

海相细粒沉积成因机制与有机质富集模式研究进展

施振生,周天琪

(中国石油 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:综合分析了国内外细粒沉积的特征、成因及有机质富集模式研究进展。海相细粒沉积主要由黏土矿物、石英、碳酸盐矿物和有机质组成,受风力、异轻流、重力流和底流4大搬运营力作用,发育泥纹层和粉砂纹层2类纹层,单一型、顺序型和交互型3类纹层组(层系),块状层、递变层和交互层3类层(层组)。海相细粒沉积发育浊流沉积、底流沉积及远洋-半远洋沉积3种主要沉积相类型及其过渡类型。海相细粒沉积有机质存在高生产力和强保存2种富集模式,高生产力富集模式下黑色页岩主要通过“上升洋流”、“氧含量最低值区(OMZ)”和“近岸透光带缺氧(PZE)”模式形成高有机质富集,强保存富集模式下黑色页岩主要通过“受限盆地”、“改进的受限盆地”、“不规则底形”、“水洼扩张”、“海侵化变层”和“近岸海侵(TN)”模式形成高有机质富集。目前海相细粒沉积成因机制与相模式研究存在的主要问题包括名词术语不规范、不同矿物成分成因不明确,以及细粒浊流沉积、等深流沉积和半远洋沉积难以区分,需要今后进一步研究解决。

关键词:物质组成;搬运营力;层理;相模式;有机质富集;细粒沉积学

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Advances and perspectives in the study of the genetic mechanism and organic matter enrichment models of marine fine-grained sediment

SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: This study provides a comprehensive analysis of global advances in the study of the characteristics, origin, and organic matter enrichment model of marine fine-grained sediments. These sediments, mainly composed of clay minerals, quartz, carbonate minerals, and organic matter, are predominantly transported by four geological agents: wind, hypopycnal plumes, hyperpycnal plumes, and bottom currents. They exhibit clayey and silty laminae; single, sequential, and alternating laminasets; and massive, graded, and alternating beds. Covering three major types of sedimentary facies, namely turbidite, bottom current, and pelagic to semi-pelagic facies, as well as their transition types, the sediment demonstrates two organic matter enrichment models under high productivity and enhanced preservation. In the high productivity-derived model, the organic matter enrichment in black shales typically involves upwelling currents, oxygen-minimum zones (OMZ), and nearshore photic zone euxinia (PZE). In the enhanced preservation-related model, the enrichment principally involves restricted basins, improved restricted basins, irregular bed form, expanding puddles, transgressive chemocline, and transgressive nearshore (TN) zones. Current challenges in the research on the genetic mechanism and facies models of marine fine-grained sediments primarily include non-standard terminology, undefined origins of different mineral compositions, and the difficulty in distinguishing among three sedimentary facies: fine-grained turbidite, contourite, and semi-pelagic facies. Further research is required to address these issues.

Key words: material composition, transporting agent, bedding, facies model, organic matter enrichment, fine-grained sedimentology

收稿日期:2024-02-20;修回日期:2024-05-16。

第一作者简介:施振生(1976—),男,博士、高级工程师,细粒储层地质学理论技术研究。E-mail:shizs69@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技管理部“十四五”科技重大专项(2021DJ1901)。

引用格式:施振生,周天琪. 海相细粒沉积成因机制与有机质富集模式研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 910-928. DOI: 10. 11743/ogg20240403.

SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi. Advances and perspectives in the study of the genetic mechanism and organic matter enrichment models of marine fine-grained sediment[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 910-928. DOI: 10. 11743/ogg20240403.

细粒沉积(fine-grained sediment)是指粒径小于62.5 μm 的沉积物或沉积岩^[1-7],细粒物质包括黏土级颗粒(clay)(粒径<3.9 μm)和粉砂级颗粒(silt)(粒径范围3.9~62.5 μm)^[2],其物质来源可能是陆源碎屑沉积物、化学沉积物、内碎屑及火山碎屑沉积物等^[8]。细粒沉积岩也称为泥岩(mudstone)^[5,9],根据颗粒粒度分为粉砂岩(siltstone)和黏土岩(claystone)^[10],其中,粉砂岩主要由粉砂级细粒物质组成,黏土岩主要由黏土级细粒物质组成。细粒沉积中,一部分泥岩页理发育,称之为页岩(shale)^[11]。

海相细粒沉积在全球不同地质时代广泛分布^[12],如北美的Bakken页岩^[13],Fayetteville页岩,Barnett页岩,Haynesville页岩,Marcellus页岩和Utica页岩,欧洲的Kimmeridge页岩,Barents Sea页岩,Posidonia页岩,Harju页岩和Alum页岩,以及中国的五峰组-龙马溪组页岩、筇竹寺组页岩和乌拉力克组页岩(表1)。细粒沉积的矿物组成、地球化学特征能够反映古环境、古气候、物源区属性和元素迁移过程等信息^[14-15]。细粒沉积岩是全球最重要的“碳汇”,影响和控制着全球碳埋藏和碳循环^[16],进而影响全球气候变化^[17]和海洋循环^[18]。细粒沉积岩中蕴藏着大量石油、天然气、金属矿产及非金属矿产,构成油气矿产的烃源岩、储层或盖

层,决定并改变着全球的能源格局^[19]。

近年来,业界对海相细粒沉积在物质组成与来源、搬运-沉积机制、成层性及沉积构造、沉积相划分及编图等方面取得了系统性认识。本文在对国内外海相细粒沉积学研究的系统调研基础上,介绍细粒沉积学的基本内涵,梳理目前该领域的研究现状,分析细粒沉积学研究目前存在的关键科学问题和下步研究方向。海相细粒沉积的发展,不仅能大力推动页岩油气的勘探和开发,而且能有助于解决全球气候变暖带来的一系列环境问题。

1 细粒沉积学基本内涵

细粒沉积学(fine-grained sedimentology)最早由Gorsline于1984年提出^[20],是研究细粒沉积物和沉积岩的物质成分及来源、结构、构造、分类、沉积过程、沉积环境与沉积模式、成岩演化,以及有机质富集机理与成因模式等的基础学科。

细粒沉积学的发展经历了漫长过程。1747年,Hoosen提出了泥岩的概念,Farey在1811年最早定义了页岩^[21]。Sorby在1853年首次利用显微镜技术研究泥岩的微观特征,并在1908年指出,细粒沉积看似简单、实则非常复杂^[22]。1920年代以后,随着X射线衍射、扫描电子显微镜和镜质体反射率分析等技术的广泛应用,细粒沉积的组构特征进一步明确,并提出了细粒沉积岩的系统分类方法^[23]。从此,开启了细粒沉积学的系统基础研究和工业化应用发展^[21]。

不同于以粗粒的碎屑岩、化学岩、火山碎屑岩和生物岩为主要对象的常规沉积学,细粒沉积学主要针对细粒的沉积物和沉积岩展开研究。这些细粒物质来源可能是陆源碎屑沉积物、化学沉积物、内碎屑及火山碎屑沉积物等。主要研究内容包括以下几个方面:①细粒沉积物或沉积岩的形成及演化研究,包括细粒沉积物最原始物质的形成、细粒物质的搬运和沉积作用、细粒物质的沉积后作用及孔隙演化等;②细粒沉积物或沉积岩的岩石学特征研究,包括细粒物质的矿物组成及成因、化学成分、结构组分、岩石类型、岩相特征等;③细粒沉积物或沉积岩的结构和构造研究,包括碎屑颗粒的粒度、组构、纹层及层理类型、纹层及层

表1 北美、欧洲和中国主要页岩层系及其分布

Table 1 Major shale sequences in North America, Europe, and China and their distributions

地质时代	地区	盆地	页岩
中、新生代	北美	Saint Joaquin	Monterey
晚白垩世	北美	Maverick	Eagle Ford
晚侏罗世—早白垩世	欧洲	Wessex	Kimmeridge
		Barents Sea	Barents Sea
	北美	Louisiana Salt	Haynesville
中侏罗世	欧洲	Causse	Toarcian
早侏罗世	欧洲	Lower Saxony	Posidonia
晚泥盆世—早石炭世	北美	Williston	Bakken
		Arkoma	Fayetteville
晚志留世—早泥盆世	北美	Appalachian	Marcellus
晚奥陶世—志留纪	北美	Appalachia	Utica
	中国	四川	五峰组-龙马溪组
	欧洲	Baltic	Alum
寒武纪—志留纪	中国	四川	筇竹寺组
		鄂尔多斯	乌拉力克组

理形成过程及机理等;④ 细粒沉积物或沉积岩的沉积相研究,包括细粒沉积的沉积相及相模式、沉积环境及岩相古地理编图等;⑤ 有机质富集机理及成因模式研究,包括富有机质页岩沉积特征、沉积过程与模式、全球重大地质事件及其有机质富集响应过程等。

细粒沉积学研究涉及的技术包括薄片分析、X射线衍射分析、X射线荧光分析(XRF)、扫描电子显微镜分析、CT扫描分析、元素地球化学分析、物理模拟技术、数值模拟技术、测井解释技术及地球物理预测技术等,研究学科涉及地层古生物学、矿物岩石学、沉积学、元素地球化学、地球物理学及计算机科学等领域。

2 海相细粒沉积研究进展

2.1 物质组成与来源

2.1.1 物质组成

海相细粒沉积主要由黏土矿物(伊利石、伊/蒙混层、高岭石和绿泥石)、石英、长石、碳酸盐矿物(方解石、白云石和菱铁矿)、硫化物(主要为黄铁矿)、无定形物质和有机质组成。沉积物中粉砂颗粒与黏土颗粒含量比值的变化、不同来源区物质含量的差异、生源组分含量与成岩组分含量的差异等均可造成细粒沉积的化学成分和矿物组成差异^[3]。细粒沉积的化学成分、矿物组分及物理性质变化在时间上和空间上表现出一定的规律性,其形成与源岩性质、源区构造背景、搬运过程、搬运路径、生物改造作用及成岩作用等密切相关^[4]。

川南地区五峰组-龙马溪组细粒沉积发育,其物质组分有矿物组分、生物碎屑组分和有机质组分。其中,矿物组分主要有石英(平均含量37.7%)、黏土矿物(平均34.8%)和碳酸盐矿物(平均13.6%),次要矿物有长石(平均8.8%)和黄铁矿(平均5.1%)。碳酸盐矿物主要为方解石(平均9.5%)和白云石(平均4.1%),长石主要为斜长石(平均7.5%)和钾长石(平均1.3%)。黏土矿物主要由伊利石(平均77.3%)、伊/蒙混层(平均14.3%)和绿泥石(平均7.3%),偶夹少量高岭石(平均1%),伊/蒙间层比为10%。生物碎屑成分包括放射虫、硅质海绵骨针和笔石等,有时放射虫碎屑堆积呈层状^[24]。

物质组成是海相细粒沉积分类的一种重要依据。如一些学者依据矿物成分、沉积结构和生物化石类型

对Barnett页岩的岩相进行了细分^[25];还有部分学者建议分别以石英、碳酸盐矿物和黏土矿物为端元,将海相细粒沉积分成4个大类,在此基础上再进行成分的成因分析^[6]。

2.1.2 物质来源

海相细粒沉积物质按照成因机制可划分为2种:源内组分和源外组分^[4-5]。源内组分是指上覆水体中形成的物质组分,主要为生物成因,包括碳酸盐矿物、硅酸盐矿物、磷酸钙、有机质、粪化石、粪球粒、有机质-矿物集合体(海洋雪)、絮凝颗粒、生物膜和生物席的碎片、内碎屑、凝结骨骼的碎片以及食沉积物软体动物的残余等^[5]。细粒沉积中,生物成因组分可分为2类:①在水体中生活的生物形成的残骸;②透光带中初级生产力形成的有机质。生物活动包括浮游植物季节性生长、细菌作用、底栖生物活动及游泳生物活动等,这些生物在死亡后,其残骸可能保存下来构成细粒沉积的生物成因组分。透光带中,浮游藻类的生长常常呈季节性变化,甚至在某一季节勃发^[26]。藻类勃发期,其他生物的生长由于缺乏光线、营养物质等而受到严重抑制。藻类勃发期形成大量有机质,从而形成富有机质层。细粒物质形成之后,底栖生物可以在此殖居,对其进行改造和破坏,其扰动强度与水体含氧量、沉积物沉积速率、沉积物有机质含量等密切相关^[27]。在陆源碎屑供给较少的情况下,水体中“碳酸盐工厂”可生产大量碳酸盐泥^[28],成为细粒沉积的重要组分之一。

源外组分主要来源于土壤的物理和化学风化产物,少量来源于火山灰和陆源有机质^[5]。前人研究表明,晚古生代及更年轻的土壤层中风化作用的主要产物是黏土矿物(蒙脱石、混层黏土矿物、伊利石、绿泥石和高岭石)、石英、钾长石、斜长石(包括钠长石)、方解石、玻璃质(包括玻璃碎片和浮石)、岩屑、陆源有机质、锆石和二氧化钛。硅质碎屑组分中,黏土级颗粒(粒径 $<2.0\mu\text{m}$)的矿物成分主要为黏土矿物^[29],而粉砂级颗粒(粒径范围 $2.0\sim 62.5\mu\text{m}$)主要为石英,并含有少量长石和岩屑。前人研究表明,黏土级颗粒多来源于土壤中抗风化能力较弱的火山碎屑物质,而粉砂级颗粒多来源于抗化学风化能力较强的源岩组分^[30]或生物碎屑^[31]。

在陆源碎屑输入受限的盆地中,由于初级生产力强、水体生物碎屑输入量大,细粒沉积中源内组分含量可能高于源外组分含量。

2.2 搬运-沉积机制

2.2.1 搬运营力

海相细粒沉积存在风力搬运、异轻流搬运、重力流搬运和底流搬运4大搬运营力(图1)^[32-34]。风力搬运有沙尘暴^[35-37]和火山灰^[38]2种搬运方式。沙尘暴的形成需要大面积分布的物源区和合适的信风模式;火山喷发产生火山灰,并可在区域上形成良好的火山灰标志层^[39]。

当河流流入海盆时,河水由于盐度和密度较低而漂浮于海水之上而形成异轻流(hypopycnal plumes)。此时,因坡度减缓,水流扩散,流速降低,河水中的泥质开始发生絮凝作用^[30]。异轻流的搬运距离可达几十到几百千米^[40]。

重力流搬运有3种类型,即河流三角洲伴生成因的重力流搬运、波浪和底流引发的重力流搬运以及风暴作用引发的离岸流搬运。河流三角洲伴生成因的重力流有斜坡滑塌成因^[41]、河流的洪水事件成因^[42-43]及小型干旱河流产生的高密度流成因^[44]。三角洲前缘滑塌成因重力流中,细粒沉积物要想持续保持自悬浮状态^[45],地形坡度不能低于 0.70° ^[46],这就大大限制了搬运距离(一般为几千米)。河流的洪水事件也可产生持续性的浊流,即异重流(hyperpycnal plumes)。与三角洲前缘滑塌成因重力流相似,异重流中细粒沉积物要持续保持自悬浮状态,地形坡度不能低于 0.70° ^[47]。波浪和底流引发的沉积物重力流与底层泥质沉积物再活化有关,在重力驱动下,甚至可以沿着坡度只有 0.03°

的斜坡离岸搬运^[48],并形成正粒序^[49]或“三层序列”^[26]。风暴作用引发的离岸流可形成泥质堆积,发育正粒序^[50],其形成地形坡度为 $0.03^{\circ} \sim 0.70^{\circ}$ ^[34]。由于受风暴浪基面的限制,该营力的搬运距离一般小于100 km。

海相环境中,通常存在3种底流类型,即温盐底流、风力驱动底流和深水潮汐底流^[51-53]。两种不同流体的界面上常发生内波和内潮汐活动,温跃层附近尤其活跃^[54]。底流常常会受到巨大的涡流、海底风暴和海啸等作用的影响,所有这些都能影响海底的剥蚀、搬运和沉积作用。温盐底流和风力驱动底流基本特征相似,它们在海底均半永久存在,持续影响着海底沉积作用。它们能够平行斜坡流动,也能够顺坡甚至逆坡流动,遇到障碍时甚至能顺着障碍物或者跨越障壁物流动。不同位置的温盐底流和风力驱动底流流速差异巨大:地形坡度缓的地区或洋底平均流速一般小于0.10 m/s;地形较陡或遇到障碍物时平均流速一般为0.10 ~ 0.30 m/s;在通过狭窄的通道或障碍物时流速大于0.30 m/s甚至超过1.00 m/s。底流平均流速从中心向边缘逐渐减小^[53]。深水潮汐底流在整个地质时期是一个连续的过程,具有独特的潮汐周期。在斜坡峡谷中,由于深海沟道的聚焦效应,潮汐底流的流速可高达0.25 ~ 0.50 m/s,甚至达到0.75 m/s^[55]。

而对于陆缘海或陆表海上千千米的细粒沉积,温盐底流、风力驱动底流和深水潮汐底流的搬运起到关键作用,其搬运距离可达1 000 km^[34]。

2.2.2 结构组分

现代的泥质沉积物研究表明,大多数粒径小于

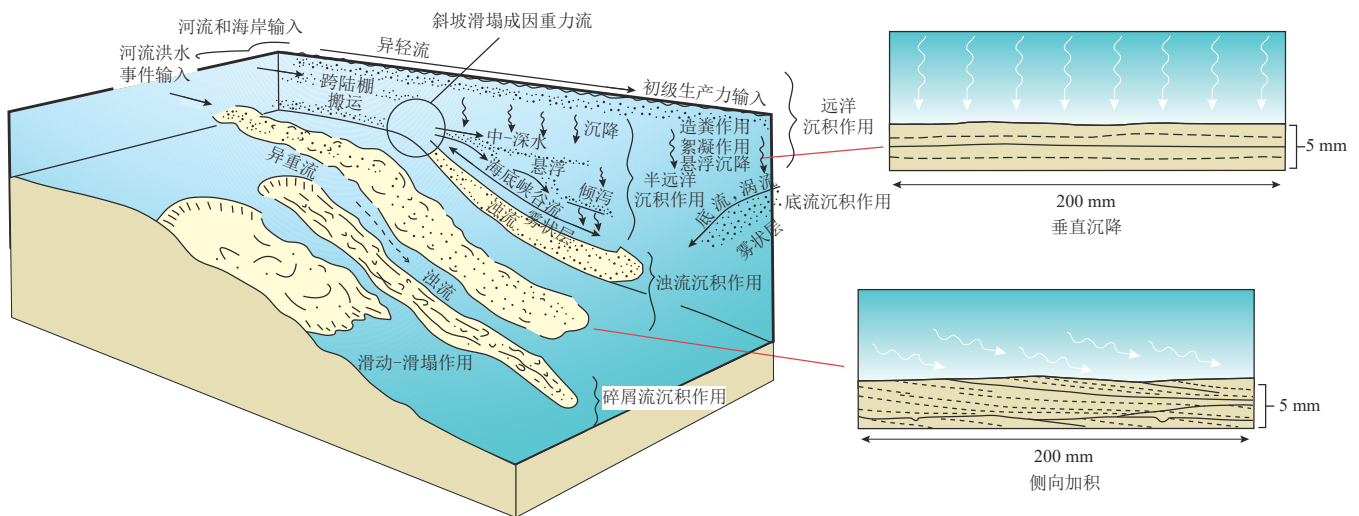


图1 海洋深水环境中沉积物主要搬运营力及沉降方式

Fig. 1 Primary transporting agents and settling behaviors of sediment in a marine deep-water environment

10 μm 的颗粒都以絮凝颗粒的形式沉积,而粒径大于 10 μm 的颗粒多以单颗粒的形式沉积。因此,细粒沉积结构组分可划分为 2 类,即单颗粒(single particles)(图 2a)和复合颗粒(composite particles)。单颗粒主要为陆源成因或成岩成因,由单一矿物组份组成,包括碎屑石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿及重矿物等。复合颗粒有絮凝颗粒、泥质撕裂屑(rip-up clasts)、页岩岩屑(shale lithics)、有机质-矿物集合体(“海洋雪”)(organo-mineralic aggregates)及浮游动物粪球粒(fecal pellets)等。

细粒物质在搬运和沉降过程中,在表面电荷、体积力(如范德华力)^[56]及生物聚合物等因素的作用下结合成絮凝颗粒^[57](图 2b)。絮凝颗粒含水量可高达 85 % 以上^[34],大小为几十至几百微米^[58],具体大小与水体浓度、黏土矿物类型及水体化学性质密切相关^[59]。搬运过程中,粒径较大的絮凝颗粒(粒径为 100 ~ 1 000 μm)沉降速率与同时期搬运的粉砂或细砂颗粒相近^[60]。当流体流速小于 15 cm/s 时,絮凝颗粒多以悬浮载荷形式搬运和沉降^[61-63]。当流体流速为 15 ~ 25 cm/s 时,絮凝颗粒多以床沙载荷形式搬运和沉降。当流体流速大于 25 cm/s 时,泥质絮凝颗粒破碎。

细粒物质中含有大量泥质撕裂屑(图 2c),是水流侵蚀未固结的泥质底层的产物,形状不规则到圆状,大小为几十微米到几厘米^[64]。水流侵蚀过程中,抗侵蚀能力不同的互层以及层面不连续等均有利于泥质撕裂屑的形成^[65]。底流速度在 15 ~ 25 cm/s 之间时有利于形

成大面积分布的泥质撕裂屑^[64]。泥质内碎屑的搬运受含水量影响,其含水量越低,搬运过程中越不易分解。而成壤集合体及再改造的冲积泥壳虽然含水量低(一般为 30 % ~ 40 %)^[66],但也不适合长距离搬运。

细粒沉积中,有一部分物质来源于页岩岩屑(图 2d)。页岩岩屑是细小矿物颗粒(黏土矿物、石英及长石等)的集合体,可能是页岩露头受风化和剥蚀的产物^[67-69],也可能是其他岩类受风化和剥蚀的产物^[70]。页岩岩屑粒度多为粉砂级,其在水体中能以底载荷的形式搬运几百到几千千米^[34]。

有机质-矿物集合体也是细粒沉积的重要组成颗粒(图 2e)。有机质-矿物集合体常常出现于远洋沉积中^[71],根据粒度大小分别称为“海雪”(marine snow)(粒径 > 500 μm)和植物腐殖质(粒径 < 500 μm)^[72]。有机质-矿物集合体主要由矿物质、细菌、微生物、粪球粒和骨骼碎屑组成。这些物质通过浮游动物分泌的胞外多糖、颗粒间的电化学吸引和不规则颗粒之间物理嵌合结合在一起^[73],含水量与絮凝颗粒相似。现代海洋环境中,“海雪”无处不在。尤其是浮游藻类勃发期,由于初级生产力增大,“海雪”更是大面积发育^[74]。

粪球粒在细粒沉积中也十分常见(图 2f),有机质含量高,粒度为几十至几百微米^[75],含水量为 70 % ~ 75 %。埋藏压实过程中,受周围刚性颗粒的挤压,粪球粒一般呈扁平状或不规则状^[76]。粪球粒有 2 种类型:富含浮游植物的颗石藻或其他再结晶矿物碎片;富含黏土矿物。根据粪球粒的形状、大小及组成推断,第

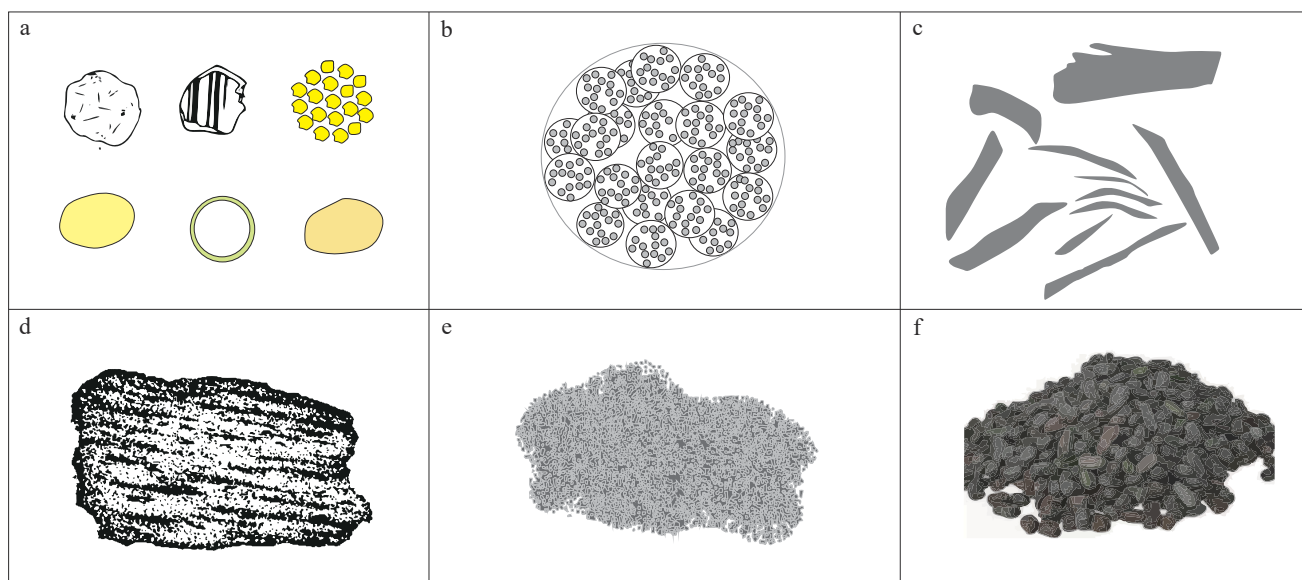


图2 海相细粒沉积不同类型颗粒示意图

Fig. 2 Sketch of different types of particles of marine fine-grained sediment

a. 单颗粒; b. 絮凝颗粒; c. 撕裂屑; d. 页岩岩屑; e. 有机质-矿物集合体; f. 粪球粒

一种粪球粒来源于浮游动物。该动物在透光带进行选择滤食并产生粪便,从而形成大量粪球粒^[77-78]。第二种粪球粒主要由黏土级碎屑构成,有机质含量低。该粪球粒由水体中生活的非选择性滤食生物形成,或由沉积物-水界面处生活的食沉积物动物形成。该动物摄入沉积物,并从吸附在颗粒表面的胞外多糖和颗粒有机质中获取营养,同时将难以消化的物质化作粪便排出。

2.2.3 沉降方式

大家一直认为,细粒物质都形成于静水环境,是直接从水体中垂直沉降下来的,细粒沉积都发育连续的水平纹层,代表连续沉降作用^[79]。近年来研究发现,细粒物质有2种沉降方式^[61]:①在水体分层的静水环境中,细粒物质以悬浮物的形式直接从水体中连续沉降下来(图1);②在流动水体中,细粒物质以颗粒集合体的形式搬运,并以水流波纹的形式聚集下来,其聚集的最大水流流速可达35 cm/s,细粒物质层与层之间可能存在着剥蚀面(图1)。洪水作用、浊流作用和高、初级生产力区形成的大量细粒物质,以羽状流形式在水体中搬运。在特定的水体环境中,由于水体pH值、 E_h 值和水体盐度等水化学环境变化或重力作用,细粒物质可以以第一种方式沉降下来。

细粒沉积搬运和沉积过程中,粒径较大的复合颗粒(粒径范围100~1 000 μm)沉降速率与同时期搬运的粉砂或细砂颗粒相近^[60]。当流体流速小于15 cm/s时,复合颗粒多以悬浮截荷形式搬运和沉降^[61-63]。当流体流速为15~25 cm/s时,复合颗粒多以床沙载荷形式搬运和沉降。沉降过程中,携带粉砂颗粒的较大絮凝颗粒会发生破裂并抛出粉砂颗粒,并在底床上形成分别由粉砂颗粒和泥质絮凝颗粒构成的移动砂波^[63]。移动砂波在迁移过程中相互叠置,从而形成粉砂纹层和泥纹层互层。当流体流速大于25 cm/s时,絮凝颗粒等复合颗粒破碎,该时期底床上只发育粉砂颗粒组成的移动砂波,从而只发育分选好的粉砂纹层^[63]。

2.3 成层性及沉积构造

2.3.1 细粒沉积的成层性

海相细粒沉积内部可划分出纹层(lamina)、层系(laminaset)和层组(bed)等沉积单元,这些沉积单元常通过矿物成分、结构、颜色的突变或渐变而显现出来,在纵向上表现出明显的成层性^[6,80]。

纹层通常也称细层,是细粒沉积的最基本、最小的

沉积单元。纹层的形成与某一流动或沉积事件小幅度波动有关(如浮游生物或底栖生物的季节性生长、半远洋沉降或风积作用、波浪振荡流等)。海相细粒沉积主要发育泥纹层(clayey lamina)和粉砂纹层(silty lamina),泥纹层主要由粒径小于31.2 μm 的颗粒组成,光学显微镜下颜色较暗,故又称为暗纹层;粉砂纹层主要由粒径31.2~62.5 μm 的颗粒组成,光学显微镜下颜色较亮,故又称为亮纹层^[81-84]。

层系通常也称纹层组,由成因上相关的一套层系组合而成。层系形成于相同的沉积条件下,是一段时间内水动力条件相对稳定的产物^[6,80]。海相细粒沉积岩中,层系存在水流波纹成因、浪成波纹成因和浊流成因。层系根据形态可分为板状、波状、弯曲状、透镜状和不规则状5种类型^[85],其中,板状层系根据粉砂纹层和泥纹层二者的构成特征可进一步细分出单一型、顺序型和交互型3类^[24,84]。单一型板状层系由泥纹层或粉砂纹层中的某一种构成,层系内部呈均质状,不存在粒度、矿物组成、排列方式及颜色等变化。顺序层系是指层系形态为板状,由粉砂纹层系列或粉砂纹层系列+泥纹层系列构成,层系内部纹层界面不可识别,但粒度呈现递变特征。海相细粒沉积中,泥层系和粉砂层系垂向水平互层,也可形成正递变或反递变结构。交互层系是指层系形态为板状,单个层系由粉砂纹层系列或泥纹层系列或粉砂纹层系列+泥纹层系列或由一系列泥纹层与粉砂纹层互层构成,层系内部纹层界面清晰。

层组也常称之为层,是由一组成因相关且相对整合的纹层或层系构成,其顶界和底界分别对应剥蚀面和停积面或相对整合面^[6,80]。细粒沉积岩中,层组厚度相对较薄,一般为几毫米至几十厘米,并没有绝对的最大值和最小值。侧向上,层组可以延伸几米至几千米。海相细粒沉积中,根据层系的构成可划分出块状层组、递变层组和交互层组。块状层组通常由泥纹层(或泥层系)或粉砂纹层(粉砂层系)构成;递变层组构成复杂,既可由层系构成,也可由单一型层系构成,还可由二者复合构成;交互型多表现为泥纹层(或泥层系)和粉砂纹层(或粉砂层系)的交互^[24,84]。

2.3.2 纹理类型及成因

纹理是恢复沉积环境的重要标志,更影响着页岩的储层品质及可压裂性^[86]。与粗碎屑岩和碳酸盐岩相似,海相细粒沉积中纹理也十分发育,可划分出交错纹理^[61,83,87]、递变纹理^[26,49,88]、水平纹理^[84-86,89]、块状构造^[59]和复合纹理^[58,85]等。

交错纹理由一系列砂泥交互式层系或粉砂层系构成,纹层与层系界面交切,层系界面相互平行或交错。少数岩心中,层系界面可见冲刷构造和薄层滞积层。根据层系的形态,交错纹理分为板状、楔状和波状3种类型(图3,图4a)。海相细粒沉积中,交错纹理的形成可能与浊流^[59,90]或底流活动有关。在流动水体中,细粒物质以絮凝颗粒的形式呈底荷载搬运^[61,63,79],并以水流波纹的形式聚集下来。水流速度、物源供给和沉积速率的差异可造成交错纹理类型的差异^[63]。

递变纹理主要由递变型层系构成,层系界面基本上相互平行。根据层系的类型,递变纹理可划分出互层型、顺序型和层纹型3种类型(图5,图4b)。海相细

粒沉积中,递变纹理存在多种成因机制。互层型递变纹理的形成与浊流底部的边界层剪切分选有关^[49,91-93]。顺序型正递变纹理可能是年纹层^[94]或浊流成因^[95],其中,年纹层成因的顺序型正递变纹理底部不发育冲刷面,而浊流成因的底部多发育冲刷面。顺序型复合递变纹理可能为半远洋沉降成因^[53,96-97]或浊流成因^[98-99]。其中,半远洋沉降成因的顺序型复合递变纹理的底界面多为连续过渡,粒序的形成与静水环境中气候季节性变化、火山喷发后火山灰沉降或浊流成因物质的扩散有关^[53,100];浊流成因顺序型复合递变纹理底部多发育冲刷面,递变纹理的对称结构常遭到破坏^[98-99]。层纹型递变层理可能为较高流速(流速 >

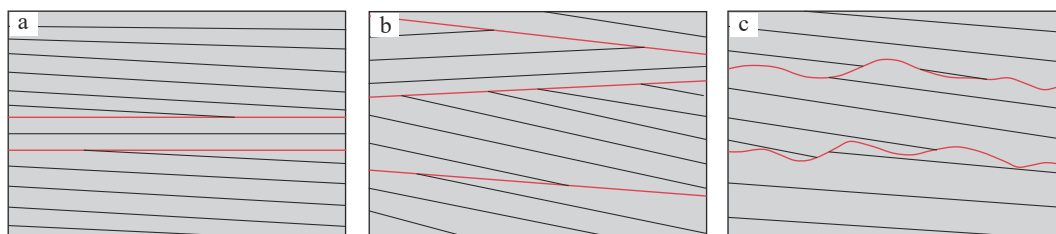


图3 海相细粒沉积交错纹理类型及特征

Fig. 3 Types and characteristics of cross bedding in marine fine-grained sediments

a. 板状交错纹理;b. 楔状交错纹理;c. 波状交错纹理
(黑色线条表示纹层界面;红色线条表示层系界面。)

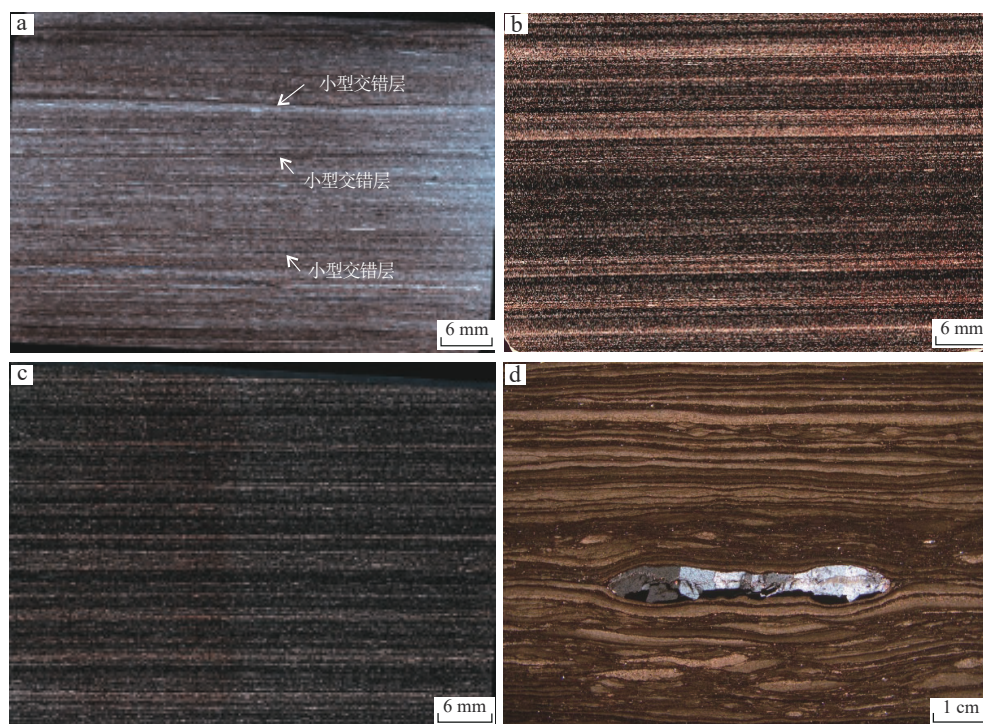


图4 川南地区五峰组-龙马溪组典型纹理类型及特征

Fig. 4 Types and characteristics of typical bedding in the Wufeng-Longmaxi formations in the southern Sichuan Basin

a. 板状交错纹理,大安2井,埋深4 048.87 m;b. 层纹型递变纹理,宜206井,埋深3 882.77 m;c. 砂-泥交互型水平纹理,泸204井,埋深3 840.93 m;
d. 复合纹理,华莹观音溪剖面,龙马溪组二段

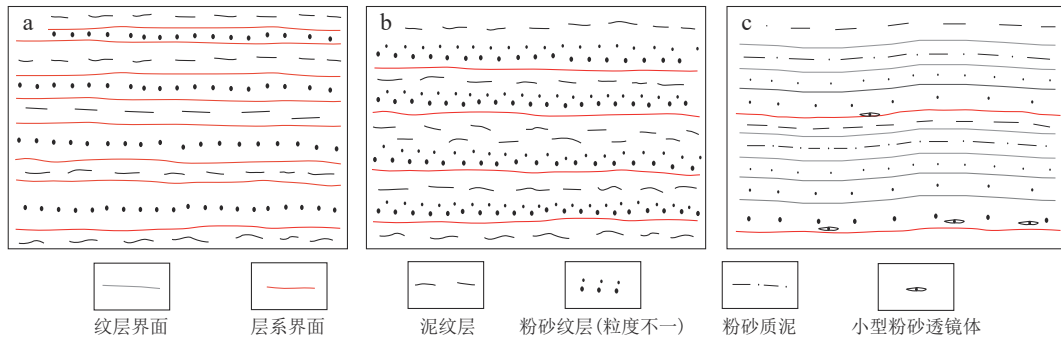


图5 海相细粒沉积递变纹理类型及特征

Fig. 5 Types and characteristics of grading bedding in marine fine-grained sediment

a. 互层型; b. 顺序型; c. 层纹型

25 cm/s)低密度浊流的牵引搬运成因,随着水流速度或强度逐渐减低而形成递变层理。整体上,细粒沉积中发育递变层理表明搬运流体浓度相对较低(体积浓度0.5%~7.0%)、流体规模较大^[101-102]。

水平纹理的特点是纹层呈直线状互相平行,并且平行于层面。按照层系的类型,水平纹理可划分出泥质型、书页型、互层型、层纹和粉砂型5种类型(图4c,图6)^[84]。海相细粒沉积中,不同类型水平纹理的成因明显差异。泥质型水平纹理的形成多与高粘度、低流速的浊流周期性快速堆积有关^[59]。书页型水平纹理的形成多与稳定水动力条件下的悬浮沉降有关^[84,89]。互层型水平纹理的形成与水流活动有关,在水体流速低于25 cm/s的情况下,细粒物质多以絮凝颗粒的形式搬运,并形成小型砂波^[61],从而形成互层型水平纹理^[63]。层纹型水平纹理的形成可能与周期性的水动力条件变化有关,水动力较强时形成粉砂层系,水动力较弱时形成泥层系。粉砂型水平纹理多形成于较高流速的牵引流沉积环境,水体流速大于25 cm/s。

块状构造又称均质层理,这是一种呈现大致均质外貌,不具任何纹层构造的细粒沉积岩。海相细粒沉积中,主要有3种类型块状构造。第一种整体由泥颗粒

或粉砂颗粒组成,粒度基本一致,内部缺少较大的颗粒。该类构造多出现于细粒浊流沉积的上部,它是高密度流体泥层原地堆积的结果^[59,90,93,103],这种高密度流体泥层也可能由极低浓度浊流长时间沉降形成的^[104]。第二种整体由粉砂颗粒组成,中间夹有大量细砂级的生物碎屑。这种类型块状构造多是悬浮物质非常快速地沉积而成,如风暴沉积作用^[105]。第三种由于生物的强烈搅动作用,使原生层理完全混合破坏,成为块状构造^[106]。

复合纹理发育于粉砂层系和泥层系互层中(图4d),包括束状纹理(wispy lamination)、透镜状纹理(lenticular lamination)和波状纹理(wavy lamination)^[85]。束状纹理主要由泥层系构成,中间夹有极少量粉砂纹层,粉砂纹层呈不连续的条带状或透镜状(图7a)。海相细粒沉积中,束状纹理的形成可能与浓度极低、流速极慢的浊流活动有关。透镜状纹理主要由泥层系构成,中间夹有少量粉砂层系,粉砂纹层相对连续(图7b,c)。透镜状纹理出现于前寒武系以来不同时代的海相细粒沉积中^[107-108],其形成可能与迁移波纹有关^[85],也可能与高含水的泥质撕裂屑受压实有关^[64]。另外,粪球粒^[109-110]或潜穴^[107]的成岩压实过程中也可能形成透镜

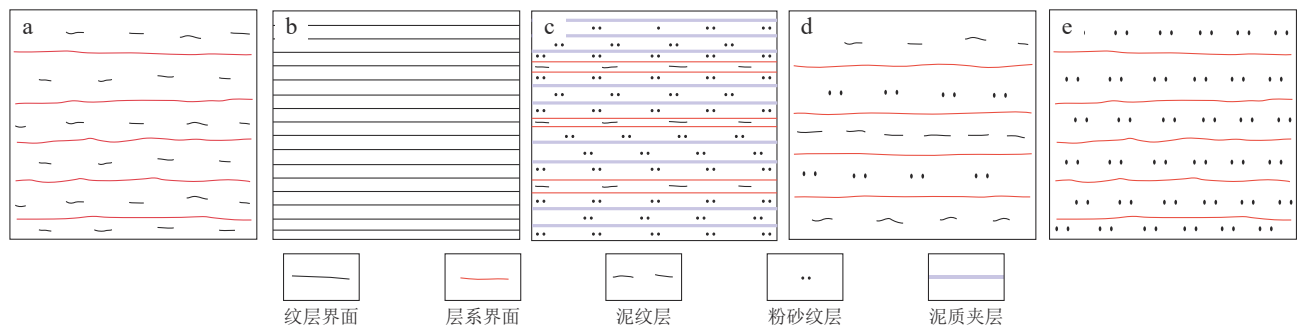
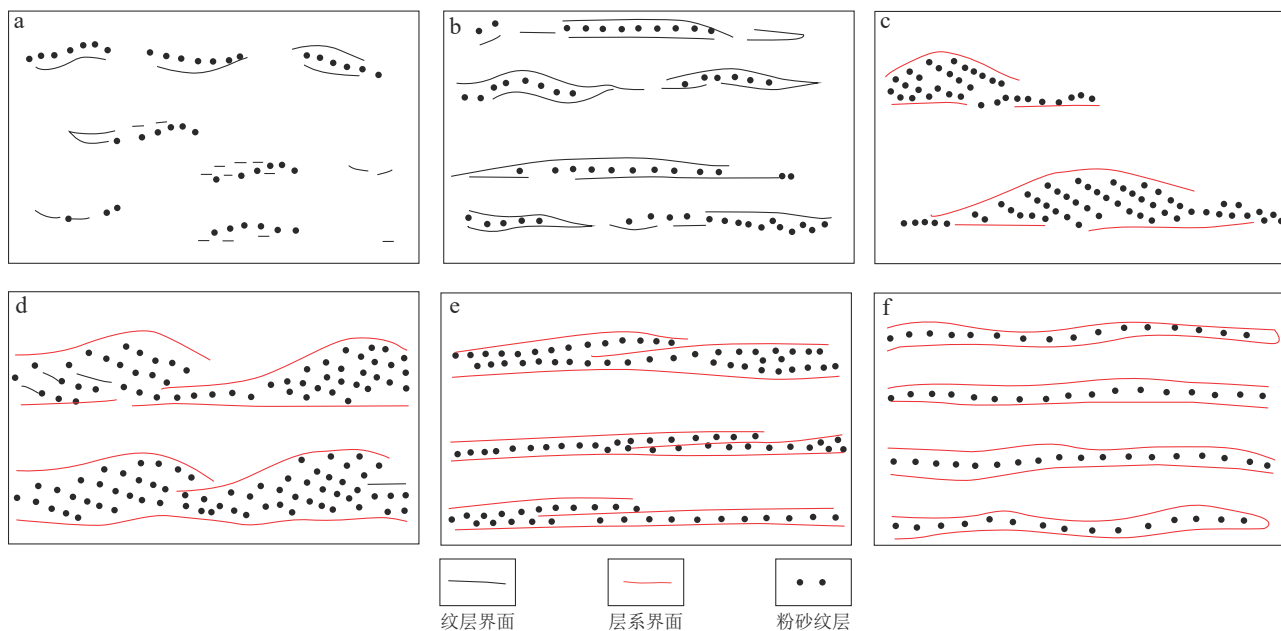


图6 海相细粒沉积水平纹理类型及特征

Fig. 6 Types and characteristics of parallel bedding in marine fine-grained sediment

a. 泥质型; b. 书页型; c. 互层型; d. 层纹型; e. 粉砂型

图7 海相细粒沉积复合纹理类型及特征^[85]Fig. 7 Types and characteristics of complex bedding in marine fine-grained sediment^[85]

a. 束状纹理; b. 均质型透镜状纹理; c. 饥饿波纹理透镜状纹理; d. 衰减波纹理波状纹理; e. 低波高长波长型波状纹理; f. 丝带型波状纹理

状纹理。整体上,泥质撕裂屑形成的透镜体外形一般不规则、分选性差;粪球粒形成的透镜体一般呈卵形,大小不足毫米,粒径分布较窄;动物潜穴形成的透镜体一般为伸长状和弯曲状^[109]。波状纹理主要由泥层系和粉砂层系互层构成,粉砂层系相互连接和叠覆成透镜体(图7d—f)。海相细粒沉积中,波状纹理的形成可能与迁移波纹有关。

海相细粒沉积中,侵蚀成因构造中最常见的是冲刷-充填构造。冲刷-充填构造是流动过程中侵蚀作用形成的原生构造,广泛发育于递变纹理和交错纹理中。由于流动介质流速的突然增大,侵蚀下伏疏松沉积物,形成起伏不平的不规则侵蚀面(凹坑),称为冲刷面。侵蚀后能量释放,流水携带的砂质颗粒和被冲刷下来的下伏沉积物(黏土和粉砂为主)搬运不远(近于原地),又沉积下来,充填在凹坑中,形成冲刷-充填构造。

2.4 沉积相和沉积环境

海相环境主要发育浊流沉积、底流沉积和远洋-半远洋沉积3种相类型,这3者之间还存在多种过渡类型^[53]。浊流沉积是指由浊流活动形成的沉积物或沉积岩。浊流沉积是事件沉积的一种,按照粒度可划分出粗粒浊流沉积^[111]、中粒浊流沉积^[112]和细粒浊流沉积^[85,113]3种类型。海相细粒沉积主要发育细粒浊流沉积相,由下至上可分出T0—T8共9个层序(图8)。岩

心和露头中,完整的细粒浊流沉积相十分少见,常见到的多是底削式和顶削式2大类型。底削式细粒浊流沉积常缺失标准模式的下部,而顶削式细粒浊流沉积常缺失标准模式的上部。

等深流沉积相是指持续性底流沉积的或改造的沉积物及沉积岩^[85]。等深流沉积相类型多样,根据组成颗粒粒度可划分出泥质、粉砂质、砂质和砾质等类型^[51];根据矿物组成可划分出硅质碎屑质、火山碎屑质、生物碎屑质(包括钙质和硅质)、化学成因及复合成因等沉积类型。海相细粒沉积中,常出现细粒泥质等深流沉积,由下至上可划分出C1, C2, C3, C4和C5共5个层序^[114](图8)。与细粒浊流沉积相似,完整的细粒泥质等深流沉积在自然界中也十分少见,岩心和露头中见到的多是底削式和顶削式2大类型(图7)。底削式常缺失标准模式的下部,而顶削式常缺失标准模式的上部。

远洋-半远洋沉积也是一种重要的细粒沉积相类型。远洋沉积多为泥级颗粒,组成物质多来源于垂直悬浮沉降。半远洋沉积颗粒多为泥级和粉砂级,组成物质多为陆源物质和生源物质混合物,其中陆源物质中粉砂质颗粒富集^[97]。半远洋沉积沉降方式既有垂直沉降也有极缓慢的侧向平流。在海相环境中,半远洋沉积构成其他沉积类型的背景值,很多黑色烃源岩和富有机质页岩均为半远洋沉积成因。更具体地说,半远洋沉积是指外陆架和斜坡环境中的细粒沉积物。

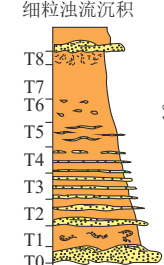
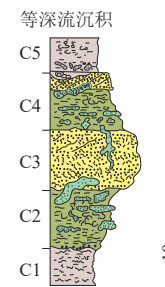
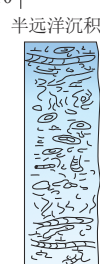
相类型	沉积作用	粒序变化	典型沉积构造	相模式
细粒浊流沉积	浊流活动	正递变	T8. 弱扰动泥 T6. 粒序泥/粉砂透镜体 T4. 不清晰纹层 T2. 波状-透镜状纹层 T0. 底部透镜状纹层(衰减波纹)	
等深流沉积	持续性底流活动	反递变+正递变	C5. 生物扰动泥岩、不清晰纹层 C4. 斑点状粉砂和泥、生物扰动不清晰纹层/透镜体、少量交错纹层 C3. 粉砂纹层、生物扰动不清晰纹层/透镜体、少量交错纹层 C2. 斑点状粉砂和泥、生物扰动不清晰纹层/透镜体、少量交错纹层 C1. 生物扰动泥岩、不清晰纹层	
半远洋沉积	垂直沉降、极缓慢侧向平流	无粒序	水平层理、生物扰动构造	

图8 海相细粒浊流沉积、等深流沉积和半远洋沉积主要特征

Fig. 8 Primary characteristics of the turbidite, contourite, and semi-pelagic sedimentary facies of marine fine-grained sediment

它主要包括生物成因的远洋沉积物(通常含量 > 10%)和陆源或火山碎屑成因物质(通常含量 > 10%)。通常,陆源或火山碎屑成因物质(含量 > 40%)的粒径达到粉砂级甚至更大(> 4 μm)。半远洋沉积与远洋沉积(生物成因软泥和深海红色黏土)、泥质等深流沉积、细粒浊流沉积和半浊流沉积等特征非常相似。随着底流流速增加和陆源输入减少,半远洋沉积和泥质等深流沉积与远洋沉积之间存在过渡关系。半浊流沉积部分呈细粒浊流沉积特征,部分呈半远洋沉积特征。呈半远洋沉积存在多种沉积相模式,目前常见的相模式及其变种见图8。

在构造活动相对活跃,气候相对温暖潮湿,相对海平面快速上升时期,陆表海可发育大面积的细粒沉积。陆表海环境主要发育三角洲相、潮坪相和陆棚相。陆棚相细分为浅水陆棚亚相和深水陆棚亚相,其中,浅水陆棚亚相细分为钙质陆棚和黏土质陆棚2个微相,深水陆棚亚相细分为深水斜坡、深水平原和深水洼地3个微相^[115]。不同微相的矿物组成、粒度、层理类型及有机质物质存在明显差别。

海相细粒沉积中,“单因素分析多因素综合作图法”是确定不同类型沉积相平面分布的一种重要方法^[116-119]。该方法通过矿物组分成因分析,确定出作图的关键单因素是地层厚度(m)、碳酸盐矿物含量(%)、石英含量(%)和黏土矿物含量(%)。其中,地层厚度(m)反映了该地层单元在区域上的分布范围、厚度变化及沉积时期的大地构造背景;碳酸盐矿物含量(%)

及分布能够反映古水深,水深越浅,碳酸盐矿物含量(%)越高;石英含量(%)及分布主要受古水深控制,水深越大,石英含量越高;黏土矿物含量(%)和分布可以反映古物源方向,黏土矿物含量越高,受陆源碎屑影响越大。海相细粒沉积的“单因素分析、多因素综合作图法”在川南地区五峰组-龙马溪组得到了应用,并取得了很好的效果。

2.5 黑色页岩形成模式

黑色页岩是指富含有机质的细粒沉积岩。黑色页岩在不同沉积环境均可发育。现代沉积环境包括大型受限盆地环境(如黑海和波罗的海)和开放环境(如受中-深水氧含量最低值影响的秘鲁海岸、纳米比亚海岸和加利福尼亚湾)^[120-122]。其他环境包括热带堤岸、沿海沼泽、大型河口湾、峡湾和受盐度分层影响的斜坡盆地等。一般来说,现代黑色页岩的形成多受局部因素控制,如受限盆地或构造孤立盆地等。然而,在地质历史时期,黑色页岩多形成于广阔的陆表海环境,具有分布范围广、时间跨度长等特征^[120]。

针对黑色页岩中有机质富集的成因机理,目前有高生产力和强保存2种解释模式^[123]。高生产力解释模式强调初、高级生产力是有机质富集的根本原因。有机质在降解过程中造成溶解氧消耗量增加,从而导致底层水体缺氧。该解释模式认为高有机质含量造成了水体缺氧,而非缺氧造成有机质含量升高^[124]。相反,强保存解释模式认为,在初级生产力不高的情况

下,水体缺氧也可造成有机质富集^[121,123]。在水体分层的情况下,由于水体上下对流受阻,溶解氧很难补给到底层水体中,从而导致底层水体缺氧。

基于有机质富集的2种解释模式,目前形成了多种黑色页岩成因模式。围绕高生产力解释模式,目前主要有“上升洋流”模式^[121](图9a)、“氧含量最低值区(OMZ)”模式^[125-127](图9b—d)和“近岸透光带缺氧

(PZE)”模式^[128](图9e)3种。围绕强保存模式,目前主要有“受限盆地”模式^[121](图9f)、“改进的受限盆地”模式^[129](图9g)、“不规则底形”模式^[130-131](图9h)、“水洼扩张”模式^[132](图9i)、“海侵化变层”模式^[133](图9j)和“近岸海侵(TN)”模式^[18,122,131](图9k)6种。

川南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩大面积发育,其形成可能是构造抬升与海平面升降、火山喷发、

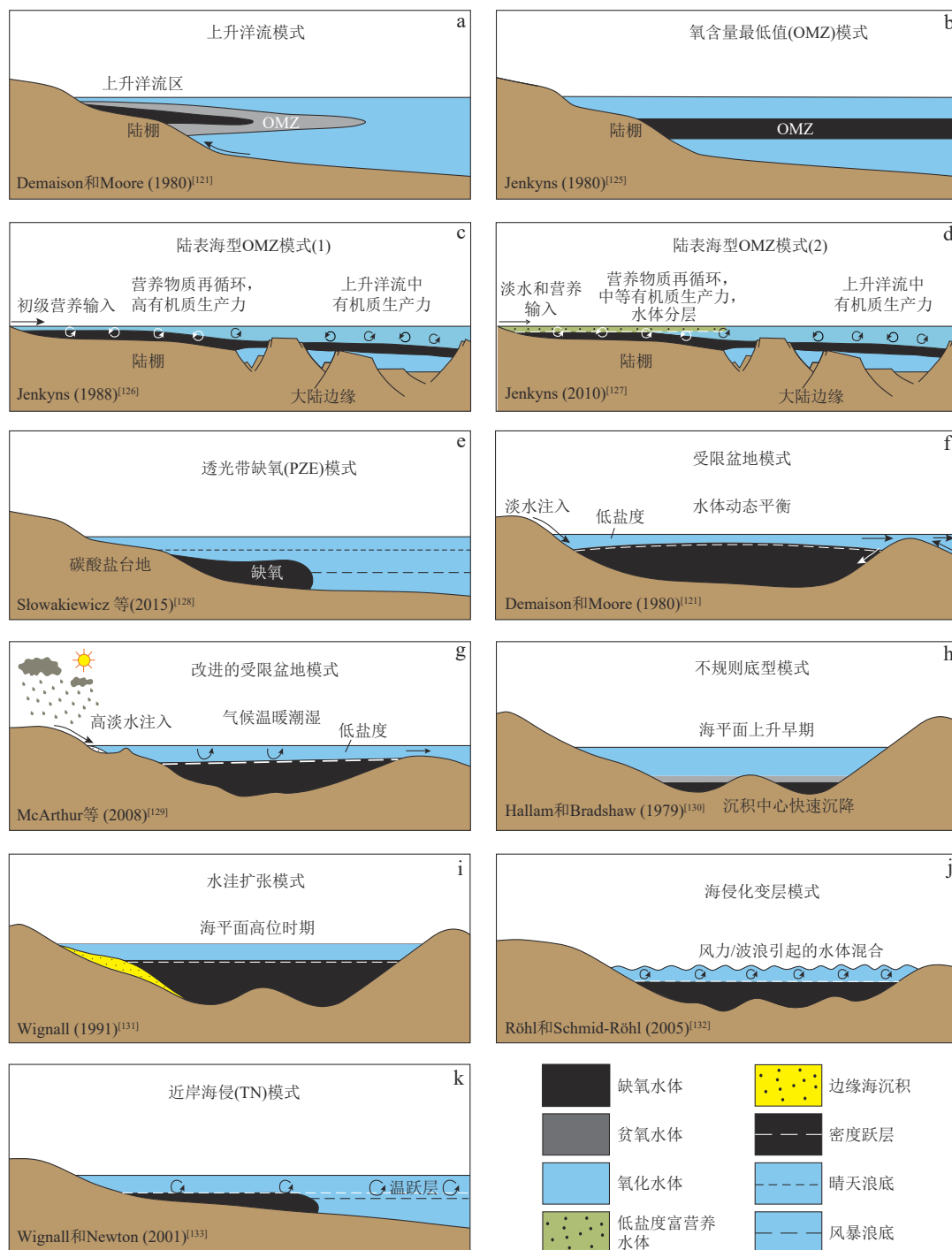


图9 陆表海环境黑色富有机质页岩形成模式^[122]

Fig. 9 Genetic models of black shales in an epicontinental sea environment^[122]

海水硫化缺氧及生物大灭绝等多种地质事件沉积耦合的结果^[134],有机质的富集可能与快速海侵形成的氧含量最低值区和近岸海侵有关^[100,135]。

3 存在问题

3.1 术语规范

细粒沉积研究目前存在着数量众多、相互交叉的术语,给研究和交流带来了诸多困扰。与细粒沉积相关的术语有页岩(shale)、黏土(clay)、黏土岩(claystone)、泥质岩(argillaceous rock)、泥(mud)、泥岩(mudstone)、泥质岩(mudrock)、细屑岩(lutite)、泥质岩(pelite)、泥板岩(argillite)、粉砂(silt)、粉砂岩(siltstone)、板岩(slate)和瓦克岩(wacke)等。其中文献中最常出现的术语是泥质岩(mudrock)、泥岩(mudstone)和页岩(shale)。

泥质岩(mudrock)是 Ingram (1953) 首先提出的^[136],用以定义那些粉砂级和黏土级颗粒含量至少为50%的沉积岩,并规定缺乏纹层且不易开的块状岩石的后缀为“-stone”,易裂开(具页理)岩石的后缀为“-shale”。这一术语得到了一批学者的支持,并将术语mudstone和shale限定为其中的次级类型使用^[5,9]。

泥岩(mudstone)是 Twenhofle (1937) 首先引入的^[137],主要包括黏土(clay)、粉砂(silt)、粉砂岩(siltstone)、黏土岩(claystone)、页岩(shale)和泥板岩(arillite)等。泥岩在英语文献中使用率也非常高,很多学者建议用该术语代替页岩^[4]。

页岩(shale)一般是指发育页理的泥岩,也有一些地质学家支持使用术语页岩(shale)一词作为所有细粒沉积岩的总称^[138]。

另外容易混淆的术语有“纹层”(laminae)、“层理”(bedding)、“纹理”(lamination)、“页理”(papery)、“裂理”(parting)等。“纹层”(laminae,也称细层)是地层组成单元的名称,它是构成地层的最基本的最小的单元,纹层的组成和结构基本一致,单个纹层之内没有任何肉眼可见的分层。“层理”(bedding)、“纹理”(lamination)和“页理”(papery)均是指细粒沉积中各组分的空间分布和排列方式,也就是指组成细粒沉积岩的颗粒彼此间的相互排列关系。它是岩石的一种沉积构造类型,因此不能用厚度等术语来描述。一般情况下,若页岩纹层(laminae)厚度小于1 mm则称为纹理,厚度1~10 mm则称为页理^[87],厚度大于1 cm则称为层理^[85]。裂理(parting)是指岩石易平行层面裂开成薄

板状或薄片状的习性^[30,139],成因与颗粒的定向排列有关^[140]。剥裂裂理(fissile partings)厚度一般为0.5~1 mm,纸状裂理(papery parting)厚度为0.5 mm^[139]。裂理只在地表露头出现,深埋在地下的粉砂岩和泥质岩是没有裂理的。

3.2 不同矿物成分的成因

海相细粒沉积主要矿物类型有黏土矿物(包括伊利石、伊/蒙混层黏土矿物、高岭石、绿泥石)、石英、碳酸盐矿物(如方解石、白云石、菱铁矿)和硫化物(主要是黄铁矿)等,这些矿物存在多种成因类型^[3,141]。矿物成因差异不仅直接影响岩石的成岩演化路径^[142]、储层特征^[143-144]和力学性质^[141,145-146],还影响着页岩古地理编图^[115,118]和全球海平面变化的恢复^[76,147]。

学术界对海相细粒沉积中不同类型矿物均开展了一系列研究。现在认为,细粒沉积中的石英除了陆源碎屑成因外,还有微生物成因和成岩自生成因,其中成岩自生石英的硅质来源主要有黏土矿物转化、长英质溶蚀和生物硅溶解、火山-热液活动等^[141,148]。黏土矿物大多数来源于母岩风化产物^[149],并以悬浮方式搬运至汇水盆地,以机械方式沉积而成^[4]。由汇水盆地中的SiO₂和Al₂O₃胶体的凝聚作用形成的自生黏土矿物,以及由火山碎屑物质蚀变形成的黏土矿物,在黏土矿物总含量中占比较少^[150]。碳酸盐矿物有陆源成因^[76]、生物成因、原生化学沉淀和成岩转化成因^[151]。陆源成因矿物含量及分布主要受物源影响,越靠近物源区,表层沉积物中碳酸盐含量越高^[152]。生物成因碳酸盐矿物含量及分布主要受表层水体中钙质生物生产、陆源碎屑稀释作用和水体溶解作用共同控制^[147,153]。黄铁矿主要有草莓状、层状、结核状、自形以及他形等类型,主要形成于同生沉积阶段,对原始粒间孔隙的保存具有重要作用^[154]。

矿物的成因研究还存在2个方面问题需要解决:①细粒沉积由于粒度细,可使用的分析手段有限,造成目前对矿物成因的认识存在多解性,不同矿物的成因识别和区分缺乏可靠的依据和标准。②矿物组分是搬运、沉积和成岩综合作用的结果,受源区性质、搬运过程和成岩作用的共同控制,但细粒沉积的矿物组成及含量与物源、沉积环境和成岩演化之间具体存在什么样的关系,目前仍不清楚。这两个问题的解决对推动细粒沉积学科的发展具有重要意义。

3.3 细粒浊流沉积、等深流沉积和半远洋沉积的区分

海相环境发育细粒浊流沉积、等深流沉积和远洋—

半远洋沉积3种相类型。浊流沉积是一种偶发性、幕式事件沉积,多形成于地质历史的一瞬间(几分钟到几天)。浊流活动能量一般较强,多顺斜坡流动,流运过程中或发生沉积或侵蚀海底^[59]。底流活动持续时间较长(有时可达几百万年),能量较弱,多沿斜坡流动,沉积速率较低^[51,155-157]。远洋-半远洋沉积发育于底流和浊流均不发育的区域,持续时间长,沉积速率低^[97]。

一般情况下,细粒浊流沉积、等深流沉积和远洋-半远洋沉积的特征差异明显,较易区分。然而,在实际工作中,由于不同地区地质情况差异、资料有限,准确区分难度极高。原因如下:①海洋环境中不同类型的搬运营力是交替出现(有时同时出现)的,产生的沉积物也多呈互层状出现,从客观上给识别和区分工作带来巨大挑战。②底流活动会筛选、侵蚀或改造已形成的浊流沉积物,同样,后期的浊流活动也会筛选、侵蚀或改造前期的浊流沉积物。二者最终所形成的产物特征相似,区分难度大。③学术界目前建立的相模式还不完善,甚至还存在着诸多矛盾,因此,根据这些模式来识别和区分不同沉积相势必会产生误导或错误。④同一种沉积构造可出现于不同沉积相中,如水平纹理既可以出现于浊流沉积中,也可以出现于等深流沉积和远洋-半远洋沉积中,因此,在资料并不充足的情况下仅根据某一种或一类沉积构造来判别沉积相势必会得出错误的结论^[85]。

因此,要准确区分海相细粒沉积的不同类型沉积相,必须要做到小尺度分析、中尺度分析和大尺度分析三者结合,综合判断,最终才能得出可靠的结论。小尺度分析包括野外分析、钻井分析和实验分析,重点分析细粒沉积的构造、结构、组构、粒序、组成、古流向、相序、旋回性及成因等。中尺度分析包括沉积体分析和区域地质背景分析,研究内容涉及研究区的古地理和古构造。大尺度分析包括沉积体系分析、海洋地理分析和构造背景分析等,研究内容包括全盆地古地形、古地理、古气候等。在大尺度分析阶段,小尺度和中尺度分析的结果必须符合盆地整体的地质规律。

4 结 论

1) 海相细粒沉积主要由黏土矿物、石英、碳酸盐矿物和有机质等组成,可分为源内组分和源外组分2种类型,源内组分形成于上覆水体中,源外组分主要来源于土壤的物理和化学风化产物,少量来源于火山灰和陆源有机质。

2) 海相细粒沉积存在风力、异轻流、重力流和底

流4大搬运营力,细粒物质呈单颗粒和复合颗粒形式搬运,复合颗粒类型有絮凝颗粒、泥质内碎屑、页岩岩屑、有机质-矿物集合体(“海洋雪”)及浮游动物粪球粒等。

3) 海相细粒沉积发育2类纹层(泥纹层和粉砂纹层)、3类纹层组(层系)(单一型、顺序型和交互型)和3类层(层组)(块状层、递变层和交互层),三者相互叠置形成交错纹理、递变纹理、水平纹理、块状构造和复合纹理5大纹理类型。

4) 海相细粒沉积发育浊流沉积、底流沉积、远洋-半远洋沉积3种相类型及其过渡类型,单因素分析多因素综合作图方法可以确定不同相的平面分布。

5) 海相细粒沉积有机质存在高生产力和强保存2种富集模式,高生产力模式中黑色页岩通过“上升洋流”、“氧含量最低值区(OMZ)”和“近岸透光带缺氧(PZE)”模式形成,强保存模式中黑色页岩通过“受限盆地”、“改进的受限盆地”、“不规则底形”、“水洼扩张”、“海侵化变层”和“近岸海侵(TN)”模式形成。

6) 目前,海相细粒沉积研究还存在着术语不规范,不同矿物成分成因不明确,细粒浊流沉积、等深流沉积和半远洋沉积难以区分等问题。这些问题的解决势必推动细粒沉积学进入崭新的阶段。

参 考 文 献

- [1] KRUMBEIN W C. The mechanical analysis of fine-grained sediments [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1932, 2 (3): 140-149.
- [2] TUCKER M E. *Sedimentary petrology* [M]. Oxford: Blackwell Science, 2001: 92-93.
- [3] 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 (5): 735-744.
- [4] 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.
- [5] MILLIKEN K. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84 (12): 1185-1199.
- [6] 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.
- [7] 姜在兴, 张建国, 孔祥鑫, 等. 中国陆相页岩油气沉积储层研究进展及发展方向 [J]. *石油学报*, 2023, 44 (1): 45-71.
JIANG Zaixing, ZHANG Jianguo, KONG Xiangxin, et al. Research progress and development direction of continental shale

- oil and gas deposition and reservoirs in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 45–71.
- [8] 操应长, 梁超, 韩豫, 等. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 729–741.
CAO Yingchang, LIANG Chao, HAN Yu, et al. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(4): 729–741.
- [9] 邵龙义, 张天畅. 泥质岩定义及分类问题的探讨[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 742–751.
SHAO Longyi, ZHANG Tianchang. Discussion on definition and classification of mudrock[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(4): 742–751.
- [10] 郭英海, 赵迪斐, 陈世悦. 细粒沉积物及其古地理研究进展与展望[J]. *古地理学报*, 2021, 23(2): 263–283.
GUO Yinghai, ZHAO Difei, CHEN Shiyue. Research progress and prospect of fine-grained sediments and palaeogeography[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(2): 263–283.
- [11] 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.
- [12] PETTIJOHN F J. *Sedimentary rocks* [M]. 3rd ed. New York: Harper and Row, 1975: 260–292.
- [13] MILLIKEN K L, ZHANG Tongwei, CHEN Jianping, et al. Mineral diagenetic control of expulsion efficiency in organic-rich mudrocks, Bakken Formation (Devonian-Mississippian), Williston Basin, North Dakota, U. S. A [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 127: 104869.
- [14] SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Mineralogy and geochemistry of the Upper Ordovician and Lower Silurian Wufeng-Longmaxi shale on the Yangtze platform, south China: Implications for provenance analysis and shale gas sweet-spot interval[J]. *Minerals*, 2022, 12(10): 1190.
- [15] QI Ling, WANG Hongyan, SHI Zhensheng, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the deeply buried Wufeng-Longmaxi Shale in the southern Sichuan Basin, China: Implications for provenance and tectonic setting[J]. *Minerals*, 2023, 13(12): 1502.
- [16] MELCHIN M J, MITCHELL C E, HOLMDEN C, et al. Environmental changes in the Late Ordovician-Early Silurian: Review and new insights from black shales and nitrogen isotopes [J]. *GSA Bulletin*, 2013, 125(11/12): 1635–1670.
- [17] MUNNECKE A, CALNER M, HARPER D A T, et al. Ordovician and Silurian Sea-water chemistry, sea level, and climate: A synopsis [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296(3/4): 389–413.
- [18] 张兴亮. 海洋惰性溶解有机碳库与海侵黑色页岩[J]. *科学通报*, 2022, 67(15): 1607–1613.
ZHANG Xingliang. Marine refractory dissolved organic carbon and transgressive black shales [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(15): 1607–1613.
- [19] 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.
- [20] GORSLINE D S. Introduction to a symposium on fine-grained sedimentology[J]. *Geo-Marine Letters*, 1984, 4(3): 133–138.
- [21] 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.
- [22] SORBY H C. On the application of quantitative methods to the study of the structure and history of rocks[J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1908, 64(1/4): 171–233.
- [23] PICARD M D. Classification of fine-grained sedimentary rocks [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1971, 41(1): 179–195.
- [24] 施振生, 周天琪, 孙莎莎, 等. 川南地区海相细粒储层研究与页岩气勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2024: 1–233.
SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, SUN Shasha, et al. Research on marine fine-grained reservoirs and shale gas exploration in the southern Sichuan region [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2024: 1–233.
- [25] 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.
- [26] MACQUAKER J H S, BENTLEY S J, BOHACS K M. Wave-enhanced sediment-gravity flows and mud dispersal across continental shelves: Reappraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions [J]. *Geology*, 2010, 38(10): 947–950.
- [27] 胡斌, 王冠忠, 齐永安. 痕迹学理论与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1997: 1–209.
HU Bin, WANG Guanzhong, QI Yongan. Theory of ichnology and its application [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology press, 1997: 1–209.
- [28] 颜佳新, 孟琦, 王夏, 等. 碳酸盐工厂与浅水碳酸盐岩台地: 研究进展与展望[J]. *古地理学报*, 2019, 21(2): 232–253.
YAN Jiaxin, MENG Qi, WANG Xia, et al. Carbonate factory and carbonate platform: Progress and prospects [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 232–253.
- [29] HILLIER S. Erosion, sedimentation and sedimentary origin of clays [M]//VELDE B. *Origin and Mineralogy of Clays*. Berlin: Springer, 1995: 162–219.
- [30] POTTER P E, MAYNARD J B, DEPETRIS P J. Mud and mudstones: Introduction and overview [M]. Berlin: Springer, 2005: 297.
- [31] SCHIEBER J. Early diagenetic silica deposition in algal cysts and spores; a source of sand in black shales? [J]. *Journal of*

- Sedimentary Research, 1996, 66(1): 175–183.
- [32] STOW D A V. Fine-grained sediments in deep water: An overview of processes and facies models[J]. Geo-Marine Letters, 1985, 5(1): 17–23.
- [33] 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.
- [34] SCHIEBER J. Mud re-distribution in epicontinental basins: Exploring likely processes[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 71: 119–133.
- [35] MIDDLETON N J, GOUDIE A S. Saharan dust: Sources and trajectories[J]. Transactions of the Institute of British Geographers, 2001, 26(2): 165–181.
- [36] WERNE J P, SAGEMAN B B, LYONS T W, et al. An integrated assessment of a “type euxinic” deposit: Evidence for multiple controls on black shale deposition in the middle Devonian Oatka Creek formation[J]. American Journal of Science, 2002, 302(2): 110–143.
- [37] SAGEMAN B B, MURPHY A E, WERNE J P, et al. A tale of shales: The relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian Basin [J]. Chemical Geology, 2003, 195(1/4): 229–273.
- [38] 杜学斌, 贾冀新, 赵珂, 等. 扬子地区奥陶纪—志留纪过渡期深时火山灰层发育特征及其对富有机质页岩沉积的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3509–3521.
DU Xuebin, JIA Jixin, ZHAO Ke, et al. Development characteristics of deep-time volcanic ash layers and its influence on deposition of organic-rich shale across Ordovician—Silurian transition in Yangtze area, South China [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3509–3521.
- [39] SU Wenbo, HUFF W D, ETTENSOHN F R, et al. K-bentonite, black-shale and flysch successions at the Ordovician-Silurian transition, South China: Possible sedimentary responses to the accretion of Cathaysia to the Yangtze Block and its implications for the evolution of Gondwana [J]. Gondwana Research, 2009, 15(1): 111–130.
- [40] SCHIEBER J. Experimental testing of the transport-durability of shale lithics and its implications for interpreting the rock record [J]. Sedimentary Geology, 2016, 331: 162–169.
- [41] PATTISON S A J. Storm-influenced prodelta turbidite complex in the Lower Kenilworth member at Hatch Mesa, Book Cliffs, Utah, U. S. A.: Implications for shallow marine facies models [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(3): 420–439.
- [42] ALEXANDER J, MULDER T. Experimental quasi-steady density currents[J]. Marine Geology, 2002, 186(3/4): 195–210.
- [43] JIN Lina, SHAN Xin, SHI Xuefa, et al. Hybrid event beds generated by erosional bulking of modern hyperpycnal flows on the Choshui River delta front, Taiwan Strait [J]. Sedimentology, 2021, 68(6): 2500–2522.
- [44] MULDER T, SYVITSKI J P M. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans [J]. The Journal of Geology, 1995, 103(3): 285–299.
- [45] PANTIN H M. Interaction between velocity and effective density in turbidity flow: Phase-plane analysis, with criteria for autosuspension[J]. Marine Geology, 1979, 31(1/2): 59–99.
- [46] FRIEDRICHS C T, WRIGHT L D. Gravity-driven sediment transport on the continental shelf: Implications for equilibrium profiles near river mouths[J]. Coastal Engineering, 2004, 51(8/9): 795–811.
- [47] BHATTACHARYA J P, MACEACHERN J A. Hyperpycnal rivers and prodeltaic shelves in the Cretaceous seaway of North America [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(4): 184–209.
- [48] OGSTON A S, STERNBERG R W, NITTROUER C A, et al. Sediment delivery from the Fly River tidally dominated delta to the nearshore marine environment and the impact of El Niño [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2008, 113(F1): F01S11.
- [49] STOW D A V, BOWEN A J. A physical model for the transport and sorting of fine-grained sediment by turbidity currents [J]. Sedimentology, 1980, 27(1): 31–46.
- [50] AIGNER T, REINECK H E. Proximity trends in modern storm sands from the Helgoland bight (North Sea) and their implications for basin analysis [J]. Senckenbergiana Maritima, 1982, 14(5/6): 183–215.
- [51] FAUGÈRES J C, STOW D A V. Bottom-current-controlled sedimentation: A synthesis of the contourite problem [J]. Sedimentary Geology, 1993, 82(1/4): 287–297.
- [52] REBESCO M, HERNÁNDEZ-MOLINA F J, VAN ROOIJ D, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations [J]. Marine Geology, 2014, 352: 111–154.
- [53] STOW D, SMILLIE Z. Distinguishing between deep-water sediment facies: Turbidites, contourites and hemipelagites [J]. Geosciences, 2020, 10(2): 68.
- [54] MA Xiaochuan, YAN Jun, HOU Yijun, et al. Footprints of obliquely incident internal solitary waves and internal tides near the shelf break in the northern South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(12): 8706–8719.
- [55] STOW D A V, HERNÁNDEZ-MOLINA F J, LLAVE E, et al. The Cadiz Contourite Channel: Sandy contourites, bedforms and dynamic current interaction [J]. Marine Geology, 2013, 343: 99–114.
- [56] MCANALLY W H, FRIEDRICHS C, HAMILTON D, et al. Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(1): 9–22.
- [57] TRAN D, STROM K. Suspended clays and silts: Are they Independent or dependent fractions when it comes to settling in a turbulent suspension? [J]. Continental Shelf Research, 2017, 138: 81–94.
- [58] SCHIEBER J. Reverse engineering mother nature—Shale sedimentology from an experimental perspective[J]. Sedimentary Geology, 2011, 238(1/2): 1–22.

- [59] TALLING P J, MASSON D G, SUMNER E J, et al. Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types [J]. *Sedimentology*, 2012, 59(7): 1937–2003.
- [60] STERNBERG R W, BERHANE I, OGSTON A S. Measurement of size and settling velocity of suspended aggregates on the northern California continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1999, 154(1/4): 43–53.
- [61] SCHIEBER J, SOUTHARD J, THAISEN K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples [J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1760–1763.
- [62] SCHIEBER J, SOUTHARD J B. Bedload transport of mud by floccule ripples—Direct observation of ripple migration processes and their implications [J]. *Geology*, 2009, 37(6): 483–486.
- [63] YAWAR Z, SCHIEBER J. On the origin of silt laminae in laminated shales [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360: 22–34.
- [64] 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.
- [65] EINSELE G, OVERBECK R, SCHWARZ H U, et al. Mass physical properties, sliding and erodibility of experimentally deposited and differently consolidated clayey muds (Approach, equipment, and first results) [J]. *Sedimentology*, 1974, 21(3): 339–372.
- [66] PEVERILL K I, SPARROW L A, REUTER D J. Soil analysis: An interpretation manual [M]. Collingwood: CSIRO Publishing, 1999: 388.
- [67] PLINT A G, MACQUAKER J H S, VARBAN B L. Bedload transport of mud across a wide, storm-influenced ramp: Cenomanian-Turonian Kaskapau Formation, western Canada foreland basin [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(11): 801–822.
- [68] SCHIEBER J, BENNETT R. Bedload transport of mud across a wide, storm-influenced ramp: Cenomanian-Turonian Kaskapau Formation, western Canada foreland basin—discussion [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83(12): 1198–1199.
- [69] PLINT A G. Mud dispersal across a Cretaceous prodelta: Storm-generated, wave-enhanced sediment gravity flows inferred from mudstone microtexture and microfacies [J]. *Sedimentology*, 2014, 61(3): 609–647.
- [70] DICKINSON W R. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1970, 40(2): 695–707.
- [71] FOWLER S W, KNAUER G A. Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column [J]. *Progress in Oceanography*, 1986, 16(3): 147–194.
- [72] ALLDREDGE A L, SILVER M W. Characteristics, dynamics and significance of marine snow [J]. *Progress in Oceanography*, 1988, 20(1): 41–82.
- [73] THORNTON D. Diatom aggregation in the sea: Mechanisms and ecological implications [J]. *European Journal of Phycology*, 2002, 37(2): 149–161.
- [74] GRIMM K A, LANGE C B, GILL A S. Self-sedimentation of phytoplankton blooms in the geologic record [J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 110(3/4): 151–161.
- [75] FLÜGEL E. Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application [M]. Berlin: Springer, 2004: 976.
- [76] SCHIEBER J, SHAO Xinhe. Detecting detrital carbonate in shale successions—Relevance for evaluation of depositional setting and sequence stratigraphic interpretation [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 130: 105130.
- [77] HONJO S. The rain of ocean particles and earth's carbon cycle [J]. *Oceanus*, 1997, 40(2): 4–7.
- [78] MACQUAKER J H S, KELLER M A, DAVIES S J. Algal blooms and “marine snow”: Mechanisms that enhance preservation of organic carbon in ancient fine-grained sediments [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(11): 934–942.
- [79] MACQUAKER J H S, BOHACS K M. On the accumulation of mud [J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1734–1735.
- [80] CAMPBELL C V. Lamina, laminaset, bed and bedset [J]. *Sedimentology*, 1967, 8(1): 7–26.
- [81] 施振生, 邱振, 董大忠, 等. 四川盆地巫溪2井龙马溪组含气页岩细粒沉积纹层特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 339–348.
- SHI Zhensheng, QIU Zhen, DONG Dazhong, et al. Laminae characteristics of gas-bearing shale fine-grained sediment of the Silurian Longmaxi Formation of Well Wuxi 2 in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 339–348.
- [82] 施振生, 董大忠, 王红岩, 等. 含气页岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因——以四川盆地志留统龙马溪组一段典型井为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(4): 829–840.
- SHI Zhensheng, DONG Dazhong, WANG Hongyan, et al. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of gas-bearing shales with different laminae and laminae combinations: A case study of Member 1 of the Lower Silurian Longmaxi shale in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 829–840.
- [83] 施振生, 邱振. 海相细粒沉积层理类型及其油气勘探开发意义 [J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 181–196.
- SHI Zhensheng, QIU Zhen. Main bedding types of marine fine-grained sediments and their significance for oil and gas exploration and development [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 181–196.
- [84] 施振生, 赵圣贤, 周天琪, 等. 海相含气页岩水平层理类型、成因及其页岩气意义——以川南地区古生界五峰组—龙马溪组为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1499–1514.
- SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Types and genesis of horizontal bedding of marine gas-bearing shale and its significance for shale gas: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1499–1514.
- [85] STOW D A V. Sedimentary rocks in the field—A colour guide [M].

- London: CRC Press, 2005: 1–318.
- [86] SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, WANG Hongyan, et al. Depositional structures and their reservoir characteristics in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. *Energies*, 2022, 15(5): 1618.
- [87] 冯增昭. 沉积岩石学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 1994: 1–298.
- FENG Zengzhao. Sedimentary petrology [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 1–298.
- [88] STOW D A V, SHANMUGAM D. 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.
- [89] COLLINSON J D, MOUNTNEY N P. Sedimentary structures [M]. 4th ed. Edinburgh: Dunedin Academic Press, 2019: 1–340.
- [90] TALLING P J. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: Deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models [J]. *Geosphere*, 2013, 9(3): 460–488.
- [91] PIPER D J W. Turbidite origin of some laminated mudstones [J]. *Geological Magazine*, 1972, 109(2): 115–126.
- [92] STOW D A V, BOWEN A J. Origin of lamination in deep sea, fine-grained sediments [J]. *Nature*, 1978, 274(5669): 324–328.
- [93] MCCAVE I N, JONES K P N. Deposition of ungraded muds from high-density non-turbulent turbidity currents [J]. *Nature*, 1988, 333(6170): 250–252.
- [94] SCHIMMELMANN A, LANGE C B, SCHIEBER J, et al. Varves in marine sediments: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 215–246.
- [95] BAAS J H, BEST J L, PEAKALL J E. Depositional processes, bedform development and hybrid bed formation in rapidly decelerated cohesive (mud-sand) sediment flows [J]. *Sedimentology*, 2011, 58(7): 1953–1987.
- [96] KRENMAYR H G. Hemipelagic and turbiditic mudstone facies associations in the Upper Cretaceous Gosau Group of the Northern Calcareous Alps (Austria) [J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 101 (3/4): 149–172.
- [97] STOW D A V, TABREZ A R. Hemipelagites: Processes, facies and model [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 129(1): 317–337.
- [98] MULDER T, ALEXANDER J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 269–299.
- [99] MULDER T, SYVITSKI J P M, MIGEON S, et al. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits. A review [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20 (6/8): 861–882.
- [100] 施振生, 王红岩, 赵圣贤, 等. 川南地区上奥陶统一志留统五峰组-龙马溪组快速海进页岩特征及有机质分布 [J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 788–805.
- SHI Zhensheng, WANG Hongyan, ZHAO Shengxian, et al. Rapid transgressive shale characteristics and organic matter distribution of the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi formations in southern Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(4): 788–805.
- [101] MIGEON S, SAVOYE B, ZANELLA E, et al. Detailed seismic-reflection and sedimentary study of turbidite sediment waves on the Var Sedimentary Ridge (SE France): significance for sediment transport and deposition and for the mechanisms of sediment-wave construction [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(2): 179–208.
- [102] NORMARK W R, PIPER D J W, POSAMENTIER H, et al. Variability in form and growth of sediment waves on turbidite channel levees [J]. *Marine Geology*, 2002, 192(1/3): 23–58.
- [103] KNELLER B C, MCCAFFREY W D. The interpretation of vertical sequences in turbidite beds: The influence of longitudinal flow structure [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73 (5): 706–713.
- [104] PAULL C K, USSLER III W, HOLBROOK W S, et al. The tail of the Storegga Slide: Insights from the geochemistry and sedimentology of the Norwegian Basin deposits [J]. *Sedimentology*, 2010, 57(6): 1409–1429.
- [105] 林春明. 沉积岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1–399.
- LIN Chunming. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Science Press, 2019: 1–399.
- [106] DROSER M L, BOTTJER D J. A semiquantitative field classification of ichnofabric [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1986, 56(4): 558–559.
- [107] O'BRIEN N R, SLATT R M. Argillaceous rock atlas [M]. New York: Springer, 1990: 141.
- [108] WIGNALL P B. Black shales [M]. New York: Oxford University Press, 1994: 130.
- [109] RÖHL H J, SCHMID-RÖHL A, OSCHMANN W, et al. The Posidonia Shale (Lower Toarcian) of SW-Germany: An oxygen-depleted ecosystem controlled by sea level and palaeoclimate [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 165 (1/2): 27–52.
- [110] SCHMID-RÖHL A, RÖHL H J, OSCHMANN W, et al. Palaeoenvironmental reconstruction of Lower Toarcian epicontinental black shales (Posidonia Shale, SW Germany): Global versus regional control [J]. *Geobios*, 2002, 35(1): 13–20.
- [111] LOWE D R. Sediment gravity flows; II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1982, 52(1): 279–297.
- [112] WALKER R G. The origin and significance of the internal sedimentary structures of turbidites [J]. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 1965, 35(1): 1–32.
- [113] 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.
- [114] STOW D A V, PIPER D J W. Deep-water fine-grained sediments: Facies models [J]. *Geological Society, London,*

- Special Publications, 1984, 15(1): 611–646.
- [115] 王红岩, 施振生, 孙莎莎, 等. 陆表海页岩沉积微相类型及微相分布模式——以川南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 51–64.
- WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Microfacies types and distribution of epicontinental shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 51–64.
- [116] 冯增昭. 华北下奥陶统岩相古地理新探[J]. 华东石油学院学报, 1977, 1(3): 57–79.
- FENG Zengzhao. Preliminary discussion on the Lower Ordovician lithofacies and paleogeography in North China [J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1977, 1(3): 57–79.
- [117] 冯增昭. 华北早奥陶世岩相古地理新探[J]. 地质科学, 1979, 14(4): 302–313, 385–386.
- FENG Zengzhao. A preliminary discussion on the Lower Ordovician lithofacies and paleogeography in North China [J]. Chinese Journal of Geology, 1979, 14(4): 302–313, 385–386.
- [118] 施振生, 周天琪, 郭伟, 等. 海相页岩定量古地理编图及深水陆棚沉积微相划分——以川南泸州地区五峰组-龙马溪组龙一11–4小层为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1728–1744.
- SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, GUO Wei, et al. Quantitative paleogeographic mapping and sedimentary microfacies division in a deep-water marine shale shelf: Case study of wufeng Formation-Longmaxi formation shale, southern Sichuan Basin, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(6): 1728–1744.
- [119] SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, ZHAO Qun, et al. Microfacies analysis and mapping of the Late Ordovician-Early Silurian Wufeng-Longmaxi shelf shale in southern Sichuan Basin, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(11): 1075.
- [120] ARTHUR M A, SAGEMAN B B. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1994, 22: 499–551.
- [121] DEMAISON G J, MOORE G T. Anoxic environments and oil source bed genesis [J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(8): 1179–1209.
- [122] LEONOWICZ P. Nearshore transgressive black shale from the Middle Jurassic shallow-marine succession from southern Poland [J]. Facies, 2016, 62(2): 16.
- [123] 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 等. 异常高有机质沉积富集过程与元素地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 931–948.
- QIU Zhen, WEI Hengye, LIU Hanlin, et al. Accumulation of sediments with extraordinary high organic matter content: Insight gained through geochemical characterization of indicative elements [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 931–948.
- [124] PEDERSEN T F, CALVERT S E. Anoxia vs. productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(4): 454–466.
- [125] JENKYN H C. Cretaceous anoxic events: From continents to oceans [J]. Journal of the Geological Society, 1980, 137(2): 171–188.
- [126] JENKYN H C. The Early Toarcian (Jurassic) anoxic event: Stratigraphic, sedimentary, and geochemical evidence [J]. American Journal of Science, 1988, 288(2): 101–151.
- [127] JENKYN H C. Geochemistry of oceanic anoxic events [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2010, 11(3): Q03004.
- [128] SŁOWAKIEWICZ M, TUCKER M E, PERRI E, et al. Nearshore euxinia in the photic zone of an ancient sea [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 426: 242–259.
- [129] MCARTHUR J M, ALGEO T J, VAN DE SCHOOTBRUGGE B, et al. Basinal restriction, black shales, Re-Os dating, and the Early Toarcian (Jurassic) oceanic anoxic event [J]. Paleogeography, 2008, 23(4): PA4217.
- [130] HALLAM A, BRADSHAW M J. Bituminous shales and oolitic ironstones as indicators of transgressions and regressions [J]. Journal of the Geological Society, 1979, 136(2): 157–164.
- [131] WIGNALL P B. Model for transgressive black shales? [J]. Geology, 1991, 19(2): 167–170.
- [132] RÖHL H J, SCHMID-RÖHL A. Lower Toarcian (Upper Liassic) black shales of the central European Epicontinental Basin: A sequence stratigraphic case study from the Sw German Posidonia Shale [M]//HARRIS N B. The Deposition of Organic-Carbon-Rich Sediments: Models, Mechanisms, and Consequences. Broken Arrow: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2005: 165–189.
- [133] WIGNALL P B, NEWTON R. Black shales on the basin margin: A model based on examples from the Upper Jurassic of the Boulonnais, northern France [J]. Sedimentary Geology, 2001, 144(3/4): 335–356.
- [134] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1–29.
- QIU Zhen, ZOU Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1–29.
- [135] ZOU Caineng, QIU Zhen, POULTON S W, et al. Ocean euxinia and climate change “double whammy” drove the Late Ordovician mass extinction [J]. Geology, 2018, 46(6): 535–538.
- [136] INGRAM R L. Fissility of mudrocks [J]. GSA Bulletin, 1953, 64(8): 869–878.
- [137] TWENHOFEL W H. The bottom sediments of Lake Monona, a fresh-water lake of southern Wisconsin [J]. Journal of Sedimentary Research, 1937, 7(2): 67–77.
- [138] ILGEN A G, HEATH J E, AKKUTLU I Y, et al. Shales at all scales: Exploring coupled processes in mudrocks [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 166: 132–152.
- [139] BOGGS S, Jr. Petrology of sedimentary rocks [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 194–219.
- [140] 曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 1986: 1–142.
- ZENG Yunfu, XIA Wenjie. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 1–142.
- [141] MILLIKEN K L, ERGENE S M, OZKAN A. Quartz types, authigenic and detrital, in the Upper Cretaceous Eagle Ford

- Formation, South Texas, USA [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 339: 273–288.
- [142] MACQUAKER J H S, TAYLOR K G, KELLER M, et al. Compositional controls on early diagenetic pathways in fine-grained sedimentary rocks: Implications for predicting unconventional reservoir attributes of mudstones [J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(3): 587–603.
- [143] 管全中, 董大忠, 张华玲, 等. 富有机质页岩生物成因石英的类型及其耦合成储机制——以四川盆地上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 700–709.
- GUAN Quanzhong, DONG Dazhong, ZHANG Hualing, et al. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: A case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 700–709.
- [144] 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.
- [145] MILLIKEN K L, OLSON T. Silica diagenesis, porosity evolution, and mechanical behavior in siliceous mudstones, Mowry Shale (Cretaceous), rocky mountains, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(4): 366–387.
- [146] 赵建华, 金之钧. 泥岩成岩作用研究进展与展望 [J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 58–72.
- ZHAO Jianhua, JIN Zhijun. Mudstone diagenesis: Research advances and prospects [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 58–72.
- [147] 江茂生, 朱井泉, 李学杰. 深水碳酸盐沉积研究进展 [J]. *古地理学报*, 2001, 3(4): 61–68.
- JIANG Maosheng, ZHU Jingquan, LI Xuejie. New progress in research on deep water carbonate sedimentation [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(4): 61–68.
- [148] SCHIEBER J, KRINSLEY D, RICUPUTI L. Diagenetic origin of quartz silt in mudstones and implications for silica cycling [J]. *Nature*, 2000, 406(6799): 981–985.
- [149] 蓝先洪, 张宪军, 刘新波, 等. 南黄海表层沉积物黏土矿物分布及物源 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(3): 11–16.
- LAN Xianhong, ZHANG Xianjun, LIU Xinbo, et al. Distribution pattern of clay minerals in surface sediments of South Yellow Sea and their provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(3): 11–16.
- [150] 虞义勇, 王永红, 李日辉, 等. 渤海西部表层沉积物中黏土矿物分布特征及物源指示 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 51–58.
- YU Yiyong, WANG Yonghong, LI Rihui, et al. Clay minerals distribution pattern in surface sediments of western Bohai and their provenance implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 51–58.
- [151] 周晓峰, 李熙喆, 郭伟, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩储层中碳酸盐矿物特征、形成机制及对储层物性影响 [J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(5): 775–788.
- ZHOU Xiaofeng, LI Xizhe, GUO Wei, et al. Characteristics, formation mechanism and influence on physical properties of carbonate minerals in shale reservoir of Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(5): 775–788.
- [152] 李国刚, 秦蕴珊. 中国近海细粒级沉积物中的方解石分布, 成因及其地质意义 [J]. *海洋学报*, 1991, 13(3): 381–386.
- LI Guogang, QIN Yunshan. The distribution, genesis, and geological significance of calcite in fine-grained sediments near the coast of China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(3): 381–386.
- [153] 李学杰, 陈芳, 刘坚, 等. 南海西部表层沉积物碳酸盐分布特征及其溶解作用 [J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 254–260.
- LI Xuejie, CHEN Fang, LIU Jian, et al. Distribution and its dissolution of carbonate in seafloor surface sediment in the western South China Sea [J]. *Geochimica*, 2004, 33(3): 254–260.
- [154] 张光荣, 聂海宽, 唐玄, 等. 页岩中黄铁矿类型及其对页岩气富集的影响——以四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩为例 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(3): 459–466.
- ZHANG Guangrong, NIE Haikuan, TANG Xuan, et al. Pyrite type and its effect on shale gas accumulation: A case study of Wufeng-Longmaxi shale in Sichuan Basin and its periphery [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2020, 42(3): 459–466.
- [155] SHANMUGAM G. Contourites: Physical oceanography, process sedimentology, and petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(2): 183–216.
- [156] 王红岩, 周尚文, 赵群, 等. 川南地区深层页岩气富集特征、勘探开发进展及展望 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1430–1441.
- WANG Hongyan, ZHOU Shangwen, ZHAO Qun, et al. Enrichment characteristics, exploration and exploitation progress, and prospects of deep shale gas in the southern Sichuan Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1430–1441.
- [157] 边瑞康, 孙川翔, 聂海宽, 等. 四川盆地东南部五峰组-龙马溪组深层页岩气藏类型、特征及勘探方向 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1515–1529.
- BIAN Ruikang, SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, et al. Types, characteristics, and exploration targets of deep shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1515–1529.

(编辑 张 晟)