

文章编号: 1671-1505(2024)05-1271-16 DOI: 10.7605/gdxb.2024.05.094

巨型事件层综述*

李攀¹ 肖冬生² 师效飞² 马强² 林潼¹ 杨润泽¹

1 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009

摘要 巨型事件层, 简称巨型层 (Megabed), 在英文文献中广泛使用, 但中文的正式出版物中尚未见报道。巨型层是指沉积物重力流所形成的巨型沉积层 (单层厚度可达数十米至数百米, 体积达数百立方千米), 它们比周围正常沉积层的规模大 1~2 个数量级以上, 在厚度、粒度、成分等方面与围岩常有明显差异, 通常发育具有多层结构特征的垂向序列, 记录了重力流流体转换、流体分异等搬运沉积过程, 对于重大地质事件解析、盆地分析、物源/古地理恢复、地质灾害预防以及油气勘探等均有重要意义。本文首先系统厘定巨型层及相关术语的概念内涵, 分析总结巨型层的沉积特征, 包括其沉积规模、物质成分与结构序列, 在此基础上探讨巨型层的识别标志、搬运沉积过程与触发机制, 最后对目前存在的问题与未来研究方向进行探讨, 旨在引起国内学者对巨型层的广泛关注和深入研究。

关键词 深水沉积 巨型层 巨型浊积岩 重力流 流体转换

第一作者简介 李攀, 男, 1985 年生, 博士毕业于英国阿伯丁大学, 现为中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事深水沉积学与层序地层学方面的研究工作。E-mail: lipancee@126.com。

中图分类号: P512.2 **文献标志码**: A

A review of megabeds

LI Pan¹ XIAO Dongsheng² SHI Xiaofei² MA Qiang² LIN Tong¹ YANG Runze¹

1 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tuha Oilfield, PetroChina, Xinjiang Hami 839009, China

Abstract Megabed is a widely used term in the English literature, but has not been reported in official Chinese publications. Megabeds refer to giant event beds formed by sediment gravity flows. They can reach tens of meters to hundreds of meters in thickness and hundreds of cubic kilometers in volume, that is, approximately 1-2 orders of magnitude larger than their surrounding normal deepwater intervals. Megabeds tend to be distinct from enclosing strata in terms of their thickness, grain size, composition, and commonly show multi-layer vertical structures that may record gravity flow transformation, differentiation and other deepwater transport and depositional processes. They are of great significance to geological events and basin analysis, provenance/paleogeography restoration, geohazard mitigation, and oil and gas exploration. In this paper, the conceptual connotation of megabed and related terms is firstly reviewed, and

* 国家自然科学基金 (编号: 41802132)、中国石油创新基金 (编号: 2020D-5008-03) 和中国石油重大科技专项 (编号: 2023ZZ0201) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41802132), the PetroChina Innovation Fund (No. 2020D-5008-03) and the Major National Science and Technology Project of China (No. 2023ZZ0201)]

收稿日期: 2024-02-20 改回日期: 2024-07-07

then the sedimentary characteristics of megabeds are analyzed and summarized, including their scale, composition, vertical structure and sequence. On this basis, the transport and depositional processes, as well as the initiation mechanisms of megabeds are discussed. Finally, existing problems and future research directions are discussed. The aim is to arouse extensive attention and in-depth research on megabeds across China.

Key words deepwater sedimentation, megabed, megaturbidite, gravity flow, flow transformation

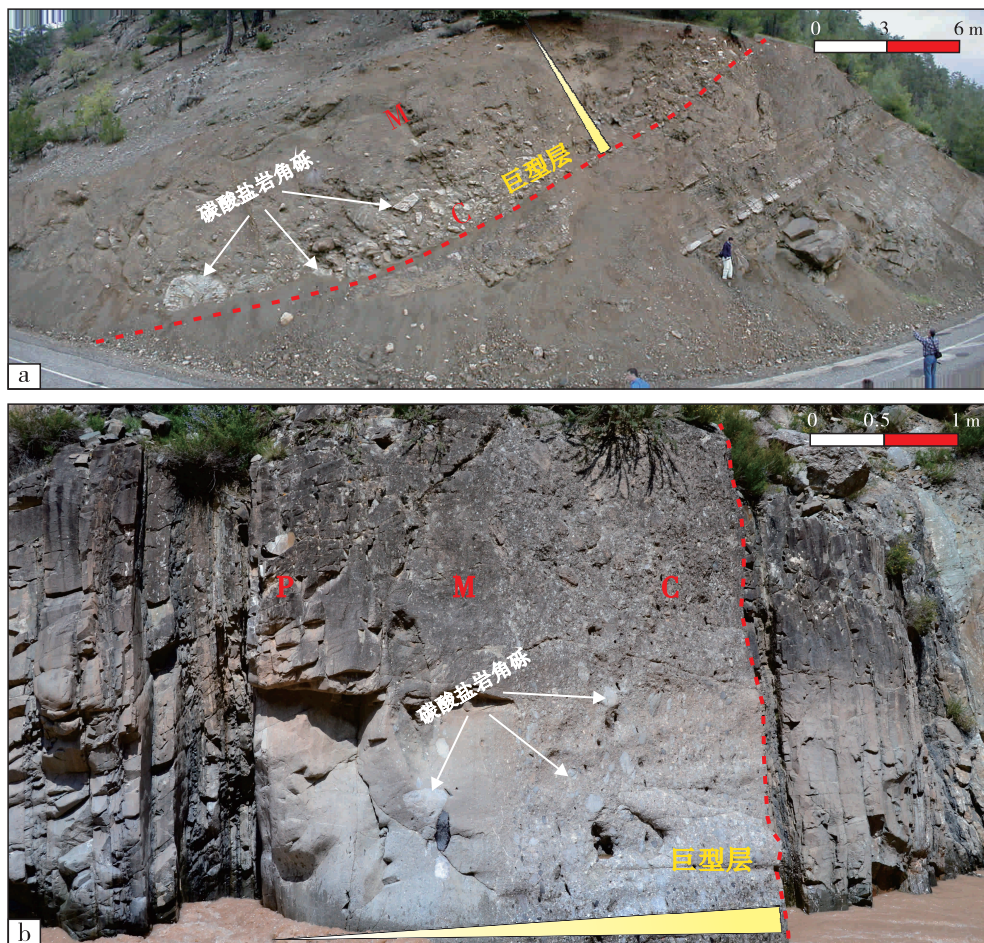
About the first author LI Pan, born in 1985, received his Ph.D. in 2017 from the University of Aberdeen, UK and is now working at the Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina in Beijing. His main research interest lies in sequence stratigraphy and deep-water sedimentology. E-mail: lipanccc@126.com.

1 概述

沉积物重力流所形成的超大规模沉积层通常被称为巨型事件层, 简称巨型层 (Megabed) (Rupke, 1976; Ricci Lucchi and Valmori, 1980; Mutti *et al.*, 1984; Kleverlann, 1987; Pauley, 1995; Marjanac, 1996; Reeder *et al.*, 2000; Kneller *et al.*, 2004; Fallgatter *et al.*, 2017; Bozetti *et al.*, 2018; Cattaneo *et al.*, 2020; Sawyer *et al.*, 2023)。它们是 1 次事件沉积的结果, 具有单层厚 (几米至几百米)、分布广 (几千米至几百千米)、体积大 (达数百立方千米) 等特征。巨型层在成分、粒度和厚度等方面与围岩常有明显差异, 例如深水细粒硅质碎屑岩序列中发育的异地碳酸盐岩巨型层 (Payros and Pujalte, 2008) 或火山碎屑岩巨型层 (Sawyer *et al.*, 2023), 相对围岩来说, 它们具有较多非硅质外来颗粒、较粗粒径 (可达巨砾或岩块)、异常厚度 (相对围岩厚 1~2 个数量级) 等特征, 因此在野外露头、地下钻井和地震剖面上极易识别追踪 (图 1)。巨型层可发育具有多层结构特征的垂向序列, 通常指示了多种沉积过程或流态之间的转换, 与混合事件层 (HEBs) 不同的是, 它们在很大程度上与流体稀释过程有关, 而非流体再浓缩的结果 (Fisher, 1983; Hampton 1972; Felix and Peakall, 2006), 因此代表了另一“端元类型”的混合重力流沉积 (Haughton *et al.*, 2009)。巨型层的这些特性使其在地球科学研究、地质灾害预防及矿产资源勘探中具有十分重要的地位: 它们不仅可以作为极好的等时标志层, 辅助野外或地下地层对比 (Mutti *et al.*, 1984; Bouma, 1987; Payros *et al.*, 1999), 在盆地分析中发挥重要作用; 而且其多层结构特征与不同流体之间的演化或转换有关

(Fallgatter *et al.*, 2017; Bozetti *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2024), 有助于提升对深水搬运、沉积过程及其产物的理解。另外, 巨型层通常由地震活动、火山爆发、海啸等灾变事件诱发 (Cita *et al.*, 1984; Kleverlann, 1987; Marjanac, 1996; Reeder *et al.*, 2000), 因此是揭示这些重要地质事件和地质灾害研究的有效手段。此外, 巨型层中的浊流沉积或碎屑流沉积可以形成区域上稳定分布的规模有效储集层 (Elmore *et al.*, 1979; Pauley, 1995; Reeder *et al.*, 2000; Bozetti *et al.*, 2018), 因此对于石油、天然气等战略资源勘探具有重要意义。

巨型层研究可追溯到 20 世纪七八十年代 (Rupke, 1976; Ricci Luchi and Valmori 1980; Bernoulli *et al.*, 1981; Johns *et al.*, 1981; Kastens and Cita, 1981; Mutti *et al.*, 1984; Bouma, 1987), 已有较长的历史。但从正式出版的文献资料来看, 研究主要集中在欧美地区 (图 2), 在中国的报道相对较少, 且主要从震积岩 (梁定益等, 1991, 1994; 杜远生和韩欣, 2000; 杨剑萍等, 2006; 冯增昭, 2013)、异地碳酸盐岩 (高振中和段太忠, 1985; 刘宝珺等, 1990; 牛新生和王成善, 2010) 等方面间接地进行了一定探索, 缺乏针对性的系统研究。实际上, 巨型层研究目前仍存在较多问题亟待梳理总结, 如巨型层相关的术语繁杂 (包括巨型浊积岩、震浊积岩、巨型角砾岩、均质岩等) (Rupke, 1976; Stanley, 1981; Mutti *et al.*, 1984; Payros *et al.*, 1999; Fanetti *et al.*, 2008), 彼此之间容易混淆, 亟需重新厘定; 其次, 巨型层的国外研究实例虽多, 但目前对其沉积特征和发育分布模式缺乏系统总结, 因此其典型识别标志和成因机制并不明确; 此外, 巨型层作为一类重要的事件沉



a—土耳其 Maras 盆地中新统（图片由英国阿伯丁大学 Bryan Cronin 教授提供）；b—中国西秦岭三叠系：巨型层厚 3.5~9 m、含大量碳酸盐岩角砾（直径达 2 m）、向上变细并具有多层结构特征（下部颗粒支撑 C，上部杂基支撑 M，顶部可发育平行层理 P），与下伏薄层（普遍小于 15 cm）陆源硅质细粒沉积在厚度、粒度、成分和垂向结构等方面形成鲜明对比（野外露头位置见图 2 中实例 11 和 28）

图 1 巨型层野外露头实例

Fig. 1 Field examples of megabeds

积，其关键的研究问题与未来突破方向还有待进一步凝练。基于上述研究现状，笔者在分析整理全球 30 个研究实例的基础上，首先对巨型层及相关术语的概念内涵进行评述，然后总结巨型层典型沉积特征及识别标志，进而探讨其搬运、沉积过程与诱发机制，最后提出未来的重要研究方向。文章旨在对这一类事件沉积的研究意义、基本特征、研究现状与未来方向等进行分析评论，以期引起国内学者的广泛关注、并为后续的深入研究提供理论基础、知识框架与数据索引。

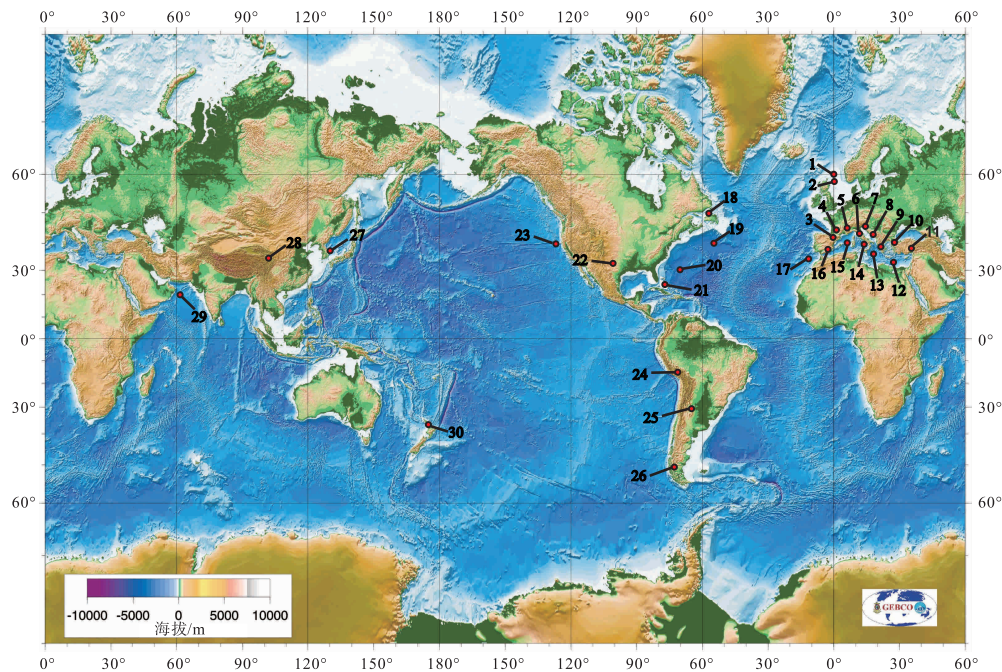
2 相关术语

清晰、准确、实用的术语在文献爆炸式增长的

数字化时代，显得尤为重要。与其他许多地质术语一样，随着时间的推移和研究人数的增加，一方面我们对巨型层本身的理解与使用容易产生偏差，另一方面与不断涌现的其他术语也易混淆。因此，有必要对这些术语的概念内涵进行厘定。下文就巨型层（Megabed），及相关的巨型浊积岩（Megaturbidite）、震浊积岩（Seismoturbidite）、巨型角砾岩（Megabreccia）和均质岩（Homogenite/Unifite）等术语进行分析、比较，在阐明各自概念内涵的基础上，重点突出巨型层与其他术语的关联性 & 差异性（表 1）。

2.1 巨型层（Megabed）

这一术语由美国学者 Rupke 在 1976 年提出，



1—北海上侏罗统 Brae Formation (Bozetti *et al.*, 2018); 2—北海古新统 Andrew Megabed (Fildes, 2013); 3—西班牙 Pyrenees 盆地 始新统 Roncal Megabed (Rupke, 1976; Johns *et al.*, 1981; Labaume *et al.*, 1987; Payros *et al.*, 1999); 4—法国 Pyrenees 盆地 Grand Bar Calcaire Megaturbidite (Bourrouilh, 1987); 5—意大利 Lombardian 盆地上白垩统 Missaglia Megabed (Bernoulli *et al.*, 1981); 6—意大利 Apennines 北部中新统 Contessa Megabed (Ricci Lucchi and Valmori, 1980; Mutti *et al.*, 1984; Amy and Talling, 2006); 7—意大利/斯洛文尼亚 Friuli 盆地古近系 (Tunis and Venturini, 1992; Ogata *et al.*, 2014); 8—克罗地亚 Dalmatian 盆地始新统—中新统 (Marjanac, 1996); 9—希腊 Pindos 盆地渐新统—中新统 (Leigh and Hartley, 1992); 10—土耳其西北 Marmara 海第四系 (Beck *et al.*, 2007); 11—土耳其 Maras 盆地中新统 (Bozetti *et al.*, 2018); 12—地中海第四系 Herototus Megaturbidite (Cita *et al.*, 1984; Reeder *et al.*, 2000; Rothwell *et al.*, 2000); 13—地中海全新统 Augias Megaturbidite (Hieke and Werner, 2000; San Pedro *et al.*, 2017); 14—地中海全新统 Tyrrhenian Sea Megabed (Sawyer *et al.*, 2023); 15—地中海更新统 Balearic Megaturbidite (Rothwell *et al.*, 1998); 16—西班牙 Tabernas 盆地中新统 Gordo Megabed (Kleverlaan, 1987; Haughton, 2000; Sánchez Gómez *et al.*, 2023); 17—东大西洋全新统 Horseshoe Abyssal Plain Turbidite (Lebreiro *et al.*, 1997); 18—加拿大纽芬兰寒武—奥陶系 Cow Head Group (Hiscott and James, 1985); 19—加拿大纽芬兰全新统 Grand Banks Turbidite (Heezen and Ewing, 1952; Piper and Aksu, 1987); 20—西大西洋更新统 Hatteras Black Shell Turbidite (Elmore *et al.*, 1979); 21—巴哈马更新统 Exuma Sound (Crevello and Schlager, 1980); 22—美国 Permian 盆地二叠系 Bone Spring Formation (Saller *et al.*, 1989; Kvale *et al.*, 2020); 23—美国 Escanaba Trough 更新统 (Zuffa *et al.*, 2000); 24—秘鲁南部白垩系 Ayabacas Formation (Callot *et al.*, 2008); 25—阿根廷石炭系 Cerro Bola Megabed (Fallgatter *et al.*, 2017); 26—智利白垩系 Cerro Toro Megabed (Sohn *et al.*, 2002; Bozetti *et al.*, 2018); 27—朝鲜东海 Onnuri 盆地更新统 (Cukur *et al.*, 2021); 28—中国青海省三叠系隆务河组 (Li *et al.*, 2024); 29—印度扇更新统 (Bourget *et al.*, 2013); 30—新西兰 Waitemata 盆地中新统 Waiwera Megabed (Fildes, 2013)

图 2 典型巨型层研究实例的全球分布情况

Fig. 2 Location map of representative case studies of megabeds

最初是用来描述浊流形成的大规模深水砂屑灰岩—泥灰岩复合沉积。之后，该词被欧美学者广泛采用，但就其确切涵义并未达成共识：一些学者认为，那些异常厚和盆地范围广泛分布的沉积层都可称之为巨型层 (Mutti, 1984; Kleverlaan, 1987)；一些学者则从原始概念的角度强调，巨型层是含有浊流成分的混合重力流所形成的大型事件层 (Fildes, 2013)；还有一些学者将同生的滑塌—重力流大型复合沉积层统称为巨型层 (如 Reeder

et al., 2000)。尽管存在这些分歧，目前已发表的几十例巨型层研究，无一例外均与沉积物重力流相关，且绝大多数来自深水沉积盆地(图 2)。考虑到巨型层这一术语的起源和目前应用情况，该词的使用范围和条件不应过度扩大或局限，笔者建议综合较多学者的使用方法，将其定义为“大规模(通常大于 1 km^3)重力流所形成的、相对围岩异常厚(大于 1 个数量级)的事件沉积层”(Rupke, 1976; Mutti *et al.*, 1984; Marjanac, 1996; Fildes, 2013;

Fallgatter *et al.*, 2017; Bozetti *et al.*, 2018; Cattaneo *et al.*, 2020; Sawyer *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024)。巨型层相对“正常”的背景性沉积来说,在厚度、成分、结构等方面通常具有“异常”特征 (Fallgatter *et al.*, 2017)。值得注意的是,该词的核心要义是重力流事件层的规模巨大,与此相关的、可能存在也可能缺失的其他属性,则是次要的,不应作为其定义的必要部分,但可以作为附加的修饰部分来强调某方面的特性。例如,在强调其成分的特殊性时,可以表述为碳酸盐岩巨型层、火山碎屑岩巨型层等;强调形成环境和粒度时,可以表述为深水砾质巨型层、深水砂质巨型层等。据笔者调研, Megabed 一词在中文文献中还未见正式的翻译使用,在中文网络上可查到的 1 次使用来自于笔者 2023 年撰写的“深水沉积专辑”约稿函 (<https://mp.weixin.qq.com/s/zxizkga9tdyFXATW-8bdOg>),但当时的翻译——“深水巨厚层”并不十分清晰、准确:一方面,巨厚的沉积层可能平面上分布局限,体积规模不一定大,所以不一定符合 Megabed 的定义;另一方面,(深水)巨厚层还容易被误认为是巨厚的地层序列,即多期沉积形成的巨厚地层,这与 Megabed 单次事件沉积的涵义相违背。综合考虑上述多种因素,笔者建议将 Megabed 一词译为巨型(重力流)事件层,简称为巨型层,来反映重力流沉积规模巨大这一根本属性。

2.2 巨型浊积岩 (Megaturbidite)

巨型浊积岩 (Megaturbidite, 或译为巨浊积岩;梁定益等, 1991)最初是用来描述厚度大、盆地范围内广泛分布、再沉积的深水异地碳酸盐岩 (Mutti *et al.*, 1984)。之后,很多学者用该词来泛指异常厚、分布广且成分异于围岩的巨型重力流沉积。Bouma (1987) 强调,在上述 3 个限制条件的基础上,巨型浊积岩还应满足“缺乏海底扇几何形态”这一条件。由此看出,巨型浊积岩的定义较巨型层更为苛刻,两者并不等同,而是具有从属关系。值得一提的是,正如 Bouma (1987) 所言,文献中所提到的巨型浊积岩很多时候并不是浊流而是碎屑流(或混合重力流)沉积,这与一些学者对浊积岩 (Turbidite) 一词的泛用有关,该术语的这一特点在后续的研究中饱受诟病 (Shanmugam, 2000)。近年来有学者将巨型浊积岩的使用局限于浊流形成的巨型层 (Cattaneo *et al.*, 2020; Cukur *et al.*,

2021)。同时,越来越多的学者在使用这一术语时不再强调其平面形态或成分方面的特殊性。

2.3 震浊积岩 (Seismoturbidite)

震浊积岩 (Seismoturbidite) 是一个成因解释性术语,用来指正常的深水浊积岩序列中那些反复出现的、由地震活动所形成的巨型浊积岩 (Mutti *et al.*, 1984)。该术语强调了巨型重力流事件层的一种重要诱发机制——地震活动,以及相关的构造活动性盆地背景 (Bouma, 1987)。由于这种成因解释本身的不确定性或不唯一性,这个术语的严苛使用条件往往较难满足,因此在文献中出现的频率远不及“巨型浊积岩”或“巨型层”。对比这 3 个术语不难看出,震浊积岩可以理解为一种(成因)类型的巨型浊积岩,而巨型浊积岩又可看作是一类特殊的巨型层。值得注意的是,国内一些学者将所有地震成因的浊积岩都统称为震浊积岩,实际上与该词的原始定义存在一定出入。

2.4 巨型角砾岩 (Megabreccia)

巨型角砾岩 (Megabreccia) 从角砾岩 (Breccia) 一词衍生而来,具有广义和狭义之分。广义的巨型角砾岩是指粒径 1 m 以上角砾状岩块 (Blocks) 为重要组成部分、并可能含有数米乃至更大粒径岩块的沉积层 (Cook *et al.*, 1972); 这些沉积层的部分层段可能含极少或不含角砾状颗粒/岩块 (Spence and Tucker, 1997; Payros *et al.*, 1999)。狭义的巨型角砾岩仅限于富含巨型角砾状岩块的沉积层段 (Johns *et al.*, 1981)。水下的巨型角砾岩通常规模巨大并富含浅水碳酸盐岩岩块,它们是浅海碳酸盐岩台地崩塌、在重力作用下再搬运至深水环境沉积的结果。广义的大规模水下巨型角砾岩代表了一种类型的巨型层,而狭义的水下巨型角砾岩则可能对应巨型层的某一层段(通常为底部部分,因此也被成为底部巨型角砾层) (Johns *et al.*, 1981; Seguret *et al.*, 1984; Labaume *et al.*, 1987)。

2.5 均质岩 (Homogenite/Unifite)

均质岩 (Homogenite/Unifite) 是指事件沉积所形成的均质、厚层(达数米至数十米)深水泥岩,这些泥岩层理不发育,但通常具有向上变细的粒度特征 (Kastens and Cita, 1981; Stanley, 1981)。

前人研究认为,均质岩是海啸、驻波(也称假潮 Seiche)、水下地震等引起的水体振荡条件下,沉积物重力流长时间悬浮沉降的结果(Kastens and Cita, 1981; Beck, 2009; Mulder *et al.*, 2009; San Pedro *et al.*, 2017)。它们通常与具有鲍马序列特征的典型浊积岩(Turbidite)一起出现,组成所谓的 HmTu 对偶层(包括上部的均质岩段 Homogenite 和下部的浊积岩段 Turbidite; Campos *et al.*, 2013)。一些情况下,均质岩也可以不发育底部的砂质浊积岩而单独出现。严格来讲,均质岩概念强调的只是深水泥岩的事件成因、垂向均质结构与异常厚度,在缺少相关的平面展布信息时,不能与巨型层相等同,但从已报道的众多实例来看,均质岩普遍分布范围广、规模大,因此通常代表了一类细粒的巨型层(均质岩独立出现)或巨型层的一部分(以 HmTu 对偶层出现)。

综上所述,巨型层与巨型浊积岩、震浊积岩、巨型角砾岩和均质岩等既有联系、也有区别(表1)。总体上,这几个相关的术语强调了巨型层不同方面的特性,包括沉积过程(巨型浊积岩)、触发机制(震浊积岩)、粒度结构(巨型角砾岩、均质岩)等,因此均可纳入到巨型层这一更具概括性和普适性的概念框架之下。

3 巨型层的沉积特征与识别标志

通过分析已报道的研究实例,并结合笔者前期研究成果发现,巨型层在沉积规模、物质成分、结构序列等方面常具有一定特殊性,它们是识别巨型层的重要依据,也是深刻理解其成因机制的关键。下文依次从上述几方面来分析总结巨型层的沉积特

征与识别标志。

3.1 沉积规模

对已发表的 30 个巨型层研究实例进行统计发现(表 2),它们的单层厚度通常在数米至数十米之间,一些情况下可超过 100 m,例如西班牙西南 Pyrenees 始新统 Hecho Group 中发育约 200 m 厚的巨型层(Labaume *et al.*, 1987),因此它们比周围正常的深水沉积层(多数为厘米至分米级)厚至少 1~2 个数量级。平面上,巨型层可大范围追踪对比,甚至在整个盆地都有分布,其长/宽数千米至数百千米,面积可达数百至数万平方千米。受地质体本身保存/出露程度、资料类型和数据分辨率等因素限制,巨型层的长、宽、厚等规模参数很难同时获取,因此其绝对体积往往存在一定不确定性。Mutti 等(1984)在研究意大利亚平宁巨型浊积岩/震浊积岩时提出,这类巨型层的体积门限值约为 1 km³,之后的现代沉积和古代露头研究发现(Cita and Aloisi, 2000; Amy and Talling, 2006; Mulder *et al.*, 2009; Wetzel and Unverricht, 2013; Fallgatter *et al.*, 2017; Cattaneo *et al.*, 2020; Sawyer *et al.*, 2023),海相盆地中巨型层的体积一般为数立方千米至数十立方千米,最大可超过 600 km³,例如地中海深海平原中发育的更新统 Balearic 巨型层达 640 km³。相对海相盆地而言,来自陆相湖盆中的巨型层实例极少,目前还难以形成具有统计意义的规模数值。但从已发表的少数研究实例来看,湖盆中已发现的巨型事件层规模要比海盆中小 1~2 个数量级(Beck *et al.*, 2007; 见表 2 中实例 10),这可能与有限的湖盆面积和较小的事件规模有关。

表 1 巨型层及相关术语的概念厘定

Table 1 Concept of megabed and related terms

| 术语名称 | 本文注解 | 参考文献 |
|----------------------------|--|---|
| 巨型层 Megabed | 沉积物重力流所形成的超大规模沉积层(强调巨型重力流沉积) | Rupke, 1976; Fildes, 2013; Fallgatter <i>et al.</i> , 2017; Sawyer <i>et al.</i> , 2023 |
| 巨型浊积岩 Megaturbidite | 浊流成因的超大规模事件层,属于一类特殊巨型层(强调巨型浊流沉积) | Bouma, 1987; Cattaneo <i>et al.</i> , 2020; Cukur <i>et al.</i> , 2021 |
| 震浊积岩 Seismoturbidite | 地震活动形成的巨型浊积岩,属于一类特殊巨型层(强调地震诱发因素) | Mutti <i>et al.</i> , 1984; Bouma, 1987 |
| 巨型角砾岩 Megabreccia | 由角砾状岩块为重要组成部分的沉积层/段,大规模巨型角砾岩构成一类粗粒的巨型层(强调粗粒角砾结构) | Cook <i>et al.</i> , 1972; Johns <i>et al.</i> , 1981; Spence and Tucker, 1997 |
| 均质岩 Homogenite/ Unifite | 事件沉积所形成的均质、厚层深水泥岩,大规模均质岩构成一类细粒的巨型层(强调细粒均质结构) | Kastens and Cita, 1981; Stanley, 1981; Campos <i>et al.</i> , 2013 |

表2 巨型层规模数据统计
Table 2 Statistics of megabed dimensions

| 序号 | 深水巨型层实例 | 厚度/m | 长度/km | 面积/km ² | 体积/km ³ |
|----|-------------------------------------|----------|---------|--------------------|--------------------|
| 1 | 北海 Brae Formation | 2~15 | 0.5~4.2 | — | — |
| 2 | 北海 Andrew Megabed | 25 | 100~400 | 2200 | 55 |
| 3 | 西班牙 Roncal Megabed | 50~200 | 12~75 | 900 | 60~140 |
| 4 | 法国 Grand Bar Calcaire Megaturbidite | 5~63 | 95 | 1000 | 50 |
| 5 | 意大利 Missaglia Megabed | 4~30 | 10~25 | 250 | 4~20 |
| 6 | 意大利 Contessa Megabed | 20 | 30~120 | 1500 | 30 |
| 7 | 意大利/斯洛文尼亚 Friuli 盆地 | 245 | 100 | 40.8~408 | 10~100 |
| 8 | 克罗地亚 Dalmatian 始新统一中新统 | 49 | 8~16 | 140 | 42 |
| 9 | 希腊 Pindos 盆地渐新统一中新统 | 60~72 | 0.7 | — | — |
| 10 | 土耳其 Marmara 第四系 | 5~8 | 10 | 75~175 | 0.6~1.4 |
| 11 | 土耳其 Maras 盆地中新统 | 9 | — | — | — |
| 12 | 地中海 Herototus Megaturbidite | 10~20 | 350 | 40000 | 400 |
| 13 | 地中海 Augias Megaturbidite | 24 | 300 | 2708 | 65 |
| 14 | 地中海 Tyrrhenian Sea Megabed | 10~25 | 10~75 | 200~1125 | 1.3~13.3 |
| 15 | 地中海 Balearic Megaturbidite | 8~10 | 120~500 | 60000 | 500 |
| 16 | 西班牙 Gordo Megabed | 40 | 11.5~17 | 190 | 6 |
| 17 | 东大西洋 Horseshoe Turbidite | 4.9 | 64~356 | 21157 | 33 |
| 18 | 加拿大 Cow Head Group | 100 | 15~37 | — | — |
| 19 | 加拿大 Grand Banks Turbidite | 3 | 300 | 70000 | 185 |
| 20 | 西大西洋 Black Shell Turbidite | 4 | 100~500 | 44000 | 100 |
| 21 | 巴哈马 Exuma Sound | 3 | 75 | 6400 | 20 |
| 22 | 美国 Bone Spring Formation | 30 | 18~55 | — | — |
| 23 | 美国 Escanaba Trough 更新统 | 60 | 150 | — | — |
| 24 | 秘鲁 Ayabacas Formation | 20~40 | 200 | — | — |
| 25 | 阿根廷 Cerro Bola Megabed | 188 | 8 | — | — |
| 26 | 智利 Cerro Toro Megabed | 10 | 3~7 | — | — |
| 27 | 朝鲜 Onnuri 盆地更新统 | 2.8~4.35 | 20~45 | 650 | 1.8 |
| 28 | 中国青海省三叠系隆务河组 | 10 | 0.6 | — | — |
| 29 | 印度扇更新统 | 11.3 | 15~90 | 260 | 2.79 |
| 30 | 新西兰 Waiwera Megabed | 15 | 30~40 | 100 | 1.5 |

注：该表中深水巨型层实例与图2中实例相对应，文献出处见图2；其中厚度为单层真厚度、长度为平面上可追踪对比的距离，面积和体积为估算的最小值，“—”代表无数据；实例10为湖相，其余均为海相。

3.2 物质成分

从与围岩成分差异性的角度来看，可以总结出3类不同的巨型层：同源型，混源型和异源型，它们分别代表了与围岩物源相同、部分相同、完全不同3种情况。在已报道的实例中，第1类占比较少，主要为第2类和第3类。同源型巨型事件层可进一步划分为硅质型和碳酸盐岩型2小类，分别为深水硅质碎屑岩中巨型碎屑岩事件层（如智利白垩系 Cerro Toro 组中的巨型层；Bozetti *et al.*,

2018）和深水异地碳酸盐岩中的巨型碳酸盐岩事件层（如现代巴哈马地区的巨型层；Crevello and Schlager, 1980），这些巨型层与它们的围岩来自同一物源区。与此形成鲜明对比的是异源型巨型事件层，主要为深水硅质碎屑岩中的碳酸盐岩巨型层，以及少量的火山碎屑巨型层（Sawyer *et al.*, 2023）。很显然，这些巨型层与围岩具有不同的物源区，并且由于它们特殊的物质组成，对于一些特定的物源区的恢复具有重要作用，如巨型层中的碳

酸盐岩角砾可能指示了同期浅水碳酸盐岩台地的存在,这与利用“指相化石”来恢复古环境异曲同工。介于上述2类巨型层之间的是混源型巨型层,它们既有构成围岩的碎屑成分,又有其他不同的成分,通常表现为碳酸盐岩与硅质碎屑岩颗粒/基质的混合。这种混合作用可以发生在物源区,例如构造作用造成不同成分的物源区隆升、剥蚀、进而形成混合物源,也可能在沉积物搬运过程中,如砂质重力流在搬运过程中对下伏碳酸盐岩基底强烈侵蚀,造成硅质碎屑和碳酸盐成分的混合 (Chiarella *et al.*, 2017)。

3.3 结构序列

从已报道的研究实例来看,巨型层可以呈现复杂出多样的垂向沉积序列,这些序列由1个或多个结构单元构成。由于巨型层的具体结构特征,包括颗粒成分、大小、支撑结构、粒序等各不相同,单纯从描述性的角度来进行分类总结并不合适。因此,本研究从成因,尤其是沉积过程的角度,对巨型层的基本结构单元进行分类,在此基础上对其垂向序列进行总结。

巨型层的结构单元大体上可以分为3类,简称为单元a、b、c(图3),分别反映了不同的沉积过程。单元a粒度最粗,为砾岩沉积,表现为颗粒支撑、分选磨圆差,通常发育较多的碳酸盐岩或其他成分的角砾、整体上呈较弱的正粒序(a_1)或逆粒序(a_2)或块状(a_3),一般解释为颗粒流(Grain Flow)/高浓缩密度流(Hyperconcentrated Flow)沉积。单元b为砂砾岩或泥砾岩沉积,表现为泥质或砂质杂基支撑、富含较多呈漂浮状态的砾级甚至巨砾级的颗粒/岩块、颗粒部分向上变细(b_1)或无粒序变化(b_2),为黏性碎屑流(Debris Flow)沉积。单元c粒度最细,表现为向上变细的砂岩或砂泥互层沉积,砂岩部分通常发育层理、具有较典型的Bouma序列(c_1)或Stow序列(c_2)特征。其中 c_1 这一类通常顶部泥岩部分较薄,而 c_2 这一类具有巨厚的泥顶,可能分别代表了非受限型和受限型2种不同背景下的浊流(Turbidity Current)沉积。

上述基本结构单元可以单独出现,也可以叠加组合,形成单层或多层结构的垂向序列。深水环境中常见的巨型层序列有Ma、Mab、Mabc₁、Mbc₁、

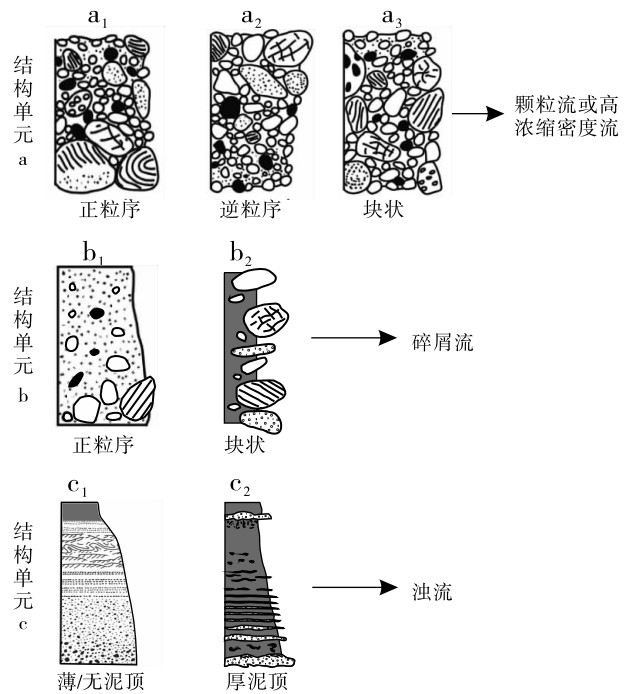


图3 巨型层的结构单元类型

(据 Cronin, 2018; Stow and Smillie, 2020; 有修改)

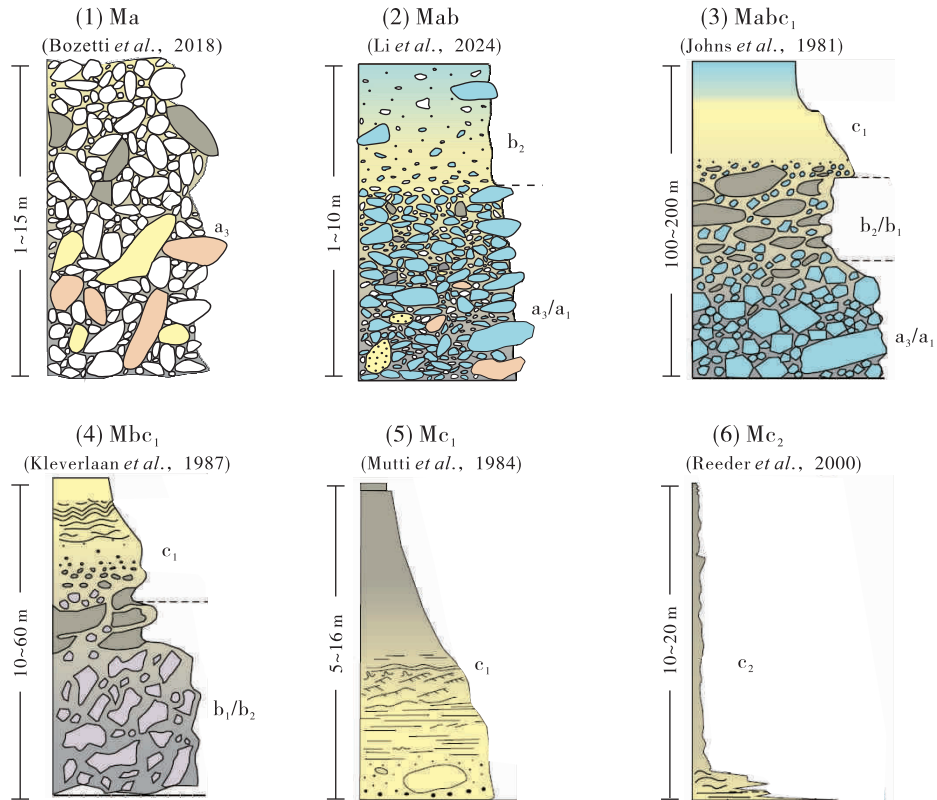
Fig. 3 Types of component internal units of megabeds

(modified from Cronin, 2018; Stow and Smillie, 2020)

Mc_1 、 Mc_2 等(其中,M代表Megabed,a、b、c则为具体的结构单元类型;Johns *et al.*, 1981; Kleverlann, 1987; Souquet *et al.*, 1987; Mutti *et al.*, 1984; Reeder *et al.*, 2000; Fildes, 2013; Fallgatter *et al.*, 2017;图4)。这些序列是1期重力流在1种或多种流态下沉积的结果,其发育分布具有较强的规律性:Ma, Mab₁, Mabc₁通常出现斜坡—坡角环境, Mbc₁和 Mc_2 则主要出现在更远端的坡角—盆内环境,而Mb₂则在斜坡到盆内均较常见。另外,巨型层可以与滑塌沉积组合,形成SM(Slump-Megabed)序列(Kleverlann, 1987),分布在其他同期序列上游的近端区。显然,从具体的沉积特征来看,这里虽然没有穷尽巨型层可能出现的所有结构序列,但在揭示巨型层搬运沉积过程方面,却具有十分的重要意义,就此笔者在下文中将进一步论述(详见巨型层搬运、沉积过程)。

3.4 识别标志

由上述分析可知,巨型层在沉积规模(厚度、平面分布范围、面积/体积)、物质成分、结构序列等方面具有一些典型特征,基于此,笔者提出如



图中 a、b、c 为结构单元类型，详见图 3 及正文（据 Fildes, 2013；有修改）

图 4 典型的深水巨型层沉积序列

Fig. 4 Typical facies sequences of deepwater megabeds

表 3 巨型层识别标志

Table 3 Identification criteria of deepwater megabeds

| 数据类型 | 主要识别标志 |
|--------|---|
| 沉积规模 | 规模比周围背景性沉积层大 1~2 个数量级；单层厚度大于 1 m，多在 5~10 m 之上，平面上延伸数千米至数十千米，体积大于 1 km ³ |
| 物质成分 | 大多含有与背景性沉积层不同的岩石成分，表现出异源或混源供给特征 |
| 沉积结构 | 粗粒巨型层内部通常含有巨大的岩块或角砾，而细粒巨型层则含有重力流成因的巨厚泥顶（数米至数十米） |
| 沉积序列 | 由颗粒流/高浓缩密度流、碎屑流和浊流等形成的单层或多层结构的垂向序列，包括 Ma、Mab、Mabc ₁ 、Mbc ₁ 、Mc ₁ 、Mc ₂ 等（图 4） |
| 沉积构造背景 | 常与典型的深水沉积共生，并且多发育在相对活动的构造背景中 |

下的巨型层识别标志（表 3）：在沉积规模方面，巨型层较周围的背景性沉积层要大 1~2 个数量级以上，具体而言，其单层厚度大于 1 m，多在 5~10 m 之上，平面上至少在数千米至数十千米范围内稳定分布，体积至少在 1 km³ 之上；在物质成分方面，大多数巨型层含有与背景性沉积层不同的岩石成分，表现出异源或混源供给的特征；在沉积结构方面，粗粒巨型层内部通常含有巨大的岩块（Block）或角砾（Breccia），而细粒巨型层则含有

重力流成因的巨厚泥顶（数米至数十米）；从垂向序列的角度来看，巨型层发育由颗粒流/高浓缩密度流、碎屑流和浊流等不同流体形成的结构单元，它们可以单独出现，也可以叠加组合，形成单层或多层结构的垂向序列，包括 Ma、Mab、Mabc₁、Mbc₁、Mc₁、Mc₂ 等（图 4）。除此之外，沉积构造背景对于巨型层的识别也有一定意义，从已报道的研究实例来看，巨型层通常发育在陆坡和深海平原环境，因此它们与典型的深水沉积共生，并且多发

育在相对活动的构造背景中（如板块汇聚边缘、断裂活动强烈的断陷盆地等）。值得一提的是，在上述识别标志中，巨型沉积规模的确定是核心和关键。然而，受研究数据类型和资料品质限制（如有限的野外地质露头），可获取的规模数据可能只有厚度和横向上可对比的距离，面积与体积则难以确定。在这种情况下，可以通过沉积层的部分规模数据，尤其是异常厚度，首先锁定潜在的巨型层，然后结合其他识别标志，如特殊的结构序列和物质成分，来最终判识巨型层。

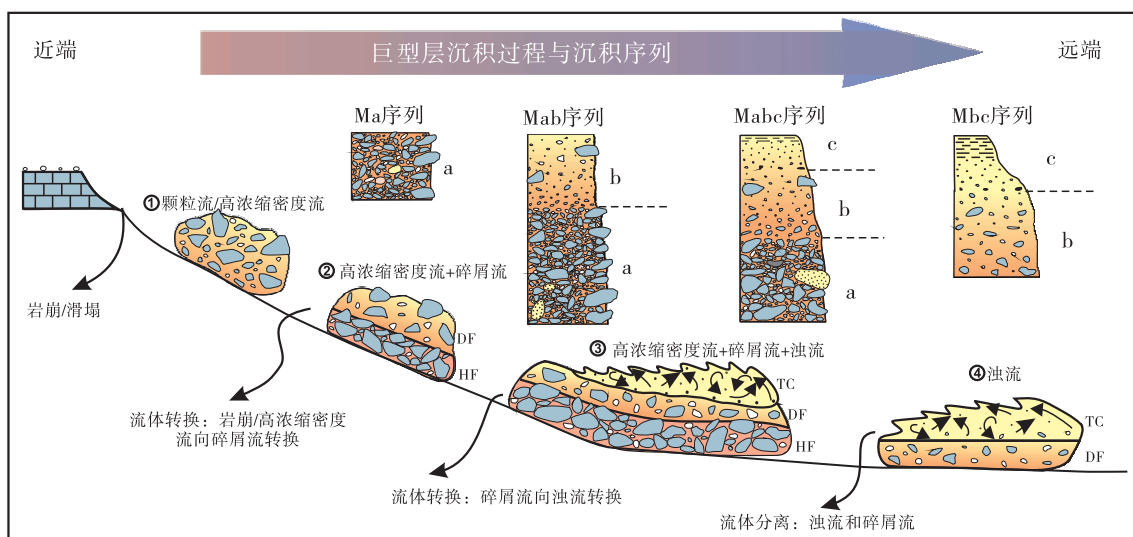
4 巨型层的成因机制

4.1 巨型层搬运、沉积过程

巨型层的沉积规模、物质成分和结构序列等特征表明，它们由超大规模的沉积物重力流所形成，这些流体厚数十米甚至上百米，它们沿着斜坡向盆内搬运，在陆坡、坡脚和深海平原或湖盆中心等深水环境中卸载沉积。异源型和混源型巨型层的广泛发育说明，巨型层通常具有不同于深水围岩的搬运路径，两者的搬运方向可以垂直甚至完全相反，如西班牙 Pyrenees 中的巨型层来自于盆地短轴方向，而其围岩则来源于盆地长轴方向（Johns *et al.*, 1981; Mutti *et al.*, 1984）；意大利/斯洛文尼亚 Friuli 盆地古近系中部分碳酸盐岩巨型层来自于盆地一侧，而其围岩则来自于盆地另一侧（Ogata

et al., 2014）。当然，一些情况下两者搬运路径也可以大体一致，形成同源型巨型层（如巴哈马 Exuma Sound; Crevello and Schlager, 1980）。

巨型层的结构序列及其空间分布特征揭示了该类重力流的时空演化规律。时间上，随着搬运距离的增加，伴随部分沉积物的卸载和周围水体的卷入，重力流流体浓度总体上呈现出不断稀释的趋势。随着浓度的稀释，这些重力驱动下的搬运过程可发生多种流态转换，包括碎屑流—高密度流转换、碎屑流—浊流转换等（Hampton, 1972; Mohrig and Marr, 2003; Strachan, 2008; Talling, 2013; Fallgatter *et al.*, 2017; 图 5）。这些流态的转换除了可以通过整体转换的方式出现外（即某一流态的流体全部转换为另一流态的流体；Fisher, 1983），更多的可能是以部分转换的形式来实现（即某一流态的流体部分转换为另一流态的流体，如在流体顶部或头部等局部位置发生的转换；Fisher, 1983），因此在某一位置可以出现多种流态共存的混合重力流，形成具有多层结构的垂向沉积序列（Talling, 2013）。空间上，垂向序列沿流体搬运方向有序变化，体现了流体分异—即不同流态流体逐渐分离的过程（图 5）。例如，形成 Mabc 序列的混合重力流随着搬运距离的增加，其底部的高浓度流段 a 可以与之上的碎屑流段 b 和浊流段 c 发生分离，在上游区形成 Ma 序列，而上部 bc 段的流体过路不沉积，继续往下游搬运；在下游区，碎



HF-高浓缩密度流，DF-碎屑流，TC-浊流；a、b、c代表不同成因的结构单元，详见图3及正文

图 5 巨型层从近端向远端搬运沉积过程与沉积序列

Fig. 5 Proximal to distal transport, depositional processes and facies sequences of megabeds

屑流和浊流可以同时沉积形成 Mbc 序列，或者部分浊流发生进一步分离，在远端形成 Mc 序列。这一分异过程表明，空间某一位置的巨型层序列不仅直接体现了该点的流体特征与沉积过程，可能也间接反映了流体到达该点之前或之后的状态与搬运过程。需要强调的是，流体分异程度可能受流体本身特性（如浓度、粒度、黏度）和盆地特征（开阔型/受限型）的影响而存在较大差别，因而在具体的巨型层搬运沉积过程分析中应充分考虑这些地质条件与控制因素。可以想象，有些富含粗大刚性岩块的流体，可能较难发生大规模的流体转换和流体分离，因此可能主要发育粗粒的 Ma 序列；另一方面，受物源区岩性或盆底形态的影响，一些盆地可能仅发育细粒的巨型层序列而完全缺失粗粒的 a 段。

4.2 巨型层触发机制

究竟是什么地质事件可以诱发厚达数十米、体积达数百立方千米的巨型层沉积？不少学者认为可能主要与地震活动有关（Mutti *et al.*, 1984; Amy and Talling, 2006; Cukur *et al.*, 2021）。地震可以引发盆缘大规模垮塌，这些滑塌体沿斜坡向下搬运过程中，随着周围水体的卷入，滑塌体可以逐渐转化为超大规模的重力流。也正是基于这一考虑，Mutti 等（1984）提出了（地）震浊积岩这一概念，强调巨型层的地震成因。尽管地震活动是构造活动型盆地中巨型层发育的一个常见诱因，但越来越多的研究表明，除了地震活动之外，还有其他多种可能的触发机制。例如，海平面变化可以造成天然气水合物的逸散，引起沉积物物理性质和力学性质的变化，从而诱发海底滑塌和滑坡，造成浅水区或斜坡区沉积物向深水区的再搬运，形成巨型层（Bugge *et al.*, 1987; Hieke and Werner, 2000; Van Daele *et al.*, 2017）。此外，火山活动诱发的海啸（Kastens and Cita, 1981; Cita *et al.*, 1996; Cita and Aloisi, 2000）、突发性冰川洪水（Zuffa *et al.*, 2000）、气候变化造成湖平面快速且大幅度的波动（Fanetti *et al.*, 2008）、构造掀斜或沉积物超负载造成的失稳（Spence and Tucker, 1997; Drzewiecki and Simó, 2002; Payros and Pujalte, 2008）、甚至是行星撞击地球诱发的滑塌等（Sánchez Gómez *et al.*, 2023）都可以形成超大规模的巨型层。总之，巨

型层可以有多种触发机制，尽管有一些诱因较其他诱因更为常见，但不能一概而论，需要具体问题具体分析。

5 面临挑战与研究展望

5.1 巨型层内涵的变化及发展趋势

前文对巨型层的基本概念及其与其他相关术语的异同作了详细论述，这里就巨型层研究中可能出现的术语问题或变化作进一步讨论。如文中所述，目前广泛接受的巨型层定义包含 2 个必要部分——由沉积物重力流形成、并且沉积规模巨大。在实际应用中，与这 2 个部分相关的复杂情况均可能出现。首先，巨型层可能存在同生的滑塌（Slump）、滑坡（Slide）沉积（如西班牙 Pyrenees 始新统 Hecho Group 中的 Roncal Unit; Rupke, 1976; Johns *et al.*, 1981），考虑到它们是同一事件所形成的流体在不同流态或不同阶段沉积的结果，一个兼有统领性和描述性的术语在未来研究中可能会出现。巨型层本身是一个概括性的术语，包括了高浓缩密度流、碎屑流和浊流等不同类型重力流所形成的巨型沉积层，未来是否会将该词进一步泛化，包含滑塌和滑坡等成因相关的流体及其沉积，现在还难下定论。此外，目前绝大多数学者将巨型层的使用局限于水下重力流沉积，但近年来也有个别学者将该词应用在陆上重力流沉积中（Chough and Sohn, 2010; Sanders and Gruber, 2023），这种“拓展”能否被广为接受，还有待实践的检验。其次，由于巨型层主体部分通常厚度大（数米至数百米），一些研究者容易将巨型层错误地等同于相对围岩异常厚的深水沉积层。一方面，异常厚的沉积层，平面分布不一定广，因此规模（体积）可能有限，不能构成巨型层；另一方面，虽然巨型层主体部分一般较厚，但其边缘远端部分可能变薄，从而与围岩厚度差异较小。因此，应综合考虑事件层的厚度和平面分布范围来确定其规模，并通过沉积特征来分析其成因，在此基础上才能真正判识巨型层。

5.2 成因机制方面的问题与发展趋势

在巨型层搬运、沉积过程方面，目前的研究主要集中在从近端到远端（proximal to distal）的纵向变化，较少涉及与搬运方向垂直，即从轴部到边缘（axial to marginal）的横向变化，以及垂向上的地

层序列 (base to top) 变化。然而, 这 2 个方向上巨型层的变化规律对于进一步揭示其成因机制具有重要意义, 可能是未来取得突破性进展的主要方向之一: 横向上, 如果流体速度、浓度和受限程度等存在较大差异, 其搬运沉积过程也可能有较明显的响应。例如, 在受限型盆地 (confined basin) 中, 重力流流体在盆地边缘部位可以发生流体反射, 形成具有特殊沉积特征的巨型层 (Tinterri *et al.*, 2022), 因此在揭示重力流—地貌相互作用和响应机制方面具有特殊意义。垂向上, 不同类型的巨型层是否发育于不同的地层序列或相似地层序列的不同位置? 这一问题到目前还没有进行过系统的研究。显然, 把巨型层沉积纳入到更宏大的地层框架中来分析, 相对于孤立的研究巨型层本身的特征来说, 更能揭示其背后的主控因素。

在巨型层的触发机制方面, 当前的研究主要还是通过区域背景分析来进行推断, 受数据资料等多方面限制, 往往存在较大不确定性。未来, 这方面的研究亟需融入一些新思路、新方法和新技术。例如, Reijmer 等 (2015) 提出, 根据巨型层成分所指示的源区环境特征 (单一环境来源/不同环境来源), 可以有效区分海平面变化和构造活动成因的碳酸盐岩巨型层。Wetzel 和 Unverriche (2013)、Polonia 等 (2016)、Cukur 等 (2021) 利用加速质谱仪 ^{14}C 定年技术来约束巨型层的形成时间, 在此基础上通过与已知的地质事件序列进行对比, 不仅可以明确巨型层的成因类型, 甚至对于事件规模也可能有较清晰的认识。针对古代的巨型层, 通过对其内部岩块或颗粒开展微体古生物分析, 一些情况下也可以对其形成时间有较好约束, 再结合其他数据分析结果, 对巨型层的触发机制可以有较为确切的认识 (Payros *et al.*, 1999; Rubert *et al.*, 2012; Accordi *et al.*, 2014)。

5.3 实践应用

巨型层可应用于盆地分析、物源/古地理恢复、重大地质事件揭示、地质灾害预防、油气勘探等众多研究中。在盆地分析方面, 巨型层由于厚度大、分布稳定、容易识别追踪等特征, 可以作为极好的对比标志层 (如意大利 Apennines 北部 Contessa bed; Amy and Talling, 2006), 并且巨型层对于盆地形态 (受限程度、地形起伏等) 和搬运距离等具有较好的响应 (Tripsanas *et al.*, 2004; Fanetti

et al., 2008), 因此在盆地分析中的应用将越来越广泛 (Bouma, 1987; Cukur *et al.*, 2021)。在物源/古地理恢复方面, 巨型层的重要作用正在逐步显现, 它们的特殊成分与沉积特征可能对特殊物源区具有“指相”意义, 例如, 某些深水碎屑岩或碳酸盐岩沉积序列中的巨型层可明确指示浅水碳酸盐岩台地、深水碳酸盐岩斜坡或火山等供源区的存在, 结合古流向、区域地质特征等, 可有效重建沉积期的古地理。通过巨型层来解析重大地质事件是近年来一个研究新热点, 有些巨型层与区域性不整合面或地层界面重合 (如法国西南部 Pyrenees 上白垩统 Turonian-Coniacian 界线上的 Grande Barre Calcaire 巨型层; Bourouilh, 1987; Mulder *et al.*, 2009), 因此在区域构造演化方面具有重要研究意义 (Gobo *et al.*, 2020; Petrinjak *et al.*, 2021); 此外, 通过巨型层来研究古地震和海啸等地质事件, 也取得了系列进展 (Seguret *et al.*, 1984; Schnellmann *et al.*, 2006; Fanetti *et al.*, 2008; Leithold *et al.*, 2019; Praet *et al.*, 2022; Vermassen *et al.*, 2023)。可以预见, 在重大地质事件方面的研究, 巨型层会受到持续关注, 取得更大突破。另外, 由于巨型层的发育通常与灾变性事件有关, 因此通过巨型层沉积记录分析, 并结合物理模拟、数值模拟等, 可以加深对地质灾害的认识, 并建立相应预防措施 (Sawyer *et al.*, 2023)。这一方面的研究目前还处于起步阶段, 亟需开展多学科联合攻关。此外, 部分巨型层可形成大规模的油气储集层, 如北海油田侏罗系和第三系的一些巨型层 (Pauley 1995; Bozetti *et al.*, 2018), 粒度粗 (主要砂砾岩)、孔渗等物性较好、单层厚度大 (数米至数十米)、平面分布广 (面积达数十平方千米的海底扇或斜坡裙), 因此构成了该区的一类重要油气产层。然而, 并非所有的巨型层或巨型层的所有层段都可成为储集层, 从巨型层的构造沉积背景的角度, 进一步明确有利的巨型层类型、储集层甜点段及空间分布规律, 将对油气勘探具有重要的指导意义。

6 结语

巨型层 (Megabed) 是沉积重力流所形成的超大规模事件沉积层, 其沉积规模巨大 (厚度达数十米至数百米, 体积达数百立方千米), 一般超过

围岩1~2个数量级;物质成分复杂—通常与围岩有一定差异,多表现为异源型或混源型;垂向沉积序列为均一的单层结构或复合的多层结构,分别代表了单一流态重力流和多流态混合重力流沉积。巨型层结构序列的垂向和纵向变化特征表明,水下重力流在浓度稀释的过程中可以发生多种流体转换,并且随着搬运距离的增加,不同流态的流体在空间上可以发生流体分异。巨型层的诱发通常与灾变性地质事件有关,包括地震、海啸、火山活动、行星撞击等,因此对于重大地质事件的揭示、地质灾害预防等具有重要意义。此外,巨型层在盆地分析、物源/古地理恢复、油气勘探等方面均可发挥重要作用。作为深水沉积家族的一员,巨型层目前受到的重视程度与其重要性极不匹配,可以预见,在未来的深水研究中巨型层将受到更加广泛的关注。

参考文献 (References)

- 杜远生,韩欣. 2000. 论震积作用和震积岩. 地球科学进展,15(4): 389-394. [Du Y S, Han X. 2000. Seismo-deposition and seismites. *Advance in Earth Sciences*, 15(4): 389-394]
- 冯增昭. 2013. 中国沉积学(2版). 北京: 石油工业出版社. [Feng Z Z. 2013. *Sedimentology of China* (2nd ed). Beijing: Petroleum Industry Press]
- 高振中,段太忠. 1985. 湘西黔东寒武纪深水碳酸盐重力沉积. 沉积学报,3(3): 7-22,135-136. [Gao Z Z, Duan T Z. 1985. Gravity-displaced deposits of Cambrian deep-water carbonates in West Hunan and East Guizhou. *Acta Sedimentologica Sinica*, 3(3): 7-22, 135-136]
- 梁定益,裴泽同,万晓樵,陈国民. 1991. 试论震积岩及震积不整合: 以川西、滇西地区为例. 现代地质,5(2): 138-146. [Liang D Y, Nie Z T, Wan X Q, Chen G M. 1991. On the seismite and seismo-disconformity: take the w. Hunan and w. Yunnan regions as an example. *Geoscience*, 5(2): 138-146]
- 梁定益,裴泽同,宋志敏. 1994. 再论震积岩及震积不整合: 以川西、滇西地区为例. 地球科学,19(6): 845-850,893. [Liang D Y, Nie Z T, Song Z M. 1994. A re-study on seismite and seismo-unconformity: taking western Sichuan and western Yunnan as an example. *Earth Science*, 19(6): 845-850,893]
- 刘宝珺,叶红专,蒲心纯. 1990. 黔东、湘西寒武纪碳酸盐重力流沉积. 石油与天然气地质,11(3): 235-246. [Liu B J, Ye H Z, Pu X C. 1990. Cambrian carbonate gravity flow deposits in Guizhou and Hunan. *Oil & Gas Geology*, 11(3): 235-246]
- 牛新生,王成善. 2010. 异地碳酸盐岩块体与碳酸盐岩重力流沉积研究及展望. 古地理论,12(1): 17-30. [Niu X S, Wang C S. 2010. Problems and prospect in studies of allochthonous carbonate blocks and carbonate gravity flow deposits. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 12(1): 17-30]
- 杨剑萍,查明,牟雪梅,王辉. 2006. 山东惠民凹陷古近系基山砂体地震作用成因新论. 沉积学报,24(4): 488-495. [Yang J P, Zhang M, Mu X M, Wang H. 2006. New demonstration of the seismic origin for Jishan sandbody of Paleogene in Huimin depression, Shandong Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 488-495]
- Accordi G, Carbone F, Di Carlo M, Pignatti J. 2014. Microfacies analysis of deep-water breccia clasts: a tool for interpreting shallow-vs. deep-ramp Paleogene sedimentation in Cephalonia and Zakynthos (Ionian Islands, Greece). *Facies*, 60: 445-466.
- Amy L A, Talling P J. 2006. Anatomy of turbidites and linked debrites based on long distance (120×30 km) bed correlation, Marnoso Arenacea Formation, Northern Apennines, Italy. *Sedimentology*, 53: 161-212.
- Beck C. 2009. Late Quaternary lacustrine paleo-seismic archives in north-western Alps: examples of earthquake-origin assessment of sedimentary disturbances. *Earth Science Reviews*, 96: 327-344.
- Beck C, Lépinay B M D, Schneider J L, Cremer M, Çağatay N, Wendenbaum E, Boutareaud S, Ménot C, Schmidt S, Weber O, Eris K, Armiijo R, Meyer B, Pondard N, Gutscher M A, Turon J L, Labeyrie L, Cortijo E, Gallet Y, Bouquerel H, Gorur N, Gervais A, Castera M H, Londeix L, Rességuier A, Jaouen A. 2007. Late Quaternary co-seismic sedimentation in the Sea of Marmara's deep basins, *Sedimentary Geology*, 199(1-2): 65-89.
- Bernoulli D, Bichsel M, Bolli H M, Haring M O, Hochuli P A, Kleboth P. 1981. The Missaglia Megabed, a catastrophic deposit in the Upper Cretaceous Bergamo Flysch, northern Italy. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 74: 421-442.
- Bouma A H. 1987. Megaturbidite: an acceptable term? *Geo-Marine Letters*, 7: 63-67.
- Bourget J, Zaragosi S, Rodriguez M, Fournier M, Garlan T, Chamot-Rooke N. 2013. Late Quaternary megaturbidites of the Indus Fan: origin and stratigraphic significance. *Marine Geology*, 336: 10-23.
- Bourrouilh R. 1987. Evolutionary mass flow-megaturbidites in an interplate basin: example of the North Pyrenean Basin. *Geo-Marine Letters*, 7: 69-81.
- Bozetti G, Cronin B T, Kneller B C, Jones M A. 2018. Deep-water conglomeratic megabeds: analogues for event beds of the Brae Formation of the South Viking Graben, North Sea. *AAPG Memoirs*, 115: 119-154.
- Bugge T, Befring S, Belderson R H, Eidvin T, Jansen E, Kenyon N H, Holtedahl H, Sejrup H P. 1987. A giant three-stage submarine slide off Norway. *Geo-Marine Letters*, 7: 191-198.
- Callot P, Sempere T, Odonne F, Robert E. 2008. Giant submarine collapse of a carbonate platform at the Turonian-Coniacian transition: the Ayabacas Formation, southern Peru. *Basin Research*, 20: 333-357.
- Campos C, Beck C, Crouzet C, Demory F, Van Welden A, Eris K. 2013. Deciphering hemipelagites from homogenites through anisotropy of magnetic susceptibility: paleoseismic implications (Sea of Marmara and Gulf of Corinth). *Sedimentary Geology*, 292: 1-14.

- Cattaneo A, Badhani S, Caradonna C, Bellucci M, Leroux E, Babonneau N, Garziglia S, Poort J, Akhmanov G G, Bayon G, Dennielou B, Jouet G, Migeon S, Rabineau M, Droz L, Clare M. 2020. The Last Glacial Maximum Balearic Abyssal Plain Megabed revisited. In: Georgiopoulou A, Amy L A, Benetti S, Chaytor J D, Clare M A, Gamboa D, Haughton P D W, Moernaut J, Mountjoy J J (eds). *Subaqueous Mass Movements and their Consequences: Advances in Process Understanding, Monitoring and Hazard Assessments*. Geological Society of London, Special Publications, Vol. 500. DOI: 10.31223/osf.io/5ayn6.
- Chiarella D, Longhitano S G, Tropeano M. 2017. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 617–627.
- Chough S K, Sohn Y K. 2010. Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: new view. *Earth-Science Reviews*, 101: 225–249.
- Cita M B, Aloisi G. 2000. Deep-sea tsunami deposits triggered by the explosion of Santorini (3500 y BP), eastern Mediterranean. *Sedimentary Geology*, 135(1): 181–203.
- Cita M B, Beghi C, Camerlenghi A, Kastens K A, McCoy F W, Nosetto A, Parisi E, Scolari F, Tomadin L. 1984. Turbidites and megaturbidites from The Herodotus Abyssal Plain (eastern Mediterranean) unrelated to seismic events. *Marine Geology*, 55: 79–101.
- Cita M B, Camerlenghi A, Rimoldi B. 1996. Deep-sea tsunami deposits in the eastern Mediterranean: new evidence and depositional models. *Sedimentary Geology*, 104: 155–173.
- Cook H E, Mcdanielp N, Mountjoye W, Pray L C. 1972. Allochthonous carbonate debris flows at Devonian bank ('reef') margins, Alberta, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 20: 439–497.
- Crevello P D, Schlager W. 1980. Carbonate debris sheets and turbidites, Exuma Sound, Bahamas. *Journal of Sedimentary Research*, 50: 1121–1147.
- Cronin B T. 2018. Lithofabric classification and distribution of coarse-grained deep-water clastic depositional systems. In: Turner C C, Cronin B T (eds). *Rift-Related Coarse-Grained Submarine Fan Reservoirs; the Brae Play, South Viking Graben, North Sea*. AAPG Memoir 115: 39–96.
- Cukur D, Um I K, Chun J H, Lee G S, Kong G S, Johnson S Y, Horozal S. 2021. Deepwater debrites and linked megaturbidites in confined basins: an example from the Onnuri basin, East Sea of Korea. *Journal of Sedimentary Research*, 91(1): 1–20.
- Drzewiecki P A, Simó J A. 2002. Depositional processes, triggering mechanisms and sediment composition of carbonate gravity flow deposits: examples from the Late Cretaceous of the south-central Pyrenees, Spain. *Sedimentary Geology*, 146(1–2): 155–189.
- Elmore R D, Pilkey O H, Cleary W J, Curran H A. 1979. Black Shell turbidite, Hatteras Abyssal Plain, western Atlantic Ocean. *Geological Society of America Bulletin*, 90(12): 1165–1176.
- Fallgatter C, Kneller B, Paim P S G, Milana J P. 2017. Transformation, partitioning and flow-deposit interactions during the run-out of megafloes. *Sedimentology*, 64: 359–387.
- Fanetti D, Anselmetti F S, Chapron E, Sturm M, Vezzoli L. 2008. Megaturbidite deposits in the Holocene Basin fill of Lake Como (Southern Alps, Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259(2–3): 323–340.
- Felix M, Peakall J. 2006. Transformation of debris flows into turbidity currents: mechanisms inferred from laboratory experiments. *Sedimentology*, 53: 107–123.
- Fildes C T. 2013. Megabeds; emplacement mechanics of large-volume event beds. Doctoral dissertation of University of Auckland: 1–256.
- Fisher R V. 1983. Flow transformations in sediment gravity flows. *Geology*, 11: 273–274.
- Gobo K, Mrinjek E, Čosović V. 2020. Mass-transport deposits and the onset of wedge-top basin development: an example from the Dinaric Foreland Basin, Croatia. *Journal of Sedimentary Research*, 90: 1527–1548.
- Hampton M A. 1972. The role of subaqueous debris flows in generating turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42: 775–793.
- Haughton P D W. 2000. Evolving turbidite systems on a deforming basin floor, Tabernas, SE Spain. *Sedimentology*, 47: 497–518.
- Haughton P, Davis C, McCaffrey W, Barker S. 2009. Hybrid sediment gravity flow deposits: classification, origin and significance. *Marine and Petroleum Geology*, 26(10): 1900–1918.
- Heezen B C, Ewing W M. 1952. Turbidity currents, submarine slumps, and the 1929 Grand Banks [Newfoundland] earthquake. *American Journal of Science*, 250: 849–873.
- Hieke W, Werner F. 2000. The Augias megaturbidite in the central Ionian Sea (central Mediterranean) and its relation to the Holocene Santorini event. *Sedimentary Geology*, 35(1–4): 205–218.
- Hiscott R N, James N P. 1985. Carbonate debris flows, Cow Head Group, western Newfoundland. *Journal of Sedimentary Research*, 55(5): 735–745.
- Johns D R, Mutti E, Rosell J, Séguret M. 1981. Origin of thick, redeposited carbonate bed in Eocene turbidites of the Hecho Group, south-central Pyrenees, Spain. *Geology*, 9: 161–164.
- Kastens K A, Cita M B. 1981. Tsunami-induced sediment transport in the abyssal Mediterranean Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 92: 845–857.
- Kleverlann K. 1987. Gordo megabed: a possible seismite in a Tortonian submarine fan, Tabernas Basin, Province Almeria, southeast Spain. *Sedimentary Geology*, 51: 165–180.
- Kneller B, Milana J P, Buckee C, al Ja'aidi O. 2004. A depositional record of deglaciation in a paleofjord (Late Carboniferous [Pennsylvanian] of San Juan Province, Argentina): the role of catastrophic sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 348–367.
- Kvale E P, Bowie C M, Flentrop C, Mace C, Parrish J M, Price B, Anderson S, DiMichele W A. 2020. Facies variability within a mixed carbonate-siliciclastic sea-floor fan (upper Wolfcamp Formation, Permian, Delaware Basin, New Mexico). *AAPG Bulletin*, 104(3): 525–563.

- Labaume P, Mutti E, Seguret M. 1987. Megaturbidites: a depositional model from the Eocene of the SW-Pyrenean Foreland basin, Spain. *Geo-Marine Letters*, 7: 91–101.
- Lebreiro S M, McCave I N, Weaver P P E. 1997. Late Quaternary turbidite emplacement on the Horseshoe abyssal plain (Iberian margin). *Journal of Sedimentary Research*, 67: 856–870.
- Leigh S, Hartley A J. 1992. Mega-debris flow deposits from the Oligo-Miocene Pindos foreland basin, western mainland Greece: implications for transport mechanisms in ancient deep marine basins. *Sedimentology*, 39: 1003–1012.
- Leithold E L, Wegmann K W, Bohnenstiehl D R, Joyner C N, Pollen A F. 2019. Repeated megaturbidite deposition in Lake crescent, Washington, USA, triggered by Holocene ruptures of the Lake Creek-Boundary Creek fault system. *Geological Society of America Bulletin*, 131: 2039–2055.
- Li P, Kneller B, Buso V V. 2024. Carbonate-rich megabeds within a Triassic siliciclastic deep-water system, West Qinling orogenic belt, Central China: character, processes and implications. *The Depositional Record*, 00: 1–28.
- Marjanac T. 1996. Deposition of megabeds (megaturbidites) and sea-level change in a proximal part of the Eocene-Miocene flysch of central Dalmatia (Croatia). *Geology*, 24: 543–546.
- Mohrig D, Marr J G. 2003. Constraining the efficiency of turbidity current generation from submarine debris flows and slides using laboratory experiments. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 883–899.
- Mulder T, Zaragosi S, Razin P, Grelaud C, Lanfume V, Bavoil F. 2009. A new conceptual model for the deposition process of homogenite: application to a cretaceous megaturbidite of the western Pyrenees (Basque region, SW France). *Sedimentary Geology*, 222 (3–4): 263–273.
- Mutti E, Ricci Lucchi F, Seguret M, Zanzucchi G. 1984. Seismoturbidites: a new group of resedimented deposits. *Marine Geology*, 55: 103–116.
- Ogata K, Pogačnik Ž, Pini G A, Tunis G, Festa A, Camerlenghi A, Rebecco M. 2014. The carbonate mass transport deposits of the Paleogene Friuli Basin (Italy/Slovenia): internal anatomy and inferred genetic processes. *Marine Geology*, 356: 88–110.
- Pauley J C. 1995. Sandstone megabeds from the Tertiary of the North Sea. *Geological Society, London, Special Publications*, 94: 103–114.
- Payros A, Pujalte V. 2008. Calciclastic submarine fans: an integrated overview. *Earth-Science Reviews*, 86: 203–246.
- Payros A, Pujalte V, Orue-Etxebarria X. 1999. The South Pyrenean Eocene carbonate megabreccias revisited: new interpretation based on evidence from the Pamplona Basin. *Sedimentary Geology*, 125 (3–4): 165–194.
- Petrinjak K, Budić C, Bergant S, Korbar T. 2021. Megabeds in Istrian Flysch as markers of synsedimentary tectonics within the Dinaric foredeep (Croatia). *Geologia Croatica*, 74 (2): 99–120.
- Piper D J W, Aksu A E. 1987. The source and origin of the 1929 grand banks turbidity current inferred from sediment budgets. *Geo-Marine Letters*, 7: 177–182.
- Polonia A, Vaiani S C, de Lange G T. 2016. Did the A. D. 365 Crete earthquake/tsunami trigger synchronous giant turbidity currents in the Mediterranean Sea? *Geology*, 44 (3): 191–194.
- Praet N, Van Daele M, Moernaut J, Mestdagh T, Vandorpe T, Jensen B J L, Witter R C, Haeussler P J, De Batist M. 2022. Unravelling a 2300 year long sedimentary record of megathrust and intraslab earthquakes in proglacial Skilak Lake, south-Central Alaska. *Sedimentology*, 69: 2151–2180.
- Reeder M S, Rothwell R G, Stow D A V. 2000. Influence of sea level and basin physiography on emplacement of the late Pleistocene Herodotus Basin Megaturbidite, SE Mediterranean Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 17: 199–218.
- Reijmer J J G, Palmieri P, Groen R, Floquet M. 2015. Calciturbidites and calcidebrites: sea-level variations or tectonic processes? *Sedimentary Geology*, 317: 53–70.
- Ricci Lucchi F, Valmori E. 1980. Basin-wide turbidites in a Miocene, over-supplied deep-sea plain: a geometrical analysis. *Sedimentology*, 27: 241–270.
- Rothwell R G, Thomson J, Kähler G. 1998. Low sea-level emplacement of a very large late Pleistocene megaturbidite in the western Mediterranean Sea. *Nature*, 392: 377–380.
- Rothwell R G, Reeder M S, Anastasakis G, Stow D A V, Thomson J, Kähler G. 2000. Low sea-level stand emplacement of megaturbidite in the western and eastern Mediterranean Sea. *Sedimentary Geology*, 135: 75–88.
- Rupke N A. 1976. Sedimentology of very thick calcarenite-marlstone beds in a flysch succession, southwestern Pyrenees. *Sedimentology*, 23: 43–65.
- Rubert Y, Jati M, Loisy C, Cerepi A, Foto G, Muska K. 2012. Sedimentology of resedimented carbonates: facies and geometrical characterisation of an upper Cretaceous calciturbidite system in Albania. *Sedimentary Geology*, 257–260: 63–77.
- Saller A H, Barton J W, Barton R E. 1989. Slope sedimentation associated with a vertically building shelf, Bone Spring Formation, Mescalero Escarpe field, southeastern New Mexico. In: Crevello P D, Wilson J J, Sarg J F, Read J F (eds). *Controls on Carbonate Platform and Basin Development*, 275–288. Tulsa, OK: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.
- Sánchez Gómez S T, Ormó J, Alwmark C, Holm-Alwmark S, Zachén G, Lilljequist R, Sánchez Garrido J A. 2023. A possible 5 km wide impact structure with associated 22 km wide exterior collapse terrain in the Alhabia – Tabernas Basin, southeastern Spain. *Meteoritics & Planetary Science*, 58: 1512–1539.
- San Pedro L, Babonneau N, Gutscher M A, Cattaneo A. 2017. Origin and chronology of the Augias deposit in the Ionian Sea (Central Mediterranean Sea), based on new regional sedimentological data. *Marine Geology*, 384: 199–213.
- Sanders D, Gruber A. 2023. Vestige of a subaerial rock avalanche deposit in an upper Cretaceous synorogenic wedge-top succession (Gosau

- Group, Eastern Alps). *Sedimentary Geology*, 451: 106378.
- Sawyer D E, Urgeles R, Iacono C L. 2023. 50000 yr of recurrent volcanoclastic megabed deposition in the Marsili Basin, Tyrrhenian Sea. *Geology*, 51: 1001–1006.
- Schnellmann M, Anselmetti F S, Giardini D, McKenzie J A. 2006. 15000 years of mass-movement history in Lake Lucerne: implications for seismic and tsunami hazards. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 99(3): 409–428.
- Seguret M, Labaume P, Madariaga R. 1984. Eocene seismicity in the Pyrenees from megaturbidites of the South Pyrenean Basin (Spain). *Marine Geology*, 55(1–2): 117–131.
- Shanmugam G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): deep-water processes and facies models: a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 285–342.
- Sohn Y K, Choe M Y, Jo H R. 2002. Transition from debris flow to hyperconcentrated flow in a submarine channel (the Cretaceous Cerro Toro formation, southern Chile). *Terra Nova*, 14(5): 405–415.
- Souquet P, Eschard R, Lods H. 1987. Facies sequences in large-volume debris and turbidity flow deposits from the Pyrenees (Cretaceous; France, Spain). *Geo-Marine Letters*, 7: 83–90.
- Spence G H, Tucker M E. 1997. Genesis of limestone megabreccias and their significance in carbonate sequence stratigraphic models: a review. *Sedimentary Geology*, 112(3–4): 163–193.
- Stanley D J. 1981. Unifites: structureless muds of gravity-flow origin in Mediterranean basins. *Geo-Marine Letters*, 1: 77–83.
- Stow D A V, Smillie Z. 2020. Distinguishing between deep-water sediment facies: turbidites, contourites and hemipelagites. *Geosciences*, 10(2): 68.
- Strachan L J. 2008. Flow transformations in slumps: a case study from the Waitemata Basin, New Zealand. *Sedimentology*, 55: 1311–1332.
- Talling P J. 2013. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models. *Geosphere*, 9: 460–488.
- Tinterrri R, Mazza T, Magalhaes P M. 2022. Contained-reflected megaturbidites of the marnoso-arenacea formation (contessa key bed) and helminthoid flysches (northern Apennines, Italy) and hecho group (south-western Pyrenees). *Frontiers in Earth Science*, 10: 817012.
- Tripsanas E K, Bryant W R, Phaneuf B A. 2004. Depositional processes of uniform mud deposits (unifites), Hedberg Basin, northwest Gulf of Mexico: new perspectives. *AAPG Bulletin*, 88(6): 825–840.
- Tunis G, Venturini S. 1992. Evolution of the Southern Margin of the Julian Basin with emphasis on the megabeds and turbidites sequence of the Southern Julian Alps (NE Italy). *Geologia, Croatica*, 45: 127–150.
- Van Daele M, Meyer I, Moernaut J, De Decker S, Verschuren D, De Batist M. 2017. A revised classification and terminology for stacked and amalgamated turbidites in environments dominated by (hemi) pelagic sedimentation. *Sedimentary Geology*, 357: 72–82.
- Vermassen F, Van Daele M, Praet N, Cnudde V, Kissel C, Anselmetti F S. 2023. Unravelling megaturbidite deposition: evidence for turbidite stacking/amalgamation and seiche influence during the 1601 CE earthquake at Lake Lucerne, Switzerland. *Sedimentology*, 70: 1496–1520.
- Wetzel A, Unverricht D. 2013. A muddy megaturbidite in the deep central South China Sea deposited ~350 yrs BP. *Marine Geology*, 346(1): 91–100.
- Zuffa G G, Normark W R, Serra F, Brunner C A. 2000. Turbidite megabeds in an oceanic rift valley recording jökulhlaups of Late Pleistocene glacial lakes of the western United States. *The Journal of Geology*, 108(3): 253–274.

(责任编辑 李新坡)