同位素较轻,如蓝细菌($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 约为-29‰),而真核藻类生源的有机碳同位素较重,如陆相高等植物($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 约为-27‰)和沟鞭藻($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 约为-25‰)^[54-56]。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 负偏反映了细菌活动的增强, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 正偏则可能与藻类和陆相高等植物的贡献增强有关。盆地不同位置的

Y2井、Y5井^[57]和SK-1s井^[8]准层序组1—9的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 曲线均呈正—负—正—负—正偏的“W”型(图3,图9)。在湖侵和早湖退时期, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 曲线负偏,细菌作用增强,且对比V/(V+Ni)曲线(表2;图3),该时期一般为水体分层的还原环境。因此,结合5.1.3节有关古水深的结论,认为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 曲线的“W”型特征反映了三级湖平面升降引起的有机质母源、底水分层及缺氧程度等综合作用的结果,具有区域可对比性。湖侵和早湖退阶段湖平面上升水体加深,形成底水分层的还原环境,有利于有机质保存。晚湖退阶段有机质的保存条件受控于物源输入引起的氧化还原环境变化。在高生产力的前提下,准层序组的顶底界面及其T旋回顶部和R旋回底部,由于湖泛引起水体加深,底水分层,无/少物源注入更易形成还原-强还原环境,有利于有机质保存。

6 高频层序格架下的有机质分布规律

二级和三级层序受控于百万年至几十万年度尺度的构造、气候和物源变化,最大湖泛期构造快速沉降,气候从干旱转变为暖湿,古生产力较高,有机质输入量大,底水分层,且粗碎屑供给较少,以还原环境为主,沉积速率较小,且保存条件好,有机质富集程度高,如:层序1和层序2的最大湖泛期(图9)。高频层序(准层序组)及其内部T-R旋回受控于几十万年至十年度尺度的古地貌差异沉降、气候和物源变化。构造稳定、气候湿润的湖泛期,粗碎屑供给较少,沉积速率较小,古生产力较高,且底水分层的部位有机质富集,如层序1的准层序组2及准层序组顶底界面、T旋回顶部和R旋回底部(图9)。

综上所述,层序格架下古生产力、氧化还原条件和沉积速率的耦合关系形成了有机质富集非均质性。T-R旋回控制了有机质分布,湖泛面是利部位。优选有利区/段为物源影响较小、古水深大于20 m的深湖区湖侵和早湖退的准层序组1—4,其中,准层序组2最优。有利沉积微相为半深湖-深湖相静水泥质沉积和泥流沉积,有利岩相为黏土质页岩。通过连井层序、岩相、纹层组合和有机质富集主控因素等综合分析,预测准层序组1—9发育7个有机质富集有利位置(图9)。不同井的TOC实测数据表明,准层序组2的准确率最高,区域可对比。西部齐家-古龙凹陷的准层序组2页岩以CL及CL+OL为主。东部三肇凹陷准层序组1—4以CL为主,其中,准层序组1和2发育CL+CCL组合的季节纹层。黏土质页岩主要发育在齐家-古龙凹陷的准层序组2及三肇凹陷的准层序组1—4。

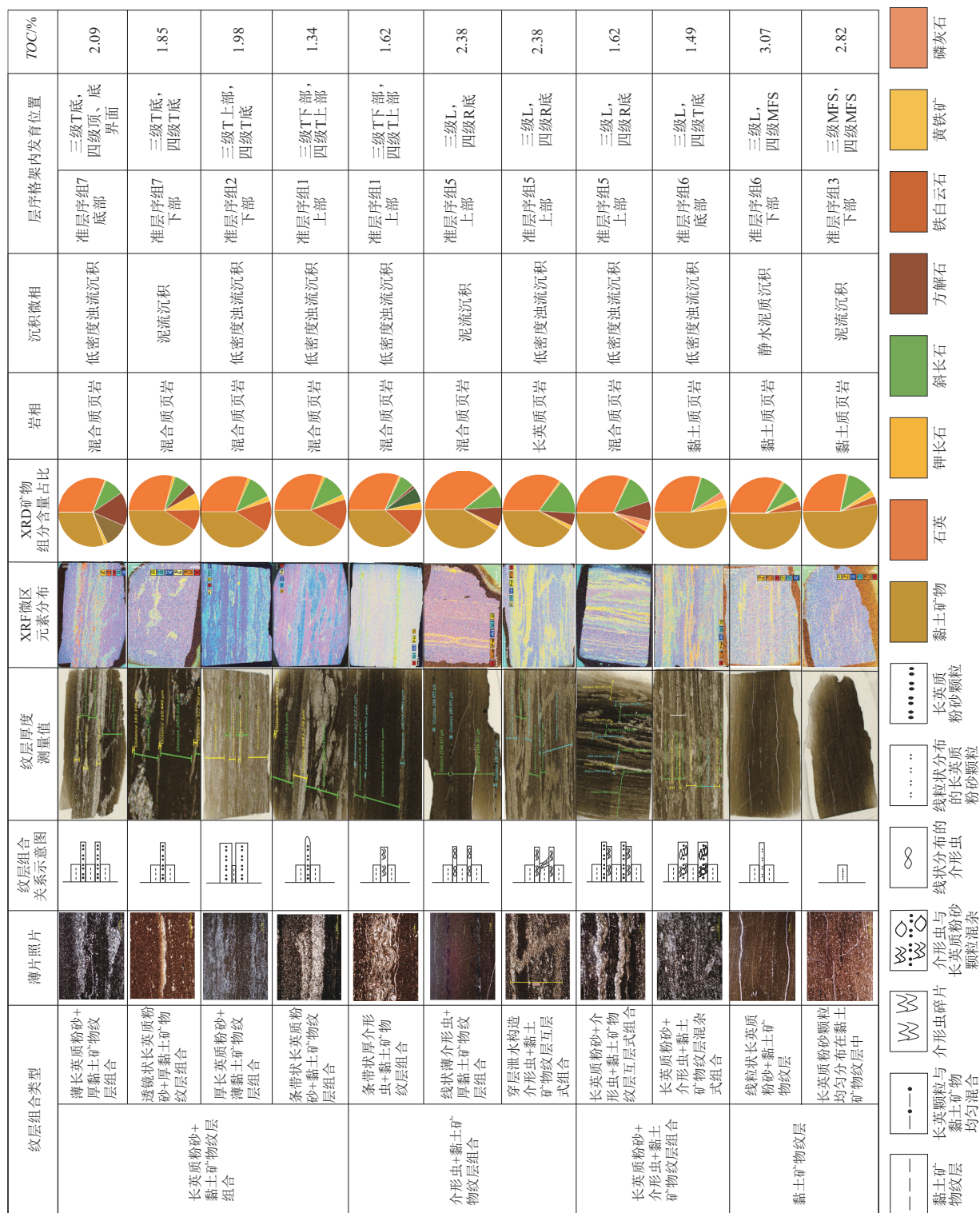


图8 松辽盆地古龙凹陷Y5井青山口组高频层序格架下的页岩纹层组合模式

Fig. 8 Models of shale laminar combination patterns under a high-order sequence stratigraphic framework from Well Y5, Qingshankou Formation, Gulong Sag, Songliao Basin

T. 湖侵体系; R. 湖退体系; MFS. 最大湖泛面; E. 早期湖退体系; L. 晚期湖退体系

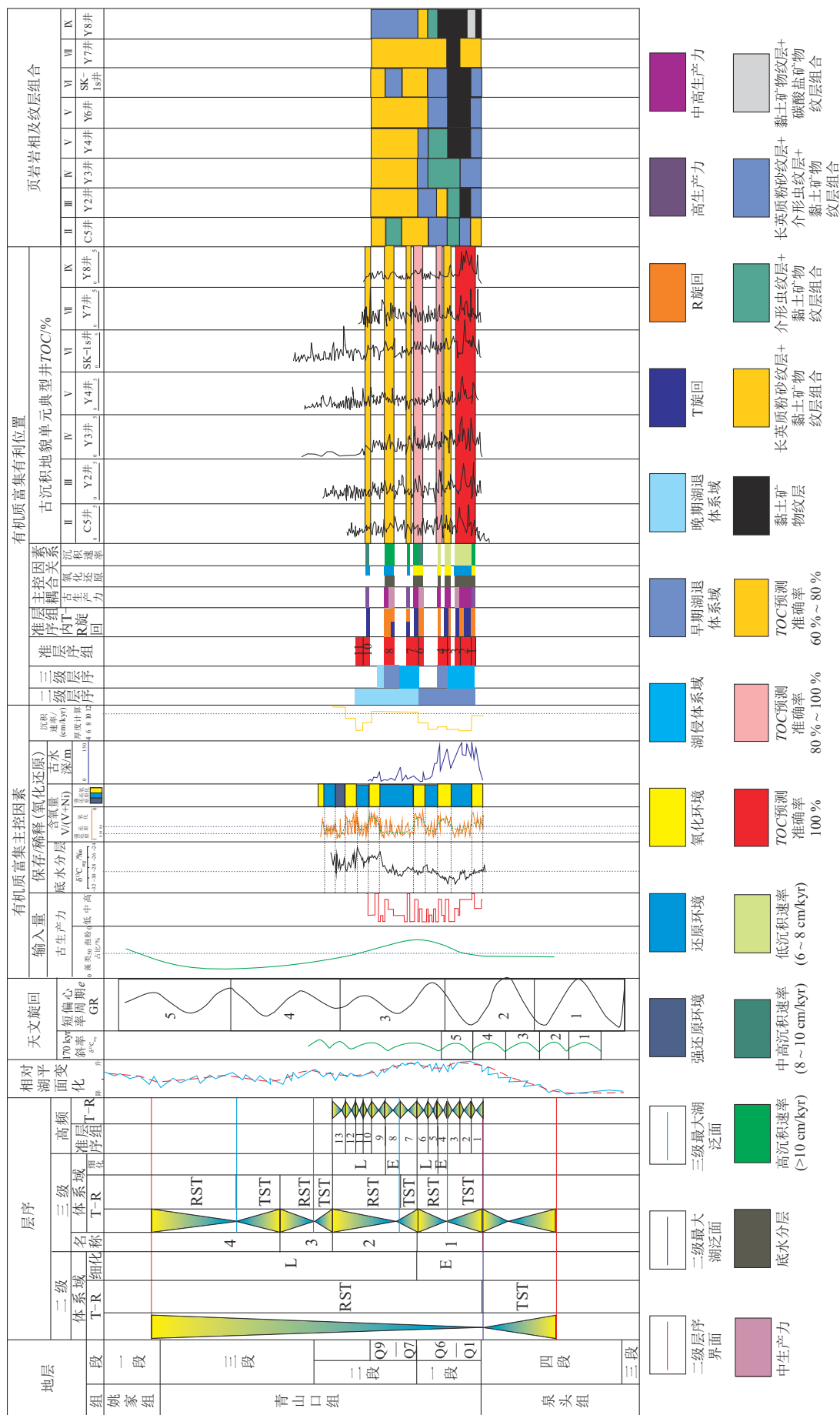


图9 松辽盆地北部青山口组高频层序格架下的有机质富集分布规律剖面 (部分数据修改自参考文献[8, 38, 42])

Fig. 9 Profile of organic matter enrichment under a high-order sequence stratigraphic framework, Qingshankou Formation, northern Songliao Basin (some data modified from [8, 38, 42])

7 结论

1) 松辽盆地古龙凹陷青山口组划分为4个三级层序,其中,层序1和层序2划分为2个T-R旋回,由13个准层序组(52个准层序)构成。每个准层序组和准层序均由1个T-R旋回构成。准层序的沉积时长约40 kyr,准层序组的沉积时长约170 kyr。

2) 古气候、物源和水体环境的演化反映了不同级别的T-R阶段。三级层序内的湖侵和早湖退阶段古水深最大,底水分层更易形成还原-强还原环境,有利于有机质保存。依据孢粉丰度个数划分古生产力水平,其中,高-中高生产力阶段在准层序组2持续时间最长。

3) 层序格架下页岩发育3种岩相、4种纹层、5种纹层组合、11种纹层组合模式和3种沉积微相。T-R旋回控制了沉积微相、岩相和纹层组合的纵向分布,其中,深湖相静水沉积和泥流沉积的黏土质页岩为有利岩相。

4) T-R旋回控制了有机质分布,湖泛面是有利部位,预测7个有利部位。不同井的TOC实测数据表明,准层序组2的预测准确率最高,可区域对比。优选有利区/段为齐家-古龙凹陷的准层序组2以及三肇凹陷的准层序组1—4。

致谢:感谢黑龙江省揭榜挂帅项目“古龙页岩油相态、渗流机理及地质工程一体化增产改造研究”和“古龙页岩储层成岩动态演化过程与孔缝耦合关系研究”对研究工作的资助;感谢大庆油田院士工作站对研究工作的指导和帮助;感谢中国石油大庆油田公司勘探开发研究院岩心库和实验室等单位提供的宝贵资料和对研究工作的支持和帮助;感谢本文的审稿人和编辑对文章修改提供的宝贵建议和指导。

参 考 文 献

- [1] 孙龙德. 古龙页岩油(代序)[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(3): 1-7.
SUN Longde. Gulongshale oil (preface)[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 1-7.
- [2] 张辉, 王志章, 杨亮, 等. 松南上白垩统青山口组一段不同赋存状态页岩油定量评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 315-327.
ZHANG Hui, WANG Zhizhang, YANG Liang, et al. Quantitative evaluation of shale oil in different occurrence states in First Member of Qingshankou Formation of Upper Cretaceous in South of Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 315-327.
- [3] 曾花森, 霍秋立, 张晓畅, 等. 松辽盆地古龙页岩油赋存状态演化定量研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(3): 80-90.
ZENG Huasen, HUO Qiuli, ZHANG Xiaochang, et al. Quantitative analysis on occurrence evolution of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(3): 80-90.
- [4] 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.
- [5] 付秀丽, 蒙启安, 郑强, 等. 松辽盆地古龙页岩有机质丰度旋回性与岩相古地理[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(3): 38-52.
FU Xiuli, MENG Qi'an, ZHENG Qiang, et al. Cyclicity of organic matter abundance and lithofacies paleogeography of Gulong shale in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(3): 38-52.
- [6] 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 251-264.
ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 251-264.
- [7] 吴怀春, 张世红, 黄清华. 中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 159-169.
WU Huaichun, ZHANG Shihong, HUANG Qinghua. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin of Northeast China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 159-169.
- [8] HUANG He, GAO Yuan, MA Chao, et al. Organic carbon burial is paced by a ~ 173-ka obliquity cycle in the middle to high latitudes [J]. Science Advances, 2021, 7(28): eabf9489.
- [9] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1205-1214.
SHI Juye, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1205-1214.
- [10] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 天文地层学研究程序及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用实例分析[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1292-1308.
PENG Jun, YU Ledan, XU Tianyu, et al. Research procedure of astrostratigraphy and case study of Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1292-1308.
- [11] 崔宝文, 张顺, 付秀丽, 等. 松辽盆地古龙页岩有机层序地层

- 划分及影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(5): 13-28.
- CUI Baowen, ZHANG Shun, FU Xiuli, et al. Organic sequence stratigraphic division and its influencing factors' analyses for Gulong shale in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 13-28.
- [12] CATUNEANU O. Scale in sequence stratigraphy[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 106: 128-159.
- [13] EMBRY A F. Transgressive-regressive (T-R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1993, 30(2): 301-320.
- [14] 孙龙德, 王广响. 论大庆油田振兴发展战略[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 1-7.
- SUN Longde, WANG Guangyun. Revitalization and development strategy of Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 1-7.
- [15] 冯有良, 邹才能, 蒙启安, 等. 构造及气候对后裂谷盆地层序建造的影响: 以松辽盆地西斜坡晚白垩世为例[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3445-3461.
- FENG Youliang, ZOU Caineng, MENG Qi'an, et al. Tectonic and climatic influences on architecture of sequences and sedimentary systems in a post-rift basin: Insight from Late Cretaceous northern Songliao Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3445-3461.
- [16] FENG Youliang, YANG Zhi, ZHU Jichang, et al. Sequence stratigraphy in post-rift river-dominated lacustrine delta deposits: A case study from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, northern Songliao Basin, northeastern China[J]. Geological Journal, 2021, 56(1): 316-336.
- [17] 何文渊, 崔宝文, 王凤兰, 等. 松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组储集空间与油态研究[J]. 地质论评, 2022, 68(2): 693-741.
- HE Wenyuan, CUI Baowen, WANG Fenglan, et al. Study on reservoir spaces and oil states of the Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. Geological Review, 2022, 68(2): 693-741.
- [18] SCHIEBER J. Developing a sequence stratigraphic framework for the Late Devonian Chattanooga Shale of the southeastern U. S. A.: Relevance for the Bakken shale[J]. AAPG Bulletin, 1998, 13(1): 58-68.
- [19] 吴靖, 姜在兴, 吴明昊. 细粒岩层序地层学研究方法综述[J]. 地质科技情报, 2015, 34(5): 16-20.
- WU Jing, JIANG Zaixing, WU Minghao. Summary of research methods about the sequence stratigraphy of the fine-grained rocks[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(5): 16-20.
- [20] 徐长明. XRF技术在岩心样品快速分析中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 10-35.
- XU Changming. Application research on XRF technology applied in the quick analysis of core samples[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 10-35.
- [21] ROWE H, HUGHES N, ROBINSON K. The quantification and application of handheld energy-dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) in mudrock chemostratigraphy and geochemistry[J]. Chemical Geology, 2012, 324/325: 122-131.
- [22] 马晓潇, 黎茂稳, 庞雄奇, 等. 手持式X荧光光谱仪在济阳坳陷古近系陆相页岩岩心分析中的应用[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 278-286.
- MA Xiaoxiao, LI Maowen, PANG Xiongqi, et al. Application of hand-held X-ray fluorescence spectrometry in the core analysis of Paleogene lacustrine shales in the Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(2): 278-286.
- [23] LAGRANGE M T, KONHAUSER K O, CATUNEANU O, et al. Sequence stratigraphy in organic-rich marine mudstone successions using chemostratigraphic datasets[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 203: 103137.
- [24] NIO S D, BROUWER J H, SMITH D, et al. Spectral trend attribute analysis: Applications in the stratigraphic analysis of wireline logs[J]. First Break, 2005, 23(4): 71-75.
- [25] 任金锋, 廖远涛, 孙鸣, 等. 基于小波变换的高精度层序地层定量划分研究及其应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2651-2658.
- REN Jinfeng, LIAO Yuntao, SUN Ming, et al. A method for quantitative division of sequence stratigraphy with high-resolution based on wavelet transform and its application[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(5): 2651-2658.
- [26] 黄春菊. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状[J]. 地学前缘, 2014, 21(2): 48-66.
- HUANG Chunju. The current status of cyclostratigraphy and astrochronology in the Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 48-66.
- [27] 杜学斌, 陆永潮, 刘惠民, 等. 细粒沉积物中不同级次高频层序划分及其地质意义——以东营凹陷沙三下一沙四上亚段泥页岩为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 244-252.
- DU Xuebin, LU Yongchao, LIU Huimin, et al. Division of high-frequency sequences of different orders in fine-grained deposits and its geologic significance: A case study of mud shale from the lower section of the third member to the upper section of the fourth member of Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(2): 244-252.
- [28] ZHANG Jingyu, PAS D, KRIJGSMAN W, et al. Astronomical forcing of the Paleogene coal-bearing hydrocarbon source rocks of the East China Sea Shelf Basin[J]. Sedimentary Geology, 2020, 406: 105715.
- [29] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 湖相泥页岩地层米氏旋回测井识别及环境响应特征——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷樊页1井Es^{des}为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 957-969.
- PENG Jun, YU Ledan, XU Tianyu, et al. Logging identification

- of Milankovitch cycle and environmental response characteristics of lacustrine shale—A case study on Es^{4cs} in Well Fanye 1, Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 957–969.
- [30] 周靖皓, 鲜本忠, 张建国, 等. 高频旋回地层约束下的湖相页岩有机质富集规律: 以东营凹陷古近系沙三下亚段为例[J]. *古地质学报*, 2022, 24(4): 759–770.
- ZHOU Jinghao, XIAN Benzhong, ZHANG Jianguo, et al. Organic matter enrichment law of lacustrine shale constrained by high resolution cyclostratigraphy: A case study from the lower sub-member of Member 3 of Paleogene Shahejie Formation, Dongying Sag [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(4): 759–770.
- [31] CATUNEANU O. Sequence stratigraphy of deep-water systems [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104238.
- [32] ZHANG Jinyu, AMBROSE W, STEEL R, et al. Long cores through the Wilcox Group, Gulf of Mexico, show process variability across different time scales [J]. *AAPG Bulletin*, 2022, 106(7): 1403–1429.
- [33] 辛仁臣, 张翼, 张春卉, 等. 松辽盆地中部含油组合高精度层序地层格架分析[J]. *地层学杂志*, 2008, 32(4): 389–396.
- XIN Renchen, ZHANG Yi, ZHANG Chunhui, et al. High-resolution sequence stratigraphic framework for the middle oil-bearing beds in the Songliao Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, 32(4): 389–396.
- [34] 高有峰, 王璞珺, 程日辉, 等. 松科1井南孔白垩系青山口组一段沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层[J]. *地学前缘*, 2009, 16(2): 314–323.
- GAO Youfeng, WANG Pujun, CHENG Rihui, et al. Description of Cretaceous sedimentary sequence of the first member of the Qingshankou Formation recovered by CCSD-SK-1 s borehole in Songliao Basin: Lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 314–323.
- [35] 王璞珺, 高有峰, 程日辉, 等. 松科1井南孔白垩系青山口组二、三段沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层[J]. *地学前缘*, 2009, 16(2): 288–313.
- WANG Pujun, GAO Youfeng, CHENG Rihui, et al. Description of Cretaceous sedimentary sequence of the second and third member of the Qingshankou Formation recovered by CCSD-SK-1 s borehole in Songliao Basin: Lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 288–313.
- [36] 石兰亭, 潘树新, 郭维华, 等. 松辽盆地南部上白垩统中部组合层序界面的识别标志及高分辨率层序地层格架[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 235–242.
- SHI Lanting, PAN Shuxin, GUO Weihua, et al. Sequence boundary characteristics and its high resolution sequence stratigraphic framework of the middle oil-bearing beds in the south of Songliao Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 235–242.
- [37] 刘招君, 孙平昌, 贾建亮, 等. 陆相深水环境层序识别标志及成因解释: 以松辽盆地青山口组为例[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 171–180.
- LIU Zhaojun, SUN Pingchang, JIA Jianliang, et al. Distinguishing features and their genetic interpretation of stratigraphic sequences in continental deep water setting: A case from Qingshankou Formation in Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 171–180.
- [38] 赵静. 松辽盆地晚白垩世早—中期孢粉、藻类及古气候古湖泊条件[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 60–75.
- ZHAO Jing. Late Cretaceous palynology (spores, pollen, algae), climate, and lacustrine conditions in Songliao Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013: 60–75.
- [39] 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, 43(4): 870–881.
- LYU Dan, WANG Huajian, LI Gang, et al. Paleobiological evidence of the paleowater environment evolution of the Qingshankou shale in the Songliao Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 2023, 43(4): 870–881.
- [40] GUAN Modi, WU Songtao, HOU Lianhua, et al. Paleoenvironment and chemostratigraphy heterogeneity of the Cretaceous organic-rich shales [J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2021, 5(4): 444–455.
- [41] 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.
- [42] WU Huaichun, HINNOV L A, ZHANG Shihong, et al. Continental geological evidence for Solar System chaotic behavior in the Late Cretaceous [J]. *GSA Bulletin*, 2022, 135(3/4): 712–724.
- [43] 侯启军, 冯志强, 冯子辉, 等. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 77.
- HOU Qijun, FENG Zhiqiang, FENG Zihui, et al. *Terrestrial petroleum geology of Songliao Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 77.
- [44] 王国栋, 程日辉, 王璞珺, 等. 松辽盆地青山口组震积岩的特征、成因及其构造—火山事件[J]. *岩石学报*, 2010, 26(1): 121–129.
- WANG Guodong, CHENG Rihui, WANG Pujun, et al. Coniacian seismites: Structure, sequence and volcanogenic origin of Qingshankou Formation in the Cretaceous Songliao Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 121–129.
- [45] 王一同, 张顺, 林春明, 等. 松辽盆地古龙凹陷泉头组坡折带特征及其对沉积层序的控制作用[J]. *高校地质学报*, 2018, 24(3): 425–432.
- WANG Yitong, ZHANG Shun, LIN Chunming, et al. Characteristics of the slope break belt and its control on the

- depositional sequence: The Quantou Formation of the Gulong Sag, Songliao Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(3): 425-432.
- [46] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544. FENG Lianjun, CHU Xuelei, ZHANG Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the neoproterozoic clastic rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 539-544.
- [47] 朱如凯, 张婧雅, 李梦莹, 等. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题[J/OL]. 地质学报: 1-23 [2023-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20230216.1101.003.html>. ZHU Rukai, ZHANG Jingya, LI Mengying, et al. Advances and key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment [J/OL]. Acta Geologica Sinica: 1-23 [2023-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20230216.1101.003.html>.
- [48] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 142-266. JIN Xiangcan. The environment of Chinese lakes [M]. Beijing: China Ocean Press, 1995: 142-266.
- [49] 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 633-642. FAN Mengmeng, BU Jun, ZHAO Xiaoyan, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 633-642.
- [50] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1265-1273. WANG Feng, LIU Xuanchun, DENG Xiuqin, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [51] 王昌勇, 常玖, 李楠, 等. 四川盆地东部地区早侏罗世湖泊古水深恢复[J/OL]. 沉积学报: 1-16 [2023-02-22]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.036>. WANG Changyong, CHANG Jiu, LI Nan, et al. Paleo-water-depth reconstruction of Early Jurassic lakes in the eastern Sichuan Basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-16 [2023-02-22]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.036>.
- [52] 邹才能, 冯有良, 杨智, 等. 中国湖盆细粒重力流沉积作用及其对页岩油“甜点段”发育的影响[J/OL]. 石油勘探与开发: 1-15 [2023-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2360.TE.20230220.1620.012.html>. ZOU Caineng, FENG Youliang, YANG Zhi, et al. Fine-grained gravity flow sedimentation and its influence on development of shale oil sweet intervals in lacustrine basins in China [J/OL]. Petroleum Exploration and Development: 1-15 [2023-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2360.TE.20230220.1620.012.html>.
- [53] CAI Yi, ZHU Rukai, LUO Zhong, et al. Lithofacies and source rock quality of organic-rich shales in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, NE China [J]. Minerals, 2022, 12(4): 465.
- [54] 张水昌, 王华建, 王晓梅, 等. 中元古代海洋生物碳泵: 有机质来源、降解与富集[J]. 科学通报, 2022, 67(15): 1624-1643. ZHANG Shuichang, WANG Huajian, WANG Xiaomei, et al. Mesoproterozoic marine biological carbon pump: Source, degradation, and enrichment of organic matter [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(15): 1624-1643.
- [55] ZHU Changfeng, CUI Xingqian, HE Yuxin, et al. Extended 3β -methylhopanes up to C_{45} in source rocks from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, Northeast China [J]. Organic Geochemistry, 2020, 142: 103998.
- [56] WANG Xiaomei, ZHANG Shuichang, YE Yuntao, et al. Molecular and carbon isotopic evidence of pigments indicating a dynamic oceanic chemocline 1.4 billion years ago in northern China [J]. Organic Geochemistry, 2021, 154: 104207.
- [57] HE Wenyuan, ZHU Rukai, CUI Baowen, et al. The geoscience frontier of gulong shale oil: Revealing the role of continental shale from oil generation to production [J/OL]. Engineering: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.08.018>. DOI: 10.1016/j.eng.2022.08.018.

(编辑 张亚雄)