

藻类水华形成机理的模糊 Petri 网优化建模研究

王小艺,唐丽娜,刘载文,许继平
(北京工商大学计算机与信息工程学院,北京 100048)

摘要: 在对湖库藻类水华形成机理深入研究的基础上,构建了描述藻类水华形成过程的 Petri 网机理模型,考虑影响藻类水华形成关键因子的综合作用机理,根据实验分析结论,通过构建模糊隶属度函数对 Petri 网机理模型中的库所信度进行模糊化处理,并采用粒子群算法对机理模型中涉及的权重进行优化率定,同时通过神经网络对机理模型库所信度进行自适应学习,实现了对藻类水华形成过程的机理建模和对藻类水华暴发的预测。

关键词: 水华形成机理; 模糊理论; Petri 网; 优化; 神经网络

中图分类号: TH873.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)01-0068-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.01.013

Research on the Fuzzy Petri Net Optimization Modeling of Water Bloom Formation Process

WANG Xiao-yi, TANG Li-na, LIU Zai-wen, XU Ji-ping

(Computer and Information Engineering Institute, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The Petri-net is utilized to preliminarily construct the mechanism model for evolutionary process of water bloom on the bases of deep research of the mechanism of evolution of lake water bloom. Considering the integrated mechanism of water bloom that affects key factors for the formation of algal water bloom and the results of the experimental analysis, membership function is constructed to fuzzy the library reliability of the Petri-net mechanism model and particle swarm optimization is used to optimize the weight involving the mechanism model. Meanwhile, with the neural network adaptively learning the mechanism model reliability, mechanism modeling and prediction are realized for algae water bloom outbreak.

Key words: formation mechanism of water bloom; fuzzy theory; Petri-net; optimization; neural network

1 引言

随着我国经济高速发展以及工业化、城市化进程的不断加快,大量氮、磷等营养物质产生并进入湖泊中,导致水体富营养化程度日趋严重,藻类水华频发,湖泊水体生态安全受到严重威胁.为保障湖泊水生生态系统健康,防止发生藻类暴发等不良的生态效应,水体富营养化预防与控制已成为重点研究和亟需解决的环境问题^[1].

藻类水华的形成机理建模是水华预测与防治的前提和基础.目前藻类水华机理建模研究主要集中在藻类水华的传统数学机理建模^[2,3]与神经网络建模^[4,5]两大方面.这两类方法在描述藻类水华形成过程方面各有所长,但也都存在不足.根据藻类水华形成机理特性,建立基于 Petri 网的水华机理模型,能够很好地描述水华的

形成过程.为进一步描述诸多影响因素对藻类水华形成过程的不确定作用关系,体现复杂生态系统的分布和并发等特性,定义了 Petri 网模型中库所信度的模糊隶属度函数,并对模型中涉及的权重及信度进行优化处理,以更加准确地描述出藻类水华形成这一复杂动态过程;同时为对藻类水华暴发特性进行研究,构建了基于模糊 Petri 网模型信度的自适应神经网络学习算法,实现对湖泊藻类水华暴发的有效预测.

2 湖泊藻类水华形成过程的模糊 Petri 网建模

藻类水华形成可以分为休眠、复苏、生物量增加、上浮和积聚等四个主要阶段,图 1 为实验室进行藻类水华形成模拟培养过程中藻类的生长变化情况.根据前期研究成果,通过实验室正交试验以及粗糙集理论确定了影

响湖泊藻类水华形成的主要影响因子有:水温、光照、总氮、总磷、pH 及溶解氧 DO^[6]。

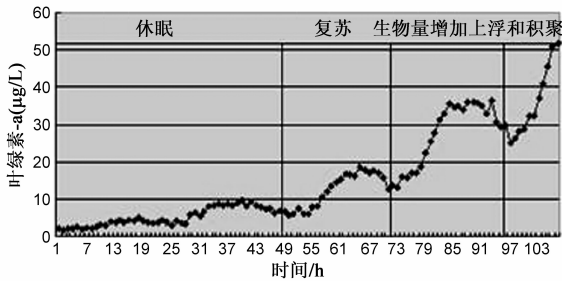


图1 实验室藻类水华形成过程中藻类生长变化情况

2.1 藻类水华形成过程的 Petri 网模型构建

Petri 网是一种描述复杂系统逻辑层次的动态建模工具,很适于描述并行和异步发生的事件,目前 Petri 网在建模方面也得到了广泛的应用^[7,8]。本文采用 Petri 网初步构建了藻类水华形成机理模型如图 2 所示。

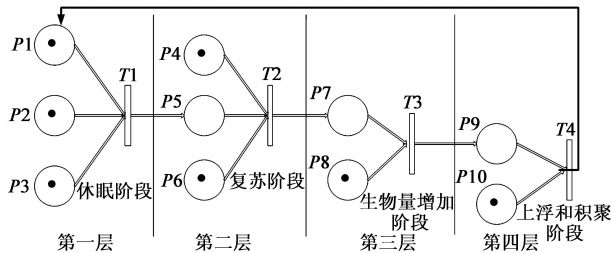


图2 藻类水华形成过程的 Petri 网模型

对藻类水华形成 Petri 网机理模型中的 10 个库所及变迁进行定义:叶绿素 a 、总氮、总磷、溶解氧、 $C_{100}H_{263}O_{110}N_{16}P$ 、温度、含无机盐藻类、光照、藻类生长能量、pH 值分别为 p_1, p_2, \dots, p_{10} ; 藻类休眠、藻类复苏、藻类生物量增加、藻类上浮和聚焦变迁分别为 t_1, \dots, t_4 。藻类水华形成模糊 Petri 网模型为 $N = \{P, T, F, L\}$, 其中 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{10}\}$ 为库所集, $T = \{t_1, t_2, t_3\}$ 为变迁集, $F = \{(p_1, t_1), (p_2, t_1), \dots, (p_{10}, t_4), (t_4, p_1)\}$ 为有向弧集, $L = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_{10}\}$ 为模糊映射函数集。

藻类水华形成过程具体描述如下:

(1) 休眠阶段的藻类生长受低温和黑暗影响,主要吸收氮磷元素,以不断积聚能量,进而形成 $C_{100}H_{263}O_{110}N_{16}P$, 即 $(p_1, t_1), (p_2, t_1), (p_3, t_1), (t_1, p_5)$;

(2) 所形成的 $C_{100}H_{263}O_{110}N_{16}P$ 在复苏阶段主要受温度和溶解氧限制,形成含有无机盐藻类,即 $(p_4, t_2), (p_5, t_2), (p_6, t_2), (t_2, p_7)$;

(3) 含有无机盐藻类在生物量增长阶段主要进行光合作用,生成藻类生长所需的能量,即 $(p_7, t_3), (p_8, t_3), (t_3, p_9)$;

(4) 在上浮和聚焦过程,藻类已经累积了能量与物质,在适合水文条件下藻类水华暴发,即 $(p_9, t_4), (p_{10}, t_4), (t_4, p_1)$ 。

2.2 藻类水华形成过程 Petri 网模糊化处理

传统 Petri 网不能处理模糊知识,使得 Petri 网在建模时缺乏柔性。Carl G. Loony 提出了基于规则决策的模糊 Petri 网 (Fuzzy Petri Net, 简称 FPN)^[9], 指定库所中的值为 0 到 1 之间的一个数值,以表示命题的置信度,变迁上的模糊量表示规则的置信度。

模糊 Petri 网的八元组表示为^[10]:

FPN = $\{P, T, I, O, M, \lambda, W, U\}$, 如果变迁 t 激发, 则其输出库所值:

$$y_k = u(t) \sum_{j=1}^n \partial(p_j) w_j, \left(\sum_{j=1}^n \partial(p_j) w_j > \lambda \right) \quad (1)$$

其中 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$, u_j 为变迁 t_j 的确信度, $u_j \in [0, 1] (j = 1, 2, \dots, m)$ 。 ∂ 为库所对应的命题可信度。

构建藻类水华形成 Petri 网机理模型之后,需要对原始测试参数进行预处理,得到对应与藻类水华形成的起始库所信度。根据藻类水华形成阶段特征,定义一个起始库所信度函数以实现原始数据模糊化。起始库所 p_i 信度函数 $\partial(p_i)$ 的表达式定义如下:

$$\partial(p_i) = \begin{cases} \frac{-\tau(x - a_1) + e}{10.7 * \delta}, & 0 < x < a_1 \\ \frac{-\tau(x - a_2)(x - a_1) + e}{a_2 * \delta}, & a_1 < x < a_2 \\ \frac{-\tau(x - a_2)(x - a_1) + e}{a_3 * \delta}, & a_2 < x < a_3 \\ 1, & x > a_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, x, e, δ, τ 分别为藻类水华 Petri 网中的各参数实测值、变化范围、调整因子及修正系数; $a_i (i = 1, 2, 3)$ 为不同阶段藻类变化的阈值。根据藻类水华形成培养模拟实验情况,确定 a_1 为 $10.7 \mu\text{g/L}$; a_2 为 $18.8 \mu\text{g/L}$; a_3 为 $40 \mu\text{g/L}$; e 取值为 0.2; δ 取值为 0.9; τ 取值 1。根据式(2)对数据进行预处理后得到各个库所信度。

3 基于进化算法的模糊 Petri 网模型权值优化与神经网络仿真

3.1 基于粒子群算法的藻类水华形成过程模糊 Petri 网权重优化

从式(1)对于与规则的组命题,在满足变迁激发情况下,输出库所对应的可信度与各个输入库所的权重系数呈线性关系,可表示为:

$$\partial(p'_1) = u_4 u_3 u_2 u_1 \partial(p_1) w_1 w_5 w_7 w_9 + u_4 u_3 u_2 u_1 \partial(p_2) w_2 w_5 w_7 w_9 + u_4 u_3 u_2 u_1 \partial(p_3) w_3 w_5 w_7 w_9 + u_4 u_3 u_2 \partial(p_4) w_4 w_7 w_9 + u_4 u_3 u_2 \partial(p_5) w_6 w_7 w_9 + u_4 u_3 \partial(p_8) w_8 w_9 + u_4 \partial(p_{10}) w_{10} \quad (3)$$

根据式(2)认为 $\partial(p'_1)$ 取值等于 1 时为藻类水华暴发。

权重系数确定与输出库所对应命题的可信度计算密

切相关,但权重系数通常不能准确获得,影响了输出库所对应的可信度计算精度.对式(3)中的待定参数 w_i 和 u_i

采用粒子群算法求得最优权重系数及可信度,使输出库所计算所得可信度逼近其实际值.

结合藻类水华模拟培养实验要求,并将机理模型计算值与实测值偏差的平方和作为目标优化函数,即

$$F = \sum_{i=1}^n [\partial(p'_i) - \partial(p_i)]^2$$

$$\text{st. } w_1 + w_2 + w_3 = 1,$$

$$w_4 + w_5 + w_6 = 1,$$

$$w_7 + w_8 = 1,$$

$$w_9 + w_{10} = 1$$
(4)

式中, $\partial(p'_i)$ 为式(3)的计算值, $\partial(p_i)$ 为叶绿素 a 的实际可信度.

优化的参数结果如下:可信度 u_1, u_2, u_3, u_4 分别为 0.3406、0.8307、0.5909、0.0305. 权重系数 ω 的优化结果见表 1.

3.2 藻类水华形成过程模糊 Petri 网的神经网络仿真

由于模糊 Petri 网存在学习困难的问题,考虑神经网络的 BP 算法适用于严格分层结构的网络模型,而藻类水华形成模糊 Petri 网模型是以变迁为中心的网络结构,可将 BP 算法应用于模糊 Petri 网模型的可信度自适应学习中,以解决模糊 Petri 网学习困难问题.藻类水华形成过程的模糊 Petri 网模型采用最大路径法进行分层,按照变迁个数分为四层(如图 2 所示),定义模糊 Petri 网的误差函数为

$$E = \sum_{p=1}^n \frac{1}{2} \sum_j [\partial(p_j) - \partial(p'_j)]^2$$
(5)

节点作用选择 Sigmoid 函数,令 t_i 为第 i 层的变迁, p_i 为 t_i 的输出库所,定义 $\text{net}(t_i) = \sum \partial(p_{ik}) w_{ik}$ 为变迁的净输入,则 $\partial(p_i) = u_i \text{net}(t_i) g(\text{net}(t_i), \lambda_i)$, 其中 $\partial(p_i)$ 取最大值;模糊 Petri 网的权值 w_{ik} 、变迁可信度 u_i 沿误差函数 E 的梯度下降方向修正.对模糊 Petri 网进行学习,输入节点为 5 个,隐含层节点 10 个,输出节点 1 个.经过样本训练得出基于 BP 算法的水华形成模糊 Petri 网机理模型的叶绿素 a 可信度预测值与真实叶绿素 a 的可信度值比较见图 3.

基于 BP 算法的藻类水华形成模糊 Petri 网模型的可信度预测结果的绝对误差为 0.0393,相对误差可达到 0.63%.由图 3 可以看出,此模型能够实现对藻类水华形成各阶段状态的有效预测.

表 1 藻类水华形成的主要阶段各库所的权重优化值

权重	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9	ω_{10}
优化值	0.2428	0.6207	0.1365	0.1100	0.7065	0.1844	0.3306	0.6694	0.1066	0.8934

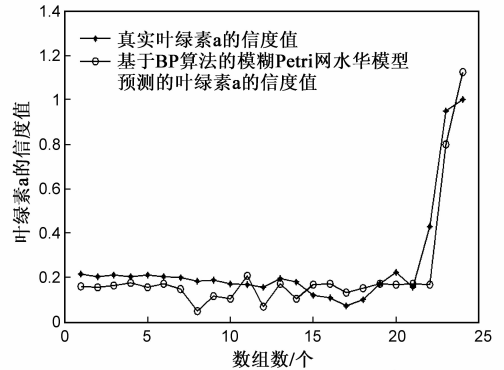


图 3 基于 BP 算法的模糊 Petri 网水华模型可信度预测结果

4 结论

通过对湖泊藻类水华形成机理的深入研究,初步构建了描述藻类水华形成过程的 Petri 网模型,为提高模型的精度及适应度,根据实验结论对机理模型中的可信度进行模糊化处理,并建立了可信度及权重的优化模型,可准确对藻类水华形成的每一阶段藻类含量变化趋势进行分析;同时通过引入神经网络中的 BP 算法对藻类水华形成过程的可信度进行自适应学习,使模型可以对藻类水华发生状况进行有效预测,进而为深入了解藻类水华的成因提供了一个准确高效的分析工具.

虽然本文提出的模型可以描述藻类水华形成过程中的每一个阶段的变化趋势,但由于受到 Petri 网本身的限制,还不能做到准确的定量描述;另外所建立的藻类水华形成模糊 Petri 网机理模型是藻类水华形成分析的框架模型,如何精确反映藻类水华暴发阶段特点还需要进一步的研究.

参考文献

- [1] 胡绵好. 经济植物浮床技术改善富营养化水体水质的机理与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. 8-9.
- [2] 吴巧梅, 刘载文, 王小艺, 等. 基于优化理论的藻类生长模型及其在水华预测中的应用[J]. 化工学报, 2008, 59(7): 1869-1873.
Wu Qiaomei, Liu Zaiwen, Wang Xiaoyi. Algae growth modeling based on optimization theory and application to water-bloom prediction[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(7): 1869-1873. (in Chinese)
- [3] 李一平, 逢勇, 向军. 太湖水质时空分布特征及内源释放规律研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(3): 300-306.
Li Yi-Ping, Feng Yong, Xiang Jun. Analysis to the characteristics of temporal and spatial distribution of the pollutant and the law of release from sediment in Taihu Lake[J]. Acta Scientiae

- Circumst Antiae, 2005, 25(3): 300 – 306. (in Chinese)
- [4] 崔广柏, 刘凌, 姚琪. 太湖流域富营养化控制机理研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 7 – 8.
- [5] 刘载文. 基于 RBF 神经网络的河湖水华软测量方法 [A]. 王小艺. 第 26 届中国控制会议论文集 [C]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007. 108 – 111.
- Liu Zaiwen. The method of soft sensing for water bloom in river and lakes based on RBF neural network [A]. Wang Xiaoyi. The Twenty-sixth Chinese Control Conference Proceedings [C]. Beijing: Beihang University Press, 2007. 108 – 111. (in Chinese)
- [6] 黄振芳, 崔丽凤, 等. 北京城市水华预警指标体系研究 [J]. 人民黄河, 2010, 32(5): 8 – 10.
- [7] 曹政才, 赵会丹, 王永吉. 基于模糊 Petri 网推理的半导体生产线投料控制策略 [J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1545 – 1550.
- Cao Zhengcai, Zhao Huidan, Wang Yongji. Releasing control policy for semiconductor wafer fabrication based on fuzzy Petri nets-reasoning [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1545 – 1550. (in Chinese)
- [8] 曹政才, 余红霞, 乔非. 基于 Petri 网与遗传算法的半导体生产线建模与优化调度 [J]. 电子学报, 2010, 38(2): 340 – 344.
- Cao Zhengcai, Yu Hongxia, Qiao Fei. Petri-Net and GA-Based approach to modeling and optimize for semiconductor wafer fabrication [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2): 340 – 344. (in Chinese)
- [9] Carl G Loony. Fuzzy Petri nets for rule-based decision making [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 178 – 183.
- [10] 李洋, 乐晓波. 克隆选择算法在优化模糊 Petri 网参数中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(15): 39 – 42.
- Li Yang, Le Xiaobo. Research on clonal selection algorithm applied in parameters optimization of fuzzy Petri nets [J]. Computer Engineering and Application, 2011. 47(15): 39 – 42. (in Chinese).

作者简介



王小艺(通讯作者) 男, 1975 年 6 月出生于山西省新绛县, 副教授, 主要研究方向为水环境领域复杂系统建模与仿真、城市污水智能控制。

E-mail: sdwangxy@163.com



唐丽娜 女, 1987 年 8 月出生于黑龙江明水县, 研究生, 北京工商大学检测技术与自动化装置专业, 研究方向为水华机理建模与预测预警研究。

E-mail: tanglina1987820@sina.com