

# 海岸沙丘风暴侵蚀研究现状与展望

罗时龙<sup>1</sup>, 靳瑞芳<sup>1</sup>, 于帆<sup>2,3</sup>, 魏巍<sup>1</sup>, 吴坤富<sup>1</sup>, 杨文丰<sup>1</sup>, 宁旋旋<sup>1</sup>

(1 国家海洋局南海分局南海调查技术中心, 广州 510300;

2 国家海洋局海岛研究中心, 福建平潭 350400; 3 中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

**摘要:**基于对海岸沙丘风暴侵蚀研究的简要回顾,概括了我国海岸沙丘风暴侵蚀概况,以及国外近期在海岸沙丘侵蚀机理、海岸沙丘风暴响应过程等方面的主要研究进展,提出了存在的科学问题。针对我国海岸风暴侵蚀研究的不足之处,应及时开展海岸沙丘资源现状调查与评估、典型岸段的风暴侵蚀机理拓展研究,以及海岸沙丘功能维持和生态养护技术示范和应用等,探究海岸沙丘风暴侵蚀机理,建立一套海岸沙丘风暴侵蚀评估和管理技术。

**关键词:**海岸侵蚀;海岸沙丘;风暴侵蚀;生态养护

**中图分类号:**P737      **文献标识码:**A      **DOI:**10.16028/j.1009-2722.2016.02001

海岸沙丘是风成的海岸堆积地貌,发育在沙源丰富、风况适宜和沙汇充足的海岸带,是最基本的海岸风沙地貌形态<sup>[1-3]</sup>。早期有关海岸沙丘发育机制、形态特征、成因类型以及分布特征等的研究较多,人们认识到海岸沙丘的形成、发展以及后期的改造等地质环境过程受陆地和海洋的双重动力因素影响,以风力作用为主的海岸沙丘动力地貌体系和以波流作用为主的海滨动力地貌体系是相互作用相互影响的<sup>[4-12]</sup>。随着对沙丘的海岸防护功能、生态功能、休闲娱乐功能以及沉积物源储汇功能的重视,人们逐渐意识到海岸沙丘资源是有限的,必须得到保护,以便永续利用<sup>[13,14]</sup>。然而,近年来由于全球气候变化以及不当的人类活动,如风暴加强、海平面上升、海滨采砂、沙丘植被破坏等,使得海岸沙丘的功能严重萎缩。其中,风暴浪潮对海岸地貌、海底地形和海洋沉积的影响非常强烈,特别是对海岸沙丘和滩肩的冲蚀极

其严重,极端风暴潮能冲越以致侵蚀沙丘顶部,引起洪泛,危害生命财产安全<sup>[15-21]</sup>。因此,近年来有关海岸沙丘风暴侵蚀机制、响应模式、风暴后恢复状况以及海岸沙丘功能养护等相关问题,引起了重大关注,并成为海岸地貌学研究的热点之一。

## 1 我国海岸风沙地貌与风暴概况

我国海岸带北起鸭绿江口,南至北仑河口,呈现向东南突出的弧形。在漫长的海岸线上,从北方的温带半湿润区到南方的热带湿润区,均有海岸风沙地貌分布。但由于沙源与气候等因素的限制,海岸风沙地貌在我国海岸呈带状断续地零散分布,各地的分布面积均不大,一般只有几到几十平方千米(图 1)<sup>[22]</sup>。据初步统计,全国海岸风沙地貌面积约 3 000 km<sup>2</sup>,其中黄渤海海岸风沙地貌总面积约 700 km<sup>2</sup>,华南地区海岸风沙地貌面积总计约 2 300 km<sup>2</sup>,占总量的 70% 以上<sup>[2,23]</sup>。然而,华南沿海是受台风风暴影响最严重的地区,1949—2006 年间登陆中国沿海达台风级别的热带气旋共有 208 个,其中 89% 的在华南沿海登陆<sup>[24]</sup>。对 1990—2009 年登陆中国沿海地区的台风类型分析显示,强热带风暴级别以上的共有

**收稿日期:**2015-08-28

**基金项目:**国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金(1520);海洋公益性项目(201405037)

**作者简介:**罗时龙(1983—),男,博士,工程师,主要从事海岸侵蚀、生态修复以及海岸与海洋动力地貌研究工作。E-mail: lsl04025@yeah.net

114 次,占总数的 72.61%,平均每年 5.7 次;热带风暴和热带低压级别的有 43 次,占总数的 27.39%,平均每年 2.15 次,其中,约 99% 的台风在华南海岸登陆<sup>[25]</sup>。可见登陆中国华南沿海地区的台风不仅强度大,而且频次多。除了风暴对海岸沙丘的冲刷侵蚀,近年来海岸带大规模高强度的开发,原始自然状态的海岸沙丘已很少,严重危害了海岸沙丘的自然防护功能,进一步加剧了海岸风暴侵蚀风险。目前,对我国海岸沙丘的研究主要集中在沙丘类型和演化,以及海岸风沙运动过程等方向,个别海滩台风效应研究中对海岸沙丘侵蚀略有涉及。由于野外数据采集以及风暴过程监测的缺少,专门针对海岸沙丘风暴侵蚀的研究还未报道过。

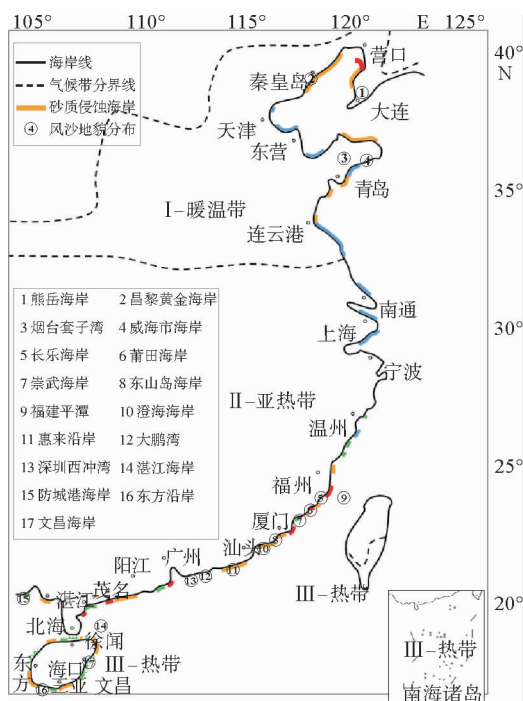


图 1 我国海岸风沙地貌分布概况以及砂质海岸侵蚀状况(据文献[22]修改)

Fig. 1 The distribution and erosion situation of coastal dunes in China(modified from reference [22])

## 2 国内外研究现状

常见的有 2 种类型的风暴会影响到海岸带:一种发源于热带,称之为热带风暴;另一种是由于冷锋和暖锋相遇而引起的,称之为温带风暴<sup>[26]</sup>。本研究中涉及的风暴类型为热带风暴,按照我国

热带气旋等级划分标准,热带气旋分为热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风 6 个等级。只有达到一定级别的热带气旋,才能够影响到海岸沙丘,进一步引起海岸沙丘侵蚀破坏,因此,本研究中的风暴特指强热带风暴级别以上的气旋,或称之为极端风暴,其底层中心附近最大平均风速超过 24.5 m/s,底层中心附近最大风力达 10 级以上。

### 2.1 海岸沙丘风暴侵蚀机理

海岸沙丘侵蚀受陆地和海洋双重地貌动力因素的影响,其中风暴作用是造成海岸沙丘侵蚀的最重要过程。前人研究把海岸侵蚀划分为 2 类:①显形侵蚀,主要是由于风暴事件引起的,风暴期间的海岸侵蚀速率是正常天气状况下侵蚀速率的若干倍。通常情况下,在风暴后的平静期,海滩剖面会在一定程度上重建,但对于海岸沙丘、海蚀崖和潮滩等由风暴侵蚀引起的后退是很难恢复的。②隐形侵蚀,是海岸系统为适应新的沉积物平衡条件而引起的侵蚀过程,引起这一过程的主要原因是海平面上升,人类活动通常诱导或加速隐形侵蚀,例如沿海油气和水资源的开采导致的地面沉降,河流流域的运河、大坝以及灌溉引起的下游沉积物载荷减少,以及丁坝、港口码头的建设阻断沿岸沉积物的运移等<sup>[19,27-32]</sup>。

在对隐形海岸侵蚀机理和侵蚀过程进行大量的野外观测和室内分析研究之后<sup>[33-45]</sup>,人们也对海岸沙丘风暴侵蚀研究做了较多的物理模型试验和数值模拟,以及野外的勘查和观测,对海岸沙丘风暴侵蚀的影响因素有了一定的认知。Ruz 等<sup>[46]</sup>对法国 Wissant Bay 强潮沙丘海岸进行了为期一年的风沙观测和地形监测,结果表明,夏秋季是风沙搬运与沉积的主要时期,冬春季风暴侵蚀占主导地位,海岸沙丘的动力沉积过程受风暴潮强度和频率的强烈控制。Saye 等<sup>[47]</sup>的研究认为海滩的侵蚀后退加速了海岸沙丘的侵蚀,同等条件下较窄较陡的海滩更易遭受风暴侵蚀。在一定程度上,海滩的宽度和坡度的变化可以作为海岸沙丘侵蚀或淤积的预警。Pries 等<sup>[48]</sup>、Claudino-Sales 等<sup>[49]</sup>研究了飓风 Ivan 和 Dennis 对佛罗里达 Santa Rosa 障壁岛海岸前丘侵蚀的影响,指出海岸沙丘高度、宽度、走向以及植被覆盖等特征能

代表海岸沙丘的抗侵蚀能力,随着风暴强度、持续时间和频率的增加,海岸沙丘在风暴后存活的几率则减小。Pye 等<sup>[50]</sup>对英国的 Sefton 海岸前丘的侵蚀和淤积进行了超过 50 年的观测,通过大量的数据分析发现,海岸前丘侵蚀速率较高的年份总是伴随着较多的风暴潮次数,指出风暴频率和强度是海岸沙丘侵蚀的主控因素。Furmańczyk 等<sup>[51]</sup>利用层次聚类分析法研究了波兰 Dziwnow 沙嘴沙丘侵蚀量对风暴的响应关系,通过对近 30 年来造成沙丘侵蚀的 32 次风暴的分析评估,指出有效风暴水位对海岸沙丘风暴侵蚀量影响最大,接下来是波高和浪向。由此可见,通过野外观测和分析,风暴对海岸沙丘或潟湖障壁岛的侵蚀取决于 2 方面的因素,一是风暴参数,如风暴增水和风暴浪;二是风暴登陆沿岸地形地貌参数,如海岸前丘高度、海岸沙丘覆被等。

研究表明,海岸侵蚀包括沿岸输沙和横向输沙 2 部分,而海岸沙丘风暴侵蚀主要是横线输沙过程,离岸流把侵蚀下来的沉积物向海搬运;沿岸流输沙相对较少。Larson 等<sup>[52]</sup>基于平衡理论提出一个半经验模型(S-beach 模型),来评估沙丘侵蚀趋势,该模型认为海滩—沙丘平衡剖面能消散来波能量,而剖面形态保持不变,沉积物输送率由实际波能消散和平衡波能消散的差值确定。而后,人们提出了以波浪传播、浅水波、波浪折射和破波理论等为依据的数值计算模型,计算区域输沙率,评估海滩—沙丘系统的蚀淤趋势<sup>[53-56]</sup>。近年来的水槽物模试验主要研究和验证前丘侵蚀模式,试验研究认为海岸沙丘风暴侵蚀受以下 4 个过程控制:①波浪冲刷侵蚀前丘;②激浪带湍流增加离岸流的搬运能力,大量沉积物向海流失;③激浪带低频波的产生,导致波浪增水值时空变化;④前丘滑塌,在沙丘坡脚形成小沙坝<sup>[55-59]</sup>。水槽物模试验表明,海岸沙丘侵蚀量主要受控于风暴增水值和沉积物粒径。

Van der Wal<sup>[60]</sup>、Houser<sup>[61]</sup>、Suanez 等<sup>[62]</sup>对海岸沙丘侵蚀后的恢复状况进行了观测记录,认为海岸沙丘恢复状况受以下因素控制:①沉积物可容纳空间的大小;②沙源供给,主要来自海滩后滨;③植被覆被;④风暴频率,避免恢复期间的 2 次或多次破坏。研究认为海岸沙丘风沙搬运沉积速率大约为  $10 \sim 20 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$ ,而极端风暴对沙

丘的一次侵蚀可达  $200 \text{ m}^3/\text{m}$ ,正常风暴侵蚀估计在  $50 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$ <sup>[58,63]</sup>。可见,自然过程下的海岸风沙沉积量是有限的,沙丘风暴侵蚀损失的沉积物,常需要通过沙丘养护来补偿。

## 2.2 海岸沙丘风暴响应过程

海滩—沙丘系统是海洋和内陆的天然屏障,是一道有效的缓冲带,保护着沿岸的生命财产、生态系统以及自然资源等免遭海洋灾害的破坏。然而,海岸带同时受来自海洋和陆地的多种因素影响,是一个不断变化着的动态系统。特别是受风暴的影响,有时对海滩以及沙丘的破坏是灾难性的,由此造成严重的生命财产损失和生态破坏,需要投入大量的人力物力进行灾后重建和生态修复。

EuroSION<sup>[17]</sup>参照 Hallermeier 等<sup>[64]</sup>提出的经验公式,依据百年一遇风暴水位和沙丘高程,计算前丘沙库(Frontal Dune Reservoir)截面积,定义了海岸沙丘风暴响应的 2 种模式:①沙丘移位,当前丘沙库截面积小于某一给定值,例如 FEMA<sup>[65]</sup>定义的值为  $160 \text{ km}^2$ ,沙丘会被移除,沉积物向海和向陆输运;②前丘侵蚀,前丘沙库截面积大于某一给定值,风暴导致前丘侵蚀,沉积物向海搬运,形成向海侧的沙丘侵蚀陡坎。Sallenger<sup>[66,67]</sup>依据风暴水位和海岸沙丘地形,提出海滩—沙丘系统对风暴响应的 4 种模式:①海滩侵蚀,风暴浪上冲的最高位置在前滨区,造成海滩侵蚀,对海岸沙丘基本不造成影响;②前丘侵蚀,风暴浪增水叠加上冲流可达沙丘顶部,引诱沙丘冲蚀和后退;③冲越模式,风暴浪冲越沙丘顶部,导致泥沙向陆输运,形成冲积扇沉积;④漫滩模式,风暴水位高于海岸沙丘,淹没整个海滩—沙丘系统,严重的引起沿岸洪泛。Stockon 等<sup>[68,69]</sup>改进了上述 Sallenger 的响应模式,并运用该模式评价了飓风 Floyd 和 Bonnie 对加利福尼亚海岸沙丘的影响,得到了较好的效果。目前,该模式已被 USGS 广泛用于美国的沙丘海岸风暴侵蚀危险性评价中<sup>[70-72]</sup>。Kriebel 等<sup>[73]</sup>运用海岸侵蚀风险的理念给出了海岸沙丘风暴侵蚀强度指数  $I$ ,用以评价海岸沙丘风暴侵蚀危险性,由此划分沙丘海岸类型,对于高危险性区域应提前做好防灾减灾措施,如进行沙丘修复和养护等。Judge 等<sup>[74]</sup>提出了海岸沙丘抗

侵蚀能力的指标  $ER$ , 该指标综合沙丘剖面参数和风暴水位参数, 较全面的评价了飓风 Fran 对 Topsail 岛 35 km 沙丘海岸 110 个监测断面的影响。可见, 海岸沙丘风暴响应是多个因子控制下的地形地貌过程, 从而引起动力地貌响应过程和尺度上的诸多差异。

由此可见, 研究海岸沙丘风暴侵蚀首先应获取丰富可靠的野外数据, 尤其是风暴前、后沙丘的沉积结构构造和形态特征变化, 以及风暴水位过程等。此后, 才能深入研究海岸沙丘侵蚀规律, 厘清海岸侵蚀过程, 有效地评价预测侵蚀风险, 为海岸沙丘管理提供依据和参考。

### 3 存在的科学问题

目前, 对于不同地质环境中的海岸沙丘风暴响应的相关研究还存在以下几点科学问题: ①不同类型的海岸沙丘风暴响应模式有何差异; ②海滩—沙丘体系沉积特性差异对海岸沙丘风暴侵蚀有哪些影响; ③潮差差异对海岸沙丘风暴侵蚀的影响是什么; ④海岸沙丘风暴侵蚀量如何计算和表达; ⑤海岸沙丘风暴侵蚀及其恢复有什么规律; ⑥海岸沙丘功能维持和生态养护的原理是什么, 如何实施养护以及养护后管理等。解答上述科学问题, 对拓展我国海岸沙丘风暴侵蚀研究及防灾减灾都有着十分重要的理论和现实意义。

## 4 我国海岸沙丘风暴侵蚀展望

### 4.1 海岸沙丘资源现状调查与评估

#### 4.1.1 环境地质

第 1, 选择典型的海岸沙丘地貌单元进行岸滩地质地貌调查, 包括物质组成、沉积结构和构造, 以及地貌特征等的记录描述并拍照。对于典型的海岸沙丘沉积单元进行钻探或者开挖探槽, 查明沉积厚度、沉积变化特征, 以及沉积演化过程等; 第 2, 进行岸滩剖面测量和典型岸滩剖面监测, 在典型剖面埋设固定桩, 定期重复监测, 查明岸滩剖面动态变化过程 and 变化趋势, 对易于遭受风暴侵蚀的断面, 应加密监测, 详细记录风暴前、后的变化量, 以及平静期的恢复状况; 第 3, 进行

沉积物采样分析, 应分别在海岸前丘的沙丘顶、前丘面、沙丘坡脚、后滨滩肩、潮间带等关键点取样, 进行沉积物碎屑矿物和粒度分析, 了解沉积物来源; 第 4, 海岸沙丘沉积物源—储—汇作用及其机制调查, 对海岸沙丘沉积物侵蚀、搬运、沉积过程进行调研。

#### 4.1.2 海岸动力环境

海岸沙丘的形成、发展以及后期的改造等受陆地和海洋的双重动力因素影响, 以风力作用为主的海岸沙丘动力地貌体系和以波流作用为主的海滨动力地貌体系是相互作用相互影响的。首先, 进行陆地地貌动力环境调查, 包括风速、风向、降雨量, 以及表层沉积物物理特性和植被覆被状况等, 这些因素对风沙起动、搬运和沉积过程有重要影响; 其次, 进行海滨动力环境调查和观测, 主要包括波况、风暴潮强度和频率、潮差和潮流状况以及地下水状况等, 这些因素对海岸水动力影响较大, 控制着沿岸的横、纵向输沙过程。

#### 4.1.3 生态环境

首先, 进行海岸沙丘植被覆被状况进行调查, 了解植被类型、分布规律, 了解海岸生态系统中海岸沙丘的生态作用和功能; 其次, 通过走访调研, 收集有关风沙活动、防护林种植以及其他对生态有影响的人类活动状况。

#### 4.1.4 社会经济状况

主要进行区域人口数量、地区生产总值、地方财政收入以及防灾减灾状况进行调查, 用来评估海岸沙丘的易损性。在此基础上进行海岸沙丘评级与分类, 同时建议开发利用和保护措施。

### 4.2 典型岸段的风暴侵蚀机理研究

对典型岸段进行风暴前、后的现场动态监测, 以现场调查观测为主要研究手段, 并配合必要的室内分析, 主要包括: ①海滩—沙丘体系沉积特征差异对海岸沙丘风暴侵蚀的影响; ②海岸沙丘风暴响应过程的潮差效应研究; ③潮汐风暴耦合作用下的海岸沙丘侵蚀量研究; ④构建海岸沙丘风暴侵蚀模式, 补充完善现有的海岸沙丘侵蚀理论。

### 4.3 海岸沙丘功能维持与生态养护

首先, 应研究硬性沙丘功能维系的关键因素, 如植被覆被、人类不当的活动等。提出因地制宜

的海岸沙丘功能维持的对策和途径。其次,借鉴海滩养护的理论和实践经验,进行海岸沙丘修复和生态养护试验,提出一套海岸沙丘养护的理论。

综上所述,我国海岸风暴侵蚀研究还存在许多空白和不足之处,应及时开展我国海岸沙丘资源现状调查与评估、典型岸段的风暴侵蚀机理拓展研究;进一步推进海岸沙丘功能维持和生态养护技术示范和应用等;探究海岸沙丘风暴侵蚀机理,并建立一套海岸沙丘风暴侵蚀评估和管理技术。从而提高我国海岸风沙地貌侵蚀研究的整体水平,减小沙丘风暴侵蚀风险。

#### 参考文献:

- [1] 王宝灿,黄仰松. 海岸动力地貌[M]. 上海: 华东师范大学出版社,1989.
- [2] 吴正,黄山,胡守真,等. 华南海岸风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社,1995.
- [3] 吴正,等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社,2010.
- [4] Short A D, Hesp P A. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia [J]. *Marine Geology*, 1982, 48: 259-284.
- [5] Pye K. Coastal dunes [J]. *Progress in Physical Geography*, 1983(7): 531-557.
- [6] Nordstorm K F, Psuty N P, Cart R W G. Coastal Dunes: Form and Process [M]. Chichester, UK: Wiley, 1990.
- [7] Sherman D J, Bauer B O. Dynamics of beach-dune systems [J]. *Progress in Physical Geography*, 1993, 17(4): 413-447.
- [8] Sherman D J, Lyons W. Beach-states controls on Aeolian sand delivery to coastal dunes [J]. *Physical Geography*, 1994(15): 381-395.
- [9] 吴正,吴克刚,黄山,等. 华南沿海全新世海岸沙丘研究[J]. *中国科学(B辑)*, 1995b, 25(2): 211-218.
- [10] 董玉祥. 中国的海岸风沙研究: 进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 26-35.
- [11] 李志文,李保生,王丰年. 海岸沙丘发育机制之研究现状评书[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 357-366.
- [12] 董玉祥,杜建会. 海岸风沙地貌台风响应研究的现状与趋势[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 634-638.
- [13] Carter R W G, Curtis T G F, Sheehy-Skeffington M J. Coastal Dunes, Geomorphology, Ecology, and Management for Conservation [M]. Balkema A A, Rotterdam, The Netherlands, 1992.
- [14] USACE. Coastal Engineering Manual, Part IV, Coastal Geology, Chapter 2, Coastal Classification and Morphology [M]. Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, 2008.
- [15] 蔡锋,苏贤泽,夏东兴. 热带气旋前进方向两侧海滩风暴效应差异研究[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(4): 436-445.
- [16] 蔡锋,苏贤泽,杨顺良,等. 厦门岛海滩剖面对9914号台风大浪波动力的快速响应[J]. *海洋工程*, 2002, 20(2): 86-90.
- [17] European Commission. Living with coastal erosion in Europe: Sand and Space for Sustainability-Guidance document for quick hazard assessment of coastal erosion and associated flooding [R]. Netherlands: EuroSION, 2004.
- [18] Doran K S, Plant N G, Stockdon H F, et al. Hurricane Ike: Observations and analysis of coastal change [R]. Virginia: U. S. Geological Survey Open-File Report, 2009.
- [19] Cai F, Su X, Liu J, et al. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention [J]. *Progress in Nature Science*, 2009(19): 415-426.
- [20] Qi H, Cai F, Lei G, et al. The response of three main beach types to tropical storms in South China [J]. *Marine Geology*, 2010(275): 244-254.
- [21] Stockdon H F, Doran K S, Serrano K A. Coastal change on Gulf Islands National Seashore during Hurricane Gustav: West Ship, East Ship, Horn, and Petit Bois Islands [R]. Virginia: U. S. Geological Survey Open-File Report, 2010.
- [22] 董玉祥. 中国海岸风沙地貌的类型及其分布规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006b, 26(4): 99-104.
- [23] 傅命佐,徐孝诗,徐小微,等. 黄、渤海海岸风沙地貌类型及其分布规律和发育模式[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28(1): 56-65.
- [24] 胡娅敏,宋丽莉,刘爱君,等. 近58年登陆我国热带气旋的气候特征分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(5): 115-121.
- [25] 牛海燕. 中国沿海台风灾害风险评估研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [26] USACE. Coastal Engineering Manual, Part II, Coastal Hydrodynamics, Chapter 5, Water levels and long waves [M]. Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, Washington D C 20314-1000, 2008.
- [27] 季子修. 中国海岸侵蚀特点及侵蚀加剧原因分析[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(2): 65-75.
- [28] European Commission. Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability-A guide to coastal erosion management practice in Europe. Netherlands: EuroSION, 2004.
- [29] Mangor K. Shoreline management guidelines [M]. DHI Water and Environment, 2004.
- [30] Marchand M. Concepts and Science for Coastal Erosion Management: Concise report for policy makers [R]. Deltares, Delft, 2010.

- [31] Van Rijn L C, Tonon P K, Sánchez-Arcilla A et al. Scaling laws for beach and dune erosion processes [J]. Coastal Engineering, 2011, (58): 623-636.
- [32] 罗时龙, 蔡 锋, 王厚杰. 海岸侵蚀及其管理研究的若干进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 1239-1247.
- [33] Bruun P. Sea-level rise as a cause of shore erosion [J]. Journal of Waterways and Harbours Divisions, 1962(88): 117-130.
- [34] Bruun P. The Bruun Rule of erosion by sea-level rise; A discussion on large-scale two- and three-dimensional usage [J]. Journal of Coastal Research, 1988, 4(4): 627-648.
- [35] Dubois R N. A re-evaluation of Bruun's Rule and supporting evidence[J]. Journal of Coastal Research, 1992, 8(3): 618-628.
- [36] 虞志英, 张 勇, 金 镠. 江苏北部开敞淤泥质海岸的侵蚀过程及防护[J]. 地理学报, 1994, 49(2): 149-157.
- [37] Bray M J, Hooke J M. Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise [J]. Journal of Coastal Research, 1997, 13(2): 453-467.
- [38] 任美镠. 海平面研究的最新进展[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2000, 36(3): 269-278.
- [39] Allen J R L. Morphodynamics of Holocene salt marshes; a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19: 1155-1231.
- [40] Schwimmer R A. Rates and processes of marsh shoreline erosion in Rehoboth Bay, Delaware, USA[J]. Journal of Coastal Research, 2001, 17(3): 672-683.
- [41] 杨桂山, 施雅风, 季子修. 江苏淤泥质潮滩对海平面变化的形态响应[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 76-84.
- [42] Cooper J A G, Pilkey O H. Sea-level rise and shoreline retreat; time to abandon the Bruun Rule [J]. Global and Planetary Change, 2004(43): 157-171.
- [43] Collins B D, Sitar N. 2008. Process of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA[J]. Geomorphology, 2008 (97): 483-501.
- [44] Ravens T M, Thomas R C, Roberts K A et al. Causes of salt marsh erosion in Galveston Bay, Texas[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(2): 265-272.
- [45] Brooks S M, Spencer T, Boreham S. Deriving mechanisms and thresholds for cliff retreat in soft-rock cliffs under changing climates; rapidly retreating cliffs of the Suffolk coast, UK[J]. Geomorphology, 2012 (153-154): 48-60.
- [46] Ruz M H, Meur F C. Influence of high water levels on aeolian sand transport; upper beach/dune evolution on a macro-tidal coast, Wissant Bay, northern France [J]. Geomorphology, 2004 (60): 73-87.
- [47] Saye S E, Wal D van der, Pye K et al. Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion; an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data[J]. Geomorphology, 2005 (72): 128-155.
- [48] Pries A J, Miller D L, Branch L C. Identification of structural and spatial features that influence storm-induced dune erosion along a barrier-island ecosystem in the Gulf of Mexico [J]. Journal of Coastal Research, 2008, 24(4C): 168-175.
- [49] Claudino S V, Wang P, Horwitz M H. Factors controlling the survival of coastal dunes during multiple impacts in 2004 and 2005; Santa Rosa barrier island, Florida [J]. Geomorphology, 2008 (95): 295-315.
- [50] Pye K, Blott S J. Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates; an investigation of significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast, UK [J]. Geomorphology, 2008 (102): 652-666.
- [51] Furmańczyk K K, Dudzińska-Nowak J, Furmańczyk K A et al. Dune erosion as a result of the significant storms at the western Polish coast (Dziwnów Spit example) [J]. Journal of Coastal Research, 2011(SI 64): 756-759.
- [52] Larson M, Kraus NC. S-beach; numerical model simulating storm-induced beach change. Report 1; empirical foundation and model development [R]. Vicksburg; Technical Report CERC-89e9. US Army Engineer Waterways Experiment Station, USA, 1989.
- [53] Steetzel H. Cross-shore transport during storm surges [D]. Delft; Delft University of Technology, The Netherlands, 1993.
- [54] Larson M, Erikson L, Hanson H. 2004. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact [J]. Coastal Engineering, 2004 (51): 675-696.
- [55] Van Thiel de Vries J S M, Van Gent M R A, Reniers A J H M et al. Analysis of dune erosion processes in large scale flume experiments, Coastal Engineering, 2008, 55(12): 1028-1040.
- [56] Van Rijn L C. Prediction of dune erosion due to storms [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(9): 441-457.
- [57] Van Gent M R A, Van Thiel de Vries J S M, Coeveld E M et al. Large scale dune erosion tests to study the influence of the wave period, Coastal Engineering, 2008, 55(12): 1041-1051.
- [58] Van Rijn L C. Coastal erosion and control [J]. Ocean & Coastal Management, 2011, (54): 867-887.
- [59] Van Rijn L C. Modeling of sandy beach and dune erosion [R]. Deltares, the Netherlands; CONSCIENCE, 2010.
- [60] Van der Wal D. Beach-dune interactions in nourishment areas along the Dutch coast [J]. Journal of Coastal Research, 2004, 20(1): 317-325.
- [61] Houser C, Hamilton S. Sensitivity of post-hurricane beach and dune recovery to event frequency [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009(34): 613-628.

- [62] Suanez S, Cariolet Jean-Marie, Cancouet R. Dune recovery after storm erosion on a high-energy beach: Vougot Beach, Brittany (France) [J]. *Geomorphology*, 2012 (139-140): 16-33.
- [63] Van der Wal D, Pye K. Patterns, rates and possible causes of saltmarsh erosion in the Greater Thames area (UK) [J]. *Journal of Coastal Research*, 2004(61): 373-391.
- [64] Hallermeier R J, Rhodes P E. Generic treatment of dune erosion for 100-year event [C] // *Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 1988: 1197-1211.
- [65] FEMA. Basis of erosion assessment procedures for coastal flood insurance studies [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1988.
- [66] Sallenger A H, Howd P, Stockdon H et al. On predicting storm-induced coastal change [C] // *Proceeding Coastal Sediments*, Clearwater Beach, Florida, USA, 2003.
- [67] Sallenger A H. Storm impact scale for barrier islands [J]. *Journal of Coastal Research*, 2000, 16(3): 890-895.
- [68] Stockon H F, Holman R A, Howd P A et al. Empirical parameterization of setup, swash, and runup [J]. *Coastal Engineering*, 2006 (53): 573-588.
- [69] Stockon H F, Sallenger A H, Holman R A et al. A simple model for the spatially-variable coastal response to hurricanes [J]. *Marine Geology*, 2007 (38): 1-20.
- [70] Stockon H F, Doran K J, Thompson D M, et al. National assessment of Hurricane-induced coastal erosion hazards: Gulf of Mexico [R]. Virginia: U. S. Geological Survey Open-File Report, 2012.
- [71] Stockon H F, Doran K J, Thompson D M et al. National assessment of Hurricane-induced coastal erosion hazards: Southeast Atlantic Coast [R]. Virginia: U. S. Geological Survey Open-File Report, 2013.
- [72] Doran K S, Stockon H F, Sopkin K L et al. National assessment of Hurricane-induced coastal erosion hazards: Mid-Atlantic Coast [R]. Virginia: U. S. Geological Survey Open-File Report, 2013.
- [73] Kriebel D L, Dalrymple R, Pratt A et al. A shoreline risk index for northeasters [C] // *Proc. , ASCE Int. Conf. on Natural Disaster Reduction*, ASCE, New York, 1997: 251-252.
- [74] Judge E K, Orerton M F, Fisher J S. Vulnerability indicators for coastal dunes [J]. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2003(126): 270-278.

## A REVIEW OF STORM-INDUCED COASTAL DUNE EROSION

LUO Shilong<sup>1</sup>, JIN Ruifang<sup>1</sup>, YU Fan<sup>2,3</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, WU Kunfu<sup>1</sup>, YANG Wenfeng<sup>1</sup>, NING Xuanxuan<sup>1</sup>

(1 South China Sea Marine Engineering Surveying Center, SOA, Guangzhou 510300, China;

2 Island Research Center, SOA, Pingtan 350400, Fujian, China; 3 China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to make a thorough review of storm-induced coastal dune erosion, the paper summarized the general status of dune erosion along the Chinese coast. The research progress of coastal dune erosion mechanisms and the response of coastal dune to storm were discussed. It is found that the research of the coastal dune as a kind of resource is far behind the others. In this regard, we suggest that the investigation and assessment of coastal dune resource and the formation mechanisms of the storm-induced erosion at typical coastal regions in China be carried out as soon as possible. Maintenance of the functions of coastal dune systems and application of ecological nourishment technique should also be launched so as to explore and develop the methodology for coastal dune erosion risk assessment and management.

**Key words:** coastal erosion; coastal dune; storm-induced erosion; ecological maintenance