

湖相重力流沉积主控因素与分类方案研究进展

范洪军¹, 王夏斌¹, 陈飞¹, 詹盛云¹, 岳大力^{2,3*}, 刘警阳^{2,3}, 李伟^{2,3}, 任柯宇^{2,3}, 张姝琪^{2,3}

1 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

2 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

3 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

* 通信作者, yuedali@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-09-04

国家自然科学基金(42272186)、中海油可行性研究项目(2022FS-20)联合资助

摘要 深水重力流沉积是当前全球油气的勘探热点。近三十年来,在湖相重力流的沉积特征、主控因素及沉积模式等方面均取得了丰硕成果。然而,由于陆相沉积盆地构造复杂、重力流类型发育多样,湖相重力流分类研究仍存在欠缺。本文通过系统梳理重力流发展历程与研究热点,总结了一套基于沉积成因和主控因素的湖相重力流沉积分类方案,并将湖相重力流的研究热点概括为以下3个方面:1)重力流主控因素研究:不同类型盆地的湖相重力流沉积特征和沉积模式差异性明显,主要受盆内因素和盆外因素控制,盆内因素主要包括盆地类型(如地形坡度)、沉降速率、水体密度等,盆外因素主要包括沉积物的成分和来源。2)“源-汇”系统下的重力流砂体分布:湖相重力流的形成演化和砂体分布样式通常受控于“源-渠-汇”系统,该系统能够将盆内因素与盆外因素很好地联系起来。3)湖相重力流分类:陆相湖盆相较海相盆地具有规模较小、水体较浅、构造活动强烈等特点,导致重力流沉积的控制因素与沉积特征多样、分类复杂。基于不同研究目的,可按沉积成因、发育位置或物源供给进行分类,但湖相重力流的分类方案尚未统一。本文综合考虑重力流成因机制与主控因素,将湖相重力流分为3大类7亚类,具体包括洪水型(缓坡富砂型、缓坡砂泥混合型、缓坡富泥型、陡坡富砂型、陡坡砂泥混合型)、滑塌型(挠曲滑塌型、断控滑塌型)以及洪水-滑塌共存型。目前,湖相重力流的研究成果已十分丰富,但在流体、流态转化和深水水道成因机制上仍存在很大进步空间,综合动力学和沉积学交叉领域探究湖相重力流的形成演化与成因机理研究已成为当前的研究热点和发展趋势。

关键词 重力流沉积; 滑塌型重力流; 洪水型重力流; 主控因素; 沉积模式

中图分类号: P618.13; TE132

Research progress on main controlling factors and classification schemes of lacustrine gravity flow deposits

FAN Hongjun¹, WANG Xiabin¹, CHEN Fei¹, ZHAN Shengyun¹, YUE Dali^{2,3}, LIU Jingyang^{2,3}, LI Wei^{2,3}, REN Keyu^{2,3}, ZHANG Shuqi^{2,3}

1 CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China

引用格式: 范洪军, 王夏斌, 陈飞, 詹盛云, 岳大力, 刘警阳, 李伟, 任柯宇, 张姝琪. 湖相重力流沉积主控因素与分类方案研究进展. 石油科学通报, 2024, 02: 167-182

FAN Hongjun, WANG Xiabin, CHEN Fei, ZHAN Shengyun, YUE Dali, LIU Jingyang, LI Wei, REN Keyu, ZHANG Shuqi. Research progress on main controlling factors and classification schemes of lacustrine gravity flow deposits. Petroleum Science Bulletin, 2024, 02: 167-182. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.013

2 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Deep-water gravity flow sedimentation is topical in global petroleum and natural gas exploration. In the past 30 years, great achievements have been made in the sedimentary characteristics, controlling factors and sedimentary models of lacustrine gravity flow. However, due to the complex structure of continental sedimentary basins and the diverse development of gravity flow types, lacustrine gravity flow classification is still lacking. By systematically sorting out the development history and research into gravity flow, this paper summarizes a sedimentary classification scheme of lacustrine gravity flows based on sedimentary genesis and the main controlling factors, and summarizes the research into lacustrine gravity flows into the following three aspects. 1) Research into the main controlling factors of gravity flow: the sedimentary characteristics and models of lacustrine gravity flow in different types of basins are obviously different. These are mainly controlled by intra-basin factors and extra-basin factors. The intra-basin factors mainly include basin types (such as topographic slope), sedimentation rate and water density, while the extra-basin factors mainly include the composition and sources of sediments. 2) Gravity flow sand body distribution in source-sink systems: the formation and evolution of lacustrine gravity flow and the distribution pattern of sand bodies are usually controlled by the source-channel-sink system. This system effectively connects internal and external factors within the basin. 3) Lacustrine gravity flow classification: Continental lacustrine basins, compared to marine basins, are characterized by smaller scale, shallower water bodies, and intense tectonic activity. These characteristics result in diverse controlling factors and complex sedimentary features of gravity flow deposition. According to different research purposes, it can be classified according to sedimentary origin, development location or provenance supply, but the classification scheme of lacustrine gravity flow has not been unified. In this paper, lacustrine gravity flow depositions are classified into three major types and seven subtypes, by comprehensively considering the causal mechanisms and main controlling factors of gravity flows. Specifically, lacustrine gravity flow depositions are classified into flood-type (gentle slope sand-rich type, gentle slope sand-mud hybrid type, gentle slope mud-rich type, steep slope sand-rich type, steep slope sand-mud hybrid type), slump-type (flexural slump type, fault-controlled slump type), and flood-slump coexisting type. There are plenty of research in the gravity flow of lacustrine facies at present. However, there is still much room for progress in fluid, flow transformation and genetic mechanisms of deep water channels. Therefore, the study of the formation, evolution and genesis mechanism of lacustrine gravity flows by integrating dynamics and sedimentology has become a current research and development trend.

Keywords gravity flow deposits; slump-induced gravity flow; flood-induced gravity flow; main control factors; deposition model

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.013

0 引言

深水沉积储层拥有巨大的勘探潜力,其中重力流是沉积物向深水环境运输的重要机制之一。沉积物重力流是指在半深湖-深湖区经过重力搬运的异地沉积物^[1]。不同于国外的海相重力流沉积,我国沉积盆地内多发育湖相重力流沉积,随着精细地震勘探技术的发展,我国石油地质学家在鄂尔多斯盆地^[2-4]、松辽盆地^[5-6]和渤海湾盆地^[7-9]的湖相重力流沉积勘探中先后取得了重大突破。目前,深水重力流沉积已经成为了陆相盆地油气勘探开发的新领域,是致密储层和低渗透储层的主要沉积砂体,对保障我国能源安全具有重大意义。

早期的重力流沉积理论主要针对深海浊流沉积^[10]。经过数十年的发展,海相重力流沉积理论相对成熟,尤其在构型模式、沉积机理以及主控因素方面已取得丰硕的成果^[11-14]。然而,当时的海相重力流沉

积并未引起中国石油地质学家的重视,直到20世纪80年代,由于油气勘探开发力度的加大,在全国范围内掀起了深水重力流沉积的研究热潮^[15-17]。受浊流沉积理论的影响,我国最初的深水湖相重力流沉积沿用了海相重力流的相关术语,如浊积岩、浊积砂体等。在此基础上,我国学者通过现代及古代沉积实例将陆相浊流沉积划分为6种成因相^[18],并对湖相浊积岩的识别标志做出了更加详细的说明^[19],将浊流沉积在盆底形成的扇体划分为水道型湖底扇和无水道型湖底扇^[20]。同时,坳陷湖盆和前陆湖盆相继发现浊流沉积体系,也改变了之前浊流主要发育在断陷湖盆的认识,并相继完善了各类型湖盆的浊流沉积模式。然而,当下研究表明湖相重力流沉积的流体类型复杂多样,由不同流体形态(砂质碎屑流、异重流、混合流以及超临界流等)形成的重力流砂体分布差异性逐渐得到重点关注^[2, 21-22],改变了前期唯浊流论的观点。随着近年来海上油气田勘探开发力度的加大,在海上油田发

现大量的重力流沉积；但由于海上井网密度低，沉积模式认识不清，限制了海上油田的勘探与开发。因此，有学者尝试利用控制因素对湖相重力流沉积模式进行分类，如蒋恕^[23]等(2022)根据坡度和物源性质将湖底扇划分为4种类型，对重新认识渤海湾盆地的重力流砂体分布特征和探井井位优选具有重要意义。

经过数十年的发展，湖相重力流沉积理论已经取得了许多代表性成果，如重力流主控因素研究^[24-26]、流体转化机理^[27-28]、湖底扇构型模式^[29-31]等。尽管如此，陆相湖盆重力流研究中仍存在主控因素不明确、沉积模式混杂等问题，导致沉积分类方案不完善。因此，本文通过系统梳理湖相重力流沉积研究成果，总结湖相重力流沉积分类方案，以期强化湖相重力流沉积地质认识，为湖相重力流沉积的勘探开发提供理论指导。

1 湖相重力流的内涵及基本特征

1.1 重力流沉积理论起源与发展历程

重力流沉积研究起源于19世纪末，冰川融化携带的沉积物进入日内瓦湖形成了密度底流(浊流)，标志着一种新的沉积物输送形态进入了地质学家的视野^[32]，在随后的几年间，罗纳河三角洲前端重力流水道^[33]和海底电缆被水下沉积物垮塌冲断^[34]均证实了重力流沉积的存在。直到20世纪50年代，浊流沉积体系被正式建立，主要观点认为浊流是递变层层的形成原因^[10]，这是对传统机械分异观点的突破。此后，多种重力流概念被相继提出，如异重流^[35]、颗粒流^[36]以及碎屑流^[37]等。Bouma序列的建立是浊流沉积理论的又一里程碑^[38]，鲍马序列是基于众多古代实例建立的理想浊积岩沉积序列，在野外露头中很难见到完整了鲍马序列，但这并不妨碍其对重力流沉积理论发展所作的贡献，并且相当长的时间内，鲍马序列为海底扇模式的研究提供了借鉴^[11, 39-40]。

随着重力流理论不断发展，有学者对鲍马序列进行了完善，同时也提出了质疑。Lowe^[41](1982)认为鲍马序列的浊流为低密度浊流，此外，还存在一种高密度浊流。然而，高密度浊流的提出也引起了国际沉积学家的争议，其中以Shanmugam^[42](1985)的砂质碎屑流为代表。砂质碎屑流是富含粗粒物质并具有塑性流变性质的深水重力流，体现出一种从黏性到非黏性的连续沉积过程，具体表现为沉积物整体固结的特征，流体内沉积物的支撑机制主要来自颗粒间的摩擦力和水体浮力。同时，大量研究表明，海相砂岩多呈现厚层块状特征，因此Shanmugam^[43](1996)认为海相砂岩

多为砂质碎屑流成因。此后，关于砂质碎屑流的概念、特征以及理论体系在全球范围内引起了广泛关注^[44-45]。从19世纪末到21世纪初，重力流沉积理论取得了长足发展，产生了众多专业术语和概念，在重力流流体转化、沉积沉降过程以及成因机制等方面取得丰富认识。同时，这也造成了学术术语相对混杂、沉积模式以及分类方案多样等问题。

1.2 湖相重力流沉积基本特征

湖相盆地内重力流沉积特征与海相重力流沉积相比具有较大差别，主要在于以下3点：1)湖相盆地类型多样，不同盆地重力流发育类型差异性明显；2)湖相盆地规模较小，缺乏宽广的陆架和陆坡，沉积过程的完整性与海相重力流存在差异；3)湖相盆地重力流发育受控因素多样，在沉积物供给、砂体发育规模以及沉积模式上差异性较大^[11, 13, 23, 30]。因此，结合构造特征、重力流触发机制以及沉积主控因素，总结了断陷盆地和坳陷盆地湖相重力流的沉积特征。

湖相断陷盆地与坳陷盆地在构造活动方式、强度及盆地规模方面具有明显差异，导致重力流沉积规律性不同。断陷湖盆具有构造活动性强、地形坡度大、碎屑物质供给充足、湖盆水体深度大等特点，相比坳陷湖盆更易形成重力流沉积。断陷盆地不同构造单元的地形坡度和物源构成存在较大差异，导致不同构造单元的重力流沉积规律不同。陡坡带距离物源区近，沉积物粒度粗、搬运距离短，重力流沉积分选性较差，相带较窄^[46]，受坡度较大的影响，流体转化被抑制，沉积过程常发育不全，易在斜坡处形成近岸水下扇。缓坡带距离物源区远，沉积物可以长距离搬运，重力流沉积分选性相对较好，通常是洪水触发所导致的重力流，易在深水区形成扇体结构，同时伴有混合事件层沉积(图1)。坳陷湖盆中不同构造区的构造活动基本稳定，由洪水触发的重力流沉积规模大于断陷湖盆，除洪水型重力流沉积，由地震等诱发的滑塌型重力流同样存在，导致洪水-滑塌共存的重力流沉积在坳陷湖盆广泛发育^[47]。

2 湖相重力流沉积机理与主控因素

不同成因重力流砂体的形成与分布受盆地外部因素和内部因素共同控制^[48-50]，盆外因素主要包括沉积物的成分和来源，如沉积物含量、泥沙组成以及颗粒粒度等，盆内因素主要包括地形坡度、沉积速率以及水体密度等。

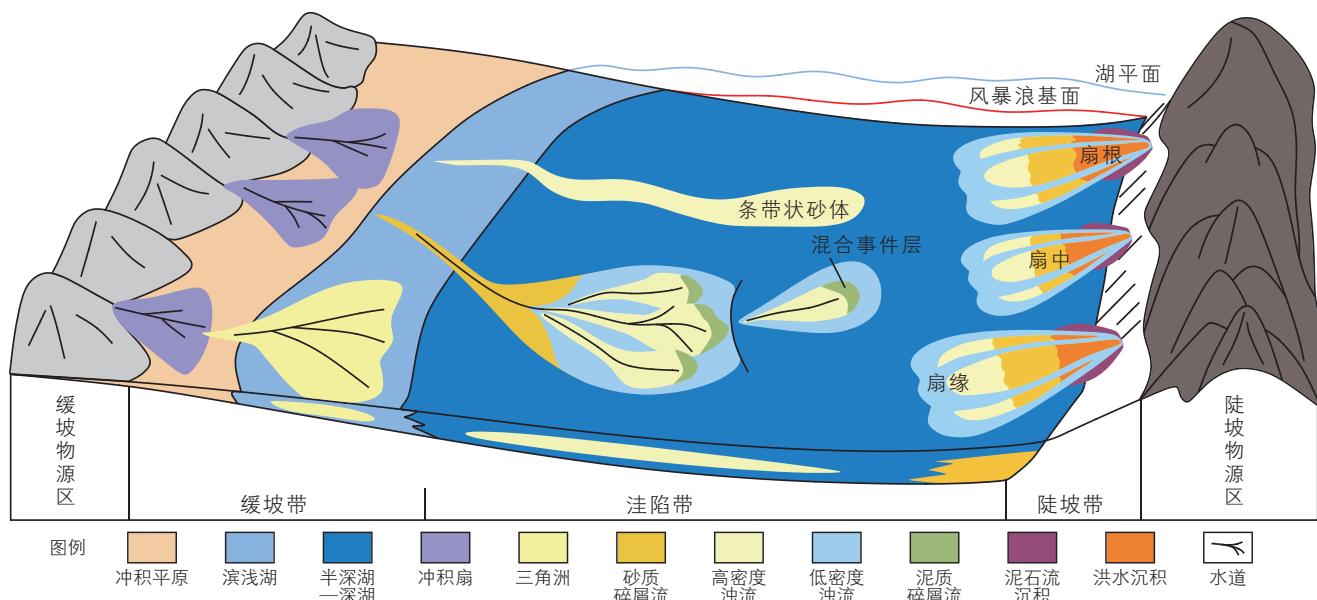


图1 断陷湖盆不同构造带深水重力流沉积模式(据文献[46]修改)

Fig. 1 Deposition model of deep water gravity flow in different tectonic zones of fault lake basin(modified by reference [46])

2.1 单一因素分析

2.1.1 坡度

坡度是用来表示地表单元陡缓程度的物理量,对湖相重力流沉积的砂体分布和流体转化控制作用十分明显。坡度通过改变汇水区流体的流量和流速,进而影响重力流水道类型。有学者采用沉积数值模拟方法分析了海底浊流沿不同斜坡流至近似平坦底床的流体流动状态和沉积特征,认为对于给定的沉积物存在相应的临界坡度,低于临界坡度时斜坡上沉积作用增强,高于临界坡度时浊流对斜坡具有侵蚀作用^[51-52]。因此,可将斜坡水道划分为侵蚀型、过渡型和沉积型,其中坡度是控制水道发育类型和岩相组合样式的主控因素之一^[53]。坡度较大时,水流能量强,发育侵蚀型水道,以底负载为主,不发育溢岸沉积,水道横向稳定性较差。随着坡度变缓,水流能量开始衰减,水道类型由侵蚀型水道向侵蚀、沉积共存的过渡型水道转化,底负载和悬浮负载共存,发育少量溢岸沉积,水道限制性较弱,砂体垂向连通性较强。当坡度进一步变缓,过渡型水道向沉积型水道转化,以悬浮负载为主,溢岸沉积发育,水道横向稳定性较强。

不同深水重力流在搬运沉积过程中亦可发生流体转化,有学者利用水槽实验揭示了黏性碎屑流向高密度浊流和低密度浊流转换的机制及其主控因素^[27-28, 54]。此外,流体转化过程中,“混合事件层”较为多见,混合事件层是指由混合重力流形成的沉积层^[55]。前期研

究认为,水下沉积物重力流的形成和流动过程中,沉积物不断与周围水体混合被稀释,逐渐从块体流到碎屑流进而转化为浊流,垂向上不存在流体混合的现象^[56]。然而,近年来的研究发现,除在盆地边缘或三角洲前缘等坡度连续规律变化的区域外,在湖盆中央也广泛发育碎屑流和浊流的伴生沉积^[57-58],这表明深水重力流的沉积机制和沉积模式具有极强的复杂性,而坡度在重力流流体转化中扮演着举足轻重的作用。

2.1.2 沉积速率

目前,超临界沉积物重力流越来越受到关注,而超临界流体的形成与沉积速率密切相关,在我国东部断陷盆地的陡坡带和深洼带是超临界流沉积物重力流的良好发育位置,因此超临界沉积物重力流对陡坡带和深洼带的油气勘探预测意义重大^[59]。超临界沉积物重力流($Fr > 1$)会形成一些特殊的沉积特征,如逆行沙丘、旋回坎(cyclic steps)等,这些沉积特征受沉积物粒度的控制作用明显。旋回坎是超临界流动条件下,一系列向上游方向移动的大型阶梯状沉积底形,旋回坎的发育规模与沉积物粒度之间存在密切关系,粒度较粗时,旋回坎的规模往往较小,旋回坎波长最大为1 km,波高最高为10 m,主要分布在沉积近端,如峡谷和近端水道;粒度较细时,旋回坎的规模较大,波长在1~7 km之间,波高最高可达80 m,主要分布在沉积远端的深水平原和水道两侧的溢岸沉积内^[60-61],表现为超临界沉积物重力流形成的旋回坎的长高比随着粒度的增加而减小^[62]。

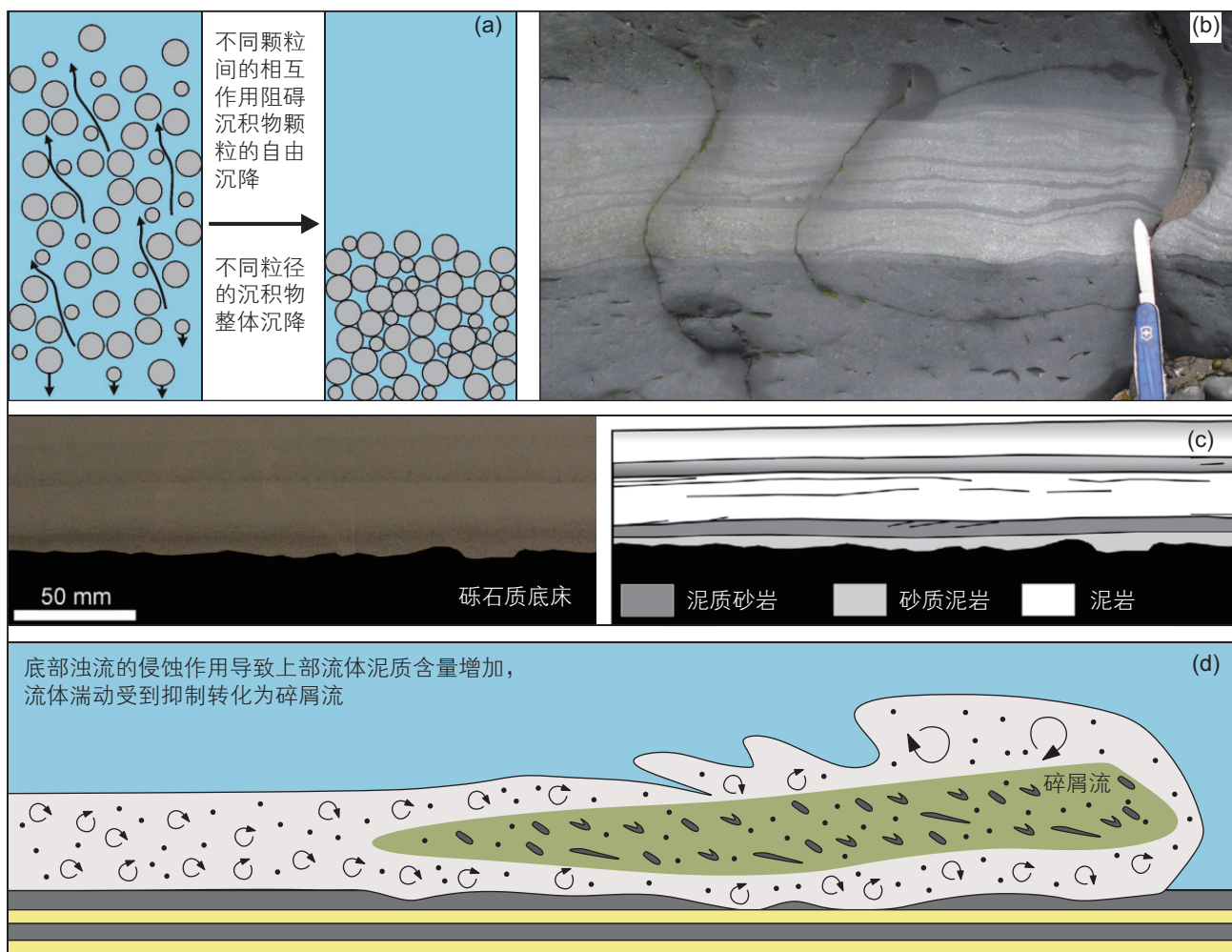
关于超临界沉积物重力流的水槽模拟实验表明^[63], 沉积速率是控制超临界流沉积特征和沉积规模的重要因素。沉积速率控制了超临界流沉积内部层理结构和整体沉积特征的保存, 较高的沉积速率能够使逆行沙丘和流槽-凹坑等构造较好的保存下来, 并且较高的沉积速率使下游非对称性旋回坎增多, 而沉积速率越慢, 上游非对称性旋回坎发育越多^[60]。

2.1.3 沉积物含量

沉积物含量是影响重力流沉降过程动力学的重要因素。当水体沉积物含量较高时, 通常表现为碎屑流沉降, 可形成块状砂岩; 当水体沉积物含量较低时, 通常表现为浊流沉降, 可形成正粒序砂岩。同时, 在重力流的形成和流动过程中, 沉积物供给的变化与流体对底形的侵蚀, 导致沉积物含量会持续发生变化。因此, 还可形成一些特殊的沉降过程, 如受阻沉降和

湍流抑制等^[50]。

受阻沉降(hindered settling)是当水体中沉积物含量较高时, 沉积物颗粒在沉降过程中受相互间的摩擦力影响, 导致沉积物颗粒的逐级递减沉降受到阻碍, 最终导致沉积物颗粒整体沉降的现象(图 2a)。受阻沉降对沉积物体积浓度较为敏感, 当沉积物体积浓度大于 10% 时, 随着沉积物含量的增加, 受阻沉降作用越明显^[36], 因此受阻沉降在高密度浊流中较为发育^[41, 64]。湍流抑制(turbulence damping)与受阻沉降相伴生^[65-67], 当水体沉积物含量增加时, 受阻沉降被触发, 导致流体湍动受到抑制, 使得沉积物表现出整体固结沉降的现象。湍流抑制也可由强凝聚力物质的增加所导致, 如黏土矿物等, 强凝聚力物质的加入造成的湍流抑制作用是导致浊流向碎屑流转化的主要因素之一^[68], 可导致重力流砂体沉积和分布特征的差异性(图 2d)。特



(a)受阻沉降作用; (b)重力流薄层砂岩与泥质条带互层, 英国西威尔士; (c)湍流抑制机制水槽模拟; (d)湍流抑制机制模式图

图 2 湖相重力流沉积物沉降的动力学过程(据文献[50, 66]修改)

Fig. 2 Dynamic processes of sedimentation of lacustrine gravity flow(modified by reference [50, 66])

别是在陆相湖盆中,黏土物质相对发育,底部浊流的侵蚀作用导致泥质含量的增加,因此更易形成薄层砂岩与泥质条带互层的重力流沉积,该现象在野外露头(图 2b)和水槽实验(图 2c)中均得到了验证^[66]。在湖相重力流沉积中,关于高密度浊流块状砂岩的成因研究及其与碎屑流块状砂岩的差异性研究较为少见^[69],另外,陆相湖盆的地质条件相对复杂,沉积物浓度变化具有不确定性,因此不同流动机制的重力流砂体分布还有待深入研究。

2.1.4 其他控制因素

除上述控制因素外,水体密度和湖盆底形同样对重力流沉积具有重要控制作用。盆地水体密度控制其与洪水供给流体之间的密度差,进而控制洪水型重力流的形成和演化过程,尤其是控制了浮力反转机制作用下的漂浮沉积发育程度,如湖盆内外水体密度相近时,漂浮相一般不发育^[70]。盆地底形影响重力流沉积物的卸载场所和卸载方式,进而控制重力流砂体的沉积展布规律。盆地底形与水动力条件密切相关,El-Gawad^[12]等(2012)利用三维非稳态数值模型对尼日尔三角洲大陆斜坡上的峡谷进行雷诺平均模拟,认为浊流的水动力与深海海底地形的形成有关。

2.2 多因素综合分析

重力流砂体的沉积规律和分布特征不只受单一因素影响,如气候变化导致降雨量变化进而导致流量变化,最终控制洪水型重力流的沉积特征。因此,不同控制因素之间总是相互关联并彼此影响,通过对不同控制因素进行综合分析是探究湖相重力流沉积规律的可行手段,而当下的“源-渠-汇”系统正是解决该问题的有效方案。“源-渠-汇”系统的核心是将盆外因素和盆内因素联合起来,通过系统化的研究,探索重力流砂体的形成和分布规律^[71]。不同的汇水盆地和物源区组合具有不同的重力流砂体沉积特征,单一汇水路径条件下,盆地内重力流砂体多呈现单一朵叶形态;多汇水路径叠合条件下,盆地内重力流砂体形成的朵叶体常呈现相互切叠的特征。在辽东湾拗陷内,不同的坡度和物源区组合造成汇水盆地内朵叶体形态具有明显差异^[23],当坡度较陡且物源区富砂时,易在湖盆内形成长宽比较大的舌形扇;当坡度较缓且物源区富砂时,易形成长宽比较小的朵叶扇;当坡度较缓且物源区富泥时,在湖盆中心则不易形成扇体结构(图 3)。

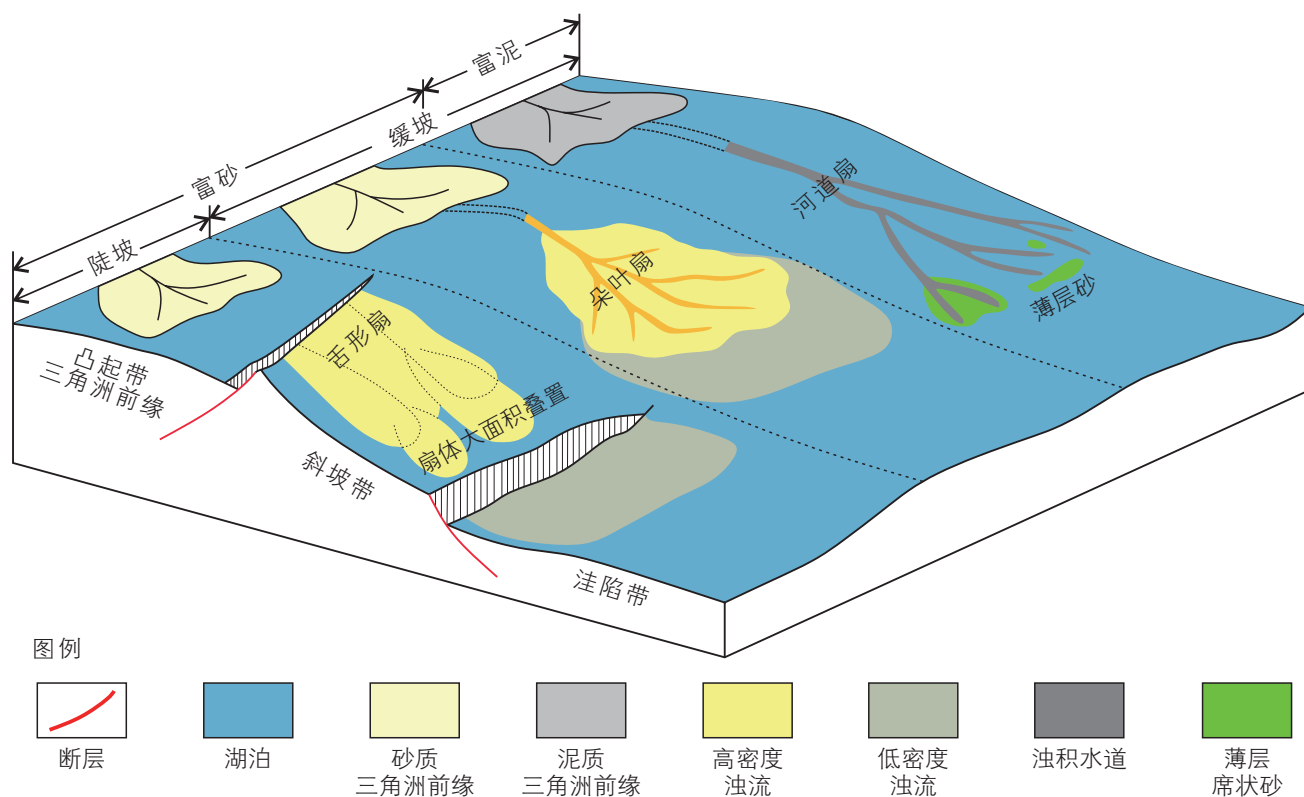


图 3 辽东湾拗陷辽西凸起东斜坡湖底扇沉积模式(据文献[23]修改)

Fig. 3 Sub-lacustrine fan sedimentary model of east slope of Liaoxi bulge in Liaodong Bay Depression (modified by reference [23])

3 湖相重力流分类及沉积模式

3.1 典型单一因素分类方案与沉积特征

湖相重力流分类方案一直是深水沉积中不可避免的问题，湖相重力流一般在湖盆内或斜坡处形成扇体结构，根据不同的研究需要，湖相重力流分类方案并不统一，目前被广泛认可的有根据沉积成因的分类方案、根据湖底扇发育位置的分类方案以及根据物源供给类型的分类方案。

3.1.1 按沉积成因分类

按沉积成因可将湖相重力流划分为滑塌型重力流、洪水型重力流以及羽流卸载重力流^[50, 72]。滑塌型重力流主要受地形和构造活动控制，在火山、地震等触发机制的作用下，三角洲前缘和前三三角洲堆积的碎屑物质发生失稳垮塌，向下滑动的过程中发生流体转化，形成无水道型重力流沉积^[73]。滑塌型重力流前期的滑动体继承了三角洲前缘的沉积特征，随着沉积物的搬运，沉积物开始变形形成滑塌体，具有明显的变形构造，随着流体的稀释，逐渐转化为碎屑流和高密度浊流，高密度浊流进一步转化形成似浪涌状浊流(图4)。滑塌型重力流一般需要较大的坡度，因此在断陷湖盆中发育较多，由于滑塌型重力流的沉积物来源于三角洲前缘等沉积前端部分，因此沉积物供给并不稳定，所以重力流砂体规模相对较小。

洪水型重力流起源于三角洲前缘，当洪水来临时，由洪水携带陆源碎屑进入湖盆从而形成重力流，流体动力由高能洪水提供，具有持续时间长，流量、能量相对稳定等特点。洪水型重力流的触发机制与滑塌型重力流明显不同，因此洪水型重力流不需要较大的坡度，在拗陷湖盆和断陷湖盆内均有发育。洪水型重力流的流体转化和沉积特征与滑塌型重力流也不大相同，洪水型重力流一般不发育滑动体和滑塌体，碎屑流中常见泥质碎屑，随着流体稀释，碎屑流逐渐转化为高密度浊流和低密度准稳态浊流，同时会在湖平面处发育低密度流(图4)，并在湖盆底部发育混合事件层沉积。洪水型重力流主水道一般与三角洲前缘水下分流河道相连，沉积物补给较稳定，所以沉积规模一般较大，砂体延伸距离较远^[74-75]。

除常规的滑塌型和洪水型重力流外，最新的研究表明，在不发生沉积物滑塌或者显著洪水的情况下，重力流沉积仍可形成^[77]。当正常河流携带细颗粒物入海后，这些细粒沉积物形成漂浮羽流，在与大潮的混合作用下卸载下来形成深水重力流。漂浮羽流向重力流转化的内在机理是羽流盐度和环境水体盐度不同导致的对流作用，盐度差异越小，越有利于发生羽流卸载重力流^[78]。然而，陆相湖盆中的漂浮羽流并不受潮汐作用影响，但河流水体与湖盆水体盐度差异较小，因此陆相湖盆中仍可发育羽流卸载重力流。该类型重力流发育明显的砂泥岩互层结构、云雾状构造、砂质

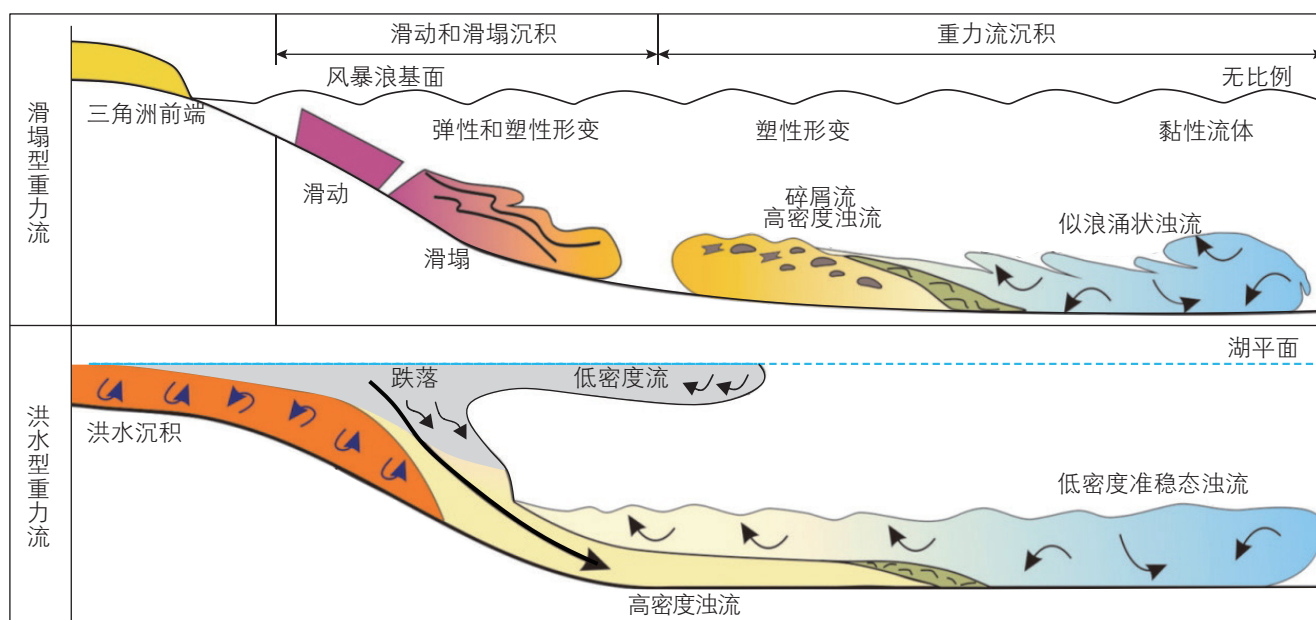


图4 不同成因湖相重力流的流体转化与沉积特征(据文献[76]修改)

Fig. 4 Fluid transformation and sedimentary characteristics of gravity flow in lacustrine facies of different origin (modified by reference [76])

团块以及液化构造,这与浊流形成的正粒序砂岩以及砂质碎屑流形成的块状砂岩具有明显区别。由此可见,羽流卸载重力流是深水细粒沉积的重要机制,其形成的砂泥岩互层结构也是油气生成和富集的有利场所。

3.1.2 按发育位置分类

按重力流发育位置可将湖相重力流其分为近岸水下扇和远岸水下扇两类^[8]。近岸水下扇常发育在断陷湖盆陡坡带,也称陡岸湖底扇^[79]、近源湖底扇^[80]或斜坡扇^[81]。近岸水下扇主要为阵发性洪水携带大量砂、砾、泥等碎屑物质直接进入湖盆的水下扇状沉积体,常发育在近物源的陡坡带,粒度较粗,以分选差的砾岩、含砾砂岩以及粗砂岩为主。近岸水下扇由于没有长期稳定的物源供应,因此扇体延伸范围较小。

远岸水下扇即常见的湖底扇,主要由辫状河三角洲前缘供给,沉积物在一定触发条件下向湖盆中心运移形成扇体,粒度较细,以中砂岩和细砂岩为主,常发育在远物源的缓坡带。通过水槽物理模拟发现:在物源充沛的条件下,远岸水下扇分流水道发育,迁移频繁,可以形成较对称的朵叶体,剖面上水道砂体多呈透镜状;受斜坡坡度、水流强度等因素影响,砂质碎屑流多发育在斜坡中下部或坡脚处,浊流沉积主要发育在外扇-深湖区。

3.1.3 按物源供给分类

按物源供给分类与按发育位置分类具有一定的关联性,通常来说,物源供给较粗的重力流一般在陡坡带形成扇体,而物源供给较细的重力流则在缓坡带形成扇体。Richards^[82](1998)将海底扇分为富砾型、富砂型和富泥型3类,富砾型海底扇水道侵蚀性较强,形

成长轴状扇体;富砂型海底扇水道以分叉为主,形成短轴状扇体;富泥型海底扇水道弯曲度大,难以形成扇体结构。有学者借鉴海底扇的分类方案,将涪西南凹陷流一段湖底扇分为富砾型湖底扇和富砂型湖底扇两类^[83]。富砾型湖底扇由于处在湖盆陡坡带,构造运动较强,具有阵发性、物源供给量中等、搬运距离较短、堆积迅速等特点。缓坡带构造活动较弱,易形成富砂型湖底扇,物源供给较充足,湖底扇具有搬运距离远、堆积速度较慢的特点。因此,物源供给造成了重力流沉积成因的差异性,进而控制重力流沉积的砂体分布特征(表1),并影响其油气富集规律。

3.1.4 按扇体形态和结构分类

根据湖底扇外部形态、内部结构可将湖底扇分为4类:(1)水道-扇状湖底扇;(2)扇状湖底扇;(3)条状湖底扇;以及(4)池状(pond-form)湖底扇^[84]。水道-扇状湖底扇本质上即为洪水型重力流形成的湖底扇,在此不过多赘述。扇状湖底扇、条状湖底扇以及池状湖底扇本质上属于滑塌型湖底扇,即无水道供给型湖底扇,根据扇体形态和结构可分为多种亚类(图5)。

受盆地底形、地形坡度等因素的控制,扇状湖底扇可分为4亚类,即挤压构造型孤立扇、无挤压构造型孤立扇、子母扇以及复合扇(图5)。孤立型扇状湖底扇常发育在简单的单斜构造上,其中挤压构造型孤立扇的显著特征是在核心区存在挤压构造,地震相上呈现混乱的低振幅单元带,伴有一系列的叠瓦状逆冲构造;而无挤压构造型孤立扇通常具有面积更小、厚度较薄、没有典型的挤压构造特征。子母扇常发育在多级斜坡背景上,地震剖面上具有双向下倾丘状反射特征,上坡区扇状复合体在重力作用下沿斜面向下滑

表1 北部湾盆地涪西南凹陷富砾型和富砂型湖底扇沉积特征对比(据文献[83]修改)

Table 1 Comparison of sedimentary characteristics of gravel-rich and sand-rich sub-lacustrine fan in Weixinan Sag, Beibuwan Bay Basin (modified by reference [83])

沉积特征	富砾型湖底扇	富砂型湖底扇
岩性	砂砾岩、含砾砂岩	细砂岩、粉砂岩
发育位置和地形	湖盆短轴方向、地形较陡	湖盆长轴方向,地形较缓
物源供给程度	中等	充足
宏观		
沉积构造	以重力流构造为主	重力流构造和牵引流构造共存
物性	低孔低渗	中孔中低渗
测井相特征	厚层齿化箱形	厚层弱齿化箱形
体系域	低位、湖侵体系域	高位体系域
岩石类型	岩屑砂岩	岩屑质石英砂岩
微观		
孔隙类型	以铸模孔为主	以原生粒间孔为主
成岩相	强压实弱胶结	中等压实中等胶结

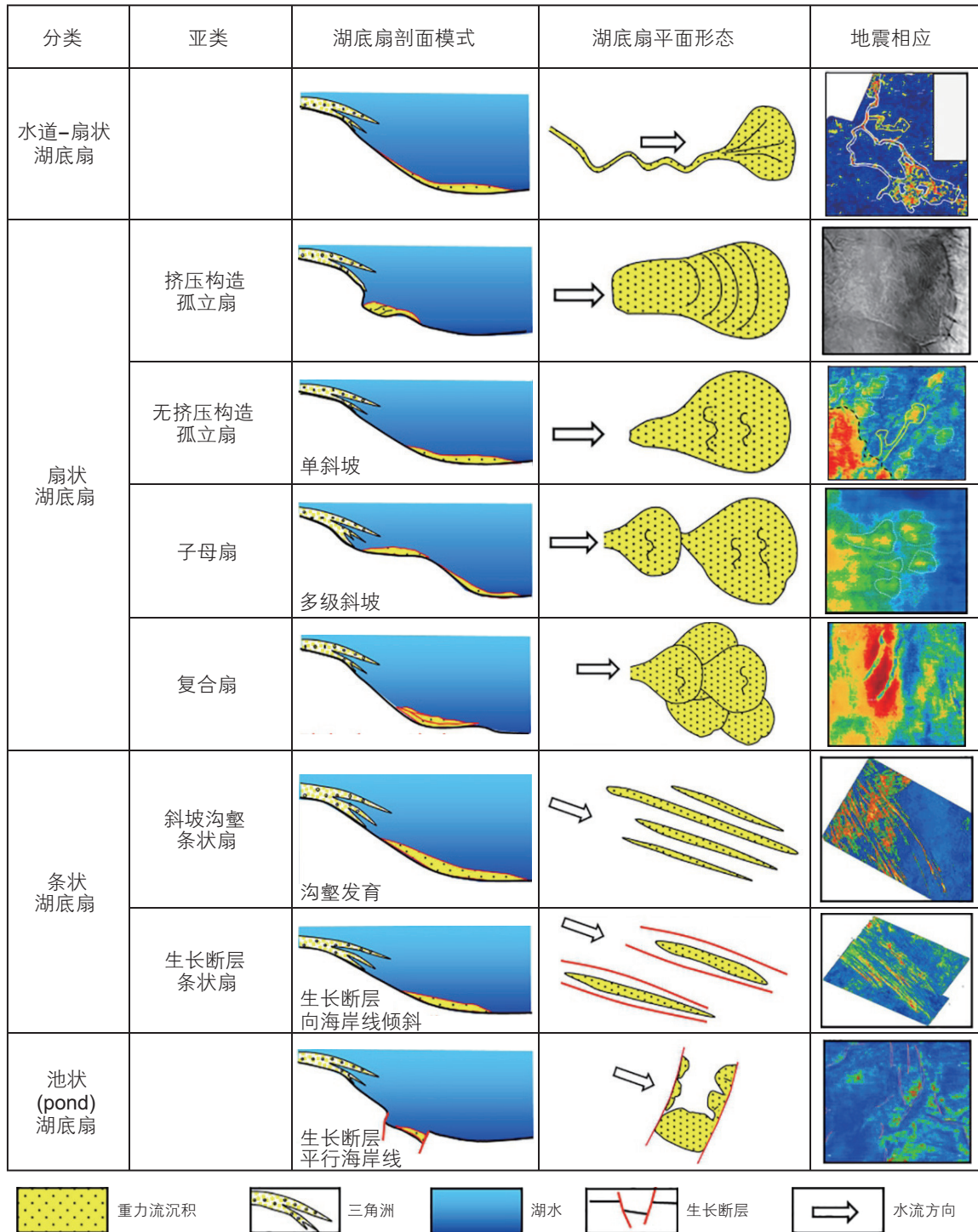


图 5 基于湖底扇形态和结构的分类方案 (据文献 [84] 修改)

Fig. 5 Classification scheme based on morphology and structure of sublacustrine fan (modified by reference [84])

动，继而在下坡区形成扇状结构，因此称为子母扇。复合扇常发育在湖底区，形成大面积叠置的扇体结构，该类型湖底扇面积一般较大，明显大于孤立扇和子母扇，扇体内部地震振幅变化快。

条状湖底扇和池状湖底扇均是受盆地内某些特殊构造或盆底不规则底形控制，导致与常规扇状湖底扇

不同。根据湖底构造条件不同，条状湖底扇可分为斜坡沟壑型条状扇和生长断层型条状扇(图 5)。斜坡沟壑系统可作为沉积物运移通道，因此当盆底斜坡发育众多沟槽时，这些构造控制着沉积物的搬运方向和卸载位置，因此沉积物通常沿着沟槽分布形成条状扇；生长断层的发育能够重塑湖底地貌，造成可容空间的

变化,生长断层对沉积物的控制作用在于断层走向与物源方向的差异,平面上砂体常呈现带状展布。池状湖底扇的发育同样与生长断层相关,当断层走向平行于湖岸线、垂直于物源方向时,会形成一些特殊地貌,如断层池(fault-related ponds),因此,当生长断层变得活跃时,重力流砂体被生长断层下坡面捕获,导致砂体呈带状在断层池内分布(图5)。

3.1.5 按沉积等级分类

等级分类方案不同于按沉积成因或按扇体形态的分类方案,其核心是在于将复杂的深海浊积体进行简单化处理。如Mutti^[85]等(1987)提出按典型砂体厚度和沉积持续时间将浊积系统划分为5个级次;Ghosh^[86]等(1993)将水道复合体划分为5个级次;Pickering^[87]等(1995)根据层序界面将深海浊积体划分为7个级次;Gardner^[88]等(2003)将水道-朵叶体过渡带划分为4个级次;因此沉积等级分类方案本质上是一种构型解剖方案。随着深水沉积研究越来越精细化,目前已经设计了许多等级分类方案来描述深海沉积结构,这些分类方案之间存在着一定的相似性和关联性,然而,将众多的等级分类方案结合起来建立通用的深海沉积等级分类标准仍存在着许多困难^[89]。

以上分类均只考虑单一因素对湖相重力流的控制作用,都是以不同研究需求为目标提出的分类方案,优点是在勘探开发前期,能够明确判别湖相重力流类型,分类方案简便快捷。如前文所述,湖相重力流较海相重力流控制因素多样,湖底扇沉积的砂体分布和沉积模式受多因素控制。并且随着勘探开发的精细化发展,或针对海上油田井资料较少的情况,单一因素分类方案已不能满足目前需求,因此需要一种综合多因素的湖相重力流沉积分类方案。

3.2 多因素综合分类方案及其沉积构型模式

根据单一因素的湖相重力流分类具有一定的关联性,如物源供给和坡度与湖底扇发育位置具有成因联系,构造活动强弱导致了湖相重力流触发机制的差异,而气候又可控制流量进而影响洪水强弱等。通过系统分析不同湖相重力流的沉积特征和沉积模式,包括油田实例^[90-93]和露头实例^[94-96],本文总结了一套以成因机制和主控因素主导的湖相重力流沉积分类方案,以期为今后的湖相重力流分类提供指导作用。

将重力流划分为洪水型和滑塌型、已成为不争的事实,但目前发现还存在洪水-滑塌共存型重力流,如鄂尔多斯盆地延长组^[29]、加拿大不列颠哥伦比亚省中东部Cariboo山脉Windermere Supergroup Isaac组露

头^[95]。因此本分类方案将湖相重力流分为洪水型、滑塌型、以及洪水-滑塌共存型3大类,继而根据不同主控因素划分为7亚类,其中洪水型根据物源组成和坡度分为缓坡富砂型、缓坡砂泥混合型、缓坡富泥型、陡坡富砂型以及陡坡砂泥混合型5类,滑塌型根据盆缘背景划分为挠曲滑塌型和断控滑塌型2类,而洪水-滑塌共存型本质上是上述7亚类之间的组合特征,因此不再细分亚类(图6)。

缓坡富砂洪水型重力流坡度相对较缓、物源供给以砂质组分为主(砂含量一般不少于70%),该类型重力流发育限制性水道-朵叶系统,水道较平直,朵叶呈扇状,单一朵叶体规模较大,横向分布范围广;缓坡砂泥混合洪水型重力流物源供给砂泥组分较均衡(30%<砂含量<70%),水道弯曲度中等,但总体较平直,易发生摆动,侧向迁移程度增强,朵叶体呈现花瓣状,单一朵叶体规模相对较小;缓坡富泥洪水型重力流物源供给泥质组分为主(砂含量一般不高于30%),水道摆动幅度较大,朵叶体不发育或很小,水道末端难以形成大规模扇体,可见薄层席状砂。陡坡富砂洪水型重力流坡度较陡、物源供给以砂质组分为主(砂含量不低于70%),砂岩粒度较粗,易在斜坡带形成长宽比较大的扇体,水道易分叉呈辫状水道体系,砂体连片性好;陡坡砂泥混合洪水型重力流物源供给砂泥组分较均衡(砂含量不高于30%不低于70%),平行层理和波纹状层理多见,水道发育稳定,呈孤立式分布,朵叶体尾部发育低密度浊流沉积。挠曲滑塌型重力流主要发育在具有挠曲坡折的盆缘背景下,不具有水道和完整扇体结构,滑塌体中火焰状构造、包卷层理发育,近源至远源通常发育滑动-滑塌-砂质碎屑流-浊流的沉积序列;断控滑塌型重力流主要发育在受断层控制的盆缘背景下,滑塌体中发育微断层,沉积物常沿断层分布,砂质碎屑流和浊流相对不发育。洪水-滑塌共存型重力流中洪水型和滑塌型占比相对均衡,体现出水道和滑塌体垂向叠置或侧向拼接的特征,根据不同构造特征和物源供给条件,可以是上述7亚类之间的不同组合。

该分类方案是基于重力流触发机制和主控因素提出的,可为重力流沉积勘探和开发初期提供沉积模式指导,为有利区预测和探井井位优选提供地质依据。然而,重力流的形成演化和砂体分布模式具有时变性,但本分类方案并未涉及,并且随着井网密度的增大,沉积模式也会相应改变。因此,在重力流流动机制上或在成熟开发区块内,该分类方案仍存在一定的局限性,所以,建立一套兼顾成因机理和砂体形态的分类

成因机制	主控因素	分类	沉积模式			
洪水型	坡度 物源组成	缓坡富砂型				
		缓坡砂泥混合型				
		缓坡富泥型	缓坡富砂型 鄂尔多斯盆地庆城油田长7 ₂ 段	缓坡砂泥混合型 鄂尔多斯盆地庆城油田长7 ₃ 段	缓坡富泥型 松辽盆地齐家-古龙地区嫩1段	
		陡坡富砂型				
		陡坡砂泥混合型	陡坡富砂型 下刚果盆地A区块白垩系Pointe Indienne组	陡坡砂泥混合型 北部湾盆地福山凹陷西部流2段		
滑塌型	盆缘背景	挠曲滑塌型				
		断控滑塌型	挠曲滑塌型 北部湾盆地福山凹陷东部流2段	断控滑塌型 渤海湾盆地东营凹陷沙三中亚段		
洪水-滑塌共存型	坡度 物源组成 盆缘背景	某一区域内同时发育洪水型和滑塌型的共存体，可以是上述7亚类中任意类型的复合特征				

河流
 三角洲
 泛滥平原
 河道
 水道
 朵叶体
 席状砂
 湖泊
 滑动体

滑塌体
 辫状水道
 溢岸沉积
 浊流沉积
 砂质碎屑流
 似碎屑流水道
 断层

图 6 综合沉积成因和主控因素的湖相重力流分类方案

Fig. 6 Lacustrine gravity flow classification scheme combining sedimentary genesis and controlling factors

方案显得尤为重要。

4 结论与展望

(1)断陷湖盆构造活动性强、地形坡度大、碎屑物质供给充足、湖盆水体深度大，相比坳陷湖盆更易形成重力流沉积；其中陡坡带距离物源区近，沉积相带

较窄，易在斜坡处形成近岸水下扇；缓坡带距离物源区远，通常是洪水触发所导致的重力流，易在深水区形成扇体结构。坳陷湖盆中不同构造区的构造活动基本稳定，由洪水触发的重力流沉积规模大于断陷湖盆，除洪水作用外，由地震等因素诱发的滑塌型重力流也大量发育，导致洪水-滑塌共存的重力流沉积特征。

(2)陆相湖盆相较海相盆地具有规模较小、水体较

浅、构造活动强烈等特点,导致重力流沉积控制因素多样,并且湖底扇的沉积特征和沉积模式往往受多因素共同控制。其中物源区性质,坡度、汇水盆地特征是最主要控制湖底扇沉积砂体分布模式的影响因素,即“源-渠-汇”系统。因此“源-渠-汇”系统控制下的湖相重力流砂体形成演化过程及其分布规律具有广阔的探索前景。

(3)系统总结了一套湖相重力流分类方案,该方案既考虑重力流成因机制又考虑不同成因的主控因素,将湖相重力流分为3大类7亚类,具体包括洪水型(缓坡富砂型、缓坡砂泥混合型、缓坡富泥型、陡坡富砂型、陡坡砂泥混合型)、滑塌型(挠曲滑塌型、断控滑塌型)以及洪水-滑塌共存型。

(4)湖相重力流作为一种十分复杂的沉积体系,在术语定义、沉积动力学机制、形成演化过程及分类方

案方面尚存在一些问题有待进一步加强。i)沉积物重力流分类方案尚需完善,关于高密度浊流和碎屑流之间的区别还存在争议,不同沉积物特征、沉积物支撑机理、流体状态以及最终的砂体分布形态之间的联系尚未系统建立。ii)水下沉积物搬运过程研究有待加强,沉积物重力流从开始启动、搬运到沉积的全过程中,存在流体之间的转化,以往研究忽略了搬运过程的流体转化,笼统的将岩性突变界面作为流体转化的识别标志,因此需要加强“源-渠-汇”系统分析方法。iii)需加强沉积模拟实验研究,目前国外针对沉积物重力流的水槽实验和数值模拟已取得了大量成果,但国内针对重力流的模拟实验相对薄弱,特别是针对沉积物的沉降过程模拟和流体流态转化模拟几乎还是空白,一定程度上限制了深水重力流沉积理论的发展。

参考文献

- [1] 郭成贤. 我国深水异地沉积研究三十年[J]. 古地理学报, 2000, 2(1): 1-10. [GUO C X. The thirty-year study of deep-water allogene deposits in China[J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(1): 1-10.]
- [2] 万晓龙, 刘瑞璟, 时建超, 等. 基于地震属性智能融合的湖相重力流沉积致密砂岩储层预测[J]. 石油科学通报, 2023, 8(01): 1-11. [WAN X L, LIU R J, SHI J C, et al. Prediction of tight sandstone of lacustrine gravity-flow reservoirs using intelligent fusion of seismic attributes[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(01): 1-11.]
- [3] 付金华, 邓秀芹, 张晓磊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂岩与致密油的关系[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 624-634. [FU J H, DENG X Q, ZHANG X L, et al. Relationship between deep-water sandstone and tight oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5), 624-634.]
- [4] 付锁堂, 邓秀芹, 庞锦莲. 晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1081-1089. [FU S T, DENG X Q, PANG J L. Characteristics and mechanism of thick sand-body of Yanchang Formation at the centre of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1081-1089.]
- [5] 张庆石, 张革, 陈彬滔, 等. 松辽盆地坳陷期湖底扇沉积特征与分布规律——以英台地区青山口组为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 318-325. [ZHANG Q S, ZHANG G, CHEN B T, et al. Deposition characteristics and distribution pattern of sublacustrine fan in Qingshankou Formation, Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3): 318-325.]
- [6] 潘树新, 刘化清, ZAVALA C, 等. 大型坳陷湖盆异重流成因的水道—湖底扇系统——以松辽盆地白垩系嫩江组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 860-870. [PAN S X, LIU H Q, ZAVALA C, et al. Sublacustrine hyperpycnal channel-fan system in a large depression basin: A case study of Nen 1 Member, Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 860-870.]
- [7] 鲜本忠, 万锦峰, 姜在兴, 等. 断陷湖盆洼陷带重力流沉积特征与模式: 以南堡凹陷东部东营组为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 121-135. [XIAN B Z, WAN J F, JIANG Z X, et al. Sedimentary characteristics and model of gravity flow deposition in the depressed belt of rift lacustrine basin: A case study from Dongying Formation in Nanpu Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 121-135.]
- [8] 蒲秀刚, 周立宏, 韩文中, 等. 歧口凹陷沙一下亚段斜坡区重力流沉积与致密油勘探[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 138-149. [PU X G, ZHOU L H, HAN W Z, et al. Gravity flow sedimentation and tight oil exploration in lower first member of Shahejie Formation in slope area of Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 138-149.]
- [9] 刘化清, 洪忠, 张晶, 等. 断陷湖盆重力流水道地震沉积学研究——以歧南地区沙一段为例[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(4): 784-794. [LIU H Q, HONG Z, ZHANG J, et al. Seismic sedimentology research on fault-depressed lacustrine basin gravity flow channels of Oilocene Es₁ in Qi'nan Area, Qikou Sag[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(4): 784-794.]
- [10] KUENEN P H AND MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. The Journal of Geology, 1950, 58(2): 91-127.

- [11] WALKER R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans—models for exploration for stratigraphic traps [J]. AAPG Bulletin, 1978, 62: 932–966.
- [12] EL-GAWAD S M A, PIRMEZ C, CANTELLI A, et al. 3-D numerical simulation of turbidity currents in submarine canyons off the Niger Delta[J]. Marine Geology, 2012, 326–328: 55–66.
- [13] 龚承林, 刘力, 邵大力, 等. 晚中新世以来孟加拉—尼科巴扇跷跷板式沉积转换及其源—汇成因机制[J]. 地学前缘, 2022, 29(4): 25–41. [GONG C L, LIU L, SHAO D L, et al. Depositional patterns of the Bengal-Nicobar fan system since the Late Miocene: Seesaw-like stepwise changes and the source-sink model[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(4): 25–41.]
- [14] 张佳佳, 吴胜和, 王瑞峰, 等. 东非鲁伍马盆地深水X气藏海底扇储层构型研究: 重力流—底流交互作用的指示意义[J]. 古地理学报, 2023, 25(1): 163–179. [ZHANG J J, WU S H, WANG R F, et al. Submarine-fan reservoir architecture of deepwater gasfield X in Rovuma Basin offshore east Africa: Insights for the interaction between sediment gravity flows and bottom currents[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(1): 163–179.]
- [15] 孙枢, 李继亮. 我国浊流与其他重力流沉积研究进展概况和发展方向问题当议[J]. 沉积学报, 1984, 2(4): 1–7. [SUN S and LI J L. Researches on turbidity and other gravity flow sedimentation in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(4): 1–7.]
- [16] 何起祥, 刘招君, 王东坡, 等. 湖泊相浊积岩的主要特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 1984, 2(4): 33–46. [HE Q X, LIU Z J, WANG D P, et al. Characteristics of lacustrine turbidites and their tectonic significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(4): 33–46.]
- [17] 赖婉琦, 顾家裕. 渤海湾含油气盆地中的浊积岩[J]. 沉积学报, 1984, 2(4): 47–57. [LAI W Q and GU J Y. Turbidity fan in the oil and gas-bearing basin in Bohai Bay[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(4): 47–57.]
- [18] 赵澄林, 刘孟慧, 纪有亮. 东濮凹陷下第三系碎屑岩沉积体系与成岩作用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. [ZHAO C L, LIU M H, JI Y L. Depositional system and diagenesis of Lower Tertiary clastic rocks in Dongpu Depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.]
- [19] 李文厚, 邵磊, 魏红红, 等. 西北地区湖相浊流沉积[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2001, 31(1): 57–62. [LI W H, SHAO L, WEI H H, et al. Turbidity current deposits of lake facies in northwestern China[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2001, 31(1): 57–62.]
- [20] 刘宪斌, 万晓樵, 林金暹, 等. 陆相浊流沉积体系与油气[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 61–66. [LIU X B, WAN Y Q, LIN J C, et al. Continental turbidite deposition system and hydrocarbon[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(1): 61–66.]
- [21] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 深水重力流类型、沉积特征及成因机制——以济阳拗陷沙河街组三段中亚段为例[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1048–1059. [TANG T, CAO Y C, WANG Y Z, et al. Types, sedimentary characteristics and genetic mechanisms of deep-water gravity flow: A case study of middle submember in Member 3 of Shahejie Formation in Jiyang Depression[J]. Acta Petroli Sinica, 2015, 36(9): 1048–1059.]
- [22] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 10–20. [YANG R C, JIN Z J, SUN D S, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the late triassic lacustrine ordos basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 10–20.]
- [23] 蒋恕, 王浩, 郭涛, 等. 渤海湾盆地辽东湾拗陷盆中隆起缓坡带重力流沉积形态及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 823–832. [JIANG S, WANG H, GUO T et al. Geomorphology of gravity flow deposits in the gentle slope zone of intra-basinal high in the Liaodong Bay Depression, Bohai Bay Basin and its controlling factors[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 823–832.]
- [24] FIROOZABADI B, AFSHIN H, BAGHERPOUR A. Experimental investigation of turbulence specifications of turbidity currents[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2010, 3(1): 63–73.
- [25] KANE I A, MCCAFFREY W D, PEAKALL J, et al. Submarine channel levee shape and sediment waves from physical experiments[J]. Sedimentary Geology, 2010, 223(1–2): 75–85.
- [26] 贺治国, 林挺, 赵亮, 等. 异重流在层结与非层结水体中沿斜坡运动的实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(6): 570–578. [HE Z G, LIN T, ZHAO L, et al. Experiments on gravity currents down a ramp in unstratified and linearly stratified salt water environments[J]. SciSin: Tech, 2016, 46(6): 570–578.]
- [27] MARR J G, HARFF P A, SHANMUGAM G, et al. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: The role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures[J]. Geological Society of America Bulletin, 2001, 113(11): 1377–1386.
- [28] FELIX M, PEAKALL J. Transformation of debris flows into turbidity currents: Mechanisms inferred from laboratory experiments[J]. Sedimentology, 2006, 53(1): 107–123.
- [29] 刘芬, 朱筱敏, 李洋, 等. 鄂尔多斯盆地西南部延长组重力流沉积特征及相模式[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 577–588. [LIU F, ZHU X M, LI Y, et al. Sedimentary characteristics and facies model of gravity flow deposits of Late Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 577–588.]
- [30] 李相博, 刘化清, 潘树新等. 中国湖相沉积物重力流研究的过去、现在与未来[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 905–921. [LI X B, LIU H Q, PAN S X, et al. The past, present and future of research on deep-water sedimentary gravity flow in lake basins of China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 905–921.]

- [31] 王家豪, 王华, 肖敦清, 等. 陆相断陷湖盆异重流与滑塌型重力流沉积鉴别[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 392–402+411. [WANG J H, WANG H, XIAO D Q, et al. Differentiation between hyperpycnal flow deposition and slump-induced gravity flow deposition in terrestrial rifted lacustrine basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 392–402+411.]
- [32] FOREL F A. Les ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires[J]. Gauthier-Villars, 1885: 725–728.
- [33] FOREL, FRANÇOIS-ALPHONSE. Le ravin sous-lacustre du Rhône dans le lac Léman[J]. Impr. L. Corbaz, 1887.
- [34] MILNE J. SUB-OCEANIC CHANGES[J]. *The Geographical Journal*, 1897, 10(2): 129–146.
- [35] BATES C C. Rational theory of delta formation[J]. *AAPG Bulletin*, 1953, 37(9): 2119–2162.
- [36] BAGNOLD R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1954, 225(1160): 49–63.
- [37] CROWELL J C. Origin of pebbly mudstones [J]. *GSA Bulletin*, 1957, 68: 993–1009.
- [38] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier, 1962.
- [39] NORMARK W R. Growth patterns of deep-sea fans[J]. *AAPG Bulletin*, 1970, 54: 2170–2195.
- [40] MUTTI E, RICCI L F. Turbidites of the northern Apennines: introduction to facies analysis (English translation by Nilsen, T. H., 1978) [J]. *International Geology Review*, 1972, 20: 125–166.
- [41] LOWE D R. Sediment gravity flows: II. depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52: 279–297.
- [42] SHANMUGAM G, MOIOLA R J. Submarine fan models problems and solutions. In: Bouma, A. H., Normark, W. R., Barnes, N. E. (Eds.), *Submarine fans and related turbidite systems* [M]. New York: Springer-Verlag, 1985.
- [43] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents, are they sandy debris flows [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66: 2–10.
- [44] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): Deep-water processes and facies models: A critical perspective [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17: 285–342.
- [45] SHANMUGAM G. Ten turbidite myths [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 58: 311–341.
- [46] 操应长, 金杰华, 刘海宁, 等. 中国东部断陷湖盆深水重力流沉积及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 247–257. [CAO Y C, JIN J H, LIU H N, et al. Deep-water gravity flow deposits in a lacustrine rift basin and their oil and gas geological significance in eastern China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 247–257.]
- [47] 鲜本忠, 陈鹏, 吴千然, 等. 湖相重力流沉积与油气勘探的特殊性与规律性[C]// 第十六届全国古地理学及沉积学学术会议. 西北大学, 西安, 中国, 2021. [XIAN B Z, CHEN P, WU Q R, et al. The particularity and regularity of lacustrine gravity flow deposition and oil and gas exploration[C]// The 16th National Conference on Palaeogeography and Sedimentology. Northwest University, Xi'an, China, 2021.]
- [48] MUTTI E, BERNOULLI D, LUCCHI F R, et al. Turbidites and turbidity currents from Alpine ‘flysch’ to the exploration of continental margins[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(1): 267–318.
- [49] 胡孝林, 刘新颖, 刘琼, 等. 深水沉积研究进展及前缘问题[J]. 中国海上油气, 2015, 27(1): 10–18. [HU X L, LIU X Y, LIU Q, et al. Advances in research on deep water deposition and their frontier problems[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(1): 10–18.]
- [50] 杨田, 操应长, 田景春. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 88–111. [YANG T, CAO Y C, TIAN J C. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 88–111.]
- [51] 郭彦英, 黄河清. 海底浊流在坡道转换处的流动及沉积的数值模拟[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 994–1000. [GUO Y Y, HUANG H Q. Numerical simulation of the flow and deposition of turbidity currents with different slope changes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 994–1000.]
- [52] 季雪瓜, 陶丽云, 黄河清. 突然释放型浊流在不同坡折渠道中的流动与沉积[J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 730–738. [JI X G, TAO L Y, HUANG H Q. Numerical simulation of flow and deposition of sudden release turbidity on different slope breaks[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(3): 730–738.]
- [53] 田荣恒, 鲜本忠, 晁储志, 等. 湖相重力流水道沉积特征与沉积模式: 以鄂尔多斯盆地瑶曲铁路桥剖面三叠系延长组为例[J]. 古地理学报, 2021, 23(5): 967–982. [TIAN R H, XIAN B Z, CHAO C Z, et al. Sedimentary characteristics and model of lacustrine gravity flow channels: A case study of the Triassic Yanchang Formation of Yaoqu railway-bridge section in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(5): 967–982.]
- [54] MOHRIG D, ELLIS C, PARKER G, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998, 110(3): 387–394.
- [55] TALLING P J, PAULL C K, PIPER D J W. How are subaqueous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active flows[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 125: 244–287.
- [56] MUTTI E, TINTERRI R, REMACHA E, et al. An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective[J]. *American Association Petroleum Geology Continuing Education Course Note Series*, 1999, 39: 1–61.

- [57] TALLING P J, AMY L A, WYNN R B, et al. Beds comprising debrite sandwiched within co-genetic turbidite: origin and widespread occurrence in distal depositional environments[J]. *Sedimentology*, 2004, 51(1): 163–194.
- [58] HAUGHTON P, DAVIS C, MCCAFFREY W, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits-Classification, origin and significance[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1900–1918.
- [59] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 超临界沉积物重力流形成演化及特征[J]. *石油学报*, 2017, 38(6): 607–621. [CAO Y C, YANG T, WANG Y Z, et al. Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity flow[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(6): 607–621.]
- [60] CARTIGNY M J B, POSTMA G, BERG J H V D, et al. A comparative study of sediment waves and cyclic steps based on geometries, internal structures and numerical modeling[J]. *Marine Geology*, 2011, 280(1–4): 40–56.
- [61] SYMONS W O, SUMNER E J, TALLING P J et al. Large-scale sediment waves and scours on the modern seafloor and their implications for the prevalence of supercritical flows[J]. *Marine Geology*, 2016, 371: 130–148.
- [62] DIETRICH P, GHIENNE J F, NORMANDEAU A, et al. Up-slope migrating bedforms in a proglacial sandur delta: Cyclic steps from river-derived underflows?[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(2): 113–129.
- [63] CARTIGNY M J B, VENTRA D, POSTMA G, et al. Morphodynamics and sedimentary structures of bedforms under supercritical-flow conditions: New insights from flume experiments[J]. *Sedimentology: Journal of the International Association of Sedimentologists*, 2014, 61(3): 712–748.
- [64] KNELLER B C, BRANNEY M J. Sustained high - density turbidity currents and the deposition of thick massive sands[J]. *Sedimentology*, 1995, 42(4): 607–616.
- [65] MALARKEY J, BAAS J H, HOPE J A, et al. The pervasive role of biological cohesion in bedform development[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6257.
- [66] BAAS J H, BEST J L, PEAKALL J. Predicting bedforms and primary current stratification in cohesive mixtures of mud and sand[J]. *Journal of the Geological Society*, 2016, 173(1): 12–45.
- [67] BAKER M L, BAAS J H, MALARKEY J, et al. The effect of clay type on the properties of cohesive sediment gravity flows and their deposits[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(11): 1176–1195.
- [68] HAUGHTON P D W, BARKER S P, MCCAFFREY W D. ‘Linked’ debrites in sand-rich turbidite systems-origin and significance[J]. *Sedimentology*, 2003, 50(3): 459–482.
- [69] 裴羽, 何幼斌, 李华, 等. 高密度浊流和砂质碎屑流关系的探讨[J]. *地质论评*, 2015, 61(6): 1281–1292. [PEI Y, HE Y B, LI H, et al. Discuss about relationship between high-density turbidity current and sandy debris flow[J]. *Geological Review*, 2015, 61(6): 1281–1292.]
- [70] ZAVALA C, ARCURI M. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: Origin and distinctive characteristics[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 337: 36–54.
- [71] HELLAND-HANSEN W, SØMME T O, MARTINSEN O J, et al. Deciphering Earth’s natural hourglasses: Perspectives on source-to-sink analysis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(9): 1008–1033.
- [72] 刘建平. 湖相滑塌型与洪水型重力流沉积过程及模式—以东营凹陷始新统为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [LIU J P Depositional processes and models of slump-derived and flood-induced gravity flows in lacustrine basins: Take Eocene Dongying Depression for example[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2019.]
- [73] LIU J P, XIAN B Z, WANG J H, et al. Sedimentary architecture of a sub-lacustrine debris fan: Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 362: 66–82.
- [74] LIU E, WANG H, LI Y, et al. Sedimentary characteristics and tectonic setting of sublacustrine fans in a half-graben rift depression, Beibuwan Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 52(2): 9–21.
- [75] 杨希冰, 赵彦璞, 陆江, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷C洼湖底扇沉积特征及控制因素分析[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(1): 18–28. [YANG X B, ZHAO Y P, LU J, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of sublacustrine fans in Sag C, Weixinan Depression, Beibuwan Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(1): 18–28.]
- [76] NIU X B, YANG T, CAO Y C, et al. Characteristics and formation mechanisms of gravity-flow deposits in a lacustrine depression basin: Examples from the Late Triassic Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Ordos Basin, Central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 148: 106048.
- [77] HIZZETT J L, HUGHES CLARKE J E, SUMNER E J, et al. Which triggers produce the most erosive, frequent, and longest runout turbidity currents on Deltas?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(2): 855–863.
- [78] SHAHRZAD D J AND MATHEW G W. Dynamics of settling-driven convection beneath a sediment-laden buoyant overflow: Implications for the length-scale of deposition in lakes and the coastal ocean[J]. *Sedimentology*, 2020, 67(1): 699–720.
- [79] 赵澄林. 沉积—储层地质文集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. [ZHAO C L. Sedimentary—reservoir geology collection[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.]

- [80] 王寿庆. 扇三角洲模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993. [WANG S Q. Fan delta model[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.]
- [81] 李淳. 单家寺油田湖相斜坡扇沉积特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(2): 11–13. [LI C. Lacustrine sediment of slope fan in Shanjiashi Oil Field[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 1999, 23(2): 11–13.]
- [82] RICHARDS M, BOWMAN M. Submarine fans and related depositional systems II variability in reservoir architecture and wireline log character[J]. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15: 821–829.
- [83] 张辉, 曾小明, 黄冬梅, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷富砾型和富砂型湖底扇沉积特征差异分析[J]. 石油实验地质, 2017, 39(5): 633–639. [ZHANG H, ZENG X M, HUANG D M, et al. Differences of sedimentary characteristics of sublacustrine fans between conglomerate-rich and sand-rich types in the Weixinan Sag, Beibu Gulf Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(5): 633–639.]
- [84] PAN S X, LIU H Q, XU D N, et al. Sublacustrine gravity-induced deposits: The diversity of external geometries and origins[J]. Sedimentary Geology, 2020, 407: 105738.
- [85] MUTTI E, NORMARK W R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: Problems and concepts. In: Leggett, J K, Zuffa, G G (eds) Marine Clastic Sedimentology[M]. Dordrecht, Springer, 1987.
- [86] GHOSH B R, LOWE D R. The architecture of deep-water channel complexes, cretaceous venado sandstone member[M]. California: Sacramento Valley, 1993.
- [87] PICKERING K T, CLARK J D, SMITH R D A, et al. Architectural element analysis of turbidite systems, and selected topical problems for sand-prone deep-water systems. In: PICKERING K T, HISCOTT R N, KENYON N H, et al. (eds) Atlas of Deep Water Environments[M]. Dordrecht, Springer, 1995.
- [88] GARDNER M H, BORER J M, MELICK J J, et al. Stratigraphic process-response model for submarine channels and related features from studies of Permian Brushy Canyon outcrops, West Texas[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(6–8): 757–787.
- [89] SOPHIE C, LUCA C, MARCO P, et al. Hierarchical classifications of the sedimentary architecture of deep-marine depositional systems[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 179: 38–71.
- [90] 袁静, 钟剑辉, 宋明水, 等. 沾化凹陷孤岛西部斜坡带沙三段重力流沉积特征与源—汇体系[J]. 沉积学报, 2018, 36(3): 542–556. [YUAN J, ZHONG J H, SONG M S, et al. Depositional characteristics and source to sink systems of gravity flow of the third member of Shahejie Formation in Gudao west slope zone of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(3): 542–556.]
- [91] 李媛, 林松, 林正良, 等. 北部湾盆地福山凹陷深湖重力流成因分类、发育机制及沉积模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 323–345. [LI Y, LIN S, LIN Z L, et al. Genesis classification, development mechanism and sedimentary model of deep-lacustrine gravity flow in Fushan Sag of Beibuwan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 323–345.]
- [92] CHEN H, LIU C S, ZHANG Z M, et al. Evolution and controlling factors of the gravity flow deposits in the Miocene sequence stratigraphic framework, the Lower Congo Congo Fan Basin, West Africa[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 146–158.
- [93] 余烨, 蔡灵慧, 尹太举, 等. 湖相重力流沉积特征及沉积模式—以刚果盆地A区块白垩系 Pointe Indienne组为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(1): 34–46. [YU Y, CAI L H, YIN T J, et al. Sedimentary characteristics and depositional model of lacustrine gravity flow deposits: A case study of the Cretaceous Pointe Indienne Formation of Block A, Lower Congo Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(1): 34–46.]
- [94] 江润, 赵俊峰, 李嫒. 鄂尔多斯盆地子长地区延长组深水砂岩露头精细解剖[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(4): 491–504. [JIANG J, ZHAO J F, LI Y. Finely outcrop analysis of deep water sandstones from Yanchang Formation in Zichang area of Ordos Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(4): 491–504.]
- [95] BERGEN A L, CUNNINGHAM C M, TERLAKY V, et al. Influence of channelized-flow density structure on the stratal architecture of deep-marine levee deposits[J]. Journal of Sedimentary Research, 2022, 92: 381–403.
- [96] 黄军平, 杨田, 张艳, 等. 湖相细粒沉积岩沉积动力学机制与沉积模式—以鄂尔多斯盆地铜川地区延长组长7油层组露头为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(4): 1227–1239. [HUANG J P, YANG T, ZHANG Y, et al. Sedimentary dynamics and deposition model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: A case study of the Chang 7 Oil Member from the Yanchang Formation in the Ordos Basin, Tongchuan Area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(4): 1227–1239.]