

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.14

山西太原盆地地裂缝与地下水开采、地面沉降关系分析

孙晓涵¹, 彭建兵^{1,2}, 崔向美¹, 蒋臻蔚^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 太原盆地是一个活动断裂多发、水资源缺乏的地区。长期以来, 过量开采地下水资源已导致太原盆地内出现了多种环境地质问题, 地面沉降即为典型的地下水超采伴生地质灾害。与此同时, 地裂缝灾害也在盆地内迅速发育, 严重影响着当地经济的发展。当地裂缝、地面沉降同时发生在某个区域内时, 两者相互作用往往大大加重了灾害的程度。本文以详细的地裂缝野外调查资料和地下水观测资料为基础, 全面分析了地裂缝和地下水开采、地面沉降在时间、空间、活动上的相互关系, 并根据地裂缝的成因机制阐述了产生这种相互关系的内在根源。通过研究, 本文认为太原盆地地裂缝的形成与发展与地下水超采在时空上有明显的正相关性, 减少地下水开采可降低地裂缝的危害程度。

关键词: 地裂缝; 地下水开采; 地面沉降; 太原盆地; 断陷盆地

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0091-08

Relationship between ground fissures, groundwater exploration and land subsidence in Taiyuan basin

SUN Xiaohan¹, PENG Jianbing^{1,2}, CUI Xiangmei¹, JIANG Zhenwei^{1,2}

(1. Department of Geology Engineering, College of the Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054, China)

Abstract: Taiyuan basin is a semiarid area and seriously short of groundwater resources but active fault is common in this area. For a long time, the excessive exploitation of groundwater resources has resulted a variety of environmental geological problems appeared, and land subsidence is a typical of groundwater associated geological disasters in Taiyuan basin. At the same time, the earth fissure disasters develop rapidly, seriously affect the development of local economy within the basin. When earth fissure, land subsidence occurred in same area simultaneous, the degree of disasters increase greatly. Based on the detailed field investigation of earth fissures and groundwater observation data, paper comprehensive analysis the relationship between earth fissures, groundwater exploitation and land subsidence in time, space and activities. then paper explains why the earth fissures have close relation to groundwater based on variety of mechanisms of earth fissures. Finally, paper suggests that the formation and development of earth fissures and groundwater exploitation have close correlation in time and space, reducing groundwater pumpage can significantly reduce the harm of earth fissures.

Keywords: earth fissure; groundwater exploitation; land subsidence; Taiyuan basin; cenozoic faulted basin

收稿日期: 2016-01-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973); 黄土重大灾害及灾害链的发生、演化机制与防控理论(2014CB744700); 断裂背景下抽水扩缝机制及预测研究(41202188)

第一作者: 孙晓涵(1983-), 男, 河北张家口人, 博士, 主要从事工程地质与地质灾害方面的研究。E-mail: sunxiaohan@qq.com

0 引言

地裂缝是地表岩土体发生开裂并形成一定规模裂缝的现象^[1]。地裂缝广泛分布于世界多个国家和地区^[2-6],美国西南部盆地和我国的华北平原、汾渭盆地地区为集中地区^[7]。截止2015年11月,汾渭盆地内共发育有地裂缝520条,其中长度大于1 km的大型、巨型地裂缝达207条,占全国同等规模地裂缝总数的70.2%^[8],是我国地裂缝发育最为强烈的地区。

太原盆地是汾渭盆地中部的一个次级断陷盆地,地裂缝于20世纪70年代最早出现在该盆地东部的太谷、祁县等地,造成了房屋建筑损毁、道路市政设施扭曲断裂,给当地社会发展,经济建设造成了很大影响。90年代后,随着人类经济活动的加强,地裂缝灾害表现出范围不断扩大、危害不断加重的趋势。截止2015年底,已有清徐、交城、文水、榆次、太谷、祁县、平遥7个县市发育107条地裂缝,其中长度大于1 km的大、巨型地裂缝34条。太原盆地西缘的清徐—文水地裂缝带长46 km,为我国迄今发现的最长的地裂缝带。近年来由于超采地下水导致地裂缝活动加剧,部分区段2010~2014年间平均活动速率达44 mm/a^[9],造成沿线大量房屋、道路、水利等基础设施破坏。太原盆地东部的祁县的白圭—郑家庄地裂缝长22.4 km,多处和大西高铁相交或近距离分布(图1),地裂缝两侧差异沉降明显,最大活动速率40 mm/a,严重威胁大西高铁的安全运营。太原盆地地裂缝的持续活动严重制约着当地经济的发展,成为盆地内的最主要的地质灾害。

由于地裂缝属于缓变型地质灾害,相对于泥石流、滑坡等突发性地质灾害,具有隐蔽性和长期性,加之太原盆地是典型的新生代断陷盆地,地裂缝和地面沉降成因机理均有别于苏锡常和华北平原地区,活动断裂和地裂缝、地面沉降之间的相互作用使得盆地内地裂缝的发生发展具有复杂性和特殊性。长期以来,各学者采用多种方法从不同角度对地裂缝和地下水开采、地面沉降关系进行了研究,对地裂缝的成因机制提出了不同的看法。李有利对山西各次级断陷盆地内大量勘探资料分析后认为地裂缝虽然在形态、分布等特征相似,但可能具有不同的成因机理。榆次地裂缝和地下水位下降有着密切的关系,而太谷的一条地裂缝则与雨后土体的冲蚀塌陷有关^[10]。丁学文从榆次地裂缝的活动特征、地震、地下水、地貌、地形变等诸方面证实了该区地裂缝是断裂活动间接所致,属构造成因,但地下水超采加剧了地裂缝的发展^[11]。赵超英采用

InSAR技术得到了清徐地区整体地表形变特征,并基于此推断地裂缝位置受到断裂控制,而近年来的异常活动则是由于地裂缝南侧沉降中心的出现所致^[12]。江娃利在交城断裂带进行活动断裂地质调查时发现清徐—文水地裂缝同洪积台地陡坎等活动构造地貌分布较为一致,开挖的多个探槽也证实了地裂缝与下伏活动断裂的位置相重合^[13]。苏宗正认为地裂缝的空间位置和运动受构造活动控制,但地下水开采对地裂缝的形成起诱发促进作用^[14]。山西省地质环境监测中心认为地裂缝是新构造活动和地下水位持续下降共同作用的结果,但不同地区主导因素不同^[15]。彭建兵概括了太原盆地地裂缝的几种成因模式,认为活动断裂是地裂缝活动的基础,地下水开采是地裂缝活动的条件,两者在地裂缝形成中前后衔接,缺一不可^[16]。武强对榆次地裂缝综合分析后认为,地裂缝灾害的形成、发展与地下水长期超采有着密不可分的关系,地下水超采对地裂缝的地面变形的形式和活动量的大小的影响不容忽视^[17]。前人对地裂缝和地下水开采、地面沉降的关系已有足够的重视,但限于地质条件的复杂和监测资料的不足,目前研究主要集中在灾情调查、发育特征和成因机制的理论性探讨上。由于理论评价结果得不到实际验证,不同层位的地下水开采对地裂缝的影响有无差异,地下水动态和地裂缝活动有何关系尚不明确,开采地下水导致地裂缝机理也有待进一步细化。本文以详细的地裂缝野外调查资料和地下水观测资料为基础,旨在通过总结分析地裂缝与地下水超采的时间和空间关系,对地裂缝与地下水开采的关系进一步细化,以期以太原盆地的地下水资源合理利用和地裂缝地面沉降的联合防治提供科学依据。

1 地裂缝发育的地质环境

太原盆地位于山西省中部,太行山与吕梁山之间,省会太原市即坐落于该盆地内部。盆地四周均为丘陵和山区环绕,盆地内地形平坦,汾河自北向南流经整个盆地(图1)。太原盆地作为一个新生代断陷盆地,地貌格局完全受活动构造控制,表现为典型的活动构造地貌^[18]。

交城断裂(F1)位于盆地西缘是盆地内活动最强烈的断裂也是最主要的控盆断裂,其上盘发育了大面积的洪积扇。范村—洪山断裂(F5)位于盆地东缘,由于活动速率不及交城断裂,盆地和边山通常不直接接触,两者之间分布着土石丘陵和黄土台地。土石丘陵和黄土台地前缘分布有洪积扇,是人类经济活动比较

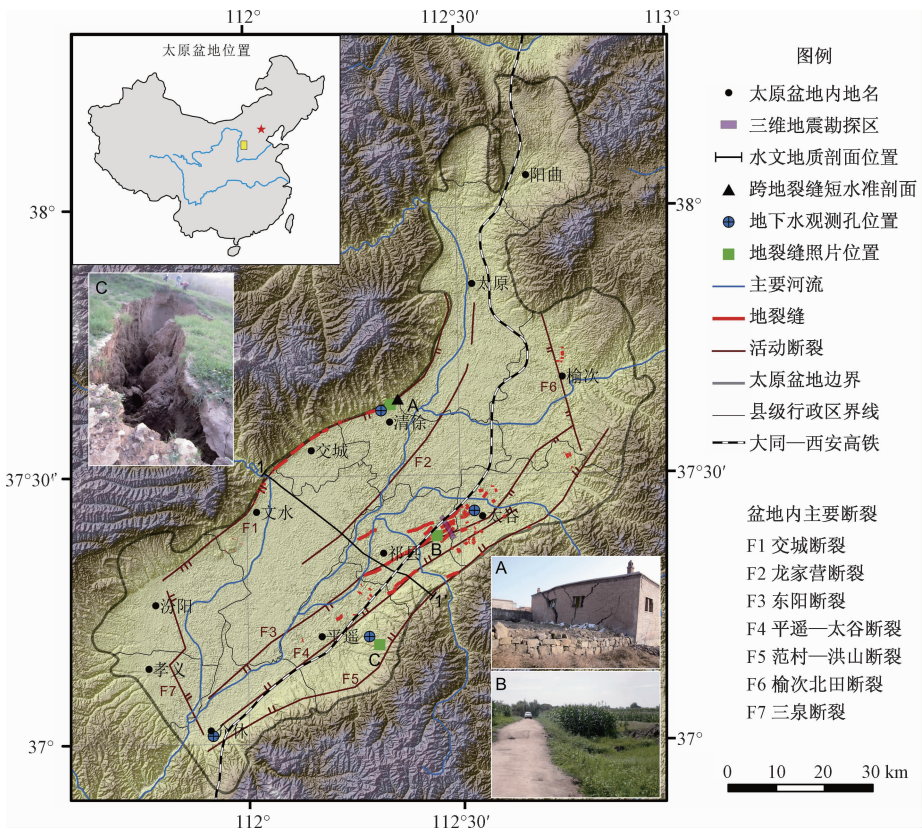


图 1 太原盆地地裂缝分布图
Fig.1 Earth fissures in Taiyuan basin

集中的地区,盆地内大多数县城即分布在其上。盆地内部的东阳断裂(F3)和平遥—太谷断裂(F4)是 NE 向延伸的隐伏断裂。由于这两条断层深埋在盆地之中,人们对断层的分布和活动性尚有诸多不同观点。近年来,有勘探和物探资料表明该断裂为全新世活动断裂,其附近地裂缝十分发育^[19]。

水文地质方面,新生代以来盆地持续下降、盆地内部堆积了巨厚的松散沉积物,为地下水的储存提供了有利条件。与此同时,新构造运动控制着盆地内松散沉积物的岩性、岩相及厚度变化,进而控制着盆地的水文地质条件。按照含水介质的年代、埋藏特征和水力特征可分为潜水含水层和承压含水层。潜水含水层位于盆地浅部,埋深一般在 50 m 以内,主要由晚更新世和全新世冲洪积成因的砂和砾石构成;承压含水层位于盆地中深部,埋深一般大于 50 m,主要由中更新世冲洪积成因的砂和砾石以及和早更新世湖相沉积物构成(图 2)。潜水含水层和承压含水层之间普遍存在着一层厚 5~30 m 的弱透土层^[20]。该弱透土层的存在使潜水和承压水具有显著不同的水位动态和水质差异。

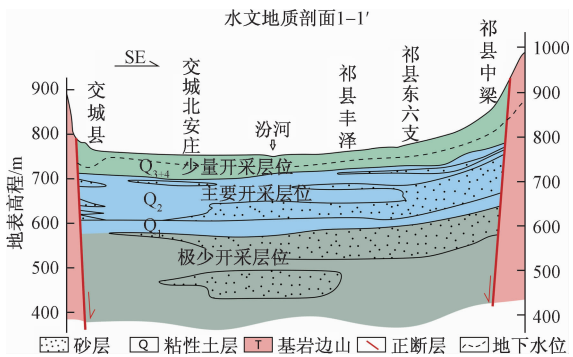


图 2 太原盆地水文地质剖面及开采模式图
(剖面位置见图 1)
Fig.2 Hydrological section and mining pattern map
(Line of section shown in Fig.1)

潜水含水层由于水质差,为少量开采层位,加之其位于地下浅部,易于得到大气降水等补给,故多年来水位变化很小;承压含水层水质好,开采井数量多、开采总量大,多年来的持续超采已导致承压水位明显下降(图 3)。截止目前,200 m 深度以内的承压含水层为主要开采层位,200 m 以下承压水含水层开采井数和开采量均很少,为极少开采层位(图 2)。

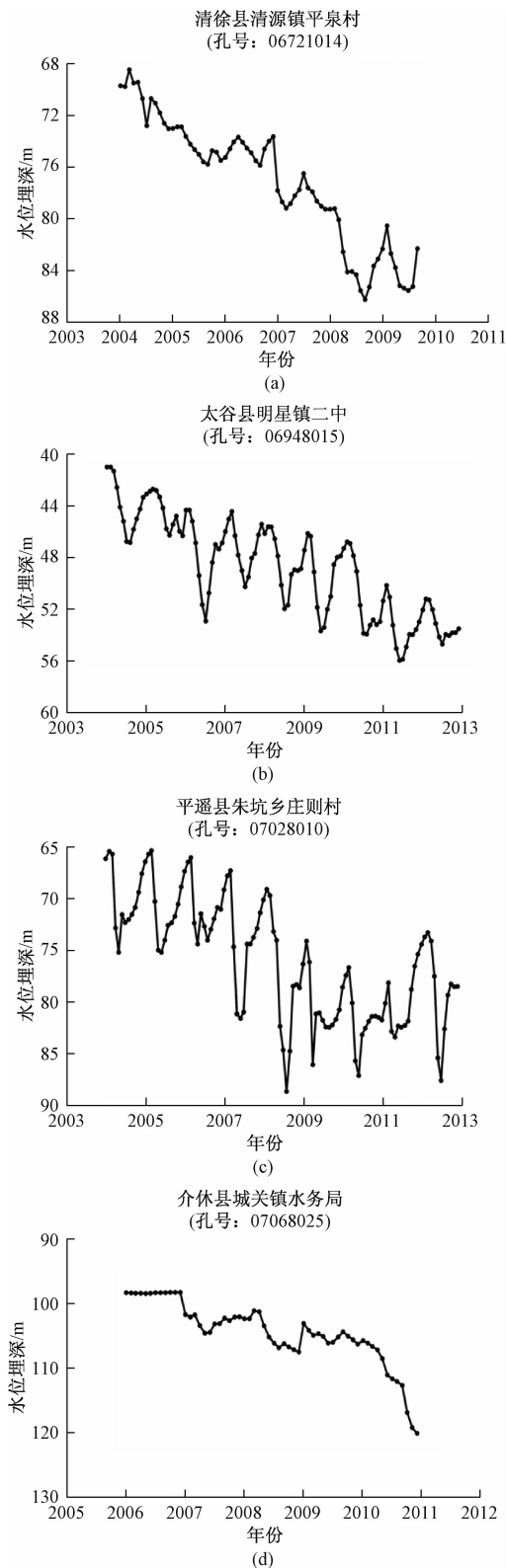


图3 太原盆地内承压水动态变化(监测孔位置见图1)

Fig. 3 Curves of groundwater level variation
(Location of monitor well shown in Fig. 1)

2 地裂缝与地下水开采、地面沉降关系

2.1 地裂缝与地下水开采的时间关系

太原盆地地裂缝发育和地下水的开发利用大致可分为三个阶段^[21]。20世纪70年代以前为太原盆地地下水开采的第一阶段。该阶段无论是开采井数还是开采量均不能与现今同日而语。本阶段末的1970年盆地内开采井总数(250口)仅为2011年盆地内开采井总数(20686口)的1.5%,且绝大部分开采井深度为15~30m^[22]。这个阶段太原盆地内尚无地裂缝出现。

第二阶段为20世纪70年代至2002年。随着经济的发展和城市的建设,盆地内各区县对于地下水的需求量急剧增加,地表水资源的不足使盆地内掀起了打井取水的高潮。该阶段每年新开挖井数急剧增加,潜水开采量变化很小,但承压水开采量增长十分迅速(图4)。1970年承压水开采量 $1082 \times 10^4 \text{ m}^3$,到1980年增长至 $7930 \times 10^4 \text{ m}^3$,到2000年增长至 $45078 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。承压水位也因此呈明显的下降趋势,地下水沉降漏斗不断新增和扩大。本阶段初,盆地内仅太原市和介休县存在降落漏斗,到本阶段中期,太原、晋中和吕梁内等多个区县内已出现了地下水降落漏斗。以10年为单位统计本阶段地裂缝发生的频率可知,1970~1980年出现10条,1980~1990年出现25条,1990~2000年出现47条地裂缝,可见本阶段地裂缝的发展也呈现出一个加速的过程(图5)。

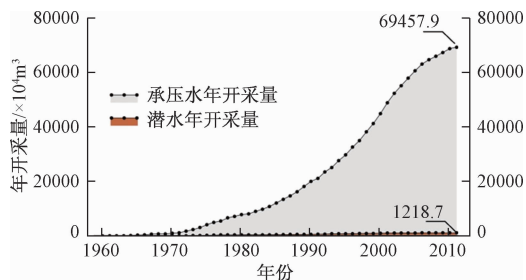


图4 太原盆地历年地下水开采量图

Fig. 4 Groundwater pumping in Taiyuan basin

2002年以后,随着盆地内配套水利设施的完善,每年新开挖的井数开始逐年降低,开采井累计总数的增长显著变缓,地下水开采进入了第三阶段,但由于实际开采井数和开采总量仍在增加,盆地内大部分地区承压水位仍持续下降(图3)。该阶段地裂缝的出现频率较上阶段有所缓和,共发现23条地裂缝。从地下水开采阶段和地裂缝发育阶段来看,地裂缝与地下水开

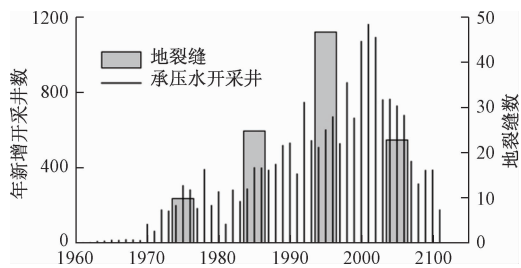


图 5 地裂缝数与承压水开采井数关系图

Fig.5 Relation between earth fissures and confined water production well

采具有趋势性的关系。

为了判断太原盆地累计地下水开采井数和累计地裂缝数两者之间的关联程度,本文采用了灰色理论中的关联分析方法,选取易统计和测量的宏观性指标,如开采井数、地裂缝数作为评价两者相互关系的因素进行研究。由于早期的地裂缝没有发生年份的确切记载,仍以 10 年为单位进行统计。以累计承压水开采井数作为系统特征序列,累计地裂缝数序列与它的邓氏关联度的计算过程如下:

设分辨系数

第 1 步,计算序列初值像

1.000	10.068	24.360	50.748	78.468
1.000	11.000	35.000	84.000	107.000

第 2 步,计算差序列

0.000	0.932	10.640	33.252	28.532
-------	-------	--------	--------	--------

第 3 步,计算极差

极差最大值:33.252

极差最小值:0.000

第 4 步,计算关联系数

1.000	0.947	0.610	0.333	0.368
-------	-------	-------	-------	-------

第 5 步,得到累计地裂缝序列与累计承压水开采井数的邓氏关联度为 0.652,说明累计承压水开采井数和累计地裂缝数关系密切。可见,太原盆地地裂缝和承压水开采井数、开采量在时间上有着较好的相关性。

2.2 地裂缝与地下水开采的平面关系

根据收集的太原盆地地下水开采情况,以县级行政区为单位,统计各个地区的年地下水开采量。太原盆地内各个区县井数不一,开采量各异,其中地裂缝发育区县的开采量大都远超过太原盆地各区县开采量的平均值(图 6)。可见,地裂缝的空间分布并不是随机的。从太原盆地承压水开采井密度与地裂缝分布图上也可以看出,地裂缝集中发育的地区通常是开采井密度较大的地区(图 7)。

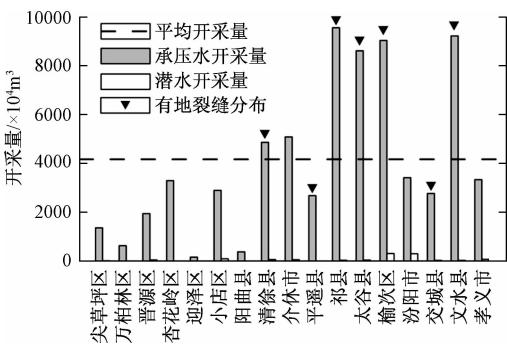


图 6 太原盆地各区县 2011 年开采量直方图

Fig.6 Groundwater histogram in districts and counties of Taiyuan basin in 2011

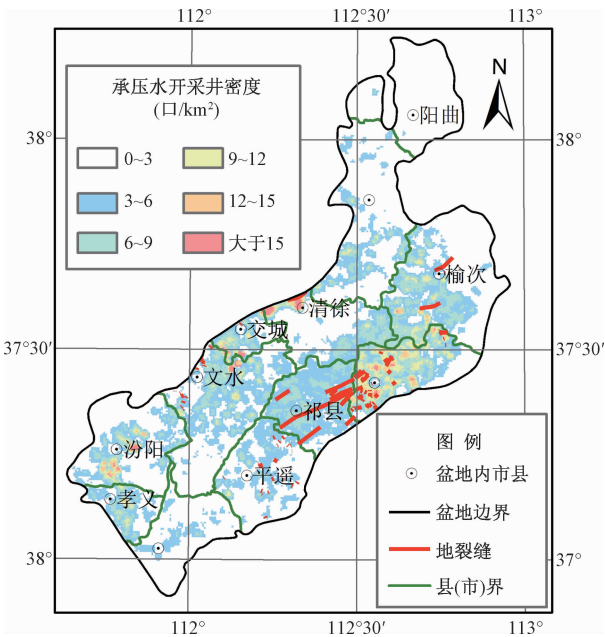


图 7 太原盆地承压水开采井密度与地裂缝分布图

Fig.7 Distribution of earth fissures and well density in Taiyuan basin

2.3 地裂缝活动与地下水开采之间关系

地裂缝活动不是匀速的,而是具有年内周期性。地质调查时对村民的走访得知,每年的夏季地裂缝活动明显加快,其它季节活动减弱或不活动。这是由于每年春季农作物春耕需水量较大而雨季尚未到,水利工程蓄水不足,故对地下水的开采也较多,致使地下水位在年内处于偏低状态。此阶段地裂缝的活动速率较快。随着雨季的到来,一方面地下水开采量逐渐减小,另一方面地下水的补给增多,水位回升,地裂缝的活动速率相应的降低。跨地裂缝短水准监测结果也表明,地裂缝活动具有显著的季节性变化特征,每年 4~10 月地裂缝的活动速率大于 10 月一次年 4 月的活动速率(图 8),同承压水位的波动具有较好的一致性。

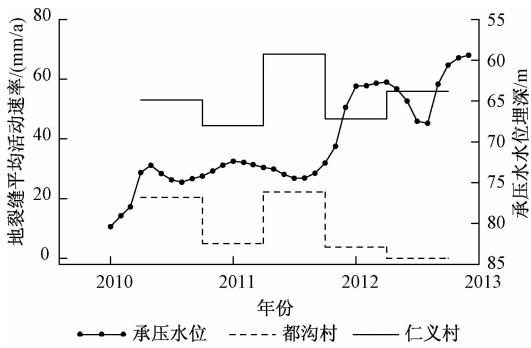


图8 清徐县地裂缝活动年内周期性(短水准位置见图1)

Fig.8 Periodicity of earth fissure activity in Qingxu (leveling section shown in Fig.1)

2.4 地裂缝与地面沉降关系

地下水的长期超采和地下水位的持续下降势必会

导致盆地内地面沉降的发生。太原盆地地面沉降监测处于起步阶段,没有系统的地面沉降资料,地裂缝和地面沉降发育的确切时间关系无法验证,但根据前期地质调查工作,地裂缝发展和地面沉降、地下水水位变化在时间上有良好的对应关系,地下水开采和地裂缝的发育都可分为发生、发展、趋于稳定三个阶段(表1)。

区域上看,由于地面沉降和地下水位的持续下降有很好的-致性,因此地裂缝分布的西边山清徐、交城、文水一带和盆地东部的榆次、太谷、祁县、平遥也都是盆地内地面沉降严重、发展迅速的地区。

局部剖面看,根据跨地裂缝短水准监测可以看出,地裂缝主要以两盘的不均匀沉降为主要特征(图9)。地裂缝下盘几乎不动,上盘整体均匀向下运动,地裂缝构成了差异沉降的陡变带。

表1 地裂缝和地下水开采、地面沉降发育阶段

Table 1 Development stages of earth fissure, groundwater exploitation and land subsidence

阶段	地下水位	地面沉降	地裂缝
发生阶段	地下水位开始下降	地面标高出现减少现象;地面沉降速率逐渐增加。	地面开始出现差异沉降变形;地表可见细微裂隙或裂缝;地裂缝活动速率逐渐增加;建筑物出现局部裂缝。
发展阶段	地下水位快速下降	沉降速率明显增加,沉降范围急骤扩大,沉降规律更加明显。	地裂缝两侧地面差异沉降变形十分明显;地表破裂增多,且破裂张开和垂直位移量进一步扩大;地裂缝活动速率明显增加;建筑物受损明显。
趋于稳定阶段	地下水位趋于稳定或者回升	地面沉降基本稳定,未出现明显变化;地面沉降速率明显减小,趋于稳定。	地裂缝两侧地面差异沉降变形基本稳定,未出现明显变化;地表破裂不再增加,张开与垂直位移量不再扩大;地裂缝活动速率明显减小或趋于稳定;建筑物未出现新裂缝。

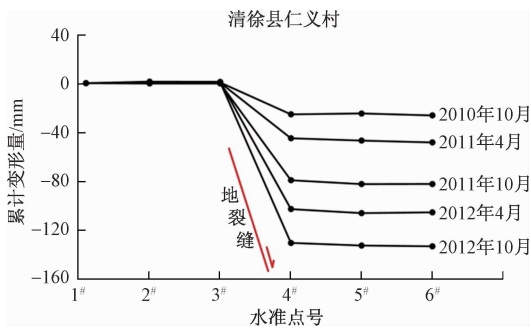


图9 清徐县跨地裂缝短水准剖面(剖面位置见图1)

Fig.9 Cross earth fissure leveling section in Qingxu (leveling section shown in Fig.1)

2.5 地裂缝对地下水和地面沉降的反作用

地裂缝和地下水地面沉降的关系还包括地裂缝会反作用于地下水和地面沉降,导致后者的分布特征、变化规律发生变化。这一点在大巨型地裂缝表现的尤为明显。由于大巨型地裂缝下伏的先存断裂面发育深、影响范围大,通常表现为水文地质上的水力屏障,会显著影响地裂缝附近地下水的流场。如太谷县水秀村、武家堡村、祁县瓦屋村、东六支村等地地裂缝两侧的地

下水水位都有显著的差别^[23]。地面沉降方面,除地裂缝可以影响地下水流场从而间接影响地面沉降外,由于地裂缝具有同沉积断层的特性,地裂缝两侧地层差异很大。地裂缝上盘粘性土层的厚度要显著大于下盘,从而在相同的水位降落条件下,直接导致地裂缝两盘沉降量的差异。

3 地裂缝与地下水开采地面沉降关系机理分析

地裂缝与地下水开采、地面沉降关系的核心就是在地面沉降的成因机制中,地下水开采对地裂缝的影响。太原盆地地裂缝具有多种成因机制,如基岩起伏差异沉降机制、古河道潜蚀机制,先存断裂差异沉降机制等。不同成因机制中地下水所起的作用不同。

在基岩起伏差异沉降机制中,基岩或者压缩性很小的硬土层起伏变化导致上部可压缩地层的结构差异明显,在超采地下水的情况下,土层差异沉降,使土体内形成的侧向拉张应力,当拉张应力达到土体的极限抗拉强度时,就会地表发生张裂^[24](图10)。

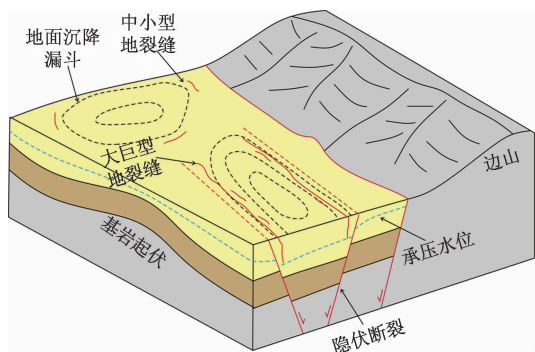


图10 太原盆地东部地裂缝成因机制示意图

Fig.10 Theoretical model of earth fissures in east Taiyuan basin

在古河道潜蚀机制中,古河道作为良好的富水地区,通常集中着大量的地下水开采井。当地下水长期持续超采,承压水位逐年下降,使得承压水位低于潜水水位,地下水的径流条件发生改变,由承压水向上顶托补给潜水变为潜水向下越流补给承压水,当水位下降幅度较大时,水力坡度和水流速度都大幅度提高,水流对浅层土层中的疏松颗粒产生冲刷、潜蚀、掏空作用,可逐渐形成隐伏土洞和地裂缝^[6, 25](图1、图11)。

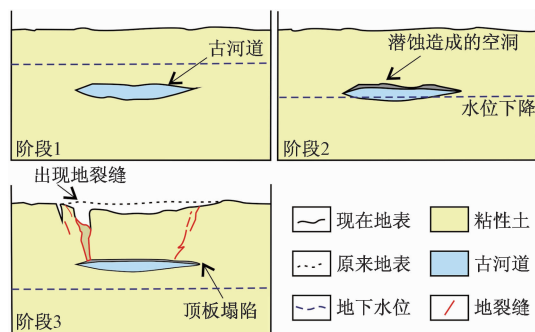


图11 地裂缝的古河道成因机理

Fig.11 Earth fissure caused by paleo-channel erosion

在先存断裂差异沉降机制中,先存断裂的持续活动造成断层两盘地层有较大的差异,长期超采导致承压水位的急剧下降,地层所受有效应力增加,断层两侧沉降量差异明显。先存断裂作为一个软弱面,也是土体中的优势破裂面,当先存断层两侧沉降量不同,土体发生调整时,两侧地层极易沿着已有的先存断裂面移动,破裂面向上延伸至地面形成地裂缝^[21],并造成地裂缝的超常活动(图10),这种情况下形成的地裂缝通常为大巨型地裂缝。

可见,太原盆地地裂缝虽成因机制众多,却均和地下水开采联系紧密。地裂缝是地层中先存构造破裂面、古河道以及基岩潜山对地下水开采的响应。

4 结论

(1)太原盆地地裂缝的发展与活动主要受承压水开采的影响,与潜水关系不大。时间上,太原盆地地裂缝的发育过程和承压水的开采、地面沉降历史相一致,可均分为发生、发展和趋于稳定阶段。空间上,太原盆地集中发育于地下水位显著下降,地面沉降严重的地区。活动上,地裂缝的活动受承压水位的动态变化影响呈现出活动速率年内周期性变化的现象。由于地面沉降和地下水开采直接相关,地裂缝因此和地面沉降也有着很好的相关性。

(2)地裂缝会反作用于地下水和地面沉降,影响后者的发育过程和分布规律。

(3)地裂缝和地下水开采、地面沉降具有紧密关系的根源在于地裂缝成因机制中地下水所起的作用。太原盆地地裂缝具有多种成因,但无论对于哪种成因机制,地下水开采都对地裂缝有明显的促进作用,减少地下水开采可降低地裂缝的危害。

参考文献:

- [1] 潘懋,李铁锋. 灾害地质学[M]. 北京:北京大学出版社,2002:260.
PAN Mao, LI Tiefeng. Hazard geology [M]. Beijing: Peking University Press, 2002: 260.
- [2] Ye, S., Wang, Y., Wu, J., et al. Characterization of earth fissures in South Jiangsu, China [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015: 372, 249 - 253.
- [3] Bankher, K. A., Al-Harhi, A. A. Earth fissuring and land subsidence in western Saudi Arabia [J]. Natural Hazards, 1999, 20 (1): 21 - 42.
- [4] El Baruni, S. S. Earth fissures caused by groundwater withdrawal in Sarir South agricultural project area, Libya [J]. Applied Hydrogeology, 1994, 2 (1): 45 - 52.
- [5] Kontogianni, V., Pytharoulis, S., Stiros, S. Ground subsidence, Quaternary faults and vulnerability of utilities and transportation networks in Thessaly, Greece [J]. Environmental Geology, 2007, 52 (6): 1085 - 1095.
- [6] Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., et al. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México [J]. Engineering Geology, 2013: 172 - 186.
- [7] Galloway, D., Jones, D. R., Ingebritsen, S. E.

- Land subsidence in the United States [M]. US Geological Survey Reston, VA, 1999.
- [8] 国土资源部中国地质调查局. 中国地面沉降地裂缝调查报告[R]. 2015.
China Geological Survey. Survey report of China land subsidence and earth fissures [R]. 2015.
- [9] 山西省地质环境监测中心. 山西盆地地面沉降防控对策报告[R]. 2015.
Shanxi Geological Environment Monitoring Center. Prevention and controlling report of land subsidence in Shanxi[R]. 2015.
- [10] Li, Y., Yang, J., Hu, X. Origin of ground fissures in the Shanxi Graben system, Northern China [J]. Engineering Geology, 2000, 55 (4): 267 - 275.
- [11] 丁学文, 陈国顺, 齐永生. 榆次地裂缝成因探讨[J]. 华北地震科学, 2000; 16 - 25.
DING Xuewen, CHEN Guoshun, QI Yongsheng. Study on the origin of Yuci ground fissure [J]. North China Earth Quake Sciences, 2000; 16 - 25.
- [12] 赵超英, 张勤, 张静. 山西清徐地裂缝形变的 InSAR 监测分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19 (1): 70 - 75.
ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, ZHANG Jing. Deformation monitoring of ground fissure with SAR interferometry in Qingxu, Shanxi province [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (1): 70 - 75.
- [13] 江娃利, 郭慧, 谢新生, 等. 山西交城断裂带活断层填图(1:5 万)报告[R]. 中国地震局地壳应力研究所, 2012.
JIANG Wali, GUO Hui, XIE Xinsheng, et al. Report of active fault in Jiaocheng fault belt, Shanxi [R]. The Institute of Crustal Dynamics, 2012.
- [14] 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; 1 - 5.
SU Zongzheng, HAO Helong, HOU Tingai, et al. Ground fissure and disaster in Taiyuan basin [J]. Earth Quake Research in Shanxi, 2000; 1 - 5.
- [15] 山西省地质环境监测中心. 山西太原盆地地裂缝调查报告[R]. 2009.
Shanxi Geological Environment Monitoring Center. Survey report of earth fissures in Taiyuan basin, Shanxi [R]. 2009.
- [16] 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 (4): 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 (4): 433 - 440.
- [17] 武强, 姜振泉, 李云龙. 山西断陷盆地地裂缝灾害研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
WU Qiang, JIANG Zhenquan, LI Yunlong. Research on ground fissure hazards in Shaanxi down faulted basin [M]. Beijing: Geology Press, 2003.
- [18] 王乃樑, 杨景春, 夏正楷. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
WANG Nailiang, YANG Jingchun, XIA Zhengkai. The Cenozoic Sediments and Tectonic Geomorphology in the Shanxi Graben System [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [19] 中国矿业大学(北京). 晋中盆地地裂缝三维地震勘探技术报告[R]. 2012.
China University of Mining and Technology (Beijing). Three dimensional seismic prospecting report of earth fissures in Taiyuan basin [R]. 2012.
- [20] 王贵喜, 曹金亮, 张佳. 山西省太原盆地地下水管理模型研究报告[R]. 1991.
WANG Guixi, CAO Jinliang, ZHANG Jia. Groundwater management model report in Taiyuan basin, Shanxi [R]. 1991.
- [21] 孙晓涵. 新生代断陷盆地地裂缝与地下水开采关系研究—以太原盆地为例[D]. 西安: 长安大学, 2015.
SUN Xiaohan. Relationship between earth fissures and groundwater exploitation in Cenozoic faulted basin: a case study of Taiyuan basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [22] 山西省地质工程勘察院. 太原盆地地下水开采量调查报告[R]. 2013.
Shanxi Geological Engineering Investigation Institute. Survey report of groundwater exploitation in Taiyuan basin [R]. 2013.
- [23] 长安大学. 新建大同至西安客运专线铁路工程沿线地裂缝勘察与评价研究报告[R]. 2010.
Chang'an University. Investigation and evaluation report of earth fissure along Datong-Xi'an high-speed railway [R]. 2010.
- [24] Schumann, H., Poland, J. Land subsidence, earth fissures and groundwater withdrawal in south-central Arizona, USA [A]. In International Symposium on Subsidence, Tokyo [C]. 1969; 295 - 302.
- [25] Jachens, R. C., Holzer, T. L. Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona [J]. Geological Society of America Bulletin, 1982, 93 (10): 998 - 1012.