

1-3-2019

Evaluation Model on the Vulnerability of Mining Area Ecosystem Based on Object-function Petri Net

Su Jia

Management College, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

Guangqiu Huang

Management College, Xi'an University of Architecture & 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.

Evaluation Model on the Vulnerability of Mining Area Ecosystem Based on Object-function Petri Net

Abstract

Abstract: Introducing the concept of function into traditional object Petri net, a new evaluation model of ecosystem vulnerability named object-function Petri net model (OFPNEM) was put forward. The facilitating and suppressing factors of the ecosystem degradation were analyzed in this evaluation model. Trigger conditions of vulnerability were depicted as transitions and the state of ecosystem in the process of change were depicted as object places. Logical causality of environmental degradation could be represented directly. Furthermore, evaluation model on the vulnerability of mining area ecosystem based on object-function Petri net was proposed. Through object-function Petri net, combining the rules of model, a reasoning algorithm was posed. The effectiveness of the algorithm was verified by experiment. Dynamic changes in the process of ecosystem degradation were taken into evaluation so that a closer ecosystem description to reality could be made.

Keywords

object-function, Petri net, vulnerability evaluation modeling, dynamic changes

Recommended Citation

Su Jia, Huang Guangqiu. Evaluation Model on the Vulnerability of Mining Area Ecosystem Based on Object-function Petri Net[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1681-1689.

矿区生态系统脆弱性的对象函数 Petri 网评价模型

苏佳, 黄光球

(西安建筑科技大学管理学院, 西安 710055)

摘要: 在传统对象 Petri 网中引入函数的概念, 定义了一种全新的生态系统脆弱性评价模型 OFPNEM (Object Function Petri Net Model), 将对生态系统恶化过程中起促进与抑制作用的两方面因素进行综合考虑与分析。用变迁表示脆弱程度的触发条件, 用对象库所表示生态系统变化过程中所处的状态, 从而直观地表示生态环境恶化的逻辑因果关系, 提出了一种基于对象函数 Petri 网的矿区生态系统脆弱性评价模型 OFPNEM。在对象函数 Petri 网基础上, 结合模型原理的规则, 给出 OFPNEM 算法, 并通过实验验证了算法的正确性。通过对象函数 Petri 网对具有动态变化过程的矿区生态系统脆弱性评价, 更加贴近实际情况。

关键词: 对象函数; Petri 网; 脆弱性评价建模; 动态变化过程

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)05-1681-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805008

Evaluation Model on the Vulnerability of Mining Area Ecosystem Based on Object-function Petri Net

Su Jia, Huang Guangqiu

(Management College, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Introducing the concept of function into traditional object Petri net, a new evaluation model of ecosystem vulnerability named object-function Petri net model (OFPNEM) was put forward. The facilitating and suppressing factors of the ecosystem degradation were analyzed in this evaluation model. Trigger conditions of vulnerability were depicted as transitions and the state of ecosystem in the process of change were depicted as object places. Logical causality of environmental degradation could be represented directly. Furthermore, evaluation model on the vulnerability of mining area ecosystem based on object-function Petri net was proposed. Through object-function Petri net, combining the rules of model, a reasoning algorithm was posed. The effectiveness of the algorithm was verified by experiment. Dynamic changes in the process of ecosystem degradation were taken into evaluation so that a closer ecosystem description to reality could be made.

Keywords: object-function; Petri net; vulnerability evaluation modeling; dynamic changes

引言

长期以来, 矿产资源的开采为国民经济的发



收稿日期: 2016-06-03 修回日期: 2016-07-19;
基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金
(15YJA910002);

作者简介: 苏佳(1991-), 女, 陕西西安, 博士生, 研究方向为矿山生态安全, 系统仿真; 黄光球(1964-), 男, 湖南桃源, 博士, 教授, 博导, 研究方向为矿山生态安全, 系统仿真。

展、社会物质资源的积累、人民生活水平的提高提供了经济基础以及物质保障。然而, 在矿产资源被大规模、不合理开发和利用的过程中, 矿区原有的生态环境遭到了破坏, 生态系统逐步恶化, 并出现地面沉陷、地下水位下降、水土流失、植被破坏、水均衡受破坏等一系列生态环境问题。生态环境作为一定区域内地形、地貌、土壤、气候、水文、动

<http://www.china-simulation.com>

• 1681 •

植物及人类活动等的综合,既受人类活动的影响,又是人类赖以生存的基础^[1],有必要对矿产资源开发利用中造成的矿区生态环境问题进行研究,以保障矿区经济的持续发展。

国内外对生态系统进行评价的研究主要分为以下几类:健康评价^[1-2]、生态风险评价^[3-4]、环境影响评价^[5-6]以及脆弱性评价^[7-8]等。20世纪70年代以来,许多学者从不同角度和途径探讨了生态系统脆弱性问题,并认为敏感性和适应性是自然生态系统的基本属性^[9]。目前,在矿区生态系统脆弱性评价方面也有很多相关研究。文献^[10-12]分别应用调查和数据分析、层次分析法、专家评判确定指标权重,利用综合指数法和GIS定量计算。这些文献虽然均建立生态环境系统脆弱性评价体系,但总体而言存在两个缺点:第一、指标权重的选择人为影响因素较大,难以客观反映各指标在评价体系中的贡献和重要程度;第二、矿产资源开发对环境造成的影响是一个动态变化的过程,生态环境系统主要因子从时间空间两方面均处于波动和变化状态^[13],采用以上方法难以反映生态系统的状态变化。文献^[14]利用模糊综合评判法,对非线性的评价论域进行量化综合,但也只能将评价信息的主观因素对评价结果的影响控制在较小的限度内;文献^[15]使用端点三角白化权函数法和可拓综合评价法对平朔矿区生态环境脆弱性评价信度与效果有所改善,但仍未摆脱使用层次分析法确定指标权系数;文献^[16-18]基于景观格局指数,提出了依循“压力-状态-响应”的评估框架,在很大程度上反映了生态系统遭到破坏后所呈现的状态,以及最终所引发的一系列后果。但该模型未能清楚的描述整个生态系统变化的因果过程。

本文在考虑以上两个缺陷的基础上,提出一种评价的新方法—对象函数 Petri 网,用该方法对矿区生态系统脆弱性进行分析建模,建立了一种新型的评价模型,即矿区生态系统脆弱性的对象函数 Petri 网评价模型(Object-function Petri Net

Evaluation Model, OFPNEM)。该评价模型有如下创新之处:

- 1) 摒弃专家打分等方法,客观上避免了主观人为因素对脆弱性评价信度和效果影响;
- 2) 使用对象函数 Petri 能清晰的挖掘出矿产资源开发活动导致生态环境恶化之间的逻辑因果关系,定量计算生态系统脆弱性;
- 3) 对象函数 Petri 网的使用有效地解决了生态系统中各个对象随时间动态变化的过程;
- 4) 生态系统中评价每个对象脆弱性的指标不同,本模型能有效地针对每个对象的不同特征选取不同的评价指标,是生态系统脆弱性评价模型更加真实可靠;
- 5) 该评价模型可用于复杂生态系统建模。

1 矿区生态系统脆弱性评价模型原理

1.1 对象函数 Petri 网评价模型特点

将矿区生态系统脆弱性的对象函数 Petri 网评价模型用于描述矿产资源开发活动导致生态系统不断恶化这一动态过程将具有如下特点:

- 1) 由于本文主要研究矿产资源开发过程对生态环境逐步恶化造成的影响,既应该对生态环境造成破坏的促进因素,又应该考虑生态恢复作用的抑制因素,这一点恰是矿区生态系统脆弱性的典型属性特征,所以本文综合生态系统的敏感性和适应性这两个积极与消极方面,在生态系统脆弱性的视角下对其进行评价;
- 2) 研究矿区生态系统脆弱性的目的在于挖掘导致生态环境恶化的逻辑因果关系,从而评价矿区生态系受到不利影响脆弱的可能性。而 Petri 网能恰当处理因果上的不存在依赖性的并行现象和表示不确定性的选择的能力,并且能将系统模型用网状图形清晰地表示出来^[19];
- 3) 脆弱性是可持续发展的一个时间函数^[16],单纯依靠传统 Petri 网无法描述生态系统的动态变

化过程。故在传统 Petri 网中引入对象函数, 每个对象包含多个动态可变的属性集, 而每个属性集是时间的函数, 通过对对象中函数的调用, 使生态系统中每个对象从一个状态转移到另一个状态实现了对对象属性的不断更新。

基于以上思路, 本文将对象函数 Petri 纳入到生态系统脆弱性评价中, 提出生态系统脆弱性评价的新方法, 即矿区生态系统脆弱性的对象函数 Petri 网评价模型。

1.2 对象函数 Petri 网评价模型原理

本文使用对象函数 Petri 网对生态系统脆弱性进行评价。在传统 Petri 网中引入对象函数, 重新定义对象函数 Petri 网。

定义 1 库所类。库所类是 Petri 网中所有库所节点对象的抽象, 它记录着生态系统恶化过程的状态。它是一个三元组 $\langle A, F, \theta \rangle$, 其中: A 是描述节点库所类的属性集; F 是该库所类中封装的方法函数, 函数是对库所类中属性集的操作描述; θ 是该库所类中属性集、方法函数的趋向方式。

定义 2 属性集。属性集描述节点库所类的状态信息 $A = \langle \text{sta_att}, \text{dyn_att} \rangle$, 包括静态属性和动态属性。

静态属性 sta_att 描述该库所类的固有的初始状态信息(例如, 在生态系统中, 根据库所类实例化创建对象地下水下降因素, 该对象具有静态信息包括: 初始地下水下降面积、初始降落漏斗深度), 该静态信息记录库所类在初始状态下属性的信息。动态属性 dyn_att 描述库所类被触发后不断更新的信息。具体而言, 在生态系统中, 若相应的变迁被触发, 库所类中封装的方法函数将对所有动态属性进行更新(例如, 地下水下降面积、降落漏斗深度以及脆弱度(VD)均会由相应的方法函数更新)。

定义 3 方法函数。方法函数 F 描述该库所节点上对属性集的操作实施行为, 它会对属性集 A 中的所有动态属性 dyn_att 从一个状态更新至另一个状态。它是生态系统中时间的函数。

定义 4 趋向方式。属性趋向方式 $\theta = \langle \text{positive}, \text{negative} \rangle$ 是对属性集和方法函数属性正负趋向的描述。 positive 表示库所类中的属性集和方法函数对生态系统恶化起正向促进作用, 即矿产资源开发所导致的生态系统产生的不利变化, 是生态系统基本属性敏感性的体现, 用符号“+”表示。本文认为生态系统中所有对象库所均具有敏感性; negative 表示库所类中的属性集和方法函数对生态系统恶化起负向抑制作用, 即生态系统在矿产开发活动产生的不利影响中恢复或适应不利影响的能力, 是生态系统基本属性适应性的体现, 用符号“-”表示。本文中提到的某对象库所具有适应性, 均指该库所具有人为的修复功能。

定义 5 变迁类。变迁类是 Petri 网中所有变迁节点的抽象, 它在函数 Petri 网中记录着生态系统逐步恶化的触发条件。它是一个三元组 $\langle TH, V, T \rangle$, 其中, TH 是描述变迁是否激活的生态阈值, 包含正向生态阈值和负向生态阈值 $TH = \langle TH^+, TH^- \rangle$, 一般为常数; V 是描述变迁类的变迁速率; T 描述变迁速率的类型。

定义 6 变迁速率与类型。变迁速率类型 $T = \langle \text{relevant_T}, \text{irrelevant_T} \rangle$, 包括相关变迁和非相关变迁速率。

相关变迁 relevant_T , 即库所从前一状态变化到后一状态, 与变迁速率相关, 在生态系统中描述为引起生态环境破坏的外因。相关变迁 $\text{relevant_T} = \langle \text{rand_T}, \text{fixed_T} \rangle$, 包括随机变迁和固定值变迁。随机变迁 rand_T , 即服从某一分布的变迁或随机生成某一速率的变迁, 在生态系统中描述为生态环境的恶化的外因具有随机不确定性; 固定值变迁 fixed_T 是速率变迁的一种, 该速率为某一固定的值, 在生态系统中描述为生态环境的恶化的外因具有故意性, $\text{fixed_T} \in (0, 1)$ 。

非相关变迁 irrelevant_T , 即库所从前一状态变化到后一状态, 与变迁速率无关, 在生态系统中描述为引起生态环境破坏的内因。

2 矿区生态系统脆弱性评价建模方法

2.1 生态系统脆弱度的定义

生态系统脆弱性^[1]是系统在面临外界压力和干扰(包括人类活动)下可能导致系统出现损伤或退化特征的一个衡量。本文在阅读大量国内外文献的基础上,结合对象函数 Petri 网对矿区生态系统库所类脆弱度有如下定义。

定义 7 库所类脆弱度(VD)。库所类脆弱度 VD 是一个二元组 $\langle S, D \rangle$, 反映了节点对象上矿产资源开发所带来的破坏恢复程度,既考虑了矿产资源开发活动带来的破坏程度,又考虑了生态系统中对象节点的恢复能力。 S 为节点对象的敏感性(Sensitivity),用于评估矿产资源开采活动对生态系统中对象节点的破坏程度; D 为节点对象的适应性(aDaptation),用于评估生态环境的恢复能力。库所类脆弱度 VD 在对象函数 Petri 网中,是该对象的一个属性值,其计算方法是由对象函数 Petri 网中库所类的敏感性与适应性组成的合函数,是该对象的一个方法函数。

根据以上定义,可计算出库所类上对象节点的脆弱度,方法如下:

$$VD_i = S_i - D_i \quad (1)$$

式(1)右边有两部分组成,第一部分为“敏感性 S ”,反映了矿产资源开发活动对生态系统带来的破坏程度;第二部分为“适应性 D ”,反映了生态系统中对象节点的恢复能力。敏感性为该库所对象上所有起积极促进作用的动态属性的加权和,计算公式如式(2)所示。

$$S_i = \sum_{j=1}^{N_p} \alpha_{ij} P_i \cdot A_j^p(t) \quad (2)$$

式中: α_{ij} 为库所类中的第 i 个实例化对象的第 j 个正向属性的权重; N_p 为对象中的正向属性的个数; $A_j^p(t)$ 为节点库所 P_i 在 t 时刻的积极状态属性信息;适应性为该库所对象上所有起消极抑制作用的动态属性的加权和,计算公式如式(3)所示。

$$D_i = \sum_{j=1}^{N_o} \beta_{ij} P_i \cdot A_j^o(t) \quad (3)$$

式中: β_{ij} 为库所类中的第 i 个实例化对象的第 j 个负向属性的权重; N_o 为对象中的负向属性的个数,其中, $N_p + N_o = N$; $A_j^o(t)$ 为节点库所 P_i 在 t 时刻的消极状态属性信息。

2.2 对象函数 Petri 网建模方法

采用对象函数 Petri 网对矿产资源开采活动所导致的生态环境恶化问题进行建模。目的在于挖掘导致生态环境恶化的逻辑因果关系。Petri 网中的库所节点表示对象所处的脆弱状态,对应定义 2 中的动态属性。变迁表示某个触发条件的发生,对应变迁类中的生态阈值与变迁速率组成的触发条件。

定义 8 对象函数 Petri 网 $OFFPN = \langle P, A, F, IA, OA, D, V, fire \rangle$

1) $P = \{P_0, P_1, \dots, P_i, \dots, P_M\}$ 是将库所类实例化后对象的有限集合 P_i 表示库所类的第 i 个实例化对象, M 表示库所类实例化对象的个数;

2) $A = \{P_0 \cdot A_0, P_0 \cdot A_1, \dots, P_0 \cdot A_N, P_1 \cdot A_1, P_1 \cdot A_2, \dots, P_i \cdot A_j, \dots, P_M \cdot A_N\}$ 是库所类实例化对象的属性集, $P_i \cdot A_j$ 表示库所对象 P_i 上的属性 A_j , N 为对象中属性的个数;

3) $F = \{P_1 \cdot F_1, P_1 \cdot F_2, \dots, P_i \cdot F_j, \dots, P_M \cdot F_N\}$ 是库所类实例化对象的方法函数的有限集合, $P_i \cdot F_j$ 表示库所对象 P_i 上的方法函数 F_j , 方法函数集 F 和动态属性集 A 一一对应。当变迁条件触发后, $P_i \cdot F_j$ 对 $P_i \cdot A_j$ 按照式(4)进行动态更新,

$$P_i \cdot F_j = \begin{cases} \{P_i \cdot A_j^u(t) \mid P_i \cdot A_j^u(t+1) = P_i \cdot A_j^p(t) + \Delta P_i \cdot A_j^p(t+1)\} \\ \text{若 } u = \text{positive} \\ \{P_i \cdot A_j^u(t) \mid P_i \cdot A_j^u(t+1) = P_i \cdot A_j^p(t) - \Delta P_i \cdot A_j^o(t+1)\} \\ \text{若 } u = \text{negative} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta P_i \cdot A_j(t+1) = v_{ij} \cdot P_i \cdot A_j \cdot \gamma_{ij} \cdot \delta_i$, v_{ij} 为变迁速率, $P_i \cdot A_j = \text{dyn}$ 。

4) $IA = \{\delta_{ij}\}$ 是变迁的输入弧集, δ_{ij} 表示从库所 p_i 到变迁 t_j 的弧;

5) $OA = \{\gamma_{ji}\}$ 是变迁的输出弧集, γ_{ji} 表示从变迁

t_j 到库所 p_i 的弧;

6) $D = \{d_0^+, d_0^-, d_1^+, d_1^-, \dots, d_i^+, d_i^-, \dots, d_M^+, d_M^-\}$ 是一个由敏感性 S_i 、适应性 D_i 分别和正向生态阈值 TH_i^+ 、负向生态阈值 TH_i^- 组成的变迁条件命题集合。 $|D|=|P|$, d_i 与 p_i 一一对应, 为变迁的触发条件。若子命题集合 $d_i^+ : S_i > TH_i^+$, 说明矿产资源开发行为已经超出了该库所类能承受的压力, 生态系统呈现出不利于自身及人类开发利用的方向演变; 若子命题集合 $d_i^- : D_i < TH_i^-$, 说明矿产资源开发行为对库所类所产生的破坏已经满足需要修复的条件, 生态系统呈现出有利于自身的方向演变;

7) $V = \{v_{00}, v_{01}, \dots, v_{ij}, \dots, v_{MN}\}$ 是变迁速率, v_{ij} 表示库所类的第 i 个实例化对象的第 j 个属性的变迁速率, 取值按照定义 6,

$$v_{ij} = \begin{cases} 0 & , t_{ij} = \text{irrelevant_T} \\ C & , t_{ij} = \text{fixed_T} \\ N(0,1) & , t_{ij} = \text{rand_T} \end{cases} \quad (5)$$

8) $fire = \{fire_0, fire_1, \dots, fire_i, \dots, fire_M\}$ 是变迁条件命题触发的集合, $fire_i$ 与 d_i 一一对应。若 $fire_i = \text{on}$, 则变迁被激发, 托肯从一个库所类转移到下一个库所类; 若 $fire_i = \text{off}$, 则变迁未被激发, 托肯不转移;

$$fire_i = \begin{cases} \text{on} & , \text{若 } S_i > TH_i^+ \text{ or } D_i < TH_i^- \\ \text{off} & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

3 模型原理规则的表达

本文将对象函数 Petri 网变迁速率类型定义为如图 1(a)、(b)、(c), 图 1(d)、(e) 分别为 positive、negative 属性的触发子条件表示。

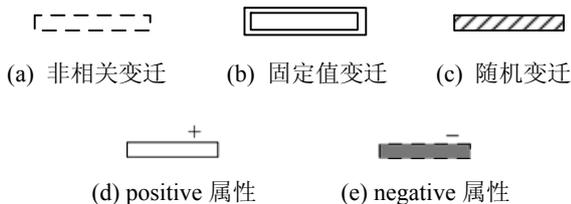


图 1 对象函数 Petri 网变迁速率类型表示
Fig. 1 Type of transition in the object function Petri net

生态系统恶化因果逻辑关系 Petri 网中存在 3

种推理规则, 与定义 6 中变迁的类型非相关变迁、固定值变迁、随机变迁等 3 种方式一一对应。规则定义如下:

1) 规则 1 IF P_1 THEN P_2 AND P_3 AND P_4 AND \dots AND P_m , 形式化描述如图 2 所示。

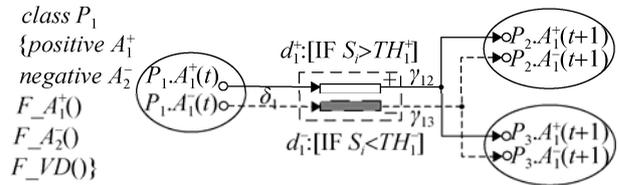


图 2 推理规则 1 原理图
Fig. 2 Schematic diagram of rule 1

规则 1 表示在同一前提库所类 P_i 下, 变迁命题集合 d_i 的激发可以同时得到多个结果状态。库所类 P_i 中包含 positive、negative 等多个属性。根据趋向方式的不同, 每个属性值通过库所类中的方法函数进行状态的更新。当某一个对象库所的敏感性值 S_i 大于正向生态阈值 TH_i^+ , 则触发正向非相关变迁, 并对所有结果状态中的 positive 属性进行更新; 当对象库所的适应性值 D_i 小于负向生态阈值 TH_i^- , 则触发负向非相关变迁, 并对所有结果状态中的 negative 属性进行更新。各个结果库所属性值的增量定义为 $\Delta P_i.A_j(t+1) = v_{ij} \cdot P_i.A_j(t) \cdot \gamma_{ij} \cdot \delta_i$ 。根据定义 6, 非相关变迁与变迁速率无关, 则 $v_{ij} = 0$, 即各个库所类的属性值增量为 $\Delta P_i.A_j(t+1) = 0$ 。

2) 规则 2 IF P_1 AND P_2 AND P_3 AND \dots AND P_{m-1} THEN P_m , 形式化描述如图 3 所示。

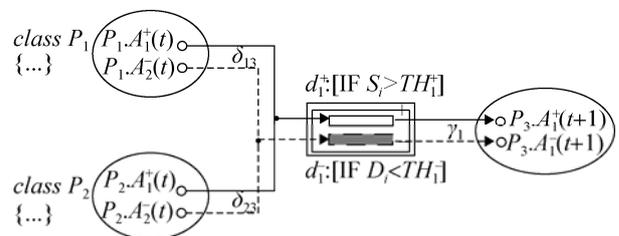


图 3 推理规则 2 原理图
Fig. 3 Schematic diagram of rule 2

规则 2 表示在不同的前提库所类 P_i 下, 经过变迁命题集合 d_i 的激发, 可以得到同一个结果状

态。库所类 P_i 中包含 positive、negative 等多个属性。根据趋向方式的不同，每个属性值通过库所类中的方法函数进行状态的更新。由于矿产资源开采具有时间上的持续性和空间上的扩展性，对矿区生态要素的影响存在着累积效应^[20]，本文将规则 2 命题结果的库所属性值的增量定义为 $\Delta P_i.A_j(t+1) = \sum_{i=1}^{m-1} v_{ij} \cdot P_i.A_j(t) \cdot \gamma_m \cdot \delta_{im}$ 。根据定义 6，固定值变迁

即变迁速率为常数，则 $v_{ij}=C$ ，即各个库所类属性值增量 $\Delta P_i.A_j(t+1) = C \sum_{i=1}^{m-1} P_i.A_j(t) \cdot \gamma_m \cdot \delta_{im}$ 。

3) 规则 3 IF P_1 OR P_2 OR P_3 OR ... OR P_{m-1} THEN P_m ，形式化描述如图 4 所示。

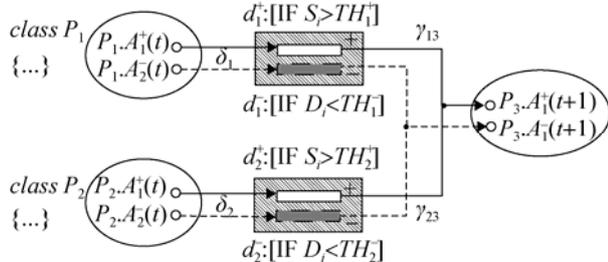


图 4 推理规则 3 原理图
Fig. 4 Schematic diagram of rule 3

规则 3 表示在不同前提库所类 P_i 下，不同的变迁命题集合 d_i 的激发可以得到同一个结果状态。库所类 P_i 中同样包含 positive、negative 等多个属性。当某一对象库所的敏感性值 S_i 大于正向生态阈值 TH_i^+ ，则触发正向随机变迁，并对所有结果状态中 positive 属性进行更新，结果库所 positive 属性值的增量定义为 $\Delta P_m.A_j^+(t+1) = \max(v_{1j} \cdot P_1.A_j^+(t) \cdot \gamma_{1m} \cdot \delta_{1m}, v_{2j} \cdot P_2.A_j^+(t) \cdot \gamma_{2m} \cdot \delta_{2m}, \dots, v_{m-1,j} \cdot P_{m-1}.A_j^+(t) \cdot \gamma_{(m-1)m} \cdot \delta_{(m-1)m})$ ；当对象库所适应性值 D_i 小于负向生态阈值 TH_i^- ，则触发负向随机变迁，并对所有结果状态中 negative 属性进行更新，结果库所 negative 属性值的增量定义为 $\Delta P_m.A_j^-(t+1) = \min(v_{1j} \cdot P_1.A_j^-(t) \cdot \gamma_{1m} \cdot \delta_{1m}, v_{2j} \cdot P_2.A_j^-(t) \cdot \gamma_{2m} \cdot \delta_{2m}, \dots, v_{m-1,j} \cdot P_{m-1}.A_j^-(t) \cdot \gamma_{(m-1)m} \cdot \delta_{(m-1)m})$ ，其中随机变迁速率服从正态分布，即 $v_{ij} \sim N(0,1)$ 。

4 实验验证

4.1 应用实例

矿区生态系统是一个结构不稳定、敏感性较高，且对矿产资源开发活动的抵抗能力小的动态系统。对生态系统进行建模，其恶化的因果逻辑关系用对象函数 Petri 网表示，如图 5 所示。

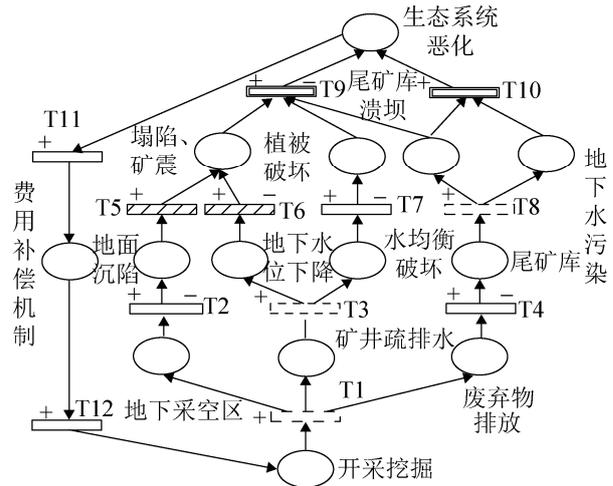


图 5 基于对象函数 Petri 网的生态系统恶化因果逻辑关系
Fig. 5 Causality relationship of ecosystem deterioration based on object function Petri net

考虑到生态系统恶化因果逻辑关系对象函数 Petri 网中有些对象在实际修复工程中无法进行直接修复，或者进行修复的难度较大，实例中认为该类对象库所不具备适应性，故对其不进行直接修复。根据图 5 对象函数 Petri，各个对象库所中均包含多个属性，对每个对象选取具有典型性的属性，其列表以及属性趋向方式，见表 1。

4.2 实例模拟与分析

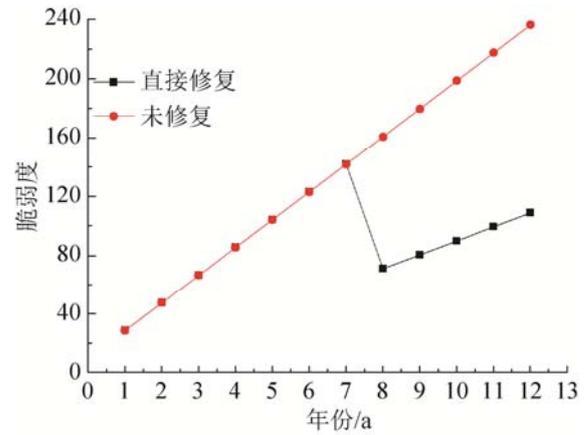
本文基于对象函数 Petri 网的矿区生态系统脆弱性评价模型，开采量为 100 t/a，其他属性的初值均是可实地观测的数据。经过大量实验的对比分析发现，权重的选择在该模型中对生态系统逻辑因果关系的挖掘影响不大，故认为其所占权重同等，即 $\alpha_{ij}=1/N_p$ ， $\beta_{ij}=1/N_o$ ，根据图 5 及表 1 进行模拟，模拟结果如图 6 所示。

表 1 图 5 中各个对象的属性列表
Tab. 1 List of attributes for each object in Fig. 5

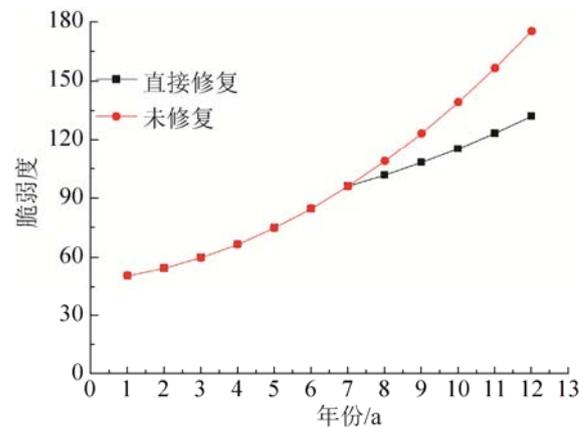
对象库所	属性	+/-
开采挖掘	采矿量(t/a)	+
地下采空区	地下采空区投影面积/m ²	+
	地下采空区填充面积/m ²	-
地面沉陷	地面沉陷量/(t/m ² ·a)	+
坍塌、矿震	滑坡、崩塌发生次数/(次/a)	+
矿井疏排水	矿井疏排水量/(m ³ /t·a)	+
	水位下降面积/(m ² /吨·a)	+
地下水位下降	降落漏斗深度/m	+
	人工回灌量/(m ³ /t·a)	-
植被破坏	地表植被覆盖度	+
	植被退化面积/m ²	+
	土地复垦面积/m ²	-
水均衡破坏	地下水总排泄量/(m ³ /a)	+
	地下水总补给量/(m ³ /a)	-
废弃物排放	废弃物排放量/m ³	+
	回收处理量/m ³	-
尾矿库	尾矿库体积/m ³	+
	浓度/(g/kg)	+
尾矿库溃坝	溃坝发生次数/(次/a)	+
	金属离子浓度/(mg/L)	+
地下水污染	矿化度/(mg/L)	+
	pH 值	+
生态系统恶化	土地污染面积	+
	地下水影响	+
	人造土壤调节剂/t ^[21]	-
	植物修复 ^[21]	-

图 6 所示模拟结果选取了两类典型对象库所, 具有修复功能的对象库所和不具备修复功能的对象库所。对以上模拟结果有如下分析:

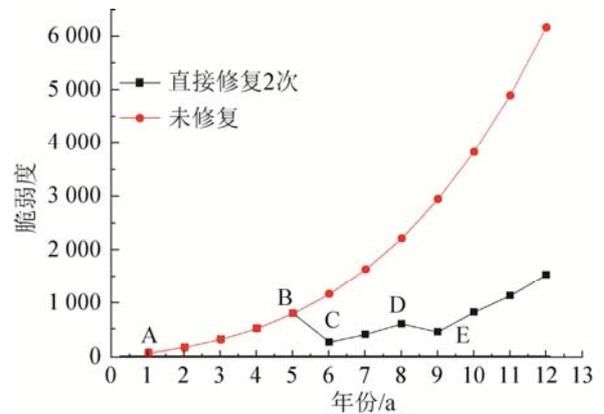
1) 生态系统中部分对象库所具有修复功能, 在本文中表现为具有 negative 属性的库所, 在未考虑该属性时, 矿产资源开发次数对各个对象库所的影响具有正相关性, 而且影响程度很大。若开发活动对生态环境造成不利的影响后, 我们人为的加入修复功能, 其对象库所的脆弱性会逐渐减低。如图 6(a)、(c)中, 矿产资源开发活动破坏了地下采空区因素等具有修复功能的库所的敏感性阈值, 人为的进行采空区填充等的修复方式, 其脆弱性明显地降低;



(a) 采空区因素



(b) 地面沉降因素



(c) 生态系统恶化

图 6 库所类修复前后脆弱度对比图
Fig. 6 Comparison of vulnerability before and after restoration

2) 生态系统中大部分对象库所不具备修复功能或直接修复较为困难, 一旦矿产资源开发对其造成影响, 该危害是不可逆的。针对此类对象库所, 我们根据生态系统恶化因果逻辑关系对象函数

Petri 网, 通过对前因库所的修复, 从而间接地对该类库所进行修复。如, 采空区地面沉降, 图 6(b);

3) 矿产资源开发活动一旦破坏生态系统中对象库所的脆弱性, 即使经过多次修复, 也不可能回到生态系统脆弱性原有的状态。如图 6(a)、(b)、(c);

4) 生态系统中某些对象库所, 如果破坏了其脆弱性并进行第一次修复, 随着开采次数的增加, 需要再次进行修复的时间间隔会逐渐缩短, 并且修复作用也会逐渐减弱。如图 6(c), C-D 时间间隔明显小于 A-B, 修复后脆弱性 C 点低于 E 点。

5 结论

本文从矿区生态系统脆弱性的角度出发, 综合考虑分析对生态系统起促进和抑制作用的正反两种因素, 在传统对象 Petri 网中引入函数的概念, 首次将其应用于评价模型中, 提出了一种基于对象函数 Petri 网的矿区生态系统脆弱性评价模型 (OFPNEM), 并结合模型的规则, 给出相应的算法, 经过实例验证, 该模型能有效表示生态系统的破坏和修复的动态变化情况, 其算法是有效的。

OFPNEM 作为一种新的复杂生态系统建模工具, 充分地利用了 Petri 网和面向对象技术的优点, 并将它们有力地结合起来, 一方面为生态系统脆弱性评价建模提供了一种全新的方法, 丰富了评价建模的研究方法, 扩展了对象函数 Petri 网的研究领域; 另一方面, 也使得其具有良好的知识表达能力、规则表示和演化过程等。

参考文献:

- [1] 杜娟, 陈英. 基于 PSR 模型的民勤县绿洲——荒漠交错带生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 215-220.
DU Juan, CHEN Ying. Ecosystem health evaluation of oasis-desert ecotone in Minqin country based on PSR model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 215-220.
- [2] 杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 等. 区域生态系统健康动态评价——以毛集生态实验区为例[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4279-4287.
- [3] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1192-1203.
KANG Peng, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e. Advances in ecosystem service-based ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [4] 孙琦, 白中科, 曹银贵, 等. 特大型露天煤矿土地损毁生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 278-288.
SUN Qi, BAI Zhong-ke, CAO Yin-gui, et al. Ecological risk assessment of land destruction in large open-pit mine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 278-288.
- [5] Xueqin Liao, Wei Li, Jinxiang Hou. Application of GIS Based Ecological Vulnerability Evaluation in Environmental Impact Assessment of Master Plan of Coal Mining Area[C]// 2013 International Symposium on Environmental Science and Technology. Procedia Environmental Sciences, 2013: 271-276.
- [6] Jorge Castilla Gómez, Juan Herrera Herbert. Environmental analysis of mining operations Dynamic tools for impact assessment[J]. Minerals Engineering (S0892-6875), 2015(76): 87-96.
- [7] 裴欢, 房世峰, 覃志豪, 等. 干旱区绿洲生态脆弱性评价方法及应用研究——以吐鲁番绿洲为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(5): 528-532.
Pei Huan, Fang Shifeng, Qin Zhihao, et al. Method and application of ecological environment vulnerability evaluation in arid oasis——A case study of Trupan Oasis, Xinjiang[J]. Journal of Wuhan university (information science edition), 2013, 38(5): 528-532.
- [8] 张德君, 高航, 杨俊, 等. 基于 GIS 的南四湖湿地生态脆弱性评价[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 874-882.
Zhang Dejun, Gao Hang, Yang Jun, et al. Assessment for the Ecological Vulnerability of Nansihu Wetland Based on GIS Technology[J]. Resources Science, 2014, 36(4): 874-882.
- [9] 刘平, 汤万金. 矿区可持续生态环境管理规划方法研究[J]. 标准科学, 2003, 14(1): 301-304.
Liu Ping, Tang Wangjin. Research on sustainable ecological environment management planning method in mining area[J]. World Standardization & Quality Management, 2003, 14(1): 301-304.

- [10] 付标, 祝桂兰, 康鸳鸯, 等. 矿区生态环境脆弱性评价——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 Gui-lan, Kang Yuan-yang, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability in mining area: a case study of Zheng cun coal mine in Xin'an County, Henan Province[J]. Journal of Anhui Agri. Sci, 2006, 34(24): 6565- 6567.
- [11] 全占军, 栗原, 李俊生, 等. 采煤矿区的生态脆弱性——以内蒙古锡林郭勒草原胜利煤田为例[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1729-1738.
Quan Zhanjun, Li Yuan, Li Junsheng, et al. Ecological vulnerability of coal mining area: A case study of Shengli Coalfield in Xilinguole of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1729-1738.
- [12] 赵桂久. 生态环境综合整治与恢复技术研究[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995: 8-19.
ZHAO Gui-jiu. Research on comprehensive rehabilitation and restoration technology of ecological environment [M]. Beijing: Beijing science and Technology Press, 1995: 8-19.
- [13] 薛建春, 白中科. 生态脆弱矿区土地复垦方案实施监测评价研究——以平朔矿区为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 246-249.
XUE Jian-chun, BAI Zhong-ke. Study on the monitoring and evaluation of land reclamation implementation in ecologically fragile mining area: A case study of Pingshuo mining area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 246-249.
- [14] 张耿杰, 白中科. 端点三角白化权函数法与可拓综合评价法在矿区生态脆弱性评价中的应用比较[J]. 西部资源, 2012(5): 174-179.
ZHANG Geng-jie, BAI Zhong-ke. Comparison of endpoint triangular function and extensive comprehensive approach applying in the evaluation of ecological fragility in the mining area[J]. Western Resources, 2012(5): 174-179.
- [15] 孙平军, 修春亮, 王忠芝. 基于 PSE 模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究: 以辽宁阜新为例[J]. 经济地理, 2010, 30(8): 1354-1359.
SUN Ping-jun, XIU Chun-liang, WANG Zhong-zhi. Assessment of mining-city's ecological fragility on changes based on the PSE mode[J]. Economic Geography, 2010, 30(8): 1354-1359.
- [16] 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, Jilin Province of Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3213-3220.
- [17] 封建民, 郭玲霞, 李晓华. 基于景观格局的陕北资源富集区生态脆弱性评价——以陕西省神木县为例[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 271-276.
FENG Jian-min, GUO Ling-xia, LI Xiao-hua. Assession of ecological vulnerability in resource enrichment areas of northern Shaanxi province based on landscape pattern: A case study of Shenmu county in Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(4): 271-276.
- [18] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
YUAN Chong-yi. Petri net principle and application [M]. Beijing: Publishing House of electronics industry, 2005.
- [19] 徐嘉兴. 典型平原矿区土地生态演变及评价研究——以徐州矿区为例[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
XU Jia-xing. Study on Land Ecological Evolution and Impact Assessment of a Typical Plain Coal Mining Area: A Case Study In Xuzhou Mining Area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.
- [20] 王宏斌, 王海娟, 曾和平, 等. 污染与恢复生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 187.
WANG Hong-bin, WANG Hai-juan, ZENG He-ping, et al. Pollution and restoration ecology[M]. Beijing: Science Press, 2015: 187.