doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.014

山西清徐—太谷地区地裂缝形成机理

贾润幸¹,方维萱¹,张建国¹,张普斌¹,张忠义¹,肖文进¹,秦邦策¹,孙银行² JIA Runxing¹, FANG Weixuan¹, ZHANG Jianguo¹, ZHANG Pubing¹, ZHANG Zhongyi¹, XIAO Wenjin¹, QIN Bangce¹, SUN Yinhang²

1.有色金属矿产地质调查中心,北京 100012;

2.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北保定071051

1. China Nonferrous Metals Resource Geology Survey, Beijing 100012, China;

2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China

摘要:山西清徐—太谷地区是中国地质灾害高发区之一,地质灾害类型主要有活动断裂、滑坡、地震、地裂缝等。通过对该区 开展地面路线地质调查、物探、水文工程钻探等工作,将地裂缝划分为山前地裂缝和盆地中部地裂缝2类。山前地裂缝主要与 断陷盆地盆-山转换带的活动断层有关,其盆地上基底构造层岩石组合具有软硬相间的"二元结构"特征,由厚层状砂岩和薄 层状粉砂质泥岩组成,这种"二元结构"在外在因素(如暴雨、地震等)的诱发作用下,软质层容易产生层间滑动,导致地裂缝等 地质灾害。盆地中部地裂缝除与可能的隐伏断裂有关外,主要与清徐—太谷地区地下水过度开采有关。水文工程钻探揭露 了该断陷盆地中多个含水层,每个含水层结构中的上下层为不透水的厚大粘土层或粉砂质粘土层,中间含水层为粉砂或细砂 层。当地下水过量开采时,水位降低,含水层受上覆地层重力作用影响,发生沉降形成地裂缝。清徐—太谷地区上更新统粉 质泥岩中常可见少量白色膏盐团斑,推测是造成本区地下水质普遍偏成的原因。

关键词:清徐-太谷;断陷盆地;地裂缝;形成机理;地质调查工程

中图分类号:P694;X141 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2022)07-1282-09

Jia R X, Fang W X, Zhang J G, Zhang P B, Zhang Z Y, Xiao W J, Qin B C, Sun Y H. The formation mechanism of ground fissures in Qingxu-Taigu area, Shanxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7):1282–1290

Abstract: Qingxu-Taigu area, Shanxi Province is one of the high incidence of geological disasters in China, the main types of geological disasters are active fault, landslide, earthquake, ground fissure and so on. This article based on the ground route geology survey, geophysical prospecting and hydrological engineering drilling, preliminarily divided the ground fissures in this area into two categories, which are the ground fissures nearby mountain and the ground fissures in central basin. The ground fissures nearby mountain are mainly associated with the active fault in the transition zone between the mountain and the graben basin, the underlying bedrock of the basin shows the characteristics of "dual structure" mainly consisting of the thick layer of sandstone and thin bedded silty mudstone, which is very easy to produce interlayer slip and lead to geological disasters such as ground fissures induced by the external factors(such as heavy rain and earthquake, etc.). The ground fissures in central basin are mainly related to groundwater overexploitation besides the possible concealed faults under the basin. The results of hydro-engineering drilling show that there are multiple aquifers in the central basin. The aquifers closed by impermeable thick clay layer or silty clay layer are usually composed of silty sands or fine sands. When the groundwater in central basin is overexploited, the water level will decrease, and the aquifer will sink to form ground fissure by the gravity of overlying strata. In addition, a small amount of white salts are often found in the Upper Pleistocene silty mudstone that may be the reason for the

资助项目:中国地质调查局项目《晋中盆地资源环境综合地质调查》(编号:DD20190593)

作者简介:贾润幸(1969-),男,博士,教授级高级工程师,从事沉积盆地及岩石学方面的研究。E-mail:chookdog@163.com

收稿日期:2020-04-10;修订日期:2020-05-30

general saltiness of underground water in this area

Key words: Qingxu-Taigu; graben basin; ground fissure; formation mechanism; geological survey engineering

地裂缝是国内外普遍存在的地质灾害类型之 一^[1-4],关于地裂缝的形成有构造成因说^[5-8]、地下 水过渡开采成因^[9]、复合成因说^[10]、黄土塌陷^[11]等, 总体可归纳为构造控制、应力驱动、区域水动力影 响等成因模式^[12-13]。山西清徐—太谷一带是中国 地质灾害高发区之一,地质灾害类型主要有活动断 裂、滑坡、地震、地裂缝等,其中地裂缝多分布于人 口居住的密集区,常造成重大的潜在隐患。关于地 裂缝的成因,前人普遍认为与活动断裂和地下水过 度开采有关^[6,8-9,14-15]。

笔者在对山西清徐—太谷地区开展地表路线 地质调查和少量物探、工程钻探、水文钻探等综合 地质调查和评价的基础上,结合该地区不同地裂缝 形成的地质背景和物质组成,从构造岩相学角度, 探讨研究区地裂缝形成机理,旨在为该区城市建设 进行科学规划提供依据,推进构造岩相学综合调查在 生态环境治理和地质灾害综合防治中的应用。

1 区域地质背景

晋中断陷盆地是山西省中部的一个大型新生 代陆内山间断陷盆地,盆地呈北东向展布,内部沉 积有巨厚新生界。盆地内新生代沉积层厚一般为 1000~2000 m,最厚达 3800 m。盆地基底地层主要 为石炭系煤系岩系、二叠系和三叠系砂页岩和岩屑 砂岩^[6],局部分布有侏罗纪碱性侵入岩,它们为盆地 上基底构造层。盆地周边出露和深埋的盆地下基 底构造层为奥陶系和寒武系碳酸盐岩系。在中生 代燕山运动时期(晚侏罗世),山西地块受中部离 石-阳泉纬向构造带影响,形成了北部以北东向复 背斜为主、南部以北北东向复向斜为主的构造格 局。喜山运动以来,由燕山期反扭主向转变为顺扭 主向,北东向、北北东向及北东东向断裂转变为张 性或扭张性,沿这些断裂发生了断块陷落成盆,盆 地两侧基底断隆成山。晋中盆地边缘铲式断裂与 中生代推覆断层相伴生,切割部分推覆体,或沿原 中生代压性断裂形成张剪性断层。

2 活动断层特征

山西地堑系形成于新构造前奏阶段(8.5~3.6

Ma),构造活动以走滑伸展变形为主,引张应力方向 为北西---南东向:在随后的新构造主变动阶段(3.6~ 0.78 Ma),引张作用和伸展变形仍然占主导地位;在 最新构造变动阶段(0.78~0.15 Ma),沿北北东向展 布的山西地堑系引张作用及裂谷盆地进一步发展, 右旋走滑活动强烈^{16]}。清徐—太谷地区活动断裂 控制晋中盆地边界(图1),交城断裂(F1)是晋中盆 地西边界的主控断裂^[14],洪山-范村断裂(F5)是晋 中盆地东边界的主控断裂^[9],活动方式为右旋走滑 兼正倾滑活动^[15]。盆地边界断层多以正断层为主, 平移断层次之。正断层可分为高角度正断层和低 角度正断层。高角度正断层倾角一般大于 75°, 主 断裂带以现今地貌陡变区为标志。如在第四系砂 粘土层中发育大型张性裂隙,宽度超过 20 cm,滑动 面上可见明显的擦痕(产状 70° ∠ 78°)(图 2-a、b)。 上石炭统厚层状岩屑砂岩夹薄层状粉砂质泥岩中 发育基底断层破碎带,断裂带中岩石裂隙明显增 多,厚层状岩屑砂岩被剪切后产生垂直于层理面的 构造破碎带(图 2-c、d)。低角度正断层倾角一般为 45°~60°,多分布于主断裂带地貌缓变区,断距最大 可超过1m,从高处到低处呈渐变趋势,通常高处倾 角较大(如图 3-a 中产状为 232°∠60°),低处倾角 趋于变小(如图 3-b 中产状为 185°∠45°),岩石破 碎松散,为应力缓慢释放变形区,这也是引发地裂 缝的主要因素之一。从吕梁山-太行山激电剖面图 (图4)看,在晋中盆地两侧及吕梁山和太行山之间 的盆山转变带附近,发育明显的高角度正断层,它 们共同控制了晋中盆地断陷成盆作用;同时,在盆 地中部还发育数条隐伏正断层,这与地震方法获得 的结果较一致。揭示晋中盆地动力学类型为陆内 双断型地堑盆地。

3 地裂缝特征及活动性分析

山西清徐—太谷地区地裂缝可分为山前地裂 缝和盆地平原区地裂缝(图1)。

(1)山前地裂缝是晋中盆地最主要的地裂缝, 也是危害最大的地质灾害,它们受山前低角度正断 层控制,以清徐县马峪村—平泉村一带的地裂缝为 代表。该地裂缝呈串珠状沿清徐-交城活动断裂带



图 1 晋中盆地(清徐—太谷段)地裂缝分布图(a)和大地构造位置(b)^[16] Fig. 1 The ground fracture distribution of the Jinzhong basin(Qingxu-Taigu area)(a) and tectonic position(b) 1—断层;2—正断层;3—地裂缝长度大于 2 km;4—地裂缝长度 1~2 km;5—地裂缝长度 500~1000 m;6—地裂缝长度小于 500 m; 7—地裂缝群(大于等于 2 个);8—水系;9—第四系等厚度线(m);10—区域挤压方向;11—区域引张方向;12—剪切方向;13—工作区; 14—物探剖面位置;15—工程钻孔;16—水文钻孔;F1—交城断裂;F2—龙家营断裂;F3—东阳断裂;F4—平遥-太谷断裂;F5-范村-洪山断裂

东南侧上盘分布,走向为 NE30°~80°,优势方位为 NE45°~70°,与清徐-交城活动断裂带基本一致。 该地裂带由 1~4 条地裂缝组成,相距 30~200 m,带 宽 30~240 m, 一般由一条主地裂和若干条次级裂 缝组合而成,具成带性特点,在清徐境内地裂缝断 续延伸长度达 15 km^[17-18]。该类地裂缝常对当地居 民房屋等造成直接破坏,房屋墙体发生"Y"字形破 裂(图5)。沿该构造岩相变形带常出现多年喷涌的 泉水,泉水喷涌点呈线状分布,附近可见多棵逾千 年的古槐树。泉水出露与山前断裂带有关,由于山 前泉水不断渗透造成局部层位和构造裂隙中水处 于饱和状态,使地层和沉积物变软后容易裂开,加 剧了地裂缝活动的风险。山前地裂缝受地形地貌 条件及降雨、地震等突发外界条件影响,起初多形 成地裂缝,随着外界因素的不断改变,可最终演变 成大面积的滑坡灾害,如清徐县清泉寺滑坡灾害和

太谷县王家坡滑坡灾害。

(2)盆地平原区的地裂缝主要分布于太谷一带 的耕地和果林中,多呈线状一带状分布,在地表仍可 见一些残留小塌陷。该处的地裂缝通常位于隐伏 断裂带(图1中的F3和F4)附近,并伴有降水漏斗 的形成,在时间上与降水漏斗的发生、发展大体同 步^[10]。盆地中部(图4)激电剖面的成果进一步验 证了盆地中部隐伏断裂带的存在,表明盆地中部平 原区内地裂缝可能与隐伏断裂具有一定的关系。

(3)该区为山西主要的农业产区,地势平坦,耕 地中地表土以土黄色粉土为主,农业灌溉以抽取地 下水为主。从本区施工的水文钻孔(图1)结果看, SZK01钻孔静止水位-19.87 m,水位高程 727.95 m; SZK02钻孔静止水位-35.15 m,水位高程 765.72 m; SZK03钻孔静止水位-44.5 m,水位高程 765.72 m,表 明从西部的清徐县到东部的太谷县,总体上地下静



图 2 山西清徐县盆山转换带中高角度活动断层特征

Fig. 2 The highangle active fault characteristics in the transition zone between mountain and basin, Qingxu, Shanxi a-第四系中发育的正断层; b-断层接触面右侧可见擦痕; c-仁义村附近发育的山前切层断裂破碎带; d-山前断裂带中已完全破碎的岩石堆积物



图 3 山西清徐县平泉村附近的低角度活动正断层





Fig. 4 The IP profile from Lvliang mountain to Taihang mountain in Jinzhong basin, Shanxi

止水位有降低的趋势。

(4)在晋中盆地的本文研究区内,太谷县为农

业大县,该地区静止水位的降低可能与地下水的开 采有关。过度开采利用盆地中部的地下水会对区



图 5 山西清徐一带的地裂缝特征 Fig. 5 The ground fissure characteristics inQingxu area,Shanxi a—清徐县西马峪乡地裂缝;b—清徐县马峪乡地裂缝

域地下水平衡状态产生较大影响,并将间接影响到 区域稳定性,如直接或间接诱发地裂缝等地质灾 害。因此,合理开采地下水是生态环境资源协调发 展的基础。

4 地裂缝地质灾害形成机理

4.1 盆地内沉积地层及沉积相分析

晋中盆地第四系沉积物为地裂缝发育的主要 载体。本次在山西清徐北格镇施工了工程地质钻 孔7个,在靠近山前断裂带施工钻孔3个,对晋中 盆地内第四纪沉积充填体进行综合调查评价。根据钻孔岩心资料并结合地表路线构造岩相学综合观测对比结果(图6),第四系全新统(Q₄)和上更新统(Q₃)岩土工程特征如下。

(1)第四系全新统以粉砂和粉土为主,沉积环 境以河漫滩沉积相为主。上更新统以粉土、粉质 粘土、砂质粉土夹少量细砂为主,以河湖相沉积为 主。二者地层单元岩性组合和沉积相具有较大差 异,全新统岩性颜色主要为褐红色粉土夹少量土 灰色粉土,含少量粉砂,推测沉积环境可能为河漫



图 6 晋中盆地中部第四系沉积物特征 Fig. 6 The quaternary sediment characteristics in middle of basin, Qingxu, Shanxi a--黄褐色粉土; b-灰色粉土与紫红色粉质粘土中的白色膏岩; c--紫红色粘土; d--细砂类

滩相,以褐红色粉土为地球化学氧化相的标志;上 更新统粉土、粉质粘土、砂质粉土夹少量细砂,粉 土呈稍密,稍湿或很湿,具较强的摇震反应,粘性 土(粉质粘土、粘土)湿,切面光滑,可塑,细砂较 松散、湿或饱和。暗红色-紫红色粉质粘土和土 黄色-青灰色粉土交替出现的韵律层,表明沉积 期间水位发生了反复抬升与下降,造成地球化学 氧化-还原相具有震荡式相体结构。中更新统分 布在晋中盆地深部或出露在两侧山区,以洪积亚 粘土夹砂砾石、粘土为主,局部发育钙质结核。 下更新统分为2个组,泥河湾组以冲-湖积相沙、 亚粘土、粘土和泥灰岩为主,泥灰岩为湖积相典 型标志。长凝组为冲积相沙夹砾石、薄层粘土。 下更新统分布在研究区隐伏区(200 m)浅部 地层^[6]。

(2)在上更新统紫红色粉质泥岩中,可见少量 白色膏盐团斑,揭示曾经为干旱炎热古气候环境或 为黄土区含膏碳酸盐型古风化壳,推测研究区地下 水的水质普遍偏咸与该层位有关。 (3)钻孔揭露了 2 个含水层结构,推测上部含 水层为相对开放体系,下部含水层为近封闭体系。 全新统中上部含水层结构中以粉砂层为含水层,上 下盘为半透水性粉土层或不透水层,并对含水层形 成了封闭结构。上更新统下部含水层结构以细砂 层为含水层,上下盘多为 2~4 m 厚透水性较差的粉 质粘土层,对含水层形成了封闭结构。

在岩体力学参数特征上(表1),粉土层含水率为16.70%~21.10%,平均为19.4%,干密度为1.71~ 1.79 g/cm³,平均为1.74 g/cm³,孔隙度为33.6%~ 36.7%,平均为35.34%,塑性指数为6.3~9.0,平均 为8.06,快剪指数为9.50~17.40,平均为13.93。粉 质粘土层含水率为23.80%~27.30%,平均为25.62%, 干密度为1.55~1.63 g/cm³,平均为1.59 g/cm³,孔 隙度为39.80%~43.10%,平均为41.72%,塑性指数 为10.90~16.50,平均为12.85,快剪指数为20.6~30.9, 平均为25.22。粘土层含水率为28.1%~31.1%,平均 为29.13%,干密度为1.44~1.52 g/cm³,平均为 1.48 g/cm³,孔隙度为44.6%~47.6%,平均为46.13%,

	表 1	山西清徐	—太谷一带	岩土物理参	数		
Table 1	Rock and so	il physical	parameters	in Qingxu-	-Taigu	area,	Shanxi

岩土 深度 含水率 密度 干密度 孔隙 饱和度 液限 塑限 塑性 快剪 C。 样号 序号 时代 $/(g \cdot cm^{-3})/(g \cdot cm^{-3})$ 度/% 名称 /m /% /% /% /% 指数 ∕kPa 粉土 21.10 36.70 8.80 1 ZK02-Y3 Q4 8 2.071.71 98.50 25.60 16.80 15.102 ZK02-Y5 粉土 12 19.80 2.07 1.73 94.90 26.00 17.40 Q4 36.00 8.60 17.40 3 ZK12-Y12 O4 粉土 34 20.80 2.071.71 36.50 97.40 24.30 15.30 9.00 11.10 4 ZK12-Y14 Q4 粉土 38 19.80 2.09 1.74 35.20 98.30 22.90 15.507.40 9.50 5 ZK02-Y14 粉土 17.50 1.78 91.20 Q3 30 2.09 34.10 22.60 14.50 8.10 15.80 粉土 99.10 6 ZK02-Y31 Q3 64 20.102.091.74 35.30 23.70 17.406.30 15.10 7 ZK10-Y14 Q3 粉土 32 16.70 1.79 33.60 88.90 21.70 8.20 2.0913.40 13.50 平均值 19.40 1.74 95.47 23.83 2.0835.34 15.76 8.06 13.93 ZK10-Y8 粉质粘土 25.70 2.00 1.59 42.00 97.50 36.50 19.90 16.50 25.30 1 Q4 20 粉质粘土 2 ZK12-Y5 Q4 2023.80 2.021.63 39.80 97.60 28.90 18.0010.90 20.60 3 ZK12-Y16 Q3 粉质粘土 44 26.30 1.97 1.56 42.90 95.70 37.20 22.60 14.60 30.90 4 ZK10-Y19 Q3 粉质粘土 46 26.20 1.97 1.56 42.40 96.40 32.40 20.90 11.50 23.00 ZK02-Y28 粉质粘土 98.00 5 Q3 58 27.30 1.97 1.55 43.10 32.50 20.30 12.20 30.10 ZK12-Y23 粉质粘土 98.90 6 Q3 58 24.402.021.6240.10 28.1016.70 11.40 21.40平均值 97.35 25.62 1.99 1.59 41.72 32.60 19.73 12.85 25.22 ZK02-Y25 Q3 粘土 28.20 1.47 46.20 90.00 41.20 1 52 1.89 23.70 17.50 36.40 2 ZK10-Y27 Q3 粘土 28.10 1.52 95.80 44.70 64 1.95 44.60 23.30 21.4034.80 粘土 94.30 3 ZK12-25 Q3 66 31.10 1.89 1.44 47.60 43.80 23.60 20.2053.10平均值 93.37 43.23 29.13 1.91 1 48 46.13 23.53 19.70 41.43

注:测试单位为自然资源部保定矿产资源监督检测中心

塑性指数 17.5~21.4,平均为 19.7,快剪 34.8~53.1, 平均为 41.43。总之,含水率特征为粉土层<粉质粘 土层<粘土层,干密度特征为粉土层>粉质粘土层> 粘土层,空隙度特征为粉土层<粉质粘土层<粘土 层,塑性指数特征为粉土层<粉质粘土层<粘土层, 快剪特征为粉土层<粉质粘土层<粘土层。随着粘 土含量增加,岩土体中含水能力增强,液限不断增 高,塑性限和塑性指数提升。

4.2 盆地基底地层岩石组构特征

晋中盆地西北为吕梁山脉,东侧为太行山脉, 在西北侧清徐一带盆山转换结合带出露基底地层 为上石炭统山西组厚层状岩屑砂岩和薄层状粉砂 质泥岩。山西组为浅海陆棚区三角洲相沉积[19]。 在东南侧太谷盆山转换结合带出露的基底地层为 上三叠统厚层状长石砂岩和薄层状粉砂质泥岩,这 些基底岩层都具有明显的软硬相间的"二元结构" 特征(图7)。在太谷盆山转换结合带中,长石砂岩 单层厚度一般为0.5~1.0 m,部分大于2 m。该地层 发育平行层理和交错层理,产状平缓,倾角多小于 10°, 一般为0°~32°∠8°~9°, 在强构造应力变形区 为48°~84°∠16°~27°。在盆山转换带附近受区域 范村-洪山活动断层右旋走滑兼正倾滑剪切应力影 响,岩层中垂向切层节理裂隙明显增多,最多达到 9条/m,可分为3组节理,产状分别为188°~ 195°∠76°~77°,239°~254°∠82°,75°∠83°。部分 垂向贯通后呈切穿多层大型裂隙的基岩体破裂面, 这些脆性裂隙破裂面为降雨-地表水进入基岩体内 部提供了构造裂隙通道。薄层状粉砂质泥岩单层 厚度一般为0.1~0.3 m,产状同厚层状岩屑砂岩一 致,在盆山转换带附近受活动断层垂向剪切应力影 响,该软质岩层垂向构造裂隙明显增多,最多达到 100条/m,揭示强碎裂岩化相为水体渗流和岩层水 化作用提供了良好的构造岩相学条件。这种软硬相 间的二元结构面在盆山转换带内,受活动断层形成的 右旋走滑兼正倾滑剪切作用影响,发生明显的破裂作 用,在遭遇极端降雨天气后,地表水沿厚层状岩屑砂 岩的垂向切层裂隙下渗到薄层状粉砂质泥岩层中,形 成裂隙储水层。薄层状粉砂质泥岩在水浸泡作用下 发生基岩层软化,软化基岩层和裂隙储水层成为层间 活动面。当整个山体不断遭受雨水浸泡后,具有这种 二元构造岩相学结构面的山体在重力作用下,会形 成多个潜在构造滑动面,在基岩体蠕动作用下,当 超过平衡临界值后形成滑动。初期山体出现裂缝,随 着重力失稳作用加剧最终演化为滑坡作用(体)。

4.3 地裂缝地质灾害形成机理

从前人资料及本次地质调查结果看,晋中盆地 形成的地质背景为拉张断陷盆地,而且至今处于伸 展地质作用,由此产生一系列的北东—北北东向大 断裂,后期的活动断裂对原有的断裂具有一定的继 承性。这种伸展作用除与区域构造应力作用有关 外^[15,20-21],通常还与盆地深部上地幔的隆起掀斜作 用有关^[6-7]。

晋中盆地的地裂缝根据分布范围可分为山前 地裂缝和盆地中部平原区地裂缝(图8),两者的形 成机理具有明显的差异:山前地裂缝是晋中盆地最 主要的地裂缝,多沿盆山转换带活动断裂上盘分 布,其走向与活动断裂走向基本一致,地裂缝的拉 张方向与活动断裂倾向也基本一致,表明山前地裂 缝的形成与山前活动断裂有直接关系。晋中盆地 西侧为上石炭统,东侧为上三叠统,由厚层状砂岩 和薄层状粉砂质泥岩组成了软硬相间的"二元结 构"构造岩相学特征,产状总体较平缓,这种"二元 结构"被盆山转换带的活动断层破坏,造成岩层倾 角增大,或发生碎裂岩化相。在"二元结构"构造岩 相层中,薄层状粉砂质泥岩在雨水作用、长期淋滤 和地表水下渗作用下发生岩石变软和蠕动变形,导 致厚层状砂岩发生层间滑动,在上覆第四系出露区 形成地裂缝。在山前活动断裂发育区,山前泉水涌 出和地下水的过渡开采导致地面沉降,会进一步加 剧已有地裂缝潜在危害。盆地中部平原区地裂缝的 形成,除与盆地内部隐伏断裂(图 8)有关外,也与地 下水过度开采引起的地面不均衡沉降有关。从图 1 中3个水文钻孔中的水位高程结果看,盆地中间的 水位明显低于盆地两侧。通常情况下,在断陷盆地 的基底形态中,盆地中间的沉积厚度远大于盆地两 侧,如该区地下水过量开采最易导致地面的不均衡 沉降。该盆地中可见多个含水层,含水层结构通过 钻探工程揭露表现为:上下层通常由不透水的厚大 粘土层或粉砂质粘土层组成,中间为粉砂或细砂。 当地下水过量开采时,水源没有及时得到补充,含 水层受上覆地层重力作用发生沉降,这种差异沉降 引起的拉张、剪切应力超过该带土层抗拉、抗剪强 度时,会发生破裂进而形成地裂缝。

从上述 2 种地裂缝的形成机理看,山前地裂缝







a—基底岩石"二元结构";b—切层贯穿性构造裂隙;c—薄层泥质粉砂岩形成层间滑动面;d—层间滑动面形成的破碎角砾岩



Fig. 8 The schematic diagram of formation mechanism for ground fissures in Jinzhong basin 1—第四系沉积;2—上新统沉积;3—上三叠统沉积;4—上石炭统沉积;5—厚层状砂岩与薄层状粉砂质泥岩形成的"二元结构"和切层节理;6—第四系粘土;7—第四系粉土;8—细砂;9—正断层;10—地裂缝;11—含水层;12—山前泉水

形成的主因为活动断层作用影响所致,盆地中部平 原区地裂缝的形成主要是人为因素诱发所致,但也 有盆地中部基底隐伏断裂活动的影响。前者只能 进行自然规避,而后者可以采取合理限量的地下水 开发利用和回灌措施,实现生态环境资源协调发 展。同时,今后需加强对盆地内隐伏活动断裂的定 位探测,为城市和道路建设规划和可行性论证研究 提供科学依据。

5 结 论

(1)从山西清徐—太谷地区地裂缝特征看,本区的地裂缝可分为山前地裂缝和盆地中部地裂缝,山前地裂缝主要与断陷盆地盆-山转换带的活动断层有关,盆地平原区的地裂缝除与可能的隐伏断裂

有关外,还与本地区的地下水过度开采有关。

(2)本区断陷盆地上基底岩石组合具有软硬相间的"二元结构",主要由厚层状砂岩和薄层状粉砂质泥岩组成,这种特征的"二元结构"在外在因素(如暴雨、地震等)的诱发作用下容易产生层间滑动,导致地裂缝或滑坡等地质灾害。

(3)该断陷盆地中可见多个含水层,每个含水 层结构表现为上、下层通常由不透水的厚大粘土层 或粉砂质粘土层组成,中间粉砂或细砂层为含水 层。当地下水过量开采时水位降低,含水层受上覆 地层重力作用影响发生沉降形成地裂缝。

(4) 在本区第四系上更新统(Q₃) 紫红色粉质 泥岩中常可见少量白色膏盐团斑, 推测是造成本区 地下水质普遍偏咸的原因。

致谢:野外工作期间得到中国地质调查局水文 地质环境地质调查中心朱继良博士和相关专家的 指导,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并 致谢。

参考文献

- Geng D Y, Li Z S.Ground fissure hazards in USA and China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 13(4): 466–476.
- [2] Rudolph D L, Cherry J A, Farvolden R N. Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico city[J].Water Resources Research, 1991, 27(9): 2187–2201.
- [3] Ei Baruni S S.Earth fissures caused by groundwater withdrawal in Sarir south agricultural project area, Libya[J]. Applied Hydrogeology, 1994, 2 (1): 45-52.
- [4] Ayalew L, Yamagishi H, Reik G. Ground cracks in Ethiopian rift valley: facts and uncertainties[J].Engineering Geological,2004,75: 309–324.
- [5] 彭建兵.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(4):433-440.

- [6] 孟令超,彭建兵,卢全中,等.山西太原盆地地裂缝群发机制与深部 构造关系[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(1):76-85.
- [7] 邓亚虹, 彭建兵, 慕焕东, 等. 渭河盆地深部构造活动的地裂缝孕育 机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(2): 521-527.
- [8] 陈元明.山西断陷盆地地裂缝特征分析[J].中国地质灾害与防治 学报,2016,27(3):72-80.
- [9] 孙晓涵,彭建兵,崔向美,等.山西太原盆地地裂缝与地下水开采、 地面沉降关系分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2): 91-98.
- [10] 苏宗正,郝何龙,侯廷爱,等.太原盆地的地裂及其灾害[J].山西地震,2000,(3):1-5.
- [11] 汪丽,李新生,李同录.隐伏地裂缝扩展的大型原位浸水试验研究[J]. 地质力学学报,2019,25(3):412-420.
- [12] Peng J B, Qiao J W, Sun. Distribution and generative mechanisms of ground fissures in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 191: 1–14.
- [13] Howard K W F, Zhou W F. Overview of ground fissure research in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(3): 97.
- [14]谢新生,江娃利,孙昌斌,等.山西交城断裂带多个大探槽全新世 古地震活动对比研究[J].地震地质,2008,30(2):412-430.
- [15]谢新生,江娃利,王焕贞,等.山西太谷断裂带全新世活动及其与 1303年洪洞8级地震的关系[J].地震学报,2004,26(3):281-293.
- [16]张岳桥,廖昌珍,施炜,等.鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及 其区域动力学背景[J].高校地质学报,2006,12(3):285-297.
- [17] 门玉明,彭建兵,李寻昌.山西清徐县地裂缝灾害现状及类型分析[J]. 工程地质学报,2007,15(4):453-457.
- [18] 马秀芳,赵晋泉,薛晓东,等.山西清徐地裂缝调查与灾害损失评 估研究[J].地震工程学报,2016,38(2) 增刊: 308-313.
- [19] 叶黎明,齐天俊,彭海燕.鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境 分析[J].沉积学报,2008,26(2):202-210.
- [20] 王涛,徐鸣洁,王良书,等.鄂尔多斯及邻区航磁异常特征及其大 地构造意义[J].地球物理学报,2007,50(1):163-170.
- [21] 马寅生,赵逊,赵希涛,等.太行山南缘新生代的隆升与断陷过程[J].地 球学报,2007,28(3): 219-233.