

西沙群岛海域海洋地质灾害现状与对策^{*}

秦志亮¹，孙思军²，谭 骏¹，石先武¹，高 廷¹

(1. 国家海洋局海洋减灾中心 北京 100194; 2. 国家海洋信息中心 天津 300171)

摘 要：海洋地质灾害对海岛开发的影响显著，西沙群岛以 13 km² 的海岛陆地面积管辖着约 260 万 km² 的海洋国土。随着我国海南省三沙市的成立，西沙群岛地区相关基础设施和海洋工程设施建设的步伐将会进一步加快。文章从海岛海洋地质灾害的特殊性与重要性入手，选取西沙海域典型地区的海岸侵蚀和海底滑坡地质灾害进行了灾害特征识别及灾害机理分析，并提出了防护对策与建议，以期为西沙岛礁开发中的防灾减灾、环境保护及经济发展提供决策支持。

关 键 词：西沙群岛；海岛；地质灾害；海岸侵蚀；海底滑坡

1 引言

海洋地质灾害是自然灾害的分支内容之一，即在外动力地质作用（如：波浪，洋流，风暴潮等）或内动力地质作用（如：地震，断裂，火山活动等）下海岸基海底地质体发生移动或变形造成的灾害，具有致灾和承灾的双重属性^[1]。随着西沙海岛资源的不断开发，交通（港口）运输、通信电缆以及光纤等海洋经济活动的迅速开展，海洋地质灾害带来的安全隐患越来越需要引起重视。历史资料显示，国内外海洋地质灾害造成重大伤亡及损失的事例比比皆是，如 1929 年 11 月 18 日，纽芬兰的 Grand Banks 地震触发了 20 km² 的海底滑坡，27 人在该事件中死亡，形成的沉积物流把 200 km³ 的碎屑带入深水中，切断了跨大西洋的海底电报电缆，造成了巨大的经济损失^[2]。2004 年 12 月 26 日苏门答腊沿海巨大的海啸，夺取了 20 多万人的生命，研究认为诱发这场海啸的大规模海底运动是地震断裂位移和海底滑坡共同作用的结果^[3]。海岛是指四面环海水并在高潮时高于水面的自然形成的陆地区域，其环境具有较高的独立性。海岛地质灾害指对海岛人民生命财产造成直接损失，或对海岛地质、生态环境和地貌景观

造成破坏，并影响海岛经济社会发展和间接造成损失的分布于岛陆、岛岸、岛坡及环岛近岸海域的地质现象和地质作用^[4]。随着全球海平面上升、人类对海岸带开发力度的加强，众多的科研工作者对海岸侵蚀及海底滑坡的灾害机理^[5-8]、等级评级^[9-10]、风险评估^[11-12]及防护防治对策^[13-14]等方面开展了大量的研究工作。

西沙群岛的开发历史悠久，但开发程度低，随着三沙市的成立，将会更好地统筹陆海关系、岛屿与海域的关系，推进三沙岛礁旅游业、渔业及海底资源的开发管理。但同时，海洋地质灾害对海洋工程设施和海洋工程环境等可能造成的风险在开发过程中需要重点考虑。

本文利用西沙实地考察资料，海底地形资料及人工地震反射资料，探讨该海域海岸带及岛坡的海岸侵蚀及海底滑坡现状，为岛礁开发过程中的防灾减灾提供依据。

2 研究区概况

西沙群岛位于南海西北陆坡区（17°07'N—15°43'N，111°11'E—112°54'E），海域面积 31 700 km²，水深范围 0~1 800 m（图 1）。我国古代称之为石塘或七洲洋，现行政隶属于我国海南省三沙市。西沙群岛由 40 余座岛、洲、

^{*} 基金项目：国家自然科学基金——青年基金（41306057）；海底科学重点实验室开放基金（KLSG1406）；国家自然科学基金——青年基金（40906028）；国家科技重大专项子课题（2011ZX05026-004-06）。

礁、沙滩组成, 为我国南海四大群岛中陆地总面积最大的群岛^[15]。西沙群岛一共发育有 4 个大型环礁、4 个中型环礁、2 个台礁、2 个滩和暗沙, 在这些礁、滩之上发育有 28 个礁岛, 东面为宣德群岛, 由北岛、石岛和永兴岛等 7 个岛屿组成; 西面是永乐群岛, 由金银、中建、珊瑚等 8 个岛屿组成 (图 1)^[16]。其中永兴岛位于 16°50'N, 112°20'E, 是在宣德环礁的一个礁盘上堆积成的灰沙岛, 高 8.2 m, 呈不规则的椭圆形, 东西长约 2 km, 南北宽约 1.4 km, 面积 1.8 km², 为西沙群岛中最大的岛屿。石岛位于永兴岛东北, 与永兴岛在同一个礁坪上, 相距 1 130 m。石岛长 375 m、宽 340 m, 面积约 0.08 km², 最高处 15.9 m, 是南海诸岛中最高

为重要。

吕炳全^[19]等 (1987) 对西沙群岛的海岸侵蚀作用进行了研究, 认为西沙诸岛存在较强烈的海岸侵蚀作用, 如北岛、南岛、东岛和金银岛北侧沿岸, 永兴岛、晋卿岛的西南和南部海滩岩均发生了强烈的侵蚀作用。本文主要以石岛为例, 探讨海岸侵蚀作用。石岛的风成沉积与水成沉积的争论一直是学术界的两种不同观点, 随着 1984 年西石 1 井的钻探, 石岛的风成沉积观点得到了确认。

根据石岛实地考察资料, 海岸侵蚀情况非常发育。石岛发育的海岸侵蚀地貌主要有海蚀洞、海蚀崖、海蚀平台等。海蚀洞不同于陆地溶洞由化学作用而形成, 它是一种机械侵蚀的结果, 在海浪成千上万年的不断冲击下, 海水冲进岩石缝隙中, 那些较脆弱的部分发生崩塌、破碎。海蚀崖一般与海蚀洞伴生发育, 随着海蚀洞规模的不断扩大, 上部岩石失去支撑而发生垮塌形成的悬崖状海岸。海蚀平台是发育在海蚀崖前的基岩平坦台地, 一般是在波浪作用下, 海蚀崖不断发育, 造成海岸不断后退, 在海蚀崖向海一侧的前缘岸坡上, 塑造出一个微微向海倾斜的平坦岩礁面, 平台不断向两侧扩展, 随着破碎岩石及沉积物质搬运过程中对平台的摩擦, 海蚀平台上一般会发育侵蚀沟槽, 擦痕, 洼地等微地貌。

西沙海域位于东亚季风区, 东北、西南季风周期性交替。每年 10 月到次年 3 月以东北风为主, 频率高、风力强, 且盛行期长; 5—8 月以西南季风为主, 季风弱, 周期短。但短期强风和灾害性暴风——台风, 常以西南风出现, 西南季风比东北季风弱, 并且常有间断。波浪和海流均受季风控制, 其变化周期和强度基本上与季风同步。所以在总体上, 东北风、浪和海流强于西南风、浪和海流。东北季风的风期和强度更高, 因此岛坡的东北边缘和西南边缘海岸侵蚀情况比较严重, 东北海蚀平台的宽度比西南部更宽。

3.2 海底滑坡

海底滑坡是广泛分布于海底的一种沉积物重力搬运过程^[11]。海水环境与陆地相比, 由于

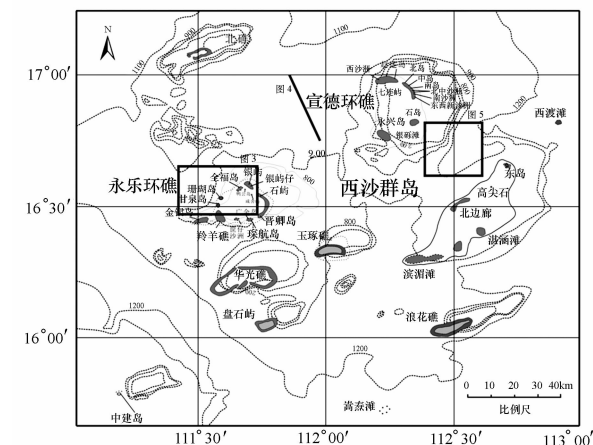


图 1 西沙群岛海域海底水深与岛礁分布

3 海洋地质灾害类型

3.1 海岸侵蚀

海岸侵蚀是指在自然力 (包括风、浪、流、潮) 和人力的作用下, 沉积物支出大于输入的净损失的过程, 它包括海岸线的后退和海滩的下蚀^[1]。海岸侵蚀是一个长期的海陆变迁过程, 海岸侵蚀会造成沿岸沉积物大量流失, 海滩生态环境恶化, 严重破坏沿海的建筑物及工程设施, 使海岸防护压力增大, 从而演变成为一种严重的环境地质灾害, 不利于沿海工程建设, 更直接影响岸线经济发展。海岛是一个限制性环境, 海岸带侵蚀造成的损失和风险将更加严重, 因此对海岸带的规划及海岸侵蚀的监控显得尤

沉积物的孔隙水压力及沉积物固结程度较低的原因,海床上会发生各种形式的沉积物失稳。水下硬质岩石构成的斜坡失稳后,发育成坠落和滚动运动形式的海底滑坡,多发生在珊瑚或海底火山形成的水下高地上,可称为崩塌。海底软质泥砂形成的斜坡失稳后,其主要运动形式是斜坡整体沿着软弱层进行滑动。海底软沉积物的抗剪切性极差,因此当海底为软沉积物时,即使坡度非常小,产生的重力分量不足以使海床发生滑动,也会使软泥海床发生形变。

西沙群岛岛坡发育的滑塌堆积物主要是风暴潮摧毁礁体或珊瑚群后向海搬运的堆积物,调查发现很多小型的滑塌沉积相位于珊瑚生长带的向海侧陡壁下,从地形转折处开始,水深为 16~20 m,其底界为 30~50 m 左右。滑塌堆积以类似于山麓滑坡的形态,穿插于珊瑚生长带之间,上部陡峭、向下变缓,前缘参差不齐,呈朵叶状展布。滑塌沉积物上粗下细,上部由 30~50 cm 的礁块、砾石等组成,直径在 2 m 以上的礁块也常有,向下粒径变细成沙砾屑^[20]。因为台风等强风暴浪主要来自西南方向,滑塌沉积物在礁体的西南部发育更多。滑塌沉积物的特征是磨圆度和分选极差,一般难以生长活体珊瑚群体,砾石表面常附生藻类。

在水深 250~1 100 m 的岛坡区,发育了一系列由于沉积物搬运而引起的规模较大的海底冲沟和海底滑坡(图 2)。从岛坡上面的物源区开始,沉积物在重力作用下顺岛坡搬运,沉积物发生滑塌的同时部分搬运物质也不断沉积下来。图 2 中左侧顺坡方向发育了数条冲沟,冲沟顺坡搬运之后演变为海底滑坡,其两侧的陡壁、挤压沉积构造及前部朵叶状沉积形态比较明显。右侧水深 1 000 m 处发育了形态非常清晰的滑坡后壁,岛坡搬运的物质在此沉积之后,由于后续搬运作用继续进行,导致大量快速堆积的沉积物再次发生失稳,发育了一套规模较大的海底滑坡,其搬运方向为南东向。

由于岛坡水深较浅,难以进行地震数据的采集,笔者选取了永乐环礁和宣德环礁之间水深 1 000 m 左右海域的一条二维地震测线进行分析(图 3)。由于海底滑坡为事件型作用过程,一般在短时间内进行大量沉积物的搬运,因此,大的

海底滑坡发育区其地层反射特征与海底正常沉积地层有明显的边界接触关系。图 3 中底部剪切面为最早一期海底滑坡与底部地层的接触面,其上为之后多期发育的海底滑坡的垂向叠置。该海域海底滑坡的地震相特征总体表现为弱振幅,波状弱连续及杂乱反射的地震反射特征。海底沉积物由岛坡搬运至此已经过了约 10 km 的搬运,沉积已经发生了不同程度的破碎,因此,固结块体的块状连续反射基本没有发现。海底正常沉积是一个持续的过程,因此在海底滑坡事件不发生时,正常沉积地层会持续进行,并披覆于滑坡地层之上,但后期的海底滑坡会对其再次进行改造,因此在滑坡地层中,可见少部分的中强振幅和弱连续地震反射特征。

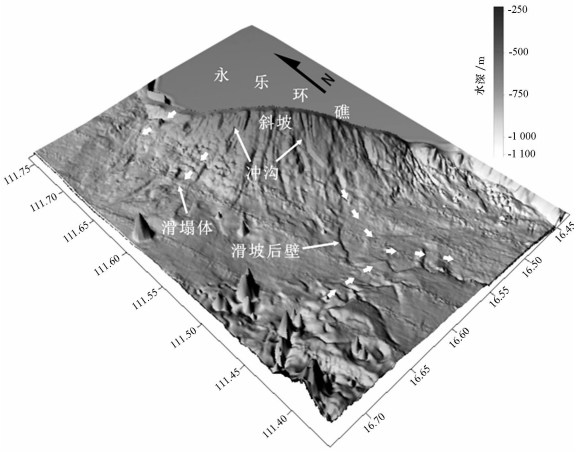


图 2 永乐环礁北侧陆坡海底三维地形图

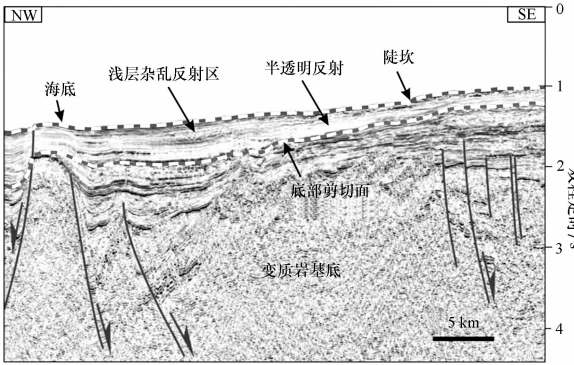


图 3 西沙海域海底失稳区域地震反射特征

4 西沙群岛海域地质灾害机理

4.1 海岸侵蚀机理

海岸侵蚀的前提是海岸沉积物补给不足,

石岛海岸主要由破碎的海底珊瑚礁生物碎屑以及沙丘岩(又称风成生物砂屑灰岩)构成。该地区主要受风暴潮、灾害性海浪及晚冰期海平面上升的影响,侵蚀变化速率的大小不等。南海海域自然灾害发生频繁,我国平均每年遭受28个热带风暴和台风的影响,其中有2/3袭击南海。热带气旋和强风浪造成的风暴潮经常袭击西沙群岛海域,往往对海岸造成非常严重的冲刷作用,进而造成岸段侵蚀,如1985年10月20日的台风将中建岛西南局部区域削低了 0.8 m ^[19]。风暴潮形成的暴风浪具有强大的拍岸力量,拍岸浪直接对海岸进行侵蚀,破坏近岸地质环境。风暴潮带来的风暴增水导致局部海平面急剧升高,增加了风暴浪基面的深度,破坏了原来的海岸水动力动态平衡,为恢复海岸水动力平衡状态,在沉积物输送条件不变的状态下,只有侵蚀海岸,重新达到水动力平衡,而且这会造成海岸的不可恢复性后退。沿岸局部海平面上升后,波高很大的波浪到近岸才会破碎形成破浪, Sunamura^[21]认为作用在对海岸造成侵蚀的波浪有三种:破浪、已破碎浪和驻波,其中破浪对基岩海岸的侵蚀作用最强。因此,风暴潮作用虽然时间短暂,但是它对海岸带的影响是不可忽视的。

石岛为热带季风岛屿气候,降雨充沛,蒸发强烈。与石岛相隔800 m的永兴岛年平均降雨量为1 854.23 mm,主要集中在6—11月;历年平均蒸发量为2 541.22 mm^[16],蒸发量大于降雨量,具有明显的干湿季变化。陆地上的溶洞多是由于溶解作用形成,而石岛充沛的降雨量也会使淡水渗入岩石中,对海岸基岩产生一定的溶解作用,进而加速了海岸侵蚀的过程。

4.2 海底滑坡机理

当顺坡方向的剪切应力超过形成滑坡物质的抗剪切强度即可产生海底滑坡,斜坡失稳本质上也是斜坡沉积物在重力作用下沿软弱层发生滑动。当斜坡中的沉积物抗剪强度变弱,或是外界施加的负荷过大时,斜坡不能保持静止,沉积物便发生滑动,引起海底沉积物的搬运。在滑动发生的初始阶段,主要是沉积体以大块固体的形式沿软弱面(滑动面)滑动;在滑动

过程中,由于水的存在,部分沉积体变成塑性,运动形式由滑动变成了流动。

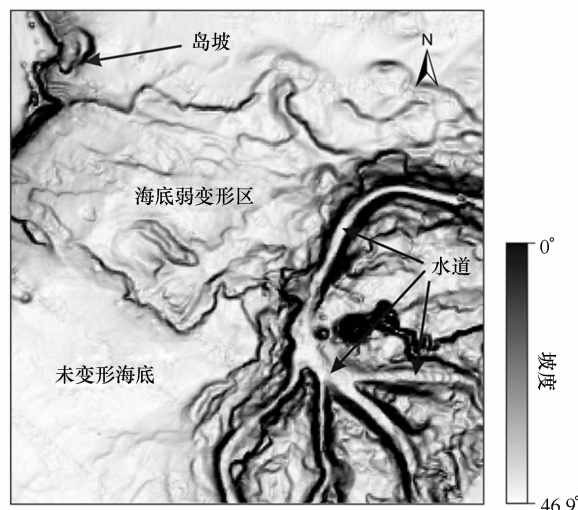


图4 西沙海域宣德环礁东侧海底坡度分布

一般认为陆地上的滑坡大多发生在坡度大于 10° 的陡坡上,但水下斜坡的坡度达到 $1^\circ\sim 3^\circ$ 时就有发生滑坡的可能性。西沙海域造礁生物非常发育,生物礁死后形成的碎屑在原地堆积下来,岛坡上沉积物不断沉积引起的岛坡坡度变大。岛坡顺坡方向侵蚀形成的海底峡谷等也会形成坡度很大的陡倾地形。图4是选取宣德环礁东南区域进行了坡度分析,从图中可以看出,海底局部坡度大于 20° ,最高达 46.9° ,这远远超过了海底稳定的坡度条件。宣德环礁东侧的海底水道的两侧也是坡度较高的区域,可见沉积物搬运过程中对海底的侵蚀之强烈。此外,当岛坡上正在进行着快速沉积过程时,快速沉积下形成未固结沉积物,其孔隙中水排出不畅,积累了较大的孔隙压力,使得沉积物的抗剪强度变低。风暴潮、洋流、暴风浪、潮汐等外在的载荷施加在岛坡上后,会使得岛坡受到向下的剪切应力增加,从而引起岛坡失稳。地震引起的振动一方面增大了土体受到的向下剪切应力,另一方面振动也会引起沉积物发生液化,沉积体内部的抗剪强度急剧降低,从而使岛坡失稳,形成海底滑坡。据国内学者的研究,第四纪南海经历了多次大的海平面变化,多次海平面的旋回也会引起海底不稳定性的增加^[22]。因此,较大的海底坡度和较高的沉积物供给速率是该西沙海域海底滑坡发育的主要原

因,海平面的多次旋回也间接促发了海底滑坡的发生。

5 建议与对策

海洋地质灾害防治工作的开展首先要进行全面的海洋地质灾害调查,在此基础上划定灾害分布范围,查明灾害发育机制,根据不同的灾害类型及灾害等级的选取合适的防治方法。西沙群岛海洋地质灾害防治工作应该在三沙开发的大框架下,将海岸保护、海岸侵蚀灾害防治与经济发展有机地结合起来,进行科学规划、有效防治。海洋地质灾害的防治关键是要建立西沙海域海洋地质灾害风险评价体系,科学合理地进行海洋地质灾害风险评价和风险区划,最终给出正确的灾害评价指标与量化方法。同时应该高度重视海洋地质灾害的监控监测工作,减少开发过程中的人为破坏。并加强地区法规建设,对灾害的责任主体、责任内容等作出明确规定。

参考文献

[1] 叶银灿,等. 中国海洋灾害地质学[M]. 北京:海洋出版社,2012.

[2] 宋海斌. 天然气水合物体系动态演化研究(Ⅱ):海底滑坡[J]. 地球物理学进展,2003, 18(3): 503—511.

[3] 陶春辉,戴黎明,孙耀,等. 印尼附近海域地震海啸发生的构造背景综述[J]. 海洋学研究, 2008, 26(2): 59—66.

[4] 杜军,李培英. 海岛地质灾害风险评价指标体系初建[J]. 海洋开发与管理,2010, 27(增刊): 80—82.

[5] 季子修,蒋自巽,朱季文,等. 海平面上升对长江三角洲和苏北滨海平原海岸侵蚀的可能影响[J]. 地理学报,1993,48(6): 516—526.

[6] 李光天,符文侠. 我国海岸侵蚀及其危害[J]. 海洋环境科学,1992,11(1): 53—58.

[7] 刘守全,刘锡清,王圣洁,等. 南海灾害地质类型及分区[J]. 中国地质灾害与防治学报,2000, 11(4): 39—44.

[8] TURNER R K, ADGER W N, DOKTOR P. As-

sessing the economic costs of sea level rise[J]. Environment and Planning, 1995, 27(11): 1777—179.

[9] 王文海,吴桑云,陈雪英. 海岸侵蚀灾害评估方法探讨[J]. 自然灾害学报,1999, 8(1): 71—77.

[10] 丰爱平,夏东兴. 海岸侵蚀灾情分析[J]. 海岸工程,2003, 22(2): 60—66.

[11] 吴时国,陈珊珊,王志君,等. 大陆边缘深水区海底滑坡及其不稳定性风险评估[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 430—437.

[12] 秦志亮,吴时国,王志君,等. 天然气水合物诱因的深水油气开发工程灾害风险[J]. 地球物理学进展,2011, 26(4): 1279—1287.

[13] 张裕华. 中国海岸侵蚀危害及其防治[J]. 灾害学,1996, 11(3): 15—21.

[14] 常瑞芳,庄振业,吴建政. 山东半岛西北海岸的蚀退与防护[J]. 青岛海洋大学学报,1993, 23(3): 60—67.

[15] 孙志鹏,许红,王振峰,等. 西沙群岛海滩岩类型及其油气地质意义[J]. 海洋地质动态,2010, 26(7): 1—7.

[16] 王国忠. 南海珊瑚礁区沉积学[M]. 北京:海洋出版社,2001.

[17] 余克服,宋朝景,赵焕庭. 西沙群岛永兴岛地貌与现代沉积特征[J]. 热带海洋,1995, 14(2): 24—31.

[18] 赵焕庭,宋朝景,余克服. 西沙群岛永兴岛和石岛的自然与开发[J]. 海洋通报,1994, 13(5): 44—56.

[19] 吕炳全,王国忠,全松青. 西沙群岛灰砂岛的沉积特征和发育规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(2): 59—69.

[20] ZHAO Q, WU SG, XU H, et al. Sedimentary facies and evolution of aeolianites on Shidao Island, Xisha Islands. Chinese Journal of Oceanology and limnology,2011,29(2): 398—413.

[21] SUNAMURA T. Geomorphology of rocky Coasts [M]. Chichester: Jonn Wiley & Sons,1992.

[22] 王大伟,吴时国,秦志亮,等. 南海陆坡大型块体搬运沉积体系的结构与识别特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2009, 29(5): 65—72.