

临汾市地裂缝灾害模拟与灾情预报的 GIS 研究*

武 强 董东林 武 雄 姜振泉 隋旺华 钱增江
傅耀军 徐建芳 张 伟

(中国矿业大学(北京校区), 北京 100083)

摘要 山西临汾市地裂缝灾害受控于多种因子. 在详尽分析了诸如地质构造、地下水渗流场、地层条件和地貌环境等各个致灾因子的基础上, 分别建立了它们各自的专题层; 然后利用先进的 AHP 方法确定出它们之间的相互关系, 通过应用 GIS 强大的空间分析和处理操作功能, 构建出地裂缝灾害模拟评价的多元地学信息复合叠加模型. 在此基础上, 对地裂缝灾害的灾情发展趋势进行了预测.

关键词 地理信息系统 地裂缝灾害 AHP 法 专题层 多源地学信息复合叠加

临汾市位于山西省中南部临汾盆地中心, 是中华民族繁衍生息场所和古代文化发祥地之一. 舜之前临汾就被建立为都城, 因而留下了丰富的文物古迹. 但由于多种因素的影响, 近年来在该地区已陆续发现了 5 个比较集中分布的地裂缝发育区, 分别见于高堆、贾得、周家庄、梁村和临汾师范大学. 地裂缝灾害已经造成市中心建筑物楼房开裂变形, 数十户居民因房屋遭破坏而被迫搬迁它处, 大面积农田灌溉用水漏失严重, 多处公路被切断裂开, 铁路也存在着潜在的危机, 地裂缝灾害严重制约着临汾市区市政建设与经济发展^[1].

国外对地裂缝的研究从近 10 多年才出现, 主要有美国和塞浦路斯等国家和地区^[2~4], 其研究程度也很有限. 美国的 Bell 在 1990 年研究了内华达州 Las Veagas 城市地面沉降灾害, 指出地面沉降及伴生的地裂缝和断层活动一起构成了该城市严重的环境工程地质问题^[5]. 另外, 美国的 Carpenter^[6]在研究了 Arizona 中南部 Picacho 山附近的地裂缝后认为, 地裂缝活动与地下水位波动存在密切关系, 同时也与隐伏断层有关联.

我国的地裂缝研究较之国外深入. 西安、大同、邯郸、衡水、石家庄、天津、榆次等地都陆续出现了灾害程度不同的地裂缝, 其中研究程度较高的地区主要有西安和大同地区. 自 80 年代初起, 西安市相继开展了大量的研究工作. 研究认为, 地裂缝主要是由构造和地下水过量开采引起的, 但未能对地裂缝灾害的形成、发展和控制因素进行全面的分析^[7~9]. 对大同市地裂缝于 80 年代末期开始研究, 但就其研究程度而言, 目前尚处于起步阶段^[10].

综上所述, 以往的国内外研究均处于定性、半定量阶段, 对影响地裂缝灾害成因的多个主控因子相互之间的关系考虑不够, 未能进行全面综合的定量研究, 缺乏灾害模拟与灾情预

2000-01-13 收稿, 2000-03-20 收修改稿

* 国家计划委员会防灾减灾资助项目(批准号: 1994-7)

报的有效方法与技术.

1 基本条件概述

临汾市地处山西省南部的交通枢纽,地势平坦.区内属半干旱大陆性气候,多年平均降雨量 535.8mm.水系以汾河的干、支流为主.

临汾盆地的周边山区主要出露基岩地层,由老到新主要包括太古界混合岩化的深变质岩系、元古界长城系滨湖相碎屑岩系、古生界海陆交互相煤系、中生界三叠系陆相红色地层和沉积厚度达 1 800~2 000m 的新生界地层.研究区水文地质条件较为复杂,松散孔隙介质沉积厚度较大,一般可划分为浅、中、深层 3 个孔隙含水层组.

2 地裂缝灾害的 GIS 模拟模型

影响临汾地裂缝灾害的因素较多,包括新构造、地下水开采、地层、地貌环境等,这些因素均具有空间分布规律.现代先进的地理信息系统(GIS)正好具有传统方法所未有的强大空间操作功能等优势,因此本文将 GIS 技术应用于灾害敏感性研究中,进行空间区域的地裂缝灾害敏感性现状评价和预测.首先对影响地裂缝灾害的各个因素综合分析,形成各单因子影响分布图,然后根据它们的重要性(权重)通过一系列的空间操作,按一定综合方法将各单因子分布图进行代数复合叠加.在此基础上,经过 GIS 模拟识别,达到对其进行敏感性分析和预测的目的.

2.1 单影响因素分析

2.1.1 新构造活动与地裂缝灾害的关系 临汾地裂缝主要分布于临汾凹陷区中部^[11,12].区内新构造格局十分明显,主要发育 NNE, NE 及 NW 向 3 组断裂(见图 1). NNE 向断裂属右旋走滑型正断层,其中盆地西侧的罗云山山前断裂和东侧的大阳断裂是控制临汾凹陷构造格局的主控断裂^[13,14]; NE 向断裂为 NNE 向断裂的派生断裂,如 F₇₋₁ 是 F₇ 和 F₈ 的派生断裂, F₈₋₂ 是 F₈ 和 F₈₋₁ 的派生断裂, F₈₋₃ 是 F₈₋₁ 和 F₉ 的派生断裂; NW 向断裂包括 F₁₀, F₁₁ 和 F₁₂.

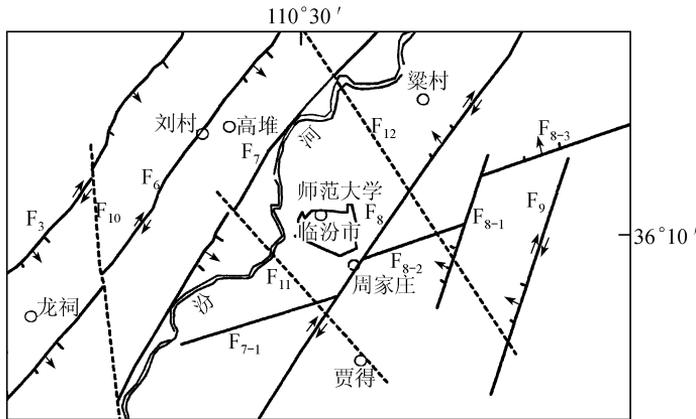


图 1 研究区活动断裂分布图

由于区域性伸展背景的影响,受力变形状态下最容易出现的构造形迹将是 NNE 向的张破裂.区内所出现的 NE-NNE 向地裂缝,其排列组合及裂面形状都显示出明显的张性特征.分

析认为,临汾凹陷基底构造分布及活动性表现有以下基本特征:(1)区内构造应力场最小主应力为 NW-SE 向的拉张作用力,最大主应力为 NE-SW 向的挤压作用力,构造应力作用可能导致的地表错断应表现为 NE-SW 向展布的开裂形变。(2)区内基底主体构造为 NE-SW 向展布的正断右旋走滑断裂,在力学性质上,地裂缝与基底断裂具有明确的配套关系。

临汾盆地在历史上曾发生过洪洞 8 级强震(1303 年)、临汾 7.5 级强震(1695 年)和 4 次 6 级以上强震,它们均导致地表错断,目前仍保留有明显形迹,如 1695 年临汾大地震形成的临汾城区-屯斗土层破裂带^[15]。但自 70 年代以来,虽然地震活动次数有所增加,但震源点分布于基底断裂的地震活动均为 3 级以下的微震或弱震,较弱的基底断裂活动不具备直接引发地裂缝的动力条件。这一点已为临汾拗陷基底构造近期活动特点与地裂缝的空间发育分布表现出的不一致性所证实。地裂缝发育具有缓慢的渐进性特点,没有表现出由地震活动引发的突发性发育特点。

2.1.2 地下水开采与地裂缝灾害的关系 临汾市在 1976 年之前,地下水系统补、排基本处于均衡状态。1976 年后开始处于超采状态,地下水位持续大幅度下降,降落漏斗中心水头下降 10 m/a 左右。到 1986 年,地下水位降落漏斗分布区域面积已超过 50 km²(漏斗长轴方向为 NE-SW)。从 1992 年至今,地下水水头降幅趋缓,降幅约在 3 m/a 左右。

地下水超采可以诱发地裂缝灾害,其直接原因是地下水超采所引发的地面沉降变形。具体因果关系可概括为:地下水位下降→孔隙水压力降低→多孔介质有效应力增加→土体固结压缩。为了定量评价这种因果关系,本文建立了弹塑性固结变形模型。计算结果表明,不同阶段地面沉降区分布在形状上相似于同期水位降深漏斗;与地下水头降深漏斗的扩展相比,沉降区的扩展滞后于地下水降落漏斗;沉降引起的水平位移方向指向沉降区中央,水平位移最大值出现在沉降区边缘的拐点处。

对比地裂缝发育位置与沉降区分布,不难发现周家庄、师范大学、梁村等处地裂缝与高堆地裂缝分别分布于沉降区边缘带两侧,且在展布方向上二者也表现出明显的对应关系。

研究区地面沉降主要发生在 1978 年以后。从沉降形变特征看,高堆、周家庄、梁村及师范大学四处地裂缝均处于 1978 年以后的沉降区边缘带,仅仅鹅舍、龙祠地裂缝发育位置的地面沉降始终保持较低水平。因此,除这两处地裂缝外,其他地裂缝的发育均与沉降存在着较为密切的因果关系。

2.1.3 地层条件与地裂缝灾害的关系 地层是地裂缝发育的介质条件,地层对地裂缝发生发展的影响主要表现于两个方面:一是作为构造应力应变传递的介质;另一方面,不同类型的土层,对于某些诱发因素的反映不同。

研究区湿陷性黄土主要分布于东西两侧的洪积扇区及汾河两岸的三级阶地的浅部。黄土层对地裂缝灾情发展的影响较为明显。发育于沉积厚度较大的湿陷性黄土分布区域的高堆、鹅舍等处地裂缝,强降雨或农田灌溉后裂缝重复显现,且开裂变形幅度加大;而发育在无黄土分布区域的其他地裂缝在同期则没有出现类似现象。因此,湿陷性黄土的湿陷性是地裂缝发育的另一个致灾因子。

根据中国地震局地质研究所研究成果^[11],临汾市地表下 20 m 埋深范围的场地条件可划分为易液化、中软及中硬场地等 3 种基本类型。作为地震液化土层判定的基本条件,易液化土层主要是指埋深在 15 m 范围的饱水粉细砂及黏粒含量较低(<15%)的粉土层,其主要特点

是结构松散, 压密程度差. 因此, 从地裂缝角度考虑, 该范围属于不易发生地裂缝灾害的场地.

2.1.4 地貌环境与地裂缝灾害的关系 不同的地貌类型反映了各种内外营力作用的差异. 研究区内不同地貌单元, 构成了不同的地裂缝发育环境. 另一方面, 沿地貌单元边界, 不同成因、岩性、物理力学性质的土层交替沉积, 两侧地形陡变, 因此地貌单元界限实际是工程地质条件发生突变的地带.

2.2 专题层(Coverage)的形成

在地学中, 许多因素很难以数字来表示, 往往只能用其某一方面的标准来反映其相对大小. 因此, 如何找到其量化参数是构造专题层的关键, 下面分别来说明.

2.2.1 构造专题层的生成 构造活动作用主要包括基底活动断裂的蠕变和地震活动两种形式. 构造活动为地裂缝的发生发展提供了力源条件, 衡量其影响程度的直接尺度应是构造应力的分布及作用强度, 所以, 构造因素的量化主要是对构造应力场实施量化.

大量研究结果表明, 不论是断层的蠕变还是地震断层活动, 在地表形成的断错形变程度沿断裂两侧均具有分带性. 一般地讲, 构造影响带可划分为 3 带. 第 1 为基底断裂主裂变带, 它对应于基底断裂发震及蠕变运动条件下的主形变宽度; 第 2 为基底断裂次裂变带, 它主要对应于基底断裂发震断裂情况下地表形变影响区域中主形变带外缘以外的范围; 第 3 为交替影响带, 它对应于相邻分布活动断裂在地表形成的裂变带中的重叠区域.

根据地球化学场特征、模拟试验结果以及其邻区活动断裂的相关资料, 本文对上述 3 带延展范围确定如下: 断裂主裂变带是指基底断裂两侧 1 000 m 范围; 断裂次裂变带是指主裂变带以外 1 000 m 宽度范围; 断裂交替影响带指相邻断裂中间范围. 具体量化处理见表 1.

表 1 各致灾因子的相对数字量化处理

物理因子	数字量化等级								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
构造					断裂次影 响带		断裂交替 影响带		断层主 裂变带
地下水超采 (形变梯度 \times $10^{-1}\%$)	<0.05		0.05 ~ 0.1		0.1 ~ 0.5		>0.5		
地层	Ⅲ类		Ⅳ类	Ⅱ类			Ⅰ类		
地貌	二级阶地区、一 级阶地及漫滩区	洪积扇区 与三级阶 地区		单元界限 影响带					

2.2.2 地下水超采专题层的生成 研究表明, 对于厚松散层中的沉降区, 在沉降区不同范围其应力分布具有较明显的规律. 在沉降区外部边缘形成拉应力区, 在沉降区中心一带形成压应力区, 在内边缘形成拉压应力区. 对应于应力的分布, 拉张应力的集中可导致土层沿拉张作用方向的开裂变形. 而压应力的集中则主要使土层沿压应力作用的方向压缩变形. 由此可见, 对于地层的沉降变形, 最可能导致拉裂的区域是沉降区的外缘区域. 对于土层固结沉降区域, 土层内的应力、应变分布与沉降区的形状特征表现出一定的对应关系. 基于以上分析, 对地下水超采因素采用以沉降的形变梯度作为依据进行分区量化处理(见表 1).

2.2.3 地层专题层的生成 地层是地裂缝的发育介质条件. 根据中-浅部土层在固结压缩

特征、强度条件、形变特征及其水理性质的差异，将研究区内土层条件分为 4 类(见表 1): 50m 埋深范围，如上部分布有不小于 5 m 厚的湿陷性黄土及黄土状土，下伏土层以较坚硬的黏性土层为主，归于 I 类；50 m 埋深范围较坚硬(黏性土硬塑-坚硬，砂层密实)土层厚度比例占 60 % 以上，15 m 深度内的液化性土层厚度<1 m，归于 II 类；埋深 50 m 范围内，饱水粉细砂及粉土等液化性土层厚度>4 m，且主要分布于浅部，黏性土层为软-可塑态归于 III 类；IV 类土则主要指分布于山前冲积扇中后缘区的较密实砂砾石层。

2.2.4 地貌专题层的生成 对地貌因素的处理，主要考虑在拉张应力作用下地貌环境所可能产生的影响。根据临汾地裂缝发育区的地貌条件，结合地裂缝分布与地貌的宏观关系，量化重点考虑地貌单元界限的影响，取单元界限为 500 m 范围作为单元界限影响带，然后对不同地貌单元的地形特征进一步分区(见表 1)。

2.3 采用层次分析法(AHP)自动确定权重系数

根据研究，地裂缝灾害受控于多种因素，虽然通过综合分析可知构造和地下水开采的影响可能占有较大的比重，但究竟如何量化它们的权重尚缺乏研究。以往只能靠定性分析确定，本文采用的 AHP 方法为解决这个量化难题提供了一个很好的途径。

AHP 法是一种定性定量相结合的决策分析方法。它是一种将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化的过程。决策者可将复杂问题分解为若干层次和若干因素，在各因素之间进行简单的比较和计算，就可确定不同方案的权重，为最佳方案的选择提供依据。

根据对影响地裂缝灾害因子的分析，得出判断矩阵。对同一层次某一因素的重要性进行两两比较(层次单排序)，采用 1~9 标度法使各因子相对重要性量化。单排序结果见表 2。

表 2 层次单排序的判断矩阵

	新构造因子	地下水开发因子	地貌因子	地层因子	权重	计算权重
新构造因子	1	2	4	6	0.395	0.404
地下水开发因子	1/2	1	3	5	0.299	0.305
地貌因子	1/4	1/3	1	2	0.210	0.201
地层因子	1/6	1/5	1/2	1	0.079	0.104

根据若干计算，可得到最大特征值为 $I_{max} = 4.256$ ，一致性指标 $CI = 0.085$ ，平均随机一致性指标为 $RI = 0.90$ ，判断矩阵的随机一致性比例 $CR = 0.094$ $8 < 0.10$ 。

根据层次决策分析方法的规定：若 $CR < 0.10$ ，则认为判断矩阵具有令人满意的一致性；否则就需要调整判断矩阵，直到满意为止。由上述计算结果可知，本次构造的判断矩阵一致性好。

2.4 GIS 模拟识别

根据反复拟合和交叉选值运算的原则，对 1978, 1986 和 1995 年的地裂缝灾害分区图进行了危险性拟合(见图 2 (a)~(c))，其拟合率均大于 80%。据此所得到的各致灾因子的权重系数分别为： $\omega_1 = 0.404$ ， $\omega_2 = 0.305$ ， $\omega_3 = 0.201$ ， $\omega_4 = 0.104$ 。同时利用频率和频数分布直方图(见图 3)，可以确定出用于评价预测的分区阈值为

- $DI > 5.3$: 地裂缝灾害危险区;
- $4.25 < DI \leq 5.3$: 地裂缝灾害较危险区;
- $3.25 < DI \leq 4.25$: 地裂缝灾害较安全区;
- $DI \leq 3.25$: 地裂缝灾害安全区。

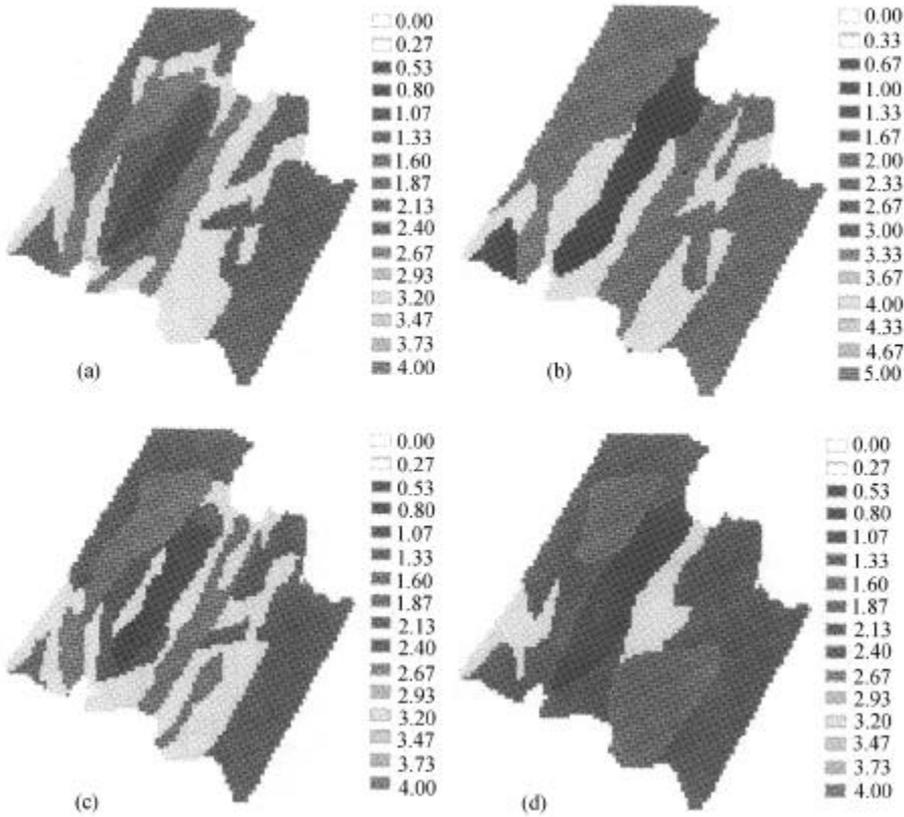


图 2 临汾市地裂缝灾害模拟评价与预报图

(a) 1978 年, (b) 1986 年, (c) 1995 年, (d) 2005 年

以此为依据进行了地裂缝发育条件分区. 最后识别确定的临汾市地裂缝灾害预报评价模型为

$$DI = \sum_{k=1}^n w_k \cdot f_k(x, y)$$

$$= 0.404 f_1(x, y) + 0.305 f_2(x, y) + 0.201 f_3(x, y) + 0.104 f_4(x, y).$$

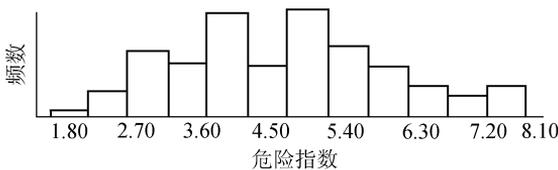


图 3 临汾市地裂缝模拟评价的频率直方图

3 地裂缝灾害发展趋势预测

据现场测量及其合理推断, 构建了 2005 年各单因子的专题层图. 经过一系列的地图代数运算, 得到 GIS 处理后的 2005 年临汾市地裂缝灾害发展趋势的预测分区图(见图 2(d)). 由该图明显看出,

未来地裂缝的发展趋势将具有以下特点: (1) 随着地下水的持续开采, 降落漏斗也逐渐增大, 引起的地表沉降的陡变带亦向外拓展, 故在河漫滩、一级阶地和二级阶地等大部分区域所发生的地裂缝灾害危险性减低. 周家庄、梁村及临汾师范大学等地的地裂缝(目前处于沉降区的内边缘地裂缝)会随沉降区的扩展, 其活动性减弱, 从而处于稳定状态; 而鹅舍、龙祠地裂缝(目前受地下水的超采影响不明显)则会随沉降区的外扩, 其活动性将被激发. 另外, 高堆地裂

缝处于沉降区的外部边缘,在未来将保持较强的活动性。(2)三级阶地及山前洪积扇区随着地表沉降陡变带外移,地裂缝活动加剧。同时还可能在地貌单元交接地带、高陡坎等位置引发新的地裂缝。(3)汾河西岸地区的地裂缝活动趋势强于东岸地区。

4 结论与建议

(1)根据地裂缝灾害受控于多个因子的特点,充分利用了GIS所拥有的强大空间操作功能优势,对临汾市地裂缝灾害构建了符合实际的多源信息复合模型,并进行了令人满意的灾情预报。

(2)在地面沉降因素影响不太明显的条件下,构造活动只有在适宜的土层及地貌环境才能引发地裂缝。

(3)根据地裂缝灾害发生条件,研究区范围内所发育的地裂缝大致可以划分为两种基本类型:一种属于构造活动引生型,如高堆、鹅舍及龙祠等处地裂缝。这些地裂缝的发育场地为黄土或较硬土层分布区域,这类土层弹性特征明显,利于构造应力形成集中并导致地表开裂变形。另一种属于地下水沉降诱发型,梁村、周家庄及临汾师范大学等地裂缝属于此种类型。这些地裂缝发育场地的土层大都具有明显的塑性变形特征,基底构造活动形成的应变能很大程度通过土层的塑性变形得以释放。因此,构造蠕变形成的应变只有在某些因素的诱发下,才可能导致其开裂变形。

(4)地裂缝灾害扩展区域主要局限于汾河东西两侧范围。在该范围内,地裂缝的规模主要受场地条件的制约,其活动性取决于诱发因素的作用强度。

(5)基底断裂的强烈活动与地裂缝灾害发育存在密切关系,由于临汾拗陷的基底断裂除罗云山山前断裂(F_5)布置了跨断层水准长期测量外,其他断裂目前尚缺少记录其活动性的系统长期观察数据,建议有关部门今后加强这方面的动态序列观测。

参 考 文 献

- 1 曲焕林,徐乃安,主编.环境地学问题研究论文集.北京:石油工业出版社,1996
- 2 Holzer T L, Pampeyan E H. Earth fissures and localized differential subsidence. *Water Resources Research*, 1981, 17(1): 223~227
- 3 Leonard R J. An earth fissure in Southern Arizona. *Journal of Geology*, 1929, 37(8): 765~774
- 4 Robinson G M. Notes on earth fissures in South Arizona. U S Geology Survey Circular, 1962, 7: 466
- 5 Bell J W. Land Subsidence in Las Vegas, Nevada, USA. In: 6th International IAEG Congress. Amsterdam: IAEG Publication, 1990. 1 327~1 332
- 6 Carpenter M C. Earth-fissure movements associated with fluctuations in ground-water levels near the Picacho mountains, south-central Arizona, 1980-1984. US Geological Survey Professional Paper. United States Government Printing Office, Washington, 1993. 497
- 7 李永善. 西安地裂缝及渭河盆地活断层研究. 北京:地震出版社,1992
- 8 吴嘉毅. 西安地裂缝工程性质. 西安:陕西科学技术出版社,1990
- 9 冯希杰. 西安地裂缝活动成灾评估. 西安地质学院学报, 1990, 12(4): 44~48
- 10 刘玉海,主编. 大同机车厂及邻区地裂缝研究. 西安:陕西科学技术出版社,1991
- 11 马宗晋,主编. 山西临汾地震研究与系统减灾. 北京:地震出版社,1993
- 12 刘玉海,赵文胜. 汾渭地堑“地裂缝系”及其灾害演生. 地质灾害与防治, 1990, 1(1): 73~79
- 13 马宗晋,主编. 现代地壳运动问题. 北京:地质出版社,1992
- 14 苏宗正. 山西断陷带地震活动的新构造背景. 山西地震, 1988, 22(4): 22~27
- 15 王景明,常丕兴. 汾渭地裂缝与现代地震活动. 地震学报, 1989, 11(1): 56~67