

基于分形理论的地裂缝成因机制研究

李自红^{1,3)} 刘鸿福¹⁾ 曾金艳³⁾ 陈文^{2,3)}

1) 太原理工大学, 太原 030024

2) 吉林大学, 长春 130012

3) 山西省地震局, 太原 030002

摘要 依据分形理论分析了清徐境内交城断裂带、地裂缝以及地貌的分形结构特征。同时根据分析结果讨论了地裂缝、断裂以及地貌之间的内在联系, 并对清徐地裂缝的成因机制进行了研究。

关键词: 分形特征 地裂缝 分维 活动断裂 地貌

引言

汾渭断陷带是地裂缝灾害严重的区域, 其地裂缝的发育具有一定的构造背景, 但不是单一构造成因的地质现象, 其在地表的发育程度和活动性同时受构造活动、地面沉降、地层、地貌等因素的共同作用, 并且各因素表现出不同的相互作用关系。了解地裂缝的形成条件以及相关因素, 研究其影响特征和程度, 对于预测地裂缝造成的灾害具有重要的作用。由于地裂缝的成因复杂, 故任何一种方法都具有其局限性(武强等, 2003)。

清徐地裂缝近几年发展比较迅速, 从 1998 年开始, 沿西边山一带的村民房屋和耕地中相继出现裂缝和地基下陷, 2002 年左右呈现日趋加重的态势, 破坏严重, 已严重威胁到村民的生命和财产安全。目前对清徐地裂缝的产生机理还缺乏研究, 本文在前人对交城断裂以及清徐地裂缝调查成果的基础上, 采用分形理论对清徐地裂缝进行了定量评价, 分析了地裂缝、断裂以及地貌的分形特征以及他们之间的内在联系, 解析了清徐地裂缝与基底主控断裂交城断裂的对应关系, 并对其成因机制进行了研究。分析的结果进一步论证了采用分形理论来研究断裂与地裂缝的本构关系具有适应性和可操作性, 为分形理论在地质学领域的应用提供了又一佐证。

1 分形理论简介

分形是上世纪 70 年代法国数学家 Mandelbrot 发明并经后来不断完善和发展的一套处理、分析系统自相似特征的方法和理论。分形指的是整体和局部之间存在某种相似的形, 体现大多数奇异集合的特征, 即研究的对象当空间尺度(时间尺度)改变后, 其结构特征不变, 只是原来的放

[收稿日期] 2011-07-12

[作者简介] 李自红, 男, 生于 1969 年。1993 年毕业于中南工业大学勘查地球物理专业, 在读博士, 高级工程师。主要从事工程物探, 地震工程等相关方面的工作和研究, E-mail: sxsdzjcy@163.com。

通讯作者 刘鸿福, 太原理工大学教授, 博士生导师。E-mail: lhfcxp@163.com

大和缩小，整体为局部的无限嵌套。分形的特征量是分维数，它是定量描述相似性的参数。

分维数的求法很多，主要有箱形覆盖法（盒维数法）、康托点集法等。本文主要采用箱形覆盖法对分维数进行测算。其原理为首先选取一定的研究区域，把它划分为若干边长为 ε 的正方形方格网，在每个正方形方格网内对客体的格子数进行统计，记录每个网格中分形体的个数 $N(\varepsilon)$ ，改变网格的宽度 ε 求取相应的 $N(\varepsilon)$ ，根据下式求出分维数 D （武强等，2003）：

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lg N(\varepsilon) / \lg \varepsilon \quad (1)$$

具体算法步骤为：

①在研究区内，以边长为 r_0 的正方形网格在构造地质图上进行覆盖，然后不断缩小网格边长，使 $r = r_0/2$ 、 $r_0/4$ 、 $r_0/8$ ，并统计不同边长方格网对应的格子数 $N(r)$ 。

②利用以下关系式：

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (2)$$

式中， D 为分维数； C 为常数。

如果研究对象具有自相似结构，则 $\lg N(r) \sim \lg(r)$ 在双对数坐标内接近于斜率为 $-D$ 的一条直线，即：

$$\lg N(r) = a + (-D) \lg(r) \quad (3)$$

③利用最小二乘法拟合 r_i 和 N_i ，求得分维数 D 和相关系数 γ 。

利用分维理论可以对断层的复杂性、构造活动程度、地震活动规律以及地质要素进行研究。研究表明：分维数的大小反应了岩体破裂系的复杂程度和构造活动性的强弱，较高的分维数伴随着区域复杂的断裂系统、强构造活动和地震活动（武强等，2003）。分形在地貌上的反应主要是构造运动的影响，分析地貌的分形特征可以进一步认识构造运动。以上都是分形理论在地学领域应用的基础。

2 清徐地裂缝研究区的地质环境

研究区位于清徐县城西北、太原盆地西边界地带，该区域内地裂缝发育（见图1）。其范围为东起上固驿村北东，西至武家坡村西，北起猫儿梁—刘家园—方山一线，南至西支河渠一线。

2.1 清徐地区的新构造特征

区域内主要发育的断裂为交城断裂。交城断裂北起太原土堂村，经清徐、交城至汾阳，全长 130km，总体走向北东，倾向南东。交城断裂形成于中生代的燕山期，主断裂位于黄土台地后缘与基岩山地交界地带，它控制了太原盆地的新生界沉积。该断裂以正断活动为主，兼有右旋活动分量，断层的两盘垂直断距达 1500m，由南向北逐渐减少，是一条全新世活动的断层。

2.2 清徐地区的地貌环境

研究区域位于吕梁山断块隆起区与太原盆地的交界部位（见图2），地势呈现北高南低，地貌类型包括剥蚀基岩低山区、倾斜平原以及冲积平原。剥蚀基岩低山区冲沟发育，多呈“U”字形，沿河谷发育三级阶地；倾斜平原主要由洪积台地、洪积扇前缘以及洪积扇前洼地构成；冲积平原是太原盆地内的主要构造沉降区，全新世以来主要由汾河带来的大量冲积物堆积而成。

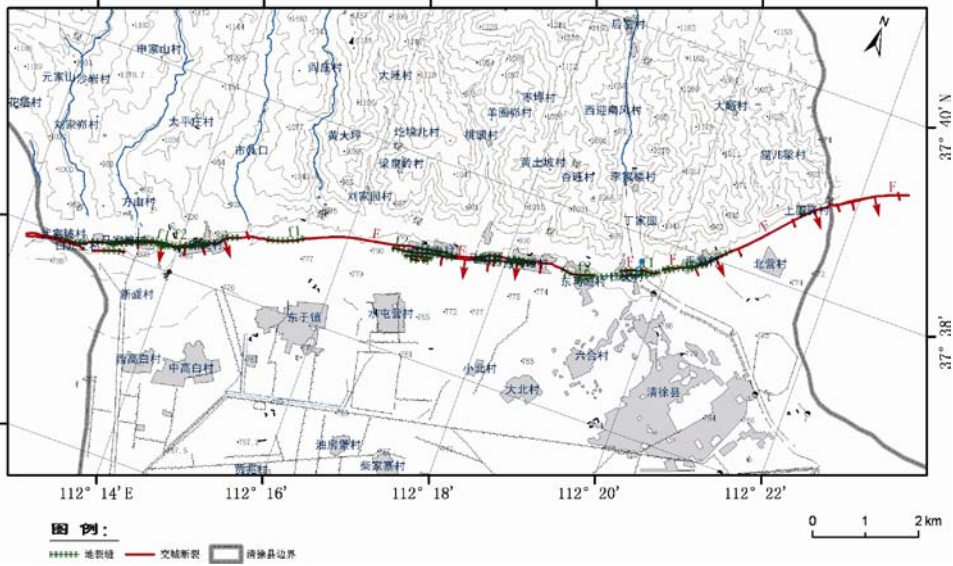


图 1 清徐地裂缝分布示意图

Fig. 1 Distribution of ground fissures in Qingxu county

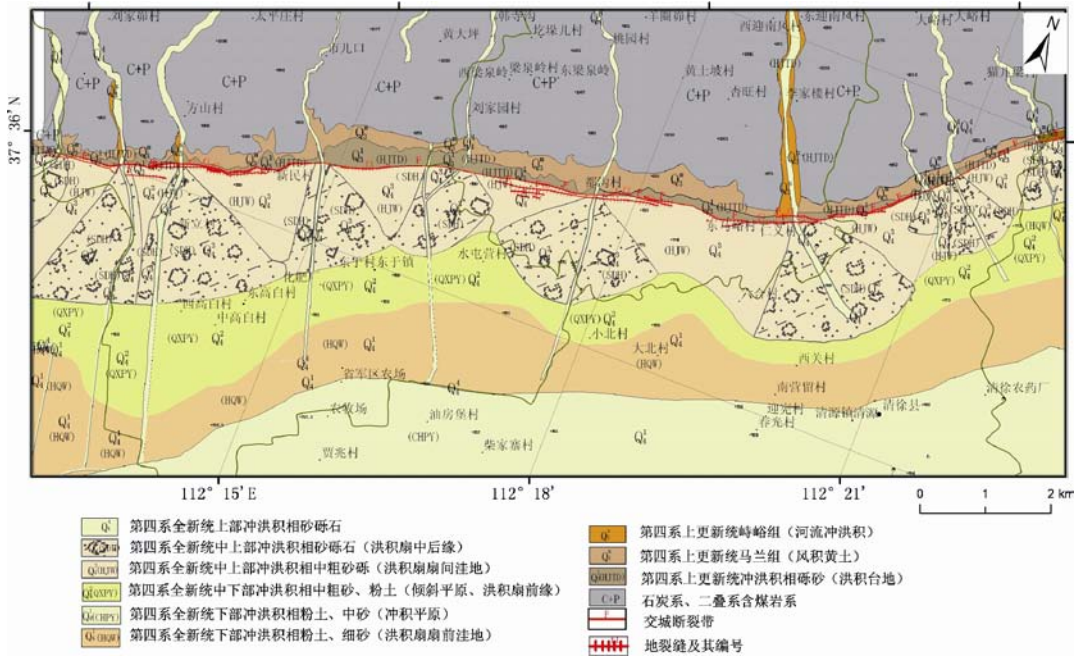


图 2 研究区地貌图

Fig. 2 Geomorphologic map of the study area

2.3 清徐地裂缝的结构特征

清徐西边山地裂缝平面形态总体上均为折线型、X 型以及 Y 型，仅在局部有方向上的变化。地裂缝在剖面上呈上宽下窄的楔形，一般宽 2—15cm，近地表处因受渗水的水流冲刷宽达 30—50cm，最宽处大于 1m。扩宽段深度较小，一般为 5—6m；有些地裂缝扩宽段深度较

大，向下可深达 20 余米。裂面陡直、粗糙、多无擦痕，只有个别地裂缝可见水平扭动擦痕。清徐地裂缝在剖面上还具有同级多条地裂缝组合，更多的是主裂缝和次裂缝在剖面上组合的特征（见图 3）。

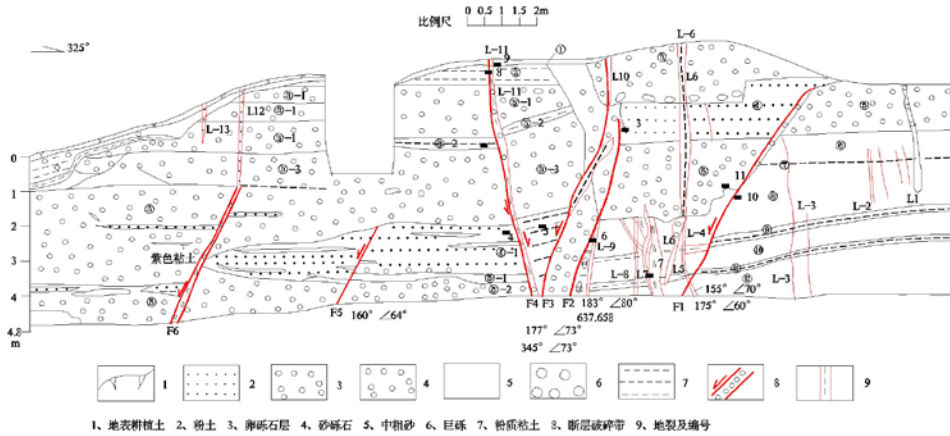


图 3 清徐地裂缝典型剖面

Fig. 3 Typical cross section of ground fissures in Qingxu county

3 研究区地质分形特征

在研究区内主要的断裂为交城断裂，根据太原市城市活动断层探测的成果，该断裂全新世以来仍活动强烈，断层的展布形态是通过地质调查以及浅层地震勘探等手段综合确定的，可以作为断层分维计算的基础；地貌、地裂缝的空间展布是通过灾害调查、地球物理勘探等手段确定的。因此，上述要素的分维计算基础资料是可靠的。

3.1 研究区地裂缝分形特征

从清徐地裂缝的空间分布来看（见图 1），具有明显的长度、宽度和延伸方向等几何要素，利用这些要素进行统计，采用箱形覆盖法对地裂缝进行分维数计算。具体步骤为：首先对收集到的资料加以整理并将地裂缝的分布校绘到地质图上，利用前文所述箱形覆盖法进行统计计算。

本文计算采用的网格尺度为 $r=0.5、1.0、2.0、4.0、8.0$ km，得到的地裂缝分维数 $D=0.9317$ ； $R^2=0.9991$ （图 4）。

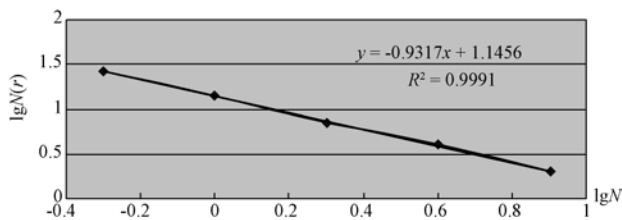


图 4 清徐地裂缝分维数求解图

Fig. 4 Plot of $Lg N(r)$ vs. $Lg N$ of ground fissures in Qingxu county

上述计算结果表明,地裂缝存在分维现象,也说明它本身是具有一定相似或相同特征的系统,而不是孤立的现象。根据地裂缝灾害调查,研究区内的地裂缝分布呈现一定的规律。首先地裂缝具有成带性;其次不同调查点所观测到的地裂缝动态变化量各不相同,但在产状和活动方式上具有一致性或具有相似的特点。这反映出地裂缝的变化在很大程度上受局部条件的限制。

3.2 研究区断裂带分形特征

活动断裂带由规模大小不等的断层组成,其几何结构在不同尺度上都具有自相似特征,这些自相似结构可以用分维进行定量描述。

对研究区的交城断裂进行分维计算,方法同样采用箱形覆盖法,网格尺度与地裂缝分维数计算相同。解析出的交城断裂的分维数 $D=1.0741$; $R^2=0.9988$ (见图 5)。

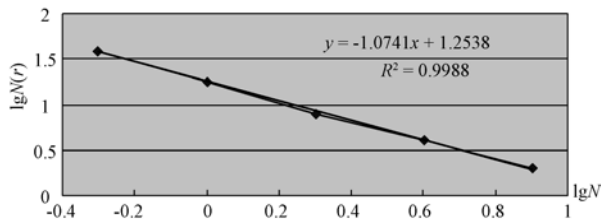


图 5 交城断裂分维数求解图

Fig. 5 Plot of Lg $N(r)$ vs. Lg N of Jiaocheng fault

根据前人的研究成果(刘科等, 2008; 易顺明等, 1995)表明:断层的分维数越高,表示断裂的长度越长,小断层和分支断层繁多,断层正在发展;反之,分维数越小,断层的规模越小。另外,断层的分维与其形成的力学环境可能存在某种对应关系,剪切断裂具有较低的分维数,张性环境中形成的断裂具有较高的分维数。周尽(1991)在海原断层系的分形研究表明,剪切断层具有较小的分维数,其值大多位于 1.1—1.3;张性环境中形成的断裂系具有较高的分维数,其值大多位于 1.5—1.6。

由计算结果可知,交城断裂具有剪切性质,这与前人的研究成果交城断裂为一剪切走滑断裂的结论相吻合¹。这也可以从太原盆地的应力场得到解释,根据太原盆地 $M_L \geq 4.0$ 级地震的 P 波初动解、单台、多台小震综合断面解结果,主压应力轴的优势分布范围在 140° — 185° 之间,2 个主应力轴相互垂直。在这种应力场的作用下,交城断裂发生横向拉张、水平扭动和垂直差异沉降。

3.3 研究区地貌分形特征

由于地貌是起伏不平的,因此在某些情况下地表具有分形性。地貌轮廓线具有多层次的分支结构,黄土台塬地的轮廓线弯曲变化,冲沟发育。各层次的小冲沟与大冲沟相似,其特征可以用分维来表示(武强等, 2003)。如果地貌受构造的影响,则地貌的分维数可以反应地貌与构造运动的关系。

研究区位于太原断陷盆地西部,其总体的地貌轮廓为北高南低,在地貌上主要分布有洪积台地、冲积平原等多个地貌单元。对其进行分维计算主要考虑不同地貌的交接带,因此对

1 赵晋泉, 曾金艳等, 2008. 山西省清徐县境内交城断裂带、地裂缝勘察及地震活性评价报告. 山西省地震工程勘察研究院.

地貌单元的交接带采用箱形覆盖法进行分维计算，网格尺度同前文。解析出的地貌分维数 $D=1.4669$ ； $R^2=0.9967$ （见图 6）。

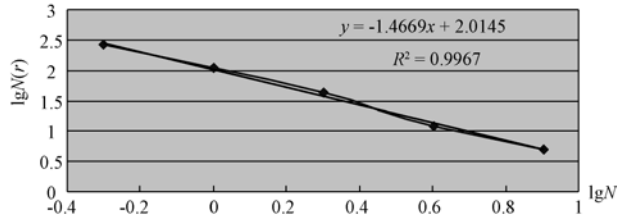


图 6 地貌分维数求解图

Fig. 6 Plot of $Lg N(r)$ vs. $Lg N$ of geomorphologic features in the study area

4 地裂缝、断裂以及地貌的同构性分析

4.1 地裂缝、断裂的同构性分析

根据前文的计算结果，断裂的分维数为 1.0741，地裂缝的分维数为 0.9317，且两者的值十分接近，由此可以推断：地裂缝与交城断裂的系统几何形态具有自相似性，并且同属于剪切走滑性质，这也说明了构造条件（交城断裂）是形成地裂缝的关键因素。同时地裂缝的分维数小于断层的分维数，说明地裂缝的复杂程度和活动量小于断层。根据交城断裂形变结果来看，太原地震台上世纪 80 年代以来跨断层短水准测量的交城断裂两盘的平均垂直速率为 1.0mm/a，大于地裂缝的活动率 0.5—1.0mm/a。

上述分形研究的结论也可以用探槽所揭示的断裂、地裂缝的典型剖面特征加以说明。根据清徐地裂缝典型剖面（见图 3）显示：清徐地裂缝的特征、形态、产状和活动方式与交城断裂具有很好的相似同构性，具体表现在以下几个方面：首先，地裂缝在平面和剖面上直接与交城断裂相连接，甚至沟通；其次，地裂缝的产状与交城断裂的产状基本一致，但倾向上地裂缝的倾角大于断裂倾角，基本上呈直立状，有部分地裂缝呈现与断裂倾向相反的特点；第三，地裂缝延伸方向单一，与其下伏交城断裂相同，呈条带状或线状分布；第四，地裂缝的活动具有周期性，地裂缝具有明显的期次，并存在有古地裂缝，这一多期活动的性质也表明地裂缝具有构造属性。

这一结果也很好地证实了用分形理论来研究地裂缝和断裂具有同构性的结论。

4.2 地裂缝、地貌的同构性分析

从地貌的分维数（1.4669）和地裂缝的分维数（0.9317）来看，前者比后者大，并且大于断层分维数（1.0741）。由此可知，地貌的形态比断层更复杂，地裂缝的出现与地貌无明显关联特点。地裂缝的形成并非受地貌的控制，但地貌在某种程度上反应了地裂缝的分布，地裂缝一般沿地形陡变等微地貌界线分布。这一点与赵晋泉的研究报告调查的结果相吻合。

根据清徐地裂缝勘察及地震活动性评价，地裂缝穿越现代河床、全新世台地、全新世洪积扇以及扇间洼地等多种地貌单元，地裂缝发育不受地层结构、岩性特征的影响。从地裂缝的空间分布来看，微地貌主要发育在地形陡坎上。在黄土台地后缘与基岩山地交界地带断裂接触带上，地裂缝密集分布，断层两侧都有地裂缝发生；尤其在断裂带上盘冲积平原的全新统上地裂缝尤为密集。

5 结论

(1) 利用箱形覆盖法解析断层的分维数为 1.0741, 地裂缝的分维数为 0.9317, 两者非常接近, 因此可以推断地裂缝和交城断裂具有同构性, 地裂缝的形成和活动方式受交城断裂控制, 并且两者都具有走滑的性质, 地裂缝是断裂持续强烈活动的结果。地裂缝的分维数小于断层的分维数, 说明地裂缝的复杂程度与活动性小于交城断裂。

(2) 地貌的分维数为 1.4669, 大于断裂和地裂缝的分维数, 因此地貌的复杂程度远远大于断裂和地裂缝, 地裂缝的发育并非受地貌的控制, 但地貌在某种程度上反映了地裂缝的分布。

(3) 地裂缝、断裂、地貌三者分维数的关系为: $D_{\text{地裂缝}} < D_{\text{断裂}} < D_{\text{地貌}}$, 从分维数表现的特征来看, 地貌在一定程度上受基底断裂的控制。受基底断裂的影响, 地貌面发生异常变化, 在基底断裂展布的方向两侧地面形成陡坎、陡坡等微地貌界线。这种界线是构造集中的部位, 在此地层条件发生差异, 地裂缝即沿地貌界线发育。

(4) 断裂与地裂缝的分维可以反映断裂和地裂缝的结构特征、复杂程度和构造活动性特征。将分形应用于构造的研究是一种地学研究的新途径, 但分维数与计算方法和所用的研究尺度以及野外构造研究的详细程度有很大的关系。

(5) 交城断裂延续至今具有特强持续的活动性, 并且在地表具有明显的表现。交城断裂的两盘错动导致了上覆土层的垂直差异变形, 且这种变形已波及地表, 形成地裂缝。因此, 可以认为清除地裂缝的主要力源是构造作用力和土体重力的共同作用, 在水平拉张应力和土体自重作用力的共同作用下, 由于基底断裂产生正断活动, 导致上覆土层自下而上产生破裂, 从而形成地裂缝。

参考文献

- 刘科, 李昌存, 2008. 河北平原地区断层系的分形特征分析. 工程地质学报, **16** (2): 206—210.
- 武强, 姜振泉, 李云龙, 2003. 山西断陷盆地地裂缝灾害研究. 北京: 地质出版社.
- 易顺民, 唐辉明, 1995. 活动断裂分形结构特征. 地球科学—中国地质大学学报, **20** (1): 58—62.
- 周尽, 1991. 海原断层系的分形研究. 西北地震学报, **13** (3): 78—85.

Study of Formation Mechanism of Ground Fissures Based on Fractal Theory

Li Zihong^{1, 3)}, Liu Hongfu¹⁾, Zeng Jinyan³⁾ and Chen Wen^{2, 3)}

1) Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2) Jilin University, Changchun 130012, China

3) Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030002, China

Abstract In this paper, the fractal structure features of Jiaocheng active fault zones, ground fissures and geomorphologic features in Qinxu county are analyzed based on fractal theory. Our analytical results show the inheritance relation among ground fissure, active fault and geomorphology. Finally, we discussed the formation mechanism of the ground fissures in Qinxu county.

Key words: Fractal structure features; Ground fissure; Fractal dimension; Active fault; Geomorphology