# Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 5

Article 21

1-3-2019

# Application of Stochastic Petri-net in Dynamic Evaluation of Ecological Environmental Vulnerability in Mining Area

Guangqiu Huang School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

Quanchen Liu School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

qiuqin Lu School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

# Application of Stochastic Petri-net in Dynamic Evaluation of Ecological Environmental Vulnerability in Mining Area

## Abstract

Abstract: In order to establish the simulation model of vulnerable process of ecological environment in mining and evaluate ecological environment vulnerability dynamically, stochastic Petri-net (SPN) was adopted. *The place set was divided into destruction state set, repair state set and virtual place set. Ways of representation and calculation method of these three types of places were given respectively. The state value of a place was to record actual change quantity of this place. The calculation of vulnerability was integrated into network system running naturally. Vulnerability algorithm based on SPN was given. In case study, a simplified SPN model was established. Its isomorphic Markov chain was drawn. We also calculated the average vulnerability using a large number of vulnerability-time sample data and steady state probability of each reachable marking. A further performance analysis then was conducted and so verified the effectiveness of the proposed method in this paper. The method can provide scientific reference for analysis of ecological environment vulnerability.* 

## Keywords

ecological environment, mining area, vulnerability evaluation, stochastic Petri-net

## **Recommended Citation**

Huang Guangqiu, Liu Quanchen, Lu qiuqin. Application of Stochastic Petri-net in Dynamic Evaluation of Ecological Environmental Vulnerability in Mining Area[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1787-1795.

第 30 卷第 5 期	系统仿真学报©	Vol. 30 No. 5
2018年5月	Journal of System Simulation	May, 2018

# 矿区生态环境脆弱度动态评价的随机 Petri 网方法

黄光球, 刘权宸, 陆秋琴

(西安建筑科技大学管理学院,陕西西安,710055)

摘要:为了建立矿区生态环境脆弱化过程的仿真模型,动态评价矿区生态环境脆弱度,采用了随机 Petri 网(SPN)。将库所集划分为了破坏状态集、修复状态集和虚库所集,并给出了它们的表示及计 算方法。利用状态值记录各库所实际量的改变情况,将脆弱度的计算融入到网系统的运行过程中, 给出了基于 SPN 的脆弱度算法。案例研究构建了一个简化的脆弱度计算 SPN 模型, 绘制了与其同 构的马尔科夫链, 计算了多条样本曲线的脆弱度值及各可达标识的稳态概率, 进行了进一步的性能 分析,验证了所提方法的有效性。该方法可为预测矿区生态环境脆弱度分析提供科学参考。

关键词: 生态环境; 矿区; 脆弱度评价; 随机 Petri 网

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 05-1787-09 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805021

## **Application of Stochastic Petri-net in Dynamic Evaluation** of Ecological Environmental Vulnerability in Mining Area

Huang Guangqiu, Liu Quanchen, Lu qiuqin

(School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to establish the simulation model of vulnerable process of ecological environment in mining and evaluate ecological environment vulnerability dynamically, stochastic Petri-net (SPN) was adopted. The place set was divided into destruction state set, repair state set and virtual place set. Ways of representation and calculation method of these three types of places were given respectively. The state value of a place was to record actual change quantity of this place. The calculation of vulnerability was integrated into network system running naturally. Vulnerability algorithm based on SPN was given. In case study, a simplified SPN model was established. Its isomorphic Markov chain was drawn. We also calculated the average vulnerability using a large number of vulnerability-time sample data and steady state probability of each reachable marking. A further performance analysis then was conducted and so verified the effectiveness of the proposed method in this paper. The method can provide scientific reference for analysis of ecological environment vulnerability.

Keywords: ecological environment; mining area; vulnerability evaluation; stochastic Petri-net

# 引言

矿产资源是国民经济建设与社会发展的物质



修回日期: 2016-08-24; 收稿日期: 2016-07-07 基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金 (15YJA910002),陕西省自然科学基础研究计划 (2015JZ010),陕西省社会科学基金(2014P07),陕西 省教育厅服务地方专项计划(16JF015); 作者简介: 黄光球(1964-), 男,湖南桃源,博士, 教授,博导,研究方向为矿区环境评价。

基础,没有矿产资源持续稳定的供应,就没有现代 经济与社会的发展<sup>[1]</sup>。当前,煤矿消费量已经占据 了我国能源消费总量的70%以上,但采矿所带来的 各种各样生态环境问题也日趋严重,甚至直接威胁 到了区域经济安全和人们的日常生产和生活<sup>[2]</sup>。如 果未能对采矿过程施加有效控制,有可能对矿区及 其周边生态环境带来严重后果。因此,如何客观、

第 30 卷第 5 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 5
2018年5月	Journal of System Simulation	May, 2018

形象地建立矿区生态环境脆弱化的仿真模型,更加 真实地反映采矿活动造成的生态环境脆弱化过程, 从而动态评价矿区生态环境脆弱度,有效控制采矿 水平,合理采用修复措施,有利于保护矿区周边生 态环境,减少矿业开采造成的生态破坏。

近年来,国外学者采用不同的评价方法对多类 生态系统的脆弱度进行了评价。Jorge 等<sup>[3]</sup>基于环 境影响评价(EIA)方法,提出了一种采矿过程中的

环境影响动态分析模型,对不同开采项目造成 的环境破坏进行了评价。Okey 等<sup>[4]</sup>利用空间信息, 从暴露度、敏感度和适应力方面对海洋生态系统在 气候变化下的脆弱度进行了评价。Tran 等<sup>[5]</sup>基于脆 弱度"自评估"的概念,结合线性优化策略,评价了 中大西洋水域环境的脆弱度。Nandy 等<sup>[6]</sup>利用遥感 技术(RS)和地理信息系统(GIS),结合空间主成分 分析法(SPCA),评价了山地生态系统的环境脆弱 度。但是,国外学者针对矿区生态环境脆弱度评价 的研究仍然很少,有关这方面的研究文献主要还是 来自于国内。Liao 等<sup>[2]</sup>基于 GIS 和 AHP 方法,利 用生态脆弱度指标(EVI)对煤矿开采区的生态脆弱 度进行了评价。吴健生等[7]提出了基于景观格局的 矿区生态脆弱性评价方法。付标等<sup>[8]</sup>应用 AHP 和 综合指数法对矿区生态环境脆弱性进行了评价。刘 平等<sup>[9]</sup>从敏感性和恢复力两方面评价了露天煤矿 生态系统的脆弱度。此外,国内学者也对其它生态 系统的脆弱度进行了评价[10-13]。

综合国内外研究文献来看,现有研究方法存在 的不足主要有:

(1) 未能将采矿过程中各活动发生的随机延时 考虑在内。

(2)不能对人工修复和自然修复的过程进行较 好地建模。

(3) 不能进行进一步的系统性能分析。

针对上述不足,本文提出了矿区生态环境脆弱 度动态评价的随机 Petri 网方法,该方法的主要优 势包括:

(1)考虑了采矿过程中各状态转移的随机时间。(2)能够对人工修复和自然修复的过程进行直

观地表示和计算。

(3) 可以进行强大的系统性能分析。

本文提出的方法正好能够弥补现有研究的不 足。同时,与较为复杂的对象 Petri 网相比,本文 将脆弱度的计算融入到网系统的运行过程中,利用 网系统的运行来动态反映生态环境脆弱化过程,因 而在计算方法和表达方式上具有简化性和动态性。

## 1 随机 Petri 网的基本概念

在连续时间随机 Petri 网中,一个变迁从可实 施到实施需要延时,即从一个变迁 t 变成可实施的 时刻到它的实施时刻之间被看成是一个连续随机 变量 x<sub>t</sub> (取正实数值),且服从于一个分布函数:

 $F_t(x) = P\{x_t \leq x\}$ 

在不同类型的连续随机 Petri 网中,这个分布 函数的定义是不一样的。在 Molloy 提出的连续时 间 SPN 中,相关于每个变迁的分布函数被定义成 一个指数分布函数

 $\forall t \in T : F_t(x) = 1 - e^{-\lambda_t x}$ 

式中:实参数 $\lambda$ >0 是变迁 t 的平均实施速率,变量  $x \ge 0$ 。这种 SPN 的可达图同构于一个齐次马尔科 夫链(简称 MC)。SPN 的每个标识映射成 MC 的一 个状态, SPN 的可达图同构于一个 MC 的状态空 间,因而可用马尔科夫随机过程求解。

为了使 SPN 更适用于生态系统的建模,我们 对 SPN 的定义作出了一定的变化。变化后的定义 并没有改变 SPN 的实质,但其更适合于表示实际 的生态系统脆弱化过程。

定义: 一个 SPN 是一个九元组

 $\Sigma = (S,T;F,W,M_0,G_0,h,\lambda,\mu),$ 

其中:

(1)  $(S,T;F,W,M_0)$  是一个 P/T 系统<sup>[14]</sup>, 其中 |S|=m, |T|=n。

(2) 库所集 *S* 划分为破坏状态集 *S<sub>d</sub>*、修复状态 集 *S<sub>r</sub>*和 虚 库 所 集 *S<sub>v</sub>*: *S* = *S<sub>d</sub>*  $\cup$  *S<sub>r</sub>*  $\cup$  *S<sub>v</sub>*, *S<sub>d</sub>*  $\cap$  *S<sub>r</sub>*  $\cap$  *S<sub>v</sub>* =  $\emptyset$ , 它们在 Petri 网中分别用不同的 图形表示。

(3) 映射  $G_0: S \to \mathbb{R}$  是各库所的初始状态函

第 30 卷第 5 期		Vol. 30 No. 5
2018年5月	黄光球,等:矿区生态环境脆弱度动态评价的随机 Petri 网方法	May, 2018

数,  $\mathbb{R}$ 表示实数集。 $\forall s \in S$ ,  $G_h(s) = a$ 表示库所 s 在第 h 时刻的状态函数值为 $\alpha$ 。

(4) h 为系统时钟,表示当前所处的时刻, h=0 表示系统的初始状态。 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 是各变迁 的平均实施速率集合,单位是次数/单位时间,其 倒数  $\tau_i = 1/\lambda_i$ 称为变迁  $t_i$ 的平均实施延迟或平均 服务时间;  $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ 是定义在变迁集上 的 平 均 变 化 系 数 集 合 ,其第 i 个 分 量  $\mu_i = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k\} (k = | {}^{\bullet}t_i|)$ 表示变迁  $t_i$ 所对应的第 $^k$ 条 输入弧的平均变化系数,它主要是用来计算变迁实 施后各库所状态值的增量,是一个实数值。

## 2 基于 SPN 的脆弱度动态评价方法

矿区生态系统是一个行为复杂的大系统,各种 各样的因素都影响着其动态演化的过程。在对矿区 生态环境脆弱度进行建模和计算的过程中,我们将 库所集 S 划分为了破坏状态集 S<sub>d</sub>、修复状态集 S<sub>r</sub> 和虚库所集 S<sub>v</sub>,分别用于不同状态值的表示及计 算。其中,破坏状态库所是指那些对矿区生态环境 脆弱度具有正反馈(促进)作用的库所,修复状态库 所是指那些对脆弱度具有负反馈(阻碍)作用的库 所,而虚库所是指那些起传递或过渡作用的库所。

## 2.1 破坏状态与修复状态的表示及计算

#### 2.1.1 仅有破坏过程

如果某个库所的所有前集变迁所表示的活动 只有破坏过程,而没有包括任何修复过程,也即其 前集变迁的前集库所中只有破坏状态库所,此时的 Petri 网图形如图1所示。



图 1 破坏过程的 Petri 网表示 Fig. 1 Representation of destruction process in Petri-net

其中库所  $p_a$ 和  $p_b$ 均为破坏状态库所,变迁  $t_i$ 表示某项破坏活动, $\lambda_i$ 为  $t_i$ 的平均实施速率, { $\mu$ }为 的平均变化系数集合,  $x = -\frac{1}{\lambda_i} \ln(1-u)$ 为  $t_i$ 的随机 延迟时间,  $u \ge [0,1]$ 上服从于均匀分布的随机数。 例如,  $p_a$ 可以表示废水排放量,  $p_b$ 可以表示河流污 染距离,  $t_i$ 表示废水排放的过程, 其中  $t_i$ 的平均实 施延迟为 $1/\lambda_i$ 。

设  $p_a \in t_i$ ,  $p_b \in t_i$ ,  $p_a$ 和  $p_b$ 均为破坏状态库所,  $\lambda_i$ 为  $t_i$ 的平均实施速率,  $\{\mu\}$ 为  $t_i$ 的平均变化系数 集合, x为  $t_i$ 的随机延迟时间。令  $G_h(p)$ 表示库所 p在 h 时刻的状态值, h,h'分别表示库所 p的最新 状态值、上一个状态值所对应的时刻。则如图 1 所示的时间变迁  $t_i$ 发生后,库所  $p_b$ 的下一个状态 值  $G_{h+x}(p)$ 计算表达式为:

$$G_{h+x}(p) = \begin{cases} G_{h}(p_{b}) + \mu G_{h}(p_{a})M(p_{b}), \\ \text{IF } \Delta G_{h-h'}(p_{a}) \ge 0 \\ G_{h}(p_{b}) + \mu \Delta G_{h-h'}(p_{a})M(p_{b}), \\ \text{IF } \Delta G_{h-h'}(p_{a}) \le 0 \end{cases}$$
(1)

式中:  $\Delta G_{h-h'}(p_a) = G_h(p_a) - G_{h'}(p_a)$ 。

从 $t_i$ 可实施到实施完成的整个过程可理解为: 在 $p_a$ 的作用下,库所 $p_b$ 从状态值 $G_h(p_b)$ 转移到状态值 $G_{h+x}(p)$ 所经过的随机时间为 $x_o$ 

#### 2.1.2 既有破坏过程,也有修复过程

如果某个库所的前集变迁所表示的活动既有 修复过程,也有破坏过程,也即其前集变迁的前集 库所中同时包含了修复状态库所和破坏状态库所, 且两类库所的输入弧同时指向同一个时间变迁,此 时的 Petri 网图形如图 2 所示。



图 2 破坏过程和修复过程的 Petri 网表示 Fig. 2 Representation of destruction process and repair process in Petri-net

其中库所  $p_a$ 和  $p_b$ 均为破坏状态库所,  $p_c$ 为修复 状态库所。变迁  $t_i$ 表示破坏过程和修复过程的同时 进行,且两者所经过的随机时间相同, $\lambda_i$ 为  $t_i$ 的平 均实施速率, { $\mu_a$ , $\mu_c$ }为  $t_i$ 的平均变化系数集合, x为  $t_i$ 的随机延迟时间。例如,  $p_a$ 可以表示矿产资源

第 30 卷第 5 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 5
2018年5月	Journal of System Simulation	May, 2018

开采量, $p_a$ 可以表示废水排放量, $p_c$ 可以表示废水 净化处理的投入资金, $t_i$ 表示产生废水的过程,其 中 $t_i$ 的平均实施延迟为 $1/\lambda_i$ 。需要注意的是,在这 种表示方法中,假设修复状态时常存在,且其状态 值是脆弱度值的函数,因此, $p_c$ 和 $t_i$ 间应该形成一 个自环,且 $p_c$ 的状态值与矿区生态环境脆弱度有关。

设  $p_a, p_c \in t_i, p_b, p_c \in t_i, p_v$ 为表示脆弱度的库 所(会在后文中介绍), 令  $G_h(p)$ 表示库所 p 在 h 时 刻的状态值, x 为  $t_i$ 的随机延迟时间, h 表示库所 p的最新状态值所对应的时刻。则如图 2 所示的时间 变迁  $t_i$ 发生后, 库所  $p_b$ 和  $p_c$ 的下一个状态值  $G_{h+x}$ ( $p_b$ )和  $G_{h+x}(p_c)$ 计算表达式为:

$$G_{h+x}(p_b) = G_h(p_b) + \mu_a G_h(p_a) M(p_b) - \mu_c G_h(p_c) M(p_b)$$
(2)  

$$G_{h+x}(p_c) = f(G_h(p_v)) M(p_c)$$
(3)

其中函数  $f(G_h(p_v))$  应根据不同矿区的实际 情况来确定。在式(2)中,  $G_{h+x}(p_b)$  可能出现负值 的情况,这与实际不符,因此,对 $G_{h+x}(p_b)$  还需要 加上下面的约束条件:

$$G_{h+x}(p_b) = \begin{cases} G_{h+x}(p_b), \text{ if } G_{h+x}(p_b) > 0\\ 0, \quad \text{ if } G_{h+x}(p_b) \leq 0 \end{cases}$$
(4)

#### 2.2 虚库所的表示及计算

虚库所是指那些没有实际意义的、起传递或过 渡作用的、或为满足某些条件而添加的库所。虚库 所和虚库所之间不能通过变迁直接相连,即两个虚 库所之间必须存在破坏状态库所或修复状态库所。 虚库所在 Petri 网中的表示如图 3 所示。其中库所 *p<sub>a</sub>*,*p<sub>c</sub>*均为破坏状态库所,*p<sub>b</sub>为虚库所*,其余相关 参数已在图中标示。



图 3 虚库所在 Petri 网中的表示 Fig. 3 Representation of virtual place in Petri-net

下面依旧给出各变迁发生后,相应库所状态值的变化情况。令 $G_h(p)$ 表示库所p在h时刻的状态值,h表示库所p的最新状态值所对应的时刻,x和y分别为 $t_b$ 和 $t_c$ 的随机延迟时间。则:

(1) 变迁 
$$t_b$$
发生后,有:  
 $G_{h+x}(p_b) = \mu_b G_h(p_a) M(p_b)$  (5)  
(2) 变迁  $t_c$ 发生后,有:

$$G_{h+y}(p_c) = G_h(p_c) + \mu_c G_h(p_b) M(p_c)$$
(6)

若将图中的任一破坏状态库所替换为修复状 态库所后,计算表达式不变。

#### 2.3 脆弱度的表示及计算

矿区生态环境脆弱度用一个破坏状态库所来 表示,它在 Petri 网中的图形如图 4 所示。在这里, 变迁 *t* 实际上是具有瞬时变迁意义的变迁,因此, 其实施速率λ应该定义在很高的数量级上,此时 *t* 的随机延迟时间 *x* 将会很小,接近于 0。





令  $G_h(p_i)(i=1,2,...,k)$  表示库所  $p_i$  在 h 时刻的 状态值,h 表示库所  $p_i$ 的最新状态值所对应的时刻,  $v_h(p_i)$  表示  $p_i$ 在第h时刻的脆弱度值,那么, $v_h(p_i)$ 的计算表达式为:

$$v_h(p_i) = \frac{G_h(p_i)}{c_i}, i = 1, 2, \cdots, k$$
 (7)

式中:  $c_i$ 为库所  $p_i$ 的评价标准值或平均值。则变迁 t 发生后,  $p_c$ 的下一个状态值  $G_{h+x}(p_c)$ 的计算表达 式为:

$$\begin{cases} G_{h+x}(p_c) = \left(\sum_{i=1}^{k} u_i v_h(p_i)\right) M(p_c) \\ \sum_{i=1}^{k} u_i = 1 \\ u_i = \frac{v_h(p_i)}{\sum_{i=1}^{k} v_h(p_i)} \end{cases}$$

$$(8)$$

考虑到实际建模过程中,由于脆弱度库所一 般还会通过一个变迁与采矿量库所相连接(如图 5 所示),从而将整个网系统构成循环。因为这两类

第30卷第5期 2018年5月

库所同为破坏状态库所,若此时仍按照式(1)来计 算库所 *p<sub>b</sub>*的状态值 *G<sub>h+x</sub>(p)*,则明显不符合实际。 而实际的采矿量应由所经过的时间来决定。因此, 对于这种情形下库所 *p<sub>b</sub>*状态值的计算方式应该另 作定义。



图 5 脆弱度库所与采矿量库所通过变迁相连 Fig. 5 Vulnerability place is connected with mining quantity place via a transition

设  $p_a$  为表示脆弱度的库所,  $p_b$  为表示开采量 的库所,  $t_i$  为一个表示逻辑选择过程的变迁, 例如  $t_i$  可以理解为继续进行采矿,  $\{\mu\}$  为  $t_i$  的平均变化 系数集合, x 为  $t_i$  的随机延迟时间。令 $G_h(p)$  为库 所 p 在 h 时刻的状态值, h,h' 分别表示库所 p 的最 新状态值、上一个状态值所对应的时刻。则如图 5 所示的变迁  $t_i$  发生后, 库所  $p_b$  下一个状态值  $G_{h+x}(p_b)$  的计算表达式为:

$$G_{h+x}(p_b) = \mu(h-h')M(p_b) \tag{9}$$

#### 2.4 稳态概率的计算

虽然利用式(1)~(9)可以计算出脆弱度的值及 其所对应的时刻,但是并不能得到每个可达标识的 稳定概率,也就不能对 SPN 进行进一步的性能分 析。为了求得 SPN 中每个可达标识的稳定概率, 可以分以下 3 个步骤进行<sup>[14]</sup>:

给出系统的一个 SPN 模型;

构造出该 SPN 所同构的 MC;

利用马尔科夫过程相关理论求解 MC 的稳定 状态概率。

现假设已求得与 SPN 所同构的 MC,其中可 达标识集 $M_0$ [>中共有n个元素,即 MC 共有n个 状态。设 MC 中n个状态的稳定状态概率是一个行 向量 $\pi = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ ,则根据马尔科夫过程有下 列线性方程组:

$$\begin{cases} \pi = \pi \boldsymbol{P}(\Delta t)(\Delta t \to 0^+) \\ \sum_{i=1}^n p_i = 1 \end{cases}$$
(10)

式中:矩阵 $P(\Delta t)$ 是马尔科夫过程的转移概率函数 矩阵,但矩阵 $P(\Delta t)$ 在实际计算过程中并不容易求 得,对式(10)进行移项变换,有: $\pi(P(\Delta t) - I) = 0$ , 两边同时乘以 $\frac{1}{\Delta t}$ ,即:

$$\pi \frac{\left( \boldsymbol{P}(\Delta t) - \boldsymbol{I} \right)}{\Delta t} = \boldsymbol{0}$$

当 $\Delta t$ →0<sup>+</sup>时,  $\frac{(P(\Delta t) - I)}{\Delta t}$ 恰好为马尔科夫过程的速率矩阵Q, 因此, 方程组(10)可等价改写为下列方程组:

$$\begin{aligned}
\pi \boldsymbol{Q} &= \boldsymbol{0} \\
\sum_{i=1}^{n} p_i &= 1
\end{aligned} \tag{11}$$

式中:速率矩阵 Q 中的元素  $q_{ij}(i, j = 1, 2, ..., n)$  是这 样获得的:当 $i \neq j$ 时,若从状态  $M_i$  到状态  $M_j$ 有 一条弧相连,则  $q_{ij}$ 的值就是弧上标注的变化速率 的值,若从状态  $M_i$ 到状态  $M_j$ 没有弧相连,则  $q_{ij}=0$ ; 当i=j时, $q_{ij}$ 的值等于从状态  $M_i$ 输出的各条弧上标 注的速率之和的负值。求解方程组(11),即可得到 每个可达标识的稳定概率  $P[M_i] = p_i(1 \leq i \leq n)$ 。

#### 2.5 基于 SPN 的脆弱度算法

根据以上描述,基于 SPN 的矿区生态环境脆弱度算法步骤如下:

(1)初始化各库所的状态值及各参数值,各源 库所(即初始具有标记的库所)的初始状态值为输 入值,其余库所的初始状态值为0,令最大开采时 间为N,当前系统时间为h。

(2)当 h<N 时,转向步骤(3);否则终止循环, 算法结束,利用式(11)计算各可达标识的稳定状态 概率,结合稳态概率进行所要求的系统性能分析。

(3) 得到当前所有可激发变迁的集合 T<sub>able</sub>,对于 T<sub>able</sub>中的所有随机延迟 x=0 的时间变迁,产生一个随机时间值。

(4) 将 T<sub>able</sub>中的所有变迁按照随机时间值的大小进行排序,得出拥有最小随机时间 x<sub>min</sub> 的变迁 t'(此时可能包含多个拥有相同最小随机时间的变 迁t'),将这些t'加入激发变迁集合 T<sub>trigger</sub>。

http://www.china-simulation.com

第 30 卷第 5 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 5
2018年5月	Journal of System Simulation	May, 2018

(5) 激发  $T_{trigger}$  中的所有时间变迁,得到网系 统的下一个标识,并将  $T_{able}$  中其它变迁(即  $T_{able}-T_{trigger}$ )的时间减去  $x_{min}$ ,系统时间  $h=h+x_{min}$ , 按照式(1)~(9)中的相应表达式计算  $T_{trigger}$ 中所有变 迁的后集库所的状态值。返回步骤(2)。

## 3 案例研究

某矿区位于西北地区,是年产原煤千万吨的大型矿区。矿区煤储量丰富,煤质较好,煤种有焦煤、 肥煤、1/3 焦煤、气煤、瘦煤、贫瘦煤等,经过半个 多世纪的发展,目前年实际产煤量约为1050万吨。 煤炭产品主要有炼焦精煤、喷吹煤、电精煤、筛混 煤、焦炭等。由于该矿区植被和绿地较少,气候干 旱少雨,土壤贫瘠,区域生态本身比较脆弱。再加 上长年的大规模开采,矿区周边生态环境破坏严 重。其中河流污染和植被破坏问题尤为突出。而且 该矿区为地下开采,偶尔会发生不同程度的塌陷。 本案例研究以该矿区为背景,对采矿过程造成的生 态环境破坏问题及其可能的修复方案进行简单分 析,并由此建立脆弱度计算的 SPN 模型。

## 3.1 模型与参数

利用 SPN 对矿区生态环境脆弱化过程进行建 模,得到简化的脆弱度计算 SPN 模型如图 6 所示。 各库所的单位和各参数的实测值分别如表1和表2 所示,随机时间按日计。表2中: *i*, *j* 指的是变  $迁_t$ 的前集库所中第j个库所对应输入弧的参数  $\mu$ 的取值。各修复状态库所的状态值函数如表 3 所 示。表 3 中:  $G_h(p_i)$ 表示库所  $p_i$ 在 h 时刻的状态值, h 表示库所 p 的最新状态值所对应的时刻, x 为  $p_i$ 对应的前集变迁所经过的随机时间, 7 为一个脆弱 度阈值,整个表达式的含义为:当脆弱度值超过一 定阈值(在本案例中是10)后,才开始进行人工修复 的投入,且脆弱度值越大,人工修复的投入越多。 由于实际中自然修复的能力很弱,可以认为在随机 时间 x 内, 自然修复的状态值保持不变。初始标志 不为0的库所(源库所)其初始状态值需要从外界输 入,各源库所的初始状态输入值如表4所示。各库 所的含义已在图 6 中标明, 例如, p1 表示矿产资源 开采量, p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub>, p<sub>4</sub> 是虚库所, 没有实际意义, p<sub>5</sub> 表示废水排放量,等等。



图 6 一个简化的矿区生态环境脆弱度计算 SPN 模型 Fig. 6 A simplified SPN model to calculate ecological environment vulnerability in mining area

Huang et al.: Ar	oplication of S	tochastic Petri-net in D	vnamic Evaluation of Ecol
			<b>,</b>

第 30 卷第 5 期 2018 年 5 月

黄光球,等:矿区生态环境脆弱度动态评价的随机 Petri网方法

	表1 各库所的单位	
	Tab. 1 Units of places	
库所	单位	
$p_1$	t	
$p_2$		
$p_3$		
$p_4$		
$p_5$	t	
$p_6$	$m^2$	
$p_7$	km <sup>2</sup>	
$p_8$	km	
$p_9$	$m^2$	
$p_{10}$	km <sup>2</sup>	
$p_{11}$	$[0,\infty)$	
$p_{12}$	千元	
$p_{13}$	km	
$p_{14}$	万元	
<i>D</i> 15	万元	

表 2 各参数的实测值				
	Tab. 2 Measured values of parameters			
参数	含义	值		
$1/\lambda_1$	$t_1$ 的平均延迟时间	0.001 日		
$1/\lambda_2$	t <sub>2</sub> 的平均延迟时间	20 日		
$1/\lambda_3$	t3的平均延迟时间	60 日		
$1/\lambda_4$	t4的平均延迟时间	60 日		
$1/\lambda_5$	t5的平均延迟时间	30 日		
$1/\lambda_6$	t <sub>6</sub> 的平均延迟时间	100 日		
$1/\lambda_7$	t7的平均延迟时间	90 日		
$1/\lambda_8$	t <sub>8</sub> 的平均延迟时间	0.001 日		
$1/\lambda_9$	t9的平均延迟时间	0.001 日		
$C_8$	评价标准值	20 km		
$C_9$	评价标准值	4000 m <sup>2</sup>		
$C_{10}$	评价标准值	80 km <sup>2</sup>		
$\mu_1$		1		
$\mu_{2,2}$	废水排放系数	0.003t/t		
$\mu_{2,12}$	废水净化投入系数	0.4t/千元		
$\mu_3$	采空面积变化系数	0.001 m <sup>2</sup> /t		
$\mu_{4,4}$	植被破坏系数	0.0005 Km <sup>2</sup> /t		
$\mu_{4,15}$	植树造林投入系数	1.5 km²/万元		
$\mu_{5,5}$	河流污染系数	0.0005 km/t		
$\mu_{5,13}$	河流自净系数	1 km/km		
$\mu_{6,6}$	塌陷面积变化系数	$0.01 \text{ m}^2/\text{ m}^2$		
$\mu_{6,14}$	塌陷地治理投入系数	500 m <sup>2</sup> /万元		
$\mu_7$	水土流失系数	$0.8 \text{ km}^2/\text{ km}^2$		
$\mu_{8,8}$	权重变化系数			
$\mu_{8,9}$	权重变化系数			
$\mu_{8,10}$	权重变化系数			
$\mu_9$	日开采量系数	200 t/日		

表 3 各修复状态库所的状态值函数 Tab. 3 State value function of repair state places			
库所	状态值函数		
$p_i^*$	$G_{h+x}(p_i) = \begin{cases} G_0(p_i) \times \frac{G_h(p_{11})}{\tau}, \text{IF} G_h(p_{11}) \ge \tau, i = 12, 14, 15, \tau = 10\\ 0, \text{IF} G_h(p_{11}) \le \tau \end{cases}$		
** 13	$G_{h+x}(p_{13}) = G_h(p_{13})$		

表 4 各源库所的初始状态值 Tab. 4 Initial state values of initial places				
库所	值	库所	值	
$p_1$	$G_0(p_1)=200$	$p_{14}$	$G_0(p_{13})=5$	
$p_{12}$	$G_0(p_{11})=3$	$p_{15}$	$G_0(p_{14})=10$	
$p_{13}$	$G_0(p_{11})=0.2$			

## 3.2 结果分析

根据图 6 的 SPN 模型,可以得到与其同构的 MC,如图 7 所示,其中共有 29 个可达标识,弧旁 边的参数为对应变迁的平均实施速率。各标识下托 肯在库所中的分布情况如表 5 所示。

利用公式(11),可求得矿区生态环境脆弱度计 算 SPN 模型的稳定状态概率分别为:  $P(M_0)=0$ ,  $P(M_1) = 0.0556$ ,  $P(M_2) = 0.0119$ ,  $P(M_3) = 0.0121$ ,  $P(M_4) = 0.0419$ ,  $P(M_5) = 0.0020$ ,  $P(M_6) = 0.0057$ ,  $P(M_7) = 0.0213$ ,  $P(M_8) = 0.0018$ ,  $P(M_9) = 0.0219$ ,  $P(M_{10}) = 0.0414$ ,  $P(M_{11}) = 0.0016$ ,  $P(M_{12}) = 0.0068$ ,  $P(M_{13}) = 0.0014$ ,  $P(M_{14}) = 0.0185$ ,  $P(M_{15}) = 0.0501$ ,  $P(M_{16}) = 0.0062$ ,  $P(M_{17}) = 0.0529$ ,  $P(M_{18}) = 0.0006$ ,  $P(M_{19}) = 0.0093$ ,  $P(M_{20}) = 0.0467$ ,  $P(M_{21}) = 0.0082$ ,  $P(M_{22}) = 0.1105$ ,  $P(M_{23}) = 0.0440$ ,  $P(M_{24}) = 0.0065$ ,  $P(M_{25}) = 0.2312$ ,  $P(M_{26}) = 0.1900$ ,  $P(M_{27}) = 0$ ,  $P(M_{28})=0$ 。可以看到,标识 $M_0, M_{27}, M_{28}$ 的稳定 状态概率为 0,这是因为变迁发生速率  $\lambda_1, \lambda_8, \lambda_9$  很 大,实际上是具有瞬时变迁意义的时间变迁。由于 这三个标识的稳态概率为0,可以理解为托肯在这 三个标识中不作停留,网系统在这3个标识上的延 迟时间接近于0。

由于与脆弱度相对应的可达标识为 M<sub>28</sub>,而根据 MC 稳态概率公式求得其稳态概率为 0,这是由于网系统在该标识上的延迟时间接近于 0 造成的。 考虑到 MC 中概率的传递性,在实际中可作如下处

第 30 卷第 5 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 5
2018年5月	Journal of System Simulation	May, 2018

理:即对于稳态概率为0的标识,设定一个传递稳态概率值,该值应等于到达该标识的上一个标识的稳态概率。如有多个标识到达该标识,则传递虚稳态概率值应为多个标识的稳态概率之和。按照这个思路,可以求得标识M<sub>28</sub>的传递稳态概率值P(M<sub>28</sub>): P'(M<sub>28</sub>)=P'(M<sub>27</sub>)=P(M<sub>24</sub>)+P(M<sub>25</sub>)+P(M<sub>26</sub>)=0.4277 以日为时间单位,计算 5000日内矿区生态环境脆弱度值的变化情况。每进行一次模拟实验,可以得 到一条脆弱度值-时间样本曲线,根据其中一次运行结果绘制的脆弱度变化曲线图如图 8 所示。总共进行 1 000 次模拟实验,可以得到 1 000 条样本曲线。对第  $i(i=1,2,\cdots,1000)$ 条样本曲线计算 5 000日內脆弱度的平均值  $avg_i$ ,根据公式 $vul = \sum avg_i/1000$ 可以求得样本均值 vul=8.549 3,以此值作为该矿区长期开采达到稳定状态时脆弱度值的预测值,且该值出现的概率为 0.427 7。



图 7 与 SPN 同构的 MC Fig. 7 MC isomorphic to SPN

Tab. 5	Distribution of tokens under different markings		
标识	托肯所在库所	标识	托肯所在库所
$M_0$	$p_1 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{15}$	$p_3 p_7 p_8 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_1$	$P_2 P_3 P_4 P_{12} P_{13} P_{14} P_{15}$	$M_{16}$	$p_4 p_5 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_2$	$p_2 p_3 p_7 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{17}$	$p_4 p_6 p_8 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_3$	$p_2 p_4 p_6 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{18}$	$P_2 P_9 P_{10} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15}$
$M_4$	$p_3 p_4 p_5 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{19}$	$p_5 p_6 p_{10} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_5$	$p_2 p_3 p_{10} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{20}$	$P_3 P_8 P_{10} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15}$
$M_6$	$p_2 p_6 p_7 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{21}$	$p_5 p_7 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_7$	$p_3 p_5 p_7 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	<i>M</i> <sub>22</sub>	$p_6 p_7 p_8 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_8$	$p_2 p_4 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	<i>M</i> <sub>23</sub>	$p_4 p_8 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_9$	$p_4 p_5 p_6 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{24}$	$p_5 p_9 p_{10} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_{10}$	$p_3 p_5 p_7 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{25}$	$p_6 p_8 p_{10} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_{11}$	$p_2 p_6 p_{10} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{26}$	$p_7 p_8 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$
$M_{12}$	$p_3 p_5 p_{10} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	<i>M</i> <sub>27</sub>	$P_8 P_9 P_{10} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15}$
$M_{13}$	$p_2 p_7 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$	$M_{28}$	$p_{11}p_{12}p_{13}p_{14}p_{15}$
$M_{14}$	$p_5 p_6 p_7 p_{12} p_{13} p_{14} p_{15}$		

表 5 各标识下托肯在库所中的分布





# 4 结论

本文研究了随机 Petri 网在矿区生态环境脆弱 度动态评价中的应用。为了使 SPN 更适用于生态系 统的建模,对 SPN 的定义作出了一定的变化,但并

没有改变 SPN 的实质。将库所集划分为了破坏状态 集、修复状态集和虚库所集,并给出了这三类库所 的表示及计算方法。将脆弱度的计算融入到网系统 的运行过程中,给出了基于 SPN 的脆弱度算法。利 用 SPN 与马尔科夫链的同构关系,可以进一步计算 各可达标识的稳态概率。案例研究构建了一个简化 的矿区生态环境脆弱度计算 SPN 模型,并绘制了与 其同构的马尔科夫链,计算了多条样本曲线的脆弱 度值及各可达标识的稳态概率,得到了脆弱度的预 测值及该值出现的概率,从而验证了本文所提方法 的有效性。SPN 模型能将生态系统中的随机延迟融 入到模型中,并能将矿区生态环境的破坏与修复过 程直观地体现出来,可以为预测矿区生态环境脆弱 度、进行矿区生态系统性能分析提供科学参考。

## 参考文献:

- 杨沈生. 我国矿产资源现状与应对措施[J]. 科技创新 导报, 2010, 46(12): 70.
   Yang Shen-sheng. Current Situation and Countermeasures of Mineral Resources in China[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010, 46(12): 70.
   Lies Yungin Li Wei Hen Engine Application of CIS
- [2] Liao Xueqin, Li Wei, Hou Jinxiang. Application of GIS Based Ecological Vulnerability Evaluation in Environmental Impact Assessment of Master Plan of Coal Mining Area[J]. Procedia Environmental Sciences (S1878-0296), 2013, 18(7): 271-276.
- [3] Jorge Castilla-Gómez, Juan Herrera-Herbert. Environmental analysis of mining operations: Dynamic tools for impact assessment[J]. Minerals Engineering (S0892-6875), 2015, 76(6): 87-96.
- [4] Thomas A Okey, Selina Agbayani, Hussein M Alidina. Mapping ecological vulnerability to recent climate change in Canada's Pacific marine ecosystems[J]. Ocean & Coastal Management (S0964-5691), 2015, 106(7): 35-48.
- [5] Liem T Tran, Robert V O'Neill, Elizabeth R Smith. A watershed-based method for environmental vulnerability assessment with a case study of the Mid-Atlantic region[J]. Environmental Impact Assessment Review (S0195-9255), 2012, 34(8): 58-64.
- [6] S Nandy, C Singh, K K Das, et al. Environmental vulnerability assessment of eco-development zone of Great Himalayan National Park, Himachal Pradesh, India[J]. Ecological Indicators (S1470-160X), 2015,

57(6): 182-195.

- [7] 吴健生, 宗敏丽, 彭建. 基于景观格局的矿区生态脆弱性评价—以吉林省辽源市为例[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3213-3220.
  WU Jian-sheng, ZONG Min-li, PENG Jian. Assessment of Mining Area's Ecological Vulnerability Based on Landscape Pattern: A Case Study of Liaoyuan in Jilin Province of Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3213-3220.
- [8] 付标,祝桂兰,康鸳鸯,等.矿区生态环境脆弱性评价一以河南省新安县正村煤矿为例[J]. 安徽农业科学,2006,34(24):6565-6567.
  FU Biao, ZHU Guilan, KANG Yuanyang, et al. Investigation of the Ecological Environment Vulnerability Assessment in Environment Impact Assessment of Mine[J]. Journal of Anhui Agri. Sci. 2006, 34(24): 6565- 6567.
- [9] 刘平,汤万金,胡聃.露天煤矿生态系统脆弱性评价 方法研究[J].中国人口资源与环境,2003,13(4): 35-39.

LIU Ping, TANG Wan-jin, HU Dan. Study on Estimate Measure of Vulnerable Ecosystem in Opencast Cocal Mine[J]. China Population, Resources and Environment, 2003, 13(4): 35-39.

- [10] Huaiyong Shao, Xiaofei Sun, Haoxue Wang, et al. A method to the impact assessment of the returning grazing land to grassland project on regional eco-environmental vulnerability[J]. Environmental Impact Assessment Review (S0195-9255), 2016, 56(8): 155-167.
- [11] Jing Shen, Hongwei Lu, Yang Zhang, et al. Vulnerability assessment of urban ecosystems driven by water resources, human health and atmospheric environment[J]. Journal of Hydrology (S0022-1694), 2016, 536(5): 457-470.
- [12] Guoba Song, Yu Chen, Meirong Tian, et al. The Ecological Vulnerability Evaluation in Southwestern Mountain Region of China Based on GIS and AHP Method[J]. Procedia Environmental Sciences (S1878-0296), 2010, 2(3): 465-475.
- [13] 赵艳霞,何磊,刘寿东,等.农业生态系统脆弱性评价方法[J]. 生态学杂志,2007,26(5):754-758.
  ZHAO Yan-xia, HE Lei, LIU Shou-dong, et al. Evaluation Method of Agro-ecosystem Vulnerability[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(5):754 -758.
- [14] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]: 北京: 清华 大学出版社, 2005.
  Lin Chuang. Stochastic Petri-net and Evaluation of System Behaviors[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.