降雨型群发浅层土质滑坡运动距离经验预测模型

黄瑞健[1]，冯文凯[1*]，李双权[1]，柳侃[2]，唐雪峰[2]，郭朝旭[2]，易小宇[1]

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室，成都 610059；
2. 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室，福州 350002

第一作者，E-mail：1550392749@qq.com

* 通信作者，E-mail：fengwenkai@cdut.cn

2024-06-28 收稿；2025-01-06 修回；2025-02-14 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(U2005205)；自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室)开放基金项目(FJKLGH2024K005)；福建省自然资源厅、福建省地质矿产勘查开发局科研项目(闽地灾专项务(2023)28 号)

中图分类号：P642.22　　文章编号：2096-8523(2025)03-0255-13　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240364

摘　要：降雨诱发的群发浅层土质滑坡具有突发性强和危险性高等特点，构建运动距离预测模型对滑坡风险防控具有重要意义。以福建省武平县“5·27”群发滑坡事件为研究对象，基于灾前灾后遥感影像、数字高程模型、无人机三维模型和野外调查，获取了 131 个滑坡特征数据。根据剪出口位置和地形特征，将滑坡分为坡脚剪出型、坡中剪出型和切坡剪出型，通过相关性分析确定了影响群发浅层土质滑坡运动距离的主要因素，采用逐步非线性回归分析方法建立了 3 类滑坡运动距离的最优预测模型。研究表明，滑源区高差是降雨型群发浅层土质滑坡运动距离的主要影响因素；建立的最优预测模型残差平方和较小，调整 R^2 值大于 0.9，显示出较高的可信度和精度。模型验证表明，预测值与实际值的相对误差较小，坡脚剪出型、坡中剪出型和切坡剪出型的最大相对误差分别为 15.6%、13.5% 和 12.4%。建立的基于统计分析的降雨型群发浅层土质滑坡运动距离预测模型为类似地区的滑坡灾害防治提供了科学依据。尽管该模型在不同类型的滑坡中表现出较高的预测精度，但研究数据主要来源于特定区域，在其他地区的适用性仍需进一步验证；未来研究可以考虑增加样本量和影响因子，进一步完善模型。

关键词：群发浅层土质滑坡；运动距离；相关性分析；逐步非线性回归；降雨型；预测模型

近年来，受台风暴雨和梅汛强降雨影响，我国东南沿海地区群发浅层土质滑坡频发，呈现突发性强、变形速度快、受灾面积广等特点，造成较大的人员伤亡及财产损失[1-3]。滑坡失稳后的运动距离(滑坡的最大水平运动距离，即滑坡后缘顶点到堆积前缘之间的最大水平距离)决定滑坡的致灾范围，是评估滑坡潜在风险和滑坡灾害防治的关键因素。

目前，滑坡运动距离的预测模型和方法主要分为 4 类：(1)确定性预测模型。一般是基于能量守恒定律和牛顿运动学原理计算滑坡运动距离。如 HEIM 等[4] 提出的滑坡运动距离预测的雪橇模型；SCHEIDEGGER[5] 提出的滑坡运动的摩擦模型；ZHANG 等[6] 使用等效摩擦系数来概念化滑坡的运动，从能量角度建立的基于统计和物理力学的预测模型。(2)数值模拟预测模型。采用离散元等数值方法模拟滑坡运动的整个过程，进而预测滑坡运动距离。江晓禹等[7] 采用数值相似方法预测了滑坡的运动距离；LIU 等[8] 通过构建粒子流模型模拟了新墨滑坡的失稳运动过程及运动距离；WANG 等[9] 采用连续介质离散元法(CDEM)模拟了甘肃省娘娘坝中寨滑坡的运动过程，并预测了不稳定黄土滑坡的潜在破坏区。(3)信息预测模型。通过优化处理不完整的滑坡数据，分析信息的模糊性，帮助更好的决策。如刘悦等[10] 提出了黄土滑坡运动距离预测的模

著录信息：黄瑞健，冯文凯，李双权，等. 降雨型群发浅层土质滑坡运动距离经验预测模型 [J]. 地质科技通报，2025，44(3)：255-267.
HUANG Ruijian, FENG Wenkai, LI Shuangquan, et al. Empirical prediction model for the runout distance of rainfall-induced group-occurring shallow soil landslides[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 255-267.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

糊信息优化处理模型；基于海原特大地震诱发黄土滑坡的野外调查数据，常晁瑜等[11] 建立了地震诱发黄土滑坡滑动距离的 BP 神经网络预测模型；WAN 等[12] 采用数据处理组合法对滑坡运动距离进行预测，构建了 GMDH(数据处理分组法(group method of data handling))模型。(4)经验统计预测模型。主要是基于对大量滑坡数据的统计分析，获得滑坡运动距离与其影响因素的经验公式。如樊晓一等[13] 基于实际滑坡运动距离的统计分析，采用非线性回归方法建立了开阔型滑坡运动距离的统计模型；陆盟等[14] 建立了地震滑坡水平运动距离案例库，通过逐步回归分析方法建立了滑坡水平运动距离多因素预测模型；刘红岩等[15] 在现有统计预测模型的基础上引入了滑坡体滑动前后最大高差对其进行修正，提高了精度。

上述研究为预测降雨型群发浅层土质滑坡运动距离提供了借鉴，统计预测模型不关注滑坡发生机理，对于诱发条件相同、地质背景相似的“同类”滑坡，其具有计算速度快、结果精度高等优势，且符合地质灾害应急情景需要[15]。降雨型群发浅层土质滑坡形成机理复杂、变形速度快、危害性高，针对此类滑坡，经验统计模型能够发挥其优势，因此本研究采用统计学方法来预测滑坡运动距离。但统计预测模型还存在一些不足：①收集滑坡基础数据的遥感图像、DEM 的分辨率较大，不能识别小规模的滑坡，精度不高；②统计的滑坡诱因、地质背景相似，发生时间、区域不同，其指标构建的模型会存在模型误差；③变形速度快的滑坡体积参数难以事先获取，能否用滑坡面积作为体积的替代因子值得考虑。

针对以上不足，本研究以福建省武平县“5.27”群发滑坡为研究对象，基于分辨率为 2 m×2 m 的数字高程模型(DEM)、灾前灾后遥感影像和无人机三维实景模型获取 131 个高精度的群发浅层滑坡基础数据，根据滑坡剪出口位置及地形条件划分滑坡类型，探究滑坡指标对运动距离的影响，并通过逐步非线性回归分析建立滑坡运动距离最优预测模型，对模型的适用性及精度进行验证，以期为降雨型群发浅层滑坡运动距离预测提供一种新思路。

1　研究区滑坡基本特征

1.1　数据源

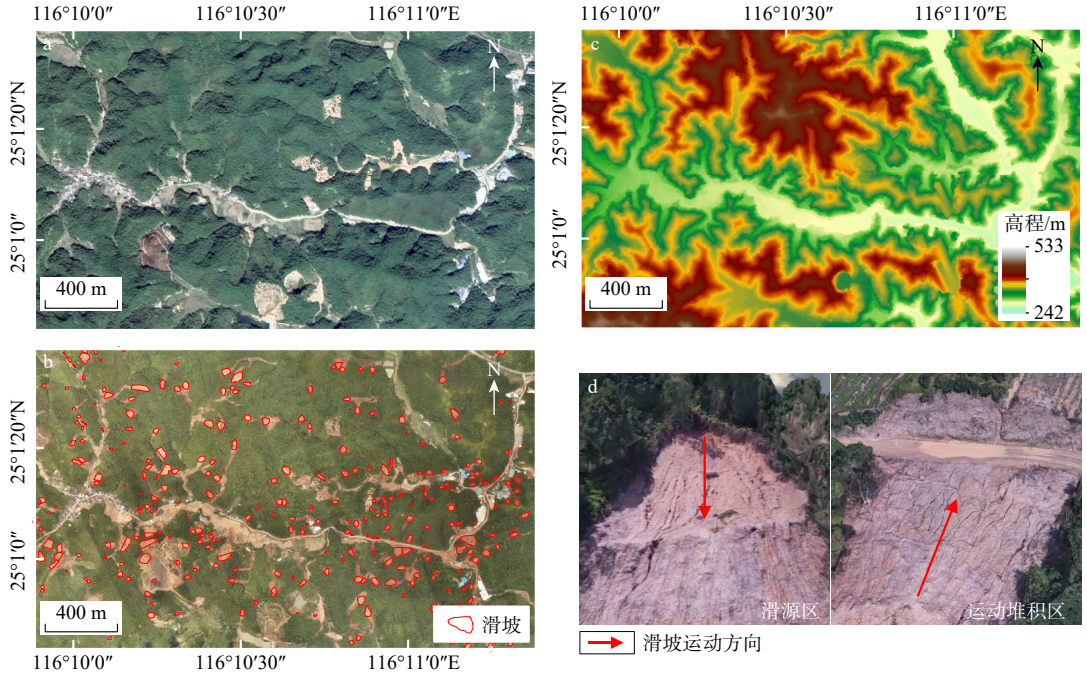
滑坡数据的真实性、准确性是建立基于统计分析方法的滑坡运动距离预测模型的基础，高精度数据能够提升模型的预测效果[9]。前人[13-15] 研究获取的滑坡基础数据是基于低分辨率的卫星影像或地面测量数据(例如：相关文献[13-15] 中影像分辨率为每像素 10 ~ 30 m，无人机摄影测量技术能够生成分辨率为每像素 3 ~ 5 cm 的影像、DEM，精度水平显著高于早期研究[13-15] 中通常使用的低分辨率数据源)。本研究采用的数据源为分辨率为 2 m×2 m 的 DEM 及灾后一个月的无人机 DOM 影像，精度为 0.2 m，并构建无人机三维模型，从多视角观察滑坡并确定其边界，同时还进行了实地测量，以减少影像测量中的不确定性。为确保滑坡数据的真实、准确和高精度，本研究先通过灾前灾后遥感影像、DEM 和无人机三维模型(图 1)解译滑坡特征数据，再通过野外校核得到降雨型群发浅层土质滑坡的高精度基础数据。首先，在三维模型中从多视角观察滑坡，确定滑坡剪出口位置，同时获取滑坡基本特征参数。之后基于灾后遥感影像解译滑坡滑源区范围，测量滑坡长度、宽度和运动距离参数。通过空间分辨率 2 m×2 m 的 DEM 获取滑坡不同位置的高程，计算滑源区高差及临空高度，使用 ArcGIS 软件空间分析功能获取滑坡坡度、运动区坡度和面积参数。最后进行实地测量校核上述多源数据，得到研究区群发浅层土质滑坡的高精度基础数据。

1.2　滑坡基本特征

在解译过程中发现受地形或建筑物影响，滑坡运动堆积距离与实际情况不一致。运动过程若受到建筑物阻挡则实际运动距离变短；若运动过程沿沟道进行，则实际距离可能变长，统计这 2 种数据进行建模可能会使结果不准确。对此，本研究仅统计滑坡运动堆积过程未受到阻碍或者不沿沟道流动的滑坡情况，以保证模型具有较高精度。根据剪出口位置和地形特征，将滑坡类型划分为 3 类：坡脚剪出型、坡中剪出型和切坡剪出型。

(1)坡脚剪出型

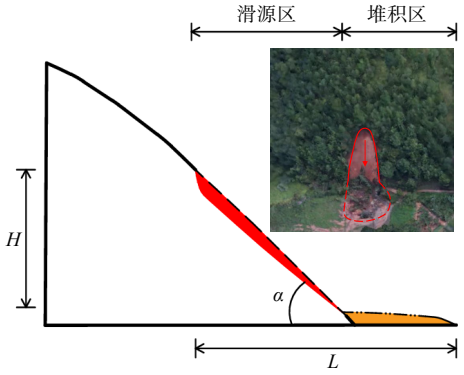
图 2 为典型的坡脚剪出型模式概化图，滑坡运动分为启动运动和堆积 2 个阶段，滑源区与堆积区在坡脚分界。滑坡破坏后沿坡脚剪出，受滑源区与堆积区坡度差的影响作减速运动，扩展堆积。获取此类滑坡的参数为滑坡运动距离 L、滑坡面积 S、滑源区高差 H、滑坡坡度 α、滑坡长宽比 λ，共 70 例滑坡详细数据，以下 2 种滑坡类型同样获取这 5 类参数数据。样本量越多，所构建的模型效果越好，对此随机选择 5 例数据作为验证集，其余为训练数据(表 1)。



a. 灾前遥感影像；b. 灾后遥感影像；c. DEM；d. 三维模型多视角图

图 1　研究区数据来源

Fig. 1　Data sources in the study area



H. 滑源区高差；*α*. 滑坡坡度；*L*. 滑坡运动距离；下同

图 2　坡脚剪出型模式概化图

Fig. 2　Schematic diagram of the foot slip-out type

(2)坡中剪出型

将坡中剪出型滑坡的运动分为启动、运动和堆积 3 个阶段。滑源区与运动区的分界在坡中，运动区与堆积区在坡脚分界。滑坡破坏后在坡中剪出，对坡面产生刮铲，消散部分能量，最后堆积于坡脚平缓地带。运动区的地形条件对滑坡运动有一定的影响，因此对该类滑坡增加考虑运动区坡度 β 指标，图 3 为该类型滑坡模式概化图，共获得 40 例滑坡基础数据，选择 35 例(表 2)作为训练数据参与模型构建。

(3)切坡剪出型

图 4 为切坡剪出型滑坡模式概化图，滑坡的运动分为启动运动和堆积 2 个阶段，与坡脚剪出型不同之处为存在切坡，形成临空区。滑坡破坏后在坡面上运动距离短，势能绝大部分转化为动能，速度快，冲击力强，运动距离变长。因此对该类型滑坡增加考虑临空高度 H_1 参数，共获取 21 例滑坡详细数据，参与模型构建的 16 例训练数据如表 3 所示。

2　滑坡运动距离影响因子相关性分析

为厘清各因子对滑坡运动距离的影响，对所获得的 131 个滑坡数据进行综合分析，定量评价各因子的相关性程度。参考大量已有研究文献 [16-19]，滑源区高差、滑坡坡度、滑坡体积和地形特征等已被广泛用于滑坡运动距离预测模型构建，并证明对滑坡运动距离有显著影响。降雨型群发浅层土质滑坡的体积参数难以事先获取，因此用滑坡面积替代体积因子，同时根据群发滑坡的实际状况提取了滑源区高差、滑坡坡度和滑坡长宽比(坡体指标)、运动区坡度和临空高度(场地指标)进行了相关性分析，为选取变量进行逐步回归分析奠定了基础。

2.1　滑源区高差分析

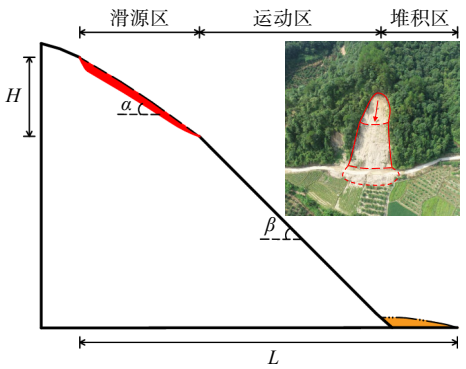
滑坡前后缘高差控制了滑坡的质心，是滑坡势能大小的体现[20-23]。将滑源区高差 H 与滑坡运动距离 L 进行总体与分类型统计(图 5)，分析两者的相关性，结果显示，分类型的决定系数(R^2)都大于总体的 R^2，因此有必要划分滑坡类型。滑坡滑源区高差主要集

表 1　用于坡脚剪出型预测模型构建的滑坡训练数据

Table 1　Landslide training data for constructing the prediction model of the foot slip-out type

序号	L/m	H/m	α/(°)	λ	S/m^2	序号	L/m	H/m	α/(°)	λ	S/m^2
1	37.5	12.6	44	1.2	215	34	20.3	10.1	45	1.5	118
2	64.1	20.4	40	2.9	321	35	65.7	27.7	39	2.0	1 028
3	24.6	8.0	41	0.5	154	36	19.8	8.4	44	1.0	147
4	69.5	26.6	38	1.1	1 404	37	25.3	7.8	43	1.0	145
5	43.4	19.5	42	1.2	541	38	30.0	11.8	43	2.0	121
6	60.7	23.6	39	1.5	794	39	77.8	34.0	39	1.7	1 810
7	78.7	26.2	38	2.4	837	40	37.5	12.6	44	1.2	360
8	33.1	13.5	36	1.0	448	41	53.2	22.0	39	1.3	1 185
9	82.0	32.2	39	1.7	1 236	42	52.7	21.9	40	0.9	1 121
10	78.9	26.1	40	1.7	957	43	47.5	22.5	40	1.2	938
11	88.5	36.5	40	2.2	1 140	44	40.4	19.2	41	2.0	430
12	60.4	25.9	41	2.5	567	45	57.8	24.9	39	1.7	745
13	73.5	29.1	41	1.9	774	46	40.7	19.8	39	2.1	452
14	69.0	27.5	39	1.0	1 879	47	61.8	30.6	41	1.6	1 262
15	53.7	22.1	40	0.9	1 461	48	23.3	11.9	44	0.9	306
16	47.5	22.6	39	1.2	1 176	49	39.7	14.7	41	0.9	492
17	47.9	22.4	41	2.4	580	50	12.1	5.1	40	0.9	58
18	22.7	11.1	51	1.3	135	51	15.8	8.0	51	1.0	124
19	16.0	6.5	40	1.4	64	52	22.6	9.9	52	0.9	115
20	27.1	11.3	38	0.7	390	53	74.6	19.9	36	1.2	735
21	13.6	7.8	48	1.0	108	54	33.1	13.5	40	1.5	247
22	36.7	18.0	39	1.1	915	55	10.3	5.2	51	0.4	74
23	28.1	10.5	41	1.2	186	56	33.5	9.5	37	1.0	219
24	30.7	12.0	38	1.1	340	57	35.8	13.8	42	1.7	330
25	44.1	21.0	40	1.5	673	58	103.3	32.1	35	2.2	1 452
26	35.2	11.7	40	1.2	285	59	23.4	7.5	41	0.8	146
27	17.7	8.6	42	1.8	81	60	21.2	9.2	44	1.7	76
28	63.1	26.8	38	2.2	1 014	61	29.1	12.7	45	1.0	158
29	25.2	12.4	46	0.9	300	62	34.3	17.8	44	1.7	319
30	33.4	13.3	39	1.1	441	63	27.9	12.6	41	1.1	323
31	52.9	24.0	38	1.7	750	64	10.9	5.5	47	0.6	80
32	12.7	7.0	53	1.7	44	65	21.6	7.0	45	0.9	104
33	17.3	7.2	40	1.2	95						

λ. 滑坡长宽比; S. 滑坡面积; 下同



β. 滑坡运动区坡度; 下同

图 3　坡中剪出型模式概化图

Fig. 3　Schematic diagram of the middle slope slip-out type

中在 10 ~ 20 m, L 随着 H 增大而增大, 两者之间存在较强的线性关系。坡脚剪出型的 R^2 为 0.891 1, 坡中剪出型的 R^2 为 0.835 2, 切坡剪出型的 R^2 为 0.882 2, 相关性高, 表明滑源区高差是影响降雨型群发浅层滑坡运动距离的主要因素之一。相较于其他 2 种类型, 坡中剪出型的 R^2 值较小, 表明还存在影响其运动距离的次要因素。

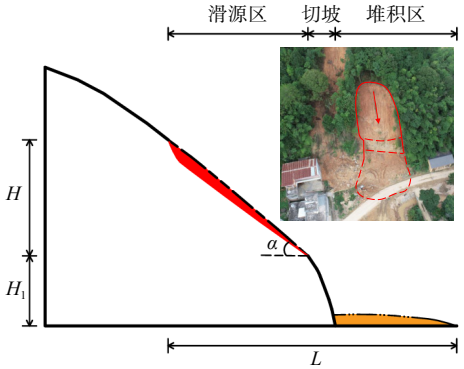
2.2　滑坡面积分析

滑坡体积可以影响滑坡运动的机械能, 其值越大, 滑坡滑行的总能量越大[24-26], 但所研究的降雨型浅层土质滑坡体积参数难以事先获取, 考虑用滑坡面积作为体积的替代因子, 建立了滑坡运动距离 L 与滑坡面积 S 的相关关系(图 6), 结果表明, 不同类型滑坡的 L 随 S 呈幂律增大, 滑坡面积大都小于

表 2　用于坡中剪出型预测模型构建的滑坡训练数据

Table 2　Landslide training data for constructing the prediction model of the middle slope slip-out type

序号	L/m	H/m	α/(°)	λ	S/m^2	β/(°)	序号	L/m	H/m	α/(°)	λ	S/m^2	β/(°)
1	56.5	15.7	39	1.5	371	28	19	63.1	17.1	38	1.1	432	42
2	51.1	14.3	42	1.5	302	31	20	30.7	8.1	43	0.7	159	43
3	46.0	15.7	43	1.6	237	31	21	32.7	10.1	43	1.2	166	43
4	105.6	29.8	38	2.9	757	31	22	33.5	12.7	44	1.8	207	43
5	100.0	24.2	37	1.3	1 181	32	23	54.8	16.2	42	2.0	345	43
6	56.0	19.2	40	1.1	823	33	24	62.8	19.6	39	1.6	641	44
7	75.3	19.1	41	1.3	660	33	25	80.9	22.1	40	1.0	1 042	45
8	80.0	20.2	40	1.2	743	34	26	29.0	10.9	41	1.2	192	45
9	89.6	25.8	39	1.5	1 123	34	27	64.9	22.8	40	1.6	776	45
10	88.5	21.5	37	1.6	677	34	28	26.9	8.5	38	1.1	148	46
11	45.5	12.9	39	0.8	521	36	29	82.0	22.9	38	1.8	720	46
12	50.2	12.9	43	1.4	331	36	30	43.6	14.3	36	1.0	619	47
13	92.0	17.6	36	1.6	545	36	31	28.9	9.0	39	1.1	163	48
14	43.6	15.5	42	2.6	278	39	32	50.0	15.3	40	1.3	480	48
15	58.9	15.7	42	1.3	422	40	33	24.8	9.9	44	1.1	178	50
16	77.6	27.2	42	1.9	1 018	40	34	67.8	23.7	41	1.5	825	51
17	31.1	10.4	41	1.4	150	41	35	30.3	11.0	42	1.3	209	58
18	55.6	14.0	40	1.4	385	40							



H_1. 滑坡临空高度, 下同

图 4　切坡剪出型滑坡示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the cut slope slip-out type

500 m^2, 坡脚剪出型的 R^2 为 0.753 4, 坡中剪出型的 R^2 为 0.760 6, 切坡剪出型的 R^2 为 0.620 7, 相关性较高, 表明对于降雨型浅层滑坡来说, 滑坡面积替代体积因子具有一定的可行性。

2.3　滑坡坡度分析

滑坡的发育往往存在一定的优势坡度区间, 在一定程度上制约着滑坡运动[27-29]。为满足后续建模需要, 对滑坡坡度 α 取正切值, 绘制两者的相关性图(图 7), 同时分析其对滑坡运动距离 L 的影响, 结果显示, 不同类型滑坡 L 随 α 的变化趋势相同, L 随 α 的增大呈幂律减小, 滑坡坡度集中在 35° ~ 45°, 坡脚剪出型的 R^2 为 0.373 7, 坡中剪出型的 R^2 为 0.241 4, 切坡剪出型的 R^2 为 0.441 2, 表明相较于其他类型, 切坡剪出型 α 与 L 的相关性较弱, 且比总体的 R^2 低。

2.4　滑坡长宽比分析

不同形态的等体积滑坡在运动过程中能量消散速度不同, 宽展型滑坡能量消散快, 不利于滑坡长距离运动; 狭长型滑坡能较长时间保持能量集中, 有利于滑动过程中能量的持续供给[30-32]。为分析不同平面形态滑坡对运动距离的影响, 建立滑坡运动距离 L

表 3　用于切坡剪出型预测模型构建的滑坡训练数据

Table 3　Landslide training data for constructing the prediction model of the cut slope slip-out type

序号	L/m	H/m	α/(°)	λ	S/m^2	H_1/m	序号	L/m	H/m	α/(°)	λ	S/m^2	H_1/m
1	50.5	14.6	41	1.1	483	3.0	9	28.7	11.5	39	0.8	479	5.2
2	21.2	7.3	49	1.7	47	3.0	10	21.0	5.8	42	0.7	78	6.1
3	25.8	9.5	41	0.8	196	3.6	11	24.5	9.3	40	0.9	80	6.8
4	48.0	18.3	38	1.4	538	3.6	12	60.1	18.8	37	1.3	464	8.0
5	25.4	9.7	49	1.5	111	4.0	13	38.2	16.2	40	1.9	272	9.4
6	20.8	6.5	44	1.0	258	4.5	14	42.0	11.3	38	1.3	232	9.6
7	49.3	15.8	40	1.7	190	4.5	15	82.7	24.8	39	2.0	798	9.8
8	18.3	7.9	43	1.3	88	4.6	16	57.6	14.0	39	1.7	228	18.2

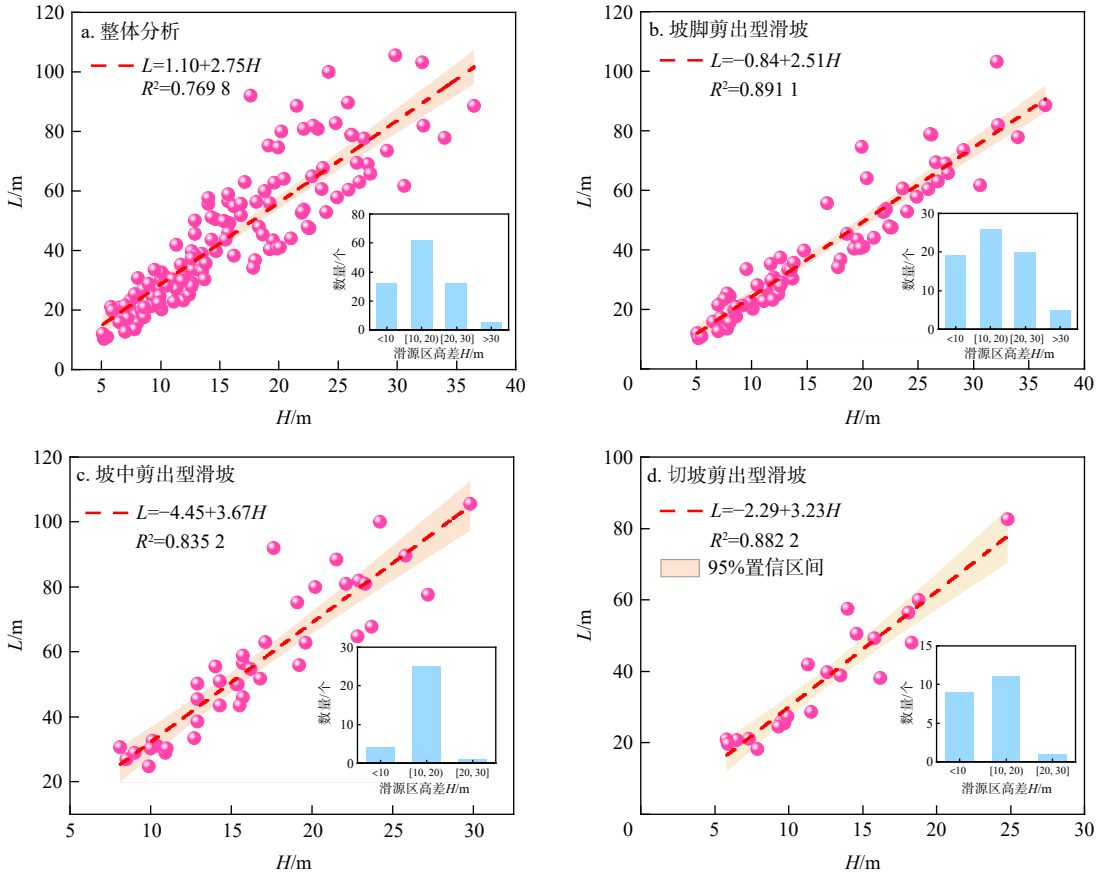


图 5　L 与 H 的相关关系

Fig. 5　Correlation between L and H

与滑坡表面长宽比 λ 的相关关系(图 8),结果显示,λ 集中于 1 ~ 2,主要为狭长形滑坡,两者的相关性相对较弱,坡脚剪出型滑坡的 R^2 为 0.222 6,坡中剪出型滑坡的 R^2 为 0.110 5,切坡剪出型滑坡的 R^2 为 0.291 9,表明滑坡长宽比对滑坡有一定影响,可用作模型的输入因子,但与坡中剪出型滑坡的相关性较小。

2.5　运动区坡度分析

滑坡剪出后,如果 $\alpha<\beta$,滑坡将产生加速运动;如果滑坡坡度 α>滑坡运动区坡度 β,滑坡将会产生减速运动[33-35]。通过 L 与 tanβ 的相关性图(图 9a)分析,发现 L 随 β 的增大呈幂律减小,与前人[13, 15] 的研究不同,其原因可能为滑坡规模较小,且呈流态化,在运动过程中对坡面刮铲,能量消散,速度减小,导致运动距离变短。其 R^2 为 0.209 5,相对较小,表明其对滑坡运动距离有一定影响,可作为模型输入变量。

2.6　临空高度分析

受人类工程活动影响,形成大量切坡,斜坡前缘临空条件良好有利于滑坡剪出,剪出口位置临空的高度越高,滑坡所具有的势能越大。滑坡剪出后势能绝大部分转化为动能,速度快,冲击力强,堆积距离长。为研究临空高度 H_1 对滑坡运动距离 L 的影响,统计分析两者的相关性(图 9b),发现 L 随 H_1 的增加呈增大趋势,R^2 为 0.152 7,表明其对滑坡运动距离具有一定影响,相较于切坡剪出型滑坡的其他指标,R^2 值相对较小,相关性相对较弱。

通过上述分析可知,滑源区高差是影响降雨型群发浅层土质滑坡的主要影响因素,其次为滑坡面积、滑坡坡度,而滑坡长宽比与运动距离的相关性较弱。坡中剪出型滑坡的运动区坡度因子与切坡剪出型滑坡的临空高度因子与滑坡运动距离的相关性偏低,但结合研究区滑坡实际状况,其对滑坡运动距离的影响不可忽略,在进行模型构建时再进行深入分析。

3　滑坡运动距离经验预测模型

3.1　模型选取

通过上述分析,降雨型群发浅层土质滑坡运动距离与其相关指标存在一定的关系,由于滑坡运动机理的复杂性和地形因素的不确定性,与其相关参数取值变化范围不一,并且降雨型浅层滑坡运动是一个复杂的非线性运动过程,非线性统计模型能较好

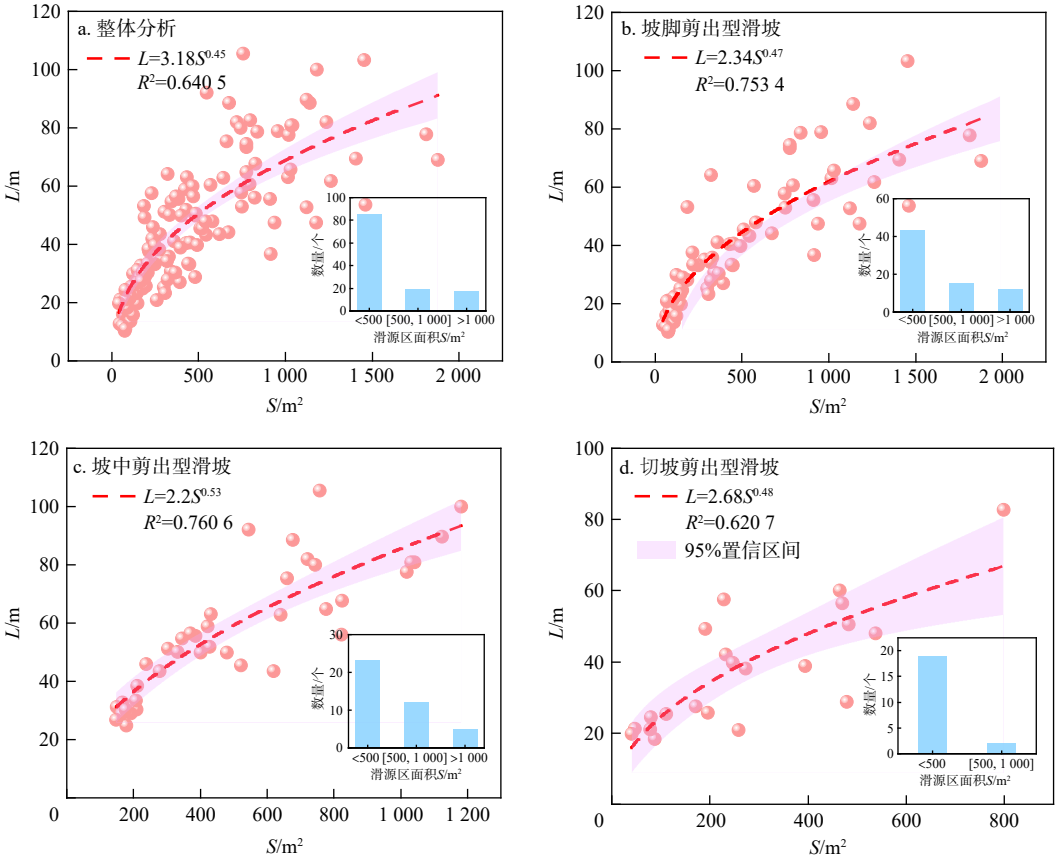


图 6　L 与 S 的相关关系

Fig. 6　Correlation between L and S

地描述滑坡运动运动距离与影响因子间的关系[36-39]。对此，本研究将降雨型群发浅层滑坡运动距离与相关影响因子的关系描述为：

$$L = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} R_3^{a_3} x_4^{a_4} x_5^{a_5}, \tag{1}$$

式中：L 为滑坡运动距离，x_i 为影响因子指标；$a_0, a_1, \cdots, a_i$ 均为模型的回归系数。

3.2　滑坡运动距离最优预测模型

为得到最佳回归模型，采用逐步非线性回归分析方法建立降雨型群发浅层土质滑坡运动距离预测模型，即每引入一个新的变量，采用调整 R^2、残差平方和(RSS)、F 值来对评价模型质量，若引入的变量降低了模型的评价指标值，则剔除掉该因素，由此获得最优回归模型。调整 R^2 用来评价模型的拟合优度，相比于评价指标 R^2 能够考虑到回归方程参数数目和样本数量的影响，更加客观地反映回归方程的拟合优度，调整 R^2 越大，拟合优度越高[40]。RSS 为模型计算值与实际值的总误差，用于比较不同模型之间的优劣，残差平方和越小，其拟合程度越好。F 值是对回归模型显著性的度量，其值越大，整体显著性水平越高。

影响因素分析表明，滑源区高差是影响降雨型群发浅层土质滑坡运动距离的主要因素，R^2 值均较高，因此可以建立考虑滑源区高差的单因素预测模型来进行初步预测，但为了使预测结果更准确，需要引入其他变量构建模型，最后比较不同模型评价效果，确定滑坡运动距离的最优预测模型。具体分析如下：

根据各因子与滑坡运动距离相关性的强弱进行逐步回归分析，得到坡脚剪出型滑坡运动距离的多个预测模型(表 4)。由表 4 可知，考虑的指标越多，RSS 越小，模型的拟合效果越好，对比不同预测模型发现，$L(H, \alpha, \lambda)$模型的调整 R^2 值最大，RSS 最小，表明模型显著性较高。与 $L(H, \alpha, \lambda)$模型相比，$L(H, \alpha)$模型的 RSS 略高，调整 R^2 略小，F 值大，表明模型显著性高，预测性能相差不大，考虑到使用较少指标获得较为准确的结果，可为地质灾害防治工作提供便利，因此确定坡脚剪出型滑坡运动距离的最优预测模型为：

$$L = 2.67 H^{0.91} (\tan\alpha)^{-1.19}。 \tag{2}$$

通过逐步回归分析获得考虑不同影响因子下坡

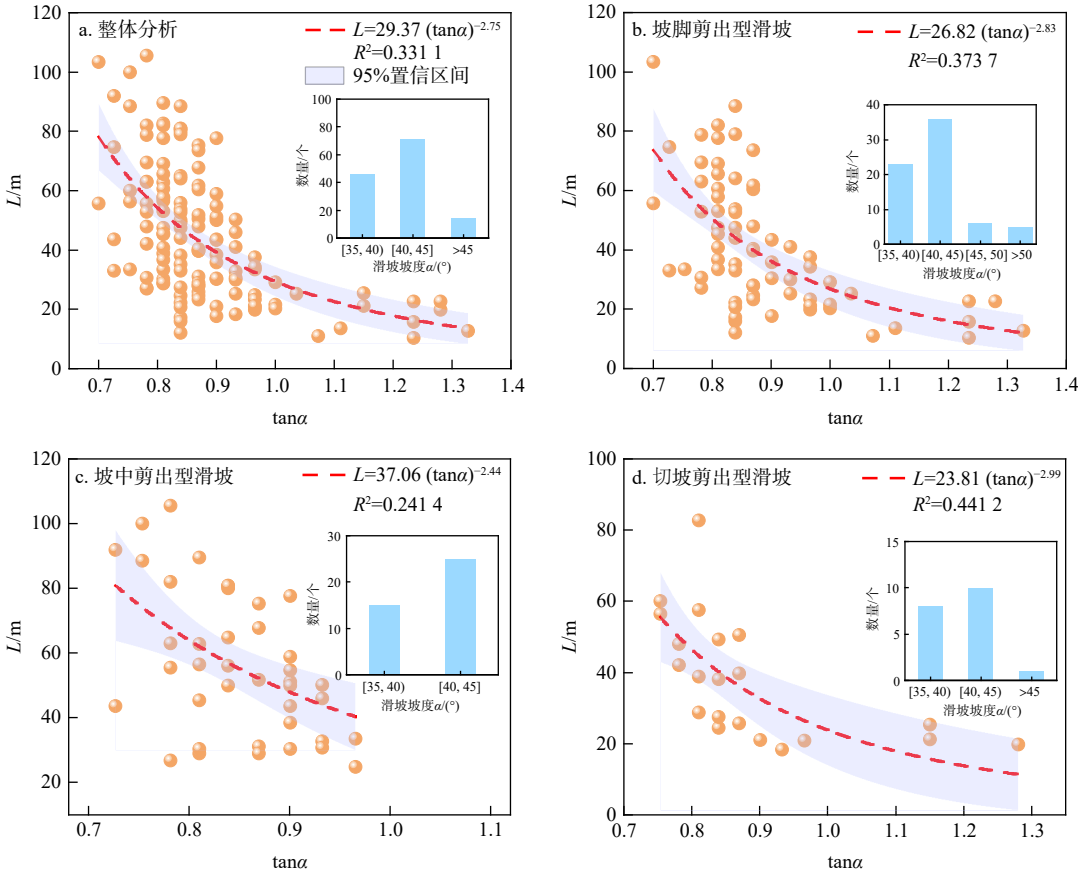


图 7　L 与 tanα 的相关关系

Fig. 7　Correlation between L and tanα

中剪出型滑坡运动距离的多个预测模型(表 5),模型拟合效果都较好,显著性高。分析发现,考虑指标增多,回归模型的 RSS 减小,调整 R^2 增大,提升效果较好。当增加指标 S 时,模型精度略微提高,效果不明显;当增加指标 λ 时,模型质量下降,剔除掉该因子。$L(H, \alpha, \beta)$模型的 RSS 相对较小,调整 R^2 值最大,且 F 值较大,回归模型显著性高,拟合效果好,故将其作为坡中剪出型滑坡运动距离最优预测模型:

$$L = 3.55H^{0.89}(\tan\alpha)^{-1.29}(\tan\beta)^{-0.24}。\quad (3)$$

通过引入不同变量进行逐步回归分析获得了切坡剪出型滑坡运动距离多因素预测模型(表 6),结果表明,当考虑滑坡面积、滑坡坡度或滑坡表面长宽比时回归模型的调整 R^2 值降低,F 值降低,模型质量变差,因此将这 3 种因子剔除。当增加临空高度(H_1)时,$L(H, H_1)$模型的 RSS 最小,调整 R^2 比其他模型大,F 值较高,表明拟合效果好,显著性高,模型质量更高。最终得到切坡剪出型滑坡运动距离的最优预测模型为:

$$L = 2.13H^{1.01}H_1^{0.18}。\quad (4)$$

通过以上分析发现,滑坡面积与滑动距离的相关性很高,但参与模型构建时会降低模型的精度,其在模型中的幂指数很小,可能与滑源区高差存在一定的联系;运动区坡度与临空高度与滑动距离相关性较小,但能够提高预测模型的精度,表明其在特定情境下会对滑动距离产生影响。这与其他学者[31]的结论有些不同,需要后续充分认识降雨型群发浅层土质滑坡的变形机理及运动特征才能解释该现象。

3.3　模型验证

为了检验本文提出的回归模型是否具有较高的可靠性和更好的稳定性,选取研究区实际已发生滑坡但未参与建模的 15 个滑坡数据作为验证样本,将逐步回归分析得到的最优预测模型的计算结果与实测滑坡运动距离进行比较(图 10),采用相对误差 P 对模型的可信度和精度进行验证:

$$P = \frac{|L_{yc} - L_{sj}|}{L_{sj}} \times 100\%,\quad (5)$$

式中:L_{sj} 为滑坡运动距离实测值;L_{yc} 为滑坡运动距离模型预测值;下同。

对比分析表明,通过逐步回归方法得到的最优预测模型的计算值与滑坡运动距离实测值的相对误

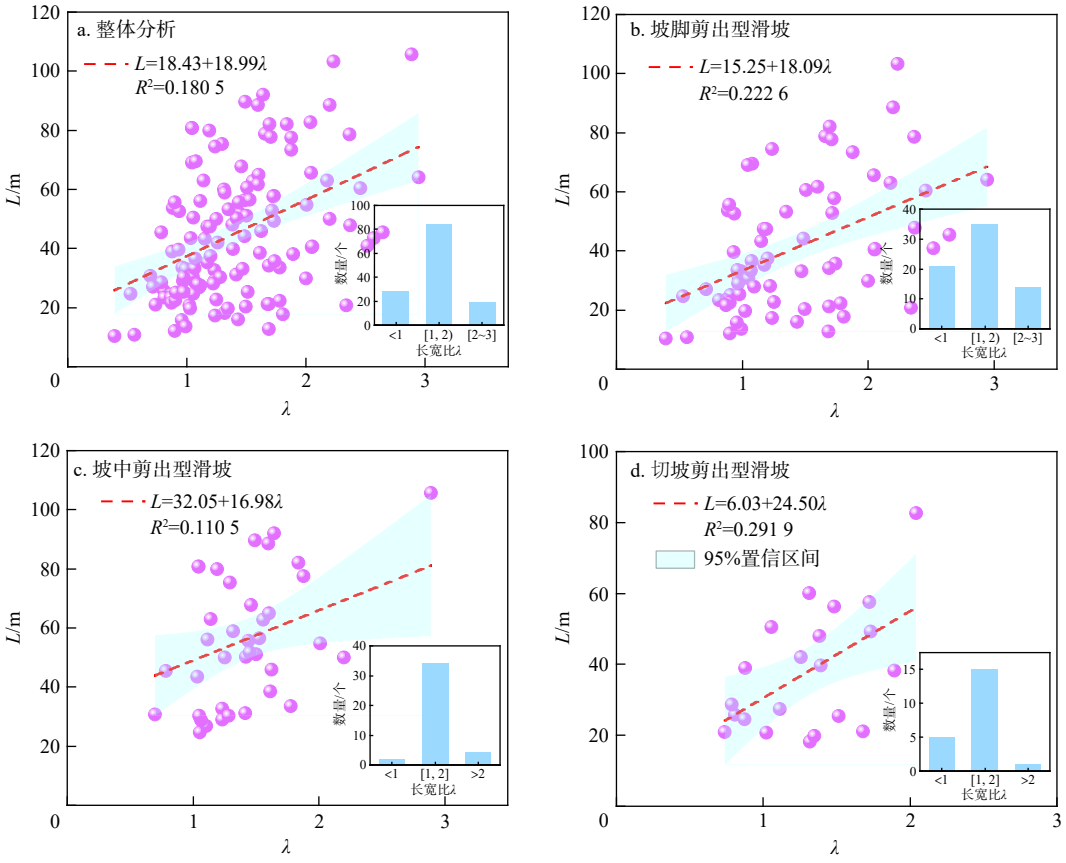


图 8　L 与 λ 的相关关系

Fig. 8　Correlation between L and λ

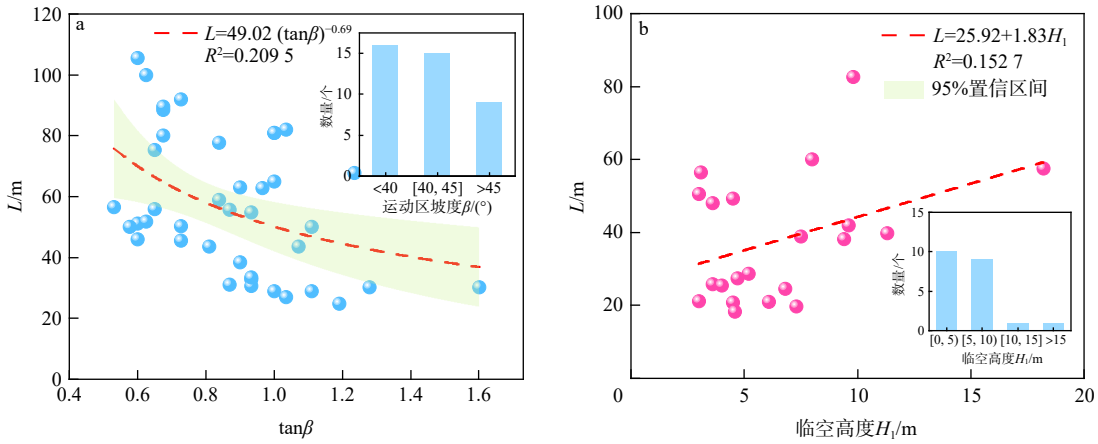


图 9　L 与 tanβ(a) 和 H_1(b) 的相关关系

Fig. 9　Correlation between L and tanβ (a), H_1 (b)

差均较小，证明预测模型具有较高的可靠性和较好的预测精度。坡脚剪出型滑坡的最大相对误差为 15.6%，最小为 5.7%；坡中剪出型滑坡的最大相对误差为 13.5%，最小为 5.5%；切坡剪出型滑坡的最大相对误差为 12.4%，最小为 4.9%。由图 10 可知，总体上模型的预测值大于滑坡运动距离实际值，可以为防灾减灾提供更保守的设计标准，增加安全性。

坡脚剪出型滑坡的误差起伏较大，某个滑坡误差偏高，可能与局部地形特征相关；坡中剪出型滑坡的误差虽然不比坡脚剪出型滑坡明显，但整体水平误差较高，可能与滑坡运动路径中地形的复杂性相关，需要考虑运动区坡度外的其他地形因子；切坡剪出型滑坡的误差较为平稳，表明模型在预测中精确可靠，但该类型样本量相对较少，可能限制了模型在

表 4　坡脚剪出型滑坡运动距离预测回归模型

Table 4　Regression model for predicting the foot slip-out type landslides runout distance

序号	类型	预测模型	*RSS*	调整R^2	*F*值
1	*L*(*H*)	$L=2.23H^{1.03}$	3295	0.8928	1336
2	*L*(*H*, *S*)	$L=2.15H^{0.98}S^{0.03}$	3276	0.8917	881
3	*L*(*H*, *α*)	$L=2.67H^{0.91}(\tan\alpha)^{-1.19}$	2289	0.9243	1270
4	*L*(*H*, *α*, *λ*)	$L=2.86H^{0.87}(\tan\alpha)^{-1.21}\lambda^{0.07}$	2240	0.9247	958

表 5　坡中剪出型滑坡运动距离预测回归模型

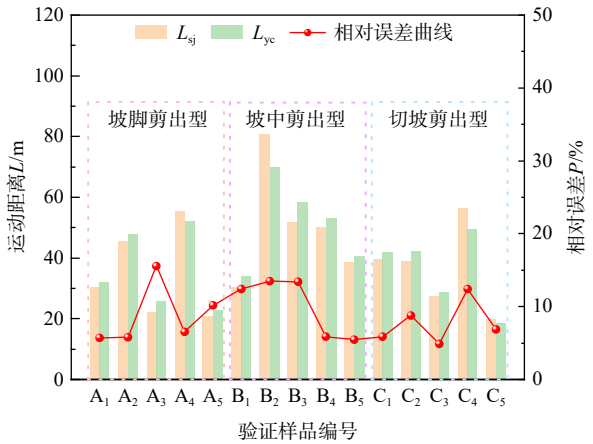
Table 5　Regression model for predicting the middle slope slip-out type landslides runout distance

序号	类型	预测模型	*RSS*	调整R^2	*F*值
1	*L*(*H*)	$L=3.063H^{1.04}$	3159	0.8162	679
2	*L*(*H*, *S*)	$L=2.46H^{0.81}S^{0.14}$	2993	0.8204	463
3	*L*(*H*, *α*)	$L=3.09H^{0.95}(\tan\alpha)^{-1.42}$	1958	0.8825	714
4	*L*(*H*, *S*, *α*)	$L=2.93H^{0.91}S^{0.03}(\tan\alpha)^{-1.39}$	1952	0.8791	520
5	*L*(*H*, *α*, *β*)	$L=3.55H^{0.89}(\tan\alpha)^{-1.29}(\tan\beta)^{-0.24}$	1571	0.9027	648
6	*L*(*H*, *α*, *β*, *λ*)	$L=3.29H^{0.93}(\tan\alpha)^{-1.24}(\tan\beta)^{-0.24}\lambda^{-0.07}$	1533	0.9019	514

表 6　切坡剪出型滑坡运动距离预测回归模型

Table 6　Regression model for predicting the cut slope slip-out type landslides runout distance

序号	类型	预测模型	*RSS*	调整R^2	*F*值
1	*L*(*H*)	$L=2.35H^{1.1}$	563	0.8817	349
2	*L*(*H*, *S*)	$L=2.4H^{1.05}S^{0.02}$	662	0.8502	183
3	*L*(*H*, *α*)	$L=2.5H^{1.06}(\tan\alpha)^{-0.27}$	553	0.8749	220
4	*L*(*H*, *λ*)	$L=2.65H^{1.04}\lambda^{0.12}$	543	0.8770	224
5	*L*(*H*, H_1)	$L=2.13H^{1.01}H_1^{0.18}$	367	0.9168	333



L_{sj} 为滑坡运动距离实测值; L_{yc} 为滑坡运动距离模型预测值

图 10　滑坡运动距离预测模型计算值与实际值对比

Fig. 10　Comparison of calculated and actual runout distance of landslide

更广泛场景下的适用性, 后续需要扩充数据库, 以进一步提高模型的性能。可以发现, 随着运动距离增大, 不同预测模型都出现了预测值小于实际值的情况, 未来模型的改进可以增加滑坡长距离运动路径上的地形因子, 以进一步提高预测精度。

4　结　论

(1)通过灾前灾后遥感影像、DEM、无人机三维影像搜集整理了 131 例典型降雨型群发浅层土质滑坡基础数据, 根据滑坡剪出口位置及地形特征区分坡脚剪出型滑坡 70 例、坡中剪出型滑坡 40 例、切坡剪出型滑坡 21 例, 各类型均抽取 5 例作为验证案例, 其余为训练样本案例, 建立了较为完备的降雨型群发浅层土质滑坡运动距离案例库。

(2)坡脚剪出型滑坡运动距离的影响因素主要是滑源区高差、滑坡面积, 其次为滑坡坡度、滑坡表面长宽比; 坡中剪出型滑坡运动距离的主要影响因素依次是滑源区高差、滑坡面积、滑坡坡度、运动区坡度, 而与滑坡表面长宽比相关性较差; 切坡剪出型滑坡运动距离的主要影响因素依次是滑源区高差、滑坡坡度、滑坡表面长宽比、临空高度。

(3)根据各因子与滑坡运动距离的相关性强弱, 通过逐步非线性回归分析建立滑坡运动距离的最优预测模型: 坡脚剪出型滑坡为 $L=2.67H^{0.91}(\tan\alpha)^{-1.19}$, 调整 R^2 为 0.9243; 坡中剪出型滑坡为 $L=3.55H^{0.89}(\tan\alpha)^{-1.29}(\tan\beta)^{-0.24}$, 调整 R^2 为 0.9027; 切坡剪出型滑坡为 $L=2.13H^{1.01}H_1^{0.18}$, 调整 R^2 为 0.9168, 模型具有较高的可信度和精度。

本研究主要基于降雨诱发的群发浅层土质滑坡展开, 缺少不同区域同类型滑坡的数据, 在其他同类型滑坡区域的适用性仍需要验证。未来建议将此方法进一步推广到具有类似滑坡发育的区域, 还可增加滑坡样本及影响因子进一步完善模型。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] 伍宇明, 兰恒星, 高星, 等. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究: 以福建地区为例 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 255-262.
WU Y M, LAN H X, GAO X, et al. Rainfall threshold of storm-induced landslides in typhoon areas: A case study of Fujian Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 255-262. (in Chinese with English abstract)

[2] BAI H L, FENG W K, YI X Y, et al. Group-occurring landslides and debris flows caused by the continuous heavy rainfall in June 2019 in Mibei Village, Longchuan County, Guangdong Province, China[J]. Natural Hazards, 2021, 108(3): 3181-3201.

[3] 庞海松，谢骏锦，张小明，等. 基于 RAMMS 数值模拟的短时强降雨型泥石流危险性评价 [J]. 地质科技通报，2024，43(2)：215-225.
PANG H S, XIE J J, ZHANG X M, et al. Hazard assessment of debris flow induced by short-time heavy rainfall based on RAMMS numerical simulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 215-225. (in Chinese with English abstract)

[4] HEIM A, BERGSTURZ M. Bergsturz und Menschenleben[M]. Zütich: Naturforschenden Gesellschaft, 1932: 120-133.

[5] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics, 1973, 5(4): 231-236.

[6] ZHANG Z L, ZENG R Q, MENG X M, et al. Estimating landslide sliding distance based on an improved Heim sled model[J]. Catena, 2021, 204: 105401.

[7] 江晓禹，乔建平. 典型滑坡危险性的接触力学预测模型 [J]. 工程力学，2006，23(8)：106-109.
JIANG X Y, QIAO J P. Contact mechanics model for risk predication of typical landslides[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 106-109. (in Chinese with English abstract)

[8] LIU Z Y, SU L J, ZHANG C L, et al. Investigation of the dynamic process of the Xinmo landslide using the discrete element method[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103561.

[9] WANG H J, SUN P, ZHANG S, et al. Evolutionary and dynamic processes of the Zhongzhai landslide reactivated on October 5, 2021, in Niangniangba, Gansu Province, China[J]. Landslides, 2022, 19(12): 2983-2996.

[10] 刘悦，黄强兵. 一种黄土滑坡滑距预测模型 [J]. 灾害学，2001，16(3)：6-11.
LIU Y, HUANG Q B. A forecast pattern of the side distance of loess landslides[J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(3): 6-11. (in Chinese with English abstract)

[11] 常晁瑜，薄景山，李孝波，等. 地震黄土滑坡滑距预测的 BP 神经网络模型 [J]. 地震工程学报，2020，42(6)：1609-1614.
CHANG C Y, BO J S, LI X B, et al. A BP neural network model for forecasting sliding distance of seismic loess landslides[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1609-1614. (in Chinese with English abstract)

[12] WAN J C, XUE X H. Application of the group method of data handling (GMDH) approach for travel distance prediction of landslides[J]. Landslides, 2023, 20(3): 645-661.

[13] 樊晓一，胡晓波，张睿骁，等. 开阔型地形条件对滑坡运动距离的影响研究 [J]. 自然灾害学报，2018，27(5)：188-196.
FAN X Y, HU X B, ZHANG R X, et al. Study on the open topography influence on the moving distances of landslides[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 188-196. (in Chinese with English abstract)

[14] 陆盟，张洁，文思成. 地震作用下滑坡水平运动距离概率预测模型 [J]. 防灾减灾工程学报，2020，40(1)：92-99.
LU M, ZHANG J, WEN S C. Probabilistic model for prediction of seismic landslide travel distance[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 92-99. (in Chinese with English abstract)

[15] 刘红岩，阎锡东，张小趁，等. 滑坡运动距离预测的统计模型及其改进 [J]. 灾害学，2022，37(4)：6-10.
LIU H Y, YAN X D, ZHANG X C, et al. The statistical model for the movement distance forecast of the landslide and its improvement[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 6-10. (in Chinese with English abstract)

[16] 翟淑花，于家烁，齐干，等. 降雨入渗条件下堆积体边坡致灾因子试验分析 [J]. 地质科技通报，2023，42(3)：9-15.
ZHAI S H, YU J S, QI G, et al. Triggering factor analysis of deposit slope under rainfall infiltration based on laboratory experiments[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 9-15. (in Chinese with English abstract)

[17] 郑德凤，潘美伊，高敏，等. 集中降雨影响下辽南仙人洞国家级自然保护区滑坡灾害多因子风险评价 [J]. 地质科技通报，2025，44(2)：48-58.
ZHENG D F, PAN M Y, GAO M, et al. Multi-factor risk assessment of landslide disasters under concentrated rainfall in Xianrendong national nature reserve in southern Liaoning Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 48-58. (in Chinese with English abstract)

[18] WALLACE C S, SANTI P M, WALTON G. Scoring system to predict landslide runout in the Pacific Northwest, USA[J]. Landslides, 2022, 19(6): 1449-1461.

[19] 孟华君，姜元俊，张树轩，等. 汶川地震前后都江堰山区滑坡滑动距离影响因素变化分析 [J]. 地质力学学报，2017，23(6)：904-913.
MENG H J, JIANG Y J, ZHANG S X, et al. Analysis on the change of influence factors on slipping displacement of landslides in Dujiangyan area before and after the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(6): 904-913. (in Chinese with English abstract)

[20] 吴博，赵法锁，贺子光，等. 基于 BA-LSSVM 模型的黄土滑坡致灾范围预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2020，31(5)：1-6.
WU B, ZHAO F S, HE Z G, et al. Prediction of the disaster area of loess landslide based on least square support vector machine optimized by bat algorithm[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)

[21] 杨明钰，陈红旗，祁小博，等. 基于可靠度理论的地震滑坡运动距离预测模型 [J]. 中国地质调查，2023，10(3)：102-109.
YANG M Y, CHEN H Q, QI X B, et al. Prediction model for the landslide movement distance induced by earthquake based on the reliability theory[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(3): 102-109. (in Chinese with English abstract)

[22] 钟兴荣. 基于功能定理的高位滑坡运动距离预测方法研究 [J/OL]. 工程地质学报，2024：1-11. (2024-03-11). https://link.cnki.net/doi/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0185.
ZHONG X R. The study of movement distance forecast method of the rock avalanche based on work-energy principle[J/OL]. Journal of Engineering Geology, 2024: 1-11. (2024-03-11). https://link.cnki.net/doi/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0185.(in Chinese with English abstract)

[23] 段俊杰，李孝波，周兴浩，等. 黄土地震滑坡运动特征研究：以海

原特大地震诱发滑坡为例 [J]. 地震工程学报, 2024, 46(5): 1151-1159.
DUAN J J, LI X B, ZHOU X H, et al. Kinematic characteristics of loess seismic landslides: A case study of landslides triggered by the Haiyuan great earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(5): 1151-1159. (in Chinese with English abstract)

[24] 董建辉, 钱珂江, 赵建军, 等. 基于深度神经网络的高位滑坡范围预测 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 972-981.
DONG J H, QIAN K J, ZHAO J J, et al. Prediction of high landslide range based on deep neural network[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 972-981. (in Chinese with English abstract)

[25] 王冉, 王学良, 袁鸿鹄, 等. 基于统计分析和数值模拟方法的滑坡视摩擦系数影响因素及特征研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 825-833.
WANG R, WANG X L, YUAN H H, et al. Influence factors and characteristics of apparent friction coefficient of landslide based on statistical analysis and numerical simulation[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 825-833. (in Chinese with English abstract)

[26] 郑光, 许强, 彭双麒. 岩质滑坡-碎屑流的运动距离计算公式研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4897-4906.
ZHENG G, XU Q, PENG S Q. Calculation model of the long-run-out distance of rock avalanche[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4897-4906. (in Chinese with English abstract)

[27] ROMAN QUINTERO D C, ORTIZ CONTRERAS J D, TAPIAS CAMACHO M A, et al. Empirical estimation of landslide runout distance using geometrical approximations in the Colombian northeast Andean region[J]. Sustainability, 2024, 16(2): 793.

[28] 吴伟乐, 贺凯, 高杨, 等. 强降雨条件下碎屑岩滑坡远程运动模拟分析: 以牛儿湾滑坡为例 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1115-1126.
WU W L, HE K, GAO Y, et al. Long-runout fluidization disaster simulation analysis of clastic landslide under heavy rainfall: A case study of the Niuerwan landslide[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1115-1126. (in Chinese with English abstract)

[29] 宋德光, 吴瑞安, 马德芹, 等. 四川泸定昔格达组滑坡灾害运动过程模拟分析 [J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2185-2197.
SONG D G, WU R A, MA D Q, et al. Simulation analysis of landslide disaster movement process in Xigeda Formation, Luding County, Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(12): 2185-2197. (in Chinese with English abstract)

[30] 邵葆蓉, 孙即超, 朱月琴, 等. 基于多元回归的黄土滑坡滑动距离预测模型探讨: 以甘肃天水地区为例 [J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1993-2003.
SHAO B R, SUN J C, ZHU Y Q, et al. Research on gliding distance estimation of loess landslide based on multiple regression: A case study of Tianshui region, Gansu Province[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1993-2003. (in Chinese with English abstract)

[31] 康孟羽, 朱月琴, 陈晨, 等. 基于多元非线性回归和BP神经网络的滑坡滑动距离预测模型研究 [J]. 地质通报, 2022, 41(12): 2281-2289.
KANG M Y, ZHU Y Q, CHEN C, et al. Research on landslide sliding distance prediction model based on multiple nonlinear regression and BP neural network[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(12): 2281-2289. (in Chinese with English abstract)

[32] 王佳佳, 陈浩军, 肖莉丽, 等. 滑坡-碎屑流运动堆积特征与能量耗散规律 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(11): 63-71.
WANG J J, CHEN H J, XIAO L L, et al. Motion and accumulation characteristics and energy dissipation laws of landslide-debris flow[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(11): 63-71. (in Chinese with English abstract)

[33] 吴越, 刘东升, 周忠浩. 考虑滑动过程内部崩解耗散的滑坡体运动模型 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 35-46.
WU Y, LIU D S, ZHOU Z H. Mobility assessment model for landslide mass considering disintegration energy consumption in slipping process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 35-46. (in Chinese with English abstract)

[34] 李小琴, 富海鹰, 张迎宾, 等. 地形起伏对滑坡运动的影响规律研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 867-877.
LI X Q, FU H Y, ZHANG Y B, et al. Study on the influences of topography on landslide mobility[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 867-877. (in Chinese with English abstract)

[35] 王贵洲, 龚文平, 邢磊, 等. 考虑堆积区宽度影响的滑坡碎屑流运动与堆积过程物理模型试验研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1637-1647.
WANG G Z, GONG W P, XING L, et al. Model tests of run-out and deposition process of landslide debris considering influence of depositing zone width[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1637-1647. (in Chinese with English abstract)

[36] KOMU M P, NEFESLIOGLU H A, GOKCEOGLU C. Modeling shallow landslide runout distance in Eocene flysch facies using empirical-statistical models (western black sea region of Türkiye)[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2024, 13(3): 84.

[37] 樊晓一, 李天话, 田述军, 等. 未完全受阻地震滑坡运动距离的影响因素及机制分析 [J]. 地震地质, 2017, 39(4): 754-767.
FAN X Y, LI T H, TIAN S J, et al. Controlling factors and mechanisms of incomplete obstruction seismic landslide mobility[J]. Seismology and Geology, 2017, 39(4): 754-767. (in Chinese with English abstract)

[38] ZHAN W W, FAN X M, HUANG R Q, et al. Empirical prediction for travel distance of channelized rock avalanches in the Wenchuan earthquake area[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017, 17(6): 833-844.

[39] 杨海龙, 裴向军, 樊晓一. 坡脚型滑坡运动特征分析及运动距离预测 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1379-1388.
YANG H L, PEI X J, FAN X Y. Numerical inversion analysis of movement characteristics and distance prediction of slope-toe landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1379-1388. (in Chinese with English abstract)

[40] ROBERT I, KABACOFF. R in Action, Third Edition: Data analysis and graphics with R and Tidyverse[M]. Manning, 2022.

Summary for “降雨型群发浅层土质滑坡运动距离经验预测模型”

Empirical prediction model for the runout distance of rainfall-induced group-occurring shallow soil landslides

HUANG Ruijian[1]，FENG Wenkai[1*]，LI Shuangquan[1]，LIU Kan[2]，TANG Xuefeng[2]，GUO Chaoxu[2]，YI Xiaoyu[1]

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China；
2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hill Mountains of Ministry of Nature Resources, Fuzhou 350002, China

First author，E-mail：1550392749@qq.com

* Corresponding author， E-mail：fengwenkai@cdut.cn

Abstract：[**Objective**] Rainfall-induced group-occurring shallow soil landslides have the characteristics of strong and sudden occurrence and high risk. It is of great significance to build a runout distance prediction model for landslide risk prevention and control. [**Methods**] This study focuses on the "5·27" group-occurring landslide event in Wuping County, Fujian Province, and obtains 131 landslide characteristic data based on pre-disaster and post-disaster remote sensing images, digital elevation model, drone-derived 3D model and field investigation. According to the location of the slip-out point and topographic characteristics, the landslides are divided into the foot slip-out type, the middle slope slip-out type and the cut slope slip-out type. The main factors affecting the runout distance of group-occurring shallow soil landslides were determined by correlation analysis, and the optimal prediction model for the runout distance of three types of landslides was established using stepwise nonlinear regression analysis. [**Results**] Correlation analysis shows that the height of the sliding source area is the main influencing factor of the runout distance of rainfall-induced group-occurring shallow soil landslides. The established optimal predictive models exhibited a low residual sum of squares (*RSS*) and an adjusted R^2 value greater than 0.9, indicating high reliability and precision. Model validation showed that the relative errors between the predicted and actual values were small, with maximum relative errors of 15.6%, 13.5%, and 12.4% for foot slip-out, middle slope slip-out, and cut slope slip-out types, respectively. [**Conclusion**] This study established a predictive model for the runout distance of rainfall-induced group-occurring shallow soil landslides based on statistical analysis, providing a scientific basis for landslide disaster prevention in similar regions. While the models exhibit high accuracy, their applicability might be limited by the localized data source. Future research should expand sample diversity and incorporate additional influencing factors to enhance model generalizability.

Key words: group-occurring shallow soil landslide；runout distance；correlation analysis；stepwise nonlinear regression；rainfall-induced；prediction model

Received：2024-06-28；Revised：2025-01-06；Accepted：2025-02-14

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240364