

中长期地震危险性概率预测中的统计 检验方法 I: Molchan 图表法^{*}

蒋长胜¹, 张浪平², 韩立波¹, 来贵娟¹

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要:对中长期地震危险性概率预测结果的统计检验是地震预测预报的重要研究内容, 采用通用的统计检验方法是促进地震预测理论、模型“无障碍”交流和发展的必要条件。本文通过对青藏高原东北缘地区 PI 算法和 RI 算法回溯性预测结果统计检验的实例, 介绍了如何运用 CSEP 计划中已常规采用的 Molchan 图表法进行地震概率预测统计检验和分析, 并分别考虑了网格权重和地震活动权重两种算法计算“时空占有率”的情况。结果表明, Molchan 图表法可通过显著性水平 α 和概率增益 *Gain* 有效地评价概率预测模型的预测能力。此外, 对于同样的预测结果, 在考察不同的预测策略时得到的统计检验结果也可能不同。其中地震活动权重相对网格权重采用更为严格的统计检验。

关键词:中长期地震危险性概率预测; 统计检验; Molchan 图表法

中图分类号:P315.7

文献标识码:A

文章编号:1000-3274(2011)02-0106-08

引言

在中长期地震危险性分析中, 概率预测和统计检验构成其不可或缺的组成部分。统计检验方法一方面用于验证预测方法或假说的可行性^[1]以及配置合理的模型参数; 另一方面也是设计地震预测“警报”阈值、优化预报策略和预测效能评价的有效手段。

概率预测和统计检验在由美国南加州地震中心(SCEC)发起的全球“地震可预测性合作研究”(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, CSEP)计划^①中得到了很好的应用和发展。CSEP 计划采取可比较的数据、统一的计算规则和严格的统计检验约束下获取地震可预测属性^[2], 根据模型预测内容和结果产出的不同, CSEP 计划选用了 6 种不同的统计检验方法对不同预测模型的结果进行检验和对比分析^[3]: 地震数检验(N-test)、似然检验(L-test)、比率检验(R-test)、Molchan 图表法(Molchan Error Diagram)、区域技能评分检验(ASSTest)和接收者操作特性检验(ROC test)。

* 收稿日期: 2010-10-21; 修改回日期: 2011-02-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40804010)和国家科技支撑计划项目(2006BAC01B02-01-02)资助

作者简介: 蒋长胜(1979-), 男, 内蒙古额尔古纳人, 博士, 副研究员, 主要从事数字地震学和地震预测等研究。

① <http://www.cseptest.org>

中国作为 CSEP 计划的重要参与国, 在与国际同行开展地震可预测性合作研究的过程中, 通用的统计检验已成为地震预测的重要方法, 从此意义上, 熟悉和掌握这些统计检验方法尤为迫切。其中在 CSEP 检验中心已成为常规使用的 Molchan 图表法^[4~6], 由于能够客观和科学地进行地震预测评估, 目前已被广泛地应用于确定性和概率性预测的统计检验和效能评估中。本研究将通过中长期地震概率预测的实例, 介绍如何使用 Molchan 图表法进行统计检验和其所得结果的分析。

1 Molchan 图表法

Molchan 图表法(Molchan Error Diagram)最早是对 20 世纪 80~90 年代开展的经验性地震预测进行科学总结, 解决固定研究区强震时间预测问题, 并试图给出概率解释而逐渐发展起来的统计检验方法^[7]。该方法涉及到的变量有:

k -击中数(Hits): 预测“有震”而实际发震的地震数/空间网格数;

H -击中率(Hit Rate): 预测“有震”而实际发震的地震数/空间网格数与总的实发地震数/所占空间网格数之比;

v -漏报率(Miss Rate): 预测“无震”而实际发震的地震数/空间网格数与总的实发地震数/所占空间网格数之比;

τ -异常的时空占有率(Fraction of Space-time Occupied by Alarm): 发出预测“警报”的时空范围与总的时空范围之比。

Molchan 图表法使用 τ 和 v 来进行统计评分, 最佳的预测效果对应应在最大预测成功($v \rightarrow 0$)下付出最小的代价($\tau \rightarrow 0$)。 τ 在计算中常根据预测检验策略或要求的不同, 进行加权处理。将空间 G 划分成等尺寸、不重叠的网格($G_i, i=1, \dots, k$), 加权后的“异常时空占有率” τ_w 为可表示为^[7]

$$\tau_w = \sum_{i=1}^k w_i \tau_i, \quad \sum_{i=1}^k w_i = 1, \quad w_i \geq 0 \quad (1)$$

式中, k 为网格数, w_i 为网格 i 的权重。这里的 w_i 可根据预测策略和目标的不同采用不同的表示形式, 例如直接采用网格面积比^[8~10]

$$w_i = G_i \text{ 的面积} / G \text{ 的面积} \quad (2)$$

或采用空间 G 内“目标地震”的发生率^[11, 12]

$$w_i = \lambda(G_i) / \lambda(G) \quad (3)$$

在社会学和经济学等领域研究中, 如果 G_i 内还含有特定的作为权重的物理量 $p(g)$ 的分布, 例如空间 G 内人口密度的分布等, 则

$$w_i = \int_{G_i} p(g) dg / \int_G p(g) dg \quad (4)$$

式中, $p(g)$ 为人口密度等的空间分布函数。在本文中为表示方便, 可不加区别地将 τ_w 表示为 τ 。

利用 Molchan 图表法对 PI 或 RI 算法预测效果进行检验时, 通过不断降低预测的概率阈值, 分别计算 τ 和相应的漏报率 $v(\tau)$, 并在 Molchan 图表中绘制 $\tau \sim v$ 曲线, 这里为 $\tau \in [0, 1]$, $v \in [0, 1]$ 。地震预测效果的评估一方面在直观上可比较 (τ, v) 曲线与 Molchan 图表的边界线 $\tau=0$ 和 $v=0$ 所包围的面积, 面积越小则预测效果越好; 另一方面还需考察“击

中数” h 所对应的显著性水平。由于总数为 N 次事件中有 h 次或 h 次以上事件“击中”的分布概率可写为二项式形式, 相应的显著性水平 α 值可计算如下^[10]:

$$\alpha = \sum_{i=h}^N \left[\binom{N}{i} \tau^i (1-\tau)^{N-i} \right], \quad \binom{N}{i} = \frac{N!}{i!(N-i)!} \quad (5)$$

式中, N 为地震数。在 Molchan 图表中绘制 $\alpha = 1\%$ 、 $\alpha = 5\%$ 、 $\alpha = 25\%$ 和 $\alpha = 50\%$ 的等值线, 通过 $\tau \sim \nu$ 曲线上各点与各显著性水平 α 等值线的比较, 也可判断预测的效果。由式 (5) 也可见, α 等值线的位置是与实际发生的地震数 N 有关。

Molchan 图表法的概率增益被定义为^[5, 10]

$$Gain = \frac{H}{\tau} = \frac{1-\nu}{\tau} \quad (6)$$

由此可见, 概率增益 $Gain$ 在图表中即为 $(0, 1)$ 至 (τ, ν) 连线的斜率, 而当连线为 $(0, 1)$ 至 $(1, 0)$ 的直线时 $Gain=1$, 表示预测方法无统计显著性。图 1 给出了实际发生 4 个地震情况下, 利用 Molchan 图表法进行统计检验的示例, 其中图 1(a) 给出了不同显著性水平 α 的等值线, 图 1(b) 给出了不同概率增益 $Gain$ 的等值线。对于图 1 中的 A、B 和 C 三点, 可通过与 α 等值线和 $Gain$ 等值线判断各自的预测效果。例如, B 和 C 点具有相同的概率增益, 但 B 点的置信水平低于 C 点; A 点置信水平和概率增益明显优于 B 点。

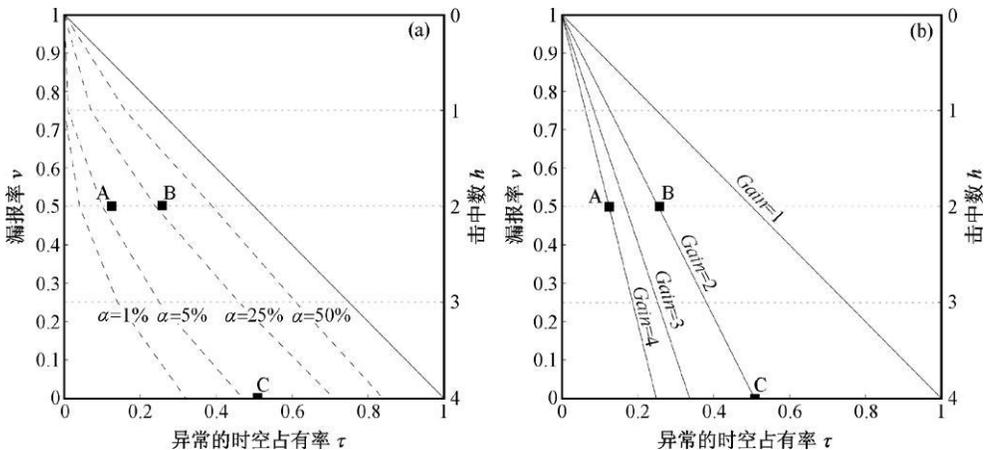


图 1 Molchan 图表法进行统计检验的示例

- (a) Molchan 图表中的显著性水平 α , 虚线为实际发生 4 个地震情况下不同显著性水平 α 的等值线, 实线为“无预测技能”(unskilled); (b) Molchan 图表中的概率增益 $Gain$ 等值线; 黑色方块 A、B 和 C 点分别为 3 个不同预测“警报”阈值下的统计结果

2 统计检验示例(以 PI 和 RI 算法为例)

为介绍 Molchan 图表法如何用于中长期地震危险性概率预测的统计检验, 本文选用了目前国内外讨论较多的, 基于统计物理的中长期地震预测方法——“图像信息学”PI 算法^[8, 13, 14], 以及用于对比研究的“地震相对强度”RI 算法进行 Molchan 图表法的应用示例。

PI 算法假定地震活动是受稳恒速度连续驱动的“阈值系统”, 通过对地震活动的“涨落”的分析, 在中长期时间尺度上估计未来地震的发生概率。计算得到的描述地震危险性概率的 PI 算法图像反映的是研究区域在预测时段内空间上的相对的危险程度, 并用对数形式

表现出来, 即用 $\log(\Delta P/\Delta P_{\max})$ 的数值表示在地图上。参照 Chen 等^[15]PI 计算的做法, 计算中仅选择地震活动性较强或地震频次较高的 50% 格点用于计算。RI 算法常被作为评价 PI 算法预测效果的“零假设”, 以评估使用 PI 算法的必要性。所谓 RI 算法, 是基于“大地震更易于发生在地震密集区”(即地震具有“丛集性”)的假设, 对格点进行地震数目的统计。与 PI 算法类似的是, RI 算法在空间上对各格点地震数进行归一化, 在^[0, 1]之间给定发出地震“警报”的门限阈值。为便于和 PI 图像比较, 本文计算中同样筛选了地震数目较多的 50% 格点参与 RI 图像的计算。

选取青藏高原东北缘地区($35^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$,)作为研究区, 回溯性研究的预测时段为 2005 年 1 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日。预测目标震级 $M_s 5.5$, 完整性震级 M_c 设定为 $M_c 3.0$, 空间网格的尺度取 $D=0.2^{\circ}$ 。此外, 参照前人的做法^[15~17], 设定地震活动“异常学习”的时间窗和“预测时间窗”均为 5 年, 计算所用目录总长度为 15 年。研究中所用的微震目录采用了中国地震台网中心提供的 1970 年以来《中国地震月报目录》和《全国编目系统速报目录》, 为考察“目标地震”的实际对应情况, 采用了中国地震台网中心提供的 $M_s 5.0$ 以上的《中国大震速报目录》。研究区预测时段 2005 年 1 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日对应的 PI 和 RI 算法预测结果, 以及实际发生地震的对应情况如图 2 所示。图 2 中仅显示了按照计算数值大小排序前 30% 的格点的 PI 和 RI 算法预测结果。预测时段内研究区共发生 $M_s 5.5$ 及以上地震 4 次, 分别为 2007 年 2 月 3 日青海海西 $M_s 5.5$ 、2008 年 11 月 10

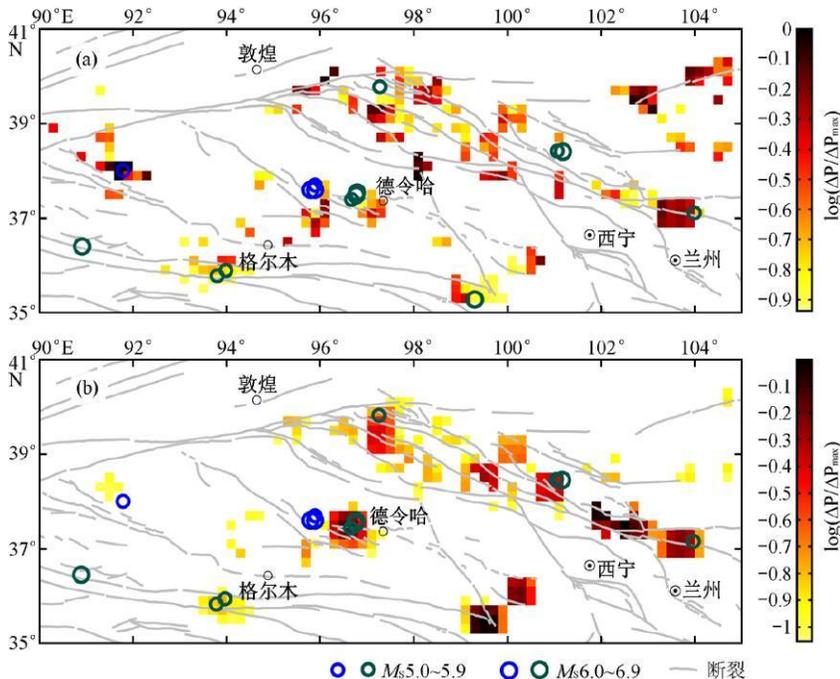


图 2 青藏高原东北缘地区(2005 年 1 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日)

PI 算法(a)和 RI 算法(b)回溯性检验

(图中用暖色块标出预测时段中预期发生 $M_s 5.5$ 以上地震的相对危险性水平; 空间格点尺度为 0.2° ; 蓝色圆圈标出预测时段内发生的目标震级以上中强地震; 绿色圆圈为地震活动异常“学习时段”内发生的目标震级以上中强地震)

日青海海西 $M_s 6.3$ 、2009 年 8 月 28 日青海海西 $M_s 6.4$ 和 2009 年 8 月 31 日青海海西 $M_s 5.9$ 地震。

Molchan 图表法中对 τ 的计算可采用多种形式, 为比较这些不同定义对结果的可能影响, 本文分别采用式(2)和式(4)计算异常时空占有率 τ 。其中对式(2)所示的网格面积比作为权重, 通过不断减小 PI 或 RI 算法预测结果的概率阈值, 计算相应“警报”区域与总区域的网格面积比, 并考察“警报”区域实际地震的对应情况, 得到相应的 τ 和 $v(\tau)$ 。对式(4)所示的地震活动面积比作为权重, 也同样通过不断减小 PI 或 RI 算法预测结果的概率阈值, 计算“警报”区域与总区域 M_c 以上的地震数量比, 考察“警报”区域实际地震的对应情况, 得到相应的异常时空占有率 τ 和漏报率 $v(\tau)$ 。两种方法获得漏报率 $v(\tau)$ 绘制成的 Molchan 图表如图 3、图 4 所示。

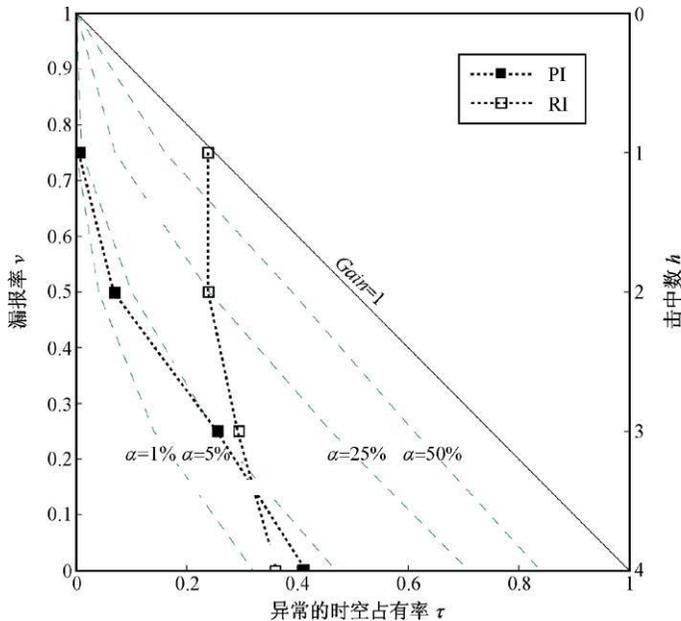


图 3 网格数权重的 Molchan 图表法对青藏高原东北缘地区(2005 年 1 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日)预测的统计检验

图中实心方块为 PI 算法的 Molchan 图表法结果, 空心方块为用于比较的 RI 算法, 对角线为“无预测技能”(unskilled)的分界线

由图 3 可见, PI 算法预测结果显著性水平优于 5%, 显示有较好的预测能力; RI 算法相对较差, 其中第一个地震事件被预测区域“击中”时, 概率增益接近 1, 且对应的时空占有率已达到整个区域面积比的 0.25, 几乎无预测能力。如果按照 Zechar 等^[10]建议的使用漏报率 $v(\tau)$ 曲线向左包围面积对 PI 和 RI 算法总体预测能力进行比较, PI 算法显著优于 RI 算法。由图 4 可见, 当采用地震活动为权重的方法计算, PI 和 RI 算法的漏报率 $v(\tau)$ 曲线明显不同于图 3, 其中 PI 算法尽管具有一定的预测能力, 但当“击中”全部 4 个地震时, 需要付出 0.92 的时空占有率; RI 算法的漏报率 $v(\tau)$ 曲线则由于几乎位于 $Gain=1$ 直线的右上方, 显示无预测能力。

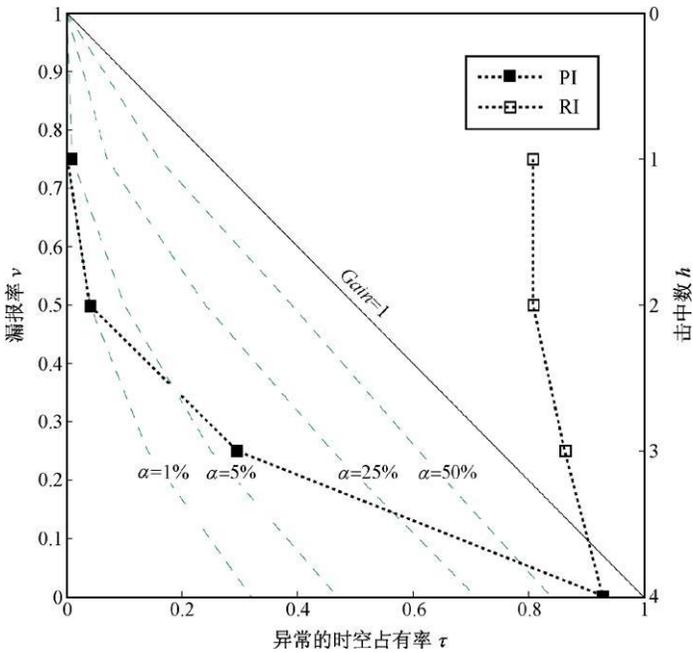


图 4 概率权重的 Molchan 图表法对青藏高原东北缘地区(2005 年 1 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日)预测效果的统计检验。图注与图 3 同

3 结论和讨论

地震危险性概率和统计检验是构成现代地震预测预报研究的两个要素，本文介绍和引入了 CSEP 计划中用于概率预测统计检验的 Molchan 图表法，通过对青藏高原东北缘地区 2005 年 1 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日 PI 算法和 RI 算法回溯性预测结果的统计检验，介绍了 Molchan 图表法的操作和分析。其中分别考虑了网格权重和地震活动权重两种计算“时空占有率” τ 的情况。结果表明，在相应的预测时段内，PI 算法均有较好的预测能力，并明显优于 RI 算法，RI 算法在考虑地震活动权重情况下无预测能力。由于 RI 算法是基于地震丛集性假设，相应的结果也可说明对于本文所考虑的青藏高原东北缘地区，地震预测的丛集性假设可能是不成立的，这一点与川滇地区有明显不同^[17]。

相关结果也表明，Molchan 图表法可通过显著性水平 α 和概率增益 $Gain$ 值，可有效地评价地震危险性概率预测模型的预测能力，且可通过漏报率 $v(\tau)$ 曲线向左包围的面积判断不同预测模型整体预测效果的优劣。此外，对图 3 和图 4 的比较也说明，同样的预测结果，在考察不同的预测策略时得到的统计检验结果也可能不同。在本文的研究中，网格权重的 Molchan 图表法关注的是地震危险性概率本身的空间分布特征及其预测效能，而地震活动权重的 Molchan 图表法除考察概率本身的空间分布特征外，还附加了背景的地震活动水平作为参考标准，尽管通过地震数目的比值分布建立在“时间非独立”的假定之上。由此可见，地震活动权重是相对网格权重更为严格的统计检验。

中国地震台网中心提供了《中国地震月报目录》和《全国编目系统速报目录》，日本数理

统计研究所(ISM)庄建仓博士、瑞士联邦理工学院(ETH)Jeremy D. Zechar 博士对本文掌握和使用 Molchan 图表法提供了有益的指导,在此谨表谢意。

参考文献:

- [1] Yamashina K. Trial of earthquake prediction in Japan and a statistical test of time-shift[J]. *Tectonophysics*, 2006, 417(1-2): 169-182.
- [2] Schorlemmer D, Zechar J D, Werner M J, et al. First results of the regional earthquake likelihood models experiment[J]. *Pure and Appl Geophys*, 2010, 167(8): 859-876.
- [3] Schorlemmer D, Gerstenberger M C. RELM Testing Center[J]. *Seismol Res Lett*, 2007, 78: 30-36.
- [4] Molchan G M. Strategies in strong earthquake prediction[J]. *Phys Earth Plane Inter*, 1990, 61(1-2): 84-98.
- [5] Molchan G M. Structure of optimal strategies of earthquake prediction[J]. *Tectonophysics*, 1991, 193: 267-276.
- [6] Molchan G M. Earthquake prediction as a decision making problem[J]. *Pure and Appl Geophys*, 1997, 149: 233-247.
- [7] Molchan G M. Space-time earthquake prediction: the error diagrams[J]. *Pure and Appl Geophys*, 2010, 167: 907-917.
- [8] Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S, et al. Mean field threshold systems and phase dynamics; An application to earthquake fault systems[J]. *Europhys Lett*, 2002, 60(3): 481-487.
- [9] Shen Z K, Jackson D D, kagan Y Y. Implications of geodetic strain rate for future earthquakes, with a five-year forecasts of M^5 earthquakes in Southern California[J]. *Seismol Res Lett*, 2007, 78(1): 116-120.
- [10] Zechar J D, Jordan T H. Testing alarm-based earthquake predictions[J]. *Geophys J Int*, 2008, 172: 715-724.
- [11] Keilis-Borok V I, Soloviev A A (eds). *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction*. Springer-Verlag[M]. In: Berlin-Heidelberg, 2003.
- [12] Kossobokov V G. Earthquake prediction: principles, implementation[J]. *Perspect Comput Seismol*, 2005, 36-1: 3-175.
- [13] Rundle J B, Klein W, Turcotte D L, et al. Precursory seismic activation and critical-point phenomena[J]. *Pure Appl Geophys*, 2000, 157: 2165-2182.
- [14] Rundle J B, Turcotte D L, Shcherbakov R, et al. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems[J]. *Rev Geophys*, 2003, 41(4): 1019, doi: 10.1029/2003RG000135.
- [15] Chen C C, Rundle J B, Holliday J R, et al. The 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake as a typical example of seismic activation and quiescence[J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L22315, doi: 10.1029/2005GL023991.
- [16] Holliday J R, Chen C C, Tiampo K F, et al. A RELM earthquake forecast based on pattern informatics[J]. *Seism Res Lett*, 2007, 78: 87-93.
- [17] 蒋长胜, 吴忠良. 对地震预测的一个统计物理算法在川滇地区的回溯性预测检验[J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(7): 852-861.

Probabilistic Forecasting Method of Long-term and Intermediate-term Seismic Hazard I: Molchan Error Diagram

JIANG Chang-sheng¹, ZHANG Lang-ping², HAN Li-bo¹, LAI Gui-juan¹

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China; 2. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract: The statistical test of long-term and intermediate-term seismic hazard probabilistic forecasting is an important aspect of earthquake forecast/prediction. Using general statistical test method is one of the necessary conditions for promoting earthquake forecast/prediction theory and model accessibility exchange and development. Based on the retrospective forecast results of PI and RI algorithm in the northeastern marginal region of the Qingzang plateau, we try to introduce how to apply the Molchan error diagram to do the statistical test of earthquake probabilistic forecast, and the situation of spatial-box number weighted and seismic rate weighted are considered respectively to calculate the fraction of space-time occupied by alarm. The result shows that the Molchan error diagram can evaluate the probabilistic earthquake forecast model effectively by using the significance level α and the probability gain. Furthermore, the significant different testing results also can be found when different forecast/prediction strategies are employed even if for the same forecast/prediction results.

Key words: Seismic hazard probabilistic forecasting; Statistical test; Molchan error diagram