

中文引用格式:祁云,薛凯隆,李绪萍,等.多策略改进SSA优化KELM的边坡稳定性预测模型[J].中国安全科学学报,2025,35(3):92-98.

英文引用格式:QI Yun, XUE Kailong, LI Xuping, et al. Slope stability prediction model based on multi-strategy improved SSA for optimizing KELM[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 92-98.

多策略改进SSA优化KELM的边坡稳定性预测模型*

祁云^{1,2,3}副教授,薛凯隆^{**4,5},李绪萍^{1,2,4}教授,汪伟^{1,2,3}副教授,白晨浩⁵,吉准泽⁶

(1 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010;2 内蒙古自治区矿业工程重点实验室,内蒙古 包头 014010;3 内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心,内蒙古 包头 014010;4 内蒙古煤炭绿色开采与绿色利用协同创新中心,内蒙古 包头 014010;5 山西大同大学 煤炭工程学院,山西 大同 037000;6 内蒙古科技大学 材料与冶金学院,内蒙古 包头 014010)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.0134

基金项目:国家自然科学基金地区基金资助(52464020);内蒙古自然科学基金资助(2024LHMS05012);山西省高等学校科技创新计划项目(2022L448,2022L449);山西大同大学研究生教育创新项目(23CX49)。

【摘要】 为了能够更加精准地预测边坡稳定状态,从而有效预防边坡失稳事故,提出改进麻雀搜索算法(ISSA)与核极限学习机(KELM)相结合的ISSA-KELM边坡稳定性预测模型。首先,将边坡失稳特征中的容重、黏聚力等6个主要影响因素作为预测指标,建立边坡稳定性评价数据集;其次,引入Sine混沌映射、Levy飞行策略、动态自适应权重以及融合最优爆炸策略和反向学习改进麻雀搜索算法(SSA),以提高其全局搜索能力和稳定性;而后利用ISSA优化KELM中的核参数 ψ 和正则化系数 C ,提升其预测精度,同时避免KELM出现过拟合现象;最后,对比分析ISSA-KELM模型与SSA-KELM、粒子群优化算法(PSO)-KELM以及PSO-支持向量机(SVM)模型的预测结果,并将ISSA-KELM模型应用于山西某露天煤矿。结果表明:ISSA-KELM模型的准确率、精确率、召回率和 F_1 分数分别达到了0.9459、1、0.8667和0.929,均优于SSA-KELM、PSO-KELM和PSO-SVM模型,模型的预测结果与实际值最为接近,表明所建ISSA-KELM模型具有较强的泛化能力。

【关键词】 边坡稳定性; 预测模型; 改进麻雀搜索算法(ISSA); 核极限学习机(KELM); 预测指标; 混淆矩阵

Slope stability prediction model based on multi-strategy improved SSA for optimizing KELM

QI Yun^{1,2,3}, XUE Kailong^{4,5}, LI Xuping^{1,2,4}, WANG Wei^{1,2,3}, BAI Chenhao⁵, JI Zhunze⁶

(1 School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 2 Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 3 Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 4 Inner Mongolia Cooperative Innovation Center for Coal Green Mining and Green Utilization, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 5 School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong Shanxi 037000, China;

* 文章编号:1003-3033(2025)03-0092-07; 收稿日期:2024-10-20; 修稿日期:2024-12-28

** 通信作者:薛凯隆(2000—),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为矿山灾害监测预警、应急技术与管理。E-mail:xuekailong22@163.com。

6 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: In order to predict the slope state more accurately and effectively prevent the slope instability accident, an improved ISSA-KELM slope stability prediction model was proposed. Firstly, six main factors such as bulk density and cohesion in slope instability characteristics were used as prediction indexes to establish a data set for slope stability evaluation. Secondly, SSA was enhanced by incorporating Sine chaotic mapping, Levy flight strategy, dynamic adaptive weights, and fusion of optimal explosion strategy and reverse learning. These improvements aimed at enhancing the global search capability and stability of SSA. Subsequently, ISSA was employed to optimize the kernel parameter ψ and regularization coefficient C in KELM for improved prediction accuracy while avoiding overfitting issues associated with KELM. The results show that the accuracy rate, precision, recall rate and F_1 score of ISSA-KELM model reached 0.945 9, 1, 0.866 7 and 0.929, respectively, which are superior to SSA-KELM, PSO-KELM and PSO-SVM models, and the predicted results of the model are the closest to the actual values. It shows that the established ISSA-KELM model has strong generalization ability.

Keywords: slope stability; prediction model; improved sparrow search algorithm (ISSA); kernel extreme learning machine (KELM); prediction index; confusion matrix

0 引言

随着社会的不断发展,矿山开采规模不断扩大,公路、铁路、水利与建筑工程建设速度不断增加,导致涉及边坡稳定性的工程数量随之增加,边坡一旦发生失稳事故,将对人民的生命和财产安全、经济建设带来不可估量的损失^[1]。因此,准确、快速、有效地分析和预测边坡稳定状态,对防治由边坡失稳引发的地质灾害具有重要的理论意义。

近年来,国内外学者采用如随机森林(Random Forest, RF)、广义回归神经网络(General Regression Neural Network, GRNN)等多种不同机器学习方法分析边坡稳定性,并取得了一系列的成果。胡少伟等^[2]通过遗传算法中的变异思想与能量函数负梯度下降原理得到改进的粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO),在一定程度上提高了边坡稳定性预测的精度;KARDANI等^[3]构建了一种包含 Logistic 回归、多层感知器、极限梯度回归提升树等多种机器学习算法的基础分类器,通过人工蜂群算法,找出其中的最佳组合,得到边坡高度和黏聚力是对边坡稳定性预测结果影响最大的因素。

综上所述,以往对于边坡稳定性的预测虽已取得了一定的成果,但仍然存在如超参数选择困难、机器学习模型易陷入过拟合等问题。由此可知:现有边坡稳定性分析方法还存在一定的局限性,不能很好地满足准确预测稳定状态的需要。鉴于此,笔者

拟通过引入 Sine 混沌映射、Levy 飞行策略、动态自适应权重以及融合最优爆炸策略的反向学习策略,对麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)进行改进,得到改进的 SSA(Improved SSA, ISSA),构建基于 ISSA-核极限学习机(Kernel Extreme Learning Machine, KELM)的边坡稳定性预测模型,对比分析文中所建模型与 SSA-KELM、PSO-KELM 以及 PSO-支持向量机(Support Vector Machine, SVM)模型的预测结果,以检验 ISSA-KELM 模型的预测准确度,并将文中所建模型应用于山西某露天矿边坡稳定性分析中,以期为分析相关边坡工程的稳定性提供依据。

1 多策略 ISSA

1.1 SSA

SSA 是由薛建凯^[4]在 2020 年提出的一种智能优化算法,该算法中麻雀种群被划分为现者、加入者和侦察者 3 类,其具体原理参见文献[4]。

1.2 ISSA

1) Sine 混沌映射。原始 SSA 随机生成初始种群时,可能存在种群分布不均匀的现象,进而影响寻优性能。为此,选择遍历性好、相对稳定的 Sine 混沌映射初始化种群信息,从而丰富种群多样性,提高算法的精准性和稳定性,在一定程度上提高其全局搜索能力^[5]。其表达式为:

$$X_{i+1} = \mu \sin(\pi x_i) \quad (1)$$

式中： x_i 为第 i 个混沌数； i 为非负整数； μ 为常数，取值范围为 $[0, 1]$ 。

2) Levy 飞行策略。Levy 飞行策略因其在搜索过程中的步长随机，因此，在搜索较大范围的未知区域时有较好的效果。在 SSA 中引入 Levy 飞行随机步长策略，能帮助算法扩大搜索范围、改善其易陷入局部最优的缺陷，提高算法的整体性能。其具体实现方法参见文献[6]。

3) 动态自适应权重。引入动态自适应权重。通过借鉴惯性权重的思想，将动态权重系数 ω 引入发现者的位置更新模式中，使其能够更好地进行全局探索^[7]。

4) 为了能够让麻雀个体在迭代后期更好地进行寻优，将最优粒子爆炸策略与反向学习方法进行融合^[8]，进一步提升算法的寻优能力。

1.3 算法性能验证

为了验证 ISSA 的寻优性能，选择 4 个不同基准

函数进行测试，所用标准函数类型见表 1。同时将 ISSA 与 SSA、PSO 和海洋捕食者算法 (Marine Predators Algorithm, MPA) 进行对比，所有算法的初始种群量与最大迭代次数分别设置为 30 和 1 000，所有算法均独立运行 20 次，ISSA 与 SSA 中发现者、加入者和侦察者比例相同。函数测试结果如图 1 所示。

表 1 标准测试函数

Table 1 Standard test function

测试函数	维度	取值范围
$f_1 = - \sum_{i=1}^n (x_i \sin(\sqrt{ x_i }))$	30	$[-500, 500]$
$f_2 = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i + 10)]$	30	$[-5.12, 5.12]$
$f_3 = - \sum_{i=1}^n [(x - a_i)(x - a_i)^T + c_i]^{-1}$	30	$[0, 10]$
$f_4 = \sum_{i=1}^n \left[a_i - \frac{x_i(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4} \right]$	30	$[-5, 5]$

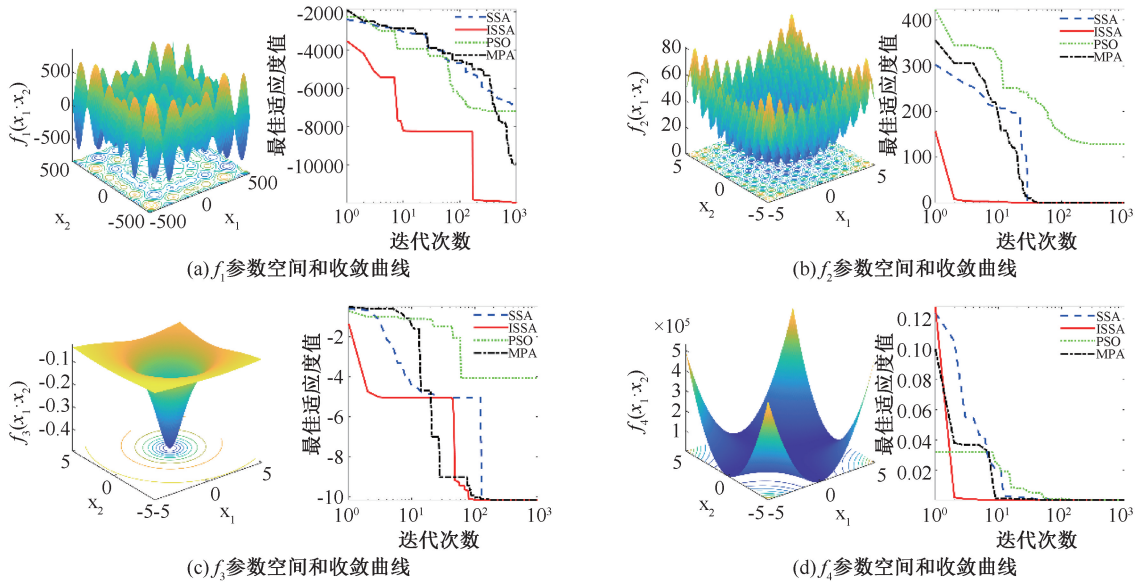


图 1 函数性能测试结果

Fig. 1 Function performance test results

由图 1 可见：在单峰、多峰和固定维测试函数上，ISSA 与其他算法相比寻优所需的迭代次数都更少，寻优时间缩短，能够有效克服原始 SSA 算法的缺陷从而快速得到最优适应度值。

2 ISSA-KELM 边坡稳定性预测模型

2.1 基于 KELM 的预测模型

HUANG Guangbin 等^[9]第 1 次将核函数引入了

极限学习机 (Extreme Learning Machine, ELM) 中进行计算。KELM 采用核映射技术来代替传统的随机映射，能有效提高预测精度。

2.2 选取边坡稳定性判别指标

导致边坡失稳的因素十分复杂，由于机器学习所需数据难以收集，故一般选择具有代表性的因素评价边坡稳定性。近几年的相关研究中，FENG Xianda^[10]、SAMUI^[11]等均认为，影响边坡稳定性的

关键因素为土体重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、边坡坡角 β 、坡高 H 、孔隙压力比 r_u 。因此,文中将这6个影响因素作为研究变量,将边坡稳定性 S 分为失稳和稳定2种,其中标签0代表失稳破坏、1代表稳定。

2.3 模型性能评价指标

通常将边坡稳定性预测归为一个二分类问题,即边坡稳定为正,边坡失稳破坏为负,依据边坡稳定性的真实情况和预测结果,即可得到混淆矩阵 D ,见表2。其中,TP为真实稳定且预测稳定样本;TN为真实稳定但预测破坏样本;FP为真实破坏且预测破坏样本;FN为真实破坏但预测稳定样本。

表2 混淆矩阵 D

Table 2 Confusion matrix D

预测结果	实际结果	
	破坏	稳定
破坏	TP	FP
稳定	FN	TN

基于所得混淆矩阵 D ,选取式(2)一式(5)所示的4个指标评估模型性能,它们的值越大模型性能越好。

$$A_c = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{2 \times P \times R}{P + R} \quad (5)$$

2.4 边坡稳定性分析流程

基于 ISSA-KELM 的边坡稳定性预测模型具体流程如图2所示。

3 边坡稳定性预测模型实例应用

3.1 数据来源与分析

传统边坡稳定性预测研究通常是收集工程数据来支持预测模型进行训练和预测,但是由于工程中收集的数据通常有缺失,且总量较少,会导致所构建的模型预测精度不够理想。为此,KARDANI 等^[3]通过 OptumG2 软件进行有限元仿真计算边坡稳定性参数,将获得的数据作为训练集,收集工程边坡数据作为训练集。因此,文中选用文献[3]中的数据,数据集由前150条有限元数据作为训练集和后

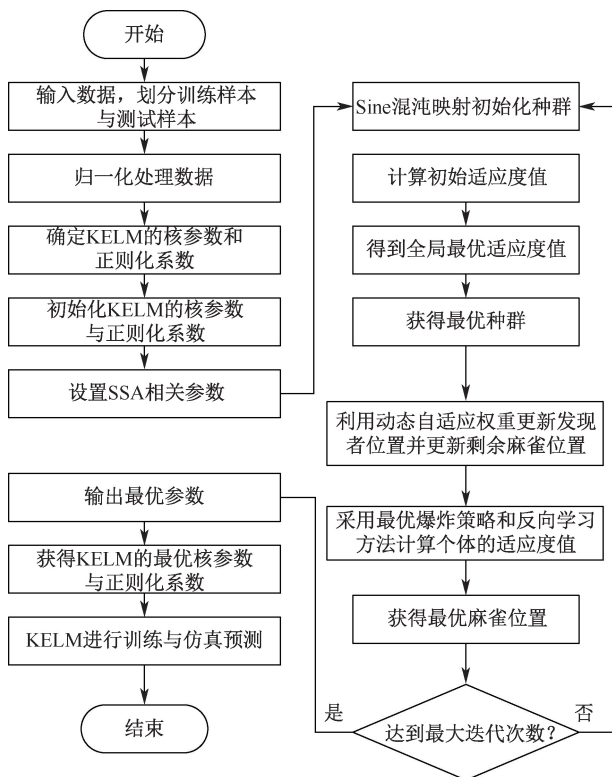


图2 ISSA-KELM 预测模型分析流程

Fig. 2 ISSA-KELM prediction model analysis process

107条历史边坡数据作为测试集构成,部分样本数据见表3;将收集到的样本数据的80%划分为训练集,20%划分为测试集。

表3 训练集部分样本数据

Table 3 Partial sample data of training set

编号	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	H / m	r_u / kPa
1	17.93	78.20	18.49	33.42	120.79	0.00
2	18.02	40.92	21.18	21.86	21.86	0.10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
149	21.03	0.00	17.72	5.79	57.31	0.00
150	25.74	0.00	17.23	30.03	80.53	0.40
151	22.40	10.00	35.00	45.00	10.00	0.40
152	19.63	11.98	20.00	22.00	12.19	0.25
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
256	18.84	14.36	25.00	20.00	30.50	0.45
257	19.97	19.96	36.00	45.50	50.00	0.50

通过分析影响因素与输出结果之间的皮尔逊相关性,得到了如图3所示的相关矩阵热力图。由图3可知:不同因素间的相关性系数都低于0.5,这表明选取的影响因素与输出结果之间的相关性较低,呈现出复杂的非线性关系^[12]。

鉴于边坡稳定性与影响因素间的正负关联存在差异,如果直接进行标准化处理,可能会使预测的准

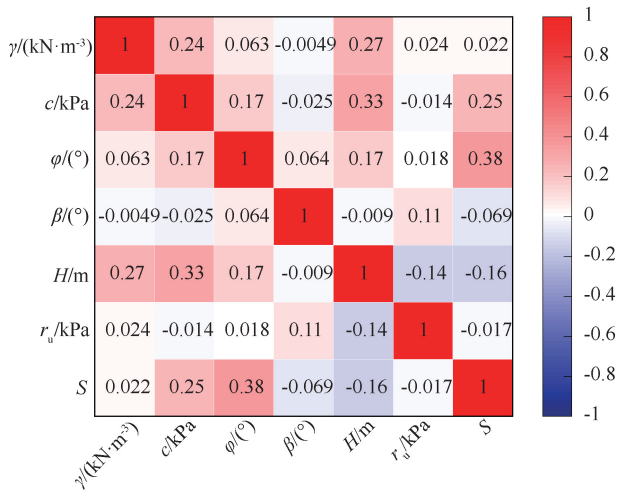


图3 数据集相关矩阵

Fig.3 Correlation matrix of data set

确性受到较大的影响。为此,引入考虑正负关联性的最大最小值标准化方法,其中表现为正相关的影响因素计算公式为:

$$\tau = \frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \quad (6)$$

表现为负相关的影响因素计算公式为:

$$\tau = \frac{\sigma_{\max} - \sigma}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \quad (7)$$

式中: σ 与 τ 分别为归一化前和归一化后的数据,归一化后数值的区间为 $[0, 1]$; σ_{\max} 和 σ_{\min} 为归一化前数据的最大值与最小值。

3.2 模型参数的确定

文中采用 ISSA 优化 KELM 模型超参数,正则化参数 C 和核函数 ψ 搜索范围均为 $[0.1, 50]$,最终本次寻优确定 $C = 48.633$,核参数值 $\psi = 0.1$ 。利用优化后的 ISSA-KELM 预测模型获得了测试集的预测结果与实际结果的混淆矩阵。同时,为了验证所建模型的有效性,选取原始 SSA-KELM 模型、PSO-KELM 模型以及 PSO-SVM 模型与 ISSA-KELM 模型预测结果进行对比,其中 3 种优化算法初始种群与最大迭代次数均与 ISSA 相同,SSA 算法相关参数与 ISSA 相同^[13]; PSO 算法中学习因子 $C_1 = C_2 = 1.5$,惯性权重为 0.8,速度限制 $V_{\max} = 1, V_{\min} = -1$,种群限制 $P_{\max} = 5, P_{\min} = -5$; SVM 中选用径向基函数作为核函数;试验环境为 Matlab 2023a,4 种预测模型所得结果的混淆矩阵如图 4 所示。由图 4 可知:对边坡状态的分类中 ISSA-KELM 模型预测错误个数最少,其混淆矩阵中的 TP 和 TN 样本数均大于其他 3 种模型的预测结果,表明文中所建的 ISSA-KELM

边坡稳定性预测模型的预测性能相较于其他预测模型更好,可靠度更高。

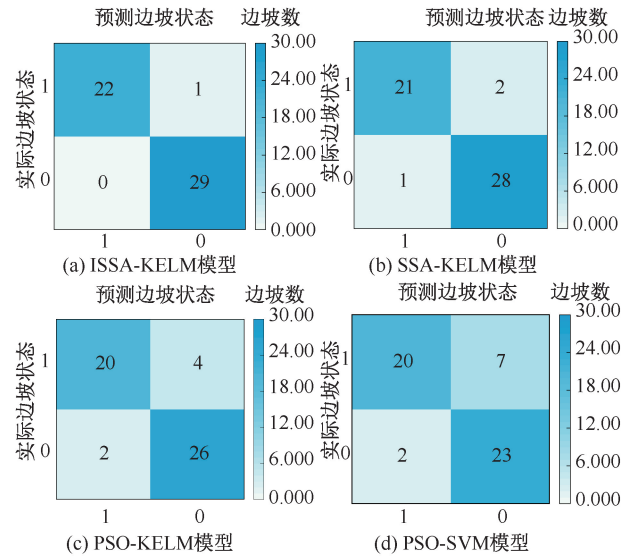


图4 各模型预测结果混淆矩阵

Fig.4 Confusion matrix of prediction results of each model

对前文所述模型性能评估指标进行计算总结,见表 4。由表 4 可知:ISSA-KELM 模型的各项评价指标均优于其他模型。其中,相较于其他模型在测试样本中的 A_c 分别提高了 3.85%、9.62%、15.39%; P 分别提高了 3.45%、7.14%、8%; R 分别提高了 3.34%、10%、20%; F_1 分别提高了 3.40%、8.6%、14.7%;这表明所建模型具有优越的预测性能。

表4 各模型评价指标结果

Table 4 Results of evaluation indicators of each model

模型	模型性能			
	A_c	P	R	F_1
ISSA-KELM	0.980 8	1	0.966 7	0.983
SSA-KELM	0.942 3	0.965 5	0.933 3	0.949
PSO-KELM	0.884 6	0.928 6	0.866 7	0.897
PSO-SVM	0.826 9	0.920 0	0.766 7	0.836

4 预测模型工程应用

为了进一步说明 ISSA-KELM 模型的实用性,从山西某露天煤矿选取 90 组数据,其中训练、测试样本之比为 6 : 4。各模型性能评价指标对比见表 5,预测结果如图 5 所示。由表 5 可以看出,文中所构建的 ISSA-KELM 预测模型在 A_c 、 P 、 R 以及 F_1 等 4 个指标方面均为最优;由图 5 可知:ISSA-KELM 模型在测试集的预测结果出现 2 处错误,为第 28 和第

31 例,且均将稳定边坡状态错误预测为了失稳破坏状态;而 SSA-KELM 模型出现 3 处错误,为第 14、28 和 34 例,且将一处失稳破坏错误预测为了稳定边坡; PSO-KELM 模型与 PSO-SVM 模型预测结果分别出现 5 处和 8 处错误,且都出现将失稳破坏边坡预测为稳定边坡的情况,这对实际预测边坡状态造成了不利参考,而 ISSA-KELM 模型未出现类似重大错误,具有良好的泛化性能。

综上所述:文中所构建的 ISSA-KELM 模型不仅预测精度高,且具有较好的稳定性和实用性,其预测结果更符合实际,能够更为准确地预测边坡稳定性。

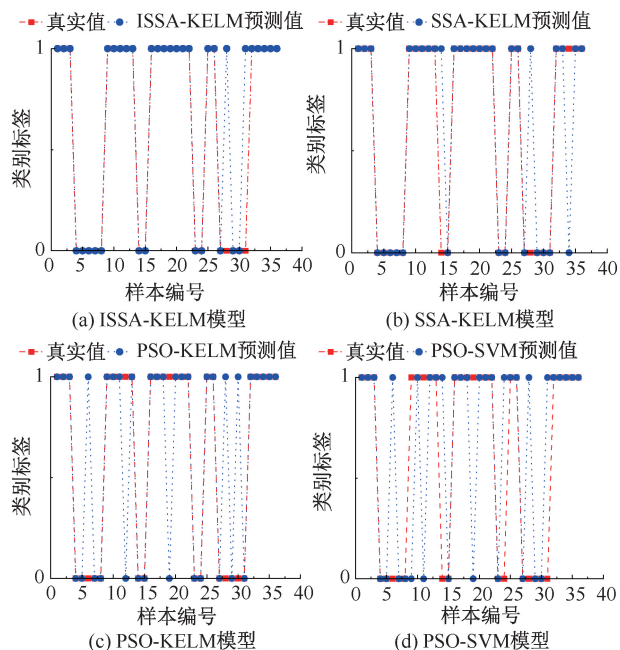


图 5 预测结果与实际结果对比

Fig. 5 Comparison between predicted and actual results

表 5 山西某矿不同模型评价指标对比

Table 5 Comparison of evaluation indicators of different models in a certain mine in Shanxi

模型	模型性能			
	A_c	P	R	F_1
ISSA-AKELM	0.945 9	1	0.866 7	0.929
SSA-AKELM	0.916 7	0.923 0	0.857 1	0.889
PSO-AKELM	0.864 9	0.857 1	0.800 0	0.828
PSO-ASVM	0.810 8	0.785 7	0.733 3	0.828

5 结 论

1) 边坡失稳特征 Pearson 相关系数矩阵图表明:各影响因素之间具有复杂的非线性关系,并且各个指标因素的相关系数都未大于 0.5,说明各个指标因素具有良好的独立性。

2) 与 SSA-KELM、PSO-KELM 和 PSO-SVM 模型相比,ISSA-KELM 模型的各个性能指标均为最优,且改进后得到的 ISSA 较原始 SSA 的全局搜索能力及寻优精度均有显著提升,使 KELM 预测精度变高,提高了边坡稳定性预测准确率。

3) 通过山西某露天煤矿边坡稳定性分析表明 ISSA-KELM 模型预测准确度高、泛化性能强,预测结果与实际情况最为接近,具有实际应用价值。

4) ISSA-KELM 模型依赖于数据驱动,需大量且有针对性地选取特征指标与训练数据。同时因不同地区的地质条件等存在差异,且文中研究对象为均质边坡,未考虑边坡几何形状、降雨等因素对模型预测性能的影响,后续还需进一步研究,增加特征参数和广泛收集不同地质条件的数据以加强模型的普适性。

参 考 文 献

- [1] WEI Zhenlei, LU Qing, SUN Hongyue, et al. Estimating the rainfall threshold of a deep seated landslide by integrating models for predicting the groundwater level and stability analysis of the slope[J]. Engineering Geology, 2019, 253: 14-26.
- [2] 胡少伟,李原昊,单常喜,等. 基于改进的 PSO-BP 神经网络的边坡稳定性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 854-861.
HU Shaowei, LI Yuanhao, SHAN Changxi, et al. Research on slope stability based on improved PSO-BP neural network[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 854-861.
- [3] KARDANI N, ZHOU Annan, NAZEM M, et al. Improved prediction of slope stability using a hybrid stacking ensemble method based on finite element analysis and field data[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(1): 188-201.
- [4] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D]. 上海: 东华大学, 2020.

- XUE Jiankai. Research and application of a new swarm intelligent optimization technique [D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [5] SEYEDALI M. SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 96: 120–133.
- [6] 余修武,彭威,余员琴,等. 基于SSO的铀尾矿库无线传感器网络定位算法[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 84–90.
- YU Xiuwu, PENG Wei, YU Yuanqin, et al. Localization algorithm for uranium tailings reservoir based on SSO in wireless sensor network [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 84–90.
- [7] 毛清华,张强. 融合柯西变异和反向学习的改进麻雀算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(6): 1 155–1 164.
- MAO Qinghua, ZHANG Qiang. Improved sparrow algorithm combining Cauchy mutation and opposition-based learning [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(6): 1 155–1 164.
- [8] 吴大飞,杨光永,樊康生,等. 多策略融合的改进粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(11): 3 358–3 364.
- WU Dafei, YANG Guangyong, FAN Kangsheng, et al. Improved particle swarm optimization algorithm with multi-strategy fusion [J]. Application Research of Computers, 2022, 39(11): 3 358–3 364.
- [9] HUANG Guangbin, ZHOU Hongming, DING Xiaojian, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2012, 42(2): 513–529.
- [10] FENG Xianda, LI Shuchen, YUAN Chao, et al. Prediction of slope stability using naive Bayes classifier [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(3): 941–950.
- [11] SAMUI P. Support vector classifier analysis of slope [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2013, 4(1): 1–12.
- [12] 张凯,张科. 基于LightGBM算法的边坡稳定性预测研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 113–120.
- ZHANG Kai, ZHANG Ke. Prediction study on slope stability based on LightGBM algorithm [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 113–120.
- [13] 祁云,薛凯隆,汪伟,等. 矿井煤与瓦斯突出事故应急救援能力评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 225–230.
- QI Yun, XUE Kailong, WANG Wei, et al. Assessment model of emergency response capability for coal and gas outburst accidents in mines [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 225–230.

作者简介: 祁云 (1988—),男,安徽淮北人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事矿井灾害防治、安全评价、应急技术与管理等方面的研究。E-mail: qiyun_sx@163.com。

