

黄河三角洲工程防护区海床侵蚀过程与 不稳定性评估

凡姚申^{1,2}, 陈沈良^{3*}, 窦身堂^{1,2}, 于守兵^{1,2}, 杜小康^{1,2}

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 水利部 黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003;
3. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘 要:近年来受入海水沙减少、海岸带高强度开发和海洋动力作用等的影响,黄河三角洲近岸海床侵蚀凸显。基于实测地形和波浪资料,研究了黄河三角洲工程防护区海床侵蚀过程及稳定性变化。工程防护区海床侵蚀主要分布在近岸 10 km 内,2007—2015 年距岸 8 km 区域内表现强烈侵蚀,堤前海床较 2000—2007 年时段侵蚀量增大,海床侵蚀向岸加剧。随着现行河口沙嘴的淤积延伸和孤东浅水区的不断侵蚀,孤东南大堤外海逐渐形成了“近岸区深,远岸区浅”的反剖面形态。随着工程防护区近岸持续侵蚀,等深线不断向岸移动,堤前海床不稳定性逐渐加剧,2015 年 84.20% 的堤前海床处于强或极强不稳定状态。本研究可为新形势下黄河三角洲综合治理提供科学依据。

关键词:黄河三角洲;工程防护区;海床侵蚀;不稳定性评估;海堤安全

中图分类号:P736

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)02-0077-09

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.02.001

引用格式:FAN Y S, CHEN S L, DOU S T, et al. Seabed erosion process and instability assessment in the engineering protection zone of the Yellow River Delta[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(2): 77-85. 凡姚申,陈沈良,窦身堂,等. 黄河三角洲工程防护区海床侵蚀过程与不稳定性评估[J]. 海岸工程, 2020, 39(2): 77-85.

受气候变化和人类活动的影响,海岸侵蚀已是一个世界性的问题,特别是大河三角洲的海岸侵蚀尤为引人关注,如埃及的尼罗河三角洲^[1-3]、越南的湄公河三角洲^[4-5]、中国的黄河三角洲^[6-7]。中国河口三角洲地区的海岸侵蚀在不断加剧^[8],如滦河三角洲、黄河三角洲、废黄河三角洲、长江口南岸都表现较高的侵蚀速率。近年来,大规模海岸围垦建堤,致使人工岸线不断增加^[9],岸线被固定,堤前海床下蚀成为主要的海岸侵蚀形式。

黄河三角洲属于弱潮河控型三角洲,其由高输沙能力的河流注入弱潮动力环境海域所形成,曾是世界上堆积速率最快、演变最剧烈的大河三角洲。近年来,受流域气候变化和人类活动的影响,黄河入海水沙持续减少,呈现枯水少沙情势,三角洲呈整体蚀退态势。东营港—孤东海岸是黄河三角洲沿岸的工程防护区,受孤东大堤和东营港海堤的防护,该区域的海岸线处于固定状态,但堤外海床侵蚀强烈,大量海堤、护岸、滩海路堤等海岸工程建筑物基础受到冲刷毁坏,严重威胁到油田和海港安全。

目前黄河三角洲海岸侵蚀防护问题已成为诸多学者关注的热点之一。以往对于黄河口区冲淤演变研究较多,但对于工程防护区海床长时间尺度侵蚀过程研究较少,从而对堤前海床稳定性状况缺乏整体认识。鉴此,本文基于多次实测的地形数据和波浪资料,评估黄河三角洲工程防护区海床侵蚀不稳定性及其发展趋势,为新形势下黄河三角洲综合治理提供科学依据。

收稿日期:2019-12-23

资助项目:国家重点研发计划项目——黄河三角洲海岸演变过程与动力机制(2017YFC0405503);国家自然科学基金委—山东省人民政府联合资助项目——黄河三角洲地貌演变的动力机制与环境效应(U1706214);黄河水利科学研究院基本科研业务费专项——水沙补给对刁口河流路海岸侵蚀的缓解作用研究(HKY-JBYW-2020-06)

作者简介:凡姚申(1989-),男,博士,工程师,主要从事河口海岸水沙动力及工程应用方面研究. E-mail: fysmyself@126.com

* **通讯作者:**陈沈良(1964-),男,博士,教授,主要从事河口海岸地貌动力学及工程应用方面研究. E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

(陈 靖 编辑)

1 研究区概况

现代黄河三角洲是 1855 年黄河在河南兰考铜瓦厢决口,夺鲁北大清河回归渤海以来,发育形成的以山东垦利宁海为顶点,西起套尔河口南至支脉沟口,向海延伸至 15~20 m 等深线的扇形堆积体(图 1)。黄河来沙量大,入海流路长期处于淤积、延伸、出汉、摆动、改道的频繁变化过程。1855 年以来,黄河入海流路经历了 11 次大的流路改道与 50 余次出汉过程,并受海洋动力的改造和人为工程的影响,形成了目前的三角洲形态。

黄河口清水沟流路自 1976 年在西河口附近经人工改道后开始行河,改道初期(1976-06—1979-09)河道处于游荡散乱多股状,入海口在现在的孤东油田陆上核心区,孤东“锤形”沙嘴也主要在这个阶段淤积造陆形成(图 2)。1980 年后入海流路南迁,并逐渐自上而下归股稳定,尤其是 1992 年后,摆动幅度更趋微弱,孤东海域南部的清水沟三角洲叶瓣逐渐形成发育(图 2)。随着黄河入海口逐渐南偏,入海泥沙输运扩散至孤东海域的量急剧减少,致使孤东海域成为严重的侵蚀区。为了保证孤东油田的安全生产,1985 年开始修建孤东大堤,1987 年全面竣工,大堤全长 17.2 km,呈西北—东南走向。20 世纪 90 年代,随着东营港的投入使用,海港及其附近海岸修筑了北起桩 106(Z106,位置见图 1)南至神仙沟口的人工海堤,与孤东大堤共同构成了约 50 km 的黄河三角洲工程防护区海岸(图 1)。

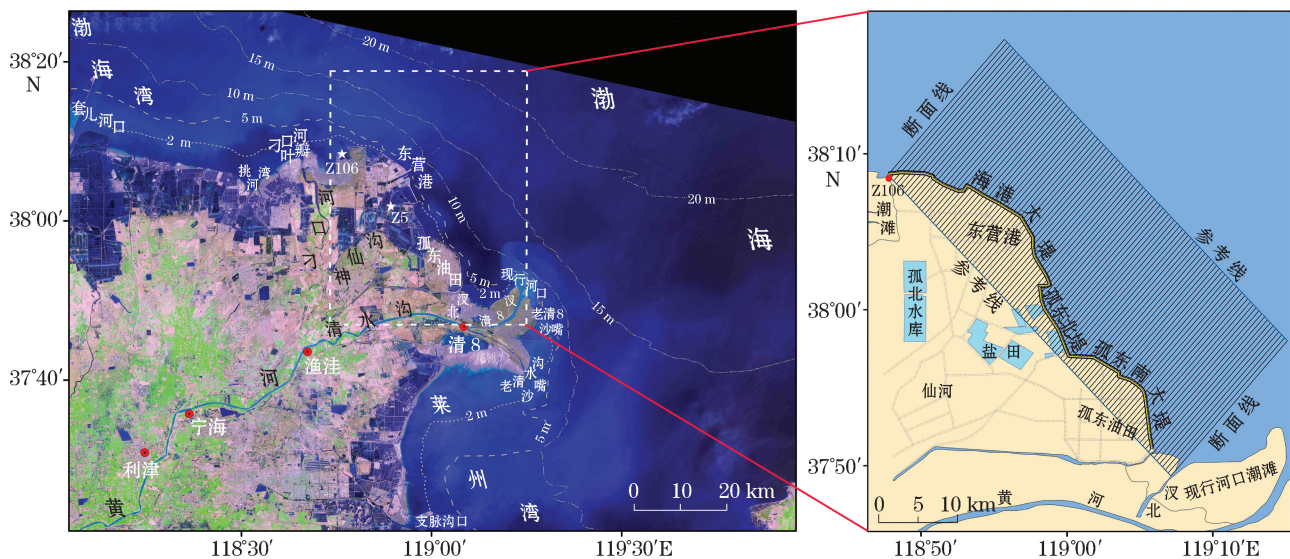


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

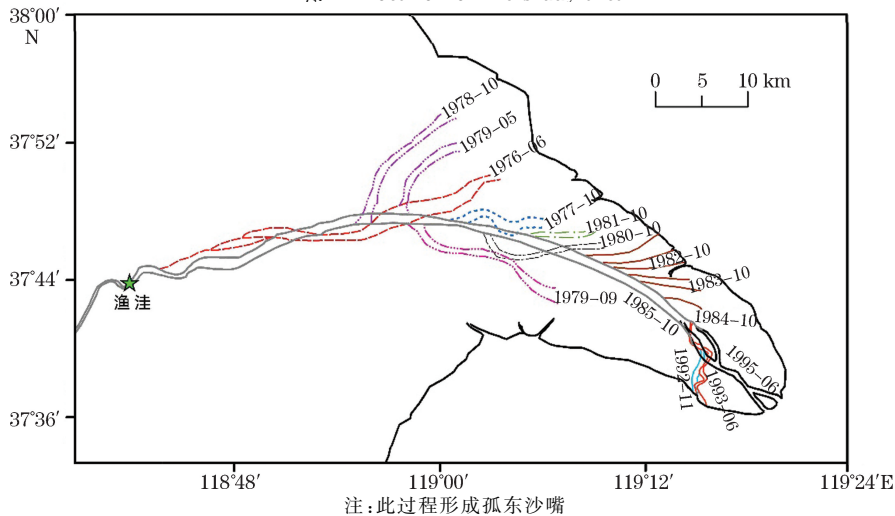


图 2 1976—1996 年入海流路摆动过程

Fig.2 Swing process of the parth flowing into the sea from 1976 to 1996

2 数据处理

为定量分析海床侵蚀过程,收集了 1992 年、2000 年、2007 年和 2015 年的黄河三角洲近岸海域水下地形测量数据,水深数据统一为黄海基准面。使用 Matlab 中的 IDW(Inverse Distance Weighted)插值程序将水深散点插值到分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的网格上生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。基于各年份的 DEM,建立水下地形地貌空间数据库,不同年份的 DEM 相减即可计算冲淤量。由于这些优点,世界上其他河口三角洲地区的冲淤演变研究也广泛采用此种空间地貌处理方法^[11-13]。

3 工程防护区海床侵蚀特征

3.1 海床侵蚀时空格局

工程防护区海岸形态受控于大堤,基本呈东南—西北走向,岸线较平直,Z106 到北汉沟口的连线也呈东南—西北走向,大致与实际海岸平行,可作为等效岸线来分析等深线距岸的距离。为分析海床侵蚀时空格局,分别建立距等效岸线 5,8,10,15 和 20 km 的缓冲区(图 3),计算不同缓冲区内 1992—2000 年,2000—2007 年和 2007—2015 年三个时段海床的冲淤变化(表 1),进而定量分析侵蚀过程。

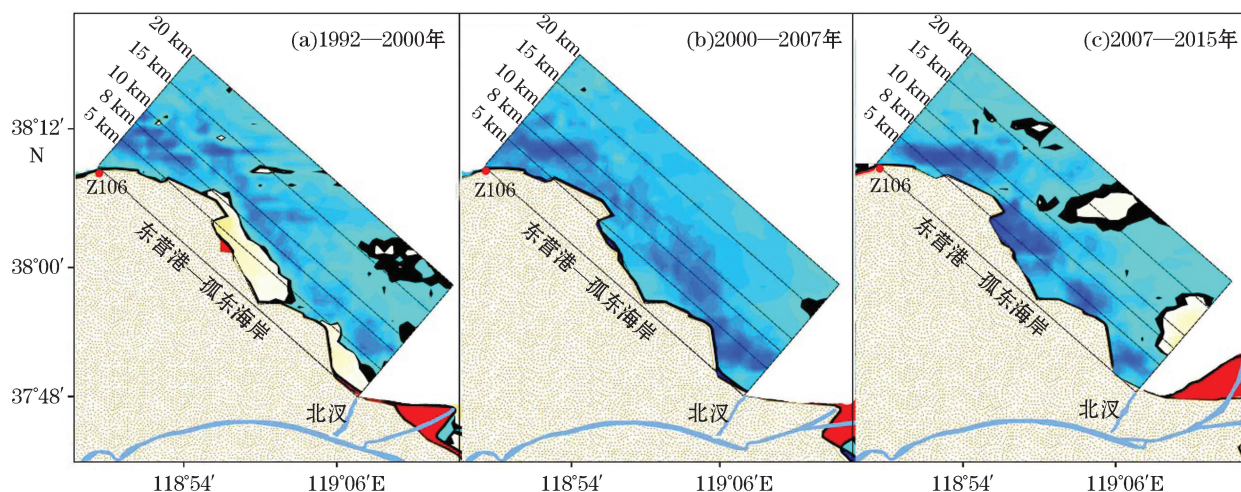


图 3 1992—2015 年东营港—孤东海岸近岸海床冲淤分布

Fig.3 Distribution of erosion and accretion of the nearshore seabed along the Dongying Port—Gudong Coast from 1992 to 2015

在 3 个时段中,1992—2000 年距岸 20 km 区域内海床侵蚀量略大于 2007—2015 年,其他区域侵蚀量和侵蚀速率都明显小于其他 2 个时段;2000—2007 年侵蚀最剧烈,该时段距岸 5 km 区域内侵蚀量小于 2007—2015 年,其他区域侵蚀量和侵蚀速率都大于其他 2 个时段。

同一时段不同区域冲淤差异明显。1)1992—2000 年距岸 5 km 区域内净淤积,平均淤积速率 6.75 cm/a ,而距岸 8 km 区域内(包括 5 km 以内,下同)净侵蚀,且侵蚀量明显大于其他区域,达 52.74 km^3 ,侵蚀速率达 33.6 km/a ,可见该时段的侵蚀主体位于距岸 5~8 km 的区域内。2)2000—2007 年距岸 5,8 和 10 km 区域内侵蚀速率逐次增加,最大达 20.90 cm/a ,这说明在距岸 10 km 区域内,越远离岸泥沙侵蚀量越多。而距岸 15 km 区域内虽然也表现为净侵蚀,但侵蚀速率小于距岸 10 km 区域内,减小的侵蚀速率说明距岸 10 km 区域外海床虽以侵蚀为主,但也有泥沙沉积,只是泥沙沉积量小于侵蚀量。同样,距岸 20 km 区域内侵蚀速

率小于距岸 15 km 区域内的侵蚀速率,这也说明该 15 km 区域外的海床有泥沙沉积。由此可知,该时段距岸 10 km 以内是侵蚀主体区域,而 10 km 以外有泥沙沉积。3)2007—2015 年距岸 5 和 8 km 区域内侵蚀速率逐次增加,最大达 15.54 cm/a,而距岸 10 km 区域内虽然也表现为净侵蚀,但侵蚀速率小于距岸 8 km 区域内,同样,距岸 15 和 20 km 区域内侵蚀速率也依次减小,由此可知,该时段距岸 8 km 以内是侵蚀主体区域,而 8 km 以外出现泥沙沉积。

表 1 东营港—孤东海床冲淤计算
Table 1 Calculations of erosion and accretion of the seabed along the Dongying Port—Gudong coast

区 域	状 态	项 目	1992—2000 年	2000—2007 年	2007—2015 年
距岸 5 km	侵蚀	面积/%	25.35	100.00	98.31
		体积/km ³	−14.44	−38.24	−62.15
	淤积	面积/%	71.07	0	1.69
		体积/km ³	62.75	0	0.08
	净冲淤	体积/km ³	48.01	−38.24	−62.07
		速率/(cm·a ^{−1})	6.75	−5.37	−8.82
距岸 8 km	侵蚀	面积/%	56.82	100.00	98.14
		体积/km ³	−101.66	−251.56	−243.84
	淤积	面积/%	43.09	0	1.84
		体积/km ³	48.92	0	0.15
	净冲淤	体积/km ³	−52.74	−251.56	−243.64
		速率/(cm·a ^{−1})	−3.36	−16.03	−15.54
距岸 10 km	侵蚀	面积/%	58.21	100.00	96.90
		体积/km ³	−113.92	−414.18	−157.11
	淤积	面积/%	41.72	0	2.86
		体积/km ³	103.20	0	1.03
	净冲淤	体积/km ³	−10.36	−414.18	−156.21
		速率/(cm·a ^{−1})	−0.43	−20.90	−6.90
距岸 15 km	侵蚀	面积/%	62.68	99.25	68.25
		体积/km ³	−197.16	−674.95	−196.65
	淤积	面积/%	37.24	−0.64	31.28
		体积/km ³	115.51	0.47	60.96
	净冲淤	体积/km ³	−81.48	−674.44	−134.62
		速率/(cm·a ^{−1})	−2.04	−19.31	−3.39
距岸 20 km	侵蚀	面积/%	62.07	97.37	51.04
		体积/km ³	−229.59	−805.40	−200.47
	淤积	面积/%	37.88	2.59	48.91
		体积/km ³	143.98	41.18	127.77
	净冲淤	体积/km ³	−85.61	−764.22	−72.70
		速率/(cm·a ^{−1})	−1.46	−14.93	−1.24

注:正值表示淤积,负值表示侵蚀

同一区域不同时段冲淤差异明显。1)距岸 5 km 区域内,1992—2000 年表现为净淤积,年淤积速率为 6.75 cm/a,而 2000 年后的 2 个时段,该区域海床侵蚀明显,且侵蚀速率从 2000—2007 年的 5.37 cm/a,增加到 2007—2015 年的 8.82 cm/a,这说明大堤提前侵蚀越来越严重。2)距岸 10 km 区域内,2000—2007 年和 2007—2015 年两个时段的侵蚀速率相差不大,分别为 16.03 和 15.54 cm/a,在 2000—2007 年该区域海床侵蚀主要出现在孤东南大堤外,而在 2007—2015 年该区域海床侵蚀主要出现在海港大堤外。

3.2 孤东南大堤海床形态

1992—2000 年内侵蚀主体在距岸 5~8 km 区域内,堤前(距岸 5 km 区域内)以淤积为主;2000—2007 年海床侵蚀明显,距岸 10 km 区域内都表现强烈的侵蚀;2007—2015 年距岸 8 km 区域内表现强烈侵蚀,且堤前较上一时段侵蚀量增大,海床侵蚀向岸加剧。这种侵蚀发展过程也影响着黄河水下三角洲的地貌格局。2007 年黄河入海流路向北分汊后,随着现行河口沙嘴的向北淤积延伸,逐渐延伸到孤东南大堤外的深水区,而孤东南大堤堤前浅水区不断侵蚀,逐渐形成了南大堤外“近岸区深,远岸区浅”的反剖面形态。选择南大堤外一条垂直于大堤走向的 21 号水深断面,可以清晰地看出反剖面形态的演变过程。由图 4 可知,2007 年该断面水深随离岸距离增大而增大的正常形态;随着河口沙嘴和拦门沙向北延伸,距起点 25~30 km 处海床不断淤积,而近岸堤前不断侵蚀,2014 年已经出现反剖面形态,即远岸区水深反而小于堤前近岸区水深,至 2016 年这种形态还在持续发展。

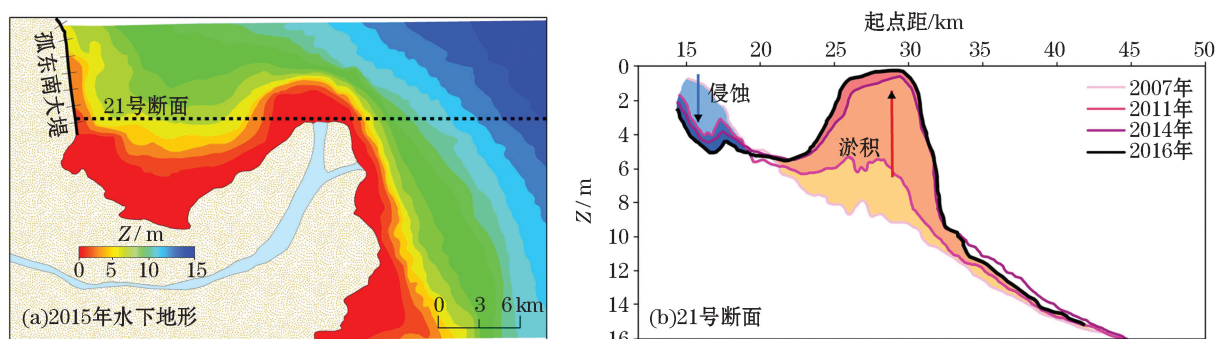


图 4 孤东南大堤外的反剖面形态及其发展过程

Fig.4 The form of the reverse profile and its developing process in the offshore area of the southern Gudong dike

4 堤前海床不稳定性评估

4.1 评估方法

海堤对其内侧陆域起到防护作用,而堤前的海床往往处于侵蚀不稳定状态。在各种不确定性因素下,近岸海床等深线变化可反映海堤及堤前海床的稳定性^[14],可基于海床等深线对其进行不稳定性评估。考虑到研究区近岸海床侵蚀主要发生在距岸 10 km 区域内,选取历年 2,5,和 10 m 等深线,对 2000—2015 年近岸海床不稳定性指数进行计算。首先计算“点”层面的不稳定性指数:基于 ArcGIS-DSAS 技术,建立垂直于等效岸线(参考线)的断面;计算每条等深线与参考线间断面长度,作为等深线距岸的距离(L);再根据波浪作用床面的临界水深对 2,5 和 10 m 等深线赋权重值(Q),3 条等深线 L 与 Q 乘积的加和即为“点”层面的不稳定性指数(I_{si})。最后将各交点不稳定性指数分级,相同级别的交点连线,得到近岸“线”层面的不稳定性级别。不稳定性指数的计算公式:

$$I_{si} = (Q_2 L_2 + Q_5 L_5 + Q_{10} L_{10}) / 1\,000, \quad (1)$$

式中: Q 为各等深线权重值, 下标表示相应的等深线。

等深线离岸越近对海堤稳定性的指示意义越大, 距岸距离的系数 Q 可依据波浪在不同水深范围内的破碎、扰动频率来确定。波浪的破碎深度可以波高的 1.28 倍计算。波浪的扰动深度可视作波浪作用下的海床泥沙全面移动的临界水深, 可根据佐藤公式计算^[15-16]:

$$\frac{H_o}{L_o} = 1.35 \left(\frac{D_{50}}{L_o} \right)^{1/3} \frac{H_o}{H_c} \text{sh}(2\pi h_c / L_c), \quad (2)$$

式中: H_o 和 L_o 分别为深水波高和波长; H_c 和 L_c 为当地的波高和波长; h_c 为临界水深; D_{50} 为泥沙中值粒径。计算时, H_o 可消去, L_o 和 L_c 可根据 Airy 线性波理论分别表示^[17]:

$$L_o = \frac{gT_o^2}{2\pi}, \quad (3)$$

$$L_c = T_c \sqrt{gh_c}, \quad (4)$$

式中: T_o 和 T_c 分别为深水波周期和 h_c 当地的波周期; g 为重力加速度。研究区海域开阔, 近岸风场受深水区风区控制, 风速可视作基本相同, 即 $T_c \approx T_o$, 代入式(4)后, 再与式(3)一起代入式(1), 经整理后可得临界水深 h_c 的计算公式:

$$h_c = \frac{gT_o^2}{4\pi^2} \left\{ \ln \left[\frac{H_c}{1.35 \left(\frac{gT_o^2}{2\pi} \right)^{2/3} D_{50}^{1/3}} + \sqrt{1 + \left(\frac{H_c}{1.35 \left(\frac{gT_o^2}{2\pi} \right)^{2/3} D_{50}^{1/3}} \right)^2} \right] \right\}^2. \quad (5)$$

根据观测波浪资料, 可知工防护区近岸海域各级波浪的破碎深度、扰动深度; 各级波浪出现的频率计算得破碎频率和扰动频率(表 2)。由此可知, 波浪破碎和扰动频率随水深增大而减少, 波高为 0.6 m 的波浪能移动 1.38 m 以浅的海床泥沙全面移动, 2.05 m 以浅的近岸海床泥沙全部扰动需要波高为 0.8 m 的波浪。根据扰动频率的平均值, 可求得 0~2.05 m 范围内的海床扰动频率为 64.18%, 相应地可求得 2.05~5.86 m 范围内的海床扰动频率为 29.04%, 5.86~9.51 m 内的海床扰动频率为 9.08%。这 3 个水深范围, 十分接近 2, 5, 和 10 m 等深线划分的海床区域。因此, 归一化 3 个水深范围内的扰动频率得到 2, 5 和 10 m 等深线权重系数分别为 63%, 28% 和 9%。

表 2 工程防护区近岸海域各级波浪的破碎深度、扰动深度及其相应的频率
Table 2 Wave breaking depth, disturbing depth and their corresponding frequency
in the nearshore area of the engineering protection zone

波 级	破碎深度/m	破碎频率/%	扰动深度/m	扰动频率/%
$0 < H \leq 0.6$	0~0.77	71.64	0~1.38	100.00
$0.6 < H \leq 0.8$	0.78~1.02	8.51	1.39~2.05	28.36
$0.8 < H \leq 1.2$	1.03~1.54	7.18	2.06~3.17	16.37
$1.2 < H \leq 1.5$	1.55~1.92	3.59	3.18~5.86	12.67
$1.5 < H \leq 2.0$	1.93~2.56	4.48	5.87~9.51	9.08
$2.0 < H$	>2.56	4.60	>9.51	4.60

4.2 评估结果

根据上述方法, 计算得到“点”层面的 I_{si} 集中分布在 1.01~1.76 范围内。按四分位分级原则, 将 $I_{si} \leq 1.2$ 的点连线, 得到“线”层面的不稳定结果, 并将其分级为弱不稳定型堤前海床; 相应地, 将 $1.2 < I_{si} \leq 1.4$ 的点连线, 划分为一般不稳定型堤前海床; 将 $1.4 < I_{si} \leq 1.6$ 的点连线, 组成强不稳定型堤前海床; 将 $1.6 < I_{si}$ 的点连线, 归为极强不稳定型堤前海床, 评估结果如图 5 所示。

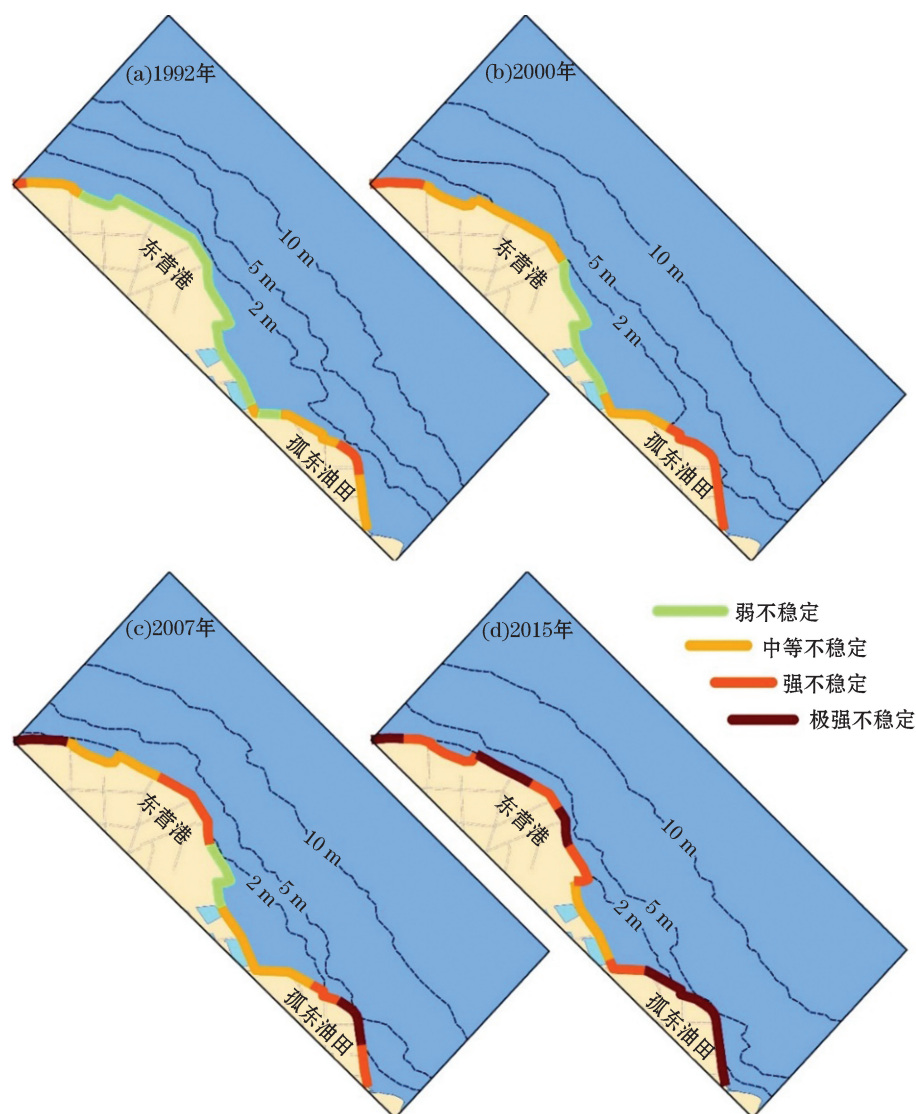


图5 1992—2015年堤前海床不稳定性评估结果

Fig.5 Instability assessment of the seabed in front of the dike during 1992—2015

1992—2015年随着近岸海床的持续侵蚀,等深线不断向岸移动,堤前海床不稳定性逐渐加剧(图5)。1992年堤前海床主要为弱稳定性和一般不稳定型,分别长29.63和16.25 km,共占整个工程防护海岸的91.05%(图6),强不稳定型堤前海床只出现在孤东南大堤中部向海凸出处,长4.51 km,占比8.95%。2000年弱不稳定型堤前海床区域减少,而一般不稳定型和强不稳定型相应增加,分别增加到20.38和15.69 km,后者占比也从1992年的不足10%增加到31.14%。2007年海床不稳定性继续加强,孤东南大堤和东营港中部向海突出处2 m等深线侵蚀消失,堤前海床分别发展为极强不稳定型和强不稳定型;整个防护区强不稳定型和极强不稳定型堤前海床已经增加到23.57 km,占比46.78%,而弱不稳定型海床减少到7.24 km,仅占14.37%。2015年已不存在弱不稳定型海床,整个防护区堤前海床以强不稳定型和极强不稳定型为主,分别长17.59和24.84 km,共占比84.20%,几乎整个南大堤堤前都发展成极强不稳定型海床;5 m等深线已经接近东营港海岸,其堤前海床也发展成强不稳定型和极强不稳定型。由此可见,受持续侵蚀的影响,工程防护区堤前海床的不稳定性逐渐加剧,海堤和堤前海床迫切需要加强防护。

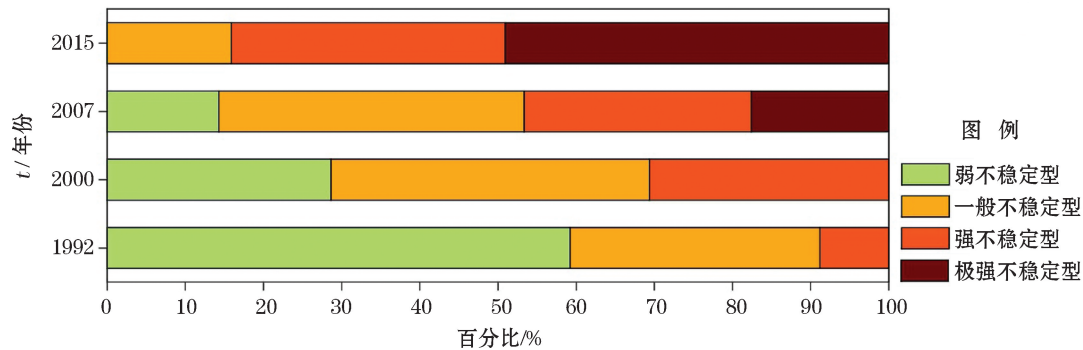


图6 1992—2015年堤前海床不稳定性各级所占比例

Fig.6 Instability grade proportion of the seabed in front of the dike during 1992—2015

5 结 语

东营港—孤东工程防护区近岸海床是黄河三角洲海岸侵蚀最强烈的区域,为更好地评估该区域的海床侵蚀不稳定性及其发展趋势,本文基于多次实测地形数据和波浪资料,研究了黄河三角洲工程防护区海床侵蚀过程及稳定性变化。得到主要结论如下:

1992—2000年海床侵蚀主体在距岸5~8 km区域内,堤前(距岸5 km区域内)以淤积为主;2000—2007年海床侵蚀明显,距岸10 km区域内都表现强烈的侵蚀;2007—2015年距岸8 km区域内表现强烈侵蚀,且堤前海床较2000—2007年时段侵蚀量增大,海床侵蚀向岸加剧。工程防护区海床侵蚀发展过程也影响着黄河水下三角洲整体的地貌格局,孤东南大堤外海出现了“近岸区深,远岸区浅”的反剖面形态。随着工程防护区近岸持续侵蚀,等深线不断向岸移动,堤前海床不稳定性逐渐加剧,2015年84.20%的堤前海床处于强或极强不稳定状态。

海堤和堤前海床迫切需要加强防护,建议对已破坏的海堤要及时进行维护,并定期进行海堤状况及海床地形监测,开展海堤破坏与海床侵蚀的机理研究,提出科学治理海岸侵蚀的应对策略。

参考文献(References):

- [1] FANOS A M. The impact of human activities on the erosion and accretion of the Nile delta coast[J]. Journal of Coastal Research, 1995, 11(3): 821-833.
- [2] BANNA M M E, FRIHY O E. Human-induced changes in the geomorphology of the northeastern coast of the Nile delta, Egypt[J]. Geomorphology, 2009, 107(1-2): 60-78.
- [3] ALY M H, GIARDINO J R, KLEIN A G, et al. In SAR study of shoreline change along the Damietta Promontory, Egypt[J]. Journal of Coastal Research, 2012, 284(5): 1263-1269.
- [4] GIOSAN L, SYVITSKI J, CONSTANTINESCU S, et al. Climate change: protect the world's deltas[J]. Nature, 2014, 516(7529): 31-39.
- [5] LIU J P, DEMASTER D J, NGUYEN T T, et al. Stratigraphic formation of the Mekong River Delta and its recent shoreline changes[J]. Oceanography, 2017, 30(3): 72-83.
- [6] CHEN S L, ZHANG G A, GU G C. Mechanism of heavy coastal erosion on Yellow River Delta and its countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(7): 1-6. 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 1-6.
- [7] CHEN S L, ZHANG G A, CHEN X Y. Coastal erosion feature and mechanism at Feiyantan in the Yellow River Delta[J]. Marine Science Bulletin, 2006, 8(1): 11-20.
- [8] XIA D X, BIAN S H, FENG A P, et al. Coastal geomorphology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014. 夏东兴, 边淑华, 丰爱平, 等. 海岸带地貌学[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [9] HOU X Y, SONG Y, LI X W. Environmental-ecological effect of development and utilization of China's coastline and policy recommendations[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1143-1150. 侯西勇, 宋洋, 李晓炜. 中国大陆海岸线开发利用的生

- 态环境影响与政策建议[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1143-1150.
- [10] BLOTT S J, PYE K, WALD V D, et al. Long-term morphological change and its causes in the Mersey Estuary, NW England[J]. Geomorphology, 2006, 81(1): 185-206.
- [11] JAFFE B E, SMITH R E, FOXGROVER A C. Anthropogenic influence on sedimentation and intertidal mudflat change in San Pablo Bay, California: 1856—1983[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2007, 73(1): 175-187.
- [12] JIANG C, PAN S, CHEN S L. Recent morphological changes of the Yellow River (Huanghe) submerged delta: causes and environmental implications[J]. Geomorphology, 2017, 293: 93-107.
- [13] LUAN H L, DING P X, ZHENG B W, et al. Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects[J]. Geomorphology, 2016, 265: 12-23.
- [14] ZHENG L, HE X F, LI M Y, et al. Analysis on the erosion-accretion changes of Shanghai petrochemical complex offshore seabed and the seawall stability[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1293-1298. 郑璐, 何晓峰, 李梦雅, 等. 上海石化近岸海床冲淤特征与海堤稳定性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1293-1298.
- [15] HORIKAWA K, WATANABE A. A study on sand movement due to wave action[J]. Coastal Engineering in Japan, 1967, 10: 39-57.
- [16] LI P, ZHU D K. The role of wave action on the formation of Yellow River delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1997(2): 39-46. 李平, 朱大奎. 波浪在黄河三角洲形成中的作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997(2): 39-46.
- [17] GUAN J Y, GU G C. Recent erosion characteristics and mechanism of old Yellow River Estuarine shoreline[J]. Coastal Engineering, 2011, 30(2): 50-61. 管君阳, 谷国传. 废黄河口海岸近期侵蚀特征与机理[J]. 海岸工程, 2011, 30(2): 50-61.

Seabed Erosion Process and Instability Assessment in the Engineering Protection Zone of the Yellow River Delta

FAN Yao-shen^{1,2}, CHEN Shen-liang³, DOU Shen-tang^{1,2}, YU Shou-bing^{1,2}, DU Xiao-kang^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China;

2. Key Laboratory of Yellow River Sediment, Ministry of Water Resource, Zhengzhou 450003, China;

3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The seabed erosion in the coastal area of the Yellow River Delta has become more prominent due to the influence of decrease in water and sediment entering into the sea, the high intensity development of coastal zone and the ocean dynamical action in recent years. The seabed erosion process and the stability change in the engineering protection zone of the Yellow River Delta are studied based on the measured topographic and wave data. The seabed erosion in the engineering protection zone is mainly distributed within 10 km near shore. From 2007 to 2015, strong erosion occurred mainly within the area 8 km away from the shore. Compared with that in the period from 2000 to 2007 the erosion amount of the seabed in front of the dike increased, and the seabed was eroded intensively toward the coast. With the extension of accretion at the current estuary sand mouth and the continuous erosion in the shallow area of the Gudong dike, a reverse profile of “deep nearshore and shallow offshore” was gradually formed in the offshore waters of the southern Gudong dike. With the continuous erosion of nearshore in the engineering protection zone, the contour lines shifted continuously toward the coast and the instability of the seabed in front of the dike intensified gradually. In 2015, 84.20% of the seabed in front of the dike was in a strong or extremely strong unstable state. This study can provide a scientific basis for the comprehensive management of the Yellow River Delta in the new situation.

Key words: the Yellow River Delta; engineering protection zone; seabed erosion; instability assessment; seawall safety

Received: December 23, 2019