引文格式:田玉雪,杨成生,卢慧敏,等.中国滑坡体积快速估算的幂律模型与几何模型方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1470-1481.DOI:10.13203/j.whugis20250013
Citation: TIAN Yuxue, YANG Chengsheng, LU Huimin, et al. Power-Law and Geometry-Modelling Method for Rapid Estimation of Landslide Volume in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(7): 1470-1481. DOI: 10.13203/j.whugis20250013

中国滑坡体积快速估算的幂律模型与几何模型方法

田玉雪[1] 杨成生[1,2] 卢慧敏[1] 石一洁[1] 丁慧兰[1] 程小强[1]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

摘 要:准确快速地估算滑坡体积是滑坡灾害评估和防治工作的基础,对及时了解滑坡灾害规模和潜在威胁、制定合理防治方案、评估灾害损失以及提高防灾减灾能力具有重要意义。针对中国滑坡体积估算中实际调查难度大、估算理论依据不足的现状,根据文献汇报收集了1995—2024年中国的滑坡数据,建立适用于中国不同地区的滑坡面积-体积幂律关系模型,并对幂律关系进行几何验证与数学证明,实现了对滑坡体积的快速估算。同时,还对基于几何建模的滑坡体积估算方法及其改进进行了讨论与分析,分别总结了幂律方法、几何建模方法估算滑坡体积适用特点。

关键词:滑坡面积;体积估算;幂律关系;几何建模;灾害评估
中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-10-12
DOI:10.13203/j.whugis20250013 **文章编号**:1671-8860(2026)07-1470-12

Power-Law and Geometry-Modelling Method for Rapid Estimation of Landslide Volume in China

TIAN Yuxue[1] *YANG Chengsheng*[1,2] *LU Huimin*[1] *SHI Yijie*[1]
DING Huilan[1] *CHENG Xiaoqiang*[1]

1 School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives**: The accurate and rapid estimation of landslide volume is a fundamental component in landslide disaster assessment and mitigation efforts. It plays a significant role in understanding the scale and potential risks of landslide disasters, formulating effective prevention and control measures, assessing disaster losses, and enhancing disaster risk reduction capabilities. However, in China, estimating the volume of landslides in remote mountainous regions is highly challenging, and the existing methods are not applicable to emergency situations that require rapid response. **Methods**: In response to the challenges of conducting field surveys and the insufficient theoretical foundation for landslide volume estimation in China, landslide data from the past 30 a (1995—2024) are collected based on literature reports. We obtain information such as the length, width, area, and volume of the landslides, and use the landslide area-volume power-law relationship and geometric modeling methods to obtain model parameters, enabling the estimation of unknown landslide volumes. **Results**: We ultimately establish a landslide area-volume power-law relationship model applicable to different regions of China, and geometrically validate and mathematically prove the landslide power-law relationship. Then the variation patterns and ranges of the power-law parameters under different environmental conditions are discussed. Additionally, we discuss and analyze the landslide volume estimation method based on geometric modeling and its improvements, and

基金项目:云南省科技计划(202403AA080001);国家自然科学基金(42174032);陕西省教育厅服务地方专项计划(23JE001);陕西省科技创新团队项目(2021TD-51);陕西省地学大数据与地质灾害防控三秦学者创新团队项目(2022)。
第一作者:田玉雪,硕士,研究方向为InSAR地质灾害识别与监测应用。2893137617@qq.com
通信作者:杨成生,博士,教授。ycsgps@163.com

compare the accuracy of the two methods for landslide volume estimation, and summary the applicability and characteristics of each method. **Conclusions:** The power-law model can effectively estimate the landslide volume and has good applicability in practical use. On the other hand, the geometric modeling method fully considers the geometric characteristics of the landslide. Compared to previous methods, it requires simpler parameter acquisition, has a solid theoretical basis in empirical formulas, and offers stronger applicability. The research findings provide theoretical support for the estimation of landslide volume and offer important reference for rapid estimation of landslide volume and assessment of landslide hazards.

Key words: landslide area; volume estimation; power-law relationship; geometric modeling; disaster assessment

滑坡是中国乃至全球范围内发生频率最高、造成损失最大的地质灾害之一[1-3]。据统计,在2012—2022年间,每年因滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害造成的人员伤亡平均约426人,年均造成的经济损失约42亿元[4]。因此,准确开展滑坡危险性评估对滑坡风险规避和减灾防灾十分重要[5]。滑坡体积是滑坡危险性评估中至关重要的信息,及时有效地估算滑坡体积,并根据其规模选择相应的防治措施,能够有效降低滑坡造成的经济损失和人员伤亡[6]。学者们利用高精度低空摄影测量技术精确测算[7]、融合光学卫星影像与数字高程模型(digital elevation model,DEM)的地表高程差异分析与建模[8-9]、无人机搭载激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)获取高质量点云[10]及多源点云融合构建滑动前后全视角三维实体模型[11]等多种遥感技术手段开展滑坡体积计算研究,但精确的滑坡体积估算通常需要滑动前后高精度的DEM或点云数据。部分学者基于滑坡区域的三维形变场,通过矢量倾斜法、质量守恒法对滑坡深度及体积进行反演[12-13]。然而这些方法处理过程复杂且耗时较长,难以获取偏远地区数据,通常仅针对单个滑坡进行处理,且数据获取受工作区环境条件影响显著。

随着卫星技术的发展,利用卫星提供的遥感图像能够获取滑坡平面尺寸,进而开展滑坡体积估算。经验公式法能够通过简化的数学模型,在短时间内较为合理地估算滑坡体积,因此具有计算简便、适应性强、能减少现场工作量的优势。众多学者利用不同滑坡数据集建立滑坡面积与滑坡体积间的关系[14],降雨积水面积、水流等级及地质指标与滑坡体积间的关系[15],以及相关几何、地形、地质和地震参数与滑坡体积间的关系[16]。以上研究虽然提供了有价值的经验公式,但仍存在公式理论依据复杂、适用范围较为局限以及往往依赖于区域性数据确定模型参数、方法普适性差的问题。

针对以上问题,本文收集了中国2 000多个滑坡数据,利用滑坡面积-体积幂律关系与几何建模方法[17],对滑坡体积估算中模型经验参数的获取与改进进行了研究,讨论了不同模型的适用场景并对模型精度进行对比。本文在研究滑坡面积-体积幂律关系的基础上,利用几何模型对其进行了合理化解释,并探讨参数在不同条件下的变化规律,增强幂律模型在实际应用中的适用性。同时,改进后的几何建模方法充分考虑了滑坡的几何特性,与以往学者在研究中提出的经验公式法相比,计算所需的参数获取简单、经验公式理论依据充分、适用性更强,能够为滑坡体积的快速估算提供技术依据与参考。本文研究内容框架如图1所示,其中精度评定采用的指标为决定系数R^2、均方误差(mean square error,MSE)、均方根误差(root mean square error,RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error,MAE)、均方对数误差(mean square logarithmic error,MSLE)和平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error,MAPE)。

1　实验数据与方法

1.1　实验数据

中国地形复杂,地势呈阶梯状,滑坡灾害易发、频发。据国家统计局2023年统计年鉴,中国在2020年、2021年、2022年发生的滑坡分别为4 810、2 335、3 919起[4],受降雨、地震以及人类活动等因素影响,滑坡在全国近24个省均有分布,影响范围极大。因此,本文通过查阅1995年以来的学术期刊、论文与会议文献等资料,共收集到2 000多个滑坡的发生位置、时间与几何信息,分布如图2所示。滑坡主要分布在低、中海拔的山地与丘陵地区,尤其是在高山峡谷众多、降水量大且集中、地理环境复杂的第二级地势阶梯内,如四

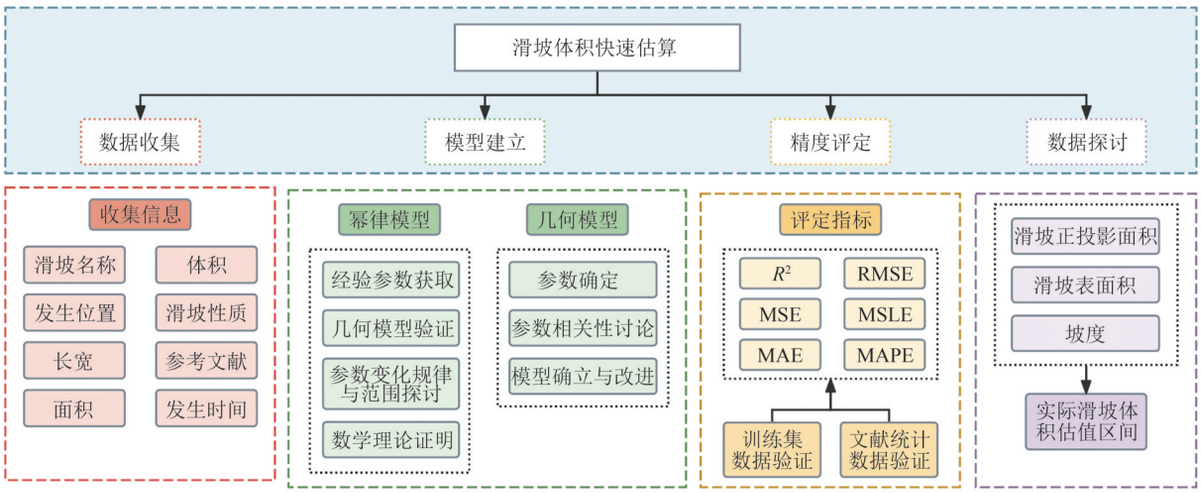


图1 研究内容框架图

Fig. 1 Diagram of Research Content Framework

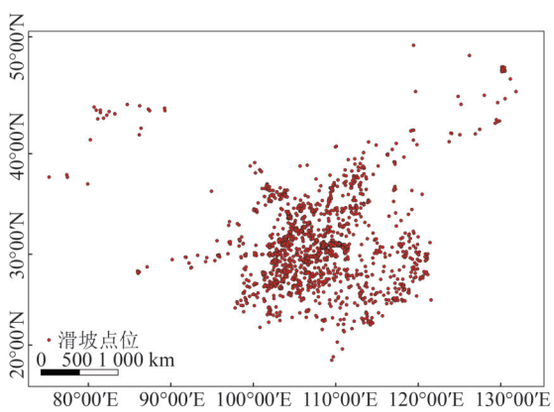
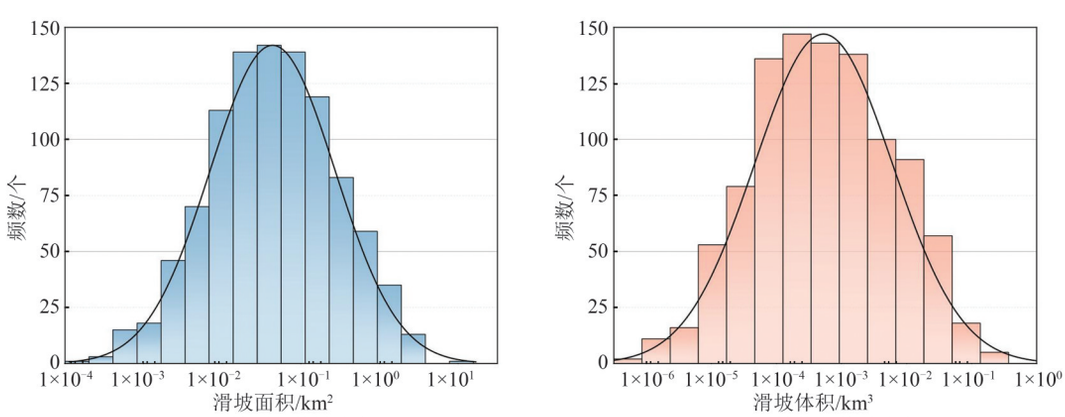


图2 滑坡点位分布

Fig. 2 Landslide Point Distribution

川、重庆、云南等西南地区。滑坡点位通常沿河分布,灾害严重区域分布在三峡库区、长江中上游、黄河流域以及珠江流域内。

图3为全国滑坡面积与体积统计值的数量分布,可见统计值跨越了较大的数量级,且在对数坐标系下呈现近似正态分布的特征,面积最大为12.5 km^2,体积最大为0.312 km^3。按照中国地质调查局对于滑坡规模等级的划分[18],小型滑坡($<1\times10^{-4}$ km^3)占26.08%,中型滑坡($[1\times10^{-4},1\times10^{-3})$ km^3)占33.70%,大型滑坡($[1\times10^{-3},1\times10^{-2})$ km^3)占26.68%,特大型滑坡($>1\times10^{-2}$ km^3)占13.54%。



(a) 滑坡面积数量分布 (b) 滑坡体积数量分布

图3 滑坡面积、体积分布统计

Fig. 3 Landslide Area and Volume Distribution Statistics

本文剔除了体积小于1×10^{-5} km^{3}的表层类微小型滑坡后,共得到921个记录了完整几何和体积信息的滑坡,作为本文的全国滑坡数据集。

1.2 滑坡面积-体积幂律模型

幂律模型已经被广泛运用在基于滑坡面积A_L估算体积V_L的计算中[19],其经验计算公式为:

$$V_L=\alpha\cdot A_L^{\beta} \tag{1}$$

式中,α、β为待回归的经验常数,取值通常在极小的区间范围内。

该幂律经验公式不考虑滑坡规模、类型、崩塌过程或触发机制,在体积估算中具有较广泛的适用性,但这种幂律关系的依据尚未明确[20]。而文献[17]提出的一种几何建模方法,将滑坡的几何数学特征与幂律关系联系在一起,实现了对滑坡面积-体积幂律关系的合理化解释。因此,本文在此基础上,利用几何建模方法对国内滑坡的幂律关系进行了几何验证与数学证明,并对幂律关系的合理性与可靠性作出解释。

1.3　滑坡滑动面的几何模型

已有研究表明,滑坡面积与体积可能存在潜在的几何特征[21]。因此,假设滑坡是空间中球体或椭球体的一部分,滑动面的形状将介于球面与椭球面之间。图4展示了一个椭球形滑动面:滑坡位于坡度为θ_s的斜面上,L、B分别为滑坡面的长、宽。在空间中平行于斜面建立一个椭球体,使其x-y平面与斜面倾斜度保持一致,此时滑坡面A_L位于距离椭球体平面xy下方h处的斜面上,滑坡体积V_L为滑坡面与椭球形滑动面间的阴影区域。

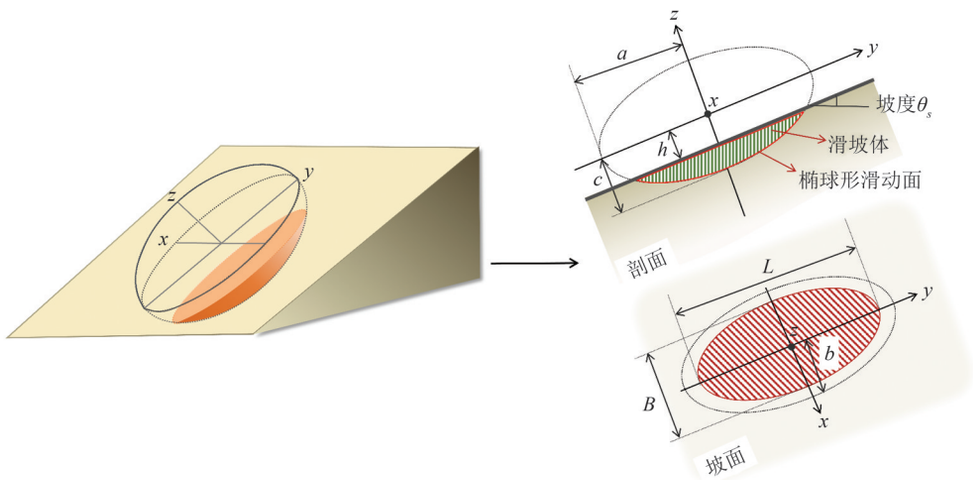


图4　椭球形滑坡滑动面

Fig. 4　Surface of Ellipsoidal Landslide Slip

因此,滑坡体积V_L以及面积A_L可通过图4所示的几何模型计算得到,两者的计算式分别为:

$$V_L=\frac{ab(c-h)^2(2c+h)\pi}{3c^2}=\frac{abc(1-\frac{h}{c})^2(2+\frac{h}{c})\pi}{3} \tag{2}$$

$$A_L=\frac{ab(c^2-h^2)\pi}{c^2}=ab\left[1-(\frac{h}{c})^2\right]\pi \tag{3}$$

式中,a、b、c分别为半长轴以及两个半次轴;h为椭球体中心到滑动面的距离。

对于球形滑动面来说$a=b=c$;而对于椭球面,可以假定轴长比为$a:b:c=k:1:1$,k值变化即轴间长宽比发生改变。对于滑坡最大深度$c-h$,在轴长给定的前提下,取决于归一化中心距h/c,比值越大,深度越小,计算出的滑坡体积也相应越小。

2　基于幂律模型的滑坡体积估算

2.1　经验参数获取

为了求取滑坡幂律模型中的经验参数α、β,本文利用921个信息完整的滑坡进行回归计算。首先,将式(1)两侧同时取对数,得到线性化表达式为:

$$\lg V_L=\lg\alpha+\beta\lg A_L \tag{4}$$

然后,对$\lg V_L$、$\lg A_L$进行线性回归,最终反算出参数α、β的大小。实际计算过程中,还对滑坡点位数量分布较多的三峡库区、长江上游、黄河流域以及珠江流域内的滑坡数据分区域分别进行了回归计算,最终结果如表1所示。评价模型的指标中,R^2主要用于衡量回归模型对于数据的解释程度,值通常在0~1间,值越接近1,说明模型拟合程度越好。

图5为基于全国滑坡数据计算出的幂律回归函数,蓝线为由全国滑坡数据计算出的幂律函数,红色点为滑坡数据点,绿色区域为95%预测带。可以看出,滑坡点多数落在了95%预测带内,仅

表1 1995—2024年全国滑坡易发区幂律关系回归系数

Table 1 Power-Law Regression Coefficient for Landslide-Prone Areas Nationwide from 1995 to 2024

地区	滑坡点/个	α	β	面积/km^2			体积/km^3			R^2/%	幂律关系
				最小值/10^{-3}	最大值	均值	最小值/10^{-5}	最大值	均值/10^{-3}		
三峡库区	265	0.032	1.279	3.25	12.50	0.315	1.46	0.250	9.23	90.58	$V_L^{(1)}=0.032A_L^{1.279}$
长江上游	198	0.031	1.298	1.70	3.40	0.224	1.10	0.210	7.81	91.89	$V_L^{(2)}=0.031A_L^{1.298}$
黄河流域	108	0.032	1.299	1.90	3.12	0.228	1.13	0.292	8.22	89.38	$V_L^{(3)}=0.032A_L^{1.299}$
珠江流域	71	0.026	1.254	2.70	1.05	0.068	1.10	0.039	1.60	90.80	$V_L^{(4)}=0.026A_L^{1.254}$
全国	921	0.030	1.280	1.00	12.50	0.208	1.10	0.312	6.48	91.91	$V_L=0.030A_L^{1.280}$

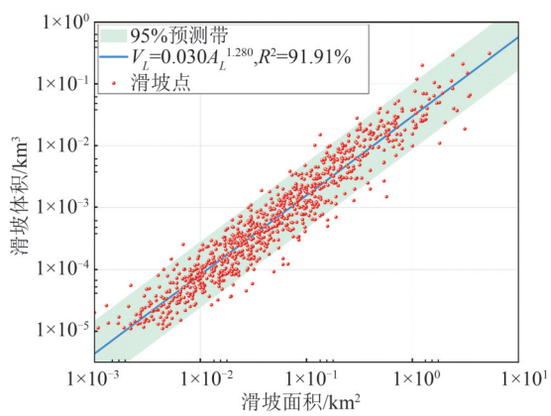


图5 全国滑坡数据滑坡面积-体积幂律关系

Fig. 5 Landslide Area-Volume Power-Law Relationship Based on National Landslide Data

有少数离群值落在区间外。可见幂律关系对滑坡数据的拟合程度较高，且能够对未知滑坡的体积进行估算。

2.2 幂律关系的几何验证

为确保幂律经验公式的可靠性，本文利用几何模型方法进行合理化验证。首先，以包含全国滑坡数据的几何范围为要求，按照一定的轴长a、b、c以及h间隔，充分获取几何模型数据点，代入式(2)、式(3)计算得到面积与体积。将数据与回归计算得到的参数α、β以及95%预测带，绘制在同一图中观察点是否都落在95%预测带范围内，从而实现幂律关系验证。

2.2.1 球形滑动面情况下($a=b=c$)

a按照一定增量0.01～1.51 km取20个数据集，对于每一个a的取值，h/c按$\Delta h/c=0.1$的增量在0.1～0.9之间取值，因此每个数据集包含9个数据点，滑坡最大厚度$c-h$随h/c的增大而减小，如表2所示。然后，按照式(2)、式(3)计算滑坡面积与体积，其中计算得到的A_L跨度为1×10^{-3}～10 km^2，涵盖全国滑坡数据集中99%以上的滑坡面积，从而保证数据集在验证滑坡幂律关系合理性过程中，与实际参与回归计算的全国滑坡数据集条件一致。当真实滑坡的厚度相对于滑坡长宽较小时，则通过改变h/c的大小，得到不同厚度大小范围的数据集。为更直观地反映数据在预测带上的变化趋势，a的取值在前6个数据集中，按照0.02 km的间隔增加，而在之后的14个数据集中按照0.1 km的间隔增加，每个数据集及其计算结果如表2和图6所示。

表2 球面几何参数

Table 2 Spherical Geometric Parameters

序号	半轴长a、b、c/km	h/km		$c-h$/km		Δh取值间隔/km
		最小值	最大值	最大值	最小值	
1	0.01	0.001	0.009	0.00 9	0.001	0.001
2	0.03	0.003	0.027	0.027	0.003	0.003
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5	0.09	0.009	0.081	0.081	0.009	0.009
6	0.11	0.011	0.099	0.099	0.011	0.011
7	0.21	0.021	0.189	0.189	0.021	0.021
8	0.31	0.031	0.279	0.279	0.031	0.031
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
19	1.41	0.141	1.269	1.269	0.141	0.141
20	1.51	0.151	1.359	1.359	0.151	0.151

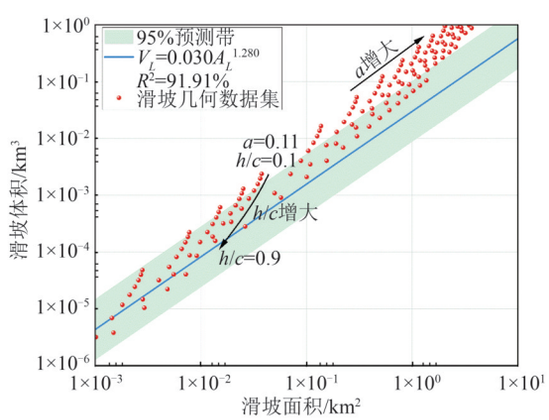


图6 球形滑动面下滑坡幂律关系的验证

Fig. 6 Validation of Landslide Power-Law Relationship for Spherical Sliding Surfaces

图6中蓝线为由全国滑坡数据计算出的幂律函数，绿色区域为95%预测带，红色点为基于几

何模型建立的滑坡数据集。可以看出,$h/c=0.1$时球形滑动面的体积位于95%预测带的上界,随着h/c值的增大,滑坡最大厚度$c-h$减小,数据点逐渐靠近幂律函数。整体上,由几何模型计算出的滑坡体积基本都落在95%预测带内。而当滑坡面积与体积取到极大时,少部分数据点会偏移预测带。以上分析表明,球形滑动面情况下,滑坡体积基本符合本文研究得到的全国面积-体积幂律函数$V_L=0.030A_L^{1.280}$。

2.2.2　椭球形滑动面情况下($a:b:c=k:1:1$)

当长宽比k取值范围为2~10时,能将模型数据集中的滑坡面积限制在10 km^{2}以内。在这个范围内,a同样按照一定增量在0.01~1.51 km的范围内取20个数据集。对于每个a的取值,h/c的值按照$\Delta h/c=0.1$的增量取0.1~0.9间,每个数据集里包含9个数据点,如表3所示。

表3　椭球面几何参数

Table 3　Ellipsoidal Geometric Parameters

k	半轴长/km		h/km		$c-h$/km		Δh取值
	a	b、c	最小值	最大值	最大值	最小值	间隔/km
2	0.01	0.005	0.000 5	0.004 5	0.004 5	0.000 5	0.000 5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2	0.11	0.055	0.005 5	0.049 5	0.049 5	0.005 5	0.005 5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2	1.51	0.755	0.075 5	0.679 5	0.679 5	0.075 5	0.075 5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
k	0.01	0.01/k	0.001/k	0.009/k	0.009/k	0.001/k	0.001/k
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
k	0.11	0.11/k	0.011/k	0.099/k	0.099/k	0.011/k	0.011/k
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
k	1.51	1.51/k	0.151/k	1.359/k	1.359/k	0.151/k	0.151/k

在全国滑坡数据集中,近99%的滑坡长宽比k均小于10,因此将长宽比$k=2$、5和10时的滑坡数据点进行绘制。图7中,蓝线为由全国滑坡数据计算出的幂律函数,绿色区域为95%预测带,红、黄、蓝色点为在不同长宽比k下基于几何模型建立的滑坡数据集。可以看到,当$k=2$、$h/c=0.1$时,点大致落在95%预测带上界,$k=10$、$h/c=0.9$时,点落在95%预测带下界。同时,随着h/c以及长宽比k的增大,滑坡最大厚度$c-h$减小,体积逐渐减小。总体而言,数据点基本都落在了95%预测带内,即在椭球形滑动面情况下,滑坡的体积同样符合本文研究得到的全国面积-体积幂律函数$V_L=0.030A_L^{1.280}$。

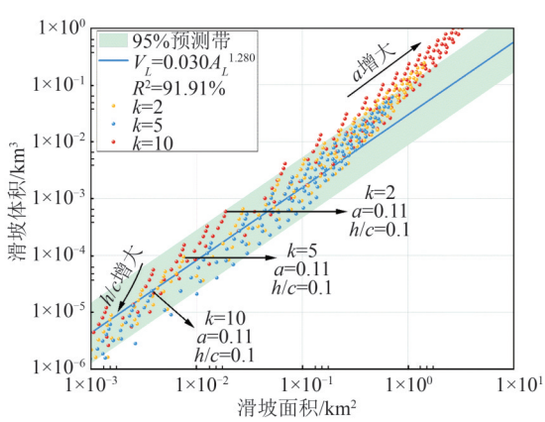


图7　椭球形滑动面下滑坡幂律关系的验证

Fig. 7　Validation of Landslide Power-Law Relationship for Ellipsoidal Sliding Surfaces

2.2.3　参数变化规律与范围讨论

几何模型滑坡数据点在面积与体积取极大值时会偏移回归线,因此需要讨论参数变化规律与范围。本文中按照海拔、地貌与地势起伏对滑坡发生较多的地域(滑坡点数量>50个)分别进行回归计算,讨论不同环境条件下幂律参数的大小变化。由表4可以看出,幂律参数变化与海拔分布间并无明显规律,但地势起伏与地貌类型可能对参数大小有影响:对于分布在大起伏、中起伏、小起伏山区的滑坡数据,幂律参数逐渐减小,同时丘陵、冲积洪积、冲积地区的参数同样随其地势起伏的变小而变小。而黄土梁峁作为中国黄土高原地区特有的地貌类型,受长期风化、侵蚀作用影响,地势起伏不定,滑坡分布数量也较多,因而该地区的滑坡面积-体积幂律参数要高于丘陵、冲积洪积等地貌。

同时,表4中考虑到不同滑坡性质,对岩质与土质滑坡进行区分。在统计数据中,土质滑坡以

表4 不同条件下的滑坡幂律关系线性回归结果

Table 4 Linear Regression Results of Power-Law Relationship of Landslides Under Different Conditions

参数	分类	取值/m	滑坡点数量/个	α	β	R^2/%
海拔	低海拔	<1 000	431	0.022	1.224	91.20
	中海拔	[1 000,2 000)	323	0.037	1.310	91.95
	中高海拔	[2 000,4 000)	121	0.028	1.241	90.24
	高海拔	[4 000,6 000)	38	0.036	1.340	95.11
地势起伏	大起伏	[1 000,2 500)	246	0.039	1.296	91.51
	中起伏	[500,1 000)	135	0.031	1.280	91.61
	小起伏	[200,500)	141	0.021	1.202	95.28
地貌	黄土梁峁		51	0.032	1.344	90.15
	丘陵		106	0.027	1.301	92.05
	冲积洪积		84	0.022	1.207	88.29
	冲积		83	0.016	1.152	83.28
滑坡性质	土质滑坡		229	0.028	1.295	92.19
	岩质滑坡		110	0.035	1.258	94.90

小、中型规模居多,而岩质滑坡以中、大、特大型规模为主。图8中,红色线为岩质滑坡幂律关系、蓝色线为土质滑坡幂律关系,对应颜色的点为不同性质的滑坡点。可以看出,同样的几何面积下岩质滑坡体积要大于土质滑坡,且随面积的增大,体积差异逐渐减小。其差异主要与滑坡物质组成、结构特征及破坏机制等多重因素有关。通常土质滑坡土体结构松散、颗粒间粘接力弱、滑动面较浅,更容易发生小规模滑动。岩质滑坡岩体具有较高的整体强度,但受结构面(如节理、断层、层理)控制,一旦沿软弱结构面发生剪切破坏,可能触发深层、大范围的岩体整体滑动,导致大规模滑坡。

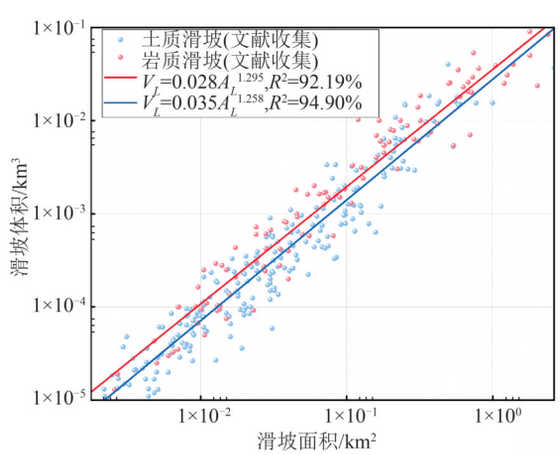


图8 不同性质滑坡幂律关系

Fig. 8 Power-Law Relationships of Landslides with Different Properties

因此,在考虑不同滑坡性质与环境条件的基础上,综合得到α取值范围为0.016~0.039,β取值范围为1.152~1.344。而参数α、β发生变化时,相应预测带也会变化,对于极端值的拟合效果有更好的表现。分析结果表明,幂律法能够有效预测滑坡体积,且几何建模法也验证了经验参数的可靠性。

2.3 幂律关系的数学证明

几何建模方法可以实现数学逻辑上对幂律关系的证明。结合式(2)、式(3),能够得到V_L与A_L的数学关系,计算公式为:

$$V_L=\frac{A_L\cdot c\left(1-\frac{h}{c}\right)\left(2+\frac{h}{c}\right)}{3\left(1+\frac{h}{c}\right)} \tag{5}$$

在椭球形滑动面情况下,规定轴长比值为$a:b:c=k:1:1$。假设现模型的轴长为$a=kr$、$b=c=r$,代入式(3)、式(5)可以求得:

$$r^2=\frac{A_L}{\pi k\left[\left(1-\frac{h}{c}\right)^2\right]} \tag{6}$$

$$V_L=\frac{A_L\cdot r\left(1-\frac{h}{r}\right)\left(2+\frac{h}{r}\right)}{3\left(1+\frac{h}{r}\right)} \tag{7}$$

而在球形滑动面下$k=1$,$a=b=c=r$。当$h/r=h/c=0.9$时,代入式(6)、式(7)得到r取值上界:

$$r=\frac{A_L^{0.5}}{0.773} \tag{8}$$

$$V_L=0.051\cdot r\cdot A_L\approx 0.065A_L^{1.5} \tag{9}$$

最终得到系数$\alpha=0.065$,指数$\beta=1.5$。本文中α取值范围为0.016~0.039,β取值范围为

1.152～1.344,均小于由 r 取上界计算出的 α 和 β 值。α 的值随 k 和 h/r 的变化而变化:当 $k=1$ 时,h/r 从 0.9 减小到 0.1,α 值由 0.065 减小到约 0.028,而当 k 增大时,α 值将进一步减小。文献[22]中提到,大型滑坡 β 值在 1.23～1.5 之间,而浅层滑坡 β 值较低,平均为 1.14,实验中的 β 值同样位于该范围内。因此,几何建模方法能够为滑坡幂律关系提供数学验证。

3　基于几何模型的滑坡体积估算

3.1　h/c 参数的确定

椭球形滑动面情况下,轴长 $a=kr$、$b=c=r$,利用几何建模方法可以得出滑坡 A_L 与 V_L 的数学关系,具体公式见式(5)。

因此对于实际中的滑坡,不论其形状如何变化,假设其为一个面积为 A_L 的椭球形滑动面,此时滑动面长度 L 可以通过沿滑坡方向的影像量测出。利用 A_L 和 L 可以计算出滑坡区域的宽度 B:

$$B=\frac{4A_L}{\pi L}=2b\sqrt{1-\left(\frac{h}{c}\right)^2}=2c\sqrt{1-\left(\frac{h}{c}\right)^2} \tag{10}$$

代入式(5)能够得到滑坡体积的计算公式:

$$V_L=\frac{A_L B\left(1-\frac{h}{c}\right)^2\left(2+\frac{h}{c}\right)}{6\left[1-\left(\frac{h}{c}\right)^2\right]^{3/2}} \tag{11}$$

对于式(11),只需要确定 h/c,再结合现有的卫星或航空影像量测出 A_L 和 L,即可实现对滑坡体积的估算。本文中确定参数 h/c 的基本步骤为:(1)利用全国滑坡数据集中已统计到的滑坡长、宽、面积、体积等信息反算出 h/c;(2)研究 h/c 与不同参数间的相关性;(3)找到相关性最高的参数,讨论与 h/c 间的线性关系;(4)确定 h/c 计算公式并估算滑坡体积。

在滑坡滑动过程中,滑源区的物质在运动和变形中会携带和堆积更多的松散物质,从而导致堆积体的体积增大,因此为区分滑后堆积体与滑坡原始体积,实验中采用 20% 的膨胀系数经验值来计算滑源区体积[23]。研究中进一步筛选得到 567 个几何信息记录完整的滑坡,最终 h/c 取值在 0～1 之间,且 81.31% 以上滑坡的 h/c 分布在 0.8～1 内,即全国滑坡多为浅层滑坡。

3.2　几何模型的建立与改进

文献[17]指出参数 h/c 与 $\lg A_L$ 存在线性关系,但研究中发现,随着滑坡数量增多,h/c 与 $\lg A_L$ 的相关性逐渐降低且与其他参数相关性无法区分高低。因此,仅考虑 h/c 和 $\lg A_L$ 间的线性关系在数据量增多时并不适用。针对以上问题,实际分析后发现 h/c 与 $\lg A_L$ 相关性依赖于长宽比 k。图 9 展示了 k 在不同的取值区间时,随着 k 的增大,h/c 与 $\lg A_L$ 的线性回归函数的斜率也越大,直至一定程度后趋于稳定。

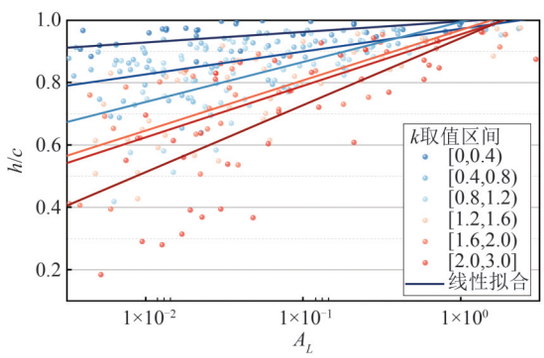


图 9　k 取不同区间时 h/c 与 $\lg A_L$ 的线性回归结果

Fig. 9　Linear Regression of h/c and $\lg A_L$ for Different Aspect Ratio k Intervals

因此,为避免大量数据中的异常值对后续回归精度产生影响,在长、宽、面积与体积信息完整的 567 个滑坡中,根据幂律法估算体积并选取误差较小的 200 个滑坡数据作为训练集,进行几何模型法参数的确定。加入 $\lg A_L \cdot k$ 参数后,各参数间的相关性如图 10 所示。

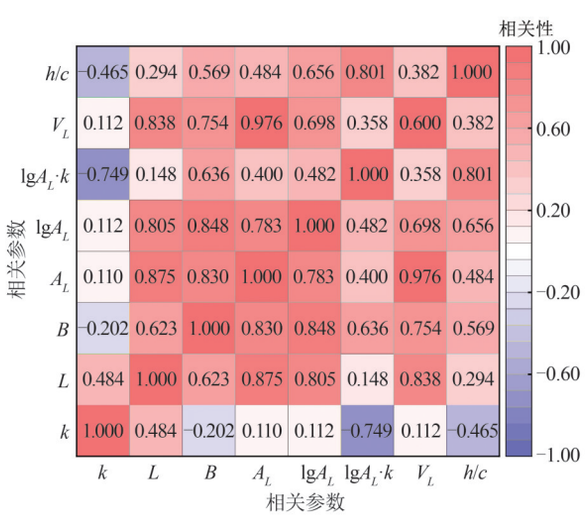


图 10　各参数相关性热力图

Fig. 10　Correlation Heatmap of Various Parameters

由图 10 可见,$\lg A_L \cdot k$ 与 h/c 的相关性更高,因此在建立线性回归模型确定 h/c 参数时,除了探讨 $\lg A_L$ 对 h/c 的影响,也应当考虑长宽比 k 的交互作用。为避免 h/c 参数集中分布在 0.8～1 间造成残差分布不正态,在回归分析前,先对 h/c 参数

进行对数几率变换得到$(\frac{h}{c})^*$,其计算式为:

$$(\frac{h}{c})^*=\lg(\frac{h/c}{1-h/c}) \tag{12}$$

而后,将$\lg A_L \cdot k$作为参数加入模型,最终计算出R^2达到73.3%,即回归模型对于数据的解释程度较好。统计检验结果表明,该模型拟合优度较高,回归残差接近正态分布,符合模型假设,最终表达式为:

$$(\frac{h}{c})^*=1.726\,1+0.215\,2\lg A_L+0.186\,2\lg A_L\cdot k \tag{13}$$

式(13)中的$(\frac{h}{c})^*$经过逆对数几率变换得到h/c。式(13)表明,相对于仅考虑$\lg A_L$对h/c参数的影响来说,加入长宽比k值在更多滑坡数据的情况下解释性更强。实际应用中,滑坡A_L与L可通过量测获取,B与k可利用式(10)计算得到。因此,利用几何模型方法无需实地量测,仅基于现有卫星遥感数据或航空影像,即可利用式(13)实现对滑坡体积的估算。

为了进行不同模型精度的对比分析,本文中还利用同样的200个滑坡数据计算了仅基于h/c与$\lg A_L$的线性回归,表达式为:

$$(\frac{h}{c})^*=1.671\,9+0.401\,5\lg A_L \tag{14}$$

该表达式的R^2仅为42.7%,远远低于加入$\lg A_L \cdot k$参数得到的R^2(73.3%)。因此,改进后的模型在滑坡数量增多时,对数据的解释性更强,更符合实际中对不同滑坡体积的估算。

4 精度评定

为了评价改进模型在体积估算中是否有效,本文中分别利用改进前后的几何模型法与幂律法对200个滑坡验证集进行体积估算,并对误差进行评估,统计结果见表5与图11。

表5 不同模型参数估计误差

Table 5 Estimation Errors of Parameters in Different Models

模型	$(\frac{h}{c})^*$	V_L	R^2/%	MSE/10^{-5}	RMSE/10^{-2}	MAE/10^{-3}	MSLE/10^{-6}	MAPE/%
原始几何模型	式(14)	式(11)	85.70	6.90	8.31	0.335	12.81	27.63
改进几何模型	式(13)	式(11)	88.25	5.11	7.15	0.269	9.48	19.38
幂律模型		$0.030A_L^{1.280}$	95.80	2.66	5.16	0.245	4.93	16.81

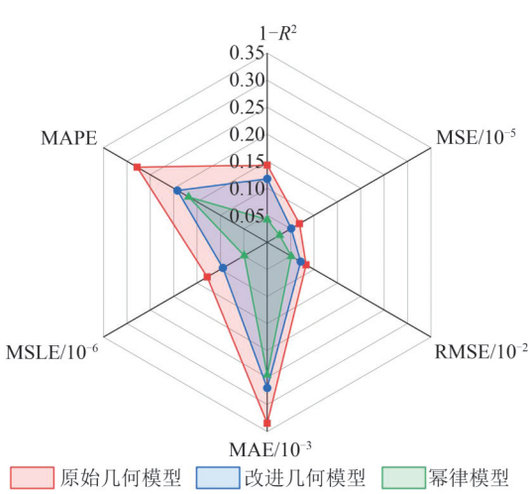


图11 误差雷达图

Fig. 11 Errors Radar Chart

在全国滑坡数据中,体积大小数量级跨越较大,因此评价精度时参考MSLE、MAPE更合理。由图11可以看出,3种滑坡体积估算方法中改进几何模型要优于原始几何模型,而幂律模型的误差最低。但对于不同方法误差对比来说,仅基于训练数据并不充分。因此,本文实验中收集了2024-08—2025-08期间汇报且未参与模型训练的55个滑坡,对3种方法在实际估算中的精度进行评价。如图12所示,其中黄、蓝色点分别为利用改进前、改进后的几何模型估算每个滑坡体积的相对误差,红色点为利用幂律模型估算每个滑坡体积的相对误差,不同颜色的虚线为由不同方法计算的MAPE大小。

整体来看,原始几何模型法MAPE最大,且大误差出现地更多,改进几何模型法误差降低,而幂律法误差最低,估算准确性更高,MAPE接近文献[24]提出的观察结果大于30%。因此,考虑长宽比k的加入,能够在众多滑坡数据的基础上保证较高的R^2,同时精度比仅建立线性关系的计算结果更好。

最终,能够得出不同方法的优缺点与适用特点:幂律模型简单且误差较小,但当滑坡规模较大时,估算会偏离预测带,同时在不同环境条件

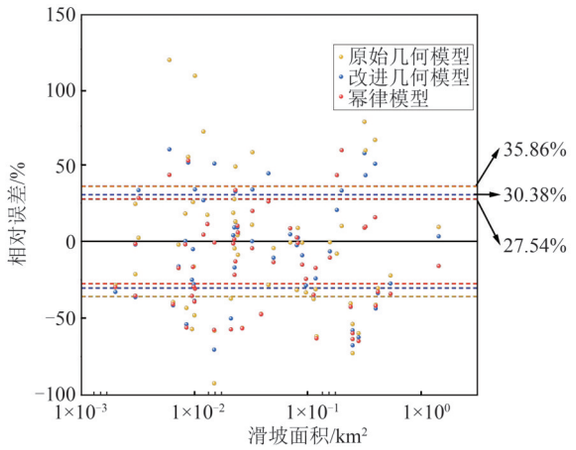


图 12　相对误差分布

Fig. 12　Relative Error Distribution

与滑坡性质下估算参数不同,进一步影响估算精度。而几何模型法充分考虑了滑坡的几何特性,精度在改进后得到提高,在滑坡数量增多的情况下仍具备较高的拟合优度,但相对于幂律法所需的估算参数增多,在实际估算中数据获取难度与不确定性增加。总体而言,两种方法均能在获取滑坡几何与面积参数的前提下,对滑坡体积进行快速估算且相对误差较小,这种简单的估算方法为实际中评估滑坡灾害的危险性提供了有效途径。

5　讨　论

在数据的获取中,通常采用两种不同的滑坡面积 A_L 定义:滑坡表面积和滑坡正投影面积,即滑坡表面积在水平面上的投影。因此,尽管大型滑坡涉及复杂的坡面几何,坡角可能沿滑坡方向变化,在获取了正射面积后,仍需进一步通过考虑坡度以减小实际滑坡体积与几何模型法估算体积间的误差。

根据图 13 能够看到,实际半主轴 a 与实际半主轴在水平面上的投影 a^* 之间存在联系,a^* 的计算式为:

$$\frac{a^*}{a}=\cos\theta_s \tag{15}$$

根据几何建模方法的定义,利用滑坡宽度(即垂直于滑坡方向的尺寸)相对应的半次轴 b 不受此变换的影响这一优势,可以分析实际滑坡表面积 A_L 根据坡度 θ_s 的变化对预测滑坡正投影面积 A_L^* 的敏感性,A_L^* 的计算式为:

$$A_L^*=a^*b\left[1-\left(\frac{H}{C}\right)^2\right]\pi \tag{16}$$

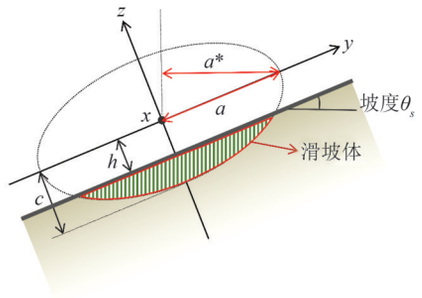


图 13　几何模型剖面示意图

Fig. 13　Diagram of Geometric Model Cross-Sectional

式中,H/C 为滑坡面积取正投影情况下所对应的归一化中心距。

因此,实际 A_L 与 A_L^* 的比率为:

$$\frac{A_L^*}{A_L}=\frac{a^*b\left[1-\left(\frac{H}{C}\right)^2\right]}{ab\left[1-\left(\frac{h}{c}\right)^2\right]} \tag{17}$$

由于归一化中心距反映椭球体中心至滑动面距离与半轴长间的相对位置状态,在不同滑坡面积定义下,该比值大小保持一致,即:

$$\frac{H}{C}=\frac{h}{c} \tag{18}$$

$$\frac{A_L^*}{A_L}=\frac{a^*}{a}=\cos\theta_s \tag{19}$$

基于幂律关系,V_L^* 与 V_L 间的比值可以表示为:

$$\frac{V_L^*}{V_L}=(\cos\theta_s)^\beta \tag{20}$$

式中,β 为滑坡幂律函数经验常数。

因此,利用几何模型法进行滑坡体积估算时,可以基于平均坡度对由 A_L^* 计算出的滑坡体积 V_L^* 进行误差修正。依据滑坡通常发生在坡度大于 10°、小于 45°的斜坡上,而在 45°以上的斜坡上通常表现为岩石垮塌与落石的特性,取坡角 θ_s 的范围为 10°～45°,式(20)中的 β 取值范围为 1.152～1.344。将坡度与经验常数取值范围代入式(20)计算得到 V_L^* 和 V_L 之间的差值范围为 1.75%($\theta_s=10°$,$\beta=1.152$)～37.24%($\theta_s=45°$,$\beta=1.344$),进而能够获取实际滑坡体积 V_L 的估值区间。

6　结　语

体积是评估滑坡危害性的一项重要指标,本文基于 1995 年以来 921 个滑坡的几何和体积数据,利用滑坡面积-体积幂律关系与几何建模方法,建立回归模型实现了对滑坡体积的快速估

算,同时分析了模型的可靠性和修正办法:通过对滑坡幂律模型进行几何验证与数学证明,表明其在滑坡体积估算中的合理性与可靠性,并分析了参数在不同环境条件与不同滑坡性质下的变化规律与极值范围;利用几何建模,对几何模型法体积估算中h/c参数的确定进行了讨论,分析表明在h/c与$\lg A_L$线性关系的基础上,加入$\lg A_L$与长宽比k的相互作用,在更多滑坡数据的情况下解释性更强;最终,对滑坡体积估算的面积-体积幂律方法和几何建模方法进行精度对比,结果表明幂律法误差较小,而改进后的几何建模方法在面对数量级跨越较大的众多滑坡数据时,相对于改进前的滑坡体积估算具有更强的适用性。本文研究成果为滑坡体积的估算提供了理论支撑,有利于在实际滑坡地质灾害防治中快速评估滑坡危害性,从而为相关部门提供决策支持,减少潜在的损失。

本文采用的滑坡数据均由文献统计得到,滑坡数量多、时间跨度大、信息准确度难以充分验证,因此模型可能存在一定的不确定性。虽然目前能够一定程度上对滑坡体积进行有效预测,但精度仍有提升空间。未来,随着更多真实可靠的滑坡数据积累、验证技术和方法的不断优化,模型的精度和适用范围有望显著提升,进而为滑坡灾害的防治提供更加有效的支持。

参 考 文 献

[1] 丁超,冯光财,周玉杉,等. 尼泊尔地震触发滑坡识别和雪崩形变分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(6):847-853.
DING Chao, FENG Guangcai, ZHOU Yushan, et al. Nepal Earthquake Triggered Landslides Recognition and Deformation Analysis of Avalanches' Region [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 847-853.

[2] 王向辉,张成龙,李振洪,等. 融合InSAR Stacking的董志塬滑坡动态易发性评价[J]. 测绘地理信息,2026,51(1):33-43.
WANG Xianghui, ZHANG Chenglong, LI Zhenhong, et al. Dynamic Landslide Susceptibility Assessment of the Dongzhiyuan Region Incorporating with InSAR Stacking [J]. *Journal of Geomatics*, 2026, 51(1): 33-43.

[3] 许强,徐繁树,蒲川豪,等. 2024年4月广东韶关江湾镇极端降雨诱发群发性滑坡初步分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1264-1274.
XU Qiang, XU Fanshu, PU Chuanhao, et al. Preliminary Analysis of Extreme Rainfall-Induced Cluster Landslides in Jiangwan Township, Shaoguan, Guangdong, April 2024[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1264-1274.

[4] 国家统计局. 中国统计年鉴2023[M]. 北京:中国统计出版社,2023.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.

[5] CHEN W, PENG J B, HONG H Y, et al. Landslide Susceptibility Modelling Using GIS-Based Machine Learning Techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1121-1135.

[6] 李彩虹,郭长宝,张广泽,等. 基于激光雷达(LiDAR)的地形与钻探滑面重构滑坡体积计算方法:以四川省巴塘县德达古滑坡为例[J]. 地质通报,2021,40(12):2015-2023.
LI Caihong, GUO Changbao, ZHANG Guangze, et al. A Landslide Volume Calculation Method Based on LiDAR Topography and Slip Surface Reconstruction: A Case Study of Deda Ancient Landslide in Batang County of Sichuan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2015-2023.

[7] 彭大雷,许强,董秀军,等. 基于高精度低空摄影测量的黄土滑坡精细测绘[J]. 工程地质学报,2017,25(2):424-435.
PENG Dalei, XU Qiang, DONG Xiujun, et al. Accurate and Efficient Method for Loess Landslide Fine Mapping with High Resolution Close-Range Photogrammetry [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(2): 424-435.

[8] MIURA H. Fusion Analysis of Optical Satellite Images and Digital Elevation Model for Quantifying Volume in Debris Flow Disaster[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1096.

[9] ATEFI M R, MIURA H. Volumetric Analysis of the Landslide in Abe Barek, Afghanistan Based on Nonlinear Mapping of Stereo Satellite Imagery-Derived DEMs [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 446.

[10] MAO Z L, HU S, WANG N L, et al. Precision Evaluation and Fusion of Topographic Data Based on UAVs and TLS Surveys of a Loess Landslide [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 801293.

[11] 许强,董秀军,赵建军,等. 基于机载LiDAR的2·8宜宾筠连山体滑坡几何特征分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2145-2153.

XU Qiang, DONG Xiujun, ZHAO Jianjun, et al. Geometric Characteristics Analysis of the 2·8 Junlian Landslide, Yibin Based on Airborne LiDAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2145-2153.

[12] 朱武, 杨璐瑶, 张金敏, 等. 联合 InSAR 和质量守恒法估计西藏贡觉地区雄巴滑坡厚度[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(3): 535-547.
ZHU Wu, YANG Luyao, ZHANG Jinmin, et al. Thickness Estimation of Xiongba Landslide in Gongjue Area of Tibet, China by Combining InSAR and Mass Conservation Method [J]. *Journal of Earch Sciences and Environment*, 2023, 45(3): 535-547.

[13] 周临轩, 杨成生, 李祖锋, 等. 高山峡谷区滑坡隐患监测与体积反演: 以四川省凉山州木里县为例[J]. 大地测量与地球动力学, 2025, 45(6): 610-617.
ZHOU Linxuan, YANG Chengsheng, LI Zufeng, et al. Monitoring and Volume Inversion of Landslide Hazards in High Mountain Canyon Areas: A Case Study of Muli County, Liangshan Prefecture, Sichuan Province[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2025, 45(6): 610-617.

[14] GUZZETTI F, ARDIZZONE F, CARDINALI M, et al. Distribution of Landslides in the Upper Tiber River Basin, Central Italy[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(1/2): 105-122.

[15] CHANG C W, LIN P S, TSAI C L. Estimation of Sediment Volume of Debris Flow Caused by Extreme Rainfall in Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2011, 123(1/2): 83-90.

[16] XU C, XU X W, SHEN L L, et al. Optimized Volume Models of Earthquake-Triggered Landslides [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29797.

[17] LEONG E C, CHENG Z Y. A Geometry-Modeling Method to Estimate Landslide Volume from Source Area[J]. *Landslides*, 2022, 19(8): 1971-1985.

[18] GB/T 32864—2016 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
GB/T 32864—2016 Landslide Prevention Engineering Surveying Standard [S]. Beijing: China Standards Press, 2016.

[19] ZHANG Y, MENG X M, DIJKSTRA T A, et al. Forecasting the Magnitude of Potential Landslides Based on InSAR Techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 241: 111738.

[20] GUZZETTI F, ARDIZZONE F, CARDINALI M, et al. Landslide Volumes and Landslide Mobilization Rates in Umbria, Central Italy[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 279 (3/4): 222-229.

[21] KANG Y, LU Z, ZHAO C Y, et al. Inferring Slip-Surface Geometry and Volume of Creeping Landslides Based on InSAR: A Case Study in Jinsha River Basin[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 294: 113620.

[22] JABOYEDOFF M, CARREA D, DERRON M H, et al. A Review of Methods Used to Estimate Initial Landslide Failure Surface Depths and Volumes [J]. *Engineering Geology*, 2020, 267: 105478.

[23] DUNNING S A, MITCHELL W A, ROSSER N J, et al. The Hattian Bala Rock Avalanche and Associated Landslides Triggered by the Kashmir Earthquake of 8 October 2005[J]. *Engineering Geology*, 2007, 93(3/4): 130-144.

[24] WANG T S, YU T T, LEE S T, et al. MATLAB Code to Estimate Landslide Volume from Single Remote Sensed Image Using Genetic Algorithm and Imagery Similarity Measurement[J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 70: 238-247.