

文章编号: 1008-2786-(2012)2-129-07

# 晚更新世以来闽东南老红砂沉积粒度特征 与古气候变化

靳建辉<sup>1 2 3</sup> 李志忠<sup>1 2 3</sup> 陈秀玲<sup>1 2 3</sup> 齐升吉<sup>1 3</sup> 吴美榕<sup>1 3</sup> 胡凡根<sup>1 3</sup>,  
张辉<sup>1 3</sup> 赵倩<sup>1 3</sup> 林舒倩<sup>1</sup> 祝淑雅<sup>1</sup>

(1. 福建师范大学 地理研究所 福建 福州 350007; 2. 福建师范大学 地理科学学院 福建 福州 350007;  
3. 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:** 对闽东南深沪湾老红砂风沙沉积进行粒度测试,提取对环境变化敏感的粒级组分,结合年代学数据,初步划分了研究区晚更新世中晚期以来的气候变化阶段和气候驱动因素。研究发现,研究区经历了较冷干-暖湿-冷干-暖湿4个气候变化过程。气候变化主要受控于太阳辐射,表现出明显的23 ka长岁差周期、14.2 ka、11.8 ka半岁差周期,叠加约0.25 ka的双世纪周期。陆地-海洋-大气系统的内部因素对表现出来的百年周期可能产生放大或缩小影响。70.8—46.4 ka BP和21.3—11.6 ka BP两个阶段老红砂沉积速率较大,是老红砂风沙堆积的两个主要时期,两个阶段沉积速率分别达到30 mm/(100 a)、650 mm/(100 a)。

**关键词:** 晚更新世; 古气候; 老红砂; 粒度

**中图分类号:** P531 X144

**文献标识码:** A

老红砂是分布在中国闽东南和粤东等沿海地区的一种红色(10R4/8)、棕红色(2.5YR4/8)、淡红棕色(5YR5/8)和暗黄橙色(5YR/5/8)为主的半胶结中细砂沉积物,是中国东南沿海地区极具特色的第四纪沉积物<sup>[1]</sup>。最近十几年来,众多学者结合年代学指标和其他气候代用指标对老红砂进行了综合分析和区域对比,在老红砂成因<sup>[1-6]</sup>、地层年代学<sup>[7-9]</sup>等方面取得了重要进展,认为老红砂是形成于晚更新世以来的海陆过渡地带以风动力为主兼有其他特殊动力环境的产物。闽东南沿海老红砂记录着丰富的区域和全球环境演变信息,是恢复区域环境演变及其全球变化研究的良好信息载体。前人虽然利用各种气候代用指标对本区气候进行过一定探

讨,但闽东南沿海地区的气候演变研究仍存在一定的模糊和不确定性。因此,本研究通过闽东南典型老红砂剖面高分辨率粒度数据,结合已有测年数据,初步建立研究区晚更新世以来古气候变化序列,对我国低纬地区古气候变化过程和驱动机制研究具有重要意义。

## 1 地层特征与研究方法

### 1.1 区域概况与剖面描述

KR剖面位于福建东南部晋江半岛深沪湾滨海地带(图1),地理坐标24°34′56.3″N,119°39′14.1″E,剖面底部海拔19.8 m。剖面所在的晋江市在地

收稿日期(Received date): 2011-09-11; 改回日期(Accepted): 2012-01-29。

基金项目(Foundation item): 福建省自然科学基金(2009J01208); 福建省公益类科研院所专项基金(2009R10039-4)。[Natural Science Foundation Project of Fujian(2009J01208); Special foundation Project of Public Research Institutes in Fujian(2009R10039-4)。]

作者简介(Biography): 靳建辉(1981-),男,山西陵川人,理学硕士,福建师范大学助教,主要从事地貌与第四纪环境演变研究。[Jin Jianhui (1981-), male, Lingchuan Shanxi province, msc assistant of Fujian Normal University, major in landform and quaternary environment evolution. ] E-mail: geojjh@fjnu.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 李志忠(1962-),男,四川绵阳人,理学博士,福建师范大学教授,博士生导师,主要从事地貌与第四纪地质研究。[Li Zhizhong(1962-), male, Mianyang Sichuan province, Ph D, professor of Fujian Normal University, Doctoral supervisor, major in landform and quaternary geology. ] E-mail: lizzfz@163.com

理位置上,东北连泉州湾,东与石狮市接壤,东南濒临台湾海峡,南与金门岛隔海相望。气候类型属于亚热带海洋季风气候,年均气温  $20 \sim 21^{\circ}\text{C}$ ,1 月均温  $11.9^{\circ}\text{C}$ ,7 月均温  $28.2^{\circ}\text{C}$ ,年均日照  $2\,130\text{ h}$ ,年均降雨量  $911 \sim 1\,231\text{ mm}$ 。地质构造上处于长乐-南澳剪切带(东南沿海变质带)中段,地貌类型以侵蚀剥蚀低丘陵和侵蚀剥蚀台地为主,包含红土台地、侵蚀剥蚀圆缓低丘陵、台间谷地、海积平原和风积垄地。地带性土壤为赤红壤。

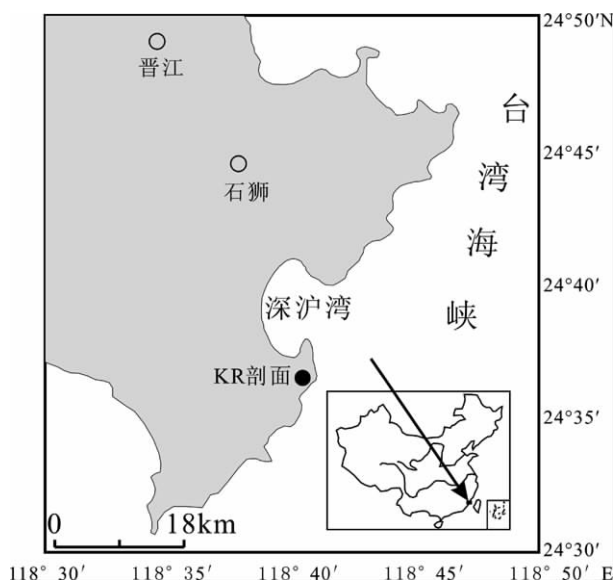


图 1 科任老红砂剖面位置图

Fig. 1 Location of KR red earth section at southern Fujian

采样点剖面是老红砂侵蚀残留的并经过人工开挖后形成的垂直剖面,整个剖面厚度约  $15\text{ m}$ ,剖面顶部为乔灌木等耐旱植被覆盖的平地,底部未见底,从上至下可分为 5 个层位,各层之间分界较明显;  $0 \sim 1.5\text{ m}$  为土壤层,胶结状态显著,其中  $0 \sim 0.5\text{ m}$  可见较多植物根系;  $1.5 \sim 6\text{ m}$  为淡红棕色中细砂层,不显层理;  $6 \sim 10\text{ m}$  为棕红色中细砂层,含斑点状铁锰胶膜,不显层理;  $10 \sim 12.5\text{ m}$  为暗黄橙色中细砂层,层理不明显,粒度均匀,可见铁锰结核,其中  $11.5 \sim 12.5\text{ m}$  间含有角砾状石英颗粒,粒径约为  $3 \sim 5\text{ mm}$ ,且夹有暗黄橙色和暗棕红色的网纹层。  $12.5 \sim 14.7\text{ m}$  为暗黄橙色和暗红棕色组成的网纹状中砂层(图 2)。

### 1.2 剖面年代与粒度实验

KR 剖面年代分别取  $1.22\text{ m}$ 、 $4.9\text{ m}$ 、 $5.93\text{ m}$  和  $11.59\text{ m}$  埋深处的年代数据<sup>[6-7]</sup>,结果依次为  $10 \pm 1\text{ ka}$ 、 $15.2\text{ ka}$ 、 $25.7\text{ ka}$ 、 $54 \pm 5\text{ ka}$ 。据此编绘了 KR 剖

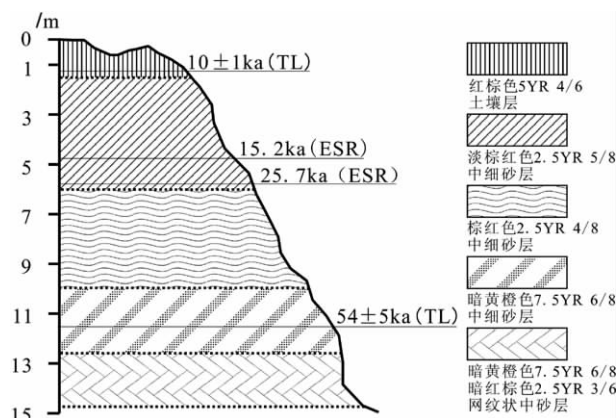


图 2 晋江科任老红砂沉积剖面岩性图

Fig. 2 Stratigraphic section of research area

面的年代-深度关系,得到各层位的沉积年代序列(图 3)。

在野外按  $2.5\text{ cm}$  等间距对 KR 剖面连续采样 593 块。样品粒度测试前处理如下:1. 去有机质,约  $1\text{ g}$  的样品放入  $100\text{ mL}$  的烧杯中,加入约  $5\text{ mL}$   $10\%$  的  $\text{H}_2\text{O}_2$  并加热使其充分反应;2. 去碳酸钙,加入  $5\text{ mL}$   $10\%$  的  $\text{HCl}$  加热使其充分反应;3. 中和,给烧杯注满蒸馏水后静置  $24\text{ h}$ ,再抽取蒸馏水,重复几次直至溶液呈中性为止;4. 分散,加入  $5\text{ mL}$   $0.05\text{ N}$  的  $(\text{Na}_2\text{PO}_3)_6$  进行分散。正式上机测试前,超声波振

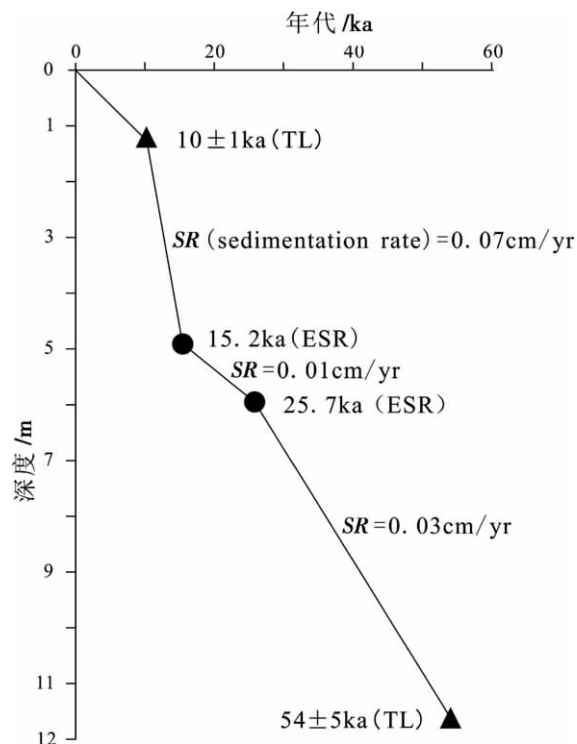


图 3 KR 剖面地层年代-深度关系图

Fig. 3 Age of KR strata

荡3~5 min 防止胶结。采用英国 Malven 公司生产的 Master Sizer-2000 激光粒度仪进行测量。测量范围0.02~2 000  $\mu\text{m}$ ,每个样品重复测试3次,以检验其重复性,重复测量误差小于2%,最后取其平均值。

## 2 粒度特征

### 2.1 粒度组成的总体特征

KR 老红砂剖面以中砂(250~500  $\mu\text{m}$ )和细砂(125~250  $\mu\text{m}$ )为主,其中中砂平均约占39.96%,细砂平均约占30.34%。与当地现代海滩砂相比,KR 老红砂的粗砂(500~1 000  $\mu\text{m}$ )、极粗砂(1 000~2 000  $\mu\text{m}$ )和砾石(>2 000  $\mu\text{m}$ )含量较少,粉砂(2~63  $\mu\text{m}$ )和粘土(<2  $\mu\text{m}$ )含量远高于现代海滩砂。其中 KR 老红砂剖面粘土含量平均为2.07%,粉砂含量平均为5.62%,而现代海滩砂几乎不含粉砂和粘土。说明 KR 老红砂的产生与风力搬运沉积有关。此外,风在搬运砂粒跃移过程中,粒间碰撞磨蚀还能产生少量粉砂颗粒<sup>[1]</sup>。其中0~11 m的粘土含量从上到下有减少趋势,线性回归方程为 $y = -0.0002x + 1.7512$ ,平均粘土含量为1.62%,该段老红砂沉积红化颜色随深度分别呈现红棕色、淡棕红色、棕红色和暗黄橙色。反映出该段粘土含量与沉积后期老红砂中不稳定矿物的风化程度有关<sup>[10]</sup>。11~14.8 m 粘土含量依次增多,线性回归方程为 $y = 0.0038x - 1.5633$ ,平均粘土含量为3.39%,远小于岭南东江流域强网纹状红土的粘土含量<sup>[11]</sup>,表明闽东南老红砂的物源和风化强度与亚热带网纹状

红土有较大区别<sup>[12]</sup>,也反映出亚热带第四纪环境的多样性和复杂性。

### 2.2 剖面粒度参数特征

剖面粒度组成变化范围为0.2~2 000  $\mu\text{m}$ ,中值粒径 $M_d$ 为69.949~438.585  $\mu\text{m}$ ,平均粒径 $M_z$ 在1.42~3.90  $\Phi$ 间;分选系数 $S_o$ 在1.22~7.22之间,标准偏差 $\sigma_i$ 在0.70~3.32  $\Phi$ 间,分选较好至分选极差不等(图4);与现代海滩砂相比,老红砂分选性较差,这主要受到老红砂沉积后期风化作用影响,使细粒物质含量增多。峰度 $K_g$ 为0.85~2.63,峰型从平坦至很尖锐变化,以尖锐峰态为主,表明老红砂的中细砂粒分选性较海滩砂好。偏度 $SK_1$ 为-0.66~-0.071,从很负偏至近对称变化,且以负偏为主,平均值为-0.24,表明深沪湾科任老红砂物源多样性特点,海岸风成沙丘砂和海滩砂是老红砂堆积的主要物源。现代沉积环境分析表明,老红砂主要见于现代海岸风沙发育良好的地方,呈单列或多列长条形沙堤沿海岸平原连续分布,科任老红砂沉积剖面正是分布在深沪湾盛行冬季风的迎风面,物源也是主要来自老红砂沉积地附近的海滩砂,而海滩砂的最初物源主要是花岗岩的陆源风化碎屑。另外坡面流水和重力作用还可将附近基岩风化碎屑混入其中,从而表现出风积为主,兼有坡积的混合堆积特征。

### 2.3 敏感粒级组分特征

从整个剖面的粒度频率分布曲线看出,剖面样品的曲线变化趋势大体相似,呈现明显的单峰且峰值较高的特点,分布区间大体一致,粒度分布相对集中。表明剖面样品的沉积环境受到相对稳定的搬运

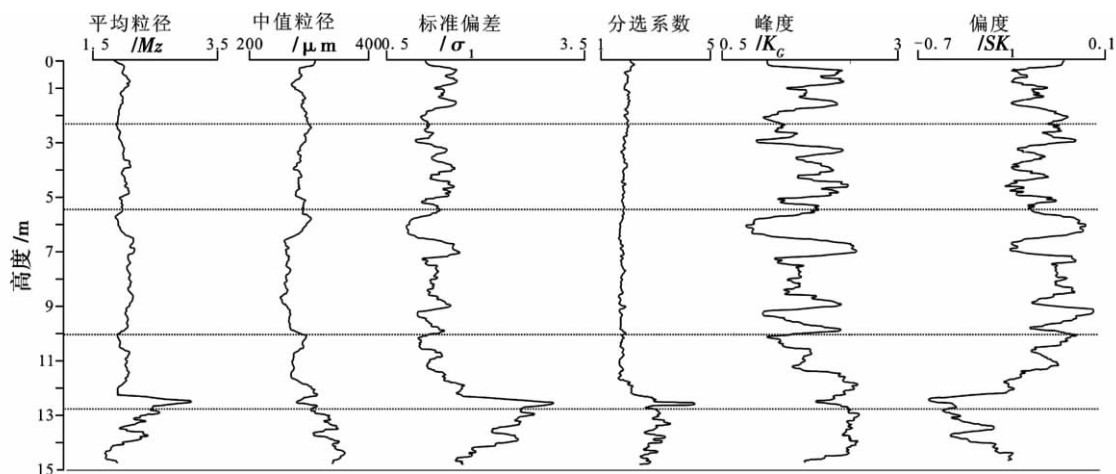


图4 KR剖面粒度参数总体分布特征

Fig.4 Distribution of grain size parameters in KR stratum

动力和搬运介质等条件的影响,有利于进行高分辨率的气候环境演变的研究。剖面标准偏差随粒级组分的变化较大值所对应的样品对于环境变化的响应较其他组分更为敏感,图5中可以看出标准偏差对应的峰值分别为 $5.053\ \mu\text{m}$ 、 $196.741\ \mu\text{m}$ 和 $666.711\ \mu\text{m}$ ,对应的谷值分别为 $24.698\ \mu\text{m}$ 和 $362.148\ \mu\text{m}$ 。应用粒级-标准偏差方法对KR剖面的粒度组分进行了分析,提取环境演变较为敏感的组分,据此划分了3个标准偏差区间: $0.1\sim 24.698\ \mu\text{m}$ (组分1)、 $24.698\sim 362.148\ \mu\text{m}$ (组分2)和 $362.148\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ (组分3)。组分1粒径百分含量变化范围为: $28.557\%\sim 76.32\%$ ,平均含量为 $59.733\%$ ,从下至上组分1含量变化呈增大趋势,线性回归方程斜率为 $0.2$ ;组分2粒径百分含量变化范围: $15.13\%\sim 60.02\%$ ,平均含量为 $34.05\%$ ;组分3粒径百分含量变化范围: $0\sim 28.50\%$ ,平均含量为 $6.22\%$ ,从下至上组分3含量变化呈减小趋势,线性回归方程斜率为 $-0.08$ 。

综合比较3个敏感粒级组分的百分含量变化特征,显示各组分波动变化均较大。整体来看,6.15~

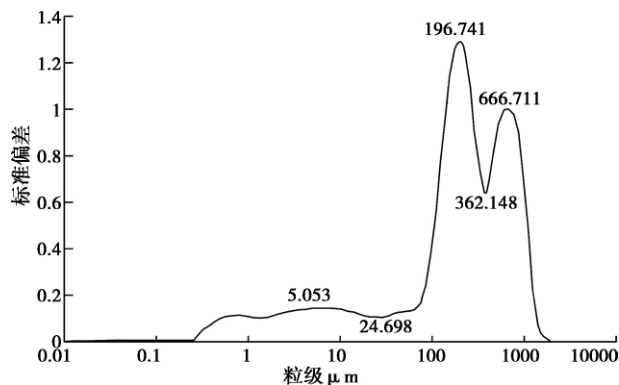


图5 标准偏差随粒级组分变化曲线图

Fig. 5 Grain-size standard curve varied by grain-size

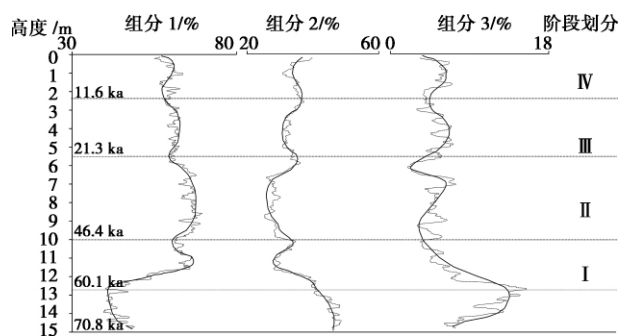


图6 KR剖面各组分平均粒径

Fig. 6 Mean particle size curves in KR stratum

14.8 m 应为晚更新世中期沉积,相当于 MIS4-3 阶段,2.35~6.15 m 应为晚更新世晚期沉积,对应 MIS2 阶段。各组分均表现出峰谷起伏变化,反映出区域古气候经历过相对暖湿-冷干的气候旋回变化过程,与闽东南若干其他老红砂剖面所测定的磁化率起伏变化具有一致性<sup>[10]</sup>。

### 3 古气候意义及驱动机制

#### 3.1 古气候意义

闽东南沿海老红砂的形成发育过程能间接反映区域气候变化过程。根据 KR 老红砂剖面的野外描述和粒度特征,并结合年代学数据,通过有序聚类分析将晚更新世中期以来的气候变化分为以下4个阶段,大约对应深海氧同位素 4-2 阶段(图6)。

阶段 I, 14.80~10.00 m, 年代为距今 70.8~46.4 ka BP。大约形成于晚更新世中期的早玉木冰期。该时段老红砂沉积速率较大,65~50 ka BP 期间沉积速率超过  $0.03\ \text{cm/a}$ ,敏感组分3平均含量为 $9.01\%$ ,组分1平均含量为 $51.26\%$ ,组分2平均含量为 $39.74\%$ ,其中70.8~60.1 ka BP 粗颗粒含量呈现递增趋势,细粒组分呈递减趋势;60.1~46.4 ka BP 期间,粗颗粒含量呈递减趋势,细粒部分出现一个峰值。季风强度较上一阶段变弱,但闽东南沿海气候整体仍表现为冷干特点。已有研究发现,玉木冰期的早期发生全球性的海面下降<sup>[13]</sup>,全球冰量增加,北极冰盖向南推移,东北季风加强,闽东南沿海气候转为干冷。在70~41 ka BP 的晚更新世中期,福建中部沿海是以中旱生的禾本科(*Poaceae*)、蒿属(*Artemisia*)为主的温带森林草原,含较多水龙骨科(*Polypodiaceae*)等蕨类植物<sup>[11]</sup>,气候凉干干燥,其中在70~60 ka BP 期间福建中部沿海存在一次范围较大的海侵<sup>[6]</sup>,表明在冷干的区域气候背景上存在一次明显的温暖湿润气候波动。

阶段 II, 10.00~5.50 m, 年代为距今 46.4~21.3 ka BP。相当于晚更新世中期的玉木间冰期形成的沉积物。沉积速率较小,组分3平均含量为 $4.62\%$ ,组分1平均含量为 $66.21\%$ ,组分2平均含量为 $29.17\%$ ,粗颗粒含量较前一阶段大幅度减少,细颗粒含量显著增加,整体较第一阶段相比温暖湿润。该时期继玉木早期海退之后,发生了玉木亚间冰期的海侵,夏季风增强,该阶段植被为亚热带常绿阔叶林,气候温暖湿润,其中在30~25 ka BP 期间

存在冷波动,沉积速率相对较大。福建沿海的第四系钻孔中普遍埋藏该时期的海相地层,在44~39 ka BP和34~20 ka BP分别发生两次海侵<sup>[6]</sup>。长江三角洲南部地区在60~22 ka BP期间的海侵层连续,并在43~40 ka BP和34~22 ka BP分别出现2次较高海面<sup>[16]</sup>,应属长江三角洲漏湖海侵<sup>[20]</sup>。苏州澄湖的钻孔沉积物保存的海相沉积地层表明在34 ka BP发生一次海侵<sup>[17]</sup>。珠江三角洲在该时期也存在海侵地层,高海平面期处于26~24 ka BP间<sup>[18]</sup>。

阶段Ⅲ 5.50~2.35 m,年代距今21.3~11.6 ka BP。相当于晚更新世晚期的晚玉木盛冰期和冰后期前期形成的沉积物。组分3平均含量为5.32%,组分1平均含量为61.63%,组分2平均含量为33.05%。粗颗粒百分含量增多,细粒组分较上阶段减少。该期老红砂更为发育,沉积速率约为0.06 cm/a,与早玉木亚冰期相比更为干冷,海面下降暴露出的大陆架早期滨海相沉积物,塑造了大规模的风成砂丘<sup>[15]</sup>,后期冬季风有所减弱。该时期闽东南沿海的植被以蒿属(*Artemisia*)、禾本科(*Poaceae*)建群的温带草原或森林草原为主,山地生长针叶林,局部高海拔地区生长云杉(*Picea*)、落叶松(*Larix*)等,气候寒冷干燥<sup>[11]</sup>。

阶段Ⅳ 2.35 m~地表,年代为距今11.6 ka BP以来。相当于全新世以来的沉积物。组分3平均含量为5.01%,组分1平均含量为62.31%,组分2平均含量为33.68%,其中在6~3 ka BP期间,粗颗粒组分较上阶段明显减少,细粒敏感组分增多。随着玉木盛冰期的结束,气候总体开始转暖,海面在波动中上升,闽东南气候逐步偏于温暖。已有研究显示,南京江北地区在9.5~8.7 ka BP期间经历一次海侵<sup>[19]</sup>。长江三角洲在全新世存在一期镇江海侵<sup>[20]</sup>。珠江三角洲全新世海侵的高海面期约为6

~2.5 ka BP间<sup>[18]</sup>。江苏苏州澄湖钻孔沉积也显示在距今6.9 ka BP左右存在海侵地层<sup>[17]</sup>。闽东北沿海也在6 ka BP和3 ka BP也分别出现过明显高于现今海面位置的高海面,海侵面积范围约在6 ka BP前达到最大<sup>[21]</sup>。

### 3.2 气候驱动机制

地球轨道和地轴的变化是第四纪气候变化的主要驱动机制,珊瑚礁<sup>[22]</sup>、孢粉<sup>[23]</sup>、黄土地层<sup>[24]</sup>、冰川<sup>[25]</sup>和热带湖泊<sup>[26]</sup>等记录中都发现了天文学参数对气候变化的影响证据,说明地球轨道参数在控制气候变化模式中扮演重要角色。老红砂等海岸风沙沉积物的堆积沉积变化也深受季风变化的制约和影响,为进一步探讨东南沿海老红砂沉积的环境信息,利用redfit对KR剖面中持续性程度较好(自相关系数较高)的指标进行了红噪声功率谱分析,试图从中寻找环境变化过程可能的驱动机制相关信息。分析结果显示,在95%置信度条件下,KR剖面的三个敏感粒级组分指标变化存在着不同尺度的频谱周期,主要有23.6 ka、14.2 ka、11.8 ka、5 ka和0.63 ka、0.38 ka、0.37 ka、0.28 ka、0.27 ka、0.255 ka、0.246 ka、0.24 ka等周期。

由图7可以看出研究区古气候主要受太阳辐射控制,太阳辐射变化中岁差和半岁差周期最为明显,表现出23 ka的长岁差周期、14.2 ka、11.8 ka的半岁差周期和5 ka的1/4岁差周期,另外存在为数较多的0.25 ka左右的双世纪周期。上述频谱周期分析显示,岁差周期是低纬季风演化中的最强周期,受太阳黑子活动影响的双世纪周期叠加在岁差周期和半岁差周期之上。至于约71 ka的周期波动,功率谱图中虽均有显示,但该剖面时间序列的长度不足以准确确定这个周期,它是否是一个相对稳定的周期,还需要有时间跨度更长的太阳活动资料序列的

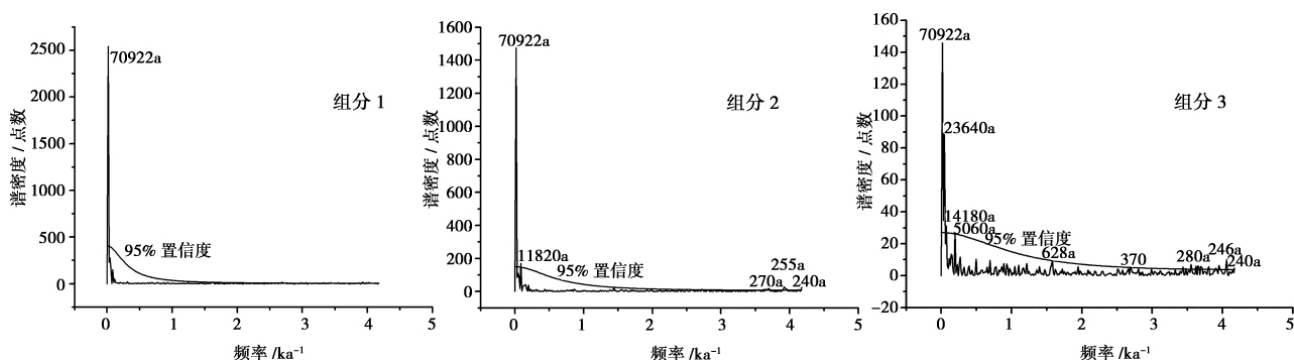


图7 敏感粒级组分频谱分析

Fig. 7 Power spectral analysis of sensitive grain grade

分析来确定。

## 4 结论与讨论

1. 应用粒度-标准偏差方法提取对环境变化敏感的粒度组分,深沪湾科任老红砂剖面粒度组成变化明显,晚更新世中晚期以来沉积厚度较大,总体上存在4个明显波动。70.8~46.4 ka BP和21.3~11.6 ka BP两个阶段老红砂沉积速率较大,两时期分别达到30 mm/(100 a)、650 mm/(100 a),是老红砂风沙堆积的两个主要时期。

2. 科任老红砂粒度特征反映了研究区晚更新世中晚期以来的季风强弱变化。其中70.8~46.4 ka BP和21.3~11.6 ka BP两个阶段冬季风加强,且第Ⅲ阶段强度大于第Ⅰ阶段,该时期海平面下降,裸露扩展的大陆架为老红砂堆积提供了丰富物源。第Ⅱ阶段和第Ⅳ阶段夏季风增强,两阶段分别发生多次海侵事件,海面波动上升,总体处于高海面时期。晚更新世中晚期以来闽东南沿海植被分别表现为温带森林草原、亚热带常绿阔叶林、温带草原或森林草原和亚热带常绿阔叶林景观,气候大体经历了较冷干-暖湿-冷干和暖湿等四个变化阶段。

3. 研究区气候变化主要受控于太阳辐射。红噪声功率谱分析主要表现出明显的23 ka长岁差周期、14.2 ka、11.8 ka半岁差周期,叠加约0.25 ka的双世纪周期,另外还表现有628 a、370 a、280 a和270 a等百年尺度周期,这些百年尺度的周期变化可能受到地震、冰川活动、海洋环流、大气组成等陆地-海洋-大气系统中的内部因素影响,进而对天文学参数起到了放大或缩小作用,其周期变化机制需进一步探讨。

## 参考文献 (References)

- [1] Wu Zheng, Wang Wei. paleogeographic environment and formation of old red sand at South China coast[J]. Science in China, 1997, 27(6): 537-542 [吴正, 王为. 华南沿海老红砂的成因与古地理环境[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 1997, 27(6): 537-542]
- [2] Wu Zheng, Huang Shan, Jin Zhimin, et al. Research on the formation and laterization of the old red sandy sediment along the coast of South China[J]. Acta Geographica Sinica, 1994, 49(4): 298-306 [吴正, 黄山, 金志敏, 等. 华南沿海老红砂的成因与红化作用[J]. 地理学报, 1994, 49(4): 298-306]
- [3] Wang Jianhua. Weathering migration property of chemical elements of the Late-Pleistocene "Old-Red Sands" in south China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1997, 36(suppl. 1): 78-83 [王建华. 华南晚更新世老红砂的元素风化迁移规律[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1997, 36(增刊1): 78-83]
- [4] Jin Zhimin, Liao Bingliang, Wu Zheng. Rubefaction of old red sand at South China coast[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(12): 1122-1124 [金志敏, 廖秉良, 吴正. 华南沿海“老红砂”红化作用研究[J]. 科学通报, 1994, 39(12): 1122-1124]
- [5] Xu Liangfeng, Wang Wei. A study on the depositional fabric of the old red sandy sediment in wenchang county of Hainan island[J]. Tropical Geography, 1997, 17(1): 19-22 [许峰宇, 王为. 海南文昌沿海老红砂沉积组构研究[J]. 热带地理, 1997, 17(1): 19-22]
- [6] Zeng Congsheng. A discussion on problems of marine transgression along the Fujian coast during the late pleistocene[J]. Tropic Oceanology, 1993, 12(1): 39-45 [曾从盛. 福建晚更新世海侵问题探讨[J]. 热带海洋, 1993, 12(1): 39-45]
- [7] Zeng Congsheng, Chen Jucheng, Wu Yougong. Sedimentary stratum and forming age of the "Old Red Sand" along the coast of southeastern Fujian[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(4): 338-342 [曾从盛, 陈居成, 吴幼恭. 闽东南沿海老红砂沉积地层与形成年代[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 338-342]
- [8] Yuan Baoyin, Xia Zhengkai, Li Baosheng, et al. Chronostratigraphy and stratigraphic division of red soil in Southern China[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(1): 1-12 [袁宝印, 夏正楷, 李保生, 等. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 1-12]
- [9] Zhang Jiafu, Yuan Baoyin, Zhou Liping. Luminescence chronology of old red sand in Jinjiang Fujian and the denotative meaning to quaternary sediment in South China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(22): 2646-2654 [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]
- [10] Zeng Congsheng, Chen Jucheng, Wu Yougong. Research on the old red sands along the coast of Southeast Fujian[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1999: 40-50 [曾从盛, 陈居成, 吴幼恭. 闽东南沿海老红砂研究[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 40-50]
- [11] Jin Dongsheng, Zheng Fen. Paleoclimate change since 120 ka BP at central coastal areas of Fujian[J]. Geology of Fujian, 1993, 12(3): 218-227 [金栋生, 郑芬. 福建中部沿海地区十二万年来的古气候[J]. 福建地质, 1993, 12(3): 218-227]
- [12] Wu Zheng, Wang Wei, Tan Huizhong, et al. Chronology of old red sand at coast of South Fujian and West Guangdong[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(5): 533-537 [吴正, 王为, 谭惠忠, 等. 闽南粤西沿海老红砂的沉积年代[J]. 科学通报, 2000, 45(5): 533-537]
- [13] Wen Xiaohao, Li Baosheng, Zheng Yanming, et al. Ages and grain-size characteristics of reticulate red clay on first terrace in Dongjiang River Basin, southern Nanling Mountains[J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(5): 59-63 [温小浩, 李保生, 郑琰明, 等. 岭南东江流域一级阶地网纹红土的时代及其粒度特征[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(5): 59-63]
- [14] Hu Xuefeng, Zhu Yu, Shen Mingneng. Multiple causes of the southern anoxic clay particle evidence[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(9): 918-925 [胡雪峰, 朱煜, 沈铭能. 南方网纹红土多元成因的粒度证据[J]. 科学通报, 2005, 50(9): 918-925]

- [14] Wang Jianhua, Liang Zhirong, Zheng Zhuo, et al. Some proofs about eolian origin of Quaternary old red sands in Eastern Guangdong and Northeastern Hainan [J]. *Tropic Oceanology*, 1998, 17(1): 51–58 [王建华, 梁致荣, 郑卓, 等. 粤东及琼东北第四纪老红砂风成的若干证据[J]. *热带海洋*, 1998, 17(1): 51–58]
- [15] Wu Zheng Feng Wenke Liao Bingliang, et al. Palaeogeographic study in the continental shelf of the Northern South China sea during the last stage of the late Pleistocene [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(6): 491–496 [吴正, 冯文科, 廖炳良, 等. 晚更新世末期南海北部陆架的古地理探讨[J]. *地理学报*, 1993, 48(6): 491–496]
- [16] Wang Zhanhua, Qiu Jinbo, Zhan Lihua, et al. Chronostratigraphy and transgression/regression during late pleistocene in the Southern Changjiang river delta plain [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(4): 1–8 [王张华, 丘金波, 冉莉华, 等. 长江三角洲南部地区晚更新世年代地层和海水进退[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 1–8]
- [17] Shi Kai. Evolution of Palaeoenvironment since Late Pleistocene of SC1 core in Chenhu lake, Jiangsu province [J]. *Geoscience*, 2010, 24(2): 214–220 [史凯. 苏州澄湖 SC1 孔晚更新世晚期以来的古环境演变研究[J]. *现代地质*, 2010, 24(2): 214–220]
- [18] Wang Jianhua, Cao Linglong, Wang Xiaojing, et al. Marine evolution of sedimentary facies and Palaeoenvironment during the Late Quaternary in Wanqingsha area of the Pearl River delta [J]. *Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 35–41 [王建华, 曹玲珑, 王晓静, 等. 珠江三角洲万顷沙地区晚第四纪沉积相与古环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 35–41]
- [19] Zhu Cheng, Ma Chunmei, Huang Yan, et al. Stratigraphic record of environmental during 9490–4840a BP on the North bank of Yangtze river, Nanjing area [J]. *Geological Review*, 2005, 51(3): 347–352 [朱诚, 马春梅, 黄林燕, 等. 南京江北地区 9490 ~ 4840 a BP 环境演变的地层记录研究[J]. *地质论评*, 2005, 51(3): 347–352]
- [20] Yu Zhenjiang, Guo Shengqiao, Liang Xiaohong, et al. Division and age assignment of the Quaternary transgression layers in the Yangtze delta area [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29( suppl. ): 618–625 [于振江, 郭盛乔, 梁晓红, 等. 长江三角洲(江南)地区第四纪海侵层的划分及时代归属[J]. *地层学杂志*, 2005, 29(增刊): 618–625]
- [21] Zeng Congsheng. Transgressions and sea level changes along the Northeast coast of Fujian during the Late Quaternary [J]. *Journal of Fujian Normal University: Nature Science*, 1997, 13(4): 94–101 [曾从盛. 闽东北沿海晚第四纪海侵与海面变动[J]. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 1997, 13(4): 94–101]
- [22] Aharon, P. Implications of the Coral-reef record from New Guinea concerning the astronomical theory of climatic change [C]// *Milankovitch and Climate*, Reidel, Dordrecht, 1984: 379–390
- [23] Hooghiemstra H, Melice J L, Berger A, et al. Frequency spectra and palaeoclimatic variability of the high-precision 30–1450 ka Funza 1 pollen record (Eastern Cordillera, Colombia) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1993, 12: 141–156
- [24] Kukla G. Loess stratigraphy in central China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6: 191–219
- [25] Loftus C, Jouzel J, Raynaud D, et al. The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming [J]. *Nature*, 1990, 347: 139–145
- [26] Kutzbach J E, Street-Perrott F A. Milankovitch forcing of fluctuations in the level of tropical lakes from 18–0 ka yr BP [J]. *Nature*, 1985, 317: 1301–1304

## Grain-size Characteristics of Old Red Sand and Palaeoclimate Change during Late Pleistocene in Southeast Fujian, China

JIN Jianhui<sup>1 2 3</sup>, LI Zhizhong<sup>1 2 3</sup>, CHEN Xiuling<sup>1 2 3</sup>, QI Shengji<sup>1 3</sup>, WU Meirong<sup>1 3</sup>,  
HU Fangen<sup>1 3</sup>, ZHANG Hui<sup>1 3</sup>, ZHAO Qian<sup>1 3</sup>, LIN Shuqian<sup>1</sup>, ZHU Shuya<sup>1</sup>

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. School of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

3. Key Laboratory of Humid Subtropical Ecosystem and Geography, Ministry of Education, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** On the basis of environmental sensitive grain-size analysis and combined with chronologic data, the process of paleoclimate change was preliminary divided and the drivers of climate change was discussed. As a result, we have found that it was going through a colder-drier, warm-wet, cold-dry and warm-wet process of paleoclimate change. The process of paleoclimate change is controlled by the solar radiation. Power spectral analysis presented remarkable 23 ka of long period of precession, 14.2 ka, 11.8 ka of period of half precession and 0.25 ka of period of double century. Internal factors of land-ocean-atmosphere system maybe enlarge or reduce the secular cycle. The deposition rate of old red sand was large in 70.8 ~ 46.4 ka BP and 21.3 ~ 11.6 ka BP and they are the major phases of sand accumulation with 30 mm/(100 a) and 650 mm/(100 a).

**Key words:** Late Pleistocene; paleoclimate; old red sand; grain-size