



吉尔伯特型三角洲沉积过程与沉积模式

侯明才, 杨田, 田景春, 蔡来星, 李晓芳, 何青, 余文强

引用本文:

侯明才, 杨田, 田景春, 蔡来星, 李晓芳, 何青, 余文强. 吉尔伯特型三角洲沉积过程与沉积模式[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1281–1294.

HOU MingCai, YANG Tian, TIAN JingChun, et al. Formation Processes and Depositional Model of Gilbert-type Deltas[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(5): 1281–1294.

相似文章推荐（请使用火狐或IE浏览器查看文章）

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

陆相湖盆大型扇三角洲沉积特征与演化规律——以准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡区三叠系百口泉组为例

Sedimentary Characteristics and Evolution Law of a Lacustrine Large-scale Fan Delta:A case study from the Triassic Baikouquan Formation on the west slope of Mahu Sag

沉积学报. 2020, 38(5): 923–932 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.089>

牛庄洼陷沙三中亚段三角洲—重力流体系沉积特征与模式

Sedimentary Characteristics and Depositional Model of Delta and Gravity Flow System of the Middle Member 3 of Shahejie Formation in Niuzhuang Sag

沉积学报. 2018, 36(2): 376–389 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.027>

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

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

沉积学报. 2018, 36(3): 542–556 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.076>

中国东部箕状断陷湖盆扇三角洲与辫状河三角洲对比研究

Contrastive Research of Fan Deltas and Braided River Deltas in Half-graben Rift Lake Basin in East China

沉积学报. 2015, 33(6): 1170–1181 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.010>

砂砾岩沉积特征分析及有利储集相带确定——以玛北斜坡区百口泉组为例

Sedimentary Characteristics of Gluteneite and Its Favourable Accumulation Facies: A case study from T1b, Mabei Slope, Junggar Basin

沉积学报. 2015, 33(6): 1235–1246 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.016>

文章编号:1000-0550(2023)05-1281-14

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.084

吉尔伯特型三角洲沉积过程与沉积模式

侯明才,杨田,田景春,蔡来星,李晓芳,何青,余文强

油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学),沉积地质研究院,成都 610059

摘要 在国内外文献调研的基础上,系统总结了吉尔伯特型三角洲概念、沉积物特征、沉积过程及模式。吉尔伯特型三角洲特指顶积层、前积层、底积层三层结构显著、重力流沉积过程主导前缘沉积的三角洲沉积。吉尔伯特型三角洲以兼具牵引流沉积与重力流沉积为典型特征,三角洲平原对应顶积层,以辫状河道沉积垂向叠置为主要特征,波浪改造作用发育;三角洲前缘斜坡以碎屑流沉积和浊流沉积为主,超临界浊流沉积构造发育,典型的沉积构造包括侵蚀凹槽、旋回坎、后积层理和广泛发育的分层构造;前三角洲对应底积层,以低密度浊流沉积为主,滑塌变形构造与碎屑滚落沉积发育,局部可见风暴改造沉积。吉尔伯特型三角洲前积层的形成过程是沉积物垮塌再搬运形成的重力流与洪水作用形成的异重流综合作用的结果,其形成过程受沉积物粒度和泥质杂质含量等内部因素与基准面升降、气候变化和构造活动等外部因素综合控制。异重流触发下超临界浊流发育的吉尔伯特型三角洲前积层形成过程研究和沉积过程与沉积构型要素综合的沉积模式研究,是吉尔伯特型三角洲沉积未来研究的攻关方向。

关键词 异重流;超临界浊流;沉积特征;沉积过程;沉积模式;吉尔伯特型三角洲

第一作者简介 侯明才,男,1968年出生,教授,博导,大地构造沉积学和层序岩相古地理学,E-mail: houmc@cdut.edu.cn

通信作者 杨田,男,研究员,博导,沉积学和油气储层地质学,E-mail: yangtian19@cdut.edu.cn

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

0 引言

三角洲是重要的过渡相沉积类型,在河流入湖或入海口广泛发育;三角洲的分类、成因及分布研究一直是沉积学家关注的重要内容^[1]。一方面,三角洲沉积是河流、波浪、潮汐三者综合作用的结果,其沉积过程蕴含了丰富的过渡相沉积动力学信息^[2-3];同时,三角洲的形成分布及其内部结构特征受构造活动和海(湖)平面升降等控制显著,其沉积物对研究地质历史时期构造活动、气候演化、海(湖)平面变化有重要意义^[4-5]。另一方面,三角洲沉积物中各种矿产资源富集,特别是作为油气富集的重要场所,其形成和分布规律研究对于高效的油气勘探与开发具有重要指导意义^[6]。

三角洲的概念可追溯到约公元前450年,古航海家和历史学家Herodotus观察到尼罗河口的冲积平原在平面上形如希腊字母△,因而将其命名为三角洲^[7]。待到1885年,Gilbert^[8]对美国邦维尔湖更新世

三角洲的系统研究,提出著名的三角洲剖面上的三层结构认识;Barrell^[9]进一步将这种三层结构命名为顶积层、前积层和底积层,在这种典型识别标志的支撑下,三角洲的研究成为沉积学研究的热点^[7,10]。然而,大量的实例研究发现,河口区平面上呈三角形的沉积体不一定具备三层结构,而大量具备三层结构的沉积体平面上并不具备典型三角形形态;为了缓和这一冲突,大量针对三角洲的限定性术语层出不穷^[7]。大量术语的涌现,有益的方面指示了对三角洲相关研究的不断深入,而不利的方面则给准确的对比研究带来了极大的挑战^[6-7,11]。近年来,关于三角洲的相关研究进一步深化,特别是浅水三角洲^[12-14]、深水三角洲^[10,15]、陆架边缘三角洲^[16-17]等概念和认识进一步发展;同时,关于三角洲形成演化过程中的沉积物搬运、沉积过程的认识进一步深化^[1,18]。然而,国内关于三角洲相关术语的使用还存在一定混乱现象;而针对三角洲沉积物搬运沉积的过程沉积学研究则长期未引起重视^[6,11]。因而,系统梳理三角洲相关概念

收稿日期:2022-06-02;修回日期:2022-07-21;录用日期:2022-08-12;网络出版日期:2022-08-12

基金项目:国家自然科学基金项目(42072126);四川省自然科学基金项目(2022NSFSCO990) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42072126; Natural Science Foundation of Sichuan Province, No. 2022NSFSCO990]

的内涵及其发展历程,重视三角洲形成发育的过程沉积学研究,可能是破解这一困境的有效方法。作者不惧浅薄,对吉尔伯特型三角洲沉积过程与沉积模式相关问题谈一些粗浅的看法,以期促进国内三角洲沉积相关研究的进一步深入发展。

1 吉尔伯特型三角洲的概念

三角洲的奠基性工作始于美国的著名地质学家 Gilbert, Gilbert^[8]针对美国邦维尔湖更新世三角洲,详细解析了三角洲的结构,划分出底积层、前积层与顶积层三层结构(图1),前积层倾角较大(多大于20°,砂质沉积物多为24°~27°,砾质沉积物多为30°~35°),是典型三角洲的代表性识别标志。

Bates^[19]是最早探求三角洲沉积过程解释研究的先行者,其根据流入盆地中流体密度与盆地水体密度的相对大小,将流入盆地的流体划分为流体密度小于盆地水体密度的异轻流(hypopycnal)、流体密度等于盆地水体密度的等密度流(homopycnal)、流体密度大于盆地水体密度的异重流(hyperpycnal)。上述三种不同性质的流体流入盆地,形成三种不同类型三角洲,异轻流主要形成滨岸三角洲(图2a),等密度流则形成吉尔伯特型三角洲(图2b),异重流主要形成深水三角洲(图2c)。Bates^[19]认为吉尔伯特型三角洲主要是受等密度流平面喷流(jet flow)作用控制,导致河流搬运底负载沉积物迅速卸载前积,形成高角度前积层,而悬浮载荷则继续向前搬运,在更远处卸载形成底积层;河流在前积层顶部的截切与搬运沉积则形成顶积层(图2b)。这是文献记载中首次以吉尔伯特型三角洲来特指这种三层结构显著的三角洲沉积,不仅是对吉尔伯特突出工作的纪念,也是三角洲沉积研究不断深入的重要标志^[5,19]。需要指出,Bates^[19]定义的吉尔伯特型三角洲并未强调其必须形成于湖泊环境,而是以湖盆中易于发育这种类型的沉积作为例证,这也为后期吉尔伯特型三角洲概念的扩大化创造了条件。此外,部分学者以 Gilbert 的工作主要针对湖盆三角洲为由,认为吉尔伯特型三角洲即湖相三角洲^[21]。

Holmes^[22]提出洪积扇向稳定水体推进形成扇三角洲的认识,扇三角洲的发育强调大的地形高差、大的坡角、底床载荷主导的溪流分叉作用。扇三角洲在上述沉积背景下,极易形成具有较大倾角的前积层,与下部底积层、上部顶积层构成典型的吉尔伯特

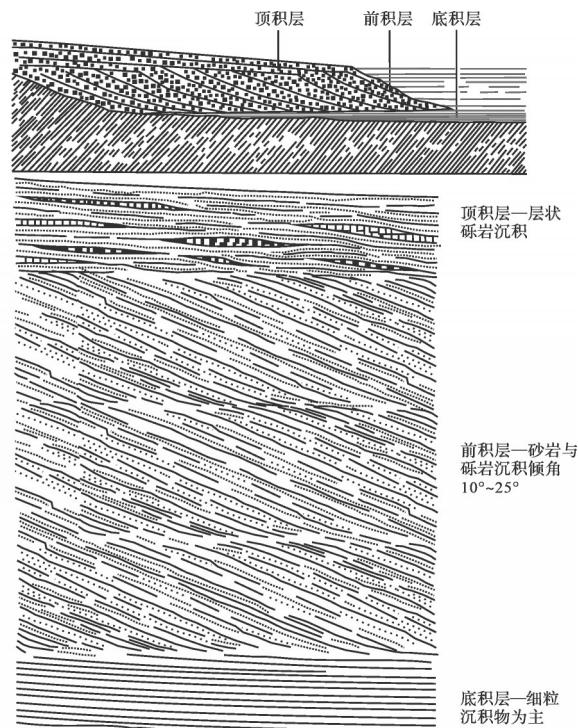
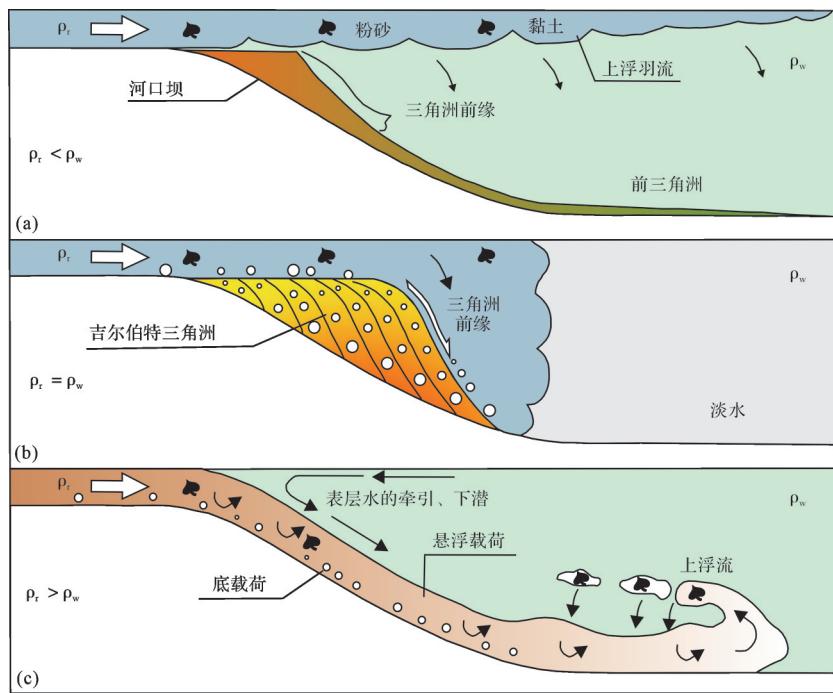


图1 Grove Karl Gilbert 发现的美国邦维尔湖更新世三角洲^[8]

Fig.1 Pliocene delta of Lake Bonville discovered by Grove Karl Gilbert, USA^[8]

型三角洲的三层结构,因而大量的研究将吉尔伯特型三角洲归为扇三角洲,或称为吉尔伯特型扇三角洲^[1,10,18,23-25],并且强调 Gilbert^[8]所研究的美国邦维尔湖更新世三角洲实际上为扇三角洲^[26-27]。尔后,关于吉尔伯特型三角洲与吉尔伯特型扇三角洲的概念开始通用,并且后续又出现了诸如吉尔伯特三角洲(Gilbert delta)^[25]、吉尔伯特前积层(Gilbert foresets)^[27]、吉尔伯特型剖面(Gilbert-type profile)^[10]、吉尔伯特型层序(Gilbert-type sequences)^[28]等一系列的相关概念^[29]。Blair et al.^[27]进一步指出高角度前积层在非三角洲环境同样发育,需要详细的相分析来佐证其具体的形成环境,因而认为吉尔伯特型三角洲的概念并不严谨。

吉尔伯特前积层或吉尔伯特型层序指示较大倾角的前积层,其并无特征的沉积环境指示意义;三角洲与扇三角洲中均具有三层结构不发育的实例存在;除了三层结构以外,沉积物的沉积过程及沉积动力机制也是需要考虑的重要方面。因此,建议以吉尔伯特型扇三角洲特指三层结构显著、平原和前缘重力流沉积过程主导的扇三角洲沉积;以吉尔伯特型三角洲指示具有三层结构、前缘重力流沉积过程

图2 基于沉积过程分析的三角洲类型^[19-20]

(a) 异轻流搬运沉积过程; (b) 等密度流搬运沉积过程; (c) 异重流搬运沉积过程

Fig.2 Classification of deltas based on depositional processes^[19-20]

主导的三角洲沉积;以此来区分三层结构不发育的扇三角洲与三角洲沉积。

2 三角洲的分类

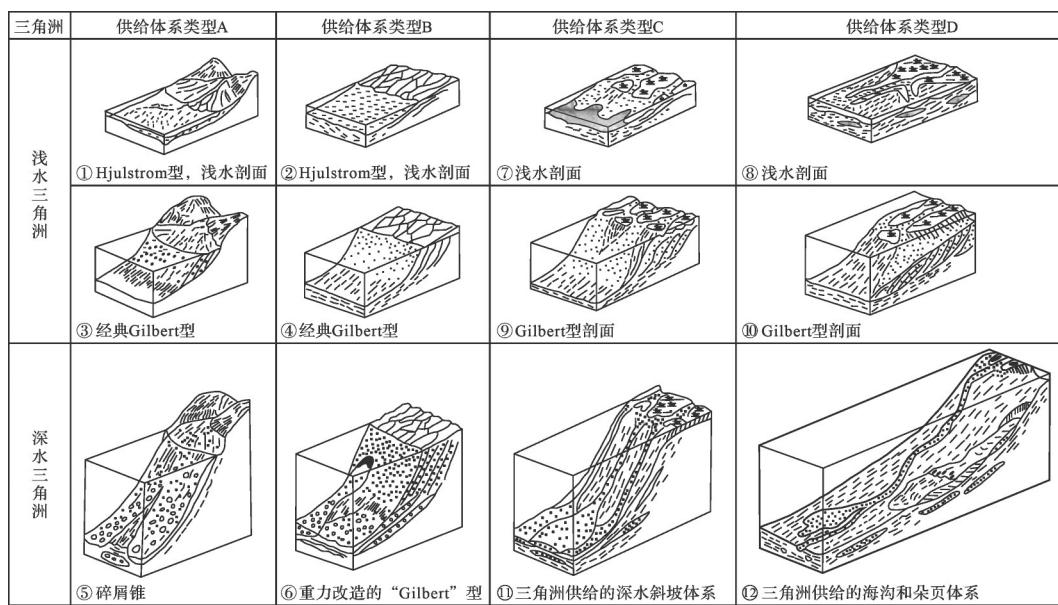
三角洲的最先系统研究始于湖泊,后期扩展到海洋,因而根据沉积环境可分为湖相三角洲与海相三角洲;海相三角洲的沉积受到河流、波浪、潮汐的综合控制,进一步可划分为河控三角洲、浪控三角洲、潮控三角洲及复合类型^[3]。三角洲形成过程中的物源供给同样对其具有明显控制作用,根据物源供给差异可划分为冲积三角洲与非冲积三角洲,非冲积三角洲主要包含火山熔岩三角洲、火山碎屑三角洲;冲积三角洲主要包含曲流河三角洲、辫状河三角洲、冲积扇三角洲、碎石堆三角洲^[7]。除物源供给以外,三角洲形成的沉积动力过程及水体深度也存在明显的差异,Postma^[10]根据沉积水体深度将三角洲系统地划分为浅水三角洲和深水三角洲两个大类,然后进一步根据物源供给、沉积物搬运方式的差异划分出12种类型(图3)。深水三角洲以深水重力流沉积作用为主;浅水三角洲根据物源供给坡度大小(坡度由大到小划分为4种类型)和沉积物搬运形式(惯性、摩擦、悬浮搬运)组合,可以划分为三角洲前积坡

度较缓的Hjulstrom型和三角洲前积坡度较陡的Gilbert型2个亚类8小类^[10](图3)。此外,还有诸多以三角洲形态、河口作用、发育位置、粒度粗细等为依据的划分方案^[6],相关的文献针对三角洲的分类进行了系统的阐述和总结^[6-7,10,26],本文不再赘述。

吉尔伯特型三角洲在上述三角洲的分类中隶属湖盆或海盆中重力改造的“Gilbert”型浅水三角洲,对应类型④(图3)。从不同的角度进行分类是对沉积现象深入认识的具体表现,但是,不同分类方案进行对比分析时,一定要明确不同分类方案的分类依据,如若不然,很容易出现概念不等价的混乱对比现象。分类出发点的差异是导致不同术语混杂的主要原因,该问题在地质学的相关研究中表现得尤为突出。

3 吉尔伯特型三角洲的沉积特征

吉尔伯特型三角洲多发育在地形坡度相对较陡、水体深度相对较大、沉积物供给相对充足的沉积背景,兼具牵引流沉积与重力流沉积,三角洲平原以牵引流沉积为主,三角洲前缘斜坡和前三角洲则以重力流沉积为主^[1,4-5,18]。

图3 沉积物供给、搬运过程和水深综合的三角洲分类^[10,26]Fig.3 Delta classification based on systematic analysis of sediment supply, transport processes and water depth^[10,26]

3.1 沉积构造

3.1.1 三角洲平原

三角洲平原主要为辫状河道沉积,以透镜状砾岩垂向和侧向叠置为典型特征,局部发育少量碎屑流沉积和漫流沉积。河道底部侵蚀特征显著,以磨圆较好的颗粒支持砾岩充填常见,块状层理或槽状层理发育,单层厚度较大;沉积物粒度向上逐渐变细,上部多发育层状叠置砾岩与平行层理发育砂岩,指示牵引流成因^[4-5]。部分沉积物粒度向上变粗的砾岩或砾质砂岩垂向层状叠置,为河道前积叠加产物。同时,在三角洲平原与前缘的转化部位,可发育部分S形或楔形叠置沉积序列,前积倾角可到10°~20°,单层以正粒序砾岩或砾状砂岩为主,内部发育平行、楔状或槽状交错层理,为滨岸河流与波浪共同作用沉积产物^[4]。部分研究也将该转化部位归为三角洲前缘上部沉积^[5],在吉尔伯特型三角洲特殊的沉积背景和沉积动力环境下,该转化部位多被平原河道沉积侵蚀,形成平原顶积层与前缘斜坡前积层直接接触的沉积结构^[4-5]。此外,与粗粒沉积物相伴随的泥岩主要为杂色,指示了浅水与间隙性暴露交互环境。

3.1.2 三角洲前缘斜坡

三角洲前缘斜坡是其最具代表性的沉积部位,发育大量特有的重力流成因沉积构造,是识别吉尔伯特型三角洲的重要依据,其中典型的沉积构造包括侵蚀凹槽、后积层理和大量广泛发育的分层构造。

1) 凹槽充填(scour and fill)

三角洲前缘斜坡由于前积层倾角较大,一方面由于沉积物堆积速率过快超过其稳定休止角易发生局部垮塌,形成广泛发育的凹槽(图4a);另一方面沿前积层搬运的薄层状浊流或异重流易于达到高弗洛德数的超临界态,超临界流体具有很强的侵蚀能力,在水力跳跃作用下对下伏沉积物进行侵蚀,形成凹槽^[1,4-5,18,30-31](图4b)。这些凹槽在几何形态上呈现不对称结构,靠近滨岸段下陷深度大且分布范围广,向深水盆地方向下陷深度减小,分布范围收敛,形似汤勺状^[4-5,31](图4a,b),连续的凹槽形成的大型波状沉积底形则被称为旋回坎(cyclic steps)^[1],吉尔伯特型三角洲前缘以部分沉积型的旋回坎最为发育^[32]。凹槽后期进一步被垮塌沉积物或超临界流搬运沉积物所充填,前者内部以块状沉积多期充填叠置为主(图4a),后者主要发育大量的后积层理(图4b)。Dietrich *et al.*^[31]对加拿大魁北克圣劳伦斯河湾北岸晚更新世吉尔伯特型三角洲前积层的研究中同样发现了广泛发育的透镜状凹槽充填构造。广泛发育于高角度前积层中的凹槽呈孤立状或断续状分布,底部多充填包含部分泥岩撕裂屑的块状粗碎屑沉积物,后积层理发育^[2]。

2) 后积层理(backsets stratification)

吉尔伯特型三角洲前缘斜坡是超临界浊流(从流态角度出发,水下弗洛德数大于1的浊流,多为快

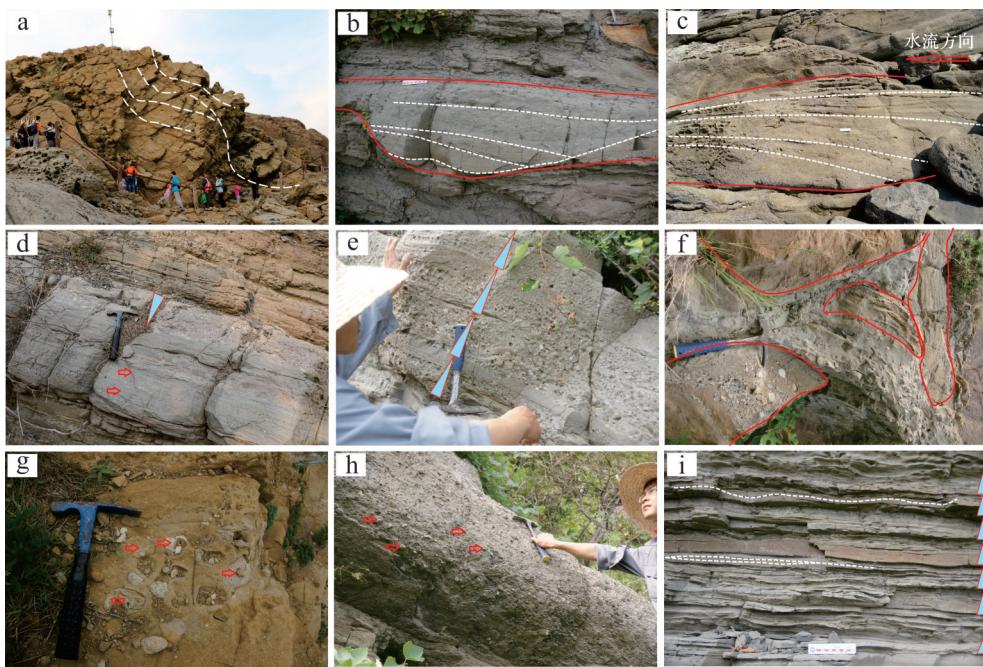


图4 灵山岛地区青山群吉尔伯特型三角洲典型沉积构造

(a)大尺度的侵蚀凹槽叠置;(b)小尺度凹槽充填;(c)后积层理;(d)下部为分层构造,上部为反粒序碎屑流沉积;(e)正粒序垂向叠置,底部侵蚀作用发育;(f)滑塌变形;(g)碎屑滚落沉积,碎屑平均直径约10 cm,磨圆较好;(h)块状碎屑流沉积,砾石呈漂浮状;(i)低密度浊流沉积部分被风暴改造

Fig.4 Typical sedimentary structures of Gilbert-type delta in the Qingshan Group, Lingshangdao area

速流动、分层特征显著的高密度浊流的流态特征)发育的有利场所^[18];在超临界浊流作用下,向上游方向移动的沉积底形会形成一系列形态和规模各异的交错层理^[31,33-36],其中后积层理最为常见,是可靠的超临界浊流沉积判断依据。后积层理主要是纹层从下层系界面向上层系界面逐渐变缓,沿上层系界面收敛,表现出向古水流上游方向迁移特征的沉积构造;后积层理一般规模较大,主要发育在粗碎屑沉积中,以相对粗碎屑沿纹层方向的定向或叠瓦状排列为特征(图4c)。希腊科林斯裂谷南海岸、加拿大魁北克圣劳伦斯河湾北岸、日本中部的Shimosa高原发育的吉尔伯特型三角洲前缘斜坡中均发育典型的后积层理^[1,31,37],这些后积层理均被解释为超临界浊流在水力跳跃作用下,沿流体流动方向逆行叠置的沉积产物。

3) 分层构造(spaced stratification)

由于超临界浊流的流速快、侵蚀能力强,因而具有较强的粗碎屑搬运能力^[31,37],这种含大量粗碎屑的流体在强烈的水力跳跃作用下向亚临界流转化,并且以牵引毯的形式发生搬运和沉降,因而形成具有明显分层构造的粗碎屑沉积^[5,18,24,37-39]。分层构造单层厚度多为数厘米,可见明显的粒度变化以区分平行层理,单层底部为反粒序,其上为不显粒序的块状层

所覆盖,不同厚度的沉积层在垂向上叠加,形成厚度较大的粗碎屑沉积^[39],可与粗粒碎屑流沉积伴生(图4d);同时,不同层间侵蚀特征不明显,平行排列的粒径差异显著的沉积物垂向上呈现连续渐变的粗细变化^[40-41](图4d),与侵蚀特征显著的正粒序垂向叠置区别明显(图4e)。不同地区发育的吉尔伯特型三角洲前缘斜坡带均可见广泛发育的分层构造,是重力流沉积层状叠置的典型识别标志^[5,18,24,37]。

3.1.3 前三角洲

1) 滑塌沉积(slumping deposits)

由于吉尔伯特型三角洲前缘斜坡倾角较大,沉积物易达到不稳定状态或在地震、火山等触发机制作用下发生前缘斜坡沉积物的垮塌再搬运^[4,18,42]。垮塌过程一方面会形成前缘斜坡广泛发育的凹槽^[18];另一方面会沿着斜坡发生剪切变形并在前三角洲地形平缓处堆积^[4,18,42]。滑塌沉积以砂、泥、砾混杂,内部强烈的揉皱变形和广泛发育的多尺度软沉积物变形构造为主要特征(图4f)。滑塌沉积的规模受再搬运沉积物多少的控制,分布厚度从数厘米至十米不等^[18]。

2) 碎屑滚落沉积(debris falls deposits)

碎屑滚落沉积是吉尔伯特型三角洲非常重要的识别标志之一^[4-5,18,37]。吉尔伯特型三角洲平原辫状河

道底负载搬运的粗碎屑颗粒在河口堆积,由于前缘斜坡倾角大,粗粒碎屑易沿着斜坡向下滚落,在坡角处堆积形成砾石堆或孤立的漂浮状砾石。这些砾石多磨圆较好,形成的砾石堆具有向上粒度变粗的特征,同时部分粒度较大的碎屑由于动量较大,可搬运较远的距离而形成孤立的漂浮状砾石^[4-5,18,37](图4g)。碎屑滚落沉积与碎屑流沉积形成的粗粒沉积之间存在明显差异,碎屑流沉积中的砾石由于被泥质杂基所支撑,因而砾石分布较为均匀(图4h);碎屑滚落沉积的砾石一般粒径较大且分布没有明显的规律性^[4,18](图4g)。

3) 风暴改造沉积(storm-reworked deposits)

前三三角洲沉积的低密度浊流沉积由于沉积物粒度较细,在风暴作用下易发生改造,形成小型丘洼状层理发育的风暴改造沉积^[4,25]。其主体沉积仍然以底部正粒序层理、上部沙纹层理发育的低密度浊流沉积为主,单层厚度多小于10 cm;浊流沉积的上部分遭受风暴的改造,形成小尺度的丘洼状层理,丘洼状层理的波长多小于20 cm,波高多小于5 cm(图4i)。沉积尺度的大小受风暴作用强度控制,在较强风暴作用下可以形成尺度较大的丘洼状沉积构造^[4]。

3.2 岩相组合

岩相组合是判断沉积环境的重要依据,吉尔伯特型三角洲不同沉积环境的岩相组合存在显著的差异。三角洲平原以辫状河沉积垂向叠置为主要特征,其发育的砾岩多杂基含量较高,叠瓦状排列,垂向上多为槽状交错层理发育的河道沉积充填,底部侵蚀构造发育,单层厚度多大于1 m,垂向叠置形成的沉积序列厚度多大于10 m^[4-5,25](图5a)。三角洲前缘斜坡以碎屑流沉积和浊流沉积为主,碎屑流沉积主要为杂基支撑或颗粒支撑块状或反序砾岩,单层顶底部多为突变接触,顶部砾石富集,单层厚度多分布在0.1~1 m之间,不同厚度的碎屑流沉积叠置多形成厚度大于5 m的沉积序列;浊流沉积以高密度浊流沉积为主,可见大量的侵蚀凹槽、后积层理和分层构造,单层底部侵蚀构造发育,以砾质砂岩沉积为主,杂基含量相对较低,单层厚度介于0.1~0.5 m,其垂向叠置形成的沉积序列可大于10 m^[4-5,25](图5b)。前三角洲以低密度浊流沉积为主,滑塌变形构造与碎屑滚落沉积发育;低密度浊流沉积为薄层—中薄层中细砂岩垂向叠置,部分砂体受风暴浪改造可发育丘洼状层理,滑塌变形构造与碎屑滚落受原始沉积物供给控制,其发育规模多变(图5c)。

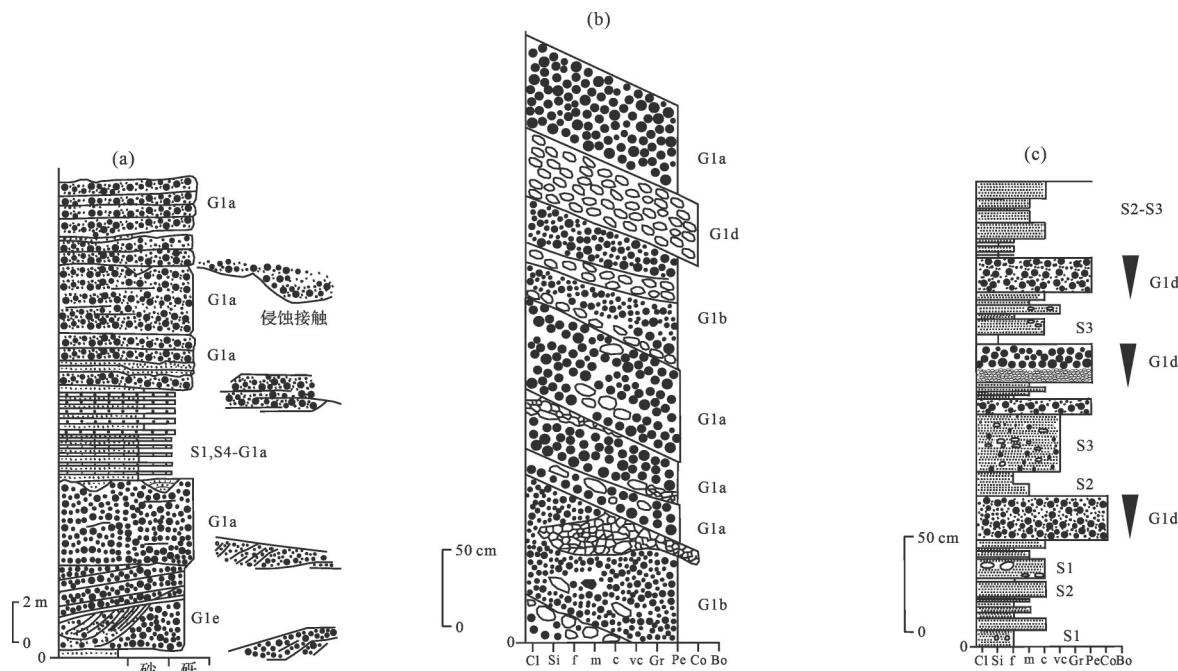


图5 吉尔伯特型三角洲沉积岩相组合序列^[5,25]

(a)顶积层;(b)前积层;(c)底积层;G1a.分选较好块状砾岩相;G1b.高倾斜砾岩相;G1c.粗略分层砾岩相;G1d.粒序频繁变化砾岩相;G1e.交错层理砾岩相;S1.块状砾岩相;S2.平行层理砾岩相;S3.交错层理砾岩相;S4.反粒序或正粒序砂岩相;Cl.泥岩;Si.粉砂;f.细砂;m.砂;c.粗砂;vc.巨砂;Gr.细砾;Pe.中砾;Co.粗砾;Bo.巨砾

Fig.5 Lithofacies association sequence of Gilbert-type delta^[5,25]

3.3 结构特征

吉尔伯特型三角洲典型的结构特征即地层产状差异显著的底积层、前积层与顶积层。前积层倾角多大于 20° ,且沉积物粒度较粗,与下部底积层之间呈连续过渡接触,即底积层是前积层粗粒沉积物沉积之后细粒沉积悬浮沉积物进一步向前部搬运的沉积产物(图6)。前积层与顶积层之间可呈现S型连续过渡接触或截切接触,S型连续过渡接触是湖平面或海平面相对上升背景下的沉积产物,而截切接触则是湖平面或海平面相对下降背景下的沉

积产物^[5,37]。因而,吉尔伯特型三角洲的结构特征对基准面的相对变化具有非常敏感的沉积学响应^[5,37]。基准面上升期,沉积物供给充分,主要形成典型的S型前积结构,以碎屑流沉积的相对粗粒沉积物沉积为主;基准面下降期,沉积物供给相对减少,伴随较为强烈的下蚀作用,形成顶部截切的斜交前积结构,以浊流沉积的相对细粒沉积物为主^[5,37](图7)。准确地识别吉尔伯特型三角洲的前积结构对恢复基准面变化与短时间尺度的气候演化具有重要意义^[5]。

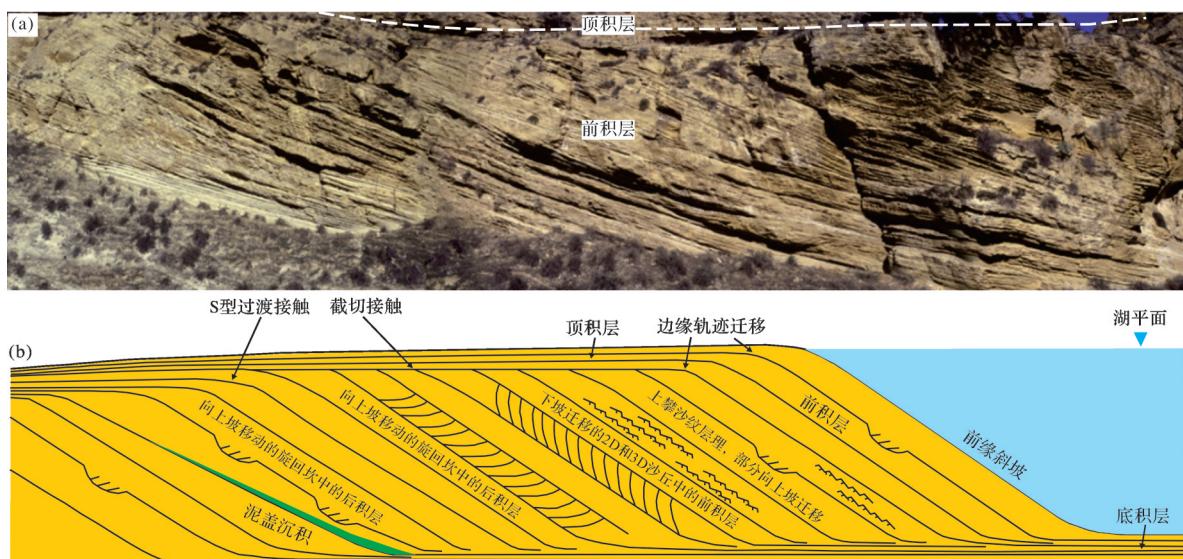


图6 吉尔伯特型三角洲沉积结构^[2,43]

Fig.6 Structures of Gilbert-type delta deposits^[2,43]

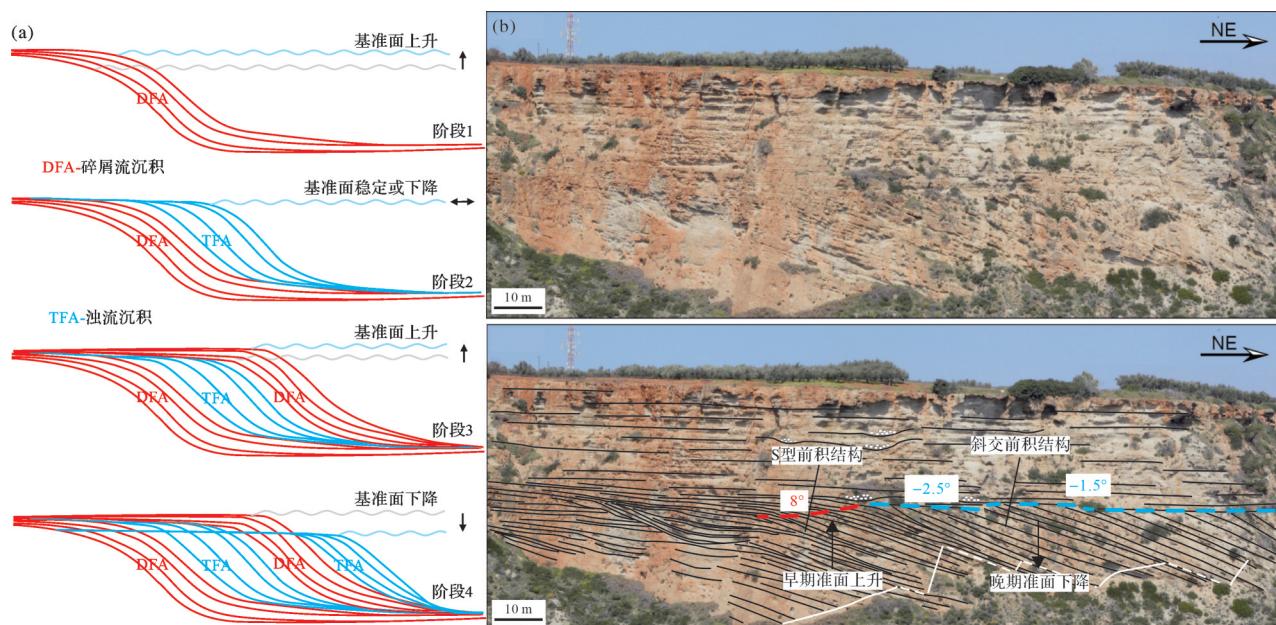


图7 吉尔伯特型三角洲前积结构与基准面升降变化关系^[5]

Fig.7 Relationship between base-level rise and fall and foreset structures in a Gilbert-type delta^[5]

需要特别指出,在三维地震剖面中呈现三层结构不一定为吉尔伯特型三角洲沉积产物,一方面高角度前积层在海滩、滨面等环境同样可形成^[27,43];另一方面细粒泥质沉积物同样可以形成具有明显三层结构的地震反射特征。因而,前积层的物质组成、沉积过程和典型沉积构(如分层构造、后积层理、侵蚀凹槽、旋回坎等)是进一步明确吉尔伯特型三角洲三层结构的重要依据^[1,27,43]。

4 吉尔伯特型三角洲的沉积过程及模式

4.1 沉积动力过程

吉尔伯特型三角洲的沉积过程受牵引流沉积与重力流沉积的综合控制,现阶段针对顶积层的河流沉积与底积层的悬浮沉积过程相对明确,而针对前积层的沉积动力过程研究近几年不断深化^[1-2,5,37,43],特别是关于前积层中超临界浊流沉积作用的认识成为近期沉积学研究的热点问题。吉尔伯特型三角洲前积层的形成过程是沉积物垮塌再搬运形成的重力流与洪水作用形成的异重流综合作用的结果^[5,37]。同时,由于前积层倾角较大,分层的高密度浊流易达到超临界状态,使得超临界浊流与亚临界浊流转化过程及沉积发育^[1-2,43]。较大的前积层倾角使得河流搬运的粒径较粗的碎屑易于沿斜坡滚落沉积,形成吉尔伯特型三角洲特有的碎屑滚落沉积^[5,18]。

枯水期,河流携带的沉积物在河口快速堆积,当前积沉积物超过稳定休止角或在地震、火山等触发机制下易于发生垮塌再搬运,其搬运过程依次经历

蠕动→滑动→滑塌→碎屑流→浊流的演化过程^[18],部分粒径较大的粗碎屑颗粒在搬运过程中易于漂浮到流体表层^[40],以碎屑滚落的形式在斜坡底部或前三角洲卸载沉积^[41](图8)。这种流体转化过程受搬运过程中的流体转化效率控制,多以碎屑流沉积形成的块状粗碎屑沉积为主^[5,37]。部分碎屑流进一步转化可形成分层构造发育的高密度浊流,这种流体易于到达超临界态而形成较多的特殊沉积构造。

洪水期,河流携带的高浓度沉积物越过河口直接沿斜坡前积层以异重流的形式搬运^[5,18];这种广义的异重流包含了碎屑流、高密度浊流和准稳态低密度浊流等多种流体形式^[44]。碎屑流在前积层上部快速沉积以后流体转化为底床载荷主导的异重流沉积,这种异重流由于流体分层作用和沿前缘斜坡的快速搬运,层状流体的垂向叠置易于形成分层构造发育的粗粒沉积^[24];同时,这种分层流体易达到超临界状态,超临界流体强烈的侵蚀作用则会在前缘斜坡形成大量的侵蚀凹槽,超临界流转化为亚临界流对凹槽的进一步充填则形成特征显著的后积层理^[1-2,43]。当然,洪水期同样可发育特征显著的碎屑滚落沉积(图8)。

4.2 沉积控制因素

4.2.1 内部因素

吉尔伯特型三角洲的物质组成复杂,不同粒径的沉积物组成是决定其沉积过程及沉积产物的关键因素。如不同粒径的碎屑颗粒,其自身所能保持的稳定休止角存在差异,粒度较粗的碎屑颗粒稳定休止角相对大,因而其形成的前积层的倾角也相对较大^[18];同时,不同粒径的碎屑滚落沉积存在显著差异,

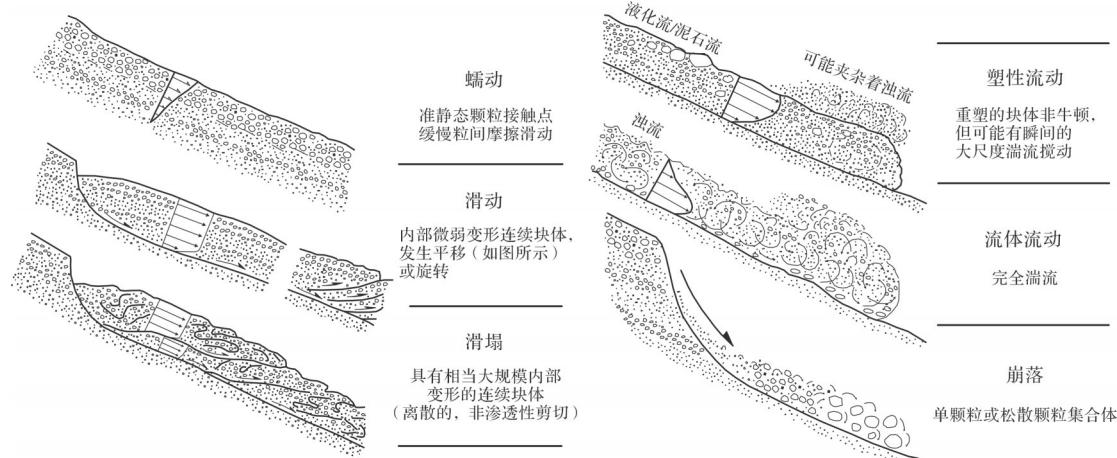


图8 吉尔伯特型三角洲主要沉积动力过程^[7]
Fig.8 Depositional dynamic process of Gilbert-type delta^[7]

碎屑颗粒的粒径越大,其受重力作用而获得的动量也越大,因而搬运速度要大于粒径小的沉积物且能够搬运更远的距离^[5,18]。碎屑流在搬运过程中,不同粒径的沉积物沉积过程也存在一定差异,由于动力筛选作用,粒径较大的碎屑颗粒倾向于在流体上部富集,而粒径较小的碎屑颗粒倾向于在流体底部富集,形成碎屑流典型的向上变粗沉积序列^[18,45]。粗粒的碎屑颗粒也易于在碎屑流的边部富集,形成流体扩张的限制条件,从而有利于碎屑流保存相对较窄的流体形态而快速向前搬运^[5,18,46]。浊流在搬运过程中沉积物粒度的差异也会导致沉积底形和沉积构造存在显著差异,沉积物粒度越粗,形成的沉积底形的波长和波高越小,长高比也小;相反,沉积物粒度越细,形成的沉积底形的波长和波高越大,长高比也大;粗粒沉积物中超临界流沉积构造发育,侵蚀多见^[31]。

沉积物中泥质杂基的黏土矿物类型与含量是控制沉积过程及其沉积产物的另一关键要素。泥质杂基是控制流体黏性和沉积物稳定性的重要因素,相对较高的泥质杂基含量导致沉积物内聚力增强,从而不易发生垮塌再搬运,其所形成的前积层的倾角也越大^[5,18];此外,泥质杂基含量是控制碎屑岩与浊流之间相互转化过程的主要因素,进而决定了碎屑流沉积与浊流沉积的分布^[18,47-49]。高泥质杂基含量的黏性碎屑流在搬运过程中,由于泥质杂基含量高,渗透率相对较低,介质环境中的水分子不能进入其中,因而碎屑流不能转化为浊流^[50-51],以碎屑流沉积为主。同时,不同的黏土矿物类型其产生的流体强度也存在显著差异,相同含量的蒙脱石与高岭石,蒙脱石产生的流体内聚力要明显高于高岭石^[52],因而更有利于黏性碎屑流的发育。

4.2.2 外部因素

基准面的升降是控制吉尔伯特型三角洲结构及其沉积作用过程的重要外部控制因素^[5,32,43]。在不考虑物源输入变化的情况下,基准面的下降导致三角洲平原的河道下切侵蚀作用增强,三角洲平原与前缘之间多呈截切接触;由于河流作用强,三角洲前缘斜坡以洪水异重流沉积作用为主,碎屑流沉积少量发育,准稳态超临界浊流侵蚀作用常见,发育侵蚀凹槽、后积层理、旋回坎等典型识别标志^[5,32,43]。基准面上升导致三角洲平原的河道下切侵蚀作用减弱,三角洲平原与前缘之间多呈S型前积过渡接触;由于河流作用弱,三角洲前缘斜坡以快速前积的沉积物垮

塌再搬运沉积过程为主,碎屑流沉积作用为主,发育少量似涌浪超临界浊流,同时,可见垮塌形成的凹槽以及碎屑滚落沉积和滑塌变形沉积等典型识别标志^[5,32,43]。

气候变化控制的洪水能量的强弱及其季节性变化也是控制三角洲前缘结构及沉积过程的重要因素^[4]。较强的洪水一方面携带沉积物能力强,沉积物粒度较粗,形成的三角洲前缘倾角较大^[4,18,53];另一方面,较强的洪水易于异重流沉积的形成,由于异重流分层特征更为明显,易于达到超临界态^[15,54],使得三角洲前缘对应的超临界浊流沉积构造更为发育^[5,32,43]。水槽实验表明,三角洲平原的河道在注入水体前是否为限制性水道,对超临界流的发育具有重要的影响^[55]。此外,洪水的季节性或年际间的变化则会导致三角洲体系中发育砂泥互结构。

构造活动则控制了地形坡度和沉积物的供给^[4]。较陡的地形坡度是吉尔伯特型三角洲形成的必要条件,较陡的地形坡度有利于沉积物的快速前积,沉积物在自身重力分量控制下易于超过稳定休止角而到达不稳定状态,以重力流形式沿斜坡进一步搬运^[18]。较陡的地形坡度使得重力流流体厚度较薄,同时,水体深度迅速增大,可有效减少重力流在相对浅水阶段搬运的耗散^[18](图9),使得流体快速达到超临界状态,从而形成丰富的超临界浊流沉积构造^[54,56]。同时,构造活动控制了物源区沉积物的持续供给,为三角洲的发育提供了物质保证,供给的沉积粒度又进一步控制了三角洲的结构特征形成。

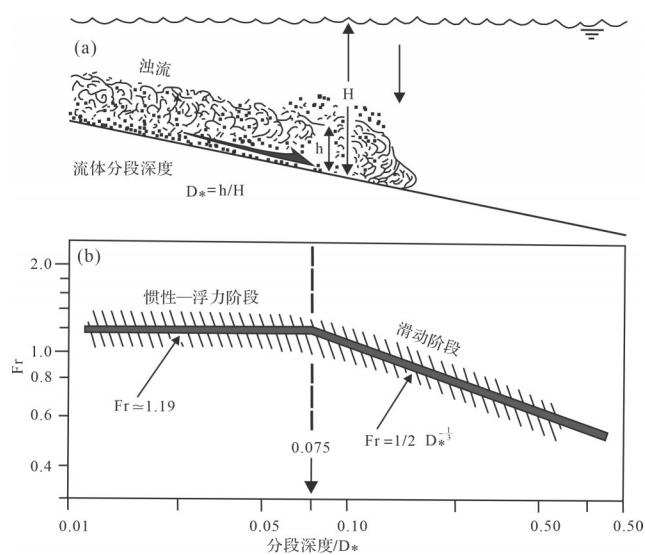


图9 吉尔伯特型三角洲沉积控制因素^[18]

Fig.9 Influencing factors of Gilbert-type delta deposition^[18]

4.3 沉积模式

吉尔伯特型三角洲的沉积模式以经典的顶积层、前积层和底积层三层结构为典型特征,顶积层对应三角洲平原、前积层对应三角洲前缘和斜坡、底积层对应前三角洲^[4-5,8]。三角洲平原以河流沉积作用,波浪改造作用平原与前缘的转化部位发育,河流沉积以杂质含量较高的砾岩为主,侵蚀作用和河道充填几何特征显著;波浪改造沉积将河道沉积中的细粒沉积物移除,形成分选较好的砾岩沉积^[4]。三角洲前缘根据主导沉积过程的差异,可分为碎屑流沉积为主和浊流沉积为主两种类型^[5,37],除了碎屑流沉积块状砾岩发育以外,沉积物垮塌形成的凹槽充填,超临界浊流形成的冲刷槽、旋回坎、后积层理、分层构造等是三角洲前缘重要的沉积识别标志^[5,32,43,57]。前三角洲以低密度浊流沉积为主,同时,碎屑滚落沉积、滑塌变形沉积在该区发育,低密度浊流沉积物还可被风暴作用进一步改造,形成丘洼状层理发育的砂质沉积物^[4](图10)。

5 吉尔伯特型三角洲的研究思考

5.1 沉积过程研究

吉尔伯特型三角洲的研究由来已久^[8],但至今仍然存在诸多的问题有待进一步的深入研究。吉尔伯特型三角洲的形态和结构主要由河流和盆地水体相互作用控制的沉积物搬运卸载方式所决定,因而形态和结构特征在不同的三角洲之间可能存在显著的差异,这也是导致三角洲命名和分类方案层出不穷的主要原因^[6,11,26]。要深入地理解吉尔伯特型三角洲,

除了结构和形态之外,沉积过程可能是更为重要的内容;即相同类型的三角洲应该具有相似的沉积过程,即使形态和结构存在较大的差异。就吉尔伯特型三角洲而言,早期研究主要强调三层结构以及前积层等密度流沉积过程^[8,19];近期大量研究强调了前积层的形成过程中异重流和超临界浊流的搬运沉积过程^[1,4-5,32,37,43]。

异重流和超临界浊流在吉尔伯特型三角洲中是否广泛发育还有待更多的实例验证,特别是国内相关的实例研究还较为少见;这需要对异重流和超临界浊流的形成条件、沉积过程和识别标志有着深入的认识。前期的相关研究认为异重流沉积主要发育于深水环境^[58-59],实际上,异重流的形成经历了从浅水至深水的演化过程,在浅水环境同样存在异重流沉积。即狭义的异重流系指洪水持续供给成因的、流体湍动支撑的准静态浊流,多发育于深水环境;而广义的异重流指洪水成因的高密度流,包含了碎屑流、浊流等多种流体类型,从浅水至深水环境均有发育^[44,60]。因而,可以认为吉尔伯特型三角洲是广义异重流发育的有利环境^[1,5,32,37,43]。快速搬运的层状重力流易于达到超临界态是目前重力流沉积动力过程的新认识^[61],吉尔伯特型三角洲较大的前积倾角为层状搬运的重力流达到超临界态创造了有利的条件^[1,32],超临界浊流的搬运沉积作用为合理解释三角洲前缘广泛发育的后积层理、侵蚀凹槽和旋回坎等沉积构造提供了依据^[1,5,32,37,43]。从异重流沉积与超临界浊流沉积过程去理解吉尔伯特型三角洲前积层的形成过程,可为吉尔伯特型三角洲的深入研究提供新的视角^[1]。

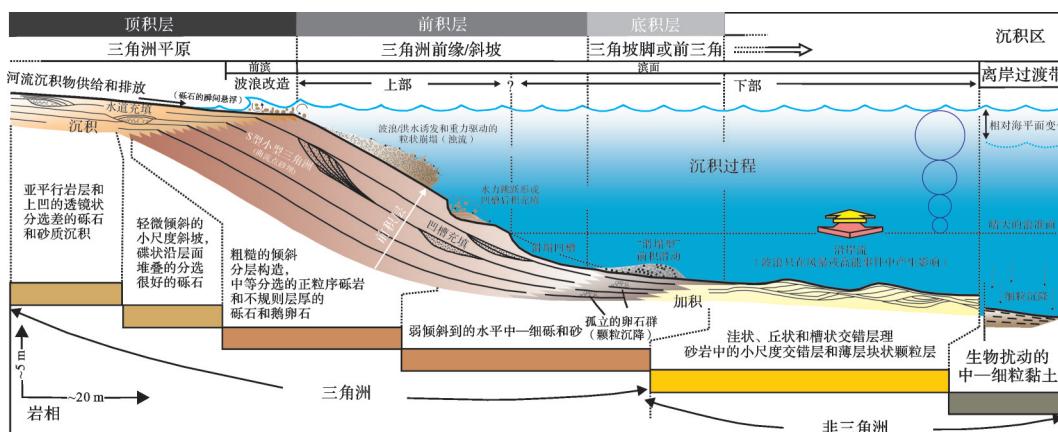


图 10 吉尔伯特型三角洲沉积模式^[4]
Fig.10 Depositional model of Gilbert-type delta^[4]

5.2 沉积模式研究

沉积模式的研究也需要跳出结构和形态研究的桎梏,从沉积过程与沉积构型要素结合的角度综合考量。宏观的结构形态是沉积模式研究的基础,特别是在野外露头和地震剖面中,可能发育的三层结构为进一步的岩相组合分析和沉积过程分析提供了框架;而三层结构内部的沉积过程与沉积构型要素是确定吉尔伯特型三角洲的关键^[5,37]。通过框架内不同部位沉积物的详细岩相组合分析,明确沉积物的几何形态、物质组成、沉积层之间接触关系、沉积层粒序特征、砾石叠瓦构造发育情况、超临界浊流沉积构造发育情况等,开展岩相组合与沉积动力和沉积过程的对应分析,明确不同部位的沉积动力和沉积过程^[5,37]。通过不同部位沉积过程与对应沉积构型要素的差异性对比分析,建立最终的沉积模式^[1,5,37]。此外,“源—汇”系统的差异也是造成吉尔伯特型三角洲的结构和形态差异的重要原因,在沉积模式的研究中需要综合“源—汇”系统与沉积过程,从而合理认识吉尔伯特型三角洲沉积结构与形态的多样性^[1,5,37]。

6 结论

(1) 吉尔伯特型扇三角洲特指三层结构显著、平原和前缘重力流沉积过程发育的扇三角洲沉积;吉尔伯特型三角洲指具有三层结构、前缘和前三角洲重力流沉积过程发育的三角洲沉积。

(2) 吉尔伯特型三角洲的典型沉积特征为兼具牵引流沉积与重力流沉积,牵引流沉积主要发生在三角洲平原,重力流沉积则主要发生在前缘斜坡和前三角洲地区。前缘斜坡发育的典型沉积构造包括侵蚀凹槽、后积层理和大量广泛发育的分层构造;前三角洲则发育滑塌沉积、碎屑滚落沉积、风暴改造沉积等。

(3) 吉尔伯特型三角洲发育底积层、前积层与顶积层三层结构。顶积层以辫状河流沉积垂向叠置为主要特征;前缘斜坡以碎屑流沉积和浊流沉积为主,超临界浊流沉积构造发育;底积层以低密度浊流沉积为主,滑塌变形构造与碎屑滚落沉积发育。

(4) 吉尔伯特型三角洲前积层的形成过程可能是沉积物垮塌再搬运形成的重力流与洪水作用形成的异重流综合作用的结果;其形成过程受沉积物粒度和泥质杂基含量等内部因素与基准面升降、气候变化和构造活动等外部因素综合控制。

(5) 异重流和超临界浊流作用下的吉尔伯特型三角洲前积层形成过程研究和沉积过程与沉积构型要素综合的沉积模式研究,是吉尔伯特型三角洲沉积未来研究的攻关方向。

参考文献(References)

- [1] Okazaki H, Isaji S, Kurozumi T. Sedimentary facies related to supercritical-flow bedforms in foreset slopes of a Gilbert-type delta (Middle Pleistocene, central Japan) [J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 399: 105613.
- [2] Massari F. Supercritical-flow structures (backset-bedded sets and sediment waves) on high-gradient clinoform systems influenced by shallow-marine hydrodynamics [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360: 73-95.
- [3] Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [M]. Houston: Houston Geological Society, 1975: 87-98.
- [4] Longhitano S G. Sedimentary facies and sequence stratigraphy of coarse-grained Gilbert-type deltas within the Pliocene thrust-top Potenza Basin (southern Apennines, Italy) [J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 210(3/4): 87-110.
- [5] Gobo K, Ghinassi M, Nemec W. Gilbert-type deltas recording short-term base-level changes: Delta-brink morphodynamics and related foreset facies [J]. *Sedimentology*, 2015, 62(7): 1923-1949.
- [6] 于兴河,李胜利,李顺利. 三角洲沉积的结构:成因分类与编图方法 [J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 782-797. [Yu Xinghe, Li Shengli, Li Shunli. Texture: Genetic classifications and mapping methods for deltaic deposits [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 782-797.]
- [7] Nemec W. Deltas-remarks on terminology and classification [M]// Colella A, Prior D B. Coarse-grained deltas. Algiers: The International Association of Sedimentologists, 1990: 3-12.
- [8] Gilbert G K. The topographic features of lake shores [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1885: 69-123.
- [9] Barrell J. Criteria for the recognition of ancient delta deposits [J]. *GSA Bulletin*, 1912, 23(1): 377-446.
- [10] Postma G. Depositional architecture and facies of river and fan deltas: A synthesis [M]// Colella A, Prior D B. Coarse-grained deltas. Algiers: The International Association of Sedimentologists, 1990: 13-27.
- [11] 邹才能,赵文智,张兴阳,等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布 [J]. 地质学报, 2008, 82(6): 813-825. [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 813-825.]
- [12] Fisk H N, Kolb C R, McFarlan E, et al. Sedimentary framework of the modern mississippi delta [Louisiana] [J]. *Journal*

- of Sedimentary Research, 1954, 24(2): 76-99.
- [13] Zhu X M, Zeng H L, Li S L, et al. Sedimentary characteristics and seismic geomorphologic responses of a shallow-water delta in the Qingshankou Formation from the Songliao Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 131-148.
- [14] Zou C N, Zhang X Y, Luo P, et al. Shallow-lacustrine sand-rich deltaic depositional cycles and sequence stratigraphy of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Basin Research*, 2010, 22(1): 108-125.
- [15] Postma G, Lang J, Hoyal D C, et al. Reconstruction of bedform dynamics controlled by supercritical flow in the channel-lobe transition zone of a deep-water delta (Sant Llorenç del Munt, north-east Spain, Eocene)[J]. *Sedimentology*, 2021, 68 (4): 1674-1697.
- [16] Junior F N A, Steel R J, Olariu C, et al. River-dominated and tide-influenced shelf-edge delta systems: Coarse-grained deltas straddling the Early-Middle Jurassic shelf-slope break and transforming downslope, Lajas-Los Molles formations, Neuquén Basin, Argentina[J]. *Sedimentology*, 2020, 67(6): 2883-2916.
- [17] Porębski S J, Steel R J. Shelf-margin deltas: Their stratigraphic significance and relation to deepwater sands[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62(3/4): 283-326.
- [18] Nemec W. Aspects of sediment movement on steep delta slopes [M]//Colella A, Prior D B. Coarse-grained deltas. Algiers: The International Association of Sedimentologists, 1990: 29-73.
- [19] Bates C C. Rational theory of delta formation[J]. *AAPG Bulletin*, 1953, 37(9): 2119-2162.
- [20] Zavala C, Pan S X. Hyperpycnal flows and hyperpycnites: Origin and distinctive characteristics [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(1): 1-18.
- [21] 周书欣. 三角洲体系的分类和油气聚集(综述)[J]. 大庆石油学院学报, 1980(2) : 61-75. [Zhou Shuxin. Classification and hydrocarbon accumulation of delta system (review)[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1980(2) : 61-75.]
- [22] Holmes A. Principles of physical geology [M]. 2nd ed. London: Thomas Nelson, 1945.
- [23] Postma G. Fan delta [M]//Middleton G V, Church M J, Coniglio M, et al. Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks. Dordrecht: Springer, 2003: 272-274.
- [24] Falk P D, Dorsey R J. Rapid development of gravelly high-density turbidity currents in marine Gilbert-type fan deltas, Loreto Basin, Baja California Sur, Mexico[J]. *Sedimentology*, 1998, 45(2): 331-349.
- [25] Backert N, Ford M, Malartre F. Architecture and sedimentology of the Kerinitis Gilbert-type fan delta, Corinth Rift, Greece [J]. *Sedimentology*, 2010, 57(2): 543-586.
- [26] 张昌民,朱锐,尹太举,等. 扇三角洲沉积学研究进展[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(3) : 362-368. [Zhang Changmin, Zhu Rui, Yin Taiju, et al. Advances in fan deltaic sedimentology [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(3) : 362-368.]
- [27] Blair T C, McPherson J G. Quaternary sedimentology of the Rose Creek fan delta, Walker Lake, Nevada, USA, and implications to fan-delta facies models[J]. *Sedimentology*, 2008, 55 (3): 579-615.
- [28] Bowman D. Climatically triggered gilbert-type lacustrine fan deltas, the dead sea area, Israel[M]. International Association of Sedimentologists, 1990: 273-280.
- [29] Picard M D. Grove karl gilbert, master of laccoliths and lakes [J]. *Rocky Mountain Geology*, 2008, 43(1): 111-118.
- [30] 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*, 2014, 61(3): 712-748.
- [31] Dietrich P, Ghienne J F, Normandeau A, et al. Upslope-migrating bedforms in a proglacial sandur delta: Cyclic steps from river-derived underflows? [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(2): 113-123.
- [32] Lang J, Sievers J, Loewer M, et al. 3D architecture of cyclic-step and antidune deposits in glacigenic subaqueous fan and delta settings: Integrating outcrop and ground-penetrating radar data [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 362: 83-100.
- [33] Cartigny M. Morphodynamics of supercritical high-density turbidity currents[D]. Utrecht: Utrecht University, 2012.
- [34] Lang J, Winsemann J. Lateral and vertical facies relationships of bedforms deposited by aggrading supercritical flows: From cyclic steps to humpback dunes [J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 296: 36-54.
- [35] Postma G, Cartigny M J B. Supercritical and subcritical turbidity currents and their deposits-A synthesis[J]. *Geology*, 2014, 42(11): 987-990.
- [36] Postma G, Kleverlaan K, Cartigny M J B. Recognition of cyclic steps in sandy and gravelly turbidite sequences, and consequences for the Bouma facies model[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(7): 2268-2290.
- [37] Gobo K, Ghinassi M, Nemec W. Reciprocal changes in foreset to bottomset facies in a gilbert-type delta: Response to short-term changes in base level [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(11): 1079-1095.
- [38] Cartigny M J B, Eggenhuisen J T, Hansen E W M, et al. Concentration-dependent flow stratification in experimental high-density turbidity currents and their relevance to turbidite facies models[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83 (12): 1047-1065.
- [39] Hiscott R N. Traction-carpet stratification in turbidites: Fact or fiction [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64 (2a) : 204-208.
- [40] Postma G, Nemec W, Kleinspehn K L. Large floating clasts in turbidites: A mechanism for their emplacement[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 58(1): 47-61.

- [41] Sohn Y K. On traction-carpet sedimentation[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67(3): 502-509.
- [42] Postma G. Mass-flow conglomerates in a submarine canyon: Abrija fan-delta, Pliocene, southeast Spain[M]//Koster E H, Steel R J. *Sedimentology of gravels and conglomerates*. Canadian Society of Petroleum Geologists, 1984: 237-258.
- [43] Winsemann J, Lang J, Polom U, et al. Ice-marginal forced regressive deltas in glacial lake basins: Geomorphology, facies variability and large-scale depositional architecture[J]. *Boreas*, 2018, 47(4): 973-1002.
- [44] Zavala C. Hyperpycnal (over density) flows and deposits[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 9: 17.
- [45] 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.
- [46] 金杰华, 操应长, 王健, 等. 深水砂质碎屑流沉积: 概念、沉积过程与沉积特征[J]. 地质论评, 2019, 65(3): 689-702. [Jin Jiehua, Cao Yingchang, Wang Jian, et al. Deep-water sandy debris flow deposits: Concepts, sedimentary processes and characteristics[J]. *Geological Review*, 2019, 65(3): 689-702.]
- [47] Baas J H, Best J L, Peakall J, et al. A phase diagram for turbulent, transitional, and laminar clay suspension flows[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(4): 162-183.
- [48] Barker S P, Haughton P D W, McCaffrey W D, et al. Development of rheological heterogeneity in clay-rich high-density turbidity currents: Aptian Britannia sandstone member, U.K. continental shelf[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2008, 78(2): 45-68.
- [49] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 234-248. [Cao Yingchang, Yang Tian, Wang Yanzhong, et al. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 234-248.]
- [50] Mohrig D, Ellis C, Parker G, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows[J]. *GSA Bulletin*, 1998, 110(3): 387-394.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Mulder T, Chapron E. Flood deposits in continental and marine environments: Character and significance[M]//Slatt R M, Zavala C. *Sediment transfer from shelf to deep water—revisiting the delivery system*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 1-30.
- [54] 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 Yingchang, Yang Tian, Wang Yanzhong, et al. Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity-flow [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(6): 607-621.]
- [55] Muto T, Yamagishi C, Sekiguchi T, et al. The hydraulic auto-genesis of distinct cyclicity in delta foreset bedding: Flume experiments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(7): 545-558.
- [56] Parker G, Garcia M, Fukushima Y, et al. Experiments on turbidity currents over an erodible bed[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1987, 25(1): 123-147.
- [57] Breda A, Mellere D, Massari F, et al. Vertically stacked Gilbert-type deltas of Ventimiglia (NW Italy): The Pliocene record of an overfilled Messinian incised valley[J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 219(1/2/3/4): 58-76.
- [58] 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 Renchao, Jin Zhijun, Sun Dongsheng, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 10-20.]
- [59] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 异重流沉积动力学过程及沉积特征[J]. 地质论评, 2015, 61(1): 23-33. [Yang Tian, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Sediment dynamics process and sedimentary characteristics of hyperpycnal flows[J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 23-33.]
- [60] 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 Tian, Cao Yingchang, Tian Jingchun. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 88-111.]
- [61] Clarke J E H. First wide-angle view of channelized turbidity currents links migrating cyclic steps to flow characteristics[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11896.

Formation Processes and Depositional Model of Gilbert-type Deltas

HOU MingCai, YANG Tian, TIAN JingChun, CAI LaiXing, LI XiaoFang, HE Qing, YU WenQiang

State Key Laboratory of oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Chengdu University of Technology), Institute of Sedimentary Geology, Chengdu 610059, China

Abstract: Reports from China and overseas on the concept, sedimentary characteristics, depositional processes, and depositional model of Gilbert-type deltas are systematically reviewed and summarized. Gilbert-type deltas are dominated by gravity-flow sedimentary deposits, typically with tripartite structures having distinct bottomset, foreset and topset stratal units comprising a combination of gravity-flow and traction-flow deposits. The topset consists of delta plains mainly composed of vertical stacking of braided river deposits modified by wave action. The slope of the delta front is dominated by debrite and turbidite, commonly exhibiting supercritical turbidity current sedimentary structures. Typical sedimentary structures include scour and fill, cyclic steps and backset stratification, with spaced stratification being common. The bottomset is a prodelta composed of low-density turbidite. Slump deposits, debris fall deposits, and storm-reworked deposits are also common in this area. The foreset comprises gravity-flow sediments following either the failure of shallow-water deposits or hyperpycnal flows from flooding rivers. These processes are affected by internal factors (e.g., grain size, mud content of the matrix) and external factors (e.g., base-level changes, climate changes, tectonic movement). Two aspects influence the prospect of studies related to Gilbert deltas: either the formation process of the foreset and the effect of supercritical turbidity currents, or the depositional model taking the sedimentary processes and architecture elements into account.

Key words: hyperpycnal flow; supercritical turbidity current; sedimentary characteristics; depositional processes; depositional model; Gilbert-type delta