

基于无人机航测的粤西海滩滩角形态特征 提取与短期演变研究^{*}

邓龙波¹⁾, 黄丽萍¹⁾, 孙锐伟¹⁾, 祁雅莉¹⁾, 李高聪^{1, 2)†}

(1)广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东湛江; 2)自然资源部热带海洋生态系统与生物资源重点实验室, 广西北海)

摘要 滩角是位于海滩的典型韵律地貌, 其形成与演变机制是海岸动力地貌研究的重要课题. 本研究以粤西东海岛中部海滩为典型研究区, 基于无人机航测技术获取短期对比影像数据, 利用可见光影像生成高精度数字地表模型, 通过等值线法提取滩角间距、深度、高度等形态参数, 并运用皮尔逊相关性分析方法, 系统分析了监测期内滩角形态的短期演变特征. 结果表明: 1)在监测期间, 滩角形态呈现显著均一化趋势, 数量增加, 分布趋于规整, 间距保持稳定, 但深度和高度均值降低, 参数离散度普遍下降; 2)在稳定中风浪(波高 0.6~0.9 m, E 和 ENE 向)作用下, 形态参数间相关性显著衰减, 间距-高度完全解耦, 揭示了滩角系统在短期监测内处于自组织过程中由正反馈占主导地位的形态构建与调整期; 3)实测值与边缘波理论预测值存在显著偏差, 表明在本研究监测的动力条件与时间尺度下, 边缘波理论对研究区滩角形成的解释能力有限. 本研究揭示了无人机航测技术在海滩滩角形态特征提取及监测中的适用性与可靠性, 为理解海岸地貌短期演变过程提供了高分辨率实证案例.

关键词 海滩滩角; 无人机航测技术; 形态特征; 自组织机制; 边缘波理论

中图分类号 P737.1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2026014

0 引言

滩角主要是由波浪塑造的典型海滩韵律性地貌, 其形态特征与动态演变对揭示海岸的冲淤、岸线进退以及地貌稳定性具有重要意义^[1]. 它通常表现为向海突出尖角(凸部)与向陆凹入浅槽(凹部)交替排列的韵律结构, 是海岸线上最重要的特征地形之一, 是近岸泥沙、水动力和地形耦合作用的产物^[2]. 传统滩角监测主要依赖地面测量或遥感影像, 但受限于分辨率、成本和时效性, 难以精准捕捉滩面微小地形变化, 尤其是快速演变阶段的动态响应^[3-8].

长期以来, 滩角的监测手段主要分为 2 大类: 第 1 类是传统地面测量方法, 如使用 GNSS RTK、全站仪或简单的桩尺进行人工断面测量. 这类方法虽然能提供高精度单点数据, 但受限于人力成本, 通常只能布设稀疏的几条测线, 采样频率低, 难以系统捕捉滩角复杂形态, 更无法实现对滩角系统在风暴事件或短周期演变中高频和同步的观测^[3-6]. 第 2 类是遥感影像解译方法, 早期多依赖卫星遥感或航空照片. 这类方法虽能提供大空间尺度的观测视野, 但其分辨率、

重访周期和成像条件(如云层覆盖)往往限制了其在地形尺度上的应用, 难以精确刻画滩角这种数十米尺度地貌单元的细节变化^[7-8].

监测手段的局限性, 直接制约了对滩角演变机制的深入理解. 边缘波理论和自组织机制理论虽然为解释滩角的成因提供了理论框架, 但这些理论的验证高度依赖于高时空分辨率的地形数据, 尤其是在滩角非均衡态的快速调整期^[9-12]. 利用高频激光雷达(LiDAR)可对多级滩角系统的复杂动态进行监测, 但此类设备操作复杂且监测效率较低, 难以在常规研究中推广^[13-14]. Pitman 等^[15]在滩角的研究中也指出, 唯有通过高时空分辨率的监测手段(如 LiDAR 与无人机结合), 才能解析滩角在短期内的快速演变特征和沉积物与地形间复杂反馈. 这些前沿研究共同指向一个方向: 发展一种兼具高精度、高效率与高灵活性的新型监测技术, 是突破滩角研究瓶颈的关键.

近年来, 无人机航测技术的飞速发展为此困境提供了革新性的解决方案. 凭借其厘米级分辨率、灵活机动的作业方式和相对低廉的成本, 无人机已开始

^{*} 2025 年广东省研究生教育创新计划资助项目(2025SQXX_022); 自然资源部热带海洋生态系统与生物资源重点实验室开放基金资助项目(2023QN04); 广东海洋大学科研启动经费资助项目(060302112304)

[†] 通信作者: 李高聪(1987—), 男, 副教授. 研究方向: 人类活动影响下的砂质海岸地貌演变. E-mail: gcli@gdou.edu.cn

收稿日期: 2026-01-18

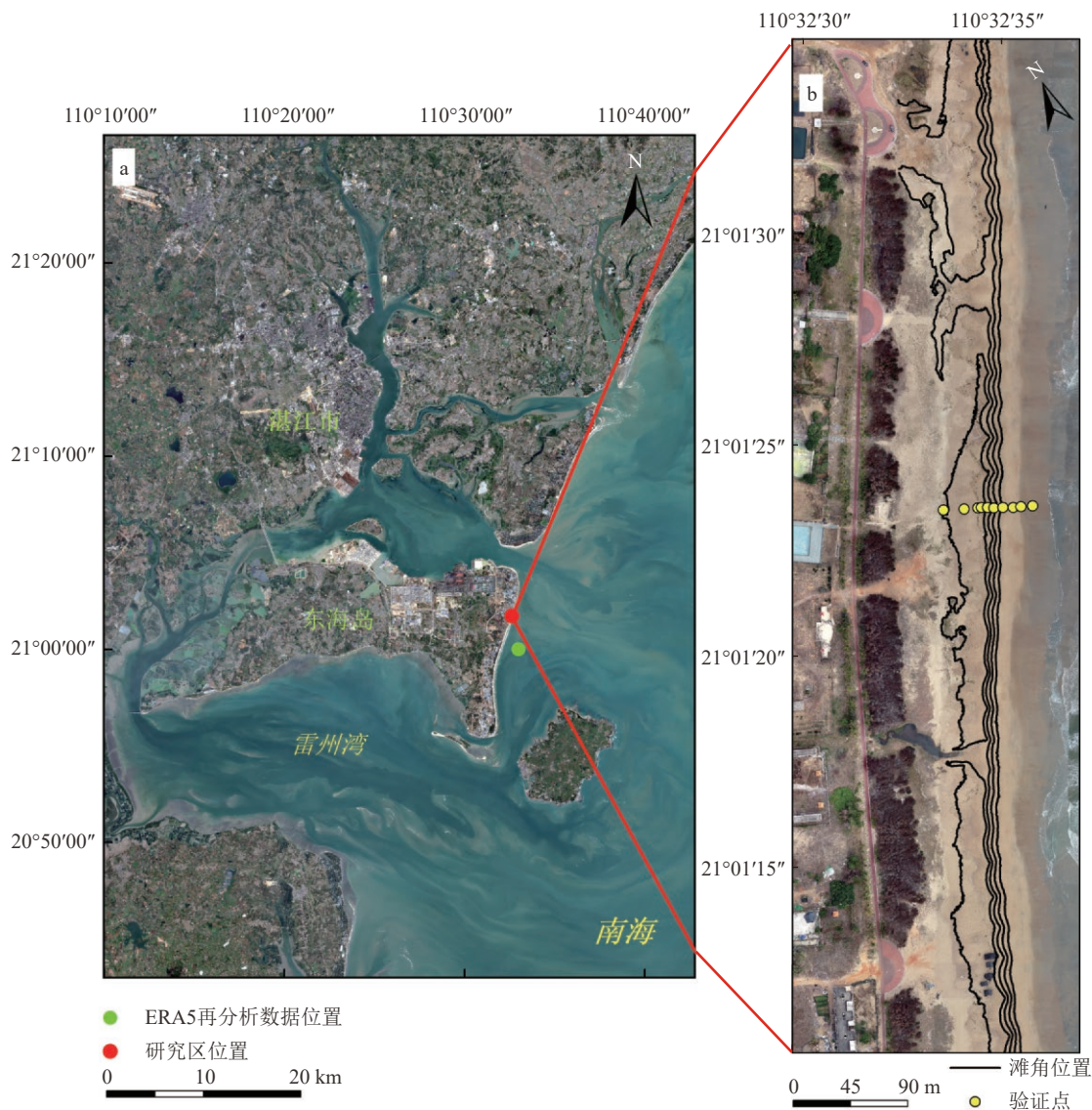
在海岸带地形监测中展现出巨大潜力^[16-18]。尽管如此,专门将无人机航测技术应用于滩角这一特定地貌单元的精细化、量化形态提取与演变分析的研究,目前仍较为匮乏。现有研究多聚焦于大范围海滩的整体地形变化,而未能充分发挥无人机航测技术在捕捉滩角这种韵律性地貌的形态参数(如间距、深度、高度)及其短期演变规律方面的独特优势。

鉴于此,本研究以湛江市东海岛龙海天北侧海滩为研究对象,旨在建立一套基于无人机航测技术的滩角形态特征提取与分析方法。通过 2 期无人机航测,结合 GNSS RTK 地面验证,本研究系统检验了该技术在裸露砂质滩面提取滩角形态特征方面的精度、可靠性和适用性。在此基础上,我们将定量揭示滩角形态特征在短期内的演变规律。本研究不仅可为海岸地貌演变研究提供高分辨率的实证数据,也可对未来

开展高频次、长序列的滩角监测提供可靠的技术路径和方法参考。

1 研究区概况

研究区位于粤西湛江市东海岛中部海滩,走向为南北,长约 1 200 m,宽约 150 m(图 1)。研究区地处低纬度地区,濒临南海,海浪以风浪为主,潮汐属不规则半日潮^[19-20]。该区域海滩滩面坡度 2%^[21],潮汐现象明显,大潮差为 5.13 m,平均潮差为 2.16 m^[22],潮差较大,涨潮时海水淹没部分海滩,落潮时又露出,在这个过程中,海水的进退会对海滩表面进行冲刷和堆积,长期作用下在冲刷带塑造出具有一定韵律的地形起伏^[23]。该区域具有较多且一系列间距规则向陆凹入的浅槽和向海突出的尖角,相互交替构成滩角地貌,因此该区域为开展滩角形态特征研究提供了有利条件。

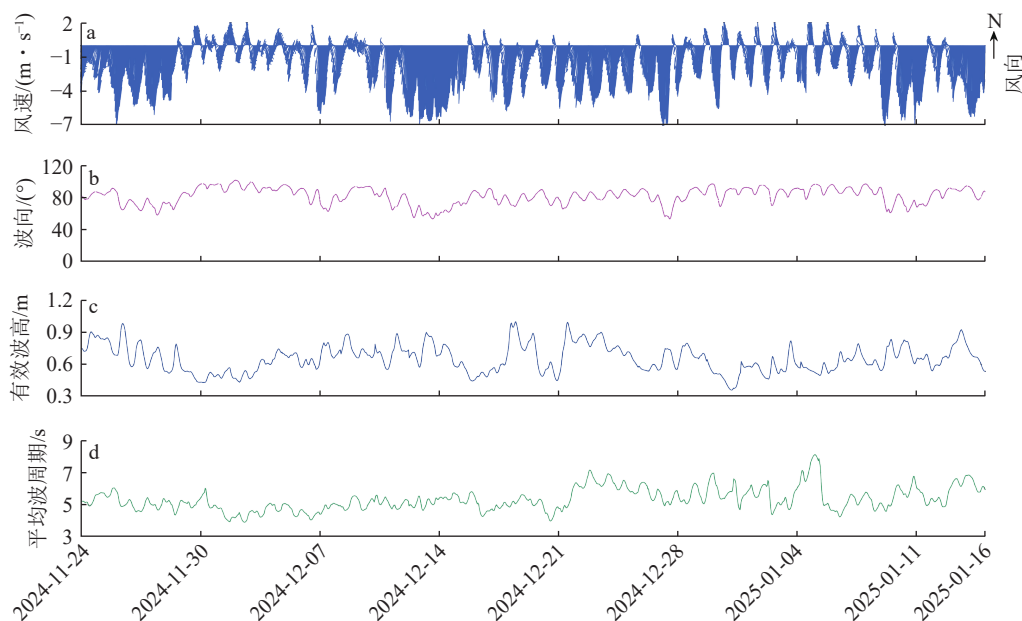


a.背景影像为 2025 年 1 月 6 日 Sentinel-2 研究区遥感影像; b.2025 年 1 月 15 日无人机航拍正射影像。

图 1 研究区的地理位置及监测范围

根据欧洲中期天气预报中心(ECMWF, <https://cds.climate.copernicus.eu/>)提供的 ERA5 逐时再分析数据进行分析, 该数据时间分辨率为 1 h, 具体站点为距离研究区邻近海域最近点位(21.00°N, 110.55°E, 图 1-a)。在监测期间, 研究区风向以南向为主, 风速整体 $>4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大风速达 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2-a); 波向主要集中在 $80^\circ \sim 95^\circ$ (E 向和 ENE 向), 2024 年 11 月 30 日前 1 周、12 月 14 日和 2025 年 1 月 11 日波向从 $80^\circ \sim 95^\circ$

短暂偏移至 $50^\circ \sim 70^\circ$ (图 2-b); 有效波高整体保持在 $0.6 \sim 0.9 \text{ m}$, 2024 年 12 月 21 日前后 1 周出现最大有效波高(1 m), 而 2024 年 12 月 28 日后 1 周出现最小有效波高(0.35 m)(图 2-c); 波周期整体保持在 4~6 s, 2024 年 12 月 21 日之前, 波周期保持在 5 s 左右, 并出现 3.9 s 最小波周期, 而 2024 年 12 月 21 日之后, 波周期整体保持在 5 s 以上, 并出现 8 s 最大波周期(图 2-d)。



a. 风场的南北方向分量, >0 代表北向风, <0 代表南向风。

图 2 风场和波浪要素特征

2 材料与方法

2.1 研究技术路线

技术路线分 4 个步骤(图 3)。1)数据采集: 通过 2 次无人机航测获取研究区影像, 同步进行 GNSS RTK 地面验证点测量, 并收集 ERA5 再分析波浪数据; 2)数据处理: 基于可见光影像数据生成正射影像与数字地表模型(DSM), 通过验证点计算均方根绝对误差(root mean squared error, RMSE)与决定系数(R^2)进行精度评估, 提取滩角等值线; 3)滩角参数提取: 提取边界控制点, 计算形态参数; 4)分析与讨论: 对形态参数进行统计和相关性分析, 与边缘波理论预测值对比, 并结合自组织机制探讨滩角演变过程。

2.2 无人机航测数据采集

本研究无人机航测数据的采集方法为无人机航拍测量与地面 GNSS RTK 测量相结合。分别于 2024 年 11 月 24 日(前期)和 2025 年 1 月 15 日(后期)完成研究区的 2 次航拍监测(均选择在当日低潮位进行),

无人机平台及摄影技术参数设置详见表 1。2 次航拍监测采用 CGCS2000 坐标系。同时, 为保证 2 次航拍的 DSM 的准确性、可靠性和一致性, 航拍过程中在研究区域的地面布设 10 个验证点点位(2 期航拍共 20 个验证点), 并使用千寻星耀 X Plus GNSS RTK (CGCS2000 坐标系)对实地坐标点和高程数据进行测量。验证点点位按由陆向海的顺序依次编号为 1~10, 其分布情况见图 1-b。

2.3 无人机航测数据处理与分析方法

在验证航拍数据精度过程中, 计算验证点 GNSS RTK 实测高程值与 DSM 高程值的绝对误差(Δx)与 E_{RMS} 和 R^2 来衡量 DSM 的精度。公式如下:

$$\Delta x = |y_i - \hat{y}_i|, \quad (1)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, \quad (2)$$



图 3 技术路线

表 1 无人机平台及摄影技术参数设置

参数	参数值
无人机平台	大疆经纬M300 RTK
负载模块	测绘相机禅思L1
监测技术	摄影测量
飞行高度/m	100
最大水平飞行速度/(m · s ⁻¹)	10
航向重叠率/%	70
旁向重叠率/%	61
GSD/(cm · pixel ⁻¹)	2.73

注: GSD(地面采样间隔, ground sampling distance)数值大小与相对地面的飞行高度有关, GSD数据为监测区域内地面采样间隔平均值。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \tag{3}$$

式中: y_i 为第 i 个验证点的 GNSS RTK 实测高程值; $\hat{y}_i$ 为 DSM 在同一位置提取的高程值; $\bar{y}$ 为所有验证点 GNSS RTK 实测高程值的平均值; n 为验证点数量。

对无人机的航拍数据进行内业处理, 通过可见光影像生成航拍正射影像及 DSM。利用 DSM 作为基础

数据源, 通过生成等值线的方式提取滩角形态特征, 等值线间距设定为 0.5 m。通过分析等值线的走向、闭合情况等特征以目视解译的方式放置滩角的边界控制点: 滩角凹部顶端(A)、滩角凸部底端(B 、 D)和滩角凹部底端(C)。根据上述的 4 个点即可创建 3 条线, 即滩角间距(点 BD 水平距离)、滩角深度(点 AC 水平距离)、滩角高度(点 AC 高程差)。然后提取滩角的边界控制点的坐标信息和高程信息。点坐标信息的坐标系为 CGCS2000 坐标系, 点高程信息的高程基准为该坐标系的大地高。点坐标信息用于计算滩角间距和滩角深度, 点高程信息则用于计算滩角高度。公式如下:

$$L = \sqrt{(\Delta L_N^2 + \Delta L_E^2)}, \tag{4}$$

$$H = h_A - h_C, \tag{5}$$

式中: L 为相邻 2 个控制点之间的水平距离; ΔL_N 为 2 个控制点北坐标之差; ΔL_E 为 2 个控制点东坐标之差; H 为高程差值(即滩角高度); h_A 为点 A 高程, h_C 为点 C 高程。

2.4 滩角形态参数的定义

基于滩角的空间形态特征, 本研究定义滩角的边

界控制点包括滩角凹部顶端(A)、滩角凸部底端(B、D)和滩角凹部底端(C). 各参数的定义如图 4 所示: 滩角向海凸出的部分为滩角凸部, 相邻滩角凸部之间向陆凹陷的部分为滩角凹部, 相邻滩角凸部底端(B、D)的水平距离为滩角间距(L), 滩角凹部顶端(A)和

滩角凹部底端(C)的水平距离为滩角深度(W), 滩角凹部顶端(A)高程与滩角凹部底端(C)高程的差为滩角高度(H). 本文采用 ArcMap 软件平台对 DSM 数据进行等值线生成与滩角边界控制点提取, 实现滩角形态参数的提取与量化分析.

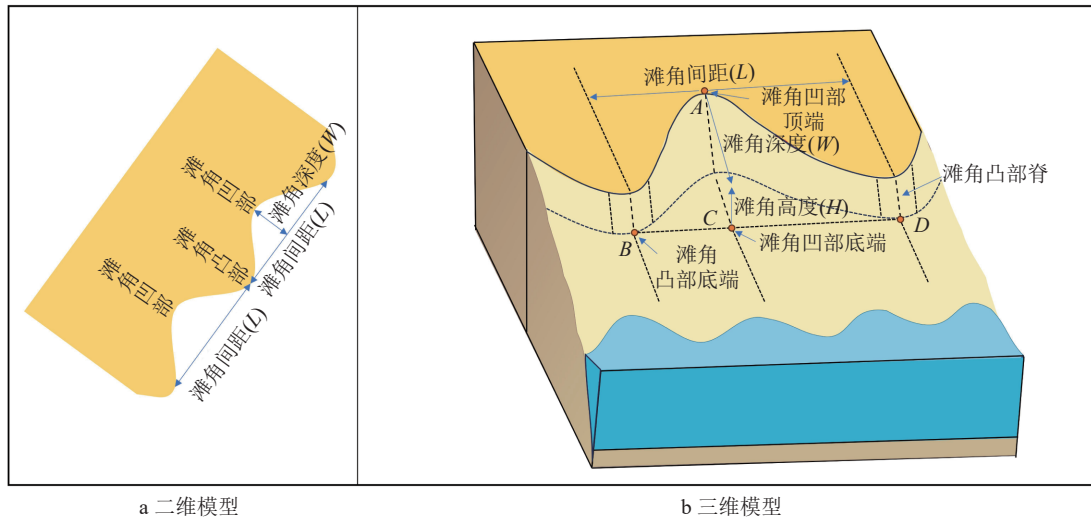


图 4 滩角形态参数示意

2.5 滩角形态特征相关性分析方法

为定量揭示滩角形态特征间的内在关联性, 本研究选取滩角形态参数中的 L 、 W 及 H 作为核心分析变量, 通过皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient) 对三者间的线性相关关系进行量化分析. 皮尔逊相关系数 (r) 适用于衡量 2 个连续变量之间的线性相关程度, 其取值范围为 $[-1, 1]$, 绝对值越接近 1 表明变量间的线性相关性越强, >0 表示正相关, <0 表示负相关, 接近 0 则说明线性相关性较弱或无显著线性相关性^[24-27]. 其计算公式为

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}, \quad (6)$$

式中: r 为皮尔逊相关系数; n 为样本数量; x 和 y 分别代表 2 个不同的滩角形态参数 (如 L 与 W 、 L 与 H 、 W 与 H); $\sum xy$ 表示 2 个变量对应观测值乘积的总和;

$\sum x$ 和 $\sum y$ 分别表示 2 个变量观测值的总和; $\sum x^2$ 和 $\sum y^2$ 分别表示 2 个变量观测值平方的总和; $(\sum x)^2$ 和 $(\sum y)^2$ 分别表示 2 个变量观测值总和的平方.

随后, 利用统计分析软件对 3 组参数数据进行配对, 分别计算 L 与 W 、 L 与 H 、 W 与 H 之间的 r , 并通过 t 检验进行显著性分析, 设定显著性水平为 $\alpha = 0.01$ 和 $\alpha = 0.05$, 若计算得到的 P 值小于设定的显著性水平, 则认为 2 个变量间的线性相关关系具有统计学意义, 反之则认为无统计学意义.

2.6 依据边缘波理论的形态参数估算

边缘波理论是解释滩角等海岸韵律地貌形成机制的经典假说之一^[9-10]. 该理论认为, 当入射波浪与海岸相互作用时, 会激发一种沿着海岸传播、振幅向海方向呈指数衰减的驻波, 即“边缘波”. 特别是当入射波频率与海滩近岸系统所固有的边缘波频率相等 (同步边缘波) 或为其一半 (分谐边缘波) 时, 会发生共振, 导致沿岸产生周期性的波浪能量高低分布, 从而在滩面上塑造出具有韵律性的滩角地貌. 因此, 根据边缘波理论, 滩角间距与波周期之间存在紧密的联系, 依据边缘波类型可分为分谐边缘波和同步边缘波^[9, 28-29]. 滩角的 L 与入射波、滩角地形的关系^[10, 30] 可表示为

$$L = gT^2 \tan \beta / m\pi, \quad (7)$$

式中: g 是重力加速度, 通常取值为 $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; T 为入射波周期 (s); $\tan \beta$ 为滩角坡度; $m = 1.0$ 或 0.5 分别

表 2 无人机产品数据的精度验证结果

参数类型	参数(前期)	参数(后期)
E_{RMS}/m	0.108 7	0.084 5
R^2	0.995 6	0.984 7
绝对误差平均值/m	0.096 6	0.070 3
最大绝对误差/m	0.184 5	0.133 5
最小绝对误差/m	0.027 5	0.010 0

对应分谐边缘波和同步边缘波。

根据监测期间(2024年11月24日—2025年1月15日)风场和波浪要素特征(图2),对研究区近岸波周期进行频率统计,频率占比结果如图5所示。基于此,滩角入射波周期取值为6 s。滩角形态参数取自2025年1月15日数据(因边缘波理论是针对砂砾质海滩均衡态的,因此滩角形态参数选自研究期间并在后期进行了形态参数估算),滩角坡度定义为 H 与 W 的比值。将研究区滩角入射波周期和滩面坡度代入式(4)计算滩角间距估算值。

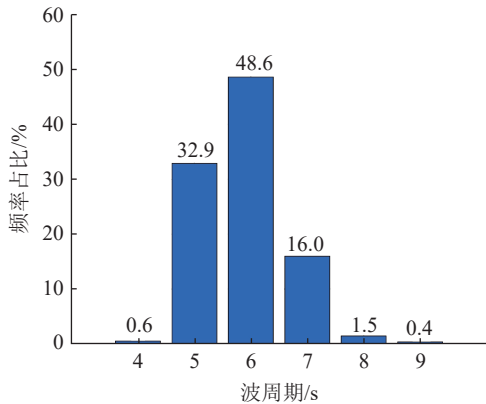


图5 波周期统计

3 结果

3.1 无人机产品数据的精度验证

2期DSM精度的验证结果详见表2。分析可知,前期DSM精度指标(E_{RMS} 为0.108 7 m, R^2 为0.995 6)与后期的(E_{RMS} 为0.084 5 m, R^2 为0.984 7)较为一致且精度较高,足以支撑滩角形态参数的提取和演变分析。整体而言,2期DSM高程误差均显著低于滩角的年际变化阈值(通常 >0.5 m)。因此,无人机航测技术在裸露滩面可实现稳定、可靠、高精度地形监测。

3.2 无人机产品数据揭示的滩角地貌动态变化

通过观察2期DSM及等值线分布(图6-a、b),滩角系统数量与分布情况呈明显变化趋势。前期滩角系统呈现数量稀少且空间分布不规则特征,而后期滩角系统数量显著增加且分布趋于规整。地形变化展示了2期滩角系统独特的演变模式(图6-c):沿岸方向上滩角的凸部(向海侧突出端)普遍出现显著淤积上升,而滩角凹部(向陆侧湾顶)则未观测到明显高程变化;滩角下部(凸部向海延伸区)呈大范围侵蚀-淤积交替条带状格局,局部侵蚀区(蓝色斑块)与局部淤积区(红色斑块)相间分布。

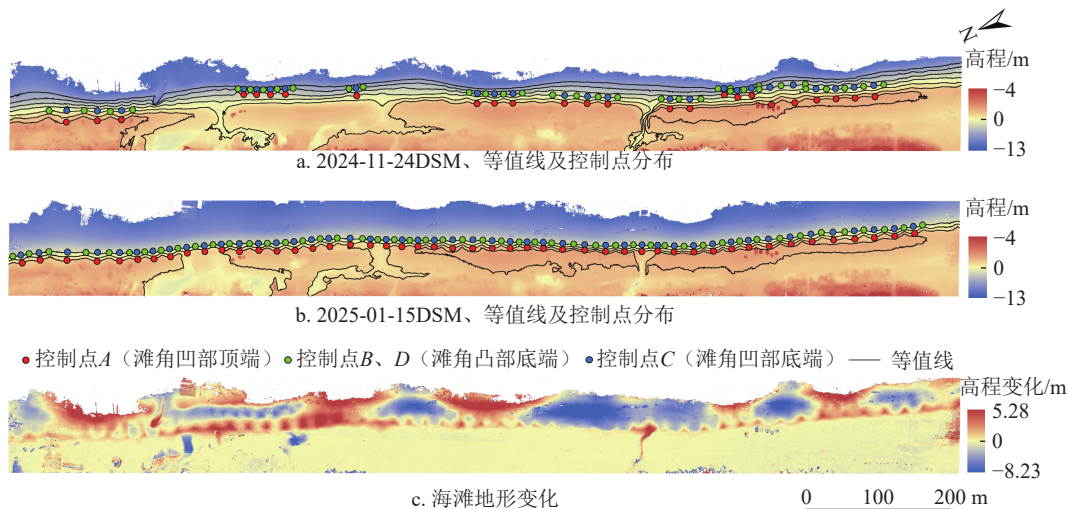


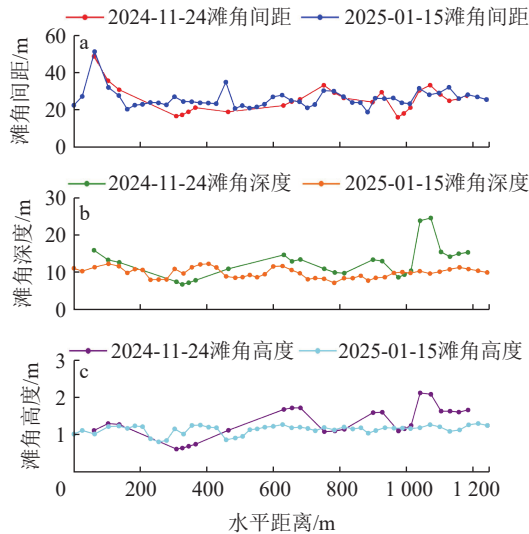
图6 滩角提取及海滩地形变化

3.3 滩角形态特征

在滩角的 L 方面(图7-a),2次观测的平均值高度接近(11月为26.52 m;1月为26.47 m),表明整体滩角系统的空间规模保持相对稳定。然而,1月数据的统计个数明显增加(从25个增至48个),且标准差由7.22 m降至5.00 m,相对离散度从27%降至19%,说明后期滩角间距的分布更为均匀集中,空间变异性显著减弱。

滩角的 W 参数则呈现明显的减小趋势(图7-b)。

11月 W 的平均值为12.73 m(范围6.88~24.48 m),而1月 W 的平均值降至9.94 m(范围7.28~12.34 m)。1月 W 的离散程度大幅降低(标准差从4.39 m缩小至1.33 m;相对离散度从35%降至13%)。同时,滩角的 H 也表现出轻微的减小和更强的均一性(图7-c): H 的平均值从11月的1.32 m(范围0.62~2.10 m)略降至1月的1.13 m(范围0.80~1.29 m),标准差由0.41 m显著降至0.12 m,相对离散度由31%大幅降至10%,表明后期滩角在垂向侵蚀作用上趋于均一化。



a. 滩角间距; b. 滩角深度; c. 滩角高度. 水平距离指每个滩角与测量的第1个滩角的距离。

图7 滩角形态参数

综合而言, 3个形态参数在后期结果中均表现出更低数据离散度和更高空间均一性, 反映在监测期间滩角形态随时间推移趋向于更规整、发育更均匀的系统特征(表3)。

3.4 滩角形态参数相关性

在2个不同时期滩角的 L 与 W 的线性相关系数分别为0.57和0.27(图8-a1、a2), 其中, 前期在置信度0.01水平上(双侧, 下同)呈显著相关, 而后期相关性不显著; L 与 H 的线性相关系数分别为0.35和-0.01(图8-b1、b2), 前后期相关性均不显著; W 与 H 的线性相关系数分别为0.88和0.49(图8-c1、c2), 前后期在置信度0.01水平上均显著相关。

从变化上看, 前后期形态参数间相关性发生系统性转变(图8)。 L 与 W 的正相关关系显著弱化(相关系数从0.57降至0.27), 这表明前期 W 随 L 增长的响应机制基本消失。 L 与 H 转为无相关性($r = -0.01$, $P = 0.958$), 其水平分布模式 $y = 1.14 - 0.0002x$, 表明二者完全解耦。 W 与 H 的正相关性虽仍显著, 但相关关系依然出现显著弱化(相关系数从0.88降至0.49), 反映了 W 对 H 的控制效能减弱。整体上, 滩角形态参数之

间的相关性从前期到后期呈现普遍弱化。

3.5 边缘波理论与滩角形态

根据边缘波理论, 利用后期滩角形态参数对 L 进行理论值计算。使用式(7)计算得到滩角在分谐波作用下的 L 理论值(表4), 理论值的平均值为12.94 m, 与 L 实际值的平均值(26.47 m)差异较大。且理论值与实际值在置信度0.01和0.05水平上均不显著($P = 0.09 > 0.01$; $P = 0.09 > 0.05$)。图9对 L 实际值与理论值进行对比(实际值与理论值之比), 实际值与理论值的比值在0.5~2.0的比值区间中仅占52%。因此, 在本研究监测的动力条件与演变阶段下, 边缘波理论难以有效解释 L 的实际分布特征。

4 讨论

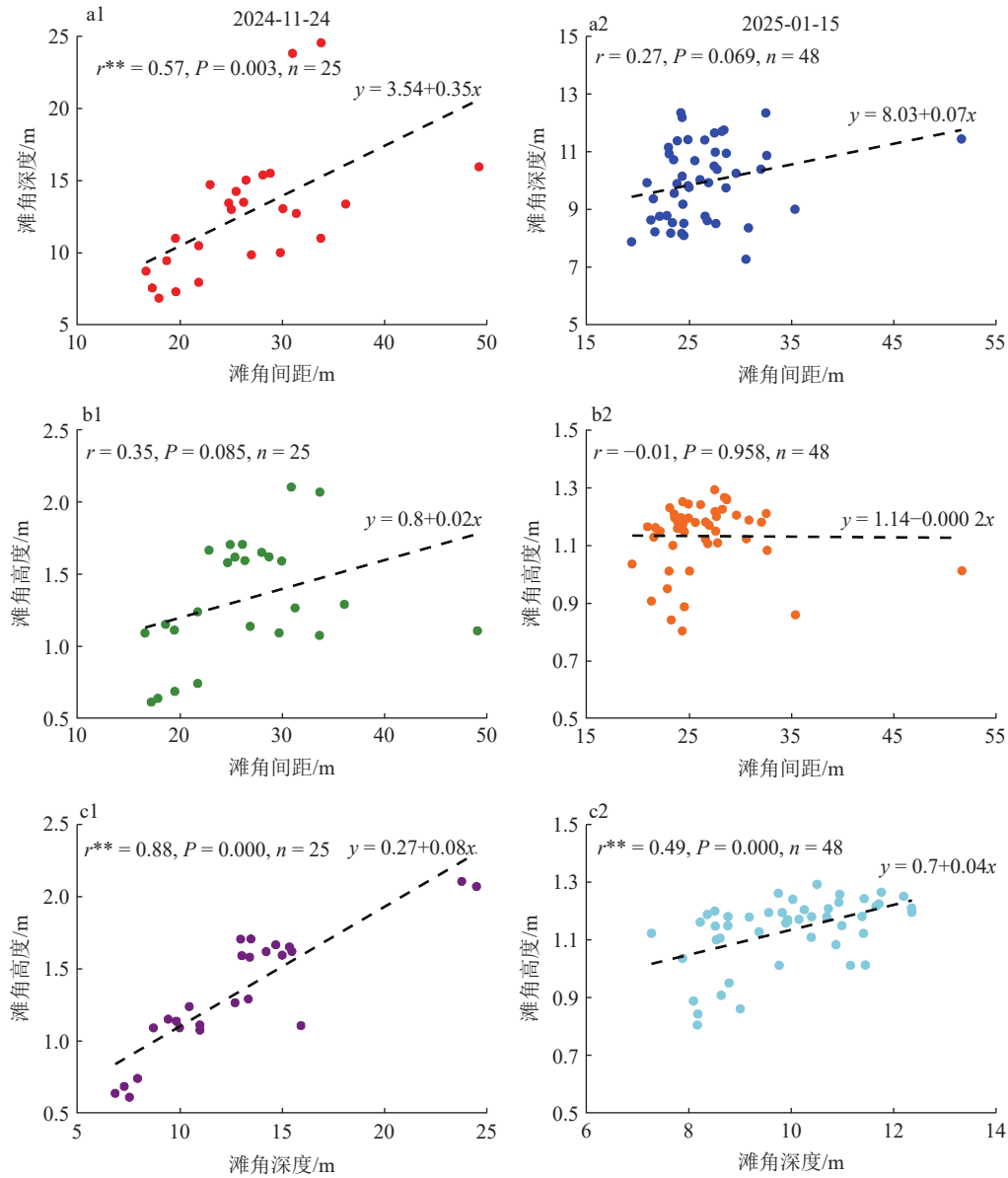
4.1 无人机应用于滩角地貌监测的意义

本研究中, 利用无人机航测技术与地面GNSS RTK测量相结合的方式, 在大潮低潮位时对研究区进行航拍监测, 获取了丰富的数据。这种方式较传统监测手段极大提高了数据采集效率, 能在短时间内获取大面积滩角区域数据, 为后续分析提供充足数据基础。无人机航测技术可精准定位不同区域地形改变, 明确侵蚀和淤积具体位置, 比传统监测方法(如实地人工断面测量、平面测量等)更高效、精确, 更能捕捉到微小地形变动, 为研究滩角地貌演变提供可靠数据支撑^[31-32]。

本研究基于2024年11月与2025年1月2期航测数据, DSM验证点的 E_{RMS} 分别为0.1087和0.0845 m。与已有研究相比, 陈奇等^[17]在象山大沙湾海滩利用大疆经纬M300 RTK平台结合激光雷达技术进行的监测中, 验证点高程 E_{RMS} 达0.1208 m; 钟小菁等^[18]在厦门彩虹海滩的研究中, 无人机摄影测量在正常天气下的 E_{RMS} 为0.082 m, 机载LiDAR为0.114 m。本研究的精度指标介于二者之间, 整体优于激光雷达单独监测结果, 接近摄影测量最优表现, 进一步表明无人机航测技术在裸滩进行滩角形态特征监测的稳定性和适用性。

表3 滩角形态参数统计结果

形态参数	日期	统计个数	最小值/m	最大值/m	平均值/m	标准差/m	相对离散度/%
L	2024-11-24	25	16.72	49.08	26.52	7.22	27
	2025-01-15	48	19.48	51.56	26.47	5.00	19
W	2024-11-24	25	6.88	24.48	12.73	4.39	35
	2025-01-15	48	7.28	12.34	9.94	1.33	13
H	2024-11-24	25	0.62	2.10	1.32	0.41	31
	2025-01-15	48	0.80	1.29	1.13	0.12	10



a.间距与深度相关性；b.间距与高度相关性；c.深度与高度相关性。 r^{**} 表示在置信度0.01水平上显著相关。

图 8 滩角形态参数之间的相关性

表 4 分谐边缘波作用下的 L 统计

形态参数	统计个数	最小值/m	最大值/m	平均值/m	相关系数	P
L (实际值)	48	19.48	51.56	26.47	-0.25	0.09
L (理论值)	48	9.95	17.32	12.94		

无人机在滩角监测的另一个重要价值在于能够实现对地貌动态变化的实时追踪。研究滩角的发育过程,关键在于了解其在不同阶段的地形变化规律,这对于解释滩角的形成机制至关重要。因此,为更加有效地对滩角形态特征及其动态演变过程进行研究,建议今后对该研究区域的滩角地貌继续开展高频次、多时段覆盖的连续无人机监测。

4.2 滩角形态参数相关性时序衰减的原因分析

本研究发现,在监测期内,滩角系统的整体形态变

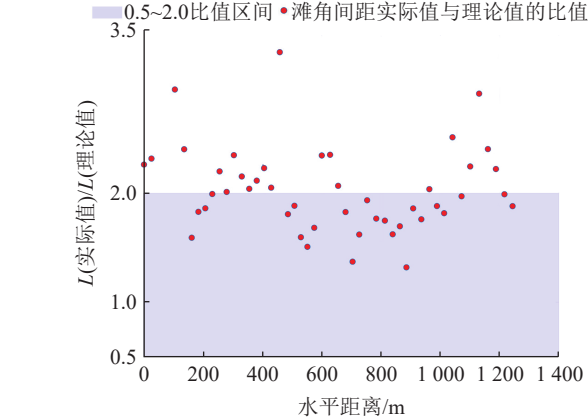


图 9 滩角间距实际值与理论值对比

得更为规则和均一(图 7、表 3),但描述其形态的关键参数(L 、 W 、 H)之间的统计相关性却普遍减弱(图 8)。

这一现象可以从自组织机制的核心过程——正反馈与负反馈的相互作用中得到深入解释,并揭示了系统所处的特定演变阶段。

正反馈是滩角形态强化的过程。在监测期间稳定的波浪作用下,初始的微小地形起伏(如偶然的凹坑)成为正反馈的起点:水流在此汇聚、流速加快,导致侵蚀加剧,凹部加深;同时,泥沙在两侧堆积,使滩角凸部更为突出(图6)。这种“放大效应”在整个海滩上多点同时发生,驱动了滩角数量的快速增加(由25个增加到48个,表3),每个新生的滩角都在独立地、强烈地响应其局部条件,导致形态多样性的短期爆发^[33-34]。因此,尽管整体分布趋向规整,但从统计上看,不同滩角的 L 、 W 和 H 值不再保持强同步变化,表现为参数间相关性的衰减(图8)。这证明系统正处于一个由正反馈强力驱动的、活跃的形态构建与调整期。形态整体均一化趋势,参数离散度下降(表3),则表明负反馈机制已开始发挥关键的调节与筛选作用。负反馈抑制形态的无限增长以维持系统稳定。当滩角凸部向海突出到一定程度,波浪折射会导致其前端能量集中、侵蚀增强,从而限制其继续延长;同时,过深的凹部也可能因水动力条件改变而减缓侵蚀。这种限制效应对正反馈产生的多样化形态进行约束和调整^[10, 12]。监测后期,所有形态参数的标准差和离散度显著降低,这正是负反馈作用显现的结果,它使得滩角的尺寸(如 W 、 H)被限制在一个更窄的、相互适配的范围内,推动系统整体向更均匀的状态发展。

综合来看,监测期间监测到的“均一化伴随相关性减弱”的状态,标志着滩角系统正处于自组织过程中由正反馈占主导地位的形态构建与调整阶段。在此阶段,强正反馈持续产生新的形态和变异(导致相关性衰减),而逐渐增强的负反馈则开始对形态进行全局性的约束和标准化(导致个体差异减小、分布趋匀)。参数相关性的减弱,特别是 L 与 H 关联的解耦,表明系统正在打破旧的平衡关系,允许各形态参数更独立地寻找动力、泥沙条件相适应的新平衡点。这并非滩角系统的退化,而是其从一种旧结构向更优化、更稳定的新结构演进的动态过渡。随着时间推移,若外部条件保持稳定,负反馈的筛选作用将更充分,系统有望在均一化的基础上,建立起一套新的、稳固的内在参数关联,达到更高效的自组织稳态^[35-37]。因此,本研究观察到的现象,实质上是滩角地貌自组织过程中,正反馈(创造多样性、驱动变化)与负反馈(约束形态、趋向稳定)2种力量在特定时间尺度上相互竞争与协同的动态体现。这进一步论证了在研究区复杂近岸动力环境下,滩角在短期内的形成与演变主要

由这种内在的自组织反馈机制所主导,而非由线性边缘波理论所预设的固定共振模式所决定。

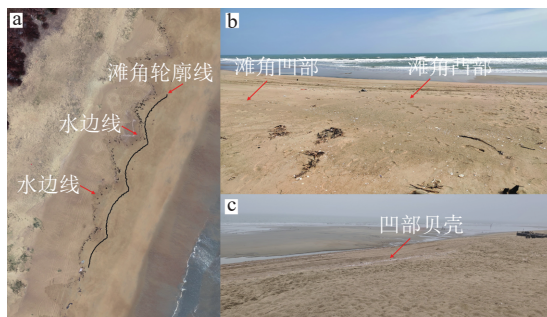
4.3 波浪作用对滩角的影响

波浪是塑造滩角形态的重要因素之一。图6中滩角形态在水平方向和垂直方向上呈现出部分不对称和部分对称的特征。在波浪入射方向和能量分布较均匀的位置(如波浪垂直于海岸线传播时),相邻滩角凸部受到相似的侵蚀与堆积作用,从而较为对称,其 L 和 H 在长期作用下趋于一致。而在波浪以一定角度冲击海岸或受沿岸流影响的区域,一侧凸部受到较强的侵蚀作用,另一侧则侵蚀作用较弱,从而导致形态不对称。此外,受地形影响波浪发生折射与绕射使相邻凸部所受作用力差异较大,也会引发不对称^[34, 38]。

本研究在冬季期间(2024年11月—2025年1月)进行,该时期的风场与波浪要素特征(图2)为滩角的演变提供了特定的动力背景。监测期间盛行南向风,风速持续较高(多 $>4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),为波浪生成提供稳定能量。波浪要素呈中等强度且相对稳定,这种持续、稳定、中等能量的风浪条件是驱动滩角系统显著均一化演变的关键外部因素。稳定的波向促进韵律性地貌有序发育,适中的波高与周期则提供持续而非破坏性的动力,启动并维持沉积物横向输运与再分配,为滩角自组织过程中的调整与重组阶段创造了理想动力环境^[39-40]。

在研究区域内,通过观察图10-a中的无人机正射影像,可以发现水边线同样具有与滩角 L 相似的韵律特征。水边线能反映出波浪能量与动力特征:滩角凹部区域的水边线高于凸部区域,说明二者形态差异导致波浪能量差异,这种能量差异是滩角形态发育的关键。在滩角发育初期或活跃调整期,冲刷流是典型的正反馈驱动因子。波浪斜向冲击海滩时,沿岸流在微小地形洼地(未来的凹部)汇聚,形成流速加快的水流,不仅增强局部侵蚀、加深凹部,还常催生垂直于岸线的裂流。裂流像“水力输送带”,将凹部底部的泥沙向海外输送,阻止回填,固化并强化凹部形态。上冲流被凸部分为2股沿岸流,在凹部汇集成较强的退流向海流去。凸部因高渗透性粗泥沙而抗侵蚀,凹部则因较强退流而易被侵蚀,这种环流对滩角发育起正反馈作用^[41-42]。从图10-b和c的现场侧拍图中可以看出,在滩角凹部的顶部区域富集了大量贝壳,而贝壳只有在一定强度的激浪作用下才能被潮流携带向海滩上部输运^[43],说明了波浪在此区域具有较大的波能,这也是导致凹部侵蚀不断加深的主要控制因素。

本研究尝试用边缘波理论解释滩角形态特征,但监测期间 L 的实际值与理论值存在较大差异(图9和



a.无人机正射影像(2025-01-15); b、c.现场侧拍照片。

图 10 滩角地貌

表 4)。尽管边缘波理论为 L 预测提供了重要框架,但实际观测与理论预测常有显著差异^[44]。这种差异可能源于理论模型的简化假设、实际海滩动力过程的复杂性,以及滩角形成的多因素耦合。边缘波理论基于线性波浪假设,忽略波浪破碎、非线性波-波相互作用及近岸水流复杂动力学^[10]。在天然海滩环境中,波浪往往表现出强烈的非线性特征,尤其在碎波带附近,能量耗散与反射显著改变边缘波传播特性^[45-47]。自组织机制则认为滩角形成于沉积物输运的正反馈过程,而非单纯波浪干涉^[12],其 L 更依赖于近岸流冲刷范围或沉积物粒径^[38]。若研究区自组织效应较强,边缘波理论的预测能力将受限。并且已有研究通过元胞自动机模型模拟表明,滩角形成是泥沙、水动力(波浪、冲流)与地形反馈的结果,具有自组织特性^[48]。此外,地貌、沉积物等因素对波浪作用的响应各有不同^[49-50]。因此,在后续的研究工作中需进一步对研究区内滩角地貌、沉积物等多因素综合进行深入讨论。

同时,用于边缘波理论预测的波浪数据来自 ERA5 逐时再分析数据(欧洲中期天气预报中心),存在空间分辨率低、时间敏感性不足、参数匹配困难、场景不适用等局限,也限制了边缘波理论对滩角形态特征的解释能力。

本文主要研究了利用无人机航测技术监测东海岛龙海天北侧岸滩的滩角形态特征演变,在研究中仍有许多问题需要探讨解决,例如无人机监测频次较少,未结合沉积物数据进行探讨,以及缺少实地水动力数据等^[45-50]。因此,未来研究工作可从以下方向深入开展:1)增加无人机监测频率,覆盖不同季节和天气事件,结合多平台观测;2)水动力-地貌耦合观测,分析沉积物特性,开展数值模拟;3)在更多地点验证自组织机制,改进边缘波理论应用。

5 结论

本研究基于无人机航测技术与 GNSS RTK 地面实测相结合的技术手段,对粤西东海岛东侧海滩的滩

角形态特征进行了高精度动态监测与分析,主要结论如下:

1)无人机航测技术在海滩滩角地貌监测中具有显著优势。2期 DSM 高程精度(E_{RMS} 分别为 0.108 7 和 0.084 5 m)可满足滩角形态参数的精细化提取需求,为未来开展高频次、长序列的滩角动态监测提供了可行的方法路径。

2)在稳定中风浪条件(波高 0.6~0.9 m, E 向和 ENE 向)驱动下,滩角系统在 52 d 的冬季监测期内呈现出均一化演变规律。滩角数量快速发育,从 25 个增至 48 个,形态参数离散度普遍下降、空间分布趋于规整,系统正处于自组织过程中的形态构建与调整阶段;形态参数间相关性的系统性衰减则反映了正反馈机制在此阶段的主导作用。

3)边缘波理论在本研究特定动力条件与演变阶段下的解释能力有限。理论预测与实测 L 存在显著偏差,研究区滩角系统自组织效应较强, L 的形成更依赖于沉积物输运与近岸流冲刷范围的正反馈机制,而非单纯的边缘波干涉模式。未来研究应整合更高时空分辨率的近岸实测波浪数据、无人机航测数据与数值模拟,对比不同理论模型在研究区的适用性,以期建立更贴合复杂海岸环境的滩角演变预测框架。

本研究为理解砂质海岸滩角形态特征的短期演变过程提供了高分辨率实证,也为海岸带动态监测技术的应用积累了经验。后续研究应通过延长监测时序、耦合多源数据、发展数值模型等手段,进一步深化对滩角地貌演变规律的认识。

6 参考文献

- [1] 李志强,陈子燊. 滩角地形时空变化过程分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(5): 109
- [2] 李志强,陈子燊. 两种滩角成因假说的实证分析[J]. 热带海洋学报, 2008(2): 12
- [3] Coco G, Burnet T K, Werner B T, et al. The role of tides in beach cusp development[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C4): 2003JC002154
- [4] Ali S, Darsan J, Wilson M. Cusp morphodynamics in a micro-tidal exposed beach[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2017, 21(6): 777
- [5] 李志强,陈子燊. 常浪条件下滩角地形变化的观测与分析[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(7): 1
- [6] Benavente J, Harris D L, Austin T P, et al. Medium term behavior and evolution of a beach cusps system in a low energy beach, Port Stephens, NSW, Australia[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, SI(64): 170
- [7] Athanasiou P, De Boer W, Yoo J, et al. Analysing decadal-scale crescentic bar dynamics using satellite imagery: a case

- study at Anmok beach, South Korea[J]. *Marine Geology*, 2018, 405: 1
- [8] 仇传银, 李行, 刘淑安, 等. 长江三角洲滩涂信息的遥感提取及时空变化 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(2): 269
- [9] Bowen A J, Inman D L. Edge waves and crescentic bars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(36): 8662
- [10] Guza R T, Inman D L. Edge waves and beach cusps[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(21): 2997
- [11] Coco G, Huntley D A, O'Hare T J. Investigation of a self-organization model for beach cusp formation and development[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C9): 21991
- [12] 李志强, 陈子桑, 严谨, 等. 基于自组织机制理论的滩角地形数值模拟 [J]. *海洋学研究*, 2009, 27(1): 90
- [13] O'Dea A, Brodie K L, Hartzell P. Continuous coastal monitoring with an automated terrestrial lidar scanner[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(2): 37
- [14] O'Dea A, Brodie K. Analysis of beach cusp formation and evolution using high-frequency 3D lidar scans[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2024, 129(2): e2023JF007472
- [15] Pitman S J, Hart D E, Katurji M H. Application of UAV techniques to expand beach research possibilities: a case study of coarse clastic beach cusps[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 184: 44
- [16] Lei Q J, Wang X K, Liu Y F, et al. Monitoring change and recovery of an embayed beach in response to typhoon storms using UAV LiDAR[J]. *Drones*, 2024, 8(5): 172
- [17] 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
- [18] 钟小菁, 陈沈良, 李鹏, 等. 无人机载 LiDAR 及摄影测量技术在沙滩地形监测中的应用研究 [J]. *海洋工程*, 2026, 44(1): 209
- [19] 钟蕊, 刘春杉, 陈鑫祥. 广东省大陆海岸线分形特征及空间分异 [J]. *广东海洋大学学报*, 2021, 41(4): 70
- [20] 张峻萍, 仇天宇, 张玉璇, 等. 广东沿海潮汐时空变化特征 [J]. *广东海洋大学学报*, 2024, 44(4): 88
- [21] 朱士兵, 李志强, 张会领, 等. 基于地貌动力学的雷州半岛海滩状态分类研究 [J]. *地理研究*, 2020, 39(6): 1269
- [22] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第五分册(上海市和浙江省北部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992
- [23] Guest T B, Hay A E. Timescales of beach cusp evolution on a steep, megatidal, mixed sand-gravel beach[J]. *Marine Geology*, 2019, 416: 105984
- [24] Pearson E S. The test of significance for the correlation coefficient[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1931, 26(174): 128
- [25] Kirwan J R. Reporting of significance levels versus Pearson's correlation coefficient[J]. *Rheumatology*, 1984, 23(3): 232
- [26] Obilor E I, Amadi E C. Test for significance of Pearson's correlation coefficient[J]. *International Journal of Innovative Mathematics, Statistics & Energy Policies*, 2018, 6(1): 11
- [27] Sreedevi S. Study of test for significance of Pearson's correlation coefficient[J]. *International Journal of Multidisciplinary Educational Research*, 2022, 11(2): 86
- [28] Guza R T, Bowen A J. On the amplitude of beach cusps[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C5): 4125
- [29] Ursell F. Edge waves on a sloping beach[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1952, 214(1116): 79
- [30] Inman D L, Guza R T. The origin of swash cusps on beaches[J]. *Marine Geology*, 1982, 49(1/2): 133
- [31] 孟现彪, 刘盛庆, 史雅茹, 等. 无人机激光雷达高程测量精度评定分析 [J]. *桂林理工大学学报*, 2022, 42(2): 438
- [32] 毕世普, 别君, 张勇. 机载 LiDAR 在海岸带地形测量中的应用 [J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(11): 59
- [33] Falqués A, Dodd N, Garnier R, et al. Rhythmic surf zone bars and morphodynamic self-organization[J]. *Coastal Engineering*, 2008, 55(7/8): 622
- [34] 李志强, 陈子桑. 常浪条件下海滩滩角地形变化研究 [J]. *海洋通报*, 2008, 27(1): 60
- [35] Ribas F, Falqués A, De Swart H E, et al. Understanding coastal morphodynamic patterns from depth-averaged sediment concentration[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(2): 362
- [36] Caballeria M, Coco G, Falqués A, et al. Self-organization mechanisms for the formation of nearshore crescentic and transverse sand bars[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 465: 379
- [37] Cook R. Spatial and temporal scales of the morphodynamic evolution within the Studland complex[D]. Bournemouth: Bournemouth University, 2007
- [38] Pitman S J, Coco G, Hart D E, et al. Observations of beach cusp morphodynamics on a composite beach[J]. *Geomorphology*, 2024, 447: 109026
- [39] Valiente N G, Masselink G, McCarroll R J, et al. Nearshore sediment pathways and potential sediment budgets in embayed settings over a multi-annual timescale[J]. *Marine Geology*, 2020, 427: 106270
- [40] Islam M S, Akita N, Nakamura T, et al. Experimental investigation on the mechanism of longshore sediment transport using a circular wave basin[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(9): 1189
- [41] Zhao Z W, Mitchell N C, Quartau R, et al. Submarine platform development by erosion of a Surtseyan cone at Capelinhos, Faial Island, Azores[J]. *Earth Surface*

- [Processes and Landforms](#), 2019, 44(15): 2982
- [42] 陈子燊. 滩角动力学研究的现状 [J]. 海洋通报, 1987, 6(3): 90
- [43] 徐志伟, 汪亚平, 李炎, 等. 多元统计及物源分析支持的北部湾东部海域沉积物输运趋势 [J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 67
- [44] Nuyts S, Li Z L, Hickey K, et al. Field observations of a multilevel beach cusp system and their swash zone dynamics[J]. [Geosciences](#), 2021, 11(4): 148
- [45] Yu B, Ma Y X, Ma X Z, et al. Laboratory study of the nonlinear transformation of irregular waves over a mild slope[J]. [China Ocean Engineering](#), 2014, 28(4): 489
- [46] 李志强, 陈子燊, 李志龙. 近岸带波浪传播过程中波性质的统计对比分析 [J]. 广东海洋大学学报, 2010, 30(4): 43
- [47] 赫岩莉, 毛鸿飞, 林金波, 等. 基于小波分析的波浪破碎能量变化特征 [J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(4): 146
- [48] 李志强, 陈子燊, 严谨. 利用元胞自动机模拟滩角地形 [J]. [复杂系统与复杂性科学](#), 2007, 4(2): 39
- [49] 曾春华, 胡泰桓, 张会领, 等. 徐闻青安湾海滩冲流带对台风“韦帕”的波动响应特征 [J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(5): 74
- [50] Katsidoniotaki E, Nilsson E, Rutgersson A, et al. Response of point-absorbing wave energy conversion system in 50-years return period extreme focused waves[J]. [Journal of Marine Science and Engineering](#), 2021, 9(3): 345

Extraction of beach cusp morphological characteristics and short-term evolution based on UAV aerial survey in Western Guangdong beaches

Deng Longbo¹⁾, Huang Liping¹⁾, Sun Ruiwei¹⁾, Qi Yali¹⁾, Li Gaocong^{1, 2)}

(1) College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong, China; 2) Key Laboratory of Tropical Marine Ecosystem and Bioresource, Ministry of Natural Resources, Beihai, Guangxi, China)

Abstract Beach cusps are typical rhythmic landforms, their formation and evolution mechanisms are important in coastal dynamic geomorphology. In this work the central beach of Donghai Island in Western Guangdong was studied. UAV aerial survey technology was used to obtain short-term comparative image data, high-precision digital surface models were generated using visible-light imagery. Morphological parameters (beach cusp spacing, depth and height) were extracted using the contour method, Pearson correlation analysis was used to analyze short-term evolution characteristics. Beach cusp morphology was found to show a significant trend toward homogenization in the monitoring period. The number of cusps increased (from 25 to 48), their spatial distribution became more regular, spacing remained stable, while the mean depth and height decreased, with an overall reduction in the dispersion of parameters. Under the influence of stable moderate swells (wave height 0.6–0.9 m, E and ENE directions), the correlations among morphological parameters decreased significantly, and the spacing-height relationship became completely decoupled. This indicates that the beach cusp system was in a phase of morphological construction and adjustment dominated by positive feedback within the self-organization process. Significant deviations were observed between measured values and predicted values of edge wave theory, suggesting that explanatory power of edge wave theory is limited under hydrodynamic conditions and timescale of this monitoring period. This study demonstrates applicability and reliability of UAV aerial survey technology for extracting and monitoring morphological characteristics of beach cusps; this provides a high-resolution empirical case for understanding short-term evolution processes of coastal landforms.

Keywords beach cusp; UAV aerial survey technology; morphological characteristics; self-organization mechanism; edge wave theory

【责任编辑: 范 林】