

文章编号:1000-0550(2014)04-0710-14

现代缓坡三角洲沉积模式^①

——以鄱阳湖赣江三角洲为例

金振奎^{1,2} 李 燕^{1,2} 高白水^{1,2} 宋宝全³ 何宇航³ 石 良^{1,2} 李桂仔^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249; 2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;

3. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

摘 要 在我国,缓坡三角洲形成了不少大油田。关于缓坡三角洲的沉积模式,前人做了大量研究,但大都针对古代地层。由于古代地层精细对比和沉积环境解释常常因人而异,因此总结出来的沉积模式五花八门,可靠性较低。鉴于此,本文从现代实例入手,选择了鄱阳湖赣江三角洲,采用野外实地测量、探槽、浅钻孔、探地雷达、粒度分析等方法,对其沉积特征进行系统研究,建立了缓坡三角洲沉积模式。本次研究主要取得了如下重要认识:①在三角洲平原上发现了两种新的砂体类型,即汉口滩和井口滩,分别位于分流河道分汊处和合并处,这意味着分流河道的分汊、合并部位也是有利的油气聚集部位;②在分流河道砂体中存在连片披覆型、孤立充填型、孤立残留型三种类型的落淤层,并提出了其形成机制;③统计了分流河道的定量参数,提出了分流河道宽度的变化规律,即从上三角洲平原到下三角洲平原,分流河道逐渐变窄,分一次分汊其宽度平均降低 1/2,而且分汊频率增高,数量变多,弯度降低,沉积物变细变薄,砂体间连通性变差;④三角洲前缘不发育水下分流河道,而是发育河口坝和席状滩;⑤由于坡度平缓,湖平面小幅度变化会引起湖岸线大规模进退,可导致水下与水上沉积频繁交互,因此缓坡三角洲沉积在地震上不会有叠瓦状或反 S 形前积反射,而是呈平行或亚平行反射。

关键词 鄱阳湖 缓坡三角洲 沉积模式 定量参数 汉口滩 井口滩

第一作者简介 金振奎 男 1963 年出生 教授 沉积学、层序地层学及成岩作用 E-mail: jinzhenkui@188.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

关于“缓坡三角洲”,前人称“浅水三角洲”,将其定义为一类发育于水体较浅和构造相对稳定的台地、陆表海或地形平缓、整体沉降缓慢的拗陷湖盆中的三角洲,并将浅水界定为水深在几十米以内,或在浪基面以上^[1,2],但关于怎样算是地形平缓并没有确切界定。我们认为,“浅水三角洲”这个词并不恰当,因为凡是三角洲都是一部分在水上,一部分在水下,都发育在浅水区,基本上所有的三角洲都可称浅水三角洲。因此,认为应称“缓坡三角洲”。

本文将“缓坡三角洲”定义为:在平缓湖底或海底发育起来的、三角洲前缘斜坡十分平缓的三角洲,其沉积在地震剖面上呈平行、亚平行反射,而不是典型三角洲具有的叠瓦状或反 S 形前积反射。坡度多大算“平缓”?根据实地测量,鄱阳湖三角洲平原、前缘及湖底坡降为 1/1000 到 2/1000,折算坡度为 0.1°左右。我国渤海、东海、南海海岸的坡度为 3°~7°。一些典型现代三角洲前缘斜坡的坡度也在 3°~7°之

间,如黄河三角洲、滦河三角洲、大石河三角洲等,而 3°~7°算是较陡的了。坡度为 1°相当于坡降为 18/1000 左右,仍较陡。因此,本文认为,可取 0.5°作为区分“缓坡”与“陡坡”的界限,缓坡应指坡度小于 0.5°的斜坡。

缓坡三角洲在我国一些重要陆相含油气盆地(如松辽白垩系、鄂尔多斯三叠系、柴达木古近系等)中广泛发育,形成重要的含油气储层^[3~8]。目前,这类三角洲形成的油气田的开发面临的主要困难是:大部分分流河道砂体宽度比井间距(较小的一般为 100~200 m)小,又较薄,其分布难以用钻井控制,地震上也分辨不出来,开发难度大。如果能够知道这类三角洲分流河道砂体的宽度、形态、分汊合并特点及平面展布型式,了解三角洲前缘砂体的形态及大小等定量参数,就能够大大提高地下砂体预测的准确度,这对合理井距选择、开发方案调整及寻找剩余油有重要指导意义。

前人虽然对古代缓坡三角洲做了很多研究,也总结出了多种沉积模式^[9~17],但由于在地下准确追踪

①国家重点基础研究发展规划(973)项目(编号:2006CB202300)资助
收稿日期:2013-10-29;收修改稿日期:2014-01-26

对比单砂体很困难,编制出来的单砂体展布图可靠性并不高,自然总结出来的沉积模式可信度低。“现在是认识过去的钥匙”。可通过研究现代的缓坡三角洲,建立其沉积模式。

鄱阳湖赣江三角洲是我国难得的、发育很好、现象丰富的缓坡三角洲。关于该三角洲,虽然已有一些研究^[18,19],但研究程度并不高,不少重要问题尚未弄清楚。例如,许多学者认为,浅水三角洲水下分流河道发育,但金振奎(2011)提出,湖泊三角洲不发育水下分流河道,所谓的“水下分流河道”实际上是低水位时湖底暴露在水上形成的,湖平面上升时又将其淹没于水下^[20]。通过鄱阳湖现代三角洲考察研究,可对类似问题进行验证。

本次在收集、分析已有钻孔等资料的基础上,主要通过实地考察、探槽、探地雷达、卫星影像分析技术等对鄱阳湖赣江三角洲展开了重点研究,同时,还对鄱阳湖其他三角洲进行了考察。

1 概况

鄱阳湖位于江西省北部,28°24′~29°46′ N,115°49′~116°46′ E,南北长 110 km,东西宽 50~70 km,北部较窄,仅有 5~8 km,是我国最大的淡水湖泊。鄱阳湖是一个吞吐型湖泊,周围有赣江、抚河、饶河、信江、修水等 5 大河流入该湖(图 1),并形成了三角洲,尤其以赣江三角洲规模最大、发育最好。鄱阳湖北部与长江相接,洪水季节鄱阳湖水汇入长江,枯水季节可出现江水倒灌。

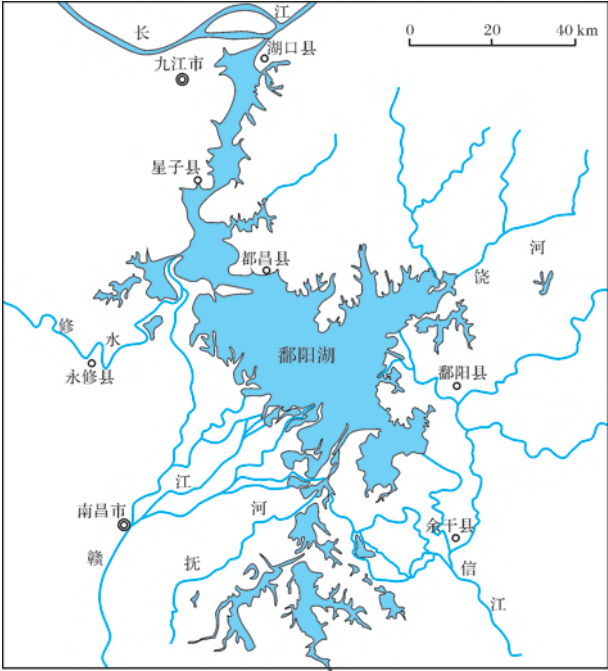


图 1 鄱阳湖概况(湖面为丰水期范围)

Fig.1 Location of Poyang Lake

(The lake area is in flood period)

鄱阳湖湖底很平缓,在 0.1°左右,水体较浅,平均水深 8.4 m。湖泊面积随季节变化很大,洪水期面积达 4 647 km²,枯水期面积仅有 146 km²,呈现“洪水一片,枯水一线”、“高水是湖,低水似河”的自然景观(图 2)^[21]。洪水期一般出现在 3 月至 7 月,枯水期一般出现在 10 月至次年 3 月。

鄱阳湖盆地是形成于中生代的构造盆地,形成后

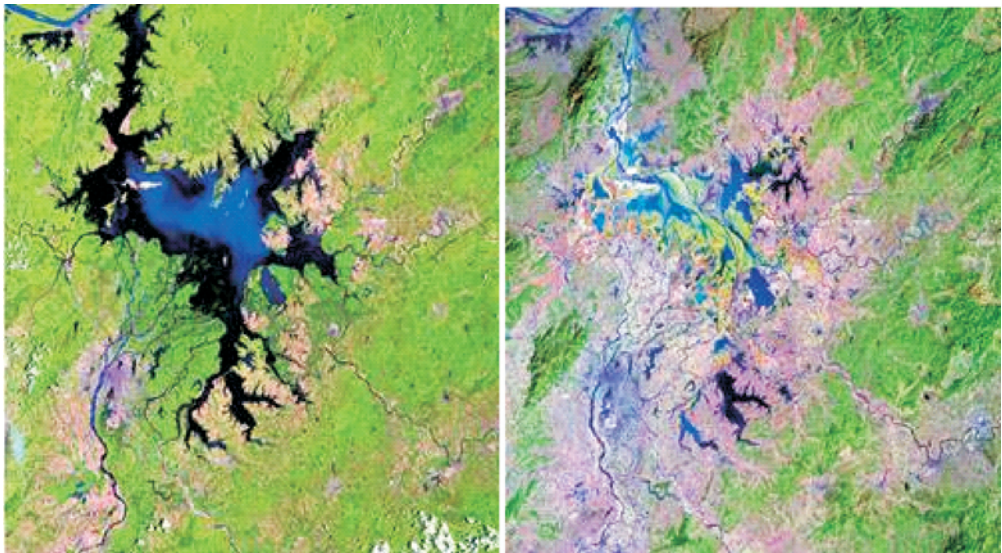


图 2 鄱阳湖丰水期(左)、枯水期(右)沉积环境变化遥感图

Fig.2 Remote sensing image of Poyang Lake (the flood period image is on the left, the dry season image is on the right)

的漫长时间内并没有积水成湖,而是形成河网切割的平原。鄱阳湖形成于公元 400 年前后,距今仅有 1 600 年左右,是一个比较年轻的湖泊。鄱阳湖的演化经历了东汉末至唐初的湖面迅速扩张期,唐、宋时期的三角洲迅速发展期,明末至清初湖面再次扩张三个演化阶段^[22]。

2 研究方法

本次研究采用的方法主要是实地考察、探槽、浅钻孔、探地雷达、卫星影像分析技术等,并收集了已有的钻孔资料。

实地考察的重点是鄱阳湖赣江三角洲,从赣江下游到三角洲平原、三角洲前缘及鄱阳湖。对于有水的河道及湖底,我们乘船并用捞泥砂的铲子捞取样品,确定沉积物类型,并用 GPS 定位。此外,还考察了抚河、信江、饶河、修水入湖形成的三角洲,但这些三角洲远没有赣江三角洲发育的好。在河道内,每隔 2 km 就测量水深及捞取沉积物。

探槽布置在分流河道内的边滩、汉口滩上及分流河道间,探槽方向采用平行于河道和垂直于河道的方向,主要用于观察河道及河道间沉积的沉积序列和内部结构。

浅钻孔主要用于观察河道沉积的沉积序列,以及探测地下砂体的横向分布范围。浅钻孔是用洛阳铲完成的,深度可达 10 m。

探地雷达主要用于探测地下砂体分布。但由于本区地下水位高,反射品质差,可用的信息不多。

卫星照片主要用来观察三角洲各部分整体面貌、分流河道的形态、宽度、分汊情况等。

3 三角洲沉积特征

通过实地考察分析认为,鄱阳湖三角洲发育三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲。上三角洲平原和下三角洲平原相带宽,分布广,三角洲前缘相带窄,可划分为上三角洲平原、下三角洲平原(图 3,4)。

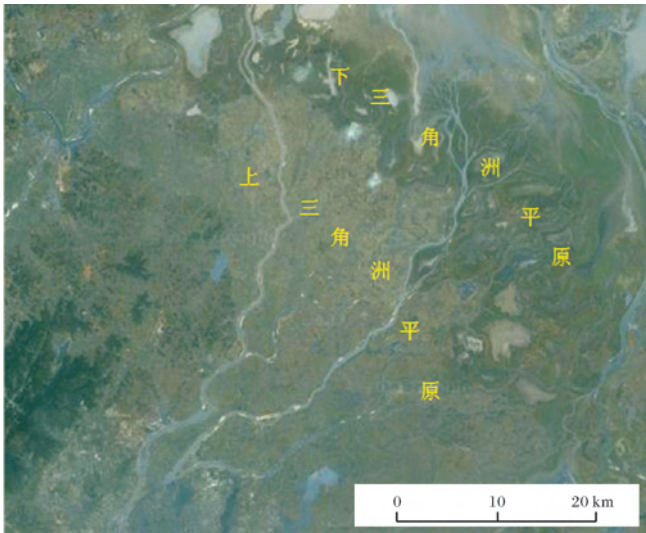


图 3 鄱阳湖赣江三角洲全貌(卫星照片),颜色暗的带为下平原,浅的带为上平原

Fig.3 Complete image of Ganjiang Delta (the dark area of the image is the lower delta plain, the light area of the image is the upper delta plain)

上三角洲平原(简称上平原)从入湖河流分汊点开始,到平均高水位线附近,是三角洲长期处于水上的部分。下三角洲平原(简称下平原)则位于平均高水位到平均低水位之间,每年枯水期暴露,洪水期

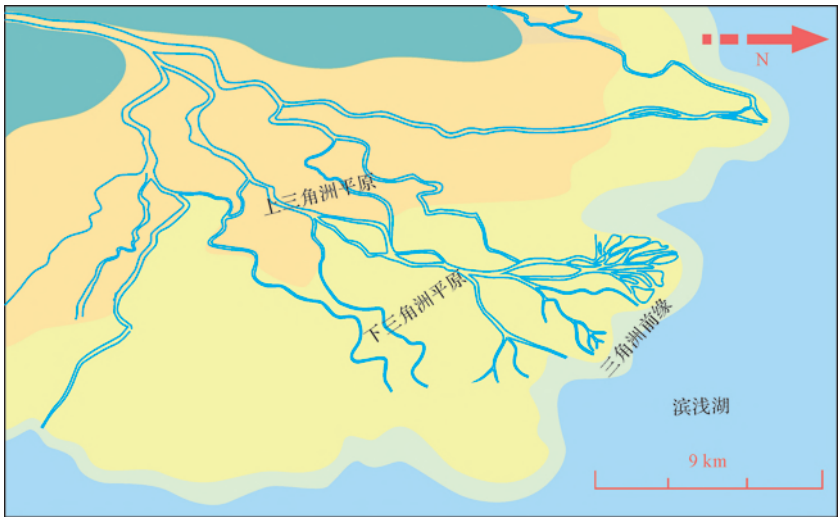


图 4 鄱阳湖赣江三角洲实际沉积相分布图

Fig.4 Sedimentary facies of Ganjiang delta, Poyang Lake

淹没。

三角洲前缘位于平均低水位到低水位时期的正常浪基面之间,长期处于水下,湖浪和沿岸流较活跃。

前三角洲则处于低水位时期的正常浪基面之下,安静低能。

3.1 三角洲平原沉积特征

本区三角洲平原上发育分流河道、天然堤、决口扇、湿地、牛轭湖。

3.1.1 分流河道沉积特征

分流河道内发育四类砂体:水道、边滩、汉口滩、并口滩,其中边滩又分为凸岸边滩和直岸边滩。边滩、汉口滩、并口滩统称滩坝,均呈底平顶凸状,而水道砂体顶面则总体平整,为顶平底凸状。

(1) 水道沉积特征

水道是分流河道内最低洼的部分,呈弯曲条带状穿流于滩体之间,是主流线位置,水动力条件最强。低水位期,滩坝顶部出露水面,但水道内仍有流水,泥质难以沉积下来,因此水道内不能形成落淤层。

本区水道沉积物为砾、含砾砂或砂,从上游到下游粒度变细,但其粒度通常比相邻的滩坝略粗些,而厚度却明显比滩坝薄,多为几十厘米至1 m左右,形成分流河道底部的滞留沉积。砾石大小一般为2~3 cm,可达5 cm,呈次棱一次圆状,成分主要为石英岩等变质岩。砂多为中、粗砂,呈褐黄色,为石英、长石及岩屑。不同时期水流强度的波动可导致粗细交替的韵律构造(图5)。

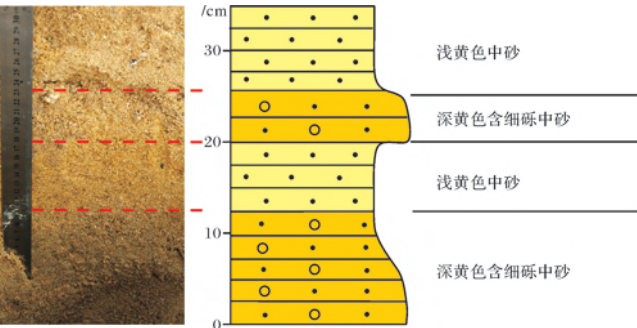


图5 赣江中支上徐村上三角洲平原分流河道的水道沉积垂向序列

Fig.5 Vertical sequence of waterway of distributary channel in the upper delta plain, near Shangxu village in Ganjiang middle branch

(2) 边滩沉积特征

根据边滩的位置,本区三角洲平原分流河道的边滩可分为两类:凸岸边滩、直岸边滩,以前者为主。

凸岸边滩分布在分流河道的凸岸,多呈新月形;直岸边滩分布在分流河道较平直段,多呈半月形(图6)。其实无论凸岸边滩还是直岸边滩,都分布在水道的凸岸,对于水道来说都是“凸岸边滩”(图7)。有些边滩受到后期洪水水流的截弯取直作用的改造,在边滩与河岸之间又形成新的、浅一些的水道,使原来的边滩与河岸分离,看上去像心滩,在此称“类心滩”(图6)。



图6 赣江三角洲铭溪洲附近分流河道中的滩坝

1~4:汉口滩;5~7:直岸边滩;8:类心滩

Fig.6 Bars of distributary channel near Mingxi Bar in Ganjiang delta

1~4: branch mouth bar; 5~7: point bar in straight bank; 8: modified point bar

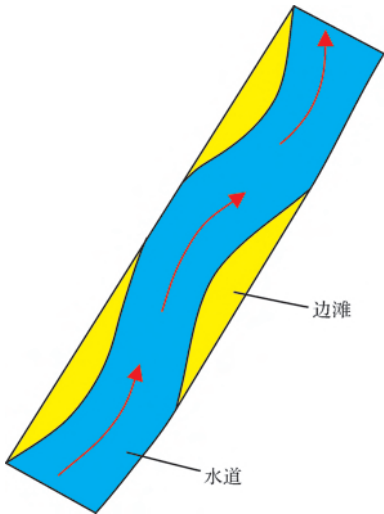


图7 水道与直岸边滩关系示意图

Fig.7 The schematic diagram of relationship between waterway and point bar in straight bank

凸岸边滩与直岸边滩大小相近,为2 500 m×800 m到300 m×70 m,大部分为800 m×200 m,厚度多为几米。尽管这些边滩在河道中的位置不同,但沉积特

征相似,其沉积主要由中、细砂组成,厚 2~5 m,具向上变细的沉积序列,内部多呈块状,交错层理构造常见,边滩表面发育不对称波痕。

边滩内部常见泥质落淤层(图 8)。落淤层在油田开发中可以成为隔层,影响开发效果和剩余油分布,因此了解其特征,对于边滩形成的油藏来说很重要。本区落淤层为暗色泥、粉砂质泥,厚 2~18 cm。如果后期埋藏经过压实,其厚度通常会减少到原来的 30%~50%。落淤层是悬浮在水中的泥或细粉砂沉积形成的。笔者认为,要形成落淤层,必须具备两个条件:(a)水中有大量悬浮搬运的泥和细粉砂。本区的河流平水期,河水较清,只有洪水期才变浑,因此落淤层主要是洪水阶段形成的;(b)水流速度需变缓。只有流速变得缓慢,悬浮在水中的泥和粉砂才会沉积下来。

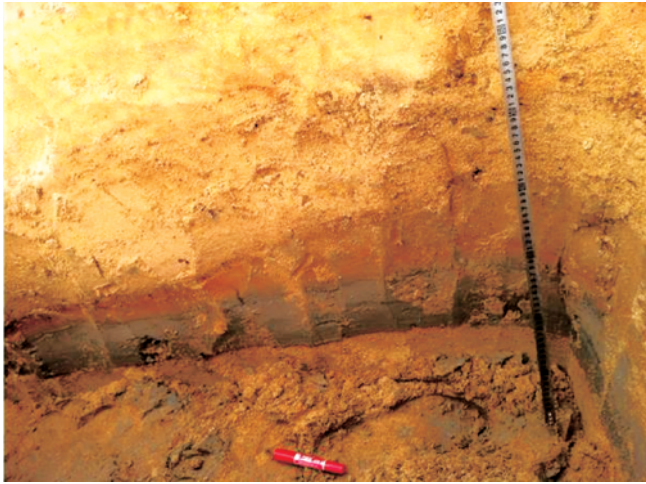


图 8 赣江三角洲新洲村附近边滩探槽剖面,黑色为泥质落淤层
Fig.8 The trench profile of point bar near Xinzhou Village in Ganjiang delta(the black layer is mud drape)

笔者认为,边滩顶面发育植被时,会导致流速骤降,形成落淤层,因为植被(本区主要是草类)会起明显的障积作用,使贴近边滩顶面的水流速度大幅度降低,尤其在洪水后期流速总体大减的情况下。因此,落淤层在边滩上的分布范围主要取决于边滩顶面植被(通常是草滩)的分布范围(图 9)。草滩面积大,落淤层面积就大。水道中由于长期属于水下,植被不发育,因此落淤层不发育。落淤层的厚度,取决于草滩植物的高度和持续时间,植物越高越茂密,持续时间越长,那么落淤层厚度越大。有些情况下,落淤层内可见草类植物碎屑,但有些情况下,植物完全腐烂分解,没有保存下来。因此,边滩顶面要形成植被,就

必须出露于水上一段时间(通常至少半年以上),否则难以难以形成茂密的植被,也就形不成落淤层。



图 9 赣江中支范湖村附近边滩顶部的草滩,从岸向河,草滩由茂密到稀少到缺失
Fig.9 Grass field on the top of point bar near Fanhu Village in Ganjiang middle branch, the density of grass decreases from river bank to channel

根据成因和产状,本区的落淤层可分三类:连片披覆型落淤层、孤立充填型落淤层、孤立残留型落淤层。

连片披覆型落淤层横向分布较稳定,覆盖边滩的大部,但通常在水道中消失。这类落淤层主要是植被障积形成的。披覆型落淤层平行于边滩表面,在边滩顶部较平,倾角小于 1°;在边滩斜坡上则向水道侧倾斜,通常倾角为 1~5°。

孤立充填型落淤层是在边滩顶部的冲坑中沉积形成的,其分布范围小,呈孤立状,相互不连接(图 10)。冲坑是在佛罗德数 Fr 远大于 1 的急流情况下



图 10 赣江三角洲新盘子附近边滩顶部充填型落淤层
Fig.10 Pit-filling mud drape on the top of point bar near Xinpanzi in Ganjiang delta

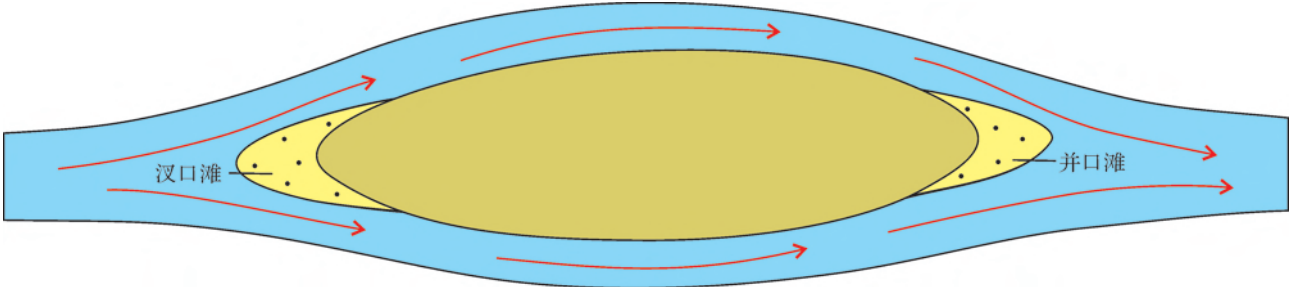


图 11 汉口滩及并口滩形成示意图

Fig.11 The schematic diagram of formation of branching-point bar and combining-point bar

冲蚀形成的,通常出现在没有植被或植被稀疏的边滩顶面,因为没有植被保护,砂质沉积物容易被冲刷。本区一些边滩顶面的冲坑直径通常小于 1 m,多为 20~70 cm,深几厘米到二十几厘米。其落淤层通常不厚,在 1 cm 以下,多为 1~5 mm(后期成岩压实后更薄)。冲坑的密度大小不一,有的边滩上冲坑间距为几十厘米,有的为几米。洪水高峰期,水流湍急,形成冲坑;消退过程中,水流变缓,当水流刚漫过边滩顶面时,冲坑中“水深流缓”,悬浮的泥和粉砂沉积下来,形成落淤层。

孤立残留型落淤层是已经形成的落淤层遭受后期强大洪水流的冲刷破坏而保留下来的部分。横向上,分布断断续续。

(3) 汉口滩及并口滩沉积特征

汉口滩和并口滩是在野外考察的基础上新提出的分流河道内的砂体沉积类型,分别发育在分流河道的分汉口和两条分流河道的合并处。汉口滩是指砂质沉积物在分流河道的分汉口处堆积形成的滩(图 6,11)。水流在这里受到汉口顶托而变缓,从而导致沉积。汉口滩大体呈三角形,头部指向上游,并不断向上游方向加积生长(图 11),初期处于水下,随着不断生长加积,后期会出露水面,表面坡度 2~4°。汉口滩沉积“头粗尾细”,头部受水流冲击相对最强,因此其沉积物粒度为滩体中最粗,向汉口滩的顶面和尾部,水流变弱,沉积物变细。探槽显示,汉口滩具有向上变细的沉积序列。汉口滩顶部也能形成泥质落淤层,其类型和形成机理与边滩的相似。

并口滩是指在两条分流河道的合并处,通常是河心洲下游末尾处,由于河心洲的屏蔽遮挡,水流在这里变缓,导致沉积。并口滩也呈三角形,但头部指向下游,并不断向下游方向加积生长,早期处于水下,后期可出露水面。并口滩沉积以中、细砂为主,也具有

向上变细的沉积序列。总体上,并口滩沉积比汉口滩细。并口滩同样可以发育落淤层。

有些情况下,当分流河道合并又分汉后,并口滩与下游的汉口滩相向生长,形成长条状砂坝(图 12)。

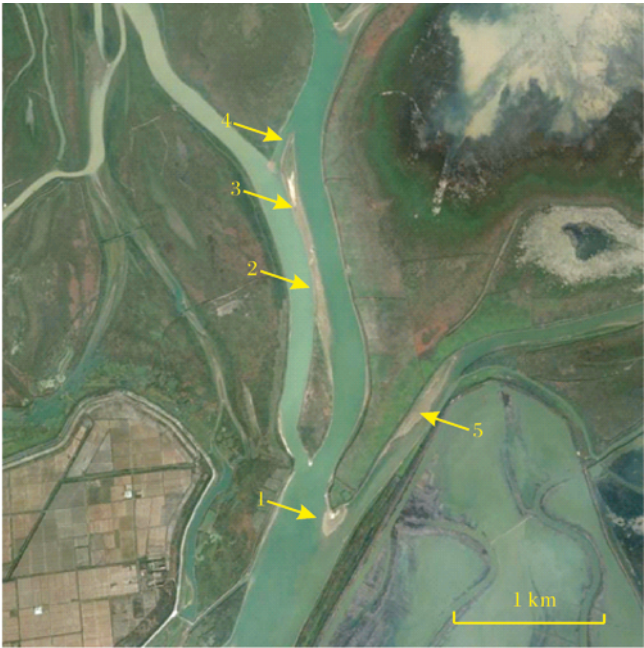


图 12 赣江中支三角洲平原分流河道中的汉口滩(图中 1, 3)、并口滩(图中 2)及直岸边滩(图中 5)。2 和 3 连接形成长条状砂坝。汉口滩 3 后期被新形成的河道切割(图中 4)。

Fig.12 The branch mouth bar (1 and 3 in the figure), combine mouth bar (2 in the figure) and point bar in straight bank (5 in the figure). 2 and 3 connect to form long striped bar. Branch mouth bar 3 is cut by channel newly formed (4 in the figure).

3.1.2 天然堤沉积特征

天然堤主要是由于洪水期河水溢出河道,沉积物在河道两岸堆积而成的。其发育程度主要与河道稳定性有关,河道越稳定,堤岸沉积时间越长,天然堤发

育程度越好。

本区分流河道天然堤高出地面约 1 m 左右,宽几十米,由泥与细砂薄互层组成(图 13)。天然堤上植被繁茂,沉积物中也常见植物根、叶化石。

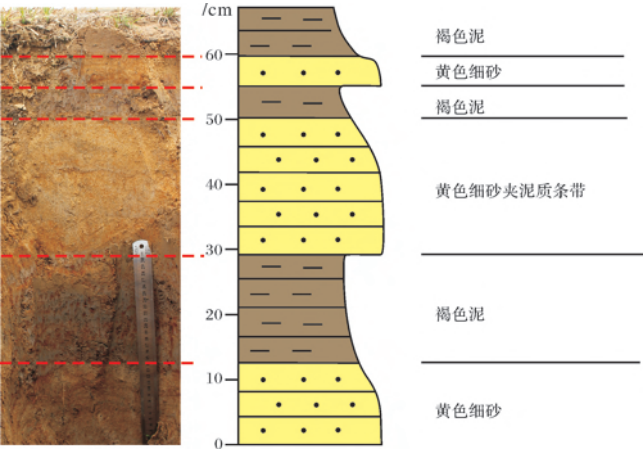


图 13 赣江三角洲天然堤沉积剖面

Fig.13 Sedimentary sequence of natural levee in Ganjiang delta

3.1.3 决口扇沉积特征

决口扇是洪水期河水冲破天然堤在湿地之上沉积形成的扇状堆积体(图 14,15)。在赣江三角洲东侧的信江三角洲平原上,分流河道发育决口扇(图 14,15)。决口扇大小为 1 400 m×1 000 m,其沉积物主要为细砂。从决口处向扇体的末端,沉积物逐渐变薄、变细,由细砂逐渐过渡为湿地的泥。纵剖面上呈底平顶斜的楔形,横剖面呈底平顶凸透镜状。由于决口处(扇柄)比河床高,如果河道突然废弃并淤积充填,会导致扇柄与河道内淤积充填的泥质沉积直接接触,形成孤立的透镜状砂体。

3.1.4 湿地沉积特征

湿地分布于分流河道之间,植物繁茂。湿地是一类新的沉积相类型,其定义为一种“地形平坦,地面潮湿或有浅水覆盖,植物繁茂”的沉积环境,进一步划分为湿原和沼泽^[23]。从沉积学角度定义的湿地有别于从生态学角度定义的湿地。在本区,湿地发育的主要是湿原。湿原分布于分流河道之间,植物繁茂,其沉积物为暗色泥质沉积,富含植物化石,枯水期可形成泥裂。以泥炭沉积为特征的沼泽不发育。

从陆向湖边,湿地植物具有明显分带性(图 16)。湖岸附近地势低洼,地面距离潜水面在 0.4 m 以内,植物为叶子较阔的草,该带宽 100~200 m;向陆方向,地面距离潜水面在 0.4 ~0.8 m 之间,为细叶的马尾状草(图 16)。在高出潜水面 0.8 m 以上的地方,则

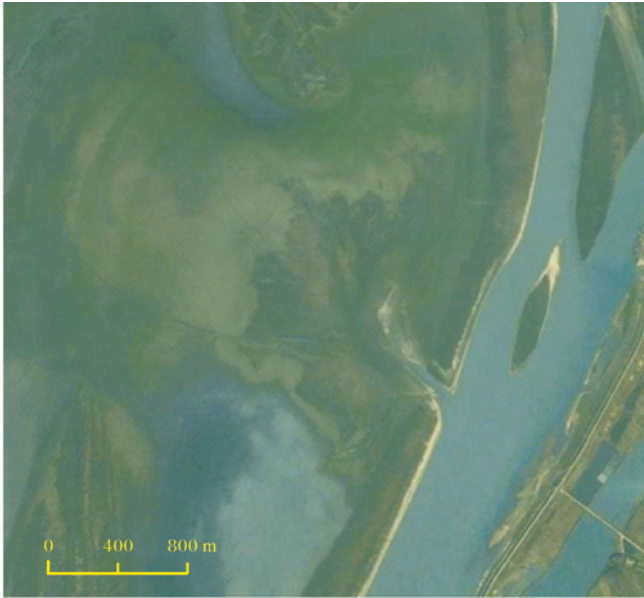


图 14 府前村附近决口扇卫星照片

Fig.14 Google map of crevasse splay near Fuqian Village

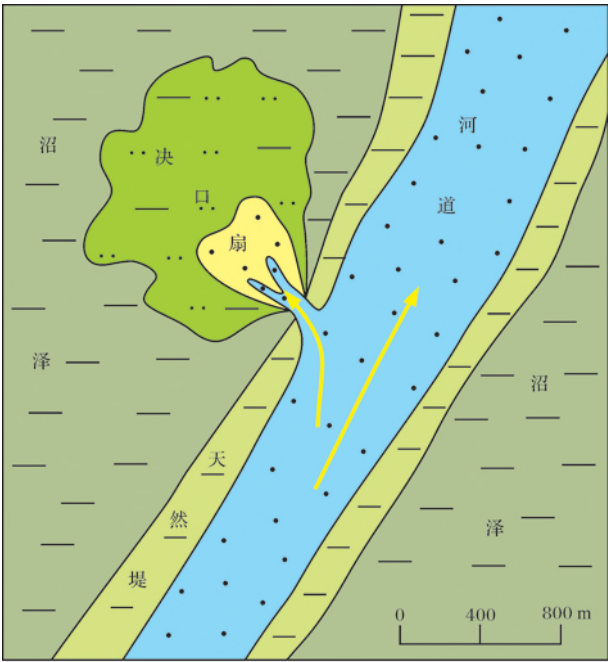


图 15 信江三角洲平原府前村附近决口扇沉积物分布

Fig.15 Sediment distribution of crevasse splay near Fuqian Village in Xinjiang delta plain

为荻蒿,具有木质茎。

3.1.5 河漫湖泊沉积特征

河漫湖泊是洪水过后,在分流河道间低洼部位积水形成的。这种湖泊面积小,直径一般为几百米到几千米;且很浅,水深在 2 m 以内。其沉积物主要为暗



图 16 赣江三角洲下平原湿地植被分带,左侧为叶子较阔的草(绿色),右侧为马尾状草(灰黄色)
Fig 16 Vegetation zones of wetland in lower delta plain of Ganjiang delta. The left area is full of green grasses with broad leaves, the right area is full of grayish yellow gulfweed

色的泥质,富含有机质,螺类生物常见。

3.1.6 牛轭湖沉积特征

牛轭湖是由分流河道废弃形成的,呈弯月形,其内水深 1~2 m,水体安静,沉积物为暗色泥,发育水平层理。泥质沉积底板为河道砂。

3.2 三角洲前缘沉积特征

本区三角洲前缘发育河口坝、远砂坝、席状滩、末梢席状滩和分流间湾,不发育水下分流河道。三角洲前缘不发育水下分流河道的原因已经作论述^[20],本次观察证实了这个观点,陆上分流河道延伸至湖边就消失了。

河口坝位于分流河道河口处,由细砂组成,但坝

的高度不大,为几十厘米,这是因为缓坡三角洲前缘坡度极缓,水体极浅,没有形成厚度较大、地形上明显隆起的坝状砂,这与典型的三角洲明显不同。分流河道入湖后受潮水顶托后,砂质沉积物呈扇状撒开,类似陆上的洪积扇(图 17)。如果分流河道废弃,河口坝也随之停止生长,远砂坝位于河口坝向湖侧,水体更深,以粉砂沉积为主。

席状滩是由湖边沿岸流将河口坝的砂侧向搬运、在分流河道河口之间的地带沉积形成的。前人称之为“席状砂”,但笔者认为“砂”代表沉积物类型,而非沉积环境类型,用词不当,因此应称“席状滩”。

末梢席状滩位于席状滩向湖侧,以粉砂沉积为

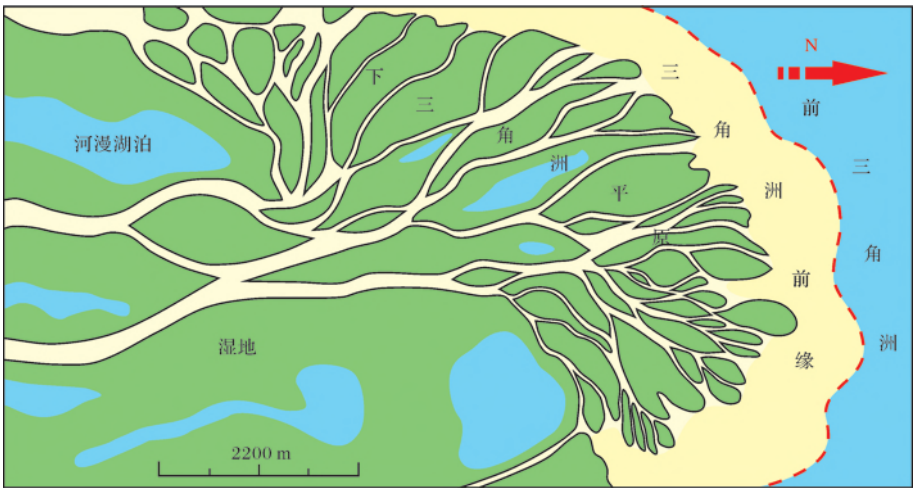


图 17 赣江三角洲平原及前缘砂体(黄色)分布图(图中绿色为湿地,蓝色为水)
Fig.17 The sand (yellow area) distribution map of delta plain and delta front in Ganjiang delta (the green area is wetland, the blue area is water)

主,与远砂坝类似。

在本区,河口坝与席状滩主要是形成机理上的不同,而在沉积特征方面并无明显差异。河口坝与席状滩是连体的,共同形成了三角洲前缘连片的“前缘滩”。

“前缘滩”的细砂分选好,泥质含量低。向湖心方向,随着水深加大,沉积物变细,以粉砂为主,可称“末梢前缘滩”,包括了远砂坝和末梢席状滩。

分流间湾发育于三角洲朵叶体之间无分流河道注入的地带,其沉积主要为泥和一些粉砂。

3.3 前三三角洲沉积特征

前三三角洲位于三角洲前缘的前方,水深在正常浪基面之下,水体安静低能,但洪水期这里仍受河流影响,河水靠惯性继续向湖中运动,带来呈悬浮状态搬运的泥和粉砂,其沉积物主要为暗色泥、粉砂质泥夹薄层粉砂。是否受河水影响,是区分前三三角洲与正常湖泊的标志。

前三三角洲的前方,是半深湖,其沉积主要是暗色泥。

4 缓坡三角洲沉积模式

根据上述赣江三角洲各种亚相、微相的沉积特征,总结出了缓坡三角洲的沉积模式(图18)。

缓坡三角洲可分为三角洲平原、前缘和前三三角洲,其中三角洲平原可分上三角洲平原(可简称上平原)和下三角洲平原(可简称下平原)。缓坡三角洲平原要比前缘宽阔的多。赣江三角洲的平原,从河流分汊点到枯水期湖岸线,距离约50 km,而三角洲前缘宽度仅1~2 km,这应是缓坡三角洲的特点之一。

三角洲平原上发育分流河道、天然堤、决口扇、湿地、牛轭湖。分流河道内发育边滩、汉口滩、并口滩,各类滩坝间为水道。三角洲前缘发育河口坝、远砂坝、席状滩、末梢席状滩、分流间湾,没有水下分流河道。河口坝和席状滩组成前缘滩,远砂坝和末梢席状滩组成末梢前缘滩。

4.1 上、下三角洲平原沉积差异

上、下三角洲平原主要在分流河道及堤岸发育特征等方面有明显差异。

4.1.1 上、下三角洲平原在微相类型方面的差异

上三角洲平原分布在南昌至朱港之间,在卫星照片上可看出上三角洲平原与下三角洲平原之间具有明显的界限,上三角洲平原在卫星照片上颜色浅,下三角洲平原在卫星照片上颜色为绿色,此乃植被茂密

程度差异所致(图3)。下平原上,由于地下水位更高、更接近地面些,所以植被更茂密些。

上三角洲平原上发育分流河道、天然堤、决口扇、湿地、牛轭湖,但下三角洲平原上则没有天然堤、决口扇、牛轭湖。这是因为下平原上分流河道改道快,发育时间短,其两岸还没等形成地形上呈明显凸起的天然堤时就改道了。没有天然堤,自然也就没有决口扇。下平原上的分流河道较直,不呈蛇曲状,自然也就没有牛轭湖了。

4.1.2 上、下三角洲平原在分流河道发育特征方面的差异

上、下三角洲平原最大的差异在分流河道的形态特征(图19)。总体上,与下平原相比,上平原分流河道较宽、弯曲度较大、密度较小、分汊频率较低、分汊指数较小,其砂体较厚,在3 m以上。下平原分流河道较窄、弯曲度较小、密度较大、分汊频率较高、分汊指数较大,其砂体较薄,在3 m以下。

具体差别如下:

(1) 分流河道宽度的差异

从上游向下游,随着不断分汊,分流河道宽度是有规律地逐渐变窄的,这是因为“流量守恒”,即上游来水量是一定的,分流河道多了,自然每条分流河道分到的水就少了,宽度自然就小了。每分汊一次,其宽度就平均减少1/2。因此,上平原分流河道宽度较大,为100~800 m,一般为300~600 m;而下平原分流河道宽度较小,为20~500 m,一般为100~300 m。

(2) 分流河道深度的差异

同样由于“流量守恒”,从上游向下游,随着不断分汊,分流河道深度是有规律地逐渐变小的。至湖边,其深度变为零,分流河道消失。

(3) 分流河道弯曲度的差异

由于上平原分流河道较稳定,发育时间较长,因此其弯曲度较大,弯曲度指数为1.1~1.68,平均1.21;而下平原的则较小,弯曲度指数为1.02~1.11,平均1.06。

(4) 分流河道密度的差异

由于不断分汊,下平原分流数量比上平原多,密度较大。上平原分流河道平均间距为4 300 m,而下平原分流河道平均间距为500 m。

(5) 分流河道沉积的差异

从上平原到下平原,由于分流河道不断分汊、数量变多,各分流河道流量变小,搬运能力降低,沉积物变细。同时,随着河道逐渐变浅,其砂体厚度变薄。

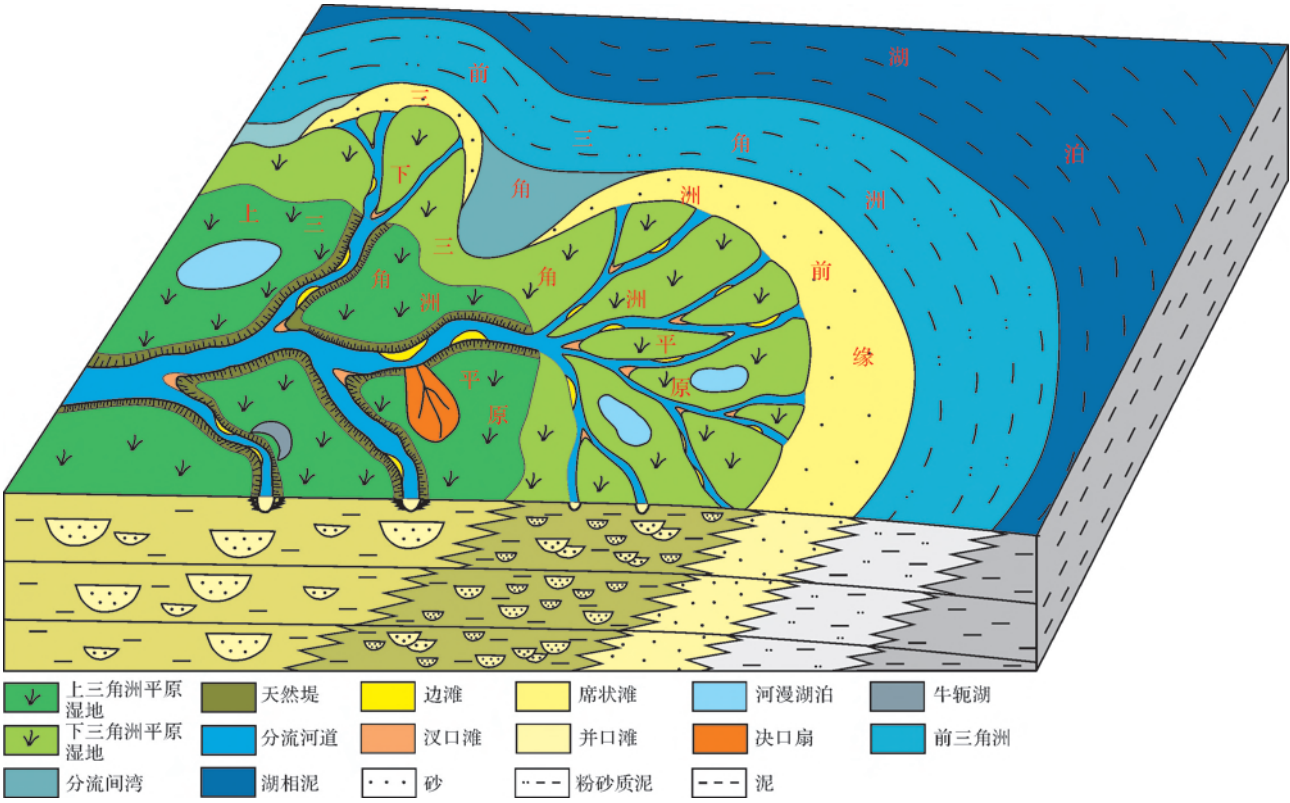


Fig.18 Depositional model of gentle-slope delta

上平原分流河道为含砾中、粗砂,甚至为砾石质沉积,越向上游方向越粗,其厚度通常在 3 m 以上,常达 5~7 m;而下平原分流河道沉积物主要为细砂,厚度为几十厘米到 1 m 左右。

(6) 分流河道滩坝的差异

上、下平原分流河道中,虽然边滩、汉口滩、并口滩均有,但下平原分流河道中各类滩坝的规模普遍较小,厚度较薄,且大部分处于水下,边滩也以直岸边滩为主。这主要是由于下平原的分流河道“年龄小”,发育时间比上平原的短,沉积的时间短。

另外,下平原分流河道滩坝间连通性比上平原差,这是因为穿流于滩坝间的水道中,在下平原砂质沉积很薄,仅几厘米到十几厘米,甚至缺失砂质沉积,河底裸露下伏的浅灰色泥质层。如果这种分流河道突然废弃的话,由于水道中无砂或极薄,边滩之间基本就没有砂层连通,形成孤立的土豆状砂体。水道中缺砂的主要原因是砂质供应不足。从上游到下游,分流河道中砂质沉积物是逐渐减少的,一是因为离物源越来越远的缘故,更是由于分流河道变多,“僧多粥少”。而上三角洲平原分流河道中滩坝的连通性就较好,因为水道普遍有砂、砾质沉积。河底裸露下伏

的浅灰色泥质层黏性较强、质地较硬,当地称“胶泥”。笔者认为,胶泥是以前在湖底沉积的松软的泥经过暴露、干结形成的,尽管后期又淹没入水下,但水再也不能将其泡软了。因此,胶泥可反映沉积间断。

(7) 分流河道侧向迁移能力的差异

下平原分流河道持续时间短,侧向侵蚀迁移弱,主要是通过改道而迁移。从 1973 年到现在 30 多年间,三角洲朵叶是不断向前推进扩大的,但分流河道的稳定性差,持续时间短,频繁改道、废弃(图 20)。这也是其宽度小、弯曲度小、沉积物薄的重要原因。

4.2 垂向沉积序列

缓坡三角洲的垂向序列与正常三角洲的基本一致,前缘砂体通常形成反旋回,分流河道砂体通常形成正旋回,不同之处在于:

(1) 由于坡度极缓,湖平面小幅度变动,会引起湖岸线大幅度进退,导致水上、水下沉积频繁交替,因此沉积的砂体普遍较薄。三角洲前缘砂体厚度一般在 3 m 以下,多为几十厘米到 1 m 左右。分流河道砂体比前缘砂体更厚一些,多为 1~5 m。在垂向沉积层序中,分流河道砂体远比前缘砂体数量多,因此测井曲线上,以钟形为主,漏斗形则较少。这是缓坡三角



图 19 赣江三角洲不同时期朵叶体形态对比(卫星照片)
Fig.19 Lobe body shapes of Ganjiang delta in different periods (Google map)

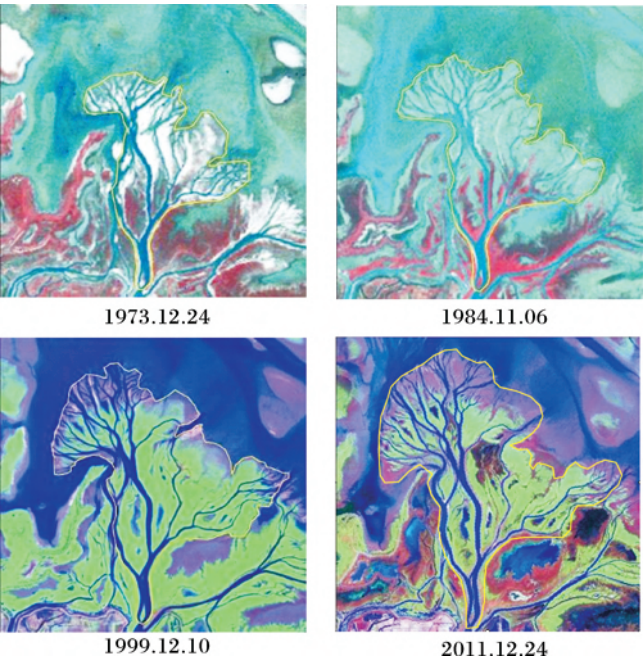


图 20 缓坡三角洲沉积模式
Fig.20 Depositional model of gentle slope delta

洲沉积的识别标志之一。

(2) 由于湖岸线频繁大幅度摆动,汉难以形成厚

度大、稳定的典型三角洲的“三层结构”(即底积层、前积层、顶积层),其地震反射结构为平行或亚平行结构,没有典型三角洲的叠瓦状反射结构。这也是缓坡三角洲沉积的识别标志。

缓坡三角洲沉积中,常见下列沉积序列:

① 湖相泥岩中常夹三角洲平原的分流河道砂岩,湖相泥岩向上突然变为分流河道砂岩,缺失三角洲前缘亚相,这是由于缓坡情况下湖岸线大幅摆动,湖底频繁暴露,分流河道直接推进到暴露的湖底之上所致。“跳相”在缓坡三角洲沉积中常见。

② 在分流河道入湖口一带,分流河道持续向前推进可形成如下沉积序列:自下而上,依次为前三三角洲泥岩—远砂坝粉砂岩—河口坝砂岩—分流河道砂岩—湿地泥岩(图 21)。如果分流河道发生明显侧向迁移,分流河道砂岩之上可覆盖天然堤沉积。湿地沉积中可夹决口扇或河漫湖沉积。该序列的特点是具有反旋回的河口坝砂岩之上直接覆盖具有正旋回的分流河道砂岩。

③ 在无分流河道注入的席状滩部位,可形成如下沉积序列:自下而上,依次为前三三角洲泥岩—末梢席状滩粉砂岩—席状滩砂岩—湿地泥岩。该序列的特点是席状滩砂岩之上直接覆盖湿地泥岩,反映席状滩逐渐加积成湿地。

④ 在无分流河道注入的,可形成如下沉积序列:自下而上,依次为滨浅湖泥岩—湿地泥岩。该序列的特点是湖相泥岩之上直接覆盖湿地泥岩,反映分流间湾逐渐淤积成湿地。

5 结论与启示

通过对鄱阳湖三角洲的考察研究,可以得出如下结论及启示:

(1) 在三角洲平原分流河道内发现了两类新型砂体,即汉口滩和并口滩,分别发育于分流河道分汉处和合并处,描述了其沉积特征,探讨了其形成机理。

(2) 缓坡三角洲前缘不发育水下分流河道,河口坝与席状滩连片,形成分布较稳定的前缘滩。

(3) 分流河道内的边滩、汉口滩、并口滩等均常见落淤层,并可分为连片披覆型、孤立充填型、孤立残留型等三种类型,对每类的形成机理进行了探讨。

(4) 从上三角洲平原到下三角洲平原,分流河道宽度有规律变窄,每分一次汉,宽度就平均减少 1/2;深度变小,数量增多,分汉频率增高,弯曲度变小;其砂体变窄、变薄、变细。

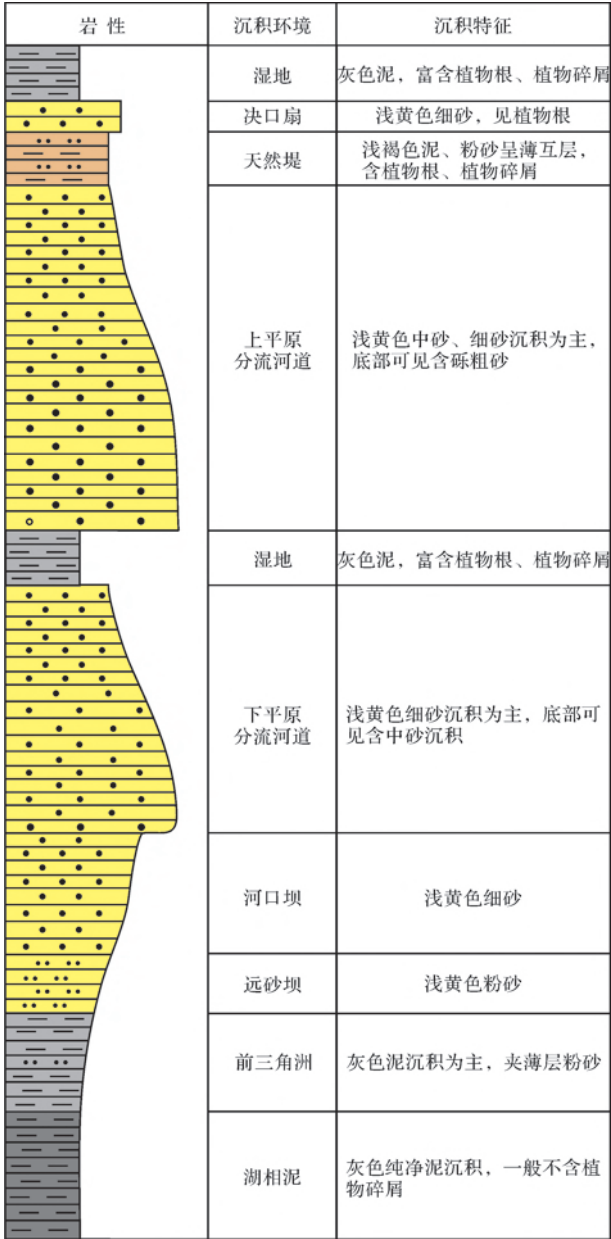


图 21 缓坡三角洲垂向序列

(下平原分流河道砂体比上平原薄、细)

Fig.21 Vertical sequence of gentle-slope delta

(channel sand of lower delta plain is thinner and finer than upper delta plain)

(5) 缓坡三角洲沉积的特点是水上、水下沉积频繁交互,跳相常见,三角洲平原分流河道砂体远多于前缘的砂体,各类砂体普遍较薄。沉积序列中测井曲线以钟形、指状为主,漏斗形较少见。地震剖面上应为平行或亚平行反射,无叠瓦状反射。

参考文献 (References)

1 Cornel Olariu, Janok P. Bhattacharya. Terminal distributary channels

and delta front architecture of river-dominated delta system[J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76: 212-233

2 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]

3 金振奎,齐聪伟,薛建勤,等. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积相[J]. 古地理学报,2006,8(2):199-210[Jin Zhenkui, Qi Congwei, Xue Jianqin, et al. Sedimentary facies of the Jurassic in northern margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(2): 199-210]

4 金振奎,齐聪伟,薛建勤,等. 柴达木盆地北缘结绿素—红山地区古新统至中新统沉积相[J]. 古地理学报,2006,8(3):377-388[Jin Zhenkui, Qi Congwei, Xue Jianqin, et al. Sedimentary facies of the Paleocene-Miocene in Jielvsu-Hongshan area in north margin of Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 377-388]

5 朱伟林,李建平,周心怀,等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报,2008,26(4):575-582[Zhu Weilin, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai bay, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 575-582]

6 吕晓光,李长山,蔡希源,等. 松辽大型浅水湖盆三角洲积特征及前缘相储层结构模型[J]. 沉积学报,1999,17(4):572-576[Lu Xi-aoguang, Li Changshan, Cai Xiyuan, et al. Depositional characteristics and front facies reservoir framework model in Songliao shallow lacustrine delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(4): 572-576]

7 王家豪,陈红汉,江涛,等. 松辽盆地新立地区浅水三角洲水下分流河道砂体结构解剖[J]. 地球科学,2012,37(3):556-564[Wang Jia-hao, Chen Honghan, Jiang Tao, et al. Sandbodies frameworks of subaqueous distributary channel in shallow-water delta, Xinli area of Songliao Basin[J]. Earth Science, 2012, 37(3): 556-564]

8 李元昊,刘池洋,独育国,等. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长 8 油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂[J]. 古地理学报, 2009,11(3):265-274[Li Yuanhao, Liu Chiyang, Du Yuguo, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta and lake shoreline control on sandbodies of Chang 8 oil-bearing interval of the upper Triassic Yanchang Formation in northwest Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(3): 265-274]

9 Buchheim H P, Brand L R, Goodwin H T. Lacustrine to fluvial floodplain deposition in the Eocene Bridger Formation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 162(1): 191-209

10 Overeem I, Kroonenberg S B, Veldkamp A, et al. Small-scale stratigraphy in a large ramp delta: recent and Holocene, sedimentation in the Volga delta, Caspian Sea[J]. Sedimentary Geology, 2003, 159(3): 133-157

11 Fisher J A, Nichols G J, Waltham D A. Unconfined flow deposits in distal sectors of fluvial distributary systems: Examples from the Miocene Luna and Huesca Systems, northern Spain[J]. Sedimentary Ge-

- ology, 2007, 195(1): 55-73
- 12 Nathanaël Geleynse, Joep E.A. Storms, Dirk-Jan R. Walstra, *et al.* Controls on river delta formation: insights from numerical modeling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(1): 217-226
 - 13 刘柳红, 朱如凯, 罗平, 等. 川中地区须五段—须六段浅水三角洲沉积特征与模式[J]. *现代地质*, 2009, 23(4): 667-675 [Liu Lihong, Zhu Rukai, Luo Ping, *et al.* Characteristics and depositional models for the shallow-water deltas of the 5th-6th interval, Xujiahe Formation, Upper Triassic in central Sichuan Basin, China[J]. *Geosciences*, 2009, 23(4): 667-675]
 - 14 李顺明, 宋新民, 刘曰强, 等. 温米退积型与进积型浅水辫状河三角洲沉积模式[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(3): 665-672 [Li Shunming, Song Xinmin, Liu Yueqiang, *et al.* Depositional models of regressive and progressive shoal braided deltas Wenmi oil-field[J]. *Journal of Jinlin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(3): 665-672]
 - 15 胡忠贵, 胡明毅, 胡九珍, 等. 潜江凹陷东部地区新沟咀组下段浅水三角洲沉积模式[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1263-1273 [Hu Zhonggui, Hu Mingyi, Hu Jiuzhen, *et al.* Shallow water delta depositional model of the lower segment of the Xingouzui Formation in eastern Qianjiang depression[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1263-1273]
 - 16 万赞来, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 盐湖盆地浅水三角洲沉积模式——以江汉盆地潜江凹陷新沟咀组为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 2011, 31(2): 55-60 [Wan Yunlai, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, *et al.* Sedimentary model for the shallow-water delta deposits in the salt lake basin: An example from the Xingouzui Formation in the Jiangnan Basin, Hubei[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2011, 31(2): 55-60]
 - 17 席胜利, 李文厚, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地神木地区下二叠统太原组浅水三角洲沉积特征[J]. *古地理学报*, 2009, 11(2): 187-194 [Xi Shengli, Li Wenhong, Liu Xinshe, *et al.* Sedimentary characteristics of shallow water delta of the Lower Permian Taiyuan Formation in Shenmu area, Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(2): 187-194]
 - 18 朱海虹, 郑长苏, 王云飞, 等. 鄱阳湖现代三角洲沉积相研究[J]. *石油与天然气地质*, 1981, 2(2): 89-103 [Zhu Haihong, Zheng Changsu, Wang Yunfei, *et al.* A study of the sedimentary facies of the deltas in Poyang lake[J]. *Oil & Gas Geology*, 1981, 2(2): 89-103]
 - 19 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]
 - 20 金振奎, 何苗. 三角洲沉积模式新认识[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(5): 443-446 [Jin Zhenkui, He Miao. New understanding of delta depositional model[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(5): 443-446]
 - 21 鄱阳湖研究编委. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 14-18 [Poyang Lake Research Editorial Board. *Poyang Lake Research* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988: 14-18]
 - 22 窦鸿身, 姜加虎, 范成新, 等. 中国五大淡水湖[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 17-19 [Dou Hongshen, Jiang Jiahu, Fan Chengxin, *et al.* *Five Fresh Water Lakes in China* [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2003: 17-19]
 - 23 Jin Zhenkui, Gu Junfeng, Su Nina, *et al.* Depositional characteristics and petroleum geological significance of wetland[J]. *Petroleum Science*, 2009, 2009(6): 347-353

Depositional Model of Modern Gentle-slope Delta: A case study from Ganjiang Delta in Poyang Lake

JIN Zhen-kui^{1,2} LI Yan^{1,2} GAO Bai-shui^{1,2} SONG Bao-quan³
HE Yu-hang³ SHI Liang^{1,2} LI Gui-zi^{1,2}

(1. Faculty of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249;

3. Exploration and Development Institute of Daqing Oil Field Co., Daqing, Heilongjiang 163712)

Abstract: In China, gentle-slope deltas have formed lots of large oilfields. As to the depositional model of gentle-slope deltas, numerous studies have been made, but most of them were on ancient strata. As different researchers may give out different interpretation about stratigraphic correlation and sedimentary environments, the depositional models summarized are various, and their reliability is low. Therefore, in this paper a modern gentle-slope delta-Ganjiang Delta in Poyang Lake-was studied systematically, through methods such as field observation and measurement, troughs, shallow boreholes, radar, grainsize analysis, etc. And the depositional model of gentle-slope delta was established. Following important conclusions were drawn through this study: ① Two new types of sandbodies were found on the delta plain, i.e. branching-point bar and combining-point bar, the former occurs at the branching point of a distributary

channel, and the latter occurs at the combining point of two distributary channels. This implies that branching points and combining points are also favorable place for oil and gas accumulation. ② Within channel sandbodies, three types of mud drapes are found, i.e. sheet drape, isolated drape and residual drape, and their origin was interpreted. ③ Statistics of quantitative parameters of distributary channels were made, and it was found that in downstream direction the channels become narrower as branching increases, and the width decrease about 1/2 after each branching; channel branching frequency increases; channel sinuosity decreases; channel sediment becomes finer and thinner, and sandbody interconnection degree decreases. ④ In delta front, there are no underwater distributary channels, and only mouth bars and sand sheet are developed. ⑤ Due to gentle slope, small fluctuation of lake level may cause large scale shifting of coastline, and may result in frequent alternation of subaerial and underwater deposits. In seismic reflection profile, gentle-slope delta deposits will not show imbricated reflection, and only show parallel or subparallel reflection.

Key words: Poyang lake; gentle-slope delta; depositional model; quantitative parameter; branching-point bar; combining-point bar