

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.01.004

引用格式:章诚诚,方朝刚,刘桃,等. 沉积盆地洪水异重流研究进展[J].华东地质,2024,45(1):49-61.(ZHANG C C, FANG C G, LIU T, et al. Research progress on flood-triggered hyperpycnal flows in sedimentary basins[J].East China Geology, 2024, 45(1):49-61.)

沉积盆地洪水异重流研究进展

章诚诚^{1,2},方朝刚^{1,3},刘桃¹,吴通¹,邵威¹,廖圣兵¹,徐锦龙⁴

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;

2.安徽省煤田地质局勘查研究院,安徽 合肥 230088;

3.云南大学国际河流与生态安全研究院,云南 昆明 650500;

4.安徽省地质调查院,安徽 合肥 230001)

摘要:洪水触发形成的异重流(hyperpycnal flow)是盆地中一种重要的深水重力流沉积体系,是当前沉积学研究的热点。基于大量文献调研,文章对异重流的发育条件、演化过程以及沉积特征的研究现状与进展进行了归纳和总结。异重流是由洪泛期河流携带大量沉积物颗粒从河口直接注入的,流体密度大于环境水体密度且受浮力影响小并沿盆底流动的流体。异重流的形成受到多种因素的影响,主要包括地形、气候和物源条件。异重流的演化经历了回流区、深度有限流区和潜入区,在流动过程中流量振荡频繁,但总体表现出先增强后减弱的水动力学演化特征。异重流形成的沉积产物被称为异重岩,以发育流水成因交错层理、层内冲刷接触面、异地植物碎片、逆粒序-正粒序二元结构而区别于其他重力流沉积。根据异重流沉积物的搬运负载方式,可将异重岩划分为底载成因、悬载成因和漂浮物成因 3 种主要岩性类型。异重岩的沉积特征与其能量演化过程密切相关,不同空间位置形成的沉积序列及沉积单元存在一定差异。深入研究异重流沉积有助于完善深水重力流理论,对认识地表地质过程、重建古环境以及指导油气勘探具有重要意义。今后可以从构建多种沉积模式、多因素耦合研究和多尺度观测监测等方面展开研究,为异重流沉积学发展和实际地质应用提供更准确的理论依据。

关键词:异重流;形成条件;演化过程;沉积特征

中图分类号:P53

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2024)01-049-13

作为向盆地深水区输送沉积物的一种重要地质营力,异重流是当前沉积学研究的热点,但其重要性在过去一直被低估^[1-2]。传统观点认为,河流从源区搬运的碎屑物质,随水流抵达海(湖)岸线后,因其流速迅速降低,主要在滨岸河口地区发生快速卸载和沉积。然而,越来越多的证据表明,河流在洪水期间形成的异重流可路过滨岸地区,并将大量沉积物向盆地内部运移数百公里^[3-7]。例如,1994 年地中海地区的 Var 河一次持续 18 小时的洪水异重流将大量沉积物输送到大洋,达到其年平均输沙

量的 11~14 倍,整个洪水期间搬运的陆源碎屑与其过去 20 年正常状态下的总和相当^[2]。因此,洪水异重流作为一种沉积物输送机制,在盆地深水沉积中扮演着至关重要的角色^[8-11]。

尽管上世纪 90 年代以来的研究已表明河流入海形成异重流的现象具有普遍性,但目前地质学家对异重流及其沉积产物的研究程度仍略显不足^[12-15],特别是对古代异重流沉积的报道仍然较少,许多含油气盆地的异重流沉积被误认为是河流相、三角洲相、滨岸相、陆架风暴流、深水浊流或砂

* 收稿日期:2024-02-17 修订日期:2024-03-12 责任编辑:叶海敏

基金项目:国家自然科学基金“下扬子地区奥陶纪一志留纪转折期开放型海盆古海洋氧化还原环境演变(编号:42302124)”、国家重点研发计划课题“东亚陆缘中生代构造过程及盆地形成演化(编号:2022YFF0800401)”和中国地质调查局“苏皖沿江凹陷带油气页岩气调查评价(编号:DD20221662)”项目联合资助。

第一作者简介:章诚诚,1989 生,男,高级工程师,博士,主要从事沉积地质研究工作。Email:1007557887@qq.com。

通信作者简介:方朝刚,1987 生,男,高级工程师,硕士,主要从事油气地质调查工作。Email:fangchaogang206@163.com。

质碎屑流沉积。此外,已有的异重流研究成果也尚未充分应用到古代地层研究的解释中。因此,本文拟从沉积学的角度对异重流的研究现状和相关进展进行综述,并提出今后应重视的研究方向,旨在加深人们对异重流的认识,并引起更多学者的关注。

1 异重流的概念和内涵

“异重流”一词最早可追溯到 19 世纪末。1892 年 FOREL F^[16] 在观察河流注入莱曼湖 (Lake Léman) 时首次报道了异重流的现象。20 世纪 30 年代,在水利工程领域观察到了类似的现象,如美国胡佛大坝上游发生洪水,河流携带大量泥沙沉入坝前水底,随后浑浊的洪水从大坝排水孔流出,而水库表面始终澄清。1953 年, BATES C^[3] 根据河流密度与盆地水体(湖泊或海洋)密度之间的关系,将汇入盆地的水流分为 3 种,即异轻流 (Hypopycnal Flow)、等密度流 (Homopycnal Flow) 和异重流 (Hyperpycnal Flow) (图 1),首次正式提出了异重流的概念,指从河口流出的密度大于蓄水体密度并在水下流动的流体。之后, MULDER T 和 SYVITSKI J P M^[17] 进一步修正了异重流的定义,认为异重流是由河流输入,密度大于周围水体密度、受浮力影响小、沿盆底流动的高密度流体。随着异重流相关研究的开展,基于流体中沉积物的属性和持续时间,不同学者又提出了不同的异重流分类和命名方案。例如, WRIGHT L 等^[18] 在考察黄河三角洲时,根据异重流相对密度,提出了低密度异重流和高密度异重流,且随着流量增大,低密度异重流可向高密度异重流转化。SOYINKA O A 和 SLATT R M^[19] 根据异重流沉积物砂泥比例,将异重流分为砂质异重流和泥质异重流。ZAVALA C 等^[15] 按照时间长短,将异重流分为短期性异重流(几小时)和长期性异重流(几周至几个月)。另外,20 世纪 80 年代,我国学者在研究陆相断陷湖盆沉积体系中提出了“洪水型湖底扇”^[20-21] 的概念,其与异重流沉积的特征颇为相似。

按照沉积物供源和触发机制,异重流又称为洪水型重力流^[22],强调的是其由洪水期河口直接注入,不需要沉积物的前期积累及地震、火山、风暴等触发机制,具有较高的密度和持续性,与盆内沉积物滑塌再搬运形成的浊流之间存在一定的差异。

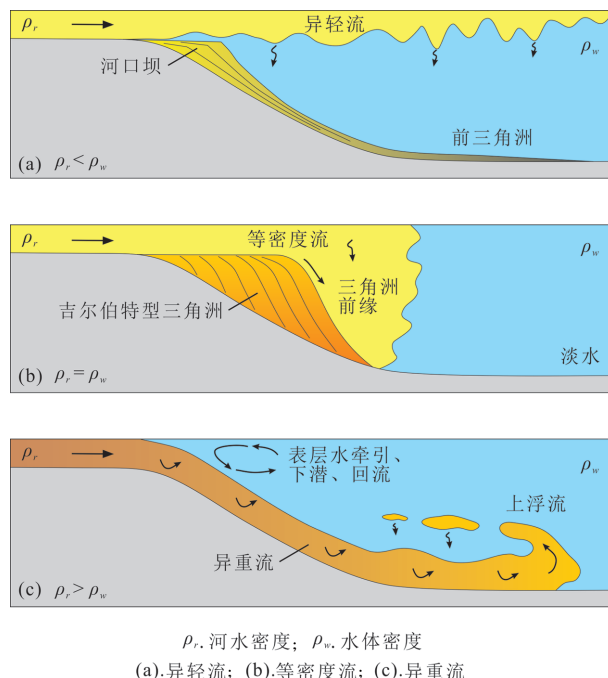


图 1 进入汇水盆地的不同密度流体的类型(据文献[3]修改)

Fig. 1 Types of flows corresponding to density differences between the effluent and the catchment basin(modified from reference [3])

MULDER T 等^[10,23] 在研究 Var 深水扇异重流沉积物时,通过计算获得搬运沉积物的流体雷诺数,发现沉积物颗粒主要靠流体湍动支撑,因而将异重流描述为“一种准稳态的浊流”。但这种看法随后被认为并不妥当,因为在其他一些实际观察中,异重流沉积包含粗粒砾岩,难以用浊流的支撑机制来解释^[11]。因此,虽然异重流是沉积物重力流的一种,但重力流不一定是异重流,盆内生成的沉积物重力流,如块体流、碎屑流、风暴流及对流不稳定产生的浊流,都不是真正的异重流^[13]。

2 异重流的形成条件

研究表明,在自然界中,异重流发育较为普遍,并能携带碎屑物质长距离向深水区运移。例如,现代海底观测发现,在全球 147 条河流中,71% 的河流会在河口位置产生不同频次(每年—每千年)的异重流^[17]。有的研究显示这一比例更高,230 条现代河流中绝大部分(84%)都发育异重流^[24]。此外,流体悬浮负载的浓度对于形成异重流至关重要。例如, MULDER T 和 SYVITSKI J P M^[17] 的理论计

算表明,海相环境中形成异重流的临界沉积物浓度达 $35\sim 43\text{ kg/m}^3$ 时,才能克服海水的阻滞力,而随海水密度变小,该临界值还能进一步降低。PARSONS J D 等^[13]基于实验研究证明,沉积物的重新聚集作用(沉积物对流、絮凝效应等)可导致低浓度的异轻流向异重流转变,因此在考虑对流沉降的情况下,沉积物浓度只需达到 5 kg/m^3 即可形成异重流。相对于海相环境,湖泊异重流发生频次更高,且在较小的体积浓度下就能形成。研究表明,在淡水湖盆中,由于湖水密度与河水密度相差不大,河流携带陆源碎屑物质浓度只需达到 1 kg/m^3 就可形成异重流^[2]。

通常异重流最有可能是由浑浊的河流注入蓄水体后形成的,这种浑浊的河流一般与洪水形成有关。洪水的水动力强弱、裹挟沉积物的多少是导致异重流发生的关键要素^[25]。总体而言,异重流的形成主要受季节性降雨、地形坡度、构造活动强度、洪水的流量、物源条件、沉积物的供给等诸多因素控制^[26-31],但这些因素之间并不完全独立,有些因素具有成因上的相关性。归结起来,异重流的形成主要受控于地形、气候、物源 3 个大的方面。

2.1 地形

地形是构造活动、风化侵蚀等一系列地质作用与过程的综合结果。地形决定了物源区河流与汇水盆地的高差和坡度,影响河流的形态和大小以及搬运载荷的浓度,对异重流的形成至关重要。地形高差越大、坡度越陡,越易产生异重流,而且形成的异重流流体流速越快^[27]。相对而言,山区的近源中小型河流更易产生高密度流;平原地区的大型河流虽然携带的沉积物总量大,但因河水稀释而沉积物浓度偏低,且沉积物更多卸载在洪泛平原和水上三角洲,因而并不利于异重流发育^[2]。

2.2 气候

气候对异重流的形成起着十分重要的作用,不同的气候背景下,异重流发生的频次、持续时间长短、规模大小等均有差异。气候制约着区域的降水强度、源区的风化速率及汇水盆地湖平面高度等诸多环境条件,从而影响异重流的发生。MULDER T 等^[2]认为干旱的气候条件不利于植被生长,地表水土流失作用增强而造成沉积物浓度的增加,从而利于异重流形成。需要强调的是,干旱气候条件下,虽然单次突发性强降水易引发洪水,但累计降水量

稀少,沉积物供给有限且湖泊水体萎缩,并不是最有利于异重流发育的条件。实际上,相对于干旱气候而言,半干旱气候条件更有利于源区风化,周期性的强降水引发的季节性洪水保证了沉积物的供给,是形成异重流的理想气候条件^[31-32]。而且半干旱气候条件下,汇水盆地处于中等-偏低水位,利于增大河流与汇水盆地间的高差。此外,与气候变暖有关的冰川融化、融雪性洪水也有利于异重流发育^[26, 33]。

2.3 物源

沉积物的浓度是影响异重流形成的重要条件。如果物源区风化剥蚀可提供大量碎屑物质,则有利于异重流的形成。在物源区,除了受构造活动、地形及气候条件的影响,母岩的性质对源区风化剥蚀也十分重要。一般来说,若母岩粒度细、固结程度低,易发生侵蚀搬运且悬浮负载的浓度高,则利于异重流形成。例如,黄河上游的黄土高原提供大量的细粒泥沙,导致黄河入海口异重流频发,成为研究异重流的天然场所^[34-35]。

3 异重流的演化过程及沉积物搬运方式

在正常状态下,若河流携带沉积物浓度偏低、河水密度低于蓄水体密度,则易在蓄水体表面形成异轻流。在洪泛期,洪水作用导致河流流量增加、流速加快,其所携带的沉积物浓度增加。因洪水密度大于蓄水体密度,流体与周围水体发生分异,直接潜入水体并沿着水体底部分层流动就形成异重流。LAMB M P 等^[36-37]基于水槽实验,认为异重流的形成会经过回流区(backwater zone)、深度有限流区(depth-limited plume)及潜入区(plunging zone)的阶段性演化(图 2)。回流区是从岸线到海(湖)水所能影响到的河水范围;深度有限流区是从岸线到流体开始下潜的深度范围,该区域水体较浅,不足以形成异重流;潜入区为流体开始下潜到加速形成稳定异重流的水体深度范围^[38]。在深度有限流区,负载流体在强水动力作用下对蓄水体产生向前的推力,分离的表层流开始变得明显,分离面之下的负载流体开始下潜。当底部压力开始增大时,底部流体加速比表层流更明显。进入潜入区,流体压力继续增加,并以底流的形式流动。当达到某一平衡后,表层流速度消失,底部流体整体以一个膨大的头部和一个瘦长的体部向前运

动^[37,39],形成稳定的异重流。ZAVALA C 等^[40]对单一期次洪水形成的异重流从盆地近端到远端不同部位的演化过程进行了很好的总结:前期,随着洪水作用的增强,近端先从接受沉积转变为冲刷侵蚀,中部的沉积和侵蚀作用相对滞后;在洪水后期,由于流速下降,从近端到远端均以发生沉积作用为主。此外,也有学者利用数值模拟方法再现了流体从上游到潜入水体、最后形成异重流的全过程^[41]。值得注意的是,异重流受洪水过程控制,整体表现出先增强后减弱的水动力学演化特征。但在自然过程中,随着单期洪水流速的反复变化,不同期次、强弱不同的洪水作用叠加以及其他控制流速变化因素的影响,异重流的实际演化过程可能更为复杂^[36]。

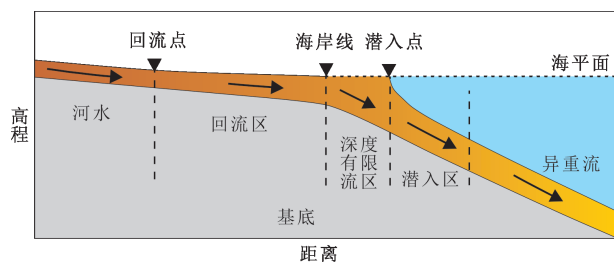


图2 异重流形成过程(据文献[36]修改)

Fig. 2 Formation process of hyperpycnal flows (modified from reference [36])

按照沉积物搬运方式,异重流通常包含底床载荷、悬浮载荷和上浮载荷三部分^[15, 42-44](图3)。一般来说,以悬浮载荷为主的异重流在海洋环境中分布更为广泛,而以底床载荷为主的异重流通常与湖泊环境中富砾水下扇、湖底扇的形成有关。异重流中的底床载荷虽然表现出牵引流的性质,但其并不是牵引流,而是受上部浊流路过产生的剪切力影响向前滚动搬运的。当异重流底床载荷逐渐减少时,整个流体表现出湍流支撑的特点。之后随着悬浮载荷沉降增加,其密度进一步降低,在流体头部会产生上浮羽流^[15, 24],这种现象主要见于海相和盐湖环境中。此外,也有研究表明异重流在流动过程中,通过聚集与侵蚀方式会发生流体性质转化^[45-48],从而使得沉积物的搬运过程复杂化,应该加以重视。

4 异重岩的沉积特征

4.1 岩相特征

异重流形成的沉积产物(沉积岩)被统称为异重岩^[2]。异重岩的岩相类型与异重流沉积物的搬运负载方式密切相关。据此,ZAVALA C 等^[15]将异重岩划分出3种岩相类型,即底床成因的B类岩相、悬载成因的S类岩相和漂浮物成因的L类岩相(图4)。

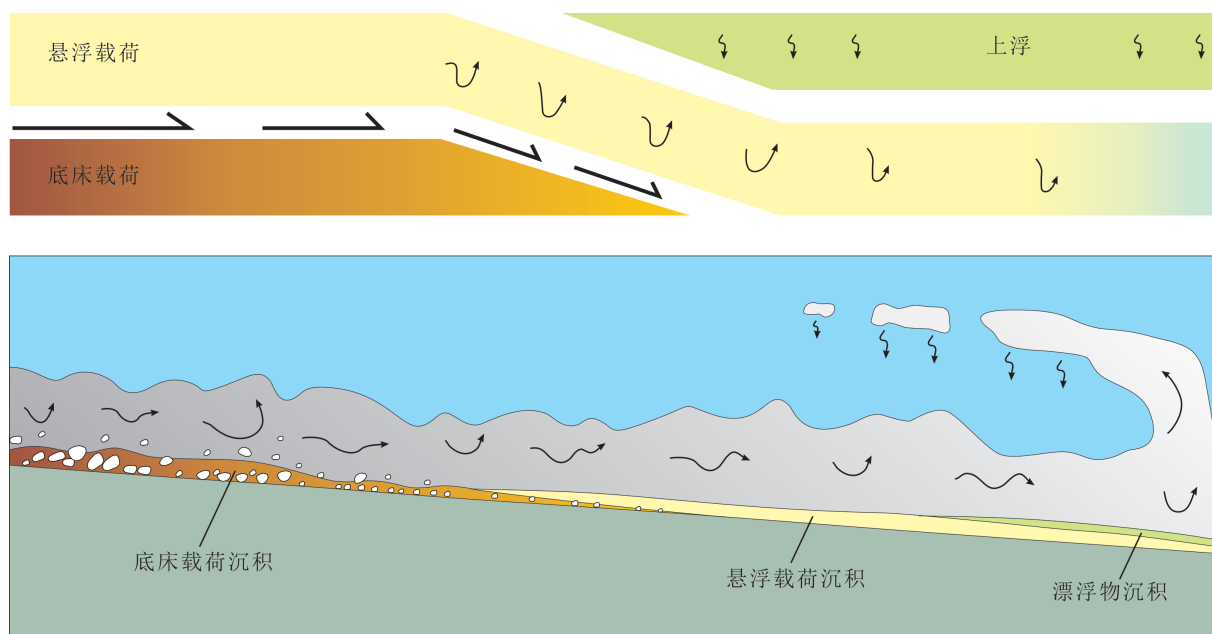


图3 异重流搬运和沉积过程(据文献[15]修改)

Fig. 3 Transport and sedimentary processes of hyperpycnal flows (modified from reference [15])

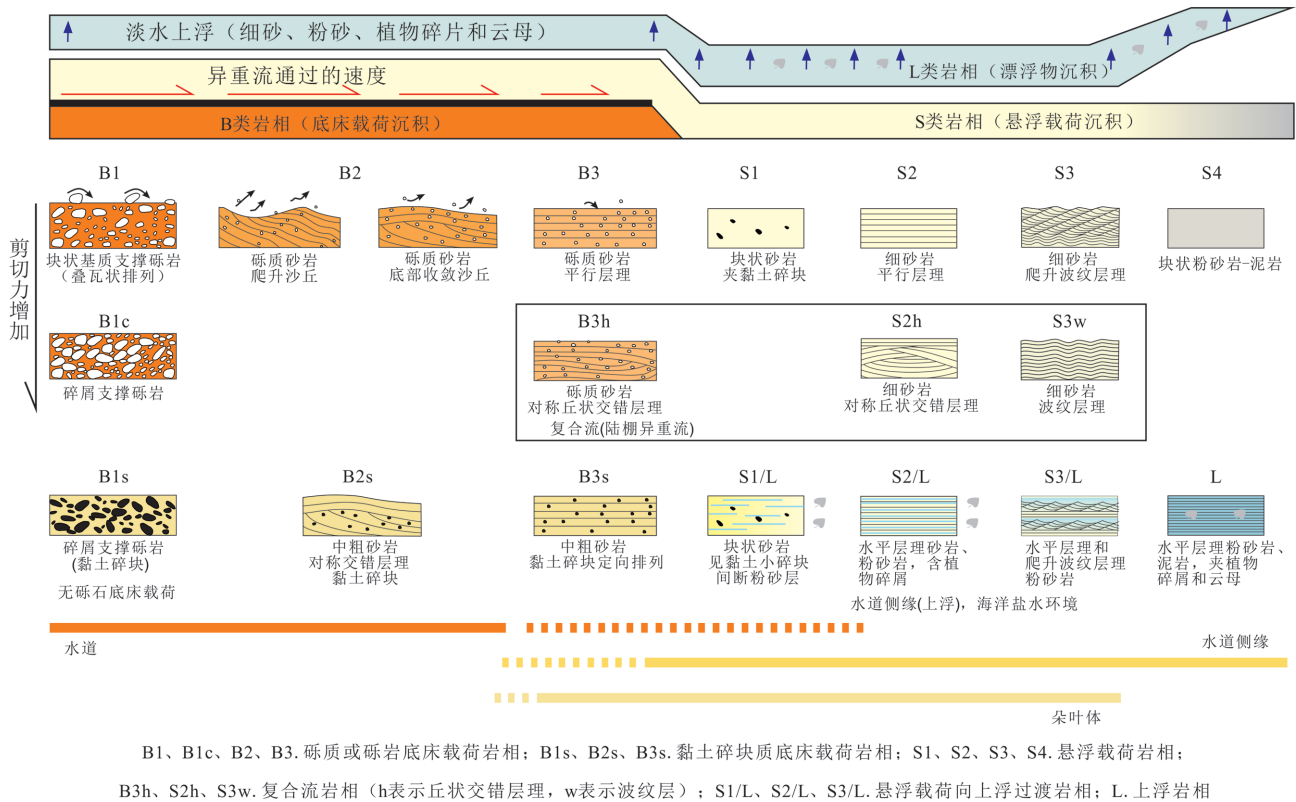


图4 异重岩的主要岩相类型(据文献[15]修改)

Fig. 4 Main lithofacies of hyperpycnites (modified from reference [15])

底床载荷通过滚动和跳跃方式搬运,沉积后主要形成细砾岩和砾质砂岩,为异重流沉积中的粗粒部分。由近源向盆地远端方向,底床载荷沉积物逐渐减少且具有粒度变细的趋势,常见的沉积构造包括块状层理、叠瓦状构造、低角度交错层理、平行层理等。其中,叠瓦状排列的粗粒碎屑(砾石或泥岩碎块)是非黏性流体的标志,对识别异重岩非常重要。

悬浮载荷是异重流沉积物最主要的搬运方式,搬运距离相对较长,悬浮颗粒重力沉降主要形成包括细砂岩和粉砂岩在内的细粒沉积岩。随着流速降低,依次发育块状砂岩、平行层理细砂岩、爬升波纹层理细砂岩、块状粉砂岩-泥岩^[49-51]。在悬载成因砂岩中,常见由陆地河流直接带入的炭屑、碳化物等植物碎片^[52-53],可区别于盆内成因的浊积岩。此外,这类砂岩中相对缺乏生物扰动构造,反映了一定的水深和水动力条件,也是鉴别异重流沉积的重要标志之一。

上浮载荷是由流体密度降低、与环境水体密度

倒置而形成的上浮羽流漂浮物。这些漂浮物在正常重力沉降作用下形成粉砂岩及黏土质岩,主要分布在异重流的边部。单层厚度一般较薄,呈毫米级,沿其层面富集大量叶片、植物碎片、云母片等。主要发育水平层理,亦可见小型重力负载构造,如火焰状构造、泄水构造等^[54]。不同期次的异重流上浮载荷沉积可形成韵律性层理,是异重岩的典型特征之一^[42]。笔者在安徽巢湖地区二叠系龙潭组底部也曾观察到异重流成因的泥质粉砂岩与粉砂质泥岩韵律性层理(图5)。其中,单一纹层的厚度较小,但横向连续性较好,延伸距离较远。

4.2 沉积序列

异重岩的沉积特征与异重流的能量演化过程息息相关。典型的异重岩沉积序列表现为一系列成对出现的洪水能量增强的逆粒序沉积单元(Ha)与洪水能量减弱的正粒序沉积单元(Hb)^[10, 19, 40, 42, 55]。在洪水发育早期,异重流能量逐渐增强,沉积物呈现反粒序特征,依次发育爬升波纹层理、交错层理、平行层理等沉积构造;洪峰过

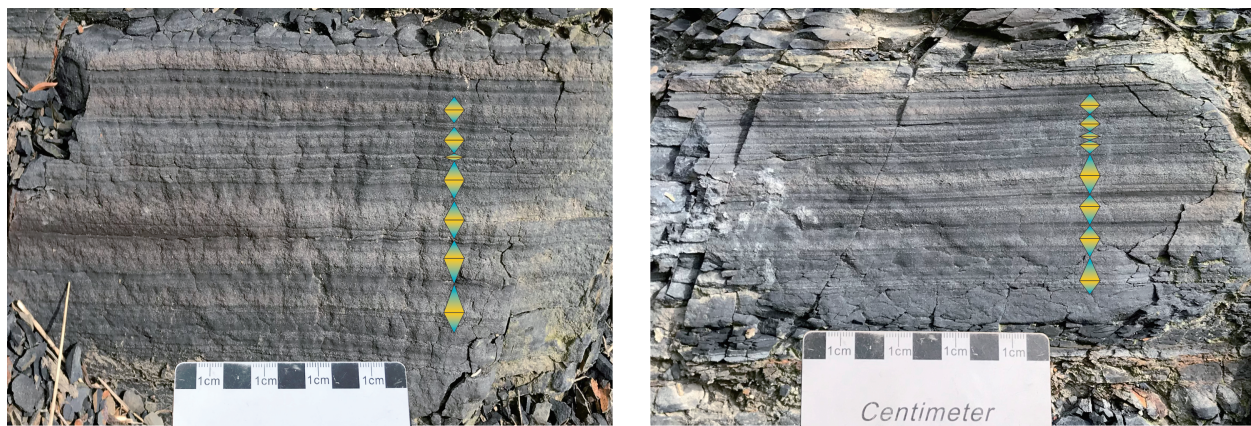


图5 安徽巢湖地区二叠系龙潭组底部泥质粉砂岩与粉砂质泥岩韵律性层理

Fig. 5 Rhythmic bedding of muddy siltstone and silty mudstone at the base of the Permian Longtan Formation in Chao-hu area, Anhui Province

后,随着洪水能量逐渐衰减,沉积物呈现正粒序特征,沉积构造序列与能量增强阶段相反。这种标准的二元结构沉积序列被认为是判断和识别异重流沉积的主要依据。

由于异重流的能量从近源到远源具有显著差异,因此,不同空间位置的异重岩沉积序列也存在一定变化^[40, 43-44](图6)。在沉积近端,洪水能量增强阶段,以侵蚀作用为主;而在洪峰过后的异重流能量下降阶段,沉积物发生卸载,大多仅发育或保存正韵律层(Hb),类似于经典的浊流沉积^[56]。沉积中部处于流体作用的过渡阶段,洪峰期间异重流能量较大,超过侵蚀下伏沉积物的临界条件,早期能量增加阶段形成的沉积物会被部分侵蚀。到能量衰减阶段,形成的正韵律层直接覆盖在早期沉积物之上,Ha与Hb之间为侵蚀接触,形成不对称的二元结构序列。在沉积远端,洪峰期异重流能量未达到对盆底沉积物造成侵蚀的临界条件,Ha与Hb之间为连续接触,形成连续接触的反-正粒序二元结构。由于自然界中异重流的能量并不是简单地单向增加或者减弱,而是表现出时间上的波动性和空间上的迟滞性^[36],因而其沉积序列可在垂向上叠加并形成多样的复合层。

4.3 沉积单元特征

异重流入盆后形成动力很强的喷射流^[57],由于洪水持续输送补给,可以长距离向前流动。因此,水道沉积单元在异重流沉积体系中扮演着关键角色(图7)。异重流水道在流动过程中表现出较强的侵蚀作用。流体的高密度和携带的颗粒物质使其

具备强大的冲刷和侵蚀能力,在水道底部可能呈现为深谷、沟槽、沟道和沉积底面的不规则形状^[58],延伸方向主要受盆底地形控制^[59-60]。随着异重流能量减弱,水道被沉积物充填,沉积物中通常包括大颗粒的砂砾沉积,形成了明显的块状层理和交错层理,反映了异重流中沉积物的分选和沉积过程中能量的变化。在流动过程中,异重流水道两侧可发育堤岸沉积,以细粒碎屑沉积为主,常见爬升波纹层理和波状层理。由于沉积物的垂向加积,堤岸沉积单元表现出一定的高度,使得水道充填后在海底形成了正向地形,控制后期水道的分布^[42]。当流体流速减小并失去了对底床的侵蚀能力后,水道末端的异重流会逐渐演化为朵叶体沉积。朵叶体平面形态呈扇形或类似扇形展布^[61],沉积物侧缘和前缘可延伸较远距离^[62-63]。其沉积物粒度偏细,主要沉积粉砂、泥质粉砂和泥,可富集陆源有机质。需要强调的是,不同“源-汇”系统条件下,异重流沉积单元特征差异较大,故并不能一概而论^[25]。

5 异重流的应用及未来研究重点

5.1 应用与意义

异重流的发现和认识,是对深水重力流理论的进一步补充和完善。异重流和盆内形成的重力流是两种不同的地质过程,两者在形成机制、流体性质、流动速度和发生地点、沉积产物等方面均有明显的差异^[64-65]。认识这些差异对于正确理解地质过程并进行环境评估以及资源勘探都具有重要的

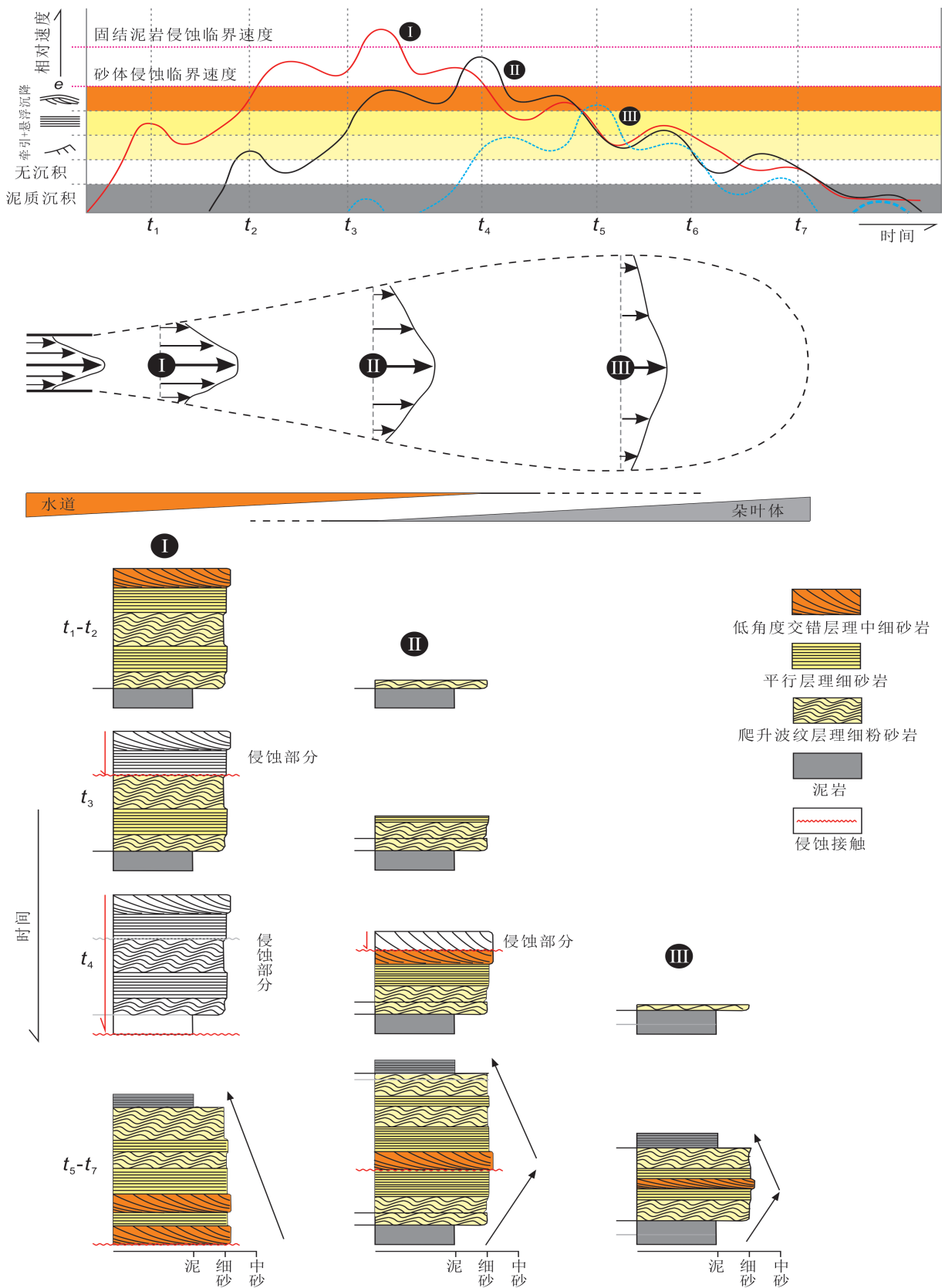
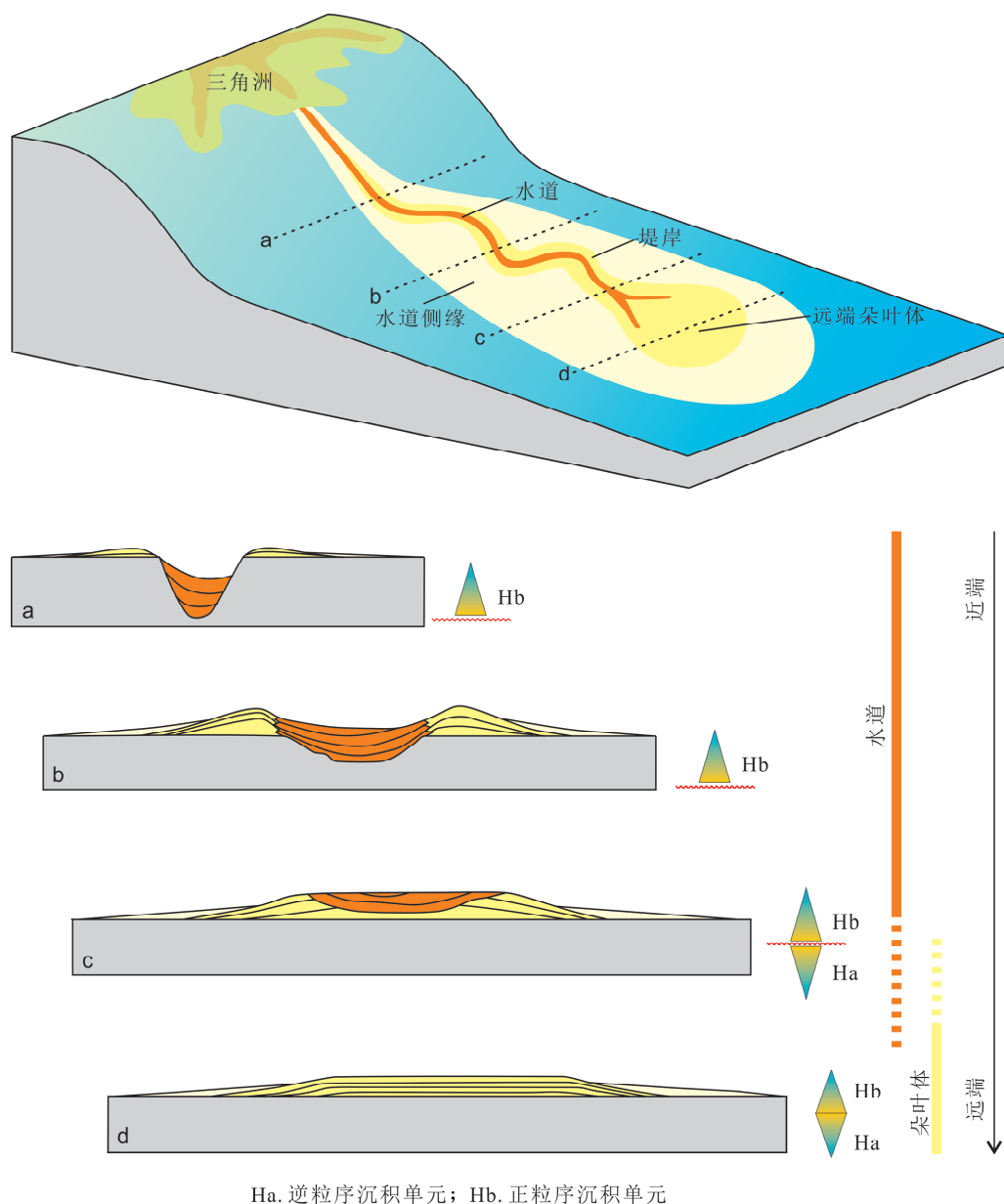


图6 异重流沉积演化过程及沉积序列(据文献[40]修改)

Fig. 6 Depositional evolution and corresponding sedimentary sequence of hyperpycnal flows (modified from reference [40])



Ha. 逆粒序沉积单元; Hb. 正粒序沉积单元

图 7 异重流沉积空间演化模式(据文献[44]修改)

Fig. 7 Spatial depositional model of hyperpycnal flows (modified from reference [44])

意义。

异重流的沉积记录有助于还原古代水体环境、气候条件和地形特征;异重流沉积物中还可能含有古代植物、动物的遗骸、有机质等,可以为重建古生态环境、认识过去气候变化和地球表面演变等提供重要地质信息。异重流与洪水作用密切相关,通过研究异重流沉积物,还可以深入了解洪水过程中沉积物的运动、沉积和分布规律,为防洪工程设计、土地规划以及防灾减灾政策的制定提供科学依据。此外,异重流的研究对于油气勘查具有特殊意义。

由于异重流能够从盆地边缘向盆地中心长距离搬运,异重流中粗粒沉积物的成熟度一般较高,砂泥比适中,其形成的厚层优质砂体可以作为油气富集的良好场所^[31, 66]。异重流亦是盆地细粒沉积物的重要来源,一方面,异重岩中的泥岩常富含有机质^[67],可以成为优质烃源岩,有利于油气的形成;另一方面,形成的细粒沉积物与深水泥页岩相伴生,形成致密油气发育的良好区带^[68]。因此,探究异重流在盆地内部的沉积特征,建立沉积模式,对于指导盆地油气资源勘探具有重要的实际意义。

5.2 未来研究重点

5.2.1 完善沉积模式和沉积理论

当前异重流沉积模式的研究还不够深入,广泛采用的“二元结构模式”是否能够全面推广仍值得商榷。实际上,海洋和湖泊等深水环境中存在着复杂的动力作用机制,它们对异重流沉积产物的形成具有一定的影响。因此,异重流在不同地质条件和沉积环境下可能呈现出多样化的沉积模式。未来的研究应该结合实际地质条件,从多个角度出发,系统研究不同构造、气候和盆地背景条件下的异重流沉积过程,构建相应的沉积模型,进一步丰富和完善异重流沉积理论。

5.2.2 多因素耦合研究

异重流的形成往往受多种因素的耦合影响,包括地形、气候、物源等。已有研究多侧重于其中的某一因素,缺乏全面考虑多因素交互影响的研究。因此,需强调多因素的耦合效应,开展综合性的系统模型研究,深入探讨地质结构、地表形态、气候变化、物源条件等因素对异重流形成的复杂影响机制。

5.2.3 多尺度观测和监测

目前,大多数异重流研究仍依赖于有限的水槽实验、数值模拟和野外地质剖面的分析,缺乏对异重流作用过程的长期、高时空分辨率的观测和监测,这使得不同时间和空间尺度上的异重流变化还缺乏全面的认识。因此,加强对异重流的多尺度观测和监测,包括利用遥感技术、传感器网络等手段,实现对异重流过程的实时监测和定量化研究,以获取更全面、准确的数据。可以预见,观测和监测技术的发展将会加深人们对异重流作用过程的认识。

6 结论

(1)异重流是一种重要的深水重力流类型。异重流的形成受多种因素控制,包括地形、气候、物源等。异重流在流动过程中总体表现出先增强后减弱的水动力学演化特征。

(2)异重流的岩性多样,包括砾岩、砂岩和泥岩。以发育流水成因交错层理、层内冲刷面、异地植物碎片、逆粒序—正粒序二元结构作为其重要的鉴别标志。空间上主要发育水道、堤岸、朵叶体等沉积单元。

(3)异重流研究对还原古代地球表面的环境条件,深入理解过去气候、水文、地貌和生态环境演

变,指导含油气盆地勘探以及防灾减灾等具有重要的科学意义与应用价值。未来异重流的研究需要跨学科、综合多尺度与多因素,更好地理解异重流的形成机制与演化过程,并构建多种沉积模式,为沉积学领域的发展和实际地质应用提供更为准确的科学依据。

参考文献

- [1] WEIMER P, SLATT R M. Introduction to the petroleum geology of deep-water settings [M]. Tulsa: AAPG, 2006: 816.
- [2] MULDER T, SYVITSKI J P M, MIGEON S, et al. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(6/8): 861-882.
- [3] BATES C. Rational theory of delta formation [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(9): 2119-2162.
- [4] GWIAZDA R, PAULL C K, USSLER III W, et al. Evidence of modern fine-grained sediment accumulation in the Monterey Fan from measurements of the pesticide DDT and its metabolites [J]. Marine Geology, 2015, 363: 125-133.
- [5] KAO S J, DAI M, SELVARAJ K, et al. Cyclone-driven deep sea injection of freshwater and heat by hyperpycnal flow in the subtropics [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37 (21): 389-400.
- [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] TALLING P J, BAKER M L, POPE E L, et al. Longest sediment flows yet measured show how major rivers connect efficiently to deep sea [J]. Nature Communications, 2022, 13: 4193.
- [8] PIPER D J W, NORMARK W R. Processes that initiate turbidity currents and their influence on turbidities: a marine geology perspective [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79: 347-362.
- [9] MULDER T, MIGEON S. Twentieth century floods recorded in the deep Mediterranean sediments [J]. Ge-

- ology, 2001, 29:1011-1014.
- [10] MULDER T, MIGEON S, SAVOYE B, et al. Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: a record of deposits from flood-generated turbidity currents? [J]. *Geo-Marine Letters*, 2001, 21: 86-93.
- [11] MULDER T, ALEXANDER J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J]. *Sedimentology*, 2001, 48: 269-299.
- [12] PLINK-BJÖRKLUND P, STEEL R J. Initiation of turbidite currents: Outcrop evidence for Eocene hyperpycnal flow turbidites [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 165(1/2): 29-52.
- [13] PARSONS J D, BUSH J, SYVITSKI J P M. Hyperpycnal plume formation from riverine outflows with small sediment concentrations [J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 465-478.
- [14] 黄学勇,高茂生,侯国华,等.莱州湾海洋沉积物粒度特征及其环境响应分析[J].*华东地质*, 2023, 44(4): 402-414.
- HUANG X Y, GAO M S, HOU G H, et al. Grain size characteristics and environmental response of marine sediments in Laizhou Bay [J]. *East China Geology*, 2023, 44(4): 402-414.
- [15] ZAVALA C, ARCURI M, MEGLIO M D, et al. A genetic facies tract for the analysis of sustained hyperpycnal flow deposits [G]//ZAVALA C, SLATT R. Sediment transfer from shelf to deep water—revisiting the delivery system. *AAPG Studies in Geology*, 2011, 61: 31-51.
- [16] FOREL F. Les ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 1881, 101 (16): 725-728.
- [17] MULDER T, SYVITSKI J P M. Turbidity current generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans [J]. *Journal of Geology*, 1995, 103(3): 285-299.
- [18] WRIGHT L, WISEMAN W, BORNHOLD B, et al. Marine dispersal and deposition of Yellow River silts by gravity-driven underflows [J]. *Nature*, 1988, 332: 629-632.
- [19] SOYINKA O A, SLATT R M. Identification and micro-stratigraphy of hyperpycnites and turbidites in Cretaceous Lewis Shale, Wyoming [J]. *Sedimentology*, 2008, 55: 1117-1133.
- [20] 赵澂林, 刘孟慧. 湖底扇模式及其在油气预测中的应用[J]. *华东石油学院学报*, 1984, 8(4): 323-334.
- ZHAO Z L, LIU M H. Facies model of the sublake-fan and its application to oil and gas exploration [J]. *Journal of Huadong Petroleum Institute*, 1984, 8(4): 323-334.
- [21] 赵国连, 赵澄林, 叶连俊. 渤海湾盆地“四扇一沟”沉积体系及其油气意义[J]. *地质力学学报*, 2005, 11(3): 245-258.
- ZHAO G L, ZHAO C L, YE L J. Sedimentary system of “four fans and one channel” in the Bohai Gulf Basin and its significance for petroleum exploration [J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, 11(3): 245-258.
- [22] ZAVALA C, ARCURI M. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: origin and distinctive characteristics [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 337: 36-54.
- [23] MULDER T, MIGEON S, SAVOYE B, et al. Reply to discussion by Shanmugam on Mulder et al. (2001, *Geo-Marine Letters* 21: 86-93) Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean. A record of deposits from flood-generated turbidity currents? [J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 22: 112-120.
- [24] MULDER T, CHAPRON E. Flood deposits in continental and marine environments: Character and significance [G]//ZAVALA C, SLATT R. Sediment transfer from shelf to deep water—revisiting the delivery system. *AAPG Studies in Geology*, 2011, 61: 1-30.
- [25] YANG T, CAO Y C, LIU K Y, et al. Gravity-flow deposits caused by different initiation processes in a deep-lake system [J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104 (7): 1463-1499.
- [26] PATTISON S J, AINSWORTH R B, HOFFMAN T A. Evidence of across shelf transport of fine-grained sediments: turbidite-filled shelf channels in the Campanian Aberdeen Member, Book Cliffs, Utah, USA [J]. *Sedimentology*, 2007, 54: 1033-1064.
- [27] ALEXANDER J AND MULDER T. Experimental quasi-steady density current [J]. *Marine Geology*, 2002, 186: 195-210.
- [28] STEVENSON C J, PEAKALL J. Effects of topography on lofting gravity flows: implications for the deposition of deep-water massive sands [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27: 1366-1378.
- [29] 伍剑波, 孙强, 张泰丽, 等. 地形起伏度与滑坡发育的相关性——以丽水市滑坡为例 [J]. *华东地质*, 2022, 43(2): 235-244.
- WU J B, SUN Q, ZHANG T L, et al. Research for the correlation between relief amplitude and landslides: a case study of Lishui City [J]. *East China Geology*,

- 2022, 43(2): 235-244.
- [30] MUTI 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: 267-318.
- [31] PETTER A L, STEEL R J. Hyperpycnal low variability and slope organization on an Eocene shelf margin, Central Basin, Spitsbergen [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90: 1451-1472.
- [32] WARRICK J A, XU J P, NOBLE M A, et al. Rapid formation of hyperpycnal sediment gravity currents offshore of a semi-arid California river [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 991-1009.
- [33] HUNEKE H, MULDER T. *Deep-sea Sediments* [M]. London: Elsevier, 2011, 46-54.
- [34] WRIGHT L D, YANG Z S, BORNHOLD B D, et al. Hyperpycnal plumes and plume fronts over the Huanghe (Yellow River) delta front [J]. *Geo-Marine Letters*, 1986, 6: 97-105.
- [35] WANG H J, BIN S, SAITO Y, et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: causes and environmental implications in its estuary [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(3/4): 302-313.
- [36] LAMB M P, MOHRIG D. Do hyperpycnal-low deposits record river-flood dynamics? [J]. *Geology*, 2009, 37: 1067-1070.
- [37] LAMB M P, MCELROY B, KOPRIVA B, et al. Linking river-flood dynamics to hyperpycnal-plume deposits: experiments, theory, and geological implications [J]. *GSA Bulletin*, 2010, 122(9/10): 1389-1400.
- [38] 余斌. 浊流和泥石流异重流初期潜入点的实验研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 27-35.
- YU B. Experimental study on the incipient plunging point of stratified flow of turbidity currents and debris flows [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 27-35.
- [39] KHAN S M, IMRAN J, BRADFORD S. Numerical modeling of hyperpycnal plume [J]. *Marine Geology*, 2005, 222/223: 193-211.
- [40] ZAVALA C, PONCE J, ARCURI M, et al. Ancient lacustrine hyperpycnites: a depositional model from a case study in the Rayoso Formation (Cretaceous) from West-Central Argentina [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76: 41-59.
- [41] KASSEM A, IMRAN J. Simulation of turbid underflow generated by the plunging of a river [J]. *Geology*, 2001, 29(7): 655-658.
- [42] ZAVALA C, 潘树新. 异重流成因和异重岩沉积特征[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(1): 1-18.
- ZAVALA C, PAN S X. Hyperpycnal flows and hyperpycnites: origin and distinctive characteristics [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(1): 1-18.
- [43] 谈明轩, 朱筱敏, 朱世发. 异重流沉积过程和沉积特征研究[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(1): 94-104.
- TAN M X, ZHU X M, ZHU S F. Research on sedimentary process and characteristics of hyperpycnal flows [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(1): 94-104.
- [44] 栾国强, 董春梅, 林承焰, 等. 异重流发育条件、演化过程及沉积特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 438-453.
- LUAN G Q, DONG C M, LIN C Y, et al. Development conditions, evolution process and depositional features of hyperpycnal flow [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 438-453.
- [45] HAUGHTON P, DAVIS C, MCCAFFREY W, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits-classification, origin and significance [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1900-1918.
- [46] TALLING P J. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models [J]. *Geosphere*, 2013, 9(3): 460-488.
- [47] TALLING P J, MASSON D G, SUMNER E J, et al. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types [J]. *Sedimentology*, 2012, 59(7): 1937-2003.
- [48] GIRARD F, GHIEFFE J, RUBINO J. Occurrence of hyperpycnal flows and hybrid event beds related to glacial outburst events in a late Ordovician Proglacial delta (Murzuq Basin, SW Libya) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82: 688-708.
- [49] ARNOTT R. Bedforms, primary structures and grain fabric in the presence of suspended sediment rain [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59: 1062-1069.
- [50] BAAS J. Conditions for formation of massive turbiditic sandstones by primary depositional processes [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 166: 293-310.
- [51] LECLAIR S. Preservation of cross-strata due to the migration of subaqueous dunes: an experimental investigation [J]. *Sedimentology*, 2002, 49: 1157-1180.
- [52] YANG T, CAO Y, WANG Y, et al. Sedimentary

- characteristics and depositional model of hyperpycnites in the gentle slope of a lacustrine rift basin: a case study from the third member of the Eocene Shahejie Formation, Bonan Sag, Bohai Bay Basin, Eastern China [J]. *Basin Research*, 2023, 35, 1590-1618.
- [53] ZAVALA C, ARCURI M, VALIENTE L. The importance of plant re-mains as diagnostic criteria for the recognition of ancient hyperpycnites [J]. *Revue de Paléobiologie*, Genève, 2012, 11: 457-469.
- [54] DUCASSOU E, MULDER T, MIGEON S, et al. Nile floods recorded in deep Mediterranean sediments [J]. *Quaternary Research*, 2008, 70:382-391.
- [55] NAKAJIMA T. Hyperpycnites deposited 700 km away from river mouths in the Central Japan Sea [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(1): 60-73.
- [56] KNELLER B, BRANNEY M. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands [J]. *Sedimentology*, 1995, 42: 607-616.
- [57] HOYAL D C J D, VAN WAGONER J C, ADAIR N L, et al. Sedimentation from jets: a depositional model for clastic deposits of all scales and environments[J]. *Search and Discovery*, 2003, 40082: 1-9.
- [58] XIAN B Z, WANG J H, GONG C L, et al. Classification and sedimentary characteristics of lacustrine hyperpycnal channels: Triassic outcrops in the south Ordos Basin, central China [J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 368: 68-82.
- [59] SINCLAIR H D, TOMASSO M. Depositional evolution of confined turbidite basins [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(4):451-456.
- [60] TONIOLO H, LAMB M P, PARKER G. Depositional turbidity currents in diapiric minibasins on the continental slope: formulation and theory [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(5): 783-797.
- [61] DOU L X, BEST J, BAO Z D, et al. The sedimentary architecture of hyperpycnites produced by transient turbulent flows in a shallow lacustrine environment [J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 411:105804.
- [62] FENG Z Q, ZHANG S, CROSS T A, et al. Lacustrine turbidite channels and fans in the Mesozoic Songliao Basin, China [J]. *Basin Research*, 2010, 22(1): 96-107.
- [63] WANG Y J, YIN T J, TANG Y, et al. Architecture characteristics of hyperpycnal deposits: insights from numerical modeling with numerical simulation platform grade [J]. *Interpretation*, 2023, 11 (1): 175-188.
- [64] SHANMUGAM G. Discussion on Mulder et al. (2001, *Geo-Marine Letters* 21: 86-93) Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean. A record of deposits from flood-generated turbidity currents? [J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 22: 108-111.
- [65] TALLING P J. On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density lows in different settings [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 155-182.
- [66] CHEN P, XIAN B Z, LI M J, et al. A giant lacustrine flood-related turbidite system in the Triassic Ordos Basin, China: Sedimentary processes and depositional architecture [J]. *Sedimentology*, 2021, 68: 3279-3306.
- [67] YOSHIDA M, YOSHIUCHI Y, HOYANAGI K. Occurrence conditions of hyperpycnal flows, and their significance for organic-matter sedimentation in a Holocene estuary, Niigata Plain, Central Japan [J]. *Island Article*, 2009, 18: 320-332.
- [68] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J].*石油学报*,2012, 33(2): 173-187.
- ZOU C N, ZHU R K, WU S T, et al. Types characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2):173-187.

Research progress on flood-triggered hyperpycnal flows in sedimentary basins

ZHANG Chengcheng^{1,2}, FANG Chaogang^{1,3}, LIU Tao¹, WU Tong¹, SHAO Wei¹,
LIAO Shengbing¹, XU Jinlong⁴

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

2. *Exploration Research Institute, Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Hefei 230088, Anhui, China;*

3. *Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China;*

4. *Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China*)

Abstract: Hyperpycnal flows triggered by floods are important deep-water gravity flow sedimentary systems in basins and are currently a hot topic in sedimentology research. Based on extensive literature review, this paper summarizes the research status and progress of hyperpycnal flows in terms of their development conditions, evolutionary processes, and sedimentary characteristics. Hyperpycnal flows are dense, formed and less affected by buoyancy during flood periods when a sediment-laden fluid plunges into the bottom of a water body and flows basinward. The formation of hyperpycnal flows is influenced by various factors, including topography, climate, and sediment sources. The evolutionary process of hyperpycnal flows involves backwater zone, depth-limited plume zone, and plunging zone, with frequent fluctuations in flow rate during flow, but overall exhibiting a hydrodynamic evolution characteristic of initial enhancement followed by attenuation. The sedimentary products formed by hyperpycnal flows are called hyperpycnites. They can be distinguished from other gravity flow deposits by their development of the typical sedimentary structures such as water causes cross-bedding, interlayer scour contact surface, allochthonous plant fragments, and the coupling of inverse and normal grading. Hyperpycnites can be divided into three lithofacies: bed load, the suspended load, and lofting, based on the sediment transport mode of the flow. The sedimentary characteristics of hyperpycnal deposits are closely related to the energy evolution process of hyperpycnal flows, and thus the characteristics of sedimentary sequences and sedimentary units formed in different spatial locations also vary. In-depth research on hyperpycnal flow sedimentation contributes to improving deep-water gravity flow theory and is of great significance for understanding surface geological processes, reconstructing ancient environments, and guiding oil and gas exploration. Future research can focus on constructing multiple sedimentary models, studying the coupling of multiple factors, and conducting multi-scale observation and monitoring to provide more accurate scientific basis for the development and practical geological applications of hyperpycnal flow sedimentology.

Key words: hyperpycnal flow; formation condition; evolutionary process; sedimentary characteristic