

## 三亚湾东段海岸侵蚀与海滩养护

王艳红, 曾成杰, 陆培东, 陈可锋

(南京水利科学研究院, 南京 210029)

**摘要:** 海岸侵蚀是当前沿海地区普遍所面临的挑战之一, 许多城市景观海滩区沿海景观和旅游休闲功能已受到海岸侵蚀的直接影响, 侵蚀性景观海滩的人工养护对保持海滩品位和促进旅游可持续发展具有重要意义。在分析三亚湾东段动力泥沙环境和岸滩自然特征基础上, 根据卫星遥感影像资料、固定断面测量资料对比分析了该岸段的侵蚀特征和成因, 提出以增加沙源有效供给和增强海滩抗冲刷能力为目标的海滩养护修复途径, 设计了海滩养护方案。根据海滩养护工程实施后的地形断面监测对比, 海滩养护后海滩范围扩大, 达到修复目标。补沙工程一年半后, 岸滩整体较为稳定, 补沙后的泥沙流失量未有显著增加, 达到预期效果。

**关键词:** 三亚湾; 砂质海滩; 海岸侵蚀; 海滩养护

由碎屑物质组成的海滩是冲淤动态最为活跃的海岸类型, 是始终处于变化状态的海岸地貌单元之一, 也是海岸带极具开发价值的部分。在我国大江大河带来巨量泥沙入海、宽阔的大陆架和内海为主的沿海区域背景下, 沿海淤泥质海岸分布较多, 海滩资源相对较少, 其在滨海休闲旅游中发挥着更为重要的作用。近年来, 随着海平面上升和海岸带开发的逐步深入, 人工岸线逐渐增多, 海岸的侵蚀日益严重<sup>[1,2]</sup>。砂质海岸的侵蚀不但造成海滩和陆域面积的减少, 对海岸景观和环境的影响也十分明显, 越来越受到广泛的关注。为应对海岸侵蚀, 包括我国在内的许多沿海国家采取了大量的海岸防护对策, 如海堤、丁坝、离岸堤等。20世纪20年代以来, 随着海岸工程学家和海岸地貌研究人员的不断探索, 发现向海滩补沙可以减缓海滩的侵蚀。海滩养护 (Beach Nourishment) 作为一种柔性的非结构海岸防护对策开始被应用。

海滩养护是通过人工措施将异地沙源运至补沙岸段人为增加海滩泥沙有效补给的砂质海岸防护手段。因海滩养护能够有效增加海滩范围、减小海滩侵蚀的不利影响, 在不改变海滩自然属性的情况下能有效改善海滩景观, 是较为理想的海滩防护方式<sup>[3,4]</sup>, 在游客密集、关注度高的旅游海滩, 其应用优势更为明显, 已被认可为一种环境友好型且经济有效的海岸侵蚀应对措施, 广泛应用于世界各地, 其中欧美发达国家较为普遍, 并成为海岸防护的主要方式之一<sup>[5-7]</sup>。根据美国海岸和海滩保护协会 (ASBPA) 对1920—2020年美国沿海海滩养护的统计, 一个世纪中全美国在475个岸段实施了3200次海滩养护, 补沙总量高达 $1.2 \times 10^9 \text{ m}^3$  (12亿方), 平均 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ , 最近10年平均达 $2.8 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[8]</sup>。

我国最早的海滩修复是1990年香港南岸的浅水湾浴场<sup>[9]</sup>, 之后多为零星的小规模浴场补沙或人造海滩工程。随着国内社会经济的发展和对滨海旅游海滩需求的日益增长,

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2021-07-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC04070501); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y219013, Y220013)

作者简介: 王艳红 (1974-), 男, 山西兴县人, 博士, 教授级高工, 研究方向为海岸演变与保护修复。

E-mail: yhwang@nhri.cn

海滩养护在我国也越来越受到重视,许多滨海旅游城市相继实施了海滩养护修复工程<sup>[10]</sup>。据不完全统计<sup>[9]</sup>,截至2019年8月,我国已完成或正在进行的海滩修复工程共有97项,分布于全国35个城市,修复岸线总长度超过120 km,总填沙量约 $2.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,总投资超过 $2.0 \times 10^5$ 万元。但整体而言,我国的海滩修复起步相对较晚,目前应对海滩侵蚀等灾害的主要方式仍以堤坝等硬质工程为主,海滩养护主要在少数旅游城市的局部海滩实施,如秦皇岛、厦门、三亚等<sup>[11-13]</sup>,海滩养护意识较为薄弱,海滩养护的研究、设计、施工方面经验相对较少。

三亚市地处海南岛最南端,是我国热带滨海旅游城市,紧挨市区的三亚湾是三亚六大海湾之一(图1)。三亚湾全长22 km,湾长沙细,岸上绿树如带,优越的海滩环境已成为三亚市民和旅游者休闲活动的重要场所,夜间沿岸彩灯辉映,成为三亚市一道亮丽的风景线。“椰梦长廊”营造了优美的自然景观和绝佳的休闲度假环境,是三亚市旅游的重要目的地,受到国内外游客的青睐。随着旅游资源的开发和城市建设的发展,供给三亚湾海滩的陆域泥沙减少,珊瑚礁区域的开发和建设,使珊瑚礁生长区对海湾岸滩的珊瑚砂供给也随之减少,再加上一些近岸工程建设等因素的影响,2014年前后三亚湾东段海滩侵蚀明显。侵蚀岸段的海滩宽度缩小,近岸植被遭到破坏,东段原本洁白、松软的海滩也逐渐变黑,已严重影响到海滨区域的观赏和休闲功能。采取必要的人工措施,修复三亚湾海滩、控制海岸进一步侵蚀,是三亚海滩整治的重要任务。

## 1 研究区概况

三亚湾东侧有鹿回头掩护,是单一岬角控制的弧形岸线海湾,东部有三亚河入注,三亚河口以西以砂质海岸为主(图1)<sup>[13]</sup>。

三亚湾主要受南海前进潮波控制,为不规则日潮型。三亚湾年最高潮位2.13 m(理论基面,下同),最低潮位0.06 m,平均潮位1.02 m,平均高潮位1.43 m,平均低潮位0.64 m,平均潮差0.79 m,最大潮差1.89 m。在三亚湾口及西侧开敞区域的测点潮流以往复性流为主,最大流速均不超过0.8 m/s;鹿回头岬角掩护下的湾内测点最大流速分别不大于0.5 m/s,并表现出一定的旋转流特征<sup>[14]</sup>。

根据三亚湾东瑁洲东侧约19 m水深处2017年4月至2018年4月波浪观测结果,海域最大有效波高3.51 m,出现在“杜苏芮”台风期间。H1/10波高大于1 m的频率为12%。该站波浪主要出现在SE~SSW方向,出现频率最多的波浪是SSE方向,频率达45%;其次是S和SE方向,频率分别是26.4%和15.0%,SSW方向波浪出现频率较小,为7.9%。但因受三亚湾东侧鹿回头掩护,常浪向波浪对湾内影响较小,使三亚湾内成为浪小流弱的天然良港。根据三亚湾海域波浪数模计算,三亚湾东段的友谊路口外侧理论基面-3 m处SSE向波浪作用时,在鹿回头半岛掩护下波高比外海减小71%,波向也偏转至SSW<sup>[15]</sup>。

根据三亚湾海域及沿岸海滩区泥沙采样分析,该海岸表层沉积物大致以部队机场附近为界,以东为中值粒径0.13~0.20 mm之间的细砂,以西为中值粒径0.2~0.3 mm的中细砂。均不含有粒径小于0.05的细粉砂和粘土颗粒,分选较好。这与潮间带区域长期受到波浪洗刷有关。平面上西粗东细的分布特征,与西部海岸开敞,动力作用较强,东部掩护条件较好,动力作用较弱的海岸动力环境相对应。-10 m以浅的水下岸坡中值粒径多在0.02~0.12 mm之间,属细砂或粉砂质砂,粘土含量可达7%~34%。

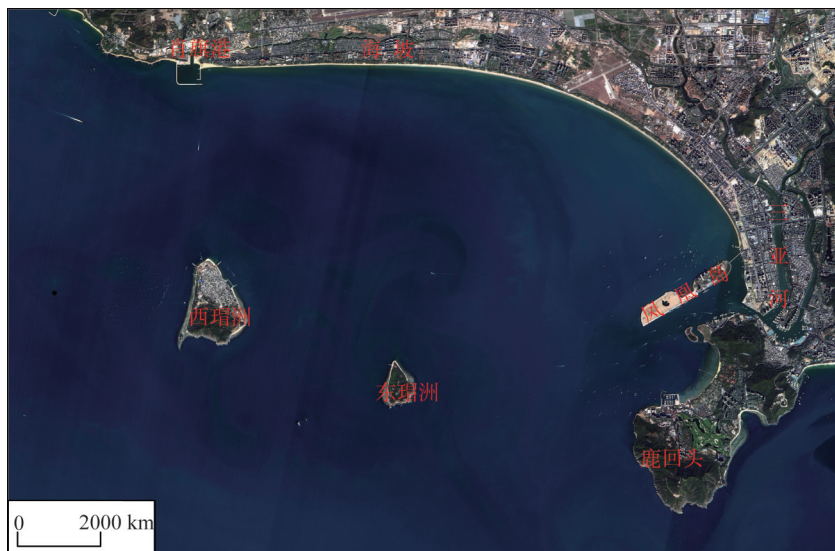


图1 三亚湾海域概况

Fig. 1 General situation of Sanya Bay

## 2 三亚湾东段的岸滩侵蚀

### 2.1 研究方法

收集了1967年5月21日、2002年1月31日及2014年1月18日的卫星遥感影像图进行对比(图2),统一配准后采用目视解译法提取各影像成像时刻的水边线。其中2002年和2014年卫星遥感影像的成像时三亚海洋站潮位分别为0.58 m和0.45 m(1967年影像成像时刻不详),2014年成像潮位略低。根据现场地形和断面资料,三亚湾东段0.5 m附近的平均坡度在1:15~1:25,0.13 m的潮位差造成的水边线误差应小于3.3 m,对岸滩整体冲淤分析影响较小,本文未进行专门修正。

2008年7月、2012年7月和2012年11月分别对三亚湾东段的6个固定断面实施了地形监测,其中2012年11月代表台风影响后的海滩状况(图3)。监测采用水陆联测,陆上部分用RTK进行,测点间距不大于5 m,在断面上地形陡变部位适当加密测点以真实反映断面地形特征;水上部分采用回声测深仪加潮位校正方式进行。其中陆上部分乘低潮阶段进行、水上部分乘高潮阶段进行,重叠部分可相互校正。

### 2.2 岸滩侵蚀结果分析

水边线对比显示,1967年以来的47年间,三亚湾岸滩冲刷主要集中在东部岸段。其中在凤凰岛大桥以南部分,原有海滩已实施围填并成为陆域,围填宽度达100~250 m,河口附近海滩因围填实施而完全消失,这一部位的岸线变化不代表海岸的自然冲淤,仅代表人工岸线的变化。该围填区向北约2.6 km岸段,岸线冲刷后退明显,冲刷岸段一直可北延至海月广场以北约0.5 km附近(图2),其中2002—2014年间,海月广场南侧南北两侧约1 km范围,最大冲刷后退幅度达25 m左右;该冲刷岸段向北,岸线基本稳定。

固定监测结果显示,因5#断面以南均为人工护岸,堤前无海滩分布,且处于人工岛掩护区和三亚港内,近岸海床高程在-1~-2 m附近,除局部因人工港池开挖变化外,海床整体较为稳定。靠近人工护岸的5#断面0 m以上的海滩在2008—2012年间已整体后退



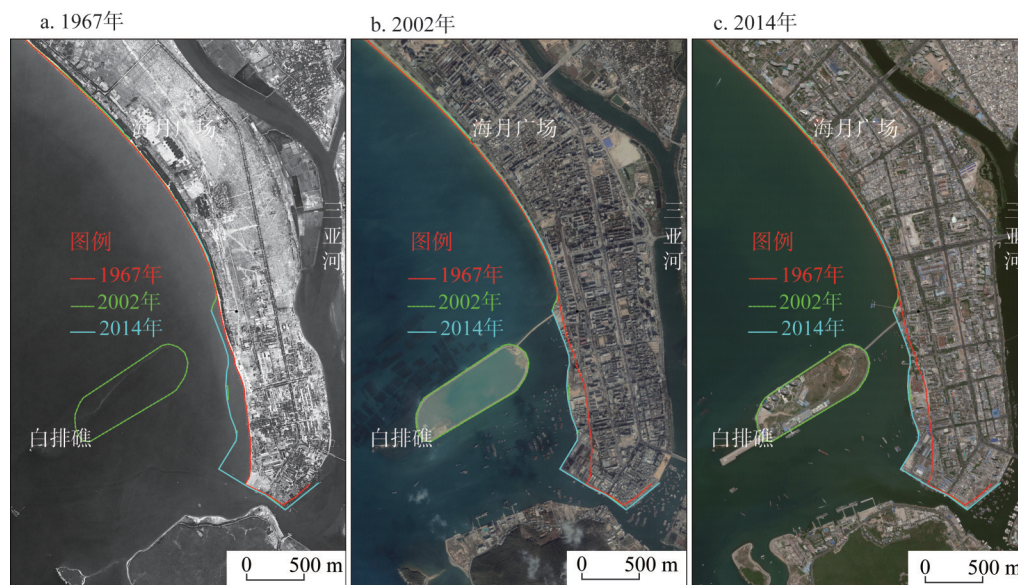


图2 1967年、2000年和2014年三亚湾东段遥感影像提取的岸线对比

Fig. 2 Comparison of shorelines extracted from remote sensing images, obtained in 1967, 2002 and 2014

约15 m, 坡度更陡, 低潮出露的1 m以上海滩宽度减小至不足20 m, 0 m以下变化相对较小; 5#断面以北的6#和7#断面, 未实施护岸, 滩面坡度相对平缓, 2008—2012年间0 m以上的冲刷略小于5#断面, -1 m以上部分整体表现为冲刷, 向北的8#断面2008年以来的冲刷及台风期间的冲刷仅发生在0~1 m高程附近; 2008—2012年间, 5#、6#、7#和8#断面单宽流失泥沙量分别约为22 m<sup>3</sup>/m、40 m<sup>3</sup>/m、30 m<sup>3</sup>/m和18 m<sup>3</sup>/m, 其中2012年7-11月(期间受台风“山神”影响)分别流失泥沙3 m<sup>3</sup>/m、12 m<sup>3</sup>/m、5 m<sup>3</sup>/m和7 m<sup>3</sup>/m。冲刷段各断面在2008年8月至2012年11月间共流失泥沙3.1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 其中2012年7-11月的流失量达1.1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 代表2012年10月24日台风“山神”影响期间的泥沙流失。可见, 台风浪对岸滩冲刷的影响十分显著, 一次强台风浪引起的岸滩冲刷量可达常年1年冲刷量级。此外, 因该岸段掩护条件较好, 波浪作用相对较弱, 海滩冲刷主要发生在-2 m以上部分, -2 m以下海床长期以来较为稳定<sup>[15]</sup>。

### 2.3 侵蚀原因与防护对策

岸滩侵蚀研究显示, 三亚湾东段海岸的侵蚀已使红太阳酒楼至金鸡岭街口长约2.6 km岸段的海滩宽度大大缩小, 内侧植被遭毁, 岸线已靠近陆侧的海滨大道, 海岸侵蚀后退失去了缓冲空间。同时, 岸坡侵蚀后退也使原沙坝下方潟湖相富含有机质的细颗粒沉积物冲刷出露, 海滩颜色黑化, 对海岸整体景观和休闲功能产生了巨大影响。对该岸段实施修复已迫在眉睫。

该岸段靠近2002年新建的凤凰岛, 近岸沙坝也曾实施较大规模的围填占据了原海滩区域。其中人工岛建设后受直立岛壁的反射影响使近岸动力局部增强, 近岸海滩区的围填占用海滩区域导致的堤前动力增强是这些人为因素影响的主要方面。此外, 三亚河河口整治、凤凰岛建设和近岸围填也减小了来自三亚河和周边珊瑚礁区域的泥沙补给, 造成这一岸段的外来泥沙不足。从恢复海岸自然动力泥沙环境的角度看, 减小动力作用、增强岸滩抗冲刷能力和增加泥沙的有效补给是修复与保护这一岸段岸滩的必要途径。

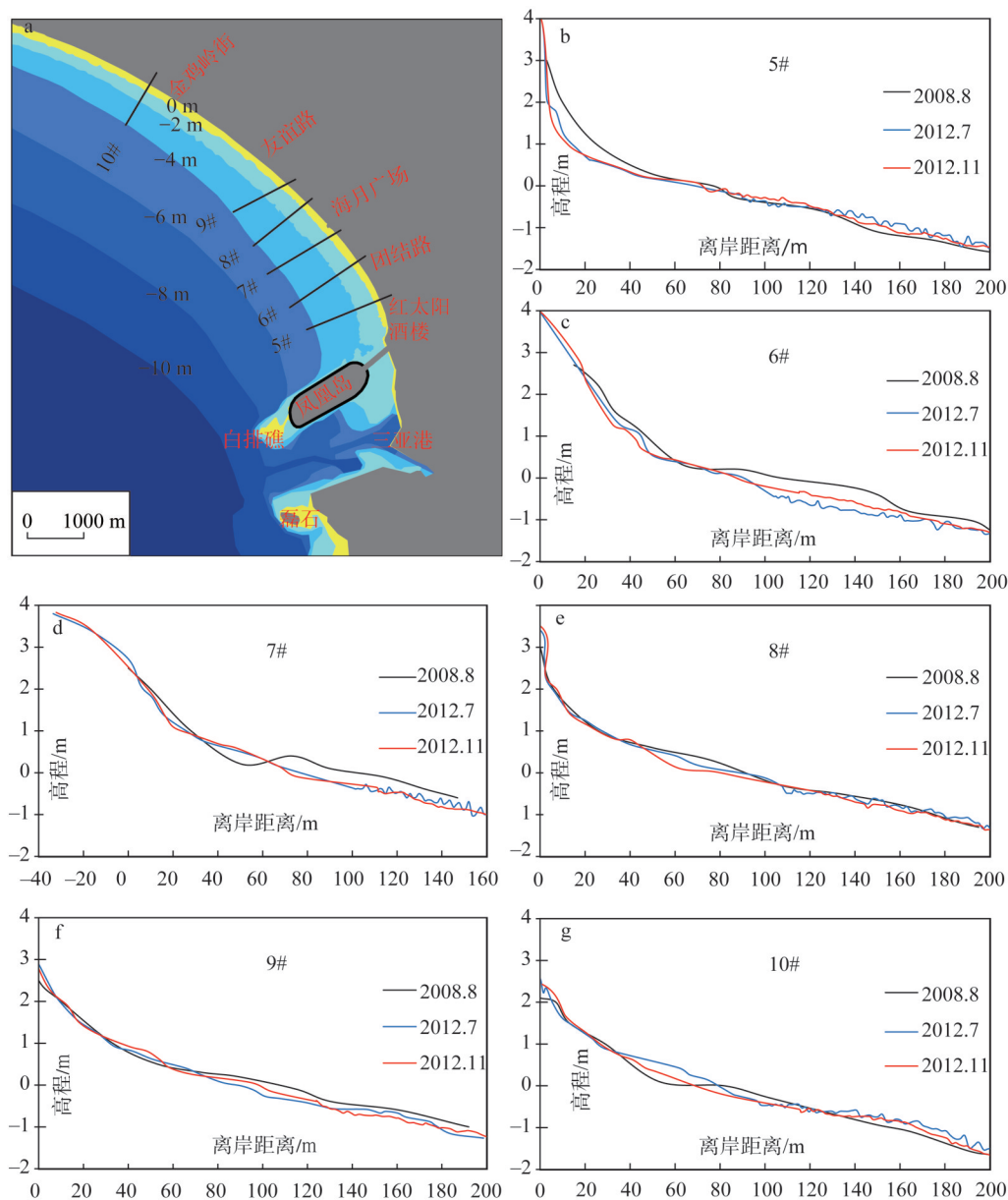


图3 三亚湾东段岸滩剖面对比

Fig. 3 Comparison of cross-shore profiles from Aug. 2008 to Nov. 2012

现有海岸动力环境与原始状况的主要区别在于靠近人工岛附近岸段的波浪动力增强,通过一定的工程措施可以实现近岸波浪动力的减弱,且能够达到足以抵消工程影响引起的动力增强。但考虑到该岸段处于三亚湾主城区,开发程度较高,在以优美的自然环境为主要吸引力的三亚湾海岸核心岸段,多年来其现有景观格局已在人们心目中留下深刻印象,并已得到广泛认可,进一步的人工工程势必改变这一岸段景观格局,消浪工程建设宜在海湾景观规划中通盘考虑。

对于构建适宜当前动力环境的海滩环境而言,由于人工工程的影响主要表现为近岸动力的增强,海滩泥沙在不适应这种较强动力环境的情况下,才出现以泥沙流失为表现

的海岸侵蚀。在海岸泥沙已大量流失、海滩环境已严重恶化的情况下,以海滩养护柔性防护形式,补充足够维持海岸侵蚀且更能适应现有动力环境的较粗颗粒泥沙,从而在不改变海岸现有格局和自然属性的情况下使岸滩更趋稳定,并能达到扩大海滩范围和改善海滩景观环境的目的。

### 3 海滩养护方案设计

#### 3.1 补沙形式与范围

海滩养护一般包括由岸上推进的沙嘴补沙、岸外沙坝补沙和滩肩补沙等形式。三亚湾地处游客和市民密集的主城区,向海明显延伸的沙嘴,对岸线自然景观影响较大,且附近缺少陆源泥沙,岸上推进的沙嘴补沙不适宜本岸段;三亚湾东段天然无岸外沙坝发育,波浪动力相对较弱,岸外沙坝泥沙不易运移至岸边。目前三亚湾岸滩冲刷的主要危害表现为滩肩的缩小甚至缺失,因此,自海上运沙进行滩肩补沙,形成宽阔滩肩,对本岸段较为理想。

三亚湾中段相对稳定海滩的滩肩宽度一般在30~40 m,滩肩高程在2.4 m左右。为保持岸滩整体的连续性,海滩养护岸段的设计滩肩宽度为35 m。

#### 3.2 沙源对比

沙源选择是海滩养护设计的重要环节,根据补沙段地形情况,2.6 km的补沙岸段按照滩肩宽度35 m、高程2.4 m的滩肩设计,补沙量约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。以就地取材为导向,调查了三亚附近可能的3个沙源地,分别进行了采样分析,依次为:(1)西部的宁远河口(SY12和SY13), (2)东部的腾桥河口(SY17和SY18), (3)肖旗港航道疏浚泥沙(SY20)(图4)。

补沙沙源的选取主要考虑拟选沙源粒径级配、补沙超填率、填筑后稳定的岸坡坡度、可用沙量以及沙源中可悬浮细颗粒等方面。

##### (1) 超填率

海滩补沙中一般选择粒径较粗且级配较好的沙作为海滩填料,以减少填沙流失。但填料中含有较细颗粒成分时,需要进行超量填筑。为此需确定超填率(指实际需要填沙的体积与可在海滩上留住的填沙体积之比),主要与当地海滩原有的沙以及新填沙两者的粒径分布有关。根据美国《海滨防护手册》<sup>[16]</sup>推荐的超填率计算方法,上述各沙源的超填率均在1.0~1.1之间,从超填率角度,各沙源无本质区别。

##### (2) 沙源适宜性

现场调查显示,三亚东部海棠湾的藤桥河口附近海滩已有一定冲刷,陆源泥沙供给不足,作为沙源地采集泥沙将进一步加剧沙源地的泥沙冲刷;肖旗港附近每年有一定的航道清淤,但每年的疏浚量不足 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,难以满足约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的补沙需求;宁远河口正在实施中心渔港一期工程建设,航道和港域开挖量巨大,从供给量方面能够满足本工程需求。

#### 3.3 岸滩坡度与剖面设计

海滩坡度是滩肩补沙的重要设计参数之一,不同的坡度也对应不同的补沙量。根据Dean等<sup>[17]</sup>,低潮位至高潮位之间的岸滩坡度与径之间的关系可用如下公式计算<sup>[17]</sup>:

$$h = Ay^{2/3} \quad (1)$$

式中: $h$ 为相对水深(m); $y$ 为离岸距离(m); $A$ 为Dean系数(查表确定)。

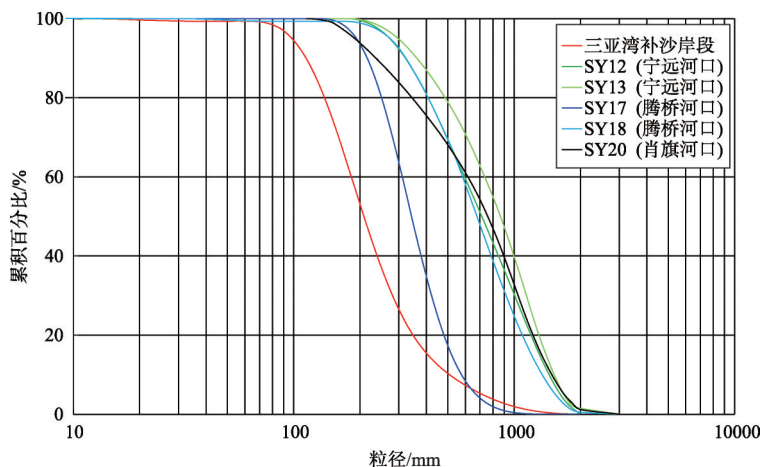


图4 三亚湾原始海滩沙和各沙源粒径累积频率

Fig. 4 Accumulated grain size of native beach sand and investigated borrowed sand

根据上述公式的计算结果, 三亚湾东段海滩粒径 0.2 mm 的天然海滩沙对应的坡度为 1 : 30, 与实测地形中该岸段潮间带海滩部分 (0~2 m) 的平均坡度接近 (图 3)。宁远河口值粒径 0.7 mm 的沙源补沙后, 形成的海滩坡度在 1 : 11 左右 (图 5)。

海滩养护后的剖面形态主要取决于: (1) 代表当地动力条件的天然海滩沙; (2) 填筑沙源的粒径; (3) 设计滩肩宽度。在沙源初步选定的情况下, 设计滩肩宽度是岸滩剖面和补沙量的决定性因素。滩肩宽度的确定一般根据健康海滩自然状况和海滩使用需要而定。就三亚湾补沙岸段而言, 其目前的大潮高潮位以上滩肩宽度自光明路口至金鸡岭路口逐渐增宽, 平均宽度 25 m; 金鸡岭路口以西的稳定岸段滩面的滩肩宽度在 30~40 m 左右, 代表了当地稳定的海滩状况。为达到与西侧稳定海滩滩肩宽度的一致, 保持滩面的连续性, 设计滩肩宽度 35 m 较为适宜, 即通过海滩补沙增宽滩肩宽度 35 m。

设计滩肩宽度确定后, 可根据以下公式计算补沙后的稳定岸滩剖面<sup>[3]</sup>:

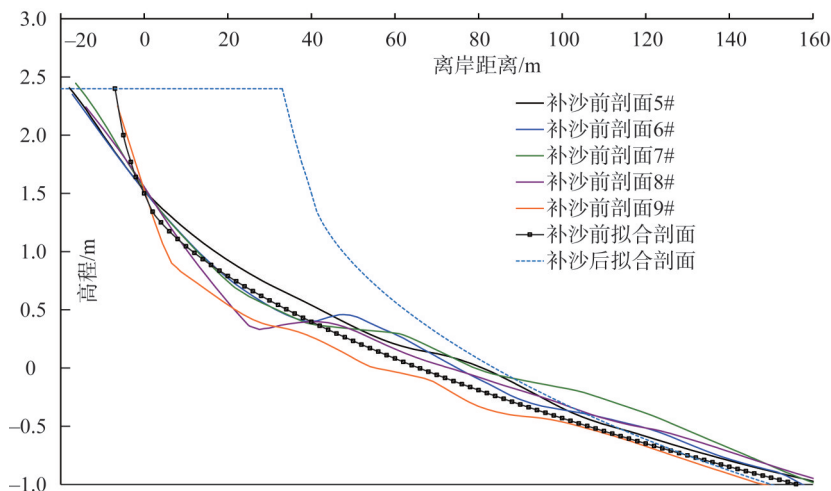


图5 补沙前后海滩剖面拟合计算

Fig. 5 Beach profile fittings before and after nourishment



$$y_b = y_n + W + h^{3/2} \left[ \left( \frac{1}{A_b} \right)^{3/2} - \left( \frac{1}{A_n} \right)^{3/2} \right] \quad (2)$$

式中： $W$ 为设计滩肩宽度（m）； $y_n$ 和 $y_b$ 分别为补沙前后各水深点的离岸距离（m）； $h$ 为平均海平面起算的水深（m）； $A_n$ 和 $A_b$ 分别为补沙岸段天然砂和填筑沙源对应的Dean系数。

据式(2)补沙后的剖面进行计算，计算结果见图5。

按照上述选择的沙源和补沙剖面，设计了滩肩宽度35 m、滩肩高程2.4 m、补沙总量 $2.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、补沙岸段长2.6 km的海滩养护方案。补沙前后不同段的岸滩形态特征见图6。

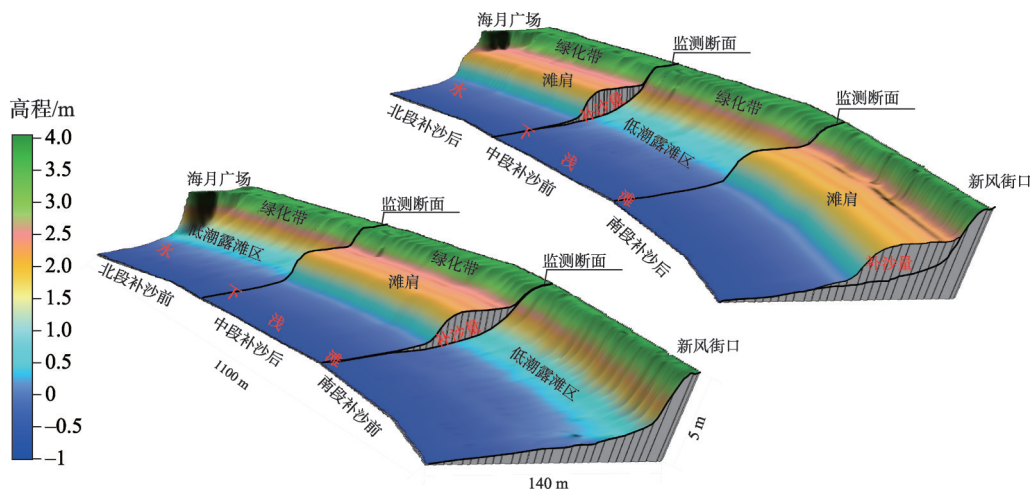


图6 设计补沙方案实施前后效果图

Fig. 6 Impression drawings of the beach before and after designed beach nourishment

#### 4 补沙工程实施与后期监测

根据上述设计方案，于2014年5-11月实施了三亚湾东段海滩养护工程，沙源全部取自宁远河口，按照超填率为1.1考虑共补沙 $2.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。按照设计要求，取沙施工选择满足设计要求的沙源，补沙全程进行监理，每船抽样检测。沙源均满足含泥量小于5%、中值粒径 $0.4 \sim 0.75 \text{ mm}$ 的要求，补沙总量、滩肩宽度等要素均达到了设计目标，并在补沙区后方种植了植被（图7）。

补沙工程实施后，分别于2015年3月、2015年11月和2016年4月对补沙段典型剖面进行监测。监测结果显示，2015年3月至2016年4月的13个月间，泥沙流失量约 $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。但补沙后的岸线形态、滩肩宽度和海滩剖面形态均未发生明显变化（图8）。因补沙后监测期间该海岸尚未经历大的台风浪影响，海滩剖面坡度相对稳定，滩肩前沿 $0 \sim 2 \text{ m}$ 部分的坡度在 $1:8 \sim 1:15$ 之间，与前述设计剖面形态基本一致。滩肩高程整体稳定在原设计的2.4 m左右。补沙工程实施一年半后，海滩泥沙有所流失，但流失量与补沙工程实施前没有显著差异，表明原设计的海滩养护方案与当地动力条件较为适应。

#### 5 讨论

三亚湾东段受鹿回头岬角掩护，动力条件相对较弱，海滩侵蚀主要原因是泥沙供给不足和近岸工程影响，直接增加泥沙有效补给的海滩养护形式对三亚湾东段岸滩修复和



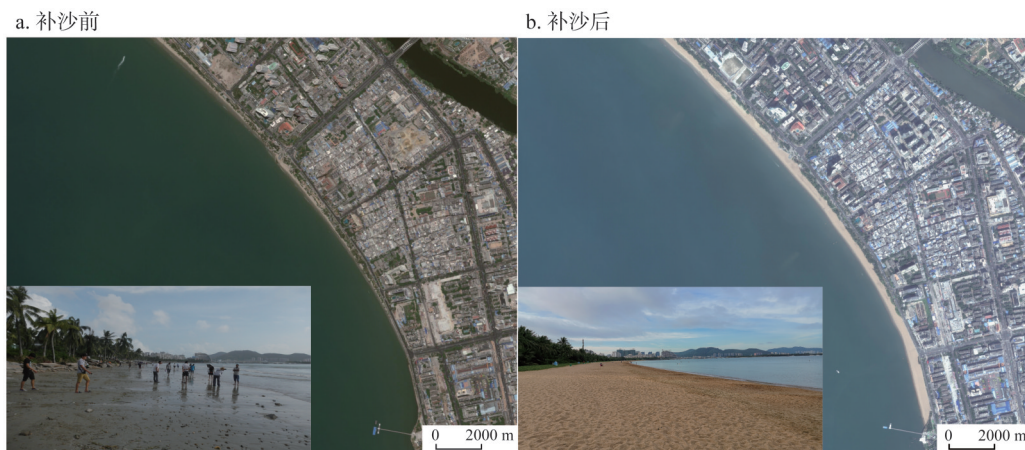


图7 补沙前(左)后(右)海滩状况对比

Fig. 7 Beach conditions before (left) and after (right) beach nourishment

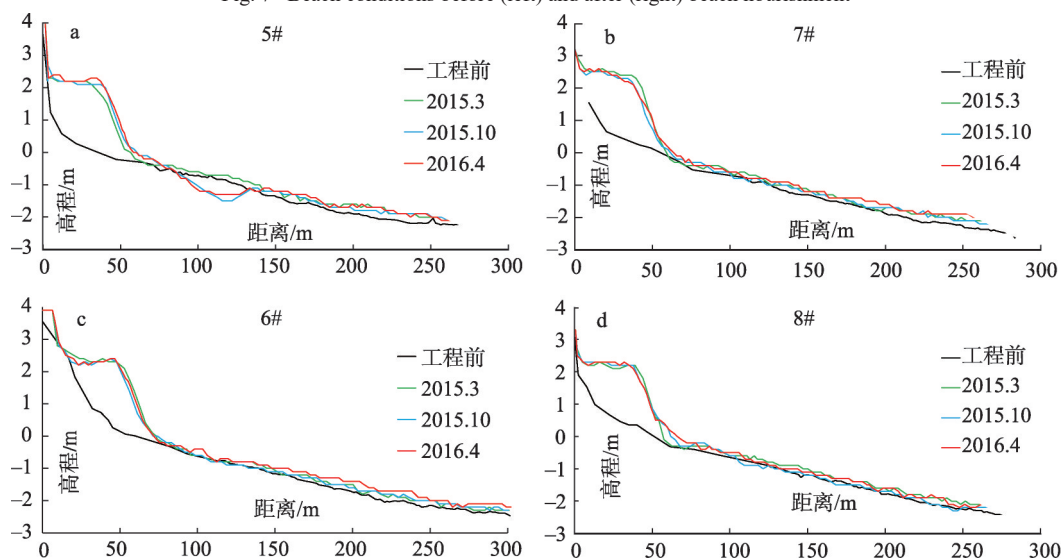


图8 海滩养护工程实施前后海滩剖面监测结果对比(剖面位置同图3)

Fig. 8 Beach profile comparison before and after beach nourishment

防护是适宜的。海滩养护工程实施后的监测结果表明, 海滩养护对增加海滩宽度和修复海滩景观环境效果显著, 在充分研究和合理设计基础上减小海滩养护, 不致对周边环境造成明显不利影响。需要指出的是, 海滩养护并不能阻止海滩侵蚀和海滩泥沙流失, 因此, 海滩养护并非一劳永逸。根据国外相关实施时间较长的海滩养护工程实践, 当泥沙流失量达到初次补沙量的40%~50%时即需要进行重补<sup>[3,8]</sup>。三亚湾东段海滩养护实施一年半后, 年平均泥沙流失速率与补沙前基本相当, 按照13个月流失泥沙 $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右(约 $1.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ), 约5年后泥沙流失至补沙量的40%~50% ( $8.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ), 即本工程的重补周期在5年左右, 重补沙量为原补沙量的50% ( $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ )。考虑到补沙后监测时间较短, 已有的监测资料中未出现明显的台风浪影响。为实时掌握补沙后岸滩的冲淤变化和泥沙流失情况, 以及台风浪引起的岸滩变化, 科学确定重补时间, 定期和不定期的

岸滩地形监测是十分必要的。

沙源选择是海滩养护的重要环节,但因所需砂量较大,清洁且适宜补沙岸段的沙源是海滩养护能否成功实施的关键。就泥沙粒径而言,接近或略粗于原始海滩沙的沙源有利于补沙后的岸滩稳定,新补泥沙后按照沙源粒径计算所得的剖面形态与实际状况吻合较好。从沙源地角度,一般沙源包括近岸沙坝、河口沙嘴和岸外的水下岸坡等。在海平面上升、陆域泥沙来源减少和河道采砂等因素影响下,国内大部分海滩均存在沙源不足现象,沙源也十分紧缺,近岸沙坝和河口沙嘴难以维系海滩长期养护的需要。对于补沙量大且有长期规划的海滩养护而言,寻找岸外海域的岸外水下岸坡区域的沙源是十分必要的,也是国外大规模海滩养护实施的主要方式<sup>[8,18,19]</sup>。因此,在补沙岸段周边运距允许范围内,通过直接和间接方式进行沙源调查,对满足海滩养护及持续的续补十分必要。

滩肩高程和滩肩宽度是海滩养护设计的关键参数,因各地的动力泥沙条件差异较大,特别是潮差、波高等因素对滩肩高程的设计至关重要。在缺少统一规范或经验借鉴情况下,依当地动力条件接近的滩肩自然高程作为海滩养护的滩肩设计高程,有利于滩肩区高程稳定,便于休闲用途和景观建设。在没有辅助设施情况下,以修复补沙岸段为主要目的的滩肩补沙、滩肩宽度与非补沙岸段的平顺过渡有利于减小泥沙沿岸方向的大规模调整。针对不同补沙目的,如考虑集中补沙岸段形成沙源补给周边冲刷岸段的“泥沙引擎(Sand Motor)”补沙形式,其对滩肩宽度的界定应按照补沙量的需求等确定。

海滩养护在国内实施尚相对较少,设计和管理经验欠缺,首先应针对海岸的动力泥沙环境、海滩冲刷机制和控制动力等方面进行系统的前期论证,研究海滩养护的适宜性和可行性。补沙实施后的跟踪监测,不但有利于评价海滩养护的成效和重补时间的确定,对类似海岸的海滩养护决策与设计也有很好的借鉴意义。

## 6 结论

(1) 海滩区沿岸方向上地形相对均一,自岸向海高程递减,分带性明显,在缺少系统性、整体性地形监测资料情况下,采用固定断面和遥感水边线反演结果对比的方法,分别提供海滩在横向和纵向上的冲淤表现,能够为掌握海滩冲淤特征提供较为全面的依据。(2) 三亚湾东段在东南侧鹿回头半岛掩护下动力条件相对较弱,海滩冲刷主要因岸滩局部围填占据原有沙坝、人工护岸形成以及人工岛等工程建设引起的泥沙来源减少和局部动力增强。增加泥沙有效补给、增强海滩抗冲刷能力是恢复和保护岸滩的应有对策。海滩位于三亚市旅游休闲区,丁坝、离岸堤等实体建筑物及其引起的岸线冲淤调整对三亚湾景观和休闲功能将产生一定的不利影响。采用不改变岸滩自然属性的海滩养护措施是类似海岸修复和养护较为适宜的选择。(3) 选择比原有岸滩泥沙更粗的沙源进行补给,能够增强岸滩的抗冲刷能力,但过粗的沙源形成的海滩坡度更陡,滩面行人感受也受到影响。略粗于原有海滩沙的沙源对维系海滩稳定和休闲功能更为适宜。补沙工程实践表明,结合现有海滩岸线和地形格局设计的滩肩补沙形式、补沙范围、尺度和沙源,对修复日益严重的三亚湾东段海滩冲刷是适宜且有效的,能够在很大程度上修复该岸段原有的海滩景观,并保持相对稳定。根据补沙后的定期监测研究,确定合理的重补时机,进一步维系三亚湾东段海滩景观和休闲功能,为类似旅游休闲海滩的修复与保护提供了较好的借鉴。

## 参考文献(References):

- [1] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要. 北京: 海洋出版社, 2010: 1-10. [CHEN J Y. The Compendium of Coastal Erosion, China. Beijing: China Ocean Press, 2010: 1-10.]
- [2] 李加林, 田鹏, 邵姝遥, 等. 中国东海区大陆岸线变迁及其开发利用强度分析. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1886-1901. [LI J L, TIAN P, SHAO S Y, et al. The change of continental coastline and its development and utilization intensity in the East China Sea. Journal of Natural Resources, 2019, 34(9): 1886-1901.]
- [3] DEAN R G. Beach Nourishment, Theory and Practice. Singapore: World Scientific, 2002: 30-50.
- [4] 季小梅, 张永战, 朱大奎. 人工海滩研究进展. 海洋地质动态, 2006, 22(7): 21-25. [JI X M, ZHANG Y Z, ZHU D K. Research development of artificial beach. Marine Geology Letters, 2006, 22(7): 21-25.]
- [5] BIRD E, LEWIS N. Beach Re-nourishment for Coast Protection. Cham: Springer International Publishing, 2015: 15.
- [6] COBURN A S. Beach Nourishment in the United States. Dordrecht: Springer, Netherlands, 2012: 105-119.
- [7] HANSON H, BRAMPTON A, CAPOBIANCO M, et al. Beach nourishment projects, practices, and objectives: A European overview. Coastal Engineering, 2003, 47(2): 81-111.
- [8] ELKO N, BRIGGS T R, BENEDET L, et al. A century of U.S. beach nourishment. Ocean & Coastal Management, 2021, 199: 1-11.
- [9] 蔡锋, 刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新. 应用海洋学学报, 2019, (4): 452-463. [CAI F, LIU G. Beach nourishment development and technological innovations in China: An overview. Journal of Applied Oceanography, 2019, (4): 452-463.]
- [10] 庄振业, 曹立华, 李兵, 等. 我国海滩养护现状. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 133-139. [ZHUANG Z Y, CAO L H, LI B, et al. An overview of beach nourishment in China. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(3): 133-139.]
- [11] 褚智慧, 王永红, 庄振业, 等. 北戴河中海滩人工养护前后沉积物粒度变化特征. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 62-70. [CHU Z H, WANG Y H, ZHUANG Z Y, et al. Changes in grain size before and after beach nourishment in middle Beidaihe Beach. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 62-70.]
- [12] 季小梅, 张永战, 朱大奎. 三亚海岸演变与人工海滩设计研究. 第四纪研究, 2007, 27(5): 853-860. [JI X M, ZHANG Y Z, ZHU D K. Evolution of Sanya coast and artificial beach design. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 853-860.]
- [13] 王艳红. 三亚市岸线生态修复与保护规划(2016—2020). 南京: 南京水利科学研究院, 2016. [WANG Y H. The planning on ecological restoration and protection of Sanya Coastline (2016-2020). Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2016.]
- [14] 王艳红, 陈可锋. 三亚凤凰岛邮轮港区岸线及海域使用总体规划潮流数学模型试验和泥沙回淤计算研究. 南京: 南京水利科学研究院, 2010. [WANG Y H, CHEN K F. Tidal current numerical simulation and sediment siltation study for the shoreline and sea area general planning of the second phase project of Sanya Phoenix Island Passenger Liner Port. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010.]
- [15] 王艳红, 王登婷. 三亚凤凰岛国际邮轮港二期工程人工岛工程对三亚湾岸滩冲淤的可能影响及对策研究. 南京: 南京水利科学研究院, 2012. [WANG Y H, WANG D T. Effects of the artificial island of the second phase project of Sanya Phoenix Island Passenger Liner Port on Sanya Bay Beach, and Control Measures. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012.]
- [16] 美国海岸工程研究中心. 海滨防护手册. 北京: 海洋出版社, 1988. [U S. Army Coastal Engineering Research Center. Shore Protection Manuel. Beijing: China Ocean Press, 1988.]
- [17] DEAN R G, DALRYMPLE R A. Coastal Processes with Engineering Applications. United Kingdom: Cambridge University Press, 2004.
- [18] LUO S, LIU Y, JIN R, et al. A guide to coastal management: Benefits and lessons learned of beach nourishment practices in China over the past two decades. Ocean & Coastal Management, 2016, 134: 207-215.
- [19] RANGEL B N, NEAL W J, JONGE V. Risk assessment as tool for coastal erosion management. Ocean & Coastal Management, 2020, 186: 105099, Doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105099.



## Beach erosion and nourishment in the east section of Sanya Bay, China

WANG Yan-hong, ZENG Cheng-jie, LU Pei-dong, CHEN Ke-feng  
(Nanjing Hydraulic Research Institute, NHRI, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Coastal erosion is one of the major challenges in coastal zones. Coastal landscape, tourism and leisure functions have been seriously affected by coastal erosion in many tourist sand beaches. Artificial nourishment on regular tourist beaches is of great importance for maintaining beach grade and promoting sustainable tourist development. Based on analysis of coastal dynamics, sediment and beach conditions, as well as comparison of remote sensing images and beach profiles, erosion conditions and origins of erosion are examined on the east section of Sanya Bay, Hainan Island, China. Artificial beach nourishment that does not shift coast nature was proposed for restoration and preservation of the beach, concerning the scenic urban area. By analyzing beach landform, dynamics, native and borrowed sand conditions, we designed a beach nourishment project, with the goal of proving resistivity to erosion and increasing the material sediment supply of the beach. Comparison of satellite images and fixed beach profiles before and after beach nourishment shows that the beach was restored and broadened as designed. Profiles measured one and a half years after nourishment show that the nourished beach face and berm were relatively stable, without an obvious increase in the rate of sand loss. The east section of Sanya Bay is a relatively calm area sheltered by the Luhuitou Peninsula. Beach erosion is mostly induced by a decrease in foreign sand supply and enhancement of local dynamic forces due to sandbar reclamation, construction of hard structural revement and artificial islands. Weakening dynamic forces to reduce sand loss and/or adding an effective supply of foreign sediment by artificial measures are necessary ways to restore and protect the beach. However, hard structures like groins and breakwaters will have a negative effect on both the coastal landscape and tourists' safety. The proposed beach nourishment project does not modify the beach nature, which is a reliable choice for beach restoration in Sanya, a famous tropical tourist city in China. Practice of the beach nourishment project indicates that beach nourishment with suitable location, range and borrowed sand following the natural coastline, landform and hydro-dynamics is effective for restoration of beach erosion of the east section of Sanya Bay. However, beach nourishment is not efficacious forever. Sand loss is still inevitable after nourishment, because the hydrodynamics have not changed. Further sustained re-nourishment is necessary to maintain the dynamic stability of the beach. Meanwhile, no strong typhoon hit the area during the surveys after nourishment, further response of the beach to storm waves are to be concerned.

**Keywords:** Sanya Bay; sandy beach; coastal erosion; beach nourishment