第 44 卷 第 6 期
2022 年 11 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 44 No. 6
November, 2022

张帆,韩晓明,李娟,等.晋冀蒙交界地区地震活动性增强分析和预测规则的优化[J].地震工程学报,2022,44(6):1422-1428.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210509002

ZHANG Fan,HAN Xiaoming,LI Juan,et al.Seismicity enhancement analysis and optimization of the prediction rule in the juncture area of Shanxi, Hebei, and Inner Mongolia[J].China Earthquake Engineering Journal,2022,44(6):1422-1428.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210509002

# 晋冀蒙交界地区地震活动性增强分析和预测规则的优化

张 帆,韩晓明,李 娟,裴东洋

(内蒙古自治区地震局,内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:** 晋冀蒙交界地区处于华北地块、鄂尔多斯地块和燕山地块交界处,其地震活动受到构造应力场变化的影响,和未来中强地震有一定关联性。2019 年以来,晋冀蒙交界地区出现 $M_L$3.0 以上地震显著增强现象,为了评估此区域地震活动起伏的震兆意义,构建有效的预测方法,文章将增强区域作为地震频次的窗口,选取 $M_L$3.0 以上地震年滑动频次为预测指标。通过回溯历次 5 级以上地震前的地震活动情况,确定最优预测规则。经过在预测规则参数空间扫描,以 $R$ 值作为目标函数,最终确定的预测窗长和阈值为 2 年和 14 次,在此规则下地震频次预测指标有较好的预测效果和较高信度。

**关键词:** 地震活动增强;预测效能;晋冀蒙交界;ROC

**中图分类号:** P315.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2022)06－1422－07

DOI:10.20000/j.1000-0844.20210509002

# Seismicity enhancement analysis and optimization of the prediction rule in the juncture area of Shanxi, Hebei, and Inner Mongolia

ZHANG Fan, HAN Xiaoming, LI Juan, PEI Dongyang

(*Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China*)

**Abstract:** The juncture of Shanxi, Hebei, and Inner Mongolia is located at the border area of the North China Block, Ordos Block, and Yanshan Block. The seismicity of this area, which is affected by the change in the tectonic stress, is related to future moderately strong earthquakes. The earthquake prediction index extracted from the observation data is a parameter with a certain physical significance, which has some degree of abnormal changes before an earthquake. The construction of the earthquake prediction index system is one of the most effective prediction methods in the empirical prediction stage. The earthquake frequency, which reflects the changes in the seismicity level and stress level, is a commonly used earthquake prediction index. Since 2019, there has been a significant enhancement of $M_L>3.0$ earthquakes in the border area of Shanxi, Hebei, and Inner Mongolia. To evaluate the earthquake precursor significance of the seismicity in

**收稿日期:** 2021-05-09

**基金项目:** 中国地震局地震科技星火计划(XH20014);中国地震局震情跟踪定向任务(2020020103)

**第一作者简介:** 张 帆(1980－),男,高级工程师,主要研究方向为地震观测技术研究。E-mail:spacelessness@163.com。

**通信作者:** 韩晓明(1980－),男,高级工程师,主要研究方向为地震学预测方法。E-mail:hxmpower@126.com。

this area and build an effective prediction method, the enhanced area was selected as the window of earthquake frequency, and the annual moving frequency of $M_L>3.0$ earthquakes was taken as the prediction index. The optimal prediction rule was determined by tracing back the seismicity before previous $M_L>5.0$ earthquakes. Through a spatial scanning of the parameters of the prediction rule and taking the $R$ value as the objective function, the prediction window length and threshold were finally determined to be 2 years and 14 times, respectively. The earthquake frequency prediction index for the proposed rule has a good prediction effect and high reliability.

**Keywords**: seismicity enhancement; prediction efficiency; juncture area of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia; ROC

## 0　引言

地震是群灾之首，地震灾害造成的死亡人数占自然灾害死亡人数总数的 54%，地震在各种自然灾害中造成的伤亡和损失最大[1]。对未来可能发生强震的时间和位置判断，是地震预测工作的主要目标。经过多年的科学研究和实践探索，我国形成了“长-中-短-临”的地震预测工作思路。精准的短临预报仍然是科学难题，但基于现有技术的地震预测工作体系已经在防震减灾中有一定成果。地震预报工作目前处于由经验预报向物理预报发展的阶段，但其实际工作仍然以经验预报为主[2]。地震预测指标体系建设是经验预报阶段最有效的途径，在不同区域针对不同学科建立的地震预报指标体系在地震预测工作中发挥了重要作用[3]，可应用于不同空间和时间尺度地震风险的估计。

地震预测指标是根据观测资料经过数据处理后提取的具有物理意义的参数，在地震发生前，预测指标会发生某种程度的异常变化[5]。预测指标的建立，包括指标的选取、触发条件的确定、预测规则的确定等。在经验预报工作中，地震预测指标主要是通过震例回溯和统计检验来确定[5-8]。地震频次反映了地震活动水平和应力水平的变化，被作为常用的一种地震预测指标[7-9]。地震的孕育和发生是地壳应力、应变的积累和释放过程，未来强震震源区域周边一定范围内中等地震活动的增强可能蕴含着有关地震成核、孕育和发展的信息，是震源体在物理场上的体现。Mogi[10]认为大地震前一段时间内，震源区周围可能出现环形的增强活动区域，其增强区的半径比震源区的半径大 2～3 倍。梅世蓉等[11]对中国 6 级以上地震的研究也表明构造应力的增加，并达到临界状态时会出现地震增强活跃现象。

晋冀蒙交界地区位于燕山地块、华北地块和鄂尔多斯地块交界区域，在鄂尔多斯地块逆时针旋转运动作用下构造活动强烈，形成盆岭构造，历史上发生过 4 次 7 级以上地震和多次 6 级以上地震，但部分断裂缺少 7 级以上地震，形成了破裂空段[12]。2019 年以来，晋冀蒙交界地区出现 $M_L3.0$ 以上地震显著增强现象，这种平静背景下的活跃增强对未来地震形势的判定是重要的。本文拟将该增强区域作为研究对象，考察将地震的滑动年频次作为预测指标的有效性，通过震例回溯和统计检验，对指标的预测效能进行评估，以实现预测规则参数的优化。

## 1　地震活动和预测指标选取

本文数据使用了中国地震台网地震目录[13]和内蒙古台网观测资料[14]，地震目录资料的完整性及可靠性分析是地震学研究的基础工作。相关研究显示，1975 年以来中国大陆地震目录完整性能够达到 $M_L3.0$ 以下[15]，而本文研究时空范围内地震目录的完整性震级可以达到 $M_L2.5$ 以下[6,16]，因此本文所采用的数据资料满足了对地震目录完整性研究的需求。对于地震活动性分析中地震目录是否需要删除余震尚存争议，一些观点认为余震掩盖了地震作为独立事件的统计特征，使得地震活动的时空分布偏离了正常活动状态，增加了地震活动的非平稳性，因此在地震活动分析中应设法删除余震活动的影响[17]；另一些观点认为余震对概率地震危险性计算结果不会产生显著影响，因此在地震区划或一般性地震危险性分析中可考虑不用删除余震[18-19]。本文采用未删除余震的目录。

2019 年以来，晋冀蒙交界地区出现了 $M_L3.0$ 以上地震显著增强的现象，在考察范围（图 1）（圆心：113.5°E，40.2°N，半径：200 km）内，截至 2020 年 5 月 1 日已发生 $M_L\geqslant3.0$ 地震共计 20 次。自 1970 年以来，该区域年平均地震个数为 11 次，2020 年后的地震活动水平显著高于背景水平。图 1 右下角的子图为 2015 年以来上述区域 $M_L\geqslant3.0$ 以上地震的滑动年频次曲线可以看出，2019年上半年起滑动年

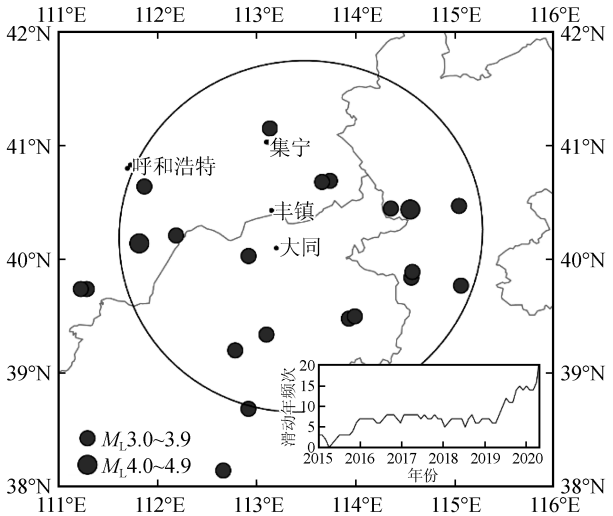



图 1 2019 年以来增强活动区域(圆形内部) $M_L \geqslant 3.0$ 地震

Fig.1 $M_L \geqslant 3.0$ earthquakes in seismicity enhancement region (inside the circle) since 2019

频次逐渐升高,2020 年 3 月达到 20 次。

根据地震活动性和中强地震的时空相关性,选取晋冀蒙交区域(38°～42°N,111°～115°E)作为预测范围,主要考察 $M_S$5.0 以上地震的回溯情况。

图 2 为预测区域内目标地震分布图。图 3 给出 1970 至今 $M_L \geqslant 3.0$ 地震滑动年频次时序曲线,图中使用倒三角形标注了目标地震的时刻,可见滑动年频次的升高和中强地震的发生具有一定关联性。

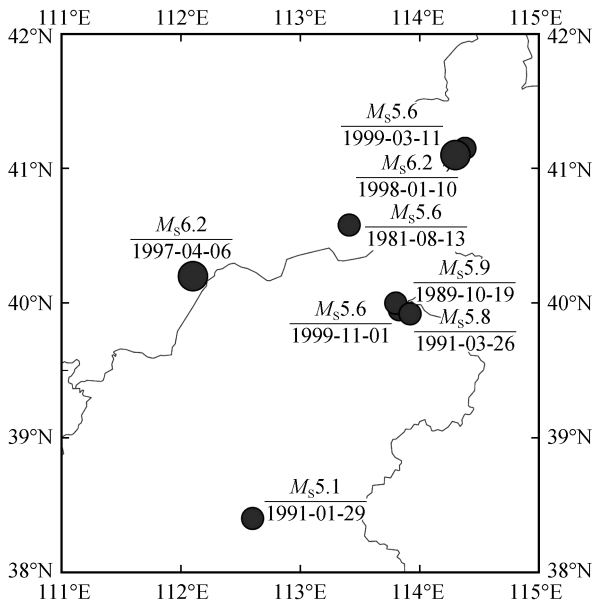



图 2 目标地震分布图

Fig.2 Distribution of target earthquakes

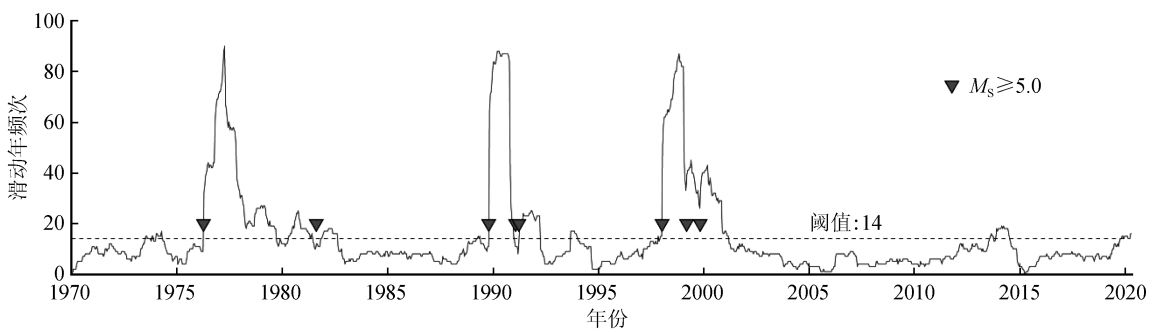



图 3 增强区域 $M_L \geqslant 3.0$ 地震年滑动频次图

Fig.3 The annual slip frequency of $M_L \geqslant 3.0$ earthquakes in the enhancement region

滑动年频次反映了中期地震活动强弱变化,初步选取预测窗长为 2 年,阈值 14,将年滑动频次超过 14 次后的 2 年作为预测时段。使用 $R$ 值评分法[20]对上述指标对于初步选取预测指标进行检验。$R$ 值的含义是扣除了随机概率的预报成功率,当 $R$ 值大于零,表明预测方法有效,$R$ 值越高则预测效果越好。统计样本的数量会影响 $R$ 值的置信水平,许绍燮[20]编制了保证 97.5%置信水平的最低 $R$ 值表($R_0$)。如果实际计算 $R$ 值大于表中对应值,则认为该 $R$ 值有至少 97.5%置信度。在上述预测规则下,采用的预测指标报准率为 87%,时空占有率为 42%,$R$ 值为 0.45,对应 $R_0$ 为 0.37,可见其预测效能是显著的。

1994 年和 2014 年研究区域内出现指标达到阈值的情况,而在两年内未出现 5 级的中强地震,属于虚报情况。地震预测指标主要基于震前指标异常和目标地震发生的关联性,并不是直接的因果关系,仅在现象上存在统计学关系,因此存在虚报现象。本文主要关注晋冀蒙交界地区中小地震活动性和中强地震,而地震前兆存在“长程关联”和“远程触发”的情况[21],特别是在相同的构造体系中,晋冀蒙交界地区、河套地震带、鄂尔多斯西北缘同属鄂尔多斯地块北缘构造体系,因此其地震活动存在相关性。1994 年的地震活动增强现象可能和发生在河套地

震带的 1996 年包头 6.4 级地震有关，2014 年的地震活动增强可能和鄂尔多斯地块西北缘的 2015 年阿拉善左旗 5.8 级地震有关。

## 2　评估预测规则的优化

虽然初步选取的预测规则可以通过统计检验，但其预测规则是否最优还有待验证。预测规则确定后，根据指标值和预测值进行预测，就可以确定报警范围（时间段），如果一次目标地震发生在报警范围内，则该次地震预测成功，反之预测失败，根据历史地震的回溯情况可以评价预测规则的优劣。本文选用的指标对应的预测规则主要包括阈值和预测窗长，阈值是预测指标的触发条件，当频次超过阈值进入有效预测时段；预测窗长为有效预报期的长度。为了进一步优化预测规则，以 $R$ 值为目标函数，改变预测规则的参数，在参数空间内搜索最优的规则（对应最高的 $R$ 值）。同时使用 ROC 曲线和 Molchan 图表法考察指标的效果。

### 2.1　*R* 值评分法

上文已经对 $R$ 值的含义进行了介绍，其值定义为：

$$R=\frac{\text{报对地震次数}}{\text{应报地震总次数}}-\frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究的总时间}} \tag{1}$$

式中：等式右端第一项为报准率，第二项为时空占有率。

首先固定预测窗长为 2 年以考察阈值变化时的预测效果，计算其不同阈值的报准率和时空占有率，并绘制了 $R$ 值随阈值变化的曲线，同时给出 $R_0$ 值曲线作为参考（图 4）。由图 4 看出，当阈值从 0 增加至 100，$R$ 值在 −0.2 至 0.45 范围变化；当阈值为 14 次时，有最高的 $R$ 值 0.45，并且超过 $R_0$。因此，初步选取的阈值 14 次是合理的。

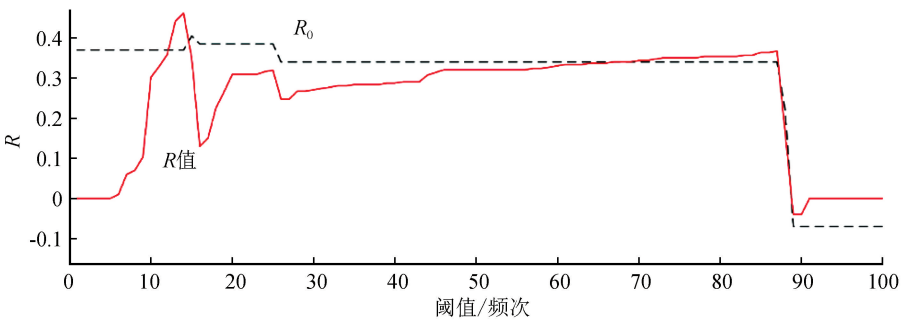



图 4　$R$ 值随阈值变化

Fig.4　Variation of $R$ value with the threshold value

为了同时选取最优的预测窗长和阈值，绘制 $R$ 值在阈值-预测窗长构成的二维参数空间的分布（图 5）。由图 5 可以看出，较高的 $R$ 值分布在阈值为 10～14 次，窗长为 100～400 天范围。结果表明初步选取的阈值 14 次是合理的，但预测窗长 2 年不是最优的，最佳预测窗长在 200～400 天之间，因此预测窗长设为 1 年更加合理。因此最后确定阈值为 14 次，预测窗长为 1 年。

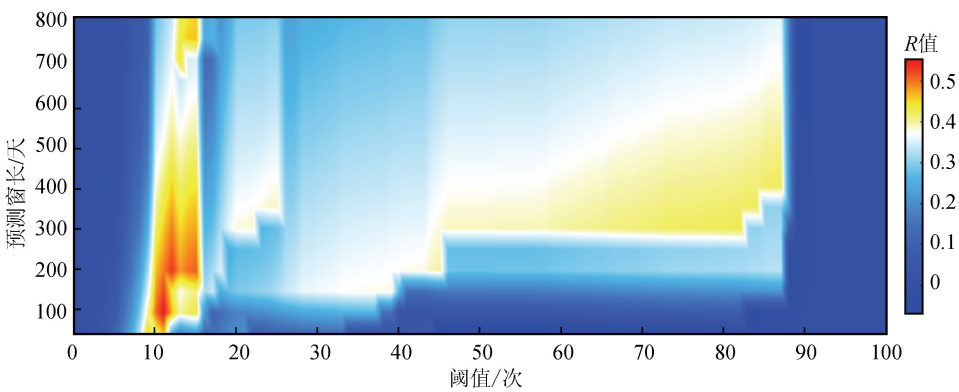



图 5　$R$ 值随阈值和窗长的变化

Fig.5　Changes of $R$ value with the threshold value and window length

### 2.2　ROC 曲线

接受者操作特性曲线（ROC 曲线），也称感受性曲线，反映敏感性与特异性之间关系，经常被应用于预测模型的评估。ROC 曲线中，横坐标为误报率

(FPR),也称特异性,表示假阳性的比例,横坐标接近零时准确率较高;纵坐标为敏感度(TPR),表示称为真阳性比例,纵坐标较大时准确率较好。ROC曲线将图划分成为两部分,曲线下方部分的面积称为AUC(Area Under Curve),AUC较大时准确性较好。曲线越接近左上角($X$ 越小,$Y$ 越大),预测准确率越高。

将预测窗长设置为1年和2年,在固定预测窗长的情况下,改变阈值范围(0～100),计算FPR和对应的TPR,绘制出两种窗长的ROC曲线(图6)。

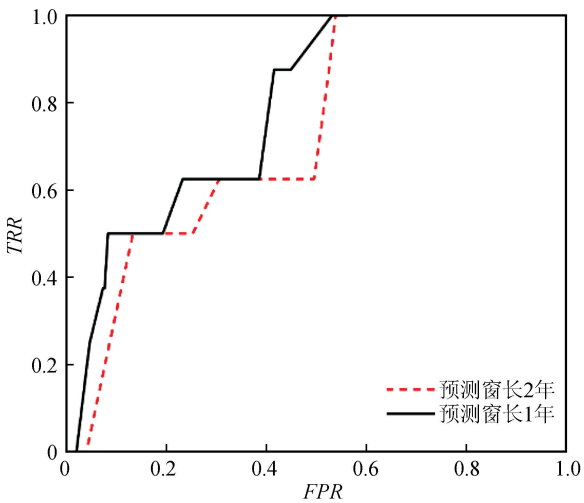



图6 两种预测窗长的ROC曲线

Fig.6 ROC curves of the two forecast window lengths

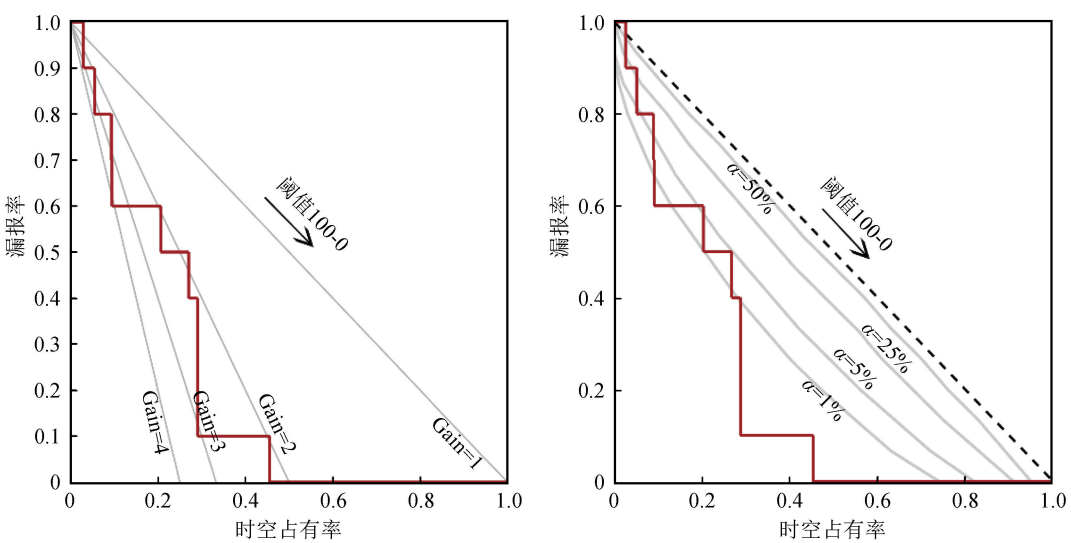
图6显示,黑色实线(窗长1年)在红色虚线上方(窗长2年),表明预测窗长为1年的预测效果好于预测窗长为2年。

在ROC曲线基础上发展出来的Molchan图表法[22]被应用于地震前兆的预报效能的评估,将时空占有率 $\tau$ 和漏报率 $\nu$ 的关系在二维空间中表示出来,当异常阈值由最高改变到最低时,时空占有率 $\tau$ 从0上升到1,漏报率 $\nu$ 从1下降到0;当最大预测成功率和付出最小的时空代价时达到最优的预测效能。将 $\tau$-$\nu$ 曲线和显著性水平 $\alpha$[式(2)]或概率增益Gain值[式(3)]对比,可以有效地评价预测方法的效果和显著性。$\tau$-$\nu$ 曲线和坐标轴包围的面积可以反映不同预测方法的优劣[23-24]。图7为预测窗长360天固定后,改变阈值绘制的Molchan曲线。其结果显示,概率增益达到4,显著性水平小于1%,但阈值下调至一定值时,漏报率可以降至0,显著性水平小于0.01,但概率增益略高于2,则最高的概率增益对应的漏报率为0.6。

$$\alpha=\sum_{i=h}^{N}\left[\binom{N}{i}\tau^{i}(1-\tau)^{N-i}\right],\binom{N}{i}=\frac{N!}{l!\ (N-i)!} \tag{2}$$

式中:$N$ 为地震数;$h$ 为击中数。

$$\mathrm{Gain}=\frac{1-\nu}{\tau} \tag{3}$$




(a) $\tau$-$\nu$曲线和概率增益等值线 (b) $\tau$-$\nu$曲线和显著性水平等值线

图7 Melchan图表(预测窗长360天)

Fig.7 Melchan chart (The forecast window length is 360 days)

## 3 讨论

$R$ 值的含义是扣除了随机概率的预报成功率。本文以 $R$ 值为评估标准,在预测规则的参数空间搜索,以获得对应最高 $R$ 值的最优规则。概率增益是指标触发和未触发情况下,地震发生概率的比值,也

可以由报准率和时空占有率计算得出。概率增益表示异常出现后目标地震发生概率的放大倍数，具有明确的统计学意义，也可以作为预测指标的评估标准。如果选取概率增益作为评估标准，也可获得对应于最大概率增益的最优预测规则，结果与以 $R$ 值为评估标准的结果会有差异。图 8 给出概率增益在参数空间的分布。可以看出，概率增益最高值在预测窗长 1 年和阈值 45 次附近。概率增益反映了收益成本比，在击中率和时空占有率都很小时可能达到很高的概率增益，此时 $R$ 值并未达到最高。如果选取概率增益最大时的预测规则，可能出现较高的漏报率。这种差异说明，概率增益对成本敏感，而 $R$ 值在成本和命中率这两方面达到某种折中，因此在实际工作中选取 $R$ 值高的指标更合理。

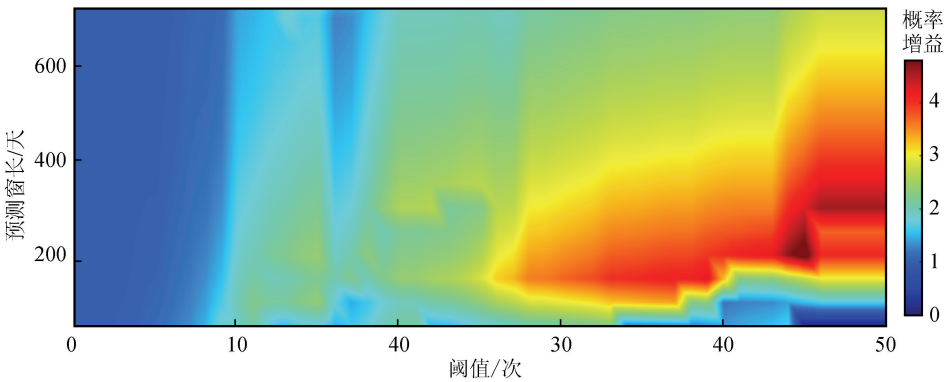



图 8　概率增益值随阈值和窗长的变化

Fig.8　Changes of probability gain value with the threshold value and window length

## 4　结论

本文对晋冀蒙地区中小地震活动性和中强地震的对应关系进行分析，在比较历史地震目录和中强地震资料的基础上建立了基于地震频次的预测指标，并优化预测规则。

在规则优化中，以 $R$ 值为目标函数，分别考察固定窗长后 $R$ 值随阈值的变化和同时改变阈值/预测窗长时 $R$ 值在二维参数空间的变化。固定窗长为 2 年后，最优阈值为 14 次；同时改变窗长和阈值，逐点计算预测规则参数空间，其结果显示，较高的 $R$ 值分布在阈值为 10～14 次，窗长为 100～400 天的范围。根据 $R$ 值在预测参数空间的扫描结果，最终确定了以晋冀蒙交界增强区域 $M_L \geqslant 3.0$ 地震滑动年频为预测指标，阈值为 14 次，预测窗长 1 年，对应的 $R$ 值达到 0.5。

$R$ 值和概率增益也都可以作为指标的评估函数。概率增益在击中率和时空占有率都很小时可能达到高值，如果选取概率增益最大时的预测规则可能出现较高的漏报率。$R$ 值在成本和命中率这两方面达到某种折中，在实际工作中选取 $R$ 值高的指标更合理。

使用 ROC 曲线和和 Molchan 图表法对预测方法进行评估。ROC 曲线显示预测窗长为 1 年时的预测效果优于窗长 2 年的；Molchan 图表显示预测指标的最优概率增益达到 4，对应的显著性水平小于 1%。

本文建立的基于单个预测指标的预测方法可应用于地震预测指标体系中。本文所采用评估和优化的方法亦可以应用于各个学科的地震预测指标评估中。

## 参考文献(References)

[1]　陈运泰.地震预测：回顾与展望[J].中国科学(D 辑：地球科学)，2009，39(12)：1633-1658.
CHEN Yuntai. Earthquake prediction: review and prospect[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2009, 39(12): 1633-1658.

[2]　石耀霖，孙云强，罗纲，等.关于我国地震数值预报路线图的设想：汶川地震十周年反思[J].科学通报，2018，63(19)：1865-1881.
SHI Yaolin, SUN Yunqiang, LUO Gang, et al. Roadmap for earthquake numerical forecasting in China: reflection on the tenth anniversary of Wenchuan earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(19): 1865-1881.

[3]　付虹，胡小静，林辉.中国大陆流体预测指标体系建设探索[J].国际地震动态，2019，49(8)：10.
FU Hong, HU Xiaojing, LIN Hui. Exploration on the construction of prediction indicators system for seismological underground fluid in China's Mainland[J]. Recent Developments in World Seismology, 2019, 49(8): 10.

[4]　梅世蓉，冯德益.中国地震预报概论[M].北京：地震出版社，1993.

MEI Shirong. Introduction to earthquake prediction in China [M]. Beijing: Seismological Press, 1993.

[5] 朱令人,洪时中,陈棋福,等.地震学方法预报效能的统计与分析:中短期前兆及预报效能评价之四[J].地震,2005,25(4):33-38.
ZHU Lingren, HONG Shizhong, CHEN Qifu, et al. Statistics and analysis of prediction efficiency of seismological methods: part 4 of mid-short-term precursor and prediction efficiency evaluation[J]. Earthquake, 2005, 25(4): 33-38.

[6] 张帆,韩晓明,陈立峰,等.鄂尔多斯地块北缘 $b$ 值的时空特征及其地震预测效能分析[J].地震学报,2018,40(6):785-796.
ZHANG Fan, HAN Xiaoming, CHEN Lifeng, et al. Spatio-temporal characteristics of $b$ value in the northern margin of Ordos Block and its earthquake prediction efficiency[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(6): 785-796.

[7] 张帆,韩晓明,李娟,等.内蒙古乌拉特后旗—临河地区地震活动的预测效能评估[J].华北地震科学,2018,36(3):35-39.
ZHANG Fan, HAN Xiaoming, LI Juan, et al. The prediction efficiency evaluation of seismicity in Wulatehouqi—Linhe area [J]. North China Earthquake Sciences, 2018, 36(3): 35-39.

[8] 贾漯昭,宋美琴,谢健健,等.华北块体地震活动显著增强预测效能评估[J].地震,2020,40(2):38-48.
JIA Luozhao, SONG Meiqin, XIE Jianjian, et al. Effectiveness evaluation of earthquake activity significantly enhanced prediction in North China[J]. Earthquake, 2020, 40(2): 38-48.

[9] 高立新.半年、月异常频次速率法在地震预报中的应用研究[J].西北地震学报,2001,23(3):261-264.
GAO Lixin. A study on application of half year and month anomalous frequency velocity rate methods in earthquake prediction[J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(3): 261-264.

[10] MOGI K. Some features of recent seismic activity in and near Japan (2): activity before and after great earthquakes[J]. Bull Earthq Res Inst Univ Tokyo, 1969, 47: 395-417.

[11] 梅世蓉,宋治平,薛艳.中国巨大地震前地震活动环形分布图象与规律[J].地震学报,1996,18(4):413-419.
MEI Shirong, SONG Zhiping, XUE Yan. Ring patterns and regulation of seismicity before great earthquakes in China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(4): 413-419.

[12] 徐锡伟,吴熙彦,于贵华,等.中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用[J].地震地质,2017,39(2):219-275.
XU Xiwei, WU Xiyan, YU Guihua, et al. Seismo-geological signatures for identifying $M \geqslant 7.0$ earthquake risk areas and their premilimary application in China's Mainland[J]. Seismology and Geology, 2017, 39(2): 219-275.

[13] 代光辉,苗春兰,翟璐媛.中国测震台网统一地震编目[J].中国地震,2019,35(1):192-203.
DAI Guanghui, MIAO Chunlan, ZHAI Luyuan. Unified earthquake cataloging of China seismographic network[J]. Earthquake Research in China, 2019, 35(1): 192-203.

[14] 刘芳,蒋长胜,杨彦明,等.内蒙古测震台网地震监测资料完整性分析[J].地震地磁观测与研究,2013,34(增刊 1):176-183.
LIU Fang, JIANG Changsheng, YANG Yanming, et al. Material integrity anailsys of Inner Mongolia earthquake networks [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2013, 34(Suppl01): 176-183.

[15] 徐伟进,高孟潭.中国大陆及周缘地震目录完整性统计分析[J].地球物理学报,2014,57(9):2802-2812.
XU Weijin, GAO Mengtan. Statistical analysis of the completeness of earthquake catalogs in China Mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(9): 2802-2812.

[16] 刘芳,蒋长胜,张帆,等.基于 EMR 方法的内蒙古测震台网监测能力[J].地球科学,2013,38(6):1356-1362.
LIU Fang, JIANG Changsheng, ZHANG Fan, et al. Monitoring capacity of seismic network in Inner Mongolia region based on EMR method[J]. Earth Science, 2013, 38(6): 1356-1362.

[17] 陈凌,刘杰,陈颙,陈龙生.地震活动性分析中余震的删除[J].地球物理学报,1998,41(增刊 1):244-252.
CHEN Ling, LIU Jie, CHEN Yong, et al. Aftershock deletion in seismicity analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(suppl01): 244-252.

[18] 徐伟进,吴健.余震时空丛集对概率地震危险性分析的影响[J].地球物理学报,2017,60(8):3110-3118.
XU Weijin, WU Jian. Effect of temporal-spatial clustering of aftershocks on the analysis of probabilistic seismic hazard[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(8): 3110-3118.

[19] BEAUVAL C, SCOTTI O, BONILLA F. The role of seismicity models in probabilistic seismic hazard estimation: comparison of a zoning and a smoothing approach[J]. Geophysical Journal International, 2006, 165(2): 584-595.

[20] 许绍燮.地震预报能力评分[C]//地震预报方法实用化研究文集:地震学专辑.北京:学术书刊出版社,1989:586-590.

[21] 郭增建,秦保燕,吴瑾冰.统计物理学在地震预报中的应用[J].国际地震动态,2000(8):1-7.
GUO Zengjian, QIN Baoyan, WU Jinbing. Application of statistical physics to earthquake prediction[J]. Recent Developments in World Seismology, 2000(8): 1-7.

[22] MOLCHAN G M. Earthquake prediction as a decision-making problem[J]. Pure and Applied Geophysics, 1997, 149(1): 233-247.

[23] 蒋长胜,张浪平,韩立波,等.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[J].地震,2011,31(2):106-113.
JIANG Changsheng, ZHANG Langping, HAN Libo, et al. Probabilistic forecasting method of long-term and intermediate-term seismic hazard Ⅰ: molchan error diagram[J]. Earthquake, 2011, 31(2): 106-113.

[24] 张盛峰,郑建常,蒋长胜,等.图像信息学(PI)算法计算参数优化分析:以山东及相邻地区为例[J].地球物理学报,2017,60(12):4633-4643.
ZHANG Shengfeng, ZHENG Jianchang, JIANG Changsheng, et al. Optimal analysis of parameter settings in pattern informatics (PI) algorithm: an example of Shandong and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4633-4643.