珊瑚礁地质稳定性研究现状

安振振, 李广雪, 马妍妍, 徐继尚, 丁　咚, 张　洋, 闵建雄, 王丽艳

(中国海洋大学 海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 为探究珊瑚礁稳定性的研究现状, 对影响礁体稳定性的诸多因素如礁体结构、地形地貌、波浪、潮汐、潮流、风诸如热带气旋和风暴、海流等进行总结, 结果表明以上诸多因素可在不同程度上决定或影响礁体稳定性。同时指出现阶段礁体稳定性研究所需注意的问题, 其一是涉及珊瑚礁地质稳定性的礁体结构、地貌形态的研究尚少, 需合理利用多波束测深仪、高分辨率多道地震探测系统、钻探及AUV、三维实时声学成像声呐技术获取礁体地形、地层及剖面形态, 并借助 GIS 技术对滑坡等失稳地带进行圈定, 其二是潟湖区、礁体边坡等区域的稳定性研究缺乏, 需引入极限平衡法评估礁体边坡、泻湖等区域的稳定性, 且需考虑波浪、潮汐引入的孔隙水压力、渗流力的影响。通过综述礁体稳定性研究现状及未来礁体稳定性研究的方向的展望, 以期为珊瑚礁体上的工程建设及未来的珊瑚礁地质稳定性研究提供些许启示。

关键词: 珊瑚礁; 浅地层结构; 地质稳定性; 水动力条件

中图分类号: P737.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)03-0113-08

DOI: 10.11759/hykx20170119002

自 19 世纪中叶达尔文提出珊瑚礁形成演化的科学推断后, 涉及珊瑚礁的研究如雨后春笋般出现, 围绕珊瑚礁地貌、地层结构、资源、海平面及环境变化相关的研究层出不穷[1-3], 珊瑚礁在环境调控、资源储藏及海洋经济方面的价值逐渐被众多海洋学家认同, 与珊瑚礁相关的研究也被列入全球变化研究的多个核心项目中。珊瑚礁的稳定性, 作为珊瑚礁工程地质研究的核心问题, 也是岛礁建设面临的首要问题, 逐步被提上议事章程。如何将礁体稳定性纳入到工程部署中, 关乎礁体工程的安全及珊瑚礁的可持续开发。本文拟对近年来关于珊瑚礁稳定性影响因素的研究进行总结, 并指出限制珊瑚礁稳定性研究的问题及相关建议。

1　珊瑚礁的概念与分布

珊瑚礁被称为“热带海洋沙漠中的绿洲”, 主要由造礁珊瑚死后的残肢遗骸经生物、成岩作用堆积而成[4-6], 通常在水温 18~35℃、水深 3~18 m, 盐度范围 27~40 的水体中发育良好。当然, 不同海域有差异, 如我国南海海域全年水温变化、盐度高于海南岛周边海域, 不过, 各海域的珊瑚礁均在低潮线以下发育较好, 低于此水深, 珊瑚礁的发育将受抑制。依据礁脊与海岸间的关系可将珊瑚礁划分为紧邻海岸的岸礁、离岸并与海岸间存在潟湖的堡礁、珊瑚礁环绕中心潟湖分布的环礁[7]。3 种类型的珊瑚礁具有相似的分带特征, 以岸礁为例, 自岸向海可划分为礁坪、礁脊和礁前斜坡。礁坪, 系从海岸延伸到礁脊的浅水区, 低潮时可部分或全部露出水面; 礁脊远离海岸, 属于礁前斜坡与礁坪的分界, 为水下隆起区; 礁前斜坡是处于向海一侧的陡峭区; 礁盘是礁体顶部形成的礁平台, 包括以上三者, 剖面形态由于礁脊的存在呈“盘”形, 故为礁盘。

现代珊瑚礁主要分布于南北回归线间的热带海洋中, 印度洋-太平洋约占 91.9%, 以环、堡礁为主; 大西洋和加勒比海仅 7.6%, 以岸礁为主。中国珊瑚礁分布集中, 华南大陆沿岸、台湾沿岸及海南岛周边海域发育大量岸礁, 而南海环礁广布[8]。

2　珊瑚礁浅部地层特征

珊瑚礁浅部地层是探究礁体工程地质的主要对象, 也是影响礁体稳定性的关键区域。自上而下可划分为全新统生物碎屑砂砾层和礁灰岩层[1], 这类地

收稿日期: 2017-01-19; 修回日期: 2017-02-16

基金项目: 中国地质调查局大陆架科学钻探项目(GZH201100202)

[Foundation: Continental Shelf Drilling Program, No.GZH201100202]

作者简介: 安振振(1991-), 男, 山东临沂人, 在读硕士, 主要从事海洋沉积方面的研究工作, 电话: 0532-66782542, E-mail: deposition_an@126.com; 李广雪, 通信作者, E-mail: estuary@ouc.edu.cn

层在永兴岛[9]、雷州半岛[10]、澳大利亚大堡礁[11]及西太平洋帕劳群岛[1]等珊瑚礁广泛分布。

全新统生物碎屑砂砾层是由原生或次生珊瑚礁岩、贝壳、珊瑚等经生物、水动力作用形成的未胶结、弱胶结的松散沉积层，胶结程度自上而下由松散至中密[12]，珊瑚碎屑多，砂、砾均有，分选差，磨圆度低，主要分布于礁坪、潟湖，自外礁坪至泻湖，砂、砾粒径逐渐变小[13]，珊瑚屑、珊瑚藻屑含量递减，生物壳体增多，地层总体向泻湖进积[1]。外礁坪多为原生礁，砾块大，砾间充填碎屑，珊瑚碎片丰富，胶结程度高，胶结物常为泥晶灰岩，整体稳定性较好；中礁坪表层为砾块层，下伏砾砂屑，主要为珊瑚、藻类和软体动物碎屑组成的砂、砾组分，砾块被珊瑚藻固结；内礁坪主要堆积粗砂、中砂至细砂，夹较多珊瑚断枝和礁灰岩碎块；潟湖一般沉积中细砂，珊瑚断枝少见，主要由珊瑚碎屑构成，欠固结状态[1, 13-14]。

礁灰岩是由原地生长的珊瑚群死亡后骨架经地质作用形成的石灰岩，常出露于礁脊、礁前斜坡、礁坪外侧[15]，不规则块体，块体间是由鹿角珊瑚及珊瑚藻胶结成的骨架结构，胶结物为亮晶方解石，顶部常见风化痕迹[13]，胶结程度随深度增加变强。礁灰岩层中普遍夹松散砂砾层及不整合面[16]，常出现孔洞及溶洞[14]。

生物碎屑层疏松、多孔、性脆、硬度、强度低，形状不规则，内摩擦角比石英砂大，同时随围压增大而减小，密实状态下易发生剪缩；礁灰岩通常结构致密，块状构造，整体性强，密度大于前者[17]，抗压、抗拉强度随礁体埋深的增大而增强，为碎裂结构岩体。生物碎屑层、礁灰岩的分布及其胶结、松散程度是制约礁体稳定性，决定礁前斜坡至泻湖区地层发育的内因。

3 珊瑚礁稳定性的影响因素

稳定性是珊瑚礁地质工程的研究重点，尤其是珊瑚礁上部为松散的生物碎屑层，下部为礁灰岩的地层特征，使人们对珊瑚礁的稳定性有着诸多质疑，在进行工程部署和规划中，通常将稳定性的考量放在首要位置。研究表明，礁体结构、地貌特征、水动力作用、沉积环境对珊瑚岛(礁)发育、地层建造、地貌演化意义重大，是影响礁体稳定性十分重要的因素。

3.1 礁体结构、地貌特征对珊瑚礁稳定性的影响

珊瑚礁的礁体结构、地貌是抵御外力、决定珊瑚礁稳定性的主因。礁体剖面似阶梯状或宝塔结构[18]，该结构的地质体整体稳定[19]，礁体自上而下愈发宽阔，土体不易剪切、滑移[10]。但礁体边坡应力会因载荷增大或地震而增大，引发滑移乃至边坡失稳。孙宗勋等[20]利用非线性弹性 E-v 本构模型探究了永暑礁地基的变形情况，发现 200 kPa 的荷载在边坡产生的拉应力难以产生大于 1 cm 的水平位移，当增大荷载使边坡水平位移大于等于 1.8 cm 时，则引发礁灰岩结构面滑移；Guo 等[21]利用 Geostudio 软件模拟了礁体在地震作用下的剪切与形变，指出自重状态下礁前斜坡的安全系数为 1.993，但该值会因地震强度持续增大而降低并最终趋稳，造成礁体斜坡失稳。目前，探究礁体结构对礁体稳定性的研究较少，借助岩土工程模拟方法及评测斜坡稳定性的软件诸如 GEO-SLOPE，对评判礁体稳定性具有一定意义。

礁体的岩盆结构也利于礁体的稳定。自外礁坪至内礁坪，岩性由礁灰岩转为生物碎屑岩，胶结程度减弱，整体上构成了以外礁坪为盆沿，中、内礁坪为盆中的岩盆结构。由于盆沿的原生礁灰岩结构紧密，可促使阶地及礁前斜坡抵御强水动力，防护岩盆内松散沉积层、珊瑚礁整体的稳定[9]，该结构在雷州半岛、永暑礁等地较常见。

礁脊受热带风暴的影响多沉积大块卵石或发育原生礁体[22]，消浪显著，直接影响沉积物在礁盘上输运的距离及其地层的侵蚀度。在礁脊不发育的礁体上，海水可快速灌入礁坪，强烈冲刷礁坪底床，由于中、内礁坪的沉积物疏松，强水动力可造成内礁坪、潟湖边缘的地层滑塌，澳大利亚鹦鹉岛处的珊瑚礁[23]即为此地貌；对发育礁脊的礁体而言，礁脊可抵御强浪、流输入礁坪，增强波浪的破碎和高频波的产生，即使有水流越过礁脊，也难以携带粗粒物质远途输运，对礁坪上的地层建造、礁体稳定性有积极作用，该地貌在大堡礁[24]、永暑礁[14]均有分布。姚宇等[25]利用发育礁冠的岸礁模型探究礁脊对波浪破碎及礁坪增水的影响，指出当礁脊存在时，礁坪区的增水呈量级增加，且增强礁坪边缘波浪破碎和高频波的生成，显著提高礁坪底床的稳定。但由于给定入射波况和礁脊水位条件的拟合公式可能会引入伪自相关，该方法有待改良。

礁坪深度、长度及底床粗糙度可耗散水动力能量，对珊瑚礁的稳定性也颇具意义。其中，礁坪深度是耗散波能的决定因素，Harris 等[26]利用放置在澳大利亚一树礁背风坡礁坪区和毗邻的砂裙区的压力传

感器获取了波浪数据，结合模拟的波能数据，指出当礁坪水深小于 0.5 m 时，入射波在传播到礁后砂裙前几于礁坪耗尽，难以侵蚀礁坪地层，即使在极高潮阶段，入射波能够到达礁后区，也仅有小于等于1%的波浪能输运沉积物；礁坪长度是影响波浪破碎的次因，同底床粗糙度一道影响波浪在礁体上的传输距离，据国外资料[27]知，由于礁坪底床主要为造礁珊瑚碎屑，底摩擦系数约为平缓沙质海滩的 10 倍以上，严重损耗波能；礁盘形状也能影响礁体地层的建造，Mandlier 等[28]通过模拟波浪在不同礁盘形状上传播，指出椭圆、圆形的礁体可显著增强波浪的辐聚，保留礁坪底床沉积，促进原地岛礁的发育，对岛礁的稳定性极重要，窄线型礁盘不利于波浪的辐聚，沉积物在波浪输运下更易越过背风坡离礁疏散，沉积于泻湖区；南沙群岛的珊瑚礁礁盘多为椭圆形，孙宗勋等[29]即认为椭圆形礁体可同季风、盛行波浪等方向对应，能减小礁缘与波向线的夹角，进而减小波浪对礁体的破坏。

礁脊同礁坪的相对高差可影响礁坪增水，进而影响波浪冲蚀礁坪地层，礁前斜坡的坡度可影响波浪破碎程度、位置。据此，笔者认为礁脊与礁坪的高差和礁前斜坡坡度间的比例可影响波浪冲击珊瑚礁边缘、礁坪地层，使礁体失稳。事实上已有利用土工试验来探究礁前斜坡坡度影响波浪破碎类型、位置和宽度的报导[30]，但其忽略了礁脊的存在。选择合适的入射波波高来探究该比例对波浪、对礁体稳定性的影响还有待探索。

3.2 波浪对珊瑚礁稳定性的影响

波浪在礁盘上的强度、传播距离对珊瑚礁地层、地貌演化乃至礁体稳定性极为重要[3]。在礁缘区，波浪冲击珊瑚枝，迫使礁体缩小，风暴期，波浪可破坏礁后珊瑚的结构[31]，影响地层发育，波浪还会将礁缘局部掏蚀成内凹地形，甚至引发边坡坍塌[32]；礁缘、外礁坪是波能损耗的主区，越过外礁坪的波浪通常难以输运背风坡的沉积物，唯有礁坪水深较大时，波浪可达泻湖区，引起泻湖边缘地层坍塌[33]。波浪对珊瑚礁的冲击引起的共振现象也会引发礁体边缘失稳[18]。

波浪在礁盘上的传播对礁盘沉积物的输运影响较大，不同位置的耗散程度也影响该区地层的建造。Lugo-Ferna´ndez 等[34]利用维京岸礁从礁前至礁后潟湖 70 h 的水深、潮流和波浪数据(20 min 的取样间隔)，模拟了波浪在该区不同位置的损耗程度，指出波能在礁前和礁脊间损耗 62%，礁前至潟湖间达 90%，换言之，自礁缘至潟湖区，波浪输运能力越来越低，对礁体的地层建造贡献逐渐减弱，这可以部分解释地层自礁坪向潟湖区进积；珊瑚砂相较普通石英砂更易起动，随波浪迁至他处，影响礁体发育。荀涛等[35]利用西沙群岛的 4 组粒径砂样，通过水工试验探究了接近原型近岸下珊瑚砂的起动特征，结果表明水深 5 cm 时，0.26 m/s 的波速就可起动表层细砂粒，波速增至 0.5 m/s 时，底床砂全面启动，珊瑚砂大量冲刷外移，贝壳屑、砾石等粗颗粒外露，水深增至 30 cm 时，起动珊瑚砂的波速增至 0.657 m/s，总体来看，粗颗粒起动波速高于细颗粒.由此可见，珊瑚砂易迁移，增大了礁体珊瑚砂流失的风险，影响礁体地礁体稳定及地层演化。

然而，礁后地层多松散中、细砂，富含水分，而松散颗粒饱水沉积物在波浪作用下，颗粒间的有效应力趋小，土体载荷因孔隙水压增大表现为液化状态，在持续规律的波浪作用下，礁坪等弱胶结区的地层可能会滑塌。现今，波浪对海底底床液化的研究虽多，关于礁坪乃至泻湖边缘区等松散地层在波浪作用下的液化状态，尚需更多的研究支持。

3.3 潮汐、潮流对珊瑚礁稳定性的影响

潮汐、潮流周期性的往复也能影响珊瑚礁稳定性、地层发育。潮流规律性的冲刷可强烈掏蚀边坡地层，加之与波浪耦合，常在该区塑造内凹的海蚀洞穴，造成边坡失稳[32]，由波浪在该处冲蚀出的槽沟在潮流作用下充分发育，边坡部分原生礁遭到侵蚀；相比于高潮期，低潮时波浪易在礁前斜坡破碎，致外礁坪增水，引发向内礁坪、泻湖的压力梯度，产生向潟湖流动的波浪流[36]，其速度在低潮期要高于高潮期，剧烈冲刷海底，破坏礁体地层，甚而造成内礁坪底床失稳；Storlazzi 等[37]指出涨潮期，海水由夏威夷岸礁的外礁坪向内输运，风成波的发育受水深限制，对底床作用小，对底床稳定性影响弱；高潮期，水深增加，更多的深水波在礁坪传播，此时信风成波可在礁坪上形成，促进沉积物在礁坪上的输运，加剧地层的侵蚀；退潮期，随着水深减小，深水波对底床剪应力增大，剧烈侵蚀底床，内礁坪地层受蚀严重，礁坪的悬浮物随水体离岸输运[38]；Lugo-Ferna′ndez 等[34]根据维京岛岸礁的实测资料模拟了该区潮流作用下的波浪耗散程度，指出低潮期相比于高潮期，波浪在礁前和礁脊处的耗散程度要高于后者 15%左右，即使礁前至潟湖区的损耗也要高 6%；潮差大小对礁

体地层的侵蚀程度、稳定性的影响也有差异，强潮汐在涨潮阶段，波浪强度更大，对礁体地层剧烈冲蚀，对底床稳定性的破坏大，落潮阶段，由于深度大，产生的深水波可强烈剪切底床，甚而破坏内礁坪边缘地层，土体滑塌。

笔者认为潮汐能促进礁体地层中的孔隙水发生渗流，引发松散的中、内礁坪区滑塌，可造成礁体失稳。研究指出，一些近岸区由于海底土体的上覆水体随潮差变化而变化，易引起超孔隙水压力升高，在低潮期，孔隙水因压力差的影响，发生渗流。由于内礁坪的地层逐渐向泻湖进积，胶结程度弱，沉积物松散，因而在潮汐作用下，应该易发生渗流，引发滑塌等事件，造成礁体失稳，相关结论有待更多的研究支持。

3.4 风(包括热带气旋和风暴)、海流对珊瑚礁稳定性的影响

风可影响礁盘物质的输运与沉积，影响珊瑚岛礁的地层建造、地貌平衡及礁体稳定[37]。通常，风驱动水体促进珊瑚礁的演化，盛行风驱动的波浪、流带来饵料，促进礁脊迎风坡造礁珊瑚的生长、原生礁地层的建造，提升礁脊的消浪作用及礁体稳定[39]；礁坪区低潮时裸露的礁体，迎风面在高频强风作用下，成岛率增加，礁盘稳定性增强；在潟湖坡上缘，季风风浪利于珊瑚及礁栖生物硬体的堆积，促进礁体地层的发育[39]。不过，在高频的热带气旋影响下波浪强烈侵蚀礁盘底床，破坏礁体结构及珊瑚岛[40]，甚至引发内礁坪、潟湖坡上缘地层垮塌。Ryan 等[41]根据大堡礁的 11 处钻孔，指出外礁坪在 6 400~1 600 a BP 的近 5 000 年沉积间断与中、晚全新世的强气旋剥蚀礁体相关，并在原地形成 1.2 m 的沉积空间，而由强气旋产生的波浪将剥离掉的大型卵石、粗粒物质输至礁坪，形成沙洲、沙波；Orama 气旋重新塑造了塔卡波托环礁迎风面的海岸线及岛屿地貌，将礁缘外坡的沉积物输至礁坪及礁体内部，为其带来 62%的沉积物质[42]；Tomas 气旋通过磨损、侵蚀塔韦乌尼岛岸礁礁体边坡、外礁坪区地层，产生大量的碎块，连同暴露于礁体边坡的大块卵石、礁坪底床先前存在的卵石(约 20%)被气旋输至珊瑚礁内部，并引起海滩向陆蚀退，最大可达 11.5 m 左右[43]。风暴对礁体稳定性的影响更甚，Harmelin-Vivien 等[44]指出风暴可将更粗粒级的礁岩块、砾石和生物骨壳碎屑等粗颗粒物质输至内礁坪甚至泻湖，促进岛礁、点礁地层的建造，Storlazzi 等[33]利用夏威夷摩洛凯岸礁的原位风场数据模拟，指出风暴用 5%的信风作用时间便可产生礁区全年 63%的沉积通量，极大促进了该地礁区地层的发育。因此，强风虽在短期内破坏珊瑚礁的岸线、结构，但长远来看，对珊瑚岛的建造、稳定性的维系也有积极意义。

海流可促进珊瑚礁的建造，利于礁体的稳定性。珊瑚礁海域的沿岸流、边缘陡坡处的上升流及其他形式的洋流可为珊瑚虫带来饵料，促进礁体地层发育[45]；Brinkman 等[46]对澳大利亚大堡礁陆架上沿岸流的研究发现，沿岸流能够阻止源于河流羽状流对大堡礁在陆架部分的冲刷，维系礁坪底床的稳定，强水动力事件如洪水常在珊瑚礁上形成粗细不均的混杂堆积，虽促进了地层的发育，同时也使新堆积成的礁体极易滑塌，洪期后，海流将细粒沉积物通过平流输送的形式运移他处，修复原地地貌，使礁体整体趋向稳定[47]；Carter 等[40]认为气旋过境期，大堡礁陆架上产生的风海流侵蚀海床，使礁体的局部底床失稳，悬移质则以平流方式运移至外陆架礁带外侧及礁内的沉积中心；气旋产生的海流还能影响平行海岸的沉积带的分布，控制礁体地层发育。

4 结论与展望

珊瑚礁的研究迄今有近两百年的历史，自达尔文对珊瑚礁类型及成因的科学推测，到目前对珊瑚礁生态、地形地貌、地层结构及礁体稳定性等复杂的多学科交叉研究，该研究领域已取得很大的进步，本文对珊瑚礁浅地层、地质稳定性的影响因素总结如下：(1)珊瑚礁浅地层主要为上部全新统生物碎屑砂砾层及下部的礁灰岩组成，自上而下、自泻湖至礁前斜坡，地层的胶结程度、抗压、抗拉强度逐渐增强，这种差异是决定礁前斜坡至泻湖区地层发育状况、礁体稳定性的内因。(2)礁体的阶梯或宝塔形、岩盆结构是维系礁体稳定性的重要因素，不过，在超荷载或地震作用下，礁前斜坡有可能发生剪切滑塌；礁脊、礁坪深度、长度、底床粗糙程度、礁体形状等地貌能通过削弱水动力强度影响礁体稳定性，此外，笔者认为礁脊与礁坪的高差同礁前斜坡坡度的比例关系也能制约礁体稳定性；波浪、潮汐、潮流、风(包括热带气旋、风暴)、海流通过对珊瑚礁地层的冲刷，改变珊瑚礁的地貌，在不同程度上影响珊瑚礁的整体稳定性。鉴于中、内礁坪区地层松散，沉积物趋于饱水的中、细砂，我们认为规则波可增大粒间孔隙水压的影响，导致底床液化，潮汐也能促进礁

坪地层中的空隙水发生渗流，在向泻湖倾坡处发生滑塌。

目前，围绕珊瑚礁地质稳定性的研究，成果显著，然而，还有诸多问题、角度应予以重视。(1)影响礁体整体稳定性的礁体结构尚未研究透彻，上文提到，珊瑚礁部分区域发育洞穴，局部地段内凹，如南海多处珊瑚礁在水深 10 m 内的礁缘边坡上就存在类似地貌，李决龙[48]据此提出了一种礁外坡整体内凹的“蘑菇型”地貌。然而，目前尚未发现类似地貌。由此，一些学者认为自然界中并不存在该地貌，因为波浪对礁体周围侵蚀的差异性难以塑造均一的负向水下地形，且礁前区域的钻探从未打穿珊瑚礁地层并触及海水。不过，这种判识方式值得商榷，加之珊瑚礁在海平面上升期间有向上增长的趋势，即使波浪作用有差异，也难以否定“蘑菇型”或“似蘑菇型”地貌的存在。而礁体局部内凹是既成的事实，对礁体的稳定性有着重要的影响，因此，加大对珊瑚礁礁体地貌、地层的研究，势在必行。如利用多波束水深测深仪、高分辨率多道地震探测系统、钻探等传统探测方式，可有效地获取大范围内凹礁体的剖面形态，识别剖面的滑塌地貌、杂乱反射及地层中的软弱层，从宏观上判别礁体的稳定状况，而且，通过获取的地震剖面数据，配套较为先进的GIS技术，还可对地层失稳地带进行圈定，规避工程中可能出现边坡失稳的区域。除此之外，近年来得到长足发展的AUV、三维实时声学成像声呐对于小范围内凹地段的地貌形态数据的精确采集有着独特优势，相较船载多波束系统，AUV 搭载多波束测深仪更加接近探测目标，减少了因水深增加带来的测量误差，获得高质量、高分辨率的水深数据，不过，其效率低下，仅为船载效率的 1/10[49]；三维实时声学成像声呐是实时精确记录珊瑚礁水下立体形态的个中翘楚，其在传统侧扫声纳基础上增加了图像的深度信息，可准确获取目标物距离、水平、垂直三维空间坐标[50]，能够在重度浑浊、强水动力条件、复杂地形的环境中精确探测，在水下三维结构物、堤坝、管道等检查中效果显著[51]。相较于传统方式，利用 AUV 搭载多波束及三维实时声学成像声呐，可以在礁体局部内凹地段获取更加精细的地貌特征。因此，在珊瑚礁地层、地貌的实际测量中，建议多种方式配套使用，大尺度的调查勘测中仍采用传统的拖曳式声学测量方式，而针对地形复杂，作业需求精度高的区域，可利用搭载多波束的AUV或三维实时成像声呐进行勘察，为判定礁体稳定性提供可靠地貌、水深数据。(2)针对珊瑚礁礁前斜坡、内礁坪、泻湖边坡稳定性的研究较少，前文多次提及此三处是影响珊瑚礁稳定性的关键区。因此，探究礁体斜坡处的稳定性对于评判珊瑚礁工程地质十分必要。笔者建议，在了解珊瑚礁现有的地质分带，土工特性、地形地貌及相关的水动力因素的基础上，可以采用应用较广的极限平衡法进行礁体边坡稳定性评估。具体包括创建礁体斜坡有限元模型、滑移模式，确定礁体地形参数、地层结构、土体强度、水动力等指标，引入 GEO-SLOPE 软件模拟不同风浪、地震事件下的稳定性。当然，考虑到波浪可增强土体的孔隙水压力，潮汐可增强土体内孔隙水的渗流力，在进行礁体边坡稳定性的评估时，还需要分析这些因素产生的应力值，如利用所研究的礁体相应区域的底床土进行适当的土工试验，结合相应的解析表达式和FLAC数值模拟等进行计算与分析。最终，通过以上模拟及实验得出的结果，预判出礁体稳定性的演化趋势，确定礁体失稳的概率。

参考文献:

[1] Kayanne H, Yamano H, Randall R H. Holocene sea-level changes and barrier reef formation on an oceanic island, Palau Islands, western Pacific[J]. Sedimentary Geology, 2002, 150(1): 47-60.

[2] 傅秀梅, 邵长伦, 王长云, 等. 中国珊瑚礁资源状况及其药用研究调查 Ⅱ. 资源衰退状况, 保护与管理[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4): 685-690.
Fu Xiumei, Shao Changlun, Wang Changyun, et al. Investigation on the status of coral reef resources and medicinal research in China Ⅱ. Resource decline status, protection and management[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(4): 685-690.

[3] Woodroffe C D. Reef-island topography and the vulnerability of atolls to sea-level rise[J]. Global and Planetary Change, 2008, 62(1): 77-96.

[4] Stoddart D R, Fosberg F R, Sachet M H. Ten years of change on the Glover's Reef cays[J]. Atoll Research Bulletin, 1982, 257(1): 256-259.

[5] Yamano H, Miyajima T, Koike I. Importance of foraminifera for the formation and maintenance of a coral sand cay: Green Island, Australia[J]. Coral Reefs, 2000, 19(1): 51-58.

[6] Perry C T, Spencer T, Kench P S. Carbonate budgets and reef production states: a geomorphic perspective on the ecological phase-shift concept[J]. Coral Reefs, 2008, 27(4): 853-866.

[7] Carter R W G, Woodroffe C D. Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics[M]. New York: Cambridge University Press, 1994.

[8] 张乔民, 余克服, 施祺, 等. 中国珊瑚礁分布和资源特点[C]//中国科协学会学术部. 提高全民科学素质, 建设创新型国家——2006 中国科协年会论文集 (下册). 北京: 科学出版社, 2006: 419-423.
Zhang Qiaomin, Yu Kefu, Shi Qi, et al. The distribution and resource characteristics of Chinese Coral Reefs[C]// China Association for Science and Technology. Improve Scientific Qualification of the Citizen, Build an Innovation-Oriented Country—the Collected Papers of China Association for Science And Technology in 2006 (the second volume). Beijing: Science Press, 2006: 419-423.

[9] 单华刚, 王稔. 珊瑚礁工程地质中的几个重要问题研究[C]//中国地质学会. 第六届全国工程地质大会论文集. 南宁: 中国地质学会, 2000: 361-365.
Shan Huagang, Wang Nian. Study on some important problem in coral reef engineering geology[C]// Geological Society of China. Collected Papers of the 6th Chinese Engineering Geology.Nanning: Geological Society of China, 2000: 361-365.

[10] 詹文欢, 詹美珍, 孙宗勋, 等. 雷州半岛西南部珊瑚礁礁体结构与场地稳定性分析[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(3): 151-154.
Zhan Wenhuan, Zhan Meizhen, Sun Zongxun, et al. Rock mass structure and ground stability of coral reefs in the southwestern Leizhou Peninsula[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(3): 151-154.

[11] Barrett S J, Webster J M. Holocene evolution of the Great Barrier Reef: Insights from 3D numerical modelling[J]. Sedimentary Geology, 2012, 265: 56-71.

[12] 严与平, 柯有青. 浅谈珊瑚礁工程地质特性及地基处理[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(U12): 47-49.
Yan Yuping, Ke Youqing. Discussion on the feathers of Coral Reefs' Engineering geology and their foundation treatment[J]. Resources Environment & Engineering, 2008, 22(U12): 47-49.

[13] Gischler E, Hudson J H. Holocene development of the Belize Barrier Reef[J]. Sedimentary Geology, 2004, 164(3): 223-236.

[14] 单华刚, 汪稔. 南沙群岛永暑礁工程地质特性[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 31-36.
Shan Huagang, Wang Nian. Youshu Reef engineering geology of Nansha Islands[J]. Marine Geology& Quaternary Geology, 2000, 20(3): 31-36.

[15] Shinn E A, Hudson J H, Halley R B, et al. Geology and sediment accumulation rates at Carrie Bow Cay, Belize[J]. The Atlantic Barrier Reef Ecosystem at Carrie Bow Cay, Belize, 1982, 1: 63-75.

[16] Woodroffe C D, Webster J M. Coral reefs and sea-level change[J]. Marine Geology, 2014, 352: 248-267.

[17] 赵焕庭, 宋朝景, 卢博, 等. 珊瑚礁工程地质研究的内容和方法[J]. 工程地质学报, 1997, 5(1): 21-27.
Zhao Huanting, Song Chaojing, Lu Bo, et al. The contents and methods of the research of coral reef engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(1): 21-27.

[18] Camoin G F, Montaggioni L F, Braithwaite C. Late glacial to post glacial sea levels in the Western Indian Ocean[J]. Marine Geology, 2004, 206(1): 119-146.

[19] Rosleff-Soerensen B, Reuning L, Back S, et al. Seismic geomorphology and growth architecture of a Miocene Barrier Reef, Browse Basin, NW-Australia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 29(1): 233-254.

[20] 孙宗勋, 詹文欢, 朱俊江. 南沙群岛永暑礁岩体稳定性评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 9-14.
Sun Zongxun, Zhan Wenhuan, Zhu Junjiang. Rockmass stability of Yongshu Reef, Nansha Islands[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(4): 9-14.

[21] Guo L, Zhan W, Xiong L, et al. Impacts of earthquake on atoll in Nansha Islands, South China Sea[C/OL]// Crockett R G M. EGU General Assembly Conference. [2016-12-21]. http://egu2016.eu/home.html.

[22] Kennedy D M, Woodroffe C D. Fringing reef growth and morphology: a review[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 57(3): 255-277.

[23] Solihuddin T, Collins L B, Blakeway D, et al. Holocene coral reef growth and sea level in a macrotidal, high turbidity setting: Cockatoo Island, Kimberley Bioregion, northwest Australia[J]. Marine Geology, 2015, 359: 60.

[24] Hopley D, Davies P J, Harvey N, et al. The geomorphology of Redbill Reef, central great barrier reef[C]// Gomez E D. The 4th International Coral Reef Symposium. Manila: Marine Science Center, University of the Philippines, 1981: 542-547.

[25] 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.
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.

[26] Harris D L, Vila-Concejo A, Webster J M, et al. Spatial variations in wave transformation and sediment entrainment on a coral reef sand apron[J]. Marine Geology, 2015, 363: 220-229.

[27] Brander R W, Kench P S, Hart D. Spatial and temporal variations in wave characteristics across a reef platform, Warraber Island, Torres Strait, Australia[J]. Marine Geology, 2004, 207(1): 169-184.

[28] Mandlier P G, Kench P S. Analytical modelling of

wave refraction and convergence on coral reef platforms: Implications for island formation and stability[J]. Geomorphology, 2012, 159: 84-92.

[29] 孙宗勋, 赵焕庭. 南沙群岛珊瑚礁动力地貌特征[J]. 热带海洋, 1996, 15(2): 53-60.
Sun Zongxun, Zhao Huanting. Features of Dynamic Geomorphology of Coral Reefs in Nansha Islands[J]. Tropic Oceanology, 1996, 15(2): 53-60.

[30] Yao Y, Huang Z, Monismith S G, et al. Characteristics of monochromatic waves breaking over fringing reefs[J]. Journal of Coastal Research, 2012, 29(1): 94-104.

[31] Roy P, Connell J. Climatic change and the future of atoll states[J]. Journal of Coastal Research, 1991: 1057-1075.

[32] 孙宗勋, 赵焕庭. 珊瑚礁工程地质学——新学科的提出[J]. 水文地质工程地质, 1998, 25(1): 1-4.
Sun Zongxun, Zhao Huanting. Coral reef engineering geology——The promotion of new subject[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998, 25(1): 1-4.

[33] 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(1): 83-96.

[34] Lugo-Fernandez A, Roberts H H, Wiseman Jr W J. Tide effects on wave attenuation and wave set-up on a Caribbean coral reef[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 47(4): 385-393.

[35] 荀涛, 胡鹏, 梅弢, 等. 西沙群岛珊瑚砂运动特性试验研究[J]. 水道港口, 2009, 30(4): 277-281.
Xun Tao, Hu Peng, Mei Tao, et al. Study on movement characteristics of coral sands in Xisha Islands[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2009, 30(4): 277-281.

[36] Hearn C J. Wave breaking hydrodynamics within coral reef systems and the effect of changing relative sea level[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104(C12): 30007-30019.

[37] Storlazzi C D, Ogston A S, Bothner M H, et al. Wave-and tidally-driven flow and sediment flux across a fringing coral reef: Southern Molokai, Hawaii[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(12): 1397-1419.

[38] Lugo-Fernández A, Roberts H H, Wiseman W J. Currents, water levels, and mass transport over a modern Caribbean coral reef: Tague Reef, St. Croix, USVI[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(17): 1989-2009.

[39] 刘宝银, 王岩峰. 南沙珊瑚环礁的遥感复合信息熵与类型[J]. 海洋学报, 2000, 22(1): 43-51.
Liu Baoyin, Wang Yanfeng. The Remote sensing composite information entropy and types of Nansha Coral Reef Atolls[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(1): 43-51.

[40] Carter R M, Larcombe P, Dye J E, et al. Long-shelf sediment transport and storm-bed formation by Cyclone Winifred, central Great Barrier Reef, Australia[J]. Marine Geology, 2009, 267(3): 101-113.

[41] Ryan E J, Smithers S G, Lewis S E, et al. The influence of sea level and cyclones on Holocene reef flat development: Middle Island, central Great Barrier Reef[J]. Coral Reefs, 2016, 35(3): 1-14.

[42] Duvat V K, Pillet V. Shoreline changes in reef islands of the Central Pacific: Takapoto Atoll, Northern Tuamotu, French Polynesia[J]. Geomorphology, 2017, 282: 96-118.

[43] Etienne S, Terry J P. Coral boulders, gravel tongues and sand sheets: features of coastal accretion and sediment nourishment by Cyclone Tomas (March 2010) on Taveuni Island, Fiji[J]. Geomorphology, 2012, 175: 54-65.

[44] Harmelin-Vivien M L. The effects of storms and cyclones on coral reefs: a review[J]. Journal of Coastal Research, 1994, 12: 211-231.

[45] Lee T N, Rooth C, Williams E, et al. Influence of Florida Current, gyres and wind-driven circulation on transport of larvae and recruitment in the Florida Keys coral reefs[J]. Continental Shelf Research, 1992, 12(7): 971-1002.

[46] Brinkman R, Wolanski E, Deleersnijder E, et al. Oceanic inflow from the coral sea into the Great Barrier Reef[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 54(4): 655-668.

[47] Larcombe P, Carter R M. Cyclone pumping, sediment partitioning and the development of the Great Barrier Reef shelf system: a review[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(1): 107-135.

[48] 李决龙. 珊瑚岛礁淡水资源开发理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 1-410.
Li Juelong. The Theory and Technology About Fresh Water Resource in the Coral Reef[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 1-410.

[49] 陈义兰, 刘乐军, 刘晓瑜, 等. 深海油气勘探中的海底地形勘测技术[J]. 海洋测绘, 2015, 35(2): 18-22.
Chen Yilan, Liu Lejun, Liu Xiaoyu, et al. Seabed topographic survey technology in deep-sea oil and gas exploration[J]. Hydrocraphic Surveying and Charting, 2015, 35(2): 18-22.

[50] Clark D E, Bell J, de Saint-Pern Y, et al. PHD filter multi-target tracking in 3D sonar[C]// James A. Jefferies.Oceans.New Jersy: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005: 1: 265-270.

[51] Davis A, Lugsdin A. High speed underwater inspection for port and harbour security using coda echoscope 3D sonar[C]//James A J. Oceans.Proceedings of Ocean 2005 MTS/IEEE Oceans Conference. Washington: IEEE Press, 2005: 2006-2011.

Research on coral reefal geological stability

AN Zhen-zhen, LI Guang-xue, MA Yan-yan, XU Ji-shang, DING Dong, ZHANG Yang, MIN Jian-xiong, WANG Li-yan

(College of Marine Geosciences, Key Laboratory of Submarine Science and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Jan. 19, 2017
Key words: coral reef; shallow stratum structure; geology stability; hydrodynamic conditions

Abstract: To understand the research situation of the coral reefal geological stability, we briefly describe the sub-bottom structure of coral reefs and the factors that can influence sediment transport, topography, and landforms in the coral reef, such as reefal structure, topographic and geomorphic features, wave, tide, tidal current, wind (including tropical cyclone and storm), and ocean currents, which consequently affect the reefal geological stability. This article also presents the problems of reefal geology stability. Considering the studies on the profile structure, topography, and landforms of the coral reef, which are closely relate to the reefal geology stability, we present suitable methods for detecting the solid shape and stratum structure of the reef: multi-beam echo sounder, high-resolution multichannel seismic exploration system, drilling, autonomous underwater data acquisition technology, and high-resolution real-time 3D sonar. With the data on the solid shape and stratum structure, we define the range of unstable zone with the advanced geographic information system (GIS). Furthermore, few studies were carried out on the stability of reef slope, inner reef flat, and slope of lagoon, which can be evaluated by the limit equilibrium method. In this evaluation, the pore water pressure and seepage force of the reefal seabed, which are caused by waves and tides, must be considered. The aim of the article is to provide references to coral reef researchers.

(本文编辑：刘珊珊)