

细粒沉积岩化学相定量表征及其与沉积环境的响应关系 ——以松辽盆地白垩系青山口组一段为例

赵灵生¹, 柳波^{1,2}, 白云凤³, 孙嘉慧^{2,4}, 刘岩¹, 刘明博²

(1. 长江大学 资源与环境学院 油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 东北石油大学 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 163318; 3. 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 163375; 4. 中国石油 大庆油田有限责任公司 井下作业分公司, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 细粒沉积岩的岩相类型与分布是控制页岩油气富集的关键因素。然而, 陆相细粒沉积岩岩相多变、沉积环境复杂, 如何量化、客观地识别岩相, 并建立沉积环境与岩相的响应关系, 对页岩油“甜点”预测具有重要意义。以松辽盆地白垩系青(青山口组)一段为例, 基于手持式X射线荧光光谱连续扫描与数据分析技术, 结合不同元素组合特征, 综合运用主成分分析、K-means聚类分析和系统聚类Ward法划分化学相, 并建立古环境控制下的化学相充填模式。研究表明: ①青一段细粒沉积岩可划分为3大类、8小类化学相, 古环境整体表现为气候湿润、还原性强的淡水-微咸水环境, 古龙凹陷的还原性、古水深及局部古盐度均高于三肇凹陷。②纵向上, 古龙凹陷与三肇凹陷的化学相变化趋势相似, 均表现为自下而上化学相类型增多、相序变化加快。③受局部水体性质及湖底地形差异影响, 两凹陷在化学相横向分布上表现出明显不同。古龙凹陷化学相类型多、相变快, 三肇凹陷化学相类型少、相序稳定。④系统探讨了细粒沉积岩化学相划分及演化充填模式, 为同类研究提供方法参考, 并对该地区页岩油“甜点”预测提供理论依据和指导。

关键词: 化学相; 岩相; 聚类分析; 沉积环境; 细粒沉积岩; 页岩油; 青山口组一段; 松辽盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Quantitative characterization of chemofacies in fine-grained sedimentary rocks and its responses to depositional environments: A case study of the 1st member of the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin

ZHAO Lingsheng¹, LIU Bo^{1,2}, BAI Yunfeng³, SUN Jiahui^{2,4}, LIU Yan¹, LIU Mingbo²

(1. Hubei Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Geochemistry and Environment, College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Co., Ltd., PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163375, China; 4. Down-hole Service Company, Daqing Oilfield Co., Ltd., PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: Lithofacies types and their spatial distributions in fine-grained sedimentary rocks are the main factors controlling shale oil and gas enrichment. However, continental fine-grained sedimentary systems are characterized by highly heterogeneous lithofacies and complex depositional settings, making the quantitative and objective identification of lithofacies, as well as the establishment of its responses to depositional environments, particularly important for shale oil sweet-spot prediction. A paleoenvironment-controlled chemofacies stacking pattern was established for the 1st member of the Cretaceous Qingshankou Formation (Qing 1 Member) in the Songliao Basin. This was achieved through continuous portable X-ray fluorescence (pXRF) scanning and geochemical data analysis techniques, followed by chemofacies classification using elemental assemblages, principal component analysis (PCA), K-means clustering, and Ward's hierarchical clustering. As indicated by the research results, (1) the fine-grained sedimentary rocks of the Qing 1 Member can be classified into three major chemofacies types and eight subtypes. The paleoenvironment was generally

收稿日期: 2025-07-25; 修回日期: 2025-10-22。

第一作者简介: 赵灵生(1995—), 男, 博士研究生, 细粒沉积学。E-mail: lingshengzhao@163.com。

通信作者简介: 柳波(1983—), 男, 博士、教授, 非常规油气地质。E-mail: liubo@nepu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A20574); 黑龙江省重点研发计划项目(GA23A906)。

characterized by a humid climate and strong redox freshwater to brackish-water environment. Compared with the Sanzhao Sag, the Gulong Sag exhibits higher redox strength, greater paleowater depth, and locally elevated paleosalinity. (2) Vertically, the Gulong and Sanzhao sags display similar chemofacies evolution trends, both showing an upward increase in chemofacies diversity and accelerated facies succession changes. (3) Laterally, significant differences in chemofacies distribution exist between the two sags due to local variations in water properties and lacustrine-bottom topography. The Gulong Sag features highly diverse chemofacies types and rapid facies transitions, whereas the Sanzhao Sag exhibits fewer chemofacies types and relatively stable facies successions. (4) This study systematically investigated chemofacies classification and evolutionary stacking patterns in fine-grained sedimentary rocks, providing a methodological reference for similar studies and offering a theoretical basis and practical guidance for shale oil sweet-spot prediction in the study area.

Key words: chemofacies, lithofacies, cluster analysis, depositional environment, fine-grained sedimentary rocks, shale oil, 1st member of the Qingshankou Formation, Songliao Basin

引用格式:赵灵生,柳波,白云凤,等. 细粒沉积岩化学相定量表征及其与沉积环境的响应关系[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1314–1328. DOI: 10. 11743/ogg20260416.

ZHAO Lingsheng, LIU Bo, BAI Yunfeng, et al. Quantitative characterization of chemofacies in fine-grained sedimentary rocks and its responses to depositional environments: A case study of the 1st member of the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1314–1328. DOI: 10. 11743/ogg20260416.

近年来,随着非常规油气勘探技术的突破,页岩油已成为常规油气的重要接替资源^[1-2]。以页岩为代表的细粒沉积学逐渐成为研究热点^[3-4]。细粒沉积学主要研究沉积环境、岩相、沉积机制和有机质富集等,岩相划分及沉积环境恢复是其研究基础^[5-6]。岩相是指在普通环境中形成的沉积岩的全部岩性特征,任何沉积环境中的岩石记录(物理和有机特征)都可以称作岩相^[7]。目前,岩相划分主要依据岩心及薄片的沉积构造,结合矿物组成和有机碳含量等,形成“矿物组成+沉积构造+有机质丰度”的划分标准^[8-10]。然而,不同学者采用的划分依据和分类原则各异,导致现有方法主观性较强、岩相类型繁多,难以实现空间分布预测,在实际勘探开发中缺乏普适性。

20世纪80年代,Kaminski等^[11]基于元素地球化学对沉积单元进行了识别与表征,开展了新的“化学地层学”研究,该方法随后被广泛应用于细粒沉积岩中。目前,化学相尚无统一定义,通常被视为岩相的类似概念^[12],即通过地球化学数据的元素聚类来表征岩相^[13]。化学相能够反映特定沉积环境的化学特征与沉积过程,揭示不同页岩类型之间矿物成分和沉积环境的变化关联^[14-15]。当前化学相研究常用统计学方法^[16]和地球化学元素分析进行识别与表征。许多研究依赖电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)获取元素数据,但该方法数据量有限,受成本制约,取样间隔通常仅能达到米级。相比之下,手持式X射线荧光光谱仪操作简便、测试速度快,可提供厘米级取样间隔的元素数据,大

量连续的数据有助于更精确地划分化学相,尤其对薄夹层的识别更为有效^[17]。相较于传统岩相划分,化学相划分更具定量化与客观性,能够提供更详细的元素信息,使视觉上相似的岩相仍可根据元素富集程度的差异进一步细分,为岩相识别与预测提供了独特视角。

此外,沉积环境控制着元素的富集、分散与迁移,不同元素类型、含量及比值可反映不同沉积时期的古环境特征^[18]。古环境变化影响湖盆演化过程中的沉积作用:古气候的干湿状况决定了沉积时期的矿物组成与化学成分^[19];水体盐度及古生产力水平影响沉积环境及有机质的保存条件,湖水适度咸化有利于湖底有机质的保存^[3];强还原环境可减缓有机质降解速率,是富有机质页岩形成的必要条件。元素的富集和分散与水深密切相关,湖平面的周期性变化对沉积环境演化及岩相分布具有控制性作用。因此,建立客观、定量的岩相识别方法,并明确岩相与沉积环境之间的响应关系,具有重要的研究意义。

相较于其他典型的细粒沉积岩,松辽盆地青山口组细粒沉积岩具有埋藏浅、黏土矿物含量高、非均质性强烈以及页理发育明显等特点,在矿物成分和含油性等方面差异显著,导致岩相划分与表征难度较大^[20]。前人对青山口组沉积环境的研究多基于微量元素分析,认为该时期整体上气候温暖湿润,为淡水-半咸水较深湖环境,古生产力较高^[21]。然而,受青山口组细粒沉积岩岩相多变的影响,不同岩相与沉积环境之间的响应关系尚不明确。

本研究以松辽盆地白垩系青(青山口组)一段细粒

沉积岩为例,基于手持式X射线荧光光谱仪(XRF)分析测试资料与岩心观察,划分化学相并恢复沉积环境,探讨化学相分布与沉积演化之间的关系,建立古环境控制下的化学相充填模式,以期页岩油勘探开发提供理论依据与指导。

1 区域地质背景

松辽盆地位于中国东北部,面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,为典型的陆相拗陷湖盆。根据构造演化特征,可进一步划分为北部倾没区、西部斜坡区、东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区以及中央拗陷区6个一级构造单元(图1a)。盆地北部的中央拗陷区以古龙凹陷、大庆

长垣和三肇凹陷为主要油气富集区域(图1b)。青山口组自下而上分为青一段、青二段和青三段,前人基于地震波形建立层序格架,将青一段进一步分为Q1—Q6油层^[22](图1c)。青一段沉积时期,湖泊范围较大,发育半深湖—深湖相沉积,岩性组合以厚层黑色泥页岩为主,间夹灰黑色泥质粉砂岩及深灰色粉砂岩^[23-24],是当前勘探开发的重点层段。

2 研究方法

2.1 手持式XRF元素测试

手持式XRF通过测试X射线信号强度,对样品的

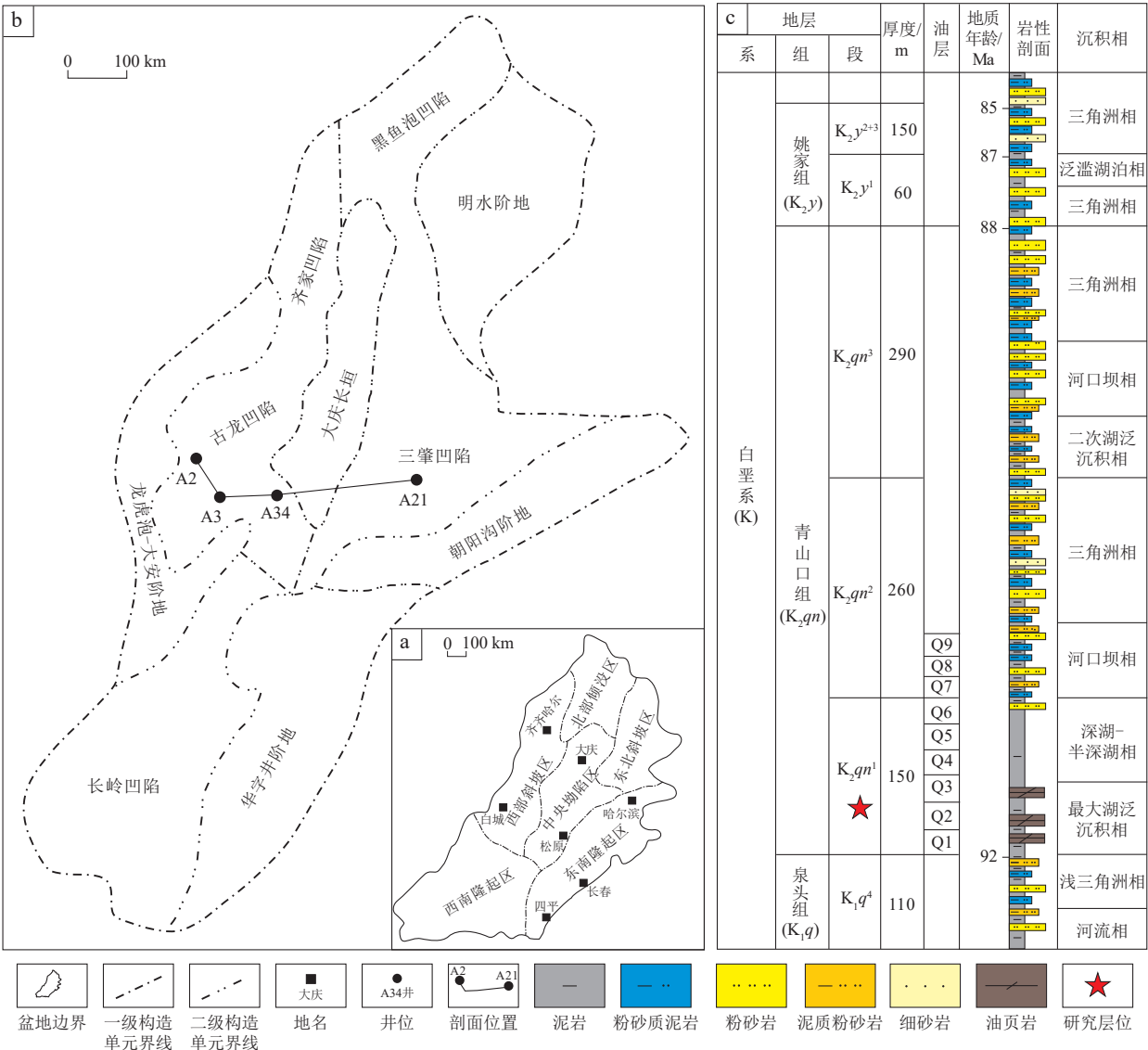


图1 松辽盆地北部构造分区(a)、研究区位置(b)及地层综合柱状图(c)(据文献[25]修改)

Fig. 1 Tectonic subdivisions of the northern Songliao Basin (a), location of the study area (b), and its composite stratigraphic column (c) (modified after reference [25])

元素组成进行定性与半定量分析。该仪器对主量元素的检测精度相对较高,而微量元素的检测限通常在 10^{-6} 级至百分比级之间,测量结果的精确度相对较低。实际应用中,通常采用多次测量取平均值并结合元素比值的方法来消除测试误差^[26]。

本研究使用布鲁克手持式XRF分析仪(SI TITAN系列)对研究区A2,A3,A34和A21井的青一段岩心进行元素含量检测。测试点间距为10~15 cm,每个测试点从3个不同方向各测量1次并取平均值,以消除手持仪器与样品接触角度及样品不均匀性对测试结果准确度的影响^[27],单次检测时间为60 s。采用台式XRF分析仪对A34井同一深度段的岩心进行对比测试,结果显示 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Ca 、 Fe 、 Mn 和 Ti 的相对平均误差分别为6.2%、3.2%、9.8%、8.8%、3.1%、3.4%和3.8%,二者测试结果吻合度较好(图2),可用于进一步分析。部分元素(如Cr和Co等)含量较低,测量结果可靠性不足,未在后续研究中使用。

为进一步细化手持式XRF测试数据的变化特征,采用Origin软件中Savitzky-Golay法对数据信号进行平滑处理,去除离群值。降噪后,可清楚地识别原始数据在纵向上的变化规律(图2)。

2.2 研究方法

主成分分析是一种典型的降维方法,常用于降低大型数据集的维数,其主要步骤包括数据标准化、计算协方差矩阵、计算特征向量和特征值、选择主成分和投影数据^[28]。该方法计算效率高,尤其适用于大规模数据处理,能够减少冗余特征,并以直观的方式展示数据结构,为后续聚类分析提供可靠依据。

K-means聚类分析通过预先设定初始质心数 K ,然后依据样本与质心之间的距离,将样本分配到距离最小的簇中^[29],其优点在于可根据实际地质背景手动调整最终聚类的 K 值,并比较不同 K 值下的聚类方案,以确定最优聚类方案。系统聚类法则是将最相似的两

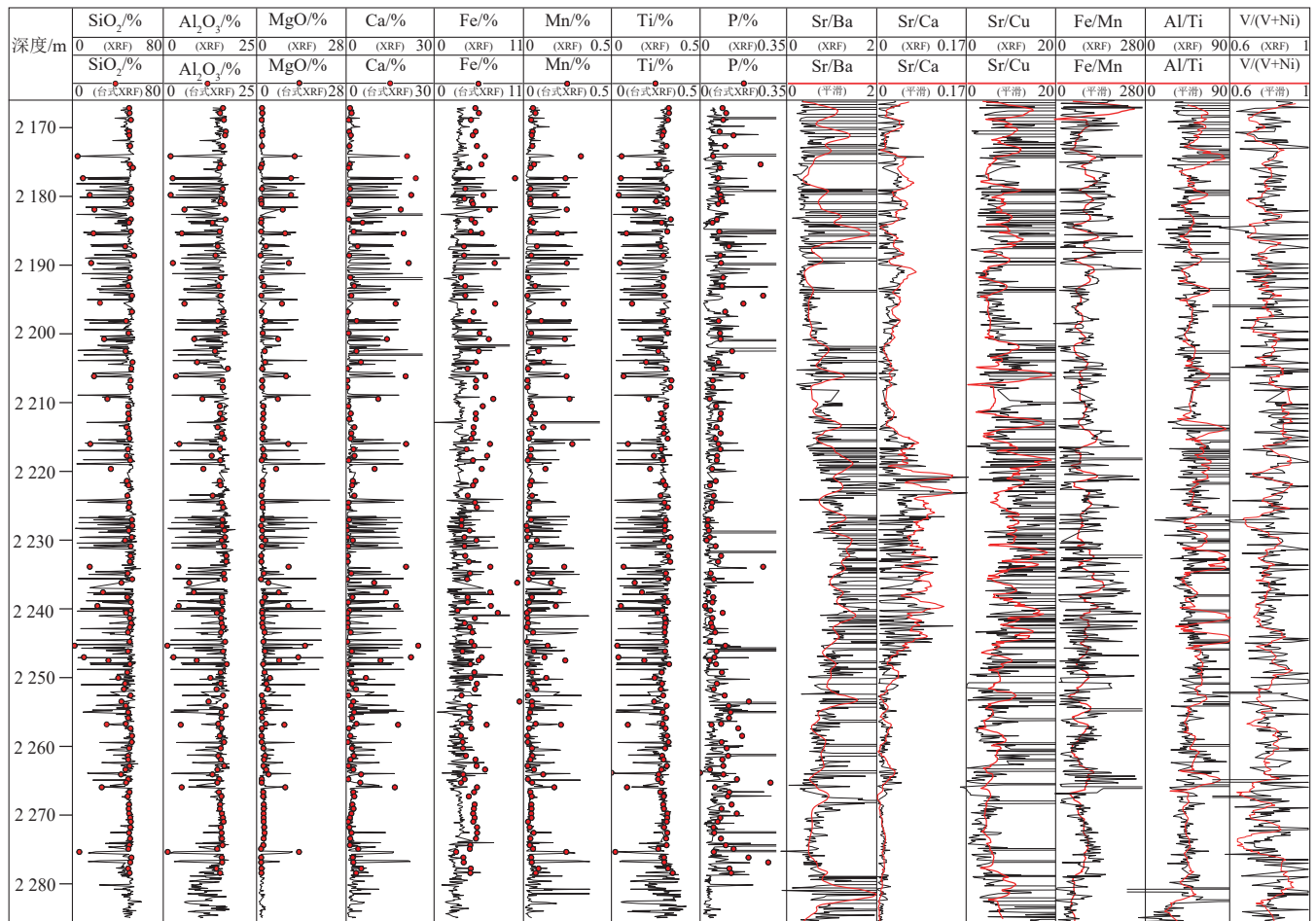


图2 松辽盆地青一段岩心样品手持式XRF与台式XRF测试结果对比及平滑处理结果

Fig. 2 Comparison and smoothing processing of portable XRF and benchtop XRF analytical results for core samples from the Qing 1 Member, Songliao Basin

(图中化合物分子式及元素符号代表该化合物及元素的含量。)

类合并,再计算新类与其他类之间的相似性,在并类过程中生成树状图。该方法的优点在于通过树状图直观反映数据间的相似程度,便于结合地质知识验证分类的合理性,适用于细粒沉积岩数据中非均质分布的特征。在实际应用中,K-means聚类与系统聚类常结合使用,并辅以地质验证,以实现化学相划分的高精度与可解释性。

3 基于元素组成的化学相划分

3.1 3大类化学相划分

选择含量变化明显的化合物和元素(SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , P , S , K_2O , Ca , Ti , Fe , Rb 和 Zr)开展主成分分析。第一主成分(PC1)与第二主成分(PC2)的方差贡献率分别为62.9%和13.4%,累计贡献率达76.3%,故选定PC1和PC2构建二维主成分空间(图3a)。成分载荷在空间中呈3组方向聚集:① Ca , MgO 和 Fe 反映碳酸盐含量增多;② P , Zr 和 Ti 代表陆源碎屑含量;③ SiO_2 , Al_2O_3 , S 和 K_2O 指示黏土矿物富集(图3b)。

基于主成分分析结果,在运用K-means聚类分析进行初始聚类划分时,综合考量青一段沉积环境的地质背景特征,包括陆源碎屑输入特征、矿物组合差异以及氧化-还原条件的空间分异规律,最终确定 $K=3$ 为最优聚类数,即划分为I类、II类和III类化学相。

I类化学相的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量最高, MgO 和 Ca 在3类化学相中含量最低(图4)。II类化学相的 SiO_2 含量高于III类化学相、略低于I类化学相, Al_2O_3 含量

相较I类化学相有所降低, Ca 含量较I类化学相小幅增加。III类化学相的 MgO 和 Ca 含量在3类化学相中最高, SiO_2 含量则为3类化学相中最低。

3类化学相在不同元素间存在差异。借鉴前人对岩相分类中矿物成分的命名方法^[13],结合氧化-还原条件(弱氧和还原)、碎屑输入及矿物组成(泥质、硅质和碳酸盐),对3大类化学相进行命名划分:①化合物和元素含量大于50%者命名为“××质”;②化合物和元素含量介于18%~50%者命名为“富××”;③化合物和元素含量小于18%者以“含××”的形式置于名称最前。据此,I类化学相黏土矿物含量较高,且 Al 含量大于18%,为还原富黏土矿物泥页岩;II类化学相碎屑含量较高,但低于18%,为还原含碎屑泥页岩;III类化学相中碳酸盐矿物的 Ca 和 Mg 含量较高,为弱氧含碳酸盐矿物泥页岩。

3.2 8小类化学相划分

在K-means聚类方法划分化学相的基础上,进一步采用系统聚类分析中的Ward法对化学相进行细分(图5)。选取测量结果中含量变化明显的化合物和元素(SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , P , S , Ca 和 Fe),通过Ward法进行聚类分析,共划分出8类化学相。

第1类化学相的 SiO_2 含量最高(图6a),第2,3和4类化学相次之(图6b—d),第6,7和8类化学相最低。第1,2和3类化学相的 Al_2O_3 含量高于第4类和第5类化学相(图6e,f)。第7类化学相的 MgO 含量较高,其余各类化学相 MgO 含量较低。 Fe 和 S 在第3类化学相中含量较高(图6c),在其他类化学相中含量较低。第6类化

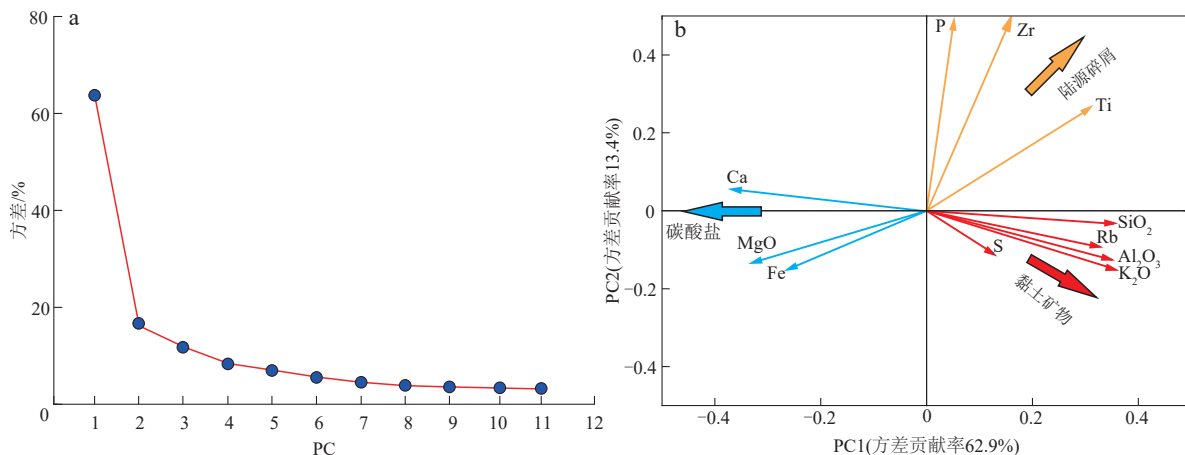


图3 松辽盆地A34井青一段岩心样品主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of core samples from the Qing 1 Member in well A34, Songliao Basin

a. 各主成分(PC)的方差(横坐标1~11表示主成分分析提取的第1至第11个主成分,其方差贡献率依次递减);b. 各成分在第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)方向上投影的载荷图

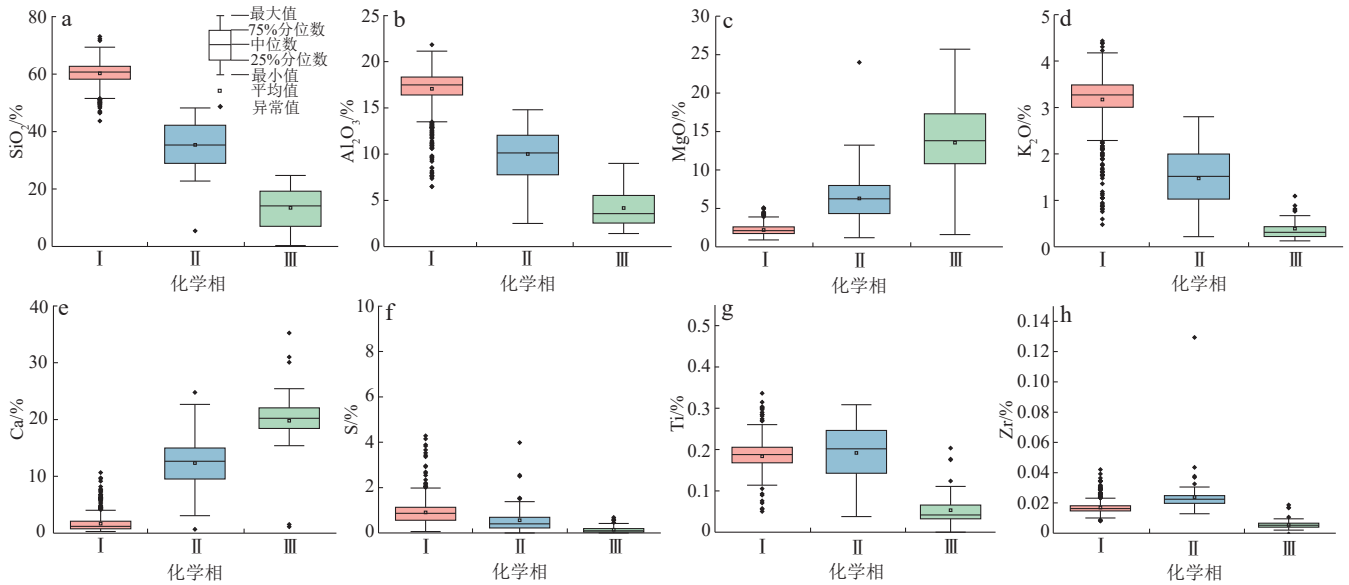


图4 松辽盆地A34井青一段岩心样品3大类化学相聚类结果箱形图

Fig. 4 Box plot of clustering results of the three major chemofacies types for core samples from the Qing 1 Member in well A34, Songliao Basin

a. SiO_2 ; b. Al_2O_3 ; c. MgO ; d. K_2O ; e. Ca; f. S; g. Ti; h. Zr

(图中化合物分子式及元素符号代表该化合物及元素的含量。)

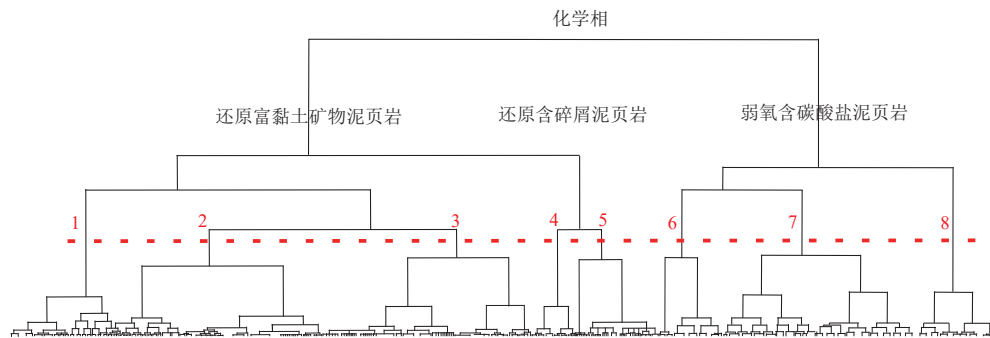


图5 松辽盆地A34井青一段岩心样品元素Ward法聚类分析结果

Fig. 5 Results of Ward's hierarchical cluster analysis of elemental data from core samples of the Qing 1 Member in well A34, Songliao Basin

(图中数字1~8代表划分的8小类化学相。)

学相可见P富集,第8类化学相的Ca含量最高(图6f)。

8小类化学相的命名是在3大类化学相划分的基础上,依据每一类化学相的主要化合物和元素含量或特征化合物和元素进行。命名规则以化合物和元素含量变化为前缀、3大类化学相为后缀,以化合物和元素含量10%和15%为界,划分为高、中、低3个等级。以Al为例:含量低于10%为低铝XX相;含量介于10%~15%为中铝XX相;含量高于15%为高铝XX相。

第1类化学相 SiO_2 和 Al_2O_3 含量最高,对应黏土矿物含量最高(图7a),Al平均含量为18.0583%,为高铝富黏土矿物泥页岩;其岩心特征为页理发育,沿平行层面裂开成薄片状,多形成于静水环境中(图7i)。第2类化学相黏土矿物含量较第1类化学相降低(图7b),Al平均含量为13.8957%,为中铝富黏土矿物泥页岩;

该类化学相岩石较致密,矿物分布均匀,纹层较少,呈块状构造(图7j),形成于沉积速率较快的静水环境。第3类化学相Fe和S含量较高,为高铁富黏土矿物泥页岩;其岩心观察可见明显的黄铁矿结核及脉状黄铁矿(图7k)。

第4类化学相 SiO_2 和 Al_2O_3 含量较前3类化学相降低,Al平均含量为12.3200%,为中铝含碎屑泥页岩;该类化学相纹层发育明显,岩心可见泥质纹层与粉砂质纹层,受底流和异重流影响,经过长距离搬运和季节性悬浮沉降形成(图7l)。第5类化学相 SiO_2 和 Al_2O_3 含量进一步降低,Al平均含量为8.3641%,为低铝含碎屑泥页岩;该类化学相粒度较粗,常见粉砂岩和细砂岩,随着水动力的减弱,在近岸处发生机械分异沉降形成。

第6类化学相Ca含量较高,但低于第8类化学相,

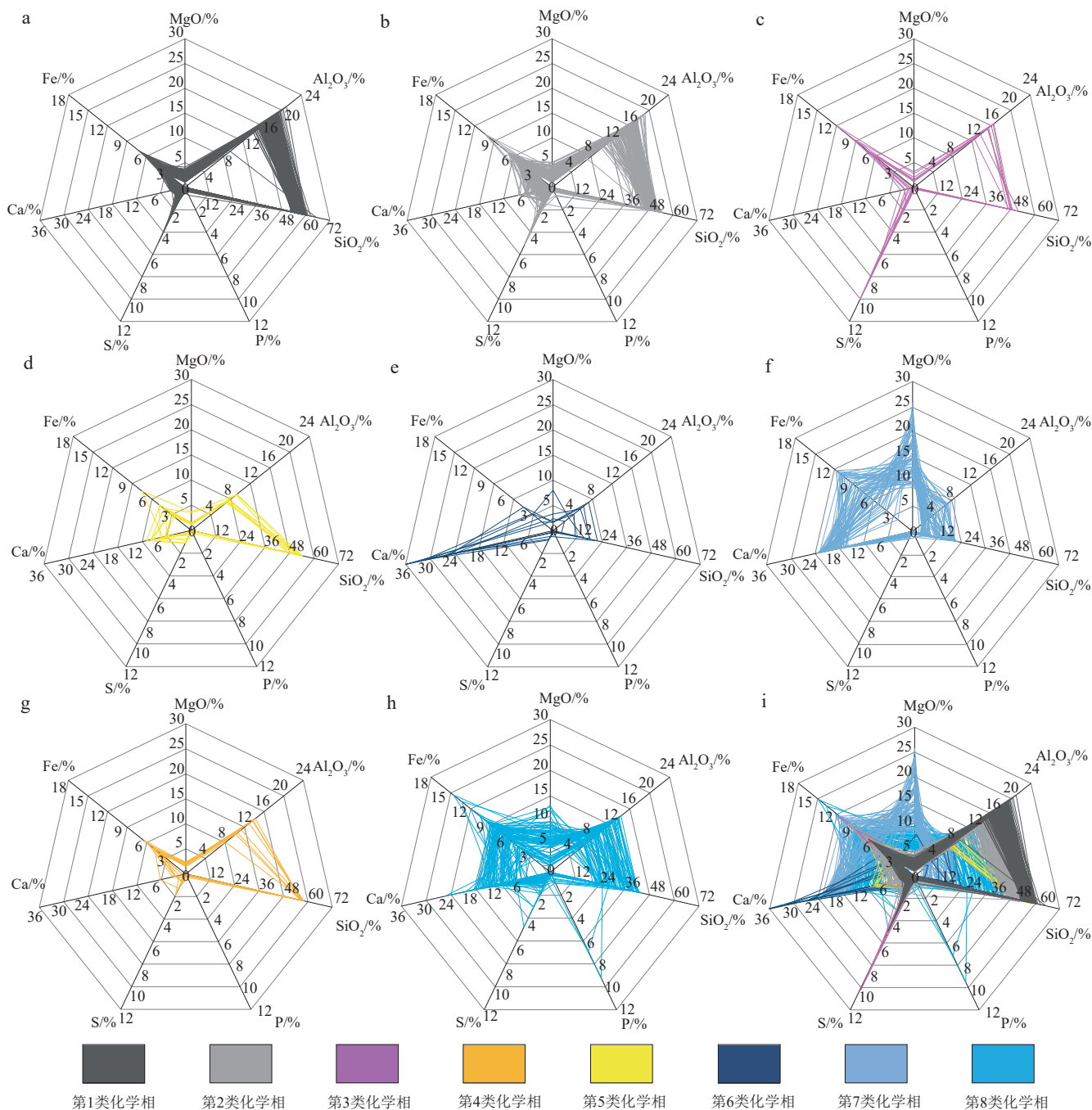


图6 松辽盆地A34井青一段岩心样品各类化学相雷达图

Fig. 6 Radar charts illustrating chemofacies characteristics for core samples from the Qing 1 Member in well A34, Songliao Basin

a. 第1类; b. 第2类; c. 第3类; d. 第4类; e. 第5类; f. 第6类; g. 第7类; h. 第8类; i. 8类汇总

(图中化合物分子式及元素符号代表该化合物及元素的含量。)

Ca平均含量为12.215 8%,为中钙含碳酸盐泥页岩;其岩心可见生物扰动痕迹,形成于相对浅水环境(图7n)。第7类化学相MgO含量最高(图7g),平均含量为15.187 7%,为高镁含碳酸盐泥页岩;其岩心观察颜色为灰白色和灰色,为滴酸缓慢起泡的块状白云岩。第8类化学相Ca含量最高(图7h),平均含量为28.153 6%,为高钙含碳酸盐泥页岩;该类化学相发育大量沿裂缝分

布的方解石脉(图7p),厚度主要介于1~5 cm,这些方解石脉形成于后期成岩过程,而非沉积过程^[30]。

4 沉积环境恢复

古盐度是古沉积环境的重要标志。目前研究中常用元素含量比值Sr/Ba, Sr/Ca和Ca/(Ca+Fe)来指示古

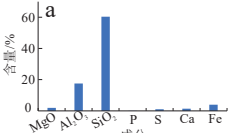
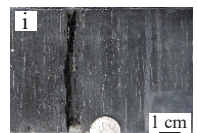
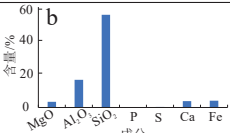
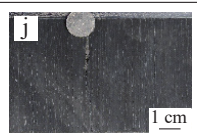
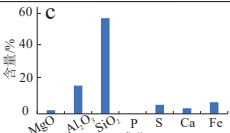
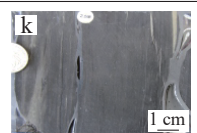
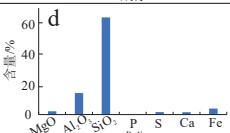
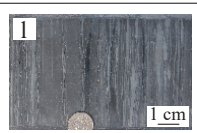
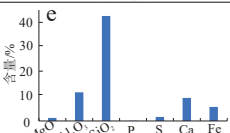
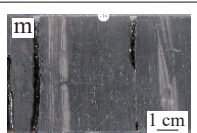
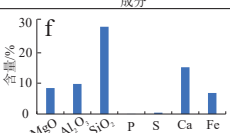
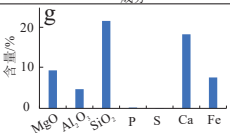
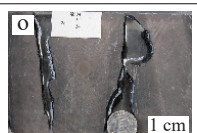
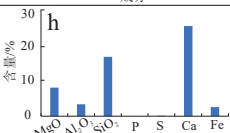
化学相			划分依据	
大类	小类		成分含量	典型岩心照片
还原富黏土矿物泥页岩	薄片状页岩	原生化学相	 SiO₂含量 > 60%, Al₂O₃含量 > 15%, Ca和MgO含量最低	 埋深2 276.26 m, 薄片状构造
	块状泥岩		 50% < SiO₂含量 < 60%, 15% < Al₂O₃含量 < 21%, MgO和Ca含量低	 埋深2 271.67 m, 块状构造
	含黄铁矿页岩		 SiO₂和Al₂O₃含量较高, Fe和S富集	 埋深2 248.36 m, 岩心可见结核状、 脉状黄铁矿
还原含碎屑泥页岩	纹层状页岩	原生化学相	 Al₂O₃含量相对薄片状页岩减少, 50% < SiO₂含量 < 60%, Fe和S含量增加	 埋深2 204.05 m, 纹层状构造
	薄砂层		 30% < SiO₂含量 < 45%, 9% < Al₂O₃含量 < 13%, 1.45 < Ca含量 < 8.72%, Fe, S和Mg含量低	 埋深2 201.92 m, 碎屑颗粒粒度较粗, 常见粉砂岩、 细砂岩
弱氧含钙泥页岩	含钙泥页岩	成岩化学相	 Ca平均含量为12.21%, SiO₂和Al₂O₃平均含量分别为 35.71%和10.10%	 埋深2 225.92 m, 岩心可见 生物扰动
	含镁泥页岩		 Ca和MgO平均含量分别为 19.91%和15.18%, SiO₂和 Al₂O₃平均含量分别为 13.27%和4.14%	 埋深2 205.69 m, 块状白云石
	裂缝充填方解石		 Ca含量最高, SiO₂和Al₂O₃含量降低	 埋深2 206.11 m, 裂缝可见方解石

图7 松辽盆地A34井青一段岩心样品8类化学相聚类结果

Fig. 7 Clustering results of the eight distinct chemofacies types for core samples from the Qing 1 Member in well A34, Songliao Basin

盐度变化,比值越高,古盐度越大^[18]。其中,Sr/Ba小于0.6为淡水环境,介于0.6~1.0指示半咸水环境,大于1.0为咸水环境;Ca/(Ca+Fe)小于0.4指示淡水环境,介于0.4~0.8为半咸水环境,大于0.8指示咸水环境^[31]。前人研究认为,古龙页岩沉积时期的古盐度Sr/Ba介于0.23~1.00,属淡水-微咸水环境,且古龙凹陷青山口组的微咸水环境是富有机质页岩形成的有利条件之一^[32]。采用Sr/Ba, Sr/Ca和Ca/(Ca+Fe)比值来判别湖泊水体的盐度变化。以A34井为例,青一段纵向上古盐度呈现先增后减的趋势(图8),在Q3和Q4层盐度达到最高,该时期的盐度增加可能与海侵有关。

古气候对沉积物中部分元素的富集具有明显影响。潮湿环境下,Fe, Al, V, Ni, Ba, Zn和Co等元素富集^[33];干旱气候条件下, Cu, Sr和Mn等元素富集^[27]。采用Sr/Cu和Fe/Mn元素含量比值表征古气候变化: Sr/Cu比值越低,指示古气候越潮湿,反之则越干旱; Fe/Mn高值指示温湿气候,低值指示干热气候。前人认为Fe/Mn大于等于40指示湿润气候, Fe/Mn小于40指示干旱气候^[34]。Sr/Cu比值变化曲线自下而上呈现由潮湿—干旱—湿润趋势,其中Q3和Q4层Sr/Cu比值增加,指示气候变干; Fe/Mn比值在Q3和Q4层增加,表现为湿润气候(图8),与Sr/Cu指示的气候矛盾。前人研究认

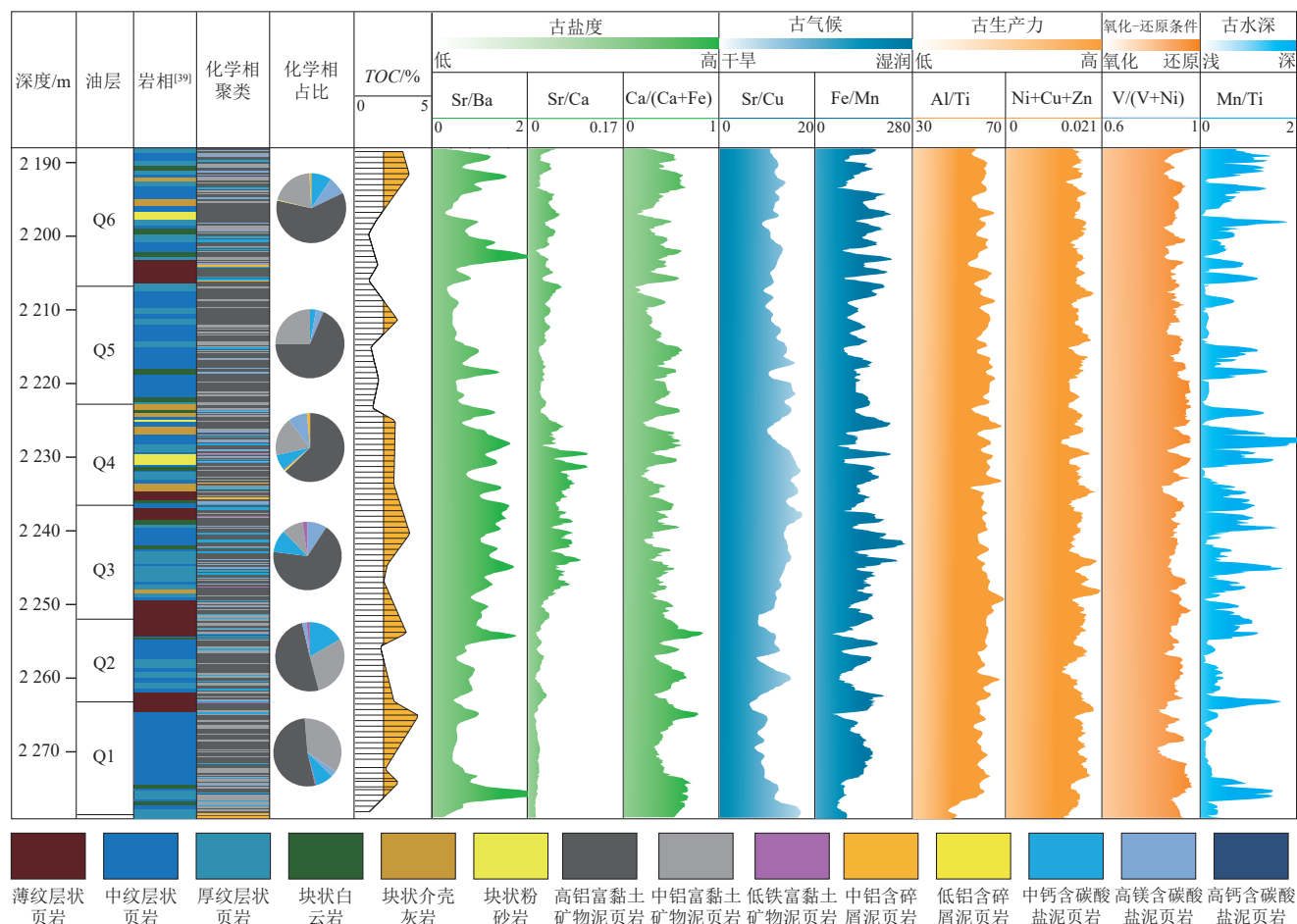


图8 松辽盆地A34井青一段沉积环境参数特征综合柱状图

Fig. 8 Comprehensive column diagram of characteristics of depositional environmental parameters of the Qing 1 Member in well A34,

Songliao Basin

TOC. 总有机碳含量

(图中元素符号代表该元素的含量。)

为,导致不同元素含量比值在同一层位指示不同气候的原因,是该时期的海侵事件影响了Sr含量,使其降低,从而干扰了Sr/Cu比值对古气候的表征^[35]。因此,采用Fe/Mn比值判断古气候变化更为可靠:Q3和Q4层为温暖潮湿气候,青一段顶、底部为半潮湿-半干旱气候。

沉积环境的氧化-还原条件对有机质的保存具有重要意义。目前V/(V+Ni)元素含量比值被广泛应用于古氧化-还原条件的识别,该比值越大,沉积环境的还原性越强^[36]。前人研究认为,V/(V+Ni)比值小于0.60指示氧化环境,介于0.60~0.84指示还原环境,大于0.84为强还原环境。利用V/(V+Ni)恢复青一段的氧化-还原条件,结果显示A34井青一段整体为强还原环境,且在Q4层还原性呈增强趋势(图8)。

古水深是影响细粒沉积过程的重要环境参数,其变化特征也是判别湖盆沉积演化的重要标志。Mn/Ti元素含量比值可用于指示古水深的变化趋势,比值越

大,水体越深^[37]。纵向上,A34井Mn/Ti比值变化曲线呈现先增后减的趋势,表明青一段古水深先增加、后减少,在Q3和Q4层达到最深(图8)。古生产力的替代指标包括同位素、有机碳、生物标志化合物以及微量元素法。其中,微量元素替代指标中常用Ni+Cu+Zn元素含量和Al/Ti元素含量比值来表征古生产力,两者数值越高,古生产力越大^[38]。A34井青一段古生产力整体呈先增后减趋势,在Q1,Q3和Q4层呈现较高值(图8),且对应的总有机碳含量(TOC)也较高。

青一段古环境整体表现为气候湿润、还原性强的淡水-微咸水环境,但横向上古龙凹陷与三肇凹陷的古环境存在一定差异。古龙凹陷A2井和A3井的Sr/Ba比值范围在0.4~0.8,盐度较低,指示淡水-微咸水环境;A34井的Sr/Ba比值范围在0.7~1.7,盐度较高,指示微咸水-咸水环境。三肇凹陷A21井的Sr/Ba比值范围在0.6~1.1,指示淡水-微咸水环境,其盐度

高于古龙凹陷A2井和A3井,但低于A34井(图9a)。总体而言,古龙凹陷整体为淡水-微咸水环境,局部为微咸水-咸水环境;三肇凹陷为淡水-微咸水环境。古龙凹陷与三肇凹陷的古气候环境整体差别不大,均为湿润气候(图9b)。古氧化-还原条件显示两凹陷整体均为强还原环境, $V/(V+Ni)$ 比值范围在0.85~1.00,但古龙凹陷的还原性强于三肇凹陷(图9c)。古龙凹陷与三肇凹陷的古生产力差别较小, $Ni+Cu+Zn$ 元素含量均介于0.010~0.015(图9d)。古水深表明,古龙凹陷水体较深,三肇凹陷水体较浅。其中,A34井位于古龙凹陷中心,水体最深(图9e)。

前人将A34井划分为薄纹层页岩相、中纹层页岩相、厚纹层页岩相、块状白云岩相、块状介壳灰岩相和块状粉砂岩相^[39],与本研究A34井的划分结果具有较好的对应关系:薄纹层页岩相对应高铝富黏土矿物泥页岩,中纹层页岩相对应中铝含碎屑泥页岩,厚纹层页岩相对应中铝富黏土矿物泥页岩,块状白云岩相对应高镁含碳酸盐泥页岩,块状介壳灰岩相对应中钙含碳酸盐泥页岩,块状粉砂岩相对应低铝含碎屑泥页岩。

5 化学相与沉积环境响应关系

不同化学相对应的沉积环境存在一定差异。中钙

含碳酸盐泥页岩和高镁含碳酸盐泥页岩沉积于盐度较高的环境;高铝富黏土矿物泥页岩、中铝富黏土矿物泥页岩和低铁富黏土矿物泥页岩的盐度低于前两者,但高于中铝含碎屑泥页岩和低铝含碎屑泥页岩(图10a)。高铝富黏土矿物泥页岩、中铝富黏土矿物泥页岩、低铁富黏土矿物泥页岩和中铝含碎屑泥页岩沉积于较湿润的环境,而低铝含碎屑泥页岩、高镁含碳酸盐泥页岩和中钙含碳酸盐泥页岩沉积于较干旱的环境(图10b)。7类化学相的氧化-还原环境均为还原-强还原(图10c)。高铝富黏土矿物泥页岩、中铝富黏土矿物泥页岩、低铁富黏土矿物泥页岩和中铝含碎屑泥页岩的古生产力较高,而低铝含碎屑泥页岩的古生产力较低(图10d)。

通过自西向东选取的连井剖面对比可知(图1b),青一段具有较强的非均质性。A2井主要发育中铝含碎屑泥页岩,并伴有少量的低铝含碎屑泥页岩;A3井与A34位于古龙凹陷中心,水体安静,黏土矿物含量增加,岩相以高铝富黏土矿物泥页岩为主(图11)。A3井的Q6层发育少量高钙含碳酸盐泥页岩和高镁含碳酸盐泥页岩;A34井的Q2和Q6层发育高铝富黏土矿物泥页岩和中铝富黏土矿物泥页岩互层;A21井位于三肇凹陷,远离物源,主要为中铝富黏土矿物泥页岩,其Q6层发育中钙含碳酸盐泥页岩,Q1、Q2和Q3层发育少量低铁富黏土矿物泥页岩(图11)。整体上,自古龙

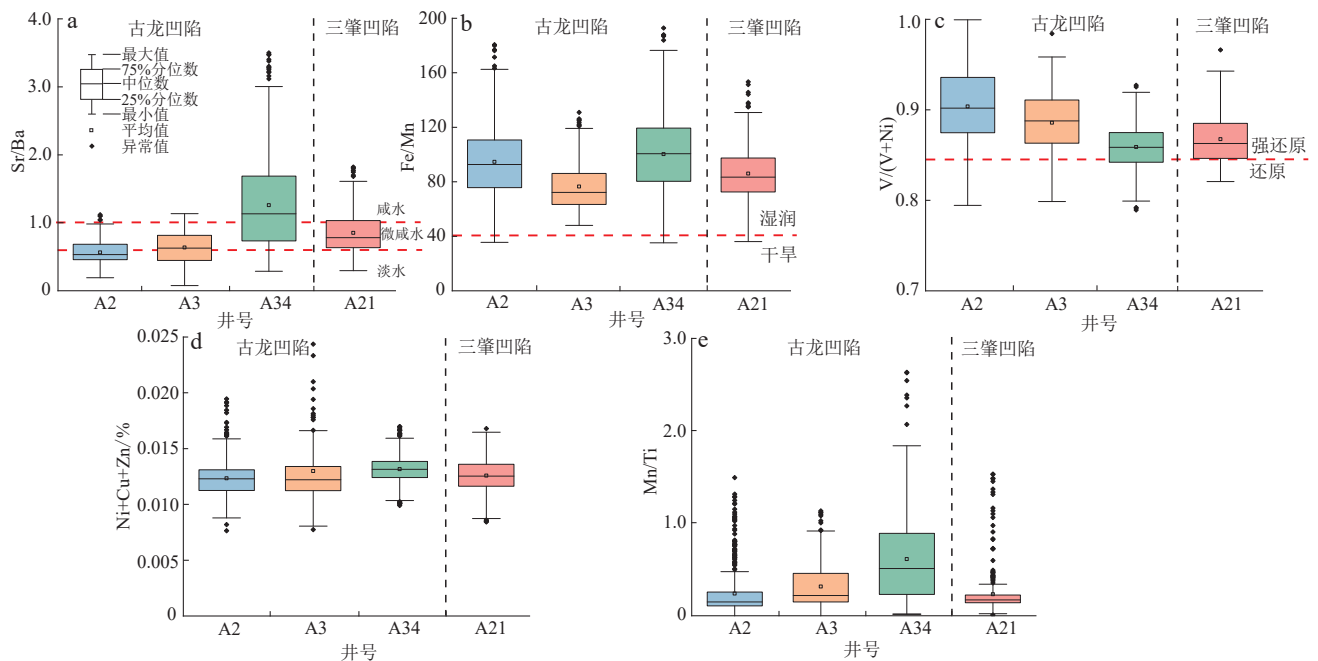


图9 松辽盆地青一段不同井岩心样品古环境参数箱形图

Fig. 9 Box plots of paleoenvironmental parameters for core samples from different wells in the Qing 1 Member, Songliao Basin

a. Sr/Ba; b. Fe/Mn; c. $V/(V+Ni)$; d. $Ni+Cu+Zn/\%$; e. Mn/Ti

(图中红色虚线为古环境参数阈值,黑色虚线为不同凹陷界限,元素符号代表该元素的含量。)

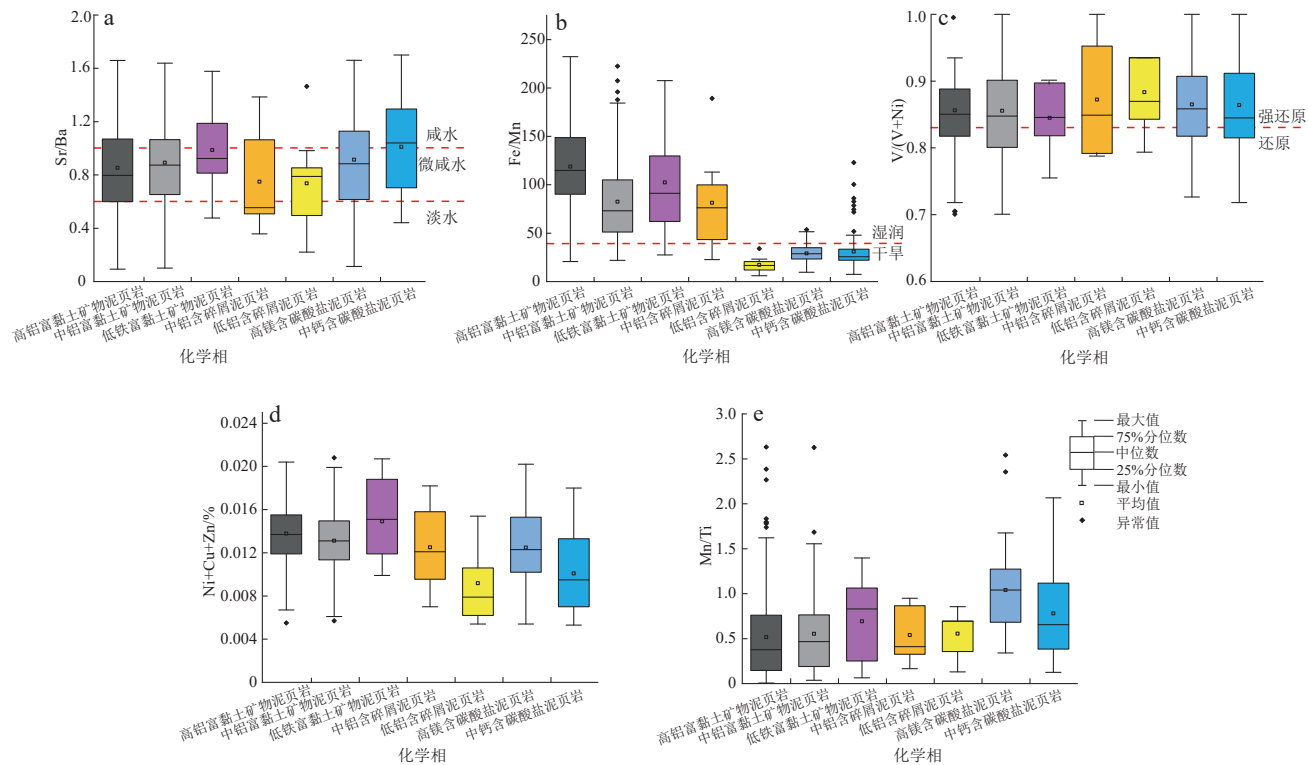


图 10 松辽盆地青一段不同化学相古环境参数箱形图

Fig. 10 Paleoenvironmental parameters across different chemofacies in the Qing 1 Member, Songliao Basin

a. Sr/Ba; b. Fe/Mn; c. V/(V+Ni); d. Ni+Cu+Zn; e. Mn/Ti

(图中红色虚线为古环境参数阈值, 元素符号代表该元素的含量。)

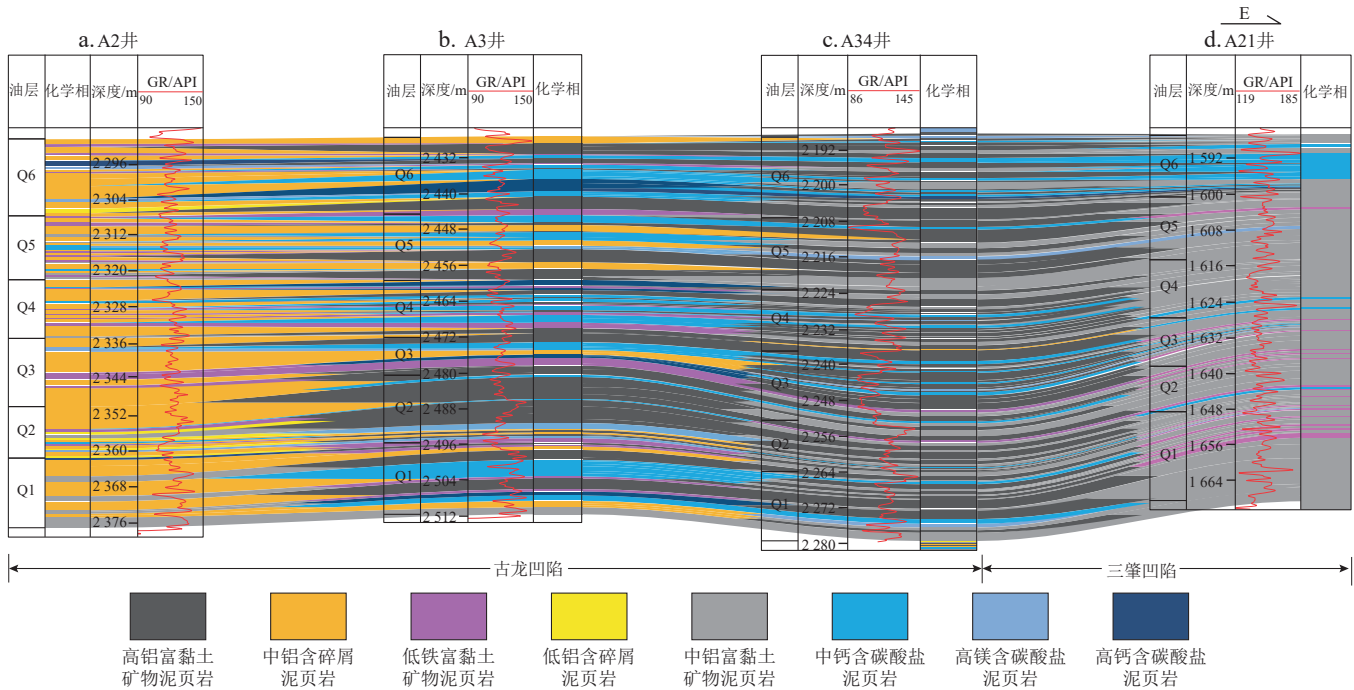


图 11 松辽盆地 A2 井—A3 井—A34 井—A21 井青一段化学相分布连井对比剖面

Fig. 11 Cross-well correlation section showing chemofacies distribution of the Qing 1 Member across wells A2, A3, A34, and A21, Songliao Basin (剖面位置见图 1b。)

凹陷至三肇凹陷,化学相呈现中铝含碎屑泥页岩—高铝富黏土矿物泥页岩—中铝富黏土矿物泥页岩的过渡规律。

不同化学相的时-空分布规律存在一定差异。低铝含碎屑泥页岩受物源影响,主要沉积于古龙凹陷边缘;中钙含碳酸盐泥页岩和高镁含碳酸盐泥页岩发育于水体较浅、盐度较高的环境;中铝含碎屑泥页岩分布于低铝含碎屑泥页岩和高铝富黏土矿物泥页岩之间,以及低铝含碎屑泥页岩和中钙含碳酸盐泥页岩之间;高铝富黏土矿物泥页岩、中铝富黏土矿物泥页岩和高铁富黏土矿物泥页岩位于凹陷中心,主要沉积于水深较深、水体安静的缺氧环境(图12)。

古龙凹陷靠近物源,受陆源输入影响较大。粉砂级碎屑由河流搬运进入湖盆,随水动力减弱在近岸处发生机械沉降,形成低铝含碎屑泥页岩;近岸沉积的粉砂级碎屑后续受浊流、底流和异重流等作用影响,发生长距离搬运沉降,形成中铝含碎屑泥页岩。三肇凹陷受陆源输入影响较小,水动力较弱,为湖泊静水区,主要为悬浮沉降,沉积中铝富黏土矿物泥页岩。此外,湖

底地形的隆-洼格局与岩相展布具有较好的耦合关系^[40]。古龙凹陷水体较深、坡度较陡^[41],导致化学相变化较快;三肇凹陷水体较浅、坡度较缓,化学相变化较慢,相序稳定(图12)。

6 结论

1) 基于聚类分析将松辽盆地青一段页岩划分为3大类、8小类化学相。还原富黏土矿物泥页岩对应高铝富黏土矿物泥页岩、中铝富黏土矿物泥页岩和高铁富黏土矿物泥页岩;还原含碎屑泥页岩对应中铝含碎屑泥页岩和低铝含碎屑泥页岩;弱氧中钙含碳酸盐泥页岩对应高钙含碳酸盐泥页岩、高镁含碳酸盐泥页岩和中钙含碳酸盐泥页岩。

2) 松辽盆地青一段古环境整体表现为淡水—微咸水环境,水体还原性较强。纵向上,古水深呈浅—深—浅的变化趋势,古盐度先增后减,古气候呈半潮湿—半干旱到温暖潮湿的周期性变化。横向上,古龙凹陷与三肇凹陷的古环境存在一定差异,古龙凹陷还原性、古

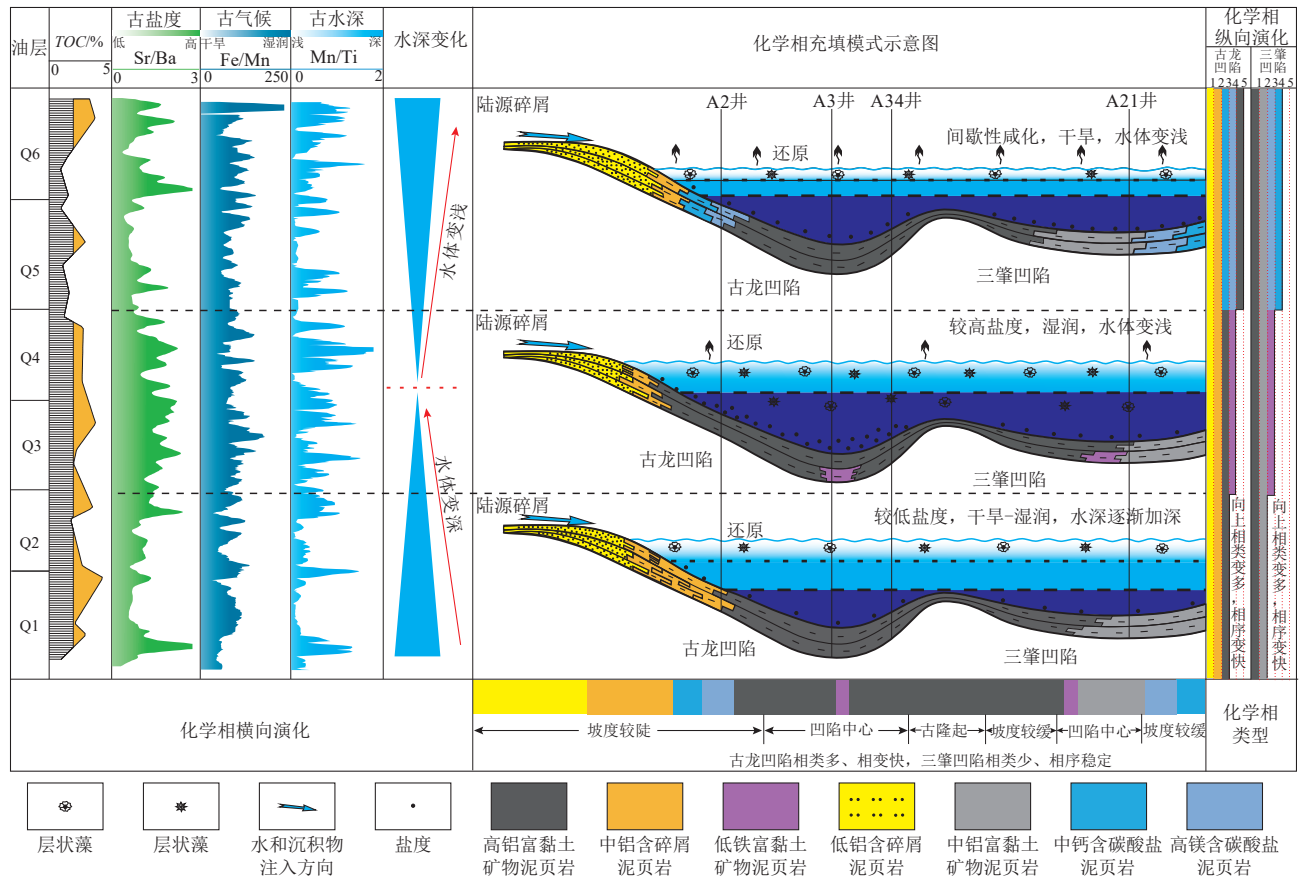


图12 松辽盆地青一段古环境控制下的化学相充填模式

Fig. 12 Paleoenvironment-controlled chemofacies stacking pattern of the Qing 1 Member, Songliao Basin

TOC. 总有机碳含量

(图中元素符号代表该元素的含量。)

水深和局部古盐度均高于三肇凹陷。

3) 古龙凹陷与三肇凹陷在纵向上化学相变化趋势相似,均表现为化学相类型增多、相序加快。横向上,化学相充填时-空分布规律存在一定差异:古龙凹陷化学相类型多、相变快,三肇凹陷化学相类型少、相序稳定。此外,陆源碎屑输入、湖底地形的隆-洼格局及坡度陡缓也影响化学相的空间分布。

4) 手持式XRF元素测试中,因部分岩心样品缺失导致取样间隔并非严格的等间距采样,可能引入一定误差。此外,化学相不能取代传统的岩相划分,而是为细粒岩相划分提供一种新思路。未来应将化学相与传统岩相划分结合,以实现更客观、定量的岩相划分。

参考文献

- [1] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [2] 朱筱敏, 王晓琳, 胡鑫, 等. 国际沉积学研究前沿和发展讨论——第37次国际沉积学家年会述评[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 685-704.
ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, HU Xin, et al. Frontiers and future prospects of international sedimentological research: Review on the 37th International Meeting of Sedimentology[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 685-704.
- [3] 朱筱敏, 王晓琳, 张美洲, 等. 中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 873-892.
ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, ZHANG Meizhou, et al. Sedimentary environments and lithofacies characteristics of fine-grained sediments in typical continental basins in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 873-892.
- [4] 郭旭升, 赵培荣, 张宇, 等. 中国陆相页岩油分类分级评价的现状、挑战与发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(6): 1745-1761.
GUO Xusheng, ZHAO Peirong, ZHANG Yu, et al. Current status, challenges, and future trends of the classification and grading evaluation of lacustrine shale oil in China[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(6): 1745-1761.
- [5] 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.
- [6] 高波, 戎佳, 张明何, 等. 川北地区下寒武统筇竹寺组页岩岩相类型及分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(6): 1892-1906.
GAO Bo, RONG Jia, ZHANG Minghe, et al. Lithofacies types of shales and their distribution in the lower Cambrian Qiongzhusi Formation, northern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(6): 1892-1906.
- [7] MOORE R C. Meaning of facies[M]//LONGWELL C R, MOORE R C, MCKEE E D, et al. Sedimentary Facies in Geologic History. Boulder: Geological Society of America, 1949: 1-34.
- [8] 柳波, 孙嘉慧, 张永清, 等. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 521-535.
LIU Bo, SUN Jiahui, ZHANG Yongqing, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 521-535.
- [9] 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.
- [10] 张一帆, 惠克来, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长73油层亚组页岩岩相及页岩油差异赋存与微观运聚特征[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1536-1553.
ZHANG Yifan, XI Kelai, CAO Yingchang, et al. Shale lithofacies, differential shale oil occurrence and its microscopic migration and accumulation features in the 3rd sub-group of the 7th oil group of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1536-1553.
- [11] KAMINSKI M A, MALMGREN B A. Stable isotope and trace element stratigraphy across the Cretaceous/Tertiary boundary in Denmark[J]. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, 1989, 111(4): 305-312.
- [12] DUARTE D, DE LIMA R P, SLATT R, et al. Comparison of clustering techniques to define chemofacies in Mississippian rocks in the STACK Play, Oklahoma [C]//2019 AAPG Annual Convention and Exhibition, San Antonio, 2020. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2020: 42523.
- [13] GABRIEL J J, REINHARDT E G, BHATTACHARYA J P, et al. Establishing detailed chemofacies of depositional environments in an epeiric seaway using high-resolution (500 μm) micro X-ray fluorescence core scanning data [J]. Sedimentology, 2025, 72(4): 1316-1342.
- [14] LARSON T E, LOUCKS R G, SIVIL J E, et al. Machine learning classification of Austin Chalk chemofacies from high-resolution x-ray fluorescence core characterization [J]. AAPG Bulletin, 2023, 107(6): 907-927.
- [15] 刘可禹, 刘畅. “化学-沉积相”分析: 一种研究细粒沉积岩的有效方法[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 491-503.

- LIU Keyu, LIU Chang. "Chemo-sedimentary facies" analysis: An effective method to study fine-grained sedimentary rocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 491-503.
- [16] LI Guiang, LIN Chengyan, MA Pengjie, et al. Chemofacies characterization of lacustrine shale based on machine learning classification: A case study from the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 241: 213154.
- [17] 刘可禹, 刘畅. "化学-沉积相"分析: 一种研究细粒沉积岩的有效方法[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 491-503.
- LIU Keyu, LIU Chang. "Chemo-sedimentary facies" analysis: An effective method to study fine-grained sedimentary rocks [J]. 2019, 40(3): 491-503.
- [18] 白静, 徐兴友, 陈珊, 等. 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段沉积相特征与古环境恢复——以吉页油1井为例[J]. *中国地质*, 2020, 47(1): 220-235.
- BAI Jing, XU Xingyou, CHEN Shan, et al. Sedimentary characteristics and paleo-environment restoration of the first member of Qingshankou Formation in Qian'an area, Changling sag, Songliao Basin: A case study of Jiyeou 1 Well[J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 220-235.
- [19] 潘永帅, 柳波, 杨易卓, 等. 火山灰蚀变对细粒混积岩元素异常的影响及对古环境恢复的作用——以三塘湖盆地条湖-马朗凹陷二叠系芦草沟组二段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(2): 530-549.
- PAN Yongshuai, LIU Bo, YANG Yizhuo, et al. Impacts of volcanic ash alteration on element anomalies in fine-grained mixed deposits and paleoenvironmental reconstruction: A case study of the 2nd member of the Permian Lucaogou Formation, Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(2): 530-549.
- [20] LI Lei, BAO Zhidong, LI Long, et al. The source and preservation of lacustrine shale organic matter: Insights from the Qingshankou Formation in the Changling Sag, Southern Songliao Basin, China[J]. *Sedimentary Geology*, 2024, 466: 106649.
- [21] WU Xiaozhuo, XU Hao, ZHOU Haiyan, et al. Improving lithofacies prediction in lacustrine shale by combining deep learning and well log curve morphology in Sanzhao Sag, Songliao Basin, China[J]. *Computers & Geosciences*, 2024, 193: 105735.
- [22] 何文渊, 裴明波. 基于地震波形驱动层序格架建立及页岩岩相特征研究——以松辽盆地古龙页岩油5号试验区为例[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(2): 123-133.
- HE Wenyuan, PEI Mingbo. Seismic waveform based sequence framework and study on shale lithofacies characteristics: A case study of No. 5 test zone of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(2): 123-133.
- [23] ZHU Xiaomeng, CAO Jian, XIA Liuwen, et al. Links between marine incursions, lacustrine anoxia and organic matter enrichment in the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 158(Part A): 106536.
- [24] 柳波, 蒙启安, 付晓飞, 等. 松辽盆地白垩系青山口组一段页岩生、排烃组分特征及页岩油相态演化[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 406-419.
- LIU Bo, MENG Qi'an, FU Xiaofei, et al. Composition of generated and expelled hydrocarbons and phase evolution of shale oil in the 1st member of Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 406-419.
- [25] 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.
- [26] 孙中瑾, 张莹莹, 叶小璐, 等. 手持式XRF在土壤调查修复项目中应用的可靠性分析[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(3): 1005-1014.
- SUN Zhongjin, ZHANG Yingying, YE Xiaotang, et al. Reliability analysis of handheld XRF application in soil investigation and remediation projects [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(3): 1005-1014.
- [27] 张广玉, 赵世煌, 邓晃, 等. 手持式X射线荧光光谱多点测试技术在地质岩心和岩石标本预研究中的应用[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(5): 501-509.
- ZHANG Guangyu, ZHAO Shihuang, DENG Huang, et al. Application of P-XRF multi-point analysis technique in pre-research of geological core and rock specimens [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(5): 501-509.
- [28] MICHAEL N A, CRAIGIE N W. Application of principal component analysis on chemical data for reservoir correlation: A case study from Cretaceous carbonate sedimentary rocks, Saudi Arabia[J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(4): 785-807.
- [29] 孟海东, 孙家驹, 殷跃, 等. 基于聚类分析的地球化学数据分布特征研究[J]. *有色矿冶*, 2012, 28(2): 1-3.
- MENG Haidong, SUN Jiaju, YIN Yue, et al. The geochemical data distribution characteristics based on clustering analysis [J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2012, 28(2): 1-3.
- [30] 何文渊, 孙宁亮, 张金友, 等. 陆相湖盆富有机质泥页岩中方解石脉成因及油气地质意义——以松辽盆地白垩系青山口组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(5): 937-950.
- HE Wenyuan, SUN Ningliang, ZHANG Jinyou, et al. Genetic mechanism and petroleum geological significance of calcite veins in organic-rich shales of lacustrine basin: A case study of Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(5): 937-950.
- [31] 蓝先洪, 马道修, 徐明广, 等. 珠江三角洲若干地球化学标志及指相意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7(1): 39-49.
- LAN Xianhong, MA Daoxiu, XU Mingguang, et al. Some geochemical indicators of the Pearl River Delta and their facies significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7(1): 39-49.
- [32] 何文渊, 蒙启安, 付秀丽, 等. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩沉积环境特征及其有机质富集机理[J]. *沉积学报*, 2024, 42(5): 1799-1816.

- HE Wenyuan, MENG Qi'an, FU Xiuli, et al. Geochemical study of the sedimentary environment and its organic matter enrichment mechanism in Qingshankou Formation shale, Gulong Sag, Songliao Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1799-1816.
- [33] YANDOKA B M S, ABDULLAH W H, ABUBAKAR M B, et al. Geochemical characterisation of Early Cretaceous lacustrine sediments of Bima Formation, Yola Sub-basin, Northern Benue Trough, NE Nigeria: Organic matter input, preservation, paleoenvironment and palaeoclimatic conditions [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 61: 82-94.
- [34] XU Jinjun, LIU Zhaojun, BECHTEL A, et al. Organic matter accumulation in the Upper Cretaceous Qingshankou and Nenjiang Formations, Songliao Basin (NE China): Implications from high-resolution geochemical analysis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 102: 187-201.
- [35] WU Haiguang, FENG Chengcheng, KANG Xun, et al. Positive and negative effects of marine transgression on the quality of lacustrine source rocks in the Upper Cretaceous Songliao Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 153: 106267.
- [36] 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]. *Petroleum Science*, 2023, 20(3): 1347-1362.
- [37] 王岚, 周海燕, 商斐, 等. 松辽盆地北部白垩纪青山口组黑色页岩元素地球化学特征及沉积古环境恢复 [J]. *地质科学*, 2022, 57(1): 156-171.
- WANG Lan, ZHOU Haiyan, SHANG Fei, et al. Element geochemical characteristics of black shale and paleo-sedimentary environmental restoration of Qingshankou Formation of the Cretaceous in the northern Songliao Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, 57(1): 156-171.
- [38] 白昕, 陈睿倩, 商斐, 等. 松辽盆地白垩系青山口组页岩沉积环境及其含油性特征 [J]. *石油实验地质*, 2024, 46(5): 1063-1074.
- BAI Xin, CHEN Ruiqian, SHANG Fei, et al. Sedimentary environment and oil-bearing characteristics of shale in Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(5): 1063-1074.
- [39] 白云风, 艾鑫. 齐家-古龙凹陷青山口组细粒沉积岩岩相类型、特征及分布规律 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2025, 44(4): 12-19.
- BAI Yunfeng, AI Xin. Lithofacies types, characteristics, distribution law of fine-grained sedimentary rocks of Qingshankou Formation in Qijia-Gulong Depression [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2025, 44(4): 12-19.
- [40] 刘勇, 刘永畅, 赵圣贤, 等. 泸州—渝西地区志留系龙马溪组沉积期古地貌特征及控储作用 [J]. *岩性油气藏*, 2025, 37(2): 49-59.
- LIU Yong, LIU Yongchang, ZHAO Shengxian, et al. Paleogeomorphological characteristics and reservoir control of the sedimentary period of Silurian Longmaxi Formation in Luzhou-Yuxi area [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2025, 37(2): 49-59.
- [41] 张赫, 王小军, 贾承造, 等. 松辽盆地北部中浅层全油气系统特征与油气成藏聚集模式 [J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 683-694.
- ZHANG He, WANG Xiaojun, JIA Chengzao, et al. Total petroleum system and hydrocarbon accumulation model in shallow and medium strata in northern Songliao Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 683-694.

(编辑 董奕含)