

小冰期福建海岸沙丘的沉积环境

靳建辉, 李志忠

(福建师范大学 地理研究所/地理科学学院/湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 选取福建东南沿海典型海岸沙丘——东海沙丘,运用 GPR(Ground Penetrating Radar)技术探测海岸沙丘内部构造,辅助天然剖面 and 人工探槽观测,进行系统的年代采样与 OSL(Optically Stimulated Luminescence)测年,并选择物理意义明确的粒度参数作为主要环境代用指标,获得了亚热带季风区砂质海岸带典型海岸沙丘的沉积年代和沉积结构。结果表明:(1)东海沙丘是由若干灌丛沙丘组成的横向沙丘,0~6 m 主要是~0.45 ka BP以来形成的海岸风成沙丘,可以划分为~0.45 ka BP和 0.22~0.12 ka BP两个阶段。(2)东海沙丘沉积过程是多因素共同作用的结果,冷干的气候环境是沙丘发育的适宜条件,入境台风频率增加可能加快了风沙的沉积过程。对比历史文献资料发现,气候异常期往往与社会动荡期、重要历史事件相对应。

关键词: 海岸沙丘; 光释光年代学; 小冰期; 环境演变

文章编号: 1000-694X(2017)06-1111-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00168

中图分类号: P531

文献标志码: A

0 引言

海岸沙丘是砂质海岸带常见的地貌类型。海岸沙丘年代学研究可为海平面变化、区域尺度上海岸风沙活动、海岸风沙地貌发育过程、不同时空尺度的海岸线重建、考古学和古人类学等研究作出重要贡献^[1-4]。随着全新世晚期(~3 ka 以来)全球太阳辐射量总体降低,全球气候在波动变化中趋于变冷^[5],全球海平面呈现整体下降趋势,此时世界各地砂质海岸带均广泛发育了各种类型的海岸沙丘,并呈现出多期次、间断发育的特征^[6-9]。近百年来,全球气候又呈现快速波动变暖趋势^[10],海岸沙丘如何响应全球变暖背景下的海平面上升值得关注。

近年来,光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)测年技术在第四纪沉积物的定年研究中得到广泛应用^[11-21]。海岸沙丘作为一种以海滩砂为物源,近源搬运堆积形成的松散沉积,其中的石英、长石等矿物颗粒在搬运沉积过程中经历了曝光过程,使得释光信号在重新堆积前归零,因此适用于光释光测年^[11]。Murray 等^[12]建立的单片再生剂量法(Single Aliquot Regenerative-dose, SAR)广泛应用于海岸沙丘的年代学研究中。在中国主要集中

应用在黄土^[15-17,20]、沙漠^[13,21]、湖泊^[14,18]等载体的断代研究,有关中国海岸风沙系统的独立的年代学工作比较薄弱^[19]。关于中国全新世中晚期海岸沙丘的形成时代,前人主要利用¹⁴C和 TL 测年方法直接测定^[22]。

中国东部海岸带深受东亚季风系统演变的影响,海岸沙丘的古环境记录除了具有全球海岸沙丘演变的共性,必然会深刻反映东亚海岸沙丘演变的独特性。福建东南沿海是中国海岸风沙和海岸沙丘分布比较集中的区域,长乐、晋江、漳浦等地海岸带均分布有晚更新世以来的海岸风沙沉积^[23-24],尤其是广泛发育全新世晚期的海岸沙丘^[25-28]。长期以来,中国海岸沙丘沉积环境演变研究,由于受测年手段的限制,缺乏典型剖面系统的年龄控制点,相关研究成果一直较少。本文以福建东南沿海的海岸沙丘为研究对象,选取典型海岸沙丘,运用探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)技术探测海岸沙丘内部构造,辅助天然剖面 and 人工探槽,进行系统的年代采样与 OSL 测年,获取亚热带季风区砂质海岸带典型海岸沙丘的年代数据和沉积结构,并探讨其成因。

1 研究区概况

研究点位于福建省长乐市梅花-江田砂质海岸

收稿日期:2016-11-14; 改回日期:2017-01-11

资助项目:国家自然科学基金项目(41271031,41301012);国家自然科学基金委员会-福建省人民政府促进海峡两岸科技合作联合基金项目(U1405231);福建省自然科学基金项目(2017J01460)

作者简介:靳建辉(1981—),男,山西陵川人,博士,讲师,主要从事海岸风沙地貌与第四纪环境演变研究。E-mail: geojjh@fjnu.edu.cn

通信作者:李志忠(E-mail: lizz@fjnu.edu.cn)

(图 1),出露地层主要为长乐组风积层(全新统长乐组)。研究区在地质上位于闽东南燕山断拗带的长乐-诏安断陷带内。研究区内所出露的地层,除零星分布的晚三叠世-侏罗纪地层外,主要是晚侏罗世-早白垩世火山岩系及第四纪地层。在气候上属于亚热带海洋性季风气候,年降水量1 000~1 200 mm,季节性明显;降水量从大陆向海迅速减少,年降水量线大致与海岸线平行。研究区主要受东亚季风环流

影响,同时受台湾海峡走向制约,常年盛行风向为偏N向风,年均风速为 $5.6\sim8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速可达 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在气候上具有干季和风季时间上同步的特征^[1],在丰富沙源供应条件下,有利于海岸沙丘发育。沿海呈现出岬角和海湾相间,丘陵台地与海岸平原交错的地貌景观。既有基岩海岸,也有沙砾海岸和宽广平缓的河口平原海岸和淤泥质海岸。

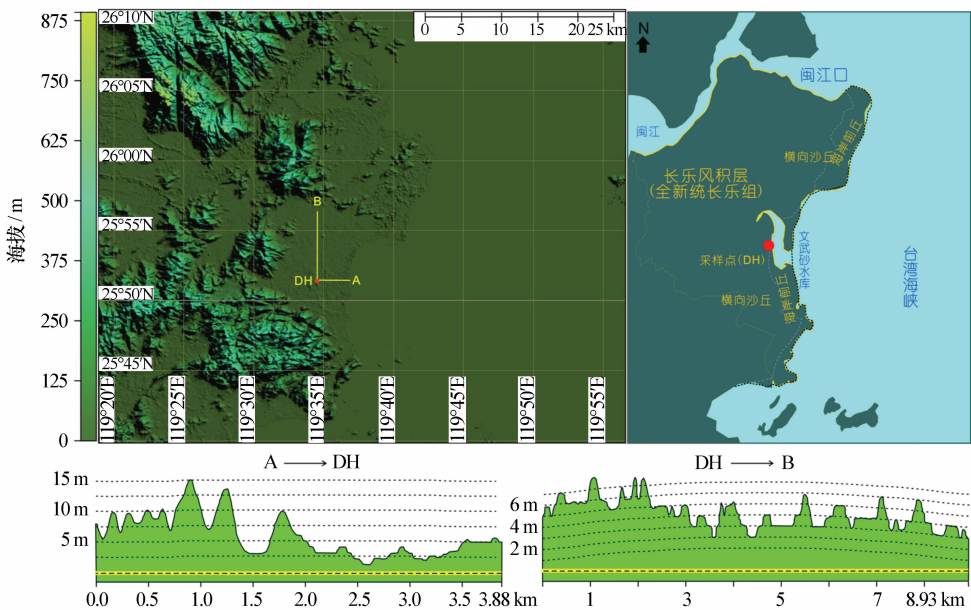


图 1 研究区位置及地形特征

Fig. 1 Location and geomorphological characteristics of the studied area

2 材料和方法

2.1 东海剖面

梅花-江田砂质海岸岸前海滩发育,岸后风沙展布,大片风沙叠加在沿岸沙堤和山丘上,形成大片海

岸风成沙丘(沙垅)和灌丛沙丘景观。向海分布了大范围的海岸前丘,海拔8~15 m,距海岸前丘约4 km的位置分布了海岸前丘二次搬运形成的横向沙丘,海拔5~6 m。选取的东海沙丘剖面(DH剖面)是人工取沙出露的剖面,从地貌上看位于沙丘落沙坡位置,纹层清晰可见(图2)。剖面顶部有人为扰

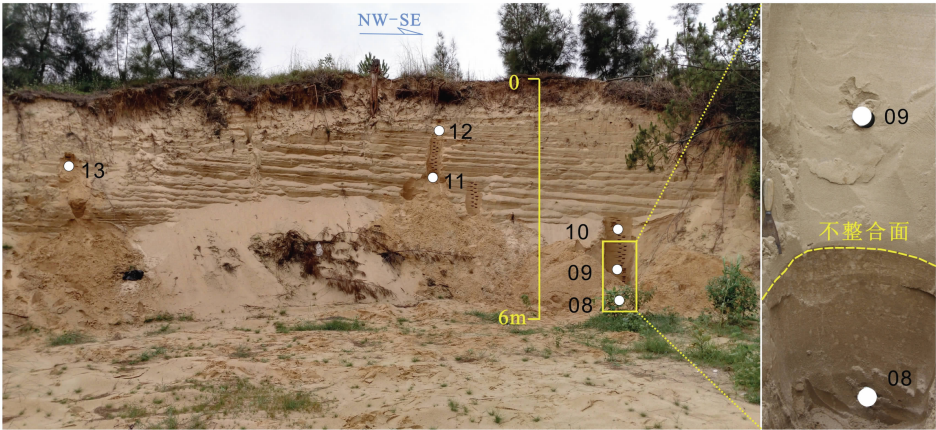


图 2 福建长乐东海(DH)剖面

Fig. 2 The Donghai (DH) section in Changle, Fujian

动,长有防风固沙植物,主要包括人工种植的木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、腊刺(*Spini-fex littoreus*)、班茅(*Saccharum arundinaceum*)、铺地黍(*Panicum repens*)、肾叶打碗花(*Calystegia soldanella*)、丝毛飘拂草(*Fimbristylis sericea*)和露兜(*Pandanus tectorius*)等,覆盖度 30%~60%。在剖面底部大约 6 m 的位置存在一个不整合面,不整合面附近两期风沙沉积颜色差异明显,这可能指示该时段是明显的沉积间断期或缓慢沉积期。

2.2 实验方法

2.2.1 光释光(Optical Stimulated Luminescence)测年

样品年龄均采用光释光(OSL)技术进行年代学测试。采样位置见图 2。

前处理与测样制备在暗室弱红光下进行,打开包装,去掉铁管两端可能曝光的部分,保留中心部位未污染、未曝光的样品供等效剂量测定,并从中取 20 g 测含水量,然后将其烘干充分研磨,直至全部通过 63 μm 的筛子,供测定样品中的 U、Th、K 含量。因样品均为细砂及以上,故采取 90~125 μm 粗颗粒组分。样品光释光辐照和信号测量采用丹麦 Risø DA-20-C/D 型热/光释光自动测量系统,该系统的激发光源分别为蓝光二极管($\lambda=(470\pm 20)$ nm)。检验长石组分所用的红外激发波长为 830 nm。测试过程中两种光源的最大功率为 90%。人工辐照源为 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$,照射剂量率为 $0.0956\text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ 。等效剂量测试在福建师范大学释光年代学分析室用 SAR 法^[12]完成。

样品 U、Th、K 含量在中国原子能科学院用中子活化法测定。沉积物所吸收的环境辐射剂量是由其本身及周围沉积物中放射性核素(^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th)及其子体和 ^{40}K 衰变产生的电离辐射提供的,同时也有宇宙射线的少量贡献。由于前处理过程中 HF 已经刻蚀掉受 α 照射的石英表层和少量的 β 辐射,另外还受到 β 射线的穿透性影响,因此,计算环境剂量率时不考虑 α 射线的贡献,计算 β 辐射剂量时乘以系数 0.9,同时考虑了含水量的影响。根据石英矿物吸收环境剂量率与环境铀、钍含量和钾含量之间的转换关系^[29],计算出各样品所吸收的年剂量。

为了获得可靠的实验条件,在测试前进行了预热实验。测量天然和再生剂量释光信号时,采用温度区间为 160~280 $^{\circ}\text{C}$ (PH1)、间隔 20 $^{\circ}\text{C}$ 、时间为

10 s 的预热设计。在测量校正的试验剂量光释光信号时,预热温度(PH2)设定为 PH1 减去 40 $^{\circ}\text{C}$,时间为 10 s。从等效剂量与预热温度之间的关系看,等效剂量在 180~220 $^{\circ}\text{C}$ 表现出较好的坪,说明样品在该区间内能得出较稳定的 D_e 。同时在 180~220 $^{\circ}\text{C}$ 温度区内,循环比率 0.9~1.1,回收率小于 5%,表明测量过程中的释光感量得到很好的校正。因此等效剂量测试的预热温度设定为 200 $^{\circ}\text{C}$ 。剂量恢复实验结果显示剂量恢复比率 0.9~1.1,进一步说明释光感量校正有效,实验流程设定的条件是可行的。

DH 剖面 6 个样品均利用早期背景信号扣除法计算等效剂量(D_e 值)。选取前 0.8 s(通道 1~5)减去背景值(通道 6~17)的释光信号值,进行线性或指数拟合(图 3A),建立光释光信号的剂量响应曲线即光释光生长曲线,确定样品的 D_e 值。将经过前处理的石英颗粒进行红外激发,然后进行蓝光激发,显示红外激发与蓝光激发的信号比小于 10%,说明长石在前处理过程中已经基本刻蚀干净,测试矿物主要为石英,样品中的长石含量已达到可忽略的水平。从样品的光释光信号衰减曲线来看,样品的光释光信号较强,且光释光信号在前 2 s 基本衰减到背景值,呈快速衰减特征,为典型的石英信号特征(图 3B)。大部分样品分布的等效剂量值比较集中(图 3C),因此计算等效剂量时采用了中心年龄模式。

2.2.2 粒度实验

粒度样品前处理方法如下:①去除有机质:约 1 g 的样品放入 100 ml 的烧杯中,加入约 5 ml 10%的 H_2O_2 并加热使其充分反应;②去除碳酸钙:加入 5 ml 10%的 HCl ,加热使其充分反应;③中和:给烧杯注满蒸馏水后静置 24 h,再抽取蒸馏水,重复几次直至溶液呈中性为止;④分散:加入 5 ml 0.025 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $(\text{Na}_2\text{PO}_3)_6$ 进行分散。正式上机测试前,超声波振荡 3~5 min 防止胶结。样品采用英国 Malvern 公司生产的 Master Sizer 2000 激光粒度分析仪进行测量。测量范围 0.02~2 000 μm ,重复测量误差小于 2%。

2.2.3 剖面地层辅助探测

本次探测布设了两条相互垂直测线。野外使用加拿大 Sensors and Software Inc 的 PulseEKKO PRO 雷达系统进行探测。地形高程测量采用美国 Trimble 公司生产的 R8GNSS RTK(Real time kinematic)设备同步进行,高程测量的系统误差为

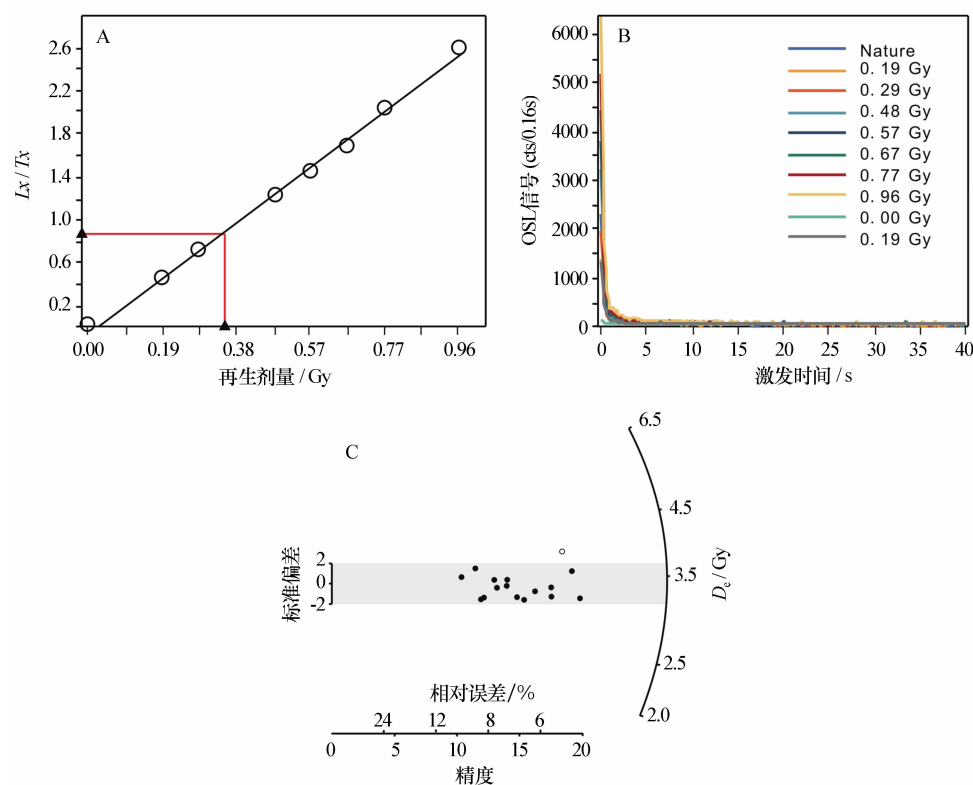


图 3 典型样品(编号 2015011)的光释光生长曲线(A)、衰减曲线(B)和等效剂量雷达图(C)
Fig. 3 OSL dose response curve fitted to a linear function(A), decay curve(B) and radar distribution histogram (C) of typical sample (No. 2015011)

±10 cm。收集到的探地雷达数据在室内使用 pluse EKKO™软件进行处理。经过高程距离修正处理后,探测雷达图像可以反映实际的沙丘地形变化和沉积构造产状信息。

3 结果与分析

3.1 OSL 年代

目前海岸沙丘的石英 OSL 年代可以精确到 10 a 尺度^[30]。DH 剖面测年结果如表 1 所示。该沙丘(0~6

m)的年代结果与距离 DH 剖面不远的东山沙丘(0~6 m)结果相近^[27],并与前人在研究区的部分研究成果相符^[23],整体来看,剖面年龄可靠,接近真实埋藏年龄。等效剂量分布的离散性会影响光释光年龄的计算^[31]。个别样品(编号 2015013)采样位置在不整合面附近的过渡层位,或者位于搬运动力复杂的剖面底部。这些部位的样品会产生诸如测片颗粒的矿物性质差异、晒退不均一或样品中放射性元素分布不均一等问题,从而使测片等效剂量值比较分散,不能准确估算等效剂量,导致年龄计算误差较大。

表 1 DH 剖面光释光年龄
Table 1 The OSL ages of DH section

样品 编号	深度 /m	U /(mg·mg ⁻¹)	Th /(mg·mg ⁻¹)	K /%	含水量 /%	等效剂量 E. D /Gy	年剂量 /(Gy·ka ⁻¹)	年龄 /ka
2015008	6	1.9±0.08	15.4±0.40	1.95±0.05	2.63±0.26	1.47±0.04	3.27±0.12	0.449±0.021
2015009	5	1.19±0.05	3.86±0.14	1.88±0.05	2.30±0.14	0.55±0.03	2.55±0.12	0.216±0.016
2015010	4	1.12±0.05	5.96±0.18	1.62±0.05	2.16±0.22	0.46±0.01	2.4±0.11	0.191±0.010
2015011	2.5	1.11±0.05	4.6±0.16	1.53±0.04	2.22±0.22	0.34±0.01	2.0±0.11	0.155±0.008
2015012	1	1.32±0.05	5.32±0.17	1.43±0.04	1.82±0.18	0.36±0.01	2.19±0.09	0.165±0.008
2015013	1.5	1.92±0.07	7.54±0.23	1.67±0.05	1.49±0.15	0.34±0.05	2.8±0.14	0.121±0.019

3.2 地层结构及粒度特征

解译探地雷达图像可获得被探测沉积体的空间展布形态、沉积序列、内部构造、沉积物含水性、潜水面深度等丰富的地质地貌信息^[32-33]。测量前进行了探地雷达传播速度实验,探地雷达图像采用 200 MHz 天线,测试深度 12 m。两条测线的布线方向分别平行和垂直于剖面,NW—SE 测线基本平行于出露剖面布设,用于验证出露剖面的沉积特征和沉积结构,NE—SW 测线垂直于剖面布设。从 NW—SE 测线结果来看,沙丘表面向下约 6 m 的位置,清晰可见一个倾角小且向沙丘内部延伸的较强震幅反射面。该反射面主要反映了剖面 6 m 附近的沉积环境和沉积动力发生明显变化,并存在明显的侵蚀不整合(图 4)。同时显示 6 m 以下沉积物含水量有所增加。这些特点与出露剖面显示的岩性基本相符(图 2)。剖面附近人工挖沙遗留的沙坑剖面所展示的沉积层理展布特征,也能说明 NW—SE 测线结果能够较好地反映出露剖面沉积结构。

从雷达图像总体特征看,剖面呈现不连续、水平或低角度纹层,这是在向岸风的作用下,沙丘向陆堆积和前移形成的前积层理。NE—SW 向测线(顺风向)能看到明显的大角度交错层理,这是灌丛沙丘或抛物线沙丘的典型特征(若要进一步判别,还需要更多条 NE—SW 测线或剖面露头)。13 m 的测线清晰显示了 3 组槽状层理。

DH 剖面粒度组成和分布表现出显著的风成特征(图 5)。粒度频率曲线主要呈现单峰特征,分布区间大体相同,体现了 DH 剖面充足的沉积物源和相对稳定的风动力强度。粒度参数均用 Φ 值表示。平均粒径(M_z) 1.12~2.27,平均值为 1.70;标准偏差(σ) 0.53~1.05,平均值为 0.64;偏度(SK) -0.313~0.006,平均值为 -0.043,大多数为负偏;峰度(K_g) 0.92~2.05,平均值为 0.96。这些特征符合中国海岸沙丘的粒度特征^[34-35]。粒度组分以中砂为主,含量 40%~60%,这与已有的研究结果类似^[27]。粗砂和细砂分异明显,含量分别为 0~40%和 10%~60%。以 3 m 处为分界线,上下两部分表现不同的粒度特征:上部细砂多(30%~60%),均值 40%,粗砂少(0~13%),均值 10%;下部粗砂多(13%~40%),均值 20%,细砂少(10%~30%),均值 10%。因此 $M_z(\Phi)$ 在上半段(0~3 m)偏大,下半段(3~5.5 m)偏小。

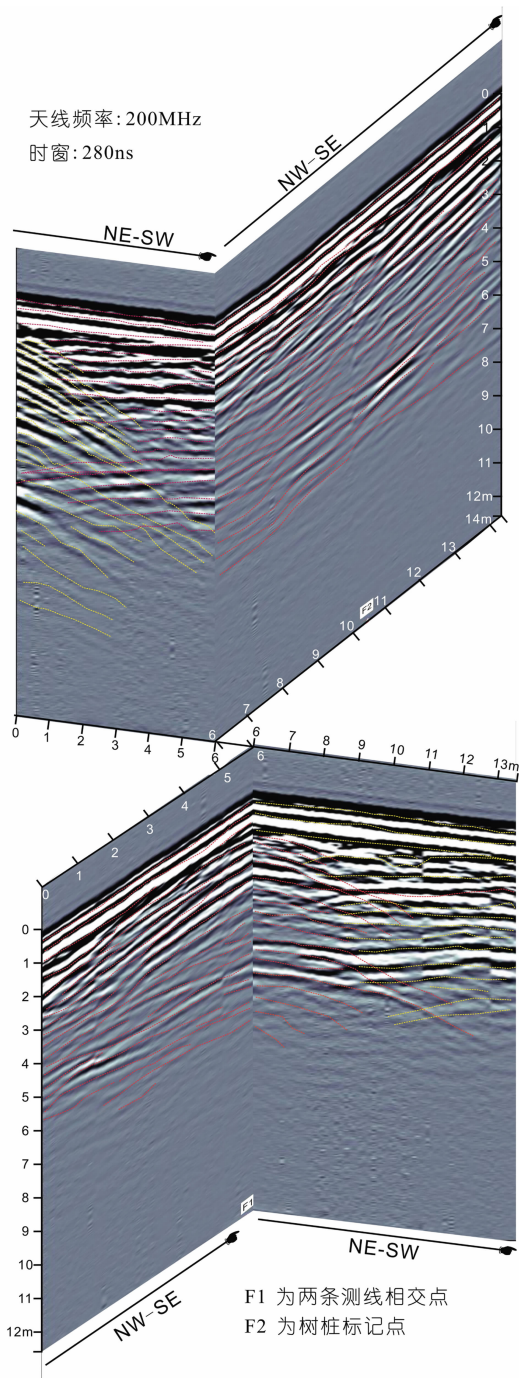


图 4 DH 剖面探地雷达图像

Fig. 4 The ground penetrating radar image of DH section

3.3 沉积过程及其影响因素

DH 剖面(0~6 m)指示了最近 450 a 来长乐海岸风积地貌的发育过程。一般情况下,海岸沙丘具有多期发育特征,且与区域植被、降水、海平面变化、冬季风强度具有重要联系。华南海岸沙丘分布广泛,从南到北发育了多处海岸风沙沉积^[1],且多是约 4 ka BP 以来形成的(图 6),这与全新世大暖期高海平面和 4 ka BP 左右的气候突变事件有关^[44]。其中

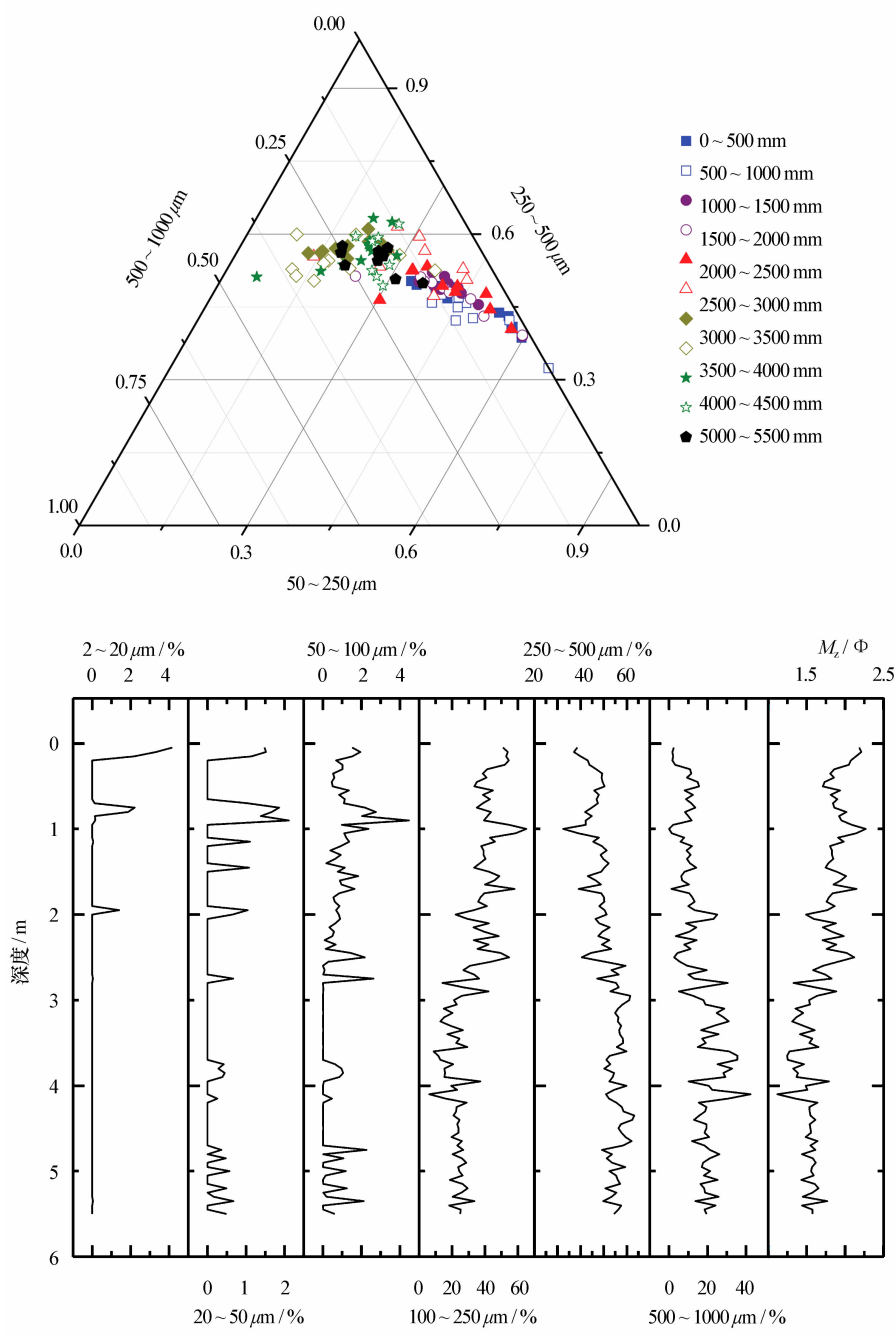


图 5 DH 剖面粒度特征

Fig. 5 The grain-size composition of DH section

1 ka BP以来是华南海岸沙丘发育的主要阶段之一。

在 DH 剖面(0~6 m)的年代学基础上,结合地层分析结果划分为 I (~0.45 ka BP)、II (0.22~0.12 ka BP)两个阶段,这两个阶段由一个不整合面分开(图 2),在野外能观察到明显的色度差异:

I 段(~0.45 ka BP)不整合面下部表现为浅棕红色,上部表现为淡灰黄色。在不整合面下部仅采集了 1 个年代学样品。

II 段(0.22~0.12 ka BP)是 DH 沙丘(0~6 m)

主要的风沙沉积期。在百年时间内沉积厚度达到约 5 m,整体平均沉积速率较快。

与 II 段风沙活动期的沉积厚度相比,近百年来风沙沉积厚度明显偏小,这可能指示近几十年来植被覆盖率的增大对风沙沉积有一定的阻拦作用^[45]。

从上述沉积过程可以看出,沙丘不同沉积阶段的沉积速率差异显著,风沙活跃期的沙丘沉积速率是缓慢期的几倍甚至十几倍。那么影响 DH 沙丘(0~6 m)沉积过程的主要因素是什么呢?

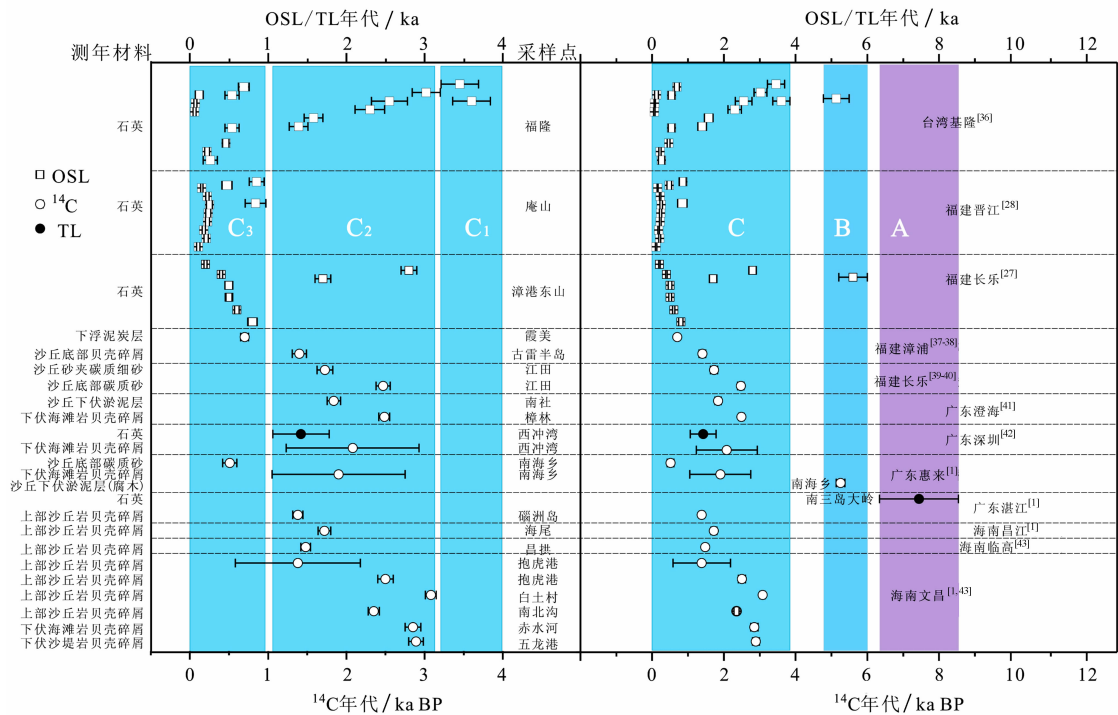


图6 华南海岸沙丘年代学

Fig. 6 Chronology of coastal dunes in South China

一般来说,海岸沙丘是多因素共同作用的结果。影响海岸沙丘发育的主要因素包括充足的沙源供应、持续的向岸风、地形条件和趋于冷干的气候条件^[1]。研究区沙质海岸带分布宽广,除少数几个月外,常年盛行偏北向岸风,从东北向东南依次发育了滩脊、海岸前丘、横向沙丘(3~4列)和沙席等风成地貌单元^[1]。DH沙丘(0~6 m)剖面正处于靠海侧的第一列横向沙丘的落沙坡位置。然而不同时间尺度和不同地区影响海岸沙丘发育的主要因素有所差异^[46]。当然,除了以上因素外,海岸沙丘的发育还与构造运动、海平面变化和台风等因素密切相关。

DH剖面发育过程与构造运动和海平面变化关系不大。福建闽东北沿海地壳上升速率约为 $4\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[47],对于发育时间只有几百年的海岸沙丘来说,构造运动的影响较小。从沙丘发育与海平面变化的关系来看,长时间尺度上的海岸风沙既可发育于低海面时期^[48-49],也可能发育于高海面时期^[50-51]。研究显示,福建东南沿海晚第四纪的红色风沙在不同海平面时期均有分布^[28]。另外,晚全新世福建沿海海平面波动幅度也不大^[52],因此海平面变化可能不是DH剖面发育的主要影响因素。

将DH剖面(0~6 m)沉积的年龄数据与福建玉华洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的近500 a夏季风降水^[53]、广东湛江玛珥湖磁化率指示的东亚冬季风^[54]、中国东

部冬半年温度距平^[55]和东南沿海近300 a来的台风入境频率^[56]进行对比,发现DH剖面(0~6 m)主要发育在两个时段(图7):

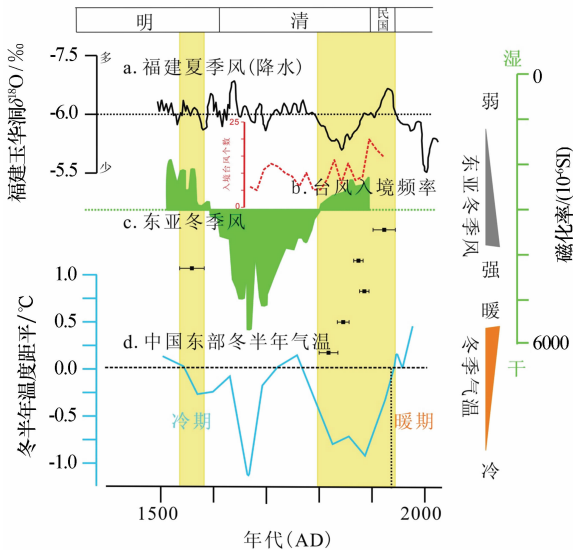


图7 DH剖面(0~6 m)沉积期及沉积环境对比

Fig. 7 The comparison of depositional stages and environment between DH section and other data

第一个时段是在~0.45 ka BP。该时段冬季风相对较弱,冬季气温较现代偏冷,夏季风降水变化在这一时期主要表现为高频振荡特征^[53]。第二个时段是在0.22~0.12 ka BP。该时段的气候条件主要表现为冬季风偏弱,冬季气温较现在明显偏低约

1℃,福建玉华洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的夏季风也偏弱,降水减少,同时该时期台风入境频率明显上升。另外,该时期的人口激增、植被破坏和耕地无序开发^[57]等现象,也是加剧风沙活动的因素之一。以上对比可以看出,6 个年代数据均落在冬季气温较冷时期,冷干的气候环境是沙丘发育的最佳条件,增加的台风入境频率有可能加快风沙的沉积。

3.4 风沙活动期与人类活动

在一定阈值内,人类活动和气候变化二者之间相互影响相互制约^[44]。其中战争^[58]、朝代更替^[44,57,59]均与气候变化有密切关系。然而任何朝代更替均不可能是某一年的气候异常的结果,而是某一段时间的综合影响,王邵武^[60]称其为典型时段($\sim 50\text{ a}$)。

在唐宋时期,研究区环境良好,风沙较小,粒度组成以细砂($100\sim 250\text{ }\mu\text{m}$)为主^[27]。例如,《平潭县志》记载,现代风沙遍布的福建海坛岛在唐宋时期是“牧马之地”^[61]。宋末至清初气候转干。清廷时期,在康熙五十一年(1712 年)取消了亘古以来的人头税,使耕地和人口数创历史记录。雍正三年(1725 年)中国耕地面积增至 890 万顷^[62],突破明代耕地数量记录,之后不再增长,而人口从康熙三十九年(1700 年)的 1.5 亿,增至咸丰元年(1851 年)的 4.32 亿^[63],造成植被覆盖度持续降低^[45],人地矛盾贯穿清朝。

例如,1850—1900 年是气候异常期。该时段冬季气温达到近 500 a 来最低,华南海岸台风每年入境频率也激增至 20 次。其中 19 世纪 60 年代是中国小冰期时期的一个显著冷谷(图 7),在该时段内气候灾害频发,爆发了清朝后期重要的历史事件:一是 1851—1864 年的太平天国运动,二是 1853—1868 年的捻军起义。19 世纪末 20 世纪初全国自然灾害频发,北方以旱荒为主,南方以水患为主。近代灾荒史研究表明,20 世纪 00 年代的气候变化,对 1900 的年义和团运动和 1911 年辛亥革命的酝酿过程起到了至关重要的作用^[64]。以上事件均对应冬季气温降低、夏季降水减少的气候时期。

野外考察发现,DH 剖面风沙层中出现了大量明末清初时期的瓷器残片,多为碗、罐等生活用瓷,说明该时期长乐沿海已出现大量人类活动。到 19 世纪末,环境转差,人类活动逐渐向内陆迁移。这与当时人类活动密切相关。闽江流域林草破坏殆尽。清光绪(1874—1908 年)《福建沿海图说》记载:“数

十年前,东海滨田舍相望,今则一片平沙,目断无人烟”。长乐显应宫是供奉妈祖和郑和的宗教建筑,20 世纪 90 年代发现时,整体建筑完全被风沙掩埋,出土碑文记载该建筑最后一次重修发生在 1841 年。推测该建筑极有可能是在 1841 年后气候异常期内被风沙掩埋的。

4 结论

东海沙丘是由若干灌丛沙丘组成的横向沙丘,0~6 m 主要是 $\sim 0.45\text{ ka}$ 以来形成,可以划分为 $\sim 0.45\text{ ka}$ 和 $0.22\sim 0.12\text{ ka}$ 两个阶段。不同区域在不同时间尺度上,影响沙丘发育的因素也不尽相同。东海沙丘 0~6 m 沉积过程是东亚冬季风、夏季风降水、入境台风频率、气温和植被盖度等因素共同作用的结果。其中,冷干的气候环境是沙丘发育的最佳条件,增加的台风入境频率有可能加快风沙的沉积。对比历史文献资料发现,气候异常期往往与社会动荡期、重要历史事件相对应。

参考文献:

- [1] 吴正,黄山,胡守真,等. 华南海岸风沙地貌研究[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [2] Jacobs Z, Roberts R G, Galbraith R F, et al. Ages for the Middle Stone Age of southern Africa: implications for human behavior and dispersal[J]. *Science*, 2008, 322(5902): 733—735.
- [3] 董玉祥,黄德全,张雪琴. 海岸爬坡沙丘形态对台风响应——以 2014 年“麦德姆”台风为例[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 865—870.
- [4] 温小浩,李保生,孟洁,等. 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.
- [5] Esper J, Frank D C, Timonen M, et al. Orbital forcing of tree-ring data[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(12): 862—866.
- [6] Clarke M L, Rendell H M. Effects of storminess, sand supply and the North Atlantic Oscillation on sand invasion and coastal dune accretion in Western Portugal[J]. *Holocene*, 2006, 16(3): 341—355.
- [7] Clemmensen L B, Bjørnsen M, Murray A, et al. Formation of aeolian dunes on Anholt, Denmark since AD 1560: a record of deforestation and increased storminess[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 199(3): 171—187.
- [8] Wells A, Goff J. Coastal dune ridge systems as chronological markers of palaeoseismic activity: a 650-yr record from south-west New Zealand[J]. *Holocene*, 2006, 16(4): 543—550.
- [9] Tamura T, Kodama Y, Bateman M D, et al. Coastal barrier dune construction during sea-level highstands in MIS3 and 5 a on Tottori coast-line, Japan[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2011, 308(3/4): 492—501.

- [10] Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly[J]. *Science*, 2009, 326(5957): 1256—1260.
- [11] Ballarín M, Wallinga J, Murray A S, et al. Optical dating of young coastal dunes on a decadal time scale[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10/13): 1011—1017.
- [12] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol[J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32(1): 57—73.
- [13] Peng J, Dong Z, Han F. Optically stimulated luminescence dating of sandy deposits from Gulang county at the southern margin of the Tengger Desert, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(1): 1—12.
- [14] Long H, Lai Z P, Wang N A, et al. Holocene climate variations from Zhuyeze terminal lake records in East Asian monsoon margin in arid northern China[J]. *Quaternary Research*, 2010, 74(74): 46—56.
- [15] 鹿化煜, 周亚利, Mason J, 等. 中国北方晚第四纪气候变化的沙漠与黄土记录——以光释光年代为基础的直接对比[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 888—894.
- [16] 覃金堂, 周力平. 沙漠边缘厚层黄土上部光释光测年的初步研究[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(4): 546—552.
- [17] 王旭龙, 卢演俦, 李晓妮. 细颗粒石英光释光测年: 简单多片再生法[J]. *地震地质*, 2005, 27(4): 615—623.
- [18] 张家富, 周力平, 姚书春, 等. 湖泊沉积物的¹⁴C和光释光测年——以固城湖为例[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(4): 522—528.
- [19] 张家富, 袁宝印, 周力平. 福建晋江“老红砂”的释光年代学及对南方第四纪沉积物释光测年的指示意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(22): 2646—2654.
- [20] 张克旗. 甘孜黄土细颗粒石英热转移光释光(TT-OSL)法测年可行性初探[J]. *地质力学学报*, 2013, 19(3): 287—294.
- [21] 张小艳, 周亚利, 庞奖励, 等. 光释光测年揭示浑善达克沙地中世纪暖期和小冰期环境变迁与人类活动的关系[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(3): 535—546.
- [22] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [23] 李从先, 陈刚, 杨红君. 福建海岸的风成沉积[J]. *中国沙漠*, 1989, 9(4): 11—21.
- [24] 张明书, 李绍全. 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.
- [25] 陈方, 朱大奎. 闽江口海岸沙丘的形成与演化[J]. *中国沙漠*, 1996, 16(3): 227—233.
- [26] 周定成, 王金坑. 闽中南海岸风沙灾害的形成与年代[J]. *应用海洋学学报*, 2010, 29(1): 94—98.
- [27] 靳建辉, 李志忠, 胡凡根, 等. 全新世中晚期福建海岸沙丘记录的海岸环境与人类活动[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 751—765.
- [28] 胡凡根, 李志忠, 靳建辉, 等. 基于释光测年的福建晋江海岸沙丘粒度记录的风沙活动[J]. *地理学报*, 2013, 68(3): 343—356.
- [29] Aitken M J, Xie J. Optical dating using infrared diodes: young samples[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1992, 11(1/2): 147—152.
- [30] Madsen A T, Murray A S. Optically stimulated luminescence dating of young sediments: a review[J]. *Geomorphology*, 2009, 109(1/2): 3—16.
- [31] 张家富, 苗建民, 王学荣, 等. 偃师商城宫城建筑基址夯土的光释光测年初步研究[J]. *核技术*, 2003, 26(1): 40—44.
- [32] 唐文武, 朱大奎, 葛晨东, 等. 探地雷达(GPR)在海岸环境勘测中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(2): 99—105.
- [33] 邓涛, 李志忠, 靳建辉, 等. 探地雷达在福建漳浦海岸抛物线沙丘沉积构造探测中的应用[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 882—889.
- [34] 董玉祥, 马骏, 黄德全. 福建长乐海岸横向前丘表面粒度分异研究[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 813—819.
- [35] 申健玲, 李志忠, 靳建辉, 等. 福建海坛岛青峰老红砂旋回沉积的粒度特征及其古气候意义[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 972—982.
- [36] Dörschner N, Reimann T, Wenske D, et al. Reconstruction of the Holocene coastal development at Fulong Beach in north-eastern Taiwan using optically stimulated luminescence (OSL) dating[J]. *Quaternary International*, 2012, 263: 3—13.
- [37] 陈承惠. 闽南沿海若干全新世沉积物剖面的孢粉组合[J]. *台湾海峡*, 1982, 1(1): 45—53.
- [38] 陈锋. 古雷半岛海滩岩的形成及闽南沿海海平面变化[C]//国际地质对比计划第200号项目中国工作组. 中国海平面变化. 北京: 海洋出版社, 1986: 166—172.
- [39] 程乾盛. 福建长乐全新世地层划分与对比的探讨[J]. *福建地质*, 1989, 8(2): 100—109.
- [40] 王雨灼. 福建省第四纪地层的划分[J]. *福建地质*, 1990, 9(4): 289—306.
- [41] 李平日, 黄镇国, 宗永强, 等. 韩江三角洲[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 10—28.
- [42] 卢演俦, 张景昭, 谢军. 广东省深圳大鹏湾沿岸沙堤粗颗粒石英热释光测年[J]. *海洋学报*, 1991, 13(4): 531—539.
- [43] 张仲英, 刘瑞华. 海南岛沿海的全新世[J]. *地理科学*, 1987, 7(2): 129—138.
- [44] 郑卓, 邓韞, 张华, 等. 华南沿海热带-亚热带地区全新世环境变化与人类活动的关系[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(4): 387—393.
- [45] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 过去三百年中国土地利用变化与陆地碳收支[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [46] 李志文, 李保生, 王丰年. 海岸沙丘发育机制之研究现状评述[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 357—366.
- [47] 胡惠民, 黄立人, 杨国华. 中国东部沿海地区的近代地壳垂直运动[J]. *地质科学*, 1993, 28(3): 270—278.
- [48] Dingle R V, Rogers J. Effects of sea-level changes on the Pleistocene palaeoecology of the Agulhas Bank[J]. *Palaeoecology of Africa*, 1972, 6: 55—58.
- [49] Tankard A J, Schweitzer F R. The geology of Die Kelders Cave and environs: a palaeoenvironmental study[J]. *South African Journal of Science*, 1974, 70: 365—369.
- [50] Barwis J H, Tankard A J. Pleistocene shoreline deposition and sea-level history at Swartklip, South Africa[J]. *Journal of*

Sedimentary Petrology, 1983, 53(4): 1281—1294.

[51] Illenberger W K. The geomorphologic evolution of the wilderness dune cordons, South Africa[J]. Quaternary International, 1996, 33(1): 11—20.

[52] 杨建明, 郑晓云. 福建沿岸6 000年来的海平面波动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(4): 67—75.

[53] 姜修洋, 李志忠, 李金全, 等. 最近 500 年来福建玉华洞石笋氧同位素记录及气候意义[J]. 地理科学, 2012, 32(2): 207—212.

[54] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon[J]. Nature, 2007, 445(7123): 74—77.

[55] Ge Q, Zheng J, Fang X, et al. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years [J]. Holocene, 2003, 13(6): 933—940.

[56] 潘威, 满志敏, 刘大伟, 等. 1644—1911 年中国华东与华南沿海台风入境频率[J]. 地理研究, 2014, 33(11): 2195—2204.

[57] 葛全胜. 中国历朝气候变化[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[58] 王俊荆, 叶玮, 朱丽东, 等. 气候变迁与中国战争史之间的关系综述[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2008, 31(1): 91—96.

[59] Zhang P, Johnson K R. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record[J]. Science, 2008, 322(5903): 940—942.

[60] 王绍武. 中世纪暖期与小冰期[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 388—390.

[61] 林惠来. 台湾海峡西岸历史年代风沙的初探[J]. 应用海洋学报, 1982, 1(2): 76—84.

[62] 陈振汉. 清实录经济史资料[M]. 北京: 北京大学出版社, 1989.

[63] 严中平. 中国棉纺织史稿[M]. 北京: 科学出版社, 1955.

[64] 李文海. 中国近代灾荒与社会生活[J]. 近代史研究, 1990, 3(5): 4—25.

Sedimentary Environment of Little Ice Age Recorded by
A Coastal Aeolian Dune in Fujian, China

Jin Jianhui, Li Zhizhong

(Institute of Geography/School of Geography Science/ Ministry of Education Key Laboratory of Humid Subtropical Ecosystem and Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Coastal aeolian dune is a typical type of aeolian landform in coastal zone of South China. The information of development history and paleoenvironment were well recorded in the sediment of coastal aeolian dune. The aim of this article is to understand the formation process of coastal aeolian dune and analyze the relationship between human activities and environmental evolution since Little Ice Age. In this study, a coastal aeolian dune (DH) of 0—6 m depth in Changle, Fujian, China, was selected as a research object. Optically stimulated luminescence (OSL) technique was selected to establish the chronological framework of this aeolian dune. Combined with grain-size parameters and geological radar images, the dune development history and paleoenvironment significance in the study area during the last 450 years were explored. Results are shown as follows. (1) DH dune (0—6 m) is a coastal aeolian transversal dune, which are made up of several shrub dunes since about 450 a BP. (2) The deposition rate of DH dune is affected by integrated factors, such as East Asia Summer Monsoon (rainfall) intensity, East Asia Winter Monsoon intensity. It also is significantly associated with the winter temperature, typhoon frequency and vegetation coverage. The cold-dry climate is the suitable condition of wind-sand activity. Meanwhile, the periods of climate abnormality are usually associated with social turbulence and important historical events.

Key words: coastal aeolian dune; optically stimulated luminescence chronology; Little Ice Age; environmental evolution