引文格式：朱安峰,郝君,刁梦妮,等. 顾及空间自相关的滑坡灾害易发性评价[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):77-81. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.12.017

顾及空间自相关的滑坡灾害易发性评价
——以温州市为例

朱安峰[1,2]，郝　君[1,3]，刁梦妮[4]，刘鸿鹄[5]，徐　刚[1*]
（1. 浙江安防职业技术学院，浙江 温州 325000；2. 温州市自然灾害遥感监测重点实验室，浙江 温州 325000；
3. 中国矿业大学环境与测绘学院，江苏 徐州 221116；4. 温州市未来城市研究院，浙江 温州 325000；
5. 温州市天空地态势感知应用技术协同创新中心，浙江 温州 325000）

摘　要：为解决滑坡灾害空间分析中存在的空间自相关效应，研究引入空间自相关因子改进IV-logistic回归模型，构建了基于IV-Autologistic回归模型的滑坡灾害易发性模型，以温州市为研究区，同时选取高程、水系和NDVI等评价因子，开展温州市滑坡灾害易发性评价研究，并采用ROC曲线对模型改进前后的精度进行对比验证。研究结果表明：研究区整体上以低易发区和非易发区为主，高易发区主要分布在低山区域，位于平原和山地的交界处，占总面积的15.58%；IV-Autologistic回归模型的精度比IV-Logistic回归模型的评价精度更高，ROC曲线下的AUC值为0.842。研究结果可为温州市及类似地区的滑坡灾害防治提供参考。

关键词：滑坡；易发性评价；信息量；Autologistic回归模型；空间自相关性
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0077-05

Susceptibility Evaluation of the Landslide Disasters Considering Spatial Autocorrelation: A Case Study of Wenzhou City

ZHU Anfeng[1,2], HAO Jun[1,3], DIAO Mengni[4], LIU Honghu[5], XU Gang[1]
(1. Zhejiang College of Security Technology, Wenzhou 325000, China;
2. Wenzhou Key Laboratory of Natural Disaster Remote Sensing Monitoring and Early Warning, Wenzhou 325000, China;
3. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
4. Wenzhou Future City Research Institute, Wenzhou 325000, China;
5. Wenzhou Collaborative Innovation Center for Space-borne, Airborne and Ground Monitoring Situational Awareness Technology, Wenzhou 325000, China)

Abstract: To address the spatial autocorrelation effect existing in the spatial analysis of landslide disasters, we introduced spatial autocorrelation factors to improve the IV-Logistic regression model, and constructed a landslide disaster susceptibility model based on the IV-Autologistic regression model. Taking Wenzhou City as the research area, we selected elevation, water and NDVI to study the susceptibility of landslide disasters in Wenzhou City, and used the ROC curve to compare the accuracy of model before and after improvement. The research results show that the study area as a whole is mainly composed of low-susceptibility areas and non-susceptibility areas. The high-susceptibility areas are mainly distributed in the low mountain area, located at the junction of plain and mountain, accounting for 15.58% of the total area. The accuracy of the IV-Autologistic regression model is higher than that of the IV-Logistic regression model, and the AUC value under the ROC curve is 0.842.The research results can provide a reference for the prevention and control of landslide disasters in Wenzhou City and similar areas.

Key words: landslide, susceptibility evaluation, IV, Autologistic regression model, spatial autocorrelation

目前，滑坡灾害易发性评价方法主要包括3种：基于知识的方法、物理信息法和数据驱动法[1-3]。基于知识的方法依赖于专家的知识储备和经验总结，主观性比较强[4-5]；物理信息法基于物理模型，可以动态地描述滑坡灾害发生的物理过程，具有较高的预测精度，但其关键参数难以获取[4,6]；数据驱动方法将过去引起滑坡灾害的因素组合进行统计评估，找到滑坡灾害发生与这些因素的关系，进而定量预测滑坡灾害的易发性，该方法具有结果客观，高效率的优点，应用广泛，常用的数据驱动方法包括：信息量法[7-8]、频率比法[9]、Logistic回归模型[10]和随机森林等。为了提高易发性评价的适用性和准确性，大量研究开展2个或

第一作者简介：朱安峰（1991—），硕士，高级工程师，研究方向为时空大数据理论技术与城市安全、应急管理应用，E-mail：20096344@zjcst.edu.cn。
通信作者：徐刚（1980—），博士，教授，研究方向为地理信息空间与遥感技术应用，E-mail：20096342@zjcst.edu.cn。

者多个易发性评价模型之间的对比研究或者耦合研究[11-15]，结果表明耦合模型具有更好的预测效果，如信息量-逻辑回归耦合模型、频率比-逻辑回归耦合模型等[13-16]。

信息量-逻辑（IV-Logistic）回归模型，通过提取各评价因子不同等级的信息量作为逻辑回归模型的输入数据，进而预测滑坡灾害的易发区域，在多地的应用中均取得了较好的成果[16-17]。但采用IV-Logistic回归模型的滑坡灾害研究很少考虑到滑坡灾害存在的空间自相关效应，而已有的研究发现滑坡灾害空间自相关性对评价分析产生影响[18]。因此，本研究尝试在信息量-逻辑（IV-Logistic）回归模型中引入空间自相关因子，构建IV-Autologistic模型，以解决滑坡灾害空间统计分析中固有的空间自相关效应的影响[19]，进行温州市滑坡灾害易发性评价分析，同时，采用ROC曲线对比验证模型改进前后的预测精度，以期研究结果可为温州市及类似地区的滑坡灾害防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

温州市位于浙江省东南部，地形以山地和平原为主，地势西南高东北低，整体呈梯形倾斜[2,20]。气候为亚热带季风气候，降水丰富但年内分布不均，集中在5-6月份的梅雨期和7-9月份的台风暴雨期，降雨量自东南沿海向西部逐渐递增[20-22]。

温州市地质灾害点1 689处，其中崩塌325处、滑坡1 038处、泥石流326处（图1）。受到梅雨和台风暴雨的影响，这3种地质灾害多发生在汛期（4月15日-10月15日）[19]。

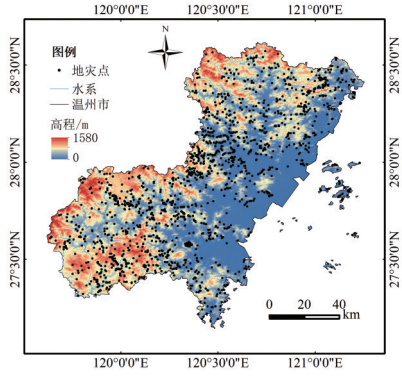


图1 研究区域

审图号：浙温S(2024)39号

1.2 数据来源

研究所用到的数据包括2种：滑坡灾害点和评价因子。滑坡灾害易发性评价的主要因素和指标包括地形地貌、地质构造、气象水文、植被覆盖和人类活动[23]。本研究选取高程、地形起伏度、曲率、坡度、道路、NDVI、水系、地层岩性和断层9个评价因子，构建温州市滑坡灾害易发性模型，并进行易发性评价。研究用到的主要数据来源见表1，坡度、地形起伏度、曲率由高程数据进行表面分析得到。

表1 数据及来源

数据	来源	精度/m
道路、河流等	国家基础地理信息中心	—
地层岩性、断层	全国1∶200 000数字地质图（公开版）空间数据库（V1）[24]	—
NDVI	中国科学院资源环境科学与数据中心	1 000 m
高程	地理空间数据云	30 m
滑坡灾害点	第一次全国自然灾害综合风险普查数据（2022年）	—

不同高程的植被覆盖、降水侵蚀、人类活动等存在差异，影响滑坡灾害的发生。一般而言，坡度越陡，滑坡灾害发生的可能性就越大[25]。地形起伏度反映了一定范围内地形变化的幅度及地形切割的情况，是滑坡灾害的影响因素之一[2]。正负曲率描述了斜坡的凹凸形态，影响着斜坡的内受力分布[26]。距离水系越近，地表越容易受到水流的冲刷和侵蚀，斜坡的稳定性也越差，从而导致滑坡灾害的发生[27]。岩土体性质对斜坡的稳定性具有绝对的控制作用[12]。断层处岩体容易破碎，更容易发生滑坡[3]。NDVI反映了植被的生长状况和数量分布，对土壤侵蚀有一定的影响[28]。道路改变了原始地形结构，影响地质条件的稳定性，有可能诱发山体滑坡[29]。

1.3 研究方法

1.3.1 IV模型

信息量（information value，IV）模型是一种定量分析方法，广泛应用于滑坡灾害易发性评价[14,29]。滑坡灾害的发生受到多种因素的影响，IV模型通过计算每种因素不同分级所包含的IV作为易发性评价的量化指标。IV值越大，意味着滑坡灾害发生的可能性越大[14,30]。

$$I=\sum_{i=1}^{n}I(x_i,H)=\sum_{i=1}^{n}\ln\frac{N_i/N}{S_i/S} \tag{1}$$

式中，I为评价单元信息量预测值，体现了滑坡灾害发生的可能性；n为评价因子数量；H为滑坡灾害数量；S为研究区总单元数；N为灾害发生的总单元数；S_i为指标x_i的单元数；N_i为指标x_i的灾害发生单元数。

1.3.2　IV-Logistic 回归模型

Logistic 回归模型是一种多元回归分析模型，广泛应用于研究二分类对象与其影响因子之间关系。IV-Logistic 回归模型是以滑坡灾害是否发生为因变量，分别取值为 1 或 0，以评价因子的信息量作为自变量，建立 Logistic 回归方程预测滑坡灾害发生的概率。表达式如下：

$$\mathrm{Log}\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right)=\beta_0+\beta_1x_1+\cdots+\beta_nx_n \quad (2)$$

式中，P 为灾害发生概率，取值范围为[0-1]；β_0 为常数项；β_1，…，β_n 为回归系数；x_1，…，x_n 为评价因子的信息量。

1.3.3　IV-Autologistic 回归模型

IV-Autologistic 回归模型是本文提出的改进 IV-logistic 回归模型，它在传统 IV-logistic 回归模型的基础之上引入空间自相关因子，从而解决滑坡灾害空间分析问题中固有的空间自相关效应的影响[19]。表达式如下：

$$\mathrm{Log}\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right)=\beta_0+\beta_1x_1+\cdots+\beta_nx_n+\beta'\mathrm{Ato\,cov}_i \quad (3)$$

式中，P 为灾害发生概率，取值范围为[0-1]；β_0 为常数项；β_1，…，β_n 为回归系数；β' 为空间自相关因子的回归系数；x_1，…，x_n 为评价因子；Atocov_i 为空间自相关因子。

研究采用密度分析中的点密度分析结果作为空间自相关因子 Atocov_i，反映滑坡灾害在空间上的密集程度，并将其纳入滑坡灾害易发性评价因子中，以补充传统 IV-logistic 回归模型的不足。

2　结果与分析

2.1　IV 计算分析

利用公式（1）计算各因子各分级指标的 IV 值。IV 值越高，表示该分级越容易发生滑坡灾害。从表 2 可以看出，滑坡灾害多发生 400 以下的低山区，坡度在 10~30°之间，起伏度在 11~24°之间。较坚硬晶、玻屑凝灰岩组是滑坡灾害发生较多的岩组，距离断层越近，滑坡灾害越容易发生，在距离断层距离大于 3 000 m，滑坡灾害增多，考虑是人类活动的影响。此外，当斜坡形态为凹坡时，滑坡灾害发生概率大于在凸坡。另外，滑坡灾害与水系和道路之间存在一定的距离效应。当 NDVI 在 0.6~0.8 之间，降雨量小于 1 150 mm，滑坡灾害更容易发生。然而，研究中部分 IV 的计算结果与以往研究结果不相符[6、26]。主要考虑两方面原因：①滑坡灾害点记录精度不够；②以点表示有一定规模范围的滑坡灾害，可能存在一定的偏差。

2.2　评价因子优化

采用共线性诊断和相关性分析对评价因子进行优化。通过计算各因子之间的方差膨胀因子（VIF）和容差来判断各因子之间的共线性情况。从表 2 可以看出，9 个评价因子的 VIF 值均小于 2.2，且容差均大于 0.1，表明因子之间共线性较弱。通过进一步计算各因子之间的相关性系数，结果显示，坡度与地形起伏度之间存在一定相关性（R =0.723），而其他因子之间的相关系数均小于 0.3，不具有相关性。因此，剔除坡度因子。

表 2　方差膨胀因子（VIF）和容差

评价因子	高程	地形起伏度	曲率	坡度	道路	NDVI	水系	地层岩性	断层
容差	0.94	0.467	0.97	0.476	0.905	0.961	0.912	0.968	0.959
VIF	1.064	2.14	1.031	2.101	1.105	1.04	1.097	1.033	1.043

2.3　滑坡易发性评价分析

2.3.1　IV-logistic 回归模型易发性评价

以各评价因子的 IV 和空间自相关因子为自变量，进行逻辑回归分析。首先对各因子之间的显著性进行检验，结果显示各因子的显著性均>0.05，具有统计学意义，因此，保留所有因子构建模型。

$$\mathrm{Log}\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right)=-0.208+1.082x_1+1.113x_2+0.594x_3+1.035x_4+0.59x_5+0.5x_6+0.124x_7+1.568x_8 \quad (5)$$

式中，P 为灾害发生概率值；x_1，…，x_8 分别为高程、地形起伏度、曲率、道路、NDVI、水系、地层岩性和断层不同等级的 IV 值。

采用自然断点法将易发性程度分为高易发区、中易发区、低易发区和非易发区 4 个等级。各等级面积占比分别为 18.12%、26.19%、24.9%和 30.79%，滑坡灾害占比分别为 47.8%、32.87%、13.05%和 6.28 %。评价结果表明，研究区以中非易发区为主；高易发区的面积最小，但滑坡灾害占比最大；滑坡灾害占比随易发性等级的降低而降低。

2.3.2　IV-Autologistic 回归模型易发性评价

在 IV-logistic 回归模型中加入空间自相关因子，实现基于 IV-Autologistic 回归模型的滑坡易发性评价。

$$\mathrm{Log}\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right)=-1.529+0.698x_1+0.94x_2+0.606x_3+0.972x_4+0.024x_5+0.770x_6+0.222x_7+0.899x_8+8.401\mathrm{Atocov}_i \quad (6)$$

式中，P 为灾害发生概率值；x_1，…，x_8 分别为高

程、地形起伏度、曲率、道路、NDVI、水系、地层岩性和断层不同等级的 IV 值； $Atocov_i$ 为空间自相关因子。

根据IV-logistic回归模型的结果，空间自相关因子系数存在且最大，表明研究区的滑坡灾害存在较强的空间自相关性。采用自然断点法将易发性程度分为高易发区、中易发区、低易发区和非易发区4个等级。各等级面积占比分别为15.57%、21.15%、28.18%和35.09%，滑坡灾害占比分别为54.62%、26.54%、13.77%和5.07%。研究区以低易发区和非易发区为主，与徐刚[2]等的研究结果一致。IV-Autologistic回归模型解决了滑坡灾害空间分析中存在的空间自相关效应，高易发区的面积最小，但滑坡灾害占比最大，滑坡灾害占比随易发性等级的降低而降低，且各易发性等级越低，面积占比越高，评价结果具有合理性[12]。高易发区呈现出多中心扩散的形态，集中在中低坡度和起伏度的低山区域，位于平原和山地的交界处；中易发区的形态呈条带状，主要分布在道路的两侧；而低易发区和非易发区则主要分布在低海拔的沿海和高海拔的山区。

2.4 精度验证

评估滑坡灾害易发性评价模型的准确性对于结果的可靠性非常重要。采用受试者特征曲线（ROC）验证滑坡灾害易发性模型的精度，横坐标表示采用曲线下的面积值（AUC）定量表示模型的准确度[14]。AUC值越接近于1，表明模型的精度越高，预测滑坡灾害的能力越强[13]。绘制IV-Autologistic回归模型和IV-Logistic回归模型的ROC曲线（见图2），改进后的IV-Autologistic回归模型和IV-Logistic回归模型的AUC值分别为0.842和0.761，说明IV-Autologistic回归模型在滑坡灾害预测方面具有更高的准确性。

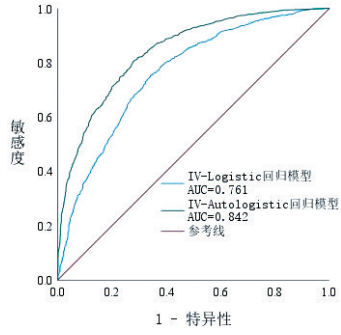


图2 模型ROC曲线和AUC值对比

3 结 语

本研究针对温州市滑坡灾害易发性评价，引入空间自相关因子构建IV-Autologistic回归模型。结果表明，滑坡灾害具有显著的空间自相关性，高易发区集中于低山与平原交界带。经ROC曲线验证，该模型精度优于传统方法，可为区域滑坡防治提供科学依据。

参考文献

[1] 周明浪,邵新民,罗美芳. 浙江温州滑坡地质灾害预警方法及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(2):90-97

[2] 徐刚,胡坤霖,温剑峰,等. 顾及地形邻域影响的地质灾害风险易发区评估[J]. 测绘通报,2021(7) :59-64

[3] 赵晓东,刘福,杨华,等. 改进的学习向量量化滑坡易发性评价模型研究[J]. 测绘科学,2023,48(5):239-246

[4] Corominas J, Van W C, Frattini P. Recommendations for the Quantitative Analysis of Landslide Risk[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(6): 209-263

[5] Huang Y,Zhao L. Review on Landslide Susceptibility Mapping Using Support Vector Machines[J]. Catena, 2018, 165(20):520-529

[6] Si A,Zhang J Q,Zhang Y C,et al. Debris Flow Susceptibility Assessment Using the Integrated Random Forest Based Steady-state Infinite Slope Method:A Case Study in Changbai Mountain,China[J]. Water,2020,12(7):2 057

[7] Liu S ,Wang L Q,Zhang W G,et al. A Physics-informed Data-driven Model for Landslide Susceptibility Assessment in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Geoscience Frontiers,2023,14(5):101 621

[8] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽. 基于GIS和信息量的滑坡灾害易发性评价:以三峡库区万州区为例[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(4):797-808

[9] 齐信,黄波林,刘广宁,等. 基于GIS技术和频率比模型的三峡地区秭归向斜盆地滑坡敏感性评价[J]. 地质力学学报,2017,23(1):97-104

[10] 唐川,马国超. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究[J]. 地理科学,2015,35(1):91-98

[11] Wu X,Song Y,Chen W,et al. Analysis of Geological Hazard Susceptibility of Landslides in Muli County Based on Random Forest Algorithm[J]. Sustainability,2023,15(5):4 328

[12] 李文彦,王喜乐. 频率比与信息量模型在黄土沟壑区滑坡易发性评价中的应用与比较[J]. 自然灾害学报,2020,29(4):213-220

[13] 谭彬,刘国栋,余安亮,等. 基于AHP-INF耦合模型的察雅县地质灾害易发性评价[J]. 地理空间信息,2023,21(11):15-19

[14] 樊芷吟,苟晓峰,秦明月,等. 基于信息量模型与Logistic回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报,2018,26(2):340-347

[15] 吴常润,角媛梅,王金亮,等. 基于频率比-逻辑回归耦合模型的

双柏县滑坡易发性评价[J]. 自然灾害学报,2021,30(4):213-224

[16] 黄鑫,吴珍云,丁德建,等. 基于信息量-逻辑回归模型的江西省婺源县地质灾害易发性评价[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2023,46(3):259-268

[17] 钱紫玲,王平,李娜,等. 基于信息量和逻辑回归耦合模型的黄土地震滑坡危险性分析[J]. 地震工程学报,2023,45(3):706-715

[18] 李慧芳. 顾及空间自相关的区域滑坡敏感性评价研究[D]. 武汉:武汉大学,2022

[19] 吴桂平,曾永年,冯学智,等. CLUE-S模型的改进与土地利用变化动态模拟:以张家界市永定区为例[J]. 地理研究,2010,29(3):460-470

[20] 温州市统计局. 2022年温州统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2022

[21] 陈光平. 台风引发温州市斜坡地质灾害的发育分布及影响因素研究[D]. 成都:成都理工大学,2012

[22] 赵晓东,杲旭日,张泰丽,等. 基于GIS的潜势度地质灾害预警预报模型研究:浙江省温州市为例[J]. 地理与地理信息科学,2018,34(5):1-6

[23] 马寅生,张业成,张春山,等. 地质灾害风险评价的理论与方法[J]. 地质力学学报,2004,9(1):7-18

[24] 李晨阳,王新春,何春珍,等. 全国1:200 000数字地质图(公开版)空间数据库(V1)[DB]. 中国地质调查局发展研究中心,中国地质调查局,全国地质资料馆,2019-06-30

[25] Chang L L,Xing G L,Yin H,et al. Landslide Susceptibility Evaluation and Interpretability Analysis of Typical Loess Areas Based on Deep Learning[J]. Natural Hazards Research,2023,3(2):155-169

[26] 姜建伟,赵法锁,祝俊华,等. 陕西省吴起县斜坡几何形态与地质灾害相关性研究[J]. 灾害学,2018,33(2):188-192

[27] 孟凡奇,高峰,林波,等. 基于AHP和信息量模型的地质灾害易发性评价:以鲁东片区为例[J]. 灾害学,2023,38(3):111-117

[28] Asmar D. Application and Validation of Ahp and Fr Methods for Landslide Susceptibility Mapping Around Choke Mountain, Northwestern Ethiopia[J]. Scientific African,2023,19:e01470

[29] Tesfa C,Woldeardearegay K. Characteristics and Susceptibility Zonation of Landslides in Wabe Shebelle Gorge, Southeastern Ethiopia[J]. Journal of African Earth Sciences,2021,182:104 275

（上接第21页）

参考文献

[1] 张永军,张祖勋,龚健雅. 天空地多源遥感数据的广义摄影测量学[J]. 测绘学报,2021,50(1):1-11

[2] 陈巧,袁飞云,付霞,等. 无人机摄影测量技术在阿娘寨滑坡应急调查中的应用[J]. 测绘通报,2023 (1):77-83

[3] 朱鹏程. 基于无人机的矿区地表水平移动监测方法[J]. 地理空间信息,2024,22(3):16-19

[4] Florinsky I V, Kurkov V M, Bliakharskii D P. Geomorphometry from Unmanned Aerial Surveys[J]. Transactions in GIS,2018,22(1):58-81

[5] Godone D, Allasia P, Borrelli L, et al. UAV and Structure from Motion Approach to Monitor the Maierato Landslide Evolution[J]. Remote Sensing,2020,12(6):1 039

[6] Cheng Z,Gong W,Tang H,et al. UAV Photogrammetry-based Remote Sensing and Preliminary Assessment of the Behavior of a Landslide in Guizhou,China[J]. Engineering Geology,2021,289:106 172

[7] 何佳男. 贴近摄影测量及其关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2019

[8] 席可. 高陡岸坡变形特征贴近摄影测量关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2024

[9] 王彦良,杜鹏超,陈富强,等. 贴近摄影测量在塔式古建筑精准保护决策中的应用[J]. 地理空间信息,2024,22(12):51-54

[10] 蔡嘉伦,贾洪果,刘国祥,等. 对比传统低空航测的无人机倾斜摄影测量精度评估[J]. 测绘通报,2022(2):31-36

[11] Ekaso D,Nex F,Kerle N. Accuracy Assessment of Real-time Kinematics (RTK) Measurements on Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Direct Geo-referencing[J]. Geo-spatial Information Science,2020,23(2):165-181

[12] 周建国,龚建宗,刘文杰. 无人机贴近摄影测量在滑坡体监测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(11):183-185

[13] 雷苏琪,牛壮群,席可,等. 水工程体无人机贴近摄影和质量控制方法[J]. 地理空间信息,2023,21(3):10-14

[14] 张永军,张勇. 大重叠度影像的相对定向与前方交会精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2005,48(2):126-130

[15] 刘飞鹏. 前方交会原理下倾斜摄影测量测图精度验证[J]. 测绘标准化,2023,39(3):109-113

[16] Murtiyoso A, Koehl M, Grussenmeyer P, et al. Acquisition and Processing Protocols for UAV Images:3D Modelling of Historical Buildings Using Photogrammetry[C]//26th Cipa International Symposium ISPRS,Ottawa,Canada,2017

[17] Murtiyoso A,Grussenmeyer P,Freville T. Close Range Uav Accurate Recording and Modeling of St-pierre-le-jeune Neo-romanesque Church in Strasbourg (France)[J]. ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2017,42:519-526