

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.02.014

# 山东黄土年代学研究进展:问题与方向

赵启<sup>1,2</sup>, 安萍<sup>1</sup>, 于禄鹏<sup>1</sup>, 徐树建<sup>1</sup>

(1. 临沂大学资源环境学院, 临沂 276005;

2. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014)

**摘要:** 山东黄土是沿海地区轨道尺度气候变化和海平面变化的重要记录, 冰期大量接收从出露的渤海沉积物风蚀而来的粉尘而与黄土高原等地的内陆黄土在物源上有很大不同, 因此具有重要的研究价值。但与黄土高原黄土相比, 山东黄土得到的关注较少, 研究程度较低。年代学是开展风成沉积古气候重建的基础, 由于受研究方法的制约, 山东黄土的年代学研究仍然有很多问题亟待解决。重点总结山东黄土在年代学研究方面的进展, 通过分析现有年代的可靠性, 提出山东黄土年代学研究存在的问题; 认为年代学研究应当成为现阶段山东黄土的研究重点, 可通过光释光测年(或者结合<sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be埋藏测年)来建立可靠的年代学框架, 为气候变化和地貌演化研究奠定基础; 同时围绕年代学研究的核心, 提出了山东黄土目前值得关注的几个重要的研究方向。

**关键词:** 光释光测年; 海平面变化; 气候变化; 物源; 侵蚀; 山东黄土

**中图分类号:** P534.63

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0256-1492(2017)02-0139-10

中国黄土颗粒大小介于黏土与细砂之间, 多呈浅黄色或黄褐色, 多孔隙, 肉眼不可见层理, 垂直节理发育, 含钙质结核和陆生蜗牛, 多为风成沉积, 分布范围较广<sup>[1]</sup>。黄土与深海沉积、极地冰盖是记录古气候变化的良好载体<sup>[2-5]</sup>。虽然山东黄土研究深度不及黄土高原黄土, 但从 20 世纪中期开始, 对其的相关研究就已经开展。早期, 刘东生指出在末次冰期最盛期, 山东黄土物源以西北内陆粉尘和东部陆架粉尘为主<sup>[1,6]</sup>, 这一观点已被大部分学者接受和证实。20 世纪 80 年代末期以来, 曹家欣等对庙岛群岛的黄土进行粒度和矿物成分分析, 并且根据<sup>14</sup>C 年代和地层中的古生物化石证明黄土主要形成于晚更新世晚期<sup>[7]</sup>。张祖陆根据钙结核<sup>14</sup>C 年代提出莱州湾南岸黄土阜地貌也形成于晚更新世晚期<sup>[8]</sup>。郑洪汉、刘乐军、彭淑贞等分别对发育较好的青州黄土进行地层年代划分及物源分析, 其中对物源的认识较为一致, 但对黄土起始年代存在争议<sup>[9-11]</sup>。于洪军等对山东半岛北部沿海和水下的“陆架黄土”进行成因研究, 提出了末次冰期陆架荒

漠化和山东沿海黄土的风成近源成因的观点<sup>[12]</sup>。徐树建等对山东多处黄土进行了光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)年代测定和成因分析, 发现多处剖面底部 OSL 年代饱和或接近饱和<sup>[13]</sup>。总之, 前人对山东黄土的物源认识较为一致, 但是对黄土的年代争议较大, 限制了山东地区古环境变化的研究。本文旨在对山东黄土的年代学研究进展进行总结, 分析已有年代数据的可靠性, 总结存在的问题, 并针对性地提出解决方案。

## 1 山东地区黄土分布与特征

山东地区的黄土分布于中国黄土分布区的东部边缘, 北连辽南黄土、河北与北京地区的黄土, 西邻内陆黄土高原, 南有长江下游地区的下蜀黄土<sup>[14]</sup>。本文根据前人研究<sup>[13,15]</sup>将山东黄土划分为三大区域: 鲁中山前区、海岛区和沿海区(图 1)。

(1) 由图 1C 淄博、潍坊风向图可知, 鲁中山前区主要盛行西北风和偏南风, 物源受西北黄土影响较大<sup>[13]</sup>。其中以青州傅家庄剖面最为典型, 黄土出露 30 m 以上, 郑洪汉认为可将其分为 9 层<sup>[9]</sup>。彭淑贞等根据粒度组成、黏土矿物的分析, 认为青州黄土主要来源于沉积区以北的黄泛平原和莱州湾等地出露的海相地层, 其次是高空气流携带的西北内陆的远缘粉尘<sup>[11,16]</sup>。

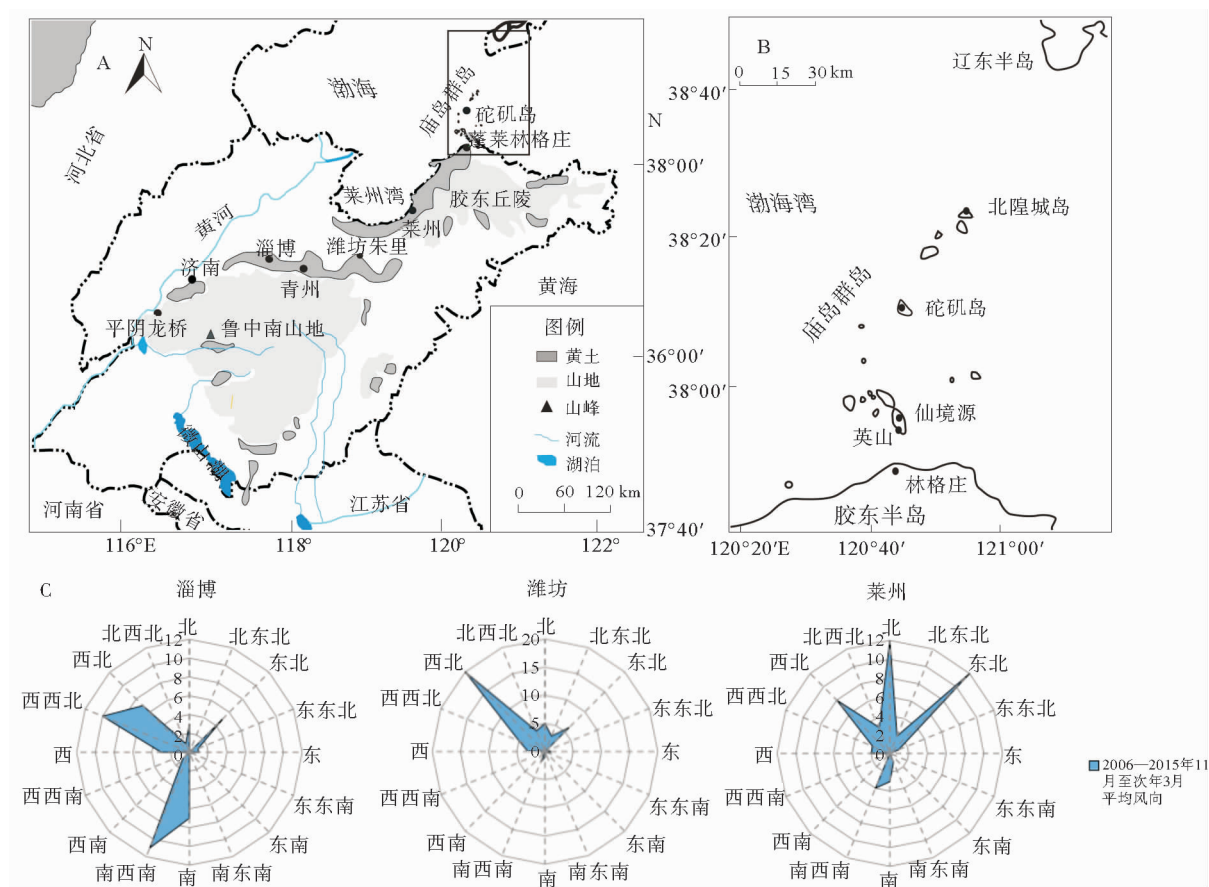
(2) 海岛区黄土物源主要为冰期时渤海和黄海出露的海洋沉积物风蚀而来的粉尘<sup>[17]</sup>, 受冰期-间

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目(ZR2015JL015、ZR2015DL008); 国家自然科学基金项目(41462006、41672167、41472159)资助

**作者简介:** 赵启(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事释光年代学与环境变化研究, zhaoli1016@yahoo.com

**通讯作者:** 安萍, 讲师, 主要从事释光年代学与国土资源遥感研究(E-mail: anping@lyu.edu.cn)

**收稿日期:** 2016-07-28; **改回日期:** 2016-10-27. 文凤英编辑



(A. 山东黄土分布图; B. 庙岛群岛图; C. 2006—2015 年 11 月至次年 3 月淄博、潍坊、莱州三地风向玫瑰图。

数据来源: 2006—2015 年中国区域地面气象要素数据集)

图 1 山东黄土分布及部分地区平均风向

Fig. 1 Loess distribution in Shandong and mean wind direction

冰期尺度海平面变化的控制, 冰期物源丰富, 间冰期海平面上升后几乎没有近源粉尘补给, 主要靠跨越渤海搬运的远源细组物质补给, 因此堆积较少, 反而可能以侵蚀为主。海岛区黄土主要指庙岛群岛的黄土, 其第四纪黄土主要分布于沟谷及其低洼处, 覆盖在各种地貌古老地层之上。由于海岛的地形影响, 海岛黄土极易受流水、重力、波浪等因素的侵蚀, 因此剖面厚度往往不超过 10 m<sup>[18]</sup>。

(3) 沿海黄土以莱州湾东岸和南岸区域为主, 盛行偏北风(图 1C), 受内陆和海洋物源的双重补给, 冰期物源比内陆黄土丰富, 间冰期期间物源比海岛黄土丰富, 属于前两种类型的过渡区<sup>[19]</sup>。其中蓬莱林格庄等地黄土形成陡直的黄土崖, 是我国唯一的一段黄土海岸, 被刘东生称为“蓬莱阁型黄土”<sup>[6]</sup>。徐树建、王涛对其进行粒度、磁化率分析, 其细颗粒含量与中国西部黄土较为接近, 同时粗颗粒含量也很多, 表明它是远源物质和近源物质共同作用的沉积物<sup>[20]</sup>。

## 2 黄土的年代学研究进展

### 2.1 黄土测年常用方法

<sup>14</sup>C 测年可用于与大气进行过碳交换的含碳动植物残体和无机盐等物质的测年, 其测年上限约为 50 ka<sup>[21]</sup>。然而, 黄土沉积中很少发现可用于直接定年的有机质残体; 土壤全样<sup>14</sup>C 测年易受成壤作用的影响而使年代低估; 而钙质结核测年只能反映钙结核形成年代, 而非黄土的年代; 此外, 黄土的年代经常会超过<sup>14</sup>C 的测年范围。

古地磁测年是根据全球性地磁场极性的周期性倒转建立起来的测年方法。其测年范围广, 是黄土高原年代框架建立的重要手段<sup>[22-24]</sup>。但是古地磁测年需要沉积记录覆盖极性周期或极性事件, 因此对于中、晚更新世地层的应用比较受限。同时, 古地磁测年的应用对沉积物的连续性要求较高。

释光测年原理是用经历最后一次曝光的沉积物重新埋藏之后所接收的辐射总量除以年剂量率,即得出埋藏时间(沉积年代)。根据释光信号的激发方式不同分为热释光(Thermoluminescence, TL)和光释光(OSL)。用于测年的矿物主要是石英和长石。TL 测年主要应用于曾经历过高温加热的物质,如陶器、瓷器、火山灰等,也可用于沉积物测年,但由于 TL 信号被光晒退需要较长的时间,所以在沉积物测年过程中可能会发现信号残留造成年龄高估的现象<sup>[25]</sup>。OSL 测年的时间尺度通常在几十年<sup>[26-28]</sup>至几十万年<sup>[29-31]</sup>之间,对晚更新世甚至中更新世以来的、在搬运过程中经历过充分曝光的沉积物均比较适用。

电子自旋共振(Electron Spin Resonance, ESR)测年和释光测年在原理上相似,测年范围可覆盖整个第四纪<sup>[32]</sup>,其测年对象为盐类、断层物质、含石英的沉积物等<sup>[33]</sup>。目前 ESR 技术针对牙齿和碳酸盐类物质的测年最为成功<sup>[34]</sup>;对于沉积物,由于光晒退不完全,很多学者对石英 ESR 信号中心的光晒退特征进行了研究<sup>[32,33]</sup>,认为只有石英 Al 心信号和石英 Ti 心适合沉积物的测年,但也存在信号残留问题。

<sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be 埋藏测年法的基本原理是:当矿物暴露在地表或埋藏于近地表时,接受宇宙射线的照射,开始生成<sup>26</sup>Al 和<sup>10</sup>Be,且二者之比约为 6.8;后期若矿物被埋藏,覆盖层屏蔽宇宙射线致使宇生核素的生成几近停止,前期暴露过程中积累的<sup>26</sup>Al 和<sup>10</sup>Be 随时间流逝而衰减且<sup>26</sup>Al 较<sup>10</sup>Be 衰变快约一倍,由此可以计算其埋藏时间<sup>[35,36]</sup>。该方法的测年范围为 0.3~5 Ma,但是要求样品可提取出粒径大于 0.2 mm 的纯石英砂或石英质砾石至少 50~100 g,并且曾较长时间暴露于地表,后被快速搬运入洞穴或埋入地下深处至少 10 m<sup>[37]</sup>。在黄土的应用中主要针对其中埋藏较深的粗砂层或者砾石。

## 2.2 山东黄土的年代学研究进展

### 2.2.1 鲁中山前区黄土年代学研究

山东青州傅家庄剖面堆积厚度最大,达 30 m 以上,郑洪汉等测得最高层位黑垆土 S<sub>0</sub> 上部<sup>14</sup>C 年龄为(3 210±190) aBP,最老黄土层位 L<sub>9</sub> 的 TL 年代为(793±64) ka<sup>[9]</sup>,据此山东黄土的底界可能超越 B/M 界限。彭淑贞等对此剖面测得的磁性地层结果显示整个剖面均为正极性,未到达 B/M 界限,表明该剖面的底界年代小于 780 ka;在 2.1、7.1、10.5 m 测得的 OSL 年代分别为(9.7±0.4) ka、

(74.8±4.6) ka、(185.1±6.5) ka,在假设沉积速率不变的基础上推测该剖面底界年代为 500 ka 左右<sup>[11]</sup>。

济南市张夏镇黄土中碳酸钙结核发育较多,张祖陆对 3 处钙结核进行<sup>14</sup>C 测年,HT3 样品内核年龄为(13 580±116) aBP,外核为(12 893±116) aBP,HT11、HT12 处钙核<sup>14</sup>C 年代分别为(15 003±422) aBP 和(21 321±125) aBP<sup>[17]</sup>,认为整个剖面均属于马兰期黄土堆积。但钙结核形成年代不能代表黄土的沉积年代,只能作为黄土最小年代的参考。

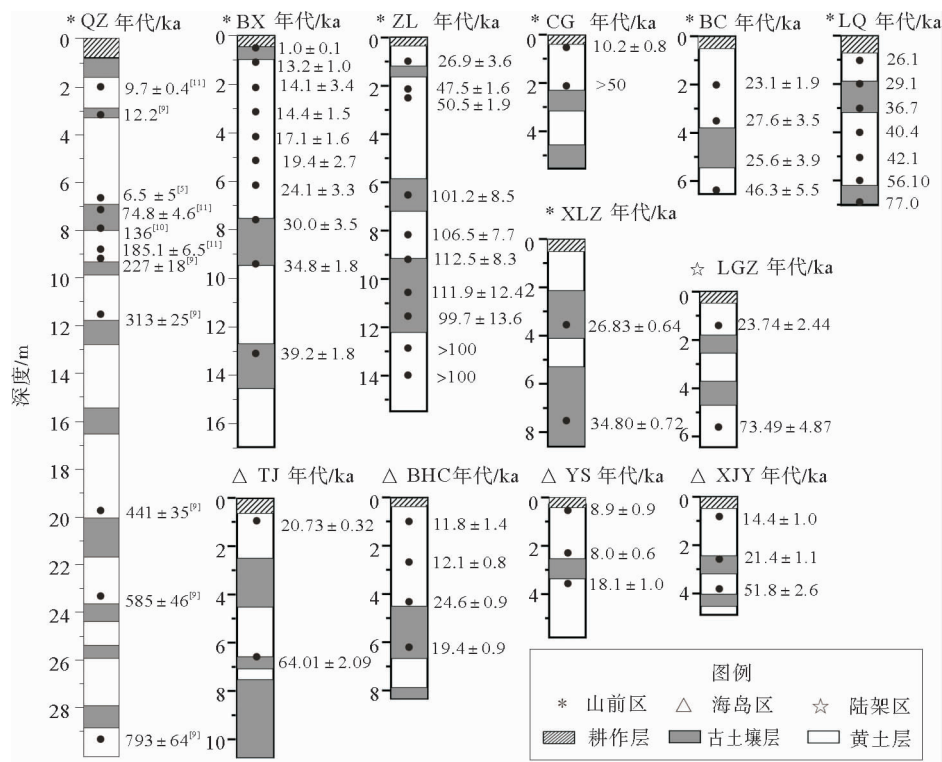
章丘埠西黄土剖面(图 2, BX)位于河流阶地上,出露厚度为 17.1 m,未见底,黄土物质组成以粉砂为主,质地均一。徐树建等<sup>[38]</sup>在剖面深度 0.5、1.1、2.1、3.1、4.1、5.1、6.1、7.6、9.6 和 13.1 m 处采集 10 个 OSL 样品。采用石英单片再生剂量法(Single Aliquot Regenerate, SAR)测年<sup>[39]</sup>,由山东省地震工程研究院土力学与年代学实验室完成。该剖面样品年代为(1.0±0.1)~(39.2±1.8) ka,具体年代见图 3,说明该剖面形成于晚更新世。徐树建等在济南港沟小汉峪(GG)、济南埠村(BC)剖面也进行了样品采集工作,剖面深度分别为 5.5 和 6.5 m,年代信息见图 2。

潍坊朱里剖面(图 2, ZL)出露 14.6 m,未见底。李强在此剖面采集 10 个 OSL 样品,选用粗颗粒石英在山东省地震工程研究院土力学及年代学实验室进行 OSL 测年。在剖面深度 1、2.2 和 2.4 m 处的 OSL 年代分别为(26.9±3.6) ka、(47.5±1.6) ka 和(50.5±1.9) ka,剖面 6.6 m 以后测得的年代均接近饱和(详情见图 2, ZL 和表 1)<sup>[40,41]</sup>。在该剖面以北 16.9 km 的徐林庄黄土剖面(图 2, XLZ),深度 3.5 和 7.5 m 的 OSL 年代分别为(26.83±0.64) ka 与(34.80±0.72) ka<sup>[13]</sup>。

平阴龙桥黄土剖面(图 2, LQ)出露厚度 700 cm,未见底,组成物质以粉砂为主。丁新潮等对其进行稀土元素特征分析并进行 OSL 测年,测年结果显示该剖面是末次冰期以来形成的堆积,剖面深度 7 m 处年代约为 77 kaBP<sup>[42]</sup>。

### 2.2.2 沿海区黄土年代学研究

徐树建和王涛对山东蓬莱林格庄剖面(LGZ)进行了系统的样品采集。剖面厚 6.4 m,未见底,在剖面 0.7、5 m 处避光采集 OSL 样品,并在中国地震局地壳应力研究所新年代学实验室采用 4~11 μm 的细颗粒石英进行测年,测定的年代分别为(23.74±2.44) ka 和(73.49±4.87) ka,说明该剖面主要为末次间冰期以来的沉积<sup>[20]</sup>。



剖面 QZ 数据引自文献[9、10、11],剖面 XLZ、TJ 数据引自文献[13],剖面 LGZ 数据引自文献[20],剖面 BX 数据引自文献[38],  
剖面 ZL 数据引自文献[40],剖面 GG、BC、LQ、BHC、YS 数据引自文献[43],剖面 XJY 数据引自文献[44]

图 2 山东各地(山前—海岛)黄土剖面地层及年代

Fig. 2 Loess stratigraphy and chronology in Shandong from piedmont to islands

### 2.2.3 海岛区黄土年代学研究

庙岛群岛亦称长山列岛(图 1B),早期曹家欣等利用群岛黄土中钙结核的<sup>14</sup>C 年代代表黄土年代,认为北长山岛店子村黄土底部年代为(12 070 ± 30) aBP,珍珠门灯塔马兰黄土的年代为(19 380 ± 320) aBP。大钦岛南村砖瓦厂黄土下部年代为(23 100 ± 400) aBP,东村古砂丘上部年代为(17 830 ± 240) aBP,证明庙岛群岛的黄土主要形成于晚更新世晚期<sup>[7]</sup>。

倪志超对庙岛群岛的仙境源(XJY)、砣矶岛(TJ)、北隍城岛(BHC)、南长山岛英山(YS)等剖面(图 1B)进行了系统的 OSL 年代学研究。在 BHC 剖面(深度 100、270、420、620 cm)、TJ 剖面(100、270 cm)以及 XJY 剖面(80、250、390 cm)处进行 OSL 采样,提取 90~300 μm 的石英,在山东省工程地震研究中心的释光测年实验室进行测定,部分样品在中国地震局地壳应力研究所新年代学实验室完成测试,具体年代数据见图 2 和表 1。倪志超将研究剖面与 LQ、XLZ、ZL、LGZ、GG、BC 剖面进行地层对比,除了 YS 顶部样品外,所有样品年代数据均 >10 ka,据此认为全新世黄土基本被剥蚀或被成土

过程所影响<sup>[43]</sup>。但本文作者考虑到海岛黄土物源的特殊性,侵蚀可能不是主要原因,由于渤海沉积物不再出露,粉尘来源受阻,沉积速率极低,因此造成堆积量极少。

## 3 山东黄土的年代学存在的问题

### 3.1 黄土的起始堆积年代

青州傅家庄剖面为山东发现的最老黄土剖面,郑洪汉利用 TL 测得其底部年代为 793 ± 64 ka<sup>[9]</sup>,而彭淑贞利用古地磁测年证明年代未超过 780 ka,并利用上部 OSL 年代推测此剖面底部年代为 500 ka 左右<sup>[11]</sup>。很显然这两个年代框架均有问题。样品中原始 TL 信号是否真正归零,在很大程度上影响年代的可靠性。风成黄土在模拟太阳灯下晒退 20 h 后其 TL 残留值仍有 20% 左右<sup>[45]</sup>,但 TL 测年的信号残留与所得的较老年代相比是有限的,郑洪汉所测得山东各地黄土的 TL 年代(见表 1)普遍大于 15 万年<sup>[9]</sup>,该框架的主要问题在于石英的 TL 测年不可能得到如此老的年代,这很显然受限于当时

表 1 山东部分黄土剖面释光年代数据及参数

Table 1 Luminescence dating results and parameters of loess in Shandong

| 剖面                  | 深度/<br>m | K/<br>% | Th/<br>$10^{-6}$ | U/<br>$10^{-6}$ | 含水量<br>% | 等效剂量<br>(Gy)     | 剂量率<br>(Gy/ka) | 年代/<br>ka       | 方法  | 矿物 | 粒径/<br>$\mu\text{m}$ | 可靠性  |
|---------------------|----------|---------|------------------|-----------------|----------|------------------|----------------|-----------------|-----|----|----------------------|------|
| LQ <sup>[43]</sup>  | 1        | 2.07    | 8.73             | 1.95            |          | 109              | 4.17           | 26.1            | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 2        | 2.23    | 7.82             | 1.65            |          | 120              | 4.13           | 29.1            | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 3        | 2.11    | 9.83             | 1.92            |          | 160              | 4.35           | 36.7            | OSL | 石英 |                      | 基本可靠 |
|                     | 4        | 2.09    | 9.76             | 2.05            |          | 180              | 4.45           | 40.4            | OSL | 石英 |                      | 可能低估 |
|                     | 5        | 2.13    | 11.4             | 2.31            |          | 200              | 4.75           | 42.1            | OSL | 石英 |                      | 可能低估 |
|                     | 6        | 2.22    | 9.9              | 1.67            |          | 248              | 4.42           | 56.1            | OSL | 石英 |                      | 可能低估 |
|                     | 7        | 2.3     | 10.2             | 2.09            |          | 355              | 4.61           | 77              | OSL | 石英 |                      | 低估   |
| GG <sup>[43]</sup>  | 0.5      | 2.2     | 14.3             | 2.2             |          | $50.3\pm 3.8$    | $4.9\pm 0.5$   | $10.2\pm 0.8$   | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 2.1      | 2.4     | 29.6             | 3.3             |          | $>400$           | $7.7\pm 0.8$   | $>50$           | OSL | 石英 |                      | 低估   |
| BC <sup>[43]</sup>  | 2        | 2.3     | 11.4             | 2               |          | $103.7\pm 3.5$   | $4.5\pm 0.5$   | $23.1\pm 1.9$   | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 3.5      | 2.3     | 10.9             | 1.9             |          | $119.5\pm 4.4$   | $4.4\pm 0.5$   | $27.6\pm 3.5$   | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 5        | 2.4     | 10.6             | 1.8             |          | $112.5\pm 4.8$   | $4.4\pm 0.5$   | $25.6\pm 3.9$   | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 6.5      | 2.5     | 11.4             | 1.9             |          | $213.5\pm 17.5$  | $4.6\pm 0.5$   | $46.3\pm 5.5$   | OSL | 石英 |                      | 可能低估 |
| XLZ <sup>[13]</sup> | 3.5      | 2.54    |                  |                 |          | $131.62\pm 3.15$ | 4.91           | $26.83\pm 0.64$ | OSL | 石英 | 4~11                 | 可靠   |
|                     | 7.5      | 3.09    |                  |                 |          | $145.00\pm 3.01$ | 4.17           | $34.80\pm 0.72$ | OSL | 石英 | 4~11                 | 可靠   |
| TJ <sup>[13]</sup>  | 1        | 2.66    |                  |                 |          | $102.62\pm 1.59$ | 4.93           | $20.73\pm 0.32$ | OSL | 石英 | 4~11                 | 可靠   |
|                     | 6.6      | 2.54    |                  |                 |          | $299.05\pm 9.75$ | 4.67           | $64.01\pm 2.09$ | OSL | 石英 | 4~11                 | 低估   |
| BHC <sup>[43]</sup> | 1        | 2.5     | 8.8              | 1.7             |          | $49.8\pm 5.8$    | $4.2\pm 0.4$   | $11.8\pm 1.4$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 2.7      | 2.4     | 9.3              | 1.7             |          | $50.9\pm 3.4$    | $4.2\pm 0.4$   | $12.1\pm 0.8$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 4.2      | 2.3     | 10.3             | 1.9             |          | $106.4\pm 3.7$   | $4.0\pm 0.4$   | $24.6\pm 0.9$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 6.2      | 2.3     | 9.5              | 1.7             |          | $80.2\pm 3.8$    | $4.1\pm 0.4$   | $19.4\pm 0.9$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
| YS <sup>[43]</sup>  | 0.5      | 2.2     | 14.1             | 1.8             |          | $41.5\pm 4.0$    | $4.7\pm 0.5$   | $8.9\pm 0.9$    | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 2.2      | 2.2     | 29.7             | 1.5             |          | $57.8\pm 4.0$    | $7.1\pm 0.7$   | $8.0\pm 0.6$    | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 3.6      | 2.2     | 10.6             | 1.9             |          | $76.9\pm 4.2$    | $4.2\pm 0.4$   | $18.1\pm 1.0$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
| XJY <sup>[44]</sup> | 0.8      | 2.4     | 11.5             | 2               |          | $66.2\pm 4.1$    | $4.6\pm 0.5$   | $14.4\pm 1.0$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 2.5      | 2.2     | 11.3             | 1.9             |          | $92.2\pm 4.4$    | $4.3\pm 0.4$   | $21.4\pm 1.1$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 3.9      | 2.1     | 10.1             | 1.9             |          | $211.8\pm 10.8$  | $4.1\pm 0.4$   | $51.8\pm 2.6$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可能低估 |
| ZL <sup>[40]</sup>  | 1        | 1.38    | 9.08             | 2.47            |          | $82.9\pm 1.0$    | $3.1\pm 0.4$   | $26.9\pm 3.6$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 2.2      | 1.03    | 5.99             | 2.55            |          | $130.9\pm 2.9$   | $2.7\pm 0.3$   | $47.5\pm 1.6$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 2.4      | 1.09    | 6.39             | 2.51            |          | $141.5\pm 5.3$   | $2.8\pm 0.6$   | $50.5\pm 1.9$   | OSL | 石英 | 90~300               | 可靠   |
|                     | 6.6      | 1.77    | 10.26            | 2.56            |          | $354.5\pm 29.3$  | $3.5\pm 0.4$   | $101.2\pm 8.8$  | OSL | 石英 | 90~300               | 低估   |
|                     | 8.2      | 1.14    | 7.27             | 2.77            |          | $308.9\pm 23.1$  | $3.0\pm 0.3$   | $106.5\pm 7.7$  | OSL | 石英 | 90~300               | 低估   |
|                     | 9.1      | 1.71    | 9.71             | 2.75            |          | $391.1\pm 7.3$   | $3.5\pm 0.4$   | $112.5\pm 8.3$  | OSL | 石英 | 90~300               | 低估   |
|                     | 10.6     | 1.53    | 9.26             | 2.62            |          | $366.7\pm 41.6$  | $3.3\pm 0.3$   | $111.9\pm 12.4$ | OSL | 石英 | 90~300               | 低估   |
|                     | 11.6     | 0.98    | 8.41             | 2.82            |          | $291.7\pm 40.6$  | $2.9\pm 0.2$   | $99.7\pm 13.6$  | OSL | 石英 | 90~300               | 低估   |
|                     | 12.9     | 0.84    | 6.23             | 2.82            |          | $>400$           | $2.7\pm 0.3$   | $>100$          | OSL | 石英 | 90~300               | 低估   |
|                     | 14       | 0.91    | 6.93             | 2.83            |          | $>400$           | $2.8\pm 0.3$   | $>100$          | OSL | 石英 | 90~300               | 低估   |
| LGZ <sup>[20]</sup> | 1.4      | 2.4     |                  |                 |          | $135.91\pm 13.9$ | 5.725          | $23.74\pm 2.44$ | OSL | 石英 | 4~11                 | 可靠   |
|                     | 5.7      | 2.62    |                  |                 |          | $386.24\pm 25.6$ | 5.256          | $73.49\pm 4.87$ | OSL | 石英 | 4~11                 | 低估   |
| QZ <sup>[11]</sup>  | 2.1      | 2.18    | $10.64\pm 0.23$  | $2.09\pm 0.21$  | 22       | $33.0\pm 1.0$    | $3.40\pm 0.11$ | $9.7\pm 0.4$    | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 7.1      | 1.76    | $10.17\pm 0.22$  | $1.92\pm 0.20$  | 22       | $219.4\pm 11.2$  | $2.93\pm 0.10$ | $74.8\pm 4.6$   | OSL | 石英 |                      | 可能低估 |
|                     | 10.5     | 2.04    | $11.55\pm 0.25$  | $2.06\pm 0.22$  | 22       | $608.0\pm 3.0$   | $3.29\pm 0.11$ | $185.1\pm 6.5$  | OSL | 石英 |                      | 低估   |
| BX <sup>[38]</sup>  | 0.5      | 2.4     | 12.5             | 2.4             | 11       | $4.4\pm 0.5$     | $4.4\pm 0.5$   | $1.0\pm 0.1$    | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 1.1      | 2.3     | 14.9             | 3               | 8        | $68.7\pm 5.0$    | $5.2\pm 0.6$   | $13.2\pm 1.0$   | OSL | 石英 |                      | 可靠   |
|                     | 2.1      | 2.4     | 11.2             | 2.1             | 15       | $62.7\pm 15.1$   | $4.4\pm 0.5$   | $14.1\pm 3.4$   | OSL | 石英 |                      | 可靠   |

续表 1

| 剖面                 | 深度/<br>m | K/<br>% | Th/<br>% | U/<br>% | 含水量<br>% | 等效剂量<br>(Gy) | 剂量率/<br>(Gy/ka) | 年代<br>ka | 方法  | 矿物 | 粒径<br>μm | 可靠性  |
|--------------------|----------|---------|----------|---------|----------|--------------|-----------------|----------|-----|----|----------|------|
|                    | 3.1      | 2.5     | 12.8     | 2.4     | 15       | 69.5±5.6     | 4.8±0.5         | 14.4±1.5 | OSL | 石英 |          | 可靠   |
|                    | 4.1      | 2.7     | 13.9     | 2.3     | 20       | 84.7±7.6     | 5.0±0.5         | 17.1±1.6 | OSL | 石英 |          | 可靠   |
|                    | 5.1      | 2.6     | 13.6     | 2.3     | 21       | 95.7±13.3    | 5.0±0.5         | 19.4±2.7 | OSL | 石英 |          | 可靠   |
|                    | 6.1      | 2.4     | 11.5     | 2.1     | 15       | 112.7±15.4   | 4.7±0.5         | 24.1±3.3 | OSL | 石英 |          | 可靠   |
|                    | 7.6      | 2.5     | 10.5     | 1.9     | 21       | 131.7±5.8    | 4.4±0.4         | 30.0±3.5 | OSL | 石英 |          | 可靠   |
|                    | 9.6      | 2.3     | 12.7     | 2.3     | 17       | 159.7±5.6    | 4.6±0.5         | 34.8±1.2 | OSL | 石英 |          | 基本可靠 |
|                    | 13.1     | 2.6     | 13.9     | 2.7     | 23       | 203.1±8.8    | 5.1±0.5         | 39.2±1.8 | OSL | 石英 |          | 可能低估 |
| QZ <sup>[9]</sup>  | L1 底     | 1.61    | 12.82    | 1.24    | 4.2      | 209.3        | 3.07            | 68±5     | TL  |    |          | 未知   |
|                    | L2 底     | 1.7     | 19.89    | 3.7     | 4.9      | 1 046.5      | 4.6             | 227±18   | TL  |    |          | 不可信  |
|                    | L3 底     | 2.21    | 23       | 0.55    | 3.8      | 1 524.9      | 4.82            | 313±25   | TL  |    |          | 不可信  |
|                    | L5 底     | 1.75    | 21.7     | 1.69    | 3.8      | 2 272.4      | 5.15            | 441±35   | TL  |    |          | 不可信  |
|                    | L6 下     | 1.81    | 16.63    | 1.17    | 3.4      | 2 810.2      | 4.8             | 585±46   | TL  |    |          | 不可信  |
|                    | L9 上     | 1.96    | 14.76    | 1.62    | 4.6      | 3 049.8      | 3.84            | 793±64   | TL  |    |          | 不可信  |
| 淄河店 <sup>[9]</sup> | L1 底     | 1.55    | 13.2     | 2.76    | 4.5      | 508.3        | 3.54            | 143±11   | TL  |    |          | 不可信  |
|                    | L2 底     | 1.64    | 13.5     | 1.61    | 4.6      | 897          | 3.7             | 242±19   | TL  |    |          | 不可信  |
| 龙桥 <sup>[9]</sup>  | L5 底     | 1.7     | 9.3      | 2.04    | 4.5      | 5554.8       | 3.28            | 474±38   | TL  |    |          | 不可信  |
| 山旺 <sup>[9]</sup>  | L2 底     | 2.28    | 13.28    | 2.6     | 3.2      | 890          | 4.18            | 213±15   | TL  |    |          | 不可信  |
|                    | L3 底     | 1.8     | 8.76     | 2.25    | 3.3      | 1 042.8      | 3.22            | 324±28   | TL  |    |          | 不可信  |
| 下朱潘 <sup>[9]</sup> | L3 上     | 1.98    | 16.8     | 1.38    | 5        | 926.9        | 3.76            | 250±19   | TL  |    |          | 不可信  |
| 铜井 <sup>[9]</sup>  | L8 顶     | 1.91    | 8.96     | 2.01    | 3.8      | 2 780.8      | 3.84            | 724±58   | TL  |    |          | 不可信  |
| 长岛 <sup>[9]</sup>  | L2 上     | 1.6     | 11.54    | 1.96    | 5.2      | 508.3        | 3.2             | 158±12   | TL  |    |          | 不可信  |

释光测年的发展程度以及对释光年代的认识程度。后期彭淑贞测得的青州剖面同层位 OSL 年代明显较低,证明了严重高估的 TL 数据的可信度较低。由于青州剖面所跨时间尺度较长,涉及到冰期间冰期旋回,黄土的沉积速率差异较大(图 2 已显示全新世的风成沉积存在较大程度缺失,并且古土壤的厚度明显小于黄土厚度),而且间冰期沉积速率较低并且受地表径流侵蚀较强,可能在部分地区造成地层缺失,沉积记录不完整。因此,基于沉积速率的估算是不可靠的。而古地磁测年结果为正极性,只能说起始年代不超过 780 ka。

BX、ZL、LGZ、LQ 剖面均未见底,其底部年代未知。已见底的剖面中,GG 剖面 2.1 m 处年代已饱和,BC、XLZ 剖面底部年代分别是(46.3±5.5) ka 和(34.8±0.72) ka,接近饱和。海岛区剖面未采集剖面底部 OSL 年代。总之,山东各地黄土起始年代多数未知,已知的年代也存在问题。

3.2 OSL 年代低估

Lai 等研究了石英 OSL 测年在洛川黄土中测年的上限,通过与标准地层对比发现当等效剂量超过 300 Gy、年龄超过 7~10 万年<sup>[46]</sup>上限时,释光信

号很可能饱和,所得年代低估。Chapot 等同样利用了洛川剖面的标准地层研究了石英 OSL 天然生长曲线和实验室再生曲线形状的差异,发现当等效剂量达到 150 Gy 时即饱和<sup>[47]</sup>。Buylaert 等研究了黄土高原西部、西宁和乐都的黄土,指出等效剂量超过 150 Gy 即饱和<sup>[48]</sup>。因此黄土的石英 OSL 测年尺度极为有限,150 Gy(40 ka 左右)应该是一个比较可靠的测年上限,超过此范围之后,年代的低估程度逐渐增大。GG 剖面 2.1 m,BC 剖面 6.5 m,BX 剖面 13.1 m,LGZ 剖面 5.7 m,TJ 剖面 6.6 m,XJY 剖面 3.9 m,LQ 剖面 4 m 以下,ZL 剖面 6.6 m 以下,QZ 剖面 7.1 m 以下 OSL 年代均超过 40 ka,等效剂量超过 150 Gy,这些年代很可能被低估,因此,仅从石英的测年尺度来说,山东黄土目前可信的 OSL 年代只占 63.46%。而长石释光信号的饱和值更高,长石 IRSL 测年最大的问题是信号的异常衰退,对 >70 ka 的洛川、东川两地样品进行对比试验,校正异常衰退后,石英年代明显低于长石年代,Buylaert 等认为对于 75~130 ka 的样品,长石年代更具有可信度<sup>[30]</sup>。长石的后红外(post-IR IRSL, pIRIR)可以通过低温红外的激发,消除不稳定的易衰变的信号的影响,从而得到稳定的高温红外信号,可将长石

测年的尺度大大延长至几十万年<sup>[49]</sup>。Li 等对洛川黄土进行钾长石多步升温(MET)pIRIR 测年,在高温(250 °C 和 300 °C)时获得的年代与已知的地层年代相符,其中最老地层 S<sub>3</sub> 的样品地层年代为(324±15) ka, 250°C 时获得的年代为(289.1±41.7) ka, 300°C 时获得的年代为(326.1±72.5) ka<sup>[50]</sup>。但长石 pIRIR 测年对样品的晒退都要求较高,并且受预热和激发温度影响较大,在理论和方法上仍有较大的发展空间。总之,长石的 pIRIR 测年为山东较老年代的研究提供了关键手段,但至今尚未得到应用。

总之,山东黄土年代学存在以下问题:(1)年代数据较少,且分布零散,不能形成很好的年代学框架;(2)黄土的起始堆积年代不准确,对于较老的年代由于测年方法不同,争议较大;(3)已有研究存在年代低估问题;(4)测年方法较单一,缺乏准确的年代数据。

## 4 未来研究方向

### 4.1 建立可靠的绝对年代框架

首先,针对较年轻剖面,利用 OSL 测年,扩大研究范围,并提高年代分辨率,从而建立可信度较高的年代框架,研究山东黄土的沉积过程。其中对于小于 40 ka 的黄土以石英测年为主,大于 40 ka 的以长石 Post-IR IRSL 为主。其次,对于年代超出 OSL 测年上限的较老样品可采用其他方法进行定年。如利用<sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be 埋藏测年法针对黄土底部或中部的砂砾层进行定年,此方法测年范围为 0.3~5 Ma。对于 30 万年以上特征层位,其结果应比 Post-IR IRSL 测年法具有更高的可信度。

### 4.2 山东黄土在不同时间尺度上的古环境意义

#### 4.2.1 不连续记录

由于黄土沉积的不连续性,黄土序列中粒度或磁化率快速变化点的年代并不一定代表冰期或间冰期终止的年代。山东黄土的沉积环境并不稳定,与黄土相比,古土壤通常缺失或极少。较明显的是全新世黄土缺失严重或者不连续(如图 2),可能是由于间冰期海平面上升造成的物源面积减少或后期侵蚀。假如全新世的沉积速率极低,则我们野外所能辨识的全新世古土壤有可能是在冰期的黄土母质上通过成壤作用形成的。在这种情况下其年代和粒度、磁化率等替代指标都是经过改造的,重建的古气

候信息不可靠。同理,现今认为的间冰期古土壤的物质积累同样可能发生于更早的冰期,而成壤作用发生于间冰期。因此,在研究过程中还需要注意古土壤的沉积与发育过程,这同样需要建立在高分辨率且准确的年代框架的基础上。

#### 4.2.2 连续记录

黄土高原的黄土-古土壤序列通常被视为连续的沉积记录,可用于研究不同时间尺度的气候变化。从现有研究来看山东黄土的时间尺度和连续性显然均不如黄土高原,但作为山东地区连接海陆的重要古环境记录,其在古环境重建方面的作用是不可忽视的。因此需要通过高分辨率的年代框架寻找连续性较高的黄土剖面是重要的研究内容,为通过各种古气候替代指标进行古环境重建奠定基础。目前来看,山东黄土保存末次间冰期以来较连续记录的可能性较大,部分地区有至少倒数第二次冰期的黄土沉积,因此在不同区域寻找典型剖面进行全新世至倒数第二次冰期不同气候阶段的古气候重建是可行的。这无疑对山东地区古环境变化对轨道尺度太阳辐射变化、季风变化、海陆间环境变化的响应,以及黄土物源的研究具有重要意义。

#### 4.2.3 黄土的侵蚀与环境

黄土的堆积和侵蚀往往与气候变化以及地形地貌密切相关。冰期气候干冷,物源丰富,黄土堆积较快;间冰期气候暖湿,物源减少,古土壤发育较慢,降水增多反而可能造成侵蚀大于堆积,这可能是沿海及岛屿区黄土沉积较少且较年轻的原因。此外,山前区及低洼沟谷地带有利于粉尘堆积,使山东内陆地区黄土-古土壤保存较完整。海岛地区缺乏末次冰期以前的黄土,可能是由于海岛的特殊地形导致流水侵蚀严重,使冰期沉积的黄土在间冰期被侵蚀,因此每个完整的间冰期之后黄土都所剩无几。而目前海岛仍有末次冰期黄土,可能是因为尚未经历足够长的间冰期侵蚀。此外,侵蚀是否有助于解释黄土的起始年代有待于进一步研究。山东黄土始于 B/M 之后是沉积环境的改善还是侵蚀的减弱,不同地区、不同类型黄土的沉积间断有无差异,沉积间断与物源的联系等问题都有待研究。同时,黄土侵蚀机制的研究及其与气候变化的关系对水土保持工作具有重要的现实意义。

## 5 结论

经过几十年的积累,我们对山东黄土已经有了较多的认识,可以总结出一些问题:(1)早期认为山

东黄土起始于几十万年的 TL 年代框架是不可信的,但古地磁测年把山东黄土的年代限定于 0.78 Ma 以来,这是对黄土年代框架的重要限定;(2)山东黄土在冰期和间冰期的物源供给差距极大,沉积速率极不稳定,通过沉积速率计算整个剖面的年代是不可行的;(3)OSL 测年为山东黄土提供了大量可靠的年代,但是有很多年代超过了 40 ka,极有可能受饱和的影响而被不同程度的低估。这些存在较多不确定性的年代造成的结果是:(1)山东黄土的起始年代仍不确定;(2)无法根据沉积记录进行可靠的古气候重建,使山东地区至今仍缺少可靠的长尺度陆地古气候记录;(3)无法对沉积记录不连续的现象做出正确的解释,阻碍对粉尘传输背景、沉积与侵蚀过程的深入认识。

解决这些问题的关键在于年代学,在可靠的年代框架的基础上开展更高层次的研究工作。目前,OSL 测年仍是最为有效的研究手段。石英的 OSL 测年可以较好地重建 40 ka 以内黄土的年代框架,而长石 post-IR IRSL 对于 40~300 ka 的年代框架的建立将起到重要作用。而个别满足条件的剖面则可以利用 $^{10}\text{Be}$ / $^{26}\text{Al}$ 埋藏测年来进一步拓展测年范围。

### 参考文献(References)

- [1] 刘东生. 黄土与环境[J]. 西安交通大学学报:社会科学版, 2002,22(4):7-12. [LIU Dongsheng. Loess and environment [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University(Social Sciences), 2002,22(4):7-12.]
- [2] 陈一萌,曾宪光. 中国西北与华北地区末次冰期黄土气候记录的对比研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6):1075-1080. [CHEN Yimeng, ZENG Xianguang. Comparative study of climate changes recorded in loess strata both in northwest China and northern China during the last glacial period[J]. Journal of Desert Research, 2009,29(6):1075-1080.]
- [3] 牛光明,强明瑞,宋磊,等. 5 000 a 来柴达木盆地东南缘风成沉积记录的冬季风演化[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5):29-37. [NIU Guangming, QIANG Mingrui, SONG Lei, et al. Change of eastern Asian winter monsoon recorded by aeolian deposits over the past 5 000 years at the southeastern margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Desert Research, 2010,30(5):29-37.]
- [4] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22Myr ago inferred from loess deposits in China[J]. Nature, 2002,416(6877):159-163.
- [5] 赵松龄. 晚更新世末期中国陆架沙漠化及其衍生沉积的研究[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(3):285-293. [ZHAO Songling. China shelf sea desertization and its derived deposits during the last stage of late Pleistocene[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1991,22(3):285-293.]
- [6] 刘东生. 第四纪环境[M]. 北京:科学出版社, 1997. [LIU Dongsheng. Quaternary Environments[M]. Beijing: Science Press, 1997.]
- [7] 曹家欣,李培英,石宁. 山东庙岛群岛的黄土[J]. 中国科学 B 辑, 1987, 17(10):1116-1123. [CAO Jiaxin, LI Peiying, SHI Ning. Loess of Miaodao island in Shandong[J]. Science in China(B), 1987,17(10):1116-1123.]
- [8] 张祖陆. 渤海莱州湾南岸平原黄土地貌及其古地理意义[J]. 地理学报, 1995, 50(5):465-470. [ZHANG Zulu. Loess mounds on the Laizhou Bay plain south of Bohai Sea and their paleogeographic implication [J]. Acta Geographica Sinica, 1995,50(5):465-470.]
- [9] 郑洪汉,朱照宇,黄宝林,等. 山东半岛及苏皖北部黄土地层年代学研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(1):64-68. [ZHENG Honghan, ZHU Zhaoyu, HUANG Baolin, et al. A study on loess geochronology of Shandong peninsula and northern part of Jiangsu and Anhui provinces[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1994,14(1):64-68.]
- [10] 刘乐军,李培英,王永吉. 鲁中黄土粒度特征及其成因探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(1):81-86. [LIU Lejun, LI Peiying, WANG Yongji. The grain-size properties and genesis of the loess in central Shandong province[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2000,20(1):81-86.]
- [11] 彭淑贞,朱丽君,肖国桥,等. 山东青州黄土的地层年代及其物质来源研究[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6):947-953. [PENG Shuzhen, ZHU Lijun, XIAO Guoqiao. Magnetostratigraphy and provenance of the Qingzhou loess in Shandong Province [J]. Arid Land Geography, 2010,33(6):947-953.]
- [12] 于洪军. 中国东部陆架黄土成因的新探索[J]. 第四纪研究, 1999,19(4):367-372. [YU Hongjun. A new exploration on the origin of loess in the shelf area of the eastern China seas [J]. Quaternary Sciences, 1999,19(4):367-372.]
- [13] 徐树建. 晚第四纪我国风尘堆积的区域对比研究[M]. 济南:山东人民出版社, 2012. [XU Shujian. Regional Comparative Studies of the Late Quaternary Eolian Deposits in China[M]. Jinan: Shandong People's Publishing House, 2012.]
- [14] 李徐生,杨达源,鹿化煜. 镇江下蜀黄土粒度特征及其成因初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1):25-32. [LI Xusheng, YANG Dayuan, LU Huayu. Grain-size features and genesis of the Xiashu loess in Zhenjiang[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2001,21(1):25-32.]
- [15] 张祖陆,辛良杰,聂晓红. 山东地区黄土研究综述[J]. 地理科学, 2004, 24(6):746-752. [ZHANG Zulu, XIN Liangjie, NIE Xiaohong. A summary of loessial researches in Shandong[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004,24(6):746-752.]
- [16] 彭淑贞,高志东,吴秀平,等. 山东青州地区黄土的粒度组成及成因分析[J]. 地质力学学报, 2007, 13(4):315-321. [PENG Shuzhen, GAO Zhidong, WU Xiuping, et al. Grain-size distribution and genesis of loess in the Qingzhou area, Shandong [J]. Journal of Geomechanics, 2007,13(4):315-321.]
- [17] 张祖陆,辛良杰,姜鲁光,等. 山东济南张夏黄土堆积及成因分析[J]. 古地理学报, 2005, 7(1):98-106. [ZHANG Zulu, XIN Liangjie, JIANG Luguang, et al. Sedimentary characteristics

- and genetic analysis of Zhangxia Loess in Jinan, Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 98-106.]
- [18] 徐树建. 山东庙岛群岛黄土的粒度特征及其环境意义[J]. *海洋科学*, 2008, 32(12): 60-63. [XU Shujian. Grain size characteristics and its indications of loess in Miaodao Islands, Shandong Province[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(12): 60-63.]
- [19] 安芷生. 洛川黄土地层学[J]. *第四纪研究*, 1989, 9(2): 155-168. [AN Zhisheng. Loess stratigraphy in Luochuan of China[J]. *Quaternary Sciences*, 1989, 9(2): 155-168.]
- [20] 徐树建, 王涛. 蓬莱黄土剖面光释光年代学及其沉积特征研究[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 295-301. [XU Shujian, WANG Tao. Optically stimulated luminescence dating and sedimentary characteristics of loess section at Penglai in Shandong province[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(2): 295-301.]
- [21] 孙洪艳, 李志祥, 田明中. 第四纪测年研究新进展[J]. *地质力学学报*, 2003, 9(4): 371-378. [SUN Hongyan, LI Zhixiang, TIAN Mingzhong. New progress in Quaternary dating research[J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 9(4): 371-378.]
- [22] Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China[J]. *Nature*, 1982, 300(5891): 431-433.
- [23] 刘东生, 安芷生. 洛川北韩寨黄土磁性地层学的初步研究[J]. *地球化学*, 1984, 13(2): 134-137. [LIU Dongsheng, AN Zhisheng. A preliminary magnetostratigraphic study of the Beihanzhai loess section[J]. *Geochimica*, 1984, 13(2): 134-137.]
- [24] Rutter N W, Ding Z L, Evans M E, et al. Magnetostratigraphy of the Baoji Loess-paleosol Section in the North-Central China Loess Plateau[J]. *Quaternary International*, 1991, 7(8): 97-102.
- [25] Yu L P, Lai Z P. OSL chronology and palaeoclimatic implications of aeolian sediments in the eastern Qaidam Basin of the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2012, 337-338(4): 120-129.
- [26] Madsen A T, Murray A S. Optically stimulated luminescence dating of young sediments: A review[J]. *Geomorphology*, 2009, 109(1-2): 3-16.
- [27] Yu L P, Lai Z P. Holocene climate change inferred from stratigraphy and OSL chronology of aeolian sediments in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 2014, 81(3): 488-499.
- [28] Yu L P, Lai Z P, An P, et al. Aeolian sediments evolution controlled by fluvial processes, climate change and human activities since LGM in the Qaidam Basin, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Quaternary International*, 2015, 372(6): 23-32.
- [29] Liu X J, Lai Z P, Madsen D, et al. Lake level variations of Qinghai Lake in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau since 3.7 ka based on OSL dating[J]. *Quaternary International*, 2011, 236(1-2): 57-64.
- [30] Buylaert J P, Vandenberghe D, Murray A S, et al. Luminescence dating of old (>70 ka) Chinese loess: A comparison of single-aliquot OSL and IRSL techniques[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1-4): 9-14.
- [31] Buylaert J P, Murray A S, Huot S. Optical dating of an Eemian site in Northern Russia using K-feldspar[J]. *Radiation Measurements*, 2008, 43(2-6): 715-720.
- [32] Rink W J, Bartoll J, Schwarcz H, et al. Testing the reliability of ESR dating of optically exposed buried quartz sediments[J]. *Radiation Measurements*, 2007, 42(10): 1618-1626.
- [33] 刘春茹, 尹功明, 韩非, 等. 石英 ESR 测年法在第四纪陆相沉积物测年中的应用[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(5): 1236-1245. [LIU Chunru, YIN Gongming, HAN Fei, et al. ESR dating methodology and its application in dating Quaternary terrestrial sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(5): 1236-1245.]
- [34] Grün R. The DATA program for the calculation of ESR age estimates on tooth enamel[J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(3): 31-232.
- [35] Granger D E, Kirchner J W, Finkel R C. Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$  in cave-deposited alluvium[J]. *Geology*, 1997, 25(2): 107-110.
- [36] 孙政, 沈冠军, 赖忠平.  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  等时线埋藏测年法基本原理与应用简介[J]. *盐湖研究*, 2012, 20(2): 66-72. [SUN Zheng, SHEN Guanjun, LAI Zhongping. Introduction to basic principles and applications of isochron  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  burial dating method[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2012, 20(2): 66-72.]
- [37] 沈冠军, 邵庆丰, Darryl E GRANGER.  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年法及其在我国早期人类遗址年代研究中的应用[J]. *人类学学报*, 2009, 28(3): 292-299. [SHEN Guanjun, SHAO Qingfeng, Darryl E GRANGER.  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  burial dating and its potential in dating early hominid sites in China[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2009, 28(3): 292-299.]
- [38] 徐树建, 丁新潮, 倪志超. 山东埠西黄土剖面沉积特征及古气候环境意义[J]. *地理学报*, 2014, 69(11): 1707-1717. [XU Shujian, DING Xinchao, NI Zhichao. The sedimentary characteristics of Buxi loess profile in Shandong Province and their paleoclimatic and palaeoenvironment significance[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1707-1717.]
- [39] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol[J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32(1): 57-73.
- [40] 李强. 山东潍坊朱里黄土剖面光释光年代及环境意义[D]. 山东: 山东师范大学, 2014. [LI Qiang. Loess chronology and environmental significance of Weifang Zhuli profile in Shandong province[D]. Shandong: Shandong Normal University, 2014.]
- [41] 徐树建, 李强, 付信花, 等. 胶莱盆地北部风尘堆积物光释光年代序列研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(5): 48-52. [XU Shujian, LI Qiang, FU Xinhua, et al. Study on the OSL chronosequence of eolian deposits in the northern of Jiaolai Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(5): 48-52.]
- [42] 丁新潮, 曹文, 徐树建, 等. 山东平阴黄土剖面稀土元素特征及对物源的指示意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(9): 188-

192. [DING Xinchao, CAO Wen, XU Shujian, et al. Characteristics of rare earth elements in Pingyin loess profile, Shandong Province and its implications for provenance[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(9): 188-192. ]
- [43] 倪志超. 山东庙岛群岛黄土光释光年代及物源探讨[D]. 山东: 山东师范大学, 2015. [NI Zhichao. Optically Stimulated Luminescence Dating and the provenance analysis of Loess in Miaodao Islands, Shandong Province[D]. Shandong: Shandong Normal University, 2015. ]
- [44] Xu S J, Ding X C, Yu L P, et al. Palaeoclimatic implications of aeolian sediments on the Miaodao Islands, Bohai Sea, East China, based on OSL dating and proxies [J]. *Aeolian Research*, 2015, 19(12): 259-266.
- [45] 卢演传, 赵华. 陕西渭南介子村黄土的热释光测年[J]. *地质论评*, 1991, 37(4): 356-362. [LU Yanchou, ZHAO Hua. Thermoluminescence dating of the late Quaternary loess-paleosol sequence at the Jiezicun section, Weinan county, Shanxi province[J]. *Geological Review*, 1991, 37(4): 356-362. ]
- [46] Lai Z P, Fan A C. Examining quartz OSL age underestimation for loess samples from Luochuan in the Chinese Loess Plateau [J]. *Geochronometria*, 2014, 41(1): 57-64.
- [47] Chapot M S, Roberts H M, Duller G A T, et al. A comparison of natural- and laboratory-generated dose response curves for quartz optically stimulated luminescence signals from Chinese Loess[J]. *Radiation Measurements*, 2012, 47(11-12): 1045-1052.
- [48] Buylaert J P, Murray A S, Vandenberghe D, et al. Optical dating of Chinese loess using sand-sized quartz; Establishing a time frame for Late Pleistocene climate changes in the western part of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3(1-2): 99-113.
- [49] Li B, Jacobs Z, Roberts R, et al. Review and assessment of the potential of post-IR IRSL dating methods to circumvent the problem of anomalous fading in feldspar luminescence [J]. *Geochronometria*, 2014, 41(3): 178-201.
- [50] Li B, Li S H. Luminescence dating of Chinese loess beyond 130ka using the non-fading signal from K-feldspar [J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10(7): 24-31.

## PROGRESS OF CHRONOLOGY RESEARCH FOR LOESS IN SHANDONG: PROBLEMS AND SOLUTIONS

ZHAO Qi<sup>1,2</sup>, AN Ping<sup>1</sup>, YU Lupeng<sup>1</sup>, XU Shujian<sup>1</sup>

( 1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

2. College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276005, China)

**Abstract:** Owing to the large amount of dust input from the exposed Bohai shelf during the glacier periods, the loess in Shandong region has quite different material sources from those on the Chinese Loess Plateau and other inland regions. The Shandong loess is a very important archive for climate and sea level changes in the coastal areas in orbital time-scales. However, it has not raised enough attention so far comparing to the loess at the Loess Plateau. Even though there have been increased input in recent years, they are still less than enough. As we are aware, chronology is the basis for paleoenvironmental reconstruction and geomorphologic studies and the major concern of geologists, it must be prioritized in the future research. After summarizing the published ages of Shandong loess, their reliability is analyzed and some problems about chronology of the Shandong loess proposed in this paper. We suggest that the chronology studies on Shandong loess should focus more on establishment of reliable chronological frameworks with optically stimulated luminescence dating (or combined with  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  dating) as the major method. A few important associated scientific questions and suggestions concerning Shandong loess are also proposed in this paper.

**Key words:** optically stimulated luminescence dating; sea level change; climate change; material sources; erosion; Shandong loess