

引用格式:白雪峰,林铁锋,刘鑫,等. 2026. 松辽盆地嫩江组下部细粒沉积岩相组合与有机质富集机制——以齐家—古龙凹陷 A34 井为例[J]. 沉积学报, 44(5): 1833-1849.

BAI XueFeng, LIN TieFeng, LIU Xin, et al. 2026. Facies Assemblages of Fine-Grained Sedimentary Rocks and Enrichment Mechanisms of Organic-Rich Intervals in the Lower Nenjiang Formation, Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(5): 1833-1849.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.057

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.057

松辽盆地嫩江组下部细粒沉积岩相组合与有机质富集机制

——以齐家—古龙凹陷 A34 井为例

白雪峰^{1,2}, 林铁锋^{2,3}, 刘鑫^{2,3}, 马生明^{2,3}, 李昕^{2,3}, 杨帆^{2,3}, 王国攀^{4,5}, 李玉寅^{4,5}, 高远^{4,5}

1. 大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163453
2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江大庆 163712
3. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712
4. 地质微生物与环境全国重点实验室, 北京 100083
5. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要 【目的】松辽盆地是我国重要油气产区, 历经 60 余年勘探, 常规油气勘探开发呈现高成本、高难度特点, 目前已全面进入非常规油气勘探阶段。上白垩统青山口组和嫩江组沉积时期发育两期大规模湖侵, 形成了巨大的页岩油潜在资源量。嫩江组一段、嫩江组二段发育大段深色富有机质细粒沉积岩, 前人研究认为总体属于深湖—半深湖相, 但更高分辨率的沉积环境变化及其与有机质富集的关系仍不清楚, 亟须综合细粒沉积岩沉积学和地球化学方法开展深入研究。【方法】基于松辽盆地齐家—古龙凹陷 A34 井岩心资料, 对上白垩统嫩江组一段、嫩江组二段进行了厘米级高精度岩心描述, 运用显微镜观察、有机质含量测试、元素线扫描和面扫描等研究方法, 对细粒沉积岩相进行了精细划分。【结果】嫩江组一段、嫩江组二段共划分出 5 类细粒沉积岩相组合和 16 种细粒沉积岩相, 此外碳酸盐岩类高频出现。基于每种岩相的沉积学和同位素、元素地球化学特征, 发现嫩江组一段底部、中部和嫩江组二段底部发育三层高有机质、中—细粒暗色泥岩, 纹层连续。【结论】综合稳定同位素地球化学数据, 认为湿润的气候和沉积物源带来的丰富营养是嫩江组一段、嫩江组二段沉积时期松辽盆地高生产力及强还原环境的关键, 这种环境导致了三层高有机质含量、沉积纹层发育明显的中—细粒暗色泥岩的出现。

关键词 松辽盆地; 细粒沉积岩; 纹层; 有机质富集; 元素与同位素地球化学

第一作者 白雪峰, 男, 1979 年出生, 教授级高级工程师, 石油地质学, E-mail: bxf@petrochina.com.cn

通信作者 高远, 男, 教授, 沉积学与古环境, E-mail: yuangao@cugb.edu.cn

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2026)05-1833-17

0 引言

松辽盆地是我国重要油气产区, 经过半个多世纪的连续开采, 常规油气勘探开发进入高成本、高难度阶段, 亟须开辟非常规油气等资源接替新领域(孙龙德等, 2021; 王广昀等, 2021), 目前已全面进入非常规油气勘探阶段(胡素云等, 2019)。松辽盆地白垩系青山口组和嫩江组沉积时期发育两期大规模湖

侵, 中央坳陷区普遍发育了青山口组一段、青山口组二段、嫩江组一段、嫩江组二段等 4 套富有机质页岩。郑玉龙等(2015)初步估算了松辽盆地北部油页岩和页岩油的储量, 计算结果表明松辽盆地北部埋深小于 1 km 的油页岩潜在资源量高达 6 008.40 亿吨, 其中嫩江组就高达 3 883.44 亿吨。前人研究认为嫩江组一段、嫩江组二段深色富有机质细粒沉积岩总体

收稿日期: 2025-05-12; 修回日期: 2025-10-05; 录用日期: 2025-11-24; 网络出版日期: 2025-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42222207)

属于深湖—半深湖相(Feng *et al.*, 2010),但更高分辨率的沉积环境变化及其与有机质富集的关系仍不清楚,亟须综合细粒沉积岩沉积学和地球化学方法开展深入研究。

细粒沉积岩指粒级小于62.5 μm 、碎屑颗粒含量大于50%的沉积岩,主要由黏土和粉砂等细碎屑组成,包含少量碳酸盐矿物、生物硅质、磷酸盐和有机质等(Krumbein, 1933; Picard, 1971; 姜在兴等, 2013)。细粒沉积岩约占全球所有沉积记录的三分之二,但是其分类和成因复杂,是当前沉积学研究的前沿领域,在重建古环境与古气候、理解深时气候演变和全球碳/硫循环中扮演重要角色(Arthur and Sageman, 1994; Stow *et al.*, 2001; Aplin and Macquaker, 2011; Zou *et al.*, 2019; 金之钧等, 2021)。传统沉积学研究受方法技术限制,主要依据粒级和沉积构造特征将其划分为泥岩、页岩和粉砂岩,其形成的沉积环境不易区分(周立宏等, 2016)。随着实验测试分析技术的进步,研究者往往依据不同研究区的特殊岩相,尝试综合结构构造、有机质丰度、地球化学特征、特殊矿物成分等对细粒沉积物开展系统的岩相分类,进而探讨高分辨率沉积环境变化(Loucks and Ruppel, 2007; 姜在兴等, 2013; Lazar *et al.*, 2015a; 鄢继华等, 2015; 胡宗全等, 2021; Kong *et al.*, 2022)。

松辽盆地嫩江组一段、嫩江组二段细粒沉积岩形成于深湖—半深湖环境,前人针对古环境、古气候的研究往往以组、段为单位开展讨论,缺乏更高分辨率的研究。但是,近年来随着研究程度的深入,发现嫩江组一段、嫩江组二段细粒沉积岩形成时的古气候和沉积环境具有复杂波动的特征。例如,高分辨率三维地震资料显示嫩江组一段发育大规模水下水道,证明其沉积环境并非传统认识上的低能静水环境(刘云, 1985; 黄清华等, 1998; 张智礼, 2005),而可能与长期异重流作用有关(冯志强等, 2006, 2010; 莫午零等, 2013; 潘树新等, 2017)。高有峰等(2011)对松辽盆地嫩江组进行了厘米级刻画,发现了细粒沉积岩相的频繁变化。一些基于元素地球化学、黏土矿物特征的研究认为嫩江组一段、嫩江组二段沉积时期的古气候显著波动,湖泊水体环境不断演变,并影响有机质富集(Gao *et al.*, 2018; 包宏扬, 2021)。除盆地内因素外,嫩江组下部是否发生海侵,海侵程度、期次和影响也使得有机质富集机制更为复杂

(Xi *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2015; 曹文心等, 2016; Xu *et al.*, 2023; Qin *et al.*, 2024)。

本研究基于松辽盆地齐家—古龙凹陷A34井岩心资料,对上白垩统嫩江组一段、嫩江组二段进行厘米级高精度岩心描述和细粒沉积岩相划分,综合显微镜观察、元素线扫描、元素面扫描、同位素地球化学等研究方法,旨在:(1)划分出A34井嫩江组一段、嫩江组二段细粒沉积岩相,分析岩相组合特征与沉积环境变化;(2)综合细粒沉积岩相特征和同位素及元素地球化学特征,厘清嫩江组一段、嫩江组二段有机质富集规律。

1 地质背景

松辽盆地地处中国的东北部,是一个典型的陆相裂谷断陷型盆地(Wang *et al.*, 2013a; 王成善等, 2016; Gao *et al.*, 2019)。西侧为大兴安岭,北—东侧为小兴安岭、张广才岭,南缘为康平—法库丘陵地带,盆地中间是嫩江、松花江和辽河水系流经的松嫩平原沼泽区。松辽盆地地面海拔120~300 m,盆地主轴呈北北东向,长轴约750 km,宽330~370 km,面积约260 000 km²。松辽盆地内白垩系从底到顶划分为10个组27个段,下部的火石岭组、沙河子组、营城组主要为火山岩相和湖沼相沉积;泉头组至嫩江组为大型湖泊、河流三角洲相沉积;四方台组、明水组为湖盆萎缩期,主要有滨浅湖相、河流相沉积。前人根据盆地内拗陷和隆起的分布特征划分出北部倾没区、中央拗陷区、东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区和西部斜坡区这六个一级构造单元(图1a)(Feng *et al.*, 2010a; Wang *et al.*, 2013a)。

松辽盆地的地质演化可分为前裂谷阶段、裂谷伸展断陷阶段、热沉降拗陷阶段和构造反转阶段(Feng *et al.*, 2010a)。其中热沉降拗陷阶段始于早白垩世中期,终于白垩纪末期,是盆地最主要的发育阶段。期间构造运动总体平稳,形成了登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组这一系列地层(图1b)(Wang *et al.*, 2016a)。松辽盆地上白垩统嫩江组可划分成五段。依据岩性变化及古生物化石特征,嫩江组可以划分为下部的一至二段和上部的三至五段,这两个层段在沉积环境和岩性上存在较大差异。

嫩江组一段、嫩江组二段沉积时期,盆地沉降速率较快,造成湖平面迅速扩张,整体为深湖相沉

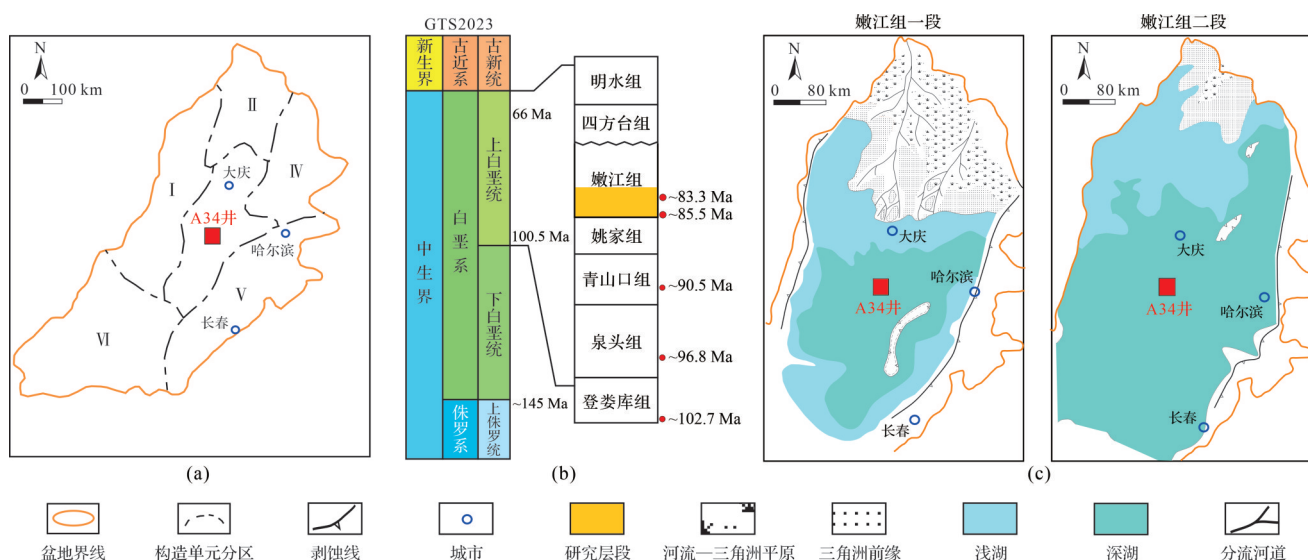


图1 松辽盆地构造分区、地层与嫩江组下部沉积环境

(a) 松辽盆地构造单元划分, 据王成善等, 2016 修改; I. 西部斜坡区; II. 北部倾没区; III. 中央拗陷区; IV. 东北隆起区; V. 东南隆起区; VI. 西南隆起区; 红色方框标识 A34 井井位; (b) 松辽盆地上白垩统地层序列与年代格架, 据吴怀春等, 2024 修改; (c) 嫩江组一段、嫩江组二段沉积相图, 据 Jia *et al.*, 2013 修改

Fig. 1 Tectonic division, stratigraphy and sedimentary environment of the lower Nenjiang Formation in the Songliao Basin

(a) tectonic unit division of the Songliao Basin, modified from Wang *et al.*, 2016; I. western slope zone; II. northern tilting subzone; III. central depression zone; IV. northeast uplift zone; V. southeast uplift zone; VI. southwest uplift zone, well A34 is marked by a red square; (b) stratigraphic sequence and chronostratigraphic framework of the Upper Cretaceous in the Songliao Basin, modified from Wu *et al.*, 2024; (c) sedimentary facies of the First and Second members of the Nenjiang Formation, modified from Jia *et al.*, 2013

积, 覆盖面积达 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1c)。到嫩江组二段沉积早期, 湖泊面积达到最大 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$, 深湖—半深湖相暗色泥岩的厚度最大可达 350 m (Wang *et al.*, 2013a, 2013b)。由于湖泊水体较深, 底层水体缺氧, 因此在嫩江组二段底部记录了良好的湖泊缺氧事件, 并形成一套有利的烃源岩。其中, 在嫩江组二段底部形成的一层优质油页岩, 可作为全盆地对比的标志层。之后, 由于盆地东部隆升, 湖盆面积开始减小、水深变浅, 嫩江组二段中上段逐渐演变成成为半深湖相沉积 (图 1c)。而嫩江组三一五段为滨浅湖相—三角洲相—湖泛平原相沉积 (Feng *et al.*, 2010a)。

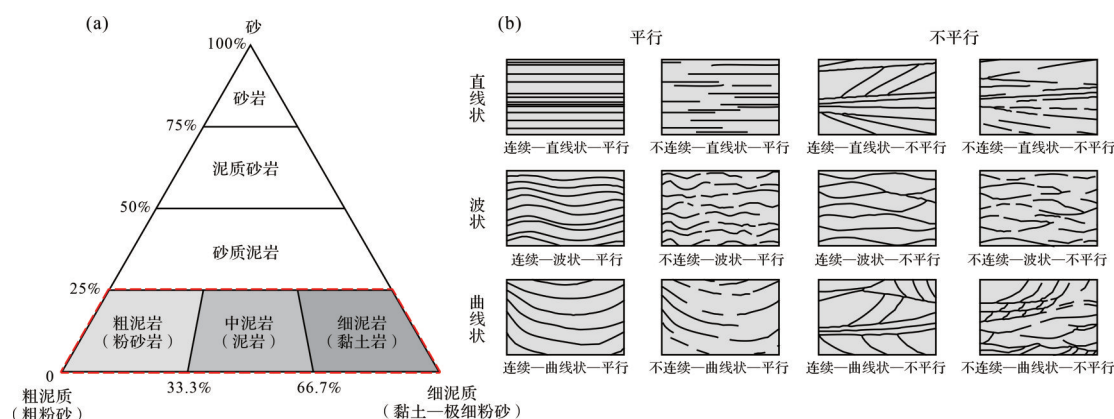
嫩江组一段、嫩江组二段岩性主要是深水湖相的灰—黑色泥岩、钙质泥岩、含钙质砂岩与细砂岩夹层的油页岩及透镜状白云岩。前人通过生物地层学、磁性地层学、放射性年代学和旋回地层学等方法对嫩江组的年代进行了大量研究 (Xi *et al.*, 2011; Deng *et al.*, 2013; Wan *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2013, 2014, 2023; Wang *et al.*, 2016b), 并且基于松科一井建立了高精度的天文年代标尺 (Wu *et al.*, 2023), 可基于嫩江组二段底部的油页岩层、火山灰层进行全盆地对比参考。

2 研究方法

2.1 细粒沉积岩相观察与描述

选取 A34 井的嫩江组一段、嫩江组二段岩心开展厘米级精细描述, 深度段为 1 431.90~1 585.18 m, 总长 153.28 m。录井资料显示, 其岩性主要包括页岩、泥岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、灰泥岩、灰岩和白云岩等, 大部分属细粒沉积岩范畴。岩心保存在大庆油田岩心展示馆, 保存条件好, 有利于进行岩心描述和细粒沉积岩相划分工作。

岩心描述方案采用 Lazar 等人提出的细粒沉积岩分类命名方案 (Lazar *et al.*, 2015a), 内容包括细粒沉积岩颜色、成分、结构、构造以及含有物 (图 2)。颜色是沉积岩最为重要的物理指标, 也是最明显的特征。采用孟塞尔岩石色彩图表 (Munsell Rock Color Chart) 对岩心颜色进行尽可能精确客观的定量对比记录, 该图表基于美国地质学会 (GSA) 岩石色彩图表修订, 是国际大洋钻探岩心颜色描述通用标准。成分方面, 主要通过对岩心及其粉末滴加稀盐酸, 观察是否冒泡以及冒泡剧烈程度来估计细粒沉积岩的钙质含量。结构 (粒度) 方面, 将细粒沉积岩分为粗、中和细泥岩 (往往对应传统的粉砂岩、泥岩和黏土岩)。其间界线为: 细泥 (黏土或极细粉砂), 粒度小于

图2 细粒沉积岩相描述方案(据 Lazar *et al.*, 2015a 修改)

(a)细粒沉积岩命名原则:结构(粒度);(b)纹层(层理)状构造几何形态分类

Fig. 2 Nomenclature guidelines for fine-grained sedimentary rocks facies(modified from Lazar *et al.*, 2015a)

(a) nomenclature guidelines for fine-grained sedimentary rocks: texture (grain size); (b) descriptive terms for lamina continuity, shape, and geometry

8 μm ;中泥(细—中粉砂),粒度范围为8~32 μm ,粗泥(粗粉砂),粒度范围为32.0~62.5 μm 。由于大部分细粒沉积岩颗粒细小,肉眼描述时可配合划痕实验来区分细粒沉积岩的粒度(Lazar *et al.*, 2015b)。该方法采用钢针对岩石表面进行刻划,在灯光或日光的条件下依靠观察划痕光泽和粉末颜色对岩石粒度进行定性描述(表1)。针对沉积构造(层理),以连续性、形状及层理之间的几何关系,可分为连续/不连续纹层(纹层厚度小于1 mm)、连续/不连续层理(纹层厚度大于1 mm)、块状构造。含有物包括生物化石、方解石脉、碳质碎屑和黄铁矿等。

在厘米级高精度岩心描述的基础上进行细粒沉积岩相初步划分,并对各岩相进行针对性取样。本研究使用的透射光偏光显微镜型号为LV100N POL,该显微镜自带拍照系统,目镜放大倍数为10倍,四个物镜的放大倍数分别为5倍、10倍、20倍和50倍。可对载玻片进行放大倍数为50~500倍的观察。

2.2 总有机质含量测试

A34井嫩江组一段、嫩江组二段的总有机碳(TOC)含量数据点共394个,对应的钻井深度段为1 595.8~1 431.7 m,采样间距平均为0.5 m。样品采集与分析测试由大庆油田有限责任公司勘探开发研究院完成,测试仪器型号为CS230碳硫分析仪。测

试流程符合国家标准 GB/T 19145—2022《沉积岩中总有机碳测定》。详细步骤为:将不少于4 g的岩石样品粉碎至粒径为0.075~0.180 mm,随后称取0.01~1.00 g样品置于瓷坩埚中,加入体积比为1:7的盐酸与蒸馏水混合液,于60 $^{\circ}\text{C}$ ~80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温环境中加热反应2 h以上以去除无机碳,确保反应完全且无样品溅出。接下来将溶样后的试样用蒸馏水洗至中性,并放入60 $^{\circ}\text{C}$ ~80 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱烘干。最后将试样在高温有氧条件下燃烧,将有机质燃烧成二氧化碳。检测产生的二氧化碳量并换算成碳元素的含量。

2.3 高分辨率元素扫描

Itrax XRF Scanner是由瑞典Cox Analytical Systems研制生产出的Itrax系列X射线全岩心元素扫描系统,具有扫描速度快、高分辨率、无损、非接触式连续扫描并对样品制备要求低等优点。Itrax高精度元素线扫描可用于元素周期表中Al-U的计数检测,检测步长最小为200 μm ,光学成像系统的像素分辨率可达50 μm ,密度扫描系统的像素分辨率可达20 μm 。对嫩江组一段、嫩江组二段18块细粒沉积岩样品进行Itrax元素扫描分析,获得的元素数据包括Al、Si、S、K、Ca、Ti、V、Cr、Fe、Mn、Rb、Sr,共12种。仪器使用设置为:在-93.6 kPa的高真空条件下,在40 kV电压下利用钼(Mo)、200 μm 扫描间隔、5 s曝光时间条件下获取元素的信号值分布。完成扫描后可得到数据点间隔为200 μm 的高分辨率数据序列。该Itrax多功能岩心扫描仪所获取的XRF结果是半定量数据,以元素计数率形式计量,单位为counts per second,即cps。因此,测试得到的数据为元素的相对含量而不是绝对含量。

表1 泥岩划痕实验特征

Table 1 Characteristics of the mudstone scratch test

划痕光泽	粉末颜色	泥岩名称
蜡状光泽	暗(深)色	细泥岩
中间光泽	中间色	中泥岩
暗淡光泽	浅色	粗泥岩

M6高精度元素面扫描使用仪器为高分辨率大面积微区XRF成像光谱仪Bruker M6 JETSTREAM。主要用于岩心、岩石、沉淀物、微体化石、年轮等多元素分布成像、进行扫描与相序分析。其优势不仅可以分析水平放置的样品,还可以分析垂直放置的样品;在高激发强度以及样品台的快速移动情况下,仍可实现快速检测;可以在5步之内根据样品结构及所需空间分辨率调整到相应的尺寸;其探测器具有很高的计数率能力,在很宽的计数率范围内拥有良好的能量分辨率。对嫩江组一段、嫩江组二段18块细粒沉积岩样品进行M6元素面扫描分析,获得包括Ca、Fe、K、Ti等12~16种元素的高精度图像。本研究进行元素面扫描的仪器参数设置为:激发电压50 kV、管电流600 μ A、每个像素停留时间10 ms/pixel、光斑尺寸50 μ m,光斑间距100 μ m。完成元素面扫描后,可得到精度为100 μ m的高分辨率岩心扫描图像。

2.4 锶同位素地球化学测试

Rb-Sr同位素组成分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室进行。准确称取0.1 g样品于聚四氟乙烯溶样罐,加入2.5 mL HF、0.5 mL HNO₃、0.015 mL HClO₄置于150 °C的电热板上保温一周用于溶解样品。采用AG 50 W $\times$ 12强酸性阳离子交换树脂分离提纯Sr。利用Triton型热电离质谱仪(TIMs)(Thermo Electron公司)测定Sr同位素比值,利用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375\,209$ 对Sr进行质量分馏校正。国际标样SRM987用于检测仪器状态,其中SRM987测定结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\,257\pm0.000\,008(2\text{SD}, n=10)$ 。实验过程以国际标准岩石样品BCR-2(玄武岩)监测分离流程,其结果是: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.705\,022\pm0.000\,016(2\text{SE})$,和文献报道值相一致(Liu *et al.*, 2020)。

3 细粒沉积岩相与有机质含量

3.1 嫩江组一段、嫩江组二段细粒沉积岩相

结合岩心描述和显微镜下观察,将A34井嫩江组一段、嫩江组二段划分为5类细粒沉积岩相组合,16种岩相(图3,4)。5类细粒岩相组合分别为:连续纹层状泥岩、不连续纹层状泥岩、连续层理状泥岩、不连续层理状泥岩、块状泥岩。具体划分为:连续纹层状细粒泥岩相、连续纹层状中粒泥岩相、连续纹层状粗粒泥岩相、不连续纹层状细粒泥岩相、不连续纹层状中粒泥岩相、不连续纹层状粗粒泥岩相、连续层

理状细粒泥岩相、连续层理状中粒泥岩相、连续层理状粗粒泥岩相、不连续层理状细粒泥岩相、不连续层理状中粒泥岩相、不连续层理状粗粒泥岩相、块状细粒泥岩相、块状中粒泥岩相和块状粗粒泥岩相。另外,我们还对岩心中高频次出现的碳酸盐岩类进行了记录,并通过滴酸测试来分辨其成分。5类细粒沉积岩相组合及碳酸盐岩的特征如下。

1) 连续纹层状泥岩

连续纹层状泥岩相以不同厚度大量分布于嫩江组一段、嫩江组二段岩心的75个层位里(占整段岩心的35.2%),总长度为59.33 m(占整段岩心的38.7%),平均厚度为0.79 m,该岩相沉积构造为连续纹层状构造,纹层厚度小于1 mm,纹层形态大多为直线平行状(70层),少数为曲线平行状(4层)和曲线不平行状(1层)。颜色主要表现为深灰色(35层)和中灰色(25层),少量为橄榄灰色(11层)、浅橄榄灰色(2层)和深灰色(2层)。含有物方面,37个层位可见黄铁矿,9个层位可见介形虫、叶肢介生物化石,20个层位中可见碳质碎屑。根据粒度将连续纹层状泥岩相细分为粗粒、中粒、细粒三种岩相,其中中粒泥岩(37层)最多,粗粒泥岩(25层)次之,细粒泥岩(13层)最少。

2) 不连续纹层状泥岩

不连续纹层状泥岩相以不同厚度分布于嫩江组一段、嫩江组二段岩心的40个层位里(占整段岩心的18.8%),总长度为38.5 m(占整段岩心的25.1%),平均厚度为0.96 m,该岩相沉积构造为不连续纹层状构造,纹层厚度小于1 mm,纹层形态大多为直线平行状(32层),少数为曲线平行状(7层)和曲线不平行状(1层)。颜色主要表现为中深灰色(18层)和中灰色(18层),少量为橄榄灰色(2层)、深灰色(2层)和浅橄榄灰色(2层)。含有物方面,24个层位可见黄铁矿,11个层位可见介形虫、叶肢介生物化石,10个层位中可见碳质碎屑。根据粒度将连续纹层状泥岩相细分为粗粒、中粒、细粒三种岩相,其中粗粒泥岩(27层)最多,细粒泥岩(7层)和中粒泥岩(6层)次之。

3) 连续层理状泥岩

连续层理状泥岩相以不同厚度分布于嫩江组一段、嫩江组二段岩心的6个层位里(占整段岩心的2.8%),总长度为5.56 m(占整段岩心的3.6%),平均厚度为0.93 m,该岩相沉积构造为连续层理状构造,纹层厚度大于1 mm,纹层形态为直线平行状(5层)和曲线平行状(1层)。颜色主要表现为中灰色

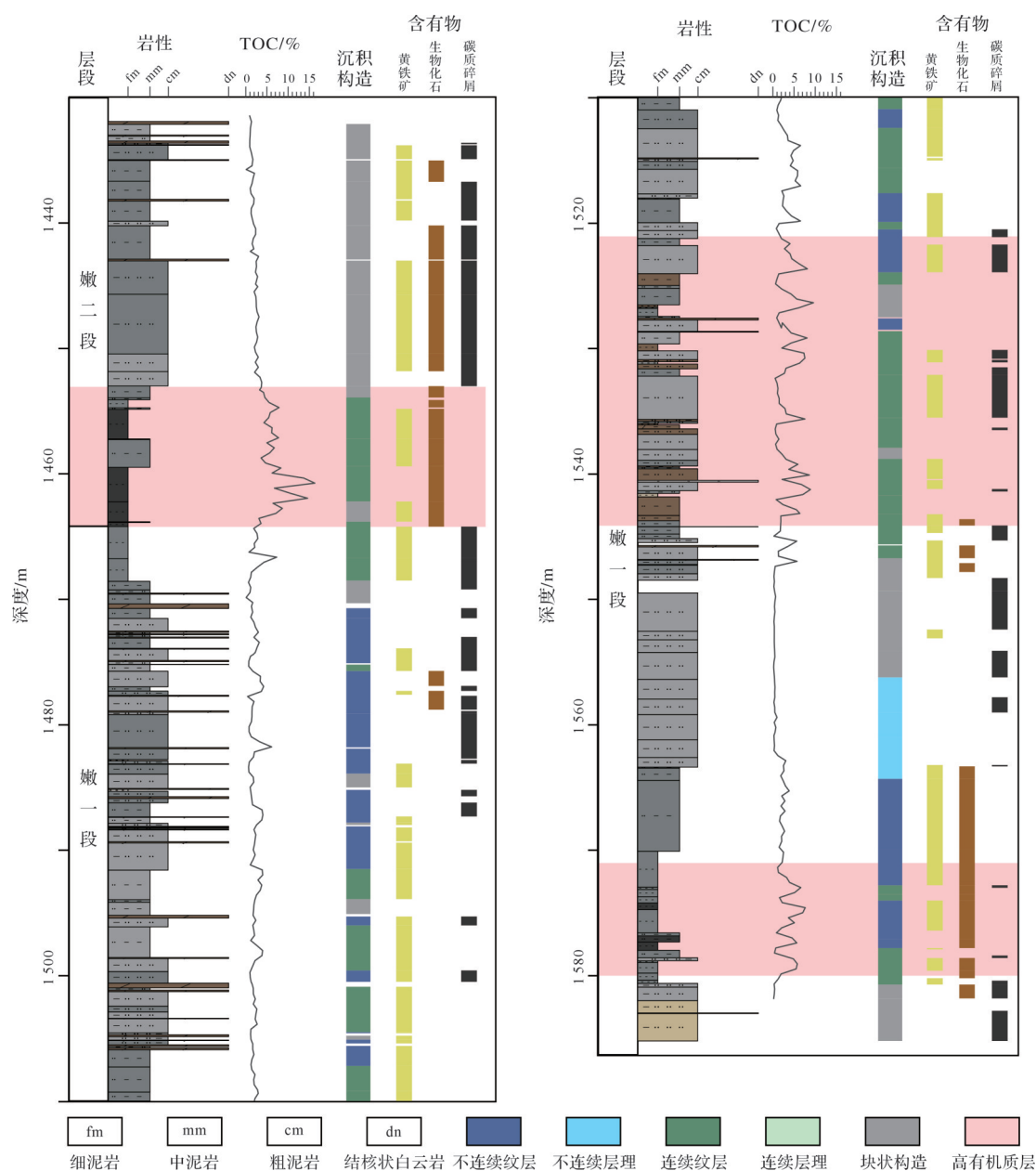


图3 A34井嫩江组下部细粒沉积特征与有机质含量

粉色条带指示高有机质层(TOC均值大于3%)

Fig. 3 Fine-grained sedimentary characteristics and organic matter content in the lower Nenjiang Formation, well A34

pink bands indicate organic-rich intervals (mean TOC>3%)

(4层),其次为中深灰色(1层)和黄绿灰色(1层)。含有物方面,1个层位可见叶肢介、介形虫生物化石,3个层位可见碳质碎屑,不可见黄铁矿。根据粒度将连续纹层状泥岩相细分为粗粒、中粒、细粒三种岩相,其中粗粒泥岩(5层)最多,中粒泥岩(1层)次之。

4) 不连续层理状泥岩

不连续层理状泥岩相以不同厚度分布于嫩江组一段、嫩江组二段岩心的6个层位里(占整段岩心的

2.8%),总长度为7.99 m(占整段岩心的5.2%),平均厚度为1.33 m,该岩相沉积构造为不连续层理状构造,纹层厚度大于1 mm,纹层形态为直线平行状(2层)和曲线平行状(4层)。颜色主要表现为中灰色(4层),其次为中深灰色(1层)和深灰色(1层)。含有物方面,2个层位可见黄铁矿,1个层位可见叶肢介生物化石,未见碳质碎屑。根据粒度将连续纹层状泥岩相细分为粗粒、中粒、细粒三种岩相,其中粗粒泥岩

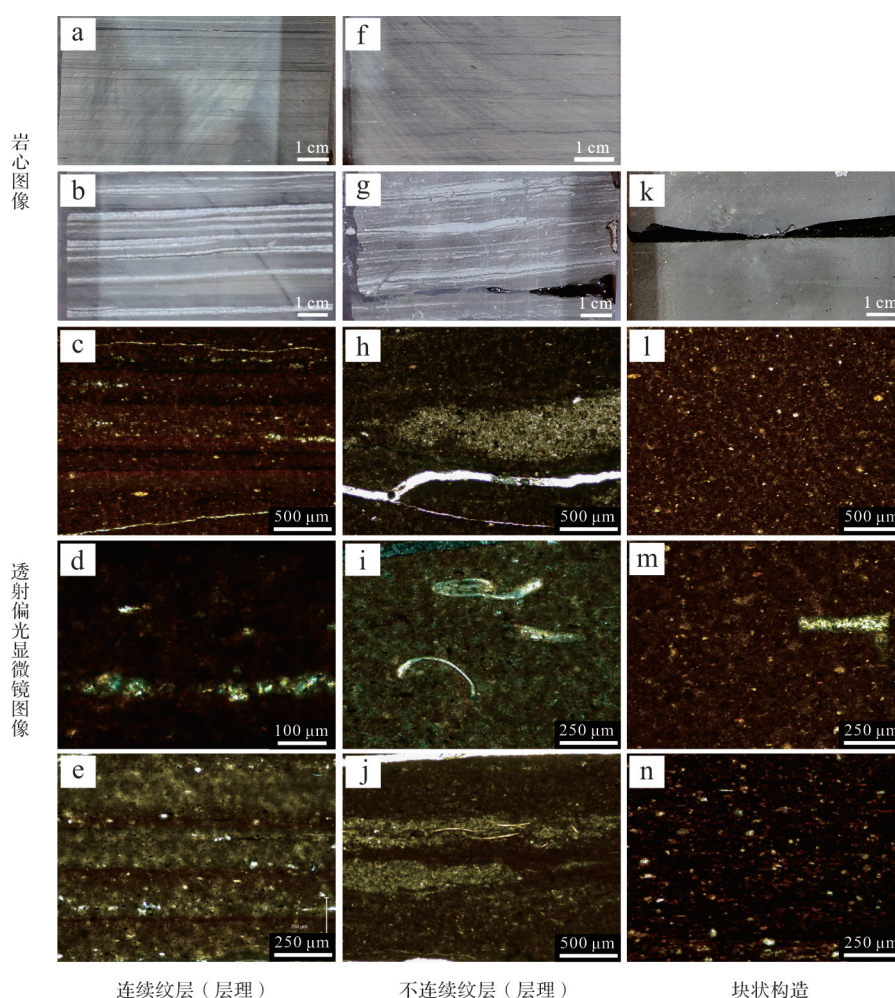


图4 A34井嫩江组一段、嫩江组二段细粒沉积岩相照片

其中a~e为连续纹层(层理)状泥岩相,f~j为不连续纹层(层理)状泥岩相,k~n为块状泥岩相;(a)1 543.61 m,连续纹层状中泥岩;(b)1 541.31 m,中深灰色连续曲线状层理中泥岩;(c)1 543.60 m,单偏光,50×;(d)1 543.60 m,石英和碳酸盐颗粒组成的纹层,正交偏光,200×;(e)1 526.00 m,中深灰色连续直线状纹层中泥岩,单偏光,100×;f)1 472.49 m,中灰色不连续直线状纹层粗泥岩;(g)1 562.39 m,中灰色不连续曲线状层理粗泥岩;(h)1 574.00 m,单偏光,50×;(i)1 565.50 m,正交偏光,100×;(j)1 488.80 m,单偏光,50×;(k)1 463.77 m,深灰色块状细泥岩;(l)1 454.40 m,单偏光,50×,100×;(m)1 454.40 m,单偏光,100×;(n)1 462.50 m,100×,单偏光

Fig. 4 Photographs of fine-grained sedimentary rock facies from the First and Second members of the Nenjiang Formation, well A34

(a-e) continuous laminated (bedded) mudstone, (f-j) discontinuous laminated (bedded) mudstone, (k-n) massive mudstone; (a) 1 543.61 m, continuous laminated medium mudstone; (b) 1 541.31 m, medium dark gray continuous curved bedded medium mudstone; (c) 1 543.60 m, plane-polarized light (PPL), 50 ×; (d) 1 543.60 m, lamination composed of quartz and carbonate particles, cross-polarized light (XPL), 200 ×; (e) 1 526.00 m, medium dark gray continuous planar laminated medium mudstone, PPL, 100 ×; (f) 1 472.49 m, medium gray discontinuous linear laminated coarse mudstone; (g) 1 562.39 m, medium gray discontinuous curved bedded coarse mudstone; (h) 1 574.00 m, PPL, 50 ×; (i) 1 565.50 m, XPL, 100 ×; (j) 1 488.80 m, PPL, 50 ×; (k) 1 463.77 m, dark gray massive fine mudstone; (l) 1 454.40 m, PPL, 50 ×; (m) 1 454.40 m, PPL, 100 ×; (n) 1 462.50 m, PPL, 100 ×

(4层)最多,细粒泥岩(1层)和中粒泥岩(1层)次之。

5) 块状泥岩

块状泥岩相主要特征为基本无沉积构造或者不明显的层理状构造。主要分布在嫩江组二段顶部、嫩江组一段底部和嫩江组一段中下部,总计44个层位(占整段岩心的20.7%),总长度为39.44 m(占整段岩心的25.1%),平均厚度为0.90 m。该岩相基本无定向沉积构造或层理不明显,根据结构细分为粗粒、中

粒和细粒三种岩相。颜色主要表现为中深灰色(20层)和中灰色(15层),少量为橄榄灰色(1层)、黄绿灰色(3层)、深灰色(3层)和中浅灰色(2层),颜色总体偏深。含有物方面,15个层位可见黄铁矿,13个层位可见介形虫、叶肢介生物化石,16个层位中可见碳质碎屑。根据粒度将块状泥岩相细分为粗粒、中粒、细粒三种岩相,其中粗粒泥岩(27层)最多,中粒泥岩(14层)次之,细粒泥岩(3层)最少,总体粒度偏粗。

6) 碳酸盐岩

A34井嫩江组一段、嫩江组二段出现的碳酸盐岩主要为白云岩、灰岩夹层或结核,少量为方解石薄层和沿裂隙发育的方解石脉,不均匀分布于整个嫩江组一段、嫩江组二段岩心中,厚度一般不超过10 cm。其颜色主要为橄榄灰色和灰白色。灰岩滴加稀盐酸产生较剧烈的气泡,白云岩表面滴加稀盐酸后基本无气泡,用钢针刻划成粉末后,滴加稀盐酸后有气泡。

3.2 A34井嫩江组一段、嫩江组二段有机质含量变化

A34井嫩江组一段、嫩江组二段进行岩心描述层段总长152.94 m,共识别到中深灰色连续直线状或块状泥岩至细粉砂岩,常见黄铁矿、碳质碎屑等,部分层段化石丰富、含大量叶肢介(图4i,j)。嫩江组二段富含化石、黄铁矿和碳质碎屑,嫩江组一段不常见化石,含黄铁矿和少量碳质碎屑。依据岩相特征和TOC均值含量(以3%为界),可划分出其他层段和高有机质层段。嫩江组一段、嫩江组二段其他层段发育中灰色不连续纹层状或块状细粉砂岩至粗粉砂岩。

三层高有机质层段及其岩相特征分别为:嫩江组一段下部高有机质层段(1 571.76~1 579.88 m,最高值为7.644,平均值为3.928),发育中灰色连续纹层状、层理状细泥岩,富含化石和黄铁矿,少见碳质碎屑;嫩江组一段中部高有机质层段(1 521.74~1 544.00 m,最高值为9.584,平均值为3.581),发育橄榄灰色连续纹层状细泥岩至细粉砂岩,部分层段见黄铁矿和碳质碎屑;嫩江组二段下部高有机质层段(1 453.04~1 464.32 m,最高值为16.299,平均值为6.746),发育深灰色连续纹层状细泥岩,含大量化石,少量黄铁矿,不含碳质碎屑。其他层段(最高值为7.305,平均值为1.901)发育中、浅灰色或其他相对浅色不连续纹层(层理)、块状粗一中泥岩为主。

4 元素扫描与同位素地球化学实验结果

4.1 Itrax元素线扫描实验结果

对A34井嫩江组一段、嫩江组二段1 436~1 580 m分布的22块样品进行了Itrax元素线扫描分析(图5)。高有机质层段分布14块样品,以相对深色连续纹层细泥岩至中泥岩为主,其他层段分布8块样品,

以相对浅色不连续纹层或块状粗泥岩为主。相对其他层段元素含量,高有机质层段中Si、S、Ca与Mn元素含量偏低,K、Fe元素含量偏高,元素比V/Cr与Rb/Sr偏高,嫩江组一段高有机质层段1 526 m的A34-09和1 543 m的A34-06样品元素S含量高且较为明显。

A34井嫩江组高有机质层样品元素相对含量具有显著的亚毫米级旋回,旋回平均厚度为100~200 μm (图5)。其中嫩江组一段下部高有机质层段A34-03样品Al、V、Cr元素旋回分布明显,Mn、Fe元素不明显;嫩江组一段中部高有机质层段A34-08样品Al、Ti、Cr、Rb元素旋回分布明显,Ca、Sr元素旋回分布不明显;嫩江组二段底部高有机质层段A34-15样品在透射光偏光显微镜下可见明显纹层。

其他层段中Si、S、Ca与Mn元素相对含量偏高,K、Fe元素相对含量偏低,元素比V/Cr与Rb/Sr偏低,指示了弱风化作用与弱还原作用,其中嫩江组一段1 565 m其他层段A34-04样品元素Ca与Mn含量较高且较为明显,嫩江组一段1 552 m其他层段A34-05样品元素Al与K元素相对含量较高。

4.2 M6元素面扫描实验结果

对A34井嫩江组一段、嫩江组二段的连续纹层状泥岩、不连续纹层状泥岩和块状泥岩进行了Bruker M6元素面扫描分析(图6),得到了不同元素在剖面上的元素分布特征。嫩江组一段1 580 m高有机质层段A34-01样品纹层发育,Fe、Ca元素面扫描纹层明显;同样位于嫩江组一段高有机质层段1 544 m的A34-06样品、1 523 m的A34-10和嫩江组二段1 463 m高有机质层段的A34-14样品具有同样的元素面扫描结果;相较于高有机质层段,位于嫩江组一段1 472 m其他层段的A34-13样品则以块状构造为主,Ti、Cr、Fe、Ca元素面扫描纹层不发育。

4.3 锶同位素地球化学结果

A34井嫩江组一段、嫩江组二段的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 锶同位素测试数据共27个数据点。数据序列中最小值为0.708 837,最大值为0.714 494,平均值为0.711 263。数据序列整体高于同时期的海水锶同位素平均值(Chamberlain *et al.*, 2013)。自嫩江组一段底部向上,数据序列呈现出总体正偏的趋势。但可观察到在高有机质层段,锶同位素整体处于高值。而在其他层段,锶同位素出现相对低值和局部负偏的小趋势。

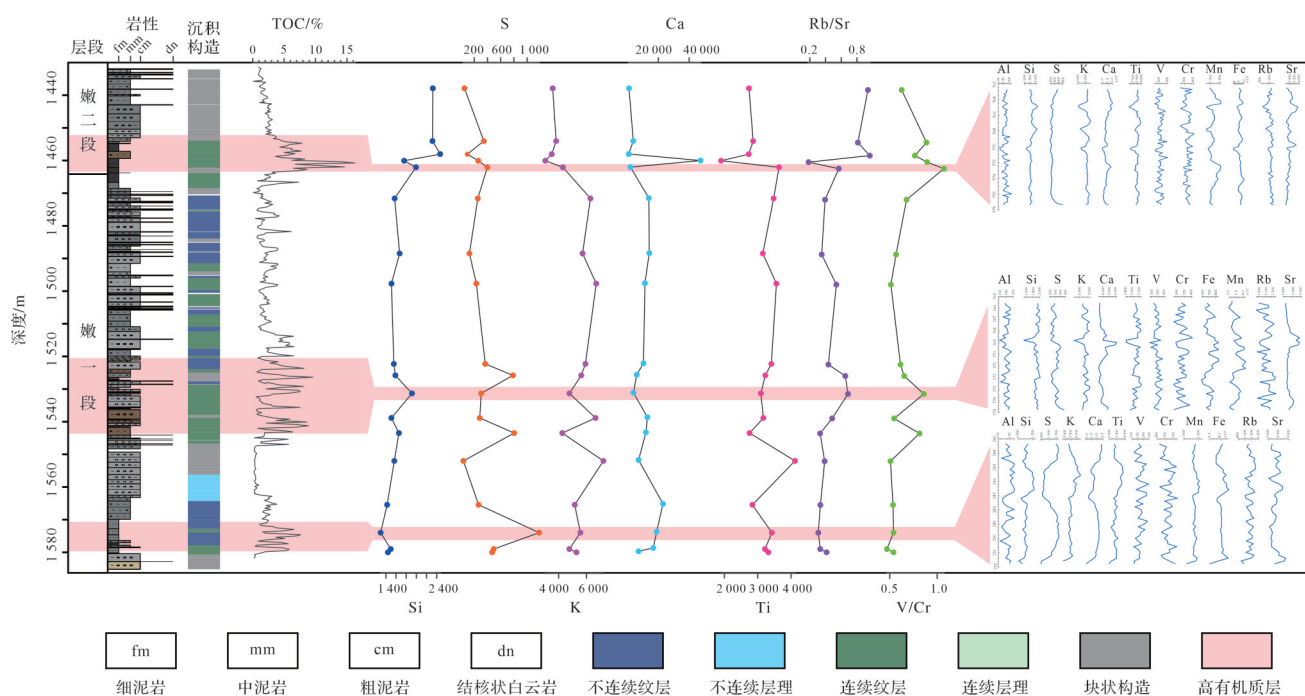


图5 A34井 ITRAX 高精度元素线扫描结果

Fig. 5 ITRAX high-resolution elemental line scans of well A34

5 讨论

5.1 古环境与古气候指标选择

湖泊中的初级生产力条件和氧化还原等古环境条件都受到古气候的控制,而古气候也影响着沉积岩的元素分布和矿物组成,因此一些元素的相对含量和元素比值可用于指示古环境和古气候。Rb可以在源岩中长期存在并缓慢迁移,而Sr在化学风化过程中很容易释放,导致Sr浓度逐渐下降。因此,Rb/Sr值可以用来估计化学风化的程度。较高的Rb/Sr值表明化学风化程度更强,气候相对温暖湿润。含氧相对较少的贫氧—缺氧环境是有机质保存的重要条件,因此,对沉积水体的氧化还原特征进行精确地判别是研究有机质富集的关键。Tribovillard *et al.* (1992)认为,V、Ni和Cr具有较强的氧化还原敏感性,在氧化条件下具有较强的溶解能力,在还原条件下溶解能力相对较弱,且在贫氧—缺氧环境容易自生富集;V的还原多发生在反硝化作用界线的下部,因而较易被胶体质点、黏土等物质吸附并沉积;Ni在还原态中以硫化物沉淀为主,这些元素的比值变化可以反映沉积水体的氧化还原状态。大量研究指出V/Cr高值(>4.25)指示明显水体分层的强还原环境或硫化条件,V/Cr低值(<2.00)指示无水体分层的氧化条件,V/Cr中间值(介于2.00~4.25)为弱水体

分层的缺氧环境或较弱的还原条件(Niu *et al.*, 2019)。湖泊古生产力方面,除Ba、Si元素可用于恢复古生产力外,P、Cu等元素作为生物活动重要的营养元素或必需微量元素,也常被用于恢复古生产力(Jafarian *et al.*, 2024)。而Ti元素主要来自陆源碎屑沉积物,在沉积和成岩过程中不易被风化和溶解,也不存在生物富集效应,其含量较稳定,可作为陆源碎屑输入的指标(Kylander *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2022a)。因此可选择Ti元素对Cu元素进行归一化处理,从而抵消来自陆源输入的变化趋势对元素记录的稀释作用。在古盐度方面,Sr/Ca常被用于指示水体盐度,比值升高代表更高盐度的偏咸水环境,介形虫壳体Sr/Ca还可用于定量重建古盐度(Zou *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022b; Yang *et al.*, 2024)。此外,S元素指示生产力,Si元素来源于石英。

综上,在使用Itrax XRF Scanner获取了12种元素的相对含量后,选取Cu/Ti值来表征湖泊初始生产力,选取V/Cr值来指示湖泊的氧化还原条件,选取Rb/Sr值来表征古气候特征(化学风化强度),选取Sr/Ca值来表征古盐度。另外,对于湖泊沉积物而言,常见的造岩元素如Al、K、Ti、Rb、Zr、Fe等,常存在于稳定的矿物质中,性质稳定且行为保守,不易受后期作用的影响,也可用作陆源碎屑输入指标。

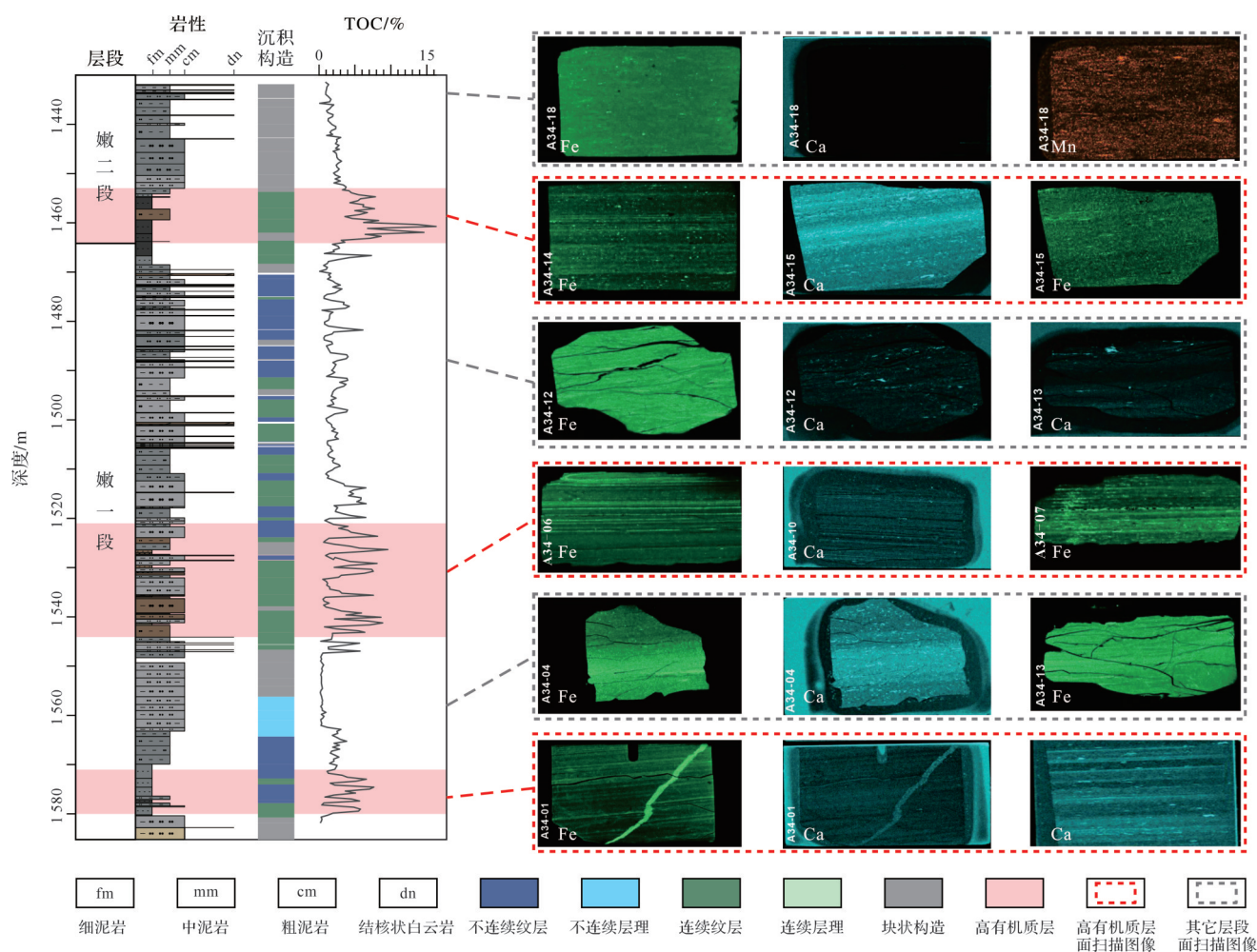


图6 A34井Bruker M6高精度元素面扫描结果

Fig. 6 ITRAX Bruker M6 high-resolution elemental area scans of well A34

5.2 嫩江组一段、嫩江组二段高有机质细粒沉积岩特征与对比

A34井嫩江组一段、嫩江组二段细粒沉积岩岩相与纹层结构、有机质含量、元素地球化学特征总结见表2。其中,嫩江组二段底部高有机质层以深色连续纹层或块状中至细泥岩为主,其元素Al、K、Ca、Mn、Fe相对含量偏低,元素S、V、Cr、Si相对含量偏高。在TOC超高层段(1 453.04~1 464.32 m,最高值为16.299,平均值为6.746),以连续纹层或层理细泥岩组成,Ca、Mn、Sr元素相对富集,Rb元素含量低。亚毫米纹层特征明显,厚度100~200 μm 的Ca(可能指示方解石)、Fe(可能指示黏土矿物和有机质)纹层显著。

嫩江组一段中部高有机质层段以深色连续/不连续纹层中—细泥岩为主,其元素Al、K、Ca、Mn、Fe含量偏低,元素S、V、Cr、含量偏高。在TOC高值层段

(TOC>6%),以连续纹层/层理细泥岩为主,富含Ca、Mn、S元素,Si、K、Al、Ti元素含量低。亚毫米纹层特征明显,厚度100~200 μm 的Ca(可能指示方解石)、Fe(可能指示黏土矿物和有机质)纹层显著。

嫩江组一段底部高有机质层段以深色中—细泥岩为主,其纹层发育程度中等,可能指示沉积环境扰动偏多。元素Al、K、Ca、Mn、Fe含量偏低,元素S、Ca、Cr含量偏高。在TOC高值层段(TOC>6%),以不连续层理细泥岩为主,富含Ca、Mn、S元素,Si、K、Al、Ti元素含量低,部分样品发育Ca、Fe亚毫米纹层。

嫩江组一段、嫩江组二段其他层段以中灰色、中深灰色粗泥岩和中泥岩为主,纹层发育情况不甚好,以不连续纹层、层理和块状构造为主,扰动多。相较于高有机质层段,元素Si、S、Ca与Mn偏低,元素K、Fe偏高。元素面扫描结果也显示特征不明显的不连

表2 A34井嫩江组一段、嫩江组二段细粒沉积岩特征与有机质富集主控因素

Table 2 Characteristics of fine-grained sedimentary rocks and main influences on organic matter enrichment in the First and Second members of Nenjiang Formation, well A34

层段	岩相特征	纹层发育特征	亚毫米纹层类型	元素特征	TOC 值特征	有机质富集 主控因素
嫩江组二段底部 高有机质层 (油页岩)	中—细粒 暗色	纹层、层理发育最好 发育亚毫米纹层	黏土矿物纹层	Si 含量偏高 Al、K、Ca、Mn、Fe 含量偏低	最高值为 16.299 平均值为 6.746	强陆源输入 高生产力 良好保存条件
嫩江组一段中部 高有机质层	细—中粒 暗色	纹层、层理发育较好连续纹层 发育亚毫米纹层	石英、黏土矿物、 黄铁矿纹层	S 含量偏高 Al、K、Ca 含量偏低	最高值为 9.584 平均值为 3.581	较高生产力 良好保存条件
嫩江组一段底部 高有机质层	细粒 暗色	纹层发育中等、不连续、 生物扰动较多	石英、黏土矿物、 碳酸盐矿物纹层	S 等自生元素含量偏高 Al、K、Ti 等陆源元素含量偏低	最高值为 7.644 平均值为 3.928	较高生产力 良好保存条件
嫩江组一段、嫩江组二段 其他层段	中—粗粒 较浅色	成层结构基本不发育	不明显	Al、K、Ti 等陆源元素含量偏高	最高值为 7.305 平均值为 1.901	较好保存条件

续纹层和均匀分布的块状构造,与肉眼观察的块状构造结果基本一致。

前人曾发表 A34 井嫩江组一段、嫩江组二段正构烷烃氢同位素数据,并解释其古环境意义(王瑞等,2023)。本研究综合这些数据,结合厘米级岩心描述、高分辨率 TOC 分析、锆同位素和元素扫描结果,进行高有机质层与其他层段对比以及高有机质层间对比。可发现嫩江组三层高有机质层相比其他层段,粒度较细、纹层较发育,对应有机碳高值、氢同位素正偏、锆同位素正偏(图 7)。高有机质层对应特征有:TOC 高值,锆同位素正偏,氢同位素正偏,中细粒纹层状泥岩,Si、S 和 V 元素相对含量高,Al、K、Ti、Rb 元素相对含量低。其中嫩江组二段底部高有机质层具有高 Si 元素相对含量,与嫩江组一段存在明显差别(图 5)。

5.3 嫩江组一段、嫩江组二段有机质富集因素分析

在陆相盆地内,影响有机质富集的因素主要有三个,即生产力、保存条件和稀释作用,而这三方面主要由沉积环境控制(Bohacs *et al.*, 2000)。湖泊盆地中陆源碎屑物质和营养元素的输入、古气候条件等影响湖泊生产力,营养元素的增加和温暖湿润的气候条件往往促进藻类等湖泊生物勃发,导致生产力提高,是有机质富集的前提;氧化还原条件对有机质的保存有着直接的影响,气候湿润、湖泊扩张加深、湖水分层都有利于湖底还原环境的形成,进而促进有机质富集;过高的陆源碎屑物质(如石英粉砂)输入会稀释细粒沉积岩中的有机质丰度,降低有机

质富集效率(Bohacs *et al.*, 2000; Niu *et al.*, 2021)。除上述因素外,一些特殊的事件,如海侵事件和大洋缺氧事件也可能影响陆相沉积盆地的有机质富集(Wang *et al.*, 2013b; Jones *et al.*, 2018)。

前人对嫩江组一段、嫩江组二段有机质富集机理进行了大量研究。Jia *et al.* (2013) 基于嫩江组生物标志物特征,认为较高的生物生产力是上油页岩层有机质富集的主要控制因素,并建立了生产力主导的模型。Niu *et al.* (2021) 综合松辽盆地嫩江组三个钻孔和一个剖面的数据集,结合生产力、盐度及氧化还原地球化学指标对比四套记录,认为嫩江组一段和嫩江组二段有机质富集的主要控制因素分别是保存条件和生产力。Liu *et al.* (2022) 综合嫩江组下部无机和有机地球化学指标,认为嫩江组一段有机质富集是由于周期性海侵造成的半咸水至咸水环境和间歇性缺氧分层的底水条件,嫩江组二段湖泊水位迅速下降,暖湿气候下强烈的水文循环造成较高初级生产力,最终导致短暂、显著的有机质富集。Chen *et al.* (2022) 通过对嫩江组两个剖面的多指标分析,认为嫩江组一段有机质富集是频繁的火山活动带来充足养分导致高生产力的结果,嫩江组二段是海侵造成缺氧分层的保存条件主导。可见,前人对嫩江组一段、嫩江组二段有机质富集机理的解释仍存在争议。

A34 井岩心描述、显微观察和元素扫描结果显示,嫩江组一段底部、中部和嫩江组二段底部三层高有机质层与其他层段沉积特征差异显著。高有机质

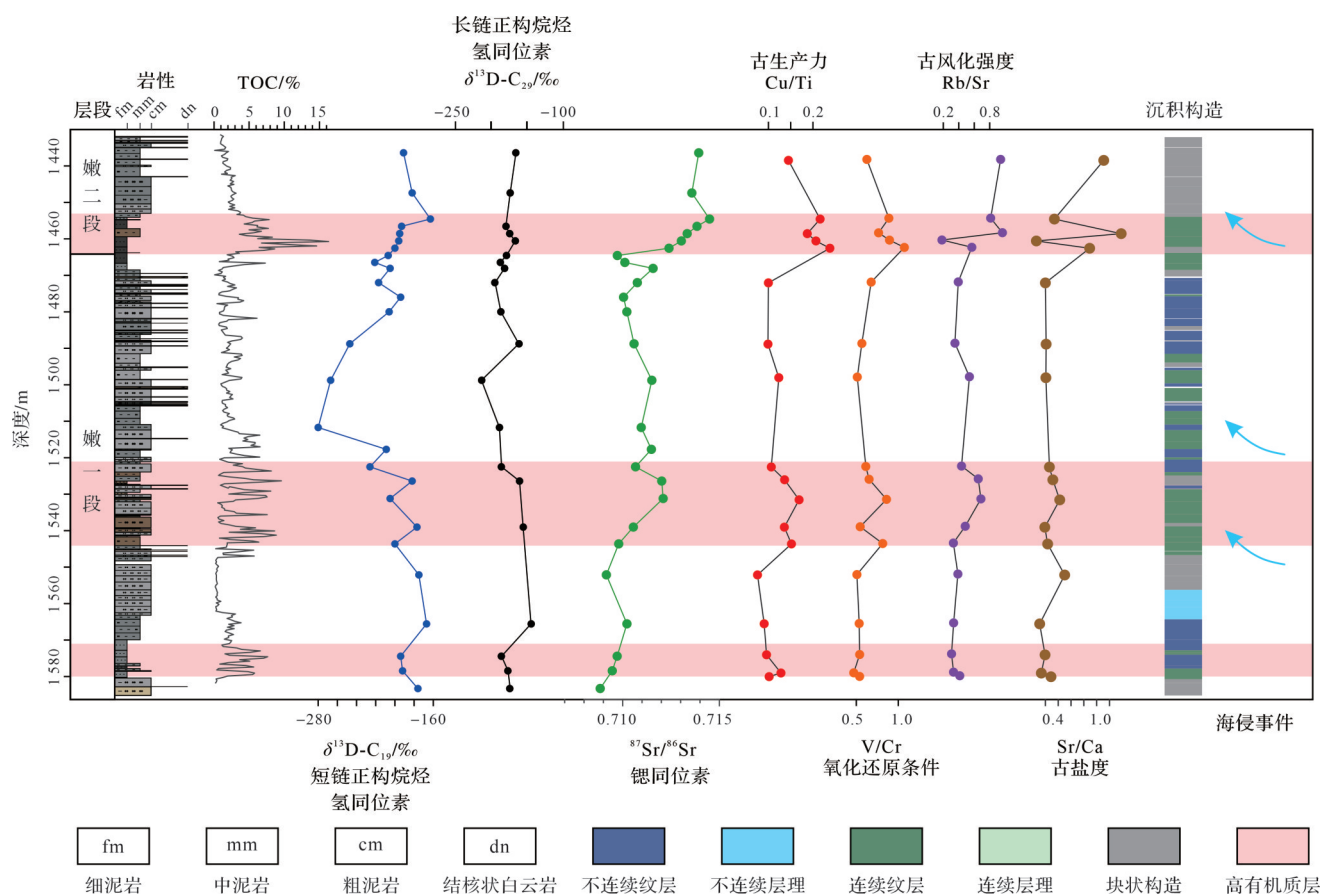


图7 A34井岩相特征、有机地球化学、锶同位素和元素扫描结果综合对比

Fig. 7 Comparison of lithofacies characteristics, organic geochemistry, Sr isotopes and elemental scans, well A34

层主要发育中—细粒泥岩,常发育100~200 μm 黏土矿物和有机质(Fe)、方解石(Ca)纹层,而其他层段往往对应中—粗粒块状泥岩,表明有机质富集时期湖泊水体较深、沉积速率较慢、沉积物受环境扰动较少。S等自生元素含量偏高,元素比值Cu/Ti、V/Cr、Rb/Sr、Sr/Ca偏高,指示生产力较高、水体还原性较强、盐度较高、源区风化作用较强。对比之前发表的A34井稳定同位素数据,短链(C-19)和长链(C-29)正构烷烃氢同位素均偏负,表明气候较湿润(王瑞等, 2023);全岩锶同位素在高有机质层位出现正偏,表明物源发生转变(图7)。

综合这些证据,嫩江组一段、嫩江组二段三层高有机质层形成时期,湿润的气候和物源变化给湖泊带来的丰富营养元素提高了生产力。湿润气候使得湖泊面积扩张、深度加深,湖泊水体分层增强导致湖底盐度更高、还原性更强,促进细泥岩的发育和亚毫米级纹层的保存,同时有利于有机质保存。间歇性出现的海侵事件可能进一步促进了有机质富集。反之,其他层段的沉积特征与高有机质

层相反,显示湖泊初级生产力降低和湖底保存条件相对较差。

进一步具体解剖嫩江组一段、嫩江组二段三层高有机质层的富集机制。嫩江组一段底部TOC高值由正构烷烃氢同位素的负偏主导,反映此时松辽盆地古气候相对湿润。锶同位素的小幅度正偏指示来自盆地的优势物源方向转向盆地东北部高锶同位素比值的物源区(Chamberlain *et al.*, 2013)。根据地震剖面、测井数据等资料,前人研究认为这一时期松辽盆地存在大型的南北向河流—三角洲系统(Feng *et al.*, 2010b),在相对湿润的气候条件下,这一系统能够为盆地输送更多陆源物质,与Cu/Ti出现小的峰值反映生产力略升一致,实现有机质的积累。嫩江组一段中部的高有机质区间延续了湿润气候(正构烷烃氢同位素呈负偏趋势),Rb/Sr进一步提升指示风化作用加强,协同锶同位素指示陆源输入进一步加强,在湖泊缺氧环境持续改善的作用下,促成了生产力较大提升(Cu/Ti),导致该层段形成了相比嫩江组一段底部更高的TOC值。此外,前

人通过特定海洋生物标志物、硫同位素和铂族元素揭示松科一井相近层段发生了两次海侵事件(图7),海侵事件可能通过带入营养盐、导致湖泊盐度分层等途径促进了嫩江组一段中部的有机质富集(Hu *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2023; Qin *et al.*, 2024)。反之,嫩江组一段上部TOC含量降低,正构烷烃氢同位素显著负偏,可能代表了强降雨事件或水源的明显转变,影响了湖泊生产力和湖底氧化还原环境,导致中粗粒泥岩发育、纹层破坏,TOC值低于高有机质层。至嫩江组二段底部,V/Cr升高指示松辽古湖泊保存条件进一步改善,伴随着锆同位素的强烈正偏,Cu/Ti出现最大幅度提升,表明这一时期的TOC显著高值形成于高生产力和最优保存条件的协同作用。对松科一井相应层位的研究同样指示这一时期可能存在海侵事件(Hu *et al.*, 2015),A34井嫩江组二段底部正构烷烃短链氢同位素出现正

偏,盐度指标也发生波动,表明这次海侵事件可能也促进了有机质富集(图8)。

6 结论

嫩江组一段下部和中部、嫩江组二段底部三层高有机质层主要发育中—细粒泥岩,S等自生元素含量偏高,Al/K/Ti等陆源元素含量偏低,常发育100~200 μm 黏土矿物和有机质(Fe)、方解石(Ca)年纹层,其他层段特征相反。嫩江组一段、嫩江组二段沉积环境受湿润气候与物源转变的影响,促进高生产力和强还原环境形成,导致出现高TOC、中—细粒泥岩和亚毫米级纹层发育的三次高有机质层,海侵事件可能对有机质富集也有促进作用。

致谢 感谢中国科学院青藏高原研究所高少鹏老师和中国地质大学(北京)杨玠老师在元素线扫描和面扫描实验中的帮助。

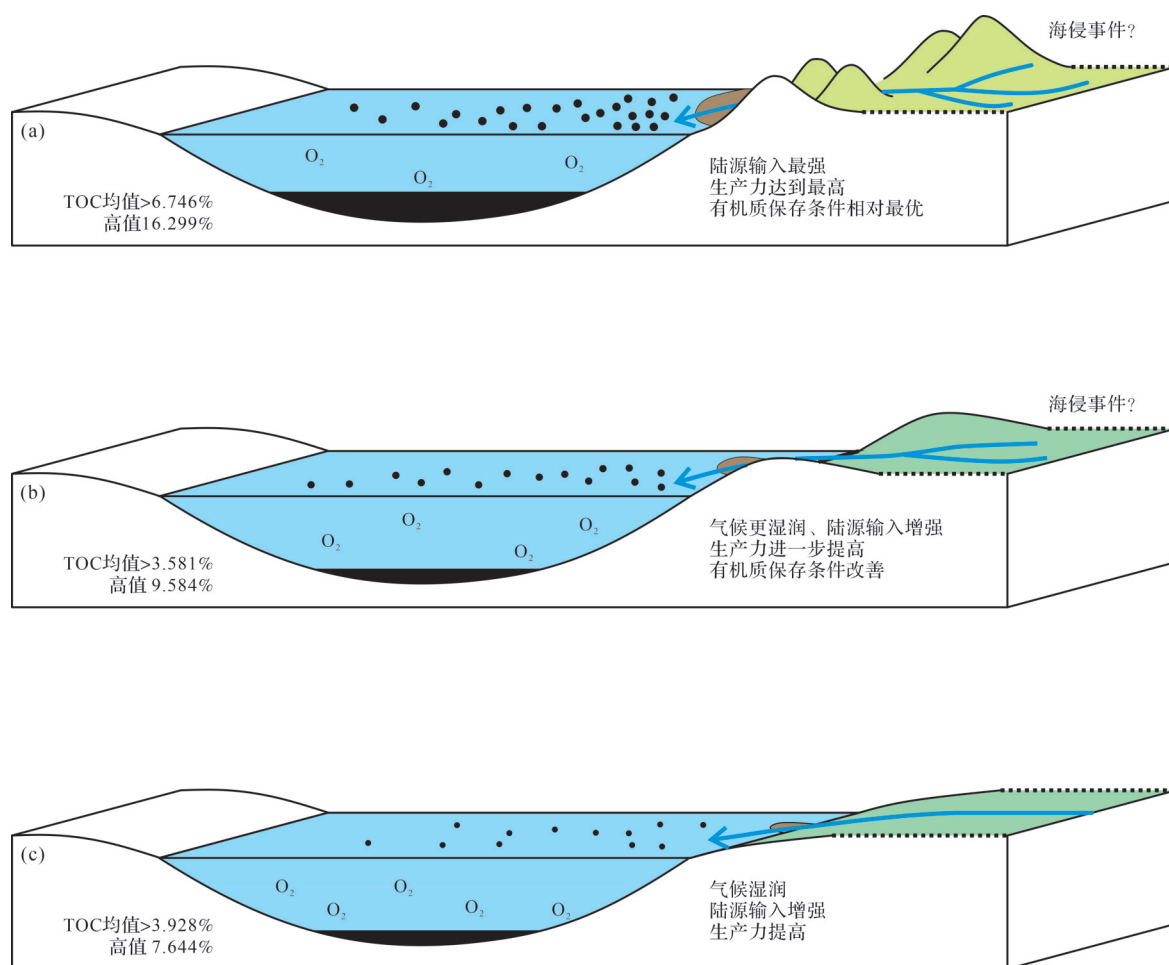


图8 A34井嫩江组高有机质层段形成机制模式

(a)嫩二段底部;(b)嫩一段中部;(c)嫩一段底部

Fig. 8 Model of formation mechanism for Nenjiang Formation high-TOC layers, well A34

参考文献(References)

- 包宏扬. 2021. 松科1井嫩江组一、二段岩相精细划分与古气候变化[D]. 北京:中国地质大学(北京). [Bao Hongyang. 2021. The explicit lithofacies division and its paleoclimatic implications of the First and the Second member of Nenjiang Formation recovered from SK-1 scientific drilling project[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 曹文心, 席党鹏, 黄清华, 等. 2016. 松辽盆地海侵事件: 松科1井钙质超微化石新证据[J]. 地质通报, 35(6): 866-871. [Cao Wenxin, Xi Dangpeng, Huang Qinghua, et al. 2016. Seawater incursion event in Songliao Basin: New evidence from calcareous nannofossils of SK-1[J]. Geological Bulletin of China, 35(6): 866-871.]
- 冯志强, 金成志, 梁江平, 等. 2010. 大庆油田勘探技术现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 12(5): 58-63. [Feng Zhiqiang, Jin Chengzhi, Liang Jiangping, et al. 2010. Present state and development trend of exploration technology in Daqing oilfield[J]. Strategic Study of CAE, 12(5): 58-63.]
- 冯志强, 张顺, 解习农, 等. 2006. 松辽盆地嫩江组大型陆相坳陷湖盆湖底水道的发现及其石油地质意义[J]. 地质学报, 80(8): 1226-1232, 1240. [Feng Zhiqiang, Zhang Shun, Xie Xinong, et al. 2006. Discovery of a large-scale lacustrine subaqueous channel in the Nenjiang Formation of the Songliao Basin and its implication on petroleum geology[J]. Acta Geologica Sinica, 80(8): 1226-1232, 1240.]
- 高有峰, 王璞珺, 程日辉, 等. 2011. 松辽盆地松科1井上白垩统嫩江组一、二段沉积序列厘米级精细刻画: 岩性·岩相·旋回[J]. 地学前缘, 18(6): 195-217. [Gao Youfeng, Wang Pujun, Cheng Rihui, et al. 2011. Centimeter-scale sedimentary sequence description of Upper Cretaceous Nenjiang Formation (lower numbers 1&2): Lithostratigraphy, facies and cyclostratigraphy, based on the scientific drilling (SK1) borehole in the Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 18(6): 195-217.]
- 胡素云, 陶士振, 闫伟鹏, 等. 2019. 中国陆相致密油富集规律及勘探开发关键技术研究进展[J]. 天然气地球科学, 30(8): 1083-1093. [Hu Suyun, Tao Shizhen, Yan Weipeng, et al. 2019. Advances on continental tight oil accumulation and key technologies for exploration and development in China[J]. Natural Gas Geoscience, 30(8): 1083-1093.]
- 胡宗全, 王濡岳, 刘忠宝, 等. 2021. 四川盆地侏罗统陆相页岩气源储特征及耦合评价[J]. 地学前缘, 28(1): 261-272. [Hu Zongquan, Wang Ruyue, Liu Zhongbao, et al. 2021. Source-reservoir characteristics and coupling evaluations for the Lower Jurassic lacustrine shale gas reservoir in the Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 28(1): 261-272.]
- 黄清华, 陈春瑞, 王平在, 等. 1998. 松辽盆地晚白垩世生物演化与古湖泊缺氧事件[J]. 微体古生物学报, (4): 87-95. [Huang Qinghua, Chen Chunrui, Wang Pingzai, et al. 1998. The Late Cretaceous bio evolution and anoxic events in the ancient lake in the Songliao Basin[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, (4): 87-95.]
- 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 34(6): 1031-1039. [Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. 2013. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 34(6): 1031-1039.]
- 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等. 2021. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 48(6): 1276-1287. [Jin Zhi-jun, Zhu Rukai, Liang Xinping, et al. 2021. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(6): 1276-1287.]
- 刘云. 1985. 松辽盆地晚白垩世粘土矿物特征及沉积环境分析[J]. 沉积学报, 3(4): 131-139. [Liu Yun. 1985. Clay minerals of Late Cretaceous Song-Liao Basin and their sedimentary environment [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 3(4): 131-139.]
- 莫午零, 吴朝东, 张顺. 2013. 松辽盆地北部嫩江组沉积物重力流形成机制[J]. 天然气地球科学, 24(3): 555-565. [Mo Wuling, Wu Chaodong, Zhang Shun. 2013. Generation mechanism of sediment gravity flow of Nenjiang Formation in the north Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 24(3): 555-565.]
- 潘树新, 刘化清, Zavala C, 等. 2017. 大型坳陷湖盆异重流成因的水道—湖底扇系统: 以松辽盆地白垩统嫩江组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 44(6): 860-870. [Pan Shuxin, Liu Hua-qing, Zavala C, et al. 2017. Sublacustrine hyperpycnal channel-fan system in a large depression basin: A case study of Nen 1 member, Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 44(6): 860-870.]
- 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 2021. 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, 48(3): 453-463. [Sun Longde, Liu He, He Wenyan, et al. 2021. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing oilfield, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(3): 453-463.]
- 王成善, 冯志强, 王璞珺, 等. 2016. 白垩纪松辽盆地松科1井大陆科学钻探工程[M]. 北京: 科学出版社. [Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Wang Pujun, et al. 2016. Initial report of continental scientific drilling project of the Cretaceous Songliao Basin (SK1) [M]. Beijing: Science Press.]
- 王广均, 王凤兰, 赵波, 等. 2021. 大庆油田公司勘探开发形势与发展战略[J]. 中国石油勘探, 26(1): 55-73. [Wang Guangyun, Wang Fenglan, Zhao Bo, et al. 2021. Exploration and development situation and development strategy of Daqing Oilfield Company[J]. China Petroleum Exploration, 26(1): 55-73.]
- 王瑞, 刘鑫, 杨倩, 等. 2023. 松辽盆地嫩江组一、二段氢同位素特征、古气候与有机质富集[J]. 大庆石油地质与开发, 42(5): 1-8. [Wang Rui, Liu Xin, Yang Qian, et al. 2023. Hydrogen isotope characteristics, paleoclimate and organic matter enrichment of Nen-1 and Nen-2 members of Nenjiang Formation in Songliao Basin

- [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 42(5): 1-8.]
- 吴怀春, 李山, 王成善, 等. 2024. 松辽盆地白垩纪综合年代地层格架[J]. *地学前缘*, 31(1): 431-445. [Wu Huaichun, Li Shan, Wang Chengshan, et al. 2024. Integrated chronostratigraphic framework for Cretaceous strata in the Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 31(1): 431-445.]
- 鄯继华, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 2015. 基于X射线衍射数据的细粒沉积岩岩石定名方法与应用[J]. *中国石油勘探*, 20(1): 48-54. [Yan Jihua, Pu Xiugang, Zhou Lihong, et al. 2015. Naming method of fine-grained sedimentary rocks on basis of X-ray diffraction data [J]. *China Petroleum Exploration*, 20(1): 48-54.]
- 张智礼. 2005. 松辽盆地青山口组—嫩江组一段介形类古生态学研究[D]. 南京: 南京大学. [Zhang Zhili. 2005. Study of paleoecology of ostracoda from the Qingshankou Formation and the 1st member of Nenjiang Formation in Songliao Basin[D]. Nanjing: Nanjing University.]
- 郑玉龙, 陈春瑞, 王佰长, 等. 2015. 松辽盆地北部页岩资源潜力评价[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(3): 683-690. [Zheng Yulong, Chen Chunrui, Wang Baichang, et al. 2015. Resource potential evaluation of oil shale in north Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(3): 683-690.]
- 周立宏, 蒲秀刚, 邓远, 等. 2016. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题[J]. *岩性油气藏*, 28(1): 6-15. [Zhou Lihong, Pu Xiugang, Deng Yuan, et al. 2016. Several issues in studies on fine-grained sedimentary rocks[J]. *Lithologic Reservoirs*, 28(1): 6-15.]
- Aplin A C, Macquaker J H S. 2011. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. *AAPG Bulletin*, 95(12): 2031-2059.
- Arthur M A, Sageman B B. 1994. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 22: 499-551.
- Bohacs K M, Carroll A R, Neal J E, et al. 2000. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: An integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework[M]//Gierlowski-Kordesch E H, Kelts K R. Lake basins through space and time. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 3-33.
- Chamberlain C P, Wan X Q, Graham S A, et al. 2013. Stable isotopic evidence for climate and basin evolution of the Late Cretaceous Songliao Basin, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 106-124.
- Chen R Q, Shang F, Cao Y S, et al. 2022. A comparative study of oil shale deposition in the Upper Cretaceous Nenjiang Formation, NE China: Evidence from petrographic and geochemical analyses[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 219: 111130.
- Deng C L, He H Y, Pan Y X, et al. 2013. Chronology of the terrestrial Upper Cretaceous in the Songliao Basin, northeast Asia[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 44-54.
- Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. 2010a. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, Northeast China[J]. *Basin Research*, 22(1): 79-95.
- Feng Z Q, Zhang S, Cross T A, et al. 2010b. Lacustrine turbidite channels and fans in the Mesozoic Songliao Basin, China[J]. *Basin Research*, 22(1): 96-107.
- Gao Y, Wang C S, Wang P J, et al. 2019. Progress on continental scientific drilling project of Cretaceous Songliao Basin (SK-1 and SK-2) [J]. *Science Bulletin*, 64(2): 73-75.
- Gao Y, Xi D P, Qin Z H, et al. 2018. Clay mineralogy of the First and Second members of the Nenjiang Formation, Songliao Basin: Implications for paleoenvironment in the Late Cretaceous[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(3): 327-338.
- Hu J F, Peng P A, Liu M Y, et al. 2015. Seawater incursion events in a Cretaceous paleo-lake revealed by specific marine biological markers[J]. *Scientific Reports*, 5: 9508.
- Jafarian A, Husinec A, Wang C S, et al. 2024. Intrashelf basin record of redox and productivity changes along the Arabian margin of Neo-Tethys during Oceanic Anoxic Event 1a[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 636: 111975.
- Jia J L, Bechtel A, Liu Z J, et al. 2013. Oil shale formation in the Upper Cretaceous Nenjiang Formation of the Songliao Basin (NE China): Implications from organic and inorganic geochemical analyses [J]. *International Journal of Coal Geology*, 113: 11-26.
- Jones M M, Ibarra D E, Gao Y, et al. 2018. Evaluating Late Cretaceous OAEs and the influence of marine incursions on organic carbon burial in an expansive East Asian paleo-lake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 484: 41-52.
- Kong X X, Jiang Z X, Ju B S. 2022. Hydrocarbon accumulation characteristics in the inter-salt shale oil reservoir in the Eocene Qianjiang Depression, Hubei province, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 211: 110117.
- Krumbein W C. 1933. The dispersion of fine-grained sediments for mechanical analysis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 3(3): 121-135.
- Kylander M E, Klaminder J, Wohlfarth B, et al. 2013. Geochemical responses to paleoclimatic changes in southern Sweden since the late glacial: The Hässeldala Port lake sediment record[J]. *Journal of Paleolimnology*, 50(1): 57-70.
- Lazar O R, Bohacs K M, Macquaker J H S, et al. 2015a. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: Nomenclature and description guidelines[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 85(3): 230-246.
- Lazar O R, Bohacs K M, Schieber J, et al. 2015b. Mudstone primer: Lithofacies variations, diagnostic criteria, and sedimentologic-stratigraphic implications at lamina to bedset scale[M]. Tulsa: SEPM.
- Li X, Huang Y J, Zhang Z F, et al. 2022a. Chemical weathering characteristics of the Late Cretaceous Nenjiang Formation from the Songliao Basin (northeastern China) reveal prominent Milankovitch band variations[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 601: 111130.

- Li X, Huang Y J, Zhang Z F, et al. 2022b. Orbitally forced chemical weathering in the Late Cretaceous northeastern China: Implications for paleoclimate change[J]. *Global and Planetary Change*, 218: 103982.
- Liu W, Liu M, Yang T, et al. 2022. Organic matter accumulations in the Santonian-Campanian (Upper Cretaceous) lacustrine Nenjiang shale (K_2n) in the Songliao Basin, NE China: Terrestrial responses to OAE3? [J]. *International Journal of Coal Geology*, 260: 104069.
- Liu W G, Wei S, Zhang J, et al. 2020. An improved separation scheme for Sr through fluoride coprecipitation combined with a cation-exchange resin from geological samples with high Rb/Sr ratios for high-precision determination of Sr isotope ratios[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(5): 953-960.
- Loucks R G, Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 91(4): 579-601.
- Niu L, Gao Y, Huang H, et al. 2021. Controlling factors for organic carbon burial in the Late Cretaceous Nenjiang Formation of the Songliao Basin, NE China[J]. *Energies*, 14(16): 4783.
- Niu Z C, Liu G D, Ge J W, et al. 2019. Geochemical characteristics and depositional environment of Paleogene lacustrine source rocks in the Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 171: 60-77.
- Picard M D. 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 41(1): 179-195.
- Qin Z, Liu J G, Cui H, et al. 2024. Rhenium-platinum group elements reveal seawater incursion induced massive lacustrine organic carbon burial[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 384: 168-177.
- Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P. 2001. Depositional processes of black shales in deep water[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 18 (4): 491-498.
- Tribouillard N P, Gorin G E, Belin S, et al. 1992. Organic-rich biolaminated facies from a Kimmeridgian lagoonal environment in the French southern Jura mountains—a way of estimating accumulation rate variations[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 99(1/2): 163-177.
- Wan X Q, Zhao J, Scott R W, et al. 2013. Late Cretaceous stratigraphy, Songliao Basin, NE China: SK1 cores[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 31-43.
- Wang C S, Feng Z Q, Zhang L M, et al. 2013a. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SK1 borehole sites in Songliao Basin, Northeast China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 17-30.
- Wang C S, Scott R W, Wan X Q, et al. 2013b. Late Cretaceous climate changes recorded in eastern Asian lacustrine deposits and North American epicontinental sea strata[J]. *Earth-Science Reviews*, 126: 275-299.
- Wang P J, Mattern F, Didenko N A, et al. 2016a. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin[J]. *Earth-Science Reviews*, 159: 82-102.
- Wang T T, Ramezani J, Wang C S, et al. 2016b. 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*, 446: 37-44.
- Wu H C, Hinnov L A, Zhang S H, et al. 2023. Continental geological evidence for Solar System chaotic behavior in the Late Cretaceous [J]. *GSA Bulletin*, 135(3/4): 712-724.
- Wu H C, Zhang S H, Hinnov L A, et al. 2014. Cyclostratigraphy and orbital tuning of the terrestrial Upper Santonian–Lower Danian in Songliao Basin, northeastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 407: 82-95.
- Wu H C, Zhang S H, Jiang G Q, et al. 2013. Astrochronology of the Early Turonian – Early Campanian terrestrial succession in the Songliao Basin, northeastern China and its implication for long-period behavior of the Solar System[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 55-70.
- Xi D P, Wan X Q, Feng Z Q, et al. 2011. Discovery of Late Cretaceous foraminifera in the Songliao Basin: Evidence from SK-1 and implications for identifying seawater incursions[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(3): 253-256.
- Xu Y L, Li D D, Gao Y, et al. 2023. Multiple S-isotopic evidence for seawater incursions during the deposition of the Upper Cretaceous source rocks in the Songliao Basin, northeastern China[J]. *Chemical Geology*, 642: 121790.
- Yang X X, Jin Z D, Zhang F, et al. 2024. Glacial-interglacial lake hydrochemistry in step with the Pleistocene Indian summer monsoon at the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 329: 108556.
- Zou C H, Mao L J, Tan Z H, et al. 2021. Geochemistry of major and trace elements in sediments from the Lubei Plain, China: Constraints for paleoclimate, paleosalinity, and paleoredox environment [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 218: 100071.
- Zou C N, Zhu R K, Chen Z Q, et al. 2019. Organic-matter-rich shales of China[J]. *Earth-Science Reviews*, 189: 51-78.

Facies Assemblages of Fine-Grained Sedimentary Rocks and Enrichment Mechanisms of Organic-Rich Intervals in the Lower Nenjiang Formation, Songliao Basin

BAI XueFeng^{1,2}, LIN TieFeng^{2,3}, LIU Xin^{2,3}, MA ShengMing^{2,3}, LI Xin^{2,3}, YANG Fan^{2,3},
WANG GuoPan^{4,5}, LI YuYin^{4,5}, GAO Yuan^{4,5}

1. Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing, Heilongjiang 163453, China

2. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Daqing, Heilongjiang 163712, China

3. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China

4. State Key Laboratory of Geomicrobiology and Environmental Changes, Beijing 100083, China

5. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: [Objective] The Songliao Basin is a major hydrocarbon-producing region in China. After more than 60 years of exploitation, conventional oil and gas development has entered a high-cost phase characterized by considerable technical difficulty; the basin has now fully transitioned to the stage of unconventional hydrocarbon exploitation. During the deposition of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation and Nenjiang Formation, two large-scale lacustrine transgressions created vast potential shale oil resources. The First and Second members of the Nenjiang Formation host thick intervals of dark, organic-rich, fine-grained sedimentary rocks. Previous studies have generally classified these deposits as deep to semi-deep lacustrine facies; however, high-resolution variations in depositional environments and their relationship to organic matter enrichment remain unclear, necessitating an integrated sedimentological and geochemical investigation of the fine-grained sedimentary rocks. [Methods] This study, based on core data from well A34 in the Qijia-Gulong Sag of the Songliao Basin, conducted centimeter-scale high-resolution core descriptions of the First and Second members of the fine-grained sedimentary rocks in the Nenjiang Formation. Microscopic petrographic analysis, total organic carbon (TOC) content measurements and elemental line and area scanning techniques were applied to subdivide their lithofacies. [Results] A total of 16 fine-grained sedimentary lithofacies and five facies assemblages were identified in the First and Second members of the Nenjiang Formation, carbonate rocks occur with high frequency. Based on the sedimentological, isotope and elemental geochemical characteristics of each lithofacies, three organic-rich intervals were recognized: at the base and middle section of the First member of the Nenjiang Formation, and at the base of the Second member of the Nenjiang Formation. These intervals are dominated by medium- to fine-grained dark mudstones with continuous lamination. [Conclusions] Integrated isotope geochemical data suggest that a humid climate, together with nutrient influx from sediment sources, were key factors in creating the high-productivity and strongly reducing conditions in the Songliao Basin during the deposition of the First and Second members of the Nenjiang Formation. These conditions led to the formation of three intervals of organic-rich, well-laminated medium- to fine-grained dark mudstones.

Key words: Songliao Basin; fine-grained sedimentary rocks; lamination; organic matter enrichment; elemental and isotope geochemistry