引文格式：黄一鸣,杨梦诗,黄成,等. 中老铁路沿线 InSAR 监测几何畸变判识与灵敏度建模[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):8-12. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.06.002

中老铁路沿线 InSAR 监测几何畸变判识与灵敏度建模

黄一鸣[1,3]，杨梦诗[2,3*]，黄　成[4,5,6]，李梦华[4]，刘朝海[3,7]，赵志芳[2,3]

（1. 云南大学国际河流与生态安全研究院，云南 昆明 650500；2. 云南大学地球科学学院，云南 昆明 650500；
3. 云南省中老孟缅自然资源遥感监测国际联合实验室，云南 昆明 650500；4. 昆明理工大学国土资源工程学院，云南 昆明 650093；
5. 云南省高原山区地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室，云南 昆明 650216；6. 云南省地质环境研究院，云南 昆明 650216；
7. 云南省遥感中心，云南 昆明 650034）

摘　要：在高原山区，复杂地形会与 InSAR 技术固有的侧式成像相互作用产生几何畸变现象导致难以获得有效观测，且影响形变监测的灵敏度。本研究结合 Sentinel-1 卫星数据及地形数据，实现了顾及局部入射角变化率的判别法对中老铁路沿线的几何畸变定量分析，并以地面几何和成像几何构建了 InSAR 监测灵敏度模型。结果表明：中老铁路沿线主要几何畸变为透视收缩，在升降轨数据中面积占比分别为 49.2%和 49.5%，叠掩加阴影区域面积在升降轨数据中仅为 1.6%和 1.3%；在升降轨数据中灵敏度值大部分位于 0.2~0.6 之间，面积占比分别为 43.8%和 43.9%，灵敏度值小于 0.2 的面积占比分别为 26.8%和 26.4%。研究综合考虑了 SAR 几何畸变和灵敏度对长线性地物进行 InSAR 监测的影响，为后续地表形变监测和结果解译精确性提供了科学依据。

关键词：中老铁路；InSAR；几何畸变；灵敏度

中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0008-05

Geometric Distortion Discrimination and Sensitivity Modeling of InSAR Monitoring Along the China-Laos Railway

HUANG Yiming[1,3], YANG Mengshi[2,3], HUANG Cheng[4,5,6], LI Menghua[4], LIU Chaohai[3,7], ZHAO Zhifang[2,3]

(1. Institute of International Rivers and Ecological Security, Yunnan University, Kunming 650500, China;
2. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China;
3. Yunnan International Joint Laboratory of China-Laos-Bangladesh-Myanmar Natural Resources Remote Sensing Monitoring, Kunming 650500, China;
4. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
5. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming 650216, China;
6. Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring, Kunming 650216, China;
7. Yunnan Remote Sensing Center, Kunming 650034, China)

Abstract: In plateau and mountainous areas, the complex terrain will interact with the side-looking imaging of InSAR technology to produce geometric distortion, which makes it difficult to obtain effective observations and affects the sensitivity of deformation monitoring. In this study, combined with Sentinel-1 satellite data and topographic data, we realized the quantitative analysis of geometric distortion along the China-Laos Railway by the discriminant method considering the change rate of local incident angle, and constructed the InSAR monitoring sensitivity model based on ground geometry and imaging geometry. The results show that the main geometric distortion along the China-Laos Railway is perspective shrinkage, accounting for 49.2% and 49.5% of the area in the lifting and lowering rail data, respectively, and the area of overlapping and shading area is only 1.6% and 1.3% in the lifting and lowering rail data. Most of the sensitivity values in the lifting and lowering rail data are between 0.2~0.6, accounting for 43.8% and 43.9% of the area, and the sensitivity values less than 0.2 accounted for 26.8% and 26.4%, respectively. In this paper, we comprehensively considered the influence of SAR geometric distortion and sensitivity on InSAR monitoring of long linear ground objects, which could provide a scientific basis for subsequent surface deformation monitoring and the accuracy of result interpretation.

Key words: China-Laos Railway, InSAR, geometric distortion, sensitivity

中老铁路作为重要基础设施，沿线地质环境复杂、地质灾害频发，列车循环荷载可能加剧地表形变，威胁运营安全[1-3]。合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术凭借全天候、高精度监测优势，被广泛应用于山

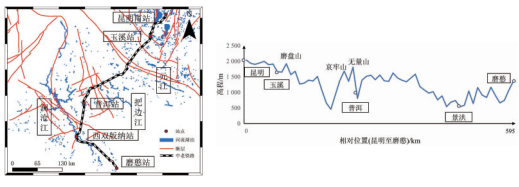
项目来源：国家自然科学青年基金资助项目（42101450）；云南省基础研究计划面上项目（202301AT070145）；云南省“兴滇英才”青年人才引进项目。

第一作者简介：黄一鸣（2001—），硕士研究生，研究方向为 InSAR 技术在地质灾害方向上的监测与应用，E-mail：1207852894@qq.com。
通信作者：杨梦诗（1990—），博士，副教授，研究方向为 InSAR 点目标精密定位与溯源以及形变解译，E-mail：yangms@ynu.edu.cn。

区地质灾害预警，但其在复杂地形中的适用性受几何畸变（如叠掩、阴影）和雷达视线方向（LOS）灵敏度影响[4-8]。前人研究通过数字高程模型（DEM）、几何关系算法（如 R 指数）及灵敏度指数分析，揭示了地形与SAR卫星成像参数的相互作用机制，但仍缺乏针对中老铁路这类特复杂区域的系统性定量评估[9-12]。本文以中老铁路中国段为研究对象，基于Sentinel-1升降轨卫星影像，结合局部入射角与卫星入射角关系，定量分析几何畸变特征；同时构建雷达视线向与真实地表形变方向的几何关系模型，量化InSAR监测灵敏度。研究旨在优化复杂山区InSAR监测适宜性评价体系，提升形变数据解释精度，为铁路沿线地质灾害长期监测与安全防控提供理论支撑。

1　研究区概况与数据介绍

中老铁路北起昆明市，向南途径玉溪市、普洱市、景洪市至中老边境磨憨口岸结束，全线长达595 km，分为中国段和老挝段两段线路，中国段部分位于云南省境内。铁路沿线地貌既有高原丘陵[13]，又有河谷盆地[14]，线路由北向南海拔从3 000 m降至几百米，越“三山”跨“四水”。沿线区域地处印度板块与欧亚板块碰撞带上（见图1），地质条件复杂，受喜马拉雅造山运动影响强烈，断裂活动剧烈[15]，并且受热带季风与高原山地气候影响显著，气象灾害繁多[16]。加之人类活动等影响，地表形变对中老铁路的安全性稳定性产生了巨大威胁。同时，复杂的地质条件也对InSAR技术在中老铁路中国段沿线区域进行地表形变监测时的相干性有所影响。



a 中老铁路、断层及河流分布　b 中老铁路昆磨段剖面高程

图1　中老铁路昆磨段位置与沿线地形地貌特征

本文采用的研究数据为欧洲空间局（european space agency，ESA）提供的Sentinel-1卫星升降轨SAR影像数据。选取了Sentinel-1A卫星的2个升轨轨道数据以及2个降轨轨道数据，其具体参数如表1所示。以中老铁路昆磨段沿线半径为10 km的缓冲区作为具体实验区域，面积约为12 025 km^2，同时为计算地形参数，本文选择使用覆盖研究区的ALOS World 3D 30 m数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据。

表1　Sentinel-1A数据参数表

参数	升轨	降轨
成像模式	TOPS	TOPS
波段	C	C
雷达波长/cm	5.6	5.6
轨道号	26、99	62、135
距离向分辨率/m	2.33	2.33
方位向/m	13.99	13.99
平均入射角/（°）	39.9	39.9
航向角/（°）	−12.4	192.4
视线向（LOS）方位角/（°）	77.6	282.4

2　InSAR适宜性分析方法

2.1　SAR几何畸变探测方法

本文将通过局部入射角与雷达入射角之间的关系识别3种不同种类的几何畸变。SAR雷达通过发射雷达波束并接收来自目标的后向散射信号进行处理后成像，假设地表地形对雷达影像的影响显示在雷达视线向的水平面上，用虚线表示从地形到视线的映射。如图2所示，AB坡体面向卫星且坡度较陡，此时传感器将先接收到来自坡顶而后接收到坡底处的后向散射信号，在雷达影像中将会呈现ba山顶与山底倒置的情况（即叠掩现象），此时局部入射角为负值；随着坡体坡度变缓如CD面，坡体成像时在距离向上会出现压缩现象，坡体的实际距离大于成像距离cd形成透视收缩现象，局部入射角 θ 小于雷达入射角 α；在坡体背向卫星且坡度较缓时如EF面，无几何畸变产生，成像分辨率相对较高适宜InSAR监测，局部入射角 θ 大于雷达入射角 α 且小于90°；在坡体背向卫星且坡度较陡时如GH面，此时雷达波束将无法到达图2所示阴影区域，传感器也无法接收到此区域内的后向散射信号，产生阴影现象无法观测，此时局部入射角 θ 大于90°。

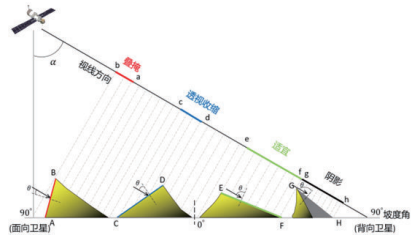


图2　雷达入射角、坡度角和局部入射角与几何畸变间关系

局部入射角 θ 可由雷达卫星入射角 α，卫星航向角 γ 以及局部地形的坡度角 β 和坡向角 φ 求出，具体公式如下：

$$\theta=\alpha-\beta\times\sin(A) \tag{1}$$

式中，A 为方位向校正因子，在升轨卫星局部入射角计算中 $A=\varphi-\gamma$；在降轨卫星局部入射角计算中 $A=\varphi+\gamma+180^\circ$。局部地形几何因子可基于研究区DEM数据求出，雷达成像几何因子可由雷达成像参数文件中的成像参数得出。

根据局部入射角 θ 与卫星入射角 α 之间关系可对几何畸变情况进行判别，其判别公式如下所示：

$$\begin{cases}\theta<0^{\circ} & \text{叠掩}\\ 0^{\circ}\leqslant\theta<\alpha\leqslant 90^{\circ} & \text{透视收缩}\\ 0^{\circ}\leqslant\alpha\leqslant\theta\leqslant 90^{\circ} & \text{适宜}\\ \theta>90^{\circ} & \text{阴影}\end{cases} \tag{2}$$

由于Sentinel-1卫星在TOPS成像模式下其一景影像的观测宽度达到近250 km，在观测时由于雷达侧视成像原理，其近斜距与远斜距之间存在差值，在卫星至星下点距离不变情况下，其入射角会产生较大差异（图4 α）。因此在局部入射角计算时必须先对一景影像中的入射角进行逐像素列计算。一景影像中任意位置的具体入射角（卫星至地心和卫星至一景影像中任一像素点之间的夹角）可通过卫星高度、星下点至地心距离以及入射斜距计算得到，具体参数可由卫星成像时的成像参数文件获得，具体公式如下：

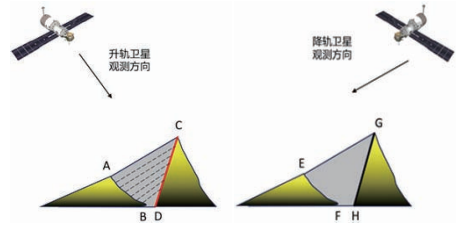
$$\alpha_i=\cos^{-1}\left(\frac{R_H-R_h}{ip_r+L_1}\right) \tag{3}$$

式中，α_i 为第 i 列像素列具体入射角；R_H 为卫星至地心距离；R_h 为卫星星下点至地心距离；L_1 为近斜距；p_r 为斜距分辨率。

根据式（3）得出一景影像中最大入射角与最小入射角之间的差值最大可达14°。入射角的变化在超长线性地物沿线区域几何畸变判别中产生较大影响，因此需要根据具体入射角对局部入射角进行计算，并对沿线区域几何畸变情况进行逐像素列判别。

在复杂山区中，实际成像时坡体还会受到邻近高陡坡体的影响从而产生被动几何畸变现象影响观测。如图3a所示，CD坡较为高陡，在升轨观测中会发生叠掩现象，此时其邻近坡体AB的散射体信号与CD坡上的散射体信号处于与卫星位置等距状态，卫星传感器将无法识别各散射体在地球表面归属的位置从而形成AB坡的被动叠掩现象。如图3所示，在降轨卫星观测中，由于GH坡较为高陡，此时会发生阴影现象，位于GH坡后的灰色阴影区域内的后向散射信号均会被阻挡，而卫星传感器无法接收到此区域内回波信号；位于此区域内的EF坡无论是否平坦，都将因传感器无法接收到信号在SAR图像中出现被动阴影的几何畸变现象。中老铁路沿线区域群山连绵，产生的被动几何畸变现象无法忽视。被动几何畸变现象可以通过GIS模型中的山体阴影算法进行计算。

将卫星位置模拟为太阳位置对其视线无法到达区域标记为阴影或叠掩区域。在具体计算时，定义叠掩的计算参数为：卫星LOS向方位角为太阳方位角，卫星入射角的余角 $\left(90^{\circ}-\alpha\right)$ 为太阳高度角；阴影计算参数为：卫星LOS向方位角的补角为太阳方位角，卫星入射角 α 为太阳高度角。考虑到在计算被动几何畸变时具体入射角的影响，对中老铁路沿线10 km内的入射角栅格影像进行分块处理，划分为10×10块区域，之后计算每块栅格影像的中心点入射角，将其代入山体阴影模型进行计算得到被动几何畸变。



a 被动叠掩　　b 被动阴影

图3 升降轨观测被动几何畸变示意图

2.2 SAR灵敏度定量分析方法

中老铁路沿线高原山地区域众多，假设此区域内许多形变是由于重力的影响，坡体会发生沿坡面向下的形变，而InSAR技术所监测到的为卫星视线LOS方向上发生的形变，真实的地表形变结果需要根据卫星以及地形角度关系和几何关系进行转换，卫星探测到LOS向形变转换为真实地表形变的能力为SAR灵敏度。根据图4所示，SAR灵敏度可以通过构建雷达视线LOS方向单位矢量 $\vec{\boldsymbol{M}}$ 与真实地表形变方向的单位矢量 $\vec{\boldsymbol{P}}$，通过计算两者间的角度几何关系来定量计算SAR的灵敏度。

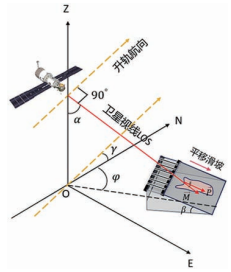


图4 卫星LOS向与真实地表形变关系示意图

对于雷达视线LOS方向上的单位矢量 $\vec{\boldsymbol{M}}$，可通过卫星飞行参数卫星方位角 γ、卫星入射角 α 进行构建。矢量 $\vec{\boldsymbol{M}}$ 指向上方表示从地球表面到卫星位置方向，卫星飞行方位角 γ 从北指向顺时针方向为正，由垂直方向指向视线方向为入射角 α，将单位矢量 $\vec{\boldsymbol{M}}$ 投影至 (N,E,Z) 坐标系中，其计算公式为：

$$\vec{\boldsymbol{M}}=\begin{bmatrix}-\cos\gamma\sin\alpha\\ \sin\gamma\sin\alpha\\ \cos\alpha\end{bmatrix} \tag{4}$$

同理，类似于雷达视线向单位矢量的构建，对于真实形变方向单位矢量的构建可以通过地形几何来计算。根据已收集的DEM数据，通过GIS算法得到研究区地形

因子坡度 β 和坡向 φ。对于沿斜坡向下的平滑位移，根据地形因子构建下坡矢量即真实形变方向单位矢量 $\vec{\boldsymbol{P}}$，同样将其投影至 (N,E,Z) 坐标系中，其计算公式为：

$$\vec{\boldsymbol{P}}=\begin{bmatrix}\sin\varphi\cos\beta\\ \cos\varphi\cos\beta\\ -\sin\beta\end{bmatrix} \tag{5}$$

灵敏度因子 s 可以根据已构建的真实形变单位矢量 $\vec{\boldsymbol{P}}$ 与LOS方向单位矢量 $\vec{\boldsymbol{M}}$ 的余弦值计算得出：

$$s=\left|\cos\left\langle\vec{\boldsymbol{M}},\vec{\boldsymbol{P}}\right\rangle\right|=\left|\frac{\vec{\boldsymbol{M}}\cdot\vec{\boldsymbol{P}}}{\left|\vec{\boldsymbol{M}}\right|\cdot\left|\vec{\boldsymbol{P}}\right|}\right|=\left|\vec{\boldsymbol{M}}\cdot\vec{\boldsymbol{P}}\right| \tag{6}$$

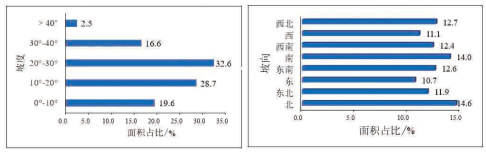
3　结果分析

3.1　中老铁路沿线SAR影像几何畸变定量分析

对中老铁路沿线进行坡度坡向分析，结果如图5所示，大部分坡体坡度位于20~30°之间，面积占比达到了32.6%，坡度大于40°的仅有2.5%，主要分布在元江和澜沧江附近，坡体坡向各朝向分布相对均匀。之后结合地形因子、SAR卫星飞行航向角以及具体入射角对Sentinel-1升降轨卫星4轨道的中老铁路沿线区域的SAR影像几何畸变情况进行分析，结果如图6~9所示。

根据图6所示，在升轨数据中中老铁路沿线几何畸变分布图主要以蓝绿色为主，几何畸变种类主要为透视收缩，沿线区域地形起伏较大，地貌也以高原丘陵为主，并未出现大面积绿色即适宜观测区域。由坡度可以看出大于40°区域主要分布在哀牢山脉和澜沧江流域附近。通过图7局部放大可以看出，在卫星右侧视成像情况下，朝向卫星视线方向的大部分坡体即坡向朝西坡体出现了几何畸变现象。在坡度稍缓区域出现了透视收缩现象而坡度较陡区域出现了叠掩现象。背向卫星视线方向的大部分坡体即坡向朝东坡体多为适宜观测的区域，而在坡度较陡区域出现了阴影现象。

在图8中老铁路沿线Sentinel-1降轨数据几何畸变分布图中，全线几何畸变分布结果也为蓝绿交替，



a 坡度分布统计图　　b 坡向分布统计图

图5　中老铁路沿线坡度、坡向分布统计图

几何畸变种类也以蓝色即透视收缩为主。对图13局部放大图进行分析，同样在哀牢山以及澜沧江流域附近坡体，大部分面向卫星即坡向朝东区域出现了几何畸变，而背向卫星即坡向朝西区域大部分适宜InSAR监测，与图7中局部放大区域对比分析，这2个区域地形坡度较大，在图7中出现大面积叠掩的区域在图9中出现了大面积阴影，结合图3卫星入射角、航向角与几何畸变关系图说明该几何畸变判别方法有效。同时说明通过联合升降轨观测可以很大程度上削弱几何畸变的影响。

通过对几何畸变结果进行定量分析，在升轨结果中，适宜区域占总面积的48.9%，透视收缩区域占总面积的49.5%，阴影区域占比0.3%，叠掩区域占比1.3%（见图10）。在降轨结果中，适宜区域占总面积的49.5%，透视收缩占总面积的49.2%，阴影区域占比1.1%，叠掩区域占比0.2%。结合图5a坡度分布统计图来看，由于坡度大于40°区域仅占2.5%，而Sentinel-1升降轨卫星平均入射角在39°左右，坡度大于入射角的区域占比较少导致阴影与叠掩的几何畸变现象较少。结合图5b坡向分布统计图来看，由于西坡区域多于东坡区域，所以降轨卫星数据中适宜区域略多于透视收缩区域，升轨卫星数据相反，且降轨卫星数据适宜区域多于升轨卫星数据。相较于叠掩与阴影几何畸变会导致信号完全被覆盖或接收不到，透视收缩区域内仍能接收到后向散射信号来进行InSAR监测，因此从整体来看，中老铁路沿线几何畸变对InSAR监测适宜性影响较小。

3.2　中老铁路沿线SAR灵敏度定量分析

根据已构建的灵敏度模型对中老铁路沿线区域Sentinel-1升降轨数据的SAR灵敏度进行了定量分析，在顾及具体入射角的变化下得到中老铁路沿线

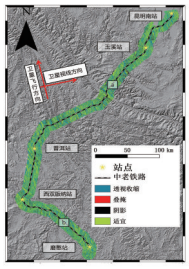
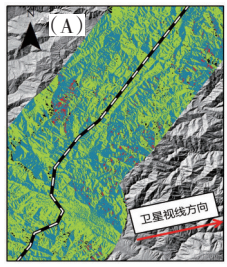
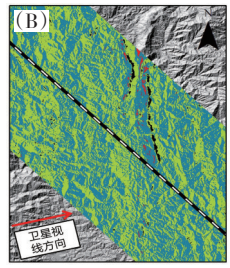


图6　中老铁路昆磨段沿线Sentinel-1升轨数据几何畸变分布



a 区域升轨观测适宜性(A)



b 区域升轨观测适宜性(B)

图7　升轨数据局部区域几何畸变分布

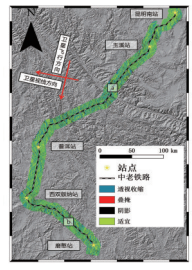
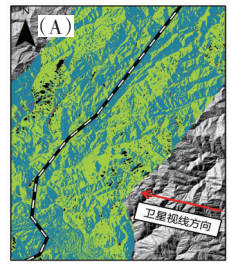
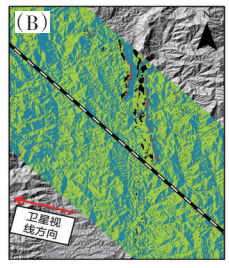


图8　中老铁路昆磨段沿线Sentinel-1降轨数据几何畸变分布



a 区域降轨观测适宜性(A)



b 区域降轨观测适宜性（B）

图9　降轨数据局部区域几何畸变分布

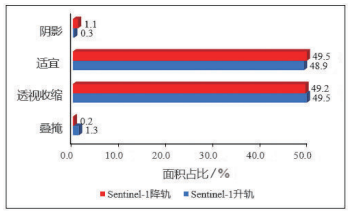


图10 Sentinel-1升降轨数据几何畸变定量统计图

SAR灵敏度分布情况如图11和图12所示。

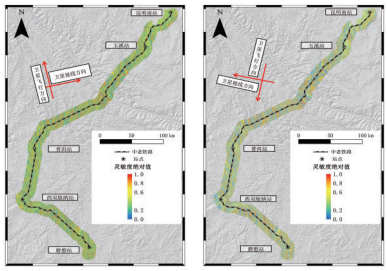
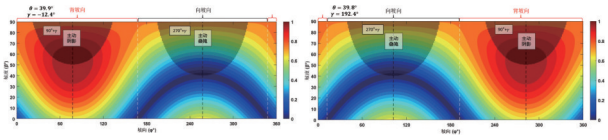


图11 中老铁路昆磨段沿线Sentinel-1升轨数据灵敏度分布

图12 中老铁路昆磨段沿线Sentinel-1降轨数据灵敏度分布

其覆盖研究区范围的Sentinel-1升轨卫星航向角为347.6°，平均入射角为39.9°，降轨卫星航向角为192.4°，平均入射角为39.8°，通过计算得到研究区SAR灵敏度分布情况，灵敏度值在0~1之间，值越大表示灵敏度越高，在此区域中测得视线向位移越靠近真实地表形变位移。根据以上数据分析几何畸变、SAR灵敏度与地形因子和卫星飞行参数间关系如图13所示。

图13模拟了覆盖研究区的Sentinel-1升降轨数据，在入射角与航向角确定的情况下灵敏度随坡向和坡度变化而变化的关系。其中坡向在$(180°-\gamma, 360°-\gamma)$坡向为向坡向，$(-\gamma, 180°-\gamma)$为背坡向。从图中可以看出，灵敏度值从0~1颜色由蓝变红，在升降轨数据中背坡向上灵敏度值都大于向坡向上灵敏度值，这是由于发生在背坡向上的形变矢量会表现出远离卫星所导致的。在本研究区中，在卫星飞行参数确定的情况下，当坡度小于90°时，坡向为$90°-\gamma$时灵敏度值最高为1，此时真实地表形变方向与卫星视线方向平行，测量的LOS向上的形变可转换为真实地表形变百分比最高；当坡向为$270°-\gamma$时，此时真实地表形变方向与卫星视线方向垂直，灵敏度值为0，测得LOS向上的形变无法转换到真实地表形变。图13中灰色区域表示主动叠掩与阴影的影响区域，在此区域内灵敏度值无意义，无法进行InSAR监测。对升降轨灵敏度结果进行定量分析，升轨数据灵敏度值在0~0.2面积占比26.8%，0.2~0.6面积占比43.8%，0.6~1面积占比29.4%；降轨数据灵敏度值在0~0.2面积占比26.4%，0.2~0.6面积占比43.9%，0.6~1面积占比29.7%。结合图8坡向分布图对中老铁路沿线Sentinel-1升降轨灵敏



a 升轨灵敏度关系图 b 降轨灵敏度关系图

图13 Sentinel-1升降轨卫星入射角、航向角、地形因子与几何畸变和灵敏度关系图

度分布情况进行分析，由于升轨卫星的航向以及SAR卫星侧视成像原理，在坡向图中东坡区域即黄色区域位于背坡向区域，在图11、12灵敏度分布图中多呈现红色，灵敏度值较高，而西坡区域即蓝色区域位于向坡向区域，在灵敏度分布图中多呈现蓝色，灵敏度值较低。同理，降轨卫星相反，其东坡区域在灵敏度分布图中多呈现蓝色，灵敏度值较低，而西坡区域在灵敏度分布图中多呈现红色，灵敏度值较高。结合灵敏度值定量分析结果来看，由于研究区大部分坡体坡度在10~30°之间，根据图13灵敏度关系图来看灵敏度值主要集中在0.2~0.6范围内。研究区内坡向朝西坡体多于坡向朝东坡体，即在升轨数据中向坡向坡体多于背坡向坡体，在降轨数据中背坡向坡体多于向坡向坡体，因此导致降轨数据中灵敏度值大于0.6的区域多于升轨数据。

4 结 语

中老铁路沿线地质环境复杂，InSAR技术在该区域地表形变监测中面临几何畸变与灵敏度制约。本研究基于Sentinel-1卫星入射角变化率，定量分析了铁路沿线的几何畸变特征。结果表明：研究区坡度>40°的区域仅占2.5%，结合坡向分布，升降轨数据叠掩与阴影面积占比不足2%，主要畸变类型为透视收缩，但仍保留有效后向散射信号。通过构建地形-成像几何灵敏度模型发现：研究区SAR灵敏度值集中于0.2~0.6区间，受西向坡体优势分布影响，降轨数据在0.6~1高灵敏度区的覆盖面积较升轨多0.3%。通过研究综合评估了SAR几何畸变与灵敏度对InSAR监测的影响，为解译精度提升和地质灾害早期识别提供了理论依据。

参考文献

[1] 朱涯,黄玮,李蒙,等. 云南省山洪地质灾害分布特征及致灾因子分析[J]. 灾害学,2018,33(3):96-100

[2] 周桂华,吴惠标,谢亚萍. 2018年云南省主要自然灾害综述与减灾对策探讨[J]. 防灾科技学院学报,2019,21(4):75-83

[3] 杨迎冬,晏祥省,王宇,等. 云南省地质灾害特征及形成规律研究[J]. 灾害学,2021,36(3):131-139

[4] 廖明生,董杰,李梦华,等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监

（下转第60页）