

文章编号: 1671-1505(2023)04-0729-13 DOI: 10.7605/gdtxb.2023.04.079

基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨*

操应长^{1,2} 梁超^{1,2} 韩豫² 蒯克来^{1,2} 王俊然² 籍士超² 梅俊芳²

1 深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东)), 山东青岛 266580

2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

摘要 细粒沉积岩分类对细粒沉积岩系统深入研究至关重要, 分类方案应当反映岩石组物质来源、沉积作用方式, 且具有广泛适用性。细粒沉积岩物质来源多样, 包括陆源碎屑来源、盆内化学沉淀来源、生物源、火山碎屑来源。不同盆地细粒沉积岩的物质来源存在巨大差异, 同一盆地同种矿物也通常具有成因多样性。细粒沉积岩作为一种特殊岩石类型, 综合考虑物质来源和沉积作用方式, 笔者提出了细粒沉积岩四组分三端元分类方案, 根据有机质含量分为高、中、低 3 大类, 以陆源碎屑物质、内源化学沉淀物质、火山碎屑物质进行三端元划分, 分为 4 类: 陆源碎屑细粒岩类、化学细粒岩类、火山碎屑细粒岩类、混合细粒岩类; 并根据三级命名原则、合并命名原则、复合命名原则, 分为 11 个亚类, 岩石名称可根据岩石组分的相对含量进行命名。

关键词 细粒沉积岩 物质来源 组分来源-成因综合分类

第一作者简介 操应长, 男, 1969 年生, 2003 年获中国科学院广州地球化学研究所地球化学专业博士学位, 现为中国石油大学(华东)教授, 主要从事沉积学、油气储层地质学的教学和科研工作。E-mail: caoych@upc.edu.cn。

中图分类号: P588.2 文献标志码: A

Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis

CAO Yingchang^{1,2} LIANG Chao^{1,2} HAN Yu² XI Kelai^{1,2} WANG Junran² JI Shichao² MEI Junfang²

1 State Key Laboratory of Deep Oil and Gas (China University of Petroleum (East China)), Shandong Qingdao 266580, China

2 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China

Abstract The classification of fine-grained sedimentary rocks is crucial for the deep and systematic study of the fine-grained sedimentary rocks. The classification scheme not only has to reflect the sources, sedimentation types of rock components, it also should be widely applicable. There are various sources of fine-grained sedimentary rocks, including terrigenous clastic sources, endogenic chemical precipitation sources, biological sources and volcanic clastic sources. Among different basins, there are significant differences in the sediment source of fine-grained sedimentary rocks; furthermore, in the same basin, the same mineral can also has multiple sources. Currently, there is no systematic classification scheme for fine-grained sedimentary rocks, a special type of rocks. Based on the components, sediment sources and

* 国家自然科学基金(编号: 42272119, 42072164)和山东省重点研发计划(编号: 2020ZLYS08)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272119, 42072164) and the Key Research and Development Program of Shandong Province(No. 2020ZLYS08)]

收稿日期: 2023-06-20 改回日期: 2023-06-30

sedimentation types, we propose a comprehensive four-component three-terminal classification scheme for fine-grained sedimentary rocks. Firstly, the sediment source is considered as the first principle, and three end-members, i.e., terrestrial clastic substances, endogenic chemical precipitants, and volcanic clastic substances, are used to classify them into four types (terrigenous clastic fine-grained sedimentary rocks, chemical fine-grained sedimentary rocks, pyroclastic fine-grained sedimentary rocks, and mixed fine-grained sedimentary rocks), and according to the content of organic matter, the fine-grained sedimentary rocks can be further divided into three categories: high organic matter, medium organic matter and low organic matter. Secondly, fine-grained sedimentary rocks are divided into 11 subtypes following the three-level naming principle, combined naming principle and compound naming principle. Thus, fine-grained sedimentary rocks could be named according to the relative content of the components.

Key words fine-grained sedimentary rock, sediments source, comprehensive classification based on composition source and genesis

About the first author CAO Yingchang, born in 1969, obtained his Ph.D. degree in geochemistry from Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences in 2003. Currently he is a professor at China University of Petroleum (East China), mainly engaged in the teaching and scientific research of sedimentology and oil and gas reservoir geology. E-mail: caoych@upc.edu.cn.

细粒沉积岩分布广泛, 约占沉积记录的三分之一, 在沉积岩中占有重要地位 (Aplin and Macquaker, 2011; Zou *et al.*, 2019)。同时, 细粒沉积包含较为完整且详细的地层信息, 在古环境、古生态、古海洋重建中扮演重要角色, 也是理解深时气候演变及全球碳/硫循环的重要窗口 (Arthur and Sage-man, 1994; Stow *et al.*, 2001; 金之钧等, 2021)。自 20 世纪 30 年代概念提出以来, “细粒沉积” 备受关注, 但由于粒度小、成分复杂以及受超微观实验条件的限制, 细粒沉积形成演化过程是沉积学界乃至地质学界研究的薄弱领域 (Krumbein, 1932; Potter *et al.*, 1980; Macquaker and Adams, 2003; Camp *et al.*, 2016)。近年来, 随着页岩油气勘探开发如火如荼地开展, 作为页岩油气的物质基础与储集载体, 细粒沉积成为地学领域研究的国际前沿与热点。

细粒沉积岩分类对细粒沉积岩系统深入研究至关重要, 一直是国内外学者关注的焦点。细粒沉积岩成分多样、来源复杂, 目前尚无一个系统有效且具有广泛适用性的分类方案得到沉积学家的普遍认可 (Tucker, 2001; Macquaker *et al.*, 2003; 董春梅等, 2015; Camp *et al.*, 2016; 陈世悦等, 2016)。“逐盆逐建, 逐次逐建” 是细粒沉积岩分类方案及模式构建的常态 (朱如凯等, 2022; 姜在兴等, 2023)。能否建立如砂岩“四组分三端元” 经典分类体系, 是沉积学家普遍关注的问题。

笔者认为细粒沉积岩分类方案应当反映岩石组分物质来源及其沉积作用, 且具有广泛适用性。基于此, 作者提出了基于组分来源及成因的细粒沉积岩分类方案, 供广大沉积学工作者探讨。

1 细粒沉积岩相关概念

经典沉积岩分类中, 将沉积岩分为由母岩风化产物组成的沉积岩、由火山碎屑物质组成的沉积岩、由生物遗体组成的沉积岩三大类 (图 1), 其中, 由母岩风化产物组成的沉积岩占据主导, 又根据沉积作用方式进一步划分为碎屑岩和化学岩。在该沉积岩分类体系中, 细粒沉积岩作为一种特殊沉积岩类型, 其物质组成来源多样且大多是混合来源, 不能简单地划归碎屑岩、化学岩或火山碎屑岩。

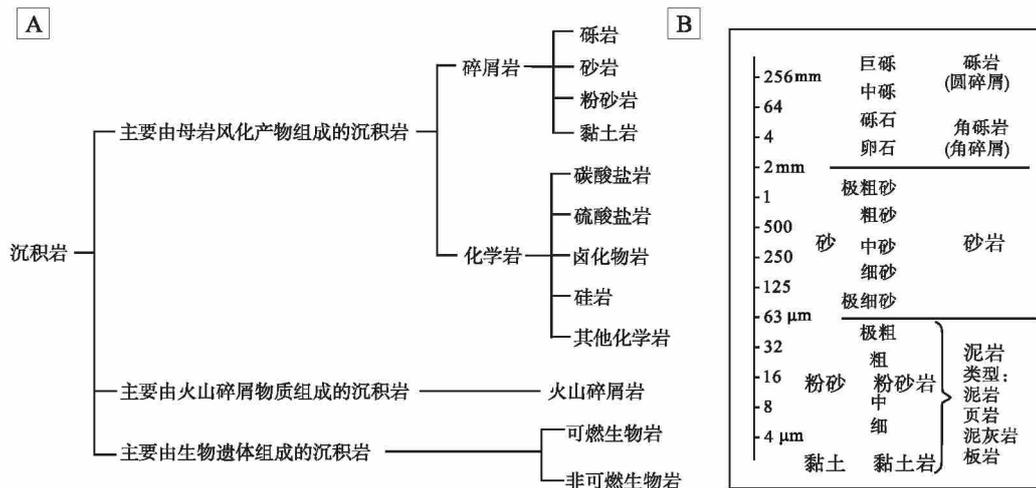
泥岩、页岩、黏土岩、细粒沉积岩相关概念存在联系, 但侧重点不同。主要表现为:

1) 泥岩强调的是粒度, 指由泥级沉积物形成的沉积岩, 泥级指粒径小于 $62.5 \mu\text{m}$ (Tucker, 2001)。

2) 页岩强调的是结构或岩石裂变性, 指发育页理的泥岩。

3) 黏土岩强调的是成分, 指主要由黏土矿物组成的沉积岩, 在沉积岩分类中属于碎屑岩 (朱筱敏, 2008; 姜在兴, 2021)。

4) 细粒沉积岩强调的是粒度, 指由细粒沉积物组成的沉积岩, 其物质来源 (成分) 包括陆源



A—经典教材中沉积岩分类 (冯增昭等, 1991; 朱筱敏等, 2008; 姜在兴等, 2010); B—Tucker 沉积岩分类 (Tucker, 2001)

图 1 几个经典的沉积岩分类

Fig. 1 Several classic classifications of sedimentary rocks

碎屑沉积物、化学沉积物及内碎屑、火山碎屑沉积物, 因此细粒沉积岩包含碎屑岩中的粉砂岩和黏土岩, 化学岩中泥晶—粉晶灰岩/云岩/硅质岩及粉屑—泥屑灰岩/云岩, 火山碎屑岩中由火山灰和火山尘组成的细粒火山碎屑岩, 以及上述沉积物混积形成的细粒混积岩。

不同学者对细粒沉积粒度的界定存在差异。国际上多数学者以 2 的几何级数制为基础, 主张粒级界定于 $62.5 \mu\text{m}$ (Krumbein, 1932; Tucker, 2001; Macquaker and Adams, 2003; Aplin and Macquaker, 2011)。国内部分学者也持该观点 (姜在兴等, 2013; 陈世悦等, 2016; 金之钧等, 2021; 朱如凯等, 2022), 同时也有学者主张以石油行业标准为基础, 粒级界定于 $100 \mu\text{m}$ (贾承造等, 2014; 袁选俊等, 2015)。笔者认为, 学术界应尽快达成共识, 以便更好地开展研究, 同时建议基于国际标准将粒级定于 $62.5 \mu\text{m}$ 以下。

2 细粒沉积岩分类研究现状

1747 年, Hoosen 最早提出了“泥岩”的概念。1853 年, “岩石学之父” Sorby 首次将显微镜应用到地质研究中, 并磨制岩石薄片, 研究了泥岩的微观特征。1922 年, Wentworth (1922) 提出应用 2 的几何级数制划分碎屑颗粒粒度, 建立了乌顿—温德华氏粒级标准 (Udden-Wentworth grade scale), 提出 $62.5 \mu\text{m}$ ($1/16 \text{ mm}$) 以下为粉砂,

$3.9 \mu\text{m}$ ($1/256 \text{ mm}$) 以下为黏土, 该粒度分级被后续学者广泛采纳。以此为基础, 1932 年, Krumbein (1932) 提出细粒沉积物 (Fine-grained sediments) 的概念, 并将粒径界定在 $62.5 \mu\text{m}$ 以下, 其主要依据是, 粒径小于 $1/16 \text{ mm}$ ($62.5 \mu\text{m}$) 的沉积物会发生絮凝作用, 导致粗碎屑的“筛选”粒度分析方法不适用于细粒沉积物, 进而提出了“移液管法”进行细粒物质粒度分析。1953 年, Ingram (1953) 系统研究了泥状岩 (Mudrocks) 的可裂变性, 如果具有可裂变性称为页岩, 无裂变性称为泥岩。1971 年, Picard (1971) 首次系统地提出了细粒沉积岩的分类方案: 以黏土、砂、粉砂为三端元将细粒沉积岩分为黏土岩、粉砂岩、泥岩。并指出除矿物含量外, 可裂变性、层理类型、沉积构造、颜色、化石成分等也应参与命名。

自此之后, 细粒沉积岩命名及分类一直是沉积学者讨论的热点。国外学者讨论的细粒沉积岩分类及模式集中在海相环境, 以野外露头、岩心薄片观察、化验分析、测井、地震等手段为基础, 选取颜色、矿物成分、沉积结构、层理类型、生物化石等特征为依据对细粒沉积岩进行分类 (Mulder and Syvitski, 1995; Macquaker and Adams, 2003; Milliken, 2014; Lazar *et al.*, 2015)。代表案例包括 Loucks 和 Ruppel (2007) 构建的“矿物成分—沉积结构—生物化石类型”分类标准和 McKee 和 Weir (1953) 提出的“沉

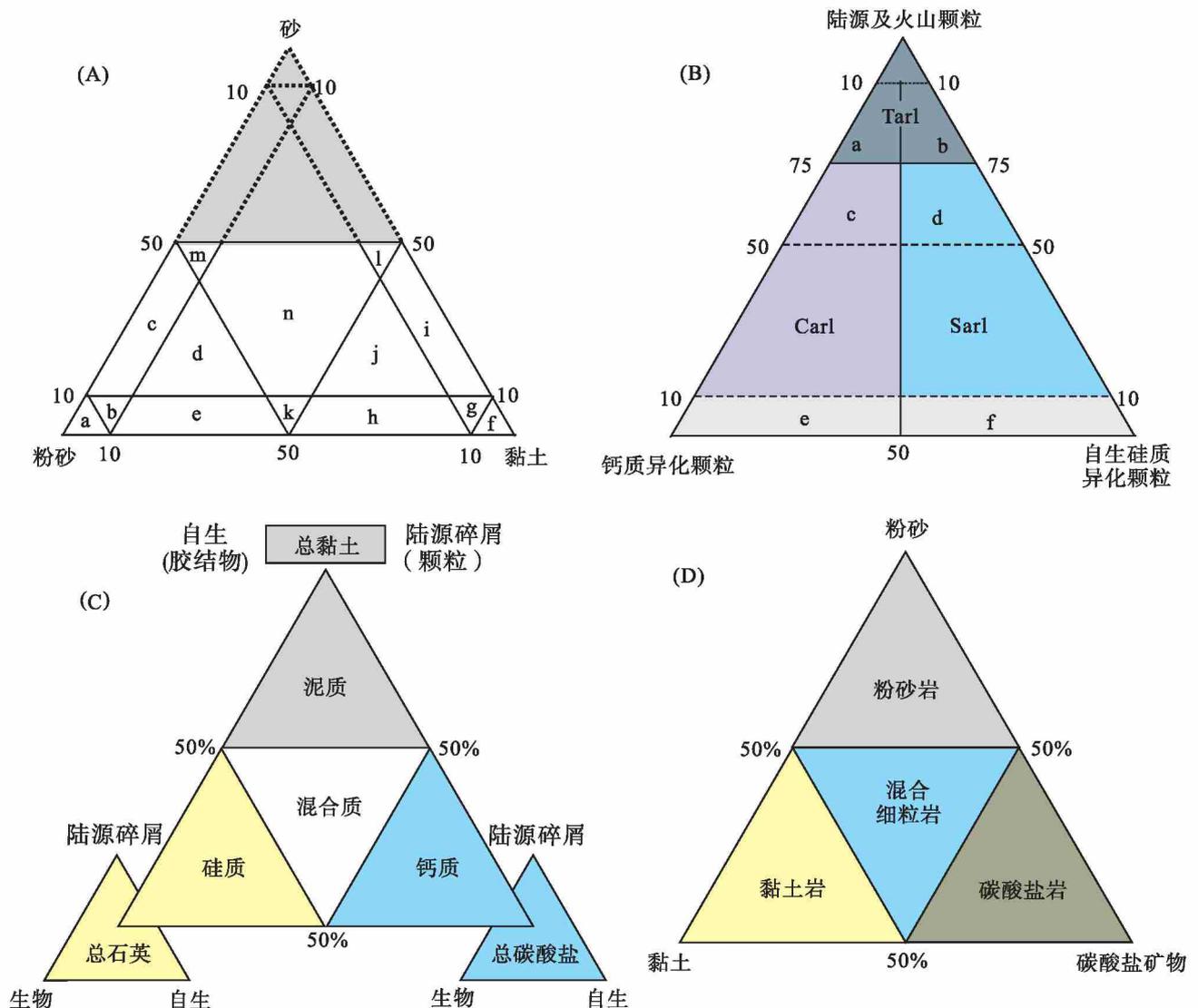


图 2 不同学者提出的细粒沉积岩分类方案

Fig. 2 Classification schemes for fine-grained sedimentary rocks proposed by different scholars

积结构层理规模—力学特征”分类标准。此外，三端元图解结构分类法作为众多成分分类方案的原型为细粒沉积岩的成因讨论提供了基础。Macquaker 和 Adams (2003) 提出了以组分含量来进行细粒沉积岩分类命名的方案(图 2-A)，并不考虑物质来源。Milliken (2014) 根据沉积及成岩特征将盆内和盆外颗粒进行区分并据此建立了 Tarl/Varl (盆外的陆源碎屑/火山碎屑组分达 75% 以上)，Carl (盆外碎屑小于 75%，盆内碎屑中生物钙质含量大于生物硅质含量) 和 Sarl (盆外

碎屑小于 75%，盆内碎屑中生物钙质含量小于生物硅质含量) 的三端元岩石分类方案(图 2-B)，有效地区分了不同矿物的沉积、成岩特征，对恢复细粒沉积岩形成过程以及后期成岩改造具有重大的推进作用 (Milliken, 2014; Camp *et al.*, 2016)。但由于细粒沉积颗粒小，该分类存在颗粒成因识别难度大、成岩蚀变后原始成分鉴别难的挑战，因此需借助高精度的观察设备和定量分析方法。Lazar 等 (2015) 提出了以黏土矿物、石英和碳酸盐含量为三端元的划分方案，共分为

4个大类,分别命名为硅质、钙质、黏土质和混合质细粒沉积岩(图2-C),在此基础上再进行成分的成因分析,黏土矿物包含自生和陆源2种类型,石英包含陆源、生物源和自生来源,碳酸盐也包含陆源、生物源和自生来源。Macquaker和Adams(2003)的分类非常精细,但仅考虑成分含量,且划分的岩石类型过多,不便于细粒沉积岩的深入研究和成因解释。Lazar等(2015)提出了良好的成分分类和命名方案,在此基础上进一步分析各组分成因。Milliken(2014)则直接按照成因分类和命名,尽管存在争议,但仍是积极的尝试。

国内细粒沉积岩分类方案多采用矿物成分三端元法为基础,综合有机质丰度、地球化学特征、特殊矿物成分、成因机制、生物特征等来划分(图2-D)(姜在兴等,2013;柳益群等,2013;张少敏等,2018;胡宗全等,2021;赵贤正等,2023)。但细粒沉积岩复杂多样,形成的盆地背景(前陆盆地、断陷盆地、拗陷盆地)、湖泊水体环境(淡水、微咸水、咸水)等均存在巨大差异(袁选俊等,2015;张少敏等,2018;周立宏等,2018;彭军等,2022)。不同盆地形成的细粒沉积岩并没形成统一的分类和命名,“逐盆逐建,逐次逐建”成为细粒沉积岩分类方案及模式构建的常态(朱如凯等,2022;姜在兴等,2023)。这极大地制约了细粒沉积岩的系统深入研究。

目前,以黏土、长英质矿物和碳酸盐矿物为三端元进行分类是最为常见的方案,但存在如下问题:(1)不能全面适用于不同沉积背景下形成的细粒沉积岩,如准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩含大量的热液矿物,鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩含大量火山碎屑。(2)不能有效反映细粒沉积岩形成的沉积作用及成因,除传统的悬浮沉积外,还存在重力流等机械沉积、化学沉积、生物沉积等(Shamugam,2003;Schieber and Southard,2009;Konitzer *et al.*,2014)。(3)不同盆地页岩组分差异大,无法形成统一的分类方案,能否建立如砂岩“四组分三端元”经典分类体系,是沉积学家普遍关注的问题。

3 细粒沉积岩的物质来源

细粒沉积广泛发育在沉积记录中,其矿物构成

复杂,包含了黏土矿物(如伊利石、伊蒙混层、高岭石、绿泥石等)、石英、长石、碳酸盐矿物(如方解石、白云石、菱铁矿等)、硫化物(黄铁矿等)、有机质、凝灰质等。就物质来源而言,主要包括陆源碎屑物质、盆内化学物质、生物源物质、火山碎屑物质等,不同盆地细粒沉积岩的物质来源及组分构成存在巨大差异(表1;图3)。

3.1 陆源碎屑物质

主要指来自母岩风化的碎屑物质通过河流、风等方式搬运并输送至盆地的沉积物(Garrels and Mackenzie,1971; Hillier,1995; Potter *et al.*,2005),几乎所有盆地的细粒沉积岩中均含陆源碎屑物质。相比于海洋,湖泊沉积物受气候、陆源、水体物理化学性质的影响更加敏感,这表现在其时空维度上具有较大的差异性(Liang *et al.*,2018a;黎茂稳等,2022)。

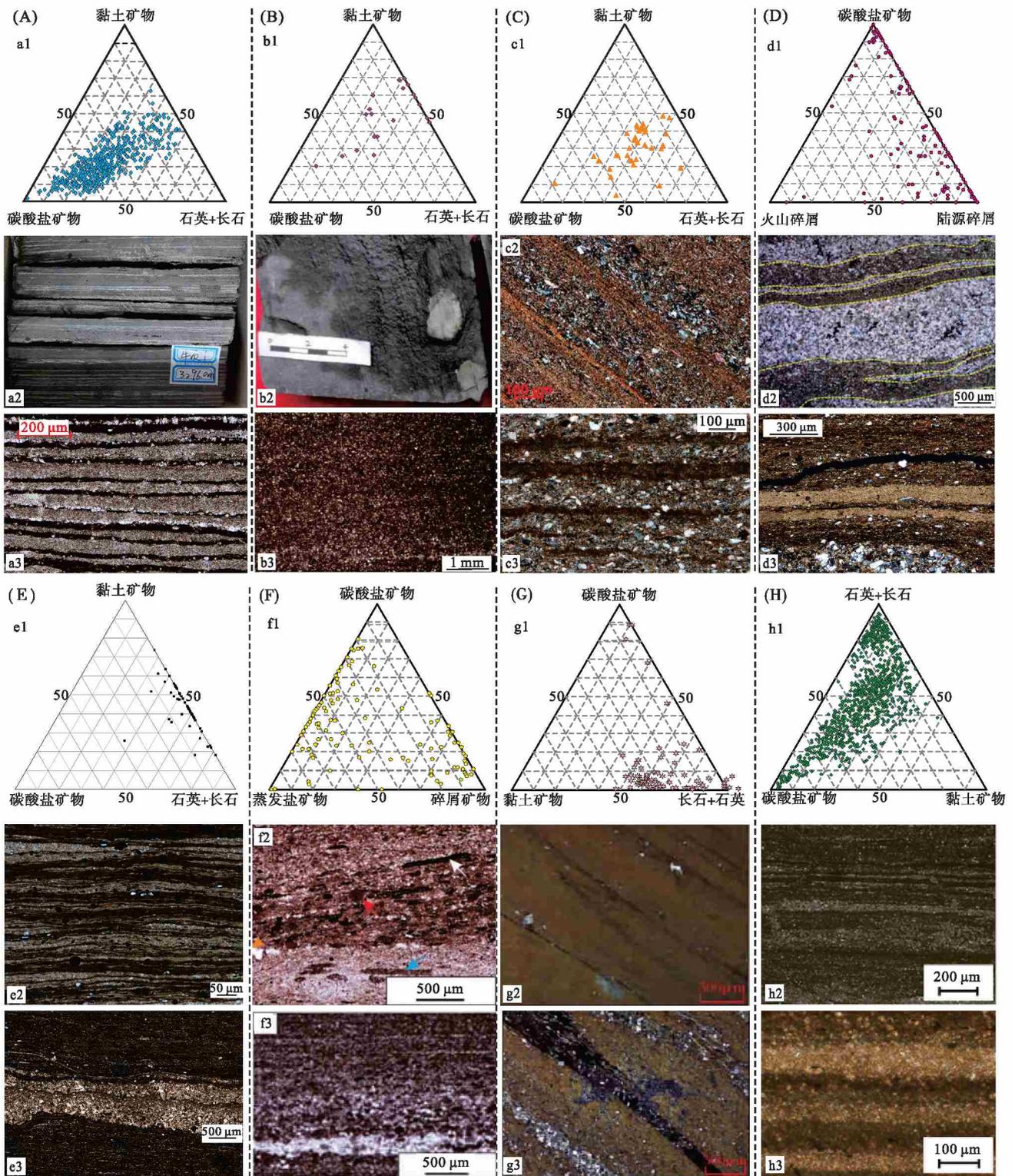
就成分而言,陆源碎屑物质包含陆源碎屑来源的石英、长石、黏土矿物、碳酸盐矿物、岩屑等。但值得注意的是:(1)石英并不都是陆源碎屑成因,也包括生物成因、成岩自生等成因(图4)。中国四川盆地五峰组—龙马溪组页岩中含有很高比例的自生石英(最高可达80%),主要来自生物硅的转化(图4-A)。中国陆相页岩中存在大量的成岩自生石英,来自黏土转化、长石溶蚀及火山物质蚀变(图4-B,4-C,4-D)。美国东部晚泥盆世Chattanooga and New Albany页岩中,充填于藻类孢囊的粉砂级石英甚至高达100%来自放射虫及硅藻溶蚀(图4-E,4-F;Schieber *et al.*,2000)。(2)碳酸盐矿物既可以来自盆内沉淀,也存在陆源碎屑成因。在四川盆地、渤海湾盆地冀中拗陷束鹿凹陷等均有陆源碳酸盐岩碎屑发现,粒径50~200 μm,与碎屑石英和长石伴生。

3.2 盆内化学物质

盆内化学物质指陆源溶解物质及深部热液来源物质在海洋/湖泊水体中通过化学及生物化学直接沉淀,或先期化学及生物化学沉积未固结经机械改造形成的沉积物。其主要矿物包括碳酸盐矿物、磷酸盐矿物、石膏及蛋白石等(Arthur and Sageman,1994; Loucks and Ruppel,2007)。在中国东部陆相细粒沉积中,盆内化学沉淀物质最高可达60%以上,如济阳拗陷沙河街组沙四上一沙三下细粒沉

表 1 中国主要陆相沉积盆地细粒沉积的物质组分构成、岩相及形成环境

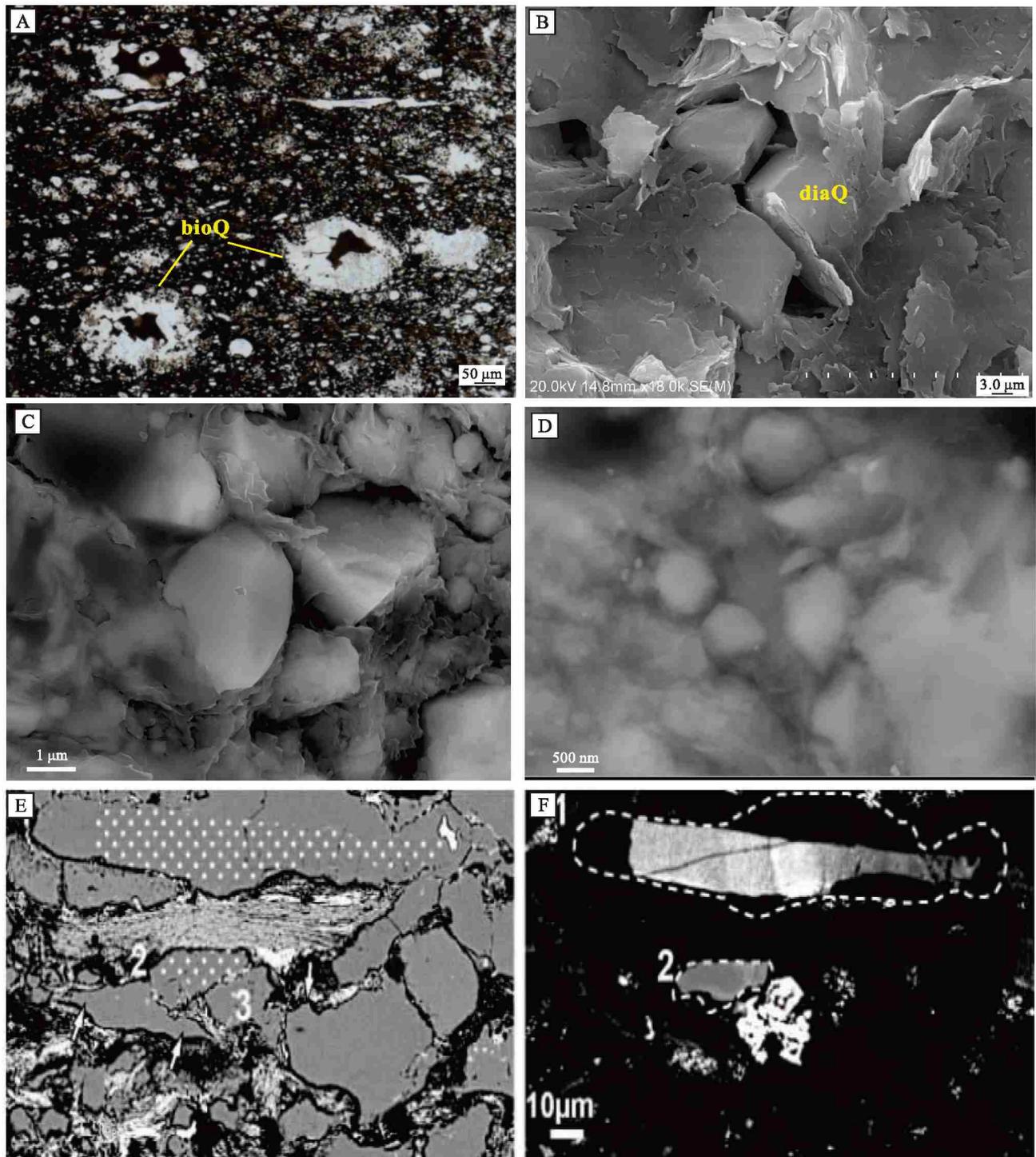
盆地及次级构造	地层	组分/%(括号内为均值)					岩石类型	沉积环境	
		黏土矿物	陆源碎屑物质	盆内化学沉淀物质	火山碎屑物质	生物源物质			
南襄盆地	泌阳凹陷	11~46.5 (34.45)	20~77.6 (43.7)	10~57.5 (35)	0~7.6 (2.8)	/	1.59~4.53 (2.93)	块状泥岩、纹层状黏土质页岩、纹层状粉砂质页岩、纹层状灰质页岩、纹层状云质页岩	干旱—半干旱、咸水、水深高频变化、还原环境
	核桃园组二段	15.9~68.2 (35.6)	1.9~49 (35.57)	0~100 (34.7)	0~17 (0.6)	1~10	(3.26)	泥岩、含云泥岩、云质泥岩、泥质云岩、含泥云岩、白云岩、粉砂质泥岩	温暖潮湿、半咸水—咸水、半深湖—深湖、贫氧环境
渤海湾盆地	沧东凹陷	1~41 (15.9)	0~100 (35.7)	0~100 (34.7)	0~17 (0.6)	1~10	(3.26)	泥岩、含云泥岩、云质泥岩、泥质云岩、含泥云岩、白云岩、粉砂质泥岩	温暖潮湿、半咸水—咸水、半深湖—深湖、贫氧环境
	孔二段	2~59 (21.07)	3~100 (27.19)	1~97 (49.6)	1~34 (3.2)	/	2~4	深灰色泥岩、灰泥岩、白云质泥岩、泥质灰岩	干旱—半干旱、咸水、还原环境
辽河拗陷	沙三段	5.6~54.9 (36.4)	2.8~100 (49.6)	4.2~9.3 (2.6)	0.9~10.5 (4)	/	(3.34)	黏土型泥页岩、长英型泥页岩、碳酸盐岩、混合型泥页岩	微咸—咸化环境
	沙四上亚段	2~62 (33.02)	25~84 (53.86)	0~68 (13.11)	1~10	0~30	2~6	泥岩、夹粉砂岩和粉砂质条带的泥岩、泥灰岩、加硅质钙质云岩、页岩	淡水为主、部分咸化、缺氧还原环境
准噶尔盆地	芦草沟组	38~98 (66.98)	22.8~66.2 (37.88)	33.33~99.18 (57.44)	0~3.11 (0.24)	5~25	(2.2)	泥质粉砂岩、泥质细砂岩、云质粉砂岩	干旱炎热、半咸水、强还原—还原
	风城组	12.37~61.5 (40.57)	19.28~90.52 (50.21)	0~14.43 (5.84)	/	5~30	3~16	块状泥岩、粒序层理泥岩、波状纹层页岩、平直纹层页岩、凝灰岩	温暖潮湿、淡—微咸水、水体较深、还原环境
鄂尔多斯盆地	长7段	15.1~75.3 (49.5)	12.1~100 (31.91)	0~67 (18)	/	/	1.16~2.68 (1.63)	纹层状砂质、粉砂质页岩、纹层状钙质页岩、富有机质页岩	温暖湿润、滨海—潟湖湖盆环境
	须家河组	6.1~39.3 (23.5)	16~90.2 (62.9)	1.1~72.5 (7.2)	1~12.8 (5.9)	/	(2.67)	泥岩、含介形虫泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、白云岩、泥灰岩、灰质泥岩	微咸化、水体持续加深、还原环境
江汉盆地	潜江凹陷	5.0~36.4 (21.5)	4.8~66.9 (24.1)	0~81.5 (41.3)	/	/	0.14~19.26 (2.53)	云质泥岩、膏岩、盐岩	半干旱—半湿润咸水还原环境



A—渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组 (Liang *et al.*, 2018a); B—四川盆地三叠系须家河组 (邓涛, 2020); C—南襄盆地泌阳凹陷核桃园组 (张文昭, 2014); D—准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组 (张少敏等, 2018); E—鄂尔多斯盆地延长组 7 段; F—江汉盆地潜江凹陷潜江组 (Kong *et al.*, 2022); G—松辽盆地古龙凹陷青山口组 (柳波等, 2018); H—渤海湾盆地沧东凹陷孔二段 (李圯等, 2020)

图 3 中国陆相细粒沉积岩组分构成及微观特征

Fig. 3 Composition and microscopic characteristics of fine-grained sedimentary rocks in continental basins in China



A—生物硅, 四川盆地龙马溪组页岩, W213 井, 3747.23 m; B—黏土转化成岩石英, 济阳坳陷沙四上亚段, NY1 井, 3456.5 m; C—鄂尔多斯盆地延长组, G292 井, 2565 m; D—准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组, J37 井, 2848 m; E 和 F—粉砂级自生石英颗粒, F 为 E 阴极发光图像 (Schieber *et al.*, 2000); bioQ—生物石英; diaQ—成岩石英; DQ—碎屑石英

图 4 细粒沉积岩中自生石英

Fig. 4 Autogenic quartz in fine-grained sedimentary rocks

积主要由盆内自生碳酸盐构成, 江汉盆地潜江凹陷潜江组细粒沉积含大量钙芒硝、白云石等盐类矿物。深层卤水带来的大量富离子流体进入沉积盆地, 已成为深水细粒沉积的重要物质来源。

盆地化学物质主要存在以下沉积作用方式(图 5): (1) 生物化学作用: 藻类等通过诱导、粘结水体中的 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 离子, 沉淀泥晶方解石 (Dupraz *et al.*, 2009), 这是济阳拗陷古近系页岩中碳酸盐矿物沉淀的重要机制 (Liang *et al.*, 2018a)。(2) 化学作用: 高温、高盐度或 CO_2 分压背景下盐类矿物析出沉淀, 如江汉盆地潜江组页岩中发育大量石盐、白云石等沉积 (姜在兴等, 2023)。(3) 盆内化学及生物化学沉积物再搬运沉积作用: 如碳酸盐质内碎屑等。

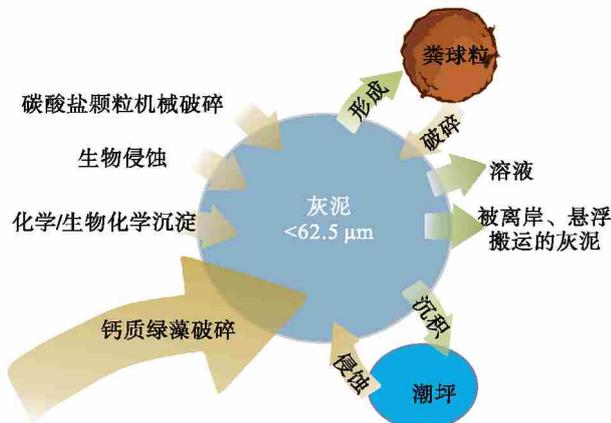


图 5 盆内自生物质来源

Fig. 5 Biomass sources within the basin

3.3 生物源物质

生物源物质是指形成于盆地中的生物体以及与生物有关的有机-无机复合体。其中, 在深水环境中, 主要来自浮游、底栖藻类等生物体及其与黏土等形成的复合体 (Macquaker *et al.*, 2010)。如颗石藻、硅藻、沟鞭藻, 这是中国东部中生界陆相页岩中有机质的主要来源 (刘传联等, 1998)。

3.4 火山碎屑物质

火山作用在许多盆地异常发育, 并在页岩油形成与富集中扮演重要角色。火山作用形成的火山灰及火山尘作为重要的物质来源, 特别是在深水环境中, 与其他来源细粒物质共同沉积。如准噶尔盆地二叠系芦草沟组页岩层系中发育大量的凝灰质纹层,

与陆源碎屑纹层或碳酸盐纹层互层。火山物质带来的大量营养盐使水体富营养化, 进而促使生物勃发, 极大地提高古生产力 (Zou *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2021)。火山物质在埋藏成岩过程中具有诸多化学不稳定性, 其对于细粒沉积物成岩进程和生烃过程具有显著影响 (Liang *et al.*, 2018b; 胡文瑄等, 2019), 但具体过程和机制仍需进一步研究。

4 细粒沉积岩组分来源-成因综合分类

笔者认为细粒沉积岩分类应当反映以下 3 个主要问题: (1) 组分物质来源, 即能够指示陆源、生物源、深部源等不同来源; (2) 沉积作用方式, 细粒物质沉积过程包括物理、化学、生物等多种作用方式; (3) 具有普遍适用性, 以便科研工作者形成统一的认识体系。有机质对于细粒沉积岩的沉积过程、成岩作用及页岩油形成与富集有着至关重要的作用 (梁超等, 2017), 因此将有机质纳入细粒沉积岩分类是必要且有意义的。

遵循上述原则, 提出了基于物质来源及成因的细粒沉积岩“四组分三端元”分类方案(表 2)。

1) 首先考虑生物源物质, 根据 TOC 含量划分为低有机质、中有机质和高有机质细粒沉积岩, 建议以 TOC 含量 2% 和 4% 为界, 划分为低有机质、中有机质和高有机质 3 类细粒沉积岩。

2) 以此为基础, 以陆源碎屑物质、盆内化学物质、火山碎屑物质进行三端元划分, 分为 4 类(图 6): I-陆源碎屑细粒岩类、II-化学细粒岩类、III-火山碎屑细粒岩类、IV-混合细粒岩类。陆源碎屑物质主要考虑石英、长石和黏土矿物等。需要说明的是, 陆源碳酸盐岩泥屑总体发育较为局限, 盆内自生黏土矿物相对含量较低, 主体仍是陆源碎屑物质。盆内化学沉淀物质主要为盐类矿物, 如碳酸盐、硫酸盐、卤化物等矿物。

3) 对单一物质来源 ($\geq 50\%$) 且有主导矿物 ($\geq 50\%$) 的细粒沉积岩采用三级命名原则进行命名: 大于 50% 定主名, 25%~50% 定 XXX 质, 10%~25% 定含 XXX。

如陆源碎屑细粒岩: 黏土含量 35%, 长英质矿物含量 55%, 且均为粉砂, 则命名为黏土质粉砂岩。

如化学细粒岩: 石膏含量 30%, 白云石含量 50%, 黏土含量 15%, 则命名为: 含黏土膏质云岩。

4) 对单一物质来源 ($\geq 50\%$) 但无主导矿物

表 2 细粒沉积岩组来源—成因综合分类方案
Table 2 Comprehensive classification scheme based on composition and genesis for fine-grained sedimentary rocks

岩类名称 (类)	物质来源及沉积作用方式		岩类名称(亚类)	岩石名称	组含量/%
	陆源碎屑/%	化学沉淀矿物/% 火山碎屑/%			
陆源碎屑 细粒岩类	> 90	< 10	陆源碎屑细粒岩亚类	粉砂岩 含黏土粉砂岩 黏土质粉砂岩 粉砂质黏土岩 含粉砂黏土岩 黏土岩	粉砂>90;黏土<10 粉砂 75~90;黏土 10~25 粉砂 50~75;黏土 25~50 粉砂 25~50;黏土 50~75 粉砂 10~25;黏土 75~90 粉砂<10;黏土>90
	75~90	10~25	含 XX 陆源碎屑细粒岩亚类	含碳酸盐细粒碎屑岩 含凝灰细粒碎屑岩 含碳酸盐—凝灰细粒碎屑岩	碳酸盐矿物>10;火山碎屑<10 碳酸盐矿物<10;火山碎屑>10 碳酸盐矿物>10;火山碎屑>10
	50~75	25~50	XX 质陆源碎屑细粒岩亚类	碳酸盐质细粒碎屑岩 含凝灰碳酸盐质细粒碎屑岩 含碳酸盐凝灰质细粒碎屑岩 凝灰质细粒碎屑岩	碳酸盐矿物 25~50;火山碎屑<10 碳酸盐矿物 25~50;火山碎屑 10~25 碳酸盐矿物 10~25;火山碎屑 25~50 碳酸盐矿物<10;火山碎屑 25~50
	< 10	> 90	化学细粒岩亚类	方解石细粒岩 含云质方解石细粒岩 云质方解石细粒岩 灰质白云石细粒岩 含灰质白云石细粒岩 白云石细粒岩	方解石>90;白云石<10 方解石 75~90;白云石 10~25 方解石 50~75;白云石 25~50 方解石 25~50;白云石 50~75 方解石 10~25;白云石 75~90 方解石<10;白云石>90
化学细粒 岩类	10~25	75~90	含 XX 化学细粒岩亚类	含陆源碎屑化学细粒岩 含火山碎屑化学细粒岩 含陆源—火山碎屑化学细粒岩	陆源碎屑>10;火山碎屑<10 陆源碎屑<10;火山碎屑>10 陆源碎屑>10;火山碎屑>10
	25~50	50~75	XX 质化学细粒岩亚类	陆源碎屑化学细粒岩 含火山碎屑陆源碎屑化学细粒岩 含陆源碎屑火山碎屑化学细粒岩 火山碎屑质化学细粒岩	陆源碎屑 25~50;火山碎屑<10 陆源碎屑 25~50;火山碎屑>10 陆源碎屑>10;火山碎屑 25~50 陆源碎屑<10;火山碎屑 25~50
	< 10	> 90	火山碎屑细粒岩亚类	火山碎屑细粒岩	火山碎屑>90
	10~25	10~25	含 XX 火山碎屑细粒岩亚类	含碳酸盐火山碎屑细粒岩 含陆源碎屑火山碎屑细粒岩 含碳酸盐—陆源碎屑火山碎屑细粒岩	碳酸盐矿物>10;陆源碎屑<10 陆源碎屑>10;碳酸盐矿物<10 陆源碎屑>10;碳酸盐矿物>10
火山碎屑 细粒岩类	25~50	25~50	XX 质火山碎屑细粒岩亚类	碳酸盐质火山碎屑细粒岩 含陆源碎屑碳酸盐质火山碎屑细粒岩 含碳酸盐陆源碎屑火山碎屑细粒岩 陆源碎屑质火山碎屑细粒岩	碳酸盐矿物 25~50;陆源碎屑<10 碳酸盐矿物 25~50;陆源碎屑 10~25 碳酸盐矿物 10~25;陆源碎屑 25~50 碳酸盐矿物<10;陆源碎屑 25~50
	25~50	25~50	XX-XX-XX 混合细粒岩亚类	火山碎屑质—陆源碎屑混合细粒岩	碳酸盐矿物<10;陆源碎屑 25~50
	25~50	25~50		陆源碎屑质—碳酸盐质细粒岩	
	< 10	> 10		含火山碎屑碳酸盐质—陆源碎屑细粒岩 碳酸盐质—火山碎屑质细粒岩 含陆源碎屑碳酸盐质—火山碎屑质细粒岩 火山碎屑质—陆源碎屑质细粒岩 含碳酸盐火山碎屑质—陆源碎屑质细粒岩	
混合细粒 岩类	< 10	> 10	XX-XX 混合细粒岩亚类	XX-XX 混合细粒岩亚类	
	25~50	25~50			
	< 10	> 10			
	25~50	25~50			

注: [1] 自生化学沉淀矿物以碳酸盐矿物为例进行命名参考; [2] 岩石名称可根据具体的岩石组分进行命名; [3] 相同含量级别的组分, 含量多的矿物放在后面。

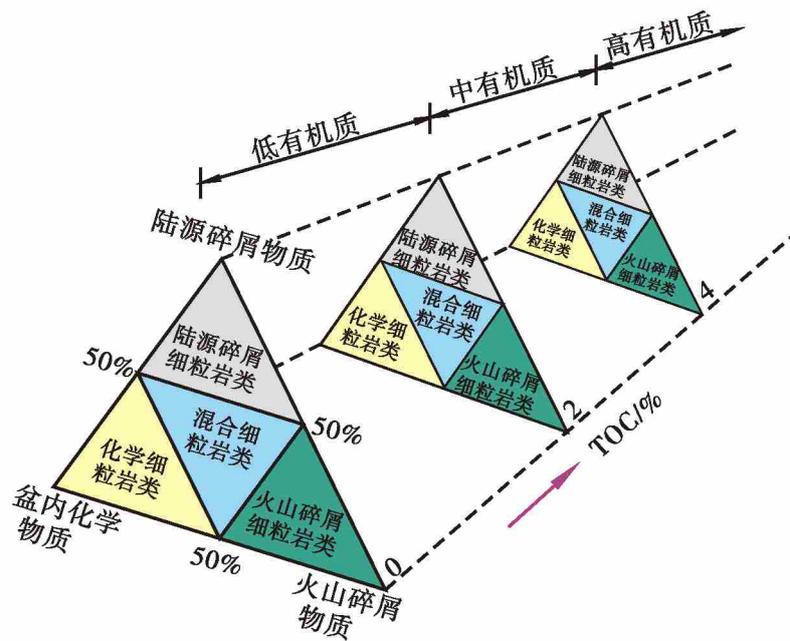


图6 细粒沉积岩四组分三端元分类方案

Fig. 6 Classification scheme for fine-grained sedimentary rocks

(<50%) 的细粒沉积岩, 采用合并命名原则:

如某细粒沉积岩中方解石含量 35%, 石英含量 22%, 长石含量 8%, 黏土含量 28%, 陆源碎屑含量 58%, 命名为灰质陆源碎屑细粒岩。

5) 对多成分来源且没有 $\geq 50\%$ 大类组分的细粒沉积岩, 采用复合命名原则: 以含量 25%~50% 的物质来源组分进行复合命名, 以“XX-XX 细粒混积岩”表示, 含量较多的写在后面, 其他物质来源组分参照三级命名原则。

如某细粒沉积岩中方解石含量 28%, 白云石含量 12%, 石英含量 20%, 长石含量 5%, 黏土含量 17%, 火山碎屑物质含量 15%, 命名为含火山碎屑的碳酸盐-陆源碎屑质细粒岩。

5 结论

细粒沉积岩物质来源包括陆源碎屑来源、盆内化学来源、生物来源、火山来源。不同盆地细粒沉积岩的物质来源存在巨大差异, 造成了组分构成的差异, 同时同一盆地同种矿物也通常具有成因多样性。基于组分来源及沉积作用, 提出了四组分三端元分类方案, 并按照三级命名原则、合并命名原则和复合命名原则, 进行细化的细粒沉积岩岩石命名, 为细粒沉积岩深入研究提供了统一分类命名方案。

致谢 本文提出的细粒沉积岩分类方案受冯增

昭先生碳酸盐岩分类思想启发, 谨以此文缅怀冯增昭先生! 同时也参考了国内外专家学者的文献, 在此一并表示感谢!

参考文献 (References)

- 陈世悦, 张顺, 王永诗, 谭明友. 2016. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征. 石油勘探与开发, 43(2): 198-208. [Chen S Y, Zhang S, Wang Y S, Tan M Y. 2016. Lithofacies types and reservoirs of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying sag, Bohai Bay Basin. Petroleum Exploration and Development, 43(2): 198-208.]
- 邓涛. 2020. 龙门山前陆盆地西南缘须家河组黑色页岩特征及有机质富集机理. 成都理工大学硕士论文: 1-95. [Deng T. 2020. Black shales characteristics and organic matter enrichment mechanism of Xujiahe Formation in the southwestern LongmenShan Foreland Basin. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology: 1-95.]
- 董春梅, 马存飞, 林承焰, 孙雪, 袁梦影. 2015. 一种泥页岩层系岩相划分方法. 中国石油大学学报(自然科学版), 39(3): 1-7. [Dong C M, Ma C F, Lin C Y, Sun X, Yuan M Y. 2015. A method of classification of shale set. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 39(3): 1-7.]
- 胡文瑄, 姚素平, 陆现彩, 吴海光, 孙福宁, 靳军. 2019. 典型陆相页岩油层系成岩过程中有机质演化对储集性的影响. 石油与天然气地质, 40(5): 947-956. [Hu W X, Yao S P, Lu X C, Wu H G, Sun F N, Jin J. 2019. Effects of organic matter evolution on oil reservoir property during diagenesis of typical continental shale sequences. Oil & Gas Geology, 40(5): 947-956.]
- 贾承造, 郑民, 张永峰. 2014. 非常规油气地质学重要理论问题. 石油

- 学报, 35(1): 1-10. [Jia C Z, Zheng M, Zhang Y F. 2014. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology. *Acta Petrolei Sinica*, 35(1): 1-10]
- 姜在兴, 陈代钊. 2021. 沉积学(第三版). 北京: 中国石化出版社. [Jiang Z X, Chen D Z. 2021. *Sedimentology* (third edition). Beijing: Sinopec Press]
- 姜在兴, 梁超, 吴靖, 张建国, 张文昭, 王永诗, 刘惠民, 陈祥. 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题. *石油学报*, 34(6): 1031-1039. [Jiang Z X, Liang C, Wu J, Zhang J G, Zhang W Z, Wang Y S, Lu H M, Chen X. 2013. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks. *Acta Petrolei Sinica*, 34(6): 1031-1039]
- 姜在兴, 张建国, 孔祥鑫, 谢环羽, 程浩, 王力. 2023. 中国陆相页岩油气沉积层研究进展及发展方向. *石油学报*, 44(1): 45-71. [Jiang Z X, Zhang J G, Kong X X, Xie H Y, Cheng H, Wang L. 2023. Research progress and development direction of continental shale oil and gas deposition and reservoirs in China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 45-71]
- 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 沈云琦. 2021. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题. *石油勘探与开发*, 48(6): 1276-1287. [Jin Z J, Zhu R K, Liang X P, Shen Y Q. 2021. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1276-1287]
- 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 李志明, 蒋启贵, 吴世强, 李政, 徐祖新. 2022. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义. *石油与天然气地质*, 43(1): 1-25. [Li M W, Ma X X, Jin Z J, Li Z M, Jiang Q G, Wu S Q, Li Z, Xu Z X. 2022. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China. *Oil & Gas Geology*, 43(1): 1-25]
- 梁超, 吴靖, 姜在兴, 操应长, 刘淑君, 逢淑伊. 2017. 有机质在页岩沉积成岩过程及储层形成中的作用. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 41(6): 1-9. [Liang C, Wu J, Jiang Z X, Cao Y C, Liu S J, Pang S Y. 2017. Significances of organic matters on shale deposition, diagenesis process and reservoir formation. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 41(6): 1-9]
- 李圻, 刘可禹, 蒲秀刚, 陈世悦, 韩文中, 张伟, 汪虎, 梁超, 赵建华. 2020. 沧东凹陷孔二段混合细粒沉积岩相特征及形成环境. *地球科学*, 45(10): 3779-3796. [Li Y, Liu K Y, Pu X G, Chen S Y, Han W Z, Zhang W, Wang H, Liang C, Zhao J H. 2020. Lithofacies characteristics and formation environments of mixed fine grained sedimentary rocks in second member of Kongdian Formation in Cangdong Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 45(10): 3779-3796]
- 刘传联, 洪太元, 毕海红, 赵泉鸿. 1998. 东营凹陷沙河街组介形虫化石保存特征研究及应用. *微体古生物学报*, (2): 80-89. [Liu C L, Hong T Y, Bi H H, Zhao Q H. 1998. Preservation characteristics of ostracods from the Shahejie Formation in the Dongying Depression. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, (2): 80-89]
- 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 吕延防, 孙先达, 巩磊, 白云凤. 2018. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件: 以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例. *石油勘探与开发*, 45(5): 828-838. [Liu B, Shi J X, Fu X F, Lu Y F, Sun X D, Gong L, Bai Y F. 2018. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: a case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5): 828-838]
- 柳益群, 周鼎武, 焦鑫, 南云, 杨晚, 李红, 周小虎. 2013. 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. *沉积学报*, 31(5): 773-781. [Liu Y Q, Zhou D W, Jiao X, Nan Y, Yang W, Li H, Zhou X H. 2013. A new type of sedimentary rocks: mantle-originated hydroclastites and hydrothermal exhalites, Santanghu Area, Xinjiang, NW China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(5): 773-781]
- 彭军, 曾垚, 杨一茗, 于乐丹, 许天宇. 2022. 细粒沉积岩岩石分类及命名方案探讨. *石油勘探与开发*, 49(1): 106-115. [Peng J, Zeng Y, Yang Y M, Yu L D, Xu T Y. 2022. Discussion on classification and naming scheme of fine-grained sedimentary rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 49(1): 106-115]
- 袁选俊, 林森虎, 刘群, 姚泾利, 王岚, 郭浩, 邓秀芹, 成大伟. 2015. 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长7油层组为例. *石油勘探与开发*, 42(1): 34-43. [Yuan X J, Lin S H, Liu Q, Yao J L, Wang L, Guo H, Deng X Q, Cheng D W. 2015. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: a case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(1): 34-43]
- 张少敏, 操应长, 朱如凯, 葱克来, 王健, 朱宁, 户瑞宁. 2018. 湖相细粒混合沉积岩岩石类型划分: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例. *地学前缘*, 25(4): 198-209. [Zhang S M, Cao Y C, Zhu R K, Xi K L, Wang Ji, Zhu N, Hu R N. 2018. Lithofacies classification of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag, Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 198-209]
- 张文昭. 2014. 泌阳凹陷古近系核桃园组三段页岩油储层特征及评价要素. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1-102. [Zhang W Z. 2014. Characteristics and evaluation factors of shale oil reservoir of the third member of Hetaoyuan Formation, Paleogene in Biyang Depression. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 1-102]
- 赵贤正, 蒲秀刚, 鄢继华, 金凤鸣, 时战楠, 柴公权, 韩文中, 刘岩, 姜文亚, 陈长伟, 张伟, 方正, 解德录. 2023. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒沉积旋回及其对有机质分布的影响. *石油勘探与开发*, 50(3): 468-480. [Zhao X Z, Pu X G, Yan J H, Jin F M, Shi Z N, Chai G Q, Han W Z, Liu Y, Jiang W Y, Chen C W, Zhang W, Fang Z, Xie D L. 2023. Cycles of fine-grained sedimentation and their influences on organic matter distribution in the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(3): 468-480]
- 周立宏, 蒲秀刚, 陈长伟, 杨飞, 夏君, 官全胜, 黄传炎. 2018. 陆相湖盆细粒岩油气的概念、特征及勘探意义: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例. *地球科学*, 43(10): 3625-3639. [Zhou L H, Pu X G, Chen C W, Yang F, Xia J, Guan Q S, Huang C Y. 2018. Concept, Characteristics and Prospecting Significance of Fine-Grained Sedimentary Oil Gas in Terrestrial Lake Basin: a Case from the Second Member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 43(10): 3625-3639]
- 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 张素荣, 蔡毅, 曹琰, 康缘. 2022. 细粒沉积学研究进展与发展方向. *石油与天然气地质*, 43(2): 251-264. [Zhu R K, Li M Y, Yang J R, Zhang S R, Cai Y, Cao Y, Kang Y.

2022. Advances and trends of fine-grained sedimentology. *Oil & Gas Geology*, 43(2): 251–264]
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学(第四版). 北京: 石油工业出版社. [Zhu Xiaomin. 2008. *Sedimentary Petrology*(Forth Edition). Beijing: Petroleum Industry Press]
- 朱筱敏,董艳蕾,刘成林,叶蕾,张美洲. 2021. 中国含油气盆地沉积研究主要科学问题与发展分析. *地学前缘*, 28(1): 1–11. [Zhu X M, Dong Y L, Liu C L, Ye L, Zhang M Z. 2021. Major challenges and development in Chinese sedimentological research on petroliferous basins. *Earth Science Frontiers*, 28(1): 1–11]
- Aplin A C, Macquaker J S H. 2011. Mudstone diversity: origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems. *AAPG Bulletin*, 95(12): 2031–2059.
- Arthur M A, Sageman B B. 1994. Marine black shales: depositional mechanisms and environments of ancient deposits. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 22(1): 499–551.
- Bouma A H, Stone C G. 2000. Fine-grained turbidite systems. *AAPG Memoir*, 72: 342.
- Camp W K, Egenhoff S, Schieber J, Slatt R M. 2016. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks: discussion. *Journal of Sedimentary Research*, 86: 1–5.
- Cao J, Xia L W, Wang T T, Zhi D M, Tang Y, Li W W. 2020. An alkaline lake in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA): a review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology. *Earth-Science Reviews*, 202: 103091.
- Du X B, Jia J X, Zhao K, Shi J C, Shu Y, Liu Z H, Duan D. 2021. Was the volcanism during the Ordovician–Silurian transition in South China actually global in extent? evidence from the distribution of volcanic ash beds in black shales. *Marine and Petroleum Geology*, 123: 1–10.
- Dupraz C, Reid R P, Braissant O, Decho A W, Norman R S, Visscher P T. 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, 96(3): 141–162.
- Garrels R M, Mackenzie F T. 1971. *Evolution of Sedimentary Rocks*. W. W. Norton and Company, New York: 397.
- Ingram R L. 1953. Fissility of Mudrocks. *Geological Society of America Bulletin*, 64(8): 869–878.
- Kong X X, Jiang Z X, Ju B S, Liang C, Cai Y, Wu S Q. 2022. Fine-grained carbonate formation and organic matter enrichment in an Eocene saline rift lake (Qianjiang Depression): constraints from depositional environment and material source. *Marine and Petroleum Geology*, 138: 105534.
- Konitzer S F, Davies S J, Stephenson M H, Leng M J. 2014. Depositional controls on mudstone lithofacies in a basinal setting: implications for the delivery of sedimentary organic matter. *Journal of Sedimentary Research*, 84: 198–214.
- Krumbein W C. 1932. The mechanic analysis of fine-grained sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 2(3): 140–149.
- Lazar O R, Bohacs K M, Macquaker J H S, Schieber J, Demko T M. 2015. Integrated approach for the nomenclature and description of the spectrum of fine-grained sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 85: 230–246.
- Liang C, Jiang Z X, Cao Y C, Wu J, Wang Y S, Hao F. 2018a. Sedimentary characteristics and origin of lacustrine organic-rich shales in the saline Eocene Dongying Depression. *GSA Bulletin*, 130: 154–174.
- Liang C, Cao Y C, Liu K Y, Jiang Z X, Wu J, Hao F. 2018b. Diagenetic variation at the lamina scale in lacustrine organic-rich shales: implications for hydrocarbon migration and accumulation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 229: 112–128.
- Liu W, Liu Y, Zeng Z X, Yang B Z, Peng L H, Xu D L, Wei Y X, Li Y Q, Ellam R M, Xu S. 2020. K-bentonites in Ordovician–Silurian transition from South China: implications for tectonic evolution in the northern margin of Gondwana. *Journal of the Geological Society*, 177(6): 1245–1260.
- Loucks R G, Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett Shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91: 579–601.
- Macquaker J H S, Adams A E. 2003. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: an inclusive nomenclature for mudstones. *Journal of Sedimentary Research*, 73(5): 735–744.
- Macquaker J H S, Bentley S J, Bohacs K M. 2010. Wave-enhanced sediment-gravity flows and mud dispersal across continental shelves: re-appraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions. *Geology*, 38(10): 947–950.
- McKee E D, Weir G W. 1953. Terminology for stratification and cross-stratification in sedimentary rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 64(4): 381–390.
- Milliken K. 2014. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 84: 1185–1199.
- Mulder T, Syvitski J. 1995. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *The Journal of Geology*, 103(3): 285–299.
- Picard M D. 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41(1): 179–195.
- Potter P E, Maynard J B, Pryor W A. 1980. *Sedimentology of Shale*. Springer.
- Potter P E, Maynard J B, Depetris P J. 2005. *Mud and Mudstones*. Springer, New York: 137–142.
- Schieber J, Kinsley D, Riciputi L. 2000. Diagenetic origin of quartz silt in mudstones and implications for silica cycling. *Nature*, 406: 981–985.
- Schieber J, Southard J B. 2009. Bedload Transport of Mud by Floccule Ripples—Direct Observation of Ripple Migration Processes and their Implications. *Geology*, 37: 483–486.
- Shanmugam G. 2003. Deep-marine tidal bottom currents and their re-worked sands in modern and ancient submarine canyons. *Marine and Petroleum Geology*, 20(5): 471–491.
- Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P D. 2001. Depositional process of black shales in deep water. *Marine and Petroleum Geology*, 18(4): 491–498.
- Tucker M E. 2001. *Sedimentary Petrology*. Wiley-Blackwell: 92–93.
- Wentworth C K A. 1922. A scale of grade and class terms of clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30: 377–392.
- Zou C N, Zhu R K, Chen Z Q, Ogg J G, Wu S T, Dong D Z, Qiu Z, Wang Y M, Wang L, Lin S H, Cui J W, Su L, Yang Z. 2019. Organic-matter-rich shales of China. *Earth Science Reviews*, 189: 51–78.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 龚承林)