

何其江, 刘刚, 王雪木, 等. 西沙群岛宣德环礁的精细水下地貌组合特征及其成因机制[J]. 海洋学报, 2021, 43(8): 81–92, doi:10.12284/hyxb2021078

He Qijiang, Liu Gang, Wang Xuemu, et al. Submarine geomorphologic features and genetic mechanism in the Xuande atoll, Xisha Islands[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(8): 81–92, doi:10.12284/hyxb2021078

西沙群岛宣德环礁的精细水下地貌组合特征及其成因机制

何其江^{1,2}, 刘刚^{1,2*}, 王雪木^{1,2}, 郑志锋^{1,2}, 段轶³, 韩孝辉^{1,2}, 沈爱斯^{1,2}

(1. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口 570206; 2. 海南省海洋地质调查研究院, 海南 海口 570206; 3. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034)

摘要: 海底地形地貌及类型分布特征对指示区域地质构造影响、海平面升降、海洋水动力等有重要意义。本文通过侧扫声呐、单波束测深、表层沉积物取样等方法, 分析了西沙群岛宣德环礁精细水下地貌组合特征, 并探讨了其成因机制。结果表明: (1) 宣德环礁为残缺型环礁类型, 中部为潟湖沉积, 礁盘之间形成西沙洲口门、“红草门”、环礁西缺口和环礁南缺口等 4 处水深超过 60 m 的深水口门, 并首次识别了西沙洲口门; (2) 宣德环礁水下地貌类型可划分为 3 级 11 类地貌类型。研究区的沙波及槽沟等动力地貌单元显示, 宣德环礁浅水区海底特征地貌由盛行季风和波浪场所控制, 深水口门形成的潮汐通道水体为塑造宣德环礁潟湖区动力地貌的主要因素。研究区东南部向海坡存在 6 级水下阶地, 通过对比南海珊瑚礁阶地特征, 宣德环礁向海坡阶地成因很可能是全球海平面变化和地壳沉降的共同作用。

关键词: 侧扫声呐; 水下地貌特征; 分类体系; 宣德环礁

中图分类号: P714⁺.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)08-0081-12

1 引言

海底地形地貌特征及分布类型对指示区域地质构造影响、海平面升降、海洋水动力有重要意义^[1-6]。珊瑚礁对海洋环境及地质环境的变化具有高敏感性, 长期受到高度关注。珊瑚礁水下精细地形地貌是认识珊瑚礁发育速率、发育过程等关键科学问题的基础。此外, 随着我国南海珊瑚岛礁开发及岛礁工程建设, 珊瑚礁精细水下地貌研究对认识珊瑚岛礁的稳定性具有重要意义。

陈俊仁^[7]和曾昭璇等^[8-9]通过实地观测、沉积物分析等手段, 以灰砂岛岛礁地貌形态为主, 总结了环礁的类型和地貌特征。余克服等^[10]和赵焕庭等^[11]对环礁水下地形、向海坡和水下阶地的调查, 划分了南沙群岛“腹地环礁”微地貌-沉积相。孙宗勋和赵焕庭^[12]进一步研究了风、流和潮汐等动力作用对珊瑚地貌发育的作用。前人的研究重点多为向海坡区域, 礁内潟湖区域研究不足^[13-18]。随着高分辨率遥感影像技术发展, 推动了岛礁地形地貌研究的进展, 其地貌分类体系精细全面化^[19-21]。左秀玲等^[22]总结前人研究成

收稿日期: 2020-05-16; 修订日期: 2020-10-20。

基金项目: 2019 年海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC350); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室自主课题(ZZ[2020]2019256-01)。

作者简介: 何其江(1987—), 男, 海南省海口市人, 工程师, 主要从事海洋调查与环境研究。E-mail: heqijiang@foxmail.com

* 通信作者: 刘刚(1982—), 男, 辽宁省铁岭市人, 高级工程师, 主要从事海洋地质、沉积和地质灾害调查及研究工作。E-mail: 174867122@qq.com

果,提出了较全面的南海珊瑚礁高分辨率遥感地貌分类体系,但限于光波物理特性制约,光学遥感手段在最清澈水体穿透深度仅为 25 m,无法探明水下暗沙、暗礁、冲刷槽等地貌单元,目前,上述地貌类型的研究尚少开展。侧扫声呐技术运用海底地物对入射声波反向散射的原理来探测海底形态,实现对微地形地貌厘米级的高精度声成像,从而对海底底质沉积形态及类型、地形地貌特征进行定性描述^[23-27]。通过水深测量、侧扫声呐测量和海底沉积物样品获取的工作方法,有助于分析海底地形地貌特征和沉积物类型^[28-31]。

西沙群岛宣德环礁,位于海南岛南偏东 180 海里处,由北部的大弧形礁盘七连屿、东南部的永兴-石岛弧形礁盘及银砾滩构成(图 1),三沙市政府坐落在宣德环礁东南部的永兴岛上。宣德环礁的基底为碳酸盐台地,厚达 1257 m,不整合覆于前寒武变质岩体上^[32],整体水深变化范围为 0~1232 m,台地之上水深小于 65 m,台地斜坡水深变化剧烈,深水盆地平原水深为 800~1232 m^[33]。宣德环礁海区潮汐为不规则日潮,属热带海洋季风气候,冬季盛行偏北季风,夏季盛行偏南季风;海浪以风浪为主,潮流特征随季风变化^[34-35]。

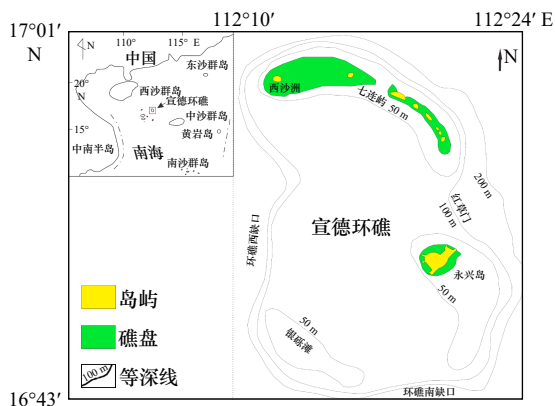


图 1 研究区位置

Fig. 1 The location of study area

本文通过分析宣德环礁的水下地形、侧扫声呐声学探测结果和海底沉积物粒度分布特征,精确识别了宣德环礁水下微地貌特征,结合测深数据及表层沉积物,刻画了宣德环礁礁前以深的水下地形地貌特征,划分了宣德环礁水下精细地貌类型,并初步探讨了其形成机制。

2 数据和方法

2.1 数据采集

2015-2016 年,海南省海洋地质调查研究院在宣德环礁水深为 10~200 m 的区域采集了侧扫声呐和

单波束水深数据,并进行海底表层沉积物取样(图 2)。在该研究区内实施了 67 条侧扫声呐测量测线,总长度约 700 km,主测线 40 条和联络测线 27 条, NW-SE 向主测线间距为 1 km, NE-SW 向联络测线间距为 2 km。单波束测线按 1:10 000 比例尺布设,测线间距 100 m。调查过程使用不锈钢蚌式抓斗取样器采集 105 个海底表层沉积物,海上导航定位使用美国星火 SF-3050 型接收机,精度可以达到亚米级,测量使用 WGS-84 坐标系、GMT 时间、UTM 投影、中央经线 111°E。

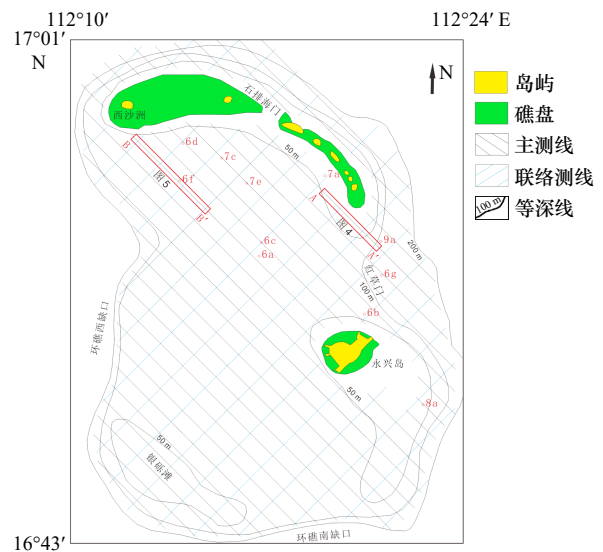


图 2 研究区侧扫声呐测线位置

Fig. 2 The location of lines of side scan sonar in study area

图中红字表示侧扫图像的位置

The red numbers represent the position of side scan images

将研究区采集的海底表层样品,送至中国科学院南海海洋研究所进行粒度测试分析,粒度分级采用尤登-温德华氏等比制粒级标准,沉积物分类采用福克分类法^[36]。

2.2 侧扫声呐

研究区所采用的侧扫声呐系统为 EdgeTech 4200 MP 侧扫声呐系统,工作频率为 100 kHz 或 400 kHz,拖鱼采取侧拖拖曳方式,工作量程设定单边为 400 m,双频作业模式,自动增益。通过对原始的侧扫声呐数据进行导航编辑、海底线精确跟踪、斜距改正、速度校正、TVG 校正、NADIR 校正,生成单条带的侧扫声呐图像,再经过图像拼接处理,镶嵌形成研究区的大面积侧扫声呐图像。

2.3 单波束水深测深仪

单波束回声测深仪采用南方 SDE-28S,工作频率

为 200 kHz,水深 20 m 内误差优于 0.2 m,水深大于 20 m 时误差优于水深的 1%。在水深测量期间,使用 RBR virtuoso duo T.D|tide 潮位仪进行潮位校正,潮高基准高程为三沙独立高程。

3 结果

3.1 宣德环礁水下地形地貌特征

融合宣德环礁侧扫声呐数据及测深数据,形成宣德环礁三维地形图(图 3)。宣德环礁为残缺型环礁类型,中部为潟湖沉积,北部发育广大弧形礁盘—七连屿礁盘,东南部发育永兴—石岛弧形礁盘,西南部为银砾滩浅滩,环礁西侧与海相通,南侧和东侧则发育部分缺口,环礁碳酸盐台地至向海坡间发育环形凸起环礁边缘。以往研究^[37]认为,切开宣德环礁的“门”有两个,一个为石岛与南沙洲之间的“红草门”,深度为 60~120 m,另一门为切开七连屿的赵述岛与北岛之间的“石排海门”,深度为 4~10 m,为浅水海门^[38]。我们的探测数据显示,宣德环礁主要水体通道口门应为水深 60 m 以上的深水口门,共有 4 处,分别为环礁西北端西沙洲口门、南沙洲—永兴的“红草门”、环礁西缺口和环礁南缺口。环礁内外水体交换分为南北两大区域,由银砾滩和永兴礁盘及其之间发育的潟湖砂沉积分隔,水体交换以北部为主。

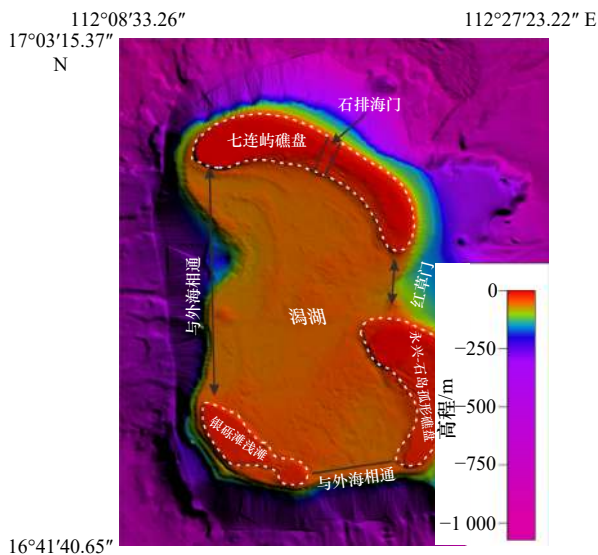


图 3 宣德环礁水下三维地形图

Fig. 3 Three-dimensional map of the study region

环礁中部为潟湖沉积地貌,发育水下沙坝及珊瑚礁,向海斜坡由礁盘向海深度陡然增加,坡度变化剧烈并发育多级水下阶地。受动力特征作用和礁盘空间位置划分,宣德环礁水下地貌分为向海坡区和潟湖区地貌。

3.2 向海斜坡微地貌类型组合特征

向海斜坡指从礁坪外缘延伸向礁盘外海的斜坡,是珊瑚礁横断面中的主要地貌单元之一,其地貌形态反映了构造作用、生物作用和水动力作用,特别是其上部的浅水平台、凸起脊—槽沟系统与造礁珊瑚群落的生长状况、海平面升降和波浪作用密切相关^[16]。通过对宣德环礁向海斜坡微地貌特征形态研究,探讨宣德环礁珊瑚礁的发育过程、海平面的升降及水动力作用具有重要的意义。

图 4 为七连屿礁前区向海斜坡(图 2 中 A-A')侧扫图像及其水深剖面,图像区域长为 5.44 km,宽为 800 m。其中 I 区为礁坪外珊瑚礁群,单礁及长垣礁组成团簇状群礁,礁体发育密集,近岸以长垣礁为主,礁体长约 100 m,宽为 20 m,礁体长轴为 NW-SE 向。II 区为礁缘区突起脊—槽沟系统,槽沟带长为 1.2 km,沟宽为 3~4 m,沟深为 0.2 m,脊线最长为 600 m,走向为 NW-SE 向,近 W-E 向,垂直于岸线和等深线。III 区为礁缘外水下阶地,有两条坡度变化界线,分别对应一级水下阶地,上界线为礁缘线,水深为 22 m,下界线为水深 70 m 处。IV 区为斜坡沙坡,水深为 150 m,其波脊线走向为 N-S 向,与等深线垂直,表明其受 W-E 向底流作用。

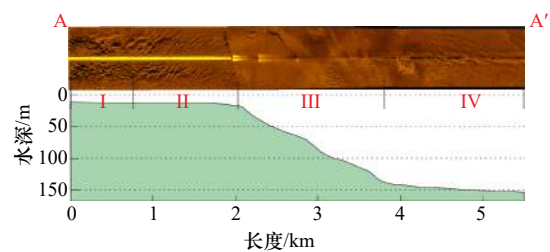


图 4 向海斜坡地貌带侧扫影像及其水深剖面
(位置见图 2)

Fig. 4 The side scan image and depth profiles along the seashore slope (the location is shown in Fig. 2)

3.3 潟湖区微地貌类型组合特征

图 5 为宣德环礁西北侧潟湖底边缘至中央(图 2 中 B-B')侧扫图像,图像区域长为 8.75 km,宽为 800 m。I 区为珊瑚礁块影像,区域水深为 55~60 m,沙波结构贯穿礁体与底质, NW-SE 向、N-S 向沙波脊线指示宣德环礁潟湖区底层为 NE-SW 向、W-E 向底层流。该区域为宣德环礁潟湖最深区域,沉积物以粉砂质砂为主,体现水动力强度随水深变化减弱而使细粒沉积物沉积于礁体形成礁体—砂质混合沉积结构。

II 区为砂质沉积覆盖于珊瑚格架上,以砂质沉积物为主,仅体现部分礁体边缘形态特征,深度范围

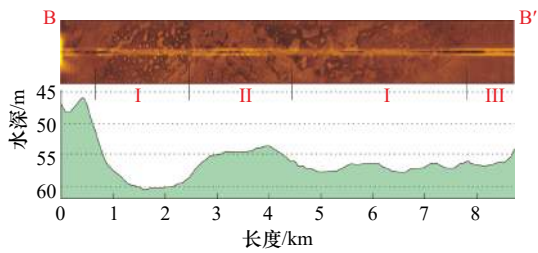


图 5 潟湖区地貌带侧扫影像及其水深剖面 (位置见图 2)

Fig. 5 The side scan image and depth profiles in the lagoon lake (the location is shown in Fig.2)

为 51~55 m, 形态及沉积结构与 I 区近似, 但沉积物颗粒更大, 应为沉积物质受潮流等较强动力搬运沉积, 在潟湖深水区形成水下沙嘴状沉积。I、II 区域特征地貌可作为潟湖内水体运动通道指示地貌, 其对应地形剖面图也表明 I 区为下切水道, II 区所示强动力特征可作为潮汐流在潟湖内沉积搬运重要指示标志。

III 区为潟湖内砂质海底沉积特征, 水深为 55~60 m, 沉积物质为含砾砂至粉砂质砂, 代表宣德环礁潟湖区平均沉积强度环境沉积特征。

3.4 微地貌特征

3.4.1 砂底

图 6a 为宣德环礁砂质海底侧扫影像, 位于环礁中央区潟湖盆中砂质沉积区, 区域地形平坦, 平均水深约为 55 m, 侧扫影像上表现为光滑影像、色度均匀、无特殊反射特征, 表层沉积物以砾、砂为主。永兴岛口门水深 54.54 m 处砂质沉积物(图 6b), 为含砾砂, 砾级物质为珊瑚碎块及生物碎屑; 图 6c 为环礁潟湖中心水深 55.31 m 处含砾砂, 砾级物质为珊瑚碎块及生物碎屑; 图 6d 点位于环礁潟湖西北角, 水深为 56.46 m, 沉积物为粉砂质砂。沉积物粒级组分统计见表 1, 统计分析研究区潟湖内砂质海底沉积粒径介于 $-0.29\Phi \sim 6.58\Phi$, 平均为 1.79Φ , 反映该区域水动力特征较强, 平均粒径与水深及分布位置存在一定相关性, 由潟湖边缘向潟湖中心, 随水深由浅及深, 沉积物

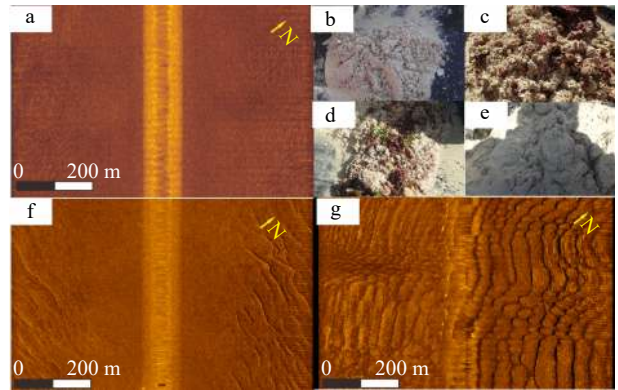


图 6 砂质海底、沙波侧扫影像及其表层沉积物 (位置见图 2)

Fig. 6 Sand seafloor, side scan image of sand wave and surface sediments (the location is shown in Fig.2)

a. 砂质海底侧扫影像; b-d. 砂质海底表层沉积物; f. 潟湖盆沙波侧扫影像; g. 向海坡沙波侧扫影像; e. 潟湖盆沙波表层沉积物
a. Sand seabed side scan image; b-d. sand seabed surface sediments; f. lateral scan image of sand wave in lagoon basin; g. sand wave lateral image of sea slope; e. sand wave surface sediments in lagoon basin

粒径减小, 平均粒径反映沉积介质平均动能大小, 反映潟湖区沉积动能强度具有由浅及深, 由边缘向中心减弱的趋势。

3.4.2 沙波

宣德环礁的海底沙波, 发育于环礁内潟湖盆及潟湖坡的砂质沉积环境, 侧扫影像中与海底反射强度变化明显, 沙波脊线呈规律的 S 形。图 6f 为宣德环礁北部潟湖盆沙波影像, 影像区域水深为 52~53 m, 波长 50~300 m, 最大可达 380 m, 波宽为 5 m, 波脊线总体走向为 W-E, 波高约 0.1 m, 沉积物为粉砂质砂(图 6e), 平均粒径为 2.99Φ 。图 6g 为环礁东侧向海坡沙波影像, 区域水深为 113~123 m, 沙波带长度达 3 km, 波长最大可达 600 m, 波宽 30~50 m, 波脊线走向为 NW-SE, 近 N-S。波脊线延展方向与等深线基本一致。沙波地貌区域的沉积环境动力比平滑的砂底区要强, 其波脊线垂直方向反映所受动力作用方向, 受沉积动力强度影响, 规模和尺度有不同表现。

表 1 砂质海底沉积物粒级组分统计表

Table 1 Statistical of grain size composition of the sand seafloor

点位	水深/m	砾石含量/%	砂含量/%	粉砂含量/%	黏土含量/%	平均粒径/ (Φ)	分选系数	偏态系数	峰态系数
b	54.54	11.60	81.73	5.43	1.24	1.06	1.90	0.05	0.86
c	55.31	11.70	82.20	4.92	1.18	1.25	1.82	-0.17	0.90
d	56.46	0.00	59.84	32.76	7.40	4.03	2.33	0.48	0.84
e	53.23	0.00	82.19	15.87	1.94	2.99	1.28	0.35	1.48

3.4.3 珊瑚礁

宣德环礁区域珊瑚礁发育广泛, 礁体与底质反射特征对比明显, 易于识别, 在不同水深环境下, 形态有不同表现。七连屿礁前(潟湖侧)水深 13 m 处珊瑚礁, 主要由直径约 20 m 单礁及长垣礁组成团簇状群礁(图 7a), 个别礁体长轴可达 100 m, 礁体高为 0.2 m, 最高为 0.5 m, 表层取样为活体珊瑚块(图 7b)。图 7c 为水深 55 m 处潟湖盆边缘珊瑚礁影像, 由反射亮度及回波强度特征可知, 其为砂质底质, 单形态上可见珊瑚礁群形成不规则状礁块, 礁块与砂底边界清晰, 单礁体基本不可见。沉积物为含砾中砂(图 7d), 平均粒径为 1.10Φ , 此区域为礁体-砂质混合沉积。由于沙波结构贯穿礁体与底质, 砂质沉积物沉积填充珊瑚礁, 使得单个礁体不可见, 仅表现出礁群结构。若仅依据侧扫影像或单点沉积物取样结果对底质沉积类型进行判断, 易形成错误认识。图 7e 为宣德环礁潟湖区最深区域礁影像, 水深为 62 m。礁体成近圆形块状分布, 直径为 30~90 m, 表层沉积物为粉砂质砂(图 7f), 平均粒径为 3.22Φ 。

3.4.4 突起脊-槽沟

突起脊-槽沟系统, 发育于礁坪前缘, 可延伸至礁

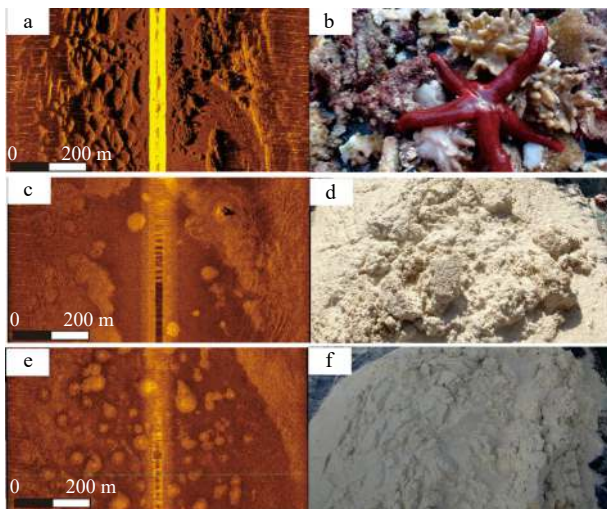


图 7 珊瑚礁侧扫影像及其表层沉积物(位置见图 2)

Fig. 7 Side scan image of coral reef and surface sediments (the location is shown in Fig.2)

a. 礁前区珊瑚礁影像; b. 礁前区珊瑚礁碎块; c. 潟湖盆边缘珊瑚礁侧扫影像; d. 潟湖盆边缘珊瑚礁表层沉积物; e. 潟湖盆珊瑚礁侧扫影像; f. 潟湖盆珊瑚礁表层沉积物

a. Coral reef image in front of the reef; b. coral reef fragments in front of the reef; c. side scan image of coral reef at the edge of lagoon basin; d. surface sediments of coral reefs at the edge of the lagoon basin; e. side scan image of coral reef in lagoon basin; f. surface sediments of coral reefs in the lagoon basin

前深水沉积中, 是珊瑚礁受海流冲刷形成的一系列凸起-沟槽结构^[39]。波浪的方向、能量以及水动力作用方式是影响突起脊-槽沟系统形成的主要决定因素^[40-41]。反射影像中与一般沉积物冲刷槽类似。珊瑚礁体为硬质固体, 冲刷形成的沟壁陡立, 故形成的沟面窄、浅, 突起脊反射强, 突起脊-槽沟结构对比强烈。永兴岛东南向位于水深 16~20 m 处礁盘前缘至礁前区域(向海侧)为典型的突起脊-槽沟地貌(图 8a)。槽沟带长可达 2.1 km, 沟宽为 3~8 m, 最宽处为 20 m, 沟深 0.2~0.6 m, 最深为 1 m, 脊线最长为 800 m, 走向为 NW-SE 向, 基本与岸线或礁坪前缘线垂直。图 8b 为西沙永兴岛珊瑚礁坪前缘(礁脊)发育的槽沟水下拍摄影像^[39], 槽沟代表海浪冲刷礁坪的作用方向, 槽沟内沉积物很少, 主要为磨圆较好的珊瑚礁碎块, 几乎没有生物碎屑砂堆积, 潮沟壁上也没有活珊瑚生长^[39]。

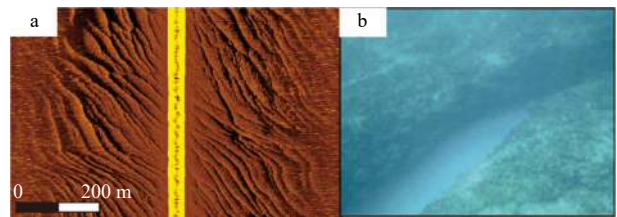


图 8 突起脊-槽沟侧扫及水下影像(位置见图 2)

Fig. 8 Protruding ridge-groove side scan and underwater image (the location is shown in Fig.2)

a. 永兴岛东南侧突起脊-槽沟侧扫影像; b. 永兴岛珊瑚礁坪前缘突起脊-槽沟水下影像^[39]

a. Side scan image of protruding ridge-groove on the southeast side of Yongxing Island; b. underwater image of the protruding ridge-groove on the front edge of the coral reef flat of Yongxing Island^[39]

3.4.5 斜坡带水下阶地

宣德环礁礁坪外缘坡折线向海一侧礁前斜坡及礁坪内缘至潟湖底的潟湖坡均有水下阶地发育, 平面影像在斜坡带形成环带结构, 且向海坡侧发育明显。图 9a 为七连屿东南角向海坡斜坡带上水下阶地侧扫影像, 图片区域可见有 1、2、3 共 3 级阶地结构, 分别在水深约 28 m、71 m、106 m 处形成环带分界, 表现出明显的环形带状结构。沉积物为含砾中砂, 砾级物质为珊瑚礁碎屑(图 9b), 平均粒径为 1.51Φ , 表明该区水动力作用强劲。

4 讨论

4.1 宣德环礁地貌分类

南沙群岛珊瑚礁的地貌形态受海洋水动力因素所控制, 自礁坪外缘至潟湖波能衰减, 形成不同强度

的波能带^[12]。宣德环礁发育受到风浪、潮流为主的动力因素及珊瑚礁生长所需透光带等生物作用因素的影响,使其所塑造的水下地貌类型分布总体呈同心环带状,据水深变化而套嵌,地貌变化界线与等深线大体重合(图 10)。在斜坡、水道等地形变化剧烈和动力作用强劲的地区,侧扫影像对特征地貌表现清晰、边界清楚,在潟湖中地形平坦、动力作用较弱的地区,侧扫图像上其地貌变化上不明显,对边界不易划定。但环礁潟湖属于低波能区,以沉积作用为主,水动力强度随水深增大而衰减,微地貌类型与海底水深吻合较好。

根据环礁形态划分一级地貌单元,以动力特征和礁盘位置划分二级地貌单元,三级地貌单元受动力特

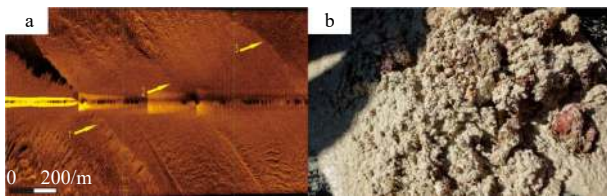


图 9 向海坡水下阶地侧扫影像及其表层沉积物 (位置见图 2)

Fig. 9 Side scan images of underwater terraces and surface sediments on the slope (the location is shown in Fig.2)

a. 七连屿向海坡水下阶地侧扫影像; b. 七连屿向海坡水下阶地表层沉积物

a. Side scan image of underwater terrace on Qilianyu sea slope; b. surface sediments of the underwater terraces on the Qilianyu sea slope

征和水深控制,将宣德环礁水下地貌分为 3 个等级共 11 类地貌类型(表 2)。第 1 等级:以环礁边缘为界,上部为环礁顶,其下为环礁向海斜坡;第 2 等级:自礁坪前缘礁脊线向海至向海坡下坡,向潟湖至潟湖底,包含礁顶向海坡、潟湖、潮汐通道、向海坡上坡、向海坡下坡;第 3 等级:包含礁前(向海侧)、礁盘前缘、礁盘斜坡、潟湖坡、礁前(向潟湖侧)、潟湖底、水下沙坝、潮汐水体通道、潮汐通道深切区、浅水平台、深水平台共 11 类 3 级地貌单元(表 2)。其中潟湖侧礁前地貌一般分类属于潟湖坡,但在侧扫影像中礁前地貌表现为环形条带状,本文为使其完整性得以保持,将其划为潟湖区三级地貌单元。水下沙坝地貌按空间位置划分属于潟湖底,但由于其为潟湖区潮汐通道搬运碎屑沉积物侵入潟湖盆的重要地貌,具有指示潮汐动力强动能输运沉积区域的重要意义,故将其也划为潟湖区三级地貌单元。研究区水深下限为

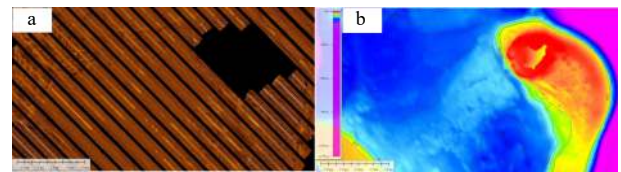


图 10 宣德环礁南部永兴岛周边海域水下侧扫影像 (a) 及其水深渲染图(b)

Fig. 10 Underwater side scan image (a) and bathymetry rendering of the waters (b) around Yongxing Island in the south of Xuande atoll

表 2 宣德环礁海底侧扫影像地貌分类

Table 2 Classification of landforms from side scan images of Xuande atoll

一级地貌	二级地貌	三级地貌	分类定义	微地貌特征	发育水深/m
1. 环礁顶	1.1 礁顶向海坡	1.1.1 礁前(向海侧)	礁坪礁脊线至水下礁脊线区域	槽沟、近岸浅水珊瑚礁群	<20
		1.1.2 礁盘前缘	水下礁脊线至礁盘边缘线区域	沙波、宣德环礁第二级水下阶地	20~70
		1.1.3 礁盘斜坡	礁盘边缘线至环礁边缘线区域	沙波、宣德环礁第三级水下阶地	70~100
	1.2 潟湖	1.2.1 礁前(潟湖侧)	礁坪礁脊线至水下礁脊线区域	槽沟、近岸浅水珊瑚礁群	<20
		1.2.2 潟湖坡	水下礁脊线至潟湖底斜坡区域		20~50
		1.2.3 潟湖底	潟湖平坦海底	水下砂质沉积	50~60
	1.3 潮汐通道	1.3.1 水下沙坝	受潮汐水道控制突入潟湖平坦海底的砂质沉积体	水下砂质沉积、浅水沙波	50~55
		1.3.2 潮汐水体通道	潮流水体自环礁边缘至潟湖水下砂质沉积体区域	水下砂质沉积	50~60
		1.3.3 潮汐通道深切区	潮流冲刷深切潟湖盆区域	砂质沉积反射特征的水下珊瑚群礁	55~60
2. 环礁向海斜坡	2.1 向海坡上坡	浅水平台	环礁边缘线以深平直型陡坡		100~700
	2.2 向海坡下坡	深水平台	切割起伏型斜坡		>700

200 m, 属向海坡上坡地貌单元, 本文中采用左秀玲等^[22]研究成果, 取水深 700 m 处为宣德环礁向海坡上、下坡界线。

侧扫与测深数据反映出水下地貌“总体重合、局

部互补”的特点, 以侧扫声呐特征地貌为水下地貌类型主要识别依据, 以水深数据为辅, 划定宣德环礁精细水下地貌界线(图 11a), 应用所构建的 3 级 11 类地貌分类体系, 绘制宣德环礁水下地貌类型图(图 11b)。

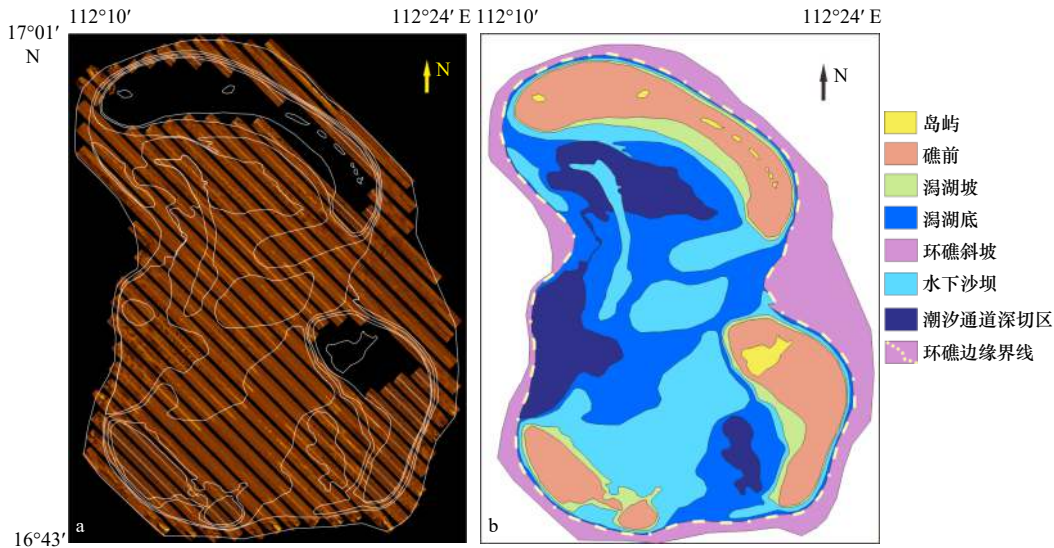


图 11 宣德环礁侧扫地貌(a)及水下地貌类型(b)

Fig. 11 Side scan geomorphologic (a) and underwater geomorphologic type (b) of Xuande atoll

4.2 宣德环礁水下地貌成因机制

4.2.1 宣德环礁浅水区地貌成因机制

宣德环礁冬季盛行偏北季风, 夏季盛行偏南季风, 海流随风向变迁。宣德环礁以水深 20 m 上下为界, 波基面以上, 礁坪前缘至礁缘区水下地貌由风场和波浪场控制, 受 NW-SE 向风浪场及地形因素影响形成的 W-E 向往复流冲刷的作用。七连屿向海坡(A-A'中 I 区)及永兴岛(8a)发育突起脊-槽沟, 沟脊走向为 NW-SE 向, 其中 A-A'中 I 区近 W-E 向, 近岸长垣礁礁体(A-A'中 II 区)平行于岸线, 长轴发育为 NW-SE 向。水深大于 20 m 处, 礁缘向外海斜坡处底层流则受地形倾向影响增强, 向海坡沙波波脊线(图 6g)走向 NW-SE 向, 近 N-S 向, 所受水动力为 SW-NE 向, 近 W-E 向, 该地貌成因机制认识与前人在南海珊瑚礁浅水区海底地貌成因认识一致^[12]。

4.2.2 宣德环礁潟湖区动力地貌成因机制

宣德环礁潟湖区属于低波能带, 水动力条件最弱, 是生物碎屑物堆积的最终场所^[12]。李亮等^[54]研究认为, 潟湖区沉积是由礁盘外强烈的海流冲刷礁盘外沿, 携带大量沉积物通过“海底通道”进入礁盘。笔者发现环礁区存在 4 处深水口门, 并形成 4 条主要潮汐水体(图 12), 北部有 3 个口门: 西沙洲、“红草门”及环礁西缺口, 形成 3 条主要潮汐通道: 环礁西北端西沙洲处口门, 水体入潟湖并分成两支, 一支向南与环

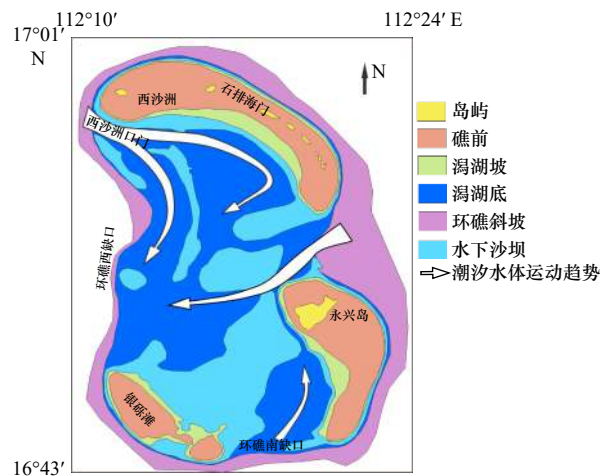


图 12 宣德环礁潮汐水体运动趋势

Fig. 12 Tidal water movement trend of Xuande atoll

礁西侧口门相通, 另一支沿七连屿礁盘向东南入潟湖中央, 强度逐渐减弱, 主要走向为 NW-SE 向。西沙洲口门强水动力进入潟湖, 沿七连屿搬运礁盘物源, 沉积物沉降填充于珊瑚礁格架中, 形成礁体-砂质混合沉积结构(图 7c), 深入潟湖中央后形成砂质沉积地貌, 为宣德环礁 NW-SE 向特征地貌的主要塑造因素。第 3 支为石岛处由“红草门”至环礁西侧缺失处, 水体进入潟湖形成 W-E 向潮汐通道, 为宣德环礁 W-E 向特征地貌的主要塑造因素。该水体与西沙洲

口门—七连屿水体交汇,形成隔断潟湖南北水体的中央砂质沉积区。环礁南侧以南部缺口为口门,进入潟湖后减弱,冲刷搬运银砾滩及永兴礁盘物质,受石岛“红草门”W-E向强劲水体截断,形成银砾滩-永兴区间砂质沉积区。宣德环礁口门动力强度具有北强南弱、西强东弱的特征。

4.2.3 宣德环礁水下阶地成因初探

由礁缘向海,地形陡然下降,坡度显著增大,根据

侧扫图像影像界线并结合地形数据,在宣德环礁东南角向海坡,划出1~6共6级水下阶地,水深分别为22 m、70 m、108 m、138 m、154 m、181 m(图13a)。赵焕庭等^[18]曾总结永暑礁环礁东南礁前向海坡的I~VI 6级水下阶地,水深分别为25 m(年龄距今约8 ka)、50 m(12~11 ka)、140 m(年龄距今约900 ka)、250 m、380 m和620 m。张江勇等^[4]在西沙甘泉海台水深小于850 m的范围内识别出多达5级的水下阶地,三级

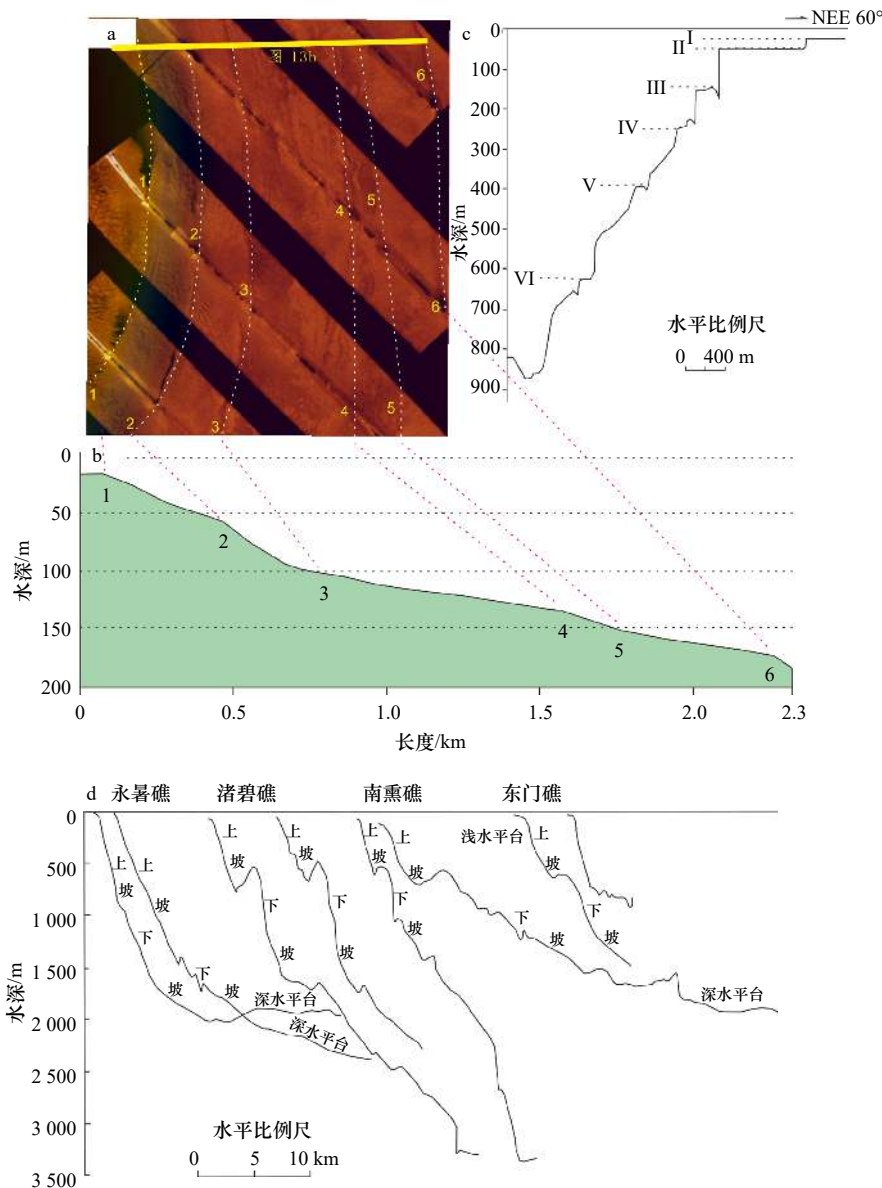


图 13 七连屿向海坡水下阶地侧扫影像及地形剖面

Fig. 13 Side scan image and topographic profile of underwater terraces on the seawall slope of Qilianyu Island

- a. 七连屿向海坡六级水下阶地侧扫影像; b. 七连屿向海坡六级水下阶地地形剖面; c. 永暑礁东南礁前向海坡地形剖面^[42]; d. 南沙群岛珊瑚礁礁外坡地形剖面^[18]
- a. Side scan image of the sixth-level underwater terrace on the Qilianyu sea slope; b. topographic profile of the sixth-level underwater terrace on the Qilianyu sea slope; c. topographic profile of the front sea slope of the southeast reef of Yongshu Reef^[42]; d. topographic profile of the outer slope of the coral reef in the Nansha Islands^[18]

礁顶阶梯状地形,其成因很可能是全球海平面变化和地壳沉降(尤其是热沉降)共同作用的结果。永暑礁和甘泉海台多级水下阶地及其他典型的南海珊瑚礁外坡地形(图 13d)反映出,对于整个南海而言,无论全球海平面变化,还是地壳热沉降,都是全海域发生的。微观结构上,宣德环礁水下阶地可见向海侧强反射,其后为阴影区,尤以一、二级阶地反映明显,表现出阶地处发育、向海侧隆起、后部凹陷结构。笔者认为,其可能形成的原因可对比礁坪前缘礁脊发育成因,礁脊由于波浪破碎应力产生的珊瑚碎屑及沉积物,受波浪和往复流作用影响,在礁坪前缘堆积并胶结形成隆起脊(礁脊)。一级阶地为礁盘边缘,在斜坡处受潮流往复冲刷,在隆起脊其后产生下切侵蚀形成凹陷,这种凸起-凹陷结构的发育应为海流搬运-堆积-侵蚀作用造成,受海平面变化或地壳沉降运动的影响,阶地沉降海底,潮流动力减弱,发育停止,其上部重新发育新阶地。阶地凸起-凹陷结构发育的规模大小或反映当时构造运动时期长短及规模,尚待进一步研究论证。

5 结论

(1)宣德环礁为残缺型环礁类型,中部为潟湖沉

积,北部发育广大弧形礁盘——七连屿礁盘,东南部发育永兴-石岛弧形礁盘,西南部为银砾滩浅滩,环礁西侧与海相通,南侧和东侧则发育部分缺口,环礁碳酸盐台地至向海坡间发育环形凸起环礁边缘。各礁盘之间形成口门,分别为西北端的西沙洲口门,南沙洲-永兴的“红草门”、环礁西侧缺口、环礁南侧缺口,四处水深 60 m 以上的深水口门,首次识别了西沙洲口门。

(2)研究区礁前以深水下地貌分类可分为 3 等级 11 类:第 1 等级包含环礁顶、环礁向海斜坡;第 2 等级包含礁顶向海坡、潟湖、潮汐通道、向海坡上坡、向海坡下坡;第 3 等级包含礁前(向海侧)、礁盘前缘、礁盘斜坡、潟湖坡、礁前(向潟湖侧)、潟湖底、水下沙坝、潮汐水体通道、潮汐通道深切区、浅水平台、深水平台。识别出宣德环礁水深分别为 22 m、70 m、108 m、138 m、154 m、181 m 的 6 级水下阶地。

(3)宣德环礁浅层水下地貌由盛行季风和波浪场控制。深水口门形成的潮汐通道水体为塑造宣德环礁潟湖区动力地貌的主要因素。通过对比南海珊瑚礁阶地特征,宣德环礁向海坡阶地成因很可能是全球海平面变化和地壳沉降共同作用。

参考文献:

- [1] 孙家淞,周长振,冯栋志.从几种海底地貌类型的发育论述水动力作用的影响[J].海洋通报,1984,3(2):54-61.
Sun Jiasong, Zhou Changzhen, Feng Dongzhi. On effects of hydrodynamic processes on the development of some submarine geomorphological features[J]. Marine Science Bulletin, 1984, 3(2): 54-61.
- [2] 郭旭东,冯文科.据地貌声图判读研究海底地貌和底质类型[J].地质科学,1978,13(4):373-382.
Guo Xudong, Fen Wenke. A study of bottom geomorphology and submarine sediments by sonarographic interpretation[J]. Chinese Journal of Geology, 1978, 13(4): 373-382.
- [3] 冯文科,鲍才旺,陈俊仁,等.南海北部海底地貌初步研究[J].海洋学报,1982,4(4):462-472.
Feng Wenke, Bao Caiwang, Chen Junren, et al. Preliminary study on submarine relief of the northern South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1982, 4(4): 462-472.
- [4] 蔡秋蓉.南海北部海底微地貌特征与近代变化[J].南海地质研究,2003(14):77-83.
Cai Qiurong. Micro-geomorphic features and their dynamic change in northern South China Sea[J]. Georesearch of Ecological South China Sea, 2003(14): 77-83.
- [5] 陈卫民,杨作升,曹立华,等.现代长江口水下底坡上的微地貌类型及分区[J].中国海洋大学学报(自然科学版),1993(S1):45-51.
Chen Weimin, Yang Zuosheng, Cao Lihua, et al. Microgeomorphology on the subaqueous slope of the Changjiang River delta[J]. Periodical of Ocean University of China, 1993(S1): 45-51.
- [6] 赵铁虎,李春,丛鸿文,等.青岛近岸海区海底地貌类型及声学特征[J].海洋测绘,2005,25(1):40-43.
Zhao Tielu, Li Chun, Cong Hongwen, et al. Relief type and acoustic characters of inshore seabed along Qingdao[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2005, 25(1): 40-43.
- [7] 陈俊仁.我国南部西沙群岛地区第四纪地质初步探讨[J].地质科学,1978(1):46-56.
Chen Junren. A preliminary discussion on quaternary geology of Xisha Qundao Islands of South China[J]. Chinese Journal of Geology, 1978(1): 46-56.
- [8] 曾昭璇.试论中国珊瑚礁地貌类型[J].热带地貌资料,1980:1-16.
Zeng Zhaoxuan. The geomorphological types of coral reef of China[J]. Tropical Landforms, 1980: 1-16.
- [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.
Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin, Zeng Diming. Some problems concerning geomorphology of Shidao, Xisha Islands[J]. Oil & Gas Geo-

- logy, 1984, 5(4): 335–341.
- [10] 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]. 热带海洋学报, 1995(2): 24–31.
Yu Kefu, Song Chaojing, Zhao Huanting. The characters of geomorphology and modern sediments of Yongxing Island, Xisha Islands[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1995(2): 24–31.
- [11] 赵焕庭, 宋朝景, 朱袁智. 南沙群岛“危险地带”腹地珊瑚礁的地貌与现代沉积特征[J]. 第四纪研究, 1992, 12(4): 368–377.
Zhao Huanting, Song Chaojing, Zhu Yuanzhi. Geomorphic and modern sedimentary features of coral reefs in the hinterland of “Dangerous Ground”, Nansha Islands[J]. Quaternary Sciences, 1992, 12(4): 368–377.
- [12] 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.
- [13] 周胜男, 施祺, 周桂盈, 等. 南沙群岛珊瑚礁砾洲地貌特征[J]. 海洋科学, 2019, 43(6): 48–59.
Zhou Shengnan, Shi Qi, Zhou Guiying, et al. Geomorphic features of coral shingle cays in the Nansha Islands[J]. Marine Sciences, 2019, 43(6): 48–59.
- [14] 张江勇, 黄文星, 刘胜旋, 等. 南海西沙海域甘泉海台的阶梯状地形[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 10–18.
Zhang Jiangyong, Huang Wenxing, Liu Shengxuan, et al. Terrace topography of the Ganquan Plateau in the Xisha Area of the South China Sea[J]. Tropical Geography, 2016, 36(1): 10–18.
- [15] 赵焕庭, 王丽荣. 珊瑚礁形成机制研究综述[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 1–9.
Zhao Huanting, Wang Lirong. Review on the study of formation mechanism of coral reefs[J]. Tropical Geography, 2016, 36(1): 1–9.
- [16] 于红兵, 孙宗勋. 南沙群岛永暑礁上部向海坡地貌特征研究[J]. 海洋通报, 1999, 18(3): 49–54.
Yu Hongbing, Sun Zongxun. Geomorphic features of upper seaward slope of Yongshu reef, Nansha Islands[J]. Marine Science Bulletin, 1999, 18(3): 49–54.
- [17] 王雪木, 陈万利, 薛玉龙, 等. 西沙群岛宣德环礁晚第四纪灰砂岛沉积地层[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(6): 37–45.
Wang Xuemu, Chen Wanli, Xue Yulong. The Late Quaternary Carbonate sand deposits at the Xuande Atoll[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(6): 37–45.
- [18] 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景. 南海珊瑚礁地貌模型研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(9): 112–120.
Zhao Huanting, Wang Lirong, Song Chaojing. Geomorphological model of coral reefs in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(9): 112–120.
- [19] 黄荣永, 余克服, 王英辉, 等. 珊瑚礁遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2019, 23(6): 1091–1112.
Huang Rongyong, Yu Kefu, Wang Yinghui, et al. Progress of the study on coral reef remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(6): 1091–1112.
- [20] 周旻曦, 刘永学, 李满春, 等. 多目标珊瑚岛礁地貌遥感信息提取方法——以西沙永乐环礁为例[J]. 地理研究, 2015, 34(4): 677–690.
Zhou Minxi, Liu Yongxue, Li Manchun, et al. Geomorphologic information extraction for multi-objective coral islands from remotely sensed imagery: a case study for Yongle Atoll, South China Sea[J]. Geographical Research, 2015, 34(4): 677–690.
- [21] 龚剑明, 朱国强, 杨娟, 等. 面向对象的南海珊瑚礁地貌单元提取[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 997–1004.
Gong Jianming, Zhu Guoqiang, Yang Juan, et al. A study on the object-oriented model for geomorphic unit extraction of coral reefs in the South China Sea[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(6): 997–1004.
- [22] 左秀玲, 苏奋振, 赵焕庭, 等. 南海珊瑚礁高分辨率遥感地貌分类体系研究[J]. 地理科学进展, 2018, 37(11): 1463–1472.
Zuo Xiuling, Su Fenzhen, Zhao Huanting, et al. Development of a geomorphic classification scheme for coral reefs in the South China Sea based on high-resolution satellite images[J]. Progress in Geography, 2018, 37(11): 1463–1472.
- [23] 金翔龙. 海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1243–1249.
Jin Xianglong. The development of research in marine geophysics and acoustic technology for submarine exploration[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1243–1249.
- [24] 吴自银, 郑玉龙, 初凤友, 等. 海底浅表层信息声探测技术研究现状及发展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(11): 1210–1217.
Wu Ziyin, Zheng Yulong, Chu Fengyou, et al. Research status and prospect of sonar-detecting techniques near submarine[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(11): 1210–1217.
- [25] 王晓, 王爱学, 蒋廷臣, 等. 侧扫声呐图像应用领域综述[J]. 测绘通报, 2019(1): 1–4.
Wang Xiao, Wang Aixue, Jiang Tingchen, et al. Review of application areas for side scan sonar image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(1): 1–4.
- [26] 郭军, 冯强强, 温明明, 等. Teledyne Benthos TTV-301声学深拖系统在海底微地形地貌调查中的应用[J]. 测绘工程, 2018, 27(10): 46–51.
Guo Jun, Feng Qiangqiang, Wen Mingming, et al. Research and application of the Teledyne Benthos TTV-301 deep-tow system to the microtopography seabed[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(10): 46–51.
- [27] 张同伟, 唐嘉陵, 李正光, 等. 蛟龙号载人潜水器在深海精细地形地貌探测中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 61(8): 1148–1156.
Zhang Tongwei, Tang Jialing, Li Zhengguang, et al. Use of the Jiaolong manned submersible for accurate mapping of deep-sea topo-

- graphy and geomorphology[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(8): 1148–1156.
- [28] Hamouda A, Soliman K, El-Gharabawy S, et al. Comparative study between acoustic signals and images for detecting seabed features[J]. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2019, 45(2): 145–151.
- [29] Alves T M, Gawthorpe R L, Hunt D W, et al. Cenozoic tectono-sedimentary evolution of the western Iberian margin[J]. *Marine Geology*, 2003, 195(1/4): 75–108.
- [30] Alves T M, Cunha T, Bouriak S, et al. Surveying the flanks of the Mid-Atlantic Ridge: the Atlantis Basin, North Atlantic Ocean (36°N)[J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1/4): 199–222.
- [31] Alves T M, Lykousis V, Sakellariou D, et al. Constraining the origin and evolution of confined turbidite systems: southern Cretan margin, Eastern Mediterranean Sea (34°30–36°N)[J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 27(1): 41–61.
- [32] 邵磊, 朱伟林, 邓成龙, 等. 南海西科1井碳酸盐岩生物礁储层沉积学年代地层与古海洋环境[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016. Shao Lei, Zhu Weilin, Deng Chenglong, et al. Sedimentological Chronostratigraphy and Paleomarine Environment of Carbonate Reef Reservoir in Well Xike 1, South China Sea[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2016.
- [33] 杨胜雄, 邱燕, 朱本铨, 等. 南海地质地球物理系列图系[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2015. Yang Shengxiong, Qiu Yan, Zhu Benduo, et al. Atlas of Geology and Geophysics of the South China Sea[M]. Tianjin: China Navigation Publications, 2015.
- [34] 李亮, 何其江, 龙根元, 等. 南海宣德海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 140–148. Li Liang, He Qijiang, Long Genyuan, et al. Sediment grain size distribution pattern and transportation trend in the Xuande Water, South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(6): 140–148.
- [35] 赵焕庭, 宋朝景, 余克服, 等. 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. Zhao Huanting, Song Chaojing, Yu Kefu, et al. Nature and development of Yongxing Island and Shi Island of Xisha Islands[J]. *Marine Science Bulletin*, 1994, 13(5): 44–56.
- [36] Folk R L. A review of grain-size parameters[J]. *Sedimentology*, 1966, 6(2): 73–93.
- [37] 王颖. 中国区域海洋学——海洋地貌学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012. Wang Ying. Regional Oceanography of China Seas: Marine Geomorphology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [38] 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. Zeng Zhaoxuan, Liang Jingfen, Qiu Shijun. Geomorphology of Coral Reefs in China[M]. Guangzhou: Guangdong People's Publishing House, 1997.
- [39] 沈建伟, 杨红强, 王月, 等. 西沙永兴岛珊瑚礁坪的群落动态和浅水碳酸盐沉积特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 56(9): 1471–1486. Shen Jianwei, Yang Hongqiang, Wang Yue, et al. Coral community dynamics and shallow-water carbonate deposition of the reef-flat around Yongxing Island, the Xisha Islands[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 56(9): 1471–1486.
- [40] Gischler E. Indo-pacific and Atlantic spurs and grooves revisited: the possible effects of different Holocene sea-level history, exposure, and reef accretion rate in the shallow fore reef[J]. *Facies*, 2010, 56(2): 173–177.
- [41] Rogers J S, Monismith S G, Feddersen F, et al. Hydrodynamics of spur and groove formations on a coral reef[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(6): 3059–3073.
- [42] 朱袁智, 沙庆安, 郭丽芬. 南沙群岛永暑礁新生代珊瑚礁地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997. Zhu Yuanzhi, Sha Qing'an, Guo Lifeng. Cenozoic Coral Reef Geology of the Yongshu Reef, Nansha Islands[M]. Beijing: Science Press, 1997.

Submarine geomorphologic features and genetic mechanism in the Xuande atoll, Xisha Islands

He Qijiang^{1,2}, Liu Gang^{1,2}, Wang Xuemu^{1,2}, Zheng Zhifeng^{1,2}, Duan Ke³, Han Xiaohui^{1,2}, Shen Aisi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geology Resources and Environment of Hainan Province, Haikou 570206, China; 2. Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China; 3. HuBei Geological Survey, Wuhan 430034, China)

Abstract: The submarine topographic features and distribution types of the Xuande atoll in the Xisha Islands have important indications for the influence of regional geological structure, sea level rise and fall, and ocean hydrodynamics. In order to study the submarine topography and geomorphology of the Xuande atoll, we detailed survey in the Xuande atoll of the Xisha Islands, including side scan sonar, single-beam sounding, and surface sediment

sampling. The results show that: (1) Xuande atoll is a type of incomplete atoll, with lagoon deposits in the middle, and four water channels with a water depth of about 60 m had been divided, namely, the gate of the Xishazhou at the northwest of the atoll, the “Red Grass Gate” of the Nanshazhou-Yongxing, the gap on the west side of the atoll, and the gap on the south side of the atoll; (2) according to the geomorphic features, the underwater geomorphic types of the Xuande atoll are divided into 3 grades and 11 types of grades classification systems. The dynamic geomorphology units such as sand waves and grooves in the study area show that the submarine features in the shallow water area of Xuande atoll are controlled by prevailing monsoons and wave sites. The tidal channel water body formed by the deep water entrance is the main factor shaping the dynamic geomorphology of the Xuande atoll lagoon area. There are six levels of underwater terraces on the seaward slope in the southeastern part of the study area. By comparing the characteristics of the coral reef terraces in the South China Sea, the genesis of the seaward slope terraces on the Xuande atoll is likely to be a combination of global sea level changes and crustal subsidence.

Key words: side scan sonar; submarine geomorphologic features; classification system; Xuande atoll