孟庆涛,胡菲,刘招君,等.陆相坳陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及成因:以松辽盆地晚白垩世青山口组为例.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(1):20-37.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230314.
Meng Qingtao, Hu Fei, Liu Zhaojun, et al. Lithofacies Types and Genesis of Fine-Grained Sediments in Terrestrial Depression Lake Basin: Taking Upper Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin as an Example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(1):20-37.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230314.

陆相坳陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及成因——以松辽盆地晚白垩世青山口组为例

孟庆涛[1,2],胡 菲[1,2],刘招君[1,2],孙平昌[1,2],柳 蓉[1,2]
1.吉林大学地球科学学院,长春 130061
2.吉林省油页岩与共生能源矿产重点实验室,长春 130061

摘要:页岩油是目前非常规油气研究的热点与难点。细粒沉积岩岩相类型及成因分析是页岩油"源储"特征研究及"甜点"预测的有效途径。松辽盆地青山口组细粒沉积广泛发育,是页岩油富集的有效层段。本文通过岩性、矿物成分、有机质丰度与沉积构造4个参数,将松辽盆地青山口组细粒沉积岩划分为6种岩相:高有机质泥纹层黏土质页岩(A)、中高有机质含细粉砂纹层长英质页岩(B)、中低有机质含粗粉砂纹层长英质页岩(C)、低有机质层状粉砂岩(D)、低有机质层状介形虫灰岩(E)和低有机质层状白云岩(F)。进一步从水动力学与有机质富集方面探讨了不同岩相类型的成因,并建立了相应的沉积模式。具体为:在风暴浪基面之下的静水、咸水环境、高湖泊生产力背景中,浮游藻类与黏土絮状物均匀悬浮沉降,形成贫富有机质黏土质纹层,沉积A岩相;在正常浪基面之下的相对静水(浪基面附近局部动荡)、半咸水环境、高湖泊生产力背景中,三角洲径流与洪流带来的细粉砂颗粒继续向湖盆中央搬运,经均匀悬浮沉降形成长英质纹层,间歇期悬浮沉降形成黏土质纹层,形成B岩相;正常浪基面之下,洪水携带粉砂级颗粒,顺着水下分流河道搬运至外前缘,以稳定性浊流的形式进入前三角洲,随流速逐渐降低,分异形成粗粉砂—细粉砂纹层,间歇期悬浮沉降形成黏土质纹层,形成C岩相;正常浪基面之下,三角洲前缘早期沉积物在阵发性浊流的作用下,滑塌至较深水区,形成D和E岩相;于正常浪基面与风暴浪基面之间,在相对干燥的气候背景下的咸水环境中,形成F岩相。

关键词:陆相坳陷湖盆;细粒沉积;岩相;成因模式;页岩油;松辽盆地;青山口组
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230314 **中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A

Lithofacies Types and Genesis of Fine-Grained Sediments in Terrestrial Depression Lake Basin: Taking Upper Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin as an Example

Meng Qingtao[1,2], Hu Fei[1,2], Liu Zhaojun[1,2], Sun Pingchang[1,2], Liu Rong[1,2]

收稿日期:2023-11-21
作者简介:孟庆涛(1984—),女,教授,博士生导师,主要从事沉积学、石油地质学、非常规油气勘探与开发方面的研究,E-mail: mengqt@jlu.edu.cn
通信作者:胡菲(1986—),男,副教授,硕士生导师,主要从事石油天然气勘探与开发方面的研究,E-mail: hufei@jlu.edu.cn
基金项目:吉林省自然科学基金项目(20230101081JC);吉林大学科技创新团队项目(2021TD-05)
Supported by the Natural Science Foundation of Jilin Province (20230101081JC) and the Program for Jilin University Science and Technology Innovative Research Team (2021TD-05)

1. *College of Earth Sciences*, *Jilin University*, *Changchun* 130061, *China*
2. *Key Laboratory for Oil Shale and Coexisting Minerals of Jilin Province*, *Jilin University*, *Changchun* 130061, *China*

Abstract: Shale oil is currently a hot and difficult topic in unconventional oil and gas research. The analysis of the types and genesis of fine-grained sedimentary lithofacies is an effective way to study the "source and reservoir" characteristics of shale oil and predict its "sweet spot". The fine-grained sediments of the Qingshankou Formation in the Songliao basin are widely developed and are effective intervals for shale oil enrichment. Based on four parameters, including organic matter abundance, mineral composition, lithology, and sedimentary structures, six kinds of lithofacies of fine-grained sedimentary rocks of the Qingshankou Formation in the Songliao basin are divided in this paper, as clay shale with high content of organic matter and mud-grade lamination(A), felsic shale with medium-high content of organic matter and fine silt-grade lamination(B), felsic shale with medium-low content of organic matter and coarse silt-grade lamination(C), layered siltstone with low content of organic matter (D), layered ostracoid limestone with low content of organic matter (E) and layered dolomite with low content of organic matter (F). Then, the genesis of different lithofacies types were discussed from the perspectives of hydrodynamics and organic matter enrichment, and corresponding sedimentary models were established. In the static and salty water environment below the base of storm waves with high lake productivity, planktonic algae and clay flocs are uniformly suspended and settled, forming organic-rich clay lamination and lithofacies A is deposited. In a relatively static and brackish water environment below the normal wave base (with local turbulence near the wave base) with high lake productivity, the fine silt particles brought by delta runoff and flood flow continue to move towward the center of the lake basin, forming a felsic lamination through uniform suspension and sedimentation, and a clay lamination is formed during the period of intermittent suspension and sedimentation, and lithofacies B is deposited. Below the normal wave base, the flood which carries silt-grade particles are transported to the outer front of delta along the underwater distributary channel, and enter the front delta in the form of stable turbidity current. As the flow velocity gradually decreases, it forms a coarse to fine silt lamination, clay lamination is formed during the period of intermittent suspension and sedimentation, and lithofacies C is deposited. Below the normal wave base, the early sediments of the delta front, under the action of paroxysmal turbidity currents, collapse into deeper water, forming lithofacies D and E. Between the normal wave base and storm wave base, lithofacies F is formed in saline water environment under a relatively dry climate.

Key words: terrestrial depression lake basin; fine-grained sediments; lithofacies; genetic model; shale oil; Songliao basin; Qingshankou Formation

0　引言

随着常规油气藏发现的难度越来越大，寻找非常规油气资源已成为国内外油气勘探的重点方向[1]。美国页岩层系油气经过近 60 a 技术攻关和生产探索取得了认识、技术、管理和战略全方面的重大创新，掀起了"页岩革命"[2]。近 10 a 来，美国页岩油产量平均增速超过 25%，2018 年美国页岩油产量为 3.29×10^8 t，占原油总产量的 59%，助推美国原油产量达历史第 2 高峰[3]。目前，中国陆相页岩油勘探尚处于起步阶段，虽然已经在多个盆地早期的页岩油勘探中获得较好发现，但是相应的页岩油富集区和富集段的选区选段评价标准尚未确定[1]。近几年，中国加大对陆相源内石油地质研究、风险勘探、整体勘探、开发试验和产能建设力度，取得了实质性重要发现和突破[4-5]，实现了鄂尔多斯、准噶尔、松辽、渤海湾等盆地多个探区规模建产，展现出良好的发展前景[4,6]。

与国外页岩油主要分布在海相富有机质致密碎屑岩和碳酸盐岩中不同，中国页岩油主要分布在湖

相富有机质页岩层系中[1]。总体看,陆相沉积相变较快、非均质性较强、矿物成分多样、孔隙结构和类型较复杂;同时,有机质成熟度偏低、流体黏度高,流动能力较差,残留量大[7]。这使得页岩油层系岩相复杂,页岩油资源类型和资源系统多样。

细粒沉积岩(fine-grained sedimentary rock),是指主要由颗粒粒级小于62.5 μm的细粒沉积物组成(体积分数大于50%)的沉积岩[8-10]。明确细粒沉积岩岩相特征,对于认识页岩油储层特征具有重要的理论意义和现实勘探意义[11];同时,岩相是"甜点"预测的有效途径,其对揭示易改造的富有机质页岩的发育特征和水平井设计具有重要意义[12-13]。近年来,我国许多学者开展了湖相细粒沉积岩的岩相划分以及环境解释,研究较多的页岩油盆地主要有松辽盆地[14-16]、鄂尔多斯盆地[11,17-18]、渤海湾盆地[19-21]、准噶尔盆地[22-24]等。但由于盆地特征差异,基本上采用"逐盆逐建"的方式,所建立的岩相划分方案具有地区性。

1 研究区地质概况

松辽盆地是中国大型中、新生代陆相沉积盆地,位于中国东北部,面积约为26×10^4 km^2。根据松辽盆地中生代构造演化,结合基底形态、盖层发育及构造特征等,坳陷期地层按区域隆起和发育特征划分成6个一级构造单元:北部倾没区、中央坳陷区、东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区和西部斜坡区。青山口组一段沉积时期湖泊范围较大,主要发育浅湖、半深湖—深湖相沉积(图1a),岩性主要为灰黑色-深灰色泥页岩夹油页岩,是松辽盆地优质烃源岩,青一段湖相页岩的分布面积达8.7×10^4 km^2,厚度为60~135 m(图1b),深湖相页岩有机质丰度可达3%~4%[25]。因此,本文在对松辽盆地研究的基础上,以松辽盆地细粒沉积岩为例,建立一套适用于所有陆相坳陷湖盆细粒沉积岩岩相划分方案,并明确其岩相特征及成因类型,对于岩相分布及"甜点"预测具有重要意义。

2 岩相划分参数

陆相页岩层系岩石组合类型复杂多样,既有页岩、泥岩,也有粉砂岩、碳酸盐岩、混积岩和沉凝灰岩等[7]。因此,对其岩石类型进行分类和岩相划分显得相对复杂。目前,在岩相划分过程中,考虑的参数主要包括岩性、矿物成分、有机质丰度、沉积构造与测井响应特征。

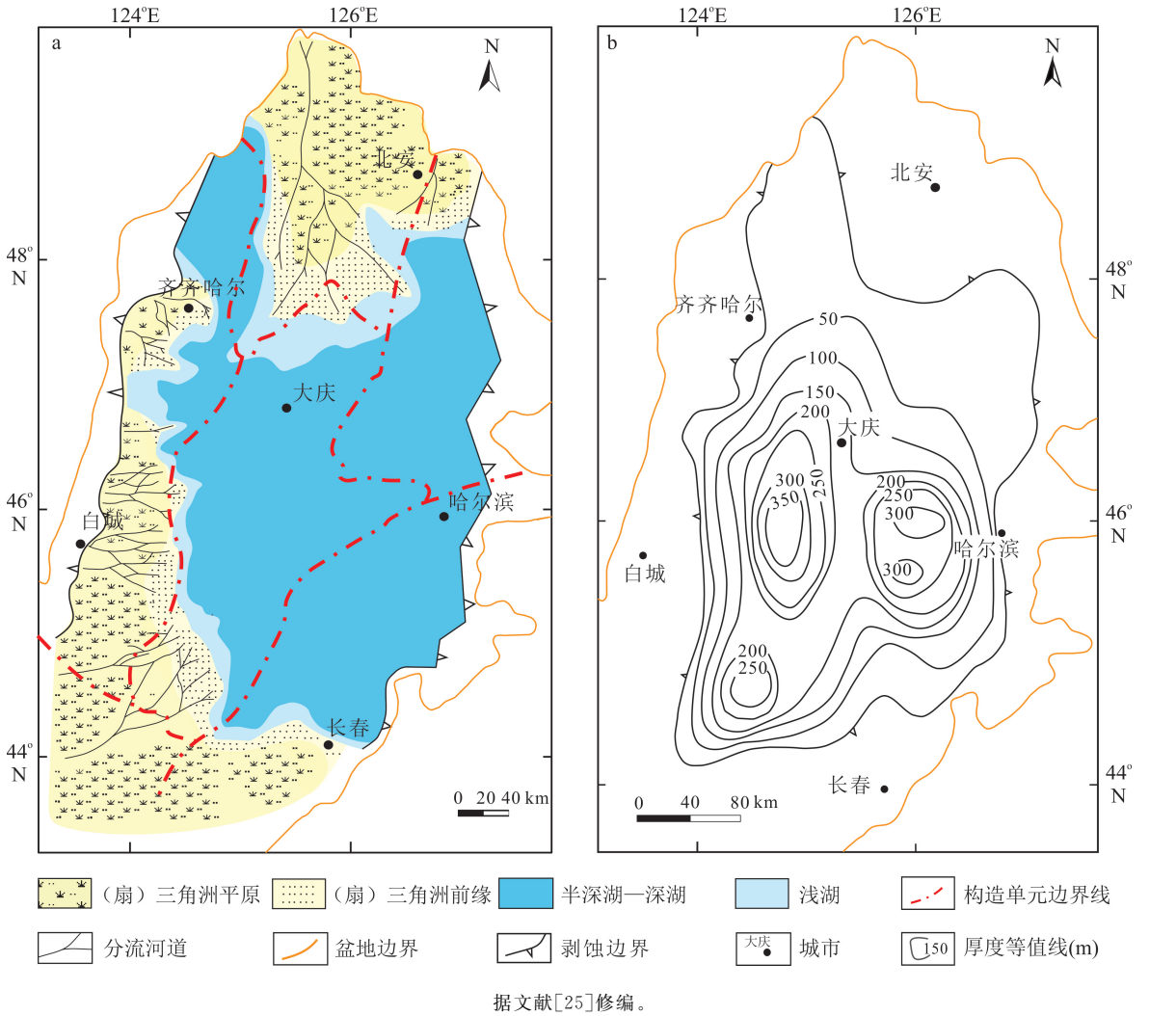
2.1 岩性

岩性是岩相划分的基本参数。岩性最直观地反映了岩石的特征,包括颜色、成分、结构和构造等,进一步决定了岩石的物理、化学性质。细粒沉积岩主要研究粒径小于62.5 μm的沉积岩。在岩性划分过程中,多采用传统的三端元分类法,以泥岩、粉砂岩、碳酸盐岩为3个单元,以体积分数50%为界,将细粒沉积岩岩性划分为泥页岩、粉砂岩、灰岩和混合岩4种类型[26-27],也有部分学者分别以25%、50%、75%为界,更细致地将岩性划分为泥页岩、砂质泥页岩、灰质泥页岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、灰质粉砂岩、灰岩、泥质灰岩、砂质灰岩、混合岩等多种类型[28]。

2.2 矿物成分

矿物成分是岩相划分中应用最多的参数。泥页岩中主要的矿物成分有黏土矿物、石英、长石、方解石、白云石和黄铁矿等。矿物组成不仅对页岩的可压裂性有作用,而且对页岩中滞留烃含量也有重要影响。北美海相页岩油气成功开采经验表明,石英及碳酸盐等脆性矿物体积分数高的页岩具有较好的可压裂性,对中高成熟度页岩油开采具有重要意义[1]。同时,中国陆相页岩矿物组成对滞留烃含量与页岩生烃潜力又具有重要的控制作用。总体看,$w(S_1+S_2)$值与黏土矿物及碳酸盐体积分数呈负相关。高黏土矿物体积分数对滞留烃与生烃潜量减少量影响更大[1]。

由于陆相湖盆距离物源较近且水体深度较小,受环境、气候因素影响更加显著,相对于海相沉积,陆相细粒沉积发育规模更小,非均质性更强[29]。根据这一特征,陆相湖盆通常以能够代表其物质来源的陆源碎屑矿物、黏土矿物和盆内自生的碳酸盐矿物作为3个端元共同进行岩石类型的划分。最具代表性的有以下4种方案:1)沿用了海相页岩划分方案,以黏土矿物、石英和碳酸盐矿物为端元,以体积分数50%为界限,将细粒沉积岩分为泥质、硅质、钙质和混合质,其中,混合质又可以进一步细分为泥质-硅质、硅质-泥质、泥质-钙质、钙质-泥质、硅质-钙质和钙质-硅质[30-31](图2a);2)以粉砂、黏土矿物和碳酸盐矿物为端元,以各自体积分数50%为界限进行细粒沉积岩命名的方案,将细粒沉积岩分为粉砂岩、黏土岩、碳酸盐岩和混合型细粒沉积岩[10](图2b);3)以长英质矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物作为端元,以体积分数50%为界限,将细粒沉积岩划分为长英



据文献[25]修编。

图 1　松辽盆地青山口组一段沉积相图(a)与青山口组泥页岩厚度等值线图(b)

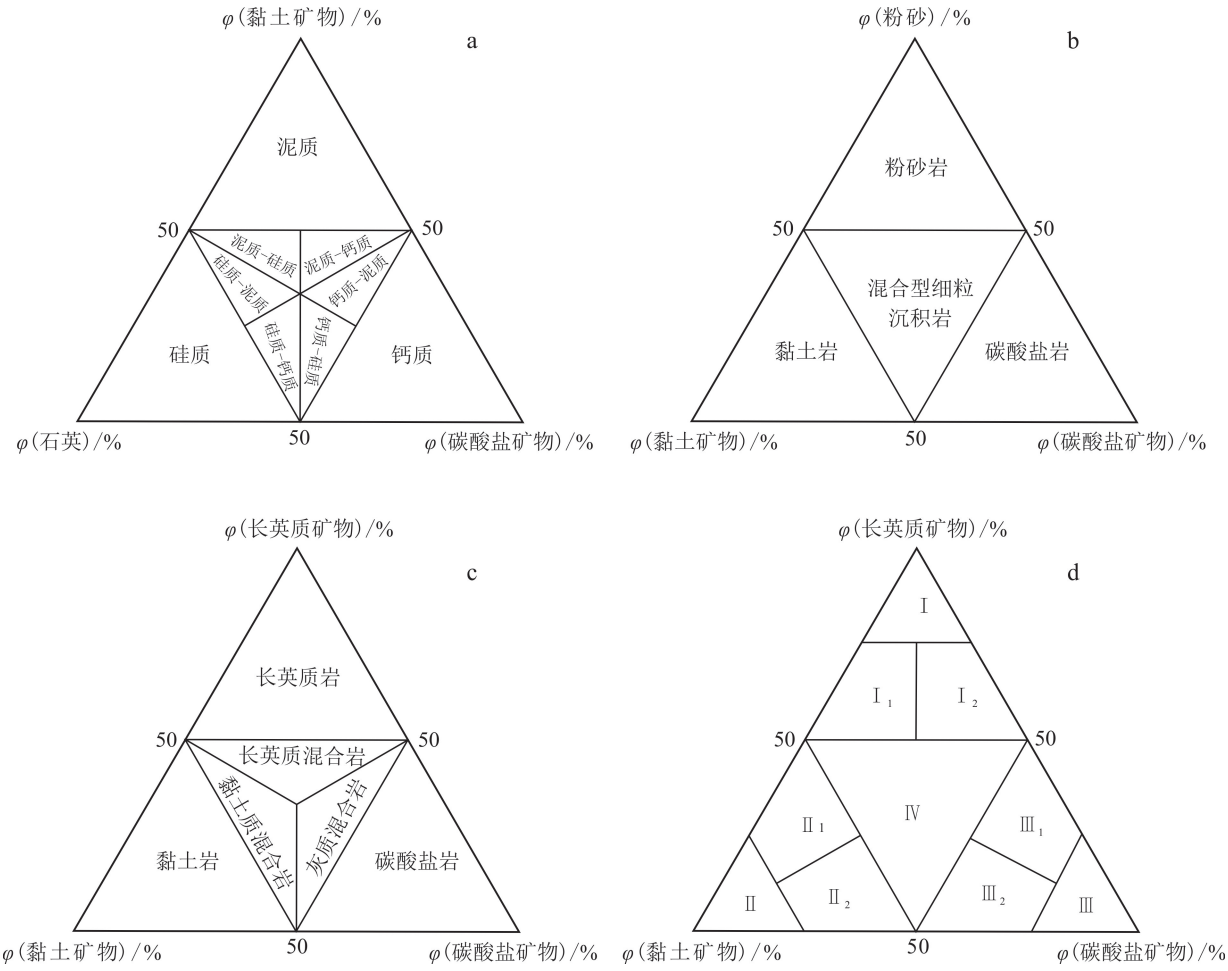
Fig. 1　Sedimentary facies map of the first member of Qingshankou Formation (a) and shale thickness coutour maop of Qingshankou Formation (b) in Songliao basin

质岩、黏土岩、碳酸盐岩、混合岩，其中混合岩又可以进一步细分为长英质混合岩、黏土质混合岩和灰质混合岩等[24,32-33]（图 2c）；4）以长英质矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物为端元，以体积分数 25%、50%和 75%为界限，将细粒沉积岩划分为长英质页岩（Ⅰ）、含黏土长英质页岩（$Ⅰ_1$）、含灰/云长英质页岩（$Ⅰ_2$）、黏土质页岩（Ⅱ）、含长英黏土质页岩（$Ⅱ_1$）、含灰/云黏土质页岩（$Ⅱ_2$）、灰/云质页岩（Ⅲ）、含长英灰/云质页岩（$Ⅲ_1$）、含黏土灰/云质页岩（$Ⅲ_2$）、混合质页岩（Ⅳ）10 种类型[23]（图 2d）。

2.3　有机质丰度

在矿物体积分数的基础上，大部分学者考虑到有机质的丰度及赋存状态，加入了 TOC（总有机碳）质量分数参数。w(TOC) 是决定烃源岩质量的重要指标，而烃源岩质量与规模决定了烃源岩的生烃能力及源内烃滞留的数量[34-36]，相关评价对于明确页岩油资源潜力、可流动性及富集区和富集段评价都具有重要意义[1]。

常规油气勘探基本上把 w(TOC)＞1.0%定为优质烃源岩的下限[37-39]。非常规油气多分布在源灶区内，缺少油气大规模运移和富集过程，所以对烃源岩质量和规模的要求与常规油藏相比有较大不同。源内油气藏以页岩油气为主，是油气在源内的滞留，缺少大规模运移和富集过程，对烃源岩质量和规模要求更高。中高成熟度页岩油 w(TOC)门限值为 2%，最佳区间为 3%～5%，中低成熟度页岩 w(TOC)门限值为 6%，且越高越好[1]。通过模拟实验与理论计算发现，在生烃增压作用下，烃源岩排



a. 海相页岩典型划分方案,以50%为界;b. 粉砂、黏土矿物和碳酸盐矿物三端元划分方案,以50%为界;c. 长英质矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物三端元划分方案,以50%为界;d. 长英质矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物三端元划分方案,以25%、50%、75%为界;Ⅰ. 长英质页岩,$Ⅰ_1$. 含黏土长英质页岩,$Ⅰ_2$. 含灰/云长英质页岩,Ⅱ. 黏土质页岩,$Ⅱ_1$. 含长英黏土质页岩,$Ⅱ_2$. 含灰/云黏土质页岩,Ⅲ. 灰/云质页岩,$Ⅲ_1$. 含长英灰/云质页岩,$Ⅲ_2$. 含黏土灰/云质页岩,Ⅳ. 混合质页岩。

图2 细粒沉积岩矿物划分岩相

Fig.2 Mineral classification of fine-grained sedimentary rocks and lithofacies

出烃占总生烃量的比例与有机质丰度呈正相关[40],高w(TOC)值烃源岩尽管滞留烃占比相对较低,但由于总生烃量大,因此其滞留烃数量远远高于低w(TOC)值烃源岩[1]。

根据不同的w(TOC)值将页岩有机质丰度分为若干等级,常用的等级刻度有0.5%、1.0%、2.0%、4.0%和8.0%等,不同盆地之间w(TOC)差别较大,采用的分类标准不一致。如渤海湾盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地泥页岩w(TOC)值较高,通常以2%和4%为界,将细粒沉积岩划分为富有机质、中有机质和贫有机质3种[19,41-42],少部分学者采用了二分方案,以2%或3%为界将有机质丰度分为高和低2个等级[21,42]。松辽盆地和鄂尔多斯盆地泥页岩有机质质量分数较低,大多分布在0.5%~8.0%范围内[14-15],通常以1%和2%为界,将细粒沉积岩划分出高、中、低3种类型[16,43-44],也有少量学者采用2%和4%的界限分成高、中、低3个等级或者以2%为界进行二分[15,17]。

2.4 沉积构造

有些学者在岩相划分方案中加入了沉积构造参数。沉积构造是研究细粒沉积岩的沉积环境及成因机制的关键参数,也是影响页岩油开发工程部署的重要指标。通常认为,沉积构造具有块状、纹层状和层状3种典型类型[40,45-46]。其中:块状构造在垂向上没有颜色、粒度、矿物成分的明显变化,岩石整体表现为均质;层状构造单层厚度大于1 cm;纹层状

构造单纹层厚度小于 1 cm。有的学者进一步根据纹层的连续性(连续或者不连续)、形态(平直、波状或者曲线状)和几何关系(平行或者不平行),将沉积构造进行了更详细的划分[30](图 3)。也有少量学者采用其他的沉积构造型式,如薄层页状、透镜状等[15,20]。

2.5　测井响应参数

不同岩相类型具有不同的测井响应特征,部分学者在研究岩相划分时采用了测井响应参数。如李国欣等[47]在研究鄂尔多斯细粒沉积岩岩相时,在将页岩划分为硅质页岩、黏土质页岩和凝灰质页岩这 3 类页岩的基础上,考虑自然伽马参数,进一步将页岩细分为 6 类页岩岩相:特高自然伽马硅质页岩、高自然伽马硅质页岩、高自然伽马黏土质页岩、高自然伽马凝灰质页岩、中等自然伽马硅质页岩和中等自然伽马黏土质页岩。除此之外,付金华等[48-49]在岩相的划分中也考虑了测井响应特征。

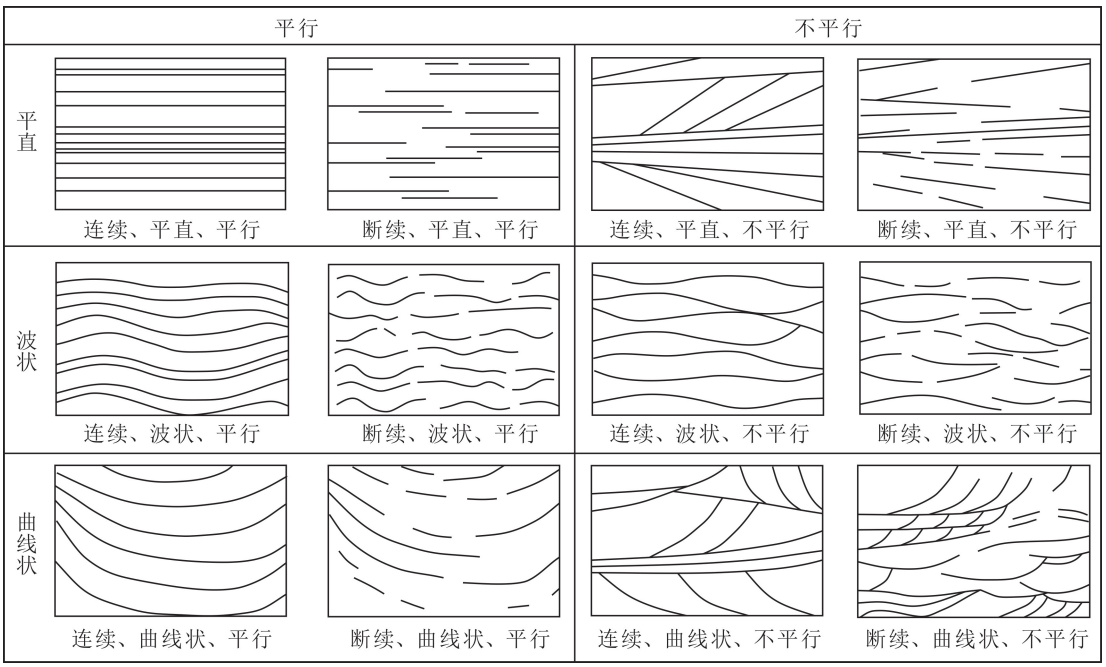
目前在细粒沉积岩岩相的研究过程中,基本上应用了以上 5 个参数,只不过根据地区差异性,不同学者选择了其中 2 个或 3 个参数来进行岩相定名,且所选参数的名称或划分界限存在差异。

3　岩相划分方案及岩相特征

3.1　本文岩相划分方案

岩性是区分岩石类型的基本参数,决定了岩石的物理、化学性质;矿物成分与 w(TOC)在页岩油评价中起到至关重要的作用,是富页岩油层系岩相划分必不可少的参数,决定了岩石的源、储及工程品质特征;而沉积构造在研究细粒沉积岩成因和页岩油开发中也起到重要的作用。因此,本文采用"岩性-矿物成分-TOC -沉积构造"四参数来进行岩相划分。

针对松辽盆地青山口组沉积特征,考虑到岩相划分方案的简便性、适用性和可操作性,岩性采用传统的三端元分类法,以粉砂岩、泥岩、碳酸盐岩为 3 个端元,以优势相为界,将岩性划分粉砂岩、泥页岩、灰(云)岩 3 种类型(图 4a)。矿物成分以长英质矿物、黏土矿物、碳酸盐矿物为 3 个端元,以优势相为界,将矿物成分划分为长英质、黏土质、灰(云)质 3 种类型(图 4b)。w(TOC) 采用 1%和 2%两个界限,将 w(TOC)划分为低、中和高 3 种级别(图 4c)。沉积构造首先分成层状与纹层状 2 种类型,其中,层状构造单层厚度>1 cm,纹层状构造单纹层厚度<



据文献[30]。

图 3　细粒沉积岩沉积构造类型

Fig.3　Classification of lamination types of fine grain sedimentary rocks

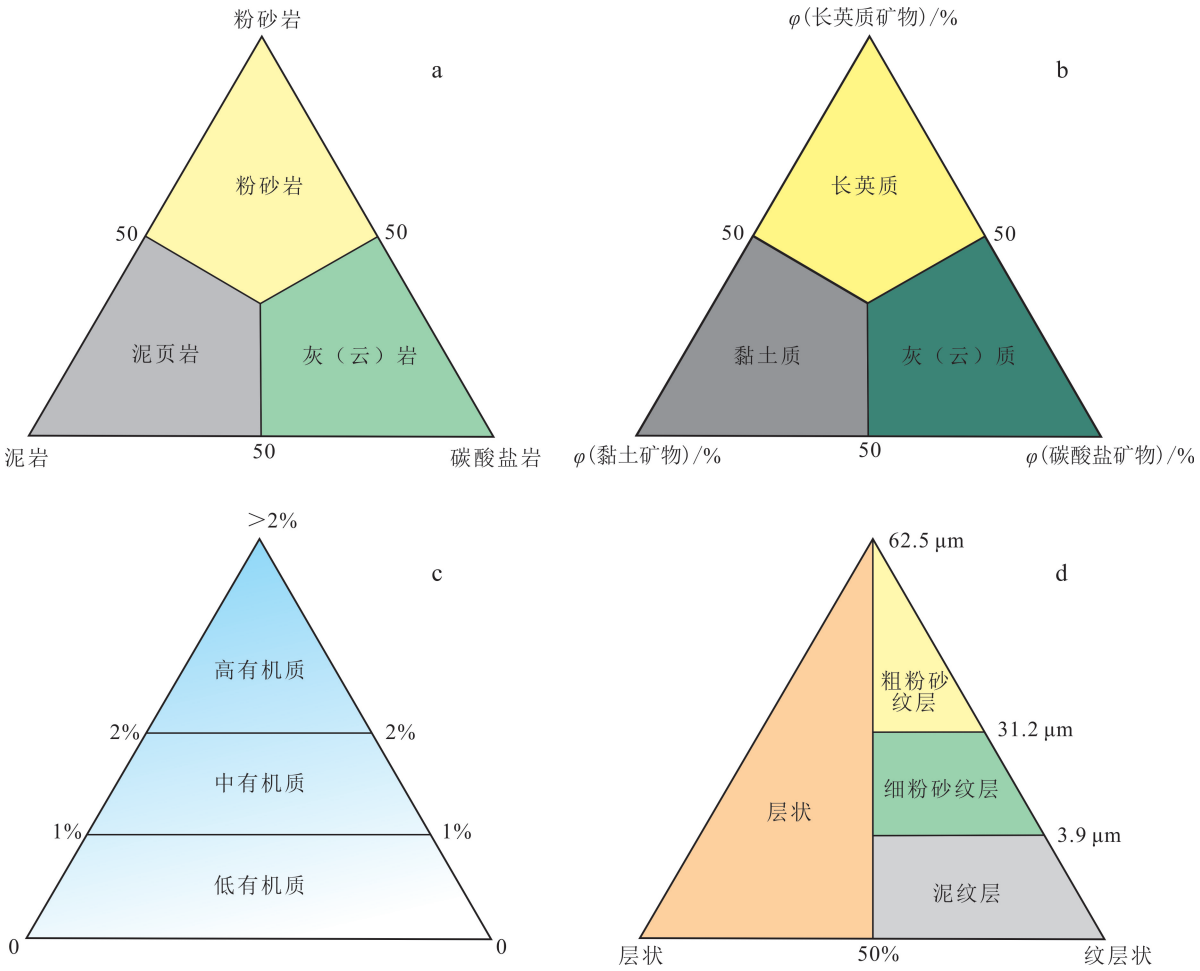
1 cm。进一步根据粒度将纹层分成泥纹层、细粉砂纹层和粗粉砂纹层。泥纹层是指粒径<3.9 μm的颗粒体积分数>50%,细粉砂纹层是指粒径介于3.9～31.2 μm之间的颗粒体积分数>50%,粗粉砂纹层是指粒径介于31.2～62.5 μm之间的颗粒体积分数>50%(图4d)。

在此划分方案的基础上,将松辽盆地青山口组细粒沉积物划分为6种岩相类型:高有机质泥纹层黏土质页岩(A)、中高有机质含细粉砂纹层长英质页岩(B)、中低有机质含粗粉砂纹层长英质页岩(C)、低有机质层状粉砂岩(D)、低有机质层状介形虫灰岩(E)和低有机质层状白云岩(F)(表1)。

3.2 岩相类型及特征

A 高有机质泥纹层黏土质页岩 颜色灰黑色、黑色,主要为泥质纹层,几乎不含粉砂质纹层,纹层平直且连续,纹层厚度<1 mm,发育连续水平层理(图5a)。镜下薄片观察纹层数量多,主要为贫富有机质泥质纹层。受到凹陷中心青山口组烃源岩高热演化程度影响,富有机质泥质纹层由于有机质发生排烃作用导致颜色差别不明显(图5b)。黏土矿物体积分数相对最高,有机碳质量分数整体≥2%,主要沉积于深湖环境。

B 中高有机质含细粉砂纹层长英质页岩 颜色主要为灰黑-深灰色,以泥质纹层为主,含一定量细粉砂纹层(10%～50%),纹层呈平直、透镜状,连续-断续状分布,纹层厚度多<1 mm(图5c),发育断续-连续水平层理、透镜状层理。镜下纹层非常发育,泥质纹层与细粉砂质纹层界限清晰、近于平直(图5d),长英质矿物体积分数较高,有机碳质量分数整体≥1%,主要形成于半深湖环境。



a. 泥岩、粉砂岩与碳酸盐岩三端元岩性参数划分方案;b. 长英质、黏土与碳酸盐矿物三端元矿物参数划分方案;c. 有机质丰度w(TOC)参数划分方案;d. 层状与纹层状沉积构造参数划分方案。

图4 松辽盆地细粒沉积岩岩相划分方案

Fig.4 Classification scheme for fine grain sedimentary lithofacies in Songliao basin

表 1　松辽盆地青山口组细粒沉积岩岩相划分类型

Table 1　Classification types of fine-grained sedimentary rocks in Qingshankou Formation of Songliao basin

岩相	岩性	矿物成分	w(TOC)/%	沉积构造	
高有机质泥纹层黏土质页岩(A)	页岩	黏土矿物体积分数较高	≥2	纹层状	粉砂纹层体积分数<5%
中高有机质含细粉砂纹层长英质页岩(B)		长英质矿物体积分数较高	≥1		细粉砂纹层体积分数 5%～50%
中低有机质含粗粉砂纹层长英质页岩(C)			<2		粗粉砂纹层体积分数 5%～50%
低有机质层状粉砂岩(D)	粉砂岩		<1	层状	
低有机质层状介形虫灰岩(E)	灰岩	碳酸盐矿物体积分数较高			
低有机质层状白云岩(F)	白云岩				

C 中低有机质含粗粉砂纹层长英质页岩　在青山口组一段和二段均有发育，颜色主要为灰—深灰色，以泥质纹层为主，含一定量粗粉砂纹层(10%～50%)，纹层呈波状、透镜状，连续-断续状分布，纹层厚度多>1 mm，发育正递变层理、砂球构造和泄水构造等(图 5e)。镜下纹层较发育，泥质纹层与细粉砂质纹层界限清晰且凹凸不平，粗粉砂纹层厚度较大，底部可见明显冲刷面(图 5f)。长英质矿物体积分数较高，页岩有机碳质量分数整体<2%，主要形成于前三角洲环境。

D 低有机质层状粉砂岩　主要以薄层形式夹于暗色页岩中，单层厚度多<20 cm，累计厚度占比较小。颜色主要为灰、灰白色，发育正递变层理、波纹层理、砂球构造和泄水构造等，底部可见明显的冲刷面和重荷模构造(图 6a)。镜下观察矿物成分主要为长英质矿物，分选较差，次棱角状，钙质胶结(图 6b)。长英质矿物体积分数较高，有机碳质量分数整体<1%，主要形成于前三角洲沉积环境。

E 低有机质层状介形虫灰岩　主要以薄层形式夹于暗色页岩中，单层厚度多<20 cm，累计厚度占比较小。颜色主要为灰色、深灰色，主要发育块状层理，底部可见明显的冲刷面和重荷模构造(图 6c)，滴酸剧烈起泡。镜下观察成分以介形虫为主，介形虫呈较完整或碎屑形态，介形虫颗粒间被泥质填隙物充填(图 6d)。碳酸盐矿物体积分数较高，有机碳质量分数整体<1%，主要形成于前三角洲环境。

F 低有机质层状白云岩　主要以薄层形式夹于暗色页岩中，单层厚度多<20 cm，累计厚度占比较小。颜色为灰白色、灰色，顶底与页岩为突变接触(图 6e)，滴酸缓慢起泡。镜下观察成分以泥晶白云石为主(图 6f)。碳酸盐矿物体积分数较高，有机碳质量分数整体<1%，主要形成于半深湖环境。

4　岩相成因与沉积模式

很多人认为细粒物质的沉积和固结是个简单的过程，然而，通过实验研究发现这是个十分复杂的问题，其结果取决于许多变量[50]。目前，对岩相的成因机制研究处于起步阶段，主要从水动力条件和有机质富集两方面进行研究。

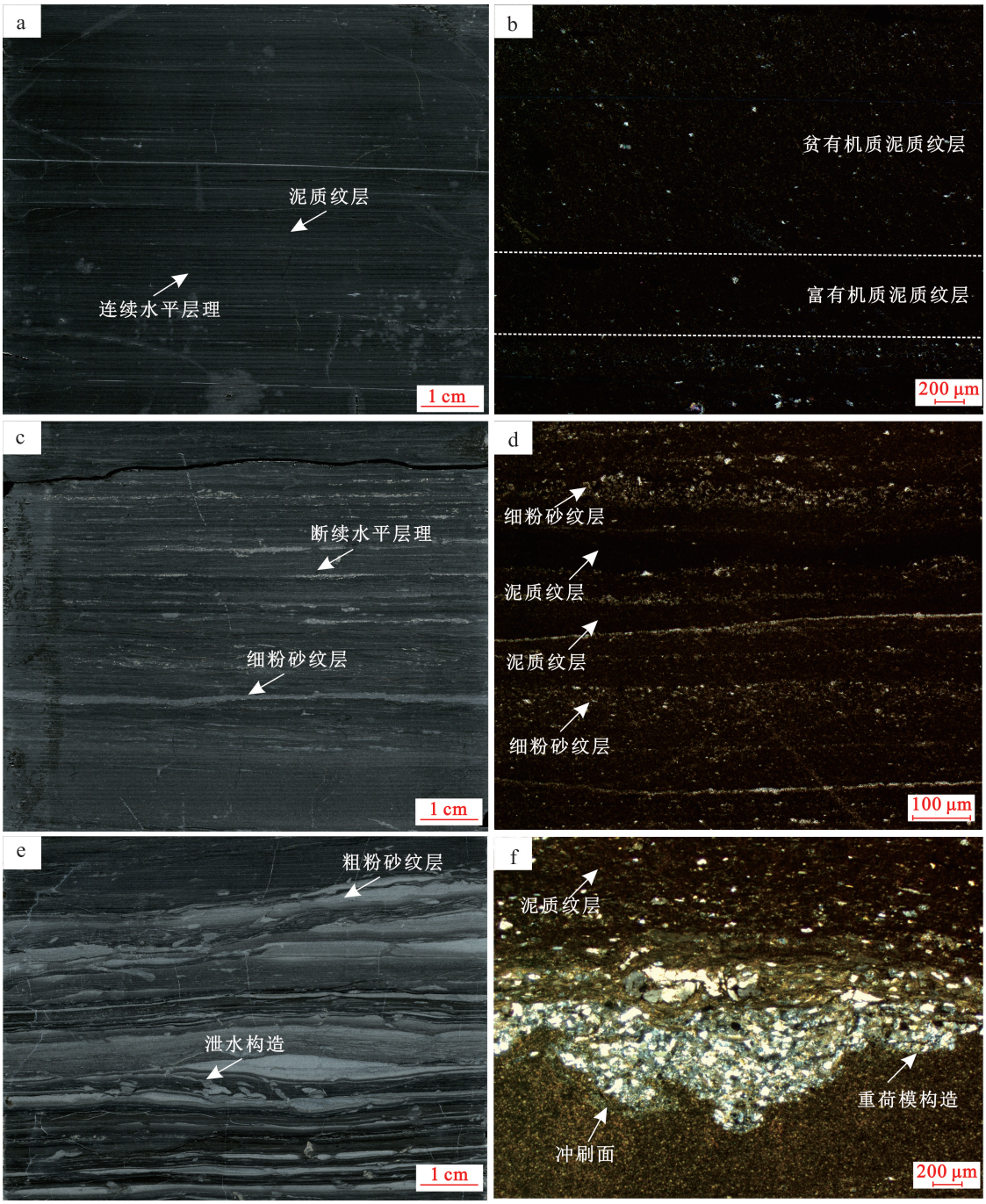
4.1　水动力学条件

细粒沉积物水动力学，目前主要从水槽实验模拟正演和粒度分析反演两方面开展研究。本次主要通过粒度分析开展页岩、粉砂岩的水动力条件研究，主要探讨泥级黏土质纹层、细粉砂长英质纹层、粗粉砂长英质纹层和层状粉砂岩的水动力成因机制。

泥级黏土质纹层是细粒沉积岩中最常见的部分，与满足斯托克定律的非黏性颗粒不同，单黏土颗粒在流体中长时间处于悬浮状态不易发生沉积，需要依靠絮凝作用发生沉降[51]。当黏土以絮凝体形式发生沉积时，主要存在 2 种方式：其一为悬浮沉降模式，此类黏土沉积不经过后期搬运、改造，只与自身粒径、形态及水动力强度有关[52]。该过程主要发生在湖泊中心静水区，与有机质共同沉积，形成贫富有机质差异的黏土质页岩，且主要形成贫富有机质黏土质纹层层耦(图 5b)。其二为“平流运输”模式，黏土物质可以形成絮状波纹向下游移动，内部存在低角度倾斜纹层，但沉积后被完全压实，波纹内部倾斜薄层不可识别，最终形成平行的黏土质纹层[53-54]。

粉砂级长英质沉积物为典型的非黏性颗粒，沉

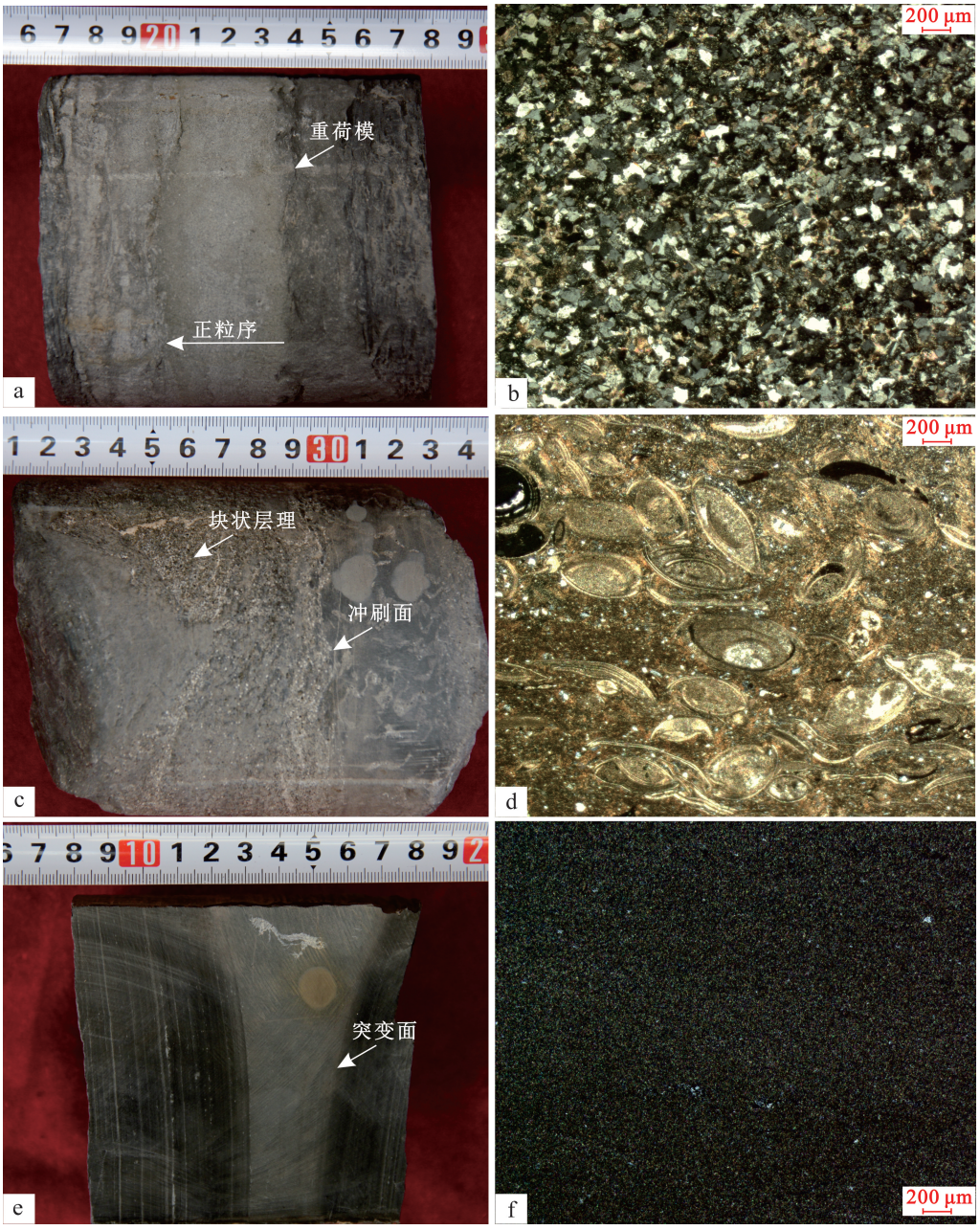
积过程满足斯托克定律,当粉砂级碎屑由陆源河流搬运进入湖盆时,受到重力、浮力、底床剪切引起的拖曳力和上举力的共同作用,当水动力减弱,颗粒运动速度降低,长英质沉积物在近岸处发生机械分异并沉降形成粉砂岩等。而现代沉积观测及古代沉积地层证实近岸沉积的粉砂级的长英质沉积物可以受



a. SN-1井,2 361.4 m,高有机质泥纹层黏土质页岩岩心特征;b. SN-1井,2 361.4 m,高有机质泥纹层黏土质页岩薄片特征;c. SN-2井,2 056.1 m,中高有机质含细粉砂纹层长英质页岩岩心特征;d. SN-2井,2 056.1 m,中高有机质含细粉砂纹层长英质页岩薄片特征;e. SN-2井,2 067.4 m,中低有机质含粗粉砂纹层长英质页岩岩心特征;f. SN-2井,2 067.4 m,中低有机质含粗粉砂纹层长英质页岩薄片特征。

图5 松辽盆地青山口组页岩岩相类型

Fig.5 Shale facies types and characteristics of Qingshankou Formation in Songliao basin



a. SB－1 井，2 199.1 m，低有机质层状粉砂岩岩心特征，发育正递变层理与重荷模构造；b. SB－1 井，2 199.1 m，低有机质层状粉砂岩薄片特征，分选较差；c. SB－1 井，2 224.8 m，低有机质层状介形虫灰岩岩心特征，发育块状层理，底部发育冲刷面；d. SB－1 井，2 224.8 m，低有机质层状介形虫灰岩薄片特征，介形虫颗粒保存完整；e. SB－2 井，2 334.6 m，低有机质层状白云岩岩心特征，顶底突变接触；f. SB－2 井，2 334.6 m，低有机质层状白云岩薄片特征，主要为泥晶颗粒。

图 6　松辽盆地青山口组粉砂岩、介形虫灰岩与白云岩岩相类型

Fig.6　Lithofacies characteristics of siltstone, Ostracoda limestone, and dolomite in Qingshankou Formation of Songliao basin

到后续风暴流、底流等作用，发生剥蚀呈再悬浮状态，并发生长距离运输，沉降形成层状、纹层状粉砂质沉积物，能够使沉积物发生长距离运输的流体包括洪水成因异轻流、异重流、浊流的长距离搬运和风力驱动环流等。粒度分析表明，泥质纹层、细粉砂纹层、粗粉砂纹层及层状粉砂岩形成的水动力条件具有差异。

泥质纹层中泥级颗粒约占 90%，少量粉砂级颗粒（图 7a，b）。直方图显示，粉砂级颗粒粒度主要集中在 6～7 φ 之间，即粒径为 7.82～15.63 μm（图

7b)。概率累计曲线表明,除泥质颗粒外,少量的粉砂级颗粒也主要以悬浮为主(图7c)。

细粉砂纹层中泥级颗粒约占30%,细粉砂颗粒约70%(图7d,e)。直方图显示,细粉砂纹层粒度主要集中在5~6 φ之间,即粒径为15.63~31.25 μm,约占65%,少量颗粒介于31.25~62.50 μm和3.90~15.63 μm之间(图7e)。概率累计曲线表明,细粉砂颗粒主要以悬浮为主,其中递变悬浮与均匀悬浮约各占50%,细截点约在5.5 φ(图7f)。

粗粉砂纹层中泥级颗粒约占20%,粉砂级颗粒约占80%(图7g,h)。直方图显示:粗粉砂纹层粒度主要集中在4~5 φ之间,即粒径为31.25~62.50 μm,约占60%;而粒度5~6 φ,即粒径为15.63~31.25 μm的颗粒约占20%,少量颗粒介于62.50~125.00和3.90~15.63 μm之间,说明其分选较差(图7h)。概率累计曲线表明,粗粉砂颗粒主要以递变悬浮为主,约占70%,其次为均匀悬浮,细截点约在4.5 φ(图7i)。

粉砂岩中泥级颗粒约占15%(图7j,k)。直方图显示:粉砂岩粒度主要集中在4~5 φ之间,即粒径为31.25~62.50 μm的颗粒约占50%;而粒度3~4 φ,即62.50~125.00 μm的颗粒约占30%,少量颗粒介于3.90~31.25 μm之间,说明其分选中等—较差(图7k)。概率累计曲线呈现三段式,跳跃组分约占30%,递变悬浮约占50%,均匀悬浮约占20%,跳跃组分与悬浮组分细截点约在4φ(图7l)。

从泥质纹层、细粉砂纹层、粗粉砂纹层到粉砂岩,粒度逐渐变粗,泥级颗粒体积分数逐渐减少,均匀悬浮组分逐渐减少,递变悬浮组分逐渐变多,甚至出现跳跃组分,反映水动力条件逐渐变强。

4.2 有机质富集

除黏土和长英质碎屑颗粒以外,有机质也是细粒沉积岩的重要组成部分,有机质的富集条件也可以直接反映细粒沉积物的成因。

细粒沉积岩有机质的富集和保存主要受构造、气候变化、沉积环境、古湖泊生产力、古水体盐度和氧化还原程度等因素的影响。古气候通过降雨量改变古湖盆的可容纳空间,影响古湖泊中生物的发育、物源供给和水体性质,是控制细粒沉积有机质富集变化的重要因素[55-56];古生产力受气候环境、地区光照率、湖盆地貌、营养盐供给、水介质条件、藻类季节性勃发和自养型细菌等的影响;有机质分解与保存条件受水体分层、细菌生物、无机矿物、水介质条件、黏土矿物和沉积速率等的综合影响。青山口组一段沉积时期松辽盆地处于快速沉降阶段[57],为盆地可容纳空间的增大提供了可能性,湖盆水体明显加深,最大水深达100 m,为低能静水半深湖—深湖沉积环境,沉积速率较低[58],为细粒沉积形成提供了场所。Rb/Sr、Mg/Sr值等古气温替代指标指示该时期主要为温暖湿润的气候条件[59],局部存在干湿交替变化,其中,富有机质细粒沉积对应偏温暖气候阶段,而贫有机质细粒沉积对应半湿润半干旱气候,表明温暖湿润的气候条件有利于富有机质细粒沉积的发育。青一段细粒沉积有机质主要来源于层状藻、结构藻等水生低等生物,为高湖泊生产力引起的"藻类勃发"的产物,有机质与藻类质量分数呈现较好的正相关性,陆源有机质输入较少,局部含薄层火山凝灰岩、白云岩和介屑灰岩。较高的Sr/Ba值、伽马蜡烷指数和V/Ni值指示青一段细粒沉积形成时期沉积水体为淡水—半咸水缺氧环境,较高的盐度和强还原环境有利于有机质的保存(图8)。

4.3 细粒沉积岩沉积模式

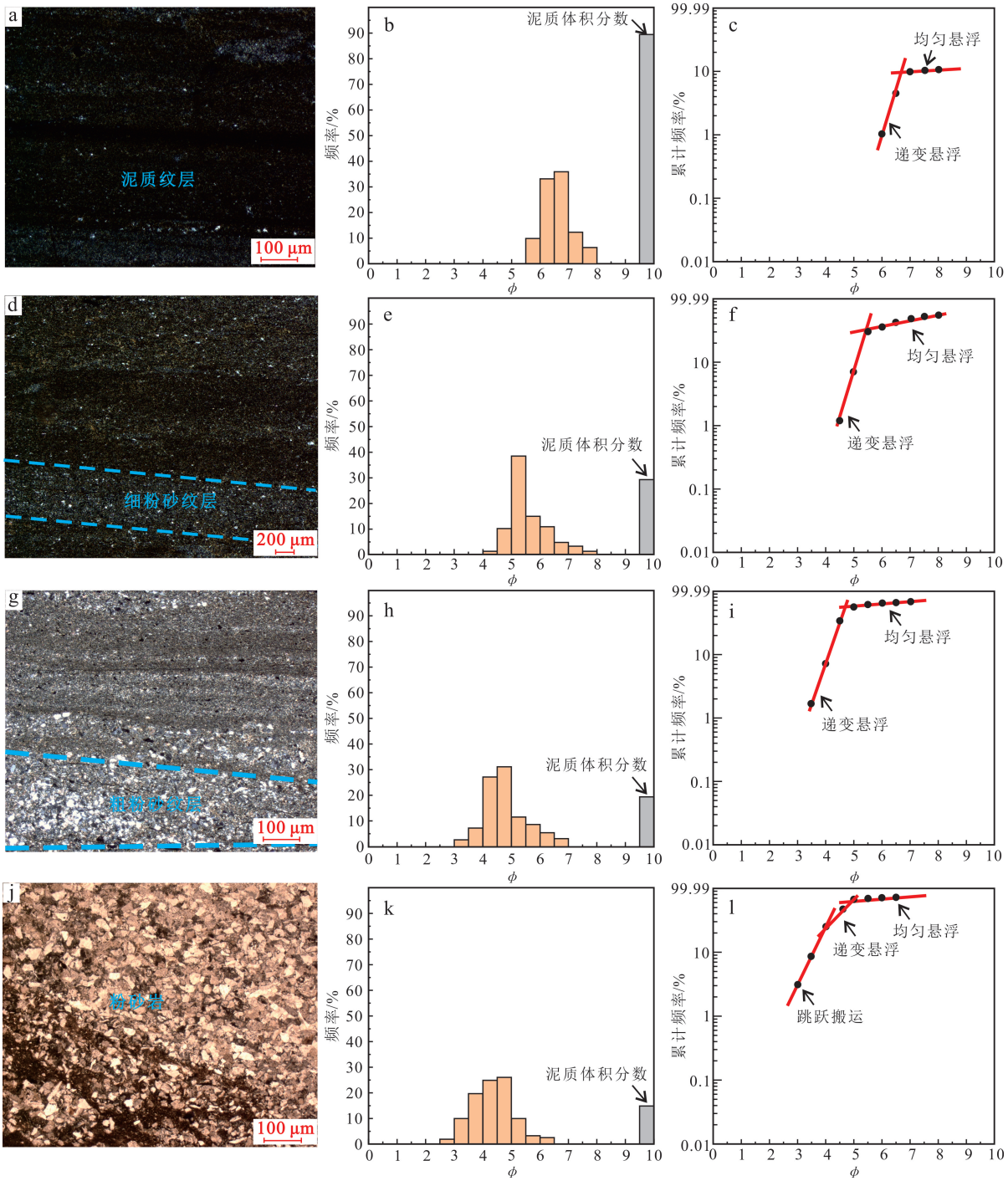
通过纹层形成的水动力条件、有机质富集机制及沉积环境分析,对松辽盆地青山口组6种细粒沉积岩岩相的成因进行分析,建立沉积模式。

高有机质泥纹层黏土质页岩(A岩相)主要形成在风暴浪基面之下、深湖静水环境、咸水、良好保存条件和高湖泊生产力背景中。浮游藻类体与黏土絮状物悬浮搬运与沉降,形成贫富有机质黏土纹层,少量细粉砂级长英质颗粒分散悬浮沉降于其中(图9)。

中高有机质含细粉砂纹层长英质页岩(B岩相)主要形成在正常浪基面与风暴浪基面之间、半深湖较静水环境、半咸水、良好的保存条件和高的湖泊生产力背景中。风暴流、底流将早期沉积物的长英质碎屑颗粒再次搬运至深水区,经递变和均匀悬浮搬运形成长英质纹层,间歇期悬浮沉降泥级黏土质纹层,形成B岩相(图9)。

中低有机质含粗粉砂纹层长英质页岩(C岩相)主要形成在正常浪基面与风暴浪基面之间、前三角洲、水体局部动荡、半咸水、相对差的保存条件和低的湖泊生产力背景中。在洪水的作用下,粉砂级颗粒以稳定性浊流的形式进入前三角洲,随流速逐渐降低,分异形成粗粉砂纹层与细粉砂纹层,间歇期悬浮沉降泥级黏土质纹层,形成C岩相(图9)。

低有机质层状粉砂岩(D岩相)与低有机质层状



a. 泥质纹层镜下特征；b. 泥质纹层粒度分析频率直方图特征；c. 泥质纹层粒度分析概率累计曲线图特征；d. 细粉砂纹层镜下特征；e. 细粉砂纹层粒度分析频率直方图特征；f. 细粉砂纹层粒度分析概率累计曲线图特征；g. 粗粉砂纹层镜下特征；h. 粗粉砂纹层粒度分析频率直方图特征；i. 粗粉砂纹层粒度分析概率累计曲线图特征；j. 粉砂岩镜下特征；k. 粉砂岩粒度分析频率直方图特征；l. 粉砂岩粒度分析概率累计曲线图特征。

图 7　松辽盆地青山口组页岩纹层与粉砂岩水动力条件分析

Fig.7　Analysis of hydrodynamic conditions of shale laminae and siltstone of Qingshankou Formation in Songliao basin

介形虫灰岩(E 岩相)主要形成在正常浪基面与风暴浪基面之间、前三角洲、水体局部动荡、半咸水、相对差的保存条件和低的湖泊生产力背景中。三角洲前缘沉积物在一定触发机制的作用下，再次滑塌以阵发性浊流的形式进入前三角洲，形成 D 或者 E 岩相(图 9)。

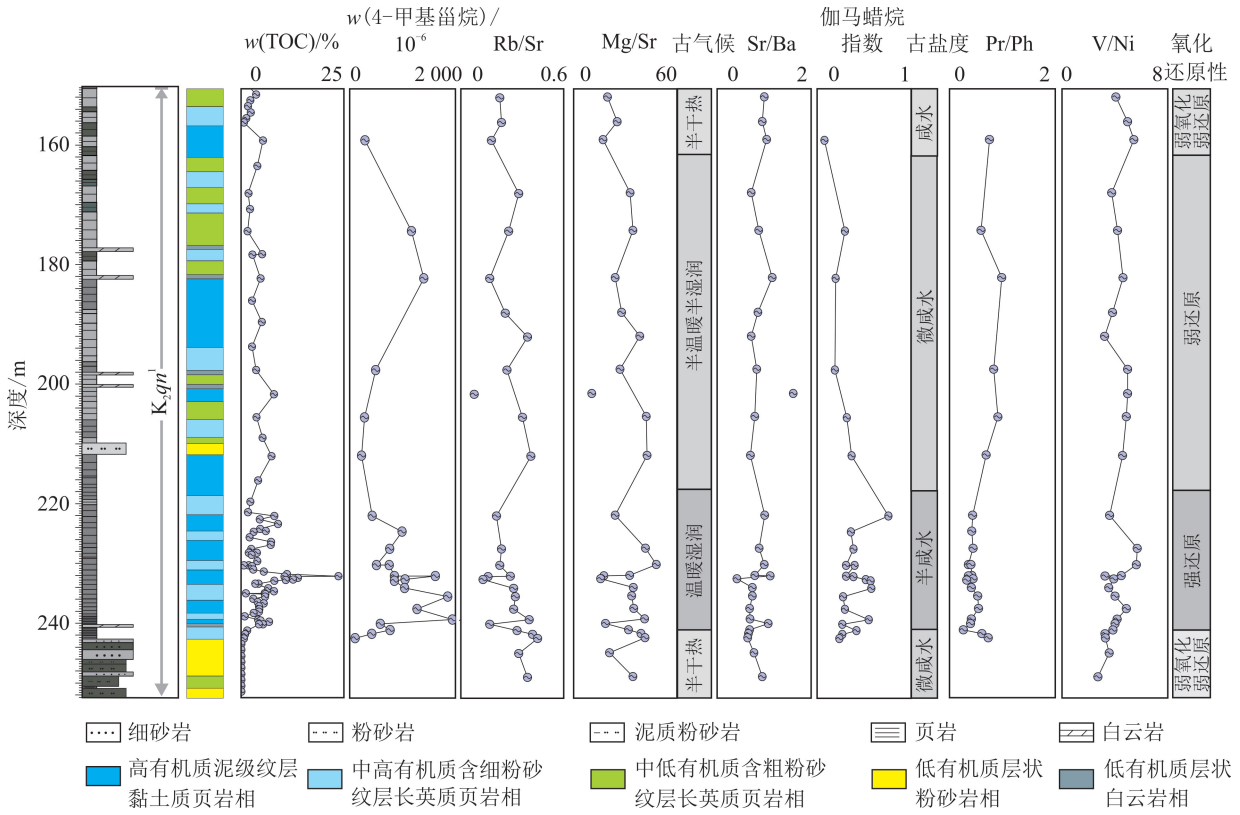


图 8 松辽盆地 SN－3 井有机质富集影响因素

Fig.8 Factors influencing organic matter enrichment in SN－3 Well in Songliao basin

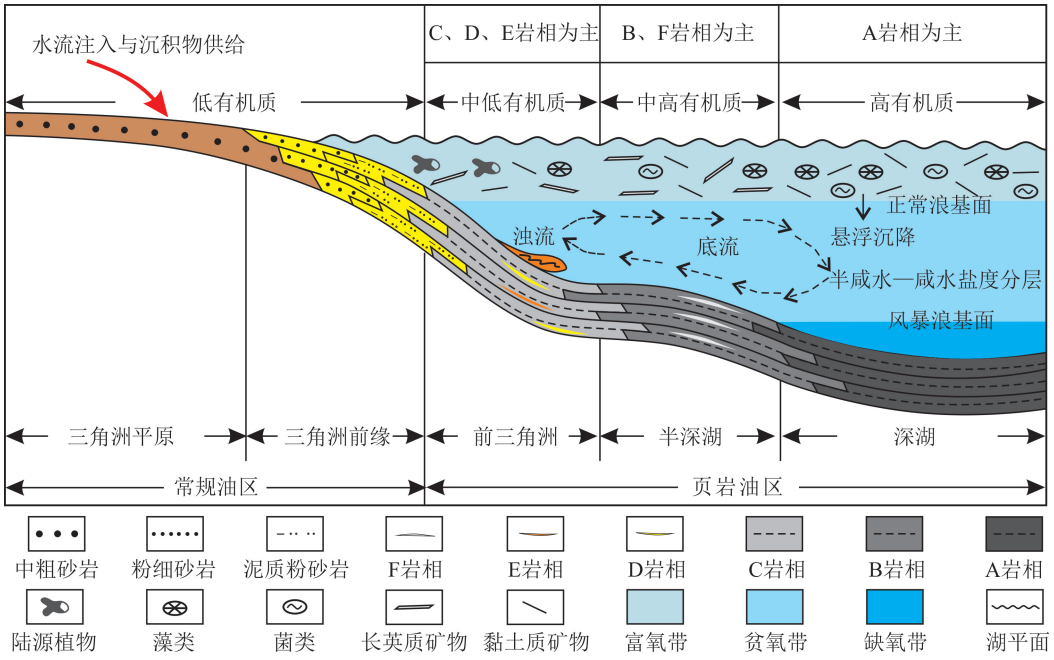


图 9 松辽盆地页岩岩相沉积与成因模式图

Fig.9 Shale facies deposition and genetic model in Songliao basin

低有机质层状白云岩(F 岩相)主要形成在正常浪基面与风暴浪基面之间、半深湖较静水环境、半咸水、良好的保存条件和高的湖泊生产力背景中。在相对干燥的气候条件下的咸水环境中，形成 F 岩相，常与 B 岩相伴生(图 9)。

5　结论

1)通过岩性、矿物成分、有机质丰度与沉积构造 4 个参数，将松辽盆地青山口组划分为 6 种岩相：高有机质泥纹层黏土质页岩(A)、中高有机质含细粉砂纹层长英质页岩(B)、中低有机质含粗粉砂纹层长英质页岩(C)、低有机质层状粉砂岩(D)、低有机质层状介形虫灰岩(E)和低有机质层状白云岩(F)。

2)A 岩相为灰黑色、黑色，主要发育贫富有机质泥质纹层，纹层平直且连续，厚度＜1 mm，黏土矿物体积分数相对较高，w(TOC)≥2%；B 岩相为灰黑-深灰色，含一定量细粉砂纹层(10%～50%)，纹层呈平直、透镜状，连续-断续状分布，厚度多＜1 mm，长英质矿物体积分数相对较高，w(TOC)≥1%；C 岩相为灰—深灰色，含一定量粗粉砂纹层(10%～50%)，纹层呈波状、透镜状，连续-断续状分布，厚度多＞1 mm，长英质矿物体积分数相对较高，w(TOC)＜2%；D 岩相为灰、灰白色，单层厚度多＜20 cm，长英质矿物体积分数较高，w(TOC)＜1%；E 岩相为灰色、深灰色，单层厚度多＜20 cm，碳酸盐矿物体积分数较高，w(TOC)＜1%；F 岩相为灰白色、灰色，单层厚度多＜20 cm，碳酸盐矿物体积分数较高，w(TOC)＜1%。

3)在高湖泊生产力的深湖、咸水环境，浮游藻类与黏土絮状物均匀悬浮沉降，形成贫富有机质黏土质纹层，沉积 A 岩相。在较高湖泊生产力的半深湖、半咸水环境，三角洲径流与洪流带来的细粉砂颗粒经均匀悬浮沉降形成长英质纹层，间歇期悬浮沉降黏土质纹层，形成 B 岩相。在较低湖泊生产力的前三角洲、半咸水环境，洪水携带粉砂级颗粒，以稳定性浊流的形式进入前三角洲，随流速逐渐降低，分异形成粗粉砂—细粉砂纹层，间歇期悬浮沉降泥级黏土质纹层，形成 C 岩相。在前三角洲区，三角洲前缘早期沉积物在阵发性浊流的作用下，再次滑塌，形成 D 和 E 岩相。在相对干燥的气候背景下的半深湖咸水环境中，形成 F 岩相。

参考文献(References)：

[1] 赵文智，张斌，王晓梅，等. 陆相源内与源外油气成藏的烃源灶差异[J]. 石油勘探与开发，2021，48(3)：464－475.
Zhao Wenzhi, Zhang Bin, Wang Xiaomei, et al. Differences in Source Kitchens for Lacustrine In-Source and Out-of-Source Hydrocarbon Accumulations [J]. Petroleum Exoloration and Development, 2021, 48(3): 464－475.

[2] 丹尼尔　耶金. 能源重塑世界[M]. 朱玉犇，阎志敏译. 北京：石油工业出版社，2012.
Daniel Yekin. Energy Reshapes the World [M]. Translate by Zhu Yuben, Yan Zhimin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.

[3] U S Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2019 with Projections to 2050 [R]. Washington: U S Energy Information Administration, 2019.

[4] 焦方正. 非常规油气之“非常规”再认识[J]. 石油勘探与开发，2019，46(5)：803－810.
Jiao Fangzheng. Re-Recognition of “Unconventional” in Unconventional Oil and Gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 803－810.

[5] 李鹭光，何海清，范土芝，等. 中国石油油气勘探进展与上游业务发展战略[J]. 中国石油勘探，2020，25(1)：1－10.
Li Luguang, He Haiqing, Fan Tuzhi, et al. Oil and Gas Exploration Progress and Upstream Development Strategy of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 1－10.

[6] 邹才能，潘松圻，荆振华，等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报，2020，41(1)：1－12.
Zou Caineng, Pan Songqi, Jing Zhenhua, et al. Shale Oil and Gas Revolution and Its Impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1－12.

[7] 赵文智，朱如凯，胡素云，等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J]. 石油勘探与开发，2020，47(6)：1079－1089.
Zhao Wenzhi, Zhu Rukai, Hu Suyun, et al. Accumulation Contribution Differences Between Lacustrine Organic-Rich Shales and Mudstones and Their Significance in Shale Oil Evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1079－1089.

[8] Stow D A V, Shanmugam G. Sequence of Structures in Fine-Grained Turbidites: Comparison of Recent Deep-Sea and Ancient Flysch Sediments [J]. Sedimentary Geology, 1980, 25(1/2): 23－42.

[9] Aplin A C, Macquaker J H S. Mudstone Diversity: Origin and Implications for Source, Seal, and Reservoir Properties in Petroleum Systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.

[10] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报,2013,34(6):1031-1039.
Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several Issues in Sedimentological Studies on Hydrocarbon-Bearing Fine-Grained Sedimentary Rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.

[11] 耳闯,罗安湘,赵靖舟,等. 鄂尔多斯盆地华池地区三叠系延长组长7段富有机质页岩岩相特征[J]. 地学前缘,2016,23(2):108-117.
Er Chuang, Luo Anxiang, Zhao Jingzhou, et al. Lithofacies Features of Organic-Rich Shale of the Triassic Yanchang Formation in Huachi Area[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 108-117.

[12] 高岗,刘显阳,王银会,等.鄂尔多斯盆地陇东地区长7段页岩油特征与资源潜力[J].地学前缘,2013,20(2):140-146.
Gao Gang, Liu Xianyang, Wang Yinhui, et al. Characteristics and Resource Potential of the Oil Shale of Chang 7 Layer in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 140-146.

[13] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报,2013, 34(1):1-11.
Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and Resource Potential of Tight Oil and Shale Oil in Ordos Basin[J]. Acta Petroleum Sinica, 2013, 34(1): 1-11.

[14] 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.

[15] 王岚,曾雯婷,夏晓敏,等. 松辽盆地齐家—古龙凹陷青山口组黑色页岩岩相类型与沉积环境[J]. 天然气地球科学,2019,30(8):1125-1133.
Wang Lan, Zeng Wenting, Xia Xiaomin, et al. Study on Lithofacies Types and Sedimentary Environment of Black Shale of Qingshankou Formation in Qijia-Gulong Depression, Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(8): 1125-1133.

[16] 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.

[17] 徐立富,邓纪梅,杜佳,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴地区海陆过渡相页岩岩相类型和储层差异[J].煤炭学报,2021,46(增刊2):862-876.
Xu Lifu, Deng Jimei, Du Jia, et al. Lithofacies Types and Reservoir Differences of Marine Continental Transitional Shale in Linxing Area, Eastern Margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Sup.2): 862-876.

[18] 王以城,张磊夫,邱振,等. 鄂尔多斯盆地东缘二叠系山$_2^3$亚段海陆过渡相页岩岩相类型与储层发育特征[J]. 天然气地球科学,2022,33(3):418-430.
Wang Yicheng, Zhang Leifu, Qiu Zhen, et al. Lithofacies Types and Reservoir Characteristics of Transitional Shales of the Permian Shan$_2^3$ Sub-Member, Eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(3): 418-430.

[19] 张顺,陈世悦,鄢继华,等. 东营凹陷西部沙三下亚段—沙四上亚段泥页岩岩相及储层特征[J]. 天然气地球科学,2015,26(2):320-332.
Zhang Shun, Chen Shiyue, Yan Jihua, et al. Characteristics of Shale Lithofacies and Reservoir Space in the 3rd and 4th Members of Shahejie Formation, the West of Dongying Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 320-332.

[20] 蒲秀刚,马超,郭彬程,等. 渤海湾盆地歧口凹陷歧北次凹沙三上亚段页岩岩相特征及含油性差异[J].东北石油大学学报,2023,47(2):55-69.
Pu Xiugang, Ma Chao, Guo Bincheng, et al. Shale Lithofacies Characteristics and Shale Oil Bearing Differences in the Es_3^s of Qibei Subsag, Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023, 47(2): 55-69.

[21] 刘惠民,于炳松,谢忠怀,等. 陆相湖盆富有机质页岩微相特征及对页岩油富集的指示意义:以渤海湾盆地济阳坳陷为例[J]. 石油学报,2018,39(12):1328-1343.
Liu Huimin, Yu Bingsong, Xie Zhonghuai, et al.

Characteristics and Implications of Micro-Lithofacies in Lacustrine-Basin Organic-Rich Shale: A Case Study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(12): 1328 - 1343.

[22] 王圣柱. 博格达山山前带芦草沟组不同岩相储集特征及含油性[J].新疆石油地质,2020,41(4):402 - 413.
Wang Shengzhu. Reservoir Characteristics and Oil-Bearing Properties of Different Lithofacies of Lucaogou Formation in the Piedmont Belt of Bogda Mountain[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(4):402 - 413.

[23] 李兆丰,唐相路,黄立良,等.准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩岩相发育特征[J].能源与环保,2021,43(4):108 - 114.
Li Zhaofeng, Tang Xianglu, Huang Liliang, et al. Lithofacies Development Characteristics of Fengcheng Formation Shale in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(4):108 - 114.

[24] 张益郴,王贵文,宋连腾,等.页岩岩相测井表征方法:以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例[J].地球物理学进展,2023,38(1):393 - 408.
Zhang Yilin, Wang Guiwen, Song Lianteng, et al. Logging Identification Method of Shale Lithofacies: A Study of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(1): 393 - 408.

[25] Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. Tectonostratigraphic Units and Stratigraphic Sequences of the Nonmarine Songliao Basin, Northeast China[J]. Basin Research, 2010, 22: 79 - 95.

[26] 吴靖,姜在兴,梁超.东营凹陷沙河街组四段上亚段细粒沉积岩岩相特征及与沉积环境的关系[J].石油学报,2017,38(10):1110 - 1122.
Wu Jing, Jiang Zaixing, Liang Chao. Lithofacies Characteristics of Fine-Grained Sedimentary Rocks in the Upper Sub-Member of Member 4 of Shahejie Formation, Dongying Sag and Their Relationship with Sedimentary Environment[J]. Acta Petroleum Sinica, 2017, 38(10): 1110 - 1122.

[27] 彭思钟,刘德勋,张磊夫,等. 鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县地区山西组页岩岩相与沉积相特征[J]. 沉积学报,2022,40(1):47 - 59.
Peng Sizhong, Liu Dexun, Zhang Leifu, et al. Shale Lithofacies and Sedimentary Facies of the Permian Shanxi Formation, Daning-Jixian Area, Eastern Margin of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(1): 47 - 59.

[28] 宁万兴,王学军,郝雪峰,等. 东营凹陷细粒沉积岩岩相组合特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2020,42(4): 55 - 65.
Ning Wanxing, Wang Xuejun, Hao Xuefeng, et al. Fine-Grained Sedimentary Rock Lithofacies Assemblage Characteristics in Dongying Depression[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(4): 55 - 65.

[29] 姜在兴,孔祥鑫,杨叶芃,等. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多源成因[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):26 - 37.
Jiang Zaixing, Kong Xiangxin, Yang Yepeng, et al. Multi-Source Genesis of Continental Carbonate-Rich Fine-Grained Sedimentary Rocks and Hydrocarbon Sweet Spots [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 26 - 37.

[30] Lazar O R, Bohacs K M, Macquaker J H S, et al. Capturing Key Attributes of Fine-Grained Sedimentary Rocks in Outcrops, Cores, and Thin Sections: Nomenclature and Description Guidelines [J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(3): 230 - 246.

[31] 李一凡,魏小洁,樊太亮. 海相泥页岩沉积过程研究进展[J]. 沉积学报,2021,39(1):73 - 87.
Li Yifan, Wei Xiaojie, Fan Tailiang. A Review on Sedimentary Processes of Marine Mudstones and Shales[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1):73 - 87.

[32] 单玄龙,邢健,苏思远,等.川南长宁地区下古生界五峰组—龙马溪组一段页岩岩相与含气性特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(5):1323 - 1337.
Shan Xuanlong, Xing Jian, Su Siyuan, et al. Shale Lithofacies and Gas-Bearing Characteristics of the Lower Paleozoic Wufeng Formation-Member 1 of Longmaxi Formation in Changning Area, Southern Sichuan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5):1323 - 1337.

[33] 李书琴,印森林,高阳,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混合细粒岩沉积微相[J]. 天然气地球科学,2020,31(2):235 - 249.
Li Shuqin, Yin Senlin, Gao Yang, et al. Study on Sedimentary Microfacies of Mixed Fine-Grained Rocks in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar

Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 235-249.

[34] 赵文智,王兆云,张水昌,等. 有机质"接力成气"模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1-7.
Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Zhang Shuichang, et al. Successive Generation of Natural Gas from Organic Materials and Its Significance in Future Exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 1-7.

[35] 赵文智,王兆云,王红军,等. 再论有机质"接力成气"的内涵与意义[J]. 石油勘探与开发,2011,38(2): 129-135.
Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Wang Hongjun, et al. Further Discussion on the Connotation and Significance of the Natural Gas Relaying Generation Model from Organic Material [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 129-135.

[36] Jarvie D M, Hill R J, Tim T E, et al. Unconventional Shale Gas Systems: The Mississippian Barnett Shale of North Central Texas as One Model for Thermogenic Shale Gas Assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.

[37] 黄第藩,李晋超,周翥虹,等. 陆相有机质演化与成烃机理[M]. 北京:石油工业出版社,1984.
Huang Difan, Li Jinchao, Zhou Zhuhong, et al. Evolution and Hydrocarbon Generation Mechanism of Nonmarine Organic Matters[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.

[38] Peters K E. Guideline of Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis [J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(3): 318-329.

[39] Katz B. Petroleum Source Rocks [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.

[40] Guo Xiaowen, He Sheng, Liu Keyu, et al. Quantitative Estimation of Overpressure Caused by Oil Generation in Petroliferous Basins[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42(11): 1343-1350.

[41] 陈世悦,张顺,王永诗,等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. 石油勘探与开发,2016,43(2):198-208.
Chen Shiyue, Zhang Shun, Wang Yongshi, et al. Lithofacies Types and Reservoirs of Paleogene Fine-Grained Sedimentary Rocks in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 198-208.

[42] 彭丽,陆永潮,彭鹏,等. 渤海湾盆地渤南洼陷沙三下亚段泥页岩非均质性特征及演化模式:以罗69井为例[J]. 石油与天然气地质,2017,38(2):219-229.
Peng Li, Lu Yongchao, Peng Peng, et al. Heterogeneity and Evolution Model of the Lower Shahejie Member 3 Mudshale in the Bonan Subsag, Bohai Bay Basin: An Example from Well Luo 69[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 219-229.

[43] 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.

[44] 金成志,董万百,白云风,等. 松辽盆地古龙页岩油岩相特征与成因[J]. 大庆石油地质与开发,2020,39(3):35-44.
Jin Chengzhi, Dong Wanbai, Bai Yunfeng, et al. Lithofacies Characteristics and Genesis Analysis of Gulong Shale in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 35-44.

[45] 刘姝君,操应长,梁超. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩特征及沉积环境[J]. 古地理学报,2019,21(3):479-489.
Liu Shujun, Cao Yingchang, Liang Chao. Lithologic Characteristics and Sedimentary Environment of Fine-Grained Sedimentary Rocks of the Paleogene in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(3): 479-489.

[46] 邓远,陈世悦,蒲秀刚,等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段细粒沉积岩形成机理与环境演化[J]. 石油与天然气地质,2020,41(4):811-823,890.
Deng Yuan, Chen Shiyue, Pu Xiugang, et al. Formation Mechanism and Environmental Evolution of Fine-Grained Sedimentary Rocks from the Second Member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 811-823, 890.

[47] 李国欣,刘国强,侯雨庭,等. 陆相页岩油有利岩相优选与压裂参数优化方法[J].石油学报,2021,42(11):1405-1416.

Li Guoxin, Liu Guoqiang, Hou Yuting, et al. Optimization Method of Favorable Lithofacies and Fracturing Parameter for Continental Shale Oil[J]. Acta Petrolel Sinica, 2021, 42(11):1405 - 1416.

[48] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油地质特征与勘探实践[J].石油勘探与开发, 2020, 47(5): 870 - 883.
Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, et al. Geological Characteristics and Exploration of Shale Oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 870 - 883.

[49] 赵贤正,周立宏,蒲秀刚,等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征:以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报,2019,40(9):1013 - 1029.
Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, et al. Favorable Formation Conditions and Enrichment Characteristics of Lacustrine Facies Shale Oil in Faulted Lake Basin: A Case Study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1013 - 1029.

[50] 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.

[51] Curran K J, Hill P S, Milligan T G. Fine-Grained Suspended Sediment Dynamics in the Eel River Flood Plume[J]. Continental Shelf Research, 2002, 22: 2537 - 2550.

[52] Kranck K, Smith P C, Milligan T G. Grain-Size Characteristics of Fine-Grained Unflocculated Sediments I: 'One-Round' Distributions [J]. Sedimentology, 1996, 43(3): 589 - 594.

[53] Schieber, Juergen, Southard, et al. Accretion of Mudstone Beds from Migrating Floccule Ripples[J]. Science, 2007, 318:1760 - 1763.

[54] Schieber J, Southard J B. Bedload Transport of Mud by Floccule Ripples-Direct Observation of Ripple Migration Processes and Their Implication [J]. Geology, 2009, 37(6):483 - 486.

[55] 刘招君,孟庆涛,贾建亮. 油页岩成矿作用研究中的关键方法和技术[J]. 古地理学报,2019,21(1):127 - 142.
Liu Zhaojun, Meng Qingtao, Jia Jianliang. Key Methods and Technologies in the Study of Oil Shale Mineralization[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(1): 127 - 142.

[56] Meng Q T, Bruch A A, Sun G, et al. Quantitative Reconstruction of Middle and Late Eocene Paleoclimate Based on Palynological Records from the Huadian Basin, Northeastern China: Evidence for Monsoonal Influence on Oil Shale Formation [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 510: 63 - 77.

[57] 钟其权,马力,石宝衡. 关于松辽盆地构造发育特征的探讨[J]. 石油勘探与开发,1978,5(2):1 - 10.
Zhong Qiquan, Ma Li, Shi Baoheng. Discussion on the Characteristics of Structural Development in the Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1978,5(2): 1 - 10.

[58] 徐进军.松辽盆地北部上白垩统油页岩有机质富集机制的高精度刻画[D].长春:吉林大学,2015.
Xu Jinjun. High Precision Characterization of Organic Matter Enrichment Mechanism of the Upper Cretaceous Oil Shale in Northern Songliao Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[59] 贾建亮.基于地球化学-地球物理的松辽盆地上白垩统油页岩识别与资源评价[D].长春:吉林大学,2012:85 - 110.
Jia Jianliang. Research on the Recognition and Resource Evaluation of the Upper Cretaceous Oil Shale Based on Geochemistry-Geophysics Technique in the Songliao Basin, China [D]. Changchun: Jilin University, 2012:85 - 110.