

黄河三角洲典型潮沟发育演变过程分析

韩震,宗全利,金凯,祝秀芝

(青岛农业大学资源与环境学院,山东 青岛 266109)

摘要:以黄河三角洲东部、侧弯丁坝北部为研究区域,基于1997—2021年内共8期Landsat系列遥感影像,采用目视解译的方法提取潮沟网络,通过分析不同时期潮沟数量、长度、密度等特征,揭示了潮沟阶段性演变规律。结果表明:潮沟的全生命周期可划分为幼年期、青年期、成熟期和退化期4个阶段,其中幼年期潮沟数量和长度增长率最大,是青年期的3倍以上;青年期潮沟数量和长度继续增加,但增长率明显降低,潮沟网络系统逐渐趋于稳定;成熟期潮沟系统发育基本完成,潮沟长度、数量、曲率等形态特征无明显变化;退化期部分潮沟萎缩、消亡、废弃,2005—2007年I组潮沟每年消亡10.8%。

关键词:黄河三角洲;潮沟;发育演变;时空特征

中图分类号:P343.5

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)04-0038-07

Evolution process analysis of typical tidal creeks in the Yellow River Delta//HAN Zhen, ZONG Quanli, JIN Kai, ZHU Xiuzhi(*College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China*)

Abstract: Taking the eastern part of the Yellow River Delta and the northern part of the side-bend spur dikes as the study area, the tidal creek network was extracted by visual interpretation based on the eight-phase Landsat series remote sensing images from 1997 to 2021, and the evolution laws of tidal creeks were revealed by analyzing the characteristics of the number, length and density of tidal creeks in different periods. The results show that the whole life cycle of tidal creeks can be divided into four periods: juvenile, young, mature and degraded periods, among which the growth rates of the number and length of tidal creeks are the highest in the juvenile period, which are more than three times those of the young period. In the young period, the number and length of tidal creeks continue to increase, but their growth rate slow down significantly, and the tidal creek network system gradually stabilizes. In the mature period, the development of the tidal creek system is basically completed, and there is no significant change in the length, number and curvature of the tidal creeks. During the degraded period, some tidal creeks shrink, die, and are abandoned, with 10.8% of tidal creeks in group I dying each year from 2005 to 2007.

Key words: Yellow River Delta; tidal creek; development and evolution; temporal and spatial characteristics

作为滩地上的典型地貌单元,潮沟是与外界交换的重要通道^[1-2]。潮沟发育和演变常受到潮汐、植被^[3]、风暴潮^[4]、海平面上升等因素的综合影响^[5]。然而,由于这些影响因素的类型和强度具有很大的时空异质性,同一地区不同潮沟的发展阶段和形态特征也常呈现很大差异^[6]。因此准确识别潮沟发育和演变过程,分析其影响因素和驱动机制,对于指导沿海地区开发建设具有重要理论意义。

国内外学者针对不同地区潮沟演变的影响因素进行了深入研究。例如:牟奎南等^[7]认为潮沟演变与海洋动力、植被发育、人类活动息息相关;Geng

等^[8]利用数学模型证明植被促进了潮沟网络的发展,并且低海拔植被更能促进潮沟发展;Sergio等^[9]发现植被发育导致潮沟底部侵蚀速率加快;Xie等^[10]通过比较综合形态特征,证明了当土地复垦比例超过一定阈值时,土地复垦对三角洲潮沟的演化趋势变化有主导影响;龚政等^[11]建立了以江苏中部粉砂淤泥质潮滩-潮沟系统为原型的降比尺物理模型,认为潮沟发育过程受到床面坡度变化与海平面上升的影响。以上研究成果对于认识潮沟整体发展和演变过程具有重要意义。

在多种因素的影响下,潮沟的发育与演变常具

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME167);山东省重点研发计划项目(2022CXGC010401-04)

作者简介:韩震(1999—),男,硕士研究生,主要从事滨海湿地遥感与河口海岸研究。E-mail:baowysp62961@163.com

通信作者:宗全利(1979—),男,博士,教授,主要从事河流动力学方面研究。E-mail:zongql@qau.edu.cn

有一定的阶段性^[12]。例如:吴德力等^[13]模拟了江苏中部潮沟演变过程,依据潮沟能量大小将潮沟演变过程大致划分为低潮带、中潮带、高潮带和细潮沟填充 4 个发育时期;张国栋等^[14]以潮沟沉积过程为划分依据,将苏北弦港潮沟的发育过程分为早期下蚀、潮沟横向迁移摆动和潮沟废弃填充 3 个阶段;燕守广^[15]将江苏淤泥质潮沟发展过程分为低沙坪型(幼年期)、高沙坪型(青年期)、盐沼型(中年期)和废弃型(消亡期)4 个阶段;Steel 等^[16]认为潮沟发展可分为起始阶段、逐渐固定阶段、形成新的较小潮沟阶段和逐渐被废弃阶段;张忍顺^[17]从泥沙供应与海岸侵蚀角度认为淤泥质潮沟发育过程可分为形成期、成熟期、消亡期 3 个阶段。潮沟数量与长度是潮沟发育过程中的重要指标,但现有研究未见以潮沟数量与长度变化为潮沟演化不同阶段主要划分标准的相关研究。同时,潮沟具有高度的空间异质性,不同发展时期潮沟可能在一个地区共存,因此选取典型潮沟进行分析,可以更加准确地识别该地区潮沟的演变过程。本文以黄河三角洲典型区域为研究区域,基于 1997—2021 年 Landsat 遥感影像提取潮沟系统,计算潮沟长度、数量、分汊率、密度、曲率等形态特征指标,研究其变化规律;并选取典型潮沟对其进行演变过程分析,深入探讨潮沟的发育演变过程。研究结果对于进一步认识黄河三角洲地区潮沟演变过程具有现实意义,同时可为盐沼潮滩的合理开发利用提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲位于黄河入海口处,由现行黄河入海口与老黄河入海口两侧南部、北部和夹角的东部三部分组成^[18]。研究区选择在三角洲东部、侧弯丁坝北侧,地理坐标为 37°43'N~37°49'N、119°09'E~119°18'E,如图 1 所示。该区域一方面受黄河尾间摆动、侧弯丁坝等人类活动影响较大,同时属于互花米草入侵严重区域,且近年潮沟发育密集,具有典型特征。

1.2 数据来源

以 Landsat 系列影像为数据源,选取 1997 年和 2001 年 Landsat5 TM 影像,2005 年、2007 年和 2009 年 Landsat7 ETM 影像,2013 年、2017 年和 2021 年 Landsat8 OLI 影像,时间选取无云时段。综合考虑潮位高低会影响暴露的潮沟潮滩面积,且单一时相数据无法有效表征该年度潮沟的动态分布等因素,因此,结合 8 个典型年同一年份高低潮遥感影像提取潮沟。所用影像统一采用横轴墨卡托 50 带投影(UTM50N)及 WGS84 基准面。基于波段融合

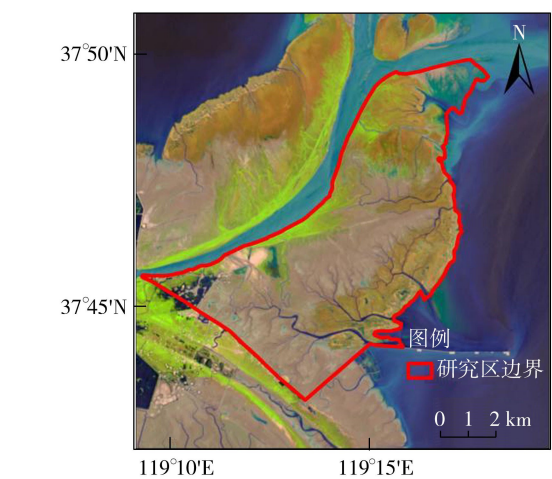


图 1 研究区位置

合成假彩色影像增强潮沟显示,利用 ArcGIS 10.3 软件对影像进行目视解译并提取潮沟。

1.3 潮沟形态特征参数提取方法

a. 潮沟分级。研究区内潮沟虽整体上由海岸线一侧向内延伸,但不同于典型的树枝状潮沟系统,潮沟形态复杂多样,多条潮沟或横纵交错,或首尾与外海(或黄河径流)相连。因此参考 Horton^[19]与 Strahler^[20]分级方法,并结合真实遥感影像与实地调查资料,按照以下规则对潮沟进行分级:最外围潮沟为 1 级,1 级潮沟汇聚成 2 级潮沟,2 级潮沟汇聚成 3 级潮沟,并以此类推,汇聚成一条等级最高的主潮沟;在潮沟分汊点前后,若遥感影像中河宽无明显变化,则为一条潮沟,如果有明显的河宽减小则为低一等级潮沟。

b. 形态参数。潮沟长度为潮沟中轴线长度;潮沟密度用单位面积潮滩上潮沟总长度表示;潮沟曲率反映潮沟发育的弯曲程度,用潮沟长度与潮沟两端点之间直线距离的比值表示。分汊率是反映潮沟发育程度的指标之一,为单位面积潮滩上潮沟交汇点个数^[21]。潮沟密度、曲率、分汊率计算公式分别为

$$D = L/A \quad (1)$$

$$r = L/L' \quad (2)$$

$$R = N/A \quad (3)$$

式中: D 为潮沟密度; L 为潮滩上潮沟的总长度; A 为潮滩面积,根据 NDWI 与遥感影像提取水陆边界,从而获得整个研究区域潮滩面积; r 为潮沟曲率; L' 为潮沟两端的直线距离; R 为潮沟分汊率; N 为潮滩上潮沟交汇点的个数。

2 结果与分析

2.1 潮沟形态特征变化过程分析

2.1.1 潮沟数量及长度

表 1 为 1997—2021 年典型年份各级潮沟数量

与长度变化(自1997年开始每隔4年选取1个典型年份,由于2007年发生尾间摆动,增加该年为典型年份,共选择了8个年份进行计算)。根据计算结果,1997年1级潮沟占比最大,占76.5%;2001年出现4级潮沟,2005—2007年因为黄河尾间摆动,导致部分2、3级潮沟等级退化;2007年后研究区潮沟不断发育的同时,各等级潮沟也不断增长,潮沟系统越来越复杂,2021年出现最高等级潮沟即5级潮沟。2001—2021年不同等级潮沟的占比随级别递减,1级潮沟占比最大,且1、2级潮沟占比基本趋于7:2。

表1 1997—2021年各级潮沟数量与长度变化

年份	各级潮沟数量/条					长度/km
	1级	2级	3级	4级	5级	
1997	13	2	2			21.5
2001	39	11	5	1		41.8
2005	49	16	6	1		72.3
2007	54	14	2	1		83.7
2009	58	19	7	1		104.1
2013	101	31	11	3		115.7
2017	127	41	16	5		133.4
2021	148	55	21	9	3	166.3

1997—2021年潮沟数量整体呈上升趋势,但其发展出现以下几个阶段:1997年黄河改道到2005年期间,潮沟数量增加了55条,主要原因是2002年黄河调水调沙一定程度上促进了潮沟发育^[22];2007年黄河尾间摆动,属于“新环境”适应期,导致许多潮沟消亡,因此,2005—2007年潮沟数量并没有增长^[23];到2009年,许多新潮沟出现,潮沟数量大幅度增长,其中2009—2013年潮沟数量增长速率达171.7%;2013年后潮沟数量持续增长,

2021年达最大值236条。
此外,由1997—2021年典型年份潮沟长度可以看出,1997—2021年潮沟长度逐渐增大,其中2007—2009年潮沟长度增长最多,达29.9 km,这主要因为侧弯丁坝的建成与黄河尾间向东北方向摆动,促进潮滩不断淤进,从而促进了潮沟长度的发育^[24]。2009年以后,潮沟长度持续增长,2021年达到最大值166.3 km。

2.1.2 潮沟密度

潮沟密度越大,潮沟的发育程度就越高。利用ArcGis核密度工具计算得到8个典型年份潮沟密度变化云图(图2),由式(1)计算得出研究区潮沟密度的变化过程,见图3。从图3可以看出,潮沟密度变化经历了如下几个阶段:①1997—2001年,潮沟密度增长幅度最大,增长103.7%(由0.81 km/km²增长至1.65 km/km²);②2001—2005年,潮沟密度持续增长,从1.65 km/km²增长到1.80 km/km²,主要原因为2002年黄河调水调沙后,下游淤积的河道受到冲刷,潮沟数量迅速增加;③2005—2007年,潮沟密度下降到1.17 km/km²,主要原因是黄河尾间摆动后,一部分旧潮沟消亡,而新潮沟并未发育,导致潮沟密度下降;④2007年之后,潮沟密度稳步增长,2021年达到最大值2.63 km/km²。

2.1.3 潮沟分汊率

潮沟分汊率越大,发育程度越高。由图3可知,研究区1997—2021年潮沟分汊率整体呈增长趋势。2001—2007年潮沟分汊率从1.4个/km降低到0.79个/km。主要原因是2002年黄河入海口调水调沙,此时处于湿地恢复初期^[25-26],入海口处泥沙

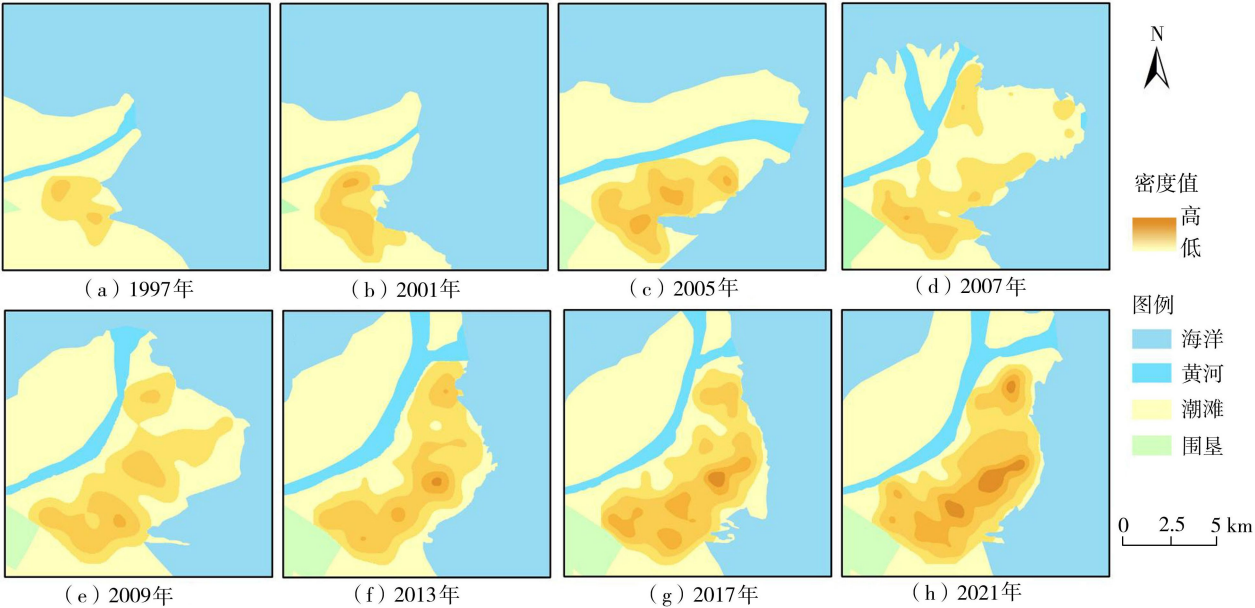


图2 典型年份潮沟密度空间示意图

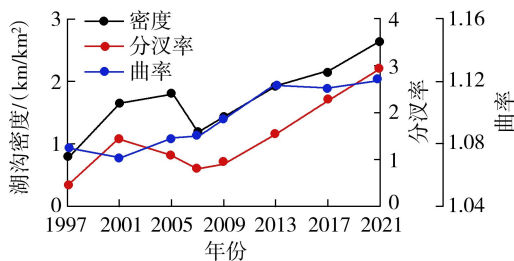


图3 潮沟密度、分汊率、曲率变化过程

淤积使潮滩面积增加,且潮沟发育程度较低,因而潮沟分汊率呈下降趋势。2007年后,进入湿地恢复后期,潮滩面积增长缓慢,潮沟继续发育,使得分汊率开始提高。2009—2021年研究区分汊率显著提高,变化特征与潮沟密度的变化趋势基本一致,2021年潮沟分汊率最大值达2.93个/ km^2 。

2.1.4 潮沟曲率

黄河改道后初期,研究区潮沟的曲率整体较小,潮沟发育程度较低。图3给出了潮沟曲率的变化过程,可以看出,2001年潮沟曲率最低,为1.07,之后进入持续增长期;2005—2009年潮沟曲率增长幅度较小,主要原因是黄河尾间摆动后,旧潮沟消亡,新潮沟刚刚发育,处于新老交替时期;2009—2013年期间潮沟曲率增长幅度最大,增长了0.022;2013—2021年潮沟曲率增长速度开始下降,2021年潮沟曲率达最大值1.12。研究区1997—2021年潮沟曲率整体呈增长趋势,主要原因与该区域为黄河入海口,有沙源补给,潮滩由蚀退转变为淤进,受海洋动力影响减小等因素有关。

2.2 潮沟全生命周期演变过程分析

将最终汇聚为一条且入海的潮沟作为一组潮沟进行研究,据此截至2021年研究区内共有7组潮沟。将其分别命名排序,再从2021年开始逆推,追溯源头,得到典型潮沟分布如图4所示。其中,V组潮沟由旧河道演变,过程不具有普遍性,且变化趋势不明显,VI组与VII组潮沟处于河口,相比其他潮沟,稳定性较差,且出现时间较短。因此,选择I、II、III、IV组潮沟进行典型潮沟演变过程分析。

a. I组潮沟演变分析。I组潮沟位于1997年旧黄河河道与新黄河河道夹角处,向潮滩西北方向延伸。图5为I组潮沟演变过程,以2007年黄河尾间摆动为界限,将I组潮沟发育期分为两个阶段。第1阶段(1997—2007年):如表2所示,1997—2001年I组潮沟增长速度最快,数量增长率为183.3%,长度增长率为63.3%,并且出现了4级潮沟;2001年后I组潮沟长度与数量稳定增长,潮沟汇聚成3组,到2005年时发育到37条,长度为35.3 km;2005—2007年潮沟长度和数量均减小,数

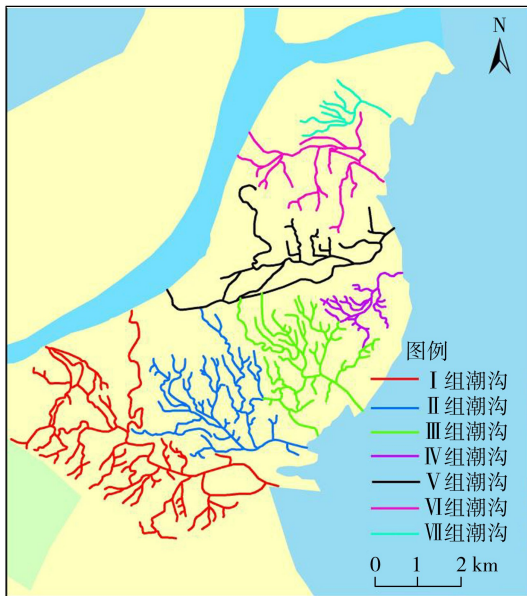


图4 典型潮沟分布

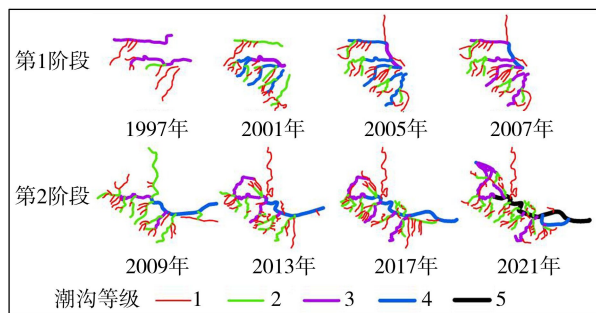


图5 I组潮沟演变过程

量减少了4条,长度减小了3.8 km。第2阶段(2007—2021年):2007年黄河尾间摆动后,3组潮沟汇聚成1组潮沟,汇聚后数量为37条,长度为35.7 km;2007—2021年I组潮沟稳定发育,14年内数量增加35条,长度增加19.6 km;2021年潮沟数量和长度都达到最大值,分别为68条和51.1 km,且出现了5级潮沟。

b. II组潮沟演变分析。II组潮沟与I组潮沟位置相邻。2007年出现9条潮沟,可分为4组,潮沟长度为11.4 km。2009年II组潮沟慢慢汇聚后与I组潮沟相连,共用相同入海口。从增长速度来看,2007—2009年II组潮沟数量和长度发育最快,两年间数量增长100.0%,长度增长71.1%(表2)。2009—2013年II组潮沟发生萎缩,长度减小1.8 km,2013年潮沟网络逐渐固定,数量与长度整体呈增长趋势。2013—2017年4组潮沟汇聚成1组潮沟,潮沟数量增加17条,长度增长7.1 km,2021年潮沟数量和长度都达到最大值,分别为52条和32 km,且出现了5级潮沟。

c. III组潮沟演变分析。III组潮沟在黄河尾间摆动后出现,位于II组潮沟北侧。2007—2009年

表 2 典型潮沟数量与长度增长率

单位: %

时间	数量增长率				长度增长率			
	I 组	II 组	III 组	IV 组	I 组	II 组	III 组	IV 组
1997—2001 年	183.3				63.3			
2001—2005 年	8.8				20.1			
2005—2007 年	-10.8				-10.8			
2007—2009 年	12.1	100.0	250.0		13.3	71.1	184.0	
2009—2013 年	24.3	83.3	121.4	400.0	5.0	-9.2	45.8	169.2
2013—2017 年	10.9	51.5	29.0	200.0	21.6	40.1	4.8	154.3
2017—2021 年	33.3	4.0	22.5	43.8	12.1	29.0	28.6	9.0

III 组潮沟数量和长度迅速增长,2 年内潮沟数量增长 250.0%, 长度增长 184.0%, 增长幅度最大(表 2)。2009—2013 年 III 组潮沟数量增加 17 条, 长度增长 6.5 km;2013 年后潮沟网络逐渐固定, 数量和长度呈稳步增长趋势;2017 年潮沟数量为 40 条,潮沟长度为 21.7 km;2021 年潮沟数量和长度都达到最大值,分别为 49 条和 27.9 km,并且出现了 5 级潮沟。

d. IV 组潮沟演变分析。IV 组潮沟在黄河尾间摆动后 2009 年出现,2013 年延伸至入海口,位于 III 组潮沟北侧。从表 2 可看出,2013—2017 年 IV 组潮沟发育初期数量和长度迅速增长,4 年内数量增长 200.0%, 长度增长 154.3%;2017—2021 年 IV 组潮沟数量和长度增长幅度有所下降,进入缓慢增长期。2021 年 IV 组潮沟数量和长度均达到最大值,分别为 23 条和 9.7 km。

3 讨 论

通过对潮沟形态特征的分析,发现潮沟演变过程存在明显的阶段性。选取 4 组典型潮沟,根据遥感影像与潮沟形态特征变化,参考河道分级分类方法^[27],将潮沟发育过程分为以下 4 阶段:

a. 幼年期:指潮沟形成后的发育初期阶段,此阶段潮沟多数于低潮滩向中高潮滩发育,少数因为雨水、陆源水流、植被等原因发育在中高潮滩^[28]。根据典型潮沟不同演变阶段数量与长度增长率的变化情况(表 3)可知,幼年期潮沟数量和长度增长迅速,其增长率是其他阶段的 3 倍以上。在 Steel 等^[16]提出的潮沟演变第一阶段内,没有植被的潮滩因受潮汐流的控制形成了第一条潮沟。这与本文幼年期相似,但除了形成了第一条潮沟,本文幼年期还包括了之后潮沟长度、数量增长率较大的阶段。

b. 青年期:指潮沟在幼年期发育基础上稳定持续发育的阶段。潮沟形成以后不断侵蚀而发展壮大,尾梢低等级潮沟向潮滩内部扩展至高潮滩,之后转为横向发育。由表 3 可以看出,青年期内潮沟数量与长度增长率均为正值,但明显低于幼年期。吴

德力等^[13]通过随机概率模型认为潮沟发育阶段存在高潮滩发育期与细潮沟填充时期,这与本文青年期相似,但其并未说明不同等级潮沟发育在青年期具有典型特征,会演变出最高等级潮沟,且在细潮沟填充时期后存在潮沟发育成熟期。

表 3 典型潮沟不同演变阶段数量与长度增长率

单位: %

潮沟编号	演变阶段	数量增长率	长度增长率
I 组	幼年期	45.8	15.8
	青年期	5.1	4.3
	退化期	-5.4	-5.4
II 组	幼年期	50.0	35.5
	青年期	11.6	5.0
III 组	幼年期	125.0	92.0
	青年期	14.4	6.6
IV 组	幼年期	77.5	40.4
	青年期	10.9	2.2

c. 成熟期:指在潮沟青年期发育基础上,潮沟长度、数量、曲率等形态特征无变化或小幅度波动的阶段。潮沟形成后一段时间发育空间逐渐缩小,发育速度逐渐缓慢,潮沟活跃性明显减弱,大多处于稳定状态,高级潮沟基本无增长,低级潮沟小幅度波动。但由于研究区内典型潮沟数量有限,所选的 4 组潮沟皆未经历潮沟发育成熟期。不过通过 4 组潮沟的数量、长度变化趋势,与研究区内潮沟可发育空间,推测在未来几年内 4 组潮沟会进入成熟期。

d. 退化期:指潮沟系统中部分潮沟萎缩、消亡、废弃的阶段。黄河三角洲潮沟系统退化主要有以下情况:①在潮沟发育青年期或者成熟期后,潮沟上游逐渐淤浅、充填,随后部分潮沟萎缩直至消亡;②盐沼植被的发育挤压潮沟两岸,导致部分潮沟与潮沟系统脱离直至废弃;③人类活动直接影响导致潮沟消亡、萎缩。燕守广^[15]认为潮沟发育退化主要是因为上游的淤浅、填充加上两侧的挤压。本文在对典型潮沟退化分析时,发现除了上游的淤浅,人类活动也会导致潮沟消亡,例如研究区内 2007 年尾间摆动,导致潮沟大面积消亡。

本文主要通过潮沟形态特征的变化来分析潮沟演变过程。对于演变过程中的横向变化,例如潮沟

的摆动、岸壁坍塌等并未涉及。实际上在水动力较强的区域,岸壁坍塌过程明显^[29-30],潮沟摆动十分剧烈^[31]。同时,需要指出,由于风暴潮、人为因素、生物入侵、极端天气等因素,潮沟发育过程并非按照固定顺序进行。例如,I组潮沟2007年经历退化期,潮沟消亡2.7%,但之后又进入青年期,2007—2009年潮沟数量增长6条。因此,对于黄河三角洲潮沟全生育周期演变的研究提出以下建议:①进一步研究潮沟退化的机制;②增加典型潮沟案例,对阶段性演变进一步量化;③探究导致潮沟发育加速、跳跃式发育的内在影响因素;④深入探究潮沟横向变化。

4 结 论

a. 研究区1997—2021年潮沟数量、长度、密度、分汊率、曲率整体呈现增长趋势,2021年均达到最大值,分别为数量236条,长度166.3 km,密度2.63 km/km²,分汊率2.93个/km²,曲率1.121,并且出现最高等级为5级的潮沟。

b. 潮沟发育主要分为4阶段:①幼年期,此时潮沟数量与长度增长率最大,幼年期潮沟增长率是青年期的3倍以上;②青年期,此时潮沟网络逐渐固定,潮沟数量与长度稳定增长,但增长率小于幼年期,4组潮沟增长率最大为14.4%;③成熟期,潮沟网络已基本固定,潮沟数量、长度、曲率等形态特征小幅度增长或不增长;④退化期,潮沟系统中部分潮沟萎缩、消亡、废弃,主要由植被覆盖、人类活动、潮汐、降水等原因导致,2005—2007年I组潮沟出现消亡,潮沟数量每年减少5.4%,长度每年减小5.4%。

c. 潮沟普遍演变过程为幼年期—青年期—成熟期—退化期,但由于外界因素影响,并不一定会以固定的顺序进行,可能幼年期后直接进入成熟期,可能青年期后经历短暂的退化期继续进入青年期,甚至因为外界因素的影响,导致已经成熟期的潮沟系统再次活跃进入青年期。

参考文献:

[1] VANDENBRUWAENE W, MEIRE P, TEMMERMAN S. Formation and evolution of a tidal channel network within a constructed tidal marsh[J]. *Geomorphology*, 2012, 151/152: 114-125.

[2] 吕亭豫, 龚政, 张长宽, 等. 粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 178-188. (LYU Tingyu, GONG Zheng, ZHANG Changkuan, et al. Reviews of morphological characteristics and evolution processes of

silty mud tidal creeks [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(2): 178-188. (in Chinese))

[3] GONG Z, ZHANG C, ZHANG L, et al. Assessing spatiotemporal characteristics of native and invasive species with multi-temporal remote sensing images in the Yellow River Delta, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 32(3): 1338-1352.

[4] 龚政, 张岩松, 赵堃, 等. 风暴作用下淤泥质潮滩-潮沟系统地貌演变研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(4): 75-84. (GONG Zheng, ZHANG Yansong, ZHAO Kun, et al. Advances in coastal storm impacts on morphological evolution of mud tidal flat-creek system [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(4): 75-84. (in Chinese))

[5] 时海东, 沈永明, 康敏. 江苏中部海岸潮沟形态对滩涂围垦的响应[J]. *海洋学报*, 2016, 38(1): 106-115. (SHI Haidong, SHEN Yongming, KANG Min. Rapid response of tidal creek network patterns to the reclamation on the central Jiangsu coast [J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(1): 106-115. (in Chinese))

[6] GONG Z N, WANG Q W, GUAN H L, et al. Extracting tidal creek features in a heterogeneous background using Sentinel-2 imagery: a case study in the Yellow River Delta, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(10): 3653-3676

[7] 牟奎南, 宫兆宁, 邱华昌. 黄河三角洲潮沟网络形态特征的时空分异规律及其发育过程[J]. *地理学报*, 2021, 76(9): 2312-2328. (MOU Kuinan, GONG Zhaoning, QIU Huachang. Spatiotemporal differentiation and development process of tidal creek network morphological characteristics in Yellow River Delta [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(9): 2312-2328. (in Chinese))

[8] GENG L, D'ALPAOS A, SCARABOTTO A, et al. Intertwined eco-morphodynamic evolution of salt marshes and emerging tidal channel networks [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(11): 155-172.

[9] SERGIO F, ANNALISA B, WILLIAM E D, et al. Tidal networks: automatic network extraction and preliminary scaling features from digital terrain maps [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(12): 3891-3904.

[10] XIE C J, CUI B S, XIE T, et al. Reclamation shifts the evolutionary paradigms of tidal channel networks in the Yellow River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 1-14.

[11] 龚政, 严佳伟, 耿亮, 等. 开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制: III 海平面上升影响[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 109-117. (GONG Zheng, YAN Jiawei, GENG Liang, et al. Mechanisms underlying the dynamic evolution of an open coast tidal flat-creek system: III

- impact of sea level rise[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 109-117. (in Chinese))
- [12] PHILIP B W, MICHELLE K O, NICHOLAS J G. Hydraulic geometry: a geomorphic design tool for tidal marsh channel evolution in wetland restoration projects [J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10(3): 577-590.
- [13] 吴德力, 沈永明, 方仁建. 江苏中部海岸潮沟的形态变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 955-965. (WU Deli, SHEN Yongming, FANG Ren Jian. A morphological analysis of tidal creek network pattern on the central Jiangsu coast[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 955-965. (in Chinese))
- [14] 张国栋, 朱静昌, 王益友, 等. 苏北盐港现代潮沟沉积研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 1984(2): 223-234. (ZHANG Guodong, ZHU Jingchang, WANG Yiyu, et al. Study of modern deposition of tidal creek in harbor area in northern Jiangsu Province[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984(2): 223-234. (in Chinese))
- [15] 燕守广. 江苏淤长型淤泥质海滩上潮沟的发育与演变[D]. 南京: 南京师范大学, 2002.
- [16] STEEL T J, PYE K. The development of saltmarsh tidal creek networks: evidence from the UK[C]//Proceeding of Canadian Coastal Conference. Guelph: University of Guelph, 1997: 267-280.
- [17] 张忍顺. 渤海湾淤泥质海岸潮汐道的发育过程[J]. *地理学报*, 1995, 50(6): 506-513. (ZHANG Renshun. Development of tidal inlet in mud coast along bohai bay [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(6): 506-513. (in Chinese))
- [18] 牛明香, 王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 26-33. (NIU Mingxiang, WANG Jun. Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River Delta based on Landsat remote sensing image[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 26-33. (in Chinese))
- [19] HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1945, 56: 275-370.
- [20] STRAHLER A N. Dynamic basis of geomorphology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, 63(9): 923-938.
- [21] VLASWINKEL B M, CANTELLI A. Geometric characteristics and evolution of a tidal channel network in experimental setting [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(6): 739-752.
- [22] 徐国宾, 张金良, 练继建. 黄河调水调沙对下游河道的影响分析[J]. *水科学进展*, 2005, 16(4): 518-523. (XU Guobing, ZHANG Jinliang, LIAN Jijian. Effect of water-sediment regulation of the Yellow River on the lower reach [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4): 518-523. (in Chinese))
- [23] 李军华, 许琳娟, 张向萍, 等. 河道调整研究现状及其对黄河下游游荡型河道调整的启示[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(4): 1-6. (LI Junhua, XU Linjuan, ZHANG Xiangping, et al. Current research status of river regulation and its enlightenment to wandering river regulation in the lower reaches of the Yellow River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(4): 1-6. (in Chinese))
- [24] LI P, KE Y H, BAI J H, et al. Spatiotemporal dynamics of suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China during the past two decades based on time-series Landsat and Sentinel-2 data [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110518.
- [25] 黄海军, 樊辉. 黄河三角洲潮滩潮沟近期变化遥感监测[J]. *地理学报*, 2004, 59(5): 723-730. (HUANG Haijun, FAN Hui. Change detection of tidal flats and tidal creeks in the Yellow River Delta using Landsat Tm/Etm+ images[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 723-730. (in Chinese))
- [26] 张金良, 仝亮, 王卿, 等. 黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(2): 41-49. (ZHANG Jinliang, TONG Liang, WANG Qing, et al. Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(2): 41-49. (in Chinese))
- [27] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [28] HANSEN J L J, VAN P B C, VOLP N D, et al. Where and why do creeks evolve on fringing and bare tidal flats? [J]. *Geomorphology*, 2022, 403: 161-174.
- [29] GONG Z, ZHAO K, ZHANG C K, et al. The role of bank collapse on tidal creek ontogeny: a novel process-based model for bank retreat[J]. *Geomorphology*, 2018, 311: 13-26.
- [30] ZHAO K, COCO G, GONG Z, et al. A review on bank retreat: mechanisms, observations, and modeling [J]. *Reviews of Geophysics*, 60: e2021RG000761.
- [31] GENG L, GONG Z, ZHOU Z, et al. Assessing the relative contributions of the flood tide and the ebb tide to tidal channel network dynamics [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(1): 237-250.

(收稿日期: 2023-03-31 编辑: 骆超)