

# 珊瑚礁海岸侵蚀的影响因素与响应特征分析

邵超<sup>1</sup>, 林浩<sup>2</sup>, 任海波<sup>1</sup>, 唐迎迎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宁波海洋研究院, 浙江 宁波

<sup>2</sup>国电浙江北仑第一发电有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2022年2月7日; 录用日期: 2022年3月2日; 发布日期: 2022年3月9日

## 摘要

珊瑚礁海岸作为常见的生物海岸类型, 在我国南海区域普遍发育。全球气候变化和海岸带人类开发活动的影响导致珊瑚礁海岸的侵蚀现象普遍发生。本文以我国珊瑚礁海岸为研究对象, 结合前人研究资料, 探讨分析珊瑚礁海岸侵蚀的特征、复杂性和不确定性, 尝试分析珊瑚礁海岸侵蚀的影响因素。研究得出珊瑚礁海岸侵蚀原因包括珊瑚礁生态因素和海岸因素。海岸侵蚀原因要素在珊瑚礁海岸表现形式上不同, 其时空尺度响应有所差异, 主要表现为对海平面上升、风暴和大浪潮因素带来的负面影响的减缓和降低; 对导致发育环境恶化的气候变化因素的敏感反应, 响应则更为快速和明显。

## 关键词

珊瑚礁海岸, 海岸侵蚀, 影响因素, 响应特征

# Analysis of Influencing Factors and Response Characteristics of Coral Reef Coastal Erosion

Chao Shao<sup>1</sup>, Hao Lin<sup>2</sup>, Haibo Ren<sup>1</sup>, Yingying Tang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ningbo Institute of Oceanography, Ningbo Zhejiang

<sup>2</sup>Guodian Zhejiang Beilun No. 1 Power Generation Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: Feb. 7<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2022; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Coral reef coast, as a common type of biological coast, is widely developed in the South China Sea. The impacts of global climate change and human development activities in coastal zones have led

to widespread erosion of coral reef coasts. In this paper, the characteristics, complexity and uncertainty of coral reef coastal erosion are discussed and analyzed based on the understanding of the previous research data, and the influencing factors of coral reef coastal erosion are analyzed. It is concluded that the causes of coral reef coastal erosion include coral reef ecological factors and coastal factors. Coastal erosion causes have different manifestations in coral reef coasts, and their spatial and temporal scales respond differently. The main manifestations are the slowdown and reduction of negative impacts caused by sea level rise, storm and big wave factors, and the more rapid and obvious response to climate change factors that lead to deterioration of development environment.

## Keywords

Coral Reef Coast, Coast Erosion, Influence Factor, Response Characteristic

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

海滩 - 珊瑚礁系统是一种常见的热带海岸类型, 受生物过程和地貌过程的双方面控制, 具有独特的海岸演化特征。在全球变化背景下, 我国珊瑚破坏极为严重, 珊瑚大面积死亡, 覆盖率急剧降低, 礁体采挖破坏严重; 进而海滩也受到极大的威胁, 海岸侵蚀灾害频发。因此, 迫切需要对珊瑚礁海岸侵蚀的影响因素进行针对性分析, 开展保护和管理。

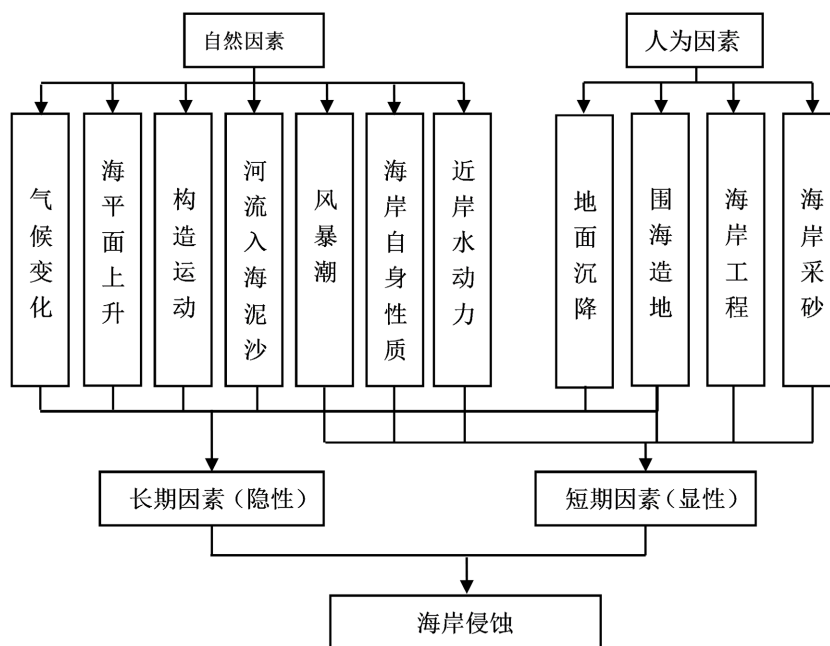
全球气候变化背景下珊瑚礁海岸侵蚀的影响因素分析, 关键是认识海岸侵蚀原因, 把握各类直接或间接、显性或隐性因素对珊瑚礁生态系统和海滩动力地貌系统等的的影响过程和机理, 全面认识我国珊瑚礁海岸的态势, 在此基础上构建适应我国珊瑚礁海岸侵蚀问题的管理框架, 提出管理方法和策略, 实现珊瑚礁海岸的有效保护和可持续发展。

## 2. 海岸侵蚀的基本原因分析

海岸侵蚀是海岸发育的普遍过程, 也是全球沿岸国家面临的共同问题, 从动力地貌角度看, 海岸侵蚀就是沿岸海洋动力条件与海岸稳定性之间的失衡, 海洋动力作用增强、海岸稳定性降低, 海岸侵蚀就会发生和发展[1]。但从影响因素来看, 海岸侵蚀又具有多变性和复杂性, 不同影响因素时空尺度迥异, 海岸侵蚀的表现形式也不同, 任何海岸的侵蚀都是多因素综合作用的结果, 其基本原因主要包括气候变化、海平面上升、构造运动、河流入海泥沙、风暴潮、海岸自身性质、近岸水动力等长期隐性因素, 以及地面沉降、围海造地、海岸工程、海岸采砂等短期显性因素(图 1)。

### 2.1. 海平面上升

从长时间尺度上看, 海平面上升是引起大范围岸线变化的根本因素, 其作用虽然缓慢, 但累积效应明显, 具有全球普遍性。目前全球海平面正以 1.5~2.5 mm/a 的速率上升[2], 预计未来 30 年, 南海海平面将比 2009 年升高 73~127 mm [3]。此外, 构造运动和过度开采地下水等人为活动导致的地面沉降, 也会引起局部海平面变化, 即相对海平面变化, 使受和缓营力作用的上部沉积层改受强烈的海洋营力作用, 引起海滩系统失衡, 造成海岸侵蚀。

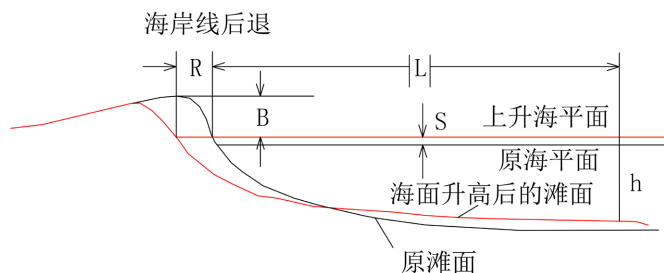


**Figure 1.** Schematic diagram of main causes of coral reef coastal erosion  
**图 1.** 珊瑚礁海岸侵蚀主要原因示意图

海平面上升引起岸线后退的概念模式，最初由 Bruun [4]提出：当海平面上升时，海滩剖面会进行上部侵蚀而下部堆积地保持原状向岸推移，发生海岸侵蚀后退，海岸线的后退距离(R)与海平面上升值(S)的关系式如下：

$$R = \frac{L}{B+h} S \tag{1}$$

式中，h 为闭合深度，L 为海岸线至闭合水深 h 间的横向距离，B 为滩肩或侵蚀沙丘的垂直高度(图 2)。



**Figure 2.** Coastal erosion caused by sea level rise  
**图 2.** 海平面上升引起的海岸侵蚀

上述关系式也可改为

$$R = \frac{S}{\tan \theta} \tag{2}$$

式中  $\tan \theta = (B+h)/L$ ，是指海滩剖面的平均坡度，坡度  $\tan \theta$  一般介于 0.01~0.02 之间，则根据公式  $R = 50\sim 100 S$ ，即海平面上升速率若为 1 mm/a，则每年岸线将后退 5~10 cm。尽管年际尺度的侵蚀量较少，但累积到百年尺度的岸线后退能达数百米。目前对此法则的应用范围、影响尺度等方面仍存在一定的争

议，但海平面上升导致岸线后退和海岸侵蚀是共识。

## 2.2. 风暴潮

风暴潮诱发的水位变化和狂风暴浪是事件性海岸侵蚀的主要因素，风暴会导致大量泥砂离岸运移，造成海崖崩塌后退，海滩地形发生急剧变化，沉积物粒度变粗、分选变差[5]。海岸沉积物在风暴作用下快速再分配，成为控制岸线短期变化的最重要因素，将促使局部岸线加速变化甚至导致岸线的变化趋势发生改变，会对海岸十余年甚至更长时间的变化趋势产生影响[6]。

风暴浪潮对海岸地貌、海底地形和海洋沉积的影响剧烈，特别是对海岸和高潮滩的冲刷极其严重，也会对一些海岸防护和构筑物等造成严重破坏[7]。一次强台风所造成的侵蚀往往会超过正常情况下数月的变化，是海岸变化的变速器。风暴潮引起的海岸侵蚀灾害备受世界各沿海国家和地区的关注，我国沿海历史最高风暴潮增水 4.57 m [8]，由台风和温带气旋等产生 2 m 以上增水的严重风暴潮平均每年 2 次，不仅造成大量人员伤亡和经济损失，而且往往对海岸和海滩的塑造起决定作用[9]。

## 2.3. 海岸泥沙减少

入海泥沙减少导致的海岸沉积物供需失衡，是造成海岸侵蚀的另一个主要原因，其中人为因素引起的入海泥沙量减少表现的尤为明显。其一是河流入海口改道会引起泥沙来源断绝，岸段因失去泥沙来源而侵蚀后退[10]，如苏北废黄河口岸段。其二是水利工程的建设减小了河流输沙量，使海岸沙量收支失衡引发海岸侵蚀。我国近 50 年来修建了大量的大坝、水电站、水库，拦截了大量的泥沙，使入海泥沙大大减少，导致海岸沉积物赤字，引起侵蚀。其三是海岸带活动区无序采砂、清挖等，直接导致海岸沉积物减少，打破海滩系统的沉积物平衡。上世纪六、七十年代开始，我国沿海采砂业发展迅速，大规模采砂活动打破了岸滩剖面的平衡，造成海岸泥沙严重亏损，直接引起采砂区及相邻海岸的蚀退，造成严重的海岸侵蚀。

## 2.4. 不合理构筑物

不合理的海岸工程包括围海造地，港口码头、护岸、防波堤等海岸防护工程等，围填海工程人工岸线的建设代替了自然岸线，对围填海区域原岸线截弯取直，导致岸线长度减少，自然岸线消失，海岸动态平衡遭到破坏。港口码头等建设改变了区域动力环境和输沙链，引起周边海岸侵蚀，例如福建崇武半月湾因建成大规模渔港工程，导致岸线蚀退剧烈[7]。硬式结构能固定岸线，短时间内阻止海岸线的后退，但也阻断了陆海联系以及物质的交换，影响了局部海洋动力条件，改变了原来陆海相互作用的方式和过程，导致海岸侵蚀，尤其是对于砂质海岸，通常会引起了海滩质量的降低，甚至导致堤前海滩的消失。

## 2.5. 近岸水动力

不同的海岸自身性质(剖面形态、泥沙组成和岸线走向等)，会产生不同的海滩剖面的地形动力分布和海滩侵蚀方式，不同的海岸类型会有不同的抗侵蚀能力，开敞海岸因其外海波浪影响大，近岸沉积物输移活跃，比具有港湾或岛屿遮蔽的湾内海岸更易遭受侵蚀[5]。波浪和潮汐产生的水流是海岸侵蚀的原动力，其对海岸作用的大小决定于波浪的能量，波能越大，对海岸的侵蚀作用越强。南海海区的强海流流速导致海滩沉积物处于活跃的冲刷、堆积状态，加速海岸侵蚀。

## 3. 珊瑚礁海岸侵蚀特征

珊瑚礁海岸作为一种特殊的生物海岸，其特有的海岸过程使其具有不同于其他海岸的侵蚀机理和侵蚀过程。导致珊瑚礁海岸侵蚀的原因既包括海平面上升、风暴潮、人为破坏珊瑚礁等海岸相关因素，也

包括引起珊瑚礁发育环境变化的自然和人为干扰等生态相关因素。下面将结合珊瑚礁海岸的特点，论述不同因素作用下的海岸演化过程和海岸侵蚀特征。

### 3.1. 对海平面上升的响应

活珊瑚生长和生物地貌分带与水位之间具有严格的对应关系，这是珊瑚礁海岸响应海平面变化的根本机制[11]。根据珊瑚礁堆积速率和海平面上升速率之间的差异，可以将珊瑚礁海岸对海平面上升的响应分为以下3种模式(图3)：

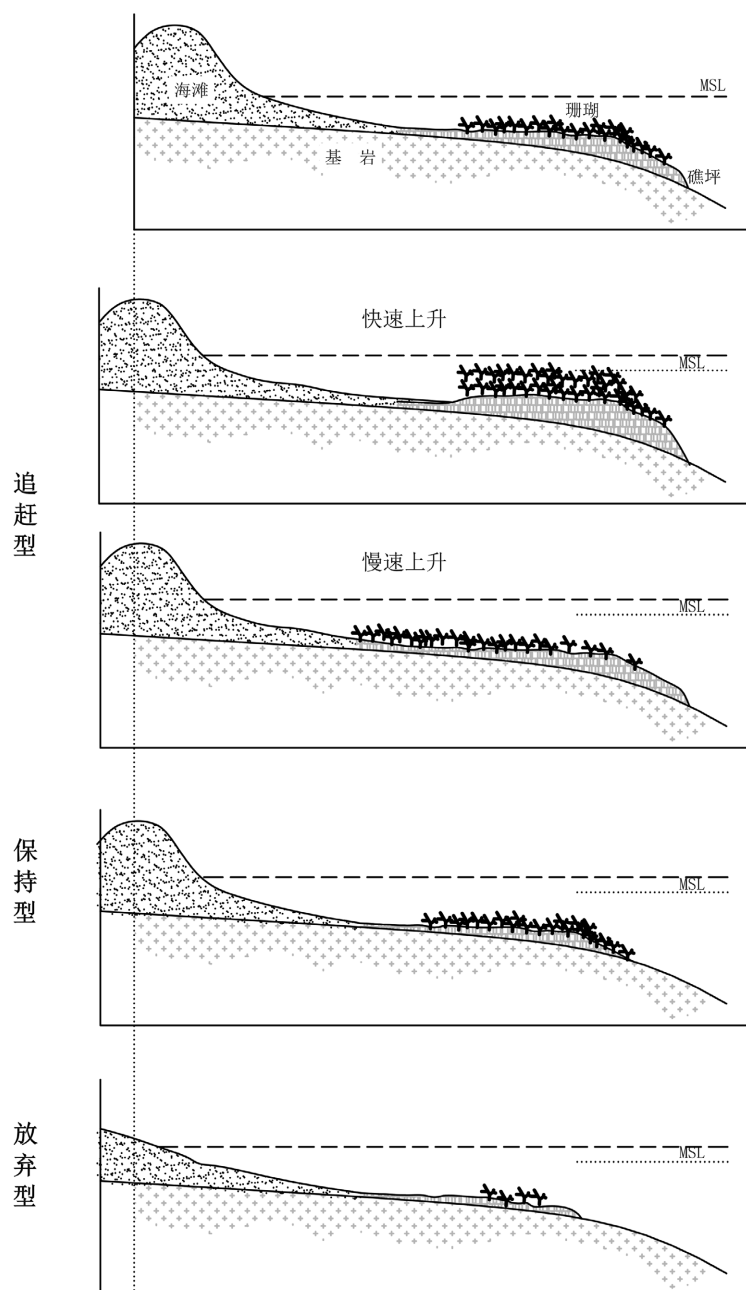


Figure 3. Schematic diagram of response of coral reef coast to sea level rise  
图3. 珊瑚礁海岸海平面上升响应示意图

1) 追赶(缓和)型, 珊瑚礁堆积速率大于海平面上升速率, 深水珊瑚礁逐渐进入浅水区生长。海平面快速上升时期, 珊瑚礁的堆积以垂直向上为主, 高度增加后的礁坪对海岸保持了原有的保护功能, 海平面上升对海岸造成的影响主要体现在水位变化上, 而动力环境变化得以缓和, 海岸侵蚀响应相对较小; 海平面缓慢上升时期, 珊瑚礁的堆积以侧向生长为主, 宽度增加后的礁坪能够更好的耗散海洋动力, 使海岸对海平面上升的响应迟缓。

2) 保持(稳定)型, 珊瑚礁堆积速率等于海平面上升速率, 珊瑚礁维持在海面附近生长, 珊瑚礁通过生长发育维持原有的海岸动力平衡, 维持海岸的稳定存在, 抵消或缓和海平面上升对海岸的影响。

3) 放弃(侵蚀)型, 珊瑚礁堆积速率小于海平面上升速率, 浅水珊瑚礁逐渐进入深水区, 最终导致珊瑚停止生长。礁坪高度下降且宽度变窄, 其消波减浪功能也随之减弱, 海岸逐渐转化为非珊瑚礁海岸, 近岸海洋水动力逐渐增强, 海滩平衡剖面被打破, 造成海岸侵蚀。

目前南海区域的珊瑚礁堆积速率为 2.06~3.33 mm/a, 而地壳构造下沉速率(0.1 mm/a)与现代海平面上升速率(1~2 mm/a)之和相当于相对海平面上升速率, 约为 1.1~2.1 mm/a, 属于追赶(缓和)型珊瑚礁海岸。中国珊瑚礁成熟度较高, 未来全球海平面升高可能为由目前的侧向生长转为向上生长创造有利条件, 中国珊瑚礁完全能跟上海平面上升的趋势, 做到“水涨岛高”[12], 有效缓和海平面上升对海岸带来的侵蚀压力。

### 3.2. 对风暴潮的响应

珊瑚礁海岸在风暴潮作用时具有强大的抵制能力, 当珊瑚礁礁顶发展完善时, 它能减少 90% 以上的波浪能[13]。风暴作用下珊瑚礁构建的天然防波堤削弱了风暴诱发的直接作用于海岸的高能水动力, 有岸礁的岸段灾情更轻, 海岸侵蚀程度更低。另一方面, 珊瑚礁本身在受风暴破坏后具有很强的恢复能力。珊瑚礁依靠存活珊瑚的再生、活珊瑚碎片的粘附和生长以及新底质的开拓, 能够在破坏程度很大的情况下, 迅速增长并在较短时间内(不到 15~20 年)重建复杂的三维形状[14]。珊瑚礁被誉为海岸天然屏障, 能减轻波浪、尤其是台风浪的作用, 防止海岸遭受严重侵蚀。但是一旦遭受慢性干扰导致的系统再生能力减弱和恢复机理改变, 珊瑚礁将无法自我修复。珊瑚礁固有的抵抗和恢复能力若被削弱, 海岸抗风暴侵蚀能力将逐渐降低, 达到一定程度就会发生海岸侵蚀灾害, 而侵蚀的加剧又会反过来导致珊瑚礁生态系统的自然退化, 形成恶性循环。研究指出, 珊瑚礁发育程度和分布特征的不同, 会导致海岸产生不同的风暴响应特征[15], 这也是珊瑚礁海岸抗侵蚀能力的证据。

### 3.3. 对人为破坏的响应

由于人为破坏的日益加剧, 造成的珊瑚严重死亡、珊瑚礁严重破坏和衰退, 已经成为全球珊瑚礁生存发展的重大威胁[16]。全球珊瑚礁监测网络 2004 年报告表明, 东南亚的珊瑚礁, 38% 已被破坏, 28% 处于危急状态, 29% 受到威胁, 中国南海珊瑚破坏率则高达 90% 以上[17]。

人类对珊瑚礁的直接外力破坏包括过度和破坏性捕捞、抛锚、践踏、采砂挖土、港口和码头建设、珊瑚礁爆破和开采等, 这些人类活动导致珊瑚礁坪变窄变矮, 沿岸水深增大, 原波浪的消能带向岸推移或消失, 海滩水动力增强, 进而导致海岸平衡被打破, 造成海岸侵蚀。海南岛 80% 的珊瑚礁海岸遭到了不同程度的破坏, 有的地区岸礁资源已濒临绝迹, 这已成为海南省海岸侵蚀的主要原因。例如西瑁洲岛在历史上曾无度采挖珊瑚礁, 导致生态环境日趋恶化, 部分岸滩严重蚀退, 侵蚀速率达 2 m/a [18]。又如清澜湾邦塘岸段因礁坪被人工凿取用作建筑材料, 造成海岸强烈侵蚀, 最大蚀退距离近百米左右[19]。

### 3.4. 对发育环境变化的响应

珊瑚礁生长发育需要具备严格的自然环境条件, 全球气候变化和人类活动引起的礁区发育环境的变

化会通过影响活珊瑚的覆盖率、生长速率、珊瑚礁的堆积速率,进而影响到礁坪质量,最终改变海岸的动力平衡状态,诱发海岸侵蚀进程。

#### 1) 海水盐度和水质

全球气候变化会造成降水量的频率和强度的变化,降水量的增加会引起海水淡化现象。整体上来看,21世纪降水增加所产生的淡化效应是有限的,仍在适应珊瑚生长的范围内,不会对其生长构成威胁[20]。

人类活动包括陆地和港口活动、海水养殖和滨海旅游等产生的污染物排放入海,会导致水质恶化,使得珊瑚生长减缓、停滞甚至死亡,珊瑚生长覆盖率直线下降。海南三亚港河口和海水的营养盐、重金属和有机物严重超标,导致其北侧白排礁岸段珊瑚灭绝,鹿回头岸段北部的小洲岛礁坡珊瑚也面临消失[21]。据统计,徐闻县角尾乡养殖造成的水质污染对礁区的破坏是极其严重的,从20世纪80年代至2000年的20年间,珊瑚的高度已从1 m变为不足80 cm。

#### 2) 表层海水温度升高

全球变暖引起海表温度的升高会对珊瑚礁造成不良的影响,造成珊瑚礁白化和死亡[22]。1988年的厄尔尼诺事件导致世界珊瑚礁损失16%,而历年人类活动造成的损失仅11% [23]。据报道,热带海洋表层水温至2100年会增加1°C~2°C,这将达到大多数珊瑚礁生长的温度阈值[24]。珊瑚礁很可能是因为全球环境变化导致珊瑚礁白化而失去的第一个生态系统[25]。

#### 3) 海水酸化

海洋酸化会导致珊瑚礁系统中钙化生物钙化率的降低,也会促进珊瑚礁系统内的溶解现象,导致珊瑚礁被“淹死”。到21世纪中叶,海洋中碳酸盐浓度将下降至200  $\mu\text{mol/kg}$ ,到那个时候,珊瑚礁被侵蚀的速度将超过珊瑚虫的石灰化速度,而这种状况会伴随大气和海水温度升高造成的负面影响同时出现,其后果是珊瑚和珊瑚礁生态系统遭受严重破坏和退化[26]。

### 4. 珊瑚礁海岸侵蚀因素响应差异

珊瑚礁海岸侵蚀模式与其他海岸有所差异,各种海岸侵蚀原因表现出来的时空尺度也有所差别,主要表现在全球气候变化、海平面上升和构造下沉、风暴和波浪这三个方面(图4)。1) 活珊瑚生长和珊瑚礁累积适应水位变化,对海平面上升和构造下沉引起的相对海平面上升具有良性响应,减缓了海岸侵蚀;2) 珊瑚礁对海岸具有消浪耗能的保护作用,在风暴和大浪潮等强烈水动力条件下有助于维持海滩平衡,将破坏程度和响应时间降低。3) 珊瑚礁的发育环境与全球气候变化密切相关,气候变化导致的发育环境恶化将通过影响活珊瑚生长和珊瑚礁堆积速率间接影响珊瑚礁坪保护海岸的能力,加速加重海岸侵蚀,使得珊瑚礁海岸对全球变化的响应更为直接和明显。

### 5. 结论

本文以我国珊瑚礁海岸作为研究对象,在理清海岸侵蚀基本原因及影响程度的基础上,分析并总结了珊瑚礁海岸侵蚀的各种直接和间接影响因素,根据珊瑚礁海岸侵蚀的特征、复杂性和不确定性,尝试探讨珊瑚礁海岸对各影响因素的响应特征及差异,得出如下结论:

1) 海岸侵蚀是全球沿岸国家面临的普遍问题,其基本原因主要包括气候变化、海平面上升、构造运动、河流入海泥沙、风暴潮、海岸自身性质、近岸水动力等长期隐性因素,以及地面沉降、围海造地、海岸工程、海岸采砂等短期显性因素。不同影响因素时空尺度迥异,海岸侵蚀的表现形式也不同,任何海岸的侵蚀都是多因素综合作用的结果。

2) 珊瑚礁海岸侵蚀原因包括珊瑚礁生态因素和海岸因素,不同因素作用下的珊瑚礁海岸具有不同的演化过程和侵蚀特征。生态因素是指气候变化和人类活动引起的礁区发育环境的变化,包括海水表层温

度、盐度、酸碱度和水质等，通过影响珊瑚礁生态系统多样性和健康度改变礁坪质量，生态破坏可能导致海岸动力失衡，引起海岸侵蚀；海岸因素包括海平面上升、风暴潮、直接人为破坏等，通过改变近岸水动力或海岸本身，导致海滩系统稳定性降低，引起海岸侵蚀。

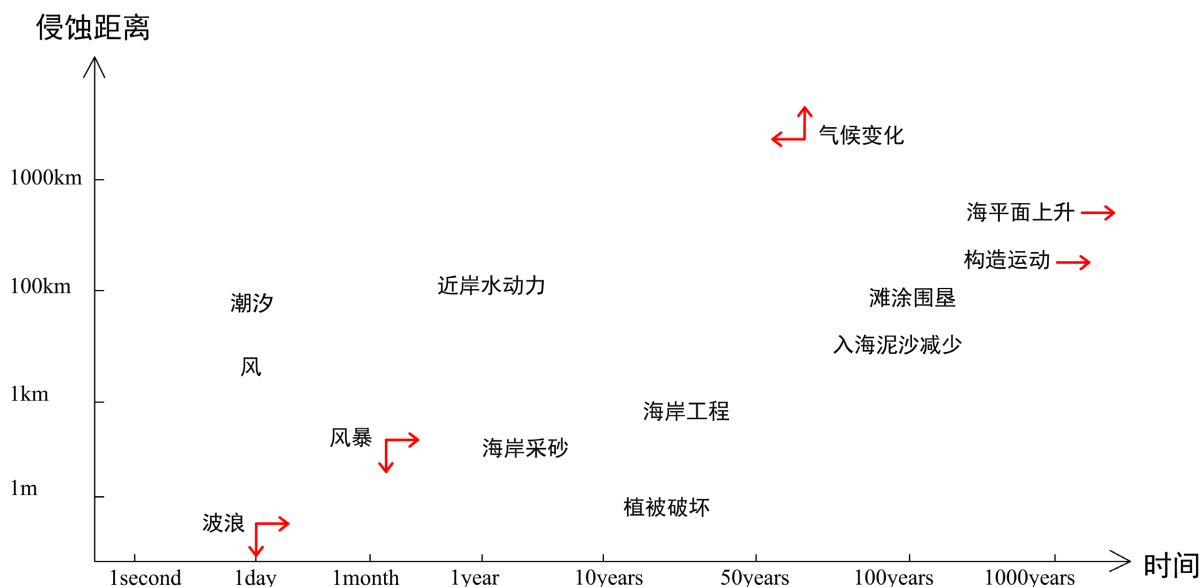


Figure 4. Coral reef coastal erosion response model

图 4. 珊瑚礁海岸侵蚀响应模式

3) 海岸侵蚀影响因素在珊瑚礁海岸表现形式上不同，其时空尺度响应有所差异，主要表现为对海平面变化上升、风暴和大浪潮因素带来的负面影响的减缓和降低；对导致珊瑚礁发育环境恶化的气候变化因素的敏感反应，响应更为快速和明显。

## 参考文献

- [1] 吕炳全, 王国忠, 全松青. 海南岛珊瑚岸礁的特征[J]. 地理研究, 1984, 3(3): 1-16.
- [2] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [3] Bruun, P. (1962) Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. *Journal of the Waterways & Harbors Division Proceedings of the America Society of Civil Engineers*, **88**, 117-130.
- [4] 李兵, 蔡锋, 曹立华, 等. 福建砂质海岸侵蚀原因和防护对策研究[J]. 应用海洋学学报, 2009, 28(2): 156-162.
- [5] 刘建辉. 福建砂质海岸侵蚀机制及影响因素分析[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [6] Frihy, O.E., El Ganaini, M.A., El Sayed, W.R., et al. (2004) The Role of Fringing Coral Reef in Beach Protection of Hurghada, Gulf of Suez, Red Sea of Egypt. *Ecological Engineering*, **22**, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2003.11.004>
- [7] 翁国玲. 闽江口台风风暴增水预报的研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2007.
- [8] 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): 69-79.
- [9] Birkeland, C. (1997) *Life and Death of Coral Reefs*. Springer, Berlin, 536.
- [10] 蔡锋, 戚洪帅, 夏东兴. 华南海滩动力地貌过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 62-93.
- [11] 王国忠. 全球海平面变化与中国珊瑚礁[J]. 古地理学报, 2005, 7(4): 483-492.
- [12] Roberts, H.H. (1989) *Physical Processes as Agents of Sediment Transport in Carbonate Systems*. St. Croix, United States Virgin Islands: Terrestrial and Marine Geology of St. Croix, US Virgin Islands. West Indies Laboratory Special Publication No. 8.



- 
- [13] Highsmith, R.C., Riggs, A.C. and D'Antonio, C.M. (1980) Survival of Hurricane-Generated Coral Fragments and a Disturbance Model of Reef Calcification/Growth Rates. *Oecologia*, **46**, 322-329. <https://doi.org/10.1007/BF00346259>
- [14] Wilkinson, C. (2002) Status of Coral Reefs of the World: 2002. Australian Institute of Marine Science (AIMS), Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), Townsville.
- [15] 邵超, 戚洪帅, 蔡锋, 等. 海滩-珊瑚礁系统风暴响应特征研究——以 1409 号台风“威马逊”对清澜港海岸影响为例[J]. 海洋学报, 2016, 38(2):121-130.
- [16] 张乔民, 余克服, 施祺, 等. 全球珊瑚礁监测与管理保护评述[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(2): 71-78.
- [17] 高伟, 李萍, 傅命佐, 等. 海南省典型海岛地质灾害特征及发展趋势[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(2): 59-65.
- [18] 包萌. 近 40 年间海南岛海岸线遥感监测与变迁分析[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014.
- [19] IPCC (2001) Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge.
- [20] Schoeman, F.R. and Thornton, J.A. (1987) Sedimentary Environments and Facies. *Earth-Science Reviews*, **24**, 233. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(87\)90041-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(87)90041-9)
- [21] 国家海洋局. 2004 年中国海洋环境质量公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2005.
- [22] Wilkinson, C. (2000) Status of Coral Reefs of the World: 2000. Australian Institute of Marine Science (AIMS), Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), Townsville.
- [23] Wilkinson, C. (2004) Status of Coral Reefs of the World: 2004. Australian Institute of Marine Science (AIMS), Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), Townsville.
- [24] 王国忠. 全球气候变化与珊瑚礁问题[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(1): 8-13.
- [25] Orr, J., Fabry, V. and Aumont, O. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification over the Twenty-First Century and Its Impact on Calcifying Organisms. *Nature*, **437**, 681-686. <https://doi.org/10.1038/nature04095>
- [26] Holling, C.S. (1978) Adaptive Environmental Assessment and Management. John Wiley and Sons, New York, 377-378.