

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.06.014

# 海南岛西南海域晚第四纪古水深反演

陈泓君<sup>1,2</sup>, 黄文凯<sup>1,2</sup>, 邱燕<sup>1,2</sup>

(1. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510760; 2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075)

**摘要:**晚第四纪以来, 因古气候和海平面发生多次变化, 南海西北部经历了海岸线变迁和海陆演变多个过程。利用钻孔测年和高分辨率单道地震资料开展对比、划分了7个主要地震反射界面并确定其时代。同时基于现今水深数据, 依据全球海平面变化曲线和地层厚度, 对海南岛西南海域晚第四纪(100.1~40.7 kaBP)以来的古水深和海岸线进行反演。反演结果表明, 100.1 kaBP时, 海南岛西部、西北和南部局部地区海岸线向海方向移动, 陆域面积略微增加, 海域陆架较窄, 最大水深超过550 m, 海底地形以陆坡深水区为主。78.1 kaBP时, 海南岛西部海岸线发生较大规模迁移, 陆域面积增加, 陆架变宽, 海底地形平缓。大部分区域水深均小于200 m。49.9~40.7 kaBP, 海南岛西部陆域面积进一步扩大, 海底地形平坦, 水深变浅, 地形以陆架区浅水区为主。研究表明, 100.1~40.7 kaBP以来研究区的水深变浅, 地形变为平缓, 海岸线向海迁移, 区域古气候、海平面变化以及物源供应对塑造海底地形地貌具有重要的作用。

**关键词:**古水深; 反演; 海平面变化; 晚第四纪; 海南岛

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)06-0128-12

近年来, 全球温室效应加剧, 气温上升, 导致冰川融化及海洋上层水体受热膨胀, 海平面在不同地区有不同程度的上升。海平面上升将带来低地、城镇淹没、海岸侵蚀加剧、洪水泛滥等一系列问题。因此, 开展海平面变化研究, 尤其是晚第四纪以来海平面的变化和古海岸线的变迁具有重要的现实意义。第四纪最重要的环境特点之一是气温频繁大幅度的变化, 以及气候变化导致的全球海平面的变化, 陆架海侵海退及海岸位置在平面上往返迁移<sup>[1-4]</sup>。南海北部陆架古岸线以及陆架沙脊、陆架深切河谷、河谷充填沉积、冰后期海进型和海退型沙坝等都是海平面升降的响应结果<sup>[5,6]</sup>。

第四纪尤其是晚更新世以来南海北部陆架发生多次海侵海退事件, 在末次冰盛期, 南海北部部分区域位于海平面之上<sup>[7-9]</sup>, 遭受剥蚀或接受陆相沉积形成了许多埋藏古河道、水下三角洲、海底沙丘等地形地貌。在海底地貌上遗留了-210、-155、-130、-50和-20 m等多级阶地和古海岸线遗迹<sup>[9-14]</sup>。南海北部晚第四纪15.6 ka时期海平面相对现代海平面下降146 m, 当时的古海岸线位于距今海岸线约170 km处<sup>[15]</sup>。在冰后期的海平面回升过程中,

海平面出现过多次停滞阶段<sup>[11]</sup>, 塑造了相应的特征地貌和沉积物, 主要是海底阶地、陡坎、古岸线等地貌和古海滩沉积<sup>[16]</sup>, 直到6 ka海平面稳定, 形成现代海岸线格局<sup>[4,8,10,14,17-23]</sup>。

第四纪期间, 随着海平面变化, 古海岸线在南海北部陆架区不断来回迁移, 形成海侵型和海退型海岸。海侵型海岸往往容易被剥蚀, 保留下来的主要是海退型海岸, 因此从钻孔或者海底地形地貌能够识别出来的古海岸极其有限<sup>[15]</sup>。前人通过海底地形地貌、钻孔岩性特征、古生物标志以及地震地层来判别古海岸线具有一定的局限性, 只能判断某一特定时期局部地区的古海岸线位置, 无法开展大面积、区域性的海平面变化研究。采用数字高程模型, 综合钻孔以及地震资料, 可开展大范围区域性的古水深变化及古海岸线变迁研究<sup>[8]</sup>。本文利用研究区获得的高分辨率单道地震剖面, 结合钻孔测年, 采用数字高程模型, 反演海南岛西南海域晚更新世末次冰期古水深及海岸线, 并与现今水深进行对比, 进一步揭示并了解晚第四纪以来研究区沉积格局演化规律。本文研究成果对于海南岛近岸环境保护及防灾减灾具有重要的科学意义。

## 1 区域地质背景

研究区位于南海西北部北部湾东侧, 海南岛西南海域陆架区。水深范围0~200 m, 地形平缓, 水

**基金项目:** 中国地质调查局项目(1212010611302, GZH201500207)

**作者简介:** 陈泓君(1973—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋区域地质调查与研究, E-mail: 243494863@qq.com

**收稿日期:** 2017-08-29; **改回日期:** 2017-11-03. 蔡秋蓉编辑

深等值线在海南岛西部为 SN 向,向东北部逐渐转为 NE 向。北部湾是我国南海西北部一个半封闭海湾。北部湾为西、北、东三面环陆的天然半封闭型浅水海湾,面积接近 13 万  $\text{km}^2$ ,海岸线总长约 2 200 km,是南海最大的海湾。它东临我国的雷州半岛和海南岛,北临我国广西壮族自治区,西临越南,南与南海相通(图 1)。

研究区构造上位于莺歌海盆地东南部。莺歌海盆地位于印支地块与欧亚地块的拼接带上,它的构造演化主要受到北西走向的红河断裂带控制。莺歌海盆地的基底组成比较复杂,发育古生代及其以前的印支地块型基底和华南地块型基底,还有中生代火山-侵入杂岩型基底。莺歌海盆地始新世最大沉降中心位于盆地西北,走向 NW。38~21 Ma 期间沉降中心为 NNW—近 SN 向,新的沉降中心在老沉降中心的南东侧生成,成右阶雁列式,21 Ma 之后沉降中心又转为 NW 向<sup>[24]</sup>。

莺歌海盆地自裂陷期以来强烈沉降,尤其是 10 Ma 以来快速沉降和快速充填,导致盆地内堆积了巨厚的沉积物<sup>[25]</sup>。莺歌海盆地具有巨厚的新近系和第四系沉积盖层(盆地中心最大沉积厚度超过 14 km)<sup>[26]</sup>、快速的沉降沉积活动(沉降速率为 0.1~0.5 mm/a,沉积速率为 0.4~1.4 mm/a)和异常高温高压(盆地内平均地温梯度 4.25  $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,压力

梯度高达 18~22 kPa/m)等地质现象,被认为是世界上独特的沉积盆地<sup>[27]</sup>。

钻探资料表明,莺歌海—琼东南盆地崖 13-1-1 井、乐东 30-1-1 井第四系有一千多米厚,莺歌海盆地第四系乐东组最厚达二千余米<sup>[28]</sup>。该区第四纪沉积速率高达 1 m/ka。巨厚的第四系分布在强烈沉降区,由构造抬升区迅速的剥蚀作用提供物源。南海北部几个盆地惟独莺—琼盆地第四纪及新近纪沉积巨厚,应与海南岛的急剧抬升及邻域江河大量输入的陆源物质有关<sup>[28,29]</sup>。海南岛西南部为高山区,因此琼东南盆地西部及莺歌海盆地东南部粗碎屑较多,这些地区也是现代海底的砂质沉积区<sup>[29]</sup>。

## 2 材料与方法

2006—2011 年,广州海洋地质调查局开展了“1:100 万海南岛幅海洋区域地质调查”项目,由“奋斗五号”船在研究区开展了约 3 100 km 的单道地震测线调查和浅地层钻探工作。

研究区单道地震数据采集采用拖曳等时激发模式。数字单道记录系统为 Exsea Delph Seismic, EPC-1086 记录仪, SureShot 气枪控制器。激发采用 G. I. 枪震源,工作压力 2 000 psi,容量 210  $\text{in}^3$ ,

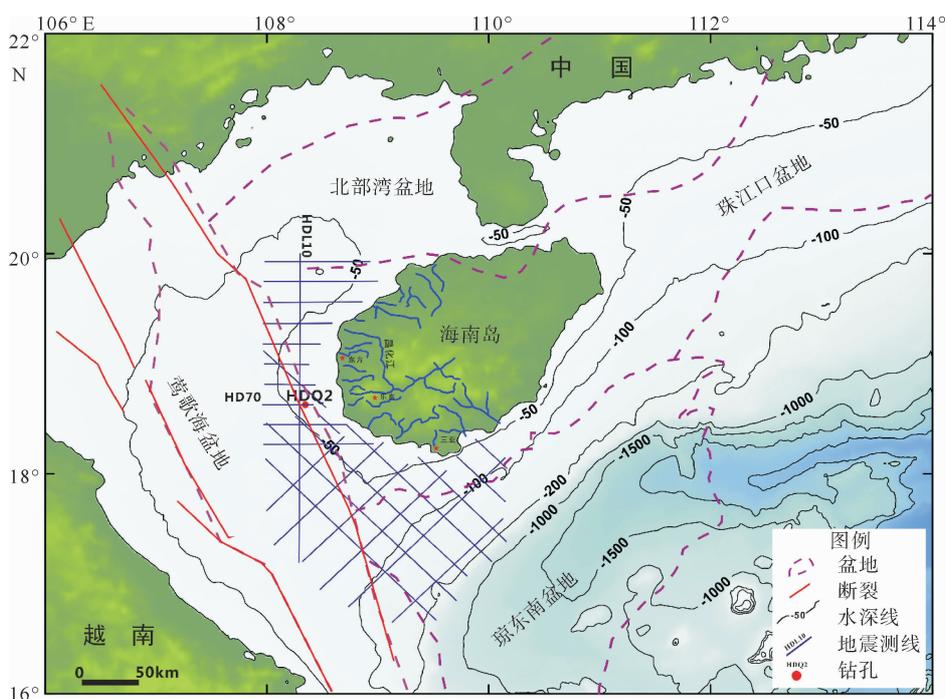


图 1 研究区水深、单道地震测线及钻孔位置

Fig. 1 Location of the seismic profiles, drilling core and bathymetric map in the study area

沉放深度 2.5~3 m, 激发间隔为 6~7 s, 记录长度为 1 500~2 000 ms。所有的地震资料均开展了多次波压制, 涌浪静校正, 气泡效应、随机噪声等处理。

HDQ2 钻孔站位水深 44 m, 总进尺 88.3 m, 取心长度 65.67 m, 取心率 74.37%, 钻探设备为 HGD-300 型海洋钻机。海上钻孔每回次进尺 < 3 m, 取样后用塑料管密封保存, 在管上标注管号、进尺、回次、日期及顶底等并低温保存。

钻孔样品分别进行了光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)和 AMS-<sup>14</sup>C(Accelerator Mass Spectrometry, AMS)测年分析。光释光测年由青岛海洋地质研究所实验测试中心进行, 测试采用石英颗粒的单片再生法进行年代测定, 仪器为 Daybreak 2200 释光测年系统。首先在实验暗室中提纯碎屑颗粒石英进行制片, 然后用单片再生剂量法测量样品的等效剂量, 最后根据样品所在地的年剂量计算出光释光年龄。等效剂量测量在热释光/光释光测量仪(RisΦ-TL/OSL-15)上进行, 附带放射性 β 源为 90Sr/90Y<sup>[30]</sup>。

AMS-<sup>14</sup>C 测试挑选完整的有孔虫或贝壳样品, 贝壳样品送往美国 Beta 实验室进行测年, 其余样品前处理与石墨靶制备由中国科学院广州地球化学研究所制样实验室进行。制成的石墨靶样品送北京大学核物理与核技术国家重点实验室加速器质谱中心的美国 NEC<sup>14</sup>C 专用加速器质谱仪进行<sup>14</sup>C 年代测定, 并利用 CALIB 7.1 程序对<sup>14</sup>C 年龄数据进行了校正。

研究区水深数据来自美国国家海洋和大气管理局公开的地形资料, 分辨率为 1', 首先根据需要将数据定制好并下载, 下载的栅格文件为 ASCII 光栅格式, 通过处理将其转化为 surfer 的网格文件, 用于古海岸线重建的计算<sup>[8]</sup>。

## 3 结果

### 3.1 主要地震反射界面

根据地震反射特征, 研究区由上至下共识别出 R1—R7 共 7 个主要地震反射界面(图 2, 图 3), 可在全区连续追踪, 各界面主要特征如下:

R1 界面: 该反射界面位于研究区海平面下约 60~130 ms 处, 由东向西, 由北向南呈缓慢倾斜, 埋藏深度逐渐加大。该界面东西方向上一般比较平整, 部分区段出现起伏、凹凸不平。南北方向上, 北部较为起伏, 往南相对平整, 局部有起伏。该界面为

高频、中振幅、高连续, 存在明显的下切谷现象, 总体上近岸地区振幅较弱、连续性变差, 该界面对下伏地层削截作用明显。

R2 界面: 该反射界面位于研究区海平面下约 70~200 ms 处, 由东向西, 由北向南呈缓慢倾斜, 埋藏深度逐渐加大。该界面东西方向上一般比较平整, 部分区段略有起伏。南北方向上, 北部靠近海南岛位置发生尖灭, 往南相对平整, 局部有起伏。该界面为高频、强振幅、高连续, 有下切谷现象。

R3 界面: 该反射界面位于研究区海平面下约 80~230 ms 处, 由东向西, 由北向南呈缓慢倾斜, 埋藏深度逐渐加大。该界面东西方向上略为平整, 部分区段有起伏。南北方向上, 北部靠近海南岛附近界面起伏较大, 往南相对平整, 局部有起伏。该界面为中高频、强振幅、中连续, 可追踪对比。

R4 界面: 该反射界面位于研究区海平面下约 90~300 ms 处, 由东向西呈缓慢倾斜, 埋藏深度逐渐加大。该界面东西方向上一般比较平整, 部分区段略有起伏。南北方向上, 该界面起伏较大, 北部靠近海南岛附近发生尖灭, 往南缓慢下倾, 在南部受浅层气和局部构造影响, 界面发生波状起伏。该界面为中—低频、中—弱振幅、中连续, 部分区段可出现强振幅, 连续性良好, 可追踪对比。

R5 界面: 该反射界面位于研究区海平面下约 150~400 ms 处, 该界面东西方向上比较平整。由东向西呈缓慢倾斜, 埋藏深度逐渐加大。该界面南北方向上起伏较大, 北部靠近海南岛附近局部受侵蚀而下凹, 往南下倾, 在南部受浅层气和局部构造影响, 界面发生波状起伏。该界面为中—低频、中—弱振幅, 中—低连续, 部分区段为弱振幅、连续性良好, 较易追踪对比。

R6 界面: 该反射界面位于研究区海平面下约 200~450 ms 处, 该界面东西方向上比较平整。由东向西倾斜, 埋藏深度逐渐加大, 在东部靠近海南岛侧钻孔处发生尖灭。该界面南北方向上起伏较大, 北部靠近海南岛附近局部受侵蚀缺失, 往南下倾, 在南部受浅层气和局部构造影响, 界面发生波状起伏。该界面为低频、中—弱振幅、低连续, 部分区段为中振幅、连续性较好, 可追踪对比。

R7 界面: 该反射界面位于研究区海平面下约 200~500 ms 处, 该界面东西方向上比较平整。由东向西倾斜, 埋藏深度加大。该界面南北方向上起伏较大, 北部靠近海南岛附近局部受侵蚀发生剧烈下凹, 往南下倾, 在南部受浅层气和局部构造影响, 界面发生波状起伏。该界面为低频、中弱振幅、低连

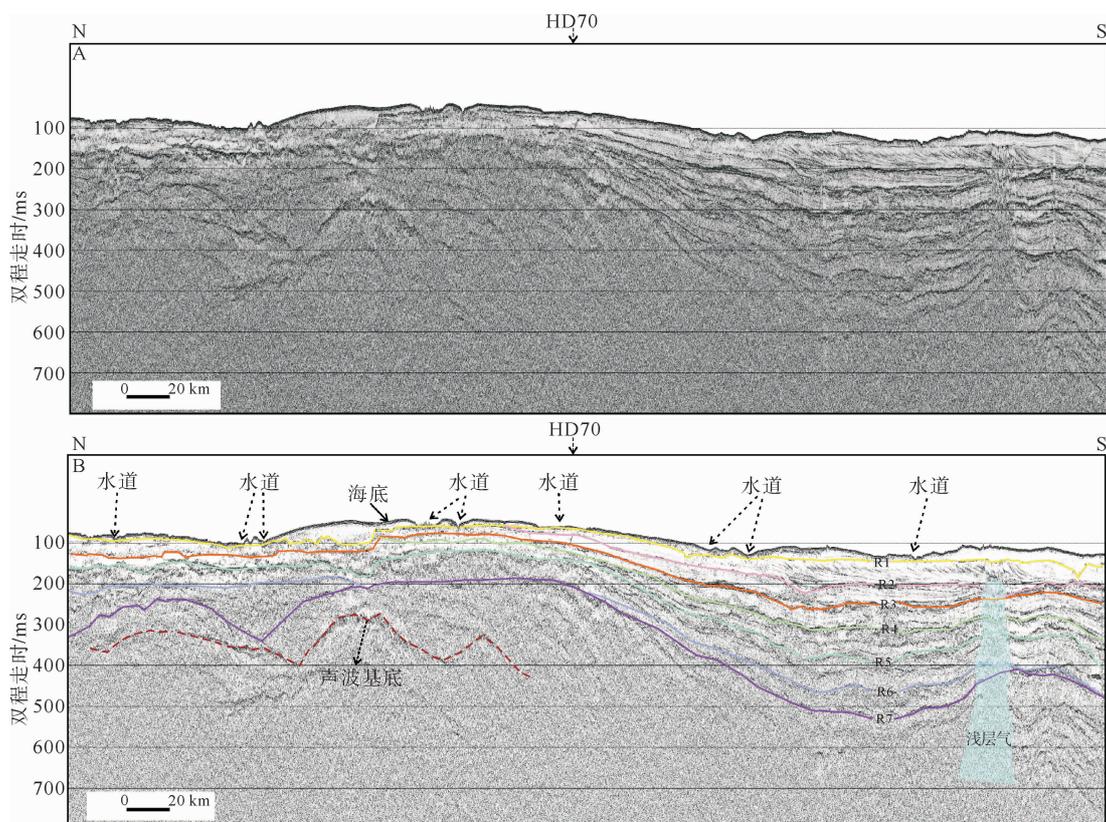


图 2 单道地震测线 HDL10(A)及解释剖面(B)(测线位置见图 1)

Fig. 2 Single channel seismic profile HDL10 (A) and the interpretation profile (B)(for location see Fig. 1)

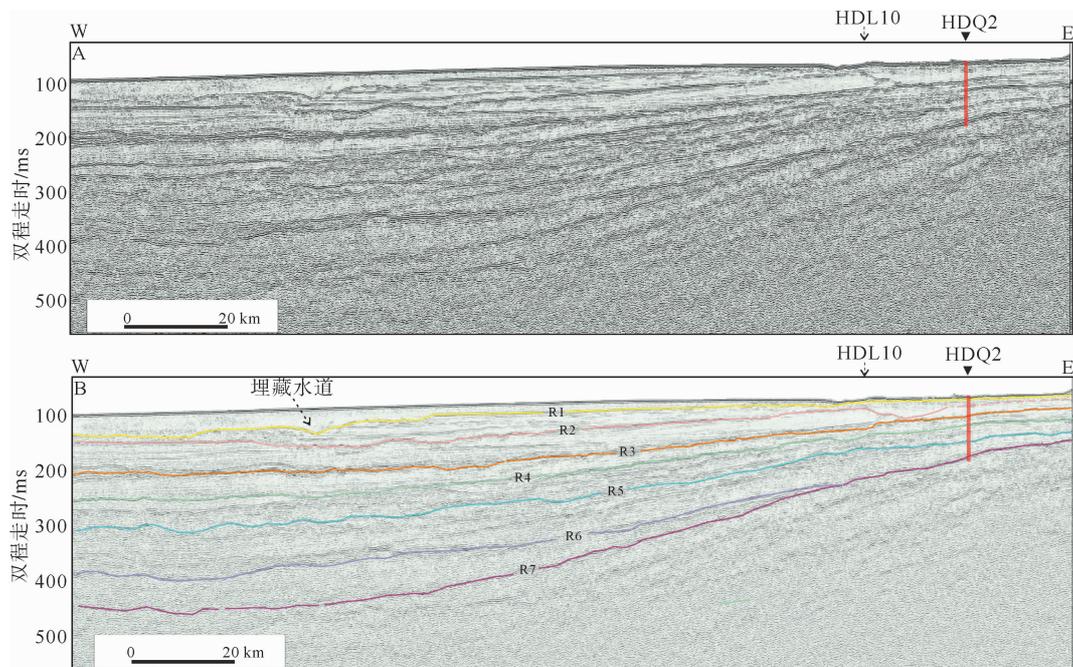


图 3 单道地震测线 HD70(A)及解释剖面(B)(测线位置见图 1)

Fig. 3 Single channel seismic profile HD70 (A) and its interpretation (B)(for location see Fig. 1)

续、局部可出现强振幅异常段,可追踪对比。

### 3.2 钻孔岩性特征与地震反射界面对比

根据钻孔岩心沉积物特征,钻孔岩性总体上以粉砂为主,其中0~16、28~49、78~80 m层段岩性变化较大。0~6 m岩性为粉砂和砂质粉砂互层;7~16 m主要以砂质粉砂为主;28~49 m岩性变化复杂,以砂质泥、砂质粉砂、粉砂、砾质泥互层,局部夹有粉砂质砂、砾质砂和含砾泥;78~80 m岩性为粉砂质砂、砂质泥、含砾泥质砂和粉砂互层(图4)。

根据主要地震反射界面的时间,以1600 m/s地层速度计算各界面深度,结果分别为R1:6.4 m、R2:11.2 m、R3:24.8 m、R4:38.4 m、R5:58.4 m、R7:76.0 m(表1)。

表1 地震反射界面时间-深度

Table 1 The time-depth of seismic reflectors

反射界面	双程走时/ms	深度/m
海底	55	0
R1	63	6.4
R2	69	11.2
R3	86	24.8
R4	103	38.4
R5	128	58.4
R7	150	76.0

根据各界面深度计算结果,对比钻孔岩性,除R2界面外,其他界面与钻孔岩性变化对应较好,说明以1600 m/s层速度来进行反演是相对可靠的。如R1界面6.4 m附近,存在明显的岩性差异,界面上下岩性分别为粉砂和砂质粉砂。24 m处为含砾泥质砂夹层,与R3界面位置吻合较好。38 m处岩性变化复杂,粒度相对较粗,为砂质粉砂和砾质泥互层,与R4界面相对应。钻孔58~60 m处有一砾质泥夹层,砾石直径约2 cm,与R5界面位置相对应。76~80 m处为粉砂质砂、砂质泥夹层和含砾泥质砂夹层,与R7界面位置大致吻合。R2界面处岩性变化不大,为粒度较粗的砂质粉砂,该地震反射界面的存在可能是地层内部含水率或者沉积结构等特征不同引起的(图4)。

### 3.3 地震反射界面年代

为确定研究区地层时代属性,对HDQ2孔岩心样品进行了测年。其中,AMS-<sup>14</sup>C测年样品共10个,光释光测年样品共9个,测试结果见表2。

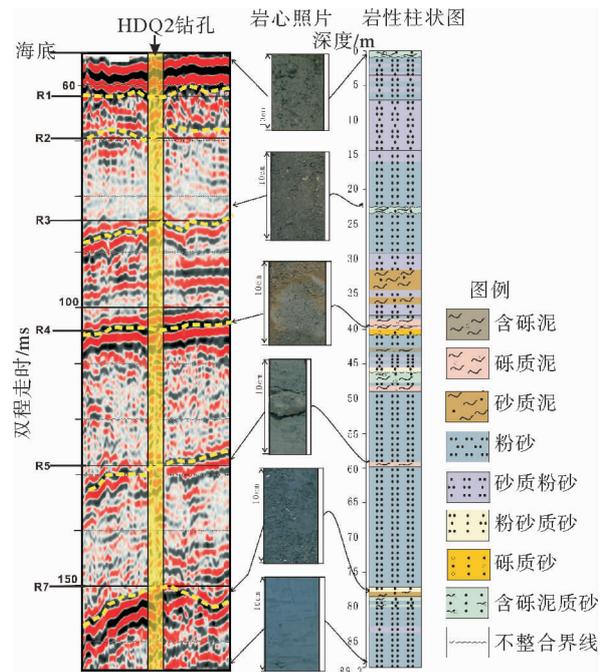


图4 HDQ2 钻孔岩性与地震剖面对比

Fig. 4 Comparison of core HDQ2 and the seismic profile

根据测年结果,将AMS-<sup>14</sup>C年龄>3.5 kaBP的数据剔除。光释光测年结果表明,钻孔78与80 m处年龄发生倒转(表2),可能是钻孔施工过程中上部样品掉下来或者测年样品取样过程中样品曝光引起,亦可能为测试数据误差所致,故将88 m处光释光测年数据剔除。总体而言,钻孔揭露了全新统一上更新统。综合测年结果,拟合出HDQ2孔的时间-深度关系曲线(图5)。尽管研究区存在几个清晰的地震反射界面,代表不同时期的侵蚀面,考虑到该区沉积速率较大,晚第四纪期间构造相对稳定,沉积间断年代差距较小,拟合曲线总体上能够反映研究区地层的时间-深度关系。根据拟合曲线,计算

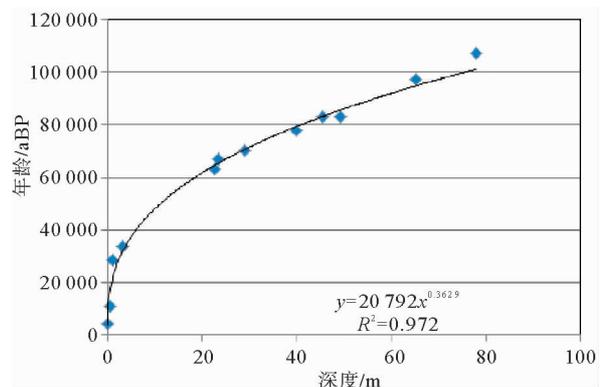


图5 HDQ2 钻孔测年深度-年龄模型

Fig. 5 The age-depth model of Core HDQ2

表 2 HDQ2 钻孔 AMS-<sup>14</sup>C 和光释光测年结果  
Table 2 The AMS-<sup>14</sup>C and OSL age of Core HDQ2

样品编号	深度/m	年代/ka	误差/a	校正年龄/cal. kaBP	标准偏差/a	测年方法
1	0.01	4.300	±30	4.320~4.520		AMS- <sup>14</sup> C
2	0.63	9.740	±38	11.220~11.169		AMS- <sup>14</sup> C
3	1.10	23.734	±85	28.435	±168	AMS- <sup>14</sup> C
4	3.40	28.620	±113	34.014	±185	AMS- <sup>14</sup> C
5	3.60	35.501	±188	40.813	±241	AMS- <sup>14</sup> C
6	7.00	33.405	±166	38.796	±221	AMS- <sup>14</sup> C
7	8.05	35.300	±370	38.620~40.240		AMS- <sup>14</sup> C
8	9.50	25.268	±143	30.421	±209	AMS- <sup>14</sup> C
9	14.25	31.111	±159	36.473	±207	AMS- <sup>14</sup> C
10	19.99	43.180	±920	44.400~48.050		AMS- <sup>14</sup> C
11	22.70	63.000			7	OSL
12	23.40	67.000			7	OSL
13	29.00	70.000			9	OSL
14	39.80	78.000			8	OSL
15	45.6	80.000			8	OSL
16	49.20	83.000			9	OSL
17	65.2	97.000			11	OSL
18	78.0	107.000			11	OSL
19	88.0	67.000			9	OSL

出 R2—R7 各界面的年龄,分别为:R1 界面 40.7 kaBP,R2 界面 49.9 kaBP,R3 界面 66.7 kaBP,R4 界面 78.1 kaBP,R5 界面 90.9 kaBP,R7 界面 100.1 kaBP(表 3)。

表 3 HDQ2 孔地震反射界面深度、年龄、沉积速率和古水深  
Table 3 The age, depth, sediment rate and water depth of seismic reflectors at Core HDQ2

反射界面	深度/mbsb	年代 /kaBP	沉积速率 / (m/ka)	古水深/m
R1	6.4	40.7	0.16	-72
R2	11.2	49.9	0.52	-47
R3	24.8	66.7	0.93	-68
R4	38.4	78.1	1.20	-44
R5	58.4	90.9	1.57	-32
R7	76.0	100.1	1.91	-37

### 3.4 海平面变化曲线

目前南海北部已有的海平面变化曲线主要是反映末次盛冰期以来的海平面变化<sup>[8,10,11,14]</sup>,缺少研究区末次冰期以来的海平面变化曲线。为了能够相

对准确地反演古海岸线变化,本文采用 Waelbroeck 等<sup>[31]</sup>10 万年以来的全球海平面变化曲线来代替南海的相对海平面变化曲线(图 6)。该曲线可以反映出末次冰期以来全球平均的海面下降幅度。各界面发育时期海平面下降幅度为:R1 界面-72 m,R2 界面-47 m,R3 界面-68 m,R4 界面-44 m,R5 界面-32 m,R7 界面-37 m(表 3)。

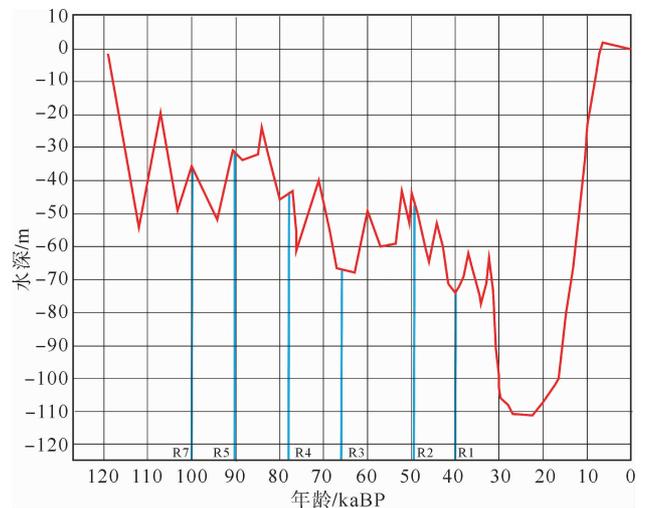


图 6 地震反射界面与海平面变化曲线对应关系(据文献[31]修改)  
Fig. 6 The correlation of seismic reflectors and sea level curves

### 3.5 沉积厚度

海岸线的变化除了受海平面升降影响外,剥蚀和沉积作用也是非常重要的因素。鉴于末次冰期以来南海西北部因出露而遭受剥蚀的厚度难以计算,而且相对于本次研究的分辨率和海平面变化幅度来说,因出露而遭受剥蚀的厚度可不予考虑<sup>[8]</sup>。而对于各地震反射界面所沉积的厚度则可以通过钻孔资料和高分辨率的地震反射剖面计算来获得。

### 3.6 古海岸线反演公式

姚衍桃(2009)等认为古海岸线反演模拟通常需要3类数据:现今的DEM(DEM<sub>0</sub>)、相对海平面变化数据(RSL)、沉积或剥蚀厚度数据(S),点 $r$ 在 $t$ ( $t < 0$ )时刻的高程可以表示为:

$$DEM_t(r) = DEM_0(r) - RSL_t(r) + S_t(r) \quad r \in R$$

其中, $RSL_t(r)$ 为点 $r$ 在 $t$ 时刻相对于现在的海平面高度;

$S_t(r)$ 为点 $r$ 从 $t$ 时刻至现在因遭受剥蚀或沉积而产生的相对厚度变化值(即侵蚀为正,堆积为负),同时考虑到莺歌海盆地构造沉降,以及本文引用的全球海平面变化数据,因此将公式修改为:

$$DEM_t(r) = DEM_0(r) - (S_t(r) + SL_t(r) + H_t(r)), \quad r \in R$$

其中, $SL_t$ 为区域 $R$ 在 $t$ 时刻的海平面升降幅度,低于现今海平面用负值,高于现今海平面用正值表示,可对已知点在该时刻的全球海平面下降曲线进行内插来获得。

$H_t$ 为 $t$ 时刻的沉降深度,研究区的沉降速率取 $425 \text{ m/Ma}^{[32]}$ 。

## 4 结果和讨论

根据以上综合分析和反演公式计算,得出研究区晚第四纪(100.1~40.7 kaBP)以来的古水深演变序列。根据地震界面的解释,分别选取了钻孔的底部(R7)、中部(R4)和上部界面(R2, R1),即研究区在100.1、78.1、49.9和40.7 kaBP时期进行海岸线位置和相应的古水深反演。

100.1 kaBP:当时海平面低于现今海平面约37 m,海南岛西部部分海岸线向海方向移动,其中西北部、西部、南部局部地区海岸线往海方向推移至现今水深40 m处。总体上古水深线围绕着海南岛岸线平行分布。当时陆架非常窄,200 m水深线距离海

岸线最近处仅50多千米,海南岛南部大部分海域为陆坡区。海南岛西部和西北部海域地形平缓,水深小于150 m,而海南岛南部海域地形较陡,水深变化较大,最大水深超过550 m,最深处位于研究区的东南角(图7)。在海南岛西南部,地震剖面揭示R7界面埋深约300~500 ms,相对水深约240~400 m, R6—R7界面地震反射特征之间主要是以连续、弱振幅反射特征为主,未见下切河道,反映了深水沉积环境(图2)。

78.1 kaBP:当时海平面低于现今海平面约45 m,海南岛西部海岸线发生较大规模海退,海南岛西部部分海域出露海底。此时陆架变宽,海底地形平缓,大部分区域水深均小于200 m。研究区东南部水深相对较深,水深范围约200~400 m。地震剖面揭示R4界面埋深约300 ms,相对水深约240 m。R3—R4界面地震反射特征之间主要是以中—低连续、中振幅、局部弱反射特征为主,未见下切河道,反映了浅海沉积环境(图2)。

49.9 kaBP:当时海平面低于现今海平面约50 m,海南岛西部海岸线继续发生较大规模海退,后退距离约50多千米,海南岛西部,西北部大部分海域出露海底。此时海域陆架加宽,海底地形平缓,大部分区域水深均小于200 m。研究区东南部水深相对较深,水深范围约200~300 m。地震剖面揭示R2界面埋深约200 ms,相对水深约160 m, R1—R2界面地震反射特征之间主要是以中连续、中振幅、前积反射特征为主,局部发育下切河道,反映了滨浅海沉积环境(图2)。

40.7 kaBP:当时海平面低于现今海平面约70 m,海南岛西北部、南部陆域面积进一步扩大,发生持续海退。海南岛西部海退范围较小。海域地形变得极为平坦。研究区海域大部分为陆架区,仅东南部局部区域为水深>200 m的陆坡区。地震剖面揭示R1界面埋深约150 ms,相对水深约120 m。R1至海底地震反射特征之间主要是以中—低连续、中振幅、局部杂乱反射特征为主,下切河道发育,反映了滨浅海沉积环境(图2)。

研究区晚第四纪(100.1~40.7 kaBP)以来古海岸线和水深反演表明,随着时间的推移,海平面持续下降,研究区海南岛陆域面积持续扩大,海域面积减小,同时陆架不断加宽,200 m水深线往深水区迁移。古水深由深变浅,海底地形坡度由陡变缓。地形剖面揭示,100.1 kaBP时期,研究区水深变化范围为100~550 m,陆架较窄,地形坡度较陡;78.1 kaBP时期,水深加速变浅,介于50~400 m之间,地

形坡度相对平缓;49.9 kaBP 时期,水深进一步变浅,陆架区范围增大,大部分地区水深 < 250 m,海底地形因水下河道侵蚀而发生下切现象。40.7 kaBP 时期,陆域面积逐渐扩大,水深变浅,海底地形变为平缓(图 8)。

反演结果表明,古海岸线变迁具有一定特点,即

海岸线由东往西,由北往南发生迁移。海岸线变迁首先由海南岛西部开始,100.1 kaBP 时古海岸线位于现今海岸线东侧(图 7),陆域面积较现今略有扩大。78.1 kaBP 时期,古海岸线变化范围加大,海南岛西部发生大面积的海退,古海岸线距现今海岸线约 20 多千米,随着海平面进一步下降,49.9 kaBP

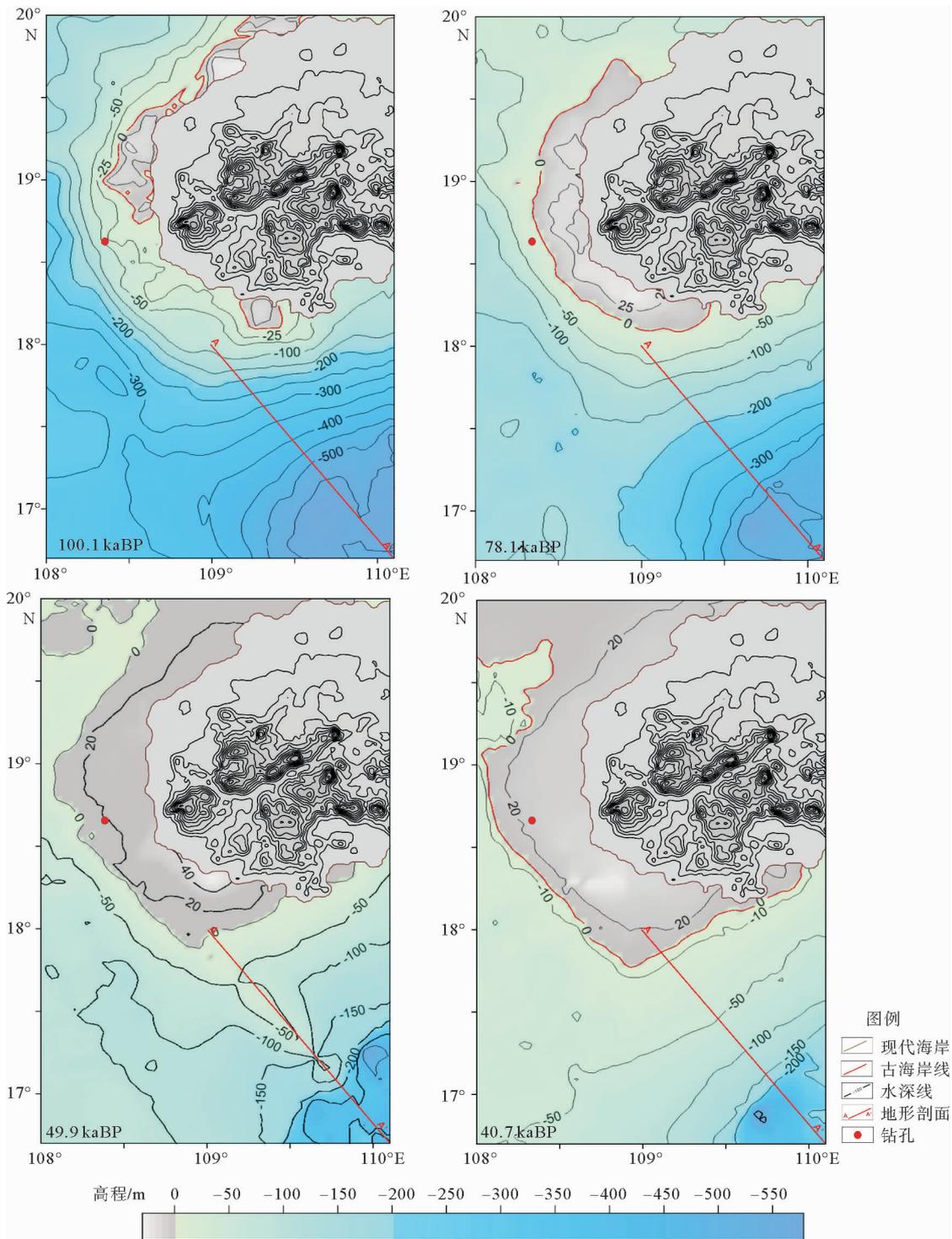


图 7 研究区 100.1~40.7 kaBP 时期古水深和海岸线反演结果

Fig. 7 The inversion results of Paleo bathymetric and coastal line during 100.1~40.7 kaBP

时期,海南岛西北部以及北部湾海面区面积增大,研究区西北部变为港湾浅水区。40.7 kaBP 时期,古海岸线继续往南,往西迁移,古海岸线距今海岸线最大距离可达 50 km。钻孔的沉积速率也反映了海岸线的变迁过程,100.1 kaBP 时,钻孔处于陆架浅水区,位于海面之下,沉积速率较高,约为 1.91 m/ka。78.1 kaBP 时,钻孔位于近岸区,沉积速率减小,为 1.201 m/ka。49.9~40.7 kaBP 时,钻孔处于陆相沉积环境,沉积速率大幅降低,约为 0.52~0.16 m/ka(表 3)。考虑到研究区晚第四纪以来,主要是由气候驱动的海平面升降变化,100.1~40.7 kaBP 时期古海岸线演变过程应该是来回迁移的过程,但总体趋势是由东向西、由南向北迁移。

前人研究表明,海南岛西部海域沉积物来源比较复杂,受北部湾环流的影响,由越南、广西和海南岛西部的多条河流输送的沉积物都在这里沉积,部分由粤西沿岸流携带来的沉积物经过琼州海峡也可能搬运至此<sup>[33]</sup>。海南岛的河流发源于中部山地,向四周海岸呈放射状分布,主要河流有 3 条,即南渡江、昌化江和万泉河,其中位于海南岛西部的昌化江的径流量变化大,年输沙量为 $(88\sim 298)\times 10^4\text{t}$ <sup>[34]</sup>。

晚更新世早期(128~75 kaBP)是温暖期,全球性高海平面时期,中国陆架被海水淹没<sup>[35]</sup>。该时期内,海南岛西部河流,尤其是昌化江对海南岛西海岸提供了主要物源,100.1 kaBP 时期古海岸线的迁移主要开始于昌化江河口邻近海域,并逐渐往南扩展到乐东三亚一带。53.5~39 kaBP 期间,气候再次变冷,进入玉木冰期中期阶段,海平面下降幅度较大,古海岸线向海快速推进,加之该时期物源区侵蚀作用强烈,海南岛物源供应充足,促使海区发育了较厚的沉积层,水深变浅,研究区大部分海域变为陆架区,北部湾及海南岛西部大部分区域暴露成为陆地,遭受剥蚀或接受陆相沉积。

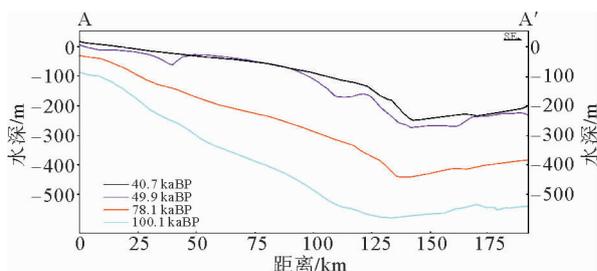


图 8 研究区 100.1~40.7 kaBP 时期地形剖面对比(剖面位置见图 7)

Fig. 8 The comparison of relief profiles during 100.1~40.7 kaBP( for location see Fig. 7)

在末次冰期最盛期,海平面位于现今海平面的 100 多米之下,南海西北部的海岸线几乎推移到陆坡区,研究区陆架区均位于海平面之上,遭受剥蚀或接受陆相沉积,在海底形成了许多古水道(图 2,图 3)。

以上研究表明,古气候、海平面变化以及物源供应对塑造海底地形地貌具有重要的作用,尤其对陆架区海底地形地貌改变较大,利用钻孔和高分辨率地震剖面开展古水深和海岸线的反演,与海平面变化曲线以及海南岛物源供应具有较好的响应关系。由于本文在时深转换、地震层序界面定年、海平面变化取值等方面存在一定的误差,且忽略了沉积或剥蚀厚度的影响,因此结果可能存在一定的偏差,但考虑到 10 万年来的时间尺度,以及海平面变化的幅度,尤其是反演结果表明研究区水深变化的幅度达 200~300 m,计算结果引起的误差可以暂时忽略。

## 5 结论

(1)研究区发育 7 个主要地震反射界面(R1—R7),结合钻孔年代-深度模型,计算得出 7 个主要地震反射界面时间约为 100.1~40.7 kaBP。

(2)100.1 kaBP 时陆架较窄,研究区以地貌陆坡区为主,地形较陡,水深变化较大,最大水深超过 550 m。78.1 kaBP 时海南岛西部部分海域出露海底。此时陆架变宽,海底地形平缓,大部分区域水深均小于 200 m。49.9 kaBP 时海南岛西部、西北部大部分海域出露海底。此时海域陆架加宽,海底地形平缓,大部分区域水深均小于 200 m。40.7 kaBP 时海南岛西北部、南部陆域面积进一步扩大,发生持续海退。海南岛西部海退范围较小,海域地形变得极为平坦,研究区海域大部分为陆架区。

(3)古海岸线变迁总体上具有由东往西、由北往南迁移的特点。100.1 kaBP 时古海岸线位于现今海岸线东侧,78.1 kaBP 时期,古海岸线变化范围加大,海南岛西部发生大面积的海退,古海岸线距现今海岸线约 20 多千米,49.9 kaBP 时期,海南岛西北部以及北部湾内陆域面积增大,至 40.7 kaBP 时期,古海岸线继续往南、往西迁移,古海岸线距今海岸线最大距离可达 50 km。

## 参考文献(References)

- [1] 李平日,黄镇国,张仲英,等. 广东东部晚更新世以来的海平面变化[J]. 海洋学报, 1987, 9(2): 216-222. [LI Pinri,

- HUANG Zhenguo, ZHANG Zhongying, et al. Sea level changes since Late Pleistocene in eastern Guangdong [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 9(2): 216-222. ]
- [2] Kershaw S, Guo L. Marine notches in coastal cliffs: indicators of relative sea-level change, Perachora Peninsula, central Greece[J]. *Marine Geology*, 2001, 179(3-4): 213-228.
- [3] 庄振业, 林振宏, 刘志杰, 等. 海平面变化及其海岸响应[J]. *海洋地质动态*, 2003, 19(7): 1-12, 37. [ZHUANG Zhenye, LIN Zhenhong, LIU Zhijie, et al. Sea level changes and coastal responses[J]. *Marine Geology Letters*, 2003, 19(7): 1-12, 37. ]
- [4] 赵信文, 向薇, 肖尚斌, 等. 末次冰消期以来海平面变化研究进展[J]. *华南地质与矿产*, 2012, 28(3): 189-196. [ZHAO Xinwen, XIANG Wei, XIAO Shangbin, et al. Research progress in sea-level changes since the last deglaciation[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2012, 28(3): 189-196. ]
- [5] 张虎男, 赵红梅. 华南沿海晚更新世晚期-全新世海平面变化的初步探讨[J]. *海洋学报*, 1990, 12(5): 620-630. [ZHANG Hunan, ZHAO Hongmei. The primary discussion of sea level changes during Late Pleistocene to Holocene in coastal Huanan [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(5): 620-630. ]
- [6] 时小军, 余克服, 陈特固. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(5): 121-132. [YE Xiaojun, YU Kefu, CHEN Tegu. Progress in researches on sea-level changes in South China Sea since mid-Holocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(5): 121-132. ]
- [7] Tanabe S, Hori K, Saito Y, et al. Song Hong (Red River) delta evolution related to millennium-scale Holocene sea-level changes[J]. *Quaternary Science Review*, 2003, 22(21-22): 2345-2361.
- [8] 姚衍桃, Harff J, Meyer M, 等. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2009, 36(6): 753-762. [YAO Yantao, Harff J, Meyer M, et al. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(8): 1127-1136. ]
- [9] 周川, 范奉鑫, 栾振东, 等. 南海北部陆架主要地貌特征及灾害地质因素[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(1): 51-60. [ZHOU Chuan, FANG Fengxin, LUAN Zhendong, et al. Geomorphology and hazardous geological factors on the continental shelf of the northern South China Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 2013, 29(1): 51-60. ]
- [10] 汪品先. 冰期时的中国海: 研究现状与问题[J]. *第四纪研究*, 1990, 10(2): 111-124. [WANG Pinxian. The ice-age China sea-status and problems [J]. *Quaternary Science*, 1990, 10(2): 111-124. ]
- [11] 张虎男. 南海北部地质灾害对油气勘探开发的影响[J]. *中国海上石油(地质)*, 1994, 8(4): 252-259. [ZHANG Hunan. Geological disasters in the northern part of South China Sea influence on the oil and gas exploration and exploitation[J]. *China offshore Oil and Gas (Geology)*, 1994, 8(4): 252-259. ]
- [12] 鲍才旺. 珠江口陆架区埋藏古河道与古三角洲[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(2): 25-34. [BAO Caiwang. Buried ancient channels and deltas in the Zhujiang River Mouth shelf area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 25-34. ]
- [13] 张明书, 李绍全, 刘健. 中国海岸带晚更新世风成沉积分区、序列特征及其气候-环境意义[J]. *第四纪研究*, 1996, 16(1): 31-41. [ZHANG Mingshu, LI Shaoquan, LIU Jian. Sedimentary zones, sequential features and climatic environmental significance of late Pleistocene eolian deposits along coastal areas of China[J]. *Quaternary Science*, 1996, 16(1): 31-41. ]
- [14] 黄镇国, 陈特固, 张伟强, 等. 广东海平面变化及其影响与对策[M]. 广州: 广东科技出版社, 2000: 33-60. [HUANG Zhenguo, CHEN Tegu, ZHANG Weiqiang, et al. *Sea Level Changes, Influence and Countermeasure in Guangdong Province*[M]. Guangzhou: Science and Technology of Guangdong Press, 2000: 33-60.
- [15] 王树民, 陈泓君, 钟和贤. 南海东北部晚第四纪地层不整合的发现及其地质意义[J]. *南海地质研究*, 2001: 55-61. [WANG Shuming, CHEN Hongjun, ZHONG Hexian. The foundation of late Quaternary strata unconformity and their geological significant in northeastern South China Sea [J]. *Research of geological South China Sea*, 2001: 55-61. ]
- [16] 寇养琦. 南海北部大陆边缘海底滑坡的初步研究[J]. *南海地质研究*, 1993(5): 43-56. [KOU Yangqi. The primary research of submarine slide in the northern margin of South China Sea[J]. *Geological of South China Sea*, 1993(5): 43-56. ]
- [17] 蓝东兆, 张维林, 陈承惠, 等. 晚更新世以来台湾海峡西部的海侵及海平面变化[J]. *海洋学报*, 1993, 15(4): 77-84. [LAN Dongzhao, ZHANG Weilin, CHEN Chenhui, et al. Sea intrusion and sea level changes since late Pleistocene in western Taiwan strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(4): 77-84. ]
- [18] 常琳, 罗运利, 孙湘君. 南海北部 MD05-2904 站位 2 万年以来孢粉记录的古环境演变[J]. *科学通报*, 2013, 58(30): 3079-3087. [CHANG Lin, LUO YunLi, SUN Xiangjun. Paleoenvironmental change base on a pollen record from deep sea core MD05-2904 from the northern South China Sea during the past 20000 years[J]. *Chinese Science China*, 2013, 58(30): 3079-3087. ]
- [19] Steinke S, Kienast M, Hanebuth T J J. On the significance of sea-level variations and shelf paleo-morphology in governing sedimentation in the southern South China Sea during the last deglaciation[J]. *Marine Geology*, 2003, 201(1-3): 179-206.
- [20] 陈泓君, 李文成, 陈弘, 等. 南海北部中更新世晚期以来古海岸变迁及其地质意义[J]. *南海地质研究*, 2005(1): 57-66. [CHEN Hongjun, LI Wencheng, CHEN Hong. Ancient coastline transfer since middle-Pleistocene in northern South China Sea and its geological significance[J] *Geological South China Sea and its geological significance*[J] *Geological South*

- China Sea, 2005(1): 57-66.]
- [21] Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples and exploration significant [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(11): 1687-1709.
- [22] 赵希涛, 杨达源. 全球海面变化[M]. 北京: 科学出版社, 1992. [ZHAO Xitao, YANG Dayuan. *Global Sea Level Change*[M]. Beijing: Science Press, 1992.]
- [23] 陈欣树, 包昞彦, 陈俊仁, 等. 珠江口外陆架晚第四纪最低海面的发现[J]. *热带海洋*, 1990, 9(4): 73-77. [CHEN Xinshu, BAO Liyan, CHEN Junren, et al. Discovery of lowest at the continental sea level in late quaternary shelf off pearl river mouth [J]. *Tropical Oceanology*, 1990, 9(4): 73-77.]
- [24] 朱俊江, 詹文欢, 唐诚, 等. 红河断裂带活动性研究[J]. *华南地震*, 2003, 23(2): 13-19. [ZHU Junjiang, ZHAN Wenhuan, TANG Chen, et al. Study on activity of Red River Fault Zone[J]. *South China Journal of Seismology*, 2003, 23(2): 13-19.]
- [25] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及10Ma以来的构造事件[J]. *科学通报*, 1998, 43(8): 797-810. [LI Sitian, LIN Changsong, ZHANG Qiming, et al. Episodic rifting of continental marginal basins and tectonic events since 10 Ma in the South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(1): 10-23.]
- [26] 孙珍, 钟志洪, 周蒂. 莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2007, 32(3): 347-356. [SUN Zhen, ZHONG Zhihong, ZHOU Di. The Analysis and Analogue Modeling of the Tectonic Evolution and Strong Subsidence in the Yinggehai Basin[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32(3): 347-356.]
- [27] 李纯泉. 莺歌海盆地流体底辟构造及其对天然气成藏的贡献[J]. *中国海上油气(地质)*, 2000, 14(4): 253-257. [LI Chunquan. Fluid diapirs and their contributions to hydrocarbon accumulation in Yinggehai Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2000, 14(4): 253-257.]
- [28] 夏伦煜, 麦文, 赖霞红, 等. 莺歌海-琼东南盆地第四系初步研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 1989, 3(3): 21-28. [XIA Lunli, MAI Wen, LAI Xiahong, et al. The primary Quaternary research of Yinggehai-Qiongdongnan Basin[J]. *China offshore oil and gas (geology)*, 1989, 3(3): 21-28.]
- [29] 吕明. 莺-琼盆地低位沉积模式的新探讨[J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(4): 221-230. [LV Ming. A new discussion on lowstand deposition models in Ying-Qiong Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2002, 16(4): 221-230.]
- [30] 陈双喜, 赵信文, 黄长生, 等. 现代珠江三角洲地区QZK4孔第四纪沉积年代[J]. *地质通报*, 2014, 33(10): 1629-1634. [CHEN Shuangxi, ZHAO Xinwen, HUANG Changsheng, et al. Chronology of Quaternary sediments from drill hole QZK4 in modern Pearl River Delta region[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(10): 1629-1634.]
- [31] 宋维宇. 莺歌海盆地由沉积负载引起的裂后期快速沉降的耦合模式[J]. *海洋地质动态*, 2010, 26(8): 8-14. [SONG Weiyu. A coupled model incorporating lower-crustal flow in response to post-rift sedimentary load of Yinggehai Basin's rapid subsidence[J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(8): 8-14.]
- [32] Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, et al. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1-3): 295-305.
- [33] 许冬, 龙江平, 钱江初, 等. 海南岛近海海域7个沉积岩芯的现代沉积速率及其分布特征[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(3): 9-17. [XU Dong, LONG Jiangpin, QIAN Jiangchu, et al. The modern sedimentation rate and the distribution character of 7 cores in Hainan Island offshore[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(3): 9-17.]
- [34] 王颖. 海南岛海岸环境特征[J]. *海洋地质动态*, 2002, 18(3): 1-9. [WANG Ying. Features of Hainan island coastal environment[J]. *Maine Geology Letters*, 2002, 18(3): 1-9.]
- [35] 张军强, 唐璐璐, 邹昊. 晚更新世以来古气候与海平面变化在东海地区的响应[J]. *海洋湖沼通报*, 2008(1): 25-31. [ZHANG Junqiang, TANG Lulu, ZOU Hao. The response to the variety of Paleoclimate and sea level in the East China Sea after the Late Pleistocene[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008(1): 25-31.]

## THE INVERSION OF LATE QUATERNARY PALEO-WATER DEPTH IN SOUTHWESTERN OFFSHORE HAINAN ISLAND

CHEN Hongjun<sup>1,2</sup>, HUANG Wenkai<sup>1,2</sup>, QIU Yan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 51760, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** There are several cycles of coastal line migration and water-land inversion in the northwestern South China Sea due to climate and sea level changes during late Quaternary. Seven seismic reflectors have been recognized and dated based on high resolution seismic profiles and drilling cores. The inversion of late Quaternary (100.1~40.7 kaBP) paleo-water depth and coastal line have been build based on modern water depth, global sea level change curves and thickness of sediment in the study area. The inversion results indicate that part of the coastal line in western, northwestern and southern Hainan Island migrated seawards 100.1 kaBP. The water depth was larger than 550 m with a narrow shelf in the study area then. The shelf area became larger with a flat sea floor at 78.1 kaBP. The western coastal line migrate to sea in large scale with more land area exposed. The water depth was less than 200m. Factors suggest that the paleo-water depth and coastal line was controlled by climate, sea level changes and sediment supply.

**Key words:** Hainan Island; Late Quaternary; paleo-water depth; inversion; sea level change