

陈聪, 万秋池, 郑卓, 余风玲, A SWITZER, 万一兴. 福建平潭岛晚第四纪沉积序列及 MIS 5 海侵旋回特征[J]. 热带地理, 2016, 36 (3): 406-416.

CHEN Cong, WAN Qiuchi, ZHENG Zhuo, YU Fengling, A Switzer, WAN Yixing. Late Quaternary Sediment Stratigraphy and Marine Cycles in the Pingtan Island, Fujian Province[J]. Tropical Geography, 2016, 36 (3): 406-416.

福建平潭岛晚第四纪沉积序列 及 MIS 5 海侵旋回特征

陈 聪¹, 万秋池¹, 郑 卓¹, 余风玲^{2,3}, A SWITZER², 万一兴¹

(1. 中山大学 地球科学与地质工程学院, 广州 510275; 2. 新加坡南洋理工大学 新加坡地球观测中心, 新加坡 639798;
3. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 选择位于福建平潭岛北部芦洋埔海积平原的 PT01 钻孔, 岩芯长度 28.3 m, 采用加速器碳同位素 (AMS ¹⁴C) 和光释光 (OSL) 测年建立地层年代框架, 认为晚更新世富含孔虫等海相生物化石的地层应归属于 MIS 5 高海面期, 即 MIS 5e 的潮下带滨海相沉积。结合岩性特征、古生物化石、沉积物色度、粒度分析及其参数等指标, 进行了沉积单元的划分, 重建了 MIS 6 末期以来的沉积相变化过程, 揭示出 MIS 5 期间的多次海平面波动变化, 即 MIS 5 高海面期沉积环境仍存在滨海、潮坪、潟湖、风成砂等沉积相之间的转换, 并可能存在短暂的陆相或风化过程。而该区整个末次冰期的沉积缺失或较薄, 上部全新世沉积也不发育, 厚度仅为 3.79 m, 以沼泽相—风成砂相为主。

关键词: 平潭岛; 晚第四纪; 沉积环境; 海侵旋回; MIS 5

中图分类号: P531

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2016)03-0406-11

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.002845

晚第四纪是全球气候环境与海陆变迁频繁的重要地质时期。前人对深海氧同位素^[1-3]和珊瑚^[4-5]等进行了大量研究, 建立了高分辨率的全球第四纪气候—海平面波动曲线^[6-8]。华南沿海地区普遍存在晚第四纪海陆交互相沉积地层, 其中的海相沉积旋回与全球的高海面存在密切关系, 福建沿海晚第四纪的沉积厚度较大, 一直以来成为沿海地区海陆交互相沉积环境演变研究的热点区域^[9-12]。然而, 由于测年手段限制及新构造运动引起的升降差异, 关于沿海地区晚第四纪地层的年代框架和更新世海侵年代对比等问题一直存在分歧。在已有研究中, 被广泛发现的晚更新世海侵地层 (福州海侵) 因测年手段的限制, 大多将其划分在 MIS 3^[13-17]。在沿海地区涉及到 MIS 5 的海侵地层仅见于霞浦利埕的 DK1 孔 (90—80 ka)^[18]。纵观最近几十年的研究结果, 福建沿海地区已有研究的地层年代框架建立主要是根据传统

¹⁴C 和热释光测年方法, 这些方法限制了 4 万 a 左右或更老地层的测定。此外, 沿海地区虽然有厚层的海陆交互相沉积, 但早年的替代性环境指标分辨率多数较低, 尚需要新的高分辨率古环境研究加以补充。

平潭岛是福建省第一大岛, 周边第四纪地层发育, 是进行晚第四纪海平面变化高分辨研究的理想场所。平潭岛的第四纪沉积主要分布于芦洋埔平原、流水平原、县城东部和三十六胶湖周围、以及南部滨海地区。但第四纪沉积物无论在岩性、沉积岩相和厚度等方面均变化较大。前人通过对地层特征及其所包含的孢粉、微体古生物及测年资料的综合分析, 认为平潭岛的第四系包括晚更新世和全新世地层, 沉积相类型有残积相、过渡相、风积相、冲洪积相、潮下带滨海相和滨海相等^[19]。本文选择了平潭岛东北部芦洋埔平原进行钻孔, 采用加速器放射性碳同位素 (AMS ¹⁴C) 和光释光 (OSL) 进行年代

收稿日期: 2016-02-24; 修回日期: 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (41230101、41072128)

作者简介: 陈聪 (1989—), 男, 广东人, 博士研究生, 主要从事全球变化与古环境研究, (E-mail) chenc7@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 郑卓 (1956—), 男, 广东人, 教授, 博士生导师, 主要从事第四纪地质学、全球变化科学、古环境生态学、环境考古学、海岸带环境地质与地质灾害研究, (E-mail) eeszhuo@mail.sysu.edu.cn.

测定, 结合钻孔的岩性特征、古生物化石、沉积物色度、粒度等指标的分析结果, 较系统地探讨福建沿海晚更新世至全新世以来的海陆变迁过程, 重点探讨晚更新世海侵层的年代归属和海平面变化的关系, 重建福建沿海特别是平潭岛区域晚第四纪地层的年代以及沉积环境演变历史。

1 区域概况与研究材料

1.1 区域概况

平潭岛(亦称海坛岛)是福建省最大的岛屿, 西侧近闽江入海口, 与大陆间海峡宽度为 5~10 km, 东侧为台湾海峡, 南北长约 29 km, 东西宽约 19 km, 面积约 279 km² (图 1)。该岛基底由白垩系石帽山流纹岩、熔结凝灰岩、燕山期花岗闪长岩等组成; 地势低平, 中间略高, 最高海拔 435 m; 地貌复杂, 类型多样, 以丘陵、台地、滨海平原为主, 小溪均独流入海, 流域面积有限, 未形成完整的水系。该地气候类型为中亚热带海洋性季风气候, 多年平均气温 19.5℃, 最热月(7—8月)平均气温约 28℃, 最冷月(1—2月)平均气温约 11℃; 多年平均降水量 1 180 mm, 春雨季(2—4月)约占 26%, 梅雨季(5—6月)占 36%, 台风雨季(7—9月)占 26%, 冬雨季(10—1月)占 12%; 盛行风向多为向岸的 NNE 风向(6—8月受台风影响为 SSW 风向), 常年风力强劲, 年均大风天数 > 100 d, 年均风速达 6.9 m/s, 风速由沿海到山地递减显著。平潭岛附近海面风大浪高, 波浪潮汐和风力等外动力作用强劲^[20-22]。

1.2 研究材料

钻孔 PT01 位于第四系厚度较大的平潭岛芦洋埔海积平原, GPS 坐标为 25° 35′ 13″N, 119° 45′ 22″E (图 1-b), 孔口标高 8 m, 进尺回次共 34 次, 岩芯

全长为 28.3 m。钻孔沉积物以青灰—灰色黏土质粉砂和黄—黄褐色中细砂为主, 不同层位岩性变化明显, 10.25~12.68 和 19.96~23.17 m 含 2 层分选性好的灰色黏土质粉砂, 其中第 2 层的上覆和下伏层位(约 17~19 和 23~24 m)均含大量完整或破碎贝壳; 部分层位见中细砂—黏土交错层理, 4.00~4.38 和 8.05~8.86 m 含 2 层黑色黏土—粉砂层, 含大量植物残余。钻孔底部为分选性差的黏土质粉砂, 含较多磨圆差的砾石, 底部为基岩风化壳(图 2)。

1.3 研究方法

本研究在平潭芦洋埔平原 PT01 钻孔选取了 3 个泥炭样品和 1 个贝壳用于加速器碳同位素(AMS ¹⁴C)测年, 在美国 Beta 实验室完成。还采集了 4 个样品用于光释光(OSL)测年, 采用不锈钢管避光采样, 上部 2 个样品选取细颗粒(4~11 μm)石英, 以及下部 2 个样品选取粗颗粒(90~125 μm)石英进行释光测量。4 个样品均在美国产 Daybreak 1100B 型释光仪测量系统上完成, 激发光源为波长 470 ± 5 nm 的蓝光束, 测试条件为高纯氮气下, 预热温度 260℃, 试验剂量预热温度 220℃, BLSL 采用 125℃, 辐照源为 Daybreak 801 型 β 源(Sr90/Y90), 铀、钍、钾等元素含量测试在澳实(广州)矿物实验室完成, 采用美国 Agilent VISTA 型电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES)和 Agilent7700x 型电感耦合等离子质谱(ICP-MS)结合测试, 测试方法代码为 ME-MS61U, 相对误差为 10%。OSL 测年在中山大学地球科学与地质工程学院释光实验室完成。

以 20 cm 间隔选取岩芯沉积物样品共 142 个进行粒度分析, 采用筛分法与英国 Malvern 公司产 Mastersizer 2000 激光粒度仪(范围 0.02~2 000 μm)

测试结合, 每个样品重复测试 3 次取平均值。粒度组分分级参照 Udden-Wentworth (尤登-温德华氏)粒级标准^[23-24], 粒径使用 Φ 值表示(Φ = -log₂d, d 单位为 mm), 粒度参数通过 Folk & Ward 公式^[25]计算得出。有孔虫鉴定在中山大学地球科学与地质工程学院第四纪环境实验室完成, 采样间距为 20 cm, 其中丰度较高的层位采样密度提高至 10 cm, 共鉴定 171 个样品, 每个样品取 10 g 干样进行处理, 并在显微镜下统计分析。此外, 还对钻孔进行色度测定, 仪器为日本 Konica Minolta CR400/410 型色度色差仪, 用白

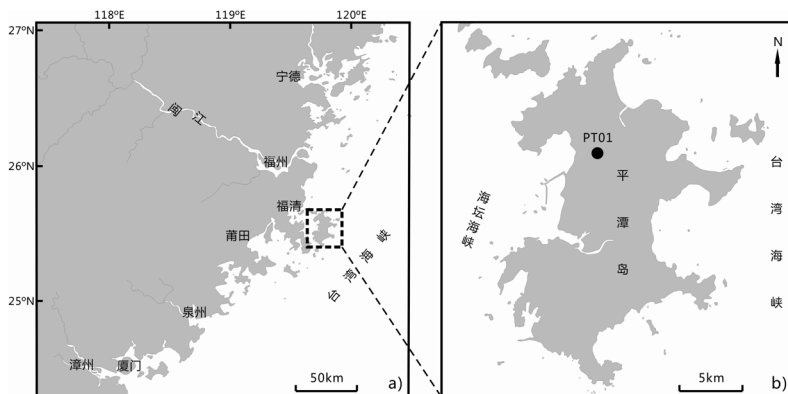


图 1 平潭岛地理位置(a)及 PT01 钻孔位置(b)

Fig.1 Geographic locations of the Pingtan Island (a) and core PT01 position (b)

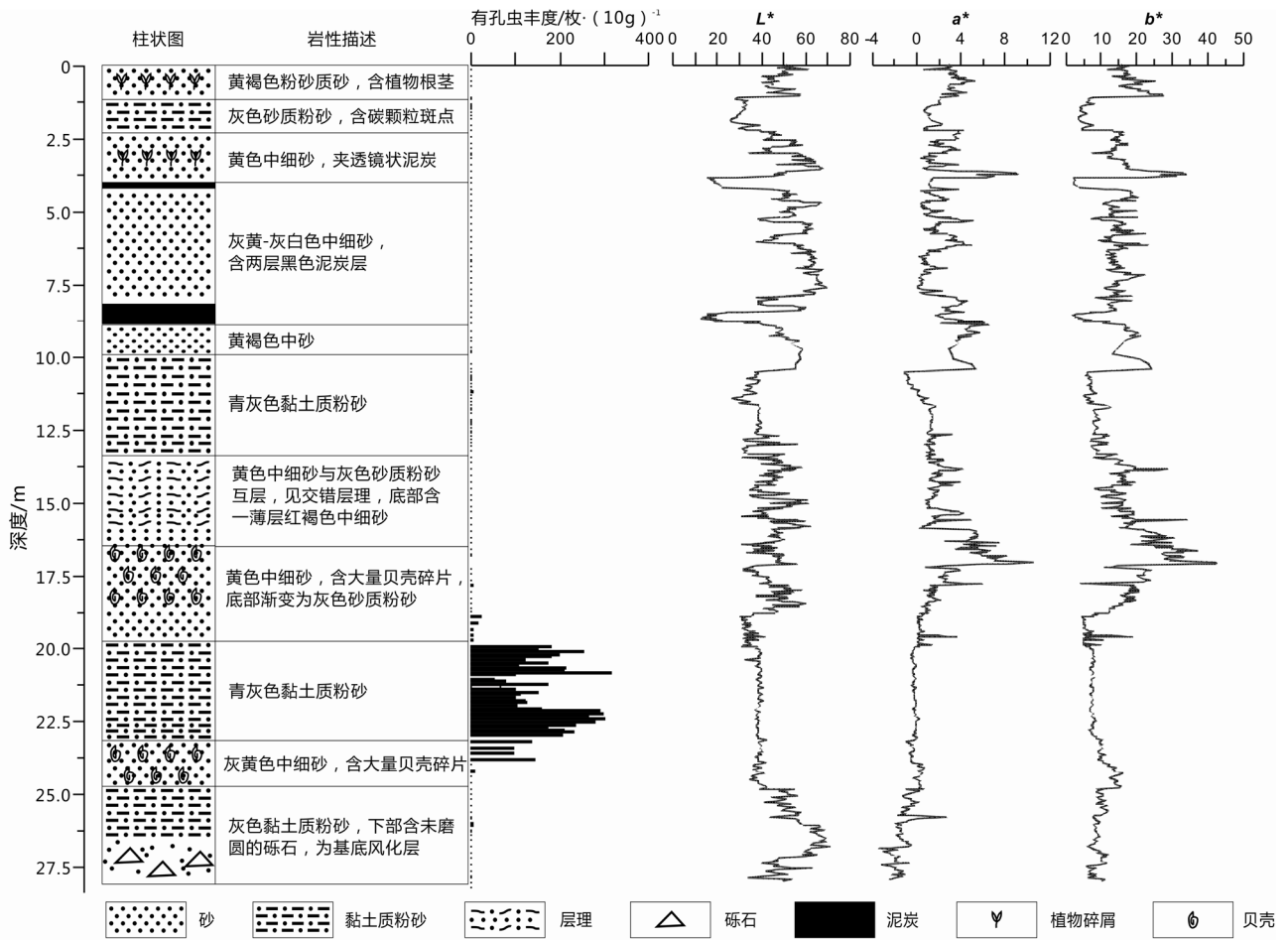


图2 PT01 钻孔岩性描述、有孔虫丰度和色度

Fig.2 Lithology, foraminifera abundance and color indexes of core PT01

色参照色板完成校正后，对各回次岩芯以 2 cm 间隔进行测定，每样测定 3 次取平均值求得颜色的各参数值，色度参数使用 CIE Lab 颜色模型描述。

2 结果与讨论

2.1 钻孔沉积物年代

碳同位素年龄使用 IntCal 09 数据库^[26]进行校正(表 1)，其中在 4.25 m 处的 1 个样品实测年龄接近碳同位素测年的上限，15.55 m 处的 1 个样品实测年龄值较小，但上下层位的 2 个样品则超出了测年范

围，意味着 15.55 m 处的样品可能受到新碳污染。AMS ¹⁴C 年龄表明：全新世沉积在平潭岛北部较薄，仅为 3 m 左右，而下伏地层的年代可能属于 MIS 3，甚至有可能在 MIS 5 范围内。

PT01 钻孔的晚更新世地层中 2 个样品细颗粒石英 OSL 测试因信号饱和，无法获得准确年龄。而在海相层 15.75 和底部 24.60 m 的粗颗粒石英 OSL 测年结果分别为 78.66 ± 3.30 和 81.02 ± 10.04 ka。如果按照实际光释光测年的值，其年代对应于深海氧同位素 4 阶段 (MIS 4)。然而，根据大量研究显示：

表 1 平潭岛 PT01 钻孔 AMS ¹⁴C 年代测试结果

Tab.1 AMS ¹⁴C dating results of drilling core PT01 of the Pingtan Island

样品/实验室编号	埋深/m	材料	¹⁴ C 年龄/a B.P.	校正年龄/cal.a B.P.
PT01-C2/Beta-326018	4.25	泥炭	34 412 ± 290	40 250—38 740
PT01-C5/Beta-326019	8.59	泥炭	> 43 500	—
PT01-C7/Beta-326020	15.55	炭块 (黑色砂)	14 360 ± 60	17 610—17 410
PT01-C14/Beta-326021	23.89	贝壳	> 43 500	—

MIS 4 的海平面处于现代平均海平面以下 60 m^[7]，按照钻孔标高（8 m）和样品埋深（15.76 和 24.60 m），该阶段的平均海平面与平潭岛钻孔晚更新世海相层所处的海拔高度相距甚远。传统观点认为：粗颗粒组分在搬运过程中主要依靠底载推移搬运，会导致曝光不充分而引起年龄结果偏老^[27]。但是，欧洲和韩国海岸带的研究结果认为：潮间带的沉积物获得的 OSL 年龄是可靠的，说明潮间带的沉积物在沉积时获得了充分的曝光^[28-29]。最近在韩国西南部海岸带的 1 项研究中，将细颗粒（4~11 μm）和粗颗粒（90~212 μm）石英 OSL 测年结果进行对比发现：从 40 ka 开始两者出现不一致，粗颗粒测年结果较细颗粒年轻 30%~60%，且细颗粒测年结果与岩性地层和古生物证据等较为一致，认为长石的污染与信号过早饱和导致粗颗粒石英的年龄被低估^[30]。考虑本钻孔测年样品沉积环境与 Kim 等^[30]的研究区相似，推测本研究钻孔依据粗颗粒石英的 OSL 测年结果也可能同样存在年龄低估的问题。Kim 等对最接近 80 ka 的 2 个样品测年结果（85.8 和 85.9 ka）对比发现：粗颗粒比细颗粒石英的测年结果平均年轻约 35%。

据此，本钻孔按照低估 35%来进行校正（表 2）。这些校正结果使平潭岛下部海相层的年代归入 MIS 5e 高海面阶段^[7]，这个年代相当于末次间冰期最高海面时期，与本钻孔富有有孔虫的海相岩性特征相一致。据此，根据海相沉积物特征以及 OSL 校正后的年龄推测，本钻孔沉积单元 I 中的潮下带滨海相—潮滩沉积应为 MIS 5 高海面时期的海相沉积层（图 3）。

2.2 岩性与沉积相分析

根据岩性特征和各项替代性指标的变化，将钻孔划分为 3 个沉积单元（基底风化层除外），自下而上每个单元的沉积相指标特征如下（见图 2、3）：

沉积单元 I（晚更新世 MIS5e-c）

岩芯深度 10.04~24.79 m，为海—陆交互相沉积单元。可进一步划分为 Ia、Ib 和 Ic 三部分。

Ia：15.90~24.79 m，潮滩—潮下带滨海相沉积，主体为一厚层（19.96~23.14 m）青灰色黏土质粉砂沉积，岩性均一，含海相微体古生物化石，丰度变化为 2~316 枚/10g，有孔虫主要有奥茅卷转虫（*Ammonia aomoriensis*）^[32]、科伯卷转虫（*Ammonia*

表 2 平潭岛 PT01 钻孔 OSL 年代测试结果

Tab.2 OSL dating results of drilling PT01 of the Pingtan Island

样品/实验室编号	埋深/m	等效剂量/Gy	环境剂量/(Gy·ka ⁻¹)	OSL 年代/ka	校正年龄/ka
PT01-08/WQ01	7.55	> 600 (饱和)	2.75 ± 0.2	—	—
PT01-14/WQ02	13.24	> 600 (饱和)	2.07 ± 0.2	—	—
PT01-18/WQ03	15.75	195.63 ± 8	2.49 ± 0.2	78.66 ± 3.30	121.01
PT01-29/WQ04	24.60	198.26 ± 24	2.45 ± 0.2	81.02 ± 10.04	124.65

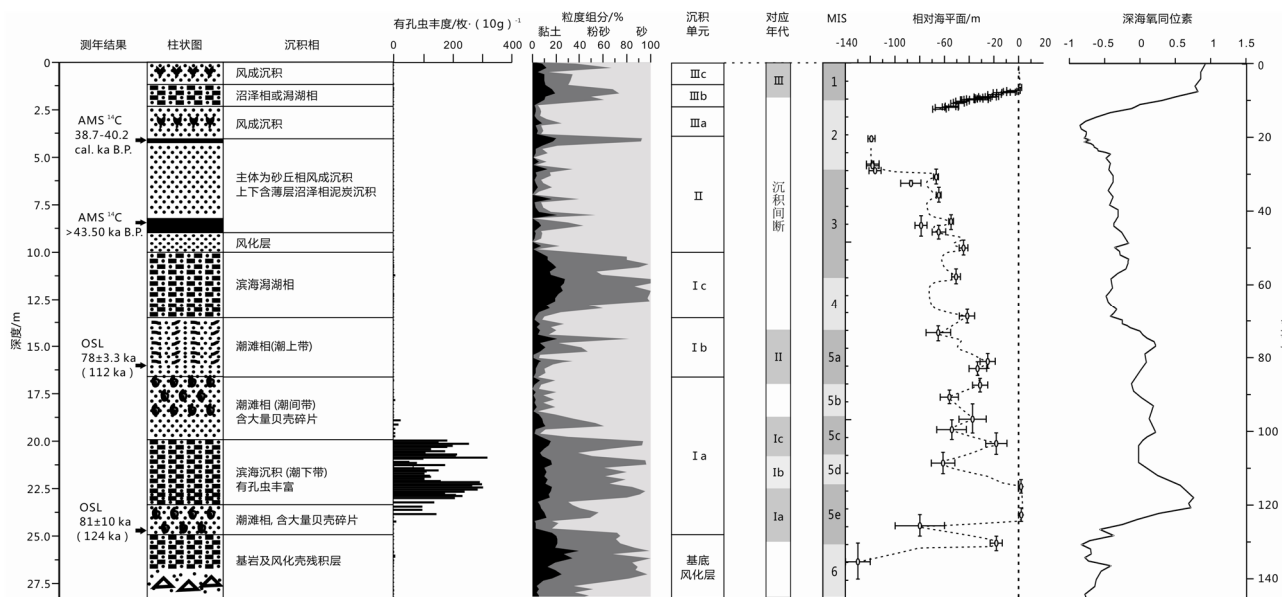


图 3 PT01 钻孔岩性特征、粒度组分与相对海平面^[7]、深海氧同位素曲线^[31]对比

Fig.3 Comparison between lithology, and grain size of core PT01, relative sea level change^[7] and the LR04 benthic stack^[31]

koeboeensis)、光滑块心虫 (*Massilinalaevigata Cushman et Todd*)、颗粒先希望虫 (*Protelphidium-granosum*)、异地希望虫 (*Elphidiumadvenum*) 等,介形类主要有典型中华美花介 (*Sinocytherideaimpressa*)、四针刺面介 (*Spinileberisquadriaculeata*)、广盐海星介 (*Pontocyprisouryhalina*) 等;该层沉积的上覆 (16.55~19.96 m) 和下伏 (23.14~24.79 m) 层为灰-灰黄色或黄褐色中细砂,含大量贝壳碎片。Zong^[33]对华南沿海海岸带不同沉积相进行了环境划分,认为海滩砂中含有大量贝壳代表着平均潮位 (MTL) 至平均高潮位 (MHW) 的沉积环境。*Ammonia aomoriensis* 一般生活在潮间带至水深 < 20 m 的滨海带^[32], *Sinocytherideaimpressa* 多生活在潮上带^[34], 而 *Sinocytherideaimpressa-Spinileberisquadriaculeata* 的组合则代表着海相-半咸水环境^[35]。因此, Ia 代表着 1 次海进旋回, 相对海平面 < 20 m。该部分上部 (15.90~16.55 m) 为红褐色中砂, 上覆于含贝壳黄褐色中砂层之上, 色度 a^* 值达到阶段最大值, 指示氧化强度较大。

Ib: 13.19~15.90 m, 潮滩沉积, 黄色中细砂和灰色黏土质粉砂互层, 层厚 1~20 cm 不等, 部分层位见交错层理, 未见海相微体古生物化石, 指示潮上带沉积环境。潮滩沉积中的砂-泥潮汐层理, 毫米级为半日潮的产物, 厘米级则为半月天文潮^[36], 因此本部分的层理除了厘米级的半月潮产物外, 更厚的层理应为海平面波动的产物。

Ic: 10.25~13.19 m, 潟湖-滨海相沉积, 以青灰色黏土质粉砂为主 (10.25~12.68 m), 中部 (10.90~11.30 m) 为砂质粉砂。除中部砂质粉砂层外, 岩性较为单一且较细, 代表稳定的弱水动力条件, 与 Ia 厚层黏土质粉砂沉积相似, 该层未发现海相微体古生物化石, 推测为湖相或潟湖相沉积。中部的砂质粉砂层粒度明显变粗, 且发现零星有孔虫化石, 说明该层位为 MIS 5c 的相对高海面的海相沉积。

沉积单元 II (晚更新世 MIS 5a-5b)

岩芯深度 3.79~10.25 m, 为沼泽-风成砂丘相结合的沉积单元。上部以灰黄色-灰白色中细砂为主, 局部见黑色碳质斑点, 色度 L^* 值总体偏大, 为风成沉积。4.00~4.38 和 8.05~8.86 m 含 2 层黑色泥炭层, 含大量植物残余, 为湖沼相沉积。该单元在埋深 4.25 和 8.59 m 处泥炭样品的 ^{14}C 测年结果分别为 34410 ± 290 a B.P. (40 250-38 740 cal. a B.P.) 和 >43500 a B.P.。其 ^{14}C 年代虽然落在 MIS 3, 但大于碳同位素测定上限值也证明了该单元的沉积年代更可能属于

MIS 5 上部的时段 (MIS 5a)。该单元底部 (8.86~10.25 m) 为黄褐色中砂, 色度 a^* 值在 2.15~5.68 之间, 较上下层位显著增大, 指示偏氧化环境, 为 MIS 5b 低海平面阶的沉积。

沉积单元 III (全新世 MIS 1)

岩芯深度 0~3.79 m, 为滨海沼泽相-风成砂丘相组成的沉积单元。根据岩性差异, 可进一步划分为 3 部分。

IIIa: 2.24~3.79 m, 灰黄-黄色中细砂为主, 夹 1 层 3 cm 厚透镜状泥炭。

IIIb: 1.07~2.24 m, 灰色黏土质粉砂为主, 色度 L^* 值较低, 但略大于泥炭层, 说明有机质含量较多, 未见有孔虫化石, 为沼泽相或潟湖相沉积。

IIIc: 0~1.07 m, 灰黄色中细砂为主, 局部含黑色碳质斑点, 为风成砂沉积。

该单元底部含 1 层约 20 cm 厚的黄褐色中细砂, 直接上覆于单元 II 顶部的黑色泥炭层之上, 色度 a^* 出现峰值, 指示较强的氧化环境。

2.3 沉积物粒度变化特征

根据粒度组分和参数变化特征, PT01 孔共划分为 9 个特征带 (基底风化层除外), 自下而上描述分别如下 (图 4):

带 A: 23.17~24.79 m, 以砂为主 (43.9%~83.2%, 体积分数, 下同), 粉砂次之 (14.5%~46%), 平均粒径多处于细砂范围 (2.335~4.615 Φ), 标准偏差在 1.733~2.749 之间, 偏度都为正偏, 处于 0.135~0.550 之间, 峰态为中等-尖锐 (0.660~1.668)。对应沉积单元 I a 下部潮滩相砂沉积。

带 B: 19.99~23.17 m, 以粉砂为主 (32.3%~80.3%), 平均粒径在 1.974~6.316 Φ 之间, 绝大部分属于粉砂级别, 表示总体粒度偏细, 标准偏差在 1.580~3.387 之间, 偏度多为负偏, 个别层位略微正偏, 峰态多为平坦-中等。对应沉积单元 I a 中部潮下带滨海相沉积。

带 C: 16.19~19.99 m, 以砂为主 (39.281%~95.516%), 平均粒径处多于中-细砂级别 (0.682~4.149 Φ), 总体粒度偏粗, 其中在 17.01 m 达到最粗 (0.682 Φ); 标准偏差在 0.843~3.416 之间, 偏度基本为正偏 (19.01~19.22 m 为负偏除外), 峰态多在中等-很尖锐之间 (0.558~2.923)。对应沉积单元 I a 上部潮滩相沉积。

带 D: 13.19~16.19 m, 以砂为主, 含量在 53.259%~94.172% 之间 (14.59 m 为 17.802% 除外), 平均粒径在 1.445~5.824 Φ 之间, 基本处于中-细砂

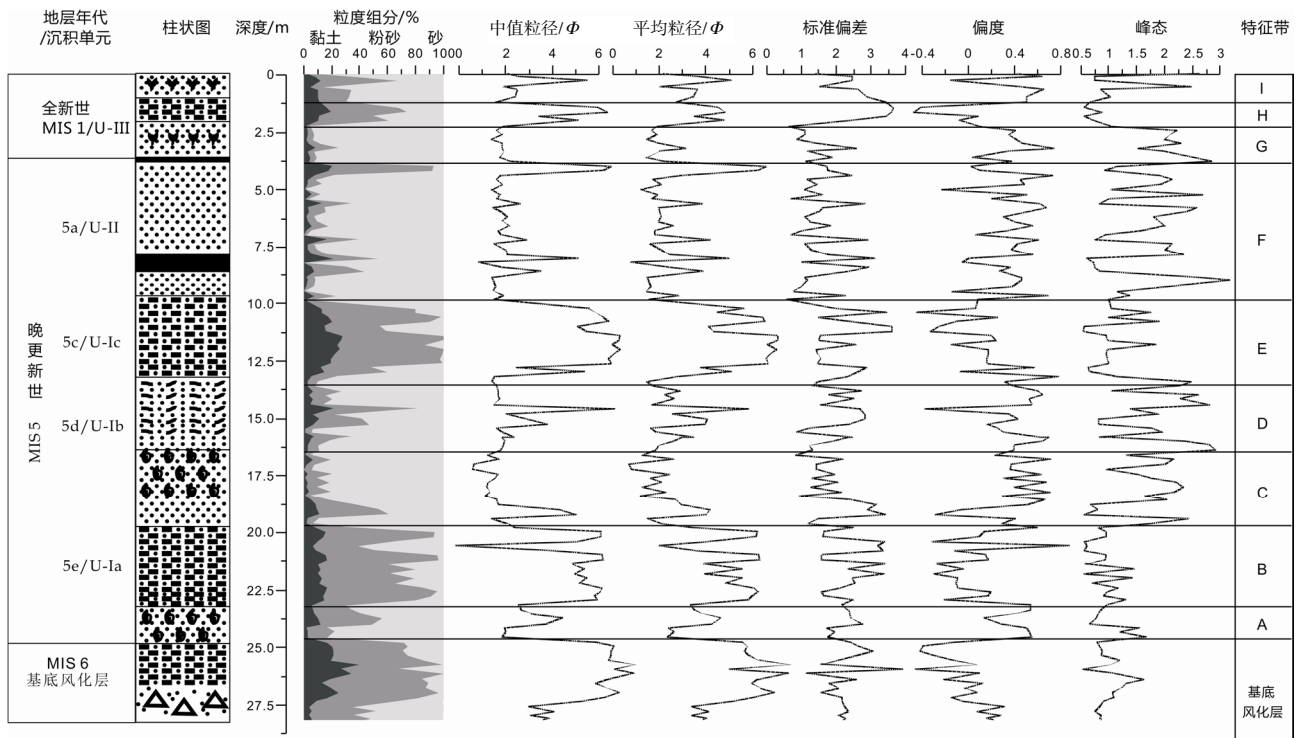


图 4 PT01 钻孔粒度组分和参数特征

Fig.4 Grain size characteristics of core PT01

范围, 与带 C 相似; 标准偏差在 0.871~2.726 之间, 偏度基本为正偏 (14.59 m 为-0.375 除外), 峰态在 0.819~2.811 之间, 多为尖锐—很尖锐。对应沉积单元 I b 潮滩相沉积。

带 E: 10.25~13.19 m, 以粉砂为主 (35.633%~81.547%), 在 12.79~13.19 和 11.00~11.41 m 砂含量大增 (40.202%~52.439%), 平均粒径在 3.772~7.074 Φ 之间, 为粉砂级别, 粒度较带 C、D 明显变细; 标准偏差在 1.442~3.617 之间, 偏度正负偏变化频繁, 但数值均较小 (-0.444~0.563), 峰态在 0.550~1.908 之间, 多为平坦—中等。对应沉积单元 I c 潟湖—滨海相沉积。

带 F: 4.00~10.25 m, 以砂为主 (4.00~4.38 和 8.05~8.86 m 两泥炭层除外), 含量在 60.579%~98.746% 之间, 平均粒径为 1.435~4.185 Φ 变化, 为中—细砂级别; 标准偏差为 0.575~2.908, 偏度多为正偏, 峰态在中等—很尖锐之间。4.00~4.38 m 和 8.05~8.86 m 两泥炭层的粉砂体积分数分别增加至 72.786%~74.794% 和 24.734%~36.162%, 同时黏土体积分数也有明显增加, 平均粒径均属于细—粉砂级别。对应沉积单元 II 沼泽—风成砂相沉积。

带 G: 2.25~4.00 m, 以砂为主 (75.225%~

95.537%), 平均粒径在中—细砂级别 (1.416~3.133 Φ), 沉积物组分与带 F 顶部的泥炭层区别明显; 标准偏差在 0.651~2.578 之间, 偏度均为正偏 (0.039~0.735), 峰态多为尖锐—很尖锐 (1.053~2.845)。对应沉积单元 III a 风成砂相沉积。

带 H: 1.20~2.25 m, 以粉砂为主 (38.324%~54.677%), 砂次之 (26.210%~50.315%), 平均粒径在 3.503~4.811 Φ 之间, 属于粉砂级别, 粒度较上下层明显变细; 标准偏差在 2.495~3.625 之间, 偏度均为负偏, 峰态均属于平坦—很平坦 (0.558~0.716)。对应沉积单元 III b 沼泽相或潟湖相。

带 I: 0~1.20 m, 以砂为主, 含量为 32.490%~96.662%, 平均粒径在 2.158~5.089 Φ 之间, 属于细砂级别; 标准偏差为 1.406~2.890, 偏度均为正偏, 峰态变化较大 (0.667~2.625)。对应沉积单元 III c 风成沉积。

各分带粒度变化特征在粒度频率曲线中亦有明显区别 (图 5): 1) 带 A、C、D 和 F、G、I 总体呈现较为尖锐的单峰, 仅有部分层位出现次峰, 且主峰粒径分布在 0~4 Φ 之间, 总体粒度较粗, 指示这些分带的沉积环境外动力条件较为单一, 且外动力强度较大, 沉积物分选性好, 所以呈现较为单一的

较粗组分; 2) 带 B、E 和 H 呈现双峰态, 主峰较为尖锐且范围窄, 粒径分布在 $-2\sim 4\Phi$ 之间; 相反, 次峰则较为平坦且分布范围较宽, 粒径在 $4\sim 12\Phi$ 之间, 组分较细, 指示这些分带的沉积环境外动力条件较为复杂, 且占主导作用的外动力强度较弱, 沉积物主要为较细组分。因此, 粒度频率曲线所代表的沉积环境和外动力条件与粒度特征和沉积相分析对应一致。

2.4 粒度特征指示的沉积环境

粒度参数散点图是综合反映粒度参数之间关系特征的图解方法, 能较正确地反映沉积环境特征, 在华南海岸带研究中被广泛使用^[37-39]。对 PT01 钻孔不同深度的粒度参数投入散点图, 不同特征带的分布呈现了较为明显的分区, 特征带 A、C 和 D、F、G、I 多集中分布, 而特征带 B、E 和 H 趋于集中分布(图 6)。结合沉积相分析, 带 A、C、D 三个特

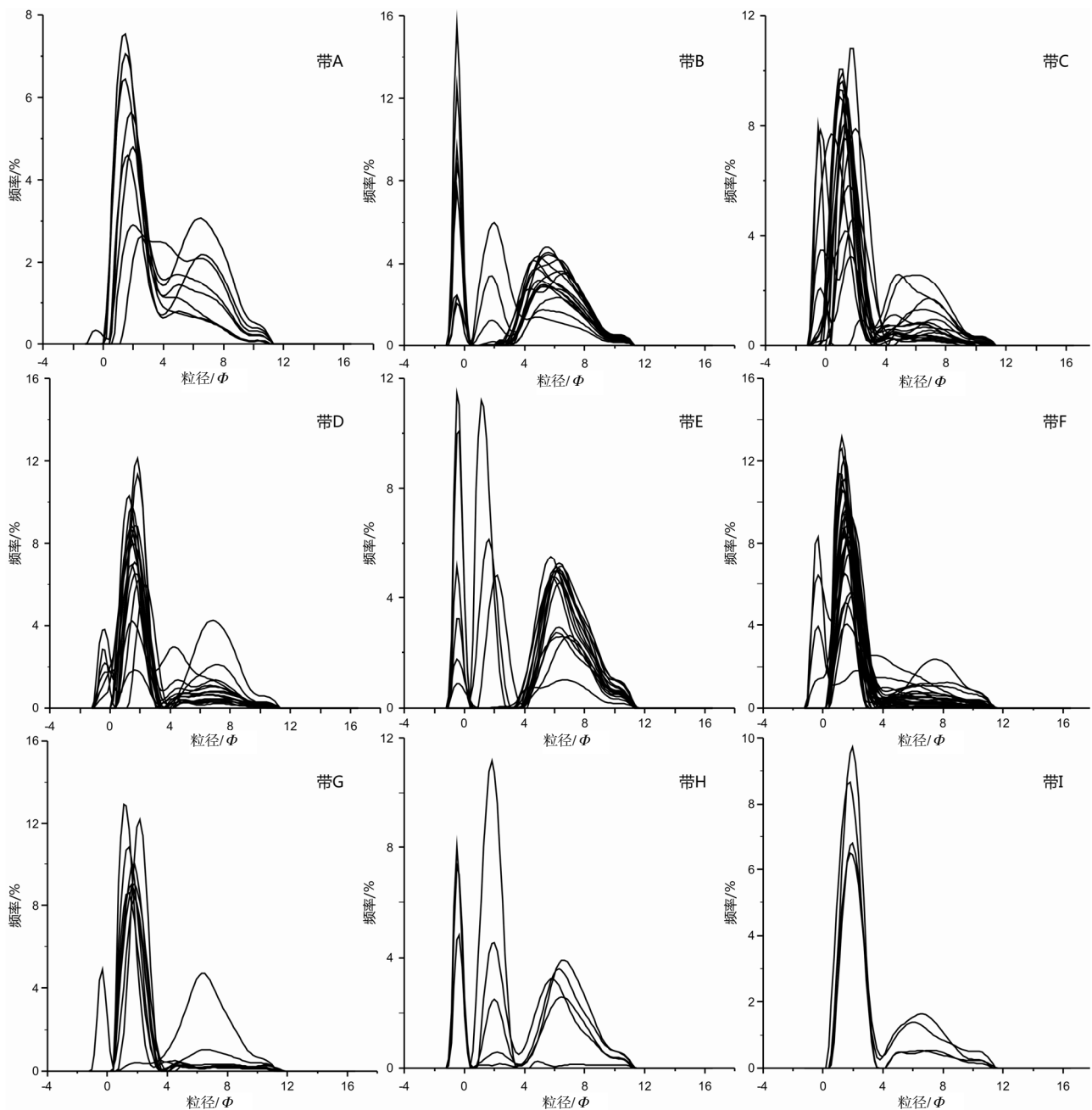


图5 PT01 钻孔粒度频率曲线

Fig.5 Frequency distribution curves of core PT01

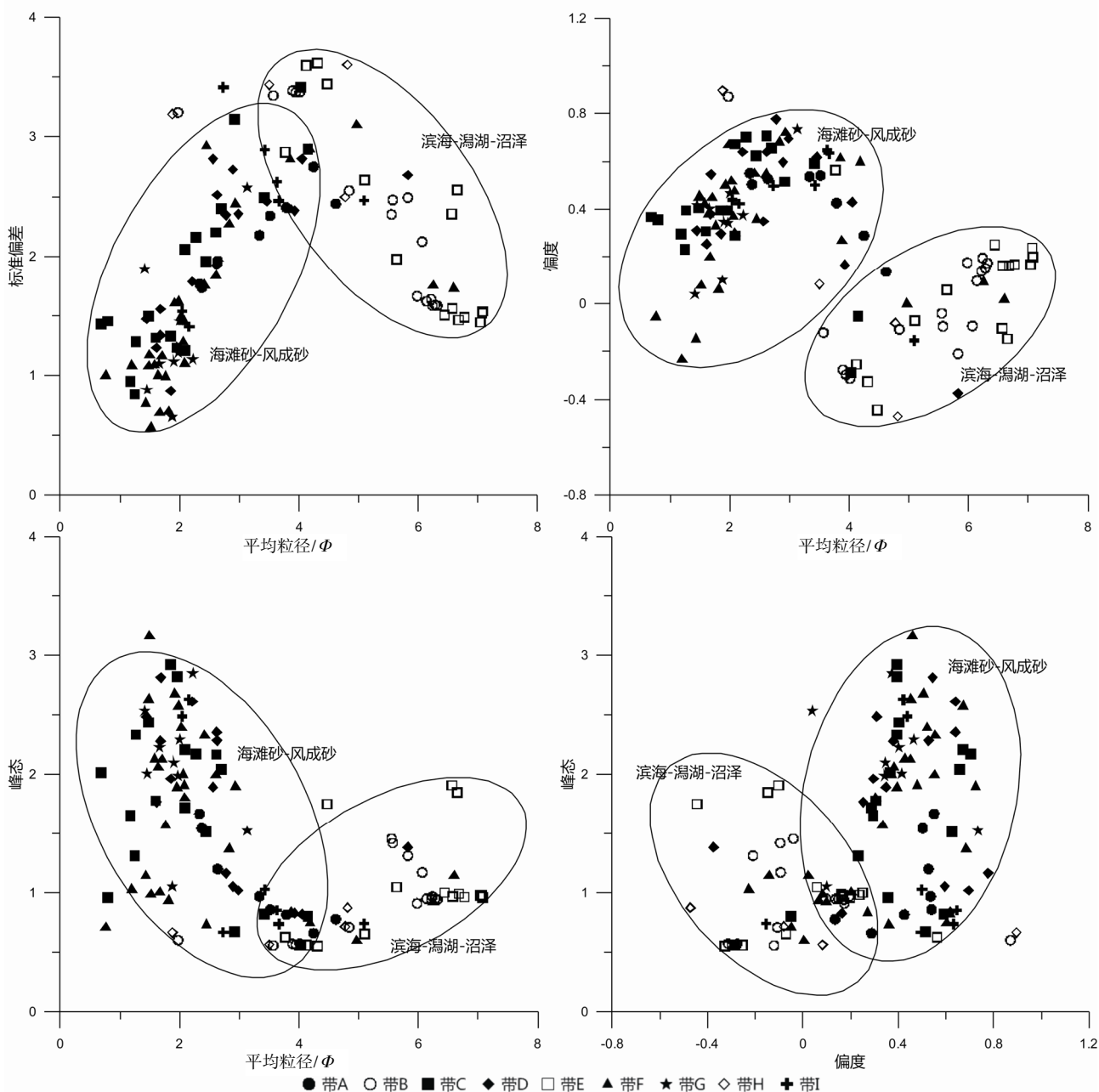


图 6 PT01 钻孔不同粒度参数散点图及其对应的沉积相

Fig.6 Plot of grain size parameters and corresponding sedimentary facies of core PT01

征带均为海滩或潮滩相沉积，受往复运动的潮汐动力影响，水动力条件较强，沉积物组分偏粗；另外根据前人的研究结果，海滩砂和现代砂丘砂由于具有较好的“亲缘关系”因而在参数散点图中难以区分^[37,39]，而 F、G 和 I 三个带均为风砂沉积，和带 A、C、D 趋于集中分布，这与前人的研究结果相一致。带 B 富含海相化石，指示水深 < 20 m 的潮下带滨海相环境，受潮汐波浪影响较小，水动力条件较带 A 明显偏弱，粒度组分偏细，因此与 A 在散点图中的

分布区域明显不同；同时，带 E 属于潟湖环境，带 H 属于滨海沼泽环境，同属于水动力条件较弱的沉积环境，与带 B 趋于集中分布。

3 区域沉积环境演变

福建平潭岛芦洋埔平原第四系沉积序列中的晚更新世海侵地层十分发育，相应地全新世沉积则十分薄。根据 PT01 钻孔的年代学和多指标古环境分析，该地的第四系沉积覆盖了 MIS 6 末期以来的沉

积序列,且主要沉积物年代为 MIS 1 和 MIS 5。可以认为:本区海相或潮间带各沉积相均与全球海平面变化关系密切,特别是与间冰期高海面时期相对应(见图3)。在 MIS 6,芦洋埔地区处于基岩出露和风化剥蚀阶段,至末期为河流冲积过程。随着 MIS 5 海平面的快速升高,在 MIS 6 沉积之上经短暂陆相堆积后接受海相沉积, MIS 5 的底部为潮滩相沉积,此后在 MIS 5e 全球高海面期水深达到最大,根据大量有孔虫和粒度等指标判断,该时期属于潮下带(< 20 m 水深)滨海相沉积环境,该沉积阶段的存在与平潭岛东北部青峰末次间冰期(约 125 ka)老红砂的发现^[40]可以对比。随后海平面下降,本地区沉积演变为潮滩,并在 MIS 5d 相对低海面期出露地表,遭受风化作用,沉积物呈现红褐色。MIS 5c 海平面重新上升但海洋生物十分少,水深应明显低于此前的 MIS 5e。推测在 MIS 5c 为潮滩相沉积,并在潮汐和海平面波动影响下,形成不同厚度的砂-泥互层的潮滩沉积序列。由于沉积物的淤积阻塞和海平面的波动,本地区在此阶段形成潟湖沉积,水动力条件偏弱,沉积物粒度变细,但在相对高海面时海水可能曾越过沙坝再次侵入本地区,沉积物中零星出现有孔虫化石。

在 MIS 5 期间,随着全球海平面波动变化,本区除了 MIS 5e 为潮下带沉积外,其余沉积相均指示潮间带一潮上带沉积,甚至可能多次出露地表,而遭受风化作用。如多层 a^* 值较高的红黄褐色沉积是这些海平面波动的证据。至 MIS 5a,本钻孔沉积物以风成砂沉积为主,并在顶底位置出现泥炭层,指示了海平面以上潮上带洼地沼泽及风成沉积的变化过程^[41]。本研究认为:末次冰期 MIS 2-4 因全球海平面仍在 -60 m 左右,特别是末次盛冰期全球海平面大幅下降,台湾海峡出现低海面,大部分出露为陆地^[42],平潭岛由于相对较高的地形,演变为丘陵地貌,因此缺失整个冰期阶段(MIS 2-4)的沉积,或者整个冰期阶段的沉积物厚度较薄,受本研究测年结果的限制,未能在各项替代指标中有明显的体现。

本区在全新世水深较浅,平潭岛海岸带不同于大型河口区的盆地断陷,因而在全新世高海面期并无厚层的海相沉积,仅为 3.79 m 的风成砂沉积和潮上带泥炭沼泽沉积组成,这些沉积对应于区域全新世相对高海面时期^[43-44]。

4 结论

1) 利用加速器碳同位素(AMS ^{14}C)和光释光

(OSL)测年的手段进行定年,并对 OSL 粗颗粒测年结果进行了低估校正,结合岩性、生物化石和沉积相分析,推测钻孔晚更新世厚层海相沉积层为末次间冰期高海面时期的产物。本研究综合运用多种年代学和沉积学手段,提升了准确重建平潭岛晚更新世以来沉积环境演变的可靠性。

2) 沉积物粒度分析在海岸带沉积环境演变的研究中表明:粒度参数和相关散点图等方法能较为准确地区分和指示不同的沉积环境和水动力条件。结合其他替代指标,能起到相互印证的作用。

3) 福建平潭岛芦洋埔地区沉积环境演变与海平面变化关系密切,从 MIS 6 末开始接受沉积,发育较厚层的末次间冰期(MIS 5)海相沉积层,期间仍有数次海平面波动。随着末次冰期(MIS 2-4)全球海平面下降,本区出露地表接受风化,或仅接受较薄层的陆相沉积,甚至在全新世相对高海面时期仅发育风成砂和潮上带泥炭沼泽沉积,并未出现全新世海相沉积。

致谢:衷心感谢评审专家提出宝贵的修改意见与编辑部老师的辛苦付出,以及中山大学地球科学与地质工程学院古环境室实验员王重在野外工作中的帮助。

参考文献:

- [1] CHAPPELL J, SHACKLETON N J. Oxygen isotopes and sea level[J]. *Nature*, 1986, 324 (6093): 134-140.
- [2] CHAPPELL J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6 (S3/4): 183-190.
- [3] WAELBROECK C, LABEYRIE L, MICHEL E, DUPLESSY J C, MCMANUS J F, LAMBECK K, BALBON E, LABRACHERIE M. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21 (S1/3): 295-305.
- [4] BARD E, HAMELIN B, FAIRBANKS R G. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130,000 years[J]. *Nature*, 1990, 346 (6283): 456-458.
- [5] CHAPPELL J, OMURA A, ESAT T, MCCULLOCH M, PANDOLFI J, OTA Y, PILLANS B. Reconciliation of late quaternary sea levels derived from Coral Terraces at Huon Peninsula with Deep Sea Oxygen isotope records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 141(1): 227-236.
- [6] LAMBECK K, CHAPPELL J. Sea level change through the last glacial cycle[J]. *Science*, 2001, 292 (5517): 679-686.
- [7] LAMBECK K, ESAT T M, EMMA-KATE P. Links between climate and sea level for the past three million years[J]. *Nature*, 2002, 419 (6903): 199-206.
- [8] SIDDALL M, ROHLING E J, ALMOQI-LABIN A, HEMLEBEN CH, MEISCHNER D, SCHMELZER I, SMEED D A. Sea-level fluctuations

- during the last glacial cycle[J]. *Nature*, 2003, 423 (6942): 853-858.
- [9] 杨怀仁, 陈西庆. 中国东部第四纪海面升降、海侵海退与岸线变迁[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5 (4): 59-80.
- [10] 蔡爱智, 龚金美. 海坛岛芦洋浦平原的海进沙与风沙层序[J]. *应用海洋学学报*, 1992, 11 (2): 112-117.
- [11] 蓝东兆, 张维林. 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.
- [12] 王绍鸿, 杨建明, 曾从盛, 吴学忠, 俞鸣同. 福建沿海晚更新世以来的海平面变化[J]. *台湾海峡*, 1994, 13 (2): 166-175.
- [13] 蓝东兆, 于永芬, 陈承惠, 谢在团. 福州盆地晚更新世海侵及全新世海面波动的初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986, 6 (3): 103-111.
- [14] 杨建明. 福建沿岸晚更新世末次海侵及其海平面的变化[J]. *海洋科学*, 1988 (5): 5-9.
- [15] 曾从盛. 福建晚更新世海侵问题探讨[J]. *热带海洋学报*, 1993, 12 (1): 39-45.
- [16] 杨建明. 闽江口晚第四纪海侵地层的研究[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 1993, 9 (1): 86-90.
- [17] 周定成, 孙全, 许志峰. 台湾海峡西部海域晚更新世 3 次“海侵”依据的探讨[J]. *应用海洋学学报*, 2011, 30 (3): 324-329.
- [18] 王雨灼. 福建省第四纪地层的划分[J]. *福建地质*, 1990, 9 (4): 289-306.
- [19] 陈方. 海坛岛第四纪地层及其沉积环境演变[J]. *海洋通报*, 1996, 15 (5): 53-60.
- [20] 陈方. 海坛岛的地貌及其发育演变[J]. *海洋通报*, 1994, 13 (6): 60-66.
- [21] 赵绍华. 平潭岛附近海域全新世以来沉积特征及古气候变化研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2012: 7-15.
- [22] 温小浩, 李保生, 孟洁, 杨庆江, 郑琰明, 牛东风, 王丰年, 蔡瑜杭. 150~20 ka BP 福建东部平潭岛海岸风成沉积的粒度特征及其环境意义[J]. *中国沙漠*, 2015, 35 (6): 1473-1482.
- [23] UDDEN J A. Mechanical composition of clastic sediments[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1914, 25: 655-744.
- [24] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *Journal of Geology*, 1922, 30 (5): 377-392.
- [25] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27 (1): 3-26.
- [26] REIMER P J, BAILLIE M G L, BARD E, BAYLISS A, BECK J W, BLACKWELL P G. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 2009, 51 (4): 1111-1150.
- [27] FUCHS M, STRAUB J, ZÖLLER L. Residual luminescence signals of recent river flood sediments: A comparison between quartz and feldspar of fine- and grain-sized sediments[J]. *Ancient TL*, 2005, 23 (1): 25-30.
- [28] HONG D G, MAN S C, HAN J H, CHEONG C S. Determination of sedimentation rate of a recently deposited tidal flat, western coast of Korea, using IRSL dating[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22 (22): 1185-1189.
- [29] MAUZ B, BAETEMAN C, BUNGENSTOCK F, PLATER A J. Optical dating of tidal sediments: Potentials and limits inferred from the North Sea coast[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5 (6): 667-678.
- [30] KIM J C, CHANG T S, YIS, HONG S S, NAHM W H. OSL dating of coastal sediments from the southwestern Korean Peninsula: A comparison of different size fractions of quartz[J]. *Quaternary International*, 2014, 384: 82-90.
- [31] LISIECKI L E, RAYMO M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20 (1): 1-16.
- [32] 类彦立, 李铁刚. 奥茅卷转虫 *Ammonia aomoriensis* (Asano, 1951) 与毕克卷转虫 *Ammonia beccarii* (Linnaeus, 1758) (有孔虫) 的分类学以及在黄东海分布的温盐深特征比较研究[J]. *微体古生物学报*, 2015, 32 (1): 1-19.
- [33] ZONG Y. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China[J]. *Quaternary International*, 2004, 117 (3): 55-67.
- [34] 赵泉鸿, 汪品先. 中国浅海现代介形虫的数量和属种分布[J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19 (6): 553-561.
- [35] 刘春莲, Franz T Fursich, 董艺辛, 车晓光, 陈亮, 庄畅. 珠江三角洲 PRD05 孔的高分辨率介形类记录与晚第四纪古环境重建[J]. *古地理学报*, 2008, 10 (3): 313-322.
- [36] 王建, 柏春广, 徐永辉. 江苏中部淤泥质潮滩潮汐层理成因机理和风暴沉积判别标志[J]. *沉积学报*, 2006, 24 (4): 562-569.
- [37] 胡凡根, 李志忠, 靳建辉, 赵倩, 张辉, 王贤立, 夏菁. 福建东部海坛岛老红砂敏感粒度组分对东亚冬季风演变的响应[J]. *中国沙漠*, 2013, 33 (2): 443-452.
- [38] 黄镇国, 宗永强. 应用粒度参数区分沉积相——以珠江三角洲为例[J]. *热带地理*, 1982, 2 (2): 37-42.
- [39] 唐丽, 董玉祥. 华南海岸现代风成沙与海滩沙的粒度特征差异[J]. *中国沙漠*, 2015, 35 (1): 14-23.
- [40] 俞鸣同, 张红艳, 龚正权, 陈有喜, 王佳韡, 张熠, 胡绍洁, 吴惠. 福建平潭青峰老红砂中季风组分以及形成期研究[J]. *地理科学*, 2014, 34 (3): 352-357.
- [41] 巫锡良. 福建沿海泥炭的成因分析[J]. *热带地理*, 1987, 3 (3): 219-227.
- [42] 黄镇国, 张伟强, 蔡福祥, 徐起浩. 华南末次冰期盛期最低海面问题[J]. *地理学报*, 1995, 50 (5): 385-393.
- [43] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 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: 化学生命科学地球学)*, 1992, 22 (12): 1300-1308.
- [44] 张伟强, 黄镇国. 台湾沿岸全新世海平面波动[J]. *热带地理*, 1996, 16 (3): 226-235.

Late Quaternary Sediment Stratigraphy and Marine Cycles in the Pingtan Island, Fujian Province

CHEN Cong¹, WAN Qiuchi¹, ZHENG Zhuo¹, YU Fengling^{2,3}, A SWITZER², WAN Yixing¹

(1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Earth Observatory of Singapore, Nanyang Technology University, Singapore 639798, Singapore;

3. College of Ocean and Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A 28.3 m long core, PT01, from the Pingtan Island, Southeast China, is selected to be studied. Radiocarbon dating (AMS ¹⁴C) and optical stimulated luminescence (OSL) are used for establishing chronology. Combining age-dating results with marine microfossil and color index, we classify the Late Quaternary sediment stratigraphy in the coastal region of Fujian Province. It is suggested that the late Pleistocene marine deposit, dated back to 124 ka, and abundant marine microfossil (e.g. foraminifer and ostracods), would belong to the Marine Isotope Stages 5(MIS 5). Moreover, the late Quaternary sediment could be divided into three units based on the analysis of lithology, microfossil, grain size and color index. Our results reveal that the sediment environment during the MIS 5 was significantly controlled by global sea level change which varied among coast, tidal flat, lagoon, and eolian sand, and probably there existed weathering process. A hiatus during the last glacial (MIS 2-4) was attributed to low relative sea level. And the Holocene deposit, as thick as 3.79 m, developed poorly and was mainly comprised of swamp facies and eolian dune.

Key words: the Pingtan Island; Late Quaternary; sediment environment; marine cycles; MIS 5

(上接第 405 页)

Abstract ID: 1001-5221 (2016) 03-0399-EA

New Insight on the Marine Deposit in the Southern Hainan Island

WANG Mengyuan^a, ZHENG Zhuo^{a,b}, HUANG Kangyou^a, ZHANG Yimeng^a

(a. School of Earth Science and Geological Engineering; b. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on AMS ¹⁴C and optical stimulated luminescence dating of core TLG01 from Tielu Harbor of Sanya in southern Hainan Island, this study comprehensively analyzes lithology, sediment grain size, color index, marine macrofossil and foraminifer indexes. The upper marine deposit belonging to the Holocene is thin that is interpreted as tidal sand flat. Whereas, the lower marine deposits, as thick as 38 m, are dated to MIS 5e and 5d according to optical stimulated luminescence dating. The late Pleistocene transgression-regression sequences are as follows: tidal sand flat-subtidal-tidal mud flat-tidal sand flat. The species of Mollusca living in deep-water condition are identified in late Pleistocene marine layer. The species identification and their related habitats make possible to restore the sedimentary facie. In MIS 5e, the content of silt and clay sharply increased followed by a decrease trend at MIS 5d. Sediment grain size, foraminifera abundance and sediment color index L* show that the highest sea level appeared at the beginning of MIS 5e, while from MIS 5e to MIS 5d, the sea level was lowered, accompanied by the increase in terrestrial coarse sand, indicating relative low sea level toward MIS 5d. The triangular plots of interglacial periods MIS 1 and MIS 5 are respectively consistent with modern surface sediments from the island intertidal zone of Zhanjiang and the South China Sea.

Key words: the Hainan Island; MIS 5; sedimentary facies; sea level change index