



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.013

王中锋. 基于动态朴素贝叶斯分类器的明渠水华风险评估模型[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 89-94, 108. WANG Zhong feng. Risk assessment model for algal bloom of open channel based on dynamic Naïve Bayes classifier[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 89-94, 108. (in Chinese)

基于动态朴素贝叶斯分类器的明渠水华风险评估模型

王中锋

(河南工程学院, 郑州 451191)

摘要: 水华风险不仅是水利工程规划时需要考虑的环境问题, 也是水利设施运营时不能忽视的监测项目。为了提高明渠水华风险等级预测的准确率, 针对水华成因的不确定性和发展的时序性, 基于动态朴素贝叶斯网络分类器提出一种应用于明渠的水华风险评估模型。模型用水华风险等级结点对应藻叶绿素 a (Chla) 的浓度, 并考虑了 9 项影响水藻生长的因素。采用主成分分析法, 处理专家咨询结果, 进行参数的设计。在苏州河道北门桥 2011 年 6 月初至 9 月初观测的 53 例连续监测数据上, 与基于朴素贝叶斯网络分类器的评估模型进行比较实验。混淆矩阵显示对中等风险情况的预测识别率提高了 15.625%, 单尾配对 t 检验表明在显著性水平 0.05 时, 两模型预测识别率差异显著。考虑了时序特征的基于动态贝叶斯网络分类器的评估模型对明渠中等水华风险的预测识别率提高显著。

关键词: 明渠; 水华; 动态贝叶斯网络; 富营养化

中图分类号: TV213 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)02-0089-06

Risk assessment model for algal bloom of open channel based on dynamic Naïve Bayes classifier

WANG Zhong feng

(Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Algal bloom risk is not only an environmental issue to be considered in water conservancy project planning, but also a monitoring item that cannot be ignored in the operation of water conservancy facilities. In order to improve the prediction accuracy for algal bloom risk of open channels, a risk assessment model for algal bloom of open channels was proposed based on the dynamic Naïve Bayes classifier, with consideration to the uncertainty of the cause of algal bloom and sequential nature of its development. The risk grade nodes of the proposed model correspond to the concentration of chlorophyll a (Chla), and take into consideration 9 factors affecting the growth of algae. Network parameters were designed according to the results of expert consultation using the principal component analysis method. Based on the 53 cases of consecutive monitoring data observed from June 2011 to September 2011 at Beimen Bridge on Suzhou River, comparison was made between the proposed model and the assessment model based on Naïve Bayes classifier. Confusion matrix results showed that the prediction accuracy for medium risks increased by 15.625%. Single tailed paired t test showed that the recognition rates of the two models were significantly different when the significance level was 0.05. The assessment model based on dynamic Naïve Bayes classifier with consideration to time sequence has significantly higher prediction and recognition rates for medium algal bloom risk of open channels.

Key words: open channel; algal bloom; dynamic Bayesian network; eutrophication

收稿日期: 2016-01-18 修回日期: 2016-05-18 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1304702); 河南省科技厅软科学项目(152400410480); 河南工程学院博士基金(D2015030)

Funds: National Natural Science Foundation of China (U1304702); Soft Science Project of Henan Province (152400410480); Doctoral Fund of Henan Institute of Engineering (D2015030)

作者简介: 王中锋(1977-), 男, 河南郑州人, 讲师, 博士, 主要从事水资源数据挖掘方面研究。E-mail: iewzf@163.com

1 研究背景

南水北调中线工程正式通水以来,由于水藻超标,已经给部分沿线水厂造成了经济损失。亟待研究明渠水藻预警技术,提前处理,降低损失。现有的相关研究成果主要集中在海洋湖泊的水华^[1]成因分析、水华识别模型、预警模型,以及这些模型在水利工程规划运营过程中的应用4个方面。水华的成因分析开展了多年,研究人员对影响水华的因素和它们之间的关系已经有了较为全面的认识^[2,7]。水华识别模型的研究通常采用图像识别方法^[8]、神经网络方法^[9]、贝叶斯方法^[10]和支持向量机方法^[11]等。这些方法适用于识别已经爆发了水华的水体。水华预测方法可以分为确定性方法和不确定性方法,确定性方法较为成熟,多是利用各种水动力学模型和水质模型来进行分析,例如美国环保局研发的HYNHYD和WASP模型^[12,13]、美国水利资源工程公司提出的CE-QUAL模型^[14]和美国陆军工程兵团使用的RMA4模型^[15]等。由于这些模型忽略了复杂水环境的不确定性,虽然应用简单,但描述与预测能力有限。因此,近年来研究人员开始着手研究不确定性方法, Song等^[16]基于模糊方法预测水质,刘悦忆等^[17]提出了基于蒙特卡洛模拟的水质概率预报模型, Karamouz等^[18]采用随机遗传方法分析。这些模型在处理水质影响因素的不确定性方面,提高了模型的表现能力。同时,各种水华识别和预测模型的具体应用研究也在不断进行着^[19-22]。本文在这些工作的基础上,考虑水质变化时序特征的不确定性,基于动态朴素贝叶斯网络分类器提出一种水华风险评估模型。朴素贝叶斯网络分类器能够通过网络结构和网络参数对不确定性知识进行描述,并进行不确定性推理实现分类。水华发生的风险因素具有不确定性,适合采用贝叶斯网络进行描述;水华发生的风险因素与水华风险之间的关系具有不确定性,可以应用贝叶斯网络分类器在各个风险因素的基础上推理出水华风险强度。动态朴素贝叶斯网络分类器是考虑了时序特征的朴素贝叶斯网络分类器,用来预测水华风险时不仅能够考虑到当前的风险因素情况,还能结合到前一时段的水华风险情况。

2 动态贝叶斯网络模型

动态贝叶斯网络(Dynamic Bayesian Networks, DBN)^[23]是贝叶斯网络的时序扩展,可将不同时间片间时序依赖关系与时间片内依赖关系融为

一体,并通过量化推理进行动态分析、预测。若用 $X[0], X[1], \dots, X[T]$,表示随机向量序列, $X[t] = \{X_1[t], \dots, X_n[t]\}$, $0 \leq t \leq T$, $x[t] = \{x_1[t], \dots, x_n[t]\}$,为其值向量序列。则对网络结构GDB的联合概率分解情况为

$$p(x[0], x[1], \dots, x[T]) = p(x[0])p(x[1]|x[0]) \dots p(x[T]|x[0], \dots, x[T-1]) = \prod_{i=1}^n p(x_i[0]|\pi_i[0, 0], G_{DB}) \prod_{i=1}^n p(x_i[1]|\pi_i[1, 0], \pi_i[1, 1], G_{DB}) \dots \prod_{i=1}^n p(x_i[T]|\pi_i[T, 0], \pi_i[T, 1], \dots, \pi_i[T, T], G_{DB}) = \prod_{t=0}^T \prod_{i=1}^n p(x_i[t]|\pi_i[t, 0], \dots, \pi_i[t, t], G_{DB}) \quad (1)$$

由于在一般的动态贝叶斯网络中,一个结点在所属时间片和时序前面的时间片中都可能存在父结点,网络结构异常复杂,推理计算非常困难,所以,通常在实际应用中附加一些约束条件来简化动态贝叶斯网络。以下研究假设动态贝叶斯网络满足一阶Markov假设和平稳性假设,这两个约束条件能够使动态贝叶斯网络转换为先验网 G_0 和转换网 G^* ,方便使用。

一阶Markov假设在时间片段 t 的变量的状态仅与时间片段 $t-1$ 的变量状态有关,而与 $t-1$ 以前的时间片段内变量的状态无关。即:

$$p(x[t+1]|x[0]x[1], \dots, x[t]) = p(x[t+1]|x[t]) \quad (2)$$

用于分解 $p(x[t+1]|x[t])$ 的贝叶斯网络就是转换网,而平稳性假设对所有的 t ,转移概率 $p(x[t+1]|x[t])$ 都相同,也就是转换网是唯一的,可以从两个相邻时间片数据集中建立转换网。在这两个假设下,可以得到联合概率的分解形式:

$$p(x[0], \dots, x[T]) = p(x[0]) \prod_{t=1}^{T-1} p(x[t+1]|x[t]) \quad (3)$$

从这个分解形式可知,联合概率计算可以转化为 $p(x[0])$ 和 $p(x[t+1]|x[t])$ 的计算。而这两个局部联合概率的计算又可以依据先验网和转移网络进一步分解,即

$$p(x[0]) = \prod_{i=1}^n p(x_i[0]|\pi_i[0], G_0) \quad (4)$$

$$p(x[t+1]|x[t]) = \prod_{i=1}^n p(x_i[t+1]|\pi_i[t+1], \pi_i[t], G^*) \quad (5)$$

其中, $\pi_i[0]$ 是先验网 $X_i[0]$ 中父结点集 $\Pi_i[0]$ 的配置, $\pi_i[t+1]$ 和 $\pi_i[t]$ 分别是 $X_i[t+1]$ 在转换网络中属于 $\{X_1[t+1], \dots, X_n[t+1]\}$ 的父结点集 $\Pi_i[t+1]$ 和属于 $\{X_1[t], \dots, X_n[t]\}$ 的父结点集 $\Pi_i[t]$

[t] 的配置。

先验网描述同一时间片内的依赖关系,转移网描述不同时间片内的依赖关系,它们都是静态贝叶斯网络,静态贝叶斯网络是个有向无环图(Directed Acyclic Graph),由网络结构和网络参数两部分构成。在网络结构中,节点表示模型变量,边表示变量间的依赖关系。代表变量的节点通常用大写字母表示,其对应的变量值用相应的小写字母表示。若变量 A 通过一条弧指向另一个变量 B ,则表明变量 A 与变量 B 有依赖关系,且变量 A 的取值会对变量 B 的取值产生影响。在这对依赖关系中, A 叫做 B 的父结点, B 叫做 A 的子结点。网络参数是指每一个变量对应的条件概率表(Conditional Probability Tables, CPT)。CPT 为每个实例变量都指定了条件概率。通过每个节点的条件概率分布可以得到各个节点的联合概率传播网。

给定动态贝叶斯网络后,就可以在只有一个变量取值不定,而其它变量取值确定的情况下推理出此不确定取值变量的不同取值情况概率大小。若假定出现概率最大的取值为该变量的值,便可以依照此过程,对该变量进行分类。

3 水华风险评估模型

动态朴素贝叶斯网络分类器是一种结构简单的动态贝叶斯网络分类器。本文基于动态朴素贝叶斯网络分类器设计水华风险评估模型。分网络结构和网络参数两部分进行。

3.1 基于动态朴素贝叶斯网络分类器的水华风险评估模型结构

由于水华是水体藻类大量生长繁殖或聚集并达到一定浓度的现象^[1],所以在水华实验研究中通常以水体中叶绿素 a(Chla) 含量间接代表水体中藻类的数目^[5]。在这个模型中,本文采用藻叶绿素 a 浓度来评估水华风险等级。影响藻类生长的因素很多,诸如物理因素、化学因素和生物因素,水体富营养化与水华的爆发正是由这些因素影响着。本文参考文献[5]的监测项目,考虑了水温,日降雨量,浊度,透明度,藻类光合活性(F_v/F_m),总氮含量(TN),氨氮(NH_4^+-N)含量,总磷含量(TP),氮磷比 9 项对 Chla 有影响的因素。由于动态朴素贝叶斯网络分类器是朴素贝叶斯网络分类器与时间序列的结合,是一种简单的动态贝叶斯网络分类器,其中类变量形成马尔科夫链,时间片属性变量形成局部星型结构。基于动态朴素贝叶斯网络分类器设计水华风险评估模型,没有考虑各个水华风险因素相互之间的影响作用。

图 1 为本文采用动态朴素贝叶斯网络分类器设计的水华风险评估模型的网络结构图。其中, A_1 表示水温, A_2 表示日降雨量, A_3 表示浊度, A_4 表示透明度, A_5 表示 F_v/F_m , A_6 表示 TN, A_7 表示 NH_4^+-N 含量, A_8 表示 TP, A_9 表示氮磷比, C 表示 Chla 浓度。整个网络结构由先验网络和转移网络展开得到。

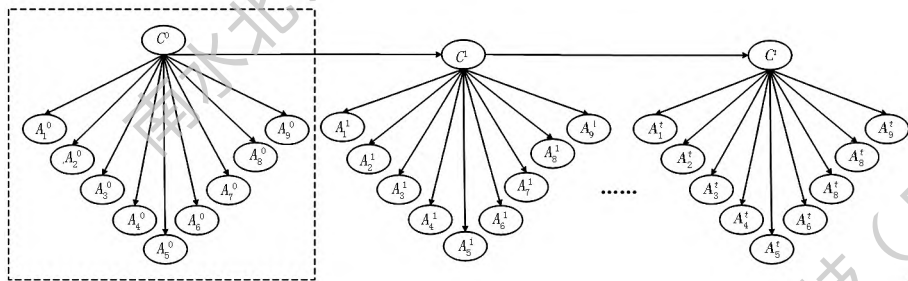


图 1 基于动态贝叶斯网络的水华风险评估模型结构

Fig. 1 Structure of risk assessment model for algal bloom based on dynamic Bayesian network

虚线包含的部分为先验网络结构。由于朴素贝叶斯网络分类器只考虑了类变量对属性变量之间的依赖关系,没有考虑属性变量之间的相互依赖关系。图中只有从类结点指向各个属性结点,各个属性结点之间不存在边。

属性结点和类结点的上标表示该结点所对应的的时间片。连接相邻时间片之间类结点的边构成了模型的转移网络结构,在转移网络中,时间片 $t+1$ 中代表水华风险等级的类变量除了受该时间片中影响

因素的作用外,还受到上一时刻 t 中水华风险等级情况的影响。

在这个基于动态朴素贝叶斯网络分类器的水华风险评估模型中,每一个时刻的风险等级情况除了与当前的影响因素有关外,还受到历史时刻风险等级情况的影响,而不受历史时刻的影响因素的影响。在这个过程中历史时刻风险等级对当前时刻风险等级的有一定程度的影响。依据贝叶斯网络条件独立性关系,图 1 可以描述为

$$p(c^t | c^0, \dots, c^{t-1}, a_1^0, \dots, a_9^0, \dots, a_1^t, \dots, a_9^t) =$$

$$p(c^t | c^{t-1}, a_1^t, \dots, a_9^t) = \frac{p(c^t, c^{t-1}, a_1^t, \dots, a_9^t)}{p(c^{t-1}, a_1^t, \dots, a_9^t)} =$$

$$\varphi(c^{t-1}) p(c^t | c^{t-1}) \prod_{i=1}^9 p(a_i^t | c^t) \quad (6)$$

其中, α 为与 c^t 无关的量。进而, 本文定义基于动态朴素贝叶斯网络分类器的水华风险评估模型为

$$\arg \max_{c^{t-1}, a_1^{t-1}, \dots, a_9^{t-1}} \left\{ p(c^{t-1}) p(c^t | c^{t-1}) \prod_{i=1}^9 p(a_i^t | c^t) \right\} \quad (7)$$

以上是对基于动态朴素贝叶斯网络分类器的水华风险评估模型网络结构的设计, 但这个网络结构只是粗略的描述了各个影响因素之间的关系, 还要设置依赖参数来详细描述它们之间的依赖强度。

3.2 基于动态朴素贝叶斯网络分类器的水华风险评估模型参数

本文通过分析参考文献[5]观测的各个风险因素与叶绿素 a 的关系, 咨询多个专家, 经过加权平均来确定贝叶斯网络参数, 包括先验概率和转移概率参数。在计算各专家所占权重时采用主成分分析法, 消除信息的重叠性, 降低个人因素的影响^[24]。对于水华风险先验概率, 为了提高模型的灵敏度, 本文设置高风险为 0.4, 中等风险为 0.3, 低风险为 0.3。对于转移概率参数, 本文同时根据文献[25]针对河流水体对部分参数做了调整。如在流动水体中, 优势藻种多为汉斯冠盘藻(硅藻), 本文调整为河流优势藻种适宜的条件。文献[5]研究城

市景观河道中绿藻和蓝藻时, 17 次共 76 日水华对应的水温做的一个从高到低的排序图。观察到的可见水华发生时水温主要集中在 23.4 °C~ 34.4 °C 之间, 且表现出良好的连续性, 观察期间, 在水温 27.8 °C 时有一个间断, 水温在 27.8 °C~ 34.4 °C 期间发生水华的次数为 14 次, 占有次数的 82.4%, 持续的天数为 64 d, 占发生水华的天数的 84.2%。文献[25]研究河流水体中冠盘藻水温为 2 °C 左右生长繁殖良好, 与 15 °C 条件下无显著差别。本文根据冠盘藻的特点调整水温在 1 °C~ 15 °C, 叶绿素 a 具有较高的概率取值。

表 1 为概率 $p(c^t | c^{t-1})$ 参数表, 表示当前水华风险等级对最近观测到的风险状态的依赖强度, 为了在模型中适当体现出风险情况的时序依赖性, c^t 中与 c^{t-1} 相同的取值设置了较高的发生概率。

表 1 概率 $p(c^t | c^{t-1})$ 的参数表

c^{t-1} 取值	$c^t = H$	$c^t = M$	$c^t = L$
H	0.8	0.1	0.1
M	0.1	0.8	0.1
L	0.1	0.1	0.8

表 2 为概率 $p(a_i^t | c^t)$ 的参数表, 其中 x 表示 $a_1 - a_9$ 中的任一变量。当 Chla 浓度分别为 H(高)、M(中)和 L(低)时, 参数值分别表示水温, 日降雨量, 浊度, 透明度, Fv/Fm, TN, NH₄⁺-N 含量, TP, 氮磷比各种情况发生概率的大小。

表 2 概率 $p(a_i^t | c^t)$ 的参数表

取值范围	$a_1^t / ^\circ\text{C}$	a_2^t / mm	a_3^t / NTU	a_4^t / cm	a_5^t	$a_6^t / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$a_7^t / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$a_8^t / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	a_9^t																		
	≥ 15	≥ 1	< 1	> 0.1	≥ 10	≥ 25	< 5	≥ 5	≥ 20	≥ 74	≥ 67	≥ 19	≥ 0	< 0.55	≥ 0.55	≥ 0.6	≥ 3.5	< 3.5	≥ 2	< 2	> 0.15	< 0.15	≥ 21	< 21	< 25	≥ 25	
$c^t(H)$	0.1	0.8	0.1	0.5	0.3	0.15	0.05	0.1	0.85	0.05	0	0.2	0.7	0.1	0	0.2	0.8	0.9	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1
$c^t(M)$	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.4	0.5	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$c^t(L)$	0.4	0.1	0.5	0.05	0.15	0.3	0.5	0.45	0.05	0.5	0.5	0	0.1	0.4	0.7	0.2	0.1	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1	0.9

当设定了水华风险评估模型的网络结构和网络参数后, 对于符合模型要求的水体, 输入当时的监测值, 就能预测下一时刻 Chla 的浓度, 评估当前的风险等级。

4 实例分析

实验数据来源于文献[5]在 2011 年 4 月 14 日到 2012 年 1 月 10 日之间监测苏州河道北门桥的数据。考虑到实际应用时, 对高风险情况和

中等风险的预测情况, 更能体现模型的价值, 本文选取了 6 月初到 9 月初的 53 例连续监测数据, 将这段时间分为 52 个时间片, 其中包括 1 例低风险数据, 32 例中等风险数据和 20 例高风险数据。在本文的研究中, 依据文献[5], 采用藻叶绿素 a(Chla) 的浓度区分不同的水华风险状态。当藻叶绿素 a(Chla) 浓度小于 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时, 设置水华风险状态等级为“较低”; 当 Chla 浓度大于等于 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ 且小于 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时, 设置水华风险状

态等级为“中等”；当 Chla 浓度大于 50 $\mu\text{g/L}$ ，设置水华风险状态等级为“较高”。

实验分两步进行，首先，只考虑同一时间片中的依赖关系，用基于朴素贝叶斯网络分类器的评估模型进行预测；然后用基于动态贝叶斯网络的评估模型进行预测，在考虑同一时间片中的依赖关系的同时，还考虑上一时间片时间观察到的 Chla 浓度。实验过程中，第一次的监测值用于评估第二次监测时刻的风险等级，依次类推，最后一次的监测值不参与实验，因此，每步共预测 52 次。第一步实验结果显示 33 次预测正确，预测准确率为 63.46%；第二步

实验结果显示 38 次预测正确，预测准确率为 73.08%。预测准确率提高了 9.63%。图 2(a) 和图 2(b) 分别是基于朴素贝叶斯网络分类器的评估模型和基于动态贝叶斯网络的评估模型的预测值与实际观测值的折线比较图。在这两张图中，实线表示实际值，虚线分别表示两个预测模型的预测值。图中，若两条线重合，表示预测值与实际观测值一致，若不重合，表示预测有误。显然，图 2(b) 比图 2(a) 中两线的重合度高，表明基于朴素贝叶斯网络分类器展开后的评估模型比基于动态贝叶斯网络的评估模型预测精度高。

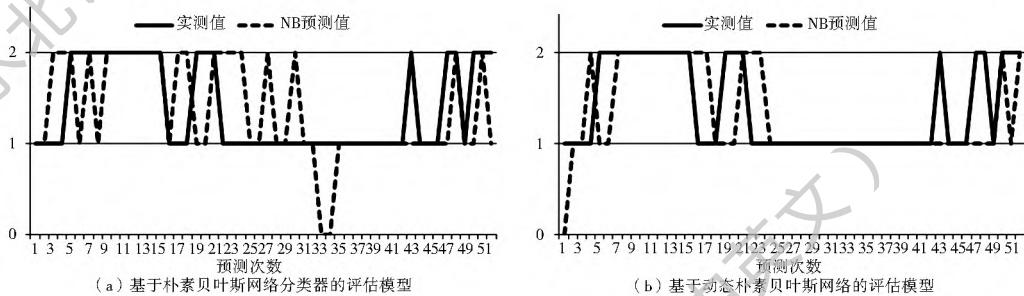


图 2 模型预测值与观测值的曲线比较

Fig. 2 Curve charts comparing predicted results with the actual values

进一步分析，表 3 是基于朴素贝叶斯网络分类器的评估模型和基于动态贝叶斯网络的评估模型的预测结果的混淆矩阵。每一列代表了预测类别，每一列的总数表示预测为该类别的数据的数目；每一行代表了数据的真实归属类别，每一行的数据总数表示该类别的数据实例的数目。每一列中的数值表示真实数据被预测为该类的数目。通过两个表的对比，可以看出，两个矩阵中，对高风险等级和低风险等级的预测结果没有变化，对中等风险等级的预测正确数目从 21 例提高到 26 例，识别率从 65.625% 提高到 81.26%，提高了 15.625%。

表 3 基于朴素贝叶斯网络分类器的评估模型混淆矩阵
Tab. 3 Confusion matrix of risk assessment model based on Naïve Bayes classifier

	基于朴素贝叶斯网络分类器的评估模型			基于动态贝叶斯网络的评估模型		
	H	M	L	H	M	L
H	12	8	0	12	8	0
M	9	21	2	5	26	1
L	0	0	0	0	0	0

对于中等风险等级的样例，仅有 32 个样本，属于小样本，所以选择 t 检验。实验是在同一样本集合上比较基于朴素贝叶斯网络分类器的评估模型和基于动态贝叶斯网络的评估模型的识别率，具有方

向性，所以采用单尾配对样本 t 检验进行分析。计算结果显示中等风险等级的预测结果 t 检验概率为 0.048014，显著性水平在 0.05 之下，拒绝原假设 H_0 ，表明两种模型的识别率相互比较有显著变化。结合混淆矩阵显示的中等风险等级的预测识别率提高了 15.625%，说明本文所提算法识别率显著提高。

5 结论

本文基于动态朴素贝叶斯网络分类器提出了一种水华风险评估模型，并采用主成分分析法处理专家知识，设计模型网络参数。利用苏州河道北门桥河段监测的数据，与基于朴素贝叶斯网络分类器的评估模型进行比较实验。结果显示在显著性水平 0.05 的单尾配对 t 检验时，对中等风险等级的水华预测识别率提高显著，提高了 15.625%。表明本文所提的考虑了风险因素的不确定性和风险状态时序发展特征的模型适用于明渠的水华风险评估。另外，考虑更多水华影响因素和水华影响因素之间的相互作用，对提高评估模型的识别率和适用范围是必要的，这将是下一步的研究任务。

参考文献 (References):

[1] Sellner K G, Doucette G J, Kirkpatrick G J. Harmful algal blooms: causes, impacts and detection [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2003, 30(7): 383-406.

- [2] 窦明, 谢平, 夏军, 等. 汉江水华问题研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 557-561. (DOU Ming, XIE Ping, XIA Jun, et al. Study on algal bloom in Hanjiang River [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5): 557-561. (in Chinese))
- [3] 张娟, 孔秀琴, 于涛, 等. 河流水华成因与控制对策研究[J]. 广东化工, 2013, 40(5): 88-89. (ZHANG Juan, KONG Xiur qin, YU Tao, et al. The study of river water bloom causes and the control methods [J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(5): 88-89. (in Chinese))
- [4] 石文波, 陶益, 张锡辉. 水环境中硅藻水华预警和控制技术研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(2): 60-6369. (SHI Wen bo, TAO Yi, ZHANG Xi hui. Study on early-warning of diatom bloom in water environment and its control technology [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(2): 60-6369. (in Chinese))
- [5] 薛峰. 缓流景观水体藻类水华的消长规律及其影响因素[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012. (XUE Feng. Dynamic changes and influence factors of algal boom [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [6] 黄振芳, 刘波, 王雪莲. 水流扰动对水华的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 49-51. (HU ANG Zhen fang, LIU Bo, WANG Xue lian. Flow disturbance influence on bloom forming [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 49-51. (in Chinese))
- [7] 尹涛, 丁爱中. 北京南海子湖水华期间浮游植物对环境周期性变化的生理响应[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4): 650-653. (YIN Tao, DING Ai zhong. Physiological responses of phytoplankton to the periodic changes of environment during water bloom in Nanhaizi Lake of Beijing [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(4): 650-653. (in Chinese))
- [8] 石为人, 贾承晖, 王楷. 基于图像处理的三峡库区水域水华检测算法及预警研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2641-2647. (SHI Wei ren, JIA Cheng hui, WANG Kai. Research on water bloom detecting algorithm and early warning based on image processing for Three Gorges Reservoir area [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(12): 2641-2647. (in Chinese))
- [9] 卫召. 基于神经网络的南水北调中线工程水质评价及预测[J]. 电子设计工程, 2015(3): 30-3236. (WEI Zhao. Assessment and prediction of water quality in the middle route project of south to north water diversion [J]. Electronic Design Engineering, 2015(3): 30-3236. (in Chinese))
- [10] Ma F, Li C, Wang X, et al. A Bayesian method for comprehensive water quality evaluation of the Danjiangkou Reservoir water source area, for the middle route of the South to North Water Diversion Project in China [J]. Frontiers of Earth Science, 2014, 2(2): 242-250.
- [11] 刘朔孺, 杨敏, 张方辉, 等. 基于支持向量机分类的嘉陵江草街水库甲藻水华预警[J]. 湖泊科学, 2015(1): 38-43. (LIU Shuo ru, YANG Min, ZHANG Fang hui, et al. Research on early warning of dinoflagellate bloom in Caojie Reservoir base on support vector machine classification [J]. Journal of Lake Sciences, 2015(1): 38-43. (in Chinese))
- [12] Caruso B S. Water quality simulation for planning restoration of a mined watershed [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, 150(1): 221-324.
- [13] 龚然, 徐进, 邵燕平. WASP模型湖库水环境模拟国内外研究进展综述[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(10): 15-18. (GONG Ran, XU Jin, SHAO Yan ping. Research progress of applying WASP model in lakes and reservoirs in home and abroad [J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(10): 15-18. (in Chinese))
- [14] 李云生, 刘伟江, 吴悦颖, 等. 美国水质模型研究进展综述[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 68-73. (LI Yun sheng, LIU Wei jiang, WU Yue ying, et al. A review of progress in research on water quality models in America [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(2): 68-73. (in Chinese))
- [15] 马莉, 桂和荣, 曹彭强. 河流污染二维水质模型研究及RMA4模型概述[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 102-108. (MA Li, GUI He rong, CHAO Peng qiang. Study on integration of 2D water quality models and review of RMA4 model [J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2011, 35(1): 102-108. (in Chinese))
- [16] 宋科, 赵晟, 张力等. 基于模糊综合评价法的东极大黄鱼养殖区海水水质评价[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(2): 383-388. (SONG Ke, ZHAO Sheng, ZHANG Li, et al. Fuzzy comprehensive assessment on water quality of Larimichthys crocea mariculture areas at Dongji [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(2): 383-388. (in Chinese))
- [17] 刘悦忆, 赵建世, 黄跃飞, 等. 基于蒙特卡罗模拟的水质概率预报模型[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 51-57. (LIU Yue yi, ZHAO Jian shi, HU ANG Yue fei, et al. Water quality probability forecasting model based on Monte Carlo simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 51-57. (in Chinese))
- [18] Karamouz M, Kerachian R. Optimal operation of reservoir systems considering the water quality: application of stochastic sequential genetic algorithms [C]. In: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management, 2014, 1-10.
- [19] 谢平, 窦明, 夏军. 南水北调中线不同调水方案对汉江中下游水华的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(1): 7-953. (XIE Ping, DOU Ming, XIA Jun. Different schemes of the water transfer on the water bloom in the middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(1): 7-953. (in Chinese))
- [20] 谢平, 窦明, 夏军. 南水北调中线不同调水方案下的汉江水华发生概率分析[J]. 环境科学学报, 2005, 25(10): 1343-1348. (XIE Ping, DOU Ming, XIA Jun. Analysis to occurrence probability of water bloom in Hanjiang river under different water transfer schemes of the Middle Route of China's South to North Water Transfer Project [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(10): 1343-1348. (in Chinese))

(下转第108页)

- 水文, 2008, 28(4): 12-15. (XIANG Jun, PENG Jir ping, PANG Yong, et al. Study on sediment salinity release in estuaries and loughs[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(4): 12-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2008.04.004
- [17] 刘莹, 肖树芳, 王清. 吹填土室内模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2004(4): 518-521, 528. (LIU Ying, XIAO Shu fang, WANG Qing. Research on indoor scale down test of dredger fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(4): 518-521, 528. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2004.04.003
- [18] 詹良通, 童军, 徐洁. 吹填土自重沉积固结特性试验研究[J]. 水利学报, 2008(2): 201-205. (ZHAN Liang tong, TONG Jun, XU Jie. Laboratory study on self weight sedimentation and consolidation behaviors of hydraulic dredged mud[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(2): 201-205. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.02.012
- [19] 孙玉龙, 郝振纯, 陈启慧, 等. 土壤电导率及土壤溶液电导率与土壤水分之间关系[J]. 河海大学学报, 1997, 25(6): 69-73. (SUN Yur long, HAO Zhen chun, CHEN Qi hui, et al. Relationship among ionic strength and electrical conductivity of soil solution and soil bulk conductivity[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(6): 69-73. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980.1997.06.014
- [20] 李金玲. 盐分对土壤饱和导水率影响的实验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006. (LI Jir ling. Effect of salinity on hydraulic conductivity in saturated soil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y938869
- [21] 陈巍, 陈邦本, 沈其荣. 滨海盐土脱盐过程中 pH 变化及碱化问题研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 521-528. (CHEN Wei, CHEN Bang ben, SHEN Qi rong. Studies on the changes of pH value and alkalization of heavily saline soil in seabeach during its desalting process[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 521-528. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2000.04.012
- [22] 殷仪华, 陈邦本. 江苏省滨海盐土脱盐过程 pH 值上升原因的探讨[J]. 土壤通报, 1991, 22(1): 5-7. (YIN Yi hua, CHEN Bang ben. Discussion on the causes of rising pH value during the desalination process of coastal saline soil in Jiangsu Province[J]. Journal of Soil Science, 1991, 22(1): 5-7. (in Chinese))
- [23] 王丽娜, 张玉龙, 范庆锋, 等. 淋洗状态下保护地土壤 pH 与盐分含量及其组成关系的研究[J]. 节水灌溉, 2009(9): 8-11. (WANG Li na, ZHANG Yur long, FAN Qing feng, et al. Study on relationship between pH value of protected field soil and its salinity content and composition under leach condition[J]. Water Saving Irrigation, 2009(9): 8-11. (in Chinese)) DOI: 1007-4929(2009)06-0008-04

(上接第 94 页)

- [21] 谢平, 窦明, 夏军. 南水北调中线工程不同调水方案下的汉江水华发生概率计算模型[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 727-732. (XIE Ping, DOU Ming, XIA Jun. Water bloom occurrence probability calculation model in Hanjiang River under different water transfer schemes of the Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 727-732. (in Chinese))
- [22] 刘威, 彭文启, 冯健, 等. 针对小江回水区水华现象的生态调度方案评估[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 79-8287. (LIU Wei, PENG Wen qi, FENG Jian, et al. Assessment on ecological operation scheme for algal bloom in backwater area of Xiaojiang river [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 79-8287. (in Chinese))
- [23] Murphy K P. Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning [D]. Doctor, Berkeley: University of California, 2002.
- [24] 郭艳军, 叶鹰. 主成分分析在确定贝叶斯网络参数中的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2009, 24(1): 71-73. (GUO Yarr jun, YE Ying. Using principal component analysis to calculate parameter in Bayesian Networks [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2009, 24(1): 71-73. (in Chinese))
- [25] 殷大聪, 黄薇, 吴兴华, 等. 汉江水华硅藻生物学特性初步研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 6-10. (YIN Da cong, HUANG Wei, WU Xing-hua, et al. Preliminary study on biological characteristics of spring diatom bloom in the Hanjiang river [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 6-10. (in Chinese))