

文章编号 1001-7410(2007)02-295-08

# 风尘堆积常见的同沉积和沉积后改造特征及其环境意义\*

尹秋珍<sup>①③</sup> 肖国桥<sup>②③</sup> 郭正堂<sup>①</sup> 葛俊逸<sup>②③</sup> 郝青振<sup>①</sup> 袁宝印<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029; <sup>②</sup>中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室,西安 710075; <sup>③</sup>中国科学院研究生院,北京 100049)

**摘要** 黄土堆积作为气下沉积,任何一个深度都曾经暴露于地表,因而必然受到相关地表过程的作用。由于这些过程均发生于特定的环境条件下,形成的特征多数具有明确的环境意义;而黄土在沉积后也可能受到各种地质过程的改造,从而对研究中常用的气候代用指标有一定影响。文章基于野外、微形态等分析,结合前人成果,对我国北方新近纪风尘堆积中常见的同沉积和沉积后改造特征、形成过程及环境意义进行研究。由于一些特征在黄土堆积中具有普遍性,可作为识别风成堆积的标志和环境事件研究的指标,并有助于全面理解常用的替代指标的环境意义。

**关键词** 黄土 同沉积作用 沉积后作用 微形态 古环境

**中图分类号** P941.74 **文献标识码** A

## 1 引言

黄土类沉积物在各大洲均有分布,总面积大约覆盖陆地表面10%<sup>[1]</sup>。前人<sup>[2]</sup>根据源区性质的不同,将其划分为“热黄土”(来自沙漠的黄土)和“冷黄土”(来自冰川外围的黄土)。世界上许多大河谷地的阶地上也发育黄土<sup>[3-5]</sup>,主要是第四纪冰期河滩大面积出露,风力将冲积物中的细粒物质搬运至阶地上堆积而成,可称为“河谷黄土”。我国长江谷地的黄土<sup>[6]</sup>可能主要属于此类。在沿海地区,由于冰期时海面下降,风力将大陆架上的细粒物质吹扬起来,堆积在合适的地形面上形成黄土,这类黄土可称为“滨海黄土”,或称之为蓬莱阁型黄土<sup>[1]</sup>。我国东部沿海岛屿上的不少黄土堆积<sup>[1,7]</sup>大致属于此类。当然,一些地区的黄土可能是不同来源物质的混合,如长江谷地的黄土很难说没有来自北方沙漠的物质,而北方河流阶地上的一些黄土更是如此。

无论上述哪种类型的黄土,其形成都需要3个基本条件:1)源区地表或因干旱、或因寒冷而植被覆盖度很低,细粒物质才能被风吹扬起来。从这个意义上讲,源区的荒漠条件是形成黄土所必备的<sup>[8]</sup>。有些地区地表尽管有大量细粒物质(如我国

西南地区),但由于植被覆盖良好,很难被吹扬起来形成黄土。2)有足够强劲的风力,作为风尘物质的搬运动力。3)有合适而相对稳定的堆积地形。一般地,黄土堆积发育于相对平坦的高地上。一些地区虽然有风尘降落,但因地形起伏较大,黄土堆积很难保存下来。这就是一些地区为什么缺失某些时代黄土堆积的原因。在六盘山以西的西部黄土高原,第四纪黄土较完整的序列只在较宽阔的阶地上保存<sup>[3,9]</sup>。六盘山以东的黄土高原普遍缺乏8MaB. P.前的黄土堆积,并不意味着当时没有风尘堆积,而是因为当时缺乏合适的堆积地形或原有风尘堆积在基底后期经历的构造运动中被侵蚀<sup>[10]</sup>。从这个意义上讲,连续完整的风尘堆积只在少数地区保存,而不连续的、在一定程度上被改造的黄土的分布范围要比连续完整的黄土-古土壤序列分布范围大的多。为了严格区分,刘东生等<sup>[1]</sup>将黄土划分为原生黄土和次生黄土(或黄土状土)。第四纪原生黄土在洛川<sup>[1,11]</sup>、西峰<sup>[1,12]</sup>、宝鸡<sup>[13]</sup>、渭南<sup>[1]</sup>等地保存有完整的序列,而黄土高原内更大范围的黄土仅部分层段是完整的。实际上,即便是典型的原生黄土露头附近,也经常可以发现受不同程度改造的黄土状土,只是研究黄土的学者在黄土-古土

第一作者简介:尹秋珍 女 28岁 博士 第四纪地质学专业 E-mail:qiuz-yin@163.com

\*中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KZCX3-SW-139)和国家自然科学基金项目(批准号:40231001)资助  
2006-12-20收稿,2007-01-17收修改稿

壤序列的建立过程中,均避开了这样的部位而使用了典型的平行露头,因为只有典型黄土才包含大区域的或全球意义的环境信息。

由于黄土是气下环境的产物,任何一个深度都代表堆积时期的地表,必然受当时相关地表过程的作用,成壤过程就属于此类过程之一,但不是本文的主要研究对象。实际上,黄土层本身也受程度不同的成壤过程的改造,也可看作是土壤来研究,只是成壤强度与上下相邻的古土壤层相比偏弱。有些时代或地区的“黄土层”所经历的成壤强度可能高于另一些层段或地区的古土壤单元。当堆积期气候很干冷时,或粉尘堆积速率较高时,堆积下来的物质经历的成壤作用就弱一些,颜色往往偏黄偏淡;反之,在堆积速率低或气候相对温暖湿润的条件下,堆积下来的物质经历的成壤作用就强一些,颜色就偏红,二者似乎没有十分严格的界限。第四纪的离石黄土和午城黄土由于堆积速率低于马兰黄土,颜色偏红而在上世纪前期曾被称为“红色土”<sup>[1]</sup>。一些学者<sup>[14]</sup>用10条判定准则来定义黄土,但似乎不易囊括目前全球各地发现的黄土堆积。而刘东生等<sup>[1]</sup>则强调黄土是风力搬运、未经次生扰动的粉砂质土状堆积物。Pye<sup>[15]</sup>也强调黄土是“由风力搬运、以粉砂颗粒为主的气下沉积物”。这些定义似乎更能概括多数地区的黄土。

本文主要基于近年来对新近纪不同时期黄土堆积的野外观察,结合室内微形态等分析,对黄土堆积时期或堆积以后受到的表生作用或其他地质营力作用所导致的一些特征进行研究。由于这些特征均形成于特定的环境背景下,多数具有明确的环境意义,可以作为古环境重建的指标。同时,一些过程对黄土中常用的环境指标的变化有一定影响,有些特征也容易在野外与其他动力形成的特征混淆,对其进行较系统的研究,有助于全面提取黄土记录的环境信息。

## 2 常见同沉积作用的特征及其环境意义

这里的同沉积(syn-depositional)作用<sup>[16]</sup>指黄土堆积的同时或粉尘堆积后短时期内经历的各种表生过程或其他地质过程。除因基底地形导致的次生黄土过程外,其他多数特征在黄土堆积,甚至在普遍认为的典型黄土中相当普遍,有些在一定意义上可认为是黄土沉积所具备的沉积学特征。

### 2.1 堆积地形对黄土-古土壤序列形成过程的影响

在黄土研究中可以发现,所有风尘堆积序列的最底部几乎无例外地包含程度不同的、厚度不等的受坡地流水作用的层段,其厚度取决于当时的基底地形条件和剖面所在位置。如西峰晚第三纪风成红粘土的最底部就包含有坡地流水作用的特征<sup>[17]</sup>。这是因为典型风尘堆积需要较为平坦的正地形,而风尘堆积初期的地表或多或少均有起伏。当地形起伏较大时,降落于高地地表的风尘会受到坡面流水、风蚀等作用的侵蚀,在较低的部位堆积,形成次生黄土甚至洼地水下沉积。随着上述过程的进行,原有起伏的地形反差逐渐变小,上述过程减弱,堆积地形趋于平缓,黄土堆积面达到一个与该区降雨、风力、植被等环境条件相适应的坡度后稳定下来<sup>[18]</sup>,沉积开始向典型黄土过渡。当此类特征较为明显时,比较容易在野外识别。但有时需要更为细致的观测或室内分析才能揭示出来。由于上述过程发生于粉尘堆积后很短的时期,与黄土堆积后的侵蚀和再搬运有一定区别,我们认为应属于同沉积过程的一种。虽然同沉积侵蚀和沉积后侵蚀都可形成黄土状土,但二者有本质的不同,应区别对待。前者形成的黄土状土堆积,是有气候事件分辨能力的,如孢粉分析可以很好揭示植被变化,其中也可形成古土壤等;而沉积后侵蚀常常是快速堆积,不具备这些特征。

当堆积地形周围一直有基岩高地或其他基底沉积暴露时,局地的风力也可以将零星的粗颗粒吹到黄土或古土壤中。据风洞实验<sup>[19]</sup>,大于 $100\mu\text{m}$ 的颗粒很难被风悬浮搬运,多数是从近源跃移搬运。如秦岭山间盆地边缘的第四纪黄土中,由于形成时周边地形起伏,经常含一些与下伏基岩成分吻合的粗颗粒。河流阶地上的黄土堆积也常常如此,因为附近的高阶地有时未被黄土覆盖,局地风力就可以把粗颗粒带入黄土-古土壤序列中。多数情况下,这些粗颗粒数量很少,一般不影响常用环境指标的应用。

上述特征本身不具严格的环境意义。但是由于坡面流水或风力有可能带来一些基岩的碎屑或粗颗粒,剖面最下部的粒度分析有时不能很好反映风尘堆积的粒度<sup>[20]</sup>。典型黄土剖面的建立要避免这样的部位,确定典型黄土堆积的底界也一般扣除这样的部分。但由于这些层段也可靠地记录了地

磁极性变化, 可以作为地层研究的对象, 从而有助于确定典型风尘堆积的下界。

## 2.2 植被破坏与水蚀特征

不同的植被下形成不同的土壤。黄土作为一种易受侵蚀的土壤, 从土壤侵蚀的角度有大量研究<sup>[21]</sup>。但我们这里主要针对几种在古环境研究中常见的特征进行研究。

黄土作为干旱-半干旱环境下的土壤, 一些干旱事件可以使地表植被变得很稀疏。当降雨打击地面时, 发育一种土壤结壳(soil crust), 是干旱-半干旱区粉砂质地土壤十分常见的特征。Kemp等<sup>[22, 23]</sup>曾报道了兰州附近第四纪黄土中的土壤结壳现象, 反映了当时地表植被相当稀疏。该特征可通过模拟降水实验研究再现<sup>[24, 25]</sup>。

由于干旱环境和稀疏的植被下, 土壤生物活动也很微弱, 这种结壳不能被及时破坏, 直接影响降水向土壤中的渗透。当地表有轻微起伏时就可以形成坡地漫流, 导致的微形态特征就更加明显。图 1a 和图 1b 分别是第四纪黄土和中新世剖面中坡地漫流形成的微形态特征。这种特征在兰州附近第四纪黄土中也有报道<sup>[22, 23]</sup>。所以, 即便在最典型的黄土-古土壤序列中, 几乎无例外地可以找到这些特征。从这个意义上讲, 它们可以被看作是黄土堆积的沉积学特征之一。

当地形坡度较大, 片流侵蚀达到一定强度以后, 就会导致高地上原有的黄土或土壤遭到侵蚀, 有时部分土壤钙积层的钙结核在侵蚀中被再搬运, 在地形较低处形成层状堆积(图 2a)。地层中这些特征导致一定的扰动, 但因范围较小, 常在侧向上尖灭, 研究黄土的学者在黄土-古土壤序列的建立中一般通过平行探槽避开这样的部位。在地形起伏较大的情况下, 片流侵蚀的进一步发展就导致沟谷侵蚀。后者实际上介于同沉积和沉积后侵蚀之间, 将在下文讨论。上述现象有十分明确的环境意义, 指示了黄土堆积的某些时期气候干旱, 植被覆盖较差。当然, 黄土的侵蚀不仅是植被-气候变化造成的, 构造变动也是黄土侵蚀的重要原因, 但后者造成的侵蚀规模一般要大得多。

## 2.3 植被破坏与风蚀特征

形成黄土的粉尘不是堆积下来就不再移动, 除前面讨论的水蚀作用外, 风蚀作用的特征在黄土-古土壤序列中也相当普遍。和水蚀作用一样, 风蚀

作用也指示地表植被覆盖很差, 同时指示风力作用强盛。在对西峰第四纪黄土的研究<sup>[26, 27]</sup>中, 曾发现具“假砂粒微结构”的黄土, 其基质由圆至次圆状、由粉砂和粘土粒级胶结组成的粒径在 60~300 $\mu\text{m}$  的颗粒, 就是粉尘堆积后经风力侵蚀再推移搬运而形成的, 反映了当时地表裸露, 风力较大, 气候干冷<sup>[26, 27]</sup>。另一种常见的特征是风蚀作用使古土壤层上界与上覆黄土呈突变过渡, 而在界线上方有风蚀形成的破碎土壤团块。洛川、宜川  $L_1$  和  $S_1$  的界线都为不规则的突变性过渡<sup>[27]</sup>, 并且在  $L_1$  底部可观察到一些红色土壤团块, 这些土壤团块具清晰的边界, 与周围黄土基质明显不同, 而与下伏古土壤的物质相同。微形态研究显示, 其中没有任何水流作用的痕迹。突变界线显然是风蚀作用形成的<sup>[27]</sup>。在西峰  $L_5$  底部/ $S_5$  顶部黄土基质中亦有较多的这种土壤团块(图 1c)。由于这种现象在古土壤向上覆黄土的过渡部位十分普遍, 我们曾推测<sup>[27]</sup>, 间冰期和冰期之间的过渡期常有一个很干冷的时期, 当时地表植被稀疏, 风力强盛。同时, 这一作用可能造成一定的地层缺失。最近对黄土高密度的释光测年研究<sup>[28, 29]</sup>也揭示出风蚀现象的存在。

这里需指出一种“假团块”现象, 其外观表现为红色土壤颗粒散布于灰白色钙质中, 无层理, 无定向排列, 无分选, 呈棱角状或次棱角状, 肉眼观察貌似风力搬运的土壤团块(图 2b), 很容易造成错误解释。这种特征实际上是具团粒或细棱柱状结构的古土壤 B 层被上覆土壤淋溶下来的钙质胶结形成。当黄土-古土壤序列中两层古土壤之间的黄土层较薄时, 上覆古土壤淋溶下来的碳酸盐, 不仅占据整个黄土层, 而且占据下伏土壤的上部。碳酸钙沿土壤裂隙渗透并向基质中浸染, 被浸染的部分呈灰白色, 在土壤结构体粘化程度较高时碳酸盐难于浸染, 一些未被浸染的部位便表现为红色的“假团块”(见图 2b)。显微镜下可以看出, 这些“假团块”与周围被浸染部分的基质实际是一个整体, 只是没有被碳酸盐浸染(图 1d)。这种现象在较湿润地区, 因碳酸盐淋溶较强烈, 淋溶深度较大、土壤 B 层粘化度也较高时更加明显。尤其当剖面有微地形起伏, 侧向的碳酸盐淀积可在土壤下部形成钙板(petrocalcic horizon)<sup>[30]</sup>, 使“假团块”现象更加突出。在第四纪黄土中, 这种现象在关中地区的午城黄土中比较多, 因为该区气候湿润, 形成粘化程度较高的土壤, 结构也发育, 碳酸盐淋溶也强烈; 而午城黄土中古土壤密集, 黄土层薄, 有利于上述现象

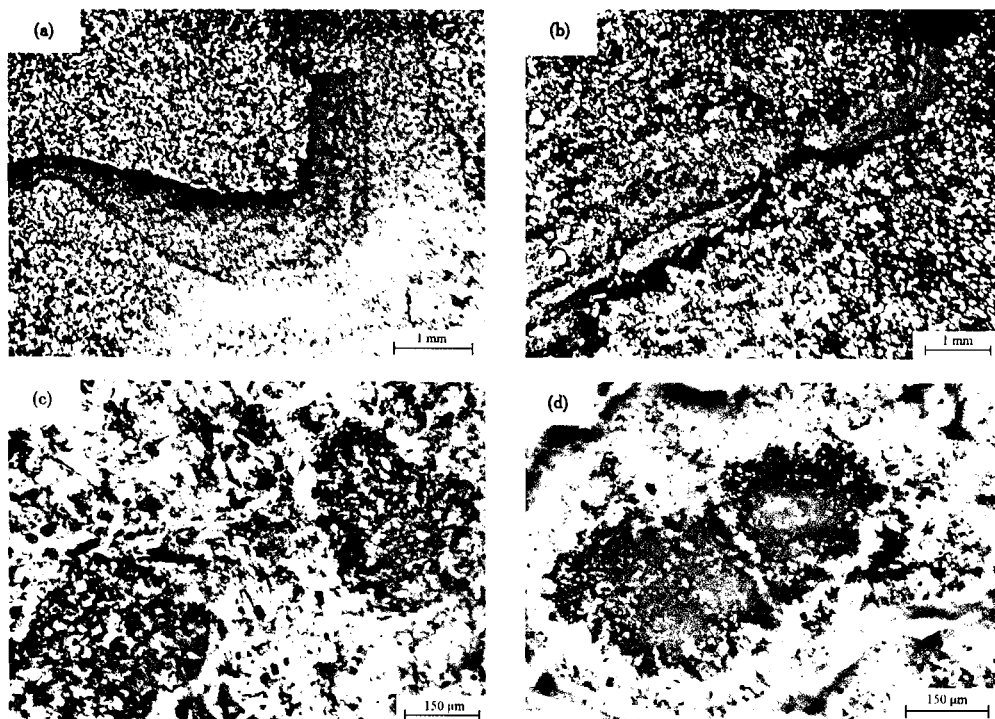


图1 黄土堆积中几种常见现象的微形态特征

(a) 西峰午城黄土中漫流作用形成的特征(单偏光) (b) 秦安中新世黄土中漫流作用形成的特征(单偏光)  
 (c) 西峰L<sub>1</sub>底部黄土基质中的风蚀土壤团块(单偏光) (d) “假团块”的微形态特征(秦安剖面, 216.1m, 单偏光)

Fig. 1 Commonly observed micromorphological properties in loess deposits

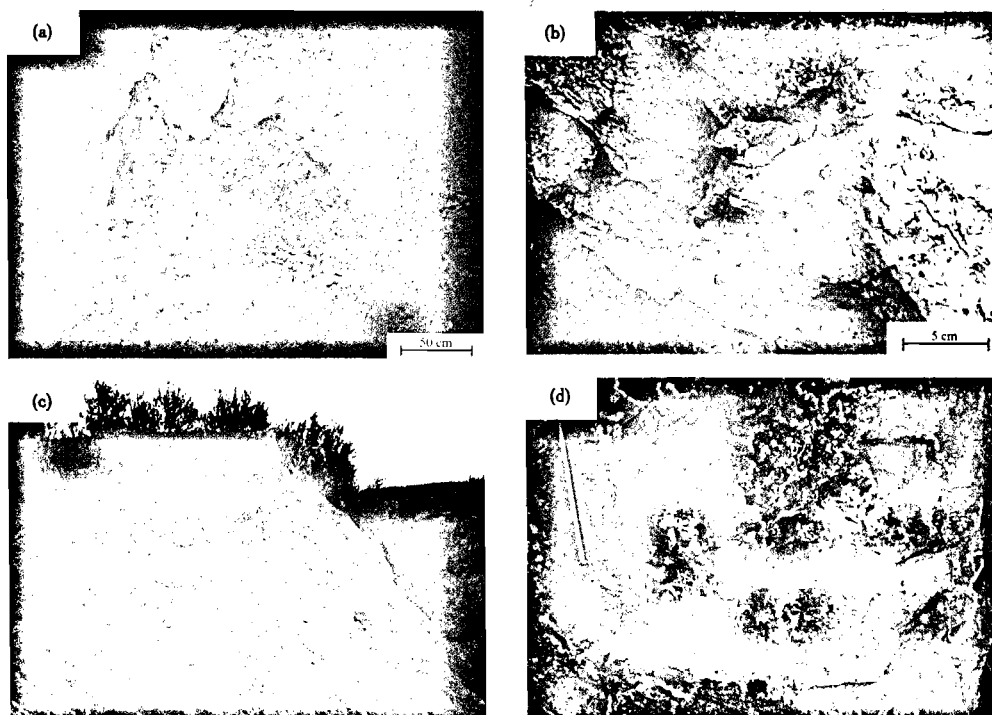


图2 黄土堆积中几种常见现象的宏观形态特征

(a) 洛川黑木沟剖面附近片流形成的钙结核层 (b) 蓝田午城黄土中的“假团块”  
 (c) 莲花中新世黄土的沉积后潜育化现象 (d) 沉积后潜育化层的手标本特征

Fig. 2 Commonly observed macromorphological features in loess deposits

的形成。这种现象在中新世和上新世的黄土-古土壤序列中更多些,因为第四纪前的黄土堆积速率低,黄土层薄;而古土壤又很发育,结构体粘化程度高,碳酸盐淋溶也强烈。从这个意义上讲,它是相对暖湿气候条件下的特征。

#### 2.4 地下水位变化对黄土堆积的影响

由于气候变化一般遵循米兰科维奇周期<sup>[31]</sup>,气候的冷暖干湿交替使正地形的风尘堆积形成黄土和古土壤交替出现的黄土-古土壤序列。因为正地形可使土壤具有较好的排水性,土壤发育按照地带性土壤过程进行,在我国北方形成红色调的古土壤。典型土壤过程包括碳酸钙和粘土的淋溶淀积、生物扰动等。黄土层也经历土壤过程的改造。但是,当一个地区或局部地形的地下水位较高,其波动可以影响风尘沉积表面或次表面时,上述土壤过程均不能正常进行,形成不具黄土与古土壤交替旋回或旋回大为减弱的原地风尘堆积。这种黄土堆积在山西中南部盆地内的离石黄土中下部很常见。因为当地第四纪湖泊发育到中更新世中期结束,后继以风尘堆积。湖泊结束后不久的时期,地下水位尚对地表有影响,形成上述特征。西峰三趾马红土中部的层段也属于这种类型<sup>[17]</sup>。

这种风尘堆积最突出的特点是具原地风尘堆积的特征,没有任何再搬运的痕迹,但不具清晰的黄土-古土壤旋回。旋回的清晰程度取决于地下水位影响的程度。而同时代不受地下水位影响的风尘堆积就形成黄土-古土壤序列,古土壤层具有清晰的土壤发生学层次<sup>[10]</sup>。

上述过程还会带来一系列影响,在用黄土研究常用的代用指标时,需要区别对待。如,风尘粒度能有很好的代表性,而颜色指标不能很好反映地带性成壤强度等。

#### 2.5 冻融作用的特征及其环境意义

处于寒带、亚寒带及高海拔区的黄土,常会受到冻融作用的影响,形成各种与冻融作用有关的特征。在欧洲、西伯利亚及阿拉斯加等地的黄土中,常发育较明显的冰冻龟裂纹、冰楔、冰裂、冻融扰动及冰冻微层理等现象<sup>[32-35]</sup>。不少学者将地质历史时期的冻融特征与现代同类特征的形成环境类比,估算古温度、土壤湿度等条件<sup>[32,35]</sup>。

冻融特征在我国第四纪黄土中也有报道<sup>[22,23,26,36,37]</sup>。北京西山斋堂一带黄土中有明显的

冰楔、冰楔群、冰缘卷曲、冻融褶曲和融冻泥流堆积等古冰缘现象<sup>[36,37]</sup>。西峰剖面的 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 中的一种破裂微结构属于一种弱冻融作用形成的特征<sup>[26]</sup>。兰州皋兰山和九州台黄土的微形态研究<sup>[22,23]</sup>揭示出的冻融特征呈一种近水平、不连续的带状结构(banded fabric)。冻融作用由于其特定的环境意义,实际上显示了其他指标无法显示的气候信息。目前在黄土高原南部尚未发现冻融作用形成的特征。

### 3 几种沉积后作用的特征及其环境意义

本文讨论的沉积后(post-depositional)作用<sup>[16]</sup>指黄土-古土壤序列形成以后经历的各种过程。这里主要讨论几种常见的特征。

#### 3.1 沟谷侵蚀及其环境意义

在前述的片流作用发展到一定程度后,如果侵蚀继续加强,就会发展为沟谷侵蚀。黄土-古土壤序列形成以后,一些地质-环境事件也可导致沟谷侵蚀。现今千沟万壑的黄土高原正是沟谷侵蚀的结果,黄土中常可见到一些古冲沟<sup>[38,39]</sup>。由于黄土序列有可靠的年代控制,附近的古冲沟的发育时代可通过侧向的地层接触关系而确定,从而确定侵蚀事件发生的时间<sup>[38,39]</sup>。这些堆积也给黄土-古土壤序列的建立带来了不便,采样时需通过平行探槽避开这些位置而采集发育完整的黄土-古土壤序列。冲沟的发育受气候或构造因素控制,可作为研究气候事件<sup>[38,39]</sup>或构造事件的依据。一些研究揭示出第四纪时期一些地区的冲沟侵蚀遵循米兰科维奇周期<sup>[39]</sup>。

#### 3.2 黄土状土及其中的生物化石

古生物学者<sup>[40]</sup>认为地层中大型哺乳动物化石的保存一般要求快速的埋葬条件,而且较多的哺乳动物化石需要流水搬运来富集。由于黄土堆积速率一般不大,所以典型黄土-古土壤序列中很难有大化石保存,而只有零散分布的小哺乳动物化石<sup>[8,10]</sup>。如果在黄土区发现丰富的大型哺乳动物化石,一般是保存在黄土状土所在的层位中,与典型黄土地层为不整合接触,仔细观察可以找到清楚的侵蚀面。典型黄土地层中即便有较大的化石,也是呈十分零散的分布,因为没有流水的搬运富集,很难形成集中的化石群。黄土状土的形成可以使动

物化石快速埋藏<sup>[40]</sup>,为古生物学的研究提供了宝贵的材料<sup>[1,40,41]</sup>。

### 3.3 黄土-古土壤序列的后生潜育化作用及其影响

黄土-古土壤序列形成以后,由于侵蚀等因素造成的局部水文环境的改变,地下水的作用有时可以使一些层位产生明显的潜育化现象,这种现象常发生于冲沟两侧。由于冲沟内的水向两侧地层内渗透,质地较粗、空隙较多的黄土层往往含水多,局部颜色还原为灰绿色,而古土壤层因为粘土含量较高,受到的潜育化作用相对较弱,颜色改变较小。这种过程在局部可形成灰绿色黄土层与红褐色古土壤层相间的序列。前人对第四纪黄土中的类似潜育化现象做过报道<sup>[42]</sup>。莲花一带的中新世黄土中也有类似特征(图2c)。但这种现象的成因在野外比较容易识别,其特点是分布范围有限,向冲沟两侧短距离消失,转变为正常的黄土-古土壤序列。敲开手标本或在薄片观测,可以发现这些还原作用是后生作用的产物,并非堆积时期形成(图2d)。需要注意的是,潜育化作用会导致磁化率降低。我们在野外对同一黄土层横向上磁化率的测量发现,受潜育化影响部位的磁化率值明显低于未受影响的部位,所以典型黄土-古土壤序列的建立需避开这样的层位。

## 4 讨论与结论

由于黄土-古土壤序列是气下沉积,无论黄土层还是古土壤层,其形成时期均是暴露于地表的土壤,必然经过相关地表过程的改造。本文对黄土研究中常见的一些同沉积和沉积后改造特征进行研究。它们中少数只有局地意义,而多数因为形成于特定的环境条件下而具有明确的环境意义,可以作为环境事件重建的标志。同时,这些特征有可能对黄土-古土壤序列中常用的环境替代指标构成一定影响,对其研究可以更准确地提取黄土-古土壤序列包含的古环境信息。由于表生过程的复杂性,本文所研究的现象只是常见的一部分。由于有些特征几乎无例外地出现于所有黄土-古土壤序列中,在一定程度上可以视为黄土沉积特征的一部分。

**致谢** 彭淑贞、乔彦松、孙斌、姚政权、梁美艳、周鑫、秦利、刘恋和詹涛参加了野外工作和讨论,在此一并致谢!

## 参考文献(References)

- 1 刘东生等著. 黄土与环境. 北京:科学出版社,1985. 1~481  
Liu Tungsheng et al. Loess and the Environment. Beijing: Science Press,1985. 1~481
- 2 奥勃鲁契夫 B A. 黄土的成因问题. 见:乐涛,刘东生等译. 砂与黄土问题. 北京:科学出版社,1958. 101~144  
Obruchev B A. Problem of origin in loess. In: Le Tao, Liu Tungsheng et al. Translation. Problem between Sand and Loess. Beijing: Science Press,1958. 101~144
- 3 Burbank D W, Li J J. Age and palaeoclimatic significance of the loess of Lanzhou, North China. *Nature*, 1985, **316**:429~431
- 4 Pye K, Winspear N R, Zhou L P. Thermoluminescence ages of loess and associated sediments in central Nebraska, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1995, **118** (1~2):73~87
- 5 Rodbell D T, Forman S L, Pierson J et al. Stratigraphy and chronology of Mississippi Valley loess in western Tennessee. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, **109** (9):1134~1148
- 6 乔彦松,郭正堂,郝青振等. 皖南风尘堆积-土壤序列的磁性地层学研究及其古环境意义. 科学通报,2003, **48** (13):1465~1469  
Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen et al. Loess-soil sequences in Southern Anhui Province: Magnetostratigraphy and paleoclimatic significance. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (19):2088~2093
- 7 曹家欣,李培英,石宁. 山东庙岛群岛的黄土. 中国科学(B辑),1987,(10):1116~1122  
Cao Jiabin, Li Peiying, Shi Ning. Study on the loess of Miaodao islands in Shandong province. *Scientia Sinica (Series B)*, 1988, **31** (1):120~128
- 8 Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, **416**:159~163
- 9 鹿化煜,安芷生,王晓勇等. 最近14Ma青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据. 中国科学(D辑),2004, **34** (9):855~864  
Lu Huayu, Wang Xiaoyong, An Zhisheng et al. Geomorphologic evidence of phased uplift of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since 14 million years ago. *Science in China (Series D)*, 2004, **47** (9):822~833
- 10 Hao Q Z, Guo Z T. Magnetostratigraphy of a Late Miocene-Pliocene loess-soil sequence in the western Loess Plateau in China. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31** (9):L09209, doi: 09210.01029/02003GL019392
- 11 Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature*, 1982, **300**:431~433
- 12 Sun D H, An Z S, Shaw J et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic significance of Late Tertiary eolian sequences in the Chinese Loess Plateau. *Geophysical Journal International*, 1998, **134** (1):207~212
- 13 Ding Z, Yu Z, Rutter N W et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quaternary Science Reviews*, 1994, **13** (1):39~70
- 14 Pécsi M. Loess is not just the accumulation of dust. *Quaternary*

- International*, 1990, 7(18): 1~21
- 15 Pye K. The nature, origin and accumulation of loess. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14(7~8): 653~667
  - 16 Kemp R A. Pedogenic modification of loess: Significance for palaeoclimatic reconstructions. *Earth-Science Reviews*, 2001, 54(1~3): 145~156
  - 17 Guo Z T, Peng S Z, Hao Q Z *et al.* Origin of the Miocene-Pliocene Red-Earth Formation at Xifeng in Northern China and implications for paleoenvironments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 170(1~2): 11~26
  - 18 杨景春等著. 中国地貌特征与演化. 北京: 海洋出版社, 1993. 132~138  
Yang Jingchun *et al.* Features and Evolution of Landforms in China. Beijing: China Ocean Press, 1993. 132~138
  - 19 Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits. London: Academic Press, 1987. 1~334
  - 20 Vandenberghe J, Lu H Y, Sun D H *et al.* The Late Miocene and Pliocene climate in East Asia as recorded by grain size and magnetic susceptibility of the Red Clay deposits (Chinese Loess Plateau). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 204(3~4): 239~255
  - 21 牛振华, 王占礼, 黄新会. 我国黄土地区土壤侵蚀研究历史与进展. 水土保持研究, 2004, 11(4): 169~173  
Niu Zhenhua, Wang Zhanli, Huang Xinhui. Research history and progress in soil erosion in loess regions of China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 169~173
  - 22 Kemp R A, Derbyshire E, Meng X M *et al.* Pedosedimentary reconstruction of a thick loess-paleosol sequence near Lanzhou in North-central China. *Quaternary Research*, 1995, 43(1): 30~45
  - 23 Kemp R A, Derbyshire E, Meng X M. A high-resolution micromorphological record of changing landscapes and climates on the western Loess Plateau of China during oxygen isotope stage 5. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 170(1~2): 157~169
  - 24 Múcher H J, Ploey J D. Experimental and micromorphological investigation of erosion and redeposition of loess by water. *Earth Surface Processes*, 1977, 2(2~3): 117~124
  - 25 Bresson L M, Boiffin J. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 1990, 47: 301~325
  - 26 郭正堂, Fedoroff N, 刘东生. 130ka 以来黄土-古土壤序列的典型微形态特征与古气候事件. 中国科学(D 辑), 1996, 26(5): 392~398  
Guo Zhengtang, Fedoroff N, Liu Tungsheng. Micromorphology of the loess-paleosol sequence of the last 130ka in China and paleoclimatic events. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(5): 468~477
  - 27 郭正堂. 黄土中记录的末次间冰期前后气候过渡期的古气候行为. 见: 纪念王乃梁先生诞辰 80 周年筹备组编. 地貌与第四纪环境研究文集. 北京: 海洋出版社, 1996. 114~117  
Guo Zhengtang. Behaviour of the glacial-interglacial-glacial transitions recorded in China loess. In: Preparation Group of Commemoration of 80th Anniversary of the Birth of Professor Wang Nailiang ed. Collection of Landform and Quaternary Environment Theses. Beijing: China Ocean Press, 1996. 114~117
  - 28 鹿化煜. 高密度光释光测年揭示的距今约 15~10ka 黄土高原侵蚀事件. 科学通报, 2006, 51(23): 2767~2772  
Lu Huayu, Steven T, Yi Shuangwen *et al.* An erosional hiatus in Chinese loess sequences revealed by closely spaced optical dating. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(18): 2253~2259
  - 29 Stevens T, Armitage S J, Lu H Y *et al.* Sedimentation and diagenesis of Chinese loess: Implications for the preservation of continuous, high-resolution climate records. *Geology*, 2006, 34(10): 849~852
  - 30 Retallack G J. The environmental factor approach to the interpretation of paleosols. In: Amundson R *et al.* eds. Factors of Soil Formation: A Fiftieth Anniversary Retrospective. *Soil Science Society of America Special Publication*, 1994, 33: 31~64
  - 31 Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 1976, 194: 1121~1132
  - 32 van Vliet-Lanoë B. Frost and soils: Implications for paleosols, paleoclimates and stratigraphy. *Catena*, 1998, 34(1~2): 157~183
  - 33 Chlachula J. The Siberian loess record and its significance for reconstruction of Pleistocene climate change in North-central Asia. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(18~19): 1879~1906
  - 34 Péwé T L. Quaternary geology of Alaska. Geological Survey Professional Paper 835. U. S. Government Printing Office, 1975. 1~145
  - 35 Washburn A L. Permafrost features as evidence of climatic change. *Earth-Science Reviews*, 1980, 15(4): 327~402
  - 36 郭旭东, 严富华, 金增信. 北京西山的冰缘期和更新世自然环境. 冰川冻土, 1991, 13(2): 159~167  
Guo Xudong, Yan Fuhua, Jin Zengxin. Periglacial periods and Pleistocene environment in Western Mountain of Beijing, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, 13(2): 159~167
  - 37 王克鲁, 胡碧茹, 严富华等. 北京斋堂盆地黄土结构构造与形成环境. 北京地质, 1998, (1): 1~10  
Wang Kelu, Hu Biru, Yan Fuhua *et al.* Texture and structure and palaeoenvironment of loess in Zhaitang Basin of Beijing. *Beijing Geology*, 1998, (1): 1~10
  - 38 袁宝印, 巴特尔, 崔久旭等. 黄土区沟谷发育与气候变化的关系(以洛川黄土塬区为例). 地理学报, 1987, 42(4): 328~337  
Yuan Baoyin, Ba Te'er, Cui Jiuxu *et al.* The relationship between gully development and climatic changes in the loess Yuan region: Examples from Luochuan, Shaanxi Province. *Acta Geographica Sinica*, 1987, 42(4): 328~337
  - 39 Porter S C, An Z S. Episodic gullying and paleomonsoon cycles on the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 2005, 64(2): 234~241
  - 40 张云翔, 薛祥煦. 甘肃武都龙家沟三趾马动物群化石的埋藏特点及该地区“三趾马红层”的成因. 科学通报, 1995, 40(19): 1782~1784  
Zhang Yunxiang, Xue Xiangxu. Taphonomic characteristics of Longjiagou *Hipparion* Fauna and genesis of 'Hipparion Red Clay' in Wudu Country, Gansu Province. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(3): 238~241

- 41 薛祥煦,张云翔,岳乐平. 从哺乳动物化石看中国黄土高原红黏土-黄土系列的气候环境及演变. *中国科学(D辑)*,2006,36(4):359~369  
Xue Xiangxu, Zhang Yunxiang, Yue Leping. Paleoenvironments indicated by the fossil mammalian assemblages from red clay-loess sequence in the Chinese Loess Plateau since 8.0MaB. P. *Science in China (Series D)*,2006,49(5):518~530
- 42 张宗祜,张之一,王芸生著. 中国黄土. 北京:地质出版社,1989. 196~197  
Zhang Zonghu, Zhang Zhiyi, Wang Yunsheng. *Chinese Loess*. Beijing: Geological Publishing House,1989. 196~197

## SYN- AND POST- DEPOSITIONAL MODIFICATION OF LOESS DEPOSITS AND THEIR PALEOENVIRONMENTAL SIGNIFICANCE

Yin Qiuzhen<sup>①③</sup> Xiao Guoqiao<sup>②③</sup> Guo Zhengtang<sup>①</sup> Ge Junyi<sup>②③</sup>  
Hao Qingzhen<sup>①</sup> Yuan Baoyin<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; <sup>②</sup>State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075; <sup>③</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

### Abstract

Loess-paleosol sequences are widely used for paleoenvironmental reconstructions. To be sub-aerial deposit, loess or soil was exposed to earth surface, and was subject to syn-depositional and post depositional modifications by various processes.

In this paper, some commonly found syn-depositional and post-depositional features of loess deposits are studied mainly based on field and micromorphological investigations on the eolian deposits in Northern China. Since most of these features are formed under specific environmental conditions, they may be used as indicators for paleoenvironmental reconstruction. Meanwhile, such modifications may affect the significance of some climate proxies that are frequently used in loess studies. Consequently, their influence should be taken into considerations in the climate interpretations.

Firstly, we show that the lowest parts of some loess-soil sections usually contain water-reworking features. This is because the substratum of loess deposits was never flat enough so that eolian dust deposited in the earliest stage was more or less affected by surface water. These processes may lead to a progressive flattening of the land surface, resulting in the formation of typical loess-soil sequences. Vegetation degradations under extremely dry conditions may cause eolian and sheet-water erosions of loess deposits. These features are highly common in the loess deposits in Northern China. Wind and sheet-water erosion features are most frequently observed across the boundaries between loess and soil layers, suggesting that climate transitions at orbital scales are usually marked by a severe dry event, leading to vegetation degradation.

Freeze-thaw features are much less common in the loess deposits in China than in the loess of Europe and Americas, probably due to the much drier conditions. However, some weak frost features are observed in the northern and northwestern Loess Plateau while they are absent in the southern Loess Plateau. These are consistent with the present-day climate pattern in the region.

A number of post-depositional modifications are also described as they may influence the significance of some climate proxies. Also, because some features of the loess-soil sequences are easy to be confused with the modifications described above. Their basic morphological properties, formation processes and their significance are also discussed.

**Key words** loess, syn-depositional processes, post-depositional processes, micromorphology, paleoenvironment