

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201907032

河北平原隆尧地裂缝成因机理与模式研究

吴玉涛¹, 杨为民², 周俊杰³, 于鸿坤⁴, 李晓乐⁵, 张田田^{2,6}, 万飞鹏^{2,6}

(1. 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300461; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 4. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 5. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088; 6. 中国地质大学(北京)中国地质科学院, 北京 100083)

摘要:隆尧地裂缝是华北平原地区规模最大、活动性最强、灾害程度最为严重的构造地裂缝,但其与断裂之间的成因研究一直缺少系统的证明材料和完整的理论分析,即隆尧地裂缝与断裂之间是怎样的成生关系仍较为模糊。文章根据现场调查、探槽、地球物理探测和钻孔联合剖面等方法,分析了隆尧地裂缝几何运动特点和深部构造特征,探讨了隆尧地裂缝的成因机理和模式。研究表明:隆尧地裂缝(主要指西段)的发育位置与隆尧活动断裂基本重合,地裂缝走向近EW,倾向南,倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,南盘相对北盘下降,具正断性;同时,地裂缝面处黏土层中发育擦痕,上盘发育的分支裂缝与主裂缝相交成“y”型,地裂缝上下盘位移差随深度增加;地球物理探测解译隆尧活动断裂上断点埋深40~50 m,钻孔联合剖面揭示隆尧地裂缝向下延伸与隆尧活动断裂上断点吻合。地裂缝发育位置、产状、几何特点、运动特征与物探解译、钻孔联合剖面揭示的隆尧活动断裂一致,因此,隆尧地裂缝与隆尧活动断裂直接相连。根据上述成因理论,提出了构造地裂缝的一种成因模式——断层直剪式,即:在区域应力加强或转变的基础上,基底隐伏断裂开始蠕滑运动,断层面或断层带向地表延伸,切穿第四系岩土层,在地表形成陡坎。并据此分析了隆尧地裂缝的形成、显现和发展过程,为断层直剪式地裂缝成因研究提供理论指导。

关键词:隆尧地裂缝;隆尧活动断裂;成因机理;成因模式;断层直剪式

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0161-10

A study of the genesis mechanism and model of Longyao ground fissures in Hebei plain

WU Yutao¹, YANG Weimin², ZHOU Junjie³, YU Hongkun⁴, LI Xiaole⁵, ZHANG Tiantian^{2,6}, WAN Feipeng^{2,6}

(1. CCCC (Tianjin) Ecological Environmental Protection Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 4. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China; 5. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 6. Chinese Academy of Geological Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Longyao ground fracture is the tectonic ground fracture with a largest scale, which is one of the strongest activity and the most serious degree of disasters in North China Plain. However, the cause of formation between the Longyao ground fracture and faults were seldom examined and complete demonstration materials and systematic theoretical analyses are lacking. Based on field investigation, including trenching,

收稿日期: 2019-07-14; 修订日期: 2019-12-21

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160267; DD20190318)

第一作者: 吴玉涛(1992-),男,硕士,助理工程师,从事工程地质与地质灾害等研究工作。E-mail: 1548815054@qq.com

通讯作者: 杨为民(1962-),男,博士,研究员,从事活动断裂、工程地质和地质灾害等研究工作。E-mail: snon_72@163.com

physical exploration and joint borehole profile, etc, this paper analyses the planes, profiles and deep characteristics of ground fissures and discuss the genesis mechanism and mode of the Longyao ground fissures. The development location of the Longyao ground fissures (western part) coincides with the Longyao fault. The ground fissures trends in EW direction, dip south with 60 ~ 80 degrees, and is of normality. The ground fissure surface development scratches in the clay layer, the branch fissures in the hanging wall intersects with the main fissures to form a “y” shape, and the displacement between the hanging wall and foot wall increases with depth. The depth of the Longyao active fault upper break poin is 40 ~ 50 m by the interpretation of exploration, and the joint borehole profile reveals that the downward extension of the ground fissures coincides with the upper break point of the buried faults. The Longyao ground fracture is directly connected with the Longyao active fault. According to the above genetic theory, a genetic mode of structural ground fissures, fault direct shear type, is proposed. On the basis of regional stress strengthening or transformation, the hidden faults in the base began to creep and slide, the fault surface or fault zone extended to the surface, cut through the Quaternary rock and soil layers, and formed scarps on the surface. The formation, appearance and development of the Longyao ground fissures are analyzed. The results provide theoretical guidance for the study of the cause of ground fissures of direct shear type.

Keywords: ground fissures of Longyao; activity fault of Longyao; genesis mechanism; genesis model; fault direct shear type

20 世纪 60 年代隆尧地裂缝初露地表,目前地裂缝长约 30 km,在地表形成高 0.5 ~ 1.2 m 的陡坎,地裂缝所过之处地表建筑和地下设施大量损毁、农田严重漏水,造成数亿的经济损失。不仅如此,隆尧地裂缝目前仍具有较强的活动性,严重制约着隆尧地区的规划建设和经济发展。为此,众多学者开展了对隆尧地裂缝的研究,以确定隆尧地裂缝的几何分布特点和变形运动特征^[1-2],分析隆尧地裂缝的形成机理和致裂因素等^[3-4]。据前人研究成果,隆尧地裂缝可能由地震引起^[5],或长期超采地下水引起地表差异沉降所致^[6],而绝大多数人认为与断裂活动密切相关。马学军等^[7]通过地震波解译隆尧地裂缝下存在一条隐伏断裂,二者在空间展布和现代活动特征上的高度一致性表明它们之间具有明显的成生关系。冯军等^[8]利用地球化学探测确定隆尧活动断裂的具体位置和空间展布,从现今隆尧地裂缝发育位置和空间展布来看,与隆尧活动断裂吻合性较好。徐继山和彭建兵等^[9-10]认为隆尧地裂缝的形成是复杂的断裂应力集中、转移、释放的内动力和抽水沉降引起的外动力耦合驱动的结果。宋伟等^[11]以断层蠕滑理论解释隆尧地裂缝成因,认为隆尧活动断裂蠕滑运动引起第四系土体节理的开启从而形成隆尧地裂缝。

目前,隆尧地裂缝构造成因观点虽已提出,但缺少地裂缝与断裂之间的直接证明资料和系统的理论分析,即:隆尧地裂缝与隆尧活动断裂是怎样的成生关系

仍较为模糊,二者的内在联系和形成过程又是怎样的还不明确。本文通过搜集大量的研究成果和现场调查,采用较为完整的方法探究隆尧地裂缝的成因机理,在此基础上提出了该成因作用下地裂缝的成因模式,分析隆尧地裂缝的形成过程,为断层直剪型地裂缝研究提供理论指导。

1 隆尧地裂缝形成的地质背景

隆尧县地处太行山隆起的南麓东侧,东临新河凸起,北接宁晋凸起,南为临清凹陷,是华北地块核心部位。从板块运动来看,受印度板块向欧亚板块俯冲影响,自白垩纪以来,太行山以垂直升降为主;受太平洋板块向西俯冲欧亚板块作用影响,上地幔软流层物质向上挤压并融入地壳,地壳厚度变薄,沿 NW—SE 向形成张拉应力场,压应力主轴为 NE—SW 向^[12]。自日本 9.0 级大地震后,据东北和华北地应力监测资料显示,最大压应力主轴为近 EW 向^[13]。板块构造运动为华北平原地裂缝产生提供了动力来源。

从活动断裂来看,隆尧地区主要发育 NE 和近 EW 向断裂,平面上呈“叉”型^[14],NE 向断裂发育受近 EW 向断裂穿切限制。隆尧地裂缝正是发育在近 EW 向隆尧活动断裂与 NE 向元氏断裂、石家庄—保定断裂、新河断裂的交汇处,断裂构造背景十分复杂,各断裂特征见表 1。受活动断裂影响,隆尧地区地震频发,近 20 年内发生 32 次 5 级以上地震,复杂

的断裂背景与频繁的地震活动为隆尧地裂缝开启提供孕裂条件(图 1)。

从地貌和地层岩性上看,隆尧县位于太行山山前冲洪积平原区,地势总体上北西高、南东低,地势平坦开阔,地表相对起伏较小,地表水系包括 SN 走向的新

澧河、旧澧河。第四系厚度从西向东增加,厚度达 300~550 m^[15],岩性以砂、砂质黏土、粉质黏土和黏土为主。巨厚覆盖层为构造应力的集中、传递与释放提供良好的物理场,而第四系地层岩性与结构不同也是隆尧地裂缝在地表形态差异的物质基础。

表 1 隆尧地区主要活动断裂

Table 1 Main active faults in the Longyao area

断层编号	断层名称	断层产状			断裂性质	最新活动年代
		走向	倾向	倾角		
F ₁	石家庄—保定断裂	NE40°~45°	SE	20°~35°	正断层	N—Q ₁
F ₂	晋县断裂	NE40°	NW	30°~40°	正断层	N
F ₃	新河断裂	NNE	NWW	35°~45°	正断层	Q ₃
F ₄	隆尧活动断裂	近 EW	S	65°~80°	正断左旋	Q ₄
F ₅	邢台断裂	NNE	SE	50°~60°	正断右旋	Q ₃
F ₆	鸡泽断裂	SN—NE			正断层	
F ₇	广宗断裂	NE				

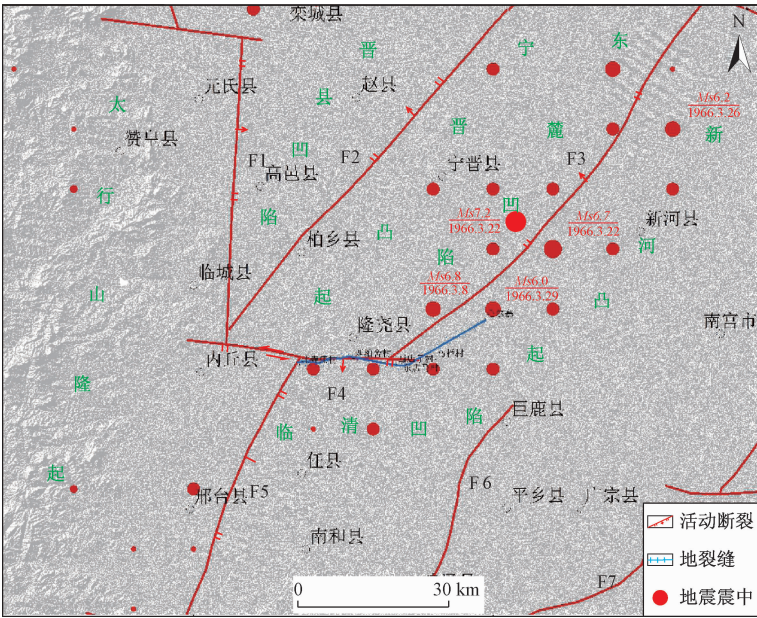


图 1 隆尧地裂缝区域构造图

Fig.1 Regional tectonic map of the Longyao ground fissure

2 隆尧地裂缝特征

隆尧地裂缝西起北寺庄北西,向东经周张庄、南小河、虎中村、西店子村,走向近 EW;在东店马村东地裂缝发生偏转,走向 NE,延伸至毛尔寨村附近,全长约 30 km。地裂缝所过之处房屋严重损毁、农田漏水、道路变形、地下管道错位。

2.1 平面特征

隆尧地裂缝分为东西两段,西段西起北寺庄西北 1 km,向东经周张庄、南小河、虎中、西店子、东店马村,

走向近 EW、局部弯曲偏转、斜列,长约 14.5 km(图 2)。地表陡坎高 0.5~1.2 m,人工整平后呈缓坡状。地裂缝发育不受地貌、地物限制,线性特征明显,连续性好,延伸远,陡坎微向南倾,倾角约 80°,地裂缝南盘下降,北盘相对抬升,具正断性。

东段为东店马村至毛尔寨村,走向 NE,线性延伸,长约 15.5 km,该段地裂缝未见明显地表陡坎,但农田漏水现象严重。当遭遇强降雨或农田灌溉时,地表发育串珠状或条带状塌陷坑。

第四系土层岩性和结构差异是引起隆尧地裂缝平

面特征不同的主要原因。西段地层岩性以黏土、粉砂质黏土为主,具较高的凝聚力,结构性强,受断裂应力作用发生剪切变形,在地表形成陡坎;东段地层岩性为粉细砂、粉砂,土体结构松散,稳定性差,受断裂应力作用发生结构失稳,形成塌陷坑、落水洞等。同时,地裂缝活动性与地表分段相对应,据 2013 年跨地裂缝监测,隆尧地裂缝上下盘监测点年活动量为 17.41 mm,东西为 11.6 mm,垂直为 53.34 mm^[2];东段在强降雨或灌溉时期常发育串珠状或长条形塌陷坑。二者相比,隆尧地裂缝西段活动性较强。

2.2 剖面特征

在西店子村东侧澧河河道内开挖 T₁ 探槽(图 3),探槽长 25 m,宽 10 m,深 13 m,长边与澧河河道平行。

由探槽(T₁)可知,隆尧地裂缝倾向 S,倾角 70°~80°,产状稳定,地裂缝面发育至地表,形成高 0.8 m 的陡坎,向深部延伸角度变缓,未揭露底。地裂缝上盘发育分支或次级裂缝,平行排列,与主裂缝产状相反,倾向 N 或 NW,倾角 60°~70°,向下延伸与主裂缝相交呈“y”型。地裂缝上盘裂隙较下盘发育,上盘相对下盘下降,上盘为主动盘,与地表建筑损毁程度及地裂缝影响范围一致。同时,地裂缝上盘位移量随深度明显增加,主裂缝错断回填土层约 0.8 m,埋深 5 m 的黏土层垂直断距约 0.9 m,埋深 8 m 的黏土层垂直断距约 2.65 m,向下错断粉细砂层,垂直断距大于 3 m,反映向深部延伸地裂缝上下盘位移差逐渐增加(图 3)。



图 2 隆尧地裂缝平面图

Fig. 2 Plane map of the Longyao ground fissure

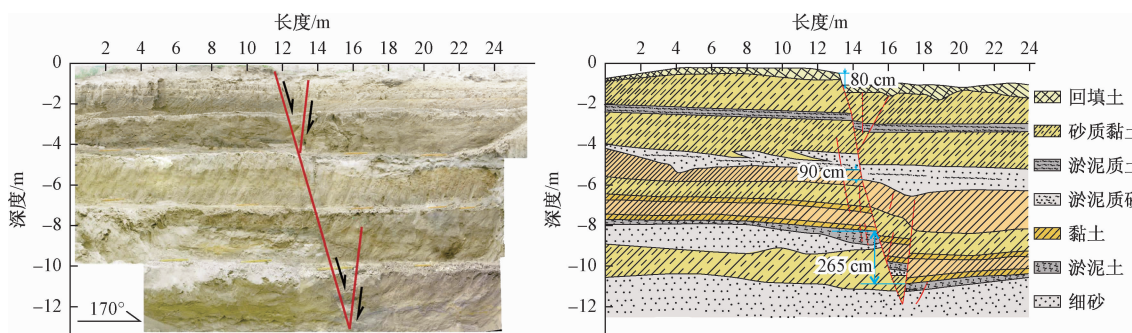


图 3 西店子村澧河河道探槽剖面照片(a)及剖面图(b)

Fig. 3 (a) Profile photo and (b) profile of channel exploration of the Lihe River in Xidianzi Village

3 隆尧地裂缝成因机理

为深入剖析隆尧地裂缝成因机理,验证地裂缝

陡坎与基底隐伏断层的直接联系,从地裂缝地表陡坎发育特点、探槽揭露地裂缝浅部构造特征、地震电法解译结果与钻孔联合剖面等四方面探讨隆尧地裂

缝成因机理,并探讨地下水超采对隆尧地裂缝形成的影响。

(1)隆尧地裂缝地表陡坎发育特点

隆尧地裂缝地表陡坎高 0.5 ~ 1.2 m,长度约 14.5 km(主要指西段),走向近 EW,连续性好,延伸稳定,地裂缝空间展布、走向与隆尧活动断裂一致(图 4)。尤其在西店子村西侧地裂缝横切澧河河道,形成跌水陡坎,河流下游(南侧)河道水体深而宽(图 4c)。如此高强度、大规模的地表形变与一般地裂缝破坏特征明显不同,所需开启和活动的能量一般只有活动断裂才能提供。

(2)探槽揭露地裂缝浅部构造特征

在西店子和东店马村跨隆尧地裂缝开挖探槽,揭露主裂缝,开启性好,宽 0.2 ~ 0.3 m,被粉土、粉质黏土充填,倾向 S,倾角 80°,向深部延伸,开口逐渐闭合,倾角逐渐变缓,未见底。地裂缝上盘相对下盘下降,上下盘位移量随深度逐渐增加,且在东店马村探槽深 5.5 m 处黏土层中发育擦痕,倾伏向南,倾伏角约 80°,在西店子村探槽深约 5 m 处也发育擦痕(图 5)。地裂缝产状、上下盘运动特点与隆尧活动断裂一致,擦痕面平整、光滑,黏土矿物发生定向排列,断裂应力作用强烈,是断层面延伸至地表的一种构造迹象。



图 4 隆尧地裂缝地表陡坎
Fig.4 Surface scarcity of the Longyao ground fissures

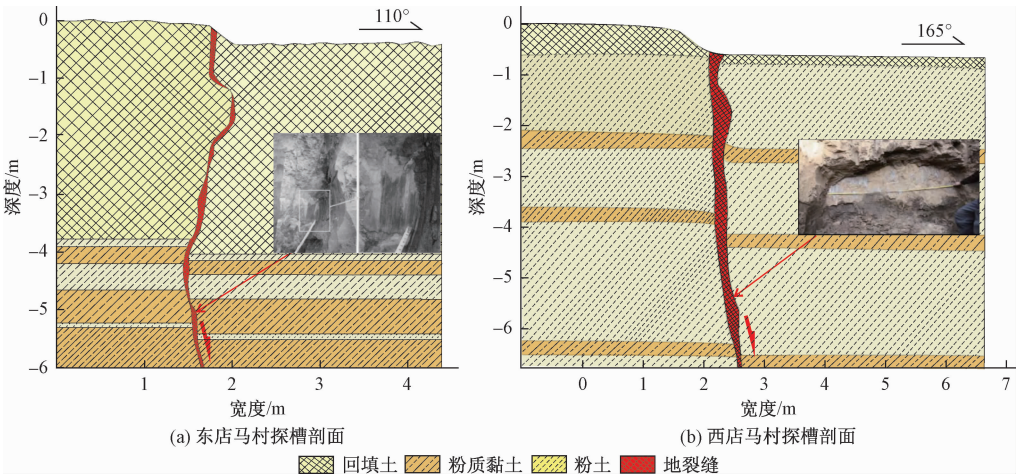


图 5 隆尧地裂缝东店马和西店子村探槽剖面

Fig.5 Trench profile of the Longyao ground fissure in the Dongdianma and Xidianzi Village

(3)地球物理探测解译

目前,对地裂缝与基底断裂直接联系的研究一直

是难点问题,而地球物理勘探对基底断裂解译分析是一种有效的手段。为探究隆尧活动断裂与地表裂缝的成因关系,在西店子村附近垂直地裂缝分别布置一条地震和电法勘探线 D_1 、 D_2 ,位置见图 2。

D_1 测线位于西店子村东侧,走向 285° ,长度约 850 m,地震解译结果显示隆尧主断裂位于 D_1 测线起点 410 m 处,倾向 S,倾角约 70° ,上断点埋深 50 ~ 60 m,下断点埋深 60 ~ 80 m。早更新世断距约 40 m,中更新世断距约 20 m,全新世断距约 1.5 m,主断裂向下一直延伸切穿第四系、新近系地层。伴生断裂与隆尧主断裂产状相反,倾角约 45° ,上断点 50 ~ 60 m,下断点埋深 60 ~ 80 m,向下延伸与隆尧主断裂相交成“y”型(图 6)。地震剖面解译隆尧活动断裂深部几何特点、运动特征、断层性质与探槽揭露地裂缝浅部构造特征一致,且隆尧活动断裂上断点埋深较浅,地裂缝面向下延伸与上断点可能相连。

电法探测显示地表陡坎位于 540 m 处,由于澧河附近地下水位埋深较浅,水体沿地裂缝下渗至裂隙带,改变了土体的电导性,显示在 380 ~ 570 m 之间存在明显的低阻带,反映地裂缝向深部发育为构造裂隙带,且上盘裂隙带宽度大于下盘,与探槽揭露地裂缝浅层特征一致。隆尧活动断裂向上发展以断裂带形式存在,而水对断裂的活化滑移也具有一定促进作用^[18],断裂带与地裂缝直接相连(图 7)。

(4) 钻孔联合剖面

钻孔联合剖面揭露了地裂缝面与断层面的直接联系。地裂缝面上陡下缓,倾角 $60^\circ \sim 75^\circ$,上盘下降,下盘相对抬升,且上下盘相对位移差随深度增加,上盘地层沉积厚度增加,具同生断层性质,地裂缝上盘发育反倾裂隙,主裂缝面向深部发育未见底。钻孔联合剖面揭露地裂缝特征与浅部地裂缝、深部物探解译隆尧活动断裂特征一致,同时,钻孔联合剖面揭露地裂缝深度与物探解译断裂上断点吻合,进一步证实地裂缝面与断裂的直接联系(图 8)。

(5) 地下水对隆尧地裂缝的影响

隆尧县属于地下水超采区。1959—1992 年西店子村地下水埋深由 4 m 下降至 20 m,平均下降速率为 0.54 m/a ;到 2013 年,西店子村地下水埋深为 52 m,此阶段地下水位平均下降速率为 1.52 m/a ^[2]。2006 年在柏乡附近超采地下水诱发地裂缝,但与隆尧地裂缝明显不同^[16]。隆尧地裂缝于 20 世纪 60 年代初露地表,当时无超采地下水现象;随着地下水开采加剧,地下水位逐渐下降,先存断裂可能改变了地下水的运移,土体强度相对较弱^[17-19],使该地区更易产生地裂缝。因此,隆尧地裂缝直接受隆尧活动断裂控制,超采地下水可能加快了地裂缝的显现和后期发展,但相对于断裂活动其影响较小。

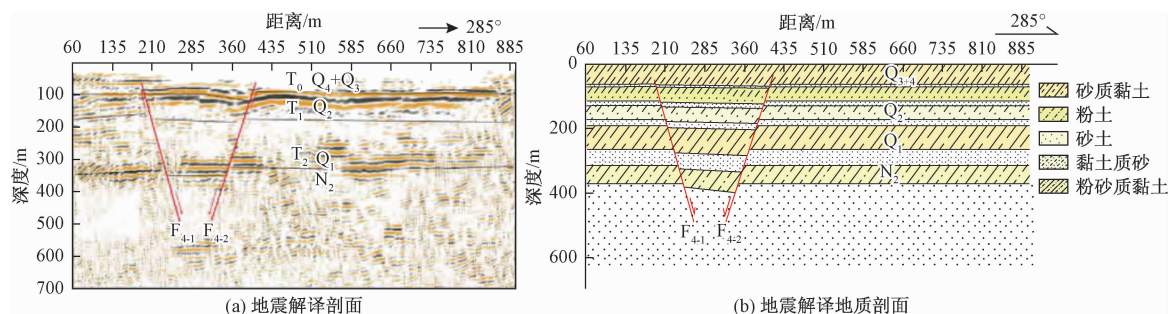


图 6 西店子村 D_1 地震解译剖面

Fig. 6 D_1 earthquake interpretation profile in the Xidianzi Village

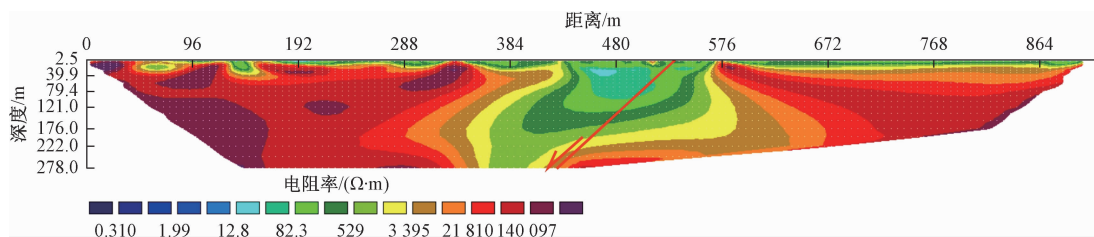


图 7 西店子村东侧澧河东岸电法解译剖面

Fig. 7 Electrical interpretation profile in the east bank of the Lihe River near the Xidianzi Village

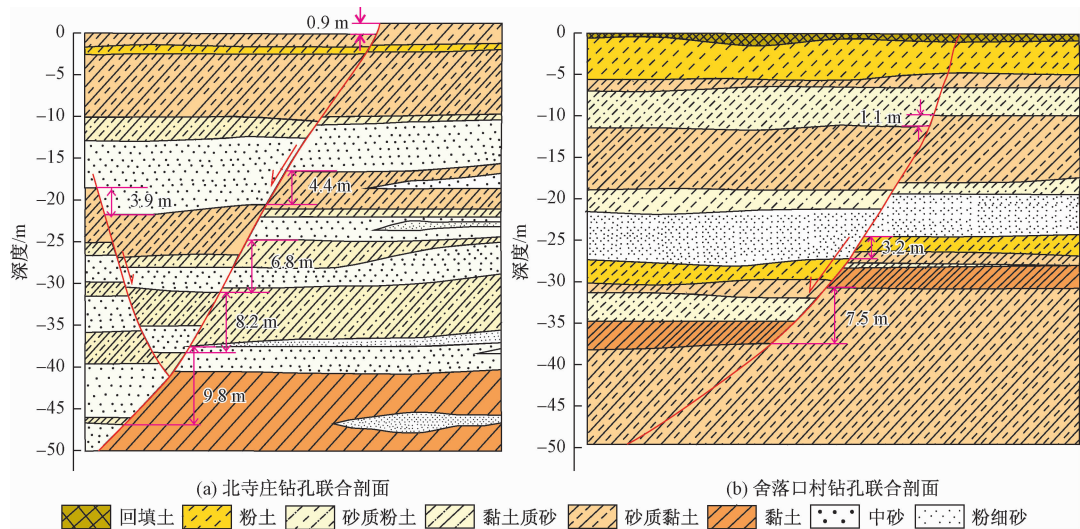


图 8 隆尧地裂缝钻孔联合剖面

Fig. 8 Drilling joint profile of the Longyao ground fissures

4 隆尧地裂缝成因模式

在深入剖析隆尧地裂缝成因机理的基础上,提出了断层蠕滑型机理下的一种地裂缝成因模式,即“断层直剪式”。断层直剪式地裂缝是指活动断层蠕滑运动,切穿第四系岩土层,在地表形成陡坎。隆尧地裂缝为典型的断层直剪式地裂缝,形成演化过程分为四个阶段:地裂缝孕育期、地裂缝形成前期、地裂缝显现期和地裂缝发展期。

(1)地裂缝孕育期

地裂缝孕育是指与地裂缝形成有关的内外因素的发育阶段。在隆尧地区,挽近时期以来,隆尧活动断裂隐伏于第四系地层之下,未见明显活动。但随着区域应力的集中与转换,NNE 或 NE 向太行山山前深大断裂在 NW—SE 向挤压后开始松弛,且区域最大压应力主轴由 NE 或 NEE 向开始向近 EW 向转化^[20-21]。在区域应力转换的背景下,形成 EW 向挤压应力不断累积,SN 向拉张的应力模型(图 9a)。

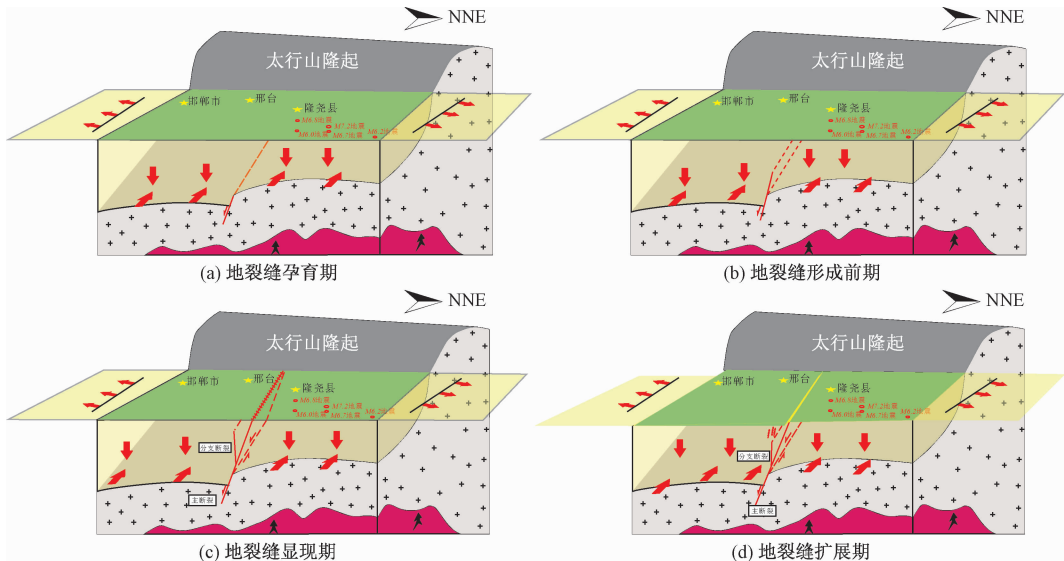


图 9 隆尧地裂缝演化过程

Fig. 9 Evolutionary process of the Longyao ground fissures

(2)地裂缝形成前期

当应力达到一定值时,应力沿构造薄弱带向上传

递,断裂开始活动,由于上覆第四系松散层较厚,对基底构造应力起到很好的缓冲作用,在松散堆积物中应

力沿下方断层带不断集中和向上传递,断层面或断层带逐渐向上扩展^[22]。构造应力向上传递为地裂缝形成提供动力来源,而巨厚的松散堆积物为地裂缝形成提供物质基础(图9b)。

(3) 地裂缝显现期

断层面在构造应力缓慢释放的过程中逐渐向上发展,受区域构造应力调整影响,1966年邢台地区发生5次6级以上地震。现已查明发震断裂为东麓凹陷西边界附近的铲式正断层^[23],断层活动可能诱发东麓凹陷地块运动,使其近EW向集中应力加速释放,隆尧活动断裂也由原来的缓慢蠕滑阶段变为加速蠕滑运动^[24-25],同时,地震作用使第四系土层发生振动变形与破坏,断层面上发展的速率有所增加,到达地表后形成地裂缝(图9c)。



图10 顺义机场地裂缝地表陡坎

Fig. 10 Surface scarp of ground fissures in Shunyi airport

5 结论

(1)隆尧地裂缝西段全长约14.5 km,地表发育连续线性陡坎,高0.5~1.2 m;整体走向近EW,延伸稳定,不受地物地貌限制,地裂缝面倾向S,倾角60°~80°;全新世黏土中发育擦痕,南盘相对北盘下降,上盘发育反倾裂缝与主裂缝相交成“y”型,上下盘位移差随深度逐渐增加;隆尧地裂缝具正断性,且地裂缝发育位置、空间展布、活动特征与隆尧活动断裂一致。

(2)在分析隆尧地裂缝构造成因的基础上,提出隆尧地裂缝与隆尧活动断裂直接相连,即:地表陡坎向下延伸与隆尧活动断裂带直接相连。隆尧活动断裂的运动方式和活动程度直接控制着隆尧地裂缝地表陡坎发育高度和扩展长度。超采地下水引起的地表差异沉降促进了地裂缝开启,但在地裂缝陡坎形成以后,因地下水开采大幅减弱,地表差异沉降对后期地裂缝陡坎发育影响较小。

(3)地裂缝陡坎与活动断裂直接相连是一种新的

(4) 地裂缝发展期

隆尧地裂缝地表陡坎是隆尧活动断裂蠕滑运动到地表形成的一种构造迹象。从开挖探槽、物探解译和钻孔联合剖面资料来看,隆尧地区的地表陡坎向下延伸与隆尧活动断裂面直接相连,断层的持续蠕滑运动将会促使隆尧地裂缝陡坎进一步发育;而从地表建筑破坏类型来看,隆尧地裂缝发展具三维运动特点,即水平拉张、垂直位移和横向剪切(图9d)。

除此之外,北京顺义国际机场地裂缝成因与隆尧地裂缝近一致,其地表大量的连续性线性陡坎高5~10 cm,走向NE45°,倾向SE,南东盘相对北西盘下降,长度约5 km。地裂缝走向、倾向与顺义断裂一致。同时,地表陡坎发育位置与已探明的顺义断裂位置吻合,进一步证明该地裂缝与顺义断裂的成生关系(图10)。

地裂缝成因机理,有着独特的形成过程,其中复杂的构造应力集中与释放是地裂缝形成的基础,而第四系土层对构造应力具缓冲作用。但因为其土体性质、厚度和结构的不同,导致地裂缝形态有所差异,因此,针对这种由断裂直接控制的地裂缝,提出了一种新的地裂缝成因模式——“断层直剪式”地裂缝,即:由于区域应力转换或加强,先存断裂做蠕滑运动,应力缓慢释放,断层面逐渐向上扩展,最终切穿第四系岩土层,在地表形成陡坎。据此分析了隆尧地裂缝孕育、形成、显现和发展过程,为断层直剪式地裂缝研究提供理论指导。

致谢:感谢中国科学院地质与地球物理研究所金维浚研究员和硕士研究生杨磊同学在地球物理工作中的帮助!

参考文献 (References):

- [1] 万阳,马润勇,王林清,等.河北隆尧跨地裂缝建筑物破坏特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,

- 2019, 30(1): 86 - 92. [WAN Y, MA R Y, WANG L Q, et al. Analysis of building failure characteristics across ground fissure in Longyao county of Hebei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 86 - 92. (in Chinese)]
- [2] 曹建玲, 白淑芳, 姜正义. 隆尧地裂缝形变特征及成因分析[J]. 华北地震科学, 2015, 33(2): 13 - 19. [CAO J L, BAI S F, JIANG Z Y. Characteristic and mechanism analysis of ground fissures in Longyao[J]. North China Earthquake Sciences, 2015, 33(2): 13 - 19. (in Chinese)]
- [3] 马学军, 杨旭东, 贾国欣. 河北平原断层蠕滑地裂缝成因分析[J]. 中国地质调查, 2015, 2(8): 48 - 54. [MA X J, YANG X D, JIA G Q. Genesis analysis of fault creep type ground fissures in the Hebei plain [J]. Geological Survey of China, 2015, 2(8): 48 - 54. (in Chinese)]
- [4] 李世雄, 李守定, 郝洪强. 河北平原地裂缝分布特征及成因机制研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 178 - 183. [LI S X, LI S D, HAO H Q. The distribution characters and origin mechanics of ground fissures hazard in Hebei plain [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2): 178 - 183. (in Chinese)]
- [5] 郭慧, 王鑫. 河北隆尧现今地裂缝与1966年邢台地震关系[J]. 华北地震科学, 2017, 35(1): 10 - 16. [GUO H, WANG X. Relationship between the present-day ground fissures in Hebei Longyao and the 1966 Xingtai earthquake [J]. North China Earthquake Sciences, 2017, 35(1): 10 - 16. (in Chinese)]
- [6] 刘沛然, 杨成生, 赵超英. 河北邢台隆尧地裂缝活动PS-InSAR监测与分析[J]. 测绘技术装备, 2017, 19(4): 42 - 46. [LIU P R, YANG C S, ZHAO C Y, et al. PS-InSAR monitoring of Longyao ground fissure in Xingtai, Hebei province [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2017, 19(4): 42 - 46. (in Chinese)]
- [7] 马学军, 宋伟, 王洪磊. 隆尧地裂缝成因[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, 22(3): 43 - 47. [MA X J, SONG W, WANG H L. Causes for the ground cleave in Longyao county [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2011, 22(3): 43 - 47. (in Chinese)]
- [8] 冯军, 李红光, 吴涛, 等. 河北隆尧隐伏断裂地球化学探测[J]. 物探与化探, 2011, 35(5): 597 - 599. [FENG J, LI H G, WU T, et al. Geochemical survey of Longyao concealed fault in Hebei [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(5): 597 - 599. (in Chinese)]
- [9] 徐继山, 彭建兵, 马学军, 等. 邢台市隆尧地裂缝发育特征及成因分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 160 - 169. [XU J S, PENG J B, MA X J, et al. Characteristic and mechanism analysis of ground fissures in Longyao of Xingtai [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 160 - 169. (in Chinese)]
- [10] PENG J B, XU J S, MA R Y, et al. Characteristics and mechanism of the Longyao ground fissure on north China plain, China [J]. Engineering Geology, 2016, 214: 136 - 146.
- [11] 宋伟, 马学军, 贾国欣. 邢台隆尧典型断层蠕滑型地裂缝成因初析[J]. 地质学刊, 2011, 35(4): 405 - 412. [SONG W, MA X J, JIA G X. Cause analysis of creep type ground fissures for Longyao typical faults in Xingtai [J]. Journal of Geology, 2011, 35(4): 405 - 412. (in Chinese)]
- [12] 黄禄渊, 杨树新, 崔效锋, 等. 华北地区实测应力特征与断层稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 204 - 213. [HUANG L Z, YANG S X, CUI X F, et al. Analysis of characteristics of measured stress and stability of faults in North China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup1): 204 - 213. (in Chinese)]
- [13] 谭成轩, 胡秋韵, 张鹏, 等. 日本 M_w 9.0级大地震前后华北和东北地区现今构造应力作用调整过程与研究意义探讨[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 345 - 359. [TAN C X, HU Q Y, ZHANG P, et al. Present tectonic stress adjustment process before and after Japan M_w 9.0 earthquake in North and Northeast China and its research significance [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 345 - 359. (in Chinese)]
- [14] 徐杰, 方仲景, 杨理华. 1966年邢台7.2级地震的构造背景与发震构造[J]. 地震地质, 1988, 10(4): 51 - 59. [XU J, FANG Z J, YANG L H. Tectonic background and causative fault of 1966 Xingtai M_s 7.2 earthquake [J]. Seismology and Geology, 1988, 10(4): 51 - 59. (in Chinese)]
- [15] 陈望和, 倪明云. 河北第四纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 4 - 68. [CHENG W H, NI M Y. Hebei Quaternary geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 4 - 68. (in Chinese)]
- [16] 李志明, 杨旭东, 兰剑梅, 等. 河北邢台柏乡地裂缝成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 135 - 138. [LI Z M, YANG X D, LAN J M, et al. An

- analysis of earth fissures at Baixiang county, Xingtai city[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2):135-138. (in Chinese)]
- [17] YANG C S, LU Z, ZHANG Q, et al. Deformation at Longyao ground fissure and its surroundings, north China plain, revealed by ALOS PALSAR PS-InSAR [J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2018, 67:1-9.
- [18] 蒋臻蔚, 彭建兵, 王启耀. 先存断裂对抽水沉降及地裂缝活动影响的数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4): 1099-1103. [JIANG Z W, PENG J B, WANG Q Y. Numerical simulation of the effect of preexisting fault on land subsidence and ground fissures during pumping[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(4): 1099-1103. (in Chinese)]
- [19] 王启耀, 蒋臻蔚, 彭建兵. 抽水作用下先存断裂活化滑移机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 108-112. [WANG Q Y, JIANG Z W, PENG J B. Mechanism of reactivation and slip of the preexisting fault under pumping[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 108-112. (in Chinese)]
- [20] 沈正康, 万永革, 甘卫军, 等. 华北地区 700 年来地壳应力场演化与地震的关系研究[J]. 中国地震, 2004, 20(3): 211-228. [SHEN Z K, WAN Y G, GAN W J, et al. Crustal stress evolution of the last 700 years in north China and earthquake occurrence[J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(3): 211-228. (in Chinese)]
- [21] 李瑞莎, 崔效锋, 刁桂苓, 等. 华北北部地区现今应力场时空变化特征研究[J]. 地震学报, 2008, 30(6): 570-580. [LI R S, CUI X F, DIAO G L, et al. Temporal and spatial variation of the present crustal stress in northern part of North China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(6): 570-580. (in Chinese)]
- [22] 黄强兵, 马玉杰, 姜紫看, 等. 地裂缝活动作用下地层应力和位移传递规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 144-150. [HUANG Q B, MA Y J, JIANG Z K, et al. A study of the transfer law of formation stress and displacement induced by active ground fissures [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 144-150. (in Chinese)]
- [23] 张家茹, 邵学钟, 章思亚, 等. 邢台强震的深部三维构造背景和孕震条件[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 319-328. [ZHANG J R, SHAO X Z, ZHANG S Y, et al. Background of 3-D deep structure and dynamic conditions for occurrence of strong Xingtai earthquake [J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 319-328. (in Chinese)]
- [24] 于文才, 杨亚磊, 卢全中, 等. 不同活动速率下隐伏地裂缝的模型试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 98-105. [YU W C, YANG Y L, LU Q Z, et al. Comparative study on physical model test of concealed ground fissure rupture propagation under different activity rates[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 98-105. (in Chinese)]
- [25] 邵长庆, 杨强, 李浩, 等. 活动断层作用下地裂缝开裂机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 34-41. [SHAO C Q, YANG Q, LI H, et al. A study of the cracking mechanism of ground fissures under the action of active faults[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 34-41. (in Chinese)]

编辑: 汪美华