

基于 Petri 理论的水质安全预警模型构建与应用

迟盼盼¹ 魏 巍² 叶 松^{1*}

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 重庆市巫山县生态环境监测站, 重庆 404700)

摘要: 水质安全预警对于预防水污染事故发生、保障水资源安全具有重要意义。传统的水质安全预警模型只能对渐变式水环境污染事故或已经发生且有明显征兆显现出的水环境污染事故进行预警, 无法对没有明显征兆的突发式水环境污染事故进行有效预警。针对这一问题, 将 Petri 网的跃阶思想有效地纳入传统评价指标体系中, 实现对模型逻辑拓扑网络的结构调整, 并结合模糊综合评价法和 BP 神经网络, 构建了可以对突发式水环境污染事故做出及时反应的预警模型, 将该模型应用到太湖水质安全预警的研究中。结果表明: 在将 TN、TP、透明度等指标纳入跃阶因子的基础上, 模型可对太湖多次发生的水华事件实现准确预警。该结论为研究突发水环境污染事故预警提供了新的思路和理论依据。

关键词: 水质安全; Petri 理论; 跃阶; 模糊综合评价法; 突发事件预警

DOI: 10.13205/j.hjgc.202112012

ESTABLISHMENT AND APPLICATION OF WATER QUALITY SAFETY EARLY WARNING MODEL BASED ON PETRI THEORY

CHI Pan-pan¹, WEI Wei², YE Song^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;
2. Wushan Ecological Environmental Monitoring Station of Chongqing City, Chongqing 404700, China)

Abstract: Water quality safety early warning is of great significance for preventing water pollution accidents and ensuring water resources safety. The traditional water quality safety early warning model can only give early warning to the gradual water environmental pollution accidents or the water environmental pollution accidents that have already occurred and have obvious signs appearing, but cannot give effective early warning to the sudden water environmental pollution accidents without obvious signs. To solve this problem, the step idea of Petri net was effectively incorporated into the traditional evaluation index system, so as to realize the structural adjustment of the logical topology network of the model. Combined with the fuzzy comprehensive evaluation method and BP neural network, an early warning model which can timely reflect the sudden water environmental pollution accident was established. The model was applied to the study of water quality safety in Taihu Lake. The results showed that the model could accurately predict the occurrence of multiple bloom events in Taihu Lake, on the basis of incorporating the indexes of total nitrogen, total phosphorus and transparency into the step factors. The conclusion provided a new idea and theoretical basis for studying the early warning of water environmental pollution accidents.

Keywords: water quality safety; Petri theory; step problem; fuzzy comprehensive evaluation method; emergency warning

0 引言

水作为重要的自然资源,是区域经济可持续发展
和人类生存的物质基础,也是维系区域生态环境质量

的重要因子^[1]。随着城市化进程的加快、气候条件的
变化以及人口的增长,突发水环境污染事故频发,
引起了人们的广泛关注^[2,3]。相关研究资料表明,

收稿日期: 2020-11-27

基金项目: 国家自然科学基金“基于隐患识别与响应建模的供水系统预警技术研究”(51508288)。

第一作者: 迟盼盼(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为供水安全评价与预警技术。15192655787@163.com

* 通信作者: 叶松(1982-),男,博士,副教授,主要研究方向为供水安全评价与预警技术。nigel.ye@yeah.net

2006—2016年,我国共发生874起突发性水环境污染事故,对城市的生态环境、社会经济、居民生活等造成了严重影响^[4]。因此,有必要开展水质安全预警研究,从而最大限度地防控突发水环境污染事故的发生。

目前,国内外针对水质安全预警的研究已经取得了较为丰富的成果,重点集中在预警指标的选择和预警模型的构建上^[5-9]。但是,传统的水质安全预警模型多是基于在线监测数据,通过预警指标的加权运算获得预警对象的安全状况,并未考虑相对“不重要”的指标会直接跃阶影响目标结果的可能性,而这种情况却经常存在于突发性水环境污染事故中。因此,本文基于Petri网的传递阶梯理论^[10],对传统指标体系的逻辑拓扑网络进行结构性调整,并将其与较为广泛应用的模糊综合评价法和BP神经网络进行耦合,构建水质安全预警模型,并采用该模型对太湖水质安全状况进行了评价,为太湖水污染防治提供科学依据。

1 研究方法

1.1 改进 AHP 法

1) 定义。

将Petri网的传递阶梯理论嵌入传统AHP法中,构建含有跃阶因子的层次分析网络模型,如图1所示。改进AHP法^[11,12]可定义为1个四元组:

$$A = \{ \langle N, V \rangle; \langle C, W \rangle \} \quad (1)$$

其中: $N = \{ n_1, n_2, \dots, n_k \}$ 为节点的有限集合,以实线圆形(或矩形)表示; $V = \{ v_1, v_2, \dots, v_k \}$ 为节点取值的有限集合, V 与 N 一一映射; $C = \{ c_1, c_2, \dots, c_k \}$ 为有向边的集合, $C = \dot{C} \cup \vec{C}$, 其中 \dot{C} 为普通边集,以单箭头实线段表示, \vec{C} 为超越边集,以双箭头实线段表示,箭头方向表示分权点到授权点的权重依附方向; $W = \{ w_1, w_2, \dots, w_k \}$ 为有向边的权重集合, W 与 C 一一映射。

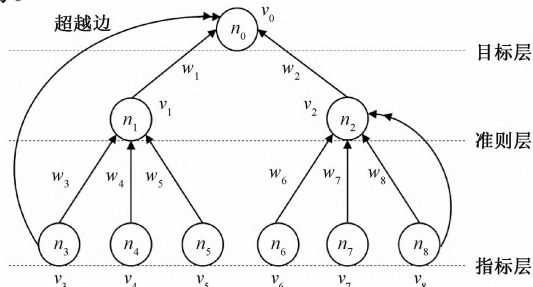


图1 层次分析网络模型示意

Figure 1 Schematic diagram of AHP network model

①定义1:

若 $n_k = \{ n | n \in N \wedge (n, n_k) \in C \}$, 称 n 为 n_k 的输入集; 若 $n_k = \{ n | n \in N \wedge (n_k, n) \in C \}$, 称 n 为 n_k 的输出集。

②定义2:

若 $n \neq \emptyset$ 且 $n^+ = \emptyset$, 则称 n 为根节点, 根节点有且只有1个; 若 $n^+ \neq \emptyset$ 且 $n^- \neq \emptyset$, 则称 n 为枝节点, 枝节点允许有多个; 若 $n^+ \neq \emptyset$ 且 $n^- = \emptyset$, 则称 n 为叶节点, 叶节点允许有多个。

③定义3:

若节点 n_i 到 n_j 立即可达, 称 n_i 为 n_j 的子节点, 并称 n_j 为 n_i 的父节点; 若节点 n_i 到 n_p 立即可达, 且节点 n_j 到 n_p 立即可达, 称 n_i 与 n_j 互为兄弟节点。

④定义4:

若节点 n_i 到 n_j 可达, 称节点 n_i 为 n_j 的后代节点, n_j 为 n_i 的祖先节点, 并称 n_i 与 n_j 互为直系血亲节点; 若 n_i 到 n_j 不可达, 且 n_i 与 n_j 不互为兄弟节点, 则称 n_i 与 n_j 互为旁系血亲节点。

⑤定义5:

若节点 n_i 为 n_j 的后代节点, 则 $c_s = (n_i, n_j) \in \vec{C}$ 为 n_i 到 n_j 的超越边, μ_{jr} 和 m 分别为与超越边 c_s 映射的超越权重和阈值, v_i 和 v_j 分别为与节点 n_i 和 n_j 映射的取值, 当 $v_i \geq m$ 时, 则 $\mu_{jr} = 1$, 超越边 c_s 断裂; 当 $v_i < m$ 时, 则 $\mu_{jr} = 0$, 超越边 c_s 成立, 超越边终点取值被0因子化。

⑥定义6:

若叶节点 n_i 到枝节点 n_j 立即可达, 枝节点 n_j 到根节点 n_0 立即可达, c_1, c_2 分别为 n_i 到 n_j 、 n_j 到 n_0 的超越边, μ_{j1}, μ_{j2} 和 m_1, m_2 分别为与超越边 c_1, c_2 映射的超越权重和阈值, v_i, v_j 和 v_0 分别为与叶节点 n_i 、枝节点 n_j 和根节点 n_0 映射的取值, 当 $v_i \geq m_1$ 时, 则 $\mu_{j1} = 1$, 超越边 c_1 断裂; 当 $v_i < m_1$ 时, 则 $\mu_{j1} = 0$, 超越边 c_1 成立, $v_j = 0$, 此时无须再对 v_j 与 m_2 进行比较, 按照 $\mu_{j2} = 1$ 对根节点 n_0 取值进行计算, 则 $v_0 = v_j + v_p + v_q$ (其中 v_p 和 v_q 为层次分析网络模型中的枝节点)。

2) 优先级计算。

设层次分析网络模型中的超越边集、阈值集和超越边源点取值集分别为 \vec{C}, M 和 V ; 叶节点 n_i 到根节点 n_0 路径上的超越边集、阈值集和超越边源点取值集分别为 \vec{C}_i, M_i 和 V_i 。当叶节点 n_i 至根节点 n_0 路径上存在超越边时, 若 $\forall \vec{c}_i \in \vec{C}_i$, 有 $v_i < m_i$ (条件

1) , 且 $\forall \vec{c} \in \vec{C}, \forall \vec{c} \notin \vec{C}_i$, 有 $v \geq m$ (条件 2), 则叶节点 n_i 的评估优先级计算式为:

$$p(n_i) = \text{card}(N_1) + \text{card}(N_2) \quad (2)$$

式中: N_1 为判定条件 1 成立需评估的叶节点集; N_2 为条件 1、2 均成立后仍需评估的叶节点集。

当叶节点 n_i 至根节点 n_0 路径上不存在超越边时, 则 $\text{card}(N_1) = 0$, 叶节点 n_i 的评估优先级计算式为:

$$p(n_i) = \text{card}(N_2) \quad (3)$$

规定叶节点评估优先级数值越小, 叶节点的优先级越高。

3) 节点取值计算。

枝节点 n_i 的取值 v_i 的计算式见式(4):

$$v_i = \prod_{r=1}^p \mu_p \cdot \left[\sum_{k=1}^a (v_k \cdot w_k) \right] \quad (4)$$

$$\mu_p = \begin{cases} 0, & v_p < m_p \\ 1, & v_p \geq m_p \end{cases}$$

式中: μ_p 为以节点 n_i 为终点的超越边权重值; v_p 为超越边源点取值; m_p 为超越边阈值; p 为超越边条数; a 为节点 n_i 对应的子节点数目; v_k 为节点 n_i 对应的子节点取值; w_k 为节点 n_i 对应的子节点权重值。

根节点 n_0 的取值 v_0 的计算式见式(5):

$$v_0 = \sum_{i=1}^q (v_i \cdot \prod_{j=1}^{k_i} w_j \cdot \prod_{j=2; r=1}^{k_i \cdot p} \mu_{jr}) \quad (5)$$

$$\mu_{jr} = \begin{cases} 0, & v_{jr} < m_{jr} \\ 1, & v_{jr} \geq m_{jr} \end{cases}$$

式中: q 为叶节点数目; v_i 为叶节点 n_i 对应的取值; k_i 为 n_i 的祖先节点数; w_j 为 n_i 的祖先节点权重; μ_{jr} 为以节点 n_0 为终点的超越边权重值; p 为超越边条数; v_{jr} 为超越边源点取值; m_{jr} 为超越边阈值。

1.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法^[13,14]运用模糊集及隶属度函数对一些边界不清的因素进行量化, 实现多层次复杂问题的准确评估, 其具体算法如下。

1) 步骤一: 建立因素集及评语集。

因素集是以影响水质安全的各风险因素为元素组成的集合。评语集是以相关专家利用已有的知识和经验对需要评价的系统做出的评价结果为元素组成的集合。安全等级标准如表 1 所示。

表 1 安全等级标准

Table 1 The grade criteria of security evaluation

等级	很安全	安全	较安全	较危险	危险
分值	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2

2) 步骤二: 建立隶属度矩阵。

采用半梯形隶属度函数求得各层节点的隶属度矩阵:

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \\ \vdots \\ R_{ib} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i1}^1 & r_{i1}^2 & \cdots & r_{i1}^p \\ r_{i2}^1 & r_{i2}^2 & & r_{i2}^p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{ib}^1 & r_{ib}^2 & \cdots & r_{ib}^p \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{R}_i 为准则层第 i 个因素的隶属度矩阵; b 为准则层第 i 个因素的子节点数目; p 为评语集的维度; r_{ij} 为准则层第 i 个因素第 j 个子节点对应的隶属度值。

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \cdots, \mathbf{R}_a]^T \quad (7)$$

式中: \mathbf{R} 为目标层的隶属度矩阵; a 为准则层因素的数目; T 为转置符号。

3) 步骤三: 模糊综合评判。

准则层第 i 个因素的评价值 F_i 计算公式如下:

$$F_i = \mathbf{B}_i \times \mathbf{S}^T \quad (8)$$

其中:

$$\mathbf{B}_i = w_i \times \mathbf{R}_i \quad (9)$$

式中: \mathbf{B}_i 为准则层第 i 个因素的评价向量; w_i 为准则层第 i 个因素的权重集; \mathbf{R}_i 为由式(6)求得的隶属度矩阵; \mathbf{S} 为评语集向量, $\mathbf{S} = [1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2]$ 。

目标层的评价向量 \mathbf{A} 计算公式如下:

$$\mathbf{A} = w \times \mathbf{B} \quad (10)$$

式中: w 为目标层的权重集; \mathbf{B} 为准则层评价向量。

结合式(5), 引入跃阶因子后, 式(10)可改写为:

$$A_j = \sum_{a=1}^l (r_a^j \cdot \prod_{b=1}^{n-1} w_a^b \cdot \prod_{c=2; r=1}^{n-1; d} \mu_{cr})$$

其中:

$$\mu_{cr} = \begin{cases} 0, & v_{cr} < m_{cr} \\ 1, & v_{cr} \geq m_{cr} \end{cases} \quad (11)$$

式中: A_j 为第 j 个评价等级的目标层结果隶属度; l 为叶节点数目; r_a^j 为第 a 个叶节点在第 j 个评价等级上的隶属度; w_a^b 为第 a 个叶节点的第 b 层上级节点权重; n 为评价体系的层数; d 为超越边数目; μ_{cr} 为以节点 n_0 为终点的超越边权重值; v_{cr} 为超越边源点取值; m_{cr} 为超越边阈值。

目标层的评价值 F 计算公式如下:

$$F = \mathbf{A} \times \mathbf{S}^T \quad (12)$$

其中:

$$\mathbf{A} = [A_1, A_2, \cdots, A_j] \quad (13)$$

式中: \mathbf{A} 为目标层评价向量; \mathbf{S} 为评语集向量, $\mathbf{S} =$

[1.0,0.8,0.6,0.4,0.2]。

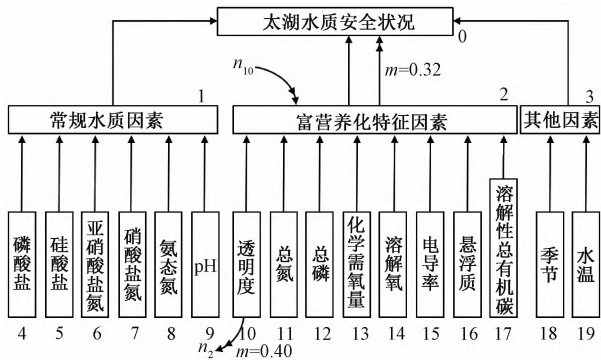
2 案例应用

2.1 研究区概况

太湖(30°55′—31°32′N,119°52′—120°36′E) 是我国第 3 大淡水湖泊,位于长江三角洲的南缘,与 172 条河流或河道相连,流域面积为 3.69 万 km²,水域面积为 2338.1 km²,平均水深为 1.89 m,蓄水容积为 49.56 亿 m³,是太湖流域内最大的湖泊,是整个流域洪水和水资源调蓄的中心,承担着市政用水、农业灌溉及防洪等重要功能,对长三角地区的经济发展起着至关重要的作用^[15,16]。

2.2 水质安全评价

本文结合太湖实际情况,通过查阅文献[17,18]及相关资料,将影响太湖水质安全状况的指标分为常规水质因素、富营养化特征因素及其他因素 3 大类,构建如图 2 所示的水质安全评价指标体系。依据 2007—2015 年太湖内 8 个观测站点的实测数据^[19],采用改进 AHP 法与模糊综合评价法构建的评价模型对太湖水质安全状况进行评估。



注: n 为指标体系中各节点; m 为超越边阈值
图 2 太湖水质安全评价指标体系

Figure 2 Taihu Lake water quality safety evaluation index system

首先由式(2)、(3)计算太湖水质安全评价指标体系中各叶节点的评估优先级为: $p(n_4 \sim n_9) = 16$, $p(n_{18} \sim n_{19}) = 16$, $p(n_{10}) = 9$, $p(n_{11} \sim n_{17}) = 8$ 。

采用层次分析法计算太湖水质安全评价指标体系中各层兄弟节点的权重向量,结果如表 2 所示。

表 2 太湖水质安全评价体系各层兄弟节点的权重向量

Table 2 Weight vectors of brother nodes in each layer of

Taihu Lake water quality safety evaluation system

父节点	兄弟节点	权重向量
n_0	$n_1 \sim n_3$	[0.2605, 0.6333, 0.1062]
n_1	$n_4 \sim n_9$	[0.0556, 0.0556, 0.2222, 0.2222, 0.2222, 0.2222]
n_2	$n_{10} \sim n_{17}$	[0.0744, 0.1621, 0.297, 0.1621, 0.1621, 0.0445, 0.0445, 0.0531]
n_3	$n_{18} \sim n_{19}$	[0.5, 0.5]

采用模糊综合评价法对叶节点取值进行评估,其评估值如表 3 所示。

表 3 太湖水质安全评价体系中叶节点的评估值向量

Table 3 Evaluation value vector of leaf nodes in Taihu Lake water quality safety evaluation system

父节点	叶节点	评价值向量
n_1	$n_4 \sim n_9$	[0.585, 0.678, 0.778, 0.616, 0.650, 0.600]
n_2	$n_{10} \sim n_{17}$	[0.300, 0.552, 0.726, 0.786, 0.898, 0.740, 0.200, 0.736]
n_3	$n_{18} \sim n_{19}$	[0.800, 1.000]

按照求得的优先级顺序,优先对 $n_{11} \sim n_{17}$ 节点进行校核,得到其节点值为 $v_{11 \sim 17} = 0.68$,满足超越阈值 $m_2 = 0.32$,超越边 b_2 断裂;继续对 n_{10} 节点进行校核,得到其节点值为 $v_{10} = 0.30$,不满足超越阈值 $m_{10} = 0.40$,超越边 $b_{10} = (n_{10}, n_2)$ 成立,则 $v_2 = 0$,节点 $n_{10} \sim n_{17}$ 均被废弃。

根据式(11)及表 2 和表 3 中的数据,可求得目标层的评价向量为:

$$A = [0.0531, 0.1293, 0.1831, 0.0011, 0]$$

再根据式(13)可得最终的评价结果 $F = 0.2668$,对应表 1 安全评价等级标准,结果介于很危险与危险之间。若采用传统的 AHP 法,则超越边权重值 $\mu_{10} = 0$ 被忽略,求得最终结果为 $F = 0.6983$,对应表 1,结果介于较安全与安全之间。显然,改进 AHP 法解决了湖泊水质安全评价中的节点跃阶问题,能够获得更加真实的评价结果。

其余发生水华现象各观测站点评价结果如图 3 所示。

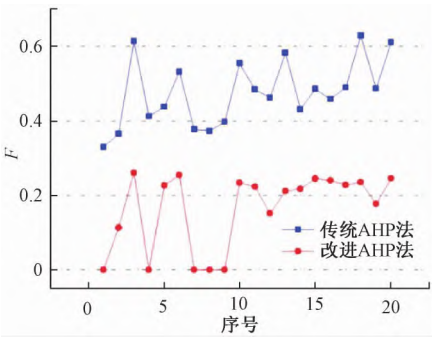


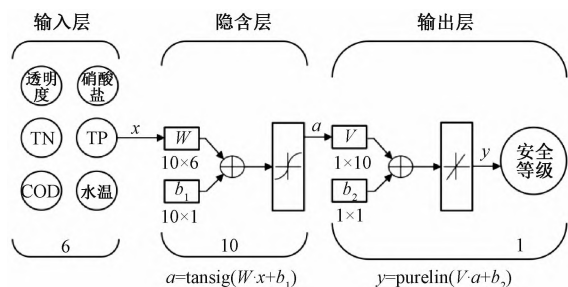
图 3 其余发生水华现象各观测站点评价结果

Figure 3 Evaluation results of the observation sites for the remaining water bloom

2.3 水质安全预警

BP 神经网络^[20]是一种具备自适应性、自学习性、非线性映射能力的评价方法,在水质安全评价及预警、湖泊富营养化评价中应用广泛。本文采用 3 层的 BP 网络构建湖泊水质安全预警模型。输入层节

点个数为 6 个,输入层因子选择的基本原则是与输出因子相关而又彼此无关的环境因子。本文利用 SPSS 软件对因子之间的相关性进行分析,最终确定 TN、TP、COD、水温、透明度及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为输入因子;输出节点个数为 1 个,即湖泊水质安全等级;隐含层节点个数经试凑法确定为 10 个,节点激活函数选择 sigmoid 函数,BP 神经网络模型拓扑结构如图 4 所示。



注: x 为输入变量; W 和 b_1 为输入层与隐含层间的连接权重和阈值;

a 为隐含层输出变量; V 和 b_2 为隐含层与输出层间的连接权重和

阈值; y 为输出变量

图 4 BP 神经网络模型拓扑结构

Figure 4 Topological structure diagram of BP neural network model

依据该模型对太湖水质安全预警等级进行预测,由于篇幅限制,仅列出 THL00、THL06 观测站点的预测结果,如图 5a、b 所示。

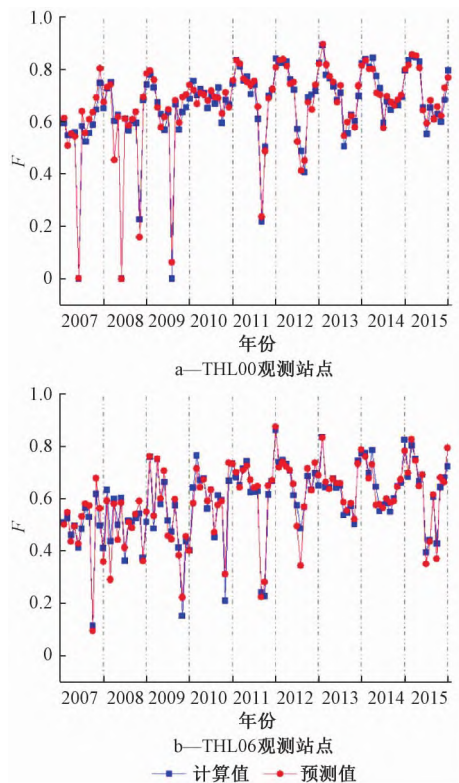


图 5 2007—2015 年太湖水质安全等级预测结果

Figure 5 Taihu Lake water quality safety grade forecast results

由图 5 可知: 本文构建的水质安全预警模型对 THL00、THL06 观测站点在 2007—2015 年内发生水华现象的多个时间点的安全等级状况的预测结果均在 0~0.3,且模型预测值与计算值具有较好的一致性,预测值较计算值的平均绝对误差为 0.0242,平均相对误差为 3.9917%,模型绝对误差的置信区间为 [0.0398, 0.0437],模型预测精度较高,可以实现对太湖水质安全状况的有效预警。

3 结 论

1) Petri 网是异步并行系统建模与分析的重要工具,允许跨层的有向边连接,且网络中阈值的设定可以实现评价指标体系的动态化调整。本文基于 Petri 网的基本理论,对传统评价指标体系的逻辑拓扑结构进行改进,并结合模糊综合评价法和 BP 神经网络构建水质安全预警模型。

2) 基于改进的水质安全预警模型对太湖水质安全状况进行评价,结果表明: 改进的水质安全预警模型解决了传统预警模型由于相对权重机制的缺陷,而对某些指标的突然变化无法及时响应的问题,提高了预警模型应对突发水环境污染事故的准确性及灵敏性,为今后太湖水污染防治提供了科学依据。

参考文献

- [1] HE C S, HARDEN C P, LIU Y X. Comparison of water resources management between China and the United States [J]. Geography and Sustainability, 2020, 1(2): 98-108.
- [2] WANG Y, ENGEL B A, HUANG P, et al. Accurately early warning to water quality pollutant risk by mobile model system with optimization technology [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 208: 122-133.
- [3] LU Y, XU H W, WANG Y X, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method: a case in Huai'an City [J]. Water Resources and Industry, 2017, 18: 71-77.
- [4] 许静,王永桂,陈岩,等. 中国突发水污染事件时空分布特征 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4566-4575.
- [5] 黄东龙,凌亮,周勤. 基于视觉技术的水质安全在线生物预警系统设计 [J]. 中国给水排水, 2014, 30(9): 113-117.
- [6] 左锐,石榕涛,王骥,等. 地下水型水源地水质安全预警技术体系研究 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(3): 409-418.
- [7] DING X W, ZHU Q, ZHAI A F, et al. Water quality safety prediction model for drinking water source areas in Three Gorges Reservoir and its application [J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 734-741.

(下转第 158 页)

- Energy Materials and Solar Cells, 2008, 92(3) : 348-352.
- [23] NGUYEN C C, VU N O, DO T O. Efficient hollow double-shell photocatalysts for the degradation of organic pollutants under visible light and in darkness [J]. Materials Chemistry A, 2016, 4(12) : 4413-4419.
- [24] ZHANG Q, WANG H, LI Z L, et al. Metal-free photocatalyst with visible-light-driven post-illumination catalytic memory [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(26) : 21738-21746.
- [25] LI L N, LIU Z S, GUO L T, et al. NaBiO₃/BiO_{2-x} composite photocatalysts with post-illumination “memory” activity [J]. Materials Letters, 2018, 234(1) : 30-34.
- [26] 李静, 吉庆华, 兰华春, 等. ZnTiO₃-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 [J]. 环境科学, 2019, 40(2) : 693-700.
- [27] TAKAHASHI Y, TATSUMA T. Remote energy storage in Ni (OH)₂ with TiO₂ photocatalyst [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2006, 8(23) : 2716-2719.
- [28] LI J, LIU Y, ZHU Z J, et al. A full-sunlight-driven photocatalyst with super long-persistent energy storage ability [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2409.
- [29] LI Y T, ZHANG J M, LI H W, et al. Highly stable dispersibility in water induced by surface hydration force of TiO₂ nanocrystalline mixtures during phase transformation [J]. Dispersion Science and Technology, 2010, 31(2) : 260-263.
- [30] EL-SHESHTAWY H S, EL-HOSAINY H M, SHOUER K R, et al. Facile immobilization of Ag nanoparticles on g-C₃N₄/V₂O₅ surface for enhancement of post-illumination, catalytic, and photocatalytic activity removal of organic and inorganic pollutants [J]. Applied Surface Science, 2019, 467/468: 268-276.
- [31] ZHAO D, CHEN C C, YU C L, et al. Photoinduced electron storage in WO₃/TiO₂ nanohybrid material in the presence of oxygen and postirradiated reduction of heavy metal ions [J]. Physical Chemistry C, 2009, 113(30) : 13160-13165.
- [32] XING Z, ZENG X K, DELETIC A, et al. Constructing ultrathin film with “memory” photocatalytic activity from monolayered tungstate nanodots [J]. Chemical Communications, 2016, 52(43) : 6985-6988.
- [33] PARK S, KIM W, SELVARAJ R, et al. Spontaneous reduction of Cr (VI) using InSnS₂ under dark condition [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 321: 97-104.
- [34] WANG G, XING Z, ZENG X K, et al. Ultrathin titanium oxide nanosheets films with memory bactericidal activity [J]. Nanoscale, 2016, 8(42) : 18050-18056.
- [35] TATSUMA T, TAKEDA S, SAITOH S, et al. Bactericidal effect of an energy storage TiO₂-WO₃ photocatalyst in dark [J]. Electrochemistry Communications, 2003, 5(9) : 793-796.

(上接第 83 页)

- [8] SEIS W, ZAMZOW M, CARADOT N, et al. On the implementation of reliable early warning systems at European bathing waters using multivariate Bayesian regression modelling [J]. Water Research, 2018, 143: 301-312.
- [9] 任永泰, 卢静, 付强. 基于评价指数的三江平原水安全系统预警研究 [J]. 人民黄河, 2017, 39(3) : 75-80.
- [10] 袁崇义. Petri 网原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [11] 方可, 马萍, 杨明. 用于虚拟样机系统可信度评估的多属性决策网方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5) : 1054-1060.
- [12] 方可, 马萍, 杨明. 仿真可信度评估中的 AHP 超越权重 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(5) : 584-588.
- [13] 方可, 何博夫, 杨明, 等. 模糊综合评价法在仿真可信度评估网中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(5) : 30-36.
- [14] 封丽, 张学睿, 封雷, 等. 基于粗糙集的三峡库区支流水质富营养化模糊综合评价模型研究 [J]. 环境工程, 2015, 33(12) : 105-110.
- [15] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况公报 [EB/OL]. 2018. <http://www.tba.gov.cn/slbthylglj/sj/sj.html>.
- [16] KIM D K, ZHANG W, WATSON S, et al. A commentary on the modelling of the causal linkages among nutrient loading, harmful algal blooms, and hypoxia patterns in Lake Erie [J]. Journal of Great Lakes Research, 2014, 40(suppl. 3) : 117-129.
- [17] 叶松. 城市供水安全防范平台技术研发与实践 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [18] 朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(6) : 1510-1524.
- [19] 闵岫, 钱荣树, 朱广伟, 等. 2007—2015 年太湖水体理化监测数据集 [DB/OL]. Science Data Bank, 2019. DOI: 10.11922/sciencedb.833.
- [20] 殷高方, 张玉钧, 胡丽, 等. BP 神经网络在水华短期预测中的应用 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(6) : 655-660.