

# 安徽宣城风成沉积—红土系列剖面 ESR 年代学研究\*

杨 浩 赵其国 李小平 夏应菲

(中国科学院南京土壤研究所, 210008)

## 摘 要

本文利用电子自旋共振测年法(ESR)测定了安徽省宣城风成沉积—红土系列剖面的形成年龄。根据各层的年龄,可以将本剖面划分为三个形成期次:(1)早更新世晚期,形成年龄约为1000—730ka之间,包括砾石层和上伏的粉砂层;(2)中更新世早期,包括网纹红土及与其互层的棕黄色风成堆积层,其形成年龄在730—400ka之间;(3)中更新世晚期,均质红土(含夹于其间的棕黄色风成堆积层)属于本期,形成年龄约在400—100ka之间。

年龄的精确测定,使我们有可能进一步研究“过去全球变化”,并为分析和提取剖面中贮藏的气候环境变迁的信息打下基础。

**关键词** 红土, ESR 年代学, 全球变化

## 1 引 言

中国南方热带—亚热带地区广泛发育的第四纪红土及红色风化壳,早已引起学术界的高度重视,并进行了深入研究,取得了丰硕的成果<sup>[1-5]</sup>。随着全球变化研究热潮的掀起,几乎每个学科都积极参与并进行研究。全球变化研究十分关心在温室效应的持续影响下,对未来增温时期的地球表面环境会出现何种改变,但要准确回答此问题目前还较困难,因为国际上还没有一个可综合评价和预测全球增温所导致环境改变的理论模型。为此一些地球科学家提出了“过去全球变化”(past global change)的研究课题,以期通过对第四纪时期典型的气候旋回(冷—暖和干—湿的交替变化),特别是增温期的气候环境格局的研究,为预测未来的全球变化提供一个参照体系<sup>[6-8]</sup>。“过去全球变化”主要是通过研究第四纪环境信息载体来进行的,目前研究较详细的有:黄土—古土壤系列<sup>[5-8]</sup>、洞穴沉积<sup>[9]</sup>、深海沉积物<sup>[24-25]</sup>、湖泊沉积物<sup>[10]</sup>、冰川及冰川沉积物<sup>[11]</sup>和极地冰岩芯等。

中国南方的第四纪红土作为活跃的气候—生物作用的产物,同样记录着其形成时气候环境变迁的丰富信息,因此它可以作为“过去全球变化”的信息载体进行研究,目前已着手这方面的工作,并取得了一些有意义的结果<sup>[12-16,26]</sup>。

\* 国家自然科学基金资助项目。

收到修改稿日期:1994-12-30

建立一个正确的时空概念,是认识大自然的基础。第四纪环境变迁的研究,时间坐标的建立是首要任务,没有精确的时间尺度,“过去全球变化”的研究将无法深入。因此在提取和解译第四纪红土中贮藏的环境信息以前,必须对剖面进行详细的年代学的研究工作,这样在纵向上可以获得我国南方第四纪以来各个时段气候和地理环境的状况及其变迁特征;横向上可与其它地区(特别是北方黄土区)进行对比,从不同时间尺度的环境演化上找出它们间的异同点和内在联系,这对全面深入了解全国第四纪环境变迁还有非常重要的意义。

电子自旋共振(Electron Spin Resonance,简称 ESR)测年是近十几年迅速发展起来的新方法,我们曾用此法测定了江西省余江黎家剖面的四个红土样品的年龄,结果令人满意<sup>[26]</sup>。

安徽省宣城剖面具有良好的沉积旋回,加之考古挖掘提供了很好的露头,非常适合“过去全球变化”的研究,在进行详细野外工作的基础上,对此剖面进行了较详细的 ESR 年代学研究,确定了剖面中各沉积层-古土壤层的沉积年龄,并对本剖面沉积的地质时代进行了划分,同时简述了其形成过程的气候环境变迁的格局。

## 2 宣城剖面简介

宣城剖面位于长江下游的支流水阳江的南岸,属河成二级阶地,区内地形以低山丘陵、山间盆地与河间平原相间为特征,气候温暖湿润。剖面顶高为海拔 45 米左右,垂直高度约 13 米,它是一个旧石器出土地点。

根据沉积物的结构、颜色、紧密程度以及层间接触关系等,可将剖面分成 17 层(参见文献[16]和图 1)。可将除砾石层外的 16 层组合为 8 个层组,每个层组由上部的古土壤(关于古土壤的鉴定,将另文论述)与下部的棕黄色层构成,层组间为侵蚀间断接触。7 个红色的古土壤层具有下列共同特征:颜色偏深(从红色至紫红色),多发育垂直或近垂直的网纹(从  $S_3$  开始),网纹较粗,一些网纹明显保留了植物根管的形态。古土壤层与下伏棕黄色沉积层之间呈过渡关系,界线较模糊,有时古土壤层中可出现后者的残余(直径数厘米至几十厘米),这些特征均说明古土壤是棕黄色沉积物经生物化学成壤作用而形成的。

据研究<sup>[16]</sup>,宣城剖面的沉积物主要系风积成因(仅第 16—17 层为冲积成因),它们由北方冬季风带来,当地裸露的干河床及湖滩的沉积物也是部分来源。

## 3 材料与方法

### 3.1 样品的采集和制备

由于 ESR 测年技术的特殊要求,在采集和制备样品时,尽可能避免阳光和灯光的照射,野外采样时在阴天进行,且距剖面 30cm 深处取样,样品采集后立即用塑料袋扎口封装,然后放入黑布袋内装箱待运。实验室内制备样品时在暗室的红灯下进行。

宣城剖面共测定 10 个样品,其取样位置见图 1。

由于供 ESR 测年的对象是红土中的石英晶体,为获得较纯的石英样品,对红土样品进行了下列处理:

- 1.用 5%NaCl 溶液浸泡若干小时,待其充分分散后,在水中过 300 目筛,去掉粘土矿物和其它细小矿物;
- 2.用 50%的王水侵蚀若干小时,溶解样品中绝大多数的无机盐类矿物;
- 3.用 30%的氢氟酸溶蚀 10 分钟(25℃),腐蚀掉石英表面的氧化膜和碳化膜;
- 4.在 50℃ 温度下烘干;
- 5.利用转靶 X 射线衍射仪和电子能谱仪检查样品的纯度,经上述处理后,石英含量可达 95%以上,符合 ESR 测年要求。

深度 Depth (m)	层号 Layer -No.	柱状图 Columnar section	采样位置 Sampling site	样号 Sample No.
1	1			
	2			
	3	▨ S <sub>1</sub>	▲	X <sub>1</sub>
3	4		▲	X <sub>2</sub>
	5	▨ S <sub>2</sub>	▲	X <sub>3</sub>
	6		▲	X <sub>4</sub>
5	7	▨ S <sub>3</sub>	▲	X <sub>5</sub>
	8			
7	9	▨ S <sub>4</sub>		
	10			
	11	▨ S <sub>5</sub>	▲	X <sub>6</sub>
9	12			
	13	▨ S <sub>6</sub>	▲	X <sub>7</sub>
	14		▲	X <sub>8</sub>
11	15	▨ S <sub>7</sub>	▲	X <sub>9</sub>
	16		▲	X <sub>10</sub>
	17	●●●●●		X <sub>11</sub>

图 1 宣城剖面柱状图及 ESR 年龄样品取样位置

Fig.1 Columnar sections and sampling sites of ESR dating samples from the Xuancheng profile

### 3.2 ESR 年龄的测定

用 ESR 测定第四纪沉积物的形成年龄的方法是基于对样品(一般为沉积物中的矿物)的天然辐射损伤的检测。由于样品在自然环境中,遭受到微量放射性元素 U、Th、K(<sup>40</sup>K 为放射性同位素)等在衰变过程中释放的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线的辐照,能将电子从其所在的原子或离子中分离出来,产生未成对电子和空穴,它们被晶格中的缺陷或俘获层所捕获,形成各种不同的顺磁中心(Paramagnetic centers),而这些中

心可以被 ESR 谱仪所探测。样品中顺磁中心的数量与其形成的年龄成正比,即样品的年龄越“老”,顺磁中心的数量也越多、相应于累积的总辐照剂量( $TD$ )或称等效剂量( $ED$ )就越大。如知道每年的辐照剂量,即年平均剂量率( $AD$ ),就可以测得该样品的形成年龄( $T$ )<sup>[17]</sup>:

$$T(a) = ED(Gy) / AD(Gy/a) \quad (1)$$

### 3.2.1 等效剂量( $ED$ )的测定

等效剂量用附加剂量法进行测定<sup>[7,17]</sup>,首先将样品分成 7 等份(小样),每份 100mg,然后用<sup>60</sup>Co 放射源辐照不同的附加剂量( $D$ ),其剂量分别为 0、500、1000、2000、3500、6000、9000Gy,放置一周后,用电子自旋共振谱仪分别测量每个小样的 ESR 信号强度( $I$ ),测试条件参见文献[7]。测量结果列于表 1。

结果显示,附加剂量  $D$  与 ESR 信号强度  $I$ (任意单位)成指数关系,当  $D$  超过一定的数值后, $I$  便趋于一饱和值  $I_{\max}$ ,用指数形式和一级动力学方程可表征  $I-D$  曲线:

$$I = I_{\max} [1 - e^{-\mu(D+ED)}] \quad (2)$$

式中  $\mu$  是灵敏度系数。上式可改写成:

$$-\ln(1 - I / I_{\max}) = \mu(D+ED) \quad (3)$$

表 1 宣城剖面十个样品的 ESR 信号强度

Table 1 ESR signal intensity of ten samples from the Xuancheng profile

样号 Sample No.	附加剂量 Additional dose (Gy)						
	0	500	1000	2000	3500	6000	9000
X <sub>1</sub>	4.43	5.78	6.20	7.60	9.83	11.59	12.51
X <sub>2</sub>	5.43	8.00	9.58	10.60	12.11	13.50	14.65
X <sub>3</sub>	5.67	8.81	9.04	9.84	10.97	13.61	15.79
X <sub>4</sub>	7.37	8.90	9.41	10.50	12.13	13.01	14.41
X <sub>5</sub>	9.22	9.58	10.41	12.50	12.93	13.99	14.88
X <sub>6</sub>	6.00	6.41	7.01	7.50	9.60	11.15	12.68
X <sub>8</sub>	10.01	11.00	12.81	13.53	14.93	16.25	17.60
X <sub>9</sub>	11.72	11.91	12.51	14.07	14.50	15.03	15.27
X <sub>10</sub>	10.99	12.03	12.59	14.01	15.40	15.90	16.91
X <sub>11</sub>	13.69	13.99	14.34	14.91	16.52	17.45	18.39

由最小二乘法在公式(3)中反复假定  $I_{\max}$ ,直到  $(I_{\text{the}} - I_{\text{obs}})$  和的最小二乘被找到,其中  $I_{\text{the}}$  是式中假定  $I_{\max}$  后各点的理论值,  $I_{\text{obs}}$  为各点的测量值。

### 3.2.2 年平均剂量率( $AD$ )的确定

样品每年吸收的放射剂量(即年平均剂量率)可以通过在采样处理设剂量计或分析样品及周围环境所含 U、Th、K 等微量放射性元素的含量进行计算而获得<sup>[7]</sup>,本文采用后一种方法。红土可以看作一个均一体(指取样点周围有限的距离内),放射性元素含量均匀,因此可按无限元系统计算年平均剂量率<sup>[7]</sup>:

$$AD = AD_i + AD_c \quad (4)$$

$$\text{而} \quad AD_i = K_\alpha AD_{i\alpha} + K_\beta AD_{i\beta} + AD_{i\gamma} \quad (5)$$

式中:  $AD_{i\alpha}$ 、 $AD_{i\beta}$ 、 $AD_{i\gamma}$  分别表示红土内部接受的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  的年剂量, 它分别是红土内所含的放射性元素所释放出的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  对年剂量的贡献, 而  $K_\alpha$ 、 $K_\beta$  则分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  辐照相对于  $\gamma$  辐照的效率, 据实验,  $K_\alpha = 0.18$ ,  $K_\beta = 1.9$ <sup>[7]</sup>。  $AD_c$  为宇宙射线对年剂量的贡献, 本剖面的样品埋藏较深, 故  $AD_c$  忽略不计。

测定红土中 U、Th、K 的含量, 就可以查 Bell 表<sup>[27]</sup>求出年平均剂量率, 测试及计算结果列于表 3。

表 2 样品的拟合方程和等效剂量

Table 2 Fitting equations and equivalent dose values of the sample

样号 Sample No.	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficient	等效剂量 Equivalent dose (Gy)
X <sub>1</sub>	$I = 12.72[1 - e^{-0.000325 \cdot (D+1163)}]$	0.998	1163
X <sub>2</sub>	$I = 15.12[1 - e^{-0.000312 \cdot (D+1780)}]$	0.994	1780
X <sub>3</sub>	$I = 19.10[1 - e^{-0.000141 \cdot (D+3138)}]$	0.990	3138
X <sub>4</sub>	$I = 15.72[1 - e^{-0.000194 \cdot (D+3624)}]$	0.994	3624
X <sub>5</sub>	$I = 15.43[1 - e^{-0.000203 \cdot (D+3474)}]$	0.992	3474
X <sub>6</sub>	$I = 17.33[1 - e^{-0.000105 \cdot (D+3893)}]$	0.997	3893
X <sub>8</sub>	$I = 18.82[1 - e^{-0.000209 \cdot (D+3923)}]$	0.995	3923
X <sub>9</sub>	$I = 15.34[1 - e^{-0.000435 \cdot (D+3175)}]$	0.996	3175
X <sub>10</sub>	$I = 17.50[1 - e^{-0.000256 \cdot (D+4084)}]$	0.991	4084
X <sub>11</sub>	$I = 19.60[1 - e^{-0.000179 \cdot (D+6445)}]$	0.997	6448

表 3 放射性元素含量, 年平均剂量率和 ESR 年龄

Table 3 Radioactive element contents, annual dose and ESR age

样号 Sample No.	放射性元素含量 Contents of radioactive elements			年平均剂量率 Annual dose (10 <sup>-5</sup> Gy/a)	等效剂量 Equivalent dose (Gy)	ESR 年龄 ESR age (ka)
	U(ppm)	Th(ppm)	K(%)			
	X <sub>1</sub>	2.21	13.41			
X <sub>2</sub>	2.01	14.10	1.97	369	1730	205
X <sub>3</sub>	1.99	13.51	2.01	861	3138	364
X <sub>4</sub>	2.17	14.19	1.79	854	3624	424
X <sub>5</sub>	1.94	13.04	1.56	764	3474	455
X <sub>6</sub>	1.91	10.77	1.59	713	3893	546
X <sub>8</sub>	1.61	8.91	1.44	615	3923	638
X <sub>9</sub>	1.02	7.50	1.15	468	3175	678
X <sub>10</sub>	1.90	9.21	1.13	583	4084	701
X <sub>11</sub>	1.71	13.33	1.79	789	6448	817

### 4 宣城剖面的沉积年龄及讨论

根据样品的等效剂量(ED)和年平均剂量率(AD)值,代入(1)式就可以计算出各样品的形成年龄(表3)。

从表3可以看出,样品的年龄随地层深度的增加而增大,这符合地层沉积顺序。砾石层广泛分布于我国南方的广大地区,发育于典型的均质红土-网纹红土-砾石层剖面的底部,因此,本砾石层可以作为地层划分的标志层,准确地确定其形成时代,对研究我国南方红土的形成期次是至关重要的。据地质部力学所在鄱阳湖地区通过地磁测量推算出本区网纹红土下伏的红泥砾层形成年龄在800—1000ka<sup>[11]</sup>;江西余江县黎家剖面的底部砾石层,其形成年龄为769.4ka(ESR法)<sup>[26]</sup>;湖北新洲县的棕黄色砾石层的热释光年龄为920ka<sup>[18]</sup>。本次研究中,宣城剖面砾石层上覆的黄色粉砂层底部的年龄为817ka。野外地层对比发现,上述几个地区的砾石层的地层层位相当,应为同期的产物,这也说明本次测年结果是可以接受的。如果将目前公认的布容/松山极性世界限的年龄730ka作为早、中更新世的界限<sup>1)</sup>,则可将粉砂层及其下伏的砾石层划为早更新世晚期,与大姑冰期相当。

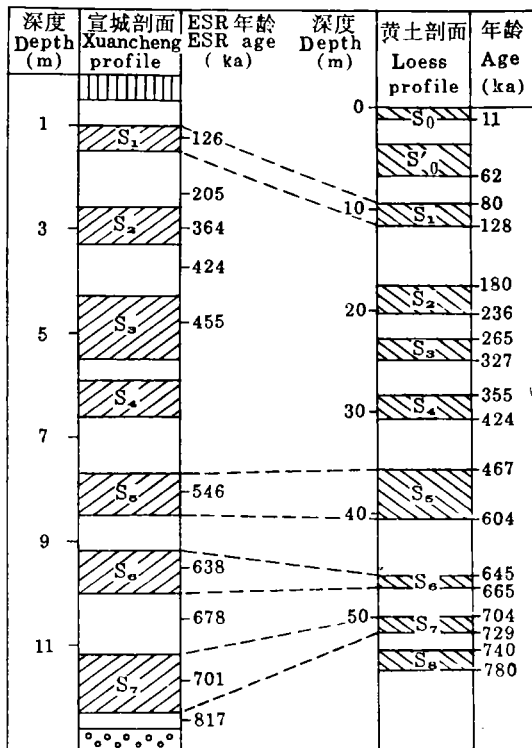


图2 宣城剖面与黄土剖面对比图

Fig.2 Comparison between the Xuancheng and loess profile

1) 国际地层委员会主席 G.M.Richmond 给中国第四纪委员会的一封信。

网纹红土,历来被认为是更新世的形成产物<sup>[13-14,19-20]</sup>。近几年的年代测定则将它形成年龄限定在中更新世早期。黄姜依曾测定网纹红土顶部的年龄(热释光法)为 405.6ka<sup>[21]</sup>;关康年等利用热释光法测定了湖北省新洲县网纹红土底部的年龄,结果为 660ka<sup>[18]</sup>;我们曾对江西余江县黎家剖面的网纹红土进行了 ESR 年龄的测定,两个样品的结果分别为 486.6ka(上部)和 552.2ka(中下部)<sup>[26]</sup>。结合本次测年的结果(表 3),网纹红土及与其互层的棕黄色风成沉积物的年龄在 701—426ka 之间,我们认为网纹红土的形成年龄应在 730—400ka 之间,为中更新早期的产物。

均质红土形成年龄的下限无疑是在 400ka 左右,从地层对比看,它应与南京地区的下蜀土相当,据研究下蜀土形成于中更新世晚期,年龄在 400—100ka 之间<sup>[21]</sup>。余江黎家剖面均质红土中部的 ESR 年龄为 331.2ka<sup>[26]</sup>,宣城剖面均质红土(含沉积物)三个样品的 ESR 年龄在 364—126ka 之间,因此,我们初步断定,我国南方均质红土形成于中更新世晚期。

将宣城剖面与我国北方同时代(中更新世)的黄土-古土壤系列的标准剖面对比(图 2),发现两地的古土壤(特别是 S<sub>1</sub>、S<sub>5</sub>、S<sub>6</sub>、S<sub>7</sub>)的形成时间比较一致,古土壤的层数也是相同的,充分说明我国南北两大区域在中更新世以来,具有一致的气候旋回特征。

## 参 考 文 献

1. 李庆远,1983:中国红壤。1—60页,科学出版社。
2. 熊毅,李庆远,1987:中国土壤(第二版)。39—66页,科学出版社。
3. 赵其国,谢为民,贺湘逸,王明珠,1988:江西红壤。1—55页,江西科学出版社。
4. 赵其国,1992:我国红壤现代成土过程和发育年龄的初步研究。第四纪研究,第4期,341—350页。
5. 刘东生,丁仲礼,1990:中国黄土研究新进展(二)古气候与全球变化。第四纪研究,第1期,1—9页。
6. 刘东生,1955:黄土与环境。1—77页,科学出版社。
7. 孙建中,赵景波,1991:黄土高原第四纪。27—38页,科学出版社。
8. 王永炎,管屿贞雄,1985:中国黄土研究的新进展。1—19页,陕西人民出版社。
9. 吴汝康,1985:北京猿人遗址综合研究。1—11页,科学出版社。
10. 黄麒,陈克造,1990:七十三万年来柴达木盆地察尔汗盐湖古气候波动的形式。第四纪研究,第3期,205—211页。
11. 施雅风,崔之久,李吉均,1989:中国东部第四纪冰川与环境问题。1—10,133—186页,科学出版社。
12. 龚子同,刘良悟,1993:红色风化壳与环境谏议。中国第四纪南北对比与全球变化,60页,广东高等教育出版社。
13. 席承藩,1990:土壤是气候变化的长期记录者。第四纪研究,第1期,82—90页。
14. 席承藩,1991:论华南红色风化壳。第四纪研究,第1期,1—7页。
15. 朱照宇,郑洪汉,张国梅,江伟华,朱林,卢庆新,孙玉文,1991:华南热带红土期及风化物初步研究。同上,18—27页。
16. 赵其国,杨浩,1995:中国南方红土与第四纪环境变迁的初步研究。第四纪研究,第2期,107—116页。
17. 彭子成,1989:一种第四纪地质年龄测定的新方法——电子自旋共振年龄测定法。海洋地质与第四纪地质,第9卷2期,89—99页。
18. 关康年,黄宁生,1993:鄂东阳逻地区早更新世砾石层研究。中国第四纪南北对比与全球变化。64—65页。广东高等教育出版社。
19. 杨怀仁,1958:长江下游第四纪冰川与冰缘沉积。中国第四纪研究,第1卷1期,238—243页。
20. 任美镔,1953:庐山地形的初步研究。地理学报,第19卷1期,1—7页。
21. 黄姜依,方家骅,邵家骥,杨达源,1988:南京下蜀黄土沉积时代的研究。地质论评,第34卷3期,240—247页。
22. Baker, F. W. G., 1989: Progress towards the global change program. Episodes, No. 12, pp. 38—39.
23. Price, R. A. and Hsu, K. J., 1988: IUGS task force on global change. Ibid., No. 11, pp. 133.

24. Shackleton, N. J. and Opdyke, N. D., 1973: Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28—238. Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a  $10^5$  year and  $10^6$  year scale. *Quaternary Research*, Vol. 3, No. 1. pp. 39—55.
25. Shackleton, N. J. and Opdyke, N. D., 1977: Oxygen isotope and paleomagnetic evidence for early Northern Hemisphere glaciation. *Nature*, Vol. 270. pp. 216—219.
26. Yang, H. and Zhao, Q. G., 1995: Dating of Quaternary red earth by Electron Spin Resonance(ESR). *Pedosphere*. pp. 510—519, Nanjing University Press.
27. Bell, W. T., 1976: The assesment of radiation dose—rate for thermoluminescence dating. *Archeometry*, Vol. 18. pp. 107—111.

## ESR DATING OF EOLIAN SEDIMENT AND RED EARTH SERIES FROM XUANCHENG PROFILE IN ANHUI PROVINCE

Yang Hao      Zhao Qiguo      Li Xiaoping and Xia Yingfei

*(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)*

### Summary

To elucidate the chronological characteristics of the Xuancheng profile in Anhui Province, the ESR ages of 10 samples were determined. The results indicated that the ESR age increased with the increase of stratum depth and followed the stratigraphic sequence. If taking the Brunhes—Matuyama boundary (B / M) (730ka) between early and middle Pleistocene, based on previous researches and our ESR dating results, the gravel layer and the upper silt layer could be assigned to the later stage of early Pleistocene epoch(1000—730ka), Plinthitic red earth layers and brown—yellow eolian sediment layers (from the 15th layer to the 6th) to the early stage of middle Pleistocene epoch (730—400ka), and the isotropic red earth (from the 5th layer to the 3rd) to the later stage of middle Pleistocene epoch (400—100ka).

**Key words**      Red earth, ESR dating, Global change