岩土力学

特大型碎石土老滑坡复活演化机理分析及稳定性评价

唐承忠[1]，郝永河[2]，郝永艳[3]，杨 华[4]

（1. 鄂尔多斯市水旱灾害防御技术中心，鄂尔多斯 017000；
2. 鄂尔多斯市农牧技术推广中心，鄂尔多斯 017000；
3. 山西省煤炭地质水文勘查研究院，太原 030006；4. 太原市杏花岭区防汛抗旱保障中心，太原 030013）

摘 要：为准确掌握碎石土老滑坡的复活演化机理及其稳定性，结合滑坡区地质环境条件及发育特征，先开展其复活因素及演化流程分析，并在此基础上，通过传递系数法评价滑坡现状稳定性，并利用 WOA-RVM-GRNN 模型实现滑坡变形预测，以分析其稳定性发展特征。结果表明：老滑坡复活诱发因素较为完备，是在固有内在因素存在前提之下，由外在因素诱发复活而成；老滑坡演化流程较为清晰，其基覆界面存在台阶特征，是由地壳新构造运动间歇抬升，加之不断下侵、侧蚀所致，且滑体是崩坡物堆积而成。经稳定性分析，滑坡在不利工况条件下，滑坡稳定性属欠稳定~基本稳定状态，且滑坡后续变形趋势等级为Ⅲ级，变形不具收敛特征，失稳风险相对较大。通过研究，有效掌握了碎石土老滑坡的复活机理，并为其稳定性评价提供了一种思路，值得进一步推广验证。

关键词：碎石土老滑坡；复活因素；复活演化机理；变形预测；稳定性评价
中图分类号：P642 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-8249（2026）05-0050-06
DOI：10. 19860/j. cnki. issn1005-8249. 2026. 05. 008

Analysis of the Tevival Evolution Mechanism and Stability Evaluation of Extra Large Gravel Soil Old Landslides

TANG Chengzhong[1], HAO Yonghe[2], HAO Yongyan[3], YANG Hua[4]

（1. Ordos Technical Center for Flood and Drought Disaster Prevention, Ordos 017000, China;
2. Ordos Agricultural and Animal Husbandry Technology Promotion Center, Ordos 017000, China;
3. Shanxi Coal Geological Prospecting Institute of Hydrology, Taiyuan 030006, China;
4. Taiyuan Xinghualing District Flood Control and Drought Relief Guarantee Center, Taiyuan 030013, China）

Abstract: To accurately understand the revival and evolution mechanisms of old landslides in crushed soil and their stability, this study first analyzes the factors triggering their revival and the evolutionary process, based on the geological environmental conditions and developmental characteristics of the landslide area. Subsequently, the current stability of the landslide is evaluated using the transfer coefficient method, and the deformation prediction is achieved through the WOA-RVM-GRNN model to analyze its stability development characteristics. The results indicate: the factors inducing the revival of old landslides

项目来源：内蒙古自治区“科技兴蒙”项目重点专项项目（2021EEDSCXSFQZD011）。
作者简介：唐承忠（1968—），男，本科，高级工程师，研究方向：农业水土工程。
收稿日期：2024-06-05

are relatively comprehensive, forming under the premise of inherent internal factors triggered by external factors; the evolutionary process of old landslides is relatively clear, with stepped features at the base-cover interface caused by intermittent uplift of crustal new tectonic movements, coupled with continuous downward intrusion and lateral erosion, and the sliding mass is formed by the accumulation of collapse materials. Stability analysis reveals that under unfavorable working conditions, the landslide exhibits a state of unstable to basically stable, with a subsequent deformation trend classified as Grade III, lacking convergence characteristics, and presenting relatively high instability risks. Through this research, the revival mechanism of old landslides in crushed soil is effectively grasped, providing a new approach for stability assessment that warrants further promotion and validation.

Key words: gravel soil old landslide; revival factors; revival evolution mechanism; deformation prediction; stability evaluation

0　引言

近年来，我国滑坡灾害频发，造成严重的经济损失。碎石土滑坡具备区别于其他滑坡类型的独特发育特征，现有研究虽已对其形成机理[1]、堆积特征[2]开展一定探讨，但整体研究基础仍较为薄弱，对其失稳演化规律的认识尚不够充分。开展碎石土滑坡相关研究，能够进一步揭示其灾变机制，为灾害识别、风险评估及工程防控提供理论支撑，具备重要的理论与工程实践价值。

据龙孝等[3]、陈家兴等[4]的研究成果，滑坡诱发因素较多，主要包括括地形地貌、地层岩性、地质构造、地震、降雨等，但仅分析碎石土滑坡的诱发因素是不够的，应进一步开展其滑坡复活演化机理研究，以掌握其成灾演化流程，可为其后续防治指明方向。

值得指出的是，滑坡稳定性评价是防治基础，传递系数法是滑坡稳定性评价的常用方法，贾升安等[5]、李锐鹏等[6]的研究成果充分说明传递系数法在滑坡稳定性评价中的适用性。但是，传递系数法只能评价具体剖面在现有状态下的稳定性，缺乏滑坡稳定性发展特征评价。根据李春阳等[7]、宁波等[8]和耿海深等[9]的研究，滑坡稳定性的影响因素相对较多，且各类因素对滑坡稳定性的影响程度是各不相同的，也难以量化评价各因素对滑坡稳定性的影响程度，但不论各影响因素的影响程度如何，其共同作用产生的滑坡变形是直观的，那么通过滑坡变形预测来衡量滑坡稳定性的发展特征是可行的。

在滑坡变形预测过程中，单一预测模型已难以满足精度要求，多类方法联合构建的组合预测模型具有更好的应用前景，根据徐满等[10]、李晓斌[11-12]、雷海智等[13]的研究成果，相关向量机（Relevance Vector Machine，RVM）是一种稀疏概率模型，能有效基于主动相关决策理论实现岩土变形预测，具有很强的非线性预测能力，将其作为滑坡变形预测的基础模型是可行的；但是，由相关向量机的使用经验可知，其核函数及权重向量均由模型随机产生，对预测精度具有较大影响，为保证模型参数的最优性，提出对这两个参数进行优化，且考虑到鲸群优化算法（Whale Optimization Algorithm，WOA）能通过模拟座头鲸捕食行为来进行参数寻优，具有全局寻优能力强、便于理解及收敛快等优点，因此，提出以其开展 RVM 模型的核函数及权重向量优化处理，提高其预测精度。同时，由夏梦凡等[14]、马琳[15]的研究成果，得出广义神经网络（General Regression Neural Network，GRNN）属改进型神经网络，非线性逼近能力较强，能有效实现预测误差的补偿预测，那么利用其进一步提升预测精度，即可利用相关向量机、鲸群优化算法和广义神经网络联合构建滑坡变形预测模型。

综合上述，以碎石土滑坡为工程背景，基于滑坡区地质环境条件及发育特征，先开展其复活因素及演化流程分析，并在此基础上，进一步综合传递系数法评价结果和变形预测结果分析滑坡稳定性特征。

1　滑坡稳定性评价方法

1.1　传递系数法的计算参数及工况

在传递系数法的稳定性计算过程中，根据取样试验结果，将计算参数设置为：滑体土天然重度为 20.05 kN/m^3，饱和重度为 21.35 N/m^3；滑带土天然抗剪强度中的内摩擦角为 28.93°，黏聚力为 15.48 kPa；滑带土饱和抗剪强度中的内摩擦角为 22.24°，黏聚力为 13.07 kPa。

岩土力学

共设计 3 个工况，即：天然工况（工况一），用天然参数开展稳定性计算；暴雨工况（工况二），用饱和参数开展稳定性计算，其代表滑坡处于降雨条件下的状态；地震工况（工况三），用天然参数开展稳定性计算，且计入地震力，其代表滑坡处于地震条件下的状态。

1.2 变形预测指标构建

滑坡变形预测模型为 WOA-RVM-GRNN 模型，其基础模型方法的原理见文献［12-18］，不再赘述。

一般来说，若滑坡后续变形速率趋于减小，说明滑坡变形呈减速变形，对滑坡稳定性有利；反之，则对稳定性不利。因此，根据变形预测结果进一步构建滑坡稳定性发展特征评价指标 S_s。

$$S_s = S_1/S_2 \tag{1}$$

式中：S_1 为后续预测速率；S_2 为现有监测速率。

结合 S_s 值，进一步将滑坡后续变形趋势等级划分标准设计见表 1。

表 1 滑坡稳定性发展特征评价标准

Table 1 Evaluation criteria for landslide stability development characteristics

后续变形趋势等级	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级
S_s 指标范围	$S_s \leqslant 0.5$	$0.5 < S_s \leqslant 1.0$	$1.0 < S_s \leqslant 1.3$	$S_s > 1.3$
稳定性发展特征评价	滑坡后续变形具较强的收敛趋势，其稳定性将趋于有利。	滑坡后续变形具一般收敛趋势，其稳定性将趋于维持现状。	滑坡后续变形具一般加速特征，其稳定性将趋于一般减弱。	滑坡后续变形具加速特征，其稳定性将快速减弱，具较大失稳风险。

2 实例分析

2.1 老滑坡基本发育特征

结合现场调查成果，将老滑坡基本发育特征总结为：

（1）滑坡形态特征

滑坡平面具“扇形”特征（平面形态如图 1 所示），主滑方向为 355°，长约 800 m，宽约 500 m，平均厚度为 27 m，体积约 1 080×10^4 m^3，属特大型滑坡。

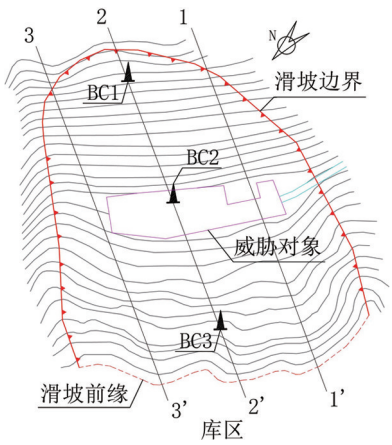


图 1 滑坡平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of landslide

（2）变形破坏特征

①地表变形特征。该滑坡属库岸滑坡，在蓄水前，未见变形迹象，其后，前缘水库于 2008 年开始蓄水，随后滑坡就出现前缘溜塌，往后历年均会在强降雨、库水位变动期间出现变形，因此，滑坡地表变形特征较为显著。

②时间-变形特征。为切实掌握滑坡地表变形量，在滑坡主滑面上布设了变形监测点，如图 1 所示，编号为 BC1~BC3，统计得到 36 期变形监测成果（监测频率为 2 d/次），对应时间-变形曲线如图 2 所示。从 BC1 监测点→BC2 监测点→BC3 监测点，其对应累计变形值由 118.85 mm→145.81 mm→237.15 mm，说明从滑坡后缘至前缘，变形逐步增大，即具显著的牵引式特征。

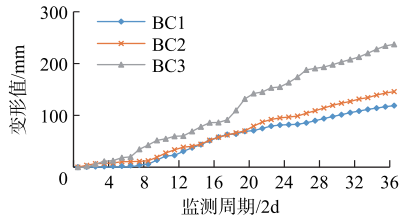


图 2 滑坡时间-变形曲线

Fig. 2 Landslide time deformation curve

2.2 老滑坡复活演化机理分析

2.2.1 复活因素分析

地形地貌。据勘查资料，滑坡区斜坡地貌显著发育，其前缘高程约 302.5 m，后缘高程约 682.7 m，高差约 380.2 m，起伏相对较大，且斜坡坡度多介于 25°~40°，局部具“陡-缓”特征，利于坡体浅表层滑移；同时，滑坡前缘临空面较为发育，为滑坡失稳提供了滑移空间，不利于滑坡稳定。

地层岩性。滑体土岩性主要为碎石土，结构较为松散，具较强的渗透性，在降雨条件下，雨水易入渗至坡体内，会极大程度上增加滑体土重度，进而增加下滑力，减弱滑坡稳定性，且滑体土厚度主要介于 13~35 m，平均厚度约 27 m，这为滑坡失稳奠定了物质条件。

地质构造。滑坡区距最近断层的距离约 36 km，其在滑坡区引发了一定量的次生构造，进而形成了破碎带，极大程度上减弱了岩体完整性。

地震。滑坡区地震烈度属Ⅶ度区，历史上发育多次大地震，其中，最近一次是 2004 年发生了一次 6.3 级地震，滑坡区距震源距离约 13 km；同时，自 2008 年水库蓄水以来，库区范围内也多次发生水库地震，震级相对较小，多介于 3.4 级~4.1 级。在地震发生时，会在坡体内部附加地震力，不利于坡体稳定。

降雨及地下水渗流。一般来说，降雨是老滑坡复活的常见影响因素，其作用机理不在此赘述；值得指出的是，由于滑体土为碎石土，渗透性强，当发生降雨时，会在坡体内形成地下水径流，增加滑坡下滑力，不利于滑坡稳定。

前缘库水位波动。为满足滑坡前缘水库运营需要，库水位会周期性的波动，且滑坡前缘属水位波动范围以内。在库水位波动过程中，一方面会改变前缘土体的物理力学性质及受力状态；二方面也会在滑坡前缘土体中形成地下径流；两者综合影响滑坡前缘稳定，诱发局部垮塌，且在周期性库水位升降作用条件下，会对滑坡前缘稳定性造成疲劳破坏，持续减弱滑坡稳定性。

人类工程活动。人类工程活动主要存在于滑坡中部，其房屋建设、农业耕种均会较大程度上影响坡体地形地貌，对滑坡稳定性具有较大影响。

据上，老滑坡复活诱发因素主要包括地形地貌、地层岩性、地质构造、地震、降雨及地下水渗流、前缘库水位波动及人类工程活动，且滑坡是在固有内在因素存在前提之下，由外在因素诱发复活而成。

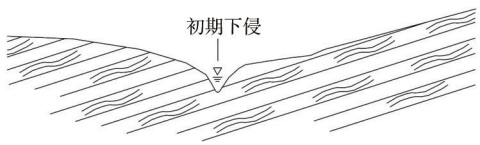
2.2.2　演化流程分析

在上述分析基础上，滑坡基覆界面存在台阶特征，推测其应是地壳新构造运动间歇抬升，加之不断下侵、侧蚀所致，且滑体是崩坡物堆积而成，因此，可将此滑坡演化流程划分为 3 个阶段，其演化流程如图 3 所示。

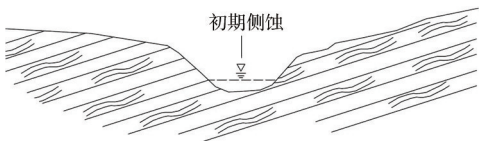
演化阶段一。由于滑坡区地壳初步抬升，会使滑坡区前缘出现初期下侵，如图 3（a）所示，且在初期，侧蚀速度小于下切速度，此阶段会形成“V”字形特征；其后，随地壳抬升趋于稳定，此时的侧蚀速度速度会加快，造成初期侧蚀，如图 3（b）所示。

演化阶段二。在初期下侵、侧蚀基础上，滑坡区后期又出现了多次地壳抬升、侧蚀，只是规模存在一定差异，此阶段会不断加深、拓宽沟谷，不断形成滑坡基础平台，即形成滑面台阶特征。

演化阶段三。在近期（相对滑坡形成而言），滑坡区侵蚀面、堆积平台初步形成，如图 3（c）所示，其后缘出现多次崩滑，在平台上形成了初步堆积体，即现有滑体原始地貌形态，如图 3（d）所示，并在其后历年演化作用下，形成现有滑坡体。

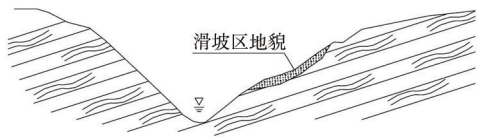


（a）滑坡区初期下侵特征



（b）滑坡区初期侧蚀特征

（c）滑坡区后期下侵特征



（d）滑坡区初步形成特征

图 3　滑坡演化流程示意图

Fig. 3　Schematic diagram of landslide evolution process

2.3　滑坡稳定性评价

2.3.1　传递系数法的结果分析

计算剖面设置为 3 个（计算位置如图 1 所示），

岩土力学

即 1-1’剖面至 3-3’剖面；经计算结果统计，得到传递系数法的稳定性计算结果见表 2。从工况一至工况三，其对应稳定系数呈减小趋势，即地震工况为其设计工况，其原因应是：滑体土厚度相对较厚，降雨条件下，其雨水难以渗入至滑带处，只是改变了滑体重度，且由于滑坡属特大型，规模相对较大，其地震附加力相对较大，因此，地震工况相对更为不利。

表 2 传递系数法计算结果

Table 2 Calculation results of transmission coefficient method

工况	1-1′剖面	2-2′剖面	3-3′剖面
工况一	1.354	1.260	1.305
工况二	1.212	1.125	1.184
工况三	1.054	1.021	1.032

同时，按照滑坡稳定状态划分标准，3 个剖面在工况一和工况二条件下属基本稳定~稳定状态，且 1-1′剖面的工况 3 也属基本稳定状态，其余 2 个剖面在工况三属欠稳定状态。

2.3.2 稳定性发展特征分析

通过 WOA-RVM-GRNN 模型开展滑坡变形预测，并以预测结果评价滑坡稳定性发展特征。由于预测模型是由 RVM 模型→WOA-RVM 模型→WOA-RVM-GRNN 模型，其具逐步寻优流程；为验证各优化流程步骤的有效性，提出以 BC1 监测点为例，详述对比 3 类模型的预测效果，结果见表 3。BC1 监测点在第 32~36 期的预测结果中，从 RVM 模型→WOA-RVM 模型→WOA-RVM-GRNN 模型，对应监测周期条件下的相对误差值 X 呈减小趋势，并对三者的 X 参数均值进行求解，RVM 模型的 X 参数均值为 3.22 %；WOA-RVM 模型的 X 参数均值为 2.64 %；WOA-RVM-GRNN 模型的 X 参数均值为 2.08 %。因此，对比三类模型的预测效果可知，随寻优流程递进，预测精度逐步变优，验证了该预测模型的可行性。

表 3 BC1 监测点在 3 类模型中的预测结果

Table 3 Prediction results of BC1 monitoring points in three types of models

监测周期/2 d	变形值/mm	RVM 模型		WOA-RVM 模型		WOA-RVM-GRNN 模型	
		预测值 Y/mm	相对误差 X/%	预测值 Y/mm	相对误差 X/%	预测值 Y/mm	相对误差 X/%
32	108.32	104.84	3.21	105.41	2.68	106.04	2.10
33	111.54	107.98	3.19	108.53	2.70	109.24	2.06
34	114.04	110.22	3.35	111.08	2.59	111.72	2.03
35	116.68	113.01	3.15	113.61	2.63	114.21	2.12
36	118.85	115.05	3.20	115.75	2.61	116.39	2.07

采用 WOA-RVM-GRNN 模型开展其他监测点的预测，结果见表 4。BC1~BC3 监测点的 X 参数均值介于 2.05 %~2.08 %，不仅值较小，且变化范围也相对较小，说明 WOA-RVM- GRNN 模型在滑坡变形预测中不仅具有较优的预测精度，还具较强的稳定性，后续外推预测结果的可信度较高。

表 4 3 个监测点的预测结果

Table 4 Prediction results of three monitoring points

监测周期	BC1 监测点			BC2 监测点			BC3 监测点		
/2 d	变形值/mm	预测值 Y/mm	相对误差 X/%	变形值/mm	预测值 Y/mm	相对误差 X/%	变形值/mm	预测值 Y/mm	相对误差 X/%
32	108.32	106.04	2.10	131.49	128.91	1.96	212.68	208.32	2.05
33	111.54	109.24	2.06	134.23	131.52	2.02	219.90	215.48	2.01
34	114.04	111.72	2.03	139.14	136.22	2.10	227.69	222.80	2.15
35	116.68	114.21	2.12	143.08	140.14	2.05	234.06	229.24	2.06
36	118.85	116.39	2.07	145.81	142.73	2.11	237.15	232.17	2.10
37		117.92			145.65			238.27	
38		119.56			149.01			245.18	
39		122.05			152.23			252.30	
40		123.46			154.83			259.33	

据表 4 中外推预测结果，得出滑坡后续变形均呈增加趋势，并按照式（1）计算滑坡稳定性发展特征评价指标 S_s，其结果见表 5。BC1、BC2 监测点的后续变形趋势等级为Ⅱ级，BC3 监测点的后续变形趋

势等级为Ⅲ级。

表 5　指标 S_s 的计算结果

Table 5　Calculationresults of indicator S_s

监测点	S_1/（mm/2 d）	S_2/（mm/2 d）	S_s 值	趋势等级
BC1	1. 77	2. 63	0. 67	Ⅱ级
BC2	3. 02	3. 58	0. 84	Ⅱ级
BC3	6. 79	6. 12	1. 11	Ⅲ级

对比三个监测点的 S_s 指标值，从滑坡后缘至前缘，其 S_s 指标值呈逐步减小趋势，说明由滑坡后缘至前缘，其稳定性逐步减弱，具显著的前缘牵引破坏特征。按照不利原则，滑坡后续变形趋势等级宜按Ⅲ级进行评价，即滑坡后续变形具加速特征，其稳定性将快速减弱，具较大失稳风险。

3　结论

通过对特大型碎石土老滑坡复活演化机理分析及稳定性评价，主要得出如下结论：

（1）老滑坡复活是在固有内在因素存在前提之下，由外在因素诱发复活而成，即老滑坡复活是各类影响因素综合作用的结果。

（2）老滑坡演化流程主要包含三个阶段，滑坡基覆界面存在台阶特征，其由地壳新构造运动的间歇抬升，由不断下侵、侧蚀所致。

（3）在传递系数法的稳定性分析结果中，滑坡中部稳定性相对最弱，且滑坡稳定性属欠稳定~基本稳定状态；在变形预测的稳定性发展特征分析结果中，滑坡后续变形趋势等级为Ⅲ级。

参　考　文　献

[1] 滕明明，王孔伟，王宵亮，等. 三峡库区树坪滑坡形成机理与演化特征［J］. 水电能源科学，2022，40（10）：178-182.

[2] 郑光，许强，彭双麒. 滑坡-碎屑流的堆积特征及机理分析［J］. 工程地质学报，2019，27（4）：842-852.

[3] 龙孝，吴欢. 碎石土滑坡演化过程及其防治对策分析［J］. 人民长江，2021，52（增刊 1）：90-92，107.

[4] 陈家兴，赵兰英，司长亮. 碎石土古滑坡演化复活机理分析［J］. 人民长江，2019，50（10）：136-142.

[5] 贾升安，李春阳，段顺荣. 青海尕沙日特大型滑坡稳定性评价［J］. 大地测量与地球动力学，2023，43（3）：250-254.

[6] 李锐鹏，张宁晓，魏中凯. 顾及混沌特征识别的黄土滑坡变形预测与稳定性评价［J］. 河南科学，2022，40（11）：1802-1810.

[7] 李春阳，贾升安，段顺荣. 黄河深切区巨型老滑坡的稳定性评价及后续预警研究［J］. 西北师范大学学报（自然科学版），2023，59（3）：119-125.

[8] 宁波，刘玉健，王安东. 巨型古滑坡的稳定性评价及发展趋势分析［J］. 大地测量与地球动力学，2022，42（5）：515-519.

[9] 耿海深，吕文斌，栗桑，等. 滑坡失稳机理分析及预警预测研究［J］. 西北师范大学学报（自然科学版），2021，57（6）：103-109.

[10] 徐满，张冬梅，余想，等. 基于多重分形的改进 GRU 滑坡位移预测模型［J］. 浙江大学学报（工学版），2024，58（7）：1407-1416.

[11] 李晓斌，白海军. 高位远程古滑坡既有变形特征和后续变形发展规律研究［J］. 大地测量与地球动力学，2023，43（11）：1129-1135.

[12] 李晓斌. 基于极限位移准则和变形预测的滑坡变形潜势分析［J］. 大地测量与地球动力学，2022，42（6）：588-593.

[13] 雷海智，谢继香. 滑坡变形预测分析和趋势判断研究［J］. 西北师范大学学报（自然科学版），2023，59（4）：129-134.

[14] 夏梦凡，李丽敏，任瑞斌，等. 基于 KPCA-SSA-GRNN 的滑坡预报模型［J］. 国外电子测量技术，2022，41（9）：109-115.

[15] 马琳. 基于 ICEEMD-ICA 准则进行数据处理的基坑变形组合预测研究［J］. 地质与勘探，2023，59（5）：1074-1082.

[16] 罗亦泳. 基于变分模态分解与相关向量机的变形特征提取及智能分析研究［D］. 武汉：武汉大学，2019.

[17] 杨晨昊，郑东健. 基于 KPCA-WOA-RVM 的混凝土坝变形预测模型及其应用［J］. 水电能源科学，2022，40（10）：118- 122.

[18] 王飞. 基于局部均值分解和 PSO-RVM-ARIMA 模型的基坑变形预测研究［J］. 河南科学，2021，39（10）：1649-1654.