

# 800 年来苏北废黄河三角洲的演变模式\*

张 林 陈沈良 刘小喜

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062)

**提要** 根据历史资料、数据和相关研究,结合研究区域背景,分析苏北废黄河三角洲的演变。结果显示,岸线演变在发育阶段和侵蚀阶段分别为向海延伸约 90 km 和侵蚀后退约 22 km,面积相差约 800 km<sup>2</sup>,三角洲地貌演变表现为岸线平直-曲折-平滑-平直的过程。在废三角洲陆海相互作用的基础上,运用演化模式分析三角洲的演变过程。该三角洲演变可以分为 7 个演变阶段,发育期在径流和潮流作用下以沙洲并陆淤积延伸方式进行,侵蚀期在波浪和潮流作用下以沙洲合并侵蚀后退和淤积外长交替侵蚀的方式。泥沙运输、人类活动和气候变化对废三角洲的演变有重要影响,巨量的来沙是三角洲发育的原因,泥沙平衡被打破是侵蚀的主要原因。发育期中,泥沙运输影响淤积速度和位置,人类活动和气候变化影响黄河河道迁移、输沙量和产沙量;侵蚀期中,泥沙运输影响侵蚀状态,人类活动在一定程度上影响海岸带冲/淤,气候变化将影响三角洲的演变趋势。

**关键词** 废三角洲;演变模式;泥沙运输;人类活动;气候变化

**中图分类号** P736 **doi:** 10.11693/hyhz20130228002

三角洲演变与入海河流有密切关系,河道迁移、河流输水输沙量的变化和工程直接影响三角洲的发育和侵蚀(Scraton, 1960)。由于河流体系的变化,世界上许多三角洲经历了建设和破坏的演变过程,许多学者对美国的密西西比河(Gould, 1970)、埃及的尼罗河(Frihy *et al.*, 1991)、中国的黄河(任于灿等, 1994; Chu *et al.*, 2006)和滦河(高善明, 1981; Feng *et al.*, 1998)形成的三角洲的演变进行了研究和分析。研究结果可以总结为,三角洲发育阶段是不同时期形成的叶瓣的组成体,当泥沙断绝后叶瓣废弃后均遭受了侵蚀,或者当入海泥沙减少时,三角洲呈现出废弃三角洲遭受侵蚀的特征。

黄河在历史时期频繁发生河道变迁,形成了黄淮三角洲(今废黄河三角洲)和现代黄河三角洲。废黄河三角洲同其他由于气候变化、水库或大坝建设和部分河段废弃或改道而被侵蚀的三角洲有重要的区别,所以研究苏北废黄河三角洲的演变对现代黄河三角洲的演变具有重要的借鉴和参考意义。目前,苏北废

黄河三角洲的研究主要集中于三角洲的侵蚀过程(虞志英等, 1986; 高抒, 1989; Zhang, 1998; Fan, 2001),比较关注废弃后的岸线后退和 underwater 三角洲侵蚀方面;关于废三角洲的发育,历史资料和部分文献均有记载(张忍顺, 1984; 叶青超, 1986; 万延森, 1989; 李元芳, 1991),多局限于文字性的记载和描述。因此,对于整个三角洲的演变缺乏系统的研究分析,无法了解废三角洲的系统演变过程。

本文主要研究废黄河三角洲的演变过程,根据历史资料进行分析岸线和地貌的变化,从而建立演变模式。废三角洲的演变主要分为发育和侵蚀两个演变阶段,岸线在发育阶段不断向海淤长,而在侵蚀阶段则不断向陆退缩,同时,三角洲面积和岸线长度也随之发生改变,发育和侵蚀是个方向相反的演变过程。通过演变模式的模拟,分析废三角洲发育和侵蚀阶段的地貌演变过程,结合影响因子,呈现出废黄河三角洲较完整和系统的发育和侵蚀过程。

\*全球变化研究重大科学研究计划课题, 2010CB951202 号; 河口海岸学国家重点实验室自主课题经费资助, SKLEC-2012KYYW06 号。张林, 博士研究生, E-mail: zhang2201@163.com

通讯作者: 陈沈良, 教授, E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2013-03-02, 收修改稿日期: 2013-06-27

## 1 研究区域背景

### 1.1 废黄河和废三角洲

黄河是中国含沙量最大的河流, 因此历史上的黄河下游经常决口泛滥, 河流流路和河口位置常发生摆动和迁移(图 1)。历史上, 黄河入海口主要在山东省和江苏省之间变动, 分别注入渤海和黄海。据黄河水利委员会统计, 近 2000 年来, 黄河有 26 次较大的改道, 其中 14 次呈南徙流入淮河。1128—1855 年间, 黄河南徙注入黄海, 1855 年黄河北归后, 废弃在江苏北部的黄河下游流路就成为废黄河, 是黄河夺淮入海遗留的产物, 期间塑造的三角洲随之成为废黄河三角洲。

1194 年黄河南侵之前, 淮河河口主要在云梯关附近, 黄河夺淮后, 黄河河水流向单一。根据黄河水利委员会科研所统计, 黄河的多年流量为  $1546 \text{ m}^3/\text{s}$ , 现代黄河入海的泥沙量达 10 亿  $\text{m}^3$ (南京师范大学黄河古道综考队, 1984)。黄河流经江苏 700 多年的时间里, 携带的巨量泥沙不断沉积及向海加积, 三角洲和浅滩不断发育, 同砂坝、沙岛和泻湖淤积相联叠加, 规模较大的陆上三角( $9000 \text{ km}^2$ )和下水三角洲( $25000 \text{ km}^2$ )发育而成(沈怡, 1971)。1855 年后, 黄河北归, 废黄河的径流量和含沙量剧减, 枯水期时发生断流。废黄河口附近的水动力环境发生巨变, 陆海之间的动力平衡被打破, 废三角洲随着进入侵蚀后退的时期(Fan, 2001)。目前, 废黄河三角洲属于淤泥质海岸, 陆上范围以云梯关为顶点, 北达灌河口, 南至射阳河口, 海岸线长  $139.9 \text{ km}$ , 面积约  $7000 \text{ km}^2$ 。

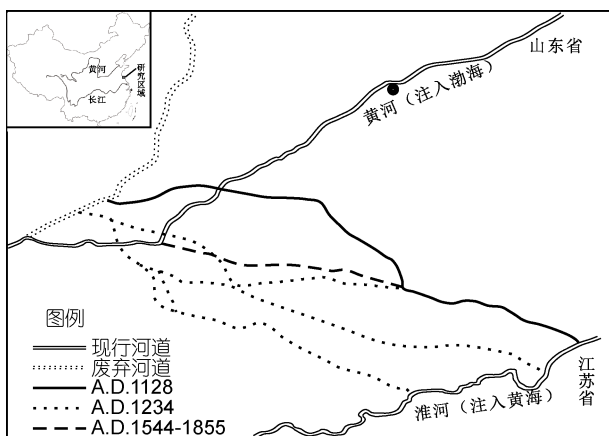


图 1 黄河改道图(据《黄河防洪志》改绘, 1991)

Fig.1 The evolution channel of the Huanghe (Yellow) River (modified after *The Annals of the Yellow River Flood Prevention*, 1991)

### 1.2 苏北历史岸线

苏北岸线的位置在历史时期处于动态波动中(图 2)。平原上分布有西冈、中冈、东冈和新冈四列贝壳堤, 代表了苏北不同时期的古岸线的位置(凌申, 1994)。通过苏北平原的地质钻孔和黄海浅钻等历史资料的分析研究, 晚更新世气候比较干冷, 发生过三次海进和两次海退(耿秀山等, 1983), 海进时期有三次越过现今苏北海岸的位置(距今 13—8 万年、3 万年和 0.6—0.5 万年), 海退时期两次推到东海外陆架  $-100 \text{ m}$  和约  $-155 \text{ m}$  水深处(大陆架外缘坡折线)。全新世以来, 全球气温升高, 伴随着冰融事件, 海平面迅速回升(Edouard, 1996), 至  $7 \text{ ka B.P}$  左右时海侵达到最大, 苏北海岸线退到最西侧(凌申, 2002)。其后, 气候和海平面相对稳定, 并发育了西冈贝壳堤, 经  $^{14}\text{C}$  测定形成时间约为  $6.5 \text{ ka B.P}$ (虞志英等, 1982), 可以代表  $5.5—6.5 \text{ ka B.P}$  古海岸的大体位置。6 ka B.P 以来, 海平面变化总体趋势是稳中有降, 岸线向东推进非常缓慢, 基本在  $20 \text{ km}$  范围内, 期间中冈和东冈砂堤相继出现。中冈出露较多也比较连续, 经  $^{14}\text{C}$  测定年代在  $4.2 \text{ ka B.P}$  左右, 东冈为唐代和宋代范公堤所在地带, 经  $^{14}\text{C}$  测年鉴定该砂堤形成在  $3.3 \text{ ka B.P}$  以前, 所以至  $800 \text{ a B.P}$  前的 3000 多年中, 海岸线基本徘徊在东冈附近。新冈形成于黄河夺淮后, 约公元 1128 年以后, 估计在 1426—1435 年(凌申, 1994)。

### 1.3 地貌及水动力环境

废三角洲在黄河南徙夺淮期间发育形成, 在黄河北归后被废弃进入侵蚀阶段, 地貌由淤积型转变为侵蚀型, 湖泊、沙洲相间的地貌转变为平原, 曲折的岸线转变为较平直的岸线。沉积特征为平面上多为决口扇沉积、泛滥平原沉积和洼地沉积, 纵向剖面上为充填沉积(蔡明理等, 1999), 组成物质多为粘土或亚粘土, 沉积物厚度由河道向两侧减少。废黄河三角洲地势西高东低, 地面高程在  $1.3—3 \text{ m}$  之间, 沿岸地势平坦。废黄河两侧为高滩地, 河床高出地面  $2—4 \text{ m}$ , 是黄河淤积和人工筑堤的原因, 沉积物以粉砂为主(Wang *et al.*, 1997), 粒度由河床向两侧变细(任美镔, 1985)。废黄河口的沉积物可能成为东海类黄河沉积物的来源, 为东海陆架提供了粘土矿物(周晓静等, 2010)。

废黄河三角洲主要受黄海旋转潮波和东海前进驻波两个潮波系统控制, 两者在弼港岸外辐合, 无潮点位于废黄河口以东  $80 \text{ km}$  处。潮流多属于不正规半日潮, 往复流显著, 潮流趋势是涨潮流速大于落潮流

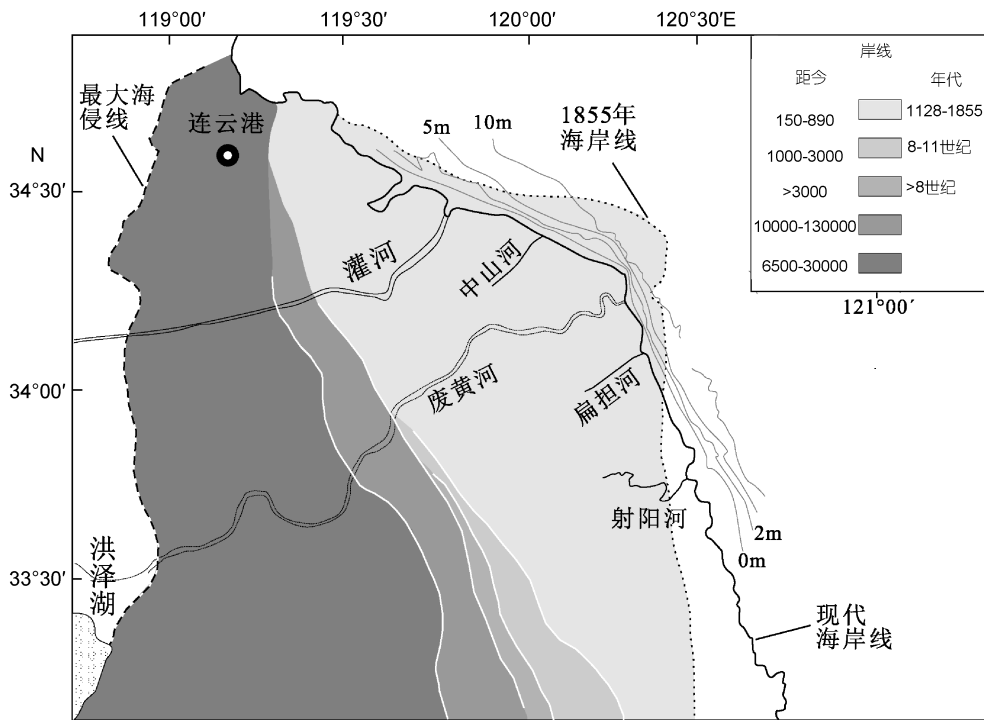


图2 废黄河三角洲历史海岸线向海变化图(白色线表示历史海岸线的位置)(据耿秀山等改绘, 1983)

Fig.2 Changes of shorelines of the abandoned Huanghe (Yellow) River delta, progressing seaward (white line is the location of shorelines in the past) (modified after Geng, 1983)

速, 垂线全潮平均流速为 0.6—0.7 m/s。研究区为中潮型海域, 沿岸潮差均小于 2 m, 河口区只有 1.5 m, 平均潮差由北向南增大。波浪常浪向为 NE, 强浪向为 N-NE, 冬季主要是以风浪为主的混合浪, 以偏北向浪为主, 夏季基本上为混合浪, 大多以南向浪为主(任美镔, 1985)。废黄河口附近含沙量在  $0.5 \text{ kg/m}^3$  以上, 由岸向海递减, 由底层向表层逐渐减小, 南侧大于北侧。

## 2 资料来源

在中国历史长河中, 每个朝代均有关于黄河流域或治理方面的记载, 根据历史资料、历史遗迹和考古文化, 分析研究废黄河三角洲的演变过程。岸线变化主要依据叶青超(1986)资料, 图中根据盐城市、射阳县、阜宁县等村镇共计 13 个点的经纬度坐标数据在 Arcgis 中进行配准, 配准最大 RMS 为 0.0147, 平均 RMS 为 0.0114。经过配准后, 距离误差为 2.1%, 本文认为其可以作为长时间尺度海岸线变迁精度的要求。

岸线形态变化分析主要根据海图资料, 三角洲发育时期, 清代雍正和道光年间(A.D.1678—1850)有记载三角洲地貌形态粗略的地貌图。黄河北归后, 近

代国内外出版了该三角洲的海图, 包括 1904(英版)、1935—1940(日版)1960、1980 年的海图。随着科学发展和调查技术的出现, 20 世纪 80 年代以来, 中国考察队(如: 南京师范大学黄河故道考察队、江苏海岸带和海涂资源综合考察队)先后对苏北三角洲进行了调查, 获取了珍贵的资料。结合实地野外调查研究, 布设固定断面对岸滩演变进行监测(陆培东, 2007), 取得了第一手资料和数据。

## 3 研究结果

废黄河三角洲的演变过程分为发育和侵蚀两个阶段, 1128—1855 年为发育阶段, 1855 年以后进入侵蚀阶段。废三角洲发育和侵蚀过程主要表现为面积增减、岸线长度和形态的改变, 作为黄河流路变迁的产物, 演变特征具有大淤大冲的特点。发育阶段中河口向海延伸达 90 km, 岸线向海推进平均约 66 km, 岸线推进距离和速率由河口向三角洲两侧减小。侵蚀阶段中岸线后退距离达 22.5 km, 流失了约 1/6 的土地面积。

### 3.1 废三角洲发育和侵蚀

1128 年(南宋建炎二年)杜充为了阻止金兵南下

人为掘开黄河, 使河水奔流南下流入淮河(王质彬等, 1994), 此时黄河分为北流和南流两个河道, 泥沙主要沿途淤积, 至 1194 年, 岸线主要稳定在云梯关附近(图 3)。1194—1578 年, 由于黄河流路分散和决口, 泥沙主要淤积在下游的冲积平原上(叶青超, 1986), 沿岸泥沙淤积较少, 所以, 岸线延伸平均距离为 14.2 km, 延伸速率为 36.8 m/a(表 1)。1578 年, 潘季驯采用“束水攻沙”的治河策略, 黄河结束了近 400 年的分流局面, 泥沙大量向下游输运和堆积, 河口位置达到四套(图 3)。至 1591 年, 黄河两岸修建堤防(王质彬, 林观海, 1994), 黄河水沙被固定于堤防之间, 泥沙大量向海输运, 河口延伸速率高达 1540 m/a, 河口位置到达十套。1579—1591 年间, 20 年的时间里岸线向海推进 13.2 km, 速率达 1015.8 m/a。1592 年后由于黄河频繁

发生决口分流, 岸线向海推进减缓, 至 1700 年, 河口到达八滩, 岸线向海推进 8 km, 速率为 72.7 m/a(图 3 和表 1)。1747 年, 河口延伸至七巨港, 岸线推进速率为 256 m/a, 1776 年, 河口延伸至新淤尖, 岸线推进速率为 156 m/a, 推进距离约 12 km。1777—1803 年, 由于期间有 15 年(1782—1797 年)为枯水时段, 河口淤积较缓, 位置到达南北尖(图 3), 岸线推进速率为 146.2 m/a。1808 年以后, 修复并延长河口提防, 1804—1810 年, 河口延伸速率增大(500 m/a), 岸线推进速率为 478 m/a。至 1855 年河口位置到达最东端(望海墩), 岸线推进速率为 157.8 m/a(表 1)。

1855 年, 黄河北归入渤海后, 废三角洲进入侵蚀阶段, 由于泥沙基本断绝和陆海相互之间的动力平衡被打破, 废三角洲遭到严重侵蚀(Wang *et al*,

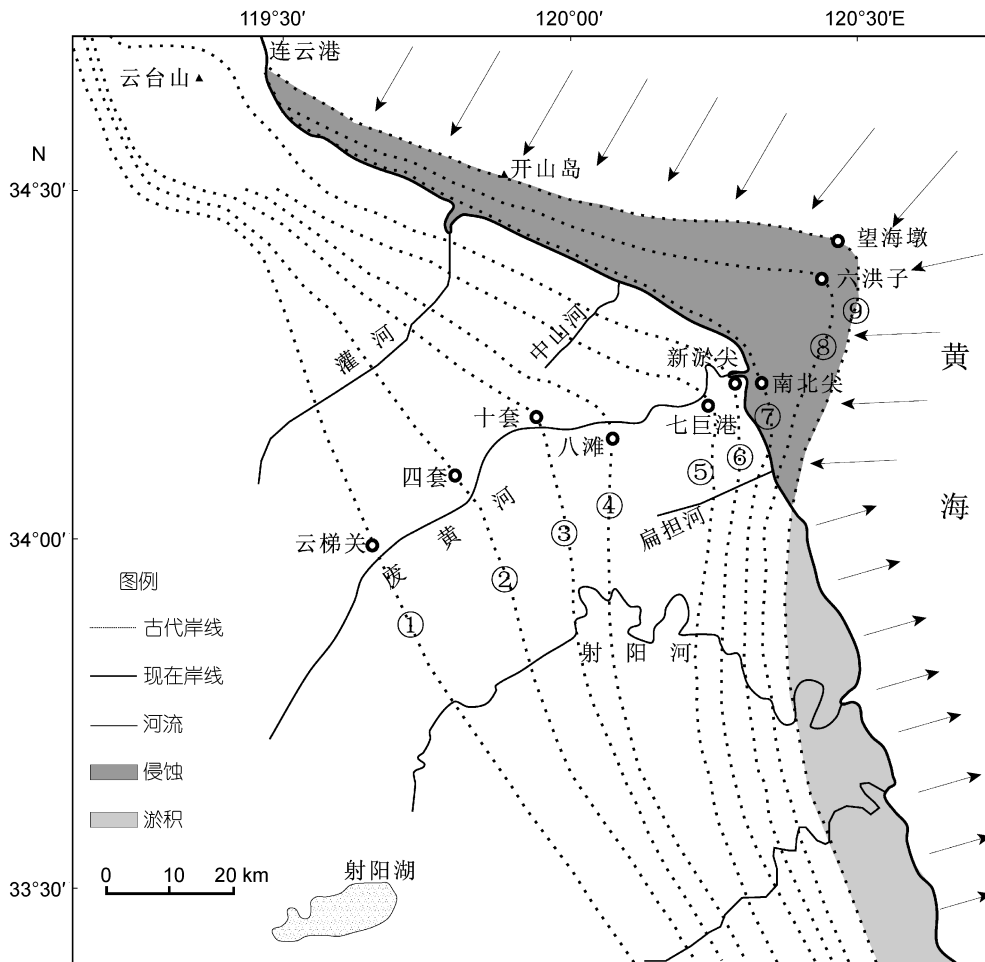


图 3 废黄河三角洲岸线变化图( — 分别为 1194、1578、1591、1700、1747、1776、1803、1810 和 1855 年的岸线; 侵蚀和淤积是现代废三角洲相对于 1855 年时期的三角洲变化)(据叶青超改绘, 1986)

Fig.3 Shoreline change of the abandoned Huanghe (Yellow) River delta (Numbers — are shorelines in the years of 1194, 1578, 1591, 1700, 1747, 1776, 1803, 1810, and 1855, respectively; erosion and deposition are estimated using present abandoned Huanghe River delta vs that in 1855) (modified after Ye, 1986)

表 1 废黄河三角洲岸线向海推进距离与速率、面积和岸线长度  
Tab.1 Distance, rate, delta area, and shoreline length of seaward extension of the abandoned river delta

阶段	年份	间隔	北侧		河口		南侧		平均 距离 (km)	平均 速率 (m/a)	面积 (km <sup>2</sup> )	岸线 长度 (m)
			距离 (km)	速率 (m/a)	距离 (km)	速率 (m/a)	距离 (km)	速率 (m/a)				
发育 阶段	1194—1578	385	12.5	32.4	15.0	33	15.0	39.0	14.2	36.8	1527	87
	1579—1591	13	11.2	858.0	20.0	1540	8.5	650.9	13.2	1015.8	1164	129
	1592—1700	109	5.4	49.4	13.0	119	5.4	49.4	7.9	72.7	161	136
	1701—1747	47	6.9	147.3	15.0	320	14.2	302.8	12.1	256.4	1548	160
	1748—1776	29	5.0	172.4	5.5	190	3.1	106.1	4.5	156.1	745	165
	1777—1803	27	5.4	199.4	3.0	111	3.5	128.2	3.9	146.2	777	170
	1804—1810	7	3.8	549.5	3.5	500	2.7	384.6	3.3	478.0	889	186
	1811—1855	45	3.8	85.5	14.0	300	3.5	76.9	7.1	157.8	784	192
侵蚀 阶段	1855—1890	36	-10	-277.8	-13	-361	-14	-389	-12.3	-342	-377.9	232.7
	1890—1921	32	-6.2	-195	-7.4	-230	-5.4	-168	-6.3	-197	-329.2	125.1
	1921—1958	38	-2.9	-76.3	-3	-78	-2.7	-78.9	-2.9	-75.4	-84.7	112.2
	1958—1971	14	-0.8	-57.1	-1	-70	-1.3	-92.8	-1	-73.8	—	—
	1978—1987	10	-0.13	-12.9	-0.07	-6.8	-0.08	-8.3	-0.28	-28	-16.4	109
	1989—2010	22	0.15	7	-0.3	-13.8	0.09	4.1	-0.06	-0.003	—	—

表中正值为淤积, 负值为侵蚀。发展阶段主要依据图 2; 侵蚀阶段南侧统计根据扁担河附近的岸线变迁计算, 数值偏大; 岸线长度和三角洲面积根据图 2 与相关文献, 数值为粗略值

1987)。1855—1890 年岸线蚀退距离达 12.3 km, 平均每年后退 342 m, 扁担河附近侵蚀强度较大。1934 年, 射阳河口由淤积转变为侵蚀, 所以, 1855—1934 年三角洲南侧处于向海淤积增长状态, 河口处及北侧为侵蚀状态。随着侵蚀的自然衰减, 岸线后退逐渐减缓, 至 1971 年, 侵蚀速率减小为 73 m/a, 整体岸线后退距离达 22.5 km。20 世纪 70 年代后, 一系列海岸防护工程减缓了岸线的进一步蚀退, 1978—1987 年岸线侵蚀速率减小为 28 m/a (张旸等, 2009)。随着防护工程的完善, 至 2010 年岸线侵蚀后退基本得到控制, 侵蚀后退速率仅为 0.003 m/a (彭修强, 2012)。

由于侵蚀的持续, 废三角洲沿岸的部分陆上三角洲转变为水下三角洲, 随着岸线后退得到控制, 下蚀作用继续侵蚀岸滩。废三角洲沿岸的 4 条固定断面分析显示(图 4), 陆上三角洲的侵蚀不仅表现在岸线和岸滩的侵蚀后退, 也表现为岸滩的下蚀。四个断面形态均显示为下凹型, 这是遭受侵蚀特有的特征, 尤其是拐角处和废黄河口处最为显著。由于废三角洲经历了最初几十年的侵蚀, 90 年代后, 北侧岸滩演化表现为以距岸 4.5 km 为界, 上部比较稳定或略有淤积, 下部侵蚀, 南侧以侵蚀为主。至 2004 年, 拐角处在距岸 5 km 处下蚀深度达 16 m, 坡度为 4.7%, 废黄河口处的剖面坡度为 4%, 两

处的 10 m 等深线离岸距离在 2 km 左右。所以, 断面剖面演变充分说明了岸滩的侵蚀程度, 拐角和废黄河口侵蚀最严重, 侵蚀程度由拐角向两侧减缓。

### 3.2 废三角洲面积、岸线长度和岸线变迁

废三角洲的演变过程中, 三角洲面积和岸线长度表现为时空增减的变化(表 1)。1149 年以来三角洲面积增加了约 7600 km<sup>2</sup>, 沉积厚度平均为 9 m 左右。1855 年时期的三角洲同 20 世纪 80 年代的三角洲对比计算可以得出, 三角洲面积整体增加约 800 km<sup>2</sup>。侵蚀阶段中南侧淤长了约 780 km<sup>2</sup> 的面积, 北侧和河口处减少了约 1500 km<sup>2</sup> 的面积。发育阶段中岸线长度不断增长, 至 1855 年, 岸线长度为 192 km。侵蚀阶段初期(1890 年)岸线达到最长(232 km), 侵蚀作用使岸线形态趋于平直, 岸线长度也趋于逐渐缩短。

1855 年至 1985 年的岸线如图 5 所示, 以废黄河口以南 20 km 为界, 以北呈后退状态, 最大后退距离为 22.7 km, 平均 12 km, 以南呈淤积状态, 最大淤积距离为 11.2 km, 平均 6 km。1989 年至 2010 年(图 5), 废三角洲北侧岸线较少的岸段发生较弱侵蚀, 整体以淤积为主, 岸线平均淤长了 148 m。拐角处侵蚀距离平均为 289.6 m, 表现为废黄河口两侧的岸线侵蚀强度比河口处大, 其中南侧最大。

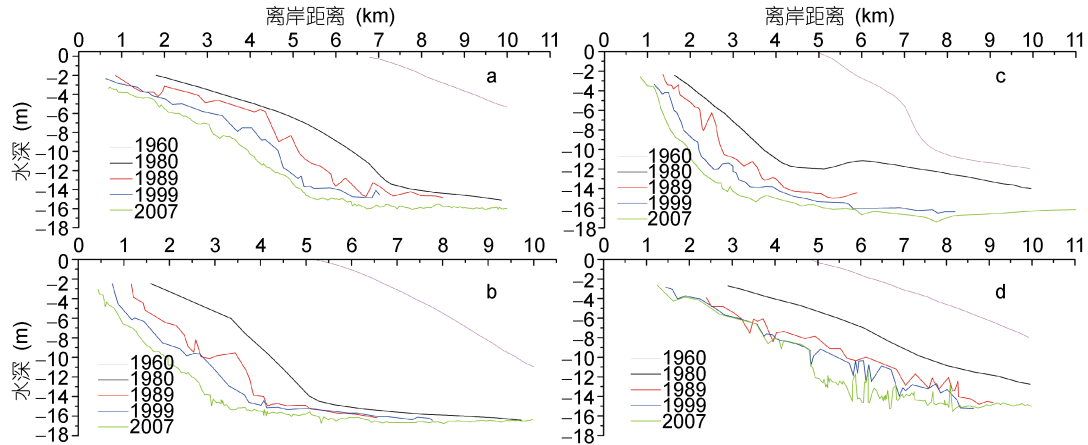


图 4 废黄河三角洲沿岸断面演化(a.南侧, b.废黄河口处, c.拐角处, d.北侧)(陆培东, 2007)

Fig.4 Profile showing evolution of the abandoned Huanghe (Yellow) River delta (a: the southern part; b. around the estuary of the abandoned Huanghe River; c: corner of the delta; d: the northern part)

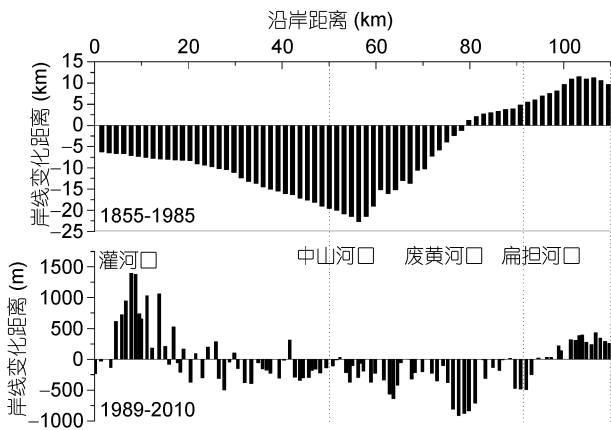


图 5 废黄河三角洲岸线变化距离图(1989—2010 年数据来源: 彭修强, 2012)

Fig.5 Change in distance of the shoreline in abandoned Huanghe (Yellow) River delta during 1989—2010 (after Peng, 2012)

### 3.3 岸线形态演变

废黄河三角洲岸线形态的历史演变同海平面变化、黄河和长江两大河流入海口变迁、陆海相互作用和人类活动有密切关系。早全新世时期, 气候变暖引起海平面上升, 海岸线在废黄河口海域水深 30 m 附近(任美镔, 1985), 长江在现今入海口以北入海, 岸线形如喇叭口(图 6)。最大海侵时, 岸线退回到内陆地区约 119°E 以西的位置(图 2), 随着海平面的降低, 岸线向海推进, 古长江入海口也初步雏形, 大致在弼港附近入海。据历史记载, 隋唐时期(A.D. 581—907)岸线稳定在云梯关一线, 近海为浅水海湾, 长江入海口逐渐向南移动(任美镔, 1985)。至 1128 年, 黄河南移至江苏入黄海, 由于黄河较高的含水含沙量, 大量

泥沙向海方向淤积, 海岸线迅速向海推进, 灌河口和射阳河口之间的地区成陆速度最快, 因此三角洲迅速发育, 地貌呈现出河网密布、岸线曲折的特征。同时, 岸外的浅滩也发生了一系列变化, 黄河南徙前的浅滩随着三角洲的发育逐渐并陆或迁移, 同时又在岸外生成了新的浅滩。清朝雍正年间(A.D. 1678—1735)和道光年间(A.D. 1782—1850)的苏北海岸图显示, 岸线形态向曲折多变发展的趋势, 岸外浅滩比较发育, 有向南移动的趋势。至 1855 年, 废三角洲发育形成, 岸线曲折, 岸外的五条浅滩非常明显。

1855 年后, 岸线形态随着三角洲的侵蚀逐渐平滑和顺直(图 6), 支离破碎的陆地逐渐合并, 侵蚀后退的过程中岸线曲率变的越来越小, 形态也越来越平直。1904 年英国版海图显示, 岸线曲折程度有所减缓, 岸线形态如扇形, 岸外的五条沙和大沙等浅滩仍比较清晰。1935-1940 年版的海图上岸线比较平直, 初显三角洲拐角形态的岸线, 岸外的浅滩已明显衰减, 拐角海域的浅滩已不存在。1960 年版海图显示, 废三角洲的岸线形状明显向海突出, 浅滩规模减小, 椭圆长轴方向呈平行于北侧岸线方向发育。1980 年海图显示岸线已比较平直, 浅滩基本不存在, 现今的岸线与 1980 的岸线相比, 除了水平方向较弱的侵蚀后退外, 形状变化不是很明显。

## 4 讨论

苏北废黄河三角洲的历史演变过程是一个复杂的过程, 不仅包括长达 700 多年的发育阶段, 也包括约 150 多年的侵蚀阶段。根据历史资料和侵蚀机理, 采用演化模式阐述其演变过程, 有助于分析研究该

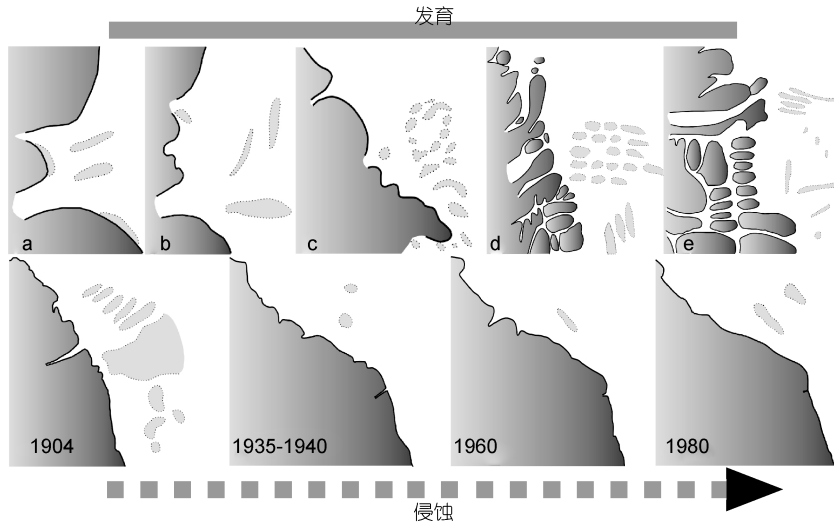


图6 岸线变化图(发育阶段: a. 早全新世, b. 最大海侵时期, c. 黄河夺淮前期, d. 清朝雍正年间(据陈伦炯《沿海全图》, 1723—1730, e. 清朝道光年间(据陶澍《海运图》); 侵蚀阶段据4个时期的海图)

Fig.6 The shoreline changes in different periods: a. early Holocene; b. maximal transgression period; c. prophase of the Huanghe (Yellow) River capturing Huaihe River; d. Yongzheng Reign in Qing Dynasty (after Chen L J: the *Coastal Map* 1723—1730); e. Daoguang Reign in Qing Dynasty (after Tao S: *Ocean Shipping Map*; the erosion phase (based on marina chart of four periods)

三角洲的具体发育和侵蚀过程。同时, 分析演变过程的影响因素, 泥沙输运、海平面升降和人类活动与废三角洲的演变有密切关系, 对其发育和侵蚀有重要的影响。

#### 4.1 演变模式

废黄河三角洲的演化模式主要建立在发育基底、沉积物淤积或侵蚀、岸线演变、水动力作用和泥沙输运等基础上, 将废三角洲的演变划分为7个阶段, 阐述演变和侵蚀机制, 分析三角洲的演变过程(图7)。发育期主要受径流和潮流影响, 以沙洲并陆淤积延伸方式进行演变; 侵蚀期主要受波浪和潮流影响, 以沙洲合并侵蚀后退和淤积外长交替侵蚀的方式进行演变。

**发育前期:** 全新世中期, 海平面稳中有降, 淮河携带的泥沙在古淮河口海湾的堆积作用比较活跃, 发育了滨海砂堤和河口沙嘴, 砂堤分为青莲冈古砂堤和淮北贝壳砂堤群南北两支, 内侧发育有古硕项湖(凌申, 2003)。随着古岸线向海迁移的过程中, 发育了中冈、东冈等一系列平行的古砂堤。所以, 黄河南徙夺淮之前, 研究区为泻湖-堡岛体系(张忍顺, 1984), 沿海为浅水湾地貌, 发育基底为泻湖和浅海沉积。

**第一阶段:** 1128年黄河夺淮入黄海, 携带了大量泥沙淤积在古淮河三角洲上、古泻湖和浅海湾中, 先前的砂堤并陆, 并发育了新冈。三角洲向海缓慢淤积, 下游河道沙洲雏形, 同时, 岸外发育有少量浅滩。

**第二阶段:** 1578年采取了治河策略, 泥沙大量向下游堆积, 古泻湖由于处于黄泛区域, 泥沙逐渐淤积在湖内和潮汐汉道中, 也淤积在淮河入海口(凌申, 2003)。灌河以北和河口处淤积较快, 随着三角洲向海推进, 下游发育有沙洲, 岸线曲折程度较大, 废黄河口和射阳河口均出现沙咀(彭修强, 2012), 岸外沙洲和岸外浅滩比较发育。

**第三阶段:** 清朝中后期(始于1796年), 大量的泥沙继续向海输运, 古海湾、古泻湖相继淤积成为陆地。岸线迅速向海推进, 前期的沙洲先后并陆, 同时又发育新的沙洲, 岸外浅滩继续发育和迁移, 浅滩椭圆长轴方向平行于黄河入海方向。北部连云港海湾淤积成平原, 云台山并陆, 岸线形态呈锯齿状, 河口呈鸟咀状的三角港形态向海突出(陈希祥等, 1983; 万延森, 1989), 至1855年, 以沙洲先后并陆为主, 并陆后岸滩以向海淤长为辅的形式发育了沼泽平原相三角洲(张忍顺, 1984)。

**第四阶段:** 由于黄河北归, 大量泥沙来源断绝, 从而导致废三角洲的岸线、沙洲和岸外浅滩与新的水动力环境进行重新调整。河口沙咀首先受到侵蚀后退, 沙洲外侧侵蚀的泥沙主要向内侧和两侧输运, 用于填充沙洲间的水道、潮流汉道和潮滩上的潮沟, 南侧接受搬运来的泥沙向海淤积推进, 岸线趋于平滑。同时, 岸外浅滩(如五条沙和大沙)在波浪和潮流的联合作用下开始消减并向南移动, 椭圆长轴开始缩短。



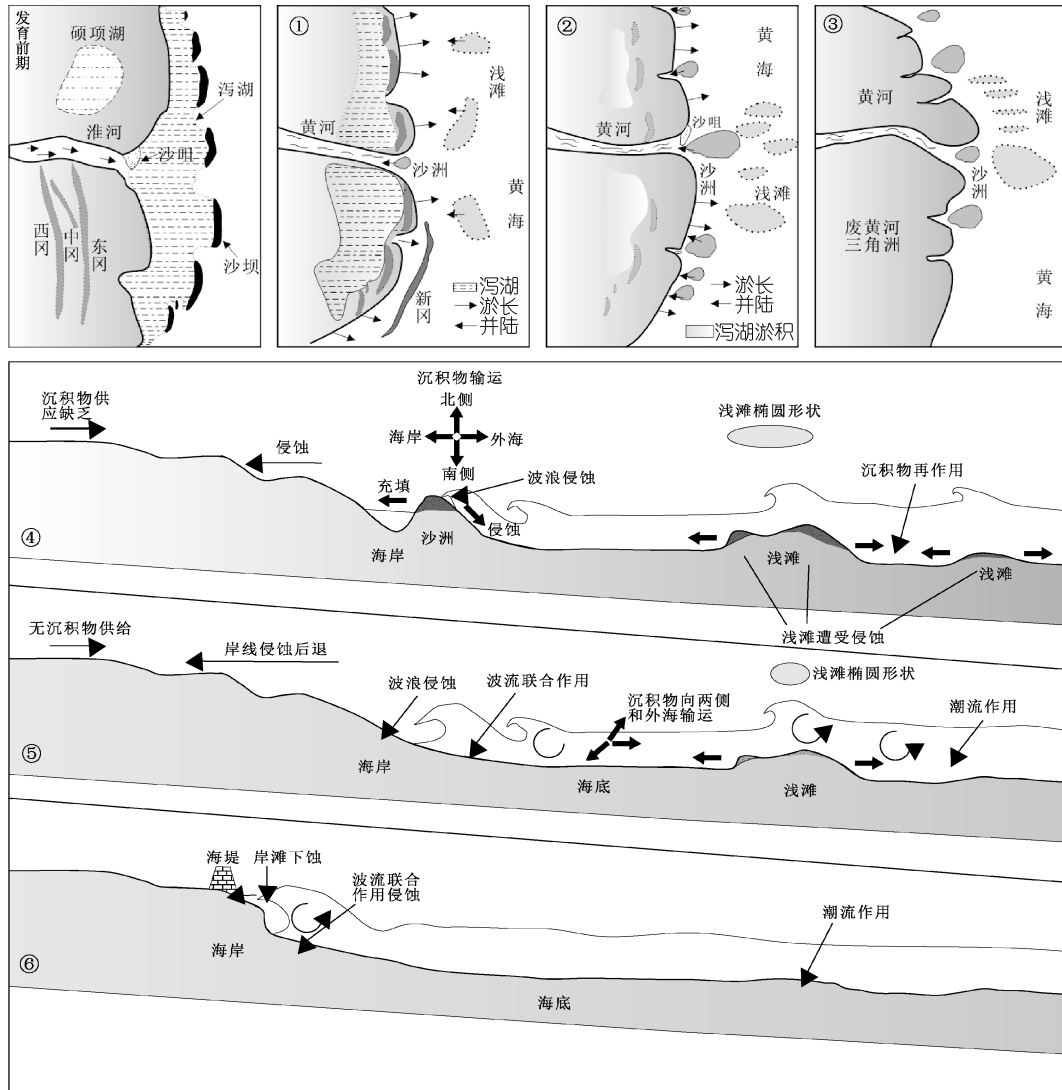


图 7 苏北废黄河三角洲发育模型(包括 7 个发育阶段: 发育前期和 为发育阶段, 为侵蚀阶段)

Fig.7 Model of the development of the abandoned Huanghe (Yellow) River delta in North Jiangsu Province (including 7 phases: prophase development, deposition phase ( ), and erosion phase ( ))

第五阶段: 侵蚀仍在继续进行, 废三角洲向海凸出的拐角夹角增大, 岸线在波浪、波流联合作用下侵蚀后退, 形状向平直趋势发展, 侵蚀范围向南扩散, 沉积物在潮流作用下主要向三角洲两侧和外海运输。20 世纪初, 五条沙和大沙由于处于开阔水域, 在较强的波浪和潮流作用下基本侵蚀殆尽, 岸外只存有接近圆形的浅滩。20 世纪 70 年代, 岸线趋于平直并较稳定, 但后退仍在进行, 射阳河口已发生侵蚀后退, 岸外浅滩椭圆轴方向向平行于岸线方向发展。这与潮流有重要联系, 陈可峰(2008)认为随着废黄河三角洲不断侵蚀后退, 分潮振幅以废黄河口为界, 以北振幅减小以南振幅增大,  $M_2$  和  $S_2$  分潮无潮点位置向西南方向发展。

第六阶段: 岸外的浅滩已基本被侵蚀殆尽, 水下三角洲被夷平, 岸滩侵蚀在水动力调整作用下逐渐趋于平衡。20 世纪 70 年代后, 由于陆续采取了护岸措施, 如修建了一系列的护岸工程, 岸线后退基本得到控制。但是, 护岸堤坝导致了岸滩下蚀, 岸滩在水动力的作用下侵蚀深度有所增大。

### 4.2 演变模式特征

废黄河三角洲的演变为过程可以分为缓慢发育、快速发育、快速侵蚀和侵蚀减缓的阶段, 河口区的发育和侵蚀速率比三角洲两侧高。演变模式特征为以径流-潮流为主转变为以波浪-潮流为主, 以沉积物快速向海和沿岸淤积的形式发育, 以沉积物大量被侵蚀、悬浮和扩散的形式侵蚀后退, 以岸线扇形形态向海



扩展转变为以河口向海突出、岸线趋于平直的三角形形态向陆侵蚀。因此,这种快速淤积和快速侵蚀的演变过程和特征同其它三角洲演变有重要区别。

废黄河三角洲同其它在弱潮和多沙条件下形成的三角洲具有不同的演变模式。废三角洲主要以沙洲并陆的形式进行发育,现代黄河三角洲以叶瓣发育并相互堆叠的发育模式为主,叶瓣的形成与黄河改道有密切关系(Li *et al.*, 2004)。中国的滦河三角洲在弱潮、河流和波浪为主要的动力作用下,以不同时期连续发育沙坝、沙岛形成堡岛泻湖的扇形三角洲。密西西比河三角洲的发育基础是峡谷状河流和连接深海的沉积环境,以叶瓣发育、叶瓣分布不连续的模式发育形成鸟足状的三角洲(Duncan *et al.*, 2004)。

#### 4.3 泥沙输移

泥沙输运在废黄河三角洲演变过程中具有举足轻重的作用。泥沙来源的输运量、方向和入海口位置决定了三角洲发育过程中淤积速度、方向和淤积位置。根据黄河口不同部位的泥沙量(陆上 24%, 滨海 49%, 海域 36%)计量(庞家珍等, 1980), 1194 年以来有  $650 \times 10^8$  t 泥沙淤积在滨海区, 有  $318 \times 10^8$  t 泥沙淤积在陆上, 每年有  $2 \times 10^8$  t 泥沙被输运至废黄河口。黄河在夺淮期间经常发生河道变迁, 1495 年前, 黄河夺淮的河道南北摆动, 泥沙多是沿途散布, 三角洲向海淤积缓慢。黄河入海位置主要位于向海突出的位置, 有时由于人为因素或决口而发生迁移, 北侧决口多于南侧, 据记载明万历二十三年(1595 年)、康熙四年(1665 年)和嘉庆十三年(1808 年), 黄河从灌河入海(吴君勉, 1942; 中国水利水电科学研究院水利史研究室, 2004)。康熙三十五年(1696 年)黄河被导入南潮河入海, 南潮河迅速淤为陆地, 道光二十二年(1842 年), 黄河水三分入埝子口, 七分入灌河, 所以三角洲北侧迅速淤积, 三角洲北侧成陆速度最快。嘉庆十二年(1807 年)黄河在云梯关决口由射阳河入海。黄河南徙期间, 黄河入海的泥沙主要向南输运, 南侧长期保持淤积状态。

泥沙输移方向和含沙量决定了侵蚀过程中的三角洲冲/淤及位置。侵蚀期的泥沙输运主要是横向泥沙运动和纵向泥沙运动(李本川, 李成治, 1980): 横向运动表现为波流作用下的沉积物横向分异规律, 结果是岸线侵蚀后退, 水下形成潮间浅滩; 纵向运动表现为废三角洲两侧方向相反的泥沙流, 结果是废三角洲拐角海域的岸线和岸滩遭受侵蚀。悬沙浓度的分布也反映出泥沙输运状态, 悬沙受潮流、波浪、季

风和环流因素的影响, 向三角洲两侧、黄海和东海输运(邢飞等, 2010; 陈斌等, 2011; Wang *et al.*, 2011; Dong, 2011)。因此, 废三角洲的沉积物持续的处于侵蚀、悬浮、搬运、沉积和再侵蚀作用的循环过程中, 三角洲不断地侵蚀后退, 冲/淤节点不断向南移动。

#### 4.4 人类活动和气候变化

废黄河三角洲的演变是泥沙输运史, 泥沙对三角洲演变的影响是显性的, 而人类活动和气候变化则是隐性的影响因素。人类活动和气候变化与三角洲的演变有重要关系(Morton, 1977; Hartwing *et al.*, 2005; Syvitski, 2005), 人类活动(如农业、工业、建设等)、气温、降水和海平面变化影响三角洲的演变过程。发育前期岸线主要受海平面升降的影响, 人为因素导致了黄河的南徙。在发育过程中, 黄河上游的农业活动和水土状况影响了黄河的含沙量(许炯心, 2001; Walling, 2006), 人为改变黄河入海口和治河策略影响了淤积状态和岸线变迁(潘季驯, 1590; 李元芳, 1991), 气候变化的影响退居次要地位(杨达源, 1999)。人类活动在侵蚀过程中仍具有重要的影响, 采挖海沙和贝壳堤加剧岸线侵蚀, 护岸工程控制了岸线的进一步蚀退, 但加剧了岸滩的下蚀。极端天气(台风引起风暴潮)加剧海岸带的侵蚀, 气候变化将在三角洲的演变趋势中占越来越重要的影响, 对侵蚀的贡献率有增大的趋势(Titus, 1986; 朱季文等, 1994; IPCC, 2007)。

## 5 结论

苏北废黄河三角洲的演变经历了发育阶段和侵蚀阶段, 演变主要表现在岸线进退、面积增减和岸线形态变化方面。发育时期岸线向海延伸了约 90 km, 面积增加了近 8000 km<sup>2</sup>, 侵蚀时期岸线后退了约 22 km, 侵蚀的面积约 800 km<sup>2</sup>。现代的废三角洲相对于发育时期的三角相岸线后退平均约 3 km, 北侧和河口区的面积减少了 1500 km<sup>2</sup>, 南侧淤长了约 800 km<sup>2</sup>。岸线形态变化显示出平直-曲折-平滑-平直的过程, 显示了三角洲地貌形态的变化。

废三角洲的演变模式较好的模拟了发育和侵蚀阶段的演变过程, 根据历史资料和有关研究分析, 将演变过程分为 7 个阶段进行模拟分析。结果显示, 发育期主要受径流和潮流影响, 以沙洲并陆淤积和延伸方式进行演变, 侵蚀期主要受波浪和潮流影响, 以沙洲合并侵蚀后退和淤积外长交替侵蚀的方式进行演变, 岸线后退被控制后, 以岸滩下蚀作用为主的方

式演变。

影响废三角洲演变的影响因素中, 泥沙输运对三角洲的发育和侵蚀都有非常重要的影响, 决定了三角洲的演变趋势。人类活动和气候变化时三角洲演变的隐含的影响因子, 人类活动对黄河河道的变迁有一定的影响, 护岸工程减缓了废三角洲的侵蚀后退, 却加剧了岸滩下蚀。气候变化影响黄河泥沙产量, 海平面变化长时间尺度影响岸线的变迁, 极端天气加剧海岸侵蚀。

### 参 考 文 献

- 万延森, 1989. 苏北古黄河三角洲的演变. 海洋与湖沼, 20(1): 66—74
- 王质彬, 林观海(黄河水利委员会黄河志总编辑室), 1994. 金史·河渠志. 河南人民出版社
- 王艳红, 2006. 废黄河三角洲海岸侵蚀过程中的岸滩变异与整体防护研究. 南京: 南京师范大学博士学位论文
- 中国水利水电科学研究院水利史研究室, 2004. 再续行水金鉴·黄河卷. 武汉: 湖北人民出版社
- 叶青超, 1986. 试论苏北废黄河三角洲的发育. 地理学报, 41(2): 112—122
- 邢 飞, 汪亚平, 高建华等, 2010. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征. 海洋与湖沼, 41(3): 159—468
- 朱季文, 1994. 海平面上升对长江三角洲及邻近地区的影响. 地理科学, 14(2): 109—117
- 任于灿, 周永青, 1994. 废弃的黄河三角洲的地貌特征及演化. 海洋地质与第四纪地质, 14(2): 19—28
- 任美镔, 1986. 江苏海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京: 海洋出版社
- 许炯心, 2001. 人类活动对公元 1194 年以来黄河河口延伸速率的影响. 地理科学进展, 20(1): 1—9
- 李元芳, 1991. 废黄河三角洲的演变. 地理研究, 10(4): 29—39
- 李本川, 李成治, 1980. 苏北平原海岸地貌特征及沿岸泥沙动态. 海洋科学, 3: 12—17
- 杨达源, 张建军, 李徐生, 1999. 黄河南徙、海平面变化与江苏中部的海岸线变迁. 第四纪研究, 3
- 吴君勉, 1942. 古今治河图说. 水利委员会印制
- 沈 怡, 1971. 黄河问题讨论集. 台湾商务印书馆
- 张 旻, 陈沈良, 2009. 苏北废黄河三角洲海岸时空演变遥感分析. 海洋科学进展, 27(2): 166—175
- 张忍顺, 1984. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程. 地理学报, 39(2): 173—184
- 张忍顺, 陆丽云, 王艳红, 2002. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势. 地理研究, 21(4): 469—478
- 陆培东, 2007. 江苏滨海港 10 万吨级海港工程海岸稳定性和泥沙研究. 南京: 南京水利科学研究院研究报告
- 陈 斌, 周良勇, 2011. 废黄河口海域潮流动力与悬沙输运特征. 海洋科学, 35(5): 73—81
- 陈可峰, 2008. 黄河北归后江苏海岸带陆海相互作用过程研究. 南京: 南京水利科学研究院博士学位论文
- 陈希祥, 缪锦洋, 宋育勤, 1983. 淮河三角洲的初步研究. 海洋科学, 4: 10—13
- 周晓静, 李安春, 万世明等, 2010. 东海陆架表层沉积物粘土矿物组成分布特征及来源. 海洋与湖沼, 41(5): 667—675
- 庞家珍, 司书亨, 1980. 黄河口演变——河口水文特征及泥沙淤积分布. 海洋与湖沼, 11(4): 295—305
- 南京师范大学黄河古道综考队, 1984. 江苏省黄河古道综合考察. 资料汇编(一). 南京师范大学资料室
- 耿秀山, 万延森, 李善为等, 1983. 苏北海岸线的演变过程及苏北浅滩动态模式的初步探讨. 海洋学报, 5(1): 62—70
- 凌 申, 1994. 苏北全新世海进与古砂堤研究. 台湾海峡, 13(4): 338—345
- 凌 申, 2002. 全新世苏北沿岸岸线冲淤动态研究. 黄渤海海洋, 20(2): 37—46
- 凌 申, 2003. 全新世以来硕项湖地区的海陆演变. 海洋通报, 22(4): 48—54
- 高 抒, 1989. 废黄河口海岸侵蚀与对策. 海岸工程, 8(1): 37—42
- 高克昌, 刘于礼, 窦守宽等(黄河水利委员会黄河志总编辑室), 1991. 黄河防洪志. 河南人民出版社
- 高善明, 1981. 全新世滦河三角洲相和沉积模式. 地理学报, 36(3): 303—314
- 黄河水利委员会, 1959. 人民黄河. 北京: 水利电力出版社
- 彭修强, 2012. 基于 GIS 和 RS 的苏北废黄河三角洲海岸演变研究. 南京: 南京大学硕士学位论文
- 虞志英, 陈德昌, 金 镠, 1986. 江苏北部旧黄河水下三角洲的形成及其侵蚀改造. 海洋学报, 8(2): 187—206
- 虞志英, 陈德昌, 唐寅德, 1982. 关于苏北中部平原海岸古砂堤形成年代的认识. 海洋学报, 4: 11—14
- 蔡明理, 王 颖, 1999. 黄河三角洲发育演变及对渤、黄海的影响. 南京: 河海大学出版社, 1—215
- 潘季驯, 1590. 河防一览, 2
- Chu Z X, Sun X G, Zhai S K *et al*, 2006. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. Marine Geology, 227: 13—30
- Dong L X, 2011. Sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 93: 248—258
- Duncan M F, Mark K, Shea P *et al*, 2004. Morphologic and stratigraphic evolution of muddy ebb-tidal deltas along a subsiding coast: Barataria Bay, Mississippi River delta. Sedimentology, 51(6): 1157—1178
- Edouard B, Bruno H, Maurice A *et al*, 1996. Deglacial sea-level record from Tahiti Corals and the timing of global meltwater discharge. Nature, 382(18): 241—244
- Fan S J, 2001. Coastal ocean morphodynamics and the resulting

- erosion and deposition: an analytical approach. Dissertation of Old Dominion University
- Feng J L, Zhang W, 1998. The evolution of the modern Luanhe River delta, north China. *Geomorphology*, 25: 269—278
- Frihy O E, Komar P D, 1991. Patterns of beach-sand sorting and shoreline erosion on the Nile delta. *Journal of Sediment Petrology*, 61(4): 544—550
- Gould H R, 1970. The Mississippi delta complex. In *Deltaic Sedimentation: Modern and ancient*. Spec Publ Soc Econ Paleont, Miner, 15
- Hartwig H K, Martin D A, Tissier L *et al*, 2005. Land Sea Interactions in the Coastal Zone (LOICZ)-Science Plan and Implementation Strategy (IGBP Report 51/IHDP Report 18), IGBP Secretariat, Stockholm, Sweden: 22—27
- IPCC, 2007. Nicholls R J, Wong P P, Burkett V R *et al*, 2007: Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P *et al* ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315—356
- Li A L, Li G X, Cap L H *et al*, 2004. The coastal erosion and evolution of the Yellow River Delta abandoned lobe, *Journal of Geographical Sciences* 14(4): 465—472
- Morton R A, 1977. Historical shoreline changes and their causes, Texas Gulf Coast. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 27: 352—364
- Scraton P C, 1960. Delta Building and the Deltaic Sequence. In: *Recent Sediments, Northwest Gulf of Mexico*, Am Ass Petrol Geol, Tulsa (ed. by F P Shepard, Tj H Van Andel), 82—102
- Syvitski J P M, Vörösmarty C, Kettner A J *et al*, 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308: 376—380
- Titus J G, 1986. The causes and effects of sea level rise, effects of changes in stratospheric ozone and global climate. *Sea Level Rise*, 4: 219—241
- Walling D E, 2006. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79: 192—216
- Wang X H, 2011. The turbidity maxima of the northern Jiangsu shoal—water in the Yellow Sea, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93: 202—211
- Wang X, Ke X, 1997. Grain-size characteristics of the extant tidal flat sediments along the Jiangsu coast, China. *Sedimentary Geology*, 112: 105—122
- Wang Y, Aubrey D G, 1987. The characteristics of the China coastline. *Continental Shelf Research*, 7(4): 329—349
- Zhang Y, Douald J Pswift, Yu Z Y *et al*, 1198. Modeling of coastal profile evolution on the abandoned delta of the Huanghe River. *Marine Geology*, 145: 133—148

## EVOLUTION OF THE ABANDONED HUANGHE (YELLOW) RIVER DELTA IN NORTH JIANGSU PROVINCE IN 800 YEARS

ZHANG Lin, CHEN Shen-Liang, LIU Xiao-Xi

(State Key Lab of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University Shanghai 200062, China)

**Abstract** Based on historical information, we analyzed the evolution of the abandoned Huanghe (Yellow) River delta in 800 years. We divided the evolution into growth and erosion periods and seven phases. Shoreline extended seaward for about 90 km in the growth phase, and withdrew landward for 22 km in the erosion phase, making a difference of about 800 km<sup>2</sup> in area. Geomorphology evolution of coastline experienced a course of straight—zigzag—smooth—straight in curvature because of land-sea interaction changes. In the growth period, the delta initiated from former shoals with siltation, deposition, and extended seaward in alternation of runoff-tide actions. In the erosion period, shoals re-occurred, was eroded back, and filled, in alternation of wave-tide actions. Sediment transport, human activities, and climate change contributed to the impact on the evolution of the delta. The huge amount of sand supply has been the key factor for the delta development, and sediment disbalance was the main reason of delta erosion. In the growth period, sediment transport affected the deposition velocity and location, and human activities and climate change affected the channel migration of the river course, and sediment discharge and supply. In the erosion period, sediment transport was less and slow, and human activities affected natural deposition-erosion along coastal zone to a certain degree. Climate change affects the evolution trend of the delta.

**Key words** abandoned delta; evolution model; sediment transport; human activities; climate change