

文章编号: 0253-3782(2002)05-0525-08

学术讨论

年度地震预报能力的科学评价*

张国民¹⁾ 刘杰¹⁾ 石耀霖²⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

2) 中国北京 100039 中国科学院研究生院

摘要 首先简单介绍了我国地震预报的科学思路, 分析了地震预报能力评价中遇到的各种问题; 在此基础上应用 R 值评分方法, 讨论了 1990~2000 年我国年度地震危险区预测的实际效能, 并对当前地震预报能力作了评述.

关键词 地震预报 年度会商 预报评分

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A

引言

自 20 世纪 60 年代全球一些地震研究先进国家开展有计划的地震预报研究以来, 地震预报已经历了将近 40 个年头. 对于这漫长岁月中地震预报的艰难历程, 美国著名科学家, 曾任美国加州地震预报评定委员会主席的 Alen 评论说: 地震预报的科学难度要比原先预想的困难得多, 地震预报的实际进展要比原来预想的缓慢得多. 正是在这种背景下, 1996 年 Geller 等人在 *Science* 等杂志上连续发表文章, 提出地震不能预报. 随即 Wyss 针锋相对地发表反对文章, 国际地震界引发迄今为止最为激烈的争论, 引起了国际科学界的广泛关注 (Geller *et al.*, 1997; Wyss, 1997; 陈运泰, 1993; 丁国瑜, 1993; 吴忠良, 1998).

在这场争论中, 中国的许多专家则坚持地震可以预报的观点. 其基本认识是, 经过数十年的研究和实践, 当前我们的地震预报水平是: 在某些有利的条件下, 对某种类型的地震有做出一定程度预报的可能. 那么, 形成这种观点的科学依据是什么? 本文通过选择和确立对地震预报能力的评价方法, 并在对我国连续多年的预报实际进行科学检验的基础上来讨论这一问题, 即地震能否预报和当前的预报能力到底有多高?

1 我国地震预报的科学思路

自 20 世纪 60 年代我国开展大规模地震预报研究以来, 在一些主要地震区建立了包括地球物理、地球化学、大地形变的地震前兆监测台网, 并在台网监测范围内取得 100 多次 5 级以上地震震例, 其中包括 14 次 7 级以上大震震例和 40 多次 6 级以上强震震例. 在这

* 国家重点基础研究发展项目(G19980407)资助.

2002-01-17 收到初稿, 2002-04-27 收到修改稿并决定采用.

些震例中记录到许多震前的前兆异常变化 (Zhang, Li, 1997). 通过对这些震例资料的系统研究, 马宗晋等、梅世蓉等指出, 地震前兆现象的出现、发展、变化是地震孕育过程各阶段的反映, 也是大区域地壳构造变动与震源逐步成熟和暴露过程的反映. 基于这一基本认识, 并参照岩石力学实验所给出的岩石破裂大致经历线弹性变形、非线性体积膨胀和破裂加速扩展等诸阶段发展过程的研究结果, 逐步形成了长、中、短、临阶段性地震预报的科学思想和工作程序 (Ma *et al.*, 1989; 梅世蓉等, 1993; 丁国瑜等, 1981; Zhang *et al.*, 1984). 其基本内容如下:

长期预报. 是指对 10 年左右时间尺度内某地区地震活动趋势的预测. 一般是根据地震活动的时空变化特征, 如周期性、填空性、迁移性等的统计特性, 区域地壳形变的研究, 活动构造研究, 以及太阳活动、地球自转等环境因素与地震活动关系的分析等作出的. 长期预报的地区和时间尺度都比较大, 必须通过中期预报逐步缩小.

中期预报. 是指对未来一二年内可能发生破坏性地震的地区和震级的预测. 其主要的预测依据包括: 区域地震活动时空演变特征; 地震活动的背景性因素, 如地震围空区、地震条带等异常图象; 前兆观测资料长趋势异常; 以及强震活动与环境因子相关分析等.

短期预报. 是指对未来 3 个月内将要发生地震的时间、地点和震级的预报. 通过对有中期预报的重点危险区的跟踪监测, 依据多种趋势异常的准同步回返或恢复、或加速变化, 区域地震活动异常判据, 以及多种前兆手段出现速率较快的新异常等.

临震预报. 是在中期和短期预报基础上, 尽最大可能提高预报的精度和准确度, 缩短预报时间为 1~2 周之内, 预报区范围为 100~200 km, 并减小预报震级的误差(小于 1 级). 其主要依据是地下流体(如水位、水压、水温、水化学成份)、地电、地磁、地倾斜等手段的突发性快速异常变化, 前震活动, 以及磁暴、潮汐应力等触发因素的分析.

遵循边探索研究、边在实践中应用检验的原则, 从 20 世纪 70 年代以来, 在我国一些主要地震区开展了上述阶段性地震预报的研究和实践. 其中应用最广、工作最系统、积累资料最完善的是年度中期预报. 如上所述, 地震中期预报是对未来一二年内可能发生破坏性地震的地区和震级的预测. 为了将预测成果更好地服务于社会和经济建设, 我国的中期地震预报主要是以年度预报形式来实施的. 亦即在每年年底, 针对一年来我国和各地震区地震活动的实况和各学科地震前兆观测的最新资料, 应用几十年来所积累的震例经验和研究成果, 分析判断下一年度我国地震活动趋势的重点地震危险区, 并通过地震专家仔细会商、研讨, 形成对新的一年的年度地震中期预报意见. 年度中期预报主要是圈定出新一年中国大陆地区可能发生破坏性地震的地区及其震级强度. 图 1 给出了 1995 年底预测的 1996 年度地震重点危险区和 1996 年地震活动的实况. 这项预报已开展 30 年, 尤其是在 20 世纪 90 年代国际减灾十年中, 进一步加强了年度预测研究工作. 因此, 本文以 20 世纪 90 年代我国年度地震预报实况的实际检验, 来讨论地震能否预报和当前地震预报的科学能力.

2 如何寻找客观评价地震预报能力的方法

要讨论地震能否预报, 要准确评估地震预报的能力, 首先需要寻找客观评价地震预报能力的方法. 应该说, 在现阶段, 寻找准确和客观的评价地震预报能力的方法, 也是一项探索性很强的研究工作. 例如, 在 20 世纪 90 年代中叶, 国际学术界对希腊科学家用的 VAN

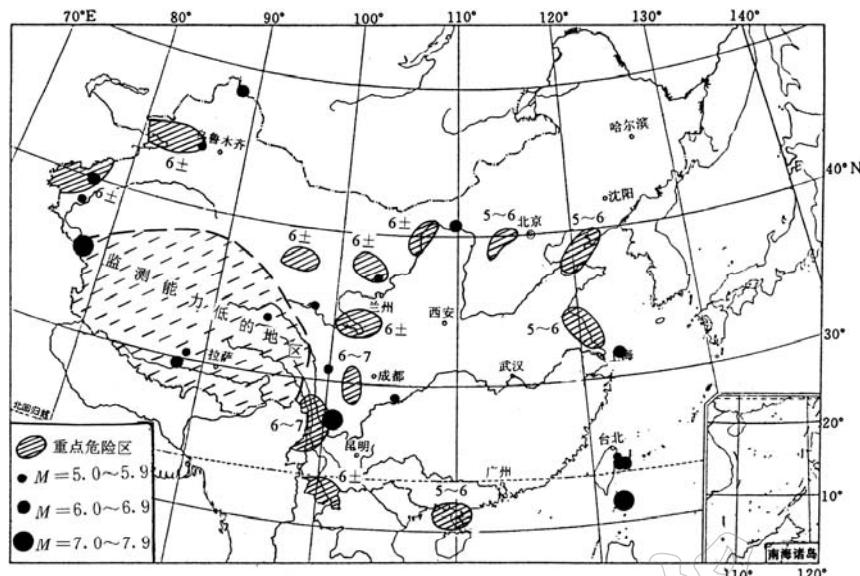


图 1 1996 年度地震危险区及 $M \geq 5.0$ 地震实况

方法预报地震的有效性问题就有过非常激烈的辩论(Geller, 1996; Varotsos *et al.*, 1996, Aceves, *et al.*, 1996; Kagan, 1996, 1997). 如上所述, 我国已经做了 30 年的年度预报, 每年的年度预报都给出了明确的结果, 并且都已受到了历年地震实况的检验. 但要作出准确的评价, 依然是一件不容易的事情. 比如, 假设对 A 年作出了年度重点危险区预测, 共预测了 9 个可能发生的危险区(在地图上画出了 9 个表征危险区的圈). 到 A 年结束时, 共发生了 12 次 5 级以上地震(作为预测目标的检验样本). 其中, 4 次分别落入所预测的 9 个危险区中的 4 个之中, 而另外 8 次则发生在所预测的 9 个危险区之外. 对于所作的 9 个危险区预测来说, 有 4 个区(圈)发生了地震, 而另外 5 个圈则未发生地震.

对于这样一个看起来十分简单的事, 要评价起来却并不那么简单, 会遇到很多问题:

1) 对所预测的危险区来说, 9 个区内有 4 个发生了地震. 一个简单的对应是预测的正确率为 $4/9$, 即 44%. 但是还留下一个问题, 即剩下的那 5 个还没有发生地震的圈怎么说? ——虚报. 于是虚报率是 $5/9$, 即 56%. 那么, 如何统一评价这 44% 的对应和 56% 的虚报的总体水平的高低呢?

2) 从年内所发生的地震来说, 12 次预测对象中有 4 次落入所报的危险区之中, 即报准率(在预报人员的专业术语中称有震报准率)为 $4/12$, 即 33%. 但是也同样留下一个问题, 即发生在预报区之外的 8 次地震怎么算? ——漏报. 于是, 漏报率为 $8/12$, 即 67%. 那么, 类似的问题是, 如何评判在这 33% 报准率和 67% 漏报率情况下的总体水平.

3) 上述的情况往往导致多元的结果. 有人从预测区的对应角度说, 其预报正确程度达 44%; 有人则从年内发生地震被报准的情况来说, 其报准率为 33%; 还有人从 56% 的虚报和 67% 的漏报的角度, 将对预报效能给出完全不同的说法. 于是一个突出的问题被摆到面前. 在这种多元结果的情况下, 如何尽可能客观和准确地综合评价这 A 年度预测的整体水平及其预报能力?

4) 仅用所预报的危险区个数(即所画的圈的数目)与年内发生地震的对应来评判其对应率和报准率也是不全面的。在圈的大小大致相近的情况下, 圈(所报危险区)越多, 则报准地震的可能性越大。另一方面, 危险区数量不变, 而其面积(即圈大小)越大, 则对应率和报准率都会提高。一个夸张的例子是, 假如 B 年的年度预报只画一个圈, 而这个圈又包含了全部国土, 则年内发生的地震肯定都会报准。但显然, 这种 100%的对应率和报准率都是毫无意义的。

5) 在检验地震报准与否时, 如何统一和严格掌握标准也是一个经常碰到的问题。比如, 地震发生在危险区边外, 但仅差几十公里, 到底算报准还是算漏报? 此外, 预测目标定为某个阈值(如 $M_S \geq 5$), 那么, 4.9 级地震能否被放宽考虑? 因为正如大家所熟知的, 对于已发生了的地震, 震级测定和震中定位还常常有明显的误差, 何况是世界难题的震前预报。这些不确定的因素又常常会给预报水平和预报能力的评价带来更多的不确定性。

上述这些问题仅仅是对于简单、明确的年度预报而言的, 而且还只是评价中众多问题中的一部分。若对某次地震的各种具体预报意见, 其评价的复杂性将更大。因此, 自 20 世纪 70 年代以来, 国内外地震学家都在寻找能比较客观和准确评价地震预报能力的方法。20 世纪 80 年代以来, 包括地震系统内外的众多学者就一直在探索地震预报效能的检验方法(朱令人等, 1991; 朱成熹等, 1991; 秦卫平, 洪时中, 1991; 黄世奇, 1991; 吴忠良, 1999; 刘杰等, 2000; 王晓青等, 2000)。通过对国内外多种统计评分方法的比较, 及其用于地震预报实践中的检验, 朱令人等(1991)推荐了若干适合与目前地震预报实际的评价方法, 其中, R 值评分方法是被推荐的比较适合的方法之一。

3 R 值评分方法

R 值评分方法是由许绍燮(1989)提出的。该方法在时间序列研究中应用较多。根据秦卫平的研究, 在 R 评分中将预报时间的占有率表示为虚报率时, 则 R 评分与 Q 评分相一致(秦卫平, 1991)。20 世纪 80 年代后期以来, 笔者将 R 值评分应用于对历年年度预测效能的检验, 之后又进一步完善了 R 评分方法在年度预测中的效能检验(石耀霖等, 2000)。其主要原理如下:

1) 将中国大陆和邻近海域以 $1^\circ \times 1^\circ$ 为网格单元进行划分, 共 N 个单元。其中, N^1 个单元预报发生地震, N^0 个单元没有预报; 同样, 如果根据地震在网格中的分布, 也可以划分成 N_1 个单元发生了地震, N_0 个单元无地震发生。

在预报单元(N^1)中, n_1^1 个单元报对了地震, n_1^0 个单元没有发生地震。在没有预报的单元(N^0)中, n_0^1 个单元发生了地震, n_0^0 个单元没有发生地震。

同样也可以用实际地震的分布来定义上述 4 个数值。在有震单元(N_1)中, n_1^1 个单元有预报, n_1^0 个单元无预报; 在无震单元(N_0)中, n_0^1 个单元有预报, n_0^0 个单元无预报。

由上面的定义可得到如下关系, 也可以用列表方式表达(表 1)。

表 1 预报情况表

实际情况	预报情况		和
	报有震	报无震	
有震	n_1^1	n_1^0	N_1
无震	n_0^1	n_0^0	N_0
和	N^1	N^0	N

$$\begin{aligned}
 N &= N^1 + N^0 & N &= N_0 + N_1 \\
 N^1 &= n_1^1 + n_0^1 & N^0 &= n_1^0 + n_0^0 \\
 N_1 &= n_1^1 + n_1^0 & N_0 &= n_0^1 + n_0^0
 \end{aligned}$$

2) 由于危险区划分多采用椭圆形式, 在统计预报单元时, 采用如下规则: 首先将危险区划分到网格中, 对于危险区的边缘地区, 如果该危险区在这个网格中能占有 1/3 以上的面积, 那么该网格就属于预报格点.

3) 在此基础上, 将每年经过余震删除后的地震标入相应的格点中. 根据上述关系, 统计出报震有震 n_1^1 , 报震无震 n_0^1 , 报无震实际有震 n_1^0 和报无震实际无震 n_0^0 的方格数. R 值计算方法为

$$R = c - b = \frac{n_1^1}{N_1} - \frac{n_0^1}{N_0} = \frac{\text{报震有震网格数}}{\text{总的有震网格数}} - \frac{\text{虚报的网格数}}{\text{总的无震网格数}}$$

由该定义可以看出, R 值就是报震的成功率(即 c)减去危险区占用的虚报网格数与总的无震网格数之比(即 b). 该公式的第二项的主要目的是扣除随机概率的预报成功率. 可以看出, 如果完全报对, 并且每个危险区仅占一个网格(即危险区很小, 随机概率很小)时, R 值为 1; 完全报对, 但所预测的危险区是全部网格数时(随机概率为 1), R 值为 0, 它表明这种预报无任何意义; 完全报错时, R 值是负值. 因此, 当 R 值大于 0 时, 其含义是所做的预报的成功率高于随机概率的成功率, 即该预报是起一定作用的. 当然, R 值越大, 则预报效果越好.

4 检验结果

1) 将中国大陆和邻近海域以 $1^\circ \times 1^\circ$ 为网格单元进行划分, 在去掉地震监测能力差的青藏高原部分地区后, 网格总数(N)为 931 个.

2) 根据上述规则, 将 1990~2000 年期间每年的危险区分配到网格中, 统计出每年预报区的格点数(N^1).

3) 将每年发生的 5 级以上地震, 在经过余震删除后标入到网格中, 得到每年发生地震的总数(N_1)和其中报对的地震数目(N_1^1).

4) 根据表 1 和 R 值的定义, 就可计算得到每年 R 值的计算结果(表 2). 图 2 给出了每年地震危险区在网格中的分布及地震预测统计结果, 图 3 给出了 R 值的年度分布.

表 2 R 值评分的计算结果

年份	报对地震 n_1^1	地震总数 N_1	预报区格点数 N^1	格点总数 N	R 值
1990	2	12	66	931	0.097
1991	5	19	118	931	0.139
1992	3	10	102	931	0.193
1993	3	14	89	931	0.121
1994	1	10	60	931	0.036
1995	5	18	104	931	0.170
1996	5	11	110	931	0.340
1997	4	11	95	931	0.265
1998	3	7	77	931	0.349
1999	4	13	86	931	0.228
2000	5	9	84	931	0.470
平均	3.6	12.2	90.1	931.0	0.219

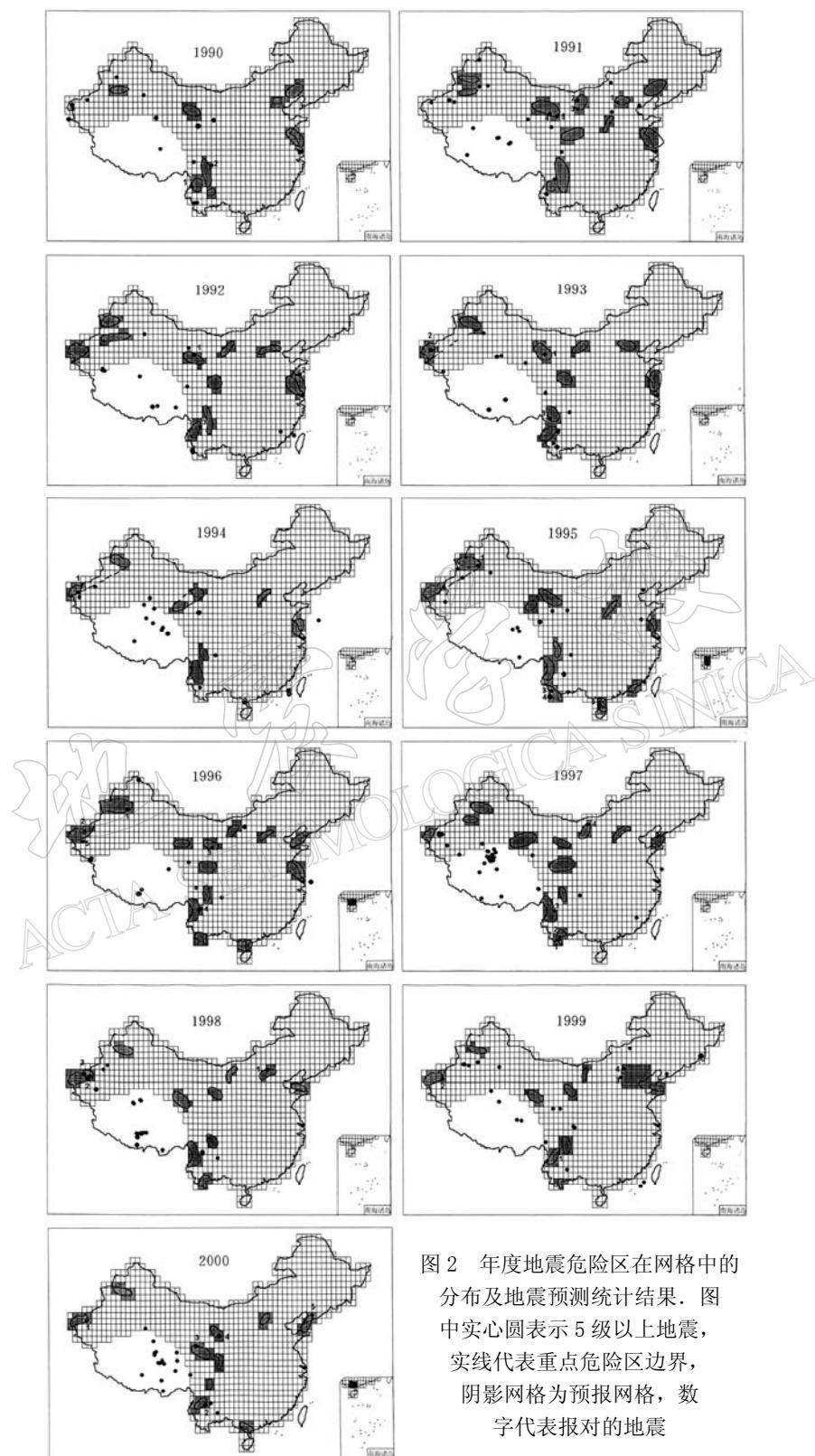


图2 年度地震危险区在网格中的分布及地震预测统计结果. 图中实心圆表示5级以上地震, 实线代表重点危险区边界, 阴影网格为预报网格, 数字代表报对的地震

5 讨论

1) 从 1990~2000 这 11 年的地震预报看, 其 R 值均大于 0, 即均比随机预测的概率要高。连续 11 年都能大于随机预测的水平, 这在统计上是一个概率非常小的事件。因为在随机预测(相当于瞎猜)的情况下, R 值大于 0 和小于 0 的几率是相对的, 因此, 要连续 11 年

$R > 0$, 其几率仅为 $1/2^{11}$, 即十万分之五。而连续 11 年 R 值不仅为正, 且平均为 0.22, 其可能性只有百万分之一。因此, 表 2 的结果表明, 我国年度地震预测是有科学含量的, 并不是随机预测。

2) R 值总体上讲还十分低, 其平均值仅为 0.22。这表明现在的地震预报水平还相当低。

3) 比较每年的 R 值变化, 显示出 R 值在时间轴上的涨落现象。这种预报效能的不稳定变化, 可能正是地震预测目前正处于探索阶段的客观反映。

4) 1994 年 R 值是这 11 年中最低的, 这种情况是与地震活动密切相关的。1994 年是中国大陆 20 世纪第五个活跃期中地震活动从相对平静转入高潮活动的转折年份。该年的地震活动与前几年相比明显不同, 并在一些新区(东南沿海的台湾海峡和北部湾)发生较大地震, 地震活动的主体地区发生一定的转移。 R 值低表明该年的地震预测效果差。从方法上讲, 在年度尺度上采用的预报方法, 在地震活动出现转折的年份会面临更大的困难。

5) 除了本文提出的评分方法外, 我们还提出了考虑背景地震活动时的 R 值计算方法。其含义是在多震地区, 若报对一次地震, 对 R 值贡献比仅考虑随机预测要低; 反之, 在少震地区, 若报对一次地震, 对 R 值贡献比仅考虑随机预测要高。计算结果表明, 在考虑背景地震活动的情况下, R 值的评分结果比本文的结果平均降低 0.1。这表明地震活动性分析是年度地震预报的重要方法。

参 考 文 献

- 陈运泰. 1993. 地震预测研究概况[J]. 地震学刊, (1): 17~23
- 丁国瑜. 1993. 地震预报与活断层分段[J]. 地震学刊, (1): 8~10
- 丁国瑜, 梅世蓉, 马宗晋. 1981. 地震预报方法[A]. 见: 丁国瑜, 梅世蓉, 马宗晋编. 国际地震预报讨论会论文选[C]. 北京: 地震出版社, 174~179
- 黄世奇. 1991. 预报成败的评定方法[A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 地震预报方法实用化研究文集综合预报专辑[C]. 北京: 地震出版社, 413~415
- 刘杰, 庄建仓, Vere-Jones D, 等. 2000. 地震统计模型的年概率增益评估[J]. 地震学报, 22(1): 35~44
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 1~498
- 秦卫平. 1991. 一维地震预报评分问题[J]. 地震学报, 13(2): 234~242
- 秦卫平, 洪时中. 1991. 一维地震预报评分问题—— 3×2 列联表在地震预报评分中的应用[A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 地震预报方法实用化研究文集综合预报专辑[C]. 北京: 地震出版社, 406~412
- 石耀霖, 刘杰, 张国民. 2000. 对我国 90 年代年度地震预报的评估[J]. 中国科学院研究生院学报, 17(1): 63~69
- 王晓青, 傅征祥, 张立人, 等. 2000. 中长期时空增益综合概率模型及其初步应用[J]. 地震学报, 22(1): 45~53
- 吴忠良. 1998. 自组织临界性与地震预测——对目前地震预测问题争论的评述(之一)[J]. 中国地震, 14(4): 1~10
- 吴忠良. 1999. 地震前兆统计检验的地震学问题——对目前地震预测问题争论的评述(之二)[J]. 中国地震, 15(1): 14~22
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分[A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 地震预报方法实用化文集地震学专辑[C]. 北京: 地震

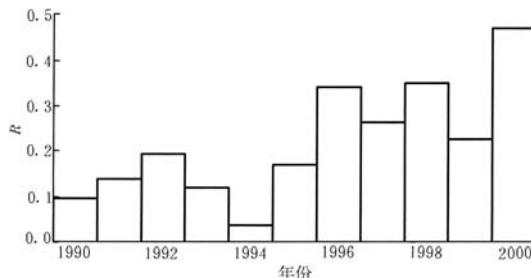


图 3 R 值的年度分布

- 出版社, 586~589
- 朱成熹, 朱令人, 郑兴树. 1991. 地震预测有效性的统计检验和统计效率值研究[A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 地震预报方法实用化研究文集综合预报专辑[C]. 北京: 地震出版社, 389~405
- 朱令人, 朱成熹, 洪时中. 1991. 地震预报效能评价[A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 中国地震预报方法研究[C]. 北京: 地震出版社, 35~45
- Aceves R L, Park S K, Straus D J. 1996. Statistical evaluation of the VAN method using the historic earthquake catalog in Greece[J]. *Geophys Res Lett*, 23: 1 425~1 428
- Geller R. 1996. Debate on evaluation of the VAN method: Editor's introduction[J]. *Geophys Res Lett*, 23: 1 291~1 293
- Geller R, Jackson D, Kagan Y, et al. 1997. Earthquake cannot be predicted[J]. *Science*, 275: 1 616~1 617
- Kagan Y Y. 1996. VAN earthquake prediction—an attempt at statistical evaluation [J]. *Geophys Res Lett*, 23: 1 315~1 318
- Kagan Y Y. 1997. Statistical aspects of Parkfield earthquake sequence and Parkfield prediction experiment[J]. *Tectonophysics*, 270: 207~219
- Ma Zongjin, Fu Zhengxiang, Zhang Yingzhen, et al. 1989. *Earthquake Prediction* [M]. Beijing: Seismological Press and Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1~332
- Varotsos P, Eftaxias K, Vallianatos F, et al. 1996. Basic principles for evaluating an earthquake prediction method[J]. *Geophys Res Lett*, 23: 1 295~1 298
- Wyss M. 1997. Cannot earthquake be predicted?[J]. *Science*, 278: 487~488
- Zhang Guomin, Li Li. 1997. On earthquake prediction in China[A]. In: Shen Jianzhong, Sun Hong, Terry L Schaefer eds. *Proceeding of US/China Workshop on Natural Disaster Mitigation and Reduction*[C]. Beijing: China Ocean Press, 332~344
- Zhang Guomin, Ma Zongjin, Liu Defu, et al. 1984. On the procedure of earthquake prediction in China[A]. In: The Organizing Committee of SCSEP ed. *A Collection of Papers of International Symposium on Continental Earthquake*[C]. Beijing: Seismological Press, 839~845

AN SCIENTIFIC EVALUATION OF ANNUAL EARTHQUAKE PREDICTION ABILITY

Zhang Guomin¹⁾ Liu Jie¹⁾ Shi Yaolin²⁾

1) *Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China*

2) *Graduate School of Academica Sinica, Beijing 100039, China*

Abstract: The scientific idea of earthquake prediction in China is introduced firstly. The various problems on evaluation of earthquake prediction ability are analyzed. The practical effect of prediction on annual seismic risk areas in 1990~2000 in China is discussed based on *R*-value evaluation method, and the ability of present earthquake prediction in China is reviewed.

Key words: earthquake prediction; annual consultation; prediction evaluation