引文格式：高茂宁 ,魏冠军 ,雷传金 ,等. 顾及时序InSAR的海东市辖区滑坡敏感性评价[J]. 地理空间信息, 2024, 22(5): 97-101. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.05.021

顾及时序InSAR的海东市辖区滑坡敏感性评价

高茂宁[1,2,3]，魏冠军[1,2,3]，雷传金[1,2,3]，张　沛[1,2,3]
（1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070；2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃 兰州 730070；
3. 甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃 兰州 730070）

摘　要：针对传统滑坡敏感性评价模型存在假阴性、假阳性误差的错分类结果，提出顾及时序InSAR的信息量—逻辑回归（IV-LR）滑坡敏感性评价方法。以海东市辖区为例，通过SBAS-InSAR获取形变速率因子，并与传统评价因子共同作为IV-LR模型的输入变量生成新滑坡敏感性制图。结果表明，形变速率因子对IV-LR模型具有较强的影响，与仅考虑传统评价因子的原始滑坡敏感性制图相比，新滑坡敏感性制图中高、极高敏感区占比分别增加了0.18%、1.7%，模型的AUC从0.901提升至0.925，有效减少了错分类结果的影响，具有更高的预测精度，可为海东市辖区的滑坡防治工作提供更可靠的参考。

关键词：滑坡敏感性评价；IV-LR模型；SBAS-InSAR
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）05-0097-05

Landslide Susceptibility Evaluation of Haidong Urban Area Considering Time Series InSAR

GAO Maoning[1,2,3], WEI Guanjun[1,2,3], LEI Chuanjin[1,2,3], ZHANG Pei[1,2,3]
(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;
3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the misclassification results of false negative and false positive errors in the traditional landslide susceptibility evaluation model, we proposed an information-logistic regression (IV-LR) landslide susceptibility evaluation method considering time series InSAR. Taking Haidong urban area for example, we used SBAS-InSAR to obtain the annual average deformation velocity in the study area, and taking deformation velocity and tradition evaluation factor as the input variable of IV-LR model, generated a new landslide susceptibility map. The results show that the deformation velocity factor has an obviously influence on the IV-LR model. Compared with the original landslide sensitivity mapping that only considered tradition evaluation factor, the proportions of high and extremely high sensitive areas in the new landslide sensitivity mapping increase by 0.18% and 1.7%, respectively. The AUC increases from 0.901 to 0.925. The impact of misclassification results is effectively reduced, and the prediction accuracy is higher, which can provide a more reliable reference for the landslide prevention and control work in Haidong urban area.

Key words: landslide sensitivity evaluation, IV-LR model, SBAS-InSAR

滑坡敏感性评价在对现有滑坡进行编目、调查的基础上，综合多方面评价因子数据集，分析斜坡发生失稳、破坏的可能性，获得滑坡敏感性制图（LSM）结果。信息量法、证据权法、逻辑回归方法、随机森林方法[1-4]等常用滑坡敏感性评价方法具有数据获取简单、预测效率高等优势，已成为领域内研究的热点。通常滑坡敏感性评价模型是由历史滑坡数据和传统评价因子构建的，若地理环境随时间变化，则不能完全反映当前滑坡的时空变化特征，存在假阴性和假阳性误差。为降低滑坡敏感性评价的错分类结果，部分学者尝试将合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术与滑坡敏感性评价相结合，如Zhao F[5]等利用修正矩阵将InSAR结果应用于喀喇昆仑公路沿线的LSM，结果表明InSAR技术弥补了LSM中历史灾害数据的缺失和区域尺度评价的空白；黄龙[6]等将InSAR结果作为评价因子纳入基于随机森林的滑坡敏感性评价模型中，对基于历史滑坡数据得到的LSM进行改正，有效降低了假阴性误差的影响；Cao C[7]等将InSAR技术与滑坡敏感性评价结果相结合，利用无人机影像进行调查，结果表明将多源技术引入滑坡敏感性评价中可以获得更

收稿日期：2023-01-28。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41964008）；兰州交通大学优秀平台资助项目（201806）。
第一作者简介：高茂宁（1997—），硕士研究生，研究方向为地质灾害监测、预警，E-mail：932655441@qq.com。

合理的LSM，识别出具有高敏感性的滑坡。相关研究表明，将InSAR数据与多种数据集相结合可以获得更准确全面的地质灾害评价结果，具有广泛的应用空间[8-11]。然而，目前将时序InSAR结果作为评价因子纳入敏感性评价模型的研究仍较少，因此本文提出了顾及时序InSAR的信息量—逻辑回归（IV-LR）滑坡敏感性评价方法，信息量法可直观确定各因子分级的权重，逻辑回归法可确定各评价因子贡献率大小，结合二者优点的耦合模型通常具有更高的评价精度[12-13]。本文以海东市辖区为例，探究了形变速率因子在IV-LR模型中的作用和适用性，并讨论了LSM的效果和可靠性，以期为海东市辖区滑坡防治工作提供更可靠的参考。

1 研究区概况

本文选取的研究区为青海省海东市平安、乐都两市辖区，位于101°49′03″~102°47′42″E、36°12′20″~36°51′10″N之间，属于青藏高原与黄土高原的过渡带。研究区海拔约为1 805~4 400 m，呈现南北高、中间低的地势；北部为达坂山脉，南部为拉脊山脉，中部以黄土地貌的浅山为主，并分布有多条南北走向的河谷，湟水河自西向东流经全境形成湟水谷地。研究区属半干旱型大陆性气候，年均降水量为300~400 mm；区域内地层岩性复杂，主要包括长城系、寒武系、奥陶系、志留系、三迭系、白至系、第三系；断裂构造发育，存在拉脊山和大冰沟等断裂带。复杂地形、水文、地质和构造运动等因素为该区域滑坡的孕育提供了良好的条件。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

本文选取41幅欧空局的哨兵1号（Sentinel-1A）升轨微波遥感数据，C波段成像的41幅单视复数影像时间跨度为2020-04-09—2021-10-01，极化方式为VV，成像模式为IW，重访周期为12 d。引入POD精密定轨数据提高影像轨道精度，将空间分辨率为30 m的ASTER数字高程模型（DEM）作为外部DEM数据，消除地形起伏的影响。将时间基线阈值设置为90 d，临界基线百分比设置为15，生成231组干涉对，通过小基线集合成孔径干涉测量（SBAS-InSAR）技术，获得坡度向年均形变速率。

根据历史滑坡调查编目资料，确定了205个滑坡点，在距离滑坡点1.5 km外随机选择205个非滑坡点共同构成样本点。本文基于ASTER DEM、1∶2 500 000地质图、OpenStreetMap、MODIS遥感数据等，结合研究区内滑坡分布特征和形成条件，选取高程、岩性、断层距离、道路距离、坡向、坡度、平面曲率、河流距离、归一化植被指数（NDVI）9个指标作为传统评价因子，并结合各因子特点采用不同标准进行分级。

2.2 IV-LR模型

信息量模型可定量描述评价因子与滑坡灾害之间的相关性。将研究区内各评价因子量化为信息量值，作为定量指标[14]，计算公式为：

$$I\left(i_j\right)=\ln\frac{N_{ij}/N}{S_{ij}/S} \tag{1}$$

式中，$I(i_j)$为第i个评价因子中第j类的信息量值；N_{ij}为第i个评价因子中第j类滑坡点总数；N为滑坡灾害点总数；S_{ij}为第i个评价因子中第j类的总面积；S为研究区总面积。

逻辑回归是一种广义的线性回归分析模型，可在因变量与多个输入变量间形成多元回归关系，从而预测区域的滑坡发生概率[15]，计算公式为：

$$P=\frac{e^z}{1+e^z} \tag{2}$$

$$z=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\ldots+\beta_ix_i \tag{3}$$

式中，P为滑坡发生的概率；β_0为常数项；β_1、β_2、…、β_i为逻辑回归系数；x_1、x_2、…、x_i为滑坡评价因子。

将信息量归一化后作为逻辑回归模型的输入变量，以滑坡发生与否作为因变量，计算β_1、β_2、…、β_i，再通过式（2）、（3）得到评价单元的滑坡预测概率。

2.3 研究方法

本文研究方法的具体步骤为：①构建基于传统评价因子的LV-LR模型，得到滑坡预测概率；②将其等距离分为极低(0，0.2]、低(0.2，0.4]、中(0.4，0.6]、高(0.6，0.8]、极高(0.8，1]5级，得到原始LSM；③将基于SBAS-InSAR技术获得的形变速率以所有相干像元形变速率的标准差σ为步长，划分为>-9、-18~-9、-27~-18、-36~-27、<-36共5级，并重采样为与传统评价因子分辨率一致的栅格单元，作为形变速率因子；④将形变速率因子与传统评价因子共同作为输入变量构建新IV-LR模型，得到顾及时序InSAR的滑坡预测概率，当评价单元中的形变速率因子因失相干现象缺失时，采用基于传统评价因子的滑坡预测概率；⑤按同样的方法对其分级，获得顾及时序InSAR的新LSM。

3　研究结果与分析

3.1　SBAS-InSAR结果

本文基于SBAS-InSAR技术[16]，得到坡度向形变速率（图1），可以看出，研究区形变速率在-131.5~92.1 mm/a之间，受地形、植被等因素影响，形变结果未覆盖全部研究区。根据SBAS-InSAR监测结果，通过遥感目视解译，共识别出H_1~H_{25}共25个潜在典型滑坡区域。由于研究区内地形地貌复杂，存在非滑坡因素引起的形变，且在植被茂密的高山区域InSAR监测精度将受到影响，需综合多种影响因素进行评价，以减少过度依赖形变结果产生的假阳性误差[17-19]。因此，本文将形变速率因子与传统评价因子共同作为输入变量参与IV-LR运算，获得顾及时序InSAR的新LSM。

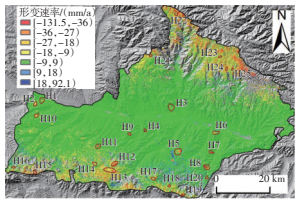


图1　年均形变速率结果

3.2　顾及时序InSAR的IV-LR模型结果

各评价因子分级的信息量值见表1，可以看出，形变速率越大、所在分级的信息量值越高，对滑坡的促进作用越大。将排除共线性后的归一化信息量值作为自变量参与逻辑回归运算，逻辑回归系数见表2，各评价因子的显著性均小于0.05，模型预测结果具有统计学意义。各评价因子按权重大小降序排列依次为形变速率、NDVI、高程、断层距离、平面曲率、河流距离、道路距离、岩性、坡度以及坡向，其中形变速率、NDVI和高程的逻辑回归系数明显高于其他因子，对滑坡的发生具有更强的影响，因此将形变速率因子作为输入变量纳入IV-LR模型具有一定的合理性。

3.3　LSM结果

两种方法获得的LSM见图2，可以看出，两种方法获得的敏感性分区整体上分布一致，高、极高敏感区主要分布于低海拔的河谷两侧以及构造活动强烈、岩土体破碎的高海拔区域。滑坡敏感性分区面积占比见表3，与原始LSM相比，新LSM中极低、低、中敏感区占比分别减少了1.01%、0.13%、0.73%，高、极高敏感区分别增加了0.18%、1.7%，总体提升了研究区的滑坡敏感性程度。

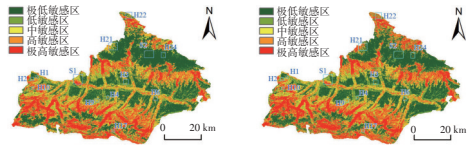
对比遥感目视解译得到的潜在滑坡发现，H_1、H_2、H_3、H_4、H_6、H_9、H_{10}、H_{17}、H_{21}、H_{22}、H_{24}的敏感性在新LSM中均有明显提升。两种LSM均可较准确地预测研究区内的大型滑坡和分布集中的滑坡群，但对

表1　信息量值

评价因子	分级	信息量值	评价因子	分级	信息量值
高程/m	1 805~2 393	-0.48	坡度/(°)	0.01~9.14	-0.213
	2 393~2 813	0.444		9.14~16.18	0.073
	2 813~3 290	-0.755		16.18~22.96	0.031
	3 290~4 400	0.19		22.96~30.00	-0.225
岩性	坚硬岩	-0.83		30.00~38.89	0.087
	较坚硬岩	-0.032		38.89~66.78	0.657
	较坚硬岩夹较软岩	1.77	平面曲率	0~15.17	0.244
	较软岩	1.113		15.17~27.10	0.178
断层距离/m	0~500	0.083		27.10~39.68	0.014
	500~1 000	0.076		39.68~53.87	0.003
	1 000~1 500	-0.031		53.87~69.02	-0.205
	1 500~2 000	-0.365		69.02~82.24	-0.5
	>2 000	-0.224	河流距离/m	0~150	0.514
道路距离/m	0~150	0.191		150~300	0.416
	150~300	0.293		300~450	0.73
	300~450	0.223		450~600	-0.206
	450~600	-0.149		>600	-0.177
	>600	-0.313	NDVI	<0.2	-0.057
坡向	平面	0		0.2~0.4	-0.025
	东北	0.186		0.4~0.6	-0.302
	东	0.155		0.6~0.8	0.453
	东南	-0.314		>0.8	-1.115
	南	-0.035	形变速率/(mm/a)	>-9	-0.498
	西南	-0.218		-18~-9	0.942
	西	-0.399		-27~-18	1.023
	西北	0.041		-36~-27	1.311
	北	0.3		<-36	1.565

表2　逻辑回归相关参数

评价因子	逻辑回归系数	显著性
高程	2.887	0.000
坡度	1.178	0.036
坡向	1.177	0.006
平面曲率	1.681	0.001
断层距离	1.973	0.010
岩性	1.182	0.009
道路距离	1.469	0.001
河流距离	1.563	0.002
NDVI	2.909	0.000
形变速率	2.980	0.001
常量	-8.043	0.000



a 原始LSM　　b 新LSM

图2　LSM结果

于受人类工程活动等因素影响形成的小型滑坡和蠕变滑坡，新LSM具有更高的预测效率，从而有效降低假阴性误差的影响。此外，以S1区域为代表的部分评价单元敏感性等级低于原始LSM，分析认为该区域随时空环境变化滑坡条件消失，坡体趋于稳定，原始LSM存在一定的假阳性误差，顾及时序InSAR的IV-LR方法可利用稳定区域的形变信息在一定程度上抑制假阳性误差的影响；S2区域的SBAS-InSAR结果显示平均形变速率达-14.26 mm/a，但该地区森林茂密、植被覆盖度高、滑坡较不发育，以非滑坡因素影响导致的形变为主，新LSM中大部分区域并未出现明显提升，一定程度上避免了新的假阳性误差产生。综上所述，新LSM可有效减少研究区内的错分类评价结果，降低假阴性、假阳性误差的影响，在一定程度上避免了新的假阳性误差产生，能更加准确、全面地体现研究区的滑坡敏感性程度。

表3 两种方法敏感性分区占比/%

方法	极低敏感区	低敏感区	中敏感区	高敏感区	极高敏感区
原始LSM	31.93	15.08	14.75	17.33	20.91
新LSM	30.92	14.95	14.01	17.51	22.61

3.4 精度验证

为评价预测精度，采用受试者工作特征（ROC）曲线进行验证，ROC曲线的横轴表示非滑坡点预测为滑坡点的比例，纵轴表示滑坡点被准确预测的比例，将ROC曲线下面积（AUC）作为精度评价标准，AUC越接近1表示预测精度越高。本文利用ROC曲线和AUC值对模型的准确性进行检验，结果见图3，可以看出，原始LMS和新LMS的AUC值分别为0.901和0.925，表明顾及时序InSAR的IV-LR模型有效减少了错分类的预测结果，具有更高的评价精度。

3.5 典型滑坡分析

本文选取潜在滑坡H_2进行进一步分析，以讨论新LSM的细节（图4）。该地区位于百草湾村附近，不在历史滑坡编目中；结合遥感影像调查，区内以北向滑坡为主，土质疏松，分布有多条明显的冲沟，坡体上建有公路，且常年进行农田灌溉活动，受人类工程活动影响较大，出现了明显的蠕滑迹象。坡体后缘、前缘的最大形变速率分别达到-56.79 mm/a和-34.16 mm/a，表明该坡体已处于活跃状态。在原始LSM中，只将坡体后缘的部分评价单元预测为高敏感区，并没有完全体现该坡体当前的实际状况；而在新LSM中，出现蠕变迹象的评价单元滑坡敏感性等级被明显提高，由此可见，形变速率在IV-LR模型中具有较重要的影响作用，能更准确地预测蠕变滑坡的敏感性，有效降低了假阴性滑坡的影响。

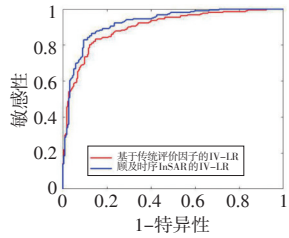


图3 ROC曲线

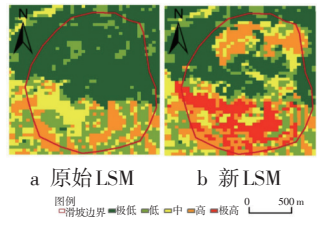


图4 H_2滑坡细节对比

4 结 语

本文以海东市市辖区为研究区，提出了顾及时序InSAR的IV-LR滑坡敏感性评价方法，并在大面积、地貌复杂区域讨论其效果和适用性，得到以下结论：①形变速率在IV-LR模型中对滑坡敏感性有较强的影响作用，体现出良好的适用性；②与原始滑坡敏感性评价方法相比，高、极高敏感区占比分别增加了0.18%、1.7%，本文方法有效减少了假阴性结果，也抑制了一定的假阳性误差；③相较于基于传统评价因子构建的IV-LR模型，顾及时序InSAR的IV-LR模型的AUC从0.901提高至0.925，具有更高的评价精度；④分析典型滑坡发现，新LSM能有效提升存在蠕变现象坡体的滑坡敏感性，提高了LSM的可靠性；⑤研究区内的滑坡主要分布于低海拔的河谷两侧以及构造活动强烈、岩土体破碎的高海拔区域，本文方法对于小型和蠕变滑坡的敏感性具有更高的预测效率，可为海东市辖区滑坡灾害防治工作提供更精细、准确的参考，后续应对呈现高敏感度的蠕变滑坡进行进一步的详细调查。

参考文献

[1] 封建民,杨波,谢瑞莲,等. 陕西省略阳县地质灾害危险性区划评估[J]. 地理空间信息,2021,19(2):78-82

[2] 白光顺,杨雪梅,朱杰勇,等. 基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(5):128-138

[3] 孙强,陈时军,张正帅. 基于GIS等方法的淄博市地震灾害风险区划研究[J]. 地理空间信息,2022,20(11):57-63

[4] 段宇英,汤军,刘远刚,等. 基于随机森林的山西省柳林县黄土滑坡空间敏感性评价[J]. 地理科学,2022,42(2):343-351

[5] Zhao F, Meng X, Zhang Y, et al. Landslide Susceptibility Mapping of Karakorum Highway Combined with the Application of SBAS-InSAR Technology[J]. Sensors, 2019, 19(12):2 685

[6] 黄龙,孙倩,胡俊. 基于InSAR与随机森林的滑坡敏感性评价与误差改正[J]. 测绘通报,2022(10):13-20

[7] Cao C,Zhu K,Xu P,et al. Refined Landslide Susceptibility Analysis Based on InSAR Technology and UAV Multi-source Data[J]. Journal of Cleaner Production,2022,368:133 146

[8] Huang J X,Xie M W,Atkinson P M. Dynamic Susceptibility Mapping of Slow-moving Landslides Using PSInSAR[J]. International Journal of Remote Sensing,2020,41(19):7 509-7 529

[9] Wang S,Zhang G,Chen Z,et al. Evaluating Expressway Stability Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and Measuring Its Impact on the Occurrence of Geohazards: A Case Study of Shanxi Province,China[J]. GIScience and Remote Sensing,2023,60(1):2 161 200

[10] Ciampalini A,Raspini F,Lagomarsino D,et al. Landslide Susceptibility Map Refinement Using PSInSAR Data[J]. Remote Sensing of Environment,2016,184:302-315

[11] 杨光. 基于SBAS-InSAR技术优化的茂县区域滑坡敏感性评价[D]. 长春:吉林大学,2020

[12] 赵玉,陈丽霞,付圣. 变量取值方式对崩塌易发性的影响[J]. 地理空间信息,2021,19(12):12-17

[13] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等. 信息量模型、确定性系数模型与逻辑回归模型组合评价地质灾害敏感性的对比研究[J]. 现代地质,2018,32(3):602-610

[14] 温鑫,范宣梅,陈兰,等. 基于信息量模型的地质灾害易发性评价:以川东南古蔺县为例[J]. 地质科技通报,2022,41(2):290-299

[15] 皇甫文超. 逻辑回归模型在滑坡灾害易发性评价中的应用:以赣州市为例[D]. 上海:东华理工大学,2021

[16] Berardino P,Fornaro G,Lanari R,et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(11):2 375-2 383

[17] 王磊,连增增,刘杰. 基于SBAS-InSAR技术和Sentinel-1A的城市地表沉降监测[J]. 地理空间信息,2022,20(4):59-64

[18] 李德仁,廖明生,王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):664-668

[19] 周定义,左小清,喜文飞,等. 基于SBAS-InSAR技术的深切割高山峡谷区滑坡灾害早期识别[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):16-24

（上接第80页）

差制作正射影像立体像对，并从理论上分析了两种量测方法的精度，选择反算至原始像点再进行前方交会的方法进行坐标量测。在上述理论的基础上，通过相关软件技术开发了基于正射影像立体像对的无人机测图系统，具备高效的大影像浏览能力，采集的地形图数据可在ImageStereo2和AutoCAD两个平台中实时联动。在多个无人机测图项目的测试结果表明，无论正射影像立体像对是由量测相机影像还是由非量测相机影像制作，本系统的平面量测精度均较高，高程量测精度低于平面量测精度，但均满足相应规范对1∶2 000DLG的精度要求。在实际生产中，可与LiDAR数据相结合制作地形图，即利用本系统采集地物的平面位置，利用LiDAR数据自动生成等高线。未来将验证该系统应用于1∶500地形图采集的可行性，并研究能自动绕避地物的立体拼接线生成算法。

参考文献

[1] 贲亮. 山区复杂地形的无人机大比例尺测图应用[J]. 地理空间信息,2020,18(8):56-59

[2] 李志晖. 无人机倾斜摄影在大比例尺测图中的应用[J]. 地理空间信息,2020,18(7):26-29

[3] 张欢. 基于无人机倾斜摄影测量的建筑物平立面一体化测图[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(12):214-217

[4] 张雪莲. 无人机大比例尺测图关键技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020

[5] 顾天襄. 立体正射像片对测图[J]. 铁路航测,1984,10(4):32-46

[6] Pyka K,Słota M,Twardowski M. Usage of Stereo Orthoimage in GIS: Old Concept,Modern Solution [J]. ISPRS-international Archives of the Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2012(XXXIX-B4):379-383

[7] 王密. 大型无缝影像数据库系统(GeoImageDB)的研制与可量测虚拟现实(MVR)的可行性研究[D]. 武汉:武汉大学,2001

[8] 李德仁,王密. 一种基于航空影像的高精度可量测无缝正射影像立体模型生成方法及应用[J]. 铁道勘察,2004,30(1):1-6

[9] 王争鸣,任晓春,王玮. 大场景立体模型建立及量测方法研究[J]. 铁道工程学报,2013,30(2):1-6

[10] 吕慧玲. 真实感场景模型制作工艺及质量控制方法[J]. 铁道标准设计,2016,60(9):28-32

[11] 张占忠. 铁路大场景立体影像模型制作关键技术及应用[J]. 铁道工程学报,2020,37(4):11-16

[12] 孟祥连,周福军. 真实感场景遥感技术在铁路工程勘察中的应用[J]. 西南交通大学学报,2017,52(5):949-955

[13] 刘亚林. 基于真实感场景影像的天陇铁路勘察遥感解译与分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):227-234