

《岛礁工程·珊瑚礁海岸水沙动力学》专栏

[编者按]珊瑚礁广泛分布于热带和亚热带浅水海域,被誉为海岸线的天然屏障。近年来,随着全球气候变化和人类活动的影响,全球的珊瑚礁持续出现了大规模的白化现象进而发生退化。充分了解珊瑚礁海岸水沙动力过程是进一步认识珊瑚礁环境中各种物理、化学和生物过程的前提。南海岛礁是我国宝贵的陆地资源,也是建设“海上丝绸之路”和维护海洋权益的关键节点,关乎国家核心利益。当前,南海岛礁的防浪设施在台风等极端天气作用下的安全问题也亟须相关的水沙动力学理论作为支撑。

在此背景下,本期《岛礁工程·珊瑚礁海岸水沙动力学》专栏推出6篇文章,首先综述了珊瑚礁海岸水沙动力学的最新研究进展,然后分别从珊瑚礁海岸风、浪、流作用下水动力特性,珊瑚砂的产生、输运及珊瑚礁海岸演变机理,珊瑚礁海岸波浪与海岸构筑物相互作用,珊瑚礁海岸水沙动力数值模拟技术等方面介绍了最新的研究成果。

专栏主编简介:

姚宇,教授,博士生导师,长沙理工大学科学技术处副处长,水利与环境工程学院船舶与海洋工程专业负责人,国家级人才计划青年学者,湖南省科技创新领军人才,湖南省湖湘青年英才。先后主持国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目等纵向项目10余项,发表各类学术期刊论文80余篇,担任1个SCI期刊编委,获发明专利授权10余项,先后获得中国航海学会科学技术奖一等奖和海洋工程科学技术奖二等奖。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20230427002

文章编号:1672-9331(2023)04-0001-10

引用格式:姚宇,钟翔.岛礁水沙动力学研究综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(4):1-10.

Citation:YAO Yu,ZHONG Xiang.A review of water-sediment dynamics around the reef islands[J].J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci),2023,20(4):1-10.

岛礁水沙动力学研究综述

姚宇^{1,2},钟翔¹

(1.长沙理工大学 水利与环境工程学院,湖南 长沙 410114;
2.长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘 要:珊瑚礁广泛分布于热带和亚热带浅水海域,是保护海岸带的天然屏障。近年来,受全球气候变化和人类活动的影响,全球的珊瑚礁持续出现了大规模白化现象进而发生退化。充分了解珊瑚礁海岸水沙动力过程是进一步认识珊瑚礁环境中各种物理、化学和生物过程的基础。南海岛礁是我国宝贵的陆地资源,也是建设“海上丝绸之路”和维护海洋权益的关键节点,关乎国家主权核心利益。当前,南海岛礁的防浪设施在台风等极端天气作用下的安全保障也亟须相关的水沙动力学理论作为支撑。本文基于当前国内外珊瑚礁海岸水沙动力学的研究进展,从珊瑚礁海岸波、流作用下的水动力特性与生态健康、珊瑚礁海岸低频长波运动与海岸防灾减灾、珊瑚砂运动与珊瑚砂岛演变、波浪与防浪建筑物相互作用及岛礁防护4个方面进行了分析和总结,并针对这4个方面提出了研究展望,旨在为今后岛礁水沙动力学的研究提供一定的借鉴和参考。

关键词:岛礁;波浪;水沙动力学;珊瑚砂;海岸工程

中图分类号:TV148

文献标志码:A

收稿日期:2023-04-27;修回日期:2023-05-16;接受日期:2023-05-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC00502);国家自然科学基金资助项目(51979013)

通信作者:姚宇(1982—)(ORCID:0000-0002-0089-9568),男,教授,主要从事珊瑚礁海岸水沙动力学方面的研究。

E-mail:yaoyu@csust.edu.cn

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

0 引言

珊瑚礁是由碳酸钙组成的珊瑚虫骨骼在数百年至数千年的沉积过程中形成的,广泛分布于热带和亚热带浅海地区。珊瑚礁具有极高的生物多样性,素有“蓝色沙漠中的绿洲”“海洋中的热带雨林”的美誉。它是4 000多种鱼类和800多种珊瑚的家园,孕育着众多鲜明而珍异的生物,它们彼此共生共栖,形成了五彩斑斓、令人叹为观止的海底生态奇观。全球直接或间接依赖珊瑚礁生态系统生存的人口达数亿。中国海域亦有着十分丰富的珊瑚礁资源,分布在西沙、南沙、台湾以及海南岛等地(图1),它们均位于世界珊瑚礁种类最为丰富的“珊瑚金三角”的北缘,是全球珊瑚礁生态系统的重要组成部分。在众多珊瑚礁类型中,岸礁(fringing reef)、堡礁(barrier reef)和环礁(reef atoll)是最为常见的3类(图2)。一个典型的珊瑚礁海岸由连接深海海床且较陡的礁前斜坡和延伸向岸滩的相对水平的礁坪组成,在礁前斜坡与礁坪相接的礁缘处常常存在一个隆起的礁冠,在礁坪和岸滩之间可能存在一个较深的潟湖。在影响珊瑚礁水动力过程的若干海洋动力因素(波浪、潮汐、风和洋流等)中,波浪被广泛认为是最重要的影响因素^[1]。

珊瑚礁是地球上最多样化的生态系统之一。然而,随着经济社会的发展,珊瑚礁资源的开发利用与环境承载力之间的矛盾日益凸显,珊瑚礁正面临着广泛而日益加剧的威胁,包括过度捕捞、海

岸开发、农田径流等区域性威胁。更重要的是,全球气候变化已经开始以多种方式加剧对珊瑚礁的不良影响。海水变暖已经对珊瑚礁造成了广泛的破坏,高温导致了一种名为“珊瑚白化”的应激反应,使得珊瑚失去了色彩斑斓的共生藻类,仅剩下白色的骨架,最终珊瑚死亡,珊瑚礁退化,如著名的1998年全球范围的珊瑚白化事件导致全球约16%的珊瑚死亡^[3],而2016年全球珊瑚白化事件使得世界最大最长的珊瑚礁群——澳大利亚大堡礁(the Great Barrier Reef)29%的活珊瑚死亡。据统计,在1980—1997年,全球观测并报道了大约370次珊瑚白化事件,而在1998—2010年超过3 700次^[4]。近年来,海水温度异常升高的现象有所增多,这将导致珊瑚白化更为频繁、严重和广泛^[5]。此外,不断增加的二氧化碳排放量正在加剧海洋酸化。海洋酸化会减缓珊瑚的生长速度,如果不加以控制,可能会弱化珊瑚维持自身结构的能力。区域性威胁再加上全球变暖和海洋酸化,珊瑚礁越来越容易受到强风暴、虫害(如长棘海星暴发)、海水温度和浊度变化等的干扰与破坏。这种破坏的典型表现是活珊瑚面积减小,藻类覆盖增加,物种多样性降低,鱼类丰度降低等。尽管有研究表明,珊瑚的生命活动是具有弹性的,可以从特定威胁的影响中恢复过来,但是如果人类不加以重视并采取措施,很可能将看到这些宝贵的生态系统崩溃,原有的天然防护屏障不复存在。珊瑚礁急剧退化会加剧海岸侵蚀、淹没进程,这将严重威胁珊瑚礁沿岸地区人类的生存环境。

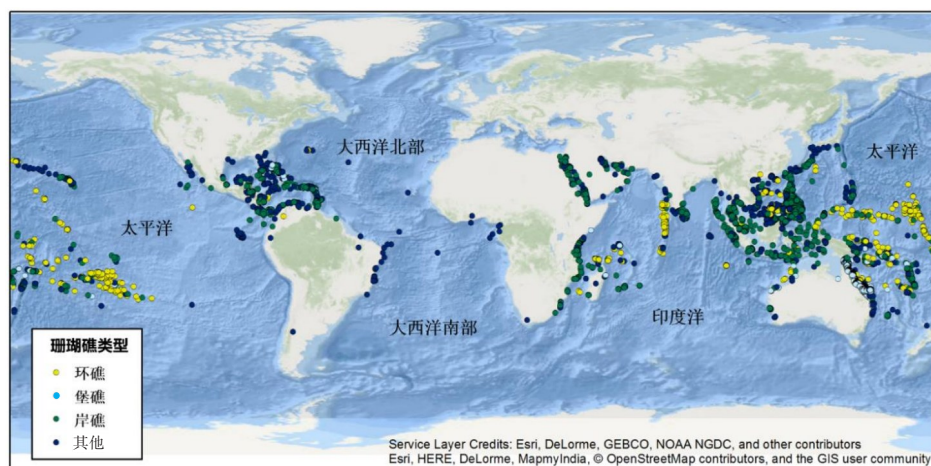
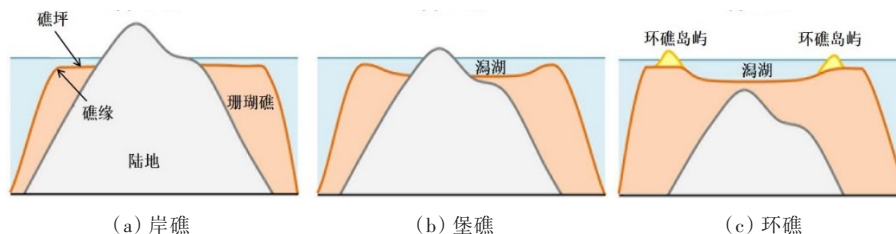


图1 不同类型珊瑚礁的分布^[2]

Fig. 1 Distribution of different types of coral reefs^[2]

图2 不同类型的珊瑚礁^[2]Fig. 2 Different types of coral reefs^[2]

南海珊瑚岛礁是我国宝贵的陆地资源,也是建设“海上丝绸之路”和维护海洋权益的关键节点,关乎国家核心利益。近年来,我国在南海岛礁开展了一系列填海造陆工程,建设了相关的基础设施,并以此为依托逐步推进南海油气、渔业、旅游等资源的利用。因此,针对南海岛礁的开发与保护已成为推进“一带一路”倡议和“海洋强国”战略的重大需求。珊瑚岛礁海岸的天然动力地貌环境与其他海岸的迥异,波浪作为最主要的海洋动力因素,在珊瑚礁陡变地形上的传播变形、破碎、增水、波生流的产生、爬高等水动力过程有其复杂性和特殊性^[6],需要在海岸动力学基础理论上对珊瑚礁海岸独特的水动力环境有更为深刻的认识。我国在珊瑚礁海岸水沙动力学基础理论研究方面起步晚,南海填礁成陆工程在国际上也无先例可循,因此出现了基础理论远远落后于工程实际需求状况。

基于以上研究背景,本文重点介绍珊瑚礁海岸水沙动力学的基本理论及其最新研究进展,主要涉及:珊瑚礁海岸波、流作用下的水动力特性与生态健康,珊瑚礁海岸低频长波运动与海岸防灾减灾,珊瑚砂的运动与珊瑚砂岛演变,波浪与防浪建筑物相互作用及岛礁防护4方面的内容,旨在

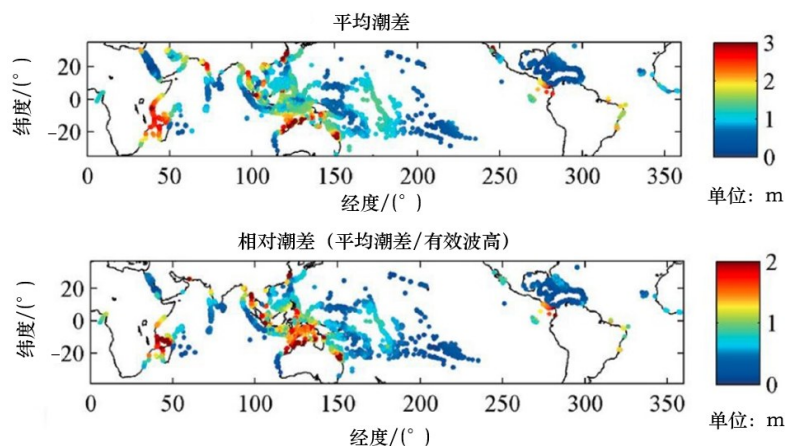
为国内从事相关领域工作的学者和工程师提供一定的参考。

1 研究内容及意义

1.1 珊瑚礁海岸波、流作用下的水动力特性与生态健康

珊瑚礁海岸水沙动力学所涉及的流体运动范围十分广泛,大至数十公里范围内的潮汐运动,中至水平礁面几百米到几千米范围内的波浪运动,小至数米范围内珊瑚冠层及其内部分支结构中的湍流运动,它们无一不对珊瑚礁生态系统和珊瑚礁海岸生态环境的维持具有重要意义。

对于大尺度下的潮汐运动,根据最新的研究成果^[7],世界上约1/3珊瑚礁海域的水动力实际上由潮汐主导。在传统的现场观测研究中,学者们主要分析了潮位的影响。当现场潮差较大时,潮流可能会替代潮位对珊瑚礁附近的环流系统产生重要影响,并反过来影响波浪的运动特性。因此,近年来学者们对潮流的关注日益上升^[8-10]。潮流的运动影响了潟湖与外海的水体交换速度,因此决定了珊瑚礁系统的水环境质量。图3所示为全球珊瑚礁的分布。

图3 全球珊瑚礁的分布^[7]Fig. 3 Distribution of Global coral reefs^[7]

对于中尺度(与珊瑚礁礁坪规模相当)的波流运动,以往现场观测研究表明:波浪从深海传播至礁前斜坡时,由于浅化作用而变陡,在礁缘处通常发生破碎并损耗大量能量,波浪破碎带通常会在礁坪上延伸一段距离,随后破碎作用停止并重新生成垂直于海岸的行进波,所以在珊瑚礁地形上并不存在一个类似于平底海岸的冲流带(swash zone)^[11]。在正常海况下,70%~90%的入射波能量会因礁冠处的破碎而耗散,再加上礁面的摩阻损耗,最终到达海岸的波浪几乎可以忽略^[12];同时,在礁坪上可以观测到的波谱显著变宽,部分波能向高频波和低频波转移^[13]。另外,波浪在礁缘附近破碎所产生的增水驱动了礁坪上的向岸流;同时,由于礁坪在沿岸方向的分布往往是不连续的,间隔存在连通潟湖和外海的口门,因此沿岸分布不均的增水会在礁坪上和潟湖内驱动沿岸流,并汇入口门内以裂流的形式返回外海,形成水平二维的波生环流^[14],类似于沙质海岸的裂流系统,该环流的强度受诸如礁坪宽度、口门的尺寸和位置、礁面粗糙度等因素的影响^[15]。近岸环流是珊瑚礁海域营养物质、幼虫、珊瑚砂等发生水平运输的主要物理驱动力^[16],对于珊瑚礁海岸岸线的演变和维持珊瑚礁生态系统的健康均具有重要的意义。

对于小尺度(礁坪水深尺度)下的流动,水体流经珊瑚礁骨架结构分支所形成的流态通常被称为“冠层流(canopy flow)”^[7,16]。珊瑚礁冠层附近流体的流态与陆地冠层(如森林冠层、城市建筑冠层等)及其他水生冠层(如海草、红树林等)附近流体的流态相似^[17],但由于珊瑚礁冠层的内部结构极其不均匀,且会受到波浪、潮汐等海洋动力因素的作用^[18],因此珊瑚礁冠层流有其特有的水动力特性。对于珊瑚礁海岸水环境中最小尺度的湍流,珊瑚礁冠层流通过控制礁床与上覆水体之间的垂向交换,决定着热量、食物、珊瑚幼虫等的垂向运输^[19],这对于维持底栖生物生长、光合作用、呼吸作用等关键的新陈代谢过程至关重要^[20]。

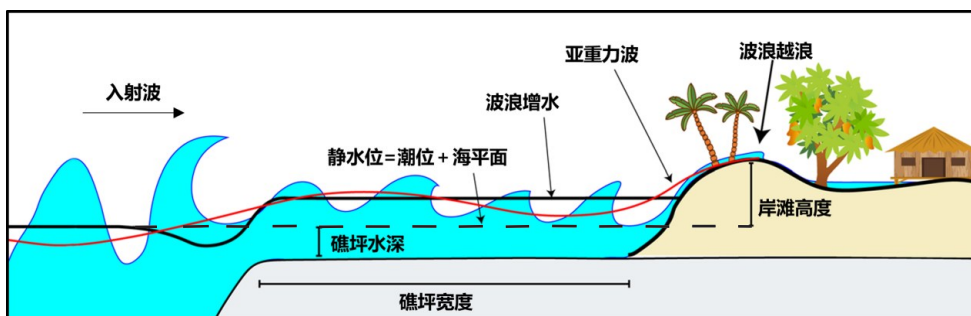
1.2 珊瑚礁海岸低频长波运动与海岸防灾减灾

尽管学术界普遍认为珊瑚礁是海岸线的天然屏障,但是文献中时常有低海拔珊瑚礁沿岸在风暴潮的作用下发生洪涝灾害的报道^[21-22]。珊瑚礁海岸礁后岸滩波浪爬高是评估海岸洪水最重要的

指标。波浪爬高主要由短波(频率区段为0.040~0.400 Hz)、低频长波(频率区段为0.001~<0.040 Hz)和波浪增水共同组成^[22],其中大部分短波能量在礁缘附近因波浪破碎而耗散,随后在礁坪又进一步被底部摩擦所消耗。因此,波浪爬高主要受海岸附近低频长波的影响。图4为波浪与珊瑚礁海岸相互作用示意图。

低频长波又叫亚重力波或次重力波(infragravity wave, IGW),文献中对于珊瑚礁地形上低频长波的产生机理主要有两种观点:第一种是约束长波(bound long wave, BLW),其与入射波群反相(相位差为 180°)^[24],当它们在向海岸传播时,能量会从短波转移到长波^[25],在浅水中波浪破碎时能量通常可以释放出来使长波变为自由波(free wave, FW),然后继续传播到海岸,自由波在礁后岸滩发生反射后可能返回外海,也可能在岸线附近产生边缘波(edge wave, EW)。第二种是由波浪破碎点的移动产生的低频长波,即由破碎点驱动的长波(breakpoint-forced long wave, BFLW),其与由波群调制的随时间变化的波浪增水相关^[26],破碎点以波群的频率摆动从而产生低频长波。根据BFLW的产生机制,波浪破碎点会产生两个低频长波:一个是传向海岸且与波群同相位的低频长波,另一个是传向外海且与波群反相位的低频长波。低频长波一旦被释放,可能会通过床面摩擦耗散能量,也可能会将能量转移到其他频率的波上,还可能会发生破碎或与反射波叠加形成驻波^[27]。BALDOCK^[27]提出了一个衡量两种机制相对重要性的经验表达式,被称为波拍相似系数(ξ_{surfbeat}),其与海床相对坡度和入射短波波陡相关, ξ_{surfbeat} 值较小时BLW占主导作用,较大时BFLW占主导作用。由于珊瑚礁礁前斜坡普遍较陡(通常大于1:20),故礁坪上以BFLW为主,这与相关文献中的报道一致^[28-29]。

由于珊瑚礁剖面在垂直于海岸的方向通常是半封闭的,所以波浪在传播过程中产生的低频长波会在不同周期和礁坪水深组合下表现出不同的运动特征,在某些情况下特别是在风暴潮引起高潮位时,低频长波更易在礁坪上发生共振现象,引起海岸线附近低频长波的放大效应^[30-31],进而加剧海岸波浪爬高,增大发生洪涝灾害的风险。

图4 波浪与珊瑚礁海岸相互作用示意图^[23]Fig. 4 Schematic diagram of wave interaction with coral reef coasts^[23]

综上所述,由于珊瑚礁海岸具有特殊的陡变地形,相对于普通沙质海岸,低频长波是波浪爬高更为重要的组成成分,可能会引发海岸极端洪水事件,同时还与珊瑚礁上的泥沙输运息息相关。因此,近几年来在珊瑚礁海岸水动力学研究领域得到了广泛关注,详见文献[6]。深入认识低频长波的产生机理及其共振模式可为珊瑚礁海岸防灾减灾措施的决策提供理论指导。

1.3 珊瑚砂运动与珊瑚砂岛演变

碳酸盐沉积物中的珊瑚砂(coral sand)是由珊瑚礁在外动力作用(风浪、潮流等)和风化作用下经过侵蚀、破碎、打磨而形成的钙质碎屑物^[32],某些鱼类啃噬珊瑚礁所产生的排泄物亦是其重要来源。珊瑚砂与陆源石英砂在力学特性方面存在较大差异,珊瑚砂磨圆度低、棱角度高,具有高孔隙比;硬度低、内孔隙多,具有高压缩性;内摩擦角大、强度低,易破碎^[33]。此外,珊瑚沉积物独特的物质组成及特性决定了其颗粒大小不均,不同地区珊瑚沉积物的粒径分布存在较大差异。

珊瑚礁系统中碳酸盐沉积物特殊的形成方式、存在环境及物理特性,使得碳酸盐沉积物在起动与沉降时呈现出与普通石英砂迥异的运动特征^[34]。早期 MADSEN 等^[35]考虑波浪环境的影响,将 Shields 曲线进一步优化,提出用床面最大瞬时剪切应力代替床面剪切应力,得到了新的碳酸盐沉积物起动希尔兹数。后续学者常通过物理模型试验的方式进一步研究碳酸盐沉积物的运动特征^[36]。关于沉积物的沉降,多以沉积物颗粒沉降速度(ω)为研究对象展开,最近,DE KRUIJF 等^[37]对碳酸盐沉积物沉降速度的相关研究进行了系统综述,阐述了碳酸盐沉积物颗粒的物理性质对沉降速度的重要性,回顾了碳酸盐沉积物沉降方程

的演变历史,归纳了大量碳酸盐沉积物的沉降公式。

珊瑚砂与陆源石英砂在上述物理性质上的差异导致波浪作用下珊瑚礁海岸附近珊瑚砂的运动特性与一般沙质岸滩附近泥沙的运动特性存在显著差异。珊瑚礁系统中碳酸盐沉积物的输运是一个跨尺度、多物理过程相耦合的复杂过程,沉积物在运动过程中同样存在悬移质和推移质两种运动表现形式。同时,珊瑚礁特有的陡变地形导致在礁坪处可观测到明显的波谱变化,波浪能在高频和低频区间转化;礁坪处的波谱不仅同时存在短波和低频长波成分,而且表现出明显的双峰(bi-modal)特征^[7]。上述两个珊瑚礁海岸的波浪特征显著区别于普通沙质岸滩的,并对沉积物的输移产生了重要的影响^[38]。目前文献中珊瑚礁沉积物的输运主要是采用 Delft 3D 和 XBeach 两个软件进行数值模拟的^[39-40],这两个软件主要包含波浪、水流、泥沙、水质等模块,并通过耦合波浪和水流两个模块来模拟珊瑚礁海岸的波流作用,而沉积物输运的模拟则采用对流扩散方程和经验输沙公式进行。

珊瑚砂岛多发育于环礁的礁坪区域,由沉积物堆积而成,其结构松散,大小不一,宽度一般为几百米至十几公里不等,且可能被海洋分割成几个单独的个体,是岛礁区最适合人类居住的海上陆地之一^[31]。近年来,全球气候变化带来的海平面上升和强台风多发导致的极端波浪事件影响了低海拔珊瑚砂岛的稳定性^[41],且海平面上升可能会使低洼砂岛在未来几十年后不再适合人类居住^[42]。最新的物理模型试验^[43]和数值模拟研究^[44]发现:珊瑚砂岛地形能够对海平面上升做出积极的调整,珊瑚砂岛会随入射波高(代表风暴潮强

度)和礁坪水位(代表海平面高程)的增大而向上淤积,并向潟湖方向沿礁迁移;沉积物的供应(代表珊瑚的生长)不仅能促进砂岛海拔的增加,还能抑制珊瑚砂岛的迁移和侵蚀。上述发现对于理解珊瑚砂岛的长期演变及其对未来气候变化的适应性具有重要参考价值。

南海的珊瑚砂岛是我国重要的海上国土资源,长期以来学者们对珊瑚砂的运动规律、珊瑚砂流失的部位、路径和机理等缺乏足够的认识,关于砂岛水文条件、地貌特征等方面的资料积累甚少。因此,未来开展南海珊瑚砂岛附近泥沙输运和岸线演变问题的研究具有十分重要的现实意义。

1.4 波浪与防浪建筑物相互作用及岛礁防护

我国在南海部分远海珊瑚岛礁进行的填礁造陆工程已然完成,而在新填筑的岛礁上建设的各类设施需要防浪建筑物的保护。目前,国内外文献中对在珊瑚礁地形上建设防浪建筑物的研究报道相对缺乏,这是因为:首先,这类建筑物常处于远海地区,易受到风暴潮等极端波浪事件的影响,而且用于建筑物辅助设计的现场观测数据往往比较缺乏;其次,珊瑚礁地形迥异于普通沙质海岸的地形,典型的珊瑚礁剖面存在陡峭的礁前斜坡(通常大于1:20)和水平礁坪,当极端波流作用时在礁坪上相对于沙质海岸会产生更强烈的波浪破碎和波流运动^[45];最后,对于我国人工岛礁而言,防浪建筑物一般建设在新填筑的礁坪上,工程建设周期短,地质条件相对薄弱,建成后在风暴潮等极端自然灾害及长期自然力(包括风、浪、流、潮)的侵蚀、掏蚀作用下更易发生局部基础失稳破坏。因此,传统的防浪建筑物设计标准已不再适用,亟须新开发适用于珊瑚礁地形的防浪建筑物的设计方法和工程规范来指导工程实践。

顶部越浪量是防浪建筑物设计的一个重要指标,国内外广泛应用的预测防浪建筑物越浪量的方法都是基于近岸缓坡地形得出的。欧盟的CLASH项目被认为是认识波浪越浪问题的一个重大突破^[46],该项目提供了一个由10 000多个案例组成的波浪越浪数据库,不少学者利用数据库中的数据进行分析,提出了预测越浪量的经验公式,但均未考虑珊瑚礁陡变地形上防浪建筑物的波浪越浪问题。珊瑚礁海岸防浪建筑物建造中所涉及

的水深与波高的关系、底坡坡度等问题均超出了现有规范中越浪量计算公式的适用范围^[46],针对珊瑚礁地形的相关规范我国正在制定当中。

对于珊瑚礁地形上防浪建筑物越浪量的估算,相关学者通过波浪水槽试验分别研究了规则波和不规则波在筑堤珊瑚礁上的传播过程,并分析了堤顶的越浪量^[47-48],发现入射波高、堤身干舷高度、防波堤在礁坪上的位置等因素是影响防波堤越浪量的主要因素,并提出了适用于预测珊瑚礁上直立式防波堤越浪量的经验公式。CHEN等^[49]基于不可压缩流体的Navier-Stokes方程结合大涡模拟(large eddy simulation, LES)分析了越浪量随入射波高、波浪周期、礁坪水深、礁前斜坡坡度、防波堤到礁缘的距离和防波堤堤顶宽度的变化规律,并提出了一种考虑更多因素的适用于珊瑚礁地形上直立式防波堤越浪量的预测公式:

$$\frac{Q}{\sqrt{gH_0^3}} = 0.15 \exp\left(-6.03 \frac{R_c}{H_0}\right) \left(\frac{H_0}{gT^2}\right)^{-1.07} \left(\frac{D}{W}\right)^{-1.13} s^{0.73} \quad (1)$$

式中: Q 为越浪量; g 为重力加速度; H_0 为入射波高; T 为波浪周期; D 为防波堤到礁缘的距离; R_c 为堤身干舷高度; W 为堤顶宽度; s 为礁前斜坡坡度。

防浪建筑物所受的波浪荷载是另一个重要的设计指标,文献^[50]对珊瑚礁地形上斜坡堤胸墙在不同水深和波浪条件下的水平力和浮托力进行了研究,发现胸墙的波浪力受波浪破碎后的堤前壅水、破碎波高和冲击水流的共同影响,胸墙水平力呈矩形分布,浮托力呈三角形分布。基于数值模拟的分析结果,综合考虑入射波高、周期、礁坪水深、礁前斜坡坡度、防波堤距礁缘的距离、堤顶宽度等影响因素,CHEN^[49]提出了预测珊瑚礁地形上防波堤水平波浪力的计算公式:

$$\frac{F_x}{\rho g H_0^2} = 0.10 \left(\frac{h_r}{H_0}\right)^{0.81} \left(\frac{H_0}{gT^2}\right)^{-0.50} \left(\frac{D}{W}\right)^{-0.02} s^{0.13} \quad (2)$$

式中: F_x 为水平波浪力; ρ 为海水密度; h_r 为礁坪水深。FANG等^[51]通过一系列物理模型试验和基于Navier-Stokes方程的数值模拟,研究了孤立波在岸礁地形上的传播以及破碎波对礁坪上直立海堤的冲击,并提出了防波堤最大波压力的预测公式。

LIU等^[52]在物理模型试验中通过在礁坪上设置呈正弦函数分布的类似于潜堤的沙坝地形,使用基于 Boussinesq 方程的数值模型研究了波浪在岸礁上的布拉格反射,发现该地形可以有效降低波浪岸滩爬高,并证实波浪在礁坪上发生了布拉格共振效应。

总之,岛礁上防浪建筑物的设计方法在国际上无先例可循,我国学者对该问题的研究有助于填补国内外相关领域设计规范的空白,优化结构设计以降低施工成本,为国家海岸工程建设提供技术积累^[53-54]。

2 结论与展望

南海岛礁是我国宝贵的陆地资源,也是建设“海上丝绸之路”和维护海洋权益的关键节点,关乎国家主权核心利益。近年来,随着我国“一带一路”和“海洋强国”战略的稳步推进,我国在南海进行了一定规模的填礁成陆工程。岛礁水沙动力学不仅能为远海复杂动力环境下的海岸线演变、生态环境保护等问题提供一定的理论参考,还能为海岸防护以及岛礁相关工程建设提供一定的决策依据。本文首先按照从大到小的尺度分析了珊瑚礁海岸波、流作用下的水动力特性及其对珊瑚礁生态健康的影响;随后,阐释了低频长波的产生与共振机理及其对海岸防灾减灾的重要性;再次,揭示了珊瑚砂在理化性质和运动特性上不同于陆源石英砂的重要特征,介绍了全球气候变化影响下珊瑚砂的输运和珊瑚砂岛的演变规律;最后,阐述了以珊瑚礁上防浪建筑物的越浪量和所受波浪荷载为代表的设计指标的预测方法。

今后我国对岛礁水沙动力学的研究可侧重于以下几个方面:

1) 珊瑚礁海岸波、流作用下的水动力特性:针对珊瑚礁海岸水沙动力特性及其对近岸生态系统影响的深入研究需要涉及环境、生物、地质、工程等多个学科领域的知识,未来需要开展更多跨学科的交叉融合研究。

2) 珊瑚礁海岸低频长波运动:未来可考虑基于现有的研究成果研发珊瑚礁海岸洪水灾害预警系统,建立针对南海珊瑚岛礁的现场水文数据集,

并以此为依托采用基于数据驱动的方法提供更快速、准确的洪水预报。

3) 珊瑚砂运动与珊瑚砂岛演变:南海珊瑚岛礁地处远海,由于现场资料获取困难,相关文献资料匮乏,关于砂岛水文条件、地貌特征等方面的资料积累甚少,因此有必要增加现场资料的获取,为其动力学研究提供基础验证数据。

4) 波浪与防浪建筑物的相互作用:尽管波浪是影响珊瑚礁海岸水动力过程的最重要因素,但在珊瑚礁环境中还存在潮汐、风、海流等因素的影响。因此,未来可在风、浪、流等复杂海洋动力因素共同作用下进一步研究筑堤工程活动影响下珊瑚礁海岸的水沙动力问题。

[参考文献]

- [1] MONISMITH S G. Hydrodynamics of coral reefs [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2007, 39: 37-55. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092125.
- [2] WOODROFFE C D. Coasts: form, process and evolution [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [3] OLIVER J K, BERKELMANS R, EAKIN C M. Coral bleaching in space and time [M]//Ecological Studies. Cham: Springer International Publishing, 2018: 27-49. DOI: 10.1007/978-3-319-75393-5_3.
- [4] BURKE L, REYTAR K, SPALDING M, et al. Reefs at risk revisited [M]. Washington DC: World Resources Institute, 2011.
- [5] EAKIN C M, SWEATMAN H P A, BRAINARD R E. The 2014—2017 global-scale coral bleaching event: insights and impacts [J]. Coral Reefs, 2019, 38(4): 539-545. DOI: 10.1007/s00338-019-01844-2.
- [6] 姚宇. 珊瑚礁海岸水动力学问题研究综述[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 139-152. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.014.
YAO Yu. A review of the coral reef hydrodynamics [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 139-152. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.014.
- [7] LOWE R J, FALTER J L. Oceanic forcing of coral reefs [J]. Annual Review of Marine Science, 2015, 7: 43-66. DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015834.
- [8] GREEN R H, LOWE R J, BUCKLEY M L. Hydrodynamics of a tidally forced coral reef atoll [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(10): 7084-7101. DOI: 10.1029/2018jc013946.
- [9] GRIMALDI C M, LOWE R J, BENTHUYSEN J A, et al. Wave and tidally driven flow dynamics within a coral reef atoll off northwestern Australia [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2022, 127(3):

- e2021JC017583. DOI: 10.1029/2021jc017583.
- [10] YAO Y, HE W, DENG Z, et al. Laboratory investigation of the breaking wave characteristics over a barrier reef under the effect of current [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2019, 61(2): 210–223.
- [11] 姚宇, 袁万成, 杜睿超, 等. 岸礁礁冠对波浪传播变形及增水影响的实验研究 [J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(6): 19–25. DOI: 10.11978/2015031.
- YAO Yu, YUAN Wancheng, DU Ruichao, et al. Experimental study of reef crest's effects on wave transformation and wave-induced setup over fringing reefs [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(6): 19–25. DOI: 10.11978/2015031.
- [12] FERRARIO F, BECK M W, STORLAZZI C D, et al. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3794. DOI: 10.1038/ncomms4794.
- [13] YOUNG I R. Wave transformation over coral reefs [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94 (C7): 9779–9789. DOI: 10.1029/jc094ic07p09779.
- [14] LOWE R J, FALTER J L, MONISMITH S G, et al. Wave-driven circulation of a coastal reef-lagoon system [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, 39(4): 873–893. DOI: 10.1175/2008jpo3958.1.
- [15] FALTER J L, ATKINSON M J, MERRIFIELD M A. Mass-transfer limitation of nutrient uptake by a wave-dominated reef flat community [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49 (5): 1820–1831. DOI: 10.4319/lo.2004.49.5.1820.
- [16] LOWE R J, SHAVIT U, FALTER J L, et al. Modeling flow in coral communities with and without waves: a synthesis of porous media and canopy flow approaches [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53 (6): 2668–2680. DOI: 10.4319/lo.2008.53.6.2668.
- [17] FINNIGAN J. Turbulence in plant canopies [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000, 32: 519–571. DOI: 10.1146/annurev.fluid.32.1.519.
- [18] ASHER S, SHAVIT U. The effect of water depth and internal geometry on the turbulent flow inside a coral reef [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(6): 3508–3522. DOI: 10.1029/2018jc014331.
- [19] DAVIS K A, PAWLAK G, MONISMITH S G. Turbulence and coral reefs [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2021, 13: 343–373. DOI: 10.1146/annurev-marine-042120-071823.
- [20] LOWE R J, KOSEFF J R, MONISMITH S G, et al. Oscillatory flow through submerged canopies: 2. canopy mass transfer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C10): C10017. DOI: 10.1029/2004jc002789.
- [21] HOEKE R K, MCINNES K L, KRUGER J C, et al. Widespread inundation of Pacific Islands triggered by distant-source wind-waves [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 128–138. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.06.006.
- [22] MERRIFIELD M A, BECKER J M, FORD M, et al. Observations and estimates of wave-driven water level extremes at the Marshall Islands [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41 (20): 7245–7253. DOI: 10.1002/2014gl061005.
- [23] BEETHAM E, KENCH P S. Predicting wave overtopping thresholds on coral reef-island shorelines with future sea-level rise [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3997. DOI: 10.1038/s41467-018-06550-1.
- [24] LONGUET HIGGINS M S, STEWART R W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beats" [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1962, 13 (4): 481–504. DOI: 10.1017/S0022112062000877.
- [25] JANSSEN T T, BATTJES J A, VAN DONGEREN A R. Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(8): 1–14. DOI: 10.1029/2002jc001515.
- [26] SYMONDS G, HUNTLEY D A, BOWEN A J. Two-dimensional surf beat: long wave generation by a time-varying breakpoint [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87 (C1): 492–498. DOI: 10.1029/jc087ic01p00492.
- [27] BALDOCK T E. Dissipation of incident forced long waves in the surf zone: implications for the concept of "bound" wave release at short wave breaking [J]. *Coastal Engineering*, 2012, 60: 276–285. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.11.002.
- [28] PÉQUIGNET A C N, BECKER J M, MERRIFIELD M A, et al. Forcing of resonant modes on a fringing reef during tropical storm Man-Yi [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36 (3): L03607. DOI: 10.1029/2008GL036259.
- [29] POMEROY A, LOWE R, SYMONDS G, et al. The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117 (C11): C11022. DOI: 10.1029/2012jc008310.
- [30] BECKER J M, MERRIFIELD M A, YOON H. Infragravity waves on fringing reefs in the tropical Pacific: dynamic setup [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(5): 3010–3028. DOI: 10.1002/2015jc011516.
- [31] NING Y, LIU W J, ZHAO X Z, et al. Study of irregular wave run-up over fringing reefs based on a shock-capturing Boussinesq model [J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 84: 216–224. DOI: 10.1016/j.apor.2019.01.013.

- [32] KENCH P S, SMITHERS S G, MCLEAN R F. Rapid reef island formation and stability over an emerging reef flat: Bewick Cay, northern Great Barrier Reef, Australia[J]. *Geology*, 2012, 40(4): 347–350. DOI: 10.1130/g32816.1.
- [33] 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.
SUN Zongxun. Engineering properties of coral sands in Nansha Islands[J]. *Tropic Oceanology*, 2000, 19(2): 1–8.
- [34] FORD M R, KENCH P S. The durability of bioclastic sediments and implications for coral reef deposit formation[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(3): 830–842. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2011.01281.x.
- [35] MADSEN O S, GRANT W D. Sediment transport in the coastal environment [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1976.
- [36] SMITH D A, CHEUNG K F. Initiation of motion of calcareous sand[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(5): 467–472. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130: 5(467).
- [37] DE KRUIJF M, SLOOTMAN A, DE BOER R A, et al. On the settling of marine carbonate grains: review and challenges [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 217: 103532. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103532.
- [38] POMEROY A W M, LOWE R J, GHISALBERTI M, et al. Mechanics of sediment suspension and transport within a fringing reef [C]//the Proceedings of the Coastal Sediments 2015. San Diego: World Scientific, 2015. DOI: 10.1142/9789814689977_0086.
- [39] STORLAZZI C D, ELIAS E, FIELD M E, et al. Numerical modeling of the impact of sea-level rise on fringing coral reef hydrodynamics and sediment transport [J]. *Coral Reefs*, 2011, 30: 83–96. DOI: 10.1007/s00338-011-0723-9.
- [40] BRAMANTE J F, ASHTON A D, STORLAZZI C D, et al. Sea level rise will drive divergent sediment transport patterns on fore reefs and reef flats, potentially causing erosion on atoll islands[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(10): e2019JF005446. DOI: 10.1029/2019jF005446.
- [41] FORD M R, KENCH P S. Spatiotemporal variability of typhoon impacts and relaxation intervals on Jaluit Atoll, Marshall Islands [J]. *Geology*, 2016, 44(2): 159–162. DOI: 10.1130/g37402.1.
- [42] STORLAZZI C D, GINGERICH S B, VAN DONGEREN A, et al. Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding [J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaap9741. DOI: 10.1126/sciadv.aap9741.
- [43] TUCK M E, KENCH P S, FORD M R, et al. Physical modelling of the response of reef islands to sea-level rise [J]. *Geology*, 2019, 47(9): 803–806. DOI: 10.1130/g46362.1.
- [44] MASSELINK G, MCCALL R, BEETHAM E, et al. Role of future reef growth on morphological response of coral reef islands to sea-level rise [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(2): e2020JF005749. DOI: 10.1029/2020jF005749.
- [45] GOURLAY M R. Wave set-up on coral reefs: 1. set-up and wave-generated flow on an idealised two dimensional horizontal reef [J]. *Coastal Engineering*, 1996, 27(3–4): 161–193. DOI: 10.1016/0378-3839(96)00008-7.
- [46] VAN DER MEER J W, VERHAEGHE H, STEENDAM G J. The new wave overtopping database for coastal structures[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(2): 108–120. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.03.012.
- [47] 陈松贵, 王泽明, 张弛, 等. 珊瑚礁地形上直立式防浪堤越浪大水槽实验[J]. *科学通报*, 2019, 64(增刊2): 3049–3058. DOI: 10.1360/N972018-01195.
CHEN Songgui, WANG Zeming, ZHANG Chi, et al. Experiment on wave overtopping of a vertical seawall on coral reefs in large wave flume [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(sup 2): 3049–3058. DOI: 10.1360/N972018-01195.
- [48] LIU Y, LI S W, CHEN S G, et al. Random wave overtopping of vertical seawalls on coral reefs [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 100: 102166. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102166.
- [49] CHEN S G, YAO Y, GUO H Q, et al. Numerical investigation of monochromatic wave interaction with a vertical seawall located on a reef flat [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 214: 107847. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107847.
- [50] 陈松贵, 陈汉宝, 赵洪波, 等. 珊瑚礁地形上胸墙波浪力大水槽试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 65–70. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.010.
CHEN Songgui, CHEN Hanbao, ZHAO Hongbo, et al. Experimental study of wave forces on the seawall of coral reef in large wave flume [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(1): 65–70. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.010.
- [51] FANG K Z, XIAO L, LIU Z B, et al. Experiment and RANS modeling of solitary wave impact on a vertical wall mounted on a reef flat [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 244: 110384. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110384.
- [52] LIU W J, LIU Y S, ZHAO X Z, et al. Numerical study of irregular wave propagation over sinusoidal bars on

- the reef flat[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 121: 103114. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103114.
- [53] 常留红, 汤薇, 肖政, 等. 波浪作用下空心块体堤身结构稳定性和消浪特性试验研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(3): 24–31. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.03.003.
- CHANG Liuhong, TANG Wei, XIAO Zheng, et al. Experimental study on structural stability and wave suppression characteristics of hollow block dike under wave action[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 18(3): 24–31. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.03.003.
- [54] 游涛, 赵利平, 程永舟, 等. 波浪在岸滩上的变形模拟[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 13(3): 65–69, 75.
- YOU Tao, ZHAO Liping, CHENG Yongzhou, et al. Numerical simulation of wave transformation along the shore slope[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2016, 13(3): 65–69, 75.

A review of water-sediment dynamics around the reef islands

YAO Yu^{1,2}, ZHONG Xiang¹

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Coral reefs are extensively distributed in shallow waters of tropical and subtropical regions, and they are recognized as the natural barriers along coastlines. In recent years, due to the impacts of global climate change and human activities, coral reefs worldwide have been undergoing large-scale bleaching and degradation. A complete comprehension of the water-sediment dynamic processes of reef islands is a prerequisite for further investigating the physical, chemical and biological processes within the reef environment. The coral reef islands situated in the South China Sea hold vital land resources and are intricately linked to China's core interests. Additionally, they play a pivotal role in establishing the Maritime Silk Road and safeguarding maritime rights and interests. At present, the safety of anti-wave facilities in the South China Sea under the influences of extreme climate events such as typhoons need the support from relevant water-sediment dynamic theories. In this study, based on a comprehensive literature review, the state-of-the-art research advances on water-sediment dynamics around the reef islands are summarized in view of the following four aspects: the hydrodynamic characteristics and ecological well-being of reef system under combined action of wave and current, the low-frequency wave motions around the reef coasts, along with the coastal disaster prevention and mitigation, the movement of coral sand and the evolution of reef islands, the interaction between waves and breakwaters, as well as the defense of reef islands. Subsequently, this study proposes future research directions for the above four topics, respectively. It aims to provide the reference for future relevant research on water-sediment dynamics around the reef islands.

Key words: reef island; water wave; water-sediment dynamics; coral sand; coastal engineering

Manuscript received: 2023-04-27; **revised:** 2023-05-16; **accepted:** 2023-05-22

Foundation item: Project (2021YFC00502) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (51979013) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: YAO Yu (1982—) (ORCID: 0000-0002-0089-9568), male, professor, research interest: coral reef water-sediment dynamics. E-mail: yaoyu@csust.edu.cn

(责任编辑: 石月珍; 校对: 赵冰; 英文编辑: 汪进婷)