

数字图象处理方法在确定地震空间分布中的应用*

陈锦标 沈 萍 郑治真

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文提出了用数字图象处理方法确定地震空间分布图象的实用方法及其计算结果. 该方法能克服通常在确定地震空间分布时难免的人为随意性. 还讨论了地震空区的表现形式和识别孕震空区的方法.

必须指出, 本方法是个创新, 但确定地震空区还不唯一, 要识别真正的孕震空区还需要综合分析其它有关参量(例如 b 值等)的变化. 结果表明: 被低地震活动区包围起来的高地震活动区现象——地震丛集图象, 是地震空间分布的普遍形式; 而被高地震活动区围起来的地震活动弱区——地震空区图象, 只是地震空间分布的一种重要形式. 地震往往发生在某一地震丛集区内或其边缘地带.

关键词 图象处理; 地震空区; 地震丛集图象

引 言

地震作为一种自然现象, 由于其自身的极其复杂性, 决定了探索地震预报方法的多样性. 虽然地震预报迄今仍是悬而未决的世界难题, 但地震空区至今还是我国较广泛使用的探索预报未来大地震可能地点的一种方法(陈章立, 1986; 陆远忠、宋俊高, 1989). 1983—1984 年期间, 国家地震局科技监测司曾组织力量专门对地震空区方法进行较系统的清理攻关研究; 1987—1989 年再次组织规模较大的地震前兆系统清理和预报方法实用化攻关研究; 1990 年又责成有关专家汇编出版了攻关成果的系列丛书. 凡此种种大大推进了中国地震预报工作.

本文着重解决用图象处理方法去掉以往勾画地震空间分布时的人为随意性. 引起随意性的原因主要有: 地震空间分布不均匀, 以致对少震或无震地区难以勾画空区边界, 不同研究者都可以根据自己的意志和原则勾画出不同形状的地震空区; 起算震级对确定地震空区的影响已为许多人所注意, 采用不同的起算震级, 或采用不同的震级限制, 勾画出的地震空区形态差异甚大; …… 所有这些都可以通过编制计算机语言程序, 把一

* 地震科学联合基金会资助项目. 国家地震局地球物理研究所论著 94A0025.
1993 年 2 月 5 日收到初稿, 1994 年 1 月 3 日决定采用.

切计算机能做的事情尽量交给计算机去做, 既可以提高工作效率, 又可以避免人为主观随意性, 并减少错误. 一旦根据需要选定了初始条件——起迄时间、区域范围、震级限制, 以及衰减系数等, 即可启动运行程序, 实现由计算机勾画(打印输出)、满足给定条件、且边界完全确定的地震空间分布图象.

1 地震资料

李全林等(1991)给出的研究结果表明: 大量中、小地震对显现地震空间分布图象起“举足轻重”作用. 在研究地震空间分布形态时, 为充分发挥地震资料作用, 我们起初采取不事先规定下限震级的做法, 对有的地区的起算震级(b_m), 甚至可取到 0.5 级. 然而, 实践表明, 在不影响地震空间分布形态的前提下, 为节省计算机使用时间, 应当采用较高的起算震级. 否则, 不仅浪费计算机时, 而且还将使地震空间分布图象显得十分零乱. 陈锦标等(1991)提供的《中国地震各时期目录汇编(磁盘或磁带)》, 汇集了中国及其邻近地区自公元前 780 年至公元 1984 年的全部地震, 共 30 万余条(李全林等, 1991). 这是迄今为止更为准确、齐全, 而且在计算机上能直接使用的中国地震目录资料.

2 方 法

数字图象处理是一门年轻的学科. 它的兴起与发展主要是两种应用范围的需要: 其一是改善人类做判断用的图象信息; 其二是为了处理自动装置感受的景物数据(例如, 本世纪 20 年代, 用于改善在伦敦和纽约之间经海底电缆传输的图片的质量). 随着计算机技术的普及, 目前数字图象处理技术已在许多领域中得到了应用. 除了在通信中应用外, 还在宇宙探测、遥感遥测、生物医学诸领域得到许多实际应用. 本文尝试将它应用于地震研究.

根据数字信号处理(郑治真, 1988)和数字图象处理原理(余松煜等, 1989; 冈萨雷斯、温茨(著)、李淑梁(译), 1981), 假设函数 $f(x, y)$ 为某一数字图象(亦即在空间坐标上和亮度上都已离散化了的图象), 此处 x 和 y 是某空间点坐标, 而在任意点 (x, y) 的 f 值正比于图象在该点的亮度(灰度级). 因此, 一幅数字图象也就是一个矩阵, 其行和列标识了图象中的一个点, 而相应的矩阵中元素的值, 标出该点的灰度等级. 在数字图象处理中, 为了加重图象的轮廓, 或者说为了使获得的空间图象边界鲜明, 还往往采用尖锐化方法. 其中, 微分尖锐化——梯度法是常用的空间域图象尖锐化方法. 现简要介绍如下:

函数 $f(x, y)$ 在坐标 (x, y) 上的梯度定义为矢量

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

该矢量指向 $f(x, y)$ 变化率最大的方向, 其幅度为

$$G[f(x, y)] = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

亦即等于在 G 方向上每单位距离 $f(x, y)$ 的最大增加率.

上述式(2)是许多图象微分法的基础,也是本文图象处理方法的依据.对于数字图象,式(2)中的导数可以用差分来近似,典型的近似关系之一由下式给出:

$G[f(x,y)] \cong \{[f(x,y) - f(x+1,y)^2] + [f(x,y) - f(x,y+1)^2]\}^{\frac{1}{2}}$ (3)

采用绝对值得到如下相似的结果:

$G[f(x,y)] \cong |f(x,y) - f(x+1,y)| + |f(x,y) - f(x,y+1)|$ (4)

应用计算机实现梯度运算时,式(4)更合乎要求.

对于地震研究,地震频度-震级关系遵循地震界熟悉的古登堡公式 $\lg N = A - BM$,或者说遵从指数分布 $n = 10^{a-bM}$,亦即 $n(x) = e^{a-bx}$, $x \geq 0$. 这里, N 或 n 为地震累积频度或地震微分频度, M 或 x 为震级, A 与 B 或 a 与 b 是两个参数. 这表明,在一定范围内,地震频度随震级呈指数衰减分布.事实上,自然界中许多事物在一定范围内均遵从指数分布.诸如,天空中恒星数目按星等的分布,电子元器件的可靠度函数等等.参考 Keilis-Borok 和 Kossobokov(1986)的余震衰减规律,本文不妨定义地震场 $I(i,j)$ 呈如下形式的指数分布:

$$I(i,j) = \sum_{k=1}^L M_k e^{-\alpha \gamma_k} \tag{5}$$

式中, (i,j) 为空间点相对坐标, M_k 为选定区域中第 k 个地震的震级(共有 L 个地震), γ_k 为空间点 (i,j) 到地震 M_k 的欧氏距离(以 km 为单位).应当指出,虽然原则上可以认为,衰减系数 α 随震级不同而不同,但为简单起见,本文暂且认定 α 为某一常数.很明显, α 愈大地震场衰减愈快;震级愈大,相应影响(波及)范围亦愈广.因此,如此定义地震场可一定程度上克服地震空间分布的不均匀性.与此同时,还参考地震能量衰减规律,对不同大小地震分别限制一定的影响范围——距离权重.仿效 Keilis-Borok 和 Kossobokov(1986)的做法,但向小震级端拓宽,做出如表 1 所示的种种规定.

上述种种考虑,已编写计算机 FORTRAN 语言程序来实现(限于篇幅,本文省略源程序,感兴趣的读者可直接向笔者索取).试验计算表明,综合考虑中国大地构造和强震震中分布图(国家地震局,1978),以及强震前 b 值空间分布图象(李全林等,1979),选取 $\alpha = 0.60$ 较为适宜.在回溯性检验中,计算了表 2 所列举的 12 个震例.应当指出,着眼于探索可能的实用前景,选择使用资料的时间都较短,从强震前 7—8 年、3—4 年、乃至 2—3 年不等.限于篇幅,本文只给出代表性的图 1—3,而且给出的图件是经笔者勾划过的略图.图中以“*”表示强震震中位置,闭合曲线区域代表相应指定震级以上的地震丛集区或等 b 值线空间分布图.各图件通用参量说明如下:

ll 为选定区域指定时间段内地震数量, mm 为分档数, bm 为起算震级, dm 为分档间隔, $lmax$ 为最大震级限制, $alfa$ 为地震场衰减系数.

表 1 对各种震级地震影响范围的估计

震 级	影响范围估计(半径, km)
0—1	5
1—2	12
2—3	22
3—4	34
4—5	50
5—6	80
6—7	122
7—8	150
>8	200

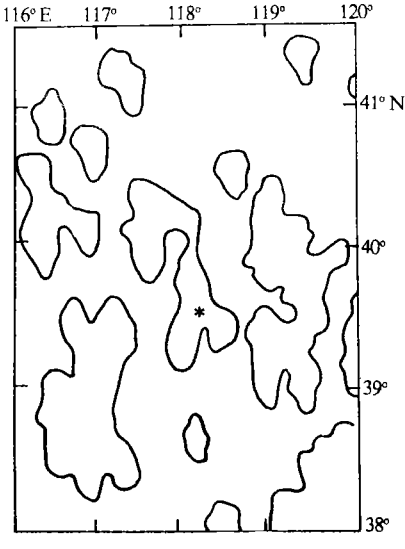


图 1 唐山地区地震空间分布(1972-01-01—1976-07-27), $l=114$, $mm=20$, $bm=3.0$, $dm=0.3$, $lmax=80$, $alfa=0.60$

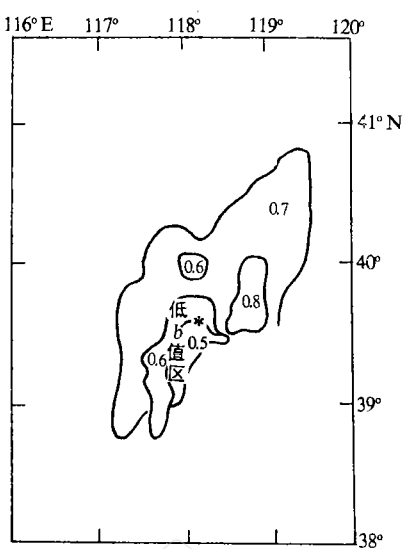


图 2 唐山地区 b 值空间扫描(最大似然法)(1974-07-27—1976-07-27), $l=175$, $mm=17$, $bm=2.3$, $dm=0.3$, $lmax=80$

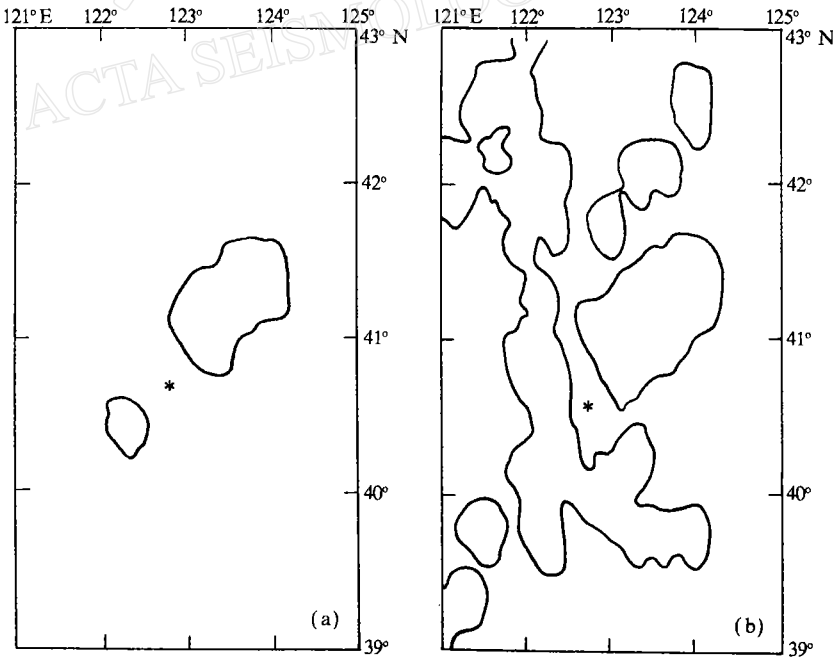


图 3 海城地区地震空间分布(1973-01-01—1975-02-04)
(a) $l=19$, $mm=20$, $bm=3.5$, $dm=0.3$, $lmax=80$, $alfa=0.60$
(b) $l=732$, $mm=20$, $bm=0.5$, $dm=0.3$, $lmax=80$, $alfa=0.60$

表 2 检验地震空区的部分震例

震 例 (日期)	震 中 位置	起 算 震 级	起 迄 时 间	区 域 范 围	地 震 个 数	空 区 形 态	
						围 空	丛 集
唐山 7.8 级 (1976-07-28)	39°24'N 118°00'E	3.0	1972-01-01 至 1976-07-27	38°00'—41°30'N 116°00'—120°00'E	114		✓
和林格尔 6.2 级 (1976-04-06)	40°12'N 112°06'E	0.5	1974-01-01 至 1976-07-05	38°30'—41°35'N 110°20'—115°20'E	688		✓
五原 6.0 级 (1979-08-25)	41°12'N 108°06'E	1.0	1977-01-01 至 1979-08-24	39°00'—43°00'N 106°00'—110°00'E	120		✓
		3.0	1944-09-23 至 1979-08-24		54		✓
炉霍 7.6 级 (1973-02-06)	31°18'N 100°42'E	3.0	1977-08-25 至 1973-02-05	29°15'—33°15'N 98°40'—102°40'E	58		✓
		3.5	1970-02-06 至 1973-02-05		16		✓
九龙 6.0 级 (1975-01-15)	29°25'N 101°47'E	3.0	1970-01-05 至 1975-01-14	27°00'—31°00'N 101°00'—105°00'E	311		✓
		4.0	1970-02-06 至 1973-02-05		68		✓
盐源 6.7 级 (1976-11-07)	27°36'N 101°26'E	3.5	1970-11-07 至 1976-11-06	24°30'—28°30'N 99°00'—103°00'E	71		✓
永善 7.1 级 (1974-05-11)	28°12'N 104°06'E	3.0	1970-05-11 至 1974-05-10	27°00'—31°00'N 101°00'—105°00'E	127		✓
		3.5			46		✓
黑水 5.0 级 (1978-07-13)	31°53'N 103°01'E	3.0	1970-07-13 至 1978-07-12	31°00'—35°00'N 101°00'—105°00'E	888		✓
		3.5			235		✓
		4.0			101	✓	
		4.5			57	✓	
松潘 7.2 级 (1976-08-16)	32°36'N 104°06'E	3.0	1970-08-16 至 1976-08-15	31°30'—34°30'N 102°00'—106°00'E	216		✓
海城 7.3 级 (1975-02-04)	40°42'N 122°48'E	0.5	1973-01-01 至 1975-02-04	39°00'—43°00'N 121°00'—125°00'E	732	✓	
		1.5			608	✓	
		2.5			160	✓	
		3.0			60	✓	
		3.5			19		✓
西克尔 5.8 级 (1977-12-19)	39°52'N 77°18'E	3.5	1970-09-22 至 1977-12-18	38°00'—42°00'N 76°30'—80°00'E	400		✓
		4.5			187		✓
南坪 6.5 级 (1973-08-11)	32°54'N 104°06'E	3.0	1970-08-11 至 1973-08-10	31°00'—35°00'N 101°00'—105°00'E	21		✓
		3.5			6		✓

注：划“✓”者表示属于此类型。

3 结论与讨论

从前述震例回溯性检验中不难看出：

(1) 地震空间分布形态呈现多样化。既有通常认为的“围空区”形态，亦即被围起来的区域比周围区域地震稀少，图象呈围起来的“空区”；又表现为“丛集”状，亦即被四周低地震频度区构成的“空区”包围起来的地震频度颇高或甚高的区域景象——地震丛集图象。而且，后者是相当普遍的现象，也可以说是“常态”(正常状态)；而“围空区”形态只

是个别现象, 或者说是地震“丛集”的一种特殊形态——环绕某一特定区域的地震丛集. 事实上, 选择适当的起算震级, 有可能使地震空间分布图象由“围空”(图 3b)变成“丛集”(图 3a). 通常, 起算震级取 3.0 级左右较为适宜.

(2) 着眼于探索可能的应用前景, 本文使用资料的时间都较短, 而且随选定区域的地震活动性强弱而异. 相应结果的可靠性除了列举的震例可作佐证外, 还需要更多震例与更长时间的验证. 对有的地区而言, 只要 2—3 年的地震目录资料, 就基本具备考察该选定时空区域地震时空分布的条件, 尤其用于初步判断是否存在某种形态的地震空区, 从而为探索震情趋势提供依据. 显然, 这并不意味着否定应当长期积累稳定、可靠地震目录资料的重要性.

(3) 地震往往发生在某一地震丛集区域或其边缘地带, 如果辅以其它有关参数(诸如 b 值就是其一)的综合分析, 往往能较客观地识别未来强震震源区的大致范围(如图 1—图 2 所示).

(4) 震例分析表明, 对于 5 级及其以上的中强震、强震, 大都可以采用本文给出的方法, 实现由计算机勾画(打印)指定时空区域与震级限制的地震空间分布图象, 识别可能的地震空区, 为探索未来可能潜在震源区提供科学依据.

(5) 地震“丛集区”往往位于(中国)地质构造分界的交汇处或交界地带, 这正是通常发生强震的主要地点. 在识别未来可能潜在强震震源区时, 对照分析中国主要构造体系新活动和强震震中分布图(国家地震局, 1978), 有重要参考价值.

(6) 地震空间分布的丛集形态, 似乎也可用地震空区理论的凹凸体模式进行解释. 据认为, 凹凸体指的是应力值高于其周围介质的区域(陈运泰、倪晓希, 1990). 该体的“平均强度”无疑也比周围区域高, 以致最终破裂很可能在这里发生.

4 结 语

地震空间分布呈“空区”图象, 作为地震活动性图象的一种, 如前所述, 其形态不单纯表现为“围空”, 还更多地表现为地震丛集. “空区”图象本身实质上是一种特殊的“丛集”, 而且对于大陆地震(板内地震)而言, 地震丛集更具普遍性. 当然, 有关结论需要更多震例的验证和更长时间的检验, 而且其物理实质和形成机制, 以及分析方法的量化等, 都还需要作进一步研究. 此外, 国际上诸如以 Kagan 和 Jackson(1991), 以及 Soth Stein(1992)为代表的研究板缘地震空区的思路, 也很值得我们探讨.

参 考 文 献

- 陈锦标、庄灿涛、李全林、宋锐、修济刚、吴宁远、陈佩燕、耿洪、杨懋源、秦馨葵、范杨、白金城、王碧泉、孙友福、林纪曾, 1991. 中国地震各时期目录汇编(磁盘或磁带). 地震出版社, 北京.
- 陈运泰、倪晓希, 1990. 地震空区的破裂动力学研究. 地球物理研究所四十年, 60—67. 地震出版社, 北京.
- 陈章立, 1986. 地震活动图象在地震预报中的应用. 世界地震译丛, 3, 1—6.
- 冈萨雷斯, R. C., 温茨, P. (著), 李淑梁(译), 1981. 数字图象处理, 123—192. 科学出版社, 北京.
- 国家地震局, 1978. 中国地震烈度区划工作报告(附图). 地震出版社, 北京.
- 李全林、于涿、郝柏林、陈锦标, 1979. 地震频度-震级关系的时空扫描, 37—46. 地震出版社, 北京.
- 李全林、宋锐、陈锦标、白金城、庄灿涛、陈佩燕, 1991. 中国地震各时期目录汇编——编辑说明与使用指南, 80—

90. 地震出版社, 北京.

陆远忠、宋俊高, 1989. 地震空区与地震预报, 102—110. 地震出版社, 北京.

余松煜、周源华、吴时光, 1989. 数字图象处理, 83—85. 电子工业出版社, 北京.

郑治真, 1988. 数字信号处理基础, 102—105. 地震出版社, 北京.

Kagan, Y. Y. and Jackson, D. D., 1991. Seismic gap hypothesis: ten year after. *J. Geophys. Res.*, **91**, 21419—21431.

Keilis-Book, V. I. and Kossobokov, V. G., 1986. Time of increased probability for the great earthquakes of the world. *Comput. Seismal.*, **19**, 48—58.

Soth Stein, 1992. Seismic gaps and grizzly bears. *Nature*, **356**, 387—388.

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA