

对 SQIP 方法数据处理部分的尝试性改进的研究^{*}

许晓庆^{1,2}, 罗国富², 马禾青²

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 2. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要: 从地震学定量综合预测方法 (SQIP) 的预报思路出发, 对 SQIP 方法的具体数据处理作了探索性改进, 针对西北地区东部中强震进行综合预测检验。结果表明改进后的方法具有一定地震预测能力和实用性, 预测结果符合渐近式的预报思路。

关键词: SQIP 方法; 地震预测; 西北地区

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)03-0365-07

0 引言

地震综合预测是相对于单科学、单项观测预报而言的。由于地震的复杂性、单一观测结果多解性和局限性, 以某个单项观测来揭示地震孕育全过程, 进而对地震作出准确预测相当困难。综合预测是根据多种方法、观测提供的结果进行综合分析和研究, 依据地震前后各种效应的组合特征进行地震预测 (陆远忠等, 1985)。在目前地震物理预测尚未过关, 主要为经验预测的现状下, 经验性综合预测还是一种较为实用的地震预测方法。

地震学定量综合预测方法 (简称 SQIP 方法) 是一种经过自学习过程, 确定单项、综合参量和预测指标的地震学综合预测方法 (周翠英等, 2001)。笔者参照该法采用的提取“有震”和“无震”样本并进行参数分时对比的思路, 以西北地区东部为研究对象进行地震综合预测检验, 在网格划分、样本提取和对比筛选 (周翠英等, 1994) 等方面与原方法有所不同, 以此作为新的尝试。

1 资料处理

1.1 区域构造背景

笔者选取中强以上地震较多、弱震记录较为丰富的青藏高原北部地区作为研究对象。青藏高原北部地区由于受到青藏块体向北挤压和蒙古块

体的阻挡, 构造发育, 变形强烈, 地震活动十分强烈, 是我国主要的强震活动区之一。青藏高原北部的西北以 NEE 向的阿尔金山断裂为界, 向东延伸与北大山南麓断裂、龙首山北缘断裂、祁连山北缘断裂相交, 以榆木山、大黄山、文殊山 3 个隆起的北边界断裂为界, 与阿拉善地块相连; 东部以香山—天景山、毛毛山、海原、六盘山断裂为界, 与鄂尔多斯地块和华南地块相邻; 南部以昆仑山口—江错断裂为界, 与藏北地块连接。其总体的主应力方向为 NE 向, 年变形速率为 6~10 mm (王海涛等, 2005), 内部主要断裂都是北西走向的走滑断裂, 与相邻的区域相比, 其构造活动和地震活动特征具有相似性。

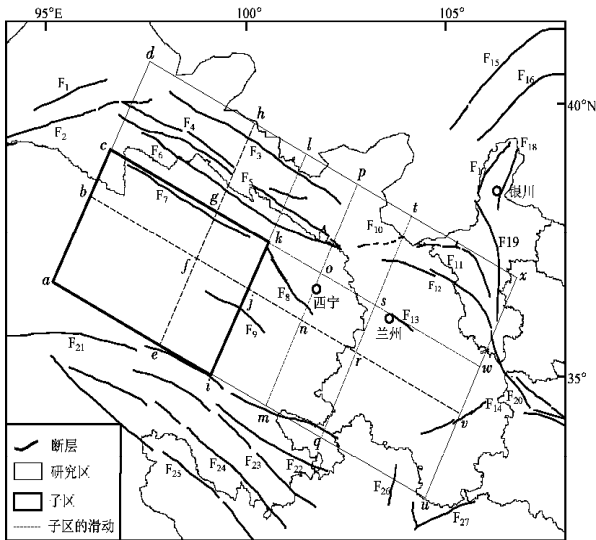
通过对区域地质构造、小震目录完整性分析, 并考虑到 5.0 级以上地震的数量, 给出本文研究的具体空间范围为 a (36.7°N, 95.0°E)、 d (40.7°N, 97.5°E)、 x (36.8°N, 106.9°E)、 u (32.8°N, 104.5°E) 四点形成的四边形区域 (图 1), 时间范围选取 1980 年 1 月至 2010 年 11 月, 弱震震级下限选取 $M_L 2.8$ (冯建刚等, 2010), 强震震级下限选取 $M_S 5.5$ 。

1.2 地震目录资料选取

地震目录来自两部分: (1) 原中国地震局分析预报中心汇编的, 后由中国地震局台网中心汇集并在网上发布的全国小震目录; (2) 中国地震局监测预报司预报管理处 (2005) 汇编的中国强地震目录。

^{*} 收稿日期: 2010-10-08.

基金项目: 宁夏自然科学基金资助项目 (NZ10206)。



F_1 : 敦煌三危山断裂; F_2 : 阿尔金断裂; F_3 : 走廊北侧断裂; F_4 : 祁连山北缘断裂; F_5 : 昌马-俄博断裂; F_6 : 陶莱山-门源断裂; F_7 : 中祁连山北侧断裂; F_8 : 日月山-拉脊山断裂; F_9 : 哇玉香卡-拉干断裂; F_{10} : 黄羊川断裂; F_{11} : 香山-天景山断裂; F_{12} : 海原断裂; F_{13} : 金城关断裂; F_{14} : 礼县-罗家堡断裂; F_{15} : 狼山-色尔腾山前断裂; F_{16} : 噶口-本井断裂; F_{17} : 贺兰山东麓断裂; F_{18} : 黄河断裂; F_{19} : 牛首山-大小罗山断裂; F_{20} : 固关-功县断裂; F_{21} : 阿尼玛卿断裂; F_{22} : 玛多断裂; F_{23} : 桑日麻断裂; F_{24} : 清水河断裂; F_{25} : 岷山江断裂; F_{26} : 龙门山后山断裂

图1 研究区域的空间网格化

Fig. 1 Spatial grids of the study area

余震是震源附近区域应力在时间和空间上的调整 (梅世蓉, 冯德益, 1993), 它会在一定程度上掩盖地震作为独立事件的统计特征, 使地震活动的时空分布偏离正常活动状态, 增加了地震活动的非平稳性, 因此在数据处理前需作余震删除。本文采用 K-K 法 (Keilis-Borok, Knopoff, 1980) 将 $M_L 2.8$ 以上地震作余震删除。

1.3 学习样本的提取

学习样本是指一定时、空范围内的弱震, 在提取学习样本之前, 必须先明确学习样本的空间范围和时间范围。

1.3.1 学习样本的空间范围和时间范围

一般地, SQIP 方法常采用沿经、纬方向滑动的方式作为学习样本的空间范围, 或者以震例震中为中心, 一定的宽度范围作为学习样本的空间范围 (周翠英等, 1994, 2001)。该做法虽然方便计算, 但研究区构造背景因素难以兼顾, 尤其针对西北区东部这样构造复杂的地区, 需要充分考虑构造因素。

考虑到研究区主要包含祁连山-六盘山断裂系、河西断裂系和柴达木断裂系, 6 级左右地震较为丰富等因素, 笔者将研究区沿着断裂系的走向划分为 6 个子区, 并将其作为学习样本的空间范围, 每个子区北西向长 400 km、北东向宽 300 km, 滑动步长约为边长的 $2/3$ 。子区的长边大体为断裂系的走向, 东北边的 3 个子区域主要为祁连山-六盘山断裂系的西、中、东三段, 西南边的 3 个子区域主要为河西断裂系、柴达木断裂系及二者结合部位 (图 1)。

笔者以中短期预测为目标, 以提取中短期异常为主, 考虑到弱震样本量需要满足地震学参数计算条件, 因此将学习样本的资料时段取为 2 年。周翠英等 (1999) 将学习样本进一步分为“有震”和“无震”两类, 并指出“有震”样本取震例发生前 1 个月, “无震”样本取无震区基本无邻区大震影响时段。

为了确保提取出的“无震”样本不受邻区大震影响, 笔者从 2 个方面入手: (1) 空间上, 将每个子区向外扩充 Δd 的宽度, 并认为子区连同 Δd 范围之外发生的强震不会对子区范围内造成影响。(2) 时间上, 要求子区连同宽度 Δd 范围内发生的强震间的时间间隔 Δt 不易太短 ($\Delta t \geq 2$ 年, 即平静时段至少要满足学习样本资料时段为 2 年的要求)。

如图 2 所示, 地震 A 发生在 Δd 之外, 因此 A 对发生在子区内的地震 C、D 影响较小可忽略, 研究 C、D 时可不必考虑 A 的影响; 而地震 B、C、D 发震位置较近, 因此只有它们之间的发震时间间隔较长, 才不致于相互影响。样本提取正是围绕着强震间的这种空间位置和时间间隔的相互关系展开的。

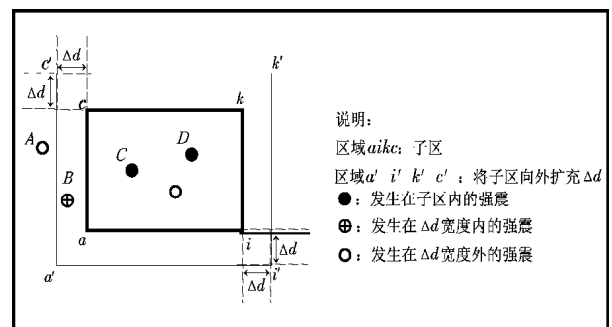


图2 空间单元格及其空间避让

Fig. 2 Spatial grids and exclusion areas

将网格边缘外一定宽度的区域 Δd 称为空间避让, 将强震间需满足的时间间隔 Δt 称为时间避让。由于时间避让和空间避让的参数设置会影响学习样本的提取, 如何合理取值还需进一步研究。在兼顾样本量的前提下, 本文的时间避让参考 K-K 法中震级—时间关系, 空间避让宽度暂取 50 km。

1.3.2 提取学习样本的算法步骤

确定了学习样本的空间范围、空间避让和时间避让就可以进行子区内“有震”样本和“无震”样本的提取。本文的计算机提取算法为:

① 从扩充 Δd 后的区域 (如 $a'c'k'i'$ 内) 内读取一条强震记录, 根据该强震的震级大小 (参考 K-K 法) 给出强震震后的小震恢复到正常水平所消耗的时间 (即震后时间避让)。

② 继续读取一条强震记录, 判断该强震发生的时间是否在前次强震的震后时间避让期内。

③ 若在避让期内, 则计算本次强震的震后时间避让, 选取前次和本次时间范围较大的震后时间避让作为新的震后时间避让, 重复步骤②。

④ 若在避让期外, 则判断本次强震发震地点是否在子区内 (如 $acki$)。

⑤ 若不在子区内, 即强震发生在避让带上, 则计算本次强震的震后时间避让, 将之作为新的震后时间避让, 重复②。

⑥ 若在子区内, 则提取前次强震的震后时间避让与本次强震发震之间的弱震目录, 设集合为 u_i 并保存。计算本次强震的震后时间避让, 将之作为新的震后时间避让, 重复步骤②。

⑦ 当子区内的强震提取完后, 步骤②步终止, 针对集合 $U=\{u_1, \mu_2, \mu_3, \cdots, \mu_i, \cdots, \mu_n\}$ 中每一个元素, 从强震发生时刻开始, 向前推 2 年, 将这个时段内的弱震作为“有震”样本, 从强震发生时刻的前 2 年开始, 每向前推进 2 年就作为 1 个“无震”样本……, 依次直到元素中的弱震目录为空。

本算法对研究区域“有震”样本、“无震”样本的提取结果见表 1。

1.4 单项特征的归一化

从反映地震活动性时、空、强等方面选取具有代表性的地震学参数进行单项特征计算, 针对每个子区内的样本, 时间窗取 1 年, 逐月滑动 (周翠英等, 2001) 计算上述各地震学参数值。计算出的所有参数值形成一个参数矩阵, 对该矩阵

表 1 研究区域样本对象提取结果
Tab. 1 Results of extracting the objects in the study area

子区编号	子区	“有震”样本个数	“无震”样本个数
1	<i>acki</i>	1	2
2	<i>egsq</i>	2	4
3	<i>monu</i>	2	4
4	<i>bdlj</i>	2	6
5	<i>fhtr</i>	2	2
6	<i>npv</i>	4	2
合计		13	20

归一化处理后成为备选参数矩阵。归一化处理采用, 以各参量不同时间段的相对变化率作为统计量。考虑到平静幕和活跃幕中地震总体水平差异, 以样本时段前 5 年资料求取的均值作为长期平均水平 (周翠英等, 1999)。

1.5 对比筛选和 R 值评分计算

一个完整的单项特征包括 2 个方面: (1) 阈值点——对样本性质的判断 (阈值点内为有震, 阈值点外为无震); (2) R 值评分 (许绍燮, 1989) ——单项特征判断对象性质的能力 (用于综合判定加权)。

对于某个单项特征, 所有样本 (有震和无震) 的该特征值组成一个取值空间。由于单项特征参数可能是高异常 (超出正常水平时称高异常), 也可能是低异常 (低于正常水平称低异常), 因此单项特征经归一化后的取值空间可能是一边对应“有震”, 一边对应“无震”, 也可能取值空间被分成 3 个区域, 分别与“无震”和“有震”样本对应。

对比筛选时 SQIP 方法只考虑了双侧扫描的情况, 并且阈值是按照一定的步长来搜索的。由于“无震”样本和“有震”样本计算出的特征值并不能达到完全区分的理想效果, 因此按步长扫描的方式增加了计算量, 故而无必要。本文采用新的描法方式并增加了单侧扫描结果。

(1) 单侧扫描

将单项特征的值按大小排列形成一个数轴, 从数轴一侧开始逐一取出单项特征值, 并假定该值为所求阈值点, 计算 R 值。最后找出最大的 R 值, 作为此单项特征的划分结果。

(2) 双侧扫描

双侧扫描与单侧扫描做法类似, 只是扫描是

从数轴的两端开始,扫描的阈值点有两个。单、双侧扫描如图3。

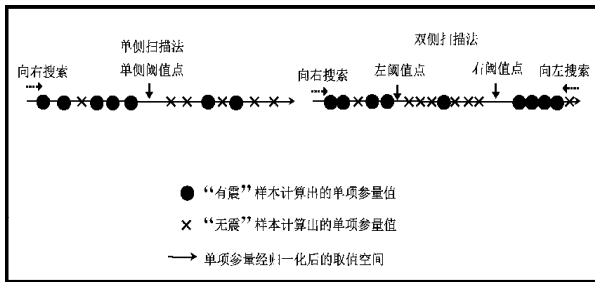


图3 阈值点单、双侧扫描

Fig. 3 Using single side and double-side scanning to find the threshold points

1.6 综合预测参数 P 的计算

有了单项特征阈值和 R 值评分后,综合预测可采用多种方法来进行计算。这里采用震兆加权的思路给出综合预测参数的计算: (1) 计算每种最优单项特征的 R 值占所有最优单项特征 R 值之和的百分比; (2) 用每个最优单项特征对某个样本的性质进行判别 (是有震还是无震),若判断为有震,则将相应的 R 值百分比相加,将相加之后的 R 值百分比作为最后的综合预测结果,一般 R 值大于等于 50% 则认为有地震发生,反之,则为无地震发生。

2 计算结果和检验

选取时间集中度 C_t 、空间集中度 C_d (杨明芝等, 2006)、地震频次 N 、平均震级 M_{ave} 和最大震级 M_{max} 共 5 个地震学参数进行单项特征的计算。经归一化、单双侧阈值扫描、 R 值计算后,获得 5 个参数的单项特征的阈值点和 R 值统计 (表 2),统计显示最优单项特征分别是: 频次 N_9 (即地震前 9 个月开始再向前推 1 年的年频次 N 、最大震级 M_{max7} (从震前 7 个月开始,时间向前推 1 年的时段内的最大震级 M_{max})、平均震级 M_{ave5} (从震前 5 个月开始,时间向前推 1 年的时段内的平均震级 M_{ave})、时间集中度 C_{t18} (从震前 8 个月开始,时间向前推 1 年的时段内的时间集中度 C_t)、空间集中度 C_{d5} (从震前 5 个月开始,时间向前推 1 年的时段内的空间集中度 C_d),每个最优单项特征的扫描方式及相应 R 值最大评分见表 2。

表2 单项特征的单、双侧扫描及 R 值最大评分结果

Tab. 2 Single side and double-side scanning of single feature and the maximum of R value

最优单项特征	扫描方式	类型	左阈值	右阈值	最大 R
N_9	单侧扫描	右边有震	-0.104 5	-	0.495 6
M_{max7}	单侧扫描	左边有震	0.018 3	-	0.622 8
M_{ave5}	双侧扫描	中间有震	-0.220 3	0.007 5	0.508 8
C_{t18}	单侧扫描	右边有震	0.070 9	-	0.486 8
C_{d5}	双侧扫描	两边有震	-0.105 1	0.003 0	0.450 0

注: 单侧扫描只有 1 个阈值点。

按 R 值加权后,最优单项特征 N_9 , M_{max7} , M_{ave5} , C_{t18} , C_{d5} 的权重分别为: 0.19, 0.24, 0.20, 0.19, 0.18。利用最优单项特征按 R 值加权计算综合参数 P ,对 13 次“有震”样本和 20 次“无震”样本进行检验,结果“有震”样本报错 3 次,“无震”样本报错 4 次,综合 R 值评分为 0.6 (表 3)。

以未进行经验获取的 2007 年 1 月至 2010 年 11 月的地震目录进行外推预测检验 (表 4)。由于最优单项特征是从已发生的震例中提取出的经验,是从地震发生时刻向前反推的方式获得的结果,在实际预测中无法预知发震时刻,因此本文采用如下方式使用最优单项特征进行实际地震预测:

① 计算单元格内 2007 年 1 月至 2007 年 12 月 1 年的弱震频次 N ,由于 N_9 是对未来第 9 个月即 2008 年 9 月的震情进行预测;对于最大震级 M_{max7} ,2007 年 3 月至 2008 年 2 月的弱震资料与 2008 年 9 月的震情对应;同理对于平均震级 M_{ave5} ,该时段是 2007 年 5 月至 2008 年 4 月;对于时间集中度 C_{t18} ,该时段是 2007 年 2 月至 2008 年 1 月;对于空间集中度 C_{d5} ,该时段是 2007 年 5 月至 2008 年 4 月。

② 计算上述各个时段相应的地震学参数值并作归一化处理。

③ 将归一化后的地震学参数值与相应的最优单项特征的阈值点 (表 2) 进行比较,如果参数值位于“有震”区间,则判断未来有地震发生,否则判为无震。

④ 将判为有震的最优单项特征的 R 值累加并计算百分比,若大于 50%,则综合预测认为未来有地震发生,否则认为未来无地震发生。

⑤ 以第①步中各参数的开始时间为起点,以

窗长 1 年, 步长 3 个月进行时间扫描, 每滑动一次就重复②~④步。

⑥ 针对每个单元格重复步骤①~⑤后, 计算结束。

表 3 内附检验结果 (D 代表有震样本, S 代表无震样本)

Tab. 3 Results of samples test (D represents earthquake samples, S represents non-earthquake samples)

样本 对象	各单项特征预测的百分比					综合 P 值	预测 结果
	N_9	$M_{\max 7}$	$M_{\text{ave} 5}$	C_{18}	$C_{d 5}$		
D	0.19	0.24	0.20	0.00	0.18	0.62	√
D	0.19	0.00	0.00	0.19	0.18	0.56	√
D	0.19	0.24	0.00	0.19	0.00	0.38	×
D	0.00	0.24	0.20	0.19	0.18	0.81	√
D	0.19	0.24	0.00	0.00	0.18	0.61	√
D	0.19	0.00	0.20	0.00	0.00	0.39	×
D	0.19	0.24	0.20	0.19	0.18	1.00	√
D	0.19	0.24	0.20	0.19	0.00	0.82	√
D	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	×
D	0.00	0.24	0.20	0.19	0.18	0.81	√
D	0.19	0.00	0.20	0.19	0.18	0.76	√
D	0.19	0.24	0.20	0.19	0.00	0.82	√
D	0.19	0.24	0.00	0.19	0.18	0.80	√
S	0.19	0.00	0.20	0.00	0.00	0.39	√
S	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	√
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	√
S	0.19	0.00	0.20	0.00	0.00	0.39	√
S	0.00	0.24	0.20	0.00	0.18	0.62	×
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	√
S	0.19	0.00	0.00	0.00	0.18	0.37	√
S	0.00	0.24	0.00	0.19	0.18	0.61	×
S	0.19	0.00	0.00	0.00	0.18	0.37	√
S	0.19	0.00	0.00	0.19	0.00	0.38	√
S	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.24	√
S	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	√
S	0.19	0.24	0.00	0.00	0.00	0.43	√
S	0.19	0.24	0.20	0.19	0.18	0.37	√
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	√
S	0.00	0.00	0.00	0.19	0.18	0.37	√
S	0.19	0.00	0.20	0.19	0.00	0.58	×
S	0.00	0.24	0.00	0.19	0.18	0.61	×
S	0.00	0.24	0.00	0.00	0.18	0.42	√
S	0.19	0.00	0.00	0.19	0.00	0.38	√

2007 年 1 月至 2010 年 12 月研究区共发生 $M_{\text{S}}5.5$ 以上地震 3 次, 分别是: 青海海西 2008 年 11 月 10 日 6.3 级、2009 年 8 月 28 日 6.4 级和 2009 年 8 月 31 日 5.9 级地震, 震中位于子区 1 内。表 4 是以 1 年为窗长, 3 个月为滑动步长, 以 4 个月为预测时间的预测结果。其中, 子区编号代表 6 个子区, 弱震资料时段给出了计算每个最优单项特征所用的弱震时段, 针对预测时段, 5 个最优单项特征给出综合预测结果。

可以看出, 1 号子区 2008 - 08 ~ 2008 - 11、2008 - 11 ~ 2009 - 02 和 2009 - 02 ~ 2009 - 05, 前 2 个时段内综合 P 值分别为 0.62 和 0.82, 预测为有震, 这与 2008 年 11 月海西 6.3 级地震事实相符, 而 2009 - 02 ~ 2009 - 05 综合 P 值为 0.61, 但事实上 2009 - 02 ~ 2009 - 05 时段内 1 号子区并无地震发生, 因此认为该预测与事实不符, 属于虚报。由于受 2008 年 11 月 10 日海西 6.3 级地震的影响, 且与 2009 年 8 月 28 日海西 6.4 级地震的发震间隔不足 1 年, 已经不满足本文的计算条件 (至少连续 2 年的弱震资料), 因此以符号 “-” 表示 1 号子区的最优单项特征不满足计算条件。除去 “-” 的情况, 表 4 中共有 48 次预测, 针对 2008 年海西 6.3 级地震有 2 次预测, 预测结果正确, 其余均为对无震时段内的预测, 共有 9 次虚报。

3 讨论

笔者详细论述了 SQIP 方法在西北地区东部的使用, 该方法在数据处理方面有以下几个特点:

(1) 空间上, 依据区域地质构造情况展开空间的网格扫描, 充分考虑消除地区差异; (2) 为了提高对象提取的准确性和可靠性, 明确了网格空间避让和时间避让概念; (3) 给出了详细的学习样本提取算法步骤, 该算法整合了空间网格化、空间避让及时间避让等要求, 也是数据处理的重点之一; (4) 补充了对比筛选单侧扫描的结果并改进了扫描方式。由于提取到的最优单项特征有来自单侧扫描的结果, 因此增加单侧扫描结果很有必要; 修改了单、双侧的扫描方式, 计算效率得以改进; (5) 较详尽地描述了最优单项特征在实际地震预测中的应用, 预测结果符合渐进式的预报思路 (张国民等, 2001), 适合日常震情跟踪工作的需要。

表 4 外推检验结果

Tab. 4 Results of extrapolated test

子区 编号	弱震资料时段					预测 时段	综合 预测 P	预测 结果
	最优单项特征 N_9 时段	最优单项特征 $M_{\max 7}$ 时段	最优单项特征 $M_{ave 5}$ 时段	最优单项特征 C_{t8} 时段	最优单项特征 C_{d5} 时段			
1							0.62	✓
2							0.56	×
3	2007-01	2007-03	2007-05	2007-02	2007-05	2008-08	0.38	✓
4	~	~	~	~	~	~	0.24	✓
5	2007-12	2008-02	2008-04	2008-01	2008-04	2008-11	0	✓
6							0.39	✓
1							0.82	✓
2							0.20	✓
3	2007-04	2007-06	2007-08	2007-05	2007-08	2008-11	0.18	✓
4	~	~	~	~	~	~	0.61	×
5	2008-03	2008-05	2008-07	2008-04	2008-07	2009-02	0.19	✓
6							0.38	✓
1							0.61	×
2							0.39	✓
3	2007-07	2007-09	2007-11	2007-08	2007-11	2009-02	0.20	✓
4	~	~	~	~	~	~	0	✓
5	2008-06	2008-08	2008-10	2008-07	2008-10	2009-05	0.39	✓
6							0.19	✓
1							-	-
2							0	✓
3	2007-10	2007-12	2008-02	2007-11	2008-02	2009-05	0.20	✓
4	~	~	~	~	~	~	0.37	✓
5	2008-09	2008-11	2009-01	2008-10	2009-01	2009-08	0.61	×
6							0.19	✓
1							-	-
2							0.61	×
3	2008-01	2008-03	2008-05	2008-02	2008-05	2009-08	0.39	✓
4	~	~	~	~	~	~	0.20	✓
5	2008-12	2009-02	2009-04	2009-01	2009-04	2009-11	0	✓
6							0	✓
1							-	-
2							0.42	✓
3	2008-04	2008-06	2008-08	2008-05	2008-08	2009-11	0.19	✓
4	~	~	~	~	~	~	0.62	×
5	2009-03	2009-05	2009-07	2009-04	2009-07	2010-02	0.80	×
6							0.24	✓
1							-	-
2							0	✓
3	2008-07	2008-09	2008-11	2008-08	2008-11	2010-02	0.39	✓
4	~	~	~	~	~	~	0.24	✓
5	2009-06	2009-08	2009-10	2009-07	2009-10	2010-05	0	✓
6							0.20	✓
1							-	-
2							0.39	✓
3	2008-10	2008-12	2009-02	2008-11	2009-02	2010-05	0.19	✓
4	~	~	~	~	~	~	0.38	✓
5	2009-09	2009-11	2010-01	2009-10	2010-01	2010-08	0.20	✓
6							0.39	✓
1							-	-
2							0	✓
3	2009-01	2009-03	2009-05	2009-02	2009-05	2010-08	0.42	✓
4	~	~	~	~	~	~	0.62	×
5	2009-12	2010-02	2010-04	2010-01	2010-04	2010-11	0.18	✓
6							0.61	×

在外检时, 由于研究区 5.5 级以上地震平静, 有震时段的检验明显不足, 无震时段检验较多, 因此进一步的预测效能还需在以后的工作中逐步展开。

参考文献:

- 冯建刚, 姚家骏, 代伟. 2010. 青藏高原北部地区小震目录完整性分析[J]. 高原地震, 22(2): 10-14.
- 陆远忠, 陈章立, 王碧全, 等. 1985. 地震预报的地震学方法[M]. 北京: 地震出版社.
- 梅世蓉, 冯德益. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社.
- 王海涛, 杨立明, 马文静, 等. 2005. 西北地区强地震短期前兆特征和预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分[M]. 北京: 学术期刊出版社.
- 杨明芝, 马禾青, 廖玉华, 等. 2006. 宁夏地震活动与研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 张国民, 傅征祥, 桂燮泰, 等. 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社.
- 周翠英, 侯海峰, 王红卫, 等. 2001. 中国典型地区强震的地震学综合预测指标筛选及其在西南地区的检验[J]. 中国地震, 17(4): 392-402.
- 周翠英, 蒋海昆, 王红卫, 等. 1994. 地震学定量预报指标的一种提取方法—对比筛选法[J]. 地震, 4(4): 14-22.
- 周翠英, 朱元清, 王红卫, 等. 1999. 华北地区地震学指标的定量对比筛选及其综合预报方法研究[J]. 地震学报, 21(2): 208-213.
- Keilis-Borok, Knopoff. 1980. Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes[J]. Nature, 283(5744): 259-263.

Improvement of the Data Processing of the Seismological Quantitative Integrated Prediction Method

XU Xiao-qing^{1,2}, LUO Guo-fu², MA He-qing²

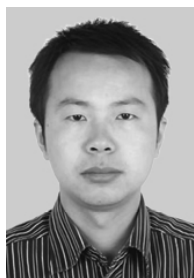
(1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

(2. Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

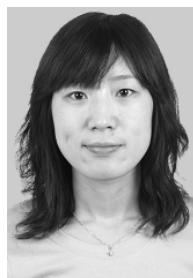
Abstract

According to the theory of the Seismological Quantitative Integrated Prediction method (SQIP), we improve the data processing of the method tentatively. Then we apply the improved SQIP method to the prediction of the medium-and strong-earthquakes in the eastern part of northwest China. The result turns out that the improved method becomes more practical and more capable for the earthquake prediction. The prediction results fit for the style of gradually proceeding prediction.

Key words: SQIP method; earthquake prediction; eastern part of northwest China



董燕生 北京农业信息技术研究中心助理研究员。2010 年毕业于北京师范大学，获博士学位。主要从事地震灾害遥感、农业灾害遥感等领域的研究，尤其是灾后遥感监测与损失评估。



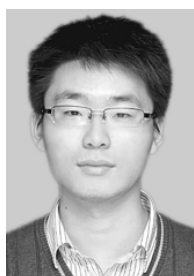
兰双双 北京工业大学建筑工程学院博士后。2005 年、2007 年、2010 年毕业于吉林大学环境与资源学院，并分别获学士、硕士、博士学位。主要从事水环境与地震地下流体方面的研究。



倪红玉 安徽省地震局工程师。2008 年毕业于中国科技大学化学物理系，获硕士学位。主要从事地震预报研究工作。



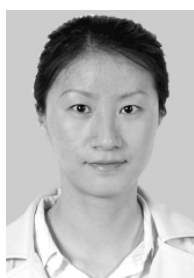
王伟涛 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2009 年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学系，获博士学位。主要从事重复震源和 4D 地震学研究。



魏运浩 中国地震局地震研究所硕士研究生。2007 年毕业于武汉理工大学资源与环境工程学院，获学士学位；2008 年 9 月至今，在中国地震局地震研究所水库诱发地震研究室攻读硕士学位。主要从事地震工程研究工作。



许晓庆 宁夏回族自治区地震局工程师。2004 年毕业于成都信息工程学院计算机科学与技术专业，获学士学位；2010 年毕业于中国科学技术大学地球和空间科学学院固体地球物理专业，获硕士学位。现主要从事地震预测和计算地震学等研究工作。



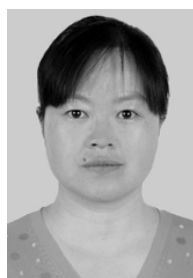
张风霜 中国地震局第一监测中心工程师。2006 年毕业于天津师范大学数学与应用数学专业，获理学硕士学位；2009 年 2 月至 6 月于中国科学院上海天文台学习利用 Gamit/Globk 软件进行 GPS 数据处理的基础理论与方法。现主要从事 GPS 数据处理与地震预测研究。



张双凤 河北省地震局邯郸中心台工程师。1999 年毕业于河北工程大学计算机专业，获学士学位。主要从事地震观测及分析预报工作。



张新东 河北省地震局高级工程师。1988 年毕业于云南大学地球物理系，获理学学士；2003 年毕业于中国科技大学地球物理专业，获硕士学位。曾参与首都圈地震台网建设、十五河北数字地震台网改造等项目。主要从事地震台网的勘选、设计与建设，数字化地震波形资料的应用研究等。



李 琼 云南省地震局工程师。2008 年毕业于云南大学固体地球物理系，获硕士学位，主要从事地震前兆和地震预报等方面的研究工作。