

# 马兰黄土的热释光年龄

李 虎 侯

（中国社会科学院考古研究所，北京）

## 摘 要

本文提出了利用石英晶格中的热释光性质测定黄土形成年龄的理论基础，明确了计算黄土形成年龄的起始时刻，并用石英中积存能量的阳光晒退性质证实这个起始时刻的可靠性。文中报道了对陕西省洛川县黑木沟秦家寨一段剖面上所采集的 41 块马兰黄土标本的热释光年龄值，获得了一条马兰黄土的形成年龄对黄土深度的曲线，从而证明了马兰黄土的形成是不均匀的，可以看出形成速度快慢不同的时期。

石英晶格中贮存的辐射能量能够被阳光晒退，这一事实证明可以应用石英的热释光技术测定黄土形成的年龄。Shelkopyas<sup>[1]</sup> 曾用热释光方法测定了乌克兰黄土的年龄；Wintle<sup>[2]</sup> 曾测定过英格兰、德国和波兰的黄土年龄；Rendall 等<sup>[3]</sup> 也曾测定过巴基斯坦的黄土。值得注意的是，这些文章都没有回答：什么时刻是计算年龄的起始时刻？它的根据是什么？对于具体的测定方法也没有作出详细的交待。为此，本文拟对热释光方法用于测定黄土年龄的原理、方法和存在的问题所作的探索进行总结，并报道在陕西洛川剖面上马兰黄土的测定结果，以及从这些结果所获得的认识。

## 一、利用黄土中石英的热释光测定黄土形成年龄的基本原理

石英晶体的热释光现象起源于晶格中贮藏的能量受热后的转换。晶体贮藏能量的本质是晶格缺陷、杂质混入和辐射损伤的后果，而利用石英的热释光来测定它所代表的标本的年龄时，认为石英晶格中的能量是来自恒定的辐射场，它在常温下能够稳定地贮存在晶格中，只是在石英晶体受热后，这些能量才以光子的形式释放出来。在这种情况下，石英晶格中积累能量的起点应该是：晶格形成的时刻或者晶体经历过最后一次热事件的时刻。

黄土中的石英晶体既不是在黄土形成时生成的，也没有经历过热事件，这就提出了石英晶格中贮存能量的起点问题。自从石英晶格中贮藏的能量能够被阳光晒退的事实在实验室被证实以后<sup>[4]</sup>，就可以利用这一现象来测定黄土的年龄。石英晶格中贮存能量的起点问题可以用图 1 来表示。横坐标是石英晶体生成以后所经历的时间；纵坐标是晶格中积累的能量。从 O 到 A 代表石英晶体生成以后到形成黄土这段时间内能量的积累过程；从 B 到 C 是石英自黄土

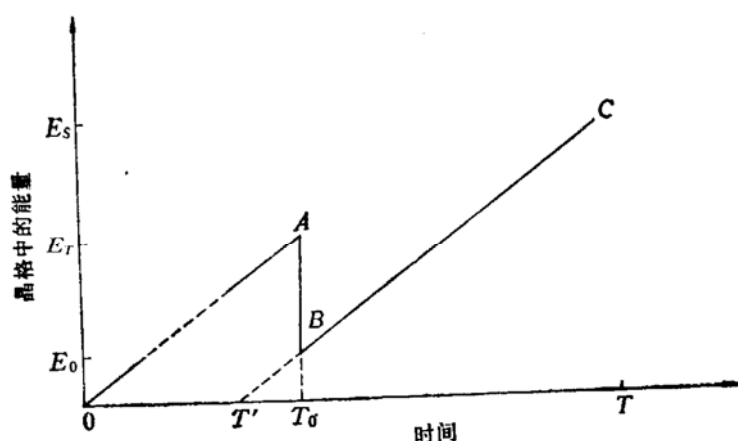


图1 黄土中石英积累能量的过程

形成至今的这段时间内晶格中能量的积累过程；从  $A$  到  $B$  表示石英晶格中贮存的能量出现骤然减弱，事件发生在石英晶体受到阳光的曝晒。因此，从图1可以看出， $T_0$  是黄土形成的时刻，黄土的年龄就是  $T - T_0$ 。

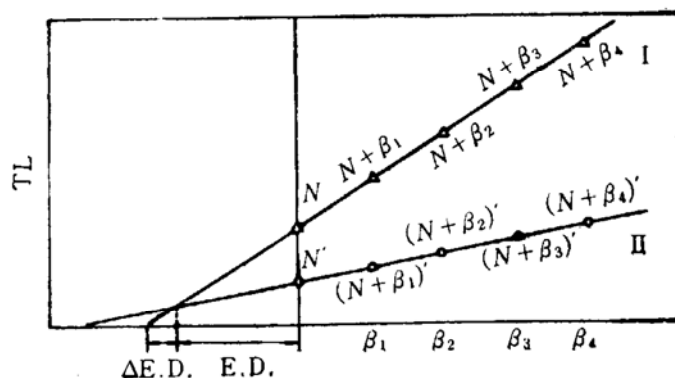
黄土形成年龄测定的基础，重要的是从  $T_0$  到  $T$  这段时间内石英是处于一个稳定的辐射场中，以保证晶格中能量的积累按照  $BC$  线段表示的规律从  $E_0$  到  $E_s$ 。而从  $O$  到  $T_0$  这段时间内，石英晶体经历过哪些变迁，以及这些变迁的具体过程，晶格中积累起来的能量  $E_r$  的具体数值等，对于确定黄土形成的年龄都是无关紧要的。黄土是富含石英的<sup>[9]</sup>，而且粒径在  $2-8 \mu\text{m}$  的比例不少，它为应用热释光方法测定黄土年龄提供了必要条件。

## 二、黄土热释光年龄测定方法

黄土年龄测定的方法是在应用细粒石英测定陶片年龄的基础上<sup>[6]</sup>经过以下几个方面的修正而建立起来的。

### 1. 光晒退修正自然积存热释光量

石英晶格中积累的能量通常是将样品用等差的辐射剂量照射后，测量其热释光量，并用图解法求出等效辐射剂量值。光晒退的实验事实除了确定黄土中石英积累能量的起点外，同时也提供了一种修正等效  $\beta$ -剂量的方法。具体做法就是用两组同样的样品，分别给以相同的递增  $\beta$ -辐射剂量照射。一组是照射后立即测出热释光量，另一组则经过光晒退，然后再测定其

图2 等效  $\beta$  剂量的光晒退校正

热释光量。将两组样品的结果同绘于一图中, 并从两条曲线的相交处求得应该校正的等效  $\beta$ -剂量值。图 2 是 4 种校正图之一, 图中曲线 I 是未经光晒退的样品测出的热释光量, 曲线 II 则是样品经光晒退后测出的。光晒退的试验是求取石英中的自然积存热释光由  $N$  减弱到  $N'$  的量值。石英晶格中贮存能量的这一变化过程相当于图 1 中所示的  $A$  点到  $B$  点, 能量值则是由

表 1 石英经光晒退后的剩余热释光量

| 编 号   | $\frac{N'}{N}$ | $\frac{(N + \beta_1)'}{(N + \beta_1)}$ | $\frac{(N + \beta_2)'}{N + \beta_2}$ | $\frac{(N + \beta_3)'}{N + \beta_3}$ | $\frac{(N + \beta_4)'}{N + \beta_4}$ |
|-------|----------------|----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| TG148 | 0.1435         | 0.0982                                 | 0.0897                               | 0.0896                               | 0.0694                               |
| TG149 | 0.1553         | 0.1322                                 | 0.1471                               | 0.1227                               | 0.1179                               |
| TG150 | 0.2022         | 0.1377                                 | 0.1205                               | 0.1067                               | 0.1390                               |
| TG151 | 0.1598         | 0.1283                                 | 0.1188                               | 0.1077                               | 0.0954                               |
| TG152 | 0.1980         | 0.1138                                 | 0.1207                               | 0.1102                               | 0.1159                               |
| TG153 | 0.1538         | 0.1157                                 | 0.1113                               | 0.1003                               | 0.1000                               |
| TG154 | 0.1228         | 0.1063                                 | 0.1029                               | 0.0937                               | 0.0954                               |
| TG155 | 0.1101         | 0.1070                                 | 0.0926                               | 0.0850                               | 0.1411                               |
| TG156 | 0.1539         | 0.1328                                 | 0.1176                               | 0.1084                               | 0.0959                               |
| TG157 | 0.1500         | 0.1363                                 | 0.1208                               | 0.1214                               | 0.1096                               |
| TG158 | 0.1469         | 0.1058                                 | 0.1271                               | 0.1239                               | 0.1240                               |
| TG159 | 0.1397         | 0.1262                                 | 0.1108                               | 0.0995                               | 0.0993                               |
| TG160 | 0.1313         | 0.1120                                 | 0.1049                               | 0.0984                               | 0.0994                               |
| TG161 | 0.1413         | 0.1133                                 | 0.1082                               | 0.1017                               | 0.1127                               |
| TG162 | 0.1375         | 0.1186                                 | 0.1079                               | 0.1018                               | 0.1090                               |
| TG163 | 0.1400         | 0.1158                                 | 0.1148                               | 0.1034                               | 0.0994                               |
| TG164 | 0.1538         | 0.1406                                 | 0.1379                               | 0.1150                               | 0.1242                               |
| TG165 | 0.0878         | 0.0909                                 | 0.0862                               | 0.0831                               | 0.0882                               |
| TG166 | 0.1125         | 0.0905                                 | 0.0968                               | 0.0956                               | 0.0907                               |
| TG167 | 0.1053         | 0.0821                                 | 0.0838                               | 0.0713                               | 0.0700                               |
| TG168 | 0.1200         | 0.1071                                 | 0.0972                               | 0.0909                               | 0.0904                               |
| TG169 | 0.2500         | 0.2056                                 | 0.2313                               | 0.2360                               | 0.2316                               |
| TG170 | 0.0775         | 0.0666                                 | 0.0638                               | 0.0655                               | 0.0585                               |
| TG171 | 0.0795         | 0.0990                                 | 0.0797                               | 0.0742                               | 0.0795                               |
| TG172 | 0.1143         | 0.1286                                 | 0.1167                               | 0.1163                               | 0.1195                               |
| TG173 | 0.1647         | 0.1360                                 | 0.1333                               | 0.1202                               | 0.1200                               |
| TG174 | 0.1009         | 0.0805                                 | 0.1058                               | 0.0925                               | 0.1007                               |
| TG175 | 0.1405         | 0.1290                                 | 0.1105                               | 0.0995                               | 0.0898                               |
| TG176 | 0.1111         | 0.1417                                 | 0.1067                               | 0.0852                               | 0.0922                               |
| TG177 | 0.0825         | 0.0719                                 | 0.0588                               | 0.0600                               | 0.0739                               |
| TG178 | 0.1064         | 0.0769                                 | 0.0773                               | 0.0667                               | 0.0708                               |
| TG179 | 0.0787         | 0.0909                                 | 0.0945                               | 0.0833                               | 0.0833                               |
| TG180 | 0.1354         | 0.1421                                 | 0.1103                               | 0.1000                               | 0.1003                               |
| TG181 | 0.0526         | 0.0456                                 | 0.0403                               | 0.0345                               | 0.0325                               |
| TG182 | 0.0982         | 0.0753                                 | 0.0787                               | 0.0717                               | 0.0744                               |
| TG183 | 0.0813         | 0.0688                                 | 0.0750                               | 0.0759                               | 0.0722                               |
| TG184 | 0.0917         | 0.0823                                 | 0.0761                               | 0.0733                               | 0.0667                               |
| TG185 | 0.1351         | 0.1156                                 | 0.1000                               | 0.0897                               | 0.0800                               |
| TG186 | 0.1448         | 0.1279                                 | 0.1194                               | 0.1135                               | 0.1077                               |
| TG187 | 0.1143         | 0.1200                                 | 0.1228                               | 0.1176                               | 0.1135                               |
| TG188 | 0.0548         | 0.0474                                 | 0.0433                               | 0.0436                               | 0.0440                               |

$E_T$  降到  $E_0$ 。未经光晒退时求得的等效  $\beta$ -剂量值应该是  $E \cdot D$  和  $\Delta E \cdot D$  的总和, 而经光晒退修正后的等效  $\beta$ -剂量值则只有  $E \cdot D$ , 校正值为  $\Delta E \cdot D$ 。这个修正值反映了石英晶格中经光晒退以后剩余的能量值  $E_0$ 。如果不加修正, 计算年龄的起始时刻是  $T'$ ; 修正以后, 计算年龄的起始时刻则是  $T_0$ 。这个晒退后剩余的能量值  $E_0$  在数值上不是零, 因此, 修正是不可缺少的。Wintle 等人<sup>[7]</sup>在讨论沉积物的热释光年代中, 已经注意到石英晶格中积存能量的光效应, 但他们并不认为它是使晶格中积存能量减弱的唯一因素, 而且认为沉积物积存的天然热释光是由两部分组成: 即沉积时残留的热释光和沉积后再积累起来的热释光, 并假定残留的热释光量很少, 它和以后再积累起来的热释光相比甚至可以忽略不计。这就等于说, 图 1 中的  $E_0$  值是零, 或者接近于零, 不必进行校正。表 1 列出了 41 块马兰黄土标本经阳光晒退后的剩余热释光量。从这些数字可以看出, 自然积存热释光剩余分数为 5% 的只有两块标本, 剩余热释光分数高达 20% 的也只有三块标本, 而绝大部分标本的剩余热释光分数都在 10% 左右。可以, 在实际测定黄土标本的年龄时, 每一块标本都必须作光晒退的实验校正。样品的光晒退是在人工光源下进行的, 晒退进行的时间都在 20h 以上, 最长的进行了 96h 的连续曝晒。此外, 作者还曾测定过沙漠砂的自然积存热释光量, 在所测的近 20 个沙漠砂标本中, 没有一个标本的自然积存热释光量是零。这也可以作为石英中剩余热释光量不是零的一个佐证。甚至可以说, 在自然界除了加热以外的其余各种自然变迁中, 已经积存在石英晶格中的能量都是难以除尽的。

## 2. 石英晶体对辐射的热释光响应的超线性校正

应用热释光技术测定陶片年龄时出现在低剂量区热释光响应不成比例, 这一现象引起了 Fleming<sup>[8]</sup> 和 Bowman<sup>[9]</sup> 的注意。怎样解释这一现象呢? 实验证明: 石英晶体对辐射的热释光响应只是在一定的条件下才存在线性关系。石英晶体对辐射的热释光响应同时受其接受辐射的历史和受热历史的制约。未经热作用或长期处于稳定环境中的石英晶体, 初次接受辐射剂量时, 在  $5-10^3\text{Gy}$  剂量范围内, 它的热释光响应与所接受的辐射剂量成线性关系, 非线性区出现在剂量小于  $3\text{Gy}$  和大于  $10^3\text{Gy}$  的两端。而马兰黄土中的石英, 在测定年龄时所用的  $\beta$ -辐射剂量是在线性区之内。此外, 在对等效  $\beta$ -剂量进行阳光晒退校正时, 非线性区的这部分为数很少的剂量已经包括在修正的  $\Delta E \cdot D$  之内了。因此, 所谓的超线性并不影响实验结果。通过  $2\beta_i$  随辐射剂量增加所表现的线性关系, 及其与  $N + \beta_i$  的线性关系可以获得两线段的斜率  $S'_p$  和  $S_p$ , 在  $S'_p = S_p$  的条件下,  $2\beta_i$  线的起点有时不在零点, 有正也有负。在 41 块黄土标本中, 有 21 个标本的  $2\beta_i$  线起点就是零点, 不需要校正, 另外有 8 个在正位; 12 个在负位。经研究后得知, 造成这种差别的原因可以是: 石英样品加热后辐射灵敏度增高; 大剂量辐射后样品出现了饱和; 样品中含有杂质的影响。所有这些都是属于实验中的问题, 并不是石英晶体本质的反映, 因此, 不必进行修正, 只是在发现这种情况时, 需要重复测定以保证结果的重复性。所以, 本实验中所有黄土标本年龄的测定都不考虑非线性的修正。

## 3. 年剂量率修正

黄土标本年剂量率的计算是把黄土看成均匀的, 任何一块黄土标本都是处于均匀的辐射场中, 这个辐射场就是黄土中所含的天然放射性元素铀、钍和钾所提供的核辐射, 再加上宇宙射线的总和。因此, 测定出黄土中铀、钍和钾的含量是求取年剂量率的依据。在距离地表 1m 以内的黄土标本的宇宙辐射剂量, 每年定为  $15 \times 10^{-5}\text{Gy}$ 。

铀放射系和钍放射系中都包含有一个气态放射性元素——氡的同位素。为了测定氡气在黄土中的扩散,采用了一套改良的 $\alpha$ -粒子计数测量装置<sup>[10]</sup>,用它可以分别测定出标本中总 $\alpha$ -粒子计数, $N_T$ 和氡以及氡的子体放射性核素所放出的 $\alpha$ -粒子计数, $N_{Rn}$ 。在密闭体系里,三个自然放射系都处于永久平衡的条件下,上述两种 $\alpha$ -粒子计数之间应存在关系:  $N_{Rn} = 0.476 N_T$ ,于是可以定义氡的逸散系数,

$$\varepsilon = \frac{N_{Rn}}{0.476 N_T},$$

在实际测量中,从大多数马兰黄土标本中获得的氡的逸散系数,  $\varepsilon \approx 1$ ,也就是说,氡气在黄土中的逸散近乎 100%,因此,在计算黄土中的辐射剂量时,必须作氡逸散的校正。校正的方法是三个放射系中各成员所放射的不同种类射线对年剂量率的贡献,其值列于表 2 中。

表 2 铀和钍的含量各为 1ppm 时,年剂量的分配

|             | $\alpha \times 10^{-5} \text{Gy}$ | $\beta \times 10^{-5} \text{Gy}$ | $\gamma \times 10^{-5} \text{Gy}$ | 总计 ( $10^{-5} \text{Gy}$ ) |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 钍系          | 74.0                              | 2.90                             | 5.00                              | 81.90                      |
| 钍射气及其子体     | 43.0                              | 1.85                             | 3.17                              | 48.02                      |
| 钍射气及其子体所占分数 | 0.581                             | 0.638                            | 0.634                             | 0.586                      |
| 铀系          | 278.3                             | 14.64                            | 12.68                             | 305.62                     |
| 氡及其子体       | 152.1                             | 8.71                             | 11.99                             | 172.8                      |
| 氡及其子体所占分数   | 0.547                             | 0.598                            | 0.946                             | 0.565                      |

### 三、洛川剖面马兰黄土的形成年龄

选择了黑木沟秦家寨的一段剖面,以硷桥北东  $65^\circ$  处地面定为取样剖面深度的零点,去掉表土后,从 2.36m 处采集第一块标本,标本体积为  $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ ,以其中心点与地表的距离

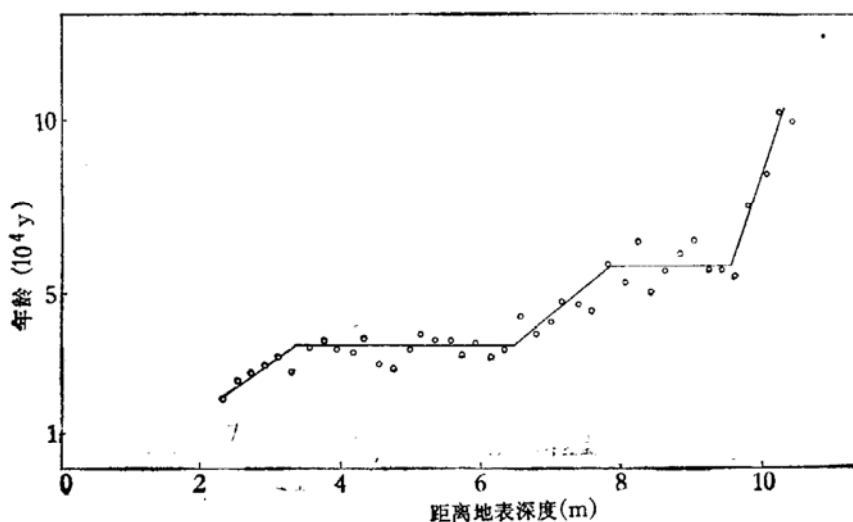


图 3 洛川马兰黄土的堆积年龄

表 3 洛川剖面马兰黄土的年龄

| 序 号 | 深度 (m) | 年剂量率 ( $10^{-3}\text{Gy}$ ) | 等效 $\beta$ -剂量 (Gy) | 年龄 ( $10^4\text{y}$ ) |
|-----|--------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|
| 1   | 2.36   | 281                         | 58.3                | $2.1 \pm 0.2$         |
| 2   | 2.56   | 276                         | 68.2                | $2.5 \pm 0.3$         |
| 3   | 2.76   | 269                         | 71.9                | $2.7 \pm 0.3$         |
| 4   | 2.96   | 229                         | 66.9                | $2.9 \pm 0.3$         |
| 5   | 3.16   | 267                         | 84.3                | $3.2 \pm 0.3$         |
| 6   | 3.36   | 294                         | 81.8                | $2.8 \pm 0.3$         |
| 7   | 3.56   | 315                         | 110.3               | $3.5 \pm 0.3$         |
| 8   | 3.76   | 296                         | 106.6               | $3.6 \pm 0.4$         |
| 9   | 3.96   | 301                         | 101.6               | $3.4 \pm 0.4$         |
| 10  | 4.16   | 302                         | 99.2                | $3.3 \pm 0.4$         |
| 11  | 4.36   | 288                         | 106.6               | $3.7 \pm 0.4$         |
| 12  | 4.56   | 307                         | 84.3                | $2.7 \pm 0.3$         |
| 13  | 4.76   | 321                         | 90.5                | $2.8 \pm 0.3$         |
| 14  | 4.96   | 317                         | 106.6               | $3.4 \pm 0.4$         |
| 15  | 5.16   | 294                         | 112.8               | $3.8 \pm 0.4$         |
| 16  | 5.36   | 300                         | 111.6               | $3.7 \pm 0.4$         |
| 17  | 5.56   | 305                         | 110.3               | $3.6 \pm 0.4$         |
| 18  | 5.76   | 274                         | 104.1               | $3.8 \pm 0.4$         |
| 19  | 5.96   | 301                         | 106.6               | $3.5 \pm 0.4$         |
| 20  | 6.16   | 346                         | 111.6               | $3.2 \pm 0.4$         |
| 21  | 6.36   | 338                         | 114.0               | $3.4 \pm 0.4$         |
| 22  | 6.56   | 305                         | 131.4               | $4.3 \pm 0.4$         |
| 23  | 6.76   | 298                         | 112.8               | $3.8 \pm 0.4$         |
| 24  | 6.96   | 298                         | 124.0               | $4.2 \pm 0.4$         |
| 25  | 7.16   | 295                         | 138.8               | $4.7 \pm 0.5$         |
| 26  | 7.36   | 281                         | 131.3               | $4.7 \pm 0.5$         |
| 27  | 7.56   | 264                         | 119.0               | $4.5 \pm 0.5$         |
| 28  | 7.76   | 295                         | 171.0               | $5.8 \pm 0.5$         |
| 29  | 7.96   | 296                         | 156.2               | $5.3 \pm 0.5$         |
| 30  | 8.16   | 263                         | 168.6               | $6.4 \pm 0.5$         |
| 31  | 8.36   | 295                         | 148.7               | $5.0 \pm 0.5$         |
| 32  | 8.56   | 294                         | 166.1               | $5.6 \pm 0.6$         |
| 33  | 8.76   | 266                         | 162.4               | $6.1 \pm 0.6$         |
| 34  | 8.96   | 268                         | 173.5               | $6.5 \pm 0.6$         |
| 35  | 9.16   | 293                         | 166.1               | $5.7 \pm 0.6$         |
| 36  | 9.36   | 280                         | 158.7               | $5.7 \pm 0.6$         |
| 37  | 9.56   | 303                         | 166.1               | $5.5 \pm 0.6$         |
| 38  | 9.76   | 320                         | 240.4               | $7.5 \pm 0.8$         |
| 39  | 9.96   | 299                         | 250.4               | $8.4 \pm 0.8$         |
| 40  | 10.16  | 273                         | 280.1               | $10.3 \pm 0.9$        |
| 41  | 10.36  | 295                         | 270.2               | $9.2 \pm 0.9$         |

为标本所在位置的深度。向下每增加深度 20cm 采集标本一块,一共收集该剖面上的马兰黄土标本 41 块,逐块测出它的形成年龄,测定和计算年龄的主要数据及结果一并列于表 3。从所获得的各标本的年龄值来看,以下几点结论是明确的。

1. 陕西省洛川县的马兰黄土的形成年龄定在十万年是正确的 这个结果以前我们报道过<sup>[11]</sup>,洛川剖面的上列数据又一次证实了这个结论的正确。

2. 洛川马兰黄土堆积的过程不是均匀的 图 3 所示年龄随深度变化的规律不是一条正比的直线,而是一条折线,并且出现了两个平直的线段,它们分别表明,在距今三万五千年和六万年这两个时期,在陕西洛川地区黄土沉积的速率很快。在三万五千年前后,这一段时间内黄土堆积了将近 3m 厚;在六万年前后的一段时间内,黄土又堆积了 1—2m 厚。这两个时期是洛川黄土的迅速堆积时期,此外,图 3 中还出现了形成黄土的三个均匀堆积的时期,黄土在这段时间内堆积的厚度随着时间的推移而按比例地增加。即使在均匀堆积期,它们之间各个时期的黄土沉积速率也不完全一致。

3. 41 块黄土标本里三个自然放射性元素含量值列于表 4,表 4 中分别列举了 41 块标本中铀、钍和钾含量的平均值,最大含量值和最小含量值。这些数据表明,黄土的成分也不完全均匀,在不同深度上铀、钍含量所呈现的差异反映了各个时期形成黄土的来源不同。

表 4 黄土中铀、钍和钾的含量

|                     | 平均含量 | 偏 差  | 最大含量  | 最小含量 |
|---------------------|------|------|-------|------|
| U(ppm)              | 2.40 | 0.57 | 3.69  | 1.40 |
| Th(ppm)             | 9.28 | 2.51 | 13.92 | 3.59 |
| K <sub>2</sub> O(%) | 2.39 | 0.17 | 2.72  | 1.94 |

## 四、现实与前景

在我们的实验室里建立的模拟阳光晒退技术,证实了阳光晒退造成石英晶格中贮存的能量可以大部分消失或者一部分消失。不必考虑消失量的大小如何,关键是我们能够利用这一性质找到计算黄土年龄的起点,这一点使我们有理由运用热释光技术来测定黄土的形成年龄。值得注意的是,我们无需了解石英晶格中贮存的能量能够被阳光晒退多少,因此,我们也就不必花很多时间去研究所谓的“零化”问题。

马兰黄土也许是利用石英的热释光性质测定年龄的最好对象。它富含石英,而且细粒居多,因此,所测数据稳定、重现性好。

当然,利用石英的热释光测定年龄的方法不是无懈可击的。热释光是结晶固体的一种性质,不少矿物都有热释光特性,在 350—400℃ 范围内出现热释光峰的矿物也不鲜见,而黄土中的各种矿物还没有逐一进行系统地研究它们的热释光特征。显而易见的干扰可以在实验室里排除,而那些有影响又不突出的干扰却往往被忽视,好在总是以实验的再现性来反映统计规律,仍可不失其客观的真实性。

作者在洛川的工作中得到刘东生先生的关怀与指导,对洛川剖面的介绍以及具体采样地点的确定受益不少。采样时又得到了袁宝印、巴德尔两位同志的帮助。先后参加实验工作的有张亚斌、梅屹、卢良才和李盛华等同志,谨此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Shelkopyas, V. N., in *Problems of the Pleistocene Division, Leningrad*, 1971, 295.
- [2] Wintle, A. G., *Nature*, **289** (1981), 479.  
Wintle, A. G. et al., *PACT*, 9(II), 1983, 547.
- [3] Rendall, H. M. et al., *PACT*, 9(II), 1983, 555.
- [4] 李虎侯, 地球化学, 1982, 3: 82.
- [5] 刘东生等著, 黄土的物质成份和结构, 科学出版社, 1966.
- [6] 李虎侯, 考古, 1981, 6: 539.
- [7] Wintle, A. G. et al., *Quaternary Science, Riview*, 1982, 1: 31.
- [8] Fleming, S. J., *Archaeometry*, **17(I)** (1975), 122.
- [9] Bowman, S. G. E., *ibid*, **17(I)** (1975), 129.
- [10] 李虎侯, 中国沙漠, **3**(1983), 3: 18.
- [11] 李虎侯, 科学通报, **30**(1985), 11: 862.