

文章编号:1000-0550(2025)05-1592-13

# 三角洲分类及浅水三角洲定义问题探讨

邵龙义<sup>1</sup>, 潘浩<sup>1</sup>, 王学天<sup>1</sup>, ZAVALA Carlos<sup>2</sup>, 周凯<sup>1</sup>, 杨仁超<sup>2</sup>, 邵延文<sup>1</sup>, 鲁静<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

**摘要** 【意义】三角洲作为河流与受水水体(海洋或湖泊)交互作用形成的重要沉积体系,因其独特的沉积特征和资源潜力而成为沉积学的研究热点,特别是有关三角洲类型的划分及浅水三角洲定义的讨论受到极大关注。【进展】针对浅水三角洲定义,系统梳理了浅水三角洲的研究脉络,重点介绍了其定义的演变,基于基底沉降速率、浪基面、相构成及发育位置的多种界定视角,对浅水三角洲沉积动力学过程、形态演化与砂体构型、控制因素等进行探讨,揭示其低坡度、强水动力条件、活跃的分流河道与广泛的砂体展布等独特规律。【结论与展望】对比分析了现有三角洲分类方案的局限性,试图综合考虑基底沉降速率、水动力条件及沉积位置等三要素对三角洲进行综合分类,提出滨岸浅水三角洲、滨岸—陆棚深水三角洲、陆棚边缘深水三角洲和海底峡谷深水三角洲等四类型的分类系统。同时,对含煤岩系滨岸浅水三角洲的沉积模式进行讨论,阐明了上三角洲平原、下三角洲平原、三角洲前缘、前三角洲等亚相组成及三角洲平原的聚煤特征。

**关键词** 浅水三角洲;深水三角洲;沉积体系;三角洲分类体系;含煤岩系

**第一作者简介** 邵龙义,男,1964年出生,博士,教授,沉积学和煤田地质学,E-mail: ShaoL@cumtb.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标志码** A

**DOI:** 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.056

**CSTR:** 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.056

## 0 引言

三角洲是河流与海洋或湖泊相互作用形成的沉积体,是海陆或河湖过渡带的重要沉积体系。古代沉积序列中三角洲的研究始于Gilbert<sup>[1]</sup>1890年对美国邦维尔湖更新世湖相三角洲的研究,他指出三角洲具有三层结构。1912年,Barrell<sup>[2]</sup>在Gilbert对三角洲的描述的基础上,提出了顶积层、前积层、底积层等术语,并提出“三角洲是河流在稳定水体中或紧邻水体处形成的、部分露出水面的一种沉积物”。此后三角洲的研究历经了从形态描述到过程响应、从单一模式到复杂系统认知的深刻变革<sup>[3-4]</sup>。近年来,随着人们对陆棚边缘三角洲<sup>[5-9]</sup>以及异重流海底扇三角洲<sup>[10]</sup>的深入认识,表明最初三角洲的定义已经有了较大的发展,因此有必要对河流入海、经陆棚搬运沉积、至大陆斜坡最终沉积这一系列过程中发育形成的沉积体进行定义和分类。

浅水三角洲概念自Fisk研究密西西比河三角洲

提出后,因其独特的沉积特征、巨大的资源潜力和广泛的地理分布(如现代密西西比河Lafourche三角洲、美国东部宾夕法尼亚纪阿勒格尼组等),成为现代沉积学和能源地质学的研究热点<sup>[11-14]</sup>。近年来,随着勘探技术的进步、研究方法的创新与沉积学理论的发展,浅水三角洲研究取得了显著进展<sup>[15-19]</sup>,其概念从早期浅水区三角洲沉积体拓展到现今受河流入海或入湖形成的多样化泛三角洲沉积体,即受河流直接控制的人海或入湖沉积体。浅水三角洲的早期概念指浅水区滨岸三角洲沉积体,包括吉尔伯特三角洲和当前油气勘探研究经常用到的极缓斜坡发育的狭义浅水三角洲。然而,目前沉积学界对浅水三角洲的概念定义仍存在分歧,分类方案众多且缺乏系统性,相应的沉积模式也需要进一步丰富完善。此外,浅水三角洲在含煤岩系能源矿产勘探中的应用研究也相对不足,尤其是在聚煤规律和煤系非常规天然气成藏方面的综合研究较少<sup>[20]</sup>。

国际上对三角洲分类的研究已形成多维度框

收稿日期:2025-08-19;修回日期:2025-10-08;录用日期:2025-10-10;网络出版日期:2025-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(42530208,42302126)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42530208, 42302126]

架:Galloway<sup>[21]</sup>基于河流、波浪和潮汐动力强度提出三端元分类方案;Postma<sup>[12]</sup>结合水深与供给系统建立二元分类体系;Bhattacharya *et al.*<sup>[22]</sup>聚焦陆棚边缘三角洲,提出“源—汇”系统与重力流的关联;Zavala *et al.*<sup>[23]</sup>基于入流水体密度差异拓展了三角洲分类维度。国内学者薛良清等<sup>[24]</sup>较早引入国际分类体系并适配中国陆相盆地特征,邹才能等<sup>[13]</sup>、朱筱敏等<sup>[14,25]</sup>针对陆相浅水三角洲构建了特色分类与沉积模式。然而,现有研究仍旧存在国际与国内进展整合不足、分类维度单一等问题<sup>[26]</sup>。

针对上述问题,本文对浅水三角洲研究的发展脉络进行梳理,综述重要研究进展,在此基础上试图提出三角洲综合分类方案,总结含煤岩系浅水三角洲的沉积模式,并探讨其在含煤岩系能源矿产勘探中的意义,旨在为相关领域的理论深化和勘探实践提供依据。

## 1 浅水三角洲概念的演变

浅水三角洲的研究经历了从形态描述到系统理论构建的发展过程,主要集中在浅水三角洲的沉积

特征描述和分类等方面(图1)。

### 1.1 基于构造背景与沉降速率的界定

最早对浅水三角洲的区分源于对其发育的构造背景和沉降速率的认识。Fisk *et al.*<sup>[27]</sup>在研究现代密西西比河三角洲时,首次提出了浅水和深水三角洲的划分。在构造沉降相对缓慢、可容纳空间增长有限的区域(如Lafourche朵叶),三角洲表现出独有的特征:分流河道频繁分叉、间距小,河口坝砂体易于合并成薄的席状砂层,且由于下伏的前三角洲泥层较薄,几乎不发育滑塌、底辟等重力流构造。与之相对,在构造沉降强烈的区域(如Balize朵叶),巨大的可容纳空间使得厚的泥质沉积得以堆积,分流河道间距大,呈指状延伸,河口坝砂体厚度常超过水深,并因重力失稳而普遍发育滑塌构造和浊积岩。

Donaldson<sup>[11]</sup>和Horne *et al.*<sup>[29]</sup>在研究阿巴拉契亚盆地石炭纪含煤岩系时,进一步强化了这一认识,明确指出浅水三角洲形成于构造相对稳定的台地或陆表海环境,其特征与基底的缓慢沉降密切相关。Olariu *et al.*<sup>[33]</sup>对美国墨西哥湾Booch三角洲的研究也证实,浅水三角洲形成于水体较浅、地形平缓、构造缓慢沉降的背景下。因此,从研究脉络上看,“浅水”

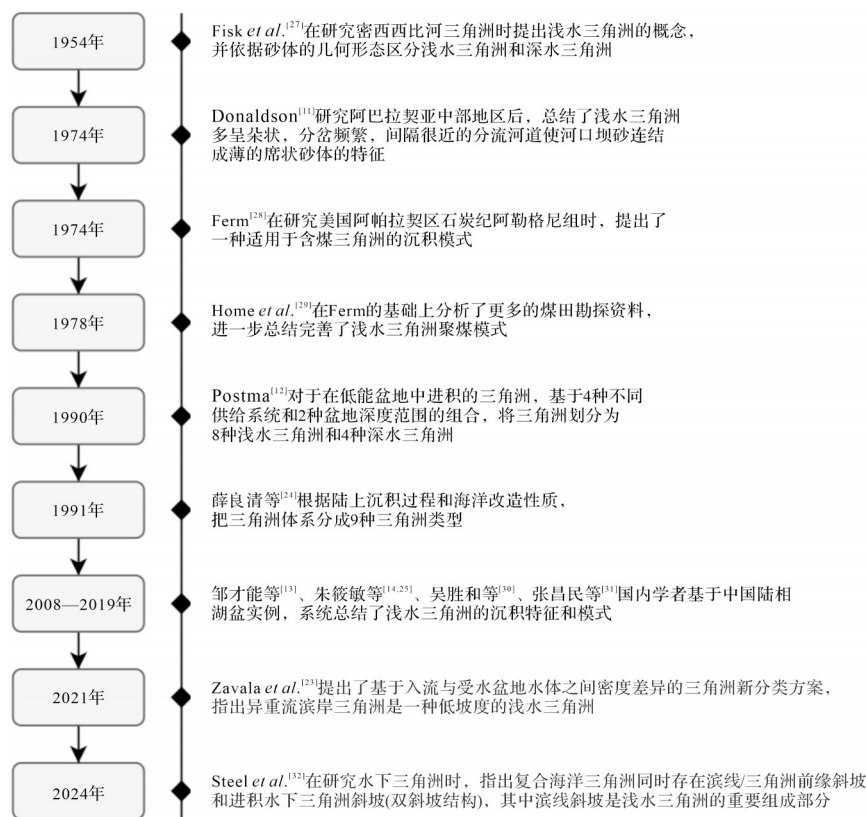


图1 浅水三角洲研究进展

Fig.1 Research progress of shallow-water deltas

最初并非单纯指水体深度,而是对一种“沉积物供给速率远大于可容纳空间增长速率”的沉积状态的描述,其本质是由缓慢的构造沉降所控制的。

## 1.2 基于水深与水动力条件的界定

随着研究的深入,人们尝试用水深相关的物理界面来更精确地定义“浅水”。Postma<sup>[12]</sup>提出将浪基面作为划分标准,认为浅水三角洲发育于浪基面以上的水体。然而,这一定义过于宽泛,因为绝大多数三角洲的主体都位于浪基面之上,这使得该标准失去了区分的意义。吴胜和等<sup>[30]</sup>提出了一个更为量化的标准,即“河—盆水深比”(初始河道深度与盆地水深之比),将比值大于等于1的定义为极浅水三角洲,其分流河道能够下切至前三三角洲沉积中,分流河道会对已有沉积进行较大的改造,残留三角洲剖面的三层结构不明显,形成顶积层主控的三角洲剖面<sup>[34]</sup>,呈现为“毯式”,即 Fisk *et al.*<sup>[26]</sup>所指的浅水三角洲。

Steel *et al.*<sup>[32]</sup>指出复合海相三角洲同时存在滨岸/三角洲前缘斜坡和进积水下三角洲斜坡(即双斜坡结构)(图2),认为现代三角洲在显著的波浪、潮汐或海流影响下,其三角洲水深数据、地震数据和近地表沉积物采样数据分析表明,这些三角洲存在双斜坡结构,且两者通过一个水下平台相连。水下三角洲指三角洲前缘向深水延伸的沉积体,具“滨岸斜坡—水下平台—水下前积层”的三级结构;水下三角洲平台为滨岸坡折与水下坡折间的平缓区域(水深10~30 m),是潮汐与波浪改造沉积物的核心地带,连接滨岸与深水沉积体系。河流携带至海岸的大量泥质沉积物会越过河口坝/滨线斜坡,在三角洲远端的水下部分发生沉积、侵蚀、再悬浮及保存。

盆地水深显著影响着沉积物在三角洲水上与水下部分的分配比例,Muto *et al.*<sup>[36]</sup>基于水池试验模拟提出用平衡指数模型来定量描述这种现象。平衡指数定义为单位时间内沉积物分配在陆上的体积和供给的总体积之比,是介于0~1的无量纲数。盆地水深越大,平衡指数越接近于0,表明沉积于陆上的沉积物越少,分流河道越接近平衡稳定状态;反之,盆地水深越浅,平衡指数越接近于1,越多沉积物位于水下,分流河道越远离平衡稳定状态。平衡指数定量表达了盆地水深单一因素对三角洲地貌动力学特征(进积速率、加积速率、分流河道迁移速率、决口周期)的贡献,另一方面有助于解释除水深之外的其他因素对三角洲地貌演变的影响<sup>[37]</sup>。

## 1.3 基于沉积结构与相构成的界定

Bhattacharya<sup>[38]</sup>的研究指出,浅水三角洲分流河道砂体通常表现为下粗上细的正粒序,反映了河道废弃过程中水动力的减弱,而河口坝和远砂坝等前缘沉积则呈现下细上粗的反粒序,这是三角洲向前推进、水深变浅、水动力增强的典型标志。中国学者在陆相湖盆浅水三角洲的研究中取得了丰硕成果,并从沉积结构和相构成的角度提出了独到的见解。邹才能等<sup>[13]</sup>在研究大型敞流拗陷湖盆时,将具有“毯式”剖面结构、分流河道可下切至前三三角洲的类型定义为浅水三角洲,强调了其在剖面上的独特构型。张昌民等<sup>[31]</sup>则根据砂体展布形态,将浅水三角洲分为以分流河道为主的“枝状”三角洲和以连片分流砂坝为主的三角洲。朱筱敏等<sup>[14,25]</sup>通过对松辽盆地和鄂尔多斯盆地的研究,系统总结了大型拗陷湖盆中浅水三角洲的形成条件和沉积模式,指出其通常发育在地形平缓、整体缓慢沉降的背景下,以分流河道砂

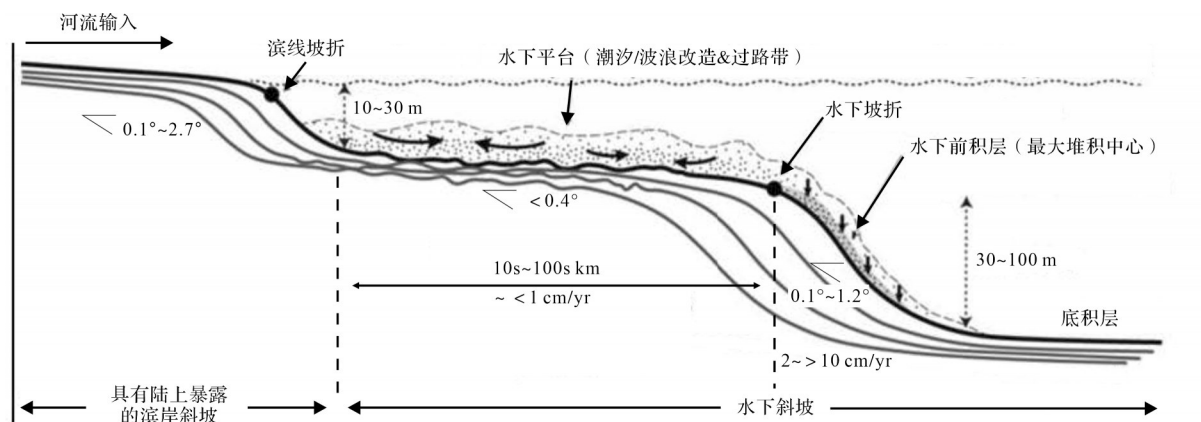


图2 滨岸—陆棚边缘双斜坡三角洲(据文献[32, 35]修改)

Fig.2 Shore-shelf edge double-slope delta (modified from references [32, 35])



体为骨架,河口坝不发育或规模很小。这些研究揭示了在低坡度、低沉降速率的广阔湖盆背景下,浅水三角洲独特的沉积过程与砂体构型,为全球浅水三角洲研究提供了宝贵的陆相实例。

#### 1.4 浅水三角洲概念的核心

浅水三角洲的概念经历了从基于构造背景的宏观定性描述,到基于物理界面的定量化尝试,再到基于沉积结构与相构成的精细刻画。因此,以往研究中浅水三角洲并不具有一个统一、普适的定义。本文认为,浅水三角洲是形成于特定地质条件下,通常为低沉降速率、浅水体、低坡度,以分流河道高度发育和席状砂体广泛分布为特征的三角洲体系的统称。

## 2 浅水三角洲研究进展

### 2.1 定量化的 Galloway 三端元分类

近年来,随着物理海洋学和沉积动力学的发展,一些学者依据河流、波浪和潮汐驱动的三角洲沉积物通量平衡,试图建立 Galloway 三端元定量框架,将定性“主控作用”转变为可计算的沉积物通量<sup>[39-40]</sup>。定量化 Galloway 三角图中三角洲的位置由河流、波浪、潮汐三个相对通量比值决定,通量比能够与遥感测量的地貌参数及定量重建三角洲形态参数建立定量关系。数值模拟表明全球三角洲的沉积物通量平衡可以解释至少35%的分流河道口数量变化和42%的岸线曲率变化<sup>[41]</sup>,波浪作用倾向于减少分流河道数量并使岸线平滑,而潮汐作用则倾向于增加岸线曲率,但不影响河道数量。

三角洲沉积通量定量化有助于对三角洲演化过程的正演模拟与反演模拟。在正演模拟中,能够基于已知河流输沙率、波浪和潮汐条件,定量预测该处发育的三角洲可能具有的岸线形态、河道数量和河口宽度等特征<sup>[40]</sup>。这对于评估未来气候变化或人类活动对三角洲地貌的影响至关重要。在反演模拟中,通过对古代三角洲的地貌形态进行定量重建,可以进一步反演出其形成时期的古海洋动力条件<sup>[40]</sup>。这为缺乏直接过程数据的地质历史时期的古环境重建提供了强有力的工具。

### 2.2 三角洲发育控制因素

浅水三角洲的形成、演化及其最终的地层结构,是多种控制因素在不同时空尺度上复杂相互作用的结果。这些因素可分为两大类:提供或改变沉积物

容纳空间的外部控制因素,以及在盆地内部进行沉积物再分配的内部(自源)动力过程。

#### 2.2.1 外部控制因素

##### 1) 可容空间与沉积物供给的相互作用

可容空间(A)与沉积物供给(S)之间的相对关系(即 A/S 比值)是层序地层学分析三角洲演化的核心原理<sup>[42]</sup>。这一比值直接控制了三角洲岸线的进退行为和地层叠置样式:进积过程中沉积物供给速率超过可容空间增加速率( $A/S < 1$ ),三角洲向盆地中心推进,形成向海(湖)的进积型层序;加积过程中两者速率大致平衡( $A/S \approx 1$ ),三角洲垂向向上生长,岸线位置相对稳定,形成垂向加积的层序;退积过程中可容空间增加速率超过沉积物供给速率( $A/S > 1$ ),岸线向陆地地方向迁移,三角洲发生退缩,形成向陆地退积的层序。

Uroza *et al.*<sup>[43]</sup>进一步提出“可容空间驱动型”和“供给驱动型”三角洲的概念。可容空间驱动型三角洲的进退主要受海平面升降控制,在海平面升降旋回中在陆棚上来回迁移。而供给驱动型三角洲拥有巨大的沉积物供给,即使在海平面高位期,也能持续向海进积,甚至抵达陆棚边缘<sup>[43]</sup>。

##### 2) 构造背景与沉降模式

构造活动通过控制盆地的形成、几何形态和沉降速率,为三角洲的长期发育提供了最基本的背景和可容空间<sup>[44]</sup>。不同构造背景下的沉降模式差异巨大,直接影响三角洲的规模和发育样式。例如,在裂谷盆地的同裂陷期,快速的构造沉降可以产生巨大的可容空间,有利于形成厚层的三角洲沉积序列。而在坳陷盆地的稳定沉降期,沉降速率相对缓慢均匀,有利于形成规模巨大、横向展布广泛的浅水三角洲体系。此外,盆地内的断层活动和古地貌起伏也会对物源体系和沉积物分散路径产生局部控制,从而影响三角洲朵叶体的具体展布位置<sup>[45]</sup>。

##### 3) 气候与海平面/湖平面控制

气候变化是影响输沙量与可容空间比值的最活跃因素之一。气候通过控制源区的风化剥蚀速率和流域的降雨径流,直接影响河流的输沙量<sup>[46]</sup>。例如,在一些地质历史时期,全球性的增温事件(极热事件)会导致水文循环加剧,从而引发沉积物供给的脉冲式增加,形成受气候驱动的沉积层序<sup>[47]</sup>。另一方面,全球气候变化通过控制冰川的消长,驱动全球海平面发生周期性升降,从而改变可容空间<sup>[46]</sup>。陆相湖盆中气候的干湿变化也影响着湖平面的升降。因此,气候—

海平面/湖平面旋回是驱动三角洲在不同时间尺度上发生进积—退积旋回的主要异源强迫机制。

### 2.2.2 内部控制因素

三角洲的内部动力过程,即自源过程,决定了沉积物在三角洲内部的具体分配方式,塑造了其复杂的内部结构和地貌形态。

#### 1) 河流动力学

河流自身的动力学特征,特别是流量变化,对三角洲形态有直接的塑造作用。基于数值模拟和对现代赣江三角洲的研究表明,流量变化控制着河道的迁移速率和改道频率<sup>[48]</sup>。高流量变化条件下(如季节性洪水),高流量和强水动力导致分流河道频繁决口、分叉和废弃,河网结构复杂,沉积物被输送到三角洲的多个区域,而不是集中在河口,从而形成平滑岸线的扇状三角洲。低流量变化条件下,分流河道较为稳定,数量少,沉积物集中在少数几个河口堆积,形成向前突出的指状砂坝,如典型鸟足状三角洲。

#### 2) 海洋/湖泊动力过程

河流输入的沉积物在河口会立即受到接收盆地中海洋或湖泊动力的改造,这些过程的相互作用共同塑造了三角洲前缘的形态和沉积相带<sup>[49]</sup>。河流—波浪相互作用主要发生在河口附近。波浪的能量和入射方向决定了对河口沉积物的改造强度。强波浪会将河口坝的沉积物沿岸输送,形成与岸线平行的沙坝和海滩,使岸线平直化。河流—潮汐相互作用主要发生在中—强潮汐环境的三角洲或河口湾。强烈的往复潮流会冲刷、改造河口,形成漏斗状河口和与潮流方向一致的沙脊、沙坝。潮流作用还可以向上游延伸,影响三角洲平原下段的河道。波浪—潮汐相互作用时,潮汐不仅直接影响沉积过程,还可以通过改变水深来间接影响波浪的破碎带位置,从而移动相应的沉积相带<sup>[49]</sup>。

这些自源过程与异源强迫之间存在着复杂的反馈关系。例如,海平面上升(异源)创造了可容空间,但三角洲的沉积填充过程是通过单个朵叶体的稳定进积,还是多个朵叶体的频繁迁移,则由河流流量变化与河道稳定性(自源)决定。

## 3 现有三角洲分类方案的局限性

### 3.1 基于水动力过程的分类

Galloway<sup>[21]</sup>提出的基于河流、波浪、潮汐三种动力相对强度的三端元分类方案是沉积学领域影响最

为深远的模型之一。该模型直观地将三角洲形态与主导水动力过程联系起来,如河流主导形成鸟足状,波浪主导形成弓形或尖嘴状,潮汐主导则形成指状或港湾状。

该分类方案的局限性在于主要考虑了三角洲前缘沉积物的再分配过程,忽略了其他控制三角洲发育的宏观地质因素。例如,为何在相似水动力条件下,不同构造背景(如裂谷盆地与被动大陆边缘)的三角洲会发育出截然不同的内部结构和地层叠置样式。

### 3.2 基于成因和结构的分类

#### 1) 结构—成因分类

Postma<sup>[12]</sup>将供源体系(如冲积扇、辫状河)和盆地水深(浅水/深水)两个维度引入分类,从而将三角洲的外部形态与内部结构和盆地背景联系起来,能够较好地区分吉尔伯特型三角洲和缓坡型三角洲。

#### 2) 密度流分类

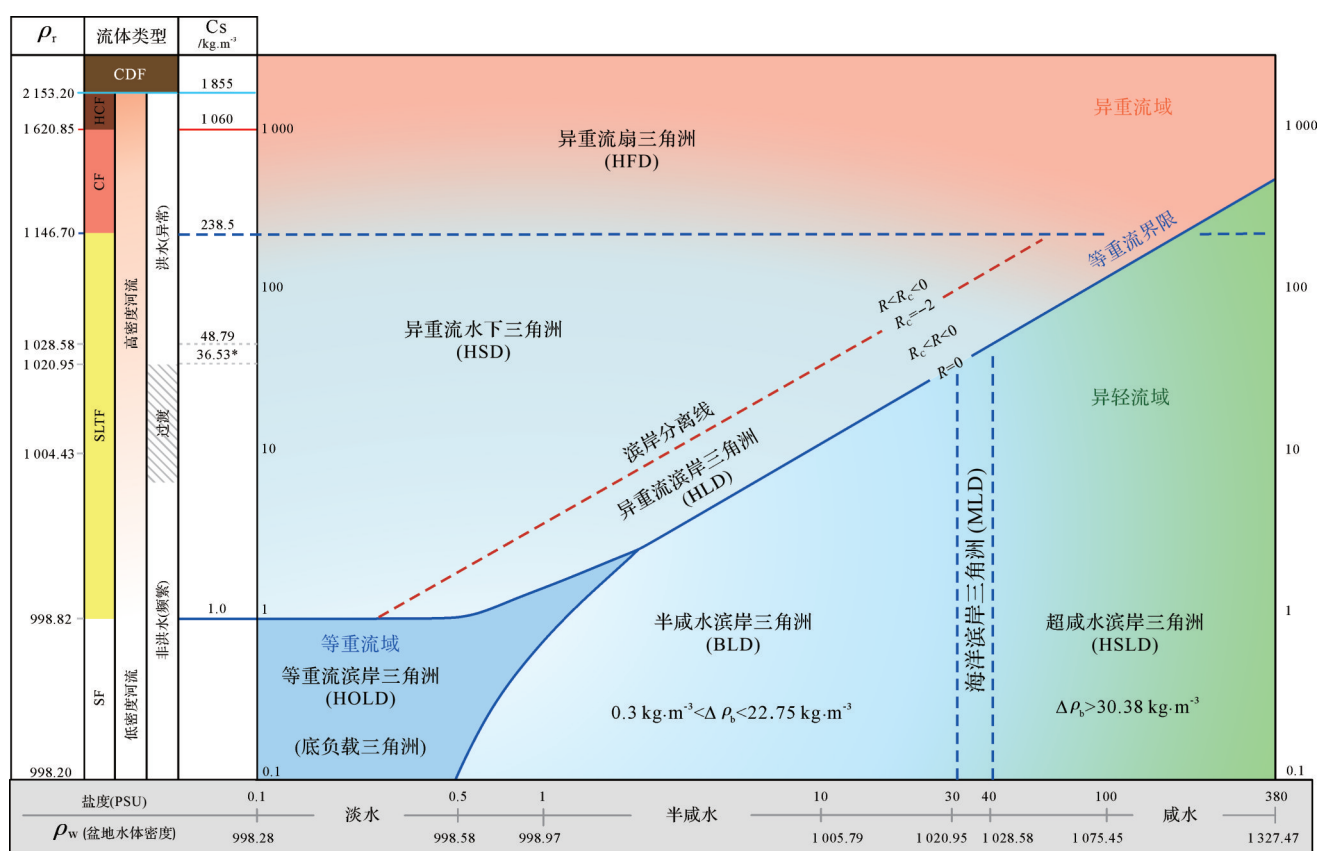
Zavala *et al.*<sup>[10,23]</sup>基于Bates<sup>[50]</sup>提出基于入流水与盆地水体密度差异的理念,将三角洲分为异轻流(hypopycnal,河水密度<盆地水)、等重流(homopycnal)和异重流(hyperpycnal,河水密度>盆地水)三大类(图3)。该分类方案强调沉积过程的重要性,尤其是异重流(即高密度浊流)将陆源沉积物直接输送至深水区的重要作用,最终在海底峡谷出口形成异重流三角洲<sup>[50]</sup>。依据Bates的定义,异重流三角洲仍属三角洲范畴,因沉积物直接来源于陆源河流输入,符合“河流—受水水体交互”的核心定义<sup>[10]</sup>。其中异重流滨岸三角洲属浅水类型,而异重流水下三角洲可归为滨岸—陆棚过渡类型,二者的核心差异在于水深与动力主导类型。

Postma<sup>[12]</sup>的分类方案虽然考虑了更多因素,但其划分仍较为宏观。Zavala *et al.*<sup>[10,23]</sup>的分类方案虽较系统地考虑了沉积过程,但在应用于古代地层记录时面临挑战,因为直接判断古水流的密度非常困难。此外,这两个模型虽然都涉及了水深,但仍未将基底沉降速率所代表的构造要素作为一个独立的、首要的分类维度来综合考虑。

## 4 本文建议的三角洲综合分类方案

### 4.1 分类原则与标准

三角洲的形成和演化受多种因素控制,主要包括构造背景、水动力条件、沉积物供给、盆地几何形态和气候条件等。传统上根据河流、潮汐和波浪作

图3 Zavala强调异重流的三角洲分类<sup>[10]</sup>Fig.3 Zavala's classification of deltas with emphasis on hyperpycnal flows<sup>[10]</sup>

用构建的三端元分类方案难以归纳三角洲的所有类型。本文综合考虑基底沉降速率、水动力条件和空间发育位置三个关键因素,试图提出三角洲分类的新方案。

### 1) 基底沉降速率

根据基底沉降速率与沉积速率的相对关系,将三角洲形成的构造背景划分为四类:极缓慢稳定沉降型(沉降速率远小于沉积速率)、缓慢沉降型(沉降速率与沉积速率基本平衡或略大于沉积速率)、较快速沉降型(沉降速率大于沉积速率,水深未显著变化)和快速沉降型(沉降速率远大于沉积速率,水深逐渐增加)。

### 2) 水动力条件

基于主导水动力类型和能量强度,可将三角洲划分为四类:河流主导型(高能量河流作用)、波浪主导型(强波浪改造作用)、潮汐主导型(显著潮汐影响)和混合能量型(两种或多种水动力条件均起到显著作用)。

### 3) 空间发育位置及水深

三角洲空间发育位置由构造背景、沉积供给强

度、海(湖)平面变化共同决定,根据发育位置及水深可划分为四类:海岸带(正常浪基面以上)、浅水陆棚(海岸带下部至内陆棚)、陆棚边缘(浅水陆棚与大陆斜坡之间地带)和深水环境(大陆斜坡及深水盆地)。

## 4.2 三角洲类型及其特征

基于上述分类标准,将三角洲分为四大类型:滨岸浅水三角洲、滨岸—陆棚深水三角洲、陆棚边缘深水三角洲及海底峡谷深水三角洲(表1)。

### 4.2.1 滨岸浅水三角洲

滨岸浅水三角洲发育于滨岸带环境,水深通常在浪基面以上。基底沉降速率缓慢或稳定,通常远小于沉积速率,形成浅水盆地环境。这类三角洲即 Fisk *et al.*<sup>[27]</sup>当初主张的浅水三角洲,通常发育在构造稳定、基底沉降缓慢的地区,如大型坳陷盆地的缓坡带或稳定克拉通边缘。以河流作用为主导,波浪和潮汐作用相对较弱。由于水体浅,波浪能量在传播过程中迅速衰减,对三角洲前缘的改造作用有限。潮汐作用在浅水条件下可能增强,但通常不足以主导三角洲形态<sup>[51]</sup>。

沉积特征表现为:(1)以分流河道砂体为骨架,



表1 本文建议的三角洲综合分类

Table 1 Comprehensive classification of deltas recommended in this study

| 三角洲类型  | 滨岸浅水三角洲            | 滨岸—陆棚深水三角洲          | 陆棚边缘深水三角洲                              | 海底峡谷深水三角洲       |
|--------|--------------------|---------------------|----------------------------------------|-----------------|
| 水深范围   | 滨岸带,正常浪基面以上        | 滨岸带下部至内陆棚           | 陆棚边缘                                   | 大陆斜坡及斜坡角深水环境    |
| 基底沉降速率 | 稳定、极缓慢沉降           | 缓慢沉降                | 较快速沉降                                  | 快速沉降            |
| 主导水动力  | 河流与滨岸作用<br>(波浪和潮汐) | 波浪与潮汐改造的异重流         | 河流+异重流                                 | 异重流             |
| 主要砂体类型 | 分流河道<br>砂体+河口坝     | 河口坝                 | 三角洲前缘砂体(常含滑塌变形)                        | 水道充填+天然堤+砂岩朵体   |
| 沉积构造   | 交错层理、平行层理、冲刷构造     | 浪成波痕、潮汐<br>束状体、爬升层理 | 块状层理、悬浮<br>韵律层(lofting rythmites)、滑塌构造 | 块状层理、复合层理、悬浮韵律层 |
| 生物化石   | 植物碎片、陆相<br>化石、古土壤  | 底栖动物化石、<br>植物碎屑     | 少量浮游动物化石、植物碎屑                          | 浮游动物化石、植物碎屑     |

河口坝不发育或规模小;(2)单砂体薄但横向分布广,多期砂体叠置形成复合砂体,厚度可达数十米;(3)沉积构造以交错层理、平行层理和冲刷—充填构造为主,反映强水动力条件;(4)生物扰动较弱,多见植物碎片、根系化石及煤层,反映浅水和间歇性暴露环境。

4.2.2 滨岸—陆棚深水三角洲

滨岸—陆棚深水三角洲发育于滨岸带向浅海陆棚过渡的区域,水深可以从低潮面延伸到正常浪基面以下,是一种过渡类型的三角洲。垂向上可能广泛发育进积型准层序,特征为具有底积层、前积层与顶积层的三层结构<sup>[52]</sup>。由于此类三角洲发育于陆棚环境,远离海岸线,因此其向上变粗序列的顶部少见三角洲平原沉积。基底沉降速率与沉积速率基本平衡,或沉降速率略大于沉积速率,形成相对稳定的深水环境。这类三角洲通常发育在构造活动中等、基底缓慢沉降的地区,如断陷盆地的缓坡带或被动大陆边缘。水动力条件复杂,通常为河流、波浪和潮汐的混合作用<sup>[51]</sup>。与滨岸浅水三角洲相比,波浪和潮汐作用更为显著,对三角洲前缘沉积物的改造作用更强。由于水深增加,波浪能量在到达三角洲前缘时仍有较强的改造能力,形成较为平缓的三角洲前缘。

沉积特征表现为:(1)垂向上可出现较完整的三角洲三层式结构,但前积层倾角较小;(2)分流河道和河口坝均较发育,河口坝规模较大,呈“朵叶状”或“扇形”分布;(3)砂体厚度较大,横向连续性好,常形成厚层块状砂岩;(4)沉积构造多样,除河流成因的交错层理外,还可见波浪成因的浪成波状层理和爬升层理;(5)生物扰动较强,可见海相或半咸水生物化石,反映较深水环境;(6)平面形态:滨岸深水三角洲通常呈扇形或半圆形,前缘较为平滑,受波浪改造

作用明显。根据主导水动力条件,可进一步分为河流主导型、波浪主导型和潮汐主导型亚型。

4.2.3 陆棚边缘深水三角洲

陆棚边缘三角洲发育于陆棚边缘附近,是连接浅海和深水环境的重要沉积体系<sup>[53]</sup>。基底沉降速率与沉积速率接近平衡,但沉降速率略大于沉积速率,形成相对稳定的陆棚边缘环境。这类三角洲通常发育在构造活动较强、基底沉降较快的地区,如前陆盆地的前缘或活动大陆边缘。以河流作用为主导,但受海洋环境影响显著。陆棚边缘三角洲通常形成于相对低水位时期,河流能量强,能够将沉积物输送至陆棚边缘。在陆棚边缘,沉积物常通过异重流过程进一步向深水搬运,形成与深水扇相连的“源—汇”系统。

沉积特征表现为:(1)具有独特的“双斜坡(double clinoform)”结构,即三角洲前缘斜坡和陆棚边缘斜坡;(2)三角洲前缘斜坡较陡,发育下切谷和滑塌构造;(3)垂向上表现为向上变粗的反旋回,底部为深水泥岩,向上过渡为三角洲前缘砂体;(4)砂体以三角洲前缘砂体为主;(5)常见重力流沉积构造,如滑塌变形层理、碎屑流沉积和浊流沉积;(6)平面形态:陆棚边缘三角洲通常呈“鸟足状”或“指状”,前缘呈锯齿状,发育下切谷系统。

4.2.4 海底峡谷深水三角洲

此类三角洲体系(如海底扇)由陆源沉积物重力流(异重流)进入深水环境形成,亦即 Zavala *et al.*<sup>[10]</sup>的异重流深水三角洲。其物源主要来自河流入海形成的异重流:在河流洪水期形成的异重流越过陆棚坡折后,会转化为大规模盆外供源的浊流,这些浊流被搬运至深水盆地并发生沉积,最终形成海底扇。基底沉降速率远大于沉积速率,形成深水盆地环境。

此类沉积体系通常发育于构造活动强烈、基底快速沉降的区域,如弧后盆地或深海海沟附近。沉积物搬运以含沉积物异重流为主,通常形成盆外供源的浊积岩沉积。该类三角洲常与陆棚边缘三角洲或其他浅水三角洲构成“源—汇”系统,沉积物通过海底峡谷、斜坡水道等通道系统,从大陆架直接搬运至深水区域<sup>[54]</sup>。

沉积特征表现为:(1)平面形态呈扇状或朵叶状,由内扇、中扇和外扇三部分组成。各扇体段的沉积物中均含有丰富的盆外组分,如植物残体及木炭碎屑。(2)内扇以“下切谷—主水道”为主要发育特征,沉积物粒度从细粒至粗粒均有分布,普遍发育块状层理和多期粒序层理<sup>[55]</sup>;(3)中扇发育分流水道和天然堤,伴有悬浮韵律层,沉积物以砂岩朵叶体为主;(4)外扇以溢岸沉积为主要特征,沉积物以细粒(粉砂岩、泥岩)为主,发育水平层理和悬浮韵律层;(5)此类深水三角洲常与盆内重力流沉积伴生;(6)垂向上表现出多期向上变细旋回,反映了受气候和构造控制的周期性异重流事件;(7)平面形态,该类三角洲通常呈扇状或朵叶状,根据其形态及内部结构可进一步细分为鸟足状扇、朵叶状扇和裙状扇。

## 5 含煤岩系浅水三角洲沉积模式

滨岸浅水三角洲发育于低沉降速率背景,其沉降速率远小于沉积速率,易形成浅水盆地环境,在古植物及古气候条件满足的情况下是聚煤作用发生的重要场所。广泛发育的分流间湾为泥炭沼泽持续发育提供空间,废弃的分流河道也可充填形成泥炭沼泽;基准面上升导致三角洲大面积废弃,广阔的暴露或极浅水区域迅速沼泽化,形成大面积泥炭沼泽,这种废弃事件是形成厚煤层和区域稳定煤层的关键触发机制。

Horne *et al.*<sup>[29]</sup>针对含煤岩系浅水三角洲,划分出河流—上三角洲平原相(以河流作用为主)、过渡带—三角洲平原(可能受潮汐作用影响)、下三角洲平原、三角洲前缘及前三角洲等亚相类型(图4)。三角洲平原一般发育分流河道、天然堤、决口扇、分流间湾、泥炭沼泽等沉积类型,但是上三角洲平原分流河道占比较大,下三角洲平原分流间湾占比较大,上三角洲平原煤层厚但横向上因河道冲刷而不连续,下三角洲平原煤层一般较薄,只有在上、下三角洲平原过渡带中厚度较大且横向广泛分布的煤层发育,这

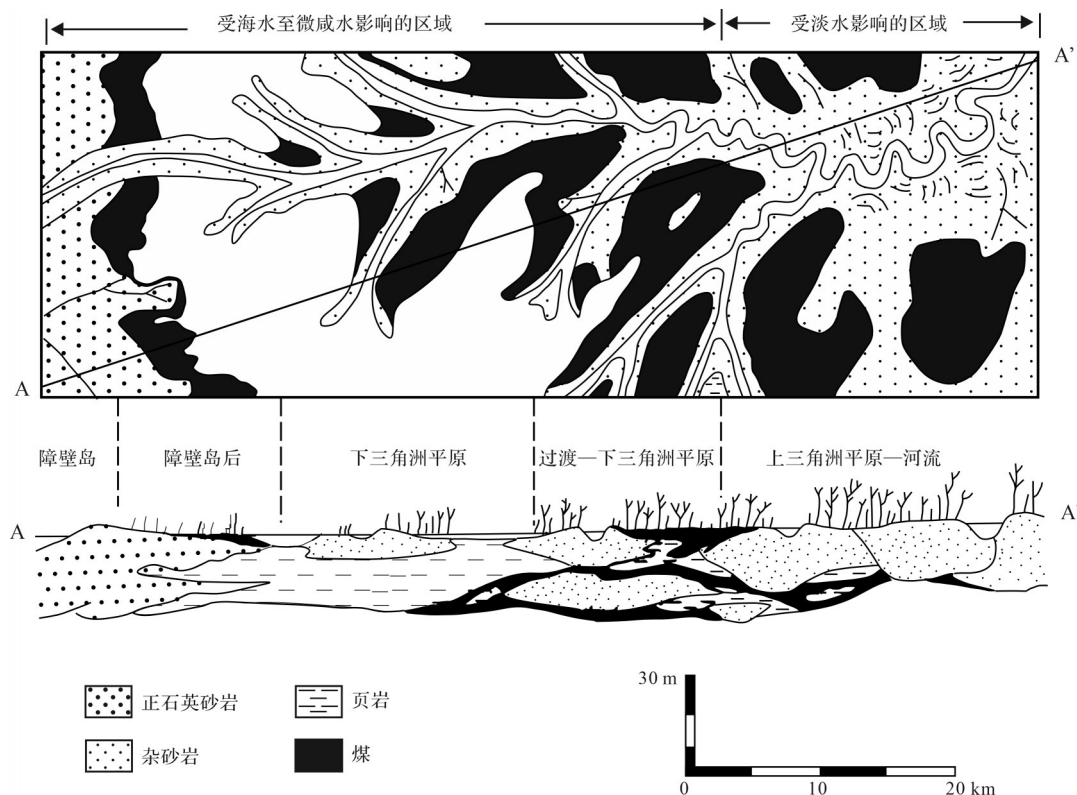


图4 Horne的含煤浅水三角洲沉积模式<sup>[29]</sup>

Fig.4 Horne's coal-bearing shallow-water delta sedimentary model<sup>[29]</sup>



就是著名的阿勒格尼三角洲模式(图4)。

贵州西部上二叠统主要由碎屑岩夹石灰岩组成,属于云贵地区的海陆过渡相类型沉积,发育典型的含煤岩系浅水三角洲沉积<sup>[56]</sup>。该过渡相区沉积特征受到来自西侧陆源河流和来自东侧与东南侧广海方向的海洋潮汐作用双重因素的影响,最终使得该区发育典型的三角洲—潮坪沉积体系,这一沉积体系强调河流和潮汐的双重控制,只是在不同部位两者表现得相对强弱不同,靠陆方向河流作用占优势,靠海方向潮汐作用占优势。该沉积体系可进一步划分为河控的上三角洲平原、河流和潮汐双重控制的过渡三角洲平原、潮控的下三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲等亚相(图5)。

#### 1) 河控的上三角洲平原

河控上三角洲平原发育分流河道、天然堤、决口扇和决口水道、分流间湖泊、分流间湾及分流间泥炭沼泽等沉积类型。

分流河道沉积主要由中—细粒岩屑砂岩组成,可见海绿石矿物,底部常见冲刷面,并伴生有树干化石、泥砾及煤屑等。一套砂岩内有多次冲刷接触和多层由粗变细的序列。砂岩中常见大型槽状交错层理和大型板状交错层理。

天然堤沉积位于分流河道沉积之上,以具有纹层状的极细砂、粉砂岩或泥为特征,发育小型砂纹层理,可见到稀疏的植物根化石,潜穴较发育,以非垂直者最多。

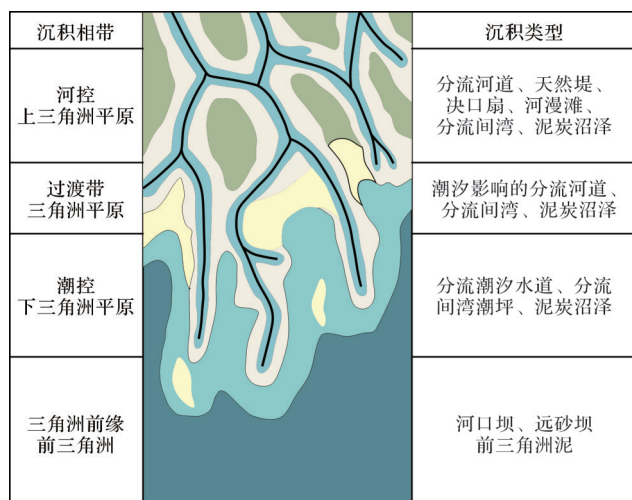


图5 黔西晚二叠世含煤浅水三角洲沉积模式

(据文献[56]修改)

Fig.5 Sedimentary model of the Late Permian coal-bearing shallow-water delta in western Guizhou (modified from reference [56])

决口扇分为两种类型,一类是与分流河道、天然堤共生的决口扇沉积,另一类是深入到岸后或分流间湾湿地环境中的粉砂质决口扇,前者常为细砂到粉砂级、发育小型砂纹层理及冲刷面,后者常具有向上变粗的小型三角洲沉积特征,厚度一般介于1~2 m,往分流间湾中心地带逐渐变薄尖灭,决口扇沉积的顶界往往为明显接触,为煤或泥质沉积所覆盖,所以在决口扇砂岩的顶部常常可见植物根痕。

分流间湾沉积不很发育,仅在最大海侵期可发育这种类型沉积。以含动物化石(瓣鳃类、腹足类、腕足类及头足类等)的泥岩为代表,并含有薄层状菱铁矿。

泥炭沼泽发育于分流河道间的湿地上,沼泽的水体性质主要为淡水,沉积物以根土岩和煤为主,夹有炭质泥岩及泥质粉砂岩夹矸。上三角洲平原泥炭沼泽形成的煤层煤质较好,为低灰(<15%)和低硫(0.5%~1.0%)。

#### 2) 河流—潮汐双重控制的过渡三角洲平原

过渡带三角洲平原主要特征表现在既有较强的河流作用,同时又受到较强的潮汐作用的影响,基本处于河流和潮汐双重作用控制下,贵州西部纳雍地区以及盘州市盘关向斜东南翼等地发育了过渡带三角洲平原。

潮汐影响的分流河道是该相带的主要沉积类型,主要由中细粒海绿石质岩屑砂岩和长石质岩屑砂岩组成,底部发育冲刷面,河床滞留沉积粒度较粗,常含有树干化石、泥砾及煤屑,向上为发育大型槽状交错层理、大型板状层理以及具双黏土层构造的潮汐束状体的砂岩。这种分流河道向上游会过渡为河控的分流河道,向下游会过渡为潮道。层序的顶部往往发育潮坪相的粉砂岩,其中有典型的砂—泥薄互层层理、脉状层理和透镜状层理。

过渡带三角洲平原泥炭沼泽多是在分流间湾潮坪上演化而来,由于受到潮汐作用影响,所以形成的煤层常为中—高硫煤,全硫含量为1%~3%。

#### 3) 潮控的下三角洲平原

潮控的下三角洲平原可识别出分流潮汐水道(潮道)及分流间湾潮坪沉积类型。

潮控分流水道指受潮汐影响的分流河道,沉积物主要为细粒海绿石质岩屑砂岩和长石岩屑砂岩,底部有冲刷面,其上可见泥砾及树干化石,发育大型槽状交错层理、大型板状交错层理及双向交错层理。

泥砾及树干化石证明有来自陆地的河流的影响,双向交错层理说明有来自海洋的潮汐作用影响。砂体平面上为分枝状,剖面上为透镜状。

分流间湾潮坪由薄层菱铁矿和具沙泥薄互层层理的粉砂岩互层组成,代表相对闭塞环境中的潮汐沉积。

#### 4) 下三角洲平原泥炭沼泽

下三角洲平原受潮汐作用影响强烈,其泥炭沼泽相多由分流间湾潮坪演化而来,形成的煤层厚度较小,煤质较差,灰分一般大于20%,硫分一般介于2%~4%。

#### 5) 三角洲前缘

河口坝沉积主要为中厚层及厚层纯净细砂及粉砂岩组成向上变粗序列,发育大型楔状交错层理与板状交错层理,可夹有薄层潮汐层理泥岩。沉积序列顶部可发育生物潜穴及生物碎屑化石,顶面偶见波痕等层面构造。河口坝砂体剖面上多呈对称的透镜状砂体,平面上多呈与上游河道砂体平行的长椭圆形或呈辐射状分布。

远砂坝沉积以薄层状粉砂岩和泥质粉砂岩互层为特征,夹薄层泥质条带,发育潮汐层理、浪成波痕以及冲刷—充填构造、生物扰动构造等,含动物化石。

#### 6) 前三角洲

位于三角洲前缘外侧,因浅水环境下物源供应充足,沉积物快速覆盖至较深水区,故前三角洲极薄或与海相泥岩过渡,水平层理发育,生物扰动强烈。

## 6 结论

(1) 浅水三角洲概念自Fisk提出后持续演变,核心争议集中于“浅水”界定标准(浪基面以上、沉降速率缓慢或毯式沉积结构)。近年研究强调其形成于构造稳定、地形平缓、浅水环境,分流河道高活跃度、砂体广布且连通性多变,受控于古构造、湖平面波动及物源供给速率。

(2) 本文基于基底沉降速率、水动力、空间发育位置提出了三角洲三维度综合分类方案,将三角洲划分为滨岸浅水型、滨岸—陆棚深水型、陆棚边缘深水型和海底峡谷深水三角洲四类,避免了传统分类因忽略构造背景与沉积位置而存在的局限性。

(3) 含煤岩系滨岸浅水三角洲中,分流间湾及废弃河道为泥炭沼泽发育提供了有利空间,基准面上

升触发的三角洲废弃事件是厚煤层形成的关键机制。该类三角洲包括河控的上三角洲平原、河流和潮汐双重控制的过渡三角洲平原、潮控的下三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲等亚相,过渡带三角洲平原是重要聚煤区。

## 参考文献(References)

- [1] Gilbert G K. Lake bonnevill[R]. Washington: U. S. Geological Survey Monograph, 1890: 438.
- [2] Barrell J. Criteria for the recognition of ancient delta deposits[J]. GSA Bulletin, 1912, 23(1): 377-446.
- [3] Posamentier H W, Walker R G. Facies models revisited[M]. Tulsa: SEPM Special Publication, 2006, 84: 527.
- [4] Reading H G. Sedimentary environments: Processes, facies and stratigraphy[M]. 3rd ed. Blackwell Scientific Publication, 2013: 1-704.
- [5] Edwards M B. Upper Wilcox Rosita delta system of South Texas: Growth-faulted shelf-edge deltas[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(1): 54-73.
- [6] 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.
- [7] 武强,解习农,姜涛. 陆架边缘三角洲的研究现状及其意义[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(3): 1-5. [Wu Qiang, Xie Xinong, Jiang Tao. Study situation of shelf-margin delta and its significance[J]. Marine Geology Frontiers, 2005, 21(3): 1-5. ]
- [8] 朱筱敏,葛家旺,赵宏超,等. 陆架边缘三角洲研究进展及实例分析[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 945-957. [Zhu Xiaomin, Ge Jiawang, Zhao Hongchao, et al. Development of shelf-edge delta researches and typical case analyses[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 945-957. ]
- [9] 张曼莉,林畅松,何敏,等. 珠江口盆地晚渐新世陆架边缘三角洲沉积层序结构及演化[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 875-885. [Zhang Manli, Lin Changsong, He Min, et al. Sequence architecture and evolution of shelf-margin deltaic systems of the Late Oligocene in Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 875-885. ]
- [10] Zavala C, Arcuri M, Zorzano A, et al. Deltas: New paradigms [J]. The Depositional Record, 2024, 10(5): 600-636.
- [11] Donaldson A C. Pennsylvanian sedimentation of central Appalachians[M]//Briggs G. Carboniferous of the southeastern United States. Geological Society of America Special Papers, 1974: 47-78.
- [12] Postma G. An analysis of the variation in delta architecture[J]. Terra Nova, 1990, 2(2): 124-130.
- [13] 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. ]
- [14] 朱筱敏,潘荣,赵东娜,等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 7-14. [Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2013, 37(5): 7-14. ]
- [15] 刘忠保,罗顺社,何幼斌,等. 缓坡浅水辫状河三角洲沉积模拟实验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(6): 9-14. [Liu Zhongbao, Luo Shunshe, He Youbin, et al. Study on sedimentation simulation experiment of gentle-slope shallow braided river delta[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2011, 9(6): 9-14. ]
- [16] 王夏斌,姜在兴,胡光义,等. 浅水三角洲分流河道沉积模式分类[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(5): 654-667. [Wang Xiabin, Jiang Zaixing, Hu Guangyi, et al. Classification of sedimentary models of distributary channels in shallow-water deltas[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2020, 42(5): 654-667. ]
- [17] 袁选俊,周红英,张志杰,等. 坳陷湖盆大型浅水三角洲沉积特征与生长模式[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(1): 1-11. [Yuan Xuanjun, Zhou Hongying, Zhang Zhijie, et al. Depositional features and growth pattern of large shallow-water deltas in depression basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(1): 1-11. ]
- [18] 徐振华,邓航,吴胜和,等. 河控浅水三角洲前缘树枝状沙坝沉积构型与形成机理[J]. 古地理学报, 2024, 26(6): 1338-1351. [Xu Zhenhua, Deng Hang, Wu Shenghe, et al. Depositional architecture and formative mechanism of dendritic bars within river-dominated shallow-water delta front[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2024, 26(6): 1338-1351. ]
- [19] 崔映坤,鲍志东,李忠诚,等. 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层浅水曲流河三角洲沉积与演化特征[J]. 古地理学报, 2025, 27(5): 1207-1226. [Cui Yingkun, Bao Zhidong, Li Zhongcheng, et al. Sedimentary characteristics and evolution of shallow-water meandering river delta in Fuyu oil layer, southern Fuxin uplift zone, Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2025, 27(5): 1207-1226. ]
- [20] 邵龙义,徐小涛,王帅,等. 中国含煤岩系古地理及古环境演化研究进展[J]. 古地理学报, 2021, 23(01): 19-38. [Shao Longyi, Xu Xiaotao, Wang Shuai, et al. Research progress on paleogeographic and paleoenvironmental evolution of coal-bearing strata in China[J]. *Journal of Paleogeography*, 2021, 23(01): 19-38. ]
- [21] Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [M]/Broussard M L. Delta: Models for exploration. Houston: Houston Geological Society, 1975: 87-98.
- [22] Bhattacharya J P, Giosan L. Wave-influenced deltas: Geomorphological implications for facies reconstruction[J]. *Sedimentology*, 2003, 50(1): 187-210.
- [23] Zavala C, Arcuri M, Di Meglio M, et al. Deltas: A new classification expanding Bates's concepts[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 10(1): 23.
- [24] 薛良清, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. 地质学报, 1991, 65(2): 141-153. [Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(2): 141-153. ]
- [25] 朱筱敏,刘媛,方庆,等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 89-99. [Zhu Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake. example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 89-99. ]
- [26] 金振奎,高白水,李桂仔,等. 三角洲沉积模式存在的问题与讨论[J]. 古地理学报, 2014, 16(5): 569-580. [Jin Zhenkui, Gao Baishui, Li Guizai, et al. Problems and discussions about delta depositional models[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(5): 569-580. ]
- [27] 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.
- [28] Ferm J C. Carboniferous Environmental Models in Eastern United States and Their Significance [M]/Briggs G. Carboniferous of the Southeastern United States. Geological Society of America. 1974: 79-95.
- [29] Horne J C, Ferm J C, Caruccio F T, et al. Depositional models in coal exploration and mine planning in Appalachian region[J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62(12): 2379-2411.
- [30] 吴胜和,徐振华,刘钊. 河控浅水三角洲沉积构型[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 202-215. [Wu Shenghe, Xu Zhenhua, Liu Zhao. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 202-215. ]
- [31] 张昌民,尹太举,朱永进,等. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 933-944. [Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 933-944. ]
- [32] Steel R, Osman A, Rossi V M, et al. Subaqueous deltas in the stratigraphic record: Catching up with the marine geologists[J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 256: 104879.
- [33] Olariu C, Bhattacharya J P. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(2): 212-233.
- [34] Edmonds D A, Shaw J B, Mohrig D. Topset-dominated deltas: A new model for river delta stratigraphy[J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1175-1178.
- [35] Peng Y, Olariu C, Steel R J. Recognizing tide- and wave-dominated compound deltaic clinoforms in the rock record[J].



- Geology, 2020, 48(12): 1149-1153.
- [36] Muto T, Furubayashi R, Tomer A, et al. Planform evolution of deltas with graded alluvial topsets: Insights from three-dimensional tank experiments, geometric considerations and field applications[J]. Sedimentology, 2016, 63(7): 2158-2189.
- [37] 王俊辉, 张伟, 李莉, 等. 平衡指数解释深水、浅水三角洲地貌的差异[J]. 沉积学报, 2025, 43(3): 894-911. [Wang Junhui, Zhang Wei, Li Li, et al. Principal differences between deep-water and shallow-water delta landforms: An interpretation by the grade index model[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(3): 894-911. ]
- [38] Bhattacharya J P. Deltas[M]//Posamentier H W, Walker R G. Facies models revisited. Tulsa: SEPM, 2006: 237-292.
- [39] Nienhuis J H, Ashton A D, Edmonds D A, et al. Author correction: Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain[J]. Nature, 2020, 577(7791): 514-518.
- [40] Broaddus C M, Vulis L M, Nienhuis J H, et al. First-order river delta morphology is explained by the sediment flux balance from rivers, waves, and tides[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(22): e2022GL100355.
- [41] Paniagua-Arroyave J F, Nienhuis J H. The quantified Galloway ternary diagram of delta morphology[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2024, 129(11): e2024JF007878.
- [42] Schlager W. Accommodation and supply—a dual control on stratigraphic sequences[J]. Sedimentary Geology, 1993, 86(1/2): 111-136.
- [43] Uroza C A, Steel R J. A highstand shelf-margin delta system from the Eocene of West Spitsbergen, Norway[J]. Sedimentary Geology, 2008, 203(3/4): 229-245.
- [44] Wang Y R, Lin C S, Zhang Z T, et al. Sedimentary evolution and controlling factors of Early-Mid Miocene deltaic systems in the northern Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 6134.
- [45] Cui L T, Liao X W, Zhou L Y, et al. Paleogeomorphic influence on facies characteristics of braided delta and reservoir prediction: An example from L oilfield in Bohai Bay Basin[J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2019, 7(8): 195-205.
- [46] Jervey M T. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression[M]//Wilgus C K, Hastings B S, Posamentier H, et al. Sea-level changes: An integrated approach. Tulsa: SEPM Special Publication, 1988, 42: 47-69.
- [47] Vaucher R, Musajo C, Spangenberg J E, et al. Sediment supply variation control on Lower Eocene delta sequences (Trempe Basin, Spain)[J]. Geology, 2025, 53(1): 83-88.
- [48] 李洪辉, 李伟, 岳大力, 等. 流量变化对浅水三角洲沉积特征影响[J]. 地球科学, 2025, 50(6): 2428-2443. [Li Honghui, Li Wei, Yue Dali, et al. Impact of discharge variability on sedimentary characteristics in shallowwater deltas[J]. Earth Science, 2025, 50(6): 2428-2443. ]
- [49] 彭旸, 龚承林, 李顺利. 河流—波浪—潮汐混合作用过程研究进展[J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 957-978. [Peng Yang, Gong Chenglin, Li Shunli. Recent advances in river-wave-tide mixed processes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 957-978. ]
- [50] Bates C C. Rational theory of delta Formation[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(9): 2119-2162.
- [51] Boggs S. Principles of sedimentology and stratigraphy[M]. Boston: Pearson Prentice Hall, 2012: 1-584.
- [52] 侯明才, 杨田, 田景春, 等. 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. ]
- [53] Zhang M L, Lin C S, Li H, et al. Late Oligocene to Early Miocene delta and linked slope fan systems: Depositional architecture and sediment dispersal, the Pearl River Mouth Basin[J]. Sedimentology, 2023, 70(3): 759-782.
- [54] Tang W, Xie X J, Xiong L Q, et al. Coupling relationship and genetic mechanisms of shelf-edge delta and deep-water fan source-to-sink: A case study in Paleogene Zhuhai Formation in south subsag of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 589-603.
- [55] Zavala C, Marcano J, Carvajal J, et al. Genetic indices in hyperpycnal systems: A case study in the Late Oligocene-Early Miocene Merecure Formation, Maturin Subbasin, Venezuela[M]//Slatt R M, Zavala C. Sediment transfer from shelf to deep water: Revisiting the delivery system. AAPG Studies in Geology, 2012, 61: 53-73.
- [56] 邵龙义, 刘红梅, 田宝霖, 等. 上扬子地区晚二叠世沉积演化及聚煤[J]. 沉积学报, 1998, 16(2): 55-60. [Shao Longyi, Liu Hongmei, Tian Baolin, et al. Sedimentary evolution and its controls on coal accumulation for the Late Permian in the Upper Yangtze area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(2): 55-60. ]

## Discussion on Classification of Deltas and Definition of Shallow-Water Deltas

SHAO LongYi<sup>1</sup>, PAN Hao<sup>1</sup>, WANG XueTian<sup>1</sup>, ZAVALA Carlos<sup>2</sup>, ZHOU Kai<sup>1</sup>, YANG RenChao<sup>2</sup>,  
SHAO YanWen<sup>1</sup>, LU Jing<sup>1</sup>

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2. College of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

**Abstract:** [Significance] As a crucial sedimentary system formed by the interaction of rivers and receiving water bodies (oceans or lakes), delta has become a research hotspot in sedimentology due to its unique depositional characteristics and resource potential. In particular, the discussion on the classification of delta types and the definition of shallow-water deltas has garnered significant attention. [Progress] This paper systematically reviews the research context of shallow-water deltas, focusing on the evolution of their definition and connotation. This includes multiple perspectives of definition based on basement subsidence rates, wave base, facies associations, and development settings. It summarizes research advances in sedimentary dynamic processes, morphological evolution and sandbody architecture, as well as controlling factors. The review reveals unique patterns of distributary channel activity and sandbody distribution under low-gradient and shallow-water hydrodynamic conditions. [Conclusions and Prospects] The limitations of existing delta classification schemes are comparatively analyzed. A four-type delta classification system is proposed, integrating basement subsidence rates, hydrodynamic conditions, and sedimentary settings. Four types of deltas include coastal shallow-water delta, coast-shelf deep-water delta, shelf-edge deep-water delta, and canyon deep-water delta. Meanwhile, the sedimentary models of coastal shallow-water deltas in coal-bearing strata are discussed, which clarifies the composition of subfacies such as the upper delta plain, lower delta plain, delta front, and prodelta, as well as the coal-accumulating characteristics of delta plains.

**Key words:** shallow-water deltas; deep-water deltas; sedimentary system; classification system of deltas; coal-bearing series