浮渡河口沙坝—潟湖地貌系统稳定性评价研究

张盼[1,2]，闫吉顺[1,2]，王鹏[3]，张连杰[1,2]，赵博[1,2]，林霞[1,2]

（1.国家海洋环境监测中心　大连　116023；2.国家环境保护海洋生态环境整治修复重点实验室　大连　116023；
3. 浙江省海洋科学院　杭州　310012）

摘要：沙坝—潟湖是一类持续处于动态平衡调整过程中的地貌系统，具有河口典型的生态系统和重要的科研价值。文章从物源供给特征、外部干扰特征和沙坝—潟湖系统结构特征 3 个方面考虑，构建了沙坝—潟湖系统稳定性评价指标模型，用于评估浮渡河河口沙坝—潟湖稳定性。结果表明：2001—2012 年沙坝—潟湖稳定性明显下降，河口筑坝、围海养殖等海岸开发活动强度的增加是引起稳定性下降的主要原因。在人类干扰活动较小的阶段，沙坝—潟湖稳定性会逐步调整并趋于动态平衡，但很难恢复原始稳定状态。沙坝－潟湖海岸是海岸整治修复的重要对象，采用量化指数方法识别沙坝－潟湖海岸演化趋势，可进一步增强海岸整治修复对策合理性。

关键词：沙坝；潟湖；浮渡河；稳定性；整治修复

中图分类号：P76　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005－9857(2022)11－0011－05

Study on the Stability Evaluation of Sand Bar-lagoon Geomorphology System in Fudu River Estuary

ZHANG Pan[1,2], YAN Jishun[1,2], WANG Peng[3], ZHANG Lianjie[1,2], ZHAO Bo[1,2], LIN Xia[1,2]

(1.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Marine Ecosystem Restoration, Dalian 116023, China; 3.Marine Academy of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Sand bar-lagoon is a kind of geomorphic system which is in the process of dynamic equilibrium adjustment. It has typical estuarine ecosystem and important scientific research value. This paper constructed the stability evaluation index model of sandbar-lagoon system from three aspects: the supply characteristics of material sources, the external interference characteristics and the structural characteristics of sandbar-lagoon system, which was used to evaluate the stability of sandbar-lagoon system in Fudu estuary. The results showed that the stability of sand bar-lagoon decreased significantly from 2001 to 2012, and the increase in the intensity of coastal

收稿日期：2022-03-07；**修订日期**：2022-09-27

基金项目：国家海洋环境监测中心博士启动基金“多类型人类活动影响下河口沙坝－潟湖动力地貌系统的受损机制与恢复能力研究”(2018－A－18).

作者简介：张盼，高级工程师，博士，研究方向为海洋环境保护与综合治理

通信作者：闫吉顺，工程师，硕士，研究方向为海洋资源环境评价

development activities such as dam construction and coastal aquaculture was the main reason for the decline in stability. In the stage of small human disturbance, the stability of sand bar-lagoon gradually adjusted and tended to dynamic equilibrium, but it was difficult to restore the original stable state. The sandbar-lagoon coast was an important object of coastal remediation. The quantitative index method was used to identify the evolution trend of sandbar-lagoon coast, which could further enhance the rationality of coastal remediation countermeasures.

Keywords: Sand bar, Lgoon, Fudu River, Stability, Renovation

0 引言

河口地区发育的沙坝—潟湖地貌系统具有河口典型的生态系统和独特的景观科研价值[1]，既是世界沉积性海岸重要组成部分也是受人类活动影响密集的海陆过渡带区域[2-3]。沙坝—潟湖是一类持续处于动态平衡调整过程中的地貌系统[4]，极易因自然环境演化和人类活动影响导致脆弱性增加和结构功能的改变。

目前，已有学者对沙坝—潟湖海岸脆弱性动态平衡体系开展了研究。潮汐通道地貌体系稳定性是一项重点研究内容，O'Brien [5]提出了潟湖口门截面积和纳潮量之间的关系，国内贾建军等[6]、张乔民等[7]也研究了纳潮量与口门截面积之间的平衡关系。遥感影像在国内外被广泛应用于沙坝及潟湖稳定性研究，翁毅等[8]利用遥感影像研究了旅游开发活动对沙坝—潟湖景观稳定性影响，孙伟富等[9]对我国大陆海岸潟湖发育演变阶段进行了统计和变迁分析。国内也有研究者针对人类活动影响下沙坝—潟湖海岸环境因子变化及其稳定性进行了研究，王洁等[2]、王世俊等[10]对海南小海沙坝—潟湖海岸演化过程进行了研究，提炼了沙坝—潟湖—潮汐通道体系动态调整的规律性认识。尽管国内外对沙坝—潟湖海岸的稳定性研究已取得不少成果，但较少开展采用综合指数方法量化评价人类活动作用下沙坝—潟湖海岸稳定性的研究。本研究在参考众多学者研究成果基础上，从物源供给特征、外部干扰特征和沙坝—潟湖系统结构特征 3 个方面考虑，构建了沙坝—潟湖系统稳定性评价指标模型，用以量化评估自然和人类活动作用下河口沙坝—潟湖稳定性，为形成以自然恢复为主的整治修复对策提供技术借鉴。

1 研究区域

研究区位于渤海辽东湾东岸，具体地理位置在辽宁省营口市浮渡河河口处(40°05′N—40°08′N，121°56′E—121°59′E)，区内水深均较浅，落潮时大部分滩面出露海面。研究区属北温带大陆性季风气候，受季风影响显著，区内以正规半日潮流为主，潮流具有明显的往复性。海区内常浪向为 SW 向，次常浪向为 N 向，强浪向为 NNW 向。浮渡河是研究区内唯一的入海河流，河口两侧发育了典型的沙坝—潟湖地貌体系，现存沙坝长度约 2.1 km。浮渡河口沙坝—潟湖海岸作为辽东湾东岸规模最大、保存较完整的现有砂质岸线，具有重要的景观和科研价值。近几十年来，浮渡河口周边进行了河口筑坝、围填海、围海养殖和河道采砂等大量海洋开发活动，其中，2010—2015 年潟湖内开始进行围海养殖、道路建设等活动，2011 年开展河口堤坝建设，2015—2016 年沙坝外侧进行人工岛建设，随着人类活动的不断加剧，沙坝—潟湖地貌形态发生了重大改变。

2 资料与方法

2.1 资料来源

本研究收集了浮渡河口 1992—2020 年分辨率为 1.5～2.5 m 的高精度遥感影像，遥感影像来自 SPOT、ZY、GF 等卫星平台，遥感数据影像均已经过系统辐射校正和地面控制点几何校正。同时，补充收集了 2010 年以来的 Google Earth 高清遥感影像，作为沙坝—潟湖地貌体系与景观格局的遥感学解译的对比分析材料。

2.2 遥感影像解译方法

本研究采用目视解译法计算入海河流和沙坝—潟湖 2 个地貌单元典型特征参数长时间序列变化，各地貌单元参数提取和确定方法如下。

(1)入海河流地貌参数解译方法。入海河流河口宽度以河流入海处两岸突出角的连线确定，河道宽度以多处特征河道断面宽度平均值确定，河道长度以河口至第一个河道弯曲处(40°05′26″N，121°58′30″E)的中心线长度确定。

(2)沙坝—潟湖地貌参数解译方法。沙坝长度计算以 1992 年河口北侧沙坝端部为原点，统计各年度沙坝坝尖到原点的线性距离。潟湖口门宽度为各年度沙坝坝尖到海岸线的垂直距离，潟湖面积按照沙坝至海岸线间闭合水域面积计算。人工构筑物面积按照各类型堤坝出露水面外轮廓形成的闭合区域面积计算。

3　沙坝—潟湖地貌参数变化特征

3.1　入海河流地貌参数变化特征

1992—2020 年，浮渡河河口宽度变化范围为 325～873 m，平均为 506 m。近 29 年间河口宽度总体呈先增加后减少的趋势，共计减少 419 m，年均缩减宽度为 14.4 m。2018 年以后，河口宽度基本处于稳定状态，与 1992 年相比减少了 56.3%。通过分析发现，1992—2007 年，河口宽度从 744 m 增加至 873m，从 2007 年开始呈现减少趋势，2007—2020 年，河口宽度从 873 m 减少至 325 m(图 1)。河口处围海养殖、码头堤坝建设等人类活动以及河口泥沙淤积造成的河流入海处两岸突出角位置的改变，从而引起河口宽度的变化。

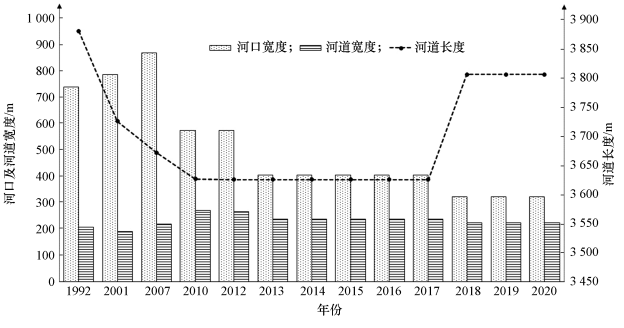

图 1　1992—2020 年入海河流典型地貌参数变化

1992—2020 年，浮渡河河道宽度变化范围为 192～274 m，平均为 234 m。近 29 年间河道宽度的变化基本与河口宽度的变化趋势相同，总体呈先增加后减少的趋势，主要拐点出现在 2010—2012 年，河道宽度约 270 m，2013 年后河道宽度变化趋于平稳并略有下降的态势(图 1)。河道宽度增加可能与河道疏浚整治有关，后期河口构筑物建设和河道泥沙淤积造成河道宽度减少。

1992—2020 年，浮渡河河道长度在 3 626～3 880 m，平均为 3 698 m。近 29 年间河道长度总体呈先减少后增加的趋势，2018 年以后，河道长度基本处于稳定状态。通过分析发现，1992—2010 年，河道长度从 3 880 m 减少至 3 626 m，2017—2018 年河道长度从 3 626 m 增加至 3 806 m(图 1)。河道长度主要基于河流形态及其中心线位置确定，不同年份河流形态变化以及河口位置的变化导致了河流中心线长度的变化。

3.2　沙坝—潟湖地貌参数变化特征

1992—2020 年，沙坝长度在 1 908～3 733 m，平均为 2 363 m。近 29 年间沙坝长度总体呈先减少后略有增加的趋势，共计减少 1 180 m，年均缩减宽度为 40.7 m。1992—2012 年是沙坝长度急剧减少时期(图 2)，沙坝长度从 3 317 m 减少至 1 908 m，2012 年沙坝长度与 1992 年相比减少了 42.5%，河口处沙坝逐渐灭失是沙坝长度减少的主要原因。2013 年以后，沙坝长度基本保持稳定并略有增加，2013—2020 年沙坝长度从 1 952 m 增加至 2 137 m，2020 年沙坝长度与 2013 年相比增加了 9.5%，但与 1992 年相比减少了 35.6%。1992—2020 年，潟湖口门宽度在 216～411 m，平均为 321 m。近 29 年间潟湖口门宽度总体不断减少的趋势(图 2)，其中，2001—2020 年共计减少 195 m，年均减少宽度为 9.8 m，减少幅度达 47.4%。沙坝长度增加和潟湖口门宽度减少主要与北侧沙坝坝体不断延伸有关。

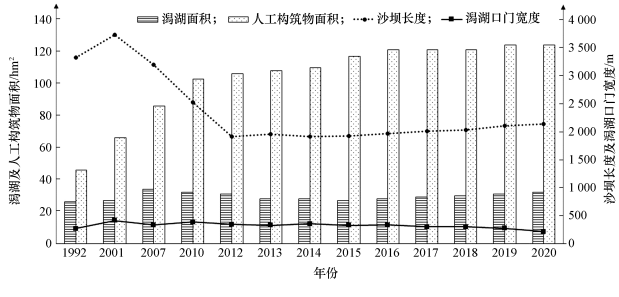

图 2　1992—2020 年沙坝—潟湖典型地貌参数变化

1992—2020 年，潟湖面积在 26～34 hm^2，平均为 29 hm^2。近 29 年间潟湖面积呈波动变化的趋势，共计增加 6 hm^2，增长幅度达 23.1%。1992—2007 年、2017—2020 年是潟湖面积增加时期（图 2），面积最大可达 34 hm^2，沙坝坝体逐渐延伸是潟湖面积增加的主要原因。2010—2016 年，潟湖面积呈现逐年减少的趋势，主要是由于填海造地和围海养殖建设占用潟湖面积造成的。

1992—2020 年，人工构筑物面积在 46 124 hm^2。近 29 年间人工构筑物面积呈不断增加的趋势，共计增加 78 hm^2，年均增加面积为 2.7 hm^2，增长幅度达 170%。通过分析发现，1992—2010 年人工构筑物面积从 46 hm^2 增加至 106 hm^2，2013—2016 年人工构筑物面积从 108 hm^2 增加至 121 hm^2，从 2019 年开始人工构筑物面积保持稳定（图 2）。1992—2010 年人工构筑物面积迅速增加主要是由大面积围海养殖造成的，2013—2016 年河口堤坝、人工岛等围填海工程建设导致人工构筑物面积小幅增加。2018 年以来，随着国家严控围填海政策的出台，人工构筑物面积不断增长的趋势得到明显遏制。

4 指标体系与评价方法构建

本研究从物源供给特征、外部干扰特征和沙坝—潟湖系统结构特征 3 个方面考虑，构建了沙坝—潟湖系统稳定性评价模型。其中，物源供给特征选取河口宽度、河道宽度和河道长度 3 个评价指标，反映沙坝—潟湖系统砂源供给主体即入海河流状况；外部干扰特征选取人工构筑物面积 1 个评价指标，反映各种人类活动对沙坝—潟湖系统外部干扰和造成的表观影响；沙坝—潟湖系统结构特征选取沙坝长度、潟湖面积和口门宽度 3 个评价指标，反映沙坝—潟湖地貌系统内部整体发展和稳定状况。在此基础上，建立了沙坝—潟湖系统稳定性评价指标模型，指数的大小反映了沙坝—潟湖系统稳定性水平。公式如下：

$$V_i = x_i - a \tag{1}$$

$$V'_i = \frac{V_i - V_{\max}}{V_{\max} - V_{\min}} \tag{2}$$

$$\mathrm{STAI} = \sum_{i=1}^{n} V'_i \cdot C_i \tag{3}$$

$$c_i = \mathrm{CORREL}[x_i, x_{\text{沙坝长度变化}}] \tag{4}$$

$$C_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^{n} |c_i|} \tag{5}$$

式中：V_i 为评价指标 x_i 与标准值 a 的差值；$V_{\max}$ 为 V_i 的最大值；$V_{\min}$ 为 V_i 的最小值；V'_i 为 V_i 的归一化处理；c_i 为评价指标 x_i 与沙坝长度变化值的相关系数；C_i 为评价指标 x_i 影响沙坝稳定性的贡献指数；CORREL[x，y]为评价指标 x_i 与沙坝长度变化值的相关性分析函数；STAI 为沙坝—潟湖稳定性指数。标准值 a 为未受到人类活动干扰下沙坝—潟湖系统稳定运行各地貌参数的值，通过历年遥感影像分析，本研究以 1985 年沙坝—潟湖系统受人类活动影响较小的各项地貌参数作为标准值。

通过沙坝—潟湖稳定性评价指标相关系数及贡献指数可以看出（表 1），河口宽度、河道宽度和人工构筑物面积与沙坝长度之间存在极强相关性，并共同影响着沙坝—潟湖系统稳定性。

表 1 沙坝—潟湖稳定性评价指标相关系数及贡献指数

评价要素	评价指标	相关系数	贡献指数
物源供给特征	河口宽度	0.87	0.21
	河道宽度	−0.65	−0.16
	河道长度	0.38	0.09
外部干扰特征	人工构筑物面积	−0.88	−0.21
沙坝—潟湖系统结构特征	潟湖面积	−0.07	−0.02
	潟湖口门宽度	0.28	0.07
	沙坝长度	1.00	0.24

经沙坝—潟湖系统稳定性评价模型计算可以看出（图 3），2001 年 STAI 出现峰值，2001 年沙坝长度、潟湖口门宽度等地貌参数处于近 29 年最大值，河口宽度等物源供给和人工构筑物干扰处在适中水平，沙坝—潟湖地貌系统能够通过自我调节维持良好稳定性。2001—2012 年，STAI 呈急剧下降的趋势，由于该时间段内规模较大的围海养殖活动、河口堤坝以及填海造地建设，造成了沙坝—潟湖系统沉积动力环境的改变，沙坝长度和河口口门宽度逐渐减少，人类活动等外部干扰逐渐增加，引起沙坝—潟湖稳定性下降。2012—2014 年除河口堤坝的继续建设外无其他明显人类活动，虽然河口

宽度发生一定变化，但沙坝—潟湖系统仍然维持了动态平衡。在 2015—2017 年，由于沙坝外侧人工岛建设和潟湖口门宽度减少等原因，导致沙坝—潟湖稳定性进一步下降。2017 年以后，人类活动等外部干扰开始得到遏制，沙坝长度和潟湖面积逐渐得到恢复，对沙坝—潟湖稳定性起到较好恢复作用。同时，沙坝的不断延伸也导致了潟湖口门逐渐变窄，STAI 值在 2017 年后虽然有所上升但仍未达到平衡状态。上述分析表明，一旦沙坝—潟湖地貌系统内进行了完全改变自然属性的开发利用活动，很难恢复原始稳定状态，在进行沙坝—潟湖地貌系统整治修复过程中，需注重寻求沙坝—潟湖系统的动态平衡状态，以实现各典型地貌参数合理变化。

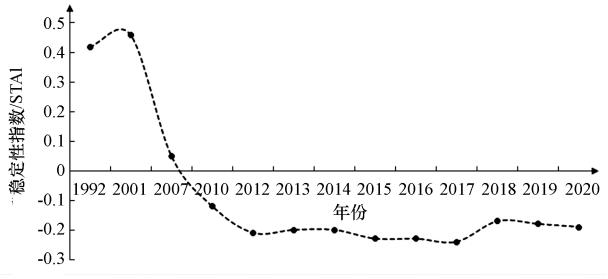

图 3　1992—2020 年沙坝—潟湖稳定性指数变化

5　结论及建议

本研究通过对浮渡河河口沙坝—潟湖典型地貌参数包括河口宽度、河道宽度、河道长度、沙坝长度、潟湖面积、潟湖口门宽度和人工构筑物面积 7 个参数的统计分析，构建沙坝—潟湖系统稳定性评价模型，并对近 29 年来沙坝—潟湖的稳定性进行评价。2001—2012 年沙坝—潟湖稳定性明显下降，这与河口筑坝、围海养殖等海岸开发活动强度的增加是同步发生的。在人类干扰活动较小的阶段，沙坝—潟湖稳定性会逐步调整并趋于动态平衡，但很难恢复原始稳定状态。沙坝－潟湖海岸是“蓝色海湾”整治修复的重要对象，在整治修复过程中科学诊断其稳定性，识别沙坝－潟湖海岸演化趋势，可以增强“自然恢复为主，人工修复为辅”整治修复对策的合理性。

参考文献

[1]　张盼，王鹏，林霞，等.海洋生态文明视域下河口沙坝－潟湖生态修复思路探究[J].海洋开发与管理，2021，38(3)：45－48.

[2]　王洁，张登荣，杨世伦，等.海南岛小海沙坝－泻湖－潮汐汉道体系的演变分析研究[J].遥感信息，2013，28(2)：88－92.

[3]　戴志军，施伟勇，陈浩.沙坝—潟湖海岸研究进展与展望[J].上海国土资源，2011，32(3)：12－17.

[4]　于晓晓，谷东起，闫文文，等.辽东湾东岸砂质海岸的地貌特征[J].海岸工程，2016，35(3)：52－62.

[5]　OBRIEN M P. Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts [J]. Journal of the Waterways and Harbors Division，1969，95(1)：43－52.

[6]　贾建军，高抒.建立潮汐汉道 P－A 关系的沉积动力学方法[J].海洋与湖沼，2005(3)：268－276.

[7]　张乔民，陈欣树，王文介，等.华南海岸沙坝潟湖型潮汐汉道口门地貌演变[J].海洋学报(中文版)，1995(2)：69－77.

[8]　翁毅，蒋丽.旅游开发活动对沙坝—潟湖景观稳定性的影响分析：以广西北海银滩沙坝—潟湖景观为例[J].海岸工程，2008(1)：47－55.

[9]　孙伟富，张杰，马毅，等.1979－2010 年我国大陆海岸潟湖变迁的多时相遥感分析[J].海洋学报，2015，37(3)：54－69.

[10]　王世俊，李春初，田向平.海南岛小海沙坝－泻湖－潮汐通道体系自动调整及恶化[J].台湾海峡，2003(2)：248－253.