

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.02.18

苏南平原区地裂缝现状及其需要解决的几个问题

龚绪龙¹, 杨 蕴^{1,2}, 朱锦旗¹, 于 军¹, 王光亚¹, 武健强¹, 张 岩¹

(1. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018;

2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 地裂缝是江苏近二十年来新出现的地质灾害类型, 地裂缝带延伸长度累计已达 23 km, 灾害发生在经济高度发展的苏锡常地区, 造成的危害和损失是巨大的。苏南平原区地裂缝有下列特点: 基于第四系土层结构差异的地质背景, 过量开采地下水, 于局部地段产生明显的差异沉降是主要原因; 方向性、对称性、集群性和隐蔽性是主要分布规律。从目前研究, 特别是从定量化研究的现状出发, 指出存在 6 个方面的不足, 进而提出需要研究解决的 7 个科学问题, 为提高苏南平原区地裂缝研究水平献策。

关键词: 地裂缝; 成因机制; 监测技术; 地裂缝模型

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)02-0103-07

Ground fissures in south plain of Jiangsu province and related issues

GONG Xulong¹, YANG Yun^{1,2}, ZHU Jinqi¹, YU Jun¹, WANG Guangya¹, WU Jianqiang¹, ZHANG Yan¹

(1. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Geological

Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 2. Department of Earth Science and

Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Earth fissure has been a new geological disaster over the 20 years in Jiangsu province, and the total length is over 23 kilometers. It mainly lay in Su-Xi-Chang area with rapid economic development and caused severe damage and loss in China. There are several characteristics related to land subsidence in south plain of Jiangsu Province. Based on the structural difference of Quaternary strata, earth fissure is mainly caused by differential land subsidence due to excessive pumping of groundwater, having the characteristics of directionality, symmetry, gregariousness, and concealment. Finally, for the purpose of giving some advice to improve the quantitative research on earth fissures, six main limitations have been proposed and seven scientific issues need to be resolved.

Keywords: ground fissure; mechanism; monitoring; ground fissure model

0 引言

地裂缝是一种可由多种因素引起的地表岩层或土体开裂, 并在地面形成一定长度和宽度裂缝的宏观破坏现象, 严重时会成为一种地质灾害^[1]。自 20 世纪 70 年代中后期, 我国几个新构造活动区域相继发生较

大规模的地裂缝灾害, 集中发育在汾渭盆地、华北平原和苏南平原区, 约占全国地裂缝总数的 90% 以上。人类活动和地质作用是造成地裂缝的主要原因, 其中在苏南平原区过量抽取地下水是最主要的原因。80 年代以来, 随着大中城市经济的发展, 过量抽汲承压水导致的地裂缝两侧不均匀地面沉降进一步加剧了地裂缝

收稿日期: 2013-07-31; 修订日期: 2014-07-30

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)——青年基金项目(BK20131009); 国土资源公益性行业科研专项资金(201411069); 河海大学中央高校基本科研业务费专项资金(2014B03614)

第一作者: 龚绪龙(1982-), 男, 工程师, 主要从事水文地质、工程地质和环境地质研究工作。Email: xulonggong@126.com

的活动,地裂缝所经之处,地面及地下各类建筑物开裂,破坏路面,错断管道,对人们的生产、生活、交通等造成了极大的损失和危害,成为一种严重的环境地质问题,影响和制约着当地国民经济的可持续发展^[2-4]。因此,2000年起苏锡常地区开展了以禁采为主要手段的地面沉降地裂缝防控。本文基于苏南平原区地裂缝20余年来的研究成果,总结了区域地裂缝的发育特点和研究现状,指出目前研究中的不足,提出需要进一步研究解决的科学问题,为地裂缝防治提供科学依据。

1 苏南平原区地裂缝基本状况

苏南平原由抽取地下水引起的地裂缝主要出现在常州、无锡和苏州,其中常州市最早发生地裂缝,1989年武进区横林镇孟瑶头村出现地裂缝,目前已有地裂缝带8处;无锡市是苏南平原区地裂缝相对较密集地区,共发生地裂缝14处;苏州市地裂缝发生较少,仅在1994-1995年张家港市西张、塘桥和杨圆村发生地裂缝灾害,灾情相对较轻^[2]。总体来看苏南平原区地裂缝发育分布有其独特性,地裂缝带长100~2000 m、宽30~400 m不等,规模较小;平面形态或呈对称分布或向一侧发育或呈环形展布,与区域主要构造NE-SW方向相吻合,方向性强,其空间展布及成灾时间与地下水水位、地面沉降、基岩起伏变化以及土层结构差异等因素密切相关^[5]。

常州市因强烈开采地下水引发了地面沉降和地裂缝始于20世纪70年代初期,由于地层结构的差异,造成地面不均匀沉降,在横林、湖塘、漕桥镇引发了8处地裂缝,造成了地面房屋、厂房等建筑的破坏,居民被迫搬迁,经济损失惨重^[6]。其中常州市漕桥镇地裂缝位于常州市的南部,该地裂缝始发于2002年,发育地裂缝18处,墙裂缝4处,具有地裂缝围绕镇自来水厂呈环形放射状展布,外环长轴(SEE)350 m、短轴(NEE)100 m,目前仍在发展之中。常州大学城地裂缝位于常州市城南湖塘—鸣凰镇之间,在大学城东南侧南周村发生的地裂缝灾害始发于2000年,2001-2002年墙体裂缝1~1.2 cm,墙体地基塌空达4 cm。地裂缝23条墙体裂缝12处。分布方向以围绕南洲色织厂深井为中心呈放射状一环状。地裂缝长度一般<10 m,断续分布长25 m。地裂缝至东侧小河边消失。调查资料表明,过量开采地下水是常州市地裂缝产生的主要原因。地下水局部地段强采后,水位下降速度快,导致含水层压密和顶底板黏土层释水压密,形成局部地面沉降,在降落漏斗一定范围内边缘,地表因沉降则向中心拉张,故形成似环形或放射状地裂缝。

无锡市因基岩面起伏变化较大,加之长期过量开采第Ⅱ承压含水层地下水产生非常严重的不均匀地面沉降^[7-8]。其中江阴市河塘地区第四系西厚东薄,在主裂缝发育部位分布有北东向潜山,同时河塘镇区现有的19眼深井中16眼集中在镇西,形成局部的强开采点,地裂缝总体上呈现向西跌落的展布,高差一般2~10 cm,最大可达15~20 cm。无锡石塘湾因果岸因长期地下水超采形成了一条长约2000余米,宽约100 m,南北两侧高差达50 cm陡坎的地裂缝带。该区南西侧为北东向波状起伏的潜伏山体,潜山北陡南缓,山体外围稳定分布了Ⅱ承压含水砂层,顶部含水砂层缺失,为因果岸地区形成地裂缝提供了基础地质背景条件。总体来讲无锡地区地裂缝的产生主要是第四系地层差异、谷基底起伏变化较大和区内强烈开采地下水造成地面沉降综合作用的结果^[9]。

地裂缝严重的地区主要在经济高度发展的苏锡常地区,是江苏最大的优势板块和最快的经济增长区。根据地裂缝灾害造成的土地、建筑物的破坏以及可能影响程度和范围评估计算,20世纪90年代以来苏南平原区地裂缝直接损失数百亿元。主要体现在以下几个方面:(1)地裂缝导致建筑物拉裂、剪断而破坏。如楼房、平房、墙体、大厅库房、厂房等,其地基基础凡有地裂缝切穿者,都遭到不同程度破坏,乃至结构失效,建筑物报废被拆除。如原江阴市长泾镇标志性9层建筑“双平大厦”1997年落成,尚未正式使用,就因地裂缝灾害发生而成险房,无奈在2000年夏被迫拆除,造成巨大的经济损失。据不完全统计,苏锡常地区地裂缝损坏的房屋近3000间,动迁单位数十家;(2)地裂缝活动可以造成生命工程线,如电力、供气、供暖、供水、排水、通讯等工程的直接破坏。如东亭、无锡—上海公路,路面错断,错差最大达15 cm;(3)毁坏沿线农田,造成沿线农田漏水,使大量水浇地变旱田。如无锡市毛村园地裂缝导致周围农田灌溉期常常渗漏,造成一定程度的减产;破坏水井,主要表现为井管错位、水量减少;(4)降低城市土地使用价值,土地是可贵的有价资源,由于地裂缝活动,降低了其场地的土地使用价值,增加了地基处理成本;(5)地裂缝发育之处,房裂、地陷不仅造成经济损失,而且常使附近群众惊恐不安,严重影响正常工作和生活秩序。1990年,锡山区东亭镇方湾里、姚夹里等地有151间房屋开裂,22间成危房,个别住户地面下沉,有些村民误传要发生大地震,纷纷搭建防震棚,严重影响了当地社会安定。

2 地裂缝的发育特点

苏南平原区 25 处地裂缝分布(图 1)。综观苏南平原区地裂缝除了突发性、集群性和不可逆等共同特点外,还有下列特点:

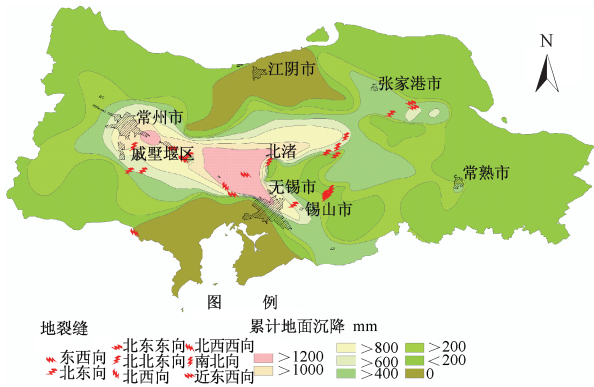


图 1 苏南平原区地裂缝易发区分布图
Fig.1 The prone regions distribution map of earth fissures in southern Jiangsu plain

(1)地裂缝空间分布上的优势方向为 NE-SW 向,

与隐伏基岩的古潜山走向及中更新世古长江河道分布相吻合(图 2)。苏南平原区近 25 处地裂缝,其中 17 处 NE-SW 走向,占地裂缝总数的 68%。

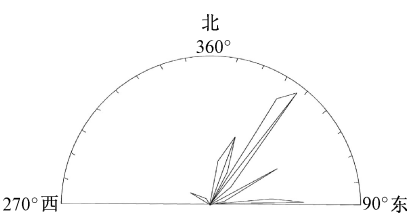


图 2 苏锡常地裂缝走向玫瑰图
Fig.2 The rose diagram of earth fissures in Su-Xi-Chang area

(2)地裂缝的主要原因是过量开采地下水。苏南平原区地裂缝发生的地点可以分为两类,一类是地下含水层突变区,另一类是地下水水位降落漏斗区。按地下水水位埋深划分,各区地裂缝数量如表 1。统计数据表明,地裂缝集中发育在地下水位埋深超过 30 ~ 40 m 的地区,占地裂缝总数的 68%。地裂缝分布围绕地下水开采形成的水位降落漏斗呈环形或放射形分布,规模较小,无明显的滞后性。

Table 1 Statisitcs between groundwater level and the number of earth fissures									
地下水位/m	含水层突变区	0 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90
地裂缝数	7	0	1	2	0	5	2	6	2

(3)不均匀的地面沉降是导致地裂缝的直接原因。从应力应变理论分析角度,地面沉降梯度最大的地区即应力最集中的地区,地面沉降在水平方向上差异性较大。从实际发生情况看,64% 地裂缝发生在梯度大的区域(表 2)。

Table 2 Statisitcs between land subsidence gradients and the number of earth fissures				
地面沉降梯度范围/%	>0.01	0.005 ~ 0.01	0.001 ~ 0.005	<0.001
地裂缝数	16	2	0	7

(4)第四纪地层岩性对地裂缝的控制起着重要作用。不同的岩性对应力的传递作用不一样,通常认为,硬质黏土是地裂缝发生的良好介质,而软土由于自身的塑性强,应力得不到有效传递,即使深部介质发生裂缝,若地表覆盖软质土,地裂缝在地表基本不会表现出来。统计表明(表 3)所有 25 处地裂缝均在地表岩性为亚黏土的地区发现。

(5)基岩面起伏直接控制了第四系的发育程度。

从地面沉降的角度分析,基岩面起伏决定了沉降的潜在空间,从地裂缝形成角度分析,潜山型或陡崖型的基岩面形态又为差异性地面沉降创造了条件。依据统计数据(表 4),埋藏浅的基岩或起伏大的基岩面控制了地裂缝发育的优势区。发生在埋深小于 120 m 的基岩面上的地裂缝占地裂缝总数的 60%。

Table 3 Statisitcs between surface lithology and the number of earth fissures			
地表岩性	淤泥质亚黏土	亚砂土及亚黏土	亚黏土
地裂缝数	0	0	25

Table 4 Statisitcs between buried depth of bedrock and the number of earth fissures			
基底埋深/m	120	120 ~ 160	> 160
地裂缝数	15	7	3

3 地裂缝的研究现状

地裂缝灾害是最近几十年来城市化进程加快才凸

的一维沉降模型,提出了可抑制地裂缝发展的城市地下水开采方案^[12-13];应用GIS技术强大的空间分析功能,对地裂缝易发区带进行了划分,确定出安全区、较易发生区和极易发生区三种类型^[14];同时运用人工神经网络技术(ANN)分析了地下水位和地面沉降两项动态地质条件对地裂缝形成的作用关系^[15];最后采用灰色GM模型对已有地裂缝的未来发展变化进行了计算,为地裂缝防灾减灾和综合治理奠定了基础^[16]。

在这几十年中,虽然国内外学者对于地裂缝问题进行了大量研究,取得了很多丰硕的科研成果,但总的来说,目前对于地裂缝的研究仍然还不够成熟,存在以下不足:a.前期工作只针对个别地裂缝宏观特征进行勘探评估,对于地裂缝形成的微观机制缺乏深入研究;b.苏南平原地裂缝研究缺乏以典型地裂缝为原型的物理模型研究。物理模型通过可控边界条件可再现地裂缝生成和扩展的全过程,以此探讨地裂缝形成的力学机制,彭建兵等(2008)通过大型物理模拟试验研究地裂缝破裂扩展机制^[17];李永靖(2008)还开展了频繁矿震作用下地裂缝的变形破坏机制试验研究^[18];c.地裂缝大部分研究成果以定性描述和半定量评价为主,对地裂缝进行定量模拟研究更是少之又少,地裂缝数学模型研究是地裂缝量化研究的关键环节,Burbey(2010),石玉玲(2008),Hernandez(2012)利用连续介质力学分析的方法,分析土体破坏前临界应力应变分布^[19-21];陈立伟(2007),王哲成(2012)将基于破坏力学的数值模拟方法引入到地面形变模型中,模拟地裂缝的开展过程^[22-23];d.现有的基于破坏力学理论的地裂缝数学模型中,土体的断裂韧度参数获取比较困难,且这方面的研究比较滞后;e.现有的任何一种地裂缝监测技术都不完全适用于所有类型地裂缝的监测,也很少有学者综合对比分析不同技术的监测效果。同时现有的监测技术只能对已存在的地裂缝进行测量,无法对土体内部潜在裂缝的发生和发展进行有效监测和预警;f.基于不确定的分析方法对地裂缝进行预警预测和易发区评价存在难以识别内部参数,难以确定预警标准等缺点。建立以地裂缝数学模型和地裂缝灾害预警标准为基础的地裂缝地质灾害风险预测模型,进行危险性等级划分是下一步要研究解决的。

4 需要解决的几个科学问题

苏南平原区地裂缝虽然取得了很多成果,但总的来说研究以定性和半定量为主,尽管针对苏南平原区25处地裂缝开展了勘查监测与成因机理研究,但从

学术角度看,下列几个问题是迫切需要解决的。

(1)地裂缝专项调查需进一步加强。地裂缝调查需结合区域地面沉降调查与勘探,进而摸清地裂缝的分区性、分段性、迁移性等空间分布特征,基于此,研究地裂缝形成的机制和地质环境背景。不同的地质环境对地面沉降的发生、发展有着不同的影响和控制,研究地裂缝发育的地质环境背景条件及人类工程经济活动等内在和外在影响因素、时空分布规律、成因模式及成因机理。对于一些非抽水因素和非地质因素对地裂缝的影响及形成机理也需要进一步研究。

(2)完善地面形变监测网络,形成地裂缝监测技术方法体系,提高监测精度。地裂缝形变监测技术是国内外学者研究重点,近年来高科技监测技术取得了较大进展,应用多种先进的监测手段,包括大范围监测技术,如合成孔径干涉雷达(InSAR)和全球定位系统(GPS)融合集成技术,实现高度自动化集成的分布式连续面监测;中小范围监测技术,如光纤监测技术,实现对土体内部潜在裂缝的发生和发展进行有效监测和预警。对比新技术与传统技术的监测效果,评价各类方法的适宜条件,以此建立实时监测体系,获取地裂缝三维形变场数据,为机制研究及模拟仿真提供第一手数据。

(3)地裂缝成因机理认识不够。通过地裂缝调查与探测,研究地裂缝的成因机理是远远不够的,需加强地裂缝物理模型研究,从微观尺度上进行地裂缝发育的多场耦合研究。目前国内还没有一个针对苏锡常“采水型”地裂缝大型物理模型,所以需要从实验室尺度建立在可控条件下形变、应力、视电阻率和激励电流等多物理场信息监测的物理模型,研究土层系统在地下水开采条件下的孔隙水压力场、应力应变场、非饱和和地层含水量和地电场变化特征与地裂缝发育的时空演变规律。通过长期连续监测,获取应力、位移和孔隙水压的原始数据,研究抽水型地裂缝的破裂扩展机制。

(4)地裂缝三维数值建模。地裂缝的形成是一个复杂的动力学过程,具有不同阶段的力学响应规律,在现有的抽水为主因的地裂缝数学模型中,基于破坏力学理论中模拟裂缝开裂过程,并没有实现与地下水流流的真正耦合,且这方面的研究比较滞后,因此将三维地面沉降模型和正确的刻画土层断裂破坏机理的“破坏准则”耦合起来,建立刻画地裂缝的数学模型是地裂缝三维数值模拟的亟需解决的问题。利用实验室和野外地裂缝监测数据,识别地裂缝数学模型和验证所提出地裂缝成因机理。

(5)地裂缝发展趋势预测和地下水资源的合理开

采及可持续发展。首先迫切需要做的是把苏南平原作为一个整体,在宏观上对这一经济高度发展地区地裂缝做出预测,从可持续发展和对环境影响最小的角度出发提出地下水资源开发利用的最优调度和控制方案,为这个地区国民经济的可持续发展提供科学依据。

(6)地裂缝防灾减灾措施和区域性地裂缝防治规划的制定。2000年起,江苏省人大通过决议,采取了以“禁采”为主要手段的防控措施,制订了有关有利于地质灾害综合防治的相应法律、法规,历时5年,地面沉降及地裂缝活动性明显减弱。但地裂缝是一个区域性的现象,仅靠一个地区、一个单位是难以解决的,应该从全局、整体出发,开展地裂缝防灾减灾理论与技术研究和防灾减灾示范工程建设,致力于地裂缝基础性研究的社会化服务,逐步实现地裂缝发育位置预测、地裂缝扩展方式预报、地裂缝发展速率预报和地裂缝活动的时间预报,以实践地裂缝地质灾害在城市规划、重大工程建设中的防灾减灾活动。

(7)地面沉降地裂缝影响区水土环境影响评价。首先需要解决的是苏南平原区地裂缝地质灾害发生前后水土环境长时间演变过程。通过分析灾害影响区内的生态和生物地球化学效应,刻画灾害发生前后及发展过程中生物地球化学过程和生态系统结构的演变,评估地裂缝灾害对水土环境的影响,为灾害的危害性评估提供依据,为灾害的防治奠定基础。

5 结语

本文基于苏南平原区地裂缝20余年来的研究成果,介绍了地裂缝的基本状况,分析了区域地裂缝的发育特点,评述了地裂缝的研究现状,指出了存在六个方面的不足,进而提出亟需研究解决的七个科学问题。苏南地裂缝灾害是基于第四系土层结构差异的地质背景,在长期抽汲地下水尤其是深层地下水这一人为活动诱发下,于局部地段第四系产生明显的差异压缩响应——不均匀地面沉降所致。地裂缝是制约当地经济可持续发展的重要因素之一,地裂缝的防治不仅是地质环境保护的需要,也是保证区域水资源可持续利用、地区经济可持续发展的必不可少的先决条件。地裂缝的研究涉及多个学科领域:水文地质学、工程地质学、土力学,只有在学科真正交叉的基础上,通过生产、教学、科研单位的协作,发挥各自优势才有可能解决前面提出的问题。

参考文献:

[1] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西

安:陕西科学技术出版社,2000.

WANG Jingming. Theory of ground fissures hazards and its application[M]. Xi'an: Shanxi Scientific & Technical Publishers, 2000.

[2] 刘聪,袁晓军,朱锦旗. 苏锡常地裂缝[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2004.

LIU Cong, YUAN Xiaojun, ZHU Jinqi. The ground fissure in Suzhou-Wuxi-Changzhou area [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004.

[3] Wang G Y, You G., Shi B., et al. Earth fissures triggered by groundwater withdrawal and coupled by geological structures in Jiangsu province, China [J]. Environmental Earth Science, 2009, 57: 1047 - 1054.

[4] Zhang Y., Xue Y. Q., Wu J. C., et al. Land subsidence and earth fissures due to groundwater withdrawal in the Southern Yangtze Delta, China[J]. Environmental Earth Science. 2008, doi:10.1007/s00254-007-1028-8.

[5] 宗开红. 苏锡常地区地裂缝灾害研究[A]. 全国突发性地质灾害应急处置与灾害防治技术高级研讨会论文集,北京:中国灾害防御协会,2010.

ZONG Kaihong. Research on earth fissures in Su-Xi-Chang area [A]. Beijing: China Association for Disaster Prevention, 2010.

[6] 黄敬军,张丽,缪世贤. 江苏省地下水开发利用中的环境地质问题及对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):101-107.

HUANG Jingjun, ZHANG Li, MIAO Shixian. Environmental geological problems and countermeasures during development and utilization of groundwater in Jiangsu [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4): 101 - 107.

[7] 竺清良,高中和,郭江宁. 无锡东亭地裂缝及其成因分析[J]. 防灾减灾工程学报,1993,3:116-119.

ZHU Qingliang, GAO Zhonghe, GUO Jiangning. Analysis on the causes of ground cracks in Dongting, Wuxi city [J]. Journal of Disaster and Mitigation Engineering, 1993, 3: 116 - 119.

[8] 伍洲云,余勤,张云. 苏锡常地区地裂缝形成过程[J]. 水文地质工程地质,2003,30(1):62-69.

WU Zhouyun, YU Qin, ZHANG Yun. Forming process of earth fissure hazard in the Suzhou-Wuxi-Changzhou area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(1): 62 - 69.

[9] 于军,王晓梅,苏小四,等. 苏锡常地区地裂缝地

- 质灾害形成机理分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(2): 236-241.
- YU Jun, WANG Xiaomei, SU Xiaosi, et al. The mechanism analysis on ground fissure disaster formation in Suzhou-Wuxi-Changzhou area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(2): 236-241.
- [10] 李后尧, 冯启言. 江苏典型的城市地质灾害与防治[J]. 中国矿业, 2003, 12(1): 67-70.
- LI Houxiao, FENG Qiyan. Typical urban geologic hazards in Jiangsu province [J]. China Mining Magazine, 2003, 12(1): 67-70.
- [11] 胡建平, 隋兆显, 陈杰. 苏锡常地区地下水禁采后的地质环境效应研究[J]. 江苏地质, 2006, 30(4): 261-264.
- HU Jianping, SUI Zhaoxian, CHEN Jie. Study on geological environmental effect after banning groundwater pumping in Su-Xi-Chang area [J]. Jiangsu Geology, 2006, 30(4): 261-264.
- [12] 于军, 吴吉春, 叶淑君, 等. 苏锡常地区非线性地面沉降耦合模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(5): 11-16.
- YU Jun, WU Jichun, YE Shujun, et al. Research on nonlinear coupled modeling of land subsidence in Suzhou, Wuxi and Changzhou areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(5): 11-16.
- [13] 薛禹群, 吴吉春, 张云, 等. 长江三角洲(南部)区域地面沉降模拟研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2008, 38(4): 477-492.
- XUE Yuqun, WU Jichun, ZHANG Yun, et al. Simulation of regional land subsidence in the Southern Yangtze delta [J]. Science in China Series (D-Earth Sciences), 2008, 38(4): 477-492.
- [14] 伍洲云. 苏锡常地区地裂缝灾害危险性评价与预测[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 28-31.
- WU Zhouyun. A laboratory study of biodegradation and adsorption and desorption of trichloroethylene to mixed bacteria [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(1): 28-31.
- [15] 朱兴贤, 于军, 武键强. 基于 ANN 的苏锡常地裂缝预测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 28-30.
- ZHU Xingxian, YU Jun, WU Jianqiang. Prediction of ground fissures in Suzhou-Wuxi-Changzhou area based on ANN analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(2): 28-30.
- [16] 焦殉, 苏小四, 于军. 苏锡常地裂缝危险性分区[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(1): 142-146.
- JIAO Xun, SU Xiaosi, Yu Jun. Fatalness zoning of earth fissure hazard in Suzhou-Wuxi-Changzhou Area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(1): 142-146.
- [17] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 西安市地裂缝对长安路立交桥致灾机理调查研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(2): 65-69.
- SHI Yuling, MEN Yuming, PENG Jianbing, et al. Analysis on Xi'an ground-fissure destruction to Chang'an road overpass [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(2): 65-69.
- [18] 李永靖, 张向东, 蒋建中, 等. 频繁矿震作用下地裂缝扩展机理及数值模拟研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 73-76.
- LI Yongjing, ZHANG Xiangdong, JIANG Jianzhong, et al. Ground fissure caused by frequent mine-quakes and its numerical simulation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 73-76.
- [19] 石玉玲, 门玉民, 彭建兵, 等. 西安城区地裂缝破裂扩展的数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 56-60.
- SHI Yuling, MEN Yumin, PENG Jianbin, et al. Numerical simulation of ground-fissure cracking and extending in Xi'an [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 56-60.
- [20] Burbey T. J. Mechanisms for earth fissure formation in heavily pumped basins. 2010 [A]. IAHS-AISH Publication, 2010.
- [21] Hernandez M. and Burbey, T. J. Fault-controlled deformation and stress from pumping-induced groundwater flow [J]. Journal of Hydrology, 2012, 428: 80-93.
- [22] 陈立伟. 地裂缝扩展机理研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2007.
- CHEN Liwei. Research on propagation mechanism of ground fissures [D]. Ph. D. Thesis, Chang'an University, 2007.
- [23] 王哲成. 抽水条件下拉张型地裂缝开展过程的数值模拟研究[D]. 南京大学硕士学位论文, 2012.
- WANG Zhecheng. Simulation of propagation of tensile-induced earth fissures due to groundwater extraction [D]. Master Thesis, Nanjing University, 2012.