

祁连山与龙首山断层的分维特征*

石特临 郭大庆 杨玉衡
郭建康 肖丽珠 孙景芳

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文利用分维几何学方法对祁连山和龙首山断层进行了定量性研究。结果表明,分维数可以表征断层的不均匀性、不规则性和复杂性等,但是,与地震活动无明显的相关关系。分维数的大小与断层分枝数、断层迹线的展布面积有一定关系。

一、引 言

1977年,法国学者B.B.Mandelbrot首次提出了分维的概念^[1],1982年,他又创立了分维几何学。此后许多学者对断层系的分维进行了实际测定和研究,如P. G. Okubo, K. Aki, C. A. Aviles和C. H. Scholz对San Andreas断层的研究以及牛志仁、马瑾等对渭河断裂、鲜水河断裂的研究等。在此基础上,本文根据分维几何学的基本观点和方法,对龙首山断裂和祁连山断裂的分维数进行了实际测定,并初步研究了其分维特征。

二、方法与数据处理

B. B. Mandelbrot介绍了多种测量一条连续曲线的分维数的方法,其中能够用于断层研究的有尺子法和面积覆盖法。

尺子法是用测尺测量被测断层的长度(图1a)。当测尺长度 ϵ 变小时,被测断层长度 $L(\epsilon)$ 增加,两者之间的关系为:

$$\text{Lg}L(\epsilon) = \text{Lg}F + (1 - D)\text{Lg}\epsilon。$$

式中 F 是常数, D 是分维数。

对于这种方法,最主要的问题是如何处理未被测到的剩余部分。本文采用的处理方法是,在一定允许误差下,选择合适的测尺,将其长度测出后加到 $L(\epsilon)$ 中去,这样做能使离散度减小。

*地震科学联合基金资助课题。姬凤英、王爱君、朱建平参加了资料处理工作。

面积覆盖法(图1b)是在一个平面内用圆或某种图形的最小数量来覆盖待测面积内的断层及其分支,然后计算分维数。如果用直径为r的圆来覆盖,所用圆的最小数目为N(r),则断层长度

$$L(r) = N(r)\pi\left(\frac{r}{2}\right)^2/r$$

或 $L(r) = Nr \cdot r$ 。

将所测数据在双对数坐标上拟合,得到一条斜率为b的直线,则分维数

$$D = 1 - b > 1。$$

在本文中,对龙首山断裂的测量采用1:20万构造图,对龙首山北缘断裂采用1:5万地质构造图(以上图件均来源于甘肃省煤炭工业总公司145地质队),最小采样间隔分别为200米和50米。对祁连山大断裂的测量用1:50万地质构造图(来源于甘肃省地质局水文地质二队),最小采样距离为500米。

一般情况下,地质构造图中断层迹线的定位精度在50米之内。考虑到成图过程中由于滑坡、较厚的植被覆盖以及快速沉积等的影响,估计精度在100米左右。

在测量祁连山断层主迹线分维时,使用内插法来进行断层迹线的平滑连接。对所测数据经高斯投影正标和换标,利用Robbins公式对数据间的长度进行地球形状改正(图2)。计算工作在VAX11/750和IBM/PC计算机及数字化仪上进行。

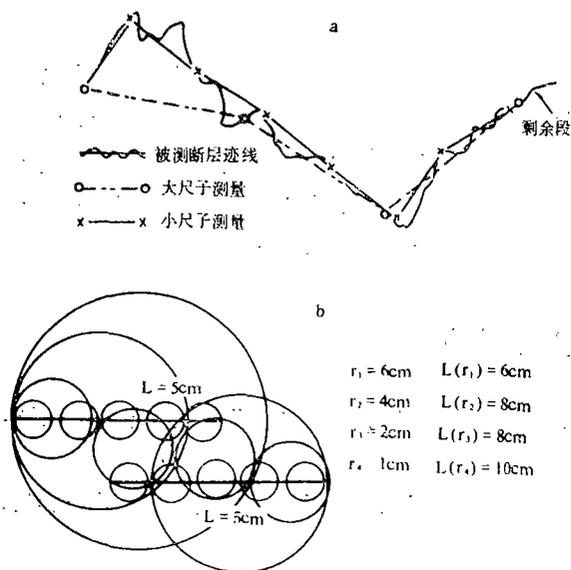


图1 尺子法与圆面积覆盖法测量断层长度示意图

a. 尺子法 b. 圆面积覆盖法(4种直径的圆覆盖两条迹线)

Fig. 1 The sketch of measuring the fault's length with ruler method and circle area covering method

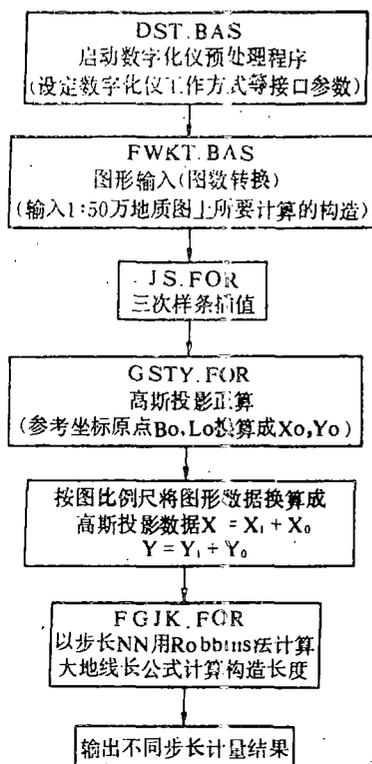


图2 地球形状改正及构造长度计算流程图
Fig. 2 Flow chart of calculation for earthsphere corrector and fault's length

三、龙首山断裂与龙首山北缘断裂的分维特征

龙首山断裂位于河西走廊北侧，呈北西或北西西方向延伸，全长约150公里。它可大致划分为东、中、西三段(图3a)。

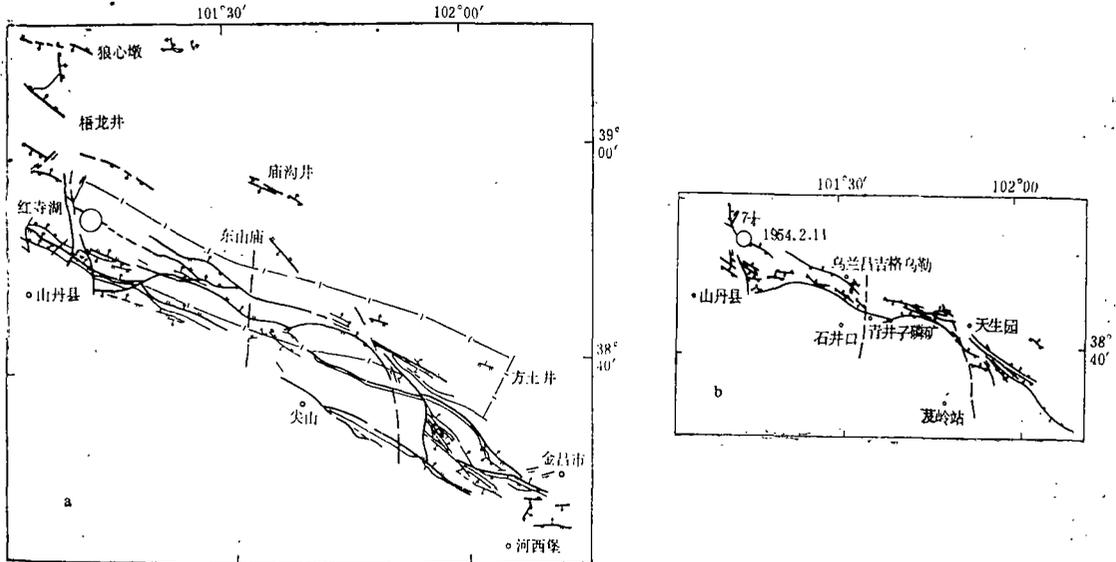


图3 龙首山断裂草图和分段示意图

a. 龙首山断裂 b. 龙首山北缘断层

Fig. 3 The sketch of Longshoushan Mountain fault and dividing sector

龙首山北缘断裂如图3b所示，采用圆面积覆盖法对其分维数进行测量。覆盖圆直径为0.1—1.0公里，采样间隔为50米；直径为1.0—9.5公里，采样间隔为100米；直径为9.5—13.0公里，采样间隔为250米；直径为13.0—85.0公里，采样间隔为500米。图4a为lgL(r)随lgr的变化曲线(r为覆盖圆直径)。由图可见，断层长度是随面积覆盖圆的直径的增大而变短的。根据斜率变化可将曲线分为三段：当r=12.6km时，曲线斜率变小，这是断层分形

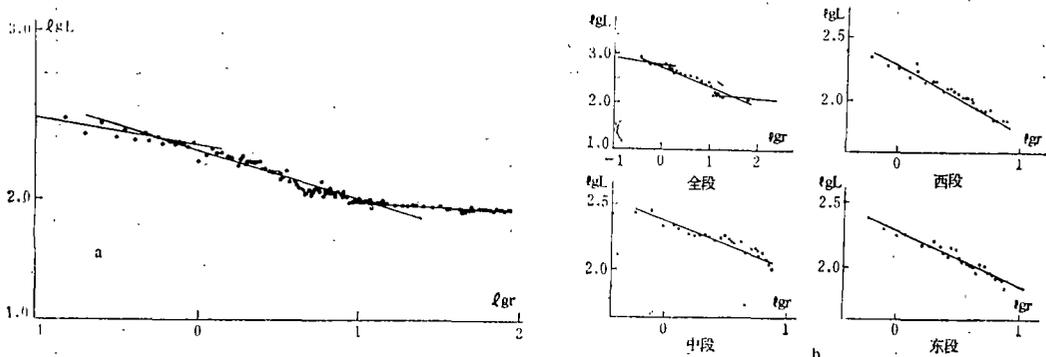


图4 龙首山及其北缘断裂LgL(r)与Lgr图

a. 龙首山北缘断裂 b. 龙首山断裂

Fig. 4 LgL(r)-Lgr curve of Longshoushan Mountain and it's north fringe faults

的上临界点; 在 $r=0.5\text{km}$ 时, 曲线斜率亦有所变小, 这是断层分形的下临界点; 当 $12.6\text{km} > r > 0.5\text{km}$ 时, 曲线斜率代表了断层分形特征。这样, 分别计算三段曲线的斜率, 进而可计算分维数 D 值。计算结果为: 当 $r \geq 12.6\text{km}$ 时, $D=1.0312$; 当 $12.6\text{km} > r > 0.5\text{km}$ 时, $D=1.286$; 当 $r \leq 0.5\text{km}$ 时, $D=1.2054$ 。计算时, D 值的可信度均在99%以上。

同样, 用圆面积覆盖法研究龙首山断裂(东经 $101^{\circ}04'$ — $102^{\circ}13'$, 北纬 $38^{\circ}02'$ — $39^{\circ}00'$)的分维结构。表1和图4b表示龙首山断裂全段和西、中、东三段的断层长度随覆盖圆直径 r 变化的情况。 D 值计算结果为: 全段 $D=1.410$; 西段 $D=1.431$; 中段 $D=1.308$; 东段 $D=1.434$ 。由图可以看出, 变化是非常显著的, 西、中、东三段 $L_g L(r)$ 与 $L_g r$ 的相关系数分别为 -0.95 、 -0.949 和 -0.971 。

应当说明的是, 对于龙首山断裂全段和西、中、东三段的数据采样的标准差和协方差有一些差别, 其中中段断层长度和覆盖圆直径长度的标准差和协方差相对比较小, 精度较高, 最大相对误差在5%左右; 其它三段的相对误差即数据采样的离散度相对大一些, 在10%左右。这是由于用人工采样带来的误差造成的。

表1 龙首山断裂全段与分段分维计算数据表

全 段			西 段			中 段			东 段		
r (km)	N	$L(r)$ (km)	r (km)	N	$L(r)$ (km)	r (km)	N	$L(r)$ (km)	r (km)	N	$L(r)$ (km)
0.4	2010	804	0.4	592	236.8	0.4	687	274.8	0.4	805	322
0.6	1108	664.8	0.6	348	208.8	0.6	458	274.8	0.6	406	243.6
0.8	778	622.4	0.8	227	181.6	0.8	347	277.6	0.8	239	191.2
1.0	555	555	1.0	177	177	1.0	218	218	1.0	176	176
1.2	465	558	1.2	128	153.6	1.2	184	220.8	1.2	146	175.2
1.4	388	543.2	1.4	117	163.8	1.4	145	203	1.4		
1.6	296	473.6	1.6	84	134.4	1.6	117	187.2	1.6	93	148.8
2.0	225	450	1.8	76	136.8	1.8	100	180	1.8	83	149.4
2.4	178	427.2	2.0	69	138	2.0	91	182	2.0	78	156
2.8	142	397.6	2.2	54	118.8	2.2	83	182.6	2.2	65	143
3.0	122	366	2.4	51	122.4	2.4	73	175.2	2.4	53	127.2
4.0	84	336	2.6	48	124.8	2.6	64	166.4	2.6	48	124.8
5.0	67	335	2.8	42	117.6	2.8	60	168	2.8	54	151.2
6.0	47	282	3.0	39	117	3.0	54	162	3.0	46	138
7.0	37	259	3.2	33	105.6	3.2	51	163.2	3.2	37	118.4
8.0	33	264	3.4	31	105.4	3.4	51	173.4	3.4	33	112.2
9.0	29	261	3.6	29	104.4	3.6	46	165.6	3.6	31	111.6
10	22	220	3.8	27	102.6	3.8	42	159.6	3.8	29	110.2
11	16	176	4.0	25	100	4.0	39	156	4.0	27	108
12	13.5	162	4.4	20	88	4.4	37	162.8	4.4	21	92.4
13	12	156	4.8	18	86.4	4.8	28	134.4	4.8	23	110.4
14	10	140	5.2	16	83.2	5.2	28	145.6	5.2	20	104
15	9	135	5.6	15	84	5.6	27	151.2	5.6	17	95.2
16	8	128	6.0	12	72	6.0	24	144	6.0	15	90
17	7	119	6.4	11	70.4	6.4	21	134.4	6.4	13	83.2
18	7	126	7.0	10	70	7.0	17	119	7.0	12	84
60	2	120	7.2	10	72	7.2	15	108	7.2	11	79.2
			7.8	9	70.2	7.8	13	101.4	7.8	9	70.2

四、祁连山断裂的分维特征

祁连山断裂西起昌马，往东经肃南、俄博至天祝，由数条断层平行排列组成，主要有走廊南山北缘断层、祁连山断层和托来南山断层。本文主要研究祁连山断层和走廊南山北缘断层，称之为祁连山大断层。这些断层现今活动均较强烈^[5]。依据地质构造、地震活动性和地震形变带特点等可将祁连山大断层分为西、中、东三段（图 5）。

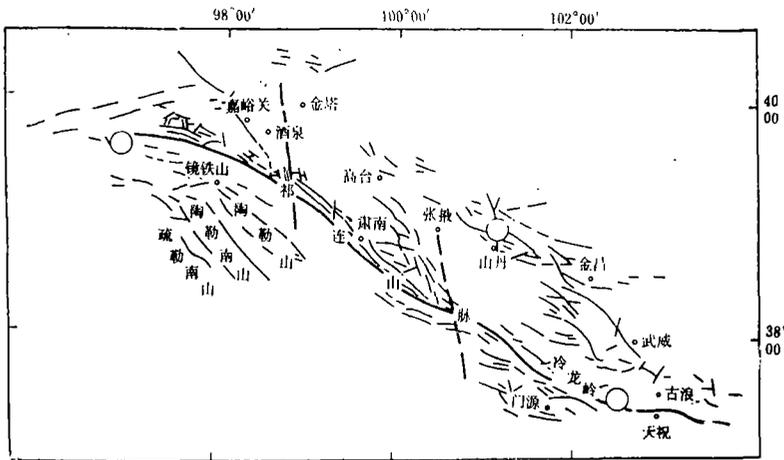


图 5 河西走廊地质构造示意图

Fig. 5 Geological structure sketch for the Hexi corridor

对祁连山断裂的分维研究，我们采取两种方法。其一是根据地质构造的特征勾划出祁连山断层的主迹线，用尺子法对其进行分维研究。使用 Houston 公司 True grid1017 型数字化仪进行数字采集，采样范围从 500 米至断层全长，然后经高斯正标后进行地球形状改正。其二是将祁连山大断层分为三段来研究，用面积覆盖法进行分形数据采集，对断层迹线的分布宽度取 90 公里。

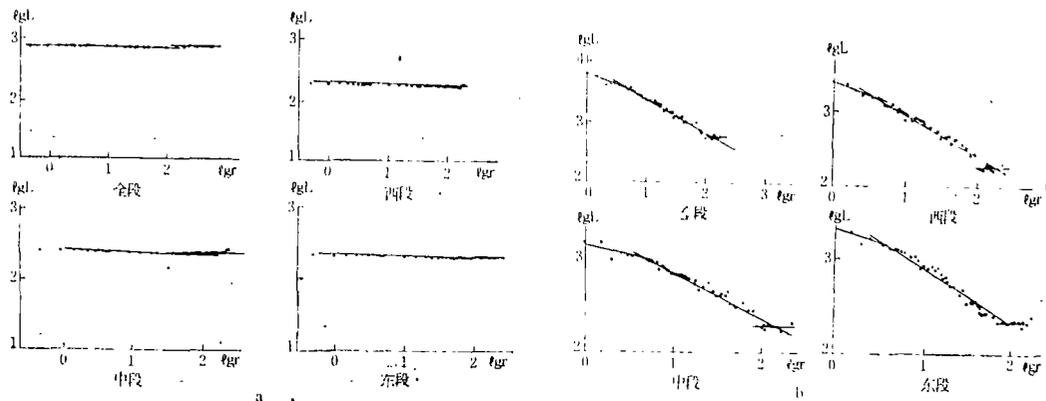


图 6 祁连山断裂 $Lg L(r) - Lgr$ 图

a. 祁连山断层主迹线（尺子法） b. 祁连山大断层（圆面积覆盖法）

Fig. 6 $Lg L(r) - Lgr$ curve for Qilianshan Mountain fault

图6a为用尺子法研究祁连山断层主迹线分维特征所得到的 $LgL(r)-Lgr$ 变化图,表2给出了分维数的计算结果。

从表2可以看到,祁连山断层主迹线整体上是光滑的,因为所求得的D值都小于1.040。最大D值为断层中段的短尺度范围内求出的1.0301。在长尺度范围内还得出小于1的三个数。这主要是由于断层迹线较为光滑,其长度在长尺度范围内不因尺子变短而变长,因此,在测量误差影响下,D值在1附近会有偏离,出现小于1的情况亦可理解。另外,从测量可信度来看,长尺度范围的测量结果的可信度都较低,有两个数据低于95%。 $LgL(r)$ 和 Lgr 的相关系数极低,西段的只有0.0232。这说明祁连山断层主迹线的分形性质只有在尺度较短的情况下才有意义。

表2 祁连山大断层主迹线分维数研究结果

		长尺度	中等尺度	短尺度	临界点	
					上	下
断层全段	D 值	0.9955	1.0118	1.0142		
	LgL 与 Lgr 相关情况	-0.2095	-0.9595	-0.0774		
	可信度	<95%	99%	99%		
西段	D 值	0.9992	1.0043	1.0071	$Lgr=1.6$	
	LgL 与 Lgr 相关情况	-0.0232	-0.4723	-0.9045		
	可信度	<95%	99%	99%		
中段	D 值	0.9696	1.0154	1.0301	$Lgr=1.6$	
	LgL 与 Lgr 相关情况	-0.4494	-0.6096	-0.9732		
	可信度	97.5%	99%	99%		
东段	D 值	1.014	1.0075	1.0035	$Lgr=1.6$	
	LgL 与 Lgr 相关情况	-0.4999	-0.7890	-0.9354		
	可信度	97.5%	99%	99%		

为进一步分析上述D值的可靠性,下面讨论D值的误差问题。根据误差理论,D值的误差决定于尺子的误差和测量时断层的误差。尺子误差,即数字化仪器定位的误差一般很小,对于Houston TG-1017型数字化仪来说,只有0.0025毫米,按采用的1:50万地质构造图换算, $dr=0.00125$ 公里。因 $L=Nr$,则由 $dL=Ndr$ 可计算出 dL 。另由分维数D的计算公式 $LgL=a+Dlgr$ 可得

$$dD = \frac{1}{lgr} \cdot \frac{dL}{2 \cdot \ln 10} + a \frac{1}{lg^2 r} \cdot \frac{dr}{r \ln 10} \quad \circ$$

若取 $r=100$, $dr=0.005$, $dL=5$, 计算得

$$dD \approx 0.000008 \quad \circ$$

dD 的这一数值表明,在短尺度和中等尺度范围内,上述祁连山断层主迹线的D值结果是可信的。

用圆面积覆盖法对祁连山大断层(即走廊南山北缘断层与祁连山断层)全段及其西、中、东三段的D值计算结果示于表3,图6b为其 $lgL-lgr$ 图。祁连山大断层全段 $D=1.518$,

西段 $D=1.549$ ，中段 $D=1.537$ ，东段 $D=1.460$ 。 lgL 和 lgr 的相关系数达到了 -0.98 — -0.99 。这表示随覆盖圆直径的增大而断层变短的分形行为非常明显。测量结果的可信度均在99%以上。各段断层上、下临界点大体相近，中段的上临界点低一些，为79公里。表3最后一栏还列出了临界点附近断层的长度。

表3 祁连山大断层面积覆盖法D值计算结果

	断层全段		西段		中段		东段	
D值	1.518		1.549		1.537		1.460	
$LgL-Lgr$ 相关情况	-0.99		-0.99		-0.98		-0.98	
可信度	99%		99%		99%		99%	
上、下临界点(km)	100	3.98	100	3.52	79	3.16	100	5.00
相应临界长度(km)	562	3981	141	1513	223	1412	178	933

本文还对曾于1932年发生7.6级强震的昌马断层进行了分维计算。将该断层分为三段，西段范围为东经 96.5° — 97° ，北纬 39.6° — 40° ；中段为东经 97° — 97.5° ，北纬 39.25° — 40° ；东段为东经 97.5° — 98° ，北纬 39.2° — 39.4° 。用圆面积覆盖法进行计算，结果如表4所示。1932年7.6级地震发生在中段，该段分维数最大，断层的地表展布也较复杂。

表4 昌马断层各段分维数计算结果

	西段	中段	东段
D值	1.427	1.609	1.602
$LgL-Lgr$ 相关情况	-0.97	-0.98	-0.98
可信度	>99%	>99%	>99%

五、结果与讨论

1.研究表明，祁连山断层主迹线的分维数 D 很小，在1.0035—1.0301范围内。一般来说，在短尺度范围内测量出的 D 值都大于长尺度和中等尺度范围内测出的 D 值。这里需注意的是，祁连山断层主迹线的东段在长尺度范围内测出的 D 值反而比短尺度测出的大（表2），这是因为东段比中、西段迹线更为弯曲。根据文献〔4〕，祁连山断层的 D 值较低，反映了断层主迹线的弯曲程度是有限的。

1984年，B.B.Mandelbrot等〔6〕在对金属表面分形的研究中指出，金属表面的分维数 D 可以用来对金属纵剖面的复杂程度和弯曲、凹凸程度进行推算，只需在表面的 D 值上加1即可。如果这种相同的关系可以利用的话，那么祁连山断层的剖面的分维数在2.0035—2.0301范围内。当然，这一问题还需要进一步深入研究。

2.用最小圆面积数覆盖法求出的祁连山大断层的分维数的结果（表3）表明，祁连山西段的 D 值是最大的。这意味着西段的分枝结构图案较复杂，分布面也较广，自相似或嵌套结构亦更深邃。

从图7a中表示的各段分枝数和分维数的对应关系可以看到，分枝数多和分维数高是一

一对应的,表明D值与单位面积内断层的分枝的数量有关,即与其密度有关。

以断层的最西端为起点,将距该点的距离为横坐标,纵坐标表示最远的一条分枝距断层主迹线的距离,每隔0.5度取一个点,结果绘于图7b中。由图可见,断层分枝的最远距离和分维数D的大小无关。

3.图6b表明,祁连山大断层各段的LgL和Lgr相关曲线的斜率变化大致分三段。在中间尺度范围内,尺度变短后断层的全长变长的速率更大一些。其次是在短尺度范围内,断层长度随尺度变长而缩短的速率与中间尺度相比要小一些。当尺度变长到某一点后,在尺子继续变长时,断层全长将无明显变化,而在某一点跳动。对于断层全段,上临界点 $r \approx 100\text{km}$,下临界点 $r \approx 3.98\text{km}$,分别对应断层长度为562km和3981km;西段的上、下临界点分别为100km和3.52km,对应断层长度分别为141km和1513km;中段的上、下临界点分别为79km和3.16km,分别对应断层长度为223km和1412km;东段上下临界点分别为100km和5km,对应断层长度分别为178km和933km(表3)。由此看出,祁连山断层的上、下临界点的值各段相差不大,其断层长度由于尺度的变短可从数百公里变到数千公里。

对比各段的分维数可以看到,分维数大的西段,断层长度从141公里变到1513公里,变长1372公里,中段变长1189公里,东段变长755公里,这反映了断层长度的变化和分维数的相关关系,亦反映了分维数大的断层段的结构较复杂。

用圆面积覆盖法研究祁连山大断层的分维时,最小圆直径取为1公里,用其充满断层的迹线,得到西段断层长为2457公里,中段长2341公里,东段长1469公里。最大圆直径为各段的长,西、中、东三段分别为:168公里、198.5公里、168公里。由此可以看出,分维数最大的西段并非是最长的一段,而与其同长的东段分维数最小。西段的伸长范围最大,为2289公里;中段为2142.5公里,东段最短,为1301公里。由此亦可说明,分维数的大小并不取决于断层的长短,而取决于断层结构的复杂性。

4.研究龙首山北缘断裂分维特征时,覆盖圆直径从0.1公里至85.9公里,后者代表了所研究的断层全长,其对数值从-1变到1.934,尺度变化的范围是比较大的。从图4a表示的三段LgL(r)与Lgr曲线可以看到,在短径范围内,其斜率比中径范围内的小,而长径范围内的斜率又比短径范围内的小。圆的直径从12.6公里变化到85.9公里时,属于长径范围,圆的直径的变化对断层长度的影响较小,说明断层长度的分形特征是对一定测度范围而言的。越是复杂的图形,其上临界点可能会越高。

图8a表示龙首山断裂西、中、东三段断层分枝数与D值的关系。从图中可以看到,分枝断层的条数越多,得到的D值越大。因此,分维数越大表明单一断层迹线的曲折程度越大,还说明断层分枝迹线的数目越多。图8b表明,西段的断层分枝展布范围最宽,中段次之,东段最窄,说明断层分枝展布宽度与D值无直接关系。但在长径范围内进行分维计算时,分枝展布范围较宽可能会引起D值增大,因为这需要更多的圆去覆盖。

1954年山丹7 1/4级地震发生在西段,但西段的D值在三段断层中并不是最大的。因此,说明D值的大小与大地震的分布无直接关系。

5.为了讨论祁连山大断层的分维数和地震活动之间的关联,我们画出了1970年以来其西、中、东三段的地震频次图(图9)。从图中可以看出,东段的中小地震活动高于中段和西段。从能量释放情况来看,东段最低年释放能量为 2.5×10^{15} 尔格,中段为 2.3×10^{14} 尔格,西段为 1.8×10^{14} 尔格;西段的最高年释放能量为 4.5×10^{18} 尔格,中段为 1.86×10^{20} 尔

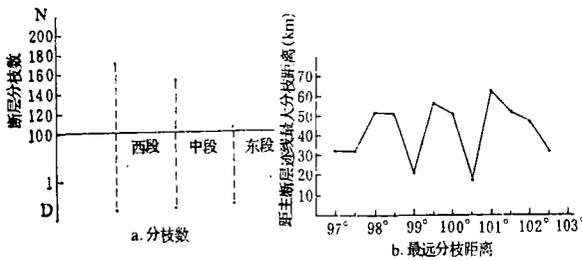


图7 祁连山大断层各段分枝数及最远的分枝距离与D值对应关系

Fig. 7 Relationship between branch number, distance of farthest branch from main fault and D value for Qilianshan Mountain fault's every section.

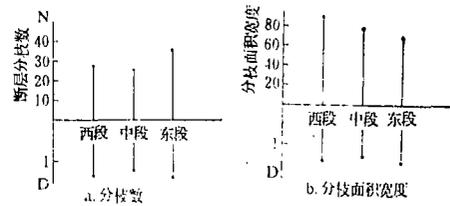


图8 龙首山断层各段分枝数、分枝面积宽度与D值图

Fig. 8 Relationship between branch number, branch distribution area and D value for Longshoushan Mountain fault

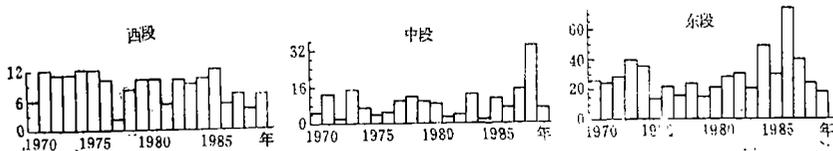


图9 祁连山大断层西、中、东段1970年以来地震N—T图

Fig. 9 Earthquake N—T figure for the Qilianshan Mountain fault's west, middle and east sections since 1970

格，东段为 1.37×10^{21} 尔格。平均起来，东段的能量释放是最高的，西段最低，中段居中。根据分维数的计算结果，东段的分维值为1.460，是三段中最低的。显然，分维数与中小地震的活动无关，亦即断层图案较为复杂的地段不一定是地震多发区。

(本文1990年4月6日收到)

参 考 文 献

[1] Mandelbrot, B.B., Fractals: Form, Chance and Dimension, W.H. Freeman, San Francisco, Calif., 1977.
 [2] Mandelbrot, B.B., The Fractal Geometry of Nature, W.H. Freeman, San Francisco, Calif., 1982.
 [3] Okubo, P.G. and K. Aki, Fractal geometry in the San Andreas Fault System, J. Geophys. Res., Vol. 92, No. B1, 1987.
 [4] Aviles, C.A. and C.H. Scholz, Fractal analysis applied to characteristic segments of the San Andreas Fault, J. Geophys. Res., Vol. 92, No. B1, 1987.
 [5] 李玉龙、侯珍清, 中国西北陕甘宁青(E90—111°, N32—42°)地震区划, 甘肃人民出版社, 1986.
 [6] Mandelbrot, B.B., D. E. Passoja and A. J. Paullay, Fractal character of fracture surfaces of metals, Nature, 308, 1984.

THE FEATURES OF FRACTAL DIMENSION IN QILIAN MOUNTAIN
FAULT AND LONGSHOU MOUNTAIN FAULT

Shi Telin, Guo Daqing, Yang Yuheng,
Guo Jiankang, Xiao Lizhu, Sun Jingfang
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China*)

Abstract

Fractal geometry is applied to the quantitative analysis of Qilian Mountain fault and Longshou Mountain fault. Using the circle area covering method, the fractal dimensions for every segment of Longshou Mountain fault range from 1.308 to 1.434 with confidence 99%. Using ruler method, the D values of the total fault, west segment, median segment and east segment for the main fault trace of Qilian Mountain are respectively 1.0118, 1.0043, 1.0154 and 1.0075 with confidences 95—99%. And by means of circle area covering method, the D values are 1.518, 1.549, 1.537 and 1.460 respectively for the total fault and every segment of Qilian Mountain.

The study results show that the fractal dimension D may express fault heterogeneity, irregularity, complexity and so on. But according to the results, the correspondence between earthquake activity and fractal dimension is not obtained. There is a slight correlation between the fractal dimension and the branch number and the occupied area of branches.