

# 基于岩体加卸载响应原理的强矿震危险性预测

李 铁<sup>1 2)</sup> ✉ 孙学会<sup>3)</sup> 吕毓国<sup>4)</sup> 盛继权<sup>4)</sup> 梅亭亭<sup>1 2)</sup>

1) 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083 2) 北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083

3) 抚顺矿业集团有限责任公司,抚顺 113008 4) 抚顺矿业集团有限责任公司老虎台矿,抚顺 113003

✉ 通信作者, E-mail: fslitie@yahoo.com.cn

**摘 要** 以抚顺老虎台矿田为工程背景,采用加卸载响应比理论,开展强矿震预测技术应用研究.研究表明: $0 \leq M_L \leq 0.5$  矿震在各开采深度作为加卸载响应震级的预测效能均较好,对于阶段峰值震级的平均预测信度为 0.72;  $M_L \geq 1.4$  矿震作为加卸载响应震级,具有深度尺度效应,响应震级与开采深度成正比,一般小于预测震级 0.5~1.0,对于阶段峰值震级的平均预测信度 0.60;  $0.6 \leq M_L < 1.4$  矿震作为加卸载响应震级的随机性较大,分析是两种不同机制矿震混合的结果,不适宜作为加卸载响应震级;开采深度越大,地应力环境强度越高,预测敏感性和效果越好.在阜新煤田和门头沟矿田进行普适性检验,预测信度分别为 0.8 和 0.73. 试验结果表明,加卸载响应比理论和方法预测强矿震具有较好的效能和应用前景.

**关键词** 深部开采; 矿震; 震级; 预测

**分类号** TD 324; P 315.02

## Predicting the risk of strong mining-induced seismicity based on the rock load/unload response theory

LI Tie<sup>1 2)</sup> ✉, SUN Xue-hui<sup>3)</sup>, LÜ Yu-guo<sup>4)</sup>, SHENG Ji-quan<sup>4)</sup>, MEI Ting-ting<sup>1 2)</sup>

1) Key Laboratory of High-Efficiency Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China

2) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) Fushun Mining Group Co. Ltd., Fushun 113008, China

4) Laohutai Coal Mine, Fushun Mining Group Co. Ltd., Fushun 113003, China

✉ Corresponding author, E-mail: fslitie@yahoo.com.cn

**ABSTRACT** Taking Laohutai Coal Mine in Fushun of northeastern China as an engineering background, an application study of strong mining-induced seismicity prediction was carried out on the basis of the load/unload response ratio (LURR) theory. It is shown that when the load/unload response magnitude adopts the mining-induced seismicity of  $0 \leq M_L \leq 0.5$ , the forecasting efficacy is very good in all mining depths and the average forecasting reliability of the staged peak magnitude is 0.72. When  $M_L \geq 1.4$ , the response magnitude is direct proportion to mining depth, and is generally 0.5 to 1.0 lower than the predicted magnitude, while the average forecasting reliability of the staged peak magnitude is 0.60. When  $0.6 \leq M_L < 1.4$ , there might be a mixture of two mining-induced seismicities with different mechanisms, which is not suitable to the load/unload response magnitude due to its wide randomness. With the increase of mining depth, the in-situ stress intensity is higher, and the prediction is better. According to universal tests in Fuxin Coal Field and Mentougou Mine, the forecasting reliability is 0.8 and 0.73, respectively. The results indicate that the LURR theory and methods have a good ability and a broad application in predicting strong mining-induced seismicity.

**KEY WORDS** deep mining; mining-induced seismicity; magnitude; prediction

矿山开采导致的岩石动力学灾害,其中一类通常发生在远离采掘工作面  $10^2$  m 级别尺度以外.这类灾害的特点是:①发生的时间相对采掘扰动活动具有不确定的延迟性;②发生的空间位置往往偏离

采掘部位,易于沿已存在的地质弱面或地质间断面发生,也可产生新的岩体位错;③通常是大尺度采掘空间应力重分布导致的地质间断面滑移施加动荷载作用的结果;④主破裂强度较高<sup>[1-6]</sup>. 本文称此类

灾害为强矿震. 在对强矿震的研究中,适用于近场冲击地压和岩爆的预测技术与方法绝大部分失效,只有微震法可使用.

强矿震因破裂源远离采场,释放的能量通过介质吸收和几何衰减,通常对采场的直接破坏作用不强,但其对采场中围岩的薄弱部位、采矿技术条件造成的应力集中部位、处于亚临界失稳状态的含瓦斯煤层以及冲击地压和岩爆等潜在灾源的动力输入可形成能量叠加或耦合,诱导发生所谓的“低指标”煤矿瓦斯动力灾害,使得人们疏于防范,是深部采掘活动不可忽视的灾源之一,其危险性预测具有重要的工程应用价值.

强矿震震源区介质在开采扰动下逐渐受到损伤,最后演化为非稳定失稳,具有非线性特征,微震序列统计学分析方法使用受限. 本文分析了矿田和煤田尺度岩体破裂失稳的加卸载力学机理,进而探索了强矿震破裂失稳阶段的前兆信息,对强矿震危险性起提示和预警作用.

### 1 研究方法

岩石受力在弹性变形范围内时,其应力-应变曲线卸载可沿加载路径返回,即加载和卸载的应变响应相等;而进入塑性阶段后,应力-应变曲线的卸载路径滞后于加载路径,即加载的应变响应大于卸载. 根据这一原理,尹祥础等<sup>[7]</sup>提出了预测天然地震的“加卸载响应比 (load/unload response ratio, LURR) 理论”,并将地球固体潮引潮力的周期变化作为对地壳介质的加载和卸载应力,而将某一区域及某一时段内对应的地震能量  $E$  作为响应物理量,将加卸载响应比  $Y$  值定义为

$$Y = \left( \sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+ / \left( \sum_{i=1}^{N_-} E_i^m \right)_- \quad (1)$$

式中:  $E$  为地震能量,  $N$  为地震数,“+”和“-”分别表示加载和卸载,  $m$  为常数. 当介质处于弹性状态时,  $Y = 1$ ; 当介质进入非线性损伤状态后,  $Y > 1$ ,且随着失稳状态的逼近,  $Y$  值增大. 因此,  $Y$  值可以定量地描述介质逼近失稳的程度,并在实验室小尺度试验和大尺度天然地震预测中取得了较好的应用效果<sup>[8-9]</sup>.

本文选择矿震活动水平较高,强矿震多发,具有连续矿震观测资料的矿山进行应用试验研究和普适性检验,探索该理论可否应用于矿田或煤田尺度岩体破裂的非稳定失稳判别及其应用条件.

#### 1.1 试验研究

选择辽宁省抚顺老虎台矿田进行试验研究. 紧

邻抚顺老虎台矿田的胜利矿田在 1933 年发生了全国最早的冲击地压灾害. 从 1968 年 12 月起至今,老虎台矿田一直在使用微地震设备连续监测矿震,里氏近震震级  $M_L \geq -0.3$  矿震观测资料连续完整. 1990 年以后,老虎台矿田开始发生  $M_L \geq 3.0$  ( $E = 1.8 \times 10^8$  J) 的高强度矿震; 2002 年时达到能量释放高峰,  $M_L \geq 3.0$  的强矿震发生共 21 次. 截至 2010 年 6 月 30 日,  $M_L \geq 3.0$  强矿震共发生 108 次,最高强度矿震  $M_L = 3.7$  ( $E = 2.8 \times 10^9$  J).

应用式(1),将矿田所在区域地球固体潮引潮力的周期变化作为对矿田区地壳介质的加载和卸载应力,将对应期间采矿产生矿震事件的能量作为响应物理量,取  $m = 1/2$ ,  $E^{1/2}$  即为著名的 Beniof 应变,是岩体应变量的测度,因此地球固体潮引潮力-本尼奥夫应变的关系与岩体本构关系具有相似性.

选取 1969—2004 年  $M_L \geq 0$  的全部矿震观测资料连续计算,尽量加长考察周期,保证相关的可靠性. 在自然时间段和采矿深度划分的时间段尺度范围分别计算,考察采矿深度对加卸载响应的影响. 对于两个不同的时间尺度,计算的时间窗长和滑动步长(计算参数)从若干年变化到若干天,进行逐尺度筛选. 选取各级别的矿震作为响应震级,震级范围尽量大,力求使响应矿震的数量足够多. 最后确定出加卸载响应矿震事件震级以及所期望的预测矿震强度.

为评价预测效能,本文将  $Y > 1$ ,且能对应上期望预测强度震级矿震的异常称为可信异常  $\alpha_1$ ; 有异常但没有发生期望预测强度震级的矿震称为虚假异常  $\alpha_2$ ; 发生了期望预测强度震级的矿震但没有出现异常称为缺信异常  $\alpha_3$ ,定义预测信度  $C_p$  为

$$C_p = \alpha_1 / (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \quad (0 \leq C_p \leq 1.0) \quad (2)$$

#### 1.2 普适性检验

选择辽宁省阜新煤田和原北京门头沟矿田进行普适性检验. 阜新煤田 2004—2006 年强矿震频发,附近地震台可观测到该煤田  $M_L \geq 1.0$  的矿震. 在我国,原北京门头沟矿田最早开始布设微震设备观测矿震,该矿 1990—2000 年的  $M_L \geq 1.0$  矿震观测资料连续完整,1994 年曾发生过  $M_L = 4.2$  强矿震,是我国煤矿发生的强度最高的矿震之一.

### 2 抚顺老虎台矿的试验结果

抚顺老虎台矿田为古近系煤系建造,煤层为向北倾斜的向斜褶皱南翼,东薄西厚,南薄北厚,厚度为 0.6 ~ 110.5 m,平均厚度 58 m. 矿田地质构造复杂,主体断裂走向北东东,  $F_1$  断裂是构成矿田的北侧

边界,次级断裂发育.主采煤层顶板为古近系油页岩,厚度为 25.8~362.35 m,平均厚度 194.08 m,节理发育,单轴抗压强度为 47.3 MPa,抗拉强度为 1.8 MPa;煤样单轴抗压强度为 7~10 MPa;底板大部分为太古界厚层片麻岩系变质岩,单轴抗压强度 136.5 MPa,抗拉强度 12.4 MPa.矿井采用斜竖井结合阶段水平大巷开拓方式,开拓段高 100~150 m,回采段高 50 m,由上至下分层开采.先后已回采完 -225 m, -330 m, -430 m, -580 m, -630 m, -680 m, -780 m 和 -830 m 水平.

2.1 自然时间秩序的分析

经反复筛选,使用全部 36 年的微震数据或随机抽取 30 个月以上一段时间的数据,使用时间窗长 2 个月(或 1)个月、滑动步长 10 d(或 5 d)的时间扫描参数  $\rho \leq M_L \leq 0.5$  的微小震级为响应震级时,加卸载响应比指标  $Y$  值对相应时段发生的高强度矿震均有较显著响应;响应震级  $M_L \geq 0.6$  时,噪声信号较强,未发现规律性前兆异常信号.即以微小震级作为加卸载响应震级,尽管采矿作业由浅入深,但具有统一的扫描参数;而当加卸载响应震级提高后,随机抽取一段时间, $Y$  值与发生的高强度矿震间表现出高离散性和低相关性.

响应震级取为  $0 \leq M_L \leq 0.5$ , 预测效能的部分结果见表 1 和图 1(图中箭头指示强矿震发生的时

间轴位置,数字表示震级,下同),用式(2)的预测效能评价方法进行评价,平均信度为 0.72. 810 m 以浅平均预测信度 0.65, 810 m 以深平均预测信度 0.81,深部比浅部平均预测信度提高 24.6%,表明在各应力强度环境下均存在强矿震前岩体的微小破裂及其自组织临界失稳,而环境应力越强,加卸载响应的敏感程度越高,非线性系统的特征越显著,预测效能越高.

表 1 老虎台矿田自然时间秩序预测效能

采矿深度/m	预测震级, $M_L$	可信异常数/次	缺失异常数/次	虚假异常数/次	$C_p$
510	$\geq 2.2$	2	0	2	0.50
585	$\geq 2.4$	5	3	0	0.63
610	$\geq 2.5$	7	0	1	0.88
660	$\geq 2.6$	2	0	1	0.67
710	$\geq 2.6$	5	1	2	0.63
760	$\geq 2.7$	4	1	2	0.57
810	$\geq 3.4$	3	1	0	0.75
910	$\geq 3.4$	7	1	1	0.78
710 和 910	$\geq 3.2$	8	1	0	0.89
合计	—	43	8	9	—
平均	—	—	—	—	0.72

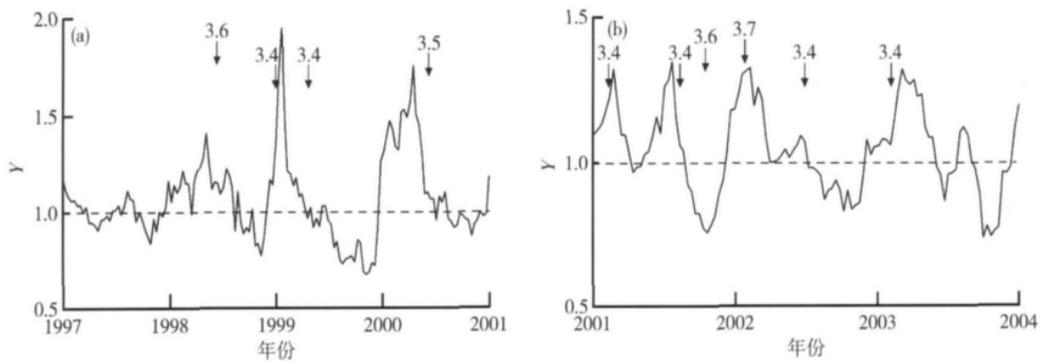


图 1 老虎台矿田自然时间秩序加卸载响应比预测强矿震效能. (a) 1997—2000; (b) 2001—2003

Fig. 1 Efficacy to predict strong mining-induced earthquakes by time sequence LURR at Laohutai Mine: (a) 1997—2000; (b) 2001—2003

2.2 地应力强度时间秩序的分析

由于  $M_L \geq 0.6$  矿震对自然时间秩序的矿震加卸载响应未见较好的预测效能,根据由浅入深的采矿历史,建立一种地应力强度主导的时间秩序,即将相同开采深度(或地应力强度)期间发生的全部矿震划为同一时间集合.使用时间窗长 2 个月(或 1 个月)、滑动步长 10 d(或 5 d)的时间扫描参数.结果显示  $0.6 \leq M_L < 1.4$  的响应震级,噪声信号较强,

未见预测意义;  $M_L \geq 1.4$  可作为高能量事件的下限响应震级,但响应震级与采矿深度成正比提高;而  $0 \leq M_L \leq 0.5$  的微小矿震作为响应震级的计算结果与 2.1 节基本相同.即以高能量矿震作为加卸载响应矿震,具有统一的时间扫描参数,但响应震级具有地应力强度效应,地应力强度越高,需要的响应震级越高.

预测效能见表 2 和图 2,平均预测信度为 0.60, 910 m 以深预测信度有增高趋势.

表 2 老虎台矿田地应力强度时间秩序预测效能

Table 2 Prediction efficacy by in-situ stress intensity time sequence at Laohutai Mine

采矿深度/m	响应震级, $M_L$	预测震级, $M_L$	可信异常数/次	缺信异常数/次	虚假异常数/次	$C_p$
510	$\geq 1.4$	$\geq 2.2$	2	0	1	0.67
585	$\geq 1.4$	$\geq 2.4$	5	3	0	0.63
610	$\geq 1.5$	$\geq 2.5$	7	0	6	0.54
660	$\geq 1.5$	$\geq 2.6$	2	0	2	0.50
710	$\geq 1.8$	$\geq 2.6$	4	3	1	0.50
760	$\geq 2.2$	$\geq 2.7$	4	1	2	0.57
810	$\geq 2.7$	$\geq 3.4$	2	2	0	0.50
910	$\geq 2.9$	$\geq 3.4$	4	2	0	0.67
710 和 910	$\geq 2.1$	$\geq 3.2$	8	1	1	0.80
合计	—	—	38	12	17	—
平均	—	—	—	—	—	0.60

### 3 普适性检验结果

科学研究中的“普适性”问题十分重要。目前的一些研究显示,在一个矿山总结出的矿震活动规律,往往在另外的矿山并不适用或不完全适用。加卸载响应比这个力学机理比较明晰的理论能否在此方面有所突破需要得到检验。本文使用阜新煤田和原门头沟矿田比较完整的矿震观测资料进行普适性检验,结果表明具有较好的普适性。

采用本文上述相同的方法,由于没有得到这两个矿  $M_L < 1.0$  的矿震资料,响应震级则选取了高震级段的矿震事件。

阜新煤田经筛选,扫描时间窗长选取 2 个月,滑动步长选取 10 d,响应震级  $M_L \geq 2.9$ ,预测  $M_L \geq 3.5$  矿震,这样的参数在该煤田预测效能最高(图 3)。预测期内共发生 5 组(7 次)  $M_L \geq 3.5$  矿震,其中 4

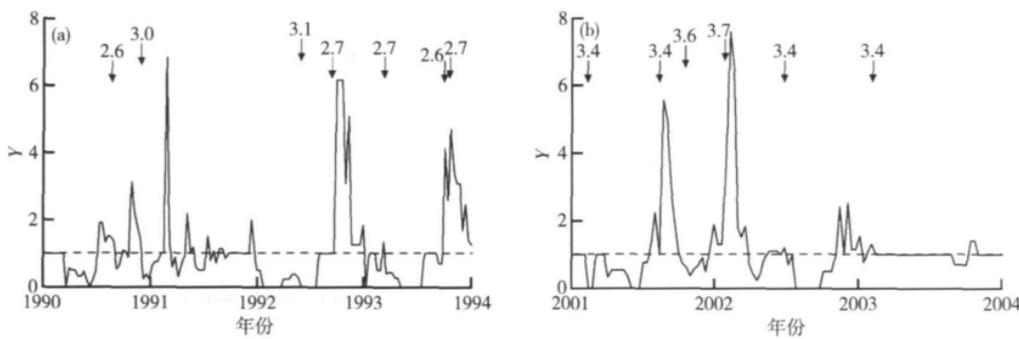


图 2 老虎台矿田地应力强度时间秩序加卸载响应比预测强矿震效能。(a) 1990—1994, 710 m 深度; (b) 2001—2004, 910 m 深度

Fig. 2 Efficacy to predict strong mining-induced earthquakes by in-situ stress intensity time sequence LURR at Laohutai Mine: (a) 1990—1994, 710 m in depth; (b) 2001—2004, 910 m in depth

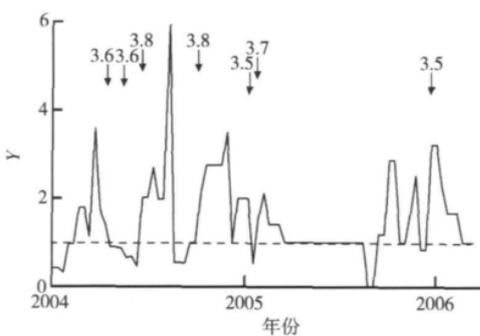


图 3 阜新煤田加卸载响应比预测强矿震效能

Fig. 3 Efficacy to predict strong mining-induced earthquakes by LURR at Fuxin Coal Field

组(6 次)存在可信异常,1 次缺信漏报,预测信度为 0.8。

原门头沟矿田经筛选,扫描时间窗长选取 2 个月,滑动步长选取 10 d,响应震级  $M_L \geq 2.7$ ,预测

$M_L \geq 3.2$  矿震。连续 10 年资料显示,发生  $M_L \geq 3.2$  矿震 12 次(图 4),其中 11 次有显著可信异常,但出现 3 次虚假异常,1 次缺信漏报,预测信度 0.73。门头沟矿田的震前响应异常出现较早,持续时间相对较长,为 3~5 个月,这可能与该矿田厚层坚硬的石英岩顶板有关。

### 4 讨论与结论

(1) 加卸载响应比理论和方法的力学机理清晰,在抚顺老虎台矿田的应用研究和阜新煤田及原门头沟矿田的普适性检验表明,该理论预测强矿震的效能较高,具有良好的应用前景。

(2) 老虎台矿田的试验显示:  $0 \leq M_L \leq 0.5$  作为加卸载响应震级的预测效果较好,适用于各开采深度,对于阶段峰值震级的平均预测信度为 0.72;  $M_L \geq 1.4$  作为加卸载响应震级,具有深度尺度效应,响应震级与开采深度成正比,一般小于预测震级 0.5~

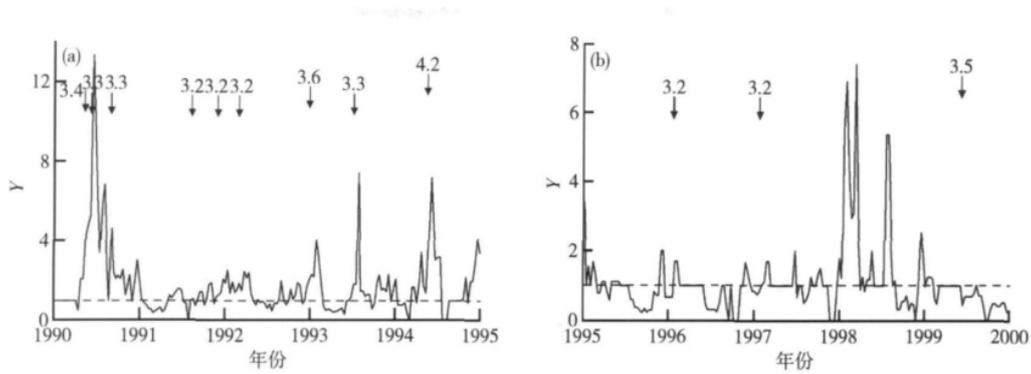


图 4 门头沟矿田加卸载响应比预测强矿震效能. (a) 1990—1994; (b) 1995—1999

Fig. 4 Efficacy to predict strong mining-induced earthquakes by LURR at Mentougou Coal field: (a) 1990—1994; (b) 1995—1999

1.0, 对于阶段峰值震级的预测信度为 0.5 ~ 0.8. 而 810 m 采深以下随着环境应力增强  $\rho \leq M_L \leq 0.5$  响应震级的预测信度趋于增高, 反映加卸载响应的敏感程度增强, 表明高应力环境的非线性特征趋于显著.

(3) 对于由浅入深分水平开采的煤田或矿田, 选择高震级段矿震作为响应震级需逐级逐开采深度筛选的方法不是很方便, 但对于观测能力不足或缺少微小矿震观测资料的矿山, 仍不失为一种可供使用的预测方法和参数.

(4) 加卸载响应比出现时间的迟早和持续的长短, 与顶板岩层的坚硬程度有关, 厚层坚硬顶板异常出现早、持续时间长, 但异常值的大小未见与预测震级有显著相关性.

(5) 微小震级事件作为响应震级的无深度尺度效应现象, 表明在各应力强度环境均存在强矿震前的岩体微小破裂自组织临界失稳. 高强度破裂事件作为响应震级与采矿深度成正比, 这种深度(应力强度)尺度效应问题, 表明在系统趋于临界状态后, 越接近主破裂强度的前震破裂, 其对加卸载的响应越敏感. 老虎台矿田的  $0.6 \leq M_L < 1.4$  矿震作为加卸载响应震级的随机性较大, 不适宜作为加卸载响应震级, 缘于此震级段的矿震包含采矿直接相关和间接相关两种不同机制岩体破裂事件所致<sup>[10]</sup>.

致 谢

感谢中国地震局地球物理研究所张少泉研究员、抚顺市地震局和阜新市地震局提供的资料.

参 考 文 献

[1] Kijko A, Drzęzła B, Stankiewicz, T. Bimodal character of the distribution of extreme seismic events in Polish mines. *Acta*

*Geophys Pol*, 1988, 35(2): 157

[2] Johnston J C, Einstein M H. A survey of mining associated seismicity // *Rockbursts and Seismicity in Mines: Proceedings of the 2nd International Symposium*. Minneapolis, 1990: 121

[3] Knoll P, Kuhnt W. Investigation of the mechanism of rockbursts by seismological measurements // *Rockbursts, Global Experiences, International Bureau of Strata Mechanics*. Hyderabad, 1990: 11

[4] Gaviglio P, Revalor R, Piguat J P, et al. Tectonic structures, strata properties and rockbursts occurrence in French coal mine // *Rockbursts and Seismicity in Mines: Proceedings of the 2nd International Symposium*. Minneapolis, 1990: 289

[5] Krishnamurthy R, Shringarputale S B. Rockburst hazard in Kolar Gold Fields // *Rockbursts and Seismicity in Mines: Proceedings of the 2nd International Symposium*. Minneapolis, 1990: 411

[6] Li T, Cai M F, Cai M. A discussion on the classification of mining-induced seismicity. *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25(Suppl 2): 3679  
(李铁, 蔡美峰, 蔡明. 采矿诱发地震分类的探讨. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增刊 2): 3679)

[7] Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. The load-unload response ratio theory: a new approach to earthquake prediction. *Chin J Geophys*, 1994, 37(6): 767  
(尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 加卸载响应比: 一种新的地震预报方法. *地球物理学报*, 1994, 37(6): 767)

[8] Yin X C, Chen X Z, Song Z P. The development of load-unload response ratio theory and its application to earthquake prediction. *Chin J Geophys*, 1994, 37(Suppl 1): 223  
(尹祥础, 陈学忠, 宋治平. 加卸载响应比理论及其在地震预测中的应用研究进展. *地球物理学报*, 1994, 37(增刊 1): 223)

[9] Yin X C. A new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio (LURR) theory. *Mech Eng*, 2004, 26(6): 1  
(尹祥础. 地震预报的新途径: 加卸载响应比理论. *力学与实践* 2004, 26(6): 1)

[10] Li T, Chen S H. The mechanism of the self-similarity of the Gutenberg-Richter relation: a km-scale in-situ observational investigation // *RaSiM7(2009): Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines*. Dalian, 2009: 1003