

王宇喆, 邱隆伟, 许红, 等. 七连屿海滩沙-沿岸沙丘-现代植物-砂岛成因模式[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(6): 92-100.

七连屿海滩沙-沿岸沙丘-现代植物-砂岛成因模式

王宇喆¹, 邱隆伟^{1*}, 许红^{2,3*}, 马骁^{1,2}, 付和平^{1,2}

(1 中国石油大学(华东), 青岛 266580; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘要: 海滩沙是砂岛形成的基础, 成长初始状态原生态海滩沙是砂岛形成的标志; 沿岸沙丘是植被成长屏障, 二者都具有重要的研究意义。笔者以 2019 年科考航次现场海滩沙-沿岸沙丘、砂岛及植被调查与卫星遥感资料分析为基础, 对七连屿海滩沙-沿岸沙丘-植被地质特征、形态、位置, 它们与砂岛的关系进行讨论; 揭示了海滩沙-沿岸沙丘形成不但决定于海浪、潮汐, 风暴潮等动力作用, 而且也与沉积物搬运过程、沉积作用关系密切; 同时探讨了岛屿形成过程中现代植物的分布: 从点状发育过渡到逐渐覆盖整个潮上带区域, 即先是沿岸沙丘, 再是海岛中心, 最后呈面状覆盖全岛。其中, 植物的定植起到了重要作用, 不但能够起到固沙作用, 而且参与了砂岛的型成。由此, 提出建立七连屿海滩沙-海滩岩-植被-砂岛成因模式。

关键词: 七连屿; 粒度分析; 海滩沙; 沿岸沙丘; 现代植被

中图分类号: P736.14; Q949.9

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.208

0 引言

沿岸沙丘发育于海洋与陆地的交汇处、水动力活跃的地带。其具有多种不同的生态系统功能, 对风暴潮、海浪袭击和内陆侵蚀具缓冲作用, 并为动植物提供了独特的栖息地。沿岸沙丘还通过减少严重风暴期间对已建基础设施的破坏而产生可观的经济效益^[1]。近 80 年来的研究表明, 沙丘的粒度分布是沙丘形态和动力过程的重要影响因素^[2-3]。其不仅可以用来揭示沉积物的物质来源、沉积动力和输移趋势等环境信息, 还能在很大程度上反映出海域的动力-沉积-地貌相互耦合机制^[4-5]。

在生物礁砂岛逐渐形成与发育的过程中沿岸沙丘起到了不可忽视的作用, 而植物的生长及其对沉积物的固定作用在砂岛沿岸沙丘成长中扮演了

非常重要的角色^[6-10]。前人对植物在沿岸沙丘中的分布及其对沿岸沙丘的保护机制也进行了较为详细的研究, 研究显示沿岸沙丘的生态系统功能与短期(如严重的偶发风暴)和长期(如风沙堆积、海平面上升)的海岸过程有着内在的联系。植物被认为在这些过程中发挥了关键作用, 通过根系强化沙丘沉积物, 减少侵蚀, 耗散风暴潮能量, 并帮助捕获额外的风暴潮沉积物, 从而协助了沙丘的持续生长^[1]。宣德环礁七连屿各砂岛沉积环境相似, 人类活动较少, 是研究海滩沙、现代植物在砂岛中的相互关系的良好载体。然而, 对于植被在七连屿沿岸沙丘功能中的作用, 特别是在砂岛形成初期植物的生长充填模式的认识仍然存在很大的差距。

以 2019 年西沙群岛科考航次宣德环礁七连屿现场考察与采集样品粒度分析测试为基础, 笔者对七连屿砂岛形成过程中的沿岸沙丘动力特征与现代植物发育特征及其相互关系进行研究, 进而探讨宣德环礁发育模式, 及其对海岛形成演化的影响。

1 区域概况

西沙群岛位于中国南海中建盆地北部西沙隆起区, 目前西沙群岛除了高尖石岛为火山岩岛屿之外, 其余岛屿均为生物礁生成与发展的过程中形成

收稿日期: 2020-12-10

资助项目: 国家自然科学基金(41872114); 国家科技基础资源调查专项课题(2017FY201407)

作者简介: 王宇喆(1992-), 男, 在读博士, 主要从事海洋地质与生物礁地质方面的研究工作。E-mail: 1048271747@qq.com

* 通讯作者: 邱隆伟(1967-), 男, 博士, 教授, 现主要从事储层地质学研究工作。E-mail: qjulwsd@163.com;

许红(1957-), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气地质调查与资源勘探评价及海洋生物礁成因研究工作。E-mail: qdxhong@163.com

的碳酸盐岩岛屿^[11-13]。其中宣德环礁位于西沙群岛东北部, 出露水面部分主要由位于南部的永兴岛与石岛及位于北部的七连屿 2 部分组成(图 1)^[13-14]。其中七连屿主要由北部链状分布于 2 个碳酸盐岩台地之上的 8 个砂岛组成, 但是在现今台风等气候作

用下仍不时有新的沙洲出现或消失。七连屿各岛屿面积差别较大, 最大的岛屿北岛面积可达 0.32 km², 而最小的北沙洲面积仅有 0.018 km²。七连屿现代砂岛表面发育了大量的以草海桐等为代表的现代植物, 且各岛屿中现代植物分布存在较大的差别^[15]。

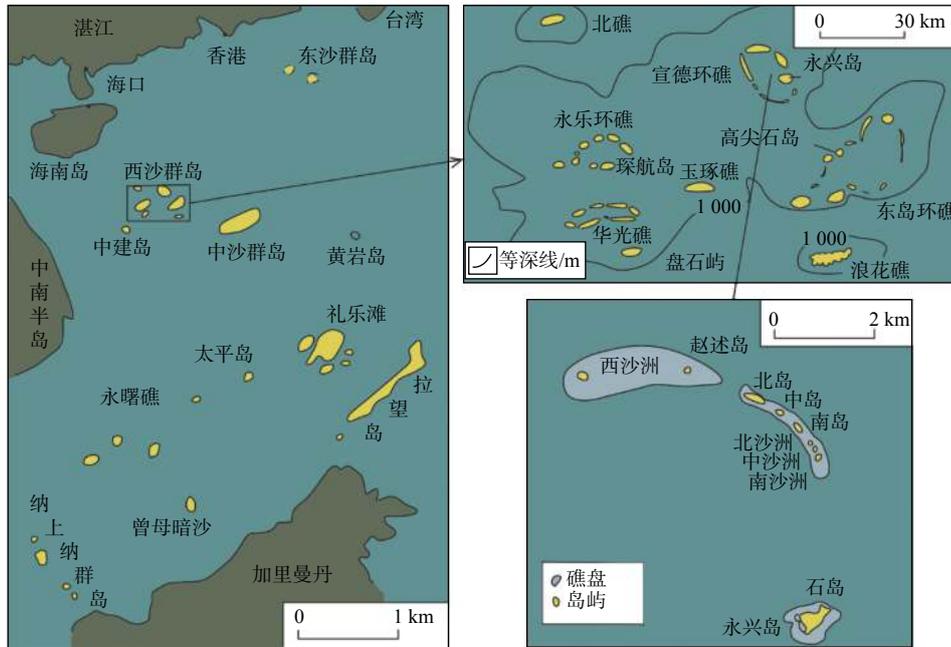


图 1 研究区位置^[13-14]

Fig. 1 Location of the research area^[13-14]

2 材料与方法

本次研究中海滩沙样品于 2019 年科考航次现场取得。样品分别来自七连屿北岛、中岛、西沙洲海边的潮间带及潮上带沿岸沙丘之中。由于部分样品粒度明显 $> 2 \text{ mm}$, 无法使用激光粒度分析仪, 因此, 本次研究采用筛析法对所取得样品进行分析。对所取得样品利用电子天平取得 50 g 样品, 分别放入目数 6~200 的筛子摇晃 30 s 以上, 精确测量每个筛子所得样品重量后统计样品各目数所占比例, 并保证测量后样品总重量损失 $< 1\%$ 。本研究以此数据为基础对七连屿地区海滩沙粒度进行分析。

3 结果

3.1 宣德环礁海滩沙与现代植物的形态及分布

七连屿各岛屿面积, 规模, 植物分布等均存在较大差别, 是研究生物礁环境中岛屿内现代植物发

育的良好地区。宣德环礁诸岛均为现代形成的现代砂岛, 其中沉积的海滩沙年龄多为千年以内^[16], 受到人类活动影响较少且未经历成岩作用影响, 能够较好地反映现代砂岛形成过程中海滩沙的发育形态。因此, 本文以此二者为研究对象进行此次研究。

3.2 七连屿海滩沙粒度特征

北岛位于宣德环礁北部, 七连屿中部, 长达 1 500 m, 最宽处为 350 m, 面积为 0.32 km², 沿岸沙丘环岛发育。其最明显的特点是其西部发育的海滩沙形态从海面明显分为三级阶地。样品 BD5、BD6、BD7 从下至上分别采集于沙堤中的 3 个阶地。对北岛样品进行粒度分析显示, 在北岛所取得的沙样中, 几乎不存在很细的颗粒, 且概率累积曲线中斜率均较高, 显示了其形成时受到了更加剧烈的水动力作用(图 2)。北岛沿岸沙丘样品显示其三级阶地从下到上粒度存在明显的区别, 分选逐渐变差, 粒度逐渐增加, 这说明北岛沙滩中的沙粒并不全是由均匀的海浪作用搬运而来, 而存在着潮汐等更为

强劲且尺度更大的水动力作用。从下至上随着沙滩高度的不断增高,海浪的作用逐渐减小而来自潮汐的作用占比逐渐增加。在北岛沿岸沙丘中,还可

以看到风暴所形成的碎块,被正常海浪改造不完全时,和海滩沙混杂出现的现象。而海滩沙之上,也可以被新的风暴沉积物所覆盖(图2)。

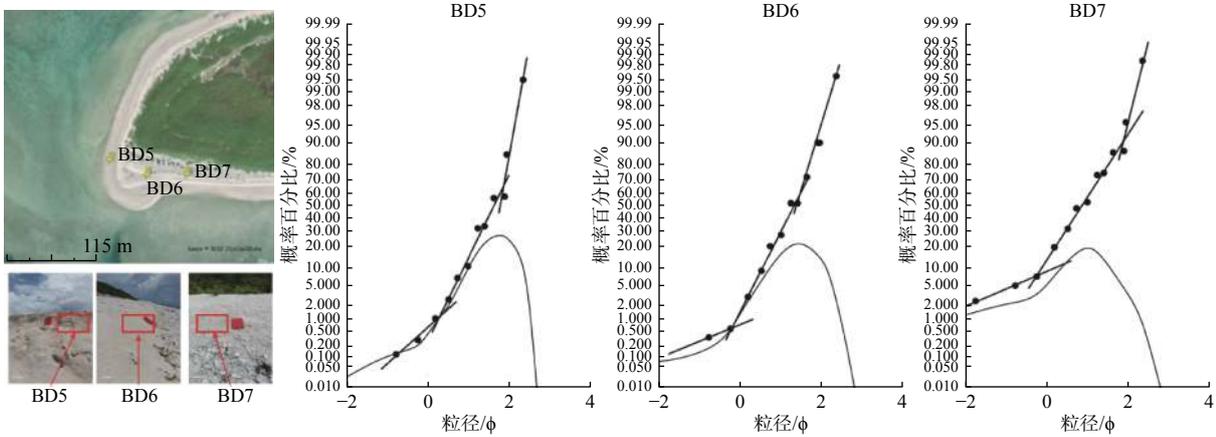


图2 北岛样品取样位置及概率累积曲线

Fig.2 Sampling location and probability accumulation curve of the samples from Beidao Island

中岛位于西沙群岛七连屿北岛东南,呈椭圆状,面积约 0.13 km²。岛屿沿岸沙丘同样环岛发育且发育有未胶结的以数厘米长珊瑚碎屑为骨骼的碎屑堆积。

于 ZD7,且几乎没有砂质颗粒。

在中岛所取得的 ZD7、ZD8、ZD9 中,ZD8、ZD9 样品位于同一位置,隶属于数厘米级的珊瑚骨架与砂屑互层的海滩沙剖面。其中,ZD8 取自细粒砂质沉积物;ZD9 取自珊瑚骨架沉积物,二者均未固结。

分析表明,中岛砂样同样缺乏悬浮搬运组分。概率累积曲线中显示 ZD8、ZD9 粒度 > 2φ, ZD7 则存在 2φ~4φ 的粉细砂级沉积物。其中,ZD9 与 ZD7 样品粒度分布与典型海滩沙不同,属于较标准的对数正态分布。其中,ZD9 样品中充满孔隙的珊瑚碎屑内部,含有少量不符合海滩沙沉积特征的砂质沉积物,属于快速堆积;ZD8 样品概率累积曲线与北岛 BD5 样品相似,都属于强水动力条件下形成的典型海滩沙;因此,ZD8 与 ZD9 很可能是一次规模较大的风暴沉积产物(图3)。

ZD7 与 ZD9 样品,均为数厘米大小的珊瑚骨架间夹砂质沉积物,但 ZD9 样砂质含量不但明显小

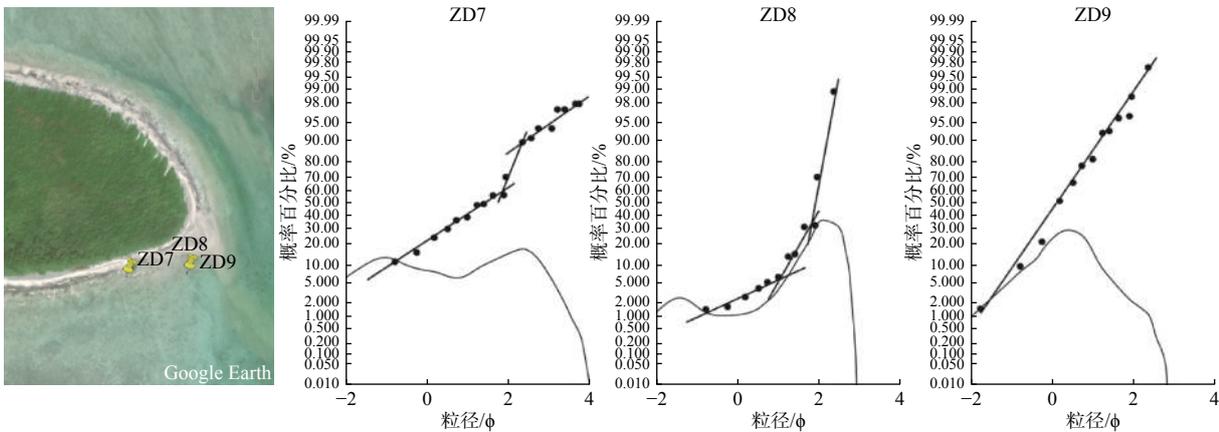


图3 中岛样品取样位置及概率累积曲线

Fig.3 Sampling location and probability accumulation curve of the samples from Zhongdao Island

西沙洲位于西沙群岛的宣德群岛最西端,由珊瑚沙堆积而成,与赵述岛同位于一个礁盘,面积 0.24 km²。西沙洲样品中,XSZ3 取自岛屿西北侧海

面线附近,XSZ4 取自岛屿东北侧潮上带。西沙洲就是典型的发育于礁盘上的沙洲,其岛屿面积较小,几乎全部由细小的沙子所覆盖。

在粒度曲线中, 2 个样品较高的斜率反映二者粒度均较为平均, 所受到的水动力均一旦较强, 这说明西沙洲的海滩沙主要由长期的海浪作用搬运形成, 所搬运的沙粒受到水流更长时间的冲刷。而海浪的作用就和筛子一样, 越轻越小的物质能够被

筛的越远, 因此我们可以见到 XSZ4 样品离海岸更远, 而其沉积物粒度也相对较细(图 4)。

在现代沿岸沙丘研究中粒度参数常与粒度图解结合, 每一个粒度参数都能够以一定的数值定量的表示碎屑物质的粒度特征(表 1)。

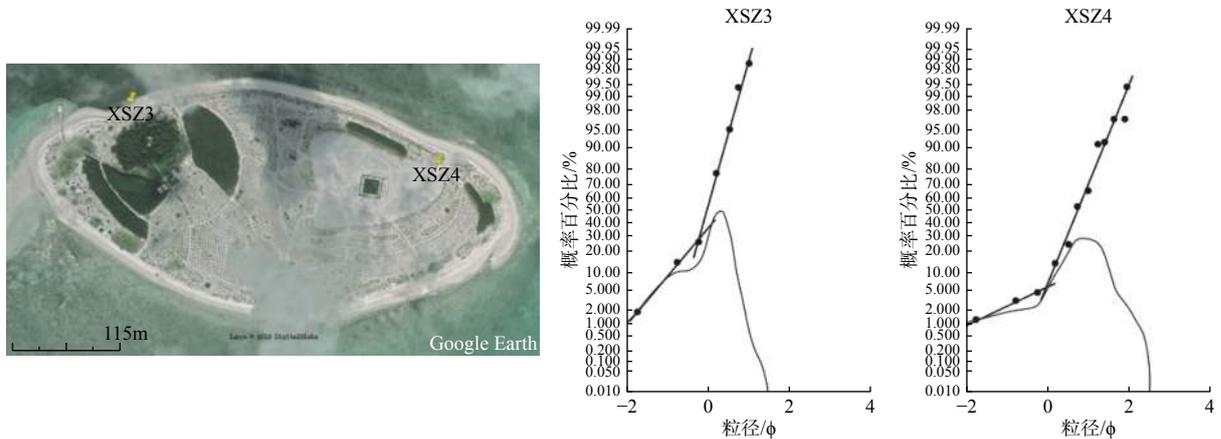


图 4 西沙洲样品取样位置及概率累积曲线

Fig.4 Sampling location and probability accumulation curves of the samples from Xishazhou

表 1 西沙群岛沿岸沙丘样品粒度参数

Table 1 Grain-size parameters of coastal dune samples from Xisha Islands

粒度参数	BD5	BD6	BD7	ZD7	ZD8	ZD9	XSZ3	XSZ4	LYJ2	JQD1
平均粒径/ Φ	1.52	1.22	0.83	1.14	1.82	0.24	-0.14	0.70	-0.04	0.59
标准偏差/ Φ	0.47	0.57	0.80	1.29	0.43	0.83	0.56	0.50	1.10	1.20
偏度	-0.17	0.00	-0.14	-0.28	-0.44	0.06	-0.39	-0.05	0.26	0.33
峰态	0.86	1.01	1.03	1.01	1.41	1.34	1.95	1.27	0.42	1.31
粒度中值	1.56	1.22	0.87	1.41	1.91	0.16	-0.03	0.71	0.23	0.21
分选系数	1.73	1.66	2.11	3.77	3.54	1.40	1.84	2.44	1.33	1.47

平均粒径(MZ): 西沙群岛现代海滩沙的平均粒径介于 $-0.136\Phi \sim 1.823\Phi$ 。其中北岛三级阶地中阶地越高平均粒径越大; 中岛的 3 个样品中 ZD7、ZD8 粒径可达 1Φ 以上而 ZD9 则低至 0.2Φ ; 西沙洲 XSZ3 样品粒径则大于 XSZ4。

均值 1.16。依据 Folk 等的峰值等级界限, 北岛样品属于中等峰态, 中岛、西沙洲样品则均为尖锐峰态。

标准偏差(σ): 西沙群岛现代海滩沙的标准偏差介于 $0.43\Phi \sim 1.29\Phi$, 平均值 0.77Φ , 分选较好。其中北岛、西沙洲样品分选最好; 中岛样品中 ZD8 分选最好, 可达 0.4Φ , ZD9 其次, 分选最差的是 ZD7。

粒度中值(Md): 粒度中值是选取样品中的一个粒度值, 大于此粒度值的颗粒数占 50%, 小于此粒度值的颗粒数也占 50%, 于是我们就称这个粒度值为粒度中值。西沙群岛现代海滩沙的粒度中值介于 $-0.03\Phi \sim 1.91\Phi$, 平均值 0.83Φ 。其中北岛粒度较小, 中岛粒度差别较大, 西沙洲粒度较大。

偏度($SK1$): 是统计数据分布偏斜方向和程度的度量, 被用于判别海滩沙粒度分布的不对称程度。利用 Folk-Ward(1957)的偏度公式, 计算出了西沙群岛现代海滩沙的偏度, 介于 $-0.44 \sim 0.32$, 平均值 -0.08 。

分选系数(So): 指粒度累计曲线上, 75% 和 25% 处所对应的颗粒直径的比值, 是表示碎屑沉积物分选性的一种参考。 $So = P25/P75$, 当颗粒分选很好时, P25 和 P75 两值很靠近, 所以越接近于 1, 反之, 则远 > 1 。西沙群岛现代海滩沙的分选系数介于 $1.33 \sim 3.77$, 平均值为 2.13, 显示西沙群岛总体分选较好。但中岛不同位置样品分选系数存在较大差别, 显示其水动力环境出现了较大变化。

峰态(KG): 是用来衡量粒度频率曲线尖锐程度的, 也就是度量粒度分布的中部与两尾端的展型之比。西沙群岛现代海滩沙的峰态为 $0.41 \sim 1.95$, 平

3.3 七连屿现代植物分布特征

在七连屿诸岛中, 海滩沙丘在赵述岛、北岛、中岛、南岛规模较大且普遍发育, 属于比较成熟的岛屿(图 5a), 在南沙洲小规模发育(图 5b), 沙丘上植物覆盖率较高。而西沙洲、北沙洲、中沙洲等, 处

于砂岛发育初期阶段, 面积较小, 形成时间较新, 没有出现明显环岛的或者沿岸的沙丘发育的情况, 植物在其中呈点状分布(图 5c)。未见西沙洲沿岸沙丘明显发育, 大型乔木植被植物多为人工种植(图 5d); 诸岛海滩沙多呈 NW-SE 向展布于两侧, 垂直于季风方向。



(a) 赵述岛沿岸沙丘; (b) 南沙洲沿岸沙丘; (c) 中沙洲点状发育的植物; (d) 西沙洲海岸

图 5 七连屿沿岸沙丘及其上植物覆盖情况

Fig.5 Coastal dune and vegetation cover of Qilianyu Island

在历史卫星图像中可见, 赵述岛、北岛、中岛、南岛是七连屿 4 座规模较大的海岛, 除位置受到海浪及潮水影响未发育植物外, 其余地区自然成因草海桐等植物均发育良好, 且在海滩位置与植物发育的交界线上可见相对于海滩呈隆起状、被植物完全覆盖的海滩沙发育(图 6)。而在北沙洲、中沙洲、南沙洲等规模较小的砂岛中, 各岛之间由于位置、面积、朝向等不同, 植被分布也有着较大的差别。总体来说, 各岛总面积在台风等时间的影响下面积有一定的波动, 越小的岛屿受到的影响越大, 但各岛屿植物生长面积均在稳步增加(表 2)。北沙洲及南沙洲 2002 年以来的卫星图展现了砂岛形成初期植物从无到有的发育过程及其间分布的规律。从历史卫星图可见, 砂岛在形成一定高度之后, 会首先出现少量的植物点状发育, 并会再在此基础上扩展, 并最终扩展分散至全岛(图 6)。在南沙洲 2002

年至今的卫星图中, 可见以草海桐为主的植物分布位置从主要位于海滩逐渐向岛屿内部扩散充填, 并呈占据全岛的趋势; 2002 年至今, 植物覆盖面积从 $31\,379\text{ m}^2$ 增长至 $33\,139\text{ m}^2$, 岛屿面积也在逐渐增长(表 2), 增加的面积主要在岛屿的中部和南部(图 6); 而环岛海滩却一直处于裸露状态。此特征在西沙群岛各岛尤其是七连屿普遍出现。裸露的关键在于海滩是潮涨潮落的位置, 接收海浪提供新生成的海沙, 植物难以扎根定植, 最终裸露形成至今的海滩沙。而西沙洲岛屿面积较大, 与中岛相当, 其原为纯沙洲, 内部并未出现自然生成的植物。近十几年人们在西沙洲进行了大规模人工种植, 但并未发现被现代植物覆盖的相对呈隆起状态的沿岸沙丘, 海滩与人工种植植物之间呈现出平滑的过度状态(图 6)。据此推断, 在砂岛形成的过程中植物的逐步固沙作用, 与岛屿海滩沙的形成有一定的相关性。

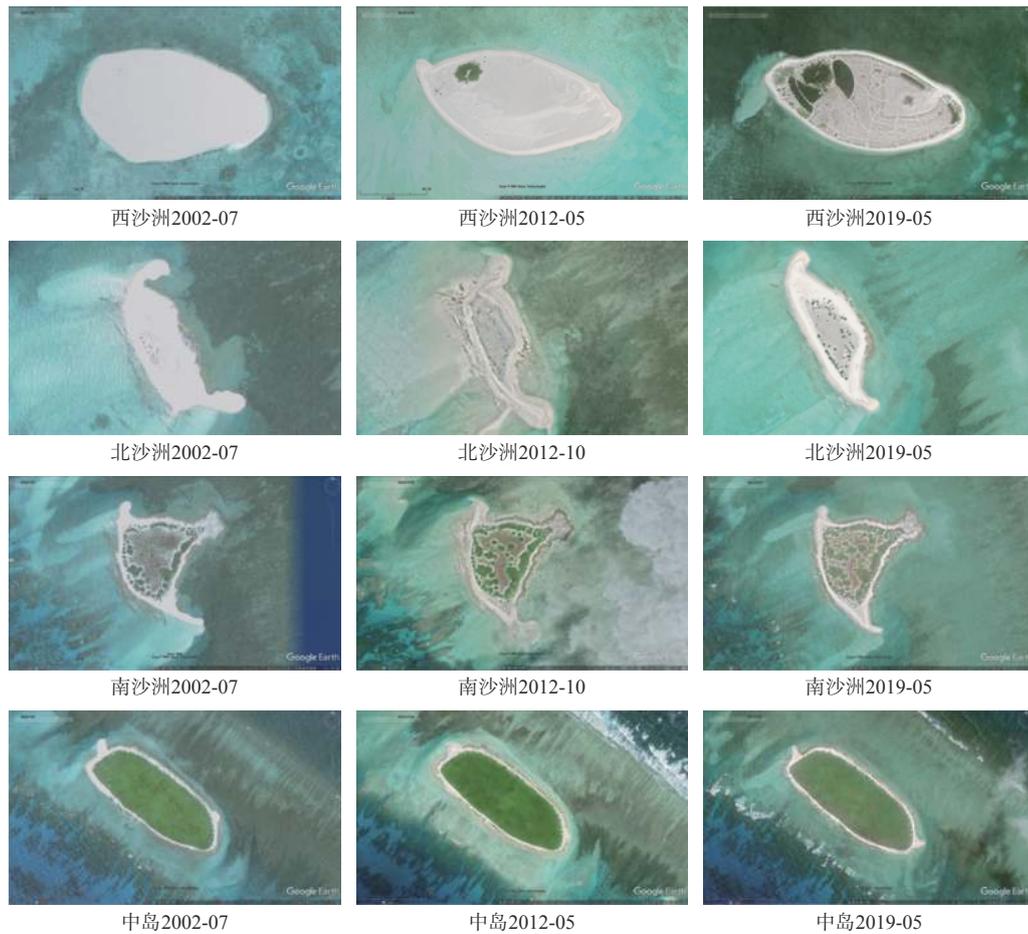


图 6 七连屿岛屿历史卫星影像

Fig.6 Satellite images of Qilianyu Island

表 2 七连屿岛屿面积变化

Table 2 Changes in the area of Qilianyu Island

岛屿	日期	总面积/m ²	植物面积/m ²	海滩砂面积/m ²
西沙洲	2002-07	254 217	0	254 217
	2012-05	257 044	7 591	249 453
	2019-05	233 683	194 952	38 731
北沙洲	2002-07	15 142	1 242	13 900
	2012-10	17 455	3 108	14 347
	2019-05	13 094	4 745	8 349
南沙洲	2002-07	51 983	31 379	20 604
	2012-10	53 147	32 202	20 945
	2019-05	57 970	33 139	24 831
中岛	2002-07	119 226	91 008	28 218
	2012-05	116 506	92 340	24 166
	2019-05	115 792	94 564	21 228

4 讨论

海滩沙为平行于海岸的堆积沙体, 形成于物源丰富且潮涨潮落的开阔区域, 由海面上强劲的海风

以及季风、加上波浪、潮汐和风暴潮等沉积动力作用, 将海滩、礁坪中尚未固定的礁区生物碎屑砂粒等吹动, 进而沉积到海滩上, 在岛离岸潮下带区域堆积, 反复以往, 最终形成海岛海滩沙; 海滩沙加积, 其拦截砂粒等物质的能力加强, 自身将不断地加积, 增高, 加长和加宽, 在后缘会形成平行于海岸线分布的沿岸沙丘^[17-19]。西沙群岛发育有特有的双向季风气候, 在冬季, 季风以东北方向为主, 而夏季则为西南方向^[20]。这使得岛屿的迎风面与被风面均存在良好海滩沙的发育条件; 而且这些海滩沙会随季节的不同此消彼长, 比如目前赵述岛东北部海滩沙, 不同季节刮不同方向风时海滩沙赋存分布形态不同, 甚至会整体消失。

对七连屿的沙丘观察和对沿岸沙丘样品粒度参数的研究表明, 七连屿各岛、礁、滩、海滩沙形成过程中的沉积物, 主要是礁盘物质在双向季风、强潮、风暴潮等不同水动力环境作用下, 将已经破碎的生物骨骼等碎屑颗粒混杂在一起, 搬运到礁盘之上, 随后受潮上带植物的固定作用等因素影响下形

成沿岸沙丘沉积。在沿岸沙丘沉积中,沉积物不仅直接受到海浪的影响,使得海滩中的沙粒发生分异变化;风暴等作用也能够更加广泛的参与沉积物的搬运作用。这些作用的影响范围非常广,使得沙粒不仅能够从附近的礁盘、岛屿搬运而来,还可以来自远离岛礁的另一个大陆。

在宣德环礁动力条件复杂地区,砂岛的发育过程中由物源搬运而来的沉积物能否被留在砂岛礁盘、海滩上,进而固定下来也是砂岛能否形成与扩张的关键。在沙丘的形成过程中,植物的固沙作用起到了非常重要的作用,前人的大量研究表明^[1,6,8],植被的存在可以有效地抑制风蚀以及减少沙面活动,植被密度和高度的增加能够对风动量进行消耗从而减少沙丘所受到的剪切力,抑制风蚀。有学者通过风洞研究发现,当沙丘中的植物含量达到30%以上时,就能够大幅度减弱风蚀,当植被覆盖度达到35%~40%时,则几乎能使风蚀作用停止,不但能够阻止沙丘流动,使流动沙丘变成固定沙丘^[6]。在此过程中,植物的种型与发育情况可能会起到一定的作用。前人的研究显示,在一年生植物周围形成的早期沙丘可能是季节性的,需要多年生植物的加入才能稳定下来^[8]。高大、浓密的植物往往会产生更高、更近似于丘状的沙丘形式,而较低矮、平铺与地面的植物则会产生更低矮的沙丘形式^[21-23]。在高潮线以上地区,先锋植物幼苗沿海岸相对横向连续生长,以及在滨岸地区植物地下根茎的生长可在滨岸地区形成早期沿岸沙丘^[8]。沙丘的形态发育主要取决于植物的密度、分布、高度和覆盖率,以及风速,风向和输沙率,和冲流、冲刷、风暴潮汐和浪的发生概率等次要因素在随后的沙丘演化中也扮演了重要的角色^[21,24-25]。根据笔者对七连屿各岛、礁、滩、沙的观察,七连屿中各岛在沿岸沙丘发育的植物均以草海桐为主。现代草海桐等植物为双子叶植物,属直根系,其特点是主根明显而发达,并且方向为竖直向下,侧根呈葡萄状分布于主根周围其根系入土较深,其侧根在土壤中的伸延范围也较广,可达10~18 m,常超过树冠的好几倍,拥有较为良好的固沙作用^[26]。

无论是七连屿中成熟岛屿还是尚未成熟的砂岛,植物均无法存在于沿岸受到潮水影响的潮间带内,这说明砂岛中植物只能生长于潮上带等植物种子能够稳定存在并发育的地区。前人的研究显示,西沙群岛在近4 ka的时间中海平面正处于逐渐降低的过程中^[27]。这无疑会使得潮上带逐渐后退,对

砂岛的逐渐形成与扩张产生促进作用。

在七连屿中,西沙洲由于未发生现代植物的自然生长,使得该岛海拔相对较低,岛屿形态平整,沿岸沙丘不发育。中沙洲及北沙洲中现代植物发育从无到有,开始时呈点状发育,随着时间的推移植物的密度逐渐增加,且中沙洲沿海植物密度增加速度最为迅速。南沙洲植物则从沿岸沙丘逐渐向岛屿中心及岛屿外侧逐渐扩张。赵述岛、北岛、中岛、南岛现代植物的分布则除了人工建设之外,在近十数年间密度未见有显著变化,面积则呈逐渐增长。

七连屿各岛屿以上的特征较好地展示了它们各自海滩沙发育的各个阶段,以及沿岸沙丘和现代植物在其中的作用。砂岛发育的最初阶段就如西沙洲受到人工建设之前的情况,为纯沙质岛屿,之后随着海平面下降,沙质进一步堆积,多种原因逐渐增高砂岛海拔,出现潮上带,在双向季风等因素的推动下发育构造海滩,并通过捕获植物种子使得现代植物开始呈点状发育,如北沙洲及中沙洲的数年前的状况;之后,植被逐渐扩展,并多发于岛屿沿岸高潮线之上及迎风面,使其能够更好地保存淡水,与捕获植物种子等;这样,高潮线以上存在最高的植物覆盖率,并在季风,风暴等对物质搬运以及高潮线上植物发育繁茂,沿岸沙丘植物带与植物分布向海岛内部逐渐扩张,如南沙洲所呈现出的状态。最终使得多年生植物填满整个岛屿,使得岛屿逐渐发育成为稳定的砂岛,如赵述岛、北岛、中岛以及南岛;而南沙洲,北岛等岛礁海滩沙的良好保存和发育(图6)。总的来说,植物会随砂岛形成与扩张的过程而优先在沿岸沙丘出现,生长,随后加密,并最终覆盖整个砂岛的潮上带地区。以上现象可在十余年的卫星图观测中表现的非常明显,因此可合理推测从植物出现至植物覆盖整个砂岛的全过程可在十数年至数十年之间完成。

综上,对七连屿砂岛的发育模式进行合理的推测:在砂岛因为海平面下降等各种原因发育,足以不受潮水影响的潮上带地区便形成了初始砂岛;并逐步发育形成初始海滩沙、沿岸沙丘和高潮线上植被三大要素和条件(图7a、b);海滩沙受季风等因素影响,其后发育形成沿岸沙丘,它位于潮上带,不仅捕获风成砂屑,同时捕获保护植物种子发育形成植被,从而形成中期砂岛(图7c);而植物覆盖率的增加导致海岛稳定性增加,以草海桐为代表的准灌木本植物+草本植物进一步发育,提供了海岛海拔高度稳固增高的条件(图7c)。在岛屿形成一定规模

后, 植物以沿岸沙丘为基础逐渐向岛屿内外扩张, 并最终覆盖全岛(图 7d), 形成成熟砂岛。在此期间植物的固沙作用对砂岛的扩张和增高起到重要的积极作用。

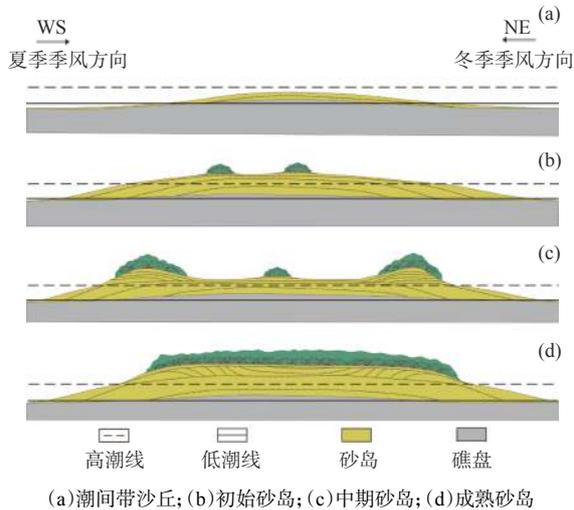


图 7 七连屿海滩沙-沿岸沙丘-植被-砂岛形成演变模式

Fig.7 Beach sand-coastal dune-vegetation-sand island genetic model in the Qilianyu Island

5 结论

(1) 现代砂岛海滩沙-沿岸沙丘动力特征

通过对研究区样品进行现场踏勘, 结合对沿岸沙丘样品的粒度数据分析, 发现宣德环礁七连屿海滩沙-沿岸沙丘形成赋存的动力学特征: 在沉积物的搬运与海滩沙-沿岸沙丘的形成过程中, 不仅有海浪与潮汐的持续作用, 风暴潮和双向季风等的影响也不可或缺。

(2) 现代砂岛植物形成与分布

通过现场观察以及对历史卫星图的研究, 发现七连屿各砂岛呈现较为完整的砂岛现代植物的发育过程, 据此提出建立了宣德环礁砂岛海滩沙-沿岸沙丘-现代植物发育模式。该模式表明宣德环礁砂岛形成过程中植物首先呈点状发育, 之后不断扩张并首先覆盖潮上带位置即沿岸沙丘, 最后由沿岸沙丘扩展至海岛中心乃至全岛; 在此期间植物的固沙作用对砂岛的扩张和增高起到十分重要的积极作用。

参考文献:

[1] SIGREN J M, FIGLUS J, ARMITAGE A R. Coastal sand dunes and dune vegetation: restoration, erosion, and storm

protection[J]. *Shore and Beach*, 2014, 82(4): 5-12.

- [2] HESP P A. *Geomorphology of desert dunes*, N. LANCASTER, publisher routledge, london (1995) (290 pp) 55.00 (hardback) isbn 0509317.99 (paperback) isbn 05094[J]. *Journal of Quaternary Science*, 1997: 12.
- [3] TSOAR H. Two-dimensional analysis of dune profile and the effect of grain size on sand dune morphology[M]. Springer Netherlands, 1986.
- [4] SHI X, CHEN C, LIU Y, ET AL. Trend analysis of sediment grain size and sedimentary process in the central South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(14): 1202-1206.
- [5] CHENG P, GAO S, BOKUNIEWICZ H. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(2): 203-212.
- [6] WASSON R, NANNINGA P. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11(5): 505-514.
- [7] HESP P A. A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes[J]. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences*, 1989, 96: 181-201.
- [8] HESP P. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics[J]. *Geomorphology*, 2002, 48(1/3): 245-268.
- [9] NOVELLO V F, CRUZ F W, MCGLUE M M, et al. Vegetation and environmental changes in tropical South America from the last glacial to the Holocene documented by multiple cave sediment proxies[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 2019, 524: 115717.
- [10] DAYNES C N, FIELD D J, SALEEBA J A, et al. Development and stabilisation of soil structure via interactions between organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi and plant roots[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57(C3): 683-694.
- [11] 魏喜, 贾承造, 孟卫工, 等. 西琛1井碳酸盐岩的矿物成分, 地化特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 3015-3025.
- [12] 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.
- [13] 魏喜, 贾承造, 孟卫工, 等. 西沙群岛石岛根管石特征, 成因及地质意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(10): 2415-2422.
- [14] 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运输趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 140-148.
- [15] 张浪, 刘振文, 姜殿强. 西沙群岛植被生态调查[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(14): 181-186.
- [16] 赵晋军, 徐利强, 吴礼彬, 等. 西沙赵述岛和北岛海鸟遗迹~(14)c年代模型及意义[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(1): 28-37.
- [17] 董玉祥, 杜建会. 海岸风沙地貌台风响应研究的现状与趋势[J]. *中国沙漠*, 2014(3): 634-638.
- [18] AAGAARD T, DAVIDSON-ARNOTT R, GREENWOOD B, et al. Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution[J]. *Geomorphology*, 2004, 60(1/2): 205-224.

- [19] 马克伟. 土地大辞典[J]. 长春:长春出版社, 1991.
- [20] 赵强. 西沙群岛海域生物礁碳酸盐岩沉积学研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- [21] Davies J L, Clayton K M. Geographical variation in coastal development[M]. London: Longman, 1980.
- [22] HEHP P. Morphodynamics of incipient foredunes in New South Wales, Australia [J]. *Developments in Sedimentology*, 1983, 38: 325-342.
- [23] HESP P A. Fore-dune formation in southeast Australia [J]. *Coastal geomorphology in Australia*, 1984: 69-97.
- [24] COWLES H C. The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of Lake Michigan. Part i. -geographical relations of the dune floras [J]. *Botanical gazette*, 1899, 27(2): 95-117.
- [25] Willis R B A J. Ecology of salt marshes and sand dunes [J]. *Journal of Ecology*, 1972, 62(2): 665.
- [26] 韦贤. 植物的根系 [J]. *农业科学实验*, 1982(9): 47.
- [27] 覃业曼. 西沙群岛琛航岛全新世珊瑚礁的发育过程及其记录的海平面变化 [D]. 南宁: 广西大学, 2019.

BEACH SAND-COASTAL DUNES-MODERN VEGETATION-SAND ISLAND GENETIC MODEL OF THE QILIANYU ISLAND

WANG Yuzhe¹, QIU Longwei^{1*}, XU Hong^{2,3*}, MA Xiao^{1,2}, FU Heping^{1,2}

(1 China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 3 First Institute of Oceanology, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: The beach sand is the material base of a sand island. It is not only the home for sea animals, but also the evidence of the forming process of a sand island. Coastal dunes may act as barriers to protect vegetation from the damage by wave and surge. Both of them have important research significance for protection of a sand island. Based on the field survey on beach sands, coastal dunes and sand islands and vegetation on the Qilianyu Island in the scientific expedition 2019 in addition to the interpretation of satellite remote sensing data, this paper discussed the geological features, morphological characteristics, and geographic positions of the beach sands, coastal dunes and vegetation as well as their relationship to the development of the sand island. It is revealed that the formation of beach-coastal dunes is not only determined by the dynamic actions of waves, tides and storm surges, but also related to the process of sediment transportation and sedimentation. With regard to the formation of sand island, vegetation plays critical roles. It starts from a pattern of spots in the beginning and then gradually expands to the whole supratidal area, and moves from coastal dunes to the center of island, and finally occupies the whole island. In the process, plant colonization plays a key role in sand fixation and sand island formation. Upon the observations mentioned above, a genetic model of beach sand-beach rock-vegetation-sand island in Qilianyu Island is proposed.

Key words: Qilianyu Island; grain size analysis; beach sand; coastal dunes; modern vegetation