DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 024

基于 SVM 参数优化的饮用水水源地风险预警

唐红亮[1,2],王 冬[3],董延军[1],谢宇宁[1],张金萍[4]

(1. 水利部珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510611; 2. 华南理工大学土木与交通学院,广东 广州 510641;
3. 长江生态环保集团有限公司,湖北 武汉 430062; 4. 郑州大学水利与交通学院,河南 郑州 450001)

摘要:以茂名市电白区罗坑水库水源地为例,运用随机森林模型识别饮用水水源地风险预警指标,基于支持向量机(SVM)模型、遗传算法(GA)和蝴蝶优化算法(BOA)构建了 3 种饮用水水源地风险预警模型,并优选最佳模型对罗坑水库水源地风险状态进行了预警分析。结果表明:相较于 SVM 模型和 GA-SVM 模型,BOA-SVM 模型的平均相对误差、均方误差、模型运行时间和均方根误差均有不同程度的下降,R^2 分别上升了 5.16%和 3.01%,BOA-SVM 模型更适用于饮用水水源地风险预警;2023—2025 年罗坑水库水源地风险预警级别均为轻警(蓝灯),处于较低风险状态;虽然风险预警级别相同,但风险预警指数逐年降低,2025 年的风险预警指数为 1.61,已逼近低风险状态的临界值。相关管理部门应加大现有规划、方案及政策的实施力度,进一步降低罗坑水库水源地风险等级。

关键词:饮用水水源地;风险预警;支持向量机模型;蝴蝶优化算法;罗坑水库

中图分类号:P333 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0209 - 07

Risk warning of drinking water source areas based on SVM parameter optimization//TANG Hongliang[1,2], WANG Dong[3], DONG Yanjun[1], XIE Yuning[1], ZHANG Jinping[4] (1. *Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou* 510611, *China*; 2. *School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou* 510641, *China*; 3. *Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan* 430062, *China*; 4. *School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: Taking the water source area of Luokeng Reservoir in Dianbai District, Maoming City as an example, the random forest model was used to identify the risk warning indicators of drinking water sources. Three risk warning models for drinking water sources were constructed based on the SVM model, GA and BOA. The optimal model was selected to warn the risk status of Luokeng Reservoir water source area. The results show that compared with the SVM model and the GA-SVM model, the mean relative error, mean square error, model operation time, and root mean square error of the BOA-SVM model have all decreased to varying degrees. The R^2 values have increased by 5.16% and 3.01% respectively. The BOA-SVM model is more suitable for the risk warning of drinking water sources. From 2023 to 2025, the risk warning levels of the water source area of Luokeng Reservoir are all at the light warning level (blue light), indicating a relatively low risk status. Although the risk warning levels are the same, the risk warning index is decreasing year by year. The risk warning index in 2025 is 1.61, which is approaching the critical value of the low-risk status. Relevant management departments should strengthen the implementation of existing plans, programs, and policies to further reduce the risk level of the water source area of Luokeng Reservoir.

Key words: drinking water source area; risk warning; SVM model; BOA; Luokeng Reservoir

饮用水水源地是居民饮用水安全的重要保障[1],然而近年来我国饮用水水源地安全问题时有发生,如 2016 年 8 月位于钱塘江中游的富春江水库发生严重的藻类水华污染,对当时在杭州召开的 G20 峰会以及杭州市居民的饮用水安全造成了极大威胁[2-3]。当前我国经济发展与饮用水水源地保护之间的矛盾日益突出,饮用水水源地不仅面临水量短缺、水质污染和管理保护不利等内部风险,还需承担生活、农业和工业等用水压力。因此,亟须通过源头和过程控制,系统全面地梳理当前饮用水水源地

基金项目:国家科技基础资源调查专项(2019FY101900);国家重点研发计划项目(2022YFC3202200, 2021YFC3200205)

作者简介:唐红亮(1986—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事水环境治理及水资源保护与开发利用研究。E-mail:464373552@qq.com

通信作者:王冬(1998—),男,硕士,主要从事水资源开发利用与管理研究。E-mail:1397032623@qq.com

所面临的风险,建立科学高效的饮用水水源地风险预警体系,帮助管理部门科学评估水源地风险状态,为饮用水水源地保护、风险管控和污染防治等提供重要的依据和科学指导。

国内外有关饮用水水源地风险预警的研究始于20世纪末。Gullick等[4]认为,完整的水源预警监测系统应包含检测、表征、沟通和应对4个方面,理想的水源预警监测系统能够持续监测所有威胁,并适时提出警告信息;Sim等[5]通过设计预警水源水监测站来防止泄漏物进入水源地污染水源;于凤存等[6]针对集中式饮用水水源地的特点,由BP模型和DPSR模型构建了完整的饮用水水源地安全预警系统框架体系;王晓红[7]针对我国现有的湖库型、河流型、地下水型3类水源地,分别建立了水质和水量安全预警指标体系,为城镇集中式饮用水水源地风险状况的监测和预警提供了有效的技术支撑。

值得注意的是,随着机器学习技术的突破,支持向量机(support vector machine,SVM)凭借其处理小样本、非线性问题的独特优势,在水资源预警领域展现出巨大的潜力。例如:刘昕[8]基于SVM模型建立了区域水安全预警模型,并将之用于预警分析陕西关中地区2009年、2015年及2020年的水安全状况;汪嘉杨等[9]将TS-SVM模型应用于山东省水安全指数计算,得到各个水安全利用方案的评价指标值和安全等级;刘东等[10]分别对比了SVM模型、ICA-SVM模型和BOA-SVM模型对区域洪水灾害预警的模拟精度,结果表明,SVM模型在寻优速度和拟合精度上均表现较差;陈海洋等[11]基于SVM模型对地下水位进行了预测预警,但模型超参数寻优过程耗时较长,影响了实际应用中的实时性和适应性。由此可见,SVM模型在水资源预警的研究中表现出了优良的性能,但在寻优速度和拟合精度上仍有待提高。

国内外学者针对饮用水水源地整体风险状况进行预警的研究较少,部分研究局限于根据现状评价结果确定预警级别,其实质仍属于饮用水水源地现状风险评价的范畴。预警是评价的延伸,应在现状风险评价的基础上,基于其内涵,进一步提炼风险评估指标体系,并对饮用水水源地的未来风险状况开展科学预警与预报分析。

本文以罗坑水库水源地为研究对象,在饮用水水源地风险评价的基础上,基于随机森林模型和GM(1,1)模型等识别并预测了饮用水水源地风险预警指标的数值,在此基础上,采用SVM模型、遗传算法(genetic algorithm, GA)和蝴蝶优化算法(butterfly optimization algorithm,BOA)构建水源地风险预警模型对罗坑水库饮用水水源地风险状态进行预警分析。

1 研究区概况

罗坑水库水源地地处广东省茂名市电白区,是粤西地区三大水库之一[12]。水库集水面积77 km^2,总库容11 473万 m^3,是一座兼顾饮用、灌溉、防洪、发电、养殖和航运等综合利用的大(Ⅱ)型水利工程。罗坑水库水源地现有2个取水口,对应2个自来水厂。取水口1位于罗坑水库,设计总供水能力730万 m^3/a,供水流量0.29 m^3/s,供水人口约24.5万人;取水口2位于罗黄干渠挡水闸(沙琅泵站),设计总供水能力8 870万 m^3/a,供水人口约60万人。罗坑水库是电白区饮用水安全的重要保障,但根据初步调研发现,罗坑水库在水量、水质、监测和管理水平等诸多方面具有一定的风险。

2 研究思路与方法

2.1 研究思路

根据预警概念及系统理论框架,饮用水水源地风险预警内容包括预警指标体系构建、预警指标预测、风险预警模型构建、制定调控措施并排除警患等4个方面。

a. 确定饮用水水源地风险预警指标是开展预警研究的前提。由预警理论框架可知,饮用水水源地风险预警指标应包括警情、警源、警兆3类,3类指标分别从不同角度表征饮用水水源地风险状态。预警是更高层次的评价,预警指标与评价指标密切相关。由于评价指标较多,考虑到指标预测的精确性,并保证指标筛选的客观性,选用随机森林模型对评价指标的重要性程度进行分析并排序筛选。预警指标阈值的确定与风险评价指标阈值相同,主要确定方法为:①由国际、国内、省、市及相关行业的规范规定确定;②由类比标准确定;③由韦伯-费希纳(Weber-Fechner, W-F)定律计算确定;④由专家咨询法确定。

b. 预测预警指标的方法众多,需根据指标数据规律、研究目标需求综合考量选取。本文主要采用3种方法:①对具有准指数规律的指标,由GM(1,1)模型对指标进行预测;②对于易受管理政策影响的指标,由相关规划方案对指标进行预测;③对于已趋于多年稳定的指标,采用多年稳定值作为预测值。

c. 风险预警模型的构建是为了评价危害及确定警度,涉及风险预警指数计算和预警级别划分两个方面,是饮用水水源地风险预警的重点也是难点。为解决这一问题,分别构建SVM、GA-SVM、BOA-SVM风险预警模型,并基于现状评价结果和模型性

能评估参数对 3 类模型进行对比择优，从而合理高效地对饮用水水源地进行风险预警。

d. 制定调控措施并排除警患是对预报警度进行反馈，是饮用水水源地风险预警的最终目的。管理部门通过预警结果制定调控措施，降低饮用水水源地风险等级，以确保电白区居民饮水安全。饮用水水源地风险预警流程如图 1 所示。

2.2 数据来源

研究数据主要涉及水质数据、水生态数据、水量数据、管理要素数据及社会经济要素数据。其中，水质数据及水生态数据来源于 2018—2022 年茂名市电白生态环境监测站和广东省水文水资源监测中心；水量数据来源于 2000—2022 年罗坑水库水文记录表；管理要素数据来源于电白区罗坑水系工程管理局；社会经济要素数据来源于电白区农业农村局、电白区第七次全国人口普查公报、2000—2022 年茂名市水资源公报、茂名市统计年鉴等。

2.3 随机森林模型

随机森林算法是一种集成学习算法，由多颗决策树组成，各个决策树之间相互独立，最后的分类结果由多个决策树共同投票决定，故具有训练速度快速、分类精度高等特点[13]。随机森林模型评价参数常用的曲线下面积（area under curve，AUC）、准确率（accuracy，ACC）及 KAPPA 系数 3 个参数均是越接近于 1，模型性能越好。在随机森林模型中，用平均基尼不纯度减少和平均准确度下降两种方法衡量指标的重要程度。平均基尼不纯度减少通过计算每个因子对分类树节点上观测值异质性的影响程度来判断因子的重要性，该值越大表示因子越重要；平均准确度下降是给某个因子随机加人噪声，导致准确率下降越多的因子重要性越高[14]。

2.4 SVM 模型

SVM 模型是一种小样本学习方法，通过变化函数对数据集进行回归分析，旨在建立两个类别间的决策边界，并使分类间隔最大。最优的分类线不仅可以正确区分两类样本，还可以使分类间隔最大[15]。推广至高维区间，最优分类线变为最优分类面。为解决模型过拟合、无法准确分类等问题，引入

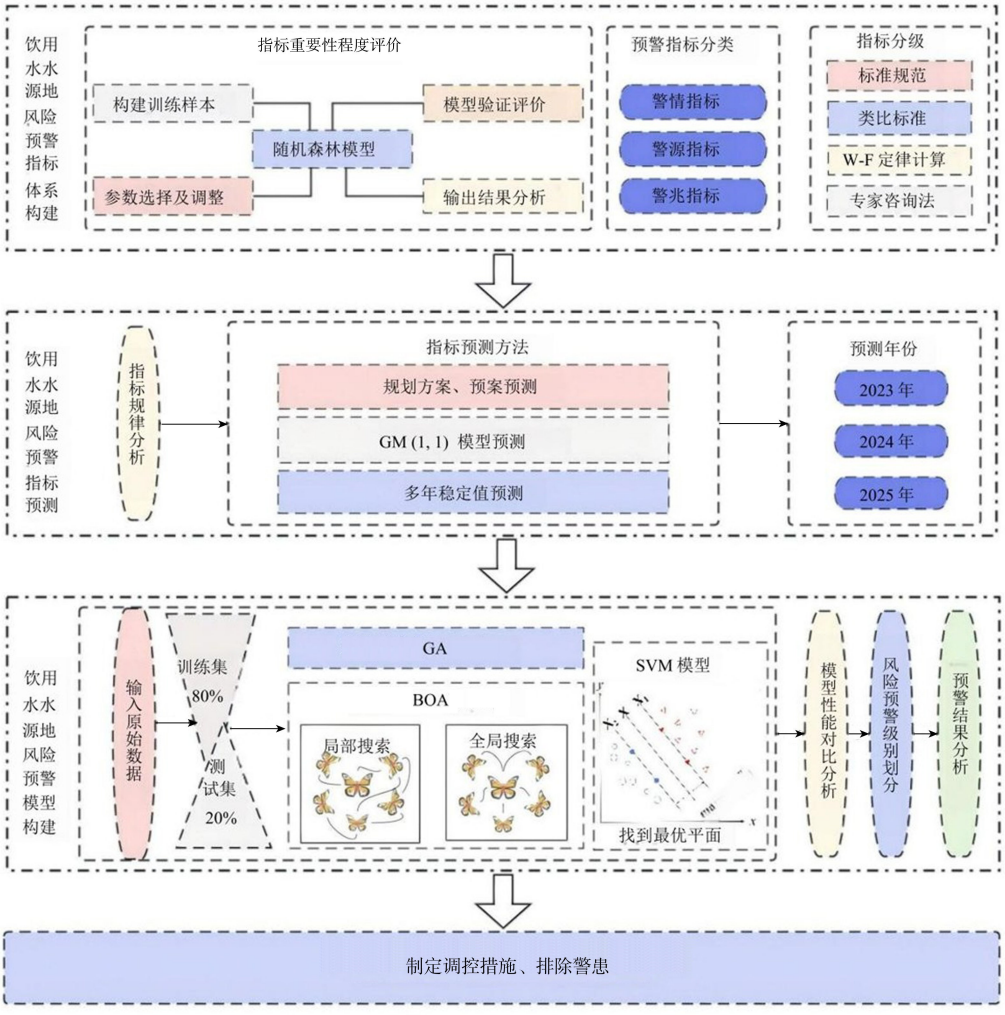


图 1 饮用水水源地风险预警流程

Fig. 1 Framework diagram of risk warning process for drinking water source areas

惩罚函数 C 和松弛变量 ζ_i 提高模型泛化能力[16]，可将原有线性不可分的线性支持向量机问题转化为凸二次规划问题。

2.5 基于 SVM 参数优化的饮用水水源地风险预警模型

2.5.1 GA-SVM 模型

GA 是通过模仿自然界生物“遗传—变异—优胜劣汰，适者生存”的生物进化机制而演变出的进化类优化算法。该算法的核心思想是将群体中的单一个体进行编码处理，按照已设定的自然规则（即适应度函数）模拟自然选择[17]。

GA 遗传操作通过选择、交叉、变异等 3 个步骤对个体进行筛选，优胜劣汰，反复循环直至满足条件。为提高 SVM 模型的精确度，选用 GA 对 SVM 模型的核心参数 $C(C>0)$ 和核函数参数 σ 进行迭代寻优，建立 GA-SVM 模型[18]，即通过 GA 对 SVM 模型的 $C(C>0)$ 和 σ 进行编码处理，形成初始群体；再通过 SVM 模型生成初始群体的适应度函数，计算所有个体适应值并进行选择、交叉、变异等自然选择，直至生成下一代子种群；通过网格搜索法寻找子种群中的最优个体参数组合并替换原参数。

2.5.2 BOA-SVM 模型

BOA 是通过模拟蝴蝶觅食和求偶行为而演化的群智能优化算法，可分为全局搜索与局部搜索两个阶段，阶段类型由转换概率 p 决定[19]。在每次迭代循环过程中，会生成 0~1 的随机数 r_1，当 $r_1>p$ 时，算法开始局部搜索；当 $r_1 \leqslant p$ 时，算法开始全局搜索，迭代循环直至满足条件结束。通过搜索寻优，BOA 可对 SVM 模型核心参数进行寻优。BOA-SVM 模型计算步骤如下：

a. 构建 SVM 模型，提取 $C(C>0)$ 和 σ，并初始化蝴蝶种群个体。

b. 设定均方误差为适应度函数。

c. 初始化 BOA 算法参数，包括最大迭代次数 $t_{\max}$ 和蝴蝶种群数量 M。

d. 计算蝴蝶种群个体适应度值，由适应度值得蝴蝶的最佳位置 g^*。

e. 比较 p 与 r，若 $p \geqslant r$，进行全局搜索并更新蝴蝶位置；若 $p<r$，进行局部搜索并更新蝴蝶位置。

f. 检查更新后的蝴蝶种群个体适应度值，并于更新前进行比较，确定全局最优的适应度值和蝴蝶位置。

g. 判断是否满足终止条件，若满足则输出最优的 $C(C>0)$ 和 σ 用于 SVM 模型构建，不满足则重复步骤 e~g。

3 结果与分析

3.1 饮用水水源地风险预警指标体系构建

3.1.1 随机森林模型构建

根据饮用水水源地风险预警等级划分建立随机森林模型，其中，输入变量为饮用水水源地风险预警指标体系的 27 项三级指标[20]，因变量输出变量为饮用水水源地风险等级，模型决策树数量为 500。由随机模拟在各等级区间生成 100 个样本数据，共计 500 个样本数据。将样本数据集随机分为训练集（80%）和测试集（20%），由模型评价参数 ACC、AUC 和 KAPAPA 系数评估模型性能，其值分别为 0.976、0.984、0.969，均大于 0.9，故认为该模型准确率较高，分类结果与实际结果偏差小，预测精度较高。

3.1.2 风险预警指标筛选

根据随机森林模型计算结果，将饮用水水源地风险预警指标重要性程度进行归一化处理，结果如表 1 所示。

表 1 饮用水水源地风险预警指标重要性程度

Table 1 Importance of risk warning indicators for drinking water source areas

指标名称	指标编号	指标重要性程度综合值
水质达标率	W11	0.52
水质综合污染指数	W12	0.51
饮用水健康风险	W13	0.40
重金属污染指数	W14	0.38
年度供水保证率	W21	0.48
年降水量	W22	0.48
水库年均水位	W23	0.36
富营养化指数	W31	0.42
植被覆盖率	W32	0.44
保护区规范化建设情况	M11	0.41
保护区综合整治率	M12	0.38
水源地监控水平	M13	0.38
管理队伍水平	M14	0.32
应急水源地建设情况	M21	0.41
应急预案及演练情况	M22	0.39
应急预警能力	M23	0.35
保护区农业种植面积强度	S11	0.43
保护区内化肥施用量	S12	0.34
农田灌溉平均用水量	S13	0.30
工业废水排放量	S21	0.33
工业用水量	S22	0.34
万元工业增加值用水量	S23	0.35
人均 GDP	S31	0.35
经济增长率	S32	0.32
生活污水排放量	S41	0.32
人均生活用水量	S42	0.31
人口自然增长率	S43	0.38

由表 1 可知，饮用水水源地风险预警指标体系的三级指标中，水质达标率重要性程度最大，为

0.52,其次为水质综合污染指数、年度供水保证率、年降水量,分别为 0.51、0.48、0.48。农田灌溉平均用水量重要度最低,仅为 0.30。由此可见,饮用水水源地风险预警指标体系中,水质和水量是饮用水水源地风险预警所要考虑的重点。

根据饮用水水源地风险预警指标重要性程度计算结果,选取重要性程度综合值大于或等于 0.4 的预警指标作为饮用水水源地风险预警指标。依据预警理论框架对饮用水水源地风险预警指标按照警情、警源、警兆 3 类进行划分。警情指标即饮用水水源地风险问题的具体呈现,如水质达标率、年度供水保证率等;警源指标为导致饮用水水源地风险状态改变的根源性指标,如保护区内化肥施用量、水质综合污染指数、富营养化指数等;警兆指标为具有先行性质的指标,常在警情发生之前发生变化,如年降水量、保护区规范化建设情况等。饮用水水源地风险预警指标类型及等级划分标准如表 2 所示。

3.2 饮用水水源地风险预警指标预测

a. 对具有准指数规律的预警指标,采用 GM(1,1)模型对指标进行预测。根据罗坑水库水源地 2018—2022 年的指标数据,通过 GM(1,1)模型预测水质综合污染指数、年降水量、保护区内化肥施用量、富营养化指数、重金属污染等指数 2023—2025 年的变化趋势,如表 3 所示。可见,2023—2025 年罗坑水库水质综合污染指数、保护区内化肥施用量、富营养化指数、重金属污染指数均呈下降趋势,但下降幅度不大,而年降水量呈增加趋势,且增幅明显。

b. 对于易受管理政策影响的指标,如植被覆盖率、应急水源地建设情况等,参照茂名市“十四五”发展规划、罗坑水库饮用水水源地安全保障达标建设实施方案、电白区农村集中供水工程等相关规划方案进行预测。

c. 对于水质达标率、年度供水保证率等已趋于多年稳定的指标,采用多年稳定值则作为预测值。

3.3 饮用水水源地风险预警结果

3.3.1 模型性能对比分析

以水源地风险预警指标为输入变量,水源地风险预警结果为输出变量建立饮用水水源地风险预警模型。SVM 模型 $C=2$、$\sigma=1$,GA-SVM 模型 $C=2.3$、$\sigma=1.5$,BOA-SVM 模型 $C=2.6$、$\sigma=1.7$。为检验 SVM、GA-SVM 和 BOA-SVM 3 种水源地风险预警模型的性能,以模型拟合优度 R^2、平均相对误差(MAE)、均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)和模型运行时间(T)5 个性能指标对模型性能进行检验[19],除 R^2 以外其他性能指标的数值越小性能越好。为降低模型模拟随机性导致的误差,对 3 种模型分别进行 50 次迭代,求 50 次迭代各个性能指标的平均值,得到模型性能雷达图如图 2 所示。

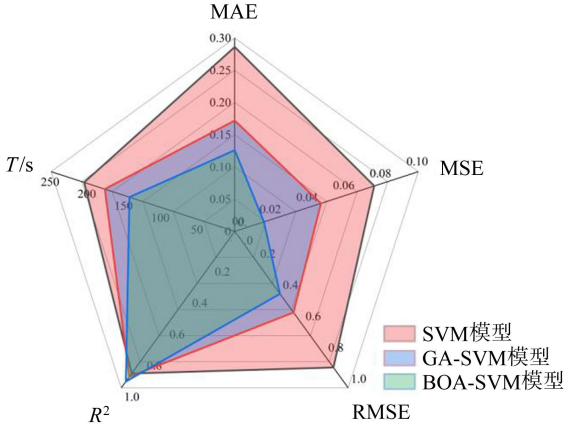


图 2 模型性能雷达图

Fig. 2 Radar chart of model performance

表 2 饮用水水源地风险预警指标类型及等级划分标准

Table 2 Types and classification standards of risk warning indicators for drinking water source areas

等级	警情		警源				警兆			
	水质达标率/%	年度供水保证率/%	水质综合污染指数	保护区内化肥施用量/t	富营养化指数	重金属污染指数	年降水量/mm	植被覆盖率/%	应急水源地建设情况	保护区规范化建设情况
Ⅰ	>95	>95	≤0.8	≤56.7	≤30	≤0.7	>2587.5	>95	>0.8	>0.8
Ⅱ	>85~95	>85~95	>0.8~1	>56.7~68.7	>30~50	>0.7~1	>1914.7~2587.5	>85~95	>0.6~0.8	>0.6~0.8
Ⅲ	>80~85	>80~85	>1~1.5	>68.7~83.4	>50~60	>1~2	>1416.8~1914.7	>80~85	>0.4~0.6	>0.4~0.6
Ⅳ	>75~80	>75~80	>1.5~2	>83.4~94.8	>60~70	>2~3	>1159.1~1416.8	>75~80	>0.2~0.4	>0.2~0.4
Ⅴ	≤75	≤75	>2	>94.8	>70	>3	≤1159.1	≤75	≤0.2	≤0.2

表 3 罗坑水库多年预测预警指标值

Table 3 Values of prediction and early warning indicators for Luokeng Reservoir over years

年份	水质综合污染指数	年降水量/mm	保护区内化肥施用量/t	富营养化指数	重金属污染指数	水质达标率/%	年度供水保证率/%	植被覆盖率/%	应急水源地建设情况	保护区规范化建设情况
2023	0.44	2145	67.55	31.24	0.13	100	100	90.0	0.70	0.60
2024	0.40	2273	66.73	30.15	0.12	100	100	92.5	0.75	0.65
2025	0.36	2384	65.91	29.10	0.10	100	100	95.0	0.85	0.70

由图 2 可知,与 SVM 模型和 GA-SVM 模型相比,BOA-SVM 模型的平均相对误差分别下降了 16% 和 4.6%,均方误差分别下降了 6.01%和 3.11%,均方根误差分别下降了 47.1%和 11.9%,模型运行时间分别下降了 61.72 s 和 33.49 s,R^2 分别上升了 5.16%和 3.01%,模型精度和寻优速度显著提高,表现出更好的泛化性。可见 BOA-SVM 模型比其他两个模型更适用于饮用水水源地风险预警。

将表 2 的 5 个指标分级阈值代入 3 个模型中,得到 3 个模型的饮用水水源地风险预警等级模拟区间,如表 4 所示。

将 2018—2022 年罗坑水库水源地风险预警指标数据分别代入 SVM 模型、GA-SVM 模型和 BOA-SVM 模型,得到 3 个模型不同等级模拟区间的罗坑水库水源地风险预警指数,如图 3 所示。

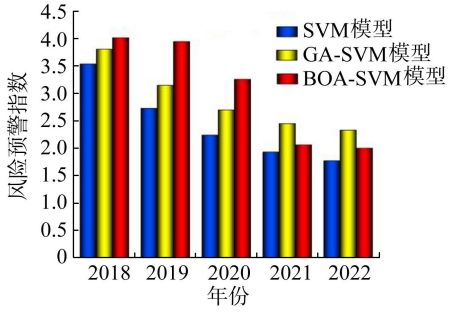


图 3　罗坑水库水源地风险预警结果对比

Fig. 3　Comparison of risk warning results of water source areas of Luokeng Reservior

由图 3 可知,BOA-SVM 模型模拟的罗坑水库水源地风险演变态势与传统 SVM 模型和 GA-SVM 模型的模拟结果大体相似;模拟的水源地风险等级与唐红亮等[20]的评价结果一致,传统 SVM 模型和 GA-SVM 模型则与评价结果存在部分偏差。其中,GA-SVM 模型在 2019 年模拟的风险等级高于评价结果一级,SVM 模型在 2019 年和 2018 年模拟的风险等级均高于评价结果一级。SVM 模型能够有效处理线性不可分和非线性问题,适用于风险预警中的数据分类和回归分析,但在参数选择和模型寻优方面存在局限性,容易导致模型精度和适应性不足;GA-SVM 模型通过模拟生物进化中的选择、交叉和变异机制,迭代优化模型参数,增强了 SVM 模型的泛化能力和预测精度,但在优化效率和精度提升上仍有一定的局限。相比于 SVM 模型和 GA-SVM 模型,BOA-SVM 模型在模型精度(如 R^2、平均相对误差、均方误差、均方根误差)和优化效率上有显著的提升,能够更好地适应复杂的环境因素和多维度指标变化。其优化速度更快、精度更高,更适用于长期、动态的水源地风险预警。

3.3.2　预警结果分析

将 2018—2022 年指标数据代入 BOA-SVM 模型,得到罗坑水库水源地每年的风险预警指数,分别为 4.02、3.95、3.26、2.06、2.00。参照风险划分等级,依次为较高风险、较高风险、中风险、较低风险、较低风险。利用训练好的 BOA-SVM 模型对罗坑水库水源地 2023 年、2024 年以及 2025 年的风险等级进行预警,结果如图 4 所示。

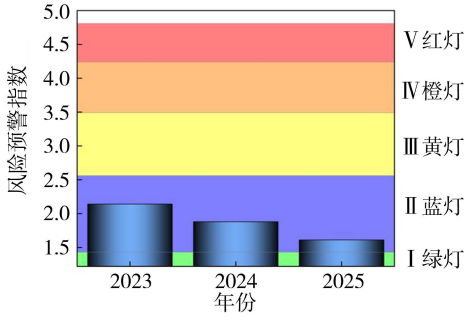


图 4　罗坑水库水源地风险预警结果

Fig. 4　Risk warning results of water source areas of Luokeng Reservoir

由图 4 可知,2023—2025 年罗坑水库水源地风险处于较低风险状态,警灯显示为蓝灯,风险预警指数逐步降低,至 2025 年已较接近低风险状态的临界值。根据茂名市“十四五”发展规划、“茂名电白罗坑水库饮用水水源地安全保障达标建设实施方案”、电白区农村集中供水工程等规划方案,“十四五”期间茂名市在以下方面的政策将有利于降低饮用水水源地风险等级:①水要素保障。加强污染防治工作,提高工业废水及生活污水处理率,特别是强化监管潜在的污染源周边,以防止新的污染发生。加快水土流失和环境治理,提高水源地植被覆盖率至 95%,建立健全水质水量安全在线监控系统,力争做到早发现、早处置、早预防、早预警。②管理要素保障。加强饮用水水源地保护区规范化建设,提高一级、二级、准保护区的综合治理能力、应急预警

表 4　各模型饮用水水源地风险预警等级模拟区间

Table 4　Simulation interval for risk warning levels for drinking water source areas in various models

模型	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
SVM	[1.07,1.37)	[1.37,2.52)	[2.52,3.51)	[3.51,4.48)	[4.48,4.78)
GA-SVM	[1.24,1.42)	[1.42,2.55)	[2.55,3.49)	[3.49,4.26)	[4.26,4.80)
BOA-SVM	[1.22,1.43)	[1.43,2.56)	[2.56,3.49)	[3.49,4.24)	[4.24,4.81)

能力和监控能力,完善各项应急预案与相关管理制度,投入更多的资金用于升级基础设施和设备。同时,吸引高水平技术人才,推动水源地保护管理工作的专业化、科学化等。③社会经济要素保障。从生活、农业、工业等各个层次提高水资源利用效率,持续推进节水型社会建立,加强水源安全教育和宣传工作,提高人民群众的节水意识,倡导群众监督与保护水源等。

4 结 论

本文基于随机森林模型和 GM(1,1)模型等方法对罗坑水库水源地风险预警指标进行了识别和预测,综合运用 SVM 模型、GA 和 BOA 构建风险预警模型并用于预警罗坑水库水源地 2023—2025 年的风险状态。结果表明,相较于 SVM 模型和 GA-SVM 模型,BOA-SVM 模型的平均相对误差、均方误差、模型运行时间和均方根误差均有不同程度的下降,R^2 分别上升了 5.16%和 3.01%,该更适用于饮用水水源地风险预警。2023—2025 年罗坑水库水源地风险预警级别均为轻警(蓝灯),处于较低风险状态。虽然预警级别相同,但风险预警指数正逐年降低,2025 年的风险预警指数为 1.61,已逼近低风险状态的临界值。因此相关管理部门可加大现有规划、方案及政策的实施力度,进一步降低罗坑水库水源地的风险等级。

参考文献:

[1] ZHANG Yulin, DENG Jianming, QIN Baoqiang, et al. Importance and vulnerability of lakes and reservoirs supporting drinking water in China [J]. Fundamental Research, 2023, 3(2): 265-273.

[2] 朱媛,王薇,俞美香,等. 针对太湖蓝藻危机的水质监测[J]. 环境科技,2009,22(1):27-29. (ZHU Yuan, WANG Wei, YU Meixiang, et al. The water quality for the bloom in Lake Taihu [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 22 (1): 27-29. (in Chinese))

[3] 黄群芳,国超旋,李娜,等. 富春江库区高温热浪变化特征及对藻类水华潜在影响研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35 (2): 530-539. (HUANG Qunfang, GUO Chaoxuan, LI Na, et al. Characteristics of summer heat waves and potential effect on algal blooms in Fuchunjiang Reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 530-539. (in Chinese))

[4] GULLICK R W, GRAYMAN W M, DEININGER R, et al. Design of early warning monitoring systems for source waters[J]. Journal American Water Works Association, 2003, 95(11): 58-64.

[5] SIM H P, BURN, D H, TOLSON B A. Probabilistic design of a riverine early warning source water monitoring system [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36 (6): 1095-1106.

[6] 于风存,方国华,肖秋英. 集中式饮用水水源地安全预警系统框架的研建[J]. 灾害学,2008(4):21-24. (YU Fengcun, FANG Guohua, XIAO Qiuying. Research and construction of a centralized drinking water source safety warning system framework [J]. Disaster Science, 2008 (4): 21-24. (in Chinese))

[7] 王晓红. 城镇集中式饮用水水源地安全预警指标体系研究[J]. 环境保护, 2018, 46 (13): 23-27. (WANG Xiaohong. Research on the safety early warning index system of urban centralized drinking water source areas [J]. Environmental Protection, 2018, 46 (13): 23-27. (in Chinese))

[8] 刘昕. 区域水安全评价模型及应用研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.

[9] 汪嘉杨,王文圣,李祚泳,等. 基于 TS-SVM 模型的水安全评价[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 1-4. (WANG Jiayang, WANG Wensheng, LI Zuoyong, et al. Water safety evaluation based on TS-SVM model [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (2): 1-4. (in Chinese))

[10] 刘东,杨丹,张亮亮,等. 基于 BOA-SVM 模型的区域洪水灾害风险评估与驱动机制[J]. 农业机械学报,2023, 54 (10): 304-315. (LIU Dong, YANG Dan, ZHANG Liangliang, et al. Regional flood disaster risk assessment and driving mechanism based on BOA-SVM model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 304-315. (in Chinese))

[11] 陈海洋,滕彦国,王金生. 基于 GA 参数优选的 ε-SVR 地下水位预测方法[J]. 水资源保护,2011,27(4):15-18. (CHEN Haiyang, TENG Yanguo, WANG Jinsheng. ε-SVR groundwater level prediction method based on GA parameter optimization [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(4): 15-18. (in Chinese))

[12] 吴超群. 罗坑水库富营养化分析研究[J]. 广东水利水电, 2013(6): 49-51. (WU Chaoqun. Eutrophication analysis of Luokeng Reservoir [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2013(6): 49-51. (in Chinese))

[13] 雷震. 随机森林及其在遥感影像处理中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.

[14] 张金萍,陈蔚,方宏远,等. 郑州市新、老城区暴雨内涝灾害风险指标重要性分析[J]. 水电能源科学,2023,41 (6): 59-63. (ZHANG Jinping, CHEN Wei, FANG Hongyuan, et al. Importance analysis of rainstorm and waterlogging disaster risk indicators in new and old urban areas of Zhengzhou City[J]. Hydropower Energy Science, 2023, 41(6): 59-63. (in Chinese))

(下转第 232 页)

新建筑,2022(1):49-54. (GONG Cong, WU Hong, HU Changjuan. Ecological function optimization strategy of urban public open space based on green infrastructure network: a case study of central Nanjing [J]. New Construction, 2022(1):49-54. (in Chinese))
[20] 丁金华,孙琦,钱晶. 基于 MSPA-InVEST 模型的水网乡村绿色基础设施网络构建研究:以吴江东北片区为例[J]. 西北林学院学报,2022,37(6):183-191. (DING Jinhua, SUN Qi, QIAN Jing. Research on the construction of rural green infrastructure network of water network based on MSPA-InVEST model: a case study of northeast Wujiang area [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(6):183-191. (in Chinese))
[21] 葛希辰. 双碳视角下 MSPA 在乡村绿色基础设施格局优化中的应用:以徐州市睢宁县为例[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
[22] SEGURA-BARRERO R, LANGEMEYER J, BADIA A, et al. The food-water-climate nexus of green infrastructure: examining ecosystem services trade-offs of peri-urban agriculture [J]. Science of the Total Environment, 2024, 951: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175799.
[23] 胡凯,许航,张怡蕾,等. 分散式农村生活污水处理设施运营模式探讨[J]. 水资源保护,2017,33(2):63-66. (HU Kai, XU Hang, ZHANG Yilei, et al. Study of operation modes for decentralized domestic sewage treatment facilities in rural areas [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2):63-66. (in Chinese))
[24] 项诚. 景观基础设施视角下乡村景观营建策略研究:以池州市栗坑村为例[D]. 南京:南京林业大学,2022.
[25] 冯矛. 嘉陵江流域多尺度绿色基础设施规划研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.

(收稿日期:2024-06-28 编辑:胡新宇)

(上接第 215 页)

[15] 张哲铭,李晓瑜,姬建. 基于 LS-SVM 的 TBM 掘进参数预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):373-379. (ZHANG Zheming, LI Xiaoyu, JI Jian. TBM excavation parameter prediction model based on LS-SVM[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2021, 49(4):373-379. (in Chinese))
[16] 刘娣,孙佳倩,余钟波. 基于机器学习模型的多层土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):7-14(LIU Di, SUN Jiaqian, YU Zhongbo. Multi layer soil moisture inversion based on machine learning[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2024, 52(3):7-14. (in Chinese))
[17] 王红瑞,魏豪杉,胡立堂,等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):488-497. (WANG Hongrui, WEI Haoshan, HU Litang, et al. Improved SVM-AR model and application based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2020, 48 (6):488-497. (in Chinese))
[18] 邓韶辉,王晓玲,石祖智,等. 基于 FIG 和 GWO-SVM 的灌浆功率时序预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020, 48 (5): 426-432. (DENG Shaohui, WANG Xiaoling, SHI Zuzhi, et al. Time series prediction of grouting power based on FIG and GWO-SVM[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2020, 48 (5): 426-432. (in Chinese))
[19] 杨丹. 区域洪水灾害风险特征及其演化态势分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
[20] 唐红亮,谢宇宁,王冬,等. 基于突变理论和模糊数学的湖库型水源地风险评价[J]. 中国农村水利水电,2024(2): 178-185. (TANG Hongliang, XIE Yuning, WANG Dong, et al. Risk assessment of lake-reservoir water source based on mutation theory and fuzzy mathematics [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2024(2): 178-185. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-30 编辑:胡新宇)

(上接第 225 页)

[36] GATIEN P, ARSENAULT R, MARTEL J L, et al. Using the ERA5 and ERA5-Land reanalysis datasets for river water temperature modelling in a data-scarce region[J]. Canadian Water Resources Journal, 2023, 48(2):93-110.
[37] 刘锋,严冬,范文晓,等. 近 50 年来新疆阿克苏河流域平原区气候变化周期分析研究[J]. 新疆农业大学学报,2021,44(2):117-122. (LIU Feng, YAN Dong, FAN Wenxiao, et al. Analysis of climate change cycle in Aksu River Basin, Xinjiang in recent 50 years[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2021, 44(2): 117-122. (in Chinese))
[38] 王磊,曾思栋,阳林翰,等. 基于 CMIP6 的未来气候变化下汉江流域干旱特征研究[J/OL]. 水资源保护. [2024-03-16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20240520.1608.009.html. (WANG Lei, ZENG Sidong, YANG Linhan, et al. Drought characteristics in Hanjiang River Basin under future climate change based on CMIP6[J/OL]. Water Resources Protection. [2024-03-16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20240520.1608.009.html. (in Chinese))
[39] MCGUIRE C R, NUFIO C R, BOWERS M D, et al. Elevation-dependent temperature trends in the Rocky Mountain Front Range: changes over a 56 and 20-year record[J]. Plos One, 2012, 7(9):12-13.

(收稿日期:2024-06-12 编辑:胡新宇)