

王振亭, 刘旭阳, 李孝泽, 等. 西沙-南沙珊瑚礁灰岩抗蚀性特征[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(6): 71-76.

西沙-南沙珊瑚礁灰岩抗蚀性特征

王振亭^{1,2}, 刘旭阳^{1,3}, 李孝泽¹, 屈建军^{1,2}

(1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 2 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 台风、风浪、涌浪、风暴潮、天文潮等现象中的气流和水流往往携带大量固体碎屑物, 对南海岛礁灰岩体产生强烈的侵蚀作用。笔者首先通过珊瑚的磨蚀与压缩实验验证了磨蚀理论的可靠性; 其次, 由抗压强度和弹性模量定义了具有压强量纲的抗蚀因子, 以定量描述岩石抵抗风水侵蚀的能力; 最后, 对石岛西南端地表风成灰岩进行了初步研究, 发现其抗蚀能力较弱。礁灰岩抗蚀性研究将为南海岛礁防护提供一定的科学依据。

关键词: 礁灰岩; 抗蚀性; 磨蚀; 压缩; 石岛

中图分类号: P736.14; P737.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.200

0 引言

南海诸岛自古为中国领土, 拥有重要的战略地位和丰富的海洋资源。这些岛屿、沙洲、暗沙等绝大多数发育于珊瑚礁盘上^[1-2]。在自然情况下, 受风浪侵蚀作用, 有些岛礁正在逐年缩小。研究程度较高的石岛是众所周知的一个例子。在 1981—2005 年间, 西沙某珊瑚砂岛南沙堤突出部位后退约 150 m^[3]。近年来, 随着南沙海域人工岛建设的蓬勃发展^[4], 岛礁稳定性对军事和民事活动的基础作用显得越发重要。

流水和风是南海岛礁地表物质迁移的 2 种主要动力因素。台风、台风浪、台风风暴潮是来自海洋的灾害性自然现象^[5]。海相碎屑物在潮间带的堆积与流失是流水作用的直接体现, 强劲风力则能够引起沙洲形态发生显著变化。通过水槽实验可以建立波浪作用下天然珊瑚砂的起动波高半经验公式^[6]。在相同动力条件下, 固体颗粒尺寸越小越容易起动并被搬运到更远的地方, 从而导致岛礁的物质损失。固定细颗粒和减少其产出是从动力学角度提高岛礁稳定性的基本途径。适宜的水温条件

使热带海域成为现代海相沉积成岩作用的优良环境^[7], 这个过程可以有效地胶结细颗粒。岛礁岩石受风化作用和风水侵蚀以及珊瑚与贝壳等生物残体在搬运过程中的碰撞均能产生碎屑物质。风化过程受温度应力、盐分结晶与水解、微生物群落演替等诸多因素控制, 难以量化分析。因此, 本文仅关注风水侵蚀。

当流体冲击岩石表面时, 其自身动量转化为作用于岩石表面的冲量。如果流速很大, 岩石内部应力会超过其自身强度, 发生破损。高压水射流切割技术就是在这个原理基础上发展起来的。然而自然界中的低速水流或气流难以直接侵蚀岩石, 我们通常所说的风水侵蚀实际上指的是水流或气流所携带的砂粒对岩石的磨蚀^[8]。石岛、高尖石及众多珊瑚岸礁低潮面以下部分易受到水流侵蚀^[9], 逐渐形成各种形态的海蚀地貌。与之相比, 南海诸岛水面以上的风蚀现象尚未引起足够重视。这可能是因为风蚀现象往往侵蚀量微小且风蚀物迅速随风而逝, 难以在小时到天时间尺度的风沙事件中观测到。实际上, 纵观西沙考察史^[10], 鲜有风沙研究者参与其中, 虽然这里拥有丰富的砂砾和台风级的强风条件。灰沙岛上沙波纹、沙堤、乃至整个沙洲的形态变化是风沙活动的鲜活明证^[2]。珊瑚砂因形貌不规则、磨圆度差、孔隙多、密度大等几何与物理特征^[11-13] 而使其具有明显不同于内陆沙漠砂的气动特征, 对包括风蚀过程与机制在内的岛礁风沙物理研究提出了全新的挑战。在岛礁吹填工程中, 大

收稿日期: 2020-12-06

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0601); 国家自然科学基金面上项目(41971011)

作者简介: 王振亭(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与地貌学研究。E-mail: wangzht@lzu.edu.cn

量砂石被运送到水面以上,风蚀现象必将增加。只有了解风水侵蚀的物理过程和力学机理,才能有针对性地设计修复和防护方案,更加顺利地进行南海岛礁建设。因此,开展岛礁岩石风水侵蚀的基础和应用研究至关重要。

1 磨蚀与压缩实验

无论水蚀还是风蚀,砂粒对岩石的碰撞磨蚀都是其中最基本的力学过程。因此,我们开展磨蚀实验,以确定不同礁灰岩的磨蚀速率。虽然实际环境中被搬运的珊瑚砂在粒径方面存在数量级上的差别,但是单颗砂粒导致的磨蚀量正比于入射砂粒平动动能(平动动能是粒径的三次方)是磨蚀研究中是众所周知的结论。鉴于此,本文不再探讨珊瑚砂粒径的影响。实验用砂为0.50~1.0 mm粒径为主的天然珊瑚砂。在图1给出的粒径分布中,0.075~0.50 mm和1.0~5.0 mm组分所占比例不足30%。目标岩石为片状、块状和树枝状的珊瑚,表面积均远大于喷砂装置出砂口的横截面面积。片状和块状只是对样品形状的简单描述,不是自然界中珊瑚岩体的实际构造。作为一种生物材料,珊瑚种属肯定对实验结果有所影响。在这个初步实验中,我们没有进行鉴定和深入探讨。喷砂装置由空气压缩机、压力调节阀、计时器、进砂口、出砂口等部分构成。空气压缩机功率、容量和不同组合的压力调节阀一起确保了喷出砂粒的初速度在0~35 m/s范围内精确可控。实验过程中,首先将出口气压和计时器调整到给定值;其次,将出砂口对准目标岩石,以便砂粒和岩石发生正碰;再次,控制进砂口的砂粒流量,打开气流出口阀门,直至计时结束,气流出口阀门自动关闭;最后,利用分析天平测定目标岩石在磨蚀前后的质量损失。

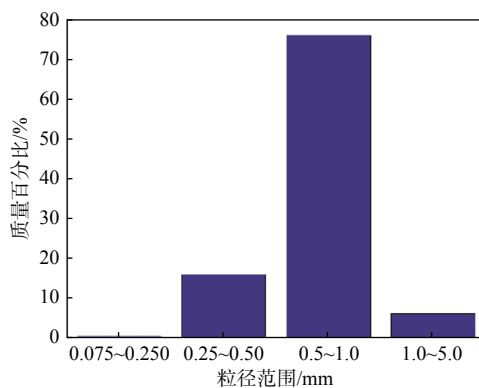


图1 实验用砂的粒径分布

Fig.1 Grain size distribution of sands used in the experiment

除了砂粒速度或流量,目标岩石力学性质在磨蚀过程中也扮演着重要角色^[14-15]。作为一种生物碳酸盐岩石,不同地域与成岩时代珊瑚的承载能力存在较大差异^[16-18]。因此,我们利用美斯特 CMT4505 型万能实验机对3种珊瑚进行了压缩实验。受实验室条件所限,力学试件的切割与打磨由人工完成,分为长方体和圆柱2种形状。树枝状珊瑚被制作成圆柱形试件,片状和块状的则做成长方体试件。其他操作都按侧向无约束的单向压缩实验标准流程进行。轴向载荷和变形由力和位移传感器测量,自动记录到计算机中。应力和应变根据定义进行计算。

2 结果分析与讨论

2.1 磨蚀速率

图2为珊瑚遭受砂粒流磨蚀后的照片。无论片状(图2a)和块状(图2b)还是树枝状(图2c)珊瑚,其表面均出现了明显的凹坑。磨蚀时间越长,砂粒流量越大,凹坑越大越深。片状珊瑚相对较薄,实验中曾发生贯穿现象。凹坑的产生主要有2方面原因:①碰撞点周边的应力超过了岩石强度,直接发生破坏;②珊瑚砂形状不规则,从出砂口到目标点之间的运动轨迹易发生一定程度的偏离。

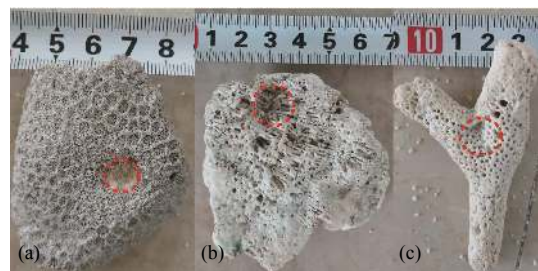


图2 珊瑚遭受砂粒流磨蚀后出现的凹坑

Fig.2 Abrasion pits on the surface of corals after abrasion by sand grains

磨蚀实验结果如图3所示,表明随着砂粒流量 J 的增加,磨蚀速率 A ,迅速增加。图中实线为二次函数的拟合曲线,基本符合根据接触力学和强度理论推导出的磨蚀速率公式^[14-15]。在相同的砂粒流量情况下,磨蚀速率按片状、块状、树枝状依次减小。下文中我们将看到,这种规律性变化是由3种珊瑚抗蚀性差别而不是形状所造成的。

2.2 应力-应变关系与力学参数

图4为压缩实验中观察到的珊瑚试件的几种

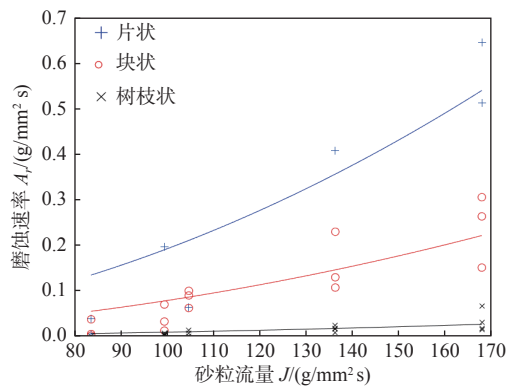


图 3 磨蚀速率随砂粒流量的变化

Fig.3 Change of abrasion rate with sand flux

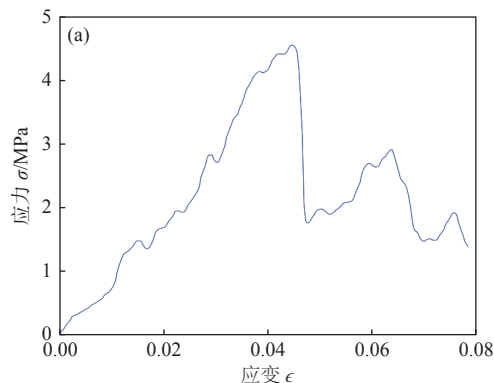
破坏方式。绝大多数试件,尤其是圆柱形的,以图 4a 中的两端连通的劈裂方式破碎成两到数块。这进一步证实珊瑚生长线是此类岩石中最脆弱的部位^[16]。个别试件发生剪切破坏,断裂面与底面约成 45° 夹角(图 4b)。还有一些试件仅在一端发生明显的破坏(图 4c)。这些破坏情况符合前人的观察和描述^[18]。不同于均匀的各向同性材料,珊瑚的生物结构和内部缺陷决定了破坏方式的多样性。加载方向亦对破坏方式有一定的影响。



图 4 珊瑚试件的破坏方式

Fig.4 Broken modes of coral specimens

应力-应变关系是压缩实验给出的最主要结果。图 5 为 2 种典型的应力-应变曲线。应力达到最大



值时,试件仍处于局部破坏状态,存在一定的残余强度(图 5a)。而在应变很小的情况下,应力迅速达到最大值,试件随即发生比较彻底的破坏(图 5b)。我们以最大应力点计算抗压强度和弹性模量。严格说来,只有在应力-应变曲线的初始阶段才符合线弹性变化,应该据此计算弹性模量。对于理想脆性材料而言,破坏前仅发生弹性变形,利用最大应力点计算弹性模量是可行的。在表 1 列出的结果中,按片状、块状和树枝状的顺序,珊瑚的这 2 个力学参数的平均值均逐渐增大。与其他压缩实验结果相比^[16, 18],得到的抗压强度也小于其它常见岩石。本实验中的树枝状珊瑚胶结程度较好,其抗压强度能达到几十兆帕。当然,弹性模量和抗压强度仅是材料的基本力学参数,只有通过力学模型才能在具体问题中发挥作用。

2.3 抗蚀因子及其应用

在此前的理论工作中,我们首先利用比较复杂的半空间三维弹性解析解和统一强度理论,得到了定量表达单颗砂粒磨蚀体积 V 的一个无量纲的磨蚀数^[14],其物理意义为入射砂粒单位体积的平动动能与岩石目标体在破坏点处的应变能之比。最近,根据 Hertz 接触理论与最大正应力强度准则,该表达式被修正为^[15]:

$$\frac{V}{d^3} \propto \frac{\rho v_0^2 E_*}{\sigma_c^2} \sqrt{\frac{\sigma_c}{E_*}} \quad (1)$$

式中: ρ 、 d 、 v_0 分别为入射砂粒的密度、粒径、速度;

σ_c 为岩石的抗压强度。

E_* 与材料参数之间的关系为:

$$\frac{1}{E_*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

式中: E_1 、 E_2 和 ν_1 、 ν_2 分别为砂粒与岩石的弹性模量

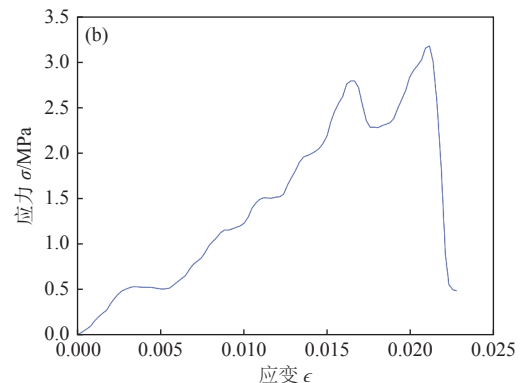


图 5 2 种典型的应力-应变曲线

Fig.5 Two typical stress-strain curves

表1 珊瑚与石岛灰岩的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coral and carbonate rocks

样品形状	编号	抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /GPa	编号	抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /GPa
片状珊瑚	A1	4.549	0.102	A2	3.533	0.052
	A3	3.535	0.204	A4	3.383	0.103
	A5	2.416	0.135	A6	5.762	0.113
	A7	1.629	0.215	A8	3.318	0.199
	平均值	3.516	0.140			
块状珊瑚	B1	19.657	1.818	B2	20.738	1.743
	B3	3.176	0.151	B4	4.820	0.122
	B5	6.888	0.168	B6	10.060	0.356
	B7	3.722	0.402	B8	4.897	0.135
	B9	4.648	0.113	B10	7.438	0.323
	B11	8.905	0.248	B12	5.172	0.298
平均值	8.343	0.490				
树枝状珊瑚	C1	15.441	0.948	C2	11.251	1.166
	C3	26.080	1.194	C4	30.244	4.156
	C5	36.329	1.034	C6	18.633	0.639
	C7	22.562	4.084	C8	16.263	0.950
	C9	22.769	1.563	C10	14.736	1.142
平均值	21.431	1.688				
石岛灰岩	S1	6.139	0.575	S2	6.686	0.751
	S3	5.513	0.252	S4	4.599	0.188
	S5	4.560	0.318	S6	3.379	0.461
	S7	4.259	0.461	S8	3.883	0.245
	S9	9.095	0.303	S10	2.970	0.089
	S11	3.431	0.218	S12	7.095	0.725
平均值	5.134	0.355				

和泊松比。当砂粒与岩石的材料完全相同时, $E_1 = E_2 = E$ 且 $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ 。因为岩石泊松比一般介于 0.2~0.4, 所以有 $\nu^2 \gg 1$ 。进而, 式(2)简化为:

$$E_* = \frac{1}{2}E \quad (3)$$

不妨从式(1)右边提取出岩石参数组合, 结合式(3), 定义抗蚀因子为 $\frac{\sigma_c^2}{E} \sqrt{\frac{E}{\sigma_c}}$ 。这个具有压强量纲的物理量代表强度和刚度的综合效应, 反映了岩石抵抗砂粒流磨蚀的能力。其实, 按同样思路容易从磨蚀数^[14]中定义更为简单的抗蚀因子 $\frac{\sigma_c^2}{E}$, 也可从基于断裂力学的磨蚀模型^[19]里导出其他表达式。水蚀领域中的最新磨蚀实验显示^[20], 后者不能描述实验结果, 前者需要补充一个经验系数。相比于 $\frac{\sigma_c^2}{E}$, 形式略显复杂的 $\frac{\sigma_c^2}{E} \sqrt{\frac{E}{\sigma_c}}$ 考虑了发生破坏时应变的影响。根据表1中的平均值, 片状、块状和树枝状珊瑚的抗蚀因子依次为 0.556、1.089 和 2.415 MPa。

抗蚀因子的这种变化情况与图3中的磨蚀速率结果完全一致。因此, 本文提出的抗蚀因子是合理的。

南海诸岛中最高的岛屿是西沙群岛中的石岛, 海拔为 15.9 m, 长期遭受强烈侵蚀^[9]。2020年10月19日, 我们在石岛西南端(112.35°E, 16.84°N)坐标点附近采集了地表生物砂屑灰岩样品(图6)。一般认为, 这些灰岩属于风成沉积, 也就是说由风积砂丘胶结而成^[21-23]。样品表面淋溶和生物作用明显, 新鲜断面以中砂为主, 胶结较弱。在实验室中, 岩石表层被切除, 制成长方形力学试件。为了探讨抗风蚀能力, 试件经充分干燥后才开始进行压缩实验(表1)。由抗压强度与弹性模量的平均值得到的抗风蚀因子为 0.617 MPa。以珊瑚抗蚀因子结果为参考, 石岛地表灰岩的抗蚀性处于中等偏下水平。抗压强度小和弹性模量大都能够导致抗蚀因子偏小的后果。强度小的材料显然更易被破坏。弹性模量大意味着刚度大, 目标体受力时的变形小, 碰撞沙粒动能转化成的弹性变形能少, 不利于能量



韩庆杰摄

图 6 石岛地表岩石样品采集

Fig.6 Sampling rocks on the Shidao Island

耗散。

为了进一步评估石岛灰岩的抗蚀性,我们利用前人测得的抗压强度和弹性模量^[16,24],计算了南海岛礁 5 个采样点的岩石抗蚀因子(表 2)。其中,前 4 种岩石依次为含硅质珊瑚砾屑灰岩、生物(中)砂屑灰岩、珊瑚砾屑灰岩、生物砾砂屑灰岩,永暑礁和

渚碧礁的样品为由大块珊瑚骨骼组成的礁灰岩。礁灰岩的力学参数随含水率变化,假设饱和和风干 2 种极端情况分别对应于水蚀和风蚀。根据表 2 中的数据,石岛灰岩的抗风蚀能力最弱,抗水蚀能力远低于邻近的永兴岛岩石。

目前,通过填海造陆工程,石岛已与永兴岛连成一体,作为三沙市政府所在地,战略地位越来越重要。这里的初步抗蚀性评估表明,很有必要实施石岛防护工程。需要说明的是,石岛古风成沉积被古土壤层分成几个不同时期^[22,25],其力学性质可能存在差异。只有在不同地点不同层位采样并测量力学参数,才能更加全面地评估石岛灰岩的抗蚀性。另外,磨蚀量或磨蚀速率取决于砂粒与岩石两方面,抗蚀因子仅代表了岩石方面。实际工作中需要密切结合砂粒密度、粒径以及水和风的动力条件,因地制宜,提出防护工程的优化设计方案。

表 2 南海岛礁礁灰岩抗蚀性的定量比较

Table 2 Comparison of anti-erodibility factors among rocks collected on the islands and reefs in the South China Sea

岩石采样点	水蚀抗压强度/MPa	水蚀弹性模量/GPa	水蚀抗蚀因子/MPa	抗压强度/MPa	风蚀弹性模量/GPa	风蚀抗蚀因子/MPa
海南岛 ^[24]	1.55	2.83	0.036 3	3.47	7.22	0.076 1
石岛 ^[24]	1.87	0.61	0.103 5	2.02	1.53	0.073 4
永兴岛 ^[24]	18.57	14.08	0.674 4	19.39	14.89	0.699 7
广金岛 ^[24]	2.59	2.22	0.088 5	5.81	4.63	0.205 8
永暑和渚碧礁 ^[16]	6.58	10.55	0.164 1	9.17	15.70	0.221 4

3 结论

(1)通过室内磨蚀和压缩实验证实了基于接触力学和强度理论的低速磨蚀模型对珊瑚砂冲击侵蚀珊瑚礁礁灰岩现象的适用性,进一步定义了抗蚀因子以定量描述岩石抵抗风水侵蚀的能力。

(2)与南海其他岛礁岩石相比,西沙石岛地表灰岩的抗蚀能力较弱,有必要加强防护。

致谢: 野外考察工作得到了海南省三沙市政府相关部门的大力支持,中科院西北生态环境资源研究院柳本立设计制造了喷砂装置,赖俊华全程参加了磨蚀实验,吴盈盈提供了大量有价值的信息,中国地质调查局青岛海洋地质研究所许红研究员和中科院南海海洋研究所陶士臣博士提出了宝贵建议,谨致谢忱。

参考文献:

[1] 钟晋樑,陈欣树,张齐民,等.南沙群岛珊瑚礁地貌研究[M].北京:科学出版社,1996.

[2] 曾昭璇,梁景芬,丘世钧.中国珊瑚礁地貌研究[M].广州:广东人民出版社,1997.

[3] 叶海民,周辉,钟小帅.中国南海某珊瑚砂岛动力环境分析[J].土工基础,2013,27(5):50-51.

[4] 赵焕庭,王丽荣.南海诸岛珊瑚礁人工岛建造研究[J].热带地理,2017,37(5):681-693.

[5] 梁海萍,梁海燕,陈海南,等.1991—2013年发生在西沙永兴岛的台风风暴潮统计特征分析[J].应用海洋学学报,2017,36(2):243-248.

[6] 周乐序,赵利平.波浪作用下珊瑚砂起动特性研究[J].中国水运,2015,15(3):170-171,175.

[7] 李建生.西沙群岛的现代沉积成岩作用[J].华南师范学院学报(自然科学版),1982,14(1):29-33.

[8] SUNAMURA T. A fundamental equation for describing the rate of bedrock erosion by sediment-laden fluid flows in fluvial, coastal, and aeolian environments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(15): 3022-3041.

[9] 曾昭璇,黄少敏,曾迪鸣.西沙群岛石岛地貌学上诸问题[J].石油与天然气地质,1984,5(4):335-341.

[10] 赵焕庭.西沙群岛考察史[J].地理研究,1996,15(4):55-65.

[11] 孙宗勋.南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J].热带海洋,2000,19(2):1-8.

[12] 王步雪岩,孟庆山,韦昌富,等.多投影面下珊瑚砂砾颗粒形

- 貌量化试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3871-3878.
- [13] 崔翔, 胡明鉴, 朱长歧, 等. 珊瑚砂三维孔隙微观特性研究[J]. 岩土力学, 2000, 41(11): 1-9.
- [14] WANG Z T, WANG H T, NIU Q H, et al. Abrasion of Yardangs[J]. *Physical Review E*, 2011, 84(3): 031304.
- [15] WANG Z T. Erosion model for brittle materials under low speed impacts[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2020, 142: 074501.
- [16] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2221-2226.
- [17] 刘志伟, 李灿, 胡昕. 珊瑚礁灰岩工程特性测试研究[J]. *工程勘察*, 2012, 40(9): 17-21.
- [18] 金昱昕, 陈天然, 孟庆山, 等. 单轴抗压强度揭示南海珊瑚骨骼结构的差异[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(2): 33-39.
- [19] GHADIRI M, ZHANG Z. Impact attrition of particulate solids. Part 1: A theoretical model of chipping[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(17): 3659-3669.
- [20] KIMBERLY L M, DOUGLAS J. Controls on the rates and products of particle attrition by bed-load collisions[J]. *Earth Surface Dynamic Discussions*, 2020.
- [21] 业治铮, 张明书, 韩春瑞, 等. 西沙石岛风成石灰岩和化石土壤层的发现及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1984, 4(1): 1-10.
- [22] 朱袁智, 钟晋樑. 西沙石岛和海南岛沙丘岩初探[J]. *热带海洋*, 1984, 3(3): 64-71.
- [23] ZHAO Q, WU S G, XU H, et al. Sedimentary facies and evolution of aeolianites on Shidao Island, Xisha Islands[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(2): 398-413.
- [24] 朱长歧, 周斌, 刘海峰. 南海海滩岩的细观结构及其基本物理力学性质研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 683-693.
- [25] YE Z Z, HE Q X, ZHANG M S, et al. Sedimentary structure and the facies model of the late Pleistocene eolian biocalcarenites in Shidao Island of Xisha Archipelago[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 4(4): 603-614.

ANTI-ERODIBILITY OF CORAL REEF LIMESTONES ON THE XISHA-NANSHA ISLANDS

WANG Zhenting^{1,2}, LIU Xuyang^{1,3}, LI Xiaoze¹, QU Jianjun^{1,2}

(1 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the South China Sea, carbonate debris and fragments are commonly transported by air and waterflow in forms of typhoon, wind wave, swell, storm surges and astronomic tide *etc.* accompanied by strongly erosion of the reef limestones. The research work presented in this paper confirmed the reliability of the abrasion theoretical model we developed via abrasion and compression experiments firstly. And then, the anti-erodibility factor with the dimension of pressure is defined using compressive strength and elastic modulus to quantificationally describe the anti-erodibility of rocks against wind and water. Finally, the preliminary investigation reveals that the aeolianites on the southwest of Shidao island have relative low anti-erodibility. The study of the anti-erodibility of reef limestones will provide certain scientific support for protection of the islands and reefs in the South China Sea.

Key words: coral reef limestone; anti-erodibility; abrasion; compression; Shidao island