

## ◆ 研究类 ◆

涠洲岛全新世珊瑚礁的形成和演变<sup>\*</sup>骆雯雯<sup>1,2</sup>, 王欣<sup>1,2\*</sup>, 黎广钊<sup>1,2</sup>, 刘涛<sup>3</sup>, 梁文<sup>1,2</sup>, 蓝军南<sup>1,2</sup>, 林明晴<sup>1,2</sup>

(1. 广西科学院, 广西海洋科学院(广西红树林研究中心), 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西北海 536000; 2. 自然资源部北部湾滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 广西北海 536015; 3. 南宁师范大学, 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西南宁 530001)

**摘要:**涠洲岛是我国最大的第四纪火山岛, 位于南海珊瑚礁分布的北界, 是我国珊瑚礁重要分布区之一。本研究采集涠洲岛各珊瑚礁区海滩岩中沉积的珊瑚碎屑等生物样品, 挑选未经过成岩改造的原生珊瑚文石部分, 进行放射性碳同位素(<sup>14</sup>C)测年和海洋储库效应校正后, 建立涠洲岛全新世珊瑚礁发育的年代框架; 通过对比我国各全新世珊瑚礁发育情况, 推演出涠洲岛全新世珊瑚礁的形成过程。结果显示, 涠洲岛珊瑚礁的起始发育时间与我国其他全新世珊瑚礁基本一致, 均属于全新世大暖期。涠洲岛全新世珊瑚礁发育及演变过程可以分为4个阶段: 在早全新世时期(12 000—8 000 a B. P.), 涠洲岛全岛的火山碎屑岩台地形成, 这为珊瑚附着生长提供了附着基质; 在中全新世早期(8 000—4 000 a B. P.), 涠洲岛北面沿岸的珊瑚岸礁及沙坝-潟湖沉积体的雏形最先形成; 在中全新世晚期(4 000—2 000 a B. P.), 涠洲岛东面和西北方向的沿岸形成沙坝-潟湖沉积体; 在晚全新世时期(2 000—900 a B. P.), 涠洲岛东面至东北和西南方向沿岸的珊瑚礁开始广泛发育。可以推断, 涠洲岛珊瑚礁形成于早全新世时期, 从岛北岸开始发育, 然后到岛的东面以及东北和西南方向, 最终演变成涠洲岛现代珊瑚礁分布格局。

**关键词:**涠洲岛; 全新世; 珊瑚礁; <sup>14</sup>C; 形成和演变

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2024)03-0342-13

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20241108.012

珊瑚礁是地质学里一系列环境信息的重要载体, 能以较高的分辨率记录过去环境的变化。珊瑚岸礁最初通过珊瑚虫体附着于死火山岛周围发育而成, 再经过火山岛沉降等地质运动和珊瑚礁的生长发育, 继

而演变成岛礁和环礁<sup>[1]</sup>。我国南海诸岛的珊瑚礁主要为环礁, 台湾岛、海南岛、涠洲岛以及雷州半岛的珊瑚礁基本都属于岸礁<sup>[2,3]</sup>。赵希涛等<sup>[4]</sup>认为我国海南岛南岸的珊瑚礁是我国全新世珊瑚岸礁最为发育

收稿日期: 2024-05-14

修回日期: 2024-08-31

\* 广西红树林保护与利用重点实验室基金项目(GKLMC-22A05, GKLMC-4202201)资助。

## 【第一作者简介】

骆雯雯(1993—), 女, 助理研究员, 主要从事珊瑚修复和珊瑚礁发育演变相关研究。

## 【\*\*通信作者简介】

王欣(1983—), 男, 副研究员, 主要从事珊瑚礁生态学与生态修复研究, E-mail: matcie@163.com。

## 【引用本文】

骆雯雯, 王欣, 黎广钊, 等. 涠洲岛全新世珊瑚礁的形成和演变[J]. 广西科学院学报, 2024, 40(3): 342-354.

LUO W W, WANG X, LI G Z, et al. Formation and Evolution of Coral Reefs in Weizhou Island during Holocene [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2024, 40(3): 342-354.

的地区之一,仅次于台湾岛南端的恒春半岛珊瑚岸礁。宋朝景等<sup>[5]</sup>对华南大陆沿岸的珊瑚礁做了分析,认为大陆沿岸珊瑚礁区的生物资源相对匮乏。而涠洲岛珊瑚礁是我国南海珊瑚礁的重要组成部分,其位于整个南海珊瑚礁分布区的北缘,拥有特殊的珊瑚礁分布地理位置和丰富的珊瑚礁资源<sup>[6-9]</sup>,极具研究价值。

涠洲岛是我国最大的第四纪火山岛。第四纪初湖光岩组火山岩喷发期间,在喜马拉雅山脉运动的影响下,地块下沉、海侵、海岛地壳隆起、海底火山喷发等地质活动时有发生,造成几次地壳的快速升降运动,首先在涠洲岛东边和北边的沿岸发生沉积,这最终使涠洲岛坐落于雷琼地陷的凸起位置<sup>[10-13]</sup>。在长期的地质作用下,涠洲岛演变形成了较为显著的海蚀地貌、海积地貌、珊瑚礁地貌和火山遗迹地貌等地貌类型<sup>[14]</sup>。成岩的珊瑚石常被用作测年载体,对珊瑚礁岩心年龄的检测和分析可得到沉积相的纵向变化,从而反映礁体的发育演化。刘文会等<sup>[15]</sup>通过对珊瑚枝进行测年,得到其年龄分布范围,由此认为涠洲岛北港海滩岩形成于1 780—836 a. B. P. 期间,属晚全新世时期。龙雅婷等<sup>[7]</sup>在涠洲岛北面珊瑚礁礁坪区的中心位置钻孔采样(井深8.2 m)并测定珊瑚礁年龄,结果显示涠洲岛北面现存珊瑚礁至晚于3 700 a. B. P. 时开始发育。涠洲岛历史研究多为单点钻孔研究,然而,单点钻孔取样测年的方式仅能反映该钻孔位置珊瑚礁的年代信息。为全面研究涠洲岛各珊瑚礁的发育演变历史,本研究采用放射性碳同位素(<sup>14</sup>C)测年技术,对涠洲岛各类型的珊瑚礁区海滩岩进行采样测年,研究并建立涠洲岛珊瑚礁发育的年代框架,整体反演涠洲岛各部分珊瑚礁的发育演变过程。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

涠洲岛(21°00′—21°10′N, 109°00′—109°15′E)<sup>[16]</sup>隶属于广西壮族自治区北海市涠洲镇,位于北海市正南方38 km处。涠洲岛区域受大气环流和海岸地形的共同影响,盛行亚热带海洋性季风气候,年平均气温为23.2℃<sup>[17]</sup>,年平均降水量为1 449.8 mm<sup>[18]</sup>,海域余流主要为西向或西北向。整个涠洲岛以火山碎屑岩台地为基底,主要由橄榄玄武岩、沉凝灰岩、凝灰质火山角砾岩、火山集块岩等火山碎屑岩组成;火山遗迹地貌出现在南湾、横路山和鳄鱼山3

处,海蚀地貌主要分布在南面沿岸,海积地貌和珊瑚礁地貌主要分布在北面沿岸<sup>[6]</sup>。涠洲岛的珊瑚礁地貌主要以岸礁的形式存在,为生物海岸类型,而珊瑚能造礁的生物特性对海岸生态环境以及海岸演变有着重要的影响。涠洲岛珊瑚礁的整体发育情况为岛屿北面、东面和西南方向沿岸珊瑚礁发育良好,西面和南面沿岸没有珊瑚礁存在<sup>[19,20]</sup>。

珊瑚对生存环境的要求极为苛刻<sup>[21]</sup>,对温度、盐度、光照、水质都有着很高的要求,温度适中、基底粗糙、水质良好的环境更能促进珊瑚虫的附着和发育。为了研究各环境条件对珊瑚生长、发育的影响,黎广钊等<sup>[16]</sup>于1983—2002年多次对涠洲岛各类环境因子进行调查,认为涠洲岛的气候、海水温度、盐度、水深、光照、水质和基底条件十分适合珊瑚虫的附着和生长。此外,水流、浪潮流等因素作用是珊瑚礁发育的重要控制因素,决定着珊瑚虫附着后是否能发育成珊瑚礁,如涠洲岛大岭一带因受夏季盛行的西南浪影响,仅零星分布抗浪性强的珊瑚种类,未见形成珊瑚礁体。据调查统计,涠洲岛活珊瑚覆盖区域集中在北面苏牛角坑—北港—后背塘沿岸海域、西北方向西角海域和东面下牛栏沿岸海域、东北方向横岭—公山背、西南方向石螺口—竹蔗寮—滴水村沿岸,与近年来珊瑚礁分布相关<sup>[22-25]</sup>。

### 1.2 涠洲岛珊瑚礁区海岸类型

涠洲岛沿岸珊瑚礁坪总面积26.8 km<sup>2</sup>,其北面和西北方向沿岸的珊瑚礁发育最好,东边和西南方向沿岸的珊瑚礁发育良好,而西边和南边沿岸仅分布珊瑚,不形成珊瑚礁体<sup>[26]</sup>。在海蚀和海积作用下,珊瑚礁区有陆源碎屑沉积和礁源碳酸盐沉积共同形成的混合沉积<sup>[19]</sup>。根据涠洲岛各向岸礁的发育程度,涠洲岛珊瑚礁区可分为3种海岸剖面:海蚀型(西面大岭一带和东南方向石盘河一带),海蚀-海积型(西南方向竹蔗寮—滴水村和东面横岭—公山背一带),堆积型(西面西角海岸至北面苏牛角坑—北港—后背塘)<sup>[20]</sup>。

海蚀型海岸代表的海岸在东南方向石盘河和西面大岭一带,前者礁坪直接与海蚀平台相接,分布多种形态的活珊瑚,优势种不明显,后者因西南向风浪强烈影响,活珊瑚仅零星分布,覆盖度较低,海蚀平台外礁坪宽只有10—20 m<sup>[6,19]</sup>。东面横岭—公山背和西南方向竹蔗寮—滴水村一带的海岸则属于过渡型,介于海蚀型和堆积型之间,是二者交替类型的岸段。东面公山背—横岭的潮间浅滩宽120 m,礁坪宽475

m, 珊瑚生长带宽 556 m<sup>[16]</sup>; 西南方向竹蔗寮一滴水村的海滩后方发育有 3 道高为 1.5—1.6 m、宽约 100 m 的沙堤, 平行于海岸, 海滩-水下沙坝宽 215 m, 礁坪宽 475 m, 珊瑚生长带宽 215 m<sup>[20]</sup>。该过渡型海岸的海滩地貌形态不明显, 面积很小, 原因是该区域风向和波浪的强度呈季节性变化。涠洲岛西面至北面一带的海岸为堆积型, 特点是自海岸线至珊瑚生长带下限均发育良好, 具有接受沉积的广泛沿岸和较宽的珊瑚礁体<sup>[27]</sup>。北面北港沿岸, 潮间浅滩宽 130 m, 礁坪宽 1 025 m, 珊瑚生长带宽 660 m<sup>[16]</sup>。

### 1.3 涠洲岛现代珊瑚礁格局分布

涠洲岛为上升岛屿, 在现阶段珊瑚礁分布区, 除东南方向石盘河和西面大岭一带, 北面、东面和西南方向的海滩地貌均发育较好, 推测其存在完整的珊瑚礁发育历史。在涠洲岛北面、东面和西南方向礁坪的海滩堆积处, 形成了具有珊瑚碎屑的海滩岩和沙堤, 推测是全新世时期波浪对礁坪的破坏作用和其带来物质的堆积作用同时叠加形成。

涠洲岛珊瑚礁可划分为沙堤、海滩、礁坪和外礁坪珊瑚生长带, 沙堤可分老沙堤、中沙堤和新沙堤, 涠洲岛北面沿岸苏牛角坑—北港—后背塘、东面横岭—公山背一带以及西南方向竹蔗寮等地的沿岸沙堤和海岸高潮带附近海滩岩形成的沉积物中主要为曾经的珊瑚断枝和生物碎屑。涠洲岛海滩岩分布区大部

表 1 涠洲岛海滩岩采样位置信息

Table 1 Locations of beach rocks sampling sites in Weizhou Island

采样点位序号 Sampling site number	采样地点 Sampling location	采样方式 Sampling method	深度/m Depth/m	高程/m Elevation/m	纬度 Latitude	经度 Longitude
1	Sand bank of Houbeitang	Potholing	7.10	5.50	21°03'41.752 8"N	109°06'16.668 0"E
2	Sand bank of Houbeitang	Potholing	3.50	5.00	21°03'43.027 2"N	109°06'15.429 6"E
3	Sand bank of Houbeitang	Potholing	3.50	5.00	21°03'39.898 8"N	109°06'18.057 6"E
4	Sand bank of Houbeitang	Potholing	2.10	5.00	21°03'44.989 2"N	109°06'14.122 8"E
5	The northwest sand bank of Xijiao	Drilling	1.80	0.20	21°03'53.989 2"N	109°06'33.613 2"E
	The northwest sand bank of Xijiao	Drilling	1.70	0.60	21°03'53.989 2"N	109°06'33.613 2"E
	The northwest sand bank of Xijiao	Drilling	2.70	1.00	21°03'53.989 2"N	109°06'33.613 2"E
	The northwest sand bank of Xijiao	Potholing	2.10	4.50	21°03'53.989 2"N	109°06'33.613 2"E
6	The northwest sand bank of Xijiao	Drilling	0.00	0.30	21°03'56.779 2"N	109°06'31.442 4"E
	Sand bank of Suniujaokeng	Drilling	6.80	1.50	21°04'03.709 2"N	109°06'54.396 0"E
		Profile of Suniujaokeng	Potholing	1.50	2.50	21°04'03.709 2"N
	Profile of Suniujaokeng	Potholing	1.00	2.00	21°04'03.709 2"N	109°06'54.396 0"E
8	Profile of Suniujaokeng	Potholing	3.60	3.90	21°04'03.734 4"N	109°07'13.591 2"E
9	High tide line of Gongshanbei	Potholing	2.70	1.50	21°03'45.853 2"N	109°08'11.979 6"E
10	High tide line of Gongshanbei	Potholing	0.00	1.00	21°03'45.914 4"N	109°08'12.130 8"E
11	Sand bank of Hengling	Potholing	3.85	3.00	21°03'16.761 6"N	109°08'23.701 2"E

分顶部被 1 层 1.0—1.5 m 厚的松散生物碎屑和珊瑚碎屑砂覆盖, 只有在海岸沙堤靠海侧的海岸陡坎和人工挖坑中出现海滩岩。

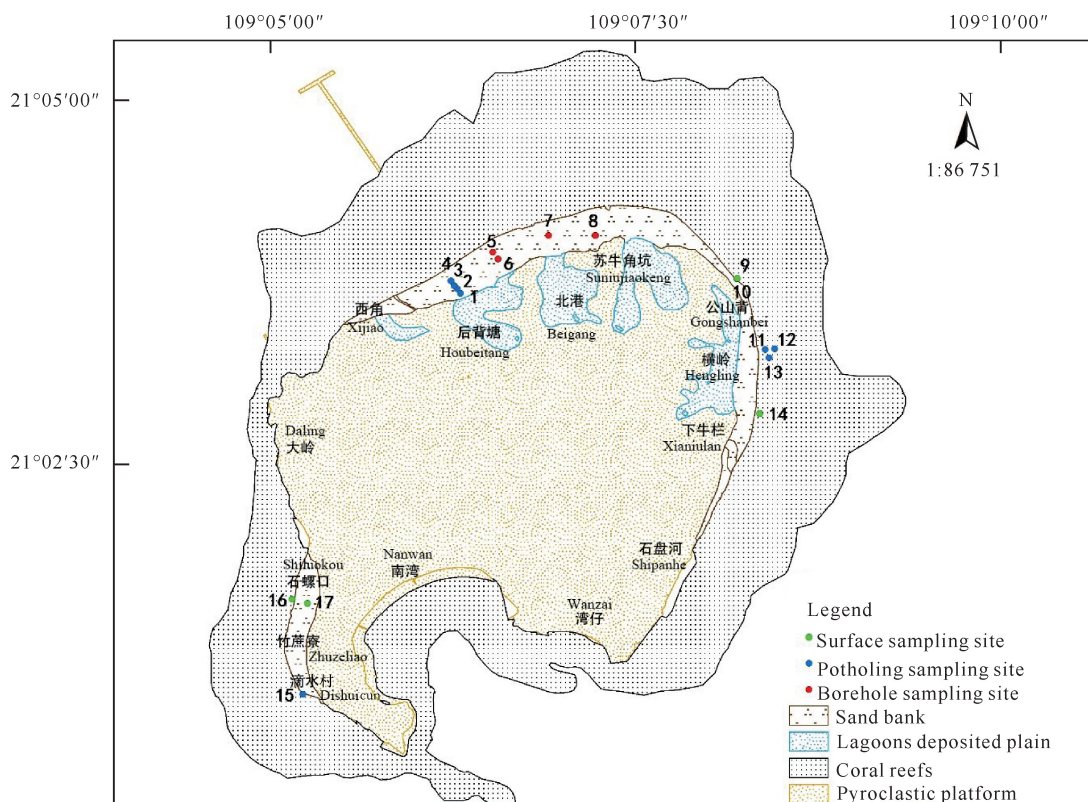
### 1.4 方法

海滩岩主要是被碳酸盐胶结的海滩相碎屑沉积岩, 根据堆积物中珊瑚碎屑或生物的产状, 可推出该堆积物是波浪对早期形成的珊瑚礁、礁栖生物遗骸及海岸基岩侵蚀破坏的产物<sup>[16]</sup>, 从而大致判断该区域珊瑚碎屑或生物碎屑的年代。根据涠洲岛地质地形分布现状, 选定后背塘、苏牛角坑、下牛栏、西角、横岭、公山背、竹蔗寮和滴水村共 8 处有海滩岩分布的区域进行采样。在沿岸沙堤、海岸高潮位带的不同海滩岩部位进行钻孔或挖坑取样, 17 个采样位点和涠洲岛地貌现状见表 1 和图 1。样品主要采集自海滩岩中的珊瑚碎屑, 并以其他生物碎屑做补充, 共采集 22 个样本。选取各站位样品中保存完好的珊瑚石, 取其核心部分, 用 X 光衍射仪 (Ultima IV, 日本理学公司) 挑选出未经过成岩改造的原生珊瑚文石作为测定年份的最终样品, 通过分析各海滩岩中样品的年代信息, 推测该位置珊瑚礁形成的时间和过程, 从而完整而全面地反演涠洲岛全新世时期珊瑚礁的发育过程。样品采集后分别送至广东省科学院广州地理研究所、中国地质科学院岩溶地质研究所、华东师范大学河口海岸科学研究院进行<sup>14</sup>C 测年鉴定。

续表

Continued table

采样点序号 Sampling site number	采样地点 Sampling location	采样方式 Sampling method	深度/m Depth/m	高程/m Elevation/m	纬度 Latitude	经度 Longitude
12	High tide line of Hengling	Potholing	1.50	4.70	21°03'13.291 2"N	109°08'25.321 2"E
13	High tide line of Hengling	Potholing	1.50	1.00	21°03'16.992 0"N	109°08'27.636 0"E
14	Sand bank of Xianlulan	Potholing	0.00	2.00	21°02'50.384 4"N	109°08'21.386 4"E
15	High tide line of Dishuicun	Potholing	1.10	1.40	21°00'54.691 2"N	109°05'13.038 0"E
16	High tide line of Zhuzheliao	Potholing	0.00	1.00	21°01'33.794 4"N	109°05'08.642 4"E
17	Sand bank of Zhuzheliao	Potholing	2.70	1.50	21°01'32.138 4"N	109°05'14.899 2"E



Drawing based on the standard map "GUI S (2022) 51".

图1 涠洲岛<sup>14</sup>C测年采样位点分布图Fig. 1 Distribution map of <sup>14</sup>C dating sampling sites in Weizhou Island

<sup>14</sup>C测年技术广泛应用于第四纪晚期地质年代学、古气候、古地理、海洋等领域,至今已累积了众多的资料和研究成果<sup>[28]</sup>。常规<sup>14</sup>C测年技术已非常成熟,用于测量高文石含量的珊瑚样品也能保证其准确性<sup>[29]</sup>,原生珊瑚文石纯度高,且未经过成岩改造,<sup>14</sup>C测年数据更能精确反映造礁石珊瑚形成年代。由于海洋储库效应(Marine Reservoir Effect, MRE)的存在,含碳的海洋沉积物测出来的年龄有较大的误差,为了排除海洋储库效应的影响,海洋沉积物样品的<sup>14</sup>C测年数据需要进行年代校正处理,从而准确评

估和计算海洋储存年龄,以判定海洋沉积物记录的环境事件年代,其中,海洋储库年龄指在某一地区在一定时间内,大气碳储库和海洋碳储库之间的偏差值<sup>[30-35]</sup>。

在前人的研究基础上,对涠洲岛典型的海滩岩特征和珊瑚礁地貌进行现场勘探。选取4处不同结构的出露海滩岩,对比分析涠洲岛东北岸公山背海岸、东岸横岭海岸和西南岸竹蔗寮海岸海滩岩的不同层岩结构特征。选取涠洲岛北面苏牛角坑(堆积型珊瑚礁)和涠洲岛东面横岭(海蚀-海积型珊瑚礁)2处典

型的珊瑚礁地貌作为监测剖面,做详细发育剖面并进行对比,分析2处沙堤和海岸高潮带的年份组成,以获得对应岸礁的发育演变过程。

## 2 结果与分析

### 2.1 珊瑚礁实测<sup>14</sup>C年龄及校正年龄分布

对涠洲岛后背塘、苏牛角坑、下牛栏、西角、横岭、公山背、竹蔗寮和滴水村珊瑚礁区沿岸的22个海滩岩生物和珊瑚碎屑样品的<sup>14</sup>C年龄进行测定,经过数据校正后,22个样品的<sup>14</sup>C年龄结果见表2。结果显示,所有样品年龄均分布在全新世时期,最老的海滩岩形成时间为(7 405±92) a B. P.,处于中全新世早期,该年龄样品来自涠洲岛北面苏牛角坑—后背塘一带。来自涠洲岛东面下牛栏、西北方向西角珊瑚礁碎

屑海滩岩的样品中,最老的海滩岩形成时间分别为(3 147±114) a B. P. 和(2 877±117) a B. P.,处于中全新世晚期,最年轻的为东面横岭—公山背沙堤和西南方向竹蔗寮—滴水村沙堤中的珊瑚碎屑海滩岩,均为2 000 a B. P. (全新世晚期)之后发育形成。

从<sup>14</sup>C校正年龄可以基本推断,自中全新世早期以来,涠洲岛岸礁的发育顺序是从北面后背塘、北港、苏牛角坑沿岸开始,至中全新世晚期,在东面的下牛栏、横岭和西南方向的竹蔗寮、滴水村岸外生长发育,随后,约2 500 a B. P. 以来相继在东面的公山背、横岭沿岸一带发育,最后,于全新世晚期才开始发育的是西南方向的竹蔗寮、滴水村沿岸一带,这部分珊瑚礁最为年轻。

表2 涠洲岛珊瑚礁实测<sup>14</sup>C年龄值

Table 2 The measured <sup>14</sup>C age value of coral reef in Weizhou Island

采样点位序号 Sampling site number	测试材料 Test material	检测机构 Test institute	<sup>14</sup> C年龄/ 距今计年 Age of <sup>14</sup> C/a B. P.	校正年龄/ 距今计年 Corrected age/a B. P.
1	Bioclast	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	6 900±100	7 405±92
2	Coral debris	Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University	3 150±100	2 937±127
3	Coral debris	Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University	3 050±100	2 968±130
4	Coral debris	Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University	2 060±90	1 985±90
5	Coral debris	Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University	3 105±100	2 877±117
	Coral debris	Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University	2 690±100	2 430±144
	Coral debris	Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University	2 490±100	2 162±125
	Coral debris	Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University	2 060±90	1 631±108
6	Coral debris	Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University	1 660±90	1 210±91
7	Coral debris	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	6 000±100	7 405±92
	Coral debris	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	6 000±110	6 412±119
	Coral debris	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	4 100±70	4 158±109
8	Coral debris	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	6 770±100	7 307±94
9	Coral debris	Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences	1 870±160	1 900±130
10	Coral debris	Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences	1 470±150	1 520±150
11	Coral debris	Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences	2 295±170	1 993±203

续表

Continued table

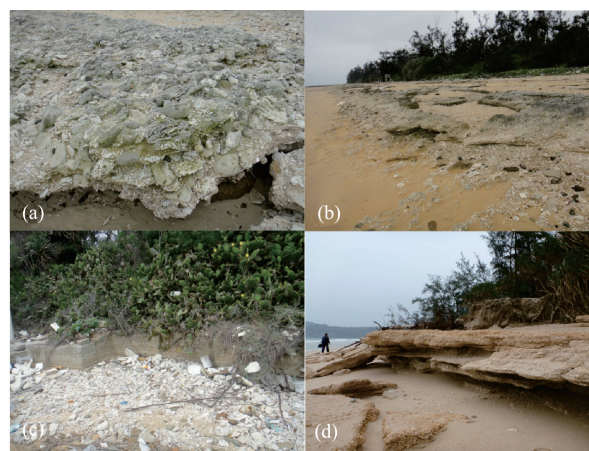
采样点位序号 Sampling site number	测试材料 Test material	检测机构 Test institute	$^{14}\text{C}$ 年龄/ 距今计年 Age of $^{14}\text{C}/\text{a B. P.}$	校正年龄/距今计年 Corrected age value/a B. P.
12	Coral debris	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	1 970±100	1 560±93
13	Coral debris	Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences	1 450±160	1 007±166
14	Coral debris	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	3 290±80	3 147±114
15	Coral debris	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	1 290±80	866±115
16	Coral debris	Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences	1 420±70	974±76
17	Coral debris	Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences	1 870±160	1 260±86

## 2.2 涠洲岛出露的生物碎屑海滩岩特征

涠洲岛海滩岩主要由灰白色中粗砾状含珊瑚碎屑、不等粒砂质生物碎屑、含生物碎屑砂岩组成,剖面垂向变化的趋势均呈上粗下细,形成清晰的岩层斜层理、交错层理和板状交错层理结构。在涠洲岛东北面公山背一带,东岸潮间带上部海滩遭受海浪侵蚀、冲刷出露的珊瑚生物碎屑海滩岩呈板状结构,表明了公山背岸段出露的海滩岩是由造礁珊瑚骨骼及其碎屑、钙藻屑、贝壳或贝壳碎屑胶结堆积形成的珊瑚生物碎屑海滩岩[图 2(a)];东面横岭海岸潮间带连续成片出露的海滩岩地貌,均含生物碎屑砂岩和含珊瑚砾石砂岩[图 2(b)],而潮间带上部人工挖坑出露的海滩岩,水平层理、斜层理清晰[图 2(c)];涠洲岛西南方向竹蔗寮潮间带上部海滩岩遭受海浪侵蚀、冲刷,出露的珊瑚生物碎屑海滩岩呈水平层理结构特征[图 2(d)]。

## 2.3 涠洲岛堆积型珊瑚礁剖面分析

根据校正后的 $^{14}\text{C}$  年龄数据和涠洲岛珊瑚礁的分布现状可以推测,7 500 a B. P. 以来,在风浪的作用下,珊瑚生长与死亡后的生物碎屑向礁前和礁后搬运,首先在涠洲岛北面(后背塘一带)堆积形成以珊瑚生物碎屑为主的海滩岩,以及含有部分松散的珊瑚生物碎屑砂砾层的海滩沙堤。涠洲岛珊瑚礁各向岸发育程度不同,且分布不均匀,涠洲岛沿岸沙坝、潟湖平原沉积的下伏地层为火山堆积物,主要岩石为凝灰质砂岩和玄武岩。以近岸部分的北面苏牛角坑珊瑚礁剖面图和东面横岭珊瑚礁地貌发育剖面图为例,两者反映了不同的潟湖堆积平原、沙堤、火山碎屑台地的空间分布格局。



(a) The characteristics of the emerged beach rocks on Gongshanbei Coast; (b) The continuous and extensive landscape exposed on Hengling Coast; (c) The characteristics of the exposed beach rocks (excavated artificially) on Hengling Coast; (d) The coral debris reef exposed due to the erosion, retreat, and collapse of the Zhuzheliao Coast exhibits horizontal bedding and washed cross-bedding structural characteristics.

图 2 涠洲岛海滩岩出露的 4 类典型海滩岩地貌

Fig. 2 4 types of typical bench rock landforms exposed in beach rock of Weizhou Island

涠洲岛北面苏牛角坑全新世珊瑚礁地貌作为发育时间最早的珊瑚礁地貌,以玄武岩为基底,沿着东北方向( $39^\circ$ )由岸向海的空间分布依次是火山碎屑岩台地、潟湖平原、老沙堤、中沙堤、新沙堤、砂质海滩(图 3)。苏牛角坑的潟湖平原分布空间狭窄,面积小,地形平坦,平面形态呈不规则的指状,靠岸一侧与火山碎屑岩台地的残破积红土陡坎相接,靠海一侧与沙堤相连,是由前期与海相通的半封闭潟湖或潮汐通道演变而成。沙堤呈条带状分布且规模小,按照沙堤

的形成年代、形态结构和空间分布等特征,可将沙堤分为老沙堤、中沙堤和新沙堤 3 种;苏牛角坑的老沙堤形成年代较老,长为 550—1 600 m,宽为 40—400

m,沉积物由中细砂及生物碎屑海滩岩组成,形态呈平缓堤状,平行于海岸线,向陆方向与潟湖平原连接,向海方向与中沙堤连接<sup>[14]</sup>。

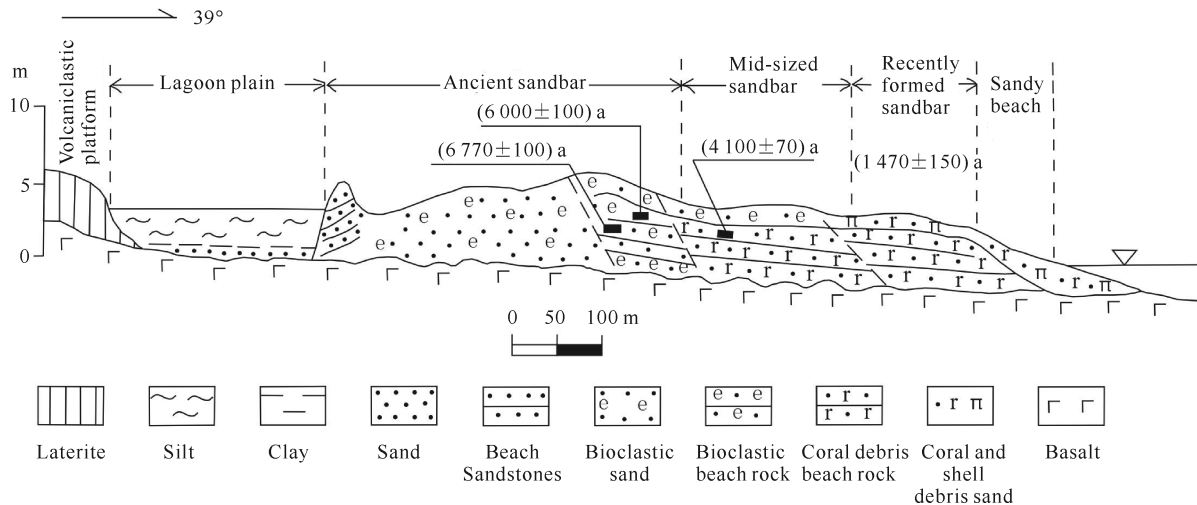


图 3 涠洲岛北面苏牛角坑全新世珊瑚礁地貌发育剖面图<sup>[14]</sup>

Fig. 3 Holocene coral reef landform development profile of Suniujiaokeng in the north of Weizhou Island<sup>[14]</sup>

在苏牛角坑对 4 处海滩岩进行采样,采样方式分别为 1 个钻孔和 3 个不同埋深的挖坑。老沙堤海滩岩中埋深 3.6 m 和 1.5 m 处生物碎屑的实测<sup>14</sup>C 年龄分别为(6 770±110) a B. P. 和(6 000±100) a B. P.,校正年龄分别为(7 307±94) a B. P. 和(7 405±92) a B. P.,表明涠洲岛北面苏牛角坑一带的老沙堤形成于早全新世时期。中沙堤位于老沙堤和新沙堤中间,向陆一侧连接老沙堤,向海一侧与新沙堤相接,中沙堤上有植被覆盖,其沉积物结构为上部是灰白色中细砂,中部是中细粒海滩砂岩,下部是含有不等粒生物碎屑或珊瑚碎屑的海滩岩。由中沙堤海滩岩站位的实测<sup>14</sup>C 年龄可知中沙堤形成于中全新世晚期。苏牛角坑新沙堤的实测<sup>14</sup>C 年龄为 1 470 a B. P.,校正后为 1 520 a B. P.,形成于晚全新世时期。如图 3 所示,3 个年代的沙堤界限并不明显,沙堤之间的接触面均倾斜,新沙堤的外缘紧连沙滩,以条带状的形态平行海岸。

涠洲岛横岭晚全新世珊瑚礁地貌作为发育较晚、尚未完全成型的珊瑚礁地貌,以玄武岩为基底,上层沿着正东方向(90°)由岸向海的组成部分依次是火山碎屑岩台地、潟湖平原、新沙堤、现代岩滩(图 4)。潟湖堆积平原呈长条状分布,近陆一侧与火山碎屑岩台地的残破积红土陡坎相接,近海一侧与新沙堤相连。横岭沙堤近陆一侧的坡度较为平缓,近海一侧却有部分岸段因海浪冲蚀而呈陡坎状,树根裸露和倒塌现象

明显。横岭新沙堤由中细砂和海滩岩构成,两者均含有珊瑚碎屑和贝壳碎屑。新沙堤<sup>14</sup>C 年龄的校正值为 1 993—1 007 a B. P.,说明该处珊瑚礁发育于晚全新世时期。

## 2.4 珊瑚礁发育演化过程

根据 22 个样品校正后的<sup>14</sup>C 年龄,以及各珊瑚礁剖面结构,推演出涠洲岛各个区域在全全新世几个时期的变化过程,最终推演出涠洲岛自第四纪湖光岩组火山岩喷发初形成以来的发育演变过程(图 5)。涠洲岛珊瑚礁的发育阶段演化过程主要分为 4 个阶段:早全新世时期、中全新世早期、中全新世晚期和晚全新世时期。

### 2.4.1 早全新世时期

涠洲岛成型后,在全全新世开始的早期(12 000—8 000 a B. P.),整个涠洲岛处于风化剥蚀阶段,涠洲岛的火山原始地形被破坏,逐步演化成了火山碎屑岩台地,其地表则出现了火山风化红土层。这些风化后的火山碎屑岩台地,是全涠洲岛珊瑚礁发育的地质基础。

### 2.4.2 中全新世早期

8 000 a B. P. 以来,全球气候转暖,被称为全新世大暖期。该时期海面迅速上升,北面海湾一带发生普遍性的大规模海侵,环涠洲岛一带的气候和水温均适合珊瑚附着、生长和发育,并且有火山碎屑岩作为珊瑚附着的基质,珊瑚开始在岩礁上迅速地生长和发

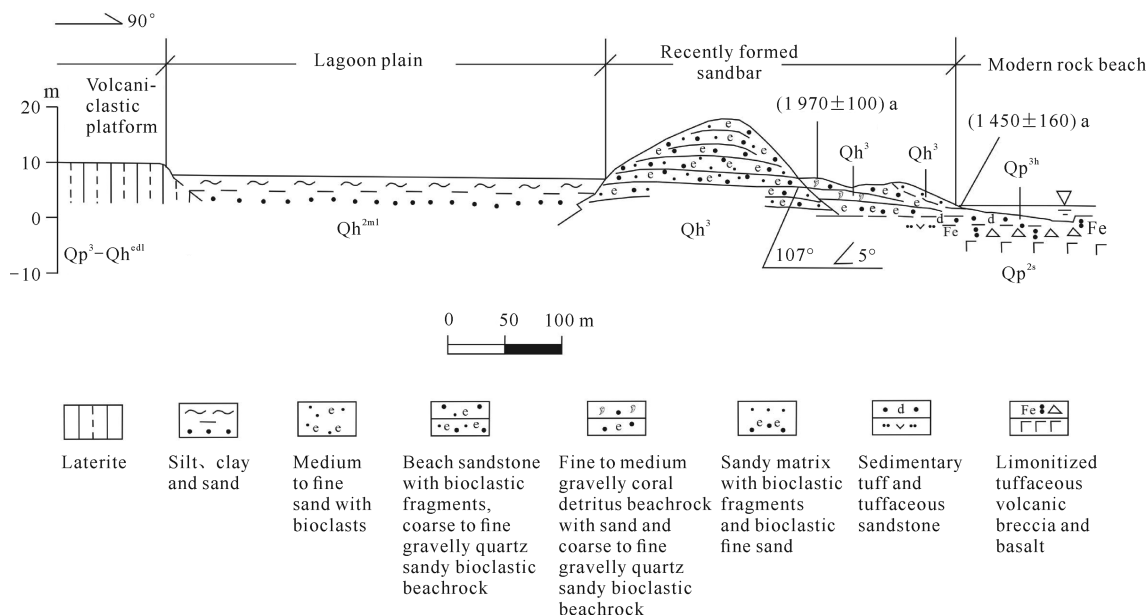
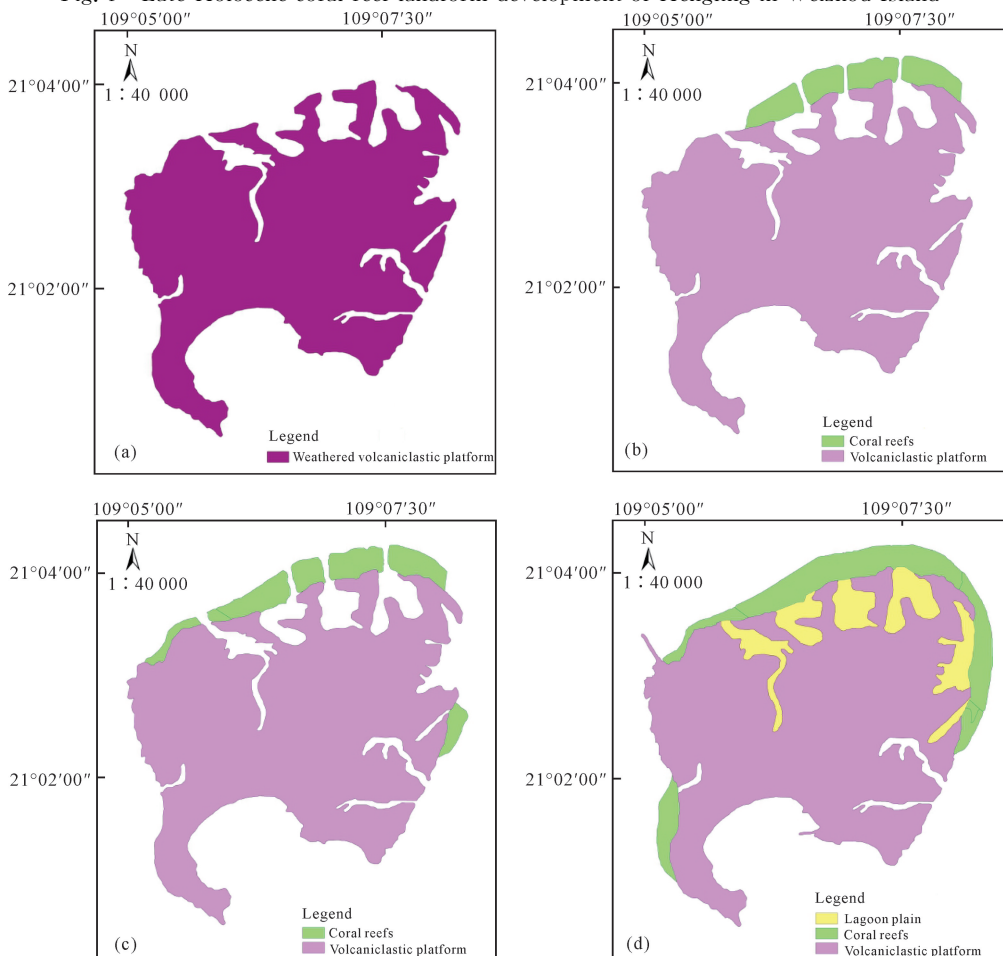


图 4 涠洲岛横岭晚全新世珊瑚礁地貌发育剖面图<sup>[8]</sup>

Fig. 4 Late Holocene coral reef landform development of Hengling in Weizhou Island<sup>[8]</sup>



(a)The Early Holocene period (12 000—8 000 a B. P. );(b)The early Middle Holocene period (8 000—4 000 a B. P. ); (c)The late period of Middle Holocene (4 000—2 000 a B. P. );(d)The late Holocene (2 000—900 a B. P. ). Drawing based on the standard map “GUI S (2022) 51”.

图 5 涠洲岛全新世珊瑚礁演变过程

Fig. 5 Evolution process of Holocene coral reefs in Weizhou Island



育。此时,海水进入涠洲岛的北面和东面,浸没该区域的低洼地,最终形成当时的潟湖。全新世珊瑚礁的发育过程整体上可以划分为垂直发育阶段和侧向加积阶段,涠洲岛珊瑚礁在 8 000—6 000 a B. P. 垂直发育较为活跃<sup>[36]</sup>。

中全新世的气候温暖,温度适宜。从中全新世开始,至中全新世早期(8 000—4 000 a B. P.),海平面上升速度减缓,海况逐步稳定,此时造礁珊瑚和其他造礁生物在适宜环境下附着于涠洲岛的北面苏牛角坑—北港—后背塘沿岸,发育形成珊瑚礁及沙坝—潟湖沉积体雏形。在 22 个涠洲岛岸礁样品的<sup>14</sup>C 测年数据中,该区域有 5 个样品的<sup>14</sup>C 年龄分布在 7 500—4 000 a B. P. 期间,占 22.7%。Montaggianni<sup>[37]</sup>对于全球范围内的珊瑚礁起始发育时间的调查结果显示,珊瑚礁的起始发育时间均在全新世时期,即 8 300—7 000 a B. P.。覃业曼等<sup>[38]</sup>搜集了基于 57 个钻孔共 54 个珊瑚礁的全新世发育数据,其中 65%左右的珊瑚礁起始发育时间在 9 000—7 000 a B. P.。由此可以推测涠洲岛珊瑚礁初始发育时间为中全新世早期,从涠洲岛北岸开始发育。

#### 2.4.3 中全新世晚期

中全新世晚期(4 000—2 000 a B. P.),珊瑚等生物碎屑在风浪的作用下,在涠洲岛北面堆积形成同时具有珊瑚生物碎屑海滩岩(岸礁)及松散珊瑚生物碎屑砂砾层的海滩—沙堤;该阶段珊瑚礁发育较好,分布范围扩大,在西北方向、东岸、北岸均有该期岸礁形成,并形成沙坝—潟湖沉积体。在 22 个涠洲岛岸礁样品的<sup>14</sup>C 测年数据中,共有 6 个样品的<sup>14</sup>C 年龄分布在 4 000—2 000 a B. P. 期间,占 27.3%。在中全新世晚期,涠洲岛珊瑚礁的发育情况是从北面开始扩散至岛的西北方向和东岸。

#### 2.4.4 晚全新世时期

晚全新世早期(2 000—900 a B. P.),珊瑚生长进入了新一轮繁殖发育期,分布范围在中全新世晚期的基础上进一步扩大,并在东北面(横岭和公山背一带)、西南(竹蔗寮和滴水村一带)沿岸发育形成珊瑚礁。此期间,在 22 个涠洲岛岸礁样品的<sup>14</sup>C 测年数据中,共有 9 个样品的<sup>14</sup>C 年龄分布在 2 000—900 a B. P. 期间,占 40.9%。这反映晚全新世时期开始发生缓慢海退,海面逐渐稳定在与现今相当的海平面位置,潟湖通道缩小或封闭,形成潟湖平原,随着岸礁发育扩展,沙坝随之扩大,沙坝与陆域火山碎屑台地岬角连接,珊瑚礁逐渐发育成熟形成现代珊瑚礁形态。

### 3 讨论

在我国南海诸岛、海南岛、雷州半岛、涠洲岛和台湾岛等珊瑚礁分布区中,涠洲岛—雷州半岛南岸—东沙群岛—台湾岛是我国现今珊瑚礁分布的北界<sup>[3,39]</sup>。我国全新世珊瑚礁发育时间见表 3,其中涠洲岛珊瑚礁(苏牛角坑)、海南岛珊瑚礁(西帽岛)<sup>[4]</sup>、海南岛鹿回头珊瑚岸礁<sup>[40]</sup>、雷州半岛徐闻西岸灯楼角<sup>[41]</sup>、雷州半岛灯楼角礁坪<sup>[42]</sup>、台湾珊瑚岸礁<sup>[43]</sup>、台湾南部恒春半岛珊瑚岸礁<sup>[44]</sup>、南海西沙珊瑚礁(金银岛)<sup>[45]</sup>和南海诸岛珊瑚礁(永暑礁 1 井和美济岛南科 1 井)<sup>[46,47]</sup>的发育起始时间均属于中全新世时期。6 700—7 200 cal. a B. P. 是整个全新世时期的最高海平面时期<sup>[36,48,49]</sup>,其中 7 000 a B. P. 是中国全新世大暖期中的最暖期之一<sup>[50]</sup>,在这期间基本形成了现代珊瑚礁的地貌格局,温暖的气候有助于珊瑚礁的发育<sup>[51,52]</sup>。同时,稳定的海平面、海水温度和盐度等环境也非常适合造礁珊瑚的生长,适宜珊瑚礁生长发育<sup>[42]</sup>,因此这些珊瑚礁的起始发育时间表现出一致性。

表 3 我国全新世珊瑚礁发育期年代分期比较

Table 3 Comparison of the chronological stages of Holocene coral reef development in China

珊瑚礁所在区域 Location of coral reefs	岸礁发育期 Bank reef development stage	年龄/ 距今计年 Age/a B. P.	高程/m Elevation/m	代表地 Representative place
Coral reefs of Weizhou island in Beibu Gulf (this study)	The early Middle Holocene period	7 500—4 000	1.5—5.5	Suniujaokeng
	The late period of Middle Holocene	4 000—2 000	0.2—5.0	Xijiao, Xianlulan
	The late Holocene	2 000—900	0.3—4.7	Hengling, Zhuzheliao, Gongshanbei, Dishuicun
Coral reefs of Hainan island <sup>[4]</sup>	Ximao Period	8 500—8 200	0.0—0.8	Ximao Island

续表

Continued table

珊瑚礁所在区域 Location of coral reefs	岸礁发育期 Bank reef development stage	年龄/ 距今计年 Age/a B. P.	高程/m Elevation/m	代表地 Representative place
Coral Reef in Luhuitou Peninsula, Hainan Island <sup>[40]</sup>	Luhuitou Period	6 300—4 800	0.0—2.5	Luhuitou Peninsula
	Yezhuang Period	4 400—4 000	1.0—2.0	Luhuitou Peninsula
	Dongmao Period	3 800—3 600	2.0—4.0	Dongmao Island
	The stage 1 of blooming Development	7 300—6 000		Luhuitou Peninsula
	The stage 2 of stagnation I	6 000—4 800		Luhuitou Peninsula
	The stage 3 of development	4 800—3 000		Luhuitou Peninsula
	The stage 4 of stagnation II	3 000—1 000		Luhuitou Peninsula
Fringing reef at the west coast of Xuwen, Leizhou Peninsula <sup>[41]</sup>	The stage 5 of evolvement of modern coral reef	Since 1 000		Luhuitou Peninsula
	The early Middle Holocene period	7 120—4 040	0.7	Dengloujiao
Uranium - series age of reef - building corals in Leizhou Peninsula <sup>[42]</sup>	The late Holocene period	4 000—present	0.2	Dengloujiao
	The Middle Holocene period	7 200—5 000	1.6—2.5	Dengloujiao Reef Flat
Fringing reef of Taiwan <sup>[43]</sup>	The late Holocene period	2 500—1 500	1.6—2.5	Dengloujiao Reef Flat
	Kenting Period	8 975—7 530	20—22	Hengchun Peninsula
Fringing reef of Hengchun Peninsula in Southern Taiwan <sup>[44]</sup>	Guoxingpu Period	7 240—5 000	10—20	Northern and Southern coast of Taiwan
	Haikou Period	4 860—2 880	10—15	The south coast of Hengchun Peninsula
	Hualien Period	2 450—840	9.0—19.5	The east coast of Taiwan
Uranium - series age of Xisha Coral Reef in the South China Sea <sup>[45]</sup>	The Middle Holocene period	7 000—6 000	10—20	Hengchun Peninsula
	The late Holocene period	Since 1 300	1.0	Hengchun Peninsula
Coral Reefs of the South China Sea Islands <sup>[46]</sup>	The Middle Holocene period	6 400	1.0	Money Island
	The Middle Holocene period	6 000	1.0	Chenhang Island
	The Middle Holocene period	7 350(in the bottom)	—16.8	Well 1 of Fiery Cross Reef
	The late Holocene period	3 050(in the top)	—3.7	Well 1 of Fiery Cross Reef

在全新世时期的大环境下,珊瑚生长的速率同时受到局部环境的影响。涠洲岛西面大岭一带和南湾一带受到局部海域的温度、水体浑浊度和海流等因素影响,在全新世时期并未形成珊瑚礁。台湾珊瑚礁的分布是由南岸的恒春半岛开始向北岸和东岸扩散<sup>[53]</sup>,其原因为中全新世时期的升温使台湾的珊瑚发生北移<sup>[40]</sup>。而涠洲岛珊瑚礁受海流环境和水质环境的影响更大,因此从北岸向西北沿岸和东岸扩散分布。张婷等<sup>[54]</sup>通过涠洲岛南湾的沉积岩心数据推测,南湾在800—950 A. D. 曾经有珊瑚发育,但是因

其高沉积速率和高浑浊度的特征使珊瑚不能存活,导致南湾没有形成珊瑚礁。局部海水温度异常和水质环境也是影响部分海域不能形成珊瑚礁的原因,全新世时期的厄尔尼诺现象从4 500—4 000 a B. P. 开始发生,并在3 000 a B. P. 前后达到峰值<sup>[55]</sup>,巴拿马海区的珊瑚礁在4 000 a B. P. 前后因受到厄尔尼诺现象影响发育终止。

涠洲岛珊瑚礁的发育年代可分为4个阶段,海南岛鹿回头珊瑚礁的发育年代可分为5个阶段<sup>[39]</sup>,雷州半岛灯角楼岸礁的发育年代可分为2个阶

段<sup>[40,41]</sup>。在全新世高温期,雷州半岛海域珊瑚礁的发育年代可细分为 9 个阶段<sup>[47,56]</sup>,期间有 9 次高频率、大幅度的气候突然变冷事件出现,称为“雷州事件”,推测珊瑚所在海域温度变化导致其生长速率发生变化。7 000 a B. P. 为中全新世的高海平面期,涠洲岛苏牛角坑、台湾南部恒春半岛<sup>[44]</sup>、雷州半岛徐闻西岸灯楼角西岸南段珊瑚礁<sup>[41]</sup>均在这段时间迅速发展。晚全新世时期也有一次高海平面期<sup>[45]</sup>,涠洲岛东面横岭—公山背和西南方向竹蔗寮—滴水村一带处于发育阶段,台湾南部恒春半岛珊瑚礁于末次冰期(1 300 a B. P.)也有部分珊瑚起始发育,因此全新世时期发育的珊瑚礁与现代珊瑚礁呈现连续生长的情况<sup>[44]</sup>。值得关注的是,雷州半岛徐闻西岸灯楼角西岸南段珊瑚礁自 4 000 a B. P. 以来,珊瑚已基本停止向上生长,即不再垂直发育,而是礁缘及礁前向海坡的珊瑚礁以水平扩张的方式,向海方向生长<sup>[41]</sup>,推测涠洲岛珊瑚礁在中全新世时期合适的气候下垂直方向和水平方向均迅速发育,到晚全新世时期则更倾向于水平发育。因此晚全新世时期,涠洲岛现代珊瑚礁的雏形基本形成,大多数发育在全新世时期珊瑚礁的外礁坪或礁前斜坡带<sup>[40]</sup>。

#### 4 结论

涠洲岛全新世珊瑚礁的发育演变过程可以分为 4 个阶段:早全新世时期、中全新世早期、中全新世晚期和晚全新世时期。在早全新世时期,涠洲岛处风化剥蚀阶段,为珊瑚礁发育奠定了地质基础。中全新世早期,涠洲岛的北面沿岸最先开始附着珊瑚,发育形成珊瑚礁及沙坝-潟湖沉积体的雏形;随后,中全新世晚期的珊瑚在涠洲岛西北面、东面和北面沿岸的珊瑚礁相继开始生长发育,并形成沙坝-潟湖沉积体。晚全新世时期,珊瑚生长进入了新一轮繁殖发育期,分布范围在中全新世晚期的基础上进一步扩大,附着于涠洲岛东北面和西南沿岸,涠洲岛珊瑚礁由中全新世时期的向上生长逐步向晚全新世时期的水平扩展转变。涠洲岛珊瑚礁起始发育时间与我国其他全新世珊瑚礁起始发育时间基本一致,但受到涠洲岛局部气候和环境的影响,大岭和南湾一带没有珊瑚礁存在。

#### 参考文献

[1] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(8):1160-1172.  
[2] DARWIN C. The structure and distribution of coral reef

[M]. London:Smith,Elder and Company,1842.  
[3] 余克服. 珊瑚礁科学概论[M]. 北京:科学出版社,2018.  
[4] 赵希涛,张景文,李桂英. 海南岛南岸全新世珊瑚礁的发育[J]. 地质科学,1983,18(2):150-160.  
[5] 宋朝景,赵焕庭,王丽荣. 华南大陆沿岸珊瑚礁的特点与分析[J]. 热带地理,2007,27(4):294-299.  
[6] 姚子恒. 广西北海涠洲岛海岸侵蚀研究[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2014.  
[7] 龙雅婷,余克服,王瑞,等. 涠洲岛珊瑚礁的发育过程及其与气候的对应关系[J]. 海洋地质与第四纪地质,2022,42(1):184-193.  
[8] 黎广钊,梁文,王欣,等. 北部湾广西海陆交错带地貌格局与演变及其驱动机制[M]. 北京:海洋出版社,2017.  
[9] 许建东,于红梅,赵波,等. 广西北海涠洲岛火山最后喷发活动时代[J]. 岩石学报,2020,36(7):2111-2115.  
[10] 佚名. 涠洲岛考察介绍[C]//中国地理学会海洋地理专业委员会中国第四纪科学研究会海岸海洋专业委员会南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室. 南海资源环境与海疆权益学术研讨会、第十五届海峡两岸地貌学研讨会暨中国第四纪研究会海岸海洋专业委员会、中国地理学会海洋地理专业委员会 2014 联合学术年会论文集. [出版地不详:出版者不详],2014:16-23.  
[11] 刘敬合,黎广钊,农华琼. 涠洲岛地貌与第四纪地质特征[J]. 广西科学院学报,1991,7(1):27-36.  
[12] 杨文健,于红梅,赵波,等. 广西涠洲岛晚新生代玄武岩地幔源区及岩浆成因[J]. 岩石学报,2020,36(7):2092-2110.  
[13] 钟红名. 涠洲岛火山岩海岸海蚀危岩形成机理与防治措施[J]. 科技风,2013(5):110-112.  
[14] 亓发庆,黎广钊,孙永福,等. 北部湾涠洲岛地貌的基本特征[J]. 海洋科学进展,2003,21(1):41-50.  
[15] 刘文会,余克服,王瑞,等. 涠洲岛北港海滩岩的铀系年代及其海平面指示意义[J]. 第四纪研究,2020,40(3):764-774.  
[16] 黎广钊,梁文,农华琼,等. 涠洲岛珊瑚礁生态环境条件初步研究[J]. 广西科学,2004,11(4):379-384.  
[17] 李嘉琪,白爱娟,蔡亲波. 西沙群岛和涠洲岛气候变化特征及其与近岸陆地的对比[J]. 热带地理,2018,38(1):72-81.  
[18] 廖秋香,尤明双,刘旭. 涠洲岛近海近 30 年气候变化特征浅析[J]. 气象研究与应用,2012,33(S1):140-141.  
[19] 王国忠,吕炳全,全松青. 现代碳酸盐和陆源碎屑的混合沉积作用:涠洲岛珊瑚岸礁实例[J]. 石油与天然气地质,1987,8(1):15-25,119-120.  
[20] 叶维强,黎广钊,庞衍军,等. 北部湾涠洲岛珊瑚礁海岸及第四纪沉积特征[J]. 海洋科学,1988,12(6):13-17.  
[21] 骆雯雯. 涠洲岛造礁石珊瑚共生体系对异常温度胁迫

- 响应的实验研究[D]. 南宁:广西大学, 2019.
- [22] 梁文, 黎广钊, 范航清, 等. 广西涠洲岛珊瑚礁物种生物多样性研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(4): 412-416, 420.
- [23] 梁文, 黎广钊, 范航清, 等. 广西涠洲岛造礁石珊瑚属组成及其分布特征[J]. 广西科学, 2010, 17(1): 93-96.
- [24] 杨振雄, 张敬怀, 吕向立, 等. 涠洲岛造礁石珊瑚群落变化特征及其环境影响因子[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7168-7179.
- [25] 王文欢. 近30年来北部湾涠洲岛造礁石珊瑚群落演变及影响因素[D]. 南宁:广西大学, 2017.
- [26] 王欣, 黎广钊. 北部湾涠洲岛珊瑚礁的研究现状及展望[J]. 广西科学院学报, 2009, 25(1): 72-75.
- [27] 龙雅婷. 涠洲岛全新世珊瑚礁的发育过程及其作为南海珊瑚避难所的潜力分析[D]. 南宁:广西大学, 2022.
- [28] 蓝高勇, 王华, 应启和, 等.  $^{14}\text{C}$  的前世今生[J]. 中国矿业, 2019, 28(S2): 502-504.
- [29] 张剑, 刁少波, 贺行良, 等. 西沙群岛珊瑚礁测年与解析[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 64-69.
- [30] 刘志杰, 余佳, 孙晓燕, 等. 海洋沉积物 $^{14}\text{C}$ 测年数据整合与校正问题探讨[J]. 第四纪研究, 2016, 36(2): 492-502.
- [31] 丁大林, 徐继尚, 王继龙, 等. 海洋沉积物测年方法综述[J]. 华东地质, 2021, 42(2): 217-228.
- [32] DEWAR G, REIMER P J, SEALY J, et al. Late-Holocene marine radiocarbon reservoir correction ( $\Delta R$ ) for the west coast of South Africa [J]. The Holocene, 2012, 22(12): 1481-1489.
- [33] LIN D C, CHEN M T, YAMAMOTO M, et al. Precisely dated AMS  $^{14}\text{C}$  marine cores reveal the complexity of millennial-scale Asian monsoon variability in the northern South China Sea (MD972146, MD972148) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69: 93-101.
- [34] NAGESWARA RAO K, SAITO Y, NAGAKUMAR K C V, et al. Holocene environmental changes of the Godavari Delta, east coast of India, inferred from sediment core analyses and AMS  $^{14}\text{C}$  dating [J]. Geomorphology, 2012, 175/176: 163-175.
- [35] YU K F, HUA Q, ZHAO J X, et al. Holocene marine  $^{14}\text{C}$  reservoir age variability: Evidence from  $^{230}\text{Th}$ -dated corals in the South China Sea [J]. Paleoceanography, 2010, 25(3): PA3205.
- [36] 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.
- [37] MONTAGGIONI L F. Holocene reef growth history in mid-plate high volcanic islands [C]// International Coral Reef Symposium Executive Committee. Proceeding of the 6th International Coral Reef Symposium. [S. l. : s. n. ], 1988, 3: 455-460.
- [38] 覃业曼, 余克服, 王瑞, 等. 西沙群岛琛航岛全新世珊瑚礁的起始发育时间及其海平面指示意义[J]. 热带地理, 2019, 39(3): 319-328.
- [39] 王丽荣, 赵焕庭. 珊瑚礁生态的一般特点[J]. 生态学杂志, 2001, 20(6): 41-45.
- [40] 黄德银, 施祺, 张叶春, 等. 海南岛鹿回头造礁珊瑚的 $^{14}\text{C}$ 年代及珊瑚礁的发育演化[J]. 海洋通报, 2004, 23(6): 31-37.
- [41] 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景, 等. 雷州半岛灯楼角珊瑚岸礁的特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 35-40.
- [42] 赵建新, 余克服. 南海雷州半岛造礁珊瑚的质谱铀系年代及全新世高海面[J]. 科学通报, 2001, 46(20): 1734-1738.
- [43] 黄镇国, 张伟强, 江璐明. 全新世中国热带北界变迁的探讨[J]. 第四纪研究, 2002, 22(4): 359-364.
- [44] 王鑫. 台湾恒春半岛的隆起珊瑚礁台地[J]. 第四纪研究, 1997, 17(4): 327-332.
- [45] 夏明, 张承蕙, 周秀云. 南海珊瑚礁铀系年龄及其地质意义[J]. 地质科学, 1985, 20(1): 12-20.
- [46] 赵焕庭, 宋朝景, 孙宗勋, 等. 南海诸岛全新世珊瑚礁演化的特征[J]. 第四纪研究, 1997, 17(4): 301-309.
- [47] 罗云, 黎刚, 徐维海, 等. 南科1井第四系暴露面特征及其与海平面变化的关系[J]. 热带海洋学报, 2022, 41(1): 143-157.
- [48] 余克服, 钟晋梁, 赵建新, 等. 雷州半岛珊瑚礁生物地貌带与全新世多期相对高海面[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 27-33.
- [49] 许国强, 梁定勇, 贾丽云, 等. 琼州海峡西口早-中全新世海滩岩的岩石学特征及古海面重建意义[J]. 地质学报, 2023, 97(7): 2386-2398.
- [50] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. 中国科学(B辑 化学 生命科学 地球科学), 1992(12): 1300-1308.
- [51] CLARK T R, CHEN X F, LEONARD N D, et al. Episodic coral growth in China's subtropical coral communities linked to broad-scale climatic change [J]. Geology, 2019, 47(1): 79-82.
- [52] 赵希涛. 海南岛鹿回头珊瑚礁的形成年代及其对海岸线变迁的反映[J]. 科学通报, 1979, 24(21): 995-998.
- [53] 黄镇国, 张伟强. 中国热带珊瑚礁的第四纪气候记录[J]. 热带地理, 2008, 28(1): 11-15.
- [54] 张婷, 胡敏航, 张文静, 等. 涠洲岛珊瑚礁近千年的发育过程及其对气候变化的响应[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(4): 70-79.
- [55] TOTH L T, ARONSON R B, VOLLMER S V, et al.

ENSO drove 2500-year collapse of Eastern Pacific coral reefs [J]. *Science*, 2012, 337(6090): 81-84.

[56] 余克服, 陈特固, 钟晋梁, 等. 雷州半岛全新世高温期珊

瑚生长所揭示的环境突变事件[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2002, 32(2): 149-156, 177.

## Formation and Evolution of Coral Reefs in Weizhou Island during Holocene

LUO Wenwen<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>1,2\*\*</sup>, LI Guangzhao<sup>1,2</sup>, LIU Tao<sup>3</sup>, LIANG Wen<sup>1,2</sup>, LAN Junnan<sup>1</sup>, LIN Mingqing<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Academy of Marine Sciences (Guangxi Mangrove Research Center), Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536000, China; 2. Observation and Research Station of Coastal Wetland Ecosystem in Beibu Gulf, Ministry of Natural Resources, Beihai, Guangxi, 536015, China; 3. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf (Ministry of Education), Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China)

**Abstract:** Weizhou Island is the largest Quaternary volcanic island in China. It is located in the northern boundary of coral reef distribution in the South China Sea and is one of the important coral reef distribution areas in China. In this study, biological samples such as coral debris deposited in beach rocks of coral reef areas in the Weizhou Island were collected, and the aragonite parts of primary corals without diagenesis were selected. After radiocarbon isotope (<sup>14</sup>C) dating and correction of the marine reservoir effect, the chronological framework of Holocene coral reef development in the Weizhou Island was established. The results show that the initial development time of coral reefs in the Weizhou Island is basically the same as that of other Holocene coral reefs in China, which belongs to the Holocene warm period. The development and evolution of the Holocene coral reef in the Weizhou Island can be categorized into four distinct stages: during the early Holocene (12 000—8 000 a. B. P.), the volcanic clastic platform was formed throughout the island, which created an attachment matrix for coral attachment and growth. In the early Middle Holocene (8 000—4 000 a. B. P.), the prototype of coral shore reefs and sandbar lagoon deposits along the northern coast of the Weizhou Island was first formed. In the late Middle Holocene (4 000—2 000 a. B. P.), bar-lagoon deposits were formed along the east and northwest coasts of the Weizhou Island. During the late Holocene (2 000—900 a. B. P.), coral reefs began to develop widely from the east to the northeast and southwest of the Weizhou Island. It can be inferred that the coral reefs of the Weizhou Island were formed in the early Holocene period, and began to develop from the north shore of the island, then to the east, northeast and southwest of the island, and eventually evolved into the distribution pattern of modern coral reefs in the Weizhou Island.

**Key words:** Weizhou Island; Holocene; coral reef; <sup>14</sup>C; formation and evolution