



论文

华家岭山地中新世风成红土堆积与西部黄土高原地貌演化

詹涛^{①②}, 郭正堂^{①*}, 吴海斌^①, 葛俊逸^①, 周鑫^①, 武春林^{①②}, 曾方明^{①②}^① 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;^② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: ztguo@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2010-04-25; 接受日期: 2010-07-14

国家自然科学基金(批准号: 40730104)和中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX2-YW-Q1-15, KZCX2-YW-117)资助

摘要 中国西北的新生代地貌演化与喜马拉雅-青藏高原隆升过程有密切关系, 因而受到学术界的广泛关注. 这些信息往往在各类沉积序列中得到保存. 本文对西部黄土高原华家岭山地相对平坦部位覆盖的中新世风成红土堆积进行研究. 所选剖面(NL-VII)厚 134.7 m, 至少包含 110 层野外可识别的古土壤, 其磁化率地层与秦安地区的 QA-I 中新世风成红土剖面可以进行详细的旋回对比, 指示了 NL-VII 剖面的年龄为 18.7~11.8 Ma, 与小哺乳动物化石指示的年龄段一致. 上述结果进一步证明了中新世风尘堆积广泛分布的特征, 同时也表明, 包括华家岭山地和秦安等地基岩高地抬升在内的西部黄土高原地貌分异过程发生于中新世早期. 山地上保存的基本连续的风尘堆积序列指示了华家岭山地基底在 18.7~11.8 Ma 期间并未经历强烈的构造运动, 否则会导致风尘堆积的显著侵蚀. 由于该地区紧邻青藏高原东北缘, 我们认为, 上述风成红土序列指示了中新世约 18~12 Ma 期间是青藏高原东北部构造相对稳定的一个时期.

关键词中新世
风成红土
华家岭
青藏高原
新生代地貌演化

中国北方的第四纪黄土-古土壤序列是亚洲和全球气候变化良好的陆相记录^[1]. 对六盘山以东(东部黄土高原)下伏于第四纪黄土的三趾马红粘土的成因与地层年代学研究, 将中国的风尘堆积序列延伸至约 8 Ma^[2,3]. 近 10 年来, 对六盘山以西的西部黄土高原的调查又将其扩展到早中新世^[4-8]. 上述序列一起构成了约 22 Ma 以来全球独有的、基本连续的气候环境变化记录.

由于风尘堆积必须有大范围的粉尘物源区和搬

运环流, 而大量古土壤的形成则需要带来水汽的环流, 西部黄土高原的中新世风尘堆积指示了亚洲内陆干旱和亚洲季风主控环境至少在中新世初期就已经形成, 导致亚洲环境格局从行星风系主控型向季风主控型的转变^[5]. 以往的数值模拟研究把上述重大环境变化与青藏高原隆升^[9-11]和副特提斯海闭合^[10-12]联系起来. 中国北方 22 Ma 以来基本连续的风尘堆积标志着亚洲内陆干旱和季风主控环境自渐新世-中新世之交形成后一直没有消失, 并持续发展至今^[5].

引用格式: Zhan T, Guo Z T, Wu H B, et al. Thick Miocene eolian deposits on the Huajialing Mountains: The geomorphic evolution of the western Loess Plateau. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4051-7

出于两方面的原因, 风尘堆积不仅包含丰富的气候环境变化信息, 而且对区域地貌演化和构造运动具有良好的指示意义: (1) 典型风尘堆积的形成和保存均需要相对平缓的基底正地形, 后者在年代上一定老于上覆风尘堆积; (2) 风尘堆积对侵蚀极为敏感, 任何明显的构造运动(如基底的褶皱变形)和地貌变化(如侵蚀基准面下降)均可能导致大规模的侵蚀. 因此, 对西部黄土高原不同地貌单元上风尘堆积的分布特征、年代及序列完整性的研究, 能够揭示中国西部新近纪地貌演化的信息, 而后者又与青藏高原的隆升历史有密切的联系.

我们过去的研究揭示出, 中新世风尘堆积在西部黄土高原秦安地区的基岩高地地区^[4,6,7]、西秦岭山地内(ML-V)^[5]和秦岭南坡(属长江流域)山间盆地(NL-VI)^[8]的边缘高地上均有分布, 但其在更北部地区的出露和分布情况仍然有待研究. 最近, 我们对秦安地区以北的华家岭山地开展了调查, 发现了广泛分布的新近纪风尘堆积. 本文选择出露较好的典型剖面(NL-VII, 厚 134.7 m)开展研究, 并讨论该区风尘堆积对西部黄土高原新近纪地貌演化及青藏高原隆升的指示意义.

1 材料与方法

华家岭山地位于六盘山以西的西部黄土高原, 地势相对平坦(图 1), 海拔变化于 2100~2500 m 之间, 常被作为“陇中盆地”的北界. 但大地构造研究表明, 华家岭隶属于祁连山造山带的南段^[17,18], 后者以天水-武山附近的西秦岭北缘断裂带(NFFWQ)为界^[13~15]. 山地的基底主要由华力西期的花岗岩和震旦系的变质岩组成. 附近的海原断裂和西秦岭北缘断裂被认为是青藏高原向东北扩展的重要边界断裂^[19,20]. 自晚白垩纪以来, 该区受鄂尔多斯地块向南的旋转位移和秦岭向东的侧向推压联合约束, 产生强烈的挤压变形, 形成了一系列北西向褶皱和相关的断裂^[21]. 在华家岭东北部发育一条压扭性断裂, 将其与静宁盆地分隔^[22]. 山地的平坦部位保存有厚度不等的新近纪风尘堆积, 多为第四纪黄土所覆盖.

本文研究的NL-VII剖面(35°26'N, 105°10'E)地处华家岭山地东缘的通渭县董家寨子村附近, 向南距我们过去研究的QA-I中新世风成红土剖面^[4]约 51 km, 距秦岭南坡的NL-VI剖面^[8]约 154 km. 剖面顶

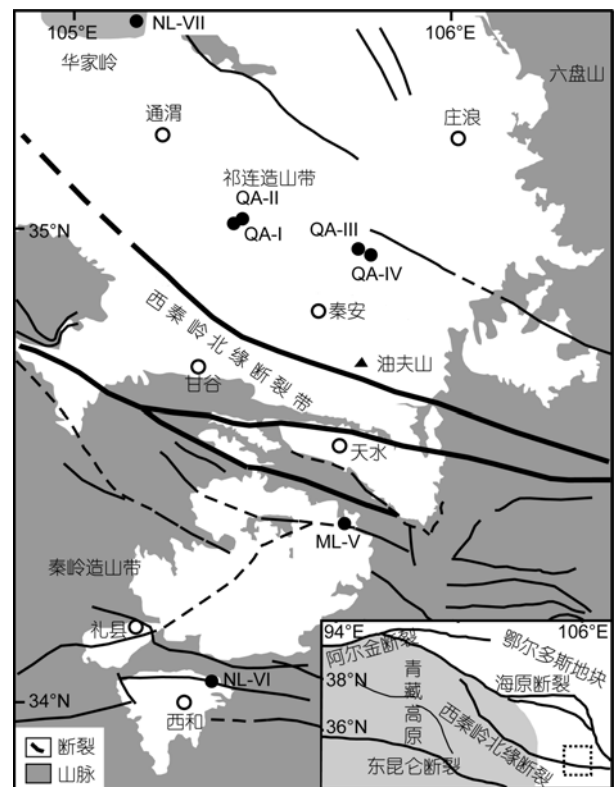


图 1 NL-VII 剖面的地理位置及大地构造背景
据文献[13~16]绘制. 右下插图中虚线框指示主图的范围

部海拔高程约为 2170 m. 我们在野外首先对剖面进行了详细描述, 并采集了小哺乳动物化石, 以确定剖面的大致年代. 对剖面以 10 cm 间距采集散样 1347 个, 用于磁化率地层的建立. 对代表性黄土与古土壤层采集了未扰动定向样品磨制土壤微形态观察片, 并在显微镜下研究了微形态特征. 对 134 个散样(1 m 间距)进行了粒度分析. 所有分析仪器和方法见文献[4].

2 形态学和沉积学特征

NL-VII剖面野外可以识别出 110 个清晰的黄土-古土壤旋回(图 2(a)). 其中, 黄土层多呈黄棕色(10YR 5/4~8), 具块状结构, 一般厚 0.3~1.3 m; 古土壤层多为深棕色(7.5YR 3/2~4), 具棱块状结构, 厚度一般为 0.3~1.0 m. 大部分古土壤的风化层(B)或粘化层(Bt)下部都发育有钙积层(C_{ca}).

显微镜观察显示, 黄土层样品中粒径>10 μm 的粗颗粒矿物主要由石英(50%~60%)、长石和云母

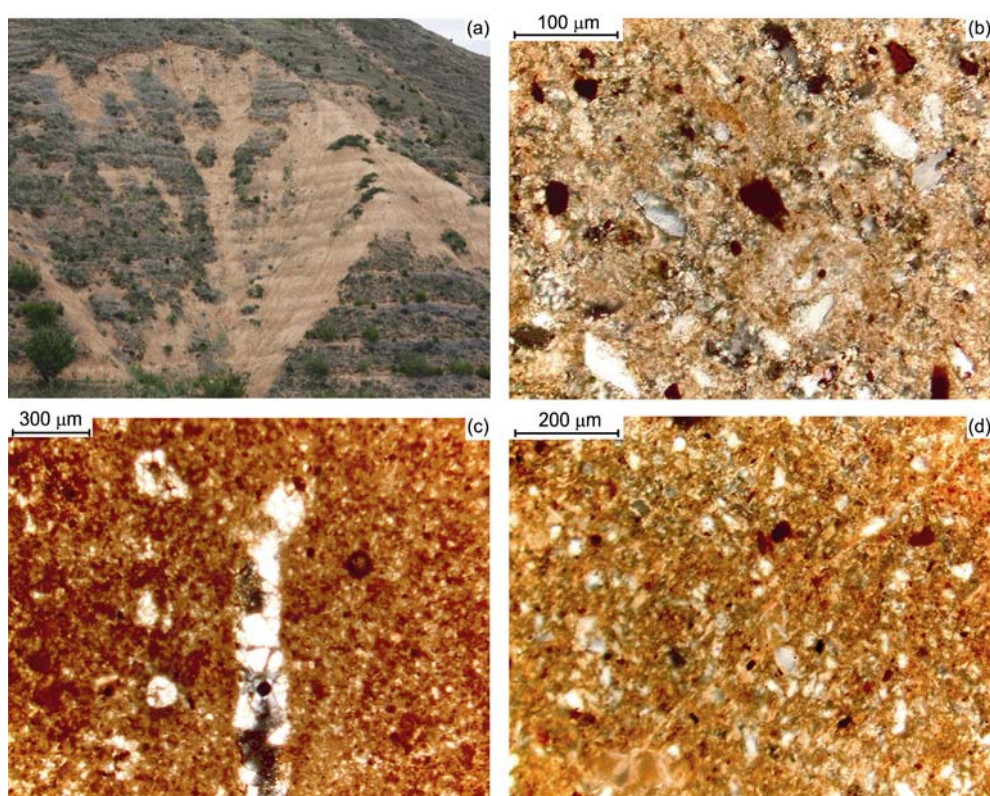


图2 NL-VII剖面的野外及微形态特征

(a) 剖面的野外特征; (b) 黄土层中的颗粒形态(38.6 m 深度, 正交偏光); (c) 孔道中的次生碳酸盐充填(33.6 m 深度, 正交偏光); (d) 古土壤层中的粘粒胶膜(110.4 m 深度, 正交偏光)

(>30%)组成, 其次为辉石和角闪石等, 与第四纪黄土^[1,23]及其他中新世风尘堆积一致^[4,8]。石英颗粒呈不规则的棱角状和次棱角状(图 2(b)), 粒径一般<100 μm , 为典型风尘样品的石英形态特征^[24]。大部分黄土层不同程度地被上覆土壤的钙积层浸润, 基质中碎屑碳酸盐的含量一般为 4%~5%, 呈随机分布。黄土的空隙以孔道为主, 基质中可见明显土壤生物扰动的痕迹。孔道常被次生碳酸盐充填(图 2(c))。上述特征均是典型的成壤特征, 表明黄土层经历了程度不同的成壤作用, 指示了整个序列形成于气下环境。

古土壤中的粗颗粒矿物组成及形态特征与黄土层基本一致, 但平均粒径较相邻黄土层明显偏细。大部分B层的基质不含碎屑碳酸盐。细粒组分(<10 μm)呈褐色, 包含丰富的氧化铁和水氧化铁颗粒。次生碳酸盐以包膜、假包膜和孔隙填充物的形式为主。部分土壤中有粘粒淀积特征, 含量在剖面下部最多可达 5% (图 2(d))。钙积层的基质不同程度地被次生微晶碳酸盐浸润, 导致较高的碳酸盐含量。这些特征证实

了剖面中的红色条带为古土壤, 多为半湿润条件下形成的淋溶土^[25]。

粒度分析表明, NL-VII 剖面中黄土层的粒度分布特征与第四纪黄土及其他新近纪风尘堆积基本相同, 呈双峰分布(图 3(a)和(b))。整个剖面以粉砂颗粒为主, 中值粒径变化于 6~16 μm 之间; >63 μm 组分的含量一般不超过 6%, 平均约为 1.4% (图 3(c))。在 C-M 图中(图 4), NL-VII 剖面的黄土样品与西峰第四纪黄土及 QA-I 剖面的黄土样品呈带状平行于 C=M 线分布, 表明它们具有相同的搬运动力, 是风成堆积的特征。由于本次研究中仅进行了 1 m 间距样品的粒度测试, 无法进行轨道尺度上的磁化率和粒度关系对比, 但从黄土和古土壤层中样品的粒度和磁化率结果来看, 具有古土壤层粒度偏细、磁化率相对较高, 而黄土层粒度相对较粗、磁化率较低的特征, 与第四纪黄土-古土壤序列一致。

综上所述, NL-VII 剖面的沉积特征、矿物组成、颗粒和土壤微形态特征都证实其为典型的风尘堆积。

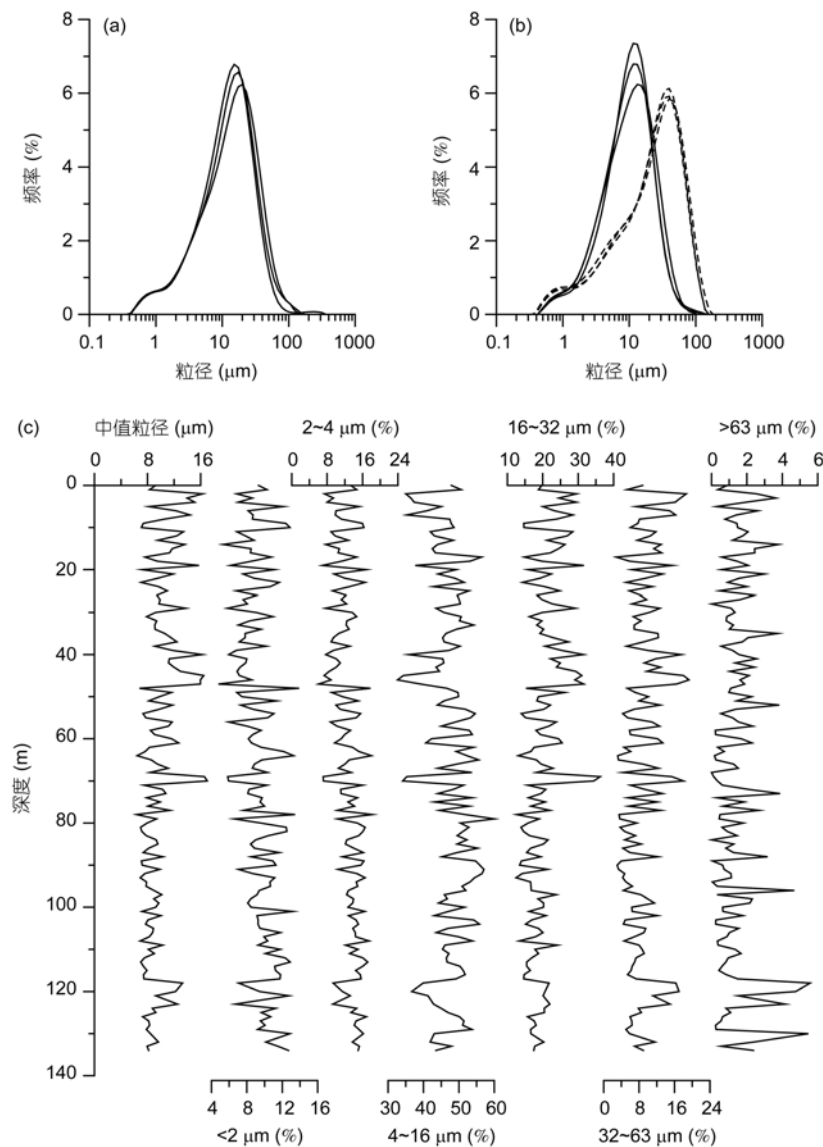


图3 NL-VII剖面的粒度特征及与其他地点风尘堆积的对比

(a) NL-VII剖面代表性黄土样品的粒度分布曲线; (b) QA-I剖面黄土样品^[4](实线)和西峰第四纪黄土样品^[4](虚线)的粒度分布曲线; (c) NL-VII剖面中值粒径及不同粒级的百分含量

3 磁化率地层和剖面年代

NL-VII剖面中找到的小哺乳动物化石如表1所列。其中, 42.1 m深度的*Alloptox gobiensis*和*Plesiodipus leei*主要出现在中中新统地层中, 估计年代约为14~12 Ma^[26,27]。76.1 m和100 m深度的*Tachyoryctoides* sp.1与*Tachyoryctoides* sp.2见于内蒙苏尼特左旗敖尔班组中, 时代为早中新世晚期^[27], 可与欧洲哺乳动物分期的MN3~MN5对应^[28], 年代约为19~16 Ma。因

此, 小哺乳动物化石组合显示NL-VII剖面的地层年代为早中新世-中晚中新世。

到目前为止, 我们在西部黄土高原已建立了6个中新世风尘堆积剖面的地层框架^[4~8], 其中包括秦安郭嘉镇附近的QA-I^[4]和QA-II^[4]剖面、莲花乡附近的QA-III^[6]和QA-IV^[7]剖面、秦岭山间盆地的ML-V^[5]剖面及秦岭南坡的NL-VI^[8]剖面(图1)。这些剖面的磁化率地层具有很好的空间可对比性, 进一步表明中新世风尘堆积的磁化率可以作为远距离地层对比

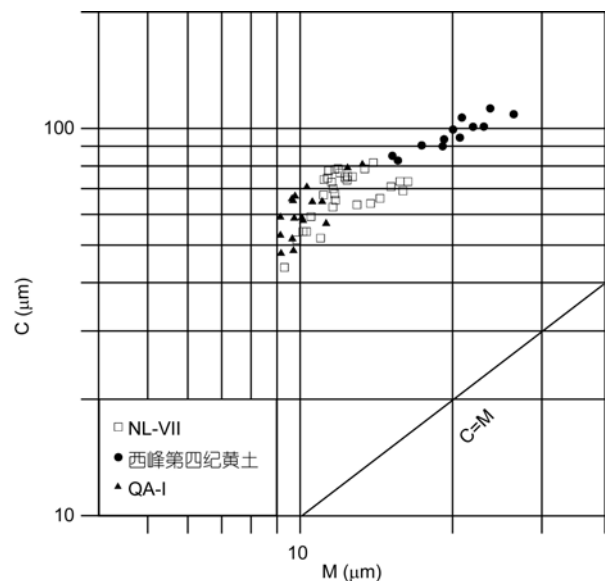


图 4 NL-VII剖面、西峰第四纪黄土^[4]和QA-I中新世黄土样品^[4]的C-M图

表 1 NL-VII 剖面的小哺乳动物化石

深度(m)	化石组合(拉丁文名称)
42.1	<i>Alloptox gobiensis</i> <i>Plesiodipus leei</i>
75.2	<i>Cervidae</i> indet.
75.6	<i>Tachyoryctoides</i> sp.1
76.1	<i>Erinaceidae</i> indet.
78.6, 78.7	<i>Ochotonidae</i> indet.
100	<i>Tachyoryctoides</i> sp.2

的有效工具^[4-7]。古土壤的磁化率高于相邻黄土层,而粒度比黄土层明显偏细,与第四纪黄土-古土壤序列的磁化率和粒度波动特征相似。

上述不同地区中新世风成红土剖面的磁化率地层具有高度相似的特征:约 18.3 Ma 之前,磁化率值中等,且有清晰的旋回特征;18.3~17.1 Ma 之间,磁化率值较低且波动幅度较小;17.1~16.7 和 14.2~10 Ma 时段,磁化率特征总体上与 18.3 Ma 之前相似。最为特征的是,16.7~14.2 Ma 的磁化率值在 22~10 Ma 时段内最高,波动幅度也最大。

NL-VII 剖面的磁化率清晰地显示出了上述特征(图 5(a)),从而能够通过 QA-I 磁化率地层的对比获得关键的年龄控制点,建立初步的年代标尺。对两剖面进一步的考证可以发现, NL-VII(图 5(c))与 QA-I(图 5(d))的磁化率可以进行逐层对比,据此可以获得 NL-VII 剖面较精细的年代标尺。对比结果指示了

NL-VII 的年代为 18.7~11.8 Ma,与小哺乳动物化石组合指示的年代范围(表 1)基本一致,进一步证实了磁化率是中新世风尘堆积地层年代对比的可靠工具。

4 华家岭山地中新世风尘堆积的古地理意义

各类证据均表明,上述披覆于华家岭山地的沉积序列是典型的风尘堆积,年代为中新世 18.7~11.8 Ma。NL-VII 剖面的磁化率与已发表的 QA-I 可以进行逐层对比,表明磁化率在大范围内可作为西部黄土高原风尘堆积地层对比的有效工具。华家岭山地近乎连续的中新世风尘堆积对西部黄土高原的古地理演化具有重要的指示意义。

NL-VII距目前已发现的最南部的NL-VI^[8]为 154 km (图 1),二者之间有QA-I^[4], QA-II^[4], QA-III^[6], QA-IV^[7]和ML-V^[5]。这些大范围分布的中新世风尘堆积说明,六盘山以西地区在早中新世就已形成了一个红色调黄土-古土壤序列覆盖的雏形黄土高原,从而进一步证明了亚洲内陆干旱和季风主控环境在早中新世即已出现。任何局部的风尘源区都无法在时间和空间上形成如此规模的风尘堆积。

一些学者常将六盘山以西秦岭和华家岭山地之间的广大地区称为“陇中盆地”,其北界即为华家岭。但是,过去大量的构造/地貌研究^[13-15]将这个广大地区划分为三个构造单元,即南部的秦岭造山带(包括西和与礼县盆地)、天水附近的西秦岭北缘断裂带(NFFWQ)(其中包括天水盆地)和北部的祁连造山带(包括秦安地区)(图 1)。这些不同的构造和地貌单元为出露或半出露的基岩高地所分隔,如天水盆地与秦安地区之间的油夫山。

该区的新近纪沉积分布与上述构造背景具有高度一致性,说明新生代的构造活化并没有显著改变先前的宏观构造格局。秦岭造山带内的山间盆地主要发育河湖相沉积,而盆地边缘的高地上则披覆了中新世-上新世的风尘堆积,如ML-V(15.41~11.01 Ma)^[5]和NL-VI(约 10~4 Ma)^[8]。在祁连造山带内,风尘堆积从早中新世开始披覆于基岩高地上,如QA-I(22~6.2 Ma)^[4], QA-II(21.6~7.6 Ma)^[4], QA-III(19.6~11.35 Ma)^[6]和QA-IV(18.5~11.6 Ma)^[7],而在高地间的盆地中则主要发育河湖相沉积。天水附近的西秦岭北缘断裂带等更低洼地区则以河湖相沉积和次生黄土堆积^[29]为主。

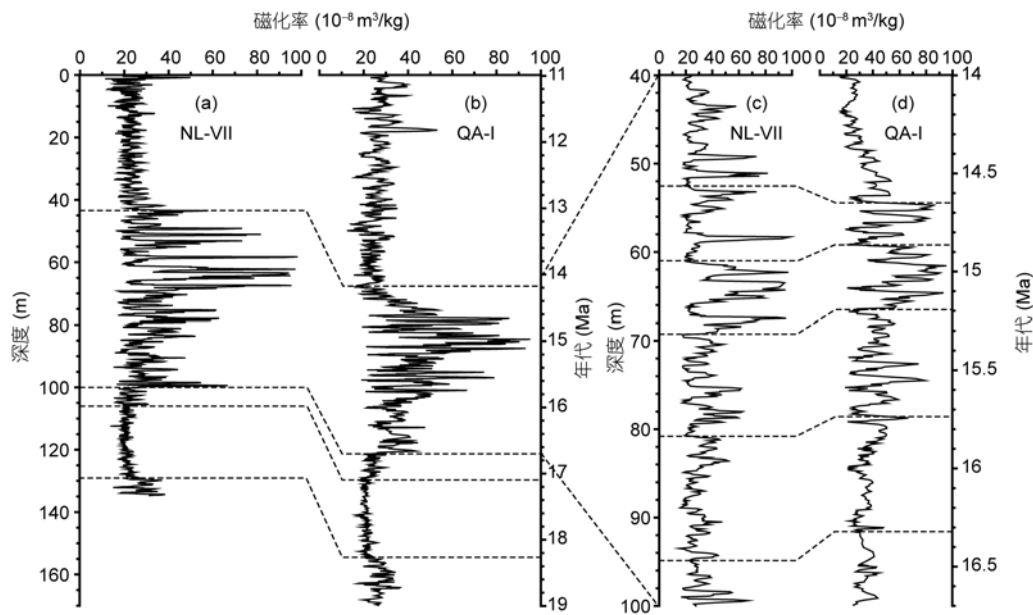


图5 NL-VII剖面与QA-I剖面的磁化率地层对比

研究区内新近纪沉积物的分布清晰地指示了中生代构造对该区的新近纪构造/地貌格局的控制。这同时也说明,西秦岭北缘断裂带以北(包括华家岭和秦安地区的基岩高地等)黄土堆积的基底地形在早中新世就已经形成,因为典型的风尘堆积只能形成于正地形之上。

尽管西部黄土高原的新近纪风尘堆积已被广泛认可,但也有学者^[30]基于陇中地区中新世为统一大盆地的假设,认为当时全部为冲洪积物充填,直到第四纪前没有风尘堆积,包括QA-I在内的细粒沉积是泥坪/远端扇和浅湖沉积,秦岭和华家岭是物源山地。然而,与QA-I同类型的沉积序列分布于秦岭南坡(NL-VI,属长江流域)^[8]、秦岭山顶(ML-V)^[5]、秦安地区的基岩高地^[4,6,7]及华家岭山顶(本文的NL-VII)上,从根本上排除了上述解释^[30]的可能,因为泥坪/远端扇沉积不能堆积在它们的物源山地上。由于对研究区沉积物的分布、接触关系、沉积特征和地层年代等研究的不足,或许亦因第三纪风尘堆积和第四纪黄土在特征上的差异,该模式^[30]把不同地貌单元内不同成因的小范围沉积物对比为一个“冲洪积扇-远端扇”体系,而未考虑大量有关风尘沉积存在的各类证据,包括对风尘堆积具指相意义的陆生软体动物化石组合^[4-8,29,31-36]。

模式的主要依据是一些年代不详或没有年代学研究、距QA-I数十公里的河湖相堆积和QA-I附近次生黄土等的描述。这些描述及所依托的标本和显微沉积特征^[30]多数没有地名和深度信息而含糊不清,无法评估或讨论,且容易导致混淆,不能作为讨论QA-I成因和研究区沉积地质模式的依据。模式的另一个缺陷是缺乏冲洪积扇主体的证据,把陇中广泛分布的各类细粒沉积解释为泥坪/远端扇沉积而只把西秦岭北缘断裂带内甘泉附近范围很小、年代不详、虽包含砾石层但主体为黏土和砂的一套堆积解释为扇的主体;甘泉南部距秦岭更近的大范围细粒沉积不支持这种解释。我们对研究区沉积物的空间分布已有较详细的讨论和制图^[29,35]。迄今在黄土高原以外的青藏高原东北缘^[31]和准格尔盆地^[36]报道的新近纪风尘堆积也从根本上与该模式的结论冲突。

虽然水成沉积序列在空间上亦可以对比,但我们研究的这批数百万年到上千万年的沉积序列批覆于大范围内不同海拔、不同地貌部位(包括属长江流域的秦岭南坡^[8]、秦岭山顶^[5]、秦安地区^[4,6,7]和华家岭山地),且在岩性、地层年代、磁化率和粒度序列上^[5]具有高度的空间可对比性(图5),或许只有海洋沉积可以实现,而在陆地上则是风尘堆积独有的特

征. 研究区内不同类型沉积物的共存指示了中新世初的陇中地区已经发生了明显的地形分异, 在高地上形成风尘堆积序列, 盆地中发育河湖相沉积. 这种沉积多样性与第四纪黄土高原完全类似. 从这个意义上讲, 西秦岭和华家岭山地之间的广大地区不宜称陇中盆地, 而称为陇中地区比较合适.

风尘堆积是极易被侵蚀的沉积物, 华家岭上贯穿 18.7~11.8 Ma 的连续风尘堆积序列还有另外两方面的重要意义. 首先, 序列的连续性说明此期间的华家岭处于比较稳定的构造环境, 使 NL-VII 序列得以连续沉积, 且未遭受明显的侵蚀. 第二, 从早中新世至今, 华家岭山地的基底并未发生过明显的褶皱变形, 也未经历明显的侵蚀基准面变化, 否则其上的风尘堆积必然会遭受严重的侵蚀或改造. 由于华家岭邻近青藏高原的东北缘, 我们认为上述堆积指示了 18.7~11.8 Ma 期间青藏高原东北部并未发生大规模的构造变形作用.

现今华家岭上的地形以丘状地貌为主. 我们的调查显示, 新近纪风尘堆积构成了丘陵的主体, 顶部多被第四纪黄土覆盖. 我们的调查未发现 11.8 Ma 之后的新近纪风尘堆积, 这表明 11.8 Ma 后该区发生了一次重要的侵蚀事件. 大致同时代的侵蚀在西秦岭地区^[5,8]和秦安地区^[4,6,7]的中新世风尘堆积序列中均存在, 指示了事件具有明显的大区域意义. 我们认为, 该侵蚀事件可能与中新世晚期青藏高原东北部的构

造不稳定性^[37~39]有关.

5 结论

本文对西部黄土高原华家岭山地上厚层风尘堆积 (NL-VII 剖面)进行了详细的成因和地层年代学研究, 得到如下结论.

(1) 剖面的野外和微形态特征、粒度组成及磁化率等均指示了 NL-VII 为典型的风尘堆积序列. 其磁化率地层与已发表的 QA-I 剖面可以逐层对比, 从而确定了 NL-VII 剖面的年代为 18.7~11.8 Ma, 与小哺乳动物化石指示的年代范围一致.

(2) 研究结果进一步揭示出中新世风尘红土堆积广泛分布的特征, 也进一步证实了它们的成因及其对亚洲内陆型干旱和季风主控型环境的指示意义^[5]. 华家岭山地上厚层的风尘堆积序列指示了包括华家岭、秦安地区基岩高地抬升在内的西部黄土高原地形分异至少发生于早中新世.

(3) 基本连续完整的 NL-VII 风尘堆积序列表明, 华家岭地区在 18.7~11.8 Ma 期间一直处于较为稳定的构造环境. 由于该区邻近青藏高原的东北缘, 这种稳定性指示了青藏高原东北部在该时期并未发生强烈的构造变形. 约 11.8 Ma 后该区发生了一次显著的黄土侵蚀事件, 可能与青藏高原晚中新世的构造不稳定性有关.

致谢 感谢郑绍华研究员对剖面中发掘的小哺乳动物化石的鉴定和审稿人提出的修改意见.

参考文献

- 1 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985
- 2 Sun D H, Shaw J, An Z S, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2 Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 85—88
- 3 Ding Z L, Yang S L, Hou S S, et al. Magnetostratigraphy and sedimentology of the Jingchuan red clay section and correlation of the Tertiary eolian red clay sediments of the Chinese Loess Plateau. *J Geophys Res*, 2001, 106: 6399—6407
- 4 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
- 5 Guo Z T, Sun B, Zhang Z S, et al. A major reorganization of Asian climate regime by the early Miocene. *Clim Past*, 2008, 4: 153—174
- 6 Hao Q Z, Guo Z T. Magnetostratigraphy of an early-middle Miocene loess-soil sequence in the western Loess Plateau of China. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L18305, doi: 10.1029/2007GL031162
- 7 刘进峰, 郭正堂, 郝青振, 等. 甘肃秦安糜子湾剖面中新世风尘堆积的磁性地层学研究. *第四纪研究*, 2005, 25: 503—509
- 8 Ge J Y, Guo Z T. Neogene eolian deposits within the West Qinling Mountains: Climatic and tectonic implications. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1483—1487
- 9 Ruddiman W F, Prell W L, Raymo M E. Late Cenozoic uplift in southern Asia and the American West: Rationale for general circulation

- modeling experiments. *J Geophys Res*, 1989, 94: 18379—18391
- 10 Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, et al. What triggers the transition of palaeoenvironmental patterns in China, the Tibetan Plateau uplift or the Paratethys Sea retreat? *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2007, 245: 317—331
 - 11 Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, et al. Impacts of tectonic changes on the reorganization of the Cenozoic paleoclimatic patterns in China. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 257: 622—634
 - 12 Ramstein G, Fluteau F, Besse J, et al. Effect of orogeny, plate motion and land-sea distribution on Eurasian climate change over the past 30 million years. *Nature*, 1997, 386: 788—795
 - 13 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 1989
 - 14 Meng Q R, Zhang G W. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 1999, 27: 123—126
 - 15 Meng Q R, Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 2000, 323: 183—196
 - 16 邓启东. 中国活动构造图(1:4000000). 北京: 地震出版社, 2007
 - 17 张彦杰, 马惠萍, 张宏斌. 甘肃华家岭-葫芦河一带韧性剪切带的发现及其地质意义. *西北地质*, 2003, 36: 24—28
 - 18 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 早古生代北秦岭-北祁连结合部构造格局的地层及构造岩浆事件约束. *西北地质*, 2008, 41: 1—21
 - 19 王志才, 张培震, 张广良, 等. 西秦岭北缘构造带的新生代构造活动——兼论对青藏高原东北缘形成过程的指示意义. *地质学前沿*, 2006, 13: 119—135
 - 20 Zheng D W, Zhang P Z, Wan J L, et al. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 248: 198—208
 - 21 刘锁旺, 甘家思, 姚运生, 等. 西秦岭北缘断裂和海原断裂的走滑转换变形及其与陇山地块的相互作用. *地壳形变与地震*, 1997, 17: 73—83
 - 22 地质部甘肃省地质局第二区域地质测量队. 静宁幅地质图(1:200000)及区域地质测量报告. 酒泉: 五四三厂出版社, 1971
 - 23 郭正堂, Fedoroff N, 刘东生. 130 ka 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: 地球科学*, 1996, 26: 392—398
 - 24 Pye K, Sperling C H B. Experimental investigation of silt formation by static breakage processes: The effect of temperature, moisture and salt on quartz dune sand and granitic regolith. *Sedimentology*, 1983, 30: 49—62
 - 25 FAO-UNESCO. *Soil Map of the World, 1:5,000,000 Vol. I, Legend*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1974
 - 26 邱铸鼎. 内蒙古中新世小哺乳动物群. 北京: 科学出版社, 1996
 - 27 Wang X M, Qiu Z D, Li Q, et al. A new early to late Miocene fossiliferous region in central Nei Mongol: Lithostratigraphy and biostratigraphy in a eorban strata. *Vertebr Palasiat*, 2009, 47: 111—134
 - 28 Mein P. Updating of MN zones. In: Lindsay E H, Fahlbusch V, Mein P, eds. *European Neogene Mammal Chronology*. New York: Plenum Press, 1990. 73—90
 - 29 袁宝印, 郭正堂, 郝青振, 等. 天水-秦安一带中新世黄土堆积区沉积-地貌演化. *第四纪研究*, 2007, 27: 161—171
 - 30 Alonso-Zarza A M, Zhao Z, Song C H, et al. Mudflat/distal fan and shallow lake sedimentation (upper Vallesian-Turolian) in the Tianshui Basin, Central China: Evidence against the late Miocene eolian loess. *Sediment Geol*, 2009, 222: 42—51
 - 31 鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 等. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34: 855—864
 - 32 Li F J, Wu N Q, Pei Y P, et al. Wind-blown origin of Dongwan late Miocene-Pliocene dust sequence documented by land snail record in western Chinese Loess Plateau. *Geology*, 2006, 34: 405—408
 - 33 李丰江, 吴乃琴, Rousseau D D. 黄土高原秦安中新世黄土-古土壤序列的蜗牛化石初步研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 438—444
 - 34 Oldfield F, Hao Q Z, Bloemendal J, et al. Links between bulk sediment particle size and magnetic grain-size: General observations and implications for Chinese loess studies. *Sedimentology*, 2009, 56: 2091—2106, doi: 10.1111/j.1365-3091.2009.01071.x
 - 35 Guo Z T, Ge J Y, Xiao G Q, et al. Comment on “Mudflat/distal fan and shallow lake sedimentation (upper Vallesian-Turolian) in the Tianshui Basin, Central China: Evidence against the late Miocene eolian loess”. *Sediment Geol*, 2010, doi: 10.1016/j.sedgeo.2010.06.019
 - 36 Sun J M, Ye J, Wu W Y, et al. Late Oligocene-Miocene mid-latitude aridification and wind patterns in the Asian interior. *Geology*, 2010, 38: 515—518
 - 37 Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet. *Science*, 1992, 255: 1663—1670
 - 38 Molnar P. Mio-Pliocene growth of the Tibetan Plateau and evolution of East Asian climate. *Palaeontol Electron*, 2005, 8: 1—23
 - 39 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论. *第四纪研究*, 2006, 26: 5—13