

文章编号 1001-8166(2002)01-0118-08

# 最近 2.5 Ma 黄土高原环境变化研究进展 ——来自洛川黄土地层的证据

李玉梅

(中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境研究室 北京 100029)

**摘要** 洛川黄土—古土壤序列记录了最近 2.5Ma 黄土高原自然环境的演化和变迁。国内外研究人员运用地层学、古生物学、土壤学、磁学、沉积学、岩石学、矿物学、地球化学等多学科的研究方法, 统一地层划分, 明确成因机制, 建立时间标尺, 分析气候指标, 提取环境信息, 逐步揭示了自早更新世以来该区气候由暖湿而冷干、频繁剧烈波动的历史以及古生物的演替过程, 为全球变化研究提供了重要资料。

**关键词** 洛川黄土; 古环境; 古气候; 全球变化

**中图分类号** P531 **文献标识码** A

中国黄土以其分布广泛、沉积连续、环境信息丰富而与深海沉积物、极地冰芯并称全球变化研究的三大支柱<sup>[1]</sup>。作为中国黄土的标准剖面之一, 洛川黄土—古土壤序列真实地记录了最近 2.5 Ma 的环境变迁<sup>[2]</sup>, 是研究亚洲季风—沙漠系统的形成和演化以及青藏高原的隆升等问题的天然信息库。国内外几代学者的孜孜以求, 取得了很多举世公认的成果, 但也产生了若干尚存争议的问题。因此, 继续对该区进行深入、系统的研究势在必行。

## 1 洛川黄土地层

半个世纪以来, 研究人员先后在洛川测定了黑木沟、秦家寨、北韩寨、下黑木等多个剖面。其中, 研究最多的黑木沟剖面(或称洛川剖面)位于洛川城南 4 km 处, 沟底为三叠系砂页岩, 上覆 10~15 m 厚的晚上新世红粘土。红粘土之上的黄土层厚约 130 m, 自下而上依次为<sup>[2]</sup>午城黄土、离石黄土下部(包括古土壤 S<sub>5</sub>~S<sub>14</sub>和黄土 L<sub>6</sub>~L<sub>15</sub>); 离石黄土上部(包括古土壤 S<sub>1</sub>~S<sub>4</sub>和黄土 L<sub>2</sub>~L<sub>5</sub>); 马兰黄土(L<sub>1</sub>)和全新世沉积(S<sub>0</sub>)。

## 2 洛川黄土年代学

### 2.1 磁性地层学

80 年代以前, 囿于测年手段的局限, 中国黄土的年龄一直困扰着国内外的地质学家们。最终突破这一瓶颈的, 是 Heller 和刘东生的古地磁研究。他们测试了 231 个洛川黄土样品之后, 首次正确地建立了中国黄土磁性地层柱, 并将其底界限定为约 2.4 Ma, 同时给出了 B/M 界线、贾拉米洛事件和奥杜维事件的深度<sup>[3]</sup>。此后, 在对黑木沟、北韩寨等剖面的进一步研究<sup>[4~7]</sup>中, 不仅明确了记录上述事件的层位, 还测得 M/G 界线恰好出现在黄土与红粘土的分界处<sup>[6,7]</sup>。

磁性地层学的成果提供了部分黄土地层(尤其是早期某些层位)的确切年龄, 是计算各层黄土年龄的重要标尺和首选参照系, 为后期的科研工作奠定了坚实基础。

### 2.2 时间标尺

显然, 古地磁极性柱能够明确标示年龄的黄土层位是非常有限的。为了建立精细、可靠、易用的时

收稿日期 2001-02-19, 修回日期 2001-06-04.

\* 基金项目 国家自然科学基金重大项目“中国古季风区古环境演变机制及其与全球变化的动力学联系”(编号 49894170)资助.

作者简介 李玉梅(1974-), 女, 黑龙江人, 博士研究生, 主要从事新生代地质与环境学研究. E-mail: liy. @263.net

间标尺,国内外学者提出了多种定年模型,包括较早得到认可的堆积量模式年龄<sup>[2]</sup>、磁化率时间标尺<sup>[8]</sup>以及后来出现的 2~16 μm 颗粒定年模型<sup>[9]</sup>、轨道调谐时间标尺<sup>[10-11]</sup>等。这些模型都是在磁性地层学的基础上,选取已知年龄的层位为控制点,通过数学计算求得各个层位黄土和古土壤的实际年龄,不同模型给出的地层年龄可以相互检验。

### 2.3 末次冰期以来的黄土年龄

末次冰期以来形成的黄土和古土壤,时代较新,可用释光、<sup>14</sup>C 等方法精确定年。洛川剖面马兰黄土上(2 m)、下(8 m)的热释光年龄分别为(13 ±2) ka 和(89 ±9) ka<sup>[2]</sup>;也有人认为其堆积于(70 ±10) ka BP 开始,早于 20 ka BP 结束<sup>[12]</sup>。黑木沟 S<sub>0</sub> 底部(0.6~0.8 m)的土壤有机质<sup>14</sup>C 年龄则为(7 650 ±275) ka BP<sup>[2]</sup>。

## 3 洛川黄土指示的古环境状况

### 3.1 古生物学

#### 3.1.1 哺乳动物

采自洛川地区的哺乳动物化石标本主要为食虫类、兔形类和啮齿类,大型哺乳动物很少<sup>[2,33]</sup>。在奥杜维正向极性亚时之前,洛川黄土中动物种类与生态类型相对较多,包括 *Eucienoceros*、*Ursus sp.*、*Lynxshansius* 等,气候较为温和湿润;奥杜维正向极性亚时之后直到 B/M 界线,化石记录仅限于啮齿类和兔形类,气候较此前干凉。B/M 界线之上,采到的化石几乎均为啮齿类,且以鼯鼠居多,马兰黄土中还出现了 *Meriomys*,表明当时气候干冷,植被类型为草原、荒漠草原为主<sup>[14]</sup>。

#### 3.1.2 蜗牛

用筛析法系统研究洛川黄土剖面的蜗牛化石后发现<sup>[15]</sup>,最近 110 ka 中,该区气候经历了温暖湿润、干冷间暖湿、凉湿、凉湿—暖湿、冷干、干冷间暖湿、暖湿为主等数个阶段。蜗牛化石所反映的气候曲线表明,印度季风强盛期黄土高原季节性或短期的湿润程度得到了加强,且黄土高原 110 ka 以来的总体干旱趋势与非洲大陆大致是同步的。末次冰期晚期的大幅度的气候快速变化<sup>[16]</sup>,可与太平洋 Taner 钻孔左旋有孔虫 *N. pachyderma* 含量变化曲线和 GRIP 2 冰芯氧同位素变化曲线很好地对比。

#### 3.1.3 植物

(1) 孢粉。洛川黑木沟黄土剖面自下而上可分为 6 个孢粉带<sup>[2]</sup>。其中,、、带孢粉稀少,植物不茂盛,可能指示了干冷气候条件下的草原

型植被;、、带孢粉较多,植物发育,可能指示了温湿气候条件下的森林型植被。

(2) 植物硅酸体。分析了晚更新世以来洛川黑木沟黄土层中的植物硅酸体后发现,自 S<sub>1</sub> 顶部至深度为 1.8 m 的黄土堆积期间,该区经历了干旱草原—荒漠草原—干荒漠—荒漠草原—草原化荒漠植被类型的演替过程;此后,又由草原化荒漠依次演变为干草原、疏林草甸(或森林草原)、干草原(或荒漠草原)、干草原(或草甸草原)<sup>[17]</sup>。全新世中期有一次明显的变暖期,C<sub>4</sub>/C<sub>3</sub> 值达到 1.98<sup>[18]</sup>,这与我国的全新世大暖期记录<sup>[19]</sup>恰好相符。

### 3.2 土壤学

洛川剖面在不同的地质历史时期中发育了黑垆土、碳酸盐褐土、褐土、淋溶褐土和棕褐土等 5 种不同类型的古土壤以及弱、中、强等各种风化程度的黄土层<sup>[20]</sup>。其中 S<sub>5</sub> 发育程度最高,相当于棕褐土,形成于最为温暖湿润的时期<sup>[21]</sup>。

### 3.3 磁化率

黄土序列的磁化率曲线与深海氧同位素曲线的对比表明,磁化率的波动包含了全球环境变化的信息<sup>[8,22,23]</sup>,常被视作东亚夏季风强度的替代性指标<sup>[24,25]</sup>。利用磁化率初步估算出洛川地区全新世和末次间冰期的年均降水量分别为 600 mm 和 540 mm,而马兰黄土堆积期仅为 310 mm<sup>[26]</sup>。

### 3.4 颗粒度

黄土—古土壤序列中,黄土的粒度组成明显粗于古土壤,说明黄土堆积时的气候条件要比古土壤形成时干旱、寒冷<sup>[2]</sup>。其中,>20 μm (或 30 μm) 的粗颗粒代表了中强程度的大气粉尘输入,不含与成壤作用有关的粘土组分,被认为是优于中值粒径的冬季风强度的替代性指标<sup>[27,24]</sup>。

在最近 1.4 Ma 的某些时段,洛川黄土序列千年尺度的粗颗粒(>105 μm) 含量变化剧烈且频繁<sup>[28]</sup>。末次冰期—间冰期旋回中的此类变化可能是 Heinrich 事件在黄土中的表现<sup>[29]</sup>。

### 3.5 矿物学

#### 3.5.1 重矿物组合

洛川黑木沟剖面各层位黄土和古土壤的重矿物种类大同小异,不透明矿物、绿帘石和普通角闪石约占 80%。随着地层变新,不稳定矿物含量增加,稳定矿物含量减少<sup>[2]</sup>。

#### 3.5.2 粘土矿物

黑木沟剖面的主要粘土矿物为伊利石,其次为绿泥石、高岭石和蒙脱石。相对而言,黄土中的伊利

石和蒙脱石较少,而古土壤中绿泥石和高岭石较少<sup>[30,31]</sup>。其中伊利石的变化是古土壤发育时冬季风减弱、携带的伊利石增多所致<sup>[32]</sup>。

黑木沟剖面伊利石的结晶度指标和多型特征表明,古气候越温暖和湿润,古土壤中伊利石的退变程度就越高<sup>[33]</sup>。布容期伊利石结晶度变化显著,是晚更新世以来气候变化频繁、变幅增大、干燥度增加的标志<sup>[2]</sup>。

### 3.6 地球化学

#### 3.6.1 元素地球化学

(1) 元素的丰度和分布。洛川黄土剖面自下而上, Ca、Sr、Fe<sup>2+</sup> 含量逐渐增大, 而 Al、K、Ti、Mn、Fe<sup>3+</sup> 等的含量趋于减少, 这与黄土堆积期间气候日益干燥有关<sup>[34]</sup>。

(2) Rb、Sr。黄土序列的 Rb/Sr 值可很好地地区别黄土和古土壤单元<sup>[35,36]</sup>。Rb/Sr 值的变化取决于 Sr 的丢失程度<sup>[37,38]</sup>, 指示了雨水淋溶程度即古降雨量的大小, 可作为衡量东亚夏季风强度的替代性指标<sup>[39]</sup>。洛川剖面的 Rb/Sr 曲线还在黄土和古土壤层内部揭示了次一级的气候波动信息, 记录了约 0.8 Ma BP 是东亚季风区气候转型的重要时期, 反映了早更新世黄土高原温暖湿润, 此后逐渐变干的气候发展趋势<sup>[40]</sup>。

(3) Mg/Al。黄土堆积期, 气候干冷, pH 值较高, Mg/Al 也偏高; 古土壤发育期, 气候温湿, pH 值较低, Mg/Al 亦偏低<sup>[41]</sup>。0.4 Ma 以来的洛川黄土 Mg/Al 曲线表明该区经历了 4 次大的气候旋回<sup>[41]</sup>。

(4) Mn<sup>2+</sup>。洛川黑木沟剖面 S<sub>0</sub>~L<sub>2</sub> 段, Mn<sup>2+</sup> 的 EPR 信号由黄土亚层到黄土成壤亚层再到古土壤层逐渐降低直至消失, 峰强变化曲线与黄土高原夏季风盛衰史非常吻合, 曲线中 Mn<sup>2+</sup> 低含量段指示了最近 130 ka 中 3 个夏季风环流强盛及降水量较大的时期, 包括末次间冰期、末次冰期中的间冰阶和冰后期。Mn<sup>2+</sup> 的电子顺磁共振谱可能是一种较为敏感的夏季风指标<sup>[42]</sup>。

(6) REE。洛川黄土样品的 REE 配分模式均为 LREE 富集型, 与新疆黄土和腾格里沙漠砂样类似<sup>[2]</sup>, 古土壤的 REE 配分模式亦与此一致, 只是 REE 有所增加<sup>[2]</sup>。在古土壤底部的钙结核中, 上述配分特征得到了继承, REE 则进一步增大, 表明成壤阶段 REE 有过微弱的移动<sup>[43]</sup>。

#### 3.6.2 有机地球化学

(1) 有机碳含量。自马兰黄土至午城黄土, 洛川剖面的有机碳含量变化范围在 0.01%~0.10%

之间<sup>[2]</sup>。自 L<sub>1</sub> 至 L<sub>2</sub> 的 3 个黄土层和 2 个古土壤层的 5 个样品中, 有机碳含量随成壤作用强度的增加而增大<sup>[44]</sup>。

(2) 类脂化合物。对采自洛川剖面 L<sub>6</sub> 和 S<sub>11</sub> 的两个样品进行抽提后发现<sup>[45]</sup>, 正构烷烃和酮在黄土中的主峰碳数为 31, 而古土壤中的主峰碳数为 16。Jia 等<sup>[45]</sup> 认为此系有机质来源不同所致。

(3) 氨基酸。洛川黄土剖面上氨基酸总量随埋藏深度的增加而减少, 且酸性氨基酸减少的速度大于碱性氨基酸, 古土壤中的氨基酸含量高于相邻层位的黄土<sup>[2]</sup>。这些特征说明, 最近 2.5 Ma 中, 洛川黄土沉积环境的碱性逐渐增强, 气候有变干的趋势, 且此间有多次干冷—暖湿的气候波动<sup>[2]</sup>。马兰黄土中蜗牛壳氨基酸检测还显示, 大约 20~40 ka BP 的古温度要比此前的 3 万年低 (5 ± 3) °C, 比全新世低 11 °C<sup>[46]</sup>。

#### 3.6.3 稳定同位素地球化学

(1) 硼同位素。赵志琦等<sup>[47]</sup> 利用混合树脂法和硼特效树脂法叠加处理样品, 首次测定了洛川也是中国黄土的硼同位素组成, 可能对该区古气候的重建不无裨益。

(2) 碳同位素。黄土中碳酸盐的溶解和沉淀过程与土壤体系相似, 次生碳酸盐的 <sup>13</sup>C 值基本上只取决于土壤 CO<sub>2</sub> 的碳同位素组成; 土壤 CO<sub>2</sub> 的 <sup>13</sup>C 值与其分压的倒数为正相关关系<sup>[48]</sup>。气候温湿, 生物活动强, CO<sub>2</sub> 分压增大, 其 <sup>13</sup>C 值便减小; 反之, 气候冷干, 则土壤 CO<sub>2</sub> 的 <sup>13</sup>C 值增大<sup>[48]</sup>。因此, 黄土和古土壤次生碳酸盐的 <sup>13</sup>C 值可以反映古气候的干湿冷暖。

多年的研究<sup>[44,48-57]</sup> 表明, 黄土中的碳酸盐的碳同位素组成重于古土壤中的碳酸盐。利用这种方法可识别出马兰黄土中的弱发育古土壤<sup>[44,49]</sup>。

不同类型的古土壤, 其底部钙结核的碳同位素组成亦大不相同: 古土壤形成时环境温度越高、湿度越大, <sup>13</sup>C 值越偏负<sup>[54]</sup>。

根据现代土壤碳酸盐的 <sup>13</sup>C 值与干燥度的关系, 我国学者<sup>[54]</sup> 估算出各层古土壤形成时该区年均降水量多为 600~800 mm, 略高于现代。

(3) 氧同位素。黄土次生碳酸盐 <sup>18</sup>O 值记录的是古大气降水的同位素信息<sup>[52]</sup>, 而后者是地表年均温的函数<sup>[58]</sup>。根据韩家懋等的关系式, 离石黄土各层古土壤形成时的地表温度均较现代高, 其中 S<sub>5</sub> 形成时的年均温为 14.6 °C<sup>[59]</sup>。

### 3.6.4 宇宙成因核素<sup>10</sup>Be

<sup>10</sup>Be 是宇宙射线高能粒子与大气中的氧、氮原子核进行散裂反应的产物<sup>[60]</sup>。洛川黄土的<sup>10</sup>Be 与深海沉积物<sup>18</sup>O 之间存在极好的相关性<sup>[60]</sup>,据此建立的布容期<sup>10</sup>Be 时标与其他模型较为吻合<sup>[61,62]</sup>。另外,宇宙射线直接与黄土石英中的氧原子发生反应生成的“就地”成因<sup>10</sup>Be 亦可望应用于高精度的黄土测年<sup>[62]</sup>。

## 4 结 语

在最近的 2.5 Ma 中,洛川地区的黄土不断地堆积、风化,形成了较为完整且连续的黄土—古土壤序列。数十年的研究表明,从早更新世至今,这一地区的气候总体上是由暖湿逐渐变为冷干,期间又经历了多个冰期—间冰期旋回,气候波动频繁,变幅颇大,且具有明显的周期性,古生物群也发生了显著的演化和变迁。洛川黄土地层还记录了大气候旋回内部出现的次级变化,甚至千年尺度的气候事件。黄土—古土壤序列所包含的古气候信息,可以与深海氧同位素资料进行较好的对比,为探索中亚干旱化的历史和进程、亚洲季风—沙漠系统的形成和演化以及青藏高原的隆升等提供了重要依据,是全球变化研究的支柱之一。在未来的一段时间里,古黄土高原的土地利用、碳循环、干旱区的形成和发展、古人类对河谷和塬面的占据以及文明的起源和演化等问题都将是人们讨论的热点。用稳定同位素分析法重建洛川附近古生态、恢复古生物量的工作也有必要继续进行,以推动古环境研究的发展和进步。

致谢:本文是在导师刘东生院士的悉心指导下完成的,撰写过程中,韩家懋、郭正堂研究员、汪罗、王国安、吴文祥博士均给予热情帮助,谨致谢忱。

### 参考文献 (References):

- [1] Williams M A J, Dunkerley D L, De Deckker P, et al. Quaternary Environments [M]. Beijing: Science Press, 1997. 189-239. [Williams M A J 等. 第四纪环境·刘东生等译·北京: 科学出版社, 1997. 189-239.]
- [2] Liu T, et al. Loess and the Environment [M]. Beijing: China Ocean Press 1985. 1-251.
- [3] Heller F, Liu T. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China [J]. Nature, 1982, 300: 431-433.
- [4] Liu Dongsheng, An Zhisheng. A preliminary magnetostratigraphic study of the Beihanzhai loess section [J]. Geochimica, 1984, 2: 134-137. [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, 2: 134-137.]
- [5] Yue Leping. New progress in the paleomagnetic study of loess [J]. Geological Review, 1985, 31(5): 453-460. [岳乐平. 我国黄土古地磁学研究进展[J]. 地质论评, 1985, 31(5): 453-460.]
- [6] Chen W, Peng G, ed. Dating of Younger Geosystems [M]. Beijing: Earthquake Press, 1991. 200-218. [陈文奇, 彭贵主编. 年轻地质体系的年代测定[M]. 北京: 地震出版社, 1991. 200-218.]
- [7] Ge Tongming. Magnetostratigraphical research of Luochuan loess sediments [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1984, 4(1): 37-44. [葛同明. 洛川黄土沉积层的磁性地层学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(1): 37-44.]
- [8] Kukla G, Heller F, Liu X. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility [J]. Geology, 1988, 16: 811-814.
- [9] Lu Huayu, An Zhisheng, Vandenberghe J, et al. A dating model of loess stratigraphy in the central Chinese loess plateau and its preliminary application [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(3): 150-152. [鹿化煜, 安芷生, Vandenberghe J, 等. 洛川黄土地层定年的一个模式及其初步应用[J]. 沉积学报, 1997, 15(3): 150-152.]
- [10] Ding Zhongxi, Yu Zhiwei, Liu Dongsheng. Progress in loess research (part 3): Time scale [J]. Quaternary Sciences, 1991, 4: 336-348. [丁仲礼, 余志伟, 刘东生. 中国黄土研究新进展(三)时间标尺[J]. 第四纪研究, 1991, 4: 336-348.]
- [11] Lu H, Liu X, Zhang F, et al. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan, central Chinese Loess Plateau [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 154: 237-246.
- [12] Forman S L. Late Pleistocene chronology of loess deposition near Luochuan, China [J]. Quaternary Research, 1991, 36: 19-28.
- [13] Liu Dongsheng, Yuanbaoyin, Gao Fuqing et al. The fossil vertebrates in loess deposits of China [J]. Quaternary Sinica, 1985, 6(1): 126-136. [刘东生, 袁宝印, 高福清, 等. 中国黄土区第四纪脊椎动物[J]. 中国第四纪研究, 1985, 6(1): 126-136.]
- [14] Yue Leping, Xue Xiangxi. The comparative study of magnetostratigraphy and biostratigraphy in Chinese loess area [J]. Quaternary Sciences, 1996, 3: 239-245. [岳乐平, 薛祥熙. 中国黄土磁性地层与生物地层对比[J]. 第四纪研究, 1996, 3: 239-245.]
- [15] Wu Naiqin, Rousseau D, Liu Dongsheng. Land mollusk records from the Luochuan loess sequence and their paleoclimatic significance [J]. Science in China (D), 1996, 39(5): 494-502.
- [16] Wu N, Rousseau D, Liu Dongsheng. Climatic instability recorded by the mollusk assemblages from the late glacial loess deposits in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(13): 1238-1242.
- [17] Lu Houyuan, Wang Yongjie. A study on phytoliths in loess profile and paleoenvironmental evolution at Heimuguo in Luochuan, Shanxi province, since late Pleistocene [J]. Quaternary Sciences, 1991, 1: 72-84. [吕厚远, 王永吉. 晚更新世以来洛川黑木沟黄土层中植物硅酸体研究及古植被演替[J]. 第四纪研究, 1991, 1: 72-84.]
- [18] Wu Naiqin, Lu Houyuan, Nie Gaozhong, et al. The study of

- phytoliths in  $C_3$  and  $C_4$  grasses and its paleoecological significance[J]. *Quaternary Sciences* 1992, 3: 241-251. [吴乃琴, 吕厚远, 聂高众, 等.  $C_3$ 、 $C_4$  植物及其硅酸体研究的古生态意义[J]. 第四纪研究, 1992, 3: 241-251.]
- [19] Shi Y, Kong Z, Wang S. The climatic fluctuation and important events of holocene megathermal in China[J]. *Science in China (B)*, 1994, 37(3): 353-356.
- [20] An Zhisheng, Wei Lanying, Lu Yanchou. A preliminary study of soil stratigraphy in Luochuan loess profile [J]. *Quaternary Sinica*, 1985, 6(1): 166-173. [安芷生, 魏兰英, 卢演涛. 洛川黄土剖面土壤地层学的初步研究[J]. 中国第四纪研究, 1985, 6(1): 166-173.]
- [21] An Zhisheng, Wei Lanying. The fifth layer paleosol in the Lishi loess and their paleoclimatic significance [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1980, 17(1): 1-10. [安芷生, 魏兰英. 离石黄土中的第五层古土壤及其古气候意义[J]. 土壤学报, 1980, 17(1): 1-10.]
- [22] Heller F, Liu Dongsheng. Magnetism of Chinese loess deposits [J]. *Geophys J R Astron Soc* 1984, 77: 125-141.
- [23] Wang Luo, Liu Dongsheng, Han Jiamao, et al. Environmental magnetism of Chinese Quaternary loess: A brief review [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 335-341. [旺罗, 刘东生, 韩家懋, 等. 中国第四纪黄土环境磁学研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 335-341.]
- [24] Lu Huayu, An Zhisheng, Liu Hongbin et al. Periodicity of east Asian winter and summer monsoon variation during the past 2500 ka record by loess deposits at Luochuan on the central Chinese loess plateau [J]. *Geological Review*, 1988, 44(5): 553-558. [鹿化煜, 安芷生, 刘洪滨, 等. 洛川黄土记录的最近 2500ka 东亚冬夏季风变化周期[J]. 地质论评, 1988, 44(5): 553-558.]
- [25] An Zhisheng, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation of the loess plateau of central China during the last 130,000 years [J]. *Quaternary Research*, 1991, 36: 29-36.
- [26] Heller F, Shen C, Beer J, et al. Quantitative estimates of pedogenic ferromagnetic mineral formation in Chinese loess and paleoclimatic implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 114: 385-390.
- [27] An Zhisheng, Sun D, Zhang X et al. Accumulation sequence of Chinese loess and climatic records of Greenland ice core during the last 130ka [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(15): 1272-1276.
- [28] Lu H, Huissteden K V, An Z, et al. East Asia winter monsoon variations on a millennial time scale before the last glacial interglacial cycle [J]. *Journal of Quaternary Science*, 1999, 14(2): 101-110.
- [29] Porter S C, An Z. Correlation between climate events in the north Atlantic and China during the last glaciation [J]. *Nature*, 1995, 375: 305-308.
- [30] Zheng Honghan, Gu Xiongfei, Han Jiamao, et al. Clay minerals in loess of China and their tendency in loess section [J]. *Quaternary Sinica*, 1985, 6(1): 158-165. [郑洪汉, 顾雄飞, 韩家懋, 等. 中国黄土的粘土矿物及其在地层剖面中的变化趋势——洛川和陇西黄土剖面的初步研究[J]. 中国第四纪研究, 1985, 6(1): 158-165.]
- [31] Zheng Honghan. Paleoclimatic records of Clay minerals in loess, China [J]. *Quaternary Sinica*, 1985, 6(2): 41-47. [郑洪汉. 中国黄土中粘土矿物的古气候记录[J]. 中国第四纪研究, 1985, 6(2): 41-47.]
- [32] Ji Junfeng, Chen Jan, Lu H. Origin of illites in the Luochuan loess section—Evidence from TEM study [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(4): 372-375.
- [33] Ji Junfeng, Chen Jun, Wang Hongqiao. Crystallinity of illite from the Luochuan loess-paleosol sequence, Shanxi province—Indicators origin and paleoclimatic of loess [J]. *Geological Review*, 1997, 43(2): 181-185. [季峻峰, 陈骏, 王洪涛. 陕西洛川黄土—古土壤剖面中伊利石结晶度—黄土物质来源和古气候环境的指示[J]. 地质论评, 1997, 43(2): 181-185.]
- [34] Wen Qizhong, Yang W eihua, Diao Guiyi, et al. The relations between paleoclimatic and elements in loess [J]. *Quaternary Sinica*, 1985, 6(2): 34-40. [文启忠, 杨蔚华, 刁桂义, 等. 黄土堆积过程中元素的演化与古气候的关系[J]. 中国第四纪研究, 1985, 6(2): 34-40.]
- [35] Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China and paleoclimatic implications [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133: 67-88.
- [36] Gallet S, Jahn B, Lanoe B V, et al. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156: 157-172.
- [37] Goldich S S, Gast P W. Effects of weathering on the Rb-Sr K-Ar ages of biotite from the Morton Gneiss, Minnesota [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1966, 1: 372-375.
- [38] Dasch E J. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments and sedimentary rocks [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1969, 33: 521-522.
- [39] Chen J, Qiu G, Lu H. An Variation of summer monsoon intensity on the loess plateau of central China during the last 130 ka. Evidence from Rb and Sr distribution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(6): 473-475.
- [40] Chen Jun, Wang Yongjin, Ji Junfeng, et al. Rb/Sr variation and its climatic stratigraphical significance of loess-paleosol profile from Luochuan, Shanxi province [J]. *Quaternary Sciences* 1999, 4(4): 350-356. [陈骏, 汪永进, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及其气候地层学意义[J]. 第四纪研究, 1999(4): 350-356.]
- [41] Yu Suhua, Wen Qizhong, Zhang Shisan, et al. The geochemistry and paleoclimatic significance of Magnesium and Aluminum in loess of late Quaternary in northwestern China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*. [余素华, 文启忠, 张士三, 等. 中国西北地区晚第四纪黄土中镁铝地球化学与古气候意义[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 112-116.]
- [42] Chen J, Ji J, Sui Y. ESR studies of  $Mn^{2+}$  in the loess plateau of central China: Implication for variation of the east Asia monsoon

- [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(1): 72-75.
- [43] Chen Jun, Wang Hongao, Lu Huayu. Behaviors of REE and other trace elements during pedological weathering-evidence from chemical leaching of loess and paleosol from the Louchan section in central China [J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70(1): 61-72. [陈骏, 王洪涛, 鹿化煜. 陕西洛川黄土沉积物中稀土元素及其他微量元素的化学淋滤证据[J]. 地质学报, 1996, 70(1): 61-72.]
- [44] Fakes L A, Sun J. A carbon isotope record of the upper Chinese loess sequence: Estimates of plant types during stadials and interstadials [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1994, 108: 183-189.
- [45] Jia R, Liu T, Yuan B. A preliminary study on lipids in loess and paleosol of Luochuan section, China [A]. In: Liu T ed. Aspects of Loess Research [C]. Beijing: China Ocean Press, 1987: 311-321.
- [46] McCoy W D, Bradley R S, Zhang Guangyu. Anostratigraphy and geochronology of the upper Lishi and Malan loess-paleosol sequence, north-central China [A]. In: Liu Dongsheng, An Zhisheng, eds. Loess, Quaternary Geology and Global Change Part 2 [C]. Beijing: Science Press, 1990: 73-82. [麦科伊 W D, 布雷德利 R S, 张光宇. 中国北方黄土氨基酸地层学及古温度讨论 [A]. 见: 刘东生, 安芷生, 主编. 黄土·第四纪地质·全球变化(第二集) [C]. 北京: 科学出版社, 1990: 73-82.]
- [47] Zhao Zhiqi, Liu Congjiang, Xiao Yingkai. Separation and isotopic determination of boron in the acid-soluble fraction of loess and paleosol [J]. Geochimica, 2000, 29(4): 351-357. [赵志琦, 刘从强, 肖应凯. 黄土—古土壤沉积物中酸溶相硼的分离及其同位素测定 [J]. 地球化学, 2000, 29(4): 351-357.]
- [48] Geng Ansong, Wen Qizhong. Some geochemical characteristics of carbonates in Luochuan Loess, Shanxi Province [J]. Geochimica, 1988, 3: 267-275. [耿安松, 文启忠. 陕西洛川黄土中碳酸盐的某些地球化学特征 [J]. 地球化学, 1988, 3: 267-275.]
- [49] Lin B, Liu R, An Z. Preliminary research on stable isotopic compositions of Chinese loess [A]. In: Liu Dongsheng, eds. Loess, Environment and Global Change [C]. Beijing: Science Press, 1991: 124-131.
- [50] Shen Chengde, Yi W eixi, Liu Dongsheng. Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  in the earth environment [J]. Quaternaria Sinica, 1987, 8(1): 1-11. [沈承德, 易惟熙, 刘东生. 地球环境中的宇宙成因核素  $^{10}\text{Be}$  [J]. 中国第四纪研究, 1987, 8(1): 1-11.]
- [51] Zheng S, Wang Y, Chen C. Studies on the stable isotopes in carbonates in Luochuan loess section: Applicability of the Ca dardues as paleoclimatic indicators [A]. In: Liu Dongsheng, ed. Aspects of Loess Research [C]. Beijing: China Ocean Press, 1987: 283-290.
- [52] Chen J, An Z, Wang H, et al. An study of the  $S_1$  paleosol carbonates from the central loess plateau of North China [J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(18): 542-545.
- [53] Gu Z. The carbonate isotopic composition of the loess-paleosol sequence and its implication of paleoclimatic change [J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(23): 1979-1983.
- [54] Han Jiamao, Jiang W enying, Lu Hyuan, et al. Carbon and oxygen isotope composition of carbonate concretions in loess part 2: carbon isotope and paleotemperature [J]. Quaternary Sciences, 1995, 4: 367-377. [韩家懋, 姜文英, 吕厚远, 等. 黄土中钙结核的碳氧同位素研究(二) 碳同位素及其古环境意义 [J]. 第四纪研究, 1995, 4: 367-377.]
- [55] Jiang W enying, Han Jiamao, Chen Jinshi, et al. A study of carbon and oxygen isotope in loess carbonate [A]. In: Liu Jiaqi, Yuan Baoyin, eds. Quaternary Geology and Environment of China [C]. Beijing: China Ocean Press, 1997: 334-344. [姜文英, 韩家懋, 陈锦石, 等. 黄土碳酸盐的碳氧同位素研究 [A]. 见: 刘嘉麒, 袁宝印, 主编. 中国第四纪地质与环境——庆贺刘东生院士 80 华诞暨从事地质工作 55 周年文集 [C]. 北京: 海洋出版社, 1997: 334-344.]
- [56] Li C, Lin W, An Z, et al. Geochemistry of 0.7 Ma BP microtektite bearing loess layers—Stable carbon isotope [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(19): 629-633.
- [57] Wang Y, Zheng S. Paleosol nodules as Pleistocene paleoclimatic indicators, Luochuan, P R China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1989, 76: 39-44.
- [58] Han J, Jiang W, Liu D, et al. Carbonate isotopic record of paleoclimatic changes in Chinese loess [J]. Science in China (D), 1996, 39(5): 460-467.
- [59] Han Jiamao, Jiang W enying, Wu Naiain, et al. Carbon and oxygen isotope composition of carbonate concretions in loess part 1: oxygen isotope and paleo-aridity [J]. Quaternary Sciences, 1995, 2: 130-137. [韩家懋, 姜文英, 吴乃琴, 等. 黄土中钙结核的碳氧同位素研究(一) 氧同位素及其古环境意义 [J]. 第四纪研究, 1995, 2: 130-137.]
- [60] Shen Chengde, Yi W eixi, Liu Dongsheng, et al.  $^{10}\text{Be}$ -susceptibility model and the Quantitative estimates of pedogenic ferromagnetic material flux in Chinese loess [J]. Quaternary Sciences, 1994, 1: 75-86. [沈承德, 易惟熙, 刘东生, 等.  $^{10}\text{Be}$ —磁化率模型及黄土中成壤磁性物质质量估算 [J]. 第四纪研究, 1994, 1: 75-86.]
- [61] Shen Chengde, Yi W eixi, Liu Dongsheng.  $^{10}\text{Be}$  records in loess with high resolution and the dating of loess stratigraphy [J]. Quaternary Sciences, 1994, 3: 203-213. [沈承德, 易惟熙, 刘东生. 高分辨率  $^{10}\text{Be}$  记录与黄土地层定年 [J]. 第四纪研究, 1994, 3: 203-213.]
- [62] Shen Chengde, Liu Dongsheng, Yi W eixi, et al. Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  of the in-site quartz and erosion rates of source regions of loess [A]. In: Liu Dongsheng, An Zhisheng, eds. Loess, Quaternary Geology and Global Change Part 3 [C]. Beijing: Science Press, 1992: 84-91. [沈承德, 刘东生, 易惟熙, 等. 黄土石英就地成因  $^{10}\text{Be}$  与黄土源区侵蚀速率 [A]. 见: 刘东生, 安芷生, 主编. 黄土·第四纪地质·全球变化(第三集) [C]. 北京: 科学出版社, 1992: 84-91.]

## LUOCHUAN LOESS-PALEOSOL SEQUENCE AND PALEO - ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS : A BRIEF REVIEW

Li Yu-mei

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract :** Luochuan section is located in Shaanxi province, at the central of Chinese Loess Plateau. Sandy shale and sand stone at Triassic is the bottom of gully. Red clay of Late Pliocene about 15m thick overlies the bedrock. The loess layer is 130m thick, and overlies red clay.

Some reliable polarity columns for the Luochuan section has been derived in order to determine the important polarity boundaries and the age of loess layer exactly. M/G boundary lies at the Wucheng Loess/Red Clay boundary, Olduvai subchron is recorded at the middle-upper portion of Wucheng, Jaramillo subchron and B/M boundary lies in Lower Lishi loess. Other methods such as  $^{14}\text{C}$  and thermoluminescent can date Malan and  $S_0$ , and time scales established respectively by Liu, Ding, Lu and Kukla have showed the age of each loess layer.

Loess-paleosol sequences in Luochuan China provide a detailed record of environment changes during the last 2.5 million years. The histories of flora, fauna and climate could be observed by means of some proxies such as susceptibility, granularity, snail species, sporopollen, phytolith,  $\text{CaCO}_3$ , stable isotope, trace element, amino acid, and so forth. Investigation of them display that the long-term changes represented by Luochuan Loess-paleosol sequences have borne a multi-cycled feature with repeated climatic fluctuations from warm-humid to dry-cold.

Before Olduvai subchron, some kinds of large mammals included *Eucienoceros*, *Ursus* sp., *Lynxshansius* inhabited Luochuan basin; but after this, most of them disappeared except lagomorph and rodent. In this sequence from the bottom upwards, the content of Ca, Sr and  $\text{Fe}^{2+}$  tends to increase; on the contrary, Al, K, Ti, Mn and  $\text{Fe}^{3+}$  decreases; acidic amino acids are present in relatively greater amounts than alkaline amino acids; and  $\text{CaCO}_3$  becomes more and more abundant. All of the facts imply that the depositional environment of Luochuan section has a bias to an alkaline and reductive thing. On the whole, the climate of Luochuan is becoming drier and colder.

The grain size distribution, magnetic susceptibility, the ratios of Rb/Sr, Mg/Al,  $\text{Mn}^{2+}$  and  $^{13}\text{C}$  in Luochuan sequence exhibits multi-cycled climatic changes as regular fluctuation. These are also evidenced by alternations of different types of loess and paleosol. The climate curve of Luochuan can also be correlated with the results of Pacific Ocean deep-sea cores studies.  $S_0$  is comparable to oxygen isotope stage 1, Loess  $L_1$  correlates with stage 2, 3, and 4, and paleosol  $S_1$  correlates with stage 5. Loess and paleosol means the term for glaciation and interglaciation respectively.

The grain size distribution represents a proxy climate index on winter monsoon of Asia; and then, magnetic susceptibility, the ratios of Rb/Sr, Mg/Al and  $\text{Mn}^{2+}$  are indexes related to past changes of precipitation and vegetation, and thus to summer monsoon. Luochuan profile has offered many data about winter or summer monsoon at central Loess Plateau. Soils were forming during intervals of strong summer monsoon, whereas loess units were deposited at times of reduced monsoon intensity. In fact, the Chinese loess-paleosol can be view as a proxy record of Asian monsoon variability extending over the last 2.5 Ma. It is pretty helpful at the study on monsoon in East Asia.

Mollusk and phytoliths in Malan loess and  $S_0$  record the paleovegetation since the last interglaciation. Spore and pollen reveals the history of flora. All of the data about biota indicate that an adverse steppe with a dry-cold climate and a more dense forest and steppe vegetation with a temperate and moist climate existed alternately.  $^{13}\text{C}$  in organic matter demonstrates such conclusion, too.

Comparison of mollusk records from the Luochuan loess sequence with those of grain-size and aridity index

from RC 27 - 61 core in the India ocean reveals obvious similarities in several time intervals , suggesting that climate variations in the Loess Plateau may have been also subjected to the Indian monsoon to a certain extent in the geological past. The presence of some specific cold-humid and cold-dry species represents deteriorated climate conditions , which might be the cooling events similar to the Heinrich events recorded in the North Atlantic.

The major clay minerals in the Luochuan loess section are illite , kaolinite , montmorillonite , chlorite , vermiculite and a small amount of disordered or ordered mixed-layer ones. In the study of clay minerals , a method for showing the “ crystallinity ” of illite was introduced to interpret the geological environment. The “ crystallinity ” of illite in Brunhes chron reflects a strong fluctuation than ever , and it indicates some intense climatic changes.

Some quantitative results about paleoenvironment have been obtained. The 0.31% change of  $^{18}\text{O}$  of meteoric water reflects the change of 1 in formation temperature. Based on above , the temperature difference between the last glaciation and the interglaciation is not smaller than 6 in Luochuan. The formation temperature of  $\text{S}_2$  is 14.5 . At the same time , the formation precipitation of most paleosols in Luochuan is 600 ~800 mm every year.

In the Luochuan district , loess began to be deposited 2.5Ma BP , and loess layers formed in the period of dry - cold climate , and the paleosols in the period of mild - humid climate , thus forming the uninterrupted loess - paleosol sequence. Based on the proxy climatic indexes in Luochuan , we have obtained a curve of paleoclimatic change 2.5 Ma. This curve may be compared with that of  $^{18}\text{O}$  stages from deep-sea deposits. It can be divided into many climatic cycles. These cycles may have a direct relationship with that of the change in the earth orbit.

Key words : Luochuan ; Loess ; Paleoenvironment ; Paleoclimatic ; Global change .

## 檠

# 生态学的前沿领域

生态学研究正在进入综合和合作的新时代 ,生态学家正面临着如何认识生物系统复杂性的挑战。为此 ,美国自然科学基金委员会于 1999 年 12 月召集 16 位著名生态学家就生态学过程的已知和未知领域及阻碍因素、应鼓励怎样的知识和理论界面等问题进行了讨论 ,将讨论结果精练为四个前沿领域。Bioscience 杂志在 2001 年第 1 期摘要介绍了这四个前沿领域(全文 2 万字) ,这里简要译出 ,以供中国生态学家参考。

前沿领域 1 :复杂的群落中结合的动态 包括 功能特点和群落组成 ; 群落结合的途径 ; 功能类群 ; 还没有发现的起作用的因子(hidden player) ; 恢复。

前沿领域 2 :生态过程的历史决定因素和进化包括 系统发育与正在进行的进化的综合作用 ;生态过程的系统发育结构 ;快速进化和生态动态 ;共同进化和生态动态 ;进化动态的尺度 ;遗传多样性和生态动态 ;生态动力的遗传组(genomics)。 环境的历史和时间变化的作用 :生产力或资源投入的历史变化 ;物种组成、丰度及相互作用强度的历史变化 ;关键非生物事件的历史变化。

前沿领域 3 :复杂系统的突发特点包括 特殊的研究问题 ;新技术。

前沿领域 4 :生态拓朴学包括 选择正确的时空范围 ;确定元师 ;改变界限。

如何迎接挑战 :合作和综合 ;分析工具 ;研究和监测工具的获取。

赵晓英 供稿