

水资源集约安全利用评价 NOA-SVM 模型的构建与应用

王辰璇¹, 赵雪影¹, 张安安², 陈 莉³

(1. 厦门理工学院经济与管理学院; 2. 合肥财经职业学院城市建设与交通学院; 3. 安徽建筑大学经济与管理学院)

摘要:针对当前水资源集约安全利用评价中对人工智能方法关注不足的问题,建立了水资源集约安全利用评价指标体系,采用星鸦优化算法(NO A)优化支持向量机(SVM)模型参数,构建了水资源集约安全利用评价 NOA-SVM 模型。通过改变训练集与测试集占比,对比了 NOA-SVM 与 SVM 模型及不同核函数 NOA-SVM 模型的评价结果,并对除港澳台外的中国 31 个省(区、市)进行了实证分析。结果表明:NOA-SVM 模型对水资源集约安全利用评价结果的准确度优于 SVM 模型,径向基函数核在各训练集占比下评价结果的拟合优度保持平稳,均方误差、均方根误差、平均绝对误差均较理想,优于线性核和多项式核;水资源集约安全利用评价结果排名前 7 位的省(区、市)为天津、河北、北京、河南、山东、山西、内蒙古,其核心优势体现在开发强度控制、用水效率提升、产业结构适配等;排名后 7 位的为江西、江苏、湖北、上海、海南、广西、西藏,其核心问题集中于资源过度开发、用水效率低下、生态用水不足等。

关键词:水资源集约安全利用评价;NOA-SVM 模型;水资源开发强度;用水效率;中国

Construction and application of water resources intensive and safe utilization evaluation model based on NOA-SVM model//Wang Chenxuan¹, Zhao Xueying¹, Zhang An'an², Chen Li³ (1. School of Economics and Management, Xiamen University of Technology; 2. School of Urban Construction and Transportation, Hefei College of Finance & Economics; 3. School of Economics and Management, Anhui Jianzhu University)

Abstract: Regarding the issue of insufficient attention to artificial intelligence methods in current evaluation of water resources intensive and safe utilization, an evaluation index system for water resources intensive and safe utilization was established. The nutcracker optimization algorithm (NOA) was employed to optimize the parameters of the support vector machine (SVM) model, leading to the construction of an NOA-SVM model for the evaluation of intensive and safe utilization of water resources. By altering the proportions of training set and testing set, the evaluation result of the NOA-SVM model was compared with that of the standard SVM model, and the performance of the NOA-SVM model under different kernel functions was analyzed and compared. Furthermore, an empirical analysis was conducted on the 31 provinces (autonomous regions and municipalities) of China excluding Hongkong, Macao and Taiwan, to verify the effectiveness of the model. The results indicate that the NOA-SVM model achieves a higher evaluation accuracy than the conventional SVM model in the evaluation of the intensive and safe utilization of water resources. In particular, the radial basis function kernel maintains a stable goodness-of-fit under different proportions of the training set, and its corresponding error metrics including MSE, RMSE, and MAE are all desirable and superior to those of the linear kernel and polynomial kernel. The top seven provinces (autonomous regions and municipalities) in the evaluation results of intensive and safe utilization of water resources are Tianjin, Hebei, Beijing, Henan, Shandong, Shanxi, and Inner Mongolia, and their core advantages lie in controlled development intensity, improved water use efficiency, and well-adapted industrial structure. The bottom seven provinces (autonomous regions, municipalities) are Jiangxi, Jiangsu, Hubei, Shanghai, Hainan, Guangxi, and Xizang, and their core issues include excessive resource development, low water use efficiency, and insufficient ecological water use.

Key words: water resources intensive and safe utilization evaluation; NOA-SVM model; water resources development intensity; water use efficiency; China

水资源作为支撑社会经济发展的基础性、先导性、控制性要素,其战略价值贯穿于生产、生活与生

态三大领域,不仅是区域发展的核心物质保障,更是维系人与自然和谐共生的关键纽带。然而,中国水

资源存在时空分布不均、集约化与安全利用水平不高等问题。因此,加强水资源集约安全利用已成为破解上述矛盾、保障水资源可持续发展的关键课题^[1]。水资源集约利用的核心在于通过优化水资源配置与利用方式提升使用效率,依托最低限度的水资源用量实现更显著的经济、社会与生态综合效益,其本质是践行“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的发展原则。节约水资源作为集约利用的内在要求,需从用量控制与效率提升两个方面统筹实施,既要无效耗水降至最低限度,也要将水资源配置向高效益领域引导,进而推动效益达到最高水平。保障水资源安全利用,关键是将开发强度控制在资源承载力限度内,坚决杜绝因过度开发导致的地下水超采、生态系统退化等问题;同时筑牢城乡供水安全与防洪安全屏障,确保水资源系统可持续运行。水资源集约安全利用应构建协同推进格局:一方面,集约利用以保障安全为前提,不得为追求短期效益而突破生态与安全红线;另一方面,安全利用应服务于集约目标,通过稳定的供水保障与健康的水生态环境,为提升水资源利用效率提供支撑,最终形成“集约提升效率、安全护航发展”的良性互动模式^[2]。

国外关于水资源集约利用的研究主要聚焦在节水管理、节水效果策略和节水技术应用。例如:Rosa等^[3]构建了雨水-灰水耦合模型,对节水潜力进行评价;Leigh等^[4]针对住宅雨水及灰水系统实施过程中的相关政策展开研究,填补了技术应用中的政策空白;Khan等^[5]以澳大利亚水资源为研究对象,对雨水收集过程中的节水效果进行度量;Carollo等^[6]测算了雨水系统的综合效益;Crouch等^[7]以美国得克萨斯州水资源为分析样本,剖析了该地区节水策略;Jeuland等^[8]将节水技术运用于废水回用,在土耳其等国进行种植结构优化研究,将节水技术与灌溉技术相结合,应用于节水实践,为全球农业节水提供了借鉴。

国内相关研究集中在水资源节约集约利用、水资源安全利用及二者协同推进。在水资源节约集约利用方面,刘同凯等^[9]指出黄河水资源集约利用与管理需双管齐下,协同推进水资源利用;杜青辉等^[10]提出黄河供水区农业、工业、生活领域均需注重节水;姚振伟等^[11]通过测算河南水资源供需平衡,给出了节水对策;张凯等^[12]分析了多重约束下水资源利用效率的空间差异;刘佳等^[13]对黄河流域水资源节约集约利用开展评价;甘荣情等^[14]从资源、社会经济与生态环境视角对黄河流域城市水资源集约利用实施定量分析。在水资源安全利用方面,刘华^[15]对城市水资源安全开展实证分析;李治军等^[16]对西安市水资源安全利用进行研究。在水

资源集约与安全协同利用方面,王红瑞等^[17]测算了2019年中国31个省(区、市)的集约安全利用水平;李来胜等^[18]从三次产业视角,推导出黄河水资源循环经济方程。

从研究方法来看,国内外水资源集约安全利用评价常用方法包括层次分析法(AHP)^[19-20]、TOPSIS法^[21-22]、模糊综合评价法、Tapio脱钩模型^[23]、相对熵排序法^[24-25]以及面板数据回归法^[26]等。各研究方法存在进一步改进空间,如AHP法对专家经验依赖性强;TOPSIS法可能存在排序失效问题;模糊综合评价法指标权重存在主观性强的问题;Tapio脱钩模型过度依赖单一脱钩指标,在面对经济社会这一复杂系统时往往显得解释力不足;相对熵排序法对概率分布估计依赖性强;面板数据回归法对数据平衡性和模型设定要求较高。随着人工智能飞速发展,其在水资源集约安全评价中的应用得到认可。汪嘉杨等^[27]将禁忌搜索-支持向量机(support vector machine, SVM)用于水安全评价,但禁忌搜索初始解和参数设定缺乏规则可循;杨荣雪等^[28]将加速遗传算法与投影寻踪结合用于水资源安全利用评价,但投影寻踪设计较多依赖经验,易陷入局部最优。

相对而言, SVM模型具备扎实的统计学习理论根基与较强的泛化性能,适合处理高维非线性问题。但 SVM模型训练结果受参数选择影响较大,而星鸦优化算法(nutcracker optimization algorithm, NOA)在优化 SVM模型参数方面优势明显。本文采用 NOA优化 SVM模型参数,构建水资源集约安全利用评价 NOA-SVM模型,并对2024年除港澳台外的中国31个省(区、市)开展实证分析。

1 评价指标体系和模型构建

1.1 评价指标体系构建

本文从水资源集约利用与安全利用两个维度构建水资源集约安全利用评价指标体系。从内在关系分析,一方面水资源集约利用通过优化配置提高水资源利用率,防止水资源过度开采带来的安全风险;另一方面,水资源安全利用又为其集约利用提供根本保障。水资源必须同时满足“质”和“量”的双重要求,才能为可持续发展提供有效支撑。在水资源开发利用中,绿色发展路径是必然选择,需以水资源承载力为刚性约束,确保水资源开发与生态环境承载力相匹配,避免因过度开发导致生态系统破坏。在此过程中,不可忽视科技创新的赋能作用,通过大力推广节水技术,提升水资源利用效率,是增强水资源集约安全利用的重要动力。在顶层设计上,坚持“节水优先”的根本准则,将“生态优先”作为保障可

持续发展的硬性底线,以生态友好为导向,严格控制开发强度,最终实现生活用水、生产用水、生态用水的安全保障与协调发展。综上,参考王红瑞等^[17,29]的研究,本文构建了水资源集约安全利用评价指标体系,如图 1 所示(括号中“+”“-”分别表示正向和负向指标)。

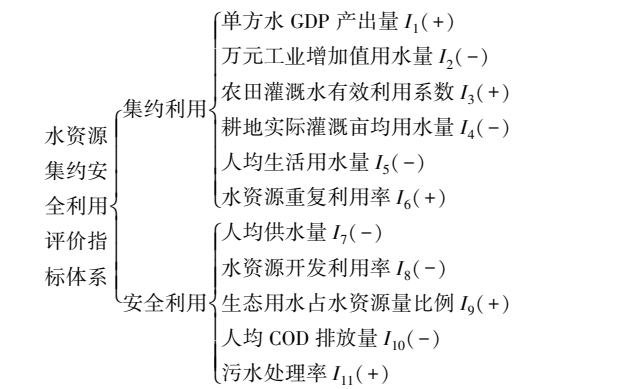


图 1 水资源集约安全利用评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for intensive and safe utilization of water resources

单方水 GDP 产出量(I_1)与当地资源条件、产业布局等有紧密联系,能反映区域水资源综合利用成效,也能体现水资源在经济效益转化中的实际贡献。万元工业增加值用水量(I_2)是评判节水效果与水资源集约利用水平的关键经济指标,能直观展现工业用水的优化程度;万元工业增加值用水量越低,则用水效率越高,反映出该地区产业结构优化,高耗水产业占比下降,同时也表明节水技术应用成效显著。农业用水效率可以通过农田灌溉水有效利用系数(I_3)与耕地实际灌溉亩(1 亩 = $1/5 \text{ hm}^2$)均用水量(I_4)来反映,前者能体现灌溉系统的技术水平,后者则反映农业用水实际效益。人均生活用水量(I_5)和水资源重复利用率(I_6)能从侧面反映公众的节水意识与日常用水习惯。人均生活用水量重点反映居民用水的整体水平与规模,包括百姓生活用水以及学校、医院等用水,其不同于节水水平,因为它更多解释的是区域用水规模、结构特点等。与水资源安全利用相关的指标中,人均供水量(I_7)和水资源开发利用率(I_8)分别用于判断区域用水保障能力与开发强度;生态用水占水资源量比例(I_9)用于反映区域生态需水保障情况,直接关系到水生态系统的正常运转。与污染相关的人均 COD 排放量(I_{10})能直观体现区域水污染负荷与水生态压力;污水处理率(I_{11})能考量不同地区污水处理能力与效果,因此, I_{10} 、 I_{11} 也是评价水生态健康状况的重要指标。

1.2 NOA-SVM 模型构建

SVM 模型的训练精度高度依赖于其参数的选择,而这类参数通常借助人工智能算法进行优化。

NOA-SVM 模型将 NOA 与 SVM 模型相结合,其核心是利用 NOA 智能寻优 SVM 模型的惩罚系数和核函数的伽马参数^[30-31]。考虑到不同核函数对模型性能的显著影响,本文将进一步探讨核函数类型对 NOA-SVM 模型评价结果的影响。

基于水资源集约安全利用评价指标体系,构建水资源集约安全利用评价 NOA-SVM 模型,评价步骤如图 2 所示。具体包括:①收集数据,对训练集和测试集占比进行动态划分,两者取值分别为 53% ~ 89%、11% ~ 47%;②选择均方根误差(RMSE)为优化目标,通过对较大误差赋予更高权重,优化 SVM 模型的收敛,降低预测偏差,提高模型整体稳健性;③设置 SVM 模型和 NOA 的参数;④全局搜索 SVM 模型参数最优解,调用 SVM 模型计算误差值;⑤根据参数变量的范围和数量,随机初始化星鸦种群;⑥将 NOA 算法参数输入 SVM 模型计算适应度,再依据 NOA 规则模拟星鸦搜寻、跳跃行为,迭代更新种群位置,逐步逼近最优解;⑦完成迭代,获得最优参数并进行模型训练,获得最优 SVM 模型,用于结果预测和综合评价^[32-35]。

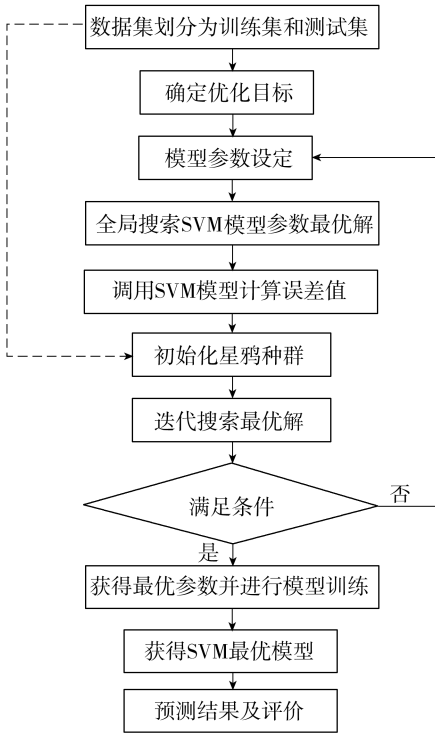


图 2 NOA-SVM 模型实现步骤

Fig. 2 Implementation steps of NOA-SVM model

2 模型应用

2.1 数据来源

中国 31 个省(区、市)水资源集约安全利用评价指标数据来自 2025 年《中国统计年鉴》、2024 年《中国水资源公报》、2024 年《城市建设统计年鉴》。

2.2 结果与分析

以中国 31 个省(区、市)的水资源集约安全利用水平为评价对象,依据指标的原始数据,建立标准化决策矩阵(表 1)。SVM 模型训练精度与参数选择有关,参数选择一般借助人工智能算法。NOA-SVM 模型采用 NOA 优化 SVM 模型参数,不同核函数对 NOA-SVM 模型也有影响,本文对线性核、多项式核、径向基函数(radial basis function,RBF)核在相同训练集和测试集占比下 NOA-SVM 模型评价结果进行比较。

2.2.1 NOA-SVM 模型与 SVM 模型评价结果比较

图 3 为训练集、测试集占比分别为 64%、36% 时,NOA-SVM 模型和 SVM 模型水资源集约安全利用的评价值与实际值的对比。分析结果表明,NOA-SVM 模型的均方误差(MSE)、RMSE、平均绝对误差(MAE)分别为 0.000 2、0.012 9、0.011 6,决定系数(R^2)为 0.995 2;而 SVM 模型的这 3 项误差分别为 0.020 2、0.142 1、0.083 7, R^2 仅为 0.414 8,说明 NOA-SVM 模型优于 SVM 模型。为进一步验证模型

运行结果的稳健性,通过改变训练集与测试集划分比例,采用 R^2 、MSE、RMSE 和 MAE 对不同模型水资源集约安全利用评价结果进行比较,结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出:①NOA-SVM 模型表现出较强的稳定性和鲁棒性。在训练集占比从 89%减小至 53%、测试集占比从 11%增至 47%时,NOA-SVM 模型的 R^2 始终稳定在 0.995 左右,波动幅度很小,其 MSE、RMSE、MAE 也基本保持恒定,几乎不受样本划分比例变化的影响,表明该模型在不同数据集划分比例下均能保持优异的拟合效果。②SVM 模型的性能随训练样本减少呈现显著劣化趋势。当训练集占比较大时(如 89%), R^2 为 0.850 1,但随着训练集占比逐渐下降, R^2 持续下滑,最低降至 0.355 3,且 MSE、RMSE、MAE 等指标呈逐步增大态势,表明模型泛化能力随训练数据减少而明显减弱。③NOA-SVM 模型在小样本场景下的优势尤为突出。在训练集占比低至 53%,测试集占比为 47%时, R^2 为 0.995 2,而 SVM 模型的 R^2 下降至 0.355 3,两者

表 1 标准化决策矩阵
Table 1 Standardized decision matrix

省(区、市)	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}
北 京	1.00	1.00	1.00	1.00	0.18	0.71	0.00	0.83	0.74	1.00	0.37
天 津	0.49	0.94	0.90	0.82	0.77	1.00	0.02	0.73	1.00	0.93	0.42
河 北	0.20	0.89	0.75	0.94	1.00	0.92	0.03	0.84	0.40	0.88	0.60
山 西	0.33	0.89	0.40	0.92	0.90	0.92	0.00	0.87	0.13	0.86	0.61
内蒙古	0.10	0.79	0.43	0.89	0.87	0.83	0.27	0.93	0.09	0.75	0.53
辽 宁	0.21	0.82	0.45	0.63	0.60	0.86	0.05	0.95	0.04	0.79	0.60
吉 林	0.10	0.72	0.51	0.71	0.72	0.59	0.12	0.97	0.03	0.74	0.66
黑龙江	0.02	0.54	0.52	0.46	0.86	0.59	0.34	0.94	0.01	0.79	0.27
上 海	0.41	0.00	0.96	0.41	0.05	0.97	0.11	0.58	0.04	1.00	0.54
江 苏	0.19	0.20	0.56	0.52	0.34	0.90	0.22	0.75	0.07	0.93	0.26
浙 江	0.44	0.87	0.53	0.56	0.26	0.84	0.03	0.97	0.01	0.98	0.43
安 徽	0.14	0.10	0.40	0.79	0.64	0.93	0.12	0.94	0.02	0.87	0.27
福 建	0.28	0.82	0.38	0.25	0.40	0.69	0.10	0.97	0.03	0.93	0.45
江 西	0.10	0.50	0.29	0.27	0.54	0.26	0.15	0.98	0.00	0.86	0.53
山 东	0.36	0.90	0.65	0.92	0.91	0.93	0.02	0.90	0.09	0.92	0.50
河 南	0.24	0.89	0.57	0.93	0.93	0.93	0.01	0.89	0.14	0.91	0.74
湖 北	0.13	0.39	0.29	0.56	0.15	0.93	0.18	0.92	0.06	0.85	0.37
湖 南	0.14	0.59	0.37	0.40	0.48	0.69	0.12	0.97	0.02	0.84	0.43
广 东	0.30	0.82	0.26	0.00	0.12	0.71	0.06	0.96	0.02	0.94	1.00
广 西	0.08	0.44	0.22	0.02	0.46	0.83	0.14	0.98	0.01	0.89	0.39
海 南	0.14	0.76	0.41	0.09	0.00	0.00	0.10	0.98	0.01	0.91	0.74
重 庆	0.39	0.66	0.18	0.70	0.47	0.90	0.01	0.97	0.01	0.94	0.72
四 川	0.20	0.88	0.16	0.62	0.43	0.64	0.05	0.98	0.01	0.91	0.11
贵 州	0.19	0.77	0.14	0.54	0.70	0.45	0.02	0.98	0.00	0.81	0.57
云 南	0.16	0.80	0.22	0.60	0.70	0.78	0.07	0.98	0.01	0.91	0.44
西 藏	0.04	0.48	0.00	0.36	0.20	0.00	0.30	1.00	0.00	0.00	0.12
陕 西	0.30	0.87	0.43	0.76	0.76	0.22	0.03	0.95	0.05	0.96	0.20
甘 肃	0.07	0.77	0.44	0.51	0.94	0.93	0.13	0.91	0.09	0.76	0.51
青 海	0.11	0.67	0.16	0.46	0.76	0.00	0.11	1.00	0.00	0.68	0.00
宁 夏	0.06	0.60	0.43	0.39	0.79	0.97	0.29	0.00	0.55	0.77	0.53
新 疆	0.00	0.78	0.41	0.32	0.40	0.13	1.00	0.87	0.07	0.84	0.62

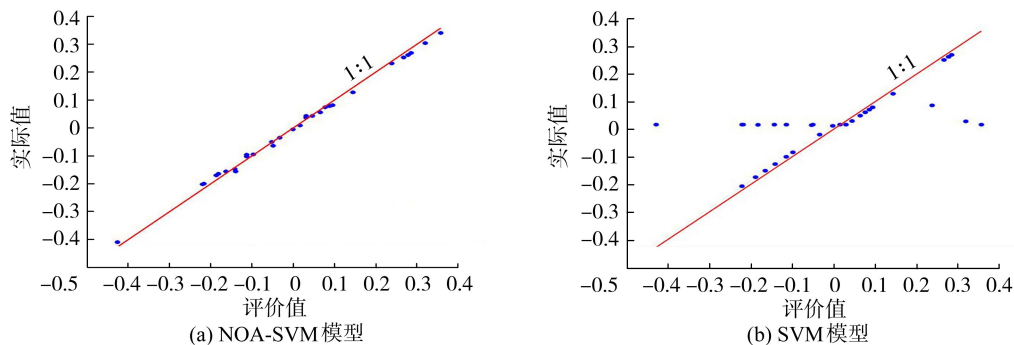


图3 NOA-SVM模型和SVM模型水资源集约安全利用评价值与实际值对比

Fig.3 Comparison of actual values and evaluation values of water resources intensive and safe utilization of NOA-SVM model and SVM model

表2 NOA-SVM模型与SVM模型水资源集约安全利用评价结果比较

Table 2 Comparison of water resources intensive and safe utilization evaluation results of NOA-SVM model and SVM model

模型	训练集占比/%	测试集占比/%	R^2	MSE	RMSE	MAE
NOA-SVM	89	11	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
	86	14	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
	83	17	0.9951	0.0002	0.0130	0.0116
	80	20	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
	77	23	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
	73	27	0.9949	0.0002	0.0133	0.0119
	70	30	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
	67	33	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
	64	36	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
	62	38	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
	59	41	0.9947	0.0002	0.0136	0.0121
	53	47	0.9952	0.0002	0.0129	0.0116
SVM	89	11	0.8501	0.0052	0.0720	0.0320
	86	14	0.8491	0.0052	0.0722	0.0328
	83	17	0.6879	0.0108	0.1038	0.0461
	80	20	0.5950	0.0140	0.2136	0.0552
	77	23	0.5690	0.0149	0.1220	0.0602
	73	27	0.5215	0.0165	0.1286	0.0673
	70	30	0.4946	0.0175	0.1321	0.0718
	67	33	0.4226	0.0199	0.1412	0.0810
	64	36	0.4148	0.0202	0.14212	0.0837
	62	38	0.3707	0.0217	0.1474	0.0895
	59	41	0.3462	0.0226	0.1503	0.0926
	53	47	0.3553	0.0223	0.1492	0.0949

差距显著扩大,说明经NOA优化的SVM模型参数组合更具泛化能力,能够有效挖掘有限样本中的关键特征信息。NOA-SVM模型水资源集约安全利用评价结果的 R^2 值始终保持在0.99以上,总体上优于SVM模型,MSE、RMSE、MAE等误差指标均远优于SVM模型,充分证明其评价准确度更高,预测效果更好。

2.2.2 核函数选择

不同核函数NOA-SVM模型评价结果比较如

表3所示。从表3可见,对于不同训练集和测试集占比,线性核、多项式核、RBF核NOA-SVM模型在相同训练集和测试集占比下评价结果的 R^2 存在差异,但差异幅度较小。选择RBF核的原因主要为:①RBF核灵活性显著优于线性核。线性核无法处理非线性问题,而RBF核适配复杂非线性问题。②模型稳定性更强。与多项式核NOA-SVM模型相比,RBF核NOA-SVM模型参数更少,鲁棒性表现突出。③具备较好的精度-效率平衡性。RBF核NOA-SVM模型在各训练集占比下的 R^2 保持平稳,MSE、RMSE、MAE均较理想,且平均耗时7.19s,仅为多项式核NOA-SVM模型的11.6%,能更好地平衡模型复杂度与拟合效果。

2.2.3 基于NOA-SVM模型水资源集约安全利用评价

采用NOA-SVM模型进行水资源集约安全利用评价,模型的运行环境为MATLAB 2018b,NOA最优惩罚系数和核函数的伽马参数分别为1.01、0.01,评价结果的MSE、RMSE、MAE和 R^2 分别为0.0002、0.0129、0.0116、0.9952。

表4为2024年中国31个省(区、市)NOA-SVM模型水资源集约安全利用评价结果,评价值越大,说明水资源集约安全利用水平越高。表中实际排名采用主成分分析(PCA)得到^[36]。从表4可以看出,黑龙江、浙江、福建、重庆、青海、新疆的NOA-SVM模型水资源集约安全利用评价结果排名与实际排名相差1位,其余省(区、市)与实际排名相同。

从表4可以看出,中国不同地区水资源集约安全利用水平差异较大。该评价结果总体与王红瑞等^[17]对2019年中国水资源集约安全利用评价结果相契合,虽然部分地区排名顺序有差异,但总趋势比较接近。造成差异的原因在于评价的年份不同,且在指标体系构建中,本文增加了水资源重复利用率、污水处理率两个指标。

表 3 不同核函数 NOA-SVM 模型评价结果比较

Table 3 Comparison of evaluation results of NOA-SVM model with different kernel functions

核函数类型	训练集占比/%	测试集占比/%	R^2	MSE	RMSE	MAE	运行时间/s
线性核	89	11	0.995 2	0.000 2	0.013 0	0.011 1	6.91
	83	17	0.995 1	0.000 2	0.013 0	0.011 2	7.06
	77	23	0.996 1	0.000 1	0.011 6	0.010 2	6.95
	70	30	0.995 2	0.000 2	0.013 0	0.011 1	7.35
	62	38	0.995 2	0.000 2	0.013 0	0.011 1	7.16
RBF 核	89	11	0.995 2	0.000 2	0.012 9	0.011 6	7.07
	83	17	0.995 1	0.000 2	0.013 0	0.011 6	7.09
	77	23	0.995 2	0.000 2	0.012 9	0.011 6	7.21
	70	30	0.995 2	0.000 2	0.012 9	0.011 6	7.18
	62	38	0.995 2	0.000 2	0.012 9	0.011 6	7.42
多项式核	89	11	0.995 1	0.000 2	0.013 0	0.011 2	61.72
	83	17	0.995 1	0.000 2	0.013 0	0.011 2	57.61
	77	23	0.996 1	0.000 1	0.011 6	0.010 2	55.85
	70	30	0.995 2	0.000 2	0.013 0	0.011 1	90.89
	62	38	0.995 1	0.000 2	0.013 0	0.011 2	44.82

表 4 NOA-SVM 模型水资源集约安全利用评价结果

Table 4 Water resources intensive and safe utilization evaluation results of NOA-SVM model

省(区、市)	实际排名	评价值	结果排名	排名差异
北 京	3	0.268 6	3	0
天 津	1	0.340 4	1	0
河 北	2	0.304 4	2	0
山 西	6	0.231 3	6	0
内 蒙 古	7	0.127 6	7	0
辽 宁	10	0.074 0	10	0
吉 林	11	0.055 6	11	0
黑 龙 江	18	-0.063 2	19	1
上 海	28	-0.199 1	28	0
江 苏	26	-0.164 1	26	0
浙 江	13	0.036 6	14	1
安 徽	21	-0.095 8	21	0
福 建	19	-0.050 0	18	1
江 西	25	-0.156 0	25	0
山 东	5	0.252 4	5	0
河 南	4	0.261 4	4	0
湖 北	27	-0.169 3	27	0
湖 南	20	-0.094 6	20	0
广 东	22	-0.102 6	22	0
广 西	30	-0.202 1	30	0
海 南	29	-0.201 8	29	0
重 庆	14	0.042 8	13	1
四 川	17	-0.035 2	17	0
贵 州	16	-0.005 4	16	0
云 南	12	0.043 6	12	0
西 藏	31	-0.408 8	31	0
陕 西	9	0.078 7	9	0
甘 肃	8	0.081 2	8	0
青 海	23	-0.155 8	24	1
宁 夏	15	0.008 7	15	0
新 疆	24	-0.147 1	23	1

2.2.3.1 排名前 7 位省(区、市)特征分析

水资源集约安全利用评价结果排名前 7 位的省(区、市)为天津、河北、北京、河南、山东、山西、内蒙

古,其核心优势体现在水资源开发强度控制、用水效率提升和产业结构适配等维度,但部分地区仍存在短板。

a. 天津排名首位。天津采用了典型的“低消耗-高产出”集约利用模式。从产出效率看,单方水 GDP 产出量为 523 元,仅次于北京,结合其人均供水量仅为 0.023 m³ 的禀赋条件,该地区已基本实现水资源价值最大化;在水资源开发利用方面,地表与地下水资源开发对其影响较大,天津水资源开发利用率适中,水资源重复利用率较高。

b. 河北排名第 2 位。河北人均用水量为全国最低,不足上海的 1/2,经济用水集约性突出。用水效率层面,万元工业增加值用水量为 10.9 m³,在全国范围内处于较低水平,远低于上海、江苏、安徽等地;农田灌溉水有效利用系数接近 0.7,在全国处于前列,耕地实际灌溉亩均用水量较广东减少 78% 以上,高效节水技术为该省排名提供核心支撑。除此之外,生态用水占水资源量比例趋近 18%,显著高于全国平均水平(5%),这是地区生态环境意识与政策导向的体现。

c. 北京排名第 3 位。北京已形成以服务业(金融、科技、信息、文化创意)和高端制造业(集成电路、新能源汽车)为主的产业结构,这些产业具有高附加值、低水耗的特点,远低于传统农业和重工业的用水强度。北京耕地面积有限,农业产值占比低,但设施农业、节水灌溉(滴灌、微喷灌)普及率极高,政府补贴力度大,加之严格的环保监管与执法力度,使该地区单方水 GDP 产出量、万元工业增加值用水量、农田灌溉水有效利用系数、耕地实际灌溉亩均用水量以及人均 COD 排放量处于全国最高水平。这是资源压力倒逼、首都定位引领、经济结构转型、强

力政策科技驱动共同作用的结果,但较高的水资源开发利用率和人均生活用水量也制约着北京市的发展。

d. 河南排名第 4 位。河南发挥水资源禀赋优势,推行低耗水利用模式。万元工业增加值用水量为 11.1 m^3 ,仅为江苏的 $1/5$;耕地实际灌溉亩均用水量为 156 m^3 、人均生活用水量为 120 L/d ,远低于海南、广东等地区。有效避免了水资源的粗放消耗,农业用水与生活用水浪费较少,成功将水资源优势转化为集约利用优势。在水资源安全利用方面,河南污水处理率目前位于全国首位,反映了该省作为人口和农业大省在水环境治理方面的特殊需求和努力。

e. 山东排名第 5 位。山东万元工业增加值用水量为 10.7 m^3 ,在全国范围内表现较好。尽管单方水 GDP 产出量无明显优势,但作为农业大省,山东在耕地与生活用水方面控制效果良好,用水量显著低于江苏、上海等地,资源集约利用压力相对较小,节水优势弥补了其产值短板。山东在水资源安全利用方面并无突出表现,这也是制约山东排名得分的关键。未来,山东需要狠抓人均供水量,努力降低生态用水占水资源量比例和人均 COD 排放量。

f. 山西排名第 6 位。山西万元工业增加值用水量、耕地实际灌溉亩均用水量、人均生活用水量均较低。与山东相似,该省在水资源集约利用方面表现良好,但仍存在明显短板,主要表现在人均供水量仅为 0.02 m^3 ,为全国较低水平,而水资源开发利用率已达 61% ,再加上过高的人均 COD 排放量,可见山西在生态保护方面投入不足。分析发现,山西位于黄土高原东缘,年均降水量较少,且时空分布不均,全省水资源总量居全国倒数,而经济社会需水量大,导致水资源开发利用率数值极高,并且山西属于以重化工为主导的产业体系,必然产生较高的工业有机污染负荷。

g. 内蒙古排名第 7 位。内蒙古水资源利用模式已从过去粗放开发转向总量严控、效率优先、生态保障的可持续轨道,内蒙古拥有大面积耕地和草场,是中国重要的“粮仓”,但较低的耕地实际灌溉亩均用水量和水资源开发利用率表明该地区政策主动约束效果良好。为严格限制地表水和地下水的开采总量,政府设定了开发利用红线,高效的灌溉技术获得了大量中央投资和技术推广支持。但需警惕,该地区内部差异巨大,在西部的阿拉善等极度干旱地区,水资源矛盾依然尖锐,需要更精细化的分区管理。

2.2.3.2 排名后 7 位省(区、市)主要问题

排名后 7 位的省(区、市)为江西、江苏、湖北、上海、海南、广西、西藏,其核心问题集中于资源过度

开发、用水效率低下、生态用水不足等,部分地区形成资源短缺、过度开发、效率低下的恶性循环。

a. 江西排名第 25 位。其水资源安全利用基本保持在全国平均水平,问题主要集中在水资源集约利用方面。万元工业增加值用水量、耕地实际灌溉亩均用水量偏高,使水资源处于超开发状态,用水需求与资源供给矛盾突出。除此之外,较低水资源重复利用率也是制约江西发展的重要因素之一。与被迫节水的地区不同,江西水资源相对丰沛,但人们节水循环意识相对淡薄,加之政策调节不足,导致江西水资源优势未能得到充分发挥。

b. 江苏、上海分别排名第 26 和 28 位。二者均面临高消耗和超开发的问题,万元工业增加值用水量、耕地实际灌溉亩均用水量偏高。江苏与上海作为经济发展较快的地区,在水资源分布上本属于丰水地区,但城镇化进程中,在水资源管理从保障供应向提升效率转型过程中却存在明显滞后性。这不仅是技术问题,更是涉及产业结构调整、资源定价改革和历史路径依赖突破的系统工程。从两地经济、技术和政策执行力情况来看,要破解这一难题并不困难,其未来的改进成效值得期待。

c. 湖北排名第 27 位。整体工业用水粗放,农业用水效率低下。万元工业增加值用水量接近 40 m^3 ,实际耕地灌溉亩均用水量为 378 m^3 ,人均生活用水量为 247 L/d ,这些指标限制了湖北水资源集约利用水平。值得注意的是该地区人均 COD 排放量显著高于同水平其他地区,这是其作为工农业大省,在特定发展阶段面临经济规模扩张、产业结构特征与水环境承载力之间矛盾的集中体现,落实工程减排、结构减排、管理减排是湖北改善现状的关键路径。

d. 海南、广西、西藏分别排名第 29、30 和 31 位。核心问题为农业极端粗放和工业低效。这些地区普遍存在农业用水强度高,尤其是广西与海南,耕地实际灌溉亩均用水量为全国平均水平的 1.8 倍,节水灌溉水平有待提升;广西、西藏万元工业增加值用水量是北京的 7 倍。海南、西藏水资源自然禀赋优越,受“开源”观念的影响,且以旅游业和农业为主的经济发展阶段与产业结构尚未对水资源产生强烈需求,两省水资源重复利用率明显滞后。虽然两地不似京津冀等缺水地区将水资源高重复利用率视为生存必需,但从发展态势来看,科学、前瞻地规划水资源管理策略仍是未来保障其可持续发展的关键。在自然条件约束、发展阶段特征与管理机制短板的共同影响之下,广西生态用水占水资源量比例仅为 0.26% ,未来需要通过强化生态用水法律保障与推广农业节水技术并举,逐步提升生态用水

保障水平,实现水资源可持续利用。西藏人均 COD 排放量约为全国平均水平的 5 倍,但万元工业增加值用水量为 48.2 m³,为全国较高水平;生态用水占水资源量比例仅为 0.0068%,自然禀赋与利用水平共同导致排名靠后。因此,应侧重加强城乡污水收集处理设施建设,尤其在旅游热点和农牧区同时推广生态农牧业技术等。

2.2.3.3 排名中段省(区、市)整体特征分析

实际排名处于中段(第 8~24 位)的省(区、市)整体呈现局部优势和短板制约的均衡性特征,优势集中于开发强度控制或单一领域效率,短板则体现在产业用水、生态投入等维度。

甘肃年平均降水量约占全国平均水平的 1/3,严重水资源稀缺直接限制了生活用水的供给能力,客观上促成了全社会节水意识的形成。此外,甘肃将水资源重复利用率设定为高耗水工业企业的硬性指标,大力推广循环冷却水系统,作用效果明显。陕西水资源重复利用率与人均水资源供应量短板明显。水资源重复利用率仅为 21%,人均供水量仅 0.025,“双低”局面体现出自然禀赋短板与经济社会发展需求之间的矛盾。辽宁为老工业基地,与广西、海南等农业大省相比,其农业用水效率虽有提升,但人均 COD 排放量过高的问题制约着辽宁的用水效率。吉林单方水 GDP 产出量较低,而水资源重复利用率却偏高,直接影响了集约利用水平。云南水资源禀赋条件优越,如果可以提升生态用水占水资源量比例,安全利用问题将很快得到改善。浙江工业用水效益在东部居前列,万元工业增加值用水量表现相对突出;但其生态用水占水资源量比例仅为 1%,是该省农业与生态的短板,影响排名。重庆单方水 GDP 产出量为 422.8 元,高于中段排名的其他省(区、市);但人均供水量较低,拉低整体排名。宁夏工业用水效益偏低,农业用水效益不高,且水资源过度开发问题较突出。贵州地形限制导致工农业节水技术推广难度大,用水效率均处于较低水平。四川用水需求与水资源禀赋基本匹配,但产业水循环利用技术滞后,工农业用水效率均不突出,生态用水占水资源量比例仅为 0.42%,生态保护有待提升。黑龙江传统产业设备老化导致工农业用水效益较差,单方水 GDP 产出量仅为 55 元,生态用水占水资源量比例为 0.36%,生态投入不足。福建人均 COD 排放量尚可,污水处理率达到全国平均水平,但农业水资源利用压力较大,生态用水占水资源量比例为 1.3%,生态修复存在提升空间。湖南农业与工业水资源利用效率均不突出,水资源安全利用水平有待提升。安徽农业用水控制较好,但工业水

资源利用率不高是目前亟须解决的困境;此外,提升生态用水占水资源量比例是未来安全用水的关键。广东大规模人口导致用水需求大,农业用水量位居全国之首,农业耕地实际灌溉亩均用水量为 711 m³,控制农业用水量,实现水资源集约利用是广东目前面临的重要问题。青海生态用水占水资源量比例仅为 0.21%,主动保护不足,与西藏相似,青海也存在重复用水低效的问题,但其水资源禀赋欠缺,提升水资源重复利用率势在必行。新疆单方水 GDP 产出量和水资源重复利用率偏低,这是其特殊的自然地理条件、经济发展阶段、产业结构特征以及水资源管理挑战共同作用的结果。近年来,新疆农业开发规模快速扩张,追求面积和产量,但单位水资源的产值增长未能同步跟上,也反映出新疆在干旱区水资源约束条件下,经济社会发展与水资源利用效率之间的矛盾。

3 结 论

a. NOA-SVM 模型水资源集约安全利用评价结果的 R^2 为 0.9952,其评价结果优于 SVM 模型。黑龙江、浙江、福建、重庆、青海、新疆的 NOA-SVM 模型水资源集约安全利用评价结果排名与实际排名相差 1 位,未来可考虑结合其他人工智能优化方法进一步改进 SVM 模型。

b. 中国水资源利用水平差异较大,呈现集约高效和粗放利用两种状态并存的状态。水资源集约安全利用评价结果排名靠前的省(区、市)体现出低开发强度、高用水效率、产业结构适配优势;排名靠后的省(区、市)存在水资源过度开采、用水效率低下、生态保护不足的共性。

参考文献:

[1] 李国英. 深入贯彻新发展理念 推进水资源集约安全利用:写在 2021 年世界水日和中国水周到来之际[N]. 人民日报,2021-03-22(10).

[2] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):1-6. (Jin Juliang, Xu Xinguang, Zhou Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):1-6. (in Chinese))

[3] Rosa G C, Ghisi E. A modelling evaluation of a system combining rainwater and greywater for potable water savings[J]. Urban Water Journal, 2020, 17(4):283-291.

[4] Leigh N G, Lee H. Evaluation of implementation strategies of onsite water-conserving technologies in three urban

- neighborhoods [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146(5): 04020022.
- [5] Khan Z, Alim M A, Rahman M M, et al. A continental scale evaluation of rainwater harvesting in Australia [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 167: 105378.
- [6] Carollo M, Butera I, Revelli R. Water savings and urban storm water management: evaluation of the potentiality of rainwater harvesting systems from the building to the city scale [J]. PLoS One, 2022, 17(11): e0278107.
- [7] Crouch M, Guerrero B, Amosson S, et al. Analyzing potential water conservation strategies in the Texas Panhandle [J]. Irrigation Science, 2020, 38(5/6): 559-567.
- [8] Jeuland M, Moffa M, Alfara A. Water savings from urban infrastructure improvement and wastewater reuse: evidence from Jordan [J]. International Journal of Water Resources Development, 2021, 37(6): 976-995.
- [9] 刘同凯, 贾明敏, 马平召. 强化刚性约束下的黄河水资源节约集约利用与管理研究 [J]. 人民黄河, 2021, 43(8): 70-73. (Liu Tongkai, Jia Mingmin, Ma Pingzhao. Research on economical and intensive utilization and management of water resources of the Yellow River under strengthen rigid constraint [J]. Yellow River, 2021, 43(8): 70-73. (in Chinese))
- [10] 杜青辉, 刘晓琴, 郝阳玲. 河南省黄河供水区水资源节约集约利用初探 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 10-14. (Du Qinghui, Liu Xiaoqin, Hao Yangling. Study on the conservation and intensive utilization of water resources in the Yellow River water supply area of Henan Province [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 10-14. (in Chinese))
- [11] 姚振伟, 程丹丹, 邵元宾. 河南省黄河流域水资源节约集约利用探讨 [J]. 人民黄河, 2022, 44(增刊2): 100-101. (Yao Zhenwei, Cheng Dandan, Shao Yuanbin. Exploration on conservation and intensive use of water resources in the Yellow River Basin of Henan Province [J]. Yellow River, 2022, 44(S2): 100-101. (in Chinese))
- [12] 张凯, 吴风平, 成长春. 三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 [J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5757-5767. (Zhang Kai, Wu Fengping, Cheng Changchun. Dynamic evolution characteristics of water resources utilization efficiency in China under the constraint of triple attribute carrying capacity [J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5757-5767. (in Chinese))
- [13] 刘佳, 付鹏举, 林春艳, 等. 黄河流域水资源节约集约水平的测度、时空差异及收敛性分析 [J]. 干旱区资源与
环境, 2024, 38(9): 20-30. (Liu Jia, Fu Pengju, Lin Chunyan, et al. Measurement, spatiotemporal variation and convergence of water resource conservation and intensification in the Yellow River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(9): 20-30. (in Chinese))
- [14] 甘荣情, 曾令武, 陈媛, 等. 黄河流域中下游城市水资源节约集约利用能力 [J]. 环境科学, 2025, 46(5): 2816-2827. (Gan Rongqing, Zeng Lingwu, Chen Yuan, et al. Water resource conservation and intensive utilization capability of cities in the middle and lower reaches of the Yellow River Basin [J]. Environmental Science, 2025, 46(5): 2816-2827. (in Chinese))
- [15] 刘华. 上海市水资源安全利用理论及应用研究 [D] 上海: 上海交通大学, 2007.
- [16] 李治军, 向扬. 基于改进能值生态足迹的西安市水资源安全综合评价 [J]. 长江科学院院报, 2025, 42(3): 34-41. (Li Zhijun, Xiang Yang. Comprehensive evaluation of water resources security in Xian based on improved emergy ecological footprint [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(3): 34-41. (in Chinese))
- [17] 王红瑞, 李一阳, 杨亚锋, 等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 18-25. (Wang Hongrui, Li Yiyang, Yang Yafeng, et al. Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 18-25. (in Chinese))
- [18] 李来胜, 高志宏. 循环经济视角下的黄河水资源集约利用研究 [J]. 中南大学学报(社会科学版), 2007, 13(6): 711-714. (Li Laisheng, Gao Zhihong. The research of Yellow River water resources intensive use under the circular economy [J]. Journal of Central South University (Social Science), 2007, 13(6): 711-714. (in Chinese))
- [19] 王幸, 张晓力, 刘翔宇. 黄河流域环境规制对水资源利用效率的影响研究 [J]. 水利经济, 2024, 42(6): 43-49. (Wang Xing, Zhang Xiaoli, Liu Xiangyu. Research on impact of environmental regulations on water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 43-49. (in Chinese))
- [20] Mao Jiansheng, Mao Jianrong, Xu Rigong, et al. Study on regional water-saving evaluation system based on extension evaluation method [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 510: 032008.
- [21] Zhao Lu, Zhang Lili, Cui Ningbo, et al. The evaluation of regional water-saving irrigation development level in humid regions of southern China [J]. Water, 2019, 11(1): 172.
- [22] Zhang Xianqi, Liang Tianyi. Comprehensive evaluation of urban water-saving based on AHP-TOPSIS [J]. Desalination and Water Treatment, 2021, 213: 202-213.

- [23] Kong Yang, He Weijun, Yuan Liang, et al. Decoupling analysis of water footprint and economic growth: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region from 2004 to 2017 [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4873.
- [24] 赵萌, 邱苑华, 刘北上. 基于相对熵的多属性决策排序方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 1098-1100. (Zhao Meng, Qiu Yuhua, Liu Beishang. Relative entropy evaluation method for multiple attribute decision making [J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 1098-1100. (in Chinese))
- [25] 卢国祥, 李冰清. 基于对称交互熵的多属性决策排序法[J]. 数学杂志, 2016, 36(6): 1253-1260. (Lu Guoxiang, Li Bingqing. Evaluation method based on symmetric cross entropy for multiple attribute decision making [J]. Journal of Mathematics, 2016, 36(6): 1253-1260. (in Chinese))
- [26] 汪倩, 陈军飞. 南水北调工程通水对受水区水资源集约利用效率的影响: 基于河南省市级层面的实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(6): 155-164. (Wang Qian, Chen Junfei. Impact of water supply of South-to-North Water Transfer Project on the intensive utilization efficiency of water resources in the water receiving area: an empirical analysis at the municipal level of Henan Province [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(6): 155-164. (in Chinese))
- [27] 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 assessment based on TS-SVM model [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2): 1-4. (in Chinese))
- [28] 杨荣雪, 洪梅, 高媛媛, 等. 区域水资源集约安全利用评价: 以北京市为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(2): 218-223. (Yang Rongxue, Hong Mei, Gao Yuanyuan, et al. Intensive and safe utilization of regional water resources: case of Beijing [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60(2): 218-223. (in Chinese))
- [29] 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 model and application of SVM-AR based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 488-497. (in Chinese))
- [30] 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 method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 373-379. (in Chinese))
- [31] 邓韶辉, 王晓玲, 石智智, 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. Prediction of grouting power time series based on FIG and GWO-SVM [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 426-432. (in Chinese))
- [32] 郭晋辉. 基于 ICEEMDAN-NOA-SVM 的采煤机截割部轴承故障诊断技术[J]. 煤炭工程, 2025, 57(2): 156-162. (Guo Jinhui. Fault diagnosis method of bearing in cutting section of shearers based on ICEEMDAN-NOA-SVM [J]. Coal Engineering, 2025, 57(2): 156-162. (in Chinese))
- [33] 唐红亮, 王冬, 董延军, 等. 基于 SVM 参数优化的饮用水水源地风险预警[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 209-215. (Tang Hongliang, Wang Dong, Dong Yanjun, et al. Risk warning of drinking water source areas based on SVM parameter optimization [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 209-215. (in Chinese))
- [34] 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. Method for prediction of groundwater level based on epsilon-support vector regression machine with parameters optimized by genetic algorithm [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(4): 15-18. (in Chinese))
- [35] Zhu Yantao, Gu Chongshi, Diaconeasa M A. A missing data processing method for dam deformation monitoring data using spatiotemporal clustering and support vector machine model [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(4): 417-424.
- [36] 陈莉, 李姣姣, 肖曙露. 支持向量机参数优化的土地集约利用评价与分析[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(7): 1651-1660. (Chen Li, Li Jiaojiao, Xiao Shulu. Evaluation and analysis of land intensive utilization based on parameters optimization of SVM [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1651-1660. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-10-08 编辑: 施业)

