

甘肃东部及邻区地壳 Q_p 值分布特征

付印发 葛延山 李 钢

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文使用兰州遥测地震台网有数字波形记录的12个台站记录到的83个近震P波资料,应用波谱计算 Q_p 值的频率域方法,求得甘肃东部及邻区 Q_p 值在170—1300之间。通过分析发现低 Q_p 区小震活动密集,中强地震较多;高 Q_p 区地震活动最弱;在高 Q_p 区和低 Q_p 区的边界一带,是历史和现今6级以上破坏性地震发生区。文中最后应用组合模式,对 Q_p 值的分布进行了分析,并对甘肃东部某些地区的地震危险性作了估计。

一、前 言

甘肃东部及邻区位于我国东部地台区与西部地槽区的接合带上,该区地震活动性高,7级以上地震不断发生,但是震中分布又相当分散,并不明显集中于某些构造体系内,说明其地质构造关系复杂,因此对该地区地震的分布特征,进行多方探索是很必要的。本文在前人工作的基础上,利用兰州遥测台网记录的甘肃东部及邻区近震P波资料,应用波谱分析法,计算了该地区的 Q_p 值,并研究了该地区的 Q_p 值分布特征及其与地震的关系。

二、测定方法和资料处理

本文共收集了1984年11月—1987年1月发生的83个近震($\Delta=100-200$ 公里)数字记录,这些地震的震级绝大部分为 $M_L=3-4$ 级。根据文献〔1〕,远场P波位移振幅为:

$$U_p(\omega) = \frac{M_0}{4\pi\rho v_p^3 r} S_p \cdot e^{-\gamma \frac{\omega}{v_p}} \cdot F_p(\omega) \quad (1)$$

式中 M_0 为地震矩, ρ 为介质密度, v_p 为纵波速度, γ 为震源距, S_p 为辐射图形因子, $F_p(\omega)$ 为波谱的形状函数。假设地震波经过地震仪及传输仪器,并由模拟磁带记录经回放进入微机A/D转换成数字地震波形记录的整个过程是线性的,根据文献〔2〕,地震记录振幅谱 $A(\omega)$ 为:

$$A(\omega) = \frac{M_0}{4\pi\rho v_p^3 r} S_0 \cdot e^{-\frac{\omega}{2Qv_p}} \cdot C \cdot g \cdot I(\omega) \cdot F_1(\omega) \quad (2)$$

式中 $I(\omega)$ 为数字记录系统频率响应, $I(\omega) = 1.25 \times \beta \times I_0(\omega) \times 10^2$ 数/厘米; β 和 $I_0(\omega)$ 分别为笔绘系统的衰减倍数和频率响应; 几何扩散因子, 对 P 波可取为 $\frac{1}{r}$; S_0 为 P 波辐射图型因子, 一般取震源球上的平均值, C 为入射波振幅在水平方向和垂直方向上的分配比例系数, g 为自由表面的影响。一般取 $C = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $g = 2$, $S_0 = 0.6$, 这时 $C \cdot g \cdot S_0 = 0.85$; Q 为震源至观测点之间的介质品质因子; $e^{-\frac{\omega}{2Qv_p}}$ 为传播路径上的衰减。体波震源波谱 $A(\omega)$ 的低频部分近似为常数, 其大小与地震矩有关, 而高频渐近趋势则与 ω^{-1} 或 ω^{-2} 成比例, 高频和低频的渐近趋势的交点即为拐角频率 ω_0 。

将 (2) 式整理后两边取对数得:

$$\lg\left(\frac{A(\omega)}{I(\omega)}\right) = \lg\left(\frac{0.85M_0F_1(\omega)}{4\pi\rho v_p^3 r}\right) - \frac{rI_0g}{2Qv_p}\omega \quad (3)$$

以 $\lg\left(\frac{A(\omega)}{I(\omega)}\right)$ 为纵轴, 以 ω 为横轴, 对 (3) 式进行线性拟合得到一直线, 由此直线的斜率 $K = -\frac{rI_0g}{2Qv_p}$ 可求出 Q 值。由于存在介质衰减的影响, 在上述坐标系中 ω 的取值应满足 $\omega < \omega_0$ 。由于震级增大, 拐角频率减小, 为使低于拐角频率 ω_0 的部分要有足够长度, 我们尽量选取 ω_0 较大的地震波谱来计算 Q 值。

兰州遥测台网共有 23 个台站, 其中可转换为数字地震波形的台站为 12 个 (图 1)。每个台站都设置有 DS-1 型短周期垂直向拾震器。为了保证质量, 要求所选资料必须清晰、无畸变、无限幅、背景噪声小。图 2 反映了资料的覆盖面积。

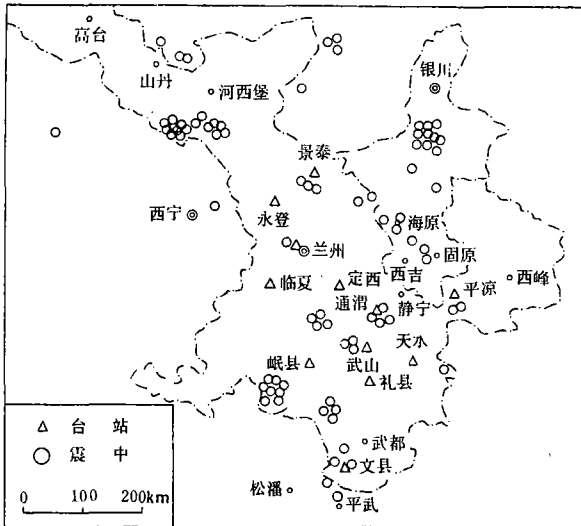


图 1 台站和震中分布
Fig. 1 Distribution of stations and epicenters

为了计算观测记录波谱, 对垂直方向记录的图形 P 波段进行快速付里叶变换 (FFT)。计算过程中均采用矩形窗, 为要满足 FFT 的 2^n 的要求, 窗长度取 10.24 秒, $m=9$ 。采样个数为 512 个点, 采样间隔 $\Delta t = 0.02$ 秒, 采样率为 50 次/秒。按采样定理可得到波谱频率的上限为 25Hz, 下限为 0.1Hz, 波谱分辨率为 0.1Hz。

三、结果与讨论

按照上述方法, 我们共测定了 83 个地震的 291 条地震 P 波射线传播路径上的地壳 Q 值。表 1 给出了测定的结果。

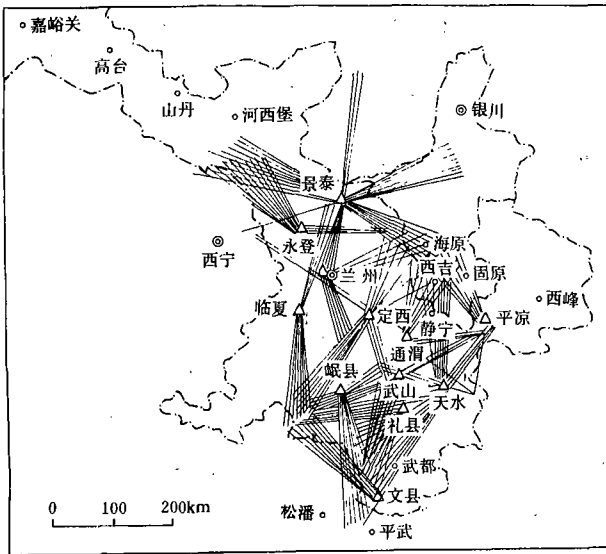


图 2 台站至震中 P 波路径分布

Fig. 2 P-wave paths from stations to epicenters

1、由余震 P 波资料确定的 Q 值讨论测定 Q 值的精度问题, 我们选取了 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震的 10 个余震和 1987 年 1 月 8 日迭部 5.9 级地震的 9 个余震, 其参数见表 1。由表 1 可见, 这些余震的基本参数⁽⁹⁾均属 A 类, 其位置相当集中, 深度又很接近, 可以认为在这样短的时间范围内, 震中与台站之间的地壳介质不会有变化。在这样的条件下测得 Q 值的差异可以认为是偶然误差。表 2 给出了由余震 P 波资料确定 Q 值的标准误差, 误差范围为 14—69, 如果舍去 6 以下的的数据, 那末误差范围为 26—69。

2、 Q 值分布

文献 [4] 认为, 传播路径较短的射线大部分穿过的介质属于较浅层的介质, 因此主要反映了浅层介质的性质。本文取震中距为 100—200 公里, 所得 Q 值变化很大为 170—1300。这可能反映了甘肃东部及邻区地壳浅层介质存在明显的横向不均匀性。

表 1

编号	发震时间					震中地区	ML	盐池		永登		定西		景泰		临夏		通渭		平凉		天水		武山		礼县		武都		岷县	
	年	月	日	时	分			Δ Q ⁽⁹⁾	Q ⁽⁹⁾	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	Q	Δ Q	
1	1984	11	24	14	34	固原	2.9	225	504		158	403					120	363							220	283					
2		11	28	00	45	和政	2.8	125	309								178	354							163	3006			98	229	
3		11	28	19	33	古浪	3.0	189	391																						
4		12	1	15	12	吴忠	3.7					210	276																		
5		12	2	09	39	海源	3.0	179	359	220	579	150	405	165	243		158	338	155	290	230	341	220	614							
6		12	3	16	41	吴忠	3.3					220	276																		
7		12	7	23	54	天祝	3.4	173	305				130	299	199	262															
8	1985	1	8	17	13	吴忠	4.2					220	237																		
9		1	14	10	50	景泰	3.4	119	381			190	211			182	271	255	255												
10		1	15	11	37	阿左旗	4.3						237	359																	
11		1	15	20	01	海源	3.2	164	404	187	704	155	363	128	237		182	719			254	574	237	1518							
12		2	9	09	46	岷县	3.1	237	355			182	376				180	471			198	492	128	2088		128	379				
13		2	9	13	59	陇西	2.6	191	193			109	179				91	229			128	272				155	199	83	111		
14		2	12	13	06	九条岭	2.7	228	381	146	1944			164	281																
15		2	18	00	13	吴忠	4.4						218	262																	
16		2	23	18	50	吴忠	3.5						210	238																	
17		3	6	07	38	武都	3.6										250	431			190	432			140	227		189	343		
18	1985	3	25	17	43	通渭	3.0	173	366	253	493	87	233																		
19		4	4	00	11	海源	3.3	182	620	237	1129	146	562	191	371	252	546	146	755		219	731	198	313							
20		4	16	02	09	临潭	4.0	128	184			109	146			90	114	145	173		219	240	134	256	164	177	218	286			
21		4	17	06	07	古浪	2.8	175	336								218	296													
22		4	22	06	08	靖远	2.5	138	684																						
23		4	29	09	22	固原	4.0	218	334			158	394				138	455			208	454	208	384	255	464					
24		4	29	22	17	海源	2.8	155	420	182	636			210	297			164	640					228	474						
25		5	21	18	51	武都	2.8													165	438	155	587	100	436		145	434			

表 1 (续)

编 号	发震时间					震中地区	M _L	盐池	永登	定西	景泰	临夏	通渭	平凉	天水	武山	礼县	岷县						
	年	月	日	时	分			△	Q	△	Q	△	Q	△	Q	△	Q	△	Q	△	Q			
69	11	14	22	51	青钢峡	3.4					219	311												
70	11	18	20	00	吴忠	2.8					237	306												
71	11	18	22	13	吴忠	3.7					228	262												
72	11	19	21	46	同心	2.9								219	462									
73	11	20	03	14	文县	2.8								193	397	173	541	128	213	155	347			
74	12	4	07	18	平武	3.9														219	265			
75	1987	1	8	02	20	迭部	3.5	219	373		182	207		155	227	208	274		246	346		173	238	
76			8	02	48	迭部	3.0	217	465					151	237							165	441	
77			8	06	39	迭部	3.3							153	222	206	249					164	330	
78			8	18	16	迭部	2.9							157	214							162	224	
79			8	19	35	迭部	3.4	219	306		180	237		155	240	210	315		243	306	165	275	175	203
80			9	14	54	迭部	3.2							152	172							160	215	
81			12	01	39	迭部	3.7	210	295					155	308	208	281		241	355	168	341	173	252
82			13	21	56	迭部	3.1	213	354					152	187									
83			14	13	39	迭部	3.4	215	286					155	181	206	247						170	200

(1) △指震中距单位为公里。(2) Q均指 Q_v (3) 1985年8月19日第11路信号由武都换为文县

表 2

台站	门源余震 (2.5 天时间内)				迭部余震 (6.5 天时间内)			
	△	数据个数	Q̄	标准误差	△	数据个数	Q̄	标准误差
盐池	258	9	453	51	219	6	346	67
永登	182	6	270	34	282	3	294	14
景泰	228	10	453	69				
临夏	277	5	299	55	155	9	210	26
通渭	437	5	444	61	208	6	273	27
平凉	519	4	561	33	337	3	366	31
天水					246	3	335	26
武山	464	4	495	47	165	5	277	58
礼县					173	4	223	25

文献 [5、6] 测得海城地震前, 震源周围地区地壳介质 Q 值比较一致, 平均约为 500—600。唐山大震前, 震源区的平均 Q 值明显偏高 (约为 660)。并认为海城和唐山地震前震源区的介质强度较高, 岩石比较均匀, 整体性很强, 这可能是孕育强震的一个重要介质条件。上述情况, 似乎说明 Q=500—600 是一个分界线, 本文以此为依据将所测 Q 值分为三类, 即 Q ≤ 300 为明显低值; 300

< Q < 500 为中间值; Q ≥ 500 为明显高值。根据上述分类原则, 对本文结果进行分析, 见图 3。由图 3 可见, 研究区内有二个明显低 Q 区, 即天水—礼县—武都—岷县—迭部—临夏—康乐—渭源—通渭所围限的地区及景泰—固原一带; 两个明显高 Q 区即静宁—通渭—天水—一线以东地区及景泰南—白银—兰州—临洮—定西所围限的地区; 三个中 Q 值区即青海西宁东—天祝—永登—兰州—永靖—化隆所围限的地区, 榆中—靖远—海原西—会宁所围限的地区及宕昌—岷县南—南坪西—两河口所围限的地区。

3、Q 值分区与地震活动的关系

(1) 7 级以上破坏性地震

该地区曾发生 6 次 7 级和 3 次 8 级地震。由图 4 可见, 这些地震几乎都发生在高 Q 值区与低 Q 值区的交界带上, 其中还有一部分地震发生在三类 Q 值分布区的交界带上, 如 1920 年海原 8.5 级、1125 年兰州 7 级、1352 年会宁 7 级地震等。

(2) 6 级地震

由图 5 可见, 6 级强震多数分布于高 Q 值区与低 Q 值区交界带上, 1990 年 10 月 20 日景

泰6.2级地震即是如此。还有一部分地震分布在中Q值区与低Q值区的交界带上。个别地震发生在高Q值区内，如1624年庄浪6级和1704年陕西陇县6级地震。

(3) 5级左右中强地震

图6给出了研究本区内公元前1177—1990年, $4.7 \leq M_s < 6$ 地震分布。由图可见, 大多数中强地震分布在高Q值区与低Q值区交界带上和中Q值区与低Q值区交界的低Q值区一侧, 较少数的中强地震分布在低Q值区内。个别地震分布在中Q值区内, 而海原附近的中Q值区内没有中强地震发生。

(4) 中强地震集中区与Q值分布

1900年以前存在两个中强地震集中区, 一个是天水—礼县—武都一带, 共发生十次地震, 该带处于高、低Q值区的交界带和低Q值区内; 另一个集中区为临洮—康乐—渭源, 发生有5次地震, 该区处于高、低Q值区的交界带上。

1900年—1954年和1954年—1990年也分别出现两个集中区。1900年—1954年的集中区, 一个在武山附近的低Q值区内, 共发生5次地震; 另一个是位于高、低Q值交界地区的临洮—永靖—兰州一带, 共发生4次地震。

1954年—1990年的集中区, 一个在位于高Q值与低Q值交界的景泰附近, 共发生5次地震; 另一个集中区是位于中Q值区与低Q值区交界带上的宕昌—岷县南—南坪—两河口所围限的地区, 共发生9次中强震。

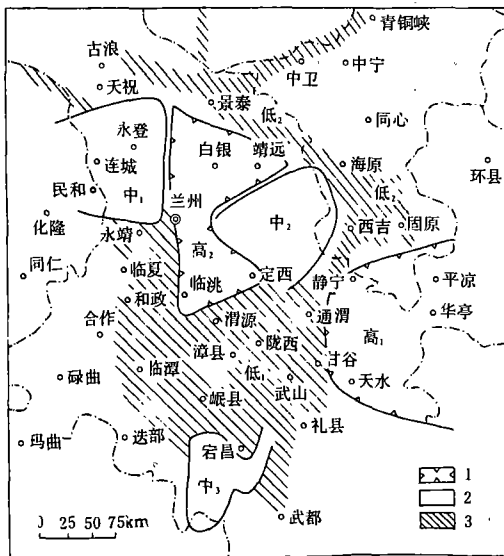


图3 甘肃东部地区Qp分布图

1、高值区 2、中值区 3、低值区

Fig. 3 Distribution of Qp value in the eastern Gansu area

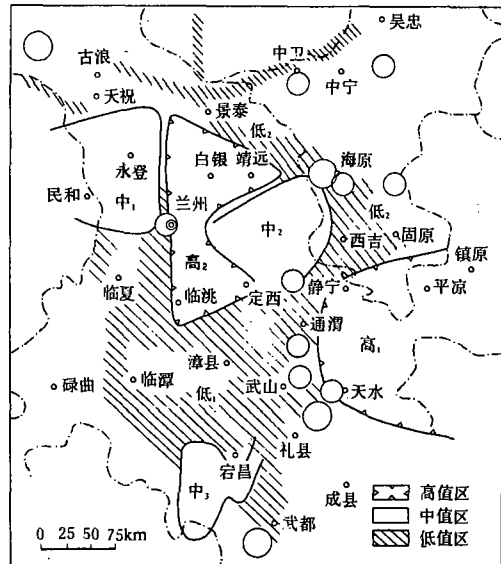


图4 Qp与7级以上地震震中分布

Fig. 4 Distribution of Qp value and $M \geq 7$ earthquakes

* 1954年以前的地震目录引自文献〔7〕

(5) 小震 (3 级左右) 活动与 Q 值分布

从文献 [8、9] 对甘肃和宁夏地震活动性的研究结果可看出, 其小震密集区正是本文所划分的低 Q 值区。

相应地从以上分析也可看出, 高 Q 值区地震活动频度小, 强度弱。高 Q 值 1 区即平凉—陇县一带, 这里是地台区的一部分, 历史上仅发生 2 次 6 级地震, 即 1624 年庄浪 6 级和 1704 年陇县 6 级地震。又如高 Q2 区和中 Q2 区, 该区位于 1920 年海原 8.5 级特大地震极震区的附近, 60 多年以来, 5 级地震多有发生, 均分布在这两个区的外部低 Q 值区内。1990 年 10 月景泰 6.2 级地震也发生在高、低 Q 值区的交界带上。该区内历史上无 6 级以上地震活动, 仅有 2 次 5 级地震发生, 即 406 年榆中 5—6 级和 1957 年定西 5.1 级地震。

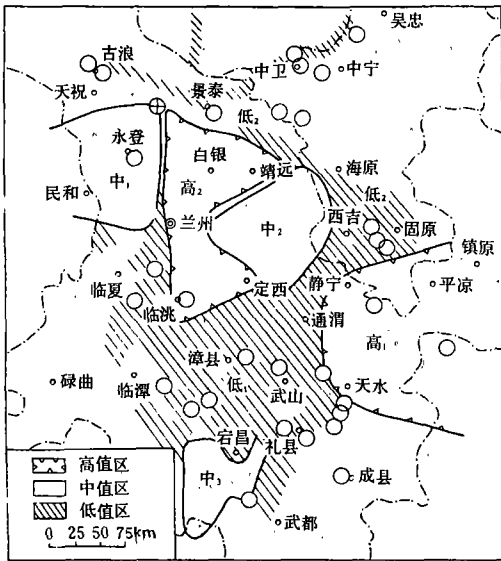


图 5 Qp 与 6.0 ≤ Ms < 7.0 地震震中分布

Fig. 5 Distribution of Qp value and earthquakes (6.0 ≤ Ms ≤ 7.0)

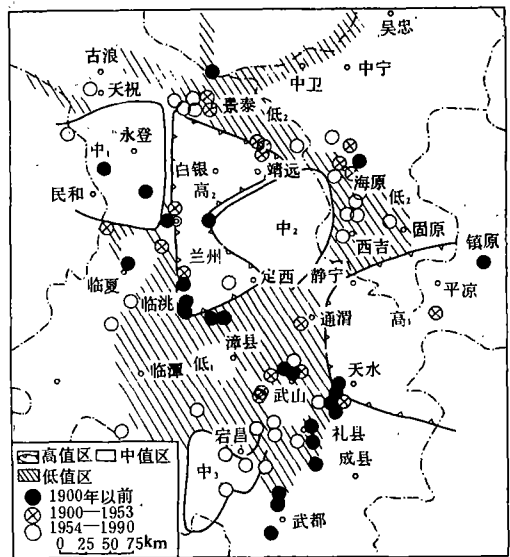


图 6 Qp 和 5.9 ≥ Ms ≥ 4.7 地震震中分布

Fig. 6 Distribution of Qp value and earthquakes (4.7 ≤ Ms ≤ 5.9)

如上所述, 6 级以上强震震中大都分布在高 Q 值区和低 Q 值区边界一带。而 Q 值的分区反映了地壳介质 (本文指上地壳) 的横向不均匀性。Q 值高的地区介质强度高, Q 值低的地区介质强度低。按照震源孕育的组合模式⁽¹⁰⁾, 一个大地震的震源是由应力积累单元和应力调整单元组合而成的, 积累单元的介质强度高, 调整单元的介质强度低, 则高 Q 值区属于积累单元, 低 Q 值区属于调整单元。在区域应力作用下, 调整单元不易积累巨大的应力, 而是容易把应力传递给邻近介质强度较高的积累单元, 从而使相邻的断裂带上积累起巨大的应力而发震。因此, 强震震中大都分布在高 Q 值区与低 Q 值区交界带上。上述结果与其他方面的某些研究结果是一致的, 如对大地测量、重力、波速比的研究显示大地震常常发生在急剧隆起带的边缘, 重力异常过渡带和波速异常区边缘⁽¹¹⁾, 文献 [12] 认为, 四川地区 1930 年以来 6 级

以上大震大都分布在高速块体与低速块体的交界处。这些结果也支持组合模式的观点，同时也佐证了我们在 Q_p 方面的研究结果。

四、海原断裂带 Q 值与其两侧介质 Q 值的对比

文献〔13〕给出1920年海原8.5级地震地表破裂带长度为215公里，走向 $N66^\circ W$ ，最大水平断距为14—17米，垂直断距为4—5米。由图7可看出，西吉、海原、固原地区12个地震至景泰观测台的射线路径基本上是沿着上述地表破裂带分布，震中距为125—210公里。在景泰台的西南方向有永登观测台，至两台的震波射线角度仅为20度，为了便于对比，两个观测台均使用同一个地震事件的P波测定 Q 值，共测得7组（表3）。由表3可见，景泰台 Q 值测定结果基本接近300，而永登台 Q 值接近600。文献〔14〕指出，沿断层带的地震波速比其两侧低1.2—2公里/秒，这说明断层带内物质的弹性模量低。沿断层带重力值及物质密度低，所以 Q 值也低。由于永登台没有位于海原断层带上，因此它所在的地区的 Q 值比位于海原断层带上的景泰地区 Q 值高是合理的。

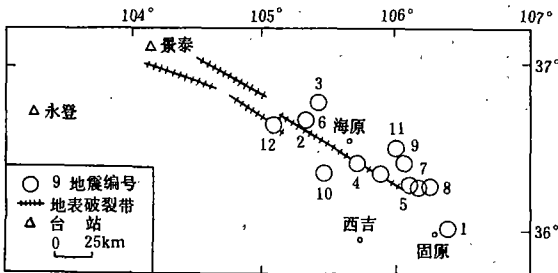


图7 海原地区地表破裂带、地震及景泰、永登台站分布

Fig. 7 Distribution of surface fracture belts in Haiyuan region, earthquakes, Jingtai Station and Yongdeng Station

表3

地震号	永登台		景泰台	
	Δ	Q	Δ	Q
2	220	579	165	243
3	187	704	128	237
5	250	636	210	297
9	264	523	200	328
6	180	543	125	296
4	235	1129	191	371

五、地震危险性的估计

综上所述，得到以下几点认识：

1、甘肃东南部及邻区历史强震大多数发生在高 Q 区和低 Q 区的边界一带。这种现象可用组合模式解释，从介质条件分析，这样的地区即具备了积累能量的高 Q 值区，又有具备让位条件的低 Q 值区。在1920年海原8.5级地震所处的高 Q 值区和低 Q 值区的交界带上，1990年10月20日又发生了景泰西南6.2级地震。这段高 Q 值区（本文所指的高2区）的南端，康乐—和政—渭源—华家岭一带，仍然是高 Q 值区和低 Q 值区的交界带，具备发生6级以上

强震的介质条件。根据国内外对地震空区或空段问题的研究,今后大地震可能发生在以往未发生破坏性地震的地区,结合本文的研究结果,笔者认为静宁—平凉北具备发生破坏性地震的介质条件。本文划分的低 Q 值区内,发生 6 级以上破坏性地震的可能性较小,因为不具备发震的介质条件,而发生中强地震的可能性较大。

2、沿断裂带或地表破裂带的地震射线路径所测 Q 值明显偏低,这样的断裂带不可能发生强震。

总之,上述研究结果表明,由 Q 值分布图象,找出高 Q 值和低 Q 值区的交界带,根据组合模式可以对地震发生的地点进行预测。虽然目前对地壳 Q 值的测定精度较低,但选择一定范围内震中距接近的地震,用相同的方法和同种类型的资料,将所得结果相互对比,还是可以找出一定的规律性的。

秦保燕研究员审阅了全文,并提出了宝贵意见,工作中还得到了韦士忠、高世奎、刘凤祥以及 131 组全体同志的帮助、支持与配合,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 陈运泰、王妙月、林邦慧、刘万琴,中、小地震体波的频谱和纵、横波拐角频率比,科学通报, No. 9, 1976.
- [2] 韦士忠、辛书义,北京地震台网数字地震波形记录的波谱分析,西北地震学报, Vol. 10, No. 2, 1988.
- [3] 国家地震局兰州地震研究所,甘肃省地震目录,1980—1987,甘肃科学技术出版社,1989.
- [4] 靳雅敏、陈运泰、于新昌,唐山地震余震的震源参数及地壳介质的品质因数,地震学报, Vol. 5, No. 1, 1982.
- [5] 朱传镇、付昌洪、容珍贵、罗胜利,海城地震前后微震震源参数与品质因子,地球物理学报, Vol. 20, No. 3, 1977.
- [6] 林邦慧、李志勇、魏富胜,京津地区 Q 值及平均应力降的分布特征,地球物理学报, Vol. 25, No. 4, 1982.
- [7] 国家地震局兰州地震研究所,陕甘宁青四省(区)强地震目录,陕西科学技术出版社,1985.
- [8] 张诚,甘肃地区地震活动特征,西北地震学报, Vol. 4, No. 2, 1982.
- [9] 李孟奎、任庆维,宁夏地震活动特征的初步探讨,西北地震学报, Vol. 2, No. 3, 1980.
- [10] 郭增建、秦保燕、徐文耀、汤泉,震源孕育模式的初步讨论,地球物理学报, Vol. 16, No. 1, 1973.
- [11] 冯德益,地震波速异常,地震出版社,1981.
- [12] 孙若味、刘福田、刘建新,四川地区地壳上地幔速度图像,中国地球物理学会年刊,地震出版社,1990.
- [13] 兰州地震研究所、四川省地震局、云南省地震局,中国南北地震带构造地震及近期强震危险区预测图(说明书),1986.
- [14] 马瑾,岩石力学与地震预报,地震科学研究, No. 2, 1982.

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF CRUSTAL Q_p VALUES
IN AND AROUND THE EASTERN AREA OF GANSU PROVINCE

Fu Yinfu , Ge Yanshan , Li Gang

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China*)

Abstract

In this paper, based on the 291 P-wave data of 83 local earthquakes recorded from the 12 digital stations of the Telemetered Seismic Network of Lanzhou, the crustal Q_p values in and around the eastern area of Gansu Province are obtained, ranging from 170 to 1300, by using the spectrum method in frequency domain. The results show that small and moderately strong earthquakes centered in the low Q_p region, but the seismicity was keeping the lowest active level in the high Q_p region; the large destructive earthquakes ($M \geq 6$) occurred on the boundary between the low Q_p and high Q_p region. Finally, it analyses the Q_p -value distribution by using the combination model, and gives a hazard estimation of potential earthquake in this area.