

西沙赵述岛和北岛海鸟遗迹¹⁴C 年代模型及意义

赵晋军¹,徐利强¹,吴礼彬²,刘晓东²,陈 林³

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院,合肥 230026

3. 中国科学院南海海洋研究所 西沙综合实验站, 三沙 573199

摘 要: 对采自西沙赵述岛和北岛的沉积剖面 ZS2、BD1 进行分析,两个剖面具有十分相似的物源组成和岩性变化。通过测定剖面中海鸟残体的¹⁴C 年龄,运用传统方法以及 Clam 和 Bacon 程序建立了 ZS2 和 BD1 沉积剖面的年龄-深度模型。对比年龄-深度模型发现,Bacon 程序运用 MCMC 作为迭代算法,排除异常数据影响,拟合得到的曲线单调相比较于 Clam 年龄模型显得更为合理。所建立的年代学模型为后期的气候环境演变研究提供了基础。根据 Bacon 程序所构建的年龄-深度模型结果,我们发现近千年来 ZS2 和 BD1 剖面处的平均沉积速率分别为 0.86 mm·a⁻¹ 和 1.26 mm·a⁻¹。采样点的沉积速率在一定程度上代表了岛屿的垂向生长速率,均低于当前海平面的平均上升速率。同时,鸟骨的¹⁴C 年龄也揭示了赵述岛海鸟活动时间应不晚于 AD 1172—1290,而海鸟开始在北岛活动的时间则不晚于 AD 984—1140。 关键词:¹⁴C 定年;海鸟遗迹;沉积速率;赵述岛;北岛;西沙群岛

Age models of seabird remains from Zhaoshu and Beidao islands in the Xisha Archipelago and its implications

ZHAO Jinjun¹, XU Liqiang¹, WU Libin², LIU Xiaodong², CHEN Lin³

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. Xisha Deep Sea Marine Environment Observation and Research Station, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Sansha 573199, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Some environmental and ecological records from several islands of the Xisha Archipelago, South China Sea, have been reconstructed in our earlier study. However, little is known about history of the Qilianyu in the Xisha Islands so far. Zhaoshu and Beidao are the two typical coral islands in Qilianyu of the Xisha Archipelago. To reconstruct history of the two islands, chronology analysis is a prerequisite. Well-preserved seabird subfossils were recovered from the ornithogenic sediments. It is aimed to establish chronology for two sediment profiles collected from Beidao and Zhaoshu islands based on radiocarbon dating of

收稿日期: 2017-04-11; 录用日期: 2017-08-16

Received Date: 2017-04-11; Accepted Date: 2017-08-16

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41402148, 41376124); Fundamental Research Funds for the Central Universities (JZ2017HGTB0201); China Postdoctoral Science Foundation (2014M550338)

通信作者: 徐利强, E-mail: xlq@hfut.edu.cn

Corresponding Author: XU Liqiang, E-mail: xlq@hfut.edu.cn

引用格式:赵晋军,徐利强,吴礼彬,等.2018.西沙赵述岛和北岛海鸟遗迹¹⁴C年代模型及意义[J]. 地球环境学报,9(1):28-37.

Citation: Zhao J J, Xu L Q, Wu L B, et al. 2018. Age models of seabird remains from Zhaoshu and Beidao islands in the Xisha Archipelago and its implications [J]. Journal of Earth Environment, 9(1): 28–37.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402148, 41376124); 中央高校基本科研业务费(JZ2017HGTB0201); 中国博士 后科学基金(2014M550338)

seabird remains. Materials and methods Ornithogenic sediments were observed during our field investigations into the Qilianyu, Xisha Islands in the year 2015. Two sediment profiles, namely ZS2 and BD1, were collected and analyzed from Zhaoshu and Beidao islands, respectively. They are 94 cm (ZS2) and 137 cm (BD1) in length. Both the two profiles consisted of three sediment units. Similarity in lithology of the cores suggests that the two islands may have a similar history and be restricted by identical environmental factors. A large number of seabird subfossil remains, including guano particles, eggshells, fish scales and bones etc., were observed and recovered in the bulk ornithogenic sediments. These biological materials imply historical occupation of these islands by seabirds. Avian subfossils were separated from the bulk sediments, and bone samples were used to investigate island history via radiocarbon (¹⁴C) analysis. *Results* ¹⁴C ages increased with depth for each of the profiles, suggesting wellpreservation of the sediments. The ¹⁴C ages based on seabird remains are much younger than previously reported ¹⁴C ages from carbonate materials, and this could be explained by secondary transport of the carbonates. Seabirdbased ¹⁴C ages reveal that the collected samples were accumulated within approximately the last 1000 years. Direct mathematic fitting, R-language based Bacon and Clam programs were employed to establish age-depth models of the two profiles. It is found that the age-depth model constructed by Bacon is more suitable for age-depth modelling than mathematic fitting models and Clam package model. *Discussion* The seabird subfossils in the bulk ornithogenic deposits reflect gradual accumulation of the sediments, as well as upward growth of the islands. According to the age-depth models for the two sediment profiles based on Bacon program package, it is found that the mean sedimentation rates of the two profiles within the last 1000 years are 0.86 mm $\cdot a^{-1}$ and 1.26 mm $\cdot a^{-1}$, respectively. This partly represents growth rates of the islands, which are significantly lower than the rate of sea level rising in the present day. This implies a potential threat to island ecosystem. In addition, the initial activity of seabirds on the Zhaoshu Island is no later than AD 1172-1290, and the first occupation of the Beidao Island by birds began no later than AD 984-1140. Conclusions The ornithogenic sediments from Zhaoshu and Beidao islands have been well-preseved and are ideal materials for studying history of the islands. Age-depth models based on Bacon program are suggested for further studies concerning the two islands. Mean upward growth rate of the islands within the last millennium is lower than that of present sea level rise. Seabird began to inhabit Qilianyu at approximately 900-1000 years ago. *Recommendations and perspectives* Chronology is essential in island history study of the Xisha Archipelago. The established chronology in the present study provides basis for further climatic, environmental and ecological records of the two islands. This study also suggests a potential threat from sea level rise on the islands, as the rising rate of sea level is greater than growth rates of the two islands, implying an underlying risk of global warming on reef islands.

Key words: radiocarbon dating; ornithogenic sediments; sedimentation rate; Zhaoshu Island; Beidao Island; Xisha Archipelago

西沙群岛位于我国南海中部,由一系列岛礁 组成,除高尖石外,均是由生物碎屑堆积而成的 灰沙岛。这些岛屿远离大陆,保存着相对原始的 生态环境。我国科学家在过去的几十年里对西沙 群岛进行了多次综合考察,并取得了一系列重要 进展(中国科学院南京土壤研究所西沙群岛考察 组,1977;海南省海洋厅,1999;孙立广等, 2005)。然而西沙群岛晚全新世岛屿演化方面的 相关研究还比较少。成岛过程的研究需建立在年 代学的基础上,以此为出发点,研究人员根据碳 酸盐碎屑的¹⁴C年龄,并结合岛屿类型、岛屿之间的相互关系及其发育状况,将西沙群岛岛屿形成时代划分为不同的期次(卢演俦等,1979),且 距今约5000多年的甘泉岛期为主要成岛期,这为 我们认识西沙群岛的成岛历史奠定了重要的基础。 但碳酸盐碎屑往往会经历再沉积作用,导致样品的¹⁴C年龄与其沉积年龄并不一致,这也是研究 珊瑚礁岛屿演化的难点之一(Kench et al, 2005; Woodroffe et al, 2007)。

以西沙群岛东岛和永乐群岛上海鸟粪土沉积

30

地球环境学报

层中的海鸟生物遗迹(鸟骨、蛋壳、鸟粪颗粒等) 为研究对象,我们对岛屿演化历史开展过一些研究 (Liu et al, 2006, 2008; Xu et al, 2010, 2011), 包括海鸟数量演变、重金属污染等方面。然而,目 前我们对西沙宣德群岛七连屿的成岛过程知之甚 少。在2015年野外考察期间,我们在七连屿上发 现了较厚的海鸟粪土沉积层,其中含有大量的海鸟 生物残体,这为研究这两座岛屿的成岛过程提供了 物质基础。构建精确的¹⁴C年龄-深度模型是研究 岛屿历史的基础 (Parnell et al, 2008; Kemp et al, 2009; Blaauw, 2010)。¹⁴C 年代模型包括经典 数学方法、CALIB(Stuiver and Reimer, 1993)、 Mixed-effect modeling (Heegaard et al, 2005) OxCal (Ramsey, 2008) Beeat (Blaauw and Christen, 2005), Bchron (Parnell et al, 2008, 2011)、Clam (Blaauw, 2010)和Bacon (Blaauw and Christen, 2011) 等。目前, 基于 Clam 和 Bacon 程序的¹⁴C年代模型是相对理想的年代模型,已在 国际上引起了广泛的关注(Anderson et al, 2015; Hua et al, 2012; Gaglioti et al, 2014),但在国内 的应用还十分少见。本文拟通过对采集自西沙赵 述岛和北岛的沉积剖面进行分析,运用¹⁴C测年测 定生物骨骼的沉积年龄,结合数学拟合方法以及 Clam 和 Bacon 程序构建这两座岛屿的年龄 - 深度 模型,并对其年代学意义进行探讨。

1 研究区域概况

西沙群岛位于我国南海中部(图 1a),分布 在 15°46′—17°08′N、111°11′—112°54′E,距离海 南 岛 约 330 km。地处 热带,年平均气温约 26℃—27℃,年降雨量约 1500 mm,年蒸发量约 2400 mm;冬春季盛行东北季风,夏秋季盛行西南 季风,属典型的热带海洋性季风气候(赵三平, 2006)。



图 1 赵述岛和北岛采样点地理位置图(b, c 分图中的阴影区域表示岛屿,图中黑色圆点为采样点位置) Fig.1 Map of study area showing sampling sites (Shaded areas in b and c represent islands, dots in b and c show sampling sites)

西沙群岛由东西两部分组成,东侧为宣德群岛,西南面为永乐群岛(图1a),这些岛屿均形

成发育在水下巨大的环礁之上,其岛屿面积共计约 10 km²,海域面积 50 多万 km²,包括 22 个小岛

第1期

赵晋军,等:西沙赵述岛和北岛海鸟遗迹¹⁴C年代模型及意义

屿和一些沙洲、暗礁(孙立广,2014)。七连屿 是位于宣德群岛礁盘上的一系列岛屿和沙洲,沿 西北-东南方向依次为西沙洲、赵述岛、北岛、中 岛、南岛、北沙洲、中沙洲、南沙洲等。

本文研究的赵述岛和北岛是位于七连屿中的 两座灰沙岛。岛屿植被茂盛且呈环带状分布,四 周大多有成片海滩岩发育,向内为环岛沙滩,沙 滩内侧发育沙堤,岛屿中央有茂密的草海桐灌木 林,其中,赵述岛似琵琶状,长约600 m,宽约 300 m,岛屿面积约0.2 km²,高程约4.4 m;北岛 位于赵述岛的东南方,距离赵述岛约4 km,岛屿 面积狭长呈西北-东南走向,长约1500 m,宽约 300 m,面积约0.4 km²,高程约8.2 m。

西沙群岛是我国著名的鸟岛,但近现代以来, 海鸟数量锐减。据统计,20世纪70年代西沙群岛 上栖息着约60种海鸟(中国科学院南京土壤研究 所西沙群岛考察组,1977),而到了1991年,约 60%的鸟种在西沙岛屿上消失,当时仅在东岛、甘 泉岛和中建岛等少数几个岛屿还有大量了海鸟活动 (海南省海洋厅,1999)。我们曾分别于2003年、 2008年和2015年三次赴西沙群岛进行野外考察, 考察期间除在东岛观察到大量的海鸟外,其余岛屿 上的海鸟已基本绝迹。尽管如此,历史时期的海鸟 活动在西沙岛屿上遗留了大量的生物遗迹(鸟粪颗 粒、蛋壳碎片、鸟类和鱼类残骨、鱼鳞片等),是 研究历史时期环境演变的理想载体(Diamond and Devlin, 2003; Devney et al, 2009)。

2 材料与方法

ZS2(16°58′40″N、112°16′15″E)和 BD1 (16°57′45″N、112°18′39″E)沉积剖面分别采自 于赵述岛和北岛。这两座岛屿上遍布灌木丛,鸟 粪土沉积分布广泛。两个剖面均采自珊瑚岛沙堤 内侧的草海桐灌木林下。采样方法为:将内径 11 cm 的 PVC 管垂直插入采样点位置,而后挖坑 取出,保证 PVC 管中的物质不受扰动,得到沉积 柱原状样。同时,在采样点处选择约1 m×1 m 的 地块,从表层开始往下对沉积剖面进行挖掘,按 照 1—2 cm 的深度间隔对其沉积物颜色、物质组 成以及粒度特征进行描述和记录,并利用 10 目的 钢筛对海鸟和鱼类遗迹初步筛选,以保证有足够 多的生物骨骼样品进行 ¹⁴C 定年分析。ZS2 和 BD1 沉积剖面的岩性特征见图 2。



棕色 - 黑色团块状腐殖质的珊瑚砂沉积层,鸟粪颗粒少见;2.黄 褐色鸟粪土沉积层,含大量颗粒状鸟粪和鸟骨,珊瑚砂粒度较细;
 黄色到灰白色珊瑚砂沉积层,含有一定量的鸟粪颗粒和鸟骨, 有机质含量很低,珊瑚砂碎块逐渐变大;4.片状碳酸钙质生物碎屑;
 鸟残骨;6.颗粒状鸟粪;7.植物残体;8.鱼鳞片。

 Grey black humus, plant residues and medium to large size coral sands in the upper layer, a little bit guano and seabird bone remains;
 Light brown ornithogenic sediments, containing a lot of medium to large size coral sands, guano particles, bone remains and fish scales;
 Yellow to white coral sand sediment layer with low organic matter content, a few guano pellets and numerous calcareous bioclasts;
 Calcareous bioclasts; 5. Bird and fish bones; 6. Guano; 7. Plant remains; 8. Fish scales.

> 图 2 赵述岛和北岛岩性剖面示意图 Fig.2 Lithology of the profiles ZS2 and BD1

ZS2 沉积剖面深 94 cm, BD1 沉积剖面为 137 cm,两个沉积剖面均可以划分为三个沉积 单元(图2)。ZS2 剖面表层 0 — 12 cm 为含 黑色团块状腐殖质的珊瑚砂沉积层,鸟粪颗粒 少见;12 — 40 cm 为黄褐色鸟粪土沉积层,含 大量颗粒状鸟粪、鸟骨、鱼骨等生物残体,珊 瑚砂粒度较细;40 — 94 cm 为灰白色珊瑚砂沉 积层,含有少量鸟粪颗粒和鸟骨,珊瑚砂碎块 逐渐变大(图2)。BD1 剖面表层 0 — 14 cm 为含大量团块状黑色腐殖质的珊瑚砂沉积 层,少见鸟粪颗粒;14 — 73 cm 是黄褐色鸟 粪土沉积层,含大量生物残体;73 — 137 cm 为灰白色珊瑚砂沉积层,分选较差,颗粒较粗, 鸟粪颗粒含量相对较少,且含少量鸟骨和鱼骨, 珊瑚砂粒度逐渐增大,鸟粪颗粒未见底。

DOI: 10.7515/JEE182001

根据观察,赵述岛ZS2和北岛BD1 剖面具 有较厚的海鸟粪土沉积层(图2),这是首次发 现七连屿上具有较厚的鸟粪层。ZS2和BD1 沉积 剖面物质组成近乎相同,表明西沙赵述岛和北岛 有相同的物质来源。此外,ZS2和BD1 沉积剖面 岩性的变化与西沙永乐群岛的甘泉岛、广金岛、 金银岛和晋卿岛剖面的岩性变化几乎完全相同 (Xu et al, 2011),从侧面反映ZS2和BD1 剖 面保存完好,能够代表岛屿的演化过程。我们在 ZS2和BD1 沉积剖面的不同位置发现了生物遗迹 样品(如鸟骨、蛋壳、鱼骨、鸟粪颗粒等),并 以其中的骨骼为材料进行了加速器质谱仪(AMS) ¹⁴C年代学分析,测试单位为美国佐治亚大学应 用同位素研究中心。

3 结果与分析

3.1 ¹⁴C 测年结果

ZS2 和 BD1 沉积剖面骨骼样品的 AMS¹⁴C 年

龄及其校正结果见表 1。由于西沙群岛海鸟主要以 飞鱼、鱿鱼为食,即其食物来源地为海洋,因此我 们选择针对海洋样品的 Marine 13 数据库作为¹⁴C 校正数据库,区域性储库效应年龄偏差 Δ*R* 设定为 -25±20 a (Southon et al, 2002),校正程序为基 于 R 语言的 Clam 程序。从表 1 的定年结果来看, 赵述岛和北岛鸟骨的¹⁴C 年龄明显小于前人所测定 的碳酸盐碎屑的年龄,如甘泉岛 20—30 cm 深处 的珊瑚砂年龄已达 3400 a (卢演俦等, 1979),赵 述岛表层沉积物的年龄也超过 1850 a (龚子同等, 1996)。这可能与定年材料的差异有关,碳酸盐碎 屑存在二次搬运的可能性,导致样品年龄明显老 于沉积年龄(Kench et al, 2005; Woodroffe et al, 2007)。

在此基础上,我们尝试利用传统数学拟合、 基于 R 语言的 Clam 和 Bacon 程序来建立年龄-深度模型, Clam 和 Bacon 程序均由英国 Queen's University Belfast ¹⁴C 定年实验室开发。

表1 ZS2 和 BD1 沉积剖面骨骼样品 AMS ¹⁴ C 年龄测定结果 Teb 1 The AMS ¹⁴ C area of hore complex from profiles ZS2 and RD1					
rau. 1 The Aivis C ages of bone samples from promes 2.52 and BD1					
沉积柱编号	样品编号	材料	深度	测定年龄	校正年龄
Profile code	Sample No	Material	Depth/ cm	Conventional age/ BP	Calibrated age/cal BP
ZS2	ZS2-14	骨骼 Bone	13.5	500 ± 20	56-256
	ZS2-23	骨骼 Bone	22.5	710 ± 20	300-449
	ZS2-32	骨骼 Bone	31.5	980 ± 20	530—641
	ZS2-42	骨骼 Bone	43.0	1030 ± 20	554-670
	ZS2-51	骨骼 Bone	61.0	1040 ± 20	558—677
	ZS2-58	骨骼 Bone	75.0	1150 ± 20	660—778
BD1	BD1-32	骨骼 Bone	31.5	560±20	134—286
	BD1-43	骨骼 Bone	45.0	730 ± 20	311-464
	BD1-52	骨骼 Bone	63.0	760 ± 20	352—488
	BD1-62	骨骼 Bone	83.0	930 ± 20	503-617
	BD1-74	骨骼 Bone	107.0	1320 ± 20	799—953
	BD1-81	骨骼 Bone	130.0	1330 ± 20	810—966

3.2 经典年龄 - 深度模型

经典的年龄 - 深度模型是对数据直接进行拟 合,并已得到了广泛应用。为便于进行比较,本 文也建立了 ZS2 和 BD1 剖面基于直接拟合的年龄 -深度模型。由于单点的校正年龄是年龄区间(表 1),而构建传统的年龄模型为数据点,此处选取 95%置信区间内的平均值年龄来构建年龄 - 深度模 型,所得到的结果如图 3 所示。

由图 3 可知,直接拟合得到的年代模型存在

一定缺陷,如数据点需要在校正区间范围内人为选择,且无法给出年代模型的不确定度范围。 目前,古气候和古环境的研究对年代模型精度 要求渐高,传统方法所得到的年龄模型存在改进空间。

3.3 Clam 年龄 - 深度模型

Clam 程序是经典年龄-深度模型的升级。 通过结合¹⁴C年龄数据及其校正年龄的概率分 布,运用线性内插、二次曲线、三次曲线等数学

第1期

赵晋军,等:西沙赵述岛和北岛海鸟遗迹¹⁴C年代模型及意义

方式重建沉积演化历史的年龄-深度模型。其中 线性内插法是通过直线连接已知的¹⁴C校正年龄 加权平均值,并假定沉积物在已知年龄段之间以 恒定速率堆积(Blaauw, 2010),并给出95%

置信区间。

以基于 Clam 程序的线性内插法为例来进行计算,得到西沙赵述岛和北岛沉积剖面的年龄-深度 模型结果如图 4 所示。



图 3 赵述岛 ZS2 和北岛 BD1 剖面基于数学拟合方法构建的年龄 - 深度模型 Fig.3 Age-depth models of ZS2 and BD1 profiles based on mathematic fitting



图 4 赵述岛 ZS2 和北岛 BD1 剖面基于 Clam 程序的年龄 - 深度模型(线性内插) Fig.4 Age-depth models of ZS2 and BD1 profiles based on Clam program package (Linear interpolation)

由图 4 可知,两个沉积剖面的年龄随深度增加 而增加,说明这些沉积物保存完好,未发生明显扰 动。ZS2 沉积剖面 Clam 程序年龄 - 深度模型分析 结果显示沉积速率表现为一定的阶段性变化:从底 部 75—61 cm (AD 1237—1317)到 61—43 cm, 沉积速率(指全岩样品的沉积速率,下同)由 1.75 mm·a⁻¹快速增加到 16.39 mm·a⁻¹;自 43 cm 到 32 cm,对应年龄 AD 1328—1362,沉积速率降为 3.23 mm·a⁻¹;在 32—13 cm (AD 1362—1794), 沉积速率相对稳定,为 0.43 mm·a⁻¹;在表层 13— 0 cm (AD 1794—2015),沉积速率变化不大,为 $0.59 \text{ mm} \cdot a^{-1}$ 。BD1 沉积剖面的沉积速率阶段性 特征也较为明显:底部 130—107 cm,即AD 1051—1061 的沉积速率最快;此后在 107—83 cm (AD 1061—1398),沉积速率降至 0.71 mm \cdot a^{-1}; 从83—63 cm (AD 1398—1519)到63—45 cm (AD 1519—1554)时,沉积速率又逐渐由 1.65 mm · a⁻¹ 增 至 5.15 mm · a⁻¹;在 45 cm 以上的两个沉积阶段中, 即 45—31 cm (AD 1554—1731)和 31 cm—0 cm (AD 1731—2015),沉积速率变化不显著,分 别为 0.78 mm · a⁻¹和 1.09 mm · a⁻¹。总的来看,基于 Clam 的深度 - 年龄模型有效记录了两个剖面沉积 速率的明显变化。沉积速率的快速变化可能在一定 程度上与台风或风暴潮有关(Yu et al, 2006; Sun et al, 2013a)。

此外,根据 Clam 深度 - 年龄模型,ZS2 沉积 剖面的沉积速率平均值约为 0.96 mm·a⁻¹;BD1 沉 积速率平均值约为 1.35 mm·a⁻¹,高于 ZS2 剖面。

3.4 Bacon 年龄 - 深度模型

Bacon程序是一种运用逐步自回归法来构建 年龄-深度模型的 y 过程(Blaauw and Christen, 2011)。通过先进的、完善的、合理的数值方法 (如贝叶斯公式),结合¹⁴C 年龄数据以及先验信 息(Prior information),通过概率密度分布函数, 运用马尔科夫链蒙特卡洛(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)抽样算法对特定深度的一系列 ¹⁴C 校正年龄进行多次迭代,剔除年龄异常值,从 而拟合出一条年龄-深度最优曲线(Blaauw and Christen, 2011),以此来重建采样点处的沉积演 化历史。

步长、沉积速率以及记忆效应可通过先验信息设定。记忆效应(Memory)表示沉积剖面特定 深度与其相邻深度的沉积速率相关性程度。在选定的沉积速率先验值前提下,通过多次迭代运算, 得到 ZS2 和 BD1 沉积剖面的 Bacon 年龄 - 深度模

型,结果如图5所示。

根据图5可以看出, 随深度单调递增的年龄 也意味着沉积物保存完好。ZS2 沉积剖面 Bacon 程 序分析结果显示其沉积速率近似一条平滑的曲线, 整个剖面沉积速率平均值约为 0.86 mm·a⁻¹, 略低 于基于 Clam 年代模型的沉积速率估算值。沉积速 率可分为两段:在75-36 cm (AD 1138-1364) 之间, 沉积速率为1.73 mm·a⁻¹; 36 — 0 cm (AD 1364—2015), 沉积速率则放缓至 0.55 mm·a⁻¹。 而 BD1 沉积剖面的沉积速率近似一条直线,意味 着沉积速率相对稳定,即整个剖面的沉积速率平 均值为 $1.26 \text{ mm} \cdot a^{-1}$, 这与 Clam 模型估算的平均沉 积速率较为接近。根据 Bacon 模型可知,北岛沉 积速率高于赵述岛 0.4 mm·a⁻¹, 这与 Clam 模型的 分析结果基本一致。北岛高程大于赵述岛,也印 证了北岛沉积速率较赵述岛要快。野外考察发现, 两座岛屿的高程变化相对较小,且同一岛屿上不 同点位的海鸟生物沉积层厚度具有相似性,采样 点处的沉积速率在一定程度上可以代表岛屿的沉 积速率。根据两个模型所计算出的两座岛屿垂向 牛长速率(即平均沉积速率)均低于当前的海平 面上升速率 3.2 mm·a⁻¹ (Cazenave et al, 2014), 这意味着海平面上升会对岛屿安全产生威胁。





图 6 为上述三种年代模型的模式年龄对比图。 由图可知,三种年代模型得到的结果存在一定的相 似性,尽管如此,三种模型也存在明显的差别。如 上文所述,直接拟合的主要缺点是无法给出年代的 不确定度。相比之下,基于 Clam 和 Bacon 的模型 则能很好地展示结果不确定度,但二者也存在明显 差别。采用线性内插法的 Clam 程序构建年龄 - 深 度模型的优点在于沉积速率变化明显且易获得;缺 点则是对 ¹⁴C 定年样品所在深度的精度要求较高。 Bacon 程序的优点在于运用贝叶斯公式来重建沉积 演化历史,在给定先验信息的前提下,迭代数百万 次,从而不会受异常数据的影响,且年龄 - 深度模

率突变现象解释不够敏感。因此,在选用年代模型 时应结合具体情况有针对性做出选择。



图 6 ZS2 和 BD1 剖面模式年龄对比图 Fig.6 Comparison of model ages for the profiles ZS2 and BD1

在本研究中,野外观察表明近千年来赵述岛 和北岛地区沉积环境相对稳定。此外,由于鸟骨 的长度有时可达3-5 cm,人为将其归入特定深 度可能会导致在运用 Clam 程序构建模型时产生一 定的偶然误差。若选择 Bacon 程序构建模型,通 过其统计学的逐步自回归法则可以在一定程度上 消除这一误差,而且能够给出最大概率密度的年 龄数据。西沙沉积物中的珊瑚砂夹层可以指示快 速沉积(Sun et al, 2013a),而 ZS2 和 BD1 沉积 剖面中未发现珊瑚砂夹层,也说明沉积速率突变 的可能性较小。综上,本文选择 Bacon 程序作为 年龄 - 深度模型构建年代学序列,为后续的研究工 作奠定基础。

海鸟生物残体是历史时期海鸟活动最直接的 证据,被广泛用于重建海鸟的生态史(Sun et al, 2000,2013b;Sun and Xie,2001)。结合ZS2和 BD1的岩性剖面中生物骨骼的年龄数据,可以推 测赵述岛和北岛开始有海鸟活动的时间节点。海 鸟开始出现在岛上的时间应不迟于剖面中鸟骨出 现的时间,结合年龄数据可知,赵述岛开始有海 鸟活动时间应不晚于 AD 1172—1290,北岛的海 鸟活动时间不晚于 AD 984—1140。结合晚全新世 海平面的变化(Chen and Liu, 1996),可推算得 到赵述岛和北岛在高出海平面2.7m和5.9m时, 海鸟已开始在岛上活动。此后,在达到鸟粪层的 底部时,鸟粪开始大量出现,海鸟数量迅速增加, 对应的时间分别为 AD 1275—1417(赵述岛)和 AD 1372—1502(北岛)。

4 结论

本文对西沙七连屿赵述岛 ZS2 和北岛 BD1 海 鸟粪土沉积剖面进行了分析,挑选了剖面中的海 鸟生物残体进行了¹⁴C 年代测定,根据基于 Clam 和 Bacon 程序的年代模型,得到如下结论:

(1) ZS2 和 BD1 沉积剖面物质组成相似,岩 性变化与西沙其它剖面的岩性变化一致,均可划 分为三个沉积单元,表明西沙赵述岛和北岛具有 相同的演化历史。

(2)近千年来,根据Bacon程序建立的深度-年龄模型,两个沉积剖面均为晚全新世以来的产物。ZS2剖面处的平均生长速率为0.86 mm·a⁻¹, BD1剖面处的平均生长速率为1.26 mm·a⁻¹,在一 定程度上代表了岛屿生长速率,低于当前海平面 的上升速率。

(3)根据两个沉积剖面中最古老的海鸟生物 残体(骨骼)的实测年龄,推测海鸟开始在赵述 岛上活动的时间不晚于 AD 1172—1290,北岛开 始有海鸟活动的时间不晚于 AD 984—1140。

致谢: 野外考察期间得到了中国科学院南海海洋 研究所西沙海洋科学综合实验站大力支持, 楼创 能、王哲、韦洋洋、李烨玲、郭敏、王雪莹、加 依纳尔等参与了样品前处理,在此一并致谢。

参考文献

- 龚子同,刘良梧,周瑞荣. 1996. 南海诸岛土壤的形成和年龄 [J]. *第四纪研究*, 16(1): 88–95. [Gong Z T, Liu L W, Zhou R R. 1996. Formation of the soils in the South China Sea islands and their ages [J]. *Quaternary Sciences*, 16(1): 88–95.]
- 海南省海洋厅. 1999. 海南省海岛资源综合调查研究专 业报告集 [M]. 北京:海洋出版社. [Hainan Ocean Administration. 1999. The professional proceedings of the integrated investigation research on sea islands resource of Hainan province [M]. Beijing: China Ocean Press.]
- 卢演俦,杨学昌,贾蓉芬.1979.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,(2):93-101.
 [Lu Y C, Yang X C, Jia R F. 1979. Quaternary biological sediments in the Xisha Archipelago, China and a discussion on the age of island-formation [J]. *Geochimica*, (2):93-101.]
- 孙立广,刘晓东,晏 宏,等. 2014. 南海岛屿生态地质
 学 [M]. 上海:上海科学技术出版社. [Sun L G, Liu X D, Yan H, et al. 2014. Ecogeology of islands in the South China Sea [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press.]
- 孙立广,赵三平,刘晓东,等. 2005. 西沙群岛生态环境报告 [J]. *自然杂志*, 27(2): 79-84. [Sun L G, Zhao S P, Liu X D, et al. 2005. An eco-environmental report on Xisha Archipelago, South China Sea [J]. *Chinese Journal of Nature*, 27(2): 79-84.]
- 赵三平. 2006. 南海西沙群岛海鸟生态环境演变 [D]. 合 肥:中国科学技术大学. [Zhao S P. 2006. Evolution of seabird eco-environment on Xisha Islands of South China Sea [D]. Hefei: University of Science and Technology of China.]
- 中国科学院南京土壤研究所西沙群岛考察组. 1977. 我国 西沙群岛的土壤和鸟粪磷矿 [M]. 北京:科学出版社. [Chinese Academy of Sciences. Institute of Soil Science. Exploration Group of Xisha Islands. 1977. Soil and guano phosphorus mine in Xisha [M]. Beijing: Science Press.]
- Anderson R S, Ejarque A, Rice J. et al. 2015. Historic and Holocene environmental change in the San Antonio Creek Basin, mid-coastal California [J]. *Quaternary Research*, 83(2): 273–286.
- Blaauw M. 2010. Methods and code for 'classical' agemodelling of radiocarbon sequences[J]. *Quaternary*

Geochronology, 5(5): 512-518.

- Blaauw M, Christen J A. 2005. Radiocarbon peat chronologies and environmental change [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series C - Applied Statistics*, 54(4): 805–816.
- Blaauw M, Christen J A. 2011. Flexible paleoclimate agedepth models using an autoregressive gamma process [J]. *Bayesian Analysis*, 6(3): 457–474.
- Cazenave A, Dieng H B, Meyssignac B, et al. 2014. The rate of sea-level rise [J]. *Nature Climate Change*, 4(5): 358–361.
- Chen Y G, Liu T K. 1996. Sea level changes in the last several thousand years, Penghu Islands, Taiwan Strait [J]. *Quaternary Research*, 45(3): 254–262.
- Devney C A, Short M, Congdon B C. 2009. Sensitivity of tropical seabirds to EI-Nino precursors [J]. *Ecology*, 90(5): 1175–1183.
- Diamond A W, Devlin C M. 2003. Seabirds as indicators of changes in marine ecosystems: ecological monitoring on Machias Seal Island [J]. *Environmental Monitoring and* Assessment, 88(1/2/3): 153–175.
- Gaglioti B V, Mann D H, Jones B M, et al. 2014. Radiocarbon age-offsets in an arctic lake reveal the long-term response of permafrost carbon to climate change [J]. Journal of Geophysical Ressarch Biogeosciences, 119(8): 1630-1651.
- Heegaard E, Birks H J B, Telford R J. 2005. Relationships between calibrated ages and depth in stratigraphical sequences: an estimation procedure by mixed-effect regression [J]. *Holocene*, 15(4): 612-618.
- Hua Q, Mcdonald J, Redwood D, et al. 2012. Robust chronological reconstruction for young speleothems using radiocarbon [J]. *Quaternary Geochronology*, 14(4): 67-80.
- Kemp A C, Horton B P, Culver S J, et al. 2009. Timing and magnitude of recent accelerated sea-level rise (North Carolina, United States) [J]. *Geology*, 37(11): 1035–1038.
- Kench P S, McLean R F, Nichol S L. 2005. New model of reefisland evolution: Maldives, Indian Ocean [J]. *Geology*, 33(2): 145-148.
- Liu X D, Sun L G, Cheng Z Q, et al. 2008. Paleoenvironmental implications of the guano phosphatic cementation on Dongdao Island in the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 247(1/2): 1–16.

Liu X D, Zhao S P, Sun L G, et al. 2006. Geochemical evidence

赵晋军,等:西沙赵述岛和北岛海鸟遗迹¹⁴C年代模型及意义

for the variation of historical seabird population on Dongdao Island of the South China Sea [J]. *Journal of Paleolimnology*, 36(3): 259–279.

- Parnell A C, Buck C E, Doan T K. 2011. A review of statistical chronology models for high-resolution, proxy-based Holocene palaeoenvironmental reconstruction [J]. *Quaternary Science Reviews*, 30(21/22): 2948–2960.
- Parnell A C, Haslett J, Allen J R M, et al. 2008. A flexible approach to assessing synchroneity of past events using Bayesian reconstructions of sedimentation history [J]. *Quaternary Science Reviews*, 27(19/20): 1872–1885.
- Ramsey C B. 2008. Deposition models for chronological records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 27(1/2): 42–52.
- Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. 2002. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and southeast Asia [J]. *Radiocarbon*, 44(1): 167–180.
- Stuiver M, Reimer P J. 1993. Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C age calibration program [J]. *Radiocarbon*, 35(1): 215–230.
- Sun L G, Emslie S D, Huang T, et al. 2013b. Vertebrate records in polar sediments: Biological responses to past climate change and human activities [J]. *Earth-Science Reviews*, 126(11): 147–155.
- Sun L G, Xie Z Q, Zhao J L. 2000. A 3000-year record of

penguin populations [J]. Nature, 407(6806): 858.

- Sun L G, Xie Z Q. 2001. Relics: penguin population programs [J]. Science Progress, 84(1): 31–44.
- Sun L G, Zhou X, Huang W, et al. 2013a. Preliminary evidence for a 1000-year-old tsunami in the South China Sea [J]. *Scientific Reports*, 3: 1655. DOI: 10.1038/srep01655.
- Woodroffe C D, Samosorn B, Hua Q, et al. 2007. Incremental accretion of a sandy reef island over the past 3000 years indicated by component-specific radiocarbon dating [J]. *Geophysical Research Letters*, 34(3): 300-315.
- Xu L Q, Liu X D, Sun L G, et al. 2010. Distribution of radionuclides in the guano sediments of Xisha Islands, South China Sea and its implication [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 101(5): 362-368.
- Xu L Q, Liu X D, Sun L G, et al. 2011. Geochemical evidence for the development of coral island ecosystem in the Xisha Archipelago of South China Sea from four ornithogenic sediment profiles [J]. *Chemical Geology*, 286(3/4): 135–145.
- Yu K F, Zhao J X, Wang P X, et al. 2006. High-precision TIMS U-series and AMS ¹⁴C dating of a coral reef lagoon sediment core from southern South China Sea [J]. *Quaternary Science Reviews*, 25(17/18): 2420–2430.