



波潮型河口泥沙输运研究

黄恩茂, 张涛, 刘德政, 朱志远, 梁曜, 贾良文

Study on sediment transport in a wave and tide dominated estuary: a case study of Moyang River estuary in western Guangdong Province

Huang Enmao, Zhang Tao, Liu Dezheng, Zhu Zhiyuan, Liang Yao, Jia Liangwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb2024129>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄恩茂, 张涛, 刘德政, 等. 波潮型河口泥沙输运研究——以粤西漠阳江河口为例[J]. 海洋学报, 2024, 46(12): 1–14, doi:10.12284/hyxb2024129

Huang Enmao, Zhang Tao, Liu Dezheng, et al. Study on sediment transport in a wave and tide dominated estuary: a case study of Moyang River estuary in western Guangdong Province[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(12): 1–14, doi:10.12284/hyxb2024129

波潮型河口泥沙输运研究

——以粤西漠阳江河口为例

黄恩茂^{1,2,3,4}, 张涛^{1,2,3,4}, 刘德政^{1,2,3,4}, 朱志远^{1,2,3,4}, 梁曜^{1,2,3,4}, 贾良文^{1,2,3,4*}

(1. 中山大学海洋工程与技术学院/中山大学河口海岸研究所, 广东广州 510275; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海, 519000; 3. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心, 广东广州 510275; 4. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东广州 510275)

摘要: 泥沙输运是河口海岸研究的基础问题, 对河口地貌演变、生态环境和工程建设具有重要的科学意义和应用价值。本文以漠阳江河口为例, 基于船载和坐底三角架实测的海流、波浪和含沙量数据, 分析漠阳江河口定点剖面上悬沙的沿岸和垂岸的输运趋势并计算泥沙输运通量, 探讨波潮型河口的泥沙输移机制与运移规律, 主要发现包括: (1) 洪季口门处受径流作用主控, 输沙量随着流量的增大而增大, 沿岸输沙与垂岸输沙在流量最大的小潮期间达到最大值, 分别为 $111.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $269.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 洪季拦门沙处则受波浪与潮流共同控制, 沿岸输沙在大小潮期间皆为沿岸向西输运, 垂岸输沙在大潮期间由落潮流主导离岸输沙 $4.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 小潮期间由波浪主导向岸输沙 $19.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。(2) 枯季拦门沙处受潮流和波浪主控, 垂岸输沙以落潮流携沙向海输运为主, 而沿岸输沙受波浪动力控制, 在波生沿岸流作用下沿岸向东输沙; 枯季拦门沙东侧同样受潮流和波浪主控, 垂岸输沙在大潮期间为涨潮流主导携沙向岸输运, 之后随着潮动力减弱转为离岸输运, 沿岸输沙受波生沿岸流的影响沿岸向东输运。(3) 洪季观测期间口门处向海输运显著, 垂向上各水层流向一致; 小潮期间出现水层流向分化, 表层向海输运, 底层向陆输运; 拦门沙处大小潮时段垂向上各水层流向较为一致, 但潮平均后大潮各水层向海输运, 小潮各水层向岸输运, 小潮期间受波浪作用明显, 向岸输运占比达到 79%。(4) 漠阳江河口口门处在下泄径流与落潮流影响下以向海输沙为主, 而口门外拦门沙处影响泥沙输运的最主要因素是潮流的向海输沙和波浪的沿岸输沙。

关键词: 漠阳江河口; 沿岸输沙; 垂岸输沙; 波浪和潮流作用

中图分类号: P737.12⁺1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)12-0001-14

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, 大部分大陆侵蚀的沉积物经过河口输送到海洋中, 不断塑造着海岸线和三角洲。因此, 河

口是三角洲形成的纽带, 同时也是对陆源沉积物波动响应最快的区域^[1]。研究河口的泥沙输运可以丰富河口泥沙运动学研究的理论内容, 对河口生态环境和工程建设也具有重要的现实意义。

河口泥沙的迁移是一个复杂的过程, 受到众多自

收稿日期: 2024-06-18; 修订日期: 2024-10-28。

基金项目: 漠阳江河口动力特性及拦门沙演变(HLSJCG-20220103)。

作者简介: 黄恩茂(1999—), 男, xx省xxx人, 博士研究生, 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

* 通信作者: 贾良文(1966—), 男, 江苏省涟水县人, 教授, 主要从事河口海岸动力、地貌和沉积及海岸工程应用研究。E-mail: jialw@mail.sysu.edu.cn

然因素的共同作用,目前定量评估这些因素对泥沙迁移的影响具有一定的挑战性^[2]。全球各地的河口由于受到不同主导动力的作用,其沉积物的迁移特性也表现出显著的差异。例如切萨皮克湾的泥沙迁移主要受到径流和河口环流的双重影响,导致中下游沉积物向河口湾上游输送^[3-4]。亚得里亚海的沉积物在波浪和潮流的共同作用下再悬浮,并被沿岸流携带迁移^[5]。波河河口在汛期时,泥沙主要通过中上层水体进行迁移,而底层泥沙输移相对较少^[6]。湄公河河口湾在波浪作用下展现出不对称的形态演化,其泥沙在洪季高流量时向海输运,而在枯季低流量时则向陆输运^[7-8]。恒河-雅鲁藏布江河口的沉积物输运则显著受到潮汐动力的影响^[9-10]。珠江三角洲其沉积物迁移主要依赖于河流径流,但潮汐动力也是一个不可忽视的影响因素^[11-12]。不同动力主控下的河口沉积物输运呈现很大的差异,进而对河口水质和生态系统产生重要影响。因此,研究并分析不同动力对河口沉积物输运的贡献率对预测河口演变具有重要意义。

然而,针对波潮型河口的泥沙输移研究较少,已有研究表明波潮相互作用对河口泥沙输运有一定影响^[13],波潮型河口泥沙的滞留时间受到潮流的影响大于径流作用,悬沙输运受潮汐影响明显^[14-15]。位于广东省粤西的漠阳江河口北津站多年平均潮差平均值为1.06 m,其西侧的闸坡波浪站多年平均波高为0.75 m,波潮比为0.71;上游双捷站多年平均流量为186 m³/s,河口多年平均潮流量为600 m³/s,径潮比约为0.3,相比潮流径流作用较弱,根据 Galloway^[16]从径流、潮汐和波浪3种动力因素的相对强度对河口进行分类的三端元分类法,漠阳江河口属于典型的波潮控型分叉河口,本文以其为靶区研究波浪和潮汐作用下的泥沙输运规律,以往对漠阳江河口泥沙输运的研究主要集中在海岸线侵蚀^[17]、河口采砂^[18]、航道维护^[19]、古河道输沙^[20]等,而在漠阳江河口的泥沙输移及输运通量等方面尚缺乏系统的研究。

本文基于船载和坐底三角架实测的海流、含沙量、波浪数据,计算了泥沙输运通量,探讨波潮型河口的泥沙输移机制与输移规律。

2 研究区域概况

漠阳江河口位于广东省西南部(图1a),口门宽度约为2 250 m,河口附近的平原是块断下沉和沉积物堆积的结果,堆积了比较厚的海相淤泥,且海岸坡度变化不大。其河口两侧属于砂质海岸,沙质松软,黏结度低,容易产生侵蚀。

漠阳江径流主要来源于降雨,因此径流的分布与降水的趋势一致。漠阳江流域多年平均径流量为58.7×10⁸ m³,由于降雨量时空分布不均,年径流变化也很大,汛期4-9月占全年径流量的70%~85%,常会造成洪涝灾害;非汛期10月至翌年3月,径流量只占全年水量的15%~30%,其中又以1-2月最枯。漠阳江下游河段处于双捷枢纽下游,上游的来水来沙受枢纽的调节,双捷水文站(图1b)其测流控制断面位于双捷枢纽下游1 125 m,其流量数据基本能代表漠阳江下游的径流过程,本文收集到双捷水文站观测期间的逐日流量数据。

漠阳江口外海域的潮汐调和常数 $R=(H_{K_1}+H_{O_1})/H_{M_2}=1.13$,属不规则半日潮,在多数情况下每个潮日(约为24.8 h)有两次高潮和两次低潮,但有显著的日潮不等现象,主要是高潮不等。北津港潮位站多年平均潮差为1.06 m,最大潮差为2.11 m。漠阳江河口季风和沿岸流作用显著,时常有台风或风暴潮发生,根据阳江波浪站的观测资料,研究区以风浪和涌浪的混合浪为主,平均波高达到0.75 m,强浪向为S向,波高大于1 m的波浪出现频率为35.8%,波周期介于2~6 s^[21]。根据数据计算得到漠阳江河口波潮比为0.71;上游双捷站多年平均流量为186 m³/s,河口多年平均潮流量为600 m³/s,径潮比约为0.3,相比潮流径流作用较弱,根据 Galloway^[16]从径流、潮汐和波浪3种动力因素的相对强度对河口进行分类的三端元分类法,漠阳江河口属于典型的波潮控型分叉河口。

漠阳江拦门沙(图1c)平面形态由口门向外呈半圆形,分别为出口深槽及口门岸线将拦门沙分为东侧连岸沙嘴、西侧连岸沙嘴、出口深槽外中心拦门沙。通过2 m等深线刻画拦门沙形态,可见西侧沙嘴浅滩呈圆弧状形态,浅滩前缘至海岸线的垂直长度为1 065 m,面积约为238×10⁴ m²,东侧沙嘴浅滩呈三角形形态,浅滩前缘至海岸线的垂直长度为1 169 m,面积约为187×10⁴ m²,西侧沙嘴较东侧沙嘴面积更大。

3 数据与方法

3.1 现场观测

现场观测于2022年洪季(2022年5月30日至6月15日)在漠阳江河口设置2个站位,即口门(L1)及拦门沙顶(L2)站,开展大、中、小潮波、流、沙座底观测,大、小潮船载同步水文泥沙观测(L1与L2站)(测点位置见图1c),水文组合主要包括洪季大潮(起始时段:5月30日12:00-5月31日13:00)、洪季小潮(起始时段:6月7日16:00-6月8日17:00);于

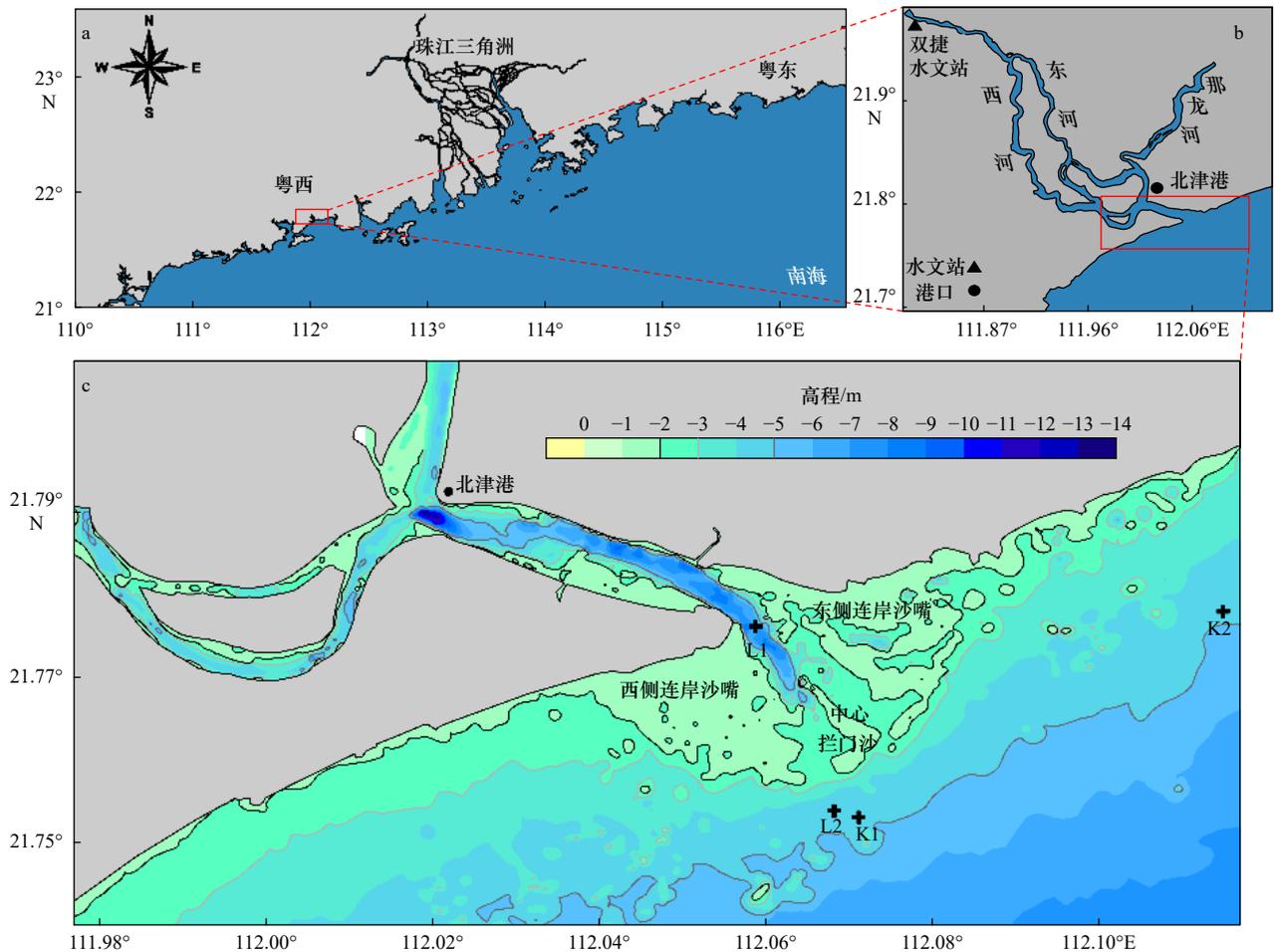


图1 研究区域(a); 双捷站位置(b); 观测站位(c)

Fig. 1 Study area (a); location of the Shuangjie station (b); Observation station location (c).

2022年枯季(2022年11月8–11月16日)在漠阳江河口设置2个站位,即拦门沙顶(K1)与河口东侧沿岸(K2)站,开展大、中、小潮波、流、沙座底观测。

其中车载观测流速、流向、浊度等数据,多普勒声学流速仪 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 固定于观测船,层厚 0.25 m, 采样频率 0.1 Hz, 入水深度 0.5 m, 盲区 0.05 m, 用以连续垂向剖面流速数据收集; OBS-3A (Optical Backscatterance Sensor) 每小时进行垂线观测, 采样频率 1 Hz, 观测浊度、深度等参数的垂向剖面数据。同时, 按照 3 点法同步采集表层(距表 0.5 m)、中层(0.6 倍水深)与底层水样, 水样悬沙含量可用来标定 OBS-3A, 使其观测数据由浊度(单位: NTU)转为悬沙含量(单位: mg/L), OBS 含沙量率定结果如图 3 所示。

座底观测采用三角架平台固定仪器, 其中 OBS-3A 采样间隔 10 s, 采样时间 10 s, 用来获取单点浊度、深度数据; AWAC (Acoustic Wave and Current Profiler) 采样频率 2 Hz, 采样间隔 10 min, 采样时间 512 s, 距底高度 1.2 m, 盲区 0.4 m, 用来获取有效波高、波周

期、波向等波浪参数; ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) 采样频率 32 Hz, 采样间隔 10 min, 采样时间 1 min, 距底高度为 0.3 m, 用来获取近底层三维高频流速数据, 仪器放置见图 2, 详细仪器观测参数见表 1。

3.2 悬沙输运通量计算

将测得的剖面流速按表层、0.2 H 、0.4 H 、中层(0.6 H)、0.8 H 和底层共 6 层划分出各层实测流速 V_i ,



图2 座底观测三脚架

Fig. 2 Base observation tripod

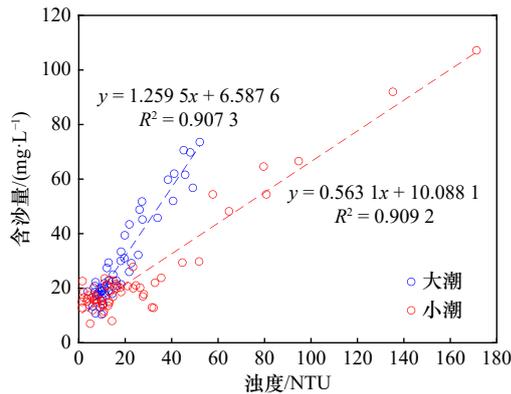


图3 浊度与悬沙含量关系(直线为线性拟合结果)

Fig. 3 The relationship between turbidity and suspended sediment concentration (the straight line represents the result of linear regression fitting).

表1 观测仪器参数设置

Table 1 Parameter Settings of observation instruments.

观测系统	测量仪器	参数设置	观测项目
船载观测	OBS-3A	整点下放, 采样频率1 Hz	剖面浊度、深度
	ADCP(Workhorse II Monitor ADCP 1)	整点开测, 层厚0.25 m, 采样频率0.1 Hz, 入水深度200 kHz, 0.5 m, 盲区0.05 m	剖面流速
座底观测	OBS-3A	采样间隔10 s, 采样时间10 s	单点浊度、深度
	AWAC(1 MHz)	采样频率2 Hz, 采样间隔10 min, 采样时间512 s, 距底高度1.2 m, 盲区0.4 m	单点波高、波向
	ADV (Vector 6 MHz)	采样频率32 Hz, 采样间隔10 min, 采样时间1 min, 距底高度0.3 m	单点三维高频流速

将各层实测流速 V_i 根据岸线投影分解为平行岸线与垂直岸线方向的分量流速 $V_{沿岸}$ 、 $V_{垂岸}$, 悬沙输运通量则按照式(1)与悬沙含量 C_i 相乘, 得到逐时各层沿岸输沙或垂岸输沙分量:

$$\begin{cases} F_{沿岸 i} = V_{沿岸 i} C_i, \\ F_{垂岸 i} = V_{垂岸 i} C_i, \end{cases} \quad (1)$$

式中: i 代表时间序列, $F_{沿岸 i}$ 、 $F_{垂岸 i}$ 分别为沿岸或垂岸分量泥沙通量 [$g/(m^2 \cdot s)$]; 将上述逐时沿岸或垂岸分量泥沙通量累加再进行潮平均得到潮周期平均各层净输沙通量:

$$\begin{cases} F_{潮平均沿岸} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{沿岸 i}, \\ F_{潮平均垂岸} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{垂岸 i}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为小时数(与各站、各观测周期有效数据时长对应), $F_{潮平均沿岸}$ 为沿岸方向潮周期平均净输沙通量, $F_{潮平均垂岸}$ 为垂岸方向潮周期平均净输沙通量。

3.3 悬沙通量机制分解

悬沙通量机制分解是将悬沙通量分解成多个动力项, 以探究各个动力因子对悬沙输移贡献的大小。潮周期平均单宽悬沙输运通量计算公式为^[22]

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h ucdzdt = h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h, u_i \rangle \overline{c_0} + \langle h, c_i \rangle \overline{u_0} + h_0 \langle \overline{u_i c_i} \rangle + \langle h, \overline{u_i c_i} \rangle + h_0 \overline{u_0' c_0'} + \langle h, u_i' c_0' \rangle + \langle h, u_i' c_i' \rangle + \langle h_0 \overline{u_i' c_i'} \rangle + \langle h, u_i' c_i' \rangle, \quad (3)$$

式中: h 表示水深; u 表示瞬时流速; c 表示瞬时含沙量; T 为潮周期; 上划线“—”表示垂向平均; “'”表示垂向偏差; 下脚 0 表示潮周期平均; 下脚 i 表示潮变化; 式中 $\langle \rangle$ 表示潮平均。式中, $T1$ 代表欧拉余流导致的物质输运项; $T2$ 代表斯托克斯漂移项, 与潮流相关, $T1+T2$ 则统称为拉格朗日平流输运项, 由单个潮周期内物质输运量所决定; $T3$ 代表与含沙量相关的潮变化项; $T4$ 为潮流与潮变化含沙量相关项, 通常被称为潮泵输沙项; $T5$ 为含沙量与潮流场相关项, 又称潮汐捕集项, 反映了底沙再悬浮能力的强弱; $T6$ 为垂向环流输沙项; $T7$ 为潮流和潮平均含沙量的垂向切变与潮位的相关项; $T8$ 为余流和潮变化含沙量的垂向切变与潮位的相关项; $T9$ 为潮流和潮变化含沙量两者的垂向切变相关项; $T10$ 为潮流和潮变化含沙量两者的垂向切变与潮汐相关项。根据输沙的驱动力, 可以把输沙项分为两类: 平流输沙项和潮流输沙项, 其中 $T1$ 、 $T2$ 、 $T6$ 和 $T7$ 属于平流输沙项, 其余 6 项属于潮流输沙项。

4 结果分析

4.1 洪季流速及悬沙含量变化

洪季漠阳江河口 L1、L2 站位观测期间流速剖面时间变化如图 4 所示, L1 站大潮与小潮流速范围分别为 0.03~1.34 m/s 和 0.01~1.51 m/s, 垂线平均流速的均值分别为 0.65 m/s、0.42 m/s; L2 站大、小潮流速范围分别为 0.01~0.41 m/s、0.04~0.32 m/s, 垂线平均流速的均值分别为 0.15 m/s、0.16 m/s。对比大、小潮流速空间分布来看, L1 站大潮期间流速大于小潮期间, 而 L2 站大、小潮流速基本相同, 无明显变化。纵向分布上, 口门处 L1 站大、小潮流速均值大于 L2 站处。

洪季漠阳江河口 L1、L2 站位观测期间悬沙含量时间变化如图 5 所示, L1 站大潮与小潮悬沙含量变化范围分别为 0.10~123.51 mg/L 和 1.23~204.44 mg/L, 垂线平均悬沙含量的均值分别为 20.08 mg/L、24.63 mg/L; L2 站大、小潮悬沙含量范围分别为 0.10~209.69 mg/L、0.40~113.60 mg/L, 垂线平均悬沙含量的均值分别为

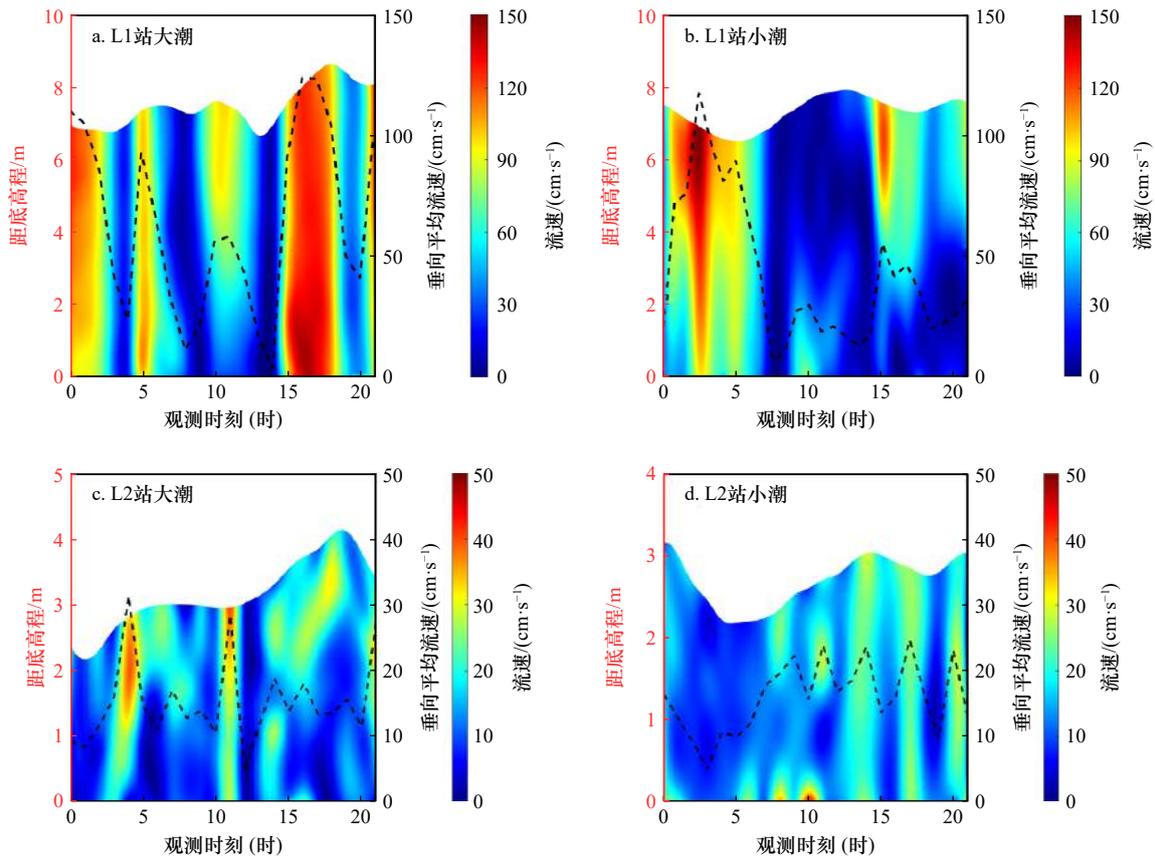


图4 洪季L1、L2站大、小潮流速剖面及垂向均值(黑色虚线)时间变化图(x轴0点代表观测周期起点时刻)

Fig. 4 Velocity profiles of large and small tidal currents at L1 and L2 stations and time variations of the vertical mean value (black dashed line) in the flood season (0 point on the x-axis represents the starting point of the observation period)

32.39 mg/L、16.90 mg/L。对比大、小潮悬沙含量分布, L1站大潮期间悬沙含量要小于小潮期间, 是因为小潮期间上游因降雨出现一次洪水过程。而L2站大潮期间悬沙含量要大于小潮期间。纵向分布上, 大潮期间口门处L1站悬沙含量均值小于L2站处, 小潮期间L1站则大于L2站处。

4.2 洪季泥沙输运通量

4.2.1 潮平均悬沙输运通量

为更好地反映漠阳江河口悬沙输运特征, 利用L1与L2站位洪季实测剖面流速与实测剖面悬沙含量数据计算不同潮情下河口沿岸与垂岸方向的潮平均悬沙输运通量, 探究其变化特征。

图6为L1、L2站洪季大小潮潮平均输沙通量垂向变化图。沿岸方向上负值表示沿岸向西输运。可以看出, L1站大、小潮沿岸输沙通量范围分别为1.11~4.10 g/(m²·s)、1.33~3.54 g/(m²·s), L2站大、小潮沿岸输沙通量范围分别为-0.30~0.08 g/(m²·s)、-0.46~0.77 g/(m²·s), L1站的沿岸输沙通量要明显高于L2站。从方向上来看, L1站大小潮期间沿岸输沙方向都为东方向, 而L2站大小潮期间皆为表层沿岸向

西输运, 底层沿岸向东输运。垂向分布来看, L1站大小潮由表至底沿岸输沙方向一致, 但变化趋势不一, 大潮期间由表向底先增大后减小, 中层输移量最大, 而小潮期间沿岸输沙通量由表向底减小, 表层输移量最大; L2站大、小潮期间沿岸输沙出现表、底输移方向不一致, 皆为表层沿岸向西底层沿岸向东, 沿岸输沙通量大小上大潮期间上3层显著大于下3层, 而小潮期间底层输移量大于上层。

垂岸方向上负值表示离岸输运。可以看出, L1站大、小潮垂岸输沙通量范围分别为-6.11~4.58 g/(m²·s)、-9.02~-1.97 g/(m²·s), L2站点大、小潮垂岸输沙通量范围分别为-0.39~-0.03 g/(m²·s)、0.42~1.94 g/(m²·s), L1站的垂岸输沙通量同样明显高于L2站, 对于同一站点, 小潮期间的垂岸输沙通量大于大潮期间。从方向上来看, L1站点大潮期间垂岸输沙方向为表层向海而底层向岸, 小潮期间都以向海方向为主, 而L2站大潮期间皆为向海运输, 小潮皆为向陆输运。垂向分布来看, L1站大潮垂岸输沙通量先增大后减小, 0.4H处输移量最大, 底部两层受潮流影响悬沙输移方向发生反转, 变为向岸运输。L1站小

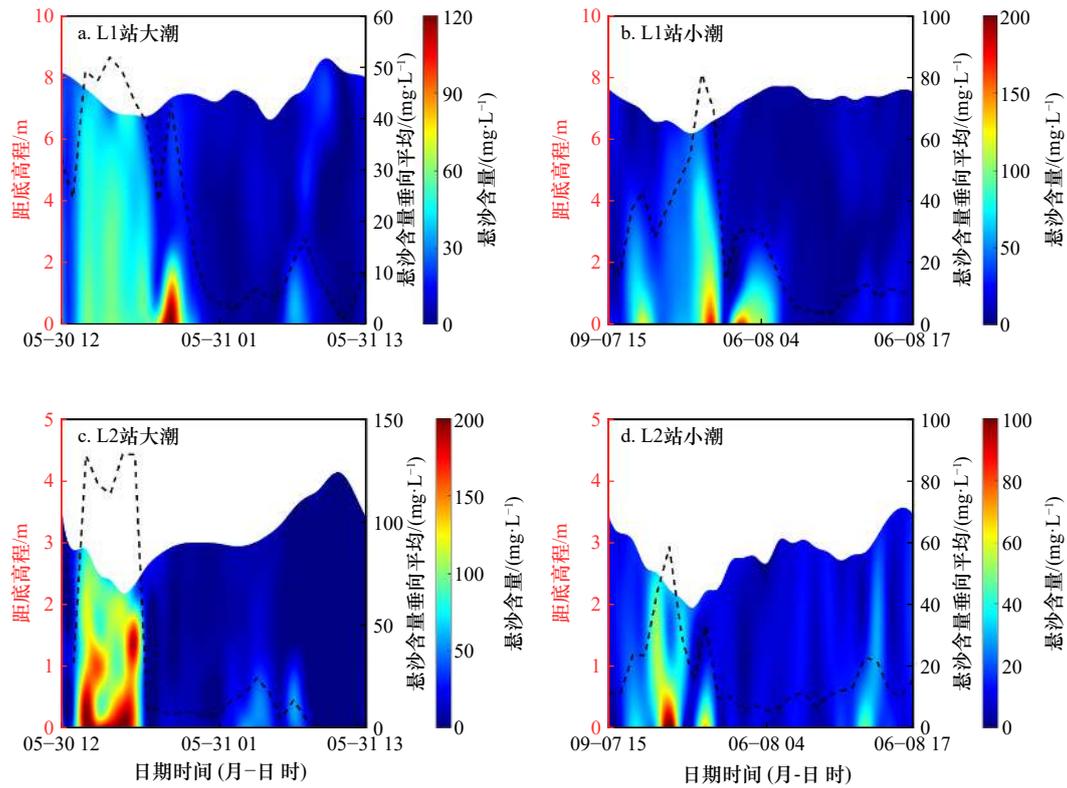


图 5 洪季 L1、L2 站大、小潮悬沙含量剖面及垂向均值 (黑色虚线) 时间变化
 Fig. 5 Suspended sediment content profiles of large tides and neaps at L1 and L2 stations and temporal variation of vertical mean value (black dashed line) in flood season

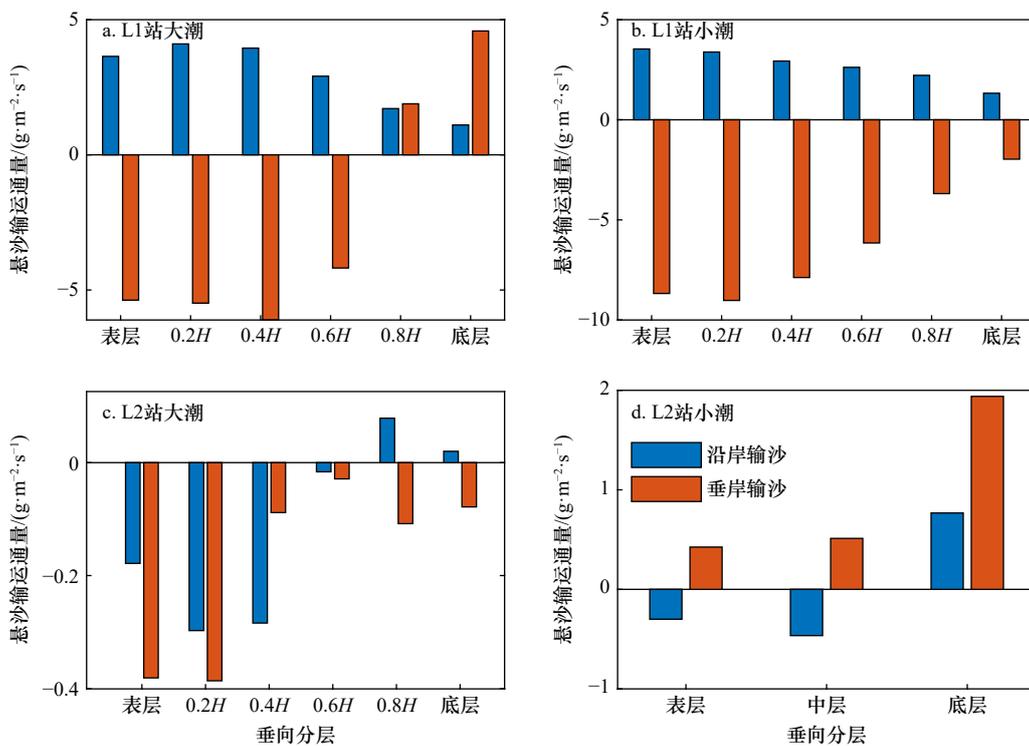


图 6 洪季潮平均输沙通量
 Fig. 6 Average sediment transport flux in flood season

潮期间垂岸输沙通量先增大后减小, $0.2H$ 处输沙通量最大而底部最小。L2 站大潮期间由表至底垂岸输沙通量先逐渐减小后逐渐增大, $0.6H$ 处最小; 而小潮期间由表至底垂岸输沙通量逐渐增大。

对比两站点沿岸和垂岸潮平均输沙通量可发现, 受径流作用影响, L1 站的输沙通量在垂岸方向上基本为离岸输运, 仅大潮期间受潮流影响底层存在向岸输运; 沿岸方向上皆为沿岸向东输运, 说明口门处径流为主控动力; 此外, L1 站大潮期间垂岸输沙通量略大于沿岸输沙, 而小潮期间垂岸输沙通量约为沿岸输沙的 2 倍, 径流动力加强, 以垂岸输沙为主。L2 站的输沙通量在沿岸方向上表层至中层为沿岸向西输运, 底层为转为沿岸向东输运, 沿岸方向受波浪与潮汐作

用明显; 垂岸方向上大潮期间皆为向海输运, 而小潮期间皆为向岸输运, 且小潮期间输运通量显著大于大潮期间, 说明拦门沙处小潮期间波浪作用更为显著; 在垂岸输沙与沿岸输沙对比上, L2 站大潮期间垂岸输沙通量与沿岸输沙相近, 而小潮期间垂岸输沙通量约为沿岸输沙的 8 倍, 同样以垂岸输沙为主。

4.2.2 逐时平均悬沙输运通量

为更好地反映漠阳江河口的悬沙输运特征, 利用 L1 与 L2 站位定点实测流速与实测含沙量等数据计算不同潮情下垂向分层的逐时平均悬沙输运通量。洪季 L1、L2 站逐时平均垂岸与沿岸的输沙通量等值线图如图 7、图 8 所示。

垂岸输运上, 洪季漠阳江口门处(L1 站)大潮期

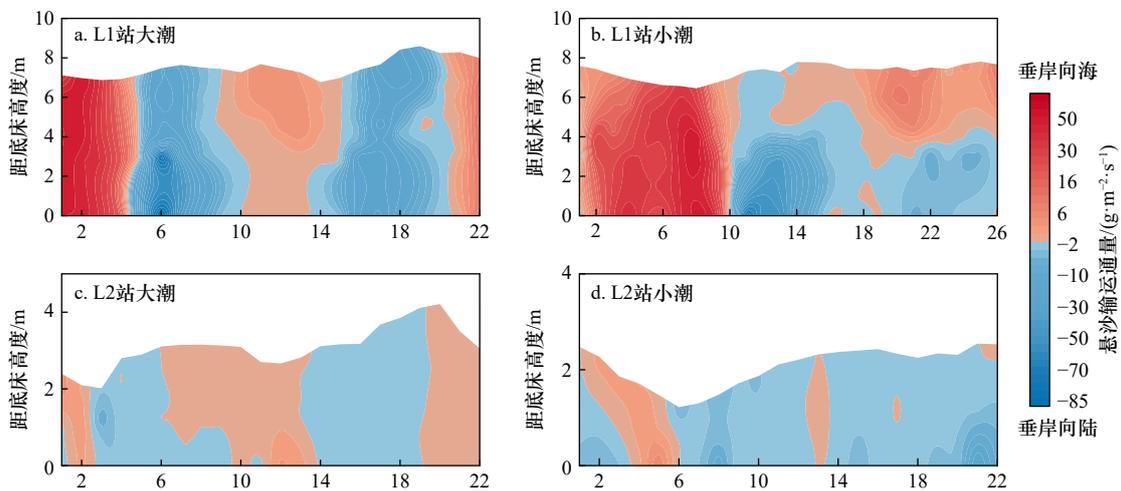


图 7 洪季 L1、L2 站逐时平均垂岸输沙通量等值线图(x 轴 0 点代表观测周期起点时刻)

Fig. 7 Contour map of hourly average vertical sediment transport flux of L1 and L2 stations in the flood season (point 0 on the x axis represents the starting point of the observation period, the same below)

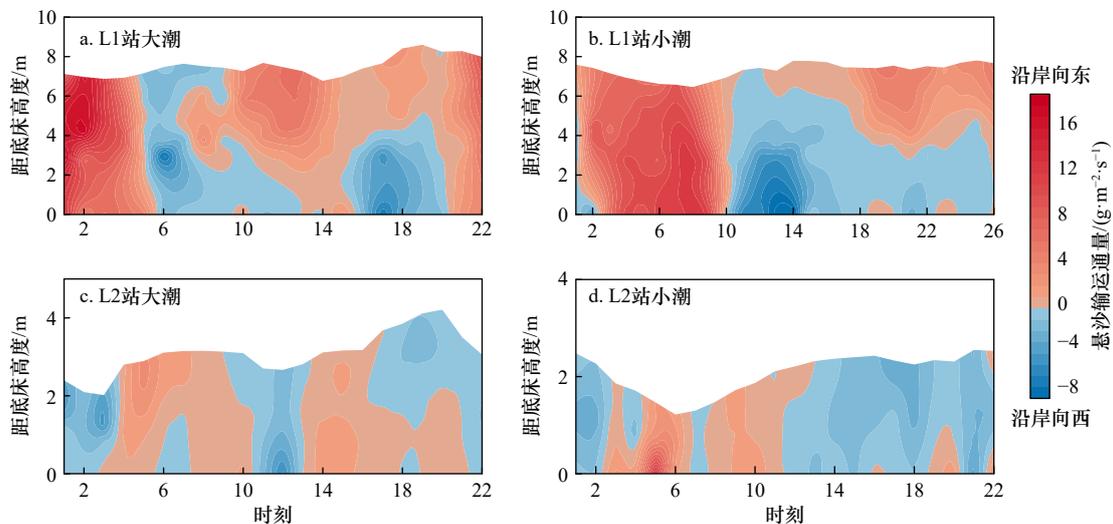


图 8 洪季 L1、L2 站逐时平均沿岸输沙通量等值线图(x 轴 0 点代表观测周期起点时刻)

Fig. 8 Contour map of hourly average alongshore sediment transport flux of L1 and L2 stations in the flood season

间垂向各水层整体呈向陆或向海输运;小潮期间在涨潮时出现水层流向分化,表层为向海输运的下泄淡水,底层为向陆输运的高盐海水,落潮时则为垂向整体向海输运。洪季漠阳江拦门沙顶处(L2站)在大潮期间第一次涨潮时出现水层流向分化,表层向海输运,底层向岸输运垂向上混合均匀,其他时间垂向上流向一致,根据涨落潮趋势,垂向各水层整体呈向陆或向海输运;小潮期间垂向上流向一致,但不随涨落潮而发生转向,基本为向岸输运。

沿岸输运上,口门处(L1站)在大潮期间的涨潮时出现水层流向分化,表层沿岸向东输运,底层沿岸向西输运,其他期间在垂向上基本流向一致,根据涨落潮趋势,涨潮时垂向各水层整体沿岸向西输运,落潮时整体沿岸向东输运。小潮期间悬沙输运趋势与垂岸输运相似,在涨潮时同样出现了水层流向分化。拦门沙顶处(L2站)大潮期间垂向上流向一致,落潮时沿岸向西输运,涨潮时沿岸向东输运;小潮期间垂向上流向一致,但是不随涨落潮发生转向,该期间潮流不是控制沿岸输运的主要影响因子。

计算结果表明,洪季观测期间L1站向海输运显著,大潮期间各水层逐时平均垂岸输沙通量变化范围为 $-76.01\sim 98.95\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,垂向上流向一致,各水层整体呈向陆或向海输运,但潮平均计算后上4层向海输运,底两层向陆输运;小潮期间各水层逐时平均垂岸输沙通量变化范围为 $-25.61\sim 35.32\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,垂向上流向不同,涨潮时刻受淡水团与咸潮上溯影响出现水层流向分化,表层向海输运,底层向陆输运,但潮平均计算后各水层皆为向海输运。

洪季观测期间L2站大潮期间各水层逐时平均垂岸输沙通量变化范围为 $-4.60\sim 5.77\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,垂向上流向一致,潮平均计算后各水层皆为向海输运;小潮期间各水层逐时平均垂岸输沙通量变化范围为 $-8.34\sim 7.88\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,同样垂向上流向较为一致,潮平均计算后各水层皆为向岸输运,受波浪作用明显,向岸输运占比达到79%。

4.3 枯季泥沙输运通量

利用枯季K1与K2站实测流速与实测悬沙含量等数据计算漠阳江河口枯季不同潮情下底层逐时平均悬沙输运通量。观测期间K1与K2站沿岸悬沙输运通量如图9所示,负值表示沿岸向西输运。整体而言,观测期间K1与K2站在不同潮情下沿岸方向平均输沙通量皆为正值,即以沿岸向东输运为主,但K1站净输运通量明显大于K2站。两站点沿岸平均输沙通量在大中小潮都呈现先减后增的变化趋势,

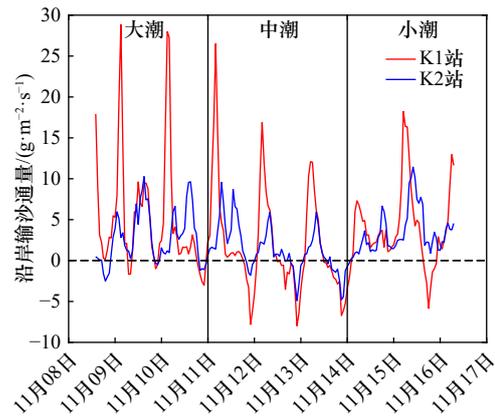


图9 枯季K1、K2站逐时平均沿岸输沙通量
Fig. 9 Average hourly alongshore sediment transport fluxes at K1 and K2 stations in dry season

K1站在大潮期间净输沙通量最大,达到 $5.18\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,而K2站则在小潮期间出现最大值 $3.29\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,两站点皆在中潮期间出现最小值。

观测期间K1与K2站点垂岸悬沙输运通量如图10所示,负值表示离岸输运。整体而言,观测期间K1站点在不同潮情下垂岸方向平均输沙通量皆为正值,即以向岸输运为主;而K2站在大潮期间垂岸平均输沙通量为正值,中潮与小潮期间为负值,且K2站净输运通量明显小于K1站。由图10可知,K1站悬沙基本没有向岸输运,以离岸输运为主,说明影响K1站垂岸悬沙输运的主要因素是落潮流。此外,两站垂岸平均输沙通量绝对值在大中小潮都呈现先减后增的变化趋势,K1站在大潮期间净输沙通量最大,达到 $-8.44\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,而K2站则在小潮期间出现最大值 $-0.68\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

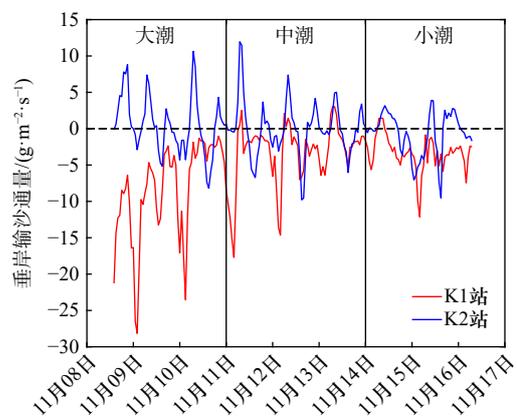


图10 枯季K1、K2站逐时平均垂岸输沙通量
Fig. 10 Average hourly cross-shore sediment transport fluxes at K1 and K2 stations in dry season

对比两站点沿岸和垂岸输沙通量可发现,K1站的输沙通量在垂岸方向上略大于沿岸方向,说明拦门的

沙处(K1站)以东南向输沙为主,落潮流作用更强。而K2站的输沙通量在沿岸上显著大于垂岸方向,说明拦门沙东侧(K2站)在波生沿岸流作用下以沿岸向东输沙为主。

4.4 悬沙输运通量分解

根据洪季两次现场定点水文泥沙观测数据进行悬沙通量机制分析,由于部分数据缺失未能计算后5项悬沙输移项,其余输移项结果如表2所示。计算结果显示,L1站口门处大潮期间潮泵输沙项(T4)最大,垂岸方向与沿岸方向分别达到-21.58 g/(m²·s)和22.71 g/(m²·s),占总输沙的比重分别为243.29%和21.51%;L1站小潮期间垂岸方向上最大的一项为与含沙量相关的潮变化项(T3),沿岸方向潮泵输沙项(T4)最大,分别达到-47.52 g/(m²·s)和19.9 g/(m²·s),二者占总输沙的比重分别为21.69%和21.93%。综合来看,L1站潮流输沙项都大于平流输沙项,且潮流输沙项在大小潮期间都与落潮流方向一致,此外小潮期间高径流量增强了落潮流及落潮流阶段的含沙量,导致小潮期间垂岸输沙量显著增强。

L2站拦门沙处大潮期间垂岸方向最大的一项为与含沙量相关的潮变化项(T3),沿岸方向欧拉余流输沙项(T1)最大,分别达到-0.63 g/(m²·s)和0.48 g/(m²·s),二者占总输沙的比重分别为22.42%和64%;L2站小

表2 各动力项潮周期输沙量和方向 [垂岸方向正值表示垂岸向陆,沿岸方向正值表示沿岸向东,单位: g/(m²·s)]
Table 2 Tidal-averaged suspended sediment flux and direction of each dynamic term [positive value in the cross-shore direction indicates movement towards the land, and a positive value in the alongshore direction signifies eastward transport along the coast, unit: g/(m²·s)]

站位及方向	T1	T2	T3	T4	T5	平流输沙项	潮流输沙项	总输沙
L1大潮垂岸输沙	8.67	12.75	5.68	-21.58	-14.40	21.43	-30.30	-8.87
L1大潮沿岸输沙	20.55	21.20	19.49	22.71	21.63	41.75	63.84	105.59
L1小潮垂岸输沙	-34.40	-46.82	-47.52	-46.94	-43.44	-81.21	-137.90	-219.11
L1小潮沿岸输沙	14.23	18.92	19.21	19.9	18.47	33.15	57.58	90.73
L2大潮垂岸输沙	-0.62	-0.60	-0.63	-0.52	-0.44	-1.22	-1.59	-2.81
L2大潮沿岸输沙	0.48	0.40	0.38	-0.37	-0.16	0.89	-0.14	0.75
L2小潮垂岸输沙	2.65	2.64	2.50	1.75	1.93	5.29	6.17	11.48
L2小潮沿岸输沙	-0.87	-1.52	-1.05	-0.24	-0.68	-2.39	-1.97	-4.36

潮期间欧拉余流输沙项(T1)最大,沿岸方向斯托克斯漂流项(T2)最大,分别达到2.65 g/(m²·s)和-1.52 g/(m²·s),二者占总输沙的比重分别为23.08%和34.86%。综合来看,L2站垂岸方向的潮流输沙项大于平流输沙项,而沿岸方向相反,说明垂岸方向受潮动力影响显著,而沿岸方向受沿岸流影响显著。此外小潮期间的潮流输沙在垂岸方向发生转向,与涨潮流方向一致。

5 讨论

5.1 径流影响

为探索漠阳江河口控制泥沙输移的动力机制,本研究搜集了洪季5月25日~6月30日期间的上游流量数据,其流量变化如图11所示。6月份漠阳江平均流量为428 m³/s,期间出现两次洪峰,其流量大小分别达到1630 m³/s与1890 m³/s。大潮定点观测期间上游流量均值为186 m³/s,呈现不断减小的趋势,但流量大小上整体变化不大。小潮定点观测期间上游流量均值为343 m³/s,呈现不断增加的趋势,且相对于大潮期间流量大小上变化较大,变化幅度达到350 m³/s,由此可见,大潮观测期间径流动力较弱而小潮观测期间径流动力明显增强。

随着洪季小潮期间径流动力增强,由表2可知漠阳江L1站口门处垂岸方向的平流输沙项(T1+T2)发生转向并且有明显增强,由向岸输沙21.43 g/(m²·s)转变为离岸输沙81.21 g/(m²·s),而L2站拦门沙处有离岸输运转变为向岸输运,与径流方向相反,说明拦门沙

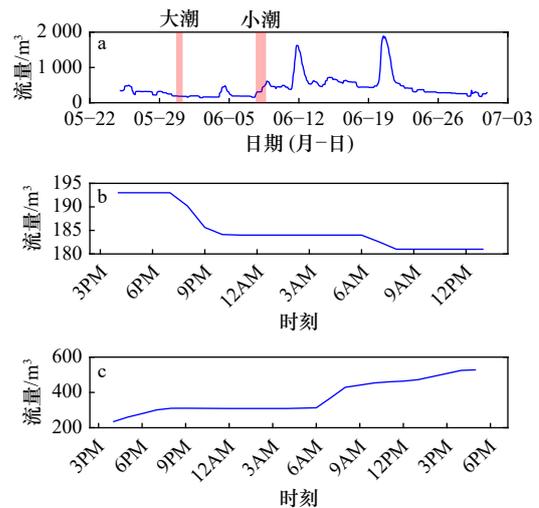


图11 双捷站逐时流量图,红色部分为定点观测时段(a);大潮观测期间流量(b);小潮观测期间流量(c)
Fig. 11 Hourly discharge chart for Shuangjie station, the red part is the fixed point observation period (a); discharge during the spring tide observation period (b); discharge during the neap tide observation period (c).

处基本不受径流控制。

图 12 为大小潮观测期间 L1 与 L2 站点垂向平均逐时输沙通量变化图, 位于口门 L1 站的输沙通量明显大于拦门沙顶的 L2 站。L1 站的泥沙输运特征在大小潮期间即以沿岸向东输沙与离岸输沙为主, 输沙方向与径流扩散方向一致, 观测期间 L1 站沿岸输沙的净输沙通量在大小潮期间分别达到 $66.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 与 $111.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 垂岸输沙的净输沙通量在大小潮期间分别达到 $-58.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 与 $-269.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。L2 站的沿岸输沙特征在大小潮期间以沿岸向西输沙为主, 净输沙通量在大小潮期间分别达到 $-3.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 与 $-2.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 垂岸方向上大潮期间为离岸输运, 净输沙通量达到 $-4.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 小潮期间为向岸输运净输沙通量达到 $19.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

由于大小潮期间径流大小不同, L1 站口门处在大小潮观测期间的输沙通量大小也呈现较大的差异, 小潮沿岸输沙增大约 1 倍, 垂岸输沙增大约 4 倍, 表明 L1 口门处受径流作用主控; 而 L2 站沿岸输沙无明显变化, 垂岸输沙由离岸输运转为向岸输运, 即 L2 站几乎不受径流作用影响, 垂岸方向主控动力因子发生改变, 由受落潮流主控转为受波浪主控。此外, 大潮

期间 L1 站口门处沿岸与垂岸输沙通量皆呈现周期性变化, 而小潮期间基本不存在周期性变化, 表明潮动力减弱, 径流增加使得携带的泥沙增加进而导致输沙通量增加。

5.2 潮汐影响

为探索漠阳江河口控制泥沙输移的动力机制, 本研究搜集了洪季 5 月 26 日至 6 月 1 日与枯季 11 月 4 日至 11 月 20 日期间北津站的日均潮差数据。洪季北津站日均潮差平均值为 105.9 cm , 大潮期间最大值达到 127 cm , 小潮期间最小值达到 70.5 cm ; 枯季日均潮差平均值为 109.5 cm , 大潮期间最大值达到 148 cm , 小潮期间最小值达到 72 cm , 洪枯季潮动力接近。

由表 2 可发现输沙通量空间分布上呈口门高, 拦门沙低的特点, 这与潮流流速的分布特征是一致的, 位于河口的 L1 站流速明显高于拦门沙的 L2 站, 如大潮 L1 站最大流速为 123.9 cm/s , L2 站最大流速为 31 cm/s ; 小潮 L1 站最大流速为 117.8 cm/s , L2 站最大流速为 24 cm/s 。通过悬沙通量分解可发现洪季 L1 站垂岸输沙在小潮时期所有输沙项方向皆为向海, 而大潮时期前 3 项方向为向陆, 其中 T3 为与含沙量相关的潮变化项, 说明大潮时期潮动力增强, 涨潮

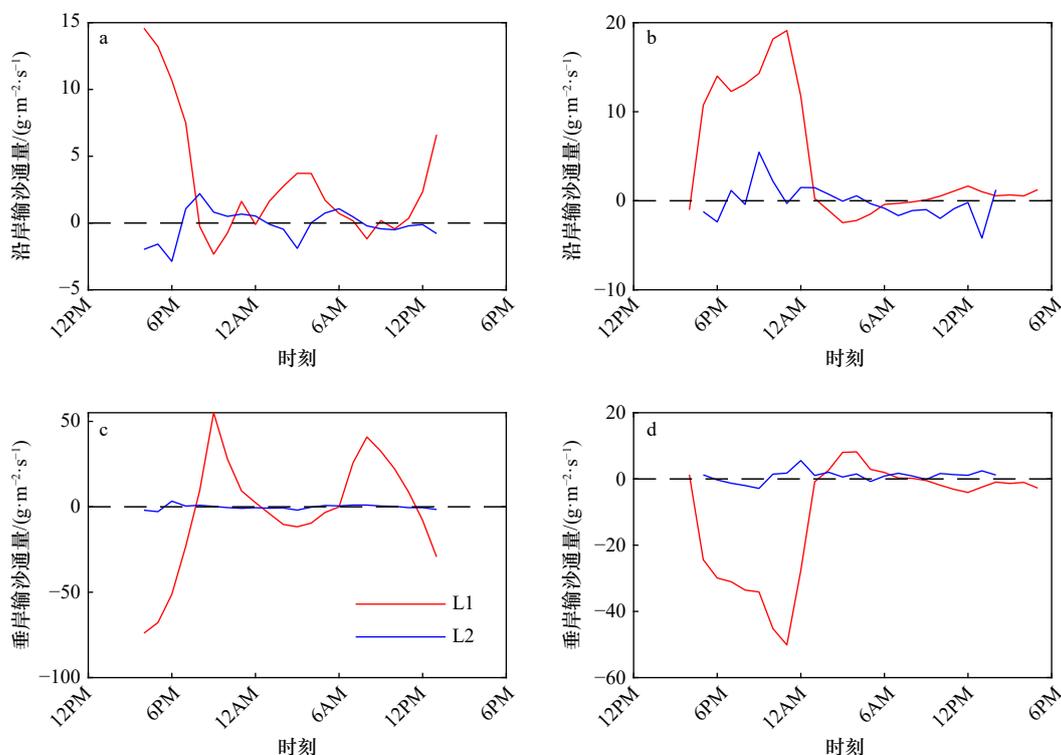


图 12 大潮逐时平均沿岸输沙通量(a); 小潮逐时平均沿岸输沙通量(b); 大潮逐时平均垂岸输沙通量(c); 小潮逐时平均垂岸输沙通量(d)

Fig. 12 Hourly average alongshore sediment transport flux during the spring tide (a); hourly average alongshore sediment transport flux during the neap tide (b); hourly average cross-shore sediment transport flux during the spring tide (c); hourly average cross-shore sediment transport flux during the neap tide (d)

流上溯输送了一部分泥沙。此外,在大小潮期间所有潮流输沙项求和后方向都与落潮流方向一致,即潮周期内总体仍以向海输运为主。对比大潮而言,小潮期间高径流量携沙增大了落潮阶段的含沙量,导致小潮期间垂岸输沙量显著增强。洪季拦门沙 L2 站垂岸方向的潮流输沙项大于平流输沙项,而沿岸方向是平流输沙项大于潮流输沙项,说明垂岸方向受潮动力影响显著,而沿岸方向受沿岸流影响显著。此外小潮期间的潮流输沙在垂岸方向发生转向,与涨潮流方向一致。

枯季拦门沙处 K1 站悬沙输运受潮汐与波浪共同影响, K1 站垂岸输沙通量在大中小潮的平均值分别为 $-8.44 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $-3.28 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $-3.35 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而 K1 站波高数据同样对应为大潮波高 > 小潮波高 > 中潮波高, 即拦门沙处大潮期间的潮动力和波浪动力皆为最大值, 使得输沙通量在大潮期间明显大于中潮与小潮期间的。枯季拦门沙东侧 K2 站垂岸输沙通量在大中小潮的平均值分别为 $0.57 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $-0.04 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $-0.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 与潮动力变化趋势一致, 即该区域垂岸输沙在大潮期间为涨潮流主导携沙向岸运输, 而后随着潮动力减弱转为离岸输运。

潮流输沙是受潮汐动力变化影响的自然现象, 潮动力在大小潮期间表现出显著差异, 这种差异导致涨落潮流速不一致, 进而对携沙力产生影响。此外泥沙的再悬浮和沉降过程以及其滞后效应, 导致悬沙含量在涨潮与落潮期间出现不对称性, 同时与流速的时间变化存在一定的相位差, 因此在潮周期内涨落潮对悬沙的输移作用无法完全抵消, 最终导致了净输沙现象的发生。

5.3 波浪影响

经统计, 洪季期间 L2 站波向主要为东南向, 占比超过 90%, 枯季期间 K1 与 K2 站的波向同样主要为东南向, 但相比于洪季要更为集中, 尤其是 $135^\circ \sim 150^\circ$, 占比能够达到 50% 以上。图 14 为 AWAC 测量的有效波高数据, 洪季 L2 站有效波高大潮平均值为 0.56 m ; 中潮平均值为 1.01 m ; 小潮平均值为 0.63 m , 中潮期间的波高要明显大于大潮与小潮波高。L2 站洪季大潮观测期间平均波高为 0.65 m , 小潮观测期间平均波高为 0.64 m , 大小潮波高相近, 而 L2 站洪季小潮期间垂岸输沙显著大于大潮期间的, 且方向相反, 这是由于大潮时期潮动力更强, 落潮流携沙离岸输运量为 $2.81 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而小潮期间潮动力减弱, 波浪向岸输沙量为 $11.48 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

枯季 K1 站有效波高大潮平均值为 0.59 m ; 中潮平均值为 0.42 m ; 小潮平均值为 0.53 m , 与洪季相反,

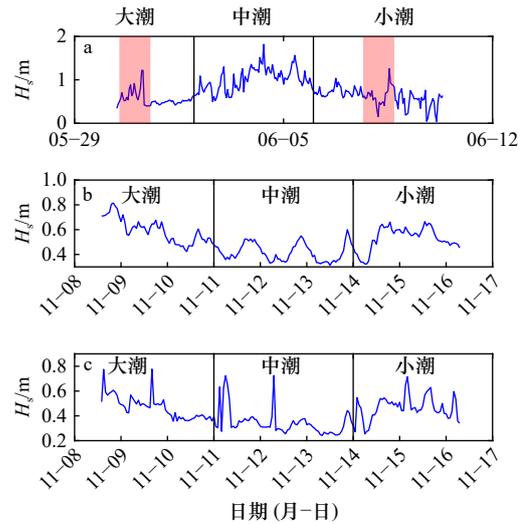


图 13 洪季 L2 站逐时有效波高, 红色部分为定点观测时间段 (a); 枯季 K1 站逐时有效波高 (b); 枯季 K2 站逐时有效波高 (c)

Fig. 13 Significant wave height for station L2 during the flood season, with the red part indicating the observation period (a); significant wave height for station K1 during the dry season (b); significant wave height for station K2 during the dry season (c)

中潮期间的波高要小于大潮与小潮波高, 而 K1 站沿岸输沙通量大小同样为 $F_{\text{大潮}} > F_{\text{小潮}} > F_{\text{中潮}}$, 说明拦门沙处沿岸输沙受波浪动力控制。枯季 K2 站有效波高大潮平均值为 0.47 m ; 中潮平均值为 0.35 m ; 小潮平均值为 0.47 m , 而枯季拦门沙东侧 K2 站大中小潮的沿岸输沙通量分别为 $2.83 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $1.36 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $3.29 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 说明该区域沿岸输沙受波浪与潮汐动力共同控制, 波生沿岸流携沙沿岸向东运输, 潮流携沙沿岸向左输运, 在二者共同影响下出现该结果。

5.4 漠阳江河口悬沙输移模式

河口泥沙在复杂动力结构驱动下不断进行着输移扩散过程。对于漠阳江河口悬沙来说, 河流携带入海的泥沙是重要来源, 同时泥沙再悬浮及随波浪带来的外海泥沙也是重要来源。河口悬沙在波浪和涨潮流的作用下向陆输移, 在此过程中, 受咸潮上溯等动力作用时空差异影响, 悬沙在垂向上也呈现着不同的分布规律, 各种动力因素相互耦合形成了河口悬沙输移模式。基于漠阳江河口洪枯季、大小潮的水动力的差异和悬沙输移过程的差异, 揭示漠阳江河口的悬沙输移模式。

洪季漠阳江河口口门处 (L1 站) 主控动力为径流与潮流, 下泄径流与落潮流影响下余流以向海输运为主, 在涨潮过程存在表层向海而底层向陆输运的差异。对比大潮而言, 小潮期间高径流量携沙增大了落

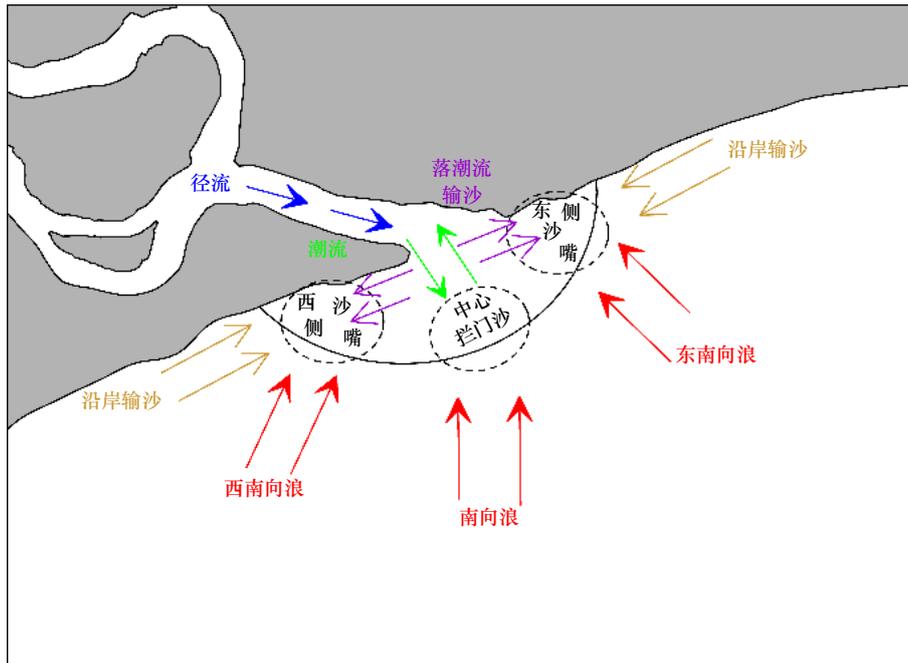


图 14 漠阳江河口悬沙输移模式示意图

Fig. 14 Schematic diagram of sediment transport model in Moyang River estuary.

潮阶段的含沙量,导致小潮期间垂岸输沙量显著增强。拦门沙处(L2站)主控动力为潮流与波浪,几乎不受径流影响,沿岸方向受波生沿岸流控制。对比大潮而言,小潮期间落潮流减弱,波浪作用更强,导致小潮期间由向海输沙转变为向陆输沙。

枯季漠阳江河口径流动力减弱,拦门沙(K1站)主控动力为潮流和波浪,垂岸输沙以落潮流携沙向海运输为主,而沿岸输沙受波浪动力控制,在波生沿岸流作用下沿岸向东输沙。拦门沙东侧(K2站)主控动力同样为潮流与波浪,垂岸输沙在大潮期间为涨潮流主导携沙向岸运输,之后随着潮动力减弱转为离岸运输;与垂岸输沙相比沿岸输沙量有明显增加,受波生沿岸流的影响沿岸向东输运。整体而言,潮流的向海输沙和波浪的沿岸输沙成为影响漠阳江河口地貌演变的最主要动力因素。基于上述内容,本文绘制漠阳江河口悬沙输移模式示意图如图14所示。

6 结论

河口的泥沙输运是河口海岸研究的热点问题,具有重要科学意义。论文以漠阳江河口为例,基于实测的海流、含沙量数据,计算了漠阳江河口口门与拦门沙处的泥沙输运通量,探讨波潮型河口的泥沙输移机制与运移规律,主要结论归纳如下:

(1)洪季口门处受径流作用主控,输沙量随着流量的增大而增大,沿岸输沙在大小潮期间皆为沿岸向东

运输,输沙量在大潮与小潮期间分别达到 $66.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $111.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,垂岸方向上皆为离岸运输,输沙量在大潮与小潮期间分别达到 $58.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $269.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;洪季拦门沙处则受波浪与潮流共同控制,沿岸输沙在大小潮期间皆为沿岸向西输运,输沙量在大潮与小潮期间分别达到 $3.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $2.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,垂岸方向上在大潮为离岸运输 $4.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,小潮为向岸运输 $19.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,这是由于大潮期间落潮流主导携沙向海运输,而小潮期间波浪主导携沙向岸运输。

(2)枯季漠阳江河口径流动力减弱,拦门沙处主控动力为潮流和波浪,垂岸输沙以落潮流携沙向海运输为主,输沙量在大中小潮期间分别达到 $8.44 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $3.28 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $3.35 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;而沿岸输沙受波浪动力控制,在波生沿岸流作用下沿岸向东输沙,输沙量在大中小潮期间分别达到 $5.17 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $1.96 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $3.87 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。拦门沙东侧主控动力同样为潮流与波浪,垂岸输沙在大潮期间为涨潮流主导携沙向岸运输,之后随着潮动力减弱转为离岸运输,输沙量在大中小潮期间分别达到 $0.57 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $-0.04 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $-0.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;与垂岸输沙相比沿岸输沙量有明显增加,受波生沿岸流的影响沿岸向东输运,输沙量在大中小潮期间分别达到 $2.83 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $1.36 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $3.29 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

(3)计算结果表明,洪季观测期间L1站向海输运显著,大潮期间各水层逐时平均垂岸输沙通量变化范围为 $-76.01 \sim 98.95 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;小潮期间各水层逐时平均垂岸输沙通量变化范围为 $-25.61 \sim 35.32 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,垂向

输运不一致, 涨潮时刻受淡水团与咸潮上溯影响出现水层流向分化, 表层向海输运, 底层向陆输运, 但潮平均计算后各水层皆为向海输运。L2 站大小潮时段垂向上各水层流向一致, 但潮平均计算后大潮各水层向海输运, 小潮各水层向岸输运, 小潮期间受波浪作用明显, 向岸输运占比达到 79%。

(4) 对于漠阳江河口等波潮型河口来说, 河流携带入海的泥沙是重要来源, 同时泥沙再悬浮及随波浪带来的外海泥沙也是重要来源。河口口门处在下泄径流与落潮流影响下以向海输沙为主。而口门外拦门沙处影响泥沙输运的最主要因素是潮流的向海输沙和波浪的沿岸输沙。

参考文献:

- [1] Nienhuis J H, Ashton A D, Roos P C, et al. Wave reworking of abandoned deltas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(22): 5899–5903.
- [2] Mayerle R, Narayanan R, Etri T, et al. A case study of sediment transport in the Paranagua Estuary Complex in Brazil[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 161–174.
- [3] Cheng P, Li M, Li Y. Generation of an estuarine sediment plume by a tropical storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(2): 856–868.
- [4] Du J B, Shen J. Transport of riverine material from multiple rivers in the Chesapeake Bay: important control of estuarine circulation on the material distribution[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(11): 2998–3013.
- [5] Harris C K, Sherwood C R, Signell R P, et al. Sediment dispersal in the northwestern Adriatic Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C11): C11S03.
- [6] Bever A J, Harris C K, Sherwood C R, et al. Deposition and flux of sediment from the Po River, Italy: an idealized and wintertime numerical modeling study[J]. *Marine Geology*, 2009, 260(1/4): 69–80.
- [7] Xue Z, Liu J P, DeMaster D, et al. Late Holocene evolution of the Mekong subaqueous delta, southern Vietnam[J]. *Marine Geology*, 2010, 269(1/2): 46–60.
- [8] Nowacki D J, Ogston A S, Nittrouer C A, et al. Sediment dynamics in the lower Mekong River: transition from tidal river to estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(9): 6363–6383.
- [9] Passalacqua P, Lanzoni S, Paola C, et al. Geomorphic signatures of deltaic processes and vegetation: the Ganges-Brahmaputra-Jamuna case study[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(3): 1838–1849.
- [10] Higgins S A, Overeem I, Steckler M S, et al. InSAR measurements of compaction and subsidence in the Ganges-Brahmaputra Delta, Bangladesh[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119(8): 1768–1781.
- [11] Heise B, Harff J, Ren J, et al. Patterns of potential sediment erosion in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 82: S62–S82.
- [12] Hu Jiatang, Li Shiyu, Geng Bingxu. Modeling the mass flux budgets of water and suspended sediments for the river network and estuary in the Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 88(2): 252–266.
- [13] 潘存鸿, 曾剑, 唐子文, 等. 钱塘江河口泥沙特性及河床冲淤研究 [J]. *水利水电工程学报*, 2013(1): 1–7.
Pan Cunhong, Zeng Jian, Tang Ziwen, et al. A study of sediment characteristics and riverbed erosion/deposition in Qiantang estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(1): 1–7.
- [14] 李谊纯, 董德信, 王一兵. 北仑河口及其邻近海域物质输运滞留时间研究 [J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 33(2): 56–63.
Li Yichun, Dong Dexin, Wang Yibing. Transport time scale in the Beilun River estuary and its adjacent area[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 33(2): 56–63.
- [15] 董德信, 陈波, 李谊纯, 等. 基于平面二维潮流模型的北仑河口悬沙输运与底床冲淤数值模拟 [J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(6): 16–21.
Dong Dexin, Chen Bo, Li Yichun, et al. Numerical simulation of suspended sediment transport and seabed change in the Beilun Estuary based on a two-dimensional tidal current model[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(6): 16–21.
- [16] Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems[J]. *Deltas: Models for Exploration*, 1975: 88–98. (查阅网上资料, 未找到对应的卷期号信息, 请确认)(查阅网上资料, 请核对文献类型及格式)
- [17] 李爽, 詹文欢, 姚衍桃. 漠阳江入海口海岸线分维及其机制分析 [J]. *海洋通报*, 2019, 38(2): 210–216.
Li Shuang, Zhan Wenhuan, Yao Yantao. Analysis of fractal dimension mechanism in coastline of the Moyang River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(2): 210–216.
- [18] 周建刚. 双捷水文站河床冲淤情况分析 [J]. *大众科技*, 2015, 17(5): 41–43.
Zhou Jiangan. Analysis on riverbed scouring and siltation of Shuangjie hydrological station[J]. *Popular Science & Technology*, 2015, 17(5): 41–43.
- [19] 赵亮, 余丹亚, 林文升. 漠阳江下游河网区主要航道维护水深分析及建议 [J]. *珠江水运*, 2023(21): 109–111.
Zhao Liang, Yu Danya, Lin Wensheng. Analysis and suggestion on maintenance water depth of main channel in river network area of lower reaches of Moyang River[J]. *Pearl River Water Transport*, 2023(21): 109–111. (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认)
- [20] 刘强, 汤民强, 贺惠忠, 等. 广东阳西沙扒海域埋藏古河道沉积特征 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2022, 52(6): 1791–1799.
Liu Qiang, Tang Minqiang, He Huizhong, et al. Sedimentary characteristics of buried ancient channels in Shapa area of Yangxi, Guangdong Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(6): 1791–1799.

- [21] 刘润, 李志强, 朱道恒, 等. 风暴后海陵岛金沙滩恢复期床面高度变化分析 [J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(8): 22–31.
Liu Run, Li Zhiqiang, Zhu Daoheng, et al. Analysis of bed level elevation during beach recovery after storm on Golden Beach, Hailing Island, Guangdong[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(8): 22–31.
- [22] Dyer K R. The salt balance in stratified estuaries[J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1974, 2(3): 273–281.

Study on sediment transport in a wave and tide dominated estuary: a case study of Moyang River estuary in western Guangdong Province

Huang Enmao^{1,2,3,4}, Zhang Tao^{1,2,3,4}, Liu Dezheng^{1,2,3,4}, Zhu Zhiyuan^{1,2,3,4}, Liang Yao^{1,2,3,4}, Jia Liangwen^{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. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai, 519000; 3. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Coasts, Islands and Reefs, Guangzhou 510275, China; 4. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Sediment transport is a fundamental issue in the study of coastal and estuarine environments, holding significant scientific importance and practical value for the evolution of estuarine geomorphology, ecological environment, and engineering construction. This paper takes the estuary of the Moyang River as an example, based on the sea current, wave and suspended sediment concentration data measured by ship and bottom tripod, analyzes the alongshore and cross-shore transport trends of suspended sediment on the fixed cross-section of the Moyang River estuary, and calculates the sediment transport flux. It explores the sediment transport mechanisms and patterns in wave-tidal estuaries, with the main findings including: (1) During the flood season at the river mouth, the sediment transport is mainly controlled by the runoff, with the sediment transport rate increasing as the flow rate increases. The alongshore and cross-shore sediment transport reaches the maximum value during the neap tide with the largest flow, which are 111.9 g/m²/s and 269.5 g/m²/s respectively. At the mouth bar in the flood season, the sediment transport is jointly controlled by waves and tides. The alongshore sediment transport is consistently westward along the coast during both spring and neap tides, while the cross-shore sediment transport is dominated by the ebb tide during the spring tide with an offshore transport of 4.0 g/m²/s, and by waves during the neap tide with an onshore transport of 19.0 g/m²/s. (2) During the dry season, the mouth bar is primarily influenced by tidal currents and wave action. Sediment transport along the vertical shore predominantly occurs due to falling tidal currents moving seaward, while coastal transport is governed by wave energy, resulting in an eastward movement under the influence of wave-generated coastal currents. On the eastern side of the mouth bar during this season, tidal currents and waves also play a significant role; vertical shore transport is mainly driven by rising tides during spring tide periods before transitioning to offshore transport as tidal forces diminish. Coastal transport remains affected by wave-induced coastal currents and continues its eastward trajectory. (3) During the flood season observation period, the offshore transport at the river mouth is significant, and the flow direction of each water layer is consistent vertically. During the neap tide, there is a differentiation in the flow direction of the water layers, with the surface layer transporting offshore and the bottom layer onshore. At the mouth bar, the flow direction of each water layer is relatively consistent vertically during both spring and neap tides. Still, after tidal averaging, the spring tide shows offshore transport in all water layers, while the neap tide shows onshore transport in all water layers. During the neap tide, the influence of waves is evident, with the onshore transport ratio reaching 79%. (4) Under the influence of runoff and tidal current, the mouth of Moyang River estuary mainly carries sediment to the sea. The most significant factors affecting sediment transport at the mouth bar are the seaward tidal currents and the alongshore and cross-shore sediment movements driven by waves.

Key words: Moyang River estuary; Alongshore sediment transport; Cross-shore sediment transport; Wave and tidal current action.