

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.011

淤泥质海岸岬湾沙滩沙泥分界特征及机理

黄君宝^{1,2}, 刘旭^{1,2}, 姚文伟^{1,2}, 黄世昌^{1,2}

(1. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310012;

2. 浙江省河口海岸重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要:以浙江省淤泥质海岸岬湾沙滩为研究对象,剖析了影响沙泥分界点位置的主要因素和沙泥分界的影响机理,并提出了岬湾沙滩沙泥分界点高程计算公式。结果表明:潮位、滩前波高、沙滩坡度和潮差是影响沙泥分界点位置的主要因素;沙泥分界点深度与滩前 1/10 大波平均波高和大潮平均潮差呈正相关关系,与沙滩坡度呈负相关关系;沙泥分界点位置呈现季节性变化和年际变化,夏季沙泥分界点位置向海外移且高程下降、冬季分界点向岸上溯,2020 年比 2019 年的沙泥分界点位置呈现向海外移、高程下降的趋势。

关键词:岬湾沙滩;沙泥分界;淤泥质海岸;演化机理;经验公式

中图分类号:P737.1

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)04-0078-07

Characteristics and mechanisms of sand-mud transition in embayed beach of muddy coast

HUANG Junbao^{1,2}, LIU Xu^{1,2}, YAO Wenwei^{1,2}, HUANG Shichang^{1,2}

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310012, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Estuarine and Coastal Areas, Hangzhou 310012, China)

Abstract: This study focuses on the muddy-coastal headland bay beaches in Zhejiang Province, identifies the primary factors influencing the position of the sand-mud boundary, and analyses the transition mechanism. A depth formula of the sand-mud boundary point in headland bay beaches is proposed. The results show that: the tide level, wave height, beach slope and spring mean tide range in front of the beach are the main factors affecting the location of sand-mud boundary; the depth of sand-mud boundary is positively correlated with the 1/10 wave height in front of the beach and the spring mean tide range, and negatively correlated with the slope of the beach; the position of the sand-mud boundary exhibits seasonal and inter-annual variations. During summer, the sand-mud boundary tends to shift seaward and decrease in elevation, while in winter, it moves landward. Notably, in 2020, compared to 2019, the sand-mud boundary showed a clear trend of seaward migration and a decrease in elevation.

Key words: embayed beach; sand-mud transition; muddy coast; evolutionary mechanism; empirical formula

具有“湾后青山、湾内沙滩、湾外泥滩”格局特征的淤泥质海岸岬湾沙滩是宝贵的自然资源^[1],在世界范围内并不多见,但在我国江苏、上海和浙江沿海普遍存在。淤泥质海床与岬湾沙滩之间存在沙泥掺混过渡带^[2],形成特有的沙滩动力地貌系统。黄世昌等^[3]系统调查了浙江沿海岬湾沙滩多处典型剖面,发现淤泥质海岸环境下的岬湾沙滩滩面基本呈现单一坡度且存在泥化现象,且浙江沿海沙滩普遍存在退化现象。Zhao 等^[4]研究认为沙泥掺混过渡带会出现迁移现象,且河口区域海滩的沙泥掺混过渡带主要向岸侧迁移。因建堤阻隔导致沙滩来沙减少等诸多原因,岬湾沙滩易出现退化和泥化现象^[5]。设定沙泥掺混过渡带中粉砂黏土质量分数超过 20% 的位置为泥化位置即沙泥分界点位置,这是岬湾沙滩动力地貌变化最直观的定量指标之一,其变化规律能反映岬湾沙滩地貌演变特征。近年来,在海岸带生态修复过程中对诸多沙滩进行了人工修复,对修复后的沙滩在高含沙量和强淤积海岸环境下的泥化预测显得尤为重要。

国内外已开展诸多淤泥质海岸岬湾沙滩泥化的相关研究^[6-7],而 George 等^[8]通过分析沙泥掺混过渡带

基金项目:浙江省水利厅科技计划项目(RB2215)

作者简介:黄君宝(1978—),男,高级工程师,博士,主要从事水沙动力学及河口海岸数值模拟研究。E-mail: Huangjb@zjwater.gov.cn

引用本文:黄君宝,刘旭,姚文伟,等.淤泥质海岸岬湾沙滩沙泥分界特征及机理[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):78-84.

HUANG Junbao, LIU Xu, YAO Wenwei, et al. Characteristics and mechanisms of sand-mud transition in embayed beach of muddy coast

[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(4): 78-84.

沉积物组分,发现沙泥掺混过渡带位置与近岸有效波高成正比;Dunbar 等^[9]发现波浪引起的底部剪应力是影响沙泥掺混过渡带深度变化的主要因素。国外开展的相关研究大多基于自然复合海岸,几乎不考虑泥质供给,与国内复合海岸沉积环境相差较大^[10]。国内对沙滩泥化现象研究起步较晚,多是基于砂质海滩泥化的具体案例,且多为沉积物起动与水动力关系的研究^[11-13]。徐啸等^[14]通过野外调查和物理模型试验等方法,对厦门同安湾人工沙滩的泥化机制进行了研究,认为沙泥掺混过渡带的形成主要受波浪动力条件影响。徐啸等^[15]通过调查厦门岸滩类型,指出厦门湾岸滩存在一个沙泥分界点的高程指标,且与当地近岸波浪条件密切相关。砂质海滩沉积物冲淤变化较为敏感,会随着风浪流等环境因素的变化而变化^[16]。蔡锋^[17]发现在波浪能不足时,砂泥复合型砂质海滩会出现泥化现象。

综上,泥化现象在淤泥质海岸岬湾沙滩中虽然普遍存在,但对沙泥分界讨论主要集中在沙泥掺混过渡带,沙泥分界点位置的影响因素和机理研究较少。本文选取浙江省淤泥质海岸岬湾沙滩为代表,研究了影响沙泥分界点位置(本文主要用深度或高程进行表征)的主要因素,并探究其影响机理,提出了岬湾沙滩沙泥分界点深度的计算公式,以期对沙滩修复的设计和运维提供参考。

1 研究区概况

浙江沿海沙滩以岬湾沙滩为主,外侧海域为细颗粒泥沙组成的平坦滩涂海床,由长江入海泥沙南输和邻近大型河流输沙堆积形成。陆域沿岸沙滩基本上分布在受河口入海泥沙直接影响较小的岸线,包括浙中象山海岸和浙南苍南东海岸。其中,前者处于椒江口以北,后者则在鳌江口以南。海岛沙滩主要分布在浙北舟山群岛、浙中临海、洞头和玉环岛屿。浙江岬湾沙滩规模形态不一,滩前动力条件多样,可作为淤泥质海岸岬湾沙滩泥化问题的研究区域。

浙江沿海绝大多数海区属于正规半日潮海区,浙北的舟山海域嵎泗大潮平均高潮位为 1.95 m,平均潮差 3.3 m;浙中象山海域大目涂海域大潮平均高潮位为 2.19 m,平均潮差为 3.7 m;浙南苍南海域大潮平均高潮位为 2.92 m,平均潮差为 5.2 m。沿海冬季盛行西北方向至东北方向范围的风,夏季盛行南方向至东南方向范围的风,年平均风速为 3~5 m/s。

浙江沿海波浪向基本与各季风向一致,随着季节风向而变化,且涌浪占有重要地位。各沙滩受风、岛屿阻挡等多重因素影响,波浪条件不一:如象山松兰山沙滩和皇城沙滩滩前年均波高 0.5 m,而象山下沙滩和大岙沙滩的海域受岛屿阻挡,波浪相对较弱,年均波高基本在 0.2 m,苍南渔寮沙滩采用邻近琵琶门长期波浪资料,年均波高 0.7 m,舟山南长涂沙滩、基湖沙滩的年均波高分别为 1.2 m 和 1.4 m。

2 研究资料及分析

2.1 数据来源

选取浙江北部的朱家尖东沙滩、南部的苍南渔寮沙滩和中部的石浦皇城沙滩、温岭洞下沙滩作为典型沙滩进行沙泥分界特征研究,分别于 2019 年 6 月、8 月、11 月和 2020 年 11 月对上述 4 个沙滩进行了潮上带、潮间带和潮下带的现场表层深度 20 cm 范围内取样,通过颗分试验分析泥沙样品组分占比,确定沙泥分界点位置。典型沙滩位置及取样位置如图 1 所示。

2.2 沙泥分界点变化规律

2019—2020 年各沙滩取样点的泥化判别及高程见表 1,其中 2019 年 11 月和 2020 年 11 月可代表常浪沙滩剖面形态,2019 年 6 月、8 月和 11 月可分别代表超强台风“利奇马”登陆前、登陆后和恢复后的沙滩剖面形态。本文主要关注泥化区域取样点高程,因此在表 1 中未列出非泥化区域的取样点高程。

从表 1 可以看出,朱家尖东沙滩的取样点在超强台风“利奇马”登陆前和登陆后均无泥化迹象,但台风作用影响恢复后的取样处 4 已出现泥化现象,沙泥分界点高程约-3.3 m,沙泥分界点位置有季节性变化现象。从年际变化来看,2020 年 11 月沙泥分界点位置介于取样点 4 和 5 之间,高程约-4.1 m,2019 年 11 月的沙泥分界点位置介于取样点 3 和 4 之间,高程约-3.3 m,呈现沙泥分界点位置向海外移、高程下降的趋势。

石浦皇城沙滩在超强台风“利奇马”登陆前和登陆后取样点 4 和 5 均有泥化现象,但到 11 月台风作用影响恢复后取样点 3、4、5 均已存在泥化现象,表明同朱家尖东沙滩一样,石浦皇城沙滩的沙泥分界点位置也呈现季节性变化现象。从年际变化来看,2020 年 11 月沙泥分界点位置介于取样点 4 和 5 之间,高程约-3.0 m,相比 2019 年 11 月而言,也呈现沙泥分界点位置向海外移、高程下降的趋势。

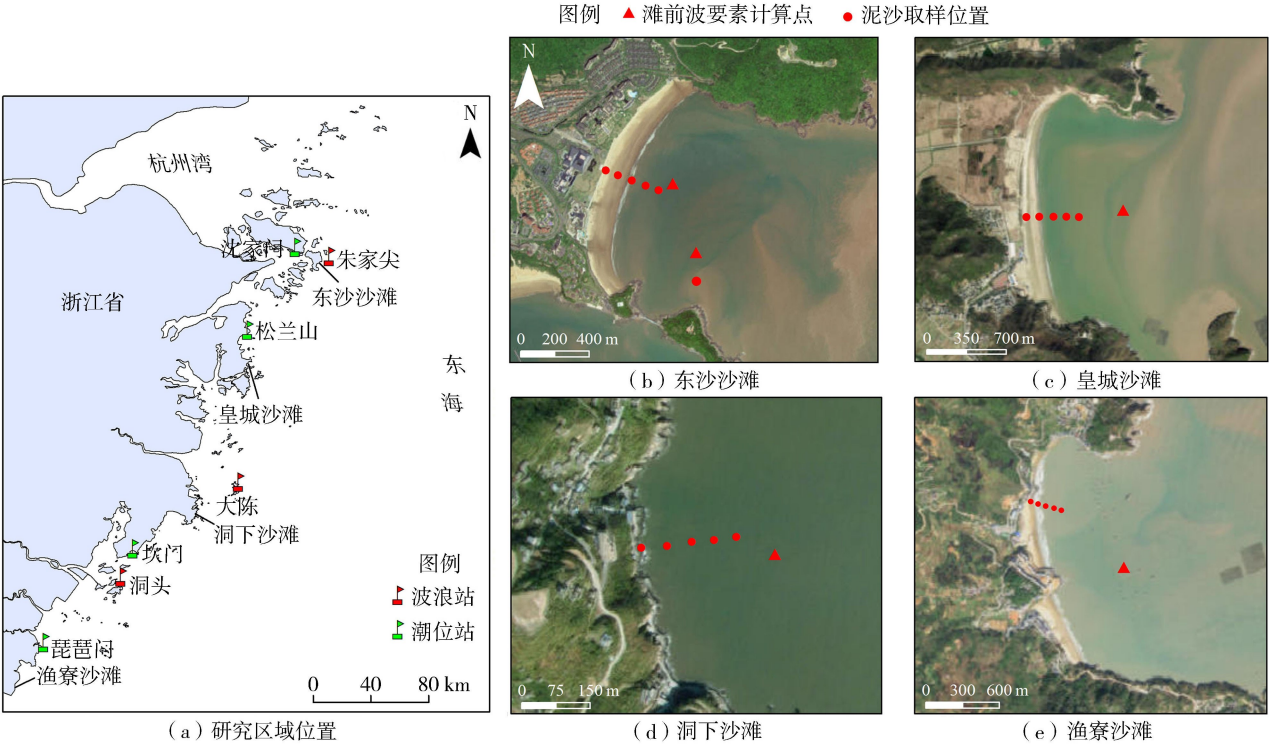


图 1 研究区域位置及取样点和波要素计算点分布

Fig.1 Study area location and distribution of sampling points and calculation points of wave elements

表 1 沙滩取样点泥化判别

Table 1 Argillation discrimination of beach sampling sites

取样点	2019 年 6 月		2019 年 8 月		2019 年 11 月		2020 年 11 月	
	是否泥化	取样点高程/m	是否泥化	取样点高程/m	是否泥化	取样点高程/m	是否泥化	取样点高程/m
东沙-1	否		否		否		否	
东沙-2	否		否		否		否	
东沙-3	否		否		否		否	
东沙-4	否		否		是	-3.3	否	
东沙-5	否		否		是	-4.0	是	-4.1
皇城-1	否		否		否		否	
皇城-2	否		否		否		否	
皇城-3	否		否		是	-2.8	否	
皇城-4	是	-2.8	是	-2.8	是	-2.8	否	
皇城-5	是	-3.0	是	-3.0	是	-3.0	是	-3.0
洞下-1	否		否		否		否	
洞下-2	否		否		否		否	
洞下-3	否		否		是	-2.88	否	
洞下-4	否		否		是	-5.34	否	
洞下-5	否		否		是	-6.36	否	
渔寮-1	否		否		否		否	
渔寮-2	否		否		否		否	
渔寮-3	否		否		否		否	
渔寮-4	否		否		否		否	
渔寮-5	否		否		是	-5	否	

注: 粉砂黏土质量分数超过 20% 时判定为泥化。取样点编号从岸向海增大, 即取样点处 1 为靠岸侧, 取样点 5 为靠外侧。

温岭洞下沙滩和苍南渔寮沙滩在超强台风“利奇马”登陆前后均无泥化迹象, 但到 11 月台风影响恢复后的取样中均已存在泥化现象。而 2020 年 11 月各取样点均未检测到泥化迹象, 表明年际上看此两处沙滩同样存在沙泥分界点位置向海外移、高程下降的趋势。

综上, 淤泥质海岸岬湾沙滩存在沙泥分界点位置, 这些位置呈现年际变化和季节性变化。由表 1 可知,

沙泥分界点位置呈现夏季向海下移、冬季向岸上溯的变化规律,2020 年比 2019 年的沙泥分界点位置呈现向海外移、高程下降的趋势。

3 沙泥分界影响机理

为进一步探究动力条件、沙滩形态等因素对沙泥分界点位置的影响,收集 2015 年和 2019—2020 年调研的 10 处沙滩的形态特征、滩前动力条件等部分参数(表 2),沙滩剖面如图 2 所示。

表 2 沙滩区域部分参数特征

Table 2 Partial parameter characteristics of embayed beach area

沙滩名称	H_{MHWS}/m	H_{MLWS}/m	$\Delta Z/m$	$H_{1/10}/m$	H_{sm}/m	i	B/m	D/m	L/m
嵊泗基湖	1.95	-1.38	3.33	1.40	-5.00	0.020 0	400	676	1 840
嵊泗南长涂	1.95	-1.38	3.33	1.20	-4.50	0.037 0	130	869	2 820
朱家尖南沙	1.56	-1.15	2.71	1.00	-4.00	0.031 3	270	1 200	2 740
朱家尖东沙*	1.56	-1.15	2.71	1.00	-4.10	0.024 0	420	1 200	1 980
象山下沙	2.19	-1.50	3.69	0.20	-1.23	0.071 4	69	383	715
象山大岙	2.19	-1.50	3.69	0.15	-1.36	0.062 5	90	167	645
象山松兰山	2.19	-1.50	3.69	0.40	-3.15	0.047 6	151	800	540
象山皇城*	2.51	-1.78	4.29	0.93	-3.00	0.031 3	190	1 135	1 690
温岭洞下*	2.34	-1.36	3.70	1.05	-3.50	0.035 7	230	280	490
苍南渔寮*	2.92	-2.26	5.18	1.20	-5.00	0.016 7	540	932	1 930

注: * 表示 2019—2020 年调研沙滩,其余为 2015 年调研沙滩。 H_{MHWS} 、 H_{MLWS} 分别为大潮平均高潮位、低潮位; ΔZ 为大潮平均潮差; $H_{1/10}$ 为滩前 1/10 大波平均波高; H_{sm} 为沙泥分界点高程; i 为沙滩坡度; B 为沙滩宽度; D 为岬湾进深; L 为岬湾长度。

3.1 沙泥分界点与滩前动力关系

潮汐是河口海岸水动力的重要组成部分,潮位则是潮汐的重要表征^[3]。由表 2 可知,虽然相近区域沙滩潮位特征相似,但其沙泥分界点高程仍会存在较大差异,如象山的下沙、大岙、松兰山和皇城等沙滩,在相似的潮汐条件下沙泥分界点高程介于-1.23 ~ -3.15 m,表明潮水作为滩前动力的托载体可能主要影响潮水所达区域的沙泥分界点位置,且沙泥分界点位置还受其他因素影响。为进一步探究潮位与沙泥分界点位置的关系,分别将沙泥分界点位于大潮平均高潮位、大潮平均低潮位和该两

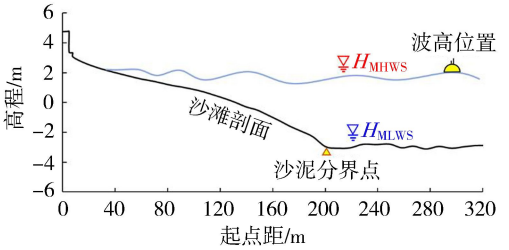


图 2 沙滩剖面示意图
Fig. 2 Sketch map of beach profile

潮位平均值以下的深度记为 h_{mh} 、 h_{ml} 和 h_{ae} 。由图 3(a)可知, H_{sm} 与 h_{mh} 、 h_{ml} 、 h_{ae} 均具有较好的相关性,其中与 h_{ae} 相关性最佳,相关系数 R^2 达 0.996 9。因此,沙泥分界点位置与潮位具有显著相关性,但在邻近区域的沙泥分界点高程并不一致,表明有其他动力因素共同影响决定沙泥分界点高程。

由图 3(b)可知, $H_{1/10}$ 与沙泥分界点深度均具有较好的相关性,特别是 h_{ae} 与 $H_{1/10}$ 的相关系数 R^2 达 0.953 9。由图3可知,沙泥分界点位置必然与潮位有紧密关系,但滩前波浪是决定沙泥分界点位置的显著动

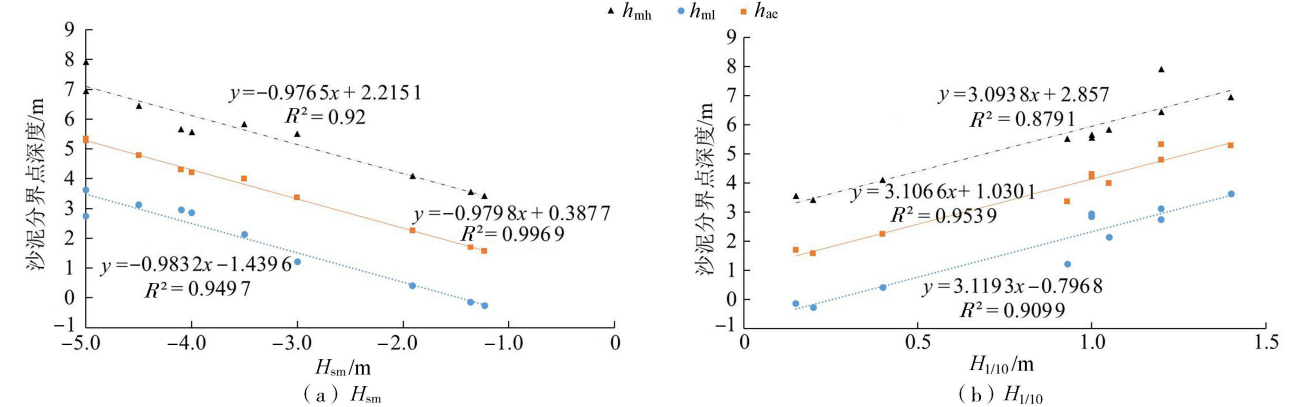


图 3 沙泥分界点深度与 H_{sm} 和 $H_{1/10}$ 的关系

Fig. 3 Relationship between depth of sand-mud boundary and characteristics of spring tide and $H_{1/10}$ wave height in front of the beach

力条件,滩前波浪作用越强,泥沙分界点高程越低,反之,当滩前波浪作用越弱,则泥沙分界点高程越高。在波浪掀沙的同时,潮流输移悬移质对沙滩和沙泥混合过渡带的塑造及演变具有重要作用,波浪和潮流这两种动力及其输移物质造床的彼此消长引起沙泥分界点移动。

3.2 沙泥分界点与沙滩形态和岬角关系

选取沙滩坡度和沙滩宽度作为表征沙滩形态的指标,选取沙泥分界点深度 h_{ac} (式(1))作为沙泥分界点位置指标,探讨沙滩形态与沙泥分界点位置之间的关系。

$$h_{ac} = \frac{H_{MHWS} + H_{MLWS}}{2} - H_{sm}$$

(1)

由图4可知,沙泥分界点位置与沙滩坡度的相关性明显较好($R^2=0.8308$)。由图5可知, $H_{1/10}$ 与沙滩坡度相关性较好($R^2=0.8117$),表明对于大部分粒径基本相近的沙滩,沙滩坡度与滩前来波条件相关性高,滩前波高越大则沙滩坡度越缓, $H_{1/10}$ 越小,则沙滩坡度越陡。例如,象山东海岸的下沙、大岙、松兰山和皇城4处沙滩的粒径与朱家尖沙滩、嵊泗基湖沙滩和渔寮南沙滩的粒径基本相近,滩面平均中值粒径为0.18~0.23 mm,象山东海岸下沙与大岙沙滩滩前海域受岛屿阻挡波高较小,实测 $H_{1/10}$ 仅0.10 m,沙滩坡度基本为1:15;松兰山和皇城沙滩 $H_{1/10}$ 则可达0.50 m,沙滩坡度为1:20;苍南渔寮 $H_{1/10}$ 达0.70 m,沙滩坡度约1:60;从波浪的传播看,嵊泗基湖沙滩前沿波浪要大于朱家尖南沙沙滩,前者滩面坡度为1:50,后者为1:30。因此,波浪作用是岸滩剖面塑造的主要影响因素,但需要注意的是,沙滩坡度也与组成沙滩的粒径、滩前地形等诸多因素有关,但不能用波浪进行影响表征。

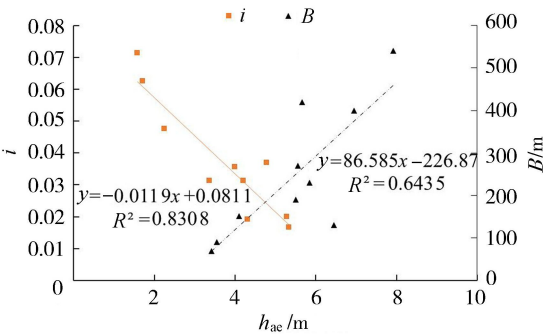


图4 h_{ac} 与沙滩形态的关系

Fig. 4 Relationship between position of sand-mud boundary and beach morphology

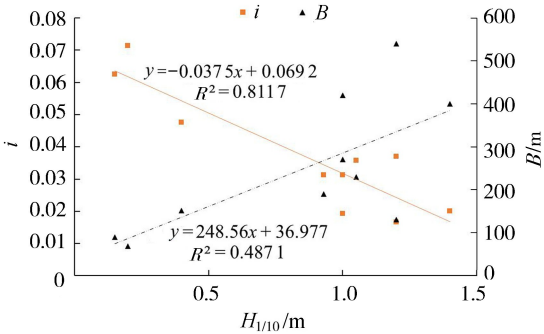


图5 $H_{1/10}$ 与沙滩形态的关系

Fig. 5 Relationship between $H_{1/10}$ of beach and beach morphology

除了沙滩坡度外,沙泥分界点位置可能也与沙滩宽度存在一定联系($R^2=0.6435$),即沙滩越宽则沙泥分界点深度可能越深,但存在不同情况,如嵊泗南长涂沙滩和朱家尖东沙沙滩,两者泥化位置接近,而沙滩宽度相差近300 m,表明沙滩宽度并非影响沙泥分界点高程的主要因素。

由图6可知,沙泥分界点位置与岬湾进深、岬湾长度并无显著的相关关系。

3.3 沙泥分界点位置公式

波浪和推移质运动是岬湾沙滩形成及变化的主要动力因子,潮流输移悬移质则是淤泥质海岸塑造及演变的主要动力因素,两种动力及其输移物质造床的彼此消长导致了沙泥分界点的上下移动^[10]。当波浪进入浅水区域时,底部泥沙搬运

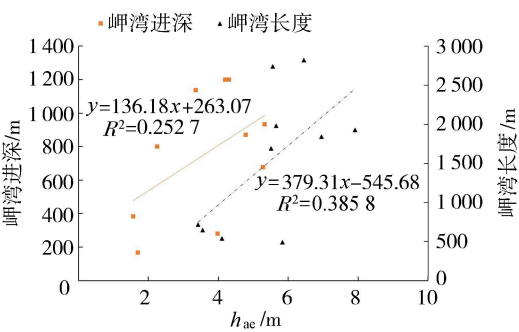


图6 沙泥分界点位置与岬湾形态关系

Fig. 6 Relationship between position of sand-mud boundary and morphology of headland bay

量增大,沙滩物质向岸运动,并被带到波浪破碎区,最后被上冲水流带到滩面堆积。由于外海悬沙为细颗粒泥沙,潮下带及邻近水下沉积物亦为细颗粒泥沙,这些泥沙随水体参与沙滩的塑造,波浪接近滩面时发生破碎,波前锋形成一小而陡的破碎面,该处水流紊动强烈,极易使细颗粒泥沙悬浮,这些悬浮的细颗粒物质则被离岸流(如底流和落潮流)带向外海,这是沙滩和沙泥掺混过渡带存在的主要原因。沙滩坡度受波浪和沉积

物粒径等诸多因素共同影响确定,是反映沙滩形态的综合性指标,对沙泥分界点位置具有显著影响,因而得出:

$$f(h_{ae},H_{1/10},i,\Delta Z)=0$$

(2)

将沙泥分界点深度表示为无量纲形式:

$$h_{ae}/\Delta Z=k\left(H_{1/10}/\Delta Z\right)^xi^y$$

(3)

式中 k 为系数。

对式(3)进行参数率定后,最终得到表达式为

$$h_{ae}=2.639H_{1/10}^{0.717}\Delta Z^{0.283}i^{-0.031}$$

(4)

结合式(1)可得:

$$H_{sm}=(H_{MHWS}+H_{MLWS})/2-2.639H_{1/10}^{0.717}\Delta Z^{0.283}i^{-0.031}$$

(5)

由图 7 可知,拟合相关系数 $R^2=0.92$,表明式(5)计算值与实测值具有良好的一致性,即沙泥分界点深度与 $H_{1/10}$ 和大潮平均潮差呈正相关关系,与沙滩坡度呈负相关关系。式(5)可以较好地说明沙泥分界点位置存在年际变化和季节性变化的原因,如夏季沙滩的 $H_{1/10}$ 和大潮平均潮差一般较冬季大,因此夏季沙泥分界点位置易向海侧移动,沙泥分界点高程相应下降,而冬季产生沙泥分界点向岸上溯。需要注意的是,在沙滩修复中沙滩坡度需要结合实际情况确定,而不能人为增大或减小沙滩坡度,否则易产生沙滩冲蚀流失或泥化上移现象。

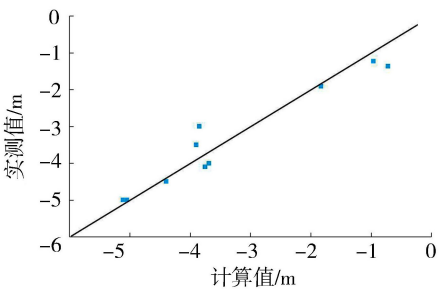


图 7 沙泥分界点高程计算值与实测值对比
Fig.7 Comparison of calculated and measured values for elevation of sand-mud boundary

4 结 论

- a. 沙泥分界点位置呈年际变化和季节性变化,夏季沙泥分界点位置向海外移且高程下降,冬季分界点向岸上溯,2020 年比 2019 年的沙泥分界点位置呈现向海外移、高程下降的趋势。
- b. 基于实测资料分析,发现潮位、滩前波高、沙滩坡度和潮差是影响沙泥分界点位置的主要因素。
- c. 提出了沙泥分界点高程计算公式,沙泥分界点深度与 $H_{1/10}$ 和大潮平均潮差呈正相关关系,与沙滩坡度呈负相关关系。

参考文献:

[1] 蔡锋,刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新[J]. 应用海洋学学报,2019,38(4):452-463. (CAI Feng,LIU Gen. Beach nourishment development and technological innovations in China;an overview[J]. Journal of Applied Oceanography,2019,38(4):452-463. (in Chinese))

[2] MCCAIVE I N. Transport and escape of fine-grained sediment from shelf areas[C]//SWIFT D J P,DUANE D,PILKEY O H. Shelf Sediment Transport. Stroudsburg:Hutchinson and Ross,1972;225-248.

[3] 黄世昌,姚文伟,刘旭,等. 淤泥质海床相邻的岬湾沙滩剖面特征研究[J]. 海岸工程,2016,35(4):1-9. (HUANG Shichang, YAO Wenwei,LIU Xu,et al. Profile characteristics of the beaches adjacent to muddy seabed in the Headland Bays[J]. Coastal Engineering,2016,35(4):1-9. (in Chinese))

[4] ZHAO Shao-hua,CAI Feng,QI Hongshuai,et al. Contrasting sand-mud transition migrations in estuarine and bay beaches and their potential morphological responses[J]. Geomorphology,2020,365:107243.

[5] 李明佳,孙志林,龚玉萌,等. 基于 Delft-3D 的砂泥共存海滩数值模拟[J]. 科技通报,2019,35(7):109-113. (LI Mingjia, SUN Zhilin,GONG Yumeng,et al. Numerical simulation of sand-mud coexisting beach based on Delft-3D[J]. Bulletin of Science and Technology,2019,35(7):109-113. (in Chinese))

[6] 张弛,卜鑫涛,刘建辉,等. 考虑水沙和风沙过程的海滩-沙丘系统耦合演变数学模型研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):81-90. (ZHANG Chi, BU Xintao, LIU Jianhui, et al. Review of mathematical models for coupled morphological evolution of beach-dune system considering subaqueous and aeolian sediment transport processes[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):81-90. (in Chinese))

[7] 王广生,童林龙,罗梦岩,等. 贝宁海滩上波浪传播演变特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):123-129. (WANG Guangsheng,TONG Linlong,LUO Mengyan,et al. Study on wave propagation and evolution characteristics over a beach

in Benin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):123-129. (in Chinese))

[8] GEORGE D A,HILL P S. Wave climate,sediment supply and the depth of the sand-mud transition;a global survey[J]. Marine Geology,2008,254(3/4):121-128.

[9] DUNBAR G B,BARRETT P J. Estimating palaeobathymetry of wave-graded continental shelves from sediment texture[J]. Sedimentology,2005,52(2):253-269.

[10] 黄世昌,李新文,娄海峰,等. 台风季节典型岬湾沙滩的变化分析:以浙江省2019年台风季为例[J]. 泥沙研究,2023,48(2):74-80. (HUANG Shichang LI Xinwen LOU Haifeng,et al. Variations in typical embayed beaches during typhoon season--using the 2019 typhoon season in Zhejiang Province as an example[J]. Journal of Sediment Research,2023,48(2):74-80. (in Chinese))

[11] 孙志林,龚玉萌,许丹,等. 新鹤海湾的演变特征及水沙模拟分析[J]. 海洋工程,2019,37(1):64-74. (SUN Zhilin,GONG Yumeng,XU Dan,et al. Evolution characteristics and flow-sediment simulation of the Xinhe Bay[J]. The Ocean Engineering,2019,37(1):64-74. (in Chinese))

[12] 周湘,蔡锋,戚洪帅,等. 台湾海峡西岸两个典型复合型海滩砂泥转换带对比研究[J]. 海洋工程,2019,37(5):133-140. (ZHOU Xiang,CAI Feng,QI Hongshuai,et al. Comparative study of sand-mud transition on two sandy-muddy transitional beaches along west coast of the Taiwan Straits[J]. The Ocean Engineering,2019,37(5):133-140. (in Chinese))

[13] 黄君宝,倪博,刘旭,等. 浙江省玉环市鲜叠沙滩人工修复研究[J]. 浙江水利科技,2022,50(5):30-35. (HUANG Junbao, NI Bo,LIU Xu,et al. Study on artificial nourishment of Xiandie beach in Yuhuan County of Zhejiang Province[J]. Zhejiang Hydrotechnics,2022,50(5):30-35. (in Chinese))

[14] 徐啸,余小建,毛宁,等. 人工沙滩研究[M]. 北京:海洋出版社,2012.

[15] 徐啸,沈莹,毛宁,等. 沙泥混合型岸滩及沙泥分界点初探:厦门湾岸滩类型调查[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):183-188. (XU Xiao,SHEN Ying,MAO Ning,et al. Study on the sandy-muddy hybrid beach and sand-silt demarcation point:survey on the type of Xiamen Bay beach[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(2):183-188. (in Chinese))

[16] GUO Junli,SHI Lianqiang,CHEN Shenliang,et al. Sand-mud transition dynamics at embayed beaches during a typhoon season in Eastern China[J]. Marine Geology,2021,441:106633.

[17] 蔡锋. 华南沙质海滩动力地貌过程[D]. 青岛:中国海洋大学,2005.

(收稿日期:2023-09-10 编辑:刘晓艳)

(上接第77页)

[15] 周益人,潘军宁,左其华. 港珠澳大桥人工岛越浪量试验[J]. 水科学进展,2019,30(6):908-914. (ZHOU Yiren,PAN Junning,ZUO Qihua. Experimental study on the overtopping of the artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Advances in Water Science,2019,30(6):908-914. (in Chinese))

[16] HIGUERA P,LARA J L,LOSADA I J. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®[J]. Coastal Engineering,2013,71:102-118.

[17] LIU X,HOU P,DUAN Z,et al. Numerical investigation on the effectiveness of pile row in local sand trapping and beach protection[J]. Ocean Dynamics,2022,72(7):539-555.

[18] 王国玉,顾新红,秦世杰,等. 基于 OpenFOAM 的挡板透空式防波堤水动力特性数值分析[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):63-69. (WANG Guoyu,GU Xinhong,QIN Shijie,et al. Numerical simulation on hydrodynamic performance of baffle type breakwater based on OpenFOAM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(2):63-69. (in Chinese))

[19] DEAN R G,DALRYMPLE R A. Water wave mechanics for engineers and scientists[M]. Singapore:World Scientific Publishing Company,1991.

[20] JACOBSEN N G,FUHRMAN D R,FREDSØE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library:OpenFoam®[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,2012,70(9):1073-1088.

[21] YAO Y,LIU Y,CHEN L,et al. Study on the wave-driven current around the surf zone over fringing reefs[J]. Ocean Engineering,2020,198:106968.

[22] OWEN M W. Design of sea walls allowing for wave overtopping[R]. Wallingford:Hydraulics Research Station,1980.

[23] VAN DER MEER J W,STAM C J M. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures[J]. Journal of Waterway,Port, Coastal, and Ocean Engineering,1992,118(5):534-550.

(收稿日期:2023-05-20 编辑:刘晓艳)