

# 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

张家富 袁宝印 周力平

( 北京大学地理学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029. E-mail: [jfzhang@pku.edu.cn](mailto:jfzhang@pku.edu.cn))

**摘要** 在中国闽东南和粤东等沿海地区分布着一种红色、棕红色、淡红棕色和暗黄橙色为主的半胶结中细砂沉积物, 已受到不同程度的化学风化, 这种沉积物俗称为“老红砂”, 是中国南方有特色的第四纪沉积物, 其形成年龄的准确测定一直是研究这类沉积物的瓶颈. 应用光释光技术对福建晋江沿海地区的“老红砂”进行了测年研究, 探讨了铀和钍在化学风化作用过程中的地球化学行为对估算样品年剂量的影响. 结果表明, 化学风化作用导致的样品年剂量变化是“老红砂”样品释光测年的主要问题, 不能准确估算样品在埋藏期间的平均年剂量可导致错误的释光年龄, 对所测“老红砂”剖面而言, 受风化影响严重的上部样品的光释光年龄不能代表其沉积年龄. 讨论了“老红砂”的光释光测年研究对中国南方沉积物释光测年的指示意义. 通过对本文测年数据的分析, 得到了晋江沿海地区海成台地的形成年代, 一级台地为~3.5 ka, 二级台地形成于~74 ka, 三级台地形成年代可能早于~77 ka, 在三级台地上发现的旧石器也应该老于该年龄.

**关键词** “老红砂” 光释光测年 年剂量 化学风化 晋江海成台地

在中国闽东南和粤东等沿海地区分布着一种红色(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, 即俗称的“老红砂”, 它是中国东南沿海地区极具特色的第四纪沉积物. 这种“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, 有的呈斑块状分布在近岸丘陵山坡上<sup>[1,2]</sup>. 人们对“老红砂”的沉积特征和成因曾进行过广泛的研究<sup>[1~7]</sup>, 其形成时代一直是中国南方地貌与第四纪研究中十分关注而又尚未很好解决的问题之一. 以往的测年工作主要是利用“老红砂”上部或下部的泥炭、腐木等有机物进行<sup>14</sup>C测年, 或者对沉积物进行热释光(TL)或电子自旋共振(ESR)测年<sup>[5,7~9]</sup>. 已发表的“老红砂”年代数据范围为9~70 ka之间, 其中大部分集中在10~30 ka之间, 这些已发表的年代数据大部分是通过TL法测量得到的.

近年发展的沉积物光释光(OSL)测年技术<sup>[10]</sup>相对于沉积物的热释光测年技术<sup>[11]</sup>有许多优点<sup>[12]</sup>, 其中最主要的就是沉积物的OSL信号在光照下很容易

晒退回零<sup>[13]</sup>, 即沉积物的光释光“时钟”在沉积物见光后立即回到零点, 沉积物被埋藏避光后又重新开始计时直到取样测量. 沉积物的光释光年龄就是它最后一次见光到现在的时间, 所以, 相对其他测年方法, 光释光技术对沉积物来说是直接定年, 它的测年物质就是沉积物中的主要碎屑矿物成分石英或长石, 因而它可以应用到几乎所有的第四纪沉积物定年上<sup>[14]</sup>. 最近, 光释光测年方法在技术上的改进<sup>[15]</sup>使测年的精度和准确性都有了很大的提高<sup>[16]</sup>. 海岸沙丘砂和海滩砂都是理想的光释光测年物质, 不管是年轻的海岸沙丘砂((6 ± 2) a)<sup>[17]</sup>, 还是老的海岸沉积物((141 ± 7) ka)<sup>[18]</sup>, 都可以得到可靠的光释光年龄值. 闽粤沿海的“老红砂”, 不管是风成的<sup>[1]</sup>, 还是海成的<sup>[19]</sup>, 从光释光信号晒退回零来说, 都应该是理想的光释光测年物质.

福建晋江沿海地区的“老红砂”分布广泛, 前人进行过大量工作<sup>[6~8,20]</sup>, 而且该区还有丰富的其他地质现象, 如海底古森林<sup>[21]</sup>、古地震<sup>[22]</sup>和旧石器<sup>[1]</sup>. 该区现已批准为国家地质公园——福建晋江深沪湾国

2007-05-09 收稿, 2007-10-18 接受

国家自然科学基金(批准号: 40471010, 49925307)资助项目

1) 袁宝印, 曾荣树, 李荣全, 等. 福建深沪湾地质公园综合考察报告. 中国科学院地质与地球物理研究所, 2003

家地质公园. 本文选择该区 5 个剖面进行光释光测年研究, 着重探讨深沪和祥芝 2 个“老红砂”剖面由于化学风化作用引起的沉积物中的铀和钍元素的活化和迁移, 以及对光释光年龄可靠性的影响.

### 1 地质背景和样品采集

福建晋江沿海是“老红砂”的一个典型分布区(图 1), 该区的地貌根据地形高度和沉积物特征可分为三级海成台地(图 2), 各台地的海拔高度与朝鲜半岛东南沿海的一、二和三级海成台地<sup>[23,24]</sup>相当. 一级台地(T1)分布于靠近现代海岸地区, 一般高出海面 3~5 m, 有的地方可达 10 m. 沉积物主要由黏土质细砂组成, 为滨海相沉积. 在一级台地上, 采取了 3 个滨海岸堆积物样品(JJ-10, JJ-11 和 JJ-12), JJ-10 和 JJ-11 采自金田村(JT)剖面, JJ-12 采自石圳村(SZ)剖面, 这两个剖面都位于农田中(图 1, 2). 为了评价海岸沉积物样品的 OSL 信号晒退回零程度, 在深沪湾(SHW)古森林遗址公园海滩附近采集了 2 个现代海岸沙丘样品(JJ-D1 和 JJ-D2)和 2 个现代海滩砂样品(JJ-B1 和 JJ-B2)(图 1, 2).

二级台地(T2)高出海面 20~30 m, 堆积物以位于祥芝镇西 300 m 公路旁约 6 m 厚的剖面(24°46'13.0"N, 118°45'43.9"E)较为典型, 该剖面称为祥芝(XZ)剖面

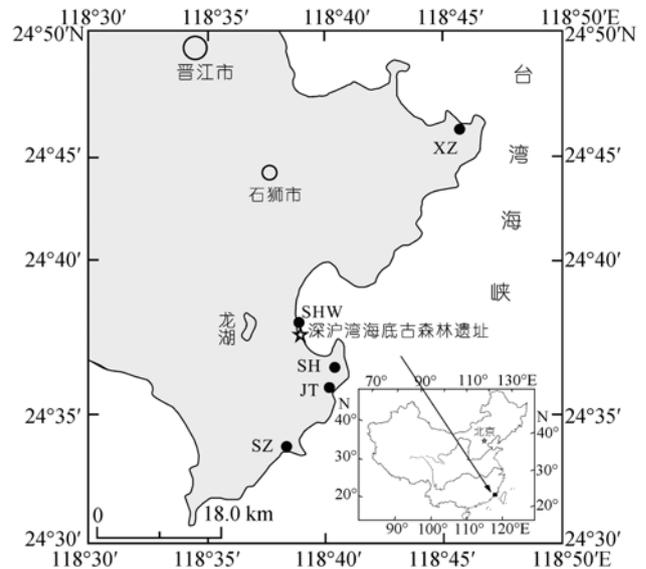


图 1 研究区的地理位置和光释光采样剖面的位置  
XZ: 祥芝剖面; SHW: 深沪湾; SH: 深沪剖面; JT: 金田村剖面;  
SZ: 石圳村剖面(下同)

(图 1, 2). 剖面上部为暗红色, 向下颜色变淡, 底部为灰白色, 反映了从上到下堆积物风化程度的减弱. 根据沉积物的颜色大致可分为 4 层, 各层之间界线不明显, 为逐渐过渡关系. 剖面顶部为厚约 0.3 m 的耕作层,

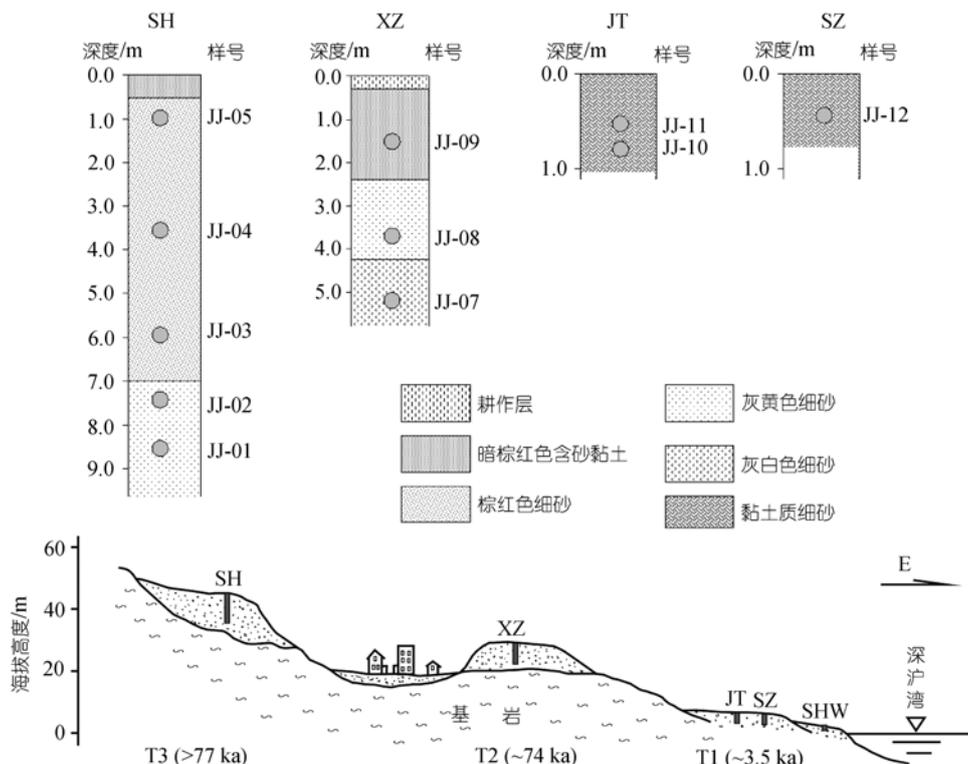


图 2 福建晋江沿海地区三级海成台地示意图和光释光样品采样剖面

向下约 2.1 m 为暗棕红色含砂黏土中细砂层;再向下为厚约 1.8 m 的灰黄色细砂,底部是厚约 1.6 m 的分选很好的灰白色石英中细砂,基本没有受到风化作用的影响.从该剖面中采取了 3 个光释光样品 JJ-07, JJ-08 和 JJ-09(图 1, 2).

三级台地(T3)高出海面约 40~50 m,堆积物以深沪镇金屿村剖面(24°36'53.6"N, 118°40'25.8"E)较为典型,该剖面称为深沪(SH)剖面(图 1, 2),厚约 10 m.根据堆积物的颜色变化,剖面从上到下可划分 3 层,顶部为厚约 0.5 m 的暗棕红色含砂黏土;中部为厚约 6.5 m 的棕红色中细砂层;下部为厚约 2.5 m 的分选很好的灰黄色中细砂层,该层被认为是风成堆积<sup>1)</sup>.该剖面从上到下风化作用减弱.在该剖面附近发现一块具有打击痕迹的脉石英砾石,经多位旧石器考古学家鉴定为锤击石核<sup>1)</sup>.在该剖面中,共采取了 5 个光释光测年样品 JJ-01, JJ-02, JJ-03, JJ-04 和 JJ-05(图 1, 2).

所有的光释光样品都是将铁罐打入新鲜的剖面上,注满样品然后拨出,用铅铂纸和胶带密封带回实验室处理.

## 2 实验测量

### 2.1 年剂量

沉积物中的放射性主要来自  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  和它们的衰变子体以及  $^{40}\text{K}$  的衰变,矿物在埋藏期间吸收的辐射能量主要取决于这些放射性核素在沉积物和矿物颗粒本身中的含量.本文中,样品的铀、钍和钾含量均在中国原子能科学研究院利用中子活化分析得到.宇宙射线对年剂量的贡献通过有关方程<sup>[25]</sup>计算得到.含水量是通过干燥前后的样品进行称重得到的,表示为水与干样品重量的百分比,这里不确定度取值 10%.根据以上测量的数据,结合测量样品颗粒大小,按有关能量转换参数<sup>[12]</sup>计算出测量样品的年剂量.

### 2.2 等效剂量

在实验室暗室中的微弱红光下,对样品进行石英颗粒的分离和提纯处理.首先去掉样品铁罐两头已见光部分的物质,以保证等效剂量测量样品从埋藏到测量期间完全没有受过自然光的照射.用  $\text{H}_2\text{O}_2$  和稀  $\text{HCl}$  分别浸泡样品去除其中的有机质和碳酸盐,待反应完全停止后,用清水反复冲洗,剩余部分为石英和长石等碎屑矿物,在烘箱中烘干后,用磁铁石去

掉含铁矿物,然后过筛选取 150~250  $\mu\text{m}$  大小的颗粒,将这些颗粒浸泡在 40% 的  $\text{HF}$  中 40 min,去除长石等杂质和石英颗粒表层受  $\alpha$  粒子照射的部分.然后,用稀盐酸冲洗去除在  $\text{HF}$  溶蚀过程中形成的氟化物,获得纯净的石英颗粒组分.提取的石英组分纯度用红外光释光检测.如果样品在  $\text{HF}$  浸泡 40 min 后,还有长石杂质,就重复上述过程,直到样品显示出可忽略的红外光释光信号.最后,将提取的石英颗粒用硅胶粘在直径约 0.97 cm 的铝质圆片供 OSL 测量.

用单片再生剂量法<sup>[15,26]</sup>测量样品的等效剂量,单片再生剂量法的优点是在测量过程中光释光信号灵敏度的变化可以通过一个试验剂量产生的释光信号来校正.再生剂量包括一个零剂量和最后一个重复剂量,零剂量用来观察样品在测量过程中电子转移的情况,重复剂量用来检验灵敏度校正是否成功.经灵敏度校正后的再生光释光信号与再生剂量作图得到测量单片的生长曲线,将校正后的自然光释光信号强度投影到生长曲线上,用内插法得到测量单片的等效剂量(图 3),该剂量称为样品的单片等效剂量.

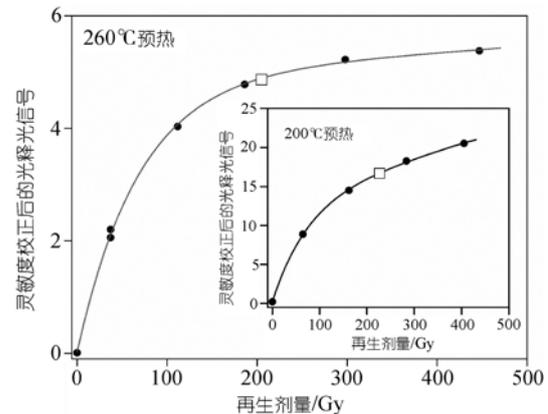


图 3 在预热温度为 200 和 260 条件下,由单片再生剂量法得到的样品 JJ-07 的光释光生长曲线  
图中的空心四方形表示自然光释光信号,实心圆表示再生信号

所有光释光测量均在北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室的热释光/光释光测量仪(Risø-TL/OSL-15)(丹麦 Risø 国家实验室生产)上进行,激发光源为绿光( $(470 \pm 10)$  nm),探测滤光片为 3 块 2.5 mm 厚的 Hoya U-340,通过光的波长为 290~370 nm 的紫外光,探测的光电倍增管为 EMI 9235QA.测量仪器上附带放射性  $\beta$  源  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ,所有人工放射性辐照都在该仪器上进行.

1) 见 2646 页脚注 1)

### 3 结果与讨论

#### 3.1 年剂量

样品中的 U, Th 和 K 的含量及计算的有效年剂量综合于表 1 和图 4. 与其他沉积物样品相比, 现代沙丘样品(JJ-D2)的 U 和 Th 含量(分别约为 $(0.91 \pm 0.05)$ 和 $(5.66 \pm 0.18)$   $\mu\text{g/g}$ )较低, 相应的年剂量( $(1.09 \pm 0.03)$  Gy/ka)较小, 这与已报道的其他地方的一些海岸沙丘砂的 U 和 Th 含量和年剂量值相似<sup>[17,27-30]</sup>, 也与某些内陆沙丘砂相似<sup>[31]</sup>. 3 个一级台地近地表沙土样品(JJ-10, JJ-11 和 JJ-12)中的 U 和 Th 含量分别  $> 1.7$  和  $> 9.3$   $\mu\text{g/g}$ , 年剂量  $> 2.1$  Gy/ka, 明显高于海岸沙丘砂的年剂量. 深沪和祥芝 2 个“老红砂”剖面中样品的 U 和 Th 含量随深度增加而减小, 在深沪剖面中样品的年剂量从上部的 3.25 Gy/ka 减少到下部的 1.42 Gy/ka.

深沪和祥芝剖面是华南沿海地区典型的“老红砂”风化剖面, 沉积物的风化程度随深度增加而减弱, 表现在剖面上从上到下: ( ) 黏土矿物含量减少, 胶结程度减弱, 曾从盛等人<sup>[6]</sup>报道祥芝“老红砂”剖面在 1.3, 3.6 和 4.6 m 深处的黏土含量分别为 6.31%, 3.15%

和 1.33%, 这些粘土主要是风化过程中形成的高岭石<sup>[4]</sup>; ( )  $\text{SiO}_2$  含量增加, 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  含量减少<sup>[1]</sup>, 这些都是化学风化作用引起元素迁移的结果<sup>[32,33]</sup>; ( ) 沉积物的颜色变浅, 而颜色反映了“老红砂”氧化作用的强度<sup>[3]</sup>. 根据上述这些特征, 可以认为深沪剖面比祥芝剖面风化程度更高, 这与它们在不同海成台地上发育的时间有关.

在深沪和祥芝 2 个剖面中, 样品的 U 和 Th 含量从上到下规律减少, 这种现象可以由 U 和 Th 在沉积物和化学风化作用过程中的地球化学行为来解释<sup>[34-43]</sup>, 例如, 岩石中的 U 和 Th 由于风化作用会发生重新分配<sup>[34,35]</sup>, 而且在后期的成壤过程中发生富集<sup>[36-38]</sup>. 在这两个剖面中, 下部受风化作用影响最小的 3 个样品 JJ-01, JJ-02 和 JJ-07 的 U 和 Th 含量与现代海岸沙丘砂样品 JJ-D2 比较接近, 说明这些样品的 U 和 Th 含量在堆积以来基本没有发生变化. 上部样品 U 和 Th 含量的增加是因为其他元素如 Ca, Si 发生了迁移流失, 导致 U 和 Th 的相对富集, 且越到剖面顶部, 风化作用越强烈, 元素迁移和富集越明显, U

表 1 光释光测年结果

实验室编号	野外编号	埋深/m	U/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	U/Th 比值	K/%	宇宙射线年剂量/ $\text{Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$	含水量 (%)	总年剂量/ $\text{Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$	等效剂量/Gy	年龄/ka
深沪湾(SHW)现代海滩											
PKU-L282	JJ-B1	0.1	未测	未测	未测	未测	未测	未测	未测	0.027±0.022	
PKU-L283	JJ-B2	0.1	未测	未测	未测	未测	未测	未测	未测	0.004±0.003	
深沪湾(SHW)现代海岸沙丘											
PKU-L284	JJ-D1	1.0	未测	未测	未测	未测	未测	未测	未测	0.09±0.02	0.08±0.02 <sup>a)</sup>
PKU-L285	JJ-D2	3.5	0.91±0.05	5.66±0.18	0.16±0.01	0.35±0.02	0.19	3.7	1.09±0.03	0.20±0.05	0.18±0.05
金田村(JT)一级海成台地(T 1)											
PKU-L295	JJ-10	0.8	2.12±0.07	11.80±0.28	0.18±0.01	1.23±0.04	0.19	3.1	2.60±0.06	9.10±1.90	3.5±0.7
PKU-L296	JJ-11	0.5	2.10±0.06	11.40±0.26	0.18±0.01	1.02±0.04	0.19	1.6	2.41±0.06	0.16±0.04	0.07±0.02
石圳村(SZ)一级海成台地(T 1)											
PKU-L297	JJ-12	0.4	1.70±0.06	9.36±0.25	0.18±0.01	1.33±0.04	0.19	14.9	2.16±0.06	0.70±0.03	0.32±0.02
祥芝镇(SZ)二级海成台地(T 2)											
PKU-L292	JJ-07	5.1	0.78±0.04	4.77±0.17	0.16±0.01	1.52±0.05	0.09	1.7	2.03±0.06	149.5±17.3	73.8±8.8
PKU-L293	JJ-08	3.8	1.16±0.05	7.55±0.22	0.15±0.01	1.95±0.05	0.11	3.2	2.68±0.07	159.60±8.50	59.5±3.5
PKU-L294	JJ-09	1.5	1.45±0.06	9.17±0.24	0.16±0.01	1.70±0.05	0.16	4.4	2.64±0.07	132.60±11.20	50.2±4.4
深沪镇(SH)三级海成台地(T 3)											
PKU-L286	JJ-01	8.5	1.08±0.04	4.38±0.17	0.20±0.01	0.90±0.04	0.06	3.7	1.42±0.05	109.50±10.70	77.0±8.0
PKU-L287	JJ-02	7.4	1.32±0.05	4.56±0.17	0.24±0.01	1.04±0.04	0.07	2.8	1.64±0.05	114.00±12.00	69.3±7.6
PKU-L288	JJ-03	6.0	2.52±0.06	9.15±0.25	0.28±0.01	1.02±0.04	0.07	4.4	2.17±0.06	86.40±6.60	39.8±3.2
PKU-L289	JJ-04	3.5	2.53±0.07	10.50±0.26	0.29±0.01	1.33±0.04	0.11	8	2.49±0.06	101.20±6.00	40.7±2.6
PKU-L290	JJ-05	1.0	3.63±0.09	18.00±0.36	0.25±0.01	1.38±0.04	0.17	9.4	3.25±0.08	104.80±6.70	32.2±2.2

a) 用样品 JJ-D2 的年剂量计算的年龄

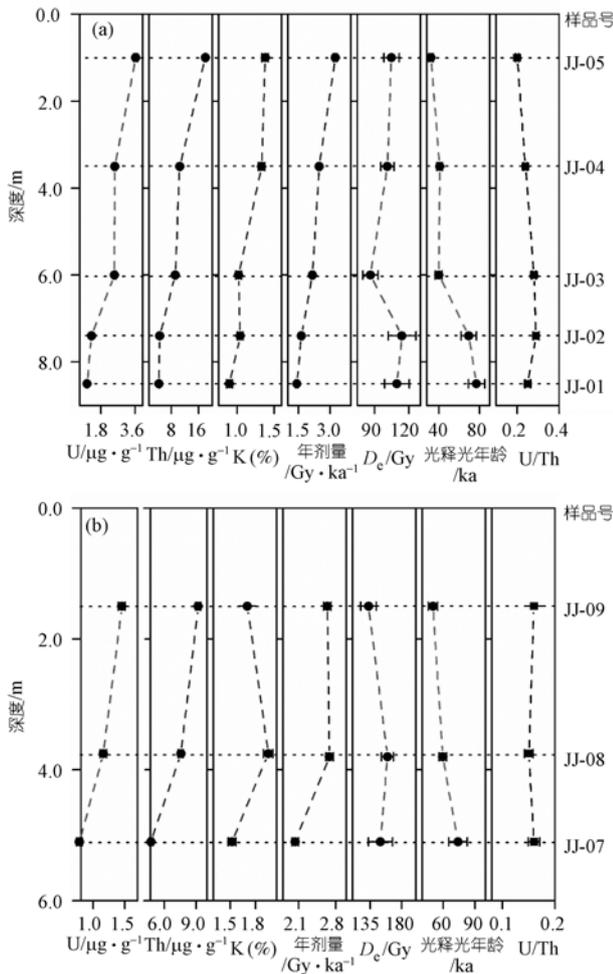


图4 福建晋江深沪(a)和祥芝(b)“老红砂”剖面中样品的  
光释光测年参数与深度的关系

和 Th 含量越高。另外，近地表耕作层由于施磷肥也可能导致土壤中的 U 和 Th 含量增加<sup>[44]</sup>，从而引起上部样品的 U 和 Th 含量增加。在祥芝剖面中铀钍随深度减小的幅度要小于深沪剖面，应该是 2 个剖面中沉积物的不同风化程度的结果。

在风化作用过程中，U 相对 Th 容易发生迁移<sup>[33,45]</sup>，即风化程度越高的沉积物，U/Th 比值越小<sup>[46]</sup>。但是，在深沪和祥芝剖面中，从上到下，U/Th 比值并没有这种变化(表 1 和图 4)。另外，三级台地深沪剖面样品的 U/Th 比值明显高于一级台地 3 个样品的 U/Th 比值 ( $0.18 \pm 0.01$ )和二级台地祥芝剖面样品的 U/Th 比值 ( $0.15 \sim 0.16$ )，后者与现代砂丘样品(JJ-D2)的 U/Th 比值 ( $0.16 \pm 0.01$ )相似。这说明在该地区“老红砂”沉积物风化过程中，U 不仅没有发生淋滤丢失，反而得到富集并和 Th 在剖面上表现出类似的相对富集程度，

这可能表明老红砂中的含 U 矿物为来源于花岗岩风化残积物的抗风矿物，而海滩沉积物的风化过程以脱硅富铝作用为主。

如表 1 和图 4 所示，深沪剖面的 K 含量由上向下逐渐变小，而二级台地祥芝剖面的 K 含量变化于 1.52%~1.92%之间，均明显高于深沪剖面 K 含量值，造成这些特征的原因及其给平均年剂量的计算带来的不确定性尚需更加深入的研究。

沉积物在发生化学风化作用后，它的化学成分发生了相应的变化，对深沪和祥芝剖面而言，最为显著的是 U 和 Th 得到了相对的富集，因此，根据现在测量的放射性元素含量计算出来的年剂量只能代表样品现在的年剂量，而不能代表样品埋藏期间的平均年剂量。风化程度越高，成分变化越大，后期 U 和 Th 富集越明显。如果不考虑风化作用引起的放射性平衡变化，那么计算的年剂量可能偏高。在深沪和祥芝剖面中，下部样品的风化程度低，或没有受到风化作用的影响，因而得到的年剂量可以认为基本接近样品在埋藏期间的平均年剂量。

### 3.2 等效剂量测量

为了选择合适的预热条件对样品进行等效剂量测量，对样品 JJ-05 进行了在 160~260 预热温度内的等效剂量预热坪区实验，对其他样品测量了在 200 和 260 预热条件下的等效剂量，检验剂量预热温度(cut heat)均为 160，结果示于图 5。该图表明除样品 JJ-07 外，其他样品的等效剂量值至少在 200 和 260 预热温度条件下无显著差异。图 5 也表明在 260 预热条件下样品的单片等效剂量值的离散度稍大于在 200 下得到的等效剂量值的离散度。而且，有的单片在 260 预热条件下得到的生长曲线趋向于饱和，而在 200 下没有这种现象(图 3)，这个问题有待进一步研究。

为了进一步检验等效剂量测量的预热条件，对样品 JJ-05 进行了剂量复原实验<sup>[47,48]</sup>。用蓝光在室温下将实验样品的自然光释光信号完全晒退后，对样品辐照一个  $\beta$  剂量(给定剂量)，然后，用单片再生剂量法对其进行测量，得出“测量剂量”。实验结果以“测量剂量”与给定剂量的比值相对预热温度绘于图 6。由图 6 可见，该样品剂量复原实验结果与上述的预热坪区实验结果基本一致，样品的测量剂量在误差范围内与给定剂量吻合，表明样品的等效剂量测量在上述条件下是可靠的。

样品的平均单片等效剂量值列于表 1。图 7 是样

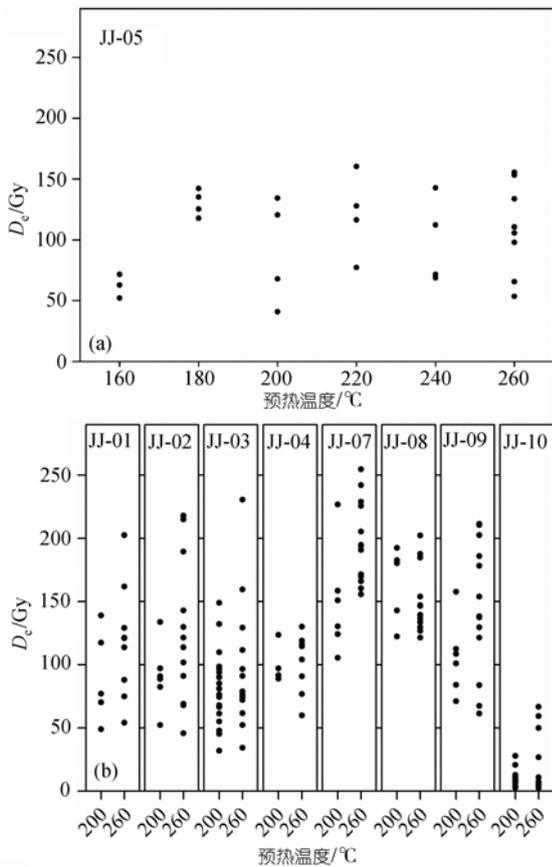


图 5 样品等效剂量与预热温度的关系

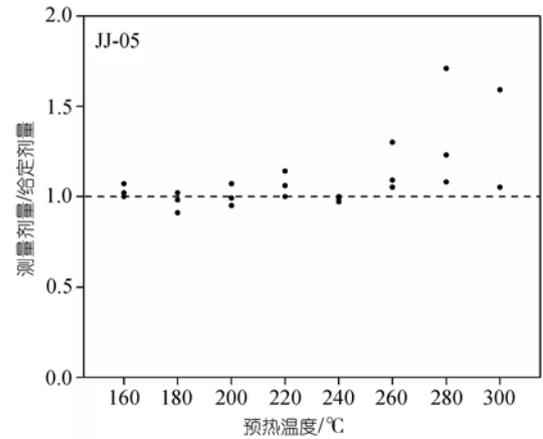


图 6 样品 JJ-03 的等效剂量复原试验

品 JJ-03 的单片等效剂量值分布图, 根据等效剂量值的分布特征, 可以认为这些样品在沉积时信号回零较好, 而且对这些老样品, 样品的信号回零也相对不重要 [47,48]. 等效剂量的离散性可能是由于放射性元素在样品中不均匀分布造成的. 图 7 也给出了现代风成样品 JJ-D1 的等效剂量分布图, 其平均等效剂量为  $(0.09 \pm 0.02)$  Gy. 现代海滩样品 JJ-B1 和 JJ-B2 的平均等效剂量分别是  $(0.03 \pm 0.02)$  和  $(0.004 \pm 0.003)$  Gy, 说明“老红砂”样品在埋藏时的残余光释光信号是可以忽略不计的. 因此, 这些样品不会因为样品在埋藏时

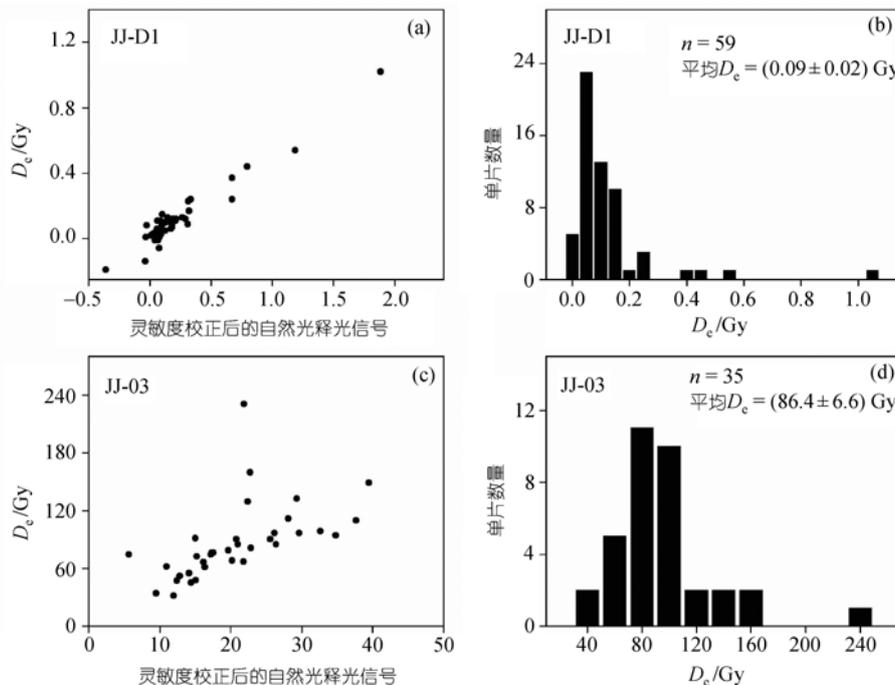


图 7 样品 JJ-D1 和 JJ-03 的等效剂量分布图

图中的负值是由测量误差引起的

的残余信号而高估了沉积年龄。

### 3.3 光释光年龄

样品的光释光年龄由 Grün 的程序计算<sup>1),2)</sup>, 结果列于表 1。2 个现代海岸砂丘样品 JJ-D1 和 JJ-D2 的 OSL 年龄分别是  $(0.18 \pm 0.05)$  和  $(0.08 \pm 0.02)$  ka。一级台地 3 个样品 JJ-10, JJ-11 和 JJ-12 的 OSL 年龄分别是  $(3.5 \pm 0.7)$ ,  $(0.07 \pm 0.02)$  和  $(0.32 \pm 0.02)$  ka。样品 JJ-11 和 JJ-12 是近地表样品, 可能受到了人类活动的影响。二级台地祥芝“老红砂”剖面的 3 个样品 JJ-07, JJ-08 和 JJ-09 的 OSL 年龄分别是  $(73.8 \pm 8.8)$ ,  $(59.5 \pm 3.5)$  和  $(50.2 \pm 4.4)$  ka。三级台地的深沪“老红砂”剖面的 5 个样品 JJ-01, JJ-02, JJ-03, JJ-04 和 JJ-05 的年龄分别是  $(77.0 \pm 8.0)$ ,  $(69.3 \pm 7.6)$ ,  $(39.8 \pm 3.2)$ ,  $(40.7 \pm 2.6)$  和  $(32.2 \pm 2.2)$  ka。在二级和三级台地上的样品的释光年龄看起来与地层层序一致。但实际上, 这两个剖面不同层位 OSL 年龄的差别可能是年剂量估算不正确造成的, 并不代表样品真正的埋藏年龄差别。

在深沪和祥芝剖面中, 样品的光释光年龄值和年剂量随深度增加而增加, 而等效剂量从上到下并没有明显的差别(图 4), 说明从上到下的 OSL 年龄值的差别主要是由于年剂量的不同引起的。正如上面讨论的, 风化作用导致 U 和 Th 在风化残留物中相对富集。因而, 根据现在测量的放射性元素含量计算出来的年剂量比实际样品埋藏期间的平均年剂量偏高, 导致计算出来的光释光年龄比真实年龄偏小。如果剖面最底部样品受风化作用的影响很小, 测量的年剂量就可以代表样品在埋藏期间的平均年剂量。深沪剖面底部风成样品 JJ-01 和 JJ-02 的年剂量值较其它样品更加接近现代砂丘样品 JJ-D2 的年剂量可能与它们受风化影响小有关, 所以, 剖面最底部样品的光释光年龄应该最接近样品的真实埋藏年龄。

### 3.4 海成台地和旧石器的形成年代

根据上述对海成台地上沉积物的测年结果, 该区的一级台地形成于  $\sim 3.5$  ka。二级台地形成于  $\sim 74$  ka, 这年龄稍早于朝鲜半岛东南沿海的二级海成台地的光释光年龄<sup>[49,50]</sup>。由于目前缺乏有很好年龄控制的区域海平面变化数据, 故难以从晚更新世新构造活动角度讨论这一年龄的可靠性和地质意义。三级台

地的释光表观年龄为  $\sim 77$  ka。根据海成台地的地貌演化规律, 三级台地上的堆积物应该老于二级台地上的堆积物, 由此推断, 三阶台地堆积物的释光年龄为低估值。如果该区海滩堆积主要发育于间冰期的话, 三阶台地底部堆积物的年龄当为 125 ka 或者更老。在这一级台地上发现的旧石器也应该大于 77 ka 这一表观年龄, 更准确的年代框架的建立还需要进一步的测年工作。

### 3.5 对南方沉积物释光测年的指示意义

在释光测年中, 年剂量的测量与等效剂量的测量同等重要, 而且假设测年样品在埋藏期间, 年剂量是恒定的<sup>[51]</sup>, 即测量的石英或长石颗粒每年从环境中吸收的辐射能量从它开始埋藏直到取样时这一期间是不变的, 这样才可以通过分析现在样品的放射性元素含量计算出它的平均年剂量。这就要求在沉积物中的放射性元素含量在样品埋藏期间没有发生变化。

中国南方由于热带和亚热带气候, 近地表的第四纪堆积物极容易发生化学风化作用, 导致沉积物的化学成分发生变化和元素重新分配, 使有些元素在风化产物中相对富集。风化作用也引起沉积物的结构、构造和孔隙度等发生变化<sup>[52]</sup>。由于不能确定风化作用发生的时间和速度, 因而也不能推算出化学成分发生变化的时间和速度。现在测量的元素含量只能代表现阶段样品中的元素含量, 而且风化作用还可能引起风化产物中的铀系不平衡<sup>[53]</sup>, 使年剂量计算更加复杂。以前发表的南方已风化的第四纪沉积物的释光年代数据, 如果没有考虑因风化作用引起的年剂量变化, 则有可能低估了样品的埋藏年龄。因此, 我们对南方第四纪沉积物如“老红砂”, 尤其是化学风化很强烈的堆积物如网纹红土, 进行释光测年时必须要考虑样品的年剂量在埋藏期间可能的变化。对这类沉积物进行测年, 如果剖面底部的样品没有受到风化作用的影响, 可对它们进行释光测年, 得出相对准确的光释光年龄。另外, 如果沉积物中的钾长石还没有完全风化成黏土矿物, 那么, 现在发展的钾长石光释光等时线测年方法<sup>[54,55]</sup>, 由于可以克服外部环境剂量的变化, 对这类风化沉积物应该可以

1) Grün R. Age.exe, Computer program for the calculation of luminescence dates. Unpublished Computer Program. RSES, Canberra, 2003

2) Li B, Li S H, Wintle A G. Overcoming environmental dose rate changes in luminescence dating of waterlain deposits. *Geochronometria* (in press)

得出比较可靠的光释光年龄,而且根据这些钾长石的等时线光释光年龄值,结合石英的光释光年龄值,就可以估算出样品的风化年龄,从而计算出样品的风化速度,这不仅对地表过程研究,而且对环境工程都将是很意义的。

#### 4 结论

中国东南沿海的“老红砂”由于化学风化作用导致其中的化学成分发生了变化,从而样品的年辐射剂量也会受到影响。对受风化影响严重的沉积物(如,“老红砂”剖面上部的样品),根据现在测量的放射性元素含量计算的年剂量比样品在埋藏期间的平均年剂量可能偏大,导致计算的光释光年龄值偏低。尽管从光释光性质来说“老红砂”适合光释光测年,但不能准确估计在埋藏期间的平均年剂量将得出错误的测年结果。相对而言,“老红砂”剖面底部样品受风化作用影响最小,测量的光释光年龄有可能代表它的埋藏年龄。对这些风化的沉积物,钾长石的等时线光释光测年方法是值得尝试的。

福建晋江沿海地区为三级海成台地,一级台地形成于全新世,台地上部样品的光释光年龄为~3.5 ka。二级台地和三级台地上都发育“老红砂”,它们的风化程度不同,二级台地的“老红砂”形成于~74 ka,三级台地的“老红砂”和其中的旧石器的年代可能对应于末次间冰期或更老。

致谢 与顾兆炎研究员讨论了有关元素迁移问题,在此表示诚挚的谢意。

#### 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1997, 27(6): 537—542
- 2 陈居成,曾从盛,吴幼恭. 闽东南沿海老红砂的分布与沉积地貌特征. 台湾海峡, 1998, 17(1): 50—54
- 3 金志敏,廖秉良,吴正. 华南沿海“老红砂”红化作用研究. 科学通报, 1994, 39(12): 1122—1124
- 4 吴正,黄山,金志敏,等. 华南沿海老红砂的成因与红化作用. 地理学报, 1994, 49(4): 298—305
- 5 曾从盛,陈居成,吴幼恭. 中国东南沿海老红砂研究综述. 台湾海峡, 1997, 16(3): 363—370
- 6 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. 中国沙漠, 1999, 19(2): 100—114
- 7 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. 中国沙漠, 1999, 19(4): 338—342
- 8 吴正,王为,谭惠忠,等. 闽粤西沿海老红砂的沉积年代. 科学通报, 2000, 45(5): 533—537
- 9 谭惠忠,吴正. 闽粤沿海老红砂的热释光测年. 中国沙漠, 2001,

- 21(4): 393—396
- 10 Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Thewalt M L W. Optical Dating of sediments. *Nature*, 1985, 313: 105—107[DOI]
- 11 Wintle A G, Huntley D J. Thermoluminescence dating of a deep-sea sediment core. *Nature*, 1979, 279: 710—712[DOI]
- 12 Aitken M J. An introduction to optical dating: The dating of Quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence. Oxford: Oxford University Press, 1998
- 13 Godfrey-Smith D I, Huntly D J, Chen W H. Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quat Sci Rev*, 1988, 7: 373—380[DOI]
- 14 Prescott J R, Robertson G B. Sediment dating by luminescence: A review. *Rad Meas*, 1997, 27: 893—922[DOI]
- 15 Wintle A G, Murray A S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Rad Meas*, 2006, 41: 369—391[DOI]
- 16 Murray A S, Olley J M. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: A status review. *Geochronometria*, 2002, 21: 1—16
- 17 Ballarini M, Wallinga J, Murray A S, et al. Optical dating of young coastal dunes on a decadal time scale. *Quat Sci Rev*, 2003, 22: 1011—1017[DOI]
- 18 Murray A S, Funder S. Optically stimulated luminescence dating of a Danish Eemian coastal marine deposit: A test of accuracy. *Quat Sci Rev*, 2003, 22: 1177—1183[DOI]
- 19 张虎男,姚庆元,赵希涛. 闽粤东沿海“老红砂”沉积成因和时代的探讨. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5(1): 47—57
- 20 吴正,王为. 闽粤沿海老红砂多期沉积地层的发现及其意义. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 328—332
- 21 徐起浩. 中国福建深沪湾海底古森林残迹的首次发现. *科学通报*, 1987, 32(21): 1650—1653
- 22 徐起浩,冯炎基,施健生. 福建深沪湾晚更新世中期以来的地壳运动. *地震地质*, 2002, 24(1): 111—123
- 23 Kim S W. A study on the terraces along the Southeastern coast (Bang-eojin-Pohang) of the Korean peninsula. *J Geol Soc Korea*, 1973, 9: 89—121
- 24 Kim J Y, Lee D Y, Choi S G. A research on Pleistocene stratigraphy. *Korean J Quat Res*, 1998, 4: 41—57
- 25 Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations. *Rad Meas*, 1994, 23: 497—500[DOI]
- 26 Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Rad Meas*, 2000, 32: 57—73[DOI]
- 27 Bateman M D, Holmes P J, Carr A S, et al. Aeolianite and barrier dune construction spanning the last two glacial-interglacial cycles from the southern Cape coast, South Africa. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 1681—1698[DOI]
- 28 Gibbertson D D, Schweininger J L, Kemp R A, et al. Sand-drift and soil formation along an exposed north Atlantic coastline: 14000 years of diverse sedimentological, climatic and human im-

- pacts. *J Archaeol Sci*, 1999, 26: 439—469[DOI]
- 29 Murray A S, Clemmensen L B. Luminescence dating of Holocene aeolian sand movement, Thy, Denmark. *Quat Sci Rev*, 2001, 20: 751—754[DOI]
- 30 Duller G A T, Augustinus P C. Reassessment of the record of linear dune activity in Tasmania using optical dating. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 2608—2618 [DOI]
- 31 Stokes S, Thomas D S G, Washington R. Multiple episodes of aridity in southern Africa since the last interglacial period. *Nature*, 1997, 388: 154—158[DOI]
- 32 Faure G. *Principles and Applications of Inorganic Geochemistry*. New York: Macmillan Publ Co, 1991. 1—626
- 33 Chesworth W. Weathering systems. In: Martini I P, Chesworth W, eds. *Weathering, Soils, and Paleosols*. New York: Elsevier, 1992. 19—40
- 34 Michel J. Redistribution of uranium and thorium series isotopes during isovolumetric weathering of granite. *Geoch Cosm Acta*, 1984, 48: 1249—1255[DOI]
- 35 Guthrie V A, Kleeman J D. Changing uranium distributions during weathering of granite. *Chem Geol*, 1986, 54: 113—126[DOI]
- 36 Gueniot B, Munier-Lamy C, Berthelin J. Geochemical behavior of uranium in soils, Part . Distribution of uranium in hydromorphic soils and soil sequences. Applications for surficial prospecting. *J Geoch Expl*, 1988, 31: 21—37[DOI]
- 37 Gueniot B, Munier-Lamy C, Berthelin J. Geochemical behavior of uranium in soils, Part . Distribution of uranium in hydromorphic soils and soil sequences. Applications for surficial prospecting. *J Geoch Expl*, 1988, 31: 39—55[DOI]
- 38 McAlister J J, Cooney G, Higgins M J. Accumulation of uranium in granitic soils overlying the Mourne Mountains, County Down, Northern Ireland. *Microchem J*, 1997, 56: 315—326[DOI]
- 39 Echevarria G, Sheppard M I, Morel J L. Effect of pH on the sorption of uranium in soils. *J Environ Rad*, 2001, 53: 257—264[DOI]
- 40 Aubert D, Probst A, Stille P. Distribution and origin of major and trace elements (particularly REE, U and Th) into labile and residual phases in an acid soil profile (Vosges Mountains, France). *App Geoch*, 2004, 19: 899—916[DOI]
- 41 Mibus J, Sachs S, Pfingsten W, et al. Migration of uranium (IV)/(VI) in the presence of humic acids in quartz sand: A laboratory column study. *J Cont Hydro*, 2007, 89: 199—217[DOI]
- 42 Peuraniemi V, Aario R. Hydromorphic dispersion of uranium in a surficial environment in northern Finland. *J Geoch Expl*, 1991, 41: 197—212[DOI]
- 43 Taboada T, Cortizas A M, Garcia C, et al. Uranium and thorium in weathering and pedogenetic profiles developed on granitic rocks from NW Spain. *Sci Total Environ*, 2006, 356: 192—206[DOI]
- 44 Takeda A, Tsukada H, Takaku Y, et al. Accumulation of uranium derived from long-term fertilizer applications in a cultivated Andisol. *Sci Total Environ*, 2006, 367: 924—931[DOI]
- 45 Osmond J K, Ivanovich M. Uranium-series mobilization and surface hydrology. In: Ivanovich M, Harmon R S, eds. *Uranium-series Disequilibrium*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1992. 260—289
- 46 Gu Z Y, Lal D, Liu T S. Weathering histories of Chinese loess deposits based on uranium and thorium series nuclides and cosmogenic <sup>10</sup>Be. *Geoch Cosm Acta*, 1997, 61: 5221—5231[DOI]
- 47 Zhang J F, Zhou L P, Yue S Y. Dating fluvial sediments by optically stimulated luminescence: Selection of equivalent doses for age calculation. *Quat Sci Rev*, 2003, 22: 1123—1129[DOI]
- 48 裴树文, 张家富, 高星, 等. 三峡井水湾遗址的光释光测年. *科学通报*, 2006, 51(12): 1443—1449
- 49 Choi J H, Murray A S, Jain M, et al. Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea. *Quat Sci Rev*, 2003, 22: 407—421[DOI]
- 50 Choi J H, Murray A S, Cheong C S, et al. The resolution of stratigraphic inconsistency in the luminescence ages of marine terrace sediments from Korea. *Quat Sci Rev*, 2003, 22: 1201—1206[DOI]
- 51 Aitken M J. *Thermoluminescence Dating*. London: Academic Press, 1985
- 52 Jeong G Y, Cheong C S, Choi J H. The effect of weathering on optically stimulated luminescence dating. *Quat Geochronol*, 2007, 2: 117—122[DOI]
- 53 Chabaux F, Dequincey O, Leveque J J, et al. Tracing and dating recent chemical transfers in weathering profiles by trace-element geochemistry and <sup>238</sup>U-<sup>234</sup>U-<sup>230</sup>Th disequilibria: The example of the Kaya lateritic toposequence (Burkina-Faso). *Comp Rend Geosci*, 2003, 335: 1219—1231[DOI]
- 54 Zhao H, Li S H. Luminescence isochron dating: A new approach using different grain sizes. *Rad Prot Dos*, 2002, 101: 333—338
- 55 Zhang J F. Development and application of luminescence dating to Quaternary sediments from China. Dissertation for the Doctoral Degree. Hong Kong: Hong Kong University, 2000