

DOI: 10.12401/j.nwg.2022046

## 西安凹陷 f12 地裂缝发育区第四系及裂缝沉降特征

史元博<sup>1,2</sup>, 朱兴国<sup>3</sup>, 卢全中<sup>4,5,\*</sup>, 杨利荣<sup>1,2</sup>, 刘聪<sup>4</sup>, 龚方圆<sup>1,2</sup>, 岳乐平<sup>1,2</sup>

(1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 3. 西安市自然资源和规划局, 陕西 西安 710018; 4. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 5. 自然资源部地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 在西安凹陷南缘清凉山地裂缝 f12 两侧钻取了两口超过 400 m 的全取芯井, 笔者对 DZ1 井(420 m)和 DZ2 井(400.5 m)岩心作了沉积学分析, 进行了古地磁、磁化率及粒度测量, 分析了地裂缝沉降特征。结果表明: DZ1 孔岩心包括 0~93 m 黄土-古土壤序列沉积 L2~S11, 缺失上部马兰黄土及 S1, 93 m 以下为三门组河湖相沉积。DZ2 钻孔岩心包括 0~72 m 黄土-古土壤 S1~S9 序列沉积, 缺失上部黑垆土 S0 和马兰黄土 L1, 73 m 以下为三门组河湖相沉积。DZ1 孔岩心和 DZ2 孔岩心的黄土地层层序基本一致, 包括中更新世离石黄土上部及早更新世离石黄土下部, 未见午城黄土。河湖相三门组与午城黄土同时异相, 在两口井都持续沉积至第四纪底界, 并穿时至上新世顶部。两口井岩心均记录了 B/M 界限, J、O、R 极性亚带及 M/G 界限, 这些界线为两口井的地层对比提供了科学依据。其标志层粉砂质黄土层 L9 位置高差为 5 m, 古地磁 B/M 界线位置高差为 4 m, J 亚带位置高差为 8~17 m, O 亚带位置高差为 31~22 m, R 亚带位置高差为 56~47 m, M/G 界线位置高差为 54 m。总体看来, DZ1 孔地层界线和古地磁界线高程都较 DZ2 孔低, 并且越靠下层差距越大。根据地层高差及古地磁界线高差判断, 地裂缝 f12 上盘相对下降 4~54 m。在 DZ1 孔 373.6 m 处发现次裂缝面, 经计算裂缝面倾向南东, 倾角为 77°。研究成果为进一步认识西安凹陷沉积环境, 地裂缝特征及对西安地区防控地裂缝地质灾害具有重要意义。

**关键词:** 地裂缝; 黄土; 三门组; 古地磁年代; 西安凹陷

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0185-12

### Drilling Sedimentation and Subsidence of Ground Fissure (f12) in Xi'an, Shaanxi

SHI Yuanbo<sup>1,2</sup>, ZHU Xingguo<sup>3</sup>, LU Quanzhong<sup>4,5,\*</sup>, YANG Lirong<sup>1,2</sup>, LIU Cong<sup>4</sup>, GONG Fangyuan<sup>1,2</sup>, YUE Leping<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. Xi'an Bureau of Natural Resource and Planning, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 4. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Observation and Research Station of Ground Fissure and Land Subsidence, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Two fully coring wells over 400 m for each have been drilled respectively on both sides of the Qingliangshan ground fissure (f12) situated at the southern margin of the Xi'an depression. Sedimentological analysis and paleomagnetic dating, magnetic susceptibility and grain size measurements on DZ1 (420 m) and

收稿日期: 2022-09-08; 修回日期: 2022-12-08; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目“同沉积作用下地裂缝破裂扩展机理及效应研究”(41877250), 西安市 2021 年度地质灾害综合防治体系建设专群结合监测预警建设项目(五标段)联合资助。

作者简介: 史元博(1996-), 男, 硕士研究生, 第四纪地质学专业。E-mail: 529845225@qq.com。

\* 通讯作者: 卢全中(1971-), 男, 教授, 长期从事地质灾害专业教学与研究。E-mail: dcdgx14@chd.edu.cn。

DZ2 (400.5 m) are made. The ground fissure subsidence characteristics are further analyzed. The results show that the DZ1 exposes loess-paleosol sequences of 93m, corresponding to L2~S11, without the upper Malan loess and S1. There are Sanmen Formation of river-lake phase below 93 m. DZ2 exposes 72m loess-paleosol sequences of S1~S9, missing the upper black loessial soil S0 and Malan loess L1. There is Sanmen Formation of river-lake phase below 73 m. The sequences of loess stratigraphy in both of DZ1 and DZ2 are basically identical. They both include the upper part and lower part of the Lishi loess, corresponding to Middle and Early Pleistocene, respectively. And the Wucheng loess has not been exposed. Sanmen Formation deposited until the bottom of Quaternary and upon the upper Pliocene. Both two cores successively recorded B/M boundaries, J, O and R polarity sub-bands and M/G boundaries, which provide a reliable evidence for stratigraphic comparison between the two cores. The elevation differences of several key layers is 5 m for the L9 layer, 4 m for the B/M boundary, 8~17 m for the J subband, 31~22 m for the O subband, 56~47 m for the R subband, and 54 m for the M/G boundary. In all, the elevation of the stratigraphic boundary and paleomagnetic boundary in DZ1 are generally lower than those in DZ2. The deeper the horizon is located, the higher the differences are. Based on the relative elevation difference of the stratigraphic and paleomagnetic boundaries between two cores, it is supposed that the upper plate of fault f12 is relatively lower by about 4~54 m. The sub-fracture plane was exposed at 373.6 m, with SE dip direction and 77° of dip angle. This study is important for further understanding the depositional environment of Xi'an depression, the characteristics of ground fissures and the prevention and control of the geological hazard related to ground fissures in Xi'an area.

**Keywords:** ground fissures; loess; Sanmen Formation; paleomagnetic dating; Xi'an depression

西安地区地裂缝发育,前期研究认为地裂缝发育原因主要包括断层活动应力释放伴生裂缝、地震产生地裂缝、盆地伸展引发地裂缝、城市抽水产生地表下沉伴生地裂缝等(彭建兵等,1992,2007,2012;卢全中等,2005;朱立峰等,2005;张勤等,2007;董英等,2019;Lu et al.,2019,2020;冯旻灏等,2023)。这些地裂缝在西安地区多发生在黄土地层与河湖相沉积层中,对西安市城镇建筑、道路、桥梁、管网产生重要影响,是西安地区重要的地质灾害类型之一(卢全中等,2021)。

西安地区第四系分布广泛,黄土-古土壤序列之下发育第四纪河湖相沉积或新近纪红色黏土及河湖相沉积。通过地表露头及各种钻孔对揭示西安地区的第四系较为深入。西安凹陷沉积中心第四系达到700 m,黄土-古土壤序列大约为几米至百余米,古三门湖沉积可达到千米之上(彭建兵等,2012)。对西安凹陷清凉山地区400 m内的第四纪沉积的观测多是通过地表露头、探槽或钻井碎屑揭示,对地层的连续性 & 变化特征缺乏全面认识。

长安大学承担的《西安市地面沉降和地裂缝监测分层标建设项目》在西安凹陷南缘清凉山地裂缝f12两侧钻取了两口超过400 m深的全取芯井,使笔者能够第一次直观的认识该区域地表之下400 m深度沉积

特征。前期观测到的清凉山地裂缝f12总体走向约为北东向40°,倾向东南,倾角为80°,发育带宽约为20 m,长度约为2000 m(彭建兵等,2012)。这次钻探的两口钻井位于西安地裂缝f12两侧,DZ1孔位于f12地裂缝东侧169 m,DZ2孔于f12地裂缝西侧32 m,用以揭示裂缝两侧沉积地层序列差异、地裂缝的特征和裂缝两侧相对沉降距离。

笔者对DZ1井(420 m)和DZ2井(400.5 m)开展沉积学分析,进行古地磁测量、磁化率及粒度分析,研究地下400 m深度沉积学特征及地层年代,进行地裂缝两侧地层对比及计算地裂缝沉降幅度。该项研究对进一步认识西安凹陷沉积特征,地裂缝特征具有重要科学意义,同时对讨论关中盆地形成演化及气候响应提供基础资料,对西安地区防控地裂缝地质灾害亦具有重要意义。

## 1 区域地质背景和采样

黄土高原的黄土沉积为黄土-古土壤序列,地层包括全新世黄土,马兰黄土、离石黄土及午城黄土。黄土-古土壤序列记录了黄土高原第四纪气候变化以及对青藏高原隆升的响应(刘东生,1985;吴锡浩等,

1996; 安芷生等, 1998)。渭河盆地(包括盆地南缘黄土台塬)同样堆积了黄土-古土壤沉积, 沉积厚度最大达到 135 m, 地层包括马兰黄土、离石黄土及午城黄土(岳乐平, 1989)。渭河盆地位于古三门湖和黄土高原接触或交叠的区域, 堆积了深厚的第四纪黄土和三门湖沉积(贾兰坡, 1966; 刘护军, 2004; 冯希杰等, 2008; Liu et al., 2013; 王斌等, 2013; 李智超等, 2015; Rits et al., 2016, 2017; 鹿化煜等, 2018; Wang et al., 2020; 宋友桂等, 2021)。

西安市位于渭河盆地中部, 受秦岭隆升影响区域形成一系列凹陷和隆起, 包括固市凹陷、咸阳-礼泉隆起、西安凹陷、临潼-蓝田隆起、灞河凹陷(乔建伟等, 2020)。西安凹陷夹持在咸阳隆起与临潼隆起之间, 南深北浅呈簸箕状, 南侧基底埋深约为 5.6 km, 北侧深为 3.7 km。沉积地层包括始新统、渐新统、中新统、上新统、更新统、全新统(彭建兵等, 2012)。

渭河盆地黄土层之下通常有古三门湖沉积, 三门湖沉积为一套交错层理发育的锈黄色细砂, 夹粗砂及小砾石, 以及灰绿色、灰白色细砂、砂质黏土。这套沉积物最早在三门峡一带发现, 以后沿渭河盆地向西在潼关、渭南、西安甚至宝鸡一带都有发现。在中国地层典中(周慕林, 2000), 1923 年最早将这套地层称为三门系, 随后将三门系分为含锈黄色砂层及砾石层的上三门系和以灰绿色黏土、砂质黏土为主的下三门系, 其后进一步将三门湖沉积含锈黄色砂层及砾石层的地层定义为上三门组, 地层中含丽蚌 *Lamprotula*

*Antigua* sp. 化石, 时代为早更新世, 下部含绿色及灰绿色的黏土与砂质黏土地层定义为下三门组(周慕林, 2000)。其后人们根据黄色地层与绿色地层称为“黄三门”与“绿三门”上下两部分, 不同学者对绿三门、黄三门的含义作出了不同解释(孙建中, 1986; 王书兵等, 2004)。薛祥煦(1981)在渭南游河附近绿三门组发现上新世游河象, 因此将下三门组重新定义为游河组, 时代为上新世。实际上所谓“黄三门”的锈黄色细砂沉积和“绿三门”的灰绿色沉积只不过是沉积物位于湖泊的不同位置而已, 位于湖滨或浅湖沉积易接受粗颗粒沉积, 并且受到氧化环境影响形成颗粒较粗的锈黄色细砂或砾石沉积, 而位于湖泊中心水位较深的灰绿色、绿色砂质黏土或黏土沉积形成于还原环境。在研究不要求作精细地层划分的情况下统称三门湖沉积, 时代可以根据古地磁年龄或化石时代确定。岳乐平(1996)讨论了黄土、红黏土及三门古湖沉积的关系, 认为三门组可以和午城黄土、离石黄土同期异相, 红黏土与三门古湖沉积的下部新近纪湖相地层同期异相。

DZ1、DZ2 钻孔位于西安凹陷西安市地裂缝 f12 两侧(图 1), 两孔钻遇的黄土地层为黄土-古土壤序列, 包括中更新世黄土及早更新世黄土上部地层(图 2a), 钻遇的古三门湖沉积为三门组沉积(图 2b)。黄土地层 0.5 m 间距采集古地磁样品, 仅在 S7、L8、S8 区间作了加密取样。除去样品实验室加工破损与测试过程中的破损, 根据样品磁性记录的优劣, 最终 DZ1 孔

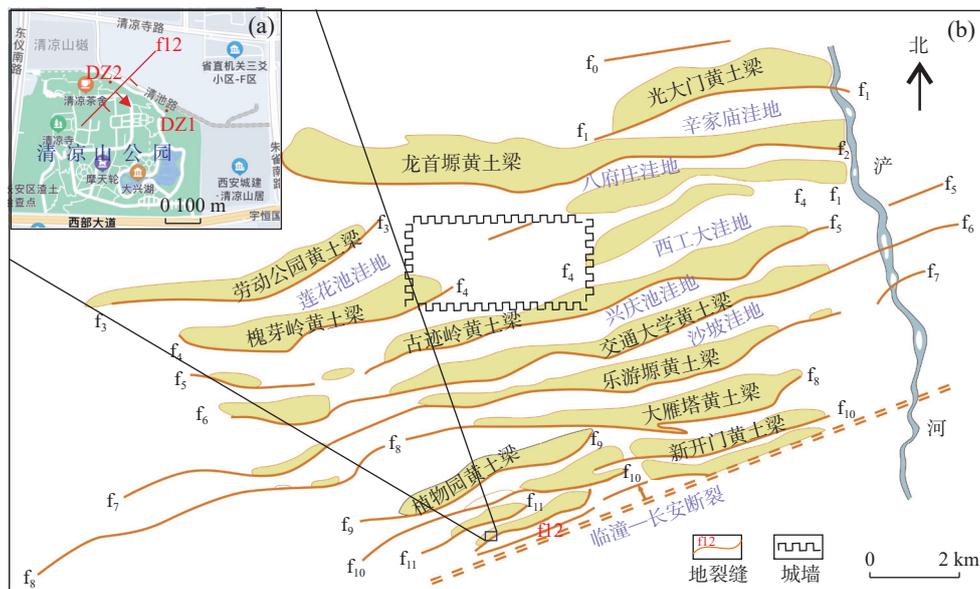


图 1 清凉山 f12 地裂缝钻孔位置图(a)和西安地区地裂缝分布示意图(b)(据王璐, 2010)

Fig. 1 (a) Drilling locations of f12 fissure and (b) Distribution of ground fissures in Xi'an area



a. 92.7 m 以上黄土-古土壤序列; b. 100.5 m 位置具层理的三门组上部锈黄色细砂岩;  
c. 含蚌壳化石的三门组下部灰绿色黏土质细砂岩; d. 373.6 m 处的裂隙

图 2 DZ1 孔岩心图

Fig. 2 Photos of the Core from DZ1

采用古地磁数据 223 个, DZ2 孔采用古地磁数据 189 个, 满足第四纪磁性地层学分析。DZ1 孔测试磁化率样品 1302 份、粒度样品 761 份, DZ2 孔测试磁化率样品 1412 份、粒度样品 736 份。

## 2 样品测试

### 2.1 古地磁测试

通过钻井取样, 对第四纪黄土地层和古湖沉积开展磁性地层学研究已较为成熟。在湖相沉积古地磁样品采集加工、实验室样品退磁及剩磁测量方面都给出了成熟的方案(Fu et al., 2013, 2015)。古地磁测试分析在中国科学院地球环境研究所古地磁实验室完成, 使用仪器为 2G U-channel 755R 超导磁力仪。由于

关中地区黄土以及三门组古地磁测试工作已经非常成熟, 剩磁载体比较清楚, 因此笔者并未开展详细的岩石磁学研究工作, 而是直接采用前期比较成熟的测试方法和程序, 采用热退磁方法, NRM 测完后退磁温分别为 100 °C、200 °C、300 °C、400 °C、500 °C、600 °C。热退磁后显示出特征剩磁, 经过矢量分析获得样品原生剩磁方向。关中盆地黄土与三门湖沉积一般在这个温度区间退磁后都能够获得特征剩磁(岳乐平, 1989)。

### 2.2 磁化率测试

样品在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 磁化率测量仪器为 MS-ZB 型磁化率仪(英国 Bartington 公司生产的), 实验过程为: 将自然风干的样品用研钵研磨至 2 μm 以下, 精确取 10 g 样品放入测试

盒子中,然后放入磁化率仪中进行低频(0.47 Hz)磁化率测试。

### 2.3 粒度测试

粒度测量在西北大学大陆动力学国家实验室完成,仪器为激光粒度仪,其测定范围为 0.02~2 000  $\mu\text{m}$ 。此实验的操作步骤为:用电子天平称取大约为 0.3 g,经过烘干箱烘干后,将所取样品放入的 500 ml 烧杯中,放置在电热板上,随后加入 10 ml 过氧化氢(浓度为 10%)去除有机质并开始一直加热,期间添加少量蒸馏水以防蒸干,直至没有气泡冒出以后表明使其样品已经充分反应;有机质反应完全后再加入 10 ml 盐酸(浓度为 10%)去除碳酸盐类并在加热板继续加热,等待反应完全气泡不再冒出;将烧杯取下并注满蒸馏水后静置 12 h,颗粒完全沉淀后倒掉上部清水;上机测试前,加入 10 ml 1 mol/L 六偏磷酸钠分散颗粒,将样品放在超声波仪器内振荡 10 mins,使样品颗粒保持分散,再用激光粒度仪对其进行测试。

## 3 测试结果

DZ1 孔岩心磁性地层学研究结果显示:该孔岩心记录了布容正极性带(B)、松山负极性带(M)以及高斯正极性带(G)。B/M 界线位于 L8 中部,孔深 59 m 处,年龄为 0.78 Ma。松山负极性带中记录了 J 亚带(年龄为 0.98~1.06 Ma),位于三门组上部,孔深约 100~120 m 位置。O 亚带(1.75~1.98 Ma)位于三门组中部,孔深大约 165~211 m 处。R 亚带(2.14~2.15 Ma)位于三门组下部,孔深约 279~303 m 处。M/G 界线(2.60 Ma)位于 404 m 处(图 3)。

DZ2 孔岩心磁性地层学研究结果显示:该孔岩心记录了布容正极性带(B)、松山负极性带(M)以及高斯正极性带(G)。B/M 界线位于孔深 53 m 处,年龄为 0.78 Ma。松山负极性带中记录了 J 亚带(年龄 0.98~1.06 Ma),位于三门组地层上部,深约 87~98 m 位置。O 亚带(1.75~1.98 Ma)位于三门组中部,深度大约 129~184 m 处。R 亚带(2.14~2.15 Ma)位于三门组下部,深度约 218~251 m 处。M/G 界线(2.60 Ma)位于 345 m 处(图 4)。

DZ1 孔岩心磁化率分析结果显示古土壤磁化率数值较高,达到 15~30(SI)。黄土磁化率大约为 5~15(SI),三门组沉积的磁化率显示含粗砂砾地层的磁化率数值较高可以达到 30(SI),细黏土层磁化率

数值为 5~10(SI)(图 3)。

DZ2 孔岩心磁化率分析结果显示古土壤磁化率数值较高,达到 20~30(SI)。黄土磁化率大约为 10~15(SI),磁化率数值可以很好的划分黄土与古土壤地层。L9 砂质黄土显示了大段的低磁化率数值,和 L9 的沉积特征相符。三门组沉积的磁化率显示含粗砂砾地层的磁化率数值较高(图 4)。

DZ1 孔与 DZ2 孔岩心粒度分析显示黄土样品中值粒径为 30~60  $\mu\text{m}$ ,黄土之下的三门组湖相沉积的中值粒径达到 200~400  $\mu\text{m}$ ,其间的粗砂层中值粒径可以达到 600  $\mu\text{m}$ ,而黏土夹层中值粒径仅为 5  $\mu\text{m}$ 。中值粒径对于地层划分起到了很好作用,DZ1 孔 93 m 之上的黄土-古土壤中值粒径为 30~60  $\mu\text{m}$ ,93 m 之下的三门组湖相沉积达到 200  $\mu\text{m}$ 。DZ2 孔 75 m 之上的中值粒径为 30~60  $\mu\text{m}$ ,75 m 之下的三门组湖相沉积粒径达到 600  $\mu\text{m}$ 。中值粒径能够清晰的划分黄土沉积与三门组沉积界线(图 3、图 4)。

## 4 讨论

### 4.1 西安凹陷清凉山一带第四系特征

磁化率和粒度数值可以很好的划分黄土与古土壤地层界线以及黄土与三门组砂层界线。根据 DZ1 孔井场的岩心岩性观察及室内磁化率、粒度测试数据综合分析认为:该孔地层包括 0~93 m 的黄土-古土壤序列沉积,钻遇地层包括 L2、S2、L3、S3、L4、S4、L5、S5、L6、S6、L7、S7、L8、S8、L9、S9、L10、S10、L11 和 S11。由于顶面为填土层,上部缺失马兰黄土及 S1,全部黄土地层为离石黄土(图 2a)。黄土地层时代包括中更新世与早更新世晚期,底部未见午城黄土(与三门组同期异相)。该孔钻遇黄土地层年龄大约为 0.13~0.90 Ma(图 3)。93 m 以下全部为古三门湖沉积(图 2b),地层定位为三门组(时间为早更新世并穿时上新世末)。根据岩性特征可以分为上、中、下 3 部分。上部岩性主要为黄色、锈黄色、土黄色细砂层、中粗砂层,局部含砾;中部主要为灰色、绿灰色粉砂层、中粗砂层,局部含砾。下部主要为灰色、绿灰色粉砂层、中粗砂层与暗红色泥岩互层。373.6 m 处见裂缝发育,裂缝高角度倾斜,倾角约为 77°,裂缝断面可见光滑擦痕(图 2d)。

关于三门湖沉积的地层划分,《中国地层典》—第四系(周慕林,2000)将渭河流域下游的三门湖沉积下

更新统地层归为三门组。由于岩石地层单位具有穿时性,所以三门组底部界限大致为2.60 Ma(更新世底部年龄)。DZ1孔M/G界限位于404 m,距井底位置

420 m处仅有16 m深度。404~420 m岩性与上部地层约100 m处的地层基本相似,并且钻孔底部约420 m处的贝壳化石与296 m处的贝壳化石相同,因

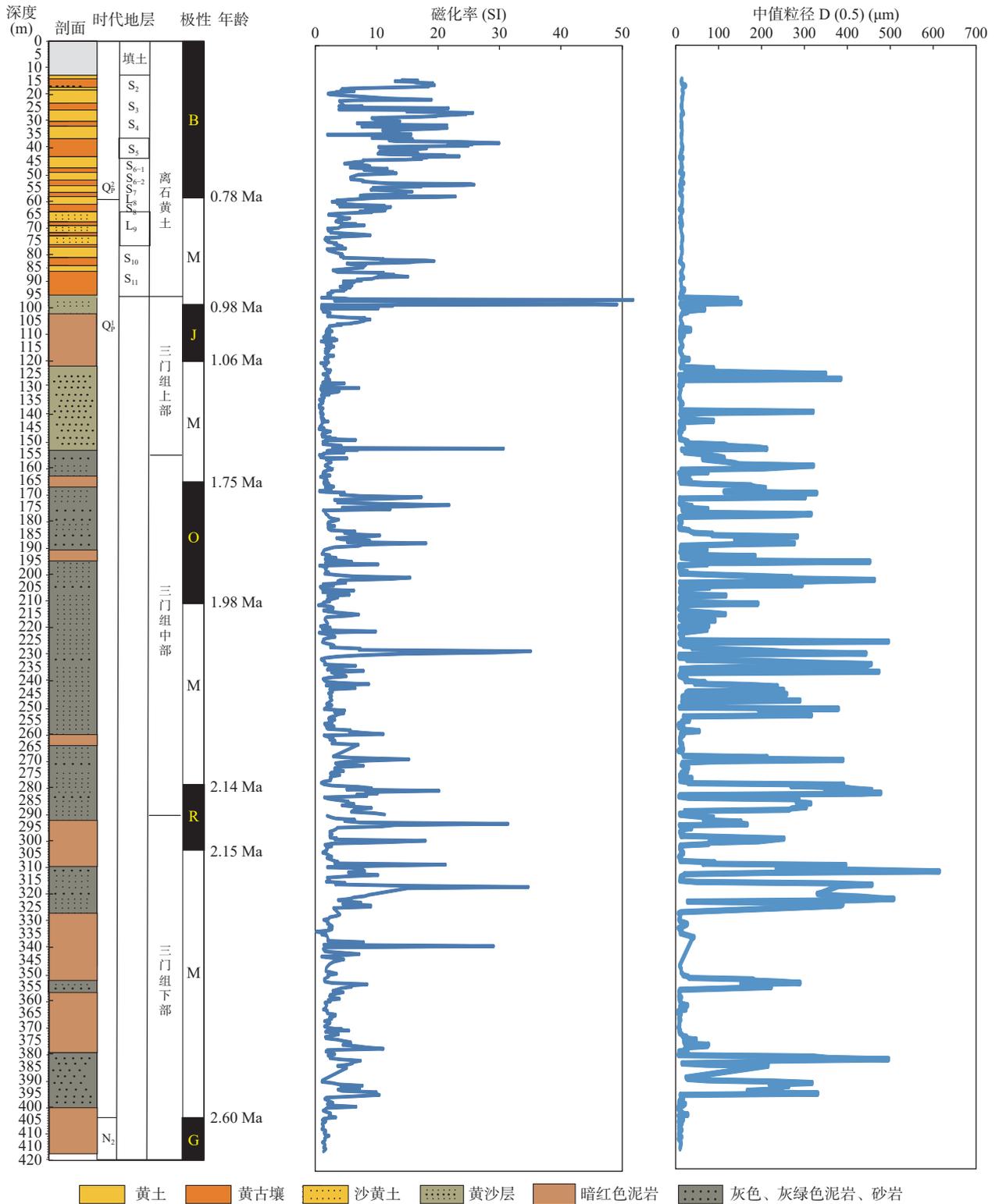


图3 DZ1孔沉积-年代-指标综合柱状图

Fig. 3 Sedimentation, chronology and proxies of DZ1

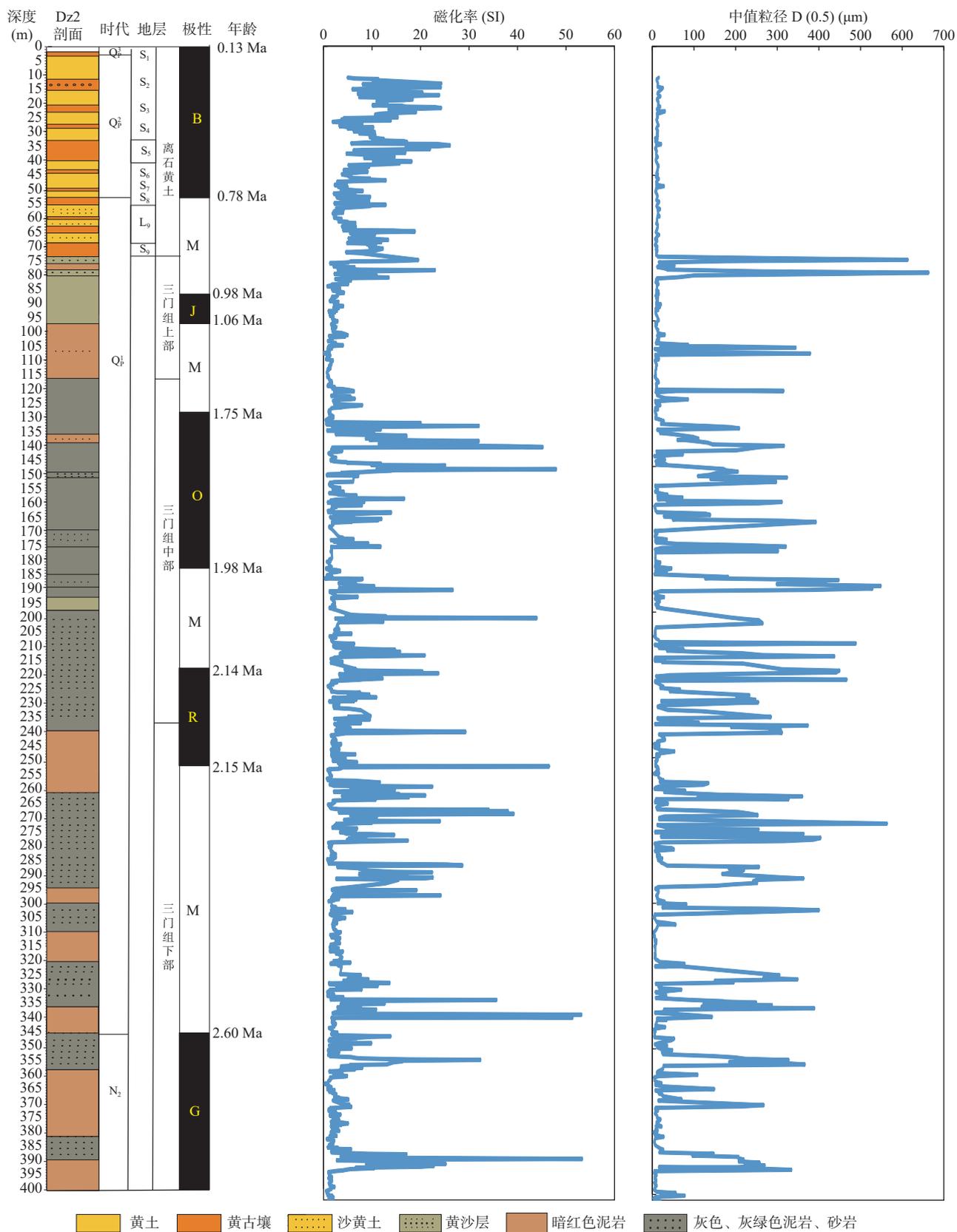


图 4 DZ2 孔沉积-年代-指标综合柱状图

Fig. 4 Sedimentation, chronology and proxies of DZ2

此将其下部 16 m 上新统归化为三门组穿时上新世顶部更合适一些。基于上述原因将 93 m 以下三门湖沉积统归三门组(图 3)。

DZ1 孔钻遇的三门湖沉积与渭河盆地其他区域的三门湖沉积特征基本一致,均为上部以锈黄色细砂为主,下部为灰绿色为主,但该孔的锈黄色细砂沉积厚度较薄,仅为 60 余 m,而灰绿色黏土质沉积厚度较大达到数百米且未见底。296 m 与 420 m 处发现贝壳化石丽蚌 *Lamprotula Antigua* sp. (图 2c),该化石在三门峡东坡沟、平陆县席坪、大荔县甜水沟、渭南赤水河及游河流域三门组中均有发现。

DZ2 孔黄土地层主要依据井场岩心岩性观测描述进行划分,并依据磁化率和中值粒径进行校正。该孔最下部黄土 55~72 m 颗粒较粗,为 L9 砂质黄土,年龄大约为 0.85 Ma。DZ2 孔标志层 L9 识别清楚,为划分黄土-古土壤地层单元的重要依据。75 m 以下为三门湖沉积,地层定位为三门组(时间为早更新世及穿越上新世末)。DZ2 孔三门组岩性与 DZ1 孔三门组岩性近似,也可以分为上、中、下 3 部分。三门组上部岩性主要为黄色、锈黄色、土黄色细砂层、中粗砂层,局部含砾;中部主要为灰色、绿灰色粉砂层、中粗砂层,局部含砾;下部主要为灰色、绿灰色粉砂层、中粗砂层与暗红色泥岩互层(图 4)。DZ2 钻孔揭示的西安凹陷清凉山一带黄土地层包括 S1、L2、S2、L3、S3、L4、S4、L5、S5、L6、S6、L7、S7、L8、S8、L9 和 S9。黄土-古土壤厚度约为 72 m,包括中更新世离石黄土上部及早更新世离石黄土下部,未见午城黄土。上部地层缺失黑垆土 S0 和 马兰黄土 L1。DZ1 孔岩心和 DZ2 孔岩心的黄土地层层序基本一致。相比之下,DZ2 孔的三门组位置更高一些,这可能是 DZ2 孔位置偏向湖泊深水一侧,DZ1 孔位置偏向湖岸,DZ1 孔位置较早脱离湖泊接受黄土沉积;DZ2 孔岩心三门组特征与 DZ1 孔岩心基本相似。

#### 4.2 西安凹陷 f12 地裂缝两侧相对位移

西安凹陷清凉山地裂缝 f12 总体走向约为 NE 40°,倾向 SE,倾角为 80°。发育带宽约为 20 m,长度约为 2 000 m。据彭建兵(2012)研究,地裂缝 f12 于 2001 年 6 月初露地表,雨后可在农田出现 10 cm 宽裂缝,裂缝的 SE 盘相对 NW 盘下降,两者高差约为 10 cm,其后不断发展;2010 年前后观测两盘高差超过 30 cm(彭建兵,2012)。地下几十米甚至几百米深度两盘相对运动距离始终没有测得。

为了解 f12 地裂缝地下 400 m 范围内地裂缝发育状况及上下两盘相对运动幅度,并为未来监测安装孔内设备,长安大学在西安市自然资源和规划局委托的《西安市地面沉降和地裂缝监测分层标建设项目》支持下,在 f12 地裂缝两侧打了两口钻孔,用以揭示裂缝两侧地层序列差异,确定裂缝两侧地层相对落差。两口钻井位于西安地裂缝 f12 两侧,DZ1 孔位于 f12 地裂缝东侧 169 m,DZ2 孔于 f12 地裂缝西侧 32 m。

两口井上部出露 B/M 界限,底部都打到 M/G 界限位置,且 J、O、R 亚极性事件清晰,为其地层对比提供重要依据。标志层粉砂质黄土 L9 高程差为 5 m,古地磁 B/M 界线高程差为 4 m,J 亚带高程差为 8~17 m,O 亚带高程差为 31~22 m,R 亚带高程差为 56~47 m,M/G 界线高程差为 54 m。总体看来,DZ1 孔地层界线和古地磁界线都较 DZ2 孔高程低,并且越靠下层差距越大(表 1,图 5、图 6)。两口井相距很近,仅为 200 余米,钻孔孔口高程现代地表高程相差约为 5 m,井下地层高程的差异能够大致反映出地裂缝两侧垂向相对运动幅度。DZ1 井 373.6 m 深处揭露断层面,断面陡倾,倾角为 77°,倾向 SE。前人研究认为 f12 地裂缝为正断型,SE 盘(上盘)相对 NW 盘(下盘)下降,断面倾角为 80°(彭建兵,2012)。笔者根据岩性和古地磁界线对比均发现,地裂缝 f12 的 SE 盘相对 NW 盘下降,产状与前人研究成果较一致。

表 1 地裂缝两侧古地磁界线高程对比表

Tab. 1 Correlations of boundary elevation at two sides of f12

钻孔	S5底位置 (m)	B/M(L8)界线 (m)	L9顶位置 (m)	黄土底界 (m)	J亚带界线 (m)	O亚带界线 (m)	R亚带界线 (m)	M/G界线 (m)
DZ1孔(上盘)	414	399	393	365	358~338	293~247	179~155	54
DZ2孔(下盘)	413	403	398	381	366~355	324~269	235~202	108
高差	1	-4	-5	-16	-8~-17	-31~-22	-56~-47	-54

注: DZ1井口高程为 458.44 m, DZ2井口高程为 453.49 m。

DZ1 井断面出露位置 A 点(图 6)的下伏地层发育古地磁 M/G 界限,即 M/G 界限发育在正断层的下盘。

假设通过点 A 的断面是 f12 地裂缝的主断裂面,那么下盘的 M/G 界限位置应该接近等高,但事实是 DZ2

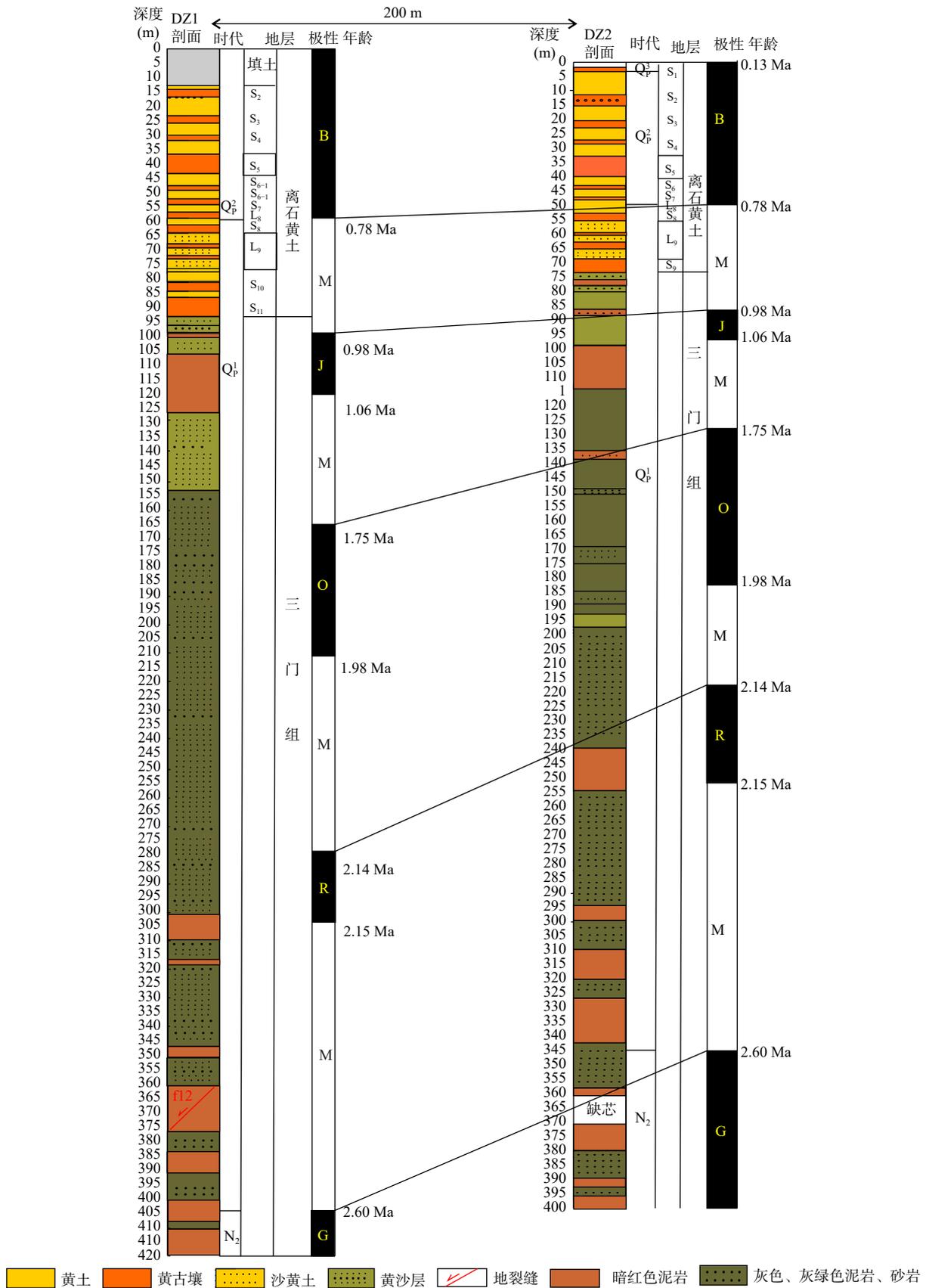
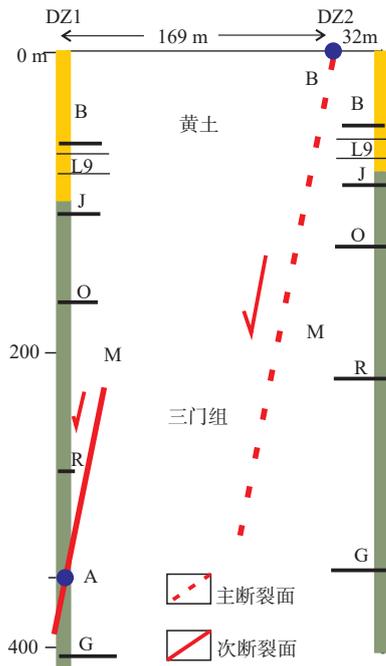


图 5 DZ1 孔与 DZ2 孔磁性地层对比

Fig. 5 Correlations of magnetic stratigraphy of DZ1 and DZ2



点 A. DZ1 井次断裂面出露深度; 点 B. 主断裂带出露地面位置

图 6 井 DZ1-DZ2 钻遇发 f12 断裂面示意图

Fig. 6 Fracture plane of f12 at DZ1-DZ2

井 M/G 界限比 DZ1 井的高出近 60 m, 说明 A 断面下盘方向还发育一级断面。根据南西距 DZ2 井 32 m 处 B 点(图 6)地面出露地裂缝推测, 其向地下延伸很可能为主断裂面。按断裂面倾角 80°推算, 该主断裂面与 DZ1 井位交点的深度远大于 420 m, 结合断裂面发育规模, 过 A 可能为次断裂面, 过 B 应为主断裂面。通过 DZ1 和 DZ2 井观测到的 f12 地裂缝上盘相对下降约为 4~54 m, 深度越大错距越大。

## 5 结论

(1) 西安凹陷南缘发育的清凉山 f12 地裂缝断裂带总体走向北东, 呈正断层。断层上、下两盘地层包括黄土-古土壤序列和三门组湖湘沉积, 三门组底部穿时第四纪与上新世界限。上盘位于 f12 地裂缝南东侧, 于 DZ1 井 373.6 m 处出露裂缝面次级断面, 倾向 SE, 倾角为 77°。

(2) 主断裂面出露于地表两井间。两口井岩心上部都记录了古地磁 B/M 界限, 底部都打到 M/G 界限位置, 且 J、O、R 亚极性事件清晰, 为其地层对比提供重要依据。两口井标志层粉砂质黄土 L9 位置高差为 5 m, 古地磁 B/M 界线位置高差为 4 m, J 亚带位置高差为 8~17 m, O 亚带位置高差为 31~22 m, R 亚带位

置高差为 56~47 m, M/G 界线位置高差为 54 m。上盘标志地层界线和古地磁界线高程普遍较下盘低, 并且越靠下层, 差距越大。

(3) 根据各层高程差及古地磁界线高程差判断, 地裂缝 f12 断裂带上盘在第四系范围内相对下降幅度约为 4~54 m。

致谢: “西安市地面沉降和地裂缝监测分层标建设项目” 提供了 DZ1 孔和 DZ2 孔岩心样品。古地磁测试得到了中科院西安地球环境研究所古地磁室强小科研究员、何占怀技师支持。西安地质矿产勘查开发院有限公司毛浓博高级工程师及长安大学研究生柯昌艳、王跃飞、毛欣宇、陈晓、张薇学、王鹏荣、李泽权、李聪、孙月敏、孟恒羽、亢佳乐、史少斌协助采集了样品, 西北大学薛泽远同学协助测试粒度、磁化率。在此一并感谢。

## 参考文献(References):

- 安芷生, 王苏民, 吴锡浩, 等. 中国黄土高原的风积证据: 晚新生代北半球大冰期开始及青藏高原的隆升驱动[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1998, 28(06): 481-490.
- AN Zhisheng, WANG Sumin, WU Xihao, et al. Aeolian evidence from the Loess Plateau in China: The onset of the Northern Hemisphere Glaciation in the Late Cenozoic and the uplift of the Tibetan Plateau[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1998, 28(06): 481-490.
- 董英, 张茂省, 刘洁, 等. 西安市地下水与地面沉降地裂缝耦合关系及风险防控技术[J]. 西北地质, 2019, 52(02): 95-102.
- DONG Ying, ZHANG Maosheng, LIU Jie, et al. Coupling Relationship between Groundwater and Ground Fissures of Land Subsidence in Xi'an City and Risk Prevention and Control Technology[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(02): 95-102.
- 冯旻譞, 齐琦, 董英, 等. 利用 Sentinel-1A 数据监测大西安 2019~2022 年大西安地表形变[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 178-185.
- FENG Minxuan, QI Qi, DONG Ying, et al. Monitoring Surface Deformation in Xi'an City from 2019 to 2022 Based on Sentinel-1A Data[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 178-185.
- 冯希杰, 李晓妮, 任隽, 等. 渭河断裂深、中、浅和近地表显示[J]. 地震地质, 2008, 30(01): 264-272.
- FENG Xijie, LI Xiaoni, REN Jun, et al. Manifestations of Weihe fault at deep, middle, shallow and near surface depth[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(01): 264-272.
- 李智超, 李文厚, 李永项, 等. 渭河盆地新生代沉积相研究[J].

- 古地理学报, 2015, 17(04): 529–540.
- LI Zhichao, LI Wenhong, LI Yongxiang, et al. Sedimentary facies of the Cenozoic in Weihe Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(04): 529–540.
- 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- LIU Dongsheng. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- 刘护军, 薛祥煦. 对渭河盆地新生界及其年代的讨论[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(04): 1–5.
- LIU Hujun, XUE Xiangxu. Discussion on the Cenozoic and its chronology in Weihe River Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(04): 1–5.
- 鹿化煜, 张瀚之, 王逸超, 等. 渭河盆地新生代沉积序列与亚洲季风气候起源演化[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(5): 1057–1067.
- LU Huayu, ZHANG Hanzhi, WANG Yichao, et al. Cenozoic depositional sequence in the Weihe Basin(Central China): A long-term record of Asian monsoon precipitation from the greenhouse to icehouse Earth[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(5): 1057–1067.
- 卢全中, 彭建兵, 陈志新, 等. 黄土高原地区黄土裂隙发育特征及其规律研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(05): 193–196.
- LU Quanzhong, PENG Jianbing, CHEN Zhixin, et al. Research on Characteristics of Cracks and Fissures of Loess and Their Distribution in Loess Plateau of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(05): 193–196.
- 卢全中, 李聪, 刘聪, 等. 地裂缝分类及地面沉降区构造地裂缝防治对策[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(02): 366–375.
- LU Quanzhong, LI Cong, LIU Cong, et al. Classification of Ground Fissures and Prevention Measures of Tectonic Ground Fissures in Land Subsidence Areas[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(02): 366–375.
- 贾兰坡, 张玉萍, 黄万波, 等. 陕西蓝田新生界现场会议论文集[M]. 北京: 科学出版社, 1966.
- JIA Lanpo, ZHANG Yuping, HUANG Wanbo, et al. , Proceedings of the Lantian Field Conference in Shaanxi Province[M]. Beijing: Science Press, 1966.
- 彭建兵, 张俊, 苏生瑞, 等. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992.
- PENG Jianbing, ZHANG Jun, SU Shengrui, et al. Active faults and geological hazards in Weihe Basin[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1992.
- 彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]. 工程地质学报, 2007, 15(04): 433–440.
- PENG Jianbing, FAN Wen, LI Xi'an, et al. Some Key Questions in The Formation Of Ground Fissures in The Fen-wei Basin[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(04): 433–440.
- 彭建兵. 西安地裂缝发育特征与活动性[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- PENG Jianbing. Development characteristics and activity of ground fissures in Xi'an[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- 乔建伟, 卢全中, 郑建国, 等. 渭河盆地安仁镇图幅(1:5万)的浅部地质结构特征[J]. 西北地质, 2020, 53(03): 93–105.
- QIAO Jianwei, LU Quanzhong, ZHENG Jianguo, et al. Shallow Structural Model of Anren Town Geological Map (1: 50000) in Wei River Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(03): 93–105.
- 宋友桂, 兰敏文, 刘慧芳, 等. 关中盆地新生界地层划分对比与第四纪下限[J]. 地质科技通报, 2021, 40(2): 24–35.
- SONG Yougui, LAN Minwen, LIU huifang, et al. Cenozoic stratigraphic correlation and the lower limit of Quaternary in Guanzhong Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(2): 24–35.
- 孙建中. 关于“黄三门”与“绿三门”[J]. 长安大学学报(地球科学版), 1986, 8(04): 42–45.
- SUN Jianzhong. Yellow Sanmen Fm and Green Sanmen Fm[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 1986, 8(04): 42–45.
- 王斌, 郑洪波, 王平, 等. 渭河盆地新生代地层与沉积演化研究: 现状和问题[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(10): 1126–1135.
- WANG Bin, ZHENG Hongbo, WANG Ping, et al. The cenozoic strata and depositional evolution of Weihe Basin: Progresses and problems[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(10): 1126–1135.
- 王璐. 西安地裂缝带岩土物理力学性质统计分析[D]. 西安: 长安大学硕士论文, 2010.
- WANG Lu. Statistical Analysis of physical and mechanical properties of of geotechnical on band of Xi'an ground fissures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- 王书兵, 蒋复初, 吴锡浩, 等. 三门组的内涵及其意义[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(01): 116–123.
- WANG Shubing, JIANG Fuchu, WU Xihao, et al. The Connotation and Significance of Sanmen Formation[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(01): 116–123.
- 吴锡浩, 安芷生. 黄土高原黄土-古土壤序列与青藏高原隆升[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 1996, 26(02): 103–110.
- WU Xihao, AN Zhisheng. Loess paleosol sequence of the Loess Plateau and uplift of the Qinghai Tibet Plateau[J]. *Science in China (Series D:Earth Sciences)*, 1996, 26(02): 103–110.
- 薛祥煦. 陕西渭南一早更新世哺乳动物群及其层位[J]. 古脊椎动物与古人类, 1981, 19(01): 35–44.

- XUE Xiangxu. An early Pleistocene Mammalian fauna and its stratigraphy of the River YOU, Weinan, Shensi[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1981, 19(01): 35–44.
- 岳乐平. 兰田段家坡黄土剖面磁性地层学研究[J]. *地质论评*, 1989, 35(05): 479–488.
- YUE Leping. Magnetostratigraphical study of the loess section at Duanjiapo, Lantian, Shaanxi[J]. *Geological Review*, 1989, 35(05): 479–488.
- 岳乐平. 黄土高原黄土、红色粘土与古湖盆沉积物关系[J]. *沉积学报*, 1996, 14(04): 149–154.
- YUE Leping. Depositional Relation between the Loess, Red Clay and Sedimentation of the Lake basin in the Loess Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(04): 149–154.
- 张勤, 黄观文, 王利, 等. GPS在西安市地面沉降与地裂缝监测中的应用研究[J]. *工程地质学报*, 2007, 15(06): 828–833.
- ZHANG Qin, HUANG Guanwen, WANG Li, et al. GPS Monitoring and Surveying on Land Subsidence and Land Fissure in Xi'an City[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(06): 828–833.
- 周慕林. 中国地层典[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- ZHOU Mulin. Stratigraphic Code of China [M]. Beijing: Geology Press, 2000.
- 朱立峰, 李益朝, 刘方, 等. 西安地裂缝活动特征及勘查思路探讨[J]. *西北地质*, 2005, 38(04): 102–107.
- ZHU Lifeng, LI Yizhao, LIU Fang, et al. Features on ground fractures and exploration train of thought in Xi'an[J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(04): 102–107.
- Fu C, An Z, Qiang X, et al. Magnetostratigraphic determination of the age of ancient Lake Qinghai and record of the East Asian monsoon since 4.63 Ma[J]. *Geology*, 2013, 41(8): 875–878.
- Fu C, Bloemendal J, Qiang X, et al. Occurrence of greigite in the Pliocene sediments of Lake Qinghai, China, and its paleoenvironmental and paleomagnetic implications[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(5): 1293–1306.
- Liu J, Zhang P, Lease R O, et al. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range-Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 281–296.
- Lu Q, Qiao J, Peng J, et al. A typical Earth fissure resulting from loess collapse on the loess plateau in the Weihe Basin, China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 259: 105189.
- Lu Q, Yang L, Peng J. Immersion test of loess in ground fissures in Shuanghuaihu, Shaanxi Province, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(5): 2299–2312.
- Rits D S, Beets C J, Prins M A, et al. Geochemical characterization of the middle and late Pleistocene alluvial fan-dominated infill of the northern part of the Weihe Basin, Central China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017: S0031018216307659.
- Rits D S, Prins M A, Troelstra S R, et al. Facies analysis of the Middle and Late Quaternary sediment infill of the northern Weihe Basin, Central China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2016, 31(2): 152–165.23.
- Wang Y, Lu H, Wang K, et al. Combined high- and low-latitude forcing of East Asian monsoon precipitation variability in the Pliocene warm period[J]. *Science Advances*, 2020, 6(46): eabc2414.