

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.004

西沙群岛宣德环礁晚第四纪灰砂岛沉积地层

王雪木¹, 陈万利², 薛玉龙¹, 刘刚¹

1. 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206

2. 中国科学院深海科学与工程研究所深海地球物理与资源研究室, 三亚 572000

摘要:灰砂岛沉积能记录碳酸盐台地上地表的沉积过程, 了解这些过程对于古灰砂岛沉积的资源勘探和现代岛屿的工程建设都有着重要意义。结合最新的岛上钻孔数据和近期野外地质考察结果对西沙群岛宣德环礁晚第四纪灰砂岛沉积地层的平面分布特征和纵向演化规律进行了研究, 结果显示南岛的灰砂岛沉积的百年尺度沉积过程复杂, 不同期次沉积相互混杂, 不利于开展百年尺度的灰砂岛沉积研究。永兴岛 18.39m 可能为更新统和全新统的分界面, 其下为珊瑚礁灰岩硬底, 为灰砂岛的淹没期, 其上为灰砂岛沉积时期的初始期、扩张期和稳定期, 发育珊瑚、贝壳生物碎屑的松散沉积物。宣德环礁的灰砂岛沉积最早是更新世晚期暴露时(MIS4)开始形成, 且主要分布在石岛, 从全新世中期开始, 宣德环礁其他岛屿上快速发育灰砂岛沉积。灰砂岛的形状受到季风和海岸地貌的影响显著, 其主要是通过控制海滩岩的发育来影响灰砂岛形状。

关键词:灰砂岛沉积; 沉积特征; 晚第四纪; 宣德环礁

中图分类号: P736.21 **文献标识码:** A

The Late Quaternary Carbonate sand deposits at the Xuande Atoll

WANG Xuemu¹, CHEN Wanli², XUE Yulong¹, LIU Gang¹

1. Marine Geological Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China

2. Marine Geophysics and Georesource, Institute of Deep-sea Science and Engineering, CAS, Sanya 572000, China

Abstract: Carbonate sands are the common clastic deposits formed on the surface of carbonate platforms. Understanding the depositional processes of the deposits is of great significance to the development of carbonate sand resources and the construction of modern artificial islands. On the basis of the latest drilling and geological survey data, the distribution pattern and vertical evolution of the Late Quaternary carbonate sand deposits at the Xuande Atoll, Xisha Islands are studied in this paper. The results suggest that the centennial scale depositional process is rather complex on the South Island, and the inter-decadal sediments are mixed each other and not conducive to the study of centennial scale sedimentation. The boundary at 18.39m in depth on the Woody Island is defined as the boundary between Pleistocene and Holocene. The Pleistocene deposits of coral reef limestone below 18.39m were formed during the submerging period of the platform. Upon the boundary deposited the loose sediments of coral and shell bioclasts formed in the initial period, expansionary period and stable period of the coral island respectively. The bioclastic deposits at the Xuande atoll were firstly formed during glacial MIS4, mainly on the Shidao Island. A large number of coral islands appeared at the Xuande Atoll after Middle Holocene. The shape of the carbonate sand island is significantly affected by the distribution of beach rocks which are controlled by the monsoon and ocean waves.

Key words: carbonate sand deposits; depositional characteristic; Late Quaternary; Xuande Atoll

当生物礁碳酸盐岩的生产力超过了礁坪可容纳空间的增加量, 砂砾屑便会逐渐堆积加高, 到一定程度时形成灰砂砾, 再进一步加积、增高、经植被覆盖、固定, 则形成灰砂岛^[1-4]。灰砂岛的出现是生物礁发

育成熟的重要标志之一, 也是可被人类利用的重要空间资源。前人已经对西沙群岛的岛屿进行了分类, 探讨了岛屿的形成时间及控制因素等^[2, 5-8], 但目前对岛屿上灰砂岛沉积地层平面上分布规律和纵向

资助项目: 海南省自然科学基金资助项目“三沙市永兴岛东部海底滑坡类型分布和成因探讨”(418QN306)

作者简介: 王雪木(1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事海洋地质调查工作, E-mail: wangxuemu@163.com

通讯作者: 陈万利(1990—), 男, 在读博士, 主要从事海洋地质、海洋地球物理方向的研究, E-mail: chenwl@idsse.ac.cn

收稿日期: 2018-06-29; **改回日期:** 2018-11-21. 蔡秋蓉编辑

上沉积特征研究还不够。本次在宣德环礁开展灰砂岛的晚第四纪沉积物的物质组成、成因类型及时空分布等研究,对于岛屿的工程建设、空间资源开发有着重要意义。

本文主要的研究区域是西沙宣德环礁的6座灰砂岛,对这几座岛屿进行了野外露头观测、取样,其中在南岛的南端沙嘴处取了1根柱状样 NDZ,样长 1.20m,在永兴岛完成了一口地质浅钻 SSZK1,孔深 55.92m(图 1)。钻孔所得的沉积物测年结果显示,灰砂岛沉积过程在百年尺度内地层倒转的现象频繁出现,结合 6 座岛屿的露头观测结果发现,最早的灰砂岛沉积分布在石岛,从中全新世开始在其他岛屿快速发育灰砂岛沉积。灰砂岛沉积严重受到季风、海岸地貌和海平面变化的影响。

1 区域地质背景

西沙群岛及其海域的海底地形是在前寒武纪变质岩基底长期裸露,经受剥蚀的地形基础上发育起来的^[9-13]。灰砂岛沉积主要在新生代晚期发育,西沙群岛已知的 31 个岛屿中,除高尖石岛与火山作用相关外,其余都为碳酸盐岛屿^[14],大部分岛屿出露的沉积物有珊瑚礁灰岩,贝壳、珊瑚砂砾岩、松散的白色贝壳、珊瑚砂砾岩、鸟粪贝壳珊瑚砂^[5]。西沙群岛长期受到东亚季风气候的影响,夏天以从海洋吹向大陆的西南风为主,热带低压气旋影响下经常出现台风,冬天来自内陆的东北季风为主^[8],在灰砂岛的冲蚀和堆积作用中发挥着重要作用^[2]。研究区

所在的宣德环礁位于海南岛南偏西方向约 180 海里,在我国的南海战略中扮演着重要的角色。礁盘上发育有赵述岛、北岛、中岛、南岛、永兴岛、石岛 6 座灰砂岛(图 1)。其中永兴岛及石岛是三沙市政府所在地,有常住渔民;赵述岛是七连屿工委所在地,有常住渔民;北岛上也有渔民定居。永兴岛和石岛上的钻井揭示在大约 19.08m(西科 1 井)、24.68m(西石 1 井)、17.72m(西永 2 井)的珊瑚碎屑砂岩下为原地珊瑚礁格架灰岩,说明西沙宣德环礁灰砂岛是在礁坪的基础上发育起来的^[14-17]。宣德环礁的灰砂岛中,除了石岛经表生成岩作用固结外,其余灰砂岛都是由生物砂砾堆积而成。大多数灰砂岛发育于环礁的礁坪上,且岛屿的长轴方向与所在礁坪的延长方向大多一致^[5]。石岛上的风成石灰岩和化石土壤层多次频繁交替出现,反映末次冰期气候的干、湿变化^[15]。

2 数据与方法

2.1 南岛柱状样

2015 年 9 月,本次研究在南岛南端的沙嘴处取了 1 根柱状样,样长 1.20m。取样使用透明 PVC 管,人力垂直砸入沙滩并挖出。将 PVC 管两头封好塞子,进行现场描述后,封装运回室内,按照 0.1m 的间隔取样,送至美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 测试,并将结果进行 2 SIGMA 校正,取样深度及测试结果见表 1。

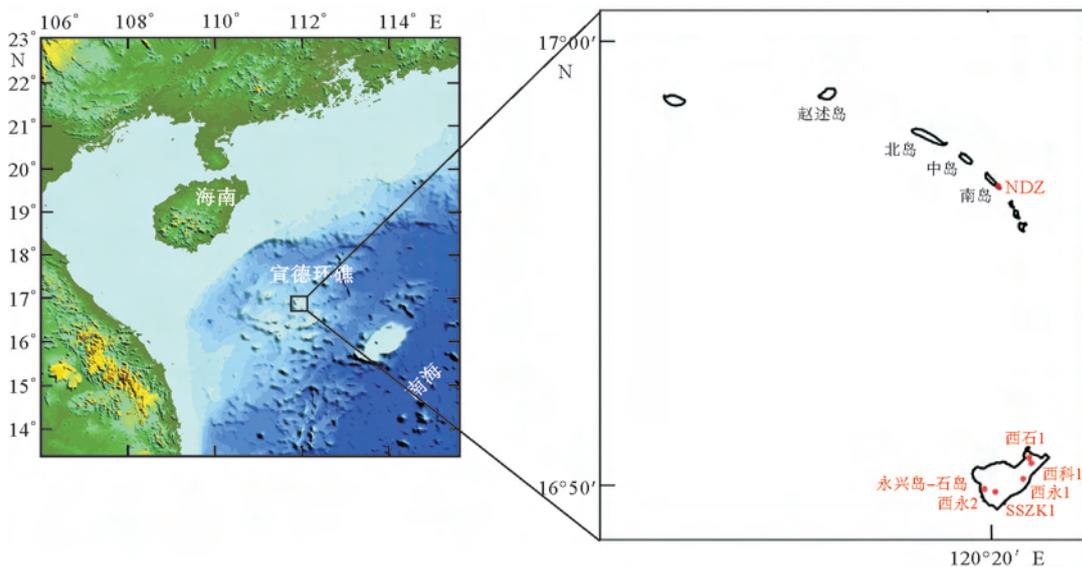


图 1 宣德环礁位置图

Fig 1 The location of Xuande Atoll

表 1 南岛柱状样 NDZ 的测年结果

(BP 是指从公元 1950 年起算)

Table 1 Dating results of the Core NDZ from Nan Island
(BP means before present, "present"=AD 1950)

取样深度/m	AMS ¹⁴ C 测试结果/aBP
0.02	640~495
0.10	1865~1625
0.20	390~175
0.30	470~280
0.40	445~260
0.50	435~255
0.60	325~135
0.70	700~550
0.80	295~75
0.90	500~310
1.00	1685~1470
1.10	445~260
1.20	425~250

2.2 永兴岛钻孔

本次在永兴岛南侧靠近机场跑道的位置施工了一口地质浅钻 SSZK1 (大体位置见图 1), 孔深 55.92m。岩心经现场岩性描述后, 封装运回室内进行岩心纵剖工作, 在不同的深度位置共选取了 16 个年龄测试样品, 其中 AMS¹⁴C 测年样品 8 个, 送至美国 Beta 实验室进行测试, 并将得到的结果进行 2 SIGMA 校正; U 系测年样品 8 个, 送至中国科学院地质与地球物理研究所铀系年代学实验室进行测试, 具体的描述及测试结果见表 2。由于 ¹⁴C 的半衰期限制, 测试的范围上限大体位于距今 40ka 左右, 所以在 18.39 和 24.30m 深度的样品已经超出了测试范围。何起祥、张明书等(1986)的研究表明, 在西沙珊瑚礁区, ¹⁴C 测试年龄偏小, 而 U 系测试年龄则偏大^[18], 本文所测的结果也显示同一点的 U 系测年结果比 ¹⁴C 测年结果大, 但在小于 1 万年的结果中, 我们采用 ¹⁴C 测年结果。

表 2 SSZK1 测年结果分析 (BP* 是指从公元 1950 年起算; BP** 是指从公元 2000 年起算)

Table 2 Analysis of dating results from borehole SSZK1

(BP* : before present, "present"=AD 1950; BP** : before present, "present"=AD 2000)

测试方法	深度/m	沉积微相	测试结果 AMS ¹⁴ C (BP*) U-Th(aBP**)	MIS	时期	沉积速率/(cm/a)	成岛时期
AMS ¹⁴ C	0.67	灰砂岛相	1830±30	1	间冰期	0.09404	稳定期
AMS ¹⁴ C	1.58	灰砂岛相	1680±30	1	间冰期		
AMS ¹⁴ C	2.95	灰砂岛相	1930±30	1	间冰期	0.548	扩张期
AMS ¹⁴ C	4.01	灰砂岛相	2130±30	1	间冰期	0.53	
AMS ¹⁴ C	5.64	灰砂岛相	3080±30	1	间冰期	0.17158	初始期
AMS ¹⁴ C	6.7	灰砂岛相	3440±30	1	间冰期	0.29444	
AMS ¹⁴ C	7.21	灰砂岛相	3800±30	1	间冰期	0.14167	
AMS ¹⁴ C	13.43	灰砂岛相	6480±30	1	间冰期	0.232089	
U-Th	7.21	灰砂岛相	4239±246	1	间冰期	\	
U-Th	13.43	灰砂岛相	8114±190	1	间冰期	\	
U-Th	18.39	礁坪相	69779±274	4	冰期	0.00784	淹没期
U-Th	24.3	礁坪相	88094±349	5	间冰期	0.03227	
U-Th	30.11	礁坪相	236524±2131	7	间冰期	0.00391	
U-Th	42.52	礁坪相	329184±5601	9	间冰期	0.01339	
U-Th	44.89	礁坪相	392344±9658	11	间冰期	0.00375	
U-Th	55.92	礁坪相	479636±19388	13	间冰期	0.01262	

2.3 野外地质考察

宣德环礁自北向南共有赵述岛、北岛、中岛、南岛、石岛、永兴岛6座灰砂岛。本次在上述岛屿进行了1:2000的地质调查,地质点按照网格化布设,点距为50m。本次野外露头考察主要描述地质点的地貌、地层岩性、物理地质等现象,岩石的颜色、结构、矿物成分、粒度等外貌特征,并描述沿途地质特征,在具有代表性的观测点采取样品(图2)。对于形成于潮间带的海滩岩,本次并没有采样进行测年,只能参考卢演侑等的研究成果^[2,19],认为其形成于千年以内,属于晚全新世地层。

3 灰砂岛沉积地层

宣德环礁出露水面的部分可分为两个礁盘,即七连屿礁盘和永兴岛礁盘,本文所探讨的岛屿中赵述岛、北岛、中岛、南岛位于七连屿礁盘的中部(图1),4个岛屿的位置比较集中,地形平缓,地质情况比较接近。地表出露2套全新统地层,其靠岛内一

侧的地层岩性为灰白色松散、未胶结成岩的鸟粪珊瑚砂屑灰岩,未在中部发现磷质胶结的珊瑚砂岩或砾岩。根据在南岛和永兴岛所钻的两口柱子,表层3m以内未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩年龄都在2000年以内(表1、表2),说明该套地层属晚更新世沉积。靠海一侧的全新世地层岩性为固结的珊瑚砾屑灰岩(海滩岩)和松散的贝壳珊瑚砂砾;卢演侑等认为西沙群岛各岛屿周围的海滩岩属于全新统晚期产物^[5],在海滩岩中还发现有废钢铁、破罐子、碎玻璃胶结在其中,因此,陈俊仁等将其归结于现代沉积物^[19]。因此,各个岛屿上出露的地层大部分是全新世晚期的沉积物,除了以上2套全新世地层外,在石岛还发育晚更新世晚期生物碎屑灰岩。

3.1 赵述岛

赵述岛平面上呈不规则椭圆形,长轴为北东—南西西向,长约718m,短轴为北西—南东向,长约368m。岛屿面积约19.23hm²,地表出露2套全新世地层(图3A)。

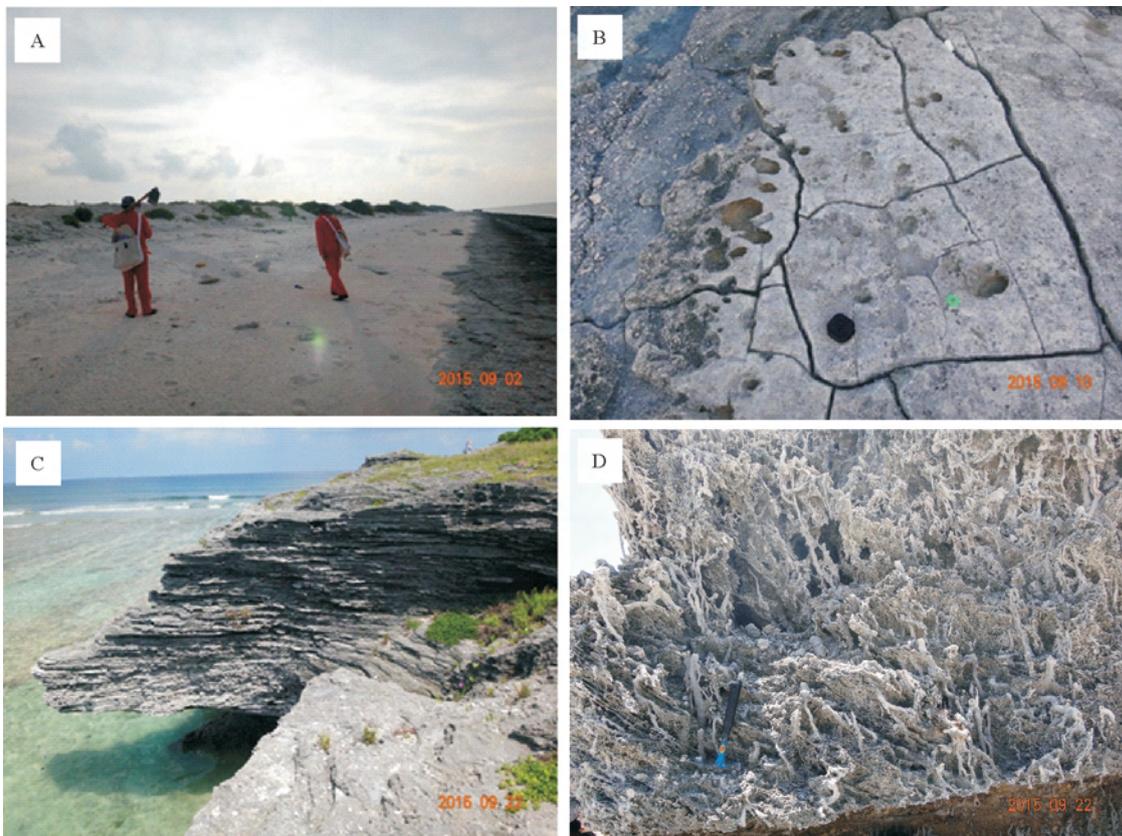


图2 岛屿野外及露头照片

A.北岛野外;B.中岛露头;C、D.石岛露头

Fig.2 Photos of islands and outcrops

North Island(A), Zhong Island(B), Shidao Island(C, D).

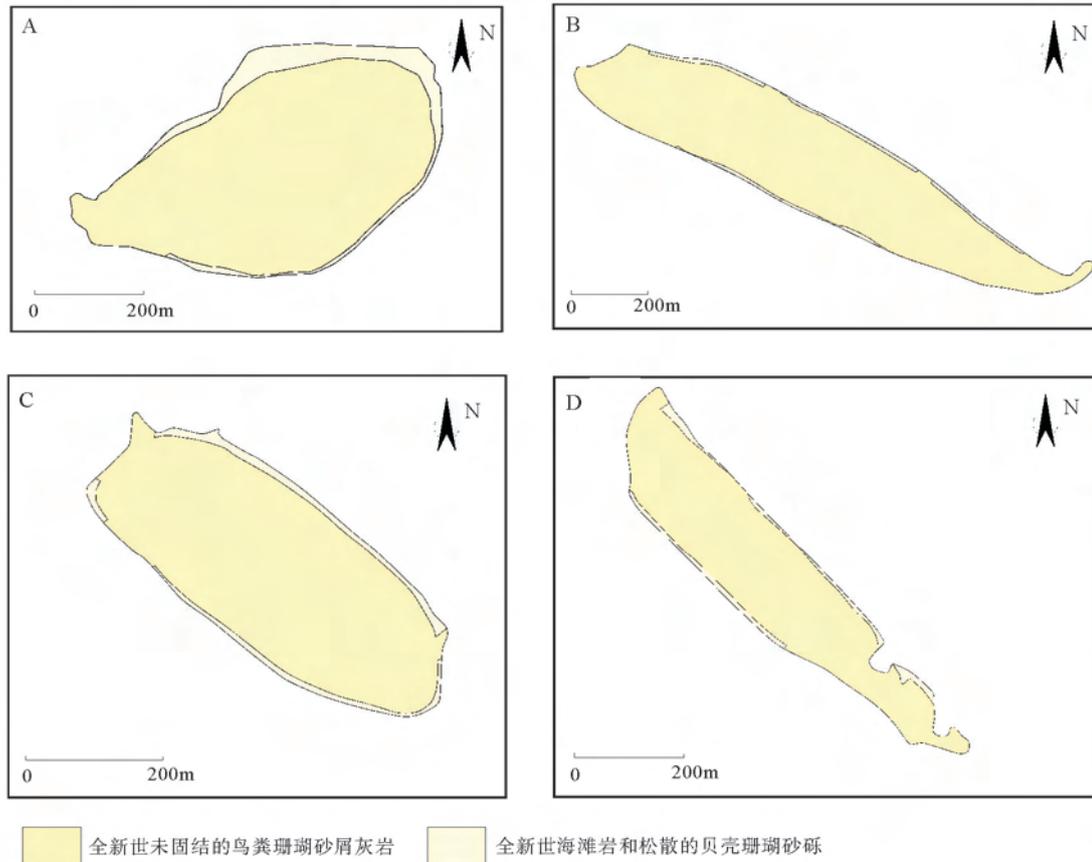


图 3 七连屿灰砂岛沉积地层分布图

A.赵述岛;B.北岛;C.中岛;D.南岛

Fig.3 Geological maps of coral island of Qilianyu Shoal
A.Zhaoshu Island;B.North Island;C.Zhong Island;D.North Island

3.1.1 全新世未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩

全新世未固结的珊瑚砂屑灰岩地层发育面积约 16.91hm²,占岛屿 87%的面积。灰白色,松散,主要成分以珊瑚砂屑为主,未见固结成岩的地层。地层延展方向为北东-西南,东北部的地层短轴方向长度更长,西南部的则较短,推测受到季风控制作用较强,且东北季风作用更强烈。

3.1.2 全新世海滩岩和松散的贝壳珊瑚砂砾

该地层主要分布在岛屿的北、西、南侧的潮间带中部及下部,向海中倾斜,倾角约 10°。在赵述岛的东半部分呈半包围形状,分布面积约 2.32hm²。该珊瑚砾屑灰岩属于海滩岩,表面呈褐灰色,新鲜断面呈灰白色,生物碎屑为块状构造,分选差。海滩岩在东北侧即礁盘靠海一侧更发育,优于西南侧即礁盘内侧靠潟湖方向,其原因是靠海一侧的波浪作用较强。

3.2 北岛

北岛平面上呈纺锤形,长轴为近北西-南东向,

长约 1478m,短轴为近北东-南西向,长约 274m,岛屿面积约 30.46hm²,地表出露 2 套全新统地层(图 3B)。

3.2.1 全新世未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩

晚全新世未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩地层主要为灰白色,松散,主要成分以珊瑚砂屑为主。岛屿大部分地区地表发育此地层,发育面积约 29.51hm²,占岛屿的 96.8%左右。该地层展布的方向与礁盘的展布方向一致,但是在迎风面的海岸线长度短于背风面的海岸线,说明在迎风面一侧的剥蚀作用强,海岸线短而平直,而背风面一侧更有利于该地层的保存,海岸线长而弯曲。

3.2.2 全新世海滩岩和松散的贝壳珊瑚砂砾

珊瑚砾屑灰岩属于海滩岩,表面呈褐灰色,新鲜断面呈灰白色,生物碎屑为块状构造,分选差(图 2A),主要分布在岛屿南北两侧的潮间带中部及下部,向海倾斜,倾角约 10°;该地层在北岛的北侧分布约 0.96hm²,南侧分布约 0.44hm²,迎风面一侧海

滩岩发育优于背风面一侧,说明迎风面一侧的波浪作用强烈。

3.3 中岛

中岛平面上呈近椭圆形,长轴为近北西-南东向,长约 593m,短轴为近北东-南西向,长约 230m,岛屿面积约 11.04hm²,地表出露 2 套全新世地层(图 3C)。

3.3.1 全新世未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩

该地层沉积物为灰白色,松散,主要成分以珊瑚砂屑为主。岛屿大部分地区地表发育此地层,发育面积约 10.14hm²,占岛屿面积的 91.8%左右。该地层在迎风面和背风面的海岸线长度大致相等,地层发育较对称,说明在该区南北两侧的风力、水动力条件较一致。

3.3.2 全新世海滩岩和松散的贝壳珊瑚砂砾

珊瑚砾屑灰岩表面呈褐灰色,新鲜断面呈灰白色,生物碎屑块状结构,块状构造,分选差(图 2B),主要分布在岛屿的东北和西南两侧的潮间带中部及下部,向海中延伸,倾角约 10°;该层位在中岛的东北侧分布约 0.49hm²,西南侧分布约 0.41hm²,两侧海滩岩发育程度相近,发育均较连续。

3.4 南岛

南岛柱状样测年样品采样间距为 0.1m,测得的最老年龄为 BP1865,揭示了该岛中部出露的晚全新世未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩地层,可以发现其地层倒转现象严重,说明灰砂岛沉积在百年尺度内沉积过程中搬运改造机制复杂,严重受到风力、水动力的改造,其沉积序列不适合在百年尺度内研究(表 1)。该岛平面上呈梭形,长轴为北西-南东向,长约 854m,短轴为北东-南西向,长约 158m,岛屿面积约 10.13hm²,地表出露 2 套全新世地层(图 3D)。

3.4.1 全新世未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩

该地层发育面积约 9.42hm²,占整个岛屿面积 93%左右,沉积物岩性以灰白色、松散的珊瑚砂屑为主。该地层北侧由于缺少海滩岩的阻挡,东南部迎风面一侧受到剥蚀而成港湾状,从形状上看和北岛特征一致,迎风面一侧的剥蚀作用强,海岸线短而平直,背风面一侧海岸线长而弯曲。

3.4.2 全新世海滩岩和松散的贝壳珊瑚砂砾

该岛的晚全新世海滩岩特征与其他岛屿一致,主要分布在岛屿的东北和西南两侧的潮间带中部及下部,向海中延伸,倾角约 10°;该地层在南岛的东北侧分布约 0.44hm²,西南侧分布约 0.28hm²,可以

看出迎风一侧的海滩岩更发育而使海岸线更加平直,在海滩岩断开处则海岸线成港湾状,背风一侧海滩岩发育相对较少,海岸线则更弯曲。

3.5 永兴岛-石岛

永兴岛上的 SSZK1 钻孔在 18.39m 处钻遇了松散的珊瑚砂之下的珊瑚礁硬底,其生长年代为 69779±274aBP(MIS4 冰期),是一个重要的暴露界面,而灰砂岛沉积形成于该暴露面之上。对 18.39m 以下的原地珊瑚礁 U 系测年结果可以发现,钻遇的珊瑚礁大部分形成于 MIS5、MIS7、MIS9、MIS11 间冰期,反映了晚更新世期间碳酸盐岩台地明显受到冰期-间冰期旋回的海平面变化的控制。

石岛上的最老的晚更新世灰砂岛沉积年代为 58500aBP^[4,7],基本上可以断定宣德环礁的灰砂岛沉积最早是 MIS4 冰期暴露时开始形成,且主要分布在石岛。SSZK1 钻孔 13.43m 处的测年结果为 6480±30aBP,说明中全新世以来永兴岛就开始发育灰砂岛沉积,但其形成年代不早于 69779±274aBP(表 2)。进行¹⁴C 测年的采样间距大约为 1m,测量的地层年龄只有一个发生倒转,可见该区可能是灰砂岛沉积期次间相互影响较少,或者是因为增大取样间距减少了地层倒转的概率。按照其沉积速率和沉积过程,可将这段灰砂岛沉积时期划分为淹没期、初始期、扩张期和稳定期(表 2)。淹没期为浅水礁坪生长时期,开始时间为晚更新世末 MIS4 期,是形成灰砂岛的基础时期。初始期为灰砂岛沉积的关键时期,开始时间为中全新世,沉积速率为 0.14167~0.29444cm/a,其沉积速率要足够大以至于能形成一定规模的珊瑚砂沉积物,在礁坪中停留,不至于被海浪带走。扩张期开始时间为 2130±30aBP,沉积速率为 0.53~0.548cm/a,该期是灰砂岛岛屿的建设期,其岛屿规模不断壮大。稳定期开始时间为 1680±30aBP,沉积速率为 0.09404cm/a,该期岛屿面积变化较小。

永兴岛与石岛原本是 2 个岛,相距约 800m,近年来由于永兴岛机场跑道的修建以及填海造地,两个岛已连接为一个岛。平面上呈不规则形状,长轴为近东西向,长约 3191m,短轴为近北西-南东向,长约 1576m,面积约 3.01km²,地形平缓。地表除机场跑道及填海造地的地区之外,出露 3 套地层(图 4)。

3.5.1 晚更新世晚期生物碎屑灰岩

该地层主要分布在石岛上,分布面积约

6.39hm²,普遍认为是风成沉积,灰白色,由分选很好的珊瑚、贝壳等生物碎屑组成,砾径 0.1~0.8mm,未见砾石成分,接触式胶结,块状构造。层理发育,交错层理随处可见(图 2C),于石岛东南侧(图 4 紫色三角星处)可见发育的根管结构(图 2D)。该地层的东北部在短轴方向长度比西南部小,说明该地层在迎风面受到的冲蚀作用更强烈。

3.5.2 全新世未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩

永兴岛大部分地表发育此地层,发育面积约 1.73km²。灰白色,松散,主要成分以未胶结成岩的珊瑚砂屑为主。

3.5.3 全新世海滩岩和松散的贝壳珊瑚砂砾

永兴岛海滩岩主要分布在公路西侧的潮间带中部及下部,向海倾斜,倾角约 10°;分布面积约 2.57hm²,岩石表面呈褐灰色,新鲜断面呈灰白色,生物碎屑呈块状构造,分选差。但由于目前正在填

海造地,该地层可能会被覆盖。

灰砂岛的形成主要受气候背景的影响,还受海岸地貌及碳酸盐岩生产力的制约,在海平面高位期发育更好^[20]。对宣德环礁的 6 个灰砂岛研究显示灰砂岛的发育形状受到季风、海岸地貌和海平面的影响显著。大部分灰砂岛沉积在海水高位期的全新世发育,并且由于迎风区的风力和水动力强,灰砂岛受到的冲蚀作用也强,但迎风区的海滩岩面积相对大且连续,对岛屿内部的中全新世地层又具有保护作用。在迎风面海滩岩不发育的地方,灰砂岛内部的珊瑚砂可能会被冲蚀,如南岛。迎风区的海滩岩较发育且连续,轨迹平直,导致迎风面的海岸线平直且短,背风面海滩岩发育不连续,且沉积物易保存,使得背风面的海岸线轨迹弯曲且长,如北岛和南岛。若迎风面和背风面的风力和水动力条件相当,则发育成类似中岛形状的灰砂岛。

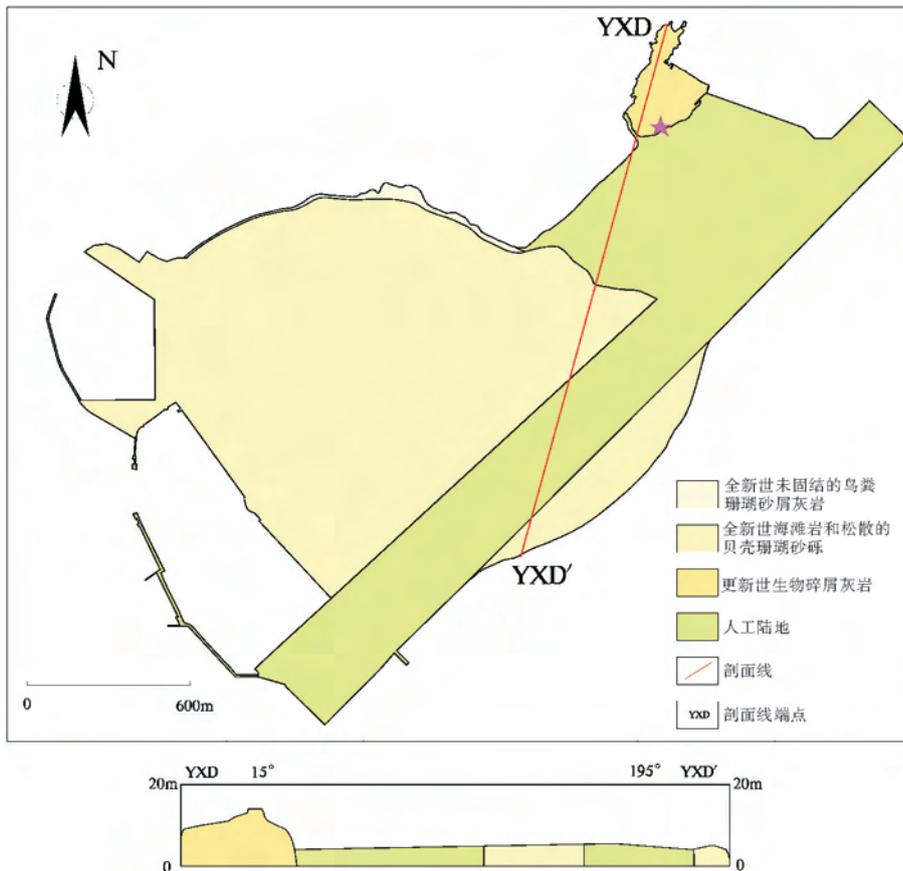


图 4 永兴岛-石岛灰砂岛沉积地层分布图

Fig.4 Geological map of Woody Island and Shidao Island

4 结论

(1) 南岛钻孔揭示灰砂岛在百年尺度沉积过程中的搬运改造机制复杂,灰砂岛不同期次间沉积相互混杂,不利于开展百年尺度的灰砂岛沉积研究,从而难以揭示过去的沉积过程及其反映的古环境古气候信息。永兴岛 SSZK1 钻孔揭示晚更新统的主要岩性以 18.39m 为分界线,其下为珊瑚礁灰岩硬底,其上为珊瑚、贝壳生物碎屑的松散沉积物,更新统与全新统的分界面可能在 18.39m。永兴岛灰砂岛沉积时期可划分为淹没期、初始期、扩张期和稳定期。

(2) 在宣德环礁的 6 座灰砂岛上主要发育有 3 套地层,分别是晚更新世风成沉积、全新世未固结的鸟粪珊瑚砂屑灰岩和全新世海滩岩和松散的贝壳珊瑚砂砾。灰砂岛的形状受到季风和海岸地貌的影响显著,其中主要是通过控制海滩岩的发育来影响灰砂岛形状,除中岛以外,其他岛屿在迎风面和背风面一侧的发育特征不一。

(3) 结合钻孔分析和岛屿露头观测结果,基本上可以断定宣德环礁的灰砂岛沉积最早是在 MIS4 冰期暴露时期开始形成,且主要分布在石岛;海水高位的间冰期是珊瑚礁发育的主要时期,在中全新世和晚全新世开始快速发育灰砂岛沉积。

致谢:本文在工作及成文过程中得到了三沙市委市政府、永兴岛工委、七连屿工委的大力协助,在此谨表谢忱。特别感谢中科院深海科学与工程研究所的吴时国老师对本文提出的建设性意见。

参考文献 (References)

- [1] Pye K. Early post-depositional modification of aeolian dune sands[J]. *Developments in Sedimentology*. M. E. Brookfield, T S Ahlbrandt, Elsevier, 1983, 38: 197-221.
- [2] 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. [LV Bingquan, WANG Guozhong, QUAN Songqing. Sedimentary characteristics and evolutionary pattern of the sand clays in the Xisha Islands[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7(2): 59-69.]
- [3] 赵三平. 南海西沙群岛海鸟生态环境演变[D]. 中国科学技术大学, 2006. [ZHAO Sanping. Evolution of Seabird Eco-environment on Xisha Islands of South China Sea[D]. University of Science and Technology of China, 2006.]
- [4] 赵强. 西沙群岛海域生物礁碳酸盐岩沉积学研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010. [ZHAO Qiang. The sedimentary research about reef carbonatite in Xisha Islands waters[D]. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010]
- [5] 卢演铸,杨学昌,贾蓉芬. 我国西沙群岛第四纪生物沉积物及成岛时期的探讨[J]. *地球化学*, 1979(2): 93-102, 179-180. [LU Yanchou, YANG Xuechan, JIA Rongfen, et al. Quaternary biological sediments in the Xisha Archipelago, China and a discussion on the age of island-formation[J]. *Geochimica*, 1979(2): 93-102, 179-180.]
- [6] 业治铮,何起祥,张明书,等. 西沙群岛岛屿类型划分及其特征的研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5(1): 1-13. [YE Zhizheng, HE Qixiang, ZHANG Mingshu, et al. Classification and characteristics of islands in the Xisha Archipelago[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1985, 5(1): 1-13.]
- [7] 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.
- [8] Rong Li, Peijun Qiao, Yuchi Cui, et al. Composition and diagenesis of Pleistocene aeolianites at Shidao, Xisha Islands: Implications for palaeoceanography and palaeoclimate during the last glacial period[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 490: 604-616.
- [9] 许德如,夏斌,李鹏春,等. 海南岛北西部前寒武纪花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(4): 510-518. [XU Deru, XIA Bin, LI Pengchun, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Precambrian granitoids in northwest Hainan Island and its geological implications[J]. *Geotectonics and Metallogenia*, 2006, 30(4): 510-518.]
- [10] 龙文国,丁式江,马大铨,等. 海南岛前寒武纪基底组成及演化[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2005, 30(4): 421-429. [LONG Wenguo, DING Shijiang, MA Daquan, et al. Formation and evolution of the Precambrian basement in Hainan Island[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(4): 421-429.]
- [11] 龙文国,丁式江,李惠民,等. 海南岛东部黄竹岭地区变质火山岩锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(1): 92-94. [LONG Wenguo, DING Shijiang, LI Huimin, et al. Zircon U-Pb ages of Metavolcanic rocks in the Huangzhuling area, Eastern Hainan Island, and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(1): 92-94]
- [12] 雷裕红,丁式江,马昌前,等. 海南岛地壳生长和基底性质的 Nd 同位素制约[J]. *地质科学*, 2005, 40(3): 439-456. [LEI Yuhong, DING Shijiang, MA Chanqian, et al. Nd isotopic constraints on crustal growth and basement characters of Hainan Island, Southern China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(3): 439-456]
- [13] 梁新权,范蔚茗,许德如. 海南岛屯昌玄武质科马提岩 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 240-244. [LIANG Xinquan, FAN Weiming, XU Deru. Sm-Nd of Tunchang Basaltic Komatiites and its geological significance

- in Hainan Island [J]. Chinese Journal of Geology, 2000, 35 (2): 240-244.]
- [14] 张明书. 西沙西永 1 井礁相第四纪地层的划分[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(2): 57-64. [ZHANG Mingshu, Quaternary reef stratigraphic division in Hole Xiyong-1 [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1990, 10(2): 57-64.]
- [15] 张明书, 何起祥. 西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1989. [ZHANG Mingshu, HE Qixiang. The Study of Quaternary Reef Carbonate Sedimentary Geology, Xisha Sea Area [M]. Sciences Press, Beijing. 1989.]
- [16] 孙志鹏, 尤丽, 李晓, 等. 西沙西科 1 井第四系生物礁-碳酸盐岩的岩石学特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2015, 40 (4): 653-659. [SUN Zhipeng, YOU Li, LI Xiao, et al. Petrologic characteristics of Quaternary reef-carbonate rocks in Well Xike-1, Xisha Area [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4): 653-659.]
- [17] 朱伟林, 王振峰, 米立军, 等. 南海西沙西科 1 井层序地层格架与礁生长单元特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2015, 40(4): 677-687. [ZHU Weilin, WANG Zhenfeng, MI Lijun, et al. Sequence stratigraphic framework and reef growth unit of Well Xike-1 from Xisha Islands, South China Sea [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4): 677-687.]
- [18] 何起祥, 张明书, 业治铮, 等. 西沙群岛石岛晚更新世碳酸盐沉积物的稳定同位素地层学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6 (3): 1-8. [HE Qixiang, ZHANG Mingshu, YE Zhizheng, et al. Carbon and oxygen stable isotope stratigraphy of Late Pleistocene carbonate deposits at Shidao Island, Xisha Islands, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1986, 6(3): 1-8.]
- [19] 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, 13(1): 45-56. [CHEN Junren. A preliminary discussion on Quaternary geology of Xisha Qundao Islands of South China [J]. Chinese Journal of Geology, 1978, 13(1): 45-56.]
- [20] 赵强, 许红, 华清峰, 等. 风成碳酸盐岩的全球分布及其对西沙的启示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014(1): 153-163. [ZHAO Qiang, XU Hong, HUA Qingfeng, et al. Global distribution of carbonate eolianite in the world and implication for Xisha Islands [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014(1): 153-163.]