

吴承强,董超,王建强,等. 瓯江口动力地貌演化的水沙环境研究[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(4): 60-70.

WU Chengqiang, DONG Chao, WANG Jianqiang, et al. The geomorphic evolution and water-sediment environment in Oujiang River Estuary[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(4): 60-70.

瓯江口动力地貌演化的水沙环境研究

吴承强¹, 董超², 王建强², 陈选博², 周宇渤², 张朋², 仇建东^{3*}

(1 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005; 2 浙江省水文地质工程地质大队, 宁波 315000;

3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

摘要:瓯江口地处东海与瓯江交汇处,是浙江省温州市沿海产业带核心区,也是温州重要产业聚集区。本文在对瓯江口水文泥沙、地形地貌、沉积环境进行调查与分析的基础上,对河口动力地貌演化及水沙输运特征等进行了研究。结果表明:滩槽动力地貌体系是瓯江口地貌格局的重要组成部分,动力地貌格局是瓯江径流以及河口浪、潮、流等多种动力条件共同作用的结果;海床地形表现为北支“槽冲”、南支“滩淤”为主的分布格局特征。河口输水表现为南支落潮下泄流占优,北支大潮潮流上溯、小潮潮流下泄特征明显,同时径流、潮流共同作用下的潮流不对称现象明显。优势输水输沙作用下的瓯江南口泥沙净输运量为 224~8 876 kg,瓯江北口泥沙净输运量为 20~15 506 kg,底沙运动较为活跃。河口动力地貌与水沙环境是径流、潮流的相对作用、河口人类建设工程及近海环流系统共同塑造的结果。

关键词:瓯江口; 沉积动力; 地貌; 水文泥沙; 输运

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2025.033

0 引言

瓯江河口地处浙江省温州市沿海,是东海与瓯江交汇的典型强潮河口,地理坐标为 27°58'—28°06'N、121°02'—121°14'E。河口区呈喇叭状向海敞开,口外岛屿星罗棋布,形成复杂的水动力环境。瓯江多年平均径流量 469 m³/s,年输沙量约 210 万 t,潮汐属正规半日潮,平均潮差 4.52 m,最大潮差可达 7.17 m,是典型的径流-潮流相互作用型河口^[1]。该区域不仅是温州沿海产业带核心区,更是浙南闽北重要的港口航运和生态敏感区^[2]。

瓯江河口动力地貌研究始于 20 世纪 80 年代。

收稿日期: 2024-02-14

资助项目: 浙江省海岸带重点区综合地质调查(温州重点区)(2018009); 玉环国家级海洋公园综合地质调查项目(2024010); 亚洲合作资金项目“长江三角洲与红河三角洲海洋地质环境与灾害合作研究”

第一作者: 吴承强(1984—),男,博士,工程师,主要从事海洋测绘和海底地貌方面的研究工作。E-mail: wuchengqiang@tio.org.cn

* 通讯作者: 仇建东(1983—),男,博士,正高级工程师,主要从事海洋沉积地质与第四纪地质方面的研究工作。E-mail: jiandongqiu@163.com

已有学者系统研究了浙南淤泥质海岸的泥沙运动特征,指出瓯江口外存在明显的泥沙分异沉积现象,沉积学分析揭示了河口最大浑浊带的形成机制及其对滩槽演化的影响^[3-4]。近年来,随着遥感技术和数值模拟的发展,姚姗姗等^[5]利用多时相卫星影像分析了滩槽演变趋势,发现 2000 年后人类活动已成为地貌演变的重要驱动力。在动力机制研究方面,水动力模型模拟结果表明,瓯江口北支的冲刷主要受潮波变形导致的余流控制,南支淤积与径流输沙和潮汐不对称密切相关^[6]。而蔡家新等^[7]的最新研究则强调了围垦工程对潮滩沉积动力系统的改造作用。

尽管以往研究取得重要进展,但仍存在以下亟待解决的科学问题,如多时空尺度下径流-潮流相互作用对泥沙输运的调控机制尚不明确,人类活动与自然过程对地貌演变的相对贡献缺乏定量评估,河口最大浑浊带的动态变化及其对沉积格局的影响机制需要进一步阐明^[8-9]。本研究基于 2018 年现场观测数据,结合历史地形和沉积资料,重点探讨:①滩槽系统的动力地貌演化过程;②水沙输运的空间分异特征;③自然与人为因素的耦合作用机制。

研究成果将为瓯江口综合治理、航道维护和生态保护提供科学依据, 对类似河口的可持续开发具有借鉴价值。

1 数据获取与研究方法

为全面获取研究区海域水文和泥沙的基本特征, 2018 年 8 月 28—29 日(大潮)和 2018 年 8 月 20—21 日(小潮)在该海域分别对 3 个测站 WB1—WB3 进行定点连续 26 h 的水文泥沙测验(图 1), 各测站

数据包括水深、流速、流向和悬沙浓度等。定点海流流速、流向和水深观测采用 RDI 公司生产的 300 和 600 kHz 的 ADCP 海流仪进行; 同时, 各船配备 1 台直读式海流仪, 对测点上、下盲区进行海流比对测定。悬沙水样采用横式采样器(容积为 1.5 L)采取, 分别在表层、 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ (H 为测站水深)和底层(距离海底 0.5 m)采水。水样用真空泵进行滤膜过滤, 滤膜直径 47 mm, 孔径 $0.45 \mu\text{m}$; 烘干后用电子天平称量悬浮体质量, 计算出各站悬沙浓度。

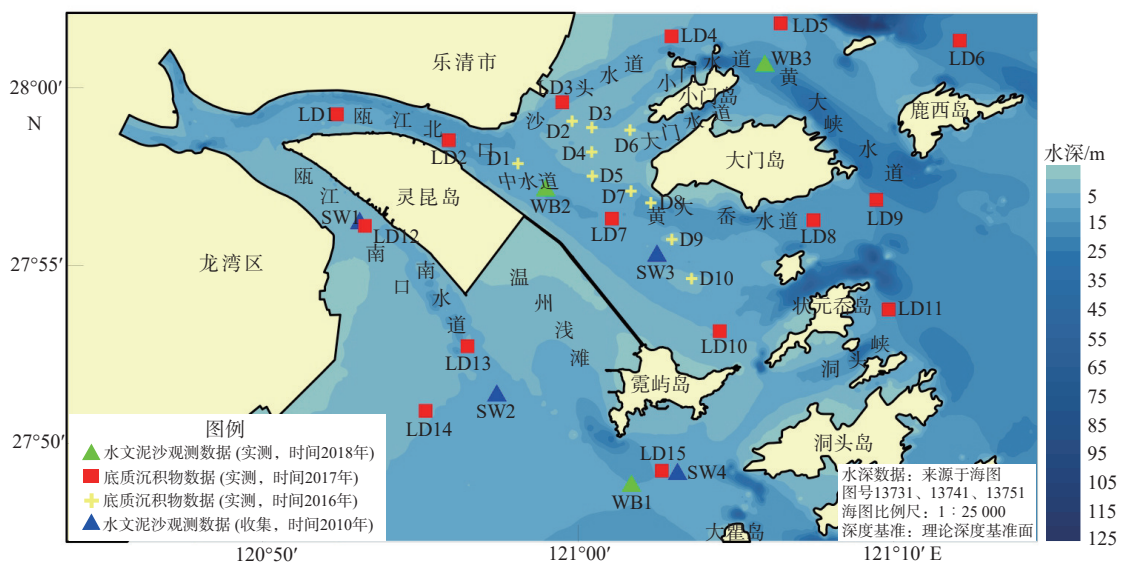


图 1 研究区位置和站位布设

Fig.1 Research area and distribution of the stations

底质沉积物数据来源于中国地质调查局青岛海洋地质研究所 2016 和 2017 年在研究区开展的沉积物调查取样资料, 主要为沉积物粒度参数数据。此外, 收集了研究区水深地形数据资料和 4 个水文泥沙观测站(SW1—SW4)数据资料。SW1—SW4 泥沙观测站数据为 2010 年在研究区获取的水文泥沙观测数据, 包括水深、流速、流向、悬沙浓度及底质粒度参数, 观测时间为 2010 年 10 月 24—25 日(大潮)和 2010 年 10 月 16—17 日(小潮)。

水深地形数据主要来源于正式出版的海图, 包括大门岛附近(图号 13731), 比例尺为 1:2.5 万, 测量时间为 1979、1986、1991、2002、2011 和 2013 年; 洞头岛附近(图号 13751), 比例尺为 1:2.5 万, 测量时间为 1979、1986、1991、2011 和 2013 年; 温州港(图号 13741), 比例尺为 1:2.5 万, 测量时间为 1979、1986、1991、2002、2011 和 2013 年。海图资料经数字化后, 统一坐标系统(WGS1984)和水深基准(理

论深度基准面), 利用 GIS 软件, 采用克里金插值方法, 建立了研究区海域各年度的水深地形数字高程模型(DEM)。通过 DEM 数据, 可形成水深地形等值线分布图, 也可对不同年份的数据进行对比计算, 计算出各年份间的地形冲淤量、冲淤速率等。

2 河口水下动力地貌及其演化

通过对海图资料再处理和分析, 利用水深地形数据形成 DEM 数据, 对海岸潮滩地形地势进行分析, 结合沉积物粒度数据分析了海岸地貌沉积动力环境。利用不同年份 0 m 线的分布及变化, 圈定了河口潮流沙脊的分布及变化。

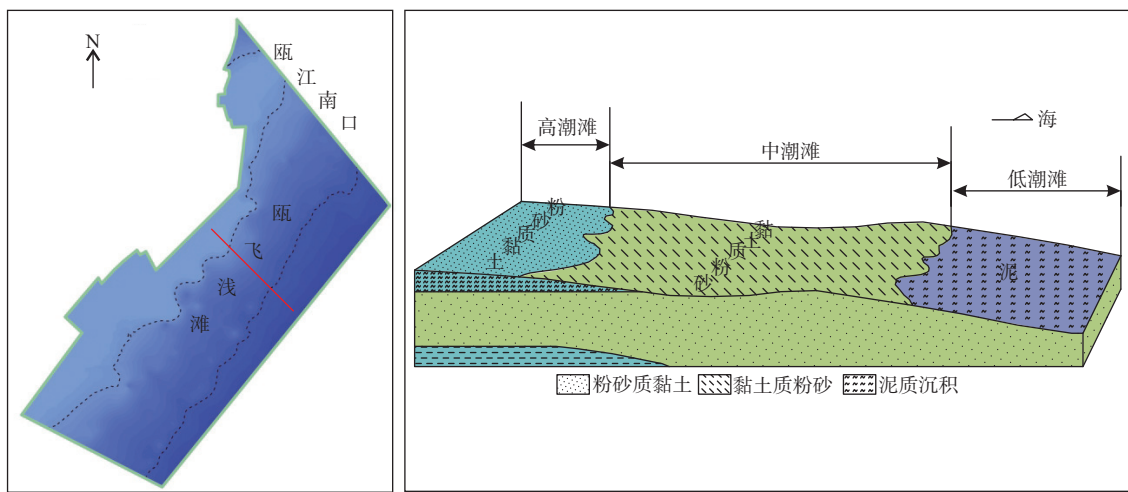
滩槽动力地貌体系是瓯江口地貌格局的重要组成部分, 该区域是在瓯江径流以及河口浪、潮、流等多种动力条件共同作用的结果, 瓯江携带的泥沙出瓯江口后, 受开敞性地形及大门岛、霓屿岛、洞头

岛等岛屿分布影响,随波流的作用,泥沙在岛间进行输送和堆积,在岛屿近岸多为潮滩堆积地貌,在口外海滨地段形成一系列的滩槽地貌体系。自近岸向外海主要发育有温州浅滩、瓯飞浅滩海岸粉砂淤泥质潮滩以及三角沙、中沙、重山沙等潮流沙脊地貌;同时,受潮流冲刷作用形成沙头水道、中水道、大、小门水道、黄大岙水道、重山水道、黄大岙水道、状元岙水道以及南水道等冲刷地貌。

2.1 潮滩

潮滩地貌属于陆海地貌过渡带体系,是瓯江

河口潮间带地貌发育的主要类型,分布在河口水深5 m以浅至岸边区域,规模较大的为瓯飞浅滩和温州浅滩。潮滩宽度一般为4~6 km,岸坡较为平缓,平均坡度介于1/700~1/1200(图2)。从沉积环境来看,潮滩具有明显的地貌相带分异,高潮滩以粉砂质黏土为主,中潮滩以黏土质粉砂为主,低潮滩以浮泥态泥质沉积物为主;黏土细颗粒中值粒径 $<0.005\text{ mm}$,粉砂中值粒径多 $<0.02\text{ mm}$,潮滩粒径分选较差,物源主要为河流携带的细颗粒物质与外海潮流输入的悬浮泥沙在河口交汇堆积形成。



修改自文献 [3]

图2 瓯江口潮流浅滩地貌相带示意图

Fig.2 The tidal shoal landform of Oujiang River Estuary

2.2 潮流沙脊

瓯江口的口外海滨地段分布有一系列的潮成沙体,主要有三角沙(后被分割为穿布沙和高沙)、中沙与重山沙嘴,其规模大小不等,与潮流冲刷沟槽交替分布,形成一定规模的潮流脊系,主体部分为0 m线所围成的区域。

(1)三角沙 位于瓯江北口与大、小门岛之间,规模较大,形态呈三角状,似马蹄形,低潮时浅滩露出水面,沙脊以靠近河口处为顶点,沿NE、SE两个方向延展,沉积物组成主要以中细砂为主,中值粒径介于 $0.35\sim 0.42\text{ mm}$;砂的含量一般 $>90\%$ (表1);从沙体的面积变化来看,三角沙自1979年不断扩展,到近期又有一定程度的萎缩;表现为该沙脊靠河口处受到冲刷,地形加深,0 m线范围收缩,潮流从沙脊中部切割,将原先完整的三角沙分割为穿布沙和高沙2个单元。

(2)中沙与重山沙嘴 位于黄大岙水道南侧,规模较小;其中,中沙自1979年以来由一系列较小规模的潮成沙体逐渐融合形成,主要组成物质为细砂,粒径约为 0.30 mm ,砂的含量 $>90\%$;其东南轴长 2.6 km ,西北轴长 2.3 km 。近年来受灵霓大堤建成的影响,中水道有所收窄,潮流主轴线向北摆动,流速变大,中沙浅滩受到冲刷,规模变小,到2011年,0 m线持续向重山沙嘴延伸,中沙南端与重山沙嘴融合,重山沙嘴规模有所扩大,并持续发育(图3)。

表1 瓯江口潮流沙脊历年面积变化统计

Table 1 Statistics on the changes in the area of tidal sand ridges at the Oujiang River Estuary over the years

	km ²			
砂体	1979年	1986年	2002年	2011年
三角沙	9.36	10.99	12.86	10.14
中沙	1.16	1.34	1.64	0.58
重山沙嘴	0.89	0.64	1.59	1.54

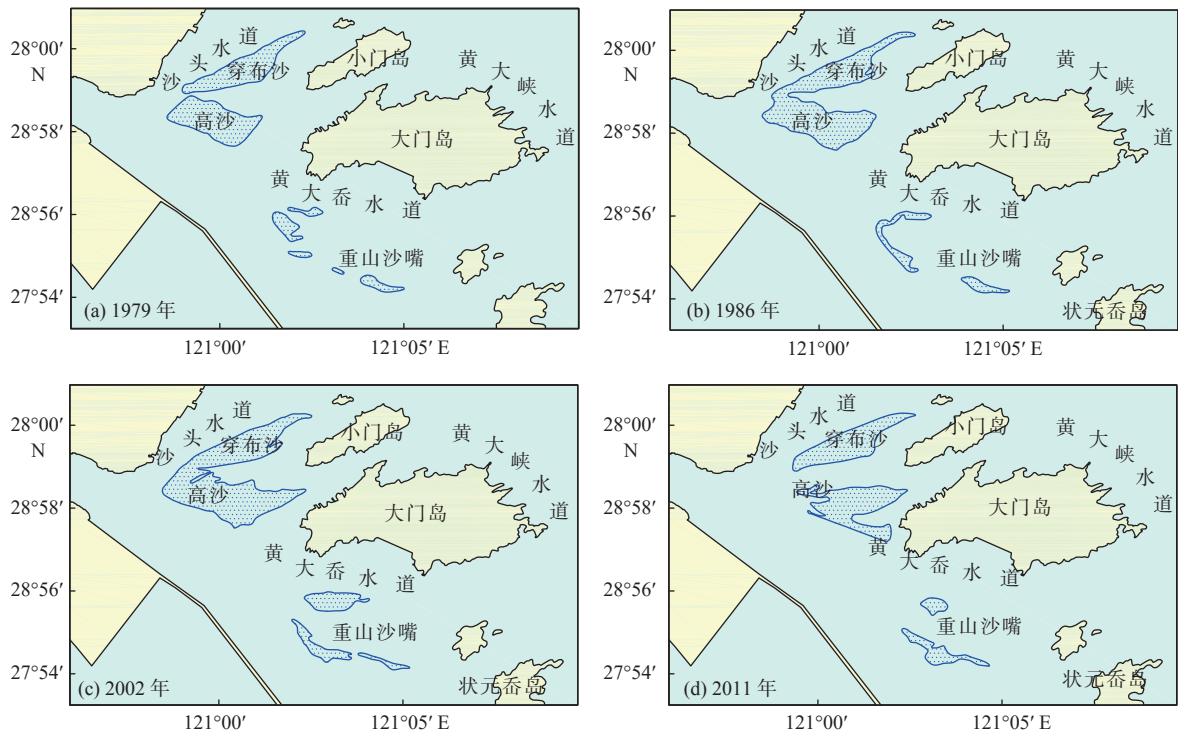


图 3 1979—2011 年瓯江口潮流沙脊发育及演化

Fig.3 Evolution of sand ridges in the Oujiang River Estuary from 1979 to 2011

2.3 潮流冲刷深槽

海底海蚀地貌主要为潮流冲刷的水道,是在潮流动力长期作用下形成的条带状沟槽,主要分布于岛间、岬角对峙的湾口和河口。瓯江口岛屿较多且呈零星分布,形成了岛屿与岛屿之间、岛屿与大陆之间众多的潮流冲刷沟槽;深的沟槽下切深度可达 50 m 以上,较浅的沟槽下切水深也约为 20 m,剖面特征一般呈现两侧陡峭,海床底部凹凸不平,形态呈“U”字形或“V”字形;沉积物厚度较薄,一般为砂、砾质沉积物,多数地段基岩裸露。

2.4 河口海底地形演化特征

2005—2013 年,瓯江口内段基本呈“北冲南淤”的格局,河道冲淤速率基本保持在 ± 0.1 m/a,口内段呈冲淤稳定趋势;口外滨海北支“槽冲”、南支“滩淤”为主的格局较为明显;北支冲刷面积进一步扩大,表现为出口门后冲刷区自中水道分别接沙头水道以带状展布沿三角沙边缘向 NE 向延伸,接黄大岙水道沿大门岛南侧方向片状分布,冲刷幅度较上一时间段有所减弱,基本介于 $0.1 \sim 0.25$ m/a,只有在黄大岙水道中心的局部冲刷幅度 > 0.5 m/a,整体看呈稳定—微侵蚀状态。口外瓯飞浅滩和温州浅滩淤积更为明显,尤其是瓯飞滩自 2005 年后

继续淤涨,靠陆侧 > 0.25 m/a;而南水道受温州浅滩一期围垦工程建设影响,局部动力条件改变,围海工程建设后南口水道平均流速有所增大,出现冲刷,冲刷速率达到 $0.25 \sim 0.5$ m/a。外侧的崎头洋海域则保持了较为稳定的冲刷趋势,平均冲刷速率 < 0.1 m/a^[10-11](图 4)。

3 河口水沙输运特征

3.1 潮流动力特征

瓯江口潮流动力特征重点选取 WB1、WB2、WB3 三个测站观测结果来反映。

依各潮汛而论,大潮汛时,各站均表现为垂向落潮平均流速大于涨潮平均流速, WB1—WB3 测站大潮垂向平均涨潮流速分别为 42.37、55.46、54.08 cm/s,垂向平均落潮流速分别为 55.47、59.24、57.25 cm/s。小潮汛时, WB1、WB3 站位呈现落潮流速强于涨潮流速,只有 WB2 测站表现为涨潮流速强于落潮流速,小潮垂向平均涨潮流速分别为 22.18、38.62、27.57 cm/s,垂向平均落潮流速分别为 30.77、35.51、37.71 cm/s(表 2)。

从潮流的平面变化特征来看,不论从平均流速或最大流速来看,瓯江口南支的 WB1 站流速较小,

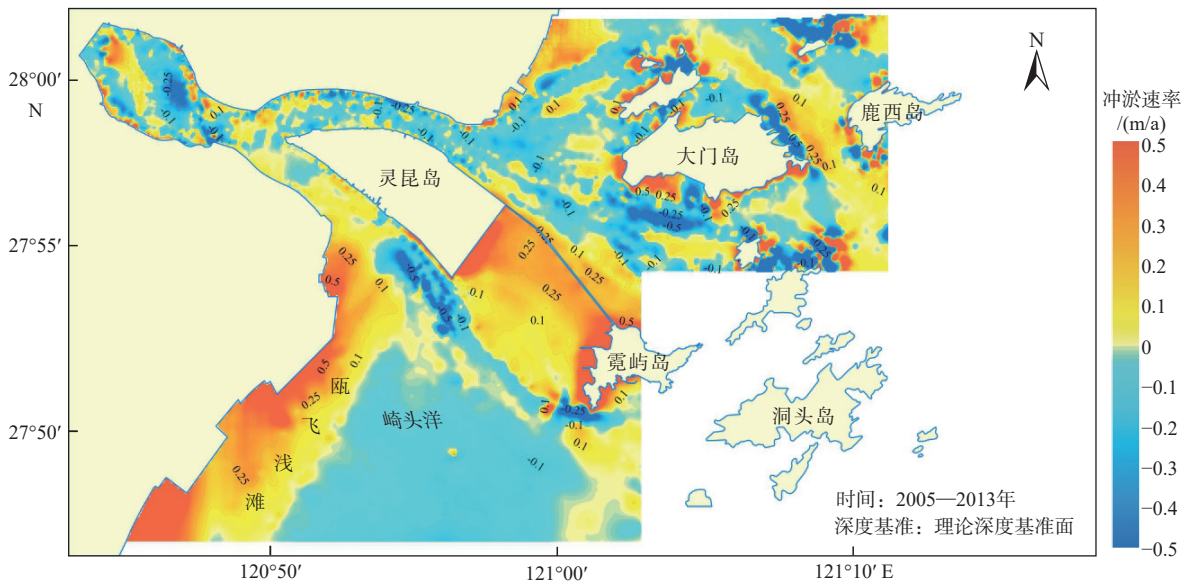


图4 2005—2013年瓯江口海床冲淤变化

Fig.4 Changes in scouring and silting in the Oujiang River Estuary from 2005 to 2013

表2 小潮、大潮期间各定点测站平均流速、流向的统计

Table 2 Statistics of the average flow velocity and direction during the neap tide and spring tide

潮汛	站位	涨落潮	流速/(cm/s); 流向/(°)							
			表层		中层		底层		垂向平均	
			流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向
大潮	WB1	涨潮	50.89	318	46.23	303	61.49	303	42.37	339
		落潮	55.35	141	48.87	126	63.40	133	55.47	121
	WB2	涨潮	75.56	302	66.04	294	62.57	291	55.46	298
		落潮	83.95	116	70.29	117	62.23	117	59.24	119
	WB3	涨潮	57.82	317	65.36	314	46.39	325	54.08	315
		落潮	68.44	139	48.57	139	49.52	147	57.25	136
小潮	WB1	涨潮	28.67	304	23.26	298	20.90	299	22.18	304
		落潮	27.48	124	28.10	125	23.99	127	30.77	96
	WB2	涨潮	43.71	310	36.76	299	29.93	296	38.62	287
		落潮	49.09	124	37.60	119	24.43	128	35.51	142
	WB3	涨潮	30.62	323	29.75	304	30.68	295	27.57	295
		落潮	47.43	143	36.28	133	36.90	151	37.71	148

瓯江口北侧海域的 WB2、WB3 测站流速较大,其中,口门处 WB2 测站流速又高于 WB3 测站。从垂向分布上看,各测站的最大流速一般出现在表层,局部时段会受到底部横向环流以及回流的影响,造成流速突变。总体而言,流速值随深度而减小。

3.2 断面单宽潮水输运

瓯江口咸淡水交互作用是河口滩槽地貌体系形成、发展与演化的重要因素,尤其此区域属于强潮河口区,潮流作用明显,是河口输水、输沙的关键要素,通过优势流指数可以较好地反映河口涨落潮流相互作用关系,体现了向陆和向海水流的相互作

用强度,以便更好地分析潮流作用的内在动力机制。优势流指数(R_Q)是一个潮周期里落潮量与整个潮期潮量的比值^[12-13],即:

$$R_Q = \frac{Q_e}{Q_f + Q_e} \quad (1)$$

式中: Q_e 、 Q_f 分别为落潮流和涨潮流的单宽通量。

R_Q 的计算值 > 0.5 , 表示落潮通量占优势,反之则涨潮通量占优势。

计算结果表明,瓯江南口大潮优势流指数介于 0.496~0.544,小潮优势流指数为 0.424~0.541,落潮下泄流占优,尤其是越靠近河口其优势越明显, < 0.5 的指数均在远离河口的霓屿岛岛南侧海域,

从潮周期单宽输水量来看,大潮单宽输水量远大于小潮;从空间分布看,河口输水量较口外海域输水量小。瓯江北口优势流指数大潮为 0.401~0.487,

小潮为 0.411~0.576,大潮潮流上溯、小潮潮流下泄特征明显(表 3),这种现象对河口内外的泥沙运动和交换起到了重要作用。

表 3 研究区各站位潮水输运特征

Table 3 Tidal transport characteristics of each station

区域	测站	潮次	落潮输水		涨潮输水		净输水		优势流指数
			输水量	方向	输水量	方向	输水量	方向	
			输水量/m ³ ; 流向/(°)						
南口	WB1	大潮	89 339	116	90 895	339	-1 555	46	0.496
		小潮	45 231	97	38 371	336	6 860	48	0.541
	SW1	大潮	82 657	129	75 221	296	7 436	213	0.524
		小潮	44 769	137	41 307	288	3 462	217	0.520
	SW2	大潮	68 255	127	64 417	311	3 839	35	0.514
		小潮	39 063	136	38 634	296	429	216	0.503
	SW4	大潮	118 303	112	99 219	286	19 084	149	0.544
		小潮	52 810	100	71 725	284	-18 915	310	0.424
北口	WB2	大潮	92 446	120	97 312	356	-4 866	86	0.487
		小潮	54 497	141	78 137	285	-23 640	237	0.411
	WB3	大潮	56 636	93	84 691	353	-28 056	198	0.401
		小潮	95 958	150	70 737	292	25 222	189	0.576
	SW3	大潮	73 481	101	82 937	270	-9 456	238	0.470
		小潮	47 416	102	46 081	268	1 335	210	0.507

3.3 断面单宽悬沙输运

优势沙指数(R_s)与优势流相似,用落潮单宽输沙量除以涨、落潮单宽输沙量之和的百分比表示。

$$R_s = \frac{Q_{es}}{Q_{fs} + Q_{es}} \quad (2)$$

式中: Q_{es} 、 Q_{fs} 分别为落潮单宽输沙量和涨潮单宽输沙量。

R_s 的计算值 >0.5 , 表示落潮输沙占优势, 反之则涨潮输沙占优势。

单宽输沙量(Q_s)计算采用以下公式:

$$Q_s = L \times T \times \int_0^H \rho_z V_z dz \quad (3)$$

式中: Q_s 为单宽输沙量值, kg;

L 为单位宽度, 取 1 m;

T 为输沙时间段, 涨潮输沙量取涨潮期时段, 落潮输沙量取落潮期时段;

H 为水深, m;

ρ_z 为含沙量, kg/m³;

V_z 为流速数值, m/s。

采用上式分别计算出单宽输沙量的北分量和东分量后, 采用矢量合成法即可计算出单宽输沙量

数值及其方向。单宽涨潮输沙通量减去单宽落潮输沙通量为单宽净输沙通量。

各测站的单宽优势输沙计算结果显示, 涨落潮单宽输沙优势与单宽输水优势在大潮汛时保持了较好的一致性, 即受优势流影响, 相应的优势输沙也较为明显, 表明大潮期潮控输沙作用强烈; 小潮汛时个别站位单宽输沙优势与潮单宽输水优势出现差异, 主要表现在 WB1、WB3、SW2 和 SW3 站位, 表明径流、潮流共同作用下的潮流不对称现象明显, 尤其是涨落潮历时的差异、涨落潮流速的不对称造成泥沙沉降滞后效应显著。

瓯江南口大潮优势输沙指数为 0.490~0.581, 以落潮下泄为主, 同样是靠近河口区域趋势较明显; 小潮汛优势输沙指数为 0.402~0.480, 出现了泥沙的回溯, 推测可能是涨潮上溯流强于径流下泄作用的结果; 瓯江北口大、小潮汛优势输沙指数均 <0.5 , 泥沙出现不同程度向河口、湾内的回溯, 可见该区域涨潮流优势输沙明显, 泥沙的回溯有利于河口最大浑浊带的形成, 是河口浅滩淤积的重要因素。从泥沙净输运量看, 大超期净输沙量大于小潮期, 尤其是瓯江北口, 越靠近河口区域, 泥沙净输运随潮汛变化约剧烈(图 5), 总体看, 瓯江南口泥沙净输运

量为 224~8 876 kg, 净输运量最大值为 SW1 站大潮汛, 最小值为 WB1 站小潮汛; 瓯江北口泥沙净输

运量为 20~15 506 kg, 净输运量最大值为 WB11 站大潮汛, 最小值为 SW3 站小潮汛。

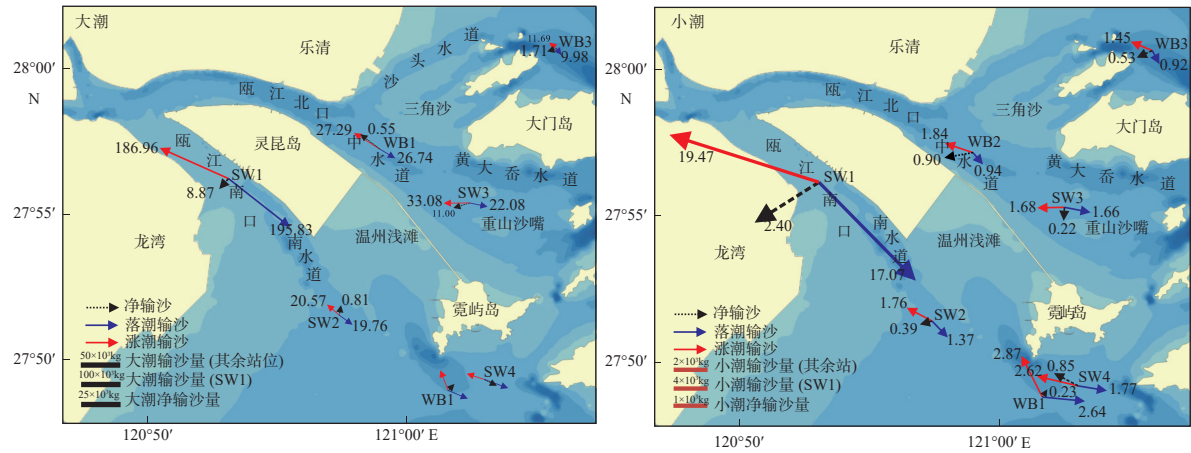


图 5 瓯江口海域单宽泥沙净输运趋势

Fig.5 Sediment transport trend in the Oujiang River Estuary

3.4 底沙输运

研究区滩槽地貌变化除受到上述输水、输沙影响外, 也与区域底沙搬运和沉积密切相关^[14]。利用张瑞瑾^[15]和窦国仁^[16]的泥沙起动流速计算公式, 得到了底沙起动对潮流作用下的响应(表 3)。结果表明, 本区域绝大多数站位底沙粒径介于 0.004~0.009 mm, 颗粒之间黏结力较大, 所需的泥沙起动流速也较大, 细颗粒泥沙起动普遍需要达到 1 m/s 以上的流速, 而且泥沙粒径越小, 所需的起动流速愈大^[17-18]。起动流速相对较小的泥沙主要集中在瓯江北口的河口潮成沙脊区域, 这里泥沙粒径介于 0.116~0.426 mm, 属粉砂粒级, 泥沙所需的起动流速 < 0.70 m/s(表 4), 据 WB2 站潮流观测结果, 在整个大潮汛内, 底沙活动性可以达到 58%, 在小潮汛泥沙活动亦可达到 20% 以上。

4 讨论

4.1 水沙输运影响因素

河口径、潮流的相对作用是河口水沙输运的重要条件。瓯江口盐淡水混合强烈, 瓯江年入海径流量不大, 多年平均径流量为 469 m³/s, 一个潮周期内的涨潮水量可以达到 35 405 m³/s, 当涨潮水量和径流量比值 > 40 时^[19], 就属于盐淡水强混合型河口; 在瓯江河口此值高达 75, 因而, 该区域属于盐淡水强混合型河口区。强烈的盐淡水混合一方面使得

表 4 研究区各站位泥沙起动流速

Table 4 Sediment incipient velocity in each station in the study area

站位	粒径/mm	起动流速/(m/s)	
		张瑞瑾公式 ^[15]	窦国仁公式 ^[16]
LD1	0.005	2.01	2.07
LD2	0.005	2.25	2.37
LD3	0.390	0.48	0.55
LD4	0.009	1.30	1.32
LD5	0.006	1.96	2.03
LD6	0.005	2.82	2.98
LD7	0.005	2.02	2.10
LD8	0.261	0.50	0.57
LD9	0.008	2.04	2.16
LD10	0.006	1.62	1.63
LD11	0.006	2.28	2.41
LD12	0.007	1.30	1.27
LD13	0.116	0.48	0.48
LD14	0.006	1.57	1.56
LD15	0.005	2.08	2.17
D1	0.349	0.47	0.51
D2	0.358	0.42	0.40
D3	0.361	0.43	0.43
D4	0.349	0.40	0.37
D5	0.351	0.43	0.43
D6	0.424	0.44	0.44
D7	0.365	0.46	0.50
D8	0.382	0.54	0.69
D9	0.303	0.41	0.38
D10	0.319	0.40	0.38
SW1	0.004	1.82	1.81
SW2	0.003	2.26	2.29
SW3	0.133	0.44	0.43
SW4	0.004	2.51	2.61

河口水沙交换频繁, 另一发面有利于河口细颗粒泥沙絮凝, 絮凝沉降造成泥沙在口门富集, 形成河口最大浑浊带。河口最大浑浊带是河口泥沙来源多样性的重要反映, 而河口泥沙来源的多样性是形成水沙输运格局的直接因素。

最大浑浊带的位置和强度与径流有关^[20-21], 其位置随径流强度的变化而变化, 径流的稀释作用对于最大浑浊带泥沙量变化起到关键作用。河口入海泥沙通量与年平均径流量具有高度相关性, 通常高径流量年份其入海泥沙通量也高, 相反, 较低的

年平均径流量对应入海泥沙通量较低(图 6)。此外, 潮流动力环境对于瓯江口河口最大浑浊带的变化具有不可忽视作用。瓯江口潮差大, 潮流动力强, 据统计, 河口区多年平均潮差可达 4 m 以上, 最大潮流流速 > 2.5 m/s。强潮作用带来的是高频率的河口水沙交换, 径潮流优势作用的此消彼长在河口形成较为明显的顶托效应是河口泥沙高浑浊带长期维持的重要因素。河口最大浑浊带的形成是瓯江口水沙运动的重要特征, 是河口泥沙输运、冲淤环境变化的重要指向。

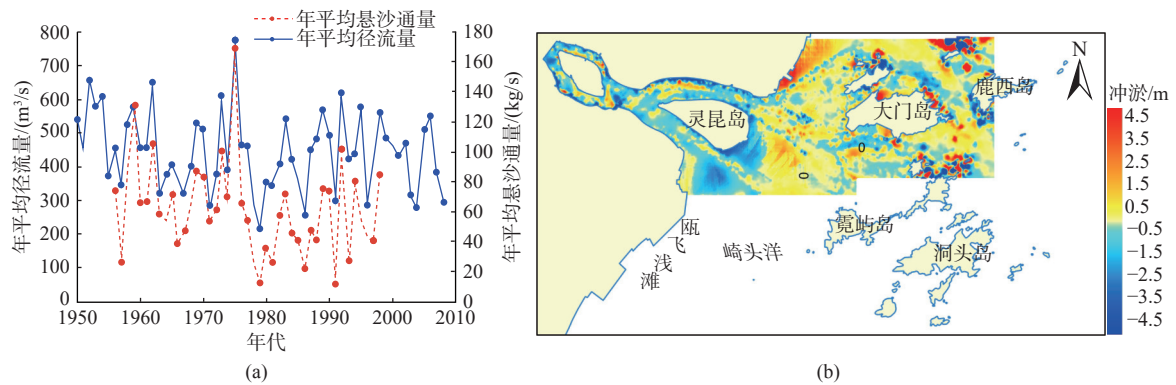


图 6 瓯江入海流量和泥沙通量变化^[22] (a) 及 1988—2002 年瓯江口海床冲淤变化 (b)

Fig.6 Inflow and sediment flux changes of the Oujian River^[22] (a), and the sediment flux and bed erosion/deposition in the Oujian River Estuary (b) from 1988 to 2002

河口人类建设工程及港口开发活动间接影响着水沙输运趋势。2002 年之前, 瓯江流域的开发利用主要为修建水库与水电站以及航道整治工程, 人类活动强度较小, 瓯江北口外侧地形主要以缓慢淤积为主(图 6), 这一时期淤积区面积远远大于冲刷区面积, 淤积区呈面状沿北支河道展布。2002 年之后, 瓯江口近岸海域先后完成了瓯飞浅滩围垦、温州浅滩一期等各类大小围垦工程; 为进一步改善北支航道淤浅问题, 疏浚拓宽了中水道—黄大岙航道。大量工程的建设, 对瓯江河口内的冲淤演变有着或多或少、直接或间接的影响, 最为明显的就是地形冲淤状态由以前的缓慢淤积向侵蚀为主状态的转变(图 4)。

近海环流系统共同参与了河口水沙输运、交换过程。浙闽沿岸流是瓯江河口近海重要环流系统。其特点是盐度低、水平梯度和年变幅大^[22-24], 流速夏强冬弱, 路径随季节变化, 是典型的季风环流。冬季, 受强劲的东北风影响, 沿岸流向南势力很强, 长江、钱塘江等河流携带的大量泥沙在沿岸流作用下向南输送, 进入温州沿海海域; 其携带的长江口外泥沙的南下扩散是本区域海域地貌的重要物质

来源。台湾暖流作为东海环流的重要组成部分^[25-27], 夏季流经浙闽近海陆架, 将浙江南部及台湾海峡泥沙向北输运, 部分泥沙在温州沿海发生堆积, 这些物质在波浪、潮流水动力条件作用下进行再分配、发生分异沉积, 对河口海岸地貌进行重塑。

4.2 治理建议

基于瓯江口地貌变化和河口水文环境的研究结果, 在制定治理建议时, 需综合考虑地貌演变、水沙输运特征以及人类活动影响等多方面因素^[28-30]。从保护和优化现有地貌、调控水沙运动、减轻人类活动负面影响等角度出发, 包括:

(1) 优化潮流浅滩利用与保护 瓯江口的温州浅滩和瓯飞浅滩等潮流浅滩面积较大, 在开发时应遵循生态原则, 合理规划围垦和建设项目。比如, 可划分出一定范围的生态保护区, 保护高潮滩的粉砂质黏土、中潮滩的黏土质粉砂以及低潮滩的浮泥态泥质沉积物等不同地貌相带, 维护其生态功能和生物多样性。对于开发区域, 采用生态型围垦技术, 如建设生态海堤, 既满足开发需求, 又能减少对浅滩地貌和生态环境的破坏。

(2)平衡潮流沙脊冲淤 针对三角沙、中沙和重山沙嘴等潮流沙脊,密切监测其面积和形态变化。当沙脊出现过度冲刷或淤积时,采取相应措施。如在冲刷严重区域,可考虑投放人工鱼礁或设置丁坝、顺坝等工程设施,改变水流流向和流速,减缓冲刷速度,促进泥沙淤积;对于淤积过度影响航道和生态的区域,合理开展疏浚工程,但要注意控制疏浚量和范围,避免对周边环境造成二次破坏。

(3)合理规划潮流冲刷深槽 潮流冲刷深槽是重要的航道资源,但部分区域存在冲淤不稳定问题。在规划航道时,充分考虑深槽的稳定性和演变趋势,避免在不稳定区域建设永久性设施。对于易冲刷的深槽边缘,采取加固措施,如铺设护岸材料,防止岸坡坍塌。同时,合理安排船舶航行路线和密度,减少船舶航行对深槽底部沉积物的扰动,维持深槽的稳定性。

(4)调控河口水沙输运 瓯江口盐淡水混合强烈,水沙交换频繁。通过建设水利工程,如在河口上游合适位置修建水库,调节瓯江的径流量和输沙量。在洪水期拦蓄部分泥沙,减少下游河道和河口的泥沙淤积;在枯水期适当放水,增强水流对河口的冲刷能力,维持河口的水动力平衡。利用潮汐发电工程,合理利用潮流动力,减少潮流对河口地貌的不利冲刷,同时也能实现能源的综合利用。

(5)减轻人类活动负面影响 2000年以来,围垦和港口建设等人类活动对瓯江口地貌和水沙环境影响较大。对于已建工程,进行环境影响后评估,对造成不利影响的部分进行整改。如围垦工程导致局部水流不畅和泥沙淤积加剧的区域,可通过开挖人工水道或调整围垦边界等方式,改善水流条件。在未来的工程规划中,严格进行环境影响评价,充分论证工程对水沙输运、地貌演变和生态环境的影响,确保工程建设的科学性和可持续性。

5 结论

(1)滩槽动力地貌体系是瓯江口地貌格局的重要组成部分。自近岸向外海主要发育有温州浅滩、瓯飞浅滩海岸粉砂淤泥质潮滩以及三角沙、中沙、重山沙等潮流沙脊地貌;同时受潮流冲刷形成沙头水道、中水道、大、小门水道、黄大岙水道、重山水道、黄大峡水道、状元岙水道以及南水道等冲刷地貌。2005—2013年瓯江口内段基本呈“北冲南淤”的格局。河道冲淤速率基本保持在 ± 0.1 m/a左右,

口内段呈冲淤稳定趋势;口外滨海呈北支“槽冲”、南支“滩淤”为主的分布格局特征,其中,淤积幅度可达0.25 m/a以上,冲刷速率介于0.25~0.5 m/a。

(2)从潮流的平面变化特征来看,瓯江口南支的流速小于瓯江口北支流速度;垂向上,流速值随深度而减小;整体来看,各站落潮平均流速大于涨潮平均流速。瓯江南口表现为落潮下泄流占优,瓯江北口大潮潮流上溯、小潮潮流下泄特征明显。受优势流影响,大潮期潮控输沙作用强烈;小潮汛期个别站位单宽输沙优势与潮单宽输水优势出现差异,表明径流、潮流共同作用下的潮流不对称现象明显,尤其是涨、落潮历时的差异、张落潮流速的不对称造成泥沙沉降滞后效应明显。

(3)河口径、潮流的相对作用是河口水沙输运的重要条件。河口最大浑浊带是形成水沙输运格局的直接因素,河口人类建设工程及港口开发活动间接影响着水沙输运趋势。浙闽沿岸流及台湾暖流季节性参与河口水沙交换过程,同时是河口泥沙物质的重要来源之一。

参考文献:

- [1] 周春煦. 瓯江河口及温州浅滩冲淤演变分析[J]. *水运工程*, 2018(5): 54-59.
ZHOU C X. Evolution of Oujiang Estuary and Wenzhou shoal[J]. *Port and Waterway Engineering*, 2018(5): 54-59.
- [2] 张敏, 时连强, 郭俊丽, 等. 浙江省沿海砾石滩地形地貌特征与发育模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2025, 45(2): 55-67.
ZHANG M, SHI L Q, GUO J L, et al. Topographic and geomorphological characteristics and development pattern of gravel beaches along the coast of Zhejiang Province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2025, 45(2): 55-67.
- [3] 曹沛奎, 董永发. 浙南淤泥质海岸冲淤变化和泥沙运动[J]. *地理研究*, 1984, 3(3): 53-63.
CAO P K, DONG Y F. Variation of erosion and siltation and sedimentation of the muddy coast in the southern Zhejiang Province[J]. *Geographical Research*, 1984, 3(3): 53-63.
- [4] 徐海, 王憬, 周鸿权. 瓯江口外潮汐通道区滩槽冲淤演变分析及调整机制的探讨[J]. *海洋学研究*, 2017, 35(2): 33-43.
XU H, WANG J, ZHOU H Q. Preliminary study on the mechanism of the erosion-deposition adjustment in the tidal inlet out of the Oujiang Estuary[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2017, 35(2): 33-43.
- [5] 姚姗姗, 李寿千, 刘怀湘, 等. 瓯江口外海区滩槽演变及主因分析[J]. *水运工程*, 2010(6): 120-126.
YAO S S, LI S Q, LIU H X, et al. Experimental study on effects of waterway regulation structures on flood capacity of river[J]. *Port and Waterway Engineering*, 2010(6): 120-126.
- [6] 单慧洁, 张钊, 汪一航, 等. 温州鳌江近海建设工程环境影响

- 潮汐潮流数值模拟 [J]. *海洋通报*, 2014, 33(3): 250-258.
- SHAN H J, ZHANG Z, WANG Y H, et al. The construction project environmental impact of numerical simulation of tide and tidal current in Wenzhou Aojiang offshore[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(3): 250-258.
- [7] 蔡家新, 潘国富, 陈培雄. 围海工程前后瓯飞滩冲淤变化特征及动力机制分析 [J]. *海洋学研究*, 2021, 39(3): 63-71.
- CAI J X, PAN G F, CHEN P X. Analysis of the characteristics and dynamic mechanism of scouring and silting changes in Oufei tidal flat before and after the reclamation project[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2021, 39(3): 63-71.
- [8] 莫思濠, 梁泓樾, 王璞, 等. 强人类活动下伶仃洋河口湾沉积地貌格局演化规律 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(5): 85-94.
- MO S H, LIANG H Y, WANG P, et al. Evolution of sedimentology and geomorphology in the Lingding Bay under anthropogenic impact[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(5): 85-94.
- [9] 李炎, 陈一宁. 基于能量耗散视角的红树林海岸沉积地貌学 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(6): 25-33.
- LI Y, CHEN Y N. Sedimentary geomorphology of mangrove coasts in perspective of energy dissipation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(6): 25-33.
- [10] 季荣耀, 陆永军, 詹小磊等. 伶仃洋茅洲河口动力地貌演变过程 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(6): 781-788.
- JI R Y, LU Y J, ZHAN X L, et al. Study on the morphodynamic evolution processes in the Maozhou estuary of the Lingding Bay[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(6): 781-788.
- [11] 陈益, 戴志军, 庞文鸿, 等. 北部湾大风江河口沙嘴动态变化过程 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2025, 45(2): 43-54.
- CHEN Y, DAI Z J, PANG W H, et al. Dynamic variation of sand spit in the Dafeng River estuary, Beibu Gulf[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2025, 45(2): 43-54.
- [12] 方正松, 闵凤阳, 张志林, 等. 长江口南支分流分沙比观测与分析 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 2009, 45(3): 416-423.
- WAN Z S, MIN F Y, ZHANG Z L, et al. Observations and analyses of the water and sediment discharge ratios in the southern branch, Changjiang Estuary[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2009, 45(3): 416-423.
- [13] 何其江, 沈爱斯, 刘刚, 等. 西沙群岛宣德环礁水下沙洲动力地貌特征及其成因机制 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(1): 1-12.
- HE Q J, SHEN A S, LIU G, et al. Morphodynamic characteristics and genetic mechanism of the submarine sandbanks in Xuande Atoll, Xisha Islands[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(1): 1-12.
- [14] 赵建春, 李九发, 李占海, 等. 长江口南汇嘴潮滩短期冲淤演变及其动力机制研究 [J]. *海洋学报*, 2009, 31(4): 103-111.
- ZHAO J C, LI J F, LI Z H, et al. Researches on characteristics and dynamic mechanism of short-term scouring and silting changes of the tidal flat on Nanhui Spit in the Changjiang Estuary in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(4): 103-111.
- [15] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 62-82.
- ZHANG R J. *Mechanics of River and Sediment Transport*[M]. Beijing: China Water and Power Press, 1998: 62-82.
- [16] 窦国仁. 再论泥沙起动流速 [J]. *泥沙研究*, 1999(6): 1-9.
- DOU G R. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. *Journal of Sediment Research*, 1999(6): 1-9.
- [17] 张俊勇, 吴华林, 陈立. 长江口北槽泥沙起动流速研究 [J]. *泥沙研究*, 2012, 1: 37-40.
- ZHANG J Y, WU H L, CHEN L. Research on incipient velocity in North Passage of Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2012, 1: 37-40.
- [18] 刘阿成, 郭伟其, 陈新玺, 等. 东海北部陆坡上缘沟的地形特征和成因探讨 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2025, 45(2): 22-30.
- LIU A C, GUO W Q, CHEN X X, et al. Topography characteristics and the origination of valleys at the upper edge of continental slope in the northern East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2025, 45(2): 22-30.
- [19] 杨家启, 唐立模, 黄朋. 甬江河口细颗粒泥沙起动流速研究 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(9): 149-154.
- YANG J Q, TANG L M, HUANG P. Research on the starting flow velocity of fine-grained sediment in the Yongjiang River estuary[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(9): 149-154.
- [20] 金元欢, 孙志林. 中国河口盐淡水混合特征研究 [J]. *地理学报*, 1992, 47(2): 165-173.
- JIN Y H, SUN Z L. Mixing characteristics of salt water and fresh water in Chinese estuary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(2): 165-173.
- [21] 毕乃双, 时义睿, 葛春海, 等. 地形地貌变化对调水调沙期间黄河口沉积格局的影响 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(5): 1-14.
- BI N S, SHI Y R, GE C H, et al. Impacts of morphological evolution of the Huanghe River Mouth by artificial regulation on deltaic sedimentation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(5): 1-14.
- [22] 樊一阳, 彭云, 王韞玮, 等. 2017—2020 年江苏中部潮滩地貌的季节和年际演化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(6): 34-44.
- FAN Y Y, PENG Y, WANG Y W, et al. Seasonal and interannual evolution of geomorphology in middle Jiangsu tidal flat from 2017 to 2020[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(6): 34-44.
- [23] DUCANH N Q, TANAKA H, TAM H S, et al. Comprehensive study of the sand spit evolution at tidal inlets in the central coast of Vietnam[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(9): 722.
- [24] 贺松林. 瓯江河口内外堆积带的形成分析 [J]. *海洋学报*, 1983, 5(5): 612-622.
- HE S L. Analysis of the formation of accumulation zones inside

- and outside the Oujiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1983, 5(5): 612-622.
- [25] 宋乐, 夏小明, 刘毅飞. 瓯江河口入海水沙通量的变化规律 [J]. *泥沙研究*, 2012, 1: 46-52.
- SONG L, XIA X M, LIU Y F. Variations in water and sediment fluxes from Oujiang River to Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2012, 1: 46-52.
- [26] 王翠, 郭晓峰, 方婧. 闽浙沿岸流扩展范围的季节特征及其对典型海湾的影响 [J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(1): 1-8.
- WANG C, GUO X F, FANG J. Characteristics of seasonal spatial expansion of Fujian and Zhejiang coastal current and their bay effects[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(1): 1-8.
- [27] 庄佳铨, 罗科, 彭雲, 等. 基于无人机 SfM 摄影测量的潮间带牡蛎礁地貌调查 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(6): 45-54.
- ZHUANG J Q, LUO K, PENG Y, et al. Geomorphological survey of intertidal oyster reefs based on UAV Structure-from-Motion photogrammetry[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(6): 45-54.
- [28] 陈斌, 高飞, 刘健. 夏季浙江沿岸陆架区泥沙输运机制 [J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 96-105.
- CHEN B, GAO F, LIU J. Sediment transport mechanism in the Zhejiang inner continental shelf in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(3): 96-105.
- [29] 陈奇, 张阳, 唐雯雯, 等. 低空无人机平台应用于海滩地形监测的初步研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(6): 55-68.
- CHEN Q, ZHANG Y, TANG W W, et al. Application of low-altitude airspace UAVs in beach terrain monitoring[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(6): 55-68.
- [30] PRADHAN U, MISHRA P, MOHANTY P K, et al. Formation, growth and variability of sand spit at Rushikulya River Mouth, South Odisha Coast, India[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116: 963-970.

The geomorphic evolution and water-sediment environment in Oujiang River Estuary

WU Chengqiang¹, DONG Chao², WANG Jianqiang², CHEN Xuanbo²,
ZHOU Yubo², ZHANG Peng², QIU Jiandong^{3*}

(1 Third Institute of Oceanology, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 2 Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ningbo 315000, China; 3 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

Abstract: Oujiang Estuary is located at the confluence of the East China Sea and the Oujiang River, and it is the core area of the coastal industrial belt and an important industrial cluster in Wenzhou City, Zhejiang Province. Based on the investigation and analysis on the hydrology, sedimentology, topography, and sedimentary environment, we studied the dynamic geomorphology evolution and water-sediment transport characteristics of the estuary. Results show that the dynamic geomorphological system of shoal-channel is an important part of the geomorphological pattern of Oujiang River estuary, and the geomorphological pattern is the result of the combined action of Oujiang River runoff and the dynamic conditions of waves, tides, and currents in the estuary. The seabed topography is characterized by the distribution pattern of “channel erosion” in the northern branch and “shoal deposition” in the southern branch. The water transport in the estuary is dominated by the ebb flow in the southern branch, while the flood flow in the northern branch is evident during the spring tide and the ebb flow is evident during the neap tide. At the same time, the asymmetry of tidal currents under the combined action of runoff and tidal currents is obvious. The net sediment transport at the southern mouth of Oujiang River was between 224 and 8876 kg, while at the northern mouth, it was between 20 and 15 506 kg, indicating active sediment movement. The dynamic geomorphology and water-sediment environment of the estuary are the result of the relative effects of river and tidal currents, human construction projects in the estuary, and the nearshore circulation system.

Key words: Oujiang River Estuary; sediment dynamics; geomorphology; hydrology and sediment; transport