

许岱玉, 靳建辉, 李志忠, 等. 福建晋江颜厝老红砂的光释光测年及其环境指示意义[J]. 中国沙漠, 2024, 44(2): 11–24.

# 福建晋江颜厝老红砂的光释光测年 及其环境指示意义

许岱玉, 靳建辉, 李志忠, 卫俊杰, 侯晨阳

(福建师范大学 福建省亚热带资源与环境重点实验室/地理科学学院, 福建 福州 350117)

**摘要:** 老红砂是全球气候变化研究的重要载体,能有效反映晚更新世以来的海岸带地貌过程和气候演化背景。囿于不可靠的测年方法,华南老红砂的形成年代及其气候环境背景问题尚未解决。为了更好地揭示华南老红砂主要的形成时段及其环境特征,本研究经野外考察后选取了位于福建晋江的颜厝老红砂剖面进行采样。在实验室选用中颗粒石英单片再生剂量法进行光释光年代测量,并对测年样品进行了粒度和地球化学元素测试。结合离散系数和化学风化指数 *CIA* 等指标对老红砂测年结果的可靠性进行了探讨。同时通过对已有的部分华南老红砂年代数据进行概率密度统计分析,探讨华南老红砂的形成年代及其气候环境背景。结果表明:(1)颜厝剖面为典型的风成砂,分选性较好,整体以中细砂为主。(2)颜厝老红砂沉积主要形成于 132.85~37.22 ka,其中,在 MIS5 和 MIS4 阶段,沙丘可能因为处于活化—沉积—再活化的状态,释光信号没有得到良好的保存,因而出现了“沉积间断”的假象。MIS3 阶段对应海退时期,风沙沉积速率较快,在暖湿的气候环境下,风化作用强烈。(3)受到海平面变化和冬季风强度等因素影响,高海面和低海面环境均有可能发育老红砂,但其沉积时段主要在 80~30 ka,对应 MIS4 和 MIS3 阶段。

**关键词:** 华南沿海; 福建; 老红砂; 释光年代学

**文章编号:** 1000-694X(2024)02-011-14

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00082

**中图分类号:** P631

**文献标志码:** A

## 0 引言

老红砂指颜色呈暗黄橙色(5YR/5/8)、淡红棕色(5YR5/8)、棕红色(2.5YR4/8)和红色(10R4/8)的以中细砂为主的半胶结沉积物<sup>[1-3]</sup>,广泛分布于中国海南、广东、福建和辽东半岛等沿海地区。早期研究对地层进行了划分和对比分析,将华南沿海的老红砂划分为第四纪沉积物,在闽粤琼鲁分别命名为“东沈组”<sup>[4]</sup>、“陆丰组”<sup>[5]</sup>、“八所组”<sup>[6]</sup>和“柳乔红层”<sup>[7]</sup>。在国外,朝鲜半岛东南沿岸<sup>[8]</sup>、越南东南<sup>[9]</sup>、印度东南沿岸<sup>[10-12]</sup>、斯里兰卡东北沿岸<sup>[13]</sup>、以色列西北沿岸、埃及北岸<sup>[14]</sup>和澳大利亚东北沿岸<sup>[15]</sup>都存在此类红化沉积物,国外学者称其为红色沙丘砂。

光释光测年技术的测年范围为几十年至几十万年<sup>[16]</sup>。相比<sup>14</sup>C测年法,光释光技术测年范围大,且测年矿物石英或钾长石在大部分沉积物中普遍

存在,凸显了光释光测年技术的优势<sup>[17]</sup>。2000年以来,随着释光测年技术完善,该方法被广泛应用于沙质海岸地貌过程和风沙环境演变<sup>[18]</sup>、海岸带史前环境考古<sup>[19-20]</sup>、人类活动遗迹<sup>[21]</sup>和古环境演变及意义<sup>[22-23]</sup>等领域。在20世纪,吴正等<sup>[1,24-25]</sup>、曾从盛等<sup>[3-4,26]</sup>对中国沿海的老红砂进行了系统研究,讨论中国老红砂的形成时间、形成机制和沉积环境等问题,尝试进一步阐明老红砂形成的古环境古气候背景。21世纪以来,有关晚更新世老红砂的研究取得长足进展。光释光测年技术广泛应用于华南海岸带<sup>[27-30]</sup>、胶东半岛<sup>[7]</sup>、朝鲜半岛<sup>[8]</sup>、印度半岛<sup>[10-12]</sup>和澳大利亚东北部<sup>[15]</sup>的晚更新世—全新世老红砂研究,将老红砂年代上限从末次冰期拓展至末次间冰期,甚至更早。在福建海岸带,老红砂的研究集中于闽江河口和海坛岛北部<sup>[31-32]</sup>;在闽南的晋江、九龙江河

收稿日期:2023-03-26; 改回日期:2023-05-23

资助项目:国家自然科学基金项目(41301012,41771020)

作者简介:许岱玉(1998—),女,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向为全球变化与第四纪。E-mail: xu19559155989@163.com

通信作者:靳建辉(E-mail: geojjh@fjnu.edu.cn)

口区也断续保存有更新世老红砂沉积,目前为止,仅有少数研究对其沉积环境和年代进行了讨论<sup>[19,27]</sup>。整体来看,有关老红砂的研究,尽管已取得不少成果,但目前的年代学数据数量和质量,还无法有效支撑老红砂沉积过程及其环境演化背景的系统研究。本研究选取晋江市颜厝村的老红砂剖面为研究对象,利用石英单片再生剂量法测试样品的等效剂量,同时对其粒度和地球化学元素进行了测试,讨论了湿润亚热带地区的化学风化过程对环境剂量率的影响,建立了颜厝老红砂的年龄框架;最后,收集整理已有研究成果,综合分析了区域老红砂的形成时间和沉积环境。该研究可为晚更新世老红砂研究提供数据支撑和理论基础。

## 1 研究区概况

华南沿海地区的老红砂,多见于以花岗岩类岩石出露为主且风大沙多的岬湾岸段,与现代沙丘的

分布范围基本一致<sup>[33]</sup>,胶结良好,抗侵蚀能力强,在局部地段可形成海岸台地和海岸阶地等<sup>[34]</sup>。本文所研究的颜厝剖面位于福建省晋江市深沪镇,海拔28 m,地理坐标为24°36′38.16″N、118°39′09.646″E,东濒台湾海峡(图1)。地貌类型为侵蚀后的老红砂台地,海拔约为35 m。其北、东、南三面临海,形成了较为复杂的海岸地貌形态,风积地貌发育,物源除当地基岩风化碎屑外,大部分是沿海沙地、沙滩和沙丘经风力二次搬运沉积形成<sup>[35]</sup>。从气候类型来看,该地区属典型的亚热带海洋性季风气候,年均气温逾20℃,年降水量900~1 200 mm,蒸发旺盛,在东季风环流和台湾海峡“狭管效应”的双重作用下,风力强劲,年均风速在6.5~8.5 m·s<sup>-1</sup>。河川径流以降水补给为主,河流含沙量较大,晋江是流域内含沙量最大的河流,多年平均含沙量约为0.438 kg·m<sup>-3</sup>。土壤类型为砖红壤性红壤、红壤、潮土以及风沙土等,植被类型为南亚热带季雨林<sup>[36]</sup>。

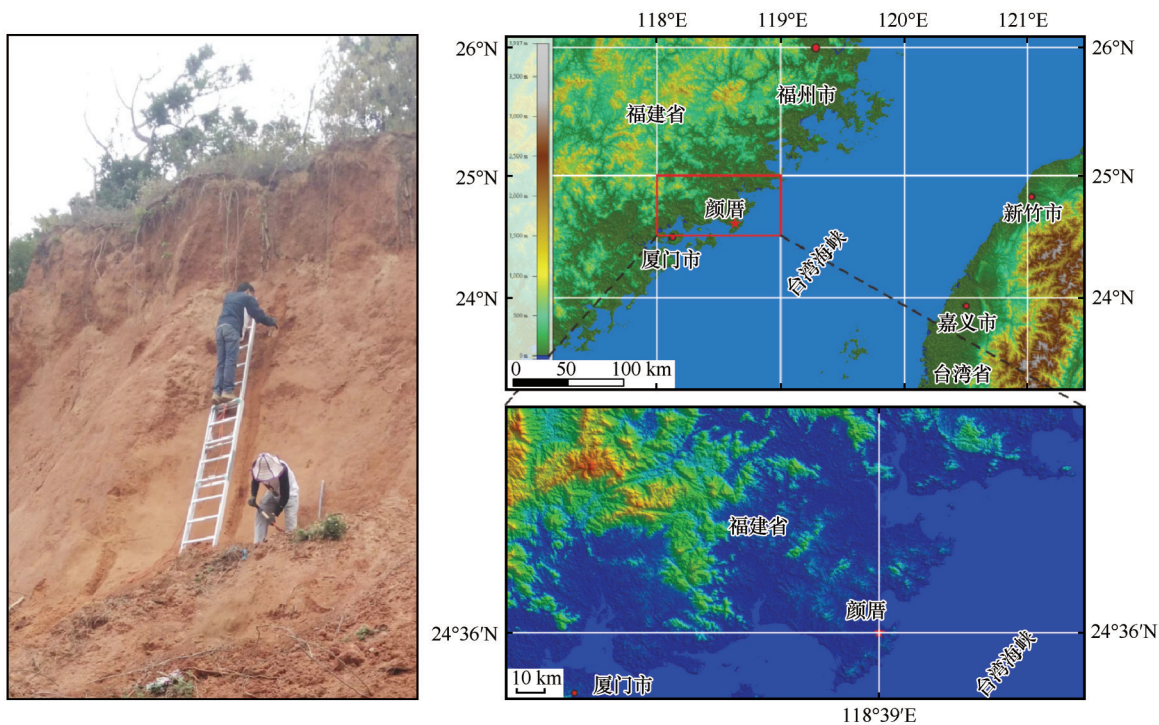


图1 颜厝剖面及研究区位置

Fig.1 The Yancuo profile and location of the studied area

## 2 材料与方法

### 2.1 地层划分与样品采集

颜厝剖面(24.610°N、118.656°E),位于福建省晋江市深沪镇颜厝村,呈台地状残留地貌,台地顶

部海拔实测高度为35 m,剖面整体出露深度约16 m。0~1.8 m为暗棕色砂层,因多根系而未采样,1.8~4.0 m为淡棕红色砂层,4~6 m为淡黄棕色砂层,6 m以下因崩塌坡积而未采样(图1)。

采样前去除剖面约30 cm的表层土壤。采样时,在不锈钢钢管的一端用泡沫板塞满,将泡沫板

端平行砸入地层,待样品充分装满后取出,立即用黑色塑料袋、锡纸和不透明胶带将两端封口以确保不曝光,最后在钢管上标上编号。注意在采集的过程中尽量不丢失水分,因为含水量对测年结果有较大的影响<sup>[37]</sup>。本剖面共采集 4 个 OSL 测年样品,样品编号及对应采样点深度分别为 YCR-01(1.8 m), YCR-02(3.6 m), YCR-03(4.5 m), YCR-04(5.5 m)。同时,每间隔 10 cm 采集一个粒度样品,共采集环境代用指标样品 55 个。

2.2 年代学实验

2.2.1 测年样品的前处理

测定的样品制备在暗室红光条件(中心波长约为 655±30 nm)下进行。按照 Lai<sup>[38]</sup>描述的程序从预处理的样品中提取 38~63 μm 的中颗粒石英。分别用 10% 盐酸和 30% 过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)处理样品,以去除碳酸盐和有机物<sup>[39]</sup>。再使用 40% 的氢氟酸处理

约 50 min,以去除长石和石英颗粒表面的 α 剂量,然后用 10% 的盐酸冲洗氢氟酸在刻蚀过程中形成的氟化物,反应结束后冲洗、烘干,筛选中粒级(38~63 μm)的石英粒组,用强磁铁去除铁磁性矿物,得到纯净的石英粒组。所得到的石英颗粒的纯度需要进行检验,若 IRSL/OSL<10% 则认为样品中的长石含量达到可以忽略的水平,该样品适用于光释光测年。最后,将硅油涂在不锈钢圆片上,均匀沾取一薄层石英颗粒,涂片直径为 2 mm。

2.2.2 测年样品的等效剂量(Equivalent dose, De)测试

等效剂量的测试采用单片再生剂量法(SAR),所使用的仪器为丹麦国家实验室生产的光释光测量仪 Risø TL/OSL-DA 20 C/D,该仪器配置的激发光源为蓝光(470±10 nm),探测滤光片为 U-340。测量仪器配置的 β 源为 <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y。每个样品制备 18 个测片。SAR 法测定样品等效剂量值的具体步骤见表 1。

表 1 标准 SAR 法流程<sup>[9]</sup>  
Table 1 Standard single-aliquot regenerative dose protocol<sup>[9]</sup>

步骤	操作	说明
1	辐照剂量 $D_i(i=0,1,2\cdots)$	$i$ 为循环数,当 $i=0$ 为天然剂量(不辐照)
2	预热(PH1)260 °C,时间 10 s	去除热不稳定信号
3	蓝光激发 40 s,激发温度为 130 °C	获得光释光信号 $L_x$
4	辐照实验剂量(test dose)	用以校正光释光感量变化
5	预热(PH2)220 °C,时间 10 s	去除热不稳定信号
6	蓝光激发 40 s,激发温度为 130 °C	获得实验剂量的光释光响应 $T_x$
7	280 °C 下蓝光激发测片	去除可能的 OSL 信号积累
	重复 1~6 步	开始下一个测量循环

2.2.3 测年样品的环境剂量率(Dose rate, D)计算

环境剂量率的测试方法可分为直接测量法和间接测量法<sup>[40]</sup>,本研究采取间接测量法(测量样品的 U、Th、K 等放射性核素含量或 α、β、γ 计数)对  $D$  值进行计算。含水量对环境剂量率也有直接影响,本研究的样品含水率使用 10%±0.3% 的估算值。宇宙射线对环境剂量率的影响与取样点的埋藏深度、沉积物密度、纬度以及地面海拔有关,本文根据 Prescott 等<sup>[41]</sup>提出的宇宙射线剂量率方法对本剖面的地理坐标和样品深度进行了校正。根据以上参数,使用 Wintle 等<sup>[42]</sup>提出的 U、Th、K 转换系数,最终计算得出样品吸收的环境剂量率。

2.3 粒度测试

粒度测试采用激光粒度仪法,测量仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪,取适量样品装入烧杯,在装有样品的烧杯中加入 10 mL 浓度为 10% 的 HCl,使其充分反应,以去除其中的 CaCO<sub>3</sub>,待其冷却并沉淀后洗酸至 pH 达到合适值;再加入一定量浓度为 10% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 以除去其中的有机质,浸泡 24 h 以上使其充分反应(不再有气泡产生说明有机质已全部去除,否则继续加入适量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>);用塑料管吸取多余的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>;向盛有样品的烧杯中加入 10 mL 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的六偏磷酸钠(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 溶液,略加搅拌后再将烧杯放入超声波清



洗池中振荡 10 min, 振荡频率设为 100 Hz; 上机测试。每测量完一个样品后将仪器清洗 3 次, 以确保下次测量时仪器中(水泵、水管等)不再有上一样品的残留物; 最后, 对粒度组分和参数数据进行整理分析。

## 2.4 地球化学元素测试

为了进一步讨论区域风化淋溶过程对环境剂量率的影响, 本研究对 4 个测年样品也进行了地球化学元素测试。在实验室内将 4 个样品以 105 °C 恒温烘干, 取 0.120~0.125 g 样品硝化, 使用 YY-40 型液压制样机压制成圆形薄片。测量了 CaO、Na<sub>2</sub>O、MgO、K<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、MnO<sub>3</sub> 等氧化物含量, 对化学蚀变指数(CIA)和淋溶系数(BA)进行了计算:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O)] \times 100 \quad (1)$$

$$BA = (CaO + K_2O + Na_2O) / Al_2O_3 \quad (2)$$

以上实验均在福建师范大学福建省亚热带资源与环境重点实验室完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 SAR法预热坪实验

预热坪实验以样品 YCR-04 为例, 选择中颗粒(38~65 μm)进行测试, 天然和再生释光测量的预热温度为 180~280 °C, 每 20 °C 为一个间隔, 预热时间为 10 s<sup>[43]</sup>。每个预热温度下有 3 个测片, 共测试了 6 个温度、18 个测片, 样品的等效剂量值根据所有测片等效剂量值的平均值和分选系数得出。预热坪实验结果如图 2 所示, 在选取的预热范围内出现坪区(220~260 °C)。因此, 本研究选择 260 °C 作为颜厝剖面老红砂样品的预热温度, cut-heat 为 220 °C。

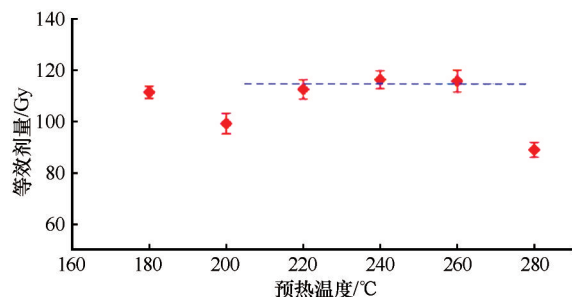


图2 预热坪实验

Fig.2 Preheat plateau test

### 3.2 颜厝剖面典型样品的释光信号特征

长石检验结果显示本研究中的 4 个样品的 IRSL/OSL 比值远小于 0.1, 说明样品中的长石矿物对实验的影响可忽略不计, 石英纯度符合释光测年的条件。同时 4 个样品的循环比、回授率及剂量恢复实验均满足 SAR 法的流程要求, 因此, 采用石英 SAR 法获得的测年结果较为可靠。

从测年样品的天然释光信号的衰减曲线可以看出, 4 个样品的天然释光信号均在 2 s 左右快速衰减至背景值, 结合组分分析, 发现 4 个样品的初始光释光信号中快组分占比 > 80%, 说明 4 个样品均以快组分为主(图 3)。4 个样品在给定剂量为 0 Gy 时信号几乎为 0, 回授率小于 5%, 说明测试过程中热转移对年代结果影响基本可忽略。此外, 采用指数加线性的拟合方法对 4 个样品进行拟合, 建立生长曲线, 如图 3B 所示。最后通过该曲线将自然信号投影内插到该曲线的剂量轴上, 即可获得对应测片的等效剂量值。

### 3.3 颜厝剖面老红砂 OSL 年代

由于风化淋溶强烈, 测年样品中无法浮选出足够的长石矿物, 因此, 本研究仅选取石英 SAR 法对颜厝的 4 个样品进行测试, 测年结果如表 2 所示。年龄模型的选择对等效剂量值的计算有重要影响。中值年龄模型(CAM)考虑单个测片上的等效剂量值对于权重均值的影响, 从而计算出多个测片之间的离散系数, CAM 模型只适合 *De* 分散小(即离散偏小)的样品; 最小年龄模型(MAM)适合 *De* 分散偏大(即离散度偏大)的样品<sup>[44]</sup>。为了更好地进行结果对比, 本文对 4 个样品分别选用了 MAM 和 CAM 进行计算。本研究参考 Jain 等<sup>[45]</sup>提出的离散度标准(*OD*=20%)对年龄模型进行选择。结果表明, 本剖面中样品 YCR-01 与 YCR-02 的离散系数相对较大, 分别为 14.2% 和 16.2%(表 2), 结合已有成果, 本研究选择 MAM 法得到的 *De* 值更合理(图 4); 样品 YCR-03 与样品 YCR-04 的离散系数较小, 分别为 8.6% 和 10.1%, 因此本文认为选择 CAM 法对 *De* 值进行计算得到的结果更可信。最后基于 Durcan 等<sup>[46]</sup>提出的 DRAC 在线计算器, 得出光释光年龄(表 2)。可以看出, 4 个样品的年代结果分布于 37.22±1.62~121.91±4.89 ka, 其中 4.5 m 处的 YCR-03 和 5.5 m 处的 YCR-04 出现了“年龄倒置”现象, 但在误差范围内, 年代结果总体上呈现从上到下递增的趋势。

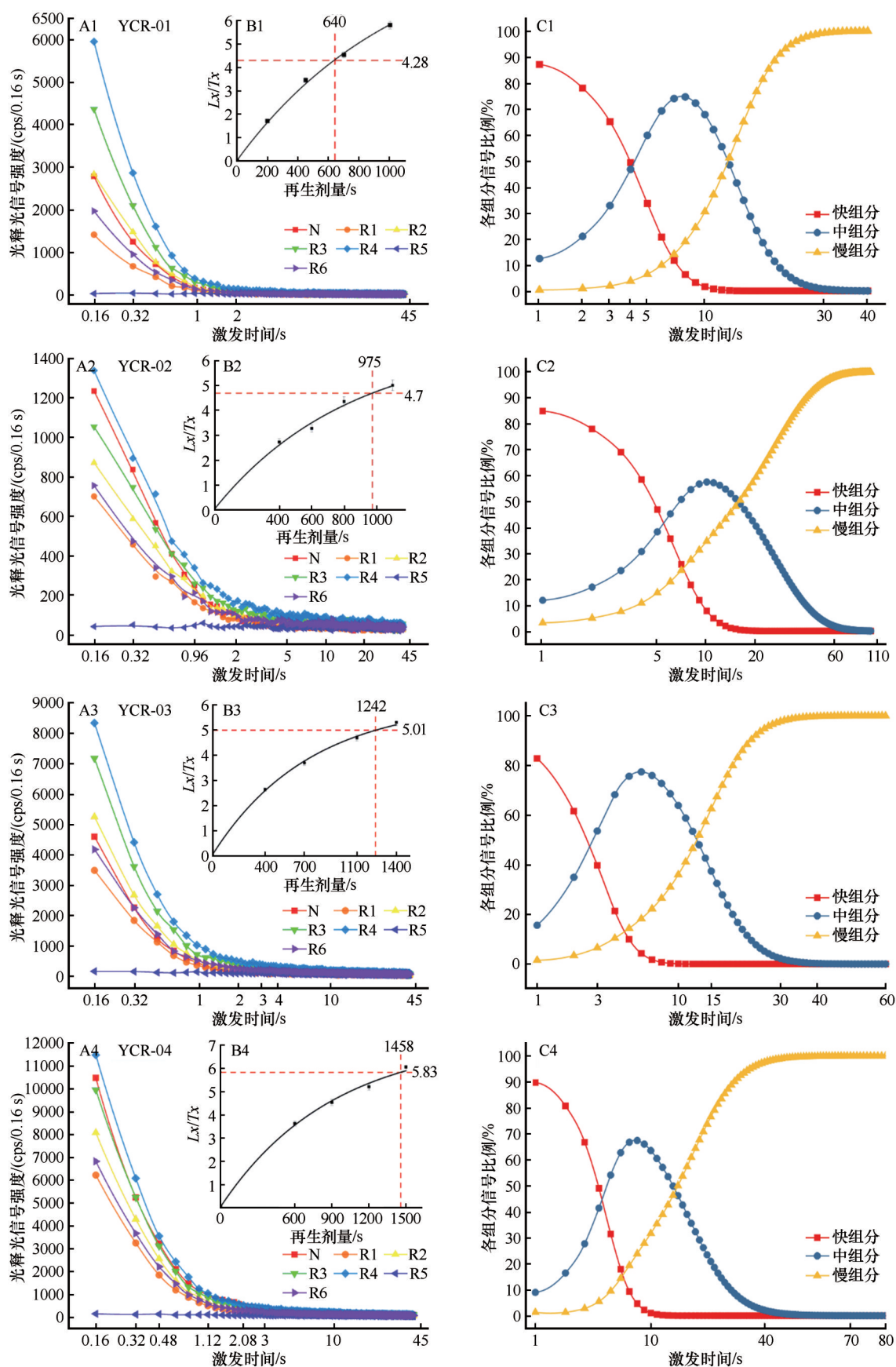


图3 颜厝剖面样品的衰减曲线(A)、生长曲线(B)和组分特征(C)

Fig.3 The decay curves (A), growth curves (B) and component characteristics (C) of samples in Yancuo profile

表2 颜厝剖面样品的光释光测年结果

Table 2 Optically stimulated luminescence dating results of samples in Yancuo profile

样品 编号	埋深 /m	K /%	U /(mg·kg <sup>-1</sup> )	Th /(mg·kg <sup>-1</sup> )	U/Th 比值	De离散 系数/%	环境剂量率 /(Gy·ka <sup>-1</sup> )	OSL-SAR 年龄/ka
YCR-01	1.8	0.647±4.5	1.22±5.0	8.70±3.0	0.14±0.23	14.2±0.8	1.58±0.032	37.22±1.62
YCR-02	3.6	0.697±4.2	1.99±4.2	9.29±2.9	0.21±0.31	16.2±1.5	1.8±0.032	52±3.08
YCR-03	4.5	0.437±5.5	1.02±5.2	5.02±3.3	0.2±0.32	8.6±0.7	1.062±0.025	121.91±4.89
YCR-04	5.5	0.659±4.3	1.12±5.1	5.80±3.3	0.19±0.30	10.1±0.8	1.326±0.027	116.01±4.33

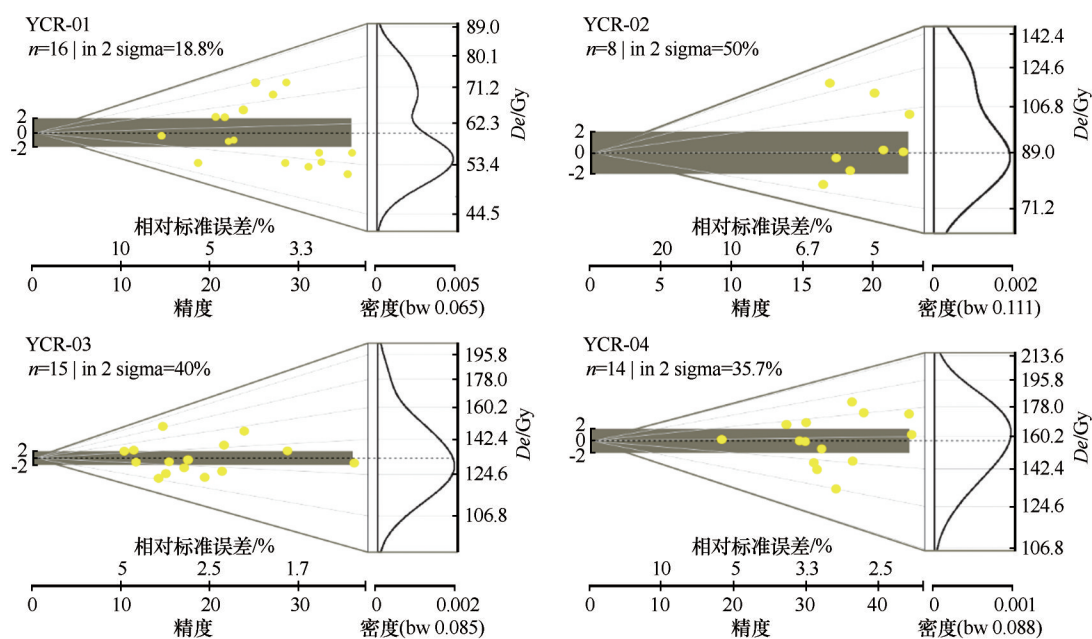


图4 颜厝剖面样品De值分布图

Fig.4 The De radio plots of samples in Yancuo profile

### 3.4 颜厝剖面粒度特征

依据乌登-温特沃斯(Udden-Wentworth)粒度分级标准,把颜厝老红砂样品粒度分为6个粒级:<2 μm(黏土),2~63 μm(粉砂),63~125 μm(极细砂),125~250 μm(细砂),250~500 μm(中砂),>500 μm(粗砂)。颜厝剖面沉积物粒度以中砂为主,其次为细砂和粉砂(图5)。其中,中砂含量占总量的25%~39%,平均含量达到36.4%;细砂含量占13%~21%,平均含量为16.8%;粉砂含量约占总量的9%~30%,平均含量为16.8%。极细砂和黏土含量均较少,极细砂含量4.6%~10%,平均含量为5.7%;黏土含量4%~13%,平均含量为8.7%。从各粒级的百分含量来看,中砂>细砂>粉砂>粗砂>极细砂>黏土,以砂组为主(>63 μm为主),占样品总量的85%左右。

粒度参数是以一定的数值定量地表示碎屑物质的粒度特征,单个粒度参数及其组合特征可作为

判别沉积动力条件及沉积环境的参考依据。粒度参数主要包括平均粒径( $M_z$ )、分选系数( $\sigma$ )、偏度( $SK$ )和峰态( $K_g$ ):

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (4)$$

$$SK = \frac{\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_{95} + \Phi_5 - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (5)$$

$$K_g = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (6)$$

分选系数可用于表示颗粒大小均匀程度,颜厝剖面的分选系数在2~3,说明其分选性较差,间接指示物源可能是沿岸流和入海河流携带的泥沙在海岸沉积后,经风力二次搬运,堆积在潮上带形成的;偏度用于表示频率曲线的对称性,实际上反映粒度分布的不对称程度,该剖面的偏度为-0.8~-0.6,总体呈负偏;峰值为0.5~1.5,呈宽峰态值窄峰态(图6)。



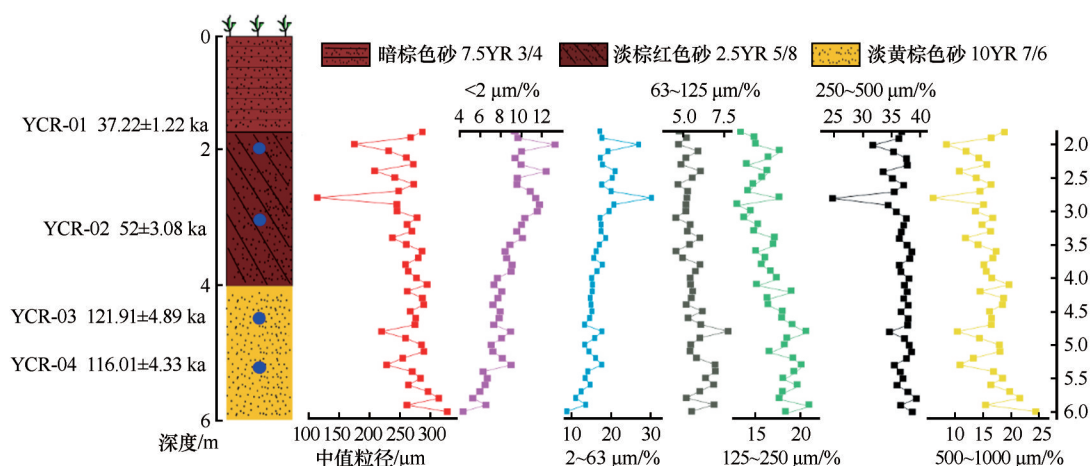


图5 颜厝剖面岩性特征及不同粒度组分特征

Fig.5 The lithologic characteristics and grain size components of Yancuo profile

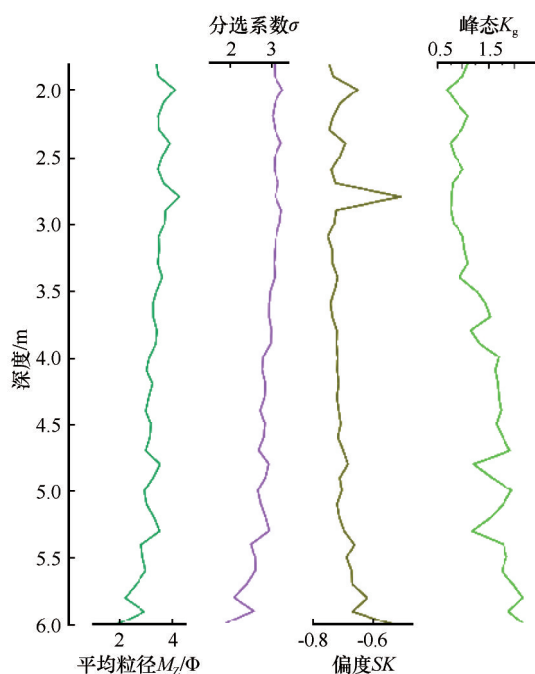


图6 颜厝剖面的粒度参数特征

Fig.6 Grain size parameters of the Yancuo profile

### 3.5 颜厝剖面老红砂的风化特征

$CIA$  指数用于定量评价长石的化学风化强度, 是  $Al_2O_3$  与不稳定氧化物的比值, 反映长石转化为黏土矿物的风化程度<sup>[47]</sup>,  $CIA$  指数越高, 风化越强烈。Fedó 等<sup>[48]</sup>做了大量研究后总结得出:  $CIA$  为 50~60, 反映弱风化程度;  $CIA$  为 60~80, 反映中等风化程度;  $CIA$  为 80~100, 则反映强烈风化程度。本研究测试了 4 个样品的地球化学元素, 计算了化学蚀变指数 ( $CIA$ )。如表 3 所示, 颜厝 4 个样品的  $CIA$  指数变化幅度小, 为 82~86, 整体为中等程度风化。在风化过程中,  $U$  相对于  $Th$  更容易发生迁移, 即风化程度越

高,  $U/Th$  比值越小<sup>[49]</sup>。土壤风化淋溶系数 ( $ba$  值) 是指母质或土壤中各种盐基的氧化物与氧化铝的分子比值,  $Al_2O_3$  比较稳定, 不容易被淋溶, 而盐基离子的盐类则容易被淋洗。所以,  $ba$  值越大, 表明盐基淋溶也越强, 反之越强。颜厝老红砂样品的  $ba$  指数更接近于网纹红土, 但远小于风成沙和海滩沙。这表明老红砂风化程度远低于网纹红土的化学风化程度, 且与风成沙的化学风化程度接近, 应处在化学风化的初期和中期阶段; 同时表 3 显示, 4 个样品  $K$  含量较平均且较少, YCR-01 与 YCR-02 的  $U$ 、 $Th$  含量明显高于 YCR-03 和 YCR-04 样品 (表 2), 其中 YCR-01 的  $U/Th$  比值明显偏低, 说明风化程度较高, 环境剂量率偏高, 测年结果较实际年龄偏小。

## 4 讨论

### 4.1 光释光年代的可靠性

张克旗等<sup>[50]</sup>认为光释光测年的可靠性在极大程度上取决于对  $De$  值和  $D$  的准确测定, 所以选择合适的矿物样品极为重要, 在理论上, 释光测年矿物必须满足的基本条件之一为完全晒退。因此, 样品的沉积埋藏前的晒退程度是光释光测年可靠性的重要影响因子, 对样品晒退情况的讨论极有必要。样品的  $De$  值分布情况可以反映颗粒的晒退程度, 从等效剂量分布辐射直方图 (图 4) 可以直观地看出样品的分散程度, 判断样品是否完全晒退<sup>[51]</sup>。对于完全晒退的样品,  $De$  通常呈现为紧凑且对称的高斯分布; 正偏的  $De$  值分布说明样品中含有一小部分晒退较差的颗粒; 分布宽的  $De$  值则说明样品存在较多晒退较差的颗粒, 也可能是沉积物样品内部的  $De$  分布

表3 颜厝剖面老红砂与区域内其他第四纪沉积物的地球化学特征对比  
Table 3 Comparison of geochemical characteristics between Yancuo Old Red Sand  
and other Quaternary deposits in the study area

样品	<i>CIA</i>	<i>ba</i> 值	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO
YCR-01	82.065	0.233	0.125	0.107	0.187	2.506	86.318	12.550	2.665	0.539	0.042
YCR-02	82.623	0.228	0.124	0.106	0.202	2.261	85.989	11.950	2.968	0.447	0.035
YCR-03	82.546	0.230	0.110	0.135	0.203	2.159	87.946	11.269	2.787	0.459	0.039
YCR-04	85.384	0.191	0.165	0.109	0.273	2.095	80.199	14.182	3.814	0.369	0.052
网纹红土	98.917	0.024	0.120	—	0.270	0.170	56.260	23.760	6.990	0.610	—
海滩沙	45.528	1.304	0.530	—	0.060	0.140	92.570	0.560	0.350	0.180	—
风成沙	72.283	0.403	0.080	—	0.090	1.680	89.580	4.590	1.050	0.110	—

不一致<sup>[52]</sup>;对于同一个样品,晒退程度越接近或者越高的测片的 $De$ 值在直方图上表现为近似的正态分布,即晒退程度越接近,峰区越狭窄<sup>[35,53]</sup>。本文选取中颗粒进行判断样品的晒退程度,4个样品均为老红砂,YCR-01分布较宽但集中,说明样品内部整体晒退较为均匀,但存在小部分样品晒退不充分。YCR-02分布呈现多峰态特征,代表着晒退程度不同的组分<sup>[54]</sup>,对于这类晒退较差的样品,可以认为第一组上升段直方图对应的测片晒退较好,取这些测片的等效剂量的平均值和分选多数得到的等效剂量值最可能接近实际值,可信度较高<sup>[35]</sup>。YCR-03和YCR-04呈正态分布,颗粒较为集中,晒退充分。总而言之,颜厝剖面的4个释光样品总体晒退程度较好,其中YCR-03和YCR-04样品 $De$ 值分布最为集中,晒退最为充分。

离散度( $overdisp, OD$ )用于反映同一个样品不同测片测试结果之间的分散程度。一般认为,若 $OD < 20\%$ ,则认为样品颗粒晒退较好<sup>[55]</sup>。若离散系数合理, $De$ 值分布集中,则可采用CAM计算测年结果,相反,若样品晒退情况较差,可采用MAM计算结果<sup>[40]</sup>。图4的辐射-直方图显示本剖面的4个样品的测片都在合理范围内集中,4个样品对应的 $OD$ 值分别为 $14.2 \pm 0.8$ 、 $16.2 \pm 1.5$ 、 $8.6 \pm 0.7$ 、 $10.1 \pm 10.8$ ,均在合理范围内。

化学风化作用是影响释光测年精度的主要问题<sup>[27]</sup>,一般来说,对于老红砂剖面,受风化强烈的上层沉积样品的释光年龄无法作为真实有效的埋藏年龄。本研究选择从剖面中部取样,同时综合考虑样品的等效剂量与环境剂量率影响因素,认为4个样品的年龄均在合理范围内,其中YCR-01样品因风化程度较高,其年代结果应略小于实际埋藏年

龄。YCR-02、YCR-03和YCR-4样品的生长曲线拟合较好,等效剂量未达到饱和,风化程度相对较低,环境剂量率接近实际剂量率,测试的年龄结果应更接近实际埋藏年龄。由于该剖面6 m之后未采样,推测颜厝老红砂的底部最老年龄超过130 ka。

综上所述,颜厝剖面的4个光释光样品的年代结果可靠性较高,与前人在该区域研究成果<sup>[24,30,56]</sup>一致。关于前面提及的年龄倒置问题,可能是YCR-04样品对应的沉积层风化程度高( $CIA=85$ )倒置年代结果小于上部的YCR-03年代结果;也可能是受沉积相影响,该沉积层可能位于海相沉积的过渡层,用于释光测年的石英颗粒的释光性质受到一定影响,样品间石英颗粒的释光性质差异导致等效剂量的差异<sup>[57]</sup>,具体的影响机制有待进一步研究。

#### 4.2 颜厝剖面老红砂发育过程的环境指示意义

老红砂指示的古气候古环境变化这一问题备受关注,尤其是老红砂沉积发育与全球海平面之间的关系。区域海平面变化受到全球海平面和相对海平面的影响,其中相对海平面与地壳运动和沉积作用紧密联系,第四纪以来,福建沿海板块运动较为活跃,闽北和闽南的板块升降也存在差异<sup>[56]</sup>。尽管如此,在轨道尺度上,区域海平面与全球海平面变化相近,冰期—间冰期的冰盖消涨是海平面升降的主要机制<sup>[58-59]</sup>。关于老红砂形成于高海面还是低海面这一问题,存在两种不同的观点,这两种观点都有其合理性。一种观点认为老红砂是低海面时期海岸风沙发生沉积的结果<sup>[24-25,60]</sup>;另一种观点则认为老红砂形成于高海面时期,河流携带了大量泥沙输入海滨,为海岸风沙活动提供丰富的砂源<sup>[7,29,61]</sup>。



本研究通过线性外推法<sup>[62]</sup>估算剖面5.5 m深度的年代约为132.85 ka,该结果与上文对剖面底部年代的推断结果一致,颜厝剖面的年代大于实际测年结果121 ka,说明外推法得到的结果与实际结果较

为相符。本文将实测年代结果(4个)与线性外推法得到的结果(1个)相结合,构建了年龄-深度模型(图7),显示该剖面的形成时段为132.85~37.22 ka,对应深海氧同位素 MIS5、MIS4段和 MIS3 段。

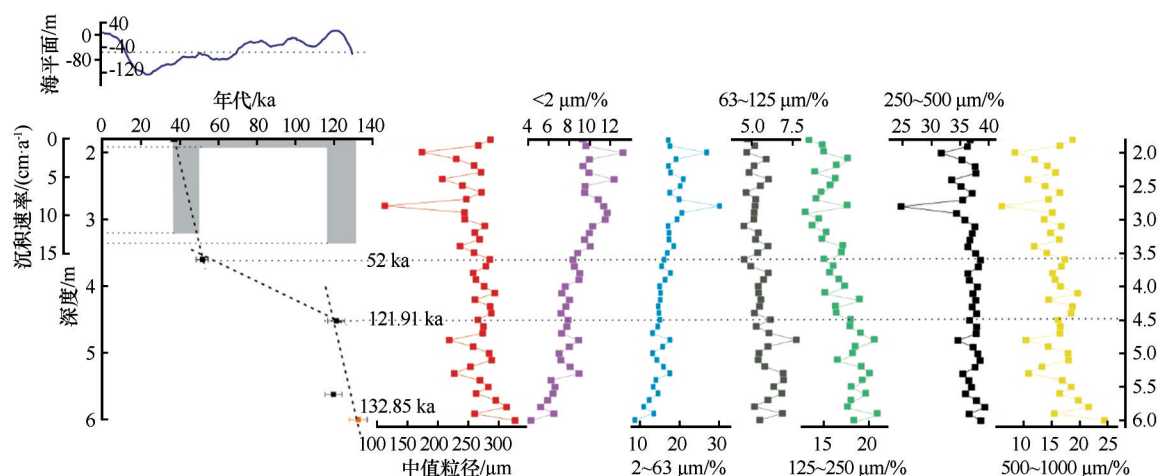


图7 颜厝剖面年龄深度模型与粒度组成

Fig.7 Age depth model and grain size compositions of Yancuo profile

根据剖面的沉积速率和粒度特征将其分为3个阶段:132.85~121.91 ka, 121.91~52 ka 和 52~37.22 ka。结合全球海平面变化数据<sup>[63]</sup>分别对3个阶段的古环境进行探讨。阶段1(132.85~121.91 ka)对应 MIS5 阶段,平均粒径整体相对偏粗。全球海平面高度与现代海平面高度相当,风沙沉积速率快。阶段2(121.91~52 ka)跨越了 MIS5 和 MIS4 阶段约7万年的沉积历史,对应深度为4.5~3.6 m,仅保存了0.9 m 的老红砂沉积。因此,颜厝剖面在此阶段存在大概率的沉积间断期,究其原因可能有两种情况:第一种情况是,该时段的冬季风强盛,研究区在 MIS4 阶段的风沙活动以侵蚀为主,导致沉积速率缓慢,甚至出现沉积间断;然而已公开报道的研究显示,福建沿海的其他地区在 MIS5-4 的转换期也存在大量老红砂沉积,说明单个沙丘很难保存完整的风沙活动记录,需要多个沙丘记录进行相互校验。如果该时段福建沿海存在老红砂沉积的话,为什么研究剖面没有保留下来? 根据埋藏矿物的释光信号特征推断,在该时期,颜厝及其周围沙丘表现为流动沙丘,强盛的冬季风使得风沙长期处于活化-沉积-再活化的状态,石英和长石矿物多次曝光,释光信号没有得到很好的保存,导致了该阶段年代数据的缺失,进而造成该阶段沉积间断的“假象”。阶段3(52~37.22 ka)对应 MIS3 阶段,细砂-中砂偏多,风沙沉积速率明显加快,海平面约为-60 m,海平面由

高向低变化。该层位为淡棕红色砂层,说明该阶段气候环境暖湿,风沙沉积物经历了红壤化过程,风化作用强,同时在海退过程中,大陆架暴露面积增大,为老红砂的形成提供大量沙源。此外,靳建辉等<sup>[30]</sup>认为,如果随着东南沿海海平面持续降低,包括台湾海峡在内的大陆架大面积出露,研究区则会变成远离海岸的剥蚀环境,沉积速率也会减缓,从而阻碍老红砂的沉积,这一观点也在下文得到大量的数据支持。

### 4.3 老红砂的形成年代及其环境意义

国内外已有大量研究针对老红砂的形成时间及其沉积环境特征这一问题进行探讨。关于老红砂的年代学问题,国内的研究进程可大致分为3个发展阶段:最初为相对年代法,接着以<sup>14</sup>C间接定年法为主,然后是以释光测年等直接定年法为主<sup>[64]</sup>。其中释光测年法将石英等作为测年材料提供了较为精准的老红砂年代数据,如张家富等<sup>[27]</sup>通过广泛调查闽南晋江、深沪等地的老红砂并采集年代学样品,测得晋江二级海成台地上的老红砂年代数据约为74 ka BP,三级海成台地上则可能为末次间冰期甚至更老。此外,于20世纪90年代兴起的可利用石英进行直接定年的电子自旋共振测年技术也取得了一定的研究成果<sup>[65]</sup>。关于国外部分专家学者对老红砂的年代学研究,Choi等<sup>[8]</sup>在朝鲜半岛东南

沿海地区发现棕红色细砂,其测年结果在  $64 \pm 6$  ka BP 左右。Jayangondaperumal 等<sup>[10]</sup>对印度半岛东南沿海地区 Tamil Nadu 海岸的 Teri red sands 进行研究,得到海岸沙丘沉积时间为  $11.4 \pm 0.9$  ka,其形成于低海面时期,而近海岸沙丘形成于高海面时期。Reuter<sup>[13]</sup>对斯里兰卡西北部 Wilpattu 国家公园的红色沉积物进行研究发现其与印度的 Teri red sands 的地层序列具有高度的相似性,且后者年代数据更为准确。Srivastava 等<sup>[11]</sup>对印度东南沿海的 Bheemuni 海岸的大量红色沉积砂进行研究,认为其提供了晚第四纪气候和海平面振荡期间海-陆相互作用的证据,测得的最大的年代数据为  $48.9 \pm 1.7$  ka。

本文搜集了白青<sup>[66]</sup>、科任<sup>[29]</sup>、庵山<sup>[19,67]</sup>、青峰<sup>[56,61]</sup>、祥芝<sup>[27]</sup>、深沪<sup>[27]</sup>、虎头山<sup>[56]</sup>、颜厝、西坑<sup>[68]</sup>、铺前<sup>[33]</sup>、锦山<sup>[33]</sup>、坂美<sup>[69]</sup>和东门下<sup>[69]</sup>15个老红砂剖面(图8),共计 107 个年代数据,最小的年代结果为距今~0.8 ka,最大的年代结果突破末次冰期,到达末次间冰期(~140 ka),MIS6~MIS1 阶段都存在着老红砂记录。

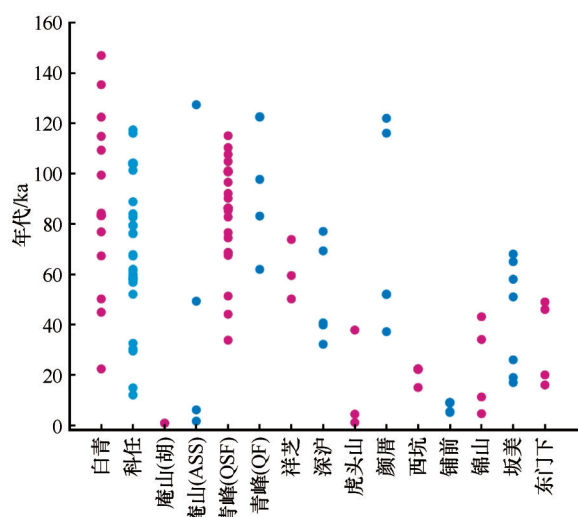


图8 华南沿海老红砂释光年代数据

Fig.8 OSL age of Old Red Sand in coastal South China

通过对已发表的年代数据进行概率密度-累积分析,并结合全球海平面变化数据<sup>[63]</sup>和黄土中值粒径指示的东亚冬季风强度变化特征<sup>[70]</sup>,将 MIS 6~MIS1 阶段大致分为I、II、III等3个时期(图9)。

阶段III(130~85 ka),对应 MIS5 阶段,全球海平面与现代海平面相比,最高约为 0 m,最低约为 -80 m,冬季风弱,气候环境温暖湿润。该时期存在老红砂记录,但是年代数据密度相对较低,累积频率减缓。这说明在高海面时期,风沙的搬运动力减

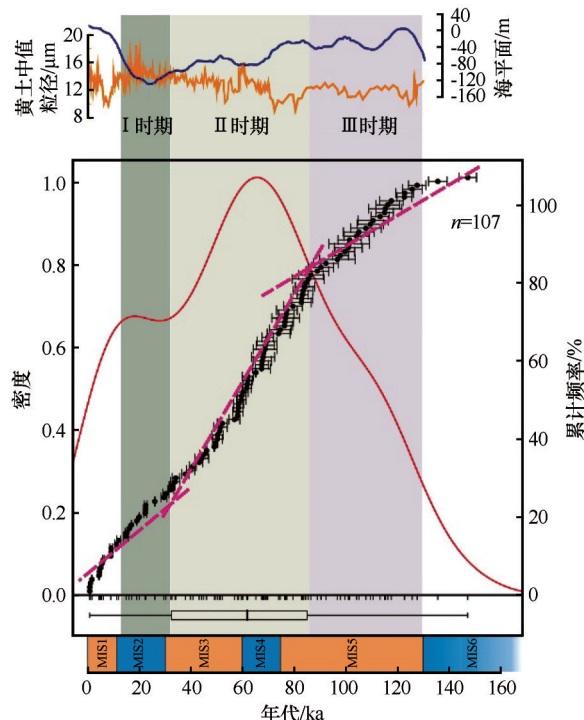


图9 华南沿海老红砂光释光年代频率累积曲线

Fig.9 Frequency accumulation curve of OSL age of Old Red Sand in coastal South China

弱,暖湿的环境下沙丘活动并不活跃,Zheng 等<sup>[71]</sup>通过研究冲绳海槽 200 ka 以来的孢粉记录对古气候进行重建,认为对应时期的东海陆架并非暴露的风沙环境,而是存在地带性草地环境和隐蔽性区域植被。Jin 等<sup>[72]</sup>认为相对固定的植被环境在一定程度上抑制了风沙活动,从而影响了老红砂的沉积速率。因此,该时段的老红砂发育相对较弱。阶段II(85~30 ka),对应 MIS4 和 MIS3 阶段,该时期有两大显著特点。一方面,存在于该时期的老红砂年代数据密度最大,累积速率最快,是老红砂沉积年代的主要分布时期;另一方面,该时期对应高海面向低海面变化的海退时期,海平面变化在 -20~-100 m。频率-密度高值指示强烈且频繁的风沙活动。因此,海退时期为老红砂的主要沉积时期,进而沉积后经过红化作用成为老红砂。阶段I(30~10 ka),对应 MIS2 阶段,为低海面时期,全球海平面最低值可达 -120 m 左右,冬季风强盛,但老红砂在该时期的年代记录相对较少,其累积速率相对减缓。低海面时期,大陆架大面积暴露,可能为老红砂的沉积提供丰富的沙源。但是,正如上文所述,当海平面过低时,并不一定有利于老红砂沉积。一方面,砂源远离研究区,另一方面,在强劲的冬季风作用下,研究

区可能会经历剥蚀,从而速率减慢。

综上所述,老红砂在低海面或高海面时期均有可能发生沉积,这种沉积规律是海岸环境对不同尺度全球变化响应的结果<sup>[56,60-61,66]</sup>。但海退时期是老红砂的主要沉积时期,其中 MIS4 和 MIS3 阶段风沙沉积最快。MIS2 阶段虽然风沙累积速率相对缓慢,但并不代表该阶段的风沙活动减弱。较低的概率密度值,可能反映了晚冰期以来海平面上升使得末次冰期海岸风沙沉积记录整体匮乏的事实<sup>[60]</sup>。

## 5 结论

颜厝剖面以中砂为主,整体呈现中砂>细砂>粉砂>粗砂>极细砂>黏土的特点,分选性较好,为风成砂丘。

颜厝剖面的老红砂释光样品以快组分为主,4 个样品都未达到饱和,线性拟合较好,不存在年龄低估的问题。同时化学蚀变指数指示该剖面的风化程度较高,环境剂量率偏高,测年结果较实际埋藏年龄偏小。

颜厝老红砂的测年样品的离散系数均在合理范围内,总体晒退程度较好,对比最小年龄模型和中值年龄模型,认为选择 CAM 法对  $De$  值进行计算得到的结果更具可靠性。年代结果分别为  $37.22 \pm 1.62$ 、 $52 \pm 3.08$ 、 $121.91 \pm 4.89$ 、 $116.01 \pm 4.33$  ka。通过线性内插-外推得到颜厝剖面的年代框架为  $132.85 \sim 37.22$  ka,对应深海氧同位素 MIS5、MIS4 和 MIS3 阶段。

老红砂在低海面或高海面时期均有可能发生沉积,海退时期是老红砂的主要沉积时期,其中 MIS4 和 MIS3 阶段风沙沉积活动最为活跃。MIS2 阶段虽然沉积速率相对缓慢,但并不代表该阶段的风沙活动减弱,可能是晚冰期以来海平面上升使得末次冰期海岸风沙沉积记录整体匮乏。

## 参考文献:

- [1] 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(6):537-542.
- [2] 朱孝宁,吴正,周曾权,等. 粤东沿海“老红砂”成因再探[J]. 热带海洋,1988(4):46-54.
- [3] 曾从盛,陈居成,吴幼恭. 闽东南沿海老红砂沉积特征与成因分析[J]. 海洋通报,1999(3):55-62.
- [4] 曾从盛,陈居成,吴幼恭. 闽东南沿海老红砂沉积地层与形成时代[J]. 中国沙漠,1999,19(4):42-46.
- [5] 杨树康. 华南沿海第四纪地层划分和海岸升降[J]. 热带海洋,

- 1982(1):21-34.
- [6] 陈伟光,张虎男,李子权,等. 琼北海组地层沉积、发育的几个问题[J]. 热带地理,1987(3):268-275.
- [7] 杨光复,韩有松,张铭汉,等. 关于胶东半岛“柳夹红层”沉积特征及其成因的探讨[J]. 海洋与湖沼,1982(3):231-240.
- [8] Choi J H, Kim J W, Murray A S, et al. OSL dating of marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea with implications for Quaternary tectonics [J]. Quaternary International, 2009, 199(1/2):3-14.
- [9] Murray-Wallace C V, Jones B G, Nghi T, et al. Thermoluminescence ages for a reworked coastal barrier, southeastern Vietnam: a preliminary report [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20(5):535-548.
- [10] Jayangondaperumal R, Murari M K, Sivasubramanian P, et al. Luminescence dating of fluvial and coastal red sediments in the SE coast, India, and implications for paleoenvironmental changes and dune reddening [J]. Quaternary Research, 2012, 77(3):468-481.
- [11] Srivastava P, Sangode S J, Parmar N, et al. Mineral magnetic characteristics of the late Quaternary coastal red sands of Bheemuni, East Coast (India) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 134:77-88.
- [12] Vidyasakar A, Sant'ovaia H, Alappat L, et al. Paleoclimatic Registers from Semi-arid Coastal Sediments of Southeastern India: A Multi Proxy Approach [C]//Water Resources in Arid Areas: The Way Forward, 2017:3-30.
- [13] Reuter M. Coastal landscape evolution in the Wilpattu National Park (NW Sri Lanka) linked to changes in sediment supply and rainfall across the Pleistocene-Holocene transition [J]. Geological Journal, 2020, 55(10):6642-6656.
- [14] Roskin J, Blumberg D G, Porat N, et al. Do dune sands redden with age? The case of the northwestern Negev dunefield, Israel [J]. Aeolian Research, 2012, 5:63-75.
- [15] Pye K. Rate of dune reddening in a humid tropical climate [J]. Nature, 1981, 290(5807):582-584.
- [16] 赖忠平,欧先交. 光释光测年基本流程 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(5):683-693.
- [17] 杨宏宇,赵晖,王兴繁. 应用最小二乘法建立钾长石释光测年标准生长曲线 [J]. 中国沙漠, 2019, 39(1):97-104.
- [18] 谢丽,张振克. 光释光测年在海岸风沙地貌研究中的新进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1):93-100.
- [19] Jin J H, Li Z Z, Huang Y M, et al. Chronology of a late Neolithic Age site near the southern coastal region of Fujian, China [J]. The Holocene, 2017, 27(9):1265-1272.
- [20] Qiu J J, Jin J H, Wang X Y, et al. OSL chronological evidence reveals one of the earliest island-type Neolithic sites in the coastal area of South China [J]. The Holocene, 2023, 33(1):27-37.
- [21] 赵雪迷,张峰,李鸿威,等. 沙漠地质记录和人类活动遗迹数据汇交规范化 [J]. 中国沙漠, 2021, 41(1):93-100.



- [22] 曹敏,于禄鹏,安萍,等.察尔汗盐湖区线形沙丘下伏湖相地层的释光年代及其环境意义[J].中国沙漠,2021,41(1):101-110.
- [23] 王颖,弋双文,徐志伟,等.腾格里沙漠两万年以来典型沉积物钾长石和石英光释光测年对比研究[J].中国沙漠,2023,43(3):1-17.
- [24] 吴正.华南海岸风沙地貌研究[J].热带地貌,1991(增刊1):95-98.
- [25] 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(5):533-537.
- [26] 曾从盛,陈居成,吴幼恭.闽东南沿海老红砂与晚第四纪环境演变[J].中国沙漠,1999(2):15-19.
- [27] 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(22):2646-2654.
- [28] 龚正权.晚更新世以来闽东沿海风沙沉积的古季风变化记录研究[D].福州:福建师范大学,2010.
- [29] 胡凡根,李志忠,靳建辉,等.福建晋江海岸带老红砂多期发育模式初步研究[J].第四纪研究,2012,32(6):1207-1220.
- [30] 靳建辉,李志忠,雷国良,等.华南老红砂沉积年代学及其环境意义:以福建青峰老红砂为例[J].地理科学,2017,37(2):301-310.
- [31] Jin J H, Li Z Z, Cheng Y, et al. Late Pleistocene aeolian activity in Haitan Island, Southeast China: insights from optically stimulated luminescence dating of coastal dunes on marine terraces [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(8): 1777-1788.
- [32] Lv T Y, Sun J M, Feathers J K, et al. OSL dating of coastal sand dunes in southeastern China provides new insights into the relationship between aeolian activity and eustatic sea-level fluctuations [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 600: 111082.
- [33] 程延,李志忠,靳建辉,等.标准生长曲线法在华南沿海老红砂石英光释光测年中的适用性[J].古地学报,2018,20(3):501-514.
- [34] 董玉祥,李志忠.近40年中国海岸风沙地貌研究回顾[J].中国沙漠,2022,42(1):12-22.
- [35] 胡凡根.基于释光测年德福建晋江海岸沙丘发育过程及其环境意义[D].福州:福建师范大学,2013.
- [36] 胡凡根,李志忠,靳建辉,等.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.
- [37] 张克旗.释光测年中环境剂量率影响因素研究[J].地质力学学报,2012,18(1):62-71.
- [38] Lai Z P. Testing the use of an OSL Standardised Growth Curve (SGC) for D-e determination on quartz from the Chinese Loess Plateau [J]. Radiation Measurements, 2006, 41(1): 9-16.
- [39] Zhang J R, Tsukamoto S, Grube A, et al. OSL and C-14 chronologies of a Holocene sedimentary record (Garding-2 core) from the German North Sea coast [J]. Boreas, 2014, 43(4): 856-868.
- [40] 赵俊香.恒山北麓晚第四纪地貌及相关沉积物光释光定年[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [41] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations [J]. Radiation Measurements, 1994, 23(2): 497-500.
- [42] Wintle A G, Aitken M J. An introduction to optical dating. The dating of quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence. xi+267 pp. Oxford, New York, Tokyo [J]. Geological Magazine, 2000, 136(1): 83-108.
- [43] Murray A S, Roberts R G, Wintle A G. Equivalent dose measurement using a single aliquot of quartz [J]. Radiation Measurements, 1997, 27(2): 171-184.
- [44] Galbraith R F, Roberts R G, Laslett G M, et al. Optical dating of single and multiple grains of quartz from jinnium rock shelter, Northern Australia; Part 1, experimental design and statistical models [J]. Archaeometry, 1999, 41(2): 339-364.
- [45] Jain M, Murray A S, Bøtter-Jensen L. Characterisation of blue-light stimulated luminescence components in different quartz samples; implications for dose measurement [J]. Radiation Measurements, 2003, 37(4): 441-449.
- [46] Durcan J A, King G E, Duller G A T. DRAC: dose rate and age calculator for trapped charge dating [J]. Quaternary Geochronology, 2015, 28: 54-61.
- [47] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [48] Fedo C, Nesbitt H W, Young G. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. Geology, 1995, 23(10): 921.
- [49] Ivanovich M, Harmon R S. Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences [M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1992.
- [50] 张克旗,吴中海,吕同艳,等.光释光测年法:综述及进展[J].地质通报,2015,34(1):183-203.
- [51] Fuchs M, Wagner G A. Recognition of insufficient bleaching by small aliquots of quartz for reconstructing soil erosion in Greece [J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(10): 1161-1167.
- [52] 欧先交.青藏高原东部雀儿山地区冰川沉积物光释光测年研究[D].广州:华南师范大学,2011.
- [53] 杜金花,卢演铸,王旭龙,等.晋豫间黄河峡谷黄土状沙丘的光释光年代学探讨[J].第四纪研究,2010,30(3):946-955.
- [54] Jain M, Bøtter-Jensen L S, Murray A, et al. Retrospective dosimetry: dose evaluation using unheated and heated quartz from a radioactive waste storage building [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2002, 101(1/4): 525-530.
- [55] Olley J M, De Deckker P, Roberts R G, et al. Optical dating of deep-sea sediments using single grains of quartz: a comparison

- with radiocarbon [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 169 (3): 175–189.
- [56] 靳建辉. 福建海岸沙丘发育年代学及其环境意义[D]. 福州: 福建师范大学, 2017.
- [57] 程延, 李志忠, 靳建辉, 等. 福建长乐海岸沙丘砂释光性质及环境演变研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11 (3): 61–71.
- [58] 王靖泰, 汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系[J]. *地理学报*, 1980 (4): 299–312.
- [59] 王绍鸿. 建立海平面变化曲线的若干问题[J]. *台湾海峡*, 1990 (4): 301–308.
- [60] 贾虹, 孙智妍, 谢金明, 等. 中国海岸风沙沉积记录的环境变化[J]. *中国沙漠*, 2022, 42 (3): 51–62.
- [61] 俞鸣同, 张红艳, 龚正权, 等. 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.
- [62] Blaauw M. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences [J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5 (5): 512–518.
- [63] Spratt R M, Lisiecki L E. A Late Pleistocene sea level stack [J]. *Climate of the Past*, 2016, 12 (4): 1079–1092.
- [64] 李志文, 李保生, 孙丽, 等. 中国东南沿海老红砂的研究现状与展望[J]. *中国沙漠*, 2011, 31 (1): 49–57.
- [65] 毕伟力, 杨海军, 易朝路, 等. 石英的顺磁中心在电子自旋共振测年中的特性及应用[J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13 (1): 84–93.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 张文静, 李志忠, 靳建辉, 等. 海南岛东北海岸风沙沉积的光释光年代学意义[J]. *沉积学报*, 2021, 39 (4): 995–1003.
- [69] 洪东铭. 我国东南海岸带老红砂的物源及其对晚更新世气候和陆–海相互作用的启示[D]. 厦门: 厦门大学, 2020.
- [70] Qin X, Mu Y, Ning B, et al. Climate effect of dust aerosol in southern Chinese Loess Plateau over the last 140,000 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36 (2): L02727.
- [71] Zheng Z, Huang K, Deng Y, et al. A ~200 ka pollen record from Okinawa Trough: paleoenvironment reconstruction of glacial-interglacial cycles [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56 (10): 1731–1747.
- [72] Jin J H, Li Z Z, Ling Z Y, et al. Chronology of coastal aeolian deposition and its paleoenvironmental implications on the Li-uao Peninsula of South China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16 (12): 2754–2769.

## Luminescence dating of Old Red Sand in Yancuo, Jinjiang, Fujian and its environmental significance

Xu Daiyu, Jin Jianhui, Li Zhizhong, Wei Junjie, Hou Chenyang

(Fujian Provincial Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment / School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

**Abstract:** As one of the important materials of global climate change research, the Old Red Sand can effectively reflect the coastal geomorphological process and climate evolution background since the late Pleistocene. Limited by no reliable dating methods, the formation age and climatic background of Old Red Sand in South China have not been well solved. For that matter, this study selected the section of Yancuo Old Red Sand located in Jinjiang, Fujian Province. In the laboratory, the single aliquot regenerative-dose method of medium-particle quartz was used for luminescence age measurement, and the samples were tested for grain sizes and geochemical elements. The influence of dispersion coefficient and chemical weathering index *CIA* on the reliability of Old Red Sand dating results was discussed. At the same time, through the statistical analysis of probability density of some reported Old Red Sand age data in South China, the formation of Old Red Sand in South China and its environmental background were discussed. The results showed that: (1) Yancuo profile (YCR) was a typical aeolian sand dune, with good sorting, and the whole was mainly medium sand and fine sand. (2) The sedimentation of Old Red Sand in Yancuo was mainly formed during the period of 132.85–37.22 ka, among which, in the MIS5 and MIS4 stages, the sand dunes may be in the state of activation–deposition–reactivation, and the OSL signal is not well preserved, so it appears the illusion of "sedimentary disconnection". And the MIS3 stage corresponds to the regressive period, the sedimentation rate of aeolian sand is relatively fast, and the weathering degree is strong in the warm and humid climate environment. (3) Affected by sea level change and winter wind intensity, Old Red Sand deposition may occurred in both high sea level and low sea level, but its sedimentation stages are mainly occurred in 80–30 ka, corresponding to MIS4 and MIS3 stages. The sedimentary process of Old Red Sand mainly occurred in the regressive stage, when the sea level is neither high nor low. Too high or too low sea level will affect the provenance range, and then affect the accumulation process of Old Red Sand.

**Key words:** South China coast; Fujian; Old Red Sand; optically stimulated luminescence