

陆相细粒沉积岩物质来源、搬运-沉积机制及多源油气甜点

姜在兴¹,王运增²,王力¹,孔祥鑫¹,杨叶芃¹,张建国¹,薛欣宇¹

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083; 2. 中国石油大庆塔木察格有限责任公司,黑龙江 大庆 163453]

摘要:伴随着非常规油气工业的蓬勃发展,细粒沉积岩研究受到广泛关注。基于近年来国内外学者对细粒沉积岩的研究认识,对陆相湖盆细粒沉积岩的岩石类型、物质来源、搬运-沉积机制和油气甜点特征进行了系统的阐述。细粒沉积岩的物质来源包括陆源、内源、火山源及混合来源。细粒物质可以通过悬浮沉降、重力流、火山-热液活动和盆内生物化学作用等方式沉积下来,且在成岩前可能发生原地沉积或湖盆内短距离的搬运和再沉积作用。细粒沉积岩在沉积特征、孔渗条件、油气富集机制等方面与细粒物质来源密切相关。对细粒沉积岩物质来源和搬运-沉积动力学模式的研究对页岩油气勘探开发具有重要的指导作用。

关键词:物质来源;搬运-沉积模式;甜点类型;细粒沉积岩;页岩油气

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Review on provenance, transport-sedimentation dynamics and multi-source hydrocarbon sweet spots of continental fine-grained sedimentary rocks

Jiang Zaixing¹, Wang Yunzeng², Wang Li¹, Kong Xiangxin¹, Yang Yepeng¹, Zhang Jianguo¹, Xue Xinyu¹

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Daqing Tamsag, LLC, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China]

Abstract: With the rapid development of unconventional oil/gas industry, more and more attention has been paid to fine-grained sedimentary rocks. The study expounds the rock types, provenances, transport-sedimentation dynamics and hydrocarbon sweet spots of fine-grained sedimentary rocks of continental lacustrine facies in a systematic manner, based on the researches of fine-grained sedimentary rocks in recent years both at home and abroad. The accumulation of fine-grained sedimentary rocks in the continental lacustrine basin is mainly a result of multi-source supply of terrestrial, intrabasinal authigenic, volcanic and mixed-source sediments. The deposition mechanisms of fine-grained sediments include suspended sedimentation, gravity flow, volcanic, hydrothermal and intrabasinal biochemical activities, and the sediments may have undergone autochthonous re-deposition or re-deposition after short-distance transport before becoming consolidated rock. The provenance of fine-grained sediments plays a major role in determining the sedimentary characteristics, physical qualities, and hydrocarbon enrichment mechanism of the fine-grained sedimentary rocks. The study of provenance and transport-deposition dynamics of fine-grained sedimentary rocks is of great guiding value to shale oil/gas exploration and development.

Key words: provenance, transport-deposition model, type of sweet spots, fine-grained sedimentary rock, shale oil/gas

引用格式:姜在兴,王运增,王力,等. 陆相细粒沉积岩物质来源、搬运-沉积机制及多源油气甜点[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1039-1048.

DOI:10.11743/ogg20220503.

Jiang Zaixing, Wang Yunzeng, Wang Li, et al. Review on provenance, transport-sedimentation dynamics and multi-source hydrocarbon sweet spots of continental fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1039-1048. DOI:10.11743/ogg20220503.

在近两个世纪的沉积学发展过程中,沉积学的研究内容逐渐丰富,并更加注重由物源到沉积盆地整体

的控制因素研究^[1]。得益于页岩油气等非常规油气资源的勘探突破,研究重心从传统的“粗-中粒沉积”向

收稿日期:2022-03-19;修订日期:2022-07-22。

第一作者简介:姜在兴(1962—),男,博士、教授,油气沉积地质学。E-mail: jiangzx@cugb.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05009-002);国家自然科学基金面上项目(41772090);中国博士后科学基金项目(2020M680624)。

“细粒沉积”转移^[2-4]。

细粒沉积物粒径小于62.5 μm ,包括粘土矿物、石英、长石、碳酸盐、硫化物和有机质等岩石组成成分^[5-7]。相较于粗碎屑岩,细粒沉积岩在沉积岩中占比更大,但受到粒度小、观察难度大的限制,对细粒物质的沉积和成岩作用研究相对薄弱,其研究程度远远低于粗碎屑岩^[5-6]。由于细粒沉积物的成分、来源和沉积构造等非常复杂,因此诸如“烃源岩”和“泥页岩”等词并不能全面地涵盖所研究的对象。非常规油气领域的研究对象粒度多为细粒级别,“细粒沉积”一词在非常规油气研究中被广泛使用^[5]。

页岩油气和致密油气等非常规油气资源都与细粒沉积岩密切相关^[4,8-9]。细粒沉积岩的分类方案已有较为详细的研究,成分、沉积构造、总有机碳含量(TOC)和沉积过程等指标均有相应的划分方案^[10-11]。细粒沉积岩岩相发育主要受控于沉积环境与物质来源,细粒物质来源包括陆源、内源、火山源和深源等^[12-14]。分析细粒沉积岩的细粒物质来源有助于了解细粒沉积岩的形成过程,加深细粒沉积学中对细粒沉积岩岩相的认识,对页岩油气的勘探和甜点预测具有重要意义。

中国广泛发育了海相和陆相细粒沉积岩,有着非常可观的油气勘探开发潜力,并已经在勘探实践中取得了巨大成功^[3],但细粒沉积岩的物质来源、搬运-沉积动力和油气富集等问题仍然需要细致深入的研究,从而更有效地指导非常规油气的勘探,满足能源需求。在以往的研究中笔者已经论述了细粒碳酸盐岩的多物质来源与油气甜点特征^[13],在本文中,笔者将基于新的研究认识,将在整个细粒沉积岩领域分析与讨论多源油气甜点理论。

1 细粒沉积岩物质组成与来源

1.1 物质组成

细粒沉积岩具有复杂的物质构成,而不是仅仅包含粘土矿物。细粒沉积岩主要由粘土矿物(伊利石、伊/蒙混层、蒙脱石、绿泥石等)、长英质矿物(石英、钾长石、斜长石等)、重矿物(黄铁矿、黑云母、白云母等)、碳酸盐矿物(方解石、白云石等)和有机物质(动植物遗体,其中植物碎屑常以炭屑形式保存)组成^[5-6],其中矿物类型可分为原生矿物与次生矿物。细粒沉积岩在不同盆地中的矿物组成差异较大,但由于组成岩石的颗粒粒度小,它们的岩心特征可能是相似的^[11,13]。

细粒沉积岩最初按照不同粒度的岩石组分被简单

地划分为粉砂岩、粉砂质粘土岩和粘土岩等类型^[15],这种划分方案在常规油气研究中是可以满足需求的,但随着非常规油气勘探开发趋于精细化,这种对细粒沉积岩的简单分类已难以为继。可以发现,随着细粒岩石储层油气勘探范围的扩展,纹层组合、有机质类型、有机质含量、矿物含量、沉积构造和沉积过程等分类标准也被应用到细粒沉积岩分类中,且呈现出从定性划分到定量划分转变的特点^[5,10,15-20](表1)。

由于在不同盆地中研究者聚焦的研究问题不尽相同,且细粒沉积岩的主要矿物组成和地球化学特征等也有很大差别,因此细粒沉积岩具有多种分类方案。TOC通常与页岩含气量强相关,而矿物成分和纹层构造则与页岩油气储层质量、可压裂性等强相关。TOC、矿物成分和纹层构造可以反映大量的沉积、成岩信息,在一定程度上可以反映出细粒沉积岩的沉积环境,在此基础上划分的多种岩石类型也可以满足页岩油气的精细勘探需求。故笔者认为,在细粒沉积岩研究的开始阶段,可以先使用相对容易获得的“TOC+沉积构造+矿物成分”资料,制定细粒沉积岩分类方案,然后针对研究的问题,再进行更详细的划分。

1.2 物质来源

湖相细粒沉积岩具有多物质来源的特点,按照主要物质来源不同可分为陆源型、火山-热液型、内源型和混源型(图1)。物质来源与细粒沉积岩物质组成、沉积-储层特征以及地球化学特征等密切相关^[16]。同时,物质来源对细粒沉积过程、富有机质页岩发育和非常规油气富集具有控制作用,其与细粒沉积岩之间的关系一直以来被研究者所关注^[8,13]。

1.2.1 陆源细粒沉积物(陆源型)

陆源细粒沉积物是指所有从陆地搬运进入湖泊中的细粒物质(图1),其中也包含了通过湖岸侵蚀进入湖泊的细粒物质^[21]。在封闭湖泊中,陆源细粒沉积物主要来自波浪对湖岸的侵蚀;而在有河流或冲积扇输入的湖泊中,陆源细粒物质则主要来自河流和冲积扇的输入。湖泊中陆源细粒物质的聚集主要取决于物源区风化剥蚀供源的数量和物质搬运距离,物源区的沉积岩、变质岩和火山岩都可以经风化、破碎为湖泊细粒沉积提供物质保障。湖泊的水体状态和气候变化也会

1.2.2 火山碎屑和热液细粒沉积物(火山-热液型)

火山喷发和水底热液都可产生细粒级别的沉积

表 1 细粒沉积岩划分标准

Table 1 Criteria for classification of fine-grained sedimentary rocks

划分原则	主要岩石类型	参考文献
岩石组分	粉砂岩(粉砂含量>80%)、粘土质粉砂岩(粉砂含量>粘土含量>10%,其他含量<10%)、粉砂质粘土岩(粘土含量>粉砂含量>10%,其他含量<10%)、粘土岩(粘土含量>80%)	Wentworth ^[15]
纹层组合 (定性划分)	黑页岩(页理、有机质纹层)、钙质页岩(页理、有机质纹层、方解石纹层)、钙质纹层页岩(富有机质的粘土纹层、隐晶方解石纹层)、均匀块状泥岩(块状含陆源碎屑)、递变纹层泥岩(底部粉砂,向上递变为泥岩)、变形泥质岩(含包卷层理等变形构造)、混杂泥质岩(含大小不等的角砾和泥质团块)	邓宏文等 ^[16]
有机质类型	腐泥型油页岩(有机质显微组分主要为藻类体、浮游动物等)、混合型油页岩、腐殖-残殖型油页岩(有机质主要为高等植物凝胶化组分和稳定组分)	郭巍等 ^[17]
纹层组合 (定量划分)	油页岩(10%<有机质纹层含量<25%,粘土纹层含量>50%)、泥页岩(有机质纹层含量<10%,粘土纹层含量>75%)、黑页岩(有机质纹层含量>25%)、钙质页岩(有机质纹层含量<10%,50%<粘土纹层含量<75%)、钙质纹层页岩(10%<有机质纹层含量<25%,隐晶方解石纹层含量>50%)、纹层状泥灰岩(有机质纹层含量<10%,50%<隐晶方解石纹层含量<75%)和纹层状灰岩(有机质纹层含量<10%,隐晶方解石纹层含量>75%)	王冠民 ^[18]
沉积过程	喷爆岩(深源岩浆上涌入湖产生爆炸破碎,形成的矿物碎屑被含热液湖水胶结)、喷溢岩(岩浆低压下沿通道宁静式溢流入湖冷凝)、喷流岩(热液喷流“白烟型”和“黑烟型”纹层岩)、喷混岩(岩浆喷爆和热液喷流物质与湖水均匀混合形成的纹层岩)和嗜热嗜毒生物岩(与热液活动相关的放射虫岩)	柳益群等 ^[19]
TOC、 矿物含量、 沉积构造	高有机质页状灰岩(TOC>4%,碳酸盐含量>50%)、高有机质页状粘土岩(TOC>4%,粘土矿物含量>50%);中有机质页状灰岩(2%<TOC<4%,碳酸盐含量>50%);中有机质页状灰质粘土岩(2%<TOC<4%,粘土矿物含量>50%);低有机质灰泥灰岩(TOC<2%,碳酸盐含量>50%);低有机质块状粘土岩(TOC<2%,粘土矿物含量>50%)	姜在兴等 ^[5]
纹层结构、 沉积结构	块状泥岩(含粉砂,纹层模糊不清)、粒序层理泥岩(泥和砂毫米级间互沉积,发育递变层理)、波状纹层页岩(含粉砂,波状层理)、平直纹层页岩(平直纹层,有机质-石英-粘土纹层)、似块状页岩(含粉砂,有机质-粘土扁平透镜体)	刘群等 ^[10]
混合方式	均匀混合型(块状层理,物质均一混合无主导)、泥砂-灰纹层叠置混合型、泥-灰纹层叠置混合型、泥砂粒序-灰纹层叠置混合型、灰-泥-云纹层叠置混合型、不均匀团块状混合型(不同矿物成分混合不均一,以团块状或其他不规则形态产出)	陈世悦等 ^[20]

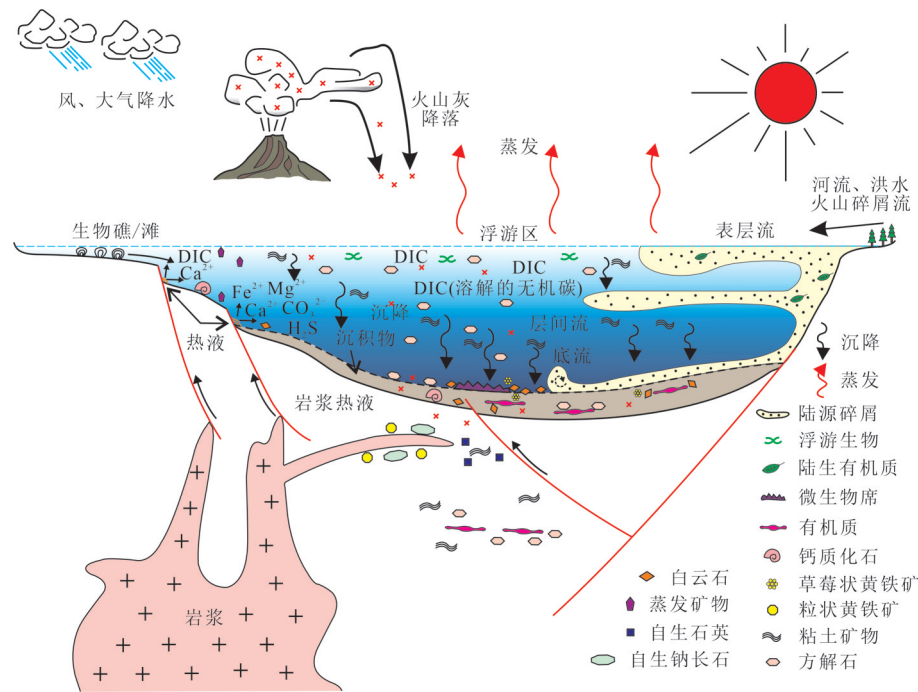


图 1 细粒沉积多源成因模式^[11]

Fig. 1 Schematic diagram showing the fine-grained sedimentation model of multiple sources^[11]

物。水底热液沉积主要为通过断层或泉眼进入湖盆的热液流体的沉淀(图1)^[8]。火山喷发产生的细粒级碎屑物质主要为火山灰、火山尘中的晶屑和玻屑,其中含有大量的矿物质和微量元素,能够促进藻类和微生物发育^[14]。火山晶屑颗粒呈港湾状溶蚀结构及破碎粒状,没

有明显的搬运特征,颗粒间可能充填黑色的铁质杂基^[22]。

1.2.3 内源细粒沉积物(内源型)

内源细粒沉积物指湖盆中所有源于湖泊内部水体的,通过物理-化学作用或生物-化学作用沉积的细粒

物质^[13,23]。内源细粒沉积物多为碳酸盐矿物沉积,也包括铝、铁和锰的氢氧化物及氧化物、硫酸盐、二氧化硅和有机质等。陆源输入和火山-热液活动与内源细粒沉积物具有密切的联系,由陆地或火山活动搬运到湖盆中的 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 等溶解物质可在微生物参与下在水体中沉淀形成内源细粒沉积物(图1)^[13];通过生物作用或由生物遗体形成的碳酸盐沉淀多分布于适合生物活动的浅水区,在深水区也有分布;气候和水体条件变化产生的碳酸盐沉淀通常在全湖都有较为均匀的分布。

1.2.4 混源细粒沉积物(混源型)

混源细粒沉积物是指多物质来源的沉积物。相比于单物质来源控制,混源型细粒沉积岩的细粒组成特征更为复杂,其中混杂了2种或3种单一物质来源的细粒沉积物^[13]。火山-热液型细粒沉积物中可能出现生物-化学作用形成的内源物质,湖盆自生的内源碳酸盐沉淀也可能与陆源输入的碳酸盐碎屑混合沉积^[11]。混源细粒沉积物的沉积环境与分布位置通常取决于不同来源细粒物质的搬运-沉积模式:陆源-内源混合沉积的钙质泥岩、钙质粉砂岩等通常分布在较深水位置;火山源-内源混合沉积形成的白云岩、凝灰质白云岩等通常分布在水下喷口附近,向喷口周围其数量呈递减趋势;陆源-火山源混合沉积通常发生在近岸或较深水位置,如凝灰质粉细砂岩。

2 细粒物质搬运-沉积机制

在经风和河流搬运进入湖泊环境的过程中,细粒沉积物可能在入湖处原地沉积,也可能经过湖泊水力循环后在湖泊的不同位置沉积^[24]。不同沉积环境(如深湖、浅湖、滨岸)沉积的细粒沉积物,其物质组成有明显的差别,这与物源、搬运-沉积模式、氧化-还原性、生物活动性都有关系^[25]。而细粒物质的沉积位置与细粒沉积岩的物质组成存在较强的相关性,离物源越近,沉积物粒度越粗,细粒沉积物占比越小^[26]。在河流长距离运输中,随着运输距离的增加,颗粒之间碰撞、破碎,并且会侵蚀沿途的地表,这导致搬运物质中的细粒沉积物占比逐渐增加。湖泊波浪主要受到风场控制,除对湖岸侵蚀外,也会对经河流、冲积扇等搬运到湖泊中的沉积物进行淘洗改造,随风浪强度和改造时间的增加,细粒物质占比逐渐增加。

2.1 陆源细粒沉积物

陆源细粒沉积物主要通过河流、洪水和风等地质

营力,以牵引流、重力流或湖岸侵蚀的形式搬运、沉积到湖盆中^[21]。在以河流为主要物源的湖盆中,河流携带的粘土、粉砂和细砂在湖滨卸载,沉积物主要包括以粘土和粉砂为主的、在湖水近表面以平面喷流的形式悬浮沉降的低密度流沉积,以及以粘土、粉砂和细砂的混合物为主的近湖水底面的高密度流沉积。在以湖岸侵蚀为主要物源的湖盆中,湖岸侵蚀程度主要受控于风浪强度和基岩的风化程度。

渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)的滩坝粉砂岩(图2a,b),其物质来源主要是波浪对湖岸的侵蚀,波浪由风场产生,将盆缘风化岩石侵蚀并搬运到滨岸破碎淘洗,具有多种交错层理和生物扰动构造^[27]。鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段(长7段)物质来源主要为河流,发育泥页岩夹粉-细砂岩。黑色页岩在深湖区以悬浮状态缓慢沉降,水动力较弱,还原性强,细粒物质周期性沉降形成水平纹层^[28-29],如受到底流影响,可能会发育微波状层理(图2c)。受到强陆源输入的影响,黑色页岩中可能会发育石英、长石颗粒或长英质条带(图2d)。细粒物质可能被浊流、滑塌等重力驱动作用搬运改造,在深水区发育重力流沉积^[14,30]。深水重力流沉积的细粒沉积物以发育变形层理为典型特征(图2e),沉积速率较快,可能发育泥质撕裂屑和陆源内碎屑(图2f),反映沉积过程中对湖底沉积物的侵蚀^[31-32]。水流侵蚀泥质沉积物可产生毫米到厘米级大小的碎片^[33],经过磨圆分选,沉积后被压平呈透镜状^[34]。

2.2 火山-热液细粒沉积物

细粒沉积物可以通过火山喷发及热液喷流的方式进入湖泊中并沉积下来。陆上火山喷发产生的火山碎屑通常粒度较大,在风化破碎后可由降水或河流搬运进入湖泊,形成细粒凝灰岩层,或与陆源碎屑混合在一起,形成细粒凝灰质砂岩层。地表沉积的火山灰层易被风化为粘土,为湖泊细粒沉积供源。盆地周缘火山喷发产生的火山灰和火山尘可由风力搬运极长的距离,在湖泊中呈悬浮状态缓慢沉积下来,形成层状产出、连续分布的凝灰层^[32]。

水下喷发物质按流体性质不同可分为悬浮型和流动型^[23,35-36](图3a)。水下喷发开始时的释压过程会产生破碎,且与水接触的岩浆会迅速产生大量水蒸气,释放出大量能量产生二次破碎^[8,35,37]。水下喷发产生的由岩浆碎屑、岩浆气、水蒸气及水等形成的混合流体会在上升过程中不断混入湖水,使混合流体的密度与水不断接近,最终呈粉尘状悬浮于湖水中形成

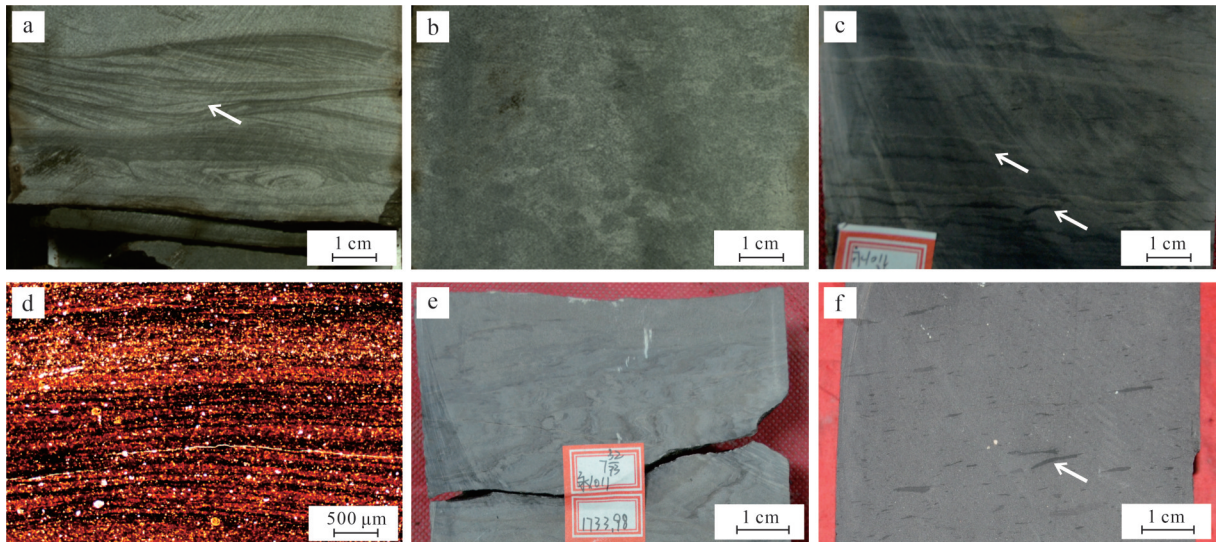


图2 不同盆地陆源细粒沉积岩岩心和镜下特征

Fig. 2 Core and thin-section photos showing the characteristics of terrigenous fine-grained sedimentary rocks from different basins

a. 波纹交错层理, 滩坝粉砂岩^[27], 东营凹陷, 沙四上亚段, FY1井, 埋深3 444.40 m, 岩心照片; b. 生物扰动构造^[27], 东营凹陷, 沙四上亚段, FY1井, 埋深3 440.64 m, 岩心照片; c. 微波状层理, 鄂尔多斯盆地, 长7段, Y1011井, 埋深1 759.10 m, 岩心照片; d. 黑色页岩, 鄂尔多斯盆地, 长7段, Y1011井, 埋深1 736.92 m, 单偏光, 薄片照片; e. 变形层理, 鄂尔多斯盆地, 长7段, Y1011井, 埋深1 733.98 m, 岩心照片; f. 泥岩撕裂屑, 鄂尔多斯盆地, 长7段, Y1011井, 埋深1 741.60 m, 岩心照片

火山灰异轻流^[8,38], 在离火山喷口较远处形成正粒序沉积^[39-40](图3b, b₁)。由于水下喷发需克服上覆水压, 常形成脉动式、少量多次喷发、沉积单层较薄而层数较多的火山沉积物^[41](图3c, c₁)。水下火山喷发爆炸产生的细粒物质也可形成浊流(图3d, d₁), 流动型水下火山沉积可能以中粗粒火山灰异重流或细粒火山灰异重流的形式沉积在喷口周缘^[12,41-42]。热液喷流表现为陆表热卤水沉积与海/湖底“黑、白烟囱”及硫化物沉淀^[8]。

2.3 内源细粒沉积物

内源细粒沉积物主要通过机械作用或化学-生物化学作用从沉积盆地的流体中沉淀出来。溶解物质以胶体溶液或真溶液的形式被搬运, 当流体的pH值、电荷、温度、压力和离子浓度等发生变化时, 溶解物质就可能发生絮凝和沉淀^[13](表2)。内源细粒沉积物在沉淀后也可能通过湖泊水动力循环, 在湖泊中产生短距离的搬运再沉积。

东营凹陷沙四上亚段页状灰岩发育犬牙状方解石层(图4a), 主要为碳酸盐矿物重新溶解、原地或就近再沉淀形成^[27]。页状灰岩有机质含量由高到低分别发育于深湖、半深湖和浅湖, 受到陆源沉积物的影响逐渐变大, 表现为陆源石英、长石含量的上升和黄铁矿、粘土矿物、碳酸盐矿物含量的下降^[27]。偏盐水环境多沉积隐晶纹层(图4b), 其发育情况可以反映古气候和

古盐度变化^[11]。有机质纹层多形成于温湿气候下浮游藻类等水生生物繁盛时期^[11]。

生物可吸取介质中钙、磷、硅等无机盐并通过生物分泌作用形成外壳和骨骼, 生物遗体可以直接堆积形成岩石或沉积矿床^[13]。细菌的细胞壁可以作为方解石成核的基底, 钙、镁离子带有正电荷, 可以吸附在带有负电荷的细胞表面^[43-44]。生物生命活动或遗体分解可使周围介质的物理化学环境产生变化, 导致溶解物质沉淀^[13](图4c), 如浮游藻类和细菌的新陈代谢可使周围湖水的pH值升高, 促进HCO₃⁻转化为CO₃²⁻, 在有机体周边形成促使方解石沉淀的微环境^[45-46](图4d)。

2.4 混源细粒沉积物

混源细粒沉积物搬运-沉积机制与沉积物混合的来源相关。陆源-火山源混合沉积通常为火山喷发物沉积在陆上, 由河流、洪水等搬运到湖泊中, 与其原本携带的陆源碎屑混杂在一起, 也有可能火山碎屑流与陆源浊流在深水区混合^[47-48]。火山源-内源混合沉积可以视为火山物质的输入引发周围水体的离子浓度变化, 进而产生细粒沉淀^[11,13]。陆源-内源混合沉积可表现为内源碳酸盐岩沉积后被陆源浊流侵蚀再搬运, 碳酸盐岩碎屑与陆源碎屑混杂在一起^[11]。相比于单物源形成的细粒沉积岩, 混源细粒沉积岩在多物源共同参与下形成, 通常难以判断主要物质来源, 判断其搬运-沉积模式也较为困难。

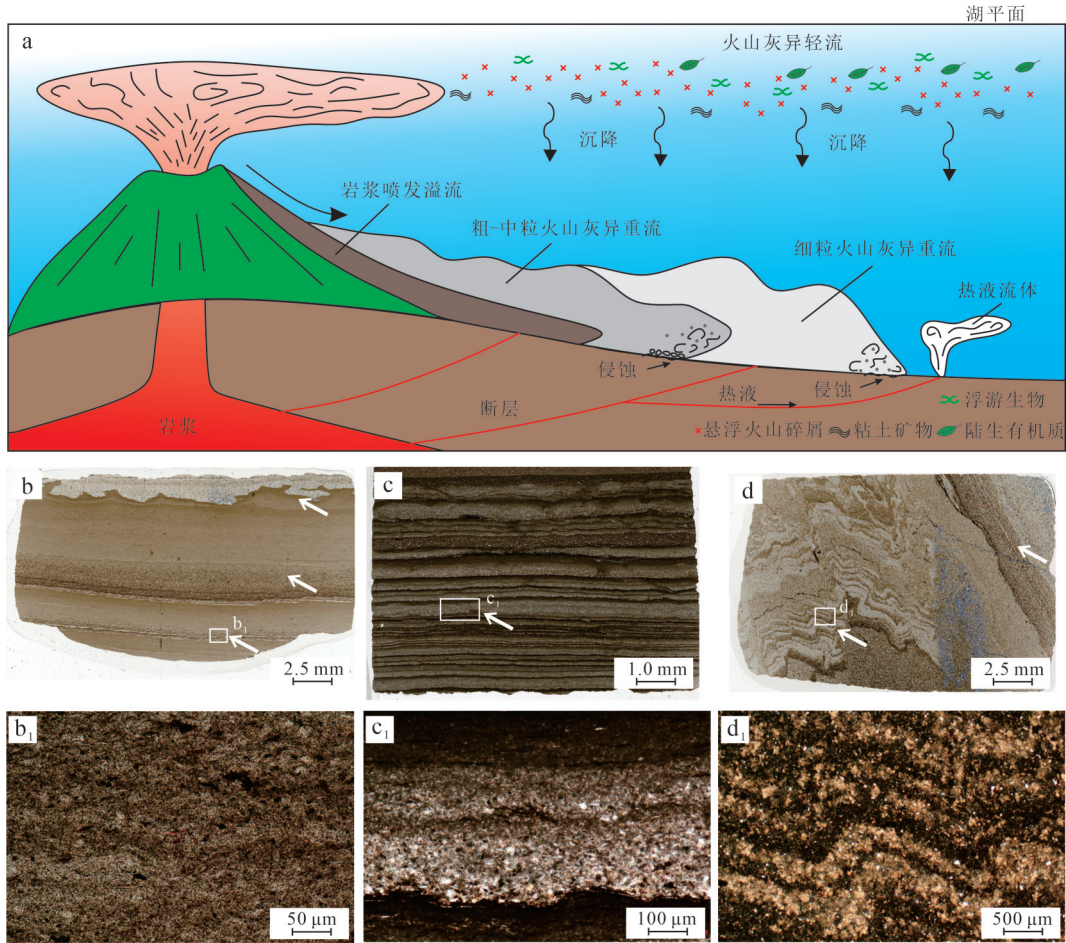


图3 火山源细粒沉积岩微观特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of fine-grained sedimentary rocks originated from volcanic eruption

a. 水下火山-热液沉积模式; b, b₁. 多期正粒序火山碎屑沉积, 长岭断陷, 沙河子组, B217-3HF井, 埋深3 605.52 m, b为薄片扫描照片, b₁为单偏光显微照片; c, c₁. 多层薄火山碎屑沉积, 长岭断陷, 沙河子组, B217-3HF井, 埋深3 570.12 m, c为薄片扫描照片, c₁为单偏光显微照片; d, d₁. 变形层理火山灰重力流沉积, 长岭断陷, 沙河子组, B217-3HF井, 埋深3 608.50 m, d为薄片扫描照片, d₁为单偏光显微照片

表2 细粒沉积岩搬运-沉积机制及甜点特征

Table 2 Transport-deposition mechanism and sweet spot characteristics of fine-grained sedimentary rocks			
物质来源	岩性组合	搬运-沉积机制	甜点特征
陆源	泥页岩、粉-细砂岩和泥质粉-细砂岩	①河流搬运到湖泊中沉积的远源细粒沉积;	①源、储临近或有运移通道连接储层和烃源岩;
		②洪水、风暴、滑塌等产生的重力流搬运到湖泊中的悬浮物质快速沉降;	②粉-细砂输入提高了储集性能和页岩层的脆性
火山源	泥页岩、凝灰质泥页岩、凝灰岩、凝灰质粉-细砂岩和碳酸盐岩	③风产生的波浪和潮流侵蚀湖岸或三角洲产生细粒沉积物,并搬运到湖泊各处	(如鄂尔多斯盆地长7段、束鹿凹陷沙三下亚段)
		①风力搬运细粒火山灰、火山尘至湖泊中悬浮沉积;	①火山物质输入利于形成高有机质烃源岩;
内源	泥页岩、碳酸盐岩	②陆表火山喷发沉积后风化破碎,由降水或河流搬运进入湖泊;	②晶屑、玻屑脱玻化易于形成优质储层;
		③水下火山喷发爆炸破碎,火山灰异轻流呈悬浮状态沉降在湖泊大范围内,细粒火山灰异重流沉积在距喷口较远位置;	③火山热源利于有机质成熟
		④热液喷流进入湖泊中,与湖水中的物质反应生成细粒硫化物、碳酸盐沉淀;喷口周围生物聚集,生物化学反应与生物遗体也可形成细粒沉积	(如滦平盆地西瓜园组、松南长岭断陷沙河子组和吉木萨尔凹陷芦草沟组)
		温度、离子浓度、pH值等流体条件变化时,矿物溶解或沉淀,这些流体条件的变化可能由气候变化、陆源输入、火山-热液活动、生物活动等引起	①碳酸盐纹层晶间孔和层间缝是良好的油气储集空间;
			②通常形成自生自储型油气甜点
			(如东营凹陷沙四上亚段、潜江凹陷潜江组)

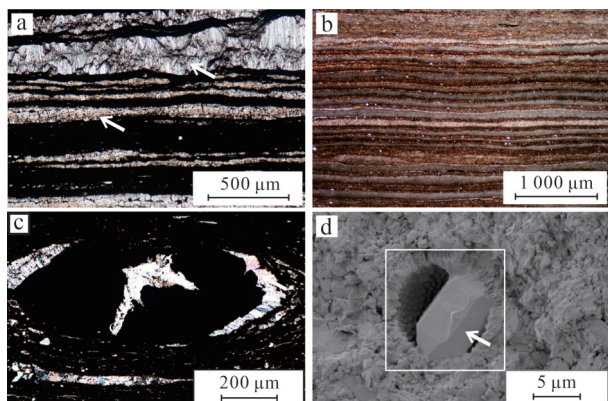


图4 内源细粒沉积岩薄片微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of thin sections of intrabasinal fine-grained sedimentary rocks

a. 犬牙状亮晶方解石层^[27], 东营凹陷, 沙四上亚段, FY1井, 埋深3 325.49 m, 正交光显微照片; b. 隐晶方解石纹层^[27], 东营凹陷, 沙四上亚段, NY1井, 埋深3 420.90 m, 单偏光显微照片; c. 生物壳壁方解石化^[11], 东营凹陷, 沙四上亚段, FY1井, 埋深3 324.79 m, 正交光显微照片; d. 渤海网窗石藻(*Reticulofenestra bohaiensis*)泥晶化^[11], 体腔充填石英, 束鹿凹陷, 沙三下亚段, J94井, 埋深3 114.22 m, 扫描电镜照片

3 细粒沉积油气甜点特征

中国陆相含油气盆地广泛发育细粒沉积岩, 具有巨大的页岩油气潜力, 并已经在勘探实践中取得了巨大成功^[3-4]。作为自生自储的非常规储层, 其在沉积特征、孔渗特征、油气富集机制等方面与常规储层有着显著的不同, 其商业化开发有赖于储层的可压裂性。

3.1 陆源细粒沉积油气甜点

以陆源细粒物质为主的岩相中产生的油气聚集为陆源细粒沉积油气甜点^[13], 主要分布于鄂尔多斯盆地延长组, 在渤海湾盆地沾化凹陷和束鹿凹陷也有发现^[13]。鄂尔多斯盆地长7段发育厚层高有机质的泥页岩与粉-细砂岩夹层, 粉-细砂岩多为浊积成因, 属于陆源输入。相比于泥页岩, 粉砂夹层通常拥有更好的孔、渗条件, 因为粉砂颗粒的抗压实能力更强, 可以保留更多的粒间孔^[49-50](图5a)。粉砂颗粒与夹层提高了泥页岩段的脆性, 也为压裂开发提供了有利条件。长7段页岩油具有源、储临近的特点^[28], 即便源、储不是包夹叠置关系, 但有运移通道可以连通储集层和有效烃源岩, 也可形成陆源型甜点。如束鹿凹陷沙三下亚段, 优质储层为强陆源物质输入条件下沉积的碳酸盐质粉砂岩和角砾岩^[51], 其周围的碳酸盐质细粒沉积岩有机质含量低, 烃源岩条件差^[52], 但在沙三下亚段底部多发育高角度裂缝, 可以将下部优质烃源岩和上部

储层沟通, 从而形成陆源型甜点^[13,53]。

3.2 火山-热液细粒沉积油气甜点

火山-热液活动可以在湖盆中形成(沉)凝灰岩和碳酸盐岩, 其相关岩相中形成的油气聚集为火山-热液细粒油气甜点^[13]。火山-热液活动与油气富集在诸多含油气盆地都展现出了极强的耦合关系, 典型的实例是滦平盆地西瓜园组^[54]、松南长岭断陷沙河子组^[55]和吉木萨尔凹陷芦草沟组^[56]。以长岭断陷沙河子组为例, 高有机质烃源岩中的夹层型凝灰岩剩余粒间孔和溶蚀孔发育, 富集油质沥青(图5b, c)。火山晶屑-玻屑脱玻化可以形成大量的次生孔隙, 这些孔隙能够作为良好的油气储集空间^[14,54]。火山-热液活动可以提供丰富的营养物质, 从而提高湖泊生产力, 形成高有机质烃源岩(图5d), 且火山喷发产生的过渡金属元素可对烃源岩生烃起到催化作用, 使烃源岩提前排烃^[13,57]。此外, 深部热液流体还可以改善碳酸盐岩储集层的储层物性^[8]。

3.3 内源细粒沉积油气甜点

内源细粒沉积油气甜点的岩性主要为自生碳酸盐质细粒沉积岩, 主要分布于渤海湾、南襄和江汉等盆地。烃类对碳酸盐物质的吸附作用较弱, 油气多富集于碳酸盐层内粒间孔和层间缝隙中^[9]。细粒沉积岩中的生烃母质生、排烃后在方解石纹层内和纹层间富集, 形成自生自储型的油气甜点。碳酸盐物质亮晶化有利于提高岩石储集性能, 如东营凹陷NY1井沙四上亚段中亮晶化和白云石化明显的岩石孔隙更为发育^[13](图5e, f)。

4 结论

细粒物质来源主要有陆源、火山-热液来源和内源3种。陆源细粒沉积物主要来自湖盆外陆地包括湖岸侵蚀, 主要由河流、洪水、波浪等搬运到湖盆中。陆地火山喷发的细粒沉积物通常以火山灰、火山尘的形式通过风力搬运到湖泊中, 或与陆源沉积物共同搬运、沉积。水下火山喷发具有火山灰异轻流和细粒火山灰异重流两种搬运-沉积机制。内源细粒沉积物主要为在流体性质改变时产生的碳酸盐沉淀, 流体性质的改变可能源于生物活动、气候变化、陆源输入、火山-热液活动等。运输到湖盆中或湖盆中自生的细粒物质, 可以通过湖泊水动力循环, 在湖泊的各个位置沉积下来, 也可能在重力作用下被搬运改造形成滑塌、浊流等。细粒沉积的岩相组合、甜点类型受到细粒物质来

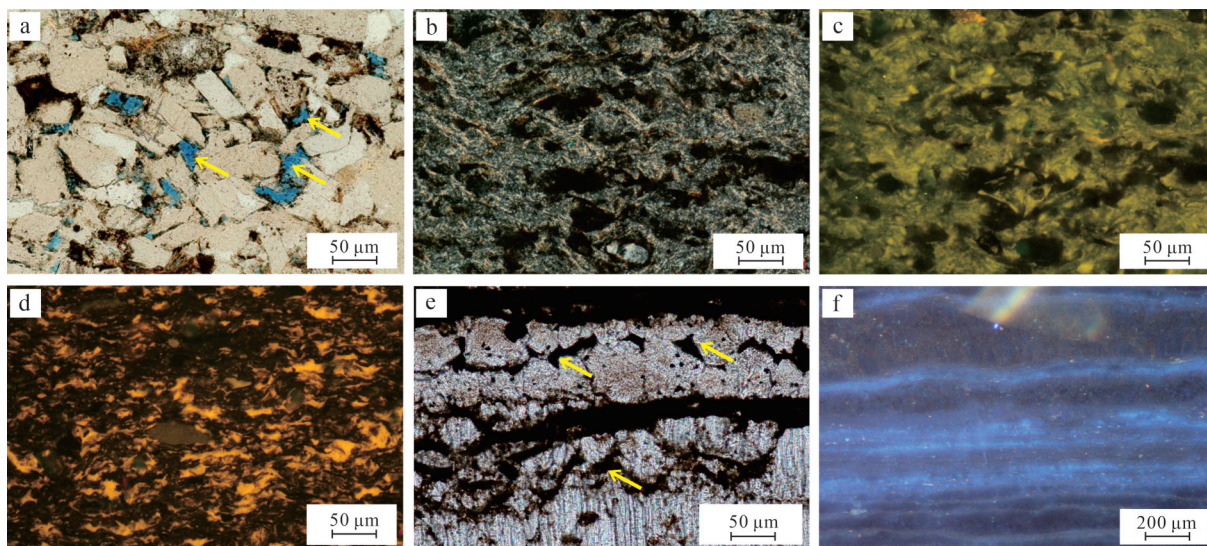


图5 细粒沉积岩多源甜点微观特征

Fig. 5 Micrographs showing characteristics of multi-source hydrocarbon sweet spots in fine-grained sedimentary rocks

a. 夹层型粉砂岩残余粒间孔发育,鄂尔多斯盆地,长7段,Y1011井,埋深1 695.70 m,单偏光显微照片;b. 凝灰岩玻屑晶屑蚀变,长岭断陷,沙河子组,B217-3HF井,埋深3 545.57 m,正交光显微照片;c. 火山碎屑沉积蚀变晶隙富集油质沥青荧光显示,长岭断陷,沙河子组,B217-3HF井,埋深3 545.57 m,荧光显微照片;d. 火山碎屑促进藻类有机质富集,长岭断陷,沙河子组,埋深3 582.07 m,荧光显微照片;e. 亮晶方解石层晶间孔隙发育,东营凹陷,沙四上亚段,FY1井,埋深3 325.49 m,正交光显微照片;f. 粘土纹层荧光显示,东营凹陷,沙四上亚段,FY1井,埋深3 325.49 m,荧光显微照片

源和搬运-沉积机制的控制。

本文基于团队以往的研究认识,将多源甜点理论由陆相细粒碳酸盐岩扩展到陆相细粒沉积岩中,丰富了多源油气甜点理论的研究内容,可以为细粒沉积研究和细粒沉积岩油气勘探提供理论参考。文中对几个典型的盆地层段进行了多源甜点理论的举例分析和定性讨论,多源甜点理论对其他陆相湖盆细粒沉积岩的适用性论证和量化研究将是未来研究的重点。

参 考 文 献

- [1] 姜在兴,王雯雯,王俊辉,等. 风动力场对沉积体系的作用[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 863-876.
Jiang Zaixing, Wang Wenwen, Wang Junhui, et al. The influence of wind field on depositional systems[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 863-876.
- [2] 金之钧,白振瑞,高波,等. 中国迎来页岩油气革命了吗?[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 1-8.
Jin Zhijun, Bai Zhenrui, Gao Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 1-8.
- [3] 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.
- [4] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 焦鑫,柳益群,周鼎武,等. 湖相烃源岩中的火山-热液深源物质与油气生成耦合关系研究进展[J]. 古地理学报, 2021, 23(4): 789-809.
Jiao Xin, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al. Progress on coupling relationship between volcanic and hydrothermal-originated sediments and hydrocarbon generation in lacustrine source rocks[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(4): 789-809.
- [9] 黎茂稳,金之钧,董明哲,等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 489-505.
Li Maowen, Jin Zhijun, Dong Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 489-505.
- [10] 刘群,袁选俊,林森虎,等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相粘土岩分类和沉积环境探讨[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1016-

- 1025.
- Liu Qun, Yuan Xuanjun, Lin Senhu, et al. The classification of lacustrine mudrock and research on its' depositional environment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1016-1025.
- [11] 孔祥鑫. 湖相含碳酸盐细粒沉积岩特征、成因与油气聚集 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Kong Xiangxin. Sedimentary characteristics, origin and hydrocarbon accumulation of lacustrine carbonate-bearing fine-grained sedimentary rocks [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [12] 李哲萱, 柳益群, 焦鑫, 等. 火山-热液作用相关细粒沉积岩研究现状及前沿探索 [J]. *古地理学报*, 2019, 21(5): 727-742.
- Li Zhexuan, Liu Yiqun, Jiao Xin, et al. Progress and present research on volcanic-hydrothermal related fine-grained sedimentary rocks [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(5): 727-742.
- [13] 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.
- [14] 聂银兰, 谢庆宾, 朱筱敏, 等. 基于岩相表征的细粒沉积物沉积机制和研究展望 [J]. *断块油气田*, 2021, 28(3): 305-310.
- Nie Yinlan, Xie Qingbin, Zhu Xiaomin, et al. The sedimentary mechanism and research prospect of fine grain sediments based on lithofacies characterization [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(3): 305-310.
- [15] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [16] 邓宏文, 钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化 [J]. *沉积学报*, 1990, 8(3): 1-21.
- Deng Hongwen, Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(3): 1-21.
- [17] 郭巍, 李成博, 宋玉勤, 等. 民和盆地炭山岭油页岩特征及成矿控制因素分析 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(6): 923-927, 932.
- Guo Wei, Li Chengbo, Song Yuqin, et al. Analysis on the characteristics of the oil shale in the Tanshanling area, Minhe Basin and their mineralization controlling factors [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(6): 923-927, 932.
- [18] 王冠民. 济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分类 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(3): 666-671, 680.
- Wang Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eocene shale in Jiyang Depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(3): 666-671, 680.
- [19] 柳益群, 周鼎武, 焦鑫, 等. 一类新型沉积岩: 地幔热液喷积岩——以中国新疆三塘湖地区为例 [J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 773-781.
- Liu Yiqun, Zhou Dingwu, Jiao Xin, et al. A new type of sedimentary rocks: Mantle-originated hydroclastites and hydrothermal exhalites, Santanghu area, Xinjiang, NW China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 773-781.
- [20] 陈世悦, 张顺, 刘惠民, 等. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨 [J]. *古地理学报*, 2017, 19(2): 271-284.
- Chen Shiyue, Zhang Shun, Liu Huimin, et al. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2017, 19(2): 271-284.
- [21] Wang W, Jiang Z, Xie X, et al. Sedimentary characteristics and interactions among volcanic, terrigenous and marine processes in the late Permian Kuishan member, eastern block of the north China craton [J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 407: 105741.
- [22] 蒋宜勤, 柳益群, 杨召, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷凝灰岩型致密油特征与成因 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 741-749.
- Jiang Yiqin, Liu Yiqun, Yang Zhao, et al. Characteristics and origin of tuff-type tight oil in Jimusar Depression, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 741-749.
- [23] Kelts K, Talbot M. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990: 288-315.
- [24] Nutz A, Schuster M, Ghienne J, et al. Wind-driven bottom currents and related sedimentary bodies in Lake Saint-Jean (Québec, Canada) [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127(9): 1194-1208.
- [25] Potter P E, Maynard J B, Depetris P J. Mud and mudstones [M]. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [26] Schieber J, Southard J, Thaisen K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples [J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1760-1763.
- [27] 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.
- [28] 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 prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11.
- [29] 杨华, 刘自亮, 朱筱敏, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组物源与沉积体系特征 [J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 10-18.
- Yang Hua, Liu Ziliang, Zhu Xiaomin, et al. Provenance and depositional systems of the upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 10-18.
- [30] Lowe D R. Sediment Gravity Flows: Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1982, 52(1): 279-297.
- [31] 吕奇奇, 罗顺社, 付金华, 等. 湖泊深水重力流沉积露头精细解剖——以鄂尔多斯盆地瑶曲剖面长7油层组为例 [J]. *地质学报*, 2017, 91(3): 617-628.
- Lyu Qiqi, Luo Shunshe, Fu Jinhua, et al. Outcrop-based analysis of a deep-water gravity flow sediments in lake: A case study from the Chang 7 of Yaoqu Section, Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(3): 617-628.
- [32] 李森, 朱如凯, 崔景伟, 等. 鄂尔多斯盆地长7段细粒沉积岩特征与古环境——以铜川地区瑶页1井为例 [J]. *沉积学报*, 2020, 38(3): 554-570.
- Li Sen, Zhu Rukai, Cui Jingwei, et al. Sedimentary characteristics of fine-grained sedimentary rock and paleo-environment of Chang 7 member in the Ordos Basin: A case study from well Yaoye 1 in Tongchuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 554-570.

- [33] Schieber J, Southard J B, Schimmelmann A. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds interpreting the rock record in the light of recent flume experiments [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(1): 119-128.
- [34] 卢斌, 邱振, 周川闽, 等. 泥页岩沉积物理模拟研究进展与发展趋势[J]. *沉积学报*, 2021, 39(4): 781-793.
Lu Bin, Qiu Zhen, Zhou Chuanmin, et al. Progress and prospects in the physical simulation of mudstone deposition[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(4): 781-793.
- [35] Seghedi I. Permian rhyolitic volcanism, changing from subaqueous to subaerial in post-Variscan intra-continental Sirinia Basin[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, 201(1): 312-324.
- [36] 焦鑫, 柳益群, 杨晚, 等. 水下火山喷发沉积特征研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(9): 926-936.
Jiao Xin, Liu Yiqun, Yang Wan, et al. Progress on sedimentation of subaqueous volcanic eruption[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(9): 926-936.
- [37] Wohletz K. Water/magma interaction: Some theory and experiments on peperite formation[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 114(1): 19-35.
- [38] Jiao X, Liu Y, Yang W, et al. A magmatic-hydrothermal lacustrine exhalite from the Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin, NW China: The volcanogenic origin of fine-grained clastic sedimentary rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 156: 11-25.
- [39] Pedersen G K, Surlyk F. Dish structures in Eocene volcanic ash layers, Denmark[J]. *Sedimentology*, 1977, 24: 581-590.
- [40] Jiao X, Liu Y, Yang W, et al. Fine-grained volcanic-hydrothermal sedimentary rocks in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin, NW China: Implications on hydrocarbon source rocks and accumulation in lacustrine rift basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104201.
- [41] Fisher R V, Schmincke H. Submarine volcanoclastic rocks[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1984: 265-296.
- [42] White J D. Subaqueous eruption-fed density currents and their deposits[J]. *Precambrian Research*, 2000, 101(2): 87-109.
- [43] Muynck W D, Belie N D, Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 118-136.
- [44] Dittrich M, Müller B, Mavrocordatos D, et al. Induced calcite precipitation by cyanobacterium *synechococcus*[J]. *Acta Hydrochim Hydrobiol*, 2003, 31: 162-169.
- [45] Dittrich M, Kurz P, Wehrli B. The role of autotrophic picocyanobacteria in calcite precipitation in an oligotrophic lake[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2004, 21(1): 45-53.
- [46] Kong X, Jiang Z, Ju B, et al. Fine-grained carbonate formation and organic matter enrichment in an Eocene saline rift lake (Qianjiang Depression): Constraints from depositional environment and material source[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 138: 105534.
- [47] Kataoka KS, Nagahashi Y. From sink to volcanic source: Unravelling missing terrestrial eruption records by characterization and high-resolution chronology of lacustrine volcanic density flow deposits, Lake Inawashiro-ko, Fukushima, Japan[J]. *Sedimentology*, 2019, 66(7): 2784-2827.
- [48] 衣健, 王璞珺, 单玄龙, 等. 长白山天池火山千年大喷发火山碎屑流堆积相特征[J]. *岩石学报*, 2020, 36(11): 3346-3362.
Yi Jian, Wang Pujun, Shan Xuanlong, et al. Facies variations in the pyroclastic density currents (PDCs) produced by the millennium eruption of the Changbaishan Tianchi volcano, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(11): 3346-3362.
- [49] 朱如凯, 邹才能, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(6): 1168-1184.
Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(6): 1168-1184.
- [50] 贺永红, 任战利, 陈占军, 等. 富县探区长8段致密油藏特征及主控因素[J]. *西安科技大学学报*, 2016, 36(3): 393-399.
He Yonghong, Ren Zhanli, Chen Zhanjun, et al. Chang 8 Section tight oil reservoir characteristics and distributional controlling factors in Fuxian exploration area[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2016, 36(3): 393-399.
- [51] 赵贤正, 姜在兴, 张锐锋, 等. 陆相断陷盆地特殊岩性致密油藏地质特征与勘探实践——以束鹿凹陷沙河街组致密油藏为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(S1): 1-9, 30.
Zhao Xianzheng, Jiang Zaixing, Zhang Ruifeng, et al. Geological characteristics and exploration practices of special-lithology tight oil reservoirs in continental rift basins: A case study of tight oil in Shahejie Formation, Shulu Sag[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 36(S1): 1-9, 30.
- [52] Jiang Z, Chen D, Qiu L, et al. Source-controlled carbonates in a small Eocene half-graben lake basin (Shulu Sag) in central Hebei province, north China[J]. *Sedimentology*, 2007, 54: 265-292.
- [53] Kong X, Jiang Z, Han C, et al. Organic matter enrichment and hydrocarbon accumulation models of the marlstone in the Shulu Sag, Bohai Bay Basin, Northern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 217: 103350.
- [54] 袁晓冬, 姜在兴, 张元福, 等. 滦平盆地白垩系陆相页岩油储层特征[J]. *石油学报*, 2020, 41(10): 1197-1208.
Yuan Xiaodong, Jiang Zaixing, Zhang Yuanfu, et al. Characteristics of the Cretaceous continental shale oil reservoirs in Luanping Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 41(10): 1197-1208.
- [55] Qin L, Zhang Z, Wu Y, et al. Organic geochemical and fluid inclusion evidence for filling stages of natural gas and bitumen in volcanic reservoir of Changling faulted Depression, southeastern Songliao Basin[J]. *Journal of Earth Science*, 2010, 21: 303-320.
- [56] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 1-11.
Zhi Dongming, Tang Yong, Yang Zhifeng, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 1-11.
- [57] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 499-520.
Liu Quanyou, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2019, 49(3): 499-520.

(编辑 张玉银)