

毕金孟、蒋长胜,2017,可操作的地震预测(OEF)国际研究动态综述,中国地震,33(1),1~13。

· 研究综述 ·

## 可操作的地震预测(OEF)国际研究动态综述

毕金孟 蒋长胜

中国地震局地球物理研究所,北京市民族大学南路5号 100081

**摘要** 对目前国际上正持续开展的“可操作的地震预测”的研究动态,从主要关注的领域、“概率增益”概念的引入、混合模型研发及其在地震减灾中的应用等方面进行了重点介绍。由于OEF是在全球“地震可预测性合作研究”计划基础上逐步发展起来,具有重要的地震预测模型研发的技术基础以及解决地震减灾决策实际问题的实践基础,因此,相关研究动态和技术思路对我国的地震预测预报工作具有重要的启发和借鉴意义。

**关键词:** 可操作的地震预测 概率增益 混合模型 应急疏散 抗震设防

[文章编号] 1001-4683(2017)01-0001-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

### 0 引言

2009年4月6日意大利拉奎拉 $M_w$ 6.3地震及其引发的“地震学家审判”事件,直接促进了“可操作的地震预测”(Operational Earthquake Forecasting, OEF)的发展和研究(Jordan et al, 2010、2011)。与一般意义上的地震预测预报有所不同,OEF的核心目标是,向公众提供权威的时间相依的地震危险性权威信息。其主要应用在于,指导社会公众对潜在的破坏性地震提前做好防震工作,以实现有效的地震减灾(Jordan et al, 2010、2014)。

自OEF被提出以来,已得到国际地震学家的广泛关注,如2014年6月8~11日在意大利Varenna召开的主题为“Operational Earthquake Forecasting and Decision Making”的会议中,涉及到的与OEF有关的专题包括“地震预测的问题”、“地震短期预测模型的检验”、“可操作的地震预测”、“短期危险向风险的转化”、“低概率预测条件下的决策过程和风险沟通”等。此外,美国地质调查局(USGS)2015年以来召开了一系列与OEF有关的工作会议,2016年美国秋季工作会议(AGU Fall Meeting 2016)中也曾就OEF的相关问题设立专题。

为全面准确地理解和把握国际上关于OEF研究的总体脉络与发展趋势,本文对当前

[收稿日期] 2016-10-20; [修定日期] 2016-12-17

[项目类别] 中国科学院国际合作局对外合作重点项目“‘一带一路’自然灾害风险与综合减灾国际研究计划”、中国地震局“监测预报改革设计研究——地震预测预报20年发展设计”专项联合资助

[作者简介] 毕金孟,男,1989年生,在读硕士研究生,主要从事地震预测研究理论研究。E-mail: jinmengbi@cea-igp.ac.cn

蒋长胜,通讯作者,男,1979年生,博士,研究员,主要从事地震监测预报技术和理论研究。

E-mail: jiangcs@cea-igp.ac.cn

OEF研究的总体思路、涉及到的包括“概率增益”在内的关键技术、构建OEF系统的预测模型基础以及OEF的应用领域等进行了梳理,并试图结合中国地震预测研究的经验进行适度讨论,以期对我国的地震预测预报研究提供参考和借鉴。

## 1 OEF研究的主要关注领域

当前OEF的研究发展,主要体现在面向地震预测的实际应用、强调服务社会公众和面向决策者提供有价值的参考信息等方面,具体包括:

(一)“概率增益”(Probability Gain)等概念的引入成为实现OEF的重要技术基础。作为评判未来地震发生可能性的核心量度工具,一个地区新近发生的地震活动尽管对地震发生率的影响不大,但却可能产生相对于背景地震活动的较高的“概率增益”,使用“概率增益”能显示出地震发生率数量级的变化,更有利于实现地震预测的“可操作性”。例如,利用“传染型余震序列”(ETAS)模型(Ogata,1988、1989、2001;Zhuang,2011)对拉奎拉 $M_w$ 6.3地震的研究表明,地震发生前1天震中大范围内(3600km<sup>2</sup>)的“概率增益”可达5~25,即拉奎拉 $M_w$ 6.3地震发生的可能性要比长期的“参考模型”预测的增大5~25倍(Marzocchi et al,2009)。美国地质调查局(USGS)在加州地区的可操作地震预测中,对“短期地震预测”(Short-Term Earthquake Probability,STEP)模型(Gerstenberger et al,2005)的研究表明,相比于长期的地震预测模型,小地震事件( $M=3\sim 4$ )震中附近的“概率增益”的量级可达 $G=10\sim 100$ (Gerstenberger et al,2007)。利用ETAS模型对美国加州地区和意大利的地震序列的回溯性研究表明,其“概率增益”量级 $G=10\sim 100$ (Helmstetter et al,2006;Console et al,2010)。因此,这种描述相对地震危险性程度的“概率增益”的引入,将对地震减灾带来更为科学的决策参考信息。

(二)全球“地震可预测性合作研究”(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability,CSEP)计划(<http://www.cseptesting.org>)对地震预测模型的系统检验评估为OEF提供了重要的预测模型基础。2006年由美国南加州地震中心(SCEC)发起的CSEP计划(Jordan,2006),经过近10年的发展和完善,已研发了大量的、不同时间尺度的地震预测模型。CSEP计划采用统一的研究区域及地震目录、严格的地震统计检验方法,对研发的地震预测模型进行“竞赛”式的参加回溯性预测检验,以筛选出“优胜”模型并进行前瞻性的预测。由此,CSEP获得的经过系统检验与评估的预测模型,为更具减灾实效的OEF系统建设构建模型提供了可能性。在CSEP计划发展过程中,为消除单一预测模型自身的局限性,采用“扬长避短”的方式试图将基于不同的“前兆”假设的单一预测模型进行融合,形成“混合模型”,并进行预测效能检验。混合模型在提高地震预测能力的同时,已逐渐成为OEF系统建设的主要选择。

(三)重视与抗震设防和应急准备相结合,构建面向实际应用的OEF系统。为实现地震减灾目标,OEF高度重视其在地震应急疏散和抗震设防领域发挥的作用。目前,抗震设防主要基于中长期地震预测以及相应的“基于概率的地震危险性分析”(Probabilistic Seismic Hazard Analysis,PSHA),并以此指导基础建筑的设计规范、抗震设计等。根据中长期地震预测/抗震设防等需求,OEF基于地震危险性概率以及相应的“成本效益分析”(Cost-Benefit Analysis,CBA)方法作出相应的减灾决策。为实现可操作的地震预测,一些研究已开始构建可应用的OEF系统,将普通社会民众和政府决策者作为服务队形,向着可公开、透明、可重

复、可检验的方向发展(Marzocchi et al, 2014)。目前,美国、意大利和新西兰等国家已建立起 OEF 系统,并实现了运行的部分自动化(Jordan et al, 2011)。

## 2 概率增益

### 2.1 “概率增益”的定义与表示

“概率增益”(Probability Gain)之所以在 OEF 研究中被引入,一个重要原因是为解决地震低发生率地区的地震危险性评估问题。对于“概率增益”,地震预测模型给出的在“前兆” $A$  条件下发生地震  $B$  的条件概率  $P(B|A)$

$$P(B|A) = \left[ \frac{P(A|B)}{P(A)} \right] P(B) \quad (1)$$

式中,右侧方括号中的即为“概率增益”(Aki, 1981; McGuire et al, 2005)。此外,基于评价地震预测效能的 Molchan 图表法(Molchan, 1991),还可将“概率增益”具体表示为

$$G = \frac{P(B|A)}{P(B)} = \frac{1 - \nu}{\tau} \quad (2)$$

其中, $\tau$  为异常的时空占有率; $\nu$  为漏报率; $G$  为 Molchan 图表法中  $(0, 1)$  与  $(\tau, \nu)$  连线的斜率。

另外,“概率增益”还可利用  $t$ -test(Student's) 检验,由置信区间内模型  $A$  相对于模型  $B$  的地震信息增益(the Information Gain Per Earthquake, IGPE)来表示(Imoto, 2007)

$$\text{IGPE}(A, B) = \frac{\ln L_B - \ln L_A}{N} \quad (3)$$

式中, $N$  为目标地震的总个数。IGPE 对应的似然函数可由下式计算

$$\ln L = \sum_{m=1}^N \ln \lambda(i_m) - \sum_{i=1}^n \lambda(i) \quad (4)$$

式中, $n$  为离散化的空间网格个数; $m$  为地震事件的序号; $\lambda(i)$  为第  $i$  个网格的预期地震个数。由赤池准则(Akaike Information Criteria, 简称为 AIC)可得(Akaike, 1974)

$$\text{AIC} = -2 \ln L + 2k \quad (5)$$

式中, $k$  为待定拟合参数的数量;AIC 值被用于描述模型对实际数据的适用性,其值越小,表示适用性越好。因此,相应的 IGPE 可表示为

$$\text{IGPE}(A, B) = \frac{\Delta \text{AIC}}{2N} = \frac{\text{AIC}_B - \text{AIC}_A}{2N} \quad (6)$$

由此,“概率增益”为

$$G = \exp[\Delta \text{AIC}/2N] \quad (7)$$

“稳态均匀泊松”(Stationary Uniform Poisson, SUP)模型和“相对强度”(Relative Intensity, RI)模型是在地震预测中常用的参考模型,也是计算其他预测模型的“概率增益”的基础。泊松模型的地震发生率强度表示为

$$\lambda_{\text{SUP}}(x, y, M) = \mu_0(x, y) \beta e^{-\beta(M - M_c)} \quad (8)$$

其中, $\beta = b \ln 10$ ;  $\mu_0$  为背景地震的发生率; $M$  为地震事件的震级; $M_c$  为计算所用的完整性震级。而 RI 模型的地震发生率强度为

$$\lambda_{RI} = \frac{P_i}{P_{\max}} = \frac{N_i}{N_{\max}} \quad (9)$$

## 2.2 关于 OEF 中“概率增益”的主要研究结果

Console 等(2010)利用 ETAS 模型回溯性地研究了意大利地区 1990~2006 年 33 个 5.0 级以上的地震事件,结果表明,ETAS 模型相对于泊松模型的“概率增益”范围为 0.93~32000.00。对于日本地区,ETAS 模型相对于泊松模型的“概率增益”为 973(Zhuang, 2011)。Lombardi 等(2009)将双分支模型(Double Branching Model, DBM)(Marzocchi et al, 2008)应用于意大利 5.5 级以上地震的回溯性预测和检验中,发现其相对于泊松模型的“概率增益”为 1.54。Rhoades 等(2009)对加州地区 1984~2004 年发生的 5.0 级以上地震的回溯性研究表明,“PPE”(Proximity to Past Earthquakes)模型、“EEPAS”(Every Earthquake a Precursor According to Scale)模型、STEP 模型相对于 SUP 模型的“概率增益”依次为 5.31、8.76、10.13。在 95%的置信水平下,Geodetic 模型、Neokinema 模型、“PI”(Pattern Informatics)模型、Kagan 模型、geodetic8.1 模型、geodetic8.5 模型相对于“HKJ”(Helmstetter-Kagan-Jackson)模型,对加州地区 5 年尺度的回溯性检验的“概率增益”(G)依次为 1.77、1.35、1.30、1.22、1.20、1.22(Rhoades et al, 2014)。应力释放模型相对于泊松模型的“概率增益”为 1.11~1.22(Zheng et al, 1994)。此外,一些研究认为,PPE 模型对 SUP 模型的“概率增益”在新西兰、日本、希腊、美国加州分别约为 4.5、1.6、1.6、3.4,EEPAS 模型相对于 SUP 模型的“概率增益”在日本、希腊、美国加州分别为 1.82、3.65、7.69(Rhoades et al, 2005; Console et al, 2006; Rhoades, 2007)。

Shebalin 等(2014)利用“EAST \* EEPAS”模型、EEPAS 模型及 EAST<sub>r</sub> 模型对美国加州地区进行了回溯性检验发现,“EAST \* EEPAS”模型相对于 EEPAS 模型的“概率增益”为 1.65,相对于 EAST<sub>r</sub> 的“概率增益”为 1.05,空间“概率增益”为 1.28,说明这种混合模型具有更强的预测能力。Rhoades 等(2014)研究认为,混合模型“HKJ&Neokinema&PI”和“HKJ&Geodetic&PI”相对于 HKJ 模型在美国加州地区的“概率增益”分别为 1.42、2.20。Rhoades(2013)、Rhoades 等(2015、2016)还对多种混合模型的“概率增益”进行了研究。

Helmstetter 等(2006)在利用 ETES 模型进行短期预测研究中,考虑了最小震级对预测效果尤其是对“概率增益”(G)的影响,当  $M_{\min} = 2$  时,  $G = 11.13$ ;  $M_{\min} = 3$  时,  $G = 11.94$ ;  $M_{\min} = 4$  时,  $G = 8.46$ ;  $M_{\min} = 5$  时,  $G = 4.41$ ;  $M_{\min} = 6$  时,  $G = 2.46$ 。用于长时间尺度的“更新模型”(Renewal Model)(Daley et al, 2004),在时间间隔固定的情况下,参数  $\kappa$  的变化与“概率增益”间存在的对应关系为  $\kappa = 0.2$  时,  $G = 1.9$ ;  $\kappa = 5$  时,  $G = 0.4$ ;  $\kappa = 25$  时,  $G = 1.2$ (Harte et al, 2005)。

## 3 地震预测混合模型

在构建 OEF 的技术系统中,目前一般采用筛选预测效能“最优”的预测模型,利用不同时间尺度或相同时间尺度按照一定的权重系数进行“混合”,然后经过优化设计后得到针对性的“混合模型”(Hybrid Models)。

### 3.1 “STEP&EEPAS&NSHMBG&PPE”混合模型

基于 2011 年新西兰 GNS 科学研讨会上专家的经验总结,McVerry(2012)定义了一种称

为“Expert Elicitation”(EE)的混合模型。EE混合模型是基于之前的一种简单的、非正式的“Average-Maximum”(AVMAX)混合模型发展而来的,主要由时变模型分量、中长期预测模型分量等构成(Gerstenberger et al,2014)。此外,Rhoades等(2016)基于“EE”模型框架还构建了每个时段最优的“LT\_TV\_OPT”混合模型,该模型主要利用检验数据集的形式并考虑了最优的权重参数。

以专家意见为设置依据,“EE”、“AVMAX”混合模型在构建中所使用的模型分量和权重比例为

$$AVMAX = p_1 STEP\_TV + p_2 EEPAS\_OF\_TV + qPPE \quad (10)$$

$$EE = m_1 STEP\_TV + m_2 ETAS\_TV + m_3 EEPAS\_OF\_TV + m_4 EEPAS\_1F\_TV + n_1 NSHMBG\_B\_POLY + n_2 PPE + n_3 PPE\_FROM\_1840 + n_4 PPE\_DECLUS \quad (11)$$

其中,  $p_i, m_i$  为时变模型分量;  $q_i, n_i$  为长期模型分量;  $p_1, p_2$  分别为 0.5、0.5;  $q$  为 1;  $m_1, m_2, m_3, m_4$  分别为 0.36、0.19、0.24、0.21;  $n_1, n_2, n_3, n_4$  分别为 0.58、0.13、0.16、0.12。相应的“LT\_TV\_OPT”模型的 LT(Long-Term)和 TV(Time-Varying)分量为

$$LT = a_1 PPE + a_2 PPE\_DECLUS + a_3 NSHMBG\_B\_POLY + a_4 SUP + a_5 PPE\_1950 \quad (12)$$

$$TV = b_1 STEP\_TV + b_2 ETAS\_TV + b_3 EEPAS\_OF\_TV + b_4 EEPAS\_1F\_TV \quad (13)$$

其中,  $\sum_{i=1}^5 a_i = 1, \sum_{i=1}^4 b_i = 1$ 。利用“Downhill Simplex”方法(Nelder et al,1965)得到可同时使 2 个分量最优的最大似然值,其所对应的权重参数即可用于模型构建。

Rhoades等(2016)对混合模型(“AVMAX”“EE”“LT\_TV\_OPT”)以及单一模型,分别对新西兰 CSEP 计划测试区(New Zealand Testing Region)进行了回溯性的对比检验,结果表明,总体上混合模型比单一模型表现更优。

### 3.2 SMA 混合模型

Marzocchi等(2014)将 ETAS 模型(Lombardi et al,2010)、ETES 模型(Falcone et al,2010)和 STEP 模型(Woessner et al,2010)等按不同的权重组合,构建了意大利地区地震预测的 OEF 技术系统。Marzocchi等(2012)将 3 种模型组合后的模型称为“平均得分模型”(Score Model Averaging,SMA),其相应的地震发生率  $\lambda_{ij}$  为

$$\lambda_{ij} = \sum_{n=1}^3 \lambda_{ij}^{(n)} \omega_n \quad (14)$$

其中,  $i$  为第  $i$  个空间网格;  $j$  为第  $j$  个震级面元;  $n$  代表了第  $n$  个模型;  $\omega_n$  为权重,可由下式计算得到

$$\omega_n = 1/L_n \quad (15)$$

其中,  $L_n$  为第  $n$  个模型预测时间开始之前的累积空间与时间的对数似然得分。

目前,SMA 混合模型已用于意大利地区的 OEF 技术系统中,Woo等(2013)也对 SMA 模型的应用进行了探讨。

### 3.3 “WGCEP-UCERF2&ETAS”混合模型

美国“加州地震概率工作组”(Working Group on California Earthquake Probabilities,WGCEP)2014 年发展了“统一的加州地震破裂预测(第 3 版)”(the Uniform California Earthquake Rupture Forecast,UCERF 3)模型,其将长期预测模型 WGCEP-UCERF2 与短期预

测模型 ETAS 进行融合,解决了由时间尺度的不同所造成的对地震发生率预测的不一致问题。时间相依的 UCERF3 模型(Field et al,2014)也应用在了 USGS 发布的 2014 年“国家地震危险性分布图”(Petersen et al,2014)中。同时,基于弹性回跳理论的长期尺度时间相依的地震预测模型也得到发展(Field et al,2015)。

### 3.4 “EAST&EPPAS”混合模型

Shebalin 等(2014)将一种利用余震早期统计特征的“地震警报短期预测”(EAST)模型(Shebalin et al,2011)与基于前兆活动性增强的中期地震预测模型 EEPAS(Rhoades et al,2004、2005、2006、2011;Console et al,2006;Rhoades,2007)进行融合,得到 2 种混合模型,即“EAST \* EEPAS”和“EAST<sub>R</sub>+EEPAS”。其中,EAST<sub>R</sub>为 EAST 模型与 RI 模型迭代混合而成,“EAST \* EEPAS”模型由 EAST 模型与 EEPAS 模型迭代混合而成,“EAST<sub>R</sub>+EEPAS”模型由 EAST<sub>R</sub>模型和 EEPAS 模型平均混合而成。此外,用 EAST、EEPAS、“EAST \* EEPAS”和“EAST<sub>R</sub>+EEPAS”等 4 种模型对美国加州地区进行了对比检验,结果表明,混合模型“EAST \* EEPAS”优于混合模型“EAST<sub>R</sub>+EEPAS”,总体上,全部的混合模型均远优于所有的单一模型。

### 3.5 “STEP&EEPAS&PPE”混合模型

Rhoades 等(2009)试图将中长期尺度预测的 EEPAS 模型和 PPE 模型(Jackson et al,1999;Rhoades et al,2004)融合到 STEP 短期预测模型中。根据不同的融合方式,STEP 模型与 EEPAS 模型组合成 SE1、SE2、SE3 等 3 种混合模型,而 STEP 模型与 PPE 模型组合成 SP1 和 SP2 两种混合模型。定义各模型的地震发生率强度函数依次为

$$\lambda_{\text{STEP}}(t, M, x, y) = \max[\lambda_{\text{CLUST}}(t, M, x, y), \lambda_{\text{STEP}}(t, M, x, y)] \quad (16)$$

$$\lambda_{\text{SE1}}(t, M, x, y) = \lambda_{\text{CLUST}}(t, M, x, y) + w\lambda_{\text{EEPAS}}(t, M, x, y) \quad (17)$$

$$\lambda_{\text{SE2}}(t, M, x, y) = (1 - r)\lambda_{\text{STEP}}(t, M, x, y) + r\lambda_{\text{EEPAS}}(t, M, x, y) \quad (18)$$

$$\lambda_{\text{SP1}}(t, M, x, y) = \lambda_{\text{CLUST}}(t, M, x, y) + u\lambda_{\text{PPE}}(t, M, x, y) \quad (19)$$

$$\lambda_{\text{SP2}}(t, M, x, y) = (1 - t)\lambda_{\text{STEP}}(t, M, x, y) + t\lambda_{\text{PPE}}(t, M, x, y) \quad (20)$$

其中,  $(w, r, u, t) \in [0, 1]$ 。

$$\lambda_{\text{SE3}}(t, M, x, y) = \lambda_{\text{CLUST}}(t, M, x, y) + P(M)\lambda_{\text{EEPAS}}(t, M, x, y) \quad (21)$$

其中,  $P(M)$  为震级大小为  $M$  的地震所对应的概率。

Rhoades 等(2009)利用 SE1、SE2、SE3、SP1、SP2 混合模型以及 SUP、STEP、EEPAS、PPE 等 4 个单一模型,对美国加州地区 1984~2004 年发生的 5.0 级以上地震进行了回溯性预测。结果表明,相应的 5 个混合模型均优于单一模型,平均“概率增益”高出单一模型 0.2。对混合模型之间的比较显示,SE1 优于 SP1,SE2 优于 SP2,SE1 和 SE3 相差不多。目前,混合模型 SE1、SE2、SP1、SP2 已被提交给 CSEP 计划的美国加州测试区(SCEC Testing Center),用于未来 1 天、3 个月尺度的短期和中期预测检验。

### 3.6 “Janus”混合模型

Rhoades(2013)将 ETAS(Ogata,1988、1989、2001;Zhuang,2011)、EEPAS、PPE 等 3 个模型按照一定的比例关系进行融合混合,并称之为“Janus”模型。“Janus”模型目前已在 CSEP 计划中的新西兰和美国加州测试区进行检验和应用。

对于“Janus”模型中的 ETAS 模型,其发生率的强度函数可表示为

$$\lambda_{\text{ETAS}}(t, M, x, y) = \nu \lambda_{\text{PPE}}(t, M, x, y) + \lambda_{\text{AS}}(t, M, x, y) \quad (22)$$

其中,  $\nu$  为常数,  $0 \leq \nu < 1$ ;  $\lambda_{\text{PPE}}$  为 PPE 模型的发生率强度;  $\lambda_{\text{AS}}$  为余震分量。而 EEPAS 模型的发生率强度可表示为

$$\lambda_{\text{EEPAS}}(t, M, x, y) = \mu \lambda_{\text{PPE}}(t, M, x, y) + \lambda_{\psi}(t, M, x, y) \quad (23)$$

其中,  $\mu$  为常数 ( $0 \leq \mu < 1$ );  $\lambda_{\psi}$  为模型的时变分量 (Evison et al, 2002, 2004)。由此, “Janus” 混合模型的地震发生率的强度函数为

$$\lambda_{\text{JANUS}} = \frac{q}{1 - \nu} \lambda_{\text{AS}} + (1 - q) \lambda_{\text{EEPAS}} \quad (24)$$

其中,  $q$  为最优时的常数,  $0 \leq q \leq 1$ 。将式 (23)、(24) 带入得

$$\lambda_{\text{JANUS}} = \frac{q}{1 - \nu} \lambda_{\text{AS}} + (1 - q) \mu \lambda_{\text{PPE}} + (1 - q) \lambda_{\psi} \quad (25)$$

由此可见, 3 个模型 ETAS、PPE 和 EEPAS 的系数分别为  $\frac{q}{1 - \nu}$ 、 $(1 - q)\mu$ 、 $(1 - q)$ , 它们可作为构成混合模型的权重系数。Rhoades (2013) 的研究表明, “Janus” 模型比表现最好的单一模型的地震信息增益 (IGPE) 高 0.2~0.5。

### 3.7 “STEP&C-RS” 混合模型

Stacy 等 (2013) 将基于早期余震序列统计预测的 “STEP” 模型 (Gerstenberger et al, 2005) 与基于主震引起库仑应力变化的 “C-RS” 物理学模型 (Dieterich, 1994; Parsons et al, 2000; Toda et al, 2005) 融合, 并提出了 STEP C1 和 STEP C2 两种混合模型进行余震短期预测的尝试。对上述 2 种混合模型, 利用 2010~2011 年新西兰 Canterbury 地区 4 次地震的余震序列前 10 天的数据预测未来 100 天  $M \geq 4$  地震的发生率, 并对其进行了回溯性以及 “伪前瞻性” (pseudo-prospective) 检验。结果表明, 将物理约束的库仑应力的变化考虑进去时, 统计预测模型的预测能力将得到提升, 同时也发现数据质量在地震预测过程中也具有极其重要的作用。这与之前混合模型 “Coulomb&ETAS” (Bach et al, 2012) 应用于预测 1992 年 Landers 地震、1999 年 Hector Mine 地震、2004 年 Parkfield 地震得到的余震序列的预测效果一致。

### 3.8 “Multiplicative” 混合模型

Rhoades 等 (2014) 对 2 个模型及 3 个模型的相互混合进行了研究。2 个混合模型以 HKJ 模型 (Helmstetter et al, 2007) 为基础, 分别与 “ALM” (Asperity-based Likelihood Model) (Wiemer et al, 2007)、PI 算法 (Holliday et al, 2007)、“大地测量模型” (Geodetic Model) (Shen et al, 2007)、Neokinema 模型 (Bird et al, 2007)、Ward 提出的 5 个不同的模型 (Ward, 2007) 以及 Ebel 等 (2007) 提出的 2 个模型进行混合。为构建合适的多元混合模型, Rhoades 等 (2014) 利用 HKJ 模型、Neokinema 模型以及 PI 模型组成混合模型应用于美国加州地区, 利用 HKJ 模型、“大地测量模型” 以及 PI 模型组成混合模型应用于美国南加州地区。结果显示, 混合模型产生的地震增益明显优于单一模型。

将预测时间尺度的大小作为权重设置的依据, Rhoades 等 (2015) 以 HBG (National Seismic Hazard Model Background)、PPE、PMF (Proximity to Mapped Faults)、PPI (Proximity to Plate Interface)、FLT (Fault in cell) 等 5 个模型为基础进行相互混合, 得到 26 个混合模型。用混合模型及其 5 个单一模型分别对 1987~2006、2007~2014 年的 5 级以上地震进行了回

溯性预测检验,结果表明,混合模型有助于改善不同时间尺度的地震预测效果。

## 4 OEF 的应用效果

在总结以往直接根据地震预测结果进行地震减灾决策的经验的基础上,目前在 OEF 研究中,人们更多地关注如何基于地震预测结果进行地震灾害风险评估,以及为可能的地震灾害应急疏散提供可操作的科学决策参考信息。

### 4.1 在应急疏散中的研究与应用

根据 2009 年拉奎拉  $M_w$  6.3 地震对应应急疏散的现实需求, van Stiphout 等(2010)提出了一种将地震“概率增益”与应急疏散的“成本效益分析”(Cost-Benefit Analysis, CBA)相结合的 OEF 方法,以期用于是否需要疏散行动的决策中。其中涉及的 CBA 已在气象预测(Katz et al, 1997)、地震后的建筑改造(Smyth et al, 2004)、雪崩风险疏散(Fuchs et al, 2007)、火山风险疏散(Marzocchi et al, 2007、2009)等众多领域中得到应用。

这种将地震“概率增益”与应急疏散的 CBA 相结合的方法的原理是,设定 1 个可接受风险的最优的概率阈值  $R$ 、疏散过程所需费用  $C$  以及地震发生造成的可能损失  $L$ , 当  $R > C/L$  时进行疏散行动是有利的。van Stiphout 等(2010)在意大利拉奎拉地区根据抗震能力将房屋分为 A(30%)、B(30%)、C(30%)和 D(10%)等 4 类, A 类为抗震性能最弱的,同时假设疏散成本每人每天分别为 500、50、20 美元等 3 种不同的情况下,发现 CBA 阈值曲线都大于损失概率曲线。对最优疏散持续时间的研究表明,疏散行动很少是“划算”的,未来的疏散目标应集中在抗震性能和场地条件较差的地方,并且需要通过发展更优的统计、物理模型来提升“概率增益”,才能更有效地利用 CBA 开展地震应急疏散任务。

同样基于上述的地震“概率增益”与应急疏散相结合的方法, Herrmann 等(2016)模拟了 1356 年 Basel 地震,并通过对模拟地震目录的分析,进一步探索地震灾害决策与信息服务。利用该方法对地震灾害进行预测,特别是对人员伤亡情况进行量化研究时发现,对于 5.5 级的前震或 6.6 级的主震,在市中心进行疏散是比较合理的。Gulia 等(2016)将震前  $b$  值变化引入短期地震预测模型中发现,2009 年意大利拉奎拉地震因  $b$  值的减小将会增加额外 50 倍的发震概率,当转变为量化的风险时,这些变化超过了短期疏散成本效益的阈值。因此,在对概率性的时间相依的危险性进行分析时,时间相依的  $b$  值变化或许能成为未来研究的新亮点。

### 4.2 抗震设防

目前, OEF 应用于地震长期预测的重要性已得到广泛认可。Jordan(2013)指出,以地震长期预测为输入信息制定地震危险性分布图,指导建筑设计规范、抗震设计以及其他的减轻灾害的工程实践,也许是目前确保地震安全所能采取的最有效方式。

在抗震设防领域的地震长期预测研究中,目前国际上大多数国家采用的是基于概率的地震危险性分析(PSHA)方法(Cornell, 1968)。即通过建立地震概率模型,根据历史地震烈度等资料以及强地震动记录确定与超越概率水平相对应的地震动参数(PGA、PGV 等),并利用超越概率和地震动参数给出地震危险性曲线,在“最佳”的时间尺度以及超越概率下获得所需的地震动参数。然后,根据统计分析方法来确定地震烈度与地震动参数间的相应关系(Wald et al, 1999a; Shabestari et al, 2001; Kuwata et al, 2002; Atkinson et al, 2015; Martin et



al, 2015)。在 PSHA 方法中,当  $t$  年内潜在震源点的地震动参数  $Y$  超出先验值  $y$  的超越概率为  $P_t(Y > y)$  时,则有

$$P_t(Y > y) = 1 - \exp\left\{-t \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{n_j} v_{kj} \omega_{kij} \int_{M_{j-1}}^{M_j} P[Y > y | E_{ki}(M)] f_{ki}(M) dM\right\} \quad (26)$$

其中,  $P[Y > y | E_{ki}(M)]$  为地震带  $k$  上潜在震源区  $i$  内至少发生  $M$  级地震时所引发的地震动参数  $Y$  超过  $y$  的条件概率;  $f_{ki}(M)$  为概率密度函数;  $N$  为地震带个数;  $n_k$  为地震带  $k$  上的潜在震源区的个数;  $n_i$  为震源区  $i$  内的震级分档;  $v_{kj}$  为第  $i$  个潜在震源区的第  $j$  个震级档的年平均发生率;  $\omega_{kij}$  为空间分布函数。

地震烈度通常采用修正过的 Mercalli 烈度 (MMI) (Wood et al, 1931)、根据地震动参数运用统计回归分析方法得到 (Wald et al, 1999a), 即烈度 MMI 利用地面峰值加速度 (PGA; 单位  $\text{cm/s}^2$ ) 和地面峰值速度 (PGV; 单位  $\text{cm/s}$ ) 通过下式得到

$$\text{MMI} = 3.66 \lg(\text{PGA}) - 1.66 \quad (27)$$

$$\text{MMI} = 3.47 \lg(\text{PGV}) + 2.35 \quad (28)$$

Wald 等 (1999b) 研究发现, 当  $\text{MMI} \leq \text{V}$  度时, 可利用式 (27) 估算烈度; 当  $\text{MMI} \geq \text{VII}$  度时, 利用式 (28) 估算烈度; 当  $\text{V}$  度  $\leq \text{MMI} \leq \text{VII}$  度时, 利用式 (27)、(28) 平均权重估算烈度, 往往能获得最佳的应用效果。2 个参数结合生成的地震烈度图已在世界范围内得到广泛应用, 如美国和意大利等国家在计算地震动预测的“仪器烈度”时, 就综合利用了地面加速度峰值 (PGA) 和地面速度峰值 (PGV) 2 个参数 (Wald et al, 1999a; Michelini et al, 2008; Lauciani et al, 2012; Marzocchi et al, 2014)。

## 5 结论和讨论

针对国际上正在实施的“可操作的地震预测”(OEF) 研究, 本文从 OEF 主要关注的领域、“概率增益”概念的引入、混合模型研发、在地震减灾中的应用等方面介绍了相关研究动态及主要技术内涵。

尽管 OEF 研究的出发点始自 2009 年意大利拉奎拉地震, 但其研究基础和技术却是在已开展长达 10 年的 CSEP 计划进行的地震预测模型研发和严格检验的基础上发展而来的。正是由于 CSEP 计划研发的大量的、量化的地震预测模型以及对地震可预测性的探索, 使得 OEF 研究以及相应的系统建设具备了可行性。这种从 CSEP 到 OEF 的扎实推进地震预测研究的发展脉络, 本身就值得思考和借鉴。中国大规模地震预测预报工作自 1966 年邢台地震后开始, 至今已半个世纪, 获得了大量的多时间尺度的“向前”预测实践经验。

我国地震预测预报体系的服务产品是以短临预测预报意见、中期尺度的“地震趋势预测”和“年度重点地震危险区”以及长期尺度的“重点监视防御区”等为主。除“重点监视防御区”外, 其他预测预报服务产品是以预测意见为最终产出形式。参照 OEF 的应用, 我国目前这种仅仅给出地震危险性评估意见的产出方式, 未能与地震应急疏散决策与准备等环节链接, 可能会给减灾决策带来难度。参照 OEF 的发展脉络、关键技术和应用领域, 我们认为其对中国相关工作的可能的启示为: 首先, OEF 考虑了“概率增益”的概念, 解决了在较低的背景地震发生率条件下的地震危险性评估难题, 显著降低了地震减灾决策的不确定性。其次, 基于 CSEP 计划检验评估的单一模型, 采用进行预测效能优化组合后的混合模型, 在

客观上实现了预测效能的提升,为实现地震预测的可操作性提供了可能,这一重要的技术基础值得借鉴。最后,在地震预测服务产品的应用以及面向抗震设计、工程减灾和应急救援准备等技术方面可为地震减灾的科学决策提供重要的科学基础。

**致谢:** 本文得到国际“地震可预测性合作研究”(CSEP)计划中国检验中心(CN CSEP Testing Center)筹备工作组指导。博士研究生张盛峰、硕士研究生解析、硕士研究生王亚文在本文的资料收集给予了帮助,在此一并表示感谢。

### 参考文献

- Akaike H, 1974, A new look at the statistical model identification, *IEEE Trans Auto Contr*, **19**(6), 716~723.
- Aki K, 1981, A probabilistic synthesis of precursory phenomena, in *earthquake prediction: An international review*, Washington, D C: Am Geophys, 566~574.
- Atkinson G M, Hassani B, Singh A, et al, 2015, Estimation of moment magnitude and stress parameter from ShakeMap Ground-Motion parameters, *Bull Seism Soc Am*, **105**(5), 2572~2588, doi:10.1785/0120150119.
- Bach C, Hainzl S, 2012, Improving empirical aftershock modeling based on additional source information, *J Geophys Res*, **117**, B04312. doi:10.1029/2011JB008901.
- Bird P, Liu Z, 2007, Seismic hazard inferred from tectonics; California, *Seism Res Lett*, **78**, 37~48, doi:10.1785/gssrl.78.1.37.
- Console R, Murru M, Falcone G, 2010, Probability gains of an epidemic-type aftershock sequence model in retrospective forecasting of  $M \geq 5$  earthquakes in Italy, *J Seism*, **14**, 9~26, doi:10.1007/s10950-009-9161-3.
- Console R, Rhoades D A, Murru M, et al, 2006, Comparative performance of time-invariant, long-range and short-range forecasting models on the earthquake catalogue of Greece, *J Geophys Res*, **111**, B09304, doi:10.1029/2005JB004113.
- Cornell C A, 1968, Engineering seismic risk analysis, *Bull Seism Soc Am*, **58**(5), 1583~1606.
- Daley D J, Vere-Jones D, 2004, Scoring probability forecasts for point processes: The entropy score and information gain, *J Appl Proba*, **41A**, 297~312.
- Dieterich J H, 1994, A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *J Geophys Res*, **99**, 2601~2618.
- Ebel J E, Chambers D W, Kafka A L, et al, 2007, Non-Poissonian earthquake clustering and the hidden Markov model as bases for earthquake forecasting in California, *Seism Res Lett*, **78**, 57~65, doi:10.1785/gssrl.78.1.57.
- Evison F F, Rhoades D A, 2002, Precursory scale increase and long-term seismogenesis in California and northern Mexico, *Ann Geophys*, **45**, 479~495.
- Evison F F, Rhoades D A, 2004, Demarcation and scaling of long-term seismogenesis, *Pure Appl Geophys*, **161**, 21~45, doi:10.1007/s00024-003-2435-8.
- Falcone G, Console R, Murru M, 2010, Short-term and long-term earthquake occurrence models for Italy: ETES, ERS and LTST, *Ann Geophys*, **53**(3), 41~50, doi:10.4401/ag-4760.
- Field E H, Arrowsmith R J, Biasi G P, et al, 2014, Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version3 (UCERF3)—The time-independent model, *Bull Seism Soc Am*, **104**(3), 1122~1180, doi:10.1785/0120130164.
- Field E H, Biasi G P, Bird P, et al, 2015, Long-term Time-dependent probabilities for the third Uniform California Earthquake Rupture Forecast(UCERF3), *Bull Seism Soc Am*, **105**(2A), 511~543, doi:10.1785/0120140093.
- Fuchs S, Thoni M, McAlpin M C, et al, 2007, Avalanche hazard mitigation strategies assessed by cost effectiveness analyses and cost benefit analyses—Evidence from Davos, Switzerland, *Nat Hazards*, **41**, 113~129, doi:10.1007/s11069-006-9031-z.
- Gerstenberger M C, Jones L M, Wiemer S, 2007, Short-term aftershock probabilities: case studies in California, *Seism Res Lett*, **78**, 66~77, doi:10.1785/gssrl.78.1.66; <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/step/>.
- Gerstenberger M C, McVerry G H, Rhoades D A, et al, 2014, Seismic hazard modeling for the recovery of Christchurch, New Zealand, *Earthq Spectra*, **30**(1), 17~29.

- Gerstenberger M C, Wiemer S, Jones L M, et al, 2005, Real-time forecasts of tomorrow's earthquakes in California, *Nature*, **435**, 328~331.
- Gulia L, Tormann T, Wiemer S, et al, 2016, Short-term probabilistic earthquake risk assessment considering time-dependent  $b$  values, *Geophys Res Lett*, **43**, 1100~1108, doi: 10.1002/2015GL066686.
- Harte D, Vere-Jones D, 2005, The entropy score and its uses in earthquake forecasting, *Pure Appl Geophys*, **162** (2005), 1229~1253, doi: 10.1007/s00024-004-2667-2.
- Helmstetter A, Kagan Y Y, Jackson D D, 2006, Comparison of short-term and time-independent earthquake forecast models for southern California, *Bull Seism Soc Am*, **96**, 90~106, doi: 10.1785/0120050067.230.
- Helmstetter A, Kagan Y Y, Jackson D D, 2007, High-resolution time-independent grid-based forecast for  $M \geq 5$  earthquakes in California, *Seism Res Lett*, **78**, 78~86, doi: 10.1785/gssrl.78.1.78.
- Herrmann M, Zechar J D, Wiemer S, 2016, Communicating time-varying seismic risk during an Earthquake Sequence, *Seism Res Lett*, **87** (2), 1~12.
- Holliday J R, Chen C C, Tiampo K F, et al, 2007, A RELM earthquake forecast based on pattern informatics, *Seism Res Lett*, **78**, 87~93, doi: 10.1785/gssrl.78.1.87.
- Imoto M, 2007, Information gain of a model based on multidisciplinary observations with correlations, *J Geophys Res*, **112**, B05306, doi: 10.1029/2006JB004662.
- Jackson D D, Kagan Y Y, 1999, Testable earthquake forecasts for 1999, *Seism Res Lett*, **70** (4), 393~403.
- Jordan T H, 2006, Earthquake predictability, brick by brick, *Seism Res Lett*, **77** (1), 3~6.
- Jordan T H, 2013, Lessons of L'Aquila for operational earthquake forecasting, *Seism Res Lett*, **84**, 4~7, doi: 10.1785/0220120167.
- Jordan T H, Chen Y T, Gasparini P, et al, 2011, Operational earthquake forecasting: State of knowledge and guidelines for implementation, *Ann Geophys*, **54** (4), 315~391.
- Jordan T H, Jones L M, 2010, Operational earthquake forecasting: Some thoughts on why and how, *Seism Res Lett*, **81** (4), 571~574.
- Jordan T H, Marzocchi W, Michael A J, et al, 2014, Operational earthquake forecasting can enhance earthquake preparedness, *Seism Res Lett*, **85** (5), 955~959.
- Katz R W, Murphy A H, 1997, Forecast value: Prototype decision making models, in *economic value of weather and climate forecasts*, 183~218, Cambridge: Cambridge University Press.
- Kuwata Y, Takada S, 2002, Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, *J Nat Dis Sci*, **24** (1), 35~42.
- Lauciani V, Faenza L, Michelini A, 2012, ShakeMaps during the Emilia sequence, *Ann Geophys*, **55** (4), 631~637.
- Lombardi A M, Marzocchi W, 2009, Double branching model to forecast the next  $M \geq 5.5$  earthquakes in Italy, *Tectonophysics*, **475**, 514~523, doi: 10.1016/j.tecto.2009.06.014.
- Lombardi A M, Marzocchi W, 2010, The ETAS model for daily forecasting of Italian seismicity in the CSEP experiment, *Ann Geophys*, **53** (3), 155~164.
- Martin S S, Hough S E, Hung C, 2015, Ground motions from the 2015  $M_w$  7.8 Gorkha, Nepal, earthquake constrained by a detailed assessment of macroseismic data, *Seism Res Lett*, **86** (6), 1524~1532, doi: 10.1785/0220150138.
- Marzocchi W, Jordan T H, 2014, Testing for ontological errors in probabilistic forecasting models of natural systems, *PNAS*, **111** (33), 11973~11978, doi: 10.1073/pnas.1410183111.
- Marzocchi W, Lombardi A M, 2008, A double branching model for earthquake occurrence, *J Geophys Res*, **113**, B08317, doi: 10.1029/2007JB005472.246.
- Marzocchi W, Lombardi A M, 2009, Real-time forecasting following a damaging earthquake, *Geophys Res Lett*, **36**, L21302, doi: 10.1029/2009GL040233.
- Marzocchi W, Lombardi A M, Casarotti E, 2014, The establishment of an operational earthquake forecasting system in Italy, *Seism Res Lett*, **85** (5), 961~969.
- Marzocchi W, Woo G, 2007, Probabilistic eruption forecasting and the call for an evacuation, *Geophys Res Lett*, **34**, L22310, doi: 10.1029/2007GL031922.
- Marzocchi W, Woo G, 2009, Principles of volcanic risk metrics: Theory and the case study of Mount Vesuvius and Campi Flegrei,

- Italy, *J Geophys Res*, **96**, B03213, doi:10.1029/2008JB005908.
- Marzocchi W, Zechar J D, Jordan T H, 2012, Bayesian forecast evaluation and ensemble earthquake forecasting, *Bull Seism Soc Am*, **102**, 2475 ~ 2585.
- McGuire J J, Boettcher M S, Jordan T H, 2005, Foreshock sequences and short-term earthquake predictability on East Pacific Rise transform faults, *Nature*, **434**( 7032 ), 457 ~ 461.
- McVerry F, 2012, New Zealand national seismic hazard model: Looking into the future after the Christchurch earthquakes, *Dams Resil*, 29 ~ 38.
- Michellini A, Faenza L, Lauciani V, et al, 2008, ShakeMap implementation in Italy, *Seism Res Lett*, **79**, 689 ~ 698.
- Molchan G M, 1991, Structure of optimal strategies in earthquake prediction, *Tectonophys*, **193**, 267 ~ 276.
- Nelder J A, Mead R, 1965, Asimplex method for function minimization, *Comput J*, **7**, 308 ~ 313.
- Ogata Y, 1988, Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J Amer Statist Assoc*, **83**, 9 ~ 27.
- Ogata Y, 1989, Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis, *Tectonophys*, **169**, 159 ~ 174.
- Ogata Y, 2001, Increased probability of large earthquakes near aftershock regions with relative quiescence, *J Geophys Res*, **106**, 8729 ~ 8744.
- Parsons T, Toda S, Stein R S, et al, 2000, Heightened odds of large earthquakes near Istanbul; an interaction-based probability calculation, *Science*, **288**, 661 ~ 665.
- Petersen M D, Moschetti M P, Powers P M, et al, 2014, Documentation for the 2014 update of the United States national seismic hazard maps, USGS Administrative Report IP-051952.
- Rhoades D A, 2007, Application of the EEPAS model to forecasting earthquakes of moderate magnitude in southern California, *Seism Res Lett*, **78**( 1 ), 110 ~ 115.
- Rhoades D A, 2013, Mixture models for improved earthquake forecasting at short-to-medium time horizons, *Bull Seism Soc Am*, **103**( 4 ), 2203 ~ 2215, doi:10.1785/0120120233.
- Rhoades D A, Christophersen A, Gerstenberger M, 2015, Multiplicative earthquake likelihood models based on fault and earthquake data, *Bull Seism Soc Am*, **105**( 6 ), 1 ~ 14, doi:10.1785/0120150080.
- Rhoades D A, Evison F F, 2004, Long-range earthquake forecasting with every earthquake a precursor according to scale, *Pure Appl Geophys*, **161**( 1 ), 47 ~ 72.
- Rhoades D A, Evison F F, 2005, Test of the EEPAS forecasting model on the Japan earthquake catalogue, *Pure Appl Geophys*, **162**, 1271 ~ 1290.
- Rhoades D A, Evison F F, 2006, The EEPAS forecasting model and the probability of moderate-to-large earthquakes in central Japan, *Tectonophys*, **417**, 119 ~ 130.
- Rhoades D A, Gerstenberger M C, 2009, Mixture models for improved short-term earthquake forecasting, *Bull Seism Soc Am*, **99**( 2A ), 636 ~ 646, doi:10.1785/0120080063.
- Rhoades D A, Gerstenberger M C, Christophersen A, et al, 2014, Regional earthquake likelihood models II: Information gains of multiplicative hybrids, *Bull Seism Soc Am*, **104**( 6 ), 3072 ~ 3083, doi:10.1785/0120140035.
- Rhoades D A, Liukis M, Christophersen A, 2016, Retrospective tests of hybrid operational earthquake forecasting models for Canterbury, *Geophys J Int*, **204**, 440 ~ 456.
- Rhoades D A, Robinson R, Gerstenberger M C, 2011, Long-range predictability in physics-based synthetic earthquake catalogues, *Geophys J Int*, **185**, 1037 ~ 1048, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.04993.x.
- Shabestari K T, Yamazaki F, 2001, A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records, *Earthq Spectra*, **17**( 4 ), 711 ~ 723.
- Shebalin P N C, Narteau J D, Zechar J D, et al, 2014, Combining earthquake forecasts using differential probability gains, *Earth Planets Space*, **66**, 37, doi:10.1186/1880-5981-66-37.
- Shebalin P, Narteau C, Holschneider M, et al, 2011, Short-term earthquake forecasting using early aftershock statistics, *Bull Seism Soc Am*, **101**, 297 ~ 312, doi:10.1785/0120100119.
- Shen Z K, Jackson D D, Kagan Y Y, 2007, Implications of geodetic strain rate for future earthquakes, with a five-year forecast of

- $M \geq 5$  earthquakes in southern California, *Seism Res Lett*, **78**, 116~120, doi:10.1785/gssrl.78.1.116.
- Smyth A W, Altay G, Deodatis G, et al, 2004, Probabilistic benefit-cost analysis for earthquake damage mitigation: Evaluating measures for apartment houses in Turkey, *Earthq Spectra*, **20**(1), 171~203, doi:10.1193/1.1649937.
- Stacy S, Gerstenberger M, Williams C, et al, 2013, A new hybrid Coulomb/statistical model for forecasting aftershock rates, *Geophys J Int*, **196**(2), 918~923.
- Toda S, Stein R S, Richards-Dinger K, et al, 2005, Forecasting the evolution of seismicity in southern California; animations built on earthquake stress transfer, *J Geophys Res*, **110**, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.
- van Stiphout T, Wiemer S, Marzocchi W, 2010, Are short-term evacuations warranted? Case of the 2009 L'Aquila earthquake, *Geophys Res Lett*, **37**(6), 1~5, doi:10.1029/2009GL042352.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, et al, 1999a, Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity and modified Mercalli intensity in California, *Earthq Spectra*, **15**, 557~564.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, et al, 1999b, Trinet "ShakeMaps": Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California, *Earthq Spectra*, **15**, 537~556.
- Ward S N, 2007, Methods for evaluating earthquake potential and likelihood in and around California, *Seism Res Lett*, **78**, 121~133, doi:10.1785/gssrl.78.1.121.
- Wiemer S, Schorlemmer D, 2007, ALM: An asperity-based likelihood model for California, *Seism Res Lett*, **78**, 134~140, doi:10.1785/gssrl.78.1.134.
- Woessner J, Christophersen A, Zechar J D, et al, 2010, Building self-consistent short-term earthquake probability (STEP) models: Improved strategies and calibration procedures, *Ann Geophys*, **53**, 141~154.
- Woo G, Marzocchi W, 2013, Operational earthquake forecasting and decision making in early warning for geological disasters—scientific methods and current practice, Berlin, Germany: Springer, ISBN: 978-3-642-12232-3.
- Wood H O, Neumann F, 1931, Modified Mercalli intensity scale of 1931, *Bull Seism Soc Am*, **21**, 277~283.
- Zheng X, Vere-Jones D, 1994, Further applications of the stress release model to historical earthquake data, *Tectonophys*, **229**, 101~121.
- Zhuang J C, 2011, Next-day earthquake forecasts for the Japan region generated by the ETAS model, *Earth Planets Space*, **63**, 207~216.

## A review on the international research of the Operational Earthquake Forecasting(OEF)

*Bi Jinneng Jiang Changsheng*

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** In this paper, the research progress of the Operational Earthquake Forecasting(OEF) is introduced from the major areas of probability gain, hybrid model development, and application in earthquake disaster reduction. Because the OEF is developed on the basis of the global Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability(CSEP) project, it has very important technical foundation for earthquake forecast modeling and the practical foundation for solving the actual problems in earthquake preparedness and disaster mitigation. The related research and its technical connotation have important inspirational and referential significance for earthquake forecasting/prediction.

**Key words:** Operational earthquake forecasting; Probability gain; Hybrid model; Emergency evacuation; Seismic fortification