

何小燕, 杜小弢, 贾明瑶, 等. 上海基岩海岛浮山岛的侵蚀现状及保护修复[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(5): 39-45.

# 上海基岩海岛浮山岛的侵蚀现状及保护修复

何小燕<sup>1</sup>, 杜小弢<sup>2\*</sup>, 贾明瑶<sup>1</sup>, 梅宇立<sup>1</sup>, 张妙<sup>1</sup>

(1 上海市海洋管理事务中心, 上海 200005; 2 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061)

**摘要:** 基于基岩海岛侵蚀研究, 利用基岩海岸演变模型, 界定浮山岛的海蚀岸类型, 估算浮山岛基岩海岸侵蚀后退速率, 并结合实地登岛调查分析, 提出了浮山岛保护修复方案。建议采用生物屏障的手段达到消浪作用, 减少海岸侵蚀, 恢复当地生态系统; 同时采用生态和工程结合的方式在浮山岛和浮山东岛两岛之间创造潮间带沼泽地, 并栽种草本植物来稳定沼泽地, 以缓减断裂谷继续发育。

**关键词:** 浮山岛; 侵蚀机制; 侵蚀后退速率; 基岩海岛

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.106

## 0 引言

上海市基岩海岛地貌类型多样, 拥有独特资源环境和区位优势。受海浪影响, 上海市的基岩海岛长期面临着严重的侵蚀问题。如金山三岛自然保护区因北坡东段和东南坡受海浪侵蚀, 岛体岩石崩塌, 一些重要保护物种消失, 岛屿动植物物种多样性受到威胁。浮山岛作为金山三岛之一, 属于市级海洋生态自然保护区, 具有较高的保护价值, 且地处强潮型海湾(杭州湾)中部, 其侵蚀状况具有一定的典型性。因此, 研究浮山岛的侵蚀状况, 探索浮山岛的保护修复技术以更好地保护自然保护区, 十分迫切和关键。

关于基岩侵蚀及演化方面, 国外学者做了大量研究。1977年 SUNAMURA<sup>[1]</sup> 应用线性自动控制理论得到 Sunamura 方程, 奠定了基岩海岸侵蚀数值研究的基础, 基岩海岛的研究都以该经典方程为出发点。1999年 BELOV 等<sup>[2]</sup> 提出 BDW 方程。TRENHAILE<sup>[3]</sup> 统计了一些生物对岩石的侵蚀速率, 如藻类贝类。SUNNMURA<sup>[4]</sup> 给出了世界各地不同基岩海岸的侵蚀后退参考速率。国内目前基岩侵

蚀的相关研究相对较少, 庄克琳和李广雪<sup>[5]</sup> 梳理了基岩海岸侵蚀数值研究的进展。张军等<sup>[6]</sup> 选取青岛西南的薛家岛海岸进行了基岩海岸侵蚀的定量研究。此外, 还有一些综合性的研究工作<sup>[7-10]</sup>。

本文选取浮山岛基岩海岛侵蚀为研究对象, 结合实地调查分析, 探索浮山岛的保护方案, 为更好地保护管理金山三岛提供理论依据和实践探索。

## 1 浮山岛概况

浮山岛位于上海市杭州湾北岸金山区海域, 大金山岛南约 0.63 km(图 1)。2013年《上海市无居民海岛、低潮高低、暗礁标准名录》获市政府批准, 正式确定了浮山东岛的名称。本文中“浮山岛”指的是浮山岛和浮山东岛的统称。

### 1.1 地貌地质

浮山岛面积约 0.05 km<sup>2</sup>, 呈椭圆形, 山头浑圆无峰, 仅中部有山脊隆起, 海拔低, 海底地形较平坦<sup>[7]</sup>。其东部尚有狭长小山脊出露海面。山体受海浪和大风侵蚀, 风化强烈, 岛上岩石大多裸露, 仅顶部有少量第四系覆盖, 植被一般发育。由于地处强潮型海湾(杭州湾)的中部, 海洋水文具有潮高、浪大、流急的特点, 长期遭受潮流、海浪的侵蚀作用, 导致岛体裸露、浮山岛与浮山东岛之间的断裂谷不断发育。由于高程较低, 台风大浪时可溅拍到整个岛上, 潮间带非常狭窄。浮山岛和浮山东岛地形地貌现状

收稿日期: 2020-07-13

资助项目: 上海市海洋局科研项目(沪海科 2017-02)

作者简介: 何小燕(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事河口海岸工程方面的研究工作。E-mail: 121493436@qq.com

\* 通讯作者: 杜小弢(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事流体力学、河口海岸工程方面的研究工作。E-mail: duxiaotao@sina.com.cn

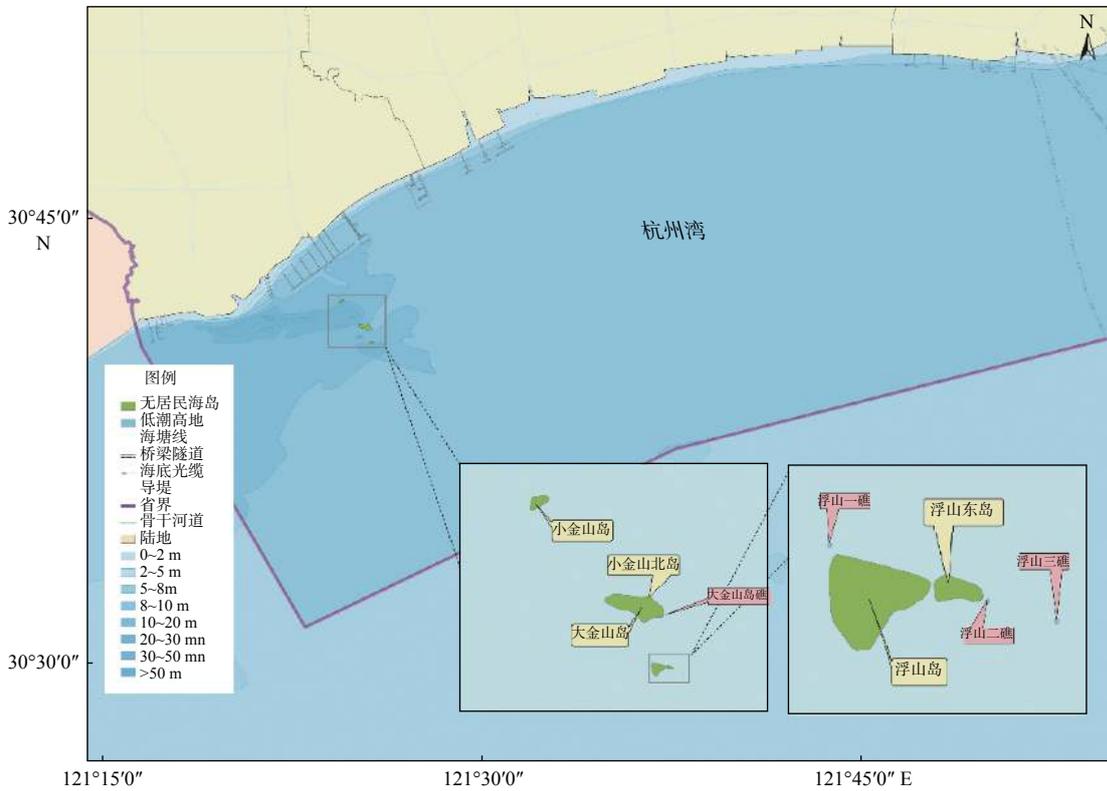


图1 浮山岛区位图

Fig.1 Location map of Fushan Island



(a) 浮山岛

(b) 浮山东岛

图2 浮山岛和浮山东岛地形地貌现状

Fig.2 Topographic and geomorphic status of Fushan Island and East Fushan Island

见图2。浮山岛与大、小金山岛同为中生代侏罗纪火山岩系构成的基岩岛,主要岩性为石英斑岩、火山角砾岩、英安岩等。

### 1.2 潮汐概况

根据滩浒岛海洋测点 2007 年 1 月—2011 年 12 月实测潮位资料进行统计(吴淞基准),浮山岛附近海域平均潮位 2.04 m,平均潮差 3.58 m,平均涨潮历时 5 时 40 分,平均落潮历时 6 小时 44 分,涨潮历时短于落潮历时。

另据 2011 年金山三岛自然保护区附近海域布

设的 5 个水文站位(图3)进行的金山三岛水文调查结果表明:此海域潮流呈 SE-NW 走向,大潮期间最大流速普遍大于小潮期间最大流速,各站潮流特征差别较大。各测站涨、落潮流最大流流向比较集中,涨潮期间流向主要集中在 WSW,落潮期间流向主要集中在 ENE。受金山三岛和外部海域的共同影响,涨落潮期间表层流速最大相差分别为 126 和 95 cm/s。从浮山岛海域潮流各站点流速和流向曲线图(图4、5)可以看出,海岛周边海域呈现典型的往复流特征,各站流速流向变化较大,流场较复杂,流速也较大。



图 3 上海金山三岛海洋自然生态保护区水文调查站位

Fig.3 Hydrological survey stations of Jinshan Three-Island Marine Matural Reserve

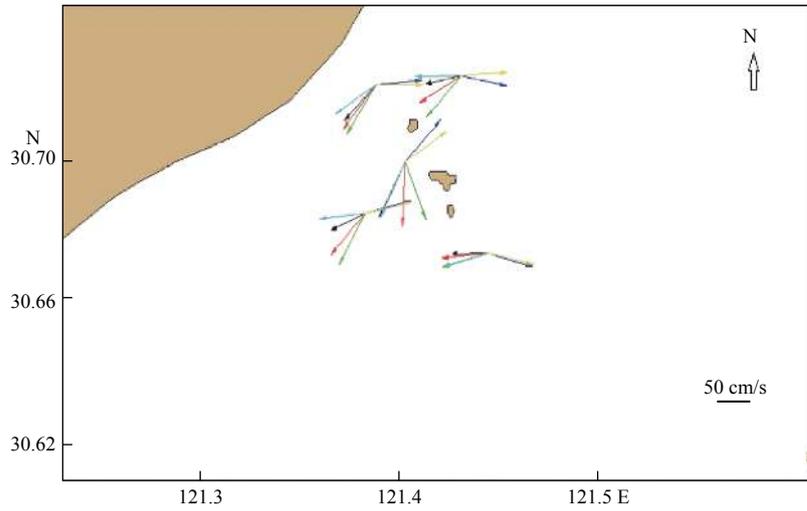


图 4 大潮期海流矢量图

Fig.4 Current vector during spring tide

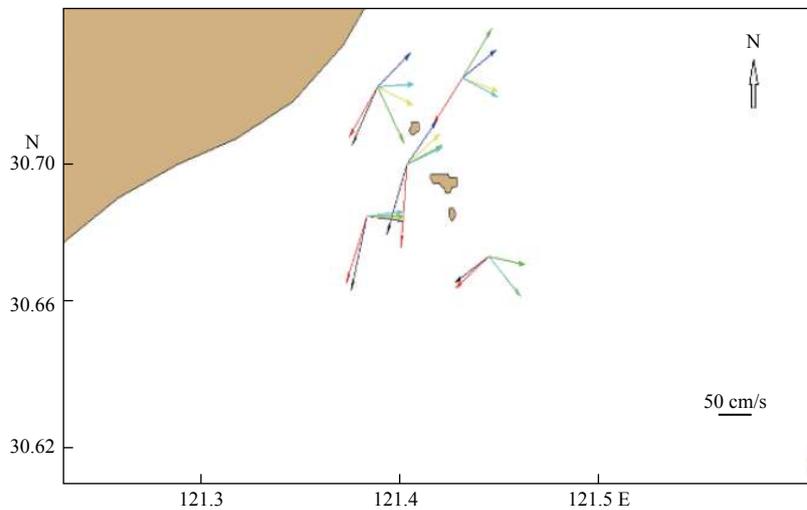


图 5 小潮期海流矢量图

Fig.5 Current vector during neap tide

### 1.3 波浪概况

滩浒岛站 2007—2011 年 5 年的统计结果表明,该海域平均波高 0.7 m,年  $H_{1/10}$  波高平均为 0.9 m,年平均周期为 3 s。浪向年季变化明显,年常浪向为 NNW—NNE 和 SE—S;冬季(12 月—次年 3 月)常浪向为 NNW—NNE,出现频率为 35.06%;冬季(12 月—次年 3 月)常浪向为 SE—S,出现频率为 25.73%。浮山岛附近常年有一定波浪,是造成基岩海岛侵蚀的主要原因之一。

### 1.4 泥沙特征

杭州湾沿岸水域悬沙浓度呈现“东高西低”的

分布态势,且涨潮悬沙浓度高于落潮悬沙浓度,冬季大潮垂线平均悬沙浓度约为  $1.5 \text{ kg/m}^3$ ,夏季约  $1.0 \text{ kg/m}^3$ 。杭州湾北岸乍浦—金山一带水域水深较深,悬沙浓度相对较低<sup>[11]</sup>,但含沙水体在涨落潮流长期的作用下对海岛岩石产生磨蚀效应仍不容忽视。

### 1.5 近岸地形概况

大金山岛与浮山岛之间发育 2 处深槽,东侧深槽距大金山岛约 294 m,水深 >40 m,西侧深槽距大金山岛约 593 m,水深约 55 m。图 6 受金山三岛岛礁影响,三岛水下地形情况较复杂,浮山岛岛体周围地形起伏较大。

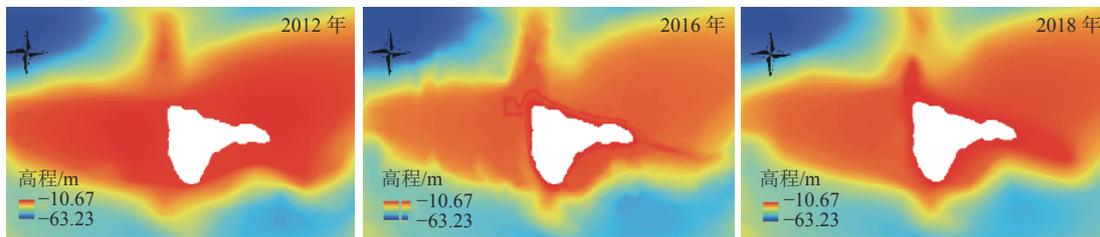


图 6 2012、2016、2018 年浮山岛水下地形

Fig.6 Topography of Fushan Island in 2012, 2016, 2018

浮山岛 2012、2016、2018 年水下地形情况(图 6)结合 2014—2016 年浮山岛水下地形演变分析,近几年浮山岛周围地形总体变化不大,受浮山岛岛体形状影响,岛体南侧深坑东测向岛体近岸冲刷,且有向东北角推进的趋势<sup>[12]</sup>。

## 2 浮山岛侵蚀现场调查

根据 2019 年实地登岛调查发现,浮山岛表面覆盖植被较少,无高大树木,浮山东岛顶部小范围覆盖植被,以杂草为主。受波浪拍击影响,浮山岛

近海面岩壁上无植物生长,南侧植物生长线位置高于北侧,可见南侧受风浪影响大于北侧。

海岛表面裸露的岩石日常暴露在阳光中,波浪拍打近岸岩石溅起水汽飘到海岛岩石表面,岩石处于不断干湿变化过程中,且水汽含盐程度相对较大,导致裸露岩石较易风化。考察发现海岛表层的裸露岩石风化程度较高,部分石块松动,徒手即可掰动。

地层断裂带形成了海岛的基本形态,在波浪的作用下,岩石裂隙逐渐发育,局部形成较大的裂隙带。浮山岛和浮山东岛间裂隙(图 7)串通后,海浪



图 7 浮山岛与浮山东岛间的裂隙

Fig.7 Fracture between Fushan Island and East Fushan Island

可从裂隙间涌入, 裂隙间水位波动幅度较大, 浪花拍打岩石, 发出较大声响。波浪对两岛岩壁产生挤压, 岩石长时间处于波浪作用下, 可能会产生疲劳破损导致两岛间岩石破碎, 使得两岛间距逐渐增大。

浮山岛所在杭州湾地区水体通常呈沙色, 水体具有一定含沙量, 在涨落潮流长期的作用下, 泥沙颗粒随水流动对浮山岛岩石也产生一定磨蚀效应, 也是侵蚀海岛岩石的一个主要因素。

### 3 波浪侵蚀分析

现场调查分析显示浮山岛岛体侵蚀主要受波浪、水流磨蚀和盐风化等因素影响, 而波浪作为最主要的因素, 也是所有外力中较容易量化的因素。岩石破坏主要受作用在岩石上的力和岩石抗力的影响, 对海岸地区的岩石来说, 波浪是作用在岩石上的主要作用力。将波浪力和岩石抗力分别记作  $F_w$  和  $F_r$ 。目前尚无测量  $F_w$  的方法, 影响因素也非常复杂<sup>[5]</sup>。岩石的抗力  $F_r$  则受层理、裂隙、节理等影响。两者相对大小决定了基岩是否受到侵蚀破坏。当  $F_w > F_r$  时, 发生侵蚀, 岩石破裂甚至破碎崩塌。当  $F_w \leq F_r$  时, 不会发生直接的侵蚀破坏, 但是反复的波浪作用会对岩石造成疲劳效应。岩石若易于风化, 在长时间的作用下,  $F_w$  变小, 当其减小到  $F_r$  时就会发生侵蚀。

波浪除了水平方向, 在垂向上也会对基岩产生侵蚀。在崖脚至破波点的区间内, 水质点受波浪影响而出现往复运动, 特别是发生卷破的时候。但是水质点的往复运动是局部的而不是在整个破碎带范围内大幅摆动。这种水体往复运动导致的底部基岩侵蚀主要受到两个因素的影响, 入射波浪的波能和水深。如果波浪运动带动泥沙在岩石表面运动的话, 因为泥沙的摩擦, 产生的影响则更大。

#### 3.1 蚀退速率估算

目前, 对基岩海岸蚀退问题的研究仍处在定性和半定量阶段<sup>[5-10]</sup>。理论上, 海蚀后退速率为<sup>[1]</sup>:  $dx/dt = \mu \ln(F_w/F_r)$

式中:  $dx/dt$  为基岩海岸蚀退速率;

$\mu$  为无量纲常数;

$F_w$  为岩石所受外力;

$F_r$  为岩石抗力。

如果用近岸波高  $H$  表示  $F_w$ , 用基岩海岸岩石的抗压强度  $Sc$  表示岩岸的抗蚀强度, 则:

$$dx/dt = \mu [\Gamma + \ln(\rho g H / Sc)], \quad \Gamma = \ln(A/B)$$

式中:  $\rho$  为海水密度;

$H$  为近岸波高;

$A$  和  $B$  分别为与岩石特性有关的 2 个参数, 其中,  $A$  为与砂砾等因素有关的影响  $F_w$  大小的无量纲常数,  $B$  为与不连续性等因素有关的影响  $F_r$  强弱的无量纲常数。

但在观测数据缺乏的情况下, 海蚀后退速率仍很难计算。

根据 SUNAMURA 给出的世界各地不同基岩海岸的蚀退速率, 研究对象是一定长度的海岸线。海岸线的时空变化差异很大, 根据岩性的不同, 大致可以从量级上进行一定程度的分类。如: 花岗岩的侵蚀速度为  $10^{-3}$  m/a 量级; 石灰岩为  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  m/a 量级; 复理石和页岩为  $10^{-2}$  m/a 量级; 白垩岩和古近—新近纪沉积岩为  $10^{-1} \sim 10^2$  m/a 量级; 第四纪沉积物为  $10^0 \sim 10^1$  m/a 量级; 未固化的火山喷发物为  $10^1$  m/a 量级。张军等<sup>[6]</sup>统计的地处胶州湾和灵山湾之间的薛家岛外侧海蚀平台的平均蚀退速率为  $10^{-2}$  m/a 量级。根据浮山岛岩性及中国基岩海岛薛家岛的蚀退速率, 估算浮山岛岸滩大概后退速率为  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  m/a 量级。与世界其他基岩海蚀海岸地区比较<sup>[4]</sup>, 浮山岛蚀退速率较低, 但因浮山岛本身岛体较小, 蚀退情况不容忽视。

#### 3.2 海蚀平台类型

SUNAMURA<sup>[4]</sup>以  $C = \rho g H / Sc$  作为基岩海岸演变的指标, 对海蚀类型进行界定。根据目前基岩海蚀形态类型, 海蚀平台根据平均海平面和海岸垂直岸壁的相对位置关系主要分为 3 类: ①平均海平面位置低于海岸崖脚, 且海底地形自崖脚以斜坡向海发展的近海平台为 A 型海蚀平台; ②海岸以垂直岩壁为陆海分界, 海岸平台位于当地平均海平面附近, 且向海侧发育成阶状地形, 为 B 型海蚀阶地; ③同 B 型类似, 海岸以垂直岩壁为陆海分界, 但不发育阶状平台的为半淹海蚀崖。3 种海蚀平台类型如图 8 所示。

根据岩石力学性质指标, 浮山岛主要成分石英斑岩、火山角砾岩、英安岩对应的岩石抗压强度  $Sc$  约 160 MPa<sup>[13]</sup>。浮山岛近岸平均波高可采用目前我国常用的风推浪计算方法莆田试验<sup>[14]</sup>公式

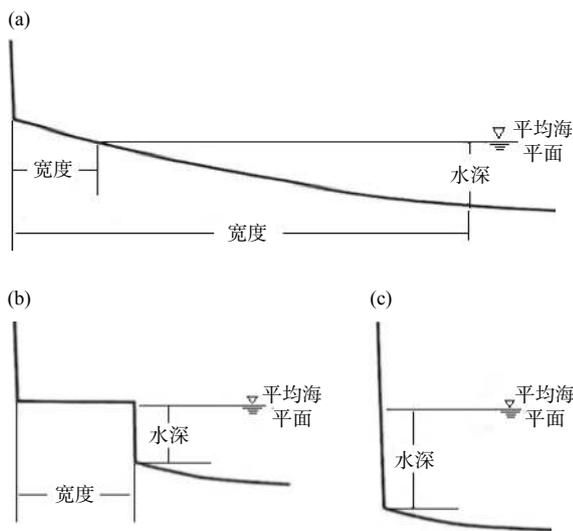


图8 海蚀形态类型

Fig.8 Schematic cross-sections of three major morphologies on rocky coasts

计算:

$$\frac{gH}{W^2} = 0.13 \tan h \left[ 0.7 \left( \frac{gH_m}{W^2} \right)^{0.7} \right]$$

$$\tan h \left\{ \frac{0.0018 \left( \frac{gD}{W^2} \right)^{0.45}}{0.13 \tan h \left[ 0.7 \left( \frac{gH_m}{W^2} \right)^{0.7} \right]} \right\}$$

式中:  $H$ 为波高;

$g$ 为重力加速度,取  $9.81 \text{ m/s}^2$ ;

$W$ 为风速,本次计算采用多年平均最大风速约为  $9.1 \text{ m/s}$ <sup>[15]</sup>;

$H_m$ 为计算水域平均水深,杭州湾平均水深约  $15 \text{ m}$ <sup>[16]</sup>;

$D$ 为风区长,度取约  $100 \text{ km}$ 。

经计算得到近岸平均波高  $H$ 约为  $0.72 \text{ m}$ 。

根据模型计算结果,  $C = \rho g H / Sc$ 约为  $4.4 \times 10^{-2}$ ,根据 SUNAMURA[4]的分类标准,判断浮山岛岸滩将发展成 C类海蚀平台,因此,有必要对海岛现状岸滩进行保护。

## 4 保护修复方案

目前,针对海岛修复,国外主要开展海岛植被修复、海岛外来物种入侵整治、海岛海岸修复工程等措施,在工程技术研究方面相对较深入。国内从过去采用单一领域的整治修复,开始更重视系统性修复,部分海岛采取了工程与生态相结合的技术以及景观修复技术<sup>[17]</sup>。根据浮山岛的侵蚀状况分析,

保护方案应着重削减波浪和潮流对岛屿的直接破坏,同时保护、整治、修复应遵循自然规律,坚持生态优先的原则。

(1) 岛体修复 GARBISCH等<sup>[18]</sup>在两岛之间创造潮间带沼泽地,并栽种草本植物来稳定沼泽地,利用工程措施对海岛进行生态修复,取得了良好效果。结合浮山岛节理、层面、缝隙等岩石间断发育情况的调查结果,建议在浮山岛和浮山东岛之间的断裂谷两侧打消浪桩,消浪桩中间抛石,上部植土,并种植芦苇和蘆草,以此填充岩石缝隙,强化岩石抗力,缓减断裂谷继续发育。

(2) 近岸滩地防护 牡蛎礁作为天然的海岸带防护措施,可以消减海浪能、减少岸线侵蚀,并在一定程度上抵御风暴带来的洪水灾害<sup>[19]</sup>,其护滩促淤的效果也为盐沼湿地的生长提供了合适条件。与自然礁特征相近的人工鱼礁可以作为海洋生物的庇护所,能较好地削弱掩护区的水动力强度,对波浪破碎、波面形态及报告消减有较大影响,还可使礁后一定范围底层泥沙向岸运移,对海滩侵蚀有防护作用<sup>[20]</sup>。建议在浮山岛岸外尤其是波浪作用较强的东北岸和南岸外,构建牡蛎礁和多孔人工鱼礁离岸堤,进行保滩促淤工程,减轻波浪对岛屿的拍打破坏作用,减轻近岸潮流冲刷侵蚀作用,同时恢复工程周边生态环境,利用人工鱼礁和牡蛎礁自身的消浪作用减轻波浪、潮流对岸滩的侵蚀和岛体的破坏,稳固浮山岛周围岩滩。

## 5 展望

浮山岛地处强潮型海湾(杭州湾)的中部,是上海市典型的受侵蚀基岩海岛。本研究对其他基岩海岛的保护有一定借鉴意义。但由于浮山岛的特殊原因,实测数据获取困难,2019年登岛调查是2005年立碑后的首次上岛实地勘察。因此,本文计算结果主要来源于文献梳理和模型计算,未能对长时期的基岩海岛侵蚀演变等进行深入特征分析,今后需进一步研究。

基岩海岛受风化侵蚀的过程是不可逆的,现有的技术手段只能减缓岩石的风化侵蚀速度,不能保持海岸线绝对不变,对于基岩海岛的保护工作不能因为岩石海岸的不断后退而放弃。应重视海岛调查、海岛修复可行性研究,建立海岛长期观测站,提升公众的海岛保护意识,多方面加强基岩海岛的保护。

## 参考文献:

- [1] SUNAMURA T. A relationship between wave-induced cliff erosion and erosive force of waves[J]. *The Journal of Geology*, 1977, 85: 613-618.
- [2] BELOV A P, DAVIES P, WILLIAMS A T. Mathematical Modeling of Basal Coastal Cliff Erosion in Uniform Strata: A Theoretical Approach[J]. *The Journal of Geology*, 1999, 107(1): 99-109.
- [3] TRENHAILE A S. *The Geomorphology of Rock Coasts*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1987.
- [4] SUNAMURA T. *Geomorphology of Rocky coasts*[M]. Chichester: Wiley, 1992.
- [5] 庄克琳, 李广雪. 基岩海岸侵蚀数值研究进展[J]. *海洋地质动态*, 1999, 15(11): 1-2.
- [6] 张军, 孙晓霞, 印萍, 等. 薛家岛岬湾型海岸侵蚀演化的定量性研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2002, 24(3): 60-67.
- [7] 上海市岛屿志编纂委员会. *上海市岛屿志*. 第1版[M]. 上海: 上海辞书出版社, 2013.
- [8] 王颖. *中国海洋地理*[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] WANG Y. The coast of China[J]. *Geoscience Canada*, 1980, 7(3): 109-113.
- [10] WANG Y, AUBREY D G. The characteristics of the China coast line[J]. *Continental Shelf Research*, 1987, 7(4): 329-349.
- [11] 叶涛焱. 杭州湾多时空尺度悬沙动力变化特征及与潮滩变化的互馈机理[D]. 浙江: 浙江大学, 2019.
- [12] 王万胜. 金山三岛滩涂水下地形演变浅析[J]. *海洋开发与管理*, 2017, 7: 80-84.
- [13] 《工程地质手册》编委会. *工程地质手册*. 第4版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [14] 李士峰. 堤防工程设计波浪爬高分析与计算[J]. *东北水利水电*, 2006, 6: 5-7.
- [15] 国家海洋局东海预报中心. 1994—2014年舟山至上海航线海域风、浪特征研究[R]. 上海: 国家海洋局东海预报中心, 2015.
- [16] 张庆伟. 杭州湾北岸近岸海床稳定性以及对海堤安全的影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [17] 史莎娜, 杨小, 黄鸽, 等. 海岛生态修复研究动态[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(1): 145-148.
- [18] GARBISCH E W. Hambleton Island restoration: Environmental Concern's first wetland creation project: Ecological engineering[J]. *The Journal of Ecotechnology*, 2005, 24(4): 289-307.
- [19] PIAZZA B P, BANKS P D, LA PEYRE M K. The potential for created oyster shell reefs as a sustainable shoreline protection strategy in Louisiana[J]. *Restoration Ecology*, 2005, 13: 499-506.
- [20] 吴建, 拾兵, 范菲菲, 等. 单排方形多孔鱼礁保滩促淤的试验研究[J]. *水利水电工程学报*, 2011(3): 42-47.

## PROTECTION AND RESTORATION OF THE ROCKY ISLAND IN SHANGHAI BASED ON THE EROSION MECHANISM: A CASE STUDY OF FUSHAN ISLAND

HE Xiaoyan<sup>1</sup>, DU Xiaotao<sup>2\*</sup>, JIA Mingyao<sup>1</sup>, MEI Yuli<sup>1</sup>, ZHANG Miao<sup>1</sup>

(1 Shanghai Administration Center for Ocean Affairs, Shanghai 200005, China;

2 Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co. Ltd, Shanghai 200061, China)

**Abstract:** Through the erosion research of the Fushan rocky island in Shanghai, the type of coastal erosion is defined and the coastline retrogradation rate estimated for the island using the rocky coast evolution model. Schemes for island conservation and restoration are proposed by field survey and in-room investigation. It is suggested that biological barrier be used to reduce the coastal erosion and restore the local ecosystem and herb plants planted to stabilize the marshland between Fushan Island and east Fushan Island. Some engineering and ecological measures are recommended to ease the coastal erosion there.

**Key words:** Fushan Island; erosion mechanism; retrogradation rate; rocky island