

“化学-沉积相”分析:一种研究细粒沉积岩的有效方法

刘可禹^{1,2}, 刘畅³

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 海洋国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083]

摘要: 细粒沉积岩作为致密油气和页岩油气重要的勘探对象, 具有粒度细、颜色均匀、非均质性强等特点, 传统的岩心观察方法难以适用于细粒沉积岩的精细研究。通过获取细粒沉积岩手标本(岩心尺度)高分辨率(30 μm)的二维原位无机地球化学元素分布信息, 结合图像分析, 建立岩心尺度精细的“化学-沉积相”模型。在模型中, 可以根据无机地球化学元素的平面分布清晰的识别细粒沉积岩的矿物成分和沉积构造。在此基础之上, 能够提取不同部位的原位地球化学信息, 针对细粒沉积岩沉积周期长厚度小的特点, 实现在毫米-厘米级尺度上表征古环境、沉积物来源和成因, 同时避免常规测试中粉碎均一化样品后所造成的信息干扰, 为致密油气与页岩油气的勘探开发提供更加精细的沉积相模型和可靠的数据来源。

关键词: 2D-XRF 扫描; 无机地球化学元素; 化学-沉积相; 细粒沉积岩; 沉积环境; 页岩油; 页岩气; 芦草沟组; 吉木萨尔凹陷
中图分类号: TE112 **文献标识码:** A

“Chemo-sedimentary facies” analysis: An effective method to study fine-grained sedimentary rocks

Liu Keyu^{1,2}, Liu Chang³

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China]

Abstract: Fine-grained sedimentary rocks, a key rock type bearing shale oil and gas, are characterized by fine grain size, colour uniformity and strong heterogeneity. Traditional sedimentological study based on visual observation and optical images alone becomes inadequate to precisely characterize such fine-grained rocks. Therefore, a “chemo-sedimentary facies” model for analyzing fine core-scale samples is established based on the high-resolution (down to 30 μm measurement intervals) 2D inorganic geochemical element mapping of rock slabs obtained by in-situ XRF scanning and optical images. Through the model, it is possible to unambiguously recognize the rock compositions and sedimentary fabrics. And then certain environment-sensitive elemental parameters (ratios) can be calculated in situ from individual chemo-sedimentary facies at millimeter-centimeter scales for the effective interpretation of depositional environment and provenance of fine-grained sediments, as well as their origin. Meanwhile, the method also avoids information interference in the conventional bulk compositional analyses whereby homogenized sample powders are often used. In conclusion, the method can help to establish more fine-scale sedimentary facies models and to provide reliable data for the exploration and development of tight and shale oil & gas.

Key words: 2D-XRF scanning, nonorganic geochemical element, chemo-sedimentary facies, fine-grained sedimentary rock, depositional environment, shale oil, shale gas, Lucaogou Formation, Jimusaer sag

随着国内外非常规油气勘探开发程度的不断深入^[1-5], 细粒沉积岩作为非常规油气中致密油(含页岩油)、致密气和页岩气的重要储层^[6-11], 逐渐成为了热门研究领域。细粒沉积岩分布范围广, 约占沉积岩的 2/

收稿日期: 2018-12-19; 修订日期: 2019-03-06。

第一作者简介: 刘可禹(1963—), 男, 博士、教授, 含油气系统分析。E-mail: liukeyu@upc.edu.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB239004); 国家科技重大专项(2017ZX05009-001); 国家基金委“油气成藏机理”创新群体项目(41821002)。

3^[11-12],虽然外貌均一简单,但却具有复杂的沉积成岩过程,粒度小和超微实验的限制进一步增加了观察研究难度^[13-14]。由于沉积速度较慢,使得细粒沉积岩在较长地质历史时期内沉积厚度较小,而细粒沉积岩受压实作用影响明显,特别是泥页岩,其孔隙度与埋深呈负指数关系。细粒沉积岩经压实后,孔隙度相对地表最大可减少近90%,相应厚度相对地表最大可减少60%左右^[15-16],这就使得细粒沉积岩在极小厚度范围内频繁变化,具有极强的非均质性,其中泥页岩的纹层厚度在10~500 μm。不同的纹层类型具有不同的地球化学特征和不同的成因^[17-19],使得地球化学特征成为表征细粒沉积岩非均质性的重要指标,同时无机地球化学元素含量及其比值被认为是恢复古气候、古盐度、古水深和古氧化还原条件等古环境演化状况的良好指标^[20-22]。

目前针对细粒沉积岩的实验分析手段主要可分为直接观察法、数值重构法、间接测定法和地化分析法^[23]。直接观察法包括薄片鉴定、扫描电镜技术等,数值重构法主要包括X-射线断层三维扫描(CT)技术和聚焦离子束成像技术(FIB)等,这些方法虽然分辨率高,但所分析的样品尺寸普遍较小,无法在整体上研究大尺度细粒沉积岩手标本样品的非均质性。间接测定法包括气体吸附法、压汞分析法和核磁共振技术,这些方法只能精细研究样品内部整体孔喉分布特征,无法研究样品在岩性等方面的非均质性特征。地化分析手段主要包括X-射线衍射(XRD)、传统X-射线荧光光谱分析(XRF)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)

等,可以研究细粒沉积岩的无机地球化学、矿物等组成特征,但在分析过程中需要将样品粉碎均一化^[24-26],仅能获得一维数据点,甚至会造成无用信息覆盖有效信息现象,无法精细研究细粒沉积岩的非均质性。鉴于此,本文通过建立精细的化学-沉积相模型,在此模型基础之上可以有效识别肉眼难以直接识别的沉积构造,并通过原位精细计算出表征细粒沉积岩古环境、物源类型(沉积物来源和成因)的无机地球化学参数,为致密油气的勘探开发提供更加精细的模型和可靠的数据来源。

1 细粒沉积岩特征

细粒沉积岩主要由细粒沉积物沉积成岩而成,细粒沉积物粒径小于62 μm^[13]。根据沉积物来源主要可分为陆源碎屑颗粒和内源自生矿物,其中陆源碎屑颗粒主要包括粘土矿物和粉砂等,粘土粒径小于4 μm,粉砂粒径介于4~62 μm,内源自生矿物主要包括盆地内碳酸盐、生物硅质、胶结成因硅、磷酸盐等颗粒^[27]。

细粒沉积岩岩石类型丰富,主要包括硅质碎屑岩和石灰岩及其过渡类型,其中硅质碎屑岩主要包括粉砂岩和粘土岩,石灰岩主要包括灰泥灰岩和部分粘结岩。目前众多学者针对不同地区的细粒沉积岩已经进行了详细科学的命名(表1),命名的主要依据基本上为长英质(粉砂)、粘土和碳酸盐三大组分的含量,分

表1 细粒沉积岩岩性划分方案
Table 1 Lithological classification of fine-grained sedimentary rocks

类型	研究学者
硅质泥岩,含粘土灰质泥岩(泥灰岩),骨架含粘土灰质泥粒灰岩	Loucks 和 Ruppel,2007 ^[28]
富粘土泥岩,含粉砂富粘土泥岩,含极细砂、粉砂富粘土泥岩,含极细砂、粉砂和粘土泥岩,细粒泥质砂岩,富碳酸盐胶结泥岩,含粉砂和粘土的富碳酸盐胶结泥岩,含细砂和粉砂的富碳酸盐胶结泥岩	Macquaker 等,2007 ^[29]
生物扰动粉砂质泥岩,粉砂质泥岩,薄层生物扰动泥岩,薄层粉砂质泥岩,薄层生物扰动粉砂质泥岩,薄层泥岩,波状纹层泥岩,薄层波状纹层泥岩	Trabucho-Alexandre 等,2012 ^[30]
硅质页岩,含钙硅质页岩,泥晶钙质页岩,钙质纹层页岩,介壳泥灰岩,波状层理页岩,白云质页岩,磷质页岩	王志峰等,2014 ^[31]
富有机质粘土质页岩,富有机质硅质页岩,富有机质碳酸盐质页岩,富有机质碳酸盐质-硅质页岩,富有机质硅质-碳酸盐质页岩,贫有机质粉砂岩,贫有机质硅质页岩,贫有机质碳酸盐质-硅质页岩,贫有机质硅质-碳酸盐质页岩,贫有机质碳酸盐质页岩,贫有机质灰岩,贫有机质粘土质页岩	蒋裕强等,2016 ^[32]
贫有机质块状粘土质细粒长英沉积岩,贫有机质纹层状硅质碎屑型混合细粒沉积岩,贫有机质块状长英质粘土岩,中有机质纹层状硅质碎屑型混合细粒沉积岩,中有机质纹层状长英质粘土岩,富有机质纹层状碳酸盐型混合细粒沉积岩	张少敏等,2016 ^[33]
云(灰)质细粒混合沉积岩,粘土质细粒混合沉积岩,长英质细粒混合沉积岩	张顺等,2016 ^[34] ;鄢继华等,2017 ^[35]
粉砂岩,(高、中、低)有机质粘土岩,(高、中、低)有机质碳酸盐岩,混合细粒岩	Wang 和 Carr,2015 ^[36] ;吴靖等,2017 ^[37]

别以其绝对含量的 50% 为界划分出粉砂岩、粘土岩、碳酸盐岩和混合型岩 4 大类,再结合沉积构造和有机质含量进行详细命名^[14]。虽然命名的指标相对较少,但命名结果种类繁多,显示出细粒沉积岩较为复杂,具有极强的非均质性。

细粒沉积岩主要形成于相对低能环境^[13-14]。在海相环境中(表 2),细粒沉积岩受控于物源和水动力条件,主要发育在滞流海盆、陆棚区局限盆地和边缘海斜坡等正常浪基面以下部位^[27]。在湖相环境中,受控于湖平面变化、构造作用、沉积物源和盆地地形等因素,细粒沉积岩主要发育在前三角洲 – 半深湖 – 深湖、滨浅湖部位中^[39-41]。以上环境虽然都是相对低能环境,但细微的沉积环境变化会造成细粒沉积岩沉积构造、沉积物来源及成因、地球化学特征等具有明显差异,目前众多学者针对不同沉积环境下细粒沉积岩的

特征进行了较为详细的研究。

细粒沉积岩的沉积构造组合可以在一定程度上指示沉积部位。在海相沉积中深海 – 半深海部位沉积的细粒沉积岩发育水平和块状层理,浅海部位发育沙纹、波状和交错层理等。在湖相沉积中 – 深湖部位沉积的细粒沉积岩发育平直纹层、似块状层理,半深湖部位发育波状、透镜状、粒序和块状等层理,深湖 – 半深湖重力流发育递变和块状层理,前三角洲 – 浅湖沉积发育块状层理、生物扰动构造和平行层理^[23]。沉积部位影响了细粒沉积岩有机质的类型和富集,因此研究沉积构造具有重要意义,但由于细粒沉积岩颜色相对均一,不利于肉眼直接识别,但沉积构造的变化会引起无机地球化学元素的变化,因此可以利用化学 – 沉积相方法中获得的无机地球化学元素强度平面分布图来识别沉积构造。

表 2 细粒沉积岩沉积环境

Table 2 Depositional environments of fine-grained rocks

沉积环境	岩性	沉积构造	研究学者
浅海,水动力较弱	泥晶钙质页岩	水平纹层	王志峰等,2014 ^[31]
半深海,贫氧环境,水动力弱	含钙硅质页岩	水平纹层	
半深海 – 深海, 贫氧环境、水动力弱	硅质页岩	无生物扰动和微沉积构造	
半深海,水动力强	介壳泥灰岩和页岩	纹层和波状层理	
半深海,短暂含氧,水动力强	钙质页岩	水平层理、波状纹层和交错纹层, 生物扰动和遗迹化石	
前三角洲 – 半深湖,水动力中等,还原条件较弱	贫有机质粘土质细粒长英沉积岩 – 硅质碎屑型混合细粒沉积岩 – 块状长英质粘土岩	块状和纹层状	张少敏等,2016 ^[33]
半深湖 – 深湖,水体相对安静	中 – 富有机质纹层状混合细粒沉积岩和粘土岩	纹层状	
气候干燥,水体盐度大,水深较浅的强还原环境	含有机质泥质灰岩	纹层	杨万芹等,2017 ^[37]
沉积于气候较潮湿,水体盐度较小,水体较深,物源增加,生物发育的还原环境	富有机质灰质泥岩	层状	
弱氧化 – 弱还原环境,水动力较强,属于滨浅湖	粉砂岩	波状交错层理和生物扰动及潜穴	吴靖等,2017 ^[38]
半深湖底部,水体深度大且还原性强,水动力较弱	高有机质灰岩	纹层平直	
半深湖上部环境,水体深度较大且还原性较强,水动力变强	中有机质灰岩、中有机质粘土岩	纹层轻微波状起伏	
浅湖环境,水体深度小且还原性弱,水动力较强	低有机质灰岩、低有机质粘土岩、灰质混合细粒岩、白云质混合细粒岩	纹层波状起伏	
水流闭塞的深湖环境中,水体深度最大且还原性很强	高有机质粘土岩	纹层平直	
干旱气候,滨湖蒸发	低有机质页状膏质粘土岩	纹层平直	

不同的沉积物来源和成因不但影响了细粒沉积岩中原油的流动也影响了后期的压裂效果。油气在储层中流动时不但受到孔喉大小的影响,还受到孔隙壁布矿物润湿性的影响^[42-43],在以石英和长石等水润湿的矿物围成的孔喉中,原油易于流动,利于开发,而在方解石和白云石等油润湿的矿物围成的孔喉中,原油不易流动,不利于开发。在对细粒沉积岩中的油气进行开发时普遍需要进行压裂,因此评价细粒沉积岩的可压裂性具有重要的意义^[44]。目前一般利用矿物组成或岩石力学参数来表征可压裂性脆性^[45-46],其中矿物可分为脆性矿物和非脆性矿物。国内外学者普遍将石英、长石、白云石和方解石作为脆性矿物^[45-51],一般情况下,脆性矿物含量越高,岩石脆性越高,越易于形成天然或诱导裂缝,但岩石的脆性也受到了脆性矿物的分布影响,当陆源碎屑石英在岩石中呈弥散状分布时,会造成岩石压裂过程中的应力分散,不利于网状裂缝的形成,因此岩石虽然具有较高的脆性矿物含量,却具有较低的脆性^[52]。生物成因的硅质,不但指示了细粒沉积岩沉积过程中较高的初级生产力,具有更高的资源量^[53-54],其分布也相对集中,可压性更好。成岩演化形成的自生石英主要由胶结作用和粘土矿物转化而成,不仅可以增加石英的含量,也可以使页岩的结构硬化进一步增加岩石的脆性^[55],因此有效识别脆性矿物的来源和成因具有重要意义。由于不同来源和成因的脆性矿物具有不同的无机地球化学元素组成,因此可以利用无机地球化学元素指标来识别脆性矿物的来源和成因。而常规识别沉积物来源和成因的方法中,薄片鉴定和扫描电镜观察仅能观察小尺度样品,容易造成取样不具代表性的问题,传统 XRF、XRD 等元素分析测试需要将样品粉碎均一化,容易造成无用信息掩盖有效信息现象,均不能有效判别细粒沉积岩沉积物来源和成因,因此可以利用化学-沉积相方法获得大尺度手标本表面的元素地球化学信息,对各像素点进行无机地球化学分析,从而弥补选样不具代表性和均一化后无用信息掩盖有效信息的不足,最大程度实现脆性矿物来源和成因的有效识别。

不同的古环境特征主要影响了细粒沉积岩中有机质的类型和富集,同时也影响了沉积物的来源和成因。在海相环境中,表层水体浮游生物的高生产力和有利于有机质保存、聚积与转化的沉积环境是形成富有机质黑色页岩的必要条件^[56]。在陆相湖泊环境中,潮湿气候下的淡水湖泊中干酪根以腐泥型为主,陆源碎屑注入较多。咸水湖泊在相对潮湿气候时期盐度较低时利于生物繁育,形成腐泥型干酪根,陆源碎屑注入量较

高;在相对于干旱气候时期,盐度较高时不利于生物繁育,主要为腐殖型干酪根,陆源碎屑注入量低,碳酸盐岩含量较高^[57-58]。水体的深浅在一定程度上影响了生物的繁盛和后期的保存,一般情况下浅水区生物繁盛具有较高的生产力,深水区以还原条件为主,利于有机质的保存。但由于古环境的频繁变化和细粒沉积岩厚度小的原因,在极小的厚度内会出现多种古环境特征。由于细粒沉积岩系厘定细、颜色均匀、非均质性强,传统的沉积相分析无法在岩心和手标本尺度获取高分辨率沉积环境的信息,因此需要借用原位分析手段获取二维元素地球化学“时空”分布信息,根据相关地球化学参数最大限度的实现对古环境变化的研究和精细表征。

2 化学-沉积相分析应用

化学地层学(chemostratigraphy)基于一维元素分析,已被广泛应用到地层对比、层序地层学和细粒沉积岩系研究^[59],但该方法仅提供一维化学元素信息无法用于表征沉积相在空间上的非均质性。因为细粒沉积岩的非均质性极强,常规的薄片鉴定和扫描电镜观察具有样品尺寸小易造成观察不具有代表性的现象,常规的 XRF 和 XRD 等元素矿物分析手段需要对样品进行粉碎均一化的处理,不但耗时也无法获得原位分析细粒沉积岩的特征,易造成无用信息过多覆盖有效信息现象。针对细粒沉积岩的非均质性和演化特征,对沉积相带可以利用无机地球化学元素的手段来进行原位表征,主要的步骤和在细粒沉积岩中的应用如图 1 所示,首先采集大体积手标本样品表面的光学

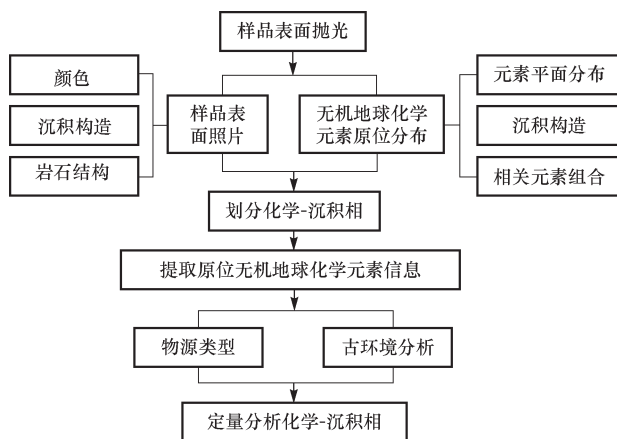


图1 化学-沉积相模型的建立步骤和在细粒沉积岩中的应用

Fig. 1 A workflow for establishing "chemo-sedimentary facies" model and its application to fine-grained sedimentary rocks

照片,再利用大面积 XRF 扫描技术对同一样品表面进行元素扫描,获得二维平面元素分布信息。将二者融合建立“化学-沉积相”(chemo-sedimentary facies),进而有效识别样品的岩石矿物成分和沉积构造、开展沉积物来源和成因及古环境精细研究等方面的工作。

综上,化学-沉积相方法可以概括为通过获取大体积手标本样品表面高分辨率(30~100 μm)二维无机地球化学元素分布图,并结合传统沉积相研究方法对岩石样品进行沉积等方面精细研究的方法。能够提供原位地球化学信息,具有高分辨率、大尺度和低耗时的优点,对细粒沉积岩的研究具有重要意义。

本文主要使用 Bruker 微区 M4 Tornado 进行样品平面的元素扫描,在扫描前为了最大限度地减小误差,首先对样品进行表面抛光处理,使样品表面平整,然后将样品放入测试仓后利用水平仪进行水平校准。仪器中 X-射线光管靶材为铑(Rh),电压为 50 kV,电流为 800 μA,光斑小于 30 μm,探测器为 Flash@ 硅漂移探测器,能量分辨率在计数率 250 000 cps 时分别优于 125 eV 和 135 eV,扫描速度最快可达 3 ms/点,提供钠以上元素的分布(Na-U),最大分辨率可达 30~100 μm。

2.1 识别沉积构造

本文所选取的样品主要来自于吉木萨尔凹陷芦草

沟组。吉木萨尔凹陷位于东部隆起,北接沙奇凸起,西接北三台凸起,东接古西凸起,南临天山山前冲断带,总面积约为 1 300 km²。吉木萨尔凹陷北部和西北部以老庄湾断裂和吉木萨尔断裂为界,西南部以西地断裂为界,南部以三台断裂和后堡子断裂为界,东部紧邻古西隆起,总体呈西断东超的箕状形态,进一步细分为东部斜坡带和西部深洼带,深洼带中心位于西地断裂附近,最大埋深达 4 500 m,内部断裂相对不发育,以小规模断层为主,主要集中在东部斜坡带。芦草沟组(P_2l)为吉木萨尔凹陷致密油的主要产层,遍布全凹陷,厚度分布在 200~350 m,自下而上可以细分为芦草沟组一段(P_2l^1)和芦草沟组二段(P_2l^2), P_2l^1 以灰色、深灰色泥岩、白云质泥岩为主夹灰色泥质粉砂岩和白云质粉砂岩, P_2l^2 以灰色、深灰色泥岩、灰质泥岩、白云质泥岩、泥质白云岩为主夹灰色、深灰色泥质粉砂岩、泥灰岩。

如图 2 所示,图 2a—e 为手标本样品光学照片,图 2f—j 为与光学照片相对应的铝(Al)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、硅(Si)5 元素强度组合平面分布图,其中 Al 为红色,K 为绿色,Ca 为蓝色,Mg 为粉色,Si 为黄色。在图 2a 中颜色分布均与不易观察到沉积构造,但在图 2f 中可观察到垂直层理的高 Ca 虫孔构造,指示相对浅水环境。在图 2g 中可以观察到下部层理不发育,呈

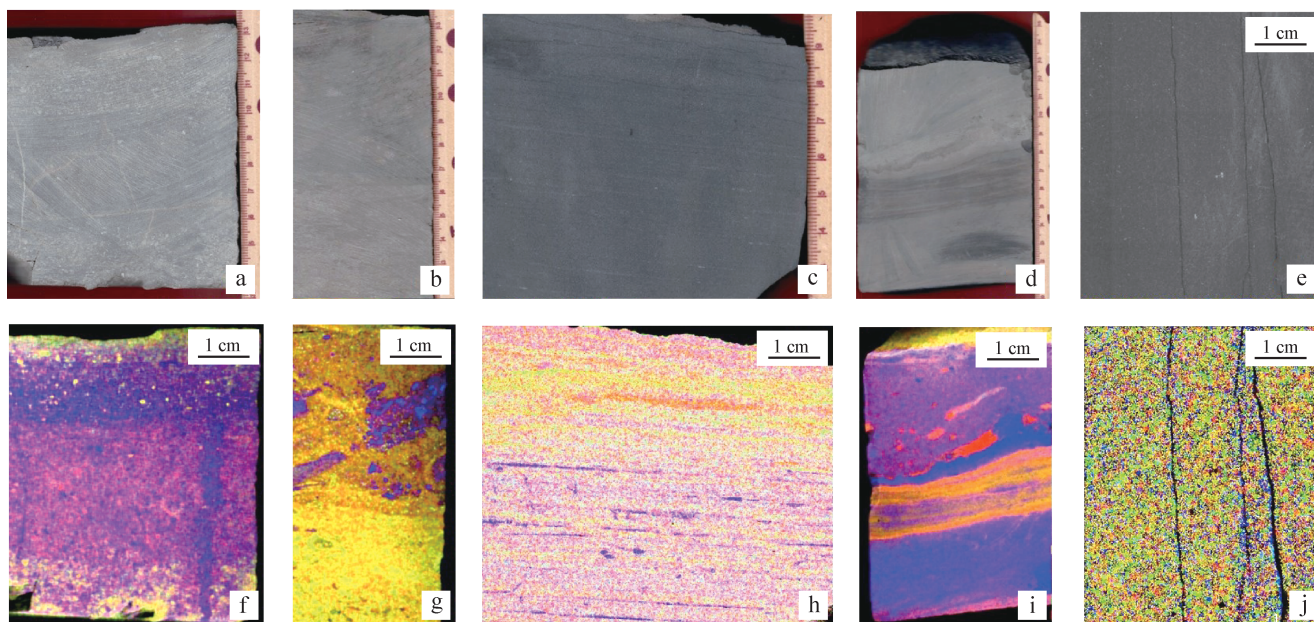


图 2 细粒沉积岩典型样品手标本光学照片和元素分布

Fig. 2 Optical photographs and elemental maps of hand specimens for typical fine-grained sedimentary rock samples

a. 芦草沟组灰色白云质灰岩;b. 芦草沟组灰色粉砂质泥岩;c. 芦草沟组黑色泥岩;d. 芦草沟组灰色粉砂质泥岩;e. 龙马溪组黑色页岩;f. 与 a 对应的 Al,K,Ca,Mg,Si 等元素强度组合平面分布图,可见垂直层理的虫孔;g. 与 b 对应的 Al,K,Ca,Mg,Si 五元素强度组合平面分布图,上部可见高 Ca,Mg 碳酸盐岩碎块;h. 与 c 对应的 Al,K,Ca,Mg,Si 五元素强度组合平面分布图,可见高频率交替出现的高 Ca,Mg 纹层和高 Al,Si 纹层;i. 与 d 对应的 Al,K,Ca,Mg,Si 五元素强度组合平面分布图,上部和下部为高 Ca,Mg,中部可见高 Al,Si 平行层理;j. 与 e 对应的 Al,K,Ca,Mg,Si 五元素强度组合平面分布图. 其中 Al 为红色,K 为绿色,Ca 为蓝色,Mg 为粉色,Si 为黄色。

块状,在上部可以观察到在高 Al, K, Si 的区域内分布着高 Ca, Mg 碳酸盐岩碎块,碎块分选磨圆极差,指示未固结沉积物遭受破坏后快速再沉积的过程。图 2c 的黑色泥岩指示深水沉积,但在图 2h 中可见明显高频率交替出现的高 Ca, Mg 纹层和高 Al, Si 纹层互层,指示在沉积过程中对古气候干旱潮湿交替出现的记录。图 2i 显示在样品中部发育高 Al, Si 平行层理,上部可见下切侵蚀构造,底部可见高 Al, Si 碎块,指示一期水动力变化。在图 2j 显示图 2e 的黑色泥岩具有低 Ca, Mg 和高 Al, Si, K 的特点,可见页理。

通过以上研究可以清晰的识别手标本上肉眼难以直接观察到的沉积构造。

2.2 识别沉积物来源和成因

沉积物中元素的来源和成因具有明显的差异性,来源可分为内源和外源,成因可分为自生成因和陆源碎屑成因。以沉积物中的硅为例,主要包括来自内源的自生硅(SGSi,包括以石英为主的生物石英、胶结石英和粘土矿物转化石英),来自外源的陆源碎屑硅

(Terrigenous Clastic Silica,简称 TCSi)。不同来源和成因的硅对岩石后期的可压性具有重要影响,内源自生硅可压性较好,陆源碎屑硅可压性较差。在此以识别自生硅和陆源碎屑硅为例,本文选取四川盆地龙马溪组页岩、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组粉砂质泥岩和鄂尔多斯延长组粉砂岩样品进行分析。可压性在非常规油气勘探开发中作为重要的评价指标,以往认为 Si 含量越高可压性越好,而新的研究认为只有当自生硅在硅中的相对含量越高时,可压性才会越好,因此快速有效识别自生硅对非常规油气勘探开发具有重要意义。在细粒沉积岩中 Al 通常由粘土矿物贡献,高 Al 含量指示指示陆源碎屑,但陆源石英含量的增加也会降低 Al 的含量^[60],而钛(Ti)一般来自陆源碎屑,比较稳定,不易形成可溶化合物,可作为指示陆源碎屑的良好指标^[50]。基于以上原理,通过建立 Al-Si 含量交会图,用来判别硅质来自粘土还是石英(图 3a, c, e);通过建立 Ti-Si 含量交汇图,用来判别石英来自陆源碎屑还是内部自生(图 3b, d, f)。在细粒沉积的陆源碎屑中粘土矿物、钾长石和钠长石包含 Al 和 Si,陆源

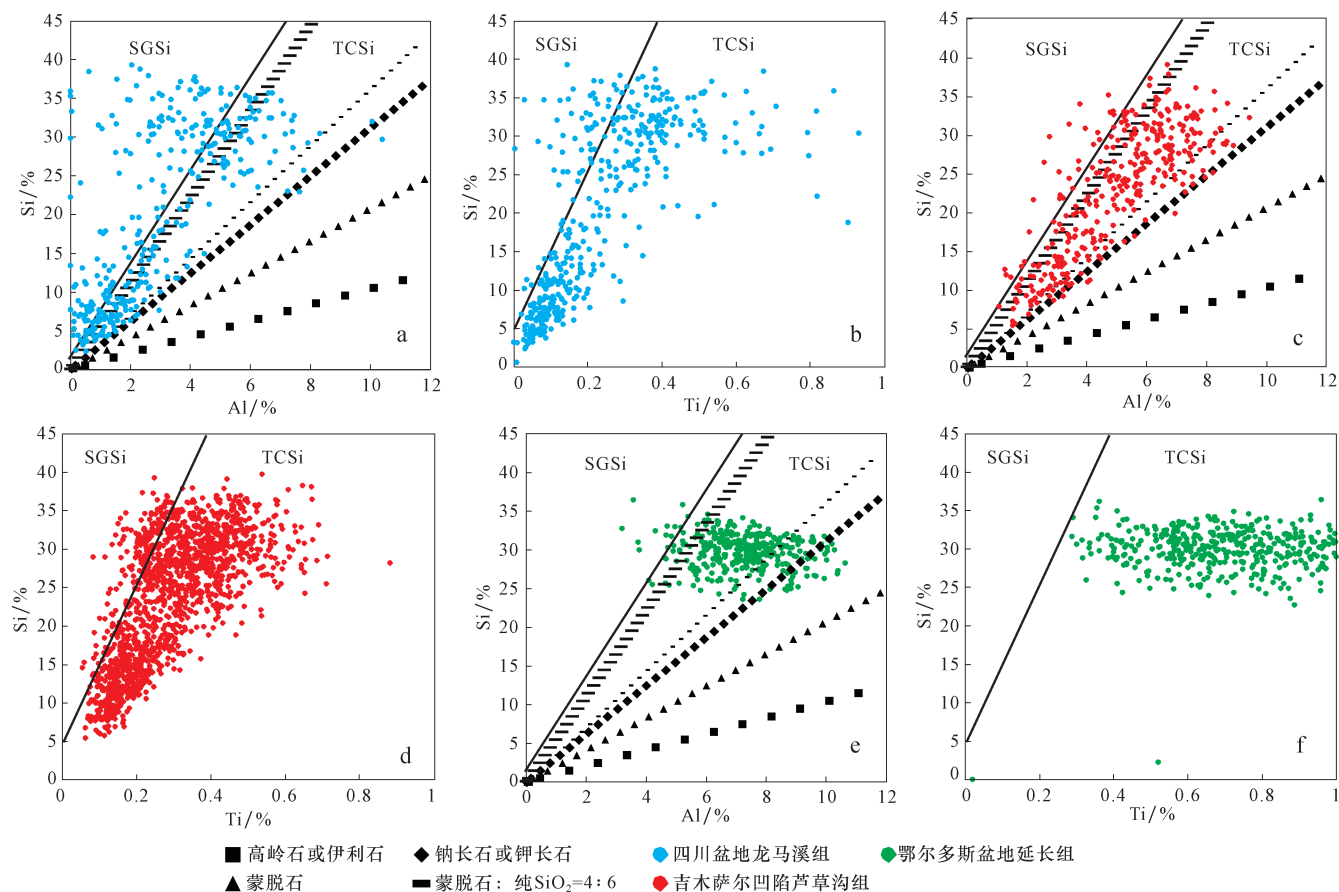


图3 细粒沉积岩典型样品硅质类型识别

Fig. 3 Identification of siliceous minerals in fine-grained sedimentary rocks

a. 龙马溪组页岩 Al 和 Si 含量交汇图; b. 龙马溪组页岩 Ti 和 Si 含量交汇图; c. 芦草沟组粉砂质泥岩 Al 和 Si 含量交汇图; d. 芦草沟组粉砂质泥岩 Ti 和 Si 含量交汇图; e. 延长组粉砂岩 Al 和 Si 含量交汇图; f. 延长组粉砂岩 Ti 和 Si 含量交汇图

碎屑石英和自生硅只包含 SiO_2 , 通过不同矿物的化学式, 以及蒙脱石与纯 SiO_2 的比例关系, 可以获得 Si - Al 的对应关系曲线, 如图 3 所示, 选取蒙脱石与纯 SiO_2 按 3 : 7 比例的曲线为分界线, 因为在此条分界线左侧, SiO_2 占绝对优势, 在右侧粘土矿物占绝对优势, 据此划分出左区为 SGSi 区, 右区为 TCSi 区。在蒙脱石 : $\text{SiO}_2 = 3 : 7$ 曲线的右侧及附近区域代表陆源碎屑富集, 在左侧区域代表自生硅, 也可代表陆源碎屑石英富集, 因此需要利用 Si 与 Ti 来区分自生硅和陆源碎屑石英。对于陆源碎屑石英富集部位 Si 含量越高, Ti 含量越高。对于自生硅富集部位 Ti 含量总体较低。建立 Si - Ti 对应关系曲线, 建立自生硅和陆源碎屑硅判别图版, 左区为 SGSi 区, 右区为 TCSi 区, 如图 3 所示。

将不同岩性样品原位高分辨率提取的无机地球化学元素数据投入判别图版, 可以有效定量判别该岩性中的 Si 是否为自生硅和陆源碎屑硅。图 3a 中, 四川盆地龙马溪组页岩数据主要位于 SGSi 区, 少量分布在 TCSi 区, 表明石英含量较高。图 3b 中, 近乎 1/3 的数据点位于 SGSi 区域, 表明自生硅含量较高, 含有较多自生硅。图 3c 中, 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组粉砂质泥岩中的数据点绝大多数分布在 TCSi 区域, 只有少量数据点位于 SGSi 区, 表明石英含量不高, 虽然在图 3d 中

一部分数据点位于 SGSi 区, 但并非指示自生硅, 高 Al 含量低 Ti 含量可指示为自生粘土矿物。图 3e 中鄂尔多斯盆地延长组粉砂岩中绝大多数数据点位于 TCSi 区域, 只有零星数据点位于 SGSi 区域, 同时在图 3f 中, 数据点几乎全部位于 TCSi 区域, 表明 Si 主要来自陆源碎屑。

2.3 精细研究古环境

古环境主要包括气候、氧化还原条件、水深和水体盐度等方面, 研究古环境对细粒沉积岩具有重要意义。化学 - 沉积相的方法可以提供样品表面高分辨率的元素强度分布图(图 4), 从蓝色到红色表示强度逐渐升高, 虽然强度不是元素的含量数据, 但强度越高也反映含量越高。根据指向性元素的强度分布图可以定性分析古环境的平面分布。其中 Al, K 和 Si 指示陆源碎屑沉积, 其含量高指示气候相对潮湿, 发育地表径流, 向盆地中搬运较多陆源碎屑。Ca 和 Mg 指示盆地内部碳酸盐岩沉积, 其含量高指示气候相对干旱, 不发育地表径流, 极少有陆源碎屑被搬运进入盆地。锶(Sr)的高值指示气候干旱, 水体盐度高, 低值指示气候潮湿, 水体盐度低^[51]。铜(Cu)为喜湿元素, 其高值一般指示潮湿气候^[61]。钛(Ti)主要来自于陆源碎屑物质, 高值指示高陆源碎屑注入量, 相对潮湿气候, 而且相对稳

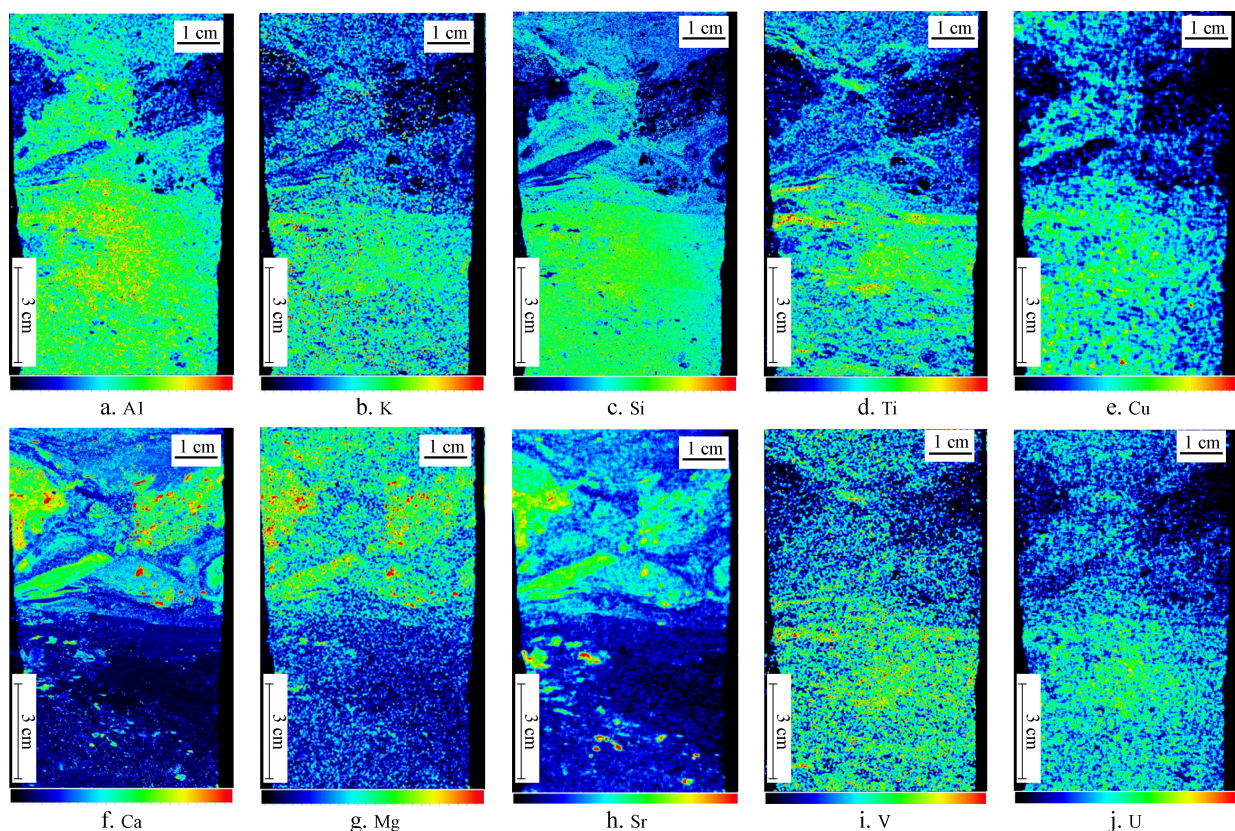


图 4 吉木萨尔凹陷芦草沟组粉砂质泥岩各元素强度平面分布

Fig. 4 Individual elemental maps of silty mudstone from the Lucaogou Formation, Jimusaer sag

定,随着搬运距离的增加会相对富集,也指示相对深水环境^[62]。V,U,Mo 富集时指示还原条件^[63-64]。以芦苇沟组粉砂质泥岩为例(图5),在样品下部 Al,K,Si 含量相对较高,而 Ti 的含量变化趋势与之一致,指示以外源陆源碎屑为主。Sr 含量相对较低,Cu 含量相对较高,指示潮湿气候,水体较深,盐度较低,同时 U,V 值相对较高,可定为还原环境。综合来看,样品下部沉积时期古环境为潮湿气候、水体较深、盐度较低和强还原环境。样品上部元素分布复杂,在高 Al,K,Si 含量中夹杂杂乱堆积分选磨圆极差的高 Ca,Mg 含量碎块,高 Al,K,Si 含量区域元素分布特征与下部基本一致,而碎块中

的 Ca,Mg 和 Sr 值高,Ti,Cu,U 和 V 值低,表明碎屑形成的原始古环境为干旱气候、高盐度、浅水和弱还原环境。

受技术限制,通过单一指向性元素的平面分布图(如化学地层学方法)目前只能定性划分样品的化学-地层带,难以在整个平面上定量划分,而常规的实验分析手段需要对样品进行均一化粉碎,在没有化学-沉积相方法的指导下,可能只取到一个古环境区域或将3个古环境区域混合到一起。但在化学-沉积相方法中可以在单一像素中原位提取元素数据,结合古环境计算参数可以认识到化学-沉积相具有明显差异。在此,本文利用 Sr/Cu 表征古气候条件,通常 $Sr/Cu > 10$

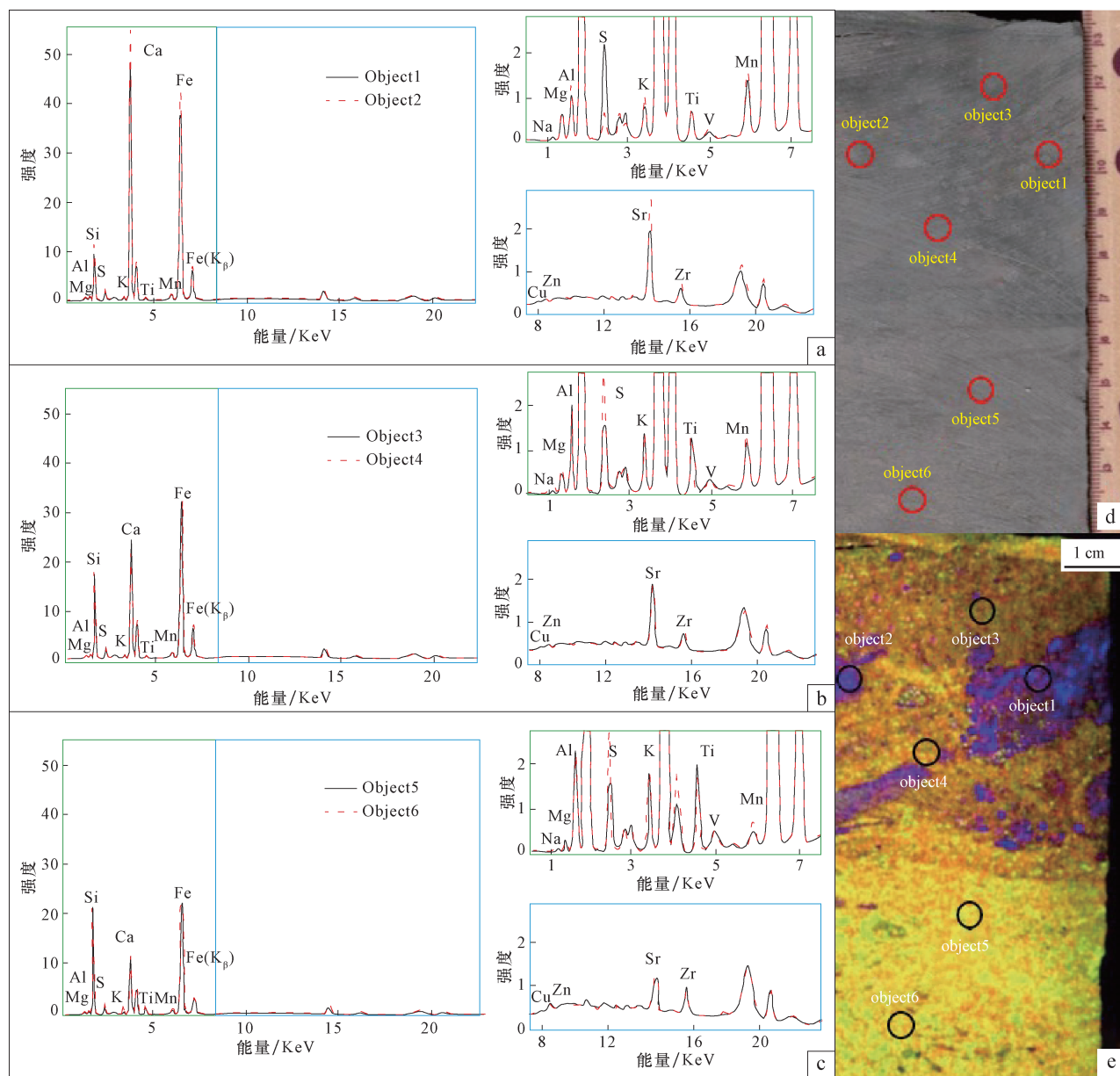


图5 吉木萨尔凹陷芦苇沟组典型粉砂质泥岩样品元素分布

Fig. 5 Samples of typical silty mudstone from the Lucaogou Formation, Jimusaer sag

- a. Object 1 和 Object 2 的元素强度谱图; b. Object 3 和 Object 4 的元素强度谱图; c. Object 5 和 Object 6 的元素强度谱图; d. 岩心照片;
e. Al(红色)、K(绿色)、Ca(蓝色)、Mg(粉色)、Si(黄色)5种元素强度综合平面分布

指示干旱气候, $1 < \text{Sr}/\text{Cu} < 10$ 指示湿润气候^[65]。利用 V/Cr 表征古氧化还原条件, 通常 $\text{V}/\text{Cr} > 4.25$ 指示强还原环境, $2 < \text{V}/\text{Cr} < 4.25$ 指示弱还原环境, $\text{V}/\text{Cr} < 2$ 指示氧化环境^[66]。利用 Sr/Ba 表征古盐度, $\text{Sr}/\text{Ba} > 1$ 指示咸水, $\text{Sr}/\text{Ba} < 1$ 指示淡水。利用 $(\text{Al} + \text{Fe})/(\text{Ca} + \text{Mg})$ 指示古水深, 高值指示深水, 低值指示浅水。分别在不同的相带原位提取无机地球化学元素数据, 如图5所示, 其中 Object-1 和 Object-2 属于同一相带, Object-3 和 Object-4 属于同一相带, Object-5 和 Object-6 属于同一相带, 在相同的相带, 元素的谱图基本一致近乎重叠, 而在不同的相带其元素谱图信息具有明显差异, 各元素定量信息在相同相带基本一致, 而不同相带间差异较大(表3)。

利用以上古环境定量指示参数, 建立雷达图, 如图6所示。Object-1 的各古环境参数中 $\text{Sr}/\text{Cu} = 456.24$ 指示干旱气候, $\text{V}/\text{Cr} = 13.36$, 指示强还原环境, $\text{Sr}/\text{Ba} = 5.38$ 指示咸水, $(\text{Al} + \text{Fe})/(\text{Ca} + \text{Mg}) = 0.33$ 指示相对浅水环境, Object-2 的各古环境参数中 $\text{Sr}/\text{Cu} = 524$ 指示干旱气候, $\text{V}/\text{Cr} = 13.95$, 指示强还原环境, $\text{Sr}/\text{Ba} = 3.75$ 指示咸水, $(\text{Al} + \text{Fe})/(\text{Ca} + \text{Mg}) = 0.34$ 指示相对浅水环境, 虽然 Object-1 和 Object-2 在平面上相距较远, 但古环境条件基本一致, 雷达图形态基

本一致近乎重合。Object-3 的各古环境参数中 $\text{Sr}/\text{Cu} = 108.7$ 指示干旱气候, $\text{V}/\text{Cr} = 13.62$, 指示强还原环境, $\text{Sr}/\text{Ba} = 3.92$ 指示咸水, $(\text{Al} + \text{Fe})/(\text{Ca} + \text{Mg}) = 0.73$ 指示相对深水环境, Object-4 的各古环境参数中 $\text{Sr}/\text{Cu} = 111.45$ 指示干旱气候, $\text{V}/\text{Cr} = 13.26$, 指示强还原环境, $\text{Sr}/\text{Ba} = 3.21$ 指示咸水, $(\text{Al} + \text{Fe})/(\text{Ca} + \text{Mg}) = 0.62$ 指示相对深水环境, Object-3 和 Object-4 古环境条件基本一致, 雷达图形态基本一致。虽然 Object-3 和 Object-1, Object-4 和 Object-2 在平面上相距较近, 但古环境条件相差明显, Object-5 的各古环境参数中 $\text{Sr}/\text{Cu} = 70.45$ 指示干旱气候, $\text{V}/\text{Cr} = 26.63$, 指示强还原环境, $\text{Sr}/\text{Ba} = 0.77$ 指示淡水, $(\text{Al} + \text{Fe})/(\text{Ca} + \text{Mg}) = 1.38$ 指示相对深水环境, Object-6 的各古环境参数中 $\text{Sr}/\text{Cu} = 61.67$ 指示干旱气候, $\text{V}/\text{Cr} = 16.93$, 指示强还原环境, $\text{Sr}/\text{Ba} = 0.75$ 指示淡水, $(\text{Al} + \text{Fe})/(\text{Ca} + \text{Mg}) = 1.32$ 指示相对深水环境, Object-5 和 Object-6 雷达图形态基本一致。

3 结论

1) “化学-沉积相”分析方法有机融合了岩石样品表面高分辨率($30\text{ }\mu\text{m}$)的二维元素平面分布信息和

表3 吉木萨尔凹陷芦草沟组典型泥质粉砂岩样品各测点地球化学元素分析结果

Table 3 Elemental analysis of various measurement points in typical argillaceous siltstone samples from the Lucaogou Formation, Jimusaer sag

测点号		Object - 1	Object - 2	Object - 3	Object - 4	Object - 5	Object - 6
主量 元素 含量/ %	Na	1. 18	1. 09	3. 84	2. 74	3. 64	3. 22
	Mg	5. 96	6. 26	2. 83	3. 21	1. 49	1. 40
	Al	3. 60	3. 93	5. 75	5. 17	6. 53	5. 96
	Si	17. 76	18. 91	27. 10	25. 33	32. 19	31. 09
	K	0. 01	0. 01	0. 02	0. 02	0. 19	0. 11
	Ca	19. 31	20. 38	8. 22	8. 81	4. 33	4. 27
	Ti	0. 19	0. 22	0. 26	0. 32	0. 37	0. 29
	Mn	0. 18	0. 20	0. 08	0. 08	0. 05	0. 04
	Fe	4. 72	5. 08	2. 31	2. 29	1. 50	1. 55
微量 元素 含量/ 10 ⁻⁶	V	184. 84	178. 24	178. 93	162. 71	131. 56	118. 84
	Cr	13. 84	12. 78	13. 14	12. 27	4. 94	7. 02
	Ni	2. 02	0	3. 65	22. 74	9. 45	5. 45
	Cu	4. 04	3. 59	9. 21	7. 62	6. 13	7. 92
	Zn	45. 98	49. 79	56. 28	51. 58	55. 83	43. 88
	Rb	9. 55	7. 54	33. 99	59. 61	45. 21	52. 34
	Sr	1 843. 27	1 881. 58	1 012. 58	849. 83	431. 81	488. 23
	Zr	60. 72	106. 99	169. 51	191. 21	260. 13	217. 95
	Ba	33. 42	50. 19	25. 85	26. 49	56. 30	65. 50

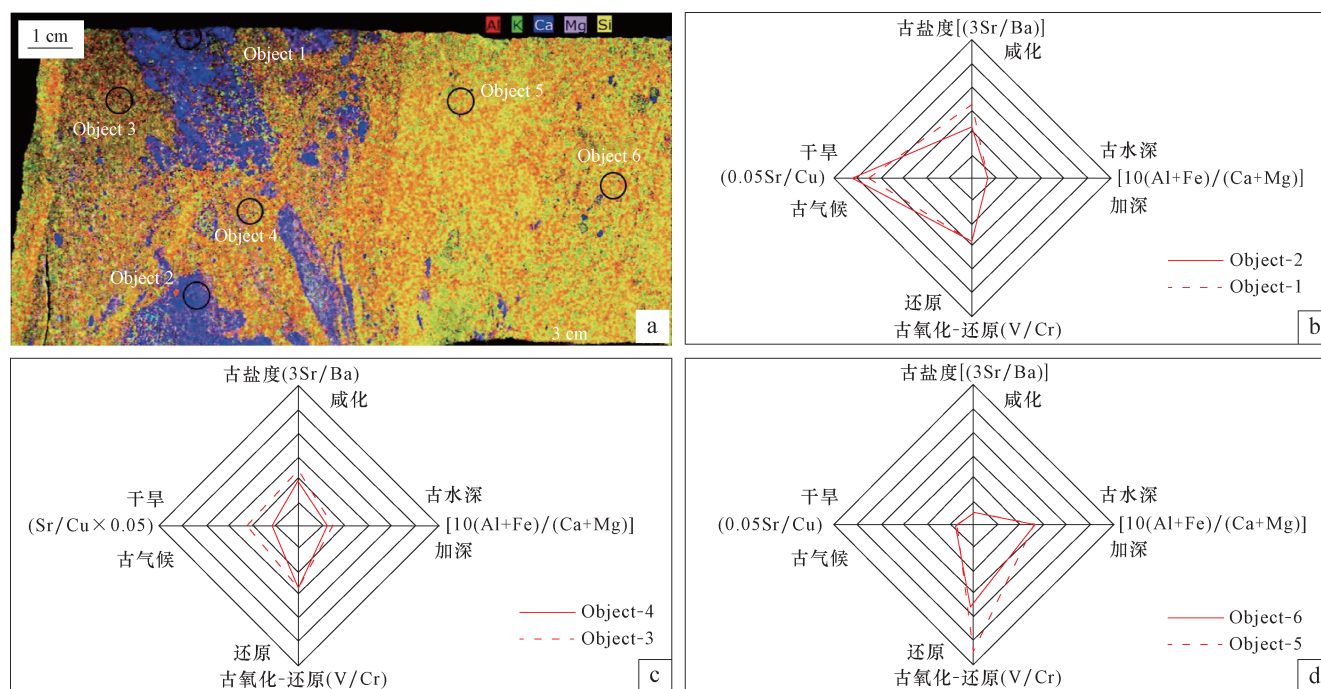


图6 不同部位各古环境指数分布

Fig. 6 Paleoenvironmental indexes in different chemo-sedimentary facies

- a. Al(红色)、K(绿色)、Ca(蓝色)、Mg(粉色)、Si(黄色)5种元素强度综合平面分布;b. Object1和Object2的古环境指数雷达图;
c. Object3和Object4的古环境指数雷达图;d. Object5和Object6的古环境指数雷达图

岩石表面图像特征,可以清晰识别细粒沉积岩中肉眼难以辨认的微相(带)特征如:岩石矿物成分、沉积结构和构造,从而解决了传统沉积学观察方法不适应于研究细粒沉积岩研究和常规化学地层学方法无法表征沉积相在二维空间上的非均质性问题。

2) 利用二维原位化学元素分析可以在大尺度手标本或全直径岩心(30 cm × 15 cm)上研究细粒的非均质性,可以弥补传统全岩XRF和XRD等实验测试需要将样品粉碎均一化所造成的无用信息遮盖有效信息的不足,通过原位获取样品地球化学元素环境指示参数,定量识别沉积物来源和成因,进而定量分析古环境演化。

致谢:中国石油勘探开发研究院邹才能院士、朱如凯教授和中国石油大学操应长教授、蒯克来副教授对本文的写作有重要启发,王晓琦和路研对本文写作过程中给予诸多帮助。感谢中国陆相致密油“973”致密储层储集空间精细表征课题团队成员长期支持。

参考文献

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 邹才能,杨智,张国生,等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发,2014,41(1):14-27.
Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [3] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发,2017,44(1):1-11.
Jia Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.
- [4] BP. Statistical review of world energy[EB/OL]. [2013-03-01]. <http://www.bp.com/statistics>.
- [5] USGS World Petroleum Assessment[EB/OL, 2013-03-01]. <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-060>.
- [6] Zou Caineng, Jin Xu, Zhu Rukai, et al. Do shale pore throats have a threshold diameter for oil storage? [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 1-6.
- [7] 邱中建,邓松涛. 中国油气勘探的新思维[J]. 石油学报,2012,33(增1):1-5.
Qiu Zhongjian, Deng Shongtao. New thinking of oil-gas exploration in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Supp. 1): 1-5.
- [8] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resources prospects of the tight oil in

- China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 343–350.
- [9] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 1–10.
- Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 1–10.
- [10] 杨华, 梁晓伟, 牛小兵, 等. 陆相致密油形成地质条件及富集主控因素: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 12–20.
- Yang Hua, Liang Xiaowei, Niu Xiaobing, et al. Geological conditions for continental tight oil formation and the main controlling factors for enrichment: A case from the Chang-7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 12–20.
- [11] Aplin C A, Macquaker H S I. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2031–2059.
- [12] Macquaker J H S, Adams A E. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: An inclusive nomenclature for mudstones[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 735–744.
- [13] Schieber J, Zimmerle W. The history and promise of shale research [C]//Schieber J, Zimmerle W, Sethi P. *Shale and Mudstones* (Vol. 1): Basin Studies, Sedimentology and Paleontology [M]. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1998: 1–10.
- [14] 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.
- [15] Baldwin B, Butler C O. Compaction curves [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69: 622–626.
- [16] 郭秋麟, 陈晓明, 宋焕琪, 等. 泥页岩埋藏过程孔隙度演化与预测模型探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 439–449.
- Guo Qiulin, Chen Xiaoming, Song Huanqi, et al. Evolution and models of shale porosity during burial process[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 439–449.
- [17] 李婷婷, 朱如凯, 白斌, 等. 酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相细粒沉积岩纹层特征及研究意义[J]. *中国石油勘探*, 2015, 21(1): 39–47.
- Li Tingting, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Characteristics and research significance of fine lacustrine sedimentary rock laminations of the Xigou Formation in the Qingxi Depression of the Jiuquan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 21(1): 39–47.
- [18] Ackleson S, Balch W M, Holligan P M. 1988. White waters of the gulf of maine[J]. *Oceanography*, 11: 18–22.
- [19] 王冠民, 钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 24(3): 43–48.
- Wang Guanmin, Zhong Jianhua. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 24(3): 43–48.
- [20] Haschk M. The Eagle III BKA system, a novel sediment core X-ray fluorescence analyser with very high spatial resolution [M]. Geological Society, London, Special Publications, 2006, 267: 31–37.
- [21] Weltje G J, Tjallingii R. Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 27(3–4): 423–438.
- [22] Rothwell R G, Rack F R. New techniques in sediment core analysis: An introduction [M]. Geological Society, London, Special Publications, 2006: 1–29.
- [23] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质 [M]. 2版. 北京: 地质出版社, 2013: 188–196.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. *Unconventional hydrocarbon geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 188–196.
- [24] 粉晶 X 射线物相分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- X-ray phase analysis of powder crystal [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980.
- [25] 吉昂, 陶光仪, 卓尚军, 等. X 射线荧光光谱分析 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 155–165.
- Ji Ang, Tao Guangyi, Zhuo Shangjun, et al. *X-ray fluorescence spectrometry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 155–165.
- [26] 张保科, 温宏利, 王蕾, 等. 封闭压力酸溶-盐酸提取-电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中的多元素 [J]. *岩矿测试*, 2011, 30(6): 737–744.
- Zhang Baoke, Wen Hongli, Wang Lei, et al. Quantification of multi elements in geological samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry with pressurized decomposition hydrochloric acid extraction [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2011, 30(6): 737–744.
- [27] Picard M D. Classification of fine-grained sedimentary rocks [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1971, 41(1): 179–195.
- [28] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 579–601.
- [29] Macquaker J H S, Taylor K G, Gawthorpe R L. High-resolution facies analyses of mudstones: Implications for paleoenvironmental and sequence stratigraphic interpretations of offshore ancient mud-dominated successions [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(4): 324–339.
- [30] Trabucoalexandre J, Dirks R, Veld H, et al. Toarcian black shales in the Dutch Central Graben: Record of energetic, variable depositional conditions during an oceanic anoxic event [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(3–4): 104–120.
- [31] 王志峰, 张元福, 梁雪莉, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组不同水动力成因页岩岩相特征 [J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 623–632.
- Wang Zhifeng, Zhang Yuanfu, Liang Xueli, et al. Characteristics of shale lithofacies formed under different hydrodynamic conditions in the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 623–632.
- [32] 蒋裕强, 宋益滔, 漆麟, 等. 中国海相页岩岩相精细划分及测井预测: 以四川盆地南部威远地区龙马溪组为例 [J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 107–118.
- Jiang Yuqiang, Song Yitao, Qi Lin, et al. Fine lithofacies of China marine shale and its logging prediction: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Marine Shale in Weiyuan area, Southern Sichuan Basin,

- China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 107–118.
- [33] 张少敏, 操应长, 朱如凯, 等. 雅布赖盆地小湖次凹细粒沉积岩岩相特征与沉积环境探讨[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 309–319.
- Zhang Shaomin, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. The lithofacies and depositional environment of fine-grained sedimentary rocks of Xiaohu Subsag in Yabulai Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2): 309–319.
- [34] 张顺, 陈世悦, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及储层特征——以东营凹陷沙河街组 and 沧东凹陷孔店组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(3): 568–581.
- Zhang Shun, Chen Shiyue, Pu Xiugang, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai fault-depressed lacustrine basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(3): 568–581.
- [35] 鄢继华, 邓远, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒混合沉积岩特征及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 98–109.
- Yan Jihua, Deng Yuan, Pu Xiugang, et al. Characteristics and controlling factors of fine-grained mixed sedimentary rocks from the 2nd Member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 98–109.
- [36] Wang G C, Carr T R, Methodology of organic-rich shale lithofacies identification and prediction: A case study from Marcellus Shale in the Appalachian basin [J], *Computers & Geosciences*, 2012, 49: 151–163.
- [37] 杨万芹, 王学军, 丁桔红, 等. 渤南洼陷细粒沉积岩岩相发育特征及控制因素[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(2): 365–374.
- Yang Wanqin, Wang Xuejun, Ding Juhong, et al. Characteristics and control factors of fine-grained sedimentary rock lithofacies in Bonan subsag[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(2): 365–374.
- [38] 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 submember of Member 4 of Shahejie Formation, Dongying sag and their relationship with sedimentary environment [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(10): 1110–1122.
- [39] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式: 以鄂尔多斯盆地延长组 7 油层组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 34–43.
- Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of the Chang-7 Member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 34–43.
- [40] 赵贤正, 蒲秀刚, 韩文中, 等. 细粒沉积岩性识别新方法 with 储集层甜点分析: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(1): 24–33.
- Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Han Wenzhong, et al. A new method for lithology identification of fine grained deposits and reservoir sweet spot analysis: A case study of the Kong-2 Member in the Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(1): 24–33.
- [41] Lemons D R, Chan M A. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Utah and southern Idaho[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(4): 635–665.
- [42] Barclay S A, Worden, R H. Effects of reservoir wettability on quartz cementation in oil fields[M]. *International Association of Sedimentologists, Special Publication*, 2000, 29: 103–117.
- [43] Buckley J S. Effective wettability of minerals exposed to crude oil[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2001, 6: 191–196.
- [44] Chong K K, Grieser W V, Passman A, et al. A completions guide book to shale-play development: A review of successful approaches towards shale-play stimulation in the last two decades [C]//*Proceedings of Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference*. Calgary, Alberta, Canada: CSUG /SPE, 2010.
- [45] Jarvie D M, Hill R J, Ruble 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.
- [46] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 356–363.
- Tang Ying, Xing Yun, Li Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 356–363.
- [47] Sondergeld C H, Newsham K E, Rice M C, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources[J]//*SPE Unconventional Gas Conference*. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: SPE, 2010.
- [48] Slatt R M, Abousleiman Y. Multi-scale, brittle-ductile couplets in unconventional gas shales: Merging sequence stratigraphy and geomechanics[C]. *AAPG Annual Convention and Exhibition*. Houston, Texas, USA: AAPG, 2011.
- [49] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Contributions in petroleum geology and engineering[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985: 320 pp.
- [50] 杜金虎, 杨华, 徐春春, 等. 关于中国页岩气勘探开发工作的思考[J]. *天然气工业*, 2011, 31(5): 6–8.
- Du Jinhu, Yang Hua, Xu Chunhui, et al. A discussion on shale gas exploration and development in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(5): 6–8.
- [51] 康玉柱. 中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. *天然气工业*, 2012, 32(4): 1–5.
- Kang Yuzhu. Characteristics and exploration prospect of unconventional shale gas reservoirs in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(4): 1–5.
- [52] 郝运轻, 宋国奇, 周广清, 等. 济阳坳陷古近系泥页岩岩石学特征对可压性的影响[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 489–495.
- Hao Yunqing, Song Guoqi, Zhou Guangqing, et al. Influence of petrological characteristics on fracability of the Paleogene shale, Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(4): 489–495.

- [53] Angel D L. Carbon flow within the colonial radiolarian microcosm [J]. Symbiosis, 1991, 10(1-3): 195-271.
- [54] Dennett M R, Caron D A, Michaels A F, et al. Video plankton recorder reveals high abundances of colonial radiolarian surface waters of the central North Pacific [J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(8): 797-805.
- [55] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组含气页岩中石英成因研究 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 377-386.
- Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Jin Zhenkui, et al. The genesis of quartz in Wufeng-Longmaxi gas shales, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 377-386.
- [56] Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P. Depositional processes of black shales in deep water [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(4): 491-498.
- [57] 薛叔浩, 刘雯林, 薛良清, 等. 湖盆沉积地质与油气勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- Xue Shuhao, Liu Wenlin, Xue Liangqing, et al. Sedimentary geology and oil exploration in lacustrine basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [58] 冯增昭. 中国沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 706-811.
- Feng Zengzhao. Chinese Sedimentology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 706-811.
- [59] Rowe H, Hughes N, Krystin R K. The quantification and application of handheld energy-dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) in mudrock chemostratigraphy and geochemistry [J]. Chemical Geology, 2012, 324-325: 122-131.
- [60] Arthur M A, Dean W E. A holistic geochemical approach to cyclomazia examples from Cretaceous pelagic limestone sequences [C]// Einsele G, Ricken W, Seilacher A. Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin: Springer Verlag, 1991: 126-166.
- [61] Norman M D, De Deckker P. Trace metals in lacustrine and marine sediments: A case study from the Gulf of Carpentaria, northern Australia [J]. Chemical Geology, 1990, 82: 299-318.
- [62] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 4-28.
- Deng Hongwen, Qian Kai. Chinese sedimentology [M]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1993: 4-28.
- [63] Algeo T J, Maynard J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. Chemical Geology, 2004, 206: 289-318.
- [64] Tribouillard N, Riboulleau A, Lyons T, et al. Enhance trapping of molybdenum by sulfurized organic matter of marine origin as recorded by various Mesozoic formations [J]. Chemical Geology, 2004, 213: 288-295.
- [65] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307-314.
- Liu Gang, Zhou Dong-sheng, et al. Application of microelement analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qian Jiang Formation in the Jianghan Basin as an example [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 307-314.
- [66] Dill H, Teschner M, Wehner H. Petrography inorganic and organic geochemistry of Lower Permian carbonaceous fan sequences ("Brand-Schiefer Series")-Federal Republic of Germany: Constraints to their palaeogeography and assessment of their source rock potential [J]. Chemical Geology, 1988, 67: 307-325.

(编辑 张玉银)

(上接第490页)

- [21] 陶高强, 董清水, 聂辉, 等. 俄罗斯西伯利亚地台油气成藏条件与分布规律 [J]. 世界地质, 2012, 31(1): 139-147.
- Tao Gaoqiang, Dong Qingshui, Nie hui, et al. Research on hydrocarbon accumulation condition and distributive regulation of Siberian platform, Russia [J]. Global Geology, 2012, 31(1): 139-147.
- [22] 张新顺, 王红军, 马锋, 等. 西西伯利亚盆地侏罗系致密油发育特征与资源潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 101-108.
- Zhang Xinshun, Wang Hongjun, Ma Feng, et al. Characteristics and resource potential of Jurassic tight shale oil reservoirs in West Siberian Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 101-108.
- [23] Liang X P, Galushyn G A, Filippov V P. Conditions of Domanicites Formation in the South-Eastern Part of the Russian Platform [J]. Georesursy, 2015, 3(62): 54-63.
- [24] Liang X P, Filippov V P, Galushyn G. A. Paleogeographic reconstruction and structural morphology of Domanik Formation in the Republic of Tatarstan [R]. SPE-176610. Society of Petroleum Engineers. SPE Russian Petroleum Technology Conference 26-28th October 2015, Moscow.
- [25] Liang X, Barkov S L. Geochemical conditions of Domanic deposits generation in the south-east area of the Russian platform [J]. Geology, geophysics and development of oil and gas fields, 2015, 10: 21-27.
- [26] Зорин В. Т., Петерсон Л. Н. Стратиграфия нижнекаменноугольных отложений северной части Минусинского прогиба [J]. Геология и геофизика, 1989, 8: 10-17.
- [27] Цветков Л. Д., Цветкова Н. Л. Нефтеносность зон растяжения земной коры на примере оффшорной части Бразилии и востока России [J]. Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. -М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013, 5(16): 105-114.
- [28] Прищепа О. М., Аверьянова О. Ю., Ильинский А. А. и др. Нефть и газ низкопроницаемых сланцевых толщ -резерв сырьевой базы углеводородов России [M]. -Сиб.: ФГУП «ВНИГРИ», 2014. -323 с. : ил. -(Труды ВНИГРИ).

(编辑 张玉银)