

杨清书, 傅林曦, 魏稳, 等. 珠江黄茅海河口湾滩槽结构演变及动态平衡研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(4): 68–81. doi:10.12284/hyxb2023037
Yang Qingshu, Fu Linxi, Wei Wen, et al. Study on the structural evolution and dynamic balance of the shoal and channel in the Huangmaohai Estuary of the Zhujiang River[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(4): 68–81. doi:10.12284/hyxb2023037

珠江黄茅海河口湾滩槽结构演变及动态平衡研究

杨清书^{1,2,3,4}, 傅林曦^{1,2,3,4}, 魏稳^{1,2,3,4}, 贾良文^{1,2,3,4}, 李博^{1,2,3,4},
王恒⁵, 黄恩茂^{1,2,3,4*}

(1. 中山大学 海洋工程与技术学院 河口海岸研究所, 广东 广州 510275; 2. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510275; 3. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心, 广东 广州 510275; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000; 5. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 河口湾常由滩、槽地貌系统组合而成, 其滩槽结构演变及动态平衡既是河口海岸研究的重要科学问题, 又是河口规划治理与港口航道建设的理论基石。本文以黄茅海河口湾为研究靶区, 采用“动力-沉积-地貌”的研究思路, 基于不同历史年代的海图资料, 运用地貌信息熵等分析方法, 研究黄茅海河口湾滩槽结构的系统演变特征及动态平衡机制, 主要发现包括: (1) 黄茅海河口湾半个多世纪以来的地貌演变, 大致以 2007 年为转折点, 经历由淤积到冲刷的状态转换, 其在 1940–2007 年呈淤积状态, 年均淤积率为 1.4 cm/a, 在 2007–2015 年呈冲刷状态, 年均冲刷率为 1.2 cm/a。 (2) 黄茅海河口湾的滩槽结构发生转换, 在 2003–2007 年之间由“三滩两槽”的结构转换为“两滩一槽”的结构, 受围垦和疏浚工程影响, 滩槽分异趋于加强, 呈现浅滩淤浅、深槽刷深的演变特征。 (3) 黄茅海河口湾地貌信息熵值先减后增, 从缓慢淤积相对稳定的有序状态向人为干预下冲淤格局变化及滩槽演变的不确定性增加转换; 滩槽结构的稳态存在差异, 浅滩相对于深槽显示出更高的不确定性。 (4) 人类活动将滩槽结构的原有稳态打破, 疏浚工程使得东槽的活力提升, 促进深槽自适应重构平衡向有序方向发展。西滩和东滩经历围垦等人类活动干扰平衡, 浅滩失稳呈无序演变。

关键词: 黄茅海; 滩槽结构演变; 地貌信息熵; 动态平衡; 河口湾

中图分类号: P343.5 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2023)04-0068-14

1 引言

河口处于河流与海洋之间的过渡带, 是海岸带的重要组成部分, 同时河口也是经济发展的核心区, 在国民经济建设及航运发展中起着关键作用, 其中河口滩槽演变的研究对港航工程等海岸工程的指导具有重要意义。近年来, 由于围垦造陆、港口建设及航道疏浚等一系列工程建设, 人类活动直接导致河口湾地貌格局的变化, 动力格局随之变化, 由此引起泥沙输

运的变化, 最终导致滩槽冲淤演变及滩槽格局的转换。在此演变过程中河口进入自适应调整状态, 河口达到新的平衡所需要的调整过程受到广大河口研究学者的关注。因此, 采用“动态平衡”理论对河口滩槽结构的状态进行表征和预测, 对河口滩槽演变研究具有较好的科学意义。

国内外学者针对河口滩槽演变的研究成果丰富, 涉及的问题包括自然条件下河口的物理过程演变^[1-2], 水库建设和河道采砂对河口侵蚀的影响过程^[3-7], 滩

收稿日期: 2022-07-14; 修订日期: 2022-10-31。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402600)。

作者简介: 杨清书(1964—), 男, 广东省平远县人, 教授, 主要从事河口海岸动力-沉积(泥沙)-地貌过程及海岸工程研究。E-mail: yangqsh@mail.sysu.edu.cn

* 通信作者: 黄恩茂(1999—), 男, 海南省文昌市人, 主要从事河口海岸动力-沉积-地貌过程研究。E-mail: huangenm3@mail2.sysu.edu.cn

涂围垦对三角洲推进的加速效应^[8-11],人类活动对泥沙运输的影响机制^[8,12-14]等。研究主要采用数值模型、水文数据分析等方法,但是针对滩槽结构的稳定性研究仍有待深入。近年来“动态平衡”在河口海岸研究方面有较为一致的认识和广泛应用,在一定意义上,地貌信息熵可以作为系统“动态平衡”的判定指标^[15-21]。作为判断地貌演化阶段的定量指标之一,地貌信息熵在流域地貌研究具有重要意义,为判断流域地貌的侵蚀和发育程度以及演化阶段提供了定量参数。通常认为,地貌信息熵的熵值越高,地貌系统越趋向于无序发展,系统的不确定性增强,而熵值降低意味着系统朝有序方向发展。一般来说,三角洲系统在自然条件下趋于熵最大化的发展趋势^[22]。

黄茅海河口湾是珠江八大口门中崖门和虎跳门汇入的河口。近50年来围垦工程导致岸线向海推移,使得纳潮量不断减小^[23-24],由于珠江河口分流分沙比的变化,上游来沙量减小导致拦门浅滩的面积不断减小并整体向海移动^[23,25]。在河口动力和人类活动的双重驱动下,黄茅海河口湾面积明显萎缩,滩槽格局发生了重大变化,这对河口治理及水安全问题带来新的严峻挑战。综上所述,选择黄茅海河口湾作为研

究靶区,以1940年以来的历史海图为基础,采用地貌信息熵的研究方法,探讨滩槽冲淤演变及转换机制、河口地貌信息熵的响应及河口稳定性。这对未来航道管理、港口建设规划等具有重要现实意义,为黄茅海河口湾的综合整治、有序开发航运资源等社会经济要求提供重要支撑。

2 研究区域概况

黄茅海位于珠江河口西翼,21°52'~22°13'N,113°00'~113°12'E,北接江门市,东部为珠海市斗门县,西部与台山县相连。黄茅海是珠江河口的两大河口湾之一,为一喇叭形河口湾,东南部与高栏港相连;河口湾内有许多岛屿,包括大襟岛、荷包岛和大杧岛等(图1)。河口湾地形复杂,大杧岛和高栏港之间有一潮流通道,受潮流冲刷作用形成深槽,大杧岛东部的深槽与崖门出海深槽相连,形成东槽,而后高栏港出海航道与东槽在荷包岛东侧交汇,组成东槽的一部分。河口湾的滩槽演变受径流输沙和海域来沙的影响,淤积现象明显^[26]。湾口受到波浪、径流和潮动力的相互作用,导致淤积和冲刷过程存在显著差异。

黄茅海径流主要来源于潭江和西江下游虎跳门

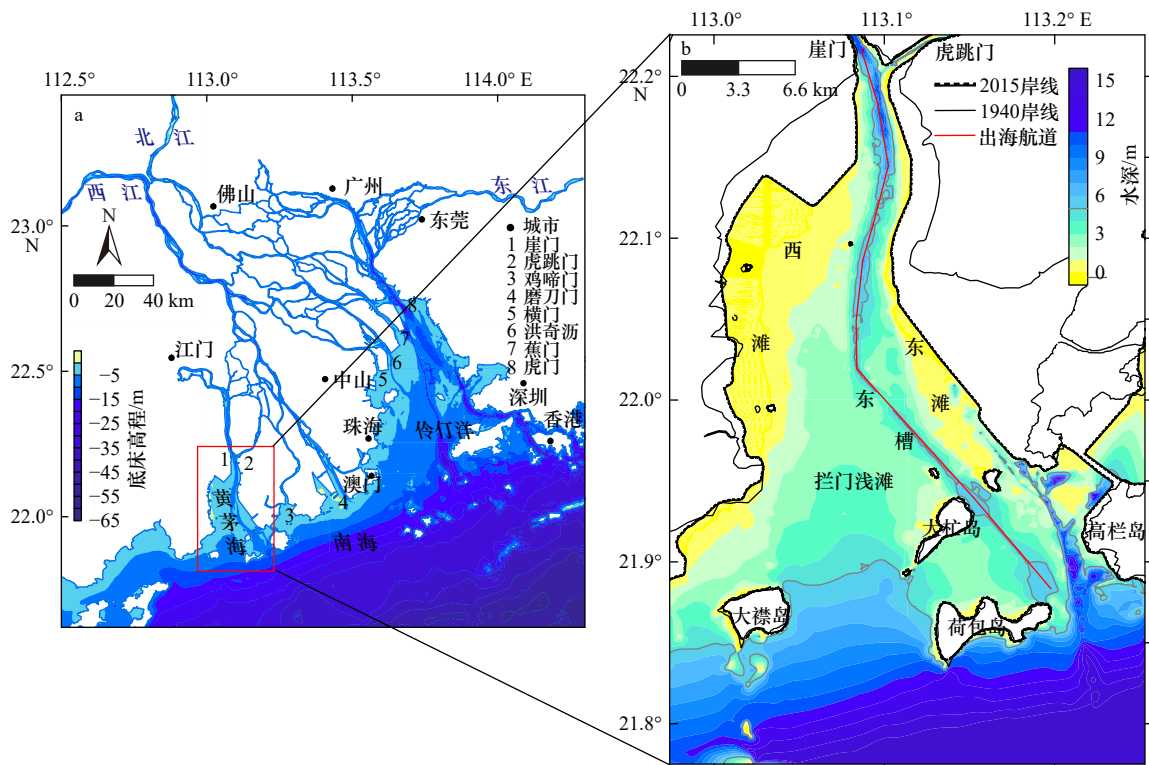


图1 研究区域地形图

Fig. 1 Topographic map of the study area

a.珠江河口; b.黄茅海河口湾

a. Zhujiang River Estuary; b. Huangmaohai Estuary

水道,经崖门和虎跳门进入河口湾。21 世纪以来,由于珠江河网分流分沙比的变化,由径流携带的泥沙呈减小趋势^[9]。黄茅海现有滩槽格局为“两滩一槽”,两滩指西滩、东滩;一槽为东槽(图 1b),原有西槽已退化湮废。拦门浅滩位于河口湾中部,北接东槽,南接南海,同时与西滩交接。

近几十年来黄茅海河口湾的人类活动主要包括围垦造陆和航道疏浚等。1940–2015 年共围垦 181.35 km²,年均围垦速率为 2.42 km²/a,围垦工程直接导致了海岸线迅速向海推进,年均推进速率为 28.8 m/a。

航道疏浚主要发生在崖门出海航道,直接影响河口湾滩槽演变过程。

3 数据与方法

3.1 数据收集与整理

海图是分析河口系统地貌演变的重要资料,基于数字化海图开展的河口海岸地貌研究技术已经较为成熟^[27–32]。为定量阐述黄茅海河口湾的滩槽演变,本文收集了 1940 年、1977 年、2007 年及 2015 年共 4 套历史海图,表 1 列出论文所使用海图的详细信息。

表 1 海图相关说明及水深资料

Table 1 Chart related descriptions and water depth information

序号	年份	海图名称	比例尺	测量时期	坐标系和投影	基准面
1	1940	上川岛至澳门港	1 : 100 000	1938–1940年	2000国家大地坐标系墨卡托投影	略最低低潮面
2	1977	香港至上川岛	1 : 150 000	1977年	2000国家大地坐标系墨卡托投影	黄海平均海面
3	2007	澳门港至珠海港	1 : 75 000	2007年	2000国家大地坐标系墨卡托投影	理论最低潮面
4	2015	小蒲台岛至小襟岛	1 : 75 000	2015年	2000国家大地坐标系墨卡托投影	1985国家基准高程

海图的数字化及处理:首先使用地理信息系统软件包 Arcgis 中的 Mapinfo 将海图数字化为水深散点、等高线和海岸线等不同的数据集;将不同年份数据集的水平坐标系统一至 WGS84 坐标系,并转换为墨卡托平面投影,垂向上均统一以理论深度基面为基准,构建黄茅海河口湾年代际地形数据库,数字化的过程中,保持比例尺 1 : 1 000 进行描绘。

3.2 河口湾地形冲淤分析

基于 Surfer 软件,选择克里金插值(Kriging interpolation)方法和 50 m×50 m 的网格,构建不同年份海图的数字高程模型(DEM)。通过相邻年份的 DEM 差值计算年代间总淤积(正值)和总冲刷(负值)量的体积;将之除以相差年数和对应的面积,即该区域的年平均冲淤体积和净冲淤速率(冲淤强度),单位为 cm/a。上述处理方法也被应用于世界上其他河口和三角洲地区的冲淤演变研究中^[29–30, 33–34]。

河口浅滩的演变以 0 m 等深线作为标识,2 m 等深线可反映水下浅滩的二级单元的分布情况,等深线变化可反映浅滩中的水深组成情况。黄茅海通常以 5 m 等深线划分滩槽^[36],通过 5 m 等深线划分不同年份的各地貌单元。本文将黄茅海的地形单元划分为东槽(水深>5 m)、西滩(0~2 m)、东滩(0~2 m)以及拦门浅滩(2~5 m),统计各地形单元的平面轮廓、面积、体积及东槽容积的变化情况,其中东槽容积为垂向上海图水深至理论深度基面之间的水体体积。

3.3 地貌信息熵计算

基于不同年代的历史海图数据,采用信息熵的方法研究黄茅海河口湾滩槽结构的动态平衡,并揭示滩槽结构的稳定性。

信息熵也称为香农熵,是用于测量信息量的一个概念。吴超羽^[15]提出,在一定意义上,地貌信息熵可以作为系统“动态平衡”的判别指标。Tejedor 等^[22]还使用信息熵来确定三角洲的稳定性。地貌信息熵的熵值越高,说明地貌系统的发展越无序,不确定性也随之增加,同时系统自身韧性较大,演变过程中受外界干扰恢复力强。从地貌系统演化的角度看,熵的增加意味着地貌系统具无序发展态势,而熵的减小意味着系统趋于有序发展。该信息熵方法已广泛应用于河口地貌演化研究^[15–22]。

本文根据吴超羽^[15]的计算方法:首先,将水深分为 40 等级(即 x_1, x_2, \dots, x_{40}),统计每个水深等级对应的面积,并绘制水深–面积图;随后依照式(1)分不同地貌单元(黄茅海河口湾及其东槽、西滩、东滩、拦门浅滩)计算各年代信息熵,探讨黄茅海滩槽结构特征及其稳定性。信息熵的计算公式为^[35]

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i), \quad (1)$$

式中,对数以 2 为底,信息熵单位为比特(bit); X 是随机事件 x_i 的集合; $P(x_i)$ 是随机事件 x_i 的概率。通过计算某一水深 h (即 x_i),对应的面积占总面积的百分

比 $P(h)$ (即 $P(x_i)$), 来进行信息熵的统计分析。

4 结果分析

4.1 黄茅海河口湾冲淤演变

黄茅海年代际冲淤结果及不同地貌单元的冲淤特征如表2及图2所示。可以看出,在时间变化上,1940–1977年为缓慢淤积阶段,黄茅海总体以淤积为主,人类活动影响较弱,主要表现为自然淤积过程,年均净冲淤体积和净冲淤速率分别为 $8.25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 1.18 cm/a 。1977–2007年,黄茅海总体仍处于净淤积状态,淤积速率加快,年均净冲淤体积和净冲淤速率分别为 $12.40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 1.58 cm/a 。在2007–2015年,黄茅海发生冲淤格局转换,由淤积转换为整体冲刷状态,表现为大面积的净冲刷,年均冲刷体积和速率分别为 $9.54 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 1.21 cm/a 。

在空间分布上,1940–1977年期间西滩、拦门浅滩处于淤积状态,东槽的湾顶段冲刷而湾口段淤积。东槽湾顶崖门附近区域呈现较强的冲刷,最大冲刷速率达 13.51 cm/a ,而虎跳门附近区域处于淤积状态,最大淤积速率达 9.46 cm/a 。1977–2007年期间,黄茅海西滩、拦门浅滩及东槽湾口段处于淤积状态,淤积速率最大的位置出现在西滩中部,达 8.61 cm/a 。而东槽湾顶段、东滩北部及大杓岛北侧呈冲刷状态。2007–2015年期间,东槽、东滩、西滩和拦门浅滩皆处于冲刷状态。最大的冲刷速率出现在东槽湾顶处,达到 57.52 cm/a ;而最大的淤积速率出现在东滩的北侧,达到 46.51 cm/a 。

4.2 滩槽格局及其演变

4.2.1 滩槽格局的转换

1940–2015年期间,黄茅海滩槽结构发生巨大变化(图3),由于西北部及东部浅滩围垦,滩槽整体被挤压减小,面积缩小了 181 km^2 。滩槽结构由1940年的三滩两槽变为2015年的两滩一槽(西滩与拦门浅滩合并为一浅滩,为方便统计,本文仍分别统计计算)。参照贾良文等^[23]的研究发现,2003年黄茅海西槽未完全萎缩,至2007年西槽已完全萎缩,因此滩槽格局转换的时间在2003–2007年之间。在这一演变过程中,河口湾东、西两侧浅滩以淤积为主,滩边界向湾口、向海推移。深槽演变的特征为原有西槽逐渐萎缩退化,深度变浅,退化为滩,而东槽逐渐刷深,1940–2015年平均水深由 7.2 m 刷深至 8.1 m ,2007年已经贯通完整连续的深槽。

4.2.2 西滩地貌演变

1940–2015年西滩的空间形态、体积及面积变化如图4所示。结果显示,1940–1977年,西滩面积增

表2 黄茅海河口湾及不同地貌单元的年代际冲淤变化

Table 2 Interdecadal erosion changes in Huangmaohai Estuary and different geomorphological units

区域		1940–1977年	1977–2007年	2007–2015年	
西滩	冲刷量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	-0.35	-0.05	-1.26
		面积/ (10^8 m^2)	0.48	0.19	0.72
	淤积量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	1.08	2.26	0.78
		面积/ (10^8 m^2)	0.90	1.02	0.61
	净冲淤	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	0.72	2.21	-0.49
		年均变化率/ $(\text{cm} \cdot \text{a}^{-1})$	0.52	1.82	-0.37
东滩	冲刷量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	-0.77	-0.007	-1.12
		面积/ (10^8 m^2)	0.39	0.02	0.12
	淤积量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	0.59	0.49	0.89
		面积/ (10^8 m^2)	0.27	0.24	0.16
	净冲淤	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	-0.17	0.49	-0.23
		年均变化率/ $(\text{cm} \cdot \text{a}^{-1})$	-0.26	1.94	-0.82
东槽	冲刷量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	-0.16	-0.35	-3.17
		面积/ (10^8 m^2)	0.06	0.09	0.22
	淤积量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	0.41	1.00	1.74
		面积/ (10^8 m^2)	0.27	0.23	0.13
	净冲淤	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	0.25	0.65	-1.43
		年均变化率/ $(\text{cm} \cdot \text{a}^{-1})$	0.76	2.07	-4.04
拦门浅滩	冲刷量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	-0.14	-0.21	-2.87
		面积/ (10^8 m^2)	0.17	0.11	0.75
	淤积量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	2.36	1.65	0.62
		面积/ (10^8 m^2)	1.25	0.87	0.26
	净冲淤	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	2.22	1.44	-2.25
		年均变化率/ $(\text{cm} \cdot \text{a}^{-1})$	1.56	1.47	-2.22
黄茅海	冲刷量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	-6.02	-3.47	-28.79
		面积/ (10^8 m^2)	2.22	2.06	3.89
	淤积量	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	14.27	15.87	19.15
		面积/ (10^8 m^2)	7.02	5.80	4.00
	净冲淤	年均体积/ $(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	8.25	12.40	-9.54
		年均变化率/ $(\text{cm} \cdot \text{a}^{-1})$	1.18	1.58	-1.21

注:正值表示淤积,负值表示冲刷。

加了 22.6 km^2 , 体积增加了 $2.65 \times 10^7 \text{ m}^3$, 该时段西滩面积增幅达到 15%, 西滩的平均水深变深 0.01 m 。此外,该时段西滩存在水平淤长,其向海延伸距离达 5.67 km (图4b)。1977–2007年西滩面积减小了 22 km^2 ,

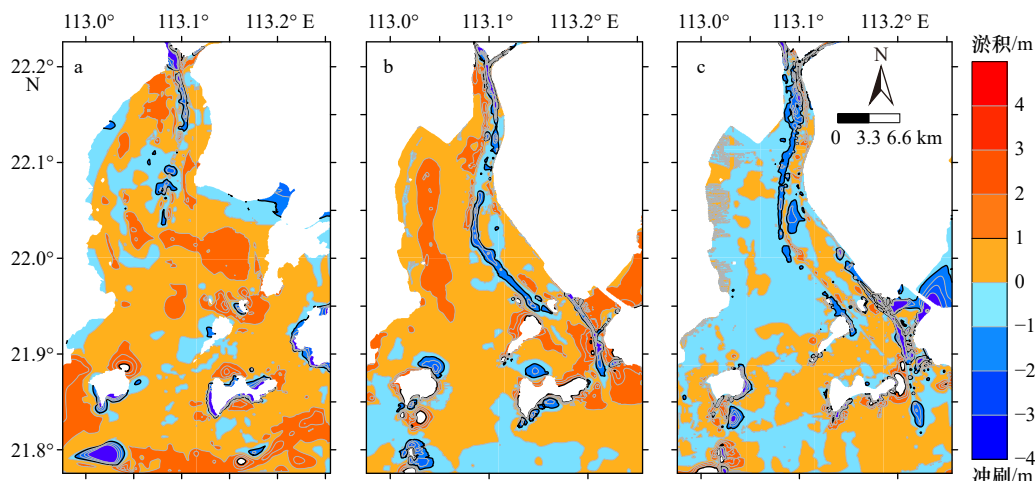


图2 黄茅海河口湾不同年代滩槽冲淤变化

Fig. 2 Sedimentation changes of shoal and channel in different years in the Huangmaohai Estuary

a. 1940–1977年; b. 1977–2007年; c. 2007–2015年
a. 1940–1977; b. 1977–2007; c. 2007–2015

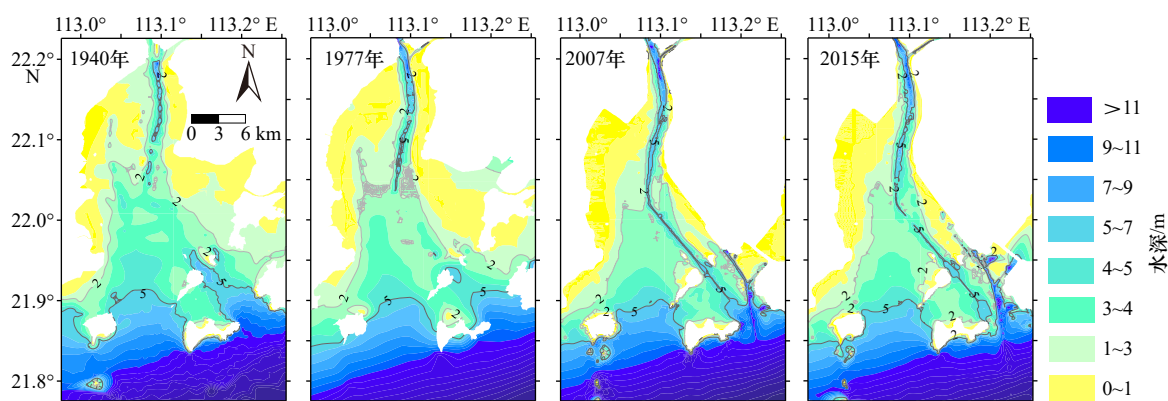


图3 黄茅海河口湾水下地形图

Fig. 3 Topographic map of the Huangmaohai Estuary

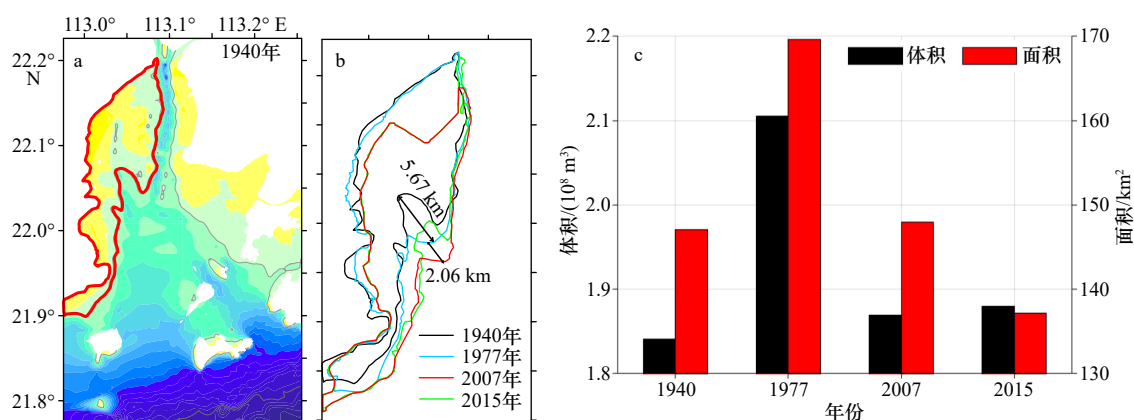


图4 西滩空间位置(a)及1940–2015年西滩的空间形态(b)、体积及面积(c)变化

Fig. 4 Spatial position (a), spatial morphological (b) and area/volume (c) changes from 1940 to 2015 of the West Shoal

体积减小了 $2.4 \times 10^7 \text{ m}^3$, 该时期西滩地貌演变存在显著变化, 面积由扩张变为萎缩, 表现为受西北部围垦挤压, 整体平面向海推移, 向海淤长的距离最大达 2.06 km(图 4b); 2007–2015 年, 西滩面积减小了

10.8 km^2 , 体积增加了 $0.11 \times 10^7 \text{ m}^3$, 该时期西滩中段小幅向陆萎缩, 表现为拦门浅滩向陆发育的挤压作用。西滩面积在 1977 年之后都在减小, 而体积在 1977–2007 年减小后在 2007–2015 年小幅度增加。此外,

西滩 1977 年平均水深为 0.76 m, 2007 年为 0.74 m, 而 2015 年为 0.63 m, 表明西滩在该时段处于不断淤浅的过程。

4.2.3 东滩地貌演变

1940–2015 年东滩的空间形态、体积及面积变化如图 5 所示。结果显示, 1940–1977 年东滩面积增加了 7 km², 体积增加了 0.5×10⁷ m³, 该时段东滩自然淤长, 平面形态整体向海平移, 向海延伸达 2.46 km。

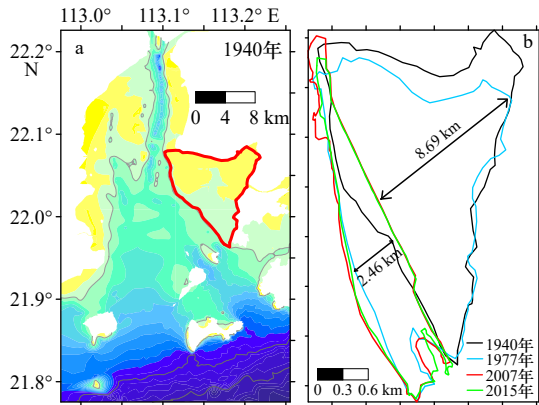


图 5 东滩空间位置(a)及 1940–2015 年东滩的空间形态(b)、体积及面积(c)变化

Fig. 5 Spatial position (a), spatial morphological (b) and area/volume (c) changes from 1940 to 2015 of the East Shoal

4.2.4 东槽地貌演变

东槽 1940–2015 年的空间形态、容积及面积变化如图 6 所示。结果显示, 1940–1977 年, 东槽面积基本维持不变, 容积增加了 1.3×10⁷ m³, 且东槽处于不连续状态, 即 5 m 等深线尚未贯通, 东槽的最大间断距离达到 10.5 km。1940 年东槽湾口段仍为连续的,

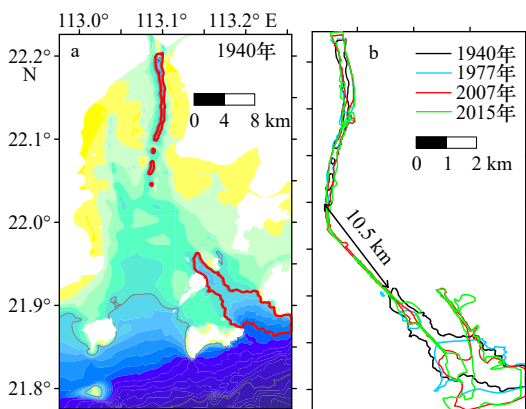


图 6 东槽空间位置(a)及 1940–2015 年东槽的空间形态(b)、体积/面积(c)变化

Fig. 6 Spatial position (a), spatial morphological (b) and area/volume (c) changes from 1940 to 2015 of the East Channel

4.3 滩槽结构不同地貌单元的水深面积分布

黄茅海河口湾及不同地貌单元 1940–2015 年的水深–面积曲线变化如图 7 所示。1940–2015 年黄茅海河口湾水深–面积分布皆呈现多峰态(图 7a), 最高峰和次高峰逐渐左移且峰值不断下降, 1940 年最高

1977–2007 年东滩面积减小了 55.6 km², 体积减小了 7.6×10⁷ m³, 该时段东滩地貌演变发生显著变化, 面积和体积大幅度减小, 减小幅度分别为 63.9% 和 64.5%。黄茅海东侧岸线大幅度向海推移, 最大推移距离达 8.69 km(图 5b)。2007–2015 年东滩面积与体积小幅度减小, 其中面积减小了 2.4 km², 减小幅度为 8%, 体积减小了 0.48×10⁷ m³, 减小幅度为 11%, 该时期东滩平面位置变化较小, 处于较稳定的状态。

而 1977 年由于泥沙淤积被截断。1977–2007 年东槽面积增加了 0.84 km², 容积增加了 1.97×10⁷ m³, 该时段东槽地貌演变发生显著变化, 至 2007 年东槽已全部连通。2007–2015 年东槽面积增加了 0.63 km², 容积增加了 2.03×10⁷ m³, 该时段东槽容积增大幅度达到 5.7%, 大于面积增长幅度(1.4%), 平均水深加深 0.33 m。

峰和次高峰对应水深为 0.3 m 和 3.3 m, 所占面积分别为 92.22 km² 和 69.08 km², 而 2015 年最高峰和次高峰对应水深为 0.28 m 和 2.8 m, 所占面积分别为 68.05 km² 和 59.96 km², 两个峰值分别代表 0~2 m 的一级浅滩和 2~5 m 的二级浅滩, 峰值对应水深减小说明黄茅

海整体处于淤积过程,河口湾水深变浅,以滩为主,滩的面积占河口湾面积的 55.4%。此外,1977 年黄茅海水深-面积曲线在水深 6.4 m 和 13 m 的位置出现小峰值,2007 年和 2015 年的水深-面积曲线分布在水深 5 m 和 10 m 左右各出现小峰值,这些峰值代表深槽地貌

单元,表明深槽面积增大。总体而言,黄茅海河口湾整体的水深-面积分析表明,河口湾不同地貌单元向更深和更浅的方向发展,意味着水深分布的多样性开始增大,滩槽分异加强。

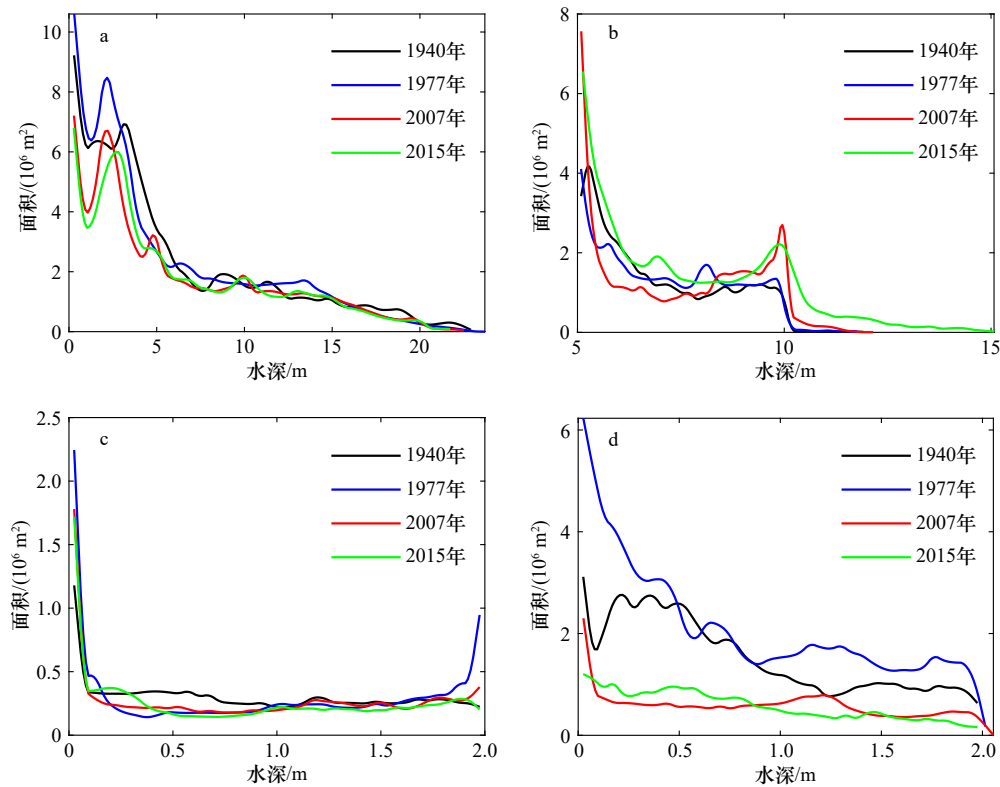


图 7 黄茅海河口湾不同地貌单元水深-面积曲线

Fig. 7 Water depth area of different geomorphological units in the Huangmaohai Estuary

a. 黄茅海河口湾, b. 东槽, c. 西滩, d. 东滩

a. Huangmaohai Estuary, b. East Channel, c. West Shoal, d. East Shoal

东槽在 1940–2015 年期间水深-面积曲线由单峰态变为多峰态(图 7b), 1940 年峰值对应水深为 5.3 m, 所占面积为 4.17 km², 而 2015 年出现 3 个峰值分别为 5.1 m、6.9 m、9.9 m, 所占面积依次为 6.56 km²、1.91 km²、2.22 km², 说明东槽在 1940–2015 年期间整体深化, 水深和面积不断增加, 向复式深槽模式转变。西滩在 1940–2015 年期间水深-面积曲线模式有两次转换, 由单峰变为双峰又转变为单峰(图 7c), 1940 年峰值对应水深为 0.03 m, 所占面积为 11.8 km², 在 1977 年出现双峰分别为 0.025 m、1.97 m, 所占面积为 22.5 km²、9.13 km², 而 2015 年又变为单峰, 峰值及对应面积为 0.024 m 和 17.2 km²。这表明西滩的水深-面积组合呈现由“单级滩-双级滩-单级滩”的转换。东滩在 1940–2015 年期间水深-面积曲线呈现多峰态(图 7d), 1940 年和 2015 年曲线的最高峰对应水深都是 0.03 m, 所占面积分别为 3.1 km² 和 1.2 km², 2015 年的水深-面

积曲线较 1940 年有明显的下移, 说明东滩面积大幅度减小, 且 2015 年的曲线波动幅度更小, 表明水深分布趋于均匀。此外, 东滩的水深组成比西滩分布着更多的峰值, 且各峰值差异较小, 水深组成的多样性更加丰富。

4.4 滩槽结构的年代际信息熵变化特征

构建水深-面积概率空间函数, 计算黄茅海滩槽结构的信息熵, 黄茅海及其滩槽结构的各年份地貌信息熵变化曲线如图 8 所示, 根据地貌信息熵值的变化趋势分析滩槽结构的演变状态。

结果显示, 1940–1977 年, 黄茅海地貌信息熵值由 4.69 减小至 4.56, 表明黄茅海在自然条件状态下发展较为稳定, 状态较为确定, 该时段黄茅海处于有序发展状态。1977–2007 年, 黄茅海地貌信息熵值由 4.56 增大至 4.75, 该时段熵值变化幅度最大(增大 4.06%), 表明黄茅海受外力干扰, 原有平衡被打破, 由

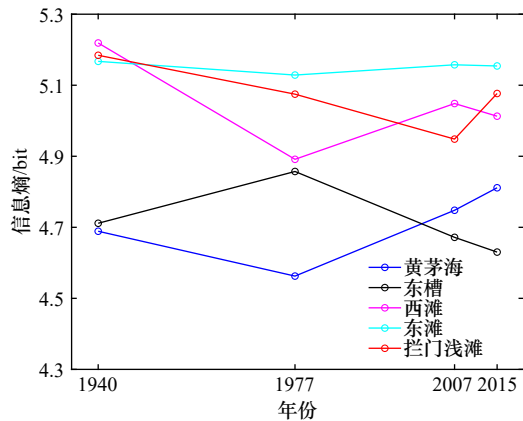


图8 黄茅海河口湾各统计区域1940–2015年地貌信息熵

Fig. 8 Geomorphological information entropy of various statistical areas of Huangmaohai Estuary from 1940 to 2015

有序发展向无序演变转变。2007–2015年,黄茅海地貌信息熵值由4.75增大至4.81,表明该时段黄茅海仍维持无序演变的状态。

东槽在1940–1977年地貌信息熵值由4.71增大至4.86,表明该时段东槽处于无序演变的状态,地貌动力及泥沙环境相对复杂多变。1977–2007年东槽地貌信息熵值由4.86减小至4.67,在2015年又减小至4.63,表明东槽从无序向有序方向演变,航道及港口的疏浚工程使得东槽不断浚深,活力提升,经自适应调整,动力结构保持相对稳定,东槽演变相对稳定,航道疏浚经河口的自适应调整,维持其有序性发展。东滩和西滩的地貌信息熵值在1940–1977年减小,在1977–2007年增加,而后在2007–2015年又减小,表明东滩和西滩经历了“自然有序发展–人类活动干扰平衡被打破后无序演变–在人类活动干预下经自适应调整维持有序发展”的状态转换。东滩在1940–2015年的地貌信息熵变化幅度较小,东滩的熵值在5.12~5.17的范围内变动,其平均信息熵值(达5.15)在所有地貌单元中最大,说明东滩的影响因子相对复杂,最接近于随机变化。西滩在1940–2015年的熵值波动在所有地貌单元中最大,在1940–1977年期间熵值由5.22减小为4.89,减小幅度达6.3%,到2007年熵值又增大至5.05,增大幅度达3.2%。拦门浅滩地貌信息熵值在1940–2007年呈现熵减的过程,在2007–2015年熵增,表明拦门浅滩受滩槽结构联动的影响,处于从有序发展到无序演变的状态。

黄茅海的滩槽结构中,东槽在4个年份的平均信息熵值为4.72,即东槽处于相对的低熵值状态,而东滩、西滩及拦门浅滩的平均信息熵值较高,位于5.04~5.15之间,处于高熵值状态,浅滩演变的影响因子相

对复杂,浅滩相对于深槽显示出更高的不确定性,深槽相对于浅滩更加稳定。

5 讨论

5.1 人类活动的影响

5.1.1 黄茅海围垦的影响

黄茅海滩槽演变特别是近40多年来的变化,主要受制于人类开发活动,而河口自然调控过程滞后于人类主导作用^[36],其中围垦工程通过减少河口湾面积改变动力结构从而对滩槽结构演变造成影响。黄茅海河口湾围垦活动在1977–2015年强度较高(图9)。1940–1977年共围垦13.56 km²,年均围垦速率为0.37 km²/a; 1977–2007年围垦面积为155.75 km²,年均围垦速率为5.19 km²/a; 2007–2015年围垦11.84 km²,年均围垦速率为1.49 km²/a。

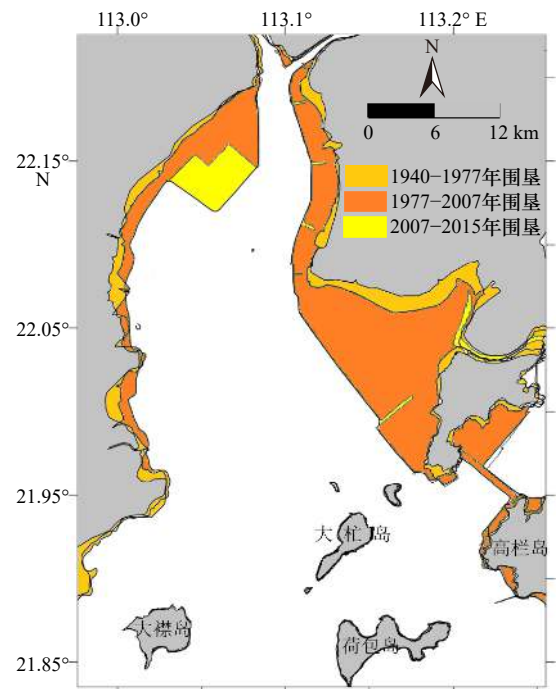


图9 黄茅海河口湾围垦区域

Fig. 9 The reclamation area of Huangmaohai Estuary

围垦工程实施后,黄茅海滩槽面积整体大幅减小(图3),岸滩的地形边界向湾内、向海推移,东滩及西滩的面积与体积大幅度减小(图4,图5),东槽近湾口段东西两侧被挤压,出现了明显的缩窄(图6),拦门浅滩也在不断淤积同时向海一侧发展。黄茅海河口湾西侧因上、下段岸滩围垦规模的显著差异,导致岸线形态呈上凸下凹,局部改变了喇叭形海湾的平面形态。结合前人对黄茅海动力的研究,围垦工程改变西侧岸线形态进而对涨潮流态及动力造成显著的影响,

使得西滩的涨潮潮沟萎缩,淤积速率加快^[36]。因西槽的萎缩,西滩和拦门浅滩合并为一浅滩,滩槽结构由“三滩两槽”转变为“两滩一槽”格局。此外,1977–2007年黄茅海河口湾整体加速淤积是由于岸线形态的显著变化引起动力和泥沙输运改变所致。围垦后东侧岸线由原来的凹形变为相对平顺的形态,这改变了河口湾平面形态的纵向收敛关系。此外,围垦后平顺的岸线形态改善了沿岸的涨落潮流态^[37],使水流集中在东槽,加大了东槽的冲刷。

5.1.2 疏浚工程的影响

除围垦工程外,疏浚工程也是影响黄茅海滩槽结构演变的人类活动之一。根据东槽的冲淤体积变化推算人工浚深泥沙量,结果列于表3。表中黄茅海冲刷量为实际黄茅海整体冲刷体积,东槽浚深量为东槽冲刷量与航道回淤量之和,1940–1977年黄茅海的疏浚工程较少故不统计。崖门航道1995–2005年的年均回淤量为 $110.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[38],将其作为常态化回淤量用以计算。

表3 黄茅海河口湾冲刷量及东槽浚深量估算

Table 3 Huangmaohai Estuary erosion volume and East Channel dredging volume estimation

时期	黄茅海冲刷量/ (10^6 m^3)	东槽浚深量/ (10^6 m^3)	浚深占冲刷量之比/%
1940–1977	222.74	–	–
1977–2007	104.1	56.76	54.5
2007–2015	230.32	39.62	17.2

注:–代表不统计。

结果显示,1977–2007年东槽浚深量占黄茅海冲刷量之比达54.5%,该时期崖门出海航道与高栏港区的疏浚工程自20世纪90年代开始实施,至2007年已基本施工完成,这导致东槽平面形态发生明显变化,由不连续状态变为全部连通,形成完整连续的航道。2007–2015年东槽浚深占黄茅海冲刷量之比下降至17.2%,表明该时期疏浚工程的影响较少。

1995年7月崖门3000 t级出海航道疏浚工程完成,至2007年崖门5000 t级出海航道疏浚工程完成,航道水深7.7 m^[38]。崖门出海航道走向与潮流流向基本一致^[39],疏浚工程完成以后,航道稳定性较好,同时进行定期维护性疏浚^[40],因此东槽的形态及平均水深可维持相对稳定。此外,高栏港区的疏浚工程实施后,其出海航道与原有东槽在荷包岛东侧相连,组成东槽的一部分。疏浚工程导致东槽面积与体积不断增加(图6),平均水深不断加深,1940–2015年平均

水深由7.2 m刷深至8.1 m。崖门出海航道疏浚工程完成后,径流沿东槽下泄动力加强,加大了东槽的冲刷,1977–2007年和2007–2015年东槽大部分区域处于冲刷状态(图2)。此外,疏浚工程完成后,有利于潮流沿航道上溯,加强近岸涨潮动力,使东槽成为黄茅海河口湾主要的潮能输送通道,这对维持滩槽格局稳定起一定作用。航道浚深将引发河口含沙量变高,加强的涨潮流携带海沙沿东槽向湾内输移,进而导致大杧岛北侧以及拦门浅滩发生沉积^[41]。

5.2 动力沉积过程对河口地貌演变的响应

随着围垦工程的开展,黄茅海河口湾的纳潮面积不断减少,纳潮量也随之减少。经统计,黄茅海河口在1972年和2016年的平均潮差分别为1.98 m和1.92 m^[42],计算得到1972年和2016年的纳潮量分别为 $18.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $15.09 \times 10^8 \text{ m}^3$,纳潮量减少了17.53%。纳潮量的减少削弱潮动力并导致动力带下移:受径流影响为主的下泄流控制区、受潮流影响为主的上溯流控制区及过渡区都发生了明显南移^[43]。过渡区位于上溯流与下泄流控制区之间,动力较弱,泥沙在此区域易发生沉积。拦门浅滩的位置与过渡区的位置相近,随着过渡区南移,拦门浅滩的位置也逐渐向海一侧移动。

受动力驱动,沉积物输移也随之发生变化,2011年与2016年黄茅海表层沉积物运移趋势如图10所示,其中2016年数据来源于中山大学河口海岸研究所。2011年黄茅海河口湾自湾顶至拦门浅滩以北,表层沉积物自北向南输运,即向下输移;而拦门浅滩至大杧岛以北,表层沉积物自南向北输运,即向上输移^[44]。总体上沉积物的运移趋势表现为黄茅海北部径流控制的沉积物向南运移趋势、南部受潮流影响向北运移趋势和中间的过渡区。至2016年,过渡区域向南移动约7 km,表明北部沉积物的向南运移趋势明显增强,沉积中心也随之南移,从而驱使了拦门浅滩逐渐向海移动。

5.3 人类活动影响下的系统稳态变化

从黄茅海整体来看,在1940–2015年期间信息熵先减小后增大(图8),人类活动打破了原有平衡使其熵增,从有序发展向无序演变转变,但从黄茅海不同地貌单元的发展状态看来,“滩”“槽”地貌单元的熵值对人类活动的响应并不总是熵增。东槽地貌演变在1940–1977年表现为自然状态的冲刷趋势,分布散乱,发展较为无序,地貌信息熵值增加;1977–2015年东槽被确立为主要通航航道,在不断浚深的影响下,其经过自适应调整达到新的平衡,表现为有序发

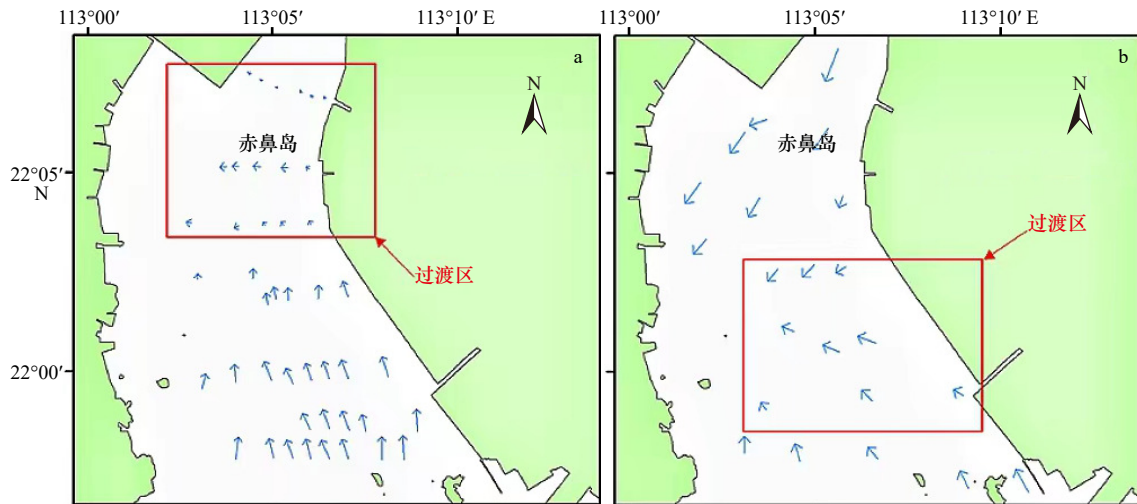


图10 黄茅海河口湾2011年(a)和2016年(b)表层沉积物运移趋势

Fig. 10 Trends in the transport of surface sediments in the dredged Huangmaohai Estuary in 2011 (a) and 2016 (b)

展,地貌信息熵减小。东槽在1940–2015年的地貌信息熵演变表明,有规律的人类活动使得东槽的活力提升,促进其有序性发展。同时,黄茅海整体信息熵和东槽信息熵均值一致,皆为4.7,然而变化趋势完全相反,表明黄茅海河口湾整体的信息熵水平受东槽牵制,浅滩的高信息熵水平平衡了东槽的逆向调整。拦门浅滩与西滩、东滩同处于高信息熵的区域,但其变化趋势介于0~2 m浅滩和深槽之间,似有其他因素影响其系统稳态,未来宜进一步深入探讨其中“动力–沉积–地貌”的耦合和协同作用。

西滩和东滩的发展自然状态下表现为三角洲式的淤长模式,在正常自然条件下西滩和东滩的发展较为确定,其信息熵的演变表现为熵减的发展趋势,1977–2007年,两滩熵值增大,较强的围垦活动导致其无序化发展;2007–2015年,西滩围垦活动大幅减少,西滩和东滩又表现为有序地淤积,信息熵减小的演变过程。人类活动将滩槽结构的原有稳态打破,不同人类活动使动态平衡向有序或失稳方向发展。

5.4 与珠江伶仃洋河口湾对比

伶仃洋是珠江河口另一河口湾,在近一百年仍维持“三滩两槽”的滩槽结构。伶仃洋的水深单元变化与黄茅海相同,呈现出“深槽更深,浅滩更浅”的变化特征^[45]。20世纪80年代以来伶仃洋围垦工程大量开展,使伶仃洋逐渐形成大喇叭型河口形态,水流更加顺畅,川鼻水道缩窄,水流集中,挟沙能力增强,川鼻水道和西槽冲刷变强^[46]。而黄茅海围垦工程的开展造成黄茅海河口湾缩窄,西部岸线呈现上凸下凹的形态,水流集中于东槽下泄。同时西滩向东南淤展,导致西槽出现萎缩。

20世纪以来人类活动对伶仃洋的改造增大了系统的无序发展,系统的不确定性增大,动态稳定趋势减弱,其中伶仃洋西滩先熵减后熵增,西槽先熵增后熵减^[46]。伶仃洋西滩的信息熵变化反映人类活动对地貌的影响与黄茅海得到的结论一致:1964–1998年,伶仃洋西滩发生较强围垦活动,其地貌信息熵表现为熵增,系统无序化发展;1998–2008年,伶仃洋西滩围垦活动大幅减少,表现为信息熵减小、有序淤积的过程。这与黄茅海东滩和西滩表现的信息熵演化过程一致。此外,伶仃洋西槽被确定为主要通航航道后,地貌信息熵先增大后减小,表现为人类航道干扰初期无序发展,经自适应调整后表现为有序发展。而黄茅海东槽被确立为主要通航航道后,地貌系统表现为有序发展,地貌信息熵减小,并未发现反映黄茅海东槽受人类航道干扰初期无序发展的过程。黄茅海东槽与伶仃洋西槽信息熵变化的这一不同,推测是受限于本研究海图年份跨度较大的原因。

6 结论

河口滩槽演变及其动态平衡是河口海岸研究的热点问题,具有重要科学意义。黄茅海河口湾是珠江三角洲西翼的重要河口湾,在国民经济建设及航运发展中起着关键作用。论文采用DEM模型、河口海岸动力地貌及地貌信息熵相结合的方法,分析黄茅海河口湾的形态演变、冲淤变化及滩槽动态平衡问题,主要结论归纳如下:

(1)黄茅海河口湾在近几十年已发生了冲淤格局转换,20世纪40年代至70年代黄茅海总体以淤积为主导,年净淤积体积和速率分别为 $8.25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 和

1.18 cm/a, 以自然淤积为主; 1977–2007 年仍处于净淤积状态, 受围垦影响淤积速率加快, 年净淤积体积和速率分别为 $12.40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 1.58 cm/a, 处于加速淤积期; 在 2007–2015 年冲淤格局转换, 表现为大面积的冲刷。

(2) 通过建立数字高程模型 (DEM), 探讨黄茅海河口湾的滩槽格局变化。结果显示黄茅海河口湾的演变向浅滩淤浅、深槽下切变深的方向发展, 河口湾总体缩窄变深; 典型喇叭形河口湾形态特征有一定程度的退化, 岸线趋直而海湾变窄, 纳潮水域减小; 滩槽格局由“三滩两槽”向“两滩一槽”格局转换。西滩和东滩因受围垦等人类活动的影响, 岸线不断向海推移, 1940–2015 年岸线推移速率最大达 290 m/a, 河口湾湾顶变窄, 浅滩总体向外海移动。东滩的面积与体积大幅度减小, 1940–2015 年期间分别减小了 64% 和 67%, 西滩在 1940–2015 年期间面积减小了 6.7% 而体积增加了 2%; 东槽由于航道疏浚工程的影响, 5 m 等深线由原来的不连续状态转变为全部贯通; 西槽逐渐淤积变浅萎缩退化, 令拦门浅滩和西滩相连。

(3) 黄茅海河口湾整体地貌信息熵的变化过程表现为先减后增, 受围垦影响, 纳潮量减少, 动力分区与

沉积中心皆南移, 从相对稳定的有序淤积状态向不确定性增加转换。滩槽结构的稳态存在差异, 浅滩信息熵均值为 5.1 而深槽为 4.7, 表明浅滩较深槽具有更高的不确定性, 在强人类活动下仍处于自适应调整演变中, 影响因子较为复杂, 尚未达到新的动态平衡, 而深槽经航道不断疏浚, 水动力及水深维持相对稳定, 处于新的稳态。黄茅海整体信息熵和东槽信息熵均值一致, 皆为 4.7, 然而变化趋势完全相反, 表明黄茅海河口湾整体的信息熵水平受东槽牵制, 浅滩的高信息熵水平平衡了东槽的逆向调整。

(4) 人类活动将河口湾滩槽结构的原有稳态打破, 不同人类活动使动态平衡向有序或失稳方向发展。疏浚工程使得东槽的活力提升, 有利于潮流沿东槽上溯, 水动力及水深保持相对稳定, 东槽在 1977–2015 年熵减, 表明东槽向重构平衡的有序方向发展。围垦活动导致浅滩失稳, 系统朝无序化发展, 东滩和西滩在 1940–1977 年熵减, 在 1977–2007 年熵增, 而后在 2007–2015 年熵减, 表明西滩和东滩经历了“自然淤积有序的动态平衡–人类活动如围垦干扰平衡打破, 浅滩失稳呈无序演变–经自适应调整重构新的动态平衡而处于相对稳定的有序发展”的格局转换。

参考文献:

- [1] 李春初. 论河口体系及其自动调整作用——以华南河流为例[J]. 地理学报, 1997, 52(4): 67–74.
Li Chunchu. On the estuarine system and its automatic adjustment[J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(4): 67–74.
- [2] 易小兵, 王世俊, 李春初. 珠江河口界面特征与河口管理理念[J]. 海洋学研究, 2008, 26(4): 86–92.
Yi Xiaobing, Wang Shijun, Li Chunchu. Estuary boundary characteristics of the Pearl River Estuary and their effects on the management idea[J]. Journal of Marine Sciences, 2008, 26(4): 86–92.
- [3] McManus J. Deltaic responses to changes in river regimes[J]. Marine Chemistry, 2002, 79(3/4): 155–170.
- [4] Syvitski J P M. Deltas at risk[J]. Sustainability Science, 2008, 3(1): 23–32.
- [5] Blum M D, Roberts H H. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(7): 488–491.
- [6] Liu Feng, Yuan Lirong, Yang Qingshu, et al. Hydrological responses to the combined influence of diverse human activities in the Pearl River Delta, China[J]. CATENA, 2014, 113: 41–55.
- [7] Giosan L, Syvitski J, Constantinescu S, et al. Climate change: protect the world's deltas[J]. Nature, 2014, 516(7529): 31–33.
- [8] 姚鹏. 人类活动对珠江口伶仃洋年代际动力地貌演变的贡献研究[D]. 广州: 中山大学, 2019.
Yao Peng. Decadal variability of Lingdingyang Bay morphodynamics: the role of human activities[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2019.
- [9] Gao Guandong, Wang Xiaohua, Bao Xianwen. Land reclamation and its impact on tidal dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 151: 285–294.
- [10] Lin Lei, Liu Zhe, Xie Lian, et al. Dynamics governing the response of tidal current along the mouth of Jiaozhou Bay to land reclamation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(4): 2958–2972.
- [11] Wu Ziyin, Saito Y, Zhao Di'neng, et al. Impact of human activities on subaqueous topographic change in Lingding Bay of the Pearl River Estuary, China, during 1955–2013[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 37742.
- [12] 应强, 何杰, 辛文杰. 巨型人工采砂坑对伶仃洋自然演变的影响[J]. 水科学进展, 2019, 30(6): 915–922.
Ying Qiang, He Jie, Xin Wenjie. Influence of giant artificial sand pits on the natural evolution of Lingding Bay[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(6): 915–922.
- [13] Walther R, Schaguene J, Hamm L, et al. Coupled 3D modeling of turbidity maximum dynamics in the Loire Estuary, France[J]. Coastal Engineering Proceedings, 2012, 1(33): 22.

- [14] Van Maren D S, Oost A P, Wang Z B, et al. The effect of land reclamations and sediment extraction on the suspended sediment concentration in the Ems Estuary[J]. *Marine Geology*, 2016, 376: 147–157.
- [15] 吴超羽. 珠江三角洲千年尺度演变的动态平衡及其唯象判据探讨[J]. *海洋学报*, 2018, 40(7): 22–37.
Wu Chaoyu. A preliminary study on the phenomenological relation between morphodynamic equilibrium and geomorphic information entropy in the evolution of the Zhujiang River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(7): 22–37.
- [16] van Wesenbeeck B K. Thresholds and shifts: consequences of habitat modification in salt-marsh pioneer zones[D]. Groningen: University of Groningen, 2007.
- [17] Möllmann C, Folke C, Edwards M, et al. Marine regime shifts around the globe: theory, drivers and impacts[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 370(1659): 20130260.
- [18] van de Koppel J, Gascoigne J C, Theraulaz G et al. Experimental evidence for spatial self-organization and its emergent effects in mussel bed ecosystems[J]. *Science*, 2008, 322(5902): 739–742.
- [19] von Elverfeldt K. System Theory in Geomorphology: Challenges, Epistemological Consequences and Practical Implications[M]. Dordrecht: Springer, 2012: 1–142.
- [20] 李炎. 均衡态: 动力-沉积-地貌系统的跨尺度联系[J]. *海洋学报*, 2018, 40(7): 38–42.
Li Yan. The equilibrium status: a cross-scale linkage for hydrodynamics, sedimentology, and geomorphology[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(7): 38–42.
- [21] 艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. *水土保持学报*, 1987, 1(2): 1–8.
Ai Nanshan. Comentropy in erosional-drainage-system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 1(2): 1–8.
- [22] Tejedor A, Longjas A, Edmonds D A, et al. Entropy and optimality in river deltas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(44): 11651–11656.
- [23] 贾良文, 罗军, 任杰. 珠江口黄茅海拦门沙演变及成因分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 120–127.
Jia Liangwen, Luo Jun, Ren Jie. The analysis of the evolution of a sand bar and its formation in the Huangmao Bay of the Zhujiang Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(5): 120–127.
- [24] 俞丰华, 余顺超, 丁晓英. 珠江河口近30年演变趋势分析[J]. *人民珠江*, 2011, 32(1): 14–17.
Yu Fenghua, Yu Shunchao, Ding Xiaoying. Analysis of evolution trend of Pearl River Estuary in the past 30 years[J]. *Pearl River*, 2011, 32(1): 14–17.
- [25] 李举国, 董兆英, 周丽华. 黄茅海拦门沙演变及回淤分析[R]. 广州: 广东省航道局总工室, 1994: 4.
Li Juguo, Dong Zhaoying, Zhou Lihua. Evolution and sedimentation analysis of barrier sand in Huangmaohai Estuary[R]. Guangzhou: General Engineering Office of Guangdong Provincial Navigation Bureau, 1994: 4.
- [26] 罗军, 张淑雯. 黄茅海二维水动力模拟[J]. *中国水运*, 2014, 14(3): 204–206.
Luo Jun, Zhang Shuwen. Two-dimensional hydrodynamic simulation of Huangmaohai[J]. *China Water Transport*, 2014, 14(3): 204–206.
- [27] Van der Wal D, Pye K. The use of historical bathymetric charts in a GIS to assess morphological change in estuaries[J]. *The Geographical Journal*, 2003, 169(1): 21–31.
- [28] Elias E P L, Cleveringa J, Buijsman M C, et al. Field and model data analysis of sand transport patterns in Texel tidal inlet (The Netherlands)[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(5/6): 505–529.
- [29] 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(1/2): 175–187.
- [30] Zhang Wei, Xu Yang, Hoitink A J F, et al. Morphological change in the Pearl River Delta, China[J]. *Marine Geology*, 2015, 363: 202–219.
- [31] Mei Xuefei, Dai Zhijun, Wei Wen, et al. Secular bathymetric variations of the north channel in the Changjiang (Yangtze) Estuary, China, 1880–2013: causes and effects[J]. *Geomorphology*, 2018, 303: 30–40.
- [32] Xie Dongfeng, Pan Cunhong, Wu Xiuguang, et al. Local human activities overwhelm decreased sediment supply from the Changjiang River: continued rapid accumulation in the Hangzhou Bay-Qiantang Estuary system[J]. *Marine Geology*, 2017, 392: 66–77.
- [33] Burrough P A, McDonnell R A. Principles of Geographical Information Systems[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [34] Dai Zhijun, Liu J T, Wei Wen, et al. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6600.
- [35] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(4): 623–656.
- [36] 丁晓瑛, 许祥向, 余顺超, 等. 基于DEM的黄茅海滩槽演变分析[C]//中国海洋工程学会. 第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2005: 547–551.
Ding Xiaoying, Xu Xiangxiang, Yu Shunchao, et al. Evolution analysis of Huangmao beach trough based on DEM[C]//Chinese Society of Ocean Engineering. Proceedings of the 12th China Coastal Engineering Symposium. Beijing: China Ocean Press, 2005: 547–551.
- [37] 胡煌昊, 徐阳, 官明开, 等. 珠江河口水下三角洲冲淤演变分析[J]. *水道港口*, 2016, 37(6): 593–598.
Hu Huanghao, Xu Yang, Guan Mingkai, et al. Analysis on morphological evolution of underwater delta in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2016, 37(6): 593–598.
- [38] 申其国, 谢凌峰, 解鸣晓, 等. 珠江三角洲河口湾航道整治研究[J]. *水道港口*, 2019, 40(3): 286–292.

- Shen Qiguo, Xie Lingfeng, Xie Mingxiao, et al. Research on channel regulation in Pearl River Delta estuaries[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2019, 40(3): 286–292.
- [39] 何杰, 辛文杰. 崖门出海航道疏浚工程潮流泥沙变化数值模拟[J]. *中国港湾建设*, 2009(3): 1–4.
He Jie, Xin Wenjie. Numerical simulation of tidal current and sediment for dredging project in Yamen Sea Channel[J]. *China Harbour Engineering*, 2009(3): 1–4.
- [40] 陈惠珍. 崖门出海航道整治研究[J]. *中国水运*, 2000(12): 35–36.
Chen Huizhen. Research on regulation of Yamen Channel leading to sea[J]. *China Water Transport*, 2000(12): 35–36.
- [41] Gong Wenping, Jia Liangwen, Shen Jian, et al. Sediment transport in response to changes in river discharge and tidal mixing in a funnel-shaped micro-tidal estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 76: 89–107.
- [42] 严静, 韦惺. 珠江黄茅海河口地貌形态变化及其动力响应[J/OL]. *热带海洋学报*, (2022–06–16)[2022–07–14]. <http://www.jto.ac.cn/CN/10.11978/2022106>.
Yan Jing, Wei Xing. Geomorphological changes and dynamic responses of the Huangmaohai Estuary of the Pearl River Delta[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, (2022–06–16)[2022–07–14]. <http://www.jto.ac.cn/CN/10.11978/2022106>.
- [43] 罗军. 十年至百年尺度黄茅海地形演变及成因研究[D]. 广州: 中山大学, 2010.
Luo Jun. Cause analysis of morphological evolution of Huangmaohai Estuary in the decade to century-scale[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010.
- [44] 贾良文, 文艺. 珠江口黄茅海枯季表层沉积物特性及输移研究[J]. *泥沙研究*, 2013(1): 60–66.
Jia Liangwen, Wen Yi. Study of characteristics and transport pattern of surface sediment during dry seasons in Huangmaohai Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(1): 60–66.
- [45] 赵狄能. 珠江河口三角洲近165年演变及对人类活动响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Zhao Di'eng. Morphological evolution of the Pearl River Delta in the past 165 years and its response to human activities[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [46] 储南洋. 人类活动影响下珠江口伶仃洋滩槽演变研究[D]. 广州: 中山大学, 2020.
Chu Nanyang. The evolution of Lingding Bay channel-shoal system under anthropogenic influence[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2020.

Study on the structural evolution and dynamic balance of the shoal and channel in the Huangmaohai Estuary of the Zhujiang River

Yang Qingshu^{1,2,3,4}, Fu Linxi^{1,2,3,4}, Wei Wen^{1,2,3,4}, Jia Liangwen^{1,2,3,4}, Li Bo^{1,2,3,4},
Wang Heng⁵, Huang Enmao^{1,2,3,4}

(1. *Institute of Estuarine and Coastal Research, School of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*; 2. *State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510275, China*; 3. *Guangdong Provincial Engineering Research Center of Coasts, Islands and Reefs, Guangzhou 510275, China*; 4. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China*; 5. *Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China*)

Abstract: Estuarine bay is a special geomorphological system, which is often characterized with the combination of shoals and channels. Its evolution and shifting balance of shoal-channel structure are not only the frontier hotspots of estuarine and coastal researches, but also the theoretical cornerstone of estuarine management and port waterway construction. Based on the nautical bathymetry data of different historical ages, using geomorphological information entropy and other analytical methods, this paper studies the phylogenetic evolution characteristics and shifting balance mechanism of the shoal-channel structure in Huangmaohai Estuary Bay (HEB), and the main findings include: (1) The geomorphological evolution of HEB has undergone a transition from siltation to erosion during 1940 to 2007. The average annual siltation rate was 1.4 cm/a. From then on, till 2015, the bay had shifted to erosion period and the average annual erosion rate was 1.2 cm/a. (2) The structure of shoal and channel in HEB was converted, and the structure of "three shoals and two channels" was transformed into the structure of "two shoals and one channel" between 2003 and 2007, and the elevation differentiation between shoals and channels tended to

be enlarged due to the impact of reclamation in the shallow coasts and dredging projects in channels. As a result, the shallow shoals became shallower and the channels were deeper. (3) The entropy value of geomorphological information of HEB decreased first and then increased, indicating HEB it changed from the relatively stable mode of slow siltation to the abrupt changing mode, in which the uncertainty of the shoal-channel evolution was induced by human intervention; moreover, the steady states of the shoal and channel are different. The shoals showed higher uncertainty than the deep channel. (4) Human activities disturbed the original steady state of the shoal-channel structure, and the dredging project will enhance the vitality of the East Channel and promote the adaptive reconstruction in the deep channel to evolve in an orderly direction. The West Shoal and the East Shoal have undergone a disturbance balance of human activities such as reclamation, and the shoal instability has shown a disorderly evolution.

Key words: Huangmaohai Estuary; shoal-channel structure evolution; geomorphological information entropy; dynamic equilibrium; estuary