

近 40ka 来海南岛海岸沙地气候与环境演变

李 森^{1,2}, 廖肖霞³, 王贵勇¹

(1 佛山大学资源与环境科学研究所, 佛山 528000;

2 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 3 佛山市顺德一中德胜学校, 佛山 528300)

摘要: 选择海南岛东、西海岸具有代表性和高分辨率特征的木堆、棋子湾等地层剖面, 在建立年代序列的基础上, 对风成沙粒度组成与参数、SC/D 值及磁化率等代用指标的研究表明, 末次冰期间冰阶时气候相对温暖, 滨海平原上河流三角洲前移, 湿地、沙丘与交错分布; 末次盛冰期时气候干凉, 海岸沙地上形成了多道平行延伸的古沙垄(丘), 并与大陆架古沙丘形成连续性沉积; 末次冰消期时气候快速变化, 古沙垄(丘)或加积发育或固定成壤; 全新世以来气候回暖并波动变化, 次生沙丘经历多次半固定、固定-沙丘加积、活化的演变。

关键词: 40ka 以来; 海岸沙地; 古风成沙; 气候与环境演变; 海南岛

文章编号: 1000-0585(2009)05-1235-08

海岸带是海-陆-水-气等各种动力作用最迅速、最敏感的地带, 海岸沙地是这个特殊环境中由海、风、水等营力作用形成的沙物质堆积体, 其中, 海岸风成沉积是海岸动力地貌系统与沉积系统的重要组成部分, 也是海岸沙地环境演变的重要信息载体。有关海岸带的研究表明, 晚更新世晚期以来全球发生多次海侵与海退, 仅在南海北部大陆架就遗留了-155m、-130m、-50m 和-20m 等多道古海岸线, 使周边海岸环境发生重大变化^[1~10]。但是, 上述研究一是集中于海洋及大陆架环境演变的研究^[4~10], 二是集中于海岸沙丘的形成与海平面升降关系的研究^[11~17], 对海岸沙地千年、百年尺度气候与环境变化的研究则较少, 国内尤其如此。

利用海岸沙地的风成沉积记录探讨海岸沙地气候与环境演变过程是环境演变研究的一个重要途径^[1,2]。本文以海南岛周边海岸沙地为研究区域, 选取海岸沙地有代表性和高分辨率特征的文昌木堆、昌江棋子湾和昌化中角等风成沉积剖面, 在对风成沙地层精确测年的基础上建立年代序列, 通过对风成沉积粒度、磁化率等代用指标的分析, 重建近 40ka 来海南岛海岸沙地的气候与环境演变过程。这不仅对认识末次冰期以来海南岛海岸沙地的环境演变过程及其对全球变化的响应将提供新的证据, 而且对回答南海北部海平面升降对海南岛海岸沙地的影响, 揭示该海岸带海陆相互作用的机理都有重要意义。

1 风成沙地层剖面岩性岩相特点及年代序列

1.1 风成沙剖面的岩性岩相特点

海南岛是位于南中国海北部的近岸大陆岛^[18], 全岛形成中部高周边低的环形层状地形, 山地、丘陵、台地、平原层层衔接, 逐级递降。海南岛周边沙质海岸线长达

收稿日期: 2009-04-30; 修订日期: 2009-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40671186)

作者简介: 李森 (1948-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博导。主要从事环境演变与沙漠化研究。

E-mail: fslisen@163.com

981 95km, 占全岛海岸线总长度的 76%。在宽约 1~ 3km 的滨海平原上, 普遍堆积了较厚的风成沙, 总面积达 885km²[19]。其中, 东北海岸沙地面积达 400km²之多[20], 主体为加积性横向沙丘和抛物线沙丘, 呈热带季雨林与沙丘景观。西海岸沙地面积达 210km²[21], 主体为纵向沙垄及横向沙垄, 呈热带稀树干草原与沙丘景观 (图 1)。

木堆剖面位于文昌市木堆村东的横向沙垄丘间地内 (19 41 31 1 N, 110 59 3 3 E), 东距海岸线 2 5km(图1)。剖面厚度> 6 62m, 形成 湖相沉积 丘间地风水两相沉积 古土壤- 风成沙沉积序列。自上而下分为: 层灰白色- 灰黄色风成沙, 风成加积纹层明显, 厚度 1 04m; 层黄褐色弱沙质古土壤, 质地较粘重, 厚度 1 20m; 层为浅黄色- 灰褐色中- 细沙, 浅黄色沙与褐色沙形成互层或交错状分布, 系丘间地风水两相沉积物, 厚度 0 96m; 层为浅灰白色- 浅灰黄色中- 细沙, 含较多的粉沙、粘土, 为湖相沉积物, 厚度> 3 42m, 未见底。在本剖面各层位采取 6 个 OSL 样品测年, 测定年龄在 6 4 0 82 kaB P ~ 38 7 1 4kaB P 间 (图 2)。

棋子湾剖面位于昌化江入海口东北 (19 21 37 N, 108 41 40 E), 北距海岸线约 0 5km (图 1), 剖面厚度> 7 2m, 形成风成沙- 洪积相- 风成沙- 弱质古土壤沉积- 风成沙沉积序列。自上而下为: 层浅黄色中- 粗风成沙, 风成交错层理明显, 厚度 2 5m; 层浅黄色- 灰黄色含砾粗沙, 系洪积相沉积, 厚度 0 2m; 层浅黄色中- 粗风成沙, 可见大型高角度板状斜层理, 厚度 2 3m; 层浅黄色中沙, 弱成壤, 弱胶结, 厚度 0 3m; 层浅灰黄色- 棕色- 暗黄橙色中- 粗沙风成沙, 顶部弱胶结, 具大型板状斜层理, 底部红化明显。本层厚度> 1 9m。在各层位采取 4 个 TL 样品测年, 测定年龄在 10 3 1 30kaB P ~ 32 10 3 30kaB P 间 (图 2)。

昌化中角剖面位于棋子湾西南 (19 20 28 4 N, 108 40 30 2 E), 西距海岸线约 0 2km (图 1)。剖面上部为灰黄色中- 细沙, 系草灌丛沙丘加积形成, 无层理, 厚度> 3 3m。距顶部 0 6m、1 85m、3 3m 处, TL 年龄分别为 4 75 0 44kaB P 、5 90

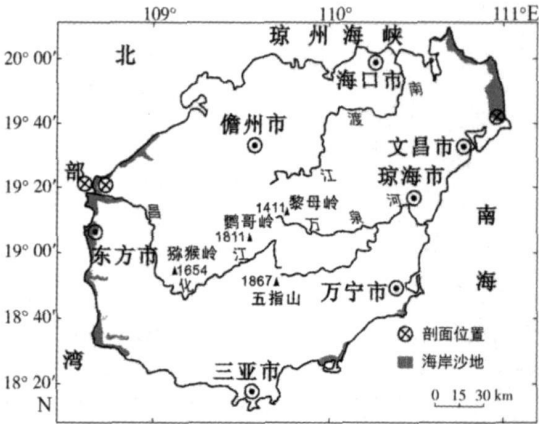


图 1 海南岛海岸沙地范围及典型风成沙剖面位置图
Fig. 1 The scope of coastal sand and the location of typical aeolian section of Hainan Island

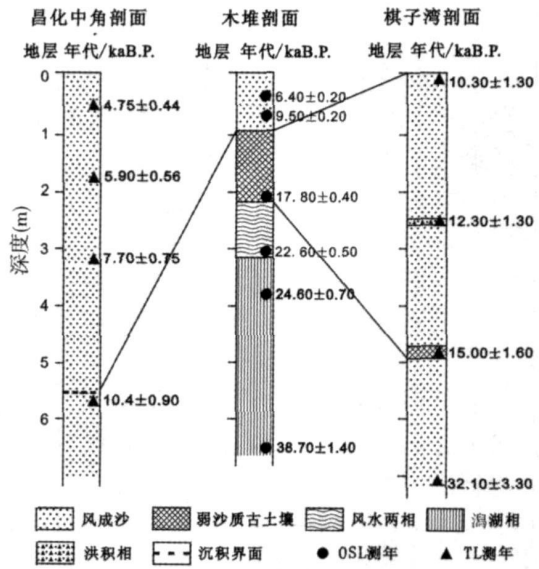


图 2 海岸岛海岸沙地典型风成沙沉积剖面
Fig. 2 Typical coastal aeolian sedimentary section of Hainan Island

0 56kaBP 和 7 77 0 75kaBP ; 下部为灰黄色风成沙, 系纵向沙垄前积形成, 风成沙厚度> 2 5m, 顶界 TL 年龄 10 4 0 9kaBP 。二者假整合接触 (图 2)。

1 2 年代序列

根据以上剖面地层的 OSL、TL 测年数据 (图 2), 结合相关研究成果^[3~ 11, 22], 本文初步建立了海南岛海岸沙地演化的年代序列: 约 40ka~ 24kaBP 为末次冰期间冰阶, 24~ 15kaBP 为末次冰期冰盛期阶段, 15ka~ 10 0kaBP 为末次冰期冰消期阶段, 10 0kaBP 至今为全新世阶段。

2 风成沙记录的气候与环境演变的证据

野外对木堆剖面 0~ 5 46m 按 2cm 等间距连续采样, 5 46m 以下按 4cm 等间距连续采样, 共采集 302 个粒度样品和 8 个介形虫样品; 对棋子湾剖面和昌化中角剖面按 10cm 和 5cm 等间距连续采样, 分别采集 72 个和 66 个粒度样品。在室内采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 激光粒度仪对粒度样品进行分析; 用 Bartington MS-2 型磁化率仪对木堆和昌化中角剖面每个样品平行测量 3 次, 分别获得 598 组和 198 组磁化率数据。

2 1 粒度证据

风成沙颗粒组分变化反映风力强弱的变化, 特别是粗颗粒的多寡指示着沙尘与粉尘由物源区向沉积区输送的强度, 因而粒度变化是冬季风风场强度及粉尘源区干燥度的有效指标^[23]。敏感指标 SC/D 值 (粉沙、粘粒之和与沙的比值), 放大了> 4 32 / < 4 32 (颗粒物质的比例关系, 可更好地说明地质时期风沙活动的强弱变化^[24]。

木堆剖面中沙含量最高, 次为细沙, 再次为粗沙、极细沙、粉沙、粘土, 平均含量依次为 45 50%、33 89%、9 31%、0 98%、5 89% 和 4 43%。其中, 层风成沙 M_z 介于 1 60~ 1 95 之间, 平均值为 1 70 , 为 0 67~ 2 02 , SC/D 值呈现由高- 低、低中略有波动的变化, 表明是分选中等- 较差的风成沙, 沉积时暖湿- 凉湿气候交替; 层弱沙质古土壤的 M_z 、 σ_1 平均值为 1 81 和 1 18 , SC/D 值为 0 03~ 0 2, 曲线峰谷交替, 表明古土壤平均粒径较细, 分选较差, 沉积时气候出现干凉- 暖湿- 干凉- 升温- 干凉的频繁气候波动; 层风水两相沉积的 M_z 、 σ_1 平均值分别为 1 61 和 0 62 , SC/D 值为零, 表明沉积物粗颗粒含量增大, 分选较好, 沉积时气候干冷; 层泻湖相的 M_z 介于 1 68 ~ 3 50 , σ_1 介于 0 72~ 2 96 , 属于粒级变化大、分选中等- 差的沉积物, SC/D 值呈现高- 低- 高- 低- 高的变化, 指示沉积时气候暖湿, 并有强- 弱- 强- 弱- 强的变化 (图 3)。

棋子湾剖面以中沙、粗沙含量居多, 二者平均含量分别为

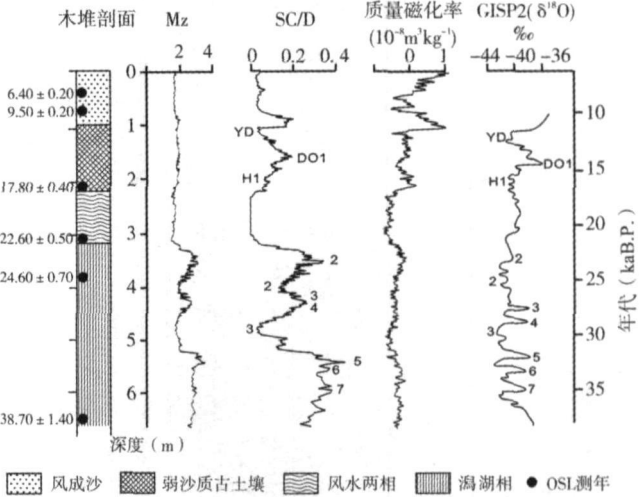


图 3 木堆剖面粒度及磁化率曲线与 GISP2 ¹⁸O 曲线^[25]对比
Fig 3 Comparison of grain size and susceptibility curves of Mudui section with GISP2 ¹⁸O curve^[25]

36.77%和44.13%。其中、
层的 M_z 值集中在 0.9~1.5 间， $\delta^{18}O$ 在 0.4~1.0 间，与现代风成沙的 M_z (0.97~1.67) 与 $\delta^{18}O$ (0.44~0.79) 有相近的相位。各层的 SC/D 值均较低，
层甚至为 0，指示、
层沉积时气候干凉。而层、层的 M_z 分别为 0.52 和 1.96，
分别为 1.14 和 1.43，SC/D 值分别为极低和极高值，表明层沉积时降水增多有利于形成洪积物，层沉积时气候温湿有利于成壤(图 4)。

昌化中角剖面的 M_z 介于 1.34~2.48 之间，平均值为 1.82，属中沙；
 $\delta^{18}O$ 介于 0.27~0.90 之间，平均值 0.49，SC/D 值波动变化于 0.01~0.07 间，并两次达到 0.13~0.14 的峰值。显示该剖面沙物质相当均一旦风选良好，沉积时夏季风增强，气温回升，并有多次冷-暖-冷-暖的波动变化(图 5)。

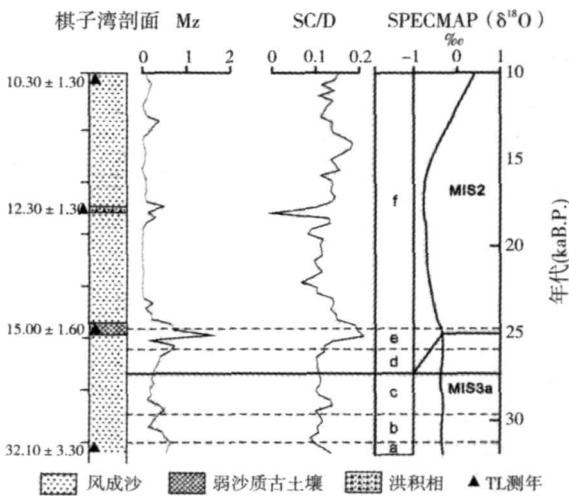


图 4 棋子湾剖面粒度及 SC/D 变化曲线
Fig 4 Curve of grain size and SC/D of Qiziwan section

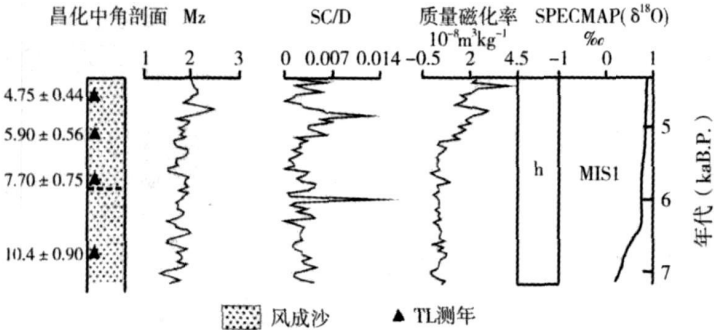


图 5 昌化中角剖面粒度及磁化率变化曲线

Fig 5 Curve of grain size and susceptibility curves of Changhuazhongjiao section

2.2 磁化率证据

磁化率是对沉积物中铁磁化矿物相对含量的度量。由于磁化率主要与暖湿、寒冷气候影响下导致成壤强度差异引起的铁磁性物质(磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿等)含量的稀散和富集有关，其值在一定程度上能直接反映成壤强度和沙尘的堆积速率，间接反映降水量及古季风强度^[26]，因此，磁化率值可作夏季风强弱的替代指标。

木堆剖面、
层质量磁化率平均值分别为 0.29、-0.16、-0.54、-0.37 $10^{-8} m^3 kg^{-1}$ 。层磁化率迅速达到高值 (1.13 $10^{-8} m^3 kg^{-1}$) 后降低，波动较多；
层磁化率值逐渐升高并出现由低-高-低-高的波动，层磁化率值普遍很低并达到最低值 (-0.72 $10^{-8} m^3 kg^{-1}$)，层磁化率值变化平缓。这指示在末次冰期间冰阶夏季风较弱，盛冰期夏季风很弱，末次冰消期夏季风逐渐增强并有多次强-弱波动，至全新世夏季风迅速增强，尔后又有多次波动(图 3)。

昌化中角剖面各层质量磁化率介于 $-0.08 \sim 3.96 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 全样平均值为 $0.85 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 。该曲线约在 70kaBP 时降低, 50kaBP 时升高, 后期波动较多, 指示气候冷-暖-波动变化(图 5)。

2.3 介形虫证据

由于海洋沉积物中的微体古生物分布广、繁衍快, 对环境变化的反映较灵敏, 因而是沉积环境的重要指征。木堆剖面的层~层沉积地层均未发现介形虫化石, 表明在末次冰期间冰阶以来, 海南岛东海岸的泻湖与海洋已脱离水文联系, 湖水位由深变浅并演变为沙丘间地, 海岸带一直为陆相沉积环境。

3 海岸沙地气候与环境演变过程

3.1 末次冰期间冰阶(约 40ka~24kaBP)

这一时期相当于 MIS-3a 阶段。由泻湖相和风成相沉积的细颗粒含量从高到低、分选程度变差、SC/D 出现波动、木堆磁化率偏低等证据表明, 这一时期海南岛周边海岸气候相对温暖, 出现暖湿(约 40ka~31kaBP) - 暖干(31ka~27kaBP) - 暖湿(27ka~25kaBP) - 暖干(25ka~24kaBP) 交替变化, 尤其在 35ka~24kaBP 南海北部发生第 8 次海侵(礼乐海侵), 海平面比现今海平面下降 $8 \sim 10 \text{ m}^{[8]}$ 。在海南岛以东、以南、以西范围不宽的滨海平原上, 形成了河流三角洲前移, 湿地、沙丘与交错分布的格局。暖湿期夏季风带来较多的降水, 使湖处于高水位, 沉积物较细, 海岸风沙活动较弱, 古沙丘缩小、固定。暖干期夏季风携带的降水减少, 湖水位降低沉积物颗粒变粗, 海岸风沙活动加强, 古沙丘活化、扩展。

3.2 末次冰期冰盛期阶段(24ka~15kaBP)

这一时期相当于 MIS-2 阶段前期。由古风成沙和风水两相沉积的分选好、粗颗粒含量急速增加、 M_z 降至谷值、SC/D 偏低甚至为 0、木堆磁化率由高到极低、无介形虫等证据表明, 24ka~15kaBP 本区进入末次盛冰期(LGM)。此时, 岭南及粤东北由红土沉积转变为棕黄色粉砂沉积, 出现澎湖动物群, 气候带演变为暖温带^[27], 本区亦演变为中亚热带气候, 冬季风强盛, 气候干凉, 海平面大幅度下降, LGM 最盛时南海北部海平面下降至 $-155 \text{ m}^{[10]}$, 海南岛与周边大陆架连成一片广阔的陆地。在冬季风的寒潮大风作用下, 大陆架上的残留沙不断向下风向搬运、堆积, 在大陆架上形成大面积多种形态的古沙丘, 并在(现今)岛东北、东、西南和岛西的海岸沙地上形成了多道平行延伸的古沙垄(丘), 垄(丘)间地则形成风水两相沉积物, 大陆架与海岸带古沙垄(丘)属于连续性沙丘沉积。据研究, 冰盛期大陆架上主要发育中旱生草原或草坡, 在沼泽湿地上有莎草科、禾本科生长, 在河谷等水暖条件较好的小气候环境中, 仍然保留喜暖的热带-亚热带植物^[28], 海岸沙地的植被与大陆架植被应是一致的。至冰盛期末(17ka~15kaBP), 气候转为温湿, 南海北部海平面回升至 $-131 \text{ m}^{[6]}$, 海岸沙地的古沙垄(丘)向半固定、固定发展。

3.3 末次冰期冰消期阶段(15ka~10kaBP)

这一时期相当于 MIS-2 阶段后期。由木堆及棋子湾剖面 M_z 、SC/D 值、磁化率有增大趋势且变化频繁等证据也表明, 此时海南岛海岸出现干凉-暖湿-干凉-升温-干凉的气候冷暖波动, 冷暖波动分别对应老仙女木冷期(15ka~13.2kaBP)、波令暖期(13.8ka~12.8kaBP)、中仙女木冷期(12.4ka~11.7kaBP)、阿勒鲁德暖期(12.5ka~12kaBP)、IACP 期(12ka~11.8kaBP)和新仙女木冷期(11.5ka~10.0kaBP)

等事件,这与南海北部、东亚季风区西北缘在末次冰消期出现 6 次气候快速变化事件^[29,30]是一致的。在老、中仙女木等冷期,海岸沙地的古沙垄(丘)继续加积、发育,但与冰盛期相比其沉积范围缩小;在波令、阿勒罗德等暖期,气候变暖,降水增加,海岸沙地的古沙丘固定,丘间地成壤,并在西海岸出现风成沙成壤和泛洪沉积。约在阿勒罗德暖期,南海北部海平面已回升到-50m,并有一短暂的停顿^[5]。至新仙女木期(Younger Dryas)冬季风再次强盛,突变干冷,其寒冷程度与冰盛期相当,在-50m 古海岸线与现今海岸带之间的海岸平原上古沙丘再次发育。

3.4 全新世(10 kaBP 至今)

这一时期相当于 MIS-1 阶段。从木堆剖面和昌化中角剖面风成沙的细颗粒含量增加、SC/D 值上升、磁化率值增大等可知,全新世本区经历了气温升高-由暖变凉-再次变暖-小冰期等变化。进入全新世后夏季风迅速加强,气候向暖湿转变,约 8ka 南海海平面迅速上升并逐渐形成现代海洋环境。在 10ka~7 kaBP 时气候暖湿,海岸沙地上风沙活动减弱,古沙垄(丘)上加积作用较弱,在其上或前缘形成固定、半固定状的草灌丛沙丘、抛物线沙丘、新月形沙丘等次生沙丘;7ka~6kaBP 时气候由暖变凉,风沙沉积活跃,流沙蔓延;6kaBP 后进入全新世大暖期,次生沙丘再次向半固定、固定方向发展;4kaBP 左右进入气候波动期,并在 0.5ka~0.1kaBP 进入小冰期,风蚀速率大于沉积速率,风成沙的粗颗粒组分增大,草灌丛沙丘活化^[21]。

4 结论

(1) 选择木堆、棋子湾和昌化中角等典型风成沙剖面,在精确定年的基础上初步建立了海南岛海岸沙地演化的年代序列。对风成沙的粒度组成与参数、SC/D 值及磁化率等代用指标的研究表明,海南岛海岸沙地在末次冰期间冰阶时气候相对温暖,暖湿-暖干交替变化,在海岸平原上形成河流三角洲前移,湿地、沙丘与交错分布的格局;盛冰期时气候极度干凉,海平面大幅度下降,海岸带古沙丘广泛发育,并与大陆架的古沙丘连形成连续性沉积;末次冰消期时出现气候快速变化为特征的 6 次冷、暖波动事件,古沙丘或加积发育或固定成壤;全新世以来经历了气温升高-由暖变凉-再次变暖-小冰期等变化,次生沙丘也经历了半固定、固定-流沙沉积、蔓延-半固定、固定-加积、活化的演变。

(2) 近 40kaBP 来海南岛海岸沙地气候、环境演变过程与高分辨率的格陵兰 GISP2 冰芯 GISP2 ^{18}O 曲线进行比较^[25],替代指标曲线可以对比,表明中低纬度区域与同期高纬度区域的气候是同相位变化的(图 4)。并且,海南岛海岸沙地的演变与全球海平面升降总的变化是一致的^[7,31],即冰期低海面是海岸风成沙发育期,间冰期高海面则是海岸风成沙衰退期。这与中国海岸风成沙年龄在 $7 \times 10^5 \text{ a}$ 内,20.0ka~12.0kaBP 为海岸风成沙发育期、12.0ka~2.5kaBP 为海岸风成沉积衰减期、2.5kaBP 至今又为海岸风成沉积发育期的结论大体一致^[22]。这表明,至少在末次冰期间冰阶以来北半球中低纬度与高纬度地区就受同一气候系统的影响,使海南岛海岸沙地与中国海岸沙地甚至全球海岸沙地有相似的演变过程。

致谢:光释光样品由国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心赵华、王成敏女士测试,热释光样品由中国科学院广州地球化学研究所卢良才先生测试,介形虫样品由天津地质矿产研究所王强先生分析。颜晋聪、黎志伦、刘妙容硕士参加了野外和室内工作,谨此致谢。

参考文献:

- [1] 董玉祥 国外海岸沙丘形成与演化的研究 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 93~ 98.
- [2] 张永战, 朱大奎 海岸带- 全球变化研究的关键地区 海洋通报, 1997(3): 69~ 80.
- [3] 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 第四纪研究, 1996, 16(1): 31~ 41 .
- [4] Bowler, J M Aridity in Australia: age, origin and expression in aeolian landform and sediments Earth Sci Rev, 1976, 12: 279~ 310.
- [5] 陈俊仁, 冯文科, 赵希涛, 等 南海北部- 50m 古海岸线的初步研究 地理学报, 1983, 38(2): 176~ 187.
- [6] 陈欣树, 包砺彦, 陈俊仁, 等 珠江口外陆架晚第四纪最低海平面的发现 热带海洋, 1990, 9(4): 73~ 77.
- [7] 汪品先 冰期时的中国海 第四纪研究, 1990, (2): 111~ 124.
- [8] 施雅风, 于革 40~ 30kaB P 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨 第四纪研究, 2003, 23(1): 1~ 11
- [9] 赵松岭, 于洪军, 等 晚更新世末期陆架沙漠化环境演化模式的探讨 中国科学(D 辑), 1996, 26(2): 142~ 146.
- [10] 吴正, 冯文科, 廖秉良, 等 晚更新世末期南海北部大陆架的古地理探讨 地理学报, 1993, 48(6): 491~ 497
- [11] 吴正, 吴克刚, 黄山, 等 华南沿海全新世海岸沙丘研究 中国科学(B 辑), 1995, 25(2): 211~ 218
- [12] 董玉祥, 马骏, 黄德全 河北昌黎黄金海岸横向沙脊表面的粒度分布模式 地理研究, 2008, 27(4): 725~ 733
- [13] Pye K Models of transgressive coastal dune building episodes and their relationship to Quaternary sea level change: A discussion with reference to evidence from eastern Austral In: Clark M W ed Coastal Research: UK Perspectives GEO Book Regency House, 1984, 81~ 104
- [14] Len Vacher Coastal dunes of Younger Bermude Coastal Geomorphology, 1980, 355~ 392
- [15] Quigley M B A guide to the sand dunes of Ireland Galuay Ireland, 1991, 1~ 37
- [16] 李从先, 陈刚, 杨红君 福建海岸的风成沉积 中国沙漠, 1989, 4(1): 20~ 25
- [17] 王颖, 朱大奎 海岸沙丘成因的讨论 中国沙漠, 1987, 3(2): 13~ 17
- [18] 刘锡清, 刘洪滨 关于海洋岛屿成因分类的新意见 地理研究, 2008, 27(1): 120~ 127
- [19] 朱震达, 刘恕, 邱醒民 中国的沙漠化及其治理 北京: 科学出版社, 1989. 234~ 248.
- [20] 吴正, 吴克刚 海南岛东北部海岸沙丘的沉积构造特征及其发育模式 地理学报, 1987, 42(2): 129~ 141
- [21] 李森, 孙武, 李凡, 等 海南岛西部热带沙漠化土地特征与成因 地理学报, 2005, 60(3): 433~ 444
- [22] 业渝光, 刁少波, 和杰, 等 中国海岸风成沙 ESR 测年的研究 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 488~ 493
- [23] Porter S C, An Zhisheng Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glacial Nature, 1995, 375: 305~ 308
- [24] 余雪飞, 李保生, 等 末次间冰期全球变化区域响应的粒度旋回))) 萨拉乌苏河流域米浪沟湾剖面记录 华南师范大学学报(自然科学版), 2004, (1): 129~ 135
- [25] Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T H The GISP2^{δ18} climate record of the past 16500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes Quaternary Research, 1995, 44: 344~ 351
- [26] An Z S, Ku Klai J C, Porter S C, et al Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess Plateau Quaternary Research, 1991, 36(1): 2~ 36
- [27] 李保生, 温小浩, David Dian Zhang, 等 岭南粤东北地区晚第四纪红土与棕黄色沉积物的古气候转变记录 科学通报, 2008, 53(22): 2793~ 2800
- [28] 孙湘君, 陈旭东, 罗运利, 等 末次冰盛期低海面时南海南北陆架上的植被 1 植物学报, 1999, 41(9): 1016~ 1023
- [29] 王律江, 卞云华, 汪品先, 等 南海北部末次冰消期及气候快速回返事件 1 第四纪研究, 1994, (1): 1~ 12
- [30] 李森, 强明瑞, 李保生, 等 末次冰消期东亚季风区西北缘气候快速变化事件 1 地质论评, 2004, 50(1): 106~ 112
- [31] 赵希涛 全球海面变化 1 北京: 科学出版社, 1992. 38~ 43.

Climatic and environmental changes in the coastal sandy land of Hainan Island in recent 40 ka

LI Sen^{1,2}, LIAO Xiao-xia³, WANG Gui-yong¹

(1. Institute of Resources and Environment Science, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China;

2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

3. Desheng School of Shunde No.1 Middle School, Foshan 528300, Guangdong, China)

Abstract: In this study, with the coastal sandy land of Hainan Island as the research object, the representative and high-resolution stratigraphic sections including Mudui, and Qiziwan sections etc. in the eastern and western coasts of Hainan Island were selected to investigate the climatic and environmental variations of the coastal sandy land in recent 40 ka. Based on the accurate OSL and TL dating the chronologic sequence was reconstructed. The studies on the proxy indicators such as the composition and grain-size parameters of aeolian sand, SC/D value and susceptibility etc. show that during the interstadial of last glaciation the climate was relatively warm, the sea level fell by $-8 \sim -10$ m, and an advancing river delta formed in the coastal plain, which exhibited an alternatively distributed pattern with wetland and sand dunes. During the last glacial maximum the climate was dry and cold, and the sea level in the north of South China Sea dropped to -155 m, the Hainan Island linked up with the surrounding continental shelf and formed a vast continent, large area and various shapes of ancient sand dunes formed on the continental shelf, many rows of ancient sand ridges (dunes) parallelly extended over the (today's) coastal sandy land and formed a continuous deposition together with ancient sand dunes of the continental shelf. By the end of the last glacial maximum ($17 \sim 15$ ka B. P.) the climate turned warm and humid, the sea level in the north of South China Sea rose to -131 m. During the last deglaciation the climate was in a cold-warm fluctuation state and six rapid climatic variation events occurred. In the cold period ancient sand ridges (dunes) experienced aggradational development but in the warm period ancient sand ridges (dunes) experienced fixation and soil-forming processes. Since the Holocene the climate turned warm and experienced fluctuated changes and at about 8 ka the sea level of South China Sea rapidly rose and gradually the modern oceanic environment formed. Meanwhile secondary sand dunes developed on the coastal sandy land and experienced multiple semi-fixation, fixation, dune aggradation and reactivation changes. This shows the coastal sandy lands in Hainan Island and other regions of China or even the global coastal sandy land experienced similar evolution processes.

Key words: since 40 ka B. P.; ancient aeolian sand; coastal sandy land; climatic and environmental evolution; Hainan Island